

「革新的新構造材料等研究開発」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機 材料・ナノテクノロジー部
-----	--

2.7「接合技術開発」

2.7.1[テーマ番号 01] アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

2.7.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量構造材料のアルミニウム（Al）と、軽量・強度・剛性に優れる CFRP との組み合わせは、今後の輸送機器用途では非常に重要な設計技術となるが、従来接合方法では接合サイクル、コスト面、設備大型化・精密化が必要となる場合や、熱源や高価な設備が必要なものもあり、更なる改善が期待されている。本事業では、より簡便に実施でき、接合特性に優れ、大型部材にも適用可能な革新的接合技術、具体的には、新規接合技術として、摩擦エネルギーを利用した簡便な摩擦（攪拌）重ね接合（Friction lap joining、以下 FLJ）技術の研究開発を進める。2017 年度までで、FLJ の要素技術検証が完了しており、当初予定としていた 2018 年度以降の実用化技術推進は、FLJ プロセスの設備化と並行して装置メーカーと連動した検討を進めることから、愛知県の戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）にて実施することとなっており、伊予分室での本テーマ検討は 2017 年度で終了とした。

(2)位置付け、目標値

【第一中間目標（2015 年度末）】

接合強度：アルミニウム／CFRP（熱可塑性樹脂ベース）の試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上、またはそれに準ずる接合試験片（例えばシングルラップ接合試験（ISO4587））の引張せん断試験で母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。また、実用化に向けては、接合部外観などの接合強度以外にも着目し、具体的な対象アイテム絞り込みに関する FLJ のポテンシャル見極めを最優先とする。

【第二中間目標（2017 年度末）】

接合強度：アルミニウム／CFRP（熱硬化性樹脂ベース）の試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上、またはそれに準ずる接合試験片（例えばシングルラップ接合試験（ISO4587））の引張せん断試験で母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。

【最終目標（2022 年度末）】

接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重最小値以上または母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。

接合時間：スポット接合の場合、1 点あたり 5 秒以内の接合を達成する。また、接

合を実用的に活用するため、電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立、およびアルミニウム／CFRP間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法確立も並行して推進する。

表Ⅲ-2.7.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (202年度末)	根拠
プロセス開発	Al／熱可塑 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベル（樹脂は PP、PA、PPS）	Al／熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベル	<ul style="list-style-type: none"> 各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベル スポット接合の場合は 5 秒以内 設備実用化 ※最終目標については平成 29 年度の状態を確認して再設定が必要な場合あり。	接合部での剥離は実用性懸念あり（母材破壊必須）
CFRP 設計	Al／熱可塑 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計（樹脂は PP、PA、PPS）	Al／熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計	各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計	接合部での剥離は実用性懸念あり（母材破壊必須）
接合データベース構築	Al／熱可塑 CFRP（樹脂は PP、PA、PPS）の DB 構築	Al／熱硬化 CFRP の DB 構築	実用部品形状での DB 構築および接合状態予測への活用	実用化に向けた机上検討に DB 必要
接合部解析	—	—	電食評価法確立 熱歪み評価法確立	接合実用化には必要
実用部品検証	—	—	実用部品への適用確立	製品レベルの実績必要

(3)全体計画

表Ⅲ-2.7.1-2 に全体計画を示す。第一に FLJ のポテンシャル見極めを優先し、まずは Al／熱可塑性 CFRP での検証を 2015 年度末までに実施した（第一中間目標）。この時点で FLJ が接合技術として適用可能であると判断し、2017 年度に Al／熱硬化 CFRP での検証を実施し（第二中間目標）、2017 年度末までに FLJ の要素技術検証を完了させた。

実用化に向けては、ロボット設備化が必須と考えており、接合プロセス検証と並

行して設備実用化に向けた初期課題抽出を進めた。

接合データベースは、2017年度末までにモデル試験片での構築を進めた。

表Ⅲ-2.7.1-2 全体計画

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023~
全体			★ 第一中間目標達成 熱可塑性CFRP		★ 第二中間目標達成 熱硬化性CFRP					★ 最終目標達成	→ 実用化 検討
	要素技術検証					実用化技術推進					
プロセス開発 (FLJ)		FLJ技術開発 ・メカニズム解析				サポイン事業へシフト → 接合装置改良(簡素化・自動化) → ロボット設備化(プロセス)					→ 実用化 検討
CFRP設計 指針策定		CFRP材料設計 ・熱可塑性系 ・熱硬化系 ・接合基材				愛知県サポイン活用 → ロボットFLJ製品化に向けた最適制御システム開発					
接合DB構築 接合部解析		基礎データベース構築(試験片)				電食・熱歪み解析、金属種展開 → 基礎データベース構築(実成形品)					
実用部品検証					適用部材ヒアリング	実用アイテム探索・展開 ・部品成形、接合特性把握					→ 実用化 検討

(4)実施体制

プロセス開発は基礎検討設備を保有する再委託先主体で要素技術開発と接合データベース構築の基礎部分を実施し、実用化の際には外部の設備メーカーとの協力が必要となる。CFRP設計は東レが実施した。表Ⅲ-2.7.1-3に実施体制のまとめを示す。実施割合が大きい担当を◎印としている。

表Ⅲ-2.7.1-3 実施体制

研究開発項目	研究内容	担当		
		東レ(株)	再委託先	外部
プロセス開発	①FLJポテンシャル把握	○	◎	
	②接合メカニズム解析	○	◎	
	③設備実用化	○	○	◎
CFRP設計	④指針確立(熱可塑)	◎		
	⑤指針確立(熱硬化)	◎		
	⑥接合基材設計	◎		
接合DB構築	⑦適正接合条件設定	○	◎	
	⑧接合法ベンチマーク	○	◎	
接合部解析	⑨電食評価法確立	○	○	
	⑩熱歪み評価法確立	○	○	
実用部品検証	⑪モデル成形・試作	◎		○

(5) 運営管理

東レ(株)と再委託先の間で定期ミーティング(電話会議なども含めて少なくとも2ヶ月に1度)を開催し、進捗確認および今後の検討方針や開発軌道修正について協議し、スケジュールに沿った研究開発運営を実施した。

(6) 実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度)

軽量構造材料のアルミニウム(比重2.7)と、強度・剛性に優れてさらに比重が小さいCFRP(比重1.0~1.6)との組み合わせは、輸送機器用途では効果的な軽量設計技術となる。FLJの適用で接合サイクル、接合ポテンシャル、コストや設備面でのメリットが見出せればAl/CFRPを接合した部材の輸送機器への適用拡大に繋がると期待できる。

現時点ではポテンシャル把握に注力しているため、具体的用途については未定となっているが、Al/CFRPの複合化により、エネルギー吸収がそれぞれ単体よりも2倍以上に大きくなる結果もあり、例えば自動車のバンパー部材などへの適用も期待できる。輸送機器用途への適用以外でも、開発期間の比較的短い家電製品などの産業用途アイテムでは特性がマッチすれば早期事業化の可能性もあると考える。

2.7.1.2 研究開発成果

(1)目標の達成度

表Ⅲ-2.7.1-4 に目標の達成度を示す。2017 年度末での実績と今後の方針について一覽にまとめた。2017 年度末までで FLJ のプロセス開発、CFRP 設計については要素技術検証が完了した。一方で実用化に向けた設備検討は愛知県の設備・システムメーカーとサポイン事業を活用して推進中である。接合 DB 構築に対しても、試験片レベルでは評価を完了している段階であり、実部品での検証をサポイン事業で進める。

表Ⅲ-2.7.1-4 目標と達成度

研究開発項目	研究内容	担当			目標	2017年度末の実績	課題と今後の方針 (実用化推進)	進捗度
		東レ	再委託先	外部	2017年度末 (要素技術検証)			
プロセス開発	①FLJポテンシャル把握	○	◎		熱可塑CFRPの母材破壊 熱硬化CFRPの母材破壊	CFRP母材破壊レベル達成	実部品での検証 サポイン活用で継続	100%
	②接合メカニズム解析	○	◎		接合メカニズム明確化	高温は樹脂分解で不良。 シランカップリング処理効果あり。		100%
	③設備実用化	○	○	◎	自動化・ロボット化の 課題明確化	曲面接合可能を確認 ロボットFLJ課題抽出	サポイン活用で継続	100%
CFRP設計	④指針確立 (熱可塑)	◎			熱可塑CFRPの母材破壊	CFRP母材破壊レベル達成	DB構築	100%
	⑤指針確立 (熱硬化)	◎			熱硬化CFRPの母材破壊	接着層と接合基材併用で CFRP母材破壊レベル達成	DB構築	100%
	⑥接合基材設計	◎			適正基材把握	熱硬化系で有効性を確認。 CF補強有効、適正厚みあり	母材破壊レベル 達成	100%
接合DB構築	⑦適正接合 条件設定	○	◎		熱可塑、熱硬化両系の 接合達成	母材破壊レベルの 接合達成	実部品への適用	100%
	⑧接合法 ベンチマーク	○	◎		他の接合法との ポジション明確化	試験片レベルでは耐久性含め て評価完了	サポイン活用で 詳細推進	100%

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.1-5 に最終目標の達成可能性を示す。当初設定した最終目標の達成見込みに関しては、FLJ の実用化部分の検討が必要であり、電食評価技術や熱歪み評価法探索などを含めて愛知県サポイン事業にて継続しており、実用化に向けて具体的な設備・システムメーカーおよびユーザー候補先と連携しながら推進中である。

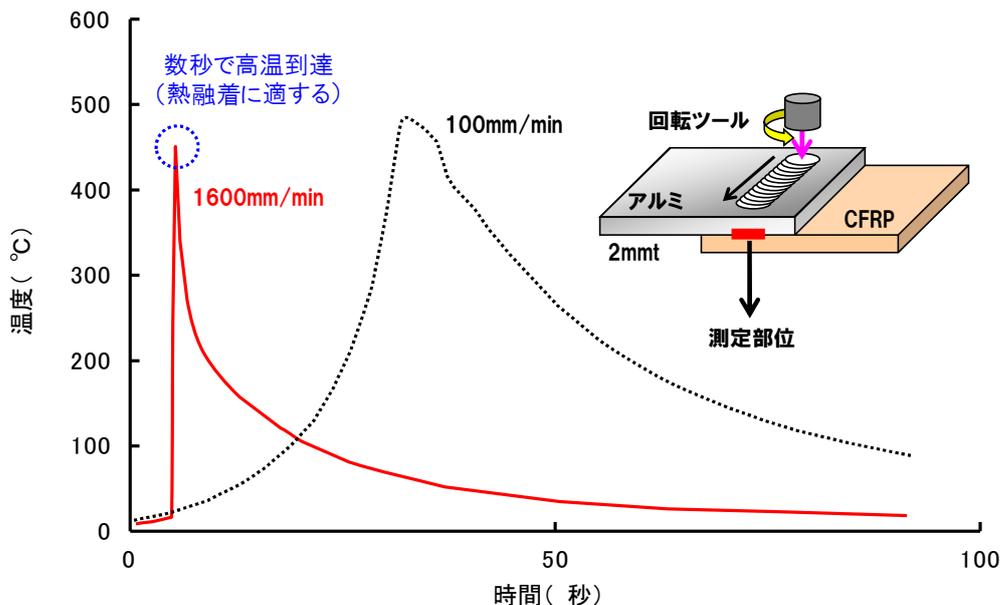
表Ⅲ-2.7.1-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目 (担当)		現状	最終目標	達成見通し	
接合技術開発	接合プロセス開発 (再委託先/東レ)	接合メカニズム明確化、 接合条件確立	接合メカニズム明確化、 接合条件確立	◎	・基礎検証完了
	CFRP設計 (東レ)	CFRP母材破壊レベル 達成	接着良好なCFRPおよ び接合基材の創出	◎	・CFRP・接合基材の 基礎設計完了
	接合技術実用化 (外部活用)	三次元形状適用の 可能性を示した	FLJ接合自動化 (三次元形状対応)	○	・サポイン事業にて検討中
	実用部品適用 (東レ、外部活用)	試験片レベルでの検証 実用部品は未着手	小型・大型部品での 実証	○	・サポイン事業にて検討中
評価技術開発	電食評価技術開発 (再委託先/東レ)	未着手	電気化学的手法を活 用した評価法確立	△	・サポイン事業に絡めて検討 ・既存手法の活用検証
	熱歪み評価法確立 (再委託先/東レ)	未着手	シミュレーション(ソリ 変形等)による予測	△	・サポイン事業に絡めて検討 ・既存手法の活用検証 (用途設定とともに検証)

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

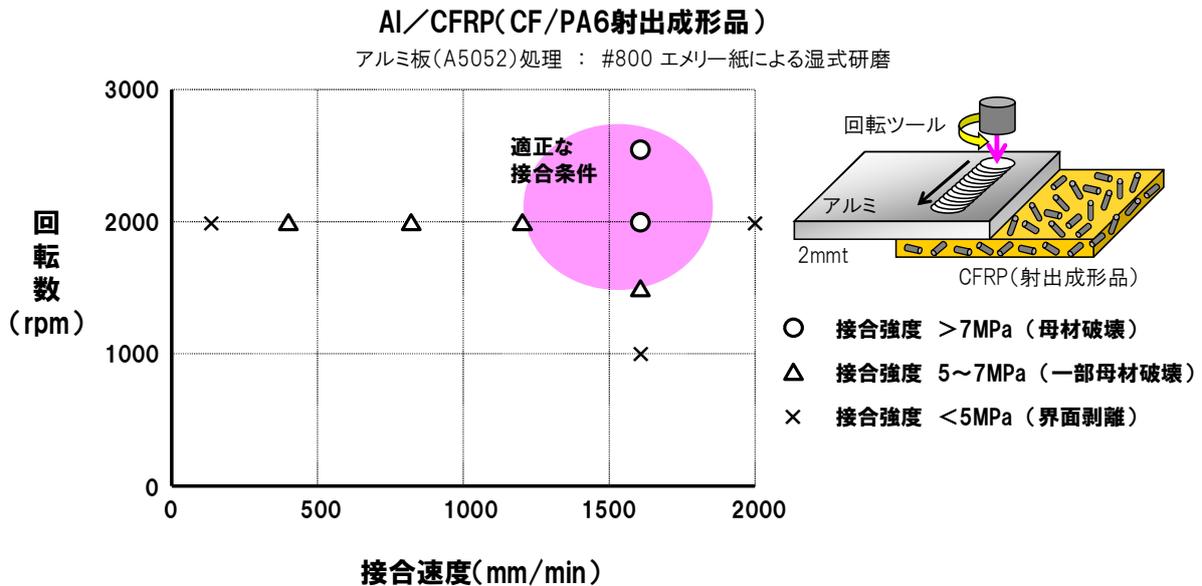
(3)研究開発の成果と意義

プロセス開発では、FLJプロセスにおける接合部の温度プロファイルを評価し、数秒程度の短時間で400℃を超える温度まで接合部の温度が上昇可能であり、熱融着に適するポテンシャルを有することが確認できた(図Ⅲ-2.7.1-1)。



図Ⅲ-2.7.1-1 FLJプロセス接合部の温度履歴

また、Al/CFRP (CF/PA6 射出成形品) の FLJ 条件検討において、図Ⅲ-2.7.1-2 に示すように適切な接合条件範囲が存在することが確認できた。回転ツールの回転数が 2000rpm 付近で、接合速度が 1600mm/min 付近のときに CFRP 母材破壊レベルとなる良好な接合が可能である。



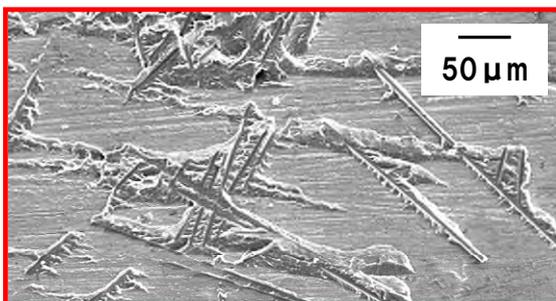
図Ⅲ-2.7.1-2 FLJ 条件と接合強度

接合強度評価後の接合部 Al 側表面の観察写真を図Ⅲ-2.7.1-3 に示す。適切な条件とすることで、左側写真のように Al 表面に CFRP 母材破壊による母材付着が確認されるが、接合条件が適切でなければ右側写真のように母材付着は確認できず、界面で薄剥離している。

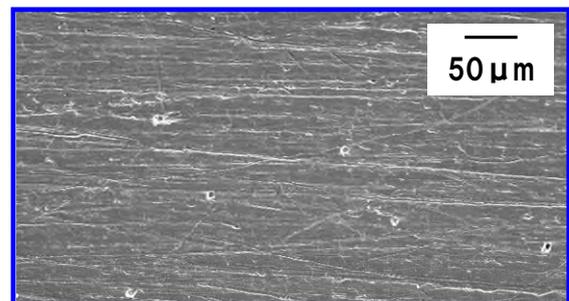
接合条件

接合速度 : 1600mm/min
ツール回転数 : 2000rpm
ツール押込深さ : 0.9mm

接合速度 : 2000mm/min
ツール回転数 : 2000rpm
ツール押込深さ : 0.9mm



CFRTP母材内破断



接合界面破断

図Ⅲ-2.7.1-3 FLJ 条件と接合強度

PA6 の他の熱可塑性樹脂として、ポリプロピレン (PP) およびポリフェニレンスルフィド (PPS) を用いた CF 強化射出成形品を検討した。PP は安価で軽量であり、PPS は高い耐熱性を有するため、輸送機器向けにはいずれも重要な樹脂となる。

PA6 で良好な接合が得られた接合速度 1600mm/min、回転数 2000rpm の接合条件で FLJ を実施したところ、PP、PPS とともに一部母材破壊となる良好な接合が得られた。

さらに高耐熱性を有する PEEK 樹脂の射出成形品を用いて FLJ を実施したところ、PEEK 樹脂がネッキング破壊する強固な接合が可能であり、FLJ プロセスは加工温度が 400°C 近辺になる PEEK 樹脂にも適用可能であることが分かった。(図 III-2.7.1-4)。

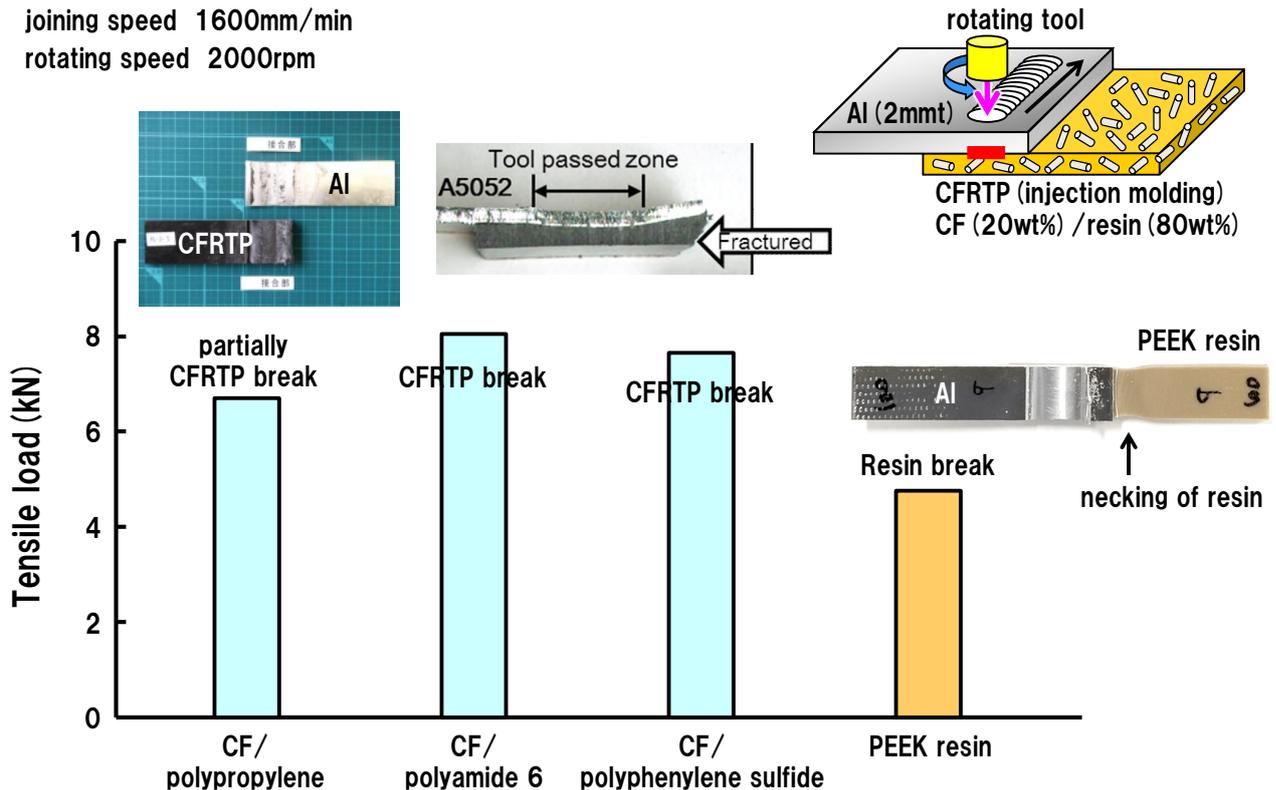


図 III-2.7.1-4 各種樹脂系での接合強度

接合メカニズム解析について、Al/CFRP (CF/PA6 射出成形品) 接合部の元素マッピングを実施した結果、Al/CFRP 界面に酸素、Mg が局在化していることが判明した。また、Al のみを FLJ プロセスに通し、Al 接合側 (回転ツールを当てた反対面) の表面分析を実施した結果、プロセス前後で酸素、Mg の局在が示唆されたことから、FLJ により Al 側の表面極性が変化し、CFRP との熱融着時に相互作用が有利に働いているものと推定する (図 III-2.7.1-5)。

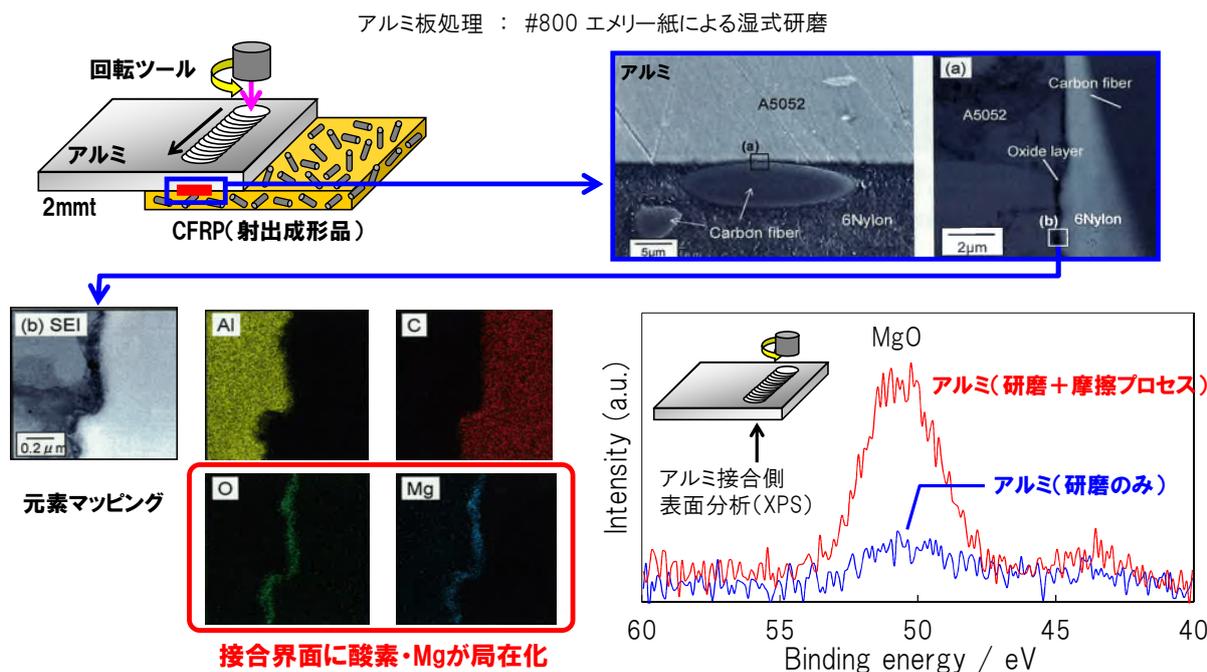
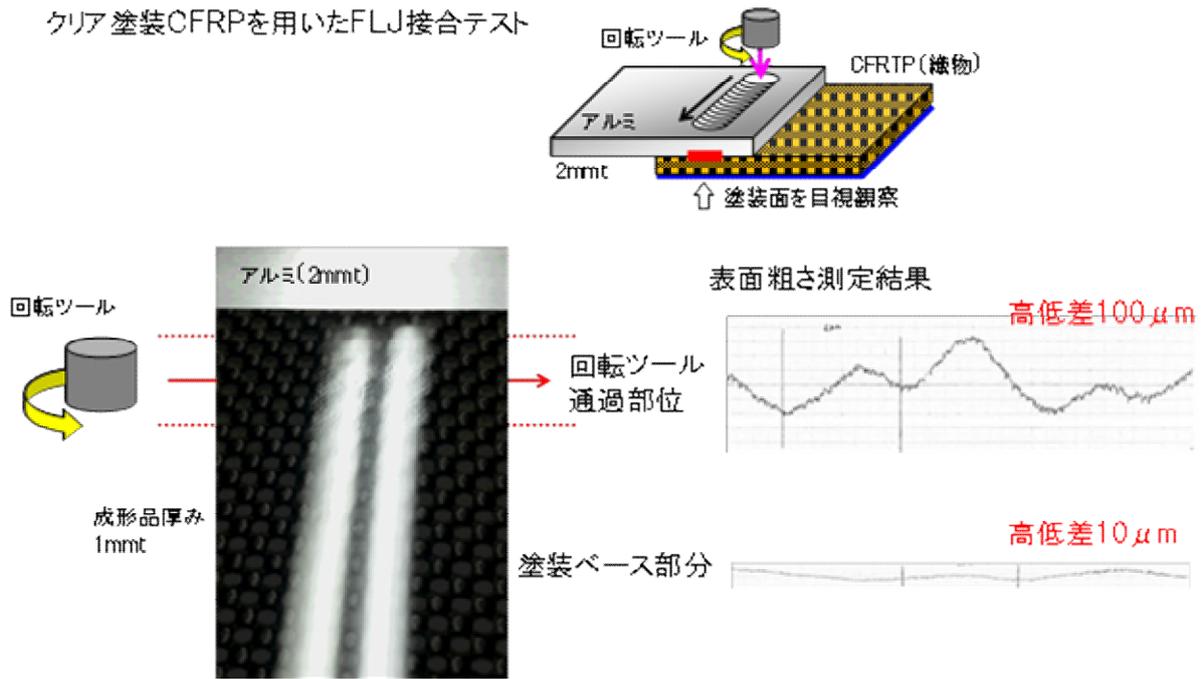


図 III-2.7.1-5 接合部元素分析

FLJ プロセスがアルミニウムと接合する CFRP 外観に与える影響について確認を実施した。CFRP には表面クリア塗装を施したのを用い、FLJ プロセス実施後の外観変化を目視および表面粗さ評価で検証した。FLJ プロセスは数秒で 400°C 近い温度まで加熱可能であるため、CFRP への熱履歴の影響は大きい。実際に回転ツールが通過した部位は、他の部位と比較して塗装表面に反射する蛍光灯が歪む結果となった (図 III-2.7.1-6)。表面粗さ評価では、塗装ベース部分は高低差 10μm 程度であるのに対して、回転ツールが通過した部位は高低差 100μm 程度と大きくなっていることがわかった。FLJ プロセスは適用部位の見極めや塗装前の適用など用途・部位に応じた配慮が必要である。

クリア塗装CFRPを用いたFLJ接合テスト



図Ⅲ-2.7.1-6 FLJの外観への影響（モデル評価）

アルミニウムと熱硬化 CFRP との接合についても検証を進めた。熱硬化 CFRP は熱可塑 CFRP には無い特性を有しており、熱硬化 CFRP と熱可塑 CFRP とを使い分けて接合が可能になれば、アルミニウムとの一体化成形品の使用に対しても幅広い特性を付与することが出来るため、輸送機器への実用化に有効となり得ると考える。

一般的に熱硬化 CFRP は樹脂が架橋構造となるため、弾性率や熱安定性が高く、熱可塑 CFRP よりも力学特性の信頼性が高くなる場合がある。一方で架橋構造であるため、熱溶着性が無く、通常は熱溶着プロセスでは接合が不可能である。（表Ⅲ-2.7.1-6）

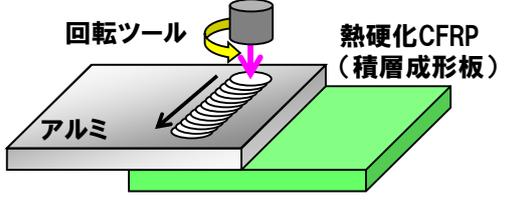
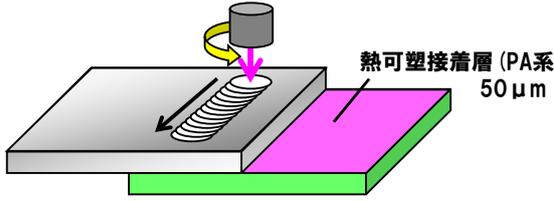
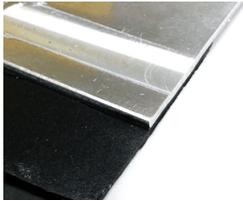
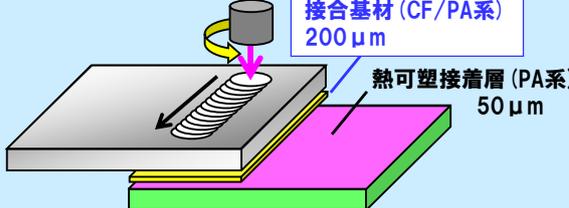
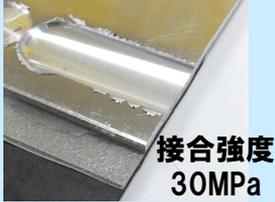
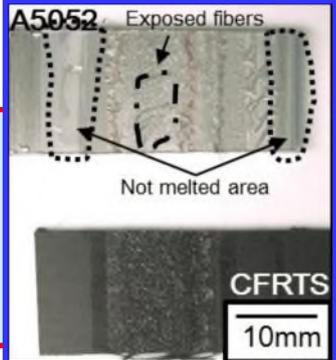
表Ⅲ-2.7.1-6 熱硬化 CFRP と熱可塑 CFRP

		熱硬化CFRP		熱可塑CFRP	
特性	樹脂構造	◎	架橋構造 (高い信頼性)	△	非架橋構造 (疲労、クリープ:劣)
	弾性率	○	高弾性率に利点	△	一般的に低弾性率
	靱性	△	一般的に低伸度	◎	衝撃(変形)に利点
	熱安定性	○	熱変形は少ない	△	溶融や熱変形
成型加工	含浸性	◎	モノマー使用 (連続繊維向き)	×	ポリマー使用 (連続繊維に不向き)
	成形時間	△	硬化時間(5分以上) ※1分速硬化も可能	◎	溶融・固化時間 (射出成形は1分)
	成形温度 成形圧力	○	低温・低圧 (大型成形向き)	△	高温・高圧 (大型成形に不向き)
	後加工性	×	接着剤、機械接合(一般的)	◎	熱溶着可能

我々は熱硬化 CFRP 表面に熱可塑樹脂を配置した熱溶着が可能な熱硬化 CFRP を用いて FLJ プロセスによる接合評価を実施した。

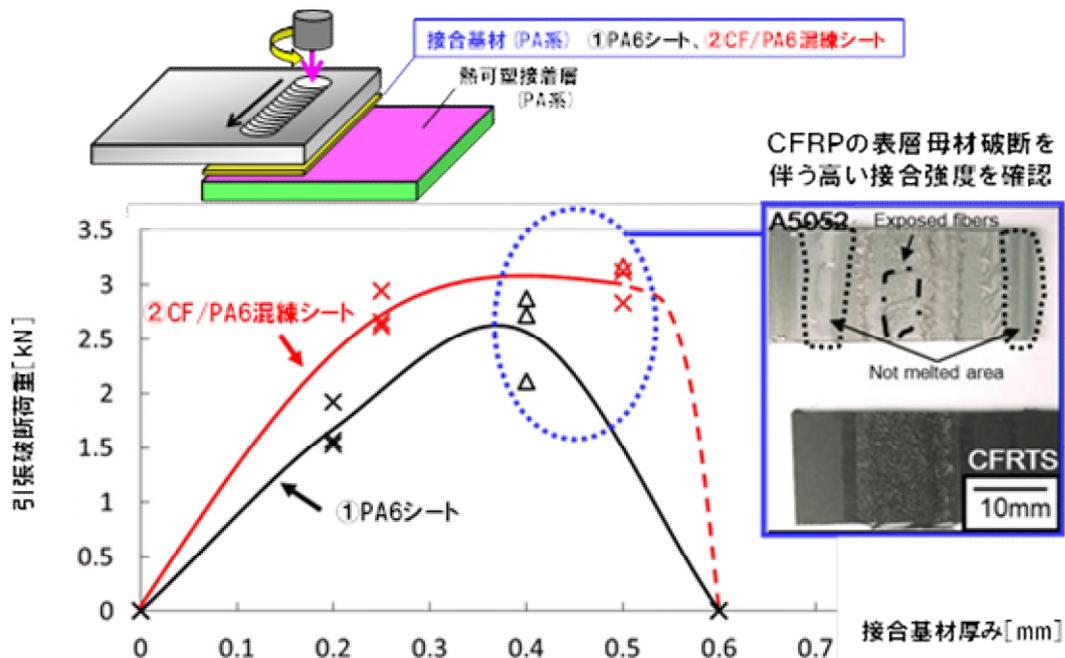
まずは比較として、熱可塑性樹脂の接着層無しの CFRP を用いて FLJ プロセスを実施したところ、予想通り溶着はしなかった。熱硬化 CFRP の表面に熱可塑性樹脂の接着層(50 μ m 厚み)を有する場合には、FLJ プロセスにより溶着可能であったが、容易に手で剥がせるレベルの接合であった。これは熱可塑性樹脂の接着層(50 μ m 厚み)が十分な量ではなかったために、溶着強度が低下したものと推定し、接合部に接合基材を追加で挿入して FLJ プロセスを実施したところ、CFRP の一部がアルミ表面にとられるほどの強固な接合強度(30MPa)を発現可能であった。また、熱可塑性樹脂の接着層が無い場合には、接合基材を追加で挿入しても容易に剥離することもわかった。熱硬化 CFRP を接合対象とする場合、表面への熱可塑性樹脂の接着層形成とともに、十分な量の熱可塑性樹脂を介在させて接合する必要がある。(表Ⅲ-2.7.1-7)

表Ⅲ-2.7.1-7 アルミニウム／熱硬化 CFRP の FLJ 接合

構成・接合条件	速度:1600mm/min 回転数:2000rpm 接合状況
	
	
	 

※熱可塑接着層無しの場合、接合基材があっても溶着せず（容易に剥離）

また、アルミニウムと CFRP との間に介在させる接合基材は、それ自身を炭素繊維（CF）で補強することで、より強固な接合強度を発現可能となる。具体的には CF を 20% 混合したポリアミド 6 樹脂を用いることで、CF を混合しないポリアミド 6 樹脂を用いた場合よりも 1.5 倍程度接合強度が向上する。これは接着層自身の強度を強化することで、接合強度が向上したものと推定する。（図Ⅲ-2.7.1-7）



図Ⅲ-2.7.1-7 FLJの外観への影響（モデル評価）

用いる接合基材の厚みも適切な範囲があり、本検討では 0.3~0.5mm 程度が良好な厚み範囲であることが分かった。

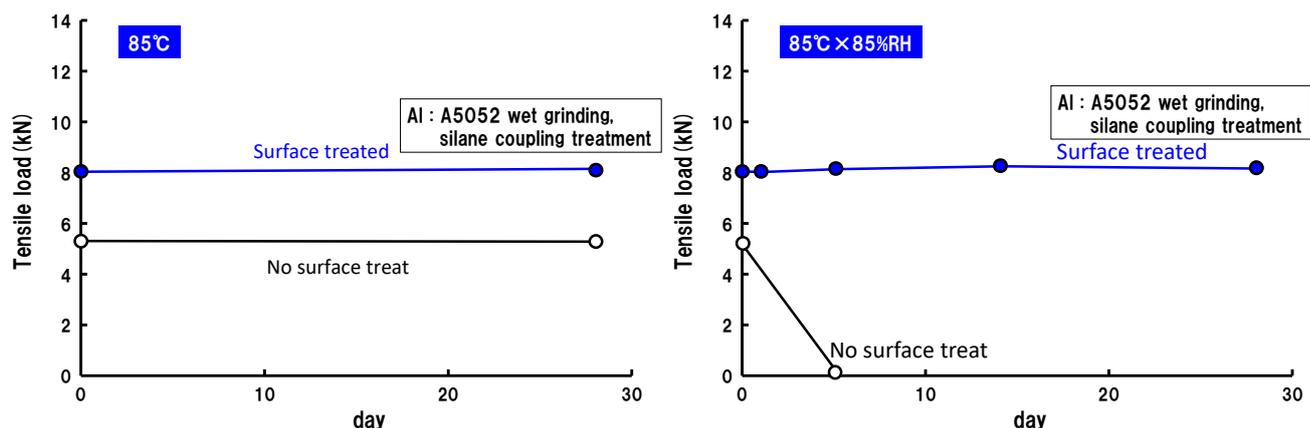
FLJ 接合試験片のデータベース構築の一環として、Al/CFRP(CF30wt%/PA6)の FLJ 接合試験片を用いた各種耐久性評価を実施した。

・ 85℃恒温試験（図Ⅲ-2.7.1-8）

アルミニウムの表面処理として湿式研磨してシランカップリング処理を施した試験片と、表面処理を施さなかった試験片とを比較すると、接合強度の絶対値は表面処理有りの方が高いものの、表面処理有無にかかわらず、85℃環境下では接合強度は初期強度から 28 日間ほぼ変化しないことが分かった。

・ 85℃×85%RH 試験（図Ⅲ-2.7.1-8）

アルミニウムの表面処理として湿式研磨してシランカップリング処理を施した試験片と、表面処理を施さなかった試験片とを比較すると、表面処理無しでは初期の接合強度が低くなり、かつ 5 日間でほぼ接合強度が無くなるが、表面処理有りの場合では 85℃環境下では接合強度は初期強度からほぼ変化しないことが分かった。



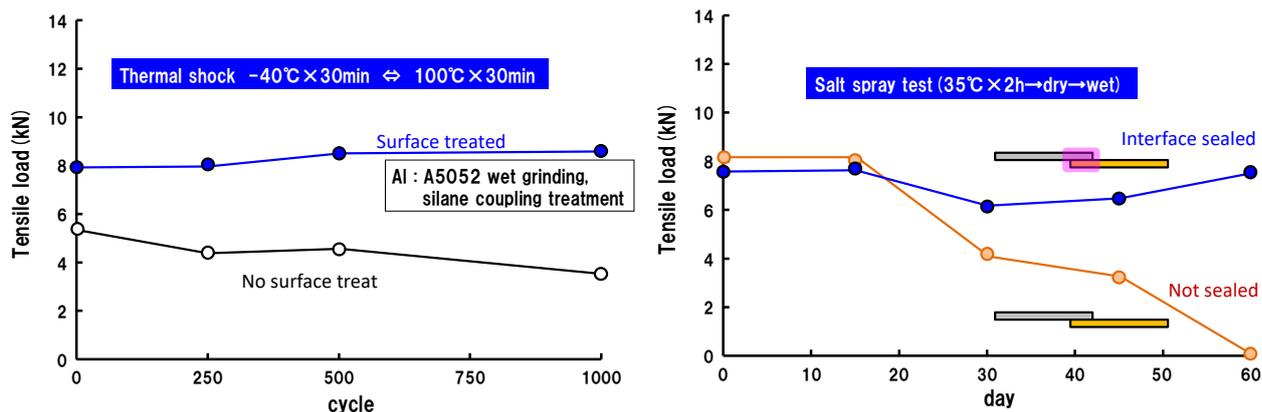
図Ⅲ-2.7.1-8 FLJ の耐久性評価(85℃、85℃×85%RH)

・ サーマルショック試験（-40℃×30分⇔100℃×30分）（図Ⅲ-2.7.1-9）

アルミニウムの表面処理として湿式研磨してシランカップリング処理を施した試験片と、表面処理を施さなかった試験片とを比較すると、接合強度の絶対値は表面処理有りの方が高くなり、かつ表面処理無しでは接合強度が徐々に低下していくことが分かった。

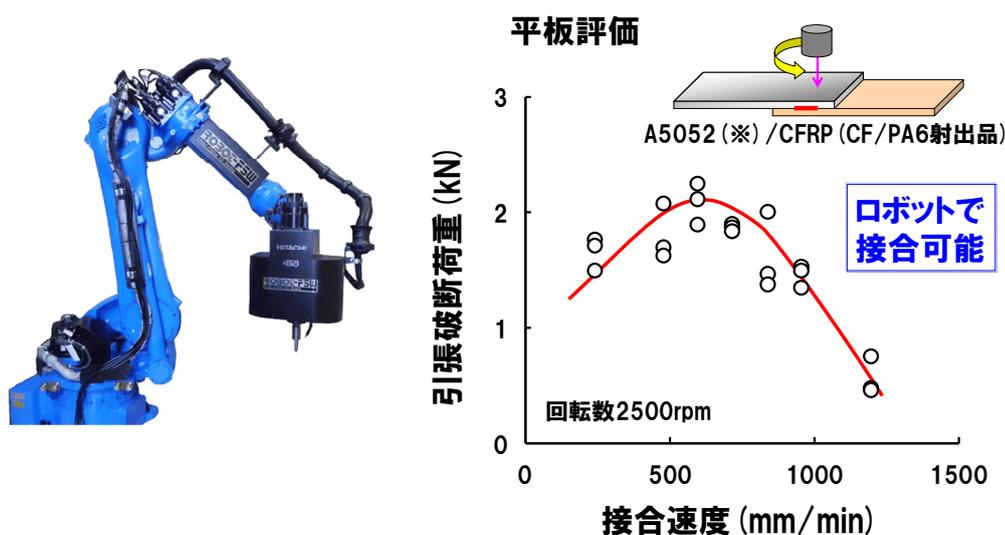
・ 塩水噴霧試験（35℃×2h→）（図Ⅲ-2.7.1-9）

接合部をラバーでシールを施した試験片と、シールを施さなかった試験片とを比較すると、シール無しでは接合強度が 60 日間でほぼゼロとなるが、シール有りでは初期強度を維持可能であることが分かった。



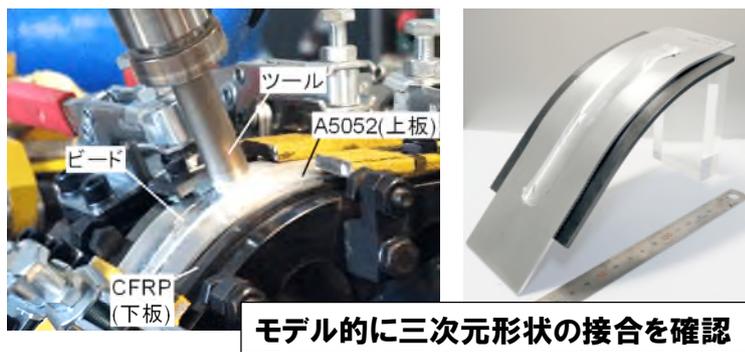
図Ⅲ-2.7.1-9 FLJの耐久性評価(Thermal shock、Salt spray)

FLJの自動化について、ロボット設備を用いた検証を実施した。まずはアルミニウムと熱可塑CFRPの平板を用いたモデル検討を進め、基礎検討時の知見同様に接合強度はプロセス条件に依存する傾向が確認でき、ロボット設備を用いたFLJによる接合はポテンシャル的に十分可能であることを確認した。(図Ⅲ-2.7.1-9)



図Ⅲ-2.7.1-10 ロボット設備を用いたFLJモデル検討

さらに、FLJ接合の適用形状に関しては、平板形状だけでなく、R100mm程度の曲面形状でも接合が可能であることを確認した。さらに、実用化に向けては①回転ツール加圧の均一維持、②接合後の冷却固化までの接合部位固定がプロセス上重要であることも分かった。特にロボット設備化を想定する場合、回転ツールを当てる角度が異なると、設備自体(回転ツールヘッド)の自重が大きいため接合部位の加圧力に影響して、加圧力の均一維持が非常に困難となる。具体的な加圧力制御と接合条件と接合強度との関係や、接合部の状態確認などの検証は愛知県の戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業)にて継続実施中である。



実用化に向けた課題抽出
(1) ツール加圧の均一維持
(2) アルミ／CFRP固定
接合後に冷却固化するまで

加圧制御技術の開発
(サポイン事業活用)

図Ⅲ-2.7.1-11 ロボット設備を用いた FLJ モデル検討

軽量構造材料のアルミニウムと、軽量・強度・剛性に優れる CFRP との組み合わせは、今後の輸送機器用途では非常に重要な設計技術となる。金属は力学特性以外にも高い電導性や熱伝導性などの優れた性能を有し、CFRP は軽量性に優れた素材であり、その複合体は輸送機器以外にも様々な用途に展開可能と考える。

本研究開発において、より簡便に実施でき、接合特性に優れ、大型部材にも適用可能な革新的接合技術として FLJ の可能性を見極めることで、AI に限らず金属／CFRP 複合体の適用部材が大きく拡大する可能性を有する。現時点では熱可塑性 CFRP（射出成形品）および熱硬化 CFRP に対して母材破壊レベルの接合強度を有することが確認出来つつあり、接合ポテンシャルは高いものと期待する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.1-8 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	3	0	0	0	0	1	1
2015FY	1	1	5	0	0	0	0	1	0
2016FY	0	0	3	1	0	1	0	1	1
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	2	1	11	1	0	1	0	3	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.1-9 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.2 [テーマ番号 02] 残留 γ 相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発

2.7.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車の軽量化ニーズに対応するため、自動車用鋼板およびアルミニウム板の画期的な高強度化・高延性化を狙い、自動車用鋼板では残留 γ 相状態を高度に制御した中高炭素鋼を活用した革新鋼板の開発、自動車用アルミニウム板では複層アルミ板の開発を進めている。一方、マルチマテリアル化を狙った際には、これらの鋼板・アルミ板の接合に難しさがあると共に、革新鋼板－革新鋼板の接合についても課題が存在する。現状、鋼板－アルミ板の異材接合については量産されている技術は、Self-Piercing Rivet (SPR) や Flow Drill Screw (FDS) といった機械締結を活用した技術が中心となっている。しかし、これらの技術は副資材が必要でコストが高かいために少量生産の高級車に適用することはできるが大量生産には適さなかったり、超高強度鋼板を対象とすると機械締結のために鋼板に穴を空ける必要があるが、その穴あけが難しかったりすることで、超高強度鋼に展開するには課題がある。

上記のような状況に対して、鋼板－アルミ異材接合については、コスト、量産性という観点では、現在最も一般的に活用されている抵抗スポット溶接を活用することが最も有効と考えられている。一方で、抵抗スポット溶接による鋼板－アルミ異材接合については、様々な研究が進められているが、金属間化合物の制御に難しさがあることから、実用化に至っていない。

そこで本テーマでは、革新鋼板－複層アルミもしくはその同等材を対象にして、量産性を考慮した抵抗スポット溶接およびその他の新接合技術を活用して継手強度を確保するための技術開発に取り組んだ。

(2)位置付け、目標値

本テーマで開発する技術は、2018年度まではテーマ 21 およびテーマ 22、2019年度は本テーマ（テーマ 02）で開発する革新鋼板ならびに複層アルミを対象とした鉄－アルミ異材接合、および、同材接合に関する技術である。

表Ⅲ-2.7.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
アルミ－鉄異材スポット溶接	—	革新アルミ・革新鋼板もしくは相当材の異材継手において、抵抗スポット溶接および新接合技術の活用による十字引張強度 1.5kN 以上	各種実用部品の接合で、JIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断。接合時間：1 点あたり 5 秒以内。	革新鋼板と複層アルミのマルチマテリアル化に必要な継手特性の確保

鉄－鉄接合	—	中高炭素革新鋼板同士の継手において、厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重平均値の 70%以上、十字引張荷重平均値の 70%	2019 年度で開発完了	革新鋼板を利用するための接合技術として必要と考えられる継手特性確保
革新鋼板の開発	テーマ 22 で実施	炭素濃度 0.4%以上、Mn 量 10%以下で強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上、水素添加時の破断強度が 980MPa 級同等以上	2019 年度で開発完了	プレス成型に適用可能かつ使用中の信頼性確保のために必要な特性を設定
革新鋼板解析技術	テーマ 22 で実施	鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術において、空間分解能：200nm 以下、濃度分解能：0.1mass%を目指す	2019 年度で開発完了	革新鋼板開発に必要な組織解析能力を設定
複層アルミ合金の開発	テーマ 21 で実施	熱処理後の耐力 700MPa 以上、成形前の伸び 20%以上、(部材成形性)平面歪領域の破断限界ひずみ 0.15 以上。	熱処理後の耐力 700MPa 以上、成形前の伸び 20%以上、成形前：(部材成形性)平面歪領域の破断限界ひずみ 0.2%以上、熱処理後：(部材圧壊性) VDA 曲げ確度 40° 以上	プレス成型に適用可能かつ衝突安全性確保のために必要な特性を設定

(3)全体計画

本テーマについては、テーマ 22 の残留 γ 高度制御革新鋼板のテーマと連動しており、革新鋼板の開発に伴い、母材の開発が進んだら、その開発鋼の特性に合わせて各接合技術による継手特性向上を図っていく。

具体的には 2015 年度までについては、強度 1.2GPa 伸び 15%以上の鋼材を対象に抵抗スポット溶接、多重レーザ、FSW と言った技術の開発に取り組んでいく。

また、2017 年度には強度 1.5GPa 伸び 20%の革新鋼板を用いて 1.5GPa 化した時の課題を抽出するとともに、その対策技術開発を進め、本プロジェクトの最終目標を実

現できる接合技術を構築する。

2018年度以降は2017年度までの知見を活用しながら革新鋼板と革新アルミもしくはその相当材の異材接合技術の抵抗スポット溶接および新接合技術に関する開発を進め、2020年度末までに十字引張強度1.5kN以上の特性確保、2022年度までに接合時間5秒/1点以下でJIS相当以上の継手強度確保可能な接合技術開発に取り組む。また、鉄-鉄接合については、2019年度までに1.5GPa級革新鋼板を対象にJIS Z3140相当の引張せん断強度、十字引張強度を確保するための技術開発を開発する。

(4)実施体制

革新鋼板、複層アルミに関する接合技術の要素技術的な支援を受けるために関係大学への再委託を実施した。

(5)運営管理

年2回程度の再委託先との進捗会議を実施し、再委託先での研究進捗の確認とそこで得られた知見を分担研の研究無いうちにフィードバックさせる方法を取ることで、研究開発が促進できるような運営を行った。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

接合技術については単体での経済効果・CO₂削減効果は見込めず、革新鋼板開発の適用を本接合技術で実用化を促進させることで、各種効果を実現する。本接合技術を構築することで初めて革新鋼板の実用化が可能となり、車体骨格部品の軽量化による自動車軽量化、それによるCO₂排出量低減が期待される。また革新鋼板の市場創出とその販売による売上硬化が期待される。

2.7.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.2-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
アルミ-鉄異材スポット溶接	革新アルミ・革新鋼板もしくは相当材の異材継手において、抵抗スポット溶接および新接合技術の活用による十字引張強度1.5kN以上	IMC面積とCTSの相関性を明示し、CTS達成策としてIMC面積拡大の方法を抽出。	○	

鉄－鉄接合	中高炭素革新鋼板同士の継手において、厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重平均値の 70%以上、十字引張荷重平均値の 70%	1.5GPa 級革新鋼板のスポット溶接継手強度の改善方法を 2 通り抽出し、JIS-A 級（JIS Z3140-2017)の継手強度の 100%を上回る特性を得られることを示した。	◎	
革新鋼板の開発	炭素濃度 0.4%以上、Mn 量 10%以下で強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上、水素添加時の破断強度が 980MPa 級同等以上	0.4%C 鋼により、引張強度 1.5GPa-伸び 20%と水素添加時の破断強度が 980MPa を超える特性を得られる組織制御指針を見出した。	◎	
革新鋼板解析技術	鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術において、空間分解能：200nm 以下、濃度分解能：0.1mass% を目指す	走査型電子顕微鏡にコンタミン除去装置と軽元素分析装置を活用することで目標の解析精度を達成した。	○	
複層アルミ合金の開発	熱処理後の耐力 700MPa 以上、成形前の伸び 20%以上、(部材成形性)平面歪領域の破断限界ひずみ 0.15 以上。	クラッド鋼材、合金組成、プロセス条件最適化により複層アルミ合金の成形性向上効果を検証し、第 3 期目標達成に目処を得た。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
アルミ-鉄異材スポット溶接	IMC半径 $5\mu\text{m}$ に拡大すればCTS目標達成に目処。IMC面積拡大策に多段通電を抽出。	各種実用部品の接合で、JIS-A級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断。接合時間：1点あたり5秒以内。	達成見通し有り
鉄-鉄接合	目標達成済み。	2019年度で完了	
革新鋼板の開発	目標達成済み。	2019年度で完了	
革新鋼板解析技術	目標達成済み。	2019年度で完了	
複層アルミ合金の開発	部材特性の向上のために曲げ性評価を実施も、接合性評価を実施中。	熱処理後の耐力700MPa以上、成形前の伸び20%以上、成型前：(部材成形性) 平面歪領域の破断限界ひずみ0.2%以上、熱処理後：(部材圧壊性) VDA曲げ確度40°以上	達成見通し有り

(3)研究開発の成果と意義

革新鋼板および複層アルミは高強度で成形性に優れるために自動車車体骨格用部品の軽量化に寄与することが期待されている。しかし、自動車車体骨格を構築するには部品間の接合が必須となってくるため、その接合技術は極めて重要な取り組みとなる。そこで本テーマでは、革新鋼板-複層アルミの異材接合ならびに革新鋼板同士の接合について検討を行った。

(3-1) 残留 γ 相制御中高炭素鋼板/革新アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発

テーマ22で開発してきた革新鋼板(炭素量0.4%以上、TS 1.5GPa-EL 20%)とテーマ21で開発中の複層アルミを対象として、十字引張強度1.5kN以上を目標として、スポット溶接工法の検討を行った。なお、革新鋼板と複層アルミの代替として

1.5GPa 級高強度鋼板および高強度アルミを用いて検討を行った。

各種スポット溶接条件で異材溶接継手を作製し、その継手特性および溶接部に形成される金属間化合物の状態を評価した。加圧方法を工夫することで、安定して金属間化合物を形成させることができることが分かった。また、金属間化合物を作り込むことで、継手強度が安定して高められることと、金属間化合物の厚さを薄めながら、金属間化合物の径を広げていくことが重要であることを見出し、最終目標を達成するための制御指針を見出した。

(3-2) 残留 γ 相制御中高炭素鋼のスポット溶接

テーマ 22 で開発中の中高炭素鋼板の継手強度、特に十字引張強度が劣位にある要因としては、ナゲット部が硬くて脆く、かつ、母材の強度が高いために拘束が厳しくコロナボンド近辺に大きな応力集中がおこりやすくなっているためと考えられる。

応力集中が起こった際に、き裂がナゲット内を進展すると界面剥離になり、スポット溶接強度が低位となると考えられる。そのため、ナゲット部の靱性をいかに改善するかが、十字引張強度向上の為に重要な制御因子と考えられる。ナゲット部の靱性については、テンパー通電により焼戻すことで改善できることが知られている。そこで、炭素量が 0.4% の革新鋼板を用いて、通電条件を変化させて継手特性評価を行った。

その結果、通常のスポット溶接では CTS は 2kN 程度と低位にあるが、通電条件を適切に付与することで継手強度を改善でき、更に 0.4C 鋼の合金元素の適正化を合わせることで、JIS 規格値を上回る良好な CTS が得られることを見出した。また、接着剤を併用したウェルドボンドを活用することにより、JIS 規格値を大きく上回る CTS が得られることが分かった。

以上のように、一般に継手特性の確保が難しい中炭素鋼でも、革新鋼板の材料設計と溶接条件の最適化により、最終目標である JIS A 級継手の継手強度の 70% 以上を大幅に上回り、JIS 規格値そのものを超えるスポット溶接強度を得られることを見出し、最終目標を超過達成できたといえる。

(3-3) 革新鋼板の耐遅れ破壊特性の兼備

テーマ 22 において、0.4C 鋼において 1.5GPa 級で 20% を超える伸びを確保できる革新鋼板を開発した。革新鋼板の材料設計については、複数種類のアプローチで特性確保できる技術を構築できたが、耐水素脆化特性のような信頼性を考慮した際に最適な材料を確認するために、SSRT 試験により耐水素脆化特性の評価を行った。

その結果、水素チャージ後の SSRT 試験での破断荷重は、全ての鋼種で最終目標である 980MPa 級鋼同等以上の特性が得られたが、鋼種によってその値に差異があり、最も良好な鋼種では、強度、伸び、耐水素脆化特性の全てを満たすことができることを見出した。以上のように、革新鋼板については本プロジェクトにおける最終目標を達成するための制御指針を構築できたと言える。

(3-4) 複層アルミの合金設計、組織解析・制御技術の開発

複層アルミについては、強度・伸びバランス向上と、部材特性向上に取り組んだ。複層アルミの機械的特性は、板厚方向の特性・組織分布が支配的であり、その分布をクラッド構成、組成、プロセス条件によって制御することができる。これまでの知見を元に、クラッド構成、合金組成、プロセス条件（均熱条件、クラッド圧延条件、焼鈍条件、拡散熱処理・人工時効条件等）の最適化を行うことで、第三期目標を達成するレベルまで特性を確保できた。

さらに、部材として要求される成形性の評価、構造部材に要求されると想定される圧壊性の指標である VDA 曲げ性の評価を行い、複層アルミの特性において、従来 7000 系合金よりも良好な特性バランスを示すことを確認した。

引き続き、複層アルミの特性向上を目指すと共に、継手特性を確保するための材料設計の指針について検討を進める。

4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	1	0	1	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	1	2	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	5	0	0	0	0	0	1
合計	1	1	9	0	0	0	0	0	7

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.2-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	1	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.3[テーマ番号 03] 中高炭素鋼の革新的接合技術の開発

2.7.3.1 テーマの概要

1) 背景と目的

自動車分野では、CO₂排出量規制を背景とした軽量化による燃費改善と衝突安全性確保を目的としたボディの高剛性化の両面が求められ、自動車ボディに用いられる高強度鋼板の強度レベルやその使用割合は、ますます増加する傾向がある。

これらの要求に答えるため、近年、高強度鋼板の開発動向では、多量のレアメタル添加による高合金化が図られているが、資源の高騰等の課題が指摘され、安価な高強度化元素として炭素（C）の活用が期待されている。例えば、C系低合金鋼（C > 0.5%）では、ベイナイト、マルテンサイト、残留オーステナイトなどの組織制御により、引張強さ $\geq 1500\text{MPa}$ 、伸び $\geq 20\%$ 以上の優れた特性を得ることが可能であるが、薄鋼板として製造することが難しいことや溶接性に課題があり、自動車用鋼板・鋼材として用いられていない。特に、0.5%以上の炭素鋼の溶接継手では、溶接金属部や溶接熱影響部の局所的な軟化、靱性低下、水素脆化、疲労特性低下などにより、本来、鋼が持つ特性を溶接構造部材として十分に発現することができなかった。そこで、本テーマでは、自動車等の移動体の生産に用いることを前提に、高性能な中高炭素鋼の性能を損なわない革新的な接合技術の開発を目指す。

2) 位置付け、目標値

本テーマでは、中高炭素鋼と中高炭素鋼の革新的接合技術の確立を目的に、具体的な開発計画を提案する。

研究開発の内容

中高炭素鋼の革新的接合技術を確立するため、以下の点をブレイクスルーポイントとして掲げ、重点的な研究開発を行う。

- ① 中高炭素鋼の溶接性明確化
- ② 継手特性の改善
- ③ 小型部材モデルによる継手・部材性能検討
- ④ 開発高炭素鋼の接合技術
- ⑤ 小型部材モデルでの検証

以下に、本開発の具体的な実施内容を示す。

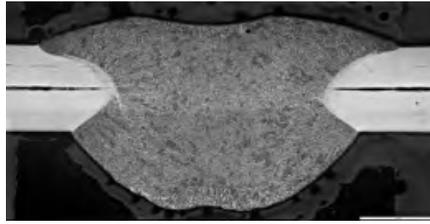
①中高炭素鋼の溶接性明確化

試供材を選定、作製し、溶融接合法、非溶融接合法の接合性検討を行う。

●溶融接合法（アークスポット）

溶融接合法では、アークスポットに注力。

最適溶材混合による溶接金属の靱性改善 + 余盛による負荷応力の最適化による継手強度確保を図る。



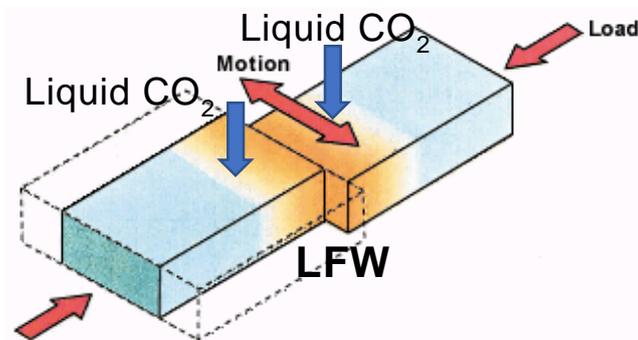
図Ⅲ-2.7.3-1 アークスポットによる貫通継手の例

- 非溶融接合法（摩擦攪拌リニア接合、複動式フラットFSW）

→2016年度から、No.46へ移行

- ・摩擦攪拌リニア接合（FSLW）

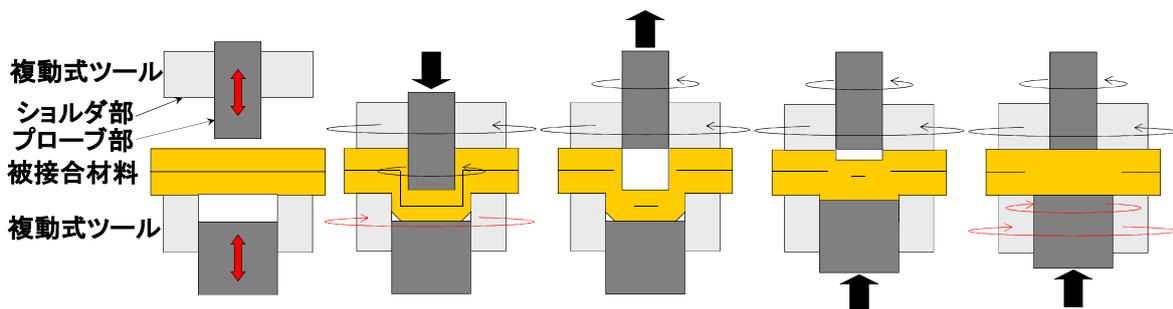
高効率冷却技術と摩擦攪拌技術を組み合わせることにより、微細な接合界面組織を実現し、継手強度の向上を狙う。



図Ⅲ-2.7.3-2 摩擦攪拌リニア接合（FSLW：大阪大学 藤井教授）

- ・複動式フラットFSW →2016年度から、No.46へ移行

低温接合（Ac1以下）と上下ツールによる大きな塑性流動を用いて、継手強度の向上を狙う。



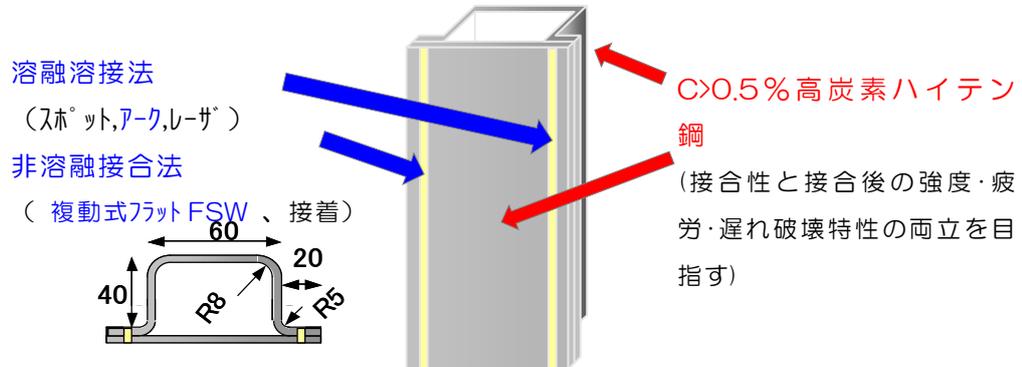
図Ⅲ-2.7.3-3 複動式フラットF S W（大阪大学 藤井教授）

②継手特性の改善

- ・予熱後熱処理/溶接条件パラメータ等の最適化
- ・継手特性（強度、疲労、遅れ破壊）の向上及びそのメカニズム検討

③ 小型部材モデルによる継手・部材性能検討

- ・ 小型モデル部品の作製
- ・ 部材特性（圧潰、曲げ）評価
- ・ 形状/継手構造の最適化による部材特性向上検討



図Ⅲ-2.7.3-4 小型部材モデルの例

④ 開発高炭素鋼の接合技術

- ・ 開発材の溶接部組織と継ぎ手特性との関連性調査
- ・ 溶接性観点からの素材開発へのフィードバック

⑤ 小型部材モデルでの検証

- ・ 試作小型モデル部材の特性評価検証

以下に、本開発の開発目標を示す。

表Ⅲ-2.7.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
研究テーマ目標	中高炭素鋼の継手特性の明確化とその改善プロセスの方向性提示。 1.2GPaの中高炭素鋼（板厚1.4mm）で、引張せん断試験における破断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A級（約14.4kN）の70%以上	中高炭素鋼板の性能を活かし得る溶接プロセス指針明確化。	1.5GPa級中高炭素鋼の性能を活かし得る溶接プロセス指針の確立と小型部材モデルでの性能検証。 強度1.5GPa以上の中高炭素鋼（板厚1.4mm）で、引張せん断試験における破断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A級（約14.4kN）以上	継手強度の評価基準として、JIS規格を採用

1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善 (新日鐵住金)	中高炭素鋼溶接部の評価、小型部材モデルの評価	成分・強度の異なる鋼での継手特性の評価・改善および、部材モデルでの性能確認	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手、部材特性明確化	中高炭素鋼の継手特性を確保するための技術開発
1-2)継手疲労特性の解明 (2014Fy まで再委託先)	中高炭素鋼のアークスポット溶接部の疲労強度特性評価	—	1.5GPa 級中高炭素鋼の疲労特性明確化	継手の信頼性確保
1-3)溶接残留応力の影響明解明 (再委託先)	残留応力解析技術の構築	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす残留応力の影響把握	継手の信頼性確保
1-4)アークスポットプロセスの解析 (新日鐵住金)	アーク挙動とワイヤ成分、溶接姿勢の影響調査	アークスポット安定溶接技術の開発	1.5GPa 級中高炭素鋼の実施工性確保	実施工性の向上
1-5)溶接部形状の数値解析技術 (再委託先)	シミュレーション手法の構築	溶接ビード形成メカニズムの明確化	1.5GPa 級中高炭素鋼での検証	プロセスメカニズムの解明
2-1)摩擦接合による継手性能評価 (新日鐵住金)	C 量、強度レベルの異なる中高炭素鋼の適正接合条件の明確化	摩擦接合の継手特性、性能の明確化	—	開発プロセスとの差異検討
2-2)摩擦接合プロセスの開発 (再委託先)	FSLW 接合プロセスの開発とその継手特性評価	FSLW 接合プロセスの開発とその継手特性評価	新接合プロセスの開発とその継手特性評価	新摩擦接合プロセスの開発
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明 (再委託先)	中高炭素鋼の摩擦接合界面組織の解析と継手特性への影響把握	接合条件による継手特性、接合部組織への影響明確化	新接合プロセスによる接合部組織の特性明確化	摩擦接合の基礎特性把握
2-4)摩擦撈拌接合の数値解析技術の開発 (再委託先)	シミュレーション手法の構築	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	新接合プロセスのシミュレーション手法構築	接合メカニズム解明

(3)全体計画

上記のように、溶融溶接としてアークスポット溶接を取り上げ、中高炭素鋼の継ぎ手諸特性のデータ蓄積や継ぎ手強度支配因子の解明を図るとともに、実施工を踏まえたプロセス最適化や溶接組み立て部材性能の検証を行う。なお、摩擦接合については2016年度以降、連携領域として、別テーマ(No.46)にて検討する。

(4)実施体制

1) 溶融溶接技術の開発 (担当機関：新日鐵住金 (株))

中炭素鋼を用いて、溶融 (アークスポット等)、非溶融 (FSW) 等による各種溶接継手を作製し、継手特性を把握する。

各種溶接による継手を作製し、各種継手強度試験 (せん断、十字) を実施して継手強度レベルを把握するとともに、断面マクロ試験片を作製し、溶接ビード形状、溶接部組織・硬度などを把握する。また、ハット型断面の小型モデル部材を作製し、落錐試験を用いて、部材の動的破壊特性を調査する。

2) 継手疲労特性の解明 (担当機関：新日鐵住金(株)、再委託先)

中高炭素鋼の各種溶接法による溶接継手の疲労強度特性評価とその強度特性発現機構の解明に取り組む。なお本再委託は、2014年度の成果を以って中止とし、2015年度は富津分担研にて実施し、完了を目指す。

3) 溶接残留応力による継手強度特性への影響解明 (担当機関：新日鐵住金 (株)、再委託先)

中高炭素鋼の各種溶接法による継手の溶接部の残留応力に着目し、継手強度特性への影響を解明する。

4) 溶接部靱性への金属組織の影響解明 (担当機関：新日鐵住金 (株)、再委託先)

中高炭素鋼の溶接継手の溶接部金属組織に着目し、継手強度特性への影響を解明する。なお本再委託は、2016年度以降、連携テーマとしてNo.46にて実施する。

5) アーク溶接、摩擦攪拌接合の数値解析技術開発 (担当機関：新日鐵住金 (株)、再委託先)

アーク溶接、摩擦攪拌接合における接合現象の解明のため、数値解析によるモデリング技術を開発する。なお本再委託は、2016年度以降、連携テーマとしてNo.46にて実施する。

6) 摩擦接合プロセスの開発 (担当機関：新日鐵住金 (株)、再委託先)

摩擦攪拌リニア接合プロセスの開発及び開発接合方法による継手特性の評価と接合メカニズム検討を行う。なお本再委託は、2016年度以降、連携テーマとしてNo46にて実施する。

【委託先】

新構造材料技術研究組合

【分担研】

新日鐵住金株式会社
(富津分室・尼崎分室)

(5)運営管理

本テーマは、中高炭素鋼の溶融、非溶融の革新的接合技術開発に向けて、継手特性に及ぼす組織、疲労、残留応力、接合メカニズム解析のためのシミュレーション技術構築、革新的な摩擦接合プロセスの開発などを大学に再委託し、個別に、定期的な進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行うとともに、年2回程度、全体会議を催し、本研究を推進する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

CO₂排出量の削減と衝突安全性能向上の観点から、自動車車体の軽量化が求められ、高張力鋼の車体骨格部品への適用は増加傾向にある。特に、980MPaを超える超ハイテンは、車体骨格部品への適用が期待され、2020年頃には、ホワイトボディに使用される鋼板の20%以上となる予想もみられる。本プロジェクトで開発を目指す革新的な接合技術は、自動車ユーザが、1.5GPa以上の中高炭素鋼を信頼、安心して使うことのできる革新的な接合技術であり、国内外での中高炭素鋼の拡販やその実用化に大いに貢献するものである。

2.7.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.3-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善 (新日鐵住金)	成分・強度の異なる鋼での継手特性の評価・改善および、部材モデルでの性能確認	モデル部材を作製し、スポット溶接に比べて部材特性が改善することを確認	○	
1-2)継手疲労特性の解明(再委託先)	1.5GPa級中高炭素鋼の疲労特性明確化	せん断、剥離モードでの疲労特性を把握。	○	
1-3)溶接残留応力の影響明解明(再委託先)	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化	溶接部残留応力の数値解析技術の構築	○	
1-4)アークスポットプロセスの解析 (新日鐵住金)	アークスポット安定溶接技術の開発	中高炭素鋼の中でも炭素量の高い鋼種でも、良好な溶接部が形成できる条件を提示した。	○	
1-5)溶接部形状の数値解析技術(再委託先)	溶接ビード形成メカニズムの明確化	No.46へ移行	—	
2-1)摩擦接合による継手性能評価 (新日鐵住金)	摩擦接合の継手特性、性能の明確化	No.46へ移行	—	
2-2)摩擦接合プロセスの開発(再委託先)	FSLW接合プロセスの開発とその継手特性評価	No.46へ移行	—	
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明(再委託先)	接合条件による継手特性、接合部組織への影響明確化	No.46へ移行	—	
2-4)摩擦撈拌接合の数値解析技術の化初(再委託先)	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	No.46へ移行	—	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善 (新日鐵住金)	0.45C 中高炭素鋼のアーク継手は、抵抗スポット継手と比べ TSS,CTS とともに高く、余盛り形状による影響が大きいと考えられた。また小型モデル部材で、スポット溶接に比べて高い部材特性が得られた。	中高炭素鋼の性能を活かし得る溶接プロセス指針の確立と小型部材モデルでの性能検証。 強度 1.5GPa 以上の	達成済み
1-2)継手疲労特性の解明 (再委託先)	アークスポット継手の疲労基礎データ (せん断、剥離モード) を取得。継手疲労強度に対する支配因子を明確化	中高炭素鋼 (板厚 1.4mm) で、引張せん断試験における破断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A 級 (約 14.4kN) 以上	達成済み
1-3)溶接残留応力の影響明解明 (再委託先)	溶接部残留応力の数値解析技術の構築		達成済み
1-4)アークスポットプロセスの解析 (新日鐵住金)	アーク点火時のスパッタ発生状況観察、その改善条件を提示した。また炭素量の高い鋼板へ適用可能であることを確認した。		達成済み
1-5)溶接部形状の数値解析技術 (再委託先)	No.46 へ移行		—
2-1)摩擦接合による継手性能評価 (新日鐵住金)	No.46 へ移行	—	—
2-2)摩擦接合プロセスの開発 (再委託先)	No.46 へ移行	—	—
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明 (再委託先)	No.46 へ移行	—	—
2-4)摩擦攪拌接合の数値解析技術の化初 (再委託先)	No.46 へ移行	—	—

(3)研究開発の成果と意義

(3).1. 研究開発の内容及び成果等

自動車等の輸送機器の軽量化推進するには部材の薄肉化が必要であり、その材料として強度・延性に優れる中高炭素鋼の開発・実用化が期待されている。しかし、鋼板強度が増加すると、自動車等の製造で多用される抵抗スポット溶接では継手強度が低下することが知られており、中高炭素鋼の接合技術として新たな接合法の開発が求められている。

本研究では革新的接合技術として、アークスポット溶接（熔融接合）の開発を行っている。これまで中高炭素鋼の継手強度の明確化に取り組み、スポット溶接に比べて特に CTS で顕著に向上することを確認した。またモデル部材を作製し、アークスポット溶接ではスポット溶接に比べて、部材の衝撃吸収特性が向上することを確認した。以下に開発成果を述べる。

(3).2. ISMA 支給材の継手強度調査

①供試鋼板

支給された共通鋼板 1.2GPa 級 TRIP 鋼板の化学成分を表Ⅲ-2.7.3-4 に示す。板厚 1.4mm の材料を用いた。

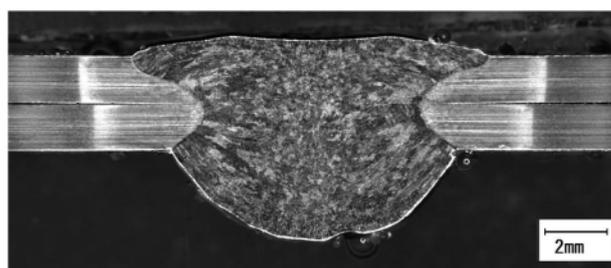
表Ⅲ-2.7.3-4 1.2GPa 級 TRIP 鋼の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	N	O
1.2 TRIP 鋼	0.40	1.50	2.00	0.010	0.002	0.04	0.0040	-

②溶接条件

・アークスポット溶接

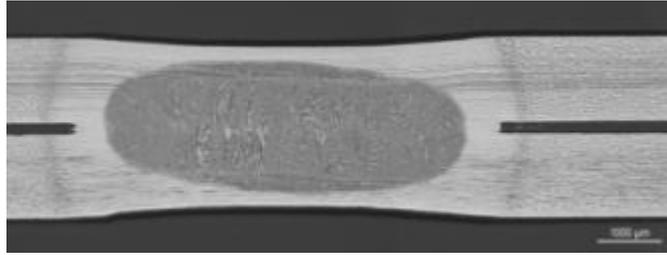
ワイヤには YM-28/1.2mmΦ を使用した。シールドガスには Ar+20%CO₂ を使用した。アークタイムは 2.5s とした。溶接金属の硬さは、溶接ワイヤによる希釈によりスポット溶接の溶接金属よりも低い約 330Hv となった。またキーエンス製形状測定機 VJ-7020 により測定した表裏面のふくらみは表約 0.74mm、裏約 3.3mm で安定していた。



図Ⅲ-2.7.3-5 アークスポット溶接部の断面観察結果

・スポット溶接

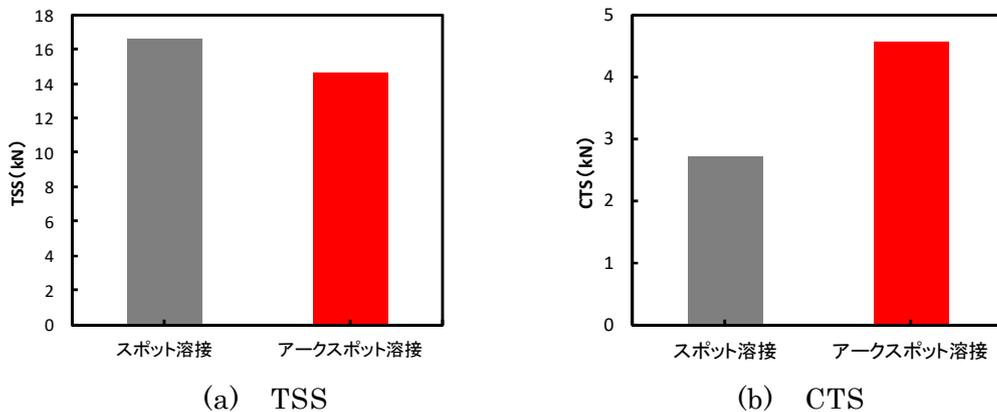
スポット溶接電極には DR 型 Φ6R40 を使用した。加圧力 350kgf、通電時間 20cyc@60Hz (以降、すべて 60Hz での記載とする)、溶接電流 7.0kA でナゲット径 $5\sqrt{t}$ となることを確認した。溶接金属部の硬さは約 720Hv となっていた。



図Ⅲ-2.7.3-6 スポット溶接部の断面観察結果

③継手強度

図Ⅲ-2.7.3-7 にスポット溶接継手、およびアークスポット溶接継手の TSS、CTS を示す。TSS は溶接金属の硬さ低下に伴い若干低下した。一方、アークスポット溶接の CTS はスポット溶接に比べて向上した。溶接金属の硬さが低く、靱性が回復したためと考えられる。



図Ⅲ-2.7.3-7 1.2GPa 鋼の継手強度

(3).3.継手強度に及ぼす炭素量の影響

①供試材料

市販の S35C、S45C、S55C 鋼板 板厚 1.6mm を焼入れ、焼き戻し処理により母材硬さを約 400Hv に調整した材料を用いた。

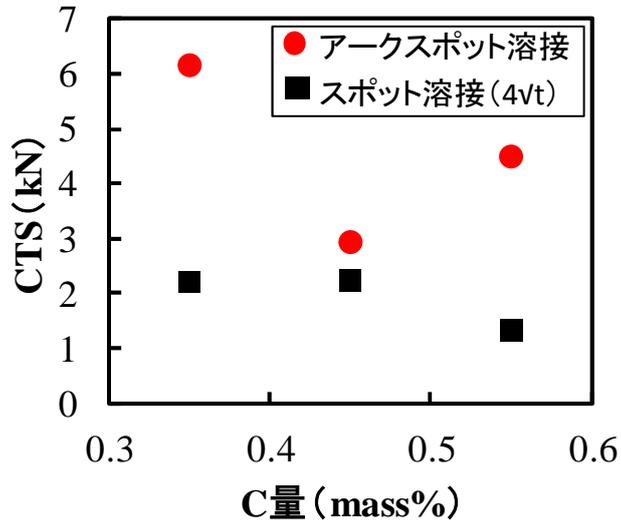
②溶接条件

アークスポット溶接は、溶接ワイヤ YM-24T/1.2mmΦ を使用した。シールドガスには Ar+20%CO₂ を使用した。アークタイムは 2.5s とした。スポット溶接はナゲット径が 4√t となる条件を採用した。

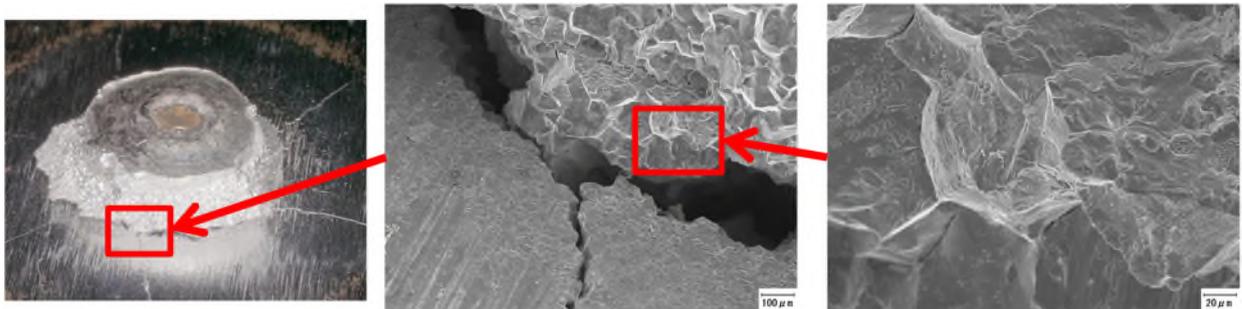
③CTS に及ぼす炭素量の影響

図Ⅲ-2.7.3-8 アークスポット溶接継手とナゲット径 4√t としたスポット溶接継手の CTS に及ぼす炭素量の影響を示す。向上程度に差は見られるものの、すべての

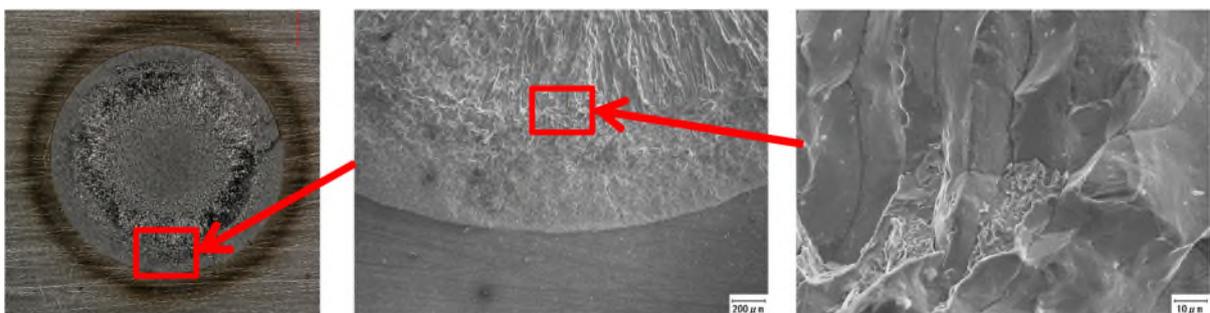
炭素量で CTS が高い値を示すことを確認した。図Ⅲ-2.7.3-9 に最も炭素量の高い S55C 鋼板溶接部の破断位置の観察結果を示す。スポット溶接継手では、溶接部の界面で破断しており、主に粒界破面が観察された。一方、アークスポット溶接では、界面ではなく亀裂が板厚方向に進展したプラグ破断となった。この破断形態の改善により継手強度が向上したと考えられた。



図Ⅲ-2.7.3-8 溶接継手強度に及ぼす炭素量の影響



(a) アークスポット溶接継手 (S55C)



(b) スポット溶接継手 (S55C)

図Ⅲ-2.7.3-9 溶接継手の破面観察結果

(3).4.ハット部材衝撃吸収特性評価

①はじめに

本評価検討において 0.45mass%C 鋼 (S45C) の薄鋼板を供試鋼とした。短冊状の供試鋼をオーステナイト単相の温度に加熱したのち、金型で急速冷却して焼入れた。焼入れ時の部材形状は短冊状ままとするか、あるいは同時に成形してハット型とした。その後、引張強さが 1200MPa 級(Hv400 程度)となるように熱処理を施した。これらの部材を組合せてアーク溶接により接合し、自動車部品を模擬したモデル部材に仕上げた。部材に対し、溶接部基礎評価(溶接部断面観察)を行った。また衝撃三点曲げ試験も実施し、部材の圧潰特性を評価した。部材評価に先立ち、継手の引張試験も実施した。比較のため、スポット溶接部材や継手も作製し、同様な評価を実施した。

②継手引張試験

部材の衝撃三点曲げ試験に先立ち、溶接部の基礎評価として、引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)を評価した。なお鋼板の熱処理条件は後述する部材作製時の条件と同様とした。アークスポット溶接継手の TSS はスポット溶接のその 3 倍程度となり、今季の目標値 (JIS A 級の 70%) を達成した。TSS も同様にアークスポットがスポットよりも 3 倍程度高くなった。

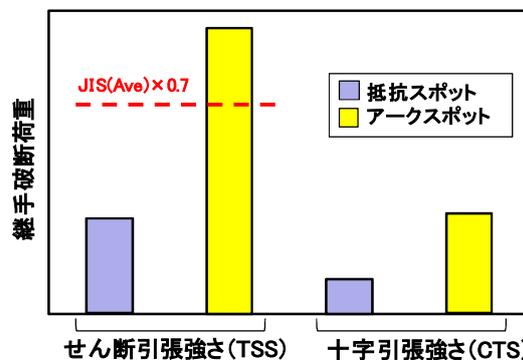


図 III-2.7.3-10 継手の引張強度比

③モデル部材の特性評価試験

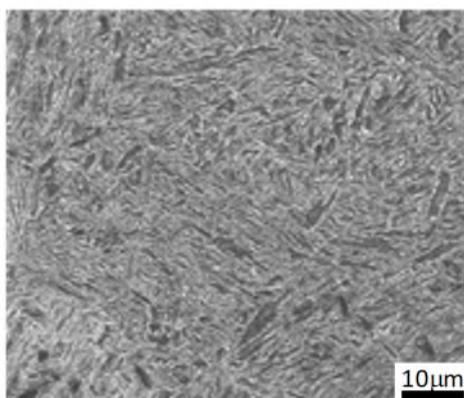
③-1 モデル部材の作製

供試鋼は板厚が 1.4mm の S45C 材である。その化学成分を表 III-2.7.3-5 に示すように、C 量は 0.44%であった。供試鋼を 920°C で 5 分間加熱し、金型で挟み込んで急冷・焼入れすると同時に、図 III-2.7.3-12 の部材概略図に示す長さ 800mm のハット型部材に成形した。その後、鋼板の引張強さが約 1200MPa(ビッカース硬さ Hv400 程度)となるよう、部材に対し 360°C×3.5 時間の焼戻し熱処理を施した。このハット型部材と向かい合わせ溶接する短冊形の鋼板に対しても同条件の加熱焼入れと焼戻し熱処理を行った。焼戻し熱処理後の組織を図 III-2.7.3-11 に示す。こうして準備したハット型部材と短冊型鋼板を重ね合わせ、そのフランジ部をスポット溶接あるいはアークスポット溶接した。図 III-2.7.3-12 に示すように、フランジにおける基準の溶接点間隔は 40mm とした。スポット溶接の場合、鋼板重ね面における溶接金属(ナゲット)の直径は $5\sqrt{t}$ (t=鋼板板厚 1.4mm)とした。溶接点間隔は 40mm を基準とした。アークスポット溶接の場合、溶接材料として $\phi 1.2\text{mm}$ のソリッドワイヤ(JIS 規格 YGW16)を用いた。鋼板重ね面における溶接金属直径は $5.8\sqrt{t}$ であった。アークスポット溶接の溶接点間隔は 40mm と 20mm の 2 水準とし、溶接点間隔の影響も評価した。アークスポット溶接では、溶接に先立ち $\phi 4\text{mm}$ の穴あけ加工を施した。ワイヤの狙い位置は穴の中心と

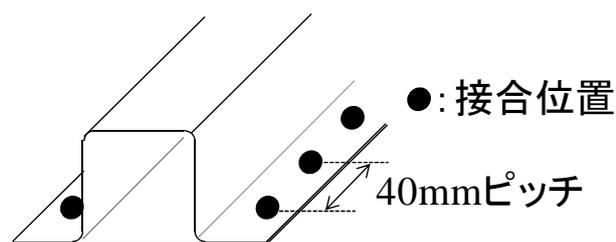
した。

表Ⅲ-2.7.3-5 モデル部材に用いた供試材料の成分 (mass)

C	Si	Mn	P	S
0.44	0.21	0.78	0.01	0.005



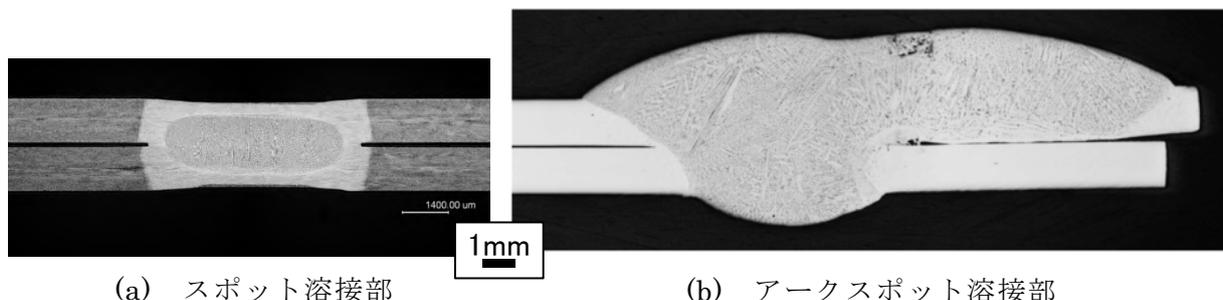
図Ⅲ-2.7.3-11 供試鋼の母材組織



図Ⅲ-2.7.3-12 モデル部材形状の模式図

③-2 溶接部断面形状

スポット溶接部断面およびアークスポット溶接部断面を図Ⅲ-2.7.3-13 に比較する。スポット溶接部では、電極の圧下を受けて表裏面が凹んだ形状となった。一方、アークスポット溶接部は表裏面ともに凸形状の溶接金属が形成された(鋼板表面よりも外側に出た部分が余盛)。また上板では右側の溶接金属量が左側よりも増加したことが判る。これは、写真右側が部材のフランジ端部であって溶接中の熱伝導が進まなかったためと考えられる。つまり、右側の溶接中の温度レベルと溶鋼の流動性が左側のそれらより高いため、溶鋼の多くが右側に流れたものと推測される。両溶接部のビッカース硬さも測定したが、溶接金属硬さはアーク溶接部がスポット溶接部を下回った。これは、スポット溶接の溶接金属にはマルテンサイトが生成したのに対し、アーク溶接の溶接金属ではより軟質なベイナイトが生成したことが理由である。この組織の相違は、アーク溶接部の溶接金属では溶接ワイヤと母材が混合し、その成分が母材成分から変化するために生じる。



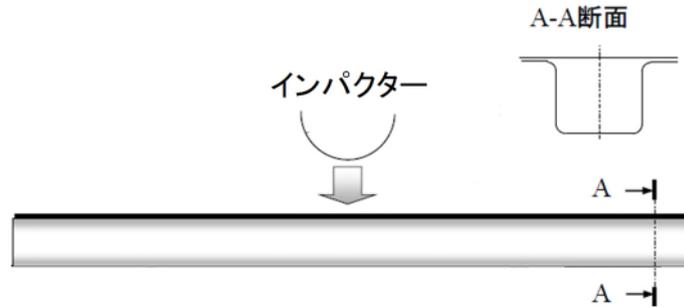
(a) スポット溶接部

(b) アークスポット溶接部

図Ⅲ-2.7.3-13 溶接部断面

③-3 衝撃三点曲げ試験条件

衝撃三点曲げ試験の模式図を図Ⅲ-2.7.3-14に示す。インパクトを部材の平板側から衝突させ、試験中の荷重と錘の変位を計測した。一定変位までの荷重の積分値を吸収エネルギーとし、それを部材特性の評価指標とした。

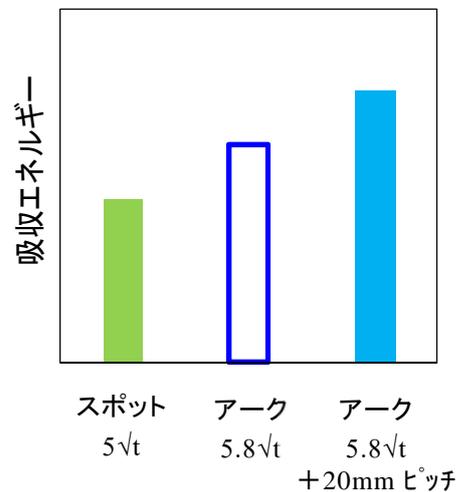


図Ⅲ-2.7.3-14 衝撃三点曲げ試験の模式図

③-4 部材特性の評価

各接合法で作製したモデル部材の吸収エネルギーを図Ⅲ-2.7.3-15に示す。スポット溶接部材の吸収エネルギーに対して、アーク $5.8\sqrt{t}$ 条件の部材で34%向上し、さらに溶接点間隔を20mmにすると67%向上した。

アーク溶接部材では、スポット溶接部材と同等以上の吸収エネルギー性能が得られており、さらに改善条件部材では、スポット溶接部材に対して吸収エネルギーが30%以上向上した。



図Ⅲ-2.7.3-15

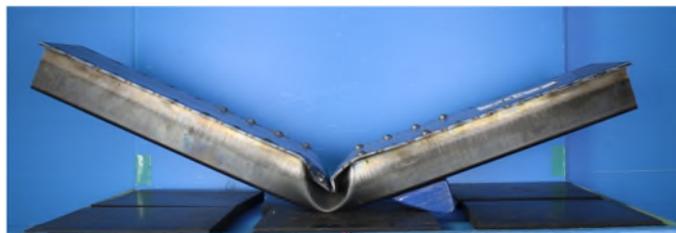
吸収エネルギーに及ぼす接合法の影響

③-5 試験後部材の外観

図Ⅲ-2.7.3-16に衝撃三点曲げ試験後のモデル部材外観を比較する。スポット溶接部材では溶接部の破断が発生したが、アークスポット溶接部材の溶接部破断が抑制された。アーク溶接部の方が強度・じん性に優れること、また余盛により溶接部の応力が緩和されることが破断抑制の理由と推定される。この破断防止を通じ、アークスポット溶接部材の吸収エネルギー向上が達成されたと考えられる。



(a) スポット溶接



(b) アークスポット $5.8\sqrt{t}$



(c) アークスポット $5.8\sqrt{t} + 20\text{mm}$ ピッチ

図Ⅲ-2.7.3-16 衝撃三点曲げ試験後のモデル部

③-6 まとめ

引張強さが 1200MPa となるように熱処理を施した 0.45mass%C 鋼のアークスポット溶接継手の特性、および自動車部品を模擬したモデル部材の特性を評価した結果、以下の知見が得られた。

- 0.45mass%C 鋼のアークスポット溶接継手の引張せん断試験において、開発目標である JIS-A 級平均値の 70%を超えることを確認した。
- アークスポットにより部材の衝撃特性がスポット溶接に比較し向上することを確認した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.3-6 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発 表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その 他			
2013FY	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	6	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	1	1	0	0	0	0	1
2017FY	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	2	0	11	1	0	0	0	0	3

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.3-7 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	1	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.4 [テーマ番号 04] 中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発

2.7.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や輸送機器の軽量化を目的とした高張力鋼板の適用拡大には、強度だけではなく加工性（伸び）も抜本的に向上させてゆく必要がある。これを達成するための具体的なアプローチとして、中高炭素鋼を用いて、加工により変態して延性を高める残留オーステナイト相の最適活用による伸びの向上について研究が進められている。

しかしながら、中高炭素鋼は、従来の溶接技術では溶接部に割れが生じたり脆化したりする。そこで、本プロジェクトでは、工業化のために必要な難溶接鋼板の連続摩擦攪拌接合（FSW）技術の開発を目的に、中高炭素鋼板の PHM（Pre/Post Heating Method）による実用 FSW 技術の開発を目指す。予熱・後熱処理プロセスを利用することにより接合部の熱履歴制御を可能とし、接合部金属組織の最適化、継手の高強度化および接合施工性向上を達成することで、革新的 FSW 技術の実用化技術を構築する。

(2)位置付け、目標値

【2015 年度】

導入する鉄鋼用 FSW 装置、および既存接合ツールを用いた検討により、鉄鋼の FSW 基礎プロセスを確立する。接合ツールは種々の材質、形状に関して検討することで、接合施工性と継手健全性の観点から適正プロセス条件範囲を明確化し、得られた適正条件範囲において設定する接合強度目標値を達成する。上記の結果と共に、塑性流動基礎解析を行うことで、開発鋼の接合で想定される課題の明確化を図る。さらに、導入する予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）の装置を用いて接合性の検証を行う。

目標としては、既存 FSW 法において厚さ 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼板に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現する。

【2017 年度】

予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）を開発する。従来の FSW 法では接合ツールと鋼材との間で発生する摩擦熱のみを熱源としているため必要な熱量を十分確保できないという課題に対し、鋼材を十分に軟化させるために予熱プロセスを付加することで接合施工性を向上する。また、後熱プロセスを付加することで、接合部の熱履歴制御を可能とし継手強度を向上する。得られた接合継手の強度に関して上記の目標値を実験室レベルで実現する。

さらに、予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）の装置に対して、上下面から加熱が可能な機能を追加し、設備の改良を行い、接合施工性を更に向上する。

目標としては、予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）を開発し、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中炭素鋼板への適用性を実験室レベルで確認する。接合強度は強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を実現する。

なお本テーマであるテーマ番号 04 中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発とテーマ番号 08 難接合性材料の線接合技術の開発は 2018 年度より統合され、テーマ番号 33 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発として研究継続される。

表Ⅲ-2.7.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2017 年度末)	最終目標 (2021 年度末)	根拠
FSW 法の開発	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法 (PHM-FSW 法) の接合性の検証	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法 (PHM-FSW 法) による接合プロセス適正条件の明確化	テーマ 33 へ継承	FSW の実用化には接合部金属組織の最適化、継手の高強度化および接合施工性向上を達成する技術の開発が必須
継手性能	既存 FSW 法において、厚さ 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さ \geq 母材強度の 70%を実現	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さ \geq 母材強度の 70%を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を達成		引張せん断強さ \geq 母材強度の 70%は、JIS Z3140 A 級相当であり、自動車車体の接合部強度の基準を満たす。

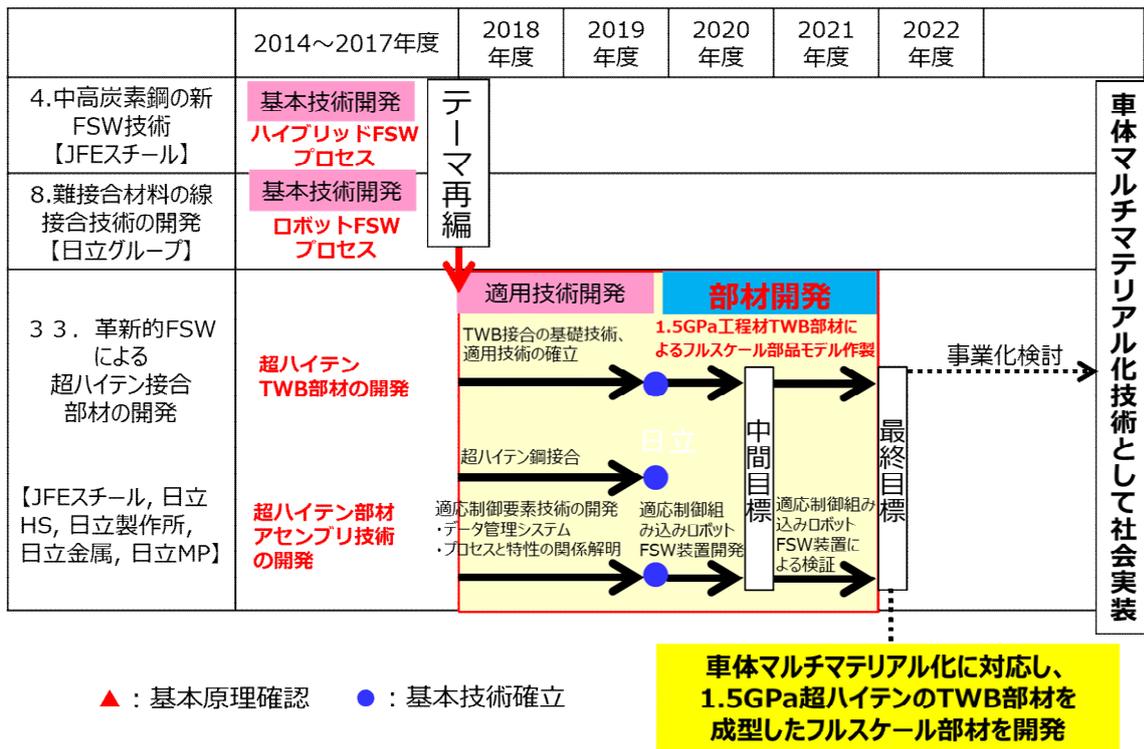
(3)全体計画

2013~2015 年度は、FSW 装置本体、PHM 装置から構成される PHM-FSW 装置を構築する。導入装置が設計・仕様に従った性能を有することを確認する。既存 FSW 法により、2mm 厚、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼を接合対象として、接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を達成する接合技術を開発する。また、研究再委託先の大阪大学にて中炭素鋼板の FSW における塑性流動基礎現象を検討する。

2016~2017 年度は、PHM 条件の最適化による FSW 施工性向上と接合部熱履歴制御による継手特性向上を確立し、PHM-FSW 法の開発を達成する。また、PHM-FSW 装置の改良を行い、両面摩擦加熱が可能な機構を追加する。開発 PHM-FSW 法により、接合対象：1.4~2mm 厚、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼を接合対象として、接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上かつ、従来を超える接合技術を開発する。

2018~2021 年度年度は、テーマ番号 04 中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発とテーマ番号 08 難接合性材料の線接合技術の開発が統合され、テーマ番号 33 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発として研究継続する。

表Ⅲ-2.7.4-2 全体計画



(4)実施体制

テーマ 04 中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発は、千葉分室（JFE スチール（株））を委託先として実施する。

(5)運営管理

テーマ 04 登録研究員による実務者進捗会議を1ヶ月に1回開催。加えて、スチール研究副所長出席による運営会議を3ヶ月毎に開催。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

開発する新接合技術および中高炭素鋼が自動車製造に適用されることにより、自動車の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量が大幅に削減され、燃費改善目標（国立環境研究所 AIM PJ チーム試算）の 10~20%相当の CO₂ 削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。加えて、自動車の安全性(耐衝突性)・走行性能の向上により、社会の安心・安全向上にも寄与すると考えられる。

また、開発する新接合技術は中高炭素鋼のみならず、異材接合技術としても非常に有用であるものと想定している。

2.7.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

1) FSW 法の開発

1.2GPa 級超ハイテンを用いた検討において、予熱プロセスなしの両面 FSW により、

従来 FSW プロセスと比較し 5 倍の接合速度を達成。更に高周波予熱を使用した両面 FSW により従来 FSW と比較し、10 倍の接合速度を達成。

2) 継手性能

予熱プロセスなしの両面 FSW により、厚さ 1.5mm、強度 1.2GPa の 1.2GPa 中炭素系開発鋼を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上を達成。

表Ⅲ-2.7.4-3 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
FSW 法の開発	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法 (PHM-FSW 法) による接合プロセス適正条件の明確化	1.2GPa 級超ハイテンを用いた検討において、予熱プロセスなしの両面 FSW により、従来 FSW プロセスと比較し 5 倍の接合速度を達成。高周波予熱を使用した両面 FSW により更なる高速化の可能性を確認した。	◎	
継手性能	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を達成	予熱プロセスなしの両面 FSW により、厚さ 1.5mm、強度 1.2GPa の 1.2GPa 中炭素鋼開発材を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上が得られ、第二中間目標を達成した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.4-4 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2021 年度末)	達成見通し
テーマ 33 へ継承			

(3)研究開発の成果と意義

① PHW-FSW法における施工性検討

①-1 高周波予熱を用いた片面FSW

高周波加熱を用いた PHW-FSW 法の検討を行った。FSW 時に高周波加熱を用いて予熱することで接合部の塑性流動を促進し、接合速度を増大させた場合においても健全な継手を達成する検討を行った。結果として、従来の FSW と比較し接合速度を 3 倍とすることに目途を得た。

a. 実験条件

C: 0.57%、板厚 2.3mm の鋼板サンプルを架台にクランプし、全体をステージ上で長手方向に移動させた。接合ツールは WC 製で、ショルダー径 12mmφ、プローブ径 4mmφ、プローブ長 1.8mm のものを用いた。周波数 80kHz の高周波加熱装置を用いて、サンプル上方に固定した加熱コイルを通じて加熱を行うとともに、コイル後方に配置した接合ツールにて FSW を行った。高周波加熱条件として、出力を 100kW、コイル鋼板間距離を 10mm とした。FSW 条件として、ツール角度を 3°、ツール回転数は 400, 600rpm、接合速度は 0.4~2.2m/min の範囲とした。

b. 実験結果

高周波予熱 FSW 試験時の加熱状態に関して、赤熱の様子からツール前方および後方では 600°C 程度になっていたと考えられる。接合継手表面の外観に関して、表面欠陥が生じる際にはプローブ径の前進側の端部の位置に沿って線状の欠陥が認められた。接合条件による表面欠陥の発生状況に関しては、高周波による予熱なしの場合は、接合速度 0.6m/min までは表面欠陥のない継手が得られたのに対し、接合速度 0.8m/min 以上では表面欠陥が発生した。一方、高周波による予熱を付与した場合は、接合速度 2.0m/min までは表面欠陥のない継手が得られたのに対し、接合速度 2.2m/min 以上では表面欠陥が発生した。予熱 FSW 接合部の断面マクロ組織に関して、高周波による予熱なしで回転数 400rpm、接合速度 0.6m/min で接合した場合では、表面欠陥は認められなかったもののプローブ径の前進側の端部の位置に内部欠陥が認められた。一方、高周波による予熱を付与し、回転数 400rpm、接合速度 2.0m/min で接合した場合においても、表面欠陥は認められなかったもののプローブ径の前進側の端部の位置に内部欠陥が認められた。予熱付与した FSW においては、回転数を 600rpm に増加することで、接合速度 2.0m/min で内部欠陥が顕著に縮小することが確認できた。

①-2 両面 FSW の施工性検討

両面 FSW 法の施工性を検討した。回転速度 1500 rpm で作製した継手において接合速度 3m/min までにおいて母材と同等の引張強さが得られ、従来 FSW プロセスと比較し 5 倍の接合速度を達成した。

a. 実験条件

供試材として板厚 1.6mm の 1180 MPa 級冷延鋼板を使用した。2 枚の鋼板の突合せ部に両側から回転ツールを押し当てて接合した。本文中ではツールの回転方向と進行方向が等しい側を前進側(AS)、反対側を後進側(RS)と表記する。

両面 FSW の適切な接合条件と継手特性を明らかにするために、1180 MPa 級鋼板 2 枚を突き合わせ、接合速度 3~6 m/min、上側、下側ツール回転速度 1500~3000 rpm、上側、下側ツール傾斜角 1.5° で接合を行い、各接合パラメータが両面 FSW の継手特性に与える影響を調べた。得られた継手に対して断面マクロ観察と引張試験を行った。断面マクロ組織観察はナイトールとピクリン酸飽和水溶液でそれぞれエッチングし光学顕微鏡を用いて組織観察を行った。引張試験片の寸法は JIS Z 2241-5 号試験片とした。

b. 実験結果

作製した継手は接合速度 5~6 m/min かつ回転速度 1500~2000 rpm 以外の接合条件で表面欠陥ない健全な状態が確認された。ピクリン酸飽和水溶液を用いてエッチングを行った試料断面を図 III-2.7.4-1 に示す。試料の右上、左上が上面ツールの RS、AS、左下、右下が下面ツールの RS、AS となるよう断面観察を行った。両面 FSW の接合部は従来の片面 FSW とは異なり、180°回転対称な攪拌部 (SZ) が形成する。接合速度の上昇による入熱低下に伴い材料の塑性流動が見られた領域が減少し、SZ の面積が縮小した。回転速度 1500 rpm 一定とした場合、接合速度 3、4 m/min の条件では表面欠陥および内部欠陥は発生しなかったが、5、6 m/min の条件では表面欠陥が生じた。一方、接合速度 5 もしくは 6 m/min 一定とした場合、回転速度を 1500 rpm から 3000rpm へ増加するに従い表面欠陥は解消された。しかしながら、1500 rpm、3 m/min と 3000 rpm、5 および 6m/min の断面マクロ組織を比較すると、1500 rpm、3 および 4m/min では接合部で十分攪拌されている様子が示されているが、3000 rpm、5 および 6 m/min では接合前の鋼板の突合せ形状が残り、十分な攪拌が得られなかったと考えられる。引張試験結果においては、1500 rpm、3 m/min の試料は引張強さ母材と同等、伸びは 9%以上となり健全な継手となったが 3000 rpm、6 m/min の試料は引張強度、伸び共に著しく低下した。以上より、接合速度 3m/min までの範囲では接合部が十分攪拌され母材と同等の引張強さが得られた。

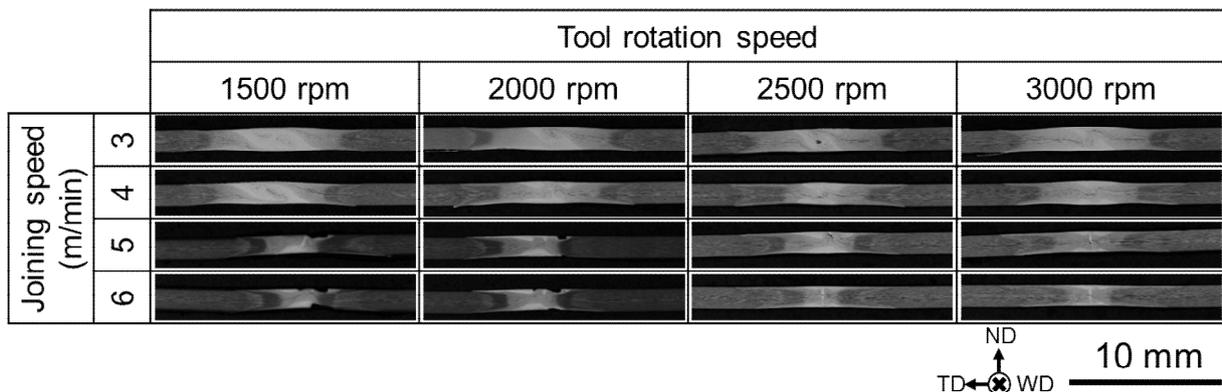


図 III-2.7.4-1 両面 FSW 継手の断面マクロ組織

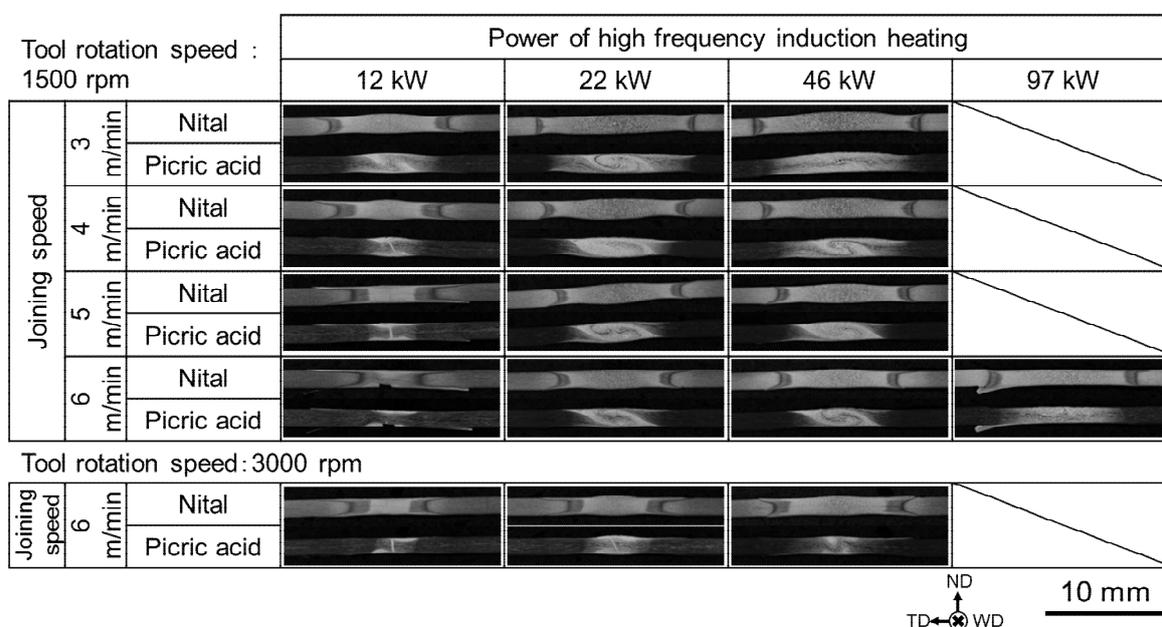
高周波予熱両面 FSW において適切な熱量を両面 FSW のツール前方に与えることで表面欠陥の抑制と材料の攪拌が促進された。接合速度 6 m/min において予熱なし両面 FSW の接合速度 3 m/min の際に見られた接合部の攪拌状態と同様な傾向が得られ、母材と同等の引張強さが得られると考えられる。

a. 実験条件

予熱の熱源として最大出力100 kW、周波数80 kHzの高周波加熱装置を使用し、高周波加熱コイルをツール前方に配置し、上側、下側ツールの回転速度1500、3000rpm、傾斜角1.5°、接合速度3~6 m/min、高周波加熱出力12~97 kWとして実験を行った。得られた継手に対し断面マクロ観察を行った。

b. 実験結果

上記の方法で高周波予熱両面 FSW 実験を行った。回転速度 1500 rpm とし 12 kW、22 kW、46 kW、97kW の出力で高周波誘導加熱装置を使用して予熱を加えると、出力 22 kW および 46 kW では接合速度 6 m/min においても表面欠陥が発生せず良好な表面状



図Ⅲ-2.7.4-2 高周波予熱両面 FSW 継手の断面マクロ組織

態が得られた。適切な熱量をツール前方に与えることで表面欠陥を抑制できることがわかった。断面マクロ観察結果を図Ⅲ-2.7.4-2 に示す。出力 12 kW の予熱では接合速度 6 m/min で表面欠陥が認められ、予熱の効果はほとんどみられないが、出力 22 kW 以上の予熱を加えると接合速度 6 m/min まで表面欠陥、内部欠陥のない接合部が得られた。さらに、接合速度 6 m/min までにおいて、予熱なし両面 FSW の 1500 rpm、3 m/min の条件と同様に接合部で材料が十分に攪拌された状態が得られ、これは良好な接合状態を示唆する結果と考えられる。以上の結果により、接合速度 6 m/min まで母材と同等の引張強さが得られると考えられる。

② 開発 FSW プロセスによる継手の性能

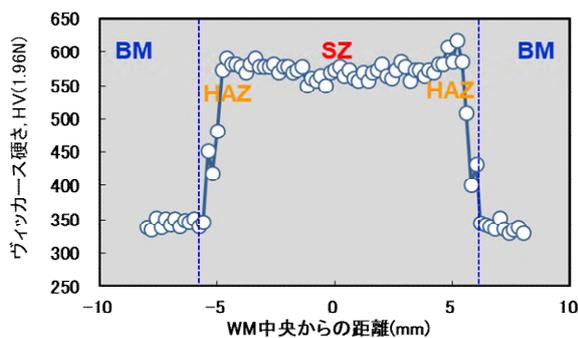
予熱プロセスなしの両面FSWにより、厚さ1.5mm、強度1.2GPaの1.2GPa中炭素鋼開発材を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の70%以上が得られ、第二中間目標を達成した。

a. 実験条件

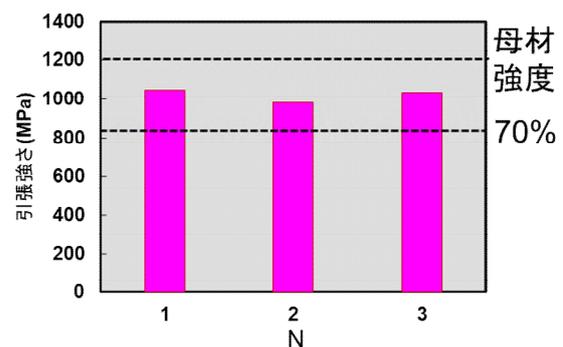
供試材として板さ 1.5mm、強度 1.2GPa の 1.2GPa 中炭素系開発鋼を使用し、予熱プロセスなしの両面 FSW により継手を作製した。接合速度 2m/min、上側、下側ツール回転速度 1500 rpm、上側、下側ツール傾斜角 1.5° で接合を行った。得られた継手に対して断面硬さ分布、継手引張特性を調査した。

b. 実験結果

作製した継手の硬さ分布を図Ⅲ-2.7.4-3 に示す。欠陥の無い健全な継手を得られたことが確認でき、接合部ではカーボン量が高くなるため顕著な硬化が見られた。継手の引張特性を図Ⅲ-2.7.4-4 に示す。継手強度は母材強度の 85% となり、第二中間目標を達成した。



図Ⅲ-2.7.4-3 1.2GPa 中炭素鋼開発材
両面 FSW 継手の硬さ分布



図Ⅲ-2.7.4-4 1.2GPa 中炭素鋼開発材
両面 FSW 継手の引張特性

【研究開発の意義】

本研究開発の意義については、テーマ番号 33 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発を参照。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.4-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	1	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	2	0	0	0	0	0	2
合計	1	0	6	0	0	0	0	0	5

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.4-6 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	2	0	0
2016FY	2	0	2
2017FY	3	0	2
合計	7	0	4

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.5 [テーマ番号 05] アルミニウム／異種材料の点接合技術

2.7.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

航空機や自動車等の輸送機器には地球温暖化対策としての CO₂ 削減と省エネルギー化が求められており、軽量化はその有効な手段である。自動車においてはとくに車両重量の 40% を占める車体の抜本的な軽量化が必要であり、従来の鋼板製車体のような単一材料ではなく、各種構造材料の特長を生かした適材適所の材料適用（マルチマテリアル車体）の研究が主流となっている。

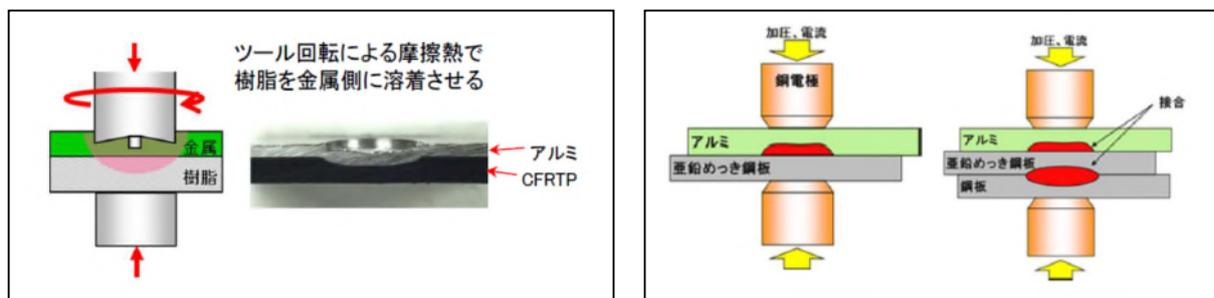
そのマルチマテリアル車体の実現には、部素材の高性能/低コスト化のための研究開発とともに、異種材料からなる複数の部素材を組み付けるための接合技術が不可欠であるが、現状ではリベットなどの機械的接合や接着に限られ、多関節ロボットによる抵抗スポット溶接を前提とした車体組立ラインには容易に展開できない。

そこで本研究開発では、マルチマテリアル車体を既存の車体組立ラインで製造するため、その主要構成材料であるアルミニウムや鋼板、CFRP などの異種材料の直接接合が可能で、且つ、組立ラインへの適合性の高い異材点接合技術を開発する。併せてそれら異材接合部の信頼性を確保するため、素材間の熱膨張差による熱歪みの解析技術や腐食電位差による電食（ガルバニック腐食）の電気化学的評価手法を確立する。

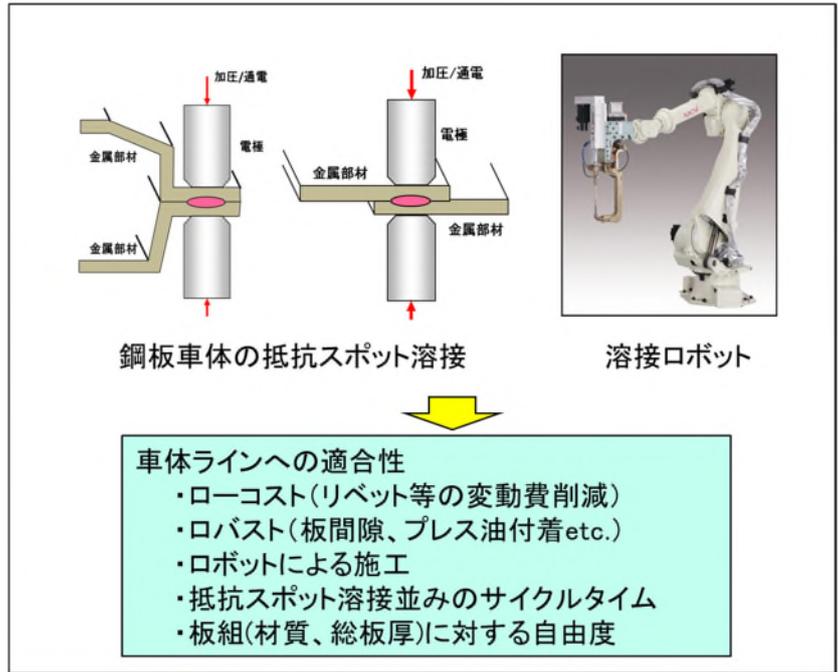
(2)位置付け、目標値

車体組立ラインで多用されている抵抗スポット溶接に置き換え可能な点接合技術を開発対象としており、一部に使用されているリベット接合よりも低コストで多様な板組（材質、総板厚）に対応できる利点もあり、マルチマテリアル車体の接合技術として他の接合手法に比べ優位にある（図Ⅲ-2.7.5-1～Ⅲ-2.7.5-4 参照）。

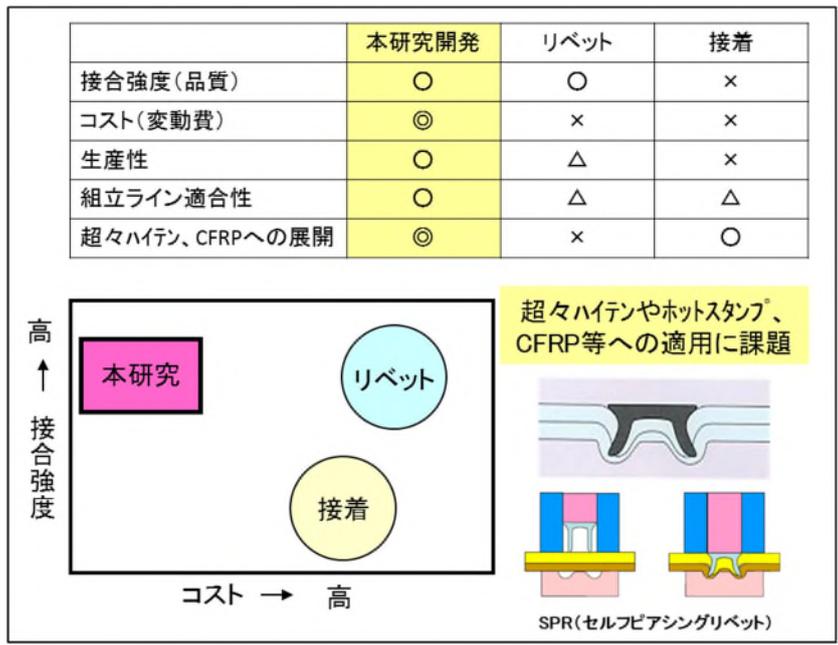
板組としては、マルチマテリアル車体で性能、コスト面で適用が進むと思われるアルミダイカスト材料とアルミニウム展伸材の接合に対しても十分に展開が可能であると考えられる。



図Ⅲ-2.7.5-1 アルミニウム/CFRP の点接合 図Ⅲ-2.7.5-2 アルミニウム/鋼板の点接合



図Ⅲ-2.7.5-3 異材点接合の要件



図Ⅲ-2.7.5-4 競合技術との対比

本研究開発の目標値を表Ⅲ-2.7.5-1に示す。アルミニウム/CFRPとアルミニウム/鋼板の点接合技術を車体の強度部材に適用するため、接合強度の目標値をJIS Z3140（スポット溶接部の検査方法）に記載のA級（特に強さを要する溶接部）以上と設定した。また、アルミニウム/CFRPの点接合については、生産性の観点から1点あたりの接合時間を抵抗スポット溶接に近い5秒以内を最終目標としている。

表Ⅲ-2.7.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
アルミニウム／CFRPの点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能／品質／コスト／主要量産課題の明確化 アルミニウム／CFRP点接合に特化した摩擦攪拌点接合ロボットの仕様決定 	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/生産性を考慮した接合プロセス要件の明確化 アルミダイカスト/アルミ展伸材への適用要件明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材の接合強度で JIS -A 級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現 1点あたりの接合時間は5秒以内 多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立 	<p>車体の強度部材に適用可能な接合強度と抵抗スポット溶接と同等の生産性の確保</p>
アルミニウム／鋼板の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能／品質／コスト／主要量産課題の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/生産性を考慮した接合プロセス要件の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材の接合強度で JIS -A 級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現 	<p>車体の強度部材に適用可能な接合強度の確保</p>
異材接合部の評価解析	<ul style="list-style-type: none"> 電食に対する防錆技術の確立 熱歪み解析手法の運用 	<ul style="list-style-type: none"> 電食に対する防錆仕様や品質保証ロジックを部品構造で検討 熱歪み解析手法を部品構造で検討 	<ul style="list-style-type: none"> 車体の設計開発での実運用 	<p>マルチマテリアル車体の品質確保</p>
異材点接合の適用研究(2016年度からテーマ化)	<ul style="list-style-type: none"> 自動車用ドアを想定したCFRP複合成形の技術課題抽出 マルチマテリアルドアの構想設計(重量とコストの概算) 	<ul style="list-style-type: none"> 衝突性能を考慮したマルチマテリアルドアの構想設計(構造検討/材料/工法及び重量とコストの概算) 革新材料のドアインパクトバーとしてのポテンシャルの明確化 	<ul style="list-style-type: none"> マルチマテリアルドアの材料/工法の決定 複合成形技術の確立 	<p>CFRPの部材性能と低コスト化の両立には複合成形技術が必須</p>

(3)全体計画

研究開発が10年間の長期に及ぶことから、当初の目標を確実に達成するため、研究期間を技術構想の実証（2013～2015年度）、実部品での性能/効果の検証（2016～2017年度）、実用化の主要課題解決（2018～2020年度）の三つのステージに分け、各ステージでの研究内容やゴールを明確に設定した。

なお、第二ステージでは新たに自動車用ドアを想定した異材点接合の適用研究に着手し、第3期では自動車用ドアを想定した異材点接合の実用化開発へ移行している。

(4)実施体制

本研究テーマは、異材点接合技術と接合部の評価解析技術および要素技術の部品への応用展開のための設計、製造技術、より軽量化を実現するための材料開発で構成される。アルミニウム/CFRPの点接合技術は、アルミニウム素材メーカーである(株)UACJとの共同開発とし、大学に接合部の基盤技術研究や動的特性評価を再委託している。また、自動車用ドアを想定した適用研究を進めるため、自動車部品メーカーを再委託先としている。さらに、ISMAとの連携体制として、接合技術分科会活動、革新接合技術の応用検討、革新材料の適用検討を進めるため新たに体制を構築した。

(5)運営管理

業務管理責任者のもと部門横断の実施体制とし、サブテーマ毎にテーマリーダーを設定した。また、研究活動のPDCAサイクルを徹底するため、業務管理責任者をレビューボードとしたマンスリーの進捗会議を開催している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

技術開発のトレンドによると車体のマルチマテリアル化は2020年代頃から車の全面改良に合わせて随時拡大するものと予想され、最小（1モデル）でも年間数万台レベル、主要車種に適用されれば年間数十万台レベル、同業他社が採用した場合にはさらに大きな事業規模に達する。開発技術を着実に社会へと還元するため、マツダの占有ではなく、海外メーカーを除く国内同業他社への技術ライセンスを検討する。

2.7.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.5-2に第三中間目標と達成度を示す。各サブテーマとも中間目標（2020年度末）を達成できる見込みである。第3期（2018～2020年度）ではアルミニウム/CFRP点接合技術の確立（接合装置開発含む）と生産ラインでの同時塗装を狙いとしたり高融点熱可塑性樹脂への応用展開、構造開発のための接合強度の静的/動的評価やデータベース化及び材料モデル構築、自動車部材への適用開発に重点的に取り組んでいる。高融点樹脂であるポリフェニレンサルファイド（PPS）などの耐熱性樹脂をマトリックスとしたCFRPについても目標を超える接合強度が得られる接合条件の検討を終え、知財権利化を完了した。

表Ⅲ-2.7.5-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
アルミニウム／ CFRPの点接合技 術	<ul style="list-style-type: none"> ・車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/生産性を考慮した接合プロセス要件の明確化 ・アルミダイカスト/アルミ展伸材への適用要件明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ・高融点樹脂を対象とし、目標強度、時間を達成可能な接合の基本プロセスを明確にした。 ・アルミダイカスト/アルミ展伸材の接合強度を得るための適用要件を明確にした。 	△	
アルミニウム／鋼 板の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/生産性を考慮した接合プロセス要件の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ・車体部材適用時の課題の一つである接合強度の確保に対し、接合部の組織と接合強度の相関性を明らかにし、接合プロセス要件を明確にした。 	△	
異材接合部の評価 解析(ガルバニッ ク腐食)	<ul style="list-style-type: none"> ・電食に対する防錆仕様や品質保証ロジックを部品構造で検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・市場環境と相関のある劣化モードを見出した。品質保証ロジックについて検討し、その要件を明確にした。 	△	
異材接合部の評価 解析(熱歪み)	<ul style="list-style-type: none"> ・熱歪み解析手法を部品構造で検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・市場環境を想定した熱歪みは、定性的な予測が可能になった。製造工程時の熱歪み予測技術の精度向上に必要な要件を明確にした。 	△	
異材点接合の適用 研究(2016年度か らテーマ化)	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突性能を考慮したマルチマテリアルドアの構想設計(構造検討/材料/工法及び重量とコストの概算) ・革新材料のドアインパクトバーとしてのポテンシャルの明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突解析に必要な高融点樹脂の材料データを取得した。 ・衝突性能を確保できる基本構造の構想設計を完了した。 ・革新鋼板、革新マグネ製ドアインパクトバーを試作・評価し、ポテンシャルを把握した。 	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.5-3 に現状と最終目標の達成見通しを示す。アルミニウム/CFRP の点接合については、ロバスト性確保のための技術開発を進め、車体実部材を想定した試作検証、構造化、本工法の板組や材質の適用拡大のステージに移行する。また、アルミニウム/鋼板の点接合についても第 2 期中に基本技術を確立し、第 3 期では接合強度のロバスト性を確保可能な接合要件の定量化を進め、2020 年度から車体部材への技術展開を想定し、品質保証手法の検討に着手する。

表Ⅲ-2.7.5-3 最終目標の達成可能性

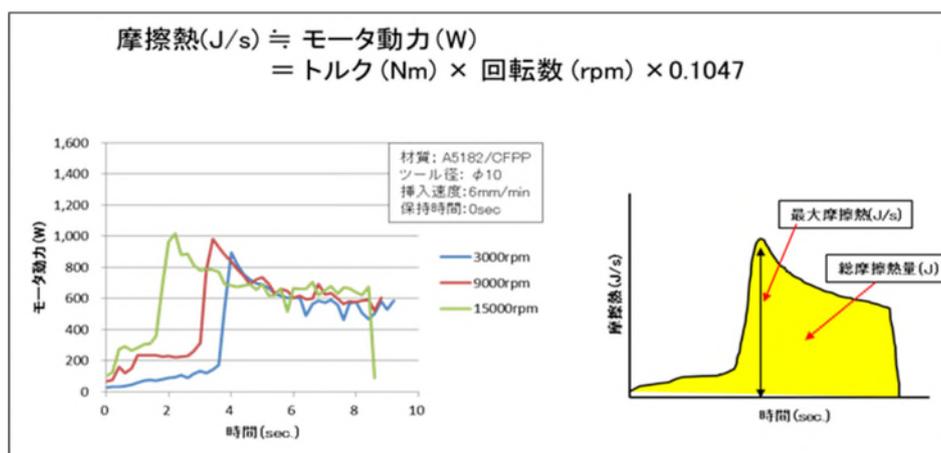
研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
アルミニウム／ CFRP の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ GFRP 製リフトゲートを用いた接合実験で量産時に想定される外乱（板間隙、治具精度、スプリングバック等）の影響度合いや管理ポイントが明らかになった。 ・ 研究成果を織り込んだ接合装置の構想設計を完了した。 ・ 高融点樹脂を対象とした高い接合強度を得るための接合プロセスを明らかにした。 ・ アルミダイカストや厚板展伸材へも展開可能性があることが明らかになった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 車体部材の接合強度で JIS -A 級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現 ・ 1 点あたりの接合時間は 5 秒以内 ・ 多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立 	高融点樹脂も含め、主要な熱可塑性 CFRP で目標達成の見通しあり。
アルミニウム／鋼板の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ アルミニウムと超ハイテンの板組においても JIS -A 級を超える引張せん断荷重が得られている。 ・ 接合強度を得る上でアルミ残厚の確保が重要で、その要件を定性的に明らかにした。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 車体部材の接合強度で JIS -A 級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現 	試験片レベルでは既に目標を達成している。実部材でも見通しあり。
異材接合部の評価解析	<ul style="list-style-type: none"> ・ 市場を想定した熱歪み予測技術を確立した。製造工程時の熱歪み予測技術の精度向上に必要な要件を明らかにした。 ・ 電食については評価法を考案し市場劣化モードの構築と品質保証のための要件を明らかにした。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 車体の設計開発での実運用 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 市場を想定した熱歪みを考慮した設計技術は運用を開始した。
異材点接合の適用研究(2016 年度からテーマ化)	<ul style="list-style-type: none"> ・ マルチマテリアルドアの基本構造と材料を仮決定し、試作検証及び曲げ強度試験を実施した。構造解析に必要な材料データを取得し、具体構造の検討に着手した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ マルチマテリアルドアの材料/工法の決定 ・ 複合成形技術の確立 	コンセプト実現の鍵を握る複合成形の技術検証に注力する計画であり、達成見通しあり。

(3)研究開発の成果と意義

①アルミニウム/CFRP 点接合技術

これまでにマトリックス樹脂の官能基とアルミニウム表面の酸化膜分子との物理的相互作用（クーロン力）による結合であることを明らかにした。その接合メカニズムに基づき、本来は官能基を含まず接合性に劣るポリプロピレン樹脂についても、カルボキシル基の添加やアルミニウム側への表面処理により接合強度が大幅に向上することを見出し、第1期目標（JIS Z3140-A級の引張せん断荷重平均値以上または母材破断）を前倒しで達成した（㈱UACJと共同）。また、本技術の接合品質と生産性（接合時間目標5秒以内/点）を両立するため、品質工学の直交表を用いた実験を行い、ポリプロピレン樹脂マトリックスのCFRPでは接合時間を2秒程度まで短縮できることも分かった。

第2期では主にアルミニウム/CFRPの点接合に特化した実用接合装置の構想設計と、実部品による技術検証を実施した。このうち接合装置の構想設計においては、その基本仕様を決定するため、予備実験として接合強度に及ぼすプロセスパラメータの影響を体系的に調査した。具体的にはツール径や回転数、挿入速度、保持時間と接合強度の関係を実験的に求め、接合部に投入される摩擦熱を指標として整理した（図Ⅲ-2.7.5-5）。

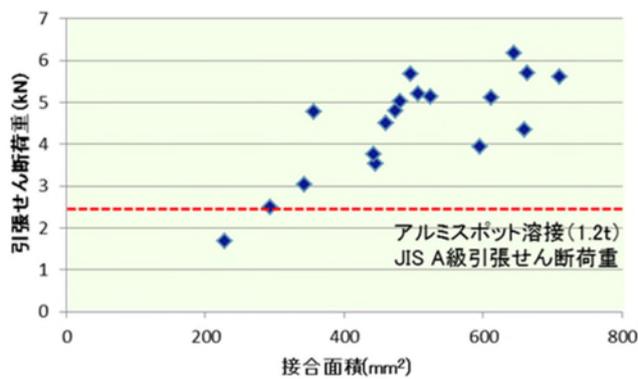


図Ⅲ-2.7.5-5 摩擦熱の指標

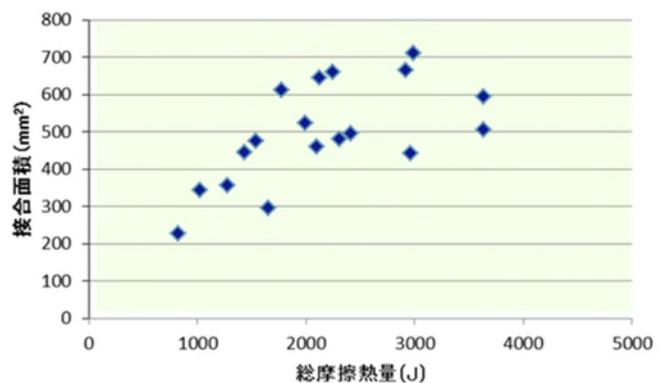
その結果、引張せん断荷重は接合面積にほぼ比例し、その接合面積は接合時に投入される総摩擦熱量と相関があることが分かった（図Ⅲ-2.7.5-6、図Ⅲ-2.7.5-7）。パラメータの中でも挿入速度と保持時間の総摩擦熱量に及ぼす影響が大きく、挿入速度が速い（接合時間が短い）ほど、引張せん断荷重が低下する（図Ⅲ-2.7.5-8）。これに対し、所定の挿入深さに到達後もツール回転を一定時間保持することで高速挿入域の引張せん断荷重が大幅に改善されることも分かった（図Ⅲ-2.7.5-9）。要求強度レベルやマトリックス樹脂の熱的性質に応じて、これらのパラメータを適切に設定することが重要である。

予備実験の知見をもとに、ポリフェニレンサルファイドや芳香族ポリアミドなど、ポリプロピレンに比べて融点の高い耐熱性樹脂への展開性も考慮したうえで、必要な摩擦熱量を得るための装置能力やパラメータの設定範囲を決定し、接

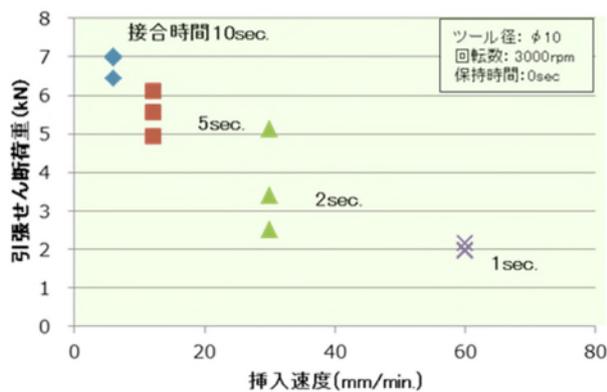
合装置の構想設計に織り込んだ。



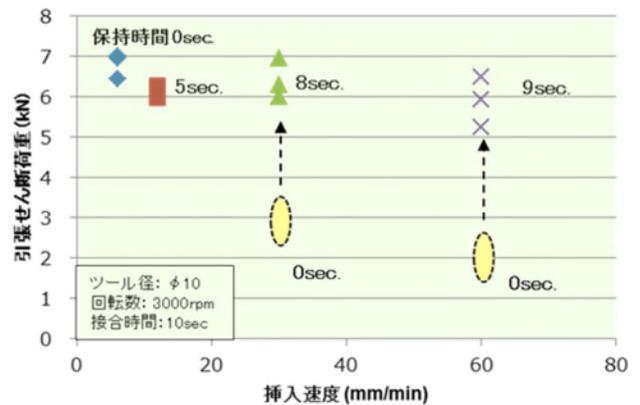
図Ⅲ-2.7.5-6 引張せん断荷重と接合面積



図Ⅲ-2.7.5-7 総摩擦熱量と接合面積

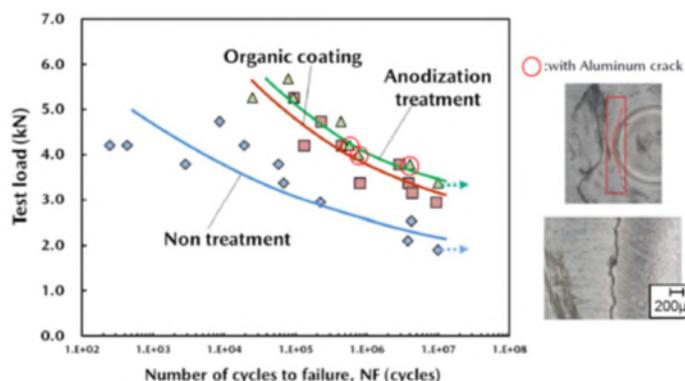


図Ⅲ-2.7.5-8 挿入速度の影響



図Ⅲ-2.7.5-9 保持時間の影響

ポニフェニレンサルファイドや芳香族ポリアミドなどの高融点樹脂を接合するため、第3期では、摩擦熱量のアップに加え、アルミニウムの表面処理などの手段で接合強度確保を検討した。この内、アルミニウムの表面処理に関しては、実用化を踏まえた部材性能と品質の向上を目的に表面処理の効果についてメカニズムを踏まえた株式会社UACJ及び大学と共同で検証を行った。結果として、アルミニウム母材から破断する仕様も見られ、疲労強度向上だけでなく強度ばらつきの抑制にも効果があることを見出した(図Ⅲ-2.7.5-10)。



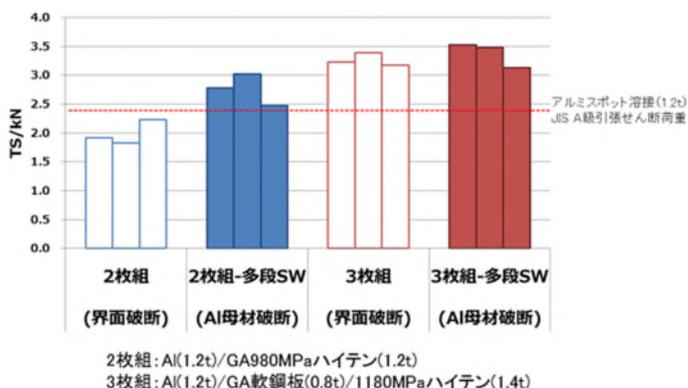
図Ⅲ-2.7.5-10 表面処理による接合部の疲労特性向上

②アルミニウム/鋼板点接合技術

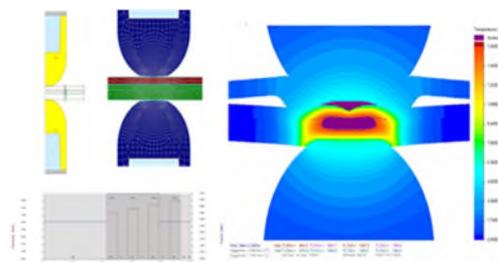
これまでに鋼板側に薄目付けの亜鉛メッキを施すことで接合強度を大幅に改善し、第1期目標（JIS Z3140-A級の引張せん断荷重平均値以上または母材破断）を達成した。また、防錆鋼板として国内では主流の厚目付GA鋼板（合金化溶融亜鉛メッキ）についても、通電を複数回に分けてステップ状に電流値を増加させる「多段通電プロセス」を用いることで、チリの抑制と接合ナゲット径の拡大が両立でき、実用レベルの剥離強度（アルミニウム同士の抵抗スポット溶接以上）が得られた。

第2期では、本技術の適用範囲を明らかにするため、超ハイテンを含む板組みでの接合性を評価した。軟鋼板の場合と同様、亜鉛メッキと多段通電の組合せにより、目標を超える引張せん断荷重が得られ、破断形態もアルミニウムの母材破断を示すことを確認した（図Ⅲ-2.7.5-11）。材料の塑性変形を前提とするセルフピアッシングリベットは硬質材料への適用が難しいことを考慮すると、超ハイテンを含む異材が接合できることは本技術の大きな利点と言える。

また、種々の板組に対する通電条件や電極仕様などの最適化ツールとして、市販の溶接シミュレーションの活用を検討した。アルミニウムと鋼板の異材組合せにおいても、断面観察により確認できるナゲット形成状態をほぼ再現できることが分かった（図Ⅲ-2.7.5-12）。

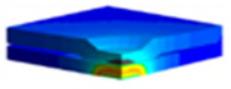
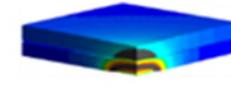


図Ⅲ-2.7.5-11 超ハイテンの接合強度



図Ⅲ-2.7.5-12 シミュレーション結果

第2期までの検討において、アルミニウムと鋼板のスポット溶接において、ナゲット部を形成するアルミニウムの残厚（アルミ残厚）の確保が重要なことを見出した。第3期では、これを実現する手段として、装置及び電極先端形状の適正化の二つの方法の検討に着手した。この内、電極先端形状の適正化に関しては、市販の溶接シミュレーションで上下の電極先端形状によるアルミニウム材の溶融面積の変化が再現できることを確認し、CAE解析による溶接部のせん断強度の予測の可能性を見出した（図Ⅲ-2.7.5-13）。今後は、CAEによるせん断強度の予測精度の検証と、金属間化合物が影響する剥離強度の予測について検討を進める。

電極組合せ	DR型(R40/R40) 	R型(R150/R25) 
断面写真		
解析結果 (温度)		

図Ⅲ-2.7.5-13 電極組み合わせによるアルミ残厚の安定化

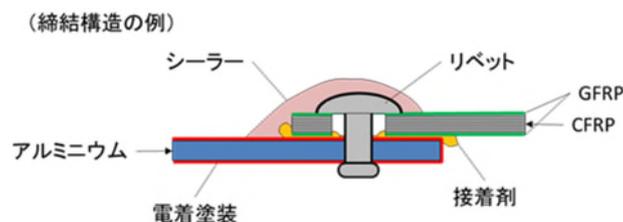
③異材接合部の評価解析

異種材料（アルミニウム/CFRP/鋼板など）の電気化学特性や熱的特性の違いに起因したガルバニック腐食や熱歪みへの対応は、マルチマテリアル車体を実現する上での大きな課題である。これまでに電気化学的評価手法を用いてガルバニック腐食を評価し、腐食速度に及ぼす炭素繊維量や電極面積比の影響を明らかにした。

アルミニウムとCFRPの接合部が被水環境に曝される場合には、防水もしくは絶縁等の防錆対策が不可欠であり、実際にCFRPを採用している欧州車ではシーラーや接着剤などの防錆副資材が用いられている。

第2期では実際の締結構造をモデルに、電気化学的評価手法による腐食の定量化と防錆仕様の検討に取り組んでいる。シーラーや接着剤を用いる場合には、防水性や絶縁性の長期品質保証が不可欠であるが、これまでは、異材接合の場合の耐食性のばらつきや市場での経年劣化を想定した品質保証のための評価方法が無かった。そこで、これら防錆副資材の施工不良や経年劣化を模擬した試験片と電気化学的手法を組み合わせた新たな評価方法を考案した。

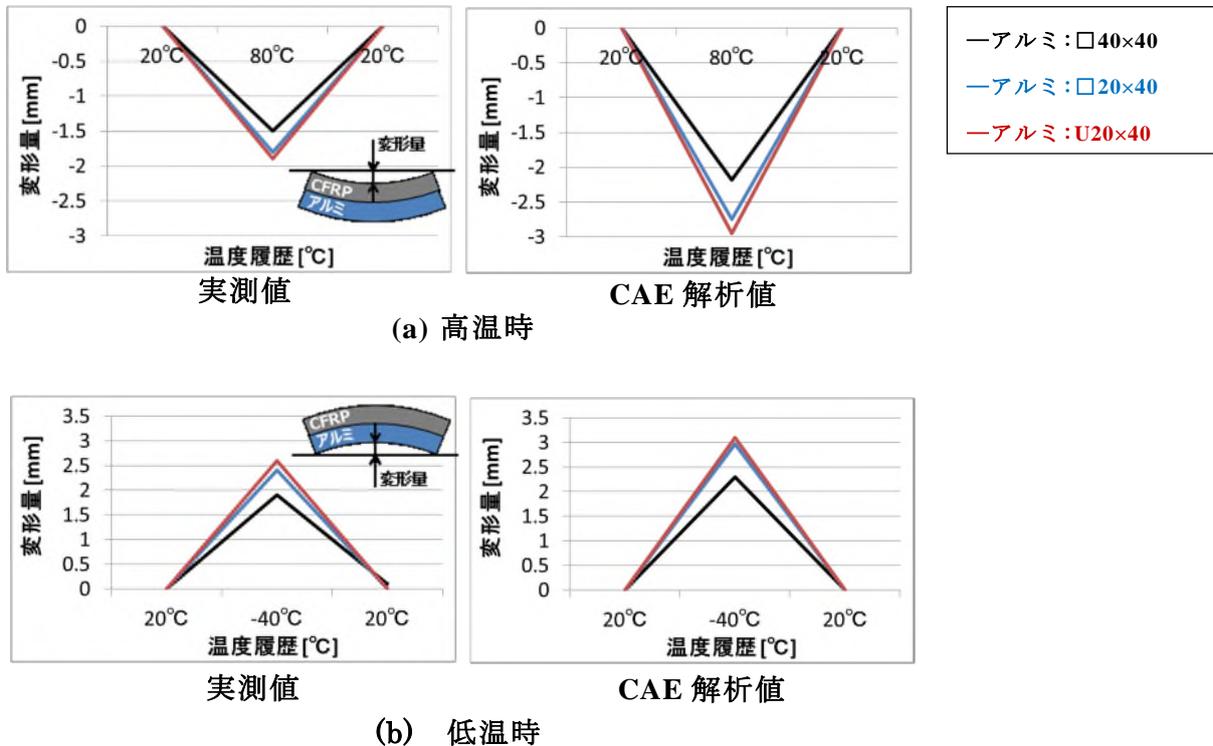
第三期では、市場と相関のある締結構造モデル（図Ⅲ-2.7.5-14）の促進劣化手法及びその品質保証要件の明確化を行う。現在、市場劣化因子の寄与度の定量化を行い、各種促進劣化モードとの相関取りを行っている。さらに、第2期から開発を継続中の電気化学的手法と合わせ、実部材や実環境を想定した防錆仕様を決定する。



図Ⅲ-2.7.5-14 締結構造モデル

一方、熱歪みについては、第2期ではCFRPとアルミニウムを接着剤で接合したフレームを想定した試験片を用い、熱歪み現象を定性的に評価できることを確認した。第3期では、同様な組み合わせで各部材の剛性比を変えた場合の熱変形

量の実測値と CAE 解析値を比較した（図Ⅲ-2.7.5-15）。なお、温度範囲は自動車の使用環境温度（-40℃から+80℃）とした。今回の予測結果については、実体と CAE 解析の値の差はさほど大きくなく、定性的に活用可能なことが確認できた。



図Ⅲ-2.7.5-15 熱変形量の実測値と CAE 解析値の比較

また、温度変化させた際の接着剤内部に生じる歪み（応力）についても実験値と CAE 解析値の比較を行い、CAE にて実験の傾向を定性的に再現できることを確認した。今後は、生産工程における接着剤硬化過程のモデル化の構築と本モデルの部品適用に取り組む。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

第1期、第2期ではアルミニウム/鋼板点接合技術に関する研究成果や異材接合部の基礎評価結果やアルミニウム/CFRP 点接合技術について外部発表した。

第3期は、異材接合技術の実用化を目指した研究成果を中心に発表を行っており、引き続き外部発表を進める。

表Ⅲ-2.7.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発 表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2015FY	1	1	4	2	0	0	0	0	1
2016FY	0	1	9	0	0	0	0	0	1
2017FY	3	4	10	5	0	2	0	0	2
2018FY	3	1	12	0	0	0	0	1	1
2019FY	0	0	5	1	0	0	0	0	1
合計	7	7	40	9	0	2	0	1	7

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

アルミニウム／異種材料の点接合技術に関わる主要特許は本事業の開始前に出願していることもあり、第1期では周辺特許を中心に申出た。引き続き、接合メカニズムに基づいた強度向上や接合時間短縮ためのキーとなる発明の体系的な知的財産権取得に注力する。第3期では実用化ステージに入るため、実際の生産を想定した装置や制御に関する特許も含め権利化を検討していく。また、外国出願も含め、実際の車体部材に適用する上で不可欠な周辺特許についてもタイムリーに出願するため、登録研究員と知財部メンバによる知財ミーティング（1回/週）を推進する。

表Ⅲ-2.7.5-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	7	0	0
2015FY	5	0	0
2016FY	5	0	0
2017FY	2	0	0
2018FY	1	0	0
2019FY	1	0	0
合計	21	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.6[テーマ番号 06] 中高炭素鋼/中高炭素鋼のフリクションスポット接合技術の開発

2.7.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

近年、地球温暖化や安全意識の高まりから、自動車には優れた燃費性能と高い安全性能の両立が強く求められており、自動車ボディの骨格部には高強度鋼板が多用されている。高強度鋼板は一般的にレアメタルの添加によって強度向上が図られているが、経済性や供給性という観点から、それらを含まない中高炭素鋼が次世代鋼として開発されている。しかしながら、鉄鋼材料は炭素量が多くなるほど急冷時に硬化組織が出現し、溶接継手の剥離強度が確保できないということが課題となっている。また、溶接部における割れなどの欠陥が生じやすくなる。

フリクションスポット接合法（**Friction Spot Joining**：以下、FSJと略す）は摩擦発熱を用いた固相接合法であり、回転工具の摩擦発熱で生じた材料軟化とその流動を利用したスポット接合方法である。FSJは固相接合であるため抵抗スポット溶接よりも投入熱量が小さく接合部の硬化を抑制できる可能性がある。そのため、炭素量の高い中高炭鋼においても従来の抵抗スポット溶接よりも優れた継手性能が得られると期待できる。

本テーマはFSJの中高炭素鋼への適用技術の確立とその実用化を目的に、その要素技術（接合ツール、以下単にツールという、接合プロセス、鋼板）について、重点的な研究開発を行う。

(2)位置付け、目標値

本テーマは、中高炭素鋼板の実用化およびその接合機器市場（溶接ロボット、ツール）で確固たるシェアを獲得することを目標に、FSJを次世代の中高炭素鋼板の接合におけるキー技術として世界に先駆けて実用化することを目指している。そのため中高炭素鋼の適用ターゲットである自動車分野において、生産性や品質要求の厳しい自動車の生産ラインでも適用できる実用ロボットシステムや、引張強度が1.2 GPaを超える高強度な中高炭素鋼板の接合に耐えうるツール素材やコーティング膜の開発、品質保証に必要な接合メカニズムの解明、自動車部材への適用を意識した継手性能の評価など実用化を見据えた研究開発を実施する。

表Ⅲ-2.7.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
(1-1) ツール素材の開発	1.2 GPa級中高炭素鋼の接合に対して、破損せずに確実に接合できるツール素材を開発する。	耐熱衝撃性などを考慮したツール素材の最適化を図る。	1.5 GPa級鋼板に適したツール素材の改良を実施する。	1.5 GPa級の鋼板でも破損せずに接合できるツール開発が必要。

(1-2) コーティングの開発	種々のコーティング物質や層構造について検討し、摩擦係数などの基礎データを蓄積する。	耐酸化性や摩擦係数、膜厚の最適化を図る。	1.5 GPa 級鋼板に適したコーティングの改良を実施する。	ツールの耐摩耗性の向上に必要。
(1-3) ツール形状の開発	1.2 GPa 級中高炭素鋼 (1.5 mm) において JIS-A 級強度 (14.4 kN) の 70 % を越える継手強度を達成する。	1.2 GPa 級鋼板 (1.4 mm) の接合継手の引張せん断試験で JIS-A 級強度 (13.02kN) の 100% 以上。	1.5 GPa 級鋼板 (1.4 mm) の接合継手の JIS-A 級強度 (13.02 kN) の 100 % 以上。	継手強度評価基準として一般的な JIS 規格値を採用。
(2-1) ツール性能の評価	ツールの自動評価システムを構築する。	—	—	開発加速のためにツール性能の効率的評価が必要。
(2-2) 接合装置開発	接合条件開発用の接合ガンおよび高ツール加圧力に対応した小型軽量ガンを試作する。	1.2 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適するようガンを改良する。	1.5 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適した小型軽量ガンの試作および設計方針を決定する。また、プロセスモニタリング機能を開発する。	適用に向けた確実な接合性能と、実生産ラインとの親和性を両立する。
(2-3) 接合プロセス開発	接合条件と形成組織の関係や、ツール形状と継手強度の関係などの基礎的知見を得るとともに、高炭素鋼に適した基本プロセスを開発する。	1.2 GPa 級鋼板に最適な接合プロセスおよび制御プログラムを開発し、継手の特性を向上させる。	1.5 GPa 級鋼板の接合プロセスの最適化を図り、目標強度を達成する。	従来の枠を超えた高炭素鋼では専用の制御プロセス開発が必要
(3-1) 接合部の評価	1.2 GPa 級鋼の継手特性把握、部材の動的・静的特性調査の実施。	共通鋼材の継手基礎データの蓄積。実部材特性を模擬した部材の試作評価、特性把握。	1.5 GPa 級のテーマ共通鋼板継手の試作と特性評価。	接合部に要求される各種性能の把握と向上が必要。
(3-2) 材料特性の影響解明	1.2 GPa 級鋼の継手強度発現メカニズムの解明。接合性向上指針の導出。	中高炭素鋼の継手強度発現メカニズム解明の推進。特性改善指針の明確化。	1.5 GPa 級までの中高炭素鋼における継手特性改善指針の導出。	継手の要求性能実現および向上のため必要。

(4-1) 組織観察	1.2 GPa 級鋼板の接合部（FSJ、抵抗スポット）について金属組織の詳細観察や硬さ分布から熱履歴と組織形成の関係を調査する。	1.2 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	1.5 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	高炭素鋼特有の接合プロセス制御に不可欠な知見を得る。
(4-2) 接合メカニズムの解明	接合界面トレース方法の検証と接合界面近傍の組織について詳細に観察する。	接合界面トレース法による 1.2 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	接合界面トレース法による 1.5 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	接合原理の把握と品質保証への応用。

(3)全体計画

表Ⅲ-2.7.6-2 に、本テーマの開発全体スケジュールを示す。なお、状況に応じて 2017 年度末を目安に 1.2 GPa および 1.5 GPa 級中高炭素鋼の基本技術を前倒しで確立し、早期に実用化ステージへ移行する考えである。

表Ⅲ-2.7.6-2 全体スケジュール

研究開発項目	2013年度	14年度	15年度	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度
マイルストーン 1.長寿命ツールの開発 (住友電気工業)				▽JIS-Aの70%達成 (1.2G級)		▽JIS-A達成				▽JIS-A達
1.1 ツール素材の開発	試作(1.2G級)	組成改良		組成最適化		試作(1.5G級)	組成改良		組成最適化	
1.2 コーティングの開発	試作(1.2G級)	膜質改良		膜質最適化		試作(1.5G級)	膜質改良		膜質最適化	
1.3 ツール形状の開発	試作(1.2G級)	形状改良		形状最適化		試作(1.5G級)	形状改良		形状最適化	
2.施工技術開発 (川崎重工業)										
2.1 ツール性能の評価	自動評価装置試作			ツール性能評価(1.1~1.3項のツール)						
2.2 接合装置の開発	接合ガン試作(#1)	接合ガン試作(#2)		改良		ガン小型・軽量化(実部材品への展)				
2.3 接合プロセスの開発	継手試作(1.2G級)	プロセス改良		プロセス最適		継手試作(1.5G)	プロセス改良		プロセス最適	
3.材料評価・開発 (新日鐵住金)										
3.1 接合部の評価	評価(1.2G級)	評価(2.3の試作継手)				1次評価(1.5G級)	評価(2.3の試作継手)			
3.2 材料成分開発	試作(1.2G級)	改良		最適化		1次試作(1.5G級)	改良			
4.接合メカニズム解明 (東北大学)										
4.1 組織解析		解析(1.2G級)					解析(1.5G級)			
4.2 接合メカニズム解明		解析(1.2G級)					解析(1.5G級)			

(4)実施体制

表Ⅲ-2.7.6-3 に本テーマの実施体制を示す。伊丹分室（住友電気工業株式会社）が長寿命接合ツールの開発を、神戸東川崎分室（川崎重工業株式会社）が施工技術の開発を、富津分室・尼崎分室（新日鐵住金株式会社）で材料評価・開発を実施している。

表Ⅲ-2.7.6-3 実施体制図

新構造材料技術研究組合	
分担研	伊丹分室 (住友電気工業株式会社)
	神戸東川崎分室 (川崎重工業株式会社)
	富津分室・尼崎分室 (新日鐵住金株式会社)

(5)運営管理

当テーマは各社が分室を設け、選任された業務管理者が研究開発の進捗を管理・遂行している。三分室で定期的な連絡会議を開き、進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行って連携を深めている。さらに、必要に応じて各分室の担当者が試験立会を行うなど、協調した研究開発が進められるよう留意している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

今後の世界の自動車生産台数は新興国での需要も加わり大きく増加すると予測され、それに伴って抵抗スポット溶接ロボットも増加する。また、引張強さが1.0 GPaを超える超高張力鋼板の自動車ボディへの適用量が増加しており、将来的なFSJの適用数の増加が見込まれる。

2.7.6.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.6-4 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 2017 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
(1-1) ツール素材の開発	耐熱衝撃性などを考慮したツール素材の最適化を図る。	炭窒化物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐久損性を両立。	◎	
(1-2) コーティングの開発	耐酸化性や摩擦係数、膜厚の最適化を図る。	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐凝着性を改善。酸化物膜の面粗さ、酸化バリア性、高温硬度を改善。	◎	
(1-3) ツール形状の開発	1.2 GPa 級鋼板 (1.4 mmt) の接合継手の引張せん断試験で JIS-A 級強度 (13.02 kN) の 100 % 以上。	ツール形状の改良により、1.2 GPa 級鋼板、1.5 GPa 級鋼板において JIS-A 級強度の 100 % の継手強度を達成。	◎	
(2-1) ツール性能の評価	—	(試作ツールについて評価実施中)	◎	
(2-2) 接合装置開発	1.2 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適するようガンを改良する。	1.2 GPa 級鋼板を接合可能な小型軽量ガンを試作・改良した。	○	
(2-3) 接合プロセス開発	1.2 GPa 級鋼板に最適な接合プロセスおよび制御プログラムを開発し、継手の特性を向上させる。	1.2 GPa 級鋼板の継手強度を向上させるため接合温度制御プログラムを開発し、剥離強度を大幅に改善できることを確認した。	◎	
(3-1) 接合部の評価	共通鋼材の継手基礎データの蓄積。実部材特性を模擬した部材の試作評価、特性把握。	1.2 GPa 級 0.45 C 鋼の FSJ 継手において TSS が開発目標を超える事を確認。部材の衝撃曲げ試験において競合接合法である従来抵抗スポット溶接に対する優位性を確認。	○	

(3-2) 材料特性の影響解明	中高炭鋼の継手強度発現メカニズム解明の推進。特性改善指針の明確化。	継手の破断経路と接合部マイクロ組織から、強度向上のための継手内硬さ分布・組織制御指針を導出。	○	
(4-1) 組織観察	1.2 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	接合継手の金属組織解析、結晶粒解析、熱履歴推定を行い、接合プロセス中の変態挙動を解明。	○	
(4-2) 接合メカニズムの解明	接合界面トレース法による 1.2 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	1.2 GPa 級鋼板について金属箔トレーサにより接合中の界面の挙動を把握。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.6-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 2022 年度末)	達成見通し
(1-1) ツール素材の開発	Co 微粒化により抗折力を改善。炭窒化物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐欠損性を両立。高温特性の更なる向上のため、耐熱合金をバインダに用いた超硬合金の合成に成功。	1.5 GPa 級鋼板に適したツール素材の改良を実施する。	5 年前倒しで最終目標を達成、2017 年度末にテーマ終了。
(1-2) コーティングの開発	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐凝着性を改善。残留応力低減により、厚膜化を実現。 酸化物膜の面粗さ、酸化バリア性、高温アニール後硬度を改善。	1.5 GPa 級鋼板に適したコーティングの改良を実施する。	5 年前倒しで最終目標を達成、2017 年度末にテーマ終了。
(1-3) ツール形状の開発	ツール形状の改良により、1.5 GPa 級鋼板において JIS-A 級強度の 121%の継手強度を達成。	1.5 GPa 級鋼板 (1.4 mmt) の接合継手の JIS-A 級強度 (13.02 kN) の 100%以上。	5 年前倒しで最終目標を達成、2017 年度末にテーマ終了。
(2-1) ツール性能の評価	自動評価装置を構築し、試作ツールの評価を実施。	—	達成

(2-2) 接合装置開発	1.5 GPa 級鋼板を接合可能な小型軽量ガンを試作し、現在、評価・改良中。また、接合温度管理によるプロセスモニタリング機能は完成。	1.5 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適した小型軽量ガンの試作および設計方針を決定する。また、プロセスモニタリング機能を開発する。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。
(2-3) 接合プロセス開発	自動的に設定した接合温度に制御するプログラムを開発し、最適化を達成。	1.5 GPa 級鋼板の接合プロセスの最適化を図り、目標強度を達成する。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。
(3-1) 接合部の評価	各種共通鋼継手の静的引張特性について把握。競合接合法による継手とも比較し、優位性や課題の明確化した。	1.5 GPa 級のテーマ共通鋼板継手の試作と特性評価。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。
(3-2) 材料特性の影響解明	強度向上のための継手内硬さ分布・組織制御指針を導出。接合部組織形成機構の解明を進め、素材ごとの接合設計指針導出に取り組中。	中高炭素鋼における継手特性改善指針の導出。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。
(4-1) 組織観察	1.5 GPa 級共通鋼板の接合継手の組織解析を完了。	1.5 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。
(4-2) 接合メカニズムの解明	1.2 GPa 鋼板、1.5 GPa 級鋼板ともに接合界面挙動は解明済み。	接合界面トレース法による 1.5 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	5年前倒しで最終目標を達成、2017年度末にテーマ終了。

(3)研究開発の成果と意義

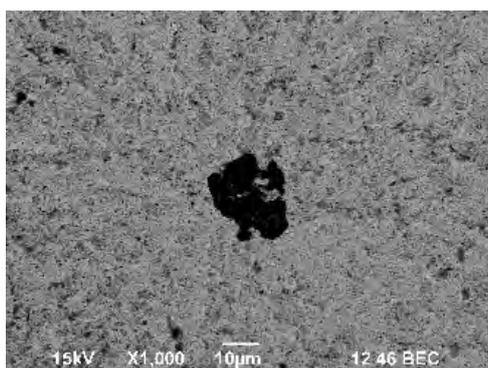
(3)-1 長寿命ツールの開発 (担当：伊丹分室 (住友電気工業 (株)))

(3)-1.1 ツール素材の開発

高温での耐塑性変形性に優れる合金を開発すべく、超硬合金の金属バインダーに改良を加えた。改良バインダー合金は、同バインダー量の超硬合金に比べて高硬度となり、高温においても超硬合金より高硬度となった。また、1000℃で15kNの荷重を5時間保持させたときの圧縮歪量は、同バインダー量の超硬合金に比べ、約4分の1倍歪みにくい結果となった。しかし、靱性と抗折力は同バインダー量の超硬合金に比べ低い結果であった。そこで、同じ圧縮歪量で靱性と抗折力を比較するため、バインダー量を調整し、圧縮歪量が同等の耐熱合金バインダー超硬と超硬合金を試作し、物性の比較を行った。それぞれの硬度、靱性、抗折力の比較を行った結果を表Ⅲ-2.7.6-6に示す。耐熱合金バインダー超硬の室温硬度は超硬合金よりも0.2GPa高いが、靱性が $1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 低い結果となり、靱性の改善が課題であることが明確になった。抗折力については同等であるが、耐熱合金バインダー超硬の破断起点は全て耐熱合金バインダーの凝集であり(図Ⅲ-2.7.6-1)、プロセスの改善により抗折力を向上できる余地があることが判明した。

表Ⅲ-2.7.6-6 圧縮歪量同等の耐熱合金バインダー超硬と超硬合金の物性比較

	バインダ量 (wt%)	圧縮歪 (%)	硬度 (GPa)	靱性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	抗折力 (GPa)
耐熱合金バインダー超硬	8	7.8	17.5	5.7	2.4
超硬合金	5	7.6	17.3	6.7	2.5



図Ⅲ-2.7.6-1 耐熱合金バインダー超硬の抗折力測定後の破断起点

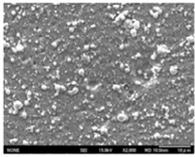
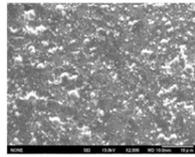
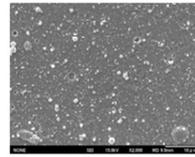
(3)-1.2 コーティングの開発

(3)-1.2.1 酸化物被膜の開発

昨年度作製した酸化物被膜は、窒化物被膜と比較して酸化バリア性は高いが、異常成長粒が多く面粗度が大きいことが課題であった。そこで面粗度の改善に取り組んだ結果、表Ⅲ-2.7.6-7に示すとおり異常成長粒を低減し、面粗度を大幅に改

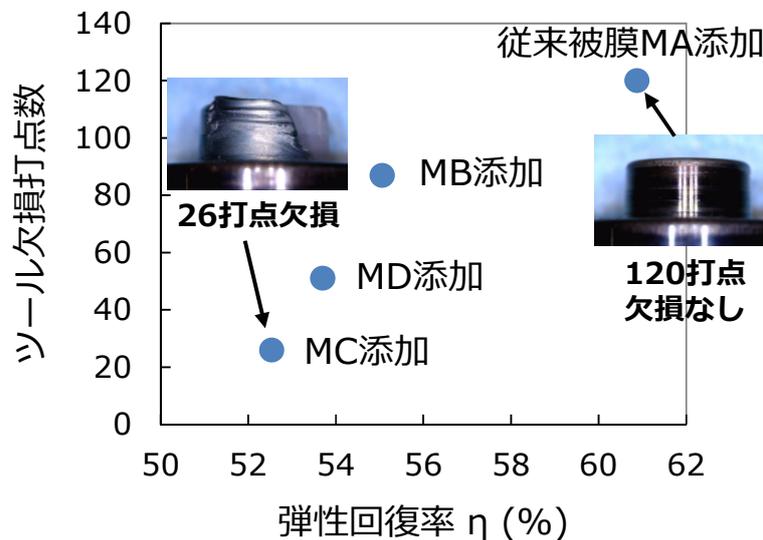
善することができた。また被膜の緻密度も合わせて改善できたため、昨年度作製した酸化物被膜に対して酸化バリア性をより向上することができた。

表Ⅲ-2.7.6-7 酸化物被膜の特性

	昨年度酸化物被膜	今年度酸化物被膜	
		改良1	改良2
表面形態			
面粗度	大	大	小
緻密度	低	高	高
酸化バリア性	中	高	高

(3)-1.2.2 窒化物被膜の開発

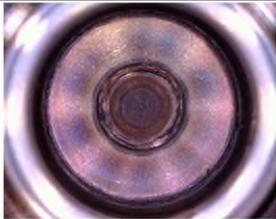
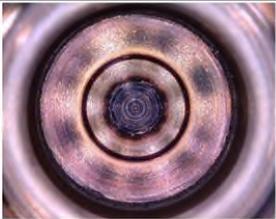
昨年度に選定した新組成の窒化物被膜を被覆したツールを用いて摩擦攪拌ツールの接合試験を行った。980 MPa ハイテン鋼（板厚 1.2 mm）におけるツールの耐久性を評価した結果を図Ⅲ-2.7.6-2 に示す。従来被膜（MA 添加）は 120 打点の接合を行ってもピンが欠損しなかったが、新組成被膜（MB 添加、MC 添加、MD 添加）は 26~85 打点でピン欠損した。欠損の原因を調査した結果、被膜の弾性回復率 η と欠損までの接合打点には相関があることが判明した。



図Ⅲ-2.7.6-2 ツール耐久性評価結果

そこで弾性回復率の高い従来被膜との複合化による欠損抑制を図った。2層積層構造、および積層周期約 20 nm の超多層構造の被膜を施したツールの耐久性評価結果を表Ⅲ-2.7.6-8 に示す。2層積層構造、超多層構造ともに 120 打点接合後も欠損が生じず、複合化により欠損が抑制されることを確認できた。

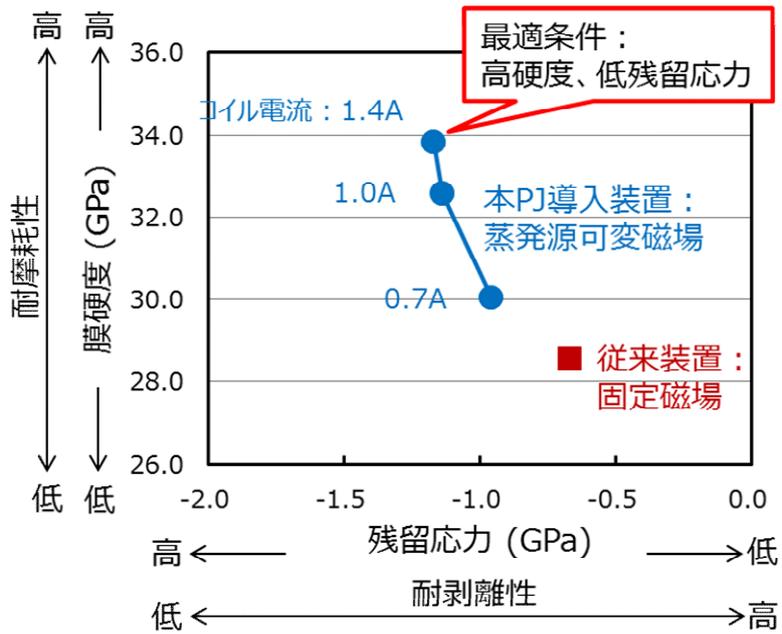
表Ⅲ-2.7.6-8 複合膜のツール耐久性評価結果

	MA添加/MC添加複合化	
	2層積層	超多層積層周期20nm
60打点		
120打点		

(3)-1.2.3 残留圧縮応力低減による窒化物膜の厚膜化

窒化物膜の耐摩耗性改善には厚膜化が有効であるが、圧縮残留応力を有する PVD 膜は膜厚を厚くすると剥離しやすくなる課題がある。そこで、圧縮残留応力低減による厚膜化を試みた。

従来の固定磁場蒸発源を持つ PVD 装置は、基材に印加するバイアス電圧を変化させることにより、圧縮残留応力の値を変化させることが可能であるが、圧縮残留応力を低減させると膜硬度が低下する課題があった。本事業で導入した PVD 装置は、可変磁場蒸発源を有し、磁場を変化することによっても、硬度、残留応力を変化させることが可能であるため、高硬度かつ低残留応力の膜が得られるコイル電流の最適値を調査した。結果を図Ⅲ-2.7.6-3 に示す。コイル電流の最適化により、高硬度かつ低残留応力の膜の成膜が得られ、膜厚 8 μm の厚膜化が可能となった。

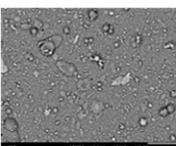
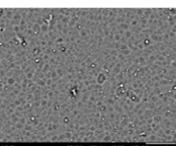


図Ⅲ-2.7.6-3 高硬度、低残留応力膜の得られる成膜条件調査結果

(3)-1.2.4 PVD コーティング装置の酸化物成膜仕様への改造

フリクションスポット接合ツールの表面に施すコーティングには、耐酸化性と耐摩耗性が要求される。そこで、酸化物膜と窒化物膜の2層膜（図Ⅲ-2.7.6-4）を成膜できるように、窒化物膜成膜仕様で導入したPVDコーティング装置を、酸化物膜も成膜可能な仕様へ改造を行った。

窒化物膜（AlTiMAN）と、改造後の装置で成膜した酸化物膜（ α -AlCrO）の膜特性の比較結果を図Ⅲ-2.7.6-5に示す。酸化物膜は、窒化物膜と比較して耐酸化バリア性が高く、また高温摺動試験（ピンオンディスク試験において、600℃でのSUJ2ボールの凝着量を評価）において耐凝着性が優れることが判明した。ただし、酸化物膜は窒化物膜よりもドロップレットが多く面粗さが悪いため、面粗さ改善が必要であることが明確になった。

	酸化物膜	窒化物膜			
<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>酸化物膜</td></tr> <tr><td>窒化物膜</td></tr> <tr><td>基材(超硬)</td></tr> </table> ⇒耐酸化性 ⇒耐摩耗性	酸化物膜	窒化物膜	基材(超硬)	酸化バリア性 (1000℃) ○ 	× 
酸化物膜					
窒化物膜					
基材(超硬)					
耐凝着性 ($\times 10^{-6} \text{mm}^3$)	△ 3911	× 15006			
膜表面モフォロジー	× ドロップレット多 	○ 			

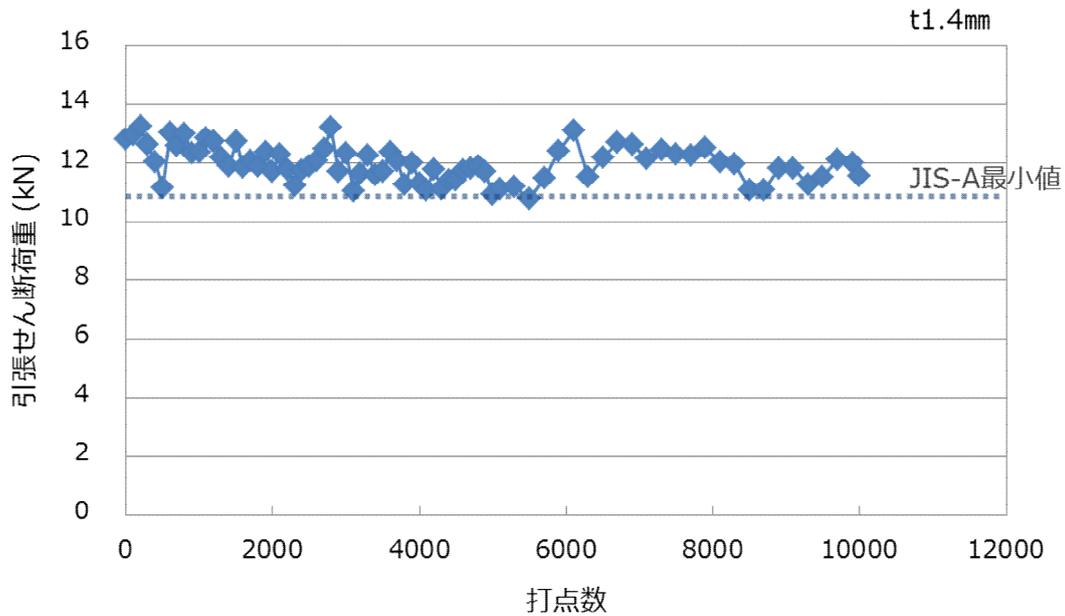
図Ⅲ-2.7.6-4 膜構造と必要特性

図Ⅲ-2.7.6-5 窒化物膜と酸化物膜の特性評価結果

(3)-1.2.5 ツール寿命評価

S45C を調質した 1.5 GPa、C=0.45wt%、板厚 1.4mm 鋼板（ISMA 共通鋼板と同スペック）を用いてツール寿命評価を行った。

ツール形状は AH ツールを用いた。接合プロセスには新たに開発した温度制御接合を用いた。継手の引張せん断強度が JIS A 級最小値を下回った打点数をツール寿命と判断した。評価結果を図Ⅲ-2.7.6-6 に、試験前後の外観を図Ⅲ-2.7.6-7 に示す。10,000 打点接合後も JIS A 級最小値以上を維持しており、10,000 打点を超える長寿命を有することが確認できた。



図Ⅲ-2.7.6-6 1.5 GPa-0.45 C（板厚 1.4mm）鋼板でのツール寿命評価結果



図Ⅲ-2.7.6-7 ツール写真（左：1万打点後、右：新品）

(3)-1.3 ツール形状の開発

寸法の異なる3種類ツールを試作し、本プロジェクトの共通鋼板（1.2 GPa 級高伸び：TRIP 鋼、1.5 GPa 級：0.45C、いずれも板厚 1.4 mm）を用いて継手強度を評価した。その結果を表Ⅲ-2.7.6-9 に示す。2022 年度末目標であった抵抗スポット溶接の JIS 要求強度の 100 % 値を上回る強度を達成した。

表Ⅲ-2.7.6-9 接合継手の最大強度

鋼種	引張せん断強度	備考
1.2TRIP 鋼	18.7 kN	JIS 要求値*13.0 kN
1.5QT 鋼	14.2 kN	JIS 要求値*13.0 kN

* 抵抗スポット溶接における JIS (Z3140) A 級要求強度 (平均値)

(3)-2 施工技術の開発 (担当 明石分室 (川崎重工業 (株)))

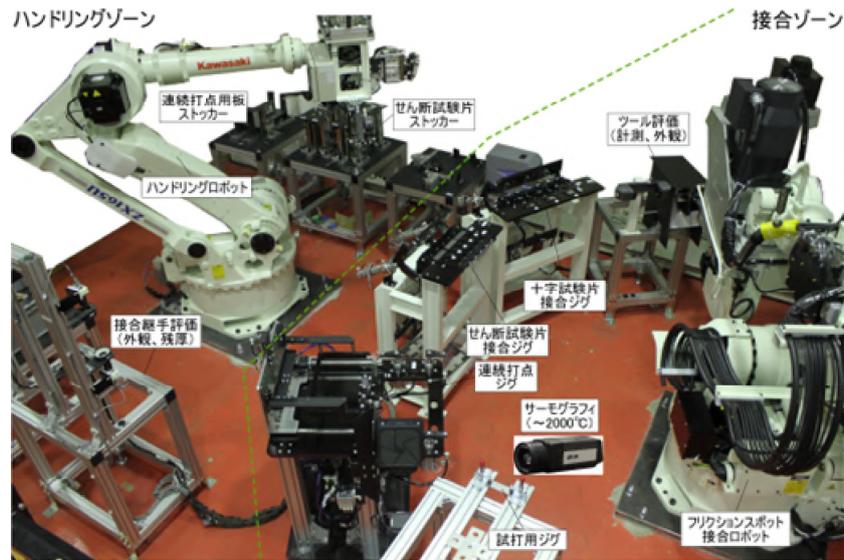
本研究開発では、各テーマ共通の試験鋼板として ISMA 共通鋼板を用いた。表Ⅲ-2.7.6-10 に ISMA 共通鋼板の仕様を示す。試験片の板厚は 1.4 mm とし、評価試験片の寸法は抵抗スポット溶接の JIS 規格 Z3140 に準じて、せん断試験片は幅 40 mm×長さ 125 mm、十字引張試験片は幅 50 mm×長さ 150 mm とした。

表Ⅲ-2.7.6-10 ISMA 共通鋼板の化学成分

鋼種	炭素量	強度	伸び
0.35C	0.35wt.%	1.2~1.3GPa	—
0.45C	0.45wt.%	1.2~1.3GPa	—
0.55C	0.55wt.%	1.2~1.3GPa	—
1.5QT	0.45wt.%	1.5GPa 以上	5% 以上
1.2TRIP	0.40wt.%	1.2GPa 以上	20% 以上

(3)-2.1 ツール性能の評価

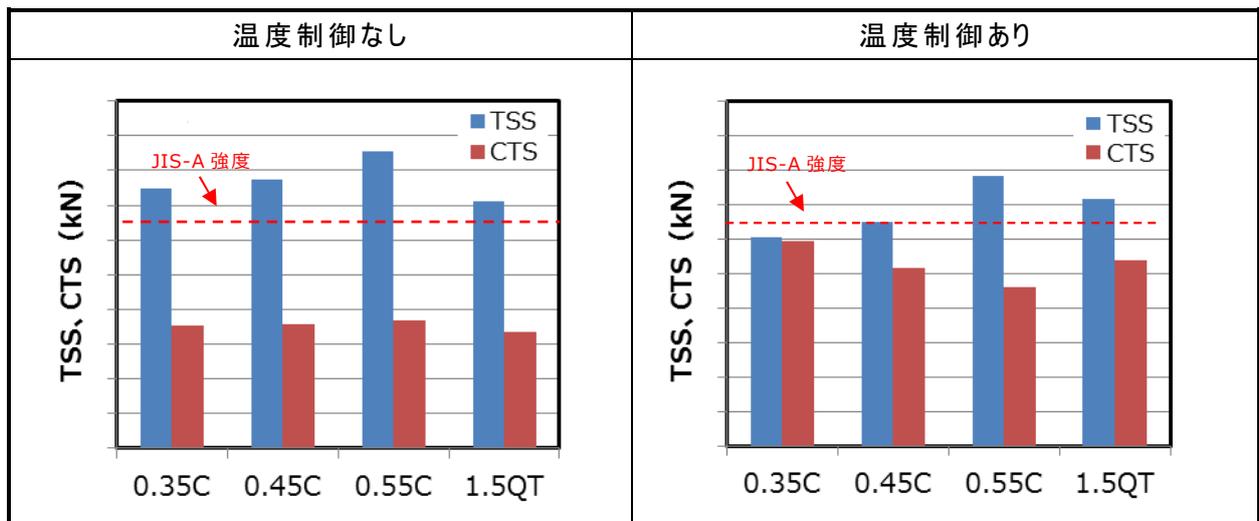
中高炭素鋼のフリクションスポット接合継手の試作や接合ツールの評価を効率的かつ客観的に行うため、ロボットを用いた自動評価システムを構築した (図Ⅲ-2.7.6-8)。本システムにより、接合中におけるツール温度など接合中の諸データや、接合後のツール寸法や外観の変化を定量的および画像的に記録することが可能となった。本システムは、接合ゾーンとワークハンドリングゾーンから成り、接合ゾーンは接合ロボットその他、引張せん断試験片および十字引張試験片接合用のジグや計測機器類、ハンドリングゾーンにはハンドリングロボットその他、供給試験片や接合後の試験片入れが配置され、全て自動化されている。



図Ⅲ-2.7.6-8 フリクションスポット接合の自動評価システム

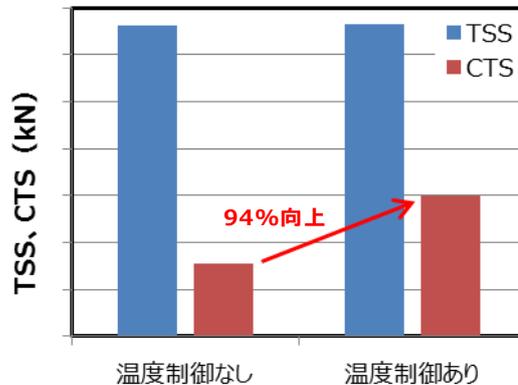
(3)-2.2 接合プロセスの開発

中高炭素鋼のフリクションスポット接合継手における剥離強度を改善するため、接合温度を制御することで接合部の硬化を防止する温度制御接合プロセスを開発し、ISMA 共通鋼板を用いたフリクションスポット継手の強度評価を実施した。まず、炭素量 0.35 C、0.45 C、0.55 C の 1.2 GPa 級鋼板を用いて温度制御なしの場合（接合温度約 1000 °C）と温度制御ありの場合（接合温度約 780 °C）で FSJ を行った。図Ⅲ-2.7.6-9 に得られた継手の引張せん断破断強度（TSS）および十字引張破断強度（CTS）を示す。温度制御ありの場合、温度制御なしの場合に比べて TSS は減少したが、CTS は最大で 69%改善された。また、1.5 GPa 級鋼板では、温度制御ありの場合でも抵抗スポット溶接の JIS（Z3140）における A 級平均強度の 100 %以上が得られており、本テーマの最終目標を達成できた。



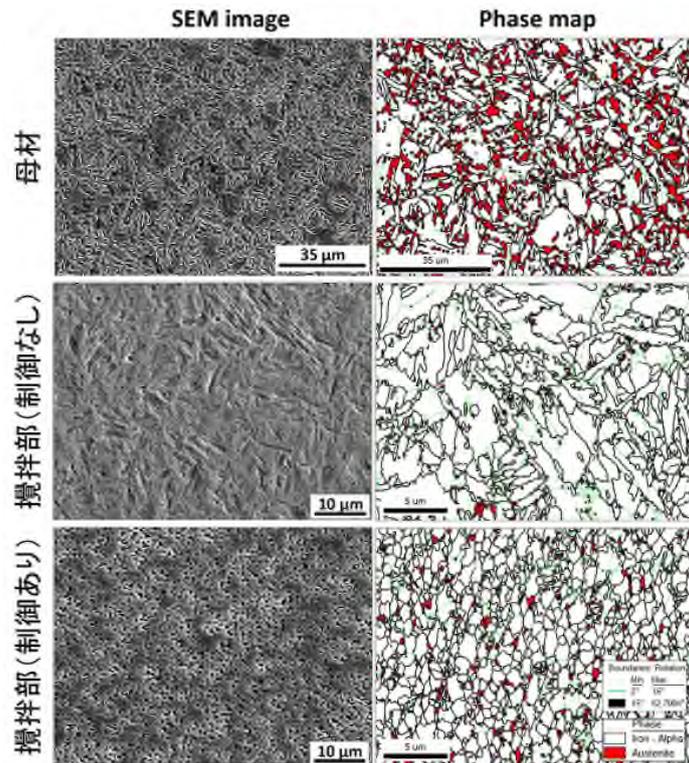
図Ⅲ-2.7.6-9 各炭素鋼の引張せん断破断強度（TSS）と十字引張破断強度（CTS）

次に、強度と伸びを両立した 1.2 GPa 級 TRIP 鋼を用いて温度制御あり、なしで接合試験を行った。図Ⅲ-2.7.6-10 に試作した継手の引張試験結果を示す。温度制御により低い温度で接合した結果、十字引張強度を 94 % 向上させることができた。



図Ⅲ-2.7.6-10 1.2TRIP 鋼継手の引張試験の結果（温度制御なし、あり）

母材と攪拌部（温度制御なし、あり）について SEM 観察および EBSD 分析を実施した。図Ⅲ-2.7.6-11 に SEM 写真ならびに EBSD 相マップを示す。母材ではフェライト、マルテンサイト、残留オーステナイトの 3 相が共存し、それぞれの相分率はフェライト：マルテンサイト：残留オーステナイト=62：14：24 と見積もられた。一方、攪拌部においては、残留オーステナイトが著しく減少しており、温度制御なしでは粗大なマルテンサイト組織が観察されたが、温度制御ありでは微細かつ等軸的なフェライト+マルテンサイト組織が観察された。攪拌部における硬さの違いはマルテンサイト量によって説明できることが示唆された。



図Ⅲ-2.7.6-11 TRIP 鋼母材と FSJ 攪拌部の SEM 写真と EBSD 相マップ

(3)-2.3 接合装置の開発

1.5 GPa 級鋼板を接合可能な小型軽量接合ガンの開発を行った。設計では FEM による構造解析により、応答性の悪化原因となる可動軸支持部で局所歪が発生しないことを確認した。試作した 1.5 GPa 用小型接合ガンは、中高炭素鋼の接合が可能な性能を保持したまま、初期の接合条件開発用ガンに比べ体積比で約 30%の小型化を達成しており、実際に自動車の生産ラインに適用されているアルミニウム用接合ガンとほぼ同じ大きさへの小型化を達成した。

(3)-3 鋼板・継手性能の評価（担当 富津・尼崎分室（新日鐵住金（株））

摩擦攪拌点接合部のマイクロ組織形成機構を調査するため、熱サイクル試験および加工熱サイクル試験を実施し、本接合法の特徴である接合中の加工歪み導入が冷却後のマイクロ組織に及ぼす影響について調査した。

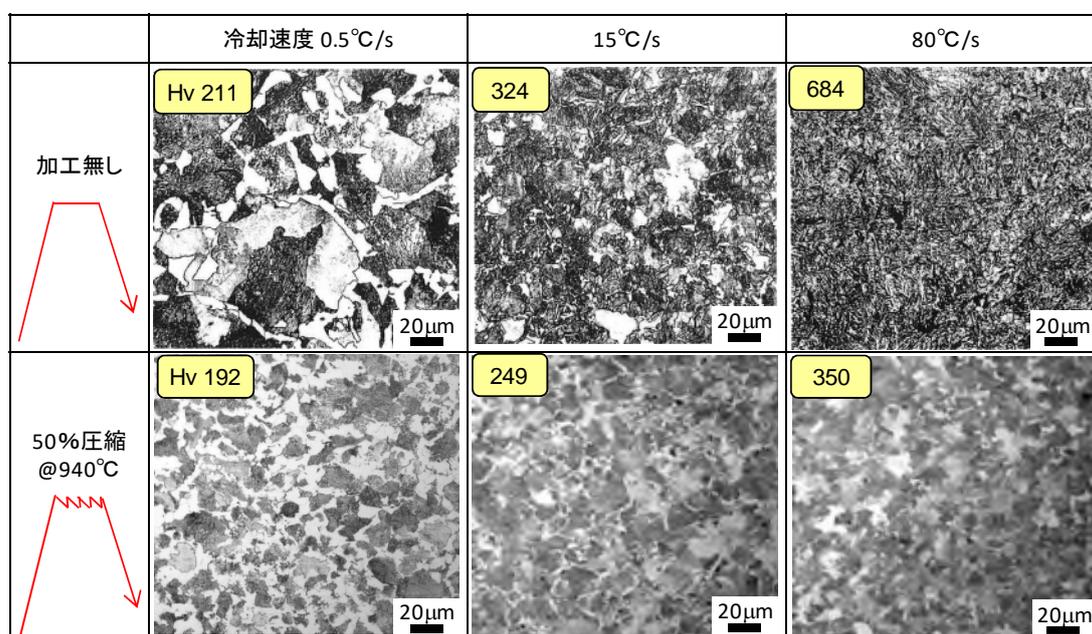
(3)-3.1 供試鋼の無加工 / 加工熱サイクル試験

供試材には、焼入焼戻しによりビッカース硬さを約 400 に調整した S45C 鋼 (0.43 %C) を用いた。50 °C/s で 940 °C まで加熱後、940 °C での保持中に 50 %の圧縮加工を行い、種々の冷却速度で室温に冷却した。また、同一熱サイクルで加工を行わないサンプルも作製し、加工有り/加工無しそれぞれのサンプルの冷却後のマイクロ組織と硬さを比較調査した。

無加工熱サイクル試験および加工熱サイクル試験後のマイクロ組織とビッカース硬さ測定結果の一例を図Ⅲ-2.7.6-12 に示す。冷却速度 0.5 °C/s においては、いずれも冷却

後にフェライト-パーライト組織が得られ、ビッカース硬さは共に 200 Hv 程度となった。但し、50 %の圧縮加工を加えたサンプルに置いて、より微細な組織が観察された。冷却速度 15 °C/s では、いずれもフェライト、パーライト、ベイナイトの混合組織が観察されたが、加工材の方がベイナイトの分率が低く、軟質であった。80°C/s 冷却材では、無加工材ではほぼ全面にマルテンサイトまたはベイナイトと考えられる低温変態組織が観察されたのに対し、50 %加工材ではフェライトとパーライト、ベイナイトまたはマルテンサイトの混合組織が観察された。

以上のように、本検討の加工条件・冷却条件の範囲においては、到達温度で加工歪みを導入した場合の方が、冷却後組織におけるフェライト、パーライトの分率が高く、冷却後の平均硬さがやや低くなる傾向が認められた。摩擦攪拌点接合部のマイクロ組織・硬さを制御するに当たっては、材料の組成、熱サイクルの他に加工歪みの導入状況も考慮して接合設計を行う必要があることが示唆された。



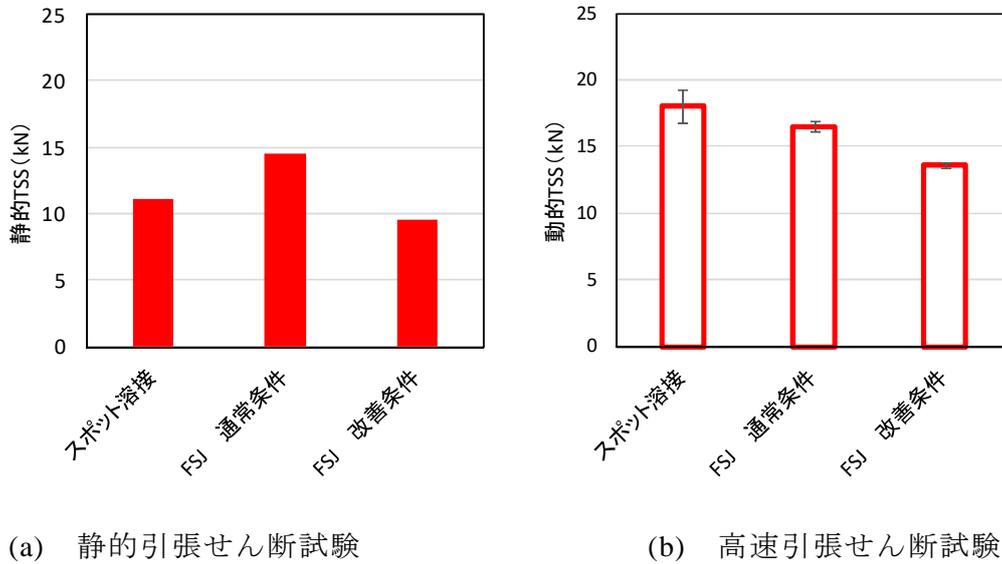
図Ⅲ-2.7.6-12 無加工（上段）/加工（下段）熱サイクル試験後のマイクロ組織硬さ

(3)-3.2 FSJ 継手の高速引張試験

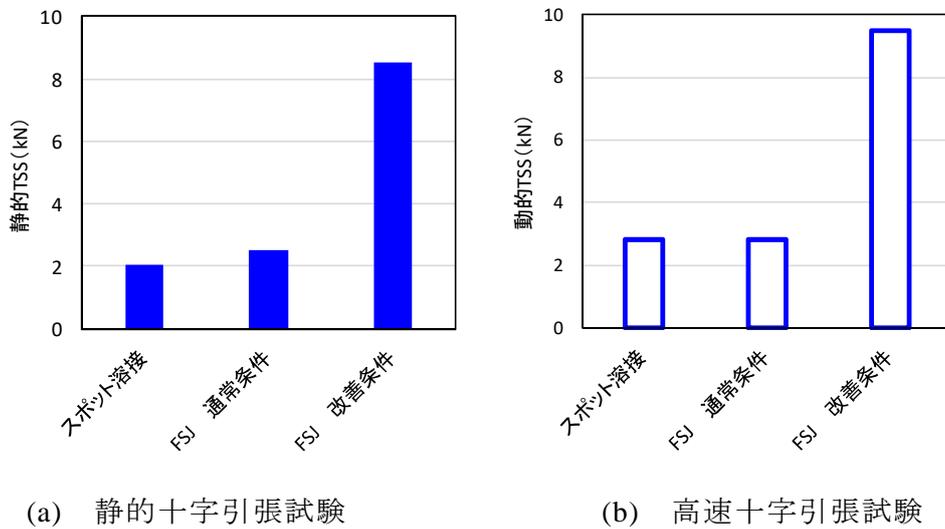
供試材料には、市販の S45C 鋼板 板厚 1.6 mm の表裏面を研削し板厚 1.4 mm にした後、焼入れ・焼き戻しにより母材強度 1.2 GPa 相当に調整した。熱処理時に付着した酸化スケールは酸洗処理により除去した。スポット溶接電極には DR 型 Φ6R40 を使用した。加圧力 350 kgf、通電時間 20 cyc@60 Hz（以降、すべて 60 Hz での記載とする）、溶接電流 7.0 kA でナゲット径 5√t となることを確認した条件で継手を作製した。フリクションスポット接合（FSJ）では温度制御なし（通常条件と表記）と温度制御あり（改善条件と表記）で継手を作製した。引張試験は TSS 継手、および CTS 継手で実施した。引張速度は、静的で 0.166 mm/s、動的で 2000 mm/s とした。

図Ⅲ-2.7.6-13 に TSS の静的・高速引張試験を、図Ⅲ-2.7.6-14 に CTS の静的・高速引張試験結果を示す。静的な TSS を比較すると、スポット溶接に比べて FSJ 改善条件は僅かに低位であった。高速の TSS でもその傾向に変化は無かったが、静的よりも

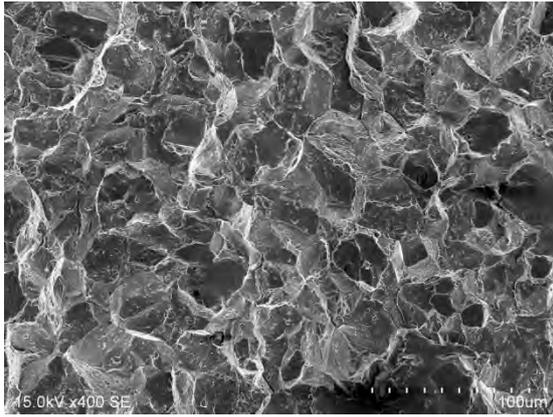
TSS が向上していることを確認した。静的の CTS を比較すると、FSJ 改善条件はスポット溶接や FSJ 通常条件に比べて向上した。また高速においても FSJ 改善条件の CTS は最も高い結果となった。図Ⅲ-2.7.6-15 に高速での CTS におけるスポット溶接および FSJ 改善条件の破面観察結果を示す。スポット溶接では粒界破面が主体となっているが、FSJ 改善条件ではディンプル破面が主体であり、接合部の靱性が改善されたことで CTS が向上したと考えられた。



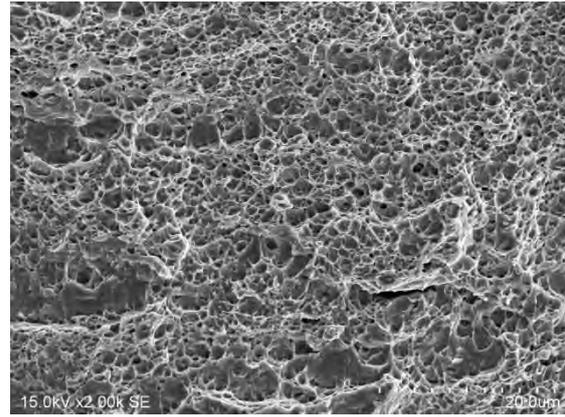
図Ⅲ-2.7.6-13 静的および高速引張試験における TSS



図Ⅲ-2.7.6-14 静的および高速引張試験における CTS



(a) スポット溶接



(b) FSJ 改善条件

図Ⅲ-2.7.6-15 高速 CTS の破面観察結果

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.6-11 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	4	1	0	0	1	0	1
2017FY	0	0	5	2	0	0	0	0	2
合計	0	0	10	3	0	0	1	0	5

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.6-12 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	2	0	0
2016FY	4	0	2
2017FY	3	0	3
合計	9	0	5

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.7[テーマ番号 07] 鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発

2.7.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

商船上部構造の構成材料として、炭素繊維強化樹脂材料（CFRP）に代表される繊維強化樹脂材料をマルチマテリアル化して利用することで構造体が軽量化でき、燃費向上、環境負荷低減が実現できる。そのために必要な CFRP 等樹脂材料と各種鋼材との異種材料接合技術、およびこれらを用いるための構造設計技術、継手健全性評価技術等を開発する。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.7.7-1 に研究開発目標と根拠を示す。なお、本テーマは最終目標応力度（500MPa）には至っていないものの、原因は解明済みであり改良可能性があること、パネル構造の設計製作も可能であること、目標の部材重量 20%低減の複合部材技術も前倒しで確立できたことから、2017 年度末にテーマを終了し、早期に実用化ステージへ移行している。

表Ⅲ-2.7.7-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2017 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 設計に必要な材料データベースの構築 重ね継手せん断引張：母材破断 	<ul style="list-style-type: none"> 継手要素の接合において、界面剥離強度\geq母材層間剥離強度 電食による接合部腐食の評価手法の確立 構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計手法の確立 	大型模擬構造体を試作し製造プロセスの成立性を検証すると共に、以下の目標値を達成する。 <ul style="list-style-type: none"> 部材の終局限界耐力$>$応力換算 500 MPa強度相当 設計強度\geq現行の鋼構造パネル強度 疲労強度：200万回疲労強度20%向上 部材重量20%低減（従来の鋼構造標準設計に対して） 	実構造物に本接合技術を適用するに当たり、構造要素（重ね継手）から構造部材、大型構造部材へと段階的に解析、設計、性能評価技術を確立して行く必要があるため。

(3)全体計画

異種材料継手の接合技術と特性評価技術の開発として、所要性能発現のための材料検討、接合手法および施工技術の開発、接合部の強度・加工特性・耐久性・耐候性把握、接合部検査手法の開発を実施する。また、異種材料継手における耐食性把握と最適配置を検討した上で、複合構造部材の設計と評価技術の確立を目指す。

(4)実施体制

【委託先】
新構造材料技術研究組合
【分担研】
株式会社IHI (横浜磯子分室)

(5)運営管理

横浜磯子分室としては研究の初期段階においては研究開発項目 07 に関わる分室および再委託先との間で定期的に会合を開き、進捗管理を行った。基本的には再委託先との個別打ち合わせが中心である。研究の進捗に伴いメールベースによる進捗管理を行うとともに再委託先毎に研究進捗会議を開催した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

コンテナ船の上部構造重量は現状、約 1000t。複合構造化により、20%程度の重量低減を見込むと、低重心化や振動の低減が可能となり、走行性能が向上する。合わせて燃費も 10%程度の低減が見込まれる。

例えば、8000TEU コンテナ船の場合、25 ノット走行で燃料消費量が 57,000t/年、10%の低減により、CO₂ 排出量の削減は

$5,700 \times 41.9 \text{GJ/kL} \times 0.0195 \text{tC/GJ} \times 44/12 = 17,076 \text{t}$ の削減

燃料費は 500 ドル/t として

$500 \text{ドル/t} \times 5,700 \text{ton} = 3.53 \text{億円/年}$ の節約

となる。20 年使用すれば、約 70 億円の節約となり、CFRP 利用による製造コストアップはある程度回収可能と考えられる。

2.7.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

構造体を構築する最も基本的な要素技術である重ね継手接合技術、電食による接合部腐食の評価技術の開発、構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発を実施し表Ⅲ-2.7.7-2 に示す成果を得た。

表Ⅲ-2.7.7-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	研究開発成果	達成度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
鋼材／CFRP等樹脂材料の接合技術開発	・継手要素の接合において、界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度	・継手要素試験、桁構造体、それぞれにおいて終局時の破壊形態は補材層間剥離であり、界面剥離強度の方が優れる事を示した	○	
	・電食による接合部腐食の評価手法の確立	・電解質を介し単極自然電位測定して腐食の可能性を評価する手法を確立した	○	
	・構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計手法の確立	・鋼とCFRPを最適に部材配置した複合I桁構造と複合柱構造を開発した。複合柱構造の中間部の単位長重量は同じ耐荷力の鋼柱構造の3/4であった	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

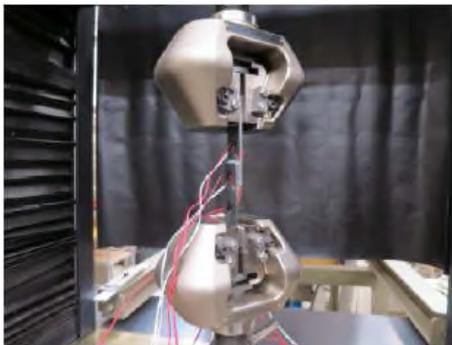
表Ⅲ-2.7.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
鋼材／CFRP等樹脂材料の接合技術開発	継手接合技術の基盤研究として摩擦重ね圧接法（FLJ）、レーザ溶着、接着を継続して実施している。施工条件が継手性能に及ぼす影響、接合に関する工学的知見などを蓄積している。継手技術と同時に構造化技術開発として複合桁構造や複合柱構造の設計施工技術化技術も開発している。複合桁構造は課題を残しているが改良の用途はたっている。複合柱構造はほぼ同じ耐荷力の鋼構造より軽量の構造部材を実現した。	大型模擬構造体を試作し製造プロセスの成り立ちを検証すると共に、以下の目標値を達成する。 ・部材の終局限界耐力 $>$ 応力換算500MPa強度相当 ・設計強度 \geq 現行の鋼構造パネル強度 ・疲労強度：200万回疲労強度20%向上 ・部材重量20%低減（従来の鋼構造標準設計に対して）	終局限界状態における応力度は500MPaには至っていない。しかし、原因は解明済で構造改良は可能である。桁構造体の開発はほぼ完了しているため、これに皮板を組み合わせるパネル構造の設計製作は可能である。疲労強度は部材レベルの供試体により検証する。複合柱構造体の一般部の単位長さ重量は鋼柱構造より25%低減の低減を達成している。

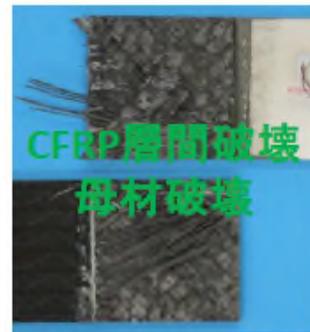
(3)研究開発の成果と意義

鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発においては、構造体を構築する最も基本的な要素技術である重ね継手接合技術、電食による接合部腐食の評価技術の開発、構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発に特に注力した。

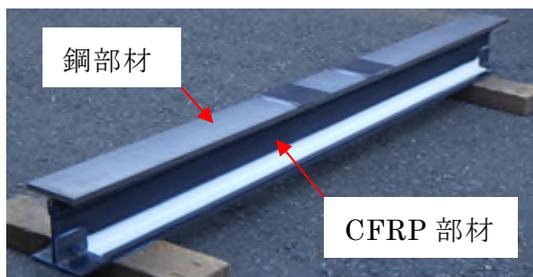
重ね継手接合技術開発では、接着、摩擦重ね接合法（FLJ）、レーザ溶着、などを検討し、それぞれにおいて施工条件の接合強度への影響などの知見を蓄積した。重ね継手の引張試験状況を図Ⅲ-2.7.7-1 に例示する。また試験結果の一例を図Ⅲ-2.7.7-2 に示す。これは熱硬化 CFRP（VE）と SUS304 の接着継手であり、接着面は予めアセトン洗浄とサンドブラスト処理を行い、かつ電食防止のためのガラスクロスを付与している。引張試験における破断形態は CFRP の層間破壊である。すなわち、界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度である事は明らかである。こうした知見をもとに鋼 FRP で構成する複合 I 桁構造体を試作した。外観を図Ⅲ-2.7.7-3 に示す。複合 I 桁構造体は圧縮応力が生じる部分を鋼材、引張応力が生じる部分を FRP で構成し、重ね継手によって接合している。曲げ荷重による載荷試験状況を図Ⅲ-2.7.7-4 に示す。この試験では構造体が破壊するまで荷重を増加している。破壊した構造体を図Ⅲ-2.7.7-5 に示す。重ね継手の添接板は脱落し、接合部の母材部分はプリプレグの層間剥離を確認した。さらに撮影した動画を踏まえると、添接板の脱落と同時にフリーエッジとなった FRP のウェブが座屈したことが推察できた。このように部材レベルにおいても終局時の継手特性は界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度である事が明らかとなった。



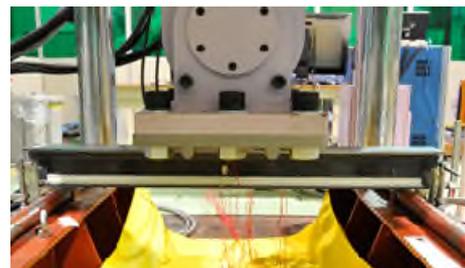
図Ⅲ-2.7.7-1 重ね継手引張試験状況



図Ⅲ-2.7.7-2 接着継手引張試験後外観



図Ⅲ-2.7.7-3 複合 I 桁構造



図Ⅲ-2.7.7-4 構造載荷試験状況



図Ⅲ-2.7.7-5 試験後の構造破壊状況

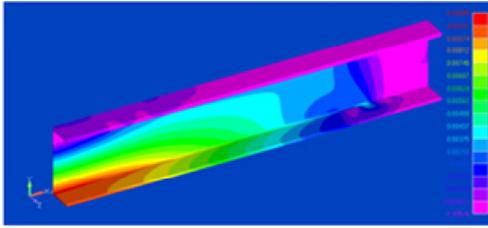
電食による接合部腐食の評価技術の開発では、金属と CFRP の重ね継手の耐食性の評価手法を検討した。電解質を介して接合もしくは接触した場合、金属側に異常腐食の可能性を単極自然電位を測定することで評価する。

各種単極自然電位に有意差が認められ、高電位側より CFRP > SUS304 > SS400 である事を確認した。従って SS400 または SUS304 と CFRP が接触した場合、両系ともガルバニック腐食（異種金属接触腐食）を起こすと判定した。このとき CFRP より低電位側になる SUS304 もしくは SS400 がアノード（陽極）になるため腐食される。特に CFRP との電位差が大きかった SS400 は、影響が大きい。そこで前述のように重ね継手にガラスクロスを付与して腐食を防止する。これによって強度低下が生じない事は引張試験によって確認している。

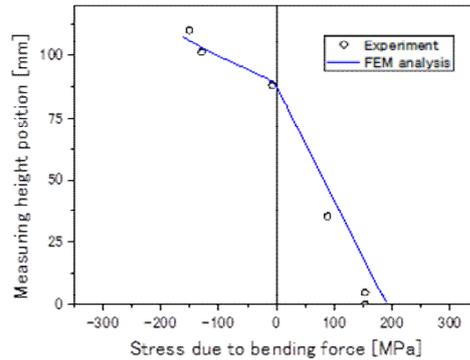
構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発では前述した複合 I 桁構造の開発と複合柱構造の開発をおこなった。

桁構造とは曲げ荷重に対応するための構造である。荷重によって圧縮応力が生じる部分に縦弾性係数が高い鋼材を、引張応力が生じる部分に引張強度に優れる FRP を配置している。複合 I 桁構造の解析例を図Ⅲ-2.7.7-6 に、曲げ載荷試験より得た応力分布と解析値との比較を図Ⅲ-2.7.7-7 に示す。試験値と解析値は概ね一致し、解析手法や解析に用いた物性値が妥当である事が分かる。また、部材断面の上側に配置した鋼材では圧縮の応力 ($-\sigma$) が、下側に配置した FRP では引張の応力 ($+\sigma$) が分布している事も見て取れる。これは前述の設計思想が具現化されている事を示している。

CFRP の縦弾性係数は鋼材と比較すると低いため、外力によるひずみと同じであるときは発生する応力は小さくなる。本部材のように鋼材と CFRP をひずみ分布に対応して断面中立軸の両側に分けて配置する事は CFRP 強度の効率的な利用という点で有効である。



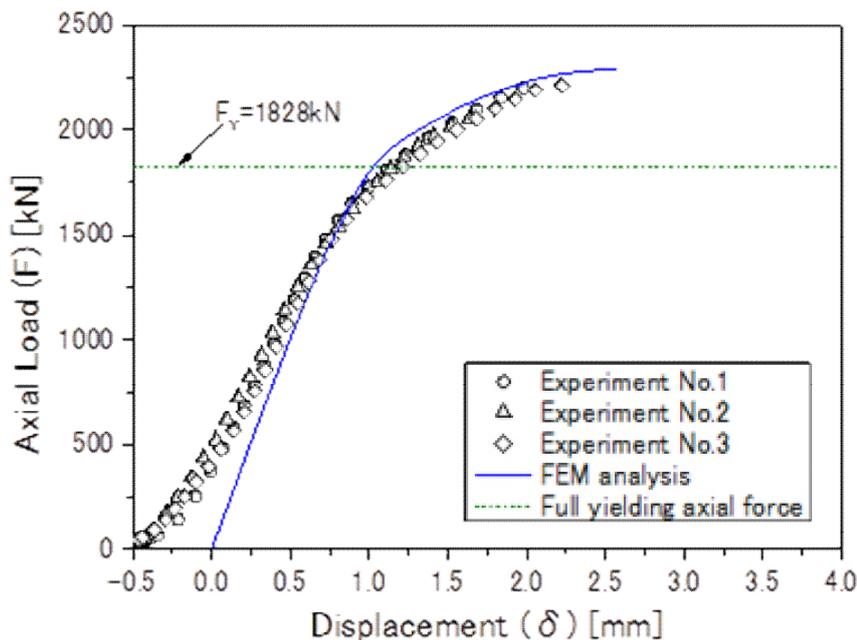
図Ⅲ-2.7.7-6 複合 I 桁構造解析例



図Ⅲ-2.7.7-7 複合 I 桁構造中央断面応力分布

柱構造とは圧縮荷重を受ける構造部材であり、その断面においては圧縮応力が卓越する。FRP は鋼材と比較すると軽量である反面、縦弾性係数が低いため局部座屈強度は低くなる。そこで、矩形断面の角部に鋼材を配置し、スキンプレートは鋼 CFRP 複層と CFRP 単層となる構造を検討した。

図Ⅲ-2.7.7-8 に試作した複合柱構造の圧縮載荷試験で得た荷重変位曲線と解析で得たそれとの比較を示す。両者はよく一致する。



図Ⅲ-2.7.7-8 実験値解析値比較（荷重変位）

鋼板／CFRP 等樹脂材料接合における接合プロセス、特性評価に関する基盤研究は、摩擦重ね圧接法（FLJ）、レーザ溶着、接着を継続して実施している。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.7-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	6	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	6	2	0	0	0	0	1
2016FY	4	0	8	2	0	0	1	1	1
2017FY	2	0	4	0	0	0	0	0	1
合計	7	0	24	4	0	0	1	1	4

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

複合構造の設計・製作に関する特許を開発の進捗に合わせて出願している。具体的には2014年度に継手レベルの重ね継手に関する特許を、2015年度には桁構造部材を出願した。続く2016年度では桁構造部材の改良技術と柱構造部材に関する技術を出願している。今後も構造要素的観点から系統的な特許出願を進めてく。

表Ⅲ-2.7.7-5 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	1	0	0
2015FY	1	0	0
2016FY	2	0	0
2017FY	0	0	0
合計	4	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.8 [テーマ番号 08] 難接合性材料の線接合技術の開発

2.7.8.1 テーマの概要

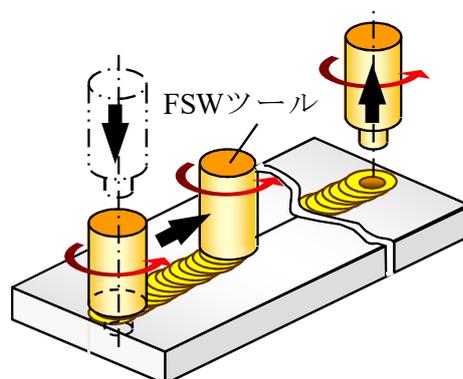
(1)背景と目的

自動車、鉄道車両、航空機などの輸送機器は CO₂ 削減、省エネルギーの観点から、軽量化への努力が継続的に行われている。軽量化の一手段として、比強度の高い材料の使用が挙げられる。比強度の高い材料として、高強度鋼（ハイテン鋼）、高強度チタン合金、高強度アルニウム合金などの金属材料に加え、近年、精力的に開発されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などがある。これら、高機能性材料の共通点として、接合が難しい点が挙げられる。

接合技術の一種に摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding、以下、FSW）と呼ばれている技術がある（図Ⅲ-2.7.8-1）。FSW は材料を溶かさずに線接合できる特異な技術である。表Ⅲ-2.7.8-1 にチタン合金に対して試算した、FSW と TIG 溶接（アーク溶接法的一种）の比較を示す。TIG 溶接は 1 回に溶接できる深さが限られているため、板厚が大きくなると、複数回溶接する必要がある。これに対し、FSW は板厚に依らず 1 パス接合となるため、厚板接合で特に有効と考えられる。これ以外に、FSW は最高温度が低いため、酸化防止対策が容易になるという長所がある。

FSW は回転するツールと接合材料の摩擦熱で局所的に材料を軟化させ、軟化した材料がツールの回転で攪拌されることで接合されるが、材料が軟化する温度は概ね材料の融点に比例して高くなる。チタン合金や鉄鋼材料は融点が 1500°C 以上であり、材料が軟化する温度は赤熱状態である。また、ツールを接合材料に押し付ける力も高融点の材料になる程、大きくなる。このため、FSW の技術的観点において、ツールの高温耐久性と FSW 装置（耐荷重、剛性）が課題となる。更に、自動車等への適用では形状多様性、生産性（大量生産）が要求されることになる。

このような背景の中、本研究開発ではハイテン鋼やチタン合金等の溶融溶接が難しい材料に対して、FSW 技術を実用化水準に引き上げることを目的とする。



図Ⅲ-2.7.8-1 FSW 概念図

表Ⅲ-2.7.8-1 FSW と TIG 溶接の比較

	FSW	TIG
接合部温度	約 900°C	融点 (1668°C) 以上
~5mm	1	1
接合パス数 5~10mm	1	2
10~13mm	1	3

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.7.8-2 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
FSW 装置開発	①Ti 材接合装置： 接合深さ 10mm 以上可能な実証機製作 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼を線接合可能なロボット FSW 装置の開発	テーマ(33)で研究を継続(目標記載)	ツール・接合材温度制御および複雑形状対応特殊機構開発	事業化に必要な機能
接合技術開発	①Ti 材接合強度： 母材強度の 90%以上 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼の線接合材の引張強度が母材強度の 70%以上	テーマ(33)で研究を継続(目標記載)	超ハイテン鋼等の高機能材料の接合強度：母材強度の 90%以上	溶融溶接同等以上の接合部強度。接合深さは接合で大半を占める厚さ
FSW ツール開発	①Ti 材接合深さ： 10mm 以上の実証	テーマ(33)で研究を継続(目標記載)	接合長 4m 以上の耐久性実証（接合深さ 5mm 以上）	大型構造部材での適用可否目安

(3)全体計画

図Ⅲ-2.7.8-2 に本テーマの全体計画を示す。2013 年度から 2015 年度にかけて、チタン合金の FSW 技術を主体に開発してきた。この間に厚み 10mm（接合深さ 10mm）を超えるチタン合金の接合技術を前倒し達成した。2016 年度からは、超ハイテン鋼を接合対象に加え、難接合性材料の線接合技術として開発を進めて来た。

以下に 2017 年度の各拠点の実施内容を示す。このテーマは 2017 年度に終了し、2018 年度からはテーマ(33)において、自動車車体への適用を想定した接合部材の試作等に関する研究を継続している。

【2017 年度】

① FSW 装置開発【日立パワーソリューションズ】

実用性を高めるため、ロボット FSW 装置のヘッド体積を現状の 3/4 (25%減) に小型化することを目標に設計、製作する。また、接合条件、接合荷重、ツール温度等の入出力データを一元管理し、ツール寿命予測等を視野に入れた、データ管理システムの基盤を構築する。

② 接合技術開発【日立製作所】

高強度鋼等の難接合性材料に対し、接合中のツール温度、接合部近傍の温度等を適正に制御した接合技術を構築し、高強度鋼に対し、母材強度の 70%以上の引張強度を有する接合材を得られる技術を構築する。

③ FSW ツール用材料量産技術開発【日立金属】

平成 28 年度の接合試験結果に対して、改良を加えた FSW ツール材料の精密鑄造用マスターインゴットの製造技術を検討するとともに、精密鑄造されたツールの材料特性を評価する。

④ FSW ツール量産技術開発【日立メタルプレジジョン】

高強度鋼等の難接合性材料を接合に最適な FSW ツールの製造条件（素材形状、鑄造条件、熱処理条件）およびツールの加工条件を確立する。

⑤ 貴金属添加 FSW ツール用材料開発【田中貴金属工業】

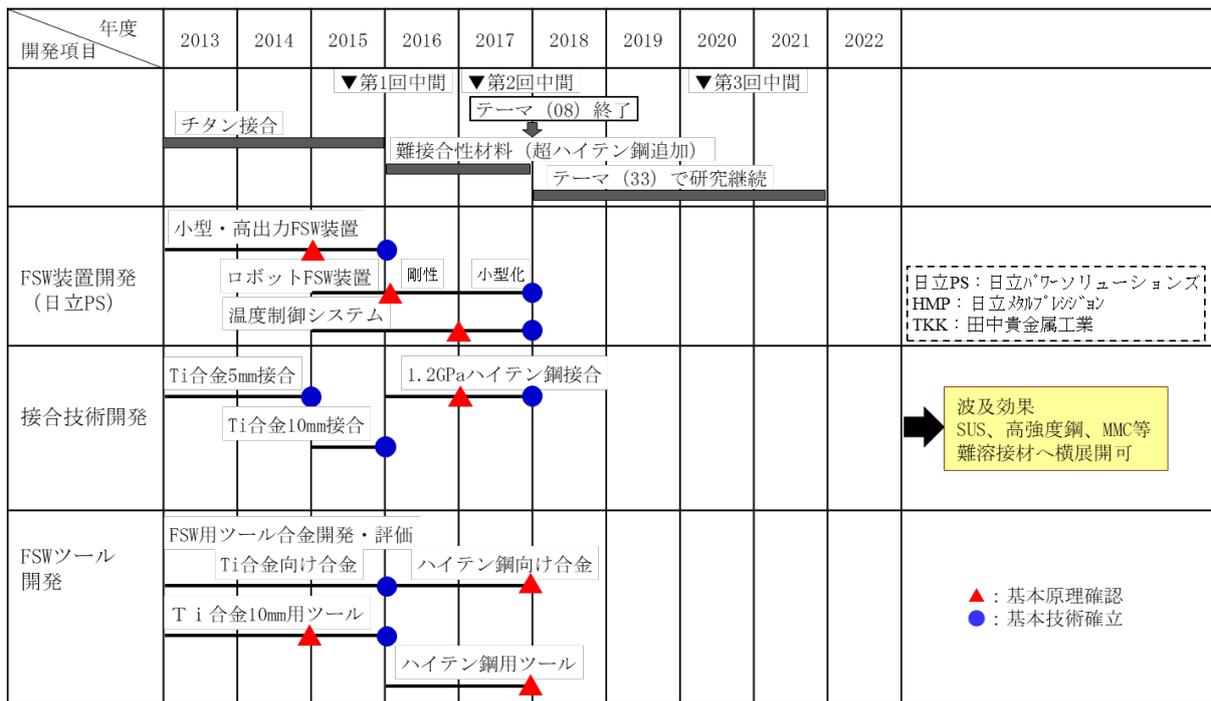
高強度鋼等の難接合性材料の接合に好適な FSW ツールの量産化に向け、ツール加工コスト低減を視野に入れた溶解鑄造法を構築する。

⑥ FSW ツール用合金開発および材料解析【再委託先（大学）】

高強度鋼やチタン合金等の難接合性材料に対して優れたツール性能を示す Co および Ni 基合金のツール材料に関し、ツール材の析出相など金属組織的特徴とツール性能の関係調査ならびに FSW 接合部の組織・特性解析を行う。

⑦接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先（大学）】

FSW による接合材の大気環境下での室温及び高温疲労強度特性に関する知見を取得し、最適接合条件検討にフィードバックする。チタン合金等の難接合性材料接合材の適用・拡大が期待される輸送機器分野における新規高温構造体応用に向けた高温強度特性の把握とその特徴的性能を見いだす。



図Ⅲ-2.7.8-2 全体計画

(4)実施体制

図Ⅲ-2.7.8-3 に示すように、本研究開発テーマは 5 つの分担拠点と 2 つの再委託先、計 7 部署で推進している。開発項目は、FSW 装置開発、接合技術開発、FSW ツール開発の三つに大別される。FSW 装置開発の主担当は（株）日立パワーソリューションズ、接合技術開発の主担当は（株）日立製作所、FSW ツール開発は日立金属（株）、（株）日立メタルプレジジョン、田中貴金属工業（株）が担当した。また、再委託先（大学）で、ツール合金開発、接合部解析、接合材の疲労破壊解析を実施している。本実施体制により、三つの研究開発項目を推進している。

【委託先】

新構造材料技術研究組合
【分担研】
株式会社日立パワーソリューションズ (日立分室会瀬)
株式会社日立製作所 (日立分室大みか)
日立金属株式会社 (日立分室安来第1)
株式会社日立メタルプレジジョン (日立分室安来第2)
田中貴金属工業株式会社 (日立分室平塚)

図Ⅲ-2.7.8-3 実施体制

(5) 運営管理

前述したように、本研究開発テーマは5つの分担拠点と2つの再委託先、計7部署で推進している。(株)日立パワーソリューションズがテーマリーダーとして全体取り纏めを担当している。着実な情報共有を図るため、おおよそ3ヶ月毎に全部署が集まる全体会議と称する会議を開催している。開催場所は各拠点持ち回り制とし、各拠点の研究設備や実験等を見学することで、他部署の開発内容の理解を深めている。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

厚み6mm程度の純チタンを接合する場合の消費電力の試算結果を表Ⅲ-2.7.8-3に示す。現在のFSWの技術レベルでも従来のTIGアーク溶接法と比較して、22%の消費エネルギー効果がある。今後の開発で、FSWの接合速度を2~4倍に上げることで、61~80%の消費エネルギー効果となる。

表Ⅲ-2.7.8-3 FSWとTIGの消費電力試算結果

接合法	接合長1m当たりの消費電力 [kWh/m] () 内数値は相対比	備考
FSW	0.47 (0.78)	速度：30mm/min-1パス
TIG	0.60 (1.00)	速度：200mm/min-2パス, 12V-300A

2.7.8.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.8-4 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
FSW装置開発	①Ti材接合装置： 接合深さ10mm以上可能な実証機製作 ②厚み2mm、強度1.2GPa以上の炭素鋼を線接合可能なロボットFSW装置の開発	ツール・接合材温度のデータ収集システムの開発完了。 複雑形状を接合可能なロボットFSW装置の試作完了。	○	
接合技術開発	①Ti材接合強度： 母材強度の90%以上 ②厚み2mm、強度1.2GPa以上の炭素鋼の線接合材の引張強度が母材強度の70%以上	Ti合金（厚み6~10mm）は母材強度の98%、超ハイテン鋼（厚み1.4mmの1.2GPa ISMA共通鋼）は母材強度と同じ（100%）の接合強度を確証。	○	

FSW ツール開発	①Ti 材接合深さ： 10mm 以上の実証	Ti 合金を接合深さ 10mm 接合可能なこと、および接合深さ 6mm で 4.7m 接合可能なことを実証。	○	
-----------	--------------------------	--	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.8-5 最終目標の達成可能性

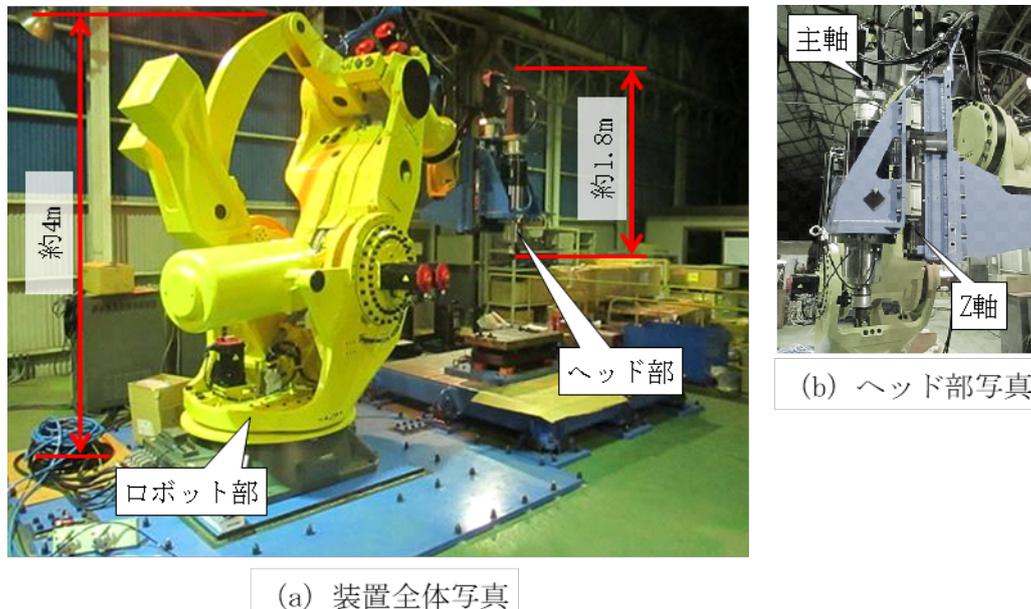
研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
FSW 装置開発	ツール・接合材温度のデータ収集システムの開発完了。 複雑形状を接合可能なロボット FSW 装置の試作完了。	ツール・接合材温度制御および複雑形状対応特殊機構開発。	2021 年度末達成見込み。 2018 年度以降、テーマ(33)で研究を継続実施。
接合技術開発	Ti 合金（厚み 6～10mm）は母材強度の 98%、超ハイテン鋼（厚み 1.4mm の 1.2GPa ISMA 共通鋼）は母材強度と同じ（100%）の接合強度を確証。	超ハイテン鋼等の高機能材料の接合強度：母材強度の 90%以上	2017 年度達成。 2018 年度以降、テーマ(33)で研究を継続実施。
FSW ツール開発	Ti 合金を接合深さ 10mm 接合可能なこと、および接合深さ 6mm で 4.7m 接合可能なことを実証。	接合長 4m 以上の耐久性実証（接合深さ 5mm 以上）	2017 年度達成。 2018 年度以降、テーマ(33)で研究を継続実施。

(3)研究開発の成果と意義

①FSW 装置開発【日立パワーソリューションズ】

図Ⅲ-2.7.8-4 に 2015 年度予算で開発したロボット FSW 装置の外観写真を示す。本装置は多関節ロボット（ロボット部）と、ロボット先端に取付けられたヘッド部により構成される。FSW で欠陥の無い接合品質を実現するためには、接合材に対するツールの押込み量を一定に保持する必要があり、FSW 装置には接合中のツール軸方向に作用する反力（以下、接合反力と称す）に対し、撓みを小さくする装置剛性が必要となる。従来型の FSW 装置は接合反力による装置変形量を極力小さくする思想で設計されている。一方、ロボット FSW 装置は複雑形状や姿勢変化に対する追従性は向上するものの、多関節ロボットの構造上、装置剛性が小さいのが実状である。そこで、本開発品ではヘッド部にツールを回転させる主軸に加えてツール押込み量を変化させる Z 軸（追込み軸）を設け、Z 軸に作用する接合反力を任意に制御することでツール

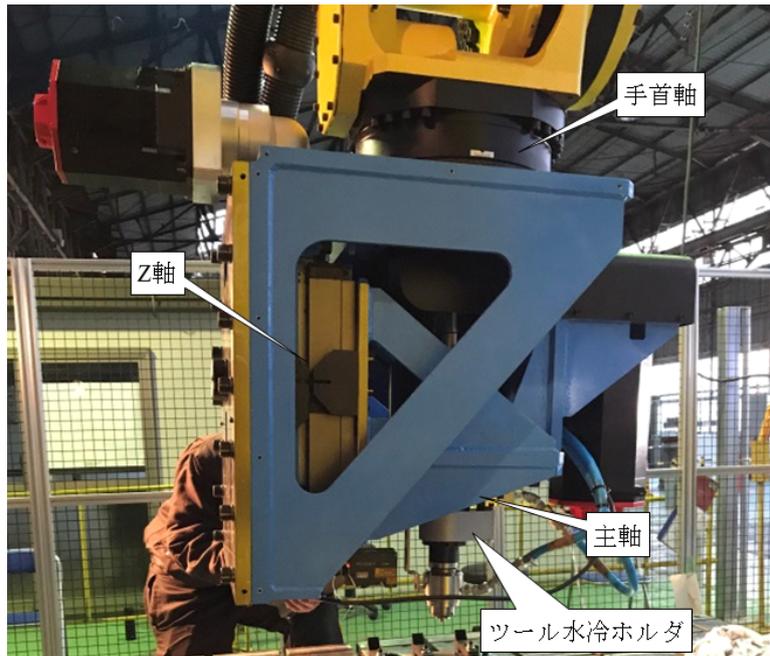
押込み量を一定に保持することを可能にしている。一方、ヘッドサイズが幅 630mm×奥行 1187mm×高さ 1587mm と大きいため、周辺の部材と干渉するなどの問題があり、実用性の観点で課題がある。そこで、本開発では自動車部品製造ラインへの適用を想定し、より小型で実用性の高いヘッド部の検討を行った。



図III-2.7.8-4 ロボット FSW 装置外観写真

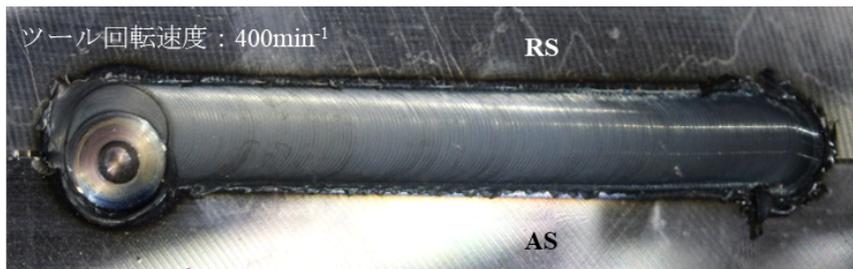
図III-2.7.8-5 に 2017 年度に開発したヘッド部（以下、小型ヘッドと称す）の外観を示す。既存ヘッドは開発当初に得られた炭素鋼（SS400）に対する接合深さ 2mm の接合テスト結果を基に、最大接合反力を 26kN とて設計した。その最大接合反力から Z 軸モータ及び主軸モータを選定し、また、各構成部品の配置を検討し、主軸先端とロボット手首軸をできるだけ近い位置に設定した。さらに、接合反力によるロボット部の撓みを考慮して Z 軸ストロークを 100mm とした結果、ヘッド全高 1578mm となっている。このため主軸をロボット手首軸と同軸上に配置する事が出来ず、ロボット部が接合反力によるモーメント荷重の影響を受けやすい構造であった。

2016 年度開発で、Co 合金ツールを冷却構造にして接合中のツール温度上昇を抑制させることで、ツール回転数をこれまでの 150rpm 程度から 400rpm 程度まで高速化して使用することが出来るようになり、接合反力を大幅に低減させることに成功している。この結果を受け、本開発では最大接合反力を 15kN として設計見直しを実施した。まず、Z 軸モータ及び主軸モータの再選定により既存ヘッドよりモータを小型にできた。また、Z 軸ストロークを 50mm に短くし、Z 軸モータの減速機を直交軸タイプにすることで Z 軸全体を小さくできた。さらに主軸モータから主軸への動力伝達に使用していた減速機をなくしてベルト駆動とし主軸モータを主軸と並列に配置することで、既存ヘッドと比較して全高を 1/2 以下に短縮することができた。これにより主軸をロボット手首軸と同軸上に配置することができ、接合反力によるモーメント荷重の低減が期待できる。これらの構造変更により、既存ヘッドに対して体積比 25%小型化を達成した。以下、小型ヘッドを用いて接合テストした結果について述べる。

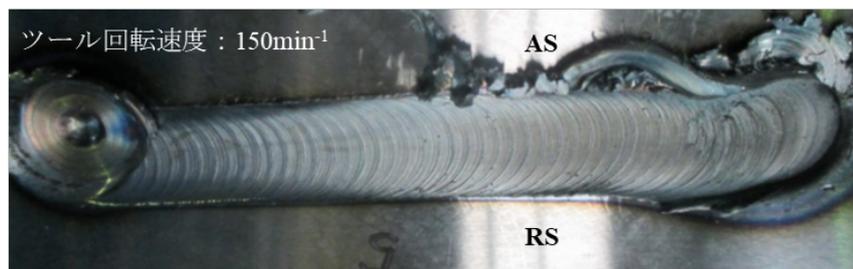


図Ⅲ-2.7.8-5 2017年度に開発したヘッド部（小型ヘッド）外観写真

図Ⅲ-2.7.8-6に小型ヘッドを搭載したロボットFSW装置で接合した材料の外観写真を既存ヘッドでの接合結果と併せて示す。厚み9mmの炭素鋼（SS400）を突合せ、接合深さ約2mm仕様のCo合金（MAST2）製ツールで接合した。いずれの接合もツールの狙い位置は開先中心である。小型ヘッドではツール挿入時に開先中心からRS側へ位置ズレが生じているが、接合方向へ移動開始してからは一定のズレ量を維持して直線的な接合が出来ている。一方、既存ヘッドでは、ツール挿入時の位置ズレに加えて接合方向移動中にも左右へ蛇行しており、小型ヘッドではツール移動方向への直進性が大幅に向上していることが確認できる。



(a) 2017年度開発ヘッド（小型ヘッド）による接合部外観



(b) 2015年度開発ヘッド（既存ヘッド）による接合部外観

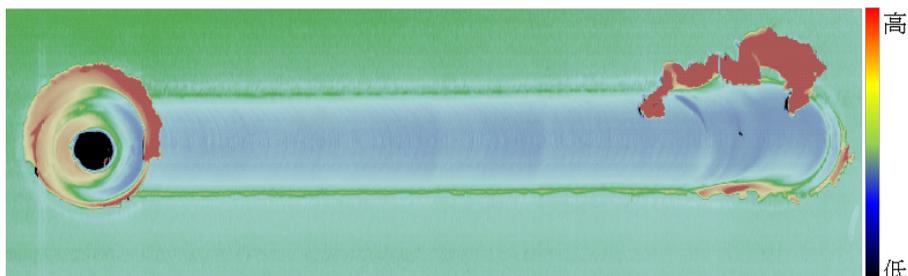
図Ⅲ-2.7.8-6 炭素鋼接合部の外観写真

図Ⅲ-2.7.8-7 に板厚 2mm の冷間圧延鋼板（SPCC）を接合した結果を示す。図Ⅲ-2.7.8-7 (a) より、接合方向に一定のビード幅を保って直線的に接合できているが確認できる。また、図Ⅲ-2.7.8-7 (b) に示すレーザ変位計による接合材表面の形状測定結果から、ビードの凹み量がほぼ一定であることが分かる。この結果は、ロボット FSW 装置によりツール挿入深さを一定に維持して接合方向へツール移動できていることを示している。

本開発により、ロボット FSW 装置ヘッド部の小型化とそれに伴う接合品質の向上が確認できた。2018 年度以降は適用製品形状を想定した接合性評価と適応制御技術の開発を行う予定である。



(a) 接合ビード外観



(b) レーザ変位計による接合部プロファイル

図Ⅲ-2.7.8-7 冷間圧延鋼板の接合テスト結果

FSW の実施にあたっては、まず接合対象となる被接合材（材質、接合深さ等）に適した接合ツール（材質、形状寸法）を選定する必要がある。次に、ツール回転数、接合速度、ツール挿入深さといった接合条件の設定が必要になるが、これらの条件は被接合材の材質によって異なり、同材質であっても板厚や継手形状によっても大きく異なる。欠陥の無い高品質な接合を実現させるために必要なこれらの情報は、経験に基づいて選定されているのが現状である。FSW 中に計測して得られる接合荷重やツール温度等の情報を利用して接合条件を自動制御し高品質な接合を実現していく動きも出てきているが、特定材質、板厚、形状毎の接合条件設定に留まっており課題も多い。

本開発では種々の接合材質や継手形状の接合対象に対して、個々の経験に左右されることなく容易に FSW プロセスを選定するための支援機能を構築することを目的として、FSW 施工時の被接合材、接合ツール、接合条件に関する情報（以下、入力情報と総称する）と、接合現象を捉えるために有効と思われる主軸トルク、接合荷重やツール温度、また、FSW 装置状況の監視に有効と思われる接合中の主軸ベアリング温度

や振動、各軸モータに生じる負荷、指令値と実効値の差異等の計測データ（以下、出力情報と総称する）を収集、格納して管理しデータベース化するためのシステム構成を検討した。本検討では、収集したデータにデータマイニング技術を用いて FSW 装置の故障やツール寿命、接合欠陥発生等を予兆診断することを想定した構成とした。

データ管理の最少構成システムは FSW 装置よりデータを収集、管理し故障予兆診断を行うものである。本構成はクライアントサーバ型のシステムとし、データ収集機能および予兆診断機能を有し、FSW 装置に設置したデータロガーとデータ格納・診断 PC を LAN で接続して収集と診断を行う。データ収集は、データ収集機能部にて以下の流れで実施される。なお、予兆診断には（株）日立パワーソリューションズの予兆診断システム『Hitachi Power Anomaly Measure Pick up System』（以下、HiPAMPS と略す）を用いる。

- (i) FSW 装置の各センサからアナログデータを取得する。
- (ii) データロガーから TCP/IP 通信を用いて、データ格納兼データ診断 PC に CSV 形式ファイルで出力する。
- (iii) データ格納兼データ診断 PC で CSV ファイルの格納を検出しデータ取り込み機能を起動させ、データベースに格納する。

格納したデータは、診断機能部にて HiPAMPS により学習・診断処理を実施し、学習結果データと診断結果データをデータベースに出力する。学習結果データおよび診断結果データは管理用のデータベースに格納する。過去のデータは画面表示機能にて表示し確認できる。

本システムで収集、管理する項目を表Ⅲ-2.7.8-6～表Ⅲ-2.7.8-9 に示す。表Ⅲ-2.7.8-6 は接合対象に関するものり、材質や機械的特性、継手形状に関する情報である。表Ⅲ-2.7.8-7 は接合に使用するツールに関する情報であり、表Ⅲ-2.7.8-8 は FSW 装置を運転する為に必要な接合条件である。これらは FSW 施工にあたり入力情報として与えられる情報である。表Ⅲ-2.7.8-9 は FSW 中に測定して得られる出力情報である。これらの測定には各種センサの使用を想定しているが、計測手法等、詳細については今後検討する。

表Ⅲ-2.7.8-6 接合材情報

No.	項目名
1	材質
2	物性値・強度
3	板厚（接合深さ、同厚、差厚等）
4	ワーク形状・寸法
5	継手形状（重ね、突合せなど）
6	接合線形状（直線、曲線など）

表Ⅲ-2.7.8-7 ツール情報

No.	項目名
1	材質
2	物性値・強度
3	寸法
4	突き出し長
5	シヨルダ径
6	プローブ径
7	プローブ長

表Ⅲ-2.7.8-8 接合条件

No.	項目名
1	ツール回転数 (挿入時/接合時)
2	接合速度
3	ツール前進角 (挿入時/接合時)
4	ツール傾斜角
5	ツール挿入量
6	ツール挿入速度
7	ツール引抜き速度
8	挿入後保持時間
9	接合終点保持時間
10	接合材加温 (予熱、後熱)
11	ツール冷却 (エア、水冷 等)
12	アンプ温度調 (加温、冷却)
13	シールドガス (Ar 等)

表Ⅲ-2.7.8-9 測定データ

No.	項目名
1	実回転数
2	主軸トルク (モータ負荷)
3	実接合速度
4	Fx荷重
5	モータ負荷 (X軸)
6	Fy荷重
7	モータ負荷 (Y軸)
8	接合線あい
9	Fz荷重
10	実挿入量
11	モータ負荷 (Z軸)
12	実挿入量
13	モータ負荷 (A軸)
14	モータ負荷 (C軸)
15	角度 (3D対応用)
16	ツール温度
17	ツール振動
18	ツール形状 (摩耗量)
19	接合材温度 (AS側/RS側)
20	ビード表面状態

生産ラインでは、接合部位ごとに複数の FSW 装置を運用することが想定される。そこで複数の FSW 装置からデータを収集し、データ管理拠点にてデータを一元管理・診断する為のシステム構成について検討した。

一元管理システムでは複数の FSW 装置のデータをデータ管理サーバにより一元管理する。FSW 装置側 (以下、拠点側と称す) には前項の最小構成システムを配置し、データの収集・管理・診断を行う。データ管理拠点では、データ一括管理用のホストコンピュータを配置して拠点側を管理する。

拠点側にて収集されたデータは、まず拠点毎に設置された HiPAMPS により個々に診断される。拠点側にて収集・診断されたデータはインターネット回線を用いてデータ管理拠点に送られる。データ収集と診断によって故障予兆を検出したデータに対してサーバ側で再度診断を実施する。ここでは診断パラメータをより細分化した再評価や、別拠点の学習データを適用した再評価を実施することで誤診断防止やデータ精度向上を図る。サーバ側の診断により得られた学習データ・診断結果データは、管理用のデータベースに格納する。この時、FSW 装置の運転条件も併せて格納する。これらのデータは各拠点設置のデータ収集通信用 PC にて、Web 画面の操作によるダウンロードを可能とし、拠点側の環境に反映させることが出来る。

FSW 装置を操作するユーザに対して最適な接合条件を検索し提供する為の実現するための支援機能項目を表Ⅲ-2.7.8-10 に示す。本機能は、データ管理拠点にて一元管理された過去の接合条件をユーザの接合部材に合わせて類似性検索し、その時に使用された接合条件をユーザのデータ収集通信用 PC に送付する。拠点側で実際に使用した運転条件はサーバ側にアップロードし登録される。サーバ側から拠点側の接合条件を遠隔で変更する機能を持たせることで、接合品質を一定制御可能なシステム構成としている。

この機能を実現するには、迅速に支援情報の提供を可能とするために接合部材の検索項目に優先度を持たせ、情報を早期に抽出する検索機能の確立と出力情報の中から接合品質の変化を読み取り予兆検出する技術の確立が必要になる。

本設計検討におけるシステムを構築する為、2018 年度以降は接合パラメータ、接合中の装置負荷、ツール摩耗量、接合材の温度など種々のデータを採取し、これらのデータと接合品質の関係性について解析を行う予定である。

表Ⅲ-2.7.8-10 接合条件選定のための支援機能項目

No.	機能	内容
1	条件検索機能	類似の接合条件を検索し、接合条件設定時の参考とすることを目的とした機能
2	条件ダウンロード機能	サーバ内に管理している接合条件をダウンロードし、拠点端末に設定する機能
3	条件編集機能	拠点端末から、サーバ内に管理している接合条件を編集する機能
4	条件アップロード機能	拠点端末で使用した運転条件をサーバ側にアップロードし、登録する機能
5	接合条件変更機能	サーバサイドから、拠点側の接合条件を遠隔で変更する機能

② 接合技術開発【日立製作所】

難接合性材料の一つである、高張力鋼板を摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding、以下 FSW）で接合する開発をした。ツール材質は Co 基合金または Ni-Ir 合金とし、ツール寸法はショルダ径 $\phi 9(\text{mm})$ とした。接合中はツール内部を水冷した。接合条件は接合速度（V）100～250mm/min、ツール回転速度（N）150～400rpm の範囲で変化させた。接合材料は ISMA 共通試験鋼板の一つである 1.2-TRIP 鋼を使用した。表 III-2.7.8-11 に接合材の化学組成を示す。この材料は熱処理により引張強度を 1.2GPa に調質したものである。厚み 1.4mm、幅 165mm、長さ 250mm の素材を幅 50mm、長さ 250mm に加工し、2 枚の材料を突合せて接合した。また、接合部の機械的特性の改善を目的に、接合中に接合完了部を高周波誘導加熱により加熱する試みもした。

表 III-2.7.8-11 接合材の化学組成 (mass%)

材 質	C	Si	Mn	P	S	Al	N	O
1.2-TRIP 鋼	0.410	1.50	2.02	0.010	0.0025	0.039	0.0039	0.0009

図 III-2.7.8-8 に接合速度 100mm/min、ツール回転速度 300rpm の条件で接合した接合部の外観写真を示す。外観上は加熱の有無による顕著な差は認められない。図 III-2.7.8-9 に接合部の断面写真を示す。マクロ的には金属組織の明確な差は認められないが、コントラストの差が認められた。

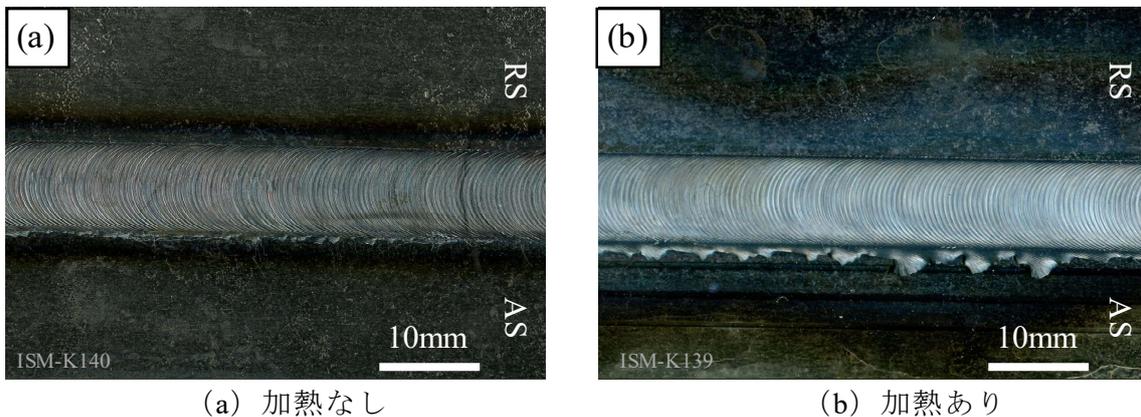
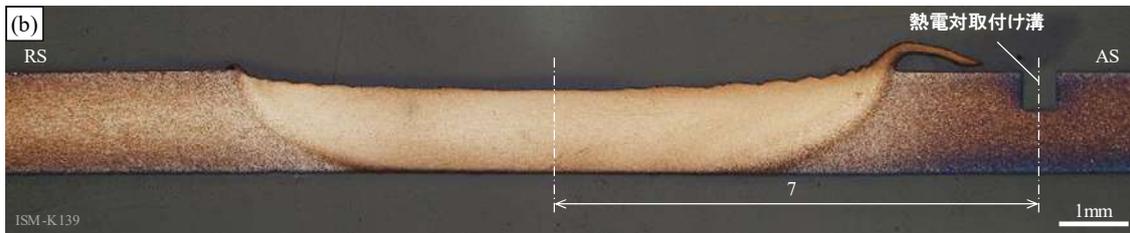


図 III-2.7.8-8 接合部外観写真



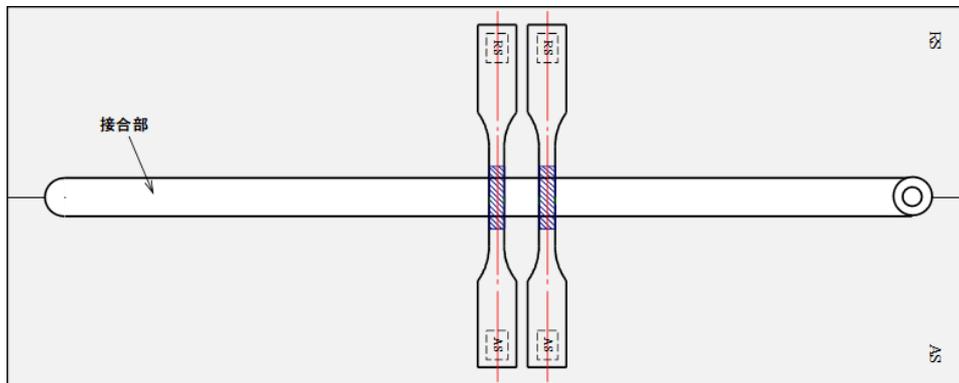
(a) 加熱なし



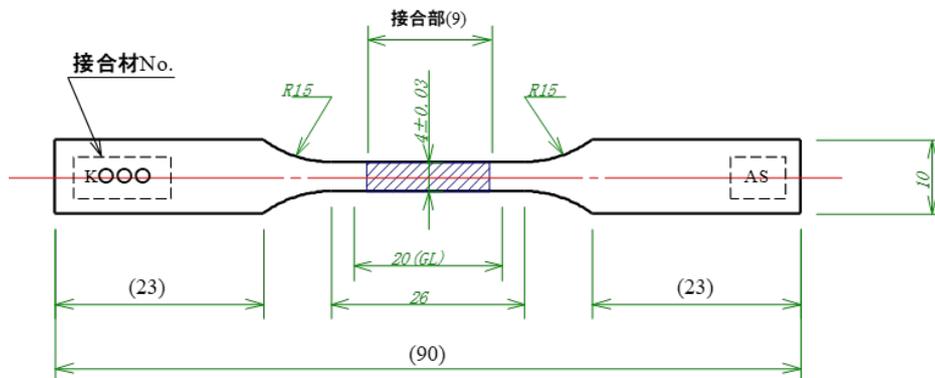
(b) 加熱あり

図Ⅲ-2.7.8-9 接合部断面写真

接合部の硬さを調査した所、接合部の硬さは、加熱なしの場合が 640～700HV であるのに対し、加熱ありの場合 480～550HV と硬さの低下が認められた。加熱により、接合部が焼戻されたためと推測している。



(a) 引張試験片採取方向



(b) 引張試験片寸法

図Ⅲ-2.7.8-10 引張試験片採取方向および引張試験片寸法

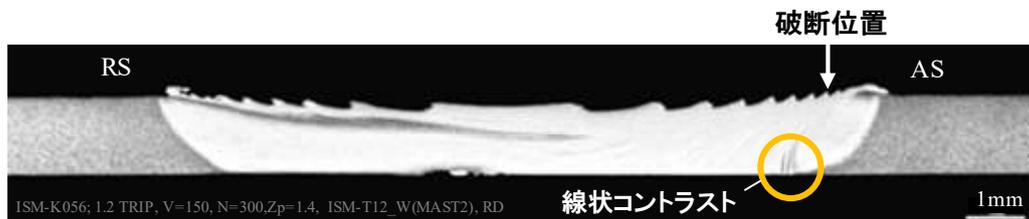
これらの接合材料から、図Ⅲ-2.7.8-10 に示す方向および寸法の引張試験片を採取し、引張試験を実施した。結果を表Ⅲ-2.7.8-12 に示す。引張強度は加熱した場合の方が約60MPa 大きかったが、有意差であるかは不明である。しかし、伸びは両材料とも3%と小さかった。但し、加熱した接合材は温度測定のために設けた熱電対取付け溝での破断であったため、引張強度、伸びともに、もう少し大きな値になる可能性がある。

いずれの場合でも、接合材は母材と同等の強度を示し、最終目標である母材強度の90%以上を達成した。

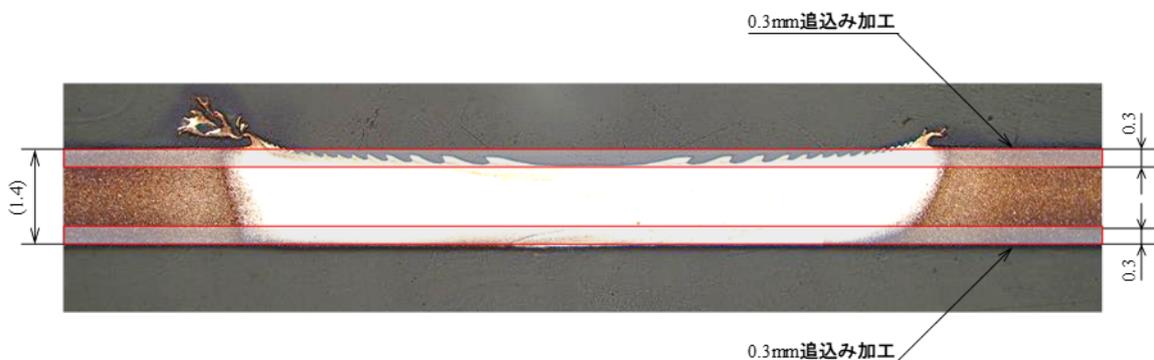
表Ⅲ-2.7.8-12 引張試験結果

材 質	引張強度 [MPa]	伸び [%]	備 考
加熱なし	1243	3	接合部破断
加熱あり	1311	3	母材破断（熱電対取付け溝）

前述の伸びが小さい結果に対し、追加検討をした。図Ⅲ-2.7.8-11 に接合部断面組織と破断位置の関係を示す。接合部に明白な内部欠陥は認められないが、接合部裏面から板厚方向に線状のコントラストが認められる。破断はこの線状コントラストに近い位置で生じていたことから、線状コントラストが破断に影響を及ぼした可能性が考えられる。そこで、図Ⅲ-2.7.8-12 に示すように、接合材を厚み方向に切削して、線状コントラスト部分を除去した試験片で引張試験を実施した。結果を表Ⅲ-2.7.8-13 に示す。表裏を切削除去したした場合としない場合とで、優位差は認められなかった。この結果より、線状コントラストが破断に与える影響は小さいと判断した。



図Ⅲ-2.7.8-11 接合部断面組織と破断位置



図Ⅲ-2.7.8-12 引張試験片加工概念図

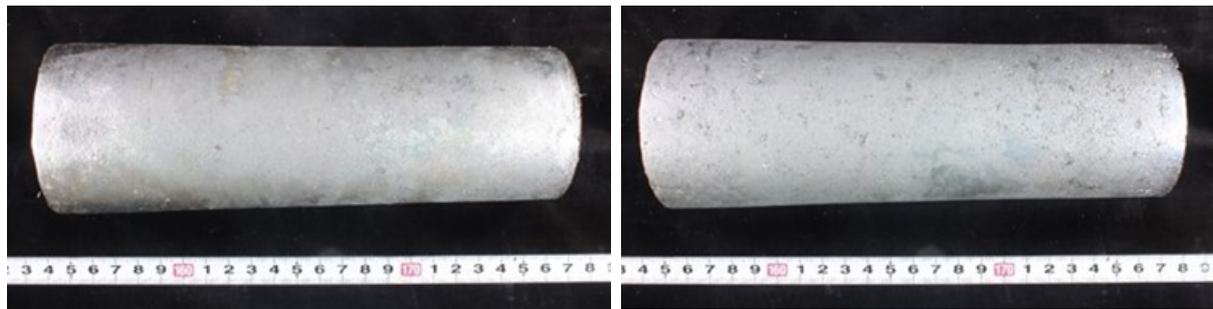
表Ⅲ-2.7.8-13 引張試験結果

材 質		引張強度 [MPa]	伸び [%]	備 考
母 材	(1)	1208	22	平行部破断
	(2)	1189	22	平行部破断
FSW 材 表裏切削：なし	(1)	1154	2	接合部破断
	(2)	1264	8	AS 側の母材破断
FSW 材 表裏切削：あり	(1)	1197	11	AS 側の母材破断
	(2)	1086	4	接合部破断

引張試験後の破面を観察した結果、母材破断した FSW 材の破面にはディンプルが観察され、延性破壊したものと考えられる。一方、接合部破断した FSW 材の破面にディンプルは認められず、脆性的に破壊したものと思われる。この結果より、伸びが小さい接合部は何らかの理由により、金属結合が弱かったものと推測している。今後、接合条件等を見直して、伸びの改善を図る予定である。

③ FSW ツール用材料量産技術開発【日立金属】

鋼板の FSW 接合評価に供するツール用 Co 合金として、ベース合金、改良合金 3 の 2 種類の精密铸造用マスターインゴットを真空誘導溶解によって溶解、铸造した。作製した約 11~13kg のマスターインゴットの外觀例を図Ⅲ-2.7.8-13 に示す。外觀観察、重量測定、成分分析等の確認試験を行った結果、良好なマスターインゴットであることを確認し、精密铸造用のマスターインゴットに供した。

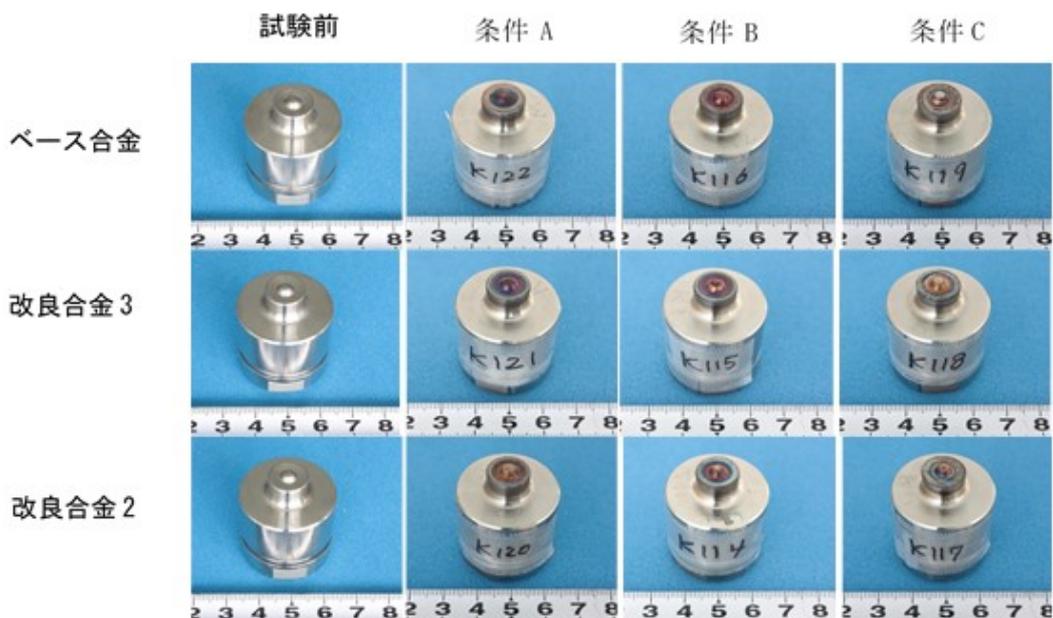


(a)ベース合金

(b)改良合金 3

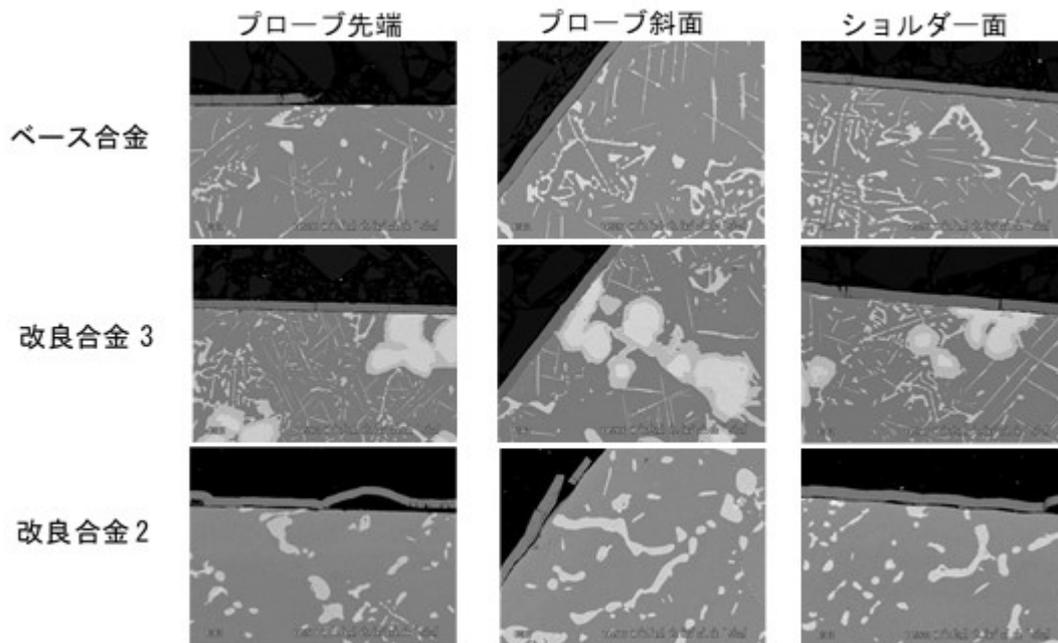
図Ⅲ-2.7.8-13 マスターインゴットの外觀例

マスターインゴットを原料に精密铸造により作製した 3 種類の Co 合金製ツールを用いて、1.2GPa の TRIP 鋼の FSW 接合を行った前後のツールの断面組織等を調査した。接合条件は、条件 A(低速走行、低回転速度)、条件 B(中速走行、中回転速度)、条件 C(高速走行、高回転速度)の 3 条件で接合長は 220mm である。接合試験前後の Co 合金ツールの外觀を図Ⅲ-2.7.8-14 に示す。試験後のツールのプローブおよびショルダ部に一部鋼板の付着が見られるものの、3 合金ともツール自体の損傷はほとんど見られず、ほぼ試験前の形状を保っている。

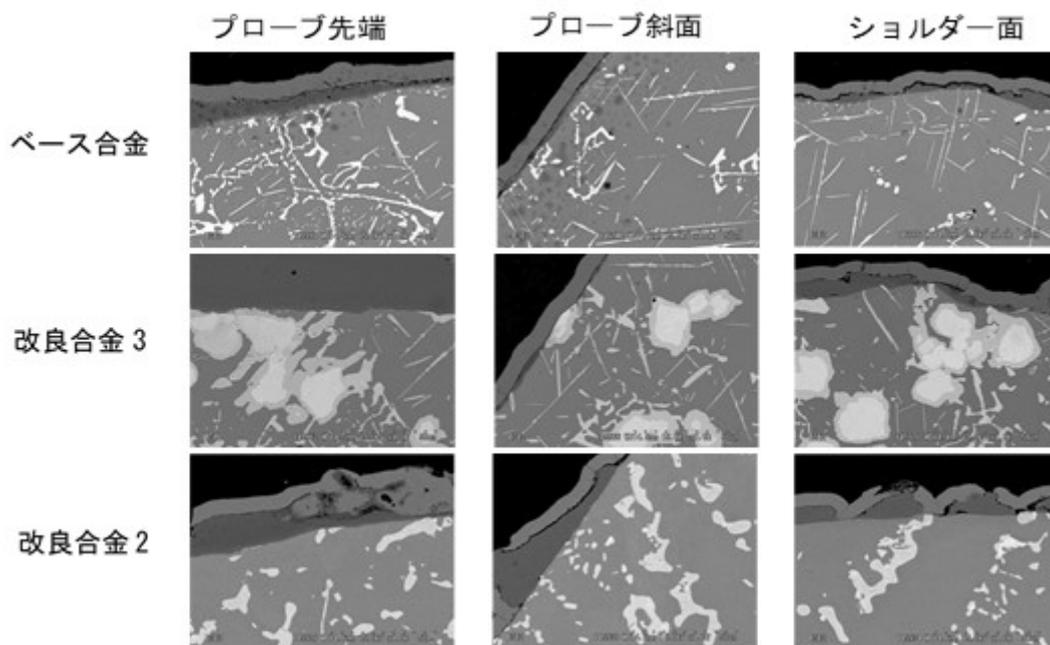


図Ⅲ-2.7.8-14 1.2GPa の TRIP 鋼の FSW 前後の Co 合金ツールの外觀

図Ⅲ-2.7.8-15 に接合試験前のツール断面 SEM 組織、図Ⅲ-2.7.8-16 に条件 B で接合試験した後のツール断面 SEM 組織を示す。試験前の断面組織中に分散する白い粗大な硬質粒子は、試験後にもほぼそのまま存在しており、損傷度合いは非常に小さかった。



図Ⅲ-2.7.8-15 FSW 前のツール断面 SEM 組織



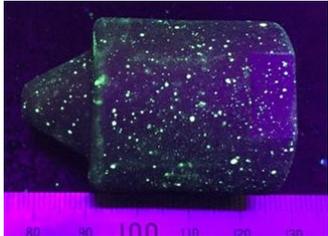
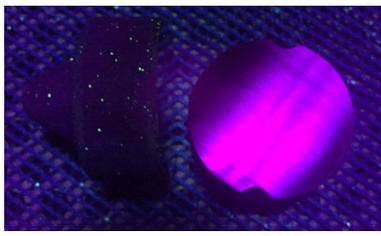
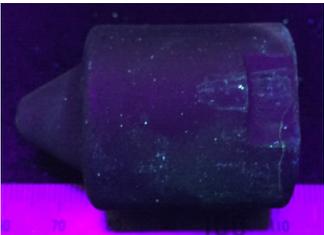
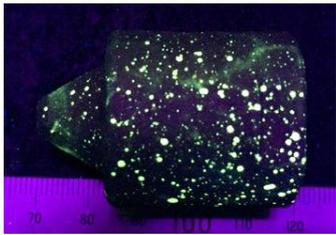
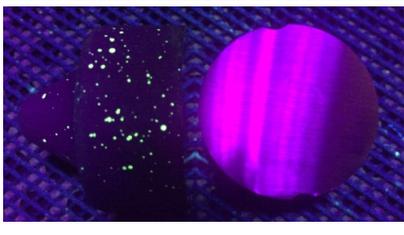
図Ⅲ-2.7.8-16 FSW 後のツール断面 SEM 組織(接合条件 B)

マスターインゴットから採取した試験片を用いて、3種類の Co 合金の高温引張特性および高温硬さを評価した。高温硬さは温度の上昇とともに徐々に低下し、室温では 500HV 前後の硬さが 800℃では約 400HV まで低下するが、900℃においても 400HV 弱の高い硬さを維持していることを確認した。

④ FSW ツール量産技術開発【日立メタルプレシジョン】

ツールは日立分室安来第1において製造したマスターインゴットを溶解原料として、精密鑄造によりニア・ネット・シェイプの鑄造材を製造した後、機械加工で最終形状に加工する。先ず、精密鑄造後の品質確認のため、蛍光浸透探傷検査を実施した。結果を図Ⅲ-2.7.8-17に示す。写真中に点状に見える淡黄色の部分が欠陥を示す。表面に関して、ベース合金と改良合金3において欠陥指示が確認された。表面欠陥指示が確認された物について、内部欠陥の有無を確認するため、断面の蛍光浸透探傷検査を実施した。断面に欠陥指示が無かったことから、欠陥はごく表層のみに発生していると考えられる。

上記の欠陥防止のため、鑄込みに時のフィルター使用や鑄造条件（鑄型温度、鑄造温度、冷却方法等）を変更して製造した。その結果、図Ⅲ-2.7.8-18に示すようにベース合金の表面部の欠陥指示は改善された。

	蛍光浸透探傷確認結果		断面の蛍光浸透探傷確認結果	
ベース合金		表面指示あり		指示は表面のみ 鑄型との 反応と推定
改良合金2		指示無し		
改良合金3		表面指示あり		指示は表面のみ 鑄型との 反応と推定

図Ⅲ-2.7.8-17 精密鑄造材の蛍光浸透探傷検査結果

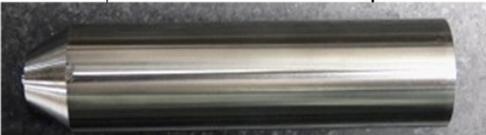
蛍光浸透探傷試験結果		
ベース合金		外周には指示無し 湯口面に多少あり
改良合金2		外周には指示無し 湯口面に多少あり

図Ⅲ-2.7.8-18 方案改良後の精密鑄造材の蛍光浸透探傷検査結果

日立分室安来第1において製造したベース合金、改良合金2の2種類のマスターインゴットを用いてFSWツールを試作した。FSWツールは使用するFSW装置によりツール取付構造が異なるため、日立分室大みかおよび東北大学で先端部分以外の形状が異なっている。各拠点向けに試作したツール形状とツール合金の内訳を図Ⅲ-2.7.8-19と図Ⅲ-2.7.8-20に示す。T12スパイラル形状のツールは攪拌力を高めることを狙った形状である。

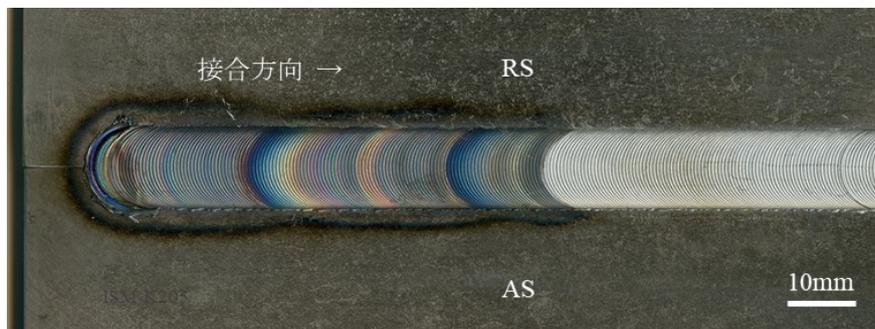
向け先	日立分室大みか							
ツール名	水冷ツール							
	T12		T14		T17		T12スパイラル	
形状			—				溝追加加工	
鋼種	ベース合金	改良合金2	ベース合金	改良合金2	ベース合金	改良合金2	ベース合金	
納品	'17/10	5	5			10	15	
	'17/10					25	20	
	'17/12							
	'18/2	11	13					
	'18/3							2

図Ⅲ-2.7.8-19 日立分室大みか向けに試作したツール内訳

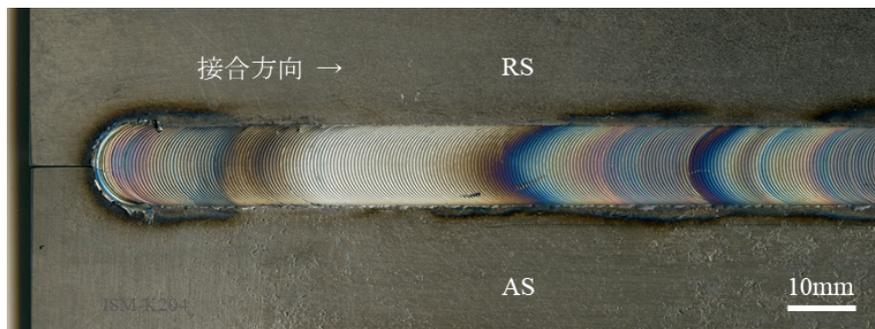
向け先	東北大学						
ツール名	常温ツール						
	T12		T14		T17		T12スパイラル
形状							
鋼種	ハース合金	改良合金2	ハース合金	改良合金2	ハース合金	改良合金2	ハース合金
納品	'17/10		1		1		
	'18/11				5	5	
	'18/2	3	5				
	'18/3						2

図Ⅲ-2.7.8-20 東北大学向けに試作したツール内訳

先端形状のスパイラルの有無による接合部の品質調査を実施した。強度 1.5GPa の超ハイテン鋼を接合した接合部の外観写真を図Ⅲ-2.7.8-21 に示す。接合部に青色や褐色に変色した部分が観察されるが、これは、ツールの冷却水が漏れて接合部に滴下したことで生じたもので、ツール形状とは無関係である。接合部の外観からは、スパイラル有無による顕著な差は認められなかった。接合後のツールを観察した結果、スパイラル溝の大部分が接合材で埋められた状態になっていた。接合開始直後からこのような状態になっていたものと推察しており、これより、今回試作したスパイラル溝は材料の流動に与える影響は小さいと考えている。このため、以降はスパイラルのないツールを主体に開発を進めた。



(a) T12 ツール (スパイラルなし)



(b) T12 ツール (スパイラルあり)

図Ⅲ-2.7.8-21 接合部外観写真

⑤ 貴金属添加 FSW ツール用材料開発【田中貴金属工業】

Ni₃Al γ '相を析出させた Ni 基合金は、高い高温強度を有していることは一般に既知である。本研究では、Ni₃Al γ '相の安定性を向上させ、更に優れた高温強度を有する Ni 基合金を開発することを目的とし、高融点かつ高硬度である Ir の添加に着目した。Ir-Al 二元系合金では Ir₃Al γ '相は形成されないが、Ir₃(Al,W) γ '相は形成されることが発見されており^[1]、この金属間化合物は Ni₃Al を超える高い相安定性を有することから、Ni-Ir-Al-W 系で高い γ '相安定性を示す可能性があることが示唆された。そこで、Ni-Al に対する Ir、W 添加の効果を検証する為、Ni-Ir-Al-W 四元系合金を作製して γ '相の固溶温度と硬度を測定した。

Ni-Ir-Al-W 四元系合金に Ir を 0~20 (at %) 添加し、各合金を作製した。所望の組成となるように純金属を秤量・混合した後、アーク溶解炉または高周波真空溶解炉を用いてインゴットを作製した。インゴットより小片を切り出し、溶体化熱処理を行った上で、示差走査熱量測定法 (Differential Scanning Calorimetry: DSC) で各 Ni-Ir 系合金の相変態温度を測定した。また、溶体化後に時効処理を行い、ビッカース硬度計を用いて硬度測定を行った。

Ni-Ir-Al 三元系合金においては Ir 添加と共に γ '相固溶温度は低下するが、Ni-Ir-Al-W 四元系合金では Ir 添加により γ '相固溶温度は上昇した。即ち、Ir と W の複合添加によって γ '相が安定化されることが明らかとなった。Ir₃(Al,W) γ '相は高い相安定性を有するため、Ni-Ir-Al-W 系合金では γ '相は (Ni,Ir)₃(Al,W) の形で存在し、10 at % Ir と W の添加で γ '相固溶温度は約 1300°C まで上昇した。また、Ir は高融点金属であり、 γ 固相線温度も Ir 添加で上昇することがわかった。以上より、Ir、W の複合添加は、融点と γ '相の固溶温度上昇の両者を満たし、高温材料としての応用が示唆される合金設計指針が得られた。

図 III-2.7.8-22 に Ni-Ir-Al-W 四元系合金の時効処理後のビッカース硬度を示す。Ir 添加により硬度は上昇し、Ir の固溶強化が確認された。また、時効処理によっても硬度が上昇しており、 γ '相の析出強化も確認された。

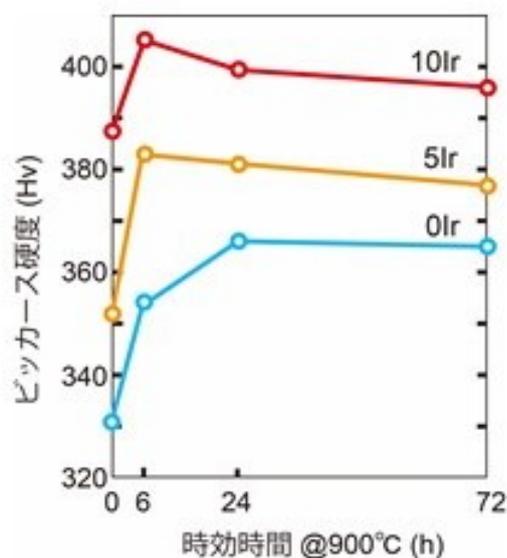
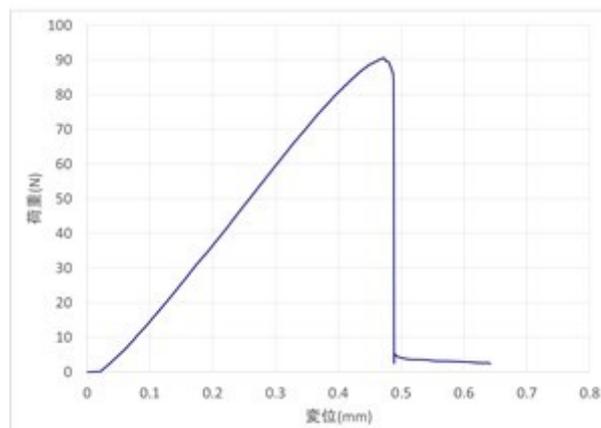


図 III-2.7.8-22 Ir 添加量と γ ' 相固溶温度および γ 相固相線温度の関係

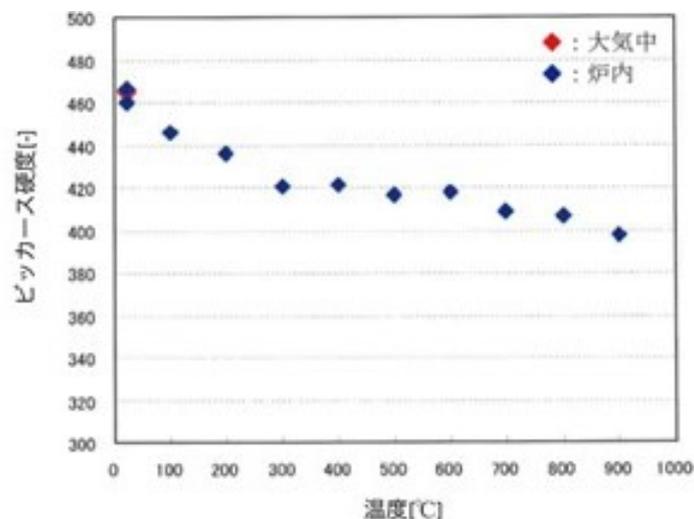
前述の高硬度を発現した Ir 10 at %組成合金に対し、圧縮試験による 0.2%耐力を測定した。鉄鋼系材料を FSW する際、1000℃に於ける圧縮強度が 400MPa 以上であることが報告されている^[2]。Ni-Ir 系合金は 1000℃で 700MPa 程度の耐力を示しており、鉄鋼系材料の FSW ツールとして有望であることが示唆された。

FSW 中のツールには回転軸方向の荷重と捻り力が作用している。従って、FSW ツールにはある程度の靱性が必要である。靱性を評価する方法として三点曲げ試験を実施した。厚み 1.0×幅 2.5×長さ 20 mm に加工した試験片を 1000℃の Ar 雰囲気中で支持間距離 15mm で試験した。荷重－変位曲線を図Ⅲ-2.7.8-23 に示す。変位量約 0.5mm で折損しており、靱性に乏しい材料であることがわかった。しかし、荷重は約 90N であったことから、強度的には強い材料であると考えている。



図Ⅲ-2.7.8-23 三点曲げ試験での荷重－変位曲線

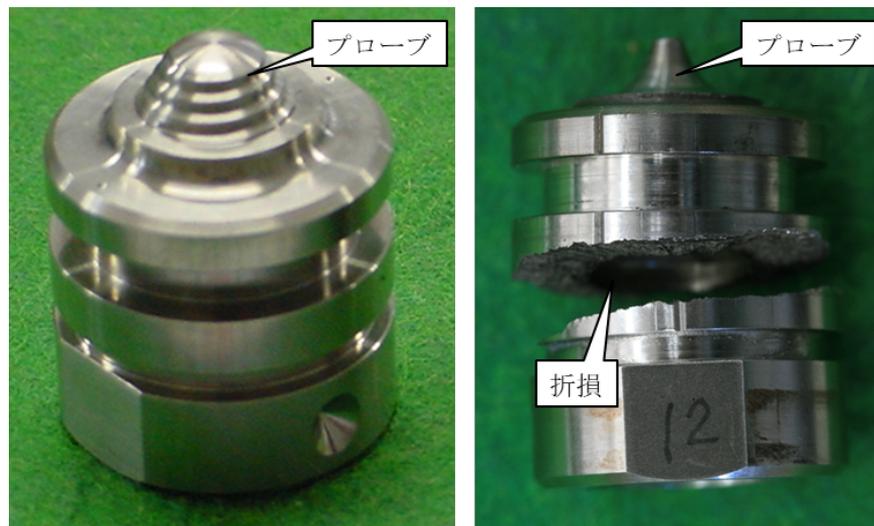
実際に FSW を行う際に重要となるのが、接合中の温度における硬度である。Ti 合金や超ハイテン鋼などの難接合材の接合中のツール温度は 900℃程度と推定され、この温度に於ける硬度の把握が必要である。図Ⅲ-2.7.8-24 に高温ビッカース硬度試験の結果を示す。温度の上昇に伴い硬度は徐々に低下するが、900℃で HV400 程度の硬度を示しており、高温でも高い硬度であると考えている。



図Ⅲ-2.7.8-24 Ni-Ir 系合金硬度の温度依存性

Ni-Ir 系合金で試作した FSW ツールの耐久性評価を実施した。接合材料は Ti-6V-4Al 合金を使用し、接合深さは 6mm とした。図 III-2.7.8-25 に耐久試験前後のツール外観写真を示す。接合長の増加に伴い、ツールは径方向に細くなるが、相対的に軸方向の摩耗は比較的小さかった。接合長 4.7m でツールの胴体部分が折損したため、耐久性評価を終了したが、ツール先端部分は接合可能な状態であった。ツールの胴体部が折損したことに関しては、ツール構造を見直し、トルク伝達位置の変更や応力集中の低減を図った。

本研究開発の FSW ツール開発における最終目標は、接合深さ 5mm 以上の接合で接合長 4m 以上としていたが、本結果より、最終目標を達成できた。



(a) 使用前

(b) 4.7m 接合後

図 III-2.7.8-25 耐久試験前後のツール外観写真

⑥ FSW ツール用合金開発および材料解析【再委託先（大学）】

チタンや超ハイテン、中高炭素鋼等の難接合性材料の FSW ではアルミニウム合金や銅合金よりも接合温度が高く、ツール軸方向荷重も大きくなると予想される。そこで、先ずチタン等の FSW において、目標とする接合深さを接合できる高温強度の高い材料の開発を 1 つの目的とした。この目的に対し、母材の高温強度向上、析出相の分解温度の高温化などが期待できる組成を設計して小型のインゴットを試作し、高温強度等の基礎データを取得するとともに、試作合金を用いた FSW ツールを作製して、チタン等の FSW 過程におけるツール摩耗挙動の解析、ツール摩耗を支配するツール材組織・物性の影響を調べた。その後、被接合材の対象を超ハイテンや中高炭素鋼へ拡大し、これら被接合材を FSW する過程でのツール摩耗挙動、ツール摩耗を支配するツール材組織・物性の影響についても調べた。また、FSW は材料を固相状態で塑性変形させて接合する特殊な原理に基づいているため、接合部の金属組織と機械的特性などの関係が不明な場合が多い。そこで、チタンや超ハイテン等の接合部における金属組織と機械的特性の関係、金属組織の形成機構などを調べた。

高温強度の高い材料として、Co 基合金と Ni-Ir 合金を試作し、金属組織、析出相 (γ') の分解温度 (固溶温度)、高温強度等に関する基礎知見を得た。

いずれの合金も γ/γ' 型をベースに種々の化学組成を有するものを試作した。Co 基合金の高温強度に及ぼす合金元素の影響を調査するため、30Ni 合金をベースとして Ta、Nb、Ti、V を添加した合金を試作し、 γ' 相固溶温度と硬度を測定した。Ta、Nb、Ti が γ' 相固溶温度の上昇に効果があることが判明し、適切な均質化熱処理と時効熱処理を行うことで硬さ上昇にも効果があることもわかった。また、FSW においては γ' の固溶温度とともに硬質析出相もツール性能に影響することが予測されるため、8 種類の Co 基合金を別途試作して、金属組織と γ' の固溶温度を調べた。いずれも γ/γ' 組織を有しており、合金成分により種々の炭化物や金属間化合物などの硬質相を含む Co 基合金を得ることが出来た。

Ni-Ir 合金においては、Ir 添加が γ' 相安定化と融点の上昇に効果があるかを検証する基礎実験を実施した。Ir、Al、W 量を種々変化させた Ni 合金を試作し、 γ' 相固溶温度の測定と硬度測定を行ったところ、適量の Ir 等の合金元素を含む Ni 合金で、 γ' 相固溶温度と融点及び硬度上昇が実現できることがわかった。

Co 基合金に関して、FSW ツールとしての適用性を高める目的で、添加元素による高強度化を試みた。示差走査熱量計(DSC)により、添加元素が固相線温度と γ' 相固溶温度に及ぼす影響を決定した。V は固相線温度に大きな影響を及ぼさなかったが、Nb、Ta は固相線温度を低下させることがわかった。一方、 γ' 相固溶温度に対し、Ta 添加は γ' 相固溶温度が上昇し、Ta のみが強化相の γ' 相の安定性を向上させたと考えられる。また、SEM による組織観察と EPMA による炭化物/金属間化合物相 (γ' 相以外) の組成分析を行った。V 添加材は M_6C 炭化物と Co_7W_6 タイプの μ 相が存在していた。Nb 添加材は、少なくとも分析した視野内においては炭化物は見られず、 μ 相のみが観察された。Ta 添加材は M_6C 炭化物と MC 炭化物及び μ 相が観察された。また、室温における硬度測定を行ったところ、いずれの試料においても添加量が多いほど硬度は高かったが、V 添加材はベース材よりも硬度が低く、Nb、Ta 添

加材においてベース材よりも硬度を上昇させることができた。さらに 0.2%耐力の温度依存性を測定したところ、いずれの合金元素を添加した試料においても、すべての試験温度域において耐力が向上していた。耐力の向上は主に γ' 相の安定化によるものと考えられた。

合金設計した Co 基合金の諸特性に基づいて、11 種類の Co 基合金を選定し、所望の組成となるように純金属を秤量・混合した後、高周波真空溶解炉を用いて、溶解・ casting により作製した。図 III-2.7.8-26 に溶解・ casting 法により作製した Co 基合金のインゴットの一例を示す。

インゴットを溶体化熱処理した後、 γ' 相を析出させるための熱処理を行い、その後、機械加工にてショルダ径 15mm、プローブ長 1.7mm の FSW ツールに仕上げた。



図 III-2.7.8-26 試作した Co 基合金インゴット

作製した Co 基合金製 FSW ツールを用いて、Ti-6Al-4V 合金の FSW 試験を実施し、Ti-6Al-4V 合金の FSW におけるツール摩耗挙動とツール摩耗を支配する Co 基合金の材料因子を調べた。接合長 200mm 毎にツール形状をデジタルマイクロスコープで取り込み、FSW に伴うツール摩耗体積を定量化した。ツール摩耗度はツール摩耗体積を接合長で割った値、「ツール摩耗率 (mm^3/mm)」を用いて比較した。また、Co 基合金の材料因子として、 1000°C における高温強度、室温硬さ、 γ' 固溶温度、母相中に分散する硬質相（炭化物や金属間化合物）のサイズと体積分率を求めた。11 種類の Co 基合金ツールを用いて、Ti-6Al-4V 合金に対して FSW を行った結果、Co 基合金ツールはそれぞれ異なったツール摩耗率を示した。図 III-2.7.8-27(a)に示すように、ツール摩耗はショルダ面の中央において優先的に生じており、FSW に伴ってショルダ面はすり鉢状を呈した。また、図 III-2.7.8-27(b)に示すように、FSW 後には Co 基合金ツール表面に Ti-6Al-4V 合金が付着していた。

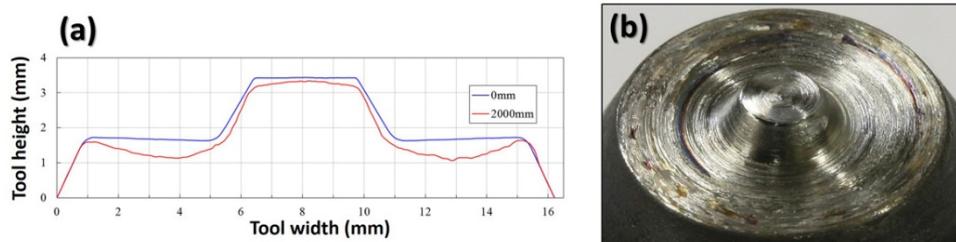


図 III-2.7.8-27 Ti-6Al-4V 合金 FSW での形状変化(a)と FSW 後のツール表面(b)

Ti-6Al-4V 合金が付着した Co 基合金ツールの断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) にて観察した結果、Co 基合金と Ti-6Al-4V 合金の界面に、厚さ $1\mu\text{m}$ 程度で、複数の相から構成される反応層が観察された。Co と Ti の 2 元系状態図から、Co と Ti から成る複数の金属間化合物であることが示唆された。いずれの Co 基合金ツールにおいても同様の反応層が観察され、厚さは Co 基合金の合金成分に依存せず、また後熱処理に伴う反応層の成長速度にも合金依存性は確認できなかったことから、ツール摩耗率に及ぼす化学反応の影響は大きくないと推察された。

ツール摩耗度に及ぼす Co 合金の材料因子の影響を調べた結果、 1000°C における高温強度とよい相関性が得られ、高温強度が高い Co 基合金ほどツール摩耗度が低くなることが示された。以上の結果から、Ti-6Al-4V 合金の FSW 過程における Co 基合金ツールの摩耗は、FSW に伴う Ti-6Al-4V 合金の付着と剥離に起因しているものと考えられる。FSW 過程で Co 基合金ツールを Ti-6Al-4V 合金中に挿入すると、Co 基合金ツール表面に Ti-6Al-4V 合金が付着し、両者の間で化学反応が生じる。次のツール挿入時には、ツール表面に付着した Ti-6Al-4V 合金に対して、大きなせん断力が Ti-6Al-4V 合金全面に作用するため、Ti-6Al-4V 合金はツール表面の Co 基合金とともに剥離すると考えられる。剥離後、再度 Ti-6Al-4V 合金がツール表面に付着するため、FSW 試験を繰り返す毎に Ti-6Al-4V 合金の付着と剥離が生じると考えられる。Co 基合金自体の高温強度が高いほど、剥離に対する抵抗は大きくなると予想されることから、高温強度がツール摩耗を支配する材料因子となり、高温強度が高い Co 基合金においてツール摩耗が生じにくかったものと推察される。

Ti-6Al-4V 合金の FSW において、異なるツール摩耗度を示した Co 基合金を 4 種類選定し、純チタンに対する FSW 試験を実施した。接合条件は Ti-6Al-4V 合金と同じであり、ツール摩耗度はツール摩耗率により定量化した。図 III-2.7.8-28 に示すように、純チタンに対する FSW の結果、いずれの Co 基合金ツール表面にも純チタンが付着するものの、ツール摩耗はほとんど生じなかった。ツール表面への純チタンの付着は Ti-6Al-4V 合金の場合と同様、Co と Ti の化学反応に起因するものと考えられる。ツール摩耗がほとんど生じなかったのは、純チタンは Ti-6Al-4V 合金よりも著しく高温強度が低いため、Co 基合金ツール表面に対する力学的負荷が少なかったことに起因すると考えられる。

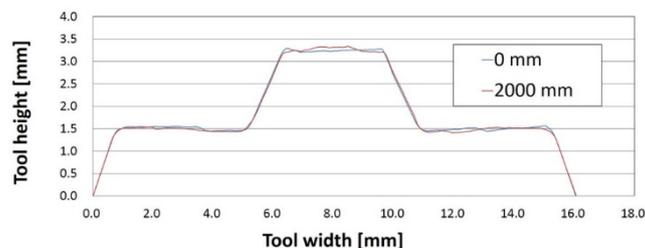


図 III-2.7.8-28 純チタンの FSW に伴うツール形状変化

Co 基合金ツールは純チタンの FSW ではほとんど摩耗しないが、高温強度が高い Ti-6Al-4V 合金ではショルダ面がすり鉢状に摩耗し、高温強度が高い Co 基合金ほど FSW に伴う摩耗量が低減することが示された。一方、鋼の FSW 過程における Co 基合金ツールの損傷挙動についてはほとんど明らかになっていないため、高強度鋼の FSW 時におけるツール損傷を、室温状態にある被接合材へツールを挿入するときに見えるツール変形と温度上昇後に生じるツール摩耗に大別して調べた。高強度鋼に対して優れた耐久性を示す Co 基合金ツール素材を開発するため、チタンの FSW 時に合金設計した Co 基合金を参考にして、組成や組織の異なる 10 種類の Co 基合金を設計して、FSW ツールを作製した。そして、ISMA 共通の 1.2GPa 級高強度鋼に対する FSW を実施し、温度上昇後のツール摩耗に優れた Co 基合金の諸特性やマイクロ組織の影響をまず調べた。ツール性能評価に用いた Co 基合金ツールの形状はショルダ径 15mm、プローブ長 1.3mm である。

種々の Co 基合金ツールを用いて高強度鋼に対して FSW を行った結果、Ti-6Al-4V 合金で優れた耐久性を示した合金とは異なるものが最良であることが分かった。高強度炭素鋼におけるツール摩耗はショルダ面端部から生じ、鋼の炭素量による違いはほとんど見られなかったが、図 III-2.7.8-29 に示すように、TRIP 鋼の FSW 時におけるツール摩耗はほとんど生じないことが示された。高強度炭素鋼におけるツール摩耗度はツール材の材料組織、特に γ/γ' 母材に分散する金属間化合物や炭化物などの硬質粒子の量やサイズに依存する可能性が示唆されたことから、高強度鋼の FSW に対するツール素材の開発に向けた新たな設計指針が得られた。

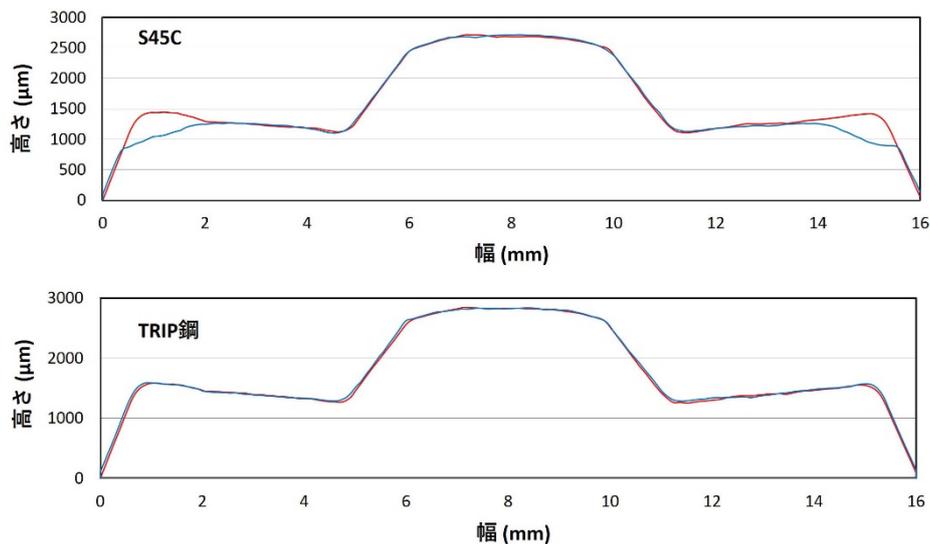
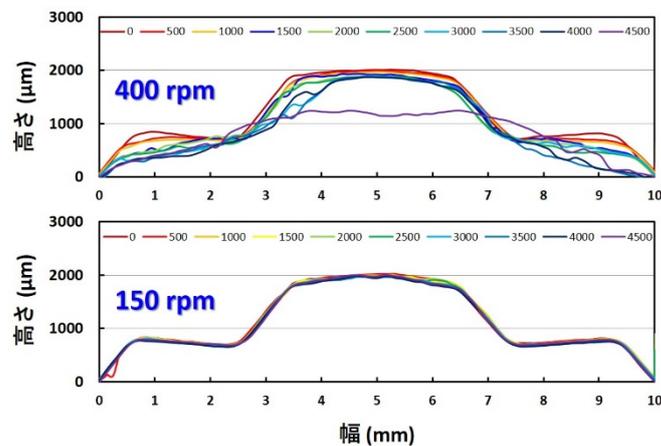


図 III-2.7.8-29 S45C と TRIP 鋼を FSW したときに生じるツール摩耗挙動
(赤線が初期形状、青線が FSW 後の形状)

次に優れたツール摩耗度を示したツール素材を用いて、ツール挿入時の変形に及ぼす鋼の硬さの影響を調べた。S45C ならびに S55C を A₃ 点以上に加熱後急冷した後、A₁ 点以下の種々の温度で熱処理することで、硬さの異なる鋼を作製した。これら鋼に対して Co 基合金ツールを用いて点接合し、ツール挿入で生じるプローブの長さ変化を定量化した。Co 基合金ツールのプローブ長さ変化に及ぼす鋼の硬さの影響を調べた結果、Co 基合金はツール自体よりも硬い鋼に挿入されたとき著しく変形することが示された。

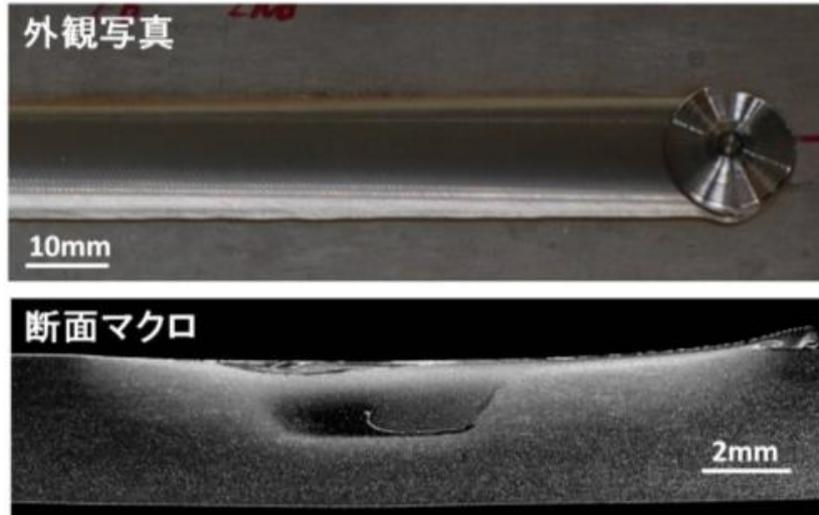
高強度鋼の FSW においては、熱影響に伴う硬化や軟化現象が見られるため、FSW 時の熱影響を減らすため、ショルダ径の小さな Co 基合金ツール（ショルダ径：9mm）を試作し、中炭素鋼（S45C）に対するツール摩耗挙動を回転速度が 400rpm と 150rpm の条件下で調べた。図Ⅲ-2.7.8-30 に FSW に伴うツール断面プロファイルの変化を示す。回転速度が高い場合、Co 基合金ツールは著しく摩耗するが、回転速度を低く設定することで、ほとんど摩耗しなくなることが示された。



図Ⅲ-2.7.8-30 中炭素鋼の FSW に伴うツール断面プロファイルの変化

接合部の金属組織と機械的特性の関連性を明らかにするため、Ti-6Al-4V 合金接合部における解析を実施した。プローブ長 1.7mm の Co 基合金ツールを用いて得られた Ti-6Al-4V 合金 FSW 部の外観写真と断面マクロを図Ⅲ-2.7.8-31 に示す。光沢がある滑らかな表面を有する無欠陥継手を得ることができた。攪拌部には α 相と β 相からなる等軸的な微細粒組織を得ることができ、EBSD 解析の結果、この組織は不連続再結晶により得られることが示唆された。

接合部の硬さ分布および攪拌部の引張特性を調べた結果（表Ⅲ-2.7.8-14）、微細粒組織形成に伴い、硬さと引張特性の向上が確認できた。



図Ⅲ-2.7.8-31 Ti-6Al-4V 合金 FSW 部の外観写真と断面マクロ

表Ⅲ-2.7.8-14 母材と攪拌部の硬さおよび引張強度

	硬さ (Hv)	引張強度 (MPa)
母材	275~300	820
攪拌部	320	940

次に無欠陥で接合深さ 5.7mm の FSW を行った Ti-6Al-4V 合金接合部の断面マクロ上で、攪拌部のミクロ組織を SEM にて解析した。攪拌部には微細かつ等軸的な α 粒組織と α/β のラス状組織が混在し、 α 粒の平均結晶粒径は約 $2\mu\text{m}$ であった。接合中心の攪拌部上部、中央、下部の組織を比較したところ、攪拌部中央での結晶粒径が最も大きかった。これは Ti 合金の低い熱伝導率に起因して FSW の冷却過程での抜熱が最も生じにくく、より粒成長が生じたためと考えられる。断面マクロを詳細に観察したところ、攪拌部の前進側にエッチングのされ方が異なる領域が見られた。その領域を詳細に解析した結果、母材よりも β 相が多くなっていることが示された。FSW 部の硬さ分布を測定した結果、攪拌部の前進側のみ高め（約 400Hv）であったが、母材から攪拌部にかけて約 300~350Hv でほぼ一定であった。攪拌部に微細粒組織が形成されたにも関わらず硬さに違いがなかったのは、母材がミルアニール状態であって若干加工硬化されていたためと考えられた。

Co 基合金ツールを用いて FSW した Ti-6Al-4V 合金接合部のミクロ組織を SEM、EDS および EBSD 法を用いて詳細に解析するとともに、接合部断面のビッカース硬さ分布を測定した。接合部の外観写真を図Ⅲ-2.7.8-32(a)に示す。接合欠陥を含まず良好な外観を有する接合部が得られた。母材部にはミルアニール状態の結晶粒組織が観察され、 α 粒界上に β 相が点在していた。攪拌部には微細かつ等軸的な α 粒組織と等軸的な α/β のラス状組織が混在し、 α 粒の平均結晶粒径は約 $1\mu\text{m}$ であった（図Ⅲ-2.7.8-32(b)）。攪拌部に存在する α 粒界の結晶方位差に対して、バーガースの方位関係に基づいたバリエーション解析を実施した結果、 $\beta \rightarrow \alpha$ の固相変態に起因する α 粒界の存

在率は極めて低かった。結晶粒組織形態とバリエント解析の結果から、FSW 過程での最高到達温度は β 変態点 (β トランザス) 以下であったことが示唆された。また、断面マクロを詳細に解析した結果、攪拌部の前進側にエッチングのされ方が異なる領域が観察された。その領域を詳細に解析した結果、母材や他の攪拌部よりも β 相が多く存在していることが示された (図 III-2.7.8-32 (c))。これは Co が β 安定化元素であるため、ツール摩耗によって攪拌部内に残存した Co 基合金が Ti-6Al-4V 合金と反応することで形成されたものと推察された。接合部の硬さ分布を測定して結果、攪拌部は母材部 (約 300Hv) よりも若干高い約 330~340Hv を呈した。これは FSW に伴って攪拌部に微細粒組織が形成されたためと推察される。

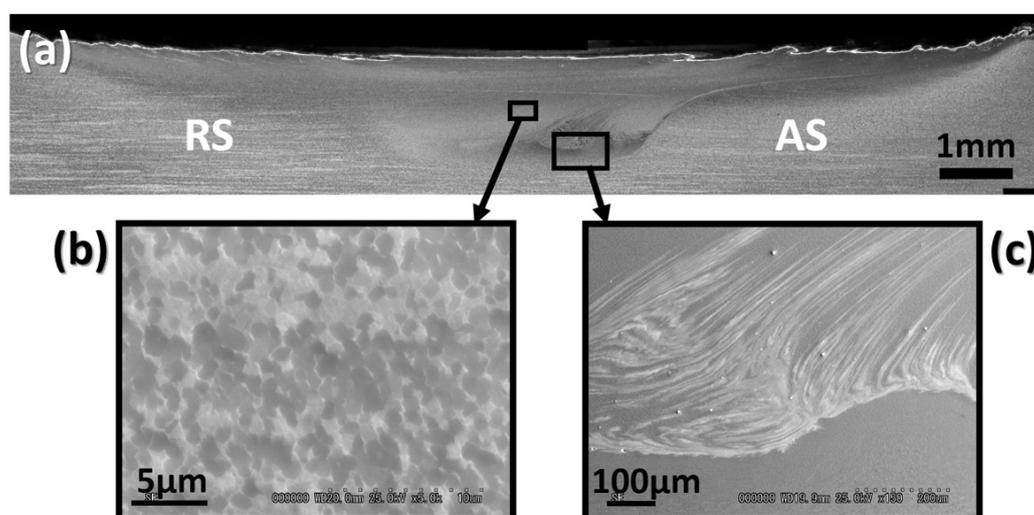
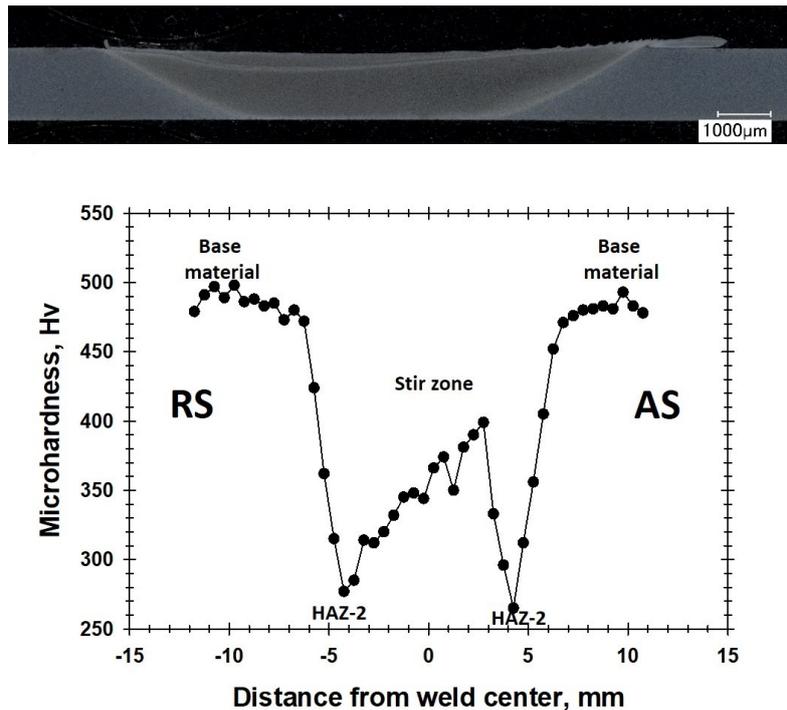


図 III-2.7.8-32 Co 基合金ツールで得られた Ti-6Al-4V 合金接合部の SEM 写真

Co 基合金ツールを用いて得られた純チタン接合部のマイクロ組織を光学顕微鏡、SEM および EBSD 法を用いて解析し、また接合部断面のビッカース硬さ分布を測定した。純チタン接合部は表面が荒れる傾向を示した。母材部には結晶粒径が $47\mu\text{m}$ の粗大かつ等軸的な α 単相組織が存在しているが、攪拌部には小角度粒界を多く含む粒径 $4\mu\text{m}$ 程度の微細結晶粒組織が形成された。極めて強い単純せん断集合組織を呈しており、 $\beta \rightarrow \alpha$ 固相変態で生じるラス状組織が観察されなかったことから、 α 単相状態、すなわち最高到達温度は 880°C 以下で FSW されたものと推察された。小角度粒界を多く含む組織となったのは、 α 相が hcp 構造ですべり系が限定されていることに起因するものと考えられる。断面マクロを詳細に解析したが、Ti-6Al-4V 合金攪拌部に見られたようなツール摩耗に起因する特異な組織は観察されなかった。接合部の硬さ分布を測定して結果、攪拌部は母材部 (約 150~170Hv) よりも若干高い約 180~190Hv を呈した。純チタンの場合にも、FSW に伴って攪拌部に微細粒組織が形成されたことに起因すると推察された。

Co 基合金ツールを用いて高強度鋼の FSW を実施した結果、欠陥のない接合部が得られた。その一例として、ツール回転速度 300rpm、接合速度 150mm/min で得られた

1.5QT 鋼接合部の断面マクロと硬さ分布を図Ⅲ-2.7.8-33 に示す。母材硬さは約 180Hv 程度であったが、攪拌部においては 320～400Hv へ低下し、その外側（熱影響部）では 260Hv 程度まで低下していた。母材には焼戻しマルテンサイト組織が観察されたが、熱影響部では母材組織の更なる焼戻しが見られ、攪拌部ではパーライトとマルテンサイトの混合組織が観察された。形成されたマイクロ組織から接合時の最高到達温度を推定すると、熱影響部では A₁ 点直下、攪拌部では A₁ 点～A₃ 点の間に加熱されたことが示唆された。



図Ⅲ-2.7.8-33 1.5QT 鋼接合部の断面マクロと硬さ分布

回転速度 150rpm、接合速度 60mm/min の条件でビードオンプレート FSW された TRIP 鋼接合部の硬さ分布を測定し、またマイクロ組織を SEM および EBSD で調べた。図Ⅲ-2.7.8-34 に本接合部の断面マクロと硬さ分布を示す。攪拌部は、母材部と異なるコントラストを呈しており、接合欠陥は観察されなかった。硬さは母材部と攪拌部の間（熱影響部）で低下し、攪拌部内で著しく増加することが示された。攪拌部、熱影響部、母材部の SEM 写真と EBSD 相マップを図Ⅲ-2.7.8-35 に示す。母材にはフェライト、硬質相（マルテンサイトもしくはベイナイト）、残留オーステナイトの 3 相が共存しており、残留オーステナイト量は約 20% であった。熱影響部においては、硬質相はほとんど見られず、また残留オーステナイトの著しい減少が確認された。TRIP 鋼においては、A₁ 点以下でフェライトと炭化物が平衡相であり、マルテンサイトやベイナイト等の硬質相、オーステナイトは準安定であることから、この領域は FSW 時に A₁ 点直下に加熱されたことで、硬質相と残留オーステナイトがフェライトと炭化物に変態した領域に対応するものと推察された。硬質相と残留オーステナイトの減少がこの領域の硬さ低下に起因しているものと考えられる。攪拌部には少量のフェライ

トと残留オーステナイトを含む硬質相組織が形成されていることが示された。この組織は、FSW 時に TRIP 鋼の A_3 点以上もしくはその近傍に加熱された後に冷却されたことで形成されたものと推察された。攪拌部における硬質相の増加が硬さ上昇に起因していると考えられた。

炭素鋼接合部においても、TRIP 鋼と同様、攪拌部における硬さの上昇とその外側での硬さ低下が見られた。攪拌部における硬さ上昇は、FSW 時の最高到達温度が A_3 点以上もしくはそれ付近であったことに起因して、マルテンサイトやベイナイト等の硬質相の量が増加したことに起因しており、一方攪拌部の外側における硬さ低下は、 A_1 点直下に加熱された結果、母材に存在する焼戻しマルテンサイトの更なる焼戻しが生じたためと推察された。

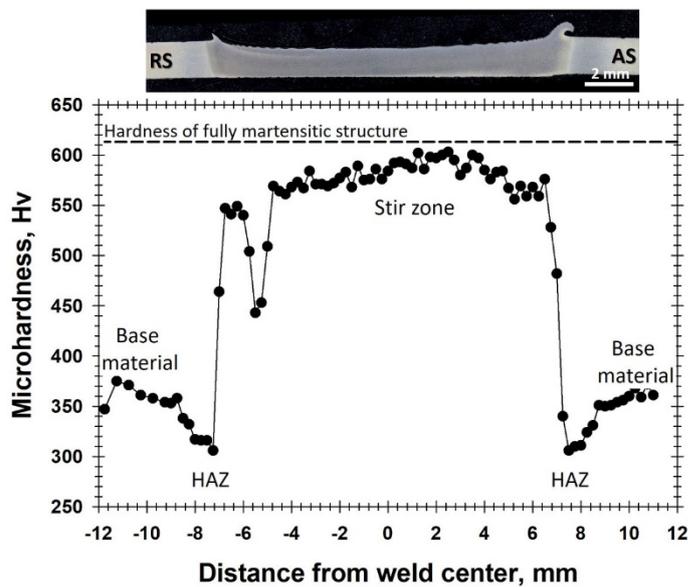


図 III-2.7.8-34 TRIP 鋼接合部の断面マクロと硬さ分布

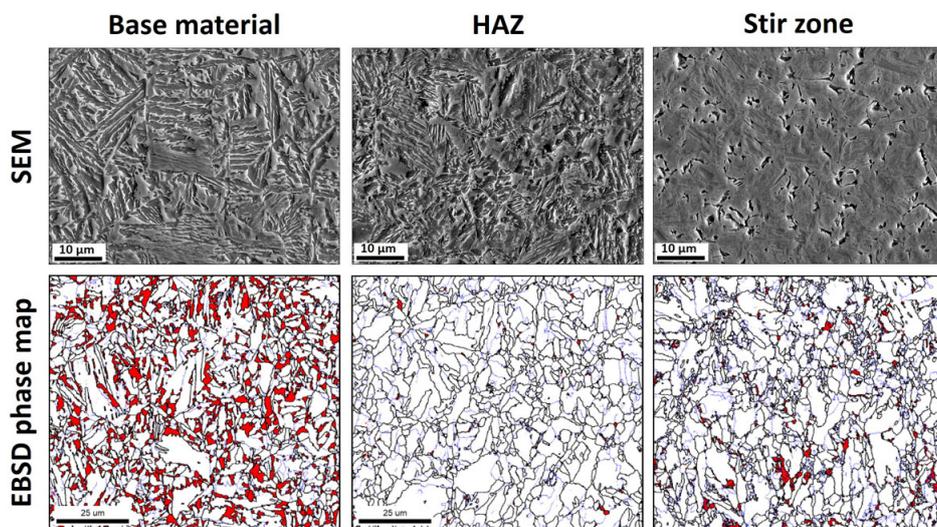
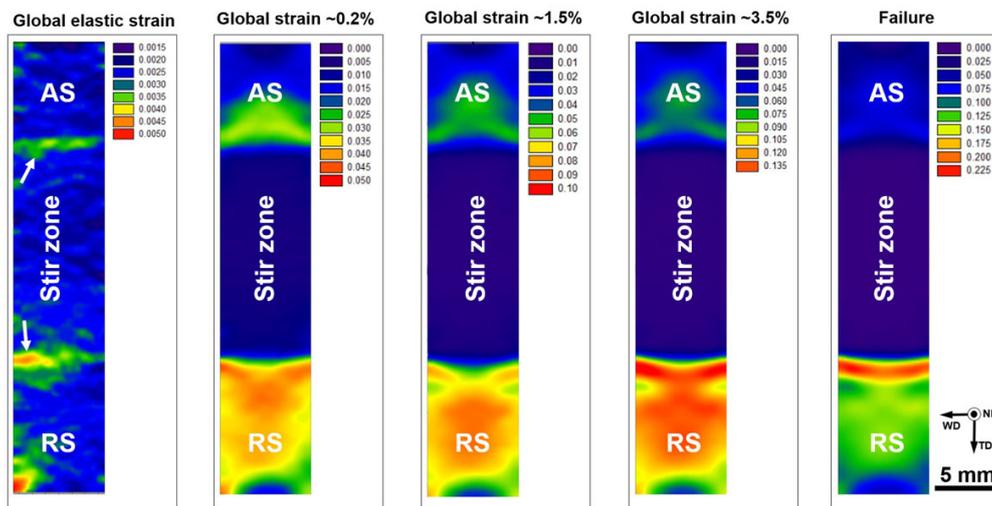


図 III-2.7.8-35 TRIP 鋼接合部の SEM 写真と EBSD 相マップ

TRIP 鋼接合部の継手引張試験を実施した結果、接合部は熱影響部で破断し、引張強度は約 1.1GPa、伸びは約 6%であった。継手引張試験過程における局部ひずみ分布変化を図Ⅲ-2.7.8-36 に示す。局所ひずみは最初に最軟化部である熱影響部で発生するが、その後母材部でもひずみが生じ、引張破断直前には再度熱影響部においてひずみが集中し、破断に至ることが示された。引張破断した母材部において、残留 γ 量が低下していたことから、母材部において TRIP 効果が発現したことが確認された。



図Ⅲ-2.7.8-36 TRIP 鋼接合部の継手引張試験過程における局部ひずみ分布変化

接合後に 400℃で 20~30 分熱処理された TRIP 鋼接合部のマイクロ組織と硬さ分布を調べた。後熱処理することで、攪拌部の硬さは母材並みに低下し、熱影響部における軟化はより進行することが明らかとなった。後熱処理により、接合部内の全ての領域において、マルテンサイトやベイナイト等の硬質相はほとんど観察されなくなり、残留オーステナイト量も減少することが示された。

本研究開発では、チタンや超ハイテン、中高炭素鋼等の難接合性材料の FSW による線接合技術を確立することを目的とし、これら難接合性材料の FSW を可能にする接合ツール材料の開発と得られた接合継手の金属組織と機械的特性との関係調査を実施した。接合ツール材の開発においては、種々の耐熱合金を設計して接合ツールとして供し、チタンや高強度鋼の FSW 過程で生じるツール摩耗挙動と摩耗の支配因子を解明することで、難接合性材料の FSW を可能にする接合ツール材料を開発することができた。また、チタンや高強度鋼の接合部における金属組織分布、金属組織と機械的特性の関係、FSW 過程における金属組織の形成機構についても明らかにすることができた。以上の成果は、各種難接合材料の FSW による線接合技術開発に貢献するとともに、また継手特性の更なる向上に向けた基礎知見を提示しており、当初の目的を達成できたと考えられる。

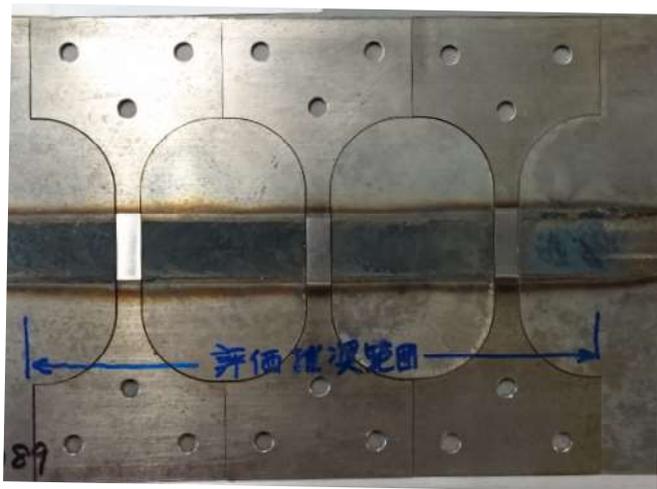
⑦接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先（大学）】

厚さ 1.4 mm の TRIP 鋼（引張強度 1.2GPa）を FSW で突合せ接合した材料の疲労特性を評価した。表Ⅲ-2.7.8-15 に接合条件を示す。接合条件 B では、FSW 直後の連続工程で 400℃×30 分加熱した後、空冷した。

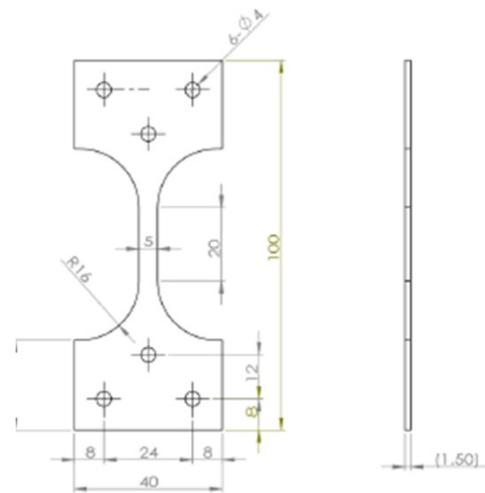
図Ⅲ-2.7.8-37 に試験片の外観写真と試験片寸法を示す。接合体の FSW 施工時の表面凹凸部を機械加工により取り除き、厚さ 1.1mm、幅 5mm、長さ 30mm の評点部を持つダンベル型の疲労試験片を放電加工により切り出した後、評点部表面を機械研磨した。

表Ⅲ-2.7.8-15 接合条件

接合条件	A	B
ツール回転速度, N (rpm)	300	400
接合速度, V (mm/min)	150	100
ツール（図Ⅲ-2.7.8-32 参照）	T12	T17
後熟処理	なし	あり



(a) 試験片外観写真



(b) 試験片寸法

図Ⅲ-2.7.8-37 試験片の外観写真と試験片寸法

一般に、高強度材の疲労強度は軸負荷下と曲げ負荷下では前者の方が低い強度を示すことから、本研究ではより信頼性の高い知見を得る目的から軸負荷下の疲労強度を評価した。疲労強度評価に当たっては、試験系のアライメントには特に配慮し、応力比は 0.4、周波数は 20Hz とし、強度のみならずき裂発生起点についても注目した。

接合試験片の疲労寿命曲線を母材単体のそれと比較して図Ⅲ-2.7.8-38 に示す。条件 A の接合体の疲労強度は母材に対して約 85%の強度を有しており、実用に耐えるものと思われる。図中の各データポイントに付記した記号（AS、RS、SZ）は疲労き裂の発生起点を示している。殆どの試験片が RS、AS のいずれかの部位で破断し、これ

ら破損部位の相違による有意な寿命差は見られなかった。ただし、攪拌部（SZ）で破断した試験片では、RS あるいは AS で破断した場合に比べて顕著な強度低下が見られる。この特徴は、後熱処理の有無に関わらず共通している。

今後は、以上の知見を最適接合条件検討にフィードバックさせ、疲労強度と信頼性向上に向けた課題に取り組む予定である。

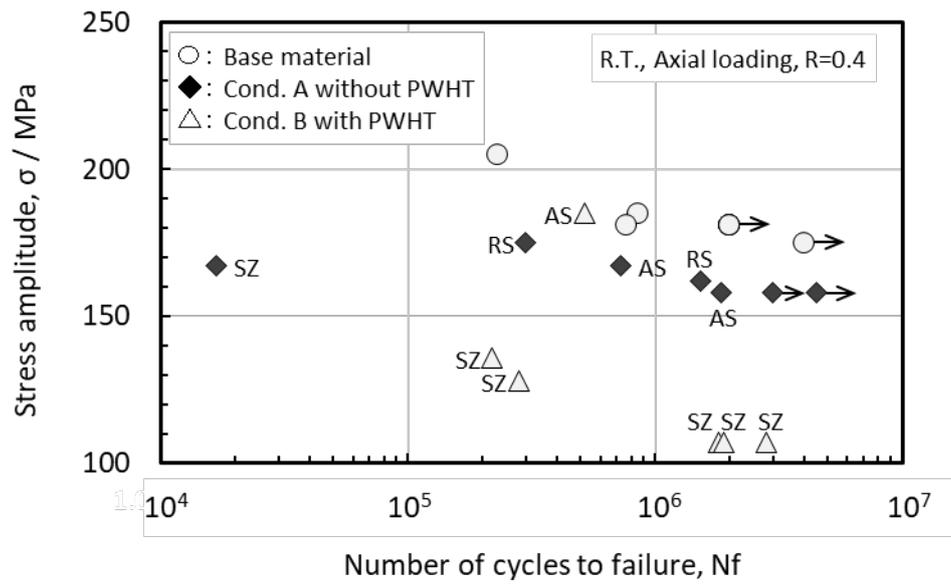


図 III-2.7.8-38 TRIP 鋼母材および接合材の疲労特性

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.8-16 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	5	0	0	0	2	0	1
2015FY	1	0	5	0	0	1	1	0	1
2016FY	2	0	5	1	0	0	3	0	1
2017FY	3	0	2	0	0	1	1	0	2
合計	7	0	17	1	0	2	7	0	5

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.8-17 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	2	0	0
2017FY	0	8	0
合計	2	8	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.9[テーマ番号 09] 水和物低温接合技術の開発

2.7.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車分野では、軽量化による燃費改善と衝突安全性向上の両面から高強度軽量素材の適用が多く検討されてきており、「強さと粘さ」のような、相反する物性を両立したハイブリッド材料を提供することが強く求められている。具体的には、高強度素材の典型である高強度鋼板と軽量素材である非鉄材料（アルミ、チタン、CFRP）の組み合わせが不可欠である。しかし、製造方法の全く異なるこれらの材料を一括形成することは困難なため、ハイブリッド化にはアセンブリ、すなわち異種材料接合技術が必要である。現行の異材接合技術としては、SPR、TOX、リベット等の機械接合技術、接着技術、スポット溶接技術、およびそれらを組合せた技術、そして、ブレイジング、摩擦圧接、摩擦攪拌接合、摩擦点接合など多種存在するが、コスト、信頼性、そして鉄と他素材の熱膨張係数差に起因する熱変形を抑制する技術に課題があり、適切な接合方法が見当たらないのが現状である。

一方、異種材料を水和物架橋で接合する技術が、（国）物質・材料研究機構ハイブリッド材料ユニット（重藤、香川ら）により提案され、半導体積層やセンサー実装等を念頭にした応用検討が行われている。同技術は、初期表面の汚染物質分子層などを除去した後の表面を、水蒸気を有する雰囲気に出しその結果生成する水和物皮膜を介して接触させ、低温で加熱し脱水縮合反応を促進することにより安定な結合を得る技術である。鉄、アルミ、チタンなどの水和物を形成し得る金属材料や、CFRPなどの一部のポリマーにおいても、架橋皮膜形成条件の明確化がなされれば、異材接合技術を達成可能と考えられる。同技術は高価な接合材料を用いることなく毒性のない水などの常在物質で架橋でき、150°C程度の比較的低温で接合できる可能性があることから、量産時の低コスト化（安価接合材料+低消費電力化）と併せ、熱膨張係数差起因の熱変形抑制の双方が期待され、日本発の世界初の新接合技術として展開する可能性がある。本テーマでは、「水和物架橋接合技術」の実用化目処を得ることを目的に、2015年度までのフィジビリティスタディを行う。

(2)位置付け、目標値

鉄とアルミ、チタン、CFRP等の異材接合技術を確立するため、以下の点をブレークスルーポイントとして掲げ、重点的な研究開発を短期間で行う。

①鉄/非鉄材料(アルミ、チタン、CFRP) 異材の水和物架橋低温接合技術開発

②界面メカニクス理論を活用した水和物架橋低温接合継手特性の評価

【第1期目標（2015年度末）】

- ・鉄とアルミ、鉄とチタン、鉄とCFRPの水和物架橋低温接合による接合界面組織、継手特性の明確化（FSJによる継手特性との比較）
- ・鉄/CFRP継手特性を改善するための指針明確化

【第2期目標（2017年度末）】

2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。

【最終目標（2022年度末）】

2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。

表Ⅲ-2.7.9-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
1-1)接合用表面素材の作製	表面凹凸状態を変えた水和物架橋接合用素材の作製（本接合に適した表面状態の把握）	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	高い継手強度が得られる表面状態の把握
1-2)接合前表面処理技術の検討	表面汚染物分子層や酸化物を減少させる表面処理技術の開発	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	継手強度確保のための前処理条件最適化
1-3)大気圧下での水和物架橋低温接合技術の検討	水蒸気などを含む大気圧雰囲気において脱水縮合反応を可能とする条件を把握	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	継手強度を発揮する接合条件の把握
1-4)水和物架橋低温接合界面の解析	得られた接合界面層の解析及び接合界面の強度試験における破壊経路の解析	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	接合メカニズム、強度確保メカニズムの解析
2-1)静的継手強度特性の評価	得られた継手の静的強度の評価及び従来技術による継手との比較	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	継手特性の把握
2-2)継手破壊様式の界面メカニクス解析	接合界面の破壊様式に配慮した界面メカニクス解析手法の提案	2015年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する。	—	異材接合界面の評価手法検討

(3)全体計画

事業項目	2014 年度				2015 年度				
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	
①異材の水和物架橋低温接合技術の開発 ・水和物架橋低温接合用素材の作製 ・表面前処理技術の検討（NIMS 再委託） ・大気圧水和物架橋低温接合技術の検討（NIMS 再委託） ・水和物架橋低温接合界面の解析 ②界面メカニクス理論を活用した水和物架橋低温接合継手特性の評価 ・継手形状の探索 ・静的継手強度特性評価 ・継手破壊様式の界面メカニクス解析（東京大再委託） ③鉄/異材・水和物架橋低温接合技術の総括・見極め		鉄/アルミ、 鉄/チタン素材試作				鉄/CFRP 素材試作			
		前処理技術検討		前処理技術検討		前処理技術検討			
		水和物架橋技術検討		水和物架橋技術検討		水和物架橋技術検討			
			界面解析		界面解析				
		継手形状探索				継手形状探索			
			継手強度評価		継手強度評価				
		界面メカニクス解析			界面メカニクス解析				
									FS 総括・見極め

(補足)

【2014 年度】

鋼/アルミの水和物架橋低温接合に取り組み、2014 年度 12 月の技術推進委員会にて、主として、表面前処理技術（Ar-FAB 法、V-UVU 法）、低温接合技術とその接合界面組織・継手強度について報告し、接合強度の向上よりも、接合界面組織に着目し、

メカニズム検討を進めるよう御指導を頂いた。

本御指導を踏まえ、2015年度は、鋼/Ti、鋼/CFRPを加えた異種材料接合に取り組み、実験結果から、『水和物架橋のための M-OOH が形成され、水和物の脱水縮合反応により、界面には、アモルファス状の酸化物層が形成された』と推定されることを報告し、得られた知見を御評価を頂いた。

しかし、FS 継続の指標として設けた継手強度レベルを得られておらず、本テーマにおける新日鐵住金による委託研究開発は 2015 年度を持って中断とする。

(4)実施体制

共同実施体制スキーム

<p>【委託先】 新構造材料技術研究組合 (新日鐵住金 (株)) テーマ名 水和物架橋低温接合技術の開発</p>
--

(5)運営管理

上記、分担にて各々の検討項目について研究開発を進めるとともに、定期的な連絡会議を開き、進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行う。さらに、必要に応じて各分室の担当者が試験立会を行うなど、協調した研究開発が進められるように進める。

(6)実施の効果 (費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度)

高価な接合材料を用いることなく毒性のない水などの常在物質の架橋、脱水縮合反応を用いた低温(150°C 程度)接合の可能性を検討したが、2016 年度に、FS 継続の指標として設けた継手強度レベルを得られておらず、本テーマにおける新日鐵住金による委託研究開発は 2015 年度を持って中断とした。ただし、本検討において得られた水和物架橋接合の新しい知見は、今後の異種金属接合の研究に役立つものと考えられる。

2.7.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.9-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
1-1)接合用表面素材の作製	表面凹凸状態を変えた水和物架橋接合用素材の作製 (本接合に適した表面状態の把握)	アルミ試験体(4種)を作成し、表面処理技術検討に提供。接合性に有利な表面状態を把握	○	
1-3)大気圧下での水和物架橋低温接合技術の検討	水蒸気などを含む大気圧雰囲気において脱水縮合反応を可能とする条件を把握	鋼/アルミ接合において水蒸気を含む N ₂ 雰囲気中で、水和物架橋接合を確認。本プロセスの実現性を示唆	○	
1-4)水和物架橋低温接合界面の解析	得られた接合界面層の解析及び接合界面の強度試験における破壊経路の解析	接合界面にはボイドが存在するが、Fe、Al のアモルファス状の架橋層(酸化物)を介した接合がなされていることを確認	○	
2-1)静的継手強度特性の評価	得られた継手の静的強度の評価及び従来技術による継手との比較	鋼/アルミ、鋼/Ti、鋼/CFRP の水和物の接合強度を	○	
2-2)継手破壊様式の界面メカニクス解析	接合界面の破壊様式に配慮した界面メカニクス解析手法の提案	界面接合強度(ひすみE開放率)の測定手法提案、鋼/Al 接合体での評価	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.9-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
革新的新構造材料 等研究開発	鋼／アルミ、／チタン、／CFRPの 水和物架橋接合を実施し、接合 面、界面の詳細評価により、水和 物架橋反応による接合と推測され た。但し、得られた各異種接合継 手強度は、FS検討の継続判断指標 としたFSJ継手と同等には至ら ず、2015年度までの検討を以って 開発中断とした。	FS継続なし。 2015までの検討を 以って開発中断	

(3)研究開発の成果と意義

(3.1) 背景・目的

自動車等の輸送機器の燃費改善には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上とともに、車両の軽量化が重要な取組課題の一つである。車両軽量化技術開発では軽量材料を適材適所に使うマルチマテリアル化と異種材料接合が必須となり、自動車としての安全性を保証する上で欠かせない接合部の性能評価技術などに関する数多くの技術課題が残されている。また、構造材料そのものの軽量化も極めて重要な課題であり、高強度、高延性、不燃性等の機能が確保された軽量構造材の開発が必要である。

自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化に向けて、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等、輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進し、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量とCO₂排出量の削減及び我が国の産業の国際競争力強化を目指す。このためには、上述したような材料を接合する技術の創出が必須である。現行の異種材料接合技術には、a) SPR、TOX、リベット等の機械的接合技術、b)溶接などの熔融を用いる手法、ならびに c)ブレージング、摩擦圧接、摩擦攪拌、摩擦点接合などの高温での拡散現象・新生面創製に基づく方法が存在する。しかしいずれの手法においても鉄との熱膨張係数差に起因する熱変形を抑制する技術に課題を残しており、接合プロセスの低温化が強く求められていた。そこで、本研究では低温での接合技術を探索することとし、水和物（ならびに親水性官能基）架橋形成によるFe、Al、Ti、CFRPの異種材料低温接合技術の確立を目的とし検討した。

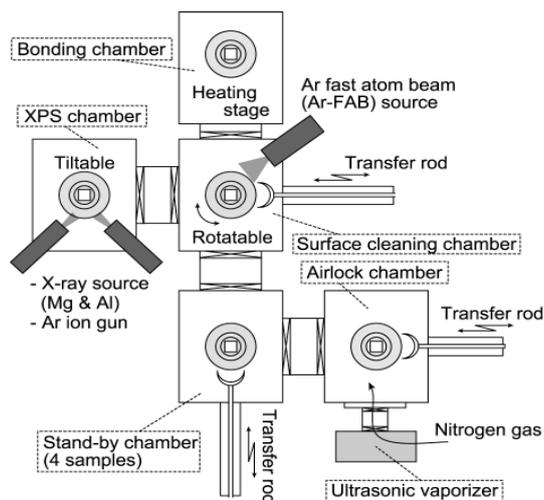
(3.2) 接合手法と各実験方法の概要

本接合実験に用いる装置の概略は以下の通りである（図Ⅲ-2.7.9-1）。接合装置は、試料導入、試料待機、Ar高速原子ビーム（Ar-FAB）照射、X線光電子分光計（以下

XPS)、接合・加熱のための各チャンバが連結され、試料が自由に行き来できる構造をしている。

試料導入チャンバには、真空紫外光照射ユニット（VUV）と、純水を霧化して体積湿度を制御しながら窒素ガスキャリアで導入するための霧化ユニットが設置されている。また、XPS チャンバは、Ar イオンビームによる深さ方向分析ならびに非破壊の角度分解法のための試料ステージを有する。

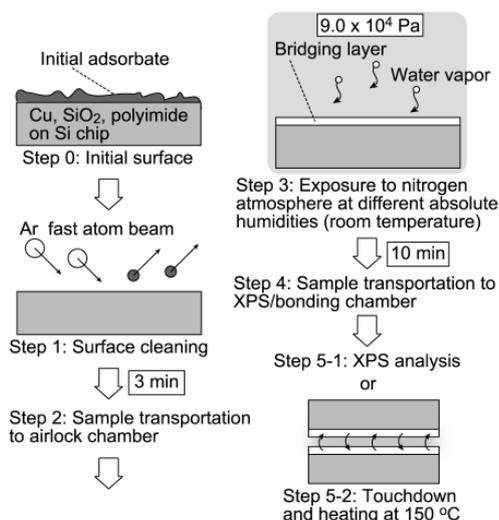
接合チャンバの圧接軸は 1000N まで荷重印加可能なほか、ステージ下部に設置したヒーターを用いて、接触・加圧中の試料を最大 400°C まで加熱できる。



図Ⅲ-2.7.9-1 接合に用いる装置の概略図

本装置を用いた接合実験のフローは以下の通りである（図Ⅲ-2.7.9-2）

- 1) Ar-FAB（もしくは VUV）による初期表面上の吸着分子除去、
- 2) 霧化純水を含む大気圧窒素雰囲気への露出、
- 3) 試料間の接触後、ただちに 150°C での加熱保持。



図Ⅲ-2.7.9-2 接合実験フロー

(3).3 接合前処理条件の検討

以下に、接合前処理条件の検討結果を示す。ここでは、事前検討の結果から、Fe、Al、Ti の検討試料として、 $10 \times 10 \text{mm}^2$ (厚さ 1mm) の板を機械的鏡面研磨したものをを用いた。

各試料とも $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 程度の領域内での平均面粗さ (Ra) は約 8nm で、目視で確認可能な面内のうねりが存在していた。

(3).3.1 Ar-FAB による接合前処理条件の検討

上記接合手法において、まず適切な表面改質条件を最適化する。ステップ 1 では、Ar-FAB 照射によりエッチングされる深さをパラメータにとり、初期表面上の汚染物質分子層を除去するのに最低限必要な条件を抽出する。これは、Ar-FAB 照射が表面洗浄に有効である反面、過剰な照射が表面粗さを増大させることが既実証されているためである。ステップ 2 では、改質後の表面を一定の体積湿度 (g/m^3) の大気圧窒素雰囲気中に露出し、金属水和物層の形成の有無を確認する。

STEP1 : Ar-FAB 照射条件の決定

Ar-FAB 照射は、Fe、Al 各試料初期表面上の吸着汚染物分子を除去し、表面全体で均一かつ水分子の吸着に有効な結合状態を確保するために行う。Fe に関しては、有機汚染物分子層ならびに金属酸化物がほぼ消滅する時点の Ar-FAB 照射エッチング深さを最適条件とする。Al に関しては、Ar-FAB の照射エネルギーと本装置のバックグラウンド真空圧では完全な酸化物除去が困難であることと、Al 酸化物への水分子吸着が可能であることが過去に実証されているので、有機汚染物分子層が除去され、均一な組成の酸化物が表出した時点を最適条件とみなす。Ar-FAB エッチング深さは、各試料とも照射後に触診式段差計で測定した。Fe 表面を順次 2~20nm まで XPS 測定したところ、2nm エッチング時で Fe ピークが顕著に現れ、O ピーク強度が減少したことから、この時点で有機汚染物分子が除去され、Fe 酸化物の層が露出したと判定できる。深さ 12nm 以上では、 $2p_{1/2} - 3/2$ スペクトルのエネルギー差 (13.1eV) が Fe の文献値と一致することが確認された。したがって、Fe 表面に対する Ar-FAB 照射により、Fe (および少量の黒鉛状 C) が露出して金属水和物 (およびカルボニルなどの親水基) が形成可能な表面が形成され、初期表面の汚染物分子除去を含めた必要エッチング深さがおよそ 12nm 以上であることが分かった。同様の評価を Al に対しても行ったところ、Al 表面に対する Ar-FAB 照射により、 Al_2O_3 が露出して金属水和物が形成可能な表面が形成され、初期表面の汚染物分子除去を含めた必要エッチング深さがおよそ 10nm 以上であることが分かった。

STEP2；架橋分子層形成の確認

Fe、Al について、3 項の検討に基づき、深さ 20nm まで Ar-FAB 照射を行った直後の表面を 15.9g/m³ の水蒸気を含む 0.9atm の高純度窒素雰囲気中に 300s 露出し、架橋分子層形成の有無を確認した。前述の通り、本来は体積湿度を変化させて架橋性皮膜形成速度を算出するべきであるが、装置構成の都合上、2015 年度は架橋層形成の確認のみを行った。

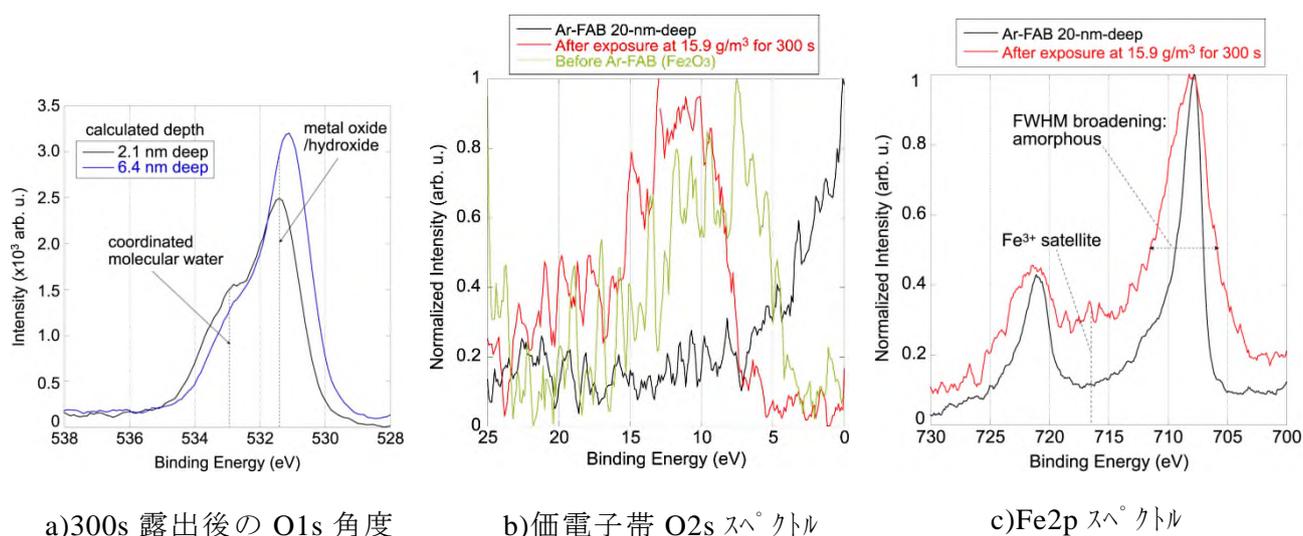
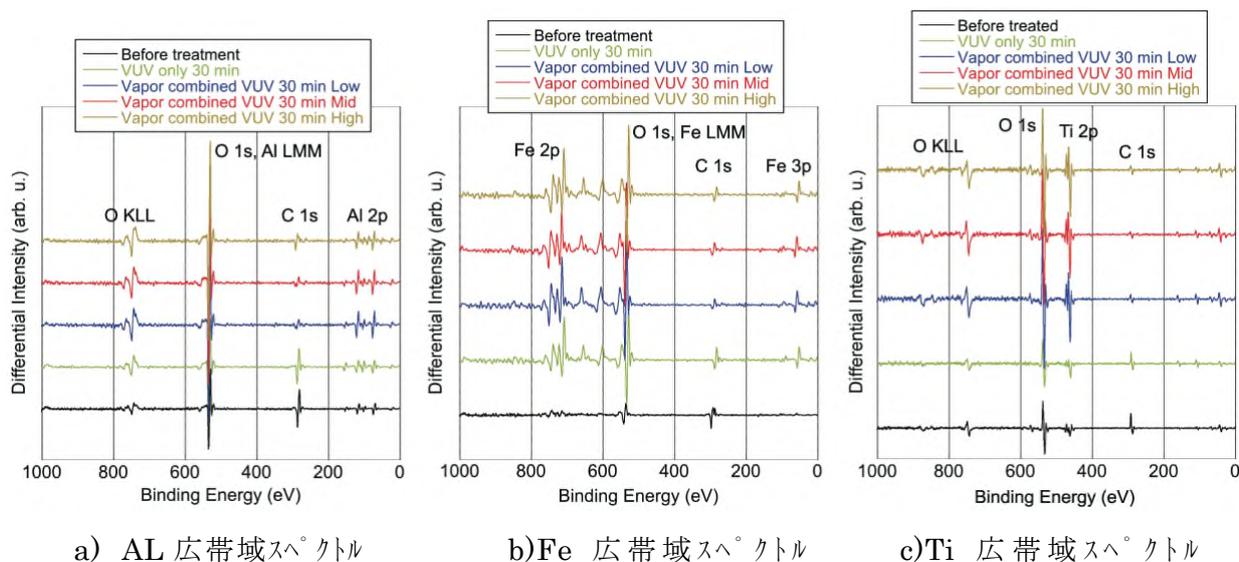


図 III-2.7.9-3 加湿窒素雰囲気(15.9g/m³)に露出された Fe 表面の化学結合状態の変化

図 III-2.7.9-3(a~c) は露出に伴う Fe 表面の結合状態変化を示す O1s、価電子帯-O2s、ならびに Fe2p スペクトルである (スキャンステップ 0.1 eV)。図 III-2.7.9-3(a) の O1s スペクトルは、水蒸気露出後の表面に対して検出角 15°と 45°で角度分解法観察を行い、金属酸化物由来のピーク強度変化から算出した深さ (膜厚) で示されている。図 III-2.7.9-3(a~c) のスペクトルは Ar-FAB 照射後と水蒸気露出後のピーク形状を比較したもので、結合状態変化を明確に示すため最大強度で平均化されている。まず、(a) の O 1s スペクトルでは、明確に分子水に対応するピークが出現している。このピークは計算値 6.4nm の深さまで存在することから、分子水を有する層は 6nm 程度の厚さを有することが確認された。(b) の価電子帯-O2s のスペクトルでは、水蒸気露出に伴いピークが高エネルギー側にシフトし、初期表面上で観察された Fe₂O₃ より高い値を示した。形成された皮膜が Fe₂O₃ より高いバンドギャップを有する構造を有すること、また、(c) の Fe2p スペクトルにおいて、アモルファス構造の混在に起因すると考えられる半値幅の広がり、Fe³⁺に対応するサテライトピークの出現が観察されたことを併せると、Fe 表面の水蒸気への露出により、当初の想定通り水分子が配位された FeOOH 皮膜が形成されたと考えられる。同様に、Al (Al₂O₃) 表面においても調査した結果、水蒸気露出により架橋能を有する AlOOH 皮膜が形成されることが判明した。

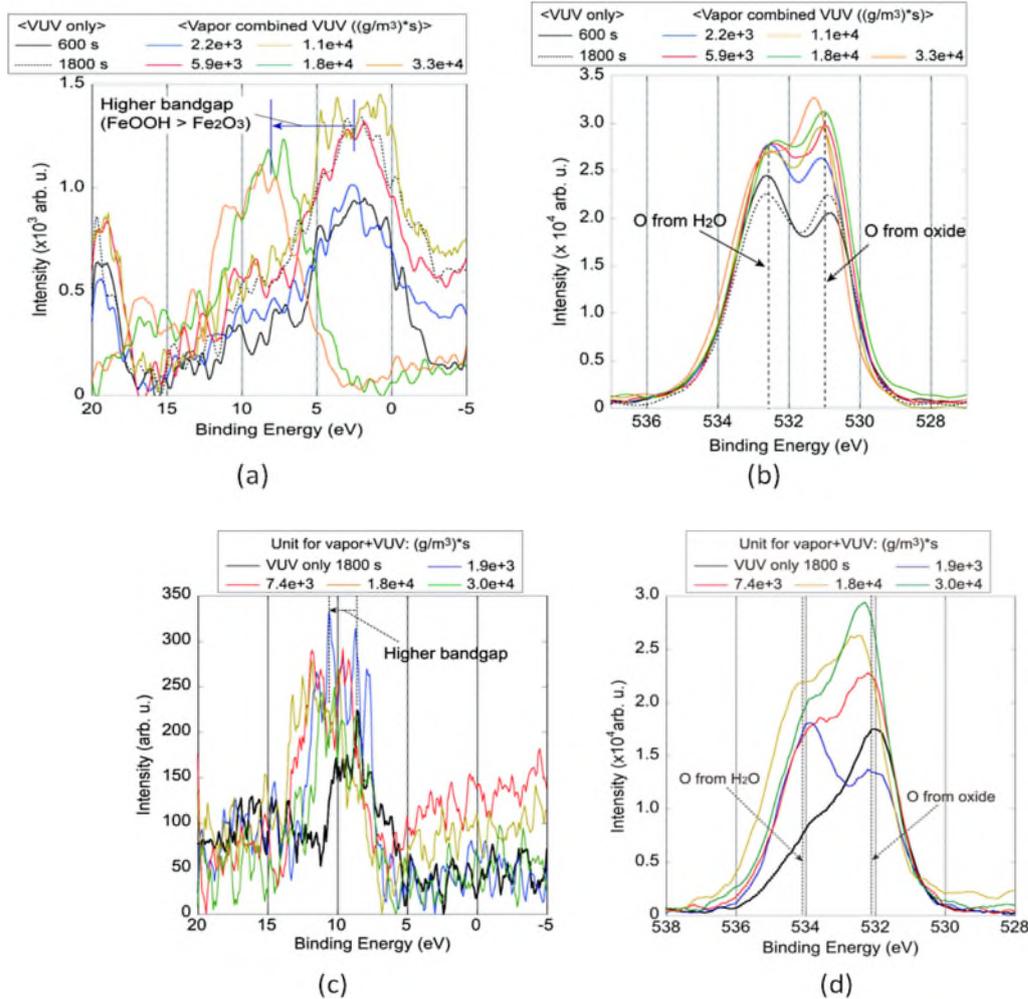
(3).3.2 VUV による接合前処理条件の検討

VUVによる表面改質手法が各材料の表面化学結合状態に及ぼす影響を、X線光電子分光計（以下XPS）を用いて評価した。Al、Fe、Tiについて、VUV照射時間を30minに固定した場合の体積湿度の影響を示す広帯域スペクトルを図III-2.7.9-4(a)-(c)に示す。元素ピークの位置と強度を強調する目的で、スペクトルは実測値を微分した状態で示した。凡例の湿度標記 low、mid、high はそれぞれ、 3.7g/m^3 、 9.9g/m^3 、 18.2g/m^3 に対応している。また、比較のため、表面改質前ならびにVUV照射のみのスペクトルも併記した。



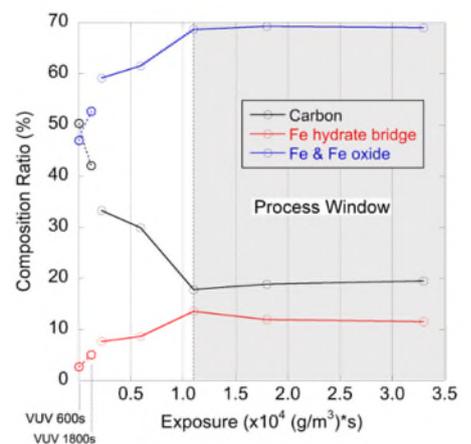
図III-2.7.9-4 Vapor combined VUV における表面結合状態の変化
(X線光電子分光スペクトル)

図III-2.7.9-4から、各材料で、vapor combined VUV手法で処理された表面では、C1sで示される有機汚染物質分子層が除去されていることがわかる（Feは炭素含有鋼なので一定量の強度が残存する）。また、VUV照射のみの試料と比較して金属の組成比が増加しており、ある程度の表面活性化効果が得られていることが確認された。さらに、O1sのスペクトルに内包される水和物の存在可能性も増加している様子が見られる。これらの効果は特にFeとTi表面において顕著であることから、表面改質条件の最適化はFe、Ti側に依存すると考えられる。この状態を詳細に分析するために、Fe、Tiそれぞれのvalence bandとO1sの狭帯域スペクトルを図III-2.7.9-5(a)-(d)に示す。狭帯域分析では、体積湿度 (g/m^3) と照射時間 (s) の積を露出量と定義し、これをパラメータに評価を行った。



図Ⅲ-2.7.9-5 Vapor combined VUV 照射量に対応した表面結合状態の変化
 (a) Fe valence band、(b) Fe O1s、(c) Ti valence band、(d) Ti O1s

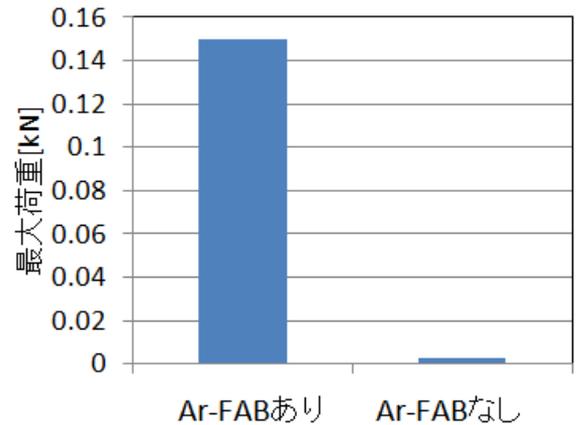
図Ⅲ-2.7.9-5(a)の、vapor combined VUV手法を適用した表面においては、自然酸化物に被覆されているVUV照射のみの表面と比較してバンドギャップの高い状態へ遷移している様子が観察されており、FeOOHが生成していると推測される。また、(b)において、酸化物由来のものより約1.5eV高い位置にピークが出現し、その強度は露出量が一定に達するまで増加する傾向が観察された。このピークはH₂Oに起因することから、水分子が配位されていることが確認された。露出量の変化にともなうFe表面の組成の変化を示した図Ⅲ-2.7.9-6から、Fe最表面の有機汚染物質分子層を除去し、金属組成比を増加させ、かつ一定量の水和物架橋皮膜を形成するために必要な露出量が、 $1.0 \times 10^4 (\text{g/m}^3) \cdot \text{s}$ 程度であることが判明した。なお、同様の挙動はTi表面でも確認された。



図Ⅲ-2.7.9-6 露出量と Fe 表面組成比の関係

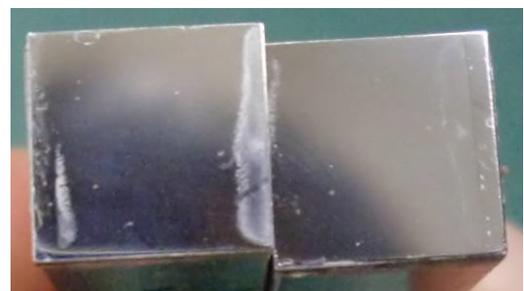
(3).4 接合強度評価、破面観察

前項までに示した条件を用いて接合実験を行った。Ar-FABによる前処理をしたもの、そうでないサンプルに対して、強度評価を試みた。強度評価方法は、Alの角棒(10x10x150mm)に市販の構造用接着材によって、サンプルを固定し、接合界面に鉛直方向の荷重を負荷し、その破断荷重を測定した。その結果を図III-2.7.9-7に示すが、現状、Al側の母材で破断するような高い継手強度は得られていない。



図III-2.7.9-7 接合強度評価結果

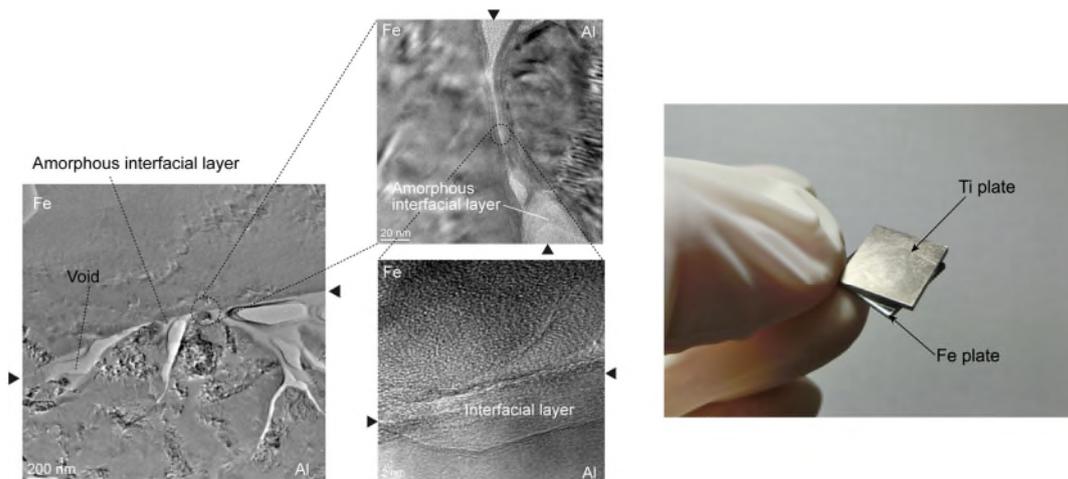
これは、図III-2.7.9-8に示しように、表面間の接触面積が小さいことに起因しており、接合強度の確保には、プロセス的な条件工夫が必要と考えられる。



図III-2.7.9-8 破面の一例

このような接合強度の課題が残存するが、接合が達成された部位においては良好な密着が達成されていることが確認されている。

図III-2.7.9-9に照射量 1.3×10^4 (g/m^3) \cdot s で接合した試料界面の透過電子顕微鏡像を示す。試験片作成を良好に行うことが可能な強度を維持するため、本試料については 200°C で接合実験を行った。(a)から、界面にはボイドが散見されるものの、接合達成部はアモルファス状の架橋層を介して密着が進行している様子が確認された。また、(b)に全体像を示したように、Fe-Tiの組合せについても一定の接合強度が得られている。

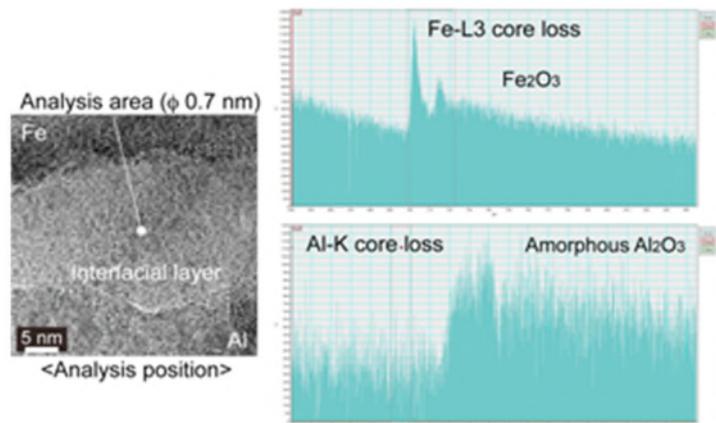


(a) 照射量 1.3×10^4 (g/m^3) \cdot s で接合された Fe-Al 試料界面の TEM 像

(b) Fe/Ti の接合体

図III-2.7.9-9 各試料の接合事例

図Ⅲ-2.7.9-10にFe-Al界面でのアモルファス状架橋層中央部における電子エネルギー損失分光測定 (EELS) スペクトルを表す。観察部位は、左図の白丸部であり、架橋層中心部分 (径 0.7nm) とした。架橋層内部からはFe、Alが検出され、その結合状態は、The EELS Databaseと照合した結果、それぞれの酸化物であることが判明した。これは、当初想定していた通りに、水和物架橋の脱水縮合が進行し、界面の構造が安定化したことを示唆する。以上のことから、vapor combined VUV手法により異種金属材料接合が達成可能であることが示された。



図Ⅲ-2.7.9-10 接合試料の界面架橋皮膜層の化学的構造を示す電子エネルギー損失分光スペクトル

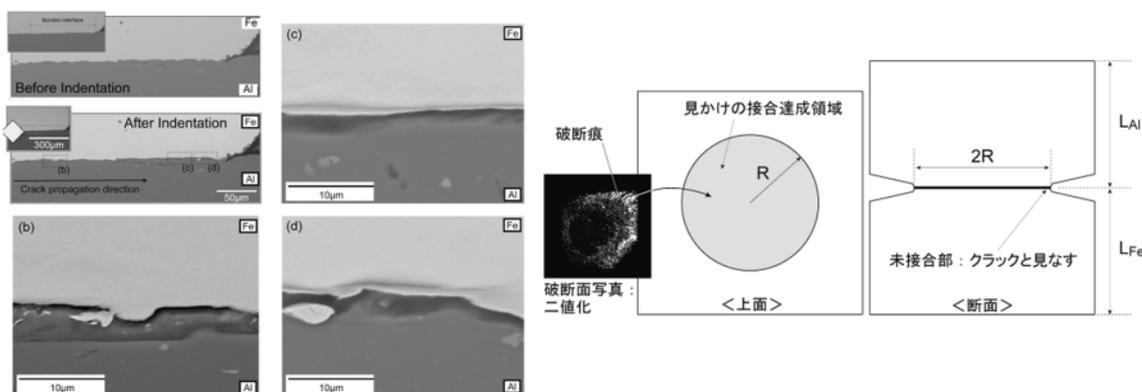
(3).5 接合界面のメカニクス評価

実試料の接合界面には表面の凹凸に起因した非接触領域が含まれるため、実際に接合が達成された部分の強度を評価する方法を考案した。図Ⅲ-2.7.9-11は、Al-Fe接合界面上にナノインデントを1kgfで圧下し、界面の剥離挙動を観察した結果である。インデント圧下後は接合界面に沿って、主にAl側で破断が進展した様子が確認された。この状態を念頭に置き、接合状態の簡単なモデル構造を図Ⅲ-2.7.9-12に示す。破断面の光学顕微鏡写真に画像処理 (2値化) を施し、破断痕跡部分を見かけの接合達成領域として、面積を抽出する。同面積の円状の接合達成領域が試料中央に存在し、未接合部を既存クラックとした構造を仮定し、引張試験においてその両端から破断が進展するものとする。クラック先端における塑性変形領域の拡大を無視し、破断に要したエネルギーが全て破断面の創製に用いられたとして、この見かけの接合領域の半径をR、Fe、Al試料片厚さをそれぞれ L_{Fe} と L_{Al} 、破断荷重をPとするとき、 σ は荷重Pを見かけの接合達成領域面積Sで割った値と定義する。この条件下で、接合部と未接合部を含む見かけの接合界面のひずみエネルギー開放率 Γ_i を考える。このような仮定のもとで、接合部と未接合部を含む見かけの接合界面のひずみエネルギー開放率 Γ_i は以下のように表現できる。

$$\Gamma_i \approx \frac{\sigma^2}{4} \left(\frac{L_{Al}}{E_{Al}} + \frac{L_{Fe}}{E_{Fe}} \right)$$

実験結果にこの式を適用して求められる Γ_i は接合部の値 Γ_{real} とある定数 Ω を用いて $\Gamma_i = \Omega \cdot \Gamma_{real}$ と表現される。ここで、 $0 < \Omega < 1$ である。また、 E_{Al} と E_{Fe} はAlとFeのヤング率で、それぞれ $7 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ならびに $1.5 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ である。Vapor combined VUV手法によ

り接合された試料については試料数がまだ少ないため、計算には便宜的に高速原子ビーム衝撃を利用した試料の引張試験結果($P=60N$)を引用した。見かけの接合面積は材料表面のうねりなどに起因して初期接触状態が異なるため均一ではないが、概ね板材試料表面の5%程度を占めることがわかっているため、 $S=5mm^2$ とした。引張試験は、板状試料をおよそ50mm長のAl角棒に接着して行われているため、 L_{Fe} と L_{Al} の解釈についてばらつきが生じるが、試料厚さが変化しても界面の破断エネルギーに顕著な違いが生じていないことを考慮し、試料と角棒を一体と見なして $L=50mm$ とすると、 Γ_i の値は約40N/mで、実際の破断面の値は0.1程度であることから、 Γ_{real} の値はおよそ400N/mと見積られる。この値は、親水化アルミ酸化物（酸化水酸化物）もしくはアルミの固体表面エネルギーと同じオーダーである。したがって、これらの単一相材料を剥離し、二つの表面を創製するための凝集仕事と同等と推測できる。なお、実験より求めた不安定剥離挙動が開始したときの荷重を利用しているために、剥離エネルギー開放率を過小評価している可能性がある。図III-2.7.9-11に示したように、界面クラックの進展は主にAl側であることから、求められた破壊エネルギーは妥当で、接合部では十分な強度が得られていると考えられる。この実験以外にも同様の接合手法を用いてTiとFe系の材料の接合を試みたところAlとFeの場合と同じような良好な接合が得られることが確認された。この場合の接合はAlとFe同様に水酸化物が支配していると考えられる。しかし、この事実を証明するためにはAlとFe系同様に剥離のエネルギー開放率を求めて評価することが必要である。



図III-2.7.9-11 ナノインデントを圧下した Al-Fe 接合界面近傍の拡大像 図III-2.7.9-12 接合達成領域の簡易モデル

(3).6 まとめ

異種金属接合プロセスの全工程を低温大気圧雰囲気で行うために、水分子含有雰囲気での真空紫外光照射を利用する手法を提案し、接合可能性を示した。解離した水分子の作用により、大気圧雰囲気での一定の表面活性化と水和物架橋形成が可能であることが明らかになり、材料表面の化学的結合状態の観察結果から、最適プロセス条件が照射量およそ 1.0×10^4 (g/m^3) \cdot sであることが明らかになった。この条件を用いてAl、Fe、Tiの接合実験を試みたところ、接合ができることは確認され、Al-Fe界面においては、水和物が脱水縮合して生成したアモルファス状の酸化物中間層を介し

て密着が進行していることが判明した。接合界面全域で接合が達成されておらずマクロ的には、十分な強度は得られていないものの、部分的には本接合での接合が達成されている。その部位の接合強度を考察する方法を考案し、Fe-Al試料の実測値に対し適用したところ、破断エネルギーがAl架橋もしくはAlの離断に要するエネルギーと同等であり、実際に接合できている部位では十分な強度が達成されていることがわかった。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.9-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2017年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ーラ ム等*
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	0	1	0	0	0	0
合計	0	0	1	0	1	0	0	0	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.9-5 特許の件数（内訳） 【2017年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願*
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.10 [テーマ番号 46] 摩擦接合共通基盤研究

2.7.10.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車の次世代構造材として期待される $C > 0.3\%$ 以上の中高炭素鋼は、冷却時に変態を伴って材料の脆化が起こるため、従来型の溶融接合法が適用できないとされる。代表的な非溶融接合の一つである摩擦攪拌接合においても、オーステナイト温度域で接合した際には、同様に変態に伴う材料の脆化が生じる。加えて、鉄鋼材料等の融点の高い材料に対しては、攪拌ツールの激しい摩耗・損傷等がネックとなり、現状では適用が困難である。このような難接合材の総合的な摩擦接合技術の確立を各機関一体となって実施するため、第二期より大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けて研究開発を開始した。第三期以降もこれを継続し、拠点の充実を図る。

(2)位置付け、目標値

本研究開発では、これらの技術課題を解決するため、コスト競争力に優れ、具体的な用途が想定された革新的接合技術を開発する。具体的には、中高炭素鋼に適用できる革新的な固相摩擦接合技術を開発する。第二期より、大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けて研究開発を開始した。

鉄鋼三社や他の再委託先等との連携を深め、線形摩擦接合、線形摩擦攪拌接合、摩擦攪拌接合、両面複動式摩擦攪拌接合等の技術を開発、高度化することにより、これまで接合が困難であった、 $C > 0.3\%$ 以上の中高炭素鋼の接合を可能にする技術を確立する。また、第三期以降継続して、拠点の充実を図る。以下に、第二期目標、第三期目標、および最終目標を示す。

【第二期目標（2017年度末）】

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手率 70%以上

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上

【第三期目標（2020年度末）】

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の 70%以上、またはスポット接合の JIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重平均値の 70%以上、十字引張荷重平均値の 70%以上

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2 mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上

【最終目標（2022年度末）】

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・ 接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の 80%以上、またはスポット接合の JIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・ 接合強度：厚み 2 mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 80%以上

【研究開発概要】

上記目標を達成するための研究開発概要を以下に示す。

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・ 両面複動式 (フラット) 摩擦攪拌接合法の開発

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合では、ツールの耐久性を向上させるため、プローブ部に応力の集中を伴うネジをつけないのが一般的である。プローブ部にネジを付与しなくても、重ね接合において、上下の流れを発生させることのできる両面複動式摩擦攪拌接合法を開発する。また、当該装置を用いて、新規摩擦接合技術の開発にも取り組む。

- ・ 重ね摩擦攪拌接合法の開発・最適化

厚さ 1.5mm 程度の共通中高炭素鋼試料などを活用し、重ね摩擦攪拌接合を実施し、2020 年度までに、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70% 以上を達成する。

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・ 線形摩擦攪拌接合法の開発

線形摩擦接合法の原理を活用し、界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦攪拌接合法を開発し、薄平板以外の形状の部材の接合に取り組む。これまでの摩擦による軟化・バリの排出に伴う新生面の形成に伴う接合ではなく、強ひずみ加工に伴う再結晶温度の低下によって、低温で接合できる技術を開発するとともに、新規概念に基づく新たな接合技術の開発にも取り組む。

- ・ 突合せ摩擦攪拌接合法の開発・最適化

厚さ 2mm 程度の共通中高炭素鋼試料などを活用し、突合せ摩擦攪拌接合を実施し、2020 年度までに、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を達成する。

(c) マルチマテリアルの摩擦接合

本拠点で、これまで蓄積してきた摩擦接合技術を異種材料の接合へ展開し、マルチマテリアル継手の強度・靱性の評価や残留応力の推定を行う技術を確立する。

以下の表 III-2.7.10-1 に、上記に示した研究開発概要について、具体的な研究開発項目、研究開発目標、および根拠を示す。

表Ⅲ-2.7.10-1 研究開発目標と根拠

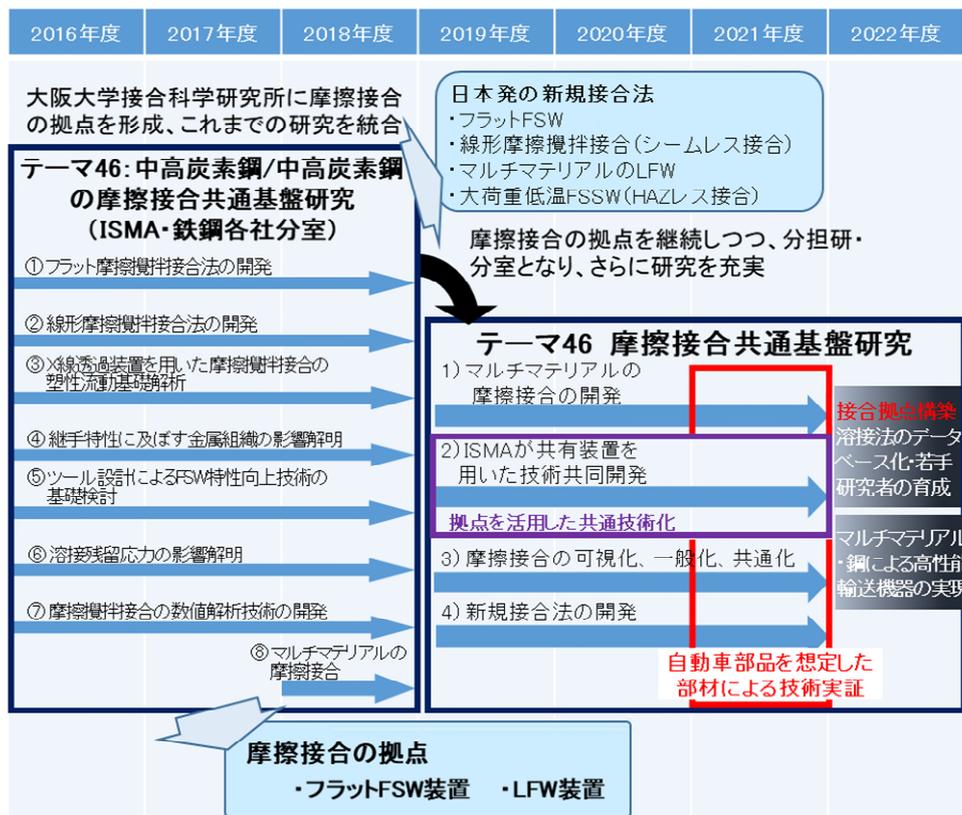
研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
研究テーマ目標	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.5mm、強度1.2GPa級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率70%以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2mm、強度1.2GPa級中高炭素鋼で、母材強度の70%以上</p>	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の70%以上、またはスポット接合のJIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重平均値の70%以上、十字引張荷重平均値の70%以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、母材強度の70%以上</p>	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の80%以上、またはスポット接合のJIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、母材強度の80%以上</p>	<p>継手強度の評価基準として、JIS規格相当を採用。</p>
①両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)	装置を導入し、強度1.2GPa級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率70%以上の手法確立。	両面複動式摩擦攪拌接合装置を用い、中高炭素鋼の点接合を行い、当該接合技術の優位性を実証する。	強度1.5GPa級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率80%以上を得る手法を確立。	継手強度の評価基準として、JIS規格相当を採用。
②線形摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)	厚さ5mm以下の強度1.2GPa級中高炭素鋼で、母材強度の70%以上を得る。	線形摩擦接合法の装置を用いて、実用化に資する複雑な断面形状を有する部材での接合の実証を行う。	厚さ2mmの強度1.5GPa級中高炭素鋼で、母材強度の80%以上を得る手法を確立。	継手強度の評価基準として、JIS規格相当を採用。
③X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析 (JFEスチール、阪大)	攪拌部の塑性流動に関する基礎データを採取するとともに、ツール形状の影響を調査する。	両面複動式摩擦攪拌接合装置を用いた点接合方法に関し、塑性流動挙動をその場観察することで接合メカニズムを解明し、中高炭素鋼に対する接合方法を確立する。	高次摩擦接合プロセスにおける塑性流動解析。	塑性流動解析による現象解明。

④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明（日本製鉄、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先）	S35C、S45C、S55Cなどの共通中高炭素鋼試料を用いて摩擦攪拌接合を実施し、継手特性の評価を行い、組織等との関連を調査する。	強度 1.5GPa 級の中高炭素鋼を接合する技術を開発し、母材強度の 70%以上を得る。	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす金属組織の影響の把握。	摩擦接合の基礎特性把握。
⑤ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討（神戸製鋼所、阪大、再委託先）	ツール形状を最適化し、最適なツール材質を検討する。	中・高炭素鋼用に新規提案した形状のツールについて、被接合材およびツールの温度制御等による接合プロセスの観点から、寿命の向上効果を検証する。	ツール設計方針の明確化。	継手特性向上。
⑥溶接残留応力の影響解明（日本製鉄、阪大、再委託先）	摩擦攪拌接合の実継手との整合性を検証し、CAE 解析精度の向上を図る。	摩擦攪拌接合解析の大規模高速解析手法により、ツールに発生する過渡応力および母材に発生する欠陥の発生メカニズムについて検討する。	ツール破損条件および母材欠陥条件を考慮することにより、1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性およびツールに及ぼす諸因子の影響について評価する。	継手の信頼性の確保。
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（日本製鉄、阪大、再委託先）	摩擦攪拌接合を実施するとともに、粒子法を用いた提案モデルの精度を向上させ、塑性流動を予測する。	ツール形状や余熱等のプロセスパラメータも含めたモデル解析を行い、鉄鋼材料に対する摩擦攪拌接合プロセスの予測と最適化が可能な計算モデルの構築を目指す。	新接合プロセスのシミュレーション手法の構築。	プロセスメカニズムの解明。
⑧マルチマテリアルの摩擦接合（ISMA、阪大）	—	データを蓄積し、マルチマテリアルの継手の強度、靱性の評価方法の検討を行う。	マルチマテリアルの摩擦接合技術の確立。	プロセスメカニズムの解明。

(3)全体計画

2017年度末までに高次接合法（線形摩擦攪拌接合法、フラット摩擦攪拌接合法）装置を導入し、日本発の新規接合法を多く開発するとともに、大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けた。2019年度以降、テーマ名を摩擦接合共通基盤研究とし、新規接合法の開発を継続しながら、マルチマテリアルの摩擦接合技術の開発を開始した。また、導入した装置を用いて拠点を活用した共通技術化を行ない、2021年度は自動車部品を想定した部材による技術実証に取り掛かり、最終的に接合拠点構築を図る。

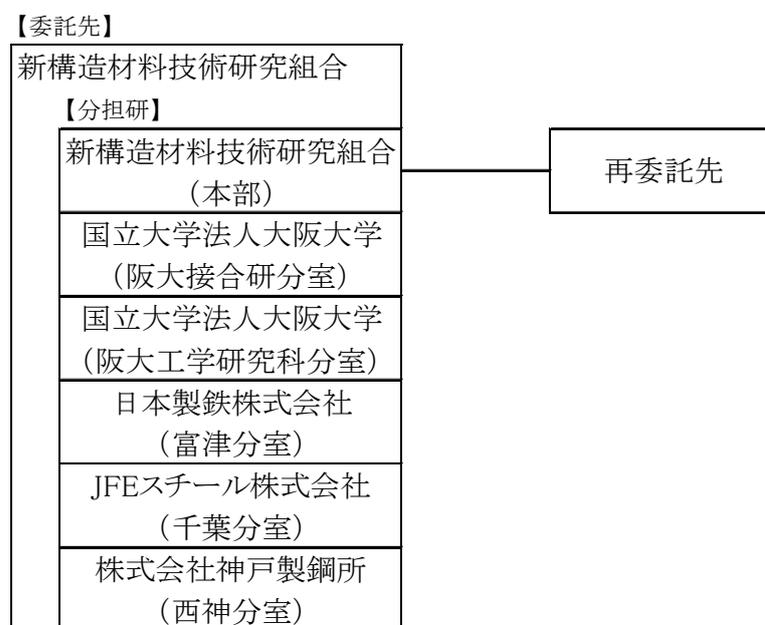
図Ⅲ-2.7.10-1に全体計画を示す。



図Ⅲ-2.7.10-1 全体計画

(4)実施体制

第二期より大阪大学接合科学研究所に新拠点を設け、鉄鋼三社、ISMA（本部）及び他の再委託先の四大学との連携を深め、中高炭素鋼に適用できる革新的な固相摩擦接合技術の研究開発を開始した。さらに 2019 年度から、大阪大学が分担研となり、よりいっそう研究開発を充実させている。図Ⅲ-2.7.10-2 に実施体制のまとめを示す。



図Ⅲ-2.7.10-2 実施体制

(5)運営管理

委託先、再委託先が一同に介し、研究推進合同会議を年 4 回開催し、本会議にて、最新の技術進捗、実験計画の細目確認を連携しながら運営を実施する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

CO₂ 排出量の削減と衝突安全性能向上の観点から、自動車部品の軽量化が求められ、高張力鋼の車体部品への適用は増加傾向にある。特に、980MPa を超える超ハイテンは、部品への使用が年々増加し、2030 年頃には部品への使用比率について約 20% となる予想もみられる。本プロジェクトで開発を目指す革新的な接合技術は、自動車ユーザが、1.5GPa 以上の中高炭素鋼を信頼し、安心して使うことのできる革新的な接合技術であり、国内外での中高炭素鋼の拡販やその実用化に大いに貢献するものである。また、本技術の中高炭素鋼への適用により、これまでに使用されているハイテン鋼（低炭素鋼合金ハイテン鋼）を『高炭素低合金ハイテン鋼』に置き換えることが可能となり、製鉄業における CO₂ 排出量を大幅に低減させることができる。

2.7.10.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.10-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
研究テーマ目標	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の70%以上、またはスポット接合のJIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重平均値の70%以上、十字引張荷重平均値の70%以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、母材強度の70%以上</p>	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 厚み1.4mm、強度1.5GPaの鋼板である1.5QT材を対象に重ね摩擦攪拌接合条件の影響を調査し、FSWの回転速度を600rpm、送り速度を300mm/minにすることで、母材強度の71.3%引張せん断応力を得ることができた。</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の鋼板である1.5QT材に対して摩擦攪拌接合を行い、引張強度1105Mpaの継手得た。また、強度1.5GPaの鋼板(500HV)である1.5QT材を対象に突合せ線形摩擦接合を実施し、最軟化部の硬度が350HV(1050MPa相当)を達成した。</p>	○	
①両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)	両面複動式摩擦攪拌接合装置を用い、中高炭素鋼の点接合を行い、当該接合技術の優位性を実証する。	超硬合金製複動式ツール及び窒化珪素製複動式ツールの適用を検討し、中高炭素鋼板のフラット摩擦攪拌点接合について接合条件の最適化を進め、顕著な凹部のない無欠陥のフラットFSSW接合部を得ることに成功した。	○	

<p>②線形摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)</p>	<p>線形摩擦接合法の装置を用いて、実用化に資する複雑な断面形状を有する部材での接合の実証を行う。</p>	<p>種々の部材での接合技術について基礎データを取得するとともに、複雑な断面形状を有する部材を用いた接合に成功した。</p>	<p>○</p>	
<p>③X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析 (JFE スチール、阪大)</p>	<p>両面複動式摩擦攪拌接合装置を用いた点接合方法に関し、塑性流動挙動をその場観察することで接合メカニズムを解明し、中高炭素鋼に対する接合方法を確立する。</p>	<p>複動式ツールを用いてショルダー部とプローブ部の回転を独立して制御し、攪拌部の形成に及ぼすショルダー部とプローブ部の影響を調査した結果、FSWにおける各部位の主な役割が明らかにするとともに、両面複動式摩擦接合において、インサート材を用いて接合の進行状況を明瞭に観察することに成功した。</p>	<p>△</p>	
<p>④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明 (日本製鉄、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先)</p>	<p>強度 1.5GPa 級の中高炭素鋼を接合する技術を開発し、母材強度の 70% 以上を得る。</p>	<p>厚み 1.4mm、強度 1.5GPa の鋼板である 1.5QT 材の重ね摩擦攪拌接合継手において、母材強度の 71.3% の引張せん断応力を達成した。 また、厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の鋼板である 1.5QT 材の突合せ摩擦攪拌接合継手において、1105MPa の引張強度を達成した。</p>	<p>○</p>	
<p>⑤ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討 (神戸製鋼所、阪大、再委託先)</p>	<p>中・高炭素鋼用に新規提案した形状のツールについて、被接合材およびツールの温度制御等による接合プロセスの観点から、寿命の向上効果を検証する。</p>	<p>ツール形状については最適な候補形状を既に得ており、複数の素材を用いて、その性能を確認した。</p>	<p>◎</p>	

⑥溶接残留応力の影響解明（日本製鉄、阪大、再委託先）	摩擦攪拌接合解析の大規模高速解析手法により、ツールに発生する過渡応力および母材に発生する欠陥の発生メカニズムについて検討する。	解析手法の大規模・高速化により、ツール周りの詳細な流動現象およびそれに伴いツールに発生する応力の詳細解析を実現した。また、異材接合時のツールに発生する応力の詳細な解析を実現した。さらには、母材に発生する欠陥評価手法を提案した。	○	
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（日本製鉄、阪大、再委託先）	ツール形状や余熱等のプロセスパラメータも含めたモデル解析を行い、鉄鋼材料に対する摩擦攪拌接合プロセスの予測と最適化が可能な計算モデルの構築を目指す。	異材接合に関して継手形状の影響を確認するため重ね継手モデルを作成し、アルミニウムと鋼材の異材接合における材料の流動と熱の流れを予測した。	○	
⑧マルチマテリアルの摩擦接合（ISMA、阪大）	データを蓄積し、マルチマテリアルの継手の強度、靱性の評価方法の検討を行う。	重ね継手の強度の実測結果と FEM モデルの計算結果と傾向が一致した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.10-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
研究テーマ目標	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 厚み 1.4mm、強度 1.5GPa の鋼板である 1.5QT 材を対象に重ね摩擦攪拌接合条件の影響を調査し、引張せん断応力で母材の 71.3%を達成した。</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 厚み 1.4mm、1.5QT 材を対象に突合せ摩擦攪拌接合条件の影響を調査し、FSW の回転速度を 800rpm、送り速度を 400mm/min にすることで引張強度 1105MPa (母材の 73.7%) を達成した。 また、強度 1.5GPa の鋼板 (500HV) である 1.5QT 材を対象に突合せ線形摩擦接合を実施し、軟化部の硬度低下を 150HV 以下とし、軟化部硬度を 350HV (1050MPa 相当) を達成した。</p>	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の 80%以上、またはスポット接合の JIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 2mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 80%以上</p>	達成見込み
①両面複動式 (フラット) 摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)	超硬合金製複動式ツール及び窒化珪素製複動式ツールの適用を検討し、中高炭素鋼板のフラット摩擦攪拌点接合について接合条件の最適化を進め、顕著な凹部のない無欠陥のフラット FSSW 接合部を得ることに成功した。	強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率 80% 以上を得る手法を確立。	達成見込み

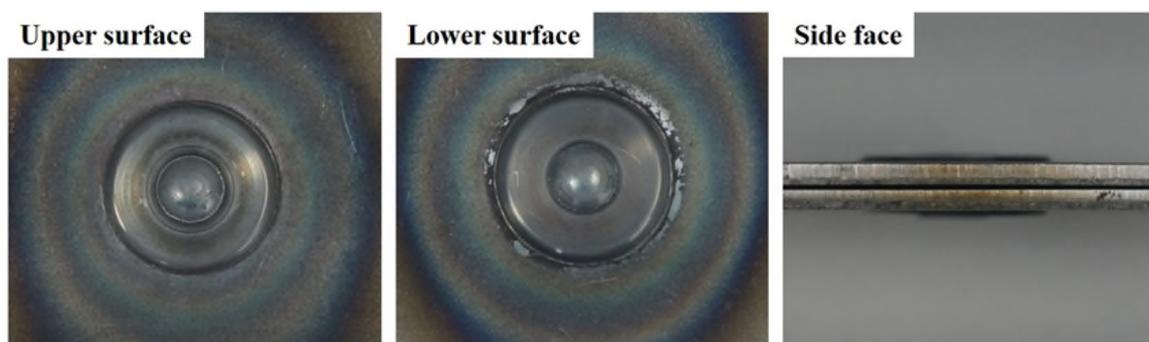
<p>②線形摩擦攪拌接合法の開発 (ISMA、日本製鉄、阪大)</p>	<p>強度 1.5GPa の鋼板 (500HV) である 1.5QT 材を対象に突合せ線形摩擦接合を実施し、軟化部の硬度低下を 150HV 以下とし、軟化部硬度 350HV (1050MPa 相当) を達成した。</p>	<p>厚さ 2mm の強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 80% 以上を得る手法を確立。</p>	<p>達成見込み</p>
<p>③X 線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析 (JFE スチール、阪大)</p>	<p>複動式ツールを用いてショルダー部とプローブ部の回転を独立して制御し、攪拌部の形成に及ぼすショルダー部とプローブ部の影響を調査した結果、FSW における各部位の主な役割が明らかにするとともに、両面複動式摩擦接合において、インサート材を用い接合の進行状況を明瞭に観察することに成功した。</p>	<p>高次摩擦接合プロセスにおける塑性流動解析。</p>	<p>達成見込み</p>
<p>④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明 (日本製鉄、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先)</p>	<p>厚み 1.4mm、強度 1.5GPa の鋼板である 1.5QT 材の重ね摩擦攪拌接合継手において、母材強度の 71.3% の引張せん断応力を達成した。 また、厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の鋼板である 1.5QT 材の突合せ摩擦攪拌接合継手において、1105MPa の引張強度を達成した。</p>	<p>1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす金属組織の影響の把握。</p>	<p>達成見込み</p>
<p>⑤ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討 (神戸製鋼所、阪大、再委託先)</p>	<p>ツール形状については最適な候補形状を既に得ており、複数の素材を用いて、その性能を確認している。</p>	<p>ツール設計方針の明確化。</p>	<p>達成見込み</p>
<p>⑥溶接残留応力の影響解明 (日本製鉄、阪大、再委託先)</p>	<p>解析手法の大規模・高速化により、ツール周りの詳細な流動現象およびそれに伴いツールに発生する応力の詳細解析を実現した。さらに、異材接合時のツールに発生する応力の詳細な解析を実現するとともに、母材に発生する欠陥評価手法を提案した。</p>	<p>ツール破損条件および母材欠陥条件を考慮することにより、1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性およびツールに及ぼす諸因子の影響について評価する。</p>	<p>達成見込み</p>
<p>⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発 (日本製鉄、阪大、再委託先)</p>	<p>FSW のモデル化は完了。材料物性値予測手法を検討中。</p>	<p>新接合プロセスのシミュレーション手法の構築。</p>	<p>計算モデルの高解像度化および材料物性値の取得ができれば可能</p>

⑧マルチマテリアルの摩擦接合 (ISMA、阪大)	重ね継手の FEM モデルにおいて、実験結果と計算結果の傾向が一致することを明らかにした。	マルチマテリアルの摩擦接合技術の確立。	達成見込み
--------------------------	---	---------------------	-------

(3)研究開発の成果と意義

①両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発

ショルダーとプローブの位置及び回転を独立制御できる複動式ツールを被接合領域の上下に配置し、これら2組の複動式ツールを連動させることで接合部の表面及び裏面がフラットとなる「フラット FSSW」を開発した。接合部をフラットとすることで意匠的に優れるだけでなく、継手の強度及び信頼性を大幅に向上させることができる。厚さ 2mm、幅 50mm 及び長さ 150mm の鋼板を供試材としてフラット FSSW 接合を施したところ、超硬合金製の複動式ツールではツールの破損や変形等により、点接合部を形成することができなかった。これに対し、ツール材質を種々検討した結果、窒化珪素製のツールを用いて接合条件を最適化することで、図Ⅲ-2.7.10-3 に示すような顕著な凹部のない無欠陥のフラット FSSW 接合部を得ることに成功した。



図Ⅲ-2.7.10-3 フラット FSSW 接合部の外観写真

②線形摩擦攪拌接合法の開発

導入した線形摩擦接合装置を用い、中炭素鋼において、印加応力と材料強度の温度依存性の関係から接合温度を制御できることを明らかにし、高印加圧力により接合温度が A_1 点以下になる低温での LFW 法を開発した^{1,2)}。板厚 2.6mm、中炭素鋼 S45C を強度 1.5GPa の鋼板 (500HV) に調質した鋼板を対象に、この低温 LFW 法を用いて突合せ接合を実施した結果、図 III-2.7.10-4 に示すように最軟化部の硬度を 350HV (1050MPa 相当) とすることに成功した。

また、板厚 2mm 中炭素鋼 S45C を用い、実用化に資する複雑な断面形状(コの字形状)に対して、低温 LFW 法を用いて突合せ接合を実施した結果、図 III-2.7.10-5 に示すように、健全な継手を得ることに成功した。

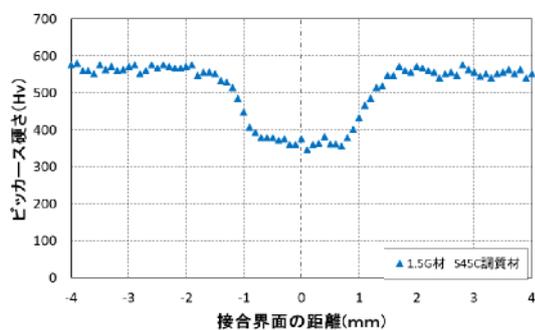


図 III-2.7.10-4 LFW 継手のビッカース硬さ試験結果

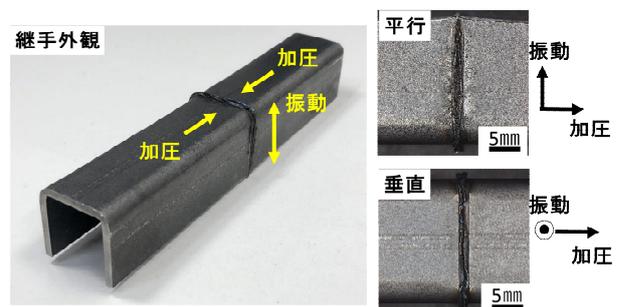


図 III-2.7.10-5 コの字型部材の低温 LFW 継手外観

③X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動解析

我々が提案しているフラット摩擦攪拌点接合 (フラット FSSW) では、プローブの引抜に起因する凹部が形成されず、バリの発生も抑制されるため、接合条件によっては従来の摩擦攪拌点接合よりも高い引張せん断強さを得ることができるが、その接合機構は明らかになっていない。そこで、高輝度 X線透過装置を用いてフラット FSSW プロセスの直接観察を試みた。図 III-2.7.10-6 に示す配置で 2mm 厚の AZ31 マグネシウム合金板材のフラット FSSW を観察したところ、被接合界面に 0.1mm 厚の銅箔を挿入することで、接合の進行状況を明瞭に観察することに成功した。図 III-2.7.10-7 に示すように、上側プローブの挿入によって被接合界面は板面に対して垂直に押し下げられた後、下側プローブの上昇によって板面に対して水平に押し戻されることが明らかとなり、当該プロセスによって強固な接合界面が形成されるものと考えられる。

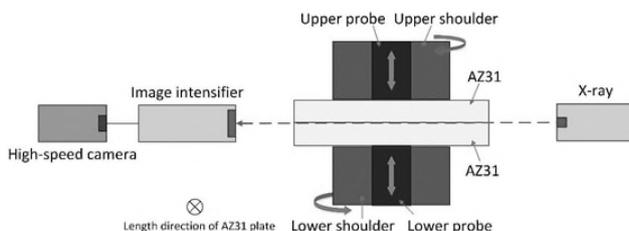


図 III-2.7.10-6 高輝度 X線透過装置を用いた直接観察の模式図

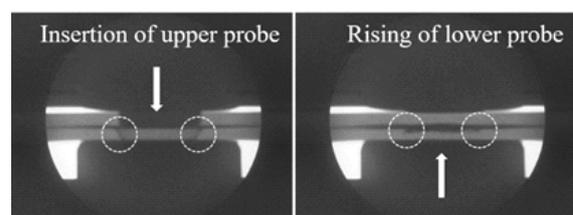


図 III-2.7.10-7 フラット FSSW の X線透過像

④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明

重ね摩擦攪拌接合試験には ISMA 共通鋼板として作製した C 量 0.45%、引張強度 1500MPa 級、板厚 1.4mm の 1.5QT 鋼を用いた。この鋼板を幅 125mm×長さ 150mm に切出し、2 枚の板を重ね代 40mm として、摩擦攪拌接合にて重ね継手を作製した。接合条件は加圧力を 35kN としつつ、ツール回転速度・送り速度を 1000rpm-300mpm、600rpm-300mpm、300rpm-150mpm の 3 水準変化させた。継手特性の評価には、摩擦攪拌接合した継手から 40mm の短冊を切出し、引張せん断強度を評価した。

図 III-2.7.10-8 に引張せん断強度の評価結果を示す。摩擦攪拌接合の条件が 1000rpm-300rpm では引張せん断強度は 56.4kN だった。これは 1.5GPa 級鋼板を厚さ 1.4mm×幅 40mm とした時の荷重 84kN に対して、67.1%と中間目標に対して未達だった。しかしながら、ツール回転速度と送り速度の比が比較的小さな 600rpm-300mpm もしくは 300rpm-150mpm では、引張せん断強度がそれぞれ 59.9kN、58.9kN で、母材強度に対してそれぞれ 71.3%、70.2%と中間目標の 70%を超える継手特性が確保できた。

次に、板厚 1.4mm の共通中高炭素鋼試料 S35C、1.5 QT を用いて作製した突合せ摩擦攪拌接合継手の断面マクロ組織を観察し鋼板成分・接合条件が接合部の組織形成に及ぼす影響を調査した。S35C は C を 0.38mass%含有した引張強度 1.3GPa の焼入れ・焼戻し鋼、1.5 QT は C を 0.46mass%含有した引張強度 1.6GPa の焼入れ・焼戻し鋼であり、焼戻しマルテンサイトを主体とした組織を示す。接合に用いたツールは窒化ケイ素製でプローブ長 1.2mm、ショルダー径 12mm であった。回転数 400、800rpm、接合速度 400mm/min により突合せ接合を行った。

回転数400rpmにおいては、攪拌部は硬さがHV400~500となり母材の焼戻しマルテンサイトから更に炭化物析出が進んだフェライト相とマルテンサイト相から成る二相組織が確認された。接合時にAc1点以上、Ac3点以下の二相域に加熱されることで、一部逆変態したオーステナイトがマルテンサイトに再び変態することで得られた組織と考えられる。一方、回転数800rpmにおいては、攪拌部は硬さがHV600程度となり100%マルテンサイト組織が確認された。これより、接合時にAc3点以上のオー

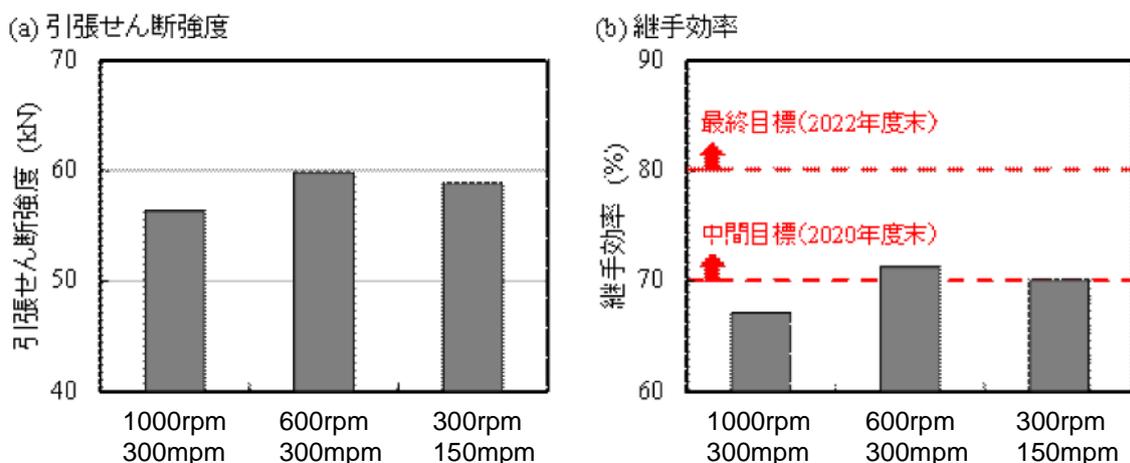
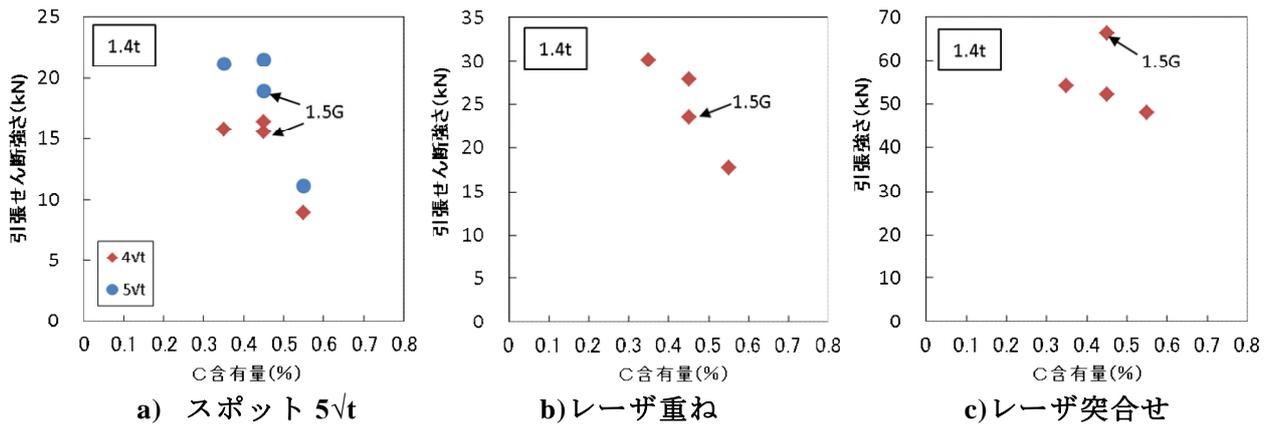


図 III-2.7.10-8 1.5GPa 級鋼 (1.5QT) の重ね摩擦攪拌接合材の

(a)引張せん断強度および(b)継手効率



ISMA 共通鋼板 1.4t (A : 0.35C-1.2G、B : 0.45C-1.2G、C : 0.55C-1.2G、D : 0.45C-1.5G)

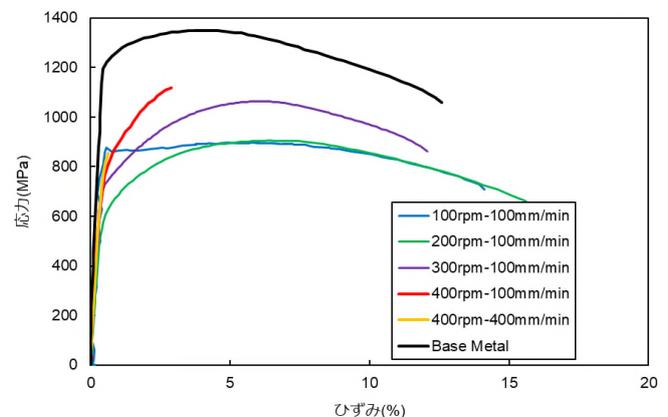
図Ⅲ-2.7.10-9 ISMA 共通鋼板の継手強度試験結果

ステナイト単相域に加熱されることで、完全にオーステナイトへ逆変態した後、マルテンサイトへ変態した組織と考えられる。S35C、1.5QTを用いて接合速度400mm/min、回転数800rpmとして作製した継手の引張強度を評価した。引張強度の平均値は、S35Cでは1077MPa、1.5QTでは1105MPaとなり、いずれの場合も継手の引張強度は母材の引張強度の70%以上となり、第三期目標である強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で母材強度の70%以上を達成した。

加えて、ISMA 共通鋼板 1.4mm 厚 4 鋼種 (A、B、C : 1.2G-0.35~0.55%C、D : 1.5G-0.45%C) について抵抗スポット溶接とレーザ溶接継手を作製し、その引張せん断強度、引張強度を評価した。幅 30mm×長さ 150mm の板材を用いてスポット溶接ではナゲット径を $5\sqrt{t}$ (t:板厚)、レーザ溶接では、重ね溶接と突合せ溶接でそれぞれ幅 30mm の貫通溶接が得られるように溶接条件を調整した継手試験の結果を図Ⅲ-2.7.10-9 に示す。

同一母材引張強さ (1.2G) で C 量のみが異なる A~C 材では、C 量の増加に伴いスポット溶接、レーザ溶接重ねの引張せん断強さ、突合せ引張強さの低下が認められた。また 0.45C 材同士で母材強度が異なる場合、母材破断となったレーザ突合せでは母材強度の大小が継手強度の大小に反映された結果となった。

最後に、摩擦攪拌接合装置を用い、供試材として引張強度を 1400MPa 程度に調質した厚さ 1.4~2.0mm の中炭素鋼 JIS-S55C の板材を、回転速度 100rpm~400rpm、接合速度 100mm/min~400mm/min の条件の範囲で突合せ接合を実施した。各接合条件で得られた継手の引張試験を実施した結果を図Ⅲ-2.7.10-10 に示す。実施した条件中で、回転速度が



図Ⅲ-2.7.10-10 各接合条件で得られた継手の引張試験結果

大きい条件で引張強度が大きくなる傾向が示され、300rpm-100mm/min および 400rpm-100mm/min の条件では、母材比 70%以上の継手効率が実現された。ここで、回転速度が 400rpm の条件に対し 300rpm の条件では引張強度はやや劣るものの、延性には優位な結果が示された。両者の接合条件の違いが継手特性の相関解明といった観点から、現在、EBSD 解析を主体とした継手組織調査を継続中である。

⑤ ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討

ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討として、まず、アルミニウム合金を用いたモデル実験を行い、FSW ツール各部の働きを明らかにした。その結果から、鉄鋼用 FSW ツールとして、長寿命化を図るためプローブ先端を半球状とした形状を提案した。次に、提案形状のツールの寿命に及ぼすツール材質の影響を検討するため、従来形状ツールと比較する加速耐久試験を行った。その結果、図 III-2.7.10-11 に示すように、超硬合金、窒化ケイ素、W-Mo-Re 合金のいずれを用いた場合でも、提案形状ツールは飛躍的な寿命の向上が認められた。以上の結果から、鉄鋼用 FSW ツールの寿命向上に非常に有効なツール形状を示せたと言える。なお、提案形状が優れる理由として、比較的低温での接合温度を達成していることが示唆される。

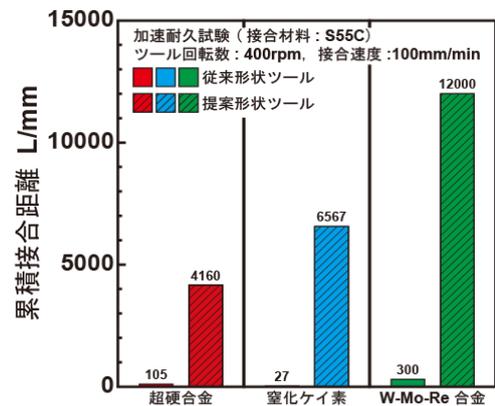


図 III-2.7.10-11 各ツール材料における従来形状ツールと提案形状ツールの寿命比較

⑥ 溶接残留応力の影響解明

FSW 時の被接合材に生じる欠陥評価が可能な解析手法について検討を行った。本手法ではまず、MPS 法の各粒子における応力及び塑性流動の計算を行い、その後、それらの物理量を用いて延性き裂進展簡易評価モデルによる損傷評価を行う。延性き裂進展簡易評価モデルでは、塑性変形の発生と共にボイドが十分に成長した段階で、ボイド同士が融合することで急速に損傷が進行すると仮定している。

入熱過剰条件における表面近傍から内部にかけて生じる表面空洞欠陥を図 III-2.7.10-12 に示す。提案手法を用いることで、接合開始位置から接合終了位置に至るまで AS

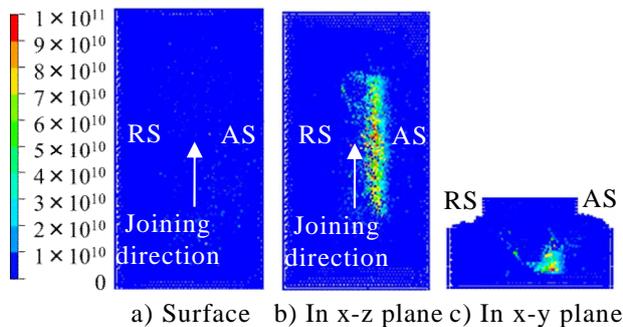


図 III-2.7.10-12 提案手法による欠陥評価結果

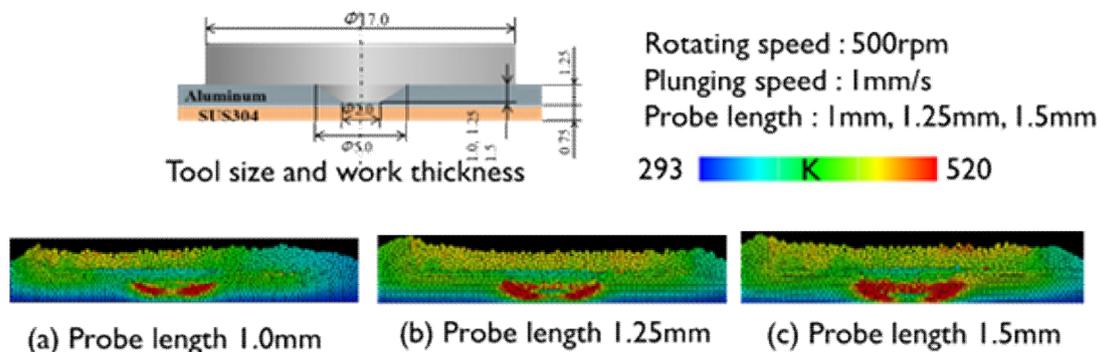


図 III-2.7.10-13 岡村らによる表面空洞欠陥

側で高い損傷評価値を示していることが確認できる。これは、図Ⅲ-2.7.10-13 に示す岡本らによる実験結果と同様の傾向である。本手法を用いることで、FSW 継手に損傷が発生しない理想的なツール形状の開発に繋がると考えることができる。

⑦ 摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発

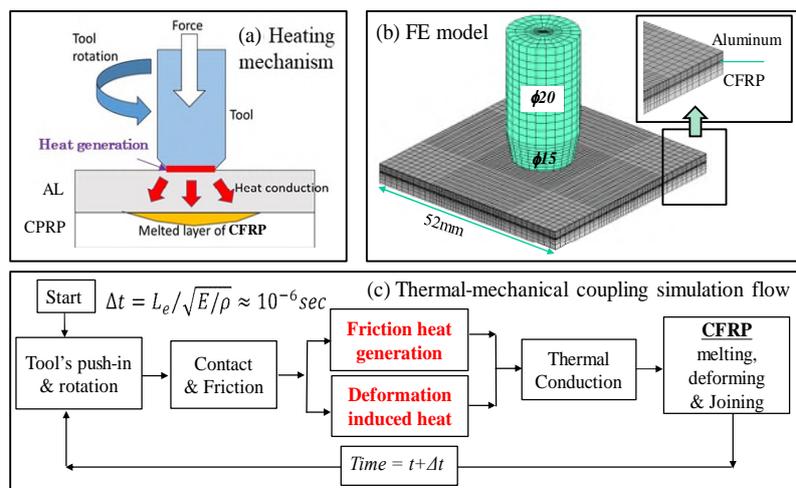
本課題では、鉄鋼材料とアルミニウム合金の異材摩擦攪拌接合プロセスにおけるツール周りの流動現象を数値計算から明らかにすることを目的としている。一般に流動現象の数値解析は計算コストが高く、大規模な解析（高解像度な解析）が困難であるという課題がある。そこで手始めとして薄板重ね接合を計算対象とすることで計算規模を抑え、計算解像度を上げることを検討した。その結果、異材の薄板重ね接合時には材料の混流はほぼ見られないことが確認された。また、図Ⅲ-2.7.10-14 に示す通りプローブ長さがプロセスに与える影響に関して検討した結果、プローブ長さのわずかな差が加工面の温度履歴に大きな影響を与えることが確認された。



図Ⅲ-2.7.10-14 プローブ長さが接合界面に与える影響

⑧ マルチマテリアルの摩擦接合

マルチマテリアル摩擦接合技術として摩擦重ね接合（FLJ: Friction Lap Joining）と摩擦重ね点接合（FLSJ: Friction Lap Spot Joining）が挙げられる。FLSJ 接合領域の内部で発生した熱・力学の物理現象を実験で観察するのは困難である。本研究では、図Ⅲ-2.7.10-15 に示すように FLSJ プロセスにおける摩擦現象・熱発生・熱伝導・塑性変形・熱応力を連成した数値解析モデルを構築した。



図Ⅲ-2.7.10-15 マルチマテリアル摩擦接合に関する熱・力学の数値解析モデリング

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.10-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その 他			
2016FY	0	2	13	2	0	1	0	4	1
2017FY	1	1	20	1	0	1	1	5	2
2018FY	10	5	49	0	0	0	1	3	1
2019FY	17	2	54	10	0	0	0	5	1
合計	28	10	136	13	0	2	2	17	5

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.10-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2016FY	3	0	0
2017FY	0	0	3
2018FY	4	0	0
2019FY	3	4	4
合計	10	4	7

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.11 [テーマ番号 53] 構造材料用接着技術の開発

2.7.11.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などの輸送機器の軽量化には、適材適所に異種材料を配置したマルチマテリアル構造が有望である。これを実現するには、プロセス温度が比較的低温で、変形が少なく、剛性を確保できる接着接合が適している。しかし、接着接合では接合強度や耐久性、生産性の観点で解決すべき問題が多い。本事業では、これらの課題を解決することにより、構造体接合法として実装できる信頼性の高い接着技術を確立することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

本テーマは、テーマ番号 45 の「構造用接着技術に関する Feasibility Study」の結果に基づいて、接着メカニズムの解明と、接着剤、強度・耐久性評価法、表面処理法、接合部検査手法を一体で開発することとした。主に自動車車体の構造材料用の接着技術の実用化を想定して、十分な強度・耐久性と信頼性が担保された接着技術を開発する。

表Ⅲ-2.7.11-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
接着性能	—	引張せん断強度 10MPa 以上	引張せん断強度： 15MPa 以上もしくは 母材破壊。	難接着材料 も被着対象 に含まれる ため。
接合部検査手法	—	—	高感度化 2 倍以上	接着強度に ほぼ影響を 与えない欠 陥が検出可 能。

(3)全体計画

電子顕微鏡を用いて接合特性に関与する界面層を特定し、界面層に含まれる階層構造を明らかにする。また、表面・界面に敏感な分光法とイメージング技術などの分光学的手法を組み合わせ、界面の分子結合状態および化学構造変化を同定する手法を開発するとともに、接着界面に関する分子シミュレーションを実施し、接着メカニズムの解明を図る。構造体接合に実装できる接着技術を実現するため、各種構造材料の接合を対象とする接着剤の技術開発と基礎研究を実施する。耐疲労性や、強度、のびなど諸物性を用途ごとに制御した接着剤の開発を行う。接着接合の強度・耐久性の評価

法は十分に確立されていないことから、接着接合部の強度評価法および耐久性予測法と接合部の設計手法を確立する。これらの結果を総合して、接合部の強度予測法並びに耐久性予測法を構築する。金属および樹脂材料の表面処理技術に関する基礎的検討を実施し、有望な系の洗い出しを行なう。接着接合を実装するためには、接合部の性能を評価できる検査手法の確立が必須である。本研究開発項目では、接着前後での検査手法を開発する。

(4)実施体制

国立研究開発法人産業技術総合研究所（委託先）とセメダイン株式会社（委託先）と物質・材料研究機構（委託先）に3大学と2企業を再委託先として加え、共同で研究開発を実施する。なおユーザー企業や大学等の専門家からなる技術委員会（アドバイザリーボード）を開催し、内容や進捗について議論しながら研究を進める。

(5)運営管理

実施者、ISMA 本部担当マネージャ、NEDO 担当者と接着技術に精通した外部専門家（上記アドバイザリーボード）が集まって、年2回程度の頻度で非公開の全体進捗報告会議を実施した。分室間および再委託先との個別の進捗状況は、サブテーマ毎で随時行った。さらに、毎年一回、公開のシンポジウムを主催して最新の研究成果発表を行った。これらの活動により研究進捗の適切な管理に努めた。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本テーマでのCO₂削減、省エネ効果は自動車の軽量化によるもので、プロジェクト全体で見込まれる数字と同じである。当該接着技術は、開発新材料に対してだけでなく、現行材料にも有効である。したがって普及車への適応も早い。国内メーカーの世界シェア向上0.1%分に貢献できるとの仮定でも2000億円程度に相当する。

2.7.11.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.11-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
接着性能	引張せん断強度 10MPa 以上	想定される組み合わせで 10MPa 以上を達成した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.11-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
接着性能	引張せん断強度 10MPa 以上	引張せん断強度： 15MPa 以上もしくは は母材破壊。	達成見込み
接合部検査手法	特定の組合せで高感度化 2 倍以上	高感度化 2 倍以上	達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

メカニズムの解明

金属とプラスチックなどの異種材料を高い強度、信頼性で接合する技術は、自動車、航空機等の軽量化にとって重要である。新規接合技術を普及させるためには、接合特性の評価と接合メカニズムの解明が必要である。

化学的な表面処理により超微細凹凸が形成された金属部品へのインサート射出成形により樹脂を金属部品に強固に接合することで実現しているが、本研究では、インサート射出接合に有効な金属表面処理技術を CFRP と金属の接合への適用を検討した。特に、低コストでの製造が期待されている、ポリアミド(PA)等の熱可塑性樹脂をマトリックスとする熱可塑性複合材料 (CFRTP) と金属 (アルミ) の接着剤による強い接合を実現するため、金属表面処理法と破壊靱性による接合特性の評価方法を検討し、さらに、ナノ有限要素法 (ナノ FEM)による接合領域の応力集中解析により接合メカニズムについて考察を行った。【産総研】

応力発光体を DCB 試験片に塗布し、き裂進展を精度良く測定し、接合界面の破壊靱性を評価した。接合界面の構造は、SEM による断面観察で接着層の厚み等均一性を確認し、STEM トモグラフィーでアルミ界面に予め作った微細凹凸の 3 次元像を構築し、この構造をシミュレーションに取り込み、界面での応力分布の解析を行った。さらに、STEM-EELS によりアルミ表面・界面での酸化膜の化学状態の変化の解析を行った。mm \sim μ m \sim nm におよぶマルチスケールでの接合界面の解析により、接合メカニズムを明らかにした。STEM-EELS により、アルミ表面の Al(OH)₃ が Al₂O₃ へと接合により化学変化することを見出した。このような化学反応がアルミ表面の微細孔への接着分子の侵入を自発的に起こしていると考えられる。シミュレーションにより明らかになった応力分布の結果から、Al 表面に接する上部のポリマー層に歪が大きく発生しているのに対し、微細凹凸に侵入したポリマーで歪が発生する領域はごく一部であることがわかった。また、Al 表面の凹凸形状により歪の集中が起こることが示唆された。アルミ表面の凹凸サイズ、深さ等の特徴を 3 次元的に解析し、接合に有効な構造を明らかにした。【産総研】

難接着材料として知られるポリプロピレンの表面処理効果に関して、和周波分光 (SFG)、赤外分光、およびラマン散乱などの各種分光法を用いてメカニズム解析を

進めた。いずれの表面処理の場合においても表面処理回数に応じて極性官能基は増加していくが、赤外光侵入深さの異なる 2 種類の全反射プリズムを用いた赤外測定から、バルク方向に極性官能基が広がっていることが確認された。一方、SFG 分光でプラズマ処理および火炎処理したポリプロピレン表面を分析した結果からは、接着強度が増加する処理回数領域では赤外で見られたようなカルボニル基や水酸基は確認されず、表面処理により形成された水酸基などの官能基は速やかにバルク方向へ移行していくことが示唆された。また火炎処理においては、表面の炭化によると思われるラマン振動モードと接触角の上昇が見られた。【産総研】

ポリアミド(PA)等の熱可塑性樹脂をマトリックスとする熱可塑性複合材料 (CFRTP) と金属 (アルミ等) の接着剤による強い接合を実現するため、CFRTP のモデル表面として、6-ナイロンの表面処理効果に関して各種分光法を用いて、その表面処理効果のメカニズム解析を進めた。酢酸処理により表面近傍の結晶層が α 型へ転移していることが確認された。6-ナイロンにおける接着強度の改善は酢酸処理によって生じた表面近傍での構造変化に起因することが強く示唆された。【産総研】

金属と高分子の接着挙動に関して、PEO 系材料を用いたシミュレーションによって、細孔のサイズの影響を明らかにした。PEO 系に加えて、エポキシ接着剤と金属界面における接合挙動を調べるためのモデル化を行った。エポキシ系の場合、架橋前分子は低分子量のため細孔基板の場合の初期構造は非常に容易に作成できる一方、モノマー架橋反応における反応率の低下、金属基板の架橋反応による変形の問題点が生じたために、初期構造モデル化手法の改善を行った。得られた金属・高分子接合構造を用いた伸長試験についてもシミュレーションを実施し、エポキシ接着剤系において後期過程における接着挙動が PEO 系と異なっている点について解析を行った。【産総研】

新規接着剤の開発

接着後塗装 (インプロセス塗装) をターゲットとしたハイテン鋼を含む鋼材の接合に向けた高じん性高耐熱エポキシ接着剤については、2017 年度に 28MPa 以上のせん断強度を示す試作品が得られている。2018 年度、2019 年度の検討によって、アルミの接着性、耐衝撃性 (じん性)、高温時の弾性率保持率及び低温時衝撃性を向上させた。耐衝撃性 (じん性) 改良は弾性率を大きく低下することなく、被膜伸びは約 2 倍、耐衝撃性は常温で約 1.6 倍、低温で 2 倍を達成し、かつ 23°C と低温時での差がほぼない良好な結果を得た。また、高温時の弾性率は、80% を保持しており 45% から大きく改善した。弾性率とじん性のバランスおよび実用温度領域で性能の変化が少なく、自動車構造用として鉄と鉄、鉄とアルミ、アルミとアルミの接合に適応できる性能を向上した。【セメダイン】

塗装後接着 (アウトプロセス塗装) をターゲットとした低温速硬化変成シリコーン系接着剤については、2017 年度に実施した検討の結果、目標の 10MPa、伸び 100% 以上をクリアすることができている。この成果に加え、油面接着性、速度依存性、各種被着体の接着性データを取得した。開発品は良好な油面接着性を有している。実使用では数多くの種類の防錆油、切削油などが使用されているため個々に確認が必要であるが、油面接着を有していることが示されたことは、実用化に有効なデータである。

速度依存性、各種被着体の接着性を評価した結果、速度依存性および幅広い接着性を有していることが示された。【セメダイン】

応力緩和が可能な接着剤として、ビスフェノール A 型エポキシモノマー主剤と芳香族ジアミンの硬化剤からなるポリロタキサソ(PR)を配合したエポキシ系接着剤の接着性を調整し、その機械的/熱的特性について検討した。これらの知見をもとに、接着に及ぼす水の影響を明らかにするため、重水素化エポキシ接着剤の新規合成・ジスルフィド基を有する解体性接着剤の開発について検討を行った。そして重水素化したビスフェノール A 型エポキシモノマー主剤と芳香族ジアミンの合成経路を確立した。ジスルフィド基を有するエポキシ接着剤を合成し、動的共有結合が接着挙動に及ぼす効果を明らかにした。【物質・材料研究機構】

CFRTP などの樹脂材の接合（樹脂材同士および樹脂/異種材の接着）を対象とする速硬化ウレタン接着剤の開発を実施している。そのフォーミュレーション並びに接着接合性能を検討するための取り組みとして、2017 年度から 2018 年度にかけては、プロトタイプのウレタン系接着剤（開発品）を用い、構造体の接合手段としての「接着」の有用性を確認してきた。2019 年度は、接着剤の組成検討をさらに充実させ、よりパフォーマンスの高いものとした。【再委託先】

また、接着接合性能の評価技術の確立に向け、昨年度に行った応力発光による接着接合部のせん断変形挙動モニタリングに対し、それに同期したシミュレーション解析を実施した。【再委託先+産総研】さらに接着剤のポリプロピレン系複合樹脂への適用を想定し、樹脂に対する表面処理検討も併せ実施した。【再委託先】

高延性接着剤の低温硬化について取り組んだ。まずは促進剤量の適正化によって 130°C/20 分にてせん断接着強度 37MPa 引張伸び 30%が発現する系を見出した。さらに最終目標の 120°C/20 分の硬化に対してはアミン系について検討を行った。アミン系では昨年に引き続き最終的に高延性特性を引き出すために新規のアミンの合成に取り組んだ。昨年度はアクリレートを出発原料としてトライした結果、分解が発生し、十分な成果が得られなかったが今年度は別の化合物を出発原料とすることによって目的のアミンを得ることができ、配合するエポキシの最適化により 120°C/20 分硬化にてせん断強度で 15MPa で引張伸びが 60%という接着剤が開発された。また、この系は室温でも硬化が可能である事が確認できた。【再委託先】

長期信頼性・機械設計の観点から構造用接着材は接着剤層内での破壊（凝集破壊）が必須とされている。本研究では、添加剤として剥離型コアシェルゴム粒子およびグラフェンを候補とし、き裂伝ぱ抵抗を向上させる効果について検討を行った。コアシェルゴム粒子のシェルの官能基量を 0 にした結果、静的破壊・疲労破壊ともに凝集破壊率が増加し、粒子添加量 5wt% で 50%、10wt% で 90%とほぼ界面破壊であった未添加（5%）よりも大きく向上することがわかった。また、疲労寿命は、粒子未添加の接着剤と比較して約 3 倍高くなり、凝集破壊と高い耐疲労性の両立が可能であることを見出した。破面観察の結果、コアシェルゴム粒子の界面で剥離が支配的であり、ゴム粒子の周囲のエポキシ樹脂の塑性変形がみられたことから、剥離型コアシェルゴムが凝集破壊効果と強靱化効果の両方を兼備していることが明らかとなった。粒子サイズについても検討した結果、3 μm と 500nm では、500nm のほうが凝集破壊効果、疲労

寿命ともに高く、粒子間距離が重要な因子であることが示唆された。疲労試験は、応力比 0.1 の正弦波を用いて行った。粒子未添加、熱可塑微粒子のみ添加した接着剤では、すべて被着体との界面で破壊したのに対し、剥離型コアシェルゴムを添加した系ではき裂伝ば速度が比較的高い領域で凝集破壊となった。新たな試みとして、ナノファイバーの一種であるグラフェンを添加剤として検討した。グラフェンのみを添加した場合、グラフェン添加量が 0.1wt% を超えると凝集破壊率が 80% 以上と、ごく少量の添加量で凝集破壊モードとなり、剥離型コアシェルゴム粒子より効果が大きいことがわかった。しかしながら、すべてのグラフェン添加系において、未添加の接着剤より疲労寿命は低くなり、またグラフェン添加量が増加するにつれて疲労寿命が低下することがわかった。グラフェン 0.1wt% と強靱化ゴム粒子 5wt% を併用した結果、凝集破壊率はほとんど低下せず、疲労寿命も未添加接着剤の約 5 倍となった。破面観察の結果、強靱化ゴム粒子の周囲のエポキシ樹脂が塑性変形を起こしていることがわかり、疲労寿命向上の要因であることが明らかとなった。【再開示先】

強度・耐久性評価法の開発

接着接合の強度・耐久性の評価法は十分に確立されていないことから、構造体接合への応用が阻害されている。本研究課題では、接着接合部の強度評価法および耐久性予測法を構築し、併せて接合部の設計手法を確立することを目的とした。接着強度では衝撃強度を中心に検討し、耐久性については接着界面に及ぼす水の影響を実験的調べた。接着接合部は、外からの水や熱の影響を受けやすく、その結果接着界面が劣化し、接合強度が大幅に低下することが知られている。そこで、水と熱に着目し接着界面に及ぼす影響を調べた。初めに、接着剤への水の侵入速度を調べるために、その拡散係数を実験的に調べた。具体的には、バルク試験片を用い、これを水へ浸漬し、定期的にその重量を測定した。その結果から Fick の拡散則を用い接着剤内部への水の拡散係数を求めた。従来の吸水劣化試験は、貼り合わせた 2 枚の被着体を水に浸漬し、一定時間後に取り出し、その強度を測定するものであった。しかしこの手法では、劣化に十分な水を吸収させるために 1 年単位の時間を必要とすることが問題となっていた。そこで、本研究では、被着体上に接着剤皮膜を形成したオープンフェイス型の試験片を用い、吸水時間の短縮を図った。また、その強度評価を SAICAS 装置により界面での切削抵抗を測定することにより実施した。【再委託先+産総研】

接着硬化物の速度依存性を明らかにするため、高速引張試験を実施した。20m/s の速度で、バルクの引張速度を行い荷重及び変位の測定を行った。試験片の変位及びひずみは、デジタル画像相関法 (DIC) も用いた。ハイスピードカメラを用いて試験片の変形挙動を撮影しデジタル画像相関法ソフトウェアを用いて解析した。横浜ゴムにて試作中の高強度ポリウレタン接着剤を評価すると、100% を大きく超えるひずみを示した。言い換えるなら、これらの接着剤は、車体の衝突事故など高ひずみ速度が予測される場合でも十分な延性を示すものと考えられる。【再委託先+産総研】

最近の接着剤では、成分が相分離して海島構造を形成し、接合部の強度などに影響を及ぼす場合が多い。また、この海島構造は、接着剤の硬化中に出現するため、その形態が硬化時の温度条件に強く依存すると言われている。そこで本研究では、接着条

件および使用環境が接着接合部の特性に及ぼす影響に関して調べた。具体的には、接着剤硬化物内部および界面に形成される海島構造の観察を、原子間力顕微鏡を用いて行った。ここではコンタクトモードにより局所的な剛性の比較、並びに局所熱分析により海島構造の局所的な熱特性の比較を行い、被着体の種類と島構造との関連について調べた。この観察結果から、界面近傍に生じる海島構造が被着体材料の種類により変化すること、および低強度の被着体では界面近傍に小さな島が、また良好な接着強度を示す被着体では界面近傍に大きな島が形成されることが分かった。【再委託先+産総研】

小型圧力容器を用いて水蒸気下での熱劣化による加速劣化法について検討した。単純重ね合せ継手試験片をこの劣化法により劣化させ、85℃・85%RHの加速劣化法と比較した。85℃・85%RHと小型圧力容器の両者の劣化を連続して試験片に加えたところ、劣化の順序により結果に差が出ることが分かった。このため、破断面の水分量について赤外分光（FTIR）で分析したところ、水分量に違いがあることが分かった。

【産総研】

接着接合部の耐久性に大きな影響を与える接着接合部の機械的挙動に関して、応力発光材料を活用した可視化を行った。接着界面強度に敏感といわれる破壊じん性値（G1c、G2c）の算出に関して、破壊進展の可視化を利用した接着強度評価を、Double cantilever beam: DCB 試験、TDCB 試験、end notch flexure: ENF 試験、compact tension: CT 試験において実施した。更に、溶接など他の接合評価にも用いられる引張りせん断強度（TSS 値）、十字引張り強度（CTS 値）を算出する引張りせん断試験、十字引張り試験についても、その機械的挙動を応力発光で可視化することに成功した。試験法、試験片は国際標準に準じたもので行っている。今後、得られた知識、方法を国際標準に展開し、ガイドライン等作成に活かす予定である。【産総研】

また、応力発光による破壊進展の可視化を利用した接着強度評価、接着強度、衝撃伝搬などの可視評価法を、実材料において実証した。具体的には、車体内装に使用される強化ポリプロピレンに対する接着剤選択（ヤング率の異なる複数接着剤）に際して、引張りせん断試験を行い、ひずみの均一分散を意味する「均一な応力発光分布」を選定基準とした接着剤選定法を開発した。本件は、プロジェクト内企業との連携の成果である。【産総研】

表面処理法の開発

開発を進めているポリアミド6系マトリックス CFRTP（CFRTP-PA6）を想定して、これに適した接着前表面処理法を検討した。その結果酢酸塗布という極めて簡便な処理により、せん断接着強度が 20MPa になる表面処理手法を見いだした。他の処理法との強度比較、破壊モードの観察、メカニズムチームと連携した分析により、接着性改善の機構の解明を進めた。その結果、PA6 の表面に脆弱層があり、強度低下を招いていることがわかった。酢酸処理によって最表面層だけでなく 20 ミクロンの深さまで改質が起きていることが示唆されており、脆弱層の改質が一因になっている。【産総研】

アルミ、SUS、SPCC、CFRP、CFRTP-PP および CFRTP-PA6 の接着性に対する各種の汚染物質（シリコンオイル、機械油、界面活性剤）の影響について検討をした。その結果界面活性剤による汚染は、アルミ、SUS、SPCC、CFRTP-PP 接着強度の低下を引き起こし、破壊モードは凝集破壊から界面剥離に変わることがわかった。またアルミとシリコンオイルの組合では特異的におおき接着強度を示した。しかしながら、CFRP や CFRP-PA6 ではこれらの汚染物質塗布による接着強度の低下は見られなかった。【産総研】

ポリアミドの一種であるナイロン6（PA6）に対して、電子線処理を施した際の接着性への影響を評価した。接着性評価には、PA6 のフィルムを用い、T型剥離試験により未処理、電子線処理、大気圧プラズマ処理を施した接着試験片の接着強度を評価した。電子線処理により、剥離強度が著しく増加しており、大気圧プラズマで処理した場合とも比較して、接着に対する効果は大きいことを見出した。電子線のPAフィルム表面への処理効果を評価するために動的接触角による各処理後の表面自由エネルギーを評価した。未処理のPA6フィルムと比較して、電子線処理・大気圧プラズマ処理により表面自由エネルギーは上昇した。特に両方の処理で、極性成分の方が大きく上昇していることから、表面の極性が大きくなったことを示している。その結果から、各処理によりPA6表面に極性基が導入されていることが明らかになった。さらに処理による表面自由エネルギーの変化量を確認すると、大気圧プラズマ処理の方が大きく変化していることが確認できた。これは、電子線処理と比較して、大気圧プラズマ処理の方が、表面により多くの極性基を導入することを意味する。従って、極性基の分量のみが接着性を決定する因子であるとした場合、接着試験の結果と矛盾することとなる。つまり、電子処理を施したPA6基板では、極性基の導入の効果による接着強度の上昇に加え、他の因子による接着強度の上昇であることが示唆された。さらに、電子線照射線量の接着強度への影響を評価した。電子線線量を0～400kGyまで変化させた際のT型剥離強度を評価した。結果として照射線量が小さいときは、線量に応じて剥離強度が上昇した。しかし、50kGyを超えると剥離強度には大きな変化がなく、PPの際とは異なる挙動を示した。【再委託先】

接着接合部の検査手法の開発

接着前の表面性状検査法の開発に関して、LIBS法による表面汚染物質検出の下限値評価を進め、FRTPのマトリックス樹脂であるポリプロピレン(PP)上のシリコンオイルについて0.05 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の検出下限値を得た。F系離型剤の検出について、当初暫定的に評価された60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の検出下限値が、測定条件の最適設定により0.50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ まで改善することを確認した。また、2019年度導入した汎用光検出評価装置を用いた評価では、アルミ合金上のシリコンオイルについて0.82 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の検出下限値が得られ、検出対象によっては高感度分光検出器に匹敵する検出感度が示されることを実証した。【産総研】

接着接合後の欠陥検出法に関して、2018年度まで開発してきた高速パルスレーザーシステムを用いて、各種構造部材および接合部材の超音波伝搬映像を取得し、機械学習による欠陥自動検出のためのデータベース構築を進めた。2019年度は3次元量み込

みニューラルネットワークによる超音波伝搬動画画像解析手法を新たに開発し、人工欠陥を導入した金属板サンプルの欠陥自動検出を試みた。その結果、2018年度開発した2次元畳み込みニューラルネットワークを用いた超音波伝搬静止画像解析による欠陥検出率（95.7%）をさらに向上（97.3%）させることに成功した。【産総研】

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.11-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	3	0	66	3	2	0	1	0	2
2018FY	8	0	38	3	0	0	2	1	2
2019FY	4	0	24	9	0	0	3	0	2
合計	15	0	128	15	2	0	6	1	6

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.11-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2017FY	0	0	1
2018FY	0	0	0
2019FY	2	0	1
合計	2	0	2

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.12 [テーマ番号 33] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発

2.7.12.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車車体のマルチマテリアル化により適材適所に材料選択が施行される中、側突部位などには超ハイテンによる接合部材の適用が期待されており、自動車の次世代構造用鋼として従来のハイテンの強度と伸びを更に上回る超ハイテンの開発が進んでいる。しかし、自動車生産に使用される既存の溶接技術により溶接を行うと、熔融・凝固に起因する割れや脆化といった問題が溶接部に生じることがあり、対策には生産性やコストを阻害する工程を付加する必要がある。摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding: FSW）は非熔融の接合方法であるため、これらの課題の解決に有望であると考えられている。

革新的新構造材料等研究開発では、これまでに予熱プロセスおよび両面 FSW を複合化することで高速化を達成したハイブリッド FSW、またツール挿入軸を付加した接合ヘッドと剛性補償システムにより鋼板接合を可能としたロボット FSW の基礎技術を開発した。

これらの技術の自動車生産への適用には、具体的に想定される部材の接合において要求される施工能率や形状に対するアクセス性の評価が必要である。そこで本テーマでは、革新的 FSW プロセスとしてこれまで開発してきたハイブリッド FSW、ロボット FSW の基礎技術を組み合わせることで適用技術を構築し、自動車車体への適用を想定した接合部材を開発することを目的とする。

なお本テーマは、テーマ番号 04 の中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発とテーマ番号 08 の難接合性材料の線接合技術の開発を 2018 年度に統合し研究継続するものである。

(2)位置付け、目標値

本テーマでは、革新的 FSW プロセスによる適用技術を確立するため、高速ハイブリッド FSW による 1.5GPa 級超ハイテンのテーラード・ブランク（Tailor-Welded Blank: TWB）を用いたプレス成形部材の開発、及びロボット FSW によるプレス成形部材のアセンブリ技術の研究開発を行う。また、ツールの長寿命化及び長距離接合での接合品質確保を達成するための研究開発を行う。

① 超ハイテン TWB 部材の開発

TWB 接合に対応したハイブリッド FSW プロセスの基礎技術を確立し、従来の TWB 接合技術をベンチマークとして優位性を評価し、さらに実機化に向けた適用技術を確立する。

また、超ハイテンを用いた TWB 部材の作製において、ハイブリッド FSW プロセスの優位性が発揮される自動車部材とその接合材組合せを選定し、接合施工性と接合部特性を明らかにするとともに、プレス成形試験により接合部の性能を確認する。

② ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発

ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発においては、接合パラメータ、接合中の装置負荷、ツール磨耗量、接合材料の温度など種々のデータを採取して、これらのデータと接合品質との関係を解析する。これと平行して、接合部の分析、強度特性評価を通じて、接合部品質向上に有効な接合技術を開発する。更に、FSW ツールの耐久性向上に向けて、分析・評価を行う。

表Ⅲ-2.7.12-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2021年度末)	根拠
① 超ハイテン TWB 部材の開発	-	引張強さ 1.5GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材を作製し、プレス成形試験において接合部の健全性確立において指針を明確にする。	引張強さ 1.5GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材を作製し、プレス成形試験において接合部の健全性を確立する。	具体的に想定される部材の接合において要求される施工能率や形状に対するアクセス性の評価が必要
② ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術	-	-接合部強度：厚み 2mm 以下の強度 1.5GPa 級超ハイテン同士で、母材強度の 70%以上を達成する。 -厚み 2mm 以下の超ハイテン接合において、25m 以上接合可能なツール耐久性の見通しを得る。 -厚み 2mm 以下の超ハイテン接合において、接合長 25m 後の定常接合部の強度低下 10% 以下を達成する。 -適応制御組込みロボット FSW 装置による線接合を検証する。	-接合部強度：厚み 2mm 以下の強度 1.5GPa 級超ハイテン同士で、母材強度以上を達成する。 -ロボット FSW 装置による曲面部材の線接合を実証する。	具体的に想定される部材の接合において要求される施工能率や形状に対するアクセス性の評価が必要

(3)全体計画

① 超ハイテン TWB 部材の開発【JFE スチール株式会社】

【2018 年度】

差厚 TWB 接合に対応したハイブリッド FSW プロセスの基礎技術を確認する。差厚材に合わせて接合ツールは種々の形状、ツール配置を検討することで、接合施工性と継手健全性の観点から適正プロセス条件範囲を明確化する。さらに、得られた適正条件範囲において TWB 接合に要求される継手特性を評価するとともに想定される課題の明確化を図る。

引張強さ 1.2GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材の作製に向け、ハイブリッド FSW プロセスの優位性が発揮される自動車部材とその接合材組合せを選定し、要求される接合施工性と接合部特性を明らかにする。

【2019 年度】

TWB 接合に対応したハイブリッド FSW 技術の確認に関して、従来の TWB 接合技術をベンチマークとして優位性を評価する。溶融・凝固に起因する溶接部の割れや脆化に関して、ハイブリッド FSW と従来 TWB 接合技術を比較・評価する。

1.2GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材の作製に向け、対象板組みにおける接合施工性、接合部特性の要求値を満足する。ハイブリッド FSW における予熱条件、両面 FSW 条件、後熱条件を検討し、対象板組みに対して接合施工性、接合部特性が最適となる条件を確認する。

【2020 年度】

TWB 接合に対応したハイブリッド FSW プロセスの適用技術を確認する。接合材間のギャップ、狙い位置ずれ、ツール損耗による形状変化が継手特性に及ぼす影響を明らかにする。

引張強さ 1.5GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材を作製し、プレス成形試験において接合部の健全性確認において指針を明確にする。プレス成型後の接合部の割れの有無、局部変形による厚さの減少を評価し、自動車部品に要求される基準として品質、特性を満足するか判定する。さらに、革新鋼板の要素を持つ 1.5GPa 級超ハイテンラボ材を用いたプレス加工部材を作製する。

【2021 年度】

引張強さ 1.5GPa 級超ハイテンを用いた TWB 部材を作製し、プレス成形試験において接合部の健全性を確認する。プレス成型後の接合部の割れの有無、局部変形による厚さの減少を評価し、自動車部品に要求される基準として品質、特性を満足する。

② ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発

②-1 FSW 装置開発【株式会社日立パワーソリューションズ】

【2018 年度】

超ハイテンを種々の接合条件で接合した際の負荷データ等を用いて、FSW 装置適応制御システムの基礎を構築する。

【2019 年度】

FSW 装置適応制御システムを使用した接合実験を実施し、接合品質との関係性を評価する。

【2020 年度】

2019 年度に前倒し開発した適応制御システム組み込みロボット FSW 装置を使用し、超ハイテンの線接合可能なことを検証する。

【2021 年度】

適応制御システム組み込みロボット FSW 装置で超ハイテン鋼を用いたプレス加工部材のアッセンブリ接合の実験を実施し、部材形状への対応を評価する。

②-2 FSW 接合プロセス技術開発【株式会社日立製作所】

【2018 年度】

超ハイテンに対し、接合条件と接合部の機械的特性の関係を調査し、適正な接合条件を検討する。また、25m 以上のツール耐久性を達成するためのツール耐久性評価接合試験および長距離接合での接合部品質変化を調査する。更に、適応制御システムの開発に必要な装置負荷データ等を採取する。

【2019 年度】

FSW ツールおよび接合条件等を適正化して 25m 以上のツール耐久性を達成するためのツール耐久性評価接合試験を実施するとともに長距離接合での接合部品質を評価する。

【2020 年度】

強度 1.5GPa 級の超ハイテン同士の接合試験を実施し、接合条件と機械的特性の関係を調査する。また、25m 以上の長距離接合の実証と接合部品質の安定性を実証する。

【2021 年度】

ロボット FSW による超ハイテン部材アッセンブリ接合を安定して実現するため、ツール損傷および装置負荷を低減する重ね接合条件を明確にする。

②-3 ツール素材量産技術開発【日立金属株式会社】

【2018 年度】

超ハイテン向け FSW ツール材料の精密鋳造用マスターインゴットを試作するとともに、25m 以上のツール耐久性を達成するための、ツール耐久性評価接合後のツールの損傷状態を分析する。

【2019 年度】

超ハイテン向けに改良した FSW ツール材料の精密鋳造用マスターインゴットを試作するとともに、25m 以上のツール耐久性を達成するための、ツール耐久性評価接合後のツールの損傷状態を分析する。

【2020 年度】

超ハイテン向け FSW ツール材料の精密鋳造用マスターインゴットを試作するとともに、強度 1.5GPa 以上の超ハイテン接合後のツールの損傷状態を分析する。

②-4 FSW ツール量産技術開発【株式会社日立メタルプレシジョン】

【2018年度】

超ハイテン FSW 技術開発に供する FSW ツールを試作するとともに、ツールコスト低減のため、ツール製造方法およびツール構造変更により Co 合金使用量を低減した FSW ツールを試作し、ツール性能への影響を評価する。

【2019年度】

超ハイテン FSW 技術開発に供する FSW ツールを試作するとともに、ツールコスト低減のため、ツール製造方法およびツール構造変更により Co 合金使用量の低減と冷却方式を変更した FSW ツールを試作し、ツール性能への影響を評価する。

【2020年度】

1.5GPa 超ハイテン FSW 技術開発に供する FSW ツールを試作するとともに、形状を多様化した FSW ツールを試作し、ツール性能への影響を評価する。

【2021年度】

1.5GPa 超ハイテン FSW 技術開発に供する FSW ツールを試作するとともに、形状を多様化した FSW ツールを試作し、ツール性能への影響を評価する。

②-5 ツール合金開発，接合部解析【再委託先①】

【2018年度】

種々の接合条件で接合した超ハイテンの金属組織等を分析し、接合条件と接合部の機械的特性の関係を調査する。また、ツール耐久性評価試験で得られたツールの分析とツール損傷低減の方策を検討する。

【2019年度】

FSW ツールおよび接合条件等を適正化した超ハイテンの金属組織等を分析し、接合部の機械的特性の関係を調査する。

【2020年度】

種々の接合条件で接合した強度 1.5GPa 級超ハイテンの金属組織等を分析し、接合条件と接合部の機械的特性の関係を調査する。

【2021年度】

適正化された FSW ツールおよび接合条件で接合した強度 1.5GPa 級超ハイテンの金属組織等を分析し、接合部の機械的特性の関係を調査する。

②-6 接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先②】

【2018年度】

接合条件と接合部の機械的特性の関係調査において、機械的特性が優れた超ハイテンの接合材に対し、疲労特性を評価するとともに破壊メカニズムを解析する。

【2019年度】

FSW ツールおよび接合条件等を適正化した超ハイテンの接合材に対し、疲労特性を評価するとともに破壊メカニズムを解析する。

【2020年度】

強度 1.5GPa 級超ハイテンの接合材に対し、疲労特性を評価するとともに破壊メカニズムを解析する。

【2021年度】

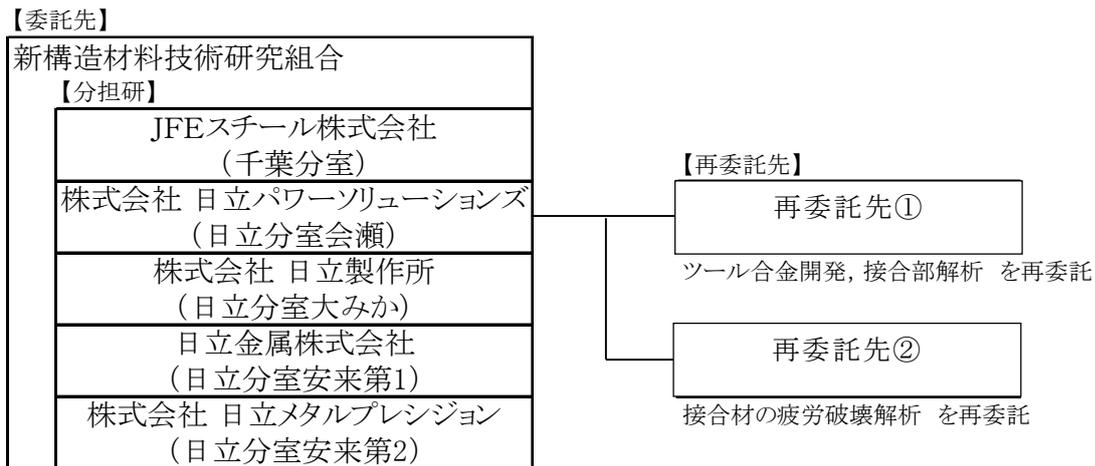
実用化の際に特に重要となる重ね合わせ接合体の疲労強度と破壊メカニズムについて、強度 1.5GPa 級超ハイテン接合体を対象として明らかにする。あわせて、接合部の繰返し接触など、重ね合わせ接合体固有の破壊機構を考慮した合理性のある評価方法も探求する。

表Ⅲ-2.7.12-2 全体計画

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度				2021年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① 超ハイテンTWB部材の開発【FESステール】	差厚TWB接合に対応した基礎技術の確立				従来技術をベンチマークとした優位性の評価				適用技術の確立							
	ツール形状、配置検討、適正条件範囲明確化		継手特性評価、課題明確化		溶融・凝固に起因する溶接部の割れ・脆化の評価項目を選定・評価		割れ・脆化を含む継手特性に関して従来溶接技術と比較により評価		接合材間のギャップ、狙い位置ずれが継手特性に及ぼす影響を調査		ツール損傷による形状変化が継手特性に及ぼす影響を調査					
	1.2GPa材を対象としたTWB部材の選定				1.2GPa材によるTWB部材の接合部特性確認				1.5GPa材によるTWB部材を作製し健全性確立において指針を明確化				1.5GPa材によるTWB部材を作製し健全性を確立			
	ハイブリッドFSWの優位性が発揮される部材と鋼板組合せ選定		要求される接合施工性と接合部特性を明確化		ハイブリッドFSWの子熱条件、両面FSW条件、後熱条件を検討		接合施工性、接合部特性において最適条件を確立		TWB部材を作製		TWB材をプレス成型し接合部を評価 革新鋼板要素持つ1.5GPa材によるプレス加工部材を作製		TWB部材を作製		TWB材をプレス成型し接合部を評価	
② ロボット適応制御FSWによる超ハイテン部材アセンブリ技術の開発 ②-1 FSW装置開発【日立パワーソリューションズ】					適応制御システムでの接合実験				2019年度に前倒し開発した適応制御システム組み込みロボットFSW装置を使用しFSWで超ハイテン鋼の線接合検証				適応制御システム組み込みロボットFSW装置でプレス加工部材のアセンブリ接合実験			
	超ハイテンの接合条件と機械的特性の関係				長距離接合での接合部品質評価				1.5GPa級超ハイテンの接合条件と機械的特性							
②-2 FSW接合プロセス技術開発【日立製作所】	ツール耐久性評価接合試験				ツール耐久性評価接合試験				2.5 m以上の長距離接合の実				ツール損傷および装置負荷を低減する接合条件調査			
	適応制御装置負荷データ採取															
②-3 ツール素材量産技術開発【日立金属】	FSWツール用インゴット試作				FSWツール用改良合金インゴット試作				超ハイテン用FSWツール合金インゴット							
	ツール耐久性評価後のツール損傷		ツール損傷		ツール耐久性評価後のツール損傷		ツール損傷		1.5GPa級超ハイテン接合後のツール損傷							
②-4 FSWツール量産技術開発【日立メタルプレジジョン】	超ハイテン用FSWツール試作				超ハイテン用FSWツール試作				1.5GPa級超ハイテン用FSWツール試作				1.5GPa級超ハイテン用FSWツール試作			
	ツールコスト低減のためのツール				ツールコスト低減改良製造方案でのツール				形状多様化ツール試作				形状多様化ツール試作			
②-5 ツール合金開発、接合部解析【再委託先①】	種々の条件での超ハイテンの接合部金属組織等分析				適正条件での超ハイテンの接合部金属組織等分析				種々の条件での1.5GPa級超ハイテンの接合部				適正条件での1.5GPa級超ハイテンの接合部			
	ツール損傷低減の方策を検討															
②-6 接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先②】	機械的特性が優れた超ハイテン接合材の疲労特性評価				FSWツール・接合条件等を適正化した超ハイテン接合材の疲労特性評価				1.5GPa級超ハイテン接合材の疲労特性評価							
					1.5GPa級超ハイテンFSW接合材の疲労特性								重ね合わせ接合体固有の破壊モードと破壊機構の解明と、合理的な試験・評価法			
				1.5GPa級超ハイテン軟鋼異種金属FSW接合材の疲労強度特性、及び、疲労き裂伝播												

(4)実施体制

革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発は、新構造材料技術研究組合 千葉分室 (JFE スチール (株))、日立分室会瀬 ((株) 日立パワーソリューションズ)、日立分室大みか ((株) 日立製作所)、日立分室安来第 1 (日立金属 (株))、日立分室安来第 2 ((株) 日立メタルプレシジョン) を委託先として実施する。さらに、日立分室会瀬から再委託として、再委託先①にてツール合金開発、接合部解析、再委託先②にて接合材の疲労破壊解析を実施する。



図Ⅲ-2.7.12-1 実施体制

(5)運営管理

テーマリーダー (分室代表者を兼任)、分室代表者、再委託先代表者の出席による全体会議を3ヶ月に1回(年4回)開催し、実施計画に対する各分室、再委託先の進捗を共有すると共に、分室間の連携により実施する研究項目に関して協議・調整する。

(6)実施の効果 (費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度)

自動車車体のマルチマテリアル化により適材適所に材料選択が施行される中、側突部位などには超ハイテンによる接合部材の適用が期待されており、自動車の次世代構造用鋼として従来のハイテンの強度と伸びを更に上回る超ハイテンの開発が進んでいる。本テーマで開発する新接合技術により、上記開発の進む超ハイテンが自動車製造に適用されることで、自動車の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量が大幅に削減され、燃費改善目標 (国立環境研究所 AIM PJ チーム試算) の 10~20%相当の CO₂ 削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。加えて、自動車の安全性(耐衝突性)・走行性能の向上により、社会の安心・安全向上にも寄与すると考えられる。

2.7.12.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.12-3 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
① 超ハイテン TWB 部材の開発【JFE スチール（株）】				
TWB 接合に対応した基礎技術・適用技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・1.5GPa 級超ハイテン TWB 部材における特性を評価。 ・従来の TWB 接合技術をベンチマークとしてハイブリッド FSW の優位性を明確化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1180-1.2mm 材-980-1.6mm 材の差厚接合において継手特性（引張、曲げ）を確認 ・ハイブリッド FSW により従来技術（レーザ溶接）と比較し接合部の拡散性水素量低減を確認 	○	
部材試作によるプロセス実現性検証	1.5GPa 級超ハイテン TWB 部材において、プレス試験での接合部の健全性を確保、TWB 部材の作製。	フルスケール TWB 部材の作製に向け、接合材組合せを選定	○	
② ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発				
②-1 FSW 装置開発【（株）日立パワーソリューションズ】				
ロボット適応制御 FSW 装置の開発	適応制御システム組み込みロボット FSW で超ハイテン鋼の線接合検証	適応制御システム組み込みロボット FSW を開発し、機能を確認。	○	
②-2 FSW 接合プロセス技術開発【（株）日立製作所】				
ツール耐久性	厚み 2mm 以下の超ハイテン接合において、25m 以上接合可能なツール耐久性の見通しを得る。	引張強度 1.5GPa、厚み 1.4mm の超ハイテン鋼を 25m 接合可能なことを実証。	○	
接合品質安定性	厚み 2mm 以下の超ハイテン接合において、接合長 25m 後の定常接合部の強度低下 10%以下を達成する。	引張強度 1.5GPa、厚み 1.4mm の超ハイテン鋼を 25m 後の定常接合部の強度低下は 5%を確認。25m 以前の接合部で強度低下 10%以上の部分あったが、ツール摩耗に応じて接合条件を修正することで改善可能。	○	

②-3 ツール素材量産技術開発【日立金属（株）】				
超ハイテン用 FSW ツール材料のマスターインゴット製造技術	ベース合金、改良合金のマスターインゴット作製	Φ80mm インゴットを作製できることを確認	○	
超ハイテン接合後のツール損傷分析	接合後のツール損傷部の評価	SPHC 鋼板および超ハイテン模擬材料 SUS304 での損傷分析を実施	×	超ハイテン接合後のツールの損傷分析を実施
②-4 FSW ツール量産技術開発【（株）日立メタルプレジジョン】				
1.5GPa 級超ハイテン用 FSW ツール試作	超ハイテン接合用 FSW ツールを精密 casting 法で製作	最適な casting 条件による品質の安定化及び製造工程の確立	○	
形状多様化ツール試作	各接合に合致した FSW ツールの試作	ツール形状の金型化によるコスト削減及び品質の作り込み	○	
②-5 ツール合金開発，接合部解析【再委託先①】				
ツール損傷低減の方策検討	鋼 FSW での Co 合金ツール損傷を低減させる方策を提示。	鋼の FSW において、ツール摩耗を低減する Co 合金の材料組織学的な特徴を解明。	○	
超ハイテン接合部の金属組織等解析	種々の接合条件で得られた強度 1.5GPa 級超ハイテン接合部の分析	超ハイテン接合部の金属組織と機械的特性に及ぼす接合条件の影響を調査・解明。	○	
②-6 接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先②】				
超ハイテン接合体（同種接合体）の疲労強度を評価すること	厚み 2mm 以下の接合体が軸荷を受けた際の疲労強度を評価する	母材に対し 85% 程度の疲労強度を有することを示すこと	○	
異種金属接合体の疲労強度を評価すること	超ハイテン鋼と軟鋼からなる異種金属接合体が軸荷を受けた際の疲労強度を評価する。	最適化した条件で製作した接合体は接合部では破損しない事を示した。	○	
接合部と母材部の疲労破壊に対する抵抗を評価する	接合部と母材部の疲労き裂伝播に対する抵抗を世界標準法に従って破壊力学的に評価・比較	FSW/TRIP 境界部を伝播する疲労き裂の抵抗は TRIP 鋼単体中を伝ばする抵抗よりも高いこと、従って、本研究で採用した[TRIP 鋼/軟鋼]の組合せと接合条件は適切であったことが示された。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.12-4 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2021年度末)	達成見通し
① 超ハイテン TWB 部材の開発【JFE スチール（株）】			
TWB 接合に対応した基礎技術の確立	1180-1.2mm 材-980-1.6mm 材の差厚接合において継手特性（引張、曲げ）を確認	従来の TWB 接合技術をベンチマークとしてハイブリッド FSW の優位性を明確化	2019 年度達成
TWB 接合への適用技術の確立	ハイブリッド FSW により接合部の拡散性水素量低減を確認	施工時の外乱(ギャップ、狙い位置ずれ)が継手品質に及ぼす影響を明確化	2020 年度末達成見込み
部材試作によるプロセス実現性検証	フルスケール TWB 部材の作製に向け、接合材組合せを選定	1.5GPa 超ハイテン TWB 部材において、プレス試験での接合部の健全性を確保	2020 年度末達成見込み
② ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発			
②-1 FSW 装置開発【（株）日立パワーソリューションズ】			
ロボット適応制御 FSW 装置の開発	適応制御システム組み込みロボット FSW を開発し、機能を確認。	超ハイテン鋼を用いたプレス加工部材のアセンブリ接合の実験を実施し、部材形状への対応を評価。	2021 年度末達成見込み
②-2 FSW 接合プロセス技術開発【（株）日立製作所】			
ロボット FSW 向けアセンブリ重ね接合技術	強度 1.5GPa の超ハイテン鋼の重ね接合材の 1 次試験完了。	ロボット FSW による超ハイテン部材アセンブリ接合を安定して実現するため、ツール損傷および装置負荷最を低減する重ね接合条件を明確にする。	2021 年度第 1 四半期達成見込み
②-3 ツール素材量産技術開発【日立金属（株）】			
1.5GPa 級超ハイテン耐久試験後のツール損傷分析	1.2GPa 級ハイテンの短距離でのツール評価は完了。	耐久試験後のツール損傷分析を行い、損傷抑制要因を明確化	2020 年度末達成見込み
②-4 FSW ツール量産技術開発【（株）日立メタルプレジジョン】			
1.5GPa 級超ハイテン用 FSW ツール試作	超ハイテン接合用 Co 合金ツールを精密鋳造法で製作	最適な鋳造条件による品質の安定化及び製造工程の確立	2019 年度達成

形状多様化ツール試作	各接合に合致した FSW ツールの製作	新規形状の金型化によるコスト削減及び品質の作り込み。	2020 年度末達成見込み
②-5 ツール合金開発, 接合部解析【再委託先①】			
ツール損傷低減の方策検討	鋼の FSW において、ツール摩耗を低減する Co 合金の材料組織学的な特徴を解明。	鋼 FSW での Co 合金ツール損傷を低減させる方策を提示。	2018 年度達成
超ハイテン接合部の金属組織等解析	超ハイテン接合部の金属組織と機械的特性に及ぼす接合条件の影響を調査・解明。	適正化された FSW ツールと接合条件で得られた強度 1.5GPa 級超ハイテン接合部の分析	2021 年度末達成見込み
②-6 接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先②】			
突合せ超ハイテン同種接合体の疲労強度を評価すること	厚み 2mm 以下の突合せ超ハイテン同種接合体が軸負荷を受けた際の疲労強度を評価する	同種接合体が母材に対し 85%程度の疲労強度を有することを示すこと	2018 年度達成
異種金属接合体の疲労強度を評価すること	超ハイテン鋼と軟鋼からなる突合せ異種金属接合体が軸負荷を受けた際の疲労強度を評価する。	最適化した条件で製作した突合せ接合体は接合部では破損しない事を示す。	2019 年度達成
接合部と母材部の疲労破壊に対する抵抗を評価する	異種金属接合部と母材部の疲労き裂伝播に対する抵抗を世界標準法に従って破壊力学的に評価・比較	FSW/TRIP 接合境界部を伝播する疲労き裂の抵抗は TRIP 鋼単体中を伝ばする抵抗と同等であること、従って、本研究で採用した[TRIP 鋼/軟鋼]の組合せと接合条件は適切であったことを示す。	2019 年度達成
超ハイテン FSW 重ね合わせ接合体の疲労強度を評価	重ね合わせ接合体固有の疲労破壊モードと破壊機構の解明	重ね合わせ接合体固有の破壊モードと破壊機構の解明と、合理的な試験・評価法の開拓を行う	2021 年度末達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

①超ハイテン TWB 部材の開発【JFE スチール株式会社】

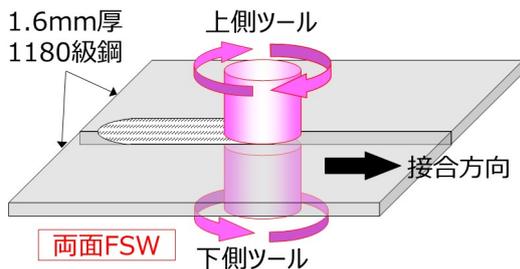
1) 両面 FSW の施工性を向上するツール形状の検討

両面 FSW において、ツール形状を改善することで攪拌部の塑性流動を促進し、健全な接合部を形成可能な接合速度の向上を検討した。従来ツールでは接合速度の上限

が 3m/min であったのに対し、ツールのショルダー部にツールの回転方向とは反対方向に渦状溝（スクロール）を設けることで 5m/min に向上することを確認した。

a. 実験条件

図Ⅲ-2.7.12-2に示すようなツール、材料配置とし、表Ⅲ-2.7.12-5に示す接合条件により接合を行った。ツールの回転方向は上側に対し下側は反対となる。従来の両面 FSW ツールとの相違点は、プローブは省略され、ツール先端には時計回りに渦状溝（スクロール）が施されている点で、ツールの回転方向は反時計回りとなる。供試鋼板には板厚1.6mmの引張強さ1180MPa級の自動車用冷延鋼板を用いた。得られた継手から、断面マクロ観察用試験片と引張試験片を採取した。引張試験片の寸法はJIS Z 2241に記載の5号試験片とした。継手の機械的特性は、引張試験により評価した。



表Ⅲ-2.7.12-5 両面 FSW の接合条件

	上側ツール	下側ツール
ツール角度(°)	0	0
ツール回転数(rpm)	500~3000	500~3000
接合速度(m/min)	3.0~6.0	

図Ⅲ-2.7.12-2 両面 FSW の概略図

b. 実験結果

接合速度を 5m/min としたときのスクロールツールを用いた両面 FSW 継手の断面マクロ組織、継手特性を図Ⅲ-2.7.12-3 に示す。ツール回転数 1500 rpm の場合は、良好な塑性流動状態が得られず、継手引張強さは母材以下、破断位置は攪拌部内部となった。一方、ツール回転数を 2500 rpm に増大した場合は、断面マクロ組織は促進された塑性流動状態を示し、継手引張強さは母材と同等、破断位置は HAZ となり健全な接合状態が得られた。スクロールツールを用いた両面 FSW の健全な接合状態が得られる接合速度の上限は 5m/min となり、従来のスクロールなしツールでの接合速度の上限の 3m/min と比較し、顕著な向上が見られた。

		ツール回転数(rpm)	
		1500	2500
断面マクロ	ナイタール		
	ピクリン酸水溶液		
継手強度	引張強さ(MPa)	818	1222
	破断位置	SZ	HAZ

図Ⅲ-2.7.12-3 スクロールツールを用いた両面 FSW 継手の断面マクロ、継手特性（接合速度：5m/min）

2) 1.2GPa 材による TWB 部材を想定した差厚接合の検討

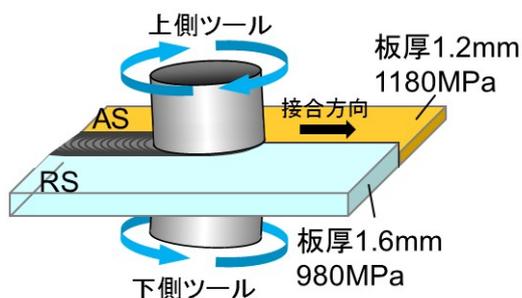
TWB 部材を想定した差厚接合の検討として、板厚 1.2mm の引張強さ 1180MPa 級の

自動車用冷延鋼板、板厚 1.6mm の引張強さ 980MPa 級の自動車用冷延鋼板を用いて両面 FSW による接合実験を行った。ショルダーの外周部にテーパ部を設け、テーパ部にツールの回転方向と同じ方向に渦状溝（スクロール）を設けることで、差厚接合における厚板側の段差分の材料をテーパ部により排除し、接合部において薄板側と厚板側の材料をショルダーにより十分に攪拌することを狙ったツール形状を検討した。上記のツールを用いることで両面 FSW により、板厚 1.2mm 1180MPa 級鋼板—板厚 1.6mm 980MPa 級鋼板の板組合せにおいて、接合速度 2m/min で健全な接合継手が得られることを確認した。

a. 実験条件

図Ⅲ-2.7.12-4に示すようなツール、材料配置とし、表Ⅲ-2.7.12-6に示す接合条件により接合を行った。供試鋼板は板厚1.2mmの引張強さ1180MPa級の自動車用冷延鋼板、板厚1.6mmの引張強さ980MPa級の自動車用冷延鋼板を用いた。用いたツールの回転方向は上側に対し下側は反対となり、材料の段差のある上側においては、板厚1.2mm 1180MPa級鋼板をアドバンシング・サイド、板厚1.6mm 980MPa級鋼板をリトリーディング・サイドに配した。接合に用いたツールは、ショルダーの外周部にテーパ部を設け、テーパ部には反時計回りに渦状溝(スクロール)が施され、ツールの回転方向も同様に反時計回りとなる。

得られた継手からサンプルを採取し、断面マクロ観察、引張試験、曲げ試験を実施した。断面マクロ組織観察はピクリン酸飽和水溶液でエッチングし光学顕微鏡を用いて組織観察を行った。引張試験はJIS Z 2241に準拠して行った。曲げ試験は、接合部の長さ方向に100mm、接合部を中央に幅方向30mmとして採取したサンプルを用い、JIS Z 2248に準拠して行った。



図Ⅲ-2.7.12-4 両面 FSW による差厚接合の概略図

表Ⅲ-2.7.12-6 両面 FSW による差厚接合の接合条件

	上側ツール	下側ツール
ツール角度(°)	1.5	1.5
ツール回転数(rpm)	1500	1500
接合速度(m/min)	2.0	

b. 実験結果

ツール回転数 1500 rpm、接合速度 2m/min のときの両面 FSW により得られた差厚接合継手の断面マクロ組織、継手特性を図Ⅲ-2.7.12-5 に示す。表面欠陥、内部欠陥の無い健全な接合部が得られた。板厚の異なる母材に対し、厚さが連続的に変化し平滑な止端部を有する接合部が得られた。断面マクロ組織は促進された塑性流動状態を示し、継手引張強さにおいては 1.2mm 厚 1180MPa 鋼板破断の HAZ で破断を呈し、母材と同等の引張強さが得られた。両面 FSW による差厚 FSW 継手の曲げ試験結果を図Ⅲ-2.7.12-6 に示す。曲げ半径 3、5、7mm に対していずれも割れは見られず、レーザ溶接

並みと考えられる結果となった。

		ツール回転数(rpm)			
		1500			
断面マクロ	ナイタール	1180MPa 1.2mmt	AS	RS	980MPa 1.6mmt 2mm
	ピクリン酸水溶液	1180MPa 1.2mmt	AS	RS	980MPa 1.6mmt 2mm
継手強度	引張強さ(MPa)	1222			
	破断位置	1.2mmt 1180側のHAZ			

図Ⅲ-2.7.12-5 両面 FSW による差厚 FSW 継手の断面マクロ，引張特性

		両面FSW	
		2m/min	
曲げ試験	3mm	○○○	
	5mm	○○○	
	7mm	○○○	

○:割れ無 ×:割れ

図Ⅲ-2.7.12-6 両面 FSW による差厚 FSW 継手の曲げ試験結果

3) 超ハイテン継手の拡散性水素量の調査による水素割れ・脆化の評価

従来のTWB接合技術であるレーザ溶接をベンチマークとして超ハイテンにおいて懸念される水素割れ・脆化の評価のため、各接合方法にて作製した継手の拡散性水素量を調査した結果、両面FSW、ハイブリッドFSWにより水素脆化抑止に有利な接合が可能であることを確認した。

a. 実験条件

表Ⅲ-2.7.12-7に示すように従来のTWB接合技術であるレーザ溶接、両面FSW、そして高周波加熱を予熱の熱源としたハイブリッドFSWにより、板厚1.6mm 980MPa冷延鋼板を用いて接合を実施した。ハイブリッドFSWに関しては、高周波誘導加熱コイルをツール前方に配置し、表Ⅲ-2.7.12-8に示す接合条件により接合を行った。得られた継手から、接合部の長さ方向に40mm、接合部を中央に幅方向140mmとして採取したサンプルを用い、表Ⅲ-2.7.12-9に示すガスクロを用いた昇温脱離分析法により拡散性水素量を測定した。

表Ⅲ-2.7.12-7 拡散性水素量の調査で用いた接合方法

	接合速度	レーザ出力	高周波予熱出力	ツール回転数
レーザ溶接	6m/min	4kW	-	-
両面FSW	3m/min	-	-	1500rpm
ハイブリッドFSW	6m/min	-	46kW	1500rpm

表Ⅲ-2.7.12-8 高周波加熱による予熱両面 FSW の接合条件

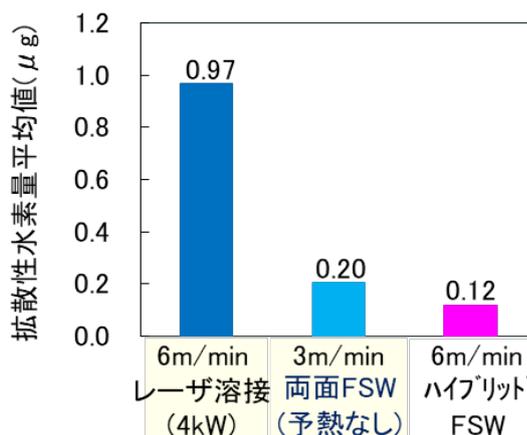
		上側ツール	下側ツール
両面FSW	ツール形状	12φ-0.5mmピン	12φ-0.5mmピン
	ツール角度	1.5°	1.5°
	ショルダ間距離	0.8mm	
	ツール回転数	1500rpm	1500rpm
	接合速度	3.0~6.0m/min	
高周波予熱	周波数	80kHz	
	出力	12~97kW	

表Ⅲ-2.7.12-9 ガスクロを用いた昇温脱離分析法により拡散性水素量の測定方法

サンプル前処理	超音波洗浄
サンプルサイズ	40×140 (接合長:40mm)
昇温速度	200°C/h
キャリアガス・流速	Ar・50mL/min
N数	3体

b. 実験結果

図Ⅲ-2.7.12-7 に板厚 1.6mm 980MPa 冷延鋼板を用いてレーザ溶接、両面 FSW、ハイブリッド FSW により作製した継手の拡散性水素量を示す。レーザ溶接と比較し、両面 FSW（予熱なし）、ハイブリッド FSW では拡散性水素量は 12～21%となり顕著な低減が可能であることが示された。レーザ溶接は熔融溶接であるため、大気中の水蒸気もしくは鋼板表面の防錆油などの水素源から熔融状態の溶接部へ水素が浸入するが、固相接合である FSW では接合中に熔融状態を経ることがなく、水素が浸入しにくいと考えられる。



図Ⅲ-2.7.12-7 板厚 1.6mm 980MPa 冷延鋼板を用いて各溶接方法により作製した継手の拡散性水素量

②ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発

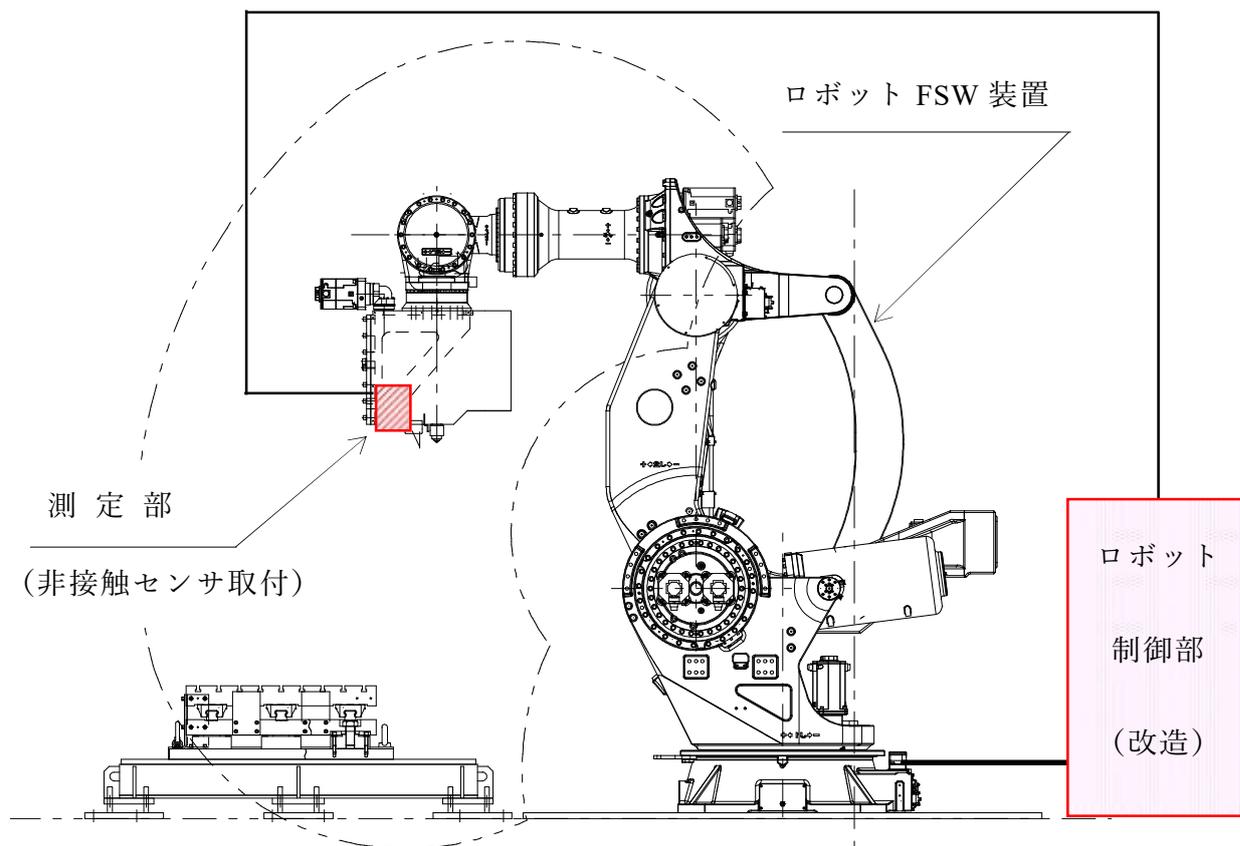
② -1 FSW 装置開発【株式会社日立パワーソリューションズ】

これまでに実施した接合データの収集、解析及び診断の結果から、材料と接合ツールの蓄熱状態等による接合負荷の変動で接合ツール先端位置が微少変動していることが判明した。これまで FSW の品質向上を目的として接合ツール温度を測定し、ツール温度が均一になるように接合条件（ツール回転数、接合速度等）を制御していたが、常に安定した制御をするためには高精度な測定が必要であり、ハイテン材の接合においてはツール冷却等の周囲温度の変動が制御精度や応答性に影響を与えていると推測した。

そこで、より高品質な FSW を行うことを目的として、ツール挿入深さを適切に自動制御する適応制御システムの開発を本研究テーマの最終目標であるロボット FSW 装置による曲面部材の線接合の実証を視野に入れ、既設ロボット FSW 装置を改造し適応制御システムを開発した。

1) システム構成

図Ⅲ-2.7.12-8 に適応制御システム組み込みロボット FSW 装置のシステム構成を示す。接合材料表面からツール先端（主軸ヘッド）までの距離を計測する測定部を設け、ツール挿入時から接合終了まで適正なツール挿入深さにリアルタイムで位置補正するシステムとした。

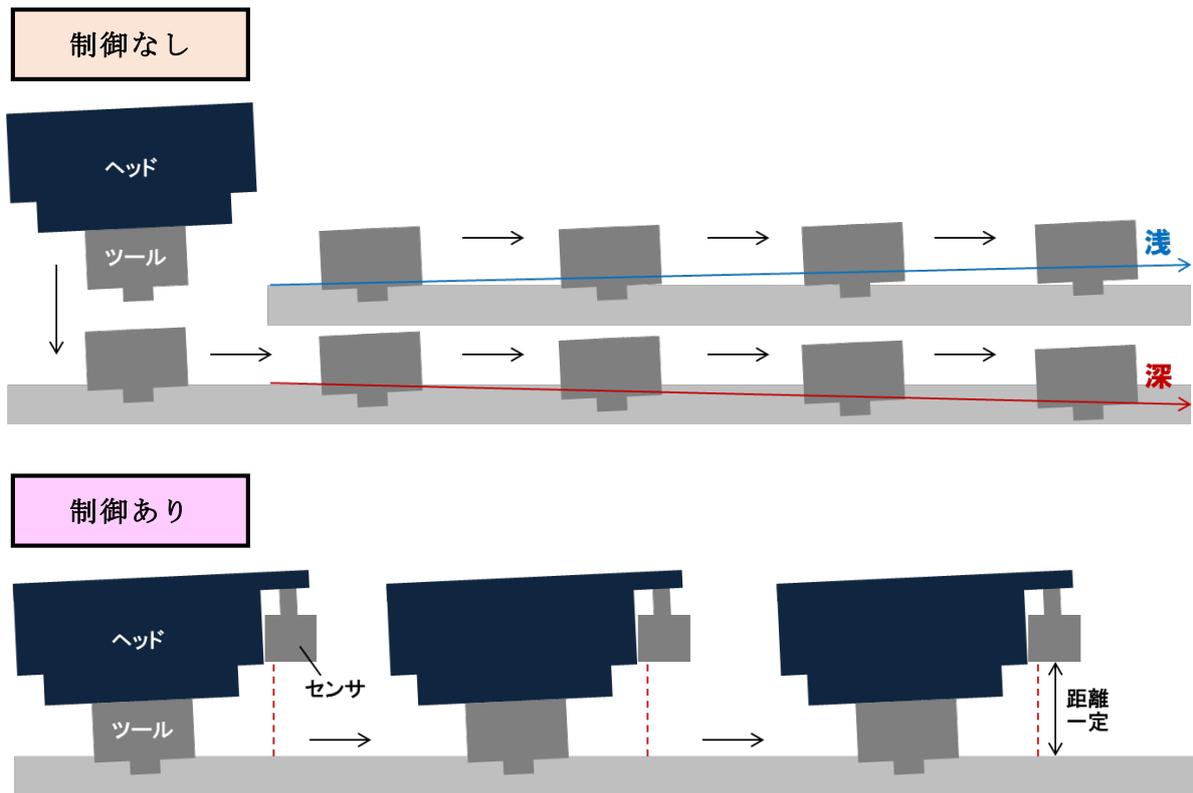


図Ⅲ-2.7.12-8 システム構成

2) 制御方法

図Ⅲ-2.7.12-9 に制御方法の概要を示す。制御無しの場合、接合が進行する過程でツール挿入量が不安定であった。これに対し本適応システムでは、ツール先端（主軸ヘッド）に設けた計測部で接合材料との距離を測定し、以下の制御をする方式とした。

- ① ツール挿入時、設定した距離（ツール挿入深さ）に到達した後、次動作（接合）に移行
- ② 接合開始から接合終了まで一定の距離を保つよう、しきい値（上限／下限）を任意に設定できるようにし、ツール挿入深さを制御



図Ⅲ-2.7.12-9 制御方法概要

3) 機能確認

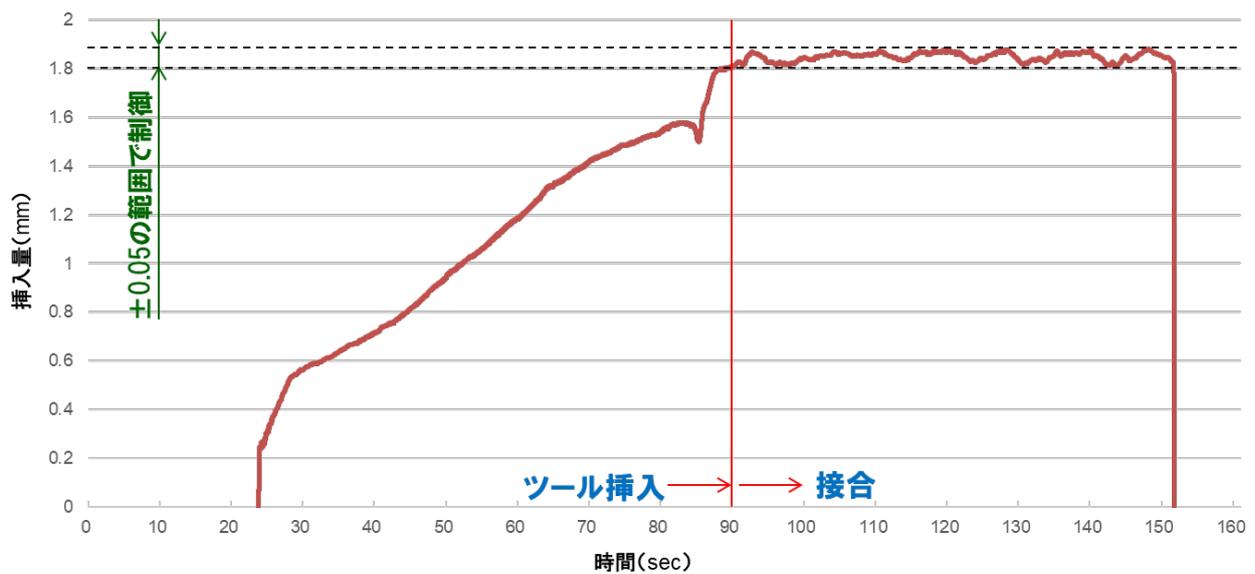
以下条件で接合テストを実施し、機能の確認を行った。

○接合テスト条件

- ・接合材料 : 熱間圧延材 (SCM) t 1.4mm
- ・接合ツール : Co 合金ツール (MAST2、水冷式)
- ・継手形状 : ビードンプレート

図Ⅲ-2.7.12-10 にツール挿入時から接合終了まで測定部で測定した距離の測定データを示す。本グラフからツール挿入後から接合終了まで、設定したしきい値内で一定の距離を保っていることを確認した。

図Ⅲ-2.7.12-11 に制御しない場合と制御した場合の接合ビード表面の写真を示す。制御しない場合は、接合が接合終点に向かうにつれて接合バリが増加していることから、ツール挿入深さが深くなっていることが分かる。それに対し、制御した場合は、接合開始から終了まで接合バリの発生量がほぼ均一であることからツール挿入深さが安定していることを示している。以上によりハイテン材の接合においては本適応制御システムが接合品質の向上に有効であると考えられる。



図Ⅲ-2.7.12-10 測定データ

制御なし



制御あり



接合方向

図Ⅲ-2.7.12-11 接合ビード表面

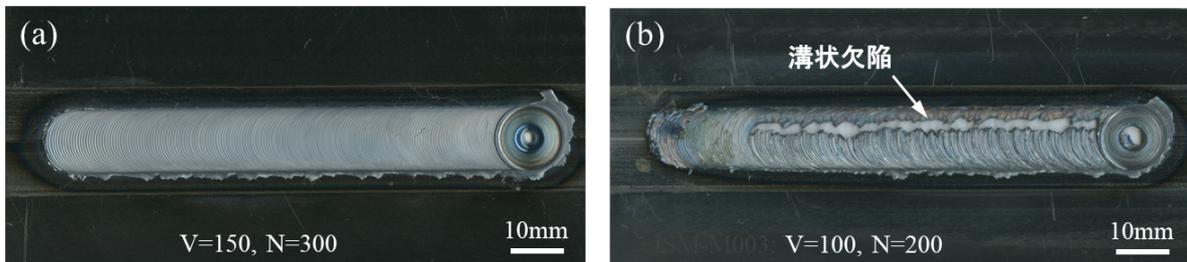
②-2 FSW 接合プロセス技術開発【株式会社日立製作所】

1) 1.5GPa 級超ハイテン鋼の適正接合条件の検討

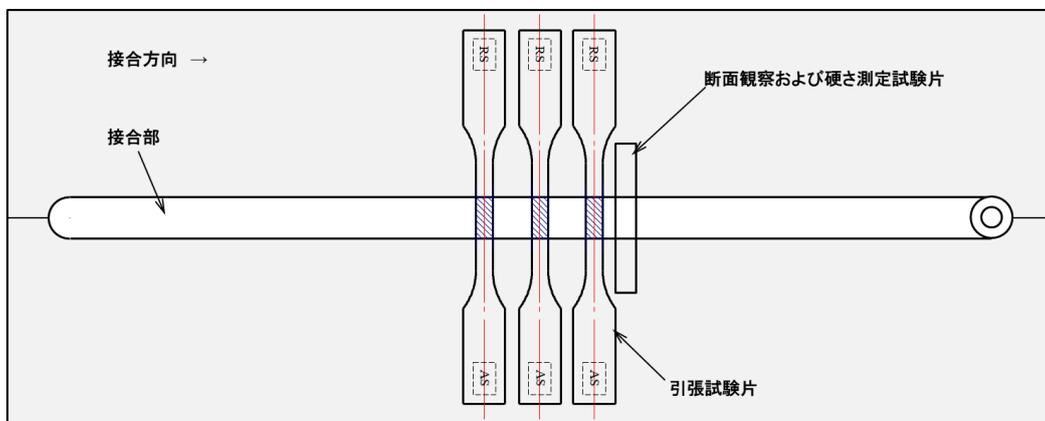
引張強度 1.5GPa 級の超ハイテン鋼を接合材として、FSW の適正接合条件の検討を実施した。接合素材は引張強度 1500MPa、伸び 7% である。素材の寸法は厚み 3.2mm、幅 150mm、長さ 220mm で、この素材を厚み 1.4mm、幅 50mm、長さ 220mm に加工し、2 枚を突合せて接合した。適正接合条件の検討ではツール回転速度 (N) と接合速度 (V) をパラメータとした。

図Ⅲ-2.7.12-12 に外観写真の一例を示す。(a)は表面欠陥が認められなかった例、(b)は認められた例である。表面欠陥が認められなかった接合条件で接合した材料を引張

試験した。引張試験片の採取位置を図Ⅲ-2.7.12-13に示す。接合条件により引張特性は異なったが、評価した範囲で最も引張強度が高かった接合材は引張強度 1484MPa、伸び 4%であった。



図Ⅲ-2.7.12-12 接合材の外観写真



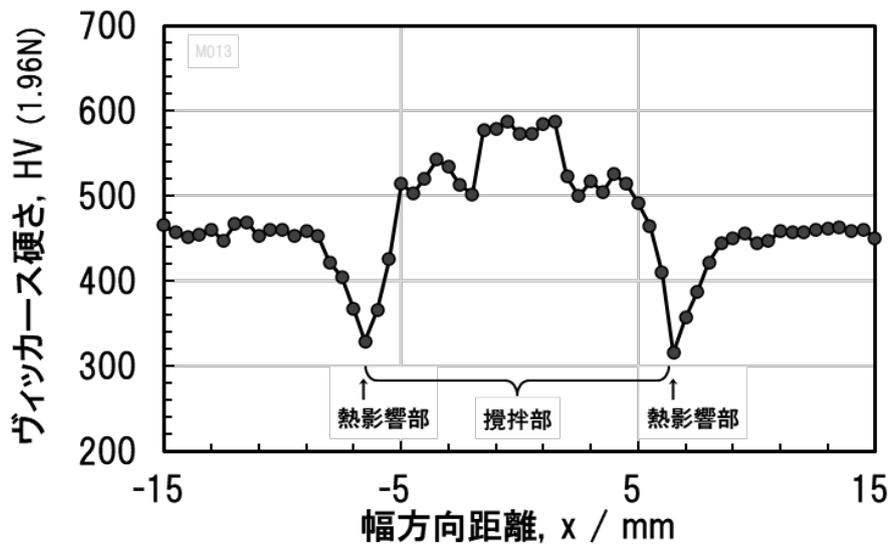
図Ⅲ-2.7.12-13 試験片採取位置

この接合材の断面写真を図Ⅲ-2.7.12-14に示す。写真中央の色が異なる領域が攪拌部と呼ばれる領域で、接合部に相当する。接合部に内部欠陥等は認められず、健全な接合部であることが確認できる。

図Ⅲ-2.7.12-15に引張試験した材料の接合部の硬さ分布を示す。母材の硬さは460HV程度であるが、攪拌部は500~600HV程度に上昇していた。これは、FSW中の加熱と冷却による焼入れ効果と考えている。攪拌部の両端に硬さが340HV程度に低下している部分があるが、この部分は熱影響部と考えている。



図Ⅲ-2.7.12-14 接合部断面写真

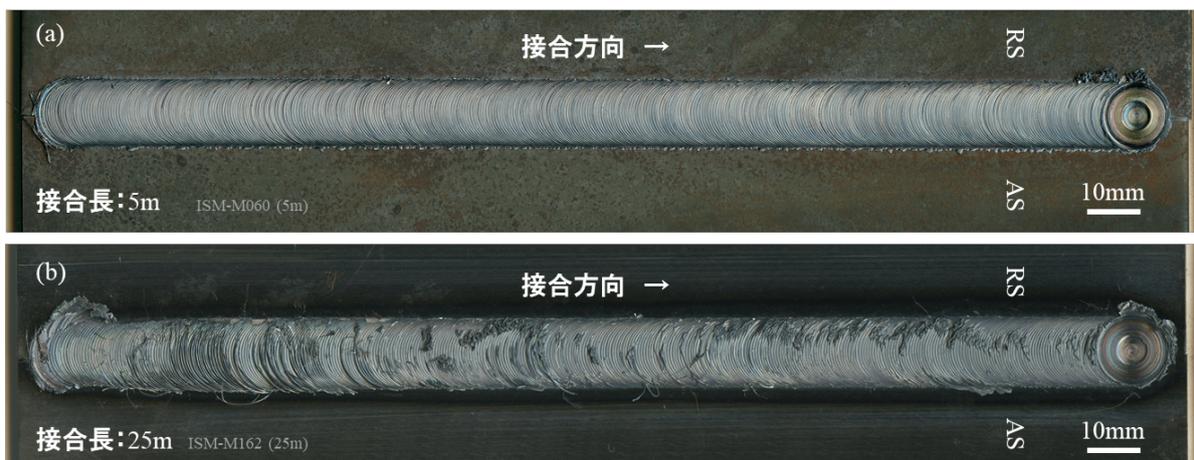


図Ⅲ-2.7.12-15 硬さ分布

2) ツール耐久性評価

ツールの耐久性（寿命）は接合コストに影響するため、実用化の観点で重要である。そこで、長距離接合を実施し、ツールの摩耗量と接合部の品質の関係を調査した。接合素材は前述した 1.5GPa 級の超ハイテン鋼を使用した。接合条件は前節で適正と判断した条件とした。接合材は引張強度を評価する場合のみ厚み 1.4mm に加工した材料を使用し、それ以外は圧延のままの厚み 3.2mm の材料を使用した。接合材の幅と長さはいずれの場合も 50mm、220mm とし、材料を 2 枚突合せて接合した。1 回の接合距離は 200mm とした。

図Ⅲ-2.7.12-16 に接合材の外観写真を示す。(a)の接合長 5m では接合部の表面性状は良好であるが、(b)の接合長 25m では接合部の表面に荒れが発生している。表面の荒れはツールの摩耗に起因したものと考えている。



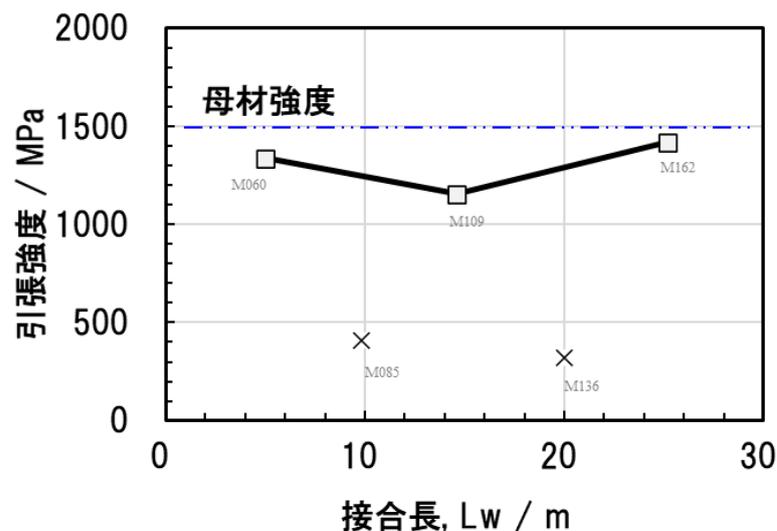
図Ⅲ-2.7.12-16 接合材の外観写真

図Ⅲ-2.7.12-17 に接合長と引張試験の関係を示す。接合長 10m 部と 20m で極端に引張強度が低下していたが、接合長 25m 部では 1419MPa の引張強度（母材の 95% の強

度)を示した。

接合部断面観察の結果、引張強度が低かった接合部には裏面に未接合部が認められ、攪拌部も小さかった。

ツール挿入量が小さかったことが原因と考えている。ツールは接合長の増加に伴い摩耗するため、これにより、ツール挿入量が小さくなったと考えている。接合試験ではビード幅やツールの赤熱状態を観察し、ツール挿入深さを修正したが、全接合において修正を加えなかったため、この例のようなツール挿入量が小さい場合が生じたと考えている。ツールの摩耗量に応じてツール挿入量を適正に修正することで、全接合長において、安定した引張強度を示す接合材が得られるものと考えている。



図Ⅲ-2.7.12-17 接合長と引張強度の関係

3) まとめ

1.5GPa 級超ハイテン鋼の適正接合条件を検討した結果、母材と同等の引張強度を有する接合材が得られることが明らかになった。

1.5GPa 級超ハイテン鋼を用いたツール耐久性評価の結果、接合長 25m の接合が可能なことを実証した。接合長 25m 部の強度は母材の 95%であったが、それ以外の部分では強度が小さい場合もあった。ツール摩耗に伴い、ツール挿入深さが小さくなったことが原因と推定している。

②-3 ツール素材量産技術開発【日立金属株式会社】

1) SPHC 鋼板接合時のツール材料特性評価

改良合金 3 のマスターインゴットにて精密鋳造した Co 合金製ツールを用いて、370MPa 級の SPHC 冷間圧延鋼板同士の FSW 接合を行った。接合長は 30.14m であり、接合条件は低速走行・中回転速度とした。接合試験後のプローブ部表面を SEM にて観察した結果を図Ⅲ-2.7.12-18 に示す。試験後のツールのプローブおよびショルダー部ではツール自体の損傷はほとんど見られず、ほぼ試験前の形状を保っていた。次に、接合後のツールの断面 SEM 組織を図Ⅲ-2.7.12-19 に示す。ツールの全ての部位において、鋼板と接触したツールの表面近傍でも粗大な硬質粒子がそのまま残っており、硬

質粒子の破碎やマトリックスの組織的な変化は見られない。続いて、接合後のツール断面の EPMA による元素マッピングを図 III-2.7.12-20 に示す。ツール表面には研磨による凝着物の脱落を防ぐために、Ni メッキを施している。ツール表面には SPHC 鋼板そのものが凝着しており、SPHC 鋼板の外表面には酸素が検出された。しかし、ツールと凝着した SPHC 鋼板の界面においては、鉄、コバルト、酸素が拡散した形跡は見られないため、ツールそのものは接合中に高温まで昇温していないと考えられる。

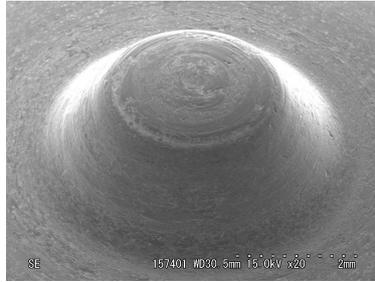


図 III-2.7.12-18 370MPa 級 SPHC 鋼板接合後のツールのプローブ部表面における SEM 観察結果

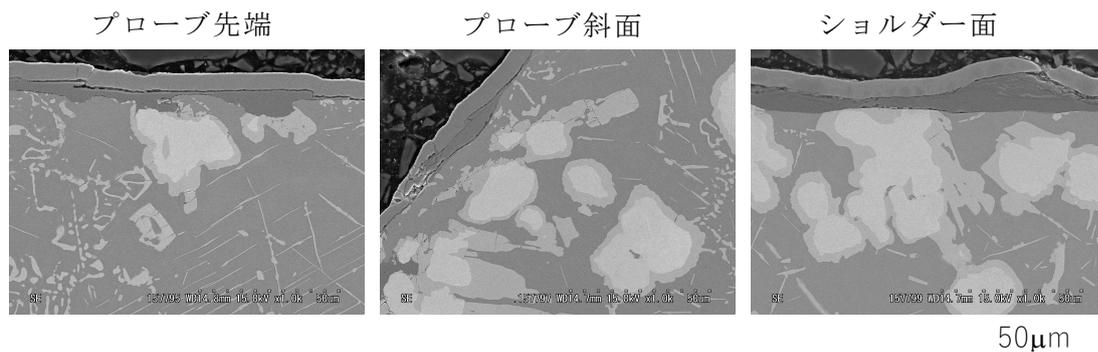


図 III-2.7.12-19 370MPa 級 SPHC 鋼板接合後の Co 合金ツールの断面 SEM 組織

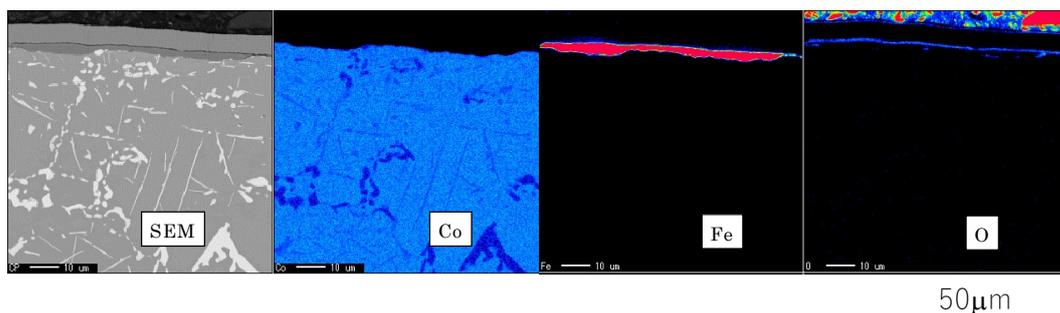


図 III-2.7.12-20 370MPa 級 SPHC 鋼板接合後の Co 合金ツール断面の元素マッピング

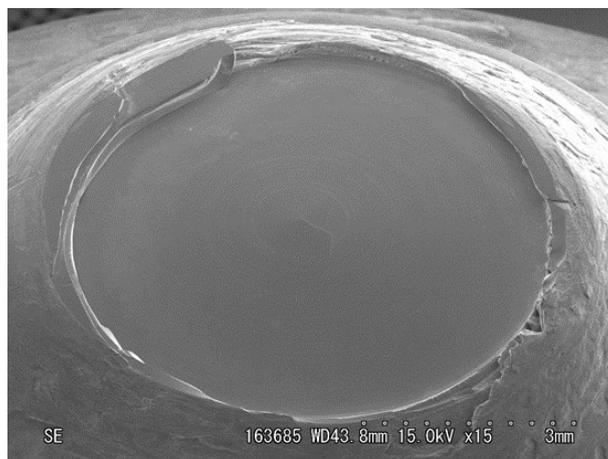
2) SUS304 鋼板接合時のツール材料特性評価

1.5GPa 級超ハイテン鋼の模擬材料として、FSW において難接合性となる SUS304 鋼板同士の FSW 接合を行い、接合後のツールの損傷評価を行った。Co 合金製ツールは、ベース合金のマスターインゴットを精密铸造したものを用い、接合長は 100mm、接合条件は低速走行・中回転速度とした。接合試験後のプローブ部表面を SEM にて観察

した結果を図Ⅲ-2.7.12-21に示す。試験後のツールのプローブ、傾斜部およびショルダー部全体にわたり、鋼板と見られる相が凝着しており、外観上のツールの損傷は確認できなかった。

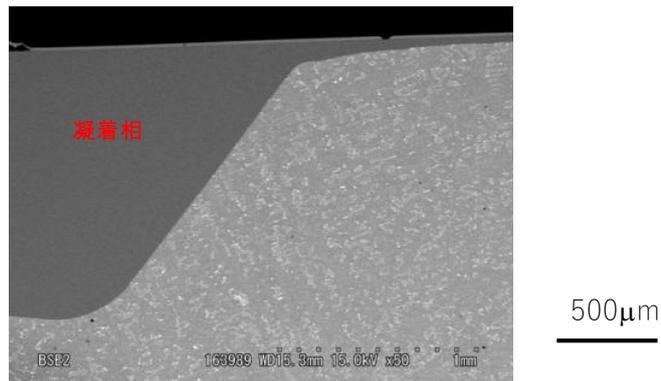
次に接合後のツールの断面 SEM 組織を図Ⅲ-2.7.12-22に示す。ツールの全ての部位において、鋼板と接触したツールの表面近傍でも粗大な硬質粒子がそのまま残っており、ほぼ試験前の形状を保っていた。また、硬質粒子の破碎や母相の組織的な変化は見られず、ツールは損傷していないことが示唆された。続いて、接合後のツール断面の EPMA による元素マッピングを図Ⅲ-2.7.12-23に示す。ツール表面に多く凝着した相は、Fe が多量に検出されたため、SUS304 鋼板であった。ツールと SUS304 鋼板の界面には鉄、コバルト、ニッケルを含み、かつ微量に酸素を含んだ相が確認された、これらはツールと鋼板が摩擦されることによって形成された移着物であると考えられる。一方、鋼板に含まれる鉄がツール内部に拡散した形跡が見られないため、母材に含まれる元素が拡散するほどの高温までは昇温していないことが示唆される。

次に、接合試験後のツール断面の室温における各部位の硬さを調査した。接合前のツールの断面硬さは、部位によってやや異なり約 500~530HV であるのに対し、接合試験後のツールの硬さは、ほとんどの部位で変わらなかった。最も熱負荷の大きい部位では、試験前に比べてやや低下したが、接合試験に摩耗を伴うような急激な低下はないことを確認した。

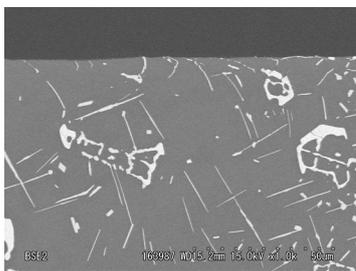


図Ⅲ-2.7.12-21 SUS304 鋼板接合後の Co 合金ツールのプローブ部表面における SEM 観察結果

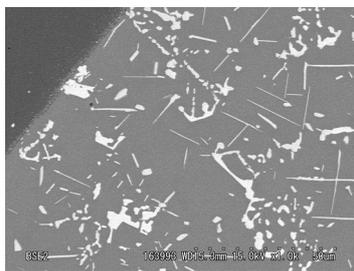
ツール全体



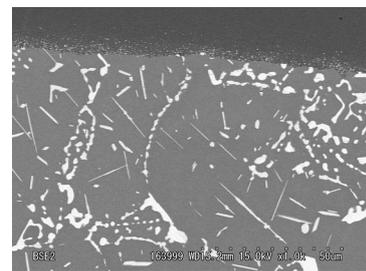
プローブ先端



プローブ斜面

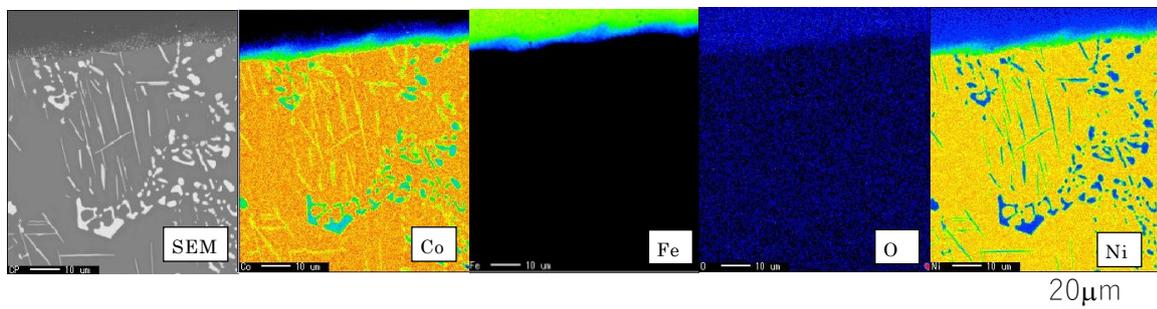


ショルダー面



50 μm

図Ⅲ-2.7.12-22 SUS304 鋼板接合後の Co 合金ツールの断面 SEM 組織



図Ⅲ-2.7.12-23 SUS304 鋼板接合後の Co 合金ツール断面の元素マッピング

3) まとめ

精密鋳造した Co 合金製ツールを用いて、370MPa 級の SPHC 冷間圧延鋼板、1.5GPa 級超ハイテン鋼の模擬材料である SUS304 鋼板を FSW 接合し、試験後のツールのミクロ組織、硬さ調査を行った。試験後のツール表面の組織変化は部分的に留まり、また硬さも急激には低下せず、ツール各部位の急激な摩耗は起こらないことを確認した。

②-4 FSW ツール量産技術開発【株式会社日立メタルプレシジョン】

1) 精密鋳造法による Co 合金ツールの製作

先端に突起物のあるツールを回転させながら接合部に押し込み、摩擦熱によって軟化した材料を攪拌して接合する FSW ツールには、高温域での高強度、高靱性、高剛性が要求される。これまでツールの高性能化を目的に、合金成分を改良した Co 合金

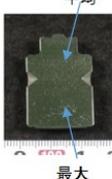
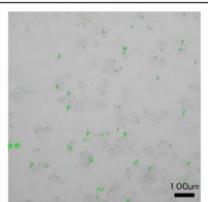
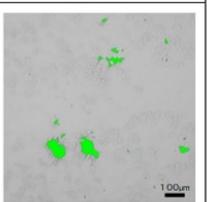
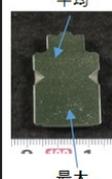
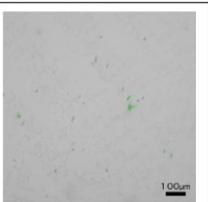
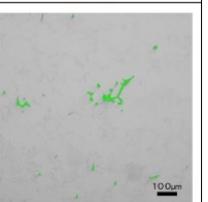
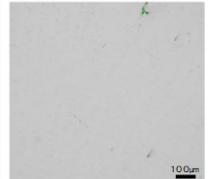
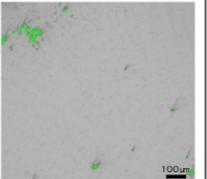
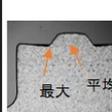
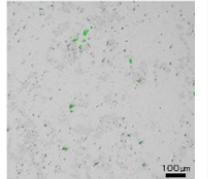
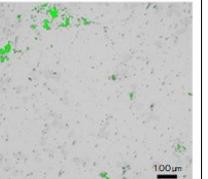
が研究されてきた。一方コストを抑える製法として用いる精密鑄造法は、溶融金属を凝固させて形を作る製法であり、合金成分の違いで溶湯の物性値が変わるため、その凝固プロセスのなかで如何に欠陥の少ない製品を作り込むかが必須である。内部欠陥は強度低下の要因であり、ツール寿命に大きく影響するため欠陥の少ないツールを製造することが重要な課題であった。

従来からツールの欠陥は合金成分によって発生形態や発生量が異なり、断面内部には鑄造品特有のマイクロシュリンケージが確認されていた。シュリンケージの形態は空洞で形状については球状や樹枝状が観察され、凝固が始まる表層付近にも分散し、湯口側の中央付近にはより多くの発生傾向が見られた。これは熱ボリュームが大きいことに起因し、湯口から最終凝固部に十分な押湯供給が得られなかったことから発生したと想定された。本研究では Co 合金の使用量を低減させコストダウンを図る目的で、ツール外径の小径化 ($\phi 30 \rightarrow \phi 20$) に取組んだ。これは内部欠陥に対しても優位であり、凝固の基本となる製品部の熱ボリュームを下げる事ができた。更に湯口サイズの最適化を行い、凝固パラメータとなる鑄型温度や鑄造温度、冷却方法を選定し見直した。結果、最終凝固部に適正な押湯効果が得られ、空洞の大きさは小さくなり発生量も少ないツールを製造することが可能になった。

断面観察に於いて確認された空洞の空隙率を測定することにより、欠陥状態を定量的に示した。測定箇所はツール全体と先端部のみを観察した場合の平均と最大で評価した。比較のため従来製造したベース合金及び改良合金 3 の測定結果を表 III-2.7.12-10 に、観察した⑥ $\phi 20$ ツールの空隙状態を図 III-2.7.12-24 に示す。ツール先端部の空隙率を④ $\phi 30$ と⑥ $\phi 20$ で比較すると、ベース合金では 89%、改良合金 3 では 87%と明らかに減少した結果となった。本研究で行った小径化や湯口サイズ、鑄造条件の最適化は内部欠陥に極めて効果があり、課題であった「欠陥の少ないツールを製造する」を概ね達成できたと言える。但し鑄造には、外気温や鑄造時の変動要因が多いことから、調査は継続してバラツキを把握しておくことが必要と考える。

表 III-2.7.12-10 空隙率測定結果

観察部位		ベース合金			改良合金 3		
		平均(%)	最大(%)	減少率(%)	平均(%)	最大(%)	減少率(%)
全体	① $\phi 17_ \phi 30$	1.73	13.75	95	5.39	9.82	92
	② $\phi 18_ \phi 20$	0.43	3.27		0.34	1.69	
	③ $\phi 19_ \phi 20$	0.08	0.53		0.42	1.50	
ツール先端部	④ $\phi 17_ \phi 30$	0.19	0.80	89	1.37	3.76	87
	⑤ $\phi 18_ \phi 20$	0.18	0.94		0.25	1.04	
	⑥ $\phi 19_ \phi 20$	0.02	0.40		0.18	0.80	

2019年	Φ20_ベース合金			Φ20_改良合金3		
	観察位置	平均値	最大値	観察位置	平均値	最大値
全体	 平均 最大	 100μm	 100μm	 平均 最大	 100μm	 100μm
ツール 先端部	 最大 平均	 100μm	 100μm	 最大 平均	 100μm	 100μm

図Ⅲ-2.7.12-24 2019年度_φ20【ベース合金、改良合金3】空隙状態

2) 金型による形状多様化ツールの製作

Co合金の使用量を減らしてコストダウンをする目的で、ツールサイズの小径化(φ30→φ20)を行い、従来のミーリングチャックや冷却機構を見直すことで形状を決定して、精密鑄造に用いられるWAX模型金型を新規製作した。この金型の特徴はそれぞれの先端形状を掘り込んだパーツを交換することにより多様な模型を成形することが出来るため、先端部は加工レス(素材のまま)で使うことが可能である。

金型で成形されたWAX模型を鑄造した後に、加工完成品まで施して従来品とのコストを比較した。小径にしたことから鑄型への組付数を1.8倍を増やして鑄造歩留りを向上させ、得られた鑄造品の重量は従来品と比較して58%軽くなり原材料費も抑えられた結果、素材単価は40%低減された。加工費に於いても必要部のみを加工することでTotalコストを半分以下に低減させた。図Ⅲ-2.7.12-25に精密鑄造品の製造工程及びツール形状比較、表Ⅲ-2.7.12-11にコスト効果の内訳を示す。



図Ⅲ-2.7.12-25 精密鋳造品の製造工程及びツール形状比較

表Ⅲ-2.7.12-11 コスト効果の内訳

	組付数 (p)	素材重量 (g)	素材単価 (%)	加工費 (%)
従来ツール_φ30	36	235	100	100
小径ツール_φ20	64	97	60	85
効果	1.8倍	▲58%	▲40%	▲15%

3) 研究成果の意義

超ハイテンや鉄鋼材を接合するには、高温域での高強度と耐久性を備え持つツールの開発が必須であり、ツールを製造する観点に於いては極めて欠陥の少ないツールを安定的に安く供給することが実用化に向けた重要な課題と考える。本研究ではツール寿命に影響する内部欠陥及びコスト低減に向けて取り組み、方向性を示す意義ある成果が得られたと考える。

②-5 ツール合金開発，接合部解析【再委託先①】

1) 鉄鋼の FSW に適した Co 合金 FSW ツールの成分最適化とツール損傷低減の方策

これまでの研究において、合金成分を変化させることで、金属組織や諸特性を変えた Co 合金を設計し、鉄鋼に対する FSW 試験を実施した結果、 γ/γ' 母材に分散する金属間化合物や炭化物などの硬質粒子の分布状態に依存し、2~5 μm の硬質粒子が高密度に分布するほど、耐摩耗性が向上する可能性が示唆された。更なる高性能化を目指して、合金分量を微調整することで硬質粒子の分布状態を変えた Co 合金を追加設計し、S45C (中炭素鋼) に対する FSW に供して、Co 合金 FSW ツールの成分最適化

とツール損傷低減の方策について検討した。その結果、追加設計された Co 合金ツールは FSW に伴い、これまでの報告と同様、ショルダ外縁部から摩耗する傾向を示したが、微細な硬質粒子を高密度に分散した合金においては、ツール摩耗量の著しい低減が確認された。3 次元的なツール摩耗を定量的に評価すると、ショルダ外縁部からの摩耗が確認できるが、マクロ的なツール摩耗はほとんど生じていなかった。単位摺動距離当たりのショルダ外縁部の摩耗体積（ショルダ摩耗率）をツール摩耗の指標として用いた結果、最良の耐摩耗性を示したショルダ摩耗率は既存の開発ツールに比べて半分以下に低減できた。また、耐摩耗性に対するツール材の物性・マイクロ組織の関係について詳細に検討した結果、微細な硬質粒子が高密度に分散した状態を定量的に示す指標として、硬質粒子間の平均距離を用いることで比較的良好な関係を得ることができた。すなわち、硬質粒子間の平均距離が小さい Co 合金 FSW ツールほど耐摩耗性に優れることが示唆された。

2) 鉄鋼 FSW 継手の形状・性能に及ぼすツール摩耗の影響

鉄鋼の FSW では、できるだけツール摩耗を抑制する接合プロセスや装置、ツール材自体の開発が不可欠であるが、FSW ツールが摩耗した後、得られた FSW 継手の形状・性能がどのように変化するのかについて調べ、許容できるツール摩耗量や程度を明らかにしておく必要がある。そこで、摩耗度が異なる FSW ツールで得られた鋼 FSW 継手の断面マクロや性能を評価した。ツール摩耗が生じやすい接合条件にて S45C を FSW した結果、接合距離の増加とともにプローブ先端とショルダ外縁部が摩耗し、プローブが短くなった。ツール摩耗度が異なる FSW ツールで得られた FSW 継手の継手断面マクロを調べた結果、接合距離が短い場合には、攪拌部中央で凹むことはないが、接合距離の増加とともに、攪拌部中央における凹みが増加して、波形のパターンが現れ、攪拌部の面積も増加する傾向が見られた。接合距離の増加とともに攪拌部中央における凹みと攪拌部面積が増加したのは、ツール摩耗に伴ってツール挿入深さを増加させる必要があったためである。FSW ではショルダ面が被接合材表面に接触することが必須であるが、接合距離の増加とともにショルダ外縁部が摩耗するため、必然的にツール挿入深さを増加させる必要があったことに起因している。また、攪拌部におけるマイクロ組織と硬さを調べた結果、接合距離が増加するほどマルテンサイト量が減少し、硬さは低下した。これはツール摩耗に伴ってツール挿入深さを増加させたため、結果的に接合時の入熱が上昇して冷却速度が低下したためと考えられた。

3) 超ハイテンの FSW における条件適正化

代表的な Cr-Mo 鋼である SCM435 に対して、焼ならし、焼入れおよび焼戻し処理を行ったものを供試材として用いて突合せ FSW を行った。接合ツールは本研究開発で組成や形状を適正化した Co 合金製のものをを用いた。条件を適正化するため、ツール回転速度 200~400 rpm、接合速度 100~400 mm/min の範囲で変化させた。種々の接合条件で FSW を行った結果、接合速度 100 mm/min では表面外観が荒れたが、それ以外の条件では表面が滑らかな継手を得ることができた。滑らかな表面外観が得られた 5 つの接合条件で得られた継手の断面マクロ写真を調べた結果、全ての攪拌部内にトン

ネル欠陥などの体積欠陥は観察されなかったが、3つの接合条件 300rpm-200mm/min、300rpm-300mm/min、400rpm-400mm/min では、攪拌部下部に初期突合せ面の残存と思われる欠陥、キッシングボンドが観察された。本研究の FSW では、装置に一定のツール挿入深さ値を入力して実施したため、FSW 走行時にはツールに働く反力により、実質的なツール挿入深さが減少することが想定される。キッシングボンドが観察された継手は、ツール回転速度に対して接合速度が速い接合条件で得られたものであったことから、ツールへの反力が大きく、実質的なツール挿入深さが減少したため、キッシングボンドが残されたものと推察された。超ハイテン継手の攪拌部の SEM 観察をおこなった結果、接合条件に依らず、全ての攪拌部において、マルテンサイトが主体のラス状組織が観察された。マルテンサイトの分率や形状、サイズに及ぼす接合条件の影響はあまり見られなかった。超ハイテン継手の硬さ分布を調べた結果、母材の硬さは 450~480 Hv 程度であったが、攪拌部の硬さは約 600 Hv であった。攪拌部硬さに及ぼす接合条件の影響はほとんど見られなかった。これは先にも述べたように、全ての攪拌部においてマルテンサイト主体のラス状組織が得られており、接合条件の影響は見られなかったことと一致している。母材と攪拌部の間、すなわち熱影響部 (HAZ) で、硬さが 300 Hv 程度まで低下しており、いわゆる HAZ 軟化が見られた。軟化部の硬さに及ぼす接合条件の影響はあまり見られなかったが、軟化部の位置はツール回転速度が高いほど接合中心から遠くへ移動する傾向が見られた。これらの結果から、断面マクロ上にキッシングボンドが観察されない 300rpm-150mm/min と 400rpm-200mm/min のうち、熱影響が少ない 300rpm-150mm/min を適正化条件として選定することとした。

4) 適正化条件で得られた超ハイテン接合部のマイクロ組織と機械的特性

適正化条件 (300rpm-150mm/min) で得られた超ハイテン接合部におけるマイクロ組織分布について調べた。母材部にはラス状組織の中に微小な炭化物が観察されることから、典型的な焼戻しマルテンサイト組織であることが分かった。HAZ 軟化が生じた“軟化部”では、ラス状組織が粗大化し、炭化物の量およびサイズが増加していたことから、母材部の焼戻しマルテンサイトが更に焼戻されたものと考えられた。このような組織は A1 点直下へ加熱されることで得られたものと考えられた。HAZ には、マルテンサイトとフェライトが共存した組織が観察された。マルテンサイト中に炭化物は観察されないことから、FSW の冷却過程において新たに形成された焼入れマルテンサイトと考えられた。HAZ において、軟化部から攪拌部に近づくにつれて、焼入れマルテンサイト量が増加していたため、HAZ は FSW 過程での最高到達温度が A1 点~A3 点の間に加熱された領域と考えられた。攪拌部では、焼入れマルテンサイトの単相組織が観察された。この接合部に対して継手引張試験を実施した結果、引張強さは約 1480 MPa、伸びは約 4%であった。HAZ 軟化部において優先的に塑性変形が生じて破断に至ったが、硬化した攪拌部ではほとんど塑性変形が生じていないことが示された。

5) 研究成果の意義

超ハイテン接合部を実用化するには、接合過程での FSW ツール摩耗を最小限に抑える方策、ツール摩耗が生じたときに得られる継手の材料組織・諸特性、超ハイテンに対する FSW 条件・プロセスの最適化、最適化条件で得られた継手の材料組織・諸特性を明らかにする必要がある。上述した研究成果は、実製造へフォードバックすべき必要不可欠な基礎データに該当しており、極めて重要な意義があるものと考えている。

②-6 接合材の疲労破壊評価と解析【再委託先②】

1) 研究開発の概要

低炭素化社会の実現が命題になっている中で、輸送機器の軽量化、製造コストの低減、製造プロセスの簡略化は極めて大きな貢献を果たす。その中でも、固相状態のまま、かつ、連続工程で高強度鋼製の 3 次元複雑構造体の製造を可能とする摩擦攪拌接合法(FSW)は、特に注目されている技術である^{1) -3)}。その一方で、これを可能にするには、接合の際のツール素材の開発、ツール形状の選択、接合条件の選択と最適化が不可欠である。そしてまた、高強度材は難接合材であることが多いことから²⁾、疲労強度を始めとする接合体の強度的信頼性を確保した上で工業的な製造技術にまで昇華させることは極めて困難とされてきた。

本研究では、熔融溶接が難しい材料の代表である高強度 TRIP 鋼と、汎用性と用途が広い軟鋼を組み合わせたいわゆる異材接合体開発を目指し、自主開発した FSW 装置、そのためのツール素材、ツール形状、接合条件などを変数とした FSW 接合体を製作し、その疲労強度を調査した。あわせて、接合時に形成された欠陥を想定し、そこからの疲労き裂伝ば抵抗を調査することにより、開発した異材接合体の信頼性を保証する基盤的情報とした。

2) 結果の要約

[1] 疲労強度

・調査手法

熔融溶接が難しい材料の代表である 1.2 GPa 級の強度を有する高強度 TRIP 鋼と、汎用性と用途が広い軟鋼を組み合わせたいわゆる突き合わせ異材接合体を製作した。接合体の応用先として軽量化を強く意識した薄肉構造物とし、自動車への用途開拓を強く意識して、厚さ 1.4 mm の板材とした。TRIP 鋼の受入れの際の熱処理は、900°Cx180s の焼入れの後、400°Cx30 分の焼戻し処理を施した。この受入材に対し、自主開発装置を用いて FSW により突き合わせ接合を施した。接合条件は、ツール回転数 300 rpm、接合速度 150 mm/min とした。使用したツールは、独自開発の Co 基合金製水冷方式のもので、ショルダ径は 12mm である。比較のため、TRIP/TRIP の同種材料 FSW 継手も準備した。

これら接合体の FSW 施工時の表面凹凸部を研削加工により取り除いた上で、接合部厚さ 0.8mm、幅 4mm、長さ 20mm の評点部を持つダンベル型の疲労試験片を放電加工により切出した。試験片の評点部の平行度については特に注意し、疲労試験に先

だつて表面を手研磨した。

一般に、高強度材の疲労強度は軸負荷下と曲げ負荷下では前者の方が低い強度を示すことから、本研究ではより信頼性の高い（安全側の）知見を得る目的から、軸負荷下の疲労強度を評価した。疲労強度評価に当たっては、試験系のアライメントには特に配慮し、基本応力比は 0.4 とした。周波数は 10Hz とし、強度のみならずき裂発生起点についても注目した。応力比の影響も調査するため、応力比は 0.1 とする条件下の疲労強度も調査した。

・結果

最初に、接合体の接合方向と垂直な断面における硬さ分布と組織観察を行った(図 III-2.7.12-26)。これより、FSW の攪拌(FSW)中心部では硬さが最も高くなる一方で、軟鋼部(Mild)は最も硬さが低い。また、FSW/TRIP 境界部、及び、FSW/MILD 境界部には、通常の溶融を伴う溶接の際に形成され易い低硬度熱影響部などの形成は見られない。

つぎに、接合試験片の疲労寿命曲線を母材単体のそれと比較して図 III-2.7.12-27 に示す。これより、TRIP/TRIP の同種材料 FSW 継手の疲労強度は TRIP 母材のそれに対して約 80%であり、異種材料 FSW 継手の疲労強度は同種材料 FSW 継手のそれに対し、約 3/4 である。最も注目すべきは、異種材料 FSW 継手の疲労破損が接合部よりも十分離れた軟鋼母材部であったことである。このことは本研究で探索した接合条件は良好であったこと、異種材料 FSW 継手の疲労強度の絶対値は軟鋼のそれに強く支配されたものであること示している。すなわち、当初の目的「厚み 2mm 以下の炭素鋼に対して、母材と同等の引張強度および母材の 85%程度の疲労強度を有する接合体製作条件を見いだす」は概ね達成できたと言える。

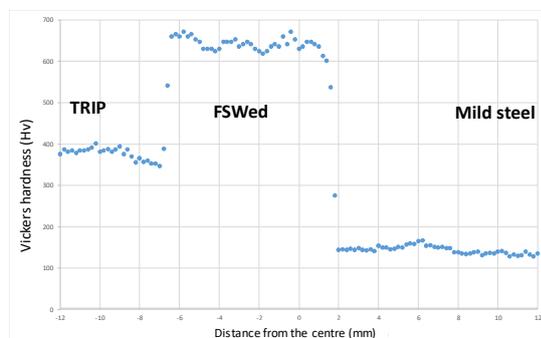


図 III-2.7.12-26 TRIP/軟鋼 FSW 異材接合体の硬さ分布

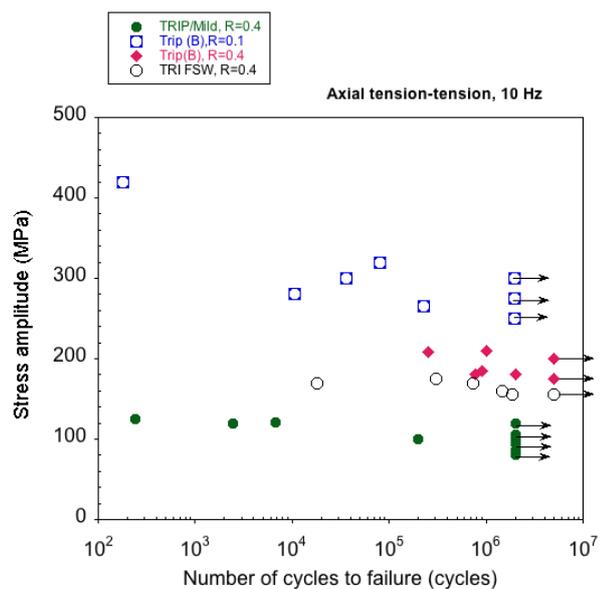
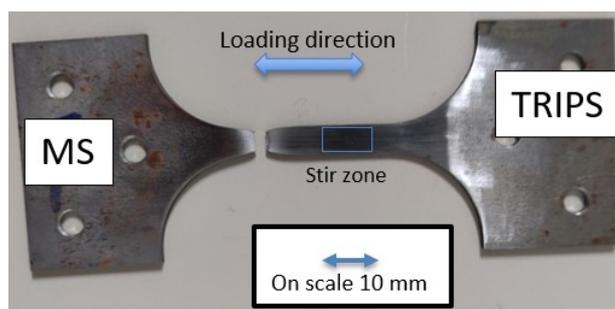


図 III-2.7.12-27 TRIP/軟鋼 FSW 異材接合体の疲労強度



図Ⅲ-2.7.12-28 TRIP/軟鋼 FSW 異材接合体の疲労破損位置

[2] 疲労き裂進展に対する抵抗

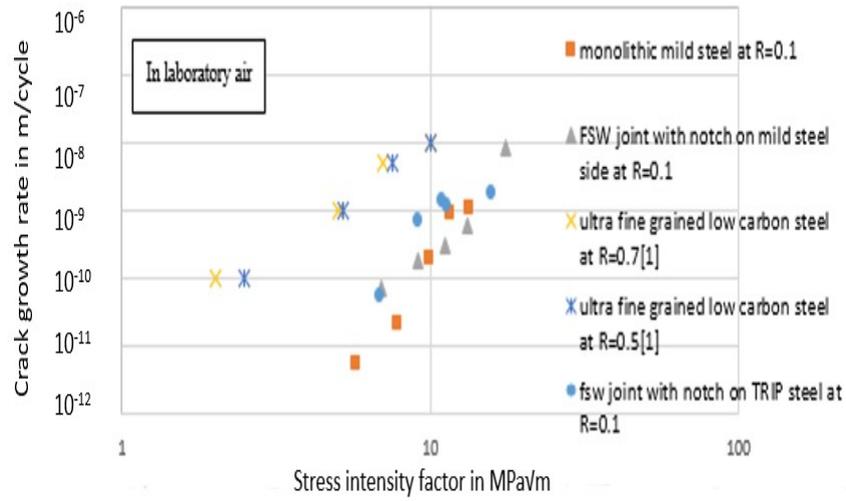
・検討手法

一般に難接合材の信頼性評価のためには、接合の際の無欠陥保証が難しいが故に、見落とされる可能性のある欠陥に対する冗長度（尤度）を把握しておくことも必要である。この目的のため、[1]と類似の方法で製作した試験片に、初期欠陥を模擬した人工切欠を種々の位置に導入し、いわゆる、中央切欠き試験片を用いて、その際の疲労き裂伝ば抵抗を測定した。切欠を導入した位置は、FSW 中心部、FSW/TRIP 境界部、FSW/MILD 境界部の3種類である。疲労き裂伝ば試験は、ASTM 標準法 E 647 に準拠して、室温、応力比 0.1 の下で行い、評価は Mode I 型のき裂進展を対象とした。

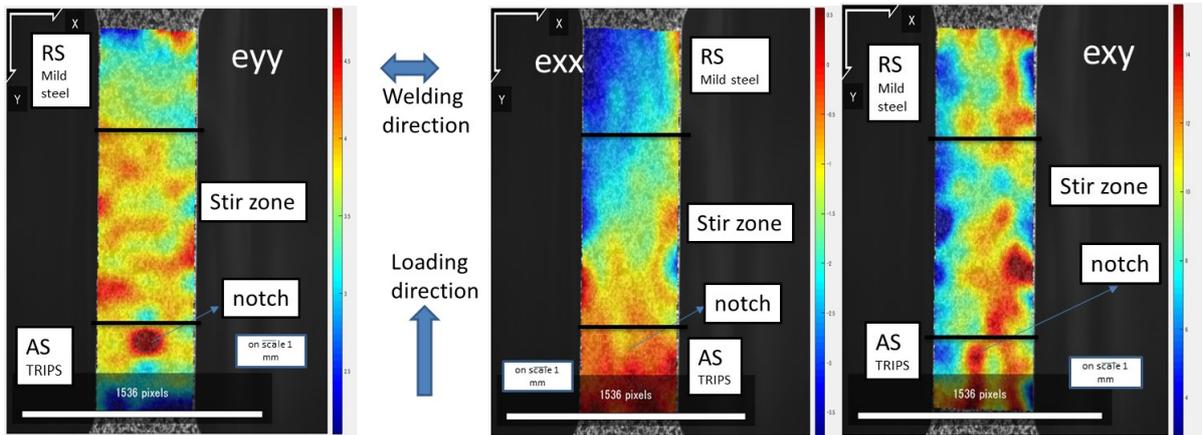
・結果

得られた結果を総括して図Ⅲ-2.7.12-29 に示す。これより、疲労き裂の進展に対する抵抗は、き裂がどの部位を伝ばしてもほとんど変わらず（▲、●）、絶対値的にも最終破損が起きる軟鋼部(図Ⅲ-2.7.12-28 参照)を伝ばする際の抵抗(■)と同等である。また、これらの結果を、文献から引用した TRIP 鋼単体に対する評価結果と比較すると（同図中*と*印）、FSW/TRIP 境界部の抵抗は TRIP 鋼単体を伝ばする抵抗よりも高い。すなわち、き裂伝ばの観点からも、「厚み 2mm 以下の炭素鋼に対して、母材の 85%程度の疲労強度を有する接合体製作条件を見いだす」とする当初の目的を概ね達成でき、且つ、本研究で採用した[TRIP/軟鋼]の組み合わせ選択は適切で、実用化が期待できると言えよう。

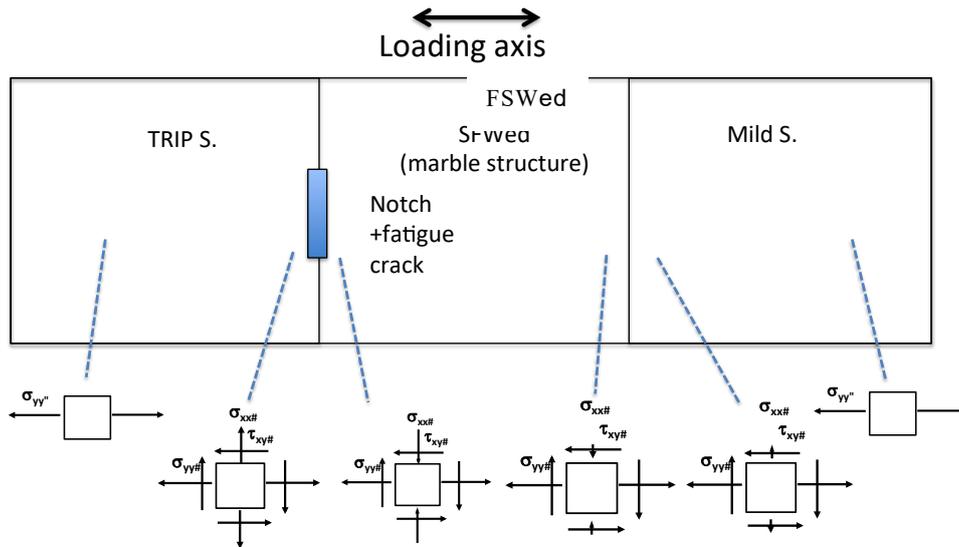
上述のように、FSW/TRIP 境界部の疲労き裂伝播抵抗は TRIP 鋼単体よりも高い。工業的にはこれは大きなメリットであるが、本研究で行った Mode I 型のき裂伝ばに限定されている可能性についても調べる必要がある。この観点からの知見を得るため、デジタルイメージ相関法(DIC)により、異材継手の変形の様子を測定した。それらの結果のうち、FSW/TRIP 境界部に疲労き裂が伝ばする際の継手変形の様子とその解析結果を図Ⅲ-2.7.12-30、図Ⅲ-2.7.12-31 に示す(図中の y 軸方向が負荷軸方向)。これによれば、疲労き裂周辺に変形が集中していることはもちろんであるが、FSW/MILD 境界部には有意な応力集中は見受けられないことがわかる、これによって類推される応力の状態を図Ⅲ-2.7.12-31 に模擬的に示した。換言すれば、図Ⅲ-2.7.12-29 に示した接合境界を伝ばする疲労き裂の抵抗は、接合体が負荷を受けた際の応力の多軸性の影響を受けている可能性が高い。



図Ⅲ-2.7.12-29 TRIP/軟鋼 FSW 異材接合体の疲労き裂伝ば抵抗の評価結果

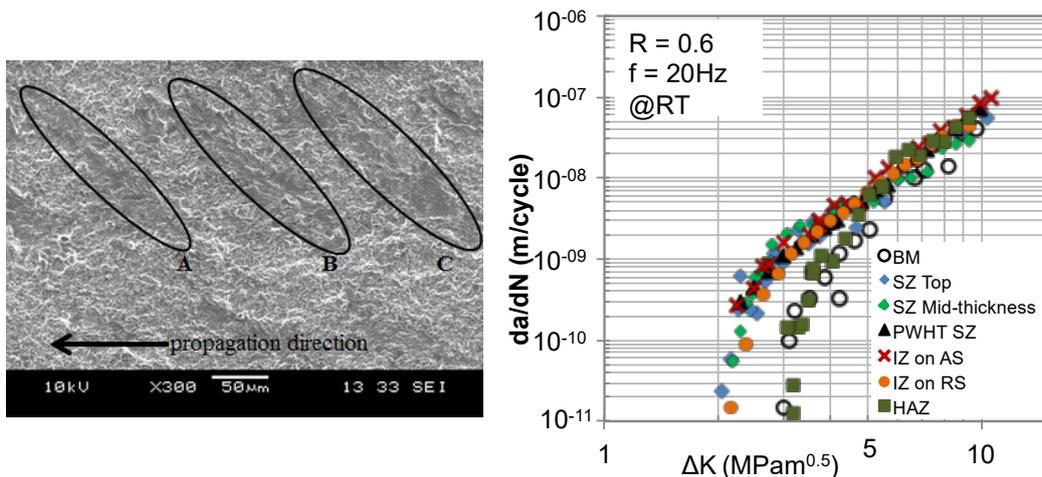


図Ⅲ-2.7.12-30 DIC による TRIP/軟鋼 FSW 異材接合体の不均一変形の様子 ($\Delta K=6.87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)



図Ⅲ-2.7.12-31 DICによるTRIP/軟鋼FSW異材接合体の応力状態の模擬図

一方、図Ⅲ-2.7.12-30において、FSWを施した領域の変形の様子に不均一性が見られることも留意に値する。これは、接合中に材料の変態にムラが起こっていることに起因するものであることを示唆するからである。これについて調査するため、昨年度まで扱ってきたチタン合金FSW接合体を対象に、その中に形成される不均質変態域(TILS)と疲労き裂伝ば抵抗の関係を調査した。その結果を図Ⅲ-2.7.12-32に示した。これによれば、不均質なTILSが形成されると、その部位の疲労き裂の伝ば抵抗が低下する可能性が示唆されるため、TRIP/MILDFSW接合体に対しても今後の検討が必要である。



図Ⅲ-2.7.12-32 疲労き裂伝ば抵抗に及ぼす局所変態の影響 (Ti-6Al-4V FSWによる結果)

以上の報告内容にかかる参考文献

- 1) M.D. Chapetti, H. Miyata, T. Tagawa, T. Miyata, M. Fujioka “Fatigue crack propagation behavior in ultra-fine grained low carbon steel .“ International Journal of Fatigue, R: Elsevier, March 2005
- 2) Antti jarvenpaa, L. Pentti Karjalainen, Matias Jaskari “Effect of grain size on fatigue behavior of type 301LN stainless steel.” International Journal of Fatigue, August 2014
- 3) R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Elsevier, Jan 2005

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.12-12 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	7	1	0	0	0	0	1
2019FY	1	0	4	2	0	0	0	0	1
合計	1	0	11	3	0	0	0	0	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.12-13 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	3	16	2
2019FY	2	10	1
合計	5	26	3

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.13 [テーマ番号 55] マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究)

2.7.13.1 テーマの概要

(1)背景と目的

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトでは、高強度で成形加工性に優れる超ハイテン材、アルミ・マグネ材、熱可塑性 CFRP を主体とした革新的な材料開発を行い、それらの開発材料と既存材料を組合せて、自動車軽量化を実現するマルチマテリアル技術の開発に取り組んでいる。

マルチマテリアル設計によって、適材適所に配置された材料組合せに対して、継手部が存在する場合、その部材・部位に要求される接合強度や耐久性を満足する継手性能を確保する必要がある。実用を踏まえると、継手部の信頼性ととも、生産性が高く、低コストの接合技術が求められる。

そこで、マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究) では、中高炭素鋼の超ハイテン材の接合技術と異材接合技術を確立する上で必要な技術課題を抽出することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

継手性能と生産性の向上、コスト低減には、科学的な裏付けとなる溶接・接合現象の見える化や接合界面の性状などを定量的に理解する必要があり、関連分野の産学官研究者との連携を通して、FS 研究として課題解決へのアプローチを検討する。なお本テーマは 2019 年度からテーマ番号 64 マルチマテリアル接合技術の基盤研究として継続される。

表Ⅲ-2.7.13-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
自動車 9 社の共通 課題		X 線や放射光、中性子ビームによる抵抗スポット溶接現象のその場観察可能性を明らかにする。	テーマ 64 へ継 承	抵抗スポット溶接は材料内部の抵抗発熱により、熔融凝固し、0.5-1 秒程度の中に接合が完了する。熔融金属の流動状態を可視化できると、適切な溶接条件の設定に必要な技術開発項目が明確になる。

自動車 9 社の共通課題		抵抗スポット溶接部検査装置及び接着部検査装置における検査精度と検査速度の仕様決定。	テーマ 64 へ継承	接合品質は製品品質に直結するため、接合部の健全性を非破壊検査を通して確認する必要がある。
異材接合継手の性能比較		アルミ鋼、アルミCFRTP、鋼-CFRTP の組合せについて、抵抗スポット溶接、接着プロセス、摩擦点接合、SPR 接合などによる継手の機械的特性の実験データを取得し、マルチマテリアル構造設計技術(CAE)への入力データを揃える。		2013 年以降、国内の企業・大学等において、異材接合技術が研究開発されており、統一的な試験方法で評価することで、継手性能を比較し、今後の実用化候補技術の選定資料とする。
継手シミュレーションモデルの開発		アルミ鋼の摩擦点接合及び接着プロセスのシミュレーションモデルの Ver.0 版完成。		マルチマテリアル構造設計(CAE)を進めるためには継手線の機械的特性を入力する必要がある、実用的には様々な板組に対応できる継手シミュレーションモデルが求められている。
革新的抵抗スポット溶接技術の開発		従来の 5 倍-10 倍の高速インバータ制御電源を用いて電流波形を精密制御することで、高性能の抵抗スポット溶接の効果を確認する。		抵抗スポット溶接は確立された点溶接法とされ広く利用されているが、現状では電源性能による適用範囲に限界がある。

(3)全体計画

課題① 自動車 9 社の共通課題

(a) 超ハイテン材を含む鋼板のスポット溶接現象および溶接品質の研究

抵抗スポット溶接の溶接条件とマイクロ組織、継手強度（TSS,CTS）、残留応力などを実験並びに理論的に解析し、大阪工大、九州工大、大阪大の連携により測定データ活用方法の体系化を推進する。

(b) 鉄-アルミの接合技術の開発

鉄-アルミの接合技術として、高性能・高信頼 SPR 技術の開発と抵抗スポット溶接技術の実用化開発の基盤研究を行う。

(b-1) SPR による鉄-アルミ接合

SPR 技術では、打点当たりの強度基準、リベット先端形状が接合状態に及ぼす影響、適用可能板組の範囲などが明確でない。そこで、豊橋技科大は SPR 実験を行い、インターロック量と強度との相関を検討し、信頼性向上を検討する。

(b-2) 抵抗スポット溶接による鉄-アルミ接合

鉄-アルミの抵抗スポット溶接では材種と板厚を絞り込み、大阪工大、大阪大、群馬大の連携により、ナゲット径と接合界面の金属間化合物の種類・分布に及ぼす影響を明らかにする。大阪工大は鉄-アルミの板組に対して、抵抗スポット溶接条件（加圧力・電流波形）を変え、接合実験を行う。チリ及び溶接欠陥発生の有無、欠陥が発生する場合、ブローホールや割れなどの種類を整理する。そして、溶接欠陥が発生しない条件におけるナゲット径と溶接条件の関係を明らかにする。大阪大は、接合時間を変化させ、接合界面の時間的変化を調べ、界面の溶融を伴わない拡散接合による界面形成とスポット溶接による溶融プロセスとの比較を通して、ナゲットおよび金属間化合物の形成現象を検討する。群馬大は、各種分析技術を駆使して、鉄-アルミ接合の金属組織や IMC の解析を行い、接合箇所の信頼性評価を行う。

(c) 接合部検査装置の開発

FS では抵抗スポット溶接と接着接合を対象として、超音波検査手法と赤外線サーモグラフィ法を取りあげ、東北大と神戸大の連携により、次世代の薄板接合部検査手法の検討を行う。薄板接合部の非破壊検査に関する研究開発は、世界的にも十分とは言えず、検査精度と検査速度の開発状況を分析し、装置仕様策定に向けた検討を行う。

課題② 異材接合継手の性能比較

2013 年度以降、様々な異材接合プロセスの研究開発が進められており、実用技術として本事業に最適な方法を FS でスクリーニングすることを目的とする。ISMA 本部より試験片材料を調達し、分担研と再委託先に配布する。次に、それぞれの機関で研究開発している接合プロセスを適用して、接合実験を行い、接合試験片を作成する。その後、分析センターにて接合強度と耐久性を調査する。なお、分担研および再委託先が担当する接合プロセスは、表Ⅲ-2.7.13-2 に示す通りである。

表Ⅲ-2.7.13-2 異材接合プロセスと担当機関

		異材組合せ		
		アルミ/鋼板	アルミ/CFRTP	鋼板/CFRTP
溶融接合	抵抗スポット溶接	分:マツダ		
	コアキシャル抵抗スポット接合		外	外
	レーザ溶着プロセス			分:IHI
ろう接	レーザろう付け	再:阪大		
固相接合・ 界面接合	FSSW	分:川重 再:豊橋技科大	分:マツダ	
	超音波接合	再:東北大		
	電磁圧接	再:東工大		
	金属塩生成接合法	再:群馬大		
接着接合	接着プロセス			分:IHI 再:群馬大
	ウエルドボンド	再:群馬大		
機械締結	セルフピアシングリベット(SPR)	再:豊橋技科大	再:豊橋技科大	再:豊橋技科大
	クリンチング(CJ)	再:豊橋技科大	再:豊橋技科大	再:豊橋技科大
	パンチングかしめ		外	外
	レーザーリベット接合	外		
	アークエレメント接合	分:神鋼		

分:分担研、再:再委託、外:外注

課題③ 継手シミュレーションモデルの開発

(a) 摩擦点接合(FSSW)継手モデル

FSSW プロセスは、自動車部材のアルミ同士およびアルミ-鉄の特定箇所の接合に適用されている。しかし、マルチマテリアル接合技術として実装するためには、構造設計から選定されたアルミと鋼板の材種や板組に応じて、構造体として要求される条件を満足する継手性能を確保する必要があり、接合実験とともにシミュレーションモデルを構築し、ツール形状も含めた接合条件を最適化する必要がある。一方、構造設計 CAE システムには、材料性能データとともに継手性能モジュールが必要となる。現時点において、固相状態の摩擦点接合によってもアルミ-鉄の接合界面には脆い金属間化合物(IMC)が生成することが明らかとなっており、モデル化にあたっては IMC の機械的特性を実験的に求める必要があり、継手箇所となるアルミ、鉄、IMC の応力-歪関係を踏まえたモデルの構築を目指す。

(b) 接着継手モデル

接着プロセスを構造材料の接合方法として確立するため、接合界面強度を低減させる構造の最適化手法を構築し、構造設計のための多軸応力接合強度則を確立する。

課題④ 革新的スポット溶接技術の開発

抵抗スポット溶接は、日米欧のいずれにおいても、確立された点溶接法とされ、広く利用されている。軽量化に向けて、超ハイテン材やアルミ、異材接合への適用ニーズが高まっているが、現状では電源性能から適用範囲に限界がある。最近、従来のインバータ電源の 5~10 倍の速度で動作する高速インバータ電源が開発されたので、これを抵抗スポット溶接機の電源として装備し、電流波形を精密制御することで得られる溶接性能の向上効果を確認する。

(4)実施体制

【委託先】		【再委託先】	課題①	課題②	課題③	課題④
新構造材料技術研究組合 【分担研】	新構造材料技術研究組合 (本部)	大阪大学(廣瀬) (国立大学法人)	●			
	マツダ株式会社 (広島分室)	大阪大学(才田) (国立大学法人)		●		
	株式会社IHI (横浜磯子分室)	大阪大学(大畑) (国立大学法人)			●	
	株式会社神戸製鋼所 (西神分室)	大阪大学(渋谷) (国立大学法人)			●	
	川崎重工株式会社 (明石分室)	大阪大学(三上) (国立大学法人)	●			
	豊橋技術科学大学(森) (国立大学法人)	●	●			
	豊橋技術科学大学(福本) (国立大学法人)		●			
	東北大学(三原) (国立大学法人)	●				
	東北大学(佐藤) (国立大学法人)		●			
	群馬大学 (国立大学法人)	●	●			
	大阪工業大学 (学校法人)	●				
	九州工業大学 (国立大学法人)	●				
	神戸大学 (国立大学法人)	●				
	東京工業大学 (国立大学法人)		●			
	富士電機株式会社				●	

図Ⅲ-2.7.13-1 実施体制

(5)運営管理

課題①では図Ⅲ-2.7.13-2に示すようにWG1(鉄/鉄接合)、WG2(アルミ/鉄接合)、WG3(非破壊検査)の3グループに分け、自動車9社(トヨタ、日産、ホンダ、マツダ、スバル、ダイハツ、三菱、スズキ、いすゞ)から成るISMA継手仕様検討委員会と意見交換しながら、生産現場で使える実用技術の確立に向けて、それを支える基盤研究を実施した。WG1~WG3の研究実施にあたってはISMA本部が進捗を見ながら、2-3か月ごとに会合を持ち、グループ内での達成状況などの情報共有を行った。



図Ⅲ-2.7.13-2 課題①の運営体制

課題②では ISMA 本部において、鋼板、アルミ、CFRTP の接合用の試験片を調達し、表 2.7.13-2 に示した分担研、再委託先、外注先に配布する。それぞれの機関で作成された接合試験片を回収し、ISMA が選定した分析センターにて接合強度と耐久性を試験・調査し、データを ISMA においてまとめる。

課題③および課題④については、ISMA 本部と再委託先との間で 2-3 か月ごとに会合を持ち、進捗および達成状況を確認する。

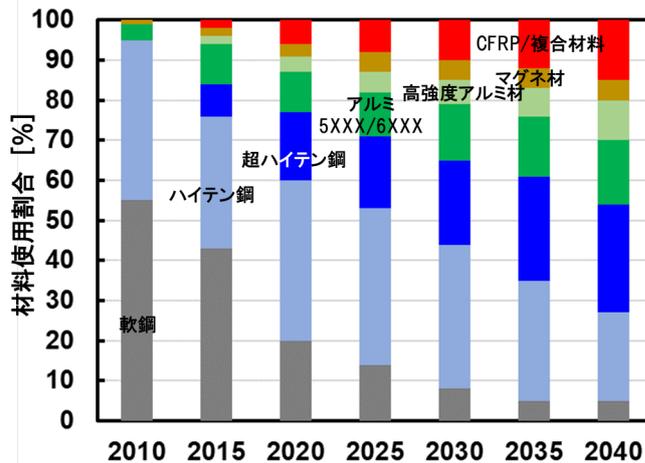
(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトでは車体軽量化に向けて、マルチマテリアル構造に対応する接合技術開発を行っている。具体的には、超ハイテン材同士、鋼材/アルミ、金属/樹脂・CFRTP などをつなぐ接合技術を確立しなければならない。すでに、高級車やスポーツカーにおいてはマルチマテリアル車が実用化されているが、地球環境に大きく影響を及ぼす CO₂は、世界中を走行する自動車の圧倒的な割合を占める量産車から排出されており、その軽量化技術を早急に確立する必要がある。

図Ⅲ-2.7.13-3 は米国における自動車車体に使用されている材料ミックスの実績と予測を示している。2010 年度では、軟鋼やハイテン材などの鋼材使用割合が圧倒的に多かったが、2020 年の時点でアルミ材料を 10%以上使用する予測をしている。北米ではアルミの精錬から圧延加工などの製造規模が大きく、供給量やコスト、自動車業界のリサイクル事情が日本とは異なるが、日本の自動車メーカ各社も欧米を含めてグローバルな生産体制をとっており、今後、量産車へのアルミ材の適用は確実に進展するものと考ええる。一方、引張強度 1000MPa 以上の超ハイテン材の適用も増加する見込みで、2030 年で 55%程度が鋼材、20%程度がアルミ材、10%程度が CFRP を含む複合材料と予測している。

国内でもすでにレクサス LC500h/LC500 などの高級車で、超ハイテン材やアルミ、CFRP などを使用したマルチマテリアル車体が実用化されているが、鋼材/アルミなどの異材接合には SPR・FDS などの機械的締結が行われている。量産車の生産技術としてリベットなどのコストや生産性を考慮すると、抵抗スポット溶接や FSSW、接着などによる異材接合技術を確立する必要があり、この FS 研究を通して、今後の技術的課題を明らかにすることができた。

現在、自動車 1 台当りの CO₂ 排出量規制とともに、鋼材やアルミなどの製鋼・精錬や圧延加工の素材製造から、自動車及びその部品メーカでの成形加工・部材加工、組立・塗装、製品完成、そして、ユーザによる様々な環境での走行、廃車、リサイクルなどを含めて、トータルで消費するエネルギーや CO₂ 排出量を評価する LCA(Life Cycle Assessment) が SDGs (Sustainable Development Goals) とも関連し、今後、製品価値を判断する要素の一つとして、重要な指標になると考えられる。したがって、今後の材料選択の視点が従来の比重や強度特性に加えて、LCA 性能にも考慮する必要があり、材料開発にも影響すると考えられる。そのため、異材接合の技術手法の開発だけでなく、接合界面における強度発現機構を明らかにすることで、今後開発される材料にも対応可能な基盤研究をさらに進める必要がある。



図Ⅲ-2.7.13-3 米国における自動車車体における材料ミックスの実績と予測
(Center for Automotive Research(2019)のデータを参考に作成)

2.7.13.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.13-3 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
自動車 9 社の共通課題	X 線や放射光、中性子ビームによる抵抗スポット溶接現象のその場観察可能性を明らかにする。	溶融部の対流挙動をその場観察するため、SPring-8で透過画像を取得した。W 粒子をトレーサとして抵抗スポット溶接を実施した後のナゲット内部の W 粒子の分散状況が掴めた。	○	
自動車 9 社の共通課題	抵抗スポット溶接部検査装置及び接着部検査装置における検査精度と検査速度の仕様決定。	FS 研究では市販の超音波検査装置およびサーモグラフィ、磁気検査装置を用いて、ナゲットサイズの異なる抵抗スポット試験片、充填幅の異なる接着試験片を作成し、検査精度を明らかにした。	○	

異材接合継手の性能比較	アルミ-鋼、アルミ- CFRTP 、 鋼 - CFRTP の組合せについて、抵抗スポット溶接、接着プロセス、摩擦点接合、SPR 接合などによる継手の機械的特性の実験データを取得し、マルチマテリアル構造設計技術(CAE)への入力データを揃える。	アルミ-鋼板の組合せではパネル 2 枚組、骨格 2 枚組の引張せん断強さ(TSS)、十字引張強さ(CTS)、引張せん断モードの疲労特性を調べ、各接合プロセスの継手性能を明らかにした。 アルミ-CFRTP、鋼板-CFRTP では TSS、CTS 並びに環境暴露試験を行い、各接合プロセスの継手性能を明らかにした。	○	
継手シミュレーションモデルの開発	アルミ-鋼の摩擦点接合及び接着プロセスのシミュレーションモデルの Ver.0 版完成。	FSSW では接合継手のアルミ母材、接合界面領域の特性を考慮し、マルチ破壊モデルを開発した。シミュレーションによる計算結果は実験結果を表現できた。接着接合については、多軸応力下での破損則に基づいた接着界面形状の最適化手法を構築し、実構造を想定した多段折曲げ平板接着試験片の強度評価した。	◎	
革新的抵抗スポット溶接技術の開発	従来の 5 倍-10 倍の高速インバータ制御電源を用いて電流波形を精密制御することで、高性能の抵抗スポット溶接の効果を確認する。	短時間溶接が可能な高電流短時間スポット溶接用電源、トランスを開発した。IGBT を用いたインバータと 10kHz の高周波トランスを構成要素として、25kA までの高電流溶接、1ms 単位の精密な電流制御を可能にした。 1.2GPa 級鋼板のナゲット部靱性の向上のため、後熱処理（マルテンパ処理）を検討し、溶接時間 0.5 秒内で、CTS の向上とプラグ破断を達成した。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本 FS テーマは 2019 年度からテーマ 64 として、実施されることになった。

表Ⅲ-2.7.13-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
テーマ 64 へ継承			

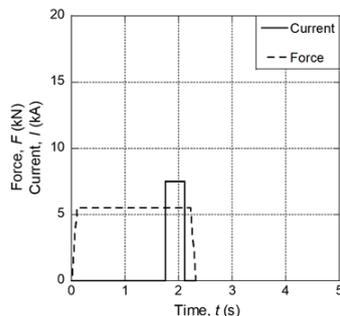
(3)研究開発の成果と意義

課題① 自動車 9 社の共通課題

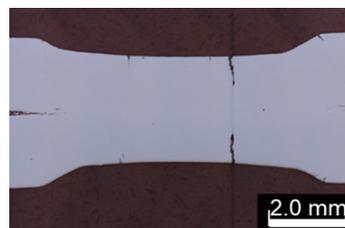
(a) 超ハイテン材を含む鋼板のスポット溶接現象および溶接品質の研究

(a-1) 超ハイテン鋼板の抵抗スポット溶接部に生じる LME 割れの発生現象と抑制方法

自動車構造用鋼板は、防錆効果などを期待した合金化溶融亜鉛メッキ処理が施されることが多い。この合金化溶融亜鉛メッキを施した超ハイテン鋼板において、抵抗スポット溶接を行った場合、その溶接部において LME (Liquid Metal Embrittlement) 割れと呼ばれる、継手表面およびシートセパレーション近傍において割れが生じることがある。この割れは溶接部に存在する亜鉛が、溶接時の熱サイクルによって材料中に浸漬するとともに、溶接時になんらかの力が加わることによって割れに至るものとして考えられており、継手強度の低下を招く恐れがあることから、その抑制が求められている。



図Ⅲ-2.7.13-4 抵抗スポット溶接時の溶接波形の例



(a) 溶接部断面



(b) 溶接部表面

図Ⅲ-2.7.13-5 超ハイテン鋼板の抵抗スポット溶接に発生する LME 割れ

供試材料には板厚 2.0 mm の 1180 MPa 級超ハイテン鋼板を用いて、抵抗スポット溶接継手を作製した。電極形状は DR6 形の銅製電極を用い、インバータ直流電源を用いて、図Ⅲ2.7.13-4 に示す溶接波形(溶接電流と加圧力の時間的変化)により施工を行った。ナゲット直径は板厚に対する大きさとして $5\sqrt{t}$ (約 7 mm) となるように、溶接波形を調整した。

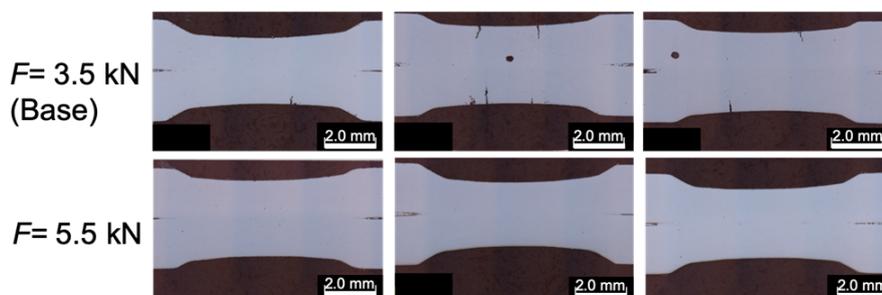
電流波形や加圧力の選定によっては、図Ⅲ-2.7.13-5(a)の接合部断面に示すように、継手表面から内部にかけて割れが生じる。継手の上側および下側からの大きな割れ以外にも、細かな割れが継手表面において散見される。また図Ⅲ-2.7.13-5(b)は継手表面における割れ状況について、カラーチェックを行った結果を示す。LME 割れは圧痕中央および近傍に

において、環状に生じていることが分かる。

そこで、LME 割れ抑制について加圧力と電極形状に着目し、実験的検討を行った。ここでは加圧力の影響について述べる。加圧力の変化は溶接部に生じる圧力の変化のみならず電極の接触面積を変化させ、その結果、継手表面の温度分布に変化を生じさせる。図Ⅲ-2.7.13-6 に示す通り、加圧力が 3.5 kN の条件においては、3 枚の試験片のすべてで継手表面から内部にかけて LME 割れが生じているのに対して、5.5 kN の条件においては、LME 割れの存在は確認できない。このことは、継手表面における温度変化が割れ抑制に影響を及ぼしているものと推察できる。

電極形状についても、先端曲率半径が 40 mm と 100mm の DR 形電極を用いて、LME 割れに及ぼす影響を調べた結果、R100 の電極を用いた継手においては、LME 割れの発生は確認できなかった。電極先端曲率を大きくすることで、継手表面において電極との接触面積が増大することから、継手表面の温度上昇が抑制されたことで、LME 割れの抑制に繋がったものと考えられる。

以上から、LME 割れは過大な入熱により生じることが明らかとなり、またその抑制方法としては、継手表面の温度上昇の抑制が有効であることを示した。



図Ⅲ-2.7.13-6 LME 割れに及ぼす加圧力の影響

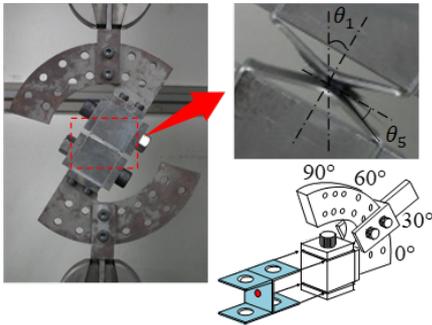
(a-2) 複合荷重試験での高張力鋼板抵抗スポット溶接重ね継手強度

日本工業規格(JIS)では抵抗スポット溶接継手の強度評価法として引張せん断試験(JIS Z 3136)、十字引張試験(JIS Z 3137)が最も汎用な手法として規定されている。実環境では、車体各部位には引張せん断荷重と十字引張荷重が複合した斜め方向の荷重が作用する。そこで、継手強度の荷重角度依存性を調べることにした。

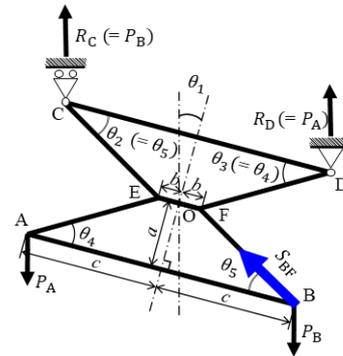
供試材料には高張力鋼板 HT590 (引張強さ 590MPa 板厚 1.0mm、1.6mm)、SPC780 (引張強さ 780MPa 板厚 1.6mm) および軟鋼板 SPHC (引張強さ 312MPa 板厚 1.6mm) を用いた。作製した引張試験片を図Ⅲ-2.7.13-7 に示す複合荷重試験用の治具に取り付け、荷重角度を変えて複合荷重試験を行った。なお、試験片は板幅 50mm、板長 150mm の鋼板の端から 50mm 位置を折り曲げてコの字形にした鋼板を背中合わせにして中央を抵抗スポット溶接して作成した。複合荷重試験における荷重角度を θ_1 、重ねた 2 枚の鋼板の開き角度を θ_5 と定義する。開き角度 θ_5 を測定した結果、どの試験片においても荷重角度 θ_1 が大きくなるにつれて開き角度が小さくなる傾向が見られた。

次に、荷重角度 θ_1 の複合荷重試験における最大荷重負荷時の試験片のマクロ力学モデルを図Ⅲ-2.7.13-8 に示す。破断箇所に対応する部材 BF に生じる力を S_{BF} とすると、継手強度 P_{All} は式(1)で与えられる。式(1)より、複合荷重下における継手強度 P_{All} は荷重角度

θ_1 と開き角度 θ_5 によって求められる。



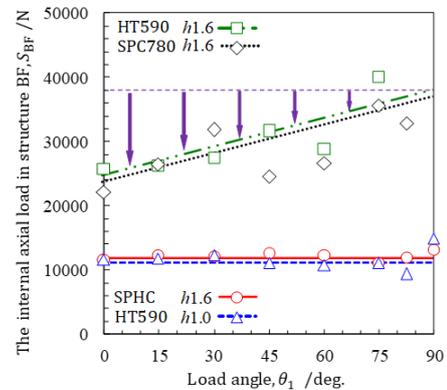
図Ⅲ-2.7.13-7 複合荷重試験用治具



図Ⅲ-2.7.13-8 複合荷重試験における最大荷重負荷時の試験片のマクロ力学モデル

$$P_{All} = P_A + P_B = \frac{\sin \theta_5}{\cos \theta_1} \times \frac{2c}{c + a \tan \theta_1} \times S_{BF} \quad (1)$$

荷重 P_{All} 並びに 2 枚の鋼板の開き角度 θ_5 を測定し、式(1)に代入すると、部材 BF に生じる荷重 S_{BF} を求めることができる。力学モデルでは部材 BF にかかる荷重 S_{BF} がある一定値に達すると継手が破断し、 S_{BF} が荷重角度に因らずほぼ一定値となることを前提としている。図Ⅲ-2.7.13-9 に示すように、板厚 1.0 mm の HT590 および板厚 1.6 mm の軟鋼 SPHC



図Ⅲ-2.7.13-9 荷重角度と部材 BF にかかる荷重との関係

から上記の前提を支持している。一方、板厚 1.6mm の HT590 および SPC780 に関しては、荷重角度 θ_1 が 75° から 0° に移行するにつれて S_{BF} が減少する傾向が見られた。これは荷重角度 0° の方が面外変形が大きいことから、部材の曲げが継手強度に影響を与えているためであると考えられ、荷重角度 0° 側が S_{BF} としては小さくなっていると考えられる。板厚が厚く、母材強さが高い材料の継手強度を予測するためには継手方向に作用する荷重だけでなく、曲げを考慮した新たな力学モデルを構築する必要があることを示唆している。

本研究を通して、全ての試験片において荷重角度が 0° から 90° に移行する際に 30° あたりで継手強度が一旦低下する荷重角度依存性を確認した。また、板厚が厚く、母材強さが高い材料の継手強度はトラス構造の力学モデルで計算される内力では予測できなかった。よって、曲げの影響を考慮した新たな材料力学モデルを構築する必要がある。

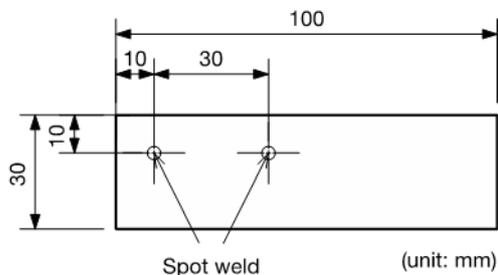
(a-3) 抵抗スポット溶接部たがね試験の数値解析モデルの構築

たがね試験は、製造工程において抵抗スポット溶接部のナゲット寸法などを確認するため、国内の自動車メーカーで広く利用されている。しかし、たがね試験によって抵抗スポット溶接部にどのような変形や応力・ひずみ分布が生じるのかという基本的な挙動が明らかではなく、試験・検査の位置付けが不明確なまま利用されているといえる。そこで本

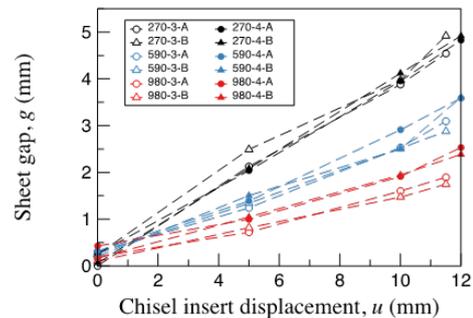
FS 研究では、たがね試験を対象とした数値解析モデルを構築した。鋼板の強度レベルを変化させ、同一条件でたがねを挿入した場合に抵抗スポット溶接部に生じる応力・ひずみ分布について比較・考察を行った。

製造工程で実施されるたがね試験を想定し、抵抗スポット溶接継手を作製し、たがね試験を実施した。抵抗スポット溶接継手の形状および寸法を図Ⅲ-2.7.13-10 に示す。板長 (L) 100 mm、板幅 (W) 30 mm、板厚 (t) 1.0 mm の鋼板 2 枚を 2 点で抵抗スポット溶接した継手である。鋼材は、引張強さ 270 MPa 級鋼(SPC270)、590 MPa 級鋼(SPC590)、980 MPa 級鋼(SPC980)の 3 種類を用いた。抵抗スポット溶接により形成するナゲット径のねらいは、 $3\sqrt{t}$ および $4\sqrt{t}$ 、すなわち 3 mm および 4 mm とした。

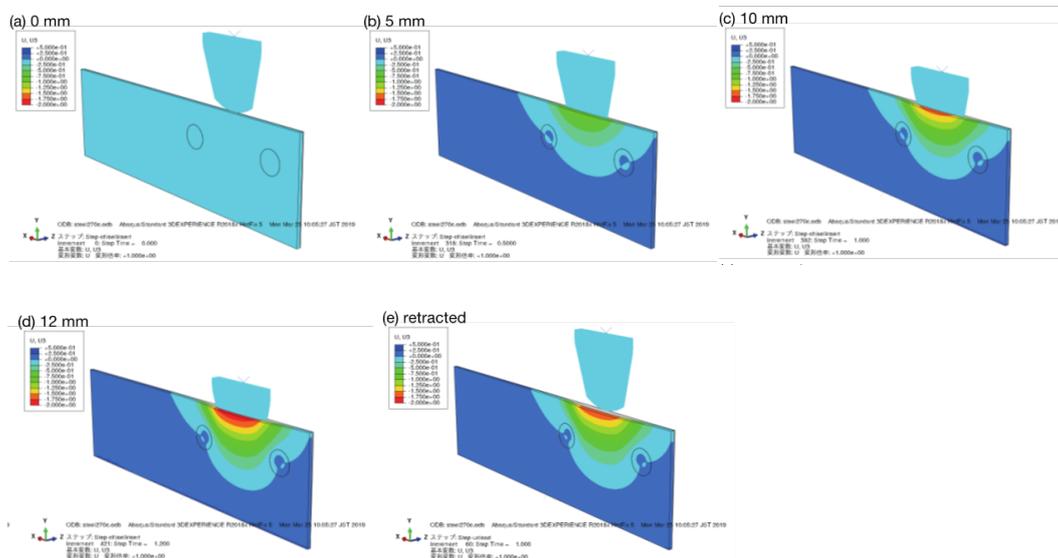
たがねの挿入量と鋼板間の開口量の関係を図Ⅲ-2.7.13-11 に示す。グラフの凡例は、(鋼板強度) - (狙いナゲット径) - (2 体の継手 A、B) を示す。母材強度が低く、たがねの挿入量が多いほど開口量が大きくなっていることがわかる。



図Ⅲ-2.7.13-10 抵抗スポット溶接継手の形状および寸法



図Ⅲ-2.7.13-11 たがね挿入量と鋼板開口量の関係

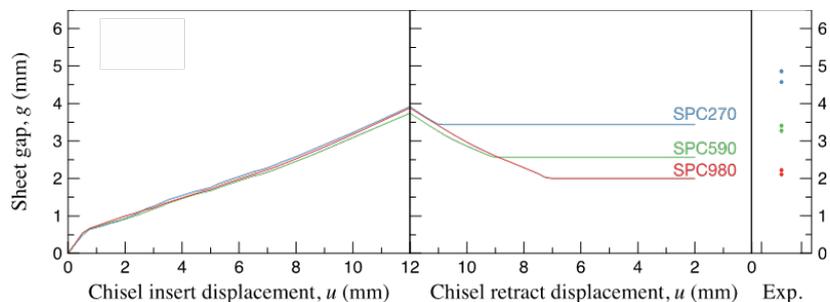


図Ⅲ-2.7.13-12 たがね試験時の変形挙動の数値解析結果 (SPC270 の例)

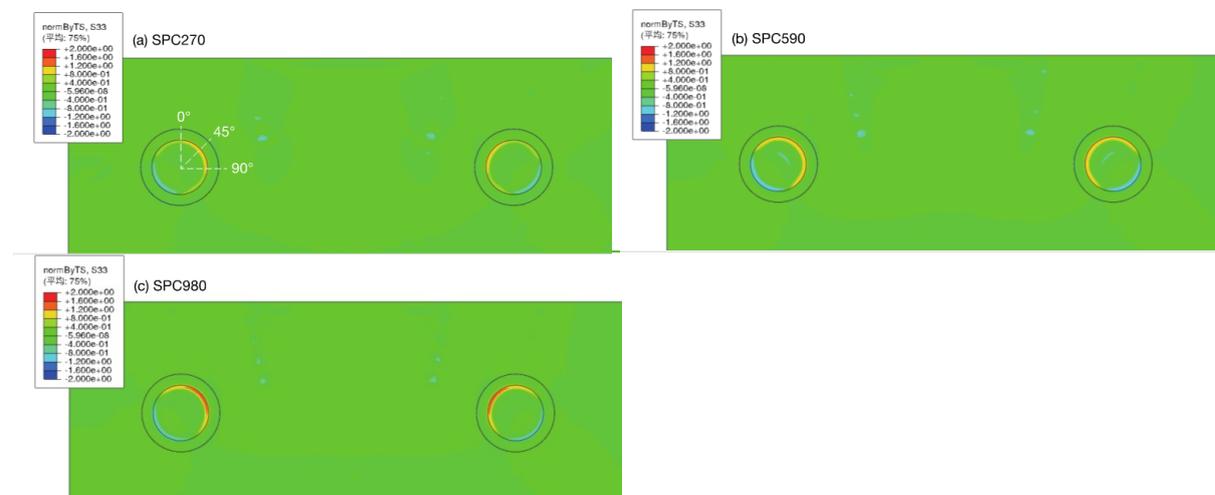
次にたがね試験を模擬した数値解析モデルを構築した。ここでは、一例として、SPC270の継手のたがね試験時の変形挙動の数値解析結果を図Ⅲ-2.7.13-12に示す。たがねの挿入量が0 mm（初期状態）、5 mm、10 mm、12 mm（ナゲット下端）、および、たがね引き抜き後の継手形状を示している。コンター表示した分布は継手の板厚方向の変位量であり、たがねの挿入によって板が張り出すと負の値の変位が生じる。

たがね試験時の鋼板の開口挙動を図Ⅲ-2.7.13-13に示す。たがね挿入位置、すなわち、2点の抵抗スポット溶接部の間における鋼板間の間隙の変化量を示す。挿入開始からナゲット下端（挿入量12 mm）に達するまでは、鋼板とたがねが常に接触しているため、たがねのテーパに応じた強制的な変位による開口が生じると考えられ、鋼板の強度レベルによらずほぼ等しい開口量が生じている。

たがねの挿入量が12 mmに達した後、引抜きを開始すると、鋼板の開口量が減少に転じる。このときの傾きは、その直前までの傾きとは正負が逆転しており、たがねのテーパ部分に接触しながら閉口が進んでいるものと考えられる。そして、引抜き途中のある段階で鋼板とたがねとの接触が解消され、引抜き後も残留する開口量となることが分かる。図Ⅲ-2.7.13-13の右端には、たがね試験(実験)において12 mm挿入後に引き抜いた場合の開口量の測定結果を示している。なお、図Ⅲ-2.7.13-11に示した実験結果は、たがねを一定量挿入して引き抜いた場合に残留する開口量であり、図Ⅲ-2.7.13-13に示した数値解析結果の履歴とは対応しない。今後、挿入量を変化させた条件で数値解析を行い、残留する開口量を評価する必要がある。



図Ⅲ-2.7.13-13 たがね試験時の鋼板の開口量の履歴



図Ⅲ-2.7.13-14 たがね挿入時の板厚方向応力 σ_z /引張強さ σ_T の分布（挿入量 12 mm）

たがねの挿入量が 12 mm の段階での応力分布を図Ⅲ-2.7.13-14 に示す。ここでは、板厚方向の応力成分を鋼板の引張強さで正規化した値 (σ_z / σ_T) を示している。図は数値解析モデルの対称面から見た状態であり、ナゲット部の板厚方向の中央断面に相当する。45°位置の値がやや大きい傾向はあるが、ナゲット部外周に沿って高応力域が広く分布している。

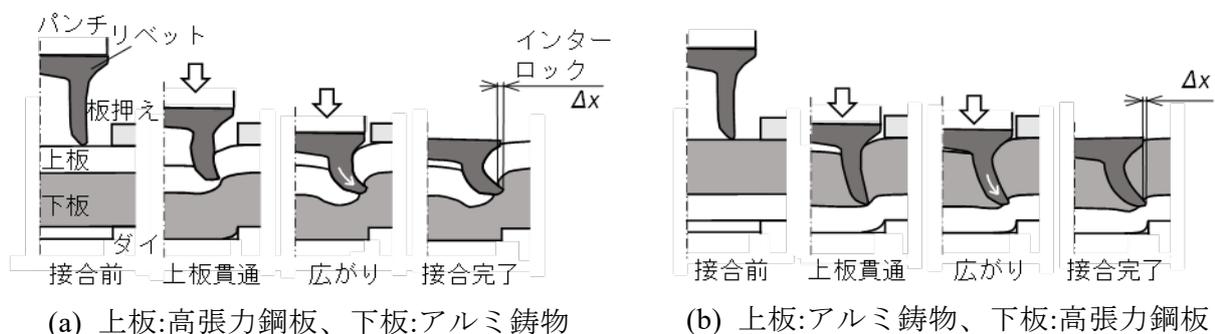
たがね試験を対象とした数値解析モデルに関しては、実験条件および結果をふまえた詳細化が必要な部分は残るものの、基本的な手法としては構築することができた。さらに、構築した数値解析手法を用いて、鋼板の強度レベルを変化させ、同一条件でたがねを挿入した場合に抵抗スポット溶接部に生じる応力・ひずみ分布を明らかにした。現時点では強度レベルの影響を相対的に比較したことに留まるが、このような基本的な情報すらも、従来明らかにされておらず、本 FS 研究で構築した手法を引き続き発展させて、たがね試験の位置付けを力学的な観点から明確にすることにつなげることができると考えられる。

(b) 鉄-アルミの接合技術の開発

(b-1) SPR による鉄-アルミ接合

自動車車体の軽量化に向けて高張力鋼板やアルミニウム材の適用が拡大している。一般的な鋼板同士の接合には抵抗スポット溶接が用いられているが、鋼板とアルミニウム材の融点は異なるために溶接が難しく、機械的接合であるセルフピアスリベッティング (SPR) が用いられている。SPR では材料の板厚、延性、組合せによって接合性が異なる。本 FS 研究では、SPR アルミニウム鋳物と高張力鋼板の接合性を調査した。ダイ形状とリベットの影響を調査するとともに、接合できた条件では接合強度を評価した。

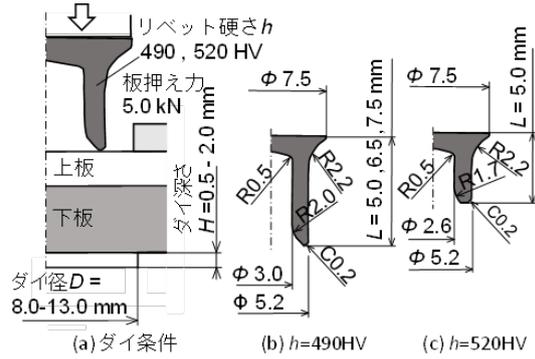
アルミニウム鋳物-高張力鋼板の SPR プロセスを図Ⅲ-2.7.13-15 に示す。SPR では、押し込まれたリベットが上板を貫通したのちに下板内部で広がり、引っ掛かりであるインターロック Δx を形成して板材を接合する。図Ⅲ-2.7.13-15 (a) に示す上板：高張力鋼板、下板：アルミニウム鋳物の組合せでは、硬い鋼板を貫通した後に厚いアルミニウム鋳物内で破断を生じずにインターロックを形成する。一方、上板をアルミ鋳物にした組合せでは、図Ⅲ-2.7.13-15(b) に示すように軟質で厚い上板をリベットで貫通させて薄い鋼板内でインターロックを形成する。



図Ⅲ-2.7.13-15 アルミニウム鋳物と高張力鋼板の SPR プロセス

表Ⅲ-2.7.13-4 接合板材の機械的性

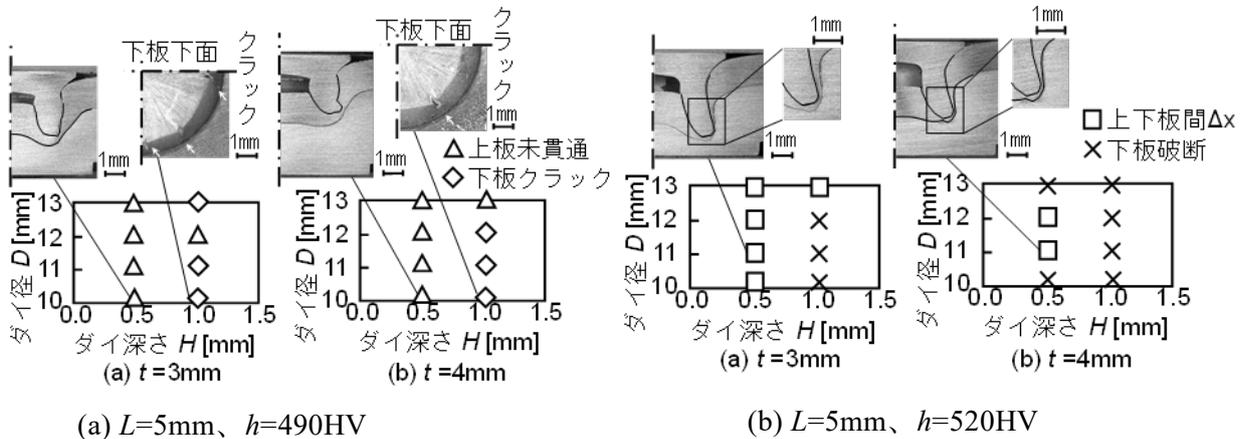
板材	公称板厚	板厚 [mm]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]
アルミニウム鋳物 AC-T5	3	2.85-3.05	272	7.6	13
	4	3.85-4.25	276	8.1	16
590MPa級鋼板		1.60	633	24	49



図Ⅲ-2.7.13-16 接合条件

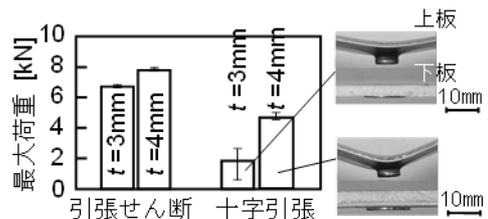
アルミニウム鋳物 AC-T5 は、公称板厚が $t=3\text{mm}$ と 4mm であり、鋼板は 1.6mm 厚さの 590MPa 級である。引張試験により求めた板材の機械的特性を表 2.7.13-4 に示す。接合条件を図Ⅲ-2.7.13-16 に示す。リベット長さ L と硬さ h を変化させて上板の貫通を行った。また、ダイ径 D とダイ深さ H を変化させて材料流動を制御した。リベットはリベットと上板の上面が一致するまで 80mm/s で押し込んだ。

$L=5\text{mm}$ 、 $h=490\text{HV}$ における高張力鋼板-アルミニウム鋳物の接合性に及ぼすダイ形状の影響を図Ⅲ-2.7.13-17(a)に示す。 $t=3\text{mm}$ と 4mm のいずれも浅いダイでは上板を貫通できず、深くすると延性の低いアルミニウム鋳物の下板下面においてクラックが生じており、接合できていない。次に上板を貫通し、下板の変形を減らすために硬いリベットを用いた $h=520\text{HV}$ 、 $L=5\text{mm}$ における接合性を図Ⅲ-2.7.13-17(b)に示す。硬いリベットを用いても上板が貫通できなかったが、下板内でリベット先端が広がり、上下板間にインターロックが形成されて接合している。



図Ⅲ-2.7.13-17 高張力鋼板(上板)-アルミ鋳物(下板)の接合性に及ぼすダイ形状の影響

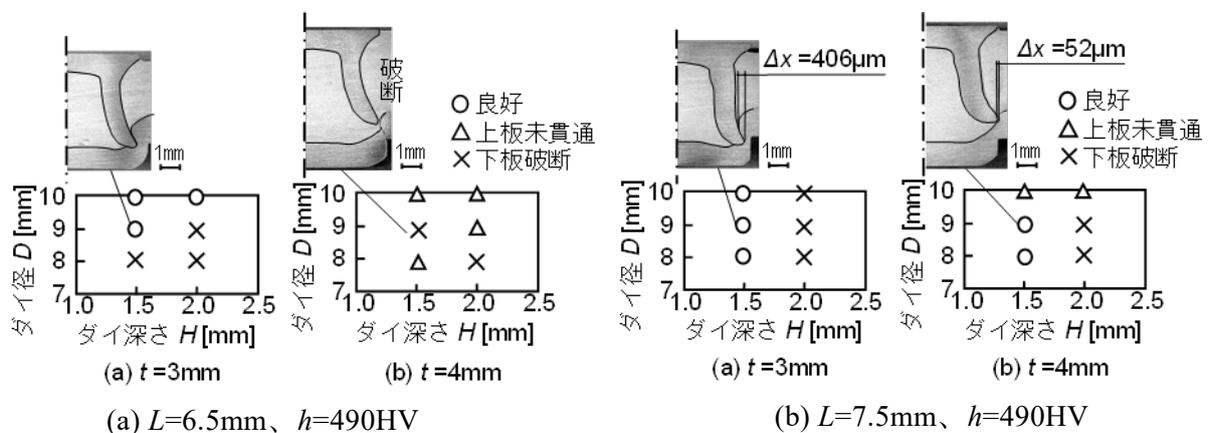
接合できた高張力鋼板-アルミニウム鋳物における接合荷重を図Ⅲ-2.7.13-18 に示す。 $t=3\text{mm}$ の引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)はそれぞれ 6.7kN と 1.9kN であり、十字引張では下板のたわみにより引抜けが早期に生



図Ⅲ-2.7.13-18 高張力鋼板(上板)/アルミ鋳物(下板)の SPR 継手の TSS と CTS ($D=11\text{mm}$ 、 $H=0.5\text{mm}$ 、 $L=5.0\text{mm}$ 、 $h=520\text{HV}$)

じたために低下した。 $t=4\text{mm}$ では下板のたわみが減少して、TSS と CTS はそれぞれ 7.9kN と 4.7kN に増加した。

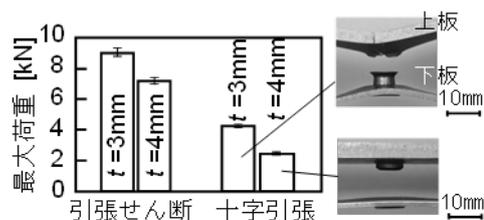
次に、アルミニウム鋳物(上板)-高張力鋼板(下板)の接合性を調査した。 $L=6.5\text{mm}$ 、 $h=490\text{HV}$ におけるアルミ鋳物-高張力鋼板の接合性に及ぼすダイ形状の影響を図Ⅲ-2.7.13-19(a)に示す。 $t=3\text{mm}$ では、ダイ直径が大きく、ダイ深さが小さい範囲で接合しており、その他では下板が破断している。 $t=4\text{mm}$ ではリベットが上板を貫通できず分離、もしくは、下板の破断が生じて接合できなかった。 $t=4\text{mm}$ では上板が貫通できなかった条件が多かったためにリベットを長くした。 $L=7.5\text{mm}$ 、 490HV における接合性に及ぼすダイ形状の影響を図Ⅲ-2.7.13-19(b)に示す。長いリベットにより $t=3\text{mm}$ では $H=1.5\text{mm}$ で接合ができ、 $t=4\text{mm}$ では $D=8$ 、 9mm 、 $H=1.5\text{mm}$ において上板を貫通し $52\ \mu\text{m}$ のインターロックを形成して接合できており、本条件では $t=3\text{mm}$ と 4mm のいずれも接合できる。



図Ⅲ-2.7.13-19 アルミ鋳物(上板)-高張力鋼板(下板)の接合性に及ぼすダイ形状の影響

アルミニウム鋳物-高張力鋼板における接合荷重を図Ⅲ2.7.13-20に示す。 $t=3\text{mm}$ では、リベットが下板深くまで進入しており、引張せん断荷重と十字引張荷重はそれぞれ 9.0kN と 4.1kN であった。 $t=4\text{mm}$ では、インターロックが小さいためにそれぞれ 7.1kN と 2.5kN に低下した。

以上をまとめると、上板:高張力鋼板-下板:アルミ鋳物では、浅いダイと硬いリベットを用いることで下板破断を抑制するとともに上下板間のインターロックを形成して接合できた。一方、上板:アルミ鋳物-下板:高張力鋼板では、長いリベットにより厚い上板を貫通させて 3mm から 4mm 厚さの上板を同じ条件で接合できた。



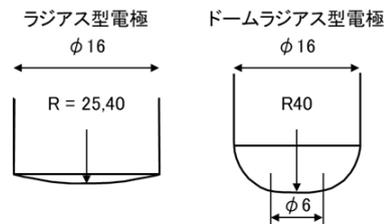
図Ⅲ-2.7.13-20 アルミ鋳物(上板)/高張力鋼板(下板)のSPR継手のTTSとCTS ($D=9\text{mm}$, $H=1.5\text{mm}$, $L=7.5\text{mm}$, $h=490\text{HV}$)

(b-2) 抵抗スポット溶接による鉄-アルミ接合

鉄-アルミの抵抗スポット溶接では材種と板厚を絞り込み、ナゲット径と接合界面の金属間化合物の種類・分布に及ぼす影響を明らかにする。鉄-アルミの板組に対して、抵

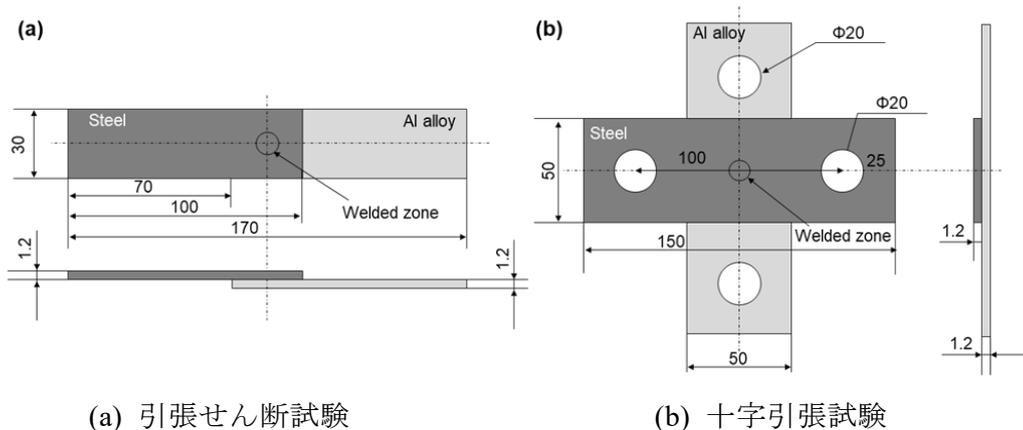
抗スポット溶接条件（溶接電流・加圧力）を変えて接合実験を行うとともに、ナゲット径と溶接条件の関係を明らかにする。接合継手を対象にした金属間化合物(IMC)の形成現象を検討するとともに、鉄-アルミ接合の IMC に着目した金属組織の解析を行い、接合箇所の信頼性評価を行う。以上に基づき、マルチマテリアル構造設計技術(CAE)開発に繋がる知見を得る。

接合対象材料として、合金化溶融亜鉛めっき鋼板 GA590（以下 GA 鋼）と時効硬化型アルミニウム合金（以下 A6061）を用いた。後述の評価方法に対応させて、供試材寸法を、引張せん断試験用：1.2mm^t × 100mm^l × 30mm^w、十字引張試験用：1.2mm^t × 100mm^l × 50mm^w、断面観察用：1.2mm^t × 50mm^l × 50mm^wとした。図Ⅲ-2.7.13-21 に示すとおり、スポット溶接には電極径 25mm または 40mm のラジラス型、そして電極径 40mm のドームラジラス型の計 3 種類の Cr-Cu 系電極を用いた。以下、それぞれを R25 電極、R40 電極、および DR 電極と呼称する。溶接時に下側に配置する Al 合金板は、表面を事前にワイヤブラシで磨き、20 秒経過してから鋼を上側に配置し、電流値（12-20kA）および加圧力（4.5-5.5kN）を変化させて溶接を実施した。

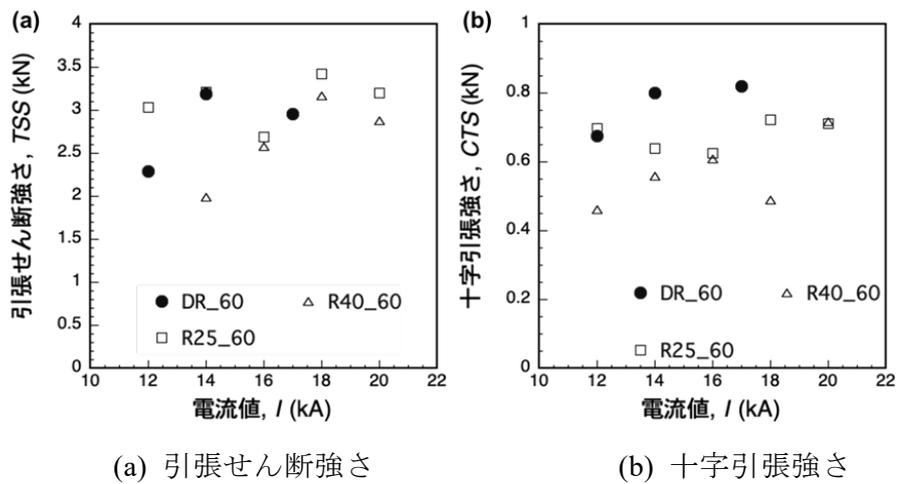


図Ⅲ-2.7.13-21 実験に使用した溶接電極形状

各種溶接条件で作製した接合体の強度評価には引張せん断試験ならびに十字引張試験を実施し、引張せん断強さ（TSS：Tensile Shear Strength）と十字引張強さ（CTS：Cross Tension Strength）を求めた。これは自動車車体における一般的な強度評価手法である。図Ⅲ-2.7.13-22 に各強度評価に用いた試験片形状と寸法を示す。



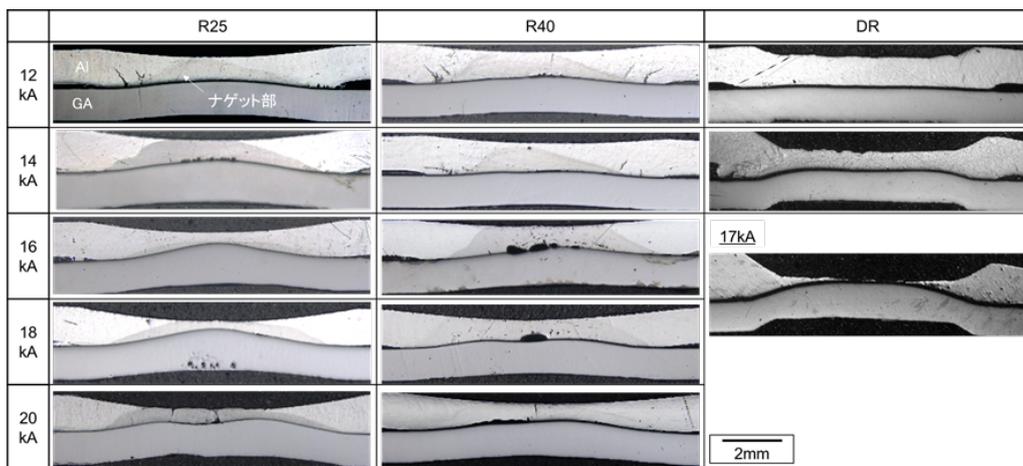
図Ⅲ-2.7.13-22 各強度評価手法における試験片形状および寸法



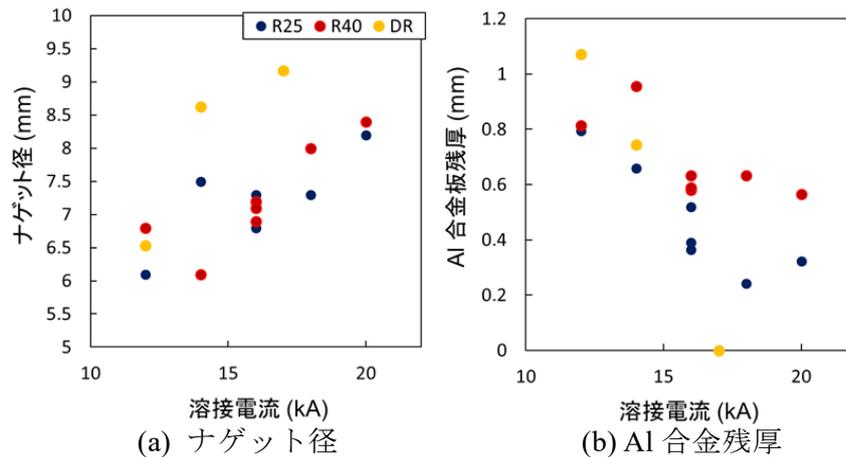
図Ⅲ-2.7.13-23 各種電極を用いたスポット溶接継手の強度と電流値の関係

図Ⅲ-2.7.13-23 に加圧力 5.0kN における電流値と TSS ならびに CTS との関係を示す。TSS および CTS のいずれにおいても、R40 電極に比べて R25 電極では高い強度が得られた。

次に接合部の断面観察を行った。各電極を用いて作製した継手断面マクロ写真を図Ⅲ-2.7.13-24 に示す。各継手のアルミ側にスポット溶接時に形成される最大溶融部分（ナゲット）が確認できる。ナゲット径と残存したアルミ板の厚さは、条件に応じて変化している。図Ⅲ-2.7.13-24 から求めたナゲット径と Al 合金板残厚と溶接電流値の関係を図Ⅲ-2.7.13-25 に示す。すべての電極形状で、電流値の増加とともにナゲット径が拡大し、アルミ側が凹み、残厚が減少する様子が確認された。特に、高い電流値のパラメータ範囲では、R40 電極、R25 電極、DR 電極の順に残厚が小さくなっており、DR 電極においてその変化が著しいことがわかった。

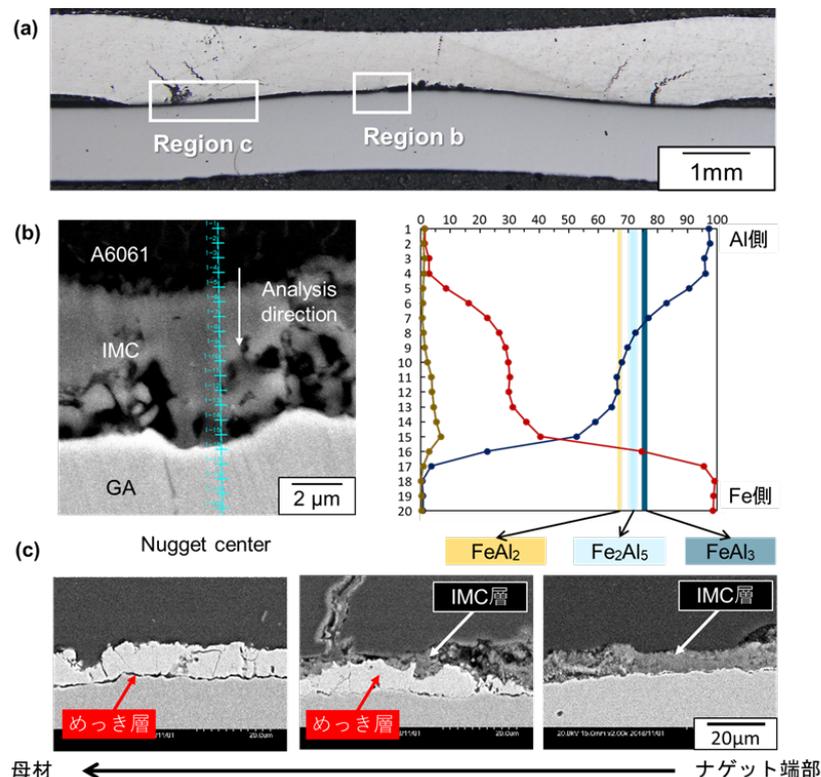


図Ⅲ-2.7.13-24 抵抗スポット溶接部のマクロ組織に及ぼす電極形状と電流値の影響



図III-2.7.13-25 各電極における溶接電流と継手形態の関係

スポット溶接継手のナゲット中心部およびナゲット端部に形成される反応層を図III-2.7.13-26に示す。ナゲット中央部において、反応層は鋼側から FeAl_2 、 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 の三つの Fe-Al 系金属間化合物から構成されている。一方、ナゲット周辺部に着目すると、母材からナゲット端部に向かって、GA 鋼表面に元々存在する Fe-Zn 系めっき層が、Fe-Al 系化合物に置換するように新たな反応層が形成される様子が認められた。この結果は、ナゲット端部において確認された厚い反応層が、元々存在するめっき層の残留挙動に由来することを示すものと推定される。



(a) スポット溶接継手 (R40 継手-12kA) 断面
 (b) ナゲット中央部の IMC 構造 (領域 b)
 (c) ナゲット端部から母材に至る反応層の変化 (領域 c)

図III-2.7.13-26 抵抗スポット溶接部の界面構造

以上をまとめると、抵抗スポット溶接の溶接電流や加圧力、電極形状などの溶接条件が界面構造の形成に大きく影響を及ぼし、その結果、継手強度を支配することが推察できた。

(c) 接合部検査装置の開発

本 FS では装置仕様策定に向けて、抵抗スポット溶接と接着接合を対象として、超音波検査手法、赤外線サーモグラフィ法、磁気検出法を取りあげ、現行の接合部検査手法の検査精度を調査することにした。

非破壊検査の研究を行っている 2 大学（東北大、神戸大）を再委託先とし、2 検査会社（東芝電力検査サービス、日本高圧電気）の協力を得て、ISMA 本部から標準接合試験片を各機関に送付し、ラウンドロビンテストの形で、抵抗スポット溶接のナゲット径、接着部の充填率を計測し、それぞれの非破壊検査法の特徴と検出精度を明らかにすることを目的とした。

[標準接合試験片]

図 III-2.7.13-27 に ISMA 本部で調達した抵抗スポット溶接の標準接合試験片の形状・寸法を示す。標準接合試験片は一つの板組に対して、抵抗スポット溶接では電流や加圧力などの溶接条件を 5 通りにして、溶融しないで密着した試験片を含め、ナゲット径を変えたものを作製した。図 III-2.7.13-28 に接着の標準接合試験片を示す。接着では接着剤の充填幅を 5mm と 10mm にした試験片を作製した。ラウンドロビンテスト時には、各機関ではナゲット径や接着剤の充填幅は未知であり、4 機関の試験・検査が終了後、試験片を解体した。そして、実測値と計測値を比較することで、検出精度の差異を明らかにした。

試験片の板組を表 III-2.7.13-5 に示す。標準接合試験片はそれぞれ板厚が同じの鋼板 2 枚組とアルミ 2 枚組を作製した。その目的は材種や板厚によって検出精度に差異が現れるかを調べることである。また、鋼板の場合、亜鉛メッキ(GA 材)の有無が検出精度に影響するかを調べた。また、接着工程では接着剤を塗布し、接着を行うが、検査のタイミングとして、接着剤の硬化処理の前後があり、硬化ありと硬化なしの 2 種類を作製した。

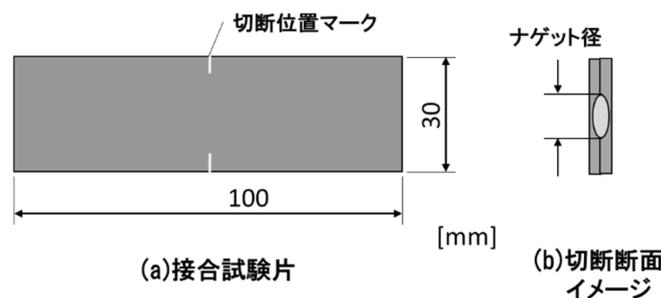
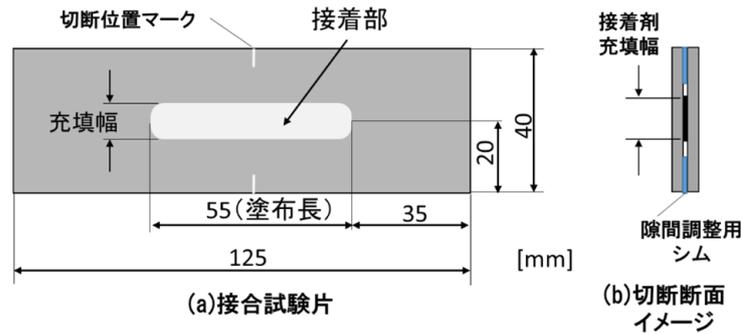


図 III-2.7.13-27 抵抗スポット溶接の標準接合試験片



図Ⅲ-2.7.13-28 接着の標準接合試験片

表Ⅲ-2.7.13-5 標準接合試験片に使用した材料の種類と板厚、接合方法

接合方法	鋼板 2 枚組(同種同厚)				アルミ 2 枚組(同種同厚)		
	270/0.7mm 厚 ×2 枚	270/0.65mm 厚 ×2 枚	980/1.6mm 厚 ×2 枚		5052/1.2mm 厚 ×2	5052/2.0mm 厚 ×2	
	メッキ有	メッキ無	メッキ有	メッキ無			
抵抗スポット溶接	R-1-1~5	R-2-1~5	R-3-1~5	R-4-1~5	R-5-1~5	R-6-1~5	
接着	硬化なし	AN-1-1, 2	AN-2-1, 2	AN-3-1, 2	AN-4-1, 2	AN-5-1, 2	AN-6-1, 2
	硬化あり	AA-1-1, 2	AA-2-1, 2	AA-3-1, 2	AA-4-1, 2	AA-5-1, 2	AA-6-1, 2

[非破壊試験方法]

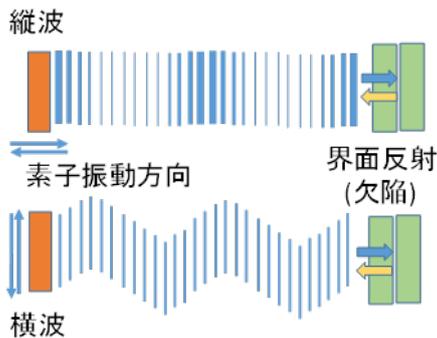
① 超音波探傷試験

①-1 探触子小型化による点音源入射

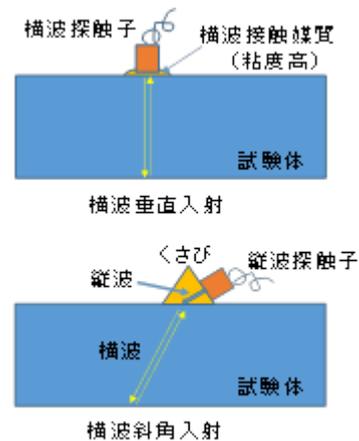
図Ⅲ-2.7.13-29 に縦波と横波の伝搬モード模式図を示す。また図Ⅲ-2.7.13-30 に工業的横波計測法として利用されている、超音波探傷の標準的横波斜角入射法と横波垂直法を模式的に示す。横波は不連続界面の検出能が高いことから、一般部材の超音波探傷において、横波斜角法が標準手法として広範に利用されている。しかし、本 FS 研究で評価するスポット溶接部は、薄板の局所接合部であり、横波が標準的に利用される斜角計測は使えない。横波を垂直入射するためには、図Ⅲ-2.7.13-30 に示すような横波振動する素子から成る特殊な探触子を用い、かつ粘度の高い横波接触媒質が計測には不可欠であるが、接触の安定に長時間を要し工業的には利用されない。このためスポット溶接の接合評価には、縦波のみが利用されてきた。

一方、横波を垂直入射する手法として、点音源縦波の入射が知られている。最も典型的な点音源入射は、レーザー超音波計測であり、レーザーを局所的に照射しその熱による弾性膨張あるいはアブレーションにより発生する弾性波(超音波)を利用した計測法である。東北大で保有する光弾性超音波可視化法で、レーザー超音波のガラス試験体への入射挙動を可視化した結果を図Ⅲ-2.7.13-31 に示す。点音源入射した縦波は、円筒状に伝搬するが、点音源縦波は入射時にモード変換横波を発生し、縦波に遅れて同心円状に伝搬する様子が観察できる。さらにガラス試験体表面を伝搬する表面波や、表面部を伝搬する縦波のモード変換波に由来するヘッドウェーブも観察される。光弾性法による超音波の輝度は、縦波より横波の方が明るく表示されるものの、発生する横波振幅は縦波と比べ十分大きな振幅を持つことが分かる。

一般的工業用途への応用において点音源による伝搬波は、振動面が小さく低エネルギーで、かつ図Ⅲ-2.7.13-31のように3次元的に球面波として伝搬するので、伝搬距離に依存して拡散減衰も大きい。しかしスポット溶接評価への適用を考えると、最大数 mm 程度の薄板接合部位の評価であることから、拡散による影響は大きな問題にはならない。しかし工業的に利用できる点音源として、レーザー超音波は一般的手法では無いので、探触子小型化による点音源入射の可能性を検討した。



図Ⅲ-2.7.13-29 超音波の縦波と横波

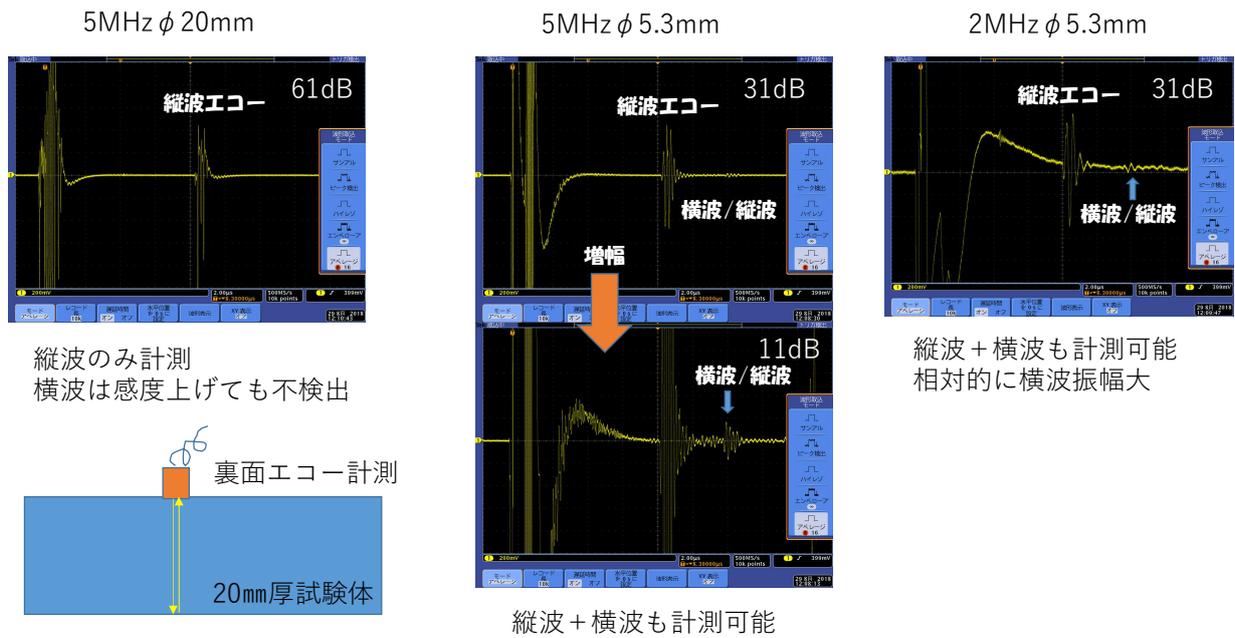


図Ⅲ-2.7.13-30 横波の既存の工業利用例

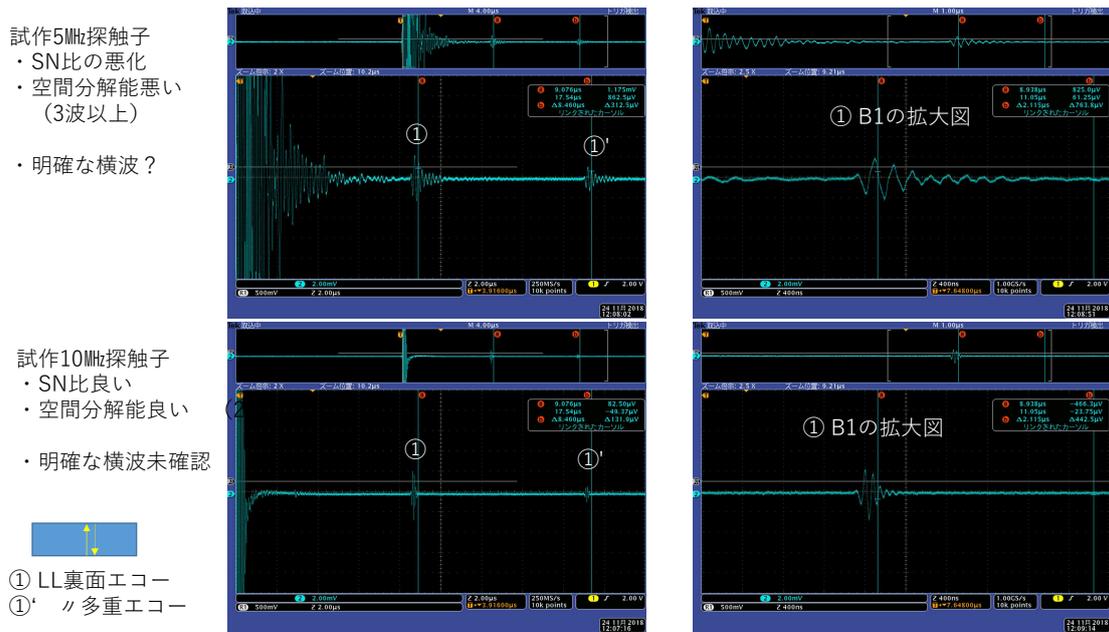


図Ⅲ-2.7.13-31 レーザー超音波の送信音場可視化画像

探触子のサイズ ($\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 5.3\text{mm}$) と周波数 (2MHz、5MHz) を変えたときの横波モード変換波の発生挙動について、板厚 20mm の裏面反射エコー挙動で調べた結果を図Ⅲ-2.7.13-32 に示す。横波モード変換波は、物理的に入射縦波の入射角度で決まるので、探触子を小型化する程、また入射超音波周波数が低い程、モード変換横波振幅は大きくなる。しかし、スポット溶接部の接合評価においては、溶融したナゲット周辺部にある接合界面の密着部の分解能が求められ、波長が長い周波数が低い超音波は接合界面反射エコーの計測分解能が低下する。図Ⅲ-2.7.13-33 に 5MHz と 10MHz での反射エコーを比較して示す。以上より、本研究では、計測の分解能を得るに不可欠の周波数として 10MHz を選択し、点音源探触子として小口径の探触子試作によりモード変換横波が効率良く発生するかどうかを確認した。図Ⅲ-2.7.13-34 に試作した $\phi 3\text{mm}$ の縦波探触子の外観写真を示す。



図Ⅲ-2.7.13-32 周波数と素子サイズによる横波モード変換波の発生能



図Ⅲ-2.7.13-33 適用周波数と計測分解能 (5MHz,10MHz 探触子)



図Ⅲ-2.7.13-34 試作 ϕ 3mm-10MHz 探触子

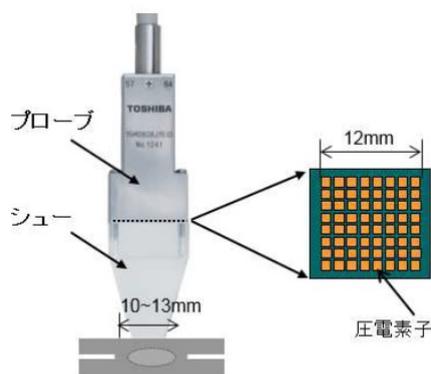
①-2 3次元超音波検査装置

東芝電力検査サービスでは、3次元超音波検査装置 MatrixeyeLT を開発しており、自動車部品（スポット溶接等）、航空機部品（CFRP 等部品）や鋼材（溶接部、母材等）の検査への適用を行っている。

MatrixeyeLT は、アレイプローブを用いて収集した超音波エコーデータに独自に開発した3次元開口合成（3D-SAFT:Synthetic Aperture Focusing Technique）手法を用いることで高精度の3次元画像を表示できることを特長としている。抵抗スポット溶接検査には、図Ⅲ-2.7.13-35 に示すマトリックスアレイプローブ（周波数 15MHz、画像化範囲 12mm x 12mm、素子配列 8 x 8）を使用している。同プローブを、ジェル状のカップラントを介して溶接部表面に密着させることで、機械走査を行わずに溶接部の3D画像を計測することができる。この3D-SAFTは、数百から数万点もの多数の送受信パターンで得られた超音波エコーデータを開口合成処理することによって、高解像で高感度の3次元画像が得られる手法である。

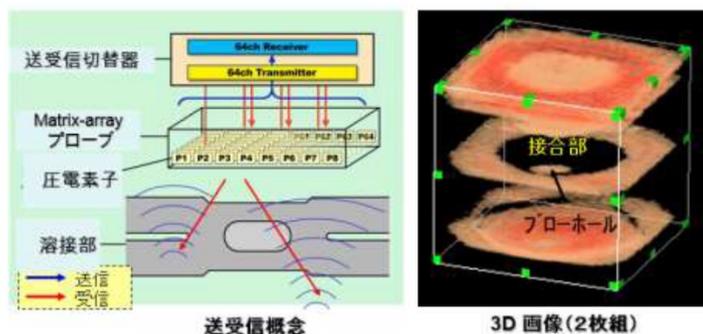
開口合成処理の原理を説明する。図Ⅲ-2.7.13-36において、マトリクス状に配置された各圧電素子は、各々、溶接部の全面に渡る指向性を有した超音波ビームを送信する設計としている。そのため、選択された1素子から送信された超音波は、溶接部内の全領域に照射され、全領域からの反射波を、マトリクス配置された全ての素子で受信することができる。この送受信を電子的に切り替えることにより、最多で64個（8×8個）の全組み合わせ4096点（64×64=4096）の反射波を瞬時に収集することができる。画像化は、収集した多数の反射信号を、送受信対の圧電振動子位置に応じて、同一反射源からのエコーがその反射源の位置に重なるように、3次元画像化範囲内の全ての画像化メッシュに対して加算処理され、この画像合成処理により溶接部の3D画像を精細に生成することができる。この開口合成処理による水平方向の解像度 ΔX は、超音波の半波長のX方向への射影成分になり、以下の近似式で表すことができる。

$$\Delta X \approx (\lambda/2) \times (d/\lambda) = d/2 \quad (d \text{ は素子の直径})$$



スポット溶接部

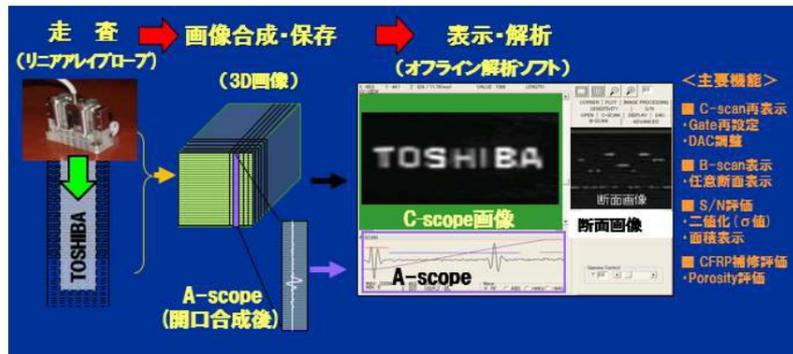
図Ⅲ-2.7.13-35 開口合成処理の原理



図Ⅲ-2.7.13-36 抵抗スポット溶接検査用のMatrix-arrayプローブ

接着材の検査では、図Ⅲ-2.7.13-37に示すように、リニアアレイプローブ（10MHz、64チャンネル）を使用し、開口合成（SAFT）により合成された断面画像をプローブの機械走査方向に配列した3D画像に基づき検査を行った。具体的には、ワイヤエンコーダを用

いて、リニアアレイプローブを機械的に走査する際に一定ピッチ毎に合成した断面画像を収集して3D画像として統合し、表示・保存した。その後、オフライン解析ソフトにより、保存した3D画像データを解析して接着部の画像を切り出して表示、計測した。

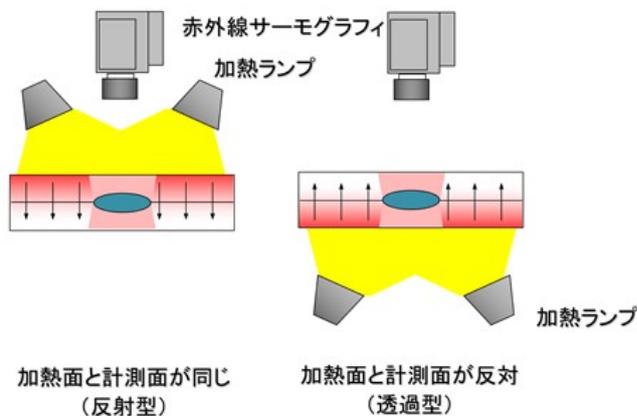


図Ⅲ-2.7.13-37 リニアアレイプローブによる検査概念

② 赤外線サーモグラフィ法

赤外線サーモグラフィによる接合部評価の原理を図Ⅲ-2.7.13-38に示す。パルス加熱を行う加熱面と計測面が同じ場合を反射型、パルス加熱を行う加熱面と計測面が反対の場合を透過型と呼ぶ。反射型の場合には加熱された加熱側の板から内部に面外方向の熱伝導が生じるが、接合部では熱が伝わりやすいため、加熱面には接合部を中心として局所的低温領域が形成される。透過型の場合には逆に計測側表面に局所的な高温領域が形成される。赤外線サーモグラフィで計測された、このような局所的な温度変化領域の形状・寸法を評価することで接合部の寸法の評価を行う。

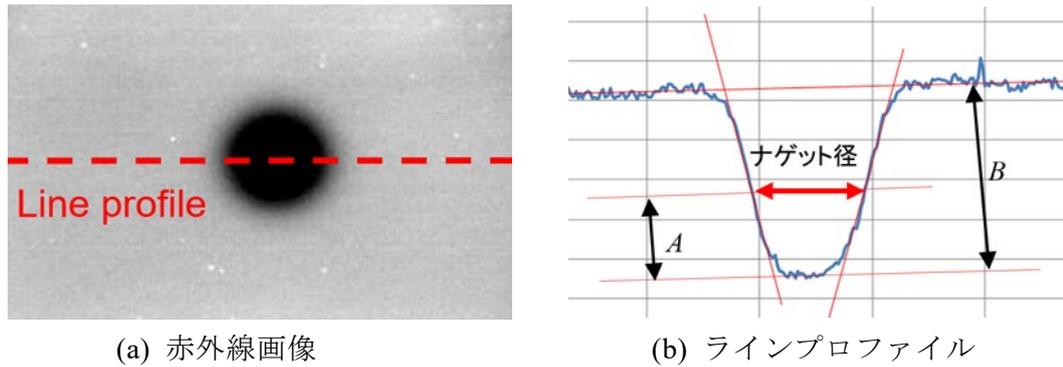
パルス加熱装置としては、商業写真撮影用のキセノンフラッシュランプを用いた。出力3200Jのフラッシュランプを4灯用いることで均質な加熱を行った。赤外線サーモグラフィとしては、パルス加熱後短時間の温度変動分布を計測するため、表Ⅲ-2.7.13-6に示す量子型赤外線アレイセンサを搭載した機種を用いた。



表Ⅲ-2.7.13-6 赤外線カメラの仕様

Detector materials	InSb
Number of pixels	320 × 256 pixels
Spectral response	1.5μm-5.1μm
Frame rate	up to 383Hz full frame
Pitch	30μm × 30μm
NETD	25mK (°C)

図Ⅲ-2.7.13-38 赤外線サーモグラフィ法による接合部評価

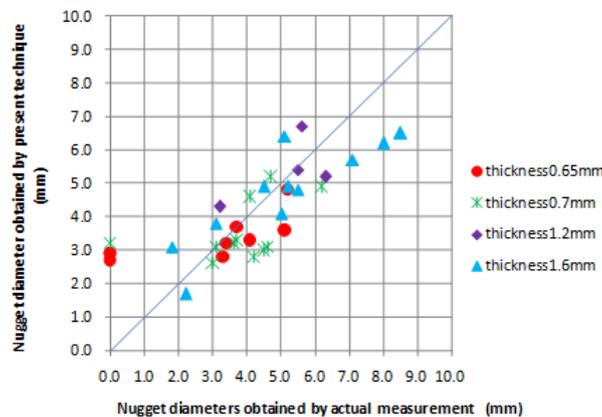


図Ⅲ-2.7.13-39 パルス加熱後の赤外線画像およびそのラインプロファイル

スポット溶接された試験片にパルス熱負荷を与えたとき加熱面側には、図Ⅲ-2.7.13-39(a)に示すような接合部を中心に低温領域が現れる温度分布が形成される。この場合に図中の破線上における温度分布（ラインプロファイル）は、図Ⅲ-2.7.13-39(b)に示すようになるので、ラインプロファイルの特徴をもとに接合部の寸法を評価することを考える。通常よく用いられる手法として半値幅法があるが、半値幅法を本手法に適用する場合には、赤外線強度分布曲線を取得する最適時刻が対象物の板厚により異なるという問題点がある。すなわち、薄板に対する最適時刻は加熱直後であり面内熱拡散の影響が比較的小さいのに対して、厚板の場合には最適時刻は遅くなり面内熱拡散の影響が大きくなる。このため、従来の半値幅法では、接合部の寸法が正しく求められなかった。そこで、先行研究においては、板厚に応じてパルス加熱後の温度プロファイル取得時刻を変えた上で、半値幅法にかわる以下のような寸法評価法を提案した。

- (1)温度プロファイルの温度低下部に接線を引く。
- (2)半値幅にかわる方法として、赤外線強度比 R を用いる。
- (3)最適な赤外線強度比 $R = A/B$ を板厚ごとに決める。
- (4)赤外線強度比 R の位置に引いた直線が左右の接線に切り取られる長さをナゲット径とする。

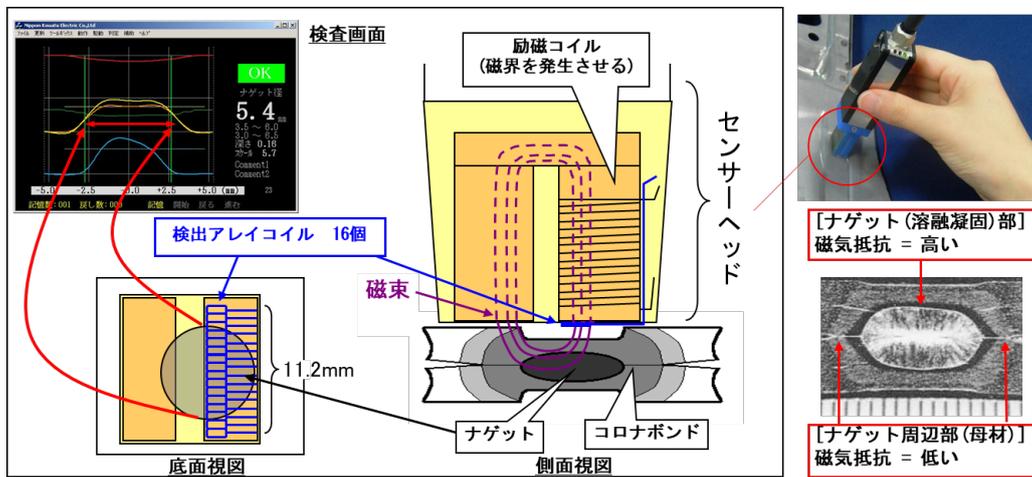
先行研究において行った実験的検討においては、面内熱拡散の影響が小さい板厚 1mm 以下の場合には $R=1$ とし、それ以外の板厚に対しては材料および板厚に応じて最適値を数値解析により求めた。その結果、板厚の推定結果は図Ⅲ-2.7.13-40 に示すようになり、接合試験片を切断して実測したナゲット径と高い相関が得られるものとなった。



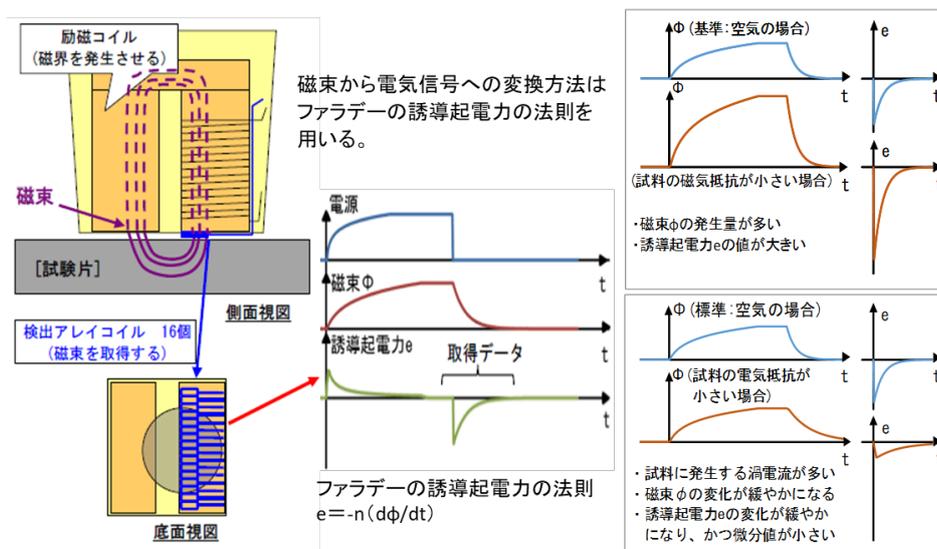
図Ⅲ-2.7.13-40 スポット溶接部のナゲット径推定結果（先行研究による）

③ 磁気検出法

本磁気検出法では、溶接部と母材部との磁気抵抗の差を検出するため、試験検査は鋼板の抵抗スポット溶接を対象とする。図Ⅲ-2.7.13-41 に測定原理を示す。センサーヘッドは磁気を発生させる励磁コイルと発生した磁束を電気信号に変換し取得するコイルから成り、検出コイルは 16 個装備されている。磁束から電気信号への変換はファラデーの誘導起電力の法則により、誘導起電力波形を取得する。図Ⅲ-2.7.13-42 に示すように、励磁コイルで発生させた磁力線は試験片に侵入し、そこで磁束の時間的变化に応じて、起電力が発生する。材料の磁気抵抗が小さい(透磁率が大きい)場合、試験片の内部の磁束は大きくなるため、起電力が大きくなる。一方、試験片は鋼板であり、導電性があるので、この起電力によって渦電流が生じる。導電性が大きくなると、電流が多く流れ、電圧波形は低くなる。このような試験片の局所的な電気磁気性質の違いを磁気センサーで捉え、溶融ナゲット部、熱影響コロナボンド部、未接合部を判別する方法である。



図Ⅲ-2.7.13-41 磁気検出法の測定原理



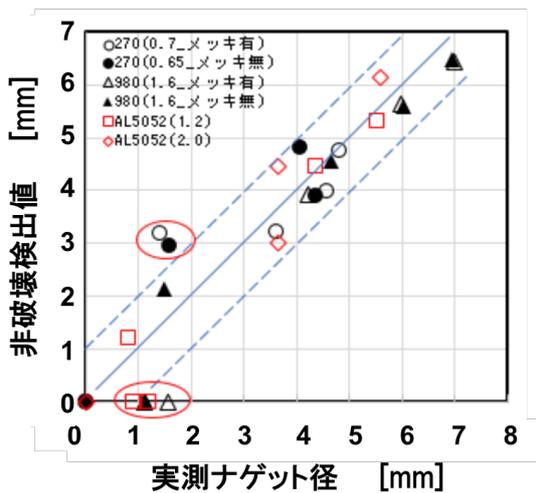
図Ⅲ-2.7.13-42 電磁誘導による起電力と材料の磁気抵抗

[ラウンドロビン結果]

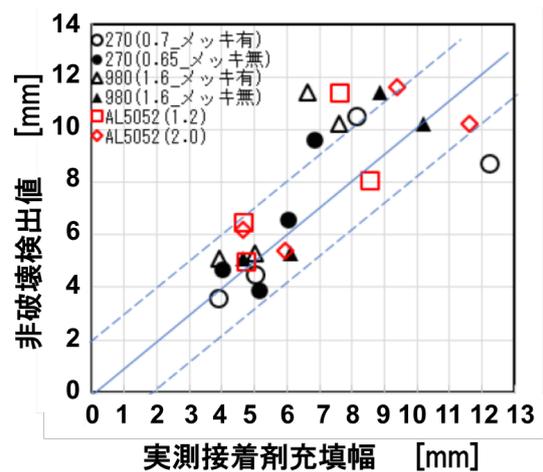
①超音波探傷試験

鋼板同士の抵抗スポット溶接は、MatrixeyeLT に標準装備されたスポット溶接検査用 UI(溶接部底面 Gate の画像で判断) で計測し、自動判定した結果を示している。図Ⅲ-2.7.13-43 に示す、980(超ハイテン材)/1.6mm (2 枚組) の検査結果例に示すように、良好な計測結果が得られている。ここで、非破壊検出値が 0mm のケース (R3-1) は、計測装置が約 2mm 以下を全て NG と判断し、強制的に 0mm と表示するためであり、実際の誤差より大きめの値となっている。270(軟鋼)材で、非破壊検出値が 3mm 近辺で (丸で囲った部分) に示すように、ハイテン材に比べ、軟鋼板で径が大きめに出る傾向となった。

アルミ同士の抵抗スポット溶接は圧接部の影響が大きく、スポット溶接検査用の標準 UI にすると、径が大きめに出る傾向が予備実験で確認したため、Matrixeye で計測した 3D 合成画像データを、図Ⅲ-2.7.13-37 に示すオフライン解析ソフトを用いて、ナゲット径を計測した。図Ⅲ-2.7.13-43 に示すように、全般的に良好な相関が得られた。今後、アルミ同士の抵抗スポット溶接検査の実用化のためには、この中間 Gate 画像による自動判定処理が可能な UI の開発が必要である。



図Ⅲ-2.7.13-43 抵抗スポット溶接試験体の検査結果



図Ⅲ-2.7.13-44 接着接合体の充填幅検査結果

図Ⅲ-2.7.13-44 に、接着接合体の検査結果を示す。接着接合体は接着幅 5mm と 10mm を狙って作製しており、5mm 幅については実測値と非破壊検出値とは良好な相関を示しているが、充填幅が大きい試験体では実測値よりも大きな検出値を示すものが一部見られた。

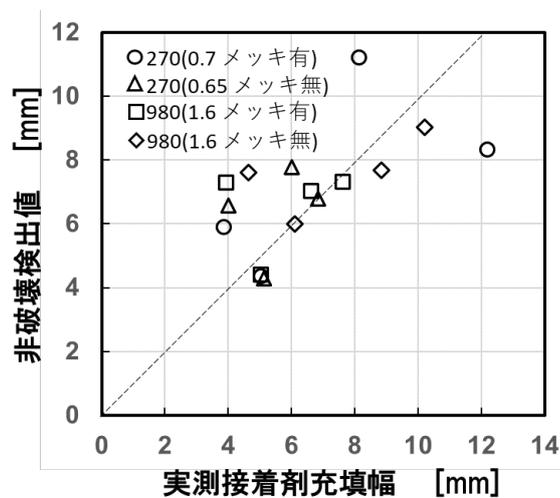
以上、現状の超音波検査装置では、抵抗スポット溶接のナゲット径については±1mm 以内の精度で検査を実施できることが明らかになった。一方、接着剤充填幅については、±3mm 以内の精度で検査可能であることが示された。今後、車体設計に関連して接合部の品質管理を行うことになるが、現状の超音波検査装置に組込むソフトの改良だけでも検査精度を高めることができることが分かった。もとより、検査精度を高めるためには、超音波プローブの圧電素子のサイズをより小さくしていくことが有効になる。

② 赤外線サーモグラフィ法

本方法は簡便かつ高速に検査を行うことができるが、ラウンドロビンでは抵抗スポット溶接部ナゲット寸法の計測においてはバラツキが大きく、データとしてまとめることができなかった。一方、接着剤充填幅については、鋼板同士の接着接合体の計測ができたので、図Ⅲ-2.7.13-45に示す。図から $\pm 3\text{mm}$ 以内の精度で検出できることが分かる。

赤外線サーモグラフィ計測の原理から、検査対象物表面の赤外線放射率は高く一定であることが要求される。金属材料の場合、酸化した表面あるいは電着塗装表面などでは放射率は向上するが、そのままでは放射率が低いため、放射率向上のためのつや消し塗料の塗布が必要となる。標準接合試験片は、いずれも放射率が低く、そのままの状態では計測が不可能であったため、すべてつや消し黒色塗料を塗布してから計測に供した。現場適用を考える場合、生産性を確保しながらも表面の放射率を確保できる手法を考案しなければならない。

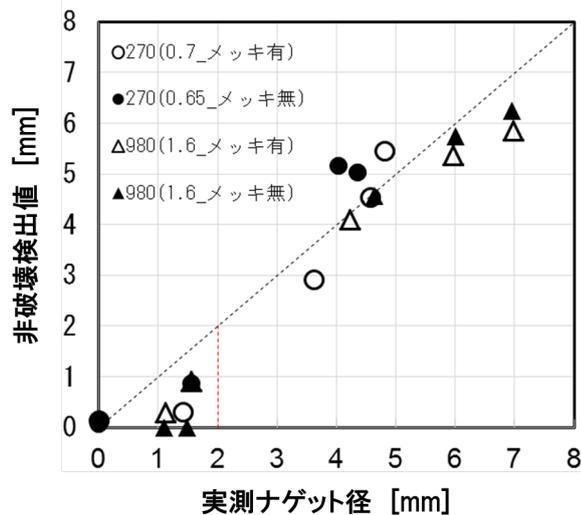
スポット溶接では溶着部であるナゲットの周囲に接触領域が存在する。熱伝導は接触によっても起こるため、これがナゲット径の評価不可能あるいはナゲット径の過大評価の原因となっている。接触面圧による熱伝導度の影響を付加したナゲット径評価法の検討を行う必要があるが、接合部を介した熱伝導と接触熱伝導を区別するには、高い計測精度で温度分布を求める必要があり、現実的には難しく、本手法を使用するためには大きな課題となる。



図Ⅲ-2.7.13-45 接着接合体の充填幅検査結果

③ 磁気検出法

本方法は、原理上、鋼板同士の抵抗スポット溶接に対して適用可能であり、ラウンドロビンテスト結果を図Ⅲ-2.7.13-46に示す。図から、 $\pm 0.7\text{mm}$ 程度の精度で検出できているが分かる。ナゲット径実測値に対する相関係数は0.96以上あり、実測ナゲット径と磁気式検出値には高い相関関係があると言える。



図Ⅲ-2.7.13-46 鋼板同士の抵抗スポット溶接試験体の検査結果

課題② 異材接合継手の性能比較

1. 異材接合の試験片と試験方法

1.1 材料組合せと接合プロセス

異材接合においては、材料の組合せと接合プロセスによって継手性能が異なるので、ユーザから見たとき選択基準が明確でない。そこで、組合せの材料を限定し、これらに対して様々な接合手法によって異材接合を行い、統一した試験方法により継手強度と耐久性を調べることにした。本プロジェクトでは2016年度にアルミ/CFRTP、鋼板/CFRTPの異材接合の継手性能について4種類の接合プロセスによる差異を調べた。その後、この2年ほどの間に、国内の溶接機メーカーや溶材メーカー、中立機関などによって、いくつかの新規接合プロセスが開発されており、従来技術も含めて継手性能を比較することで、今後の実用化研究に資することを目的とした。ここでは、材料の組合せをアルミ/鋼板、アルミ/CFRTP、鋼板/CFRTPとし、表Ⅲ-2.7.13-7に示す下線付きの接合プロセスによって作成された継手の性能を調べた。アルミ/鋼板の組合せに対しては13種類の接合プロセス、アルミ/CFRTPの組合せでは4種類、鋼板/CFRTPの組合せでは5種類の接合プロセスについて調査した。各接合プロセスによる接合実験は企業7、大学6、中立研究機関1が行った。なお、接合設備・装置や接合条件、接合前処理、接着剤、ろう材などの種類は指定していない。

1.2 試験方法

本調査における重ね異材接合の材料組合せと板厚を表Ⅲ-2.7.13-8に示す。アルミ/鋼板の接合継手は、引張せん断試験(JIS Z3136 または JIS K6850)並びに十字引張試験(JIS Z 3137)、引張せん断モードの疲労試験(JIS Z3138 または JIS K6864)を行った。アルミ/CFRTP、鋼板/CFRTPの接合継手は、室温において、引張せん断試験(ISO 19095-3)並びに十字引張試験(JIS Z 3137)を行った。そして、恒温恒湿環境、高温環境、熱サイクル環境、腐食環境に暴露し、引張せん断強度の時間的変化を調べ、耐久性を評価した。

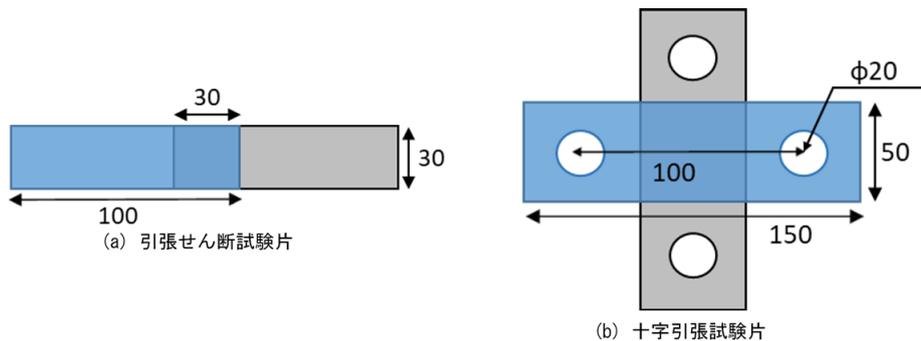
表Ⅲ-2.7.13-7 異材接合継手の試験評価に用いた接合方法(下線付き)

溶融接合	ろう接	固相接合・溶着	接着接合	機械的締結
抵抗スポット溶接 アーク溶接 レーザー溶接 ウェルドボンド	ミグろう付 <u>レーザーろう付</u>	摩擦接合(FSW, FSSW, FLJ, FEW, FBj, LFW) <u>レーザー溶着</u> 超音波接合 電磁圧接 金属塩生成接合 コアキシャルスポット接合	接着接合	リベット(SPR, BR) ボルト/ネジ(FDS) <u>クリンチング</u> ヘミング 抵抗エレメント接合 アークエレメント接合 レーザーリベット接合 バンチングかしめ

表Ⅲ-2.7.13-8 重ね異材接合の材料組合せと板厚

異材組合せ	アルミ/鋼板		アルミ/CFRTP		鋼板/CFRTP	
	材質	板厚 (mm)	材質	板厚 (mm)	材質	板厚 (mm)
アルミ/鋼板 (パネル 2枚組)	アルミ: A5052	1.2	X	X	X	X
	鋼板: SPCC-GAめっき鋼板	0.8				
アルミ/鋼板 (骨格 2枚組)	アルミ: A5052	2.0				
	鋼板: 980DP-GAめっき鋼板	1.4				
金属/CFRP			アルミ: A5052	1.2	鋼板: SPCC	1.2
			CFRTP: PA-CF30vol%射出成形	3.0	CFRTP: PA-CF30vol%射出成形	3.0

上記規格による試験片の板幅や試験片長さは板厚によって異なるが、本調査ではすべて図Ⅲ-2.7.13-47に示す試験片形状・寸法とした。なお、CFRTP単体ではJIS K7162-2 1B型試験片に加工し、引張試験を実施した。



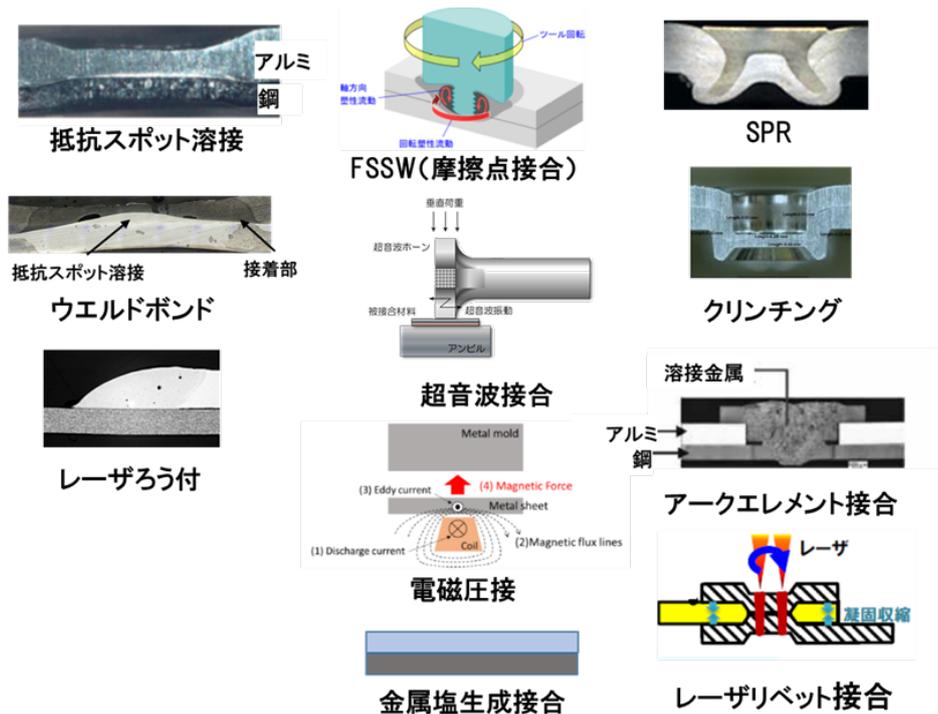
図Ⅲ-2.7.13-47 試験片形状と寸法

2. 異材接合の継手性能

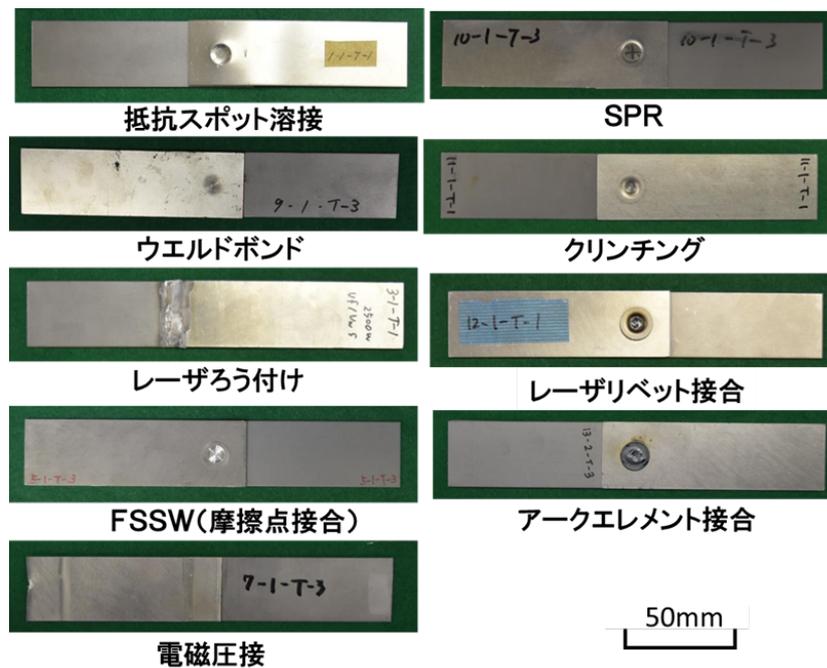
2.1 アルミ/鋼板の異材接合継手の静的強度と疲労強度

2.1.1 引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)

アルミ/鋼板の異材接合には図Ⅲ-2.7.13-48に示す11種類の接合プロセスを適用した。図Ⅲ-2.7.13-49に抵抗スポット溶接やFSSWなど9種類の接合方法により接合された引張せん断試験片の外観を示す。引張せん断試験並びに十字引張試験は、卓上型万能試験機5659(INSTRON製)を用い、試験速度5mm/minで実施した。各接合方法に対する試験片の本数(n数)は2本とした。



図Ⅲ-2.7.13-48 アルミ/鋼板の異材接合に適用した接合プロセス



図Ⅲ-2.7.13-49 アルミ/鋼板の異材接合継手の引張せん断試験片

アルミ/鋼板の異材接合継手の引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)を図Ⅲ-2.7.13-50と図Ⅲ-2.7.13-51に示す。適用した接合方法は11種類である。アルミ/鋼板の異材接合の適用対象は、薄板を組合せたパネル部材と、超ハイテン鋼とアルミ板を組合せた骨格部材を想定している。図Ⅲ-2.7.13-50に示す材料組合せにはアルミ Al-Mg系 5052-1.2mm厚と冷間圧延鋼板 SPCCの合金化溶解亜鉛メッキ鋼板 GA材-0.8mm厚を供試し、パネル部

材とした。一方、図Ⅲ-2.7.13-51 に示す材料組合せには、アルミ 5052-2.0mm 厚と超ハイテン鋼 980DP の GA 材-1.4mm 厚を供試し、骨格部材とした。

図中において接合強度レベルの判断基準として、TSS の JIS A 級の荷重ラインを示した。ここでは、アルミと鋼板の異材接合継手を対象としており、国内外に対応する試験規格がなく、「スポット溶接部の検査方法及び判定基準(JIS Z3140:2017)」を準用した。JIS Z3140 では、鋼板同士またはアルミ同士の抵抗スポット溶接部を対象に、溶接継手の引張せん断強さ(TSS)を A 級と B 級に分類している。JIS A 級は B 級よりも引張せん断荷重が大きく、溶接品質が高い。JIS Z3140 では母材の引張強度と板厚に応じて、A 級及び B 級の引張せん断強さが定められている。ここでは、母材のアルミ板と鋼板について、それぞれの引張強度と試験片断面積(板厚×試験片幅)から母材の破断荷重を求めた。すなわち、母材のアルミ板と鋼板の破断荷重が低い方を基準にして、JIS A 級の TSS を求めた。図Ⅲ-2.7.13-50 に示すパネル部材を想定した重ね継手において、抵抗スポット溶接、レーザーろう付、FSSW、電磁圧接、ウェルドボンド、SPR、クリンチング、レーザーリベット、アークエレメントの 9 種類の接合方法の TSS が JIS A 級以上の破断荷重となっている。超音波接合では接合装置の出力容量や形状・寸法の関係で引張せん断試験片を作成できなかった。

次に、図Ⅲ-2.7.13-51 に示す骨格部材を想定した重ね継手では、レーザーろう付、FSSW、ウェルドボンド、SPR、レーザーリベット、アークエレメントの 6 種類の接合方法の TSS が JIS A 級をクリアしている。

十字引張強さ(CTS)に関しては、パネル 2 枚組と骨格 2 枚組のいずれにおいても、アークエレメント接合並びにレーザーリベット接合による CTS が他の接合方法に比べて圧倒的に高く、異材接合部を貫通するリベットやエレメントが剥離強度を大きくしていることが分かる。

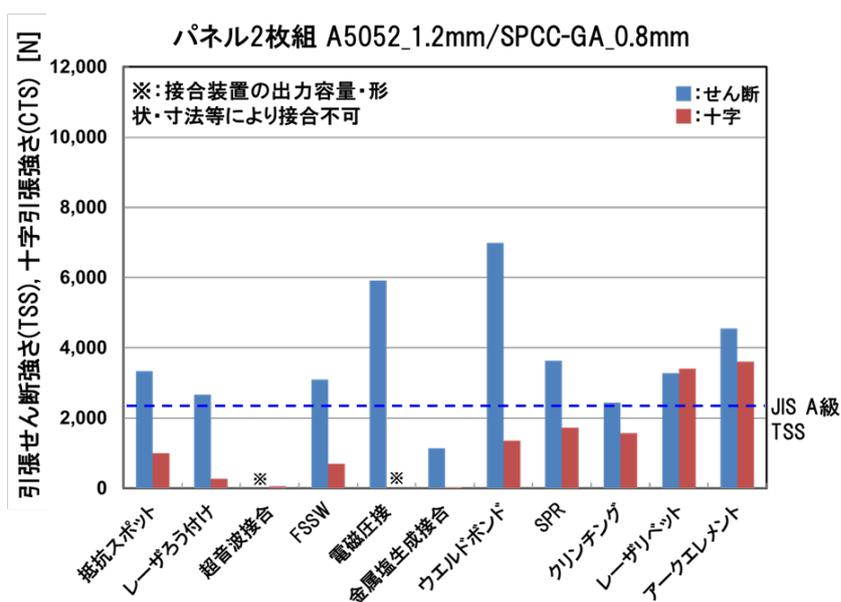
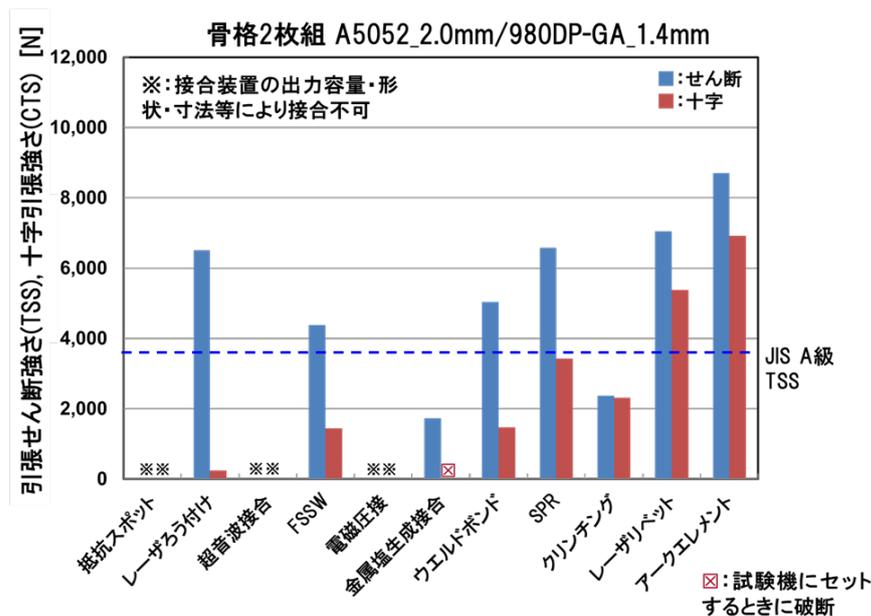


図 2.7.13-50 アルミ/鋼板の異材接合継手の引張せん断強度(TSS)と十字引張強度(CTS) (パネル 2 枚組 A5052_1.2mm/SPCC-GA_0.8mm)



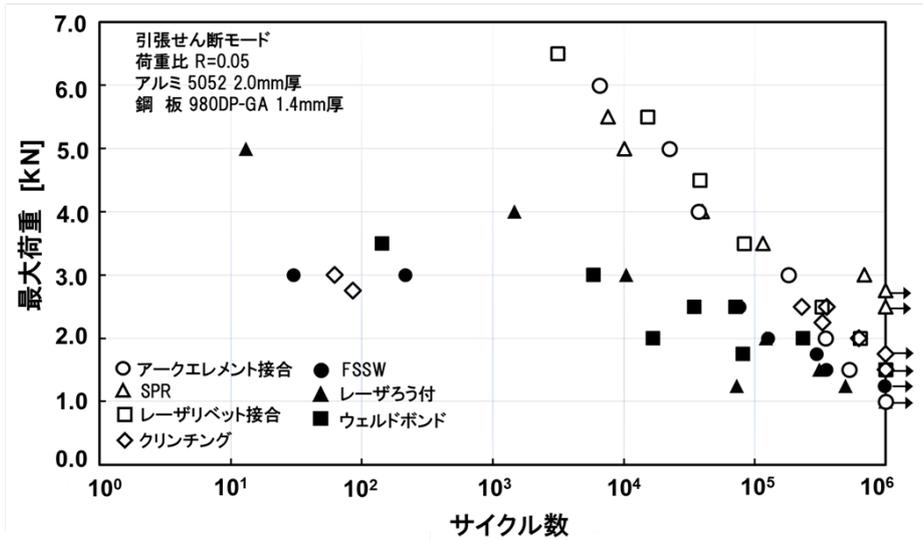
図Ⅲ-2.7.13-51 アルミ/鋼板の異材接合継手の引張せん断強度(TSS)と十字引張強度(CTS)
(骨格2枚組 A5052_2.0mm/980DP-GA_1.4mm)

2.1.2 疲労試験結果

疲労試験は引張せん断モードとし、疲労試験機 EHF-EV101K1-020-1A(島津製作所製)を用い、正弦波荷重、荷重比 $R=(\text{最小荷重})/(\text{最大荷重})=0.05$ 、10Hz で繰返し回数 10^6 サイクルまで実施し、P-N 線図を作成した。

ここでは、骨格部材を想定したアルミ 5052-2.0mm 厚と超ハイテン鋼 980DP_GA 材-1.4mm 厚の異材重ね継手の疲労試験を図Ⅲ-2.7.13-52 に示す。いずれの接合方法も繰返し回数とともに破断強度が低下し、 10^6 サイクルで 1kN~3kN 程度となっている。

現在、自動車車体はほぼ鉄鋼材料で構成されており、これまでに抵抗スポット溶接による鋼板重ね継手の疲労試験が行われている。その疲労強度は鋼種や板厚、ナゲット径によって変化するが、ほぼ 1kN~3kN の範囲にある。異材接合では、密度や弾性率、引張強度など物性値が異なる母材が接合された異材継手であり、さらに接合方法によって継手形状や接合部のミクロ組織が異なるため、今後、静的強度とともに疲労強度の向上に向けて、異材接合の強度発現機構など基礎的な研究が求められる。



図III-2.7.13-52 アルミ/鋼板-異材重ね継手の P-N 線図
(骨格 2 枚組 A5052_2.0mm/980DP-GA_1.4mm)

2.2 金属/CFRTP の異材接合継手の試験結果

2.2.1 引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)

金属/CFRTP の異材接合には図III-2.7.13-53 に示す 6 種類の接合プロセスを適用した。引張せん断試験並びに十字引張試験は、卓上型万能試験機 5659(INSTRON 製)を用い、試験速度 5mm/min で実施した。各接合方法に対する試験片の本数(n 数)は 2 本とした。

金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)を図III-2.7.13-54 に示す。まず、アルミ/CFRTP の異材重ね継手においては、コアキシャル抵抗スポット接合、FSSW、パンチングかしめ法の TSS が JIS A 級以上の破断荷重となっている。一方、鋼板/CFRTP の重ね継手では、接着プロセスとレーザ溶着の TSS が JIS A 級レベルを超えている。TSS で JIS A 級を満足していても十字引張強さ(CTS)は 1kN~2kN である。

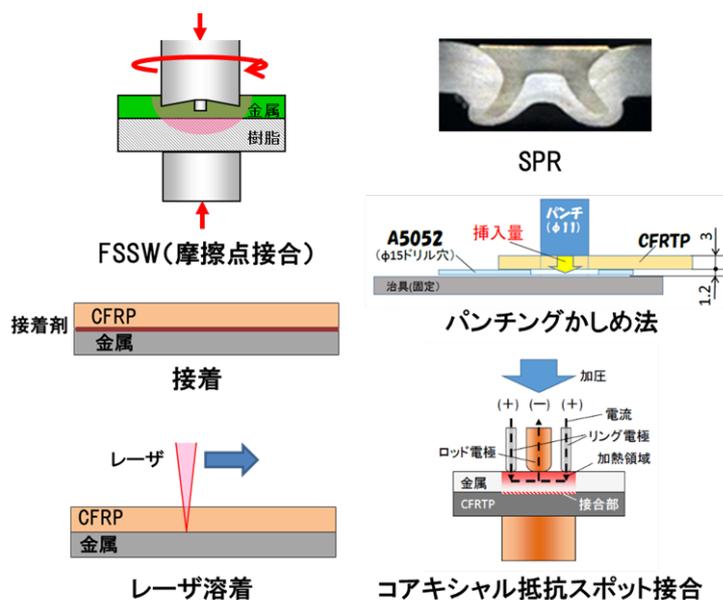
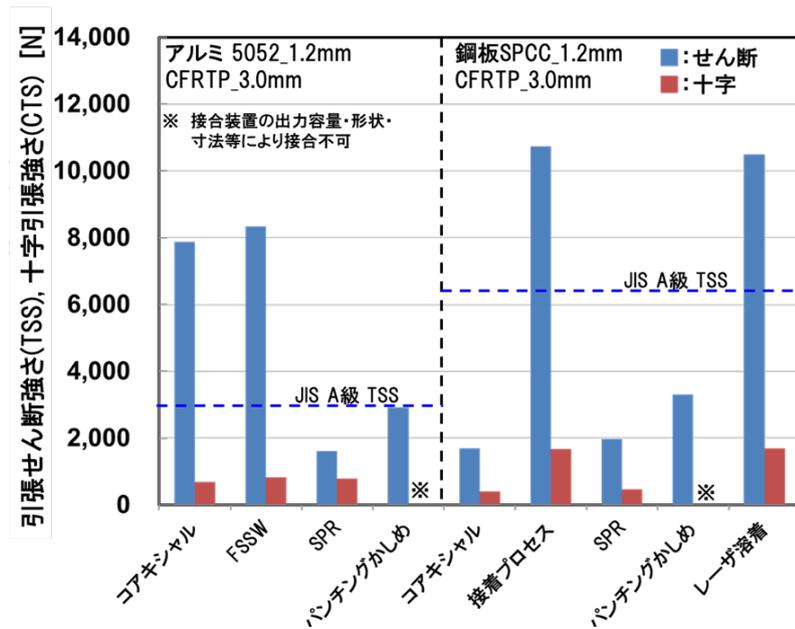


図 2.7.13-53 金属/CFRTP の異材接合に適用した接合プロセス



図Ⅲ-2.7.13-54 金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)
(アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)

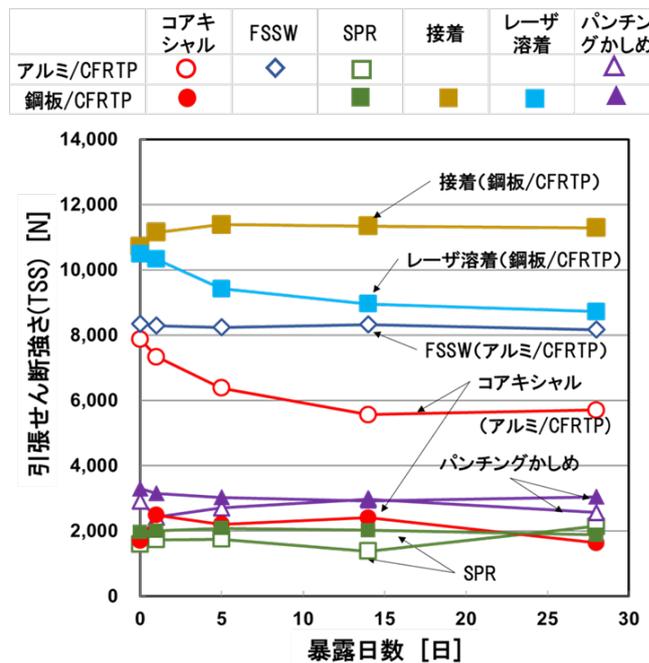
2.2.2 環境暴露試験

異材接合技術の課題として、母材の線膨張率と弾性率が起因する熱応力や熱変形がある。また、電気化学的性質(イオン化傾向)の差異によって、異材接触部に局部電池が生じ、水分が付着したり、湿潤雰囲気中ではイオン化傾向の大きい物質が溶出するガルバニック腐食が生じる。CFRP や CFRTP は導電性のカーボンファイバー(CF)と絶縁体樹脂との複合材料であるが、金属との異材接合時には接合界面で CF と金属とが接触する。そこで、金属/CFRTP の異材接合継手を対象に、表Ⅲ-2.7.13-9 に示す恒温恒湿環境、高温環境、熱サイクル環境、腐食環境に暴露し、引張せん断強さ(TSS)の時間的変化を調べ、耐久性を評価した。

表Ⅲ-2.7.13-9 環境暴露の試験条件

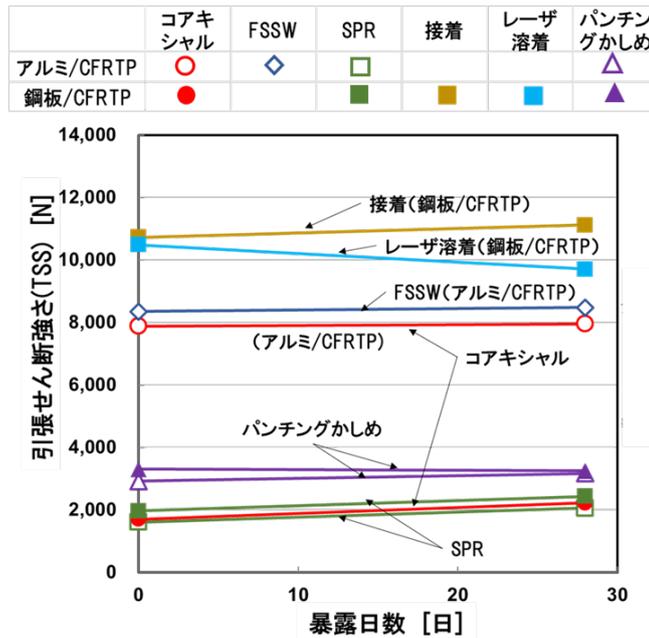
	暴露環境	評価タイミング
恒温恒湿試験	85℃×85%RH	1日, 5日, 14日, 28日
高温試験	85℃	28日
熱サイクル試験	-40℃×0.5hr⇄100℃×0.5hr	250cyc, 500cyc, 1000cyc
塩水噴霧試験	JASO M610-92モード	15日, 30日, 45日, 60日

図Ⅲ-2.7.13-55 に恒温恒湿環境における金属/CFRTP の重ね継手の TSS の時間的変化を示す。本試験では温湿度試験機 ETAC HIFLEX FX410N(楠本化成製)を用いて、85°C-85%RH の雰囲気中で引張せん断試験片を保持した。引張せん断強さの時間的変化を調べるため、暴露日数 1 日、5 日、14 日、28 日のタイミングで試験片を取り出し、試験評価した。試験本数(n 数)は 2 本とし、その平均値をプロットしている。図から鋼板/CFRTP のレーザ溶着とアルミ/CFRTP のコアキシャル抵抗スポット接合で、時間経過とともに TSS がやや低下する傾向を示している。そのほかの接合方法では、いずれも初期強さを維持していることが分かる。

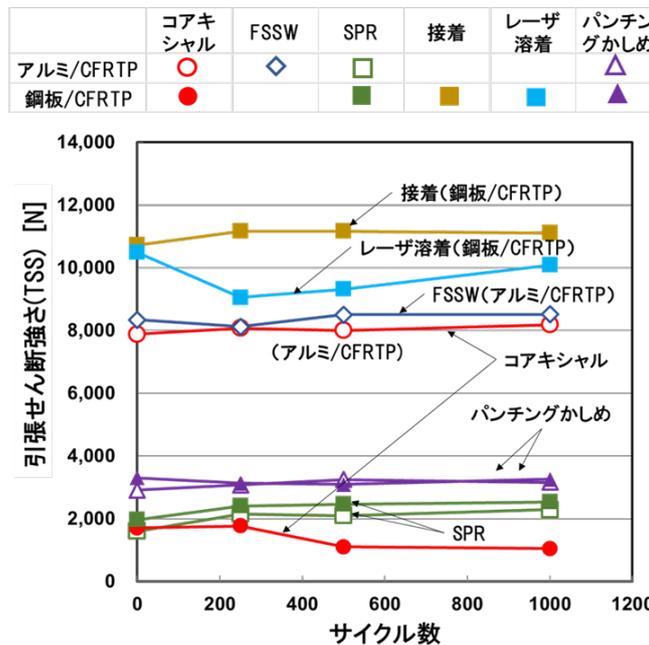


図Ⅲ-2.7.13-55 恒温恒湿環境における金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ (アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)

図Ⅲ-2.7.13-56 に高温環境における金属/CFRTP の重ね継手の TSS の時間的変化を示す。本試験では定温恒温器 DKN302(ヤマト科学製)を用いて、85°Cの雰囲気中で 28 日間保持し、試験評価した。図から、いずれの接合方法についても TSS がほとんど変化していないことが分かる。



図Ⅲ-2.7.13-56 高温保持環境における金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ
(アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)



図Ⅲ-2.7.13-57 熱サイクル環境における金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ
(アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)

図Ⅲ-2.7.13-57 に熱サイクル環境における金属/CFRTP の重ね継手の TSS の時間的変化を示す。本試験では冷熱衝撃試験機 TSA-203ES(エスペック製)を用いて、冷熱サイクルとして-40℃-30分間と 100℃-30分間を与え、250 サイクル、500 サイクル、1000 サイクルの負荷の後、試験評価した。図から、いずれの接合方法についても TSS がほとんど変化

していないことが分かる。冷熱サイクル試験では、母材の線膨張率の違いによる接合界面での熱応力に起因する TSS の変化を期待していたが、本試験では試験片を拘束しておらず、今後、異材接合が適用される部材想定を踏まえた拘束状態も含めた試験方法を検討する必要がある。

図Ⅲ-2.7.13-58 に塩水噴霧環境における金属/CFRTP の重ね継手の TSS の時間的变化を示す。本試験では複合サイクル試験機 CCT-1(スガ試験機製)を用いて、次に示す JASO M610-92 モードに従って、塩水噴霧→乾燥→湿潤の腐食環境に接合試験片を保持した。暴露日数 1 日、5 日、14 日、28 日のタイミングで試験片を取り出し、試験評価した。

①塩水噴霧

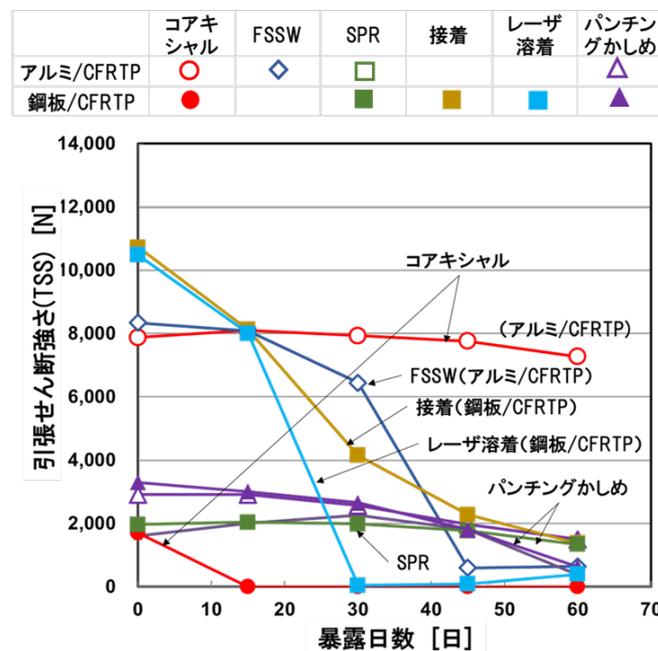
温度：35°C±1°C、
 塩水濃度：5±0.5%
 時間：2 時間

②乾燥

温度：60°C±1°C
 相対湿度：20-30%RH
 時間：4 時間

③湿潤

温度：23°C±1°C
 相対湿度：95%RH 以上



図Ⅲ-2.7.13-58 塩水噴霧環境における金属/CFRTP の異材接合継手の引張せん断強さ (アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)

図から、アルミ/CFRTP のコアキシャル抵抗スポット接合以外は、いずれの接合方法についても TSS は暴露日数とともに低下していることが分かる。引張せん断試験後の試験片を観察すると、接合界面で破断している試験片では接合部側の金属腐食が生じているこ

とから、接合試験片の重ね部の隙間に塩水が浸入し、接合部が劣化することが推察される。従って、試験片レベルでの接合部の密着度が耐久性を支配していると考えられる。なお、接着による異材接合では、重ね部全面にわたって接着剤が充填されているので、接合面は密着している。しかし、一般に接着部は湿潤雰囲気での劣化するため、この場合、水分による劣化とガルバニック腐食が複合的に生じているものと考えられる。

従って、耐食性を確保するためには、実用的には異材接合部周辺をシールする必要がある。

3. まとめ

アルミ/鋼板、アルミ/CFRTP、鋼板/CFRTP の異材重ね接合について、継手性能を調べた結果を述べた。ここで示した数値データが、今後の接合方法の開発や改良を促進し、接合品質が高い異材接合技術の実用化につながることを期待している。

自動車車体には軟鋼やハイテン材、超ハイテン材などの鋼材、5000系や6000系、7000系などのアルミ材が使用される。また、今回供試材とした CFRTP では、マトリックスの種類もポリアミド PA6 や PA66、ポリプロピレン PP などがあり、併せて、カーボンファイバー(CF)の径・長さや混入率によって材料特性が異なる。すなわち、異材接合においては材料の組合せによって線膨張率や弾性率、融点、熱伝導率、密度、腐食電位など物性値が異なるので、今後、これらの因子を含めた基盤的な研究を推進することが必要である。

課題③ 継手シミュレーションモデルの開発

(a) 摩擦点接合(FSSW)継手モデル

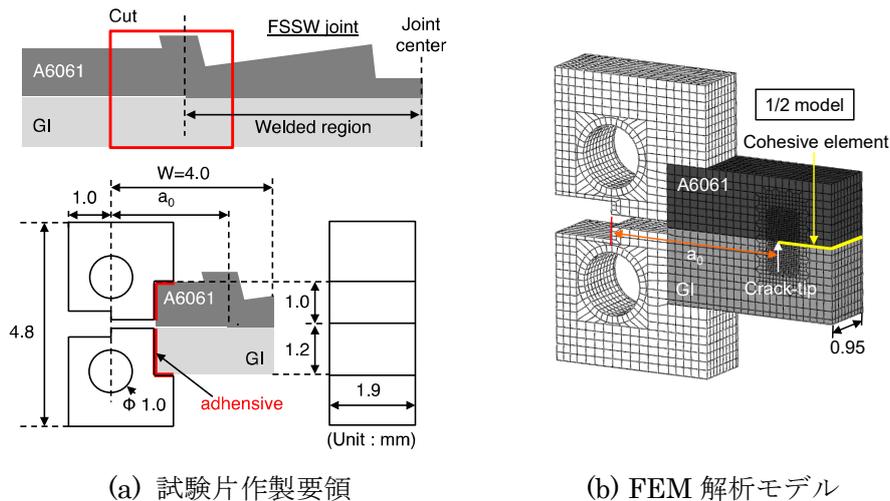
1. 目的

本 FS 研究では、溶融亜鉛メッキ鋼板 (GI 板) とアルミニウム合金板 (A6061 板) を摩擦攪拌点接合法 (FSSW) で作製した薄板重ね継手を対象とし、数値シミュレーションベースの継手強度予測手法を構築することを目的とした。そこで、十字引張強さおよび引張せん断強さの支配因子を主として実験・観察により明確にし、破壊モデルを提案して継手強度・破断挙動の予測シミュレーションを行った。

2. 継手強度予測のための破壊モデルの提案

GI 板と A6061 板の摩擦攪拌点接合継手に種々の負荷が作用した際の継手強度を予測するために、マルチ破壊モデルを提案した。これは、I. アルミニウム合金内での延性破壊モデルと、II. 界面での剥離破壊モデルを組合せたものであり、それぞれの破壊条件を競合させることで継手の破壊位置・挙動とマクロ破壊強度を数値シミュレーションにより予測しようとするものである。本モデルは、材料の基本特性試験の結果からモデルに含まれるパラメータを一義的に決定できることを目的に提案したものであり、特性評価試験を提案しながらパラメータの決定を行った。

アルミニウム合金の延性破壊モデルには、応力・ひずみ集中部からのせん断すべり型の延性亀裂の発生を予測するために提案してきた「局所相当塑性歪一定条件」、また、等軸ディンプルを伴う延性亀裂の進展を再現するために提案してきた、延性損傷発展と損傷



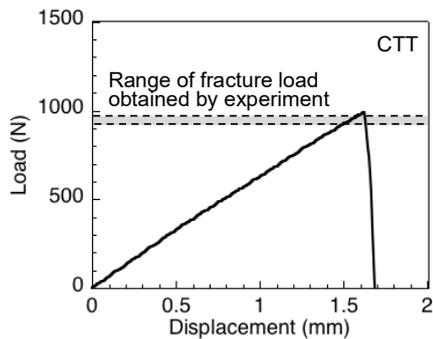
図III-2.7.13-61 界面剥離限界局所応力の取得のための小型試験片（C(T)試験片）

3. シミュレーションによる継手強度予測と実験結果との比較

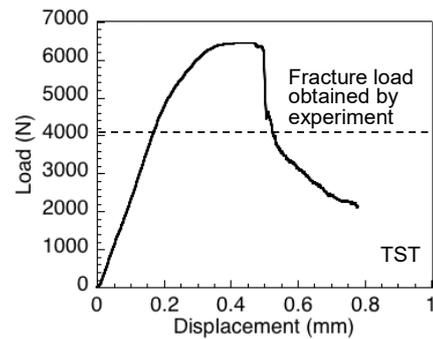
提案したマルチ破壊モデルに同定した材料パラメータを適用して、継手の十字引張試験および引張せん断試験による破断挙動も含めた強度予測シミュレーションを行った。なお、界面剥離破壊モデルでは、同定した局所限界垂直応力 $t_{n,cr}$ と限界せん断応力 ($t_{s,cr}$, $t_{t,cr}$) が同じと仮定した。

十字引張試験のシミュレーションで得られた結果を別途実施した実験結果と比較して図 2.7.13-62 に示す。実験結果と同様に A6061 のプラグ破断ではなく界面での剥離破断が先行して生じており、脆性的な破断を再現することができた。また、剥離破断荷重は実験結果とほぼ同じであり、本シミュレーションにより十字引張強度を精度よく予測できることが実証された。

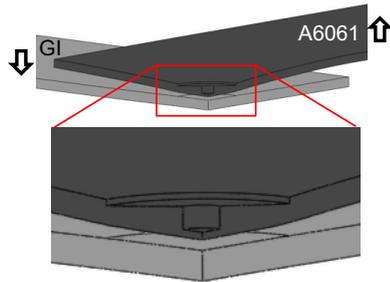
一方、引張せん断試験のシミュレーションでは、図III-2.7.13-63 に示すように実験での破断荷重を大きく超える最大荷重を示した。また破断挙動を見ると、本シミュレーションでは実験で見られた界面破断支配型（GI 板引張側（Side A）の接合部縁での亀裂発生・進展支配型）の破断挙動を再現できず、A6061 引張側（Side B）での接合部縁から A6061 内への延性亀裂発生・進展が先行し、最終的にプラグ破断する結果となった。解析で得られた局所応力の分析から、十字引張試験片の接合部縁の界面では開口（垂直）応力が支配的であるのに対し、引張せん断試験片では開口応力だけでなくせん断応力成分の割合も大きく混合モード状態になっていることがわかった。すなわち、引張せん断試験の破断挙動および破断強度を精度よく予測するためには、せん断方向の局所限界応力 ($t_{s,cr}$, $t_{t,cr}$) を取得し、さらには混合モード状態での破壊クライテリオンを明確にする必要性が示唆された。



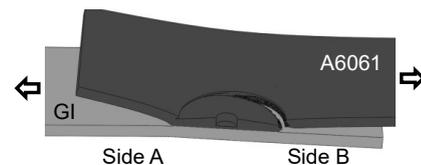
(a) 実験とシミュレーションの破断荷重の比較



(a) 実験とシミュレーションの破断荷重の比較



(b) シミュレーションで得られた破断挙動



(b) シミュレーションで得られた破断挙動

図Ⅲ-2.7.13-62 十字引張試験

図Ⅲ-2.7.13-63 引張せん断試験

4. まとめ

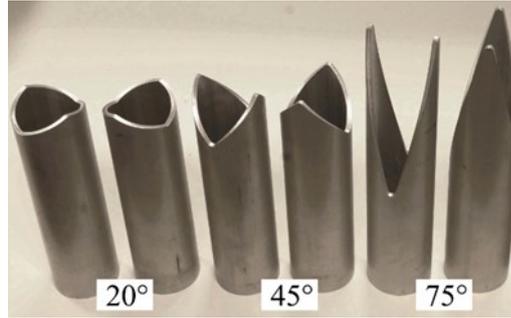
本研究では、熔融亜鉛メッキ鋼板（GI板）とアルミニウム合金板（A6061板）を摩擦攪拌点接合法（FSSW）で作製した薄板重ね継手を対象とし、数値シミュレーションベースで継手の強度予測を可能とする破壊モデルを提案し、目的を達成できた。ただし、引張せん断試験の破断挙動および破断強度を精度よく予測するためには、さらなる破壊モデルの拡張の必要性が示唆された。

(b) 接着継手モデル

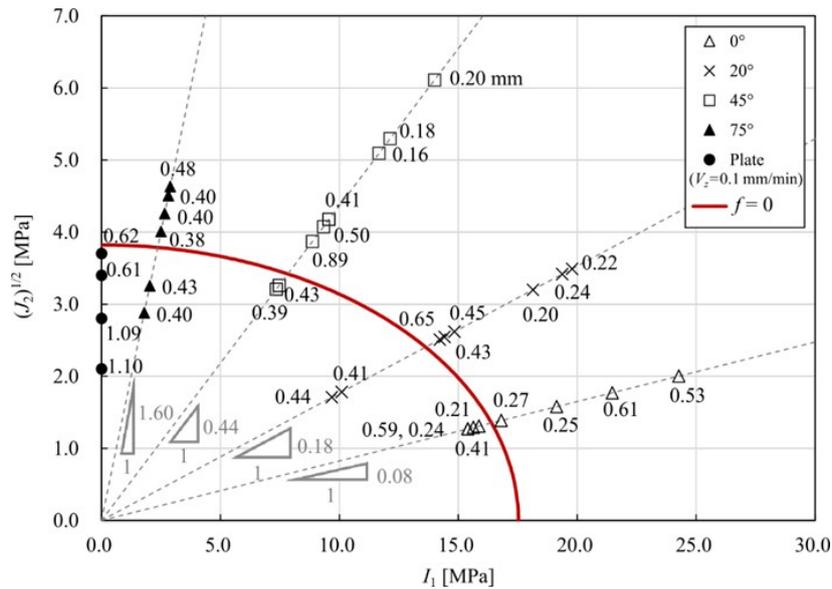
1. 研究経緯と目的

接着を用いた実構造の設計のためには接着部の強度評価が不可欠となる。従来の接着の強度試験法として、重ね継手のはく離試験や引張せん断試験などが挙げられる。しかし、これらの試験から得られるのはく離強度やせん断強度は、大きなバラツキを持ち、接着剤同士の相対評価となるとともに、はく離試験から得られるのはく離強度（単位長さあたりの限界荷重）を設計に直接適用するのは困難である。特に実構造においては接着部において複雑な多軸応力状態が生じることが想定されるので、多軸応力下における接着部の強度評価手法を見出すのが望ましい。

そこで、本プロジェクトの先行研究として、多軸応力下における接着強度評価手法の提案が行われた。端部応力集中を発生させず、かつ多軸応力状態を制御できる波型接着面を持つ異材・同材円筒型試験片（図Ⅲ-2.7.13-64）を作製し、引張試験により接着剤の破損則を同定した。荷重 - 変位曲線から求められる比例限を接着部の破損の開始点と定義し、同一の接着層厚みに対して、応力テンソルの第1不変量 I_1 と偏差応力テンソルの第2不変量 J_2 から構成される破損則が得られた（図Ⅲ-2.7.13-65）。



図Ⅲ-2.7.13-64 波型接着面を持つ異材・同材円筒型試験片



図Ⅲ-2.7.13-65 破損関数の材料パラメータの同定

しかし、得られた破損則に基づいた実用的な接着構造の設計指針については未だ十分には確立していない。そこで、本研究ではマルチマテリアル接着構造設計に向けて①多軸応力下での破損則に基づいた接着界面形状の最適化手法の構築と、実用的な塑性加工後の接着構造部材への適用の検証として②実構造を想定した多段折曲げ平板接着試験片の強度評価を目的とする。

2. 多軸応力下での破損則に基づいた接着界面形状の最適化手法の構築

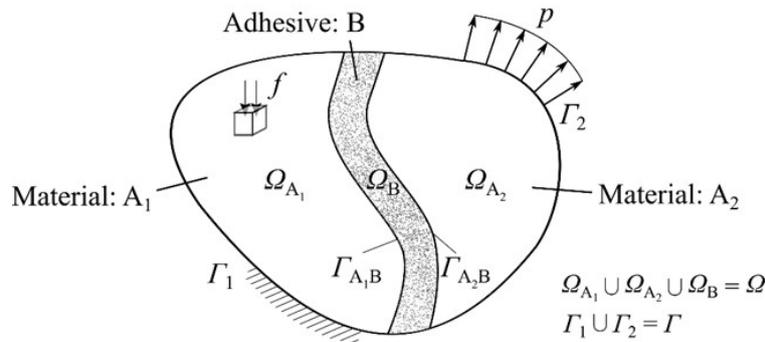
本項目においては、本研究の目的①である接着界面形状最適化問題の定式化を行い、応力集中の生じない薄肉円筒突合せ型接着構造において、数値解析的に検討する。

接着層をもつマルチマテリアル連続体として、図 2.7.13-66 の力学モデルを考える。ここで、 A_1 , A_2 は異種材料、 B は接着層を表す。 \mathbf{p} は表面力で \mathbf{f} は体積力である。このとき、各材料 ($m = A_1, A_2, B$) の領域 Ω_m と境界 Γ_m 上および Γ_1 , Γ_2 上における境界値問題の弱形式は、変位 \mathbf{u} , 変位拘束を満たす任意のベクトル \mathbf{v} に関して次式で表される。

$$a_{A_1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - h_{1A_1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + a_{A_2}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - h_{2A_2}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + a_B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - h_{1B}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - h_{2B}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - l(\mathbf{v}) = 0, \quad \forall \mathbf{v} \in U \quad (1)$$

ここで、 $a(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ と $h(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ は双1次形式を表し、 $l(\mathbf{v})$ は1次形式を表す。ベクトル \mathbf{v} が界面上で連続で、界面上の表面力がつり合うと仮定すると、式(1)の支配方程式は次式のように簡便化される。

$$a_{A_1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + a_{A_2}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + a_B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - l(\mathbf{v}) = 0, \quad \forall \mathbf{v} \in U \quad (2)$$



図III-2.7.13-66 接着層をもつマルチマテリアル問題

多軸応力下で接着部の強度評価を行うための関数として、従来の研究より得られた次式の破損関数を用いる。

$$f = c_0 J_2 + c_1 I_1 + c_2 I_1^2 + c_3 \quad (3)$$

ここで、 I_1 は応力テンソルの第1不変量、 J_2 は偏差応力テンソルの第2不変量である。式(3)の破損関数 f は無負荷の状態では $f < 0$ であり、荷重が負荷されて $f = 0$ となるときに破損が生じる。接着層内で応力は分布しているため、破損関数 f も接着層内で分布している。より強度の高い構造を得るには、接着部に生じる破損関数 f の全体的な値を下げつつ、分布の幅も抑える必要があると考えられる。そこで、本研究では、最適化問題の目的関数として、次式のように破損関数の応力不変量の項の2乗和を用いる。

$$\text{Find } \Omega_B : \min_{\Omega_B} F, \quad \text{where } F = \frac{\int_{\Omega_B} (f - c_3)^2 d\Omega}{\int_{\Omega_B} d\Omega} \quad (4)$$

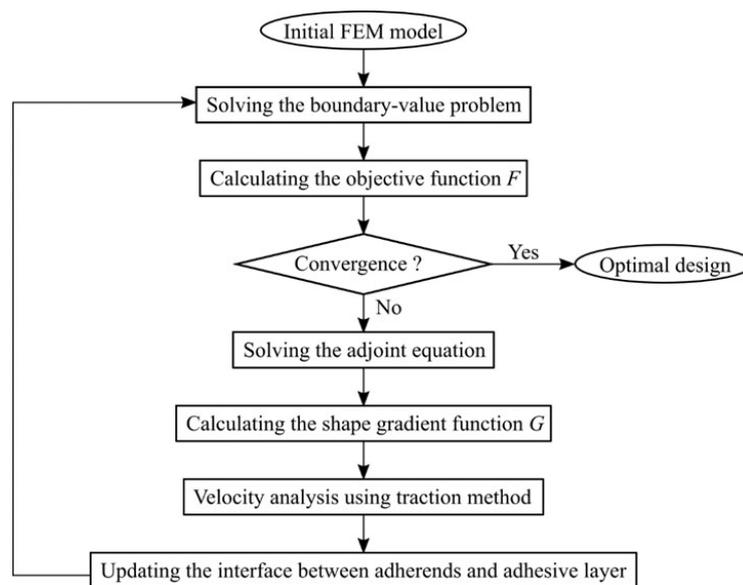
以上より、形状最適化問題は接着層領域 Ω_B を設計対象として次式で表される。

$$\begin{aligned} & \min_{\Omega_B} F(I_1, J_2) \\ & \text{subject to Eq. (1) and} \\ & V_B = \bar{V}_B \quad \text{where } V_B = \int_{\Omega_B} d\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

次に、形状最適化解析のフローチャートを図Ⅲ-2.7.13-67 に示す。

- ① 初期 FEM モデルを作成し、式 (2) で表される境界値問題の弱形式を有限要素法で解析する。
- ② 得られた応力から式 (4) の目的関数を計算
- ③ 目的関数の変化率を用いて、収束判定
- ④ 収束した場合はそのときの FEM モデルを最適形状とみなす。
収束していない場合は、随伴方程式を FEM を用いて解析する。
- ⑤ ①と④により得られた変位 \mathbf{u} と随伴変数 \mathbf{v} より、形状勾配関数 \mathbf{G} を算出
- ⑥ 得られた形状勾配関数より、 H^1 勾配法のひとつである力法を用いて、形状更新に用いる速度場を解析
- ⑦ ⑥で得られた速度場 \mathbf{V} を用いて、式(5)で表される体積制約を満たすように FEM モデルの形状を更新

以上の解析の流れを繰り返し、(4)の収束判定で収束するまで繰り返し計算を行う。



図Ⅲ-2.7.13-67 解析のフローチャート

図Ⅲ-2.7.13-68 に本研究で用いた解析モデルである、薄肉円筒突合せ型接着構造の FEM モデルを示す。一端を完全固定し、他端にトルク T と引張荷重 F を負荷して、接着層に任意の組み合わせ応力比 α の引張応力とせん断応力を生じさせる。このとき、円筒の外半径を R 、内半径を a 、肉厚を t とすると次式が成り立つ。

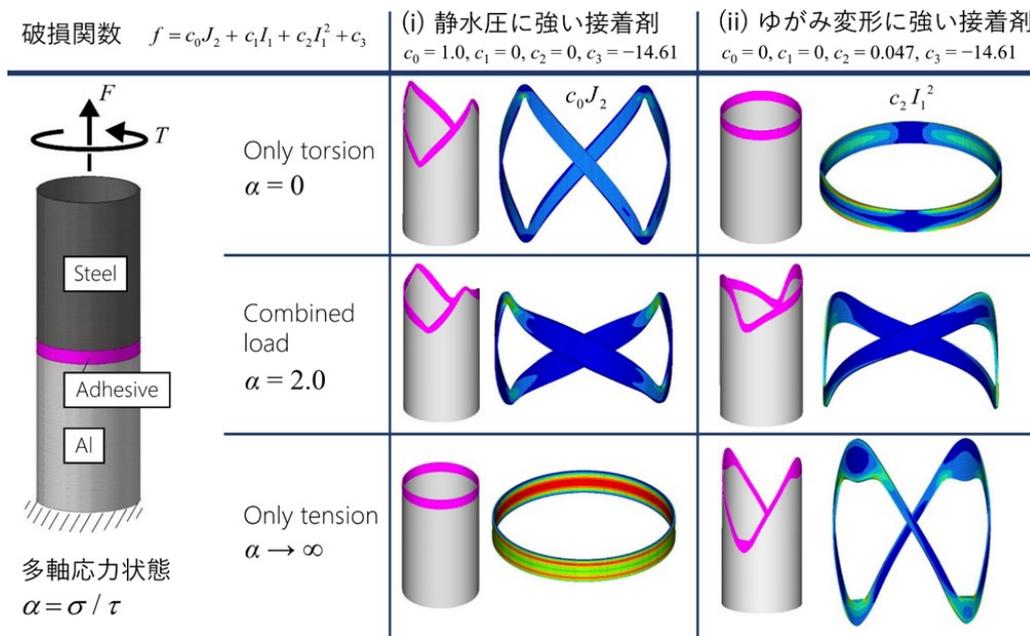
$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(R^2 - a^2)} \approx \frac{F}{2\pi at} \quad (6)$$

$$\tau(r) = \frac{2T}{\pi(R^4 - a^4)} r \approx \frac{T}{2\pi a^2 t} \quad (7)$$

$$\alpha = \sigma_z / \tau \quad (8)$$

解析に用いた各材料の物性値を表Ⅲ-2.7.13-10に示す。ここで、接着剤の物性値は、先行研究で破損則の同定に用いられた市販の接着剤（Hardloc™: M-600-08, デンカ（株））の試験で得た値を用いている。

破損関数の材料パラメータとして (i) 接着層に強い接着剤の場合と (ii) 体積変化を伴わないゆがみ変形に強い接着剤の場合を想定し、それぞれの最適界面形状を数値解析で検討した。なお、FEMモデルが完全に軸対称であると、形状変化が生じないため、接着層の形状に初期不整として微小な正弦波を与えた。得られた最適形状を図Ⅲ-2.7.13-69に示す。



図Ⅲ-2.7.13-68 薄肉円筒突合せ型接着構造の界面最適形状

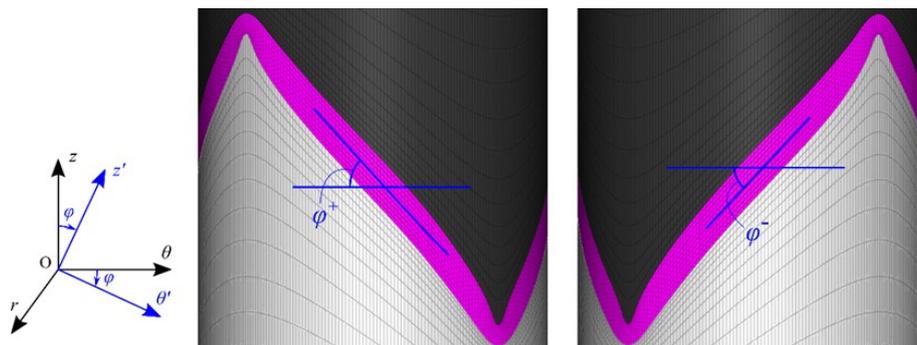
表Ⅲ-2.7.13-10 各材料の物性値

Material	Young's modulus	Poisson ratio
Steel	210 GPa	0.3
Al	70 GPa	0.3
Adhesive	352 MPa	0.4

図Ⅲ-2.7.13-68より、(i) 静水圧に強い接着剤の場合は引張荷重よりもトルクの割合が大きくなればなるほど（ α の値が小さくなればなるほど）接着層に傾斜が生じていることがわかる。一方で、(ii) ゆがみ変形に強い接着剤の場合は、トルクよりも引張荷重の方が大きくなればなるほど（ α の値が大きくなればなるほど）接着層に傾斜が生じていることがわかる。これは、(i) の場合は接着層に生じる Mises 応力を減少させるために、接着

層に傾斜を形成することで薄肉円管に生じるせん断応力が接着層では垂直応力に変換される形状となるからである。(ii) の場合は (i) と逆で、薄肉円管側に生じる垂直応力を接着層ではせん断応力に変換する事で、接着層に生じる静水圧を減少させる構造となっている。

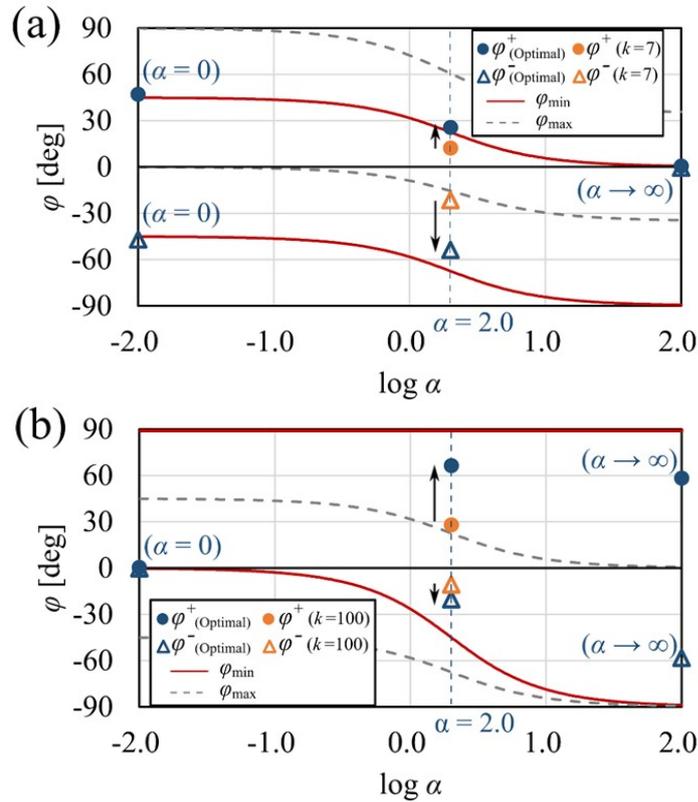
それぞれの最適形状における接着層の傾斜角を図Ⅲ-2.7.13-69のように算出し、簡易的な解析解と比較を行う。接着層の傾斜は図のように r 軸方向に対して反時計まわりの回転角 ϕ を用いて計測した。また、円筒の接着層が周方向に連結するためには、必ず傾斜角が正となる箇所と負となる箇所の両方が存在する。そのため、それぞれの傾斜角を便宜上 ϕ^+ 、 ϕ^- と区別する (図Ⅲ-2.7.13-69)。



図Ⅲ-2.7.13-69 最適形状における接着層の傾斜角

接着層に生じる周方向のひずみと半径方向に生じる応力を微小と仮定することで、一般化 Hooke の法則および外力とのつり合い式から、接着層に生じる応力を簡易的に求めることができる。簡易的に求めた応力から、破損関数を計算し、破損関数を最小または最大とするときの接着層の角度 $\phi_{\min}(\alpha)$ 、 $\phi_{\max}(\alpha)$ を解析的に導出した。 $\log \alpha$ に対するそれぞれの角度のプロットを図Ⅲ-2.7.13-70に示す。

図Ⅲ-2.7.13-70(a)、(b)は (i) 静水圧に強い接着剤の場合の傾斜角、(ii) ゆがみ変形に強い場合の傾斜角をそれぞれ示している。 $\alpha = 0, \infty$ の最適形状から計測された ϕ^+ 、 ϕ^- は便宜上 $\log \alpha = -2.0, 2.0$ にプロットしている。図Ⅲ-2.7.13-70(a)より、得られた最適形状の接着層の傾斜角は簡易的に導出される解析解 ϕ_{\min} と近い値をとっていることが確認された。一方で、図Ⅲ-2.7.13-70(b)の $\alpha = 2.0, \infty$ においては ϕ_{\min} 程に大きい傾斜角を形成していない。この原因のひとつとして、簡易的に導出された解では 90° でも接着界面に均一な応力が生じることを仮定して導出されているが、実際のモデルではその仮定は成り立たないためである。しかし、図Ⅲ-2.7.13-70(b)において、 α が大きくなるにつれて解析解 ϕ_{\min} と同様に最適形状の傾斜角 ϕ^+ と ϕ^- の大きさも大きくなっており、 90° 程ではないが、 $\phi^+ \approx 60^\circ$ という比較的大きな傾斜角を形成していることが確認された。



図Ⅲ-2.7.13-70 最適形状における接着層の傾斜角と解析解の比較

(a) 静水圧に強い接着剤(i)の場合、(b)ゆがみ変形に強い接着剤(ii)の場合)

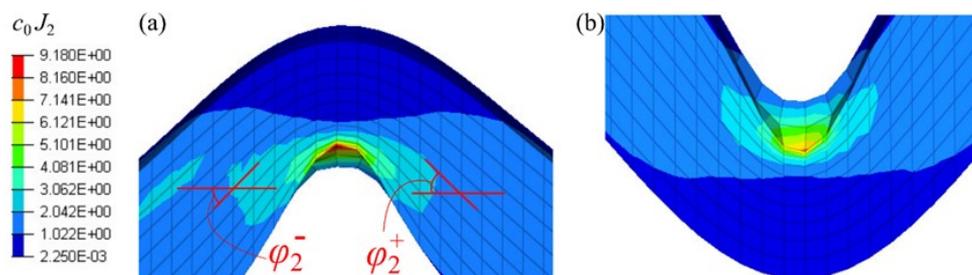
図Ⅲ-2.7.13-68 より、得られた最適接着界面形状は傾斜をもつだけでなく、折曲り部（凸部）においても特徴的な形状をしていることが確認される。特に折曲り部の形状変化が顕著であった (i) の $\alpha = 0$ の最適形状の折曲り部を図Ⅲ-2.7.13-71 に、(ii) の $\alpha \rightarrow \infty$ の折曲り部を図Ⅲ-2.7.13-72 にそれぞれ示す。

図Ⅲ-2.7.13-71 と図Ⅲ-2.7.13-72 を比較すると、接着層の傾斜部の角度 ϕ^+ 、 ϕ^- は図Ⅲ-2.7.13-71 の場合（図Ⅲ-2.7.13-70(a)の $\alpha = 0$ の場合）よりも図Ⅲ-2.7.13-72 の場合（図Ⅲ-2.7.13-70(b)の $\alpha \rightarrow \infty$ の場合）の方が大きいにも関わらず、図Ⅲ-2.7.13-71の方が折曲り部では尖っている。実際に図Ⅲ-2.7.13-71(a)において傾斜角 ϕ_2 を計測すると、 $\phi_2^- = -52.7^\circ$ 、 $\phi_2^+ = 49.7^\circ$ であり、それぞれ $\phi^- = -47.1^\circ$ 、 $\phi^+ = 47.1^\circ$ の傾斜部の角度よりも大きくなっていることがわかる。これは、Mises 応力を減少させるために、トルクによってせん断応力が生じる水平部を減らすように形状が最適化されたため、尖った形状が形成されたのだと考えられる。

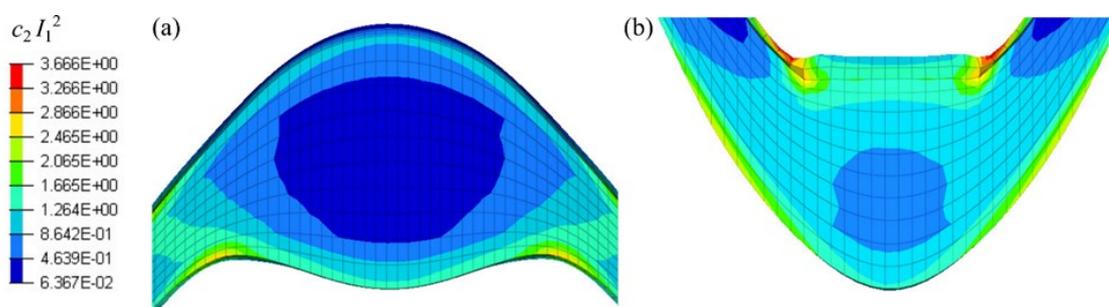
一方で、(ii) ゆがみ変形に強い接着剤の場合（図Ⅲ-2.7.13-72）は、折曲り部で接着層の厚みが増加して緩やかな形状となっている。これは、引張荷重によって生じる静水圧の応力集中を、形状を緩やかにすることで緩和させようとするためだと考えられる。

以上より、本項目で定式化された最適化手法により、多軸応力下で接着構造の強度を向上させる接着界面形状を得られ、力学的にも妥当な形状であることが確認された。得られた最適形状は、接着層に生じる (i) Mises 応力を減少させる場合と (ii) 静水圧を減少させる場合で異なる傾斜角を接着層に形成するだけでなく、折曲り部においても曲率の異なる

形状を形成することがわかった。



図Ⅲ-2.7.13-71 (i) Mises 応力を減少させる場合における最適形状の折曲り部の拡大図



図Ⅲ-2.7.13-72 (ii) 静水圧を減少させる場合における最適形状の折曲り部の拡大図

3. 実構造を想定した多段折曲げ平板接着試験片の強度評価

2章では、自由端において応力集中の生じない薄肉円筒の突合せ型接着構造に形状最適化を適用し、最適形状を得た。その結果、折曲げ部において Mises 応力を減少させる場合（図Ⅲ-2.7.13-71）と静水圧を減少させる場合（図Ⅲ-2.7.13-72）とで異なる曲率の最適形状を形成した。このことは、実接着構造の強度評価を考える上で折曲り部の形状が影響を与えうることを示唆している。

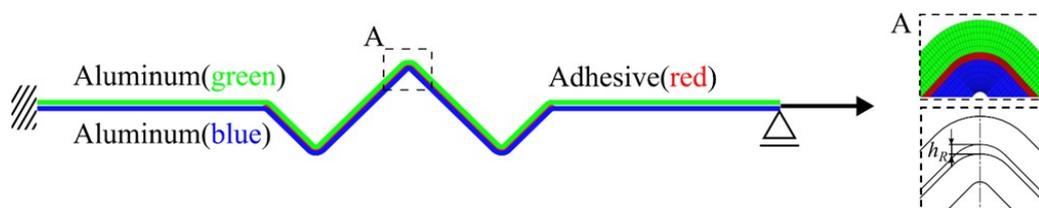
実用上、曲げ加工を施した板材の重ね合せ接着が重要となる。ここではアルミ合金 A5052 をプレス加工により多段に折曲げた後に接着した試験片に対し、引張荷重を与えて破損応力を評価する。

はじめに、有限要素法を用いて、折曲り部の形状が接着の破損強度に与える影響を検討した。図Ⅲ-2.7.13-73 に作成した有限要素解析モデルを示す。一端を完全固定して、他端に移動拘束を与えながら引張荷重を与える。

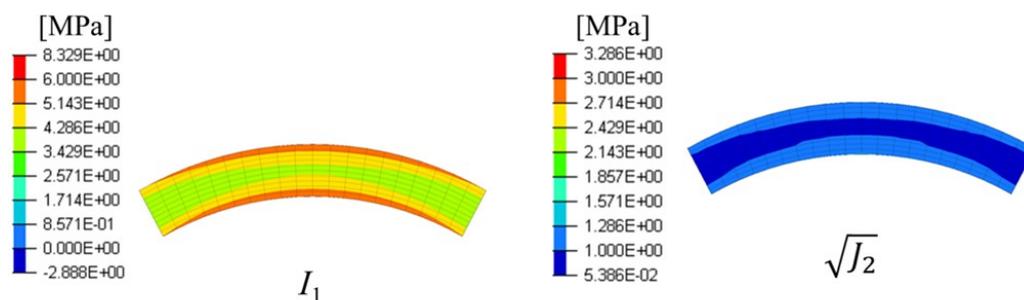
試験片の折曲り部と傾斜部の解析結果を図Ⅲ-2.7.13-74 と図Ⅲ-2.7.13-75 にそれぞれ示す。試験片の折曲り部と傾斜部に生じる I_1 と $\sqrt{J_2}$ の分布図を比較すると、折曲り部（図Ⅲ-2.7.13-74）では I_1 の方が優位となっており、傾斜部では $\sqrt{J_2}$ の方が優位となっていることがわかる。そのため、折曲り部では静水圧を減少させる形状(図Ⅲ-2.7.13-72)に近づける方が、構造全体の破損強度を向上させると予測される。実際に折曲り部の厚み h_R （図Ⅲ-2.7.13-73）を変化させた解析モデルを6種類作成し解析を行った。ある要素の破

損関数の値が $f=0$ となるときの限界荷重を求め、試験片全体の初期断面積で除した値を破損応力 σ_f と定義する。

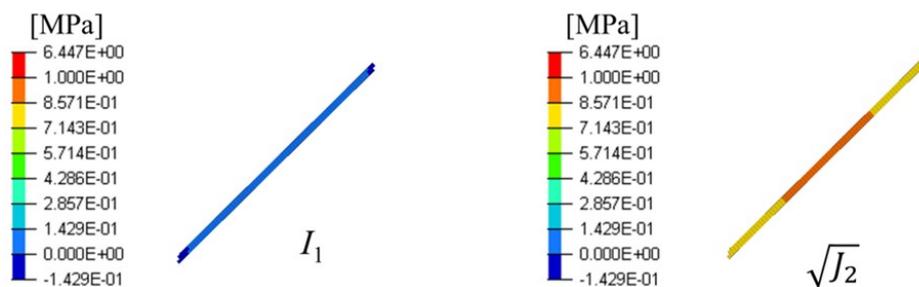
表Ⅲ-2.7.13-11 に各解析モデルの折曲り部の接着層厚さ h_R と破損応力 σ_f を示す。表Ⅲ-2.7.13-11 より、予測どおり h_R が大きいほうが比較的 σ_f が大きい傾向となることがわかる。



図Ⅲ-2.7.13-73 多段折曲げ接着構造の有限要素解析モデル



図Ⅲ-2.7.13-74 折曲り部の接着層内における I_1 と $\sqrt{J_2}$ の分布



図Ⅲ-2.7.13-75 傾斜部の接着層内における I_1 と $\sqrt{J_2}$ の分布

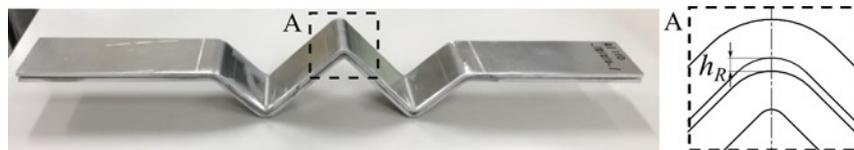
表Ⅲ-2.7.13-11 試験片の折曲り部の接着層厚さと破損応力

折曲り部の 接着層厚さ h_R [mm]	0.12	0.31	0.43	0.72	1.14	1.47
破損応力 σ_f [MPa]	1.28	1.62	1.78	2.19	2.06	2.03

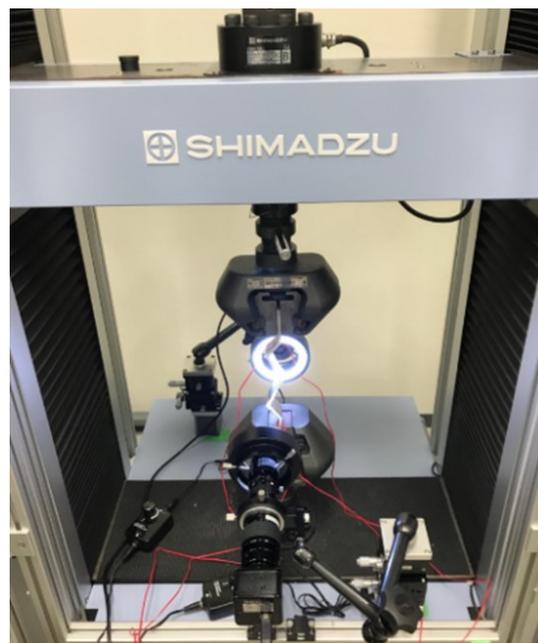
次に、実接着構造において強度評価を行うため、図Ⅲ-2.7.13-76のようにアルミ合金 A5052 を用いた多段折曲げ接着試験片を 9 本作製した。接着剤には市販の接着剤 (Hardloc™: M-600-08, デンカ (株)) を用いた。

各試験片の折曲り部の厚さ h_R を表Ⅲ-2.7.13-12 に示す。図Ⅲ-2.7.13-77 に示すように引張試験機 (オートグラフ AG-50kNX, 島津製作所 (株)) を用いて各試験片の引張試験を行った。接着層内部のボイド生成の様子を観察するため、試験片に照明を当て、前後両方向からマイクロスコープにより画像を取得した。また、A5052 板にひずみゲージを合計 4 箇所貼って被接着材側に生じるひずみも計測した。クロスヘッド速度は 1.0 mm/min とし、変位が 20 mm となるまで引張荷重を負荷し、その後除荷を行った。得られた各試験片の荷重 - 変位曲線を図Ⅲ-2.7.13-78 に示す。

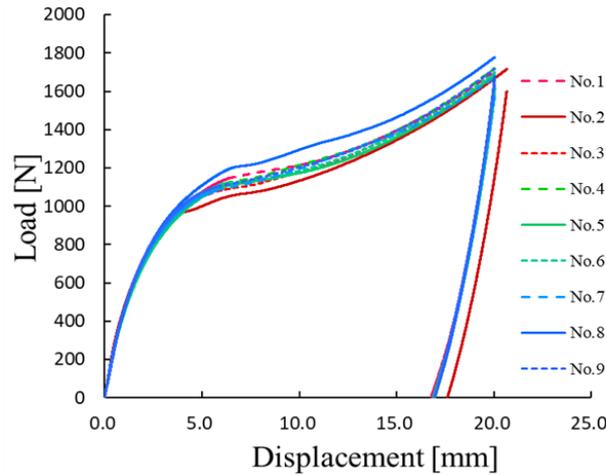
本研究では、接着層の破損の開始点を接着層の非線形変形応答の開始点 (比例限) として定義する。図Ⅲ-2.7.13-76 の接着試験片は A5052 板と接着剤から構成されるが、A5052 板と接着剤の剛性の違いから、系全体の変形応答の非線形性の開始は、接着層の非線形変形応答の開始と見なすことができる。よって、引張試験より得られた荷重 - 変位曲線 (図 2.7.13-78) の非線形変形応答の開始点を、接着層に破損が生じる限界荷重 P_p と同定し、この限界荷重を試験片全体の初期断面積で除した公称応力 (比例限) を破損応力 σ_f とする。得られた各試験片の比例限 σ_f を表 3 に示す。



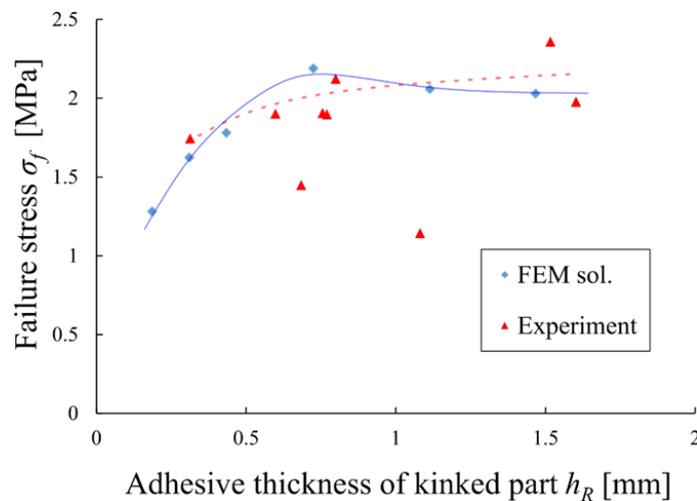
図Ⅲ-2.7.13-76 多段折曲げ平板接着試験片



図Ⅲ-2.7.13-77 引張試験の概観(試験片に照明を当ててマイクロスコープにより観察)



図III-2.7.13-78 各試験片の荷重 - 変位曲線



図III-2.7.13-79 有限要素解析と引張試験から得られた破損応力 σ_f の比較

FEM 解析により得られた破損応力と引張試験により得られた比例限の比較を図III-2.7.13-79 に示す。図から、引張試験により得られた比例限 σ_f はバラツキが大きいものの、極端に応力値の低い2点（1.5 MPa を下回る2点）を除けば、FEM による予測と比較的一致していることが確認された。

FEM の結果より、折曲り部の接着層厚み h_R が大きいほうが折曲り部の静水圧が緩和されて破損応力 σ_f が大きい傾向となった。一方で、引張試験の比例限 σ_f の値からは h_R の影響が十分には確認されなかった。これは、 $h_R > 0.5\text{mm}$ においては十分に応力集中が緩和されているため、 σ_f に有意な差が見られないのだと考えられる。よって、実構造試験片における h_R と σ_f の関係をより検討するためには、更に多くの $h_R < 0.5\text{mm}$ の試験片の引張試験が必要である。

引張試験時のマイクロスコープにより取得された画像より、接着部が完全にはく離するまでに (a) 接着層内にボイドが生成して層内はく離する場合と (b) 接着界面においてはく離が生じる場合の2種類が観察された (図III-2.7.13-80)。図III-2.7.13-80 で示した試験片 No.2 と No.8 について、A5052 板に貼付されたひずみゲージから計測された荷重 - ひ

ずみ曲線を図 2.7.13-81 にそれぞれ示す。図から、各荷重 - ひずみ曲線の非線形応答領域において、曲線の傾きが急激に変化し始める点があることが確認された。この点を破損核の核生成開始点と同日し、その限界荷重を P_n とする。一方で、マイクロ스코プ画像から視認される破損核生成開始時の限界荷重値 P_n^{micro} を図 III-2.7.13-81 に黒色の点線で示す。両者を比較すると、接着層内部においてボイドが生成した試験片 No.2 の場合は P_n と P_n^{micro} がほぼ一致しており、界面はく離が生じる試験片 No.8 では明らかに P_n と P_n^{micro} の値が異なっていることがわかる。

全ての試験片について、破損核生成開始時の限界荷重値 P_n と P_n^{micro} を求め、図 III-2.7.13-82 に示す。図から接着層内部でボイド生成が観察された No.8 以外の試験片において限界荷重 P_n と P_n^{micro} はほぼ一致している。このことから、破損核生成場所（層内か界面）の分類と限界荷重値 P_n と P_n^{micro} が一致しているかどうかは対応関係があると思われる。また、接着層内部にボイドが生成し始めているかどうかをひずみの応答から捉えることができるのではないかと考えられる。

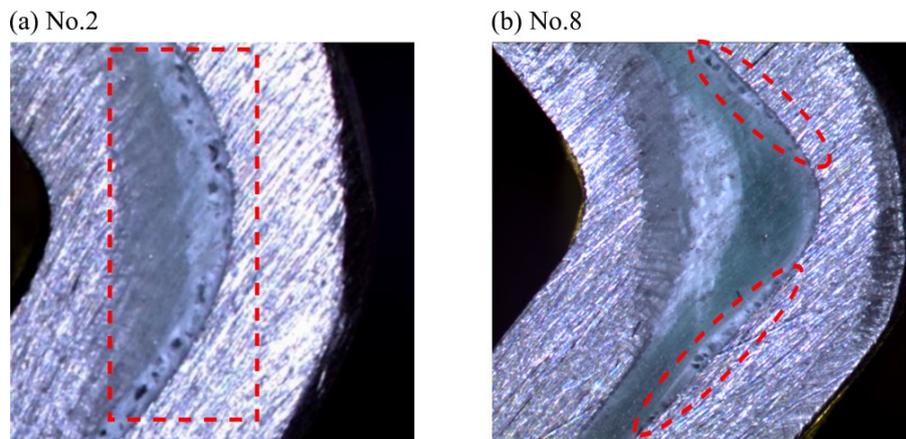


図 III-2.7.13-80 マイクロ스코プによるボイド観察

(a)接着層内部におけるボイド生成(No.2)、(b)接着界面でのはく離 (No.8)

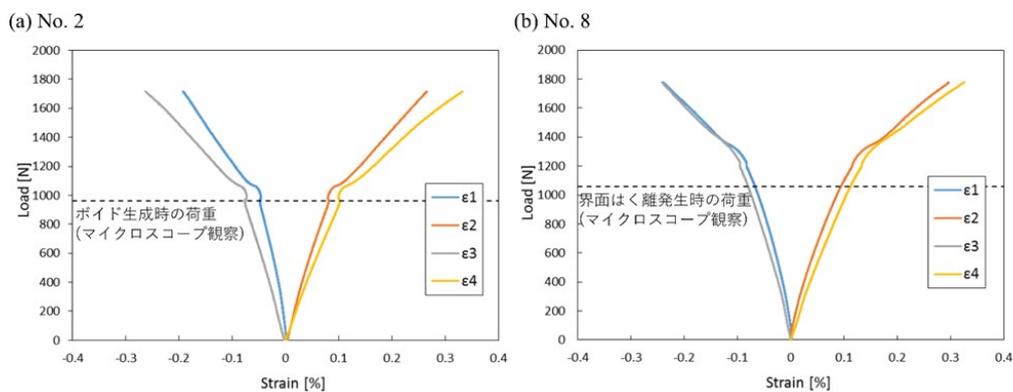
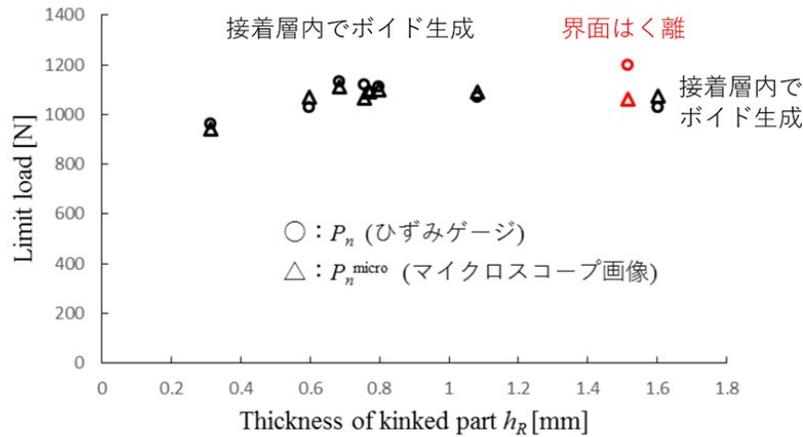


図 III-2.7.13-81 荷重 - ひずみ曲線(No.2 と No.8)



図III-2.7.13-82 マイクロスコープ観察によるボイド生成時の限界荷重 P_n^{micro} と荷重 - ひずみ曲線における急激な傾き変化時の限界荷重 P_n の比較

4. まとめ

(1) 多軸応力下での破損則に基づいた接着界面形状の最適化手法の構築

破損則を用いた最適化アルゴリズムの開発と実装が行われ、応力集中の生じない薄肉円筒突合せ型接着構造において力学的に妥当な最適形状を得ることに成功した。また、得られた最適形状から実構造設計における重要な知見が得られ、本手法の有用性が示された。そのため、研究目的①は概ね達成されたといえる。

本研究においては、接着剤の破損を荷重 - 変位曲線から得られる比例限と定義した場合の破損則に基づいているため、最適化プロセスで用いられる有限要素解析は線形弾性解析で十分である。しかし、今後の研究において、接着剤の非線形変形を含めたより精度の高い破損則が構築される場合は、弾塑性解析に基づく最適化手法への拡張が必要であり、本手法は更なる発展の余地があると考えられる。

(2) 実構造を想定した多段折曲げ平板接着試験片の強度評価

実構造を想定してアルミ合金 A5052 を用いてプレス加工を施した 2 枚の折曲げ試験片の接着構造を考案し、その接着構造の強度評価を実施した。折曲り部の厚みを変更した有限要素解析モデルと実試験片を作成し、両者に引張荷重を与えた場合の破損応力の比較を行った。有限要素解析による破損則に基づく破損応力の予測が、引張試験から得られる比例限と比較的一致しており、破損則に基づく強度評価は実構造を想定した多段折曲げ平板接着試験片においても有効であることが示された。従って、研究目的②も比例限の評価という観点においては概ね達成されたといえる。

一方で、折曲り部形状と強度の関係性の観点からは、有限要素解析においては折曲り部の接着層厚みが大きい方が強度が高いことが示されるが、試験結果の方はバラツキが大きく、折曲り部の接着層厚みが薄い試験片の試験結果が少ないため、折曲り部の厚みと強度の関係性を見出されなかった。折曲り部形状と強度の関係をより詳細に検討するためには、更に多くのサンプル数の引張試験が必要であろう。

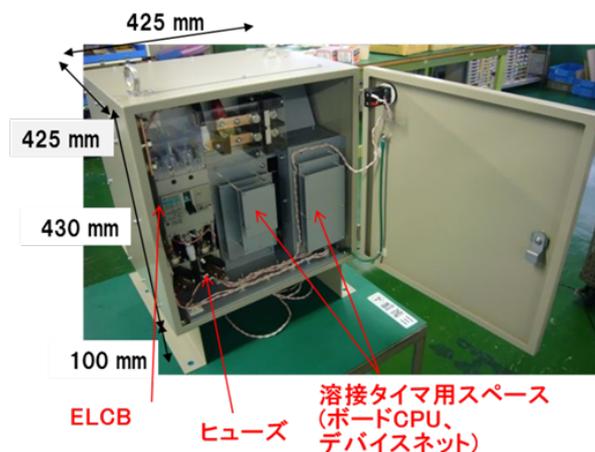
課題④ 革新的スポット溶接技術の開発

1. 背景と目的

地球温暖化防止の観点から、各国でCO₂の排出量規制の動きが活発化している。年々規制量は厳しく制限され、今後この規制強化の動きは緩む気配はない。自動車業界の動きとしては、燃費向上策のひとつとして自動車の軽量化を図っており、特に引張強さ980MPa以上の超高張力鋼の適用が進んでいる。車体の組み立て工程において、これらの超高張力鋼を適宜適用、推進していくためには溶接技術などの加工技術が非常に重要となる。実際の溶接には抵抗スポット溶接、レーザ溶接、アーク溶接などが用いられるが簡便性、コストの観点より最も多く実用化されているのがスポット溶接であり、自動車1台あたり約3000～6000点施工される。その一方、車体の衝突時の安全性を担保するためには部材における溶接部の強度の確保が最優先課題である。これらの背景から超高張力鋼を車体に適用するためにはスポット溶接部を高強度に接合する技術の開発が必要不可欠である。

一方で工業的には溶接ラインの生産性確保の観点より、溶接タクトタイム短縮化が図られている。富士電機ではタクトタイム短縮化、それに伴う溶接ラインロボット数の低減、及び熱のロスによる省電力化を顧客価値とした高電流短時間スポット溶接機を開発した。これは富士電機のIGBTを用いたインバータ、及び10kHzの高周波トランスを構成要素としている。図III-2.7.13-83にスポット溶接機の外観写真を示す。筐体は防塵、防水の規格対応のため密閉容器とし、大きさは425×425×530(430+100)mmである。しかし、この溶接用電源を用いた溶接は従来とは溶接範囲が著しく異なるため、各種溶接仕様を満足する溶接を実現するためには溶接技術の開発が必須である。

そこで今回、開発した高電流短時間溶接機を用いて1.2GPaの溶接技術の確立を行った。



図III-2.7.13-83 スポット溶接機電源外観

2. 台形波形による1.2GPa級超高張力鋼の溶接基礎特性

まず本溶接方式における溶接の基礎特性を把握するため台形波形により、通電時間、電流値をパラメータとして溶接を実施し、品質評価（ナゲット径測定、せん断強度試験）を実施した。また、従来方式との比較を行うためナデックス社の溶接機を用いた溶接品との組織比較を行った。なお、プロセス中における温度変化の経時変化を把握するため、溶接シミュレータを用いて両溶接方式の温度プロファイルの比較を行った。溶接条件、強度

試験条件、シミュレーション条件を以下に示す。

【溶接条件】

- ・溶接機：高電流短時間溶接装置
- ・キャップチップ：材質 CrCu、先端形状：R100
- ・水冷温度：10℃
- ・加圧力：600kgf
- ・電流-通電時間：25-15kA - 5～50msec
- ・板材：材質 1.2GPa 級ハイテン、板厚 1.2mm

【せん断強度試験】

- ・引張試験機：インストロン
- ・クロスヘッドスピード：20mm/min

本 FS 研究における目標値を以下に示す。

- ・スパッタ発生無（溶接中目視で確認）
- ・ナゲット径 $\geq 5.48\text{mm}$
- ・せん断強度 $\geq 10.3\text{kN}$

【シミュレーション条件】

- ・シミュレーションソフト：MARC（MSC 社）
- ・使用モード：電流-熱-応力連成解析モード
- ・使用物理パラメータ：参考資料に記載
- ・解析モデル：2D 軸対称モデル

電極端部の温度を 20℃に固定

(実際はキャップチップ内を冷却水が流れて冷却している)

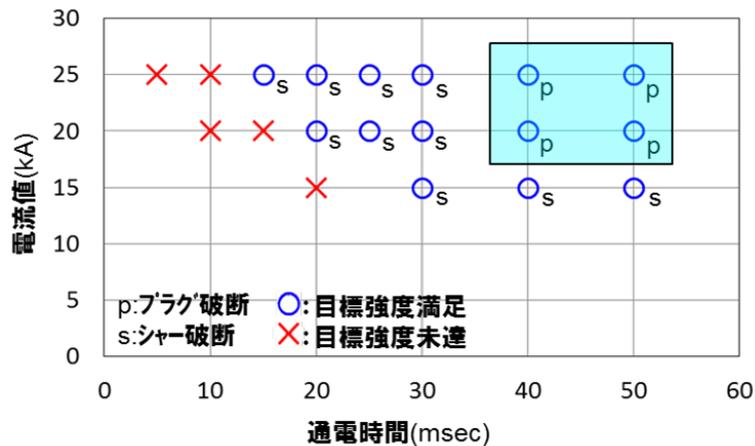
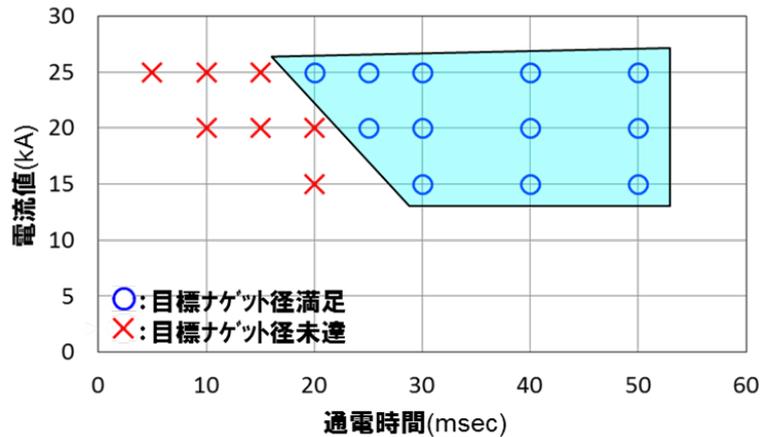
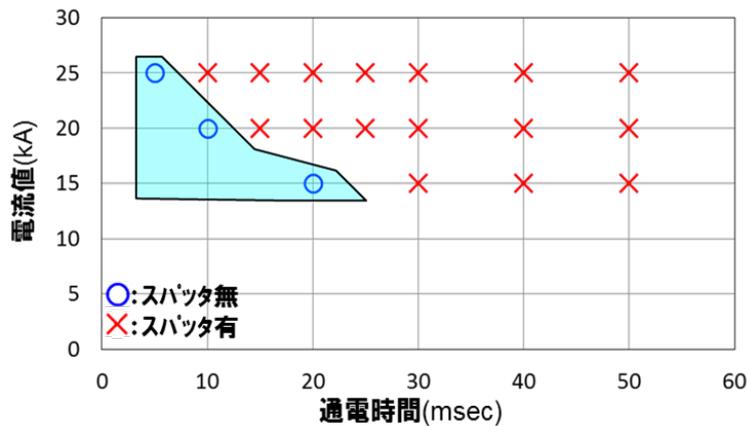


図 III-2.7.13-84 目標 TSS を満足する通電時間と電流値の関係



図III-2.7.13-85 目標ナゲット径を満足する通电時間と電流値



図III-2.7.13-86 スパッタ発生に及ぼす通电時間と電流値の関係

せん断強度、ナゲット径、スパッタ発生の品質判定結果をそれぞれ図III-2.7.13-84～2.7.13-86に示す。通电時間が低い条件ではナゲットが形成せず、スパッタは発生しなかった。ナゲット径、及び強度は電流値が大きく、通电時間が長くなるほど大きくなる傾向であった。これは熱的・力学的観点から見ても自明であり、従来の溶接方式と同様の傾向である。なお、スパッタは5ms、10ms等の短時間溶接条件以外の条件では発生し、ナゲット径の目標値を満足する条件では、スパッタレスにはできなかった。

図III-2.7.13-87に開発した高速インバータを電源とした抵抗スポット溶接断面の一例を示す。熱影響部の形状は王冠状（板厚に垂直方向に電極端部接触部、板板間部で広がっている）になっており、電極端部の熱影響部は表面まで及んでいる。その表面には溶着金属と思われるものが存在していたことから表面は溶融していると思われる。図III-2.7.13-88に従来方式の電源による抵抗スポット溶接の断面写真を示す。従来方式では熱影響部は小判状となっており、電極端部に表面溶融の痕跡は認められなかった。なお、この条件においてスパッタは発生していなかった。

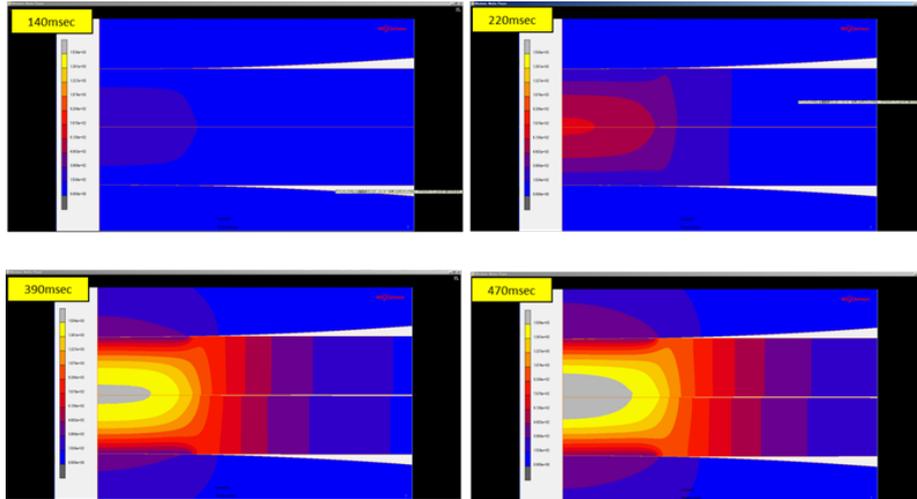


図Ⅲ-2.7.13-87 高速インバータを電源とした抵抗スポット溶接部断面の例(25kA-10ms)

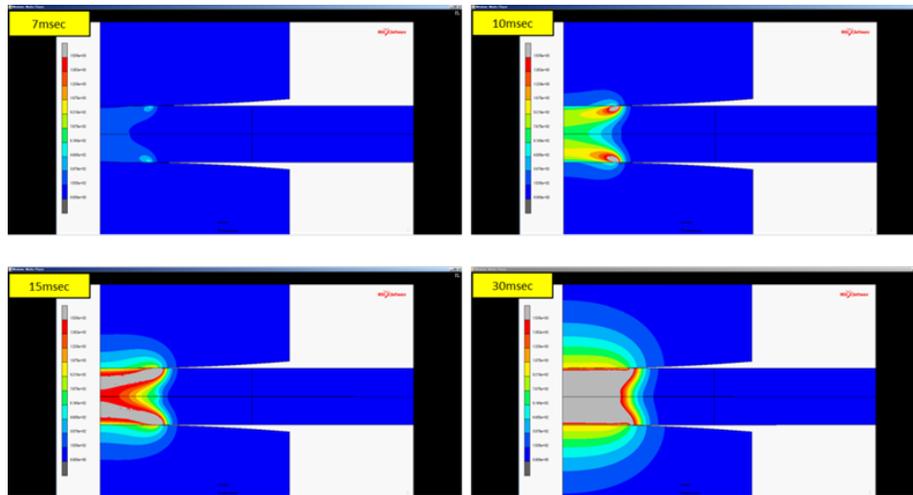


図Ⅲ-2.7.13-88 従来溶接機による抵抗スポット溶接部断面

図Ⅲ-2.7.13-89、図Ⅲ-2.7.13-90 にシミュレーションにより算出した本開発方式と従来方式の昇温過程の温度分布の時間変化を示す。従来方式は板-板間より発熱が始まり、470msの通電終わりには小判状のナゲットが形成されており、現実のナゲット形状とほぼ一致している。一方、本開発方式を模擬した高電流・短時間通電では、まず電極端部-板間での発熱が見られ、次いで板-板間が発熱して王冠状のナゲットを形成している。従来の 1/10 以下の 30ms で通電が終了しており、シミュレーション結果は現実のナゲット形状とほぼ一致している。なお、開発電源による方式でスパッタが発生している要因は、この電極端部-板間が優先的に加熱、熔融することによるものと考えており、今後、電極形状や通電波形などを最適化していく必要がある。本開発方式は高電流の溶接のため、溶接初期においては電極端部-板間に電流密度が集中し発熱する。発生した熱は大部分が電極への熱伝導により冷却されるが高電流方式では、発熱量が冷却速度よりはるかに大きくなるため、板-板間が発熱するより先に電極端部-板間の温度が上昇する。いったん温度が上昇すると材料の固有抵抗が増加し、より発熱しやすくなるため、後の通電においても同部が加熱した状態が維持され、やがて熔融しスパッタが形成され则认为している。一方、従来方式では電極近傍の加熱と冷却がバランスして、電極端部-板間が優先的に加熱されることはなく、板-板間が優先的に加熱されることで、最終的には小判状のナゲットが形成されるものと考えている。その結果、板表面の熔融がなくスパッタが抑制できていると思われる。これらの結果から、開発電源による方式の課題として、電極-板間の熔融によるスパッタを抑制する必要があることが明らかとなった。



図Ⅲ-2.7.13-89 従来方式による抵抗スポット溶接の温度分布のシミュレーション結果

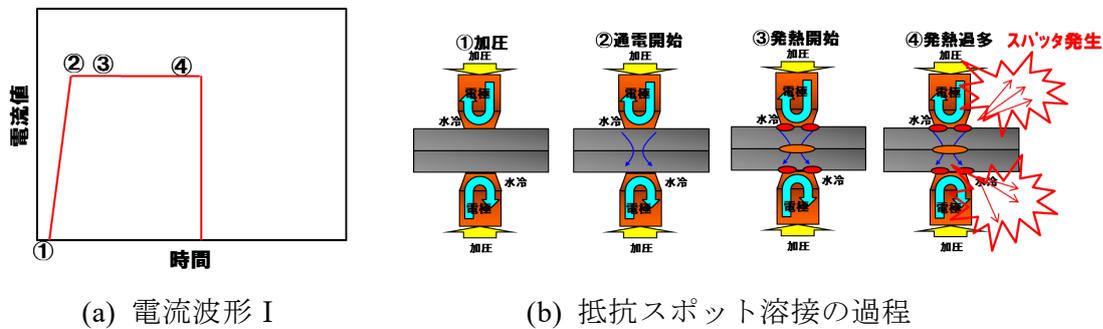


図Ⅲ-2.7.13-90 高電流・短時間通電による抵抗スポット溶接の温度分布のシミュレーション結果

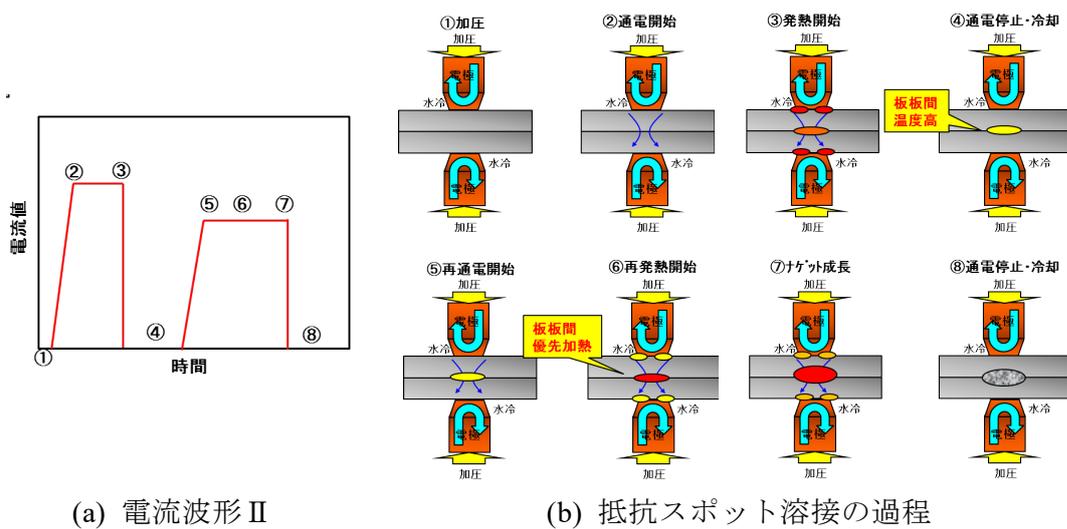
3. 溶接シミュレーションによるスパッタレス波形の検討

スパッタレスな溶接が可能な波形をシミュレーションを通して検討した。開発した高速インバータ電源の性能を活かして、適切な電流波形を検討した。図 2.7.13-91 は上述した電流波形(電流波形Ⅰと呼ぶ)と通電過程における溶接現象の模式図を示している。電流波形Ⅰでは電極-板間の温度が高くなり、熔融し、最終的にスパッタが発生する。そこで、図Ⅲ-2.7.13-92 に示すように、本通電の前に予備通電と無通電の冷却期間を設けことにした(電流波形Ⅱと呼ぶ)。電流波形Ⅱでは、まず予備通電を与えることにより電極-板間、板-板間を加熱する(①～③)。この段階では前述したように、電極-板間温度>板-板間温度となる。次に無通電の冷却期間を設ける(④)。電極-板間は冷却している電極と接しているため急激に冷却されるのに対し、板-板間は電極-板間より冷却速度は緩慢である。このプロセスを経ることにより、板-板間温度が電極-板間温度より高い状況を実現できると考えた。板-板間の温度が高くなった状態で本通電を行うと、温度が高い部分の電気抵抗

は高くなっているため、効果的にジュール熱が発生しナゲットが形成し、成長する。一方で、表面は電極により冷却されているため温度が低く、発熱が抑えられ表面が溶融しない（⑤～⑧）。この結果表面溶融することなく（スパッタが発生することなく）ナゲットを形成できると考えた。

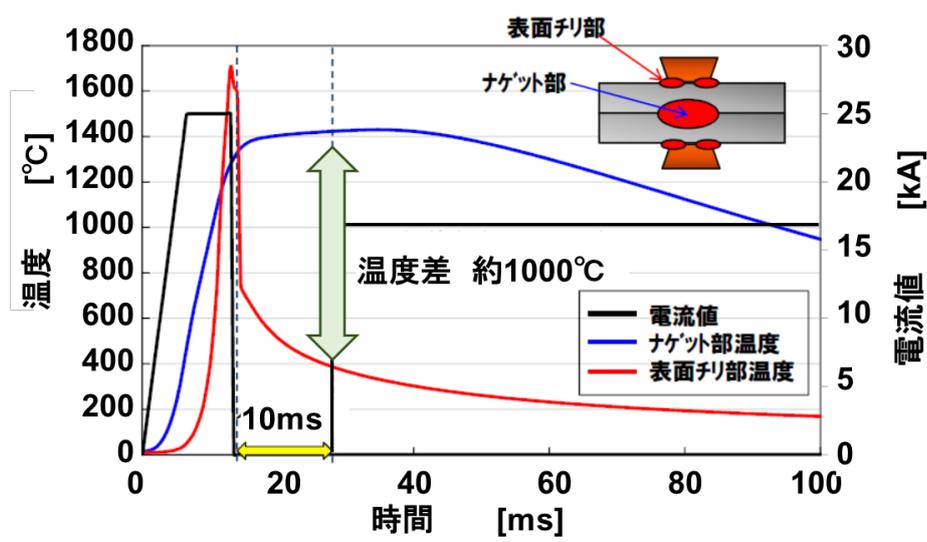


図III-2.7.13-91 電流波形と抵抗スポット溶接現象



図III-2.7.13-92 改良した電流波形と抵抗スポット溶接現象

以上の考えを検証するため、シミュレーションを用いてナゲット部と表面スパッタ部の温度変化を計算した。図III-2.7.13-93は25kA×10ms通電、その後100msの無通電の冷却期間をおいた際の表面スパッタ部とナゲット部の温度分布の時間的変化を示す。予備通電を行うことにより部材全体は加熱され、電極-板間温度が板-板間温度より高くなる。その後冷却されることにより電極-板間は急激に冷却されるので、温度の序列は入替っていることがわかる。10ms後においては1000℃程度の温度差がついており、その後両部位の温度差はゆるやかに低下していた。タクトタイムを短時間にすることを目指して、トータルの通電時間を短くするため、予備通電後の冷却時間を10msに設定した。



図Ⅲ-2.7.13-93 ナゲット部、板表面スパッタ発生部の温度の時間変化

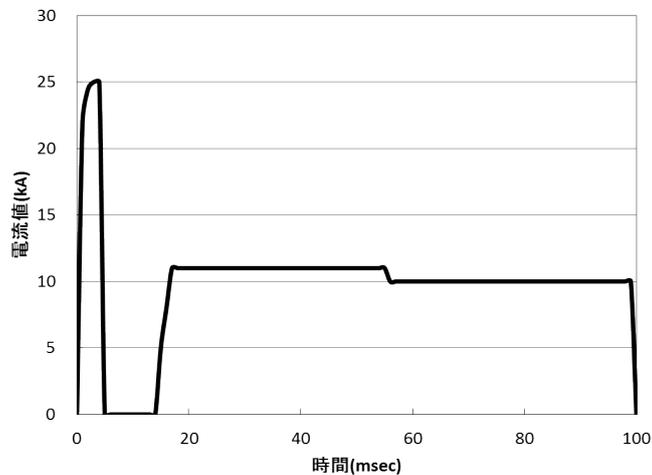
4. スパッタレス波形の実験的検証

前述したスパッタレス波形（予備通電、冷却期間、本通電）の効果を検証するため、溶接実験を実施した。また、本通電の条件は以下の手順にて選定した。

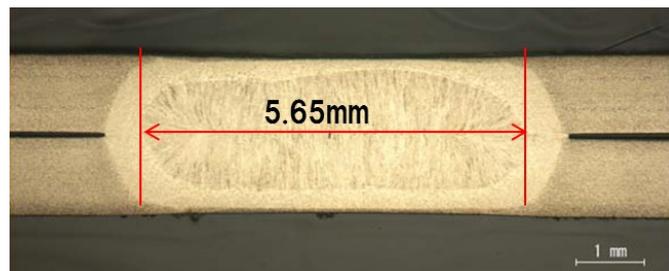
- ① 最大電流（25kA）にてスパッタが発生する限界時間まで予備通電を行う。
通電時間を短時間しつつスパッタの発生しない最大時間通電を行う。
- ② 10ms の無通電の冷却時間を設ける。
この工程により板-板間を表面-板間より高い温度とする。
- ③ 本通電をトータル通電時間が 100ms となるまで行う。
現行の開発装置の性能上、最大通電時間である 100ms 通電を行い、板-板間にナゲットを形成させる。
- ④ 上記③においてスパッタが発生した場合は発生時間を評価し、スパッタ発生前に電流値を下げる。
予備通電と冷却工程により表面からのスパッタは抑制できているものの、ナゲット部を過加熱になると、ナゲット部の膨張にコロナボンド部が耐えられなくなり、板-板間からスパッタが発生する。このスパッタを段階的に電流値を下げることにより抑制し、継続的にナゲットを成長させる。
- ⑤ 上記④においてスパッタが発生した場合は④と同様の方法を繰り返し実施する。
併せて、断面観察、十字引張試験を行い、ナゲット径、強度、破断形態を調べた。

上記の工程で実験的な検証をしたところ、図Ⅲ-2.7.13-94 に示す電流波形においてスパッタレスな溶接が可能であった。この結果から本波形によるスパッタレスの効果があることが実証された。ちなみに予備通電と冷却を含まないで、この条件で本通電を行うとスパッタが発生した。図Ⅲ-2.7.13-95 に断面観察結果を示す。ナゲット径は 5.65mm であり、目標ナゲット径（ $\geq 5.48\text{mm}$ ）を満足していた。この結果より、本波形を溶接条件として選定した。一方で十字引張試験の結果、十字引張強さは 5.78kN となり目標強度（ \geq

3.41kN) を満足した。破断形態は一部界面破断（ナゲット内破断）を呈しており、目標仕様を満足しなかった。これは急熱急冷により溶融部（ナゲット部）が焼入れされたため脆い組織となっていることが原因と考えられる。



図Ⅲ-2.7.13-94 選定したスパッタレス溶接波形



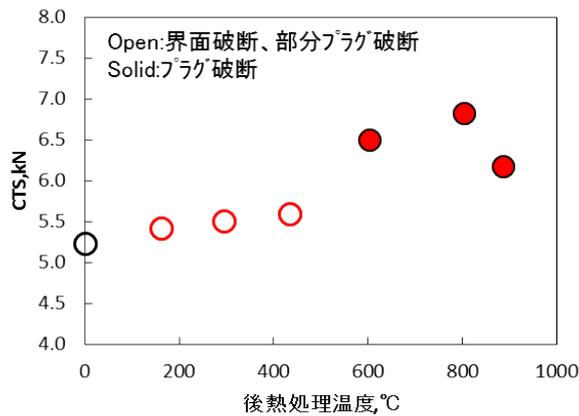
図Ⅲ-2.7.13-95 断面観察とナゲット径

5. 後熱処理条件の検討

ナゲット部の靱性向上を目的として後熱処理を検討した。後熱処理の方法はナゲットを形成させる本通電の後、室温まで冷却した後にナゲット部を所定の温度に焼戻しマルテンパ通電を選定した。後熱処理の温度はシミュレーションによりナゲット部の中心温度を溶接条件毎に算出することで設定した。表Ⅲ-2.7.13-12 に溶接条件毎のナゲット部の後熱処理温度シミュレーション結果を示す。これらの溶接条件で後熱処理を 162～887℃の範囲で行った溶接継手に対し十字引張試験を行った結果を図Ⅲ-2.7.13-96 に、破断後の外観写真を図Ⅲ-2.7.13-97 と図Ⅲ-2.7.13-98 に示す。なお、各条件 N=3 で評価を実施した。後熱処理無しでは十字引張強度は 5.2kN、破断形態は界面破断であり十字引張強さは目標仕様を満足したものの破壊形態は仕様を満足しなかった。一方で後熱処理有りでは後熱処理 800℃で最高強度を示しており、破断形態はプラグ破断となった。これらの結果から後熱処理温度は強度向上には有効であり、後熱処理温度として 800℃を選定した。

表Ⅲ-2.7.13-12 溶接条件毎のナゲット部の後熱処理温度シミュレーション結果

電流値(kA)	通電時間(msec)	後熱処理温度(°C)
無し	無し	0
9	20	162
	40	294
	60	434
	80	603
	100	805
11	60	887



図Ⅲ-2.7.13-96 後熱処理温度と十字引張強さ(CTS)の関係

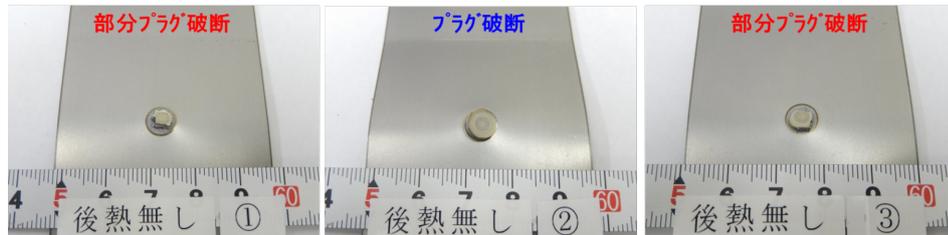
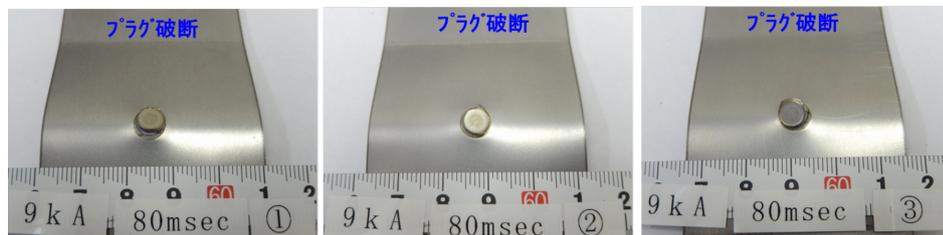


図 2.7.13-97 破断部写真 (後熱処理無し)

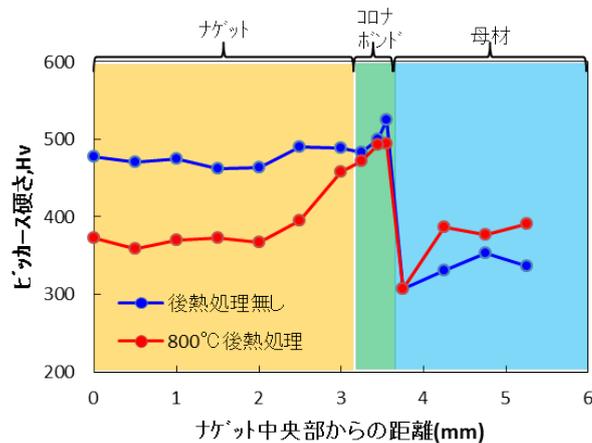


図Ⅲ-2.7.13-98 破断部写真 (9kA-80ms)

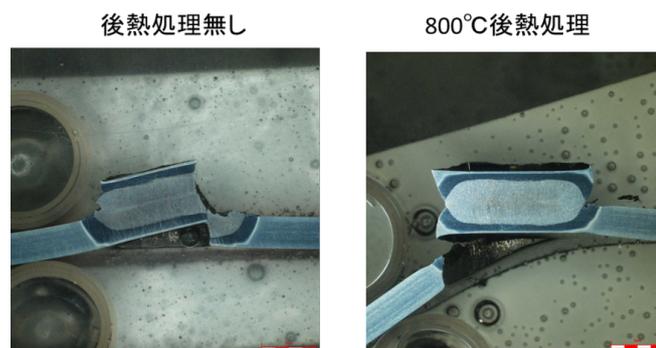
後熱処理による強度向上メカニズムを明らかにするため、後熱処理無し品、800°C熱処理品の十字引張破断試験片の断面観察、及びビッカース硬さ試験を実施した。図Ⅲ-2.7.13-99 にナゲット、コロナボンド、母材部のビッカース硬さ試験結果を示す。硬さは

コロナボンド>ナゲット>母材部の順に大きかった。ナゲット部は溶融を伴う焼入れ、コロナボンド部は溶融を伴わない焼入れ処理により母材と比較して硬さが高かったと思われる。800℃の後熱処理により、コロナボンド部、ナゲット部の硬さが全体的に低減していることがわかる。

図Ⅲ-2.7.13-100 に十字引張破断試験片の断面写真を示す。後熱処理無し品はコロナボンドからき裂が発生し、ナゲットに進展し破断に至っている（部分プラグ破断）。一方で800℃後熱処理品は、起点はコロナボンド部となっているがナゲットにき裂が進展することなく板厚方向に進展しプラグ破断となっている。先で述べた硬さ試験の結果から考察すると、強度はき裂が発生するコロナボンド部とナゲット部の硬さ、靱性によって決定される。本FS研究では、後熱処理無し品はコロナボンド部にき裂が発生していたことから靱性が不十分であり、ナゲット部にき裂が進展し、部分的に界面破断を呈したと思われる。一方で800℃後熱処理品はナゲットの硬さが後熱処理品より低く、コロナボンド部より進展したき裂がナゲットを進展することなくプラグ破断を呈したと考えられる。



図Ⅲ-2.7.13-99 ビッカース硬さ試験結果



図Ⅲ-2.7.13-100 十字引張破断試験片の断面写真

6. まとめ

本FS研究では、1.2GPa級超ハイテン鋼板を対象に、高電流短時間スポット溶接の課題を明らかにし、シミュレーションソフトを活用し、適切な電流波形並びに高強度な接合を可能とする後熱処理条件を検討した。得られた結果を要約すると、次の通りとなる。

①短時間溶接が可能な高電流短時間スポット溶接用電源、トランスを開発した。本装置は富士電機製 IGBT を用いたインバータと 10kHz の高周波トランスを構成要素としており、25kA までの高電流溶接、1ms 単位の精密な電流制御が可能なものである。

②開発した電源による抵抗スポット溶接は高電流溶接のため、板材表面が溶融しスパッタが発生する。このスパッタを抑制するため、予備通電と無通電の冷却工程を経た後に本通電を行う電流波形を提案した。この溶接方式によりスパッタが発生する板材表面の温度を板-板間の温度より低い状態とすることができた。その結果ナゲット径は目標仕様を満足しつつ、スパッタレスな溶接を可能にした。

③十字引張試験による破断形態で一部界面破断を呈したことから、急速冷却によりナゲット部が脆化していることが明らかとなった。ナゲット部の靱性を向上するため後熱処理（マルテンパ処理）を検討した。後熱処理温度はシミュレーションを通して求めた溶接部の温度分布から推定した。その結果、600～800℃の後熱処理により十字引張強さは向上し、破断形態は部分的な界面破断からプラグ破断に遷移した。また、コロナボンド部およびナゲット部の硬さが低減した。これは後熱処理による硬さの低減、それに伴う靱性の向上に伴い、より高品質な溶接部になったことによるものと考えられる。

本結果より高電流短時間の抵抗スポット溶接方式における 1.2GPa 級超ハイテン鋼板のスパッタレス溶接技術を確立した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.13-13 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その 他			
2018FY	3	0	21	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	4	0	0	0	0	1	0
合計	3	0	25	0	0	0	0	1	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.13-14 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
2019FY	1	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.14 [テーマ番号 63] 鋼板と樹脂材料の革新的接合技術及び信頼性評価技術の開発

2.7.14.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車等の輸送機器の軽量化に資する技術として、マルチマテリアル化技術開発（接合に関する技術開発）は重要なキーテクノロジーである。また、組織・体制的にはテスラ等の非自動車企業および中国企業（非自動車企業）の研究が加速していく中、国内でも非自動車企業が自動車企業と連携し、研究を加速すべきである。



図Ⅲ-2.7.14-1 自動車等の輸送機器の軽量化に資する海外動向

超強度鋼（ハイテン）/CFRP の素材技術では、まだ日本は世界をリードしている。一方、マルチマテリアル化技術開発（接合に関する技術開発）やその実証技術は、国内での実施例が少なく、世界をリードしているとは言い難い。

本事業では、「革新的新構造材料等研究開発」で開発された素材・材料（被着体・接着剤）を主に用い、「マルチマテリアル化技術の集大成」に資する実機に適用可能な信頼性を備えた鋼板と CFRP 等樹脂材料の接合技術の確立を目的とする。

(2)位置付け、目標値

1. 対象市場、製品

国内の非自動車企業が、国内の素材技術の利点を生かした接合実証技術を確認する。今後大きな市場の伸びが期待される自動車部材とその製造装置を対象とする。

2. 競合技術との対比

海外メーカーよりも信頼性を備えた鋼板と CFRP 等樹脂材料の接合技術を開発する。

① 異種材料接合部信頼性評価技術の開発

既存研究テーマで開発された鋼板、CFRP、接着剤および表面処理を主に用い、各素材の熱・力学的特性、接合における破壊形態を含めた接合信頼性評価マップを作成する。また、変形・破壊メカニズムの解明、破壊基準の確定から強度予測および耐久性予測に結び付ける。様々な接着剤および実機にも適用できる接合部信頼性評価技術に関する検討を実施する。

② 異種材料接合性能向上と実証技術の開発

自動車部品を想定した鋼板と CFRP の異種材料接合性能向上と実証技術の開発を行う。

鋼板と CFRP の接合技術と継手の施工・評価・品質保証技術を確立する。異種材料接合手法としては、レーザ溶着および接着接合を候補とする。

③ ガルバニック腐食評価技術の開発

金属材料と CFRP の間では異種金属接触腐食、通称、ガルバニック腐食の発生が懸念される。鋼板と CFRP のガルバニック腐食に関する評価を実施する。

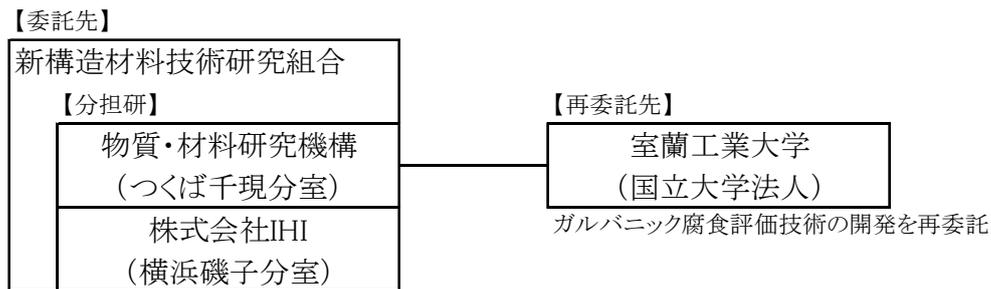
表Ⅲ-2.7.14-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
①異種材料接合部信頼性評価技術の開発		各素材の熱・力学的特性、接合における破壊形態を含めた接合信頼性評価マップの作成	接合における変形・破壊メカニズムの解明、破壊基準の確定から強度予測および耐久性予測	海外メーカーよりも信頼性を備えた接合技術開発
②異種材料接合性能向上と実証技術の開発		自動車部品を想定した鋼板と CFRP の部材接合実証と鋼板と CFRP のレーザ溶着技術の確立	自動車部品を想定した鋼板と CFRP の施工・評価・品質保証を含めた部材接合技術の確立	接合実証技術の確立、部材とその製造装置への事業展開
③ガルバニック腐食評価技術の開発		鋼板と CFRP のガルバニック腐食挙動の把握	鋼板と CFRP のガルバニック腐食対策案の提案	海外メーカーよりも信頼性を備えた接合技術開発

(3)全体計画

本事業では、自動車等の輸送機器の軽量化に資する、鋼板と樹脂材料の革新的接合技術とその信頼性評価技術を開発する。鋼板と CFRP 等樹脂材料の組合せが想定される部材の負荷に応じ、異種材料接合部の強度を確保し、界面破壊を抑止する等の「異種材料接合部の性能向上」を目指し、接合プロセスの最適化手法の研究開発を行う。一方、異種材料接合部では、両材料の線膨張率や弾性率の差異による熱応力やガルバニック腐食などが発生するため、接合部の長期耐久性や耐環境性を明らかにする必要がある。このため、「異種材料接合部耐久性評価」「ガルバニック腐食評価技術の開発」の研究開発を行う。

(4)実施体制



(5)運営管理

つくば千現分室として、研究開発項目 63 に関わる分室および再委託先との間で定期的に会合を開き、進捗管理を行った。基本的には横浜磯子分室および再委託先との個別打ち合わせが中心である。また、研究の進捗に伴いメールベースによる進捗管理も行っている。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

鋼板と CFRP のマルチマテリアル部品／製造装置の販売とシェアの拡大を目指している。また、マルチマテリアル化により自動車部品の 10～30%の軽量化を想定している。

2.7.14.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.14-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
①異種材料接合部信頼性評価技術の開発	各素材の熱・力学的特性、接合における破壊形態を含めた接合信頼性評価マップの作成	接着接合における破壊形態を含めた接合信頼性評価試験結果を示した。	△	
②異種材料接合性能向上と実証技術の開発	自動車部品を想定した鋼板と CFRP の部材接合実証と鋼板と CFRP のレーザー溶着技術の確立	自動車部品を想定した鋼板と CFRP の部材接合装置の導入 レーザー溶着技術の実施結果を示した。	△	
③ガルバニック腐食評価技術の開発	鋼板と CFRP のガルバニック腐食挙動の把握	ガルバニック腐食挙動の詳細な検討結果を示した。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.14-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
①異種材料接合部信頼性評価技術の開発	接着接合における破壊形態を含めた接合信頼性評価試験結果を示した。	接合における変形・破壊メカニズムの解明、破壊基準の確定から強度予測および耐久性予測	2020年度で本テーマは修了となるが、一部変形・破壊メカニズムの解明、強度予測は達成見込み
②異種材料接合性能向上と実証技術の開発	自動車部品を想定した鋼板とCFRPの部材接合装置の導入 レーザ溶着技術の実施結果を示した。	自動車部品を想定した鋼板とCFRPの施工・評価・品質保証を含めた部材接合技術の確立	2020年度で本テーマは修了となるが、一部は達成見込み
③ガルバニック腐食評価技術の開発	ガルバニック腐食挙動の詳細な検討結果を示した。	鋼板とCFRPのガルバニック腐食対策案の提案	2020年度で本テーマは修了となるが、一部は達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

本研究開発では、2つの主要な開発テーマ（部材レベルの接合構造の作製・評価と試験片レベルの接合部の信頼性評価）がある。

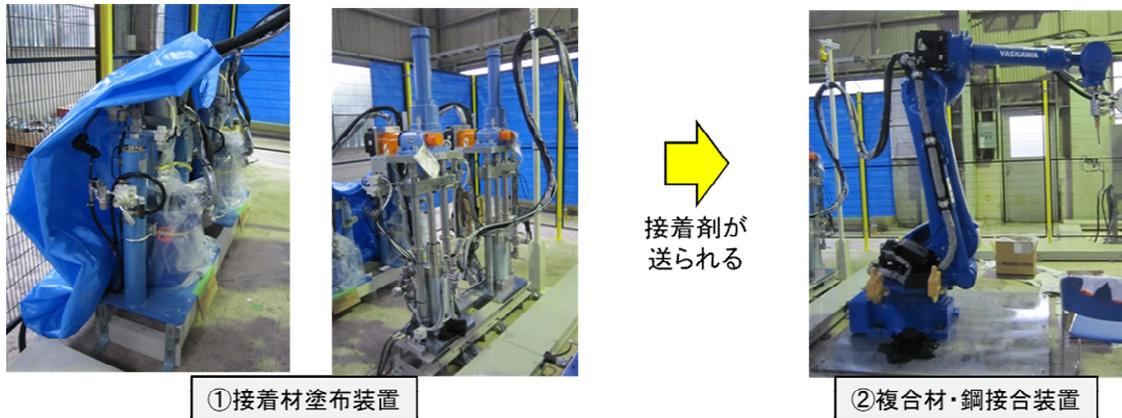
部材レベルの接合構造の作製・評価

自動車部品の軽量化に資する、鋼板とCFRPのレーザ溶着および接着接合の最適プロセスを確立し、再現施工できる異種材料接合実証機を開発することを目的とする。また、自動車部品を模擬した複合材パネル部品を試作し、性能評価を行う。

(1) 異種材料接合試作機の製作

量産化に対応するため、接着剤塗布量やセットタイムなどの手作業時に発生するバラツキの要因を排除可能な接着接合装置を試作した。図Ⅲ-2.7.14-2に導入した異種材料接合試作機を示す。接合装置は2液接着剤の使用を前提とし、接着剤を定量吐出す

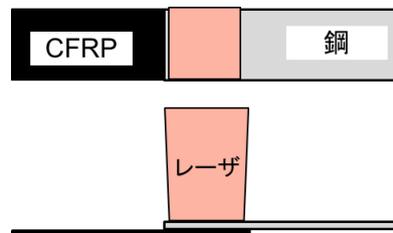
るための接着剤塗布装置と、2液接着剤を混合し部材に塗布する複合材・鋼接合装置で構成されている。本装置の導入により接着塗布プロセスを自動化した。今後は、部材レベルでの接合試験を実施し、サイクルタイムなどの生産性を評価する。



図Ⅲ-2.7.14-2 異種材料接合試作機

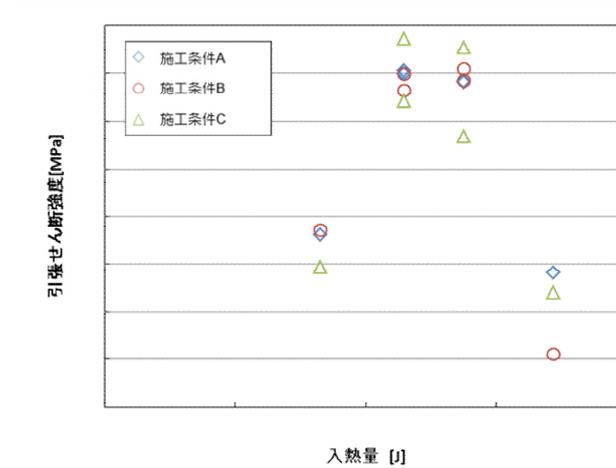
(2) レーザ溶着による異種材料接合技術開発

鋼材と CFRP の異種材料接合プロセスとしてレーザ溶着を用い、施工条件の最適化を実施した。供試材料には L100×W25×t1.2mm の鋼板および L100×W25×t3.6mm の熱可塑性樹脂 CFRP を用いた。図Ⅲ-2.7.14-3 に施工方法を示す。所定のラップ長で試験体をセットした後に、鋼板側からレーザを照射し、レーザ溶着を実施した。作製した重ね継手に、ISO19095-3 に準拠したせん断試験を実施した。



図Ⅲ-2.7.14-3 施工方法

図Ⅲ-2.7.14-4 に施工条件とせん断強度の関係を示す。入熱量によってせん断強度はピークを示していることがわかる。入熱量が低い場合では強度が低下した。また、施工条件によっては、バラツキ量の低減が確認できる。以上より、最適施工条件を選定した。



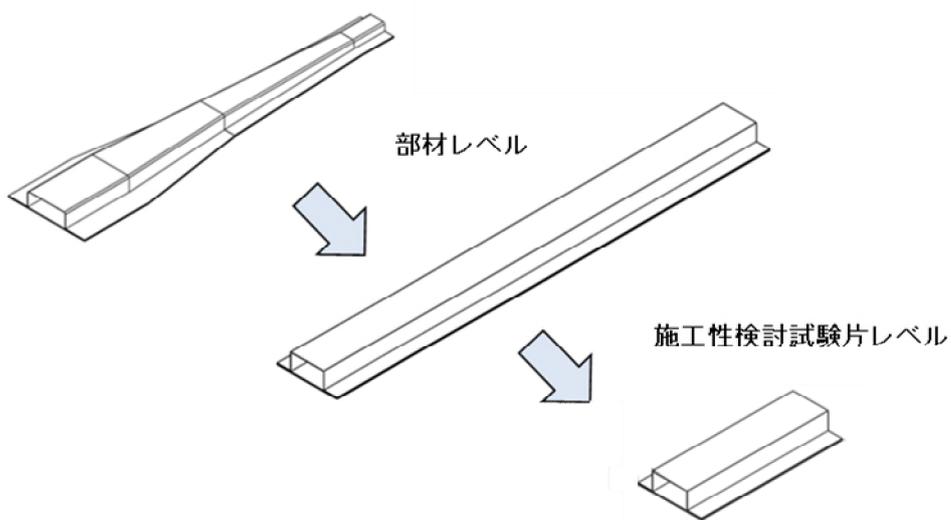
図Ⅲ-2.7.14-4 施工条件とせん断強度の関係

(3) 複合材パネル部品の設計

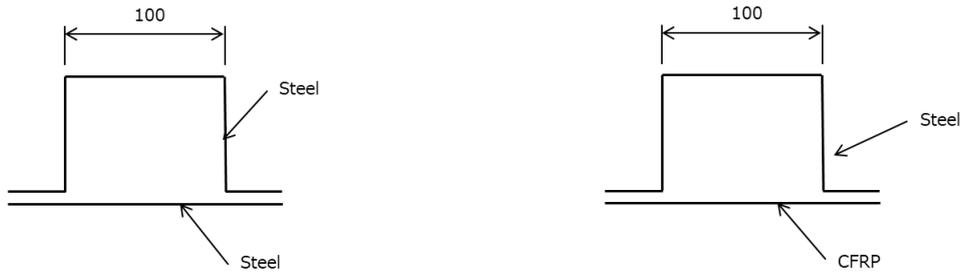
自動車部品を想定し、軽量化に資する鋼 CFRP の複合材パネル部品を設計・試作し、性能評価を行う。本年度はターゲット部材を決定し、複合材パネル部品の設計を実施した。

対象部材を選定し、それを模擬したターゲット部材形状を図Ⅲ-2.7.14-5 に示す。実車から外形寸法を採寸し、形状を決定した。実施予定の接合試験および性能評価試験では、構造を単純化したモデルを使用する。

検討を行う複合パネル部品の断面形状の一例を図Ⅲ-2.7.14-6 に示す。引張の荷重を受ける側に CFRP を採用する構造としている（図Ⅲ-2.7.14-6(b)）。製作したパネルについては、曲げ試験を行い、重量当たりのエネルギー吸収率により評価する。解析による評価の一例を図Ⅲ-2.7.14-7 に示す。今後は、解析と性能試験により、軽量かつ高性能な複合部材を製作していく。



図Ⅲ-2.7.14-5 ターゲット部材形状



(a) i-SS (IHI-Steel Section) (b) i-SFCB (IHI-Steel FRP Composite Basic type)

図Ⅲ-2.7.14-6 複合パネル部品の断面形状 一例

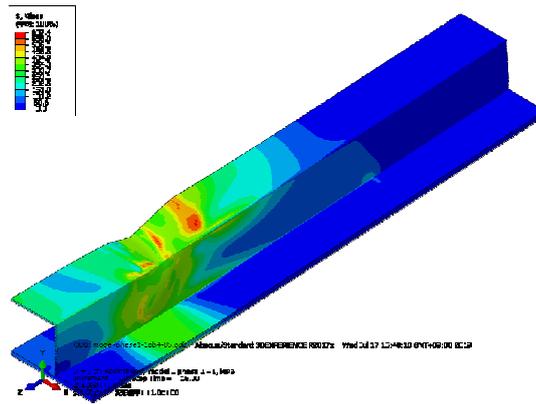
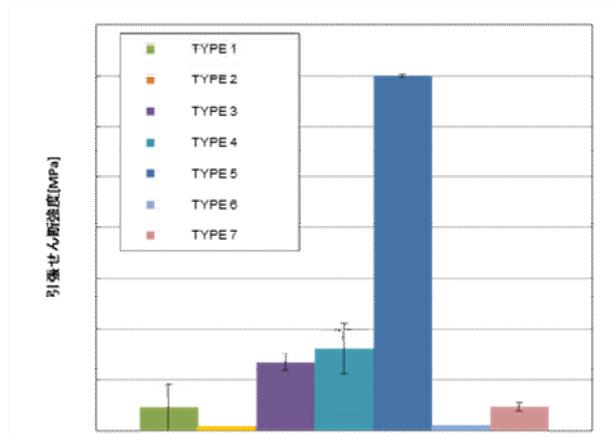


図 2.7.14-7 複合パネル解析の一例

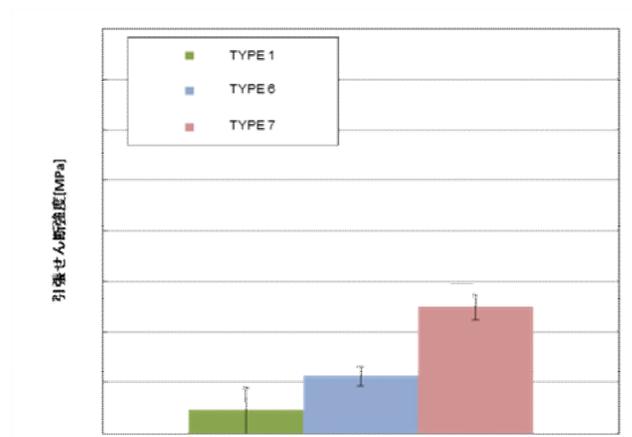
(4) 材料表面性状の評価

材料の表面性状がせん断強度に及ぼす影響を調査した。材料に対し、各種表面処理を施し、(2)で選定した施工条件にてレーザ溶着を実施し、せん断継手を製作した。鋼材側には7通りの表面処理を、CFRP側には3通りの表面処理を検討した。

図Ⅲ-2.7.14-8に表面処理とせん断強度の関係を示す。レーザ溶着向けの表面処理方法を選定した。レーザ溶着において表面処理のせん断強度に及ぼす影響は大きく、引き続き各種表面処理を検討し、データを拡充していく。



(a) 鋼板表面処理 (CFRP は未処理)



(b) CFRP 表面処理 (鋼板は未処理)

図Ⅲ-2.7.14-8 表面処理とせん断強度の関係

(5) まとめ

- ・異種材料接合装置の導入により、接着塗布プロセスを自動化した。
- ・レーザ溶着の施工条件を最適化し、標準条件を選定した。
- ・軽量化可能な複合部材の断面形状を設計した。今後は、解析と性能試験により、軽量かつ高性能な複合部材製作を目指す。
- ・レーザ溶着向けの表面処理方法を選定した。また、レーザ溶着において表面処理がせん断強度に及ぼす影響は大きく、引き続き各種表面処理データを拡充していく。

試験片レベルの接合部の信頼性評価

本研究開発では、多種の被着体や接着剤について、材料の熱的・力学的特性から継手の破壊形態までを統一的に評価する接着接合継手の接合信頼性評価マップの作製を行い、実機の強度予測や耐久性評価を行うことを目指している。継手強度に影響を及ぼす多数の評価因子について多角的な実験的知見が必要となり、それらを総合的に評価する指標の確立が求められる。

基礎的な知見拡充と種々の影響因子に対する考察を行うため、アクリル接着剤を使用した接着接合継手を対象とし、継手強度を支配する一因子である接着層厚さを変化させ、その影響について実験的な検討を行った。また、使用したアクリル接着剤についてはその材料特性を変化させ、それが継手強度に与える影響について併せて検討を行った。

被着体に板厚 3 mm の一般構造用炭素鋼 SS400 を使用した。被着体の表面状態を統一することを目的に、接着接合を行う領域にサンドブラスト処理を施し、その後アセトン脱脂を行った。接着剤はセメダイン株式会社製メタルロックを使用した。接着剤の材料特性について検討を行うため、高強度な接着剤である Y611 黒 S と、可撓性の特長を持つ Y618H の 2 種類のアクリル接着剤を使用した。作製した継手形状を図 III-2.7.14-9 に示す。

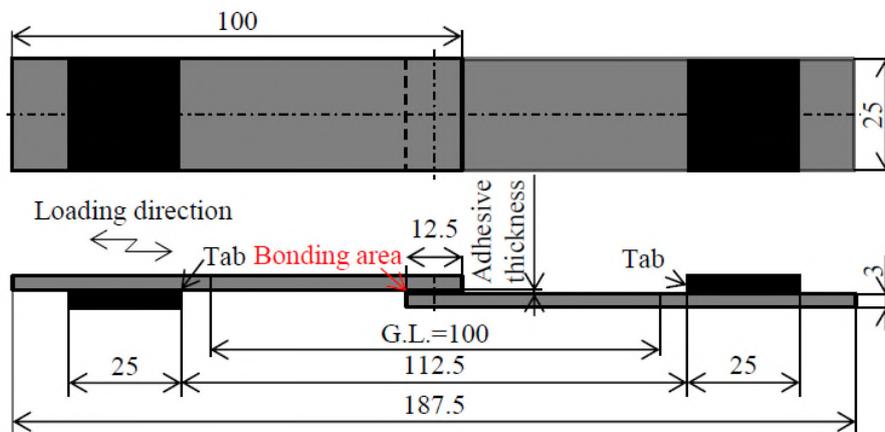
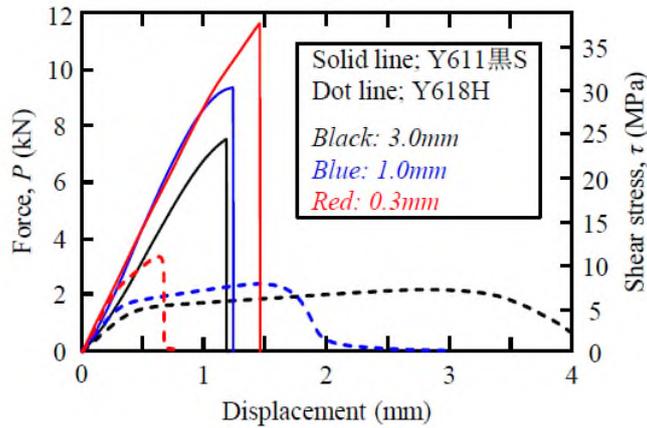


図 III-2.7.14-9 継手形状 (単純重ね合わせ継手 (SLJ: single lap joint))

2 枚の被着体を 12.5 mm で重ね合わせ、その間を接着した単純重ね合わせ継手 (SLJ: single lap joint) を使用した。接着剤の硬化条件は、硬化状態の安定化を図るため室温で 24 時間硬化させた。接着剤層厚さによる影響を検討するため、3.0、1.0、0.3 mm の 3 種類の接着剤層厚さを有する継手を作製した。接着端部についてはフィレット加工を施した。

静的試験は島津製作所製オートグラフ AG-X/R を用い、変位制御で負荷速度 1 mm/min にて実施した。試験時の伸び測定は島津製作所製ビデオ変位計 DVE-201 を使用し、標点間距離は 100 mm とした。疲労試験は MTS 製 858 Mini Bionix II を使用し、正弦波荷重にて周波数 $f = 10 \text{ Hz}$ 、荷重比 $R_P (= P_{min}/P_{max}) = 0.1$ で実施した。未破断時の打切繰返し数を $N = 1.0 \times 10^7 \text{ cycle}$ とした。静的および疲労試験後の破面観察には、キーエンス製デジタルマイクロスコープ VHX-6000 を使用した。

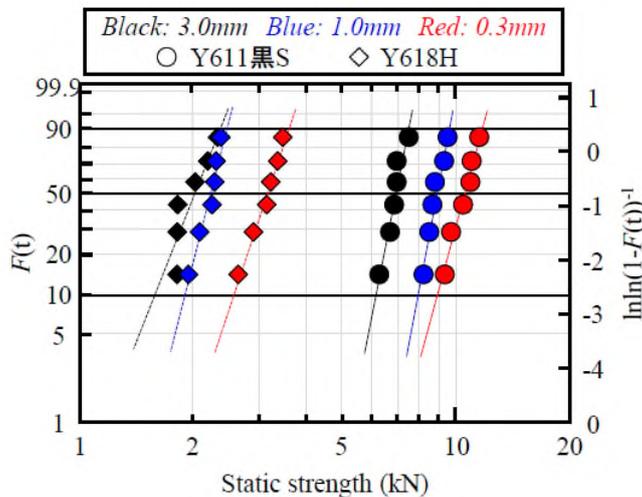
静的試験結果を図 III-2.7.14-10 に示す。



図Ⅲ-2.7.14-10 静的試験結果（荷重—変位の関係）

接着剤の違いに着目すると、継手の静的強度は Y611 黒 S の継手の方が Y618H より高く、弾性率や接着剤強度が高い接着剤を使用した継手の方がその強度は高くなることが確認された。接着剤層厚さに着目すると、接着剤層厚さが薄いほど、継手の静的強度は高くなる傾向を示した。

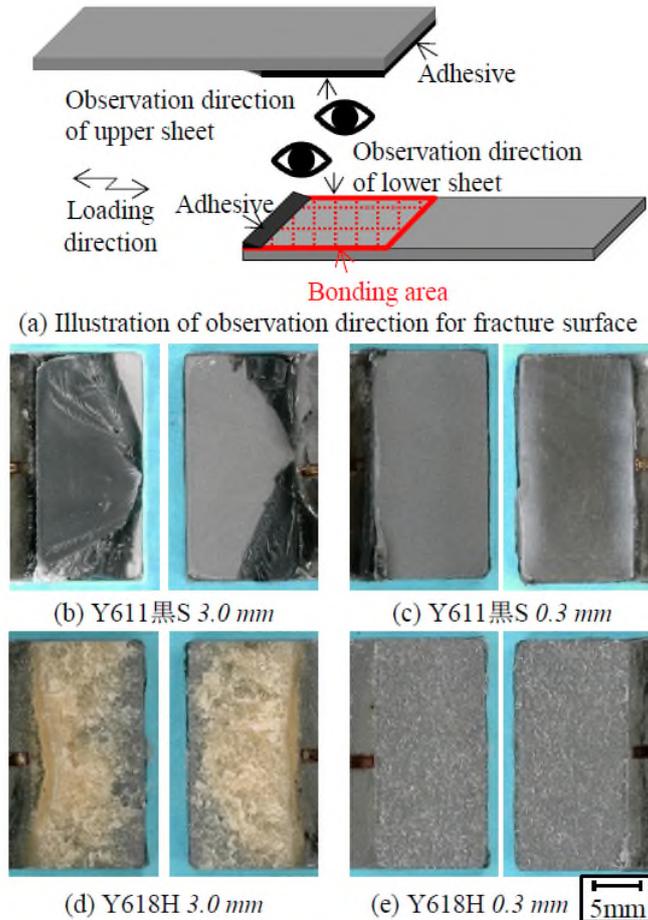
信頼性評価として静的試験での強度バラツキを評価する。図Ⅲ-2.7.14-11 に各接着剤のそれぞれの接着剤層厚さに対する継手の静的強度のワイブルプロットを示す。



図Ⅲ-2.7.14-11 各接着剤の接着剤層厚さに対する継手の静的強度のワイブルプロット

Y611 黒 S を使用した継手のワイブル係数は Y618H と比べ総じて高くなった。高弾性率・高強度の接着剤を使用するほど継手の静的強度は高く、バラツキを抑制できることが明らかになった。しかし接着剤層厚さの違いについて相関は見られなかった。

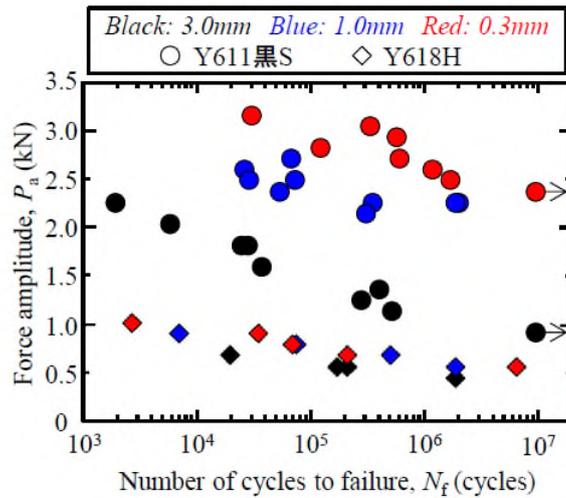
図Ⅲ-2.7.14-12 に静的破面の観察結果に示す。



図Ⅲ-2.7.14-12 静的破面観察結果

(a)は破面の観察方向を示す模式図である。(b)および(c)に示す Y611 黒 S の破面は、接着剤層厚さによらず、上板あるいは下板の一方で被着体と接着剤との界面近傍を破壊した様相となっていた。接着界面近傍の剥離応力が継手の破壊に大きく寄与することから、接着剤層厚さの変化による継手の曲げ剛性や剥離応力の影響が顕著に表れ、継手の静的強度が変化したことが考えられる、また、接着界面近傍を進展することから、接着剤の伸び量については大きく変化しなかったことが推察される。一方、Y618 H の破面は、凝集破壊となった。接着剤の白化が Y611 黒 S に比べると顕著に発現している。この破壊様相は、接着剤層厚さの違いに対して差異はなかった。しかし、接着剤自体の伸びや変形は接着剤層厚さが厚いほど大きいため、上述した静的試験の結果で見られた伸び違いが現れたと考えられる。接着剤層厚さの違いによって接着剤内部の応力状態が変化することで継手強度が変化したと考えられる。接着剤内部への破壊に伴い伸びも変化したことが Y611 黒 S と Y618H との静的試験結果における傾向の違いと対応していると考えられる。

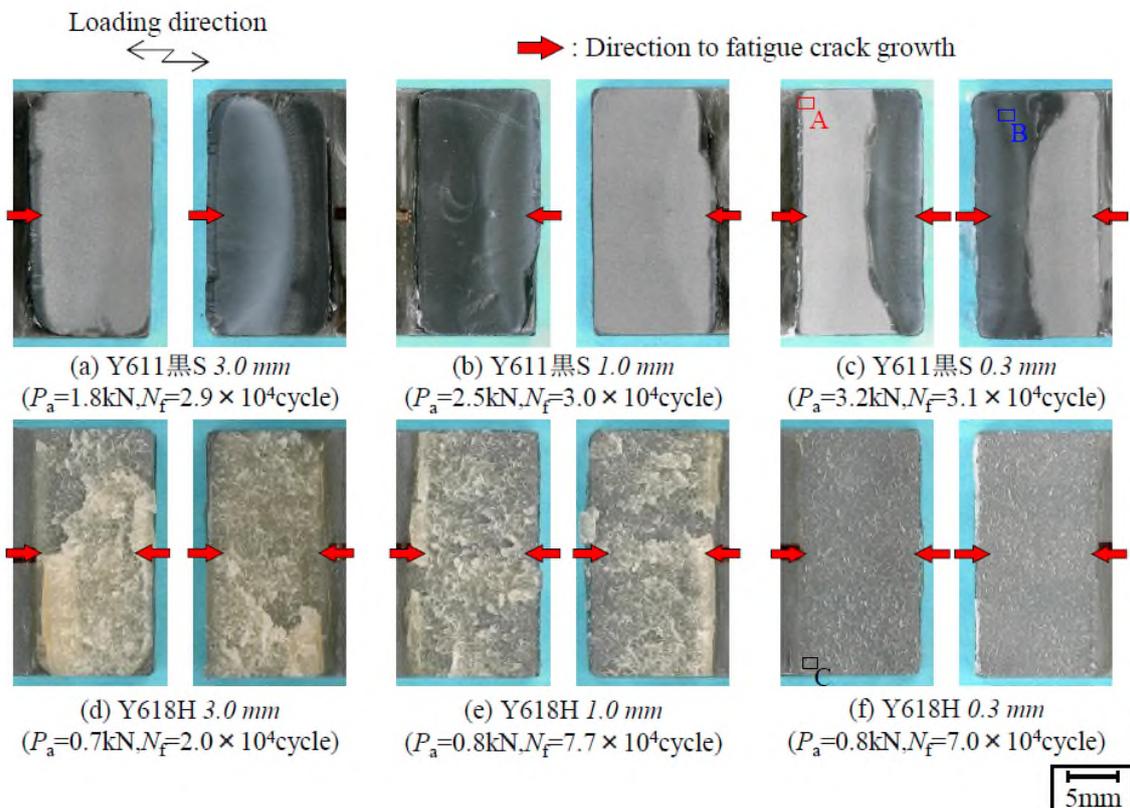
図Ⅲ-2.7.14-13 に各種接着剤に対し 3 種類の接着剤層厚さで作製した継手の疲労試験結果を示す。



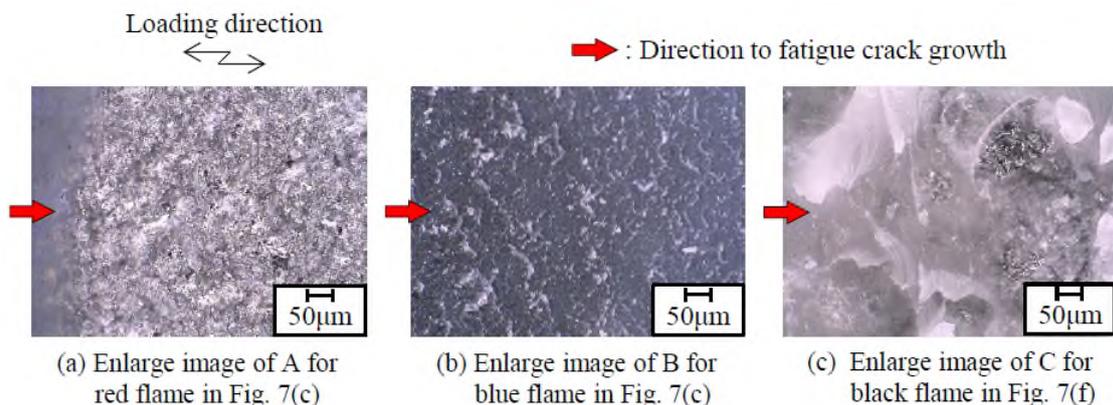
図Ⅲ-2.7.14-13 疲労試験結果（負荷試験力振幅—破断繰り返し数の関係）

縦軸は継手に作用した負荷試験力振幅 P_a 、横軸は破断までの繰り返し数 N_f である。Y611 黒 S を使用した継手の疲労強度は Y618H に比べ高く、静的強度と同様に高強度な接着剤ほど継手の疲労強度も高くなる傾向が見られた。接着剤層厚さの影響は、接着剤層厚さが薄いほど疲労強度が高くなり、その影響は Y611 黒 S が顕著であった。

図Ⅲ-2.7.14-14 に疲労破面の観察結果を示す。図Ⅲ-2.7.14-15 に特徴的な破面様相を示す箇所の拡大図を示す。



図Ⅲ-2.7.14-14 疲労破面観察結果



図Ⅲ-2.7.14-15 特徴的な破面様相を示す箇所拡大図

Y611 黒 S の継手については、接着端に作製したフィレット部から疲労き裂が発生していることが確認された。また、疲労破面中の接着剤にて白色で示す疲労き裂前縁が認められ、疲労き裂進展様相については接着剤層厚さ依存性が認められた。接着剤層厚さ 3.0、1.0 mm の継手については、上板あるいは下板の一方に被着体表面が現れ、もう一方には接着剤が残存し、破面上に凹凸がみられた。接着剤層厚さ 3.0、1.0 mm の継手の場合の疲労き裂進展過程は、一方の接着端部から発生した疲労き裂による界面破壊となった。一方、接着剤層厚さ 0.3 mm の継手では、両接着端部から疲労き裂が発生した後、接着界面をき裂が進展しており、複数の疲労き裂が合体した破面様相が確認された。Y618H の継手については、疲労き裂は接着剤内部を進展していた。本疲労破壊は接着剤層厚さによらないことが明らかになった。

図Ⅲ-2.7.14-16 に接着剤および接着剤層厚さの違いに対する継手の疲労破壊の模式図を示す。

Type	Y611黒S		Y618H
Adhesive thickness	3.0mm/1.0mm	0.3mm	All
Fracture mechanism			

図Ⅲ-2.7.14-16 接着剤および接着剤層厚さの違いに対する継手の疲労破壊の模式図

接着剤の種類に着目すると、接着剤が異なる材料を使用する場合は界面の状態が変化する。接着剤自体の強度や弾性率の高い接着剤を使用することで、継手に作用する応力の抑制が疲労寿命を延伸することが示唆される。接着剤層厚さに着目すると、接着剤層厚さを薄くするほど継手に発生する応力は小さくなる。接着剤の破壊じん性が同一と仮定した場合、継手の破断荷重は接着剤層厚さが薄いほど高くなることが推察

される。破壊様相の差異については、接着剤の濡れ性の違いや伸び変化による接着剤自体の特性の違いが一因とされる。接着剤自体の特性および接着剤層厚さの違いに対する継手の強度特性や破壊様相の差異は、混合モードである単純重ね合わせ継手特有の応力状態によるものと考えられる。今後は、個々の破壊モードに対する知見として、モード I 荷重下である DCB 試験やモード II 荷重下である ENF 試験を行い、総合的な考察から寿命予測を行う。接着剤・被着体に対する接着接合継手の信頼性マップの作製を目指す。

アクリル接着剤の材料特性や継手での接着剤層厚さについて、静的および動的な実験的知見の拡充を行った。以下に結言を示す。

- 1) アクリル接着剤の種類に対し検討した結果、使用する接着剤自体の強度が高いほど継手の静的および疲労強度が高くなることが明らかになった。
- 2) 2種類のアクリル接着剤において、その継手強度は接着剤層厚さが影響を及ぼすことが明らかとなり、特に接着剤自体の強度が高い接着剤で接着剤層厚さの影響が顕著に認められた。
- 3) 接着剤自体の特性や接着剤層厚さの違いによって継手の破壊形態は異なり、接着剤自体の強度が高いほど接着界面近傍をき裂進展し、強度が低い接着剤では接着剤内部をき裂が進展する様相が確認された。

鋼材と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) とが接して用いられると、鋼材側の腐食が加速するガルバニック腐食が生じる。このガルバニック腐食を定量的に評価するために、3種類の鋼材と CFRP とを 0.001~0.1 mol/L 食塩水中に浸漬し、両者を無抵抗電流計を介して短絡するガルバニック試験を実施した。3種類の鋼材には、冷間圧延鋼板 (SPCC-SD 材)、高張力鋼板 (HTSS 材、JSC980)、合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA 材、JAC980) を用いた。CFRP には昨年度まで用いていた熱硬化性樹脂 (CF/Epoxy) に加え、熱可塑性樹脂 (CF/PA) も用いた。ガルバニック電流については、SPCC、HTSS 材で約 $1200\mu\text{A}/\text{cm}^2$ が流れ、GA 材は約 $80\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と他の二者に比べて少なかった。CF/Epoxy 材を CF/PA 材に変更しても流れるガルバニック電流は変わらなかった。溶液濃度の影響は、食塩水濃度が 0.001、0.01、0.1 mol/L と高くなるにつれて、ガルバニック電流は大きくなった。また、溶液を攪拌することで大幅にガルバニック電流は上昇した。ガルバニック試験終了後、SPCC 材に生成した腐食生成物を XRD により分析したところ、最表面の剥がれやすい黄土色の錆層はオキシ水酸化鉄である $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 、 $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$ 、下地の黒色の錆層はマグネタイト (Fe_3O_4) であることが判明した。また、今年度導入したマイクロ波プラズマ原子発光分光分析装置 (MP-AES) を用いて溶液中に溶出する鉄イオン濃度が測定できることを確認した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.14-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	2	0	3	0	0	0	0	0	1
2019FY	1	0	8	0	0	0	0	1	1
合計	3	0	11	0	0	0	0	1	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.14-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.15 [テーマ番号 64] マルチマテリアル接合技術の基盤研究

2.7.15.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マルチマテリアル車体構造の実現のためには、信頼性の高い異種材料接合技術の確立が不可欠である^{III-1, III-2, III-3}。実用技術としては、生産性やコストの観点を考慮することが必須であり、すでに実用化が先行しているリベット接合よりも軽量化に有効な冶金的な異材接合技術の確立が望まれている。しかし、冶金的接合では、接合界面における反応とその結果として生じる異材界面の構造と特性が、継手性能を支配しており、その継手強度の発現機構が明らかでないことから信頼性が確保されていない^{III-2}。このため、接合界面の構造と特性を解析し、継手性能に及ぼす影響を定量的に評価する手法を世界に先駆けて開発・確立する必要がある。

本事業では、異材接合の界面構造と強度発現機構を解明するとともに、車体構造設計や接合プロセス制御に適用できる異材継手の性能評価技術とシミュレーション技術を開発することを目的とする。具体的には、「[テーマ番号 55] マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究)」の結果^{III-3}を踏まえ、本プロジェクトに参画している素材メーカー（「[テーマ番号 02] 残留 γ 相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発」）、自動車メーカー（「[テーマ番号 05] アルミニウム／異種材料の点接合技術」）をはじめマルチマテリアル接合に関連する各テーマとも連携して以下の3課題をサブテーマとして実施する。

- ①異材接合プロセスとその現象解析
- ②異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明
- ③異材接合継手の性能予測

さらに本事業で開発した異材接合部性能評価・予測手法により得られた異材継手性能情報をトポロジー最適化による CAE 車体設計（「[テーマ番号 59] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発」）に引き渡し、最終的に重量 1/2 車体構造の提示に繋げる。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.7.15-1 研究開発目標と根拠

(a)サブテーマ①異材接合プロセスとその現象解析

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
<p>【サブテーマ①】 異材接合プロセスの開発とその現象解析 (i) 最適接合条件の探索</p>		車体構造を踏まえた異材接合継手の性能向上に向けて、接合プロセス条件の影響因子を抽出する。	アルミニウム合金/鋼板および金属/CFRPの各種接合プロセスについて、継手強度（TSS、CTS）を評価し、良好な継手特性を確保するためのプロセスパラメータを探索する。	JIS-A級あるいは母材破断を満足する接合プロセスの選定および接合条件を最適化するため。
<p>【サブテーマ①】 異材接合プロセスの開発とその現象解析 (ii) 接合現象の解析 (a) 接合過程の実験的解析</p>		接合現象のその場観察手法とその解析条件を確立する。	接合界面の組織観察、あるいは、接合部の形成過程をその場観察・計測する技術を開発し、異材接合現象を実験的に解析・評価する。	その場観察により異材接合現象を実験的に定量解析・評価する技術を確立するため。
<p>【サブテーマ①】 異材接合プロセスの開発とその現象解析 (ii) 接合現象の解析 (b) 接合プロセスのシミュレーション手法の開発</p>		接合プロセスのシミュレーションモデルを構築するとともに、その場観察結果と比較することでその妥当性を検証する。	異材接合プロセスを高度に制御・予測することを目的として、粒子法などを用いたマルチフィジックス解析に基づいた接合プロセスのシミュレーション技術を開発する。	接合部形成過程を可視化するとともに、接合部各所の温度履歴や面積変化等の定量的な数値データを取得するため。
<p>【サブテーマ①】 異材接合プロセスの開発とその現象解析 (iii) 接合部組織形成過程の予測手法の開発</p>		接合部の組織形成過程を予測するための解析手法およびアルゴリズムを提案する。	接合現象の解析(①-(ii))を踏まえて、接合部の組織形成過程、特に、異材界面における反応層の形成過程を予測する手法を開発する。	異材接合プロセスの有効性と接合条件の最適化に対する理論的裏付けを提示するため。

(b)サブテーマ②異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
<p>【サブテーマ②】 異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明 (i) 接合界面構造、特性のナノレベル解析手法の開発 (阪大接研・茨城大)</p>		各種接合プロセスで作製した異材接合継手の界面構造原子レベル評価と解析	接合界面構造に及ぼす材料組合せ、接合プロセス条件の影響を明確化し、異材接合における接合原理を究明する。	2020年度加速予算により導入される「ナノレベル異材接合部観察・分析・特性評価装置」によって研究が促進される。
<p>【サブテーマ②】 異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明 (ii) トランススケール評価による強度発現機構解明 (阪大工・量研・茨城大)</p>		ナノ-マクロスケールでの評価・解析手法の確立に基づくマクロ特性に及ぼす界面組織および界面反応層の影響評価	トランススケール解析・評価手法を用いて各種異材接合継手の評価を行い、不均一界面を有す異材接合継手における強度発現機構を解明する。	2019年度導入した「メゾ・マイクロスケール異材接合部観察・分析装置」と上記「ナノレベル異材接合部観察・分析・特性評価装置」を連成させることによってトランススケール評価・解析による強度発現機構を解明が可能となる(世界初)
<p>【サブテーマ②】 異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明 (iii) 異材接合界面構造に及ぼす接合プロセス条件の影響評価 (阪大工・群馬大)</p>		異材界面構造と特性に及ぼす接合プロセス条件の影響を調べるとともに、異材接合部の破壊機構に及ぼす影響を検討	材料組合せと接合プロセスが異材接合界面構造と継手の強度発現に及ぼす影響を明らかにする。また、その結果をサブテーマ③に展開する。	をサブテーマ①、③と連携することで達成可能となる。

(c)サブテーマ③異材接合継手の性能予測

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
<p>【サブテーマ③】 異材接合継手の性能予測 (i) 異材接合界面でのマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発</p>		マイクロスケールでの接合界面の応力・ひずみ場の解析モデルの提案	異材接合部のマイクロスケールでのローカル破壊モデルの提案	接合部構造と継手特性の定量的関係を解明する必要がある
<p>【サブテーマ③】 異材接合継手の性能予測 (ii) トランススケールシミュレーションによる異材接合継手強度の予測手法の開発</p>		数値シミュレーションによる継手強度予測に向けた解析モデルの提案	ローカル破壊モデルに基づく異材継手性能トランススケールシミュレーションによる異材接合継手性能予測手法の開発	種々の接合部構造とマクロ継手性能の定量的関係を解明する必要がある
<p>【サブテーマ③】 異材接合継手の性能予測 (iii) 異材接合継手の疲労強度予測手法の開発</p>		異材接合継手の疲労試験による疲労強度劣化の発現メカニズムの解明	異材接合部疲労強度発現機能の解明と疲労寿命予測手法の開発	接合部構造と継手疲労寿命の定量的関係を解明する必要がある
<p>【サブテーマ③】 異材接合継手の性能予測 (iv) 異材継手性能と接合プロセス条件との関連の評価</p>		継手形式、異種材料の種類、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の性能予測のためのインターフェイスの検討	材料組合せ、継手形式、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の力学的性能予測手法の開発およびCAE車体設計との連携	継手性能を接合プロセス条件と定量的に関連付ける必要がある

(3)全体計画

本事業では、車体適用が想定される各種アルミニウム合金と鋼との異材接合ならびに金属とCFRPとの異材接合を対象に、各種接合プロセスにおける接合性の評価と接合現象の解明を行うとともに、接合プロセスのシミュレーション手法を確立する。次

いで、これらの異材継手に対して、ナノ～マクロに至るトランススケールでの実験的な解析・評価を行い、併せて、理論的な変形・破壊特性のシミュレーションを行うことで、界面構造や強度発現機構を定量的に解明する。

異材継手の定量的な性能情報が得られると、CAE 車体設計に提供することが可能となる。一方、CAE 車体設計のアウトプットである車体部位に応じた継手形式や材料組合せが与えられると、接合プロセスのシミュレーション手法を適用し、接合プロセス制御の最適化を検討する。すなわち、接合プロセスのシミュレーション手法と継手性能の評価技術を確立し、CAE 車体設計との間で定量的な情報交換することで、合理的な軽量化技術の開発を行う。

具体的には 2018 年度に実施した「[テーマ番号 55] マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究)」の成果を発展させて、アカデミックな知見に基づいて信頼性の高い異材接合技術の確立を目指して、①異材接合プロセスとその現象解析、②異材接合界面構造の評価・解析と強度発現機構の解明、③異材接合継手の性能予測の 3 課題をサブテーマとして設定して、研究開発を実施する。

本研究開発は、溶接・接合工学の世界的な拠点である大阪大学大学院工学研究科と同接合科学研究所が主体となって実施する。大阪大学大学院工学研究科と接合科学研究所は、これまでも「革新的新構造材料等研究開発」に参画しており、異種材料接合に関して多くの世界的な研究成果を公表している。また、第 1 期 SIP「革新的構造材料」(2014～2018 年度)において「金属 MI：溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」を実施しており、本研究開発はこれを異種材料開発に発展、適用するものである。研究開発の構成を図 III-2.7.15-1 に示す。

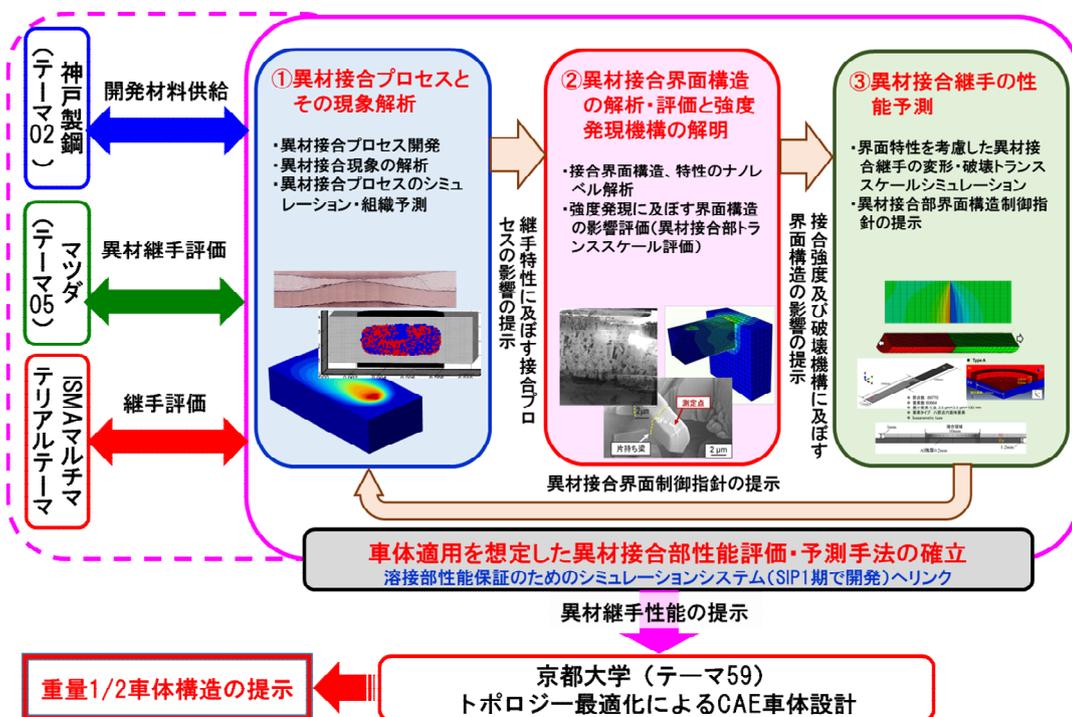


図 III-2.7.15-1 研究開発の構成

以下に各サブテーマの具体的な研究計画を示す。

サブテーマ①「異材接合プロセスの開発とその現象解析」

本サブテーマでは、高性能・高信頼な異材接合プロセスの開発、接合プロセスのシミュレーションによる接合現象の解析、および、接合部組織形成過程の予測手法の開発を行う。特に、接合部組織形成過程の予測では、サブテーマ②と連携して異材接合界面における反応層形成過程の予測手法の開発を行い、接合部組織形成の制御に資する成果を得る。具体的な研究開発内容を以下に記す。

①-(i) 最適接合条件の探索

アルミニウム合金/鋼板および金属/CFRP の各種接合プロセスについて、継手強度 (TSS、CTS) を評価し、良好な継手特性を確保するためのプロセスパラメータを探索する。

①-(ii) 接合現象の解析

(a) 接合過程の実験的解析

接合界面の組織観察、あるいは、接合部の形成過程をその場観察・計測する技術を開発し、異材接合現象を実験的に解析・評価する。

(b) 接合プロセスのシミュレーション手法の開発

異材接合プロセスを高度に制御・予測することを目的として、粒子法などを用いたマルチフィジックス解析に基づいた接合プロセスのシミュレーション技術を開発する。

①-(iii) 接合部組織形成過程の予測手法の開発

接合現象の解析(①-(ii))を踏まえて、接合部の組織形成過程、特に、異材界面における反応層の形成過程を予測する手法を開発する。

サブテーマ②「異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明」

サブテーマ①で作製した異材接合継手に対して、メゾスケールからマイクロスケールさらにナノスケールまでのトランススケールでの接合界面の構造と特性を解析・評価する手法 (図 III-2.7.15-2) を開発し、その強度発現機構を解明することを目的に以下の研究開発を実施する。

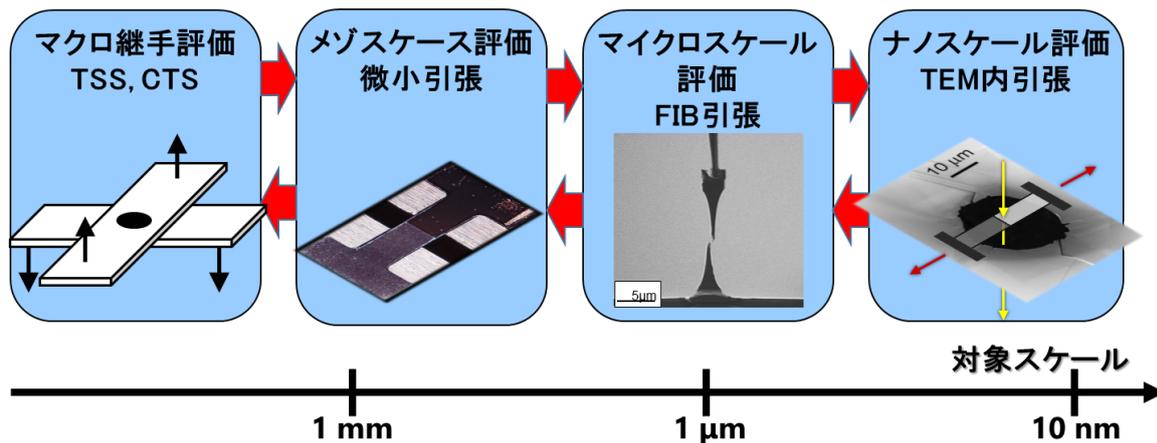
②-(i) 異材接合界面構造のナノレベル解析

材料組合せや接合プロセス条件によって変化する異材接合界面の構造を原子オーダーで解析・評価し、接合原理を究明する。

②-(ii) 異材接合部の界面構造と強度発現機構の解明

(a) トランススケール試験方法の開発

高性能・高信頼の異材継手を作成するためには、接合部の界面構造が継手強度に及ぼす影響を明らかにする必要がある。現行の JIS 規格等で規定されている継手試験方法 (TSS・CTS) による荷重-伸び関係を踏まえて、メゾスケール (サブ mm オーダー) からマイクロスケール (μm オーダー)、ナノスケール (nm オーダー) に至る各スケールでの接合部界面構造と接合部特性の関係を明らかにするトランススケール試験方法を開発する (図 III-2.7.15-2)。



図Ⅲ-2.7.15-2 トランススケール評価解析のイメージ

(b) 界面構造の力学的特性の解明

開発したトランススケール試験方法を用いて、金属間化合物層などの界面反応相を含む接合界面領域の変形・破壊特性をサブ mm オーダー、μm オーダー、nm オーダーのマルチスケールで取得する。

(c) 接合部の強度発現機構の解明

(a)(b)で得られたマルチスケールの異材接合部の力学的特性を踏まえて、不均一界面を有する異材接合部の純粋引張あるいはせん断応力下での強度発現機構を解明する。この成果を③-(i) のマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発へ展開する。

②-(iii) 接合プロセス条件が界面構造に及ぼす影響評価

研究開発項目①-(iii)では、接合過程における溶融や流動、拡散、化学反応などをシミュレーションするが、これらの物理化学現象は接合プロセス条件によって支配される。接合過程を経て形成された界面構造と②-(i)、(ii)との関係を踏まえて、接合プロセスが界面構造と継手強度発現に及ぼす影響を明らかにする。

サブテーマ③「異材接合継手の性能予測」

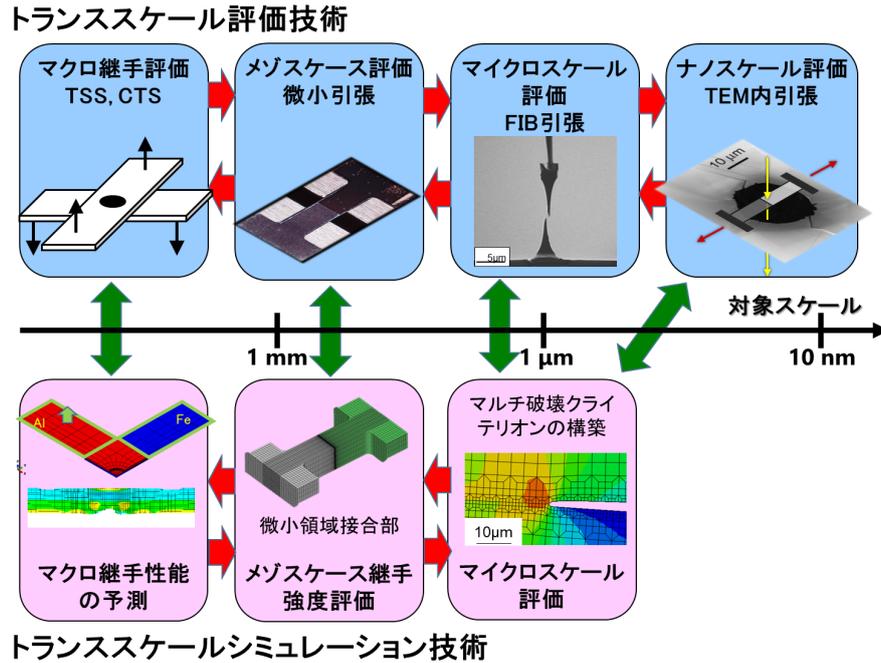
異材接合継手の強度や疲労特性は、界面特性とともに母材(非接合材)の特性によって複雑に変化し、さらには付与される外力モードにも大きく影響を受ける。本サブテーマでは、実働荷重モード下での継手性能の評価・予測手法を開発することを目的に、以下の研究開発を実施する。

③-(i) 異材接合界面でのマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発

研究開発項目②-(ii)の成果をベースとして、反応相を含む異材接合部ならびに母材の強度・破壊特性を考慮したマイクロスケールでのマルチ破壊モデルを提案し、荷重モードに応じた継手の変形・破壊挙動を予測するシミュレーション手法を構築する。

③-(ii) トランススケール-シミュレーションによる継手強度の予測手法の開発

マルチ破壊モデル(理論)と異材接合部評価結果(実験)を用いて、任意の外力が作用



図Ⅲ-2.7.15-3 トランススケール評価と連成したシミュレーションのイメージ

する場合のマクロ強度特性を予測できるトランススケールシミュレーション手法（図Ⅲ-2.7.15-3）を構築する。

③-(iii) 異材接合継手の疲労強度予測手法の開発

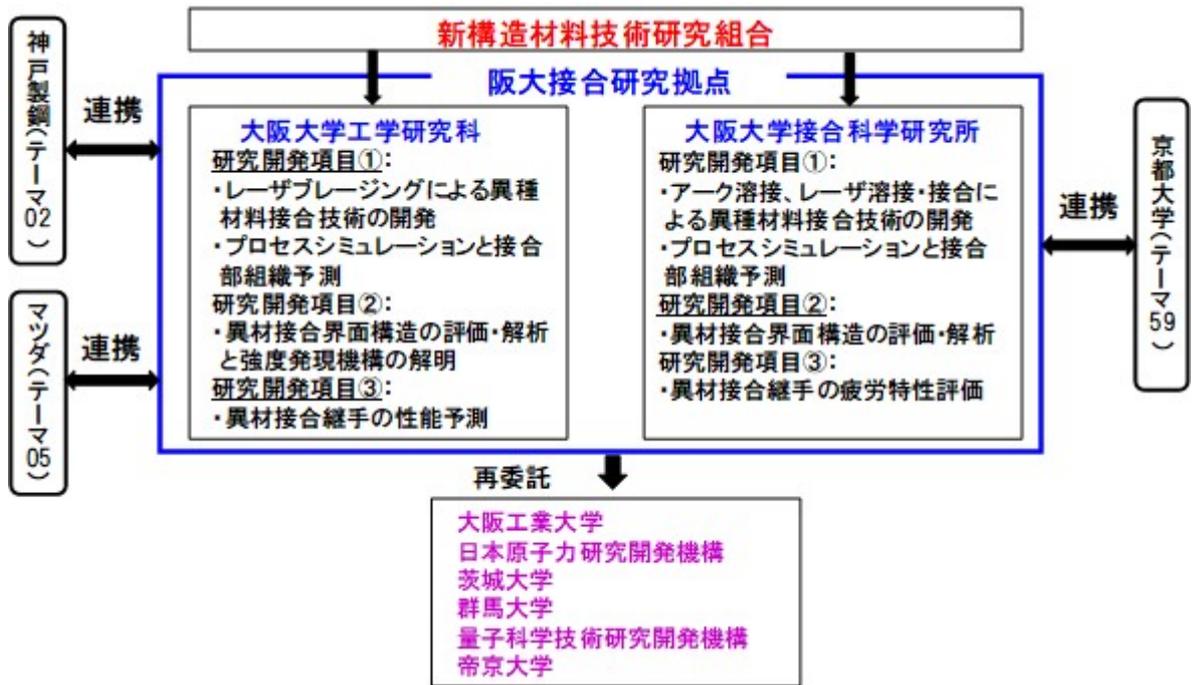
異材接合継手の疲労試験を実施し、疲労挙動の観察に基づく疲労強度の発現メカニズムを解明する。さらに疲労強度予測のために必要な材料特性（界面構造を含む）を明確にすることで、数値シミュレーションによる高精度疲労強度予測手法を構築する。

③-(iv) 接合部性能保証のためのシミュレーションシステムの開発

材料組合せ、継手形式、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の力学的性能（変形、静的強度、疲労強度）を予測する手法を開発する。そして、本予測手法を第1期 SIP「革新的構造材料」「金属 MI：溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」で開発したシミュレーションシステムにリンクするとともに、CAE 車体設計（テーマ 59）に提供する（図Ⅲ-2.7.15-1）。

(4)実施体制

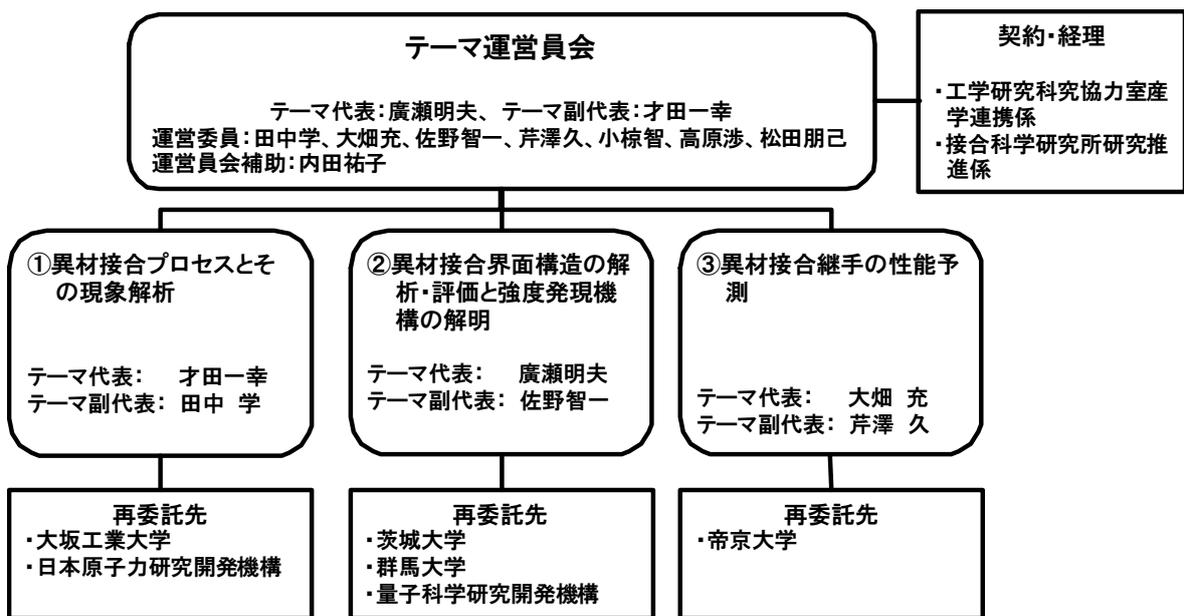
本事業は、図Ⅲ-2.7.15-4 に示すように、分担研として大阪大学工学研究科分室および大阪大学接合科学研究所分室が拠点として中心となって推進し、大阪工業大学、日本原子力研究開発機構、茨城大学、群馬大学、量子科学技術研究開発機構、帝京大学を再委託先として研究を推進する。また、テーマ 2、テーマ 5、テーマ 59 など接合関連の ISMA の他テーマとも連携する。



図Ⅲ-2.7.15-4 研究実施体制

(5) 運営管理

図Ⅲ-2.7.15-5 に示すように、サブテーマごとに、代表者 1 名と副代表者 1 名を置き、各テーマは代表者、副代表者が主導して推進する。また、各個別テーマの代表者、副代表者 6 名と登録研究員 3 名の計 9 名でテーマ運営委員会を構成し、1 ヶ月に一度開催する運営委員会にて、テーマ全体の運営方針、研究計画を決定するとともに、各個別テーマの進捗状況の確認を行う。各個別テーマにおいては、登録研究者および再委託先研究代表者で構成するテーマ内の研究会を開催し、研究進行状況、達成状況を取り纏めた上、テーマ運営委員会にて報告する。



図Ⅲ-2.7.15-5 運営管理体制

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本事業では、基盤研究として、マルチマテリアル車体に適用が想定される各種被接合材料種、接合プロセスおよび継手形状に適用できるプロセスシミュレーション技術と継手性能評価技術の開発を行う。自動車車体のマルチマテリアル化においては、適材適所に材料を用いるための最適設計法を構築することが必要であるが、同時に異材接合継手において設計強度・性能を担保するための信頼性の高い異材接合技術の開発が不可欠である。本事業で開発したトランススケール評価手法とシミュレーション技術を用いることで、異材接合継手性能の保証が可能となるとともにそれを実現する接合プロセス条件の制御指針も提示できる。2030年までには、本事業で開発したシステムを、第1期SIP「革新的構造材料」「金属MI：溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発」で開発したシミュレーションシステムにリンクすることで、SIPの資産を活用して国内メーカーに開発技術を供与する。本シミュレーション手法と評価手法を我が国の自動車メーカーが活用することにより、自動車車体製造における異材接合の適用が飛躍的に拡大し車体軽量化によるCO₂削減・省エネルギーに寄与するとともに、我が国自動車産業の技術的優位性の向上による国際競争力の強化にも貢献する。

2.7.15.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.15-2 第三中間目標と達成度

(a)サブテーマ①異材接合プロセスとその現象解析

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
①- (i) 最適接合条件の探索	車体構造を踏まえた異材接合継手の性能向上に向けて、接合プロセス条件の影響因子を抽出する。	各種異材接合継手の強度評価とその影響因子の抽出を行った。	○	
①- (ii) 接合現象の解析 (a) 接合過程の実験的解析	接合現象のその場観察手法とその解析条件を確立する。	アルミニウム合金/鋼板および金属/CFRP異材接合を対象に、接合現象のその場観察手法について基礎的検討を行った。	○	
①- (ii) 接合現象の解析 (b) 接合プロセスのシミュレーション手法の開発	接合プロセスのシミュレーションモデルを構築するとともに、その場観察結果と比較することでその妥当性を検証する。	接合プロセスのシミュレーション手法に関する基本コンセプトを提案した。	○	

①- (iii) 接合部組織形成過程の予測手法の開発	接合部の組織形成過程を予測するための解析手法およびアルゴリズムを提案する。	接合部の組織形成過程を実験的に解明した。	○	
----------------------------	---------------------------------------	----------------------	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(b)サブテーマ②異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
②- (i) 接合界面構造、特性のナノレベル解析手法の開発 (阪大接研・茨城大)	各種接合プロセスで作製した異材接合継手の界面構造原子レベル評価と解析	接合界面の TEM によるナノ構造解析手法を確立した。さらに、強度発現機構解明に向けたナノスケール特性評価システムの設計・組み立てを行った。	○	
②- (ii) トランススケール評価による強度発現機構解明 (阪大工・量研・茨城大)	ナノ-マクロスケールでの評価・解析手法の確立に基づくマクロ特性に及ぼす界面組織および界面反応層の影響評価	異材接合界面に対して、マイクロスケールでの評価・解析手法を確立するとともに、異材接合界面の破壊挙動に関する新たな知見を得た。	○	
②- (iii) 異材接合界面構造に及ぼす接合プロセス条件の影響評価 (阪大工・群馬大)	異材界面構造と特性に及ぼす接合プロセス条件の影響を調べるとともに、異材接合部の破壊機構に及ぼす影響を検討	異種材料接合界面において接合材ならびに接合プロセス条件が破壊特性に及ぼす影響の評価手法の適用性を確認できた。また、評価用の接合継手を作製した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(c)サブテーマ③異材接合継手の性能予測

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
③- (i) 異材接合界面でのマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発	マイクロスケールでの接合界面の応力・ひずみ場の解析モデルの提案	界面反応層および非接合材の弾塑性応答モデルに加え、接合界面の結合力モデルを混合した局所応力・ひずみ場の解析モデルを考案した	○	
③- (ii) トランススケールシミュレーションによる異材接合継手強度の予測手法の開発	数値シミュレーションによる継手強度予測に向けた解析モデルの提案	継手強度を数値シミュレーションによって予測するためのローカルマルチ破壊モデル（アルミニウム合金の延性損傷モデルと界面の結合力モデルの混合）を提案した	○	
③- (iii) 異材接合継手の疲労強度予測手法の開発	異材接合継手の疲労試験による疲労強度劣化の発現メカニズムの解明	MSE法を用いた低侵襲余寿命予測法の異材接合継手への適用性の基礎検証を完了した	○	
③- (iv) 異材継手性能と接合プロセス条件との関連の評価	継手形式、異種材料の種類、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の性能予測のためのインターフェイスの検討	異材接合継手の性能予測のための提案シミュレーション法を適用するための継手モデルのあり方を提示した	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.15-3 最終目標の達成可能性

(a)サブテーマ①異材接合プロセスとその現象解析

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
①- (i) 最適接合条件の探索	抵抗溶接、摩擦攪拌点接合、レーザブレイジングおよびアークブレイジングによる異材接合継手を作製し、それらの機械的特性の評価を行った。その結果に基づき、接合継手特性の影響因子を抽出できた。	アルミニウム合金/鋼板および金属/CFRPの各種接合プロセスについて、継手強度を評価し、良好な継手特性を確保するためのプロセスパラメータを探索する。	目標を達成できる見込みである。
①- (ii) 接合現象の解析 (a) 接合過程の実験的解析	各種異材接合プロセスについて、直接観察・その場計測を試行し、過渡現象・塑性流動・接合形成過程を解明するための基礎的知見を得ることができた。	接合界面の組織観察、あるいは、接合部の形成過程をその場観察・計測する技術を開発し、異材接合現象を実験的に解析・評価する。	目標を達成できる見込みである。
①- (ii) 接合現象の解析 (b) 接合プロセスのシミュレーション手法の開発	各種異材接合プロセスについて、シミュレーション手法およびアルゴリズムの開発を完了した。現在、可視化シミュレーション技術の開発に向けた検討を行っている。	異材接合プロセスを高度に制御・予測することを目的として、粒子法などを用いたマルチフィジックス解析に基づいた接合プロセスのシミュレーション技術を開発する。	目標を達成できる見込みである。
①- (iii) 接合部組織形成過程の予測手法の開発	接合部の組織形成過程を予測する手法の基本コンセプトを提案した。現在、予測モデルの構築およびシミュレーション技術の開発を行っている。	接合現象の解析(ii)を踏まえて、接合部の組織形成過程、特に、異材界面における反応層の形成過程を予測する手法を開発する。	目標を達成できる見込みである。

(b)サブテーマ②異材接合界面構造の解析・評価と強度発現機構の解明

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
②- (i) 接合界面構造、特性のナノレベル解析手法の開発 (阪大接研・茨城大)	接合界面の TEM によるナノ構造解析手法を確立した。さらに、強度発現機構解明に向けたナノスケール特性評価システムの設計・組み立てを行った。	接合界面構造に及ぼす材料組合せ、接合プロセス条件の影響を明確化し、異材接合における接合原理を究明する。	当初案の通り、達成できる見込みである。
②- (ii) トランススケール評価による強度発現機構解明 (阪大工・量研・茨城大)	異材接合界面に対して、マイクロスケールでの評価・解析手法を確立するとともに、異材接合界面の破壊挙動に関する新たな知見を得た。	トランススケール解析・評価手法を用いて各種異材接合継手の評価を行い、不均一界面を有す異材接合継手における強度発現機構を解明する。	当初案の通り、達成できる見込みである。
②- (iii) 異材接合界面構造に及ぼす接合プロセス条件の影響評価 (阪大工・群馬大)	異種材料接合界面において接合材ならびに接合プロセス条件が破壊特性に及ぼす影響の評価手法の適用性を確認した。また、評価用の異材接合継手を作製した。	材料組合せと接合プロセスが異材接合界面構造と継手の強度発現に及ぼす影響を明らかにする。また、その結果をサブテーマ③に展開する。	当初案の通り、達成できる見込みである。

(c)サブテーマ③異材接合継手の性能予測

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
③- (i) 異材接合界面でのマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発	界面反応層および非接合材の弾塑性応答モデルに加え、接合界面の結合力モデルを混合した局所応力・ひずみ場の解析モデルを考案するに至っている	異材接合部のマイクロスケールでのローカル破壊モデルの提案	サブテーマ②の実験結果を活用することで目標を達成できる見込みである
③- (ii) トランススケールシミュレーションによる異材接合継手強度の予測手法の開発	継手強度を数値シミュレーションによって予測するためのローカルマルチ破壊モデル（アルミニウム合金の延性損傷モデルと界面の結合力モデルの混合）の提案と、必要な材料特性を評価する試験法を考案するに至っている	ローカル破壊モデルに基づく異材継手性能トランススケールシミュレーションによる異材接合継手性能予測手法の開発	実験的検証を蓄積することで目標を達成できる見込みである

③- (iii) 異材接合継手の疲労強度予測手法の開発	MSE 法を用いた低侵襲余寿命予測法の異材接合継手への適用性の基礎検証まで完了している	異材接合部疲労強度発現機能的解明と疲労寿命予測手法の開発	実験的検証を蓄積することで目標を達成できる見込みである
③- (iv) 異材継手性能と接合プロセス条件との関連の評価	異材接合継手の性能予測のための提案シミュレーション法を適用するための継手モデルのあり方を提示するに至っている	材料組合せ、継手形式、接合プロセス条件、接合欠陥を考慮した異材接合継手の力学的性能予測手法の開発および CAE 車体設計との連携	サブテーマ①と②の結果を融合することで目標が達成できる見込みである

(3)研究開発の成果と意義

【サブテーマ①異材接合プロセスとその現象解析】①- (i) 異材接合プロセス開発 (阪大工学研究科分室、大工大、テーマ 05)

異材接合プロセスとして、合金化溶融亜鉛めっき (GA) 鋼とアルミニウム合金 (A6061) の組み合わせを対象にアークブレイジング (AB)、レーザブレイジング (LB)、抵抗スポット溶接 (RSW) および摩擦攪拌点接合 (FSSW)、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) と A6061 の組み合わせを対象に FSSW プロセスを用いた。GA/A6061 を対象として各接合法において得られた結果の概略を以下に示す。図 III-2.7.15-6 は GA 高張力鋼 (GA980) /A6061 の異材 AB 継手の引張せん断強度結果を示す。接合部のビード幅に対応して継手強度が整理でき、最大でアルミニウム母材と同等の強度が得られた。継手強度の増大は比較的高入熱条件で認められており、GA980 上でフィラーがよくなじみ、接合金属中におけるブローホールの残存が少なくなることが分かった。図 III-2.7.15-7 は GA 冷間圧延鋼 (SPCC-GA) /A6061 の異材 LB 継手の引張せん断強度結果を示す。3.0kW までのレーザ出力の条件において、レーザ出力、ビード幅と破断荷重に関して正の相関性が認められ、接合面積の増大に由来すると考えられた。一方、3.5kW では、ビード幅と破断荷重に正の相関性はなかった。この条件において界面反応層の急激な増大が生じることが分かり、接合面積とともに反応層厚さの制御が重要であることが明らかとなった。

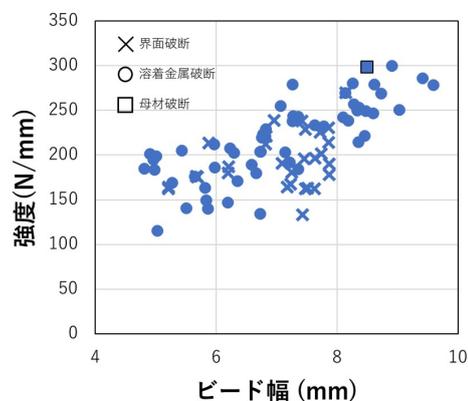
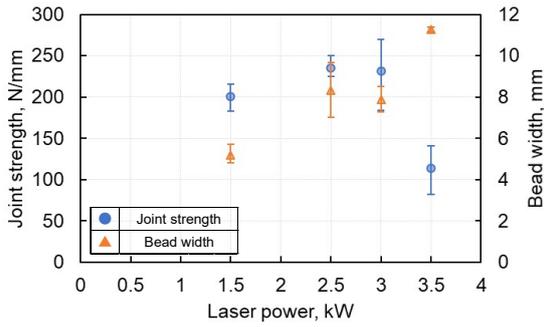
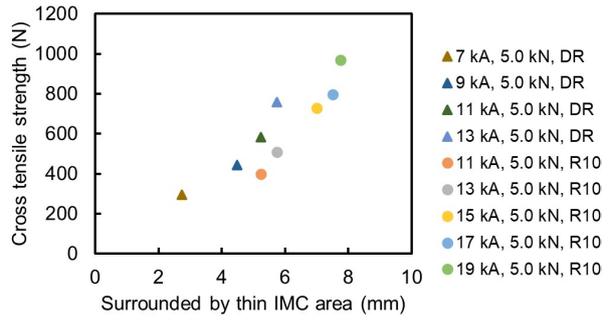


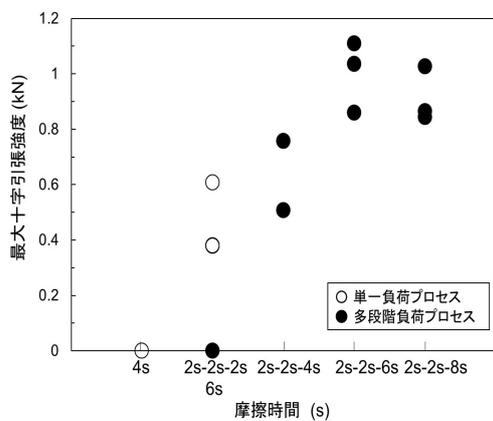
図 III-2.7.15-6 異材 AB 継手の引張せん断強度結果



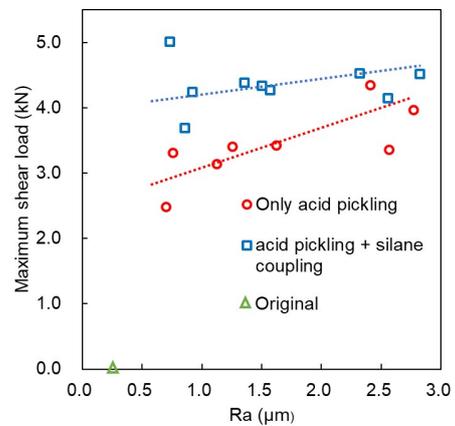
図Ⅲ-2.7.15-7 異材 LB 継手の引張せん断強度結果



図Ⅲ-2.7.15-8 異材 RSW 継手の十字引張強度結果



図Ⅲ-2.7.15-9 異材 FSSW 継手の十字引張強度結果



図Ⅲ-2.7.15-10 CFRTP/A6061-FSSW 継手の引張せん断強度

GA980/A6061 の異材 RSW においては、電極形状および電流値を変化させた検討を行うことで種々の組織的特徴量と十字引張強度の関係性を調べた。その結果、図Ⅲ-2.7.15-8 に示すように電極形状に関わらず $3\mu\text{m}$ 以下の反応層厚さを有した領域の増加と強度に相関があることが明らかとなった。図Ⅲ-2.7.15-9 は GA980/A6061 の異材 FSSW の十字引張強度結果を示す。GA を対象とした場合、従来の FSSW 手法では良好な継手が得られないことが分かった。そこで、新たに多段階負荷プロセスを考案し、良好な継手強度を得ることに成功した。以上のように、各接合法におけるプロセスや特徴量と継手強度に関する基礎的な知見を得た。これらの知見に基づきより詳細な影響因子の抽出およびプロセスの最適化を進める。

次に CFRTP/A6061 を対象として FSSW 接合法において得られた結果の概略を以下に示す。A6061 に対し酸洗いあるいは酸洗いとシランカップリング処理を行うことにより表面処理と特性の関係性を調べた。図Ⅲ-2.7.15-10 は各処理に対して得られた引張せん断強度を表面粗さで整理した結果を示す。未処理材の状態においては CFRTP と A6061 間の接合が実現されなかった。一方、酸洗いとシランカップリング処理を行うことで接合が達成され、表面粗さの増大に伴う継手強度の上昇が認められた。特に、酸洗いに加えてシランカップリング処理を行うことで更なる強度上昇が達成された。

これは酸洗いによる表面粗さの増大に伴う機械的締結力の増大に加え、シランカップリング処理により化学的結合力が付与されたためであると考えられた。以上の結果に加えて FSSW ツールを適正化した結果、引張せん断強度および十字引張強度としてそれぞれ最大 7.9 kN および 1.2 kN の継手を作製することに成功した。

①- (ii) 異材接合現象の解析手法の開発 (阪大工学研究科分室、大工大、原研)

接合界面の組織観察、あるいは接合部の形成過程をその場観察・計測する技術を開発し、異材接合現象を実験的に解析・評価することを目的として、RSW 時のアルミニウム合金内部の溶融部における対流挙動の In-situ 評価手法を確立するための検討を行った。今年度はその基礎検討として、抵抗スポット溶接を実施した後の継手に対して、SPring-8/BL14B1 で白色 X 線を用いた透過画像の取得を行った。図 III-2.7.15-11 に 2 cycles の試験体の画像を、図 III-2.7.15-12 に 6 cycles の試験体の画像をそれぞれ示す。2 cycles において、タングステン粒子は溝に充填されている状態からほとんど変化していないものの、6 cycles においてはタングステン粒子がアルミニウム合金内部に分散している様子が分かる。さらに、タングステン粒子は初期位置 (板の中央部) にはほとんど残存しておらず、多くが板の内部に、また中心から外側に散らばっている様子が確認された。このように、タングステン粒子を用いた溶接後の継手に対する白色 X 線による透過画像観察により、アルミニウム合金溶融部における攪拌現象を確認、またその挙動について傾向を把握することが出来た。

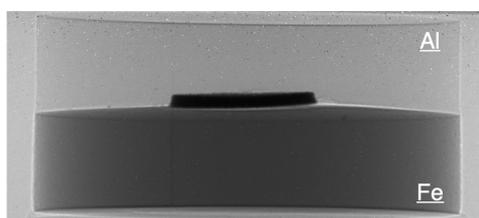


図 III-2.7.15-11 2 cycles の試験体の透過画像

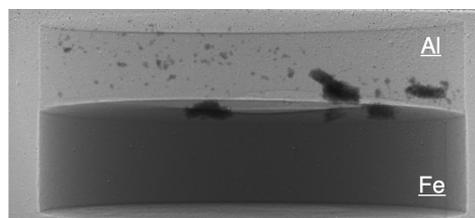
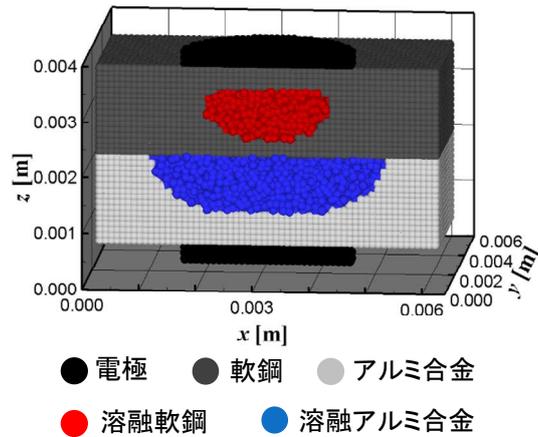


図 III-2.7.15-12 6 cycles の試験体の透過画像

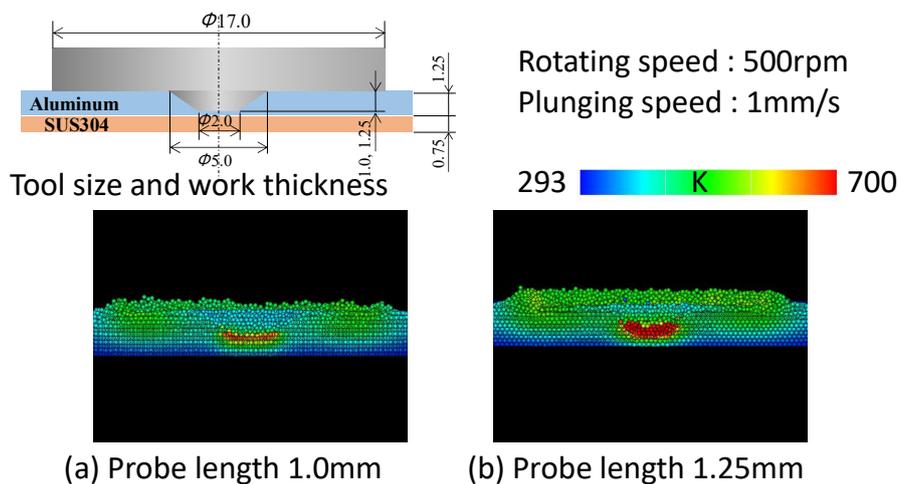
①- (iii) 異材接合プロセスのシミュレーション技術の開発 (阪大工学研究科分室、阪大接合研分室)

FSSW、RSW、LB、AB のシミュレーションモデルの構築を行った。RSW においては、接合面の形成過程をシミュレートするために、熱輸送現象の基礎モデルを構築した。①抵抗発熱、②ジュール発熱、③ローレンツ力、④熱伝導、⑤溶融、⑥流動、⑦凝固をモデルに組み入れ、粒子法を基盤としたシミュレーション手法を開発した。シミュレーション結果を図 III-2.7.15-13 に示す。通電開始後にアルミ合金が先に接触面から溶融し、さらに通電を続けると軟鋼が内部から溶融するという、実験結果と整合するシミュレーション結果が得られた。FSSW においては、接合面温度をシミュレーションにより計算した。その結果を図 III-2.7.15-14 に示す。プローブ長さを 0.25 mm 変化させて計算した結果、プローブ長さのわずかな違いが接合界面温度に大きな影響を与えていることが明らかとなった。また、LB では、流体解析ソフトウェア Flow-3D[®]

を用いて、アルミニウム合金ろう材を用いたアルミニウム合金と亜鉛メッキ鋼の

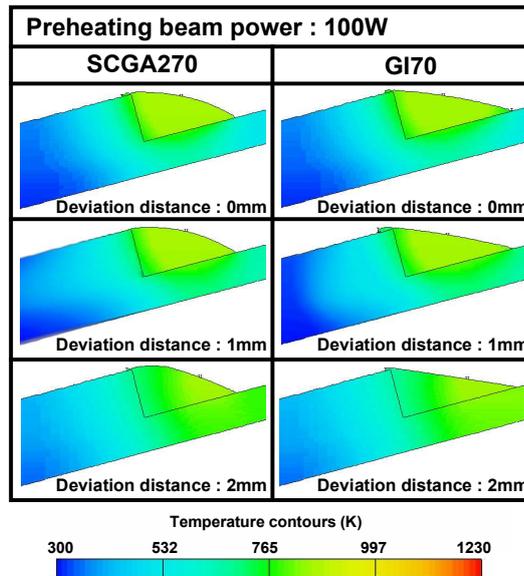


図Ⅲ-2.7.15-13 RSWにおける接合面の形成過程シミュレーション結果

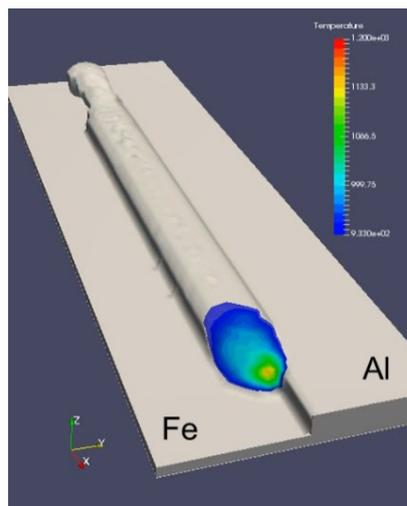


図Ⅲ-2.7.15-14 FSSWにおける接合面温度のシミュレーション結果

レーザブレイジング過程における溶融ろう材のぬれ・流れ性について解析した。図Ⅲ-2.7.15-15はGA鋼とGI鋼継手の溶融ろう材のぬれ・流れ挙動を比較したものである。予熱ビームの照射位置が変化しても溶融ろう材のぬれ・流れ挙動には大きな差異はないが、GI鋼継手はGA鋼継手に比べ、ぬれ・流れ性が明らかに優れることがわかる。この解析結果は実験結果とよく一致し、理論的解析によりビード形成挙動を予測できるものと判断される。ABにおいては、鉄／アルミニウム異材接合プロセスのシミュレーションモデルを開発した。図Ⅲ-2.7.15-16に示すような、下板が鉄、上板がアルミニウムとなる重ね継手に対してアルミニウムフィラーを用いてブレイジングするプロセスを想定し、実験条件をベースとして入熱量などを与えシミュレーションを行った結果、断面マクロ形状は実験結果と良好な一致を示した。また、界面における金属間化合物の成長に対して大きく影響する熱サイクルなどといったアウトプットを得ることができた。



図Ⅲ-2.7.15-15 溶融ろう材のぬれ・流れ挙動シミュレーション結果

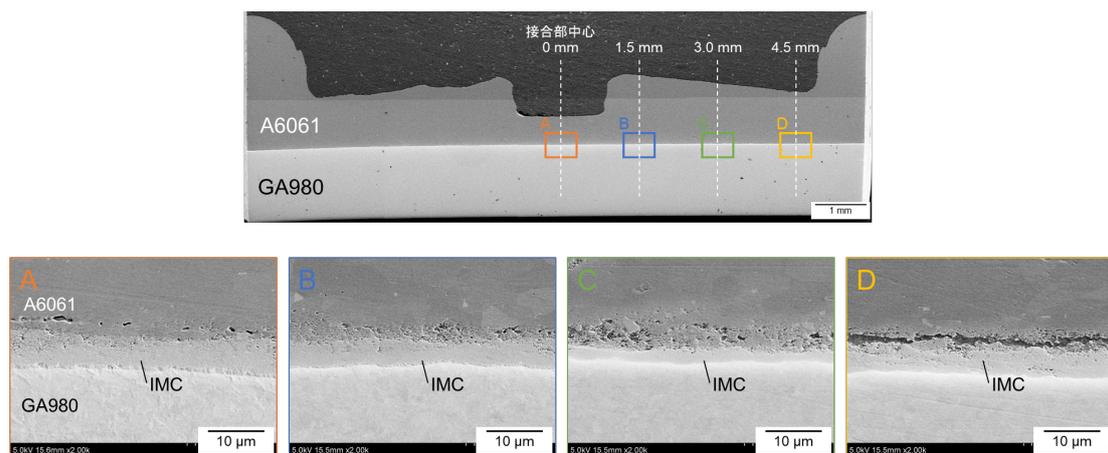


図Ⅲ-2.7.15-16 ABシミュレーション結果（表面温度分布）

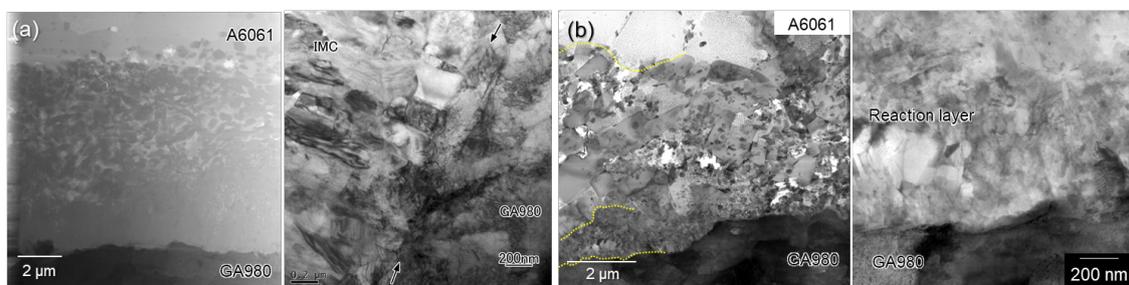
【テーマ②異材接合界面構造の評価・解析と強度発現機構の解明】②- (i) 接合界面構造、特性のナノレベル解析手法の開発（阪大工学研究科分室、阪大接合研分室、茨城大）

2019年度は異材接合界面における界面反応層、界面構造を原子レベルの分解能で解析する手法の確立を目的とした。具体的には、アルミニウム合金（A6061）と合金化溶融亜鉛めっき鋼(GA鋼)をFSSWおよびRSWにより作製した継手に対して微細構造解析を行い、その界面反応により界面に生成した反応相の形態、結晶構造、組成などの同定を行った。またこれらの解析を通じ、異種材料界面構造を原子・ナノレベルの分解能で解析する手法を確立した。

GA980/A6061-FSSW 接合継手に関して、図Ⅲ-2.7.15-17 に接合継手の界面反応層の組織変化を示す。接合部中央から端部にかけて界面反応層の厚さや形態の変化が認められた。各種異材接合部の特徴的な領域に対して、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) により HAADF 観察や高分解能観察、EDS による組成分析を行うとともに、各領域の組織を対比させた検討を実施した。図Ⅲ-2.7.15-18 に FSSW 接合した GA980/A6061 継手中央部および端部のナノレベル組織観察結果を示す。中央部の界面反応層では、上部と下部で反応相の形態が異なった (図Ⅲ-2.7.15-18(a))。反応層上部ではアルミニウム合金を示すコントラストの領域内に、棒状に成長した反応相がランダムに分布しているような形態になっていた。これに対し、下部では反応相を示すコントラストの領域が密に生成していた。IMC と鋼の接合界面では垂直方向に約 100~200 nm 幅、200~500 nm 長さの柱状の反応相が生成していた。一方、接合端部の界面反応層では中央部とは異なる組織が形成された(図Ⅲ-2.7.15-18(b))。反応層上部では粗大な反応相、下部では微細な反応相が形成した。中央部では上部のみの反応相周囲において反応相粒界に偏析した亜鉛が存在するのにに対し端部では全域に亜鉛が存在することが明らかとなった。



図Ⅲ-2.7.15-17 GA980/A6061FSSW 接合部の界面組織変化



図Ⅲ-2.7.15-18 GA980/A6061FSSW 接合部のナノレベル組織観察結果
(a)中央部 (b)端部

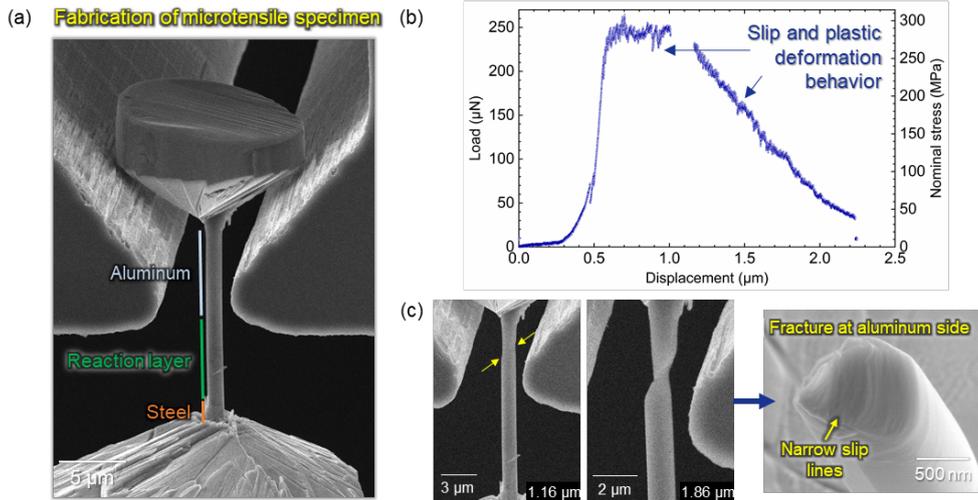
②- (ii) 強度発現機構解明 (トランススケール評価)、②- (iii) 異材接合界面構造に及ぼす接合プロセス条件の影響評価 (阪大工学研究科分室、量研、群馬大)

異材接合界面構造の評価・解析と強度発現機構の解明のため、異材接合部界面構造が接合部特性 (接合強度) に及ぼす影響の解明ならびに異材接合界面構造に及ぼす接合プロセス条件の影響評価を行った。前者については、界面反応層を含む異材接合部自体のマイクロスケール特性評価手法および界面反応層自体の物性評価手法を確立した。さらに、各評価とともに前述の異材接合界面構造のナノレベル解析と併せた検討によって界面構造と特性に関する新たな知見を得た。後者については、接合強度に及ぼす接合プロセス条件および界面に生成する金属間化合物層の影響を調べるとともに疲労強度と対応させた検討を行った。

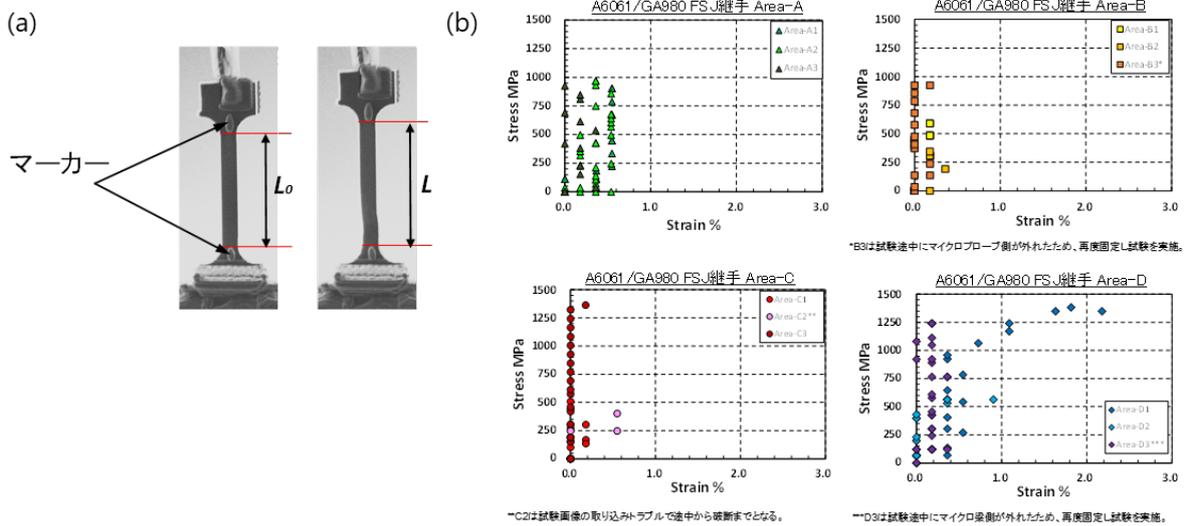
トランススケールでの異材接合部特性評価試験に関して、メゾ・マイクロスケール異材接合部観察・分析装置を用いた異材接合部特性評価手法を確立した。本手法では数 μm 以下の試験片を作製するとともに In-Situ SEM/FIB 内ナノメカニカル評価を行うことで異材接合部のマイクロスケール特性評価を行った。図 III-2.7.15-19 は異材接合材 A6061/GA980 継手の異材接合部に対するマイクロスケール特性評価結果を示す。図 III-2.7.15-19(a)には本研究で新たに構築した手法で作製した評価試験片に対して高分解能特性評価を始める様子であり、試験片は A6061/界面反応層/GA980 から構成される。図 III-2.7.15-19(b)に示すように、本手法により異材接合部のマイクロスケール引張挙動を高精度で測定することに成功した。また、図 III-2.7.15-19(c)に示すように、本試験において A6061 でのすべり変形による破壊過程を観測し、異材接合部における界面強度特性に関する重要な知見を得た。

界面反応層の物性評価に関して、集束イオンビームを用いた界面反応層物性評価手法 (超微小引張強度試験法) を確立した。本手法では SiC 製のカンチレバーに取り付けた超微小試験片の他端をタングステン細針に取り付け、針を一定ステップで引張試験を行う。カンチレバーの変位ならびにゲージ部の変化量を測定することで公称応力と公称ひずみの算出が可能になる (図 III-2.7.15-20 (a))。開発した超微小引張強度試験法を、図 III-2.7.15-17 に示した異材接合材 A6061/GA980 継手の異材接合部界面反応層の評価に適用し、技術の適用性を検討した。本結果より、総じて試験片ゲージ内部での破壊を呈し、今回用いた異材接合材に対しても試験技術の一定の適用性が確認できた (図 III-2.7.15-20 (b))。一方で、ひずみ計測の精度に関する技術課題が挙げられた。今後は、本材料に最適な更なるカンチレバーの最適化 (梁厚さの調整や梁材質の変更) を継続するとともに、予備検討で示された接合中心と端部での破壊挙動の違いについて、その有意性を含め微細組織観察等を通じて詳細について明らかにする。

以上に加え、本研究の A6061/GA980-FSSW 継手を研究対象として、接合強度および疲労強度を調査した。接合強度について抵抗スポット溶接部と比較したところ、引張せん断荷重は FSSW の方が抵抗スポット溶接よりも高くなるが、十字引張荷重では逆の傾向が見られた。疲労試験では、試験数は少ないものの、図 III-2.7.15-21 に示すように、 10^7 レベルの疲労寿命が得られ、前年度に評価したウェルドボンド接合部や FSSW 接合部と同レベルの S-N 線図が得られた。

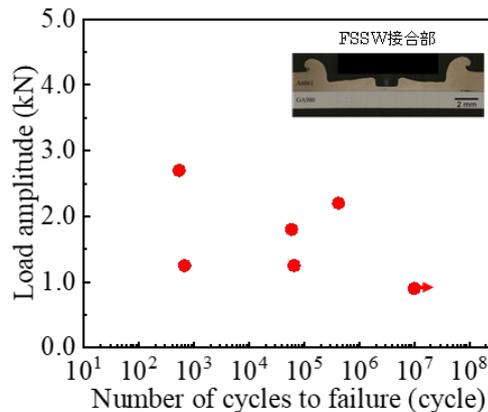


図Ⅲ-2.7.15-19 マイクロスケール異材接合部特性評価 (a) マイクロスケール試験片 (b) 高精度引張試験結果 (c) SEM 内引張過程観察結果および破面観察結果。



図Ⅲ-2.7.15-20 異材接合部の反応層に対する超微小引張試験 (a) 超微小引張試験片 (b) 摩擦攪拌点接合部の各領域に対して実施した超微小引張試験結果

Load amplitude (kN)	Number of cycles to failure (cycle)	破壊形態
2.7	535	界面破壊
2.2	420,090	A6061破断
1.8	59,086	界面破壊
1.25	672	界面破壊
1.25	65,703	プラグ破壊
0.9	10,000,000	



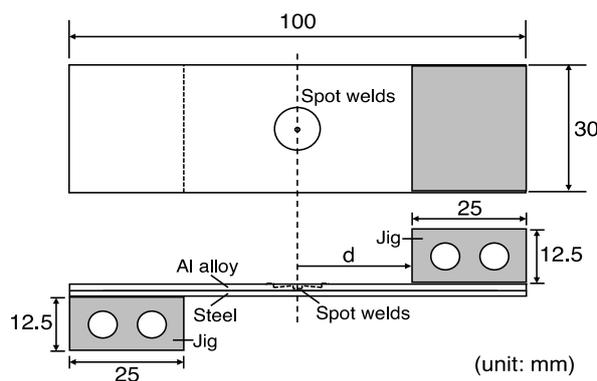
図Ⅲ-2.7.15-21 A6061/GA980 の FSSW 接合部の疲労試験結果と S-N 線図

【テーマ③異材接合継手の性能予測】③-(i)異材接合界面でのマイクロスケール変形・破壊挙動シミュレーション手法の開発（阪大工学研究科分室）

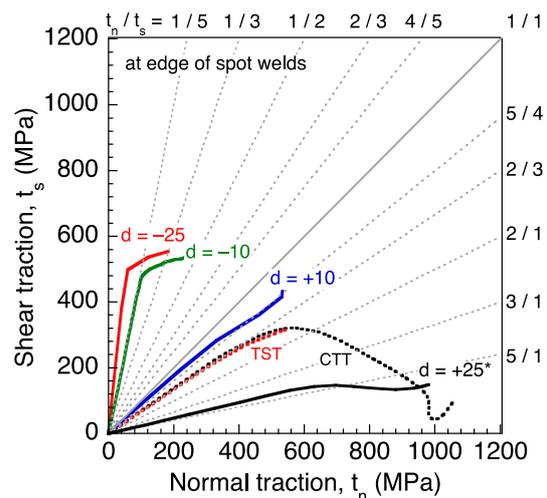
異種金属材料および異種材料の接合継手のマイクロスケールでの破断機構を解明するため、界面反応層および非接合材の弾塑性応答モデルに加え、接合界面の結合力モデルを混合した局所応力・ひずみ場の解析モデルを考案した。

③-(ii) トランススケールシミュレーションによる異材接合継手強度の予測手法の開発（阪大工学研究科分室、阪大接合研分室）

板厚 1.2mm の溶融亜鉛メッキ鋼（GI 板）と板厚 1.0mm の 6000 系アルミニウム合金 A6061 板の FSSW 継手の引張せん断試験結果及び十字引張試験結果の分析から、接合部端部における界面並びに被接合材であるアルミニウム合金における亀裂の発生・進展抵抗が継手強度を担っていることを明確にした。本結果に基づき、継手強度を数値シミュレーションによって予測するためのローカルマルチ破壊モデル（アルミニウム合金の延性損傷モデルと界面の結合力モデルの混合）を提案した。また、本提案破壊モデルを適用するための破壊クライテリオンを構築するため、任意の外力が作用する場合のマクロ強度特性予測に必要な材料特性を評価する試験法を考案した。これは、図Ⅲ-2.7.15-22 に示すように、異種金属の重ね板中央部を接合し（FSSW、RSW、接着など）、低強度材側の剛性を確保することも目的として取り付けた治具を介して引張りモードとせん断モードを任意に変化させることのできる試験方法として提案したものである。本試験片モデルに界面結合力モデルを導入して弾塑性 FEM 解析を行った結果、図Ⅲ-2.7.15-23 に示すように、接合端部界面に生じる応力状態を、純粋せん断応力状態から純粋引張応力状態に至る広範な組合せ応力状態を形成できる試験法であることが確認できた。これにより、界面破断挙動に及ぼす局所破壊クライテリオンを構築できることが期待できる。



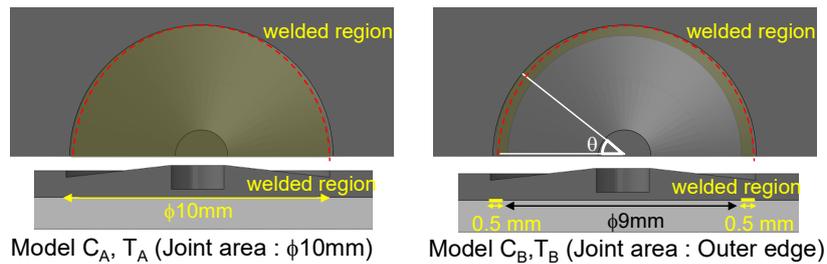
図Ⅲ-2.7.15-22 界面局所クライテリオンの評価試験手法図



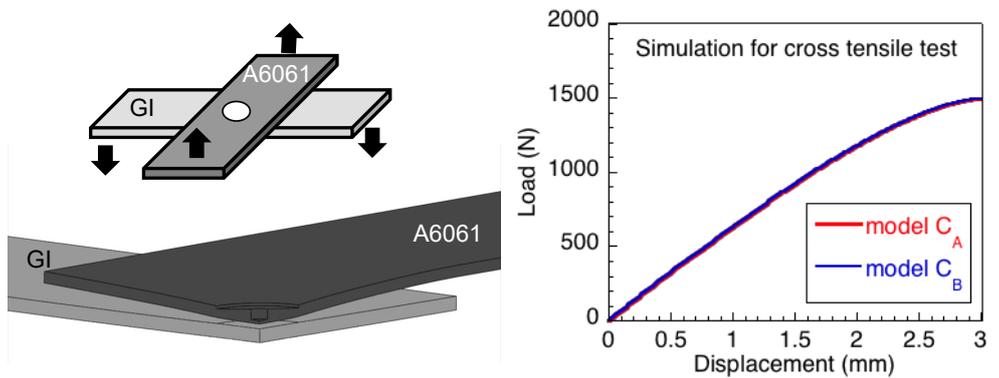
図Ⅲ-2.7.15-23 提案試験における接合部端部の応力状態

また、定量的な材料定数は上記試験から決定できるものであるが、仮定した材料定数を用いて、提案したローカルマルチ破壊モデルを弾塑性 FEM 解析ソフトに組み込み、

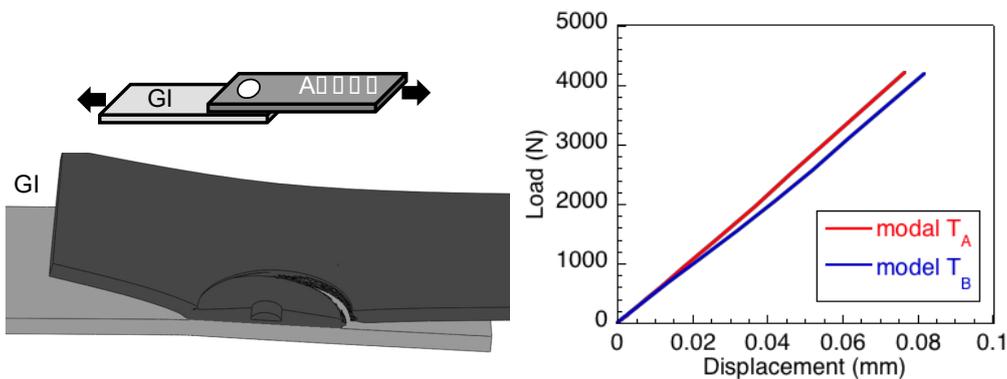
十字引張強度および引張せん断強度に及ぼす接合領域の影響についての数値シミュレーションを行った。解析対象の接合部モデルは図Ⅲ-2.7.15-24 に示すとおりであり、直径 10mm の円形領域が全て接合されている Model C_A, T_A と、同じく直径 10mm の円形領域の外周部 0.5mm の領域のみが接合されている Model C_B, T_B を対象とした。数値シミュレーションの結果を図Ⅲ-2.7.15-25 に示すように、円周部のわずか 0.5mm 領域しか接合されていない継手の十字引張強度は全面接合継手の強度とほぼ同じとなっている。せん断引張強度についても、全面接合継手の強度がわずかに高くなる傾向にあるがほぼ同じである。すなわち、十字引張試験および引張せん断試験のいずれにおいても円形領域の外周部での接合状況が継手強度を支配することが示された。



図Ⅲ-2.7.15-24 継手強度評価シミュレーションのための接合部の仮想モデル



(a) 十字引張解析



(b) 引張せん断解析

図Ⅲ-2.7.15-25 数値シミュレーションによる継手強度の及ぼす接合領域の影響解析

③- (iii) 異材接合継手の疲労強度予測手法の開発 (帝京大学)

MSE 法^{III-4)} (微粒子と水を混合したスラリーをノズルより圧縮空気にて霧状に高速噴射し、対象表面に衝突させてエロージョン摩耗を発生させる技術である) を用いた低侵襲余寿命予測法の適用性の基礎検証として、図 III-2.7.15-26、27 に示すように、自動車用構造材料 SPFC780Y の突合せ溶接部の曲げ疲労寿命予測に適用できることを実証した。さらに、アルミニウム合金 6061 と高強度鋼 (GA980 材) を摩擦攪拌点接合 (FSSW) した試験片に曲げ疲労試験を行い、未破断試験片と破断試験片に対する MSE 試験により非破壊的な継手の余寿命予測の可能性について示した。

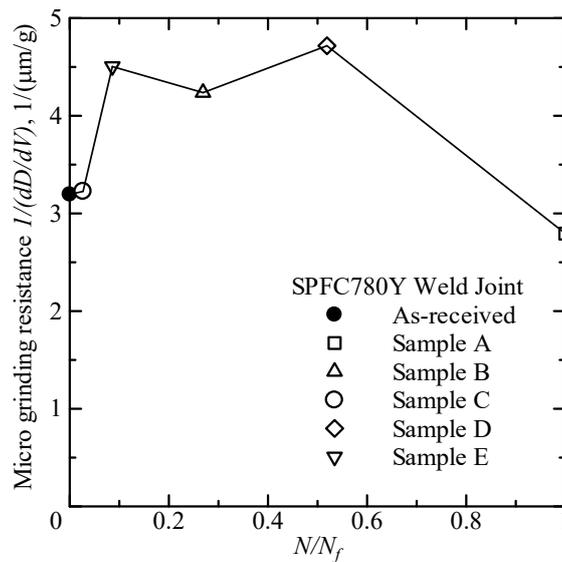


図 III-2.7.15-26 途中止め試験片の MSE 研削抵抗値の変化

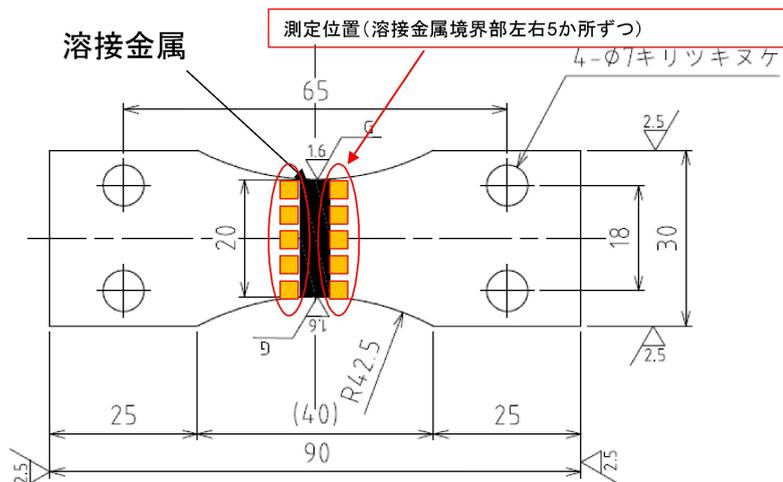


図 2.7.15-27 曲げ疲労試験に供した SPFC780Y 溶接継手

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.15-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	4	0	22	0	0	0	0	3	0
合計	4	0	22	0	0	0	0	3	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.15-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.16 [テーマ番号 64B] マルチマテリアル接合技術における継手性能データベースの構築

2.7.16.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車車体の組み立て工程においては、プレス板材、押し出し材、ダイキャスト材など、成形された材料を接合・接着技術を用いて合体し、部材を製造する。接合技術には、点および連続接合があり、それぞれ様々な接合方法が用いられており、接合条件によって、接合強度や耐久性が異なる。また接着技術では、接着剤の選択や表面処理方法などにより、その継手性能が支配される。

マルチマテリアル車体においては、超高強度鋼、高強度・高延性アルミ材、先進炭素繊維強化複合材の組み合わせ、つまり異種材料の接合技術の確立が必要不可欠である。そして材料の組み合わせと接合方法の選択は、構造設計と互いに補完関係にあり、部材に応じて最適な材料の組み合わせとともに、組み合わせに対応した、最適な接合技術の選定が不可欠である。さらに、それらの選定のためには、部材に要求される、接合強度や疲労強度といった耐久性などの継手性能を満足する必要がある。

本テーマでは、マルチマテリアル車体を設計・製作するために必要となる、材料の組み合わせ・接合技術に対応した継手性能をデータベース化し、エンドユーザがインターネット等を通して、アクセスできるシステムを構築することを目的とする。

なお、本テーマでは、異材接合の界面構造と強度発現機構の解明、車体構造設計や接合プロセス制御に適用できる異材継手の性能評価技術とシミュレーション技術の研究開発を目的とした「[テーマ番号 64]マルチマテリアル接合技術の基盤研究開発」と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。

(2)位置付け、目標値

① [テーマ番号 64]で扱う接合技術を対象とする継手性能の取得

[テーマ番号 64]で扱う接合技術である、超高強度鋼と高強度・高延性アルミ材との異材接合技術として、抵抗スポット溶接、FSSW により異材接合継手を作製し、接合強度、S-N 線図の取得、JASO 耐久試験（疲労試験）などを実施する。そして、超高強度鋼と高強度・高延性アルミ材との基材接合継手の性能をデータベース化する。

② 本プロジェクトの接合接着技術テーマの継手性能の収集

[テーマ番号 02]、[テーマ番号 63]、[テーマ番号 64]などにおける接合技術や[テーマ番号 53]における接着技術と連携し、高強度・高延性アルミ材と先進炭素繊維強化複合材料との異材接合技術、ならびに超高強度鋼と先進炭素繊維強化複合材料との異材接合技術として、FSSW、レーザ溶着、接着などによって異材継手を作製し、接合強度、S-N 線図の取得、JASO 耐久試験などを実施する。そして、高強度・高延性アルミ材と先進炭素繊維強化複合材料、ならびに超高強度鋼と先進炭素繊維強化複合材料との異材接合継手の性能をデータベース化する。

③ 継手性能データベース及び接合技術インテグレーション・システムのユーザインタフェースの構築

マルチマテリアル車体を設計・製作するために必要となる、材料の組み合わせ、接合接着技術・条件、継手性能のデータをデータベース化するための入出力のインターフェースを構築する。また、蓄積した性能データベースを用いて、未知の接合条件での性能評価予測を行う、接合技術インテグレーション・システムのアルゴリズムを構築し、一般ユーザが広く活用できるインターフェースを構築する。

表Ⅲ-2.7.16-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
[テーマ番号 64]で扱う接合技術を対象とする継手性能の取得		市中材による超高強度鋼/アルミ材の重ね異材接合継手の静的引張強度、ならびに S-N 線図取得のための疲労強度のデータを取得する。	本テーマで開発する革新材を用いた超高強度鋼/高強度・高延性アルミ材の異材接合・接着継手の機械的特性および腐食特性を取得する。	革新材を用いた異材継手の実用化に向けた机上検討にデータベースが必要
本プロジェクトの接合接着技術テーマの継手性能の収集		市中材によるアルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の静的引張強度、ならびに S-N 線図取得のための疲労強度のデータを取得する。	本テーマで開発する革新材を用いた高強度・高延性アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維強化複合材料の異材接合・接着継手の機械的特性および腐食特性を取得する。	革新材を用いた異材継手の実用化に向けた机上検討にデータベースが必要
継手性能データベース及び接合技術インテグレーション・システムのユーザインタフェースの構築		2020年度に取得する、市中材による超高強度鋼/アルミ材、アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の機械的特性をデータベースとして蓄積するための計算機システムを導入する。	蓄積した性能データベースを用いて、未知の接合条件での性能評価予測を行う、接合技術インテグレーション・システムのアルゴリズムを構築し、一般ユーザが広く活用できるインターフェースを構築する。	革新材を用いた異材継手の実用化に向けた机上検討にデータベースが必要

(3)全体計画

本研究テーマでは、本事業で開発する革新材（超高強度鋼、高強度・高延性アルミ材、先進炭素繊維強化複合材料）を活用したマルチマテリアル車体を設計・製作するために必要となる、材料の組み合わせ・接合技術に対応した継手性能をデータベース化し、エンドユーザがインターネット等を通して、アクセスできるシステムを構築する。全体計画の概要を、最終目標後の活動も含めて、表Ⅲ-2.7.16-2 に示す。

まず第三期中間目標として、本事業で開発を進めている接合技術を用いて作製する市中材による超高強度鋼/アルミ材、アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の継手性能を取得する。また、取得する継性能をデータベースとして蓄積する計算機システムを導入するとともに、取得されていない未知の接合条件で作製する異材継手の性能を推定するためのアルゴリズム、ならびにエンドユーザがアクセスするためのインターフェースの開発に着手する。

そして、2021年度より第三期最終目標である2022年度末までに、本事業で開発を進めている接合・接着技術を用いて作製する革新材による超高強度鋼/高強度・高延性アルミ材、高強度・高延性アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の継手性能を取得する。また、取得した継手性能をデータベースに蓄積するとともに、未知の接合条件で作製する異材継手の性能を推定するためのアルゴリズムを、機械学習機能を活用して高度化することで、接合技術インテグレーション・システムのアルゴリズムを構築する。さらに、エンドユーザがインターネット等を通して、アクセスするためのインターフェースを完成させる。

2023年度以降では、国内のみの限定であるが、マルチマテリアル車体を設計・製作するために必要となる、材料の組み合わせ・接合技術に対応した継手性能データベースを公開する。

表Ⅲ-2.7.16-2 全体計画

	2020	2021	2022	2023以降
①テーマ64で扱う接合技術を対象とする継手性能の取得	市中材による鋼材/アルミの重ね接合部の継手性能の取得	革新材による鋼材/アルミの重ね接合部の継手性能の取得		
		鋼材/アルミの重ね接合部の腐食特性の取得(接合・接着技術の複合化も含む)		
②本プロジェクトの接合接着技術テーマの継手性能の収集	市中材によるアルミ/CFRTP、鋼材/CFRPTの継手性能の取得	革新材によるアルミ/CFRTP、鋼材/CFRTPの継手性能の取得		
		アルミ/CFRTP、鋼材/CFRTPの腐食性能の取得(接合・接着技術の複合化も含む)		
③継手性能データベース及び接合技術インテグレーション・システムのユーザインタフェースの構築	未知の接合条件での継手性能の推定に向けた接合技術インテグレーション・システムの構築			公開可能データの開示(国内対象)
	データベースへの情報蓄積と入出力インターフェースの構築			公開可能データの開示(国内対象)

(4)実施体制

本研究テーマは、国立大学法人大阪大学（阪大接合研分室）にて研究開発を遂行する。

(5)運営管理

本事業で開発する革新材の研究事業（テーマ 02, 13, 27）、また同じく開発を進めている接合・接着技術の研究事業（テーマ 05, 53, 61, 63, 64）、ならびにデータベース構築のための異材継手を作製する事業者との定期的な技術検討会を、三ヶ月に一回の頻度で開催し、進捗確認および今後の検討方針や開発軌道修正について協議し、スケジュールに沿った研究開発運営を実施する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本テーマにより、革新材を用いた異材接合継手の性能がデータベースとして蓄積されるだけでなく、データベースとしては蓄積されていない未知の接合条件で異材接合継手を作製した場合の性能も予測可能になる。そのため、マルチマテリアル車体の設計において、既存の概念に縛られることのない車体設計も可能になると期待される。

2.7.16.2 研究開発成果（本テーマは 2020 年度より開始した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.16-3 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
[テーマ番号 64]で扱う接合技術を対象とする継手性能の取得	市中材による超高強度鋼/アルミ材の重ね異材接合継手の静的引張強度、ならびに S-N 線図取得のための疲労強度のデータを取得する。	超高強度鋼/アルミ材の重ね異材接合継手を作製するために、超高強度鋼の作製を外注するとともに、酸洗処理したアルミ合金を購入し、その静的引張特性評価を進めている。	△	
本プロジェクトの接合接着技術テーマの継手性能の収集	市中材によるアルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の静的引張強度、ならびに S-N 線図取得のための疲労強度のデータを取得する。	アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手を作製するために、超高強度鋼の作製を外注するとともに、酸洗処理したアルミ合金および先進炭素繊維複合材料を購入し、その静的引張特性評価を進めている。	△	
継手性能データベース及び接合技術インテグレーション・システムのユーザインタフェースの構築	2020 年度に取得する、市中材による超高強度鋼/アルミ材、アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手の機械的特性をデータベースとして蓄積するための計算機システムを導入する。		△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.16-4 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
[テーマ番号 64]で扱う接合技術を対象とする継手性能の取得	超高強度鋼/アルミ材の重ね異材接合継手を作製するために、超高強度鋼の作製を外注するとともに、酸洗処理したアルミ合金を購入し、その静的引張特性評価を進めている。	本テーマで開発する革新材を用いた超高強度鋼/高強度・高延性アルミ材の異材接合・接着継手の機械的特性および腐食特性を取得する。	当初案の通り、達成できる見込みである。
本プロジェクトの接合接着技術テーマの継手性能の収集	アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維複合材料の重ね異材接合継手を作製するために、超高強度鋼の作製を外注するとともに、酸洗処理したアルミ合金および先進炭素繊維複合材料を購入し、その静的引張特性評価を進めている。	本テーマで開発する革新材を用いた高強度・高延性アルミ材/先進炭素繊維強化複合材料、超高強度鋼/先進炭素繊維強化複合材料の異材接合・接着継手の機械的特性および腐食特性を取得する。	当初案の通り、達成できる見込みである。
継手性能データベース及び接合技術インテグレーション・システムのユーザインタフェースの構築		蓄積した性能データベースを用いて、未知の接合条件での性能評価予測を行う、接合技術インテグレーション・システムのアルゴリズムを構築し、一般ユーザが広く活用できるインターフェースを構築する。	当初案の通り、達成できる見込みである。

(3)研究開発の成果と意義

革新材を活用した異材接合継手性能データベースの構築に向けて、市中材による異材接合継手性能データベースを取得するために、市中材としては販売されていない超高張力鋼板の作製を外注し、7月末までに入手可能である。アルミニウム合金については、異材接合時の障害となる表面の酸化膜を酸洗した合金を購入し、その静的引張特性の計測を進めている。先進炭素繊維強化複合材料としては、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化複合材料ペレットを用いて、射出成形により炭素繊維強化複合材料板を作製し、その静的引張特性の計測を進めている。

これらの市中材の基礎的な機械的特性は、本テーマの最終目標である、未知の接合条件での異材継手性能評価の予測を行う、接合技術インテグレーション・システムのアルゴリズムを構築するための基礎データとして必要不可欠なデータである。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.16-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
合計	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.7.16-6 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
合計	—	—	—

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8 戦略・基盤研究

2.8.1 [テーマ番号 29] 新構造材料の技術・研究戦略

2.8.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、内外の技術動向や政策支援の調査、新しい技術の可能性調査（FS）、基盤研究など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。

(2)位置付け、目標値

各分野分科会（鉄鋼、非鉄、複合材料、接合、戦略・基盤）活動を通じた分野内（間）での関連情報の共有や協調課題の抽出、技術講演会等による最新情報の収集・共有、ISMA 独自の調査や再委託（テーマ 30、31、32）による技術動向調査や調査研究による新技術の創出や情報収集活動等により、プロジェクト内での関連情報の収集・共有を図ると共に、FS 研究の立案・ステアリング等研究戦略や研究の方向性への提案を策定する。表Ⅲ-2.8.1-1 に開発目標と根拠を示す。

表Ⅲ-2.8.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2017 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
新構造材料の技術・研究戦略	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。	同左	同左	プロジェクトにおいては、必要に応じて材料分野個別毎・分野横断的双方での研究課題・体制の見直しが不可欠であり、定常的な調査、およびそれに基づく研究戦略の策定が肝要である。

(3)全体計画

① 技術分野分科会活動

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分科会を開催し、定期的な各研究分野内での共通課題の抽出、講演会や勉強会を通じた関連情報（技術動向、新技術）の共有および方向性の議論を行う会議等を ISMA 本部が主催し実施する。戦略・基盤分科会では、専門委員各位の研究アクティビティの紹介や技術ヒアリング等でのアドバイスやセッションを通して各委員の専門知識・保有技術を分担研での研究開発に繋げていく。

② 技術動向調査

接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、複合材料について、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査する。調査は、ISMA 組合本部および外部専門機関等へ再委託して行う。特に、金属同士の接合およびその周辺技術に関しては、金属系材料研究開発センターに、欧米での高分子系複合材料、複合材料と金属の異材接合に関わる接着技術以外の要素技術、新規高分子材料等の技術動向については高分子学会に再委託（テーマ 30,31）して調査を行う。

③ FS 課題抽出・ステアリング委員会の開催

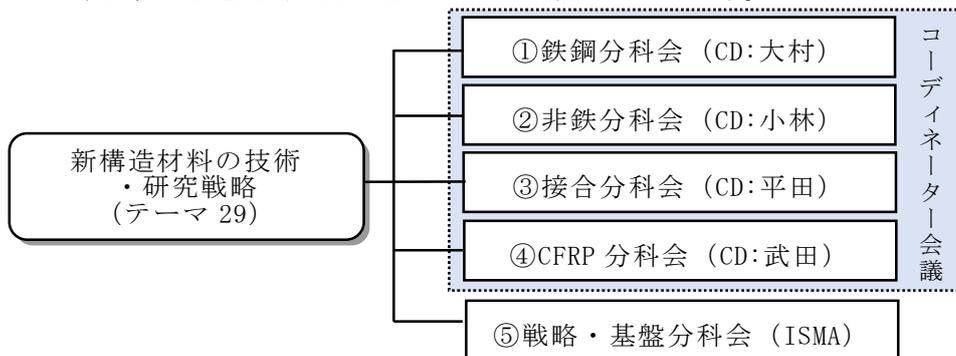
構造材料用接着技術および中性子線適用化技術について、各研究課題関係者や外部有識者からなる技術調査委員会を開催し、FS 研究の円滑な立上げに繋げる。

表Ⅲ-2.8.1-2 開発スケジュール

事業内容	2013 年度	2014 年度
① 技術分野分科会 1) 接合分科会 2) 鉄鋼分科会 3) 非鉄分科会 4) CFRP 分科会 5) 戦略・基盤分科会	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	→
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	
	技術ヒアリング、講演会等開催	
② 技術動向調査 構造材料・接合技術 (研究拠点・大学)		国内外技術動向調査
		→
③ FS 課題抽出・ステアリング委員会開催	課題抽出	中性子等量子ビームを使った構造材料解析技術に関する調査委員会
	課題抽出	構造材料用接着技術調査委員会
		→

(4)実施体制

分野分科会は、接合・個別材料分野毎にコーディネーター（CD）を配置し、コーディネーター先導のもと活動を実施している（図Ⅲ-2.8.1-1）。



図Ⅲ-2.8.1-1 分野分科会の実施体制

戦略・基盤分科会では、専門委員会を設置し、各構造材料分野の専門家の提言により個別材料の技術戦略指針の策定、実用化に向けた課題の抽出等を行っている。

表Ⅲ-2.8.1-3 戦略・基盤専門委員会委員

名前		所属機関	部署	研究課題
榎 学	材料WG	東京大学	大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授	「検査・診断技術－プロセスモニタリング/ヘルスマニタリング」
津崎 兼彰	材料WG	九州大学	大学院工学研究員 機械工学部門 教授	「革新的新構造材料－鉄鋼材料」
廣瀬 明夫	材料WG	大阪大学	大学院工学研究科 教授	「革新的新構造材料－接合プロセス」
伊藤吾朗	材料WG	茨城大学	工学部機械工学 教授	「革新的新構造材料－軽量金属材料」
新家光雄	材料WG	東北大学	金属材料研究所 教授	「革新的新構造材料－チタン材料」
北條正樹	材料WG	京都大学	大学院工学研究科 教授	「マルチマテリアル設計－複合構造」
渋谷陽二	構造WG	大阪大学	大学院工学研究科 機械工学専攻 教授	「マルチマテリアル設計－継手構造」
宇都宮 裕	構造WG	大阪大学	大学院工学研究科 教授	「マルチマテリアル設計－塑性加工」
香川 豊	構造WG	東京大学	大学院工学系研究科 教授	「材料と破壊の基礎科学－金属材料」
武田 展雄	構造WG	東京大学	大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授	「材料と破壊の基礎科学－複合材料」
横堀 壽光	構造WG	東北大学	大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 教授	「材料と破壊の基礎科学－金属材料」
志波 光晴	構造WG	物質・材料研究機構	材料信頼性評価ユニット 非破壊評価グループ グループリーダー	「検査・診断技術－接合部の非破壊評価」
小関 敏彦	材料WG	東京大学	副学長 大学院工学科 マテリアル工学専攻 教授	H26.9より参画
鳥塚 史郎	材料WG	兵庫県立大学	大学院工学研究科物質系工学専攻 教授	H26.9より参画

技術動向調査については、再委託（テーマ 30、31）と併行して主に欧州自動車業界、欧米の関連材料研究開発拠点等について、ISMA 本部において調査を実施した。

FS 課題については、各分野分科会で抽出された協調課題や ISMA 本部での提案による戦略的課題をテーマアップし、適宜 FS 研究の立上げや遂行のためのステアリング委員会を設置し、実施内容の十分な精査を行い、円滑な本研究スタートに繋げていく。鉄鋼分野より構造解析向中性子線利用技術を、接合分野より構造材料用接着技術を FS 課題としてテーマアップし、2015 年度より両テーマを FS 研究としてスタートした。両テーマに関しては、2013、2014 年度において課題の抽出、FS 研究としての立上げを行い、ステアリング委員会を設置した。

表Ⅲ-2.8.1-4、表Ⅲ-2.8.1-5 に 2015 年度各ステアリング委員会委員リストを示す。

表Ⅲ-2.8.1-4 中性子等量子ビームを使った構造材料解析技術に関する調査委員会委員

氏名	所属
大久保 雅隆	(国研)産業技術総合研究所 上席イノベーションコーディネーター
友田 陽	(国研)物質・材料研究機構
池田 進	高エネルギー加速器研究機構 大学・産業連携室
大竹 淑恵	(国研)理化学研究所 光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発グループ 中性子ビーム技術開発チーム
大沼 正人	北海道大学 大学院工学研究院
大村 孝仁	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略センター 構造材料ユニット
黒田 隆之助	(国研)産業技術総合研究所 軽量標準総合センター 分析計測標準研究部門
櫻井 健次	(国研)物質・材料研究機構 材料研究所 高輝度光解析グループ
篠原 武尚	(国研)日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン中性子セクション
鈴木 淳市	(一財)総合科学研究機構 東海事業センター 利用促進部
関戸 宣彰	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 構造材料ユニット 強度設計グループ
谷山 明	新日鐵住金(株) 技術開発本部 先端技術研究所
内藤 富士雄	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第2研究系
仲道 治郎	JFE スチール(株) スチール研究所
野中 秀彦	(国研)産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門
林崎 規託	東京工業大学 原子炉工学研究所
村上 俊夫	(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室
渡津 章	(国研)産業技術総合研究所 構造材料研究部門

表Ⅲ-2.8.1-5 構造材料用接着技術検討委員会委員

氏名	所属・役職
佐藤 千明	東京工業大学 精密工学研究所先端材料部門・准教授
西野 孝	神戸大学 大学院工学研究科・教授
岸 肇	兵庫県立大学 大学院工学研究科化学工学専攻・教授
原賀 康介	(株)原賀接着技術コンサルタント・専務取締役
岩田 奈緒子	トヨタ自動車(株) 材料技術開発部・部付
木村 隆嗣	三菱重工業(株) 技術統括本部総合研究所・主席プロジェクト総括
平野 啓之	東レ(株) 複合材料研究所・主任研究員
内藤 昌信	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター構造材料ユニット強度設計グループ・主幹研究員
堀内 伸	(国研)産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門電子顕微鏡グループ・上級主任研究員
秋山 陽久	(国研)産業技術総合研究所 機能化学研究部門スマート材料グループ・主任研究員
野中 秀彦	(国研)産業技術総合研究所 計量標準総合センター分析計測標準研究部門・部門長
山本 研一	マツダ(株) 先進車両構造研究部門車体アーキテクチャー・研究アシスタントマネージャー
長谷川 清	(株)本田技術研究所 四輪 R&D センター第9技術開発室4ブロック
山岡 弘人	(株)IHI 技術開発本部生産技術センター溶接技術部・部長

(5)運営管理

技術分野分科会は、鉄鋼分野：物質・材料研究機構大村氏、非鉄分野：産業技術総合研究所小林氏（2015年度からは吉澤氏）、接合分野：大阪大学平田教授、CFRP分野：東京大学武田教授に各分野コーディネーターを委嘱し、戦略基盤分科会は、ISMAにて取りまとめを行っている。定期的にコーディネーター会議を開催し、プロジェクト全体及び各分野内（間）の課題や研究の方向性についての整理や情報共有を行っている。

戦略・基盤分科会では、専門委員にプロジェクト内での技術ヒアリングや進捗報告等各種報告会において技術的な提言や助言を頂くと共に、各専門委員の研究アクティ

ビティおよび最新の関連技術情報等を分担研での研究開発へ反映すべく、毎月 ISMA 講演会（戦略・基盤技術）を開催して情報提供を行った。

FS 課題については、鉄鋼分野より構造解析向中性子線利用技術を、接合分野より構造材料用接着技術を提案し、2015 年度より両テーマを FS 研究としてスタートした。両テーマに関しては、2016 年度以降実施予定の本研究の実施内容の見極め等円滑な課題設定を図るべく、課題の抽出・立上げから FS 研究の実施に至るまで外部の専門家や実施者からなるステアリング委員会を設置して遂行している。

2.8.1.2 研究開発成果（本テーマは 2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施している）

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.1-6 に中間目標の達成度を示す。

表Ⅲ-2.8.1-6 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	研究開発成果	達成度 ※	原因・課題と解決 方針 ※未達の場合のみ
①技術分野分科会	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。	・共通課題として鉄鋼分野における中性子利用等の先端計測技術、非鉄分野における分析技術・シミュレーション技術、接合分野における異材接合向接着技術等を提案した。 ・戦略基盤分科会専門委員各位の研究アクティビティの紹介を ISMA 講演会として毎月開催し、情報提供を行った。	○	
②技術動向調査		モーターショー（@ジュネーブ&パリ）、ダイムラー、BMW、ミュンヘン工科大学、シュツットガルト大学や米国 DOE プロジェクト受託機関等欧米における自動車軽量化技術、特に新規材料開発に係わる研究機関やメーカーを訪問し、最新の情報を収集した。	○	
③FS 課題抽出・ステアリング委員会開催		構造解析向中性子線利用技術および構造材料用接着技術を新規 FS 課題としてテーマアップし、2015 より FS 研究としてスタートした。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、2014年度で終了し、2015年度よりテーマ番号41から45に再編して実施した。

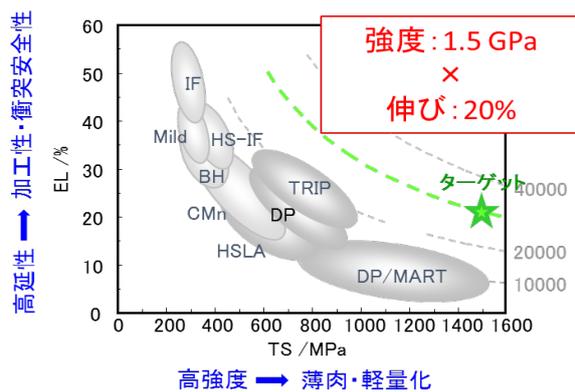
(3)研究開発の成果と意義

①技術分野分科会活動

各分科会において、まずは各分野内で協調して検討が可能な研究課題につき審議を行った。その結果、鉄鋼分科会、接合分科会、非鉄分科会において下記に示す候補課題を抽出した（CFRP分科会は、2015年度に協調課題の抽出を行った）。

まず、鉄鋼分科会では、競争領域と協調領域の洗い出しを行い、さらに協調課題の深堀を行いFSとして実施すべき技術課題の抽出を行った。中高温域での新たな材料組織挙動に関する定量データの取得がキーポイントであるとの結論を得、そのためのキーテクノロジーとして中性子線を利用した構造解析技術がFSとして適切であるとの結論が得られた。

自動車用薄鋼板等の強度・靱性バランス向上



(1) 組織制御技術開発

- ・軽元素の有効利用による粒界強化
- ・ γ - α' 複相形態制御による複相化
- ・残留 γ 中炭素量の高度制御による強靱化

競争課題



鉄鋼材料におけるレアメタル年間消費量の割合
(2008年 日本金属学会)

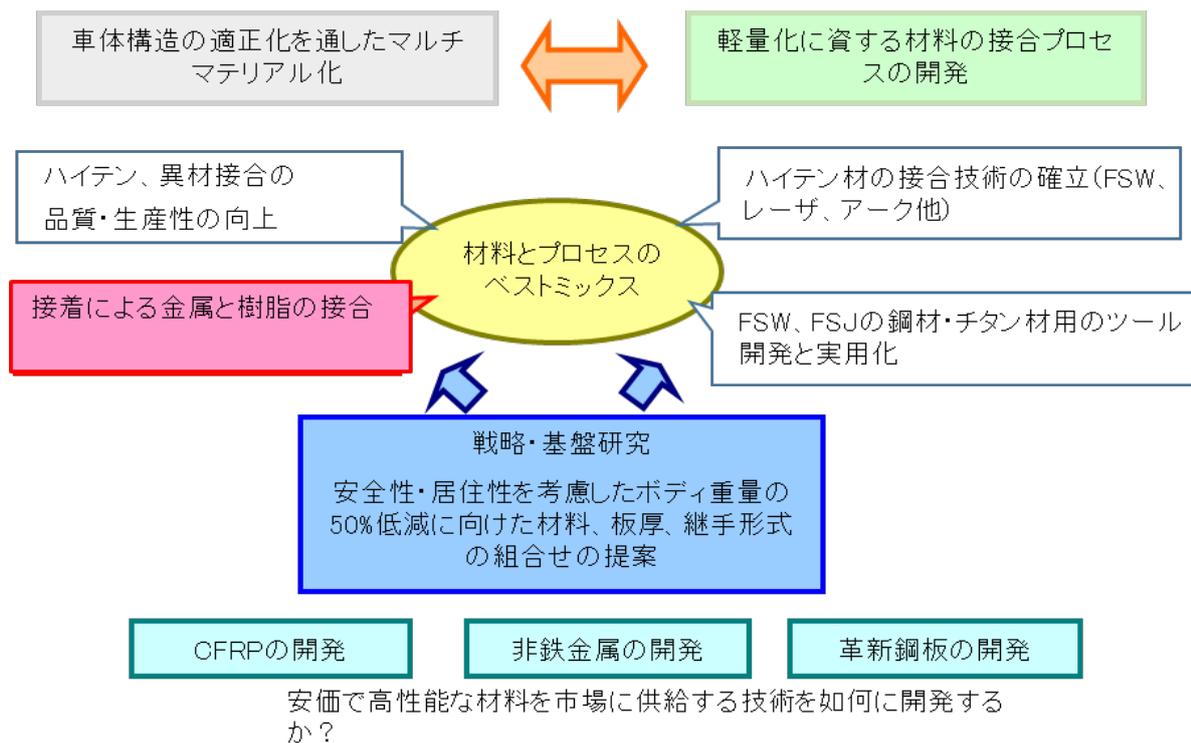
(2) 機構解明技術開発

- ・高温プロセス中その場組織観察
- ・変形中その場組織観察
- ・軽元素の濃度分析精度向上

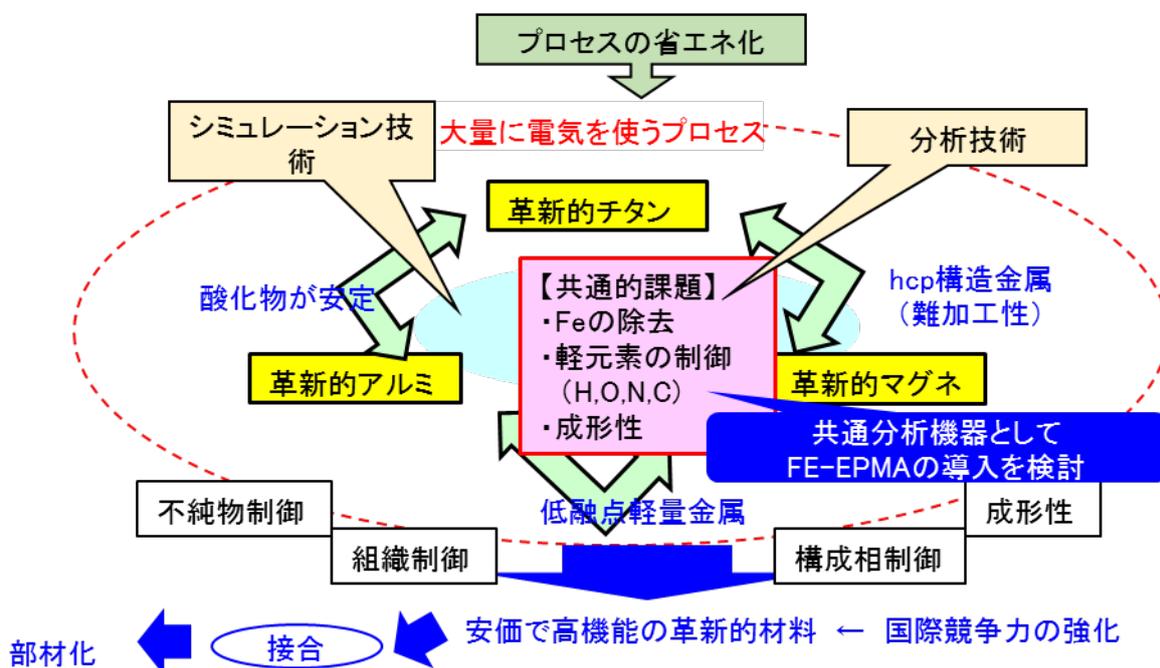
協調課題

図 III-2.8.1-2 協調課題の抽出（鉄鋼分科会）

接合分科会では、マルチマテリアル化においてキーとなる異材接合への対応として、特に被接合材が CFRP の場合に有効と考えられる接着技術を協調課題としてテーマアップした。



図Ⅲ-2.8.1-3 協調課題の抽出 (接合分科会)



図Ⅲ-2.8.1-4 協調課題の抽出 (非鉄分科会)

非鉄分科会では、チタン、マグネシウム、アルミニウム各材料において低コスト成形プロセスを確立する上での共通的な課題として、1) 不純物 (Fe) の除去、2) 軽元素 (H,O,N,C) の制御、3) 成形性の改善が抽出された。これらの課題に協調して取り

組む手段としてまずは、FE-EPMA 等による分析技術を確立していくことが必要であるとの結論を得た。

以上各分科会での審議により、技術分野毎に協調課題の抽出が行われた。この検討結果を基に後述するように新たに FS 研究としての課題を抽出することとした。

戦略・基盤分科会では、各専門委員の研究アクティビティや最新の関連技術情報を紹介する ISMA 講演会（戦略・基盤研究）を開催している（平成 26 年度から毎月開催）。講演会では、技術情報の深堀と分担研での研究開発の課題解決の足がかりとすべく、講演者である専門委員と参加者（組合関係者）との議論の時間を十分に取らながら進めた。

表Ⅲ-2.8.1-7 ISMA 講演会（戦略・基盤研究）

	講演者	所属	演題
1	武田 展雄	東京大学大学院新領域創成科学研究科	革新複合材構造の知的生産科学の構築に向けて
2	志波 光晴	物質・材料研究機構非破壊評価グループ	非破壊材料信頼性評価
3	津崎 兼彰	九州大学大学院工学研究院機械工学部門	高 Mn オーステナイト鋼の機械的特性：引張強さ・疲労・水素脆化
4	廣瀬 明夫	大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻生産科学コース	鋼と軽合金の異材接合
5	鳥塚 史郎	兵庫県立大学大学院工学研究科	1500MPa-20%の可能性を予感させる 5Mn 微細ヘテロ組織鋼
6	榎 学	東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻	先進 AE 手法によるマテリアルプロセスモニタリング

②技術動向調査

外部機関への委託調査以外に ISMA 本部にて独自に技術動向調査を行っている。国内外の自動車メーカー、欧米の公的研究機関およびナショナルプロジェクト実施機関を主な調査対象（キーワード：自動車、軽量化、材料開発）とし、ベンチマーキングをする上で今後定常的な情報収集が必要となる地域、機関を特定していく予定である。図Ⅲ-2.8.1-5、図Ⅲ-2.8.1-6、図Ⅲ-2.8.1-7 にトピックスを示す。

「自動車用車体のマルチマテリアル化技術動向調査～欧州自動車業界調査～」

1. 調査の内容

- (1) 欧州自動車メーカーの製品開発の方向性
- (2) 将来の材料・製造技術に対するシーズ技術に関する調査

対象となる技術・材料分野は、

- i 「自動車メーカーによるマルチマテリアル化車体技術の現状」
(鋼材/鋼材、鋼材/Al材、鋼材/Mg材、鋼材/CFRP等、AL材/CFRP等)
- ii マルチマテリアル車体構造の開発方向
- iii マルチマテリアル/モジュール化車体の製造技術

2. 今回の欧州訪問で対象とする団体や学会

自動車会社(Daimler AG, BMW Group)および関連技術博物館

- ① 材料技術(シュツツガルト大学、ミュンヘン工科大学)
- ② バイエルン州のプロジェクト(MA.I Carbon)の調査

3. 調査のアウトプット

欧州での自動車マルチマテリアル化の技術開発の方向性を確認し、2020年燃費規制に実装されるべく、自動車車体の軽量化に最も有効と考えられる軽量構造材料の部品適用技術(素材技術、異種材料適用技術、構造設計技術、成形加工技術)のレベルを把握して行く。

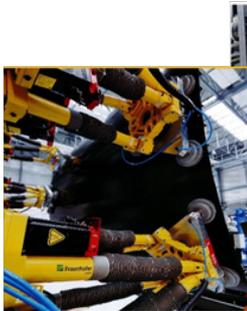


図 III-2.8.1-5 技術動向調査 (欧州自動車業界)

ドイツフラウンホーファー研究機構IFMA訪問

『StadeフラウンホーファーIFAMの概要』

- ・Stade市のR&Dセンターの中には有名なDLR(ドイツ航空宇宙研究所)があり、近くには欧州最大の航空機メーカーのエアバスの工場と研究施設、化学大手のDAWケミカルの工場などがあり、また直ぐ隣には私立の工業大学もあり、これらの企業や大学とうまく協力しながら研究開発を進めているとのことであった。
- ・Dr.Niermannが現在行っている航空機用の構造材料の自動化と製造技術に関する研究は、正式には2014年からスタートしている。CFRP製機体の加工・組立て工程を完全に自動化することを目的としており、そのため飛行場の格納庫に近い巨大な建物とその中に実物大の機体がすっぽり入る規模の組み立てユニットが設置されていた(写真参照)。
- ・この完全自動化が実現すれば、飛躍的なコストダウン(工期短縮)が可能になるとのことであり、Dr.Niermannはかなりの自信を持って研究開発を進めていた。



軽量構造体の新型支持装置



CFRP大型部材用形状・位置制御装置、加工用ロボット



機械加工棟(14m×9m×7m)と高精度機械加工ロボット

図 III-2.8.1-6 技術動向調査 (欧州研究機関)

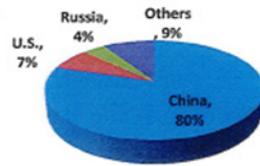
米国DOE自動車軽量化プロジェクト（各材料の目標達成時の軽量化率と残存課題）

Magnesium Alloys

When it "works" → 40-70% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$3-10/lb-saved)

- Lack of domestic supply, unstable pricing
- Challenging corrosion behavior
- Inadequate strength, stiffness, and ductility
- Difficult to model deformation behavior



Aluminum Alloys

When it "works" → 25-55% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$2-8/lb-saved)

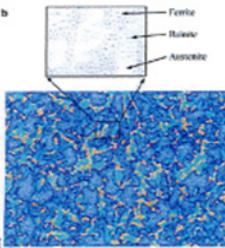
- Insufficient strength in conventional automotive alloys
- Limited room temperature formability in conventional automotive alloys
- Difficult to join/integrate to incumbent steel structures



Advanced High Strength Steel

15-25% weight reduction →

- Inadequate structure/properties understanding to propose steels with 3GAHSS properties
- Insufficient post-processing technology/understanding
- What other relevant properties should be considered? Hydrogen embrittlement, local fracture, etc.



Choi et. al., Acta Mat. 57 (2009) 2562-2504

Carbon Fiber Composites

When it "works" → 30-65% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$5-15/lb-saved)

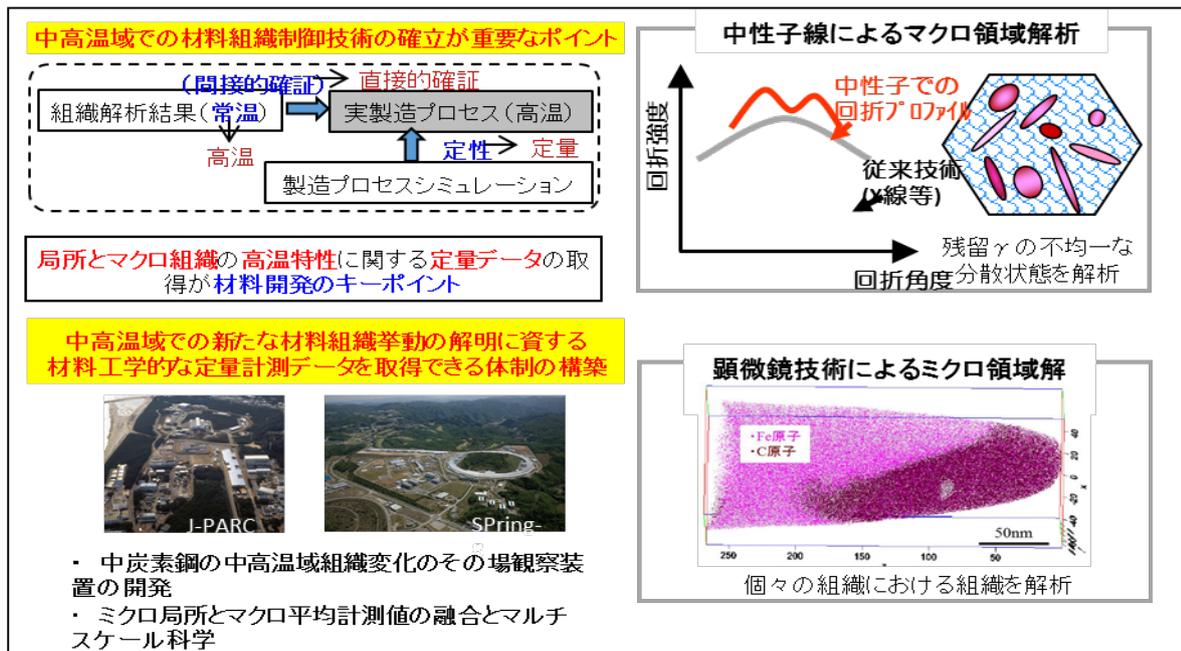
- High cost of carbon fiber (processing, input material)
- Joining techniques not easily implemented for vehicles
- Difficult to efficiently model across many relevant length scales



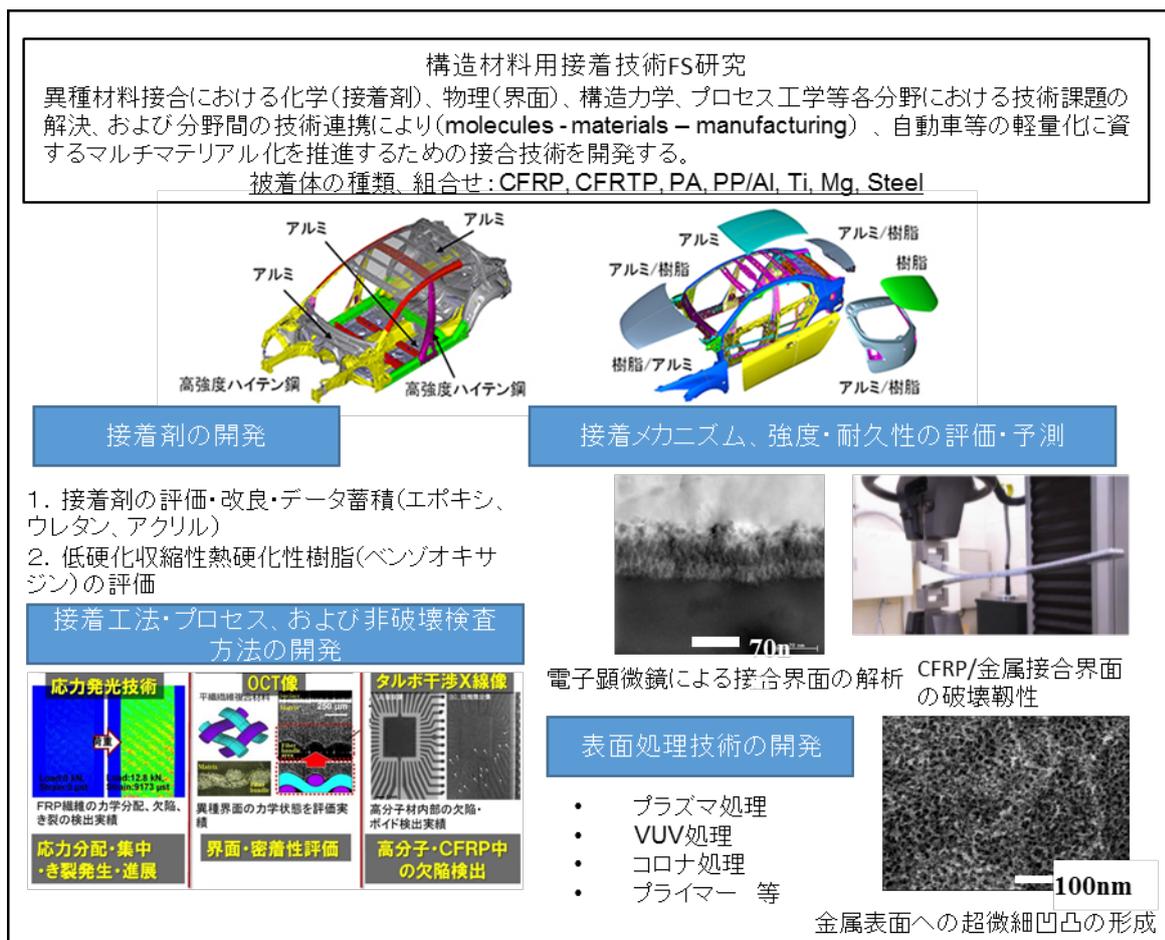
図Ⅲ-2.8.1-7 技術動向調査（米国 DOE プロジェクト）

③FS 課題抽出・ステアリング委員会開催

上記（3）. ①技術分野分科会活動において協調課題の抽出を行い、その中から課題の喫緊性、分野間への展開可能性等を鑑みて、2015年度より中性子線利用技術（鉄鋼）と接着技術（接合）をFS研究としてスタートすることとした。課題の概要を図Ⅲ-2.8.1-8、図Ⅲ-2.8.1-9に示す。



図Ⅲ-2.8.1-8 電子線・中性子線等の活用によるマクロ・マイクロ組織定量化



図Ⅲ-2.8.1-9 構造材料用接着技術

これら FS 研究は、2015 年度に研究課題を絞り込み、2016 年度以降予定している本研究に向けた実施内容の提案を行う。また、前記ステアリング委員会を設置し、研究進捗の確認、市場ニーズとの整合性、海外技術動向調査によるベンチマーキング等を通して本研究に向けた課題の絞り込みの精査を行う。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.1-8 論文、外部発表等の件数（内訳）

【2015年3月末現在】

区分	論文		その他外部発表				展示会への出展	受賞	フォーラム等*
	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	プレス発表	その他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.1-9 特許の件数（内訳）

【2015年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願*
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.2[テーマ番号 30] 技術動向調査分析

2.8.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

【2013、2014 年度】

革新的新構造材料等研究開発に係る接合技術や構造材料の技術開発の現状および今後の動向について調査・分析を行い、関連技術開発の最新の状況を把握すると共に、今後の方向性を分析し、本プロジェクトの研究開発成果の適用先探索や今後取るべき方針や戦略の構築に有益な情報を提供することを目的とする。

【2015 年度】

革新的新構造材料等研究開発に関する技術分野の中で「金属材料の接合技術および周辺領域」を中心に重要技術課題に関する詳細な調査を実施し、関連技術の最新状況を把握すると共に、今後の方向性を分析し、本プロジェクトの研究開発成果の適用先探索や今後取るべき方針や戦略の構築に有益な提言を行うことを目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2017 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
技術動向調査	金属同士の接合技術の第二中間目標達成に関する提言	(本事業後期 5 年計画の技術開発戦略策定への提言)	(次期プロジェクトとロードマップ策定への提言)	

(3)全体計画

2013 年度は、調査分野を下記 4 分野として実施した。

- A：接合技術(金属材料同士)
- B：接合技術(金属材料／CFRP)
- C：CFRP(特に自動車用、熱可塑性)
- D：金属材料(鉄鋼、チタン、アルミ、マグネシウム)

2014 年度は、上記 A、B、C の 3 分野について、2013 年度に実施した上記の広範囲な調査結果に基づいて抽出された重要技術に関して、その内容の詳細を調査すると共に、実用化の進行状況と課題について明らかにする。また、2013 年度において調査した内容について、調査対象期間に関して直近 1 年間を追加して最新情報の調査を実施した。また、一部特定課題についても調査を実施した。

2015 年度は革新的新構造材料等研究開発事業における「金属材料の接合技術および周辺領域」に関する技術課題の調査を実施する。金属材料同士の接合技術とその構成材料等の周辺技術を対象を絞り、2014 年度に実施した重要課題に関する詳細な調査結果をベースに、本プロジェクト内外の研究機関やメーカーの専門家から技術開発と実用化の状況に関する意見聴取を行い、当該分野の今後の技術開発の方向性に関するまとめと提言を行う。

(4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が 1 機関に必要な研究開発を再委託して実施する。

(5)運営管理

3 ヶ月程度毎に ISMA、NEDO、METI への進捗報告を行い、討議を実施した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

入手した技術情報を整理すると共に、進捗報告と提言により ISMA 技術企画部他への結果のフィードバックを行い、研究開発の方向性の確認や見直しに活用された。

2.8.2.2 研究開発成果（本テーマは 2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.2-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	研究開発成果	達成度 ※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
技術動向調査分析	金属材料同士の接合技術および周辺技術の調査と技術開発の方向性・戦略に関する提言 (第二中間目標達成に関する提言)	金属材料同士の接合技術、金属材料/CFRP、CFRP 材料(熱可塑性)について重要課題を抽出すると共に技術開発のベンチマークを実施。 (2013,2014 年度)	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した。

(3)研究開発の成果と意義

①技術調査対象分野と調査方法

技術動向調査は 2013 年度と 2014 年度は、表Ⅲ-2.8.2-3 に示す分野およびテーマについて実施した。また、調査方法としては、表Ⅲ-2.8.2-4 に示すように特許・文献による調査に加え、学協会・講演会等への参加や国内関係先へのヒアリング等により調査を実施した。

表Ⅲ-2.8.2-3 技術調査分野とテーマ

分野・テーマ	H25年度	H26年度
1. 接合技術(金属材料同士)	◎	◎
2. 接合技術(金属材料/CFRP材料)	◎	◎
3. CFRP材料(特に自動車用、熱可塑性)	◎	◎
4. 構造用金属材料(鋼板、チタン、アルミニウム、マグネシウム)	◎	
「軽量化を目的とした自動車のマルチマテリアル化の現状」		◎

表Ⅲ-2.8.2-4 技術調査方法

1. 特許調査:用途、対象期間を特定して他の調査と重複を回避
2. 文献調査:重要課題抽出→技術レベルのベンチマークを実施
3. 学協会関係の調査(関連学協会のロードマップ調査含む)
4. 専門家へのヒアリング

以下、金属材料同士の接合技術、金属材料／CFRP 材料の接合技術および CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)、構造金属材料分野について、成果の概要を記述する。

②金属材料同士の接合技術

金属-金属接合としては、従来から多くの種類の接合方法が存在するが、本プロジェクトがターゲットとしている自動車の軽量化の目的においては、特に高強度・高性能材料の接合および異材接合時の接合継手強度の確保が極めて重要となる。この2つの目的に合致する接合方法としては、接合時に溶融部が生成しない固相接合法が適している。固相接合法として近年特に注目されているのが摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）である。また、最近ではFSWの点接合技術に応用させたFSSWや表面改質プロセスに応用させたFSPについても注目されている。

FSWは英国のTWIにおいて発明された技術であり、Al合金やMg合金等に関して、既に電車車両や自動車用途において実用化が達成され、工業的にも確立された技術となっている。また、FSWは日本国内で権利化されていたTWIの基本特許2件が2015年1月に有効期間満了となり、その点からも今後発展が加速する可能性がある。

一方の鉄鋼材料やチタン合金のような高融点金属やそれとの異材接合に関しては、未だ工業的には技術が確立されていない。図Ⅲ-2.8.2-1に調査結果から得られたハイテン材同士およびハイテン/Al合金のFSW継手の引張強さを示す。ハイテン同士の接合技術に関しては、研究開発段階のデータではあるが、980MPa級までは母材と同等の継手強度が得られているが、それ以上の強度になると母材強度を下回っている。また、ハイテンとAl合金の接合においてもAl合金が高強度である6000系等のAl合金の場合には母材と同等の強度は得られていない。

また、高融点金属の FSW 技術の確立においては、低コストで耐久性に優れたツール用材料の開発が重要な鍵を握っている。FSW に関する今後の重要な課題として、次の 3 点が挙げられ、これらの課題は同時に本プロジェクトの中でも積極的に取り上げて開発すべき課題である。

- 高強度材接合や異材接合における強度不足、
- ツール材料の耐久性向上と低コスト化
- ツール寿命評価手法確立と寿命支配因子解明

2015 年度における技術調査は「金属材料同士の接合技術およびその周辺技術」を中心に実施しており、FSW については上記の課題に関係する研究および技術開発の現状と課題克服の可能性について検討する予定である。一方、FSW 以外にも MAG 溶接やレーザー溶接等の従来からある各種接合技術についても、本プロジェクトの用途に係わる分野への適用に関する開発状況についても併せて調査を進めている。

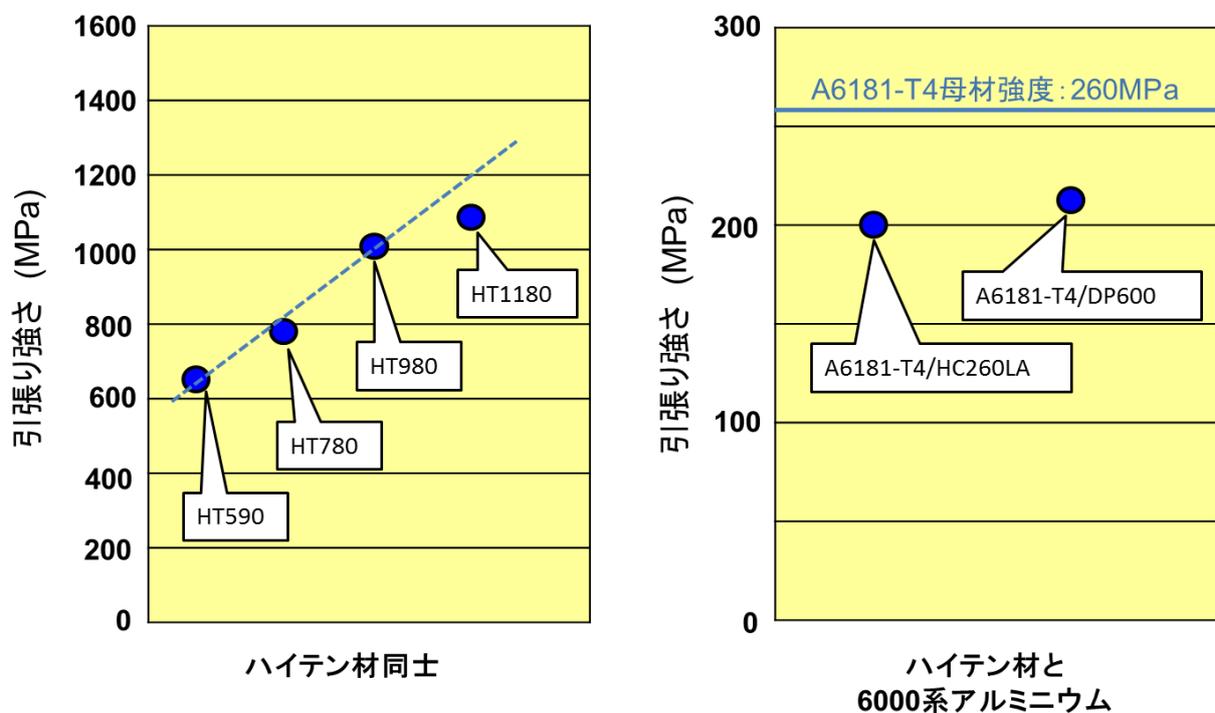


図 III-2.8.2-1 ハイテン材同士およびハイテン/Al 合金の FSW 継手の引張強さ

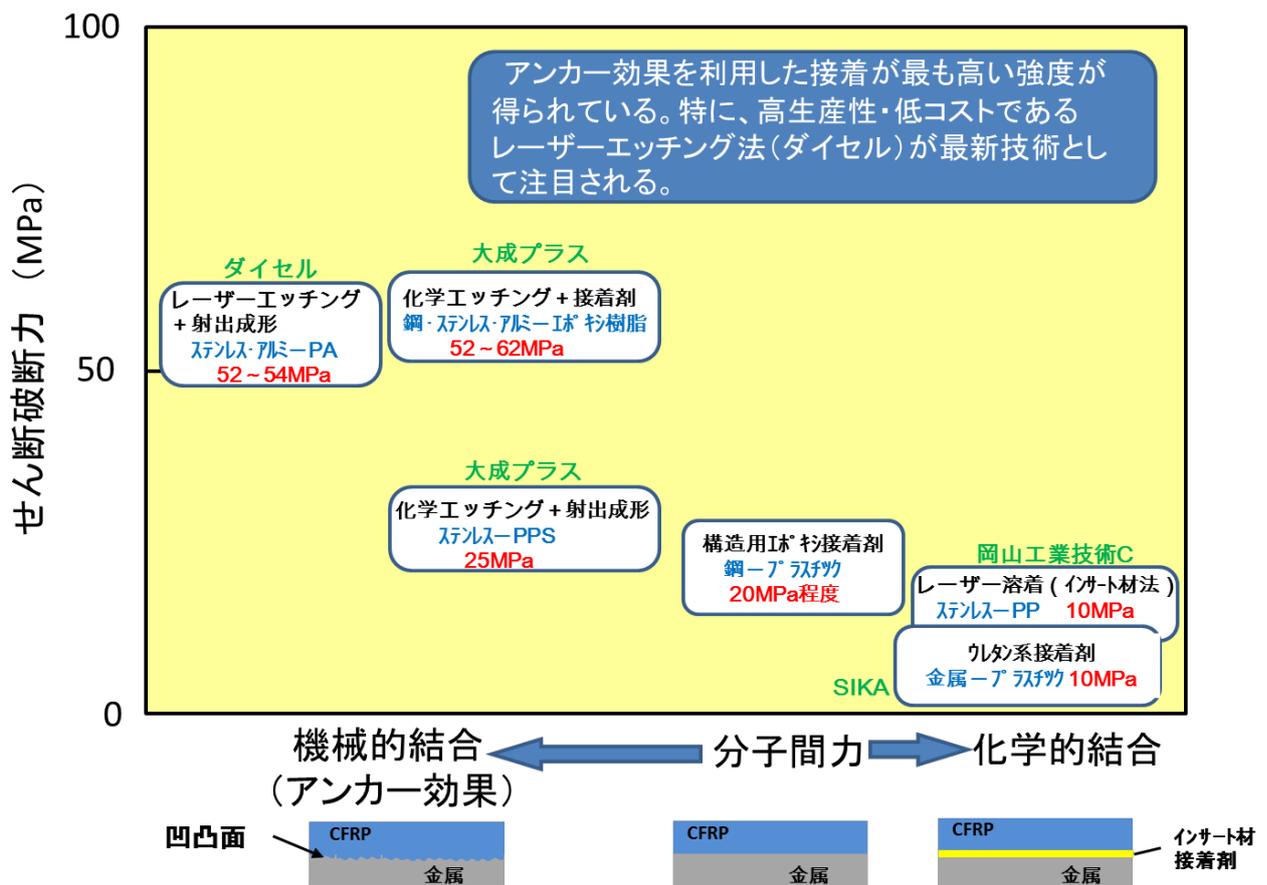
③金属/CFRP 材料の接合技術

金属/CFRP 材料の接合に関する将来技術としては、「高信頼性接着」および「熱影響の小さい溶着技術」が挙げられる。接着・溶着いずれも金属と樹脂（接着剤、インサート材含む）の界面の結合形態が重要となる。一般に通常の接着・溶着は分子間力結合であるが、結合力は小さい。これに対し、界面に凹凸を付与しアンカー効果によって結合力を向上させる方法と、極性基を付与して化学的に結合力を向上させる方法が挙げられる。それぞれの結合形態と得られる接合強度（せん断破断力）との関係を図 III-2.8.2-2 に示す。

アンカー効果を利用した接合が最も高い接合強度が得られている。これに対し、化

学的結合では極性基を付与することにより接着剤もしくはインサート材そのものの強度がネックとなり、接合強度は低くなっていると考えられる。

アンカー効果のための凹凸面付与方法として、高生産性・低コストであるレーザーによるエッチング法（ダイセル）が最新技術として注目される。レーザー等を用いた「熱影響の小さい溶着」とアンカー効果との組み合わせが一つの有力な手段になると考えられる。



図Ⅲ-2.8.2-2 金属/樹脂（接着剤・インサート材含む）界面の結合形態とせん断破断力

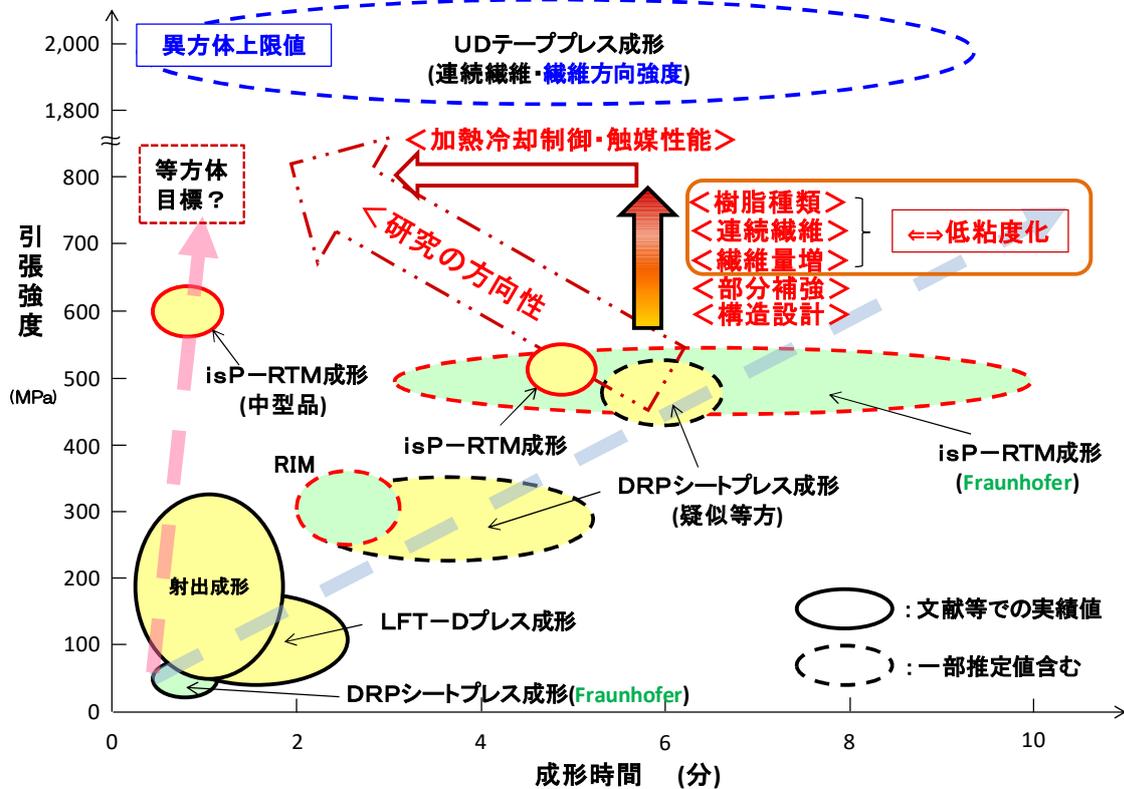
④CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)

熱可塑性 CFRP (CFRTP) に関する調査の主な内容は、「成形時間と CFRTP の強度 (引張強度主体)」であり、両者の関係を図Ⅲ-2.8.2-3 に示す。

一般に LFT-D 成形法や DRP 成形法は不連続繊維（短繊維・長繊維）を使用し Vf が 30%程度であるため、CFRTP の引張強度は高くはない。一方、isP-RTM 成形法は、連続繊維を使用するため、引張強度は高い。成形時間では、LFT-D 成形法は短時間成形が可能である。また、isP-RTM 成形法は低粘度のモノマー（熱可塑性樹脂粘度の 1/1000 程度）を重合させて使用するため、1 分程度の成形が可能である。

短時間成形かつ高強度品を得るためには、連続繊維を使用し Vf を高め、かつ熱可

塑性樹脂の低粘度化が必要である。特に樹脂の低粘度化が重要であるが、国内では新規樹脂の研究開発を実施しているところはなく、この観点からすれば低粘度のモノマーを使用する isP-RTM 成形法は有望な技術の一つであると考えられる。



図III-2.8.2-3 熱可塑性 CFRP の各種成形方法の成形時間と引張強度との関係

⑤ 構造用金属材料

本事業の対象構造用金属材料である鉄鋼、チタン合金、アルミニウム合金およびマグネシウム合金について調査を実施した。高張力鋼開発においては、日本はドイツや韓国とは異なり、中 Mn 鋼ベースの開発に移行している。チタン合金は、コスト低減のためのプロセス開発が最優先課題である。アルミニウム合金はコスト低減と接合技術開発が自動車分野では重要課題になっている。また、マグネシウム合金は、自動車分野においては車体よりもエンジン向けの開発が主流となっており、成形性の改善が大きな課題である。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.2-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォ ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	2	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	3	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.2-6 特許の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.3 [テーマ番号 31] 高分子複合材料技術開発動向調査

2.8.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量・高強度を実現する革新構造材料として、炭素繊維強化の高分子複合材料には大きな期待が寄せられ、精力的な研究開発が行われている。しかしながら、極めて高い性能が要求される自動車用途では、未だ金属材料等の代替は一部に限られている。そして、次世代を担う高分子複合材料の本格的活用には、高性能マトリックス樹脂、フィラー素材・分散化プロセス、異種材料接合制御、複合材料の評価技術などの研究開発が不可欠である。高分子学会では、実用化に向けた高分子複合材料技術開発を動向調査に関して、熱可塑性樹脂、異種材料接合技術、新規技術（樹脂ガラスやセルロースナノファイバーなど）、および、海外技術動向を主体に調査を実施し、現在の課題を明確にし、本格的な研究開発に向けた戦略方針を得ることを目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (平成34年度末)	根拠
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	マトリックス材料としての最近の動向および課題抽出	—	—	
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	CF表面処理剤の動向および課題抽出 およびセルロースナノファイバーの動向調査	—	—	
異種材料接合に関する調査	CFRPと金属などの接合技術に関する調査を実施し、マルチマテリアル化の技術動向を調査	—	—	

(3)全体計画（委託期間 2013年~2015年）

2013年度 CFRPの構造評価技術およびバイオフィラーの調査

2014年度 CF RTPに着目した技術動向および特許調査、海外動向調査

2015年度 CF RTPの異種接合技術調査、低コスト化に関する技術調査

(4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が1機関に必要な研究開発を再委託して実施する。

(5) 運営管理

高分子複合材料技術開発動向調査委員会（委員長 西野孝）では、本調査領域の専門家（大学および企業）を委嘱し、調査内容の信頼性を主として検討する。また、本調査領域に関係するテーマを研究会において設定し、有識者の講演や個別面談において情報収集することで調査内容に反映させる体制で実施する。調査全般に関しては、業務管理者が調査活動を把握・指導し、また、技術情報を集約し報告書としてまとめる。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本技術動向調査により自動車用途への CFRP の展開の可能性について現状認識と共に課題抽出を行い、国内の関連プロジェクトへの情報提供は価値が高い。

2.8.3.2 研究開発成果（本テーマは 2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.3-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	マトリックス材料としての最近の動向および課題抽出	CFRTP の自動車用途展開について可能性と課題を集約した。	○	
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	CF 表面処理剤の動向および課題抽出およびセルロースナノファイバーの動向調査	熱可塑性樹脂をマトリックスにした際の CF 表面処理の必要性、および、セルロースナノファイバーの開発状況を集約	○	
異種材料接合に関する調査	CFRP と金属などの接合技術に関する調査を実施し、マルチマテリアル化の技術動向を調査	接着剤を使用しない接合技術の初期調査を実施した	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)第二中間目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.3-3 第二中間目標の達成可能性

研究開発項目	現状	第二中間目標 (平成 29 年度末)	達成見通し
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	2014 年度に樹脂に関する中間報告書を作成	—	新たな開発情報を追記し、2015 年度において最終報告として完成する。
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	2014 年度にフィラーに関する中間報告書を作成	—	炭素繊維の低コスト化技術動向を追記し、2015 年度において最終報告として完成する
異種材料接合に関する調査	2014 年度に接合技術の予備調査を実施	—	接合技術に関する詳細情報を調査し、2015 年度において最終報告として完成する

本テーマは 2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ 41 から 45 に再編して実施した。

(3)研究開発の成果と意義

CFRP の自動車用途展開の現状を認識することは、CFRP の開発のみならず競合する鋼板などの技術開発においても必須である。本調査では、研究段階から実用化の技術まで幅広く情報を収集すると共に、競争が激しいこの領域での公開された特許を解析することによりメーカーの技術開発状況を把握するものである。また、複合材料や自動車の展示会を通じて、国内外の情報を集約し合わせることで、自動車の軽量化に関連する研究開発戦略および事業戦略に資することが可能となる。具体的には、2014 年度までの調査の成果概要を下記に示す。

熱可塑性樹脂を用いた CFRTP では、機械的性質、成形性等に加え、コストの観点から、ポリプロピレンおよびナイロン 6 が一般的に用いられている。ポリプロピレンの場合、分子内に極性基を有しないため、炭素繊維表面との共有結合や水素結合を作ることができず接着界面が課題となる。そこで、炭素繊維に付与するサイジング剤の開発や変性ポリオレフィン樹脂の開発が行われている。一方、自動車用 CFRTP の成形プロセスでは、熱可塑性樹脂の特徴を活かしてプレス成型が適用でき、熱硬化性樹脂のようにオートクレーブなどが必要ない。プレス成型する炭素繊維の基材の形態は、積層板、プリプレグなどである。積層板は、炭素繊維と樹脂を重ね合わせ、高温でプレスして平板状にした材料である。プリプレグとしては、炭素繊維を一方向

(UniDerection) に揃えた繊維を揃えて樹脂を含浸させた UD テープや平織や綾織の織物に樹脂を完全に含浸したシートが用いられている。また、短繊維と樹脂を含浸させ、短繊維の方向をランダムにしたシートもある。他方、熱硬化型でも加工技術の開発も行われ、三菱レイヨンでは、チャレンジ社が開発した量産成形技術である PCM

法を導入している。

一方、熱可塑性複合材料では、従来のボルトやカシメを用いたリベット締めなどの機械的接合の代替技術として、レーザー直接接合、超音波溶着、摩擦攪拌接合などの技術が着目されている。さらに、自動車の窓ガラスを代替する樹脂グレージングは、ガラスに比べて重量を軽減できるメリットがあると共に、耐衝撃特性が高く、自由度の高いデザインを射出成形によって実現できる特徴を有している。現在、ポリカーボネートが主として使用され、SABIC や帝人が市場展開を行っている。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.3-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.3-5 特許の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.4 [テーマ番号 32] 共通基盤技術の研究調査

2.8.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、接合技術及び個別材料技術の研究開発の方向性や目標、新たな研究開発分野などを設定する。接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。また、元素戦略・SIP 等関連プロジェクトとの連携を図り、研究開発の活性化・効率化を図る。

(2)位置付け、目標値

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。また、元素戦略・SIP 等関連プロジェクトとの連携を図り、研究開発の活性化・効率化を図る。

表Ⅲ-2.8.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2017 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
共通基盤技術 の研究調査	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針の提言、実用化に向けた課題の抽出等を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。	同左	同左	プロジェクトにおいては、必要に応じて材料分野個別毎・分野横断的双方での研究課題・体制の見直しが不可欠であり、定常的な調査、およびそれに基づく研究戦略の策定が肝要である。

(3)全体計画

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。具体的には、研究開発項目を、1) 革新的新構造材料、2) マルチマテリアル設計、3) 材料と破壊の基礎科学、4) 検査・診断技術 に細分化し、プロジェクト推進テーマ（分担研）との連携を明確にすると共に、分野横断的なテーマの創出を図る。

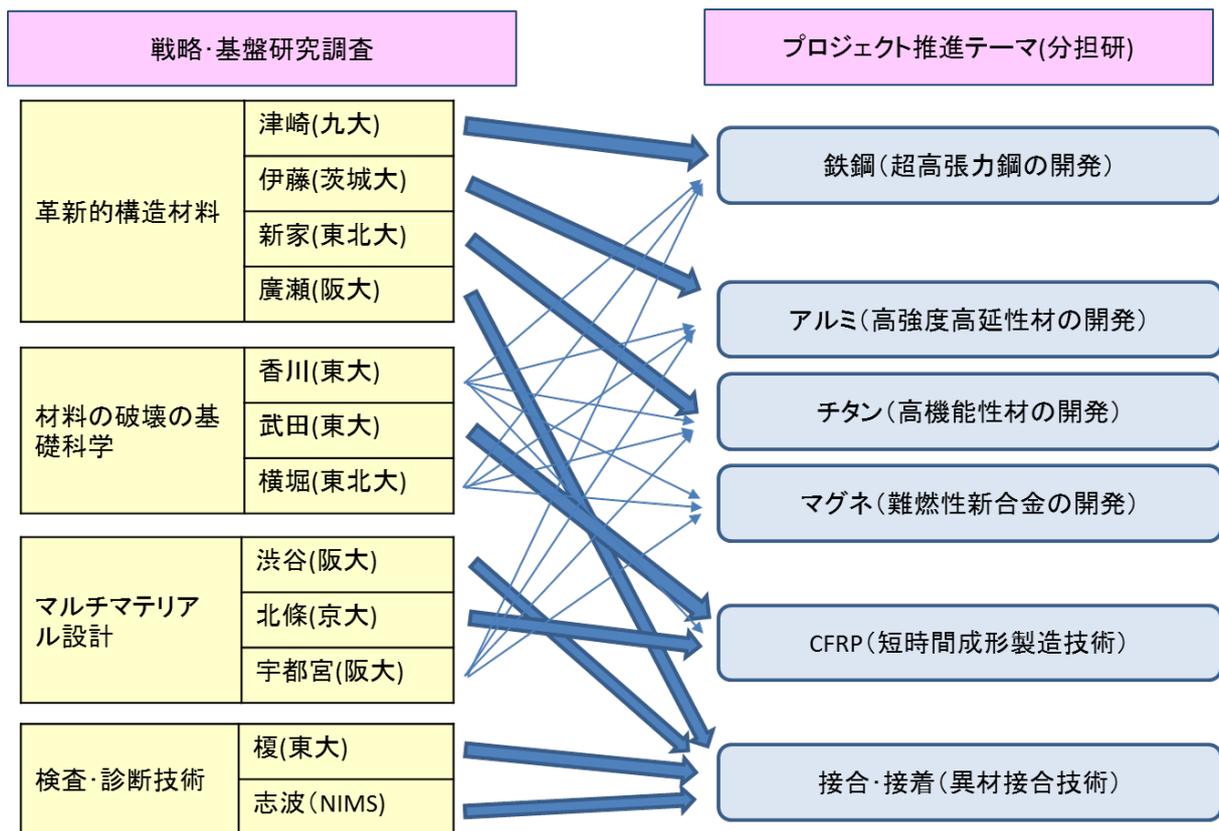
(4)実施体制

表Ⅲ-2.8.4-2 および図Ⅲ-2.8.4-1 に研究テーマ概要およびプロジェクト推進テーマとの関連性を示す。図Ⅲ-2.8.4-1 において関連付けを示す太い矢印は、単一分野に関連したもの、細い矢印は、幾つかの分野に跨って関連付けられることを示す。

表Ⅲ-2.8.4-2 研究テーマ概要

研究開発項目		テーマ概要	担当
材料WG	①検査・診断技術 -プロセスモニタリング/ヘルスマニタリング	信頼性確保のための新規プロセスモニタリング技術の開発	榎学 (東京大学)
	②革新的新構造材料 -鉄鋼材料	疲労強度と延性・韌性に優れた高強度TWIP鋼の開発	津崎兼彰 (九州大学)
	③革新的新構造材料 -アルミ合金材料	7000系、2000系Al合金の疲労特性に関する基礎的研究	伊藤吾朗 (茨城大学)
	④革新的新構造材料 -チタン材料	金属粉末射出成形法を用いたTi-Mn系高強度チタン合金の開発	新家光雄 (東北大学)
	⑤革新的新構造材料 -接合プロセス	異材接合継手の強度発現機構の基礎的研究	廣瀬明夫 (大阪大学)
	⑥マルチマテリアル設計 -複合構造	CFRP系複合材料の積層微視構造が構造要素の強度に及ぼす影響の研究	北條正樹 (京都大学)
研究開発項目		テーマ概要	担当
構造WG	①マルチマテリアル設計 -継手構造	マルチマテリアル化における軽量材料の最適配置及びその最適境界形状を求める設計手法の開発	渋谷陽二 (大阪大学)
	②材料と破壊の基礎科学 -複合材料	CFRP表皮サンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷低減手法の開発	武田展雄 (東京大学)
	③材料と破壊の基礎科学 -材料界面	界面破壊機構における剥離先端部の局所塑性変形の影響検討	香川豊 (東京大学)
	④マルチマテリアル設計 -塑性加工	塑性加工プロセスによるポーラス金属表面への緻密層形成による特性改善の研究	宇都宮裕 (大阪大学)
	⑤材料と破壊の基礎科学 -金属材料	水素環境下での自動車部品材の構造強度保証技術の開発および自動車溶接部の非破壊損傷計測と余寿命評価法の確立	横堀壽光 (東北大学)
	⑥検査・診断技術 -接合部の非破壊評価	CFRP/金属接合部を対象とした非破壊評価法の開発	志波光晴 (物材機構)

*2014.9より材料WGに小関敏彦(東京大学)、鳥塚史郎(兵庫県立大学)が参画



図Ⅲ-2.8.4-1 研究調査と推進テーマとの関連

(5) 運営管理

研究調査委託先研究者は、テーマ 29「新構造材料の技術・研究戦略」における戦略・基盤専門委員会委員としても委嘱を行っている。これは、プロジェクト研究戦略の策定を行う上で、各分担研での技術ニーズと研究者シーズの擦り合わせや推進テーマとの関連付けがより円滑に行われることを意図している。

2.8.4.2 研究開発成果（本テーマは 2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.4-3 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
共通基盤技術 の研究調査	構造材料に関する研究 開発のビジョンの明確 化、接合技術および個 別材料の技術戦略指針 の提言、実用化に向け た課題の抽出等を進 め、本プロジェクトで 開発する新構造材料の 技術・研究戦略を策定 する。	戦略・基盤分科会との 連携により、研究調査 内容のプロジェクト内 への展開や新技術の提 言を行った。また、関 連他省プロジェクト (元素戦略、SIP) との 連携を進めた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、2014 年度で終了し、2015 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した。

(3)研究開発の成果と意義

以下に、研究調査成果の概要をまとめる。

① 榎学（東京大学）

i 研究者名/研究テーマ名

榎学/信頼性確保のための新規プロセスモニタリング技術の開発

ii 研究の目的

接合や表面処理後の材料の信頼性を確保するためには、従来には無いマテリアルプロセスモニタリングが重要である。本研究においては、プロセスモニタリング装置を開発することにより、難接合性の Mg 合金/Al 合金異種材料 FSW および鉄鋼材料 FSW のモニタリングへ適用を目指した。

iii 成果の概要

AE 波形のノイズフィルタ処理を多チャンネルでもリアルタイムに行えるようにするため、GPU（Graphics Processing Unit）を利用した多並列演算を導入し、さらに GPU の特性の理解に基づいた処理の最適化を行った。より高速な PCI Express バス規格に対応した GPU を利用することで、大規模な AE 計測でも十分リアルタイム処理が行えるようになった。また、AE 事象のリアルタイム位置標定では、波形の立ち上がりの検出を高精度かつ自動的に行う必要がある。本研究では 2 つのピークがあった場合には後の A0 波を選択的に検出するよう波形処理を改良し、ノイズレベルによらず全チャンネルで A0 波による立ち上がりを検出し、精度良く自動位置標定が行えるようになった。

S45C 板材の FSW を接合開始から 10 分程度 AE モニタリングした。試料は長さ 200 mm × 幅 50 mm × 厚さ 2.0 mm の平板 2 枚を長辺で付き合わせたものである。図 III-2.8.4-2 に結果の一例を示す。図の横軸は時刻、縦軸は接合線上の位置を示しており、接合位置は右上がりの線、各 AE 事象はバブルとして表示される。時刻 0 s は接合開始を示している。良好な接合が行えた場合は殆ど AE 事象が検出されな

かったが、本例では多数の AE 事象が検出された。この AE 計測と断面観察の結果から、数秒遅れの AE 事象は接合後に裏板への放熱で急冷された材料がマルテンサイト変態した際の高速な体積変化にと

もなう弾性波を検出したものであることが推定された。AE 法を用いたことで時刻と位置の情報がリアルタイムに得られた。

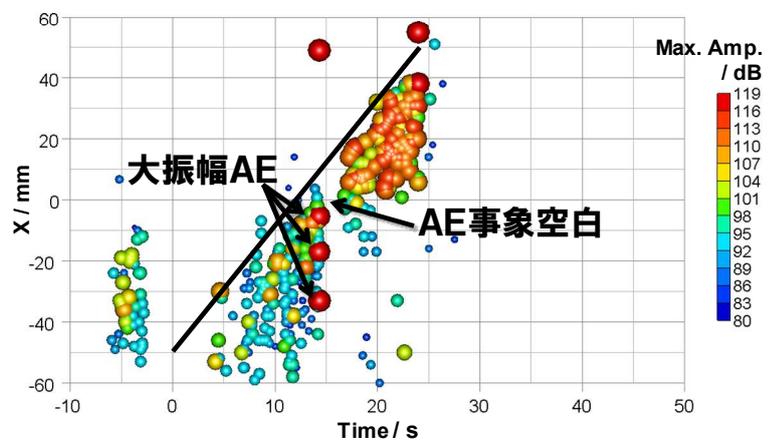


図 III-2.8.4-2 鋼材の FSW における AE 事象

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

FSW を含む異種材料接合技術は、構造物のマルチマテリアル化を進める上で非常に重要な技術である。しかし、接合の際にどうしても欠陥が生じ易いため、接合部の材料および構造物の信頼性を確保することが重要である。これらの接合技術を工業的に実用化し、イノベーションにつなげるためには、本研究の成果を含むプロセスモニタリング技術のさらなる高度化が不可欠であると考えられる。

② 津崎 兼彰（九州大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

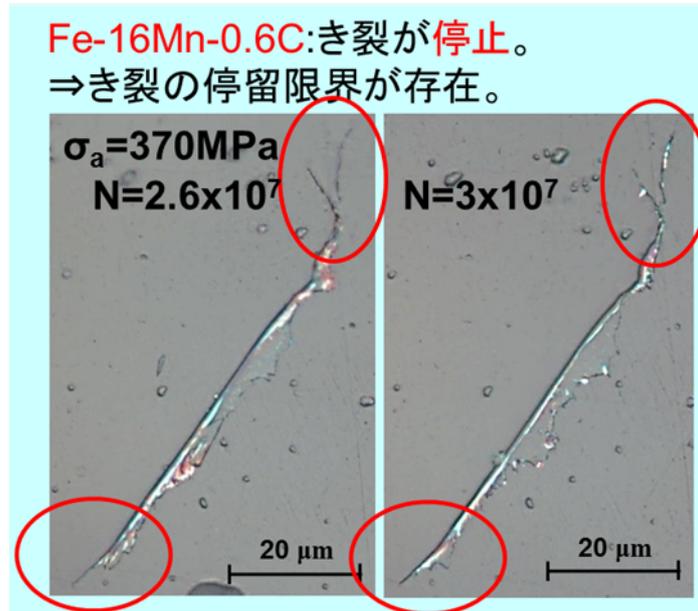
津崎兼彰/疲労強度と延性・靱性に優れた高強度 TWIP 鋼の開発

ii 研究の目的

文部科学省元素戦略プロジェクト「構造材料元素戦略研究拠点」(ESISM) との連携を取りながら、自動車および輸送機器の軽量化に貢献する新規の高強度鉄鋼材料に関する研究開発および調査を行う。

iii 成果の概要

開発研究においては、疲労強度と破壊靱性に優れた材料のものづくり技術を対象とし、自動車用の新しい高強度鉄鋼材料として注目されている変形双晶誘起塑性高強度鋼 (**T**winning -**I**nduced **P**lasticity ; TWIP 鋼) の疲労特性に注目した。Fe-30Mn-3Si-3Al 鋼に加えて、炭素を含む Fe-16Mn-0.6C 鋼を対象として、回転曲げの疲労試験を実施し疲労寿命を取得するとともにレプリカ法を用いてき裂の発生進展挙動を観察した。その結果、Fe-30Mn-3Si-3Al 鋼では疲労限が存在せず、停留き裂も認められなかった。これに対して、Fe-16Mn-0.6C 鋼では明瞭な疲労限が存在し停留き裂が観察された (図 III-2.8.4-3)。FCC オーステナイト鋼での疲労限の存在は注目される発見であり、き裂先端での拡張転位のすべり運動と炭素の相互作用が重要な働きをしていることが示唆された。また TWIP 鋼の変形双晶挙動について基礎的知見を得るために、変形双晶に及ぼす炭素の影響を検討した。



図Ⅲ-2.8.4-3 Fe-16Mn-0.6C で認められた停留き裂（レプリカ法）

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ESISM の元素戦略的研究の知見を活用しつつ、平均的な材料強度の向上を一步進めて金属材料の部材強度の向上につながる材料強化法の調査を行った。具体的には、「疲労き裂の進展を支配するき裂先端での交互すべり変形の様式（プラストン）の制御」について、すべり素過程が変形双晶やマルテンサイト変態の場合の先行研究について調査した。さらに自動車材料にとって疲労と並んで重要課題である水素脆化についての文献調査を行い、き裂の発生と伝播における整合 $\Sigma 3$ 双晶界面の重要性が新たな研究課題として注目され始めていることを示した。これより ISMA プロジェクトでのマイクロ組織と特性関係の解明においても、時間依存型損傷を解明するためには「変形素子と界面」が今後の研究開発のキーワードとなることを提言した。

③ 伊藤 吾朗（茨城大学）

i 研究者名/研究テーマ名

伊藤吾朗/2000 系、7000 系 Al 合金の疲労特性に関する基礎的研究

ii 研究の目的

比強度・加工性に優れ、複合材料に比べて低コストなことから、アルミニウム合金は今後も輸送機器分野において主要な構造材料として用いられると考えられる。しかし、一般にアルミニウム合金は、鉄鋼材料に比べて疲労特性に劣る。特に 7000 系合金は、アルミニウム合金中で静的強度が最も高いにもかかわらず、疲労特性に劣るので、航空機において、圧縮疲労荷重を受ける主翼上面外板や胴体の桁材などの一部にしか用いることができない。そこで引張疲労負荷のかかる部材には、7000 系合金よりも低強度であるが疲労特性に優れた 2000 系合金¹⁾が使用されている²⁾。

一般的には、静的強度と疲労特性は比例関係にあるといわれている³⁾ので、この両合金の疲労特性の差の原因は、解明すべき課題であるが、関係研究がほとんどなされていない。本研究では、7000系合金が水素脆化にきわめて敏感である一方で、2000系合金は鈍感である⁴⁾こと、および疲労も水素脆化も時間を要する現象であることから、7075 および 2024 と同等の強化元素を含む両系合金（調質はそれぞれ T6 および T4）の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境および合金組成の影響を調査した。

iii 成果の概要

疲労き裂進展試験の結果、比較的高い ΔK ($=14.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) で比較すると、7X（強化元素のみからなる 7000 系合金）の湿潤大気（MA）中でのき裂進展が最も速く、7X の乾燥窒素環境（DNG）中、2X（強化元素のみからなる 2000 系合金）の MA 中、7075 合金の MA 中、2X-0.6Mn（2X に 0.6%Mn を添加した合金）の MA 中、2024 合金の MA 中、2X-0.03Mn（2X に 0.03%Mn を添加した合金）の MA 中の順にき裂進展が遅くなった。すなわち 2000 系より 7000 系のほうが進展速度が速いことが確認され、また 7X では、湿潤大気中よりも乾燥窒素環境のほうが進展が遅くなること分かる。

き裂経路観察結果から、き裂経路を粒界と粒内に分類できることが分かり、全体のき裂長さに対する割合で定量的に評価した結果を図 III-2.8.4-4 に示す。粒界の割合は、水素脆化に敏感な 7X において、2000 系合金より高く、また DNG よりも MA のほうが高くなっている。このような結果は破面観察でも確認された。以上の結果から、7000 系合金の疲労き裂進展が 2000 系よりも

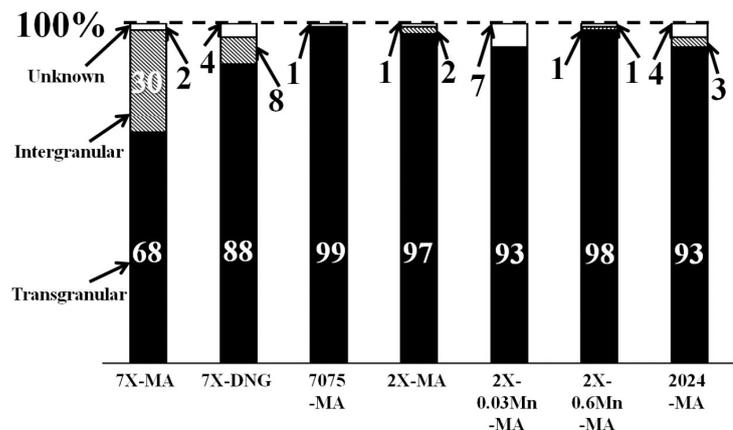


図 III-2.8.4-4 各試料、各環境でのき裂進展

速いことが確認され、それに水素脆化が関係していると推察された。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

今後、もっとも構造材料使用量の多い自動車分野においても、疲労特性が重要になると考えられ、本研究成果を自動車分野に応用する必要があると考えられる。接合（特に異材接合）においては、軽量金属（Al、Mg）では、電食が避けられず、これに伴う陽極溶解型、水素脆化型の応力腐食対策が必要になる。後者の場合、実際の部材では容易に判明しがたく、したがってこれに起因する疲労特性の低下も見逃されやすいと考えられる。今後、接合部での水素脆化・疲労の研究が重要となろう。

④ 新家 光雄（東北大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

新家光雄/金属粉末射出成形法を用いた Ti-Mn 系高強度チタン合金の開発

ii 研究の目的

低コスト添加元素であるマンガン等の利用、金属粉末射出成型法等の溶解法に依らない製造プロセスの利用および加工熱処理等による微細組織制御の利用により、低コストかつ超高強度なチタン合金を実現する。

iii 成果の概要

金属粉末射出成型法を用いて β 型 Ti-Mn 合金（マンガン含有量:8-17 mass%）を作製し、溶体化処理状態の微細組織および力学特性を評価した。

溶体化処理状態の各 Ti-Mn 合金の結晶粒直径および気孔率は、それぞれ約 100 μm および約 6%であり、構成相は、 β 相、非熱的 ω 相および炭化チタンであった。非熱的 ω 相の体積率は、マンガン含有量の増加に伴う β 安定度の増加に伴って減少することがわかった。

溶体化処理状態の各 Ti-Mn 合金の力学的特性として、引張特性および圧縮特性を評価した。引張特性では、Ti-9Mn 合金が最も良い強度－延性バランス（最大引張強さ：1050 MPa、0.2%耐力：980 MPa、伸び：5%）を示すことが明らかとなった。一方、Ti-13Mn 合金では、強度および伸びが低下した。引張試験後の破面解析から、マンガン含有量の増加にともない、破壊形態が延性破壊から脆性破壊へと変化することが明らかとなった。この脆化には、マンガン原子による固溶強化、気孔周囲における応力集中および炭化チタンの存在が影響を及ぼしていると考えられる。

各 Ti-Mn 合金の圧縮特性を評価した結果、各合金の圧縮ひずみは、Ti-6Al-4V 合金のそれより大きく、マンガン含有量の増加に伴い増加した。特に、Ti-12Mn、Ti-13Mn、Ti-15Mn および Ti-17Mn 合金は、40%以上の圧縮ひずみを示したことから、これらは極めて高い冷間加工性を有すると言える。マンガン含有量の増加に伴う圧縮ひずみの増加は、マンガン含有量の増加に伴う ω 相の減少に由来すると考えられる。

各 Ti-Mn 合金は、極めて高い冷間加工性を有することから、冷間圧延加工による微細組織制御により、引張強度の向上が期待できる。そこで、Ti-13Mn 合金に対して、圧下率 90%の冷間圧延を行った。

圧下率 90%の冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の微細組織を調査した結果、冷間圧延加工後、気孔が消失することが明らかとなった。冷間圧延加工前後の転位密度を見積もった結果、 $0.12 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ （加工前）から圧下率 90%の冷間圧延加工により $2.8 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ へと増加することがわかった。さらに、冷間圧延加工前後で顕著な ω 相の増加が認められたことから、冷間圧延加工により、変形誘起 ω 相が形成されることがわかった。

圧下率 90%の冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の引張特性を評価した結果、最大引張強さは 1.85GPa で、0.2%引張耐力は 1.82GPa であった。一方、冷間圧延加工前後で

伸びは大きく変化することなく、約 2%以下であった。冷間圧延加工による引張強度の大幅な増加は、転位密度の増加による加工硬化、気孔率の減少による応力集中の低減および炭化チタンと変形誘起 ω 相による分散強化によると考えられる。冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の引張強度は、既存チタン合金の中でもトップデータレベルの極めて高いものであり、本研究の目的である、低コストかつ超高強度なチタン合金の実現に大きく近づいた。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

本研究で開発した Ti-Mn 合金は冷間加工性に優れており、かつ既存チタン合金の中でもトップデータレベルの極めて高い引張強度を有することから、次世代の構造用チタン合金として高い可能性を秘めている。本合金は、優れた冷間加工性つまり高い塑性加工性を有することから、塑性流動を利用した接合技術である摩擦攪拌接合との相性が良いと期待される。今後、摩擦攪拌接合による本合金同士あるいは本合金と他金属材料との接合技術の確立が重要だと考える。

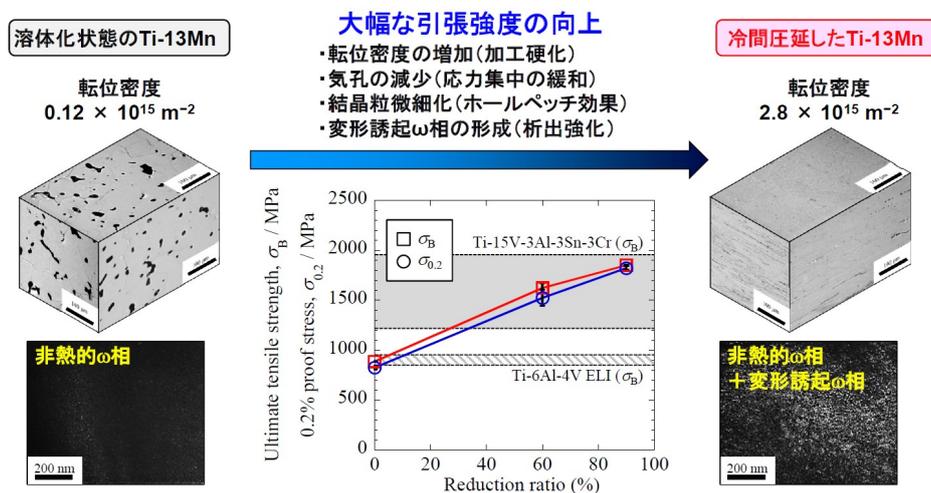


図 III-2.8.4-5 金属粉末射出成型法を用いて作製した Ti-13Mn 合金の冷間圧延前後の微細組織および引張特性

⑤ 廣瀬 明夫（大阪大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

廣瀬明夫/異材接合継手の強度発現機構の基礎的検討

ii 研究の目的

本研究は、自動車をはじめとする輸送用機器に適用される鉄鋼材料および非鉄材料の異材接合を対象に、車体構造や材料の組み合わせに応じた効果的な接合プロセスの提案を行う。具体的には、異材接合部の機械的特性、破壊形態を系統的に評価し、界面構造との対応から強度発現機構を明確化すると共に、シミュレーションにより異材接合部の変形・破壊特性を予測するための手法の構築を行うことを目的とした。

iii 成果の概要

異材接合部の界面構造と強度発現機構の検討に関しては、摩擦プロセスを用いた接合とレーザブレイジングを対象に検討を行った。摩擦プロセスを用いた接合では、まず、A6061/SUS304 および HT780 の重ね FSW 継手において、Al 合金側からのツールの押し込み位置を適性に制御することで、良好な接合が達成された。接合界面では、脆弱な Al-Fe 系金属間化合物層をほとんど形成しておらず、このような接合部では Al 合金の母材強度以上の接合強度が得られた。反応層成長の影響を評価した結果、図 III-2.8.4-6 に示すように、A6061/SUS304 継手では、反応層厚さが 0.2 μ m から 0.6 μ m までは継手強度は上昇し、母材破断となった後、さらに反応層が成長すると継手強度は大きく低下したが、A6061/HT780 継手では、反応層厚さが厚くなるほど継手強度は低下しており、被接合材料による影響があることが分かった。次に、FSSW によって A6061/GI および SPCC 継手の接合が達成できたが、すべて

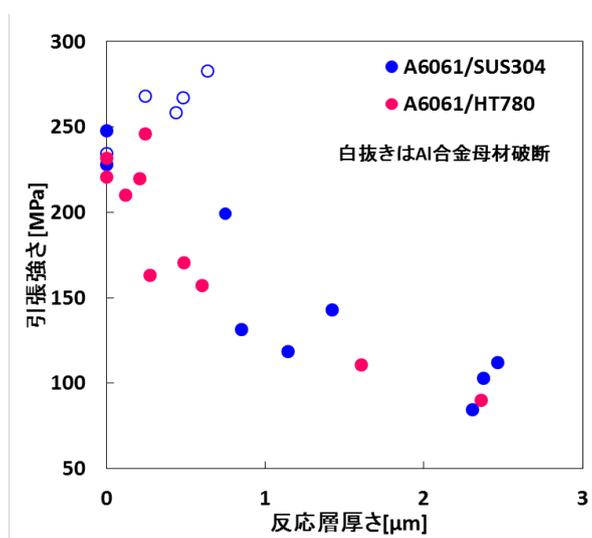


図 III-2.8.4-6 FSW 重ね異材継手における接合強度に及ぼす反応層厚さの影響

の接合条件で A6061/GI 継手の方が高強度であり、亜鉛めっきにより接合性が向上することが分かった。摩擦圧接を用いて、Ti 合金と Ni 合金の異材接合を行った結果、アップセット圧力を制御することで接合が達成でき、400MPa 以上の継手強度を得た。接合界面に形成した Ti-Ni 系金属間化合物からなる反応層を介して接合が達成されていることが分かった。次に Mg 合金ろう材を用いた Al 合金と Mg 合金の異材レーザブレイジングを行い、レーザ出力を適正に制御することで、濡れ性を確保しつつ界面反応を抑制して高強度の接合が達成できることが分かった。継手強度に及ぼす IMC 層厚さの影響を評価すると、IMC 層厚さ 200 μ m 程度で強度は最大値を示した。

次に、異材継手を構造物に実用的に用いるためには、シミュレーションを適用して異材継手の変形、破壊挙動を統合的に理解し整理することが必要である。そこで、異材接合部の破壊メカニズムに基づいた数理モデルを提案し、継手の破壊支配領域とマクロ破壊強度を予測する手法の提案を行った。本手法は、I. 合金内での延性破壊モデルと、II. IMC 層内での脆性破壊モデル、からなり、それぞれの破壊条件

を競合させることで、継手の破壊支配領域とマクロ破壊強度を数値シミュレーションにより予測しようとするものである。I. の延性破壊モデルは、接合界面近傍における合金側での破壊発生を予測するもので、異種金属間の強度差に起因した塑性拘束によって促進される損傷進展をシミュレートし、それによる延性き裂の発生・進展を予測するモデルとして提案したものである。II. の脆性破壊モデルは、脆性材料である IMC 層のへき開破壊限界を予測するもので、破壊の起点となる微視的き裂の寸法分布と最弱リンク概念を取り入れることで、数値シミュレーションによって破壊限界をばらつき特性も含めて予測するモデルとして提案した。提案したモデルに含まれる新たな破壊駆動力を用いることで、IMC 層からの破壊発生限界に及ぼす IMC 層厚さの影響を予測することが可能である。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

異材接合部の強度発現機構の解明により、最適な界面構造とその制御指針を示すことができる。これと接合部の変形・破壊挙動のシミュレーションを組み合わせることによって、試験片レベルの評価から車体構造に適用した継手レベルの評価への展開が可能となり、構造体軽量化に対して効果的な継手構造ならびに接合プロセスの提示を行うことができる。

⑥ 北條 正樹（京都大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

北條正樹/CFRP 系複合材料の積層微視構造が構造要素の強度に与える影響の研究

ii 研究の目的

複合材料構造では、繊維で強化していない板厚方向に引張応力が生じはく離が発生することが、最弱破壊モードの一つである。今後開発の進む低コスト材（RTM, OoA 等）では、はく離の発生箇所は積層構造の層間および層内の双方が考えられるが、これまでの研究は前者が中心であった。本研究では、層間と層内を区別して評価する手法を開発し、積層微視構造が構造要素の強度に及ぼす影響を検討する。航空機構造材料として重要な位置付けにある層間高じん化材につき、実際の設計基準に直結する値である、層内はく離と層間はく離の破壊靱性の違いおよびその最低値を評価した。今後疲労特性も検討する予定である。

iii 成果の概要

用いた材料は、ポリアミド粒子を用いたモデル層間高じん化 CF/エポキシ材である。層内はく離の評価のため、新たに開発した層内フィルム挿入法を用いた。ここではプリプレグ製造プロセスを改良し、含浸初期の中央部に樹脂が含浸していない状態で PTFE フィルムを挿入後、樹脂を追加含浸することにより、層内に初期欠陥を配置した。破壊靱性試験には、双片持ち梁試験片を用いた。初期欠陥の挿入状況を断面および破面の高精度観察により検討し、ボイドや樹

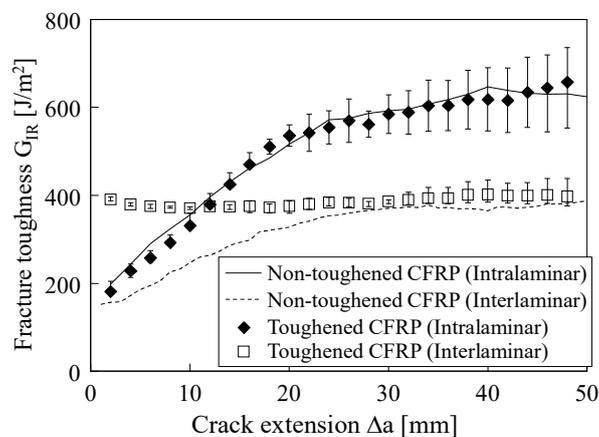
脂過多な領域が認められないこと、すなわち、新たに開発した「層内フィルム挿入法」により、正常に初期欠陥が配置され、安定に試験ができることを確認した。

図Ⅲ-2.8.4-7 に、層間高靱化材の破壊靱性値とき裂進展量 Δa の関係（R 曲線）を示す。同図では、実線および破線で非高靱化材の結果を併せて示した。各実験点は $\Delta a=2\text{mm}$ 毎に靱性値を平均化したものである。まず、 $\Delta a=0$ での初期値について、層間高靱化材の層内破壊、非高靱化材の層内および層間の靱性値がほぼ一致した。一方、層間高靱化材の層間の破壊靱性の初期値は、層内と比べ倍以上の高い値を示した。

伝ば時の靱性値について、層間高靱化材については、ほぼ一定値を示した。この場合、き裂が常に層間領域内（粒子層）を進展しており、繊維架橋の影響を受けなかったため、破壊靱性値が一定になったものと考えられる。一方、それ以外については、き裂進展量 Δa が増加するにつれて繊維架橋が発生し、破壊靱性値も上昇した。R 曲線に関しては、層内破壊については、層間高靱化材と非高靱化材の挙動が一致した。また、R 曲線の勾配は層内のほうが層間に比べて高く、飽和時の破壊靱性値も層内のほうが層間に比べて高くなった。微視観察から、R 曲線の挙動は繊維架橋の総本数等に支配されることが明らかになった。

き裂進展量 Δa が 10 mm 以下の場合、層間高靱化材の層内の破壊靱性値は、同材料の層間の破壊靱性値よりも低いが、 Δa が 10 mm 以上になると層内の破壊靱性値が層間に比べ高くなった。このことから、初期のき裂進展抵抗には層間樹脂層が大きく影響を及ぼすが、き裂進展後の挙動を考慮すると、層間に粒子を配置したことによる高靱化効果よりも繊維架橋による高靱化効果のほうが大きくなることがわかった。設計の観点からは、層間高じん化材の靱性値の最低値は、層内靱性の初期値であり、かつ非高靱化材のそれと一致することを明らかにした。

以上のとおり、きわめて重要な結果が得られるなど、研究は予定通り進行している。



図Ⅲ-2.8.4-7 層間高靱化材の層内および層間破壊靱性の非高靱化材との比較

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

本課題で開発した評価法は、熱硬化性樹脂を基として高性能を発揮する層間高靱化材料の設計のための最低値の指針を与える評価法である。この手法は、同種の材料の接合にあたっての評価に発展させることが可能と考える。また、CFRP そのものに対しては、積層構造のわずかな樹脂配置が力学特性に大きな影響を与えることを示し、物性値の評価における検討の重要性を示している。

⑦ 小関 敏彦（東京大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

小関敏彦/高強度鋼の溶接・接合

ii 研究の目的

1GPa を超える高強度鋼の溶接性の問題点を過去の検討から系統的に明らかにするとともに、それらに及ぼす鋼組成および組織の影響、溶接法・溶接条件の影響を調査して、問題解決に向けた材料組成、組織、溶接・接合法の指針を導出し、新たな鉄鋼材料の開発にフィードバックすることを目的とする。

iii 成果の概要

本検討は 2014 年度からスタートしたものであるが、初年度は高強度鋼の溶接の冶金的な課題を過去の研究のレビューから抽出するとともに、現状、年々変化する自動車用材料および接合法のトレンドから、ISMA プロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発の方向性について検討を行った。

1) 高炭素高強度鋼の溶融溶接ならびに摩擦攪拌接合 (FSW) に関する従来知見の調査
高炭素高強度鋼の溶融溶接ならびに FSW に関する従来知見を、内外の学術誌、企業の技報や公表資料などから調査した。その結果、溶接部の課題は大別すると：

- (a) 溶接熱サイクルによる溶接金属および熱影響部 (HAZ) の硬化、ならびに HAZ の軟化
- (b) 硬化部における脆性破断・軟化部に起因する継手強度低下
- (c) 疲労強度の低下
- (d) 低温割れ（水素割れ）感受性の増加

このうち、(a) の硬化は焼入れのままのホットスタンプ材の 1.5GPa 級鋼では顕著でないが、今後 TRIP 鋼で同等の強度と延性の両立を目指す場合は更に高炭素化が必要であり、溶接による硬化は避けることができない。他方、軟化は鋼材が高強度になるほど A3 以下に加熱される HAZ で顕在化し、1GPa 以上の高強度鋼では問題となる。これらは (b)～(d) の支配要因であり、溶融溶接では根本的な解決策は無い。溶融しない FSW においても攪拌部は A3 温度以上になり、攪拌部の硬化と周辺の HAZ 軟化は起こる。

次に (b) の脆性破断は硬化に起因するもので、特にスポット溶接部の十字引張強度は母材強度が上昇しても脆性破断ゆえ向上せず逆に低下する。(c) の疲労強度の低下は溶接部の形状に大きく依存し、形状的な応力集中に加え、溶接による引張残留

応力と HAZ 軟化が疲労の発生・進展を加速しており、形状を改善しても母材レベルまでの回復は難しい。更に(d)の低温割れ感受性は、開発を目指す高強度鋼では検討が必須であるが、適用が薄板であり従来知見をそのまま適用することは難しく、評価法も含め検討が必要である。

2) 上記課題の改善に向けた接合研究の方向性の検討

以上のような調査結果から改善策ならびに今後の研究の方向について検討した。溶融溶接を高強度鋼に単独で用いることは多くの課題があり、他の接合法やあるいは溶融溶接とその他の接合法の併用も検討する必要がある。加熱温度の低いあるいは常温の接合法としては、①FSW、②ろう付け、③機械接合（リベット、クリンチ、ねじ）、④接着などがすでに自動車に適用されている。①FSW は高強度鋼に用いる場合は最高到達温度の制御やツールの寿命などの検討が不可欠である。②ろう付けはレーザーを用い高速で母材非溶融、最高加熱温度も低いなどのメリットがあるが、継手強度自身は低く、適用箇所が限定される。③④は常温であり、③は高強度鋼および他の材料との異材接合で適用できる。特に SPR (Self-piercing Rivet) は 1.7GPa の強度まで適用可能と言われている。また④はすでに自動車に補助的に用いられており、接合強度上昇に加え、剛性向上や異材接触のインシュレーターとしても効果がある。

超高強度鋼の接合検討では、これらの接合の適用あるいは併用も含めた検討を並行して行うことを提言する。

【自動車に適用される接合法の最近の変化と高強度鋼溶接への展開】

一方、近年の自動車製造では B ピラーなどホットスタンプ用超高強度鋼の適用とともにマルチマテリアル化も進む中で、適用される溶接・接合法も従来のアークやスポット溶接から、レーザー溶接や FSW などに拡大してきた。これらは単独あるいは併用によって高強度鋼溶接や異材溶接への適用が可能で、車体の剛性向上や溶接熱ひずみの減少などのメリットもある。さらに機械接合や接着ではスポット溶接と同レベルの接合効率を達成できるものもあり、ISMA プロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発では、従来の接合法に拘らず、冶金的な課題解決と並行して、様々な接合法の可能性の検討が重要と思われる。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

超高強度鋼の溶接にかかわる課題は、これまでの接合法を前提とすると解決が難しいものが多く、冶金的な課題を解決する溶接部の組成・組織・プロセス条件の解明と並行して、新たな接合法を前提とした検討も必要である。適用が拡大しつつある接合法としてはレーザー溶接や FSW、リベットやクリンチの機械接合、ろう付け、さらに接着などがあり、これらは単独あるいは併用によって高強度鋼溶接だけでなく異材溶接、マルチマテリアル化への適用が可能で、車体の剛性向上や溶接熱ひずみの減少などのメリットもある。さらに機械接合や接着ではスポット溶接と同レベルの接合効率を達成できるものもあり、ISMA プロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発では、従来の接合法に拘らず、冶金的な課題解決と並行して、様々な接合法の可能性の検討が重要と思われる。

⑧ 鳥塚 史郎（兵庫県立大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

鳥塚史郎/材料と破壊の基礎科学－高強度材料 真ひずみで 1 を超える大ひずみ域までの真応力 - 真ひずみを取得しデータベースとしての確立

ii 研究の目的

自動車等の輸送機器の燃費改善には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上とともに、車両の軽量化が重要な取組課題の一つである。高強度金属材料を用いれば、材料自体の使用量を減らすことができ、燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減につながる。高強度金属材料を有効に活用するためには、真応力－真ひずみ挙動を知らねばならない。近年、最大荷重点を越える領域まで加工を行うようなことも必要とされ、破断までの真応力－真ひずみ挙動の把握のための正確な計測技術の確立が急務となっている。最大荷重点を越え破断までの真応力－真ひずみ曲線が取得できれば、高強度材料の成形限界や破断限界が推定できるようになる。高強度金属材料の真の延性・破壊ひずみ、破壊応力を明らかにでき、大きな塑性変形をとまなうプレス成形のような技術に対応できるようになる。本研究では、金属材料の最も重要な性質である真応力 - 真ひずみ曲線に関して、画像計測引張試験技術により、真ひずみで 1 を超える大ひずみ域までの真応力 - 真ひずみを取得し、データベースとしての確立を行うことを目的とする。

iii 成果の概要

引張試験機に CCD カメラシステムを設置し、画像計測引張試験を行うための専用システムを構築した。CCD カメラによって試験平行部の観測点約 50 点の長さ（直径）を 0.2s 間隔で計測した。これらのデータから試験平行部の最小半径 a と曲率半径 R を連続的に算出した。荷重 P はロードセルのデータから求めた。これらのデータから、

$$\text{平均応力 } \sigma_{av} = (P/a^2\pi) \quad (1)$$

$$\text{真ひずみ } \bar{\epsilon} = 2\ln(a_0/a) \quad (2)$$

を求めた。また、最大荷重点までは、平均応力は真応力となる。最大荷重点を越え、局所くびれ発生以降は Bridgman の式¹⁾より、

$$\text{真応力 } \bar{\sigma} = \sigma_{av} / \{(1 + 2R/a) \ln(1 + a/2R)\} \quad (3)$$

を用いて真応力を算出し、真応力 - 真ひずみ曲線を求めた。 a_0 は初期半径である。本画像計測引張試験システムによって、一様変形、くびれ発生、破断に至る試験片形状変化を連続的に正確に直接計測することができた。その結果、くびれ発生開始点やくびれの形状変化など断続引張試験では取得不可能な高精度データが得られ、

最小半径 a から、破断までの真ひずみ変化をとらえることができた。

成果の例として、化学組成 0.01C-0.30Mn-0.25Si mass%の低炭素鋼で、平均粒径 $15\mu\text{m}$ の粗粒鋼と平均粒径 $0.7\mu\text{m}$ の超微細粒鋼に対し、画像計測引張を行った結果を示す。引張試験片は、直径 3.5mm、平行部長さ 24.5mm、標点間距離 17.5mm の丸棒引張試験片を用いた。クロスヘッド速度は 0.5mm/min とした。

Bridgeman の真応力式から破断までの真応力-真ひずみ曲線を導出し、図 III-2.8.4-8 のような結果を得た。公称応力-公称ひずみ曲線も同時に示すが、著しく異なることがわかる。微細粒鋼は、公称ひずみにおいて、破断ひずみ（全伸び）が 0.15 と非常に小さかったが、真ひずみの観点からは、きわめて大きな破断ひずみ 1.75 を有する。一方、粗粒鋼は、公称ひずみにおいては、破断ひずみ（全のび）は 0.35 と大きいですが、真ひずみにおける破断ひずみは、1.95 と微細粒鋼と大きな差はなくなる。一方、応力に関しては、超微細粒鋼は粗粒鋼に比べ、真破断応力は 2 倍以上と、優れた真破断応力-真破断ひずみバランスをもつ材料であることが示されている。また、粗粒鋼は大ひずみ域では加工硬化が飽和するものの、超微細粒鋼は降伏から破断まで一貫して加工硬化し続けるという従来のセンスとは逆の結果も得た。

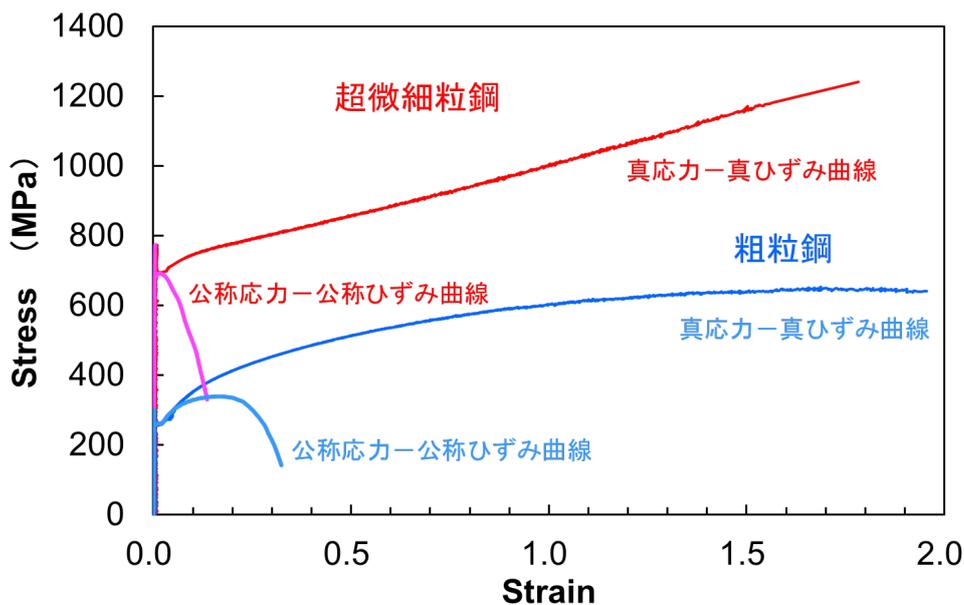


図 III-2.8.4-8 画像計測引張試験法で得られた 0.01C 組成の平均粒径 $20\mu\text{m}$ 粗粒鋼と $0.7\mu\text{m}$ 超微細粒鋼の破断までの真応力-真ひずみ曲線（公称応力-公称ひずみ曲線も併記）

超微細粒鋼は粗粒鋼に遜色のない破断ひずみとはるかに大きな破断応力を有することを明らかにしたものであり、金属材料の本質を明らかにした結果となった。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

輸送機や構造物の軽量化のため、最大荷重点伸び（一様延性）を大きく越える新しい成形加工技術等が積極的に採用され始めており、そのためには、くびれ発生以降の加工硬化挙動や真破断ひずみや真破断応力を知る必要がある。特に、ISMA で目

指している超高強度・高延性材料は、必ずしも一様延性が大きくないと思われ、これを使いこなすには、最大荷重点以降（局部延性）の変形の活用も必要とされると思われる。したがって、破断までの真応力-真ひずみ曲線データベースの確立によって、ISMA で開発される輸送機用高強度金属材料を使いこなすための基本データを与えるものができること期待される。

⑨ 渋谷 陽二(大阪大学)

i 研究者名/研究テーマ概要

渋谷陽二/マルチマテリアル化における軽量材料の最適配置及びその最適境界形状を求める設計手法の開発

ii 研究の目的

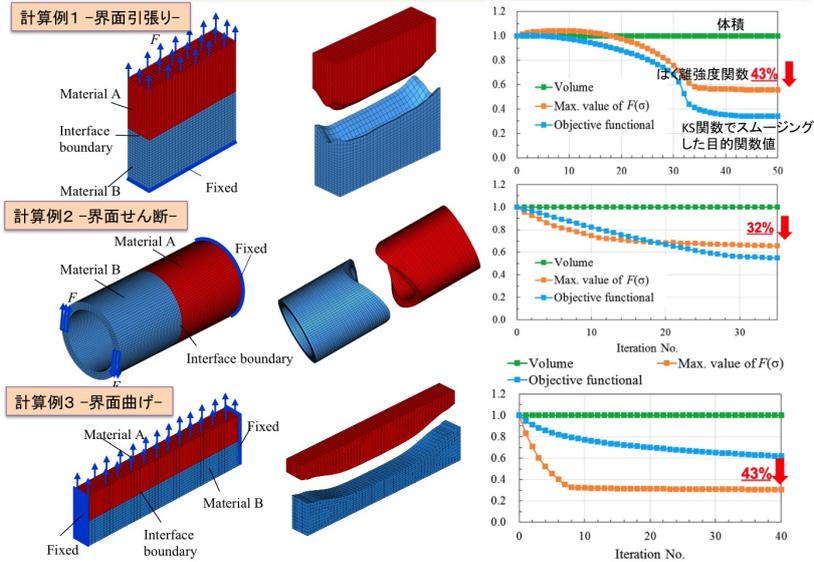
Body-In-White (BIW) のマルチマテリアル化される部材に対して、接着を含めた接合構造の最適化を探索するため、被接合材料の最適界面境界形状を求める設計手法の開発を行う。まずは、ハイテン鋼、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの異種材料からなるソリッド体の界面強度問題を対象に、界面に沿って垂直方向のはく離応力と界面に沿ったせん断応力の複合応力状態を対象にした界面強度最適化手法を確立する。そして、その手法を応用して、応力が多軸に作用した状態での接合強度評価手法を提案し、解析と実験による検討を行う。

iii 成果の概要

本研究では、マルチマテリアル構造体の接合界面強度問題に着目し、最大はく離強度関数の最小化を目的に最適界面形状を求めるための数値解析手法を提案した。そして、界面強度に応じた最適構造例を求め検証した(図Ⅲ-2.8.4-9 参照)。その結果、界面強度(界面に沿った面に垂直なはく離応力と界面に沿ったせん断応力)を意図的に変化させるとそれに応じた界面形状の得られることがわかった。この手法を用いて、両者の応力が複合的に作用した界面での強度評価が可能になった。

界面最適化の構造解析例

$E_A:E_B=1:10$
 $Z^1=Z^2=400\text{MPa}, Z=200\text{MPa}, Z=800\text{MPa}$



図Ⅲ-2.8.4-9 負荷形態に応じた界面形状の最適化シミュレーション

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ISMA の接合分科会(平田コーディネータ)の中で、界面評価接合メカニズム及び異材継手性能の評価技術に関わる分野で連携を取る予定である。提案する手法での界面強度評価の妥当性を議論し、接合分科会で得られた新たな接合へ適用を試みる。

⑩ 武田 展雄（東京大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

武田展雄/CFRP 表皮サンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷低減手法の開発

ii 研究の目的

本研究では、金属材料とは大幅に異なる材料組織から生じる複合材料製造技術に関連する力学課題についての検討を行う。とくに、航空機用新規複合材料構造としての「CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷検出」に関して検討した。

iii 成果の概要

温湿度を変化させたフォームコアの押し込み実験と CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ構造の衝撃実験を行うとともに、FEM による衝撃損傷モデリング法を構築し、実験結果を説明した。とくに圧縮負荷後の引張負荷発生時の合理的なモデル化に成功した。

まず、PMI (polymethacrylimide) フォーム材の単軸圧縮負荷・引張負荷時の応答特性（応力-ひずみ線図）を様々な温度・湿度環境下で実験的に求め、応力-ひずみ線図の実験式を構築するとともに、マイクロ損傷の詳細観察による損傷挙動の物理的意味を明らかにした。

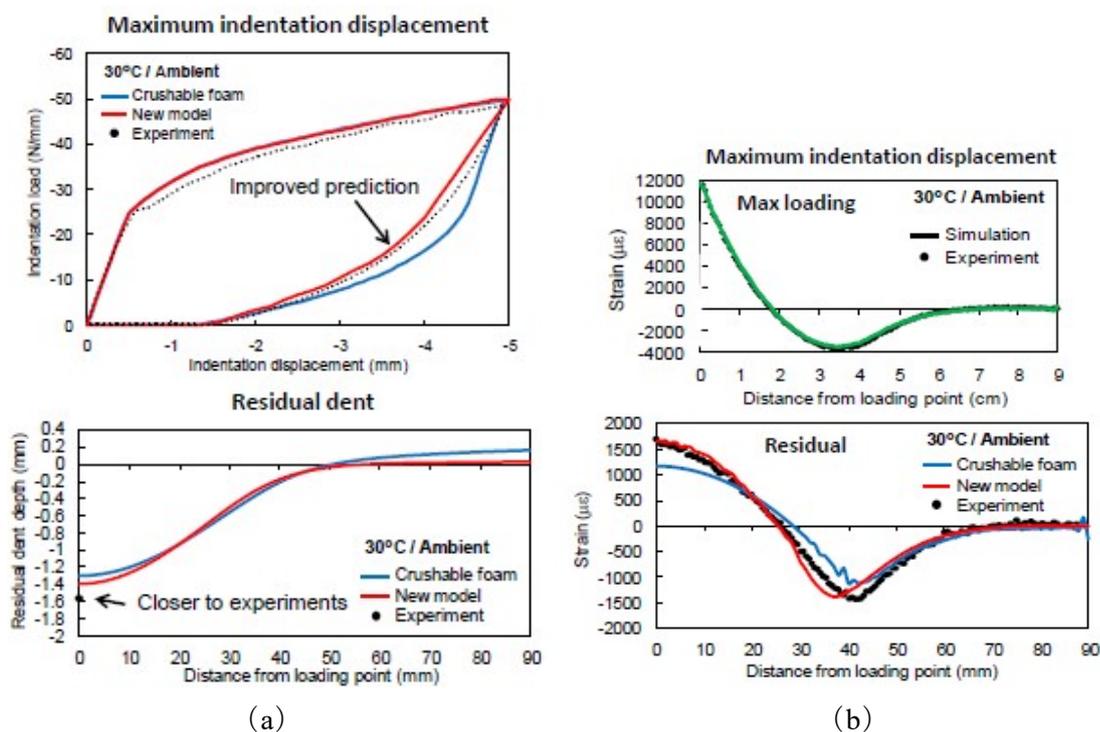
次に、CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ梁の押し込み負荷・除荷応答（負荷-変位線図）を様々な温度・湿度環境下で実験的に求めた（図Ⅲ-2.8.4-10 (a)）。また、負荷中・除荷後の表皮の押し込み深さを計測した。

さらに、上記の実験的に求めた PMI フォームの負荷応答特性を組み込んだサンドイッチ梁押し込み挙動の弾塑性有限要素 (FEM) 解析を行い、負荷-変位線図、表皮の押し込み深さを求め、計測した実験結果との比較を行った。とくに、押し込み負荷後の除荷挙動を正確に解析できる新しい弾塑性モデルを提案し、それを組み込んだ FEM 解析を行い、除荷過程中的負荷-変位線図や除荷後の押し込み深さの実験値により一致する FEM 解析が可能であることを示した（図Ⅲ-2.8.4-10 (a)）。

また、負荷中・除荷後の CFRP 表皮フォームコア境界接着層の梁長手方向のひずみ分布（図Ⅲ-2.8.4-10 (b)）を計算し、コア自体やコア・表皮間剥離損傷の大きさと範囲を検出できる可能性を示唆した。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ISMA プロジェクトで実施している CFRP は主に自動車用途であるが、本研究のフォームコアサンドイッチ構造も将来的には自動車構造への展開の可能もある。



図Ⅲ-2.8.4-10 CFRP 表皮コアサンドイッチ梁の応答

(a) 押し込み負荷・除荷応答（実験値と解析値）

(b) 境界接着層の梁長手方向のひずみ分布（実験値と解析値）

⑪ 香川 豊（東京大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

香川豊/界面破壊機構における剥離先端部の局所塑性変形の影響検討

ii 研究の目的

移動用構造体の軽量化を実現するために、Ti や Al をはじめとする軽量金属に加えて、繊維強化プラスチック(FRP)が主要な役割を果たすことが期待されている。同時に、これらの軽量材料を組み合わせて使用することの重要性が増しており、異種材料の接合・接着が重要な技術課題となるとともに、接着部には高い信頼性が要求されるようになってきている。従って、高分子系接着材料と変形しにくい金属・セラミックスの接合体を対象とし、剥離先端分での局所的な変形が剥離エネルギーに及ぼす影響を、部材が実際に使用されるときに想定される条件下で明らかにし、接着界面の信頼性確保に貢献すること定量的に調べることは大切であると考えられる。本研究では、金属と FRP の接着界面の耐剥離特性を定量的に評価する方法を検討した。なお、耐剥離特性の評価に際しては、得られるデータが実接着構造体の界面剥離の問題に容易に展開できるように、有限要素法等で解析を行う際に用いることができることを重視して検討した。

iii 成果の概要

1) 界面剥離エネルギーとフェーズアングルの重要性

界面の剥離に要するエネルギーは、界面亀裂先端のフェーズアングルに応じて変化する。フェーズアングルは亀裂先端のモード I 応力拡大係数とモード II 応力拡大係数の比によって決まるが、しかし、高強度・高剛性の材料の間に柔らかい接着剤が存在する場合や、降伏応力およびヤング率の差が大きな異種材料が接合され、設計応力を超えたときに材料の一方が大きな塑性変形を生じる場合に生じるフェーズアングルの変化とそれが剥離エネルギーに及ぼす影響は実験・理論の両面から十分に調べられていない。本研究では、モード II の負荷を受ける場合に着目し、特に接着剤の厚さが界面剥離エネルギーに及ぼす影響を知ることが重要である。特に、接着部分の面積に大きく依存する「応力」ではシミュレーションに特性を利用することは難しいために、エネルギー開放率を求めることは重要である。

2) 金属/FRP 接合材料及び試験方法

実験には、Al 合金(7075)と平織連続ガラス繊維強化プラスチック(GFRPs)をエポキシ系接着剤で接着した Al/E_p/GFRP 接合体を用いた。接合体のヤング率比 ($\Omega=EG/EA$)は $\Omega=0.53$ である。Al 合金の寸法は $150 \times 6 \times 30$ mm(LAl \times wAl \times tAl)とし、GFRP の寸法は $25 \times 6 \times 1$ mm(LGF \times wGF \times tGF)とした。また、GFRP と Al 合金の厚さ比 ($\eta=tG/tAl$)は 0.15 となるよう試験片を作製した。エポキシ接着剤の引張降伏強度 (σ_y)及びせん断降伏応力(τ_y)は ~ 20 MPa 及び ~ 25 MPa と変形しやすいものを用い、接着剤の厚さは 100 から 300 μm の間で変化させた。接合体の Al 合金と接着剤界面に

人工き裂を導入し、界面き裂先端のフェーズアングルが 60° 以上の条件下となるよう負荷を加えた。ここで、フェーズアングルは剥離部先端でのモード II 成分とモード I 成分の比を表す指標である。試験にはバーブ法(例えば、Y.F. Liu, Y. Kagawa Y., A.G. Evans, “Analysis of a "barb test" for measuring the mixed-mode delamination toughness of coatings,” *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 1 (2008) pp. 43-49. 53, N.-Y.Cao, Y.-F. Lin, Y. Kagawa, “Finite element analysis of a bard for thermal barrier coating delamination toughness measurement,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202. 13 (2008) pp. 3109-3114, N.-Y. Cao, Y. Kagawa, Y.-F. Lin, “Stress analysis of a barb test for thermal barrier coatings,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, 14 (2008) pp. 3413-3418 など)を用いた。この手法は、熱遮蔽コーティングを対象として開発されたものであるが、金属/GFRP 接合体や金属/CFRP 接合体に容易に適用できるものである。

3) 界面剥離抵抗の定量評価

荷重を加えると、負荷とともに界面き裂が徐々に進展したのち、荷重はほとんど変化せずき裂が長くなり、 $a_0 + \Delta a \sim 10 \text{ mm}$ 程度で定常状態に達した。き裂は金属と接着剤の界面に沿って進展していた。これらの傾向は接着剤の厚さによらず同様であったが、接着剤の厚さが厚くなると、き裂の進展に要する荷重はさらに大きくなる傾向が見られた。

き裂長さが長くなるほどエネルギー開放率 Γ は大きくなる R 曲線挙動が見られた(図 III-2.8.4-11 (A))。界面の初期導入き裂からき裂が進展し始めるときのエネルギー開放率 Γ_0 は、 $h_{ad}=100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 及び $200 \mu\text{m}$ のとき、それぞれ 24 J/m^2 、 30 J/m^2 及び 36 J/m^2 であった(図 III 2.8.4-11 (B))。定常状態のひずみエネルギー開放率 Γ_{ss} は、 $h_{ad}=100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 及び $200 \mu\text{m}$ のとき、それぞれ $\Gamma_{ss} \sim 96 \text{ J/m}^2$ 、 100 J/m^2 及び 120 J/m^2 であった。これらの結果から、接着剤の厚さが厚くなると Γ_0 、 Γ_{ss} はともに大きくなることが明らかになった(図 III-2.8.4-11 (B))。この結果は、接着剤の層の変形による寄与が大きいことを示していると考えられる。

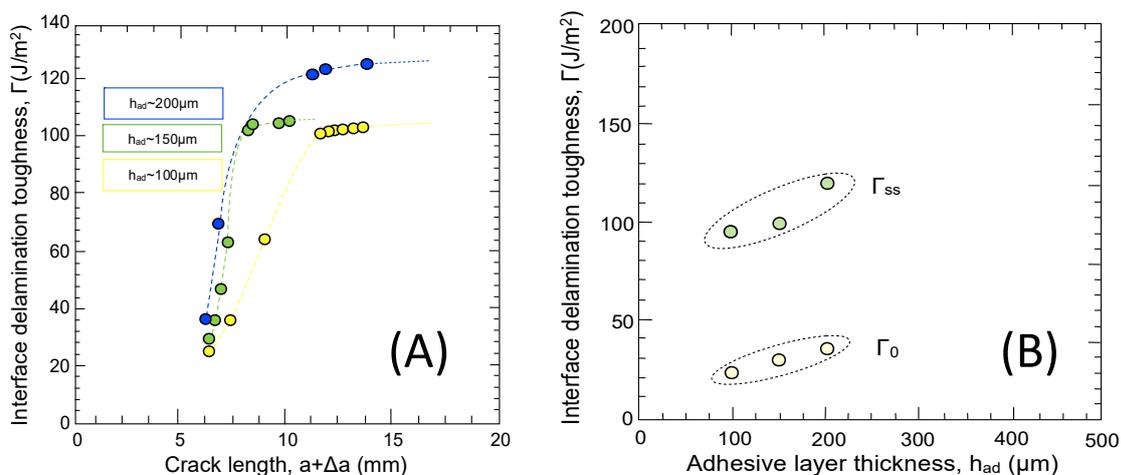


図 III-2.8.4-11 界面剥離抵抗 Γ に及ぼす接着剤層の厚さの影響(A), 剥離開始抵抗 Γ_0 及び定常状態剥離抵抗 Γ_{ss} に及ぼす接着剤層厚さの影響(B)

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

本研究で行った界面剥離抵抗を定量的に評価する手法は、小さな試験片を用いて行うことが可能である。しかも、モード II 成分を多く含む条件での接着剥離抵抗を評価することができる。定常状態の剥離抵抗を求めることが可能であることから、実験的に求めた値を構造体の大規模解析に直接利用することができる。すなわち、構造体の界面剥離部先端でのひずみエネルギー開放率とフェーズアングルの関係を求めておけば、金属材料と FRP などの異種材料接合技術開発に大きく役立つといえる。

⑫ 宇都宮 裕（大阪大学）

i 研究者名/研究テーマ名

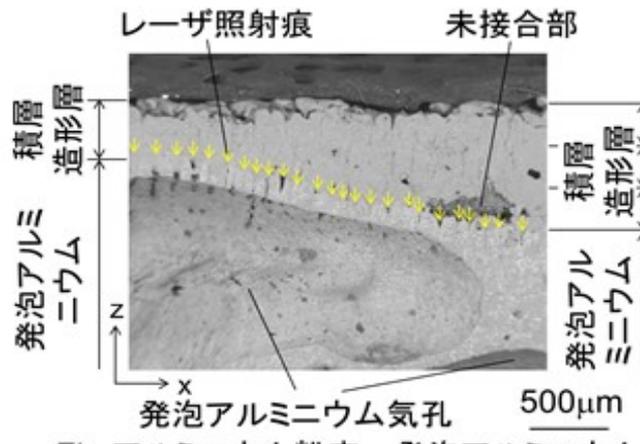
宇都宮裕/塑性加工プロセスによるポーラス金属表面への緻密層形成による特性改善の研究

ii 研究の目的

本研究は「マルチマテリアル設計」に供するため、塑性加工を利用して輸送機器用の革新的な軽量構造部材を開発することを目的としている。特にポーラス金属は内部に多数の気孔を含むため非常に軽量であり、かつ振動・音波・エネルギーの吸収性にも優れるため輸送機器部材への応用に好適であると考えられる。しかしながら、(a)現状では比強度が不十分であること、(b)構成式が不明で変形の予測が難しいことなどのため、その工業的応用は十分に検討されていない。そこで、本研究では、ポーラス金属を素材として革新的軽量構造部材を実現するため、(1)気孔率の分布の意図的な導入、(2)マクロな形状の成形、(3)材料学的強化、の適用による特性の飛躍的向上を検討する。

iii 成果の概要

発泡金属の表面にノンポーラス層を構成すること、すなわち表面緻密化は、プラトー領域の拡大、せん断帯など局所変形の抑制、切欠き効果の低減、他構造物との接合・接着の容易化の点で利点がある。平成 25 年度は「摩擦攪拌インクリメンタル加工」により、2014 年度は「金属レーザー積層造形法 (SLM)」によりサンドイッチ構造ポーラス金属の創製に成功した。図はレーザー照射された発泡アルミニウムの断面を示したものである。アルミニウム粉末は融解し、発泡アルミニウムと一体化していることが確認された。これにより発泡アルミニウムの表面の 4 面を緻密化して圧縮試験を行ったところ、プラトー応力（低ひずみの領域で、応力が低値一定となる領域の応力）が、2.4MPa となり、無処理材に比べておよそ 20%の向上が見られた。



図Ⅲ-2.8.4-12 アルミニウム粉末 - 発泡アルミニウム界面近傍の断面写真

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ポーラス材料の使用は、構造材料の使用という点でパラダイムシフトを起こす可能性を秘めている。例えば、自動車材料としては、燃費改善を目的に鉄鋼材料からアルミニウムやマグネシウムなどへの転換が検討されている。しかし、鉄鋼材料を高い比強度を有したままでポーラス化し部材に成形できるならば、軽金属材料に対する有利性は保たれる。表面緻密化は、力学特性を改善し、接合等を容易にする点で、簡便ながら有望な手法である。また、ポーラス金属のエネルギー吸収性や低熱伝導性を利用すれば、衝撃吸収材料や振動吸収部材、シールド材などこれまでにない部材が出現する可能性を秘めている。したがって、将来を見据えて応用可能分野を調査しておくことが望まれる。

⑬ 横堀 壽光（東北大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

横堀 壽光/水素環境下での自動車部品材の構造強度保証技術の開発および自動車溶接部の非破壊損傷計測と余寿命評価法の確立

ii 研究の目的

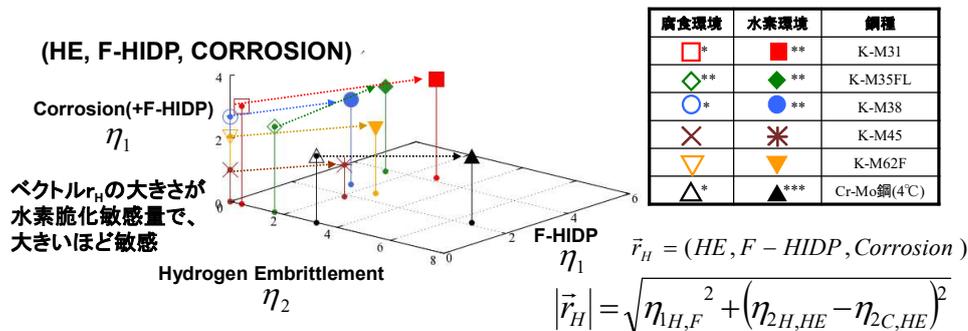
- 1)自動車用部品として使用される種々の電磁ステンレス鋼の水素脆化敏感性を定量的に評価するパラメータを実験により導出し、横堀の提案する水素拡散解析と組み合わせることにより、耐水素脆化材料開発指針の基礎基盤を構築する。
- 2)自動車溶接部の非破壊損傷計測による余寿命評価法の確立を想定したモデル研究として、マイクロスラリーエロージョン法(MSE)を用いた高温クリープ損傷評価と余寿命予測法の構築を行う。

iii 成果の概要

1)水素脆化

横堀が提案した小型試験片を用いた疲労条件下での水素脆化敏感性試験法が燃料電

池で走る自動車の電磁弁に使用される種々の電磁ステンレス鋼に対して適用可能であることを示した。本実験法を用いて系統的実験を行い、水素脆化敏感性を [de-cohesion model] と [HELP] 機構に定量的に分離評価および総合的に評価する方法を提案した。本方法により、Cr の含有量を 18-20%程度に含ませることが耐水素脆化性の一つの有効な方法であることを見出した。その評価例を下図に示す。



ベクトル r_H 値により、実験による水素脆化敏感度の定量オーダリング化に成功し、K-M45 の電磁ステンレス鋼が最も r_H が小さく、耐水素脆化性があることを示した。

Steel Type	$\eta_{1C,C}$	$\eta_{2C,HE}$	$\eta_{1H,F}$	$\eta_{2H,HE}$	$ \vec{r}_H $	$N_{Corrosion}/N_{Air}$	$N_{Hydrogen}/N_{Air}$
K-M45	◎ 1.01	○ 0	◎ 1.88	2.11	◎ 2.83	◎ 91×10^{-2}	◎ 46×10^{-2}
K-M62F	○ 2.06	○ 0	2.58	3.07	4.01	○ 43×10^{-2}	○ 19×10^{-2}
K-M38	2.68	○ 0	2.66	○ 1.45	○ 3.03	37×10^{-2}	5.1×10^{-2}
K-M35FL	2.70	1.66	3.86	◎ 1.34	3.87	13×10^{-2}	0.68×10^{-2}
2.25Cr-1Mo	2.09	3.23	○ 2.15	6.57	3.97	29×10^{-2}	15×10^{-2}
K-M31	3.11	0.44	4.22	2.84	4.85	4.0×10^{-2}	0.91×10^{-2}

今後の計画：他の材料への適用と水素拡散解析との比較による材料開発への展開

図 III-2.8.4-13 各種電磁ステンレス鋼の実験による水素脆化敏感性の定量評価結果 (r 値が小さいほど耐水素脆化性に富む。18-20%の K-M45, K-M38 の r 値が小さい)

2) マイクロエロージョン法を用いた高温クリープ損傷評価と余寿命予測法
主として、ガスタービンに用いられる Ni 基超合金 (IN100) について研究を行い、横堀の提案するクリープダクティリティと余寿命を評価する QL*パラメータと MSE を組み合わせて、MSE による微視研削抵抗値からクリープ余寿命を予測する基礎基盤的方法を構築して特許出願している。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

「水素脆化敏感性評価法」は、アルミニウム合金、Ti 合金や他の鋼材に適用可能であることから、今後は、他の材料への適用を試み、材料開発への貢献を試みる。

「MSE 法による余寿命予測法」は高温時間依存型破壊機構に従う材料の余寿命予測に適用できる。また、本方法を自動車溶接部の非破壊損傷計測に適用するため、現在、SIP 溶接グループの広瀬先生との連携研究の準備を行っている。

⑭ 志波 光晴（物質・材料研究機構）

i 研究者名/研究テーマ名

志波光晴/CFRP・金属接合部を対象とした非破壊評価法の開発

ii 研究の目的

構造物の軽量化を目的に高比強度材料である CFRP を対象に、CFRP 間や CFRP と金属等の接合、接着の信頼性を保障する非破壊評価手法の基礎検討を行った。高分子系接着剤を用いた接合部の非破壊評価においては、接合欠陥として接着不良や界面剥離があり、接合劣化として水浸漬による材質劣化が課題となる。そこで、代表的な力学測定手法である超音波及び新しい電磁気測定手法としてテラヘルツ波を用いて、各々接合欠陥及び接合劣化の検出についての基礎検討を行った。

iii 成果の概要

超音波においては、材料中に存在する閉じた界面への超音波入射による非線形超音波発生メカニズムを検討するため、3次元固体中の閉じた界面の改良型差分法における計算モデルを構築し、それを用いて2次元での現象を検討した。界面を閉じる力としての圧縮応力分布が存在する場合は、1次元でのシミュレーションで得られたのと同様に、界面の開閉口により、超音波透過波形の鋸歯状化が生じることが分かった。また2次元の有限長の閉じた界面においては、界面を閉じるための圧縮応力が存在しない場合でも、入射超音波ビームの音場分布や、界面端部からの超音波の回り込みにより、微小な開閉口現象が生じ、透過超音波波形に影響することが分かった。以上のことから、2次元における界面開閉口現象と観測される波形との関係は、界面の大きさや超音波の音場など、様々な要因が影響することが推測され、今後、様々な条件での計算機シミュレーションによる検討を元にした測定方法の開発が重要と考えられる。

テラヘルツ波においては、THz-TDS で測定した薬液浸漬試験片の複素屈折率は、侵入した薬液の量と線形関係にあった。特に酸が侵入した場合、吸収係数は周波数が高いほど増加が大きい。薬液浸漬試験片の吸収係数は、水（溶媒）と酸（溶質）の質量分率の線形モデルであらわすことができ、これを利用することで吸収係数の変化量から、水と酸の侵入量をそれぞれ求めることが可能である。今回は溶媒と溶質の2成分のみだったが、周波数ごとにモデル式が成り立つため、3成分以上の侵入量を求めることも可能性がある。つまり、多数の溶質が混在するプロセス流体や下水環境で使用される高分子材料の薬液侵入劣化を、THz-TDS によって非破壊で評価することができるようになる。また、塩基性水溶液に浸漬した樹脂試験片は樹脂が腐食し、通常の数倍の水を吸収する。この場合においても、THz-TDS による吸収係数を測定することで、水の侵入量や腐食厚さを評価することが可能であり、高分子系設置薬剤による界面劣化をテラヘルツ波により評価できる可能性が示された。

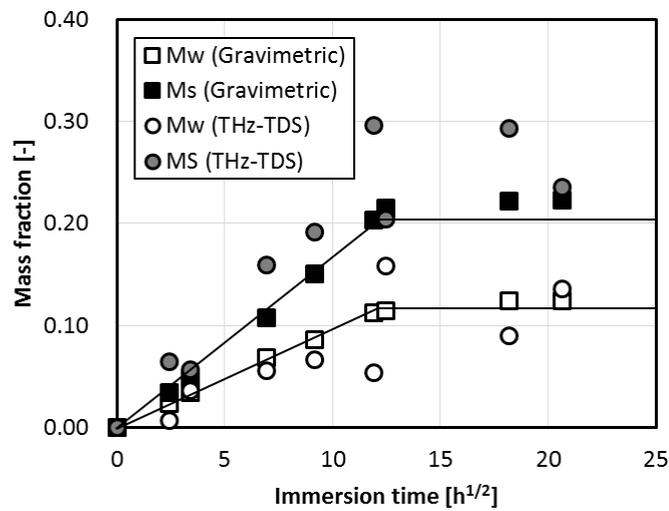


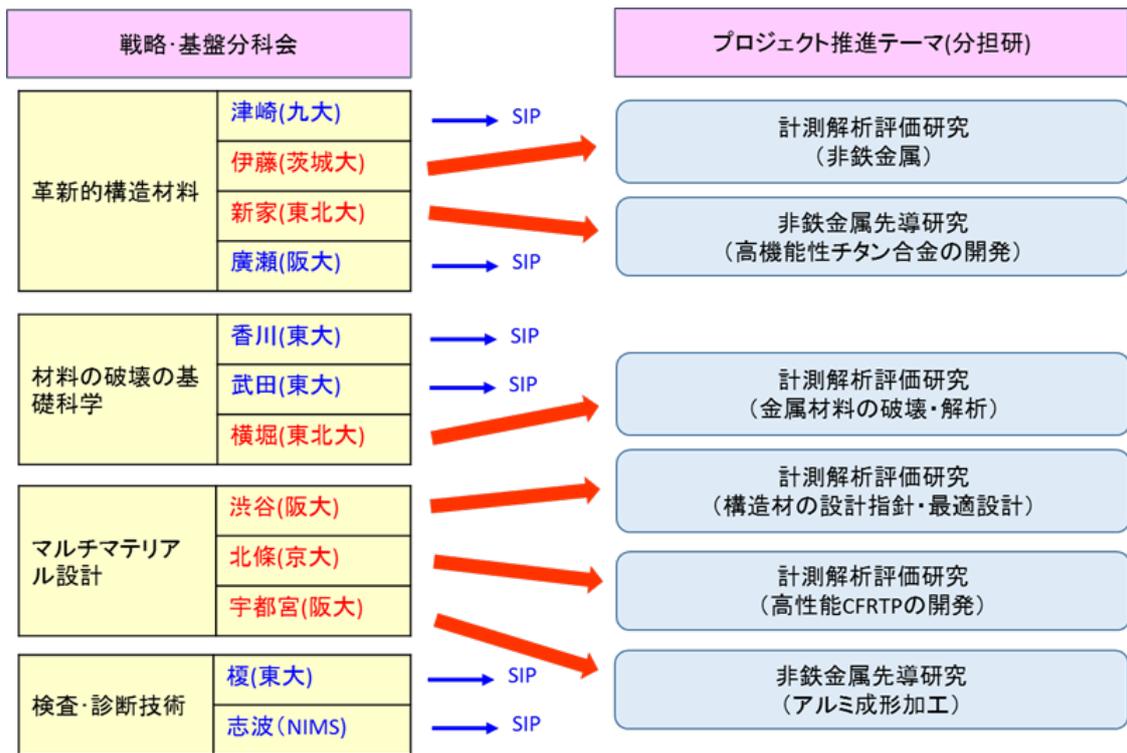
図 III -2.8.4-14 水と硫酸の質量分率 MWater、MSulfate の質量測定 (“Gravimetric”) 及びテラヘルツ (“THz-TDS”) で求めた値の比較

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

接合部の検査においては、従来の超音波探傷では検出できない接触した未接合部の検出が重要である。非線形超音波を対象とした計算機シミュレーションにより、非線形超音波を用いることで、この未接着部を検出できる可能性が示され、製造時の非破壊検査の可能性が示された。

高分子系接着剤の信頼性評価に当たり、劣化の評価が重要である。テラヘルツでは、FTIR よりも浸透深さが深い内部の材料特性が評価できる。THz-TDS 法を用いて、複素屈折率吸収係数を測定することで、水の侵入量や腐食厚さを評価することが可能であり、高分子系接着剤による界面劣化をテラヘルツ波により評価できる可能性が示された。

2015年度からは、研究調査委託先研究者の一部がSIPプロジェクト（内閣府）の課題担当研究者に移行すること、また、プロジェクト推進テーマとの関連性をより強くさせて、研究成果の展開をより加速させることを目的として、図Ⅲ-2.8.4-15に示すように体制を変更した（戦略・基盤分科会専門委員会委員は、従来どおりの体制で実施している）。



*小関（東大）、鳥塚（兵庫県立大）は、SIPへ移行

図Ⅲ-2.8.4-15 研究調査と推進テーマとの関連性（2015年度より体制変更）

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.4-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	1	0	12	0	0	0	0	0	0
2014FY	9	0	32	0	0	0	0	0	1
合計	10	0	44	0	0	0	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ2.8.4-5 特許の件数（内訳） 【2015年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.5[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

2.8.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、2015年度では自動車の軽量化を実現する非鉄金属分野の中で革新的低コスト化技術に注目し、2016年度以降の新しい研究課題につながる加工成型技術について先導的研究を実施する。

(2)位置付け、目標値

粉末冶金法によるチタン合金の製造では塑性変形機構の制御によるTi-Mn合金の強度－延性バランスの改善を検討する。Mo等を第三元素として添加することで、引張荷重時に双晶変形が生じ、双晶粒界の形成に伴う加工硬化および双晶誘起塑性による伸びの改善が期待できる、Ti-Mn-Mo合金の創製を目指す。

発泡アルミニウムの加工技術の研究開発では得られた結果を総括し、「任意の形状・特性を有する軽量高強度の構造部材」の少量多品種製造法として、ポーラス金属の表面およびバルク加工の優位性を考察する。

表Ⅲ-2.8.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
チタン合金の製造技術開発	Ti-Mn-Mo合金の創製	—	—	双晶機構を利用した強度延性バランスを検討。
発泡アルミニウムの加工技術の研究開発	バルク加工の優位性を考察	—	—	任意形状付与技術から固める。

(3)全体計画

本事業では、製造プロセスの視点から低コスト化が期待できる粉末冶金法によるチタン合金の製造技術と軽量化と強度の両立を目指した発泡アルミニウムの加工技術の研究開発を行う。

(4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が2大学に必要な研究開発を再委託して実施した。

(5)運営管理

特記事項無し。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項無し。

2.8.5.2 研究開発成果（本テーマは 2015 年度で終了した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.5-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	研究開発成果	達成度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
チタン合金の製造 技術開発	Ti-Mn-Mo 合金の創製	加工熱処理等による微細組織制御方法を確立できた。	○	
発泡アルミニウムの加工技術の研究 開発	バルク加工の優位性を考察	気孔率の分布の意図的な導入と微構造制御方法を確立した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.5-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
チタン合金の製造 技術開発	本テーマは 2015 年度で終了した		
発泡アルミニウムの加工技術の研究 開発	本テーマは 2015 年度で終了した		

(3)研究開発の成果と意義

本研究で開発した Ti-5Mn-3Mo 合金および 90%冷間圧延を施した Ti-13Mn 合金は、既存の輸送機器用構造材料に比べ、低コストかつより優れた強度－延性バランスあるいは高強度をそれぞれ有する。そのため、これらの合金は、Ti-6Al-4V 合金をはじめとする既存チタン合金にとって代わる可能性を秘めていると言える。また、本研究で実証した第三元素添加による塑性変形機構制御は、今後のチタン合金開発において、重要かつ有益な合金設計の指針となる。

発泡アルミニウムに対して「摩擦攪拌インクリメンタル加工」と、「インクリメンタルハンマリング」を組み合わせた表面塑性加工を適用して表面緻密層を形成することで、プラトー応力が約 1.5 倍にまで向上し、比エネルギー吸収量は、最大 2.5 倍と大幅に向上することを見出した。発泡アルミニウムをアルミニウム管に充填した後に冷間押し出し加工を行い、変形特性と密度変化を基礎的に調査した結果、発泡アルミニウムは押し出し比 10 以上の冷間押し出し加工に耐える変形能を有すること、発泡アルミニウムの押し出しではダイス通過前に大きな体積減少を示した後に押し出しが行われるという特異な押し出し特性を示すことが明らかとなった。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2016年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2015FY	2	0	14	2	0	0	0	0	0
合計	2	0	14	2	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.5-5 特許の件数（内訳） 【2016年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.6 [テーマ番号 42] 材料・接合等技術動向調査研究

2.8.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、内外の技術動向や政策支援の調査、新しい技術の可能性調査（FS）、基盤研究など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化・事業化に向けた課題抽出を進め、「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。

(2)位置付け、目標値

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、接合技術および個別材料技術の研究開発の方向性や目標、新たな研究開発分野などを設定する。特に、FS 研究および新規 FS 研究に係わる技術動向調査や自動車等輸送機器用構造材料の適用技術の動向調査を行う。

表Ⅲ-2.8.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
新たな研究分野の設定	FS 課題の設定	FS 課題のテーマ化	新規 FS 課題のテーマ化と既存テーマの再編・融合	世界の技術動向に合わせた改革を常態化
FS 課題の技術動向および適用技術の動向調査	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信の常態化	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信の常態化	世界の技術動向を常時組合員に提供

(3)全体計画

マルチマテリアル化に必須の接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP について、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査し、今後の方向性を議論し組合員に対して提言する。さらに、新規 FS 課題の抽出を来ない、将来を見据えた推進課題を提言する。

① 融合課題の推進検討

第 3 期までの接合、非鉄、鉄鋼、CFRP、マルチマテリアル設計等の研究開発状況・成果・問題点などの現状と対策をベースにして、分野の横串を通すことにより分野融合を推進し、将来への推進課題をも検討する。

② 各分野分科会の開催

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP、戦略・基盤各分科会を設置し、各研究分野内での共通課題の抽出、講演会や勉強会を通じた関連情報（技術動向、新技術）の共有等を実施し、参画するメンバー間の議論を深め、今後の方向性を提言する。

② 技術動向調査

接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRPについて、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査する。

構造材料用接合技術に関しては、特に異材接合に着目して技術課題・動向調査や海外の研究拠点の現地調査を行い、先行する欧州等の技術の現状を把握し、今後の研究の方向性（研究課題の優先順位付け等）の検討に反映する。

また、さらなる実用化に向けてマルチマテリアル化技術（接合、設計、信頼性評価）に関する技術戦略策定・軽量化車体構想策定を進める。

③ FS 課題ステアリング委員会の開催

マルチマテリアル設計技術、異材接合技術・LCA(Life Cycle Assessment)・耐食性向上・研究拠点整備に関する調査委員会では、FS以降の本研究に向けた研究指針の策定のため、各研究課題関係者や外部有識者からなる技術検討委員会を開催し、FS研究の円滑な推進に繋げる。

(4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が、外部機関への再委託も含めて実施する。

(5)運営管理

特記事項なし

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項なし

2.8.6.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.6-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
新たな研究分野の 設定	FS 課題のテーマ化	総計 9 課題（中性子、接 着、腐食、マグネ MI、 マルチマテリアル設計、 異材接合、LCA、耐食性 向上、研究拠点整備）テ ーマ化	○	
	各分野テーマの再 編および融合	後半検討課題案の策定	○	
FS 課題の技術動 向および適用技術 の動向調査	FS 課題進捗に関し て組員への情報 発信の常態化	成果報告会、TL 会議等 にて組員と情報共有	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

特記事項なし

(3)研究開発の成果と意義

特記事項なし

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.6-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2015FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	4

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.6-4 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.7 [テーマ番号 43] 計測解析評価研究

2.8.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、2015年度では計測解析評価研究として、自動車の軽量化を目指す材料開発の実現に資する基礎基盤的な研究を行う。本課題では共通的な自動車車体の設計技術、破壊機構の改善技術（破壊抑制理論構築、応力腐食割れの改善、繊維の方向による強度のばらつきの要因解析）および、より精度の高い分析技術に注目し、2016年度以降の研究を推進および新しい研究課題発掘となる計測解析評価研究を行うことを目的とする。

(2)位置付け、目標値

金属材料や複合材料における材料と破壊の問題に対する基礎科学的アプローチの検討や中性子線による材料評価による評価解析データ構築を進め、製品の実現において重要となる材料の高信頼性化あるいは効率的なスクリーニングのための非破壊評価方法やプロセスモニタリングに関する手法等の提言を行う。

表Ⅲ-2.8.7-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
金属材料の研究	材料強度特性に及ぼす強化組織の影響を明らかにする	事前に破壊を防止する破壊制御理論を構築	—	第二期にて終了
軽量金属材料の研究	疲労特性・応力腐食割れ改善の可能性を検討	疲労および水素脆化の解明	—	第二期にて終了
マルチマテリアル設計—複合材料の研究	積層構造の各部位での強度特性を評価する手法を開発	積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発	—	第二期にて終了
構造体の強度・位相最適化設計の研究	構造健全性の評価	接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法の構築	—	第二期にて終了
1.5世代中性子源の開発	電子入射システムとモジュレータの新造	構造材料評価についての測定時間を1/3程度にまで短縮する	—	第二期にて終了
熱可塑性CFRP製造プロセス最適化の研究	(本テーマは2016年度から実施した)	熱可塑性成形プロセスシミュレーション技術の構築	—	第二期にて終了
超高強度自動車ホットスタンピング部材の耐遅れ破壊性に及ぼす合金添加元素と組織の影響	(本テーマは2017年度から実施した)	耐遅れ破壊性に及ぼす添加元素の影響を明確にする(該当年度目標)	—	第二期にて終了

(3)全体計画

2014年度の研究から絞られた4つの課題と新規の分析技術、プロセス最適化技術に特化し事業を行う。

中高炭素鋼や非鉄金属材料において非破壊的に余寿命を予測する方法の構築を完成させるとともに耐水素脆化に寄与する材料工学的要因を特定する。

非鉄金属では7000系および2000系アルミニウム合金の疲労特性について、両者の差の原因を実験的に解明し、7000系合金の疲労特性改善の可能性を検討する。

CFRP等の複合材料においては板厚方向に引張り応力が作用する場合を想定して、積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発に取り組む。

自動車車体のマルチマテリアル化による構造健全性の評価方法を開発し、マルチマテリアル化の最適構造を得るために、接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法を構築する。

中性子線評価装置については加速器部のうち、劣化の激しい電子入射システムとモジュレータを新造し1.5世代器に更新する。

炭素繊維/樹脂マイクロモデルにより評価される応力規準に基づく熱可塑性CFRPの製造プロセスの最適化技術を構築する。

ホットスタンピングサンプルの作製や遅れ破壊試験を実施するための試験装置を開発し、最適な評価方法を提案する。

(4)実施体制

本テーマは、新構造材料技術研究組合（本部）から7大学に再委託して実施している。

(5)運営管理

各研究開発項目共に年2回の成果報告会での報告およびISMAでの進捗報告会を実施。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項なし。

2.8.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.7-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
金属材料の研究	事前に破壊を防止する破壊制御理論を構築	電磁ステンレス鋼の水素脆化（HE）に関して、耐水素脆化性に有効な化学成分が特定された。 金属の高温強度に関しては、経年劣化材の余寿命を予測する方法を確立した。	○	
軽量金属材料の研究	疲労および水素脆化の解明	7000系および2000系合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境の影響を明らかにした。	○	
マルチマテリアル設計－複合材料の研究	積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発	薄層化CFRTP積層板の損傷抑制性能と力学特性に与える影響を解明した。	○	
構造体の強度・位相最適化設計の研究	接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法の構築	接着接合における接合強度評価手法と解析手法を確立した。	○	
1.5世代中性子源開発	構造材料評価についての測定時間を1/3程度にまで短縮する	第1世代中性子源の運転を終了し、その後解体および1.5世代器の設置工事を進め、加速器の設置と加速器部全ての物理的接続が終了し、完工した。	○	
熱可塑性CFRP製造プロセス最適化の研究	熱可塑性成形プロセスシミュレーション技術の構築	強度モデルと熱可塑性シミュレーション手法の開発を実施するにあたっての基礎となるイメージベースモデリング技術について実用上問題ない精度でモデル化可能な技術を開発できた。	○	

超強度自動車ホ ットスタンピング 部材の耐遅れ破壊 性に及ぼす合金添 加元素と組織の影 響	耐遅れ破壊性に及 ぼす添加元素の影 響を明確にする (該当年度目標)	組織構造と遅れ破壊の関 係について基礎的な知見 得ることができた。更に 組織構造の異なる素材の 遅れ破壊特性について明 確にすることができた。	○	
--	---	--	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

2018年度以降は、これまでの成果をより実用に適するため該当する技術分野のテーマ（分担研）の中で実施する。

(3)研究開発の成果と意義

① 金属材料

電磁ステンレス鋼の水素脆化（HE）に関して、横堀等が提案する試験法と水素拡散解析法に基づいて、耐水素脆化性に有効な化学成分が特定された。さらに、1500MPaの強度を有する高強度材について、腐食環境下で誘起される疲労き裂成長速度に及ぼす水素脆化敏感性試験を行った。

金属の高温強度に関しては、単結晶および多結晶 Ni 基超合金に注目して、横堀の提案するクリープ延性なる指標、QL に基づいて、経年劣化材の余寿命を予測する方法を確立した。

② 軽量金属材料

7000系および2000系両合金における疲労き裂進展挙動の違いに水素脆化が関係するかどうかを探る目的で、両合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境の影響を調査した。その結果、湿潤環境で試験した7075系合金が最もき裂が進展しやすい結果となった。7075合金と類似の組成を有するAl-Zn-Mg系の試料においてき裂進展しやすい傾向を確認した。

③ マルチマテリアル設計—複合材料

薄層化CFRTPプリプレグを用いて、層厚の薄い積層板と、層厚を3倍として厚くした積層板の二種類の直交積層板を製作し、これらの結果を比較することで、薄層化に伴う損傷発生メカニズムの違いについて検討を試みた。CF/PA6材におけるトランスバースクラック発生のエネルギー解放率の臨界値は310 J/m²以上であり、熱可塑性樹脂利用に伴う高じん化が、薄層CFRTP積層板における損傷抑制に対して顕著な効果をもたらしていることが明らかとなった。

④ 構造体の強度・位相最適化設計の研究

自動車に代表される輸送機器の軽量化に不可欠なマルチマテリアル化に対して、接着を含めた接合構造の強度を最大にする被接合材料の最適界面形状設計手法の

提案を行った。そのために、異種材料の界面強度問題を対象に、実機での応力状態を想定した界面の多軸応力状態の破損則を同定するために、薄肉円管を用いた簡便な評価試験方法とその解析手法の提案を行った。

⑤ 小型中性子源を利用した鉄鋼材料測定をシームレスに進めるための 1.5 世代中性子源開発

低エネルギー加速器部、高周波導波管部などを全て含む線形加速器統合製作および設置 1 式、ライナック用冷却装置 1 式、冷中性子用クライオスタットを製作した。これら装置構成ブロック全てが揃い、第 1 世代中性子源の運転を終了し、その後解体および 1.5 世代器の設置工事を進め、加速器の設置と加速器部全ての物理的接続が終了し、完工した。

⑥ 熱可塑性 CFRP 製造プロセス最適化の研究

強度モデルと熱可塑シミュレーション手法の開発を実施するにあたっての基礎となるイメージベースモデリング技術については、実用上問題ない精度でモデル化可能な技術を開発できた。

炭素繊維の体積含有率で強度予測が可能となれば、材料開発に明確な目標を設定できることになり、さらには製造管理技術としても有望な技術となると考えられる。

⑦ 超高強度自動車ホットスタンピング部材の耐遅れ破壊性に及ぼす合金添加元素と組織の影響

ホットスタンピング工程における加熱温度や冷却速度を変化させて組織を制御し、材料特性の関係について検討した。塑性加工を加えるホットスタンピング (HS) に加え、水焼入れ (WQ) や金型に挟んで冷却するホットプレス工程 (HP) でサンプルを作製し、機械的特性について調査した。鋼材に C と P の添加量を変化させて、機械的特性を評価した。C の増加に伴い、引張り強度及び延性は増加傾向を示した。しかし、P の添加量を増やしても機械的特性の変化は確認できなかった。両サンプルに水素チャージして、機械的特性を評価した結果、全てのサンプルにおいて同様な低下傾向を示した。水素脆化により、強度と破断ひずみは低下したが、弾性率はわずかに上昇した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.7-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2015FY	2	4	5	0	0	0	0	0	1
2016FY	3	4	17	3	0	0	0	3	1
2017FY	2	5	12	0	0	0	0	0	1
合計	7	13	34	3	0	0	0	3	3

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.7-4 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.8 [テーマ番号 44] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study

2.8.8.1 テーマの概要

(1)背景と目的

透過力が高い中性子は、構造材料内部の様々な組織を直接観察できる強力なプローブであり、多様な構造材料開発のための共通基盤解析技術の核と成り得る。新構造材料技術研究組合（ISMA）で進行中の革新的構造材料開発の推進を加速することが期待されるため、本 FS 研究において、中性子構造材料解析装置の活用や次世代解析装置の在り方について課題を明確化する。

(2)位置付け、目標値

小型中性子線源、大型中性子線源の鉄鋼材料解析への適応性や計測精度の現状を定量的に明確化し、中性子装置の利活用方法や現在不足している機能や装置要件を明らかにする。日本における鉄鋼をはじめとする構造材料の中性子解析について、実行可能な戦略を立案する。

表Ⅲ-2.8.8-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015 年度末)	第二中間目標 (2015 年度末)	最終目標 (2016 年度末)	根拠
小型中性子線源を用いた計測精度の明確化	共通試料を用いた計測評価を実施し優位性を検証する。	—	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証する。	中性子回折・小角散乱などの手法の構造材料解析における有効性を評価するため。
小型装置開発のための設計検討	設計を提案	—	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定する。	実際に産業利用に資する小型中性子分析装置の仕様を明確化するため。

(3)全体計画

小型中性子線源装置（小型の加速器ベースの装置）、大型中性子線源装置（J-PARC 大強度陽子加速器装置）の鉄鋼材料解析への適応性や計測精度の現状を定量的に明確化し、中性子装置の利活用方法や現在不足している機能や装置要件を明らかにする。日本における鉄鋼をはじめとする構造材料の中性子解析について、実行可能な戦略を立案する。

鉄鋼材料などの共通試料を用いた計測評価によって、各構成相の体積率や集合組織、第 2 相の形態や組成、添加元素の定量などの測定精度を小型線源と大型線源で比較す

る。また、電子線、X線などの従来プローブによる観察との比較検証も行い、計測精度の手法依存性を明らかにして中性子線利用の利点と弱点を明確にする。ハードウェア開発の指針については、多様な専門家の視点で現状技術を精査して必要なスペックを提示し、計算機シミュレーションによる検証で妥当性を判断する。他手法との併用化など、装置の継続的な維持について検討する。

鉄鋼材料開発への応用に加えて、非鉄金属材料開発、高分子材料開発、接着材料開発、自動車業界に代表される輸送機器開発等への波及効果、中性子以外の量子ビーム発生による構造材料解析の可能性について調査し、小型装置の多角的利用方法を提案する。

(4)実施体制

本テーマは共同実施機関（つくば中央梅園分室（国立研究開発法人産業技術総合研究所）、千葉分室（JFEスチール株式会社）、西神分室（株式会社神戸製鋼所）、富津分室（新日鐵住金株式会社））ならびに3再委託先において取り組んだ。

(5)運営管理

計8回（2015年6回、2016年2回）の委員会を開催し進捗を報告した。委員会委員には共同実施機関、再委託先、加速器技術や中性子線技術に関する有識者から選任した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本事業目標を達成し、産業利用に特化した中性子分析手法とその利用体制の確立およびそのための研究開発プロジェクトの計画を策定することで、本分析結果を基にした軽量化材料・技術の自動車等輸送機器への普及によるCO₂排出量の削減や省エネルギー化が期待できる。また新規開発した装置を基にした高度分析サービス事業への展開も期待でき、本事業後においても様々な材料開発の高度化に貢献できる。

2.8.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

本テーマは2015年度から2016年度まで実施し、その成果は、2017年度より公募により開始した[テーマ番号52] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発に引き継いだ。

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.8-2 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2016年度末)	達成見通し
小型中性子線源を用いた計測精度の明確化	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証した。	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証する。	達成した
小型装置開発のための設計検討	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定した。	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定する。	達成した

(3)研究開発の成果と意義

中性子ナノ組織解析に関しては、J-PARC（大強度陽子加速器施設）を利用して、小型中性子源での計測用に作製した標準的試料の中性子回折等の静的測定を行い、小型中性子源の計測データの妥当性を検証した。2015年度に作製した評価サンプルについて、測定・解析を継続し、小型の加速器ベース中性子源の実力を検証した。また、小型線源で得られた結果と、ラボ X 線解析や放射光、大型線源で得られた結果の比較を行った。

小型中性子源を利用した材料評価に関しては、電子加速器ベースの中性子源と陽子加速器ベースの中性子源を活用して、構造材料の組織解析に必要な中性子実験を実施し、その実験結果を元に、将来要求される小型加速器中性子源の性能仕様を検討した。

小型中性子分析装置開発のための設計検討に関しては、2015年度の設計検討で得られた小型電子加速器の設計指針を元に、電力や冷却水、運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、定量的な設計をすすめた。中性子計測のニーズの深掘り調査を行い、その結果を中性子発生のためのターゲットとモデレーター、ビームライン、検出器の設計に反映させた開発プランを策定した。小型装置実現の技術課題を明確化して、各種装置・コンポーネントの仕様の最適化をすすめた。

実際に装置を製作する上で、放射線安全とサイズ等の課題を解決するために、放射線遮蔽材の最適化を行った。対象となる放射線は中性子線とガンマ線である。これらは物質透過能力が高いゆえに、量子プローブとして用いた場合非常に有効であるが、一方でその遮蔽が難しい問題がある。安価で物質量を稼ぐことができるコンクリートをベースに複数の材料を適材適所に用いることで、効率的に放射線を遮蔽し、安全の確保と小型化を実現し、なおかつ価格も抑えることができることが分った。

また本研究の成果を議論・吟味して学術論文にまとめつつある。

本テーマは 2015 年度から 2016 年度まで実施し、その成果は、2017 年度より公募に

より開始した[テーマ番号 52] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発に引き継いだ。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.8-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2017年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2015FY	0	0	2	0	0	0	0	1	0
2016FY	0	0	5	0	0	0	0	1	0
合計	0	0	7	0	0	0	0	2	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.8-4 特許の件数（内訳） 【2017年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.9 [テーマ番号 45] 構造用接着技術に関する Feasibility Study

2.8.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などの移動体の軽量化には、適材適所に異種材料を配置したマルチマテリアル構造が有望である。これを実現するには、異種材を接着接合することが適している。しかし、接着接合には生産性や耐久性の観点で解決すべき問題が多い。本事業は、異種材の接着接合技術に関する研究・開発プロジェクトの本格的な開始を目指し、有望なテーマに関して Feasibility Study を実施し、研究テーマとしての妥当性を検証することを目的とする

(2)位置付け、目標値

移動体の軽量化に向けた異種材接着接合技術並びに分析、評価および設計技術等を開発するために重要である技術課題に対して、2017年度より、本格的な研究開発をすみやかに開始できるように、当該研究では研究開発項目に対して FS 研究を実施し、その妥当性を海外の研究開発動向調査の結果との比較等から検証する。

表Ⅲ-2.8.9-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (2015年度末)	第二中間目標 (2017年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	接着接合機構解明のための手法を検証する	—	—	研究テーマとしての妥当性を検討する項目
検査手法の検討	その適用可能性を検証	—	—	研究テーマとしての妥当性を検討する項目

(3)全体計画

構造用接着技術に関する研究・開発プロジェクトの実施を踏まえ、重要度が高く、かつ実現可能性の高いテーマの抽出、並びにその優先順位付けを行う。2014年度に ISMA で実施した構造用接着技術調査委員会の答申に基づき、5つの課題、具体的には「新規接着剤開発のための方法論構築」、「機械的特性評価法・接合部の設計論の確立」、「表面処理法の確立」、「接合部検査手法の確立」および「接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の確立」に対して各種の研究を実施すると共に、海外の研究開発動向調査を実施し、各研究開発項目の予想される成果とその必要性から、研究項目の優先順位を決定する。

(4)実施体制

本テーマは、つくば中央東分室（産業技術総合研究所）が7機関に必要な研究開発を再委託して実施する。

(5)運営管理

特記事項無し。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項無し。

2.8.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

FS テーマのため 2015~2016 年度で実施、2016 年度末終了

表Ⅲ-2.8.9-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	接着接合機構解明のための手法を検証する	電子顕微鏡観察や、分光法、計算機化学的な手法が有効であることが確かめられた。	○	
検査手法の検討	その適用可能性を検証	実プロセスに適応可能な検査技術の絞り込みを行った。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

2015 年度終了予定であったが、一年延長になったため、2016 年度最終目標として達成度を記載

表Ⅲ-2.8.9-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2016 年度末)	達成見通し
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	電子顕微鏡観察や、分光法、計算機化学的な手法が有効であることが確かめられた。	接着接合機構解明のための手法を検証する	達成
検査手法の検討	実プロセスに適応可能な検査技術の絞り込みを行った。	その適用可能性を検証	達成

(3)研究開発の成果と意義

新規接着剤開発のための方法論の検討では、新規型耐熱性接着剤を評価した。室温で硬化可能なPP用の接着では、ボラン系接着剤の代替の可能性を検証したが、代替可能性は低いと判断した。機械的特性評価法・接合部の設計論の検討では、エポキシ系の高強度接着剤の設計とバルク状態での疲労亀裂伝ば抑制に成功した。加熱加圧水蒸気下での接着強度の超加速劣化試験法を検討した。接着強度の低下はみられたものの、低下速度は十分とはいえない。表面処理法の検討では、ポリプロピレンのプラズマ処理が有効であることが示された。接合部検査手法の検討、接着前検査では、接着強度に影響を与える濃度の汚染物質の検出が可能であることを実証した。接着後の検査では接着接合部の剥離欠陥の検出に成功している。また、接着接合部（内部）の動的なひずみ分布を検出可能であることが実証された。接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討では、接着界面の観察の結果、ナノレベルのアンカーリング効果が発現している可能が示唆された。またポリプロピレンの表面処理の効果は、処理法によってその接着メカニズムが異なることが示された。分光法からは、極性官能基に形成はみられなかった。またナノレベルの孔に埋め込まれた接着剤（樹脂）の剥離過程における状態を計算化学的にシミュレーションする手法を検討した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.9-4 論文、外部発表等の件数（内訳）

【2017年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2015FY	0	0	39	2	0	0	0	3	1
2016FY	4	0	50	5	0	0	0	1	2
合計	4	0	89	7	0	0	0	4	3

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.9-5 特許の件数（内訳）

【2017年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.10 [テーマ番号 49] マルチマテリアル設計技術開発 (FS 研究)

2.8.10.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機等移動体の軽量化には、異種材料を適材適所に配置したマルチマテリアル構造の導入が課題である。ただし、その設計手法は、いまだ確立されておらず現状では、単なる材料置換に留まっており、異材接合のモデル化も含めてマルチマテリアル構造最適化の設計手法の確立が急務となっている。

マルチマテリアル化による車体構造の軽量化実現のためにマルチマテリアル設計技術の新規研究課題のテーマアップを予定している。本技術の根幹となるトポロジー最適化技術に基づくマルチマテリアル構造設計ツールの開発に関して Feasibility Study を実施して、その妥当性を検証し、本格的研究での目標と実施すべき内容を明確化することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

本 FS 研究では、マルチマテリアル設計技術としてレベルセット法によるトポロジー最適化手法の適用可能性の検証、および本格的研究での検討課題の抽出、設計ツール構築までのシナリオ設定を行う。

表Ⅲ-2.8.10-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
マルチマテリアル設計技術	レベルセット法によるトポロジー最適化技術を適用するための解析システム構成、ソルバー（計算を実行するソフトウェア）との連携、設計解析モデルの実現性等につき検証を行い、本格研究での目標、実施内容を明確化する。	2017 年度で FS 研究は終了。	2017 年度で FS 研究は終了。	ユーザー（自動車メーカー）ニーズに基づいた設計システムおよびツールの仕様による。

(3)全体計画

本プロジェクトにて開発中の各種構造材料および接合技術の有効性や構造最適化も含めた構造体としての軽量化効果を明確にするために設計ツールの開発を行う。

2017 年度に実施した、本 FS 研究では、マルチマテリアル設計技術としてレベルセット法によるトポロジー最適化手法の適用可能性の検証、および本格的研究での検討課題の抽出、設計ツール構築までのシナリオ設定を行った。

本格研究では、FS 研究にて整備・検証した解析システムをベースに剛性システム設計、動的システム設計を実施し、最終的に ISMA 開発材料による詳細設計を実施し、車体構造軽量化に向けたマルチマテリアル設計案を提示する。

(4)実施体制

新構造材料技術研究組合が京都大学に再委託し、且つ自動車技術会とも連携し、実施する。

(5)運営管理

テーマ番号 42 に設置する委員会と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

開発する設計ツールを自動車関連企業に展開することにより、マルチマテリアルを基にしたボディ構造およびボディ部分構造等の高機能化設計の支援を行うことができる。また、高機能で軽量なボディ構造案を提案し、その構造案を自動車関連企業に展開することにより、大幅な軽量化を図ることができ、CO₂削減・省エネルギーが可能となる。

2.8.10.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.10-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
マルチマテリアル 設計技術	レベルセット法によるトポロジー最適化技術を適用するための解析システム構成、ソルバー（計算を実行するソフトウェア）との連携、設計解析モデルの実現性等につき検証を行い、本格研究での目標、実施内容を明確化する。	単一材料を対象としたレベルセット法によるトポロジー最適化ソフトウェアのプロタイプを開発した。 解析システム構成、ソルバー（計算を実行するソフトウェア）との連携、設計解析モデルの実現性等につき検証できた。 商用ソフトによる最適構造との比較をすることで、開発したプログラムの優位性を検証できた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

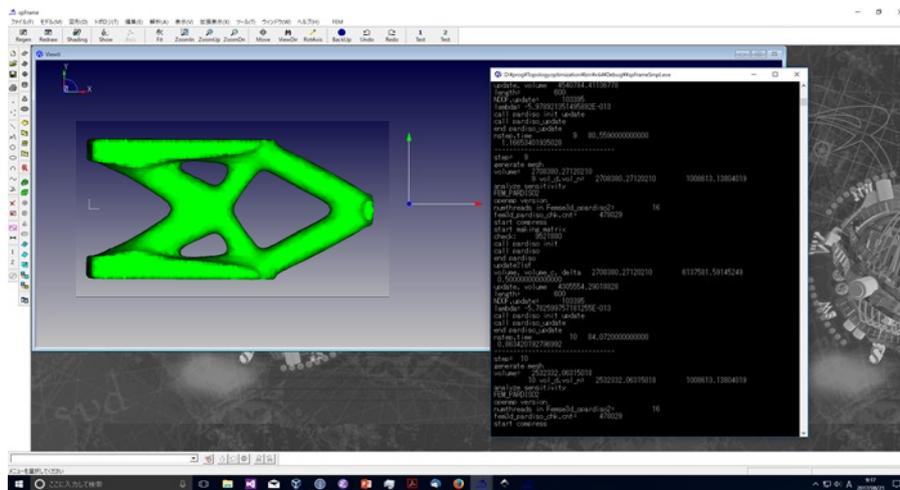
(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.10-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
マルチマテリアル 設計技術	テーマ 59 でトポロジー最適 化手法を適用した解析シス テムを構築している。	FS 研究での検証結果に基 づき、トポロジー最適化 手法を適用した解析シス テムを構築し、マルチマ テリアル化による車体剛 性システム設計、動的シ ステム設計を行い、最終 的に本プロジェクト開発 材料適用による詳細設計 を行い、マルチマテリア ル化設計案を提示する。	達成の見込み

(3)研究開発の成果と意義

図Ⅲ-2.8.10-1 に FS 研究で開発した単一材料を対象としたレベルセット法によるトポロジー最適化ソフトウェアのプロタイプを示す。ソフトウェアのプラットフォームに、(株)アルモニコスが開発している **spFrame** を用いてシステムを開発した。本システムにより、設計領域の設定、最適化、最適化結果の表示等が一貫して行える。図Ⅲ-2.8.10-2 に、商用ソフトウェアを用いて密度法により得られた最適構造との比較結果を示す。これより、密度法により得られた最適構造には、多くの空孔を含む構造を示し、最適構造の境界を明確にできないグレースケールを多く含むのに対して、レベルセット法によるトポロジー最適化により得られた最適構造は、グレースケールを含まず極めて明瞭な境界をもち、実用的な設計案を得ることができることがわかる。また、これにより、マルチマテリアル化へ展開した場合にも、異なる材料の境界も明確に表現でき、その接合状態等の検討も期待できる。



図Ⅲ-2.8.10-1 レベルセット法によるトポロジー最適化ソフトウェアのプロタイプ

	フロントバンパーメンバー	サスペンションタワー
初期構造		<p>設計領域: アルミ</p> <p>非設計領域: 鋼板</p>
レベル セット法 によるト ポロジー 最適化結 果		<p>明瞭な形状</p>
密度法に よる最適 化結果 (商用ソ フトウェア の利用)	<p>グレースケール</p> <p>グレースケール</p>	<p>断面</p> <p>グレースケール</p>

図Ⅲ-2.8.10-2 レベルセット法によるトポロジー最適化結果と密度法による最適化結果との比較

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.10-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォ ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.10-5 特許の件数（内訳） 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.11 [テーマ番号 52] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発

2.8.11.1 テーマの概要

(1)背景と目的

中性子は、構造材料内部の様々な組織を直接観察できる極めて強力なプローブであるため、革新鋼板、非鉄金属材料や CFRP 等の複合材料の性能高度化のみならず、マルチマテリアル構造の接合部や接着界面の状態把握までも可能とする構造材料開発における横断的な基盤技術になることが期待されている。しかしながら、中性子を用いた構造材料の分析結果を実際の材料開発に迅速にフィードバックするためには、解析技術、小型中性子解析装置、ユーザーが使いやすい利用体制など克服すべき課題が存在する。本事業ではこれらの課題を解決することで、中性子等量子ビームによる構造材料解析技術を産業利用において実用化し、これによる構造材料、接着・接合技術の高強度化やこれらの結果を基にした車両重量の抜本的な軽量化による省エネ化・CO₂排出量削減を図るとともに、我が国の自動車・航空機等の輸送機器産業や材料産業等の競争力強化を目指すことを目的とする。

(2)位置付け、目標値

自動車や航空機等の輸送機器の軽量化のため、これまで X 線や電子線等による量子ビーム計測解析技術が適用され、高強度化など新しい構造材料開発に活用されてきた。その中で中性子は量子ビームの中でも構造材料に対する透過力が極めて高いという大きな特長を有しており、材料内部の解析への活用が期待されている。本事業に先立つ調査研究では、中性子による構造材料等の解析の有効性、企業の利用ニーズの高さ等が判明するとともに、現状の中性子解析装置や解析手法への要求や問題点も顕在化した。そこで本事業では、以下 3 つの研究開発内容を遂行し、それぞれ目標を達成することで、その問題点を解決し、我が国の産業競争力強化に資する中性子による解析技術を実用化することで、構造材料等の性能高度化を加速させる。

表Ⅲ-2.8.11-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用	共通の鉄鋼試料等による小角散乱、ブラッグエッジ、回折等の測定ならびに測定方法の立案を行い、材料組織や接着・接合部の情報に翻訳するためのデータ解析技術の指針を得る。	第二相ナノ析出物の化学組成の変化、水素トラップに効果的な析出物形態、オーステナイト中の炭素濃度分布、高温加工中の転位密度同定、接合部のマイクロ組織および残留歪み分布の二次元マッピング等の解析手法を確立する。	2019 年度で終了したため、第三中間目標と同じ。	産業利用に即した様々な中性子分析手法を確立することで、構造材料の高度化が期待できるため。

<p>構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追求した小型装置による構造材料評価技術の開発</p>	<p>新規小型中性子装置のための設置場所を整備し、主要な構成機器を導入するとともに、次年度以降に導入する機器の詳細仕様を決定する。</p>	<p>電子ビームパワー約10 kWクラスの電子加速器、非結合型減速材をもつ中性子源、約8mの飛行路長をもつビームライン、中性子波長0.4 nmで検出効率20%以上の中性子検出器を有する小型装置を2018年度末までに開発・設置し、稼働を開始する。既存の小型装置ほかにより構造用金属材料の接合試料に対して、中性子とその他量子ビームのハイブリッド計測を行い、各種測定手法の相互関係を明らかにする。</p>	<p>0.6%程度の波長分解能でブラッグエッジイメージング測定が可能な小型装置を開発し、マルチマテリアル構造等、各種接合部の応力・組織イメージング等の解析装置として確立する。</p>	<p>産業ニーズが高いブラッグエッジイメージングが測定できる小型装置の開発により、構造材料の高度化を加速できるため。</p>
<p>中性子構造材料解析ネットワークの構築</p>	<p>2019年度より実施する。</p>	<p>新規および既存（北大、理研）小型装置ならびに大型装置において標準試料を測定し、計測量の精度や計測に必要な時間を明らかにする。ネットワーク内での、データ形式ならびに試料ホルダーの共通化を行う。またデータ解析法ならびに解析ツールの共通化に関する指針を示す。得られた情報を基にして、各装置の性能や得意とする分析手法等の構造材料の分析に必要な情報が得られる解析事例集の雛形を作成する。産業側に有用な測定カルテ・ガイドラインならびにその運用体制と情報管理体制の作成に関する指針を示す。</p>	<p>産総研・北大・理研を中心とした小型中性子解析ネットワークを構築し、各装置の性能などのユーザーが必要とする情報を網羅した測定ガイドライン等を作成・公開する。</p>	<p>ユーザーに対して中性子分析の導入に対する閾値を低減させることで、より多くの企業ユーザーの利用・参入が期待できるため。</p>

(3)全体計画

研究開発内容Ⅰの「中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用」では、主に既存の大型・小型中性子装置等による分析結果を実際の材料組織や接着・接合部の情報に翻訳するためのデータ解析技術を確立することで、非専門家でも容易に実際に必要な材料組織等の情報を獲得できるようにする。各分担機関が得意とする金属材料の高度化に有用な回折、小角散乱、ブラッグエッジイメージングなどの解析技術を確立する。まずは鉄鋼材料を中心に解析技術・材料開発を進め、非鉄金属、CFRP、マルチマテリアル接合部へ展開していく。

研究開発内容Ⅱの「構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発」では、産業用・構造材料分析用の小型中性子装置をつくば梅園分室において新規に開発する。本装置は、調査研究で最もニーズ・期待が高かったブラッグエッジイメージング法に重点化させ、さらに高感度検出器など先端的な要素技術の活用や、研究開発内容Ⅰで確立する解析法の導入により、効果的かつ効率的に新規装置開発を完了させるとともに、産業的な利用価値を最大限に高めた測定装置として実用化する。また新規装置ならびに既存小型装置における構造材料計測法やデータ解析手法も確立する。併せて、同一試料の多面的な分析のため、中性子のみでなく、X線、電子等を用いたハイブリッド分析計測技術も確立する。

研究開発内容Ⅲの「中性子構造材料解析ネットワークの構築」では、産総研、北大、理研の装置側と企業等のユーザー側が連携し、構造材料評価のための小型中性子装置の解析ネットワークを構築する。このネットワークでは、各装置の性能や得意とする分析手法等をユーザーに示すための仕組みの構築、ならびに各装置間での計測ノウハウ等の情報共有やデータ形式等の共通化という装置側の連携体制づくりを行う。これにより材料・産業側ユーザーの中性子分析に対する利用の閾値を下げ、多くのユーザーに本事業で開発する分析手法・装置を活用いただけるようにする。

本事業ではこの3つの研究開発内容を有機的に連携させて、中性子解析手法を多種多様な産業ニーズに迅速に対応できるものとすることで、革新的構造材料の開発を促進させる。

(4)実施体制

本テーマは以下の実施機関（分室）ならびに再委託先において取り組んでいる。

- ・新構造材料技術研究組合（ISMA）： つくば中央梅園分室（国立研究開発法人産業技術総合研究所、担当研究開発内容Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、富津分室（日本製鉄株式会社、Ⅰ・Ⅲ）、千葉分室（JFEスチール株式会社、Ⅰ・Ⅲ）、西神分室（株式会社神戸製鋼所、Ⅰ・Ⅲ）、夏島分室（株式会社日産アーク、Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、つくば千現分室（国立研究開発法人物質・材料研究機構、Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、2018年度より）
- ・再委託先： 国立大学法人 北海道大学（Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、国立大学法人 東京工業大学（Ⅱ）、国立研究開発法人 理化学研究所（Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構（Ⅱ）、（国立研究開発法人物質・材料研究機構、Ⅰ・Ⅰ

I・III、2017年度まで)

(5)運営管理

年2回の全体会議等において各分室ならびに再委託先と綿密に情報交換・議論を進めている。加えて研究開発内容Ⅱに関しては、主たる実施機関であるつくば中央梅園分室（産業技術総合研究所）において、新規装置開発・整備・利用・安全等に関する会議を週1回以上開催し、進捗管理を行っている。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本事業目標を達成し、産業利用に特化した中性子分析手法とその利用体制を確立すれば、本分析結果を基にした軽量化材料・技術の自動車等輸送機器への普及によるCO₂排出量の削減や省エネルギー化が期待できる。また新規開発した装置を基にした高度分析サービス事業への展開も期待でき、本事業後においても様々な材料開発の高度化に貢献できる。

2.8.11.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.11-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決 方針 ※未達の場合のみ
中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用	第二相ナノ析出物の化学組成の変化、水素トラップに効果的な析出物形態、オーステナイト中の炭素濃度分布、高温加工中の転位密度同定、接合部のマイクロ組織および残留歪み分布の二次元マッピングなどの解析手法を確立する。	小型装置(北大・HUNS)において、中性子小角散乱法を用いて、鋼中の第二相ナノ析出物のサイズ分布等を測定し大型装置(J-PARC)による測定結果とよく一致する結果を得た。中性子とX線小角散乱を併用し、両者の散乱強度の差異を用いてナノ析出物の化学組成を同定する手法を確立した。水素チャージ前後の中性子小角散乱測定により水素とナノ析出物の相互作用を解析できるようにした。J-PARCにおける中性子回折測定とプロファイル解析から、鋼中の炭素濃度分布の同定を行い、高温加工中のその場測定からは転位密度の同定を実現した。また、中性子透過ブラッグエッジ測定による第二相体積率や炭素濃度の同定、異材接合部のマイクロ組織変化の二次元マッピング等の基礎的知見を得た。さらに小型装置(理研・RANS)を用いて接着部の水の挙動を中性子イメージングで観測するための基礎実験を行った。	○	

<p>構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追求した小型装置による構造材料評価技術の開発</p>	<p>電子ビームパワー約 10 kW クラスの電子加速器、非結合型減速材をもつ中性子源、約 8 m の飛行路長をもつビームライン、中性子波長 0.4 nm で検出効率 20% 以上の中性子検出器を有する小型装置を 2018 年度末までに開発・設置し、稼働を開始する。既存の小型装置ほかにより構造用金属材料の接合試料に対して、中性子とその他量子ビームのハイブリッド計測を行い、各種測定手法の相互関係を明らかにする。</p>	<p>つくば中央梅園分室に設置した新規小型装置において、ブラッグエッジ等中性子イメージング測定に適した中性子ビームを出射するための電子加速器や中性子源等の整備・調整を、北海道大学、東京工業大学、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構の協力を得て進めた。電子加速器を駆動して中性子ビームを計測することに成功し、固体メタン減速材で期待される通り 0.4nm 周辺の中性子波長スペクトルを検出し確認した。さらに、鉄鋼材料のブラッグエッジの測定や、ラジオグラフィによる構造材の内部観察にも成功した。</p> <p>接合試料等に対して、中性子ラジオグラフィ観察および透過ブラッグエッジ測定だけでなく、反射光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、X線ラジオグラフィ観察、EBSD 測定、電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) 分析などのハイブリッド計測を行い総合的な分析と考察を行った。</p>	<p>△</p>	
--	--	---	----------	--

<p>中性子構造材料解析ネットワークの構築</p>	<p>新規および既存小型と大型装置において標準試料を測定し、計測精度や必要時間を明らかにする。ネットワーク内で、データ形式・解析法ならびに解析ツールの共通化に関する指針を示す。各装置の性能や得意とする分析手法はじめ必要な情報が得られる解析事例集の雛形を作成する。産業側に有用な測定カルテ・ガイドラインならびにその運用体制と情報管理体制の作成に関する指針を示す。</p>	<p>中性子構造材料解析ネットワークにて、新規小型装置（産総研）、既存小型装置（北海道大学、理化学研究所）ならびに大型装置の有効な利用方法を検討した。すなわち、標準試料ほかの共通試料測定で得られたデータを整理し、各装置における計測精度や計測時間等とともにデータ解析事例集や3つの小型装置の紹介資料の作成・整備を進めた。また、測定カルテ・ガイドラインのひな形を検討し、試料ホルダーやデータ解析ソフトの共通化、情報管理体制について議論を開始した。</p>	<p>△</p>	
---------------------------	--	---	----------	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.11-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
<p>中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用</p>	<p>小型装置(北大・HUNS)において、中性子小角散乱法を用いて、鋼中の第二相ナノ析出物のサイズ分布等を測定し大型装置(J-PARC)による測定結果とよく一致する結果を得た。中性子とX線小角散乱を併用し、両者の散乱強度の差異を用いてナノ析出物の化学組成を同定する手法を確立した。水素チャージ前後の中性子小角散乱測定により水素とナノ析出物の相互作用を解析できるようになった。また、J-PARCにおける中性子回折測定とプロファイル解析から、鋼中の炭素濃度分布の同定を行い、高温加工中のその場測定からは転位密度の同定を実現した。また、中性子透過ブラッグエッジ測定による第二相体積率や炭素濃度同定、異材接合部のマイクロ組織変化の二次元マッピング等の基礎的知見を得た。さらに小型装置（理研・RANS）を用いて接着部の水の挙動を中性子イメージングで観測するための基礎実験を行った。</p> <p>本課題は、2029年度で終了し、現在は得られた成果を研究開発項目ⅡとⅢへ移転中である。</p>	<p>第二相ナノ析出物の化学組成の変化、水素トラップに効果的な析出物形態、オーステナイト中の炭素濃度分布、高温加工中の転位密度同定、接合部のマイクロ組織および残留歪み分布の二次元マッピングなどの解析手法を確立する。</p> <p>(2019年度で終了したため、第三中間目標と同じ)</p>	<p>2019年度末に達成し、終了した。</p>
<p>構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発</p>	<p>短期間（2年半）で新規小型中性子装置を構築して中性子ビーム発生に成功し、ブラッグエッジやラジオグラフィーの測定を行った。現在、標準試料等を計測することで、安定運転のための装置調整を進めている。また、中性子波長スペクトル測定等することで、装置性能評価を進めている。</p> <p>中性子以外にも電子顕微鏡や放射光等を用いて、構造材料開発のハイブリッド計測データの蓄積と解析を進めている。</p>	<p>0.6%の波長分解能でブラッグエッジイメージング測定が可能な小型装置を開発し、マルチマテリアル構造等、各種接合部の応力・組織イメージング等の解析装置として確立する。</p>	<p>十分に達成可能の見通し</p>

<p>中性子構造材料解析ネットワークの構築</p>	<p>中性子構造材料解析ネットワークにて、新規小型装置（産総研）、既存小型装置（北海道大学、理化学研究所）ならびに大型装置の有効な利用方法を検討した。すなわち、これまでの標準試料の測定結果ならびに新規の測定結果に関するデータを整理し、各装置における計測精度や計測時間等とともに解析事例集や装置紹介資料の作成・整備を進めた。また、測定カルテ・ガイドラインのひな形を検討し、試料ホルダーやデータ解析ソフトの共通化、情報管理体制についても議論を開始した。</p>	<p>産総研・北大・理研を中心とした小型中性子解析ネットワークを構築し、各装置の性能などのユーザーが必要とする情報を網羅した測定ガイドライン等を作成・公開する。</p>	<p>十分に達成可能の見通し</p>
---------------------------	--	--	--------------------

(3)研究開発の成果と意義

研究開発項目 I：中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用

本研究開発項目では、非専門家でも容易に必要な材料組織などの情報を得られるように、既存の中性子装置等による各種構造材料の分析結果を実際の材料組織や接合・接合部の情報に翻訳するためのデータ解析技術を確立することを目標としている。様々な分析手法による構造材料開発を推進するため、本課題では中性子回折、小角散乱、ブラッグエッジイメージングなどの中性子を用いた解析手法等の高度化や材料解析への最適化を進めるべく、下記の5つの研究開発テーマに取り組んでおり、各研究開発成果を以下に記す。なお、本研究開発項目は2019年度をもって全て終了した。

I-①：核生成段階における第二相ナノ析出物のキャラクタリゼーションと材料組織制御への適用

まず組織状態を変えたモデル合金試料の作製と透過電子顕微鏡観察や硬さ試験によるキャラクタリゼーションを行った。北海道大学において高度化した小型中性子計測装置（HUNS-II）や大型装置である J-PARC（BL20 iMATERIA、BL15 大観）において、本試料の中性子やX線による小角散乱実験を行い、散乱プロファイルの強度比と組成毎の散乱長密度との比較によるナノ析出物の組成の推定を行った。これら分析結果を比較検討したところ、ナノ析出物のサイズ領域では、測定サイズ 1 nm 以下を実証し、小型中性子源装置によって大型中性子源装置による測定とほぼ同程度の測定が可能であることを確認した。最終目標である「中性子と X 線の小角散乱プロファイルの散乱強度比と組成毎の散乱長密度を比較してナノ析出物の組成を推定する手法」を確立した。さらに、この手法の非鉄合金への適用も進めた。

I-② 析出物と水素の相互作用の計測と遅れ破壊抑制への適用

まず高度化した北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)を用いて、水素チャージした直後および脱水素処理した後に中性子小角散乱測定がすみやかに行える実験手順、ならびに熱膨張測定による水素チャージの簡便検出法を確立した。共通試料である Nb 系析出物を含む鋼の引張り試験を実施した。引張り強度と、硬さおよび微細析出量の傾向が良く一致し、析出強化挙動を確認した。本装置において水素チャージ有無の共通試料の中性子小角散乱プロファイル測定した。その比較から散乱強度の水素チャージ有無での差異を解析できたことで、析出物による水素トラップ効果を確認した。さらに磁気散乱を活用することで、実用上問題になると想定される平均水素量に近い 5 ppm レベルの水素の局所的濃縮をとらえる方法の開発が可能であることを示した。実用性を重視した本共通試料では、析出物量および水素含有量が少ないため、測定を繰り返して統計精度を高めた結果、最終目標である「鋼中のナノ析出物と水素の相互作用を中性子小角散乱法によって実用レベルの評価ができること」を明らかにした。

I-③ ブラッグエッジスペクトルおよび回折プロファイル形状を用いた炭素濃度分布解技術の開発

炭素量の異なる 8 種類のオーステナイト鋼単体および 5 種類の鋼を重ね合わせた模擬試料体を作製した。本試料について、J-PARC での中性子回折および中性子透過ブラッグエッジ測定を行い、得られたデータを解析し炭素濃度の同定法を提案した。走査電子顕微鏡 (SEM) 観察や電子線後方散乱回折 (EBSD) 測定等を加えて総合的に検討した結果、最終目標である「炭素濃度差 0.2mass% 評価の中性子回折による達成」が示された。本成果は学術誌 *Materials Characterization* に投稿し掲載された。加えてラボ X 線回折のラインプロファイル解析による簡易測定法を実施し有用性を明らかにした。

I-④ その場中性子散乱回折による熱処理および加工熱処理による組織形成機構の解明

試料として、富津分室、千葉分室、西神分室の提案で溶解作製した低合金鋼を用いた。J-PARC に加工熱処理シミュレーターをセットし、本試料に高温での圧縮塑性加工を施した後、種々な速度で冷却しながら、その場中性子回折測定を行った。高温加工後 10 秒毎に得られた中性子回折プロファイル全体を一括フィットする新しい解析方法(Convolutional multiple whole profile: CMWP 法)を用いることで転位密度を同定することができ、最終目標を達成した。これらの結果等に関して、学術誌 *Acta Materialia* に学術論文が、学術誌 *Science and Technology of Advanced Materials* に解説論文が掲載された。

I-⑤ マルチマテリアル構造材の接着界面及び接合部の状態モニタリング手法の確立

接合部のマイクロ組織および残留歪み分布の二次元マッピングと接着部の水の検出を目的に2種類の研究開発を行った。

接合部に関しては、J-PARC および北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)において、FSW ほか各種接合部材（アルミニウム合金、マグネシウム合金、鉄鋼）の中性子透過ブラッグエッジイメージング測定を行った。また同じ試料の中性子回折測定をJ-PARC で実施し集合組織の解析を行った。RITS 解析ソフト等を用いてデータ解析法の検討や空間分解能・波長分解能などを含めた両者の結果の比較を行った。II-①で産業技術総合研究所に新設した中性子計測装置にて、鉄鋼材料等の中性子イメージング測定を行った。またラボX線回折を用いて残留応力を測定するとともに、放射光X線回折測定を行い接合部分の結晶配向性を議論した。これらの結果からFSW 接合部では集合組織が壊れ、配向度が小さくなっていることが確認されるなど、マイクロ組織の二次元マッピングに成功した。

金属と接着剤界面の水検出に関して、理化学研究所の小型中性子解析装置(RANS)を用いて異なる水の浸漬条件の金属と接着剤サンプルの中性子イメージング測定による接着剤への水の侵入状態の変化観察を実施した。その分析から、接着界面近傍の水の影響に関しては、詳細情報が得られる見通しを得た。また、実用部材を想定し作製された、鋼板とアルミ板の接着接合試料の中性子透過イメージング像を得た。両板を接着剤や他の機械締結を組み合わせた部材を使用し測定条件を検討した結果、両金属に影響されることなく接着剤の2次元イメージングが可能であり、内部に存在する気泡や厚さの違いも観察することができた。

研究開発項目II：構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追求した小型装置による構造材料評価技術の開発

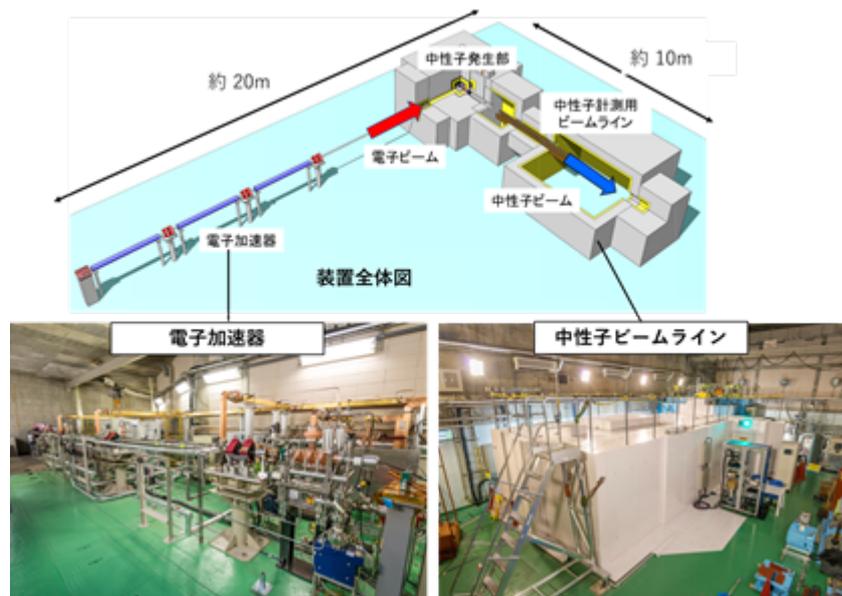
ブラッグエッジイメージング法に重点化した構造材料分析用の小型中性子解析装置を新規に開発し、併せて新規装置ならびに既存小型装置における構造材料計測法やデータ解析手法も確立する。また、同一試料の多面的な分析のため、中性子のみでなく、X線、電子線等を用いたハイブリッド分析計測技術も確立する。このために本課題では下記の3つの研究開発テーマに取り組んでおり、現時点での各研究開発成果を以下に記す。

II-①：構造材料解析に最適化した小型装置の開発

つくば中央梅園分室に、小型中性子解析装置開発のための設置場所を整備し、小型中性子解析装置構成機器（電子銃、クライストロンシステム、電子ターゲット、放射線安全システム、中性子源、中性子減速材システム、高周波ガイドシステム、加速器温調システム、電子加速器総合制御システム、中性子ビームライン遮蔽システム、中性子強度モニター等）を設計・構築・導入した。中性子強度モニターに関しては、高エネルギー加速器研究機構が主導的に開発し、理化学研究所 RANS にて性能試験を実施した。これら構成機器の接続・整備・調整・試験運転等を行うことで、電子加速器や非結合型減速材をもつ中性子源等を用いた小型中性子解析装置を設置した。本装置の整備・調整を進めることで、電子加速器を駆動して中性子ビームの発生を検出する

ことができた。パルス中性子ビーム強度の時間変化から固体メタン減速材で期待される中性子波長スペクトルを有するビームを発生できる事を確認した。さらに、鉄鋼材料のブラッグエッジスペクトルの測定も成功した。

図Ⅲ-2.8.11-1 に開発した小型中性子解析装置の全体図を示す。本装置は電子加速器、中性子発生部、中性子計測用ビームラインに大別され、下記にそれぞれ成果の詳細を記載する。



図Ⅲ-2.8.11-1 開発した小型中性子解析装置の全体図

電子加速器に関しては電子銃ならびに加速器ビームライン、ならびに電子銃と加速管用に電子加速のための高強度マイクロ波を発生させるクライストロンシステムとその電源であるクライストロン電源システム、加速管に高周波電力を輸送する高周波ガイドシステム、加速器温調システム、電子加速器総合制御システムの設計・製作・設置と必要に応じて調整・整備を行った。さらに加速器ビーム出力増強と安定化のため、電子ビーム軌道補正システムを導入し、電子ビームの出力増強と安定化のための制御パラメーター調整を、再委託先の東京工業大学や北海道大学と協力して進めた。これらにより、電子ビームの発生と加速に成功した。

中性子発生部に関しては、電子加速器からの電子ビームを入射させることで高速中性子を発生させる電子ターゲット、高速中性子の速度を減速して分析に有効な波長に変換するための中性子減速材システム、これらを格納でき、かつ中性子やガンマ線等の放射線を遮蔽するための冷却性能を持つ中性子源遮蔽体等の設計・製作・設置と各機器の試験運転を行った。

中性子計測用ビームラインに関して、その大元となる中性子ビームライン遮蔽システム、主にこの内部に設置する中性子ディスクチョッパー、中性子ガイドミラー管、ノイズ中性子除去システム、試料ステージ、二次元検出器、インターロックシステム、放射線モニター、中性子校正システムの設計・製作を行った。

II-②：小型中性子装置を用いた構造材料解析および計測・解析手法の高度化

II-①で開発する新規小型中性子解析装置ならびに既存の小型中性子解析装置の性能を比較するために、共通試料群（鉄鋼、アルミニウム合金およびマグネシウム合金のFSW接合部材等）を準備し、J-PARCならびに北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)でブラッグエッジ測定を、両者の比較が容易になるように試料のセット条件と測定時間をほぼ同じに行った。例えばアルミニウム合金のFSW部ではAl(111)ピークが明瞭に観察されたが、母材部では観測されなかった。これはFSWによる結晶方位がランダム化したためと考えられる。また新規小型中性子解析装置によるブラッグエッジ等測定を開始し、新装置の装置性能の評価を開始した。更に得られた結果等を基にして、標準試料の選定や高性能検出器導入の効果の検討を行い、より産業利用に適した新装置高度化の指針を策定した。

II-③：中性子その他量子ビームを用いたハイブリッド計測

金属構造材料等の典型的な接合試料(FSW、FSSWなど)に対して中性子ラジオグラフィ観察および透過ブラッグエッジ測定だけでなく、X線ラジオグラフィ、X線残留応力測定、反射光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、後方散乱電子回折分析、電子プローブマイクロアナライザー分析等のハイブリッド計測を行い総合的な考察を進めた。また小角散乱による鉄鋼材料中のナノ析出物の構成元素の分配状態をX線と中性子のハイブリッド計測を用いて行い基礎データを得た。

研究開発項目Ⅲ：中性子構造材料解析ネットワークの構築

本ネットワークにて、II-①の新規小型装置、既存小型装置（北海道大学HUNS-II、理化学研究所RANS）ならびに大型装置(J-PARC)におけるこれまでの標準試料での測定結果ならびに新規の測定結果に関するデータを整理し、各装置における計測精度や計測時間等とともに解析事例集や装置紹介資料のひな形を作成した。また、測定カルテ・ガイドラインのひな形の作成に着手し、試料ホルダーや解析ソフトの共通化、情報管理体制と併せて、ネットワーク内各機関との議論を開始した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.11-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	4	0	25	3	0	0	0	1	2
2018FY	3	0	27	0	0	0	0	0	1
2019FY	6	0	36	5	1	1	1	2	2
合計	13	0	88	8	1	1	1	3	5

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.11-5 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.12 [テーマ番号 54] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)

2.8.12.1 テーマの概要

(1)背景と目的

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の活用による輸送機器軽量化の流れは、航空機でその効果が実証され、高級車を中心に自動車にも拡大している。自動車への CFRP 適用は欧州が牽引しているが、ポイントは材料技術ではなく、HP-RTM などの成形技術の進歩による生産性の向上にあった。本事業は、我が国の強みである材料技術に立脚した低圧・超高速成形プレス成形技術の構築を通し、高度省エネルギー社会実現への貢献と、CFRP 加工技術の国際競争力強化を目的とする。

(2)位置付け、目標値

本 FS 研究では、マルチマテリアル化による軽量部材設計のための要素技術として、簡易な設備で低圧・高速で成形品を得るための、プレス成形プロセスと構築する。具体的には、平板および要素形状において、成形圧力 1MPa 以下、プレス型締め時間 3 分以下で、RTM 成形品と同等の比強度を持つ CFRP 成形品を得る。

表Ⅲ-2.8.12-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	最終目標 (2019 年度末)	根拠
① 樹脂供給体の開発	成形圧力 1MPa 以下、プレス型締め 3 分で平板成形品を与える、樹脂供給体の標準仕様決定	低圧成形はプレス機の規模を抑え、設備投資を軽減する。 高速成形は量産性に必須
② 低圧・高速成形プロセスの開発	研究開発項目①で開発した樹脂供給体を用いた、CFRP 平板 (30cm 角、面圧 1MPa 以下、型締め時間 3 分以内) の成形プロセスの構築 マルチマテリアル化に向けたプロセス課題の抽出	同上
③ 含浸シミュレーション技術の開発	本プロセスでの樹脂含浸挙動を表現するシミュレーションの、アプローチ手法の決定 樹脂含浸挙動の傾向の定性的な一致	品質・信頼性保証のために、含浸挙動の原理理解とシミュレーション技術は必須となる

(3)全体計画

自動車部材などに使用される RTM は、繊維基材をプリフォーム後に金型に配置し、型内に樹脂を注入・含浸後に硬化させて成形品とするプロセスである。プリフォームで比較的複雑な形状を作れる反面、成形機内で含浸と硬化の工程を担うため、装置設計が複雑となる。特に、樹脂を高圧注入 (一般に 3~12MPa) して含浸時間を短縮する HP-RTM では、専用の成形装置および金型が必要となる。HP-RTM の現行のサイクルタイムは部材の大きさや形状により異なるが、概ね 10 分弱と言われており、更な

る短縮が望まれている。本 FS 研究では、通常の CFRP のプレス成形に用いられる汎用の装置で、低圧で高速に樹脂を含浸および硬化させ、成形品を得る新規プロセスの研究開発を行う。

本技術のコンセプトを図 III-2.8.12-1 に示す。材料のキーテクノロジーは樹脂供給体で、重量の 90%以上が樹脂で構成される可搬の材料である。これをドライの CF クロスで挟み、加熱、圧縮することで、含浸と樹脂の硬化が同時に進み、熱硬化 CFRP 成形品が得られる。ここで、樹脂供給体から CF クロスへの樹脂含浸は厚さ方向（面含浸）であり、基材サイズ問わず含浸距離が短い。また、マトリックス樹脂は熱硬化性樹脂（エポキシ樹脂）を使用し、これは熱可塑性樹脂よりも大幅に粘度が低いため、低圧含浸が可能となる。すなわち、樹脂供給体を用い、熱硬化性樹脂を面含浸させることで、低圧・高速成形が実現できる。

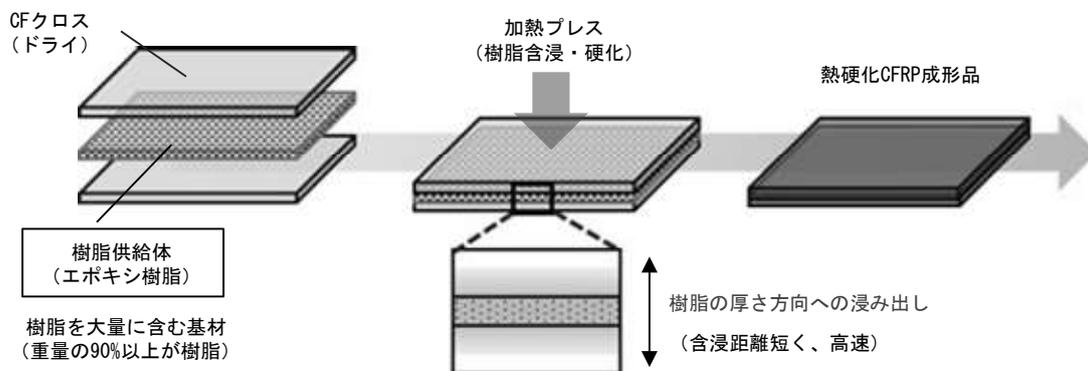


図 III-2.8.12-1 低圧・高速プレス成形技術のコンセプト

本 FS 研究では、新規プロセスの中核となる樹脂供給体による高速含浸プロセス技術の成立性、および得られた成形品の力学特性ポテンシャルにつき、平板を用いて検証する。具体的には、以下の研究開発を行う。

① 樹脂供給体の開発

炭素繊維基材への樹脂の高速含浸および硬化を、汎用のプレス装置で実現するための、新規樹脂供給体の開発を行う。具体的には、樹脂供給体を構成するマトリックス樹脂および基材を設計するとともに、これらを組み合わせて供給体とする製造法を構築する。

② 低圧・高速成形プロセスの開発

研究開発項目①で開発される樹脂供給体を用いた、汎用プレス機による低圧・高速成形技術を開発する。また、得られた成形品の健全性を評価するとともに、力学特性のデータベースを構築する。

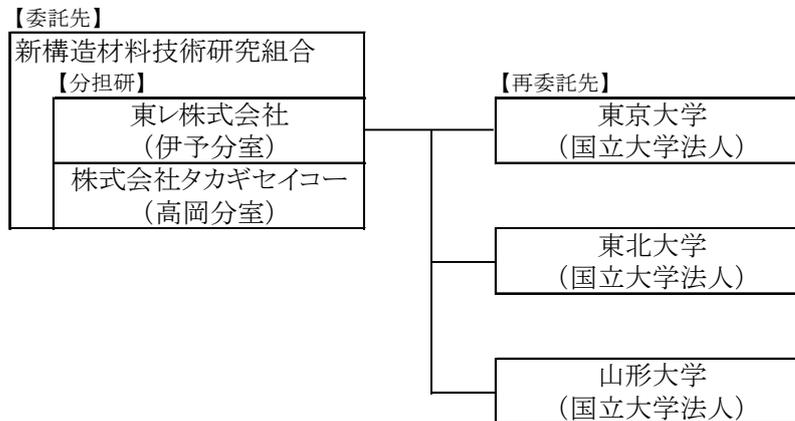
③ 含浸シミュレーション技術の開発

樹脂供給体から炭素繊維基材への樹脂含浸挙動を解析し、部材形状での含浸を再現

するシミュレーション技術を構築する。

(4)実施体制

図Ⅲ-2.8.12-2 に示す体制で推進した。材料成形の基盤技術は分室で構築し、高度な専門性を要する研究は、大学（東京大学、東北大学、山形大学）に再委託した。



図Ⅲ-2.8.12-2 実施体制

(5)運営管理

主に材料開発を担当する東レ（伊予分室）と、成形技術開発を担当するタカギセイコー（高岡分室）は、中短期の目標と検討内容を共有し、東京大学に設置された 200t プレス機を用いて 1 回／月の頻度で共同試作・開発を行った。再委託先とは定期的な連絡と、半期ごとの直接面談で成果と課題を共有した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトは、車体の大幅軽量化に向け、複数のテーマが個別技術を開発する構造を取る。従い実施効果は個別テーマ単独に帰属できないが、プロジェクトが目指す自動車軽量化による社会的、経済的影響は大きい。自動車向け CFRP の市場規模は 1,000 億規模で推移しており、FCV などの環境対応車の普及期待を含めて拡大が見込まれている。

自動車への CFRP 適用による CO₂ の削減効果は、炭素繊維協会モデルでは炭素繊維 1t あたり 50t とされる。自動車 1 台あたりに使用される炭素繊維を 100kg とすると、ライフサイクル（10 年）で 5t/台の CO₂ が削減される。CASE の拡大や環境対応車の普及、安全基準の厳格化から車体重量増は不可避であり、今後も量産と親和性のある軽量化技術は流行と関わりなく需要が続く。四輪の世界生産台数は 9,571 万台（2018 年）であり、このうち上位 10% に適用された場合でも、ライフサイクルで 48 百万 t の、年間で 4.8 百万 t の CO₂ が削減される。

2.8.12.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

中間目標なし（FS 研究であり最終目標のみ）。

(2)最終目標の達成可能性

本 FS 研究は 2019 年度で終了しており、最終目標を達成済み。

表Ⅲ-2.8.1-2 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し ※
① 樹脂供給体の開発	低圧・高速成形に適用する樹脂供給体に関する基材およびマトリックス樹脂の設計を完了した。	成形圧力 1MPa 以下、プレス型締め 3 分で平板成形品を与える、樹脂供給体の標準仕様の決定	○
② 低圧・高速成形プロセスの開発	30cm 角の CFRP 平板を、成形圧力 0.6MPa、型締め 3 分で成形するプロセスを構築した。 アルミ平板との一体成形では、技術の成立性は示されたが、部材形状、生産設備・条件の各論となった。	研究開発項目①で開発した樹脂供給体を用いた、CFRP 平板（30cm 角、面圧 1MPa 以下、型締め時間 3 分以内）の成形プロセスの構築 マルチマテリアル化に向けたプロセス課題の抽出	○
③ 含浸シミュレーション技術の開発	樹脂供給体からの面内および面外の含浸挙動を解析し、実際のプレス成形品でも同様の挙動が見られることを確認した。	本プロセスでの樹脂含浸挙動を表現するシミュレーションの、アプローチ手法の決定 樹脂含浸挙動の傾向の定性的な一致	○

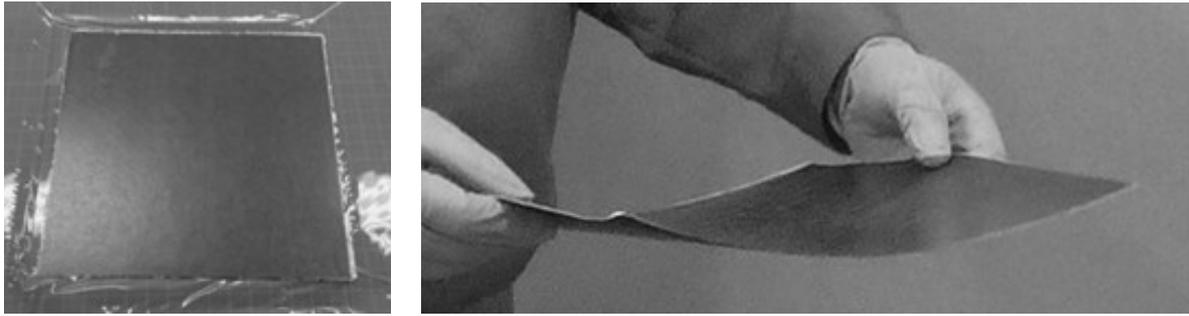
※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(3)研究開発の成果と意義

① 樹脂供給体の開発

樹脂供給体は、担持基材およびマトリックス樹脂から構成される。担持基材は短繊維からなる均質な多孔質体で、優れた樹脂担持能力を持つ。これに担持させるマトリックス樹脂は、ハイサイクルに適合する高速硬化性と、保管・プロセス中で変質しない安定性を両立させる設計としている。

樹脂供給体は自重の 20 倍以上のマトリックス樹脂を担持でき、かつ図Ⅲ-2.8.12-3 に示すように、持ち運んでも樹脂が垂れ落ちることがない。硬さは担持基材設計の結束力などで調節でき、複雑形状にも追随させることができる。



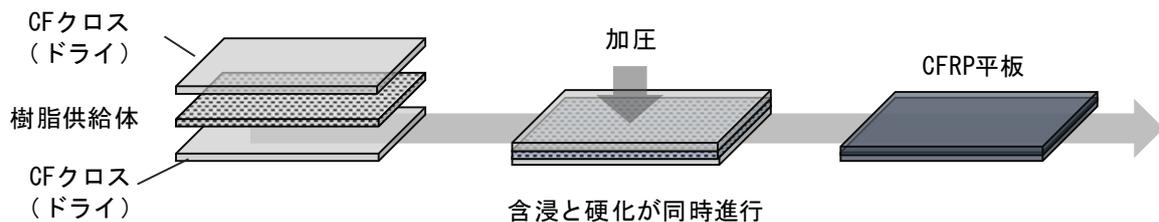
図Ⅲ-2.8.12-3 樹脂供給体の外観

樹脂供給体は、樹脂を型内で供給する点に特徴がある。外部から樹脂を供給する RTM では、成形設備や金型に樹脂の注入機構が必要となる。特に高速成形を指向する場合、含浸に高圧を要するため設備投資が大型化する。樹脂供給体は、基材の間に挟んでプレス機に置くだけでよく、専用設備を必要としない。かつ含浸は基材内部から厚さ方向に進むため、低圧で素早く進む。これら型内供給・面含浸の特徴は、小規模の試作から量産まで、幅広いプロセスに親和性が高い。

樹脂供給体の製造には、均質な担持基材の設計・製造技術と、本目的に特化したマトリックス樹脂の設計技術を要する。これらの技術は製品や製造設備から追跡することはできず、他国の企業の模倣が難しい。

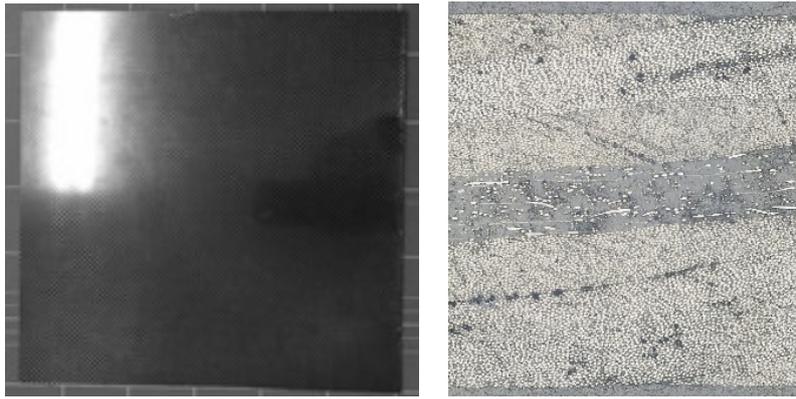
② 低圧・高速成形プロセスの開発

研究開発項目①で開発した樹脂供給体を用い、CFRP 平板を低圧、高速で成形するプロセスを構築した。基本プロセスは、図Ⅲ-2.8.12-4 に示すシンプルなものである。ドライの CF クロスと樹脂供給体を積層して加熱されたプレス型内に配置して加圧すると、樹脂が樹脂供給体から染み出し、CF クロスに含浸の後硬化して、CFRP 平板を与える。



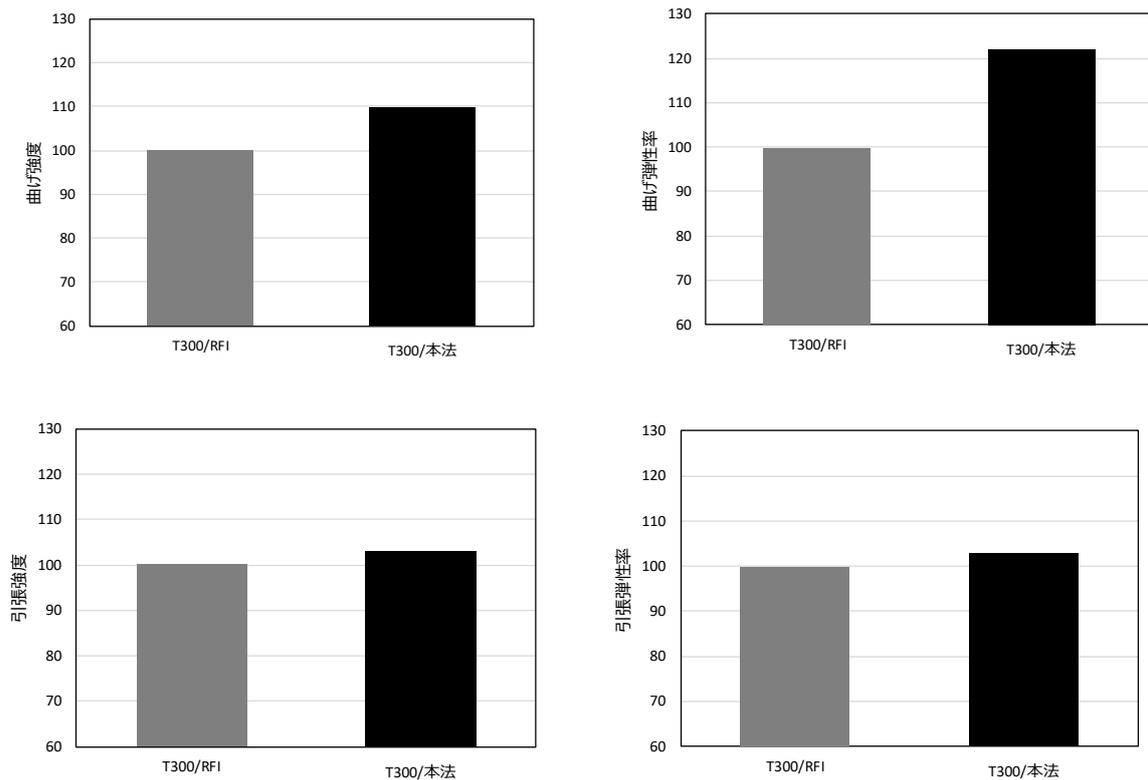
図Ⅲ-2.8.12-4 樹脂供給体を用いた低圧・高速プレス成形の基本プロセス

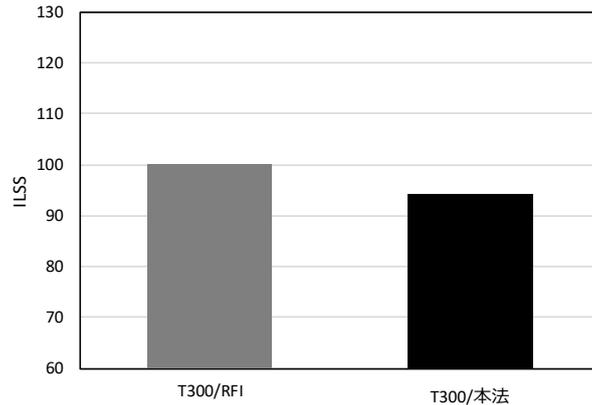
CF クロス (T300-3K クロス) を用い、プレス圧力 0.6MPa、型温 150°C、型締め 3 分で成形した CFRP 平板の外観と断面の顕微鏡写真を図Ⅲ-2.8.12-5 に示す。均一に樹脂が含浸し、成形品中にボイド、欠陥は見られていない。この結果は、本 FS 研究の狙いである樹脂供給体による高速面含浸のコンセプトが、有効に機能したことを示している。



図Ⅲ-2.8.12-5 CFRP 平板の外観と厚さ方向断面の顕微鏡写真

得られた平板の力学特性は、図Ⅲ-2.8.12-6 に示す通り、従来成形法（RFI）と同等であった。なお、樹脂供給体向けに設計した樹脂は RTM 向けと比べて粘度が高いため、比較対象の平板は、同等以上の品位が得られる RFI（Resin Film Infusion）法で作製している。

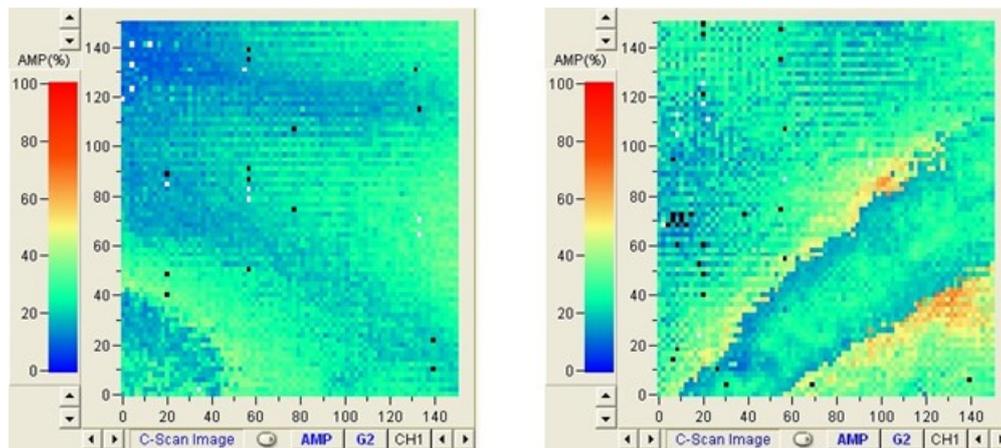




図Ⅲ-2.8.12-6 CFRP 平板の力学特性（上段：曲げ 中段：引張 下段：ILSS）
（比較対象を 100 とした場合の相対値）

この結果から、本 FS 研究で構築した低圧・高速成形プロセスは、従来プロセスよりも簡便な設備を使用しつつ、高速で品位に優れる CFRP 成形品を得られることが示された。

CFRP 平板内部の均質性は、C-scan の活用が有効であった。樹脂供給体は平板内部に残存するが、広視野 X 線 CT での検出は、難度が高いうえ検査に時間がかかった。これに対し C-scan では、図Ⅲ-2.8.12-7 に示す通り、樹脂供給体の健全性を簡便に追跡できた。プレス圧力 2.4MPa まで高めて意図的に内部を破損させた平板では、粗密差が明確に可視化された。



図Ⅲ-2.8.12-7 C-scan による CFRP のスライス画像
（左：プレス圧 0.5MPa 右：プレス圧 2.4MPa）

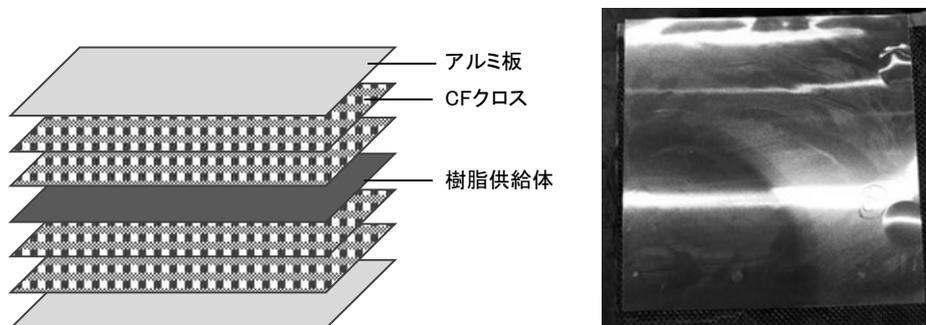
今後の部材成形を視野に、曲面、凹凸形状を持つ成形品を本プロセスで試作した結果を、図Ⅲ-2.8.12-8 に示す。予算計画の変更を受け、要素型は作製せず、保有していた不連続 FRP 向けのクラッシュカン形状の金型を用いた。流動成形を前提とする形状

のため成形難度は高く、表面ピットや樹脂だまりが散見されたものの、立壁、曲面形状部分でも含浸良好な成形品を得ることができた。



図Ⅲ-2.8.12-8 CFRP 平板の力学特性

また、マルチマテリアル一体成形の布石として、アルミとの一体成形を試み、課題を抽出した。これは、樹脂が内部から外側に向けて流れることを利用し、最外層にアルミを設置することで、含浸と接着を同時に実現する狙いに基づく。図Ⅲ-2.8.12-9に示す構成でプレス成形して得られた平板は、一部にフクレや接着不良が見られた。アルミの表面処理で接着は改善したが、フクレは完全には除けなかった。フクレは基材内部の空気が、脱気パス不足で残存したものであると思われる。アルミの表面処理時に脱気パスを作る、GF ヴェール層を挟んで電食防止と脱気パスの機能を持たせるなどの対策は考えられるが、形状、サイズ、成形条件に応じた各論となる。アルミ一体成形は、形状や製造設備に応じた各論技術となるため、個別成形して接合させるプロセスとの、費用対効果での選択となる。

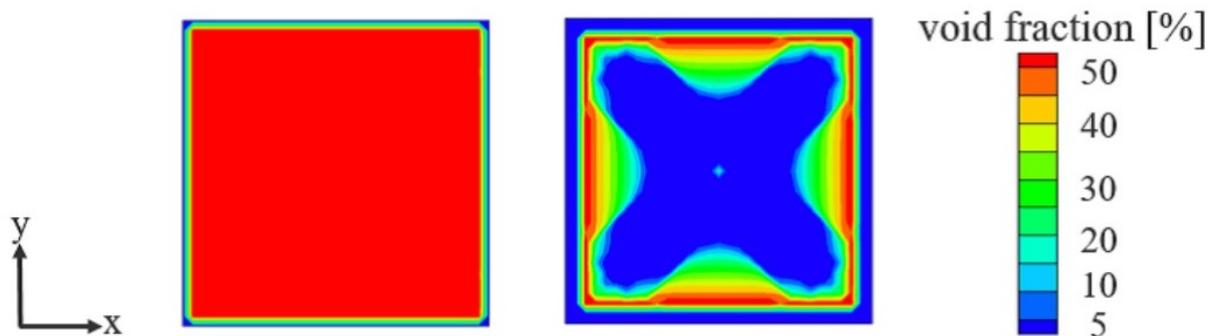


図Ⅲ-2.8.12-9 アルミ一体成形品の積層構成と外観

③ 含浸シミュレーション技術の開発

部材を始めとする製品設計では様々な形状を扱うため、樹脂供給体による含浸挙動をシミュレーションできる技術が必要となる。本 FS 研究では、平板での含浸挙動を定性的に理解する解析手法を構築した。本 FS 研究の特徴的な樹脂流動挙動の経時変化を、(A) 繊維束の圧縮の効果を取り入れた樹脂フローフロントの追跡、(B) ボイドの空間分布の導出、をモデル化し組み合わせることで表現した。また、連続の方程式（質量保存則）に、圧縮による樹脂湧き出し項を加えて、圧縮により修正された流動場分布を表現した。

図Ⅲ-2.8.12-10 は、厚さ方向中央にある樹脂供給体から、一定の距離でスライスしたときのボイド分布を表している。ボイドは、面外（厚さ）方向では樹脂供給体からの距離が近いほど、面内方向では端部に近い領域で大きくなる傾向が見られた。これは、含浸が不完全な CFRP 平板を断面観察した結果（図Ⅲ-2.8.12-11）とよく一致した。



図Ⅲ-2.8.12-10 樹脂供給体からの距離とボイド分布の関係
(左: 0.2mm 右: 0.4mm)

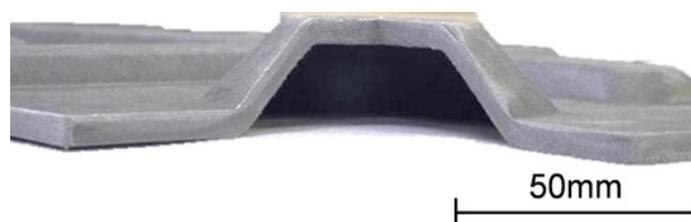


図Ⅲ-2.8.12-11 含浸が不完全な CFRP 平板断面の顕微鏡写真

④ 熱可塑性 CFRP との一体化

本 FS 研究は、熱可塑性 CFRP との一体化による、マルチマテリアルボディーへの適用を前提としている。本 FS 研究で得られた技術は、「革新的新構造材料等研究開発 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発」で構築された熱可塑性

CFRP（CFRTP）フォーム材の形状賦形技術（図Ⅲ-2.8.12-12）との一体化を想定している。いずれも高速プレス成形に適合する技術であり、比重が極めて低い（水に浮く）CFRTPフォームを、本FS研究で構築した剛性に優れるCFRPで補強したCFRTP/CFRPハイブリッド構造体は、優れた軽量化効果が期待できる。



図Ⅲ-2.8.12-12 熱可塑性CFRPフォームのプレス成形品の例

CFRPとCFRTPの接合は、東レの保有する互いに混ざり合わない樹脂を貼り合わせるハイブリッド接合技術が適用できる。これは、異樹脂間でアンカー構造を形成させ、さらに補強繊維をアンカー部に貫通させることで、強い接合面を形成する技術である。

本FS研究により、CFRTP、CFRPを適材適所に適用した熱可塑/熱硬化マルチマテリアルによる軽量構造体の要素技術が揃ったので、今後のテーマの中で、マルチマテリアル成形品を通してその効果を実証する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.12-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.12-4 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願*
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.13 [テーマ番号 56] 新材料の材料代替効果定量技術の開発 (FS 研究)

2.8.13.1 テーマの概要

(1)背景と目的

材料のライフサイクルは製品のライフサイクルとは異なるため、既存の製品を対象とした LCA (Life Cycle Assessment) 手法では総合的な材料代替効果を求めるための評価ができない。本課題では、材料代替効果を定量的に求めるために、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した、材料のライフサイクル全体を評価できる評価手法の構築を行うことを目的とした。

本テーマの最終目標は新材料開発における材料代替効果を定量的に求めることが可能な評価手法を開発し、材料の研究開発現場においてその評価手法を容易に利用可能にするために評価ツールを作成することとする。また、目標達成に向けた手段として以下を想定する。

○新材料の材料代替効果の定量的な評価手法の開発

- ・材料の物質フロー解析、リサイクル性の評価手法開発
- ・高機能材料の社会の持続可能な発展に向けた効果の定量方法の開発
- ・多様な製品への利用時における材料代替効果の算出方法の開発
- ・機能の異なる材料に対する材料代替効果の算出方法の開発
- ・材料代替効果評価手法の統合化

○新材料の材料代替効果の評価ツールの開発

- ・評価手法ツールの開発

(2)位置付け、目標値

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクト全体で実施している新規構造材料開発において、新たな技術により開発した材料の代替効果を求めることや、KPI (Key Performance Indicator) を見だしそこに研究開発の資源を投入することは重要である。しかし、材料のライフサイクルは製品のライフサイクルとは異なるため、既存の製品を対象とした LCA 手法では総合的な材料代替効果を求めるための評価ができない。本プロジェクトは材料代替効果を定量的に求めるために、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した、材料のライフサイクル全体を評価できる評価手法の構築を行い、その手法を研究開発現場で活用可能な評価ツール開発を行うもの。プロジェクトの目標は下表のとおり設定した。

表Ⅲ-2.8.13-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
①新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ● 評価項目の洗い出し ● プロトタイプの定性的な評価手法 ● リサイクル性を考慮した手法論 ● 基礎的な材料学的知見を蓄積 ● プロジェクト参加企業等に聞き取り調査 	<ul style="list-style-type: none"> ● 新材料の材料代替効果の評価枠組みの提案 ● 素材ごとのリサイクル性を評価する指標の提案 ● 評価に必要な物質フローデータの枠組みの提案
②新材料の材料代替効果の評価ツールの開発	<ul style="list-style-type: none"> ● ツールの開発に着手 ● プロジェクト内外の企業にツールの要件を聞き取り調査し、ツールの基本コンセプトを検討する 	<ul style="list-style-type: none"> ● 新材料の材料代替効果の評価ツールのプロトタイプ構築

(3)全体計画

プロジェクトを「① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築」、「② 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発」の2事業で実行した。FS事業の実行期間中の各事業の実施計画は以下のとおり。

① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築

評価において考慮すべき項目の洗い出しを製品ライフサイクル毎に実施し、評価軸の設定の妥当性や実現性を勘案して、プロトタイプの定性的な評価手法を提案する。リサイクル性に関して、既存の手法論を参照し、評価する材料に適用可能なリサイクル性を考慮した手法論を複数挙げる。さらに、リサイクル性評価のための基礎的な材料学的知見を蓄積する。また、リサイクルされる期間後の将来需要を考慮した、物質フローについて解析を着手する。新材料のリサイクル性や材料の機能や材料価値に関しても、プロジェクト参加企業等に聞き取り調査を実施し、どのように評価の枠組みに入れていくかを検討する。さらに、炭素繊維に関しては、リサイクル性等を考慮し、乗用車のライフサイクル全体での素材代替効果および環境負荷削減効果の定量に関するケーススタディを実施する。

② 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発

①で実施するプロトタイプの評価手法をベースにして、ツールの開発に着手する。また、ISMAプロジェクト内外の企業にツールの要件を聞き取り調査し、ツールの基本コンセプトを検討する。

(4)実施体制

本テーマは小野川分室（産業技術総合研究所）が再委託先 1 大学と実施した。

(5)運営管理

プロジェクトの運営にあたってはプロジェクト構成機関で構成する会議を月 1 回程度実施し、プロジェクトの進捗を管理した。

2.8.13.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.13-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020 年度末)	研究開発成果	達成度 ※
①新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ● 評価項目の洗出し ● プロトタイプの定性的な評価手法 ● リサイクル性を考慮した手法論 ● 基礎的な材料学的知見を蓄積 ● プロジェクト参加企業等に関き取り調査 	<ul style="list-style-type: none"> ● 評価手法の要素の抽出と枠組み構築 ● リサイクル性を考慮した手法論を提案 ● 鉄鋼リサイクル材の化学成分情報を蓄積 ● 鉄鋼材の基礎的な材料学的知見を文献調査 ● ライフステージに分解し評価項目の洗出し 	△ (2019 年度より テーマ 42 (42-2) で実施)
②新材料の材料代替効果の評価ツールの開発	<ul style="list-style-type: none"> ● ツールの開発に着手 ● プロジェクト内外の企業にツールの要件を聞き取り調査し、ツールの基本コンセプトを検討する 	<ul style="list-style-type: none"> ● プロジェクト参加企業 2 社に関き取り調査 ● 評価ツールの基本概念の構築 	△ (2019 年度より テーマ 42 (42-2) で実施)

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.13-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
①新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ● 評価手法の要素の抽出と枠組み構築した。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 新材料の材料代替効果の評価枠組みの提案 ● 素材ごとのリサイクル性を評価する指標の提案 ● 評価に必要な物質フローデータの枠組みの提案 	目標年度までに達成の見込み (テーマ 42 (42-2) で実施)

②新材料の材料代替効果の評価ツールの開発	● 評価ツールの基本概念の構築した。	● 新材料の材料代替効果の評価ツールのプロトタイプ構築	目標年度までに達成の見込み (テーマ 42 (42-2) で実施)
----------------------	--------------------	-----------------------------	--------------------------------------

(3)研究開発の成果と意義

研究開発項目①-1：材料代替効果評価手法の構築

材料代替効果の評価手法の実装に向けて整備が必要な事項を明らかにするために、新材料のリサイクルを想定した LCA 評価のシステム拡張について方法論を整理した。方法論としては大きく「回避効果アプローチ」と「マテリアル LC アプローチ」の2種類が存在している。それぞれの方法論の長短について簡単にまとめると、回避効果アプローチについては回避される天然資源の違いを考慮できる点がメリットとして挙げられる。その一方で、リサイクルされる先の材料による区別がないことがデメリットとなる。マテリアル LC アプローチについては、実市場と材料のライフサイクルでの需給バランスの整合が取れるというメリットがある一方で、材料の1回利用あたりの機能に違いを表現できない点がデメリットとなる。以上の整理から、評価手法の実装に向けては、材料ライフサイクルの視点から水平サイクルとすべき材料区分の定義が課題と明らかになった。

また、評価の枠組みの検討のなかで、データベースに実装する必要がある項目について議論を行った。

表Ⅲ-2.8.13-4 データベースに実装する項目 (案)

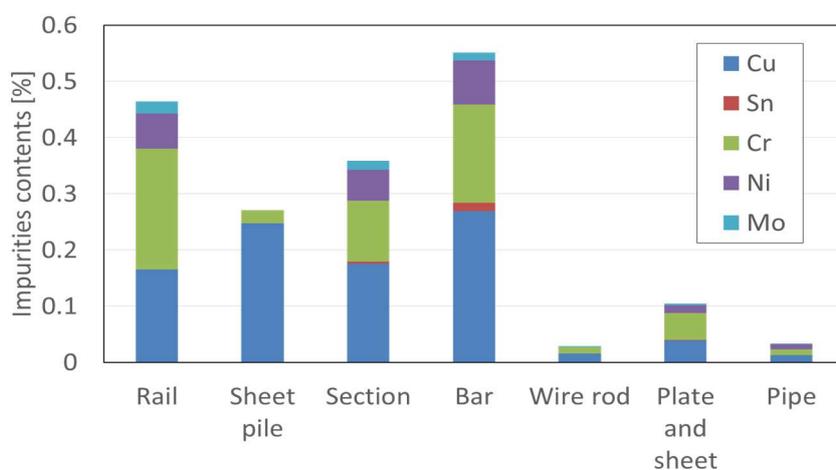
採掘プロセス 資源の偏在性 資源価格 先物取引市場の有無 安定した需要 紛争鉱物 地域・国 開山前の土地利用状況 地域の植生・動植物種数等 鉱山経営に関する法規制 埋蔵量 品位 品位の劣化 尾鉱 不法労働 不法採掘・伐採 技術種類(露天/坑内/..) 技術の伝承 出荷される製品の品質？ エネルギー エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 労働力	<small>(スクラップ以外の)廃棄物の原料利用</small> 高温プロセスの有無 医療系廃棄物の処理 エネルギー エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 必要な労働力 技術の伝承 一次・二次素材の品位差 スクラップの利用 原料中のコンタミの多さ コンタミに対する許容 素材代替性 合金種の数 リサイクル性(再溶解性) 産業共生(他産業との物質等のやり取り) 副産物	必要な労働力 中小企業の割合 技術の伝承 成形性 切削性 形状凍結性 ベークハード性 高機能化・多機能化(材料特性)	自動車 車格 動力 必要な部品 部品間の関係性 燃費 メンテナンスの容易さ 使用時の化学物質排出 リユース性	廃製品の回収システムの有無 ソーターの種類 産業としての脆弱性 解体事業者の中小企業の割合 技術の伝承 インフォーマルな回収 不法輸出 不法投棄 エネルギー エネルギー以外の資源投入
材料加工プロセス 生産地域 歩留り(不良品率) 歩留り(加工歩留り) 部品共通化・工程共通化 オートメーション化 エネルギー エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 自産業の資源(部品)投入量抑制 他産業での廃棄物の削減	組立加工プロセス 生産地域 接合技術(ロウ付け/溶接..) 不良品率 品質管理 オートメーション化 汎用性・部品共通化・工程共通化 組立工程の簡素化 環境配慮設計 エネルギー エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 必要な労働力 かしめ性 ロウ付け性 溶接性 材料の選択肢の豊富さ 耐久性 長寿命 安全性 メンテナンス性向上	自動車部品 密度 硬度 強度 疲労強度 耐力 伸び ヤング率 ポアソン比 耐酸性 耐候性 腐食度 浸食度 めれ性 表面粗さ	環境汚染物質排出 騒音・振動 必要な労働力 リサイクル性 解体性 単体分離性 製品情報の開示 スクラップ品位	
材料生産プロセス 生産地域 生産地域の偏在 生産方式 歩留り(生産歩留り) 歩留り(不良品率)	材料加工プロセス エネルギー エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 自産業の資源(部品)投入量抑制 他産業での廃棄物の削減	組立加工プロセス エネルギー以外の資源投入 環境汚染物質排出 騒音・振動 必要な労働力 かしめ性 ロウ付け性 溶接性 材料の選択肢の豊富さ 耐久性 長寿命 安全性 メンテナンス性向上	将来の社会シナリオ 人口 GDP シェアリングサービスの有無 メンテナンス市場の有無 メンテナンス頻度 使用年数 回収・再製造プロセス 燃料インフラ(充電設備、タンク…) 燃料の変化(電気、ガソリン、水素…) IoT社会(自動運転、コネクテッドカー)	

研究開発項目①-2：物質フローの分析

物質フローの将来予測を進めるにあたって、政府系機関・業界団体などで用いられている既存モデルについてレビューし、体系的に整理した。モデルの種類としては「社会・経済要因から金属需要を予測するモデル」、「金属製品需要から金属需要を予測するモデル」、「金属製品需要を直接予測するモデル」の3種類に分類される。社会・経済要因から金属需要を予測するモデルの特徴は長期予測において需要ピークを設定する例が多い点が挙げられる。このモデルの説明変数としてはGDP、人口、経済指標などが主要なものになっている。金属製品需要から金属需要を予測するモデルは主要な説明変数として金属使用原単位を用いており、政策変化や技術革新を考慮できる点が特徴といえる。金属製品需要を直接予測するモデルについては業界団体の予測などに基づいており、モデルは不詳な場合が多い。現状をもとにした将来推計だけでなく、将来目標を掲げたうえで、中間年を補完するモデルも発表されている。これらの金属需要の将来予測のうち、特にアルミニウムの将来予測に関してまとめると、①アルミニウム圧延品、鋳造品の需要の想定、②それらが使用される製品の需要の想定、③国内で回収可能なスクラップの発生量と発生源の想定が重要な要素になることが示唆された。

研究開発項目①-3：リサイクル性の評価

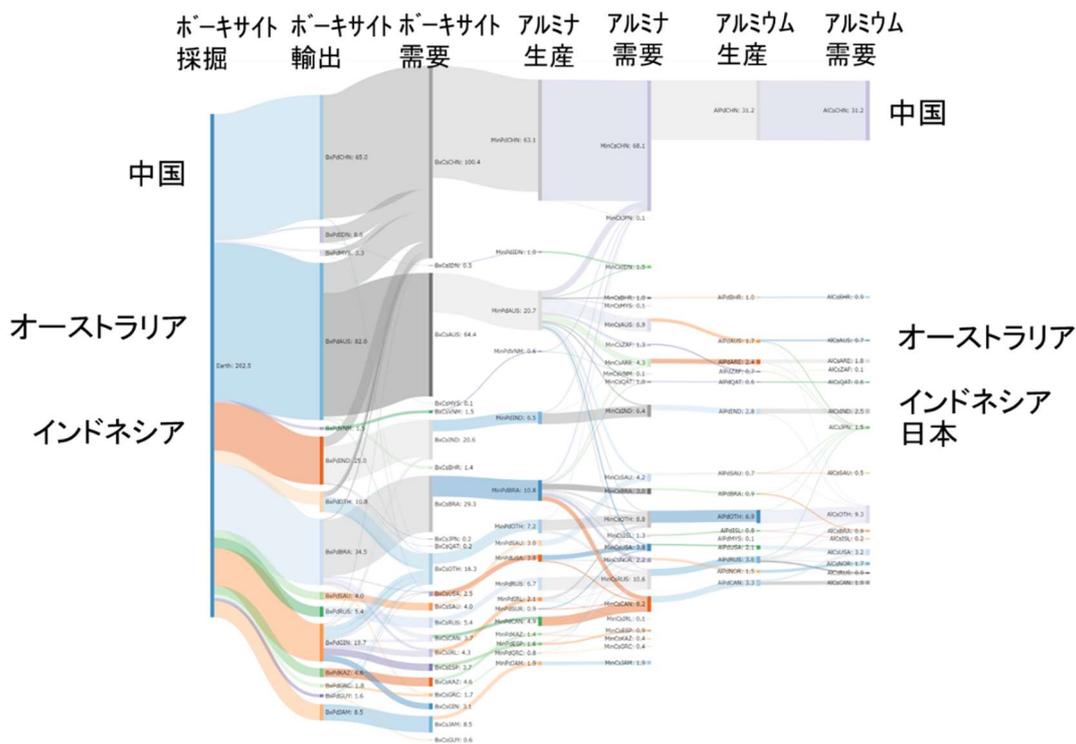
鉄鋼のリサイクル性の実態について調査した。1930年代から2010年代にかけてのリサイクル品の不純物の化学組成を調査したところ、不純物の濃化が進んでいるとは言えなかった。1973年の鉄シュレグダー導入前後では、導入後のほうが不純物の濃度が低下していることがわかった。また、足元の2017年、2018年に生産された鋼材中の不純物成分について調査した。結果から得られた示唆として、不純物の鉄鋼材リサイクルシステムへの流入量と希釈量が、不純物濃度を一定に保つ割合で釣り合っていたら全体として均質でリサイクルされていると考えられる可能性がある。



図Ⅲ-2.8.13-1 製品別の鉄鋼リサイクルの不純物濃度（2017年、2018年）

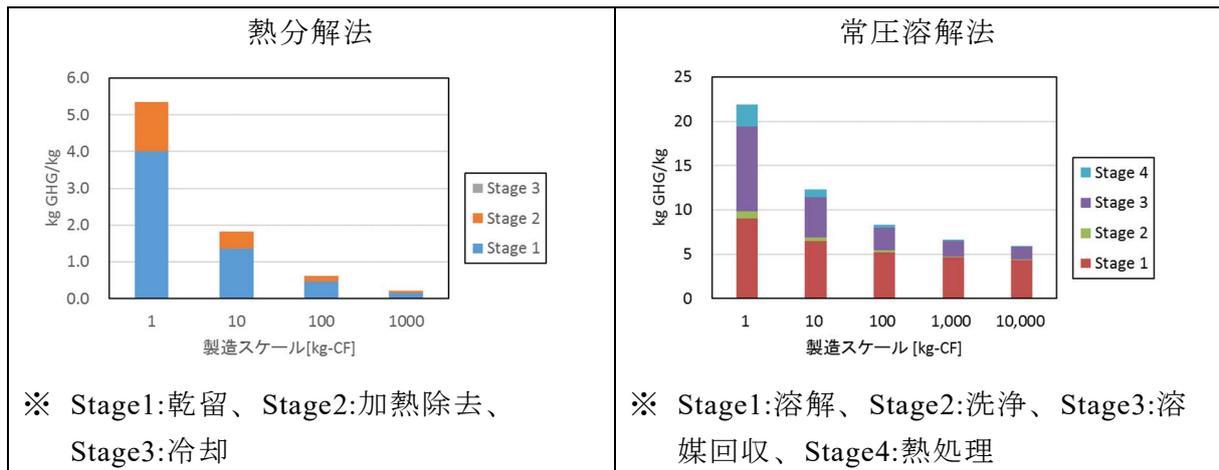
研究開発項目①-4：環境負荷のデータ整備および算定

各国のアルミニウムの使用にともなう CO₂ 排出量の差異についてデータ整備を行った。各国のデータの差としては「Comsumption Mix」と「Production domestic」に着目した。Comsumption Mix とは実際の輸入元の地域性を考慮した推計である。また、Production domestic とは国内で採掘から地金生産まで実施したと仮定した推計である。



図Ⅲ-2.8.13-2 アルミニウムのサプライチェーン

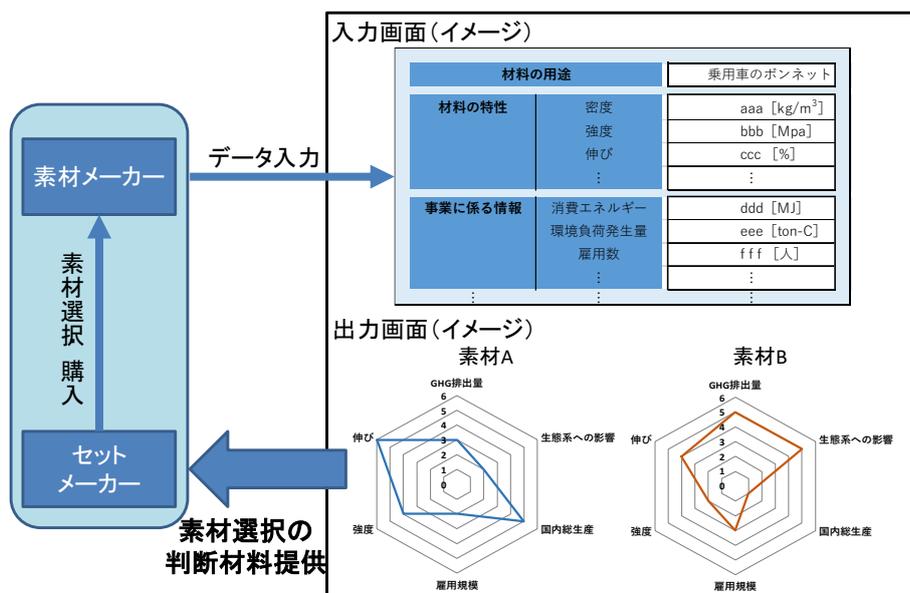
また、CFRP の製造方法別の環境負荷データについても整備した。CFRP の製造方法としては「熱分解法」と「常圧溶解法」を対象とした。熱分解法は CFRP を炭化炉で 500 度～700 度に常圧下で熱し、樹脂をガス化して取り除く方法である。ガス化した樹脂はエネルギーとして CFRP の燃焼に再利用される。廃材および EOL 品を前処理(破碎)をすることなく燃焼し、長繊維のカーボンファイバーの取り出しが可能な点が特徴といえる。カーボンファイバーリサイクル工業や新菱(三菱ケミカル)などがこの技術を採用している。一方で、常圧溶解法は、リン酸三カリウム(触媒)とベンジルアルコール(溶媒)を用いて樹脂を溶解しカーボンファイバーと樹脂を分離する方法である。熱処理を必要としないが、エステル系の樹脂のみに対応可能という特徴がある。日立化成が採用し、商業化されている。それぞれの手法の GHG 排出量と製造スケールについて下図に示す。



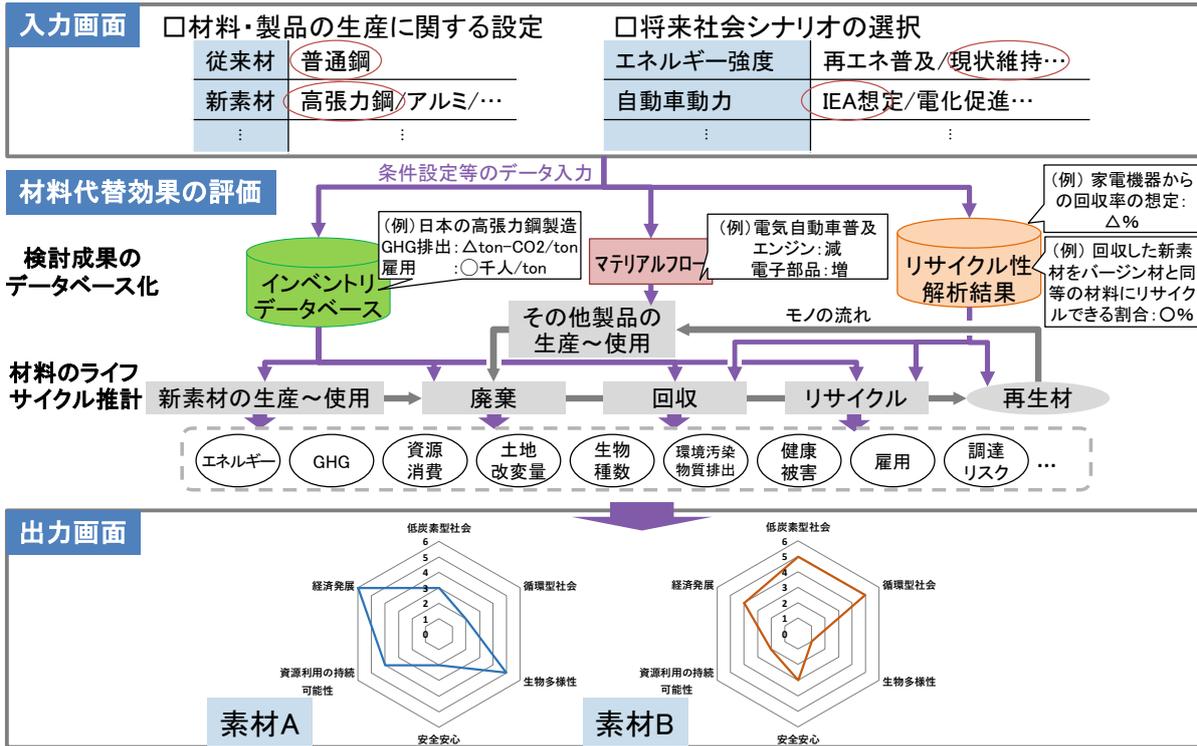
図Ⅲ-2.8.13-3 CFRP の手法別、製造スケール別の GHG 排出量

② 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発

①の検討をもとに、新材料の材料代替効果の評価ツールの構造イメージを作成した(図Ⅲ-2.8.13-4)。また、ツール内の推計ロジックについても図Ⅲ-2.8.13-5 のとおり、基本的な構造を整備した。本プロジェクトで作成するツールでは、材料・製品の生産と将来社会シナリオに関するユーザーの設定をもとに材料のライフサイクル全体の GHG 排出量その他の環境、経済、社会の変数を推計し、ユーザーには従来の材料と比較した新材料の効果・影響を出力する構造となる。



図Ⅲ-2.8.13-4 評価ツールの構造



図Ⅲ-2.8.13-5 評価ツール内の推計ロジックの構造

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.13-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会への出展	受賞	フォーラム等※
	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	プレス発表	その他			
2018FY	0	0	12	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	12	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.13-6 特許の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
2018FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

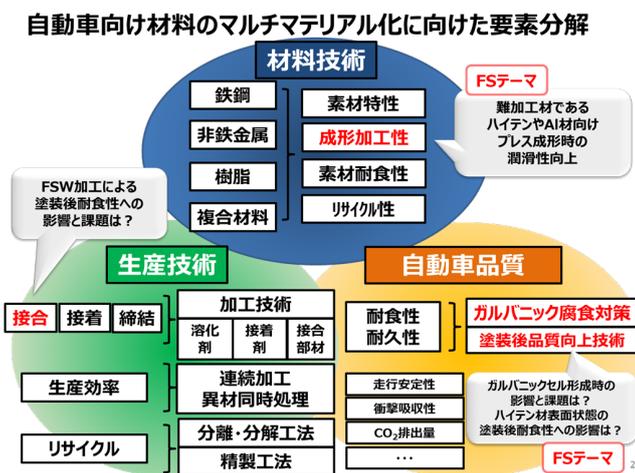
2.8.14 [テーマ番号 57] 超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装後耐食性向上技術の開発 (FS 研究)

2.8.14.1 テーマの概要

(1)背景と目的

車体用軽量化材料は、高強度化された新規金属材料や新規樹脂材料などの採用が見込まれている。これらの材料を車体構成材料として用いる際には、成形加工性や異種材料接合時の塗装品質など、様々な性能を満たさなければならない。これらの新規開発材料が単体及び異種材料接合された際においても車体材料として十分な性能を満たすよう、表面処理技術により適正化する必要がある。

マルチマテリアルからなる車体に新規高強度化材料を適用するためには幾つかの課題が生じる可能性がある。これらの課題において、表面処理技術による性能改善要素の高いものを図Ⅲ-2.8.14-1 に赤字で示した。例えば、材料開発の分野においては高強度化された金属材料に対するプレス成形時の潤滑性向上が必要となる。また、一般的に新規開発された金属材料の表面は従来材と比べ、化学成分分布などが異なる可能性があるため化成処理性や塗装後耐食性への影響が懸念される。生産技術面では、異種材料の接合・接着技術が特に注目されており、様々な技術が提案されている。しかしながら、異種材料接触時にはガルバニックセルの形成により化成処理性が低下する場合があります、この場合は十分な塗装後耐食性が得られなくなるものと予測される。ガルバニック腐食対策は自動車材料のマルチマテリアル化において、最も重要な課題の一つと言える。本検討では、高強度化された新規開発材料の表面状態を把握または予測し、自動車材料のマルチマテリアル化において表面処理技術に係わる重要な課題を把握することを FS 研究の主な目的として実施する。



図Ⅲ-2.8.14-1 マルチマテリアル車体の技術要素分解と表面処理技術による主要課題の改善点

(2)位置付け、目標値

本検討ではマルチマテリアル材料を採用した車体に対し、想定される課題を抽出し、それぞれの課題がどの程度の影響となるか確認することとした。以下に示した5つの研究開発サブテーマを FS 研究として実施した。

- 【サブテーマ①】 超高強度化材料の潤滑加工性向上
- 【サブテーマ②】 超高強度化材料の塗装後耐食性への影響
- 【サブテーマ③】 異種材料接合による塗装後耐食性への影響
- 【サブテーマ④】 大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価
- 【サブテーマ⑤】 摩擦攪拌接合法により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動

表Ⅲ-2.8.14-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	最終目標 (2018 年度末)	根拠
超高強度化材料の潤滑加工性向上	高張力鋼板を用い、潤滑皮膜による加工成形性向上効果を確認するための評価方法確立と潤滑皮膜適用の妥当性を判断する。	軽量化材料の高強度化により、車体に適用する際は、非常に複雑な形状にプレス加工されるために十分な加工特性を付与させる必要がある。
超高強度化材料の塗装後耐食性への影響	鉄鋼材料をハイテン化する際の添加化学成分として C、Si、Mn が知られている。これらの化学成分が化成処理性や塗装後耐食性に及ぼす影響を判断する。	表面状態の変化が及ぼす化成処理性や塗装後耐食性への影響は塗装後品質に直結するため、表面状態の影響調査が必要である
異種材料接合による塗装後耐食性への影響	鉄鋼材料とアルミ材料が電氣的に接合された状態を異種材料接触の最悪条件として、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査する	マルチマテリアル材料を使用した車体において、ガルバニック腐食は大きな課題であり、その影響を把握し、対策することは極めて重要である
大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価	Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法確立を検討。Al/Fe 接合材に対してガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、腐食劣化挙動を調査する	ガルバニック腐食評価の多くは浸漬評価を用いたバルク評価になっておる。実際の車体は大気腐食下で進行するため、屋外走行時を想定した新たな評価方法が不可欠である
摩擦攪拌接合法 (FSW) により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動	FSW による接合部で腐食が進行する起点となる領域を組織観察と電気化学測定を用いて解明する	FSW は、Al 合金と鉄鋼材料というような異種金属を接合した場合、接合時の入熱や冷却過程、摩擦攪拌ツールによる加工によって、材料組織が複雑に変化し、接合部近傍での腐食特性が不均一化することが予想されるため事前評価が必要である

(3)全体計画

本検討はFS研究として、5つのサブテーマに掲げた課題に対する検討を2018年度内にすべて実施した。FS研究の全体計画および実行内容を図Ⅲ-2.8.14-2に示した。

研究開発項目	2018年度上期	2018年度下期
超高強度化材料の潤滑加工性向上	高強度化材加工性評価 方法の探索	評価方法確立
超高強度化材料の塗装後耐食性への影響	高強度化材に関する事前調査	化学分量変更 試作材の作製 化成処理性への影響調査
異種材料接合による塗装後耐食性への影響	異種材料接合時の化成処理性調査	異種材料接合時の塗装後耐食性調査
大気腐食環境下におけるAl合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価	大気腐食環境下のガルバニック腐食腐食特性の探索	電気化学インピーダンス法を用いたガルバニック腐食評価法の探索
摩擦攪拌接合法(FSW)により作製したAl合金／鉄鋼対の腐食挙動	Al合金／鉄鋼摩擦攪拌接合材の調製	Al合金／鉄鋼摩擦攪拌接合材の腐食評価

図Ⅲ-2.8.14-2 2018年度研究開発スケジュール

(4)実施体制

本テーマは平塚分室（日本パーカライジング株式会社）が1再委託先と共に実施した。

(5)運営管理

研究開発の方向性や一般見解を得るために、自動車メーカーおよび材料腐食分野における有識者から構成される有識者会議を設置した。有識者会議は自動車メーカー4社、鉄鋼材料腐食の有識者2名により構成した。報告会を2018年5月、8月、12月に3回開催し、研究開発の方向性などを確認しつつ、マルチマテリアル化がもたらす真の課題を追求するために議論を行った。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本検討は2018年度に実施したFS研究であり、成果物の売り上げなどは得られていないが、本研究で行うべき課題が明確となり、翌年度ガルバニック腐食評価技術や防

食表面処理技術の提案を意図した研究開発に発展することができた。

2.8.14.2 研究開発成果

(1) 目標の達成度

テーマ 57 は 2018 年度単年に実施したテーマであり、2018 年度の達成度を表 III-2.8.14-2 にまとめた。

本検討の結果、潤滑加工性の向上と鉄鋼材料の化学成分の影響については一定の見解を得ることができた。これらの検討は本検討の成果で十分であると判断される。潤滑加工性の向上効果は明確であり、競争領域として企業側で検討すべきテーマと判断した。鉄鋼材料表面については表面状態が塗装後耐食性に大きく影響することは明らかであるが、こちらも製造時の検討課題となり、企業側で検討すべき内容と判断した。一方、ガルバニック腐食対策についてはさらに十分な検討を行い、総合的な防食技術を確立していく必要がある。FS 研究では鉄鋼-アルミニウム材を直接接触した場合ではリン亜鉛処理の適用が難しいことが判明するなど、ガルバニック腐食対策には更なる追加検討が必要であることは明確である。一方、電気化学的手法によって大気腐食下のガルバニック腐食の進行を判断する方法を提案することができたことは有益である。我が国のガルバニック腐食対策における潜在的な技術課題を明確化し、本検討で得られた上記の成果を活かしつつ、更に研究を進めていく必要がある。

表 III-2.8.14-2 目標の達成度

研究開発項目	最終目標 (2018 年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
超高強度化材料の潤滑加工性向上	高張力鋼板を用い、潤滑皮膜による加工成形性向上効果を確認するための評価方法確立と潤滑皮膜適用の妥当性を判断する。	高強度化した際に要求されるプレス成型の性能評価法を見出した。また、潤滑皮膜を施すことで高強度化材も従来材と同等の加工が行えることを確認した。	○	
超高強度化材料の塗装後耐食性への影響	鉄鋼材料をハイテン化する際の添加化学成分として C、Si、Mn が知られている。これらの化学成分が化成処理性や塗装後耐食性に及ぼす影響を判断する。	化成処理性や塗装後耐食性に最も影響する化学成分は Si であり、表面に酸化珪素の安定皮膜を形成することや C 偏析も助長する傾向が確認された。材料製造時の表面状態を調整する必要があることを確認した。	○	

異種材料接合による塗装後耐食性への影響	鉄鋼材料とアルミ材料が電氣的に接合された状態を異種材料接触の最悪条件として、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査する	異種接合状態ではリン酸亜鉛皮膜は十分な化成処理性が得られなく、塗装後耐食性も低下した。一方、カソード、アノードの双方に化成皮膜を析出可能なジルコニウム化成処理は良好な塗装後耐食性を示した。防食効果の一つとしては十分有益な情報が得られた。	○	
大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価	Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法確立を検討。 Al/Fe 接合材に対してガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、腐食劣化挙動を調査する	Al 材とハイテン材からなる腐食対について、大気腐食模擬環境におけるガルバニック腐食挙動の評価を電気化学測定によって評価することに成功した。電気化学インピーダンスによって、ガルバニック腐食挙動を Al 材の電荷移動抵抗によって評価できることを見出した。	○	
摩擦攪拌接合法 (FSW)により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動	FSW による接合部で腐食が進行する起点となる領域を組織観察と電気化学測定を用いて解明する	Al 材とハイテン材の FSW 異材接合材におけるガルバニック腐食特性が材料組織と相関していること、特に Al 合金側の組織変化と対応していることを明らかにできた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)研究開発の成果と意義

(2).1【サブテーマ①】超高強度化材料の潤滑加工性向上

従来高張力鋼板を用い、潤滑皮膜による加工成形性向上効果を確認するための評価方法確立と潤滑皮膜適用の妥当性を判断した。材料開発においては鉄鋼、非鉄材料ともに軽量化を実現させるために更なる材料の高強度化検討がなされている。これらの材料を車体に適用する際は、部位によっては非常に複雑な形状にプレス加工されるために十分な加工特性を付与させる必要がある¹⁾。車体の部位別にどのような材料が適用され、どの程度の加工性が求められるのかを表Ⅲ-2.8.14-3に示した。

表Ⅲ-2.8.14-3 車体部位別の適用材料と加工性の難易度

部位	主な適用材料	高強度化材の代替候補	加工の難易度
パネル部品 (ルーフ、フード、ドアア ウター、フェンダー)	SPC270MPa、 GA270MPa、Al 材	Al 材 (将来的には Mg 材、樹脂材料)	軽加工ではあるが、Al 材は加 工が難しく外板であるため意 匠性の観点からも更なる性能 向上が望まれる
構造部品 (ピラー、ドアインナー、 メンバー)	SPC590~980MPa	SPC980~1470MPa、 Al 鋳物 (将来的には Mg 鋳物材、樹脂材料)	プレス加工が必要であり、最 も加工難易度が高い
補強部品 (ドアビーム、バンパー、 シートフレーム)	SPC980~1470MPa、 Hotstamp 材	SPC1280~1470MPa 、 Hotstamp 材、Al 鋳物	材料厚さは厚くなるがプレス 加工ではなく曲げ加工を基本 とする。加工難易度は中程度

(2).1.1 研究開発の概要

本検討では、革新材料として鉄鋼超ハイテン材を適用した際のプレス加工性向上効果を確認するために、従来 590~980MPa 材が採用されている構造部品を対象として革新材料の適用可否を判断した。ピラーをはじめとする構造材料のプレス加工性は、円筒深絞り性評価を基準とすることが一般的であり、本検討においてもこの方法を採用した。円筒深絞り加工は先ず材料を押さえ、次いでポンチで材料を押し出すことで平板を円筒状に押し出し加工するものである。押し出し加工の際、板を押える力が小さいと押さえ部にしわが発生してしまう。このためしわの発生しない適切な押さえ圧が必要となる。また、押し出し加工性は材料特性 (r 値) でほぼ決定されるために材料特性を調整することで十分な加工性を得ることができるようになる²⁾。しかしながら実際のプレス成型においては高強度化材料ほど材料割れや金型損傷を引き起こしやすく、現場では課題となっている。これは、高強度化材料ほど前述のしわ押さえ圧を高く設定しなくてはならず、材料が強く押さえられるために押し出し加工が難しくなっているものである。既存材料を SPC590MPa 材とし、各種ハイテン材を適用した際に同等の加工性が得られる条件の予測結果を図Ⅲ-2.8.14-3 に色別で示した。これは各鋼材の強度に比例してしわ押さえ圧を高めたものであり、通常は材料強度比等倍~2倍程度のしわ押さえ圧が必要となることをプレスメーカー有識者よりヒアリングした。図Ⅲ-2.8.14-3 に示したように、材料ごとにしわ押さえ圧を変動させた際の円筒深絞り性を確認することで超ハイテン材の適用範囲を確認することとした。

材種	しわ押さえ力 (kN)																		
	10	17	20	30	33	40	50	60	66	80	100	120	133	160	166	200	250	300	
590MPa	Red	White	Red	Yellow	White	Yellow	White	Green	White	Green	Blue	White							
980MPa	White	Red	White	White	Red	White	Yellow	White	Yellow	White	Green	White	Green	White	Blue	White	White	White	White
1180MPa	White	White	Red	White	White	Red	White	Yellow	White	Yellow	White	Green	White	Green	White	Blue	White	White	White
1470MPa想定	White	White	White	Red	White	White	Red	White	White	Yellow	White	White	White	Green	White	Green	Blue	White	Blue

図Ⅲ-2.8.14-3 円筒深絞り加工性評価における同等条件の予測 (同等条件を色別に示している)

(2).1.2 方法

(2).1.2.1 供試材と潤滑皮膜

冷延鋼板：SPC590材、SPC980MPa材、SPC1180MPa材（それぞれ板厚0.8mmt）

潤滑皮膜：有機系脱膜型皮膜 皮膜量 $5\text{g}/\text{m}^2$ (皮膜乾燥条件 PMT80°C、5s)

試験水準

- ・ 590MPa…SPC590MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 980MPa…SPC980MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 1180MPa…SPC1180MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 1180MPa+潤滑皮膜…SPC1180MPa に潤滑皮膜を $5\text{g}/\text{m}^2$ となるように皮膜処理したものに、プレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの

革新材料である SPC1470MPa 材は本検討では入手できていないため、図Ⅲ-2.8.1-3 に示したように性能の予測を参考として示した。材料の成型可否は任意のしわ押さえ圧に対する r 値に依存するものと思われるため、本検討では従来ハイテン材や SPC1180MPa 材の結果を参考に革新材料の性能を予測した。

(2).1.2.2 円筒深絞り性

円筒深絞り性評価は以下の条件で実施した。プレス加工の絞り比を変更した各条件にて、しわ押さえ圧変動時の加工性を判断評価した。

装置：万能型薄板成型試験機 142-40 型（Erichsen 社製）

プレス加工条件

【絞り比 1.76】

パンチ径：28.4mm

試験片径：50mm

パンチ速度：100mm/min

【絞り比 2.0】

パンチ径：33mm

試験片径：66mm

パンチ速度：100mm/min

【絞り比 2.1】

パンチ径：33mm

試験片径：69.3mm

パンチ速度：100mm/min

成型加工の判断は破断の有無で確認した。

(2).1.2.3 結果

円筒深絞り性の評価結果を図Ⅲ-2.8.14-4~6に示した。図中での表記については、斜線網掛け部はしわが発生したもの、○印は成型できたもの、×印は破断したものをそれぞれ示す。

材種	しわ押さえ力 (kN)															
	10	17	20	30	33	40	50	60	66	80	100	120	133	160	166	200
590MPa	○		○	○		○		○		○	×					
980MPa		○			○		○		○		×		×		×	
1180MPa			○			○		○		○		○		×		×
1180MPa+潤滑皮膜			○			○		○		○		○		○		○

図Ⅲ-2.8.14-4 円筒深絞り性（絞り比 1.76）

材種	しわ押さえ力 (kN)													
	5	8	10	15	17	20	30	33	35	38	40	45	50	60
590MPa			○	○		○	○	○			○			○
980MPa					○		○	×	×		×			×
1180MPa					○	○	○	×		×				×
1180MPa+潤滑					○	○	○	○	○	○	×	×	×	×

図Ⅲ-2.8.14-5 円筒深絞り性（絞り比 2.0）

材種	しわ押さえ力 (kN)									
	5	8	10	17	20	30	33	40	50	60
590MPa	○		○		○	○		×		×
980MPa		○		×			×		×	
1180MPa			×				×			
1180MPa+潤滑			○	○	×			×		

図Ⅲ-2.8.14-6 円筒深絞り性（絞り比 2.1）

図Ⅲ-2.8.14-4に示した絞り比 1.76の結果から、しわ押さえ圧 40、60、80kNの結果を確認すると、いずれの材料も成型できており、この加工条件においてはそれぞれの材料における r 値が妥当な値であることを示している。一方、しわ押さえ圧 100kN で破断が認められた SPC590MPa 材、SPC980MPa 材に対し、より強度の高い SPC1180MPa 材はしわ押さえ圧 120kN においても成型可能であったことから、今回用いた SPC1180MPa 材の r 値は従来ハイテン材よりも高いものと予測される。次に従来ハイテン材と同等の加工性を判断するために色付けした条件での比較を行うものとする。濃緑色で色分けしたものを例に挙げると、SPC590MPa 材をしわ押さえ圧 80kN で加工した場合と同等条件とするためには、SPC980MPa 材では 133kN、SPC1180 材では 160kN のしわ押さえ圧が必要となる。SPC980MPa 材、SPC1180MPa 材は何れも破断しており、これらの成型加工性は低下した。しかしながら、SPC1180MPa に潤滑皮膜を処理したものは成型可能となった。つまり、この条件で SPC1180MPa 材を採用するためには潤滑皮膜が不可欠となることを示唆している。絞り比 1.76 条件では実際に市場で潤滑皮膜なしで用いられている従来ハイテン材に問題はなく、図Ⅲ-2.8.14-3の結果

を例にすると黄色で色分けした水準程度が最も加工不可の高い加工条件になるものと予測される。つまり、SPC1470MPaの超ハイテン材を採用する際は100kNのしわ押さえ圧であればよいものと予測され、SPC1180MPa材の結果から十分なr値が得られていればこの絞り比条件では潤滑皮膜を必要としないことが分かった。

次に図Ⅲ-2.8.14-6に示した絞り比2.1の結果を先に考察する。この条件では適正しわ押さえ圧となる前に成型時の破断が認められており、従来ハイテン材においてもしわの発生と成型性が両立できていない。つまりこの条件は実際のプレス成型を想定した場合、過度に負荷のかかった条件であるものと思われる。

最後に図Ⅲ-2.8.14-5に示した絞り比2.0の結果を考察する。この条件では赤色で色分けしたものが潤滑皮膜を適用した際の限界加工条件となることを示している。SPC590MPa材では20kNのしわ押さえ圧で加工できるが、同条件の加工を想定するとSPC980MPaやSPC1180MPa材は潤滑皮膜なしでは破断してしまっている。しかし、潤滑皮膜を施したSPC1180MPa材は成型加工できており、加工条件が拡大したことを示している。これらの結果より、円筒深絞り試験で想定される潤滑皮膜を適用すべき条件とは絞り比2.0程度のプレス加工部において潤滑皮膜を適用することにより超ハイテン材に代替することが可能となることを示唆している。

(2).1.4 まとめ

革新材料として超ハイテン材を適用した際のプレス加工性向上効果を確認するために、従来590~980MPa材が採用されている構造部品を対象として革新材料の適用可否を予測した。本検討における前提としては、未知の高強度化材のr値は対象とする従来材と同等のr値であることを前提とした上で、材料強度の違いから適切なしわ押さえ圧を予測することで従来材料と同様のプレス加工を実施した際の仕上がりを予測することが可能となった。本検討で実施した万能薄板試験機を用いた円筒深絞り評価において、従来材をSPC590MPa材として超ハイテン材の加工性を確認した。

SPC980MPa材以上のハイテン材に対して潤滑皮膜を処理せずに用いた場合、絞り比2.0では従来材と同様のプレス加工が行えないことが分かった。一方、潤滑皮膜処理した場合は同条件で成型可能となることも確認した。本検討は潤滑皮膜が効果を発現する適正範囲を予測する方法を見出すことと潤滑皮膜の効果を確認することを目標としており、これらを達成することができた。本検討で得られた検証方法を用い、実際に高強度化材料を用いた部品試作の際には設計図からプレス難易度を予測し、事前に適正な潤滑皮膜処理を行うべきである。

(2).2 【サブテーマ②】超高強度化材料の塗装後耐食性への影響

本検討では、材料開発によって表面状態の変化が大きいと予測される鉄鋼材料に限定した。鉄鋼材料をハイテン化する際に用いられる化学成分量を意図的に変化させた試験材を作製し、表面状態の変化が及ぼす化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。

(2).2.1 研究開発の概要

鉄鋼材料をハイテン化する際に添加する化学成分として C、Si、Mn を添加した試験片を作製した。これらの化学成分が化成処理性や塗装後耐食性に及ぼす影響を判断するために、それぞれの化学成分量を変化させたものは通常配合される量よりも十分多い量とした。試作材の表面状態を把握するとともに、表面処理としてりん酸亜鉛処理やジルコニウム化成処理を行い、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。尚、本検討は化学成分がもたらす表面状態への影響を調査する目的で実施したため、試作材のハイテン化処理は行っていない。

(2).2.2 方法

(2).2.2.1 供試材

一般材 : 軟鋼 SPC-270D サイズ : 70*150*0.8mm

試作材 : No.1~No.4 サイズ : 70*150*1.0mm

No.1 を標準として、C 添加量を過剰とした No.2、Si 添加量を過剰とした No.3、Mn 添加量を過剰とした No.4 を用いて性能を比較した。

(2).2.2.2 処理手順

各種鋼材に対して脱脂（必要に応じて酸洗）、表面調整、りん酸亜鉛処理を行うことでりん酸亜鉛皮膜付き鋼板を得た。各種鋼板に対して脱脂（必要に応じて酸洗）、ジルコニウム化成処理を行うことで化成皮膜付き鋼板を得た。また、表面調整後を除く全ての工程間にて水洗を行った。更に、化成処理後水洗の後には脱イオン水による洗浄も行い、最後にエアブローにて鋼板表面の風乾を行った。脱脂、酸洗、表面調整、りん酸亜鉛処理、ジルコニウム化成処理は以下の手順にて行った。

- ・脱脂 日本パーカライジング(株)製 FC-E2093 (45℃、120sec) にてスプレー処理した。
※本検討に使用した試作鋼板は、表面の撥水性が高く、通常のアルカリ脱脂工程では明らかな水はじきが認められた。このままでは化成処理性に影響を与える可能性があるため、2%硫酸 (40℃) で酸洗処理を行う水準を加えた。酸洗した試験片は次いでアルカリ中和 (1%NaOH_a,20℃) を行い、次工程に移行した。
- ・表面調整 日本パーカライジング(株)製 PL-X (20℃、30sec) を用いて浸漬処理した。
- ・りん酸亜鉛処理 日本パーカライジング(株)製 PB-L3020 (40℃、120sec) を用いて浸漬処理した。
- ・ジルコニウム化成処理 日本パーカライジング(株)PLC-2010D (38℃、120sec) を用いて浸漬処理した。
- ・乾燥や塗装 化成処理後は適宜水洗し、必要に応じて風乾や電着塗装を行うものとした。

(2).2.2.3 表面分析

脱脂処理のみ実施した鋼板やりん酸亜鉛処理やジルコニウム化成処理を行った化成皮膜付き試験片について各種表面分析を実施した。

XRF 分析 主に化成皮膜量の分析

使用機器：ZSX-PrimusⅢ（リガク）

X線管：Rh、測定方法：検量線法、フィルタ：OUT

※りん酸亜鉛皮膜の皮膜重量は P 定量値からの換算値を用いた。P の定量には PK α 線を用いた。ジルコニウムの定量にはジルコニウム La 線を用いた。測定径は 10mm ϕ または 30mm ϕ である。

SEM/EDS 分析 脱脂後の試験材表面や化成皮膜付き試験材表面の観察・分析

使用機器：(SEM)JSM-IT100 In TouchScopeTM（日本電子）、(EDS) EMAX Evolution（堀場製作所製） 加速電圧：15.0kV

FE-SEM 観察 脱脂後の試験材表面や化成皮膜付き試験材表面の微小部観察

使用機器：SU8020（日立ハイテクノロジーズ）

加速電圧：3.0kV リターディング電圧：2.5kV、検出器：Upper、Top

観察は本装置の Upper 検出器と Top 検出器を用いて行った。リターディング時、Upper 検出器では 2 次電子と低角度反射電子、Top 検出器では低エネルギーの 2 次電子が検出される。

EPMA 分析 化学成分分布の確認

使用機器：EPMA-1610 型（島津製作所）

設定倍率： $\times 3000$ 加速電圧：8kV（反射電子像観察時 15kV）

ビーム径：1 μm ϕ ビーム電流：50nA（反射電子像観察時 5nA）

GDS 分析 深さ方向の成分分析

使用機器：JY-5000RF（堀場製作所）

電力：35 W 周波数：50Hz

μ -XPS 分析 微小部における深さ方向の成分分析

使用機器：PHI5000 Versa Probe III（アルバック・ファイ製）

スパッタ間隔 \times 回数：0.25min \times 24 スパッタレート：9.4nm/min、SiO $_2$ 換算

(2).2.2.4 塗装後耐食性

塗装後耐食性は、化成皮膜付き試験材に電着塗装を施し、塩温水浸漬試験にて評価した。

塗料種：自動車ボデー用カチオン電着塗装（30 $^{\circ}\text{C}$ 、膜厚：15 μm 狙い、焼付：180 $^{\circ}\text{C}$ 、26min）

塩温水浸漬試験：電着塗装後試験片の塗膜にクロスカットを施し、5wt %NaCl 水溶液（50 $^{\circ}\text{C}$ ）に 240h 浸漬した。その後、カット部をテープ剥離し、片側最大剥離幅を測定した。

(2).2.3 結果

(2).2.3.1 鋼板表面状態の確認

脱脂板の SEM 像観察と EDS 分析を実施したところ、軟鋼表面に見られた粒界の析出物は Mn と O が高強度となった。化学成分量を意図的に変化させた試作材 No.1~3 の粒界析出物の成分は O 強度がやや高かった。試作材 No.1 は軟鋼と比べ、成分分布に大きな違いは認められなかった。試作材 No.2（C rich）は全体的に C 強度がやや高

く検出された。試作材 No.3 (Si rich) は全体的に Si 強度が高く検出された。試作材 No.4 (Mn rich) は Mn 強度が全体的に高く、粒界の析出物は Si と O が高強度であった。

表面酸化物の分布を確認するため、EPMA により O 分布を確認した。試作材 No.3、4 は Si や Mn の分布と O 分布が一致したため、これらは Si または Mn の酸化物と考えられる。別途実施した XPS による酸化膜厚の分析結果から、何れのサンプルにおいても酸化膜厚は大きく変わらない結果となった。一方、C 分布に着目すると、No.1、No.3、No.4 は鋼材全体としては同等の C 濃度であったが、本マッピング結果では試作材 No.1 よりも No.3、No.4 の方が C は全体的に高強度となり、これらは表層に C が濃化しているものと判断された。

(2).2.3.2 りん酸亜鉛処理の化成性および皮膜特性

りん酸亜鉛皮膜重量と、SEM 像観察を行った。No.2,4 は軟鋼と同程度のりん酸亜鉛皮膜が析出していることが確認された。No.3 (Si 過剰) に関しては、皮膜付着量は多少増加した程度であったが、SEM 外観からは、非常に大きな皮膜結晶となっていることが確認された。尚、標準材である No.1 でも、結晶形状は上市されている軟鋼とは異なる結果となった。

今回、検討した鋼板はミル製造とは製造工程などの違いで表面物性が異なり (いずれの試作材も酸化膜厚は厚くないものの脱脂後に明らかな水はじきが認められた)、りん酸亜鉛の結晶形状や析出性に影響を与えたものと考えられる。そのため、酸洗を行った水準に関しても化成処理性を確認することとした。全ての水準にて皮膜付着量の明らかな増加が認められたが、軟鋼や標準材 No.1 は化学成分の表面析出物が少ないためか、酸洗によって表面が鋭敏化し、非常に大きな皮膜結晶に成長したと思われる。

(2).2.3.3 ジルコニウム化成の化成処理性および皮膜特性

ジルコニウム化成の化成処理性を確認するため、ジルコニウム付着量を調査した。ジルコニウム化成はりん酸亜鉛と比較して、鋼板ごとに化成皮膜量が大きく異なる結果となった。特に No.3 (Si rich) ではジルコニウム付着量が高い値となった。

No.3 (Si rich) において、ジルコニウム付着量が測定部位によって大きく異なる現象が認められたため、複数回化成処理を行い、ジルコニウム付着量のばらつきを確認したところ、試作鋼板 No.3 は測定部位における化成皮膜量のばらつきが非常に大きいことが分かった。No.3 (Si rich) 試作材は化成処理後に試験片の部位ごとに異なる外観を示しており、数 mm~数 cm の範囲でムラが認められており化成処理性が大きく異なっていることが視認された。ジルコニウム化成皮膜量のばらつきを考慮すると、ジルコニウム化成皮膜が殆ど析出していない部分では塗装後耐食性の低下が懸念される。

これまでの検討より、最も化成処理性に影響を与えた試作材は No.3 (Si rich) であった。試作材 No.3 はりん酸亜鉛処理においては皮膜結晶が粗大化し、ジルコニウム

化成処理においては、ほとんど皮膜が析出しない部分や、逆に皮膜が過剰に析出する部分が混在していることが分かった。

XPS 測定結果から、表面近傍の Si はシロキサン結合を主とする酸化珪素の皮膜を形成しているものと考えられる。酸化珪素皮膜は化学的に安定であるため溶解しがたく、酸化珪素皮膜上は化成処理反応においてカソードとなるために、この部分に化成皮膜が過剰に析出したものと考えられる。ジルコニウム化成は表面状態の影響を強く受け、部分的な皮膜析出量のばらつきに繋がったものと推察される。

また、試作材 No.3 (Si rich) は表面の C 濃度も高いことが SEM/EDS により確認されたため、他の試作材と比較し、表面 C 濃度を比較した。試作材 No.2~4 は表層に C が偏析していることが確認でき、特に No.2、3 はその傾向が顕著であった。

(2).2.3.4 塗装後耐食性

自動車ボデー用カチオン電着塗装を施した化成皮膜付き試験片を塩温水浸漬試験に供し、試験後にクロスカット部のテープ剥離幅を確認した。リン酸亜鉛処理においては、酸洗を行わない場合に試作材 No.2~4 は耐食性がわずかに低下した。これは前述の C や SiO₂、MnO₂ などの金属酸化物析出の影響であると考えられる。酸洗を行った水準では試作材 No.3、4 の耐食性が向上した。

ジルコニウム化成においては酸洗による耐食性への影響が顕著であった。ジルコニウム化成に関しては、酸洗を行っていない試作材 No.1~4 の塗装後耐食性は、全て的水準にて軟鋼 (SPC-270D) よりも大幅に劣ったものの、酸洗を行うことで性能は大幅に改善された。ジルコニウム化成処理は、その特徴として化成処理時の鋼板エッチング性が低く、化学的に安定な表面の場合、十分に反応が進まない場合がある。今回の試験材の酸化膜厚は比較的薄い結果となったが、アルカリ脱脂後に水はじきしたように加工によって表面が安定化され、通常ジルコニウム化成処理では十分に材料表面をエッチングすることができなかつたものと思われる。これは試験材作り込みの影響により Fe の状態が変化したものと思われ、今回検討した表面化学成分の影響とは考えにくい。

酸洗を行うことで何れの化成処理においても良好な塗装後耐食性を示すこととなったが、別途実施した試験より酸洗後にも C、Si、Mn の偏析は認められることが分かっている。リン酸亜鉛化成皮膜の結晶析出状態が変化しているように、表面状態は少なからず化成処理性に影響を与えており長期耐食性評価などを行った際は有意差となる可能性が高い。

(2).2.4 まとめ

鋼板製造時に添加される化学成分の影響を調査するため、C、Si、Mn を過剰量添加した試作材を作製し、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。化成処理性や塗装後耐食性に最も影響する化学成分は Si であり、表面に酸化珪素の安定皮膜を形成することや C 偏析も助長する傾向が確認された。鉄鋼材料の作り込みによって Si の表面偏析は回避できる可能性があると思われるため、革新材料を市場化するには材料製造技術と表面処理技術を連携させ、表面状態を適正化していく必要がある。

(2).3 【サブテーマ③】 異種材料接合による塗装後耐食性への影響

本検討では、鉄鋼材料とアルミ材料が絶縁されることなく電氣的に接合された状態を異種材料接触の最悪条件として、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。尚、再委託先においては実環境でのガルバニック腐食を想定した薄水膜附着時の大気腐食を電気化学的に考察し、腐食進行の評価基準を作成するための研究を実施した。

(2).3.1 研究開発の概要

SPC 材と Al 材を重ね合わせ、電氣的に短絡した試料を作製した。更に Al 側を一定の面積になるようにテープ被覆し、各金属の面積比が異なる試料を作製した。このテストピースに対して、研究開発テーマ②と同様のジルコニウム化成 (PLC-2010D)、りん酸亜鉛化成 (PL-X、PB-L3020) を行い、XRF にて化成性を確認した。

(2).3.2 方法

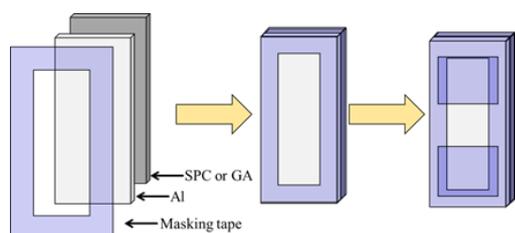
(2).3.2.1 供試材

SPC 材 : 軟鋼 (SPC-270D) サイズ : 70 × 150 × 0.8mm

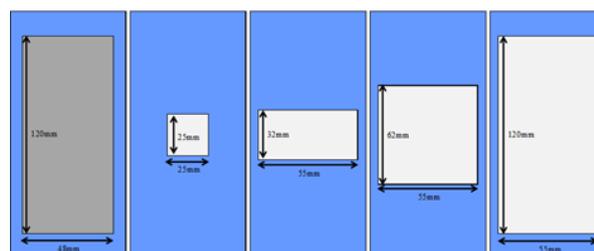
Al 材 : A6061 サイズ : 70 × 150 × 1.0mm

(2).3.2.2 試験片の作成

図Ⅲ-2.8.14-7 に示すように軟鋼と Al 材の背面を接触させるように重ね合わせ、試験片間に浸水しないように N 式マスキングテープで側面を被覆した。更に図Ⅲ-2.8.14-8 に示したようにガルバニックセル形成時にカソードとなる軟鋼 (図中灰色) や GA 材の露出面積を一定とし、アノードとなる Al 材側 (図中白色) の露出部分をテープ被覆により変化させた。試験片のカソード/アノード面積比を表Ⅲ-2.8.14-4 に示した。



図Ⅲ-2.8.14-7 試験片作成手順



図Ⅲ-2.8.14-8 試験片被覆条件

表Ⅲ-2.8.14-4 試験片のカソード／アノード面積比

露出面積(cm ²)		面積比(%)	
軟鋼	Al	CRS	Al
210	-	100	0
57.6	6.3	90	10
57.6	17.6	77	23
57.6	34.1	63	37
57.6	66.0	47	53
34.1	57.6	37	63
17.6	57.6	23	77
6.3	57.6	10	90
-	210	0	100

(2).3.2.3 処理手順

化成処理を含む塗装前処理は以下の手順で実施した。

- ・脱脂 日本パーカライジング(株)製 FC-E2093 (45℃、120sec) にてスプレー処理した。
- ・表面調整 日本パーカライジング(株)製 PL-X (20℃、30sec) を用いて浸漬処理した。
- ・りん酸亜鉛処理 日本パーカライジング(株)製 PB-L3020 (40℃、120sec) を用いて浸漬処理した。
- ・ジルコニウム化成処理 日本パーカライジング(株)PLC-2010D (38℃、120sec) を用いて浸漬処理した。
- ・乾燥や塗装 化成処理後は適宜水洗し、必要に応じて風乾や電着塗装を行うものとした。

(2).3.2.4 表面分析

りん酸亜鉛皮膜の皮膜重量およびジルコニウム化成皮膜のジルコニウム付着量を XRF にて定量した。また、軟鋼材上に形成したりん酸亜鉛皮膜に関しては SEM にて皮膜形状を確認した。

XRF 化成処理皮膜量分析

使用機器：ZSX-PrimusⅢ (リガク)

X線管：Rh、測定方法：検量線法、フィルタ：OUT

SEM リン酸亜鉛処理皮膜の外観確認

使用機器：JSM-IT100 In TouchScope™ (日本電子)

加速電圧：15.0kV、倍率：×500, ×1000 ×3000

(2)3.2.5 塗装後耐食性

電着塗装は以下の条件で実施した。

塗料名：自動車ボデー用カチオン電着 膜厚：15 μm 狙い 焼付条件：180℃、26min

塗装後耐食性は以下に示した方法で実施した。

① 塩温水浸漬試験

電着塗装後の試験片の塗膜にクロスカットを施し、50° Cに保った5wt.%NaCl水溶液に240h浸漬した。その後、カット部をテープ剥離し、片側最大剥離幅を測定した。

② VDA（複合サイクル試験）

電着塗装後の試験片にカットを入れ、VDA 233 -102³⁾ に準じて試験を行った。このサイクル試験を8サイクル（8週間）行い、カット部における片側最大膨れ幅を測定した。尚、本来はより長期間の評価を行うため、本検討は中間結果の位置づけとなる。

(2).3.3 結果

リン酸亜鉛処理およびジルコニウム化成処理を行い、カソード／アノード面積比を変動させた際の化成処理性を確認した。また、化成処理皮膜付き試験片を用いて電着塗装を行い、塗装後耐食性を評価した。

(2).3.3.1 化成処理性

<リン酸亜鉛処理性について>

Al材と軟鋼を短絡させた場合、Al材の面積比が小さく（軟鋼の面積比が大きく）なるとAl材上でのリン酸亜鉛皮膜の付着量が少なくなった。特にAl面積比率が10%の時、Al材上でのリン酸亜鉛皮膜は殆ど析出しなかった。軟鋼上に析出したりリン酸亜鉛の付着量に殆ど差異は認められなかったが、皮膜は針状の結晶が殆どであり結晶形状は粗大化していた。軟鋼表面の被覆性を評価する場合、アノード面積（Al接触面積）は10%以下である必要があるが、この場合Al材にはほとんど皮膜が析出していないことから塗装後耐食性において問題となる。

<ジルコニウム化成処理性について>

Al材と軟鋼を短絡させた場合、Al材の面積比が小さく（軟鋼の面積比が大きく）なるとAl材上でのジルコニウム付着量がやや多くなった。Al材の面積比が大きく（軟鋼の面積比が小さく）なった場合においても軟鋼でのジルコニウム付着量が多くなった。

(2).3.3.2 塗装後耐食性

電着塗装を施した化成処理皮膜付き試験材に対し、塩温水浸漬試験および複合サイクル試験としてVDA233-102試験を行った。

塩水浸漬試験結果より、リン酸亜鉛処理では異種材料接触せずに評価した水準と比較し、異種材料接触材はいずれも塗装後耐食性が低下した。この傾向はカソードとなる冷延鋼板においても、アノードとなるAl材においても同様の結果であった。

まず、カソードとなる軟鋼において化成処理性と塗装後耐食性の関連性を考察する。軟鋼の面積比が高くなるに従ってリン酸亜鉛処理時の皮膜結晶は粗大化し、塗装後耐食性もこれに従って低下した。リン酸亜鉛皮膜は結晶成長を伴って全体の化成処理皮膜量が増加するものである。リン酸亜鉛処理皮膜をより均一に析出させるためには、

先ずアノード起点となる金属のエッチング反応を金属の全面で均一的に起こすことで、アノード反応が起こった近傍で皮膜析出につながるカソード反応を均一に起こすことが重要である。しかし、異種材料接触時にはカソードとなる軟鋼表面に電子が供給され、通常のアノード反応となる金属エッチング反応を伴わずに皮膜析出が異常に析出することで、巨大な粒径の結晶となって析出したものと理解できる。また Al 材側では、カソード面積比が高くなるに従ってアノード反応が優先して起こるようになり、皮膜の析出を伴うカソード反応が抑制されるためにリン酸亜鉛の結晶析出がほとんど認められなくなったものと考えられる。つまり、リン酸亜鉛処理は結晶成長型の成長を伴うためにカソード/アノード反応の影響を強く受け、異種材料接触時にはカソード側では皮膜の異常析出が起こり、アノード側では皮膜が析出し難くなる。これは、一般的な化成処理反応の原理に基づくものである。一方、ジルコニウム化成処理は皮膜析出のメカニズムがリン酸亜鉛とは異なっている。ジルコニウム化成皮膜は非晶質の非常に細かな粒子が集積したものとされており、化成処理工程においてもリン酸亜鉛のような結晶成長を伴わない。アノード側でも皮膜の析出を伴うことからリン酸亜鉛皮膜とは異なり、カソードで電子を享受した際も一つ一つの皮膜粒子が粗大化することなく金属表面を被覆し、さらにアノード側でも皮膜析出反応が起こることから異種材料接触時にガルバニックセルを形成した双方の金属に好適な皮膜を形成したものと見える。そのため、異種材料接触時においても良好な塗装後耐食性を示したものと考えられる。

複合サイクル試験として VDA233-102 法りの評価を実施したが、評価期間に長い時間を要するため、現段階では有意差は得られていない。この評価に関しては本研究検討時に詳しく検証を行うべきである。

(2).3.4 まとめ

軟鋼 (SPCC-SD) と Al 材を用いて、異種材料接触時のカソードおよびアノード面積比を変動させた際の化成処理性と塗装後耐食性への影響を調査した。これら 2 種の金属を異種材料接触した際には軟鋼側ではカソード反応が優位となり、Al 材側ではアノード反応が優位となる。リン酸亜鉛処理ではカソード比率が 10%を超過した際、異種材料接触状態では軟鋼での析出皮膜は結晶が粗大化し、金属表面を被覆することなく粗い皮膜が析出した。Al 側ではカソード面積比が増加するに従い、リン酸亜鉛皮膜は析出しづらくなった。化成処理性の結果と同じく、塩温水浸漬試験での塗装後耐食性は異種材料接触することで大きく低下し、カソード面積比率は最大でも 10%程度が限度であることが確認された。しかしながら、腐食初期にカソード面積比が 10%であった場合においても、腐食が進行した場合にはアノードの溶解により、カソード面積比は徐々に増加するはずである。このため、軟鋼と Al 材を裸接触した場合においては塗装後耐食性のみならず、材料腐食による強度低下が懸念されるため電氣的に隔離するべきである。

一方、ジルコニウム化成処理を行った場合は皮膜析出および皮膜成長の原理がリン酸亜鉛処理と異なるために異種材料接触した双方の金属材料に良好な化成皮膜が形成された。この結果、塩温水浸漬評価における塗装後耐食性も良好な結果となった。ジ

ルコニウム化成処理を用いることで実車使用環境においても十分な塗装後耐食性を示すとは言えないが、裸接触したような材料にとってはある程度の防食効果を示すことが示された。VDA233-102 法などの複合サイクル試験での評価は長い評価時間を要するため、実車腐食環境を考慮したマルチマテリアル材の防食対策については適切な評価を行い、最新の技術を組み合わせた十分な対策が必要となるものと思われる。

(2).4 【サブテーマ④】 大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価（再委託先）

(2).4.1 実験目的

Al は Fe に比べ卑な金属であり、これらが接合した材料が腐食環境に置かれると、Al がアノード、Fe がカソードとなるガルバニック腐食が進行することとなる。このとき腐食反応の速さは、Al の耐食性と、Fe 上のカソード反応速度に依存する。特に、大気腐食環境では、Fe 上での溶存酸素の還元反応速度が全体の腐食反応速度を支配することとなり、その速度は表面の水膜厚さと強く関係する。そこで、本研究では、Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法を検討するために、Al-Mg-Si 系 Al 合金 A6061 と 1180 MPa 級超高強度鉄鋼材料からなる異種金属接合対に対してガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、腐食劣化挙動を調査した。また、化成処理した接合対についても同様の試験を実施した。本提案で開発する電気化学モニタリングおよび塗膜劣化評価技術は、提案者らがすでに耐候性鋼などの実大気環境での腐食モニタリング⁴⁾に適用した実績があり、また、実験室内で大気腐食を模擬した薄膜水下での炭素鋼、耐候性鋼、亜鉛、銅、ステンレス鋼などの腐食の基礎研究⁵⁻⁹⁾でも数多くの研究報告がある。

(2).4.2 実験方法

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6061 と鉄鋼材料は 1180MPa 級の冷間圧延鋼板（SPCC1180）であった。それぞれの材料を 10 mm x 10 mm のサイズに切断し、500 μm の距離を離してエポキシ樹脂に埋め込んで A6061/SPCC1180 腐食試験対を作製した。腐食試験対は、SiC 研磨紙で研磨し、エタノールおよび超純水中で超音波洗浄を実施して用いた。

ガルバニック腐食試験は、25℃、95%RH の恒温恒湿槽中で実施した。腐食対表面に NaCl 溶液を付与し、A6061、SPCC1180 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する NaCl 溶液の濃度を調整することで、25℃、95%RH の環境で平衡する 2M NaCl になるときに、25~100 μm となるように調整した。その他、分極測定、電気化学インピーダンス（EIS）測定を実施した。

(2).4.3 実験結果

バルク溶液中および水膜厚さ 25~100 μm のときの A6061 のアノード分極曲線、SPCC1180 のカソード分極曲線を測定した。その結果、A6061 のアノード分極曲線では、いずれの水膜厚さでも、不動領域と局部腐食の成長による電流増加が生じるこ

とがわかった。一方、SPCC1180 のカソード分極曲線では、溶存酸素還元 of 拡散限界電流領域がみられた後、水素発生反応による電流増加が観察され、拡散限界電流は、水膜厚さの減少にともなって増加することが確認された。

それぞれの腐食電位をみると、A6061 は $-0.81 \sim -0.78$ V (SSE)、SPCC1180 は $-0.56 \sim -0.62$ V (SSE) にあり、これらの材料が接合された場合、A6061 がアノード、SPCC1180 がカソードとなること推察された。また、A6061 の孔食電位は、 $-0.65 \sim -0.68$ V (SSE) 付近にあったため、SPCC1180 と接合した場合、A6061 が局部腐食することが示唆された。

A6061/SPCC1180 対のガルバニック腐食試験における腐食電位とガルバニック電流の測定結果から、腐食電位は -0.7 V (SSE) 付近にあり、水膜厚さにはほとんど依存しないことがわかった。また、ガルバニック電流は水膜厚さが減少するにつれ増加し、A6061 の腐食が促進されることがわかった。これは、SPCC1180 上のカソード反応速度が水膜厚さの減少につれ増加したためであるといえる。以上のことから、大気腐食環境において A6061 が SPCC1180 と接合した場合、A6061 上で局部腐食が生じ、水膜厚さの増加によって、A6061 の腐食が促進されることが示された。

次に、A6061/SPCC1180 対のガルバニック腐食過程において、没水および水膜下で EIS 測定を行った。その結果、EIS 挙動は没水、水膜下によらず低周波数域に容量性半円がみられるが、水膜厚さが減少するにつれ、容量性半円の大きさが大きく減少することがわかった。容量性半円の大きさは、Al のアノード反応の電荷移動抵抗を表すといえ、この抵抗の逆数が腐食速度の指標となるため、水膜厚さの減少とともにガルバニック腐食が促進されることが示された。これは、ガルバニック電流測定の結果とも一致した。

ZrO₂ および Zn₃(PO₄)₂ による化成処理をした後の A6061/SPCC1180 対について、ガルバニック腐食試験を行った。その結果、化成処理をしていない場合に比べ、化成処理を施すことによってガルバニック電流が減少していることが示された。また、Zn₃(PO₄)₂ 化成皮膜の方が若干ガルバニック電流が小さいことが示された。EIS 測定結果についても、ガルバニック電流の結果同様、ZrO₂ に比べ Zn₃(PO₄)₂ 化成処理によってインピーダンスが大きいことが示された。

(2).5 【サブテーマ⑤】 摩擦撈拌接合法により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動 (再委託先)

(2).5.1 実験目的

摩擦撈拌接合法 (以下 FSW) は、近年注目を集めている異材接合技術であるが、アルミニウム合金と鉄鋼材料というような異種金属を接合した場合、その接合時の入熱や冷却過程、摩擦撈拌ツールによる加工によって、材料組織が複雑に変化し、接合部近傍での腐食特性が不均一化することが予想される。そこで本研究では、FSW による接合部で腐食が進行する起点となる領域を組織観察と電気化学測定を用いて解明することを目的とする。

(2).5.2 実験方法

使用したアルミニウム合金は Al-Mg-Si 系のアルミニウム合金 (A6061)、鉄鋼材料は 980MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980) であった。厚さ 1 [mm] の A6061 板材と厚さ 2 [mm] の SPCC980 板材を重ね、Al 材側から FSW 回転ツールによって摩擦攪拌接合した。この時、回転ツールの走査速度を 25、50、100、300 [mm/min] の 4 段階で変えた。この FSW 接合材 A6061/SPCC980 対を試料として、表面観察、硬さ測定、ガルバニック腐食試験を実施した。

(2).5.3 実験結果

FSW 接合の結果、接合部近傍に材料組織が変化した領域が観察された。また、それにともない硬さの変化がみられた。その程度は最も低速で接合された 25 [mm/min] の条件でもっとも顕著で、Al 合金側、鋼材側に組織変化が生じた。

種々のツール走査速度で接合した A6061/SPCC980 対のガルバニック試験を実施した結果、水素発生サイトすなわち、Al 合金上の局部腐食サイトは、Al 合金上の組織変化によって、変化することが示された。特に、25 [mm] の場合、接合部近傍で水素発生がみられたが、その他の走査速度では、接合部から遠く離れた Al 上で水素発生がみられた。このことは、A6061/SPCC980 対のガルバニック腐食では、Al 合金側がアノードとして局部腐食が発生することは組織変化の程度によらず変わりはないが、その発生起点（特に腐食初期過程）については、FSW による組織変化が影響することが示された。

(2).6 研究テーマまとめ

車体用軽量化材料は、高強度化された新規金属材料や新規樹脂材料などの採用が見込まれており、これまでに様々な革新材料の開発が行われてきた。これらの材料を車体構成材料として用いる際には、成形加工性や異種材料接合時の塗装品質など、様々な性能を満たさなければならない。本テーマでは、車体のマルチマテリアル化における技術の要素分解から導き出された技術課題について、表面処理技術を適用した際の効果を確認するとともに新たな技術課題を明確化させるための FS 研究として実施した。

(2).6.1 【サブテーマ①】 超高強度化材料の潤滑加工性向上

超ハイテン材を対象として、従来ハイテン材からの代替を検討した場合に要求されるプレス成型の性能評価法を見出した。比較となる従来材料の板押さえ圧（しわ押さえ圧）に対し、評価する高強度化材の板抑え圧を材料強度に比例した圧に設定した上で円筒深絞り試験による加工性評価を行うものである。この評価法により、従来材を用いた場合においても、ある程度将来材料の加工性を予測することが可能となる。本検討で実施した結果、潤滑皮膜を施すことで超ハイテン材を従来材と同等の加工が行える上限を見出すことができた。実部品作成などにおいては、図面や加工シミュレーション技術を利用して事前に革新材料の加工性を予測することができるものと思われ、事前に適正な潤滑皮膜を設計することが重要となる。本検討は評価法の確立と潤滑皮

膜の適正使用範囲を決定することで目標を達成したが、実部品作成時には大いに本検討結果を利用すべきである。

(2).6.2 【サブテーマ②】 超高強度化材料の塗装後耐食性への影響

鉄鋼革新材料は更なる高強度化が実現されつつある。一般的に鉄鋼材料を高強度化する際は添加する化学成分を増加する場合が多い。この際、製造方法による違いはあるものの表面に化学成分が濃化する場合があり、化成処理性および塗装後耐食性に大きな影響を及ぼすことが知られている。革新材料の化学成分量はメーカーのノウハウによるものであり、これを知る方法はないため本検討では一般鉄鋼材料を想定した化学成分量に対し、C、Si、Mn を過剰量添加した試作材を作製し化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。その結果、化成処理性や塗装後耐食性に最も影響する化学成分は Si であり、表面に酸化珪素の安定皮膜を形成することや C 偏析も助長する傾向が確認された。本検討は過剰量の化学成分を鉄鋼材料に添加したものであり、この結果が革新材料を示すものではないが、化学成分量が及ぼす化成処理性や塗装後耐食性への影響を予測し、危険度を認識することができた。鉄鋼材料の作り込みによって Si の表面偏析は回避できるものと思われるため、革新材料を用いて実部品を試作する際は、塗料開発技術と表面処理技術により表面を最適化する必要がある。

(2).6.3 【サブテーマ③】 異種材料接合による塗装後耐食性への影響

異種材料接触時のガルバニック腐食の影響を調査するため、自動車材料に適用されている既存材料のうち、最も厳しい条件として鉄鋼材料とアルミニウム材料を直接接触した場合について評価を行った。この結果、カソードとなる鉄鋼材料の面積比が10%以上となった場合には、リン酸亜鉛皮膜は十分な化成処理性が得られなく、塗装後耐食性も低下した。一方、アノードとなるアルミニウム材においても同時に化成皮膜を析出可能なジルコニウム化成処理は双方の材料に皮膜を析出することができ、塩温水浸漬試験においては十分な塗装後耐食性を示した。本検討の結果により、異種材料接触時の対策としてジルコニウム化成を適した防食技術として推奨するには至らないが、防食効果の一つとしては十分有益な情報が得られた。

(2).6.4 【サブテーマ④】 大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価

大気腐食を想定した異種材料接触材料の腐食評価法に係る研究を実施した。Al 材とハイテン材からなる腐食対について、大気腐食模擬環境におけるガルバニック腐食挙動の評価を電気化学測定によって評価することに成功した。特に、大気腐食模擬環境においては、電気化学インピーダンスによって、ガルバニック腐食挙動を Al 材の電荷移動抵抗によって評価できることを明らかにした。

(2).6.5 【サブテーマ⑤】 摩擦攪拌接合法により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動

Al 材とハイテン材の FSW 異材接合材におけるガルバニック腐食特性が材料組織と相関していること、特に Al 合金側の組織変化と対応していることを明らかにでき

た。

(2).6.6 まとめ

本検討の結果、潤滑加工性の向上と鉄鋼材料の化学成分の影響については一定の見解を得ることができた。これらの検討は本検討の成果で十分であると判断される。

一方、ガルバニック腐食対策についてはさらに十分な検討を行い、総合的な防食技術を確立していく必要がある。FS 研究では鉄鋼-アルミニウム材を直接接触した場合にはリン亜鉛処理の適用が難しいことが判明するなど、ガルバニック腐食対策には更なる追加検討が必要であることは明確である。一方、電気化学的手法によって大気腐食下のガルバニック腐食の進行を判断する方法を提案することができた。我が国のガルバニック腐食対策における潜在的な技術課題を明確化し、本検討で得られた上記の成果を活かしつつ、更に研究を進めていく必要がある。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.14-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォ ーラ ム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.14-6 特許の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.15 [テーマ番号 58] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究（FS 研究）

2.8.15.1 テーマの概要

(1)背景と目的

構造部材材料の軽量化・長寿命化・強靱化は、自動車、鉄道車両などの輸送機器はもとよりのこと、工作機械、建設機械、物流産業などの、多くの産業分野、民生分野においても、エネルギー消費低減、二酸化炭素排出低減など大きな波及効果が期待できる。構造部材材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量素材材料を中心とした各素材材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、輸送機器の抜本的な軽量化に向け、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等、輸送機器の主要な構造材料の高度化等に係る技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータや知見などをプロジェクト終了後も有効に活用するためには、材料の信頼性や接着・接合技術等の関連する知識を体系的に集積して材料設計に活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトでも一部すでに行われている、材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの技術の融合により、本プロジェクト終了後においても、データの集積・管理・解析、信頼性設計ツール構築、評価・解析手法の開発、国際規格化・標準化を継続的に行う研究拠点の構築を目指す。さらに、本研究拠点は、国内の企業や他の構造材料研究拠点等とのハブ機能の役割や、海外機関との協調、国際人材融合等によるグローバル拠点の役割も担うことを企図する。本テーマでは、これに必要な研究技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る事を目的とした。また、本テーマは 2020 年度末目標として挙げられている「車体軽量化技術の集約化に関する課題の抽出」に資するものである。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.15-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第三中間目標（2020 年度末） （本研究開発は 2018 年度のみ）	根拠
マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究（FS 研究）	マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要な技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る。	上記の研究拠点の効果的な構築のため

(3)全体計画

① 調査研究

上述した「研究拠点」では、国立研究開発法人産業技術総合研究所の国立研究機関の機能を活かし、実環境での精密なデータの集積・管理・解析、信頼性設計ツール構築（材料プロセスから製品性能に至る因果関係の解明）、評価・解析手法の開発、及び国際規格化・標準化を行う計画である。同時に、国内の企業や他の構造材料研究拠点等と連携して、材料の実使用環境での信頼性データの提供・相互活用、信頼性設計ツールの共同構築等を行うハブ機能の役割を担うとともに、海外研究機関との信頼性設計ツールに関する情報交換や国際的な人材融合等を行うグローバル拠点の役割も併せ持つようにする。

マルチマテリアルの信頼性設計には、材料工学の分野において言及される、材料の製造プロセス（Synthesis/Processing）－構造（Structure/Composition）－特性（Properties）－性能（Performance）の4つの要素の因果関係（材料の4要素関係・PSPP 関係）を、マルチマテリアルを構成する個々の材料について体系的に解明し、それらの知見を基にして、マルチマテリアル化した際の部材、製品の性能（軽量性、寿命等）を正確に評価することが不可欠である。このため、本プロジェクトでも一部すでに行われている、材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの技術の融合により、マルチマテリアル化をキーとして、各材料の4要素関係材料プロセス（リサイクルを含む）から製品性能に至る PSPP 関係を体系的に解明するとともにし、それらの材料によりマルチマテリアル化した部材、製品について軽量性、寿命等の性能の向上を把握し、信頼性設計につなげることを目指す。

本調査研究では、このために関連する研究開発を調査、抽出し、その有効性を吟味するとともに、マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要な技術開発アプローチ手法を精査し、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得るために調査を実施した。

② 補足的実験等

材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術については、本プロジェクトですでに一部行われているが、材料の4要素関係 PSPP 関係の体系化のために必要であり、かつ本プロジェクトで行われていない研究課題について補足的な実験を行った。

(4)実施体制

本テーマは、名古屋守山分室（国立研究開発法人産業技術総合研究所）にて実施した。調査の実施にあたっては外部調査機関による委託調査を中心とし、月1回以上の進捗状況確認・協議を行うとともに、関連企業、関連団体等への共同ヒヤリングを行った。

(5) 運営管理

本テーマを実施・運営するにあたっては、新構造材料技術研究組合本部と密接な協議を行った。また、実施計画等を策定する際において、外部有識者を交えた「マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究検討委員会」を設け、関連する重要な調査項目を抽出し、調査の効果的な実施方法等について検討して、実施計画等に反映させた。さらに、調査研究期間中においても同委員会を開催し、進捗状況等を報告し、調査の結果等について確認・検討した。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本テーマにより、マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に関連する技術開発動向等が明らかになるとともに、本プロジェクトにおいて未実施で必要性の高い技術課題についての知見も得られ、本プロジェクトで得られたデータ等がプロジェクト終了後も有効に活用できる研究拠点の構築が可能となる。

2.8.15.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.15-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末) (本研究開発は2018年度のみ)	研究開発成果	達成度※	原因・課題 と解決方針 ※未達の場合のみ
マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS研究)	マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要な技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る。	マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に関連する技術開発動向等が明らかになるとともに、本プロジェクトにおいて未実施で必要性の高い技術課題についての知見も得られた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.15-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末) (本研究開発は2018年度の み)	達成見通し
マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS研究)	マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に関連する技術開発動向等が明らかになるとともに、本プロジェクトにおいて未実施で必要性の高い技術課題についての知見も得られた。	マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要な技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る。	達成済み

(3)研究開発の成果と意義

① 調査研究

マルチマテリアル及びマルチマテリアル信頼性設計技術に関連する研究開発動向を調査、抽出、吟味するとともに、今後、必要となる技術開発アプローチを精査することを目的として、以下の項目に分けて調査を行った。

- 1) マルチマテリアル信頼性設計研究拠点（以下、拠点）の成果が広く持続的に活用されていく上で想定される組織上の課題とその施策調査
- 2) マルチマテリアル関連技術の動向調査（特に、輸送機器の軽量化に資するもの）
- 3) マテリアルズ・インフォマティクス関連技術の動向調査（特に、構造材料に関するもの）
- 4) 材料4要素関係体系化関連技術
- 5) マルチマテリアル化関連技術の動向調査
- 6) 材料データベース関連技術の動向調査
- 7) 信頼性材料設計ツール関連技術の調査
- 8) その他関連項目の調査

調査は、文献調査、Web調査とともに、ヒアリング調査を行った。以下に結果の概略を示す。

- 1) マルチマテリアル信頼性設計研究拠点（以下、当該研究拠点もしくは拠点）の成果が広く持続的に活用されていく上で想定される組織上の課題とその施策調査

当該拠点活動による成果が広く持続的に利活用されるために拠点が具備すべき機能として以下のものが挙げられる。

- 拠点の成果および拠点リソースの利活用促進
- 拠点リソースの長期的な整備・維持・管理

- 連携・異分野融合
- 人材確保・育成
- 財務的健全性の確立（収益/コストバランス）

これらの各機能を有効に働かせるうえで想定される課題について調査した。

1-1) 拠点の成果および拠点リソースの利活用促進

- 拠点の利活用を促進するには、利用者のみならず拠点の運営側関係者（研究者、技術指導者など）にもそのメリットが理解され、利活用に向けてのインセンティブになっている必要がある。
- 拠点利用者が企業の場合、大企業と中小企業、中小企業でも従来型とベンチャー志向では、事業環境や問題意識、利用インセンティブが様々に異なり、大多数を占める従来型の中小企業での利活用が進まない。これは従来型の中小企業が個別的、直接的なソリューションを求める場合が多く、そのような個別案件に答えるのは難しい場合が多い。中小企業の持っている問題意識を、拠点側でなんとか計測、加工、合成といった実行可能なレベルまで落とし付き合っていくなど利活用促進のための利用者とのかかわり方を工夫する必要がある。
- 提供する成果物のユーザビリティの向上は、利活用促進において極めて重要な活動である。ユーザビリティの向上活動には、例えば研究者の“気付き”を支援する可視化技術のようなものと、ソフトや DB の GUI といった操作性向上やポータルサイトといったシームレスな利用環境整備などがある。

1-2) 拠点リソースの長期的な整備・維持・管理

- 拠点リソースの中でも材料データベースの重要性に関しては、すでに多くのところで指摘されている。これら連携による所謂データプラットフォーム化は、本拠点の技術分野であるマルチ・マテリアル技術（異素材間データベースや接着物質データベース必要）やマテリアルズ・インフォマティクス/インテグレーション技術（製造条件等含むプロセスデータベース必要）における主要な知的基盤としてますます重要となってきている。
- データベース以外に拠点が保有する施設、計測装置等の共通インフラ、ソフト等のサービスといったリソースにおいても上記材料データベースと同様な課題がある。

1-3) 連携・異分野融合

- 基盤・基礎的研究と産業界への橋渡しの研究開発といった役割分担の明確化と知財成果の取り扱いが重要になる。
- 産学連携も、個々の研究者レベルの共同研究だけでなく、拠点としてもう少し大きな枠組みでの産業界との連携を進めるべき。人事交流をするための制度も必要。

1-4) 人材確保・育成

- 今後、インフォマティクスのような帰納的方法を正當に理解できる人材を中長期的視点で養成する基本教育システムの構築が必須である。
- データ駆動型の研究をサポートするサービスを企画、開発、運用する人材の確保。
- 研究データの共有・公開を進め、その利活用を推進していくためには、データの利活用に精通した人材が不可欠である一方、これらの人材育成は体系的に行われていない状況。
- 広範囲にわたる膨大な物質系（有機 / 無機 / 金属）を俯瞰し、これまで集積された知見を従来の有機、無機、金属といった枠組みにとらわれずに、「機能＝構造×元素」という視点の材料設計研究者の養成が重要。
- 大学・研究機関等においては、技術職員、URA（University Research Administrator）、大学図書館職員等を中心としたデータ管理体制を整備できるように、データサイエンティストやデータキュレーターなどを研究支援人材として位置づけられるよう、包括的な育成システムを検討し、推進することが必要である。

1-5) 財務的持続性の確立（収益/コストバランス）

- 拠点におけるデータプラットフォームの維持や開発については、基礎・基盤に関する部分と、特定用途向けあるいは利用者向けに分けて考え、それぞれに適した予算措置をすることが必要である。システム全体を利用者からの負担金で運用するという事は不可能であり、国が持つべきところ（基礎・基盤部分）と利用者負担してもらうところ（特定用途向け、利便性向上のサービス）を分けた議論が必要である。
- 研究の助成を行う機関として JST、JSPS、NEDO などあるが、これらが研究のどのフェーズを支援すべきか。また、どの規模で支援すべきかという規模感の問題もある。支援する側からすると、面白そうだが実績の少ないテーマにいきなり大きな支援をするのは難しいところがある。例えば、トライアルファンドのようなものや、ステージゲートのものがある。

2) マルチマテリアル関連技術の動向調査（特に、輸送機器の軽量化に資するもの）

国内外のマルチマテリアル関連の研究開発プロジェクトを整理し、開発目標と達成状況、課題等を調査した。さらに、マルチマテリアルの標準化の動向について、輸送機器材料の信頼性に関する項目に重点をおいて、材料の疲労、腐食、接合・接着について調べた。ここでは、海外の代表的な例として、米国エネルギー省 Lightweight Materials プロジェクトと欧州委員会 EUCAR プロジェクトについて述べる。

2-1) 米国エネルギー省 Lightweight Materials プロジェクト

米国エネルギー省、Vehicle Technology Office (VTO) による Lightweight Materials プロジェクトにおいては、自動車の軽量化に係る研究開発が推進されており、その内容は多岐に亘っている。プロジェクトは主に、①Automotive Metals (Mg、Al、Ti、

HSS)、② Carbon Fiber and Polymer Composites、③ Multi-Material Joining、④ Crosscutting の 4 分野に大別され、研究開発が推進されている。2025 年までに 2012 年車と比べ軽量車重量を 25%軽量化(コスト増: \$10/kg 以下)を目標とし、米国自動車材料協会(USAMP)、国立研、大学、企業が参画している。Al、HSS は短期視野開発(10-60%の軽量化)、Mg、CFRP は長期視野開発(50-75%の軽量化)とし、以下の重点方針を掲げている。

- 計算材料科学・モデリングによる解析
- 材料特性の向上(強度、剛性、延性等)
- 製造プロセスの向上(コスト、生産速度等)
- 先進材料および合金の開発

2-2) 欧州委員会 EUCAR プロジェクト

欧州においては欧州委員会の EUCAR プロジェクトをはじめとする種々のプロジェクトで自動車に係る研究開発が推進されている。EUCAR プロジェクトは、①SAFE & INTEGRATED MOBILITY、②Sustainable Propulsion、③Affordability & Competitiveness、④Commercial Vehicles の 4 つの分野からなる。自動車の軽量化技術開発は③ Affordability & Competitiveness において展開され、SEAM クラスターの一部でもある ENLIGHT、ALIVE のプロジェクトの元で推進されてきたが、現在は ALLIANCE と LoCoMaTech (Low Cost Material Technology ; Horizon2020 のプロジェクト)に引き継がれている。

電気自動車の BiW、シャーシ等で 20~45%の軽量化(コスト増: 8€/kg 以下を目指し、企業、大学、国立研が参画している。BiW は HSS と Al のマルチマテリアルを基本(フロントボディ: HSS、Al、Mg 等。ドア: Al 等。ルーフ: FRP 等)とし、以下の技術課題を掲げている

- 約 100 種類の材料(HSS・Al・Mg、FRP 等)の特性データベースの構築
- 計算材料科学・モデリングによる材料特性、部品性能(耐衝突性等)予測
- 接合技術: 接着、リベット、遠隔レーザ溶接、スポット溶接、ヘミング加工等
- 材料技術: 新規複合材料・ハイブリッド材料技術、高性能・低コスト Mg 合金製造技術、等
- 評価技術: 接合部材信頼性評価、衝突時安全性評価、LCA、等

3) マテリアルズ・インフォマティクス関連技術の動向調査(特に、構造材料に関するもの)

計算科学活用材料技術、材料技術の人工知能(AI)等の、計算機の巨大情報処理能力を材料科学に応用するマテリアルズ・インフォマティクスに関連する技術の研究開発動向を調査した。

3-1) 国内におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

国内のプロジェクトは SIP 革新的構造材料(SIP-SM4I、内閣府)、超先端材料超高速開発基盤技術(超々PJ、経産省)、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ

(MI2I、文科省)、先進的マテリアルズインフォマティクス(文科省)がある。それぞれのプロジェクトは大まかには機能・構造、無機・有機、物質・材料という三軸で特徴づけられる。MI2Iはハブ(研究拠点)としての側面がある。そのため、SIP-SM4Iのマテリアルズ・インテグレーションシステムの開発に従事する研究者が二つのプロジェクトに横断的に取り組むという濃密な連携が可能となっている。これは、先進的マテリアルズ・インフォマティクスについても同様である。

SIP-SM4Iの開発ターゲットは航空機、発電分野の構造材料であり、無機材料、有機材料の両方が対象となっている。セラミックス基複合材料、樹脂・CFRP、耐熱合金金属間化合物に関する技術開発とともに、マテリアルズインテグレーションは上記のテーマを横断した体制をとっている。また、マテリアルズインテグレーションについてはSIP内だけではなく、本プロジェクト等との連携も進められている。

NIMSはJST事業「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ(MI2I)」を受託し、これを駆動力として、物質・材料科学から情報・数理科学にわたる産学官の共同体制を構築し、さらにより広範な企業の参画も促し、オープンイノベーションにつながるこの分野のハブ拠点化を目指している。MI2Iの設立は文科省の施策である、イノベーションハブ構築支援事業の一環である。この施策は、大学、産業界等の人材が糾合する場として、国立研究開発法人を位置づけている。技術の統合化、システム化を目指したイノベーション創出機能を強化し、人材育成にも寄与することを目的としている。

3-2) 米国におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

米国においては、材料の開発、製造、普及を従来の2倍以上迅速に、かつ、数分の一のコストで実現するための活動に対して、政策、財源、米国機関を支援するインフラの新時代を築くことを目的に、Materials Genome Initiativeプロジェクトが2011年にスタートし、その後5年間の2016年8月までに既に累積\$500M以上の資金を、DOE、DoD、NSF、NIST、NASAの連邦機関が投資している。現在においても様々な研究機関で、マテリアルズ・インフォマティクス関連の研究開発が行われている。その代表的な例であるCenter for Hierarchical Materials Design(CHiMaD)はNISTが主催する先進的な材料研究の卓越したセンター(コンソーシアム)である。次世代計算ツール、データベース、実験技術の開発を焦点に置いた先進材料研究のCOEであり、新規材料の設計、産業への実装を加速するMGIの戦略目標達成を目指している。センターの目的として、以下の事を掲げている。

- 次世代の計算ツール、データベース、実験技術を開発し、階層的な材料発見・開発を促進する。
- ワークショップ、セミナー、訓練機会と会合を通じて、マルチセクター、マルチディシプリン間の先進的交流により、現代の先達と次世代の科学者を結び付ける。
- 先進材料における新規なブレイクスルーを産業に実装する機会を与える。
- 予測、計測、解釈間の継ぎ目のない統合を採択する。
- 材料システム、方法論についての包括的知識を維持発展させる。

- NIST と一緒に、実証されたコード、集められたデータベースの国家的資源として機能し、米国企業パートナーを通じて、設計による材料開発の戦略、材料の発見を振興する。
- 金属合金システムで確立された成功の上に立ち、有機、無機の構造用ならびに多機能性材料双方への応用を通じて一般性を証明し、普遍的な、設計に基づく材料 (materials-by-design) 開発のアーキテクチャー、アプローチの方法を求める。
- ハード材料設計についての 3D、4D の方法を拡張し、ソフト材料設計の前面に活用する。

3-3) ドイツにおけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

ドイツにおいては、これまでに様々なマテリアルズ・インフォマティクス関連の研究開発プロジェクトが行われ、またインターネットなどの情報技術 (IT) を駆使して製造業の革新を促す巨大プロジェクト「インダストリー4.0」の推進もあり、関連技術開発は加速している。その代表的な例として、Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf がある。ここでは、化学、物理、冶金、材料科学を元に、新しい高機能性を持った高度な構造用材料、機能性材料を開発すべく、以下の 4 課題について学際的研究を展開している。

- 計算材料設計 Computational Materials Design : 熱力学および速度論データの第一原理計算、マイクロ組織の性質とダイナミックスの理論計算、コンピュータ支援合金設計、マルチスケールモデリングを扱っている。
- 界面化学と表面工学 Interface Chemistry and Surface Engineering : 電気化学的なエネルギー変換と同様に腐食や接着科学にも重点を置いて、電気化学の基礎研究を実施している。
- 微細構造の物理学と合金設計 Microstructure Physics and Alloy Design : 材料の機械的挙動、マイクロ組織と集合組織、合金設計と加工熱処理プロセス、原子レベル解析をカバーしている。
- 材料構造とナノ/マイクロメカニクス Structure and Nano-/Micromechanics of Materials : 材料の定量的ナノ/マイクロメカニカル試験を行うための実験的方法の開発、マイクロレベルから原子レベルの微細構造の特性評価技術による、基礎となる変形メカニズムの解明、優れた機械的特性を有するナノ構造材料の開発等を行っている。

3-4) 中国におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

中国においては、近年特にマテリアルズ・インフォマティクス関連の技術開発に力を入れ、例えば中国科学技術省は以下のような「材料遺伝子工学基幹技術プラットフォーム : China MGI」を推進している。

- 期間 : 2016~2020 年, 予算 : 2017 年約 3.3 億 CYN (53 億円)+州政府補助
- 外国、特に日本に依存している先端産業での基幹材料の自給率 (2016 年 14%) を 2020 年で 40%、2025 年で 70%に上げることを目指す。また、「新材料の開発時間 1/2、開発コスト 1/2」を目指す。

- 「経験による開発」から「理論・計算・実験検証に基づく開発」に転換。 米国 MGI と類似。
- 対象材料：軽量高強度合金、複合材料、高温材料、エネルギー材料、生体材料等

4) 材料 4 要素関係体系化関連技術

材料の製造プロセス（リサイクルを含む）から材料が発現する性能に至る、材料の 4 要素関係の体系化（理論、実験、計算科学、経験則など）に関連する研究開発動向を調査した。

材料 4 要素の概念は 1989 年に発行された米国の the Committee on Materials Science and Engineering, National Research Council のレポートに初めて紹介された。その趣旨は現在の Materials Integration の概念につながるもので製造方法と性能の間の複雑な関係を理解するために材料システムをプロセス、組織、特性、性能の 4 つに分け、それぞれの関係をモデル化することが重要であることを述べている（材料の 4 要素関係・正四面体でよく図示される）。本調査研究ではまず、主な工業材料である金属、セラミックス、ポリマーについて、化学結合の状態から機械的特性を推測することを試みた。次に、材料 4 要素関係体系化関連技術として、組織材質予測技術、材料 4 要素体系化と AI などについて調査した。

4-1) 組織材質予測技術

狭義の組織材質予測技術とは、材料の成分組成と製造プロセス条件を入力し、素材の組織ならびに特性を予測する技術をいうが、広義の材質予測技術は、成形シミュレーション、衝突シミュレーションを含む製品の性能を予測する技術である。ここでは、鉄鋼材料の組織材質予測技術、フェーズ・フィールド法による組織形態の予測、マルチスケールモデリングについて調査した。

4-2) 材料 4 要素体系化と AI

AI によるモデリングには「データ主導型のアプローチ」と「数理モデルアプローチ」がある。データ主導アプローチは、統計処理によってまで人間が意識しなかった特徴量を抽出して機械学習して予測をするものや、データをそのままディープラーニングに入れ込んで予測をするものがある。一方、数理モデルのアプローチでは、実験データが少ない場合に計算科学でデータを補完して、各対象に適合する拡張数理モデルを AI は創造する。すなわち、現場よりビックデータが提供されるときはデータ主導型のアプローチを行い、限られた数の実験室のデータを用いる場合は数理モデルアプローチが必要になる。

組織材質予測制御技術における AI の活用については、2 つの活用法が考えられる。一つは成分や製造条件の入力データと出力データである機械的性質のデータとの関係を AI 技術を駆使して高精度の機械学習をすることで統計学に則った近似式を作成することであり、もう一つは、物理現象を考慮した半理論式で使われている合わせ込み係数を AI 技術によって高精度化して予測精度を高めることである。ここでは AI 技術

に関連し、機械学習モデルとニューラルネットワーク、組織材質予測モデルと AI、物理モデルの学習について調査した。

5) マルチマテリアル化関連技術の動向調査

異種材料によりマルチマテリアル化した際の性能（軽量性、寿命等）の向上とリサイクル性に関連する研究開発動向を調査した。ここでは、マルチマテリアルの接合技術、マルチマテリアルの腐食特性評価、マルチマテリアルのリサイクル技術について述べる。

5-1) マルチマテリアル接合技術

日本、米国、欧州におけるマルチマテリアル接合技術開発状況を調べた。日本においては、異材間の接合では、Fe-Al、Al-CFRP、Fe-CFRP が検討されている。溶接では摩擦攪拌接合（FSW）が金属間だけでなく金属と CFRP の接合にも検討されている。また、スポット溶接も検討されている。米国においては、日本と同様に FSW による Al-Fe 接合が検討されている。FSW によるアルミニウムのテーラードブランク（TWB）も検討されている。マグネシウム合金の鋳造、腐食や異種金属との接合の検討がなされている。金属箔による異種金属のろう付けが検討されている。欧州においては、金属と CFRP、金属同士の接合で積極的に検討されている。また、接合するだけでなく、アルミニウムシートと CFRP を接合しながら成形して複合体を作る検討もされている。

各種異種材料接合の組合せに対する接合方法の適用の可能性について調べたところ、接着方法は、同種金属、異種金属、金属/樹脂・CFRP、金属/セラミックスのすべての組合せの接合に適用可能であるが、実用化されている事例は少ない。接着プロセスにおける接着剤固化時間の確保や接着剤の経年劣化対策等が必要であり、これらが実用化での課題となっている。しかし、欧州の自動車メーカーを中心に、異種材料間の接合に、従来の点接合から接着材での面接合の併用が 1990 年頃から増えている。主な狙いは次のとおりである。

- 面接着による接合部位の剛性、強度向上
- アルミ合金/鋼材における電食の抑制（メルセデスベンツ C クラス、AudiA4、BMW5 シリーズ）
- 異種材料間の接合面での熱膨張差の吸収

今後、接着技術はマルチマテリアル接合技術として重要となってくるが、異種材料を接着接合し、マルチマテリアル構造を実現する場合、主に問題となるのは熱応力・変形と電食であると考えられる。

5-2) マルチマテリアルの腐食特性評価

日本、米国における腐食特性評価状況を調べたところ、日本では、Fe-Al、Al-CFRP、Fe-CFRP 継手の電食、防食の検討は、これからの課題である。マグネシウム合金については、機械学習で特性予測を行うためのデータの構築中である。米国では、マグネシウム合金では、腐食メカニズム解明、コーティングによる防食の検討がなされてい

る。

5-3) マルチマテリアルのリサイクル技術

鉄鋼材料については、高炉鋼と電炉鋼に分かれるが、いずれも電炉または転炉で溶解してリサイクルする技術、流通経路が確立しており、例えば自動車に使用された鉄鋼材料の見掛リサイクル率は、90%前後と高い。

アルミニウムは他の金属と比べると腐食しにくく、融点が低いため、再生率の高い金属である。二次合金地金は品質的にも新塊合金と殆ど変わらず、しかも、製造時に必要なエネルギーが新塊合金を造る時と比べわずか3%で済むため、積極的にリサイクルが進められている。しかし、アルミニウム缶の回収率は92.4%と高いが、全体のリサイクル率は36%に留まっている。

CFRP については、炭素繊維は鉄に比べて製造時に膨大なエネルギーが消費され（鉄：48 MJ/kg、炭素繊維：234 MJ/kg）、また CFRP の工程廃材や使用済み製品は通常の焼却炉では処理できないので、現在、大部分は埋め立て処理されている。このような CFRP 処理の現状を踏まえると、CFRP をリサイクルする意義は、主に次の2点にまとめられる。①炭素繊維を回収し CFRP として再使用することにより、バージンの炭素繊維を製造する際の膨大なエネルギー消費が節減され、CFRP 部材を用いる自動車のライフサイクルエネルギーを削減することができる。②現在、埋め立て処理されている CFRP 廃材を大幅に減らすことができる。直近では、特に②の意義が大きい。例えば、欧州連合（EU）では、2015年以降、廃車部材の85%をリサイクルすることが義務付けられており、喫緊の課題となっている。

CFRP リサイクル技術には、廃 CFRP を燃焼熱として回収するサーマルリサイクル技術、廃 CFRP から炭素繊維を回収する技術、回収した炭素繊維を再度 CFRP 又は炭素繊維として再利用する技術に分けられる。サーマルリサイクル技術は、廃 CFRP を燃焼熱として回収する技術であり、マテリアルリサイクルとは異なるが、埋め立て処理する CFRP 廃材の削減につながり、現実的な対応策の一つである。炭素繊維回収技術には、物理的粉砕法、熱分解法、流動床酸化法、溶媒溶解法（液化法）などがあり、それぞれの長短について調査した。回収炭素繊維の形態は、バージン品が連続繊維（トウ、フィラメント）であるのに対して、切断繊維（カットファイバー、ステープル）であり、粉末状のミルド、短繊維のチョップド、長繊維がある。回収炭素繊維を用いて CFRP を再生する成形方法には、射出成形、BMC（bulk moulding compound）、不織布の圧縮成形、織布への樹脂含浸などがあり、それぞれの長短について調査した。

6) 材料データベース関連技術の動向調査

ここでは、データ形式・データ交換プロトコル等の標準化などのデータ処理システム技術に関する今後の進展と、それによる材料データベースの高度化・互換化に関する可能性を調査した。

6-1) NIMS（国立研究開発法人物質・材料研究機構）物質・材料データベース MatNavi

2001年 NIMS 発足時に、科学技術振興機構 JST が開発した高機能物質データベースが移管され、それと共に、NIMS の前身である旧金属材料研究所のデータベースを一元管理することになり、2003年4月からこれらのデータベースを MatNavi としてインターネット公開を開始。基礎物性、エンジニアリング、アプリケーションシステム、NIMS 構造材料データシートオンラインのデータベースから成っている。

6-2) CODATA

CODATA は国際学術会議 (ISC) のデータ委員会である。CODATA は、Open Science を推進するためのグローバルな協力関係を促進するとともに、あらゆる研究分野のデータの可用性と有用性を向上させるために存在する。CODATA では、研究によって得られ、研究に使用される可能性のあるデータは、FAIR (Findable、Accessible、Interoperable and Reusable) であるべきであるとの原則がある。

CODATA の戦略として以下の3つの優先分野を特定している。

- オープンデータとオープンサイエンスの原則、政策、実践を推進する。
- データ科学のフロンティアと科学研究への適応を推進する。
- オープンデータをサポートするために必要なデータスキルと国家科学システムの機能を改善することにより、オープンサイエンスの能力を構築する。

6-3) CEN (European Committee for Standardization)

CEN の使命は、世界的な取引、欧州市民の福祉、環境の中で、欧州経済を育成することであり、そのサービスを通じ、欧州標準やその他の技術仕様の開発のためのプラットフォームを提供している。CEN の標準化活動は、CEN の作業プログラムの実施に全責任を負う CEN テクニカルボード (BT) によって管理されており、標準は技術委員会 (TC) によって作成されている。

6-4) VAMAS

VAMAS (Versailles Projects on Advanced Materials and Standards) は、1982年のG7ベルサイユ・サミットにおいて合意された「先進材料の事前標準化に関する国際協力プロジェクト」。VAMAS の主な目的は、標準化につながる最適な汎用性のある測定方法のための技術的基盤を提供する国際的な協力を行い、先進的な材料の革新と採用によって世界貿易を促進することである。NIMS では、VAMAS 活動を通して、研究成果の公知と標準化、データの信頼性向上、国内外機関との連携などを行っている。標準化活動は個々の Technical Working Areas (TWA) で行われている。

6-5) Research Data Alliance

Research Data Alliance (RDA) は、欧州委員会 EC、米国国立科学財団 NSF および国立標準技術研究所 NIST、およびオーストラリア政府イノベーション部が共同体を構築し、2013年にデータのオープン共有を可能にする技術インフラストラクチャである。RDA は、137カ国から7200人以上(2018年9月)のメンバーが集中したグローバルワーキング・アンド・インタレスト・グループを通じて、データ共有とデータ駆

動研究を促進するインフラを開発し、ドメイン、リサーチ、国家、地理的および世代間の境界を越えて、密接なデータコミュニティの成長に貢献している。

7) 信頼性材料設計ツール関連技術の調査

構造材料（金属・複合材料）研究開発に関する国内外の注目動向のひとつとして、理論計算や数値計算モデルを活用したマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれる特性予測・材料設計のツール開発が挙げられている。マテリアルズ・インフォマティクスには、第一原理的手法と実験的評価データの効率的併用、物理モデルとディープラーニング（機械学習）による経験式との組み合わせにより、多様な元素・組織の組み合わせから信頼性の高い最適材料の設計を可能とする手法として期待が高い。また、マテリアルズ・インフォマティクスへの期待が増すにつれて、その基礎データを提供する評価・解析技術の精緻化・高度化の必要性も増している。ここでは、将来あるべき材料データ集積・管理・解析・活用システムや、それに基づく信頼性材料設計ツールを知るために、これらの研究開発動向を調査した。

7-1) ニューラルネットワークやディープラーニングを利用した材料性能予測

内閣府プロジェクト SIP において、「物理モデルとデータ駆動による疲労予測手法の開発」を実施している東京大学大学院工学系研究科榎教授グループの研究と、文科省プロジェクト学際大規模情報基盤利用・共同研究拠点・萌芽型研究において、「全電子混合基底第一原理計算法を活用したネットワーク型エネルギー絶対値算定マテリアルズ・インフォマティクス」を実施している東北大学川添良幸名誉教授グループの研究について調査した。

7-2) 複合材料強度信頼性評価シミュレーター

NEDO や文科省ポスト「京」プロジェクトにおいて、複合材料強度信頼性評価シミュレーター（FrontCOMP）とその機能拡大を進めている東京大学生産技術研究所吉川暢宏教授グループの研究と、EU で実施された自動車用複合材料の破壊挙動シミュレーション開発プロジェクト MATISSE 等について調査した。

8) その他関連項目の調査

ここでは、「Society 5.0」における材料技術開発のあり方、「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材育成のあり方と知的財産の管理と運用のあり方、今後重要となる評価・解析手法、国際規格化・標準化戦略のあり方について調査した。

8-1) 「Society 5.0」における材料技術開発のあり方

わが国の 2016 年度からの 5 年間に於ける第 5 期科学技術基本計画においては、新しい価値やサービスを持続的に創出するコンセプトとして、「超スマート社会（Society 5.0）」が新たに提唱された。このため、従来の経験と勘に頼る開発プロセスを刷新し、計算科学や AI を活用することにより、スマートマテリアル等の迅速な開

発が必要となる。これには、保有するデータに加え、実サンプルを試作・評価した結果をフィードバックして高度化した計算ソフトを活用し、データを量産化する。これにAIを活用し、マテリアルズ・インフォマティクス手法（逆問題（機能→組成・構造））により、開発期間の劇的な短縮を目指すことが重要となる。ここではまた、日本の強み・弱みとスマートマテリアル等の開発の現状を分析した。

8-2) 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材育成のあり方

Society5.0の本格実装を材料開発から支えるために「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材の確保・育成が必須である。基本的課題として

- 情報工学・数理工学に精通した人材の確保・育成
- 多様な融合領域に精通した人材の確保・育成
- 材料工学に精通した人材の確保・育成

が挙げられるが、ここでは金属素材競争力強化検討会の報告等も踏まえて調査を行った。また、米国などの海外での材料分野の人材育成の状況についても調査した。さらに、支援技術者育成についても検討した。

8-3) 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等における知的財産の管理と運用のあり方

ここではデータの共有とそのメリット)、データを共有する方法、データ管理と計画、データ管理の費用、データの文書化等について調査した。

8-4) 今後重要となる評価・解析手法

ここでは、マルチマテリアルに関連し今後重要となる評価・解析手法として、腐食性の評価・解析手法、接着の評価・解析手法を中心に調査した。

8-5) 国際規格化・標準化戦略のあり方

マルチマテリアルの信頼性評価に関する国際標準化に関連して、国際規格化・標準化戦略のあり方について、欧州、米国の動向、日本の強い所、弱い所も視野に入れて調査した。

② 補足的実験等

拠点の構築に関し必要性の高い以下の技術課題について実験等を含む補足的な研究開発を行った。

- 1) マグネシウム-アルミニウム接合体（締結材）の疲労（緩み）特性評価
- 2) マグネシウム-アルミニウム接合体の耐食性評価
- 3) マグネシウム-アルミニウム接合体接合部構造解析・欠陥評価
- 4) CFRP/アルミニウム接合体の力学的特性評価

以下にその成果を述べる。

1) マグネシウム－アルミニウム接合体（締結体）の疲労（緩み）特性評価

マグネシウム（Mg）合金とアルミニウム（Al）合金のハイブリッド部材を用いて鉄道車両構体等の構造部材の軽量化を達成するためには、その締結部の信頼性（疲労特性、耐食性）を評価するための手法を確立することが必要である。本テーマでは、Mg 合金部材と Al 合金部材をボルト締結した部材（Mg/Al ボルト締結材）を対象として、その疲労特性（ボルト緩み特性）を評価する手法を検討した。具体的には、各種パラメータ（振幅及びボルト締め付けトルク）を変化させた疲労試験をボルト締結体に対して実施し、疲労試験時の試験力（荷重：ボルトの緩みと相関）の変化を調査した。

予備試験として、Mg/Mg 締結体（対象合金：AZX611 合金）を対象として、振幅を変化させて疲労試験を実施した。振幅が ± 0.05 mm では試験力は緩やかに低下した後にはほぼ一定値を示した。それに対して、振幅を ± 0.1 mm 以上に設定すると、ある繰り返し数以上で試験力の急激な低下が見られ、ボルトの緩みを試験力の低下により検出できることを確認した。次に、ボルト締め付けトルクを変化させて疲労試験を実施した。その結果、ボルト締め付けトルクが 6.0 N-m 以下では、ある繰り返し数以上で試験力の急激な低下を確認した。この結果より、ボルト軸力低下を検証する試験条件としてボルト締め付けトルク 6.0 N-m（AZX611 合金の降伏応力の約 70%に相当）を抽出した。

さらに、Mg/Al 締結材（対象 Al 合金：A6061 合金）の疲労試験を行った。ここでは、板材の表面粗さ（算術平均粗さ）が試験力に及ぼす影響を調査した。その結果、AZX611 合金の表面粗さを低く設定すると、試験片同士の接触面積の増加が見かけの摩擦係数の増加に寄与し、ぼるとの緩みが低減することを確認した。一連の試験結果より、疲労試験時の試験力（荷重）の低下挙動により、ボルトの緩みに及ぼす各種パラメータの影響を評価可能であることを明らかにした。

2) マグネシウム－アルミニウム接合体の耐食性評価

マグネシウム（Mg）合金は腐食電位が低いため、他の金属部材と接触すると Mg 合金がアノード、金属部材がカソードとなって Mg 合金が選択的に腐食するガルバニック腐食が問題となる。アルミニウム（Al）合金は Mg 合金に次ぐ軽量材料であり、腐食電位も他の金属部材と比べて Mg 合金に近いことから、ガルバニック腐食が起こりにくい締結材として期待されるが、その詳細はあまり知られていない。本テーマでは、Mg 合金部材と Al 合金部材にスペーサを挟んだ接合体（Mg/Al 接合体）を用いて腐食環境下でのガルバニック電流および電位、走査型振動電極(SVET)に基づく接合部近傍の電位分布を測定した。試験後の接合体表面の 3D 表面形状計測も実施した。

0.1 wt% NaCl 溶液中の Mg/Al 接合体の試験開始 15 分後および 60 分後の電位差分布を SVET により測定した結果、試験初期において Mg 合金部には部分的に電位が低い領域が存在し、腐食が局部的に進行すること、Al 合金部の電位はほぼ一様であることを確認した。また、時間の経過に伴い局部腐食域は減少し、150 分後にはほぼ認めら

れなくなることを確認した。

次に、NaCl 濃度の異なる溶液中に Mg/Al 接合体を浸漬した際のガルバニック電流の時間変化を測定した。その結果、殆どの場合、ガルバニック電流は、1 時間以内に最大値を示し、その後急激に低下した。SVET による測定で確認した、局部腐食域の発生と消滅状況と良い対応を示すことを確認した。また、ガルバニック電位を測定したところ、NaCl 濃度の増加とともに低下した。一連の結果より、ガルバニック電流・電位の計測は Mg/Al 接合体の腐食挙動の評価に有効であることを明らかにした。

Mg-Al 接合部の腐食状態を 3D 表面形状計測した結果、セパレータ近傍に白色の腐食生成物が堆積していることが観察され、Al 合金側でも若干の浸食が確認された。以上の結果から、Mg/Al 締結部が腐食環境下に晒されると Mg 合金のみならず Al 合金も腐食することが予想された。

3) マグネシウム-アルミニウム接合体接合部構造解析・欠陥評価

材料の特性にはその組織や欠陥・含有ガス量などが大きく影響するように、接合体の特性には接合部の組織や欠陥・ガス量などが大きく影響を及ぼす。そこで、マグネシウム合金-アルミニウム合金異種金属接合試料の接合部の欠陥や含有水素量の測定手法の確立を目的として、モデル材を用いた X 線 CT 観察、水素量測定を行い問題点の確認を行った。

まず初めに、X 線 CT による内部欠陥観察を行った。モデル材として AZ91 マグネシウム丸棒 ($\phi 10$ mm) に空隙欠陥を模擬して $\phi 0.5$ mm の穴をあけたものを用いた。観察範囲を絞り解像度を上げて観察した結果と、観察範囲を広くし解像度を下げて観察した結果を比べると、どちらの条件でも試料中心に空隙欠陥（黒色部）が観察され、空隙を検出可能であったが、低解像度での観察においては、欠陥が大きく表示されていることが分かり、寸法精度が劣ることが分かった。

次に、水素量測定装置を用いて含有水素量の測定を行った。マグネシウム合金は蒸気圧が高く、溶解とともに蒸発・燃焼しやすい性質のため、測定や装置そのものに影響を及ぼすことが懸念される。そこで、マグネシウム合金単体の含有水素量測定を行い懸念点の確認を行った。含有水素量測定後のるつぼ及び下部電極を観察したところ、るつぼ内や下部電極周辺に、アルミニウム合金の場合は観察されないマグネシウムが飛散したと思われる形跡が確認されたが、測定中の装置の挙動や測定値などに異常な点は認められなかった。マグネシウム合金はその高い蒸気圧により測定時に蒸発するものの、測定や装置に悪影響を及ぼすことは無く正常に水素量測定が行えると考えられる。

4) CFRP/アルミニウム接合体の力学的特性評価

CFRP/アルミニウム合金接合体の変形挙動を解析するために CFRP およびアルミニウム合金の素材特性評価およびその接合体の力学特性を曲げ試験を用いて解析した。ここでは CFRP として PA6 をマトリックス樹脂として用いた織物材の積層板 (Tepex、ランクセス社) を、アルミニウム合金として PMS (Prominent Micro Structure) 処理をしたアルミニウム合金 (A5052) を使用した。接合体は PMS 処理を行ったアルミニウ

ム合金面と CFRP を、ホットプレスもしくは接着剤を用いて作製した。接着についてはアクリル系接着剤を用いて、アルミニウム合金と CFRP が直接接触する条件（薄い接着層部材）と PMS 処理側にスペーサーを導入して直接接触させない条件（厚い接着層部材）の 2 条件で接着させた。接合状態の力学的挙動を評価するため力学万能試験機（AG-Xplus SC, 島津製作所）を用いて曲げ試験をした。また、曲げ試験途中の変形挙動を観察するためにデジタル画像相関法（DIC）を用いた解析を行った。

ホットプレスによって熱接合を行ったところ、PMS 処理を行ったサンプルについては熱接合で接合体を作製できた。しかし、PMS 処理をしていないサンプルは接合させることができず、PMS 処理によって生成される比較的大きな起伏が今回の熱接合では必要であることが分かった。また、熱接合は比較的容易な接合手法である一方で、CFRP とアルミニウム合金の熱膨張率が異なるため、接合体の反りが生じた。曲げ試験の結果から CFRP とアルミニウム合金はほぼ等しい曲げ弾性率を有すること、アルミニウム合金と比較すると CFRP のほうが破断ひずみは小さいが強度は 2 倍近くあり、アルミニウム合金を CFRP と接合することによって CFRP による補強効果を期待できることが分かった。CFRP/アルミニウム合金接合体の曲げ応力-ひずみ曲線から熱接合体と薄い接着層部材はほぼ同じ曲げ弾性率なのに対して、厚い接着層部材は高い曲げ弾性率を示した。両方とも変形初期に圧子直下の PMS 処理部分から破壊した可能性がある。強度の観点から CFRP がアルミニウム合金を補強する効果を十分発現できなかった。接合形態についても更なる検討が必要である。

アルミニウム合金と CFRP の DIC 解析の結果から、引張圧縮ひずみについて注目するとアルミニウム合金は圧子直下から支持部に向かってひずみが減少する傾向であるのに対して、CFRP の場合は周期的なひずみ分布が生じた。これは CFRP の織物構造に起因する弾性率分布を反映したためと考えられる。せん断ひずみに注目すると CFRP は圧子直下にひずみが集中しているのに対して、アルミニウム合金は広い範囲にひずみが分布した。降伏変形によって、広い範囲にせん断ひずみが生じたと考えられる。CFRP については、内部構造に応じて局所的なひずみが増加することから接合体の接着寸法と CFRP 内部構造寸法が近い場合、内部構造によって接合強度が変化する可能性がある。CFRP/アルミニウム合金接合体の DIC 解析の結果の引張圧縮ひずみのコンター図から、厚い接着層部材は接着剤部分が均一に変形して、熱接合体と薄い接着層部材は、局所的な引張ひずみが存在することが示された。これらの周期はちょうど PMS 処理の周期に一致しており、接着部分と非接着部分で変形が異なっていることが分かった。また、PMS 処理の周期に応じて現れたパターンは非対称になった。今回、PMS 処理部分は圧子の直下に置いたが、圧縮過程で PMS 処理の剥離、圧子のわずかな位置のずれ等によって剥離が不均一に起きたと考えられる。これらの不均一変形は初期の剥離の影響が大きいと考えられるので、接着面積の増大等による剥離の防止が一つの解決策として考えられる。さらに、接合体の状態評価手法として DIC の有効性も確認できた。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.15-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.15-5 特許の件数（内訳） 【2019年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.16 [テーマ番号 65] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発

2.8.16.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車材料のマルチマテリアル化は材料の多様化とともに今後さらに進展する見込みであるが、同時に新たな課題を生じる可能性が高い。マルチマテリアル車体材料の技術開発においては、異種材料接触を想定した際のガルバニック腐食対策が必ず求められる。本事業では我が国に存在しない共通のガルバニック腐食評価の基準を示すとともに、既存技術の融合による防食表面処理技術の最適化提案を行うことでマルチマテリアル材料を市場に展開することを目標とする。

(2)位置付け、目標値

ガルバニック腐食の評価技術として、実環境での腐食を実験室で容易に再現可能であり、且つ、再現性の高い評価法を提案する必要がある。本テーマでは、まず実車が曝される大気腐食環境を調査し、これを再現することができる評価技術の指針を示すことを目的として2つの研究テーマを実行する。これら2つのテーマは、①「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」と、②「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」となる。それぞれの研究テーマ内で更にサブテーマを設計し、それぞれについて目標管理を行っている。

表Ⅲ-2.8.16-1 研究開発目標と根拠

①実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発

研究開発項目	第二中間目標 (2019年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
腐食環境データの取得 (試験片構造の設計)	融雪塩散布地域の塩化物付着量に基づいてガルバニック電流の面積効果を解析をし、試験片構造を決定する	前年度評価における課題を抽出し、更なる試験片構造の最適化を実施する。	評価試験片構造を決定する。	最も重要な板合わせ部のガルバニック腐食につき、実際の腐食状況を考慮した試験片を設計する必要がある
腐食環境データの取得 (実走行試験、屋外暴露試験の実施)	実車に用いられる鉄鋼、アルミニウム材、CFRTP材を基本としてこれらのガルバニック腐食への影響を精査するため、腐食評価を開始する	実車走行試験、屋外暴露試験を実施し、実腐食環境の調査を行う。	地域、環境の違いによるガルバニック腐食への影響を理解し、実腐食環境の基準データとしてまとめる。	実際の大气腐食環境のうち、ガルバニック腐食に影響する因子は正しく理解されていなく、実際の腐食環境データを得る必要がある

ガルバニック腐食評価技術の確立 (既存評価方法における課題の抽出)	既存腐食評価法である JASO M609 法、SAE-J2334 法、VDA233-102 法を用いガルバニック腐食データの採取を開始する	既存腐食評価法を用い、ガルバニック腐食への影響を調査する。それぞれの評価法における課題を整理する。	(2020 年度完了予定)	既存評価法は何れも鉄鋼材料の腐食促進を基本として設計されており、ガルバニック腐食評価を念頭に置いたものではないため、最適な評価方法を提案する必要がある
ガルバニック腐食評価技術の確立 (ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発)	ガルバニック腐食の影響因子として、材料種、形状、接合法、環境(温度、湿度、塩の種類や量)などの影響を数値化することで腐食影響因子を判断するための評価を開始する。	材料種、形状、接合法、環境といった腐食影響因子の影響度を確認し、ガルバニック腐食評価条件の探索を行う。	実腐食環境測定結果、既存評価法の課題、腐食因子の影響度の調査結果を基に、ガルバニック腐食評価の指針を決定する。	ガルバニック腐食を支配する因子を確認し、実際の腐食環境を反映可能な条件設定をすることで実験室での効果的な評価が可能となる。
防食表面処理技術の提案	(2021 年度開始予定)	(2021 年度開始予定)	革新材料を用いた試作部品につき防食表面処理を適用し、最終評価を実施する。	革新材料によるマルチマテリアル適用部品のガルバニック腐食評価を行い、各研究テーマの成果を統合し、防食性を付与する。

表Ⅲ-2.8.16-2 研究開発目標と根拠

②異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発

研究開発項目	第二中間目標 (2019 年度末)	第三中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)	根拠
異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発	大気腐食下におけるガルバニック腐食評価をモニタリング可能な方法を設計する。電気化学インピーダンス法を活用する。	(2019 年度完了)	(2019 年度完了)	ガルバニック腐食評価は浸漬などのバルク評価が一般的であるが、実車は大気腐食下にあるため新たな評価方法が必要である

異種材料接合材の塗膜劣化評価法の開発	(2020年度開始予定)	電気化学インピーダンス法による異種材料接合材の塗膜劣化診断システムを開発する	(2020年度完了予定)	塗膜劣化診断技術の開発により、ガルバニック腐食の進行度を数値化することが可能となるため有用。
異種材料接合部の腐食機構の解明	(2021年度開始予定)	(2021年度開始予定)	腐食モニタリング、塗膜劣化評価の結果から、異種金属接合部の腐食機構を解明する。	大気腐食下におけるガルバニック腐食は理解されていない点が多く、研究対象として大きな意味がある。

(3)全体計画

本研究の全体計画として、年度ごとの計画を以下に示す。尚、2021年度以降の予定については2020年度中間評価の成果を考慮し、最適化を図るための変更を行う可能性がある。

①実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発スケジュール

2019年度：数値モデリングによる試験片構造の設計、実走行試験、屋外暴露試験の開始、既存評価法の課題抽出、ガルバニック腐食の適正評価に関する基礎研究（分極曲線等の測定）

2020年度：実走行試験、屋外暴露試験の継続、新規暴露試験の実施、腐食評価試験片の分析・解析、既存評価法の課題抽出、ガルバニック腐食の適正評価に関する腐食因子の影響確認

2021年度：ガルバニック腐食評価の最適化と腐食評価の指針を決定

2022年度：マルチマテリアル試作部品の最終評価（本研究で得られたガルバニック腐食評価、マルチマテリアル材料向け各種表面処理の最適化）

②異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発スケジュール

2019年度：異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の確立

2020年度：異種材料接合材の塗膜劣化診断技術の開発

2021年度：異種材料接合部の腐食機構の解明

(4)実施体制

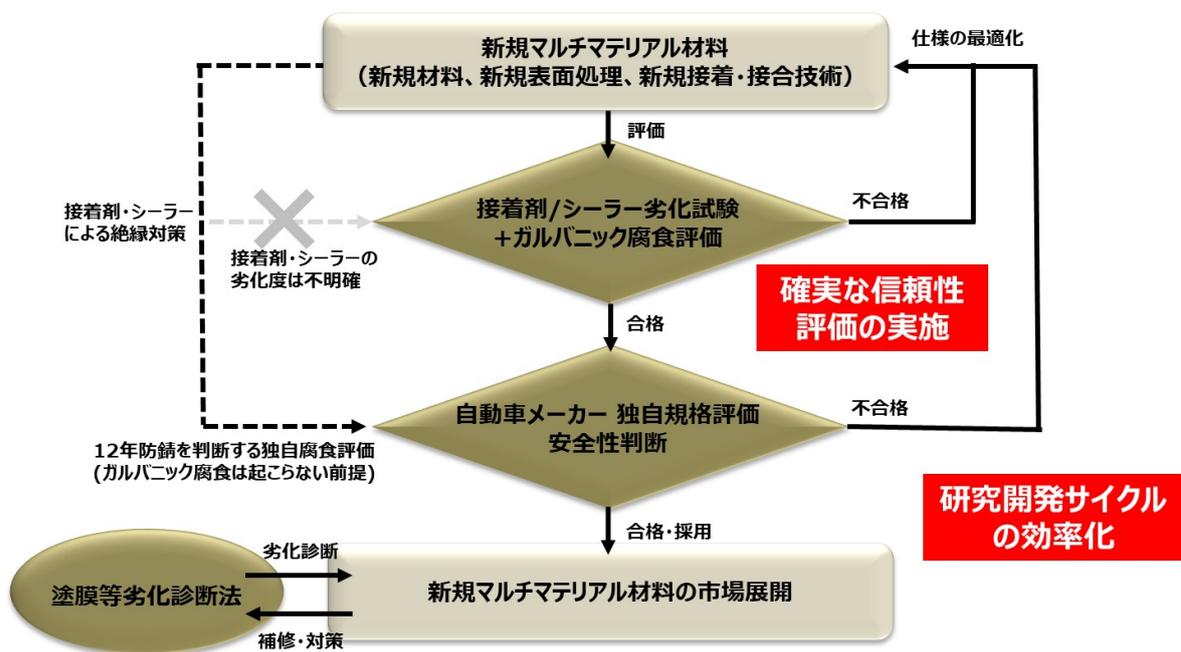
本テーマは平塚分室（日本パーカライジング株式会社）と千年分室（株式会社UACJ）が1再委託先とともに実施する。

(5)運営管理

分担研および再委託先は研究開発プロジェクトマネージャーとともに月一度を目処に定例会議を開催し、開発状況を共有化し、開発スケジュールの確認及び最適化を実施する。また、外部からの有識者による指導及び協力を仰ぐための委員会を設置する。有識者は自動車技術会、自動車メーカー3社から構成される。四半期ごとに研究の進捗状況を報告し、協議することで、研究開発の妥当性や方向性、また自動車部品を構成するうえでの懸念事項などについての的確な意見を得ることができている。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

本研究は、未だ実施されていない大気腐食環境下におけるガルバニック腐食を再現し、実験室にて再現可能な評価指針を提案するものである。我が国において前例のない検討であり、研究としての効果は非常に大きい。市場投入価値のあるマルチマテリアル材料の評価を迅速に行い、早期に市場進出を実現させることが可能となる。マルチマテリアル材料の市場展開までのモデルを図III-2.8.16-1に示す。



図III-2.8.16-1 マルチマテリアル材料市場展開への貢献モデル

2.8.16.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.16-3 第三中間目標と達成度

①実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
腐食環境データの取得 (試験片構造の設計)	前年度評価における課題を抽出し、更なる試験片構造の最適化を実施する。	試験片構造の暫定モデルを構築した。課題も抽出できており、材料の熱歪みの差異、接着剤効果時の厚さ変化を考慮した改良を実施中。	△	
腐食環境データの取得 (実走行試験、屋外暴露試験の実施)	欧州での実車走行試験、国内での屋外暴露試験を実施し、実腐食環境の調査を行う。	材料組み合わせにより、ガルバニック腐食電流量に違いが生じていることが確認された。	△	
ガルバニック腐食評価技術の確立 (既存評価方法における課題の抽出)	既存腐食評価法を用い、ガルバニック腐食への影響を調査する。それぞれの評価法における課題を整理する。	実験室での促進試験法でも実環境暴露と同様のガルバニック腐食電流の差異が得られており、各評価法の特徴を見出すことができる(評価中)。	△	
ガルバニック腐食評価技術の確立 (ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発)	材料種、形状、接合法、環境といった腐食影響因子の影響度を確認し、ガルバニック腐食評価条件の探索を行う。	浸漬環境下において、環境因子として温度、塩化物濃度(湿度)の影響を明らかにした。今後、恒温恒湿槽を用いて実環境を再現可能な条件を探索する。	△	
防食表面処理技術の提案	(2021年度開始予定)革新材料の調達および事前評価を開始	マルチマテリアル部品試作材を想定した防食表面処理技術確立に向け、事前評価を開始する。	—	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

表Ⅲ-2.8.16-4 第三中間目標と達成度

②異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発	大気腐食下におけるガルバニック腐食評価をモニタリング可能な方法を設計する。2019年度完成	電気化学インピーダンス法を活用することで、腐食促進試験にも応用可能なモニタリング法を設計した。	○	
異種材料接合材の塗膜劣化評価法の開発	電気化学インピーダンス法による異種材料接合材の塗膜劣化診断システムを開発する	電気化学インピーダンス法により、塗膜存在下でも腐食電流がモニタリング可能である。本技術を応用することでガルバニック腐食の進行度をモニタリングしている。	○	
異種材料接合部の腐食機構の解明	2021年度実施予定	未実施	—	腐食モニタリング法および実腐食環境データから、ガルバニック腐食機構を解明する

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.16-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
腐食環境データの取得 (試験片構造の設計)	接着剤を用いた接合材料において、試験片構造の不具合が認められた。材料の熱歪みの差異、接着剤効果時の厚さ変化を考慮した改良を実施中。環境腐食評価から得られたデータを用いて数値モデリングを行うことで更なる試験片の最適化を実施している。	評価試験片構造を決定する。	達成の見込み

腐食環境データの取得 (実走行試験、屋外暴露試験の実施)	走行試験を、屋外暴露試験を実施した。材料組み合わせによるガルバニック腐食電流の違いが生じており、腐食状況を進行度を軸として区分していく予定。	地域、環境の違いによるガルバニック腐食への影響を理解し、実腐食環境の基準データとしてまとめる。	達成の見込み
ガルバニック腐食評価技術の確立 (既存評価方法における課題の抽出)	VDA233-102 法や SAE-J2334 法の評価を開始した。本評価は 2020 年度までかかる見込みであり、継続的に評価を実施する。	既存評価法の課題をまとめ、新たな評価指針設定に活かす (2020 年度完了予定)	達成の見込み
ガルバニック腐食評価技術の確立 (ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発)	分極曲線からガルバニック腐食挙動を定性的に評価できることを明らかにし、浸漬環境下において、環境因子として温度、塩化物濃度(湿度)の影響を明らかにした。今後、恒温恒湿槽を用いて実環境を再現可能な条件を探索する。	実腐食環境測定結果、既存評価法の課題、腐食因子の影響度の調査結果を基に、ガルバニック腐食評価の指針を決定する。	達成の見込み
防食表面処理技術の提案	革新材料を入手し、防食表面処理技術確立に向け、事前評価を開始する。	革新材料を用いた試作部品につき防食表面処理を適用し、最終評価を実施する。	達成の見込み
異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発	電気化学インピーダンス法を活用することで、腐食促進試験にも応用可能なモニタリング法を設計した。	腐食促進試験にも応用可能なモニタリング法を設計した (2019 年度完了)	達成
異種材料接合材の塗膜劣化評価法の開発	電気化学インピーダンス法により、塗膜存在下でも腐食電流がモニタリング可能である。本技術を応用することでガルバニック腐食の進行度をモニタリングしている。	ガルバニック腐食の進行度をモニタリングする (2020 年度完了予定)	達成の見込み
異種材料接合部の腐食機構の解明	未実施	腐食モニタリング、塗膜劣化評価の結果から、異種金属接合部の腐食機構を解明する。	達成の見込み

(3)研究開発の成果と意義

本検討では以下の研究開発テーマを実施した。

- ① 「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」
 - ①-1 腐食環境データの取得
 - ①-2 ガルバニック腐食評価技術の確立
- ② 「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」
 - ②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発

それぞれの研究開発テーマについて成果をまとめた。

① 「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」

①-1 腐食環境データの取得

腐食環境データに関しては、自動車メーカーが個別に取得している可能性があるが、公開されているデータは存在しないため、共用可能なデータを有していない状況であった。また、促進試験によるガルバニック腐食評価においても実腐食環境と関連させる必要があるため、暴露腐食試験および実車走行腐食試験を実施した。

1：試験片の設計

鉄鋼、アルミ材の組合せにおけるガルバニック腐食影響について、分極データなどを参照し、数値モデリングを利用してカソードが及ぼす犠牲防食範囲を推察し、ガルバニック腐食評価サンプルの構造を決定した。

評価に用いる試験片材種を決定するため、以下に示した材種ごとの品番の違いによる自然電位の差異を確認した。尚、評価に用いた各材料の品番は以下のものを用いた。

鉄鋼材：軟鋼（270MPa）、高張力鋼（980MPa）

合金化溶融亜鉛メッキ材：軟鋼（270MPa）、高張力鋼（980MPa）

アルミニウム材：A1000、A5169、A6016

CFRTP 材：模擬異方材

鉄鋼材種や合金化溶融亜鉛メッキ材における軟鋼と高張力鋼、アルミニウム材における合金種の違いは自然電位から判断した場合大きな違いがなく、基礎データを取得する際はとずれかの代表材種を中心に水準を決定することが可能となることが分かった。我々のテーマでは、鉄鋼材料と合金化溶融亜鉛メッキ材は高張力鋼、アルミニウム材は 6016 番、CFRTP 材は NIMS より提供いただいた疑似等方材を用いることとした。

ガルバニック腐食評価の材料組み合わせにおいて、評価目標に応じてサンプルの構成を調整した。無塗装の裸材を接触させたもの、または化成処理と電着塗装を施したものについては、塩水付着時に発生する腐食電流をモニタリングした。また、合わせ

部に塩水が浸透した際の電気化学インピーダンス測定も実施した。

表Ⅲ-2.8.16-6 試験片の仕様

	化成処理	電着塗装	評価
単体サンプル	—	—	腐食外観、腐食深度
裸接触サンプル	—	—	腐食外観、腐食深度
裸接触サンプル	—	—	ガルバニック腐食電流
接触塗装サンプル	Zr系化成処理	カチオン電着 20 μ	ガルバニック腐食電流の測定と板合わせ部内の腐食観察
接触塗装サンプル (外面マスクング)	Zr系化成処理	カチオン電着 20 μ	インピーダンス計による測定実施と板合わせ部内の腐食観察
実部品想定サンプル 合わせ板サンプル	Zr系化成処理	カチオン電着 20 μ	板合わせ部内の腐食観察

2：実車走行腐食試験

2020年1月12日から2020年3月2日までの間、冬季に大型トレーラーを走行させ、その走行距離は6,536 kmであった。腐食データは2020年1月23日から2020年2月4日までのデータが回収済みである。今年の冬は例年に比べ、雪が少なくマイルドな環境であったが、トレーラー下部に装着された腐食試験片には泥が付着していた。

これまで2020年1月23日および2020年2月6日に外観写真を撮影し、さらに2020年3月2日に、試験後の腐食状況を観察した。

回収サンプルに融雪塩などが付着した状態を観察した後、付着泥の回収、表面洗浄後の試験片観察を実施した。

実車走行試験での試験片組み合わせ（鉄鋼/アルミニウム異種材料接合）の腐食外観を見ると、犠牲防食範囲を数値モデリングにより解析すると、塩分付着量は約1g/m²前後になるものと推定される。試験片に付着した塩化物を脱脂綿でふき取り採取してきたため、その結果と併せて、平板外面のガルバニック腐食の解明をさらに進めて行く予定である。また表面の電位分布を測定することも今度進めて行く。

3：屋外暴露試験

屋外暴露試験場の1か月間経過サンプルを確認した。ガルバニック腐食におけるカソード影響範囲は実車走行試験と同程度であった。CFRTP材は1か月間経過時では撥水しており、水濡れが十分でなかったため腐食電流が安定するまでにはある程度の時間を要するものと思われる。

本検討では何れの実環境腐食評価においても電気化学評価を実施している。今回は短期での評価であるためガルバニック腐食電流についてのみ、簡単な考察を行うものとする。まず、得られた腐食電流はカソード電流とアノード電流の総和として得られたものであるが、その値が正となったものをカソード電流とみなし、負となったものをアノード電流としてみなすこととした。得られた電流値の絶対値を対数化し、さらに経時期間の積分値として考察した。

ガルバニック腐食電流を比較したところ、高張力鋼 Al、高張力鋼 CFRTP、CFRTP-Al の組合せと比べ、GA-Al の組合せは、何れの評価場所においても 1/10～1/100 程度の電流値となることが確認された。通常、板合わせ内部ではアルミニウム合金がアノードとして作用するが、一部ガルバニック電流の逆転現象が微少なが生じていた。この現象がその後の合わせ内部の腐食生成物の安定性に寄与する可能性もあるので、走行試験を継続しておこなっていく必要がある。さらにガルバニック腐食現象を理解するために幾つかの研究が必要である。材料の表面電位分布と経時変化、腐食生成物の形成と腐食形態の変化などは希求する必要がある。

①-2 ガルバニック腐食評価技術の確立

既存の腐食評価法の殆どは鉄鋼材料単体の腐食促進を考慮して設計されていることが多い。また、世界各国で公知化されている腐食評価方法は実環境でのガルバニック腐食を正しく評価する方法として最適化されていない可能性が高いため¹⁾、まずはこれら既存評価法の課題を抽出することとした。さらに、ガルバニック腐食評価に及ぼす材料および環境の作用を定量化し、実腐食環境調査結果と比較することで、実環境におけるガルバニック腐食の影響因子を明らかにする。これらにより、ガルバニック腐食評価の在り方について指針を示すことが可能となる。

1：既存評価方法による課題の抽出

既存腐食評価法である JASO M609 法、SAE-J2334 法、VDA233-102²⁾法を用いガルバニック腐食データの採取を開始した。①-1 腐食環境データの取得で実施した電着塗装接触材料を用い、腐食進行の確認とガルバニック腐食電流調査を行う。本評価はいずれの既存規格においても長期間の評価期間を要するため 2020 年度も継続して実施することとなる。

2：ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発

各材料の分極曲線を測定し、各材料の腐食電位・電流密度を求めた。測定は 5% NaCl 溶液中で、室温(25℃)及び、融雪塩散布環境を想定した低温の 5℃で実施した。その結果、材料ごとに温度低下による電位・電流の挙動は異なっていた。アルミ材：少し電位が上昇し、電流密度が増加。鉄鋼材：ほとんど変化なし。亜鉛めっき材：電流密度が 1/10 程度に減少。CFRTP 材：電流密度が 1/10 程度に減少。電位の序列は温度による変化はなく、CFRTP 材 >> 鉄鋼材 > アルミ材 > GA 材 > GI 材となり、電流密度の序列は下記のようなになった。

25 ℃ : 鉄鋼材 > GA 材 > GI 材 > アルミ材 >> CFRTP 材

5 ℃ : 鉄鋼材 > アルミ材 > GA 材 > GI 材 >> CFRTP 材

また、実環境中で昼夜の湿度変化により塩化物イオン濃度が変化することを想定して、NaCl 濃度を変化させた分極曲線の測定を室温(25℃)で実施した。NaCl 濃度の低

下に伴い、アルミ材、鉄鋼材、亜鉛めっき材の腐食電位が上昇した。鉄鋼材の変化量がアルミ材のそれより急であるが、実使用環境で電位が逆転することはないと考えられる。

次に Al 1000 系と、軟鋼材・GA 材・GI 材・CFRTP 材とでガルバニック対を形成させ、室温(25°C)でガルバニック電位・電流を測定し、その結果と分極曲線からの予測値とを比較した。ガルバニック電位は分極曲線からの予測値とよい一致を示した。また、アルミ材より腐食電位の高い材料との組み合わせではアルミ材が溶解し、低い材料との組み合わせでは低い側の材料が溶解した。ガルバニック電流は、分極曲線からの予測と電流の向きは一致したものの、値は予測値よりも大きくなった。以上より、ガルバニック電位・電流は各材料の分極曲線からの予測と定性的に一致することが明らかとなった。

②「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」

②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発

2019 年度においては、Al 合金および高張力鋼板とが異種材料接触した状況を模擬した電気化学セルを用い、電気化学インピーダンス (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 法によって、液薄膜下におけるガルバニック腐食挙動を連続的にモニタリングすることで、ガルバニック腐食速度を評価することを試みた。以下では、その実験詳細について説明する。

Al は Fe に比べ卑な金属であり、これら異種金属が接合した材料が腐食環境におかれると、一般には Al がアノード、Fe がカソードとなるガルバニック腐食が進行する。このとき、この材料の腐食劣化は、Al の耐食性と、Fe 上のカソード反応速度に主に依存すると考えられる。一般的に上記のような異種金属接合部材が使用される環境としては大気環境であり、その材料表面には雨水や結露によって生じる薄い水膜下で生じる。このような大気腐食環境では、Fe 上のカソード反応となる溶存酸素の還元反応速度が全体の腐食反応速度を支配することが想定され、その速度は表面の水膜厚さに強く影響される。そこで、本年度では、Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法を検討するために、

Al 合金と高張力鋼からなる異種金属接合材を模擬した電気化学セルを使って、ガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、ガルバニック腐食機構および速度を評価する手法の開発に挑戦した。

また、異種金属接合部では、製造プロセスおよび接合法に関係して、材料間にわずかな空間（以下”すきま”）が形成されると予想される。上記したように、すきま部においては、Fe 上のカソード反応に関わる溶存酸素や Al 合金側で溶出した金属イオンの物質輸送が制限されることになる。このような物質輸送過程の制限が、すきま構造を有する異種金属接合部のガルバニック腐食挙動に影響する可能性がある。そこで、すきま構造を有する異種金属接合部材のガルバニックすきま腐食挙動を評価するための腐食モニタリングセルを考案し、その適用性について検討した。

実験 1：大気腐食模擬環境における A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食速度の評価

本研究では、Al 合金と高張力鋼板からなるガルバニック腐食評価セルを開発し、電気化学インピーダンス法を中心とした電気化学測定によって、ガルバニック腐食挙動の評価を大気腐食模擬環境において行った。その結果、ガルバニック腐食が進行しているとき、腐食電位は水膜厚さにはほとんど依存しなかったが、ガルバニック電流は水膜厚さが減少するにつれ増加することがわかった。これは、鋼板上のカソード反応である溶存酸素の還元反応速度が水膜厚さの減少につれて増加したためであると考察された。また、電気化学インピーダンス測定結果の解析から、Al 合金の平均溶解速度が測定できることを明らかにした。

以上のことから、Al 合金/高張力鋼板対のガルバニック腐食系において、電気化学インピーダンスを連続的に測定し、その解析から、腐食反応速度を検討することが可能であることを示した。また、電気化学インピーダンス挙動から腐食機構についても評価することができた。

実験 2：大気腐食模擬環境における A6016/SPCC980 対のガルバニックすきま腐食挙動評価

本研究では、Al 合金/高張力鋼板のガルバニック腐食挙動におよぼすすきま構造の影響を評価するために、ガルバニックすきま腐食評価セルを開発し、電気化学インピーダンス法を中心とした電気化学測定法によって腐食電位、ガルバニック電流、電気化学インピーダンス挙動を大気腐食模擬環境において評価した。その結果、ガルバニック腐食系の腐食電位は、すきま構造の有無に影響しないが、ガルバニック電流は鋼板上部にすきまが形成する場合大きく減少した。すなわち、鋼板上にすきま構造を形成すると、鋼板上のカソード反応が抑制されたことを示している。また、電気化学インピーダンス挙動から鋼板上部にすきま構造を有する場合、Al 合金の平均溶解速度が小さくなっていることが明らかになった。

以上から、本研究で作製したガルバニックすきま腐食評価セルにおいて電気化学インピーダンス法により連続的に Al 合金の腐食速度をモニタリングできることが示された。

実験 3：摩擦攪拌接合法による Al 合金/高張力鋼板接合対の作製

摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding、FSW) は、近年注目を集めている異材接合技術であるが、アルミニウム合金と鉄鋼材料というような異種金属を接合した場合、その接合時の入熱や冷却過程、摩擦攪拌ツールによる加工によって、材料組織が複雑に変化し、接合部近傍での腐食特性が不均一化することが予想される。2019 年度は、FSW 法によって Al 合金/高張力鋼板との異種金属接合材を FSW 法によって作製することに成功した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.16-7 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	0	0	1	1	0	0	1	0	0
合計	0	0	1	1	0	0	1	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.16-8 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.17 [テーマ番号 42-2] 材料・接合等技術動向調査研究（新材料の材料代替効果定量技術の開発）

2.8.17.1 テーマの概要

(1)背景と目的

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクト全体で実施している新規構造材料開発において、新たな技術により開発した材料の代替効果を求めることや、KPI（Key Performance Indicator）を見いだしそこに研究開発の資源を投入することは重要である。しかし、材料のライフサイクルは製品のライフサイクルとは異なるため、既存の製品を対象とした LCA 手法では総合的な材料代替効果を求めるための評価ができない。本事業では、材料代替効果を定量的に求めるために、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した、材料のライフサイクル全体を評価できる評価手法の構築を行い、その手法を研究開発現場で活用可能な評価ツール開発を行う。評価において考慮すべき項目の洗い出しを製品ライフサイクル毎に実施し、評価軸の設定の妥当性や実現性、時間的空間的システム拡張、リサイクル性、物質フローを勘案した、プロトタイプの定性的な評価手法を提案する。また、新材料の材料代替効果の評価ツールの基本コンセプトを検討する。

プロジェクトで開発している材料等を念頭に、そのマテリアルライフサイクルをシステム境界とする手法を構築する。従来の評価では製品のライフサイクルをシステム境界とし、製品ライフサイクルの最初におけるスクラップの利用と最後におけるスクラップの回収を一意に評価する手法が確立されてこなかったため、本研究では、リサイクルが考慮された手法を開発する。ただ、リサイクルは常に同じ材料にリサイクルされる訳ではなく、さらには材料が製品に搭載されてからその製品の使用期間後である。そのため、当該材料の物質フロー分析等から得られる情報を LCA 評価へインプットする必要もある。さらには、代替する材料間で、その材料がライフサイクルで発現する機能が同じとは限らない。例えば、高強度化により軽量化したものの、メンテナンス性が減少するなど、代替する材料ならびに代替される材料それぞれのライフサイクルにおけるなるべく多くの機能性の側面を考慮した手法を検討する。金属系材料、樹脂系材料、複合材料等、さまざまな材料に応じて材料生産・加工に関わるプロセスは異なるため、それらも整理する。最後に、材料間を定量的に比較するために、ここで構築した手法に必要なインベントリデータ等の各情報を収集するが、その入手可能性にも応じて手法も再度検討する。提案する手法は、LCA の専門家との議論を経て、従来の製品 LCA 手法との違いについても確認する。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.17-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
新材料の材料代替効果の評価手法の構築		<ul style="list-style-type: none"> 新材料の材料代替効果の評価手法の提案 評価に必要な物質フローデータの整備 素材ごとのリサイクル性を評価する指標の定量評価 インベントリデータの整備 	<ul style="list-style-type: none"> 新材料の材料代替効果の評価手法の提案 素材ごとのリサイクル性を考慮したライフサイクルインベントリ分析手法による定量評価 	
新材料の材料代替効果の評価ツールの開発		<ul style="list-style-type: none"> 新材料の材料代替効果の評価ツールの構築 ツールを用いて ISMA プロジェクト内の材料評価 	<ul style="list-style-type: none"> 新材料の材料代替効果の評価ツールの構築 	

(3)全体計画

事業内容	2019年度				2020年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
Ⅱ. 新材料の材料代替効果定量技術の開発【AIST(つくば小野川)、東京大学】								
① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築								
①-1.材料代替効果評価手法の構築	材料代替効果評価手法の構築				材料代替効果評価手法の構築			
①-2.材料の物質フロー解析	材料の物質フロー解析				材料の物質フロー解析			
①-3.リサイクル性の評価手法開発	リサイクル性の評価手法開発				リサイクル性の評価手法開発			
①-4.環境負荷のデータ整備および算定	環境負荷のデータ整備および算定				環境負荷のデータ整備および算定			
② 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発								
②-1.材料代替効果の評価ツールの開発	材料代替効果の評価ツールの開発				材料代替効果の評価ツールの開発			
②-2.材料代替効果の評価ツールによる評価				材料代替効果の評価ツールによる評価				

(4)実施体制

本テーマはつくば小野川分室（産業技術総合研究所）が1再委託先と実施する。

(5)運営管理

プロジェクトの運営にあたっては、プロジェクト構成機関で構成する会議を月1回程度実施し、プロジェクトの進捗を管理した。また、テーマ毎の会議は適宜実施され、全体会議で情報共有を図った。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

- ・マルチマテリアル化した車両の代替効果を定量的に評価することで、環境性、経済性、社会性が担保された技術であることを裏付けすることができる。
- ・評価結果を開発現場にフィードバックすることにより、より効果的なマルチマテリアル化を実現することが可能である。

2.8.17.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.17-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ・新材料の材料代替効果の評価枠組みの提案 ・素材ごとのリサイクル性を評価する指標の提案 ・評価に必要な物質フローデータの枠組みの提案 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価手法の要素の抽出と枠組み構築 ・リサイクル性を考慮した手法論を提案 ・鉄鋼材のリサイクル性評価に向けた鉄鋼材の物質フロー分析、不純物成分分析、特性への影響調査 ・基準年のインベントリデータベース IDEA、IDEA 物量連関表の作成 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・評価手法の要素間の定量的関係性の構築 ・物質フローデータの入手可能性の検討 ・対象素材全てに関する材料学的知見の調査と整理 ・時系列のインベントリデータベース IDEA、IDEA 物量連関表の作成
新材料の代替材料効果の評価ツールの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・新材料の材料代替効果の評価ツールのプロトタイプ構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価ツールの基本概念の構築 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・評価ツールのインターフェースの検討 ・評価項目に関するユーザのニーズをヒアリング ・将来技術・社会シナリオの構築 ・評価ツールの実装

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.17-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ・評価手法の要素の抽出と枠組み構築 ・リサイクル性を考慮した手法論を提案 ・鉄鋼リサイクル材の不純物成分情報を蓄積 ・鉄鋼材中不純物の特性影響の材料学的知見を文献調査 ・基準年のインベントリデータベース IDEA、IDEA 物量連関表の作成 	<ul style="list-style-type: none"> ・新材料の材料代替効果の評価手法の提案 ・素材ごとのリサイクル性を評価する指標の定量評価 ・評価に必要な物質フローデータの整備 ・時系列のインベントリデータベース IDEA、IDEA 物量連関表の構築 	<p>評価手法について各素材業界への説明とフィードバックを得る必要がある</p> <p>各業界の合意が得られれば達成される見通し</p>
新材料の材料代替効果の評価ツールの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクト参加企業 2 社に聞き取り調査 <ul style="list-style-type: none"> 企業や業界で検討している取り組み (→評価に準備する条件) 企業や業界で主張している強み (→評価項目の選定) ・評価ツールの基本概念の構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・新材料の材料代替効果の評価ツールの構築 	<p>評価ツールの実装に向けてプロジェクト参加企業だけでなく自動車会社等へも聞き取り調査を実施することで達成される見通し</p>

(3)研究開発の成果と意義

① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築

①-1 材料代替効果評価手法の構築

これまでの成果として大きなことは、インベントリデータベース IDEA を基礎として環境影響、社会影響を定量的に求める枠組みを構築したことにある。図Ⅲ-2.8.17-1に示すように、本プロジェクトで提案する評価手法は、環境面へ与える影響を、インベントリデータベース IDEA を用いて算出する。インベントリデータは、構築している 2015 年のデータを用いて、将来シナリオに基づき 2050 年までのデータを整備する。このことにより時間的拡張を可能にする。次に整備したデータを用いて、2015 年の各製品の生産量や生産高を用いて我が国のサプライチェーンを可視化できる IDEA 物量連関表を作成する。これにより、材料代替による産業構造へ与える影響を評価することができる。次に作成した IDEA 物量連関表を、将来シナリオを用いて、2050 年までの IDEA 物量連関表に拡張する。これにより、将来の産業構造変化やスクラップの需要バランスなど多くの事項が評価可能となる。更に、IDEA のインベントリに QOL 等の社会的側面のデータを既往の研究の成果を活用する形で整備することにより、社会

面へ与える影響を評価することが可能となる。本プロジェクト期間では社会影響の重要な側面のスクリーニングを実施する。加えて、2050年までのIDEA経済連関表を作成することにより、雇用や経済波及効果といった経済面へ与える影響を評価することも可能となる。インベントリデータは空間的にも拡張する。IDEAでは日本のインベントリデータを収集したもので、我が国の産業構造、産業活動が可視化されるものである。しかしながら、我が国の産業は海外への依存度は高く、とりわけ金属製品に関わるものは、それが高い。金属生産に重要な国々のデータを我が国のインベントリデータIDEAを用いて推計し、輸出入の情報を加味させ、データを作成する。これにより、金属製品を中心とした、世界のサプライチェーンが可視化される。現在は金属の生産に重要なデータのみを対象としてデータ収集を開始した。本課題で対象となる製品を評価するに影響の大きな国のインベントリデータを収集することも考えているが、データの取り扱える限界との計算速度との兼ね合いになると考えられる。そのためデータベースの構築方法やデータの管理方法なども検討している。図III-2.8.17-2に示す評価手法の評価の流れは、将来シナリオと技術シナリオなどを用いてインベントリデータの作成を実施し、将来データも含め原単位化をする。これにシナリオ毎の前提モデルを作成して活動量を求め、原単位と活動量を乗じて結果を出力する。原単位化を図ることにより、ツールを活用する企業等の研究開発現場の専門家は、専門的なソフトやツールを必要とせず、評価結果を得ることが行えるように工夫する。(詳しくは課題②-1 ツールの開発を参照)

リサイクル効果の算出方法としては、既存研究で提案されてきた手法論が、実際の材料への評価を検討せずに理論だけ構築されており、実際に材料へ適用するためにはさらなる一般化が必要と考えられた。いくつかの素材についてその手法論を適用することで、一般化に向けた検討を実施した。その手法におけるリサイクル効果の評価において、既存研究で提案されてきた手法が素材原料としてのリサイクルを中心に考慮したLCI分析手法であり、熱源などの副資材としてのリサイクルは考慮されてこなかったことを明らかにするとともに、それらを拡張する一般化した手法論を提案できる可能性を見出した。End-of-lifeアプローチとWaste miningアプローチの選択における条件について、条件判断のための手法開発が課題である。

次に、データベース開発基盤の整備について調査した。データベース容量、計算やクエリのパフォーマンス、同時に作業するユーザー数、可用性、バックアップとリカバリ、アクセス制御、移行などの要件を整理し、どのようなシステムで開発を実施するかを検討した。

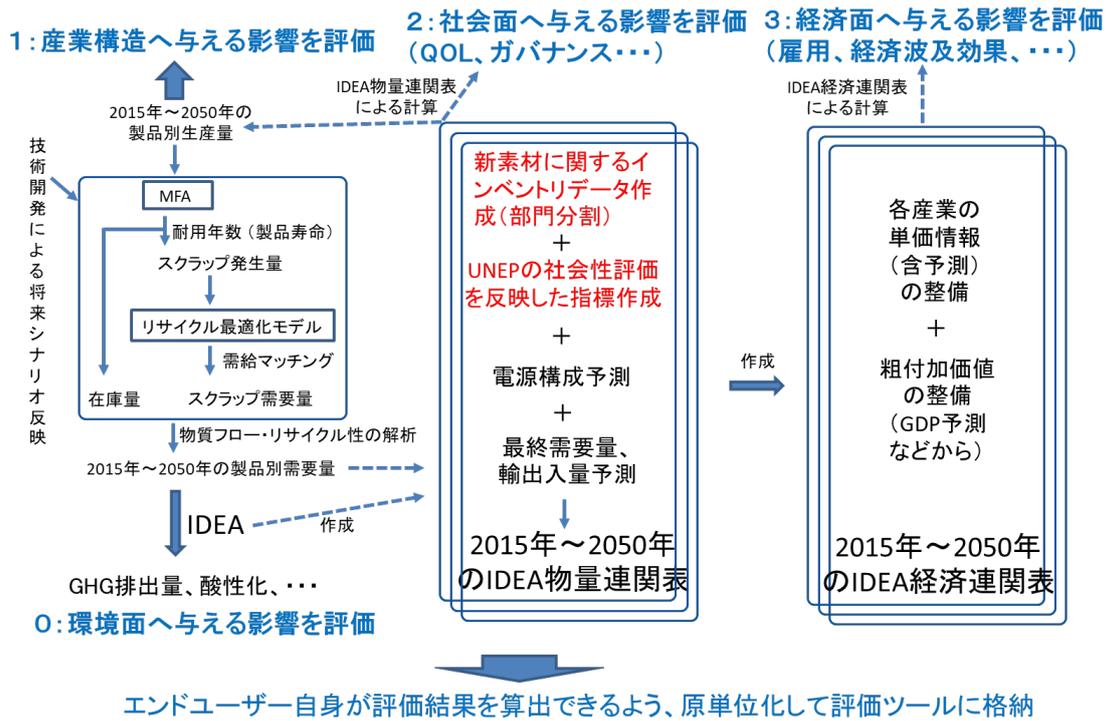


図 III-2.8.17-1 評価方法の枠組み

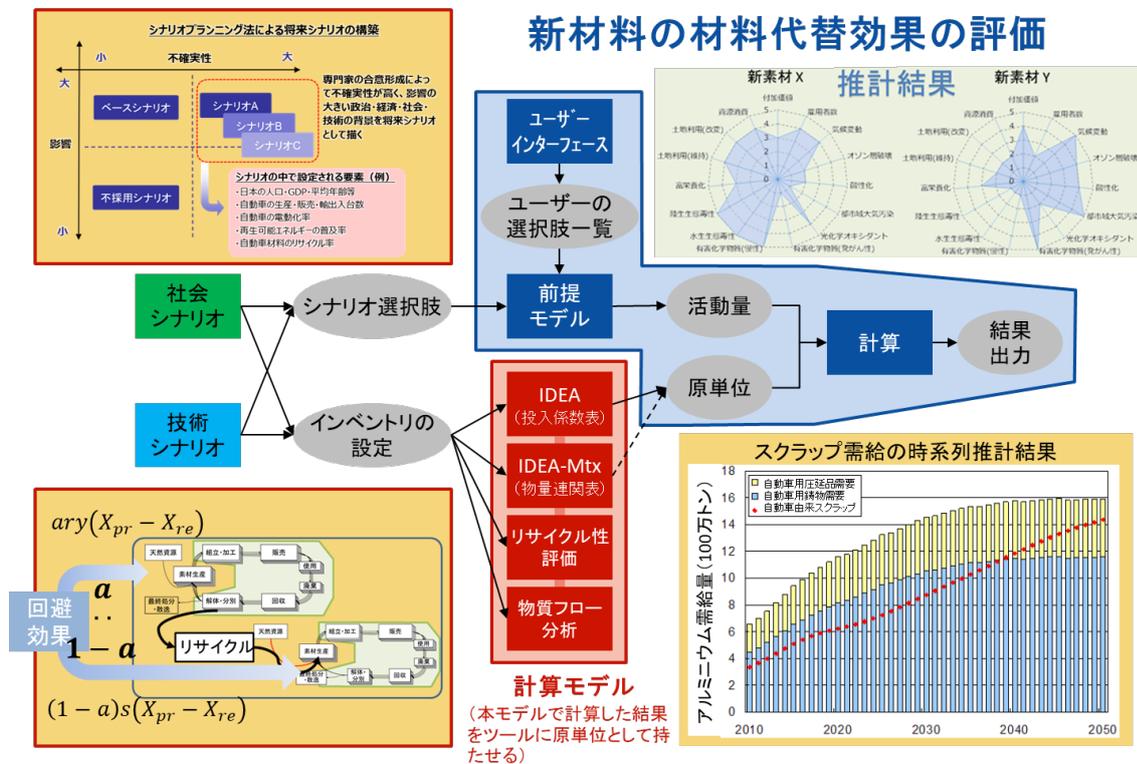


図 III-2.8.17-2 評価手法の評価の流れ

① -2 物質フローの分析

2019年度は中国の鉄鋼及びアルミニウムの物質フローデータの利用可能性を調査した。鉄鋼については、World Steel Association が提供する国内消費量データ（※1）に、既往論文（※2、※3、※4、※5、※6、※7、※8、※9）の用途別消費割合を乗じることで推計可能と考えられた。また、アルミニウムについては、World Bureau of Metal Statistics が提供する国内消費量（※10）データに、中国調査機関が報告している用途別消費割合を乗じることで推計可能と考えられた。一方、製品の貿易に伴う素材の間接輸出入や、アルミニウムの展伸材／鋳造材といった品種別のデータの利用可能性についても今後、検討が必要である。また、各素材の輸入先を参考に、中国以外の国のデータ利用可能性の調査の必要性も検討課題である。

また、物質フロー関連の基盤となるデータを IDEA 物量連関表としているため、統計を基にした物質フロー分析で得られるデータを、IDEA 物量連関表に統合する必要がある。しかしながら、従来の IDEA のインベントリデータに需要量に乗じて得られた物量連関表の中に物質フローデータがあるため、統計において最も細かな用途区分が整備されている鉄鋼材について、物質フローデータとの整合を確認した。統計の用途区分と IDEA の部門分類とが異なるため、用途区分間での対応表を作成し、データを比較したところ一部の用途区分では大きな差が見られた。これら差の要因として、物質フローデータの用途区分が IDEA の部門分類に間接的に含まれる可能性、物質フローデータの用途区分が今回の比較した IDEA 部門分類以外にも対応している可能性、IDEA 項目のインベントリデータの確からしさ、IDEA 物量連関表が需要量をダブルカウントしている可能性などが考えられた。結果的に物質フローデータの方が適切と判断された場合、IDEA 物質関連表にそのデータを改変する必要があり、そのために提案した統合手法の適用可能性についての検討も今後の課題として挙げられる。

①-3 リサイクル性の評価

材料の劣化メカニズムの特性化を目的とした方法論は、材料科学および工学の分野からの材料パラダイム「プロセス-構造-特性-機能（PSPP）関係」に基づくこととした。PSPP の材料プロセス、材料構造、材料特性、材料機能間の相互作用に基づき、材料構造においてリサイクルの影響を追加した。材料の劣化は、外部の物理的または化学的暴露による材料の固有の特性の劣化である。材料の劣化は、使用段階やリサイクル段階など、さまざまなライフサイクルの段階で発生する。リサイクルプロセス中の劣化の要因を次の3つに区別できた。意図して化学的または物理的に随伴する元素による材料の劣化（金属、コーティング、塗料、ハンダなどの合金元素など）。材料の接合による材料の劣化（不十分な材料の分離と選別を反映）。リサイクルプロセスの機械的（切断）、熱的、または化学的影響による材料の劣化。各評価対象素材について、これら要因による影響の度合いを検討することが今後の課題である。

鉄鋼材においては、Cu 濃化がリサイクルに与える影響について危惧されてきているが、その混入源が明確になっていない。従来の知見では自動車も大きな混入源の1つとの認識であるものの、近年の日本における処理の実態からは自動車からの混入は小さくなりつつあると考えられる。しかし、他の大きな混入源が明確になっておらず、

現状を説明できるだけの知見が不足しているといえる。そこで、建築解体由来のスクラップの中の Cu 含有素材の混入状況を実態調査することで、建築物解体時の電気設備の取り外しが、鉄鋼材のリサイクルにおける Cu 濃化にとって重要な要素であり、建築物解体において、対策を講じる対象として重要である可能性を示した。これにより建築発生鉄スクラップが1つの大きな混入源になりうることを示した。従来は建築由来のスクラップは混入源としては小さいと認識されており、今までの認識を転換させる新しい成果が得られたといえる。先述の評価手法における条件判断にも寄与する情報の1つと考えられるため、今後の評価における重要な知見が得られたと言えよう。

①-4 環境負荷のデータ整備および算定

将来シナリオ作成において本年度は、自動車の代替材料評価ツールの構築に向けて、自動車に関連する社会・経済・技術の将来シナリオ作成を目指し、基本的な自動車関連技術の開発傾向を調査した。その結果を基に2040年の将来社会において達成されていると予測できる技術を自動車に要求される各性能についてまとめた。また、将来シナリオと自動車構造材の代替によるCO₂削減効果との関連性を明確にするため、代替材料であるアルミニウムを例に、「再生可能エネルギーの利用」、「単位自動車あたりのアルミニウム重量の増加」、「圧延→圧延の水平リサイクルの推進」の3つのシナリオによるCO₂削減効果をLCAで試算した。次年度以降は、こうした一連の調査・試算結果を基にシナリオプランニング法によって自動車の将来シナリオを作成する。材料の輸出入データ及びインベントリデータの収集においては、鉄鋼製品、マグネシウム、アルミニウムに関して、グローバルサプライチェーンを可視化するためのモデリングを実施した。まず、世界で存在する製造方法の大別を行い、USGS等によりそれぞれの鉱物の産出量（※11）を求め、貿易統計やComtrade（※12）を用いて鉱物、半製品(アルミナなど)、製品(インゴット)の貿易量を把握した。その際にそれぞれのデータの分類や粒度が違うので、マッピングを実施してIDEAのデータと合致させた。また、各国の輸出量+生産量=輸入量+消費量の式は成立しているはずであるが、データの欠如やバランスの不一致が生じているため、種々の仮定をすることにより、データの整備を実施した。これにより、対象金属のグローバルサプライチェーンのモデリングができた。今後どのようにこのモデルをデータベースに実装していくかを検討する必要がある。

また、2050年までの日本全体の自動車によって誘発される温室効果ガス発生量について評価した。Internal Combustion Engine車(ICEV)ミドルクラス及びBattery Electric車(BEV)CクラスのライフサイクルGHG排出量をハイテン、アルミニウム素材、マグネシウム素材、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)を用いて軽量化する場合において計算することができた。(※13、※14、※15) 評価の結果、軽量化材料によってCFRP以外は削減効果が見込まれると得られたものの、結果自体は予備的な試算であるためあまり意味を持たないと考えている。むしろ、いくつかの評価結果に大きな影響を与えるデータがあることが分かったことが大きい。素材生産におけるインベントリデータにおいて、地金の生産国や生産プロセスによってインベントリデータが大き

くことなる可能性がある素材があることが明らかになった。

② 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発

②-1 代替材料効果の評価ツールの開発

「新材料の材料代替効果定量技術の開発」では、将来シナリオ（技術シナリオと社会シナリオ）、IDEA、IDEA 物量連関表、リサイクル性評価、物質フロー分析そして評価ツールを組み合わせた新材料の材料代替効果の評価手法の開発を進めている。プロトタイプ評価ツールは大きく「ユーザーインターフェース」、「前提モデル」、「計算・結果の作図」というプロセスから構成されている。ユーザーインターフェースは推計対象とする新材料の生産数量などの活動量と将来の社会や技術のシナリオ設定についてユーザーに選択させる画面である。前提モデルはユーザーの入力と、シナリオごとの設定を組み合わせて推計対象の活動量（例えば、毎年の評価対象の自動車の生産台数、燃料の消費量など）を出力するモデルである。最後に、計算・結果の作図では、計算モデルから出力された環境・経済・社会に係る原単位と、前提モデルで出力した活動量を掛け合わせることで、シナリオの影響を推計し、結果をユーザーに対して出力する機能を持つモデルを作成した。今後の評価ツールの拡張の方向性の一つとして、新材料の材料特性と材料代替比率の関係性について整理し、新材料が目標と設定している材料特性を入力すると、自動的に材料代替比率を出力するサブモデルを開発することが考えられる。現実の自動車開発現場において各部品の重量は材料特性以外の様々な要因も関係して決定するため、ツールのユーザーはこのサブモデルを使っても使わなくても推計ができるようなモデルの構造にすることが望ましいと考えられる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.17-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等*
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	1	0	11	0	0	0	0	0	0
合計	1	0	11	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.17-5 特許の件数（内訳）

【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.18 [テーマ番号 42-3] 材料・接合等技術動向調査研究（データ等活用拠点計画および異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発）

2.8.18.1 テーマの概要

(1)背景と目的

① データ等活用拠点（仮名称）計画

構造材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量材料を中心とした各材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、これらに資する技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータ等を、本プロジェクト終了後も有効に活用するためには、これらのデータ等を集積し活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点：マルチマテリアル信頼性設計研究拠点。以下、研究拠点」の構築に向け準備を行う。

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

新幹線車両構体には、軽量化のために押出性と強度とのバランスに優れた A6N01 合金を主としたアルミニウム合金が用いられている。一方、次世代の高速車両には、より一層の軽量化が求められており、本プロジェクトでの先行研究開発では、アルミニウム合金よりも低密度であるマグネシウム合金に着目し、高速車両に適した難燃性マグネシウム合金の開発を進めている。さらに、自動車の車体においてもアルミニウム合金を中心とした軽量化が進められているが、更なる軽量化のためにマグネシウム合金の適用が検討されている。

マグネシウム合金はアルミニウム合金と比較して成形性や耐食性が低く、複雑断面形状の押出型材が作製しにくいことや、高い耐食性が求められる部位には、利用しにくいことが問題となっている。上記の欠点を克服し、マグネシウム合金適用の効果を最大限に発揮するためには、マグネシウム合金とアルミニウム合金を組み合わせた接合部材として、適材適所で取り入れることが有効である。このためには、長期間の使用に耐える信頼性（疲労性能、耐食性等）を保証するためのデータを系統的に取得し、上記データに立脚した設計指針を構築する必要がある。特に、き裂の発生が集中する接合部分を対象として、様々な条件で疲労特性データを収集し、得られた結果疲労強度より基準応力を設定することが求められる。また、異種金属接合の際に問題となるガルバニック腐食特性を、各種環境（湿潤環境・塩水環境）下において系統的に把握する必要がある。これらの研究開発は本プロジェクトではこれまで行われていないが、上記の研究拠点を将来にわたり有効なものにするためには、これらの信頼性データの収集・補完は必要不可欠である。

そこで、本研究開発では、本プロジェクトのマルチマテリアル接合技術などの関連技術と連携して、マグネシウム合金ーアルミニウム合金等の異種軽量金属接合部材の

信頼性に関し、これらの合金技術に実績のある名古屋守山分室において、研究開発を実施する。

なお、テーマ番号35「革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」においては、新幹線車両構体や自動車の車体において、マグネシウム合金を成形性、耐食性に優れるアルミニウム合金と組み合わせた接合部材として、適材適所で取り入れることが検討されており、本技術開発で得られる知見を効果的にテーマ番号35の技術開発に活用することが急務となっている。このため、本技術開発は、2020年度以降は、テーマ番号35において継続実施する。

(2)位置付け、目標値

① データ等活用拠点（仮名称）計画

表Ⅲ-2.8.18-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
データ等活用拠点（仮名称）計画	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品LCA技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定する。	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品LCA技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点（仮名称）を構築する。	本プロジェクトの成果をプロジェクト終了後においても有効に活用するため。

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

表Ⅲ-2.8.18-2 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
接合部材作製	各種表面処理と接着処理等を行ったマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。	様々な異種軽量金属接合方法を吟味するため

疲労特性評価	ボルト締結体を主な対象として疲労特性の評価を実施し、締結面の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化等に及ぼす影響を明らかにするとともに得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また接着体の疲労特性評価技術を検討する。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、2020年度までに確立した手法を基に疲労特性、耐食性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する（計算科学により得られるデータベースも含む）。また、当該接合材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。	異種軽量金属接合部材の信頼性を確保する上で特に重要となる疲労特性と耐食性を重点的に評価するため。また、接合部材の信頼性は接合方法に大きく依存することから、その影響を把握するため。
耐食性評価	異種部材が接合されたマグネシウム部品に化成処理や電着塗装等を施工した場合に生ずるガルバニック腐食現象を調査し、皮膜の均一性等に及ぼす影響を探る。また、これらを低減する施工方法を検討する。以上の評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。さらに、第一原理計算等の計算科学で得られるガルバニック腐食挙動と実験結果の照合を行う。		
接合部構造解析・欠陥評価	2019年度までに確立した評価・測定手法により接合部材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。		

(3)全体計画

① データ等活用拠点（仮名称）計画

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点（仮名称）」の構築に向け準備を行う。

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

1) 接合部材作製

本プロジェクトの先行研究開発において、マグネシウム合金－アルミニウム合金等の異種軽量金属接合への溶接技術の適用は、接合界面に金属間化合物等が生成するため、技術的に極めて困難であることが明らかになっている。そこで、これらの接合部材を上記の車両構体等に適用するに当たっては、機械的締結（ボルト締結・リベット締結等）を優先的に適用することが想定されている。このため、本研究開発では、機械的締結体を主たる接合部材として想定し、本プロジェクト参画機関と連携して、接合部材を作製する。ここでは、マグネシウム合金－アルミニウム合金等の異種軽量金属の表面処理技術、接着技術等の適用を検討する。接着技術については、産総研 接着・界面現象研究ラボ（つくば中央東分室）と連携し、適正な接着剤、接着方法を吟味、検討する。

2) 疲労特性評価

疲労特性評価に当たっては、主にボルト締結体を主な対象とし、締結体の疲労特性（緩み）の適正な評価技術を構築する。ボルト軸力等に及ぼす疲労試験条件（周波数、応力振幅、繰り返し数）の関係を調査するとともに、材料の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化に及ぼす影響を明らかにする。接着体についても同様の評価を実施する。これらの評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。

3) 耐食性評価

耐食性評価に当たっては、接合部の界面のガルバニック腐食特性の適正な評価技術を構築する。走査型振動電極（SVET）や走査型電気化学顕微鏡（SECM）等により、接合部の腐食挙動のモニタリング評価を実施し、各種接合条件（接着、締結等）におけるガルバニック腐食挙動を評価する。また、ガルバニック腐食を低減するための手段を抽出する。これらの評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また、第一原理計算等の計算科学を用いてガルバニック腐食挙動を計算し、実験結果との比較を行う。

4) 構造解析・欠陥評価

X線CT法による非破壊の構造・欠陥観察、不活性ガス溶融-熱伝導度法による含有水素量、中性子ビーム法による残留応力等の測定技術を構築する。上記信頼性評価前後の接合部の構造・欠陥・水素量、残留応力を評価し、初期の接合部の状態が各種信頼性に及ぼす影響を明らかにするとともに、信頼性評価試験（≒実使用環境）が接合部の状態にどのような影響を及ぼすかを調査する。これらの評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。（中性子ビーム法による解析・評価は、産総研 分析計測標準研究部門（つくば中央梅園分室）と連携して、2020年度以降（装置準備等のため）を行う。）

(4)実施体制

本テーマは、国立研究開発法人産業技術総合研究所（名古屋守山分室）にて実施した。

(5) 運営管理

本テーマを実施・運営するにあたっては、新構造材料技術研究組合本部と密接な協議を行った。

また、「① データ等活用拠点（仮名称）計画」については、関連技術開発の連携促進のため、キックオフ全体連携検討会を 2019 年 7 月 1 日、名古屋において、また、中間全体連携検討会を 11 月 5 日、つくばにおいて開催し、連携事項の確認・調整を行うとともに、進捗状況、今後の展開等について討議した（最終全体連携検討会を 2020 年 4 月 7 日、名古屋において開催することを予定していたが、新型コロナウイルス感染対策のため延期）。さらに、個別の連携検討会を必要に応じて随時行った。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の有効な活用が可能となる研究拠点の構築が可能となる。さらに、鉄道車両および自動車構造部材への適用が検討されているマグネシウム合金-アルミニウム合金等の異種軽量金属接合部材の信頼性に関するデータの収集・補完は、この研究拠点の効果的な活動に必要不可欠である。

2.8.18.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

① データ等活用拠点（仮名称）計画

表Ⅲ-2.8.18-3 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020 年度末)	研究開発成果	達成度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
データ等活用拠点（仮名称）計画	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定する。	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について吟味・検討した。	△	これまでの検討結果に基づき 2020 年度中に有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定する。

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

表Ⅲ-2.8.18-4 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成度※	根拠
接合部材作製	各種表面処理と接着処理等を行ったマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。	各種表面処理を行ったマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための基礎条件を抽出した。	△	2020年度中に接着処理等を行った部材についても同様な処理を行い疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。
疲労特性評価	ボルト締結体を主な対象として疲労特性の評価を実施し、締結面の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化等に及ぼす影響を明らかにするとともに得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また接着体の疲労特性評価技術を検討する。	ボルト締結体を主な対象として疲労特性の評価を実施し、ボルト軸力等に及ぼす疲労試験条件（周波数、応力振幅、繰返し数）の関係など基本的なデータを収集した。また締結面の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化に及ぼす影響を検討した。	△	2020年度中に得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また接着体の疲労特性評価技術を検討する。
耐食性評価	異種部材が接合されたマグネシウム部品に化成処理や電着塗装等を施工した場合に生ずるガルバニック腐食現象を調査し、皮膜の均一性等に及ぼす影響を探る。また、これらを低減する施工方法を検討する。以上の評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。さらに、第一原理計算等の計算科学で得られるガルバニック腐食挙動と実験結果の照合を行う。	各種接合条件（接着、締結等）における腐食環境下でのガルバニック腐食挙動を走査型振動電極（SVET）等により調査し、材料とその面積比、環境が及ぼす影響を定量的に評価した。ガルバニック腐食を低減するための部材への表面処理および施工条件を提案し、効果を検証した。また第一原理計算を用いてマグネシウム合金-アルミニウム合金のガルバニック腐食挙動を推測するための基礎モデルを構築した。	△	2020年度中にこれまで得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。さらに、第一原理計算で得られるガルバニック腐食挙動と実験結果の照合を行う

接合部構造解析・欠陥評価	2019 年度までに確立した評価・測定手法により接合部材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。	X線 CT による微細欠陥観察が可能な測定条件を明らかにした。また、含有水素量測定について測定条件の異なる材料を同時に測定する際の問題点を明らかにした。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手するための基礎的検討を行った。	△ 2020 年度中にマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材の X 線 CT 観察及び含有水素量測定を行う。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。
--------------	--	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

① データ等活用拠点（仮名称）計画

表Ⅲ-2.8.18-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
データ等活用拠点（仮名称）計画	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について吟味・検討した。	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点（仮名称）を構築する。	今後、有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定するとともに、データの集積、連携の強化により、達成可能である。

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

表Ⅲ-2.8.18-6 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2022年度末)	達成見通し
接合部材作製	各種表面処理を行ったマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための基礎条件を抽出した。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。	ボルト締結体とは異なる各種接合体についても検討を行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出することにより、達成可能である。
疲労特性評価	ボルト締結体を主な対象として疲労特性の評価を実施し、ボルト軸力等に及ぼす疲労試験条件（周波数、応力振幅、繰り返し数）の関係など基本的なデータを収集した。また締結面の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化に及ぼす影響を検討した。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、2020年度までに確立した手法を基に疲労特性、耐食性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する（計算科学により得られるデータベースも含む）。また、当該接合材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。	ボルト締結体とは異なる各種接合体についても、2020年度までに確立した手法を基に疲労特性、耐食性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を行うとともに、当該接合材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手することにより、達成可能である。
耐食性評価	各種接合条件（接着、締結等）における腐食環境下でのガルバニック腐食挙動を走査型振動電極（SVET）等により調査し、材料とその面積比、環境が及ぼす影響を定量的に評価した。ガルバニック腐食を低減するための部材への表面処理および施工条件を提案し、効果を検証した。また第一原理計算を用いてマグネシウム合金-アルミニウム合金のガルバニック腐食挙動を推測するための基礎モデルを構築した。		
接合部構造解析・欠陥評価	X線CTによる微細欠陥観察が可能な測定条件を明らかにした。また、含有水素量測定について測定条件の異なる材料を同時に測定する際の問題点を明らかにした。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手するための基礎的検討を行った。		

(3)研究開発の成果と意義

① データ等活用拠点（仮名称）計画

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂（CFRP）等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点（仮名称）」の構築に向け準備を行った。信頼性評価技術、接着・接合技術、構造評価技術、材料代替効果に関して、国立研究開発法人産業技術総合研究所で行われている関連技術開発と連携して検討を行った。また、全体及び個別の連携検討会を同所において適宜開催し、連携の状況と今後の方策について討議した。

② 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発

本研究開発では、本プロジェクトのマルチマテリアル接合技術などの関連技術と連携して、マグネシウム（Mg）合金－アルミニウム（Al）合金等の異種軽量金属接合部材の信頼性に関し、これらの合金技術に実績のある名古屋守山分室において研究開発を実施した。以下、各テーマ毎に本年度の成果を記載する。

1) 接合部材作製

陽極酸化処理を実施した Mg 合金－Al 合金のボルト締結部材を作製し、その疲労特性を評価した。その結果、陽極酸化処理を実施することによりボルトの軸力変動が抑制されることを明らかにした（詳細は 2）に記載）。来年度は、各種表面処理や接着処理の影響を調査するための締結材を作成し、その軸力変化挙動を調査する予定である。

また、Mg 合金－Al 合金の新規接合方法として爆着圧接法に注目し、その接合トライを実施した。ここでは Mg 合金として AZX611 合金押出材（幅 130mm、長さ 1000mm、厚み 4mm）、Al 合金として A6N01 合金（幅 130mm、長さ 1000mm、厚み 3mm）を選定した。爆着接合に当たっては、Mg 合金を下板として固定し、爆発により Al 合金を Mg 合金に衝突させることにより爆着接合を実施した。爆着トライの結果プロセス条件を最適化することにより、試料の大部分において健全な接合体が得られることを確認した。今後は、爆着接合体の機械的特性、疲労特性、耐食性等を系統的に評価していく予定である。

2) 疲労特性評価

Mg 合金板材と Al 合金板材をボルト締結した部材（Mg/Al ボルト締結材）を対象として疲労試験を実施し、疲労試験時のボルト軸力（軸力：ボルトの緩みと相関）の変化を調査した。最初に Mg（AZX611 合金） / Al（A6061 合金）締結体の疲労試験を行った。その結果、初期軸力を高めに設定することにより、具体的には Mg（AZX611 合金）よりも高い圧縮応力が板材に印加される軸力に設定することにより、軸力の低下が著しく抑制することを明らかにした。

次に、疲労特性に対する試料表面状態の影響を調べるために、Mg 合金（AZX611 合金）と Al 合金（A6N01 合金）に陽極酸化処理を実施し、その締結材を対象として疲労試験を行った。陽極酸化処理を実施した締結体の軸力低下は 25%であり、陽極酸

化処理を実施しない締結体の軸力低下は 38%であった。この結果は、軸力低下を抑制するための手段として、陽極酸化処理の施工が有効である可能性を示唆している。来年度は、各種表面処理材を対象として、ボルト緩み挙動に対する試験条件や試料の表面状態の影響をさらに検討する予定である。

3) 耐食性評価

3-1) マグネシウム-アルミニウム異材（締結材）の耐食性評価

AZX611 マグネシウム合金/A6N01 アルミニウム合金接合体（接合体）の電流分布を、マイクロ電極法の一つである走査型振動電極（SVET）を用いて測定し、ガルバニック腐食に及ぼす NaCl 濃度の影響を評価した。腐食生成物除去後の接合体表面のプロファイル光学式 3D 表面形状計測装置で評価した。各合金の重量減少腐食速度も測定した。

SVET 測定の結果、A6N01 はカソード、AZX611 はアノードとしてふるまうことが確認できた。但し前者はほぼ全体がカソードとなるが、後者は局部アノードの集まりである等、挙動が異なった。濃度の異なる NaCl 溶液中に浸漬した接合体を評価した結果、NaCl 濃度の増大につれてカソード、アノード電流が増大した。また局部アノードが接合体境界部に集中して発生した。試験後の接合体表面のプロファイルは、SVET 測定結果と良く対応しており、SVET がガルバニック腐食の評価に利用できることが確認できた。重量減少腐食速度測定の結果、AZX611 は NaCl 濃度 0.5wt%以上で脱不動態化して活性に腐食することが判明した。この濃度は SVET において局部アノードが接合体境界部に集中する状況と良く対応している。よってガルバニック腐食はアノードとなるマグネシウム合金の皮膜安定性に密接に関係し、NaCl 濃度によって挙動が変化することが判明した。

3-2) 第一原理計算によるマグネシウム-アルミニウム界面の腐食特性予測

2 種類の金属間化合物β相 ($Mg_{17}Al_{12}$) 及びγ相 (Mg_2Al_3) の腐食挙動を、第一原理計算により検討した。β相及びγ相それぞれの結晶構造からクラスターを切り出し、 H_2O との反応を解析した。いずれの場合も、 H_2O 分子は分子中の O 原子を介して金属表面へ吸着することがわかった。β相では Mg への吸着の後に、O-H 結合が解離するというプロセスが起こりやすく、γ相では Mg と Al でどちらが有利とは一概に言えず、β相より反応は起こり難いことが判明した。また、どちらの相も Mg や Al の純粋な金属に比べると活性化エネルギーが高く、金属間化合物の方が腐食されにくいと考えられる。

次に、異種金属が接触することによるガルバニック腐食を検討した。異種金属が接触すると酸化還元電位の違いから、一方から他方へ電子移動が起こると考えられ、それを考慮するために上記で検討した系に、+2 から -2 までの電荷を負荷した状態での活性化自由エネルギーを計算した。いずれのクラスター上でも、負の電荷をかけるほど活性化自由エネルギーが低下するということがわかった。この反応は、水の還元（金属は酸化される）反応なので、電子が豊富なほど反応が促進されるという結果は、妥当なものと言える。今回は、人為的に電荷を与えたが、実際の複合体では、自発的な電荷分布により、より負の電荷が溜まりやすいところが反応サイトになると考えら

れる。今後は、難燃性 Mg 合金と Al が接合した際に形成される他の金属間化合物についてもモデルを作成し、その上での反応を検討することにより、ガルバニック腐食の挙動解明を行う。

4) 接合部構造解析・欠陥評価

接合部の欠陥評価手法確立を目的として、市販のマグネシウム合金押出材（AZ31、AZX912、AMX602、ZK60）を対象として水素量測定を行い、測定条件が測定値に及ぼす影響について調査を行った。分析時間 20 秒の条件では、加熱出力 900W でもすべての試料が完全には溶解しておらず、試料中の水素を完全に抽出できていないと考えられる。一方、分析時間 30 秒では加熱出力 850W 以上で全ての材料が完全に溶解した。マグネシウム合金の水素量は、その合金種によって大きく異なり、ZK60 は一般的なアルミニウム合金並みの 1ppm 以下であるのに対し、AZ31、AZX912、AMX602 は 1ppm を超える値を示し、更に加熱出力が高いほど測定値が増加する傾向を示した。次に、使用中の部材の劣化可能性を検討するため、接合部材が雨水に曝された状況を想定し、マグネシウム合金－アルミニウム合金接合体を水道水に 1 週間程度浸漬したのち、水素量測定を行った。水素分析は、接合体を分解してマグネシウム合金部分のみを用いて行った。水道水浸漬後は全ての試料が、浸漬前には溶解した加熱条件で溶解しなかった。これは、水道水への浸漬により試料表面に何かしらの化合物層が形成したためと考えられる。水道水浸漬後に溶解しにくくなるという現象はアルミニウム合金では観察されておらず、活性なマグネシウム合金特有の現象の可能性が高い。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.18-7 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	1	0	1	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.8.18-8 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9 「マルチマテリアル技術開発」

2.9.1 [テーマ番号 59] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発

2.9.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機等輸送機器の軽量化には、異種材料を適材適所に配置したマルチマテリアル構造の導入が、必要不可欠である。しかし、その設計手法は確立されておらず、現状では単なる材料置換にとどまっている。異種材料接合のモデル化も含め、マルチマテリアル構造最適化の設計手法等の確立をはじめとした総合的な技術開発が急務となっている。

本研究開発では、これらの課題を解決するために、マルチマテリアル構造設計に適した解析手法であるトポロジー最適化法の適用により、設計ツールを開発する。さらに、開発した設計ツールをもとに、高性能なマルチマテリアル車体設計案を作成する。

なお、本研究では「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトにおけるテーマ番号 42 に設置する「マルチマテリアル設計技術推進委員会」と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。

(2)位置付け、目標値

本研究開発では、解析対象のモデル化、解析結果の可視化とトポロジー最適化法を連携した解析システムの構築、異材接合を対象としたマルチマテリアル界面評価・モデル化の検討、車体構造適用可能性検討を行い、設計ツールとして完成させ、「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトの開発材料・接合手法による成果を集約し連携を図りつつ詳細設計を行い、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。

表Ⅲ-2.9.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二中間目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
トポロジー最適化システムの構築	—	・複数の材料（マルチマテリアル）のトポロジー最適設計法を構築する。 ・動的現象を対象としたトポロジー最適設計法を構築する。 ・複数の材料・線形過渡応答問題のトポロジー最適化結果を評価・検討及び他の CAE ツールと連携可能なシステムを構築する。	—	現在、車体のマルチマテリアル最適化に対応したソフトウェアはない。軽量車体設計には、トポロジー最適化技術を核とした設計手法とシステムが必要である。

マルチマテリアル 界面評価・モデル化	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 数値解析技術によるマルチマテリアル界面のモデル化を達成する。トポロジー最適化システムとの連携可能な適切な方法を検討する。 ・ 有望と考えられる接合法によって作製された試験片をモデル化し、マルチマテリアル界面として評価検討する。 	—	マルチマテリアル車体では、従来とは異なる結合方法が使われる。これに伴い、モデル化手法、および、材料の界面の特性を評価する手法が必要になっている。
車体構造適用可能性検討	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 複数の材料の利用を想定した対象問題を選定し、そのデータを作成する。 ・ 車体構造への展開を目的としたソフトウェアの大規模問題への拡張を検討する。 ・ 最適構造の工学的な妥当性を検証・評価する。 	—	車体設計に適用するには大規模問題へ対応が必須である。また、車体に適用した場合も、工学的に妥当な構造が得られることの確認が必要である。
マルチマテリアル 実設計への適用	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 開発材料・接合法を適用可能な最適設計法を構築する。 ・ マルチマテリアル最適構造の導出と接合法を含めた評価を実施し、最終的にマルチマテリアル軽量化車体の提案を行う。 	マルチマテリアル化による軽量化メカニズムは必ずしも明確ではない。最適化でメカニズムを解明し、具体的な車体構造の形で示す。

(3)全体計画

本研究開発では、解析対象のモデル化、解析結果の可視化とトポロジー最適化法を連携した解析システムの構築、異材接合を対象としたマルチマテリアル界面評価・モデル化の検討、車体構造適用可能性検討を行い、設計ツールとして完成させ、「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトの開発材料・接合法による成果を集約し連携を図りつつ詳細設計を行い、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。

(4)実施体制

新構造材料技術研究組合本部、浜松アクト分室（株式会社アルモニコス）、調布分室（株式会社メカニカルデザイン）、および、再委託先である京都大学が連携し、実施する。また、車体軽量化に対する各自動車会社のニーズ、実際の車体設計を行なう上での必要条件等を的確に把握するため、自動車技術会と連携し、適切な助言や設計指針の教示等を得られる体制のもとに実施する。

(5)運営管理

ユーザーニーズの明確化や検討課題の進め方等につき自技会メンバーも交えた委員会からのサジェスションに基づき検討課題の方向性や具体的な実施内容を決定し、実用化を見据えた開発を進めている。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

開発する設計ツールを自動車関連企業に展開することにより、マルチマテリアルを基にしたボディ構造およびボディ部分構造等の高機能化設計の支援を行うことができる。また、高機能で軽量なボディ構造案を提案し、その構造案を自動車関連企業に展開することにより、大幅な軽量化を図ることができ、CO₂削減・省エネルギーが可能となる。

2.9.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.9.1-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (2020年度末)	研究開発成果	達成 度※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
トポロジー最適化 システムの構築	<ul style="list-style-type: none">・複数の材料（マルチマテリアル）のトポロジー最適設計法を構築する。・動的現象を対象としたトポロジー最適設計法を構築する。・複数の材料・線形過渡応答問題のトポロジー最適化結果を評価・検討及び他のCAEツールと連携可能なシステムを構築する。	<ul style="list-style-type: none">・車体モデルに適用できるマルチマテリアルのトポロジー最適設計法を構築した。・単一材料の構造の固有振動数について、トポロジー最適設計法を構築した。・トポロジー最適化結果を面データに変換するソフトウェア、および、計算結果を汎用的なポストプロセッサに受け渡すツールを開発し、CAEツールと連携を可能にした。	△	<ul style="list-style-type: none">・複数材料への拡張作業を行う。

マルチマテリアル 界面評価・モデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・数値解析技術によるマルチマテリアル界面のモデル化を達成する。トポロジー最適化システムとの連携可能な適切な方法を検討する。 ・有望と考えられる接合法によって作製された試験片をモデル化し、マルチマテリアル界面として評価検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・境界面に CZM などの数値解析手法を適用し、各接合法に適したモデル化方法、解析手法を明確にした。 ・FSW、FSSW などマルチマテリアル車体に利用可能な接合の境界面を数値計算で評価する方法を実用化した。 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・車体の衝突解析ソフトウェア LS-DYNA 上で利用可能な接合部のモデル化手法を開発する。開発したモデル化手法を修正し、トポロジー最適化システムに組み込むこととする。
車体構造適用可能性検討	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の材料の利用を想定した対象問題を選定し、そのデータを作成する。 ・車体構造への展開を目的としたソフトウェアの大規模問題への拡張を検討する。 ・最適構造の工学的な妥当性を検証、評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・リバースエンジニアリングにより作成した BIW モデルの計算を実施し、元になった車体構造よりも軽量な最適解を得た。 ・サブストラクチャリング法の導入と、ソフトウェアの並列化により実車の大規模モデルの計算を可能にした。 ・得られた最適解について、詳細な有限要素モデルにより剛性等価で軽量であることを確認した。 	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.9.1-3 最終目標の達成可能性

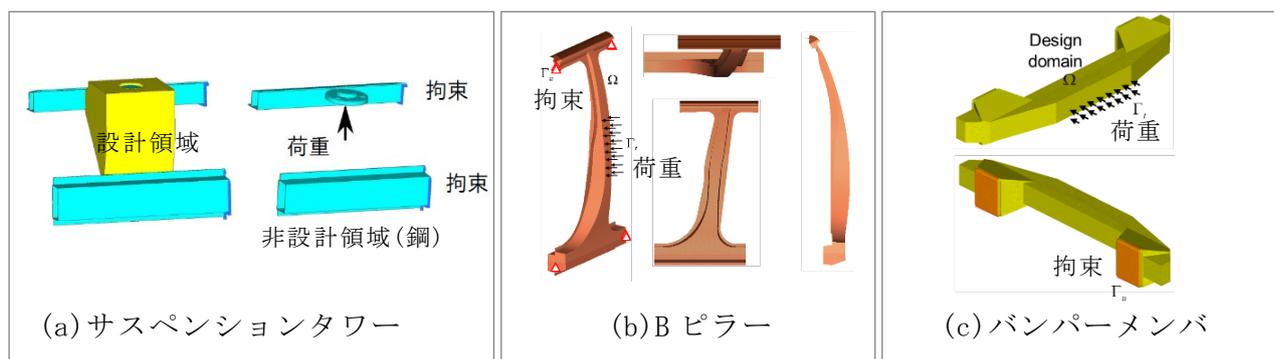
研究開発項目	現状	最終目標 (2022 年度末)	達成見通し
マルチマテリアル実設計への適用	<ul style="list-style-type: none"> ・開発材料に適用可能で、接着接合を簡易的に考慮した剛性の最適設計法は構築した。 ・最適化の結果から、実際に製造可能な車体を計算だけで求めることは難易度が高く現実的ではないため、人間が介在して車体構造に変換する手法を検討している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・開発材料・接合方法を適用可能な最適設計法を構築する。 ・マルチマテリアル最適構造の導出と接合方法を含めた評価を実施し、最終的にマルチマテリアル軽量化車体の提案を行う。 	<p>達成見込み</p> <p>達成見込み</p>

(3)研究開発の成果と意義

研究開発項目①トポロジー最適化システムの構築

2018年度は、3次元静弾性問題を対象として、2017年度FS研究で検証したレベルセット法による形状表現と反応拡散方程式に基づくトポロジー最適化の方法を、複数の材料を取り扱えるように拡張を行い実装した。同時に、開発したシステムを、自動車技術会より提供された車体部品の簡易構造モデルに適用し、車体構造への適用が可能であるか、マルチマテリアル化による軽量化が可能であるかを検討した。

図Ⅲ-2.9.1-1に検討に用いた、(a)サスペンションタワー、(b)Bピラーおよび(c)フロントバンパーメンバの簡易構造モデル、表1に最適化の目的関数と制約条件を示す。材料は鋼、アルミニウム、マグネシウムを想定しており、制約条件は設計領域を全て鋼とした場合の平均コンプライアンスを基準としている。計算に用いた材料のYoung率、密度、Poisson比はそれぞれ、鋼が205GPa、 $7.9 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、0.3、アルミニウムが69GPa、 $2.7 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、0.35、マグネシウムが45GPa、 $1.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、0.29である。



図Ⅲ-2.9.1-1 車体部品の簡易構造モデル

表Ⅲ-2.9.1-4 各モデルの目的関数と制約条件

簡易構造モデル	目的関数	制約条件 (平均コンプライアンス比)
(a)サスペンションタワー	質量	1.1以下
(b)Bピラー	質量	1.5以下
(c)フロントバンパーメンバ	質量	10.0以下

各モデルのマルチマテリアルトポロジー最適化の結果を表Ⅲ-2.9.1-5に示す。いずれも3材料の最適構造が、鋼のみよりも10~20%程度軽量な結果となっている。また、鋼以外の一材料との比較においても、3材料の結果が最も軽量である。表の中で「解なし」としているのは、設計領域を全て材料で埋めても、制約条件として指定した平

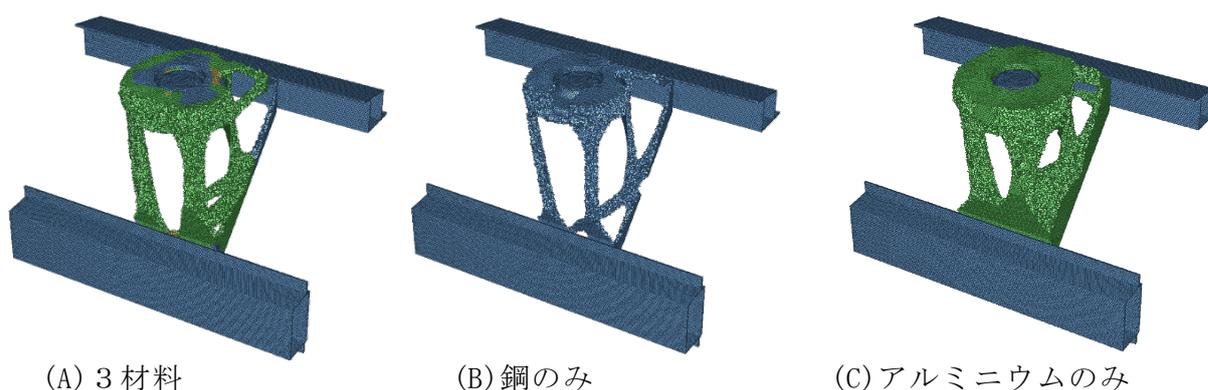
均コンプライアンスの値を満たせないことを示している。

図Ⅲ-2.9.1-2にサスペンションタワーの最適結果の材料分布を示す。図Ⅲ-2.9.1-2に示した3材料の材料分布から、荷重点まわりの設計領域には主に剛性の高い鋼が配置され、その他の大部分は軽量なアルミニウムに置き換わっており、合理的な結果であると判断した。

以上の結果より、複数材料のトポロジー最適化手法が軽量化検討の有効な手段となり得る事、また、複数材料の組み合わせにより軽量な構造を設計できる可能性があることが確認できた。

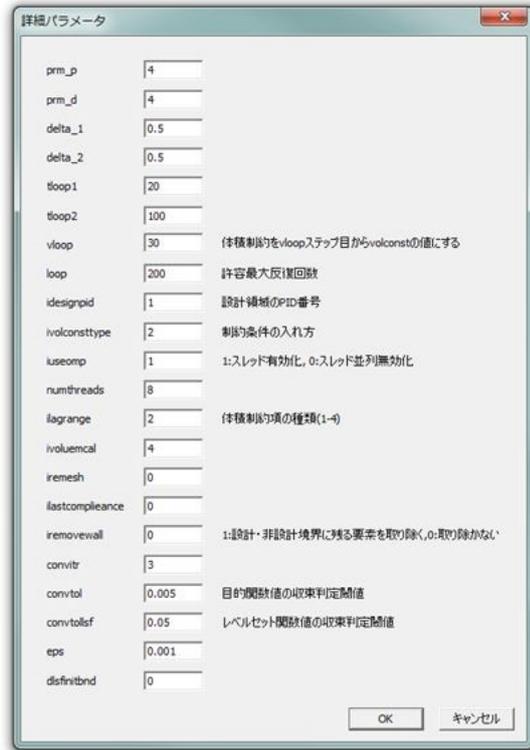
表Ⅲ-2.9.1-5 最適解の質量 (単位は kg)

	3材料	鋼	アルミニウム	マグネシウム
(a) サスペンションタワー	4.5	5.6	6.6	解なし
(b) Bピラー	54.3	60.0	解なし	解なし
(c) フロントバンパーメンバ	10.5	13.5	12.1	11.4



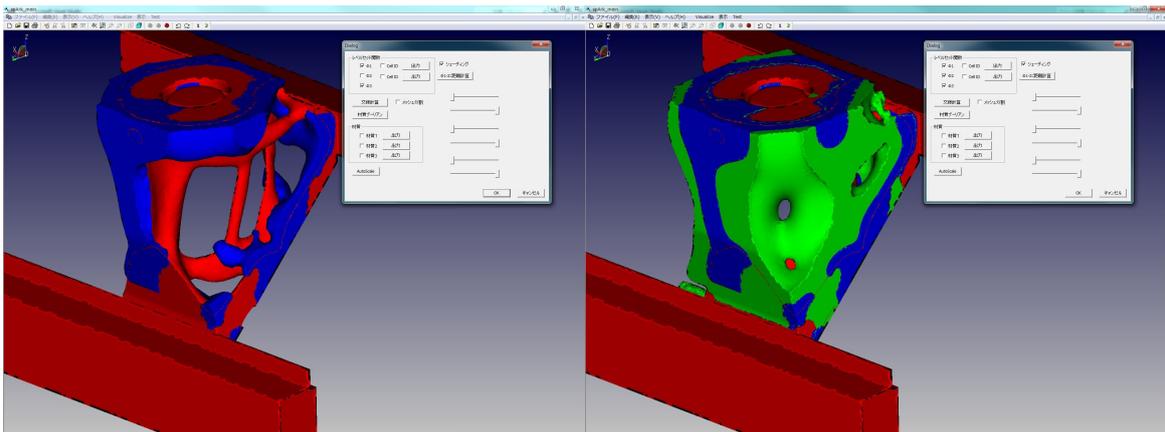
図Ⅲ-2.9.1-2 サスペンションタワーの最適化結果 (青が鋼、緑がアルミニウム、黄色がマグネシウム)

次に、プリポストシステムの改良について述べる。トポロジー最適化のソルバーにマルチマテリアル対応の条件を渡せるように、2017年のFS研究で開発したインターフェースに機能を追加した (図Ⅲ-2.9.1-3)。

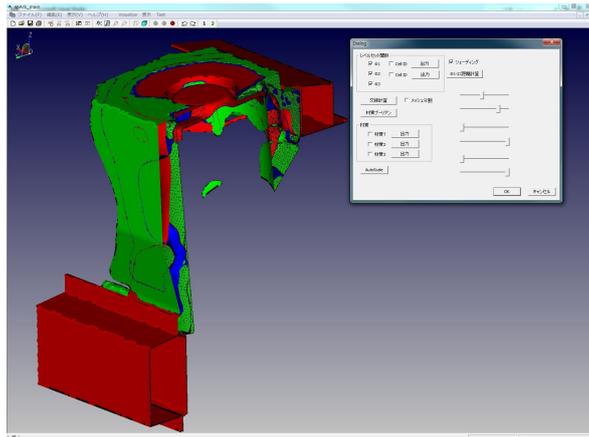


図Ⅲ-2.9.1-3 最適化条件設定入力画面

また、ポスト処理機能として、ソルバーから出力された複数のレベルセット関数値の等値面を計算して表示する機能を開発した。材料分布の断面形状を表示する機能等も、マルチマテリアルの計算結果に対応させた（図Ⅲ-2.9.1-4、図Ⅲ-2.9.1-5、図Ⅲ-2.9.1-6）。



図Ⅲ-2.9.1-4 2材料の分布の等値面表示 図Ⅲ-2.9.1-5 3材料の分布の等値面表示



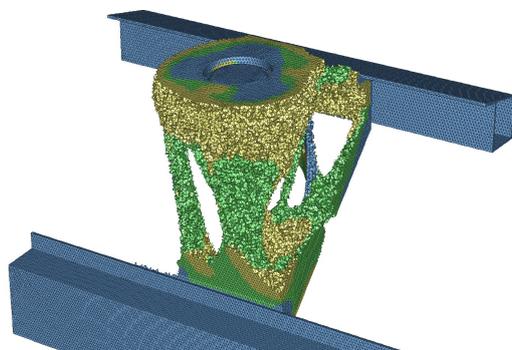
図Ⅲ-2.9.1-6 材料分布の断面表示

高速化関連では、トポロジー最適化において最も計算時間を要する感度解析およびレベルセット関数更新のための有限要素法の計算部分について、GPUによる高速化が可能かを調査した。その結果、現在使用している、Intel社MKLのPARDISOと同程度の計算時間で求まる場合があることを確認した。

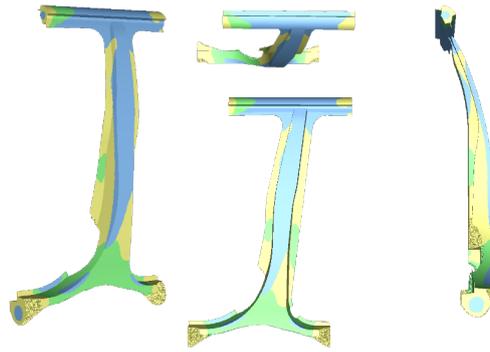
2018年度は、総質量、材料ごとの体積に関する制約のもと、平均コンプライアンスを目的関数とする最適化問題のみを扱っていたが、総質量を制約とする平均コンプライアンス最小化問題、平均コンプライアンスを制約とする総質量最小化問題を扱えるように、本最適化システムの拡張を行なった（図Ⅲ-2.9.1-7、図Ⅲ-2.9.1-8）。

さらに、車体構造への本最適化システムの適用をする際に課題となるコストについて実装を行い、最適化問題への適用を行なった（図Ⅲ-2.9.1-9）。

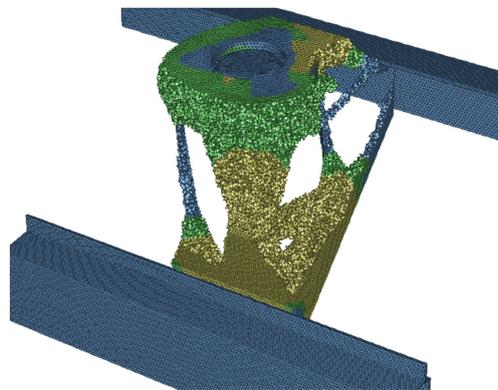
また、異材接合界面を考慮可能なモデルの導入可能性についても検討を行なった。状態場に関する有限要素法解析を通し、現行法では接合部の剛性、特に、せん断方向の剛性を高く評価してしまうことが判明した。



図Ⅲ-2.9.1-7 サスペンションタワーを対象とした総質量制約下での平均コンプライアンス最小化問題（青：鋼、緑：アルミニウム、黄：マグネシウム）



図Ⅲ-2.9.1-8 Bピラー構造を対象とした質量最小化問題（青：鋼、緑：アルミニウム、黄：マグネシウム）



図Ⅲ-2.9.1-9 サスペンションタワーを対象としたコスト制約下での平均コンプライアンス最小化問題

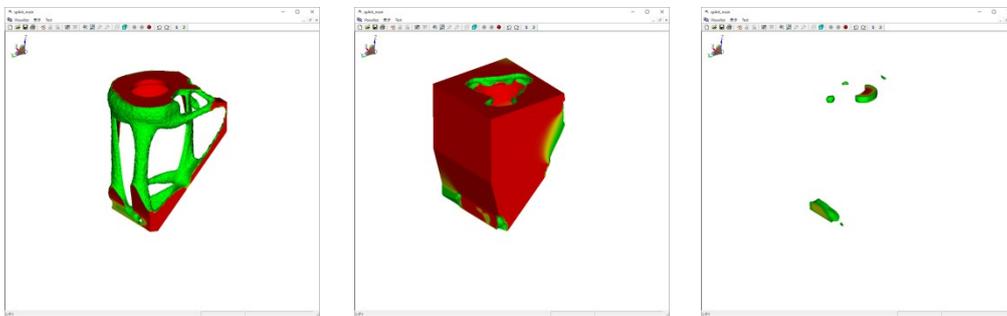
事前の検討結果に基づき、界面近傍に関し応力の制約を加えることにより異材接合の剛性を考慮する方法を構築するとともに、メッシュ1要素分よりも十分に小さい接着層に関する材料特性を現行法で使用している要素サイズで緩和する方法の検討を行なった。異種接合の剛性を考慮しない場合との比較を図Ⅲ-2.9.1-10に示す。これら検討した手法については、詳細な有限要素モデルによる剛性計算の結果から制約値を求める方法で開発中の最適化ソフトウェアへの実装を行った。

	制約なし	制約あり(開発手法)
最適構造 (鋼・アルミ)		
せん断 応力分布 (界面近傍)		

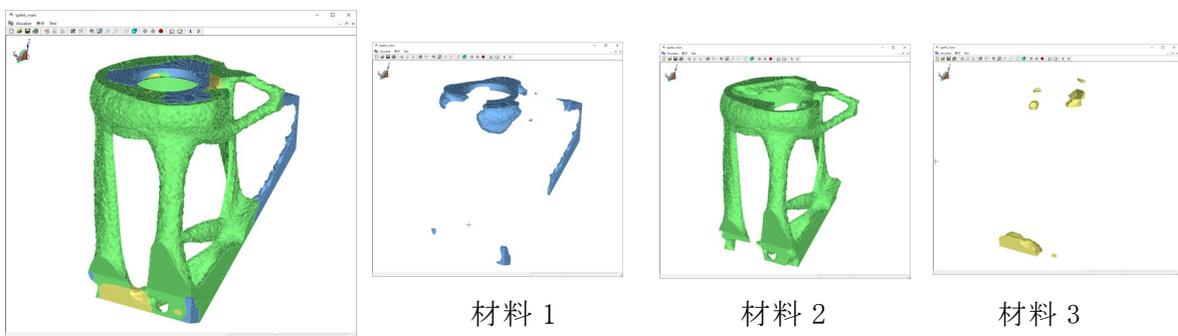
図Ⅲ-2.9.1-10 界面近傍における応力制約を加えた平均コンプライアンス最小化問題

プリポストシステム開発として 2019 年度は、マルチマテリアルトポロジー最適化計算結果における、各材料の領域を得るためのレベルセット関数ごとの等値面ポリゴンのブーリアン演算システムの開発を行なった。その結果、材料ごとのデータ（図Ⅲ-2.9.1-11）と材料間の界面データ（図Ⅲ-2.9.1-12）の出力が可能となった。

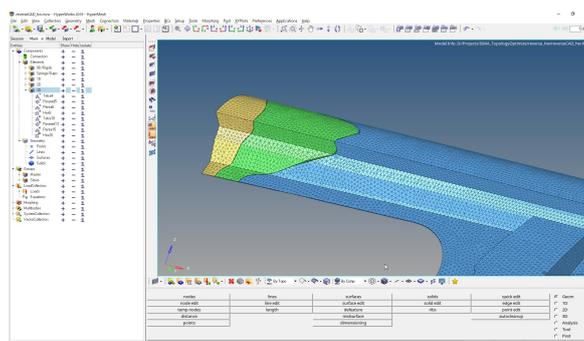
トポロジー最適化計算に利用する行列計算に関して、新規に NVIDIA の CUDA-ver10.2 を導入することにより、従来使用していた Intel 社の MKL Paradiso よりも計算を高速化できることを確認した。また、アルモニコス社製の spScan を利用し、材料ごとの STL データより、リバース CAD データを作成するシステムの開発を行なった。得られたリバース CAD データを HyperWorks に読み込み、解析用データが作成可能であることを確認した（図Ⅲ-2.9.1-13）。



図Ⅲ-2.9.1-11 レベルセット関数値の等値面表示



図Ⅲ-2.9.1-12 材料界面表示

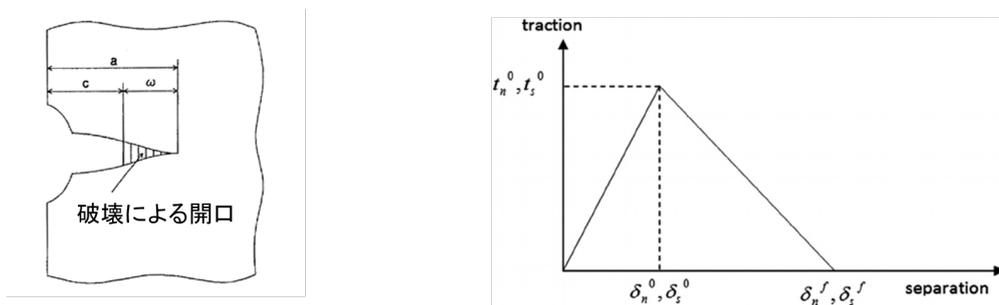


図Ⅲ-2.9.1-13 HyperWorks へのリバース CAD データの出力

研究開発項目② マルチマテリアル界面評価・モデル化

トポロジー最適化システムとの連携可能な適切な方法を検討するために「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクト接合分野研究テーマにおける剛性計測方法および剛性値の適用方法を調査した。また非線形構造解析による厳密な界面評価を行うために、接着接合への適用を踏まえて汎用 FEM における CZM モデル、機械接合モデル、疲労破壊モデルについて調査した。さらに FSW について、塑性流動解析手法および熱応力評価の従来知見を調査した。

以上の検討のうち、まず接着接合へのシミュレーションの適用性を考えると、図Ⅲ-2.9.1-14 に示す CZM モデルの相性が良いことを、国内で使用されている汎用 FEM の実績を踏まえて評価した。

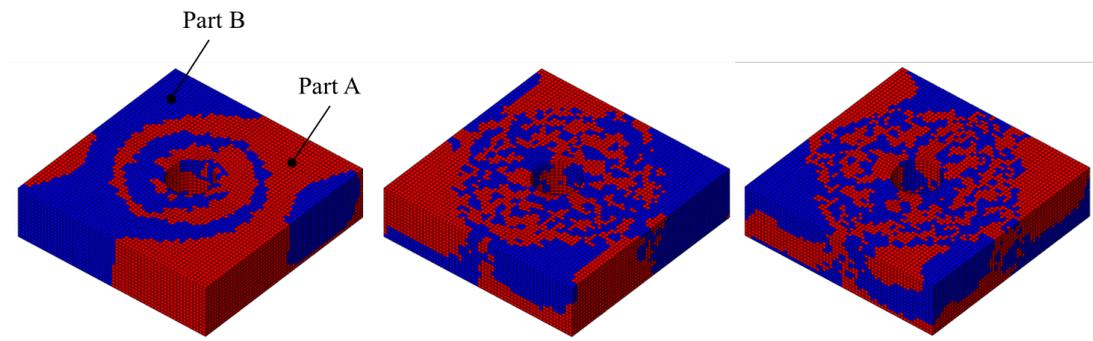


(a) 破壊による開口の発生

(b) 汎用 FEM における CZM モデルの例

図Ⅲ-2.9.1-14 接着接合の破壊による開口と、CZM モデル

また FSW については、既に革新的新構造材料等研究開発プロジェクトのなかで粒子法を用いた開発が先行しており、界面評価の視点からは残留熱応力の問題が残されたポイントになる。ここでは粒子法と有限要素法を組み合わせ、熱応力評価への可能性を評価した。また粒子法の適用は大変形問題には有利であるものの、詳細な応力評価は本来の目的ではないことが一般には指摘されているので、これらの得失を調査した。

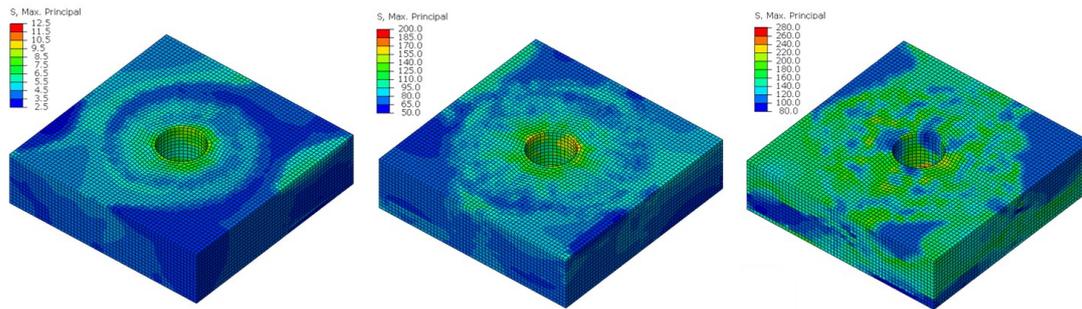


(a) 回転速度 100rpm

(b) 回転速度 500rpm

(c) 回転速度 1000rpm

図Ⅲ-2.9.1-15 大阪大学の先行例を踏まえた熱応力解析モデル



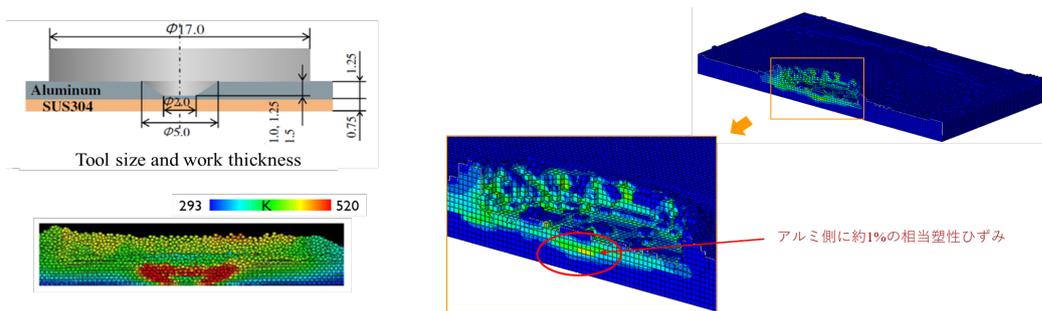
(a) 回転速度 100rpm (b) 回転速度 500rpm (c) 回転速度 1000rpm

図Ⅲ-2.9.1-16 大阪大学の先行例に対応した熱応力解析結果

マルチマテリアルトポロジー最適化において、異種材料の物体領域同士の界面の接合方法の状態をモデル化するための方法とモデルに必要な実験的測定からのパラメータ値の同定技術を開発した。CZM モデル、機械接合モデル、疲労破壊モデルについて、接着接合を対象として簡易モデルから開発の検討を進めた。実機シミュレーションへの適用性の面からは、CZM モデルの特性が良いことを明らかにした。また疲労破壊モデルについても、Paris 則によって整理された鋼板の疲労試験の先行実測例を、汎用 FEM を用いて解析できることを明らかにした。

FSSW に関しては、テーマ 64 において実施された粒子法解析の結果を構造系汎用 FEM に引き渡し、熱応力解析を実施するシステムを開発した。図Ⅲ-2.9.1-17 に示すように、粒子法で得られた異種材料の攪拌結果と温度データから、熱応力解析を行うことが可能になった。

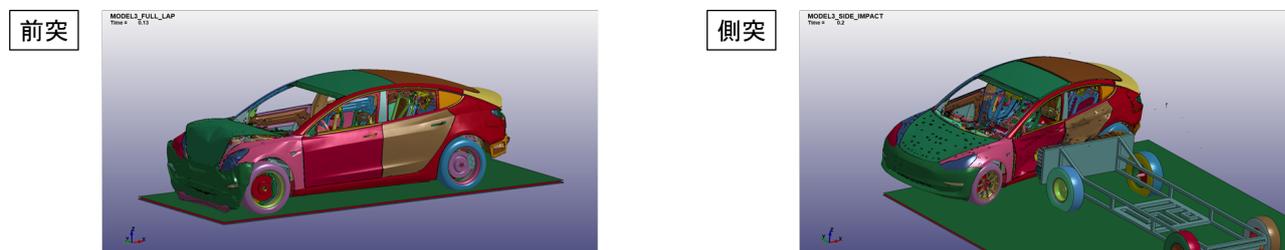
異材界面の電食に関しては従来知見の調査のため、汎用コード COMSOL による電食現象の基礎シミュレーションを行い、その解析可能性を確認できた。



(a) テーマ 64 における FSSW の粒子法解析結果 (b) 粒子法結果に基づく FEM 熱応力解析結果

図Ⅲ-2.9.1-17 テーマ 64 との粒子法/FEM コラボレーションによる FSSW 熱応力シミュレーション

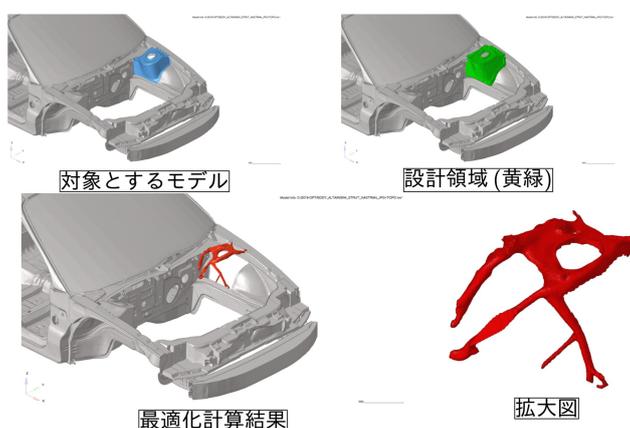
最後に、実車の衝突安全シミュレーションの準備として、自動車業界で実績のあるソフトウェア LS-DYNA を用いて、図Ⅲ-2.9.1-18 に示すように衝突シミュレーション（ベースモデルの検証）を行い、その解析可能性を確認できた。



図Ⅲ-2.9.1-18 衝突シミュレーション（ベースモデルの検証）

研究開発項目③車体構造適用可能性検討

実車相当の大規模車体モデルに対応するため、サブストラクチャリング機能の実装とソフトウェアの並列化による計算時間短縮を行なった。サブストラクチャリング法は、車体モデル内の巨大な非設計領域を設計領域との結合境界上のみの関係に置き換える縮退を行うことで、計算時間の短縮する手法であり、車体の全体としての特性を考慮しつつ部品単体だけで最適化を行うことが可能となる（図Ⅲ-2.9.1-19）。本手法を実装することで、車体全体を計算する方法に比較して計算時間の大幅な短縮が可能となった。

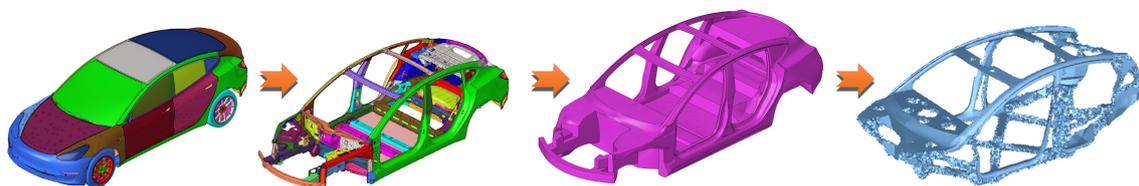


図Ⅲ-2.9.1-19 サブストラクチャリング法を適用した車体部分構造のトポロジー最適化

ソフトウェアの並列化による計算時間短縮には、MPI に基づいた方法を採用した。実際の車体の最適化では、複数の異なった荷重を考慮する必要があり、計算時間がかかるという課題があった。個々の荷重に対する剛性計算を、複数の計算に分散することで時間短縮を実現した。

実際の車体モデルに適用できるかの検討も実施した。リバースエンジニアリングに

より作成した、衝突解析用モデルから、BIWの部分を切出してトポロジー最適化用の初期モデルを作成した（図Ⅲ-2.9.1-20）。このモデルの計算を行うことで、実際の車体レベルの計算が実用的な時間で実行できることを確認した。



衝突モデル BIWモデル トポロジー最適化初期モデル 最適化事例

図Ⅲ-2.9.1-20 トポロジー最適化計算

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.9.1-6 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォ ーラ ム等*
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	6	1	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	2	0	0	0	0	1	1
合計	0	0	8	1	0	0	0	1	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表Ⅲ-2.9.1-7 特許の件数（内訳） 【2020年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願*
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約