

「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
-----	--

—目次—

1.概 要

2.プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1.事業の背景・目的・位置付け	I -1
1.1 事業の背景	I -1
1.2 事業の目的及び意義	I -3
1.3 事業の位置付け	I -5
2.NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I -7
2.1NEDO が関与することの意義	I -7
2.2 実施の効果（費用対効果）	I -7

II. 研究開発マネジメントについて

1.事業の目標	II -1
2.事業の計画内容	II -18
2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算	II -18
2.2 研究開発の実施体制	II -23
2.3 研究開発の運営管理	II -24
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II -25
3.情勢変化への対応	II -25
4.中間評価結果への対応	II -26
5.評価に関する事項	II -28

III. 研究開発成果について

1.事業全体の成果

1.1 成果の概要	III-1.1-1
-----------	-----------

2.テーマ毎の成果

2.1 革新鋼板の開発

2.1.1 「残留γ高度制御革新鋼板の開発」	III-2.1.1-1
2.1.2 「軽元素を有効に用いた革新鋼材の耐食性および成形性向上技術の開発」	III-2.1.2-1
2.1.3 「炭素活用による革新的加工性を有する超高強度鋼板の開発」	III-2.1.3-1
2.1.4 「中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発」	III-2.1.4-1
2.1.5 「複層鋼板の界面構造解析と特性調査」	III-2.1.5-1
2.1.6 「異相界面腐食解析の基盤技術開発（FS 研究）」	III-2.1.6-1
2.1.7 「超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発（FS 研究）」	III-2.1.7-1
2.1.8 「超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発」	III-2.1.8-1
2.1.9 「超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発」	III-2.1.9-1

2.2 革新的アルミニウム材の開発

2.2.1 「高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発」	III-2.2.1-1
2.2.2 「アルミニウム材新製造プロセス技術開発」	III-2.2.2-1
2.2.3 「複層アルミ合金の開発」	III-2.2.3-1

2.3 革新的マグネシウム材の開発

2.3.1 「難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価」	III-2.3.1-1
2.3.2 「易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）」	

作製の基礎的検討」	Ⅲ-2.3.2-1
2.3.3 「高強度マグネシウム材（薄板）の開発」	Ⅲ-2.3.3-1
2.3.4 「高強度マグネシウム材(押出材)の開発」	Ⅲ-2.3.4-1
2.3.5 「難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発」	Ⅲ-2.3.5-1
2.3.6 「難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発」	Ⅲ-2.3.6-1
2.3.7 「Mg 材の性能・寿命に関する MI（マテリアルズインテグレーション）活用技術 開発（FS 研究）」	Ⅲ-2.3.7-1
2.3.8 「革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価」	Ⅲ-2.3.8-1
2.3.9 「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」	Ⅲ-2.3.9-1
2.3.10 「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI） 活用技術の開」	Ⅲ-2.3.10-1
2.4 革新的チタン材の開発	
2.4.1 「チタン材一貫製造プロセス技術開発」	Ⅲ-2.4.1-1
2.4.2 「チタン薄板の革新的低コスト化技術開発」	Ⅲ-2.4.2-1
2.4.3 「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」	Ⅲ-2.4.3-1
2.5 革新炭素繊維基盤技術開発	
2.5.1 「革新炭素繊維基盤技術開発」	Ⅲ-2.5.1-1
2.6 熱可塑性 CFRP の開発	
2.6.1 「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発」	Ⅲ-2.6.1-1
2.6.2 「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術基盤技術の開発」	Ⅲ-2.6.2-1
2.6.3 「リサイクル炭素繊維の評価技術開発」	Ⅲ-2.6.3-1
2.6.4 「超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発」	Ⅲ-2.6.4-1
2.7 接合技術開発	
2.7.1 「アルミニウム／CFRP 接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.1-1
2.7.2 「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」	Ⅲ-2.7.2-1
2.7.3 「中高炭素高の革新的接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.3-1
2.7.4 「中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発」	Ⅲ-2.7.4-1
2.7.5 「アルミニウム／異種材料の点接合技術」	Ⅲ-2.7.5-1
2.7.6 「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」	Ⅲ-2.7.6-1
2.7.7 「鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発」	Ⅲ-2.7.7-1
2.7.8 「難接合性材料の線接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.8-1
2.7.9 「水和物架橋低温接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.9-1
2.7.10 「摩擦接合共通基盤研究」	Ⅲ-2.7.10-1
2.7.11 「構造材料用接着技術の開発」	Ⅲ-2.7.11-1
2.7.12 「革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発」	Ⅲ-2.7.12-1
2.7.13 「マルチマテリアル接合技術の基盤研究（FS 研究）」	Ⅲ-2.7.13-1
2.7.14 「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」	Ⅲ-2.7.14-1
2.7.15 「マルチマテリアル接合技術の基盤研究」	Ⅲ-2.7.15-1
2.7.16 「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」	Ⅲ-2.7.16-1
2.8 戦略・基盤研究	
2.8.1 「新構造材料の技術・研究戦略」	Ⅲ-2.8.1-1
2.8.2 「技術動向調査分析」	Ⅲ-2.8.2-1
2.8.3 「高分子複合材料技術開発動向調査」	Ⅲ-2.8.3-1
2.8.4 「共通基盤技術の研究調査」	Ⅲ-2.8.4-1

2.8.5 「非鉄金属先導研究」	III-2.8.5-1
2.8.6 「材料・接合等技術動向調査研究」	III-2.8.6-1
2.8.7 「計測解析評価研究」	III-2.8.7-1
2.8.8 「中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study」	III-2.8.8-1
2.8.9 「構造用接着技術に関する Feasibility Study」	III-2.8.9-1
2.8.10 「マルチマテリアル設計技術開発 (FS 研究)」	III-2.8.10-1
2.8.11 「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」	III-2.8.11-1
2.8.12 「低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)」	III-2.8.12-1
2.8.13 「新材料の材料代替効果定量技術の開発 (FS 研究)」	III-2.8.13-1
2.8.14 「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)」	III-2.8.14-1
2.8.15 「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)」	III-2.8.15-1
2.8.16 「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」	III-2.8.16-1
2.8.17 「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)」	III-2.8.17-1
2.8.18 「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)」	III-2.8.18-1

2.9 マルチマテリアル技術開発

2.9.1 「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」	III-2.9.1-1
-------------------------------------	-------------

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて

1. 事業全体の取り組み及び見通し	IV-1-1
-------------------	--------

2. テーマ毎の取り組み及び見通し

2.1 革新鋼板の開発

2.1.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.1-1
2.1.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.1-2

2.2 革新的アルミニウム材の開発

2.2.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.2-1
2.2.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.2-1

2.3 革新的マグネシウム材の開発

2.3.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.3-1
2.3.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.3-3

2.4 革新的チタン材の開発

2.4.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.4-1
2.4.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.4-1

2.5 革新炭素繊維基盤技術開発

2.5.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.5-1
2.5.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.5-4

2.6 熱可塑性 CFRP の開発

2.6.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.6-1
2.6.2 「各テーマ・各社の取り組み及び見通し」	IV-2.6-2

2.7 接合技術開発

2.7.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.7-1
2.7.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.7-4

2.8 戦略・基盤研究	
2.8.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.8-1
2.8.2 「各テーマ・各社の取り組み及び見通し」	IV-2.8-1

2.9 マルチマテリアル技術開発	
2.9.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	IV-2.9-1
2.9.2 「各社の取り組み及び見通し」	IV-2.9-2

V. 成果資料

1.革新鋼板の開発	
1.1 特許	V-1-1
1.2 論文	V-1-3
1.3 その他外部発表	V-1-7
1.4 展示会への出展	V-1-23
1.5 受賞	V-1-24
1.6 フォラーム等	V-1-26

2.革新的アルミニウム材の開発	
2.1 特許	V-2-1
2.2 論文	V-2-6
2.3 その他外部発表	V-2-9
2.4 展示会への出展	V-2-19
2.5 受賞	V-2-19
2.6 フォラーム等	V-2-20

3.革新的マグネシウム材の開発	
3.1 特許	V-3-1
3.2 論文	V-3-3
3.3 その他外部発表	V-3-9
3.4 展示会への出展	V-3-46
3.5 受賞	V-3-48
3.6 フォラーム等	V-3-51

4.革新的チタン材の開発	
4.1 特許	V-4-1
4.2 論文	V-4-4
4.3 その他外部発表	V-4-7
4.4 展示会への出展	V-4-15
4.5 受賞	V-4-16
4.6 フォラーム等	V-4-16

5.革新炭素繊維基盤技術開発	
5.1 特許	V-5-1
5.2 論文	V-5-1
5.3 その他外部発表	V-5-2
5.4 展示会への出展	V-5-7
5.5 受賞	V-5-8
5.6 フォラーム等	V-5-8

6.熱可塑性 CFRP の開発

6.1 特許	V-6-1
6.2 論文	V-6-3
6.3 その他外部発表	V-6-9
6.4 展示会への出展	V-6-43
6.5 受賞	V-6-45
6.6 フォラーム等	V-6-46

7.接合技術開発

7.1 特許	V-7-1
7.2 論文	V-7-9
7.3 その他外部発表	V-7-24
7.4 展示会への出展	V-7-79
7.5 受賞	V-7-81
7.6 フォラーム等	V-7-85

8.戦略・基盤研究

8.1 特許	V-8-1
8.2 論文	V-8-1
8.3 その他外部発表	V-8-10
8.4 展示会への出展	V-8-49
8.5 受賞	V-8-50
8.6 フォラーム等	V-8-53

9.マルチマテリアル技術開発

9.1 特許	V-9-1
9.2 論文	V-9-1
9.3 その他外部発表	V-9-1
9.4 展示会への出展	V-9-3
9.5 受賞	V-9-3
9.6 フォラーム等	V-9-3

VI. 参考文献

1.革新鋼板の開発	VI-1-1
2.革新的アルミニウム材の開発	VI-2-1
3.革新的マグネシウム材の開発	VI-3-1
4.革新的チタン材の開発	VI-4-1
5.革新炭素繊維基盤技術開発	VI-5-1
6.熱可塑性 CFRP の開発	VI-6-1
7.接合技術開発	VI-7-1
9.戦略・基盤研究	VI-8-1
8.マルチマテリアル技術開発	VI-9-1

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

概要

最終更新日	2020年7月7日
-------	-----------

プログラム（又は施策）名	未来開拓研究プロジェクト		
プロジェクト名	革新的新構造材料等研究開発	プロジェクト番号	P14014
担当推進部/ P.M、担当者	材料・ナノテクノロジー部 P.M 氏名 小川貴弘 (2018年6月～2020年7月現在) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 佐藤隆行 (2014年1月～2014年5月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 松岡隆一 (2014年1月～2014年9月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 今西大介 (2014年1月～2020年3月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 寺田幸平 (2014年6月～2016年5月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 廣井政行 (2014年8月～2020年7月現在) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 宮本一夫 (2016年2月～2018年7月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 椎野裕 (2016年6月～2018年5月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 齋藤英紀 (2017年4月～2020年3月) 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 伊東寿 (2020年4月～2020年7月現在)		
0. 事業の概要	自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）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（Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」という。）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する。これにより、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量とCO ₂ 排出量の削減、次世代自動車普及の加速、我が国の部素材産業及びユーザー産業の国際競争力強化を目指す。		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>【事業の必要性】 エネルギー消費量削減やCO₂排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。我が国においても、CO₂総排出量の20%近くが自動車からの排出であり、今後のCO₂排出量削減に向けて、自動車の燃費向上に係る技術開発が重要となる。近年の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が進められている。その際、異種材料接合が鍵となるが、材質が大きく異なる材料間の接合や、自動車としての安全性を保障する上で欠かせない接合部の性能評価技術など、今後克服すべき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、耐食性、耐衝撃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。それと同時に、これらの機能を損なうことのない接合技術や成形加工技術等の開発が求められる。</p> <p>【位置付け】 本事業は経済産業省が推進する、「未来開拓プロジェクト」の一つであり、本研究開発は既存技術の延長線上にない、夢のある「未来技術開拓」を実施するものである。内閣府総合科学技術会議では「2013年度科学技術重要施策アクションプラン」により、重点的取組として「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を実現するものと登録されている。また、日本再生戦略「グリーン成長戦略」では重点施策の「グリーン部素材が支えるグリーン成長の実現」に基づきグリーン部素材自体の革新的イノベーションを生み出すための基礎から実用化まで一貫通貫の未来開拓型の研究開発を推進し、「グリーン部素材」をテコにした成長を実現する。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」 (1) マルチマテリアル設計技術開発 (a) トポロジー最適化システムの構築 【第3期目標（2020年度末）】 ・複数の材料のトポロジー最適設計法を構築する。 ・線形過渡応答問題の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・検討および他のCAEツールと連携可能なシステムを構築する。</p> <p>(b) マルチマテリアル界面評価・モデル化 【第3期目標（2020年度末）】 ・マルチマテリアル界面の評価方法の現状、および今後のニーズを調査する。 ・数値解析技術により、マルチマテリアル界面をモデル化する。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。</p>		

(c) 車体構造適用可能性検討

【第3期目標（2020年度末）】

- ・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。

(d) マルチマテリアル実設計への適用

【第4期目標（2022年度末）】

- ・開発材料を利用した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設計車体の提案を行う。

研究開発項目②「接合技術開発」

(1) チタン／チタン連続接合技術の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・接合深さ：5mm 以上
- ・接合強度：母材強度の90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

【第2期目標（2017年度末）】

- ・接合深さ：10mm 以上
- ・接合強度：母材強度の90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

(2) 中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発

【第1期目標（2015年度末）】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値の70%

(b) 連続接合技術開発

- ・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%

【第2期目標（2017年度末）】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値の70%以上

(b) 連続接合技術開発

- ・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3期目標（2020年度末）】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、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) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の70%以上

【第4期目標（2022年度末）】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、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) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の90%以上

(3) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術）

【第1期目標（2015年度末）】

- ・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断
- ・電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立
- ・鋼板／アルミニウム間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法の確立

【第2期目標（2017年度末）】

- ・高減衰接着剤の仕様決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・接合強度：抵抗スポット溶接による剥離強度として十字引張荷重平均値が1.5kN 以上

【第4期目標（2022年度末）】

- ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値

以上または母材破断

- ・ 接合時間：1点あたり5秒以内

(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・ 接合強度：試験片の接合で、JIS-A級 (JIS Z3140:1989) の引張せん断荷重平均値以上または母材破断

- ・ 電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立

- ・ 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の確立

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・ 高減衰接着剤の実用組成の決定

- ・ 電食に対する防錆技術の確立

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ ポリアミド樹脂 (PA)、ポリフェニレンスルファイド樹脂 (PPS) など高融点樹脂をマトリックスとするCFRPの接合技術の確立

- ・ 電食の評価手法確立と防錆仕様検討への応用

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ 接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重最小値以上または母材破断

- ・ 接合時間：1点あたり5秒以内

- ・ プロセスモニタリング技術の確立

(5) 鋼材/CFRP等樹脂接合技術の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・ 接合強度：母材破断

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・ 接合強度：母材破断

- ・ 電食による接合部腐食の評価手法の確立

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ 鋼材/CFRP複合成形パネルの製作に向けた接合材料の仕様確定

- ・ 試験片レベルの接合強度：引張せん断強度15MPa以上

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ 鋼材/CFRP複合成形パネルの製作

- ・ 成形パネルの接合強度：引張せん断強度20MPa以上

(6) 構造材料用接着技術の開発

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・ 接合強度：引張せん断強度10MPa以上

- ・ 接合部劣化のメカニズム解明及び評価法の確立

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ 接合強度：金属用接着剤では引張せん断強度20MPa以上、プラスチック用接着剤に対しては7MPa以上。

- ・ 接着接合部の耐久性向上の検討

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ 接合強度：金属用接着剤は引張せん断強度28MPa以上、プラスチック用接着剤に対しては10MPa以上。

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発

【第1期目標 (2015年度末)】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・ 鉄含有値：ばらつき範囲50~500ppm 平均値200ppm以下

- ・ 酸素含有値：ばらつき範囲100~200ppm 平均値150ppm以下

- ・ 塩素含有値：300ppm以下

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

- ・ 薄板中の気孔率：1%以下

- ・ 引張強度・延性バランス：現行材より20%向上

【第2期目標 (2017年度末)】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・ 大型工業製品製造に不可欠な工程技術の要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発
・工業的に薄板を製造するプロセスの要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

・実機スケールで、 $Fe \leq 200ppm$ 、 $O \leq 150ppm$ 、 $Cl \leq 300ppm$ のスポンジチタンを製造可能な技術の確立

・A級スポンジチタンの歩留向上（85%を92%に向上）可能な技術の確立

・スポンジチタンの製造リードタイムを30%低減可能な技術の確立

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

・大型試験設備によりチタン薄板コイルを試作

・上記で試作したチタン薄板の気孔率0.2%以下

・チタン薄板の強度・延性バランスを現行材よりも30%向上

・現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを15%低減

【第4期目標（2022年度末）】

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

・第3期で作製した薄板を用いた自動車部品サンプルの試作

(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

(a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開発

・精錬後の酸素含有値：300ppm以下

(b) 上述の溶解・精錬技術と鑄造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発

・引張強度：現行材より20%向上

【第2期目標（2017年度末）】

(a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開発

・実機プロセスにおける精錬後の酸素含有値を300ppm以下とする要素技術確立の見通しを得る。

(b) 上述の溶解・精錬技術と鑄造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発

・高速高圧下箔圧延技術：生産性向上の達成に向けた要素技術を確立し、量産プロセスへの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

・引張強度が現行材より20%向上した材の量産プロセス検証

【第4期目標（2022年度末）】

・引張強度が現行材より20%向上した材を用いて実機相当部材を試作

(3) チタン新製錬技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発

（ラボスケールで検証）

・鉄含有値：2000ppm以下

・酸素含有値：1000ppm以下

【第2期目標（2017年度末）】

工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発

・製錬プロセス設計指針を構築し、量産プロセスへの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

・工業化が可能と判断される $Fe \leq 2000ppm$ 、 $酸素 \leq 1000ppm$ で、現行クロール法よりコスト20%削減に必要な要素技術を提示。

・大型化試験により、A4判サイズ、数百 μm 厚さで、 $O \leq 1000ppm$ 、 $Fe \leq 2000ppm$ を試作。

【第4期目標（2022年度末）】

・第3期の成果をベースとした自動車部品サンプルの試作

研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発

【第1期目標（2015年度末）】

・引張強度：660MPa以上（現状：600MPa）

・耐力（降伏強度）：600MPa以上（現状：550MPa）

・伸び：12%以上

【第2期目標（2017年度末）】

- ・引張強度：750MPa 以上（現状：600MPa）
- ・耐力（降伏強度）：700MPa 以上（現状：550MPa）
- ・伸び：12%以上
- 【第3期目標（2020年度末）】
 - ・疲労強度を維持しながら高強度化した合金（引張強度：750MPa）の実機レベル（大型ねじり鍛造装置を用いた）の製造技術開発
- 【第4期目標（2022年度末）】
 - ・開発合金の実機化製造条件の技術指針確立
 - ・航空機の実機カットモデルの作製・評価と量産・事業化に向けた課題解決

(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発

- 【第1期目標（2015年度末）】
 - ・電解条件の確立
 - ・電析メカニズムの解明
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・AlCl₃系イオン液体の新合成法の開発及び量産法の提示
 - ・パイロットプラントによる実証実験
- 【第3期目標（2020年度末）】
 - ・新電析浴において、電析速度 1.0μm/min 以上の達成
 - ・新電析浴を用いた量産ライン設計指針の確定
 - ・従来溶製法では製造不可な新電析浴を用いた新 Al 合金および作製法の指針確定
- 【第4期目標（2022年度末）】
 - ・不純物濃度 10ppm 以下、電解コスト 10kWh/kg 以下（国内で 150 円/kg 以下）
 - ・大型試験装置による実機化技術の検証

(3) 複層アルミ合金の開発

- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・熱処理後の耐力 600MPa 以上
 - ・成形前の伸び 20%以上
 - ・製造プロセス設計指針の提示
- 【第3期目標（2020年度末）】
 - ・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
- 【第4期目標（2022年度末）】
 - ・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 曲げ角度 40°以上

研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

(1) 易加工性マグネシウム材の開発

- 【第1期目標（2015年度末）】
 - ・レアアース添加無し
 - ・引張強度：250MPa 以上
 - ・伸び：15%以上
 - ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
 - ・AZ31（マグネシウム材）と同程度以上の押出速度
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・レアアース添加無し
 - ・引張強度：270MPa 以上
 - ・伸び：20%以上
 - ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
 - ・A6N01（アルミニウム材）と同程度以上の押出速度

(2) 高強度マグネシウム材の開発

- 【第1期目標（2015年度末）】
 - ・レアアース添加無し
 - ・引張強度：350MPa 以上
 - ・伸び：13%以上
 - ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・レアアース添加無し

- ・引張強度：360MPa 以上
- ・伸び：15%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性

(3) マグネシウム材の評価手法の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズム及び腐食メカニズムの解明と評価手法の導出

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性及び疲労特性に関するデータベース構築

(4) マグネシウム材の接合技術の開発

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム材を対象として、MIG、TIG、FSW等の接合技術の開発を行う。

(5) 革新的マグネシウム材の開発および長期性能評価

【第3期目標 (2020年度末)】

- (5-1) 前期で開発した合金を用いて高速鉄道車両適用のための大型部材 (長さ 5m 以上) の材料製造技術 (押出技術、圧延技術、加工技術) を構築する。
- (5-2) 自動車への適用に必要な機械的特性、成形性を有するマグネシウム材の開発と製造技術を確立する。
- (5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として実用化に必要な長期性能 (疲労特性等) データベースを構築する。

【第4期目標 (2022年度末)】

- (5-1) 前期で開発した合金(6N01 もしくは 7N01 合金並みの機械的特性を有する合金)を用いて鉄道車両のための大型部材 (長さ 25m 以上) の量産技術の技術指針を構築する。
- (5-2) 自動車への適用に必要な機械的特性、耐食性、成形性を有するマグネシウム材の適用技術 (成形技術、スケールアップ技術) を確立する。
- (5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として、実用化に必要な長期性能 (疲労特性等) データベースを機械学習等のデータサイエンスを利用して構築する。

(6) マグネシウム製高速車両構体の開発

【第3期目標 (2020年度末)】

- (6-1) 革新的マグネシウム材を用いて高速車両構体を設計するための技術指針を、一般断面モックアップ構体の作製・評価を通じて構築する。
- (6-2) 革新的マグネシウム材を用いて一般断面モックアップ構体を作製するための接合技術および表面処理技術を構築する。

【第4期目標 (2022年度末)】

- (6-1) 革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を設計するための技術指針を構築する。
- (6-2) 革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を作製するための接合・組立技術および表面処理技術・施工技術を構築する。

(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術開発

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・難燃性マグネシウム合金接合部の疲労性能・寿命を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールのプロトタイプを完成させる。

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・難燃性マグネシウム合金接合部の長期性能 (疲労性能・寿命、耐食性等) を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールの検証を実施し、統合したワークフローとして完成させる。

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.2GPa 以上

- ・伸び：15%以上
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・レアメタル添加量：10wt%未満
 - ・引張強度：1.5GPa以上
 - ・伸び：20%以上
- 【第3期目標（2020年度末）】
 - ・レアメタル添加量：10wt%未満、引張強度：1.5GPa以上、伸び：20%以上の開発鋼において、汎用鋼（590MPa～980MPa級）と同等の耐食性と水素脆性を目指す
- (2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発
- 【第1期目標（2015年度末）】
 - ・低濃度炭素検出技術
炭素定量下限：30ppm
 - ・微細粒成長動的観察技術
像分解能：15nm
 - ・加熱加工模擬技術の確立
 - ・鋼の歪み挙動解析技術の確立
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・鋼組織の高速定量解析技術の確立
 - ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術の確立
- 【第3期目標（2020年度末）】
 - ・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
 - ・微小電気化学計測技術、局所構造解析技術、マクロ腐食挙動との対比などによるマイクロおよびナノオーダー（ μm 以下）の腐食挙動解析技術の確立
 - ・薄鋼板の水素脆化挙動に影響を及ぼす応力、ひずみ、水素濃度分布、組織損傷を数百 μm レベルで測定できる技術を確認し、自動車用構造部材としての薄鋼板の水素脆化挙動を適切に評価できる試験方法の確立

研究開発項目⑦「熱可塑性CFRPの開発」

- (1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発
- 【第1期目標（2015年度末）】
 - ・CFRPと異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合の要素技術の見極めを行い、上記接合方式・接合形状における強度設計に必要なデータベースを構築する。
- 【第2期目標（2017年度末）】
 - ・2015年度までに構築した異材接合データベースを基に、現行量産車において多用され一般的に用いられている接合方式（ボルト締結や接着接合）と同等以上の強度を達成するための要素技術及びその設計手法を確立する。また最適な非破壊評価手法を確立する。
- (2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発
- 【第1期目標（2015年度末）】
 - (a) 熱可塑性CFRPの中間基材の開発
 - ・中間基材のバリエーションを拡大し、車体の6割軽量化を実現する中間基材の製造に係る要素技術を確立する。
 - (b) 熱可塑性CFRPの性能評価技術の開発
 - ・開発材の静的及び動的力学特性把握のための標準試験法・試験片製作方法を提案する。
 - (c) 熱可塑性CFRPを用いた構造設計技術の開発
 - ・開発材の静的及び動的力学特性をCAE（Computer Aided Engineering）解析に適用した予測技術を確立し、予測精度を既存の鋼板製車体と同等以上とする。
 - (d) 熱可塑性CFRPの成形加工技術の開発
 - ・成形シミュレーション技術を構築する。
 - (e) LFT-D（Long Fiber Thermoplastics-Direct）成形の基礎技術の開発
 - ・炭素繊維と熱可塑性樹脂の混練体の流動特性と材料特性の関係を解析し、混練プロセスの最適条件を解明し、基礎的力学的モデルを提案する。また、初歩的CAE解析技術を確立する。
 - (f) 大物高速成形技術の開発
 - ・初歩的なボディ部材を対象に高速プレス成形技術を確立する。また、構造材の剛性確保のためにLFT-D成形品の部分補強を試行する。ハイブリッド構造を達成するためのマテハン技術の概念を決定する。
 - (g) 大物高速接合技術の開発
 - ・熱可塑性CFRP使用部材同士の接合方法を見極め、最適手法を選択する。

- (h) 高意匠性外板製造技術開発
 - ・高意匠性を支配する技術要因を分析し、基礎技術を見極める。
- (i) 実証評価
 - ・実証評価の実施方法を策定する。
- 【第2期目標（2017年度末）】
- (a) 熱可塑性 CFRP の中間基材の開発
 - ・組立パーツの部品点数の半減を実現する中間基材の製造に係る要素技術を確立する。
- (b) 熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発
 - ・材料特性発現メカニズムを解明することにより、標準試験法による評価値の妥当性を検証する。
- (c) 熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発
 - ・CAE 解析予測技術を用いた複数部材の一体化設計技術を開発し、組立パーツの部品点数半減と車体の6割軽量化のための要素技術を確立する。
- (d) 熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発
 - ・成形シミュレーション技術を基にして、繊維配向や形状安定性の予測手法を確立する。
- (e) LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 成形の基礎技術の開発
 - ・量産化につながる混練・押出プロセスの要素技術を確立する。また、LFT-D の材料特性データベースの一部を構築するとともに、試験法標準化への道付けを実施する。さらに、力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトウェアに組込む。
- (f) 大物高速成形技術の開発
 - ・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。ハイブリッド成形技術を確立するとともに、高速マテハン技術の要素技術を確立する。
- (g) 大物高速接合技術の開発
 - ・熱可塑性 CFRP 使用部材同士の接合技術を確立する。
- (h) 高意匠性外板製造技術開発
 - ・選定した材料、プロセスを用いて、高意匠性付与技術を確立する。
- (i) 実証評価
 - ・自動車構造体を想定して、自動車ボディの剛性試験などにより軽量化の検証を行うとともに、量産化に向けた課題の抽出を行う。
- 【第3期目標（2020年度末）】
- (j) LFT-D 高速成形実用化技術の開発
 - ・革新炭素繊維強化熱可塑性 CFRP の LFT-D 成形性および力学特性を評価する。
 - ・LFT-D 材の混練 CAE シミュレーション技術の研究を行うとともに、成形流動および流動配向異方性を考慮した最適設計 CAE 解析技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。
- (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発
 - ・その場重合成形補強材と LFT-D とのハイブリッド成形技術を開発するとともに、新しく考案したフレーク法によるハイブリッド成形の基礎技術を開発する。
- (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発
 - ・熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行う。
 - ・熱可塑性 CFRP の材料特性データベースの一部を構築する。
- (m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発
 - ・リサイクル CF 回収技術の研究を行い、LFT-D 要件に適合する基本プロセスを開発するとともに、設備の改良開発を行う。
 - ・リサイクル CF を用いた LFT-D 成形プロセスおよび LFT-D 廃材の再利用技術、並びに設備システムの研究を行う。
- 【第4期目標（2022年度末）】
- (j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発
 - ・革新炭素繊維強化熱可塑性 CFRP の LFT-D 成形性および力学特性を評価する。
- (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発
 - ・多様な補強材と LFT-D とのハイブリッド成形技術について構造部材による技術検証を行い、技術を確立する。
- (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発
 - ・熱可塑性 CFRP の破壊メカニズムを解明し、材料特性予測技術を確立するとともに、実設計への適用を想定した実用的な材料モデルを開発する。
 - ・熱可塑性 CFRP の材料特性データベースを構築する。
- (m) 自動車向回収 CF 適用化技術の開発
 - ・リサイクル CF 回収技術を確立する。
 - ・リサイクル CF の LFT-D 成形技術、および LFT-D 廃材のリサイクル技術を開発する。

研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

(1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・下記(2)の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・下記(2)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・アクリル繊維ポリマーをベースとする完全耐炎ポリマーを得る反応プロセスを確立する。これに伴い炭素繊維紡糸工程では、Large Tow (48K) の紡糸技術を確立すると同時に、炭化プロセスも革新炭素繊維に適合するよう処理条件など検討する。炭素繊維として、フィラメント径 7 μ m で、弾性率 240GPa、強度 4GPa を凌ぐ性能を目指す。

(2) 炭化構造形成メカニズムの解明

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・マイクロ波炭化のプロセス多段化など設備を改良すると共に処理条件を最適化し、従来の炭化炉方式に優る大規模生産のための製造技術を確立する。

(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO 化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告 (TR) としてとりまとめる。さらに、新規炭素繊維前駆体から製造される炭素繊維を適用した複合材料の設計やライフサイクルアセスメント (LCA) に活用するためのデータを収集する。

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・研究開発のビジョンの明確化
- ・接合技術及び個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出
- ・プロジェクトの技術・研究戦略の策定
- ・新規材料の輸送機器への適用可能性の明確化
- ・新規材料の研究開発方針の明確化

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・研究開発の実用化・事業化ビジョンの明確化
- ・接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・新規材料の実用化に向けた技術課題 (構造体関連) の抽出
- ・異種材料接合技術の標準化・規格化の検討体制の構築

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・新規材料の実用化に向けた技術課題の抽出
- ・マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の抽出
- ・異種材料接合技術の標準化・規格化の検討

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・新規材料の実用化に向けた技術課題の明確化
- ・マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の明確化
- ・異種材料接合技術の標準化・規格化取りまとめ
- ・プロジェクト成果の取りまとめ及び検証

(2) 共通基盤技術の調査研究

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・ 構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズの顕在化
- ・ マルチマテリアル設計における、研究方向性の明確化
- ・ 材料と破壊の基礎メカニズム解明
- ・ 接合部の非破壊評価手法の確立
- ・ プロセスモニタリング/ヘルスマニタリング手法の確立

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・ 構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズ(腐食や水素脆化評価など)の顕在化
- ・ 小型中性子線などによる構造材料評価手法の構築
- ・ 軽量金属材料(アルミニウム、マグネシウム)に関する計測・評価手法の確立
- ・ 熱可塑性複合材料の損傷・強度評価手法の確立
- ・ 構造体接合部設計・評価手法の確立

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ 構造体接合部設計・評価手法の抽出
- ・ 新材料の材料代替効果定量技術の開発課題の抽出
- ・ 車体軽量化技術の集約化に関する課題の抽出
- ・ 異種材料接合における腐食課題の抽出

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ 構造体接合部設計・評価手法の確立
- ・ 新材料の材料代替効果定量技術の確立
- ・ 車体軽量化技術の集約手法・実行体制の確立
- ・ 異種材料接合における腐食解析手法の確立

(3) 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

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ 新規小型中性子装置を建設し、ブラッグエッジイメージング法による測定分解能と統計精度を明らかにする。
- ・ 中性子小角散乱とX線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を開発する。
- ・ 炭素の濃度分布を同定する技術および析出物と水素局所濃縮の関係を検出する技術を開発する。

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ ブラッグエッジイメージングのデータから、歪や金属組織のイメージング情報に変換する手法を確立し、接合部の2次元マッピングを実現する。
- ・ 中性子小角散乱とX線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を確立する。
- ・ オーステナイト中の炭素濃度分布を検出する技術を開発する。
- ・ 鋼中の水素局所的濃縮を検出する技術を開発する。

(4) 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・ 樹脂供給体における樹脂・基材の基本設計を完了する。
- ・ 低圧・高速成形の平板形状での成形条件を確立する。
- ・ 平板での樹脂含浸挙動解析シミュレーション技術を構築する。

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・ 樹脂供給体設計技術の確立
- ・ 低圧・高速成形の部材形状での成形条件を確立する。
- ・ 部材での樹脂含浸挙動シミュレーション技術を構築する。

事業の計画内容	主な実施事項	2013fy	2014fy	2015fy	2016fy	2017fy	
	接合技術	→					
	革新的アルミ材料	→					
	革新的マグネ材料	→					
	革新的チタン材料	→					
	革新鋼板	→					
	熱可塑性 CFRP	→					
	革新炭素繊維基盤技術	→					
	戦略・基盤研究	→					
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	2013fy	2014fy	2015fy	2016fy	2017fy	
	一般会計						
	特別会計(電源・需給の別)	3,960	4,760	4,300	3,708	3,544	
	開発成果促進財源	0	0	1,570	0	185	
	総予算額	3,960	4,760	5,870	3,708	3,729	
契約種類： ○をつける (委託(○) 助成() 共同研究(負担率()	(委託)	3,960	4,760	5,870	3,708	3,729	
	(助成) : 助成率△/□						
	(共同研究) : 負担率△/□						
事業の計画内容	主な実施事項	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	
	マルチマテリアル	→					
	接合技術	→					
	革新的アルミ材料	→					
	革新的マグネ材料	→					
	革新的チタン材料	→					
	革新鋼板	→					
	熱可塑性 CFRP	→					
	革新炭素繊維基盤技術	→					
	戦略・基盤研究	→					
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	2018fy	2019fy	2022fy	2021fy	2022fy	総額
	一般会計						
	特別会計(電源・需給の別)	3,512	2,827	2,738	(3,500)	(3,000)	35,849
	開発成果促進財源	0	0	412	0	0	2,167
	総予算額	3,512	2,827	3,150	(3,500)	(3,000)	38,016
契約種類： ○をつける (委託(○) 助成() 共同研究(負担率()	(委託)	3,512	2,827	3,150	(3,500)	(3,000)	38,016
	(助成) : 助成率△/□						
	(共同研究) : 負担率△/□						

開発体制	経産省担当原課	産業技術産業局 研究開発課
	プロジェクトリーダー	【プロジェクトリーダー】国立大学法人東京大学 名誉教授：岸 輝雄 【サブプロジェクトリーダー】学校法人金沢工業大学 教授：影山裕史
	委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載）	委託先：新構造材料技術研究組合（参加44社） 東レ、神戸製鋼所、日本製鉄、JFE スチール、マツダ、UACJ、川崎重工業、住友電気工業、IHI、日立製作所、日立パワーソリューションズ、日立金属、日立メタルプレジジョン、セメダイン、物質・材料研究機構、大阪大学、日産アーク、東邦チタニウム、三協立山、権田金属工業、不二ライトメタル、大日本塗料、総合車両製作所、産業技術総合研究所、名古屋大学、タカギセイコー、本田技術研究所、島津製作所、福井ファイバーテック、KADO、スズキ、トヨタ自動車、帝人、アイシン精機、共和工業、SUBARU、トヨタカスタマイジング&ディベロップメント、日本パーカライジング、日本金属、ファインセラミックスセンター、高砂工業、コニカミノルタ、アルモニコス、メカニカルデザイン 再委託先：戸畑製作所、ミリオン化学、木ノ本伸線、東レエンジニアリングDソリューションズ、日本マグネシウム協会、茨城県産業技術イノベーションセンター、近畿大学、大阪府立大学、秋田大学、広島大学、東京工業大学、大阪工業大学、東北大学、東京大学、北海道大学、岐阜大学、京都大学、九州大学、長岡技術科学大学、神戸大学、山形大学、茨城大学、兵庫県立大学、ヒロテック、帝京大学、岡山大学、豊橋技術科学大学、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構、ナガセケムテックス、横浜ゴム、日本大学、群馬大学、上智大学、室蘭工業大学、立命館大学、日本原子力研究開発機構、量子科学技術研究開発機構、岩手大学、海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所、金沢工業大学
情勢変化への対応	プロジェクトの進捗状況や技術推進委員会の結果を踏まえ、研究開発事業の見直し、新規テーマの導入を随時行っている。 また、2015年のパリ協定の採択により、更なるCO ₂ の削減、自動車においては更なる燃費向上によるCO ₂ 排出量の削減が求められるようになった。これを受けて、自動車車体の軽量化に対する要求はますます強くなり、本プロジェクトにおいては、材料開発は早期に完成させ、社会実装を加速させるため、実使用時の特性評価技術の開発や部材での実証へとテーマの再編を行った。	
中間評価結果への対応	第2回中間評価の指摘事項を踏まえ、素材ごとに別々だった開発テーマを1つの部材開発テーマに集約するなど、素材間・企業間でシナジー効果が生まれるよう連携を図った。 また、マルチマテリアル技術開発という研究開発項目を追加し、自動車メーカーの技術者を委員とする委員会を設置するなど、ユーザーニーズを取り入れた開発を行っている。	
評価に関する事項	事前評価	2014年3月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
	中間評価	第1回：2015年6月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
		第2回：2017年6月実施 担当部 材料・ナノテクノロジー部
	事後評価	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

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	
【テーマ番号22】 残留型鋼板表面腐食層の 低減	高強度高延性中高炭素鋼の 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	第3期に達成したTS-EJ目標達成材の残留型鋼板の安定化すること で、成形を想定した加工後に水素添加時の破断強度を向上 できることを示した。	◎
	中高炭素鋼の解析・評価手 法の開発	鋼中のベ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タマン除去装置であるガラス ターゲットを併設すると共に軽元素分析に有効な軟X線 分光分析装置を活用することで空間分解能140nmを達成し た。	○
【テーマ番号23】 革新鋼材の有効利用に 応じた革新鋼材の開発	革新鋼材の開発	1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、工業化に 向け諸特性の再現性を確認する。さらに現行汎用材と 同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を 示す。	軽元素の有効利用により1.5GPa×20%の特性を満足する革新 鋼材を試作し特性の安定性を確認。さらに機械特性、耐食 性、撓動性に有効な微量軽元素群を発見し、試作試験によ り諸特性を評価した。	◎
	その場観察装置の開発	1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、現行汎用 材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指 針を示す。	革新鋼材の耐食性評価技術および固溶軽元素の耐食性に及 ぼす作用検討手法を開発し、耐食性と成形性を維持する軽 元素群見出し、これらの機能を明らかにした。	◎
【テーマ番号24】 炭素鋼の加工性を向上 する炭素鋼の 開発	鋼板開発	TS≧1.5GPa、EJ≧20% (TS×EJ≧30,000) 【2017年度終了テーマ】	TS≧1.5GPa、EJ≧19%まで到達	◎
	解析・評価手法開発	炭素の分析下限が20ppm (点分析) 【2017年度終了テーマ】 鋼組織の3D評価 【2017年度終了テーマ】	炭素濃度既知の試料をN=16回繰り返し測定することによる測定誤差 が概ね20ppm以下 3D-SEMにより、開発鋼の組織解析を行い、熱処理による組織変化を 三次元的に評価	○
【テーマ番号25】 中高炭素TRIP鋼ベースの複層鋼板の 開発	超高強度—高延性を両立す る炭素鋼ベースの複層鋼板 の開発	中高炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数 を3～5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の 複層鋼板の実現可能性を確認する。【第一中間目標： 2015年度終了のFSテーマ】	中高炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3～5層として 試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認 した。	△
	鋼/非鉄合金複層化の検討	中高炭素と鋼の複層化に適した非鉄合金を選定し、層の 幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検 討を進める。【第一中間目標：2015年度終了のFSテ マ】	鋼とMg合金の接合を可能とする条件を導出	△
【テーマ番号26】 複層鋼板の界面構造解析と 特性調査	複層鋼板の界面構造解析と 特性調査	マルテンサイト鋼の3次元構造の解明、複層化による 高機能化検討、接合メカニズム解明【第一中間目標： 2015年度終了のFSテーマ】	3次元ミクロ組織解析装置を用いて三次元構造観察を実施、 層構造を変化させた複層鋼を用いた評価によって複層化に よる特性向上を検討 FEMによる歪解析により接合界面の挙動を明確化	○
	複層鋼板の微細組織構造解 析技術の確立	マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙の解明【第 一中間目標：2015年度終了のFSテーマ】	その場引張装置を用いた実験により、マルテンサイト鋼の 変形挙動・き裂進展挙を解明	○
【テーマ番号27】 複層鋼板の界面接合モデ ル・水素拡散モデル(プロ トタイプ)の構築	複層鋼板の界面接合モデ ル・水素拡散モデル(プロ トタイプ)の構築	FEMおよび第一原理計算によるモデルの構築【第一中 間目標：2015年度終了のFSテーマ】	水素透過試験によって中高炭素鋼中の水素拡散現象を解明、 モデル拡散対の評価およびFEMによる解析モデルを構築	○
	微小電気化学計測技術開発	μmレベルの微細組織の腐食挙動解析技術確立	ハイブリッド顕微鏡の早期戦力化により高空間分解能化達 成	○
【テーマ番号28】 局所腐食電位計測技術開 発 (FS研究)	局所構造解析技術開発	μmレベルの微細組織の腐食生成物解析技術検討	ミクロ組織対応腐食挙動その場分析技術により実現可能性 を提示した	○
	局所腐食電位計測技術開発	μmレベルの微細組織の腐食電位解析技術検討	マルチスケールKFM測定により実現可能性を提示	○
【テーマ番号48】 超高強度薄鋼板の水素脆化に 関する研究基盤技術開発 (FS 研究)	超高強度薄鋼板の水素脆化に 関する研究基盤技術開発	革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な 実験法、解析法等の要素技術見極め	2017年度からFS研究に着手し、水素割れ評価のために必要 な要素技術を見極め、テーマ62を立ち上げ。	△
	マクロ腐食挙動との対比	マイルドな大気腐食環境での腐食特性評価から開発技 術の性能範囲を提示	・フェライト—パーライト組織鋼共通試験材作製、配布 ・2種の共通試験片の大気腐食特性評価開始	△
【テーマ番号61】 超高強度薄鋼板の腐食挙動解析技術の開発	マクロ腐食挙動との対比	海浜環境での腐食特性の評価から測定技術の性能範囲 を提示	・2種の共通試験片の海浜環境での大気腐食特性評価試験 を、軒下と南面30度の2種の過酷度で開始	△
	マクロ腐食挙動との対比	塩分飛来環境での腐食特性評価から測定技術の性能範囲 を提示	・残留Y含有共通試験材作製、配布 ・塩分環境下大気腐食特性評価	△
【テーマ番号62】 局所腐食電位計測技術開 発	微小電気化学計測技術開発	残留Yを含む微細組織の腐食特性を評価できる技術を 提示	・サブμm分解能を見据えた技術、マスキング法、新型ポテ ンシオスタットに目途、新SPM戦力化	△
	局所構造解析技術開発	・異相組織間腐食定量解析技術開発 ・残留Y含有組織の腐食生成物解析技術開発	・顕微ラマン散乱分光装置および、腐食溶出挙動その場解 析技術の戦力化。組み合わせ運用する周辺装置開発	△
【テーマ番号63】 局所腐食電位計測技術開 発	局所腐食電位計測技術開発	共通試験片の腐食起点解析を、大気腐食環境に展開 し、腐食起点解析技術を検証するとともに予測精度を 向上せしめる	・マルチスケール化可能な電位分布計測技術としてのKFM 装置および表面処理装置戦力化、異相組織の中での腐食起 点ピックアップを進めた。	△
	多拠点測定標準共有技術 検討	・全拠点間で注目部位共有化に向けた技術検討検 討、改良	拠点間で同一部位の腐食解析を開始	△
【テーマ番号64】 超高強度薄鋼板の水素脆化 に関する研究基盤技術の開 発	超高強度薄鋼板の水素脆化に 関する研究基盤技術開発	応力、ひずみ及び水素分布の変化が超高強度鋼板の水素 脆化割れに及ぼす影響を明確化	・ひずみ、応力と拡散性水素量H(ppm)の関係を明確化 ・薄鋼板でも最大主応力と水素濃度で水素脆化破壊が生じ ることを明確化	○
	高強度アルミニウム合金を用いた 自動車部品の開発	大型ねじり鍛錬加工装置によるアルミニウム合金の高 機能化実証 溶接構造用アルミ合金の開発 (引張強さ≧250MPa) ファイナードレーザ溶接技術の開発 ベンチマークとなる自動車部材のリバースエンジニア リング	ねじり+押出加工による高機能化の検証を完了。 Al-Mg合金をベースに、強度目標値を達成。 外注によりファイナードレーザ溶接条件の最適化を実施。 対象部材を決定し、リバースエンジニアリングを実施。	△
【テーマ番号14】 アルミニウム材料開発プロセス技術開発	連続電析技術	新電解槽における攪拌法、液供給方法を改良し、長尺 の電析箔を連続的に安定して回収可能な連続電析プロ セスの指針を確定する。	新電解槽での電位、電流密度、温度の影響を調査し、Al電 析挙動を把握。適切な電析手法を確認。長時間の電析を試 みた結果、電解液の色が生じた。電析時に電析反応と電 解液の分解反応が同時に進行するためと思われる。その結 果、電析物中のAl純度が低下することも確認	△
	表面の平滑化	添加剤、電析手法のさらなる最適化により、生産効率 が良く、平滑性に優れた高品質の膜を製造可能な条件 を見極める。	EMIC-ACl ₃ 浴にて、添加剤を加えた電解槽で、高周波数でパ ルス電解を行うことで結晶粒径60nm以下で平滑な電析物が 得られた。	○
【テーマ番号14】 アルミニウム材料開発プロセス技術開発	無水AlCl ₃ 新製法	新電解槽を用いた金属Al作製法の指針を確定する。	ボーキサイト由来のAlCl ₃ ・6H ₂ Oから配位子 (脱水剤) によ り水分子を完全に置換 (脱水) したAl塩を合成可能にし た。そのAl塩を用いた新電解槽を作製し、適切な電解条件 の制御によりAl電析が可能であることを確認。	○
	共析の制御(1)	再生用電解液特性 (限界電流密度および電析速度、操 業電圧の調査、電解液の耐久性等) の把握と展伸材ア ノード使用時の不純物除去能力を把握する。	Mgの共析メカニズムを解明し、制御手法を確立した。	△
【テーマ番号14】 アルミニウム材料開発プロセス技術開発	高速電析技術	電析手法 (浴温、電流波形、攪拌手法等) と添加剤の 最適化による平面方向と板厚方向の電析速度向上手法 を調査する。	EMIC-ACl ₃ 電解槽を用いた際に添加剤、電析手法の制御によ り1.0 μm min ⁻¹ 以上で電析可能であることを確認。電析手法に ついては候補となる他の電解液にも適用可能であると考え られる。	△
	共析の制御(2)	最終目標達成のため中間目標設定なし。	最終目標達成済み。	○
【テーマ番号 21】 複層アルミ 合金の開発	複層合金設計、組織解析・ 制御技術の開発	成形前の伸び(20%以上)、平面ひずみ領域の破断限界ひ ずみ(0.15以上)、成形・熱処理後の耐力(700MPa以上)の 両立	クラッド構成の制御及びプロセス条件の最適化により、第 三中間目標達成の目処を得た。	△

III. 研究開発成果
について

	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
[フレーム番号34] 革新的なマグネシウム合金の材料の開発および信頼性評価	⑤マグネシウム合金の応力腐食特性・耐環境特性評価【相模原分室、再委託先：茨城大学】	新規開発Mg合金 (AX81) の母材及び接合材 (MIG、FSW) 継手部の耐環境特性を明らかにする。また耐環境特性に及ぼす合金組成や金属組織の影響を明らかにする。	高強度高延性を有する母材の機械的特性に及ぼす環境因子の影響について、低ひずみ速度引張力腐食割れ試験と湿潤ガス応力腐食割れ試験により調査した。湿潤環境中での脆化挙動を調査し、評価手法の確立と妥当性を明らかにした。	○	
	⑥高成形性マグネシウム材 (薄板) の開発【伊丹分室：住友電気工業】	合金組成及びプロセス開発により張強さ $\geq 200\text{MPa}$ 、伸び $\geq 25\%$ 、成形性指標であるエリクセン値 $\geq 8\text{mm}$ (室温) の特性をもつ合金開発を目標とする。	マグネシウム合金圧延板材の微細組織や諸特性に及ぼすAlやZn添加の影響を調べ、張強さ 200MPa 、伸び 25% 、エリクセン値 8mm を満足する合金組成を提案した。	○	
	⑦Mg合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【伊丹分室、再委託：長岡技術科学大学】	高強度高成形性Mg合金の衝撃靱性、強度・延性、及び成形性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。また自動車の構造部材に必要な特性を満足するための組織因子を提案する。	種々の加工熱処理条件により作製したマグネシウム合金の諸特性を評価し、靱性や引張特性、室温成形性に及ぼす各種組織因子の影響を明らかにし、高強度・高延性と優れた室温成形性を両立するマグネシウム合金厚板材の組織因子を提案した。	○	
	⑧高強度難燃性マグネシウム合金の押出し成形技術開発【長洲分室：不二ライオン】	開発合金AX92を用いたJIS H4204を満足する気密疲労構体の床部材2種、横梁部材1種を作製する。また、長さ 12.5m の長尺押出成形材(床部材)を作製する。	開発合金AX92を用いてJIS H 4204を満足する気密疲労構体の床部材2種、横梁部材1種を作製した。また、長さ 5.5m の長尺押出成形材 (床部材) を作製した。	△	
	⑨高強度難燃性マグネシウム合金ピレット製造技術開発【長洲分室、再委託：戸畑製作所】	テーマ⑧の押出成形材を作成するために必要なピレットの製造技術を確立する。	AX92合金の押出成形材を作製するのに最適なピレットの製造条件を確立した。	△	
[フレーム番号35] 革新的なマグネシウム合金の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発	①-1. Mg合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体製作指針の確立 (横浜金沢分室：(株) 総合車両製作所)	新難燃性マグネシウム合金材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体の製作指針を確立する。	各種接合方法がMg合金に適用可能であり、その接合技術を確立した。その各種接合方法を適用して鉄道車両構体の試作を実施することで、製作指針を実証確認することができた。	○	
	①-2. Mg合金部材のMIG溶接技術の確立 (木ノ本伸線 (株))	新難燃性マグネシウム合金製の長尺部材による連続MIG溶接を達成する。	ローア回転法のビードオン試験及びパワレール移動法の溶接試験により連続MIG溶接の可能性確認済み。2020年度中に溶接試験部の評価予定。今年度中に達成見込み。	○	
	①-3. FSWによる各種難燃性Mg合金の接合継手特性評価 (産業技術イノベーションセンター)	摩擦攪拌接合による各種難燃性Mg合金の継手効率 80% 以上を目指す。また、長尺部材を健全に接合できる摩擦攪拌接合ツールを開発する。	平板において、提案しているツール形状で新規開発各種難燃性Mg合金での接手効率 80% 以上は達成しており、その改良により、実型材 (中空) への適応が可能である。	○	
	①-4. 難燃性Mg合金大型展伸材の接合品質の非破壊検査技術の高度化 (つくば千原分室：物質・材料研究機構)	接合欠陥の2次元位置検定を行う。また、無線AE計測システムとMIシステムを接続し、計測データを活用できる基盤を整備する。	1次元検定を2軸組み合わせた2次元欠陥位置検定が可能となった。また、MIシステムにワークフローを制御するAPIが実装され、計測データの解析が可能となった。	○	
	①-5. 難燃性Mg合金部材の構造物としての特性評価及び設計指針の構築 (明石分室：川崎重工業 (株))	新難燃性マグネシウム合金製構体の構造要素の強度、製作性及び耐食性を検証する。	疲労強度改善が見込まれる溶接接合を開発し気密疲労試験構体に適用し製作性を検証した。また、気密疲労試験の環境における構体材料の耐食性についても実証した。2020年度末までに、構造要素として構体一般部の気密疲労強度を実証する見込み。	△	
	①-6. 難燃性Mg合金の二軸応力下における疲労強度特性評価 (立命館大学)	二軸疲労試験手法の構築ならびに多軸度および材料異方性を把握するための試験データを取得する。また、二軸応力下の疲労強度特性評価手法を提示する	二軸疲労試験を実施するために、試験体の形状決定・試作・検証および試験装置の製作を行った。	△	
	①-7. 難燃性Mg合金の腐食データベースの作成、及び難燃性Mg合金製車両構体の表面処理仕様書の確立 (小牧分室：大日本塗料 (株))	これまでに開発した表面処理法を車両に適用するための、部位別の塗装仕様を構築する。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータをDB化する。	部位別の塗装仕様は構築し現在大気暴露試験に懸念中。2020年末の回収結果をもって判断しDB化の上終了予定。今年度中に達成見込み。	△	
	①-8. 難燃性Mg合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発、及び難燃性Mg合金の腐食データベースの作成 (ミリオン化学 (株))	プロジェクトで開発した化成処理技術の確立を目指す。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータをDB化する。	化成処理技術については確立済み。促進試験での取得データも取得済み。屋外暴露結果については、2020年末の回収結果をもってDB化し終了予定。今年度中に達成見込み。	△	
	①-9. 難燃性Mg合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明 (芝浦工業大学)	耐食メカニズムの解明を継続して進めると共に、表面処理による耐食性への効果、及び微量添加元素や組織形状が及ぼす腐食挙動の影響について調査解明する。	腐食メカニズムの解明、および表面処理の有効性、処理剤の組成の硬化につき、信頼性の裏づけデータとしての解明終了。	△	
	②-1. Mg合金による自動車部品試作、性能評価 (湘南分室：(株) トヨタC&D)	実車に搭載されている自動車フロントフードを調査し、部品としての目標特性を明確化する。部分試作、実車部品製作を行い、設計、成型条件の構築を行う。	19年度末までに、フロントフードの目標特性の明確化の完了済み。今年度以降、フロントフード1/1スケール製作の実施による、プレス成型条件の構築する予定。	○	
	②-2. Mg合金-Al合金の同時化成処理技術の開発 (平塚分室：日本バーカライジング (株))	マグネシウム合金板材の表面処理性を評価し、自動車フロントフードに最適な合金組成チューニングに連携する。また、異種材料同時処理可能な化成処理技術の基本設計を行う。	Zr化成処理により、Mg-Al同時化成処理が可能となることを見出した。自動車向け電着塗装に最適化することで適用が可能。	△	
	②-3. Mg合金-Al合金の同時化成処理条件の最適化 (ミリオン化学 (株))	提供されるマグネシウム合金板材の表面処理性を従来技術および②-2で開発した技術を用いて最適化し、表面処理性を評価、明確化する。	他の金属と同様に、Mg合金に対する皮膜付着量の制御が可能であることが確認できた。これにより、自動車向け電着塗装に最適化することができ、最適付着量範囲の明確化が可能になる。今年度中に達成見込み。	△	
	③-1. Mg合金の各種信頼性 (疲労特性、腐食特性、成形性等) データベースの構築 (名古屋山分室：産総研)	開発した難燃性マグネシウム合金の疲労特性、電気化学特性を評価する。また、自動車用マグネシウム合金の各種特性 (成形性、耐食性) を系統的に評価する。	他の分室と共同で難燃性Mg合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。易成形性Mg合金の成形性も系統的に評価中。今年度中に目標を達成見込み。	△	
	③-2. Mg合金の輸送機器への適用に関する技術動向調査 (日本マグネシウム協会)	国内外で実施されるセミナー、学会等により、開発される鉄道用、自動車用マグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法の標準化に向けた課題と問題点を明らかにする	国内外で実施されたセミナー、学会等により、自動車等輸送機器部材向けマグネシウム合金等の材料開発、プレス成形・接合・表面処理等の二次加工技術の動向、適用動向を調査し、開発されるマグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法等に関する課題や問題点を抽出した。	○	
	③-3. Mg合金の接合プロセスの開発と接合部の強度信頼性評価 (長岡技術科学大学)	自動車部品を想定した接合部の応力状態に基づき、異なる接合プロセスにより得られた各種接合部の強度信頼性を評価・比較する。強度支配因子と接合部の応力状態から接合部の設計法を提案する。	自動車で広く適用されている抵抗スポット溶接とセルブアスリベット (SPR) 接合を難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金の共材および異材接合に適用した。それぞれの接合部の強度特性や接合部の状態を明らかにした。破壊メカニズムおよび強度支配因子を継続して検討し、実用的な接合部の設計法を今年度中に提案する見込み。	△	
	③-4. 易加工性Mg押出部材の開発 (射水分室：三協立山 (株))	新規難燃性高速押出合金による大型・長尺ダブルスキン材の製造プロセス技術を確立する。また、自動車ドアビーム部材への適用を実現する、易加工性高強度押出成形材の製造プロセス技術を確立する。	気密疲労モックアップ構体の設計仕様に基づく大型中空押出成形材 (全17型) の作製を完了。自動車ドアビーム部材に要求される強度と易加工性を兼ねた新規高強度押出Mg合金を開発。実機による実部材の製造プロセス技術を構築中。	△	
	③-5. 高強度Mg材 (中板・厚板) の開発 (相模原分室：植田金属工業 (株))	鉄道用材料では、開発合金のスケールアップ技術を開発し、実用性を達成するための課題を明確化する。自動車用材料では、合金組成と圧延プロセスの最適化により、フロントフードに要求される諸特性を持つ材料を開発する。	幅広い圧延板材作製条件と各種特性および組織変化の関連付けにより、実機を用いて特性低下要因を調査中。他分室と連携し継手疲労試験は継続中。これまでに得た知見を基に気密構体部材の作製を行った。	△	
	③-6. 高成形性Mg材 (薄板) の適用技術開発 (伊丹分室：住友電気工業 (株))	自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金板材を開発する。また、作製し成形性、表面処理性の基礎特性を各々のプロセス開発担当機関と連携して評価する。	他の分室と共同で難燃性Mg合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。易成形性Mg合金の成形性も系統的に評価中。今年度中に目標を達成見込み。	△	
	③-7. Mg合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明 (長岡技術科学大学)	高強度高成形性マグネシウム合金の強度・延性、成形性、および表面処理性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。	マグネシウム合金板材の強度・延性や成形性に及ぼす各種組織因子の影響を明らかにし、 8mm を超えるエリクセン値と良好な引張特性を兼ねた板材を開発した。	△	

	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
革新的なマグネシウム材の製造技術の開発 【テーマ番号53】	③-8 高強度難燃性Mg合金の押出し成形技術開発(長洲分室:不二ライオン(株))	開発合金AX92を用いた気密疲労試験機体の部材を作製する。また、AX92を自動車構造部材向けにチューニングした合金を用いてドアビーム部材を試作する。	開発合金AX92を用いて気密疲労試験機体の部材(床材、梁材)を作製した。自動車構造部材向けにチューニングした合金で耐力の目標値を達成、伸びを改善して今年度中にドアビーム部材を試作達成見込み。	△
	③-9 高強度難燃性Mg合金ピレット製造技術開発(戸畑製作所(株))	テーマ③-8の押出し部材を作成するために必要なピレットの製造技術を確認する。	AX92合金の押出し部材を作成するのに好適なピレットの製造条件を確認した。また、AX92のチューニング合金ピレットの製造条件を評価し2020年度中に達成見込み。	△
	③-10 低温高成形性Mg合金展伸材の適用技術開発(板橋分室:日本金属(株))	プレス温度の低温化と強度特性を両立するマグネシウム合金展伸材の製造技術を確認する。自動車フロントフードの製造に必要な材料仕様を検証し、部材化に必要な特性を満たす板材の提供を目指す。	合金開発によってプレス温度の低温化と高強度化に取り組んだ。結果、室温エリクセン値で8.6mmと目標値(8.0mm)を大きく上回り、室温深絞りによる試作も成功した。また、小型フード形状試作においても150℃(目標値以下)での成形を達成した。しかし、強度は目標値(耐力130MPa以上)を120MPaと下回った。	△
	③-11 Mg合金の加工時の組織評価(つば千現分室:物質・材料研究機構)	自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金として時効硬化を利用した合金の組織評価を行い上記部材に適した合金組成チューニングの指針を提供する。	合金元素添加が室温成形性と引張り特性に及ぼす影響について検討し、8mmをこえるエリクセン値を発生させるための組織設計指針を導出。	△
【テーマ番号60】 マグネシウム材の性能・寿命に関するデータプラットフォーム(MI) 活用技術の開発	①-1 各種寿命予測計算モジュールの開発(物材機構、(再)東大(履))	熱弾塑性計算とX-FEMによる長い疲労き裂進展シミュレーションを組み合わせて、難燃性マグネシウム合金継手の疲労性能の予測を行う。	結晶塑性有限要素解析による母材の疲労寿命予測手法を確立した。2020年度末までに、熱弾塑性計算とX-FEMを組み合わせて、難燃性マグネシウム合金継手の疲労性能予測が達成される見込みである。	△
	①-2 計算モジュールの実験的検証(物材機構)	AX41,81,92合金の微小疲労き裂発生・進展データベースを用いて各種合金(母材・接合材)の残留応力の測定を実施し、残留応力測定手法の高度化を行う。	AX41合金の母材および再現HAZ熱処理材について、微小疲労き裂発生・進展データベースを構築し、0.1mm以上のき裂進展は破壊力学に従うこと、溶接部を模擬した熱処理により有意な疲労強度差が生じないことを明らかにした。また、残留応力測定手法の高度化を前倒して完了した。	△
	①-3 計算モジュールのMIシステムへの組み込み及び使い込み(物材機構、川崎重工、総合車両)	開発した性能予測システムが構体設計に適用できるかを評価する。	MIシステムを利用した計算が設計に資するテーマを設定し①-1と開発を開始した。また、SIP-MIシステムが利用できる体制を確認した。	△
	②-1 信頼性予測のためのデザイン設計(産総研、(再)東大(白岩))	難燃性Mg合金信頼性データベース構築および特性予測モデルの確立	プロセスデータから特性を予測するモデルを構築した。長期性能予測についての取り組みを開始した。	△
	②-2 難燃性マグネシウム合金の機械的特性および疲労特性データベース及びモデル式の構築(産総研、物材機構、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライオン)	「革新的なマグネシウム材」研究のデータを継続しDBを完成させる。また、完成したDBを利用して、理論と経験に基づく特性予測の妥当性を検証する	サブテーマ②-7と連携し、母材の機械的特性および疲労特性をデータベース化するためのテンプレートを作製済み。2020年度中に打ち込みを終える見込み。また、機械的特性に関する特性予測式を導出できる見込み。	△
	②-3 難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性データベースの構築(総合車両、(再)大阪府大)	難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性データベースの完成とそれを用いた理論と経験に基づく特性予測式(機械的特性)の妥当性検証	様々な条件で作製した溶接継手の機械的特性および疲労特性データを取得し、溶接プロセス、継手組織、機械的特性、疲労特性に関するデータの紐付け作業を実施した。MIQ溶接継手の機械的特性を予測するための、溶質元素固溶濃度と継手強度の関係、晶出物の体積分率と伸びおよび継手強度の関係などに関する理論と経験に基づく予測式を導出した。溶接条件と継手強度の関係について、機械学習を用いた予測を行った。	△
	②-4 難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築(産総研、大日本塗料)	データの紐付け作業を継続的に実施し、腐食データベースを完成させる。また、重回帰分析等によるモデル式を完成させる。	大気暴露試験77データ、加速試験165データをデータベース化した。大気暴露試験データの重回帰分析を実施し、相関係数0.947の高い精度で腐食減量を予測することができた。極値統計に基づく最大侵食深さを目的変数新たに追加し、結果の重回帰分析も併せて実施した。	○
	②-5 マグネシウム合金母材および溶接継手の寿命予測式の構築(産総研、(再)九大)	材料・溶接プロセスを考慮した疲労強度の予測法の提案、および設計法の実証、高精度化	破壊力学に基づく疲労強度の予測法を提案した。合金元素の影響や溶接プロセスの影響などを下限界応力拡大係数として考慮する手法の有効性を示した。実用上重要な平均応力の影響について明らかにした。	○
	②-6 難燃性マグネシウム合金の衝撃特性評価技術開発(産総研、再委託先:神戸大)	難燃性マグネシウム合金の継手材について、高速変形特性を予測するためのデータベースを構築し、難燃性マグネシウム合金および継ぎ手材について構築した特性予測式を完成させる。	マグネシウムの高速変形特性に及ぼすカルシウムの添加効果について、応力とひずみの関係性を定式化した。また、難燃性マグネシウム合金(AZ612, AX41, AX92)について、幅広いひずみ速度にわたる一軸圧縮および引張試験を実施し、衝撃特性に関するデータベースを作成した。	△
	②-7 データベースのMIシステムへの組み込み及び使い込み(物材機構、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライオン、大日本塗料、総合車両、川崎重工)	WFのユーザテストと、MIシステムによる入出力パラメータ空間の自動探索で各モジュールのロバスト性と精度の情報を開発者にフィードバックしながら完成度を高める。	プロセス・組織データを含んだデータベースの意義をプロジェクト内で確認し、各プロセスのテール設計を行い、データを収集した。収集されたデータは②-1などへ提供され、プロセスデータを含めることにより予測性能が高まること示された。	△
【テーマ番号10】 チタン材の重量減産技術の開発	1.チタン低炭原料の溶解脱酸技術の開発	・脱炭溶解を実現する実機プロセスの技術課題明確化。(酸素濃度:300ppm以下) ・現行材比で強度20%向上のスケールアップ検証。	低炭原料の模擬した初期酸素濃度の原料を目標値(300ppm)以下に脱炭できる技術を活用したプロセスフローを考案し、この技術を実験で検証した。	○
	2.異質製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	・実機規模の試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率0.2%以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 ・高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より30%向上。	・実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率0.2%以下)を達成。 ・スポンジチタンからチタン梱包体(熱間圧延用の素材)を製造する方法を提案。 ・高機能化のために適正な材料選定をおこなうことで、薄板の引張強度・延性バランスの目標(現行材より30%向上)を達成。	○ △
【テーマ番号11】 チタン新製錬技術の開発	チタン新製錬技術の開発	・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、Fe≦2000ppm、O≦1000ppmのチタン箔の試作 ・実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討 ・Fe≦2000ppm、O≦1000ppmの純度で、現行ロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を開発	・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、O≦1000ppm、Fe≦2000ppmのチタン箔を製造 ・実用化の課題抽出および対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討を実施。 ・Fe≦2000ppm、O≦1000ppmの純度となる製造技術を確認	○ ○ △
	実機スケールで、 ・Fe≦200ppm、O≦150ppm、Cl≦300ppmのスポンジチタンを製造 ・A級スポンジチタンの歩留まりを85%から92%に向上	実機スケールで、以下を実現可能な技術を確認 ・Fe≦200ppm、O≦150ppm、Cl≦300ppmのスポンジチタンの製造技術を確認 ・A級スポンジチタンの歩留まりを85%から93%に向上する技術を確認	○	
	・製造リードタイムを30%低減	・還元反応と真空分離のリードタイムを、それぞれ30%、18%低減に成功。	△	
【テーマ番号12】 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	2015年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための課題点を抽出 【2015年度で終了し、テーマ11へ統合】	Fe汚染低減、O汚染低減、Cl汚染低減、分離工程短縮等、各種要素技術の実機スケール試験を行ない、効果と課題点を検証した。	△

	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	
【フレーム番号S1】 革新炭素繊維製造技術の開発	(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立	完全耐炭化した前駆体ポリマーからなる繊維を焼成した炭素繊維物性は直径5.5μmで強度37GPa、弾性率210GPaまで達することができた。さらに、ラージトウ（48K）製造基盤技術を検討し、安定凝固した後低速で巻取可能であることがわかった。	△	
	マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	PAN系前駆体繊維を耐炭化した耐炭繊維を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウの炭素化実験において、プロセス技術の深化によって引張強度3.4GPa、引張弾性率230GPaを有する炭素繊維の安定的な製造に成功した。また、弾性率の調整を可能とする技術を開発し、260GPaを示す高弾性率の炭素繊維を製造することに成功した。ラージトウの炭素化実験においても、引張弾性率250GPaを示す炭素繊維の製造に成功しており、本プロセス技術がラージトウにも適用可能である見通しを得た。このプロセス技術を深化させる過程で、炭素化をコントロールするキープバスの開発や、新設計のマイクロ波炭素化炉の追加など、それに伴う加熱メカニズムや構造形成過程の仮説を検証し解明した。確立したプロセス技術を用い、コンボジット評価用の炭素繊維の長尺品の試作に漕ぎつけた。	△	
【フレーム番号Z1】 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発	(e)LFT-D成形の要素技術の開発	・混練プロセスを完成し、LFT-D中間基材と成形部材の材料特性DBの一部を構築。 ・試験法標準化の進捗を実施。 ・成形プロセスも扱う力学モデルの高度化を行い、CAE解析ソフトに組込む。 【2017年度で終了】	・物性の支配因子である繊維長と分散の分析評価法について課題を明確化した。 ・独自の繊維長（分布）及び配向測定法を確立した。 ・LFT-D材の圧縮特性の基礎データを取得した。 ・成形流動及び反り変形のCAE予測手法について、実測データとの突き合わせにより、精度向上を行った。	○	
	(f)大物高速成形技術の開発	・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。 ・ハイブリッド成形技術を詳細まで含めて確立する。 ・高速マテハン技術の要素技術を確立する。 ・非破壊検査技術の要素技術を開発する。 【2017年度で終了】	・LFT-D成形基幹設備の改良が完了し、設備システムが完成した。 ・精度向上のためのマテハンの改造を行った。 ・安定的なフルバック成形条件を確立した。 ・LFT-D最適設計法の概念を構築し、Hat材での試行を行った。 ・構造要素試験を実施し、予測との良好な整合性を確認した。 ・LFT-D/補強材ハイブリッド成形技術の基本技術を確立した。 ・3次元超音波探傷NDI検査を行い、接合界面の健全性を確認した。	○	
	(g)大物高速接合技術の開発	・熱可塑性CFRP使用部材同士の高速接合技術を確立する。【2017年度で終了】	・部分構造試験により超音波融着の十分な接合強度を確認した。 ・実証構造の融着接合システムを完成し、融着接合トライを行った。	○	
	(h)意匠性外板製造技術の開発	・LFT-D成形板の光学特性を解明し、高意匠性外板製造に関する基礎を構築する。 【2017年度で終了】	・意匠性のパラメータである表面粗さの発生メカニズムを解明する熱収縮1次元モデルを構築し、検証した。	○	
	(j)LFT-D高速成形最適化技術の開発	(j1)LFT-D成形材の物性向上の研究を行う。弾性率25GPaを目標とする。		(j1)LFT-D物性向上の新アプローチによるLFT-D成形により、実験レベルで従来比約30%向上、ばらつき約半減の結果を得た。 本成形法の大型高速化のため新LFT-D大型成形設備システムを構築した。本設備を用いた物性向上度について2021年度に検証する。 LFT-D薄板化に取り組みリアパネル一般部板厚が約20%～30%改善した。	○
		(j2)LFT-D中間素材の繊維分散等の繊維性状の定量的評価法を開発する。		(j2)タルボ・ロー干渉計による繊維性状（繊維配向、Vf、分散性）の高速測定、定量評価、可視化・表示技術を新規開発した。	
		(j3)LFT-D混練CAE技術の研究を行う。また、プレス成形CAE技術を確立するとともに、プレス成形に伴う繊維配向異方性を考慮した最適設計CAE技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。		(j3)小型LFT-D機での繊維長サンプリングデータにより混練CAEの精度検証を行った。プレス成形CAEについて実用レベルの技術を確立した。繊維配向異方性を考慮した成形・設計連成CAEを開発し、剛性最適設計を検証した。	
		(j4)プレス成形に伴う反り変形の抑制技術を開発するとともに、LFT-D成形材同士の溶着接合界面のNDI法を開発し、安定品質を得る高速溶着接合技術を開発する。		(j4)反り変形のCAE予測による金型修正等の方策により面隙度が改善した。溶着接合界面のNDI基準を明確化し、品質と強度要件を満足する接合条件を設定、検証した。	
		(j5)革新炭素繊維LFT-D成形に関する検討を行う。		(j5)革新炭素繊維を用いたLFT-D成形性評価について検討を行った。	
	(k)熱可塑性CFRPマルチマテリアル成形技術の開発	(k1)その場重合成形による連続繊維プリフォームとLFT-D中間素材とのハイブリッド成形技術を開発する。また、新創案の非混練フレック法によるフレック繊維とLFT-D中間素材とのハイブリッド成形法の基礎技術を開発する。		(k1)その場重合成形（T-RIM）によるNCF連続繊維プリフォーム補強材の成形技術およびLFT-D中間素材（フロン）とのハイブリッド成形技術を開発した。 T-RIM連続引抜成形の基礎技術を開発するとともに、UDテープから製作した非混練フレック繊維とLFT-Dフロンとのハイブリッド成形法の基礎評価を行った。	○
(k2)ハイブリッド成形の高速マテハン技術・設備を開発するとともに、ハイブリッド成形を適用したマルチマテリアル自動車部品設計および試作評価を行う。			(k2)T-RIMプリフォーム成形用800トンプレス機および付帯設備の設置を完了した。プリフォーム補強材とLFT-Dフロンとのハイブリッド成形用、1・2期に構築した3500トンプレス機ハイブリッド成形用設備およびマテハンシステムの改良検討を行った。		
(k3)熱可塑性CFRPマルチマテリアル設計法に関する基礎データを取得する。			(k3)ハイブリッド成形ドア構造の設計を行い、ハイブリッド構造の優位性を確認するとともに、設計・成形データを取得した。EV車のCFRTP実証構造の設計、部品試作を実施し、マルチマテリアル設計に関する基礎データを取得した。		
(l)熱可塑性CFRP評価・解析技術の開発	(l1)熱可塑性CFRPの動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行い、材料特性予測の基礎技術を開発する。		(l1)LFT-D材の疲労特性の評価を実施した。X線CTおよびタルボ・ロー干渉計によるLFT-D材料特性（Vf、ひずみ分布、配向）評価に関する精度向上の研究を行った。 引張・圧縮強度予測理論モデルの検証（海技研）、大規模シミュレーションによる強度予測の検証（東京大学）、およびマルチスケールモデルによる力学特性シミュレーション（名古屋大学）を行い、材料特性予測の基礎技術を開発した。	○	
	(l2)材料データベースの一部を構築する。		(l2)成形トライ水準と紐づけたLFT-D材の物性データを収録したマスタテーブルを更新するとともに、圧縮、疲労特性に関する基礎データを取得、評価した。		
	(l3)熱可塑性CFRP試験法標準化の調査・検討を行う。		(l3)LFT-D材の疲労試験法（両振曲げ）の有効性を確認するとともに、有意なSNデータを作成した。		
	(l4)構造設計CAEに用いる実用的な材料モデルを提案する。		(l4)粘弾性モデルと損傷則を用いたLFT-Dの応力ひずみ非線形特性の予測、評価を行い、材料モデルを作成した。		
(m)自動車向リサイクルCF適用化技術の開発	(m1)航空機CFRP廃材および自動車用尿素タンク廃材等の多様なCFRP廃材からリサイクルCFを効率的に回収できる過熱水蒸気処理プロセスの開発を行う。		(m1)尿素タンク廃材および航空機CFRP廃材からリサイクルCFを高效率に回収可能な新過熱水蒸気処理炉を導入し、CF回収処理プロセス・条件を確立した。 回収CFの単糸強度および界面強度を同時評価できる新ブラグメンテーション試験法を開発するとともに、標準化の検討を行った。	○	
	(m2)リサイクルCFおよびLFT-D工程内廃材を用いたLFT-D成形技術を開発する。		(m2)リサイクルCFのLFT-D成形用のサイドフィードを開発し、NCC大型LFT-D押出機に装着するとともに、成形性の基礎評価を行った。また工程内廃材のLFT-D成形性を評価した。		
	(m3)LCA評価法に関する基礎的な調査を行い、LFT-D成形CFRPに関するLCAの予備的な評価を行う。		(m3)CF回収～LFT-D成形工程における消費エネルギーの基礎データを取得した。		

	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
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発 【テーマ番号278】	リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発	リサイクル炭素繊維の平均的な機械特性を効率的に評価するための評価試料の作製手法を確立し、評価解析手法を開発する。	配向繊維束を用いた引張試験の開発において、試験片作製・試験方法、解析技術の開発により、機械特性に関するパラメータを効率的に抽出する手法の基盤を確立した。配向繊維束と樹脂を複合化した複合材料を用いた界面強度の評価手法の開発を進めている。	○
	リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を同定・定量するための評価手法および不純物元素分析の原理手法を確立する。	CFRPから回収したCFに付着している炭素残渣量を定量するため、CFおよび炭素残渣の酸化反応性を検討し、COやCO ₂ の発生量をQCで定量分析するための技術を開発している。不純物元素の分析について、揮発性元素と揮発性元素それぞれに適した前処理法の開発を進め、種々の不純物元素が検出可能であることを確認した。	○
超軽量CFRP/CFRPハイブリッド部材の開発 【テーマ番号279】	①CFRTP/CFRP複合パネルの開発	複合パネルの曲げ剛性で、スチール比50%軽量化の実現	本テーマは2020年4月に開始しており、特記事項なし	△
	②CFRTP/CFRP複合パネルの形状賦形	CFRTPフォーム材の形状賦形限界の見極め 複合パネルの技術課題抽出	同上	△
	③CFRTP/CFRPハイブリッド部材の形状設計	50%軽量化を実現できる部材の見極め	同上	△
	④CFRTP/CFRPハイブリッド部材の成形	なし(2021年度開始)	同上	△
熱可塑性CFRPの開発及び構造技術の開発 【テーマ番号280】	①熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術の開発	現在のスチール製量産車と同等の接合強度の実現 接合強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで±10%以下とする接合技術の確立 現在のスチール製量産車と同等のライン速度1台/分を実現する指針の策定と供試体による検証 【2017年度で終了】	各種機械締結法・接着での接合方式、接合形状における表面処理・耐久性を含めた強度データベースの構築を行った。上記の実験結果と有限要素法(FEM)解析から、供試体レベルで予測結果と実験結果の誤差が10%以内の精度となる接合強度予測接合技術の確立を見出した。実装/高信頼性な高速プロセスに焦点を絞り、検討した。	△
	②(a)熱可塑性CFRPの中間基材の開発	当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立 重要特性の変動係数5%以内 【2017年度で終了】	①および②(b)(c)(d)からの要請に基づく中間基材を提供し、各々目標達成した。 重要特性の変動係数5%以内を達成した。 特にCMTでは長期耐久性(疲労)シミュレーション技術構築するとともに、クラッシュカンを成形し、GMT比エネルギー吸収量60%向上を達成した。	○
	②(b)熱可塑性CFRPの性能評価技術の開発	開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究 動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性(ひずみ速度依存係数、温度依存係数)の測定誤差(変動係数)が10%以下となる試験法の確立 【2017年度で終了】	開発材料の曲げ損傷メカニズムや温度・速度・時間依存といった動的挙動を実験的に解明した。 また、それをCAE用の材料モデルとして定式化し、数値シミュレーションでの再現性を確認した。 開発した試験法によって動的挙動(強度・弾性率の温度速度依存関係)の理論値に遜色ない実験結果を得た。	○
	②(c)熱可塑性CFRPを用いた構造設計技術の開発	スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを60%軽量化する構造の提案 開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチマテリアルボディで30%以上の軽量化を実現する構造の提案 【2017年度で終了】	②(a)、並びに、②(b)の検討を元に、汎用CAEソフトウェアを用いながら、これまで実現されなかった構造CAE解析技術を開発し、60%軽量化を実現するための設計技術を確認した。 中空部材およびパネル部材の使用割合を最適にすることで、剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、60%軽量化可能な構造を提案した。 また、現時点で想定される長期耐久性リスクを考慮した、30%軽量化達成可能な構造を提案した。	○
	②(d)熱可塑性CFRPの成形加工技術の開発	②(c)で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基に、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間1分以内での成形加工技術の開発 【2017年度で終了】	開発した中間基材で800トンプレス機及びロボット周辺機器を使用し、10MPa以下成形技術開発に取り組んでいる	○
アルミニウム/CFRP接合技術の開発 【テーマ番号01】	プロセス開発	Al/熱硬化CFRPのFLJでCFRP母材破壊レベル 【2017年度で終了】	①接合ポテンシャル把握 ・接合部短時間昇温可能 Al/熱硬化CFRPでは熱硬化CFRP表面に熱可塑性接着層を形成させ、接合基材をアルミ/CFRP間に挿入して接合することで母材破壊レベルを確認。 ②接着層、接合基材の設計が重要である。	△
	CFRP設計	Al/熱硬化CFRPのFLJでCFRP母材破壊レベルとなるCFRP設計 【2017年度で終了】	③指針確立(熱硬化) 熱硬化CFRP表面への熱可塑性接着層形成および、アルミ/CFRP間への接合基材挿入が必要であることを確認。	△
	接合データベース構築	Al/熱硬化CFRPのDB構築 【2017年度で終了】	④適正接合条件設定 Al/熱硬化CFRPで接合条件マップ作成開始 ⑤接合法ベンチマーク 接合分科会で評価開始	△
炭素繊維/樹脂/樹脂/炭素繊維の接合技術の開発 【テーマ番号02】	抵抗スポット溶接	1.2GPa中高炭素鋼板でJIS-A級の70%の継手強度 【2017年度で終了】	新スポット溶接でナゲット拡大により、せん断継手強度目標を達成した。	○
	線接合	1.2GPa中高炭素鋼板で継手効率70%以上 【2017年度で終了】	レーザーについては実質接合範囲の拡大と溶接金属部の組織改善により継手の目標強度を達成した。 FSWについては低入熱溶接により接合強度改善が見込まれており、その知見の適用で目標特性達成を図る。	○
炭素繊維/樹脂/樹脂/炭素繊維の接合技術の開発 【テーマ番号02】	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達成案として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%を目標	走査型電子顕微鏡にコンタミ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。	○
中高炭素鋼の革新接合技術の開発 【テーマ番号03】	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)平面至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目標達成に目標を得た。	○
	1-1)アークスポット溶接部の静的継手特性改善(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 【2017年度で終了】	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(名古屋大学)	1.5GPa級中高炭素鋼の疲労特性明確化 【2017年度で終了】	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(大阪府立大学)	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化 【2017年度で終了】	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 【2017年度で終了】	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(大阪大学)	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(大阪大学)	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(秋田大学)	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)摩擦接合プロセスの数値解析技術の化初(大阪大学)	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	No.46へ移行	—	

	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
【テーマ番号07】 中高炭素鋼/FRP等樹脂材料の接合技術の開発	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 【2017年度で終了し、テーマ33へ移行】	開発材を想定した高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用したPHM-FSW法により従来FSWと比較し、3倍以上の接合速度を達成。	◎
	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 【2017年度で終了し、テーマ33へ移行】	PHM-FSW法において、厚さ1.4mm、強度1.2GPaの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%以上を達成見込み。	△
	アルミニウム/CFRPの点接合技術	・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	・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	・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	・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。	△
【テーマ番号08】 鋼材/CFRP等樹脂材料の接合技術の開発	異材接合部の評価解析(ガルバニック腐食)	・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	・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)	・熱歪み解析手法を部品構造で検討	・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。	△
	異材点接合の通用研究(2016年度からテーマ化)	・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) ・革新鋼材のドラインバクトバーとしてのポテンシャルの明確化	・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 ・革新鋼材、革新鋼材製ドラインバクトバーを試作・評価し、ポテンシャルを把握した。	△
	(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。【2017年度で終了】	酸化物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐久損性を両立。	◎
【テーマ番号09】 中高炭素鋼/中高炭素鋼のフリグロスプロセス技術の開発	(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。【2017年度で終了】	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐接着性を改善。 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	1.2GPa級鋼板(1.4mm)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。【2017年度で終了】	ツール形状の改良により、1.2GPa級鋼板、1.5GPa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	1.2GPa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。【2017年度で終了】	1.2GPa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	1.2GPa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。【2017年度で終了】	1.2GPa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。【2017年度で終了】	1.2GPa級0.45C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靱性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。【2017年度で終了】	継手の破断経路と接合部ミクロ組織から、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	1.2GPa級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。【2017年度で終了】	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1.2GPa級鋼板の接合挙動の把握。【2017年度で終了】	1.2GPa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。	○
	【テーマ番号08】 鋼材/CFRP等樹脂材料の接合技術の開発	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≧母材層間剥離強度 【2017年度で終了】 ・電食による接合部腐食の評価手法の確立 【2017年度で終了】 ・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 【2017年度で終了】	・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 ・電解質を介し単極自然電位測定で腐食の可能性を評価する手法を確立した ・鋼とCFRPを最適に部材配置した複合I桁構造と複合II桁構造を開発した。複合II桁構造の中間部の単位長重量は同じ耐荷力の鋼桁構造の3/4であった。
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 【2017年度で終了し、テーマ33へ移行】	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 【2017年度で終了し、テーマ33へ移行】	Ti合金(厚み6～10mm)は母材強度の98%、超ハイテン鋼(厚み1.4mm)1.2GPa ISMA共通鋼)は母材強度と同じ(100%)の接合強度を確認。	○
【テーマ番号09】 木部/鋼材/中高炭素鋼/中高炭素鋼の接合技術の開発	FSWツール開発	①Ti材接合深さ：10mm以上の実証 【2017年度で終了し、テーマ33へ移行】	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。	○
	革新的新構造材料等研究開発	平成27年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する 【2015年度で終了】	・Ar-FAB、UVUによる表面汚染層の除去条件を把握した ・接合前処理により、水和物架橋のためのM-OOHが形成されたと推測された。 ・鋼/Alの接合界面には、アモルファス状のFe、Al化合物が認められたことから、脱水縮合反応による接合がなされたものと推測された。 ・接合した継手強度は、当初の目標（FSJ継手と同等）には、至らないものの、局所的に強固な接合がなされている可能性が示唆された。	○
【テーマ番号09】 中高炭素鋼/中高炭素鋼の接合技術の開発	研究テーマ目標	(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2mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、母材強度の70%以上	(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。 (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材に対して摩擦接合を行い、引張強度1105MPaの継手を得た。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。	○
	①両面複動式（フラット）摩擦接合装置の開発（ISMA、日本製鉄、阪大）	両面複動式摩擦接合装置を用い、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、中高炭素鋼のフラット摩擦接合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FSW接合部を得ることに成功した。	○
	②線形摩擦接合法の開発（ISMA、日本製鉄、阪大）	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。	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。	○
	③X線透過装置を用いた摩擦接合の塑性流動基礎解明（JFEスチール、阪大）	両面複動式摩擦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。	複動式ツールを用いてショルダー部とフープ部の回転を独立して制御し、撚り部の形成に及ぼすショルダー部とフープ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なるとともに、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確に観察することに成功した。	△
【テーマ番号09】 中高炭素鋼/中高炭素鋼の接合技術の開発	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）	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。	厚み1.4mm、強度1.5GPaの鋼板である1.5QT材の重ね摩擦接合継手において、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材の突合せ摩擦接合継手において、1105MPaの引張強度を達成した。	○

	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
中鋼製鋼所/中鋼製鋼所の併設統合共通設備 研究 【テーマ番号46】	③ツール設計によるFSW特 向上技術の基礎検討(神 戸製鋼所、阪大、再委託 先)	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。	◎
	④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、韌 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。	○
技術的課題 【テーマ番号53】	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。	○
	①超ハイテンTWB部材の開発【JFEスチール(株)】			
【テーマ番号33】 車体用FSWによる超ハイテン接合部材の開発	TWB接合に対応した基礎 技術・適用技術の確立	・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。	・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 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。	○
	②-2FSW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%以上の部分があったが、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機板材料SUS304での損傷分析を 実施	×
	②-4FSW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ツールを精密製造法で作製	最適な製造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	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複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以下の接合体が軸負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。	最適化した条件で作成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。	◎	
【テーマ番号55】 【テーマ番号56】 【テーマ番号57】 【テーマ番号58】 【テーマ番号59】 【テーマ番号60】 【テーマ番号61】 【テーマ番号62】 【テーマ番号63】 【テーマ番号64】 【テーマ番号65】 【テーマ番号66】 【テーマ番号67】 【テーマ番号68】 【テーマ番号69】 【テーマ番号70】 【テーマ番号71】 【テーマ番号72】 【テーマ番号73】 【テーマ番号74】 【テーマ番号75】 【テーマ番号76】 【テーマ番号77】 【テーマ番号78】 【テーマ番号79】 【テーマ番号80】 【テーマ番号81】 【テーマ番号82】 【テーマ番号83】 【テーマ番号84】 【テーマ番号85】 【テーマ番号86】 【テーマ番号87】 【テーマ番号88】 【テーマ番号89】 【テーマ番号90】 【テーマ番号91】 【テーマ番号92】 【テーマ番号93】 【テーマ番号94】 【テーマ番号95】 【テーマ番号96】 【テーマ番号97】 【テーマ番号98】 【テーマ番号99】 【テーマ番号100】	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。	FSW研究では市販の超音波検査装置およびサーモグラ フィー、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階折曲げ平板接着 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 ット部韌性の向上のため、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。	◎
【テーマ番号63】 【テーマ番号64】 【テーマ番号65】 【テーマ番号66】 【テーマ番号67】 【テーマ番号68】 【テーマ番号69】 【テーマ番号70】 【テーマ番号71】 【テーマ番号72】 【テーマ番号73】 【テーマ番号74】 【テーマ番号75】 【テーマ番号76】 【テーマ番号77】 【テーマ番号78】 【テーマ番号79】 【テーマ番号80】 【テーマ番号81】 【テーマ番号82】 【テーマ番号83】 【テーマ番号84】 【テーマ番号85】 【テーマ番号86】 【テーマ番号87】 【テーマ番号88】 【テーマ番号89】 【テーマ番号90】 【テーマ番号91】 【テーマ番号92】 【テーマ番号93】 【テーマ番号94】 【テーマ番号95】 【テーマ番号96】 【テーマ番号97】 【テーマ番号98】 【テーマ番号99】 【テーマ番号100】	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。	△
【テーマ番号64】 【テーマ番号65】 【テーマ番号66】 【テーマ番号67】 【テーマ番号68】 【テーマ番号69】 【テーマ番号70】 【テーマ番号71】 【テーマ番号72】 【テーマ番号73】 【テーマ番号74】 【テーマ番号75】 【テーマ番号76】 【テーマ番号77】 【テーマ番号78】 【テーマ番号79】 【テーマ番号80】 【テーマ番号81】 【テーマ番号82】 【テーマ番号83】 【テーマ番号84】 【テーマ番号85】 【テーマ番号86】 【テーマ番号87】 【テーマ番号88】 【テーマ番号89】 【テーマ番号90】 【テーマ番号91】 【テーマ番号92】 【テーマ番号93】 【テーマ番号94】 【テーマ番号95】 【テーマ番号96】 【テーマ番号97】 【テーマ番号98】 【テーマ番号99】 【テーマ番号100】	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	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-(iii)接合現象の解析	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-(iv)接合プロセスのシミュ レーション手法の開発	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。	○
	①-(v)接合部組織形成過程 の予測手法の開発			

	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	
【テーマ番号64】 性能データベースの構築	【テーマ番号64】 性能データベースの構築	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。	△	
	【テーマ番号64】 性能データベースの構築	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/先進炭素繊維強化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。	△	
	【テーマ番号64】 性能データベースの構築	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/先進炭素繊維強化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。	本テーマは2020年度より開始したため現時点では成果なし	△	
【テーマ番号20】 新構造材料の技術・研究戦略	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。【2014年度で終了。平2015年度よりテーマ番号41から45に再編して実施した】	・共通課題として鉄鋼分野における中性子利用等の先導計測技術、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用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)、タイムラー、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		構造解析用中性子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、平成27年度よりFS研究としてスタートした。	○	
【テーマ番号30】 技術動向調査分析	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【2014年度で終了。平2015年度よりテーマ番号41から45に再編して実施した】	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。	△	
	【テーマ番号31】 高分子複合材料技術開発	熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	CFRTPの自動車用用途展開について可能性と課題を集約した。	○	
【テーマ番号31】 高分子複合材料技術開発	炭素繊維および新規ファイバーに関する調査	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【2014年度で終了】	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	○	
	【テーマ番号31】 高分子複合材料技術開発	異種材料接合に関する調査	接着剤を使用しない接合技術の初期調査を実施した	△	
【テーマ番号32】 共通基盤技術の研究調査	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。【2014年度で終了。2015年度よりテーマ番号41から45に再編して実施した】	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。	○	
	【テーマ番号41】 非鉄合金最先端研究	チタン合金の製造技術開発	Ti-Mn-Mo合金の創製【第一期中間目標。2015年度終了テーマ】	加工熱処理等による微細組織制御方法を確立できた。	○
【テーマ番号41】 非鉄合金最先端研究	【テーマ番号41】 非鉄合金最先端研究	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【第一期中間目標。2015年度終了テーマ】	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。	○
	【テーマ番号42】 材料・接合技術動向調査研究	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	○
【テーマ番号42】 材料・接合技術動向調査研究	【テーマ番号42】 材料・接合技術動向調査研究	FS課題の技術動向および適用技術の動向調査	各分野テーマの再編および融合	後半検討課題案の策定	○
	【テーマ番号42】 材料・接合技術動向調査研究	金属材料の研究	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	○
【テーマ番号43】 計測解析評価研究	【テーマ番号43】 計測解析評価研究	軽量金属材料の研究	事前に破壊を防止する破壊制御理論を構築	破壊制御理論の基盤を構築することができた。	△
	【テーマ番号43】 計測解析評価研究	マルチマテリアル設計-複合材料の研究	疲労および水素脆化の解明	疲労き裂進展と水素脆化の関連性を基礎的に解明することができた。	△
【テーマ番号43】 計測解析評価研究	【テーマ番号43】 計測解析評価研究	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。	△
	【テーマ番号43】 計測解析評価研究	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。	△
【テーマ番号44】 中性子線による構造材料解析技術のFS	【テーマ番号44】 中性子線による構造材料解析技術のFS	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	インハウス中性子源の加速器部増強計画の67%の製作を完了。	△
	【テーマ番号44】 中性子線による構造材料解析技術のFS	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	ミクロスケール熱可塑性成形シミュレーションの試計算を実施した。	△
【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	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する。【2016年度に終了し、テーマ52へ移行】	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。	○
	【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	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、開発プランを策定する。【2016年度に終了し、テーマ52へ移行】	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。	○
【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	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【2016年度に終了し、テーマ53へ移行】	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。	○
	【テーマ番号45】 構造解析技術に関するFS	検査手法の検討	その適用可能性を検証【2016年度に終了し、テーマ53へ移行】	実プロセスに適合可能な検査技術の絞り込みを行った。	○
【テーマ番号49】 マルチマテリアル設計技術	【テーマ番号49】 マルチマテリアル設計技術	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開発を行った。 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。	○

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
材料・接合等技術開発(中間評価)研究(データ等活用拠点計画)並びに異種軽金属接合部材信頼性評価の基礎技術開発 [テーマ番号:23]	① データ等活用拠点(仮名称)計画			
	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金属材料技術、異種材料接合・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金属材料技術、異種材料接合・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・活用方法について興味・検討した。	△
	② 異種軽金属接合部材信頼性評価の基礎技術開発			
	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。	△
	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収集して、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。	△
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調べる。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収集して、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。	△	
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。	△	
マルチマテリアル車体軽量化に向けた革新的設計技術の開発 [テーマ番号:30]	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)のトポロジー最適化設計法を構築する。 ・動的現象を対象としたトポロジー最適化設計法を構築する。	・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化設計法を構築した。 ・単一材料の構造の固有振動数について、トポロジー最適化設計法を構築した。	△
	マルチマテリアル界面評価・モデル化	・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。	・境界面にCZMなどの数値解析手法を適用し、各接合方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。	△
	車体構造適用可能性検討	・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。	・リバースエンジニアリングにより作成したBW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車体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。	◎
	投稿論文	「査読付き」274件、「その他」62件		
特許	「国内出願」198件、「外国出願」81件、「PCT出願」73件 特記事項:			
その他の外部発表(プレス発表等)	2054件			
IV. 実用化・事業化の見通しについて	本中間評価の2020年度の中間目標はほとんどのテーマで達成見込みであり、一部テーマでは最終目標を前倒して達成している。テーマによっては一部で開発材料のサンプル出荷を開始しており、また、実機で試作したものや、プロジェクトを早期に卒業し実用化したテーマもある。			
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2014年3月、制定。		
	変更履歴	2016年2月、中間評価及び技術推進委員会の結果を踏まえ第2期目標を改定。		
	変更履歴	2018年2月、中間評価及び技術推進委員会の結果を踏まえ第3期、第4期目標を設定。		

プロジェクト用語集

1. 「革新鋼板の開発」

[テーマ番号 22] 残留 γ 高度制御革新鋼板の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
TRIP（変態誘起塑性）	Transformation Induced Plasticity	鉄鋼材料で室温において準安定なオーステナイトを含有する鋼を変形させた際に起こる延性向上に寄与することができる現象のことで、加工中にオーステナイトからマルテンサイトへの変態が誘発されることで加工硬化率が增大し、伸びが上昇する。
TWIP（双晶誘起）	Twining Induce Plasticity	鉄鋼材料で室温において安定なオーステナイトを含有する鋼を変形させた際に起こる延性向上に寄与することができる現象のことで、加工中にオーステナイト中に双晶変形が誘発されることで加工硬化率が增大し、伸びが上昇する。
残留オーステナイト（ γ ）	Retained Austenite	一般に Fe において高温域で安定で、室温では不安定なオーステナイトが室温に準安定状態で残存した組織。
Q&P	Quench & Partitioning	高強度・高延性組織の製造プロセスの名称、または、鋼を後に着けてそのプロセスで製造した鋼のことを示す。 焼鈍時に高温域から 100～300℃程度の温度域に焼入れ(quench)したのち、炭素の分配(partitioning)を行うための再加熱を行うプロセス。
安定度	Stability	残留 γ の安定度と記載することで、焼鈍板に加工を加えた際に残留 γ の加工誘起変態の起こりやすさとかかわる。一般に安定度は高いほど強度－伸びバランスが向上する。また、安定度はオーステナイト中の炭素濃度に関連している。そのため炭素濃度分布解析が重要となる。

[テーマ番号 23] 軽元素を有効に用いた革新鋼材の耐食性および成形性向上技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
軽元素	light element	軽元素は原子量の小さい元素。軽元素は微量添加でも鉄鋼材料の著しい機能向上をもたらす場合がある。
粒界偏析	grain boundary segregation	不純物または合金元素が多結晶材料の結晶粒界に偏析すると、しばしば材料の性質が大きく変化する。
表面偏析	surface segregation	金属表面には金属中に含まれている微量の元素が表面に単層の吸着層を作って偏析する場合と 3 次元的な厚みを持った析出物として析出する場合がある。そしてこのような組成の異なった表面層の存在は表面が関与する材料の性質に大きな影響を与える。
マルチスケール	multi scale	スケールの異なる構造体双方の物性、もしくは挙動を連成させる解析。
熱力学データベース	Thermodynamic Database	熱力学平衡計算に必要なデータベース。エンタルピー変化、生成ギブズエネルギー変化、エントロピー、比熱、相転移におけるエンタルピー変化、など
オキシアニオン	oxyanion	化学式 $A_xO_y^{z-}$ で表される化合物。

[テーマ番号 24] 炭素活用による革新的加工性を有する超高強度鋼板の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
TRIP	TRIP	Transformation Induced Plasticity(変態誘起塑性)の略。
ハイテン	High Tensile Strength Steel	高強度鋼板

[テーマ番号 25] 中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FRP	Fiber-Reinforced Plastics	ガラス繊維などの繊維をプラスチックの中に入れて強度を向上させた複合材料
FRM	Fiber-Reinforced Metal	金属を基材に繊維で強化した複合材料
TWIP 鋼	TWinning-Induced Plasticity Steel	加工誘起双晶変形を起こすことで、優れた強度－延性バランスを実現する鋼。

[テーマ番号 26] 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
複層鋼板	Multi-layer steel plate	異なる組成や組織を持つ鋼と鋼を積層して製造した鋼板
水素脆化	hydrogen embrittlement	鋼中に含まれる水素により鋼材の強度や延靱性が低下する現象
有限要素法 (FEM)	Finite Element Method	数値解析の方法の一種で、複雑な形状・性質を単純な小部分に分割することで近似し、全体の挙動を予測する手法
第一原理計算	first-principles calculation、Ab initio calculation	量子力学のシュレディンガー方程式に則って、物質中の電子運動を計算する方法
分子動力学法 (MD)	molecular dynamics method	古典力学におけるニュートン方程式によって原子・分子の運動を計算することで、系の静的、動的安定構造や、動的過程を解析する手法。
走査型電子顕微鏡 (SEM)	Scanning Electron Microscope	対象物に電子線を照射し放出される電子を解析することで、高倍率で対象物の観察を行うことが可能な電子顕微鏡
透過型電子顕微鏡 (TEM)	Transmission Electron Microscope	対象物に電子線を照射し透過した電子を解析することで、SEM よりも高倍率で対象物の観察を行うことが可能な電子顕微鏡
電子後方散乱回折法 (EBSD)	Electron BackScatter Diffraction patterns	電子線回折により結晶粒の大きさや方位を解析する手法
In-Situ 観察	In situ observation	ある状態のまま組織等の観察を行うこと、例えば引張試験中の応力負荷状態で組織観察などを行うこと

[テーマ番号 47] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究)

特になし

[テーマ番号 48] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究)

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
U 曲げ試験	U-bend test	薄鋼板を U 形状に曲げ、両端をボルト等で固定し、応力を付与した状態で酸浸漬などにより水素を導入し、遅れ破壊特性を評価する方法。

遅れ破壊	Delayed fracture	材料が静的な負荷応力を受けた状態で、ある時間を経過したとき、外見上はほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象。
水素脆化	Hydrogen embrittlement	材料中に吸収された水素により材料の強度や延性又は靱性が低下する現象。
水素割れ感受性	Susceptibility to hydrogen cracking	水素に起因した割れの起こしやすさ。一般に高強度ほど水素割れを起こしやすい。

[テーマ番号 61] 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
物質移動	Mass transfer	物質の移動である。腐食系の場合、腐食関与物質（酸素などガス、イオン、腐食生成物など化学種）の拡散を含み、腐食を律速する現象の一つ。
電荷移動	Charge transfer	原子、分子がイオンと衝突、もしくはイオン同士が衝突したときに、電子が一方から他方に移動現象。腐食の律速する現象のひとつ。
ケルビン電位	Kelvin potential	ケルビン法（試料—電極間に流れる電流が0になるように電極電位を制御することで試料電位を計測する方法）で得られる試料電位。慣用的に用いられる。
ポテンシオスタット	Potentiostat	ポテンシオスタットとも書く。試料を定電位電解するための電源。
KFM	Kelvin force Microscopy	AFM と同等の空間分解能で表面電位を計測可能。
ラマン散乱分光	Raman scattering spectroscopy	ラマン分光とも書く。物質に光を照射すると、物質との相互作用により入射光と異なる波長の散乱光（ラマン散乱光）が得られる。このラマン散乱光は物質固有のスペクトルパターンを持ち、物質同定に多用される。
CCT 試験	Cyclic corrosion test	サイクル腐食試験。ラボで、各種腐食環境を再現、促進した腐食試験を行う。
粒界偏析	grain boundary segregation	不純物または合金元素が多結晶材料の結晶粒界に偏析すると、しばしば材料の性質が大きく変化する。
マルチスケール	multi scale	スケールの異なる構造体双方の物性、もしくは挙動を連成させる解析。

[テーマ番号 62] 超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
U 曲げ試験	U-bend test	薄鋼板をU 形状に曲げ、両端をボルト等で固定し、応力を付与した状態で酸浸漬などにより水素を導入し、遅れ破壊特性を評価する方法。
遅れ破壊	Delayed fracture	材料が静的な負荷応力を受けた状態で、ある時間を経過したとき、外見上ほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象。
水素脆化	Hydrogen embrittlement	材料中に吸収された水素により材料
水素割れ感受性	Susceptibility to hydrogen cracking	水素に起因した割れの起こしやすさ。一般に高強度ほど水素割れを起こしやすい。

2. 「革新的アルミニウム材の開発」

[テーマ番号 13] 高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
7150 合金	7150 alloy	Al-(5.9-6.9)%Zn-(2.0-2.7)%Mg-(1.9-2.5)%Cu-(0.08-0.15)%Zr 合金。
Al-Li 合金	Al-Li alloy	Li を添加したアルミニウム合金。比重が低下し、ヤング率が上昇する。活性なために専用設備が必要で、コストが高い。
RRA 処理	RRA treatment	“Retrogression and Re-aging”処理。三段時効処理により、耐応力腐食割れ性を向上する。
圧縮ねじり加工	Compressive torsion processing	円盤状の材料に対し、圧縮応力を負荷しながらねじり変形を加える加工。
アンダーカット	Undercut	溶接欠陥の一種で、溶接ビードの横の部分が母材表面よりも凹んでいること。溶接ビードの幅が開先幅まで達していない場合や、過大電流で起こりやすい。
アンダーフィル	Under-fill	溶接欠陥の一種で、突き合わせの隙間が大きいため、溶接ビードの厚みが被溶接材の板厚に比べて薄くなること。
均質化処理	Homogenization heat treatment	鋳造後に行う熱処理のことで、偏析の解消や第二相粒子の析出を目的に行う。
サブグレイン組織	Subgrain structure	亜結晶粒組織。
人工時効処理	Artificial aging treatment	焼入れ後の時効硬化を人工的に行う熱処理。
水素ポア	Hydrogen pore	水素が材料内部でガスとして集まってできた隙間。
穿孔法	Hole-drilling method	残留応力測定方法の一種で、測定対象の表面にひずみゲージを貼り、穿孔によるひずみの変化から残留応力を測定する。
中性子回折法	Neutron diffraction method	残留応力測定方法の一種で、中性子中性子による回折のピークシフトから非破壊で残留応力を測定する。材料内部の三軸応力測定が可能。
ディスクレーザ溶接	Disk laser welding	レーザを発振する媒体が薄い円盤状のもの。発振器の出力が数 W～数 kW で幅広く、波長によって用途が使い分けられる。

電磁攪拌鋳造	Electromagnetic stirring casting	電磁場によるローレンツ力により、溶湯を攪拌させながら凝固させる鋳造法。
ねじり鍛錬加工	Torsion processing	棒材の一部を誘導加熱で局部的に加熱し、片端部を回転させることで部分的にねじり変形を加える。加熱部を棒材長手方向に連続的に移動させることで長手全体にねじり変形を加える。
バブリング法（脱ガス）	Bubbling (degassing)	アルゴンガスや窒素ガスなどの不活性ガスを溶湯内に流して行う脱ガス法。これらの泡の水素分圧が低いため、溶湯中の水素が気泡内に移動し、気泡と一緒に浮上することで水素ガスが除去される。
フィラードレーザ溶接	Filled laser welding	溶加材を供給しながら行うレーザ溶接。
深孔穿孔法	Deep hole-drilling method	被測定材に予め基準孔を明け、その周囲のトレパニング加工（円状の溝加工）の前後での穴径の変位から残留応力を測定する方法。
マルチマテリアルボディ	Multi material body	異種材料を組み合わせた車体。
溶体化処理	Solution heat treatment	過飽和固溶させるための熱処理。一般には融点直下の温度で行うことが多い。
リバースエンジニアリング	Reverse engineering	機械を分解したり、製品の動作を観察したり、ソフトウェアの動作を解析するなどして、製品の構造を分析し、そこから製造方法や動作原理、設計図などの仕様やソースコードなどを調査すること

[テーマ番号 14] アルミニウム材新製造プロセス技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AlCl ₃ -EMIC イオン液体	AlCl ₃ -EMIC ionic liquid	AlCl ₃ と AlCl ₃ を所定のモル比で混合して得られるイオン液体のこと。アルミニウムの電析には AlCl ₃ :EMIC=2:1 の酸性浴が主に使用される。
EMIC	1-ethyl-3-methylimidazolium chloride	AlCl ₃ -EMIC イオン液体の原料の一つ。吸湿性があるため、不活性ガス雰囲気で使用される。
アノード	anode	電極をつないで電気回路形成した際に、電子を放出する側の電極のこと。

アルミナ	alumina	酸化アルミニウム (Al_2O_3) の通称
イオン液体	Ionic liquid	イオンのみで構成される液体。高導電性、難燃性、低常気圧といった特徴をもち。親水性のもの、疎水性のものなど多くの種類がある。室温（常温）熔融塩と呼ばれることもある。
塩化アルミニウム	Aluminum chloride	AlCl_3 で表されるアルミニウムの金属塩。イオン液体の原料の一つ。
カスケードリサイクル	Cascade recycling	リサイクルをすることによって、元の製品の品質（純度）に戻らず、品質（純度）の低下を伴うリサイクル。
カソード	Cathode drum	電極をつないで電気回路形成した際に、電子を受け取る側の電極のこと。
グローブボックス	Glove box	内部に手を入れられるゴム手袋（グローブ）がついている密閉容器のことで、不活性ガス雰囲気置換して作業ができるようになっている。
サイクリックボルタンメトリー	Cyclic voltammetry	電気化学測定法の一つ。電極で荷を直線的に掃引し、応答電流を測定する手法。
三層電解法	Trinal electrolytic process	ホール・エルー法で製造されたアルミニウムを熔融塩中で電解し、高純度のアルミニウム地金を製造する方法。
水酸化アルミニウム	Aluminum hydroxide	$\text{Al}(\text{OH})_3$ で表されるアルミニウムの水酸化物。バイヤー法で製造される。
電解アルミニウム箔	Electrolytic aluminum foil	電解銅箔の手法でアルミ箔を製造する方法。ただし、アルミニウムを析出させるには水溶液を使用できないため、非水溶液および非水溶液を使用できる環境の整備が必要となる。実用化されていない。
電解精製	electrorefining	純度の低い金属をアノードにして電気分解することでカソードに純度の高い金属を析出させる手法のこと。高純度の銅やニッケルなどを得る方法として使用されている。
電解製錬	Electrolytic smelting	電気分解を利用し、鉱石から所望の金属を製造する方法。

電解銅箔	Electrolytic copper foil	カソードドラムに析出させた銅を剥がし、連続的に巻き取ることで薄箔を製造する方法。リチウムイオン二次電池負極集電体に使われている。
電析	Electrodeposition	電気分解により、カソードに還元生成物を析出させること。
バイヤー法	Bayer process	ボーキサイト中のアルミナを抽出する方法。水酸化ナトリウムに溶かし、水酸化アルミニウムを製造し、それを脱水することでアルミナを抽出する。ホール・エルー法と併せて使用される。
ボーキサイト	bauxite	アルミニウムの原料となる鉱石。アルミナを含む。
ホール・エルー法	Hall-Heroult process	現在実用化されている唯一のアルミニウム製錬方法。氷晶石とフッ化ナトリウムからなる高温熔融塩中にアルミナを溶解させ、電気分解によりカソードにアルミニウムを析出させる。
ボルタモグラム	Voltammogram	サイクリックボルタンメトリーで得られた曲線。
めっき	plating	還元反応を利用し、所望の物質表面に金属の膜を形成させる手法。防食性、装飾性、機能性等を付与することが可能。

[テーマ番号 21] 複層アルミ合金の開発

特に無し

3. 「革新的マグネシウム材の開発」

[テーマ番号 15] 難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。
AZX311 合金	AZX311 alloy	AZ31 合金に約 1mass%のCaを添加した合金。
難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
時効処理	Aging treatment	金属材料を高温から室温などへ急冷した後に、ある温度に材料を保持することで材料の硬さを増加させる処理。最も硬くなる条件をピーク時効と言う。
応力腐食	Stress corrosion	引っ張り応力や曲げモーメントなどの応力を受けた金属材料が、著しく腐食しやすくなる現象。
T6 処理	T6 treatment	溶体化処理を施した後に、人工時効硬化処理を行う処理。
溶体化（均質化） 処理	Solution treatment (Homogenization treatment)	材料を十分に加熱して合金成分を固体に溶け込ませ（固溶）、その後冷却する処理。
底面集合組織	Basal texture	六方晶の上面と下面を底面と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。

AZ31 合金 AZ91 合金	AZ31 alloy AZ91 alloy	AZ31 合金：展伸用として一般的なマグネシウム合金。(Mg-3%Al-1%Zn 合金, 質量%)。 AZ91 合金：鋳造用として一般的な合金。(AZ91: Mg-9mass%Al-1mass%Zn),。
AZX611 合金 AZX612 合金 AZX811 合金 AZX912 合金	AZX611 alloy AZX612 alloy AZX811 alloy AZX912 alloy	AZX611, AMX602 合金は AM60 合金にそれぞれ 1, 2mass%の Ca を添加した合金。AZX912 合金は AZ91 合金に 2mass%の Ca を添加した合金。
AX41 合金 AX92 合金 AX81G 合金 AX81S 合金	AX41 alloy AX92 alloy AX81G alloy AX81S alloy	プロジェクトで 2015 年度までに開発した合金。AX41 は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
DTA	Differential thermal analysis	試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法。
孔食	Pitting	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として送給される溶接法の一つ。
FSW	Friction Stir Welding	先端に突起のある工具を回転させて母材の接合部に貫入させることで、摩擦熱を発生させて母材を軟化させ、工具の回転力によって塑性流動させて練り混ぜることで部材を一体化する接合法。

下限界応力拡大係数範囲	Threshold stress intensity factor range	応力拡大係数範囲を漸減していった際に、き裂が伝播しなくなった際の値。
有効応力拡大係数範囲	Effective stress intensity factor range	き裂開閉口挙動を考慮した応力拡大係数範囲。一般的な応力拡大係数範囲は、応力拡大係数の最大値と最小値の差。有効抗力拡大係数範囲は、応力拡大係数の最大値とき裂開口時もしくは閉口時の応力拡大係数の差。
シャルピー衝撃試験	Charpy impact test	切り欠きのはいった角柱状の試験片に対して高速で衝撃を与えることで試験片を破壊し、破壊するのに要したエネルギーと試験片の靱性を評価するための衝撃試験
延性・脆性遷移温度	Ductile-(to)-brittle transition temperature	延性脆性遷移が起きる温度。

[テーマ番号 16] 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。
AX41 合金	AX41 alloy	射水分室（三協立山㈱）における開発合金。
AZ31 合金	AZ31 alloy	展伸用として一般的な Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金。(Mg-3mass%Al-1mass%Zn 合金)。
AZX311 合金	AZX311 alloy	Mg-3mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca 合金。比較的高い延性を有するAZ31合金に1mass%Caを添加した合金。

AZX811 合金	AZX811 alloy	Mg-8mass% Al-1mass% Zn-1mass% Ca 合金。 相模原分室における開発合金。
DTA	Differential thermal analysis	試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法。
EBSD	Electron backScatter diffraction	電子顕微鏡に組み合わせ、電子線を操作しながら、擬菊池パターン（試料に電子を照射した際に反射電子が試料中の原子面によって回折されることによるバンド状のパターン）を解析することで、ミクロな結晶方位や結晶系を測定する解析。
EPMA	Electron probe microanalyser	電子線を対象物に照射する事により発生する特性 X 線の波長と強度から構成元素を分析する装置。
MIG 接合	MIG welding	半自動溶融接合の一種でシールドガスに不活性ガスを用いて、電極棒が溶加材として溶融する。
T5 処理	T5 treatment	高温加工から冷却後、積極的に冷間加工を行わず、人工時効硬化処理したもの。
T6 処理	T6 treatment	溶体化処理を施した後に、人工時効硬化処理を行う処理。
応力腐食	Stress corrosion	それだけでは腐食を生じなかったようなある腐食環境下で、応力下にある領域が受ける選択的な腐食。
片振り	Pulsating stress	疲労試験において応力比=0 での試験。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分。
均質化処理	Homogenization	溶解・鋳造後の鋳塊に生成した不均一な晶出物・析出物を固溶させたり、その大きさや密度をコントロールし、均一にしたりするために行う熱処理。
孔食	Pitting	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
剛性率	Rigidity	弾性率の一つ。物体のねじれに対する抵抗の大きさを表す定数。

構体	Railway car body	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分である。
時効処理	Aging treatment	金属材料を高温から室温などへ急冷した後に、ある温度に材料を保持することで材料の硬さを増加させる処理。最も硬くなる条件をピーク時効と言う。
晶出	Crystallization	液相から固相が分かれて生成すること。
靱性	Toughness	破断する前にエネルギーを吸収する性質
成形性	Formability	割れを生じずに所要の形状への付与のしやすさ。深絞り成形性、張出し成形性、曲げ成形性等がある。
析出	Precipitation	温度による溶解度の変化で材料中に溶け込んでいた原子がもとの材料からはみだし、もとの材料とは異なる結晶をつくる現象。この時に作られた結晶を析出物という。
双晶変形	Twin deformation	金属結晶において、ある剪断応力を受けたとき、すべり（結晶塑性）によらず双晶（2個以上の結晶が一定の幾何学的規則性をもって一体に結合しているもの）の形成によって変形すること。
台枠	Under frame	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造。
妻構体	Gable end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分。
底面集合組織	Basal texture	六方晶の上面と下面を底面と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。
電気抵抗率	Electrical Resistivity	電気の通しにくさを表す、寸法によらない物性値。
難燃性	Flame resistance	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
熱伝導率	Thermal Conductivity	物質の熱伝導のしやすさを示す値。温度差のある物体において熱移動のおこりやすさで表される。
伸び・延性	Elongation	材料が破断する直前における最大の変形量（ひずみ）を伸びと呼び、もとの長さに対する比率として表す。

反重力鋳造	Antigravity-Suction-Casting	金属溶湯内に鋳型を設置し気圧差を利用して鋳造を行う方法。
引張強さ	Tensile strength	材料に引張り変形を加えた際に、破断する前に材料に表れる最大の引張応力
比熱	Specific heat	単位質量の物質の温度を単位温度だけ上昇させるのに必要な熱量。
表面処理	Surface treatment	金属材料が腐食するのを防護するためにめっき、塗装などを行うこと。
疲労	Fatigue	静的破壊力より低い繰り返し応力によって材料が破壊に至る現象。
平面曲げ疲労試験	Plane Bending Fatigue	平板状試験片に曲げモーメントを繰り返し与えることによって材料の疲労寿命を測定する試験
ポアソン比	Poisson's ratio	物体に弾性限界内で応力を加えたとき、応力に直角方向に発生するひずみと応力方向に沿って発生するひずみの比。
ヤング率	Young's modulus	固体を単純に引っ張ったり圧縮したりした場合、長さの弾性変形と外力を結び合わせる比例定数。
溶体化処理	Solution treatment	材料を十分に加熱して合金成分を固体に溶解させ（固溶）、その後冷却する処理。
両振り	Alternating stress	疲労試験において応力比=-1での試験。

[テーマ番号 17] 高強度マグネシウム材（薄板）の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
6061 合金	AA6061 alloy	6000 番台のアルミニウム合金。Al-Si-Mg 系合金。構造材として中強度の押出用合金。
5052 合金	AA5052 alloy	5000 番台のアルミニウム合金。Al-Mg 系合金。耐食性、成形性のほか、溶接性も良い合金。
ダブルスキン構造	Double skin profile	ダンボールと同じように、2 枚の板の間にトラス状の補強部材が入っている構造。骨組み無しでも強度・剛性を確保できる。

[テーマ番号 18] 高強度マグネシウム材の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AX92 合金	AX92 alloy	プロジェクトで 2015 年度までに開発した高強度押出用合金。
AZX311 合金	AZX311 alloy	展伸材として一般的な汎用合金 AZ31 (Mg-3wt%Al-1wt%Zn) に 1wt%の Ca を添加した合金。

[テーマ番号 19] 難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
屋外大気暴露	outdoor exposure test	化学的性質、物理的性質および変化を、屋外環境下で調査する試験。「日光、風雨などの自然作用に対して変化してゆく性質」を屋外設置の下で評価。JIS Z 2381(屋外大気暴露試験方法通則)に概要記載
化成処理	chemical treatment	特に金属の表面に処理剤を作用させて化学反応を起こさせることで、耐食性や塗料との親和性など、元の素材とは違った性質を与える処理。
気密疲労試験	Airtight fatigue test	積載荷重の変動やトンネルの出入りに伴う気圧の変動によって構体に加わる疲労荷重を模した試験
最適化	optimization	塗料設計面では、既存商品に対しても塗装条件や要求性能に対しチューニングを施し、より使いやすく性能向上を図る必要もありそれを最適化と称する。
常温乾燥	room-temperature drying	塗料の乾燥方法には加熱型(100℃未満)。焼付型(130℃～200℃)や、自然乾燥型(そのまま放置)等あり、常温乾燥とは常温状態でそのまま放置で乾燥させることを指す
被塗物	coated article	表面処理(塗装や化成処理の対象となるもの)
表面処理	surface treatment	材料表面の美化・耐食性向上などの為に行う種々の処理の総称(本編では、耐食性と美化を目的とする化成処理と塗装を指す)

母材	Base-metal	接合部以外の部分を指す 腐食評価においては、接合等の変性履歴 を含めオリジナルの金属材を指す
難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、 発火に対して抵抗する性質。

[テーマ番号 20] 難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。
AS, RS	Advancing side, Retreating side	摩擦攪拌接合において、接合ツールの回転方向と接合方向が一致する側を前進側（AS）、一致しない側を後退側（RS）と呼ぶ。
AZ91 合金 AM60 合金	AZ91 alloy AM60 alloy	鋳造用として一般的な合金。（AZ91: Mg-9mass%Al-1mass%Zn), (AM60: Mg-6mass%Al-0.2mass%Mn)。
AMX601 合金 AMX602 合金 AZX912 合金	AMX601 alloy, AMX602 alloy, AZX912 alloy	AMX601, AMX602 合金は AM60 合金にそれぞれ 1, 2mass%の Ca を添加した合金。AZX912 合金は AZ91 合金に 2mass%の Ca を添加した合金。
AX41 合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで平成 27 年度までに開発した合金。AX41 は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
BTR	Brittle temperature range	凝固脆性温度領域
CMT	Cold metal transfer	フローニアス社が開発した低入熱の MIG 溶接法
FSW	Friction stir welding	摩擦攪拌接合
IMC	Intermetallic compound	金属間化合物

MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として送給される溶接法の一つ。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分。
構体	Car body structure	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分。
台枠	Underframe	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造。車体の土台となる骨組。
妻構体	end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分。
難燃性	Non combustibility	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
伸び・延性	Elongation	材料が破断する直前における最大の変形量（ひずみ）を伸びと呼び、もとの長さに対する比率として表す。
引張強度	Tensile strength	材料に引張り変形を加えた際に、破断する前に材料に表れる最大の引張応力。

[テーマ番号 34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AX41 (AXM4102) 合金 AX92 合金 AX81G 合金 AX81S 合金	AX41 (AXM4102) alloy AX92 alloy AX81G alloy AX81S alloy	プロジェクトで H27 年度までに開発した合金。AX41 (AXM4102) は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
AZ31 合金 AZ91 合金	AZ91 alloy AZ31 alloy	AZ31 合金：展伸用として一般的な合金。 (AZ31: Mg-3wt% Al-1wt% Zn) AZ91 合金：鋳造用として一般的な合金。 (AZ91: Mg-9wt% Al-1wt% Zn)
AZX611 合金 AZX612 合金 AZX811 合金 AMX801 合金	AZX611 alloy AZX612 alloy AZX811 alloy AMX801 alloy	AZX611, AZX612 : AZ61 (Mg-6wt% Al-1wt% Zn) 合金にそれぞれ 1wt%, 2wt% の Ca を添加した合金。 AZX911 : AZ91 合金に 1wt% の Ca を添加した合金。 AZX811 合金 : Mg-8wt% Al-1wt% Zn-1wt% Ca 合金 AMX801 合金 : Mg-8wt% Al-0.2wt% Mn 合金

6061 合金	AA6061 alloy	6000 番台のアルミニウム合金。Al-Si-Mg 系合金。構造材として中強度の押出用合金。
5052 合金	AA5052 alloy	5000 番台のアルミニウム合金。Al-Mg 系合金。耐食性、成形性のほか、溶接性も良い合金。
LDR (限界絞り比)	Limiting Drawing Ratio	1 回の絞りで破断を起こさずに円筒を絞ることのできる最大のブランク直径とパンチ直径の比。プレス成形性（特に深絞り成形性）の指標。
MI(マテリアルズ・インテグレーション)	Materials integration	材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す総合的な材料技術ツールのこと。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として供給される溶接法の一つ。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
エリクセン値	Erichsen value	カップ状に膨らんでいく板の下面頂部に亀裂が生ずるまでパンチを押し込み、そのときの深さを mm 単位で測定した数値。プレス成形性（特に張出し成形性）の指標。
気密疲労試験	Airtight fatigue test	積載荷重の変動やトンネルの出入りに伴う気圧の変動によって構体に加わる疲労荷重を模した試験
相当曲げ剛性	Equivalent bending stiffness	はり部材の曲げ変形のしにくさを示す指標
ダブルスキン型材	Double skin profile	ダンボールと同じように、2 枚の板の間にトラス状の補強部材が入っている構造を有する押出型材。骨組み無しでも強度・剛性を確保できる。
底面集合組織	Basal texture,	六方晶の上面と下面を底面と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。
電気化学インピーダンス	Electrochemical impedance	金属腐食反応における複合電極反応界面。

難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
不働態化	Passivation	緻密な酸化膜が形成され、それ以上腐食が進行しなくなる状態。
摩擦攪拌接合、 摩擦攪拌プロセス	Friction stir welding, Friction stir process	先端に突起のある工具を回転させて母材の接合部に貫入させることで、摩擦熱を発生させて母材を軟化させ、工具の回転力によって塑性流動させて練り混ぜることで部材を一体化する接合法。 摩擦攪拌接合を材料の組織制御に利用したプロセスを摩擦攪拌プロセスと言う。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AE 計測	Acoustic Emission (AE) measurement	材料が変形・破壊する際に内部に蓄えていた弾性エネルギーを音波（AE波）を計測する手法
AX41(AXM4102)合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 (AXM4102) alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで 2017 年度までに開発した合金。AX41(AXM4102)は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
AZ31 合金, AZ91 合金	AZ91 alloy, AZ31 alloy	AZ31 合金：展伸用として一般的な合金。 (AZ31: Mg-3wt% Al-1wt% Zn) AZ91 合金：鋳造用として一般的な合金。 (AZ91: Mg-9wt% Al-1wt% Zn)
AZX611 合金, AZX612 合金	AZX611 alloy, AZX612 alloy	AZX611, AZX612 : AZ61(Mg-6wt% Al-1wt% Zn)合金にそれぞれ 1wt%, 2wt% の Ca を添加した合金。 AZX911 : AZ91 合金に 1wt% の Ca を添加した合金。
A6N01 合金, 6061 合金	A6N01 alloy, AA6061 alloy	6000 番台のアルミニウム合金。Al-Si-Mg 系合金。構造材として中強度の押し出し用合金。6N01 合金は溶接性に優れる。
BH(バークハード)性	Bake hardening	金属が塗装の焼き付け工程で加熱されたときに、降伏点が高くなり硬くなる性質。

LDR (限界絞り比)	Limiting Drawing Ratio	1 回の絞りで破断を起こさずに円筒を絞ることのできる最大のブランク直径とパンチ直径の比。プレス成形性（特に深絞り成形性）の指標。
MI(マテリアルズ・インテグレーション)	Materials integration	材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す総合的な材料技術ツールのこと。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として供給される溶接法の一つ。
SPR	Self-Pierce Riveting	機械締結法の一つ。母材下穴を事前に開ける必要がなく、上側母材を貫通し下側母材を貫通させずに、複数母材の締結を可能にする。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
エリクセン値	Erichsen value	カップ状に膨らんでいく板の下面頂部に亀裂が生ずるまでパンチを押し込み、そのときの深さを mm 単位で測定した数値。プレス成形性（特に張出し成形性）の指標。
ガルバニック腐食	Galvanic corrosion	異種金属同士を接触させた際に生じる腐食現象の総称。
気密疲労試験	Airtight fatigue test	積載荷重の変動やトンネルの出入りに伴う気圧の変動によって構体に加わる疲労荷重を模した試験
孔食	Pitting	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
相当曲げ剛性	Equivalent bending stiffness	はり部材の曲げ変形のしにくさを示す指標
ダブルスキン形材	Double skin profile	ダンボールと同じように、2 枚の板の間にトラス状の補強部材が入っている構造を有する押出形材。骨組み無しでも強度・剛性を確保できる。
継手効率	Joint efficiency	溶接継手の強度と母材の強度の割合。溶接部分と母材の強度が同じになると値は 100 (%)となる。

底面(0001)集合組織 底面(0001)集合組織 強度	Basal texture, Basal texture intensity	六方晶の上面と下面を底面（(0001)面）と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。底面集合組織強度は、ランダム配向と比較しての底面の配向の度合いを示したものの。
難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
へム加工（ヘミング加工）	Hemming	板材の折り返し曲げ加工。板材端部の強化や手等が触れたときになめらかなタッチとなるようにするために実施する。
摩擦攪拌接合	Friction stir welding	先端に突起のある工具を回転させて母材の接合部に貫入させることで、摩擦熱を発生させて母材を軟化させ、工具の回転力によって塑性流動させて練り混ぜることで部材を一体化する接合法。
溶加材	Filler material	溶接の際に加える添加材料。

[テーマ番号 50] Mg 材の性能・寿命に関する MI（マテリアルズインテグレーション）活用技術開発（FS 研究）

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
ニューラルネットワーク（ANN）	Artificial neural network	機械学習手法の一種であり、一般に、入力層、隠れ層、出力層、そしてそれぞれの活性化関数により定義される。あらゆる非線形関数を近似できる特徴がある。
マテリアルズ・インテグレーション（MI）	Materials integration	材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す総合的な材料技術ツールのこと。
モジュール	Module	物理現象を数学の式で記述した数値解析モデルのこと。予測や解析に必要な理論・経験則、数値モデリング、データベースのサブモジュール群ならびに援用するソフトウェアを包含する。
ワークフロー	Workflow	複数のモジュールの入力と出力をつなぎ合わせることで、必要な出力を得るための一連の計算プロセスを定義し、その計算の流れを可視化したもの。

[テーマ番号 60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
AX41 (AXM4102) 合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 (AXM4102) alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで 2017 年度までに開発した合金。AX41 (AXM4102) は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
AZX611 合金, AZX912 合金	AZX611 alloy, AZX912 alloy	AZX611 : AZ61 (Mg-6wt% Al-1wt% Zn) 合金にそれぞれ 1wt% の Ca を添加した合金。 AZX912 : AZ91 (Mg-9wt% Al-1wt% Zn) 合金に 2wt% の Ca を添加した合金。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として送給される溶接法の一つ。
Tanaka-Mura モデル	Tanaka-Mura model	すべり帯に沿う疲労き裂の発生寿命を予測するモデル。転位の不可逆運動によりすべり帯に蓄積されるひずみエネルギーが、単位破面の破壊エネルギーを超えたときに結晶粒寸法のき裂が発生すると考える。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
極値解析	Extreme value analysis	連続確率分布を用いた解析の一つであり、最大値又は最小値を予測する手法。
結晶塑性有限要素解析 (CPFEM)	Crystal plasticity finite element analysis	個々の結晶粒におけるすべり変形や双晶変形を考慮した構成方程式を用いることで、多結晶の変形挙動を予測する数値解析手法。金属材料における複雑な塑性変形挙動を予測するために有効である。
重回帰分析	Multi-regression analysis	1 つの目的変数を複数の説明変数で予測しようとする統計的手法。
疲労き裂発生寿命	Fatigue crack initiation life	繰返し荷重を受ける材料において、疲労き裂が発生するために要する繰返し数のこと。工学的には非破壊検査により検出可能な長さ (1 mm ~ 数 mm) のき裂が現れるまでの寿命を意味することがあるが、ここではより厳密に、結晶粒寸法のき裂が生成されるまでの寿命と定義する。

ニューラルネットワーク (ANN)	Artificial neural network	機械学習手法の一種であり、一般に、入力層、隠れ層、出力層、そしてそれぞれの活性化関数により定義される。あらゆる非線形関数を近似できる特徴がある。
マテリアルズ・インテグレーション (MI)	Materials integration	材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す総合的な材料技術ツールのこと。
モジュール	Module	物理現象を数学の式で記述した数値解析モデルのこと。予測や解析に必要な理論・経験則、数値モデリング、データベースのサブモジュール群ならびに援用するソフトウェアを包含する。
ワークフロー	Workflow	複数のモジュールの入力と出力をつなぎ合わせることで、必要な出力を得るための一連の計算プロセスを定義し、その計算の流れを可視化したもの。

4. 「革新的チタン材の開発」

[テーマ番号 10] チタン材一貫製造プロセス技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
スクラップ	Scrap	金属材料の切り屑や、金属製品の廃棄物。

[テーマ番号 11] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
スポンジチタン	Ti Sponge	チタン展伸材の原料となるスポンジ状の金属チタン。チタン鉱石を製錬して得られる。
チタン梱包体	Titanium package	熱間圧延用の素材（スラブ）。スポンジチタンを圧縮成形したブリケットをチタン厚板で覆った箱。
A 級スポンジチタン	A grade sponge titanium	比較的品位が高いスポンジチタンで、主にチタンインゴットの溶解原料として使用されるスポンジチタン
A 級歩留まり	Yield of A grade sponge	スポンジチタン塊全体に対し、A 級スポンジチタンを採取できた割合

5. 「革新炭素繊維基盤技術開発」

[テーマ番号 51] 革新炭素繊維基盤技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で強化したプラスチック成形品（樹脂成形品）の総称。
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック。ポリアミドやポリプロピレンといった熱可塑性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料。
PAN	Polyacrylonitrile	有機高分子の一種で、アクリロニトリルを重合させて得られる。PAN と略称される。PAN（ポリアクリロニトリル）は、アクリル、モダクリル繊維、衣類および家の調度品のウールの一般的な材料として生産されている。
異形状炭素繊維	Modified cross-section carbon fiber	中空など、通常の炭素繊維とは異なる断面形状を有する炭素繊維。
界面層	Interfacial layer	ある均一な液体や固体の相が他の均一な相と接している境界のことを界面と呼ぶ。炭素繊維のような強化繊維の場合、樹脂と接している境界の表面層を界面層という。
酸化処理	Oxidative treatment	炭素繊維などの表面層を改質する処理手法の一つ。エッチング処理。含酸素基を繊維表面に導入することにより樹脂との水素結合を促進し、接着性を高めることができる。
樹脂含浸ストランド物性	Resin-impregnated strand mechanical property	樹脂含浸繊維束の引張弾性率や引張強度などの特性。
前駆体化合物	Precursor compound	炭素材料になる前の高分子物質。温度を上げても熔融しない特徴を持つ。
耐炎化	Thermal stabilization	PAN 繊維が炭素化時に熔融しないように 200-350℃の空气中で数時間加熱する処理のこと。
耐炎繊維	Flame resistant fiber (Oxidized PAN fiber)	PAN 繊維を耐炎化処理して得られる耐炎性を有した有機繊維。

織度	Large linear density	繊維または繊維束において単位長さあたりの質量が大きいこと。織度の単位は長さ 1000m あたりの質量 g で表す TEX が用いられることが多く、繊維束に用いる場合、現行の炭素繊維束が 1600TEX までのものが多いため、それ以上のものを大織度として扱う。
炭素繊維 (CF)	Carbon Fiber	有機繊維の前駆体を加熱炭素化処理して得られる、質量比で 90%以上が炭素で構成される繊維。
熱可塑性樹脂	Thermoplastic resin	ガラス転移温度または融点まで加熱することによって軟らかくなり、目的の形に成形できる樹脂。一般的に、熱可塑性樹脂は切削・研削等の機械加工がしにくい事が多く、加温し軟化したところで金型に押し込み、冷し固化させて最終製品とする射出成形加工等が広く用いられている。ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ABS 樹脂、塩化ビニル樹脂、メタクリル酸メチル樹脂、ナイロン、フッ素樹脂、ポリカーボネート、ポリエステル樹脂など。
破断伸度	Fracture elongation	材料が破断したときのひずみ (変形量 / 試験片長)。
引張弾性率	Tensile modulus	材料を引張ったときの伸びにくさを表す物性値。
プラズマ表面処理	Plasma surface treatment	プラズマを利用して、繊維表面に官能基を導入する表面処理方法。
マイクロ波炭素化	Microwave carbonization	ヒーターなどによる放射や伝導による加熱ではなく、繊維をマイクロ波によって直接加熱して炭素化する方法。
ラージトウ	Large tow	大織度の繊維束。フィラメント数が、一般に 40,000 本程度以上のもの。
ライフサイクルアセスメント (LCA)	Life Cycle Assessment	製品やサービスに対する、環境影響評価の手法。主に個別の商品の製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用までの各段階における環境負荷を明らかにすることを目的としている。
レギュラートウ	Regular tow	標準的な織度の繊維束。フィラメント数では、24,000 本以下のもの。ラージトウに対しスモールトウと呼ぶこともある。

6. 「熱可塑性 CFRP の開発」

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語。略号の説明
RTM（樹脂注入成形）	Resin Transfer Molding	金型に強化繊維織物をセットし、それに樹脂を高圧で注入することにより得られる複合材。
EV（電気自動車）	Electric Vehicle	電池と電動モーターで駆動させる自動車。
異方性	Anisotropy	物質の物理的性質、例えば弾性率や屈折率などが方向によって異なること。結晶、圧延した金属、プラスチックなどに現れる。⇔ 等方性
NDI（非破壊検査）	Non Destructive Inspection	超音波探傷、X 線等により部品内部の欠陥状態を検査する方法。
LFT-D	Long Fiber Thermoplastics-Direct	比較的繊維長の長い不連続繊維と熱可塑性樹脂を直接コンパウンドして得られる低コストな複合材成形法のこと。
押出素材	Extruded material	混練により生成される中間素材。
混練	Mixing	強化繊維ロービングと樹脂ペレットをスクリー押出機に投入し、混ぜ合わせる。それによって、不連続繊維強化複合材が得られる。
等方性	Isotropy	物体の物理的性質が方向によって異なること。気体、ふつうの液体、非晶質（アモルファス）の固体（ガラスなど）は等方性を示す。⇔ 異方性
フラグメンテーション（フラグメント）試験	Fragmentation Test	マトリックスに単繊維を埋め込み、繊維方向に平行にマトリックスに引張ひずみを加えることによりせん断強度を推定するテスト方法。繊維は破断し、多数の小片に分断される。
プリフォーム	Preform	RTM や C/C コンポジット等の成形用基材で、強化繊維を立体的な形状にしたもの。
不連続繊維	Discontinuous Fiber	繊維が短く切断されたもの（短繊維）で、マトリクス樹脂内でランダムに配向される。射出成形用繊維強化樹脂でよく用いられる。

ポリアミド (PA)	Polyamide	主鎖にアミド結合 (-NH-CO-) をもつものをポリアミドと呼ぶが、主鎖が脂肪族であるものは、ナイロンとも呼ばれる。耐摩耗性、自己潤滑性に優れ耐衝撃性も大きいという長所があるが、アミド結合のために吸湿性も強いので寸法安定性が悪く、機械的、電氣的な物性が変化する。結晶化度による影響も大きいので成形時には注意が必要である。
ポリプロピレン (PP)	Polypropylene	エチレンの水素ひとつがメチル基に変わった構造のプロピレンの重合体。メチル基の立体的な位置の違いによって特性が大きく異なるが、その中でも結晶化度が高く剛性の優れたアイソタクチック PP が一般的に用いられている。
マテリアルハンドリング (マテハン)	Material Handling	工場内において材料や部品の移動に関する取扱い。移動方法としては、台車、フォークリフト、コンベヤ、ロボット等がある。
溶着接合	Welding	溶接あるいは高温で加熱して接着させること。二次加工技術（成形が一次加工）の一つ。熱可塑性の樹脂部材を、融点を超えるまで加熱し、圧力を加えると分子レベルで結合することを利用した接合方法。樹脂部材を加熱する方法として、超音波溶着、振動溶着、誘導溶着、高周波溶着、熱溶着など、様々な方法がある。
その場重合成形	in-situ polymerization molding	低粘度の ε カプロラクタムを金型内のドライプリフォームに注入し、金型内で固化させる高速成形法
ワイブル分布	Weibull Distribution	炭素繊維は脆性材料であり、その破壊挙動はワイブル分布と呼ばれる確率分布に従うことが知られている。
過熱水蒸気 (SHS)	Superheated Steam (SHS)	常圧で 100℃ 点以上に加熱された水蒸気を指し、高速かつ均一な加熱が可能である。処理によって炭素繊維を表面改質し、エポキシ樹脂等に対する密着性（界面せん断強度）の改善が可能である。
T-RTM	Thermoplastic Resin Transfer Molding	熱可塑性樹脂注入成形を指す。ここではその場重合成形と同義

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発

用語(日本語)・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で補強したプラスチック成形品（樹脂成形品）の総称。
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック。ポリアミドやポリプロピレンといった熱可塑性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料。
CMT	Carbon Fiber Mat Reinforced Thermoplastics	炭素繊維マット強化熱可塑性樹脂。GMTと対比させる形で前プロジェクトで命名したもので、炭素繊維の単糸を面内等方に分散させた CFRTP。
CTT	Chopped Carbon Fiber Tape Reinforced Thermoplastics	炭素繊維テープ強化熱可塑性樹脂。CMTと対比させる形で前プロジェクトで命名したもので、炭素繊維強化熱可塑性樹脂テープを面内等方に分散させた CFRTP。
GMT	Glass-Mat Reinforced Thermoplastics	熱可塑性樹脂（主に PP）をガラス長繊維マットで強化したプラスチック材料であり、スタンパブルシートとも呼ばれる。通常のガラス短繊維入り熱可塑性樹脂と比べて、長繊維が 50%程度も占めているので強度的に優れ、自動車部品などに使われている。
LCA	Life Cycle Assessment	製品やサービスに対する環境影響評価の手法。主に個別の商品の製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用までの各段階における環境負荷を明らかにすることを目的としている。
エポキシ（樹脂）	Epoxy (Resin)	高分子内に残存させたエポキシ基で架橋ネットワーク化させることで硬化させることが可能な熱硬化性樹脂の総称。架橋ネットワーク化前のプレポリマーと硬化剤を混合して熱硬化処理を行うと製品として完成するが、プレポリマーも製品化した樹脂も両者ともエポキシ樹脂と呼ばれる。

官能基	Functional Group	有機化合物に特別の化学性質を与える原子・原子団。例えばアルコールの -OH (ヒドロキシル基)、アルデヒドの -CHO 、カルボン酸の -COOH 、などがある。
強化材	Reinforcement	プラスチックなど、軽量であるが弾性率や強度の低い母材 (マトリックス材) に対して、強度を向上させることを目的として混入させる材料。強化材とマトリックスを組み合わせたものを複合材料とよぶ。強化材にはガラス繊維、炭素繊維、ケブラーなどが用いられる。
コンポジット	Composites	2つ以上の異なる素材を一体的に組み合わせた材料のこと。
スタンピング成形	Stamping Molding	圧縮成形 (Compression Molding) の一種で、FRTP (繊維強化熱可塑性プラスチック) のシート状中間基材を金型外で加熱し、連続的に型の中に投入してプレスする成形方法。金型内で中間基材を加熱冷却するヒートアンドクール成形に比べてサイクルタイムを大幅に短縮できるが、品質保証のための高度なマテハン (材料搬送) 技術が必要となる。
中間基材	Intermediate Material	一方向材、織物、テープ分散シート、マット等、目的に応じた繊維形態と樹脂による、成形直前の材料形態。
等方性	Isotropy	物体の物理的性質が方向によって異なること。気体、ふつうの液体、非晶質 (アモルファス) の固体 (ガラスなど) は等方性を示す。(対義語は異方性)
熱可塑性樹脂	Thermoplastic Resin	ガラス転移温度または融点まで加熱することによって軟らかくなり、目的の形に成形できる樹脂。一般的に、熱可塑性樹脂は切削・研削等の機械加工がしにくい事が多く、加温し軟化したところで金型に押し込み、冷し固化させて最終製品とする射出成形加工等が広く用いられている。ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ABS樹脂、塩化ビニル樹脂、メタクリル酸メチル樹脂、ナイロン、フッ素樹脂、ポリカーボネート、ポリエステル樹脂など。

熱硬化性樹脂	Thermosetting Resin	加熱すると重合を起こして高分子の網目構造を形成し、硬化して元に戻らなくなる樹脂のこと。使用に際しては、流動性を有するレベルの比較的低分子の樹脂を所定の形状に整形し、その後加熱等により反応させて硬化させる。接着剤やパテで A 液（基剤）と B 液（硬化剤）を混ぜて使うタイプがあるが、これは熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂で、混合により重合反応が起こっている。熱硬化性樹脂は硬くて熱や溶剤に強い。フェノール樹脂、エポキシ樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、ポリウレタンなどがある。
破断ひずみ	Failure Strain	外力の作用により、材料が破壊（破断）する時のひずみ。破断する時の応力を破断強度または破断応力ともいう。
プリフォーム	Preform	中間基材とほぼ同義。
プレヒート	Pre-Heat	成型型に基材を設置する前にあらかじめ中間基材に余熱を与えておくこと。
不連続繊維	Discontinuous Fiber	繊維が短く切断されたもの（短繊維）で、マトリックス樹脂内でランダムに配向される。射出成形用繊維強化樹脂でよく用いられる。
ポリプロピレン (PP)	Polypropylene	エチレンの水素ひとつがメチル基に変わった構造のプロピレンの重合体。メチル基の立体的な位置の違いによって特性が大きく異なるが、その中でも結晶化度が高く剛性の優れたアイソタクチック PP が一般的に用いられている。
マトリックス材	Matrix	複合材料において、強化される側の部材を母材（マトリックス）と呼ぶ。繊維強化プラスチックの場合はプラスチック、繊維強化金属の場合は金属、鉄筋コンクリートの場合はコンクリートがそれぞれマトリックスとなる。

溶着接合	Welding	溶接あるいは高温で加熱して接着させること。二次加工技術（成形が一次加工）の一つ。熱可塑性の樹脂部材を融点を超えるまで加熱し、圧力を加えると分子レベルで結合することを利用した接合方法。樹脂部材を加熱する方法として、超音波溶着、振動溶着、誘導溶着、高周波溶着、熱溶着など、様々な方法がある。
連続繊維	Continuous Fiber	すべての繊維が互いに平行に並んでいる一方向層の形態で用いられる長繊維。編んだり、織ったりして用いることができる。また一方向層を様々な方向に積層することで擬似等方性や直交性、異方性のある板をつくることができる。

[テーマ番号 27B] リサイクル炭素繊維の評価技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチックの略。炭素繊維によりプラスチックを強化した軽量複合材料。
GC	Gas Chromatography	気体の混合物を、カラムを通して分離し、各成分を同定・定量する分析手法
アライメント	Alignment	ここでは、引張試験において、試験機、治具、試験片の軸を合わせること
剛性	Stiffness	変形のしにくさ
コンプライアンス補正	Compliance Correction	力学試験において、試験装置や把持部など、本来測定したい試験片以外の部分の変形量を補正することで、試験精度を向上すること。
サイジング剤	Sizing agent	収束剤。市販の炭素繊維は数千～数万本の繊維の束として取り扱われているが、束としてまとまった状態を保持するために塗布されている薬剤をいう。
炭素残渣	Carbonaceous Residue	CFRP のリサイクル過程では、熱処理等によりマトリックスであるプラスチックを分解除去し、より耐熱性に優れる炭素繊維のみを取り出している。炭素残渣とは、分解されきらずに残留したプラスチック由来の炭化物を表す。

マイクロ波加熱	Microwave Heating	マイクロ波帯の電磁波を照射して誘電物質を加熱する手法
誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS)	Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy	高温のプラズマを利用して液中または気中の元素をイオン化し、質量分析を行う手法。多種類の元素を一度に幅広い濃度範囲で測定することができる。
ワイブル分布	Weibull Distribution	炭素繊維は脆性材料であり、その破壊挙動はワイブル分布と呼ばれる確率分布に従うことが知られている。

[テーマ番号 27C] 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック

7. 「接合技術開発」

[テーマ番号 01] アルミニウム/CFRP 接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon fiber reinforced plastics	炭素繊維強化複合材料
FLJ	Friction lap joining	摩擦重ね接合
PA	Polyamide	ポリアミド
PP	Polypropylene	ポリプロピレン
PPS	Polyphenylene sulfide	ポリフェニレンスルフィド

[テーマ番号 02] 残留 γ 相制御中高炭素鋼板の接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
摩擦攪拌接合・FSW	Friction Stir Welding	ツールを高速に回転させながら金属板に押し付け、その摩擦熱で金属を高温に温めつつ、金属を拡販流動させて鋼板を接合する技術。
ナゲット	nugget	スポット溶接で形成された溶接金属領域の名称。
エレメントアークスポット溶接・EASW	Element Arc Spot Weld	鉄アルミの異材接合手法。アルミ板を接合する鋼板と鋼製エレメントで挟み込み、アーク溶接することで鉄-アルミを接合する方法
ウェルドボンド	Weld bond	2枚以上の金属板を接合する方法で接着剤で接合した部位にさらにスポット溶接で接合する方法。
金属間化合物・IMC	Intermetallic compound	鉄-アルミの熔融接合時に鉄アルミ間に形成される脆く延性に乏しい相。
十字引張強度・CTS	Cross tensile strength	スポット溶接部の継手強度を評価するための方法。JISにて規定されたもの。
外加圧スポット	Spot weld with outside pressure	スポット溶接において電極周囲を加圧しながら通電する接合方法
SSRT 試験	Slow strain rate tensile test	水素脆化の評価方法の一つ。水素をチャージした試験片を低歪速度で引っ張ることで、水素が変形部に集中して脆化する状態を作り出して脆化を促進する試験。

マルテンサイト-オーステナイト混合組織・MA	Martensite Austenite Constituent	マルテンサイトとオーステナイトが混在した硬質な組織
------------------------	--	---------------------------

[テーマ番号 03] 「中高炭素鋼の革新的接合技術の開発」

用語（日本語）・略号	English	用語。略号の説明
アークスポット溶接	Arc spot welding	被接合材同士の接合面を加圧し、直線方向に摺動することにより発生する摩擦熱を利用した接合方法で、さらに、急冷機構を付与した接合手法。
引張せん断強さ	Tensile Shear Strength (TSS)	引張せん断試験時の破断荷重
十字引張強さ	Cross Tensile Strength (CTS)	十字引張試験（剥離試験）時の破断荷重

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FSW	Friction Stir Welding	摩擦攪拌接合
PHM	Pre/Post Heating Method	予後熱法

[テーマ番号 05] アルミニウム／異種材料の点接合技術

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
ウエルドボンド	Weld bond	溶接と接着を併用する接合法、抵抗スポット溶接と接着の組合せがその代表例
界面剥離	Interfacial peeling	接合体がその界面で破断すること
凝集破壊	Cohesive failure	接合体の樹脂や接着剤が接合界面ではなく、その内部で破壊すること
金属間化合物	Intermetallic compound	正原子価をもつ金属元素同士が作る化合物、多くは固体としてのみ安定で脆い
合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)	Alloyed zinc coated steel sheet	高温で溶かした亜鉛に鋼材を浸し、表面に亜鉛めっきした後、再加熱してめっき層を鉄と合金化するもの

樹脂官能基	Functional compound	有機化合物を特性づける原子団。機能原子団ともいう。たとえばカルボン酸のカルボキシル基 $-\text{COOH}$, アルデヒドのアルデヒド基 $-\text{CHO}$, アルコールの水酸基 $-\text{OH}$ など
振動減衰	Vibration damping	自動車の操安性を推し量る上での一つの基準、軽量化により悪化する性能
振動騒音(NVH)	Noise, Vibration, Harshness	自動車の快適性を推し量る上での一つの基準、軽量化により悪化する性能
スプリングバック	Spring back	金属や炭素繊維などが成形加工時に元に戻ろうとする変形
炭素繊維強化プラスチック(CFRP)	Carbon fiber reinforced plastics	炭素繊維を樹脂に複合化し、樹脂の機械的性質や物性を改良したプラスチック
耐シャワー性	Resistance against shower cleaning	車体を塗装前にシャワー洗浄する際の接着剤の飛び散り難さを規定する特性
貯蔵安定性	Stability of storage	熱硬化型接着剤が室温での保管時に粘度上昇を起こし難い特性
継手効率	Joint efficiency	母材強度に対する溶接継ぎ手の強度、 $(\text{溶接強度}/\text{母材強度}) \times 100\%$ で表す
抵抗スポット溶接	Resistance spot welding	被溶接物に電流を流しジュール熱を発生させ、その母材を溶融させると同時に加圧することによって点接合する溶接法
点接合	Spot welding	線や面ではなく、点で接合すること、抵抗スポット溶接はその代表例
電気亜鉛めっき鋼板(EG)	Electrolytic zinc coated steel sheet	電気めっき法により亜鉛皮膜を形成した鋼板
電食	Galvanic corrosion	材料間の腐食電位の差によって生じるマクロセル腐食、CFRPは腐食電位が高いため金属側の腐食を促進する
熱歪み	Thermal distortion	材料間の熱膨張差によって接合部材に生じる歪み、自動車の塗装乾燥工程で発生しやすい
ポリプロピレン(PP)	Polypropylene	プロピレンを重合させた熱可塑性樹脂、自動車部品として幅広く使用されている

ポリアミド(PA)	Polyamide	アミド結合によって結合してできたポリマー、一般にナイロンと総称される
ポリフェニレンサルファイド(PPS)	Polyphenylenesulfide	ベンゼン環と硫黄原子が交互に結合した結晶性の熱可塑性樹脂に属する合成樹脂
モルフォロジー	Morphology	接着剤などの有機合成物のマイクロ組織の形態

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
引張せん断強さ	Tensile Shear Strength (TSS)	引張せん断試験時の破断荷重
十字引張強さ	Cross Tensile Strength (CTS)	十字引張試験（剥離試験）時の破断荷重
0.45C		鋼の炭素含有量が 0.45mass% であること
バインダー	Binder	超硬合金に用いられる結合剤

[テーマ番号 07] 鋼材/CFRP 等樹脂材料の接合技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
TEU（20 フィートコンテナ換算個数）	TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)	コンテナ船の積載能力を示す単位。1TEU は 20 フィートコンテナ 1 個分を示す。
摩擦重ね圧接法・FLJ	Friction Lap Joining	2 枚の板を重ね、重ね部に片側より回転するツールを押し付け移動させることで、摩擦熱と加圧力を移動線上に与えながら 2 枚の板を接合する手法。
極性官能基	Polar functional group	官能基とは有機化合物の炭化水素の水素部分に置き換わって結合する原子団のことで有機化合物の特性を決定する。極性官能基はこのうち、電気陰性度の高い酸素や窒素原子を含む官能基のこと。水酸基、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル基などがそれにあたる。
熱可塑性樹脂	Thermoplastic resin	適当な温度に加熱すると軟化して可塑性を持ち、冷却すると固化する樹脂の総称。
熱硬化性樹脂	Thermosetting resin	初期重合物を加熱すると架橋反応を起こし硬化する樹脂の総称。いったん架橋すると再度加熱しても軟化しなくなる。

STEM（走査透過型電子顕微鏡）	Scanning Transmission Electron Microscope	サブナノサイズに集光した電子線を走査しながら試料に照射し、散乱もしくは透過した電子から得られる像を観察する装置。高角度環状暗視野像（HAADF 像）を用いることで、原子レベルの観察が可能となる。
構造設計技術	Structural integrate technology	接合技術、継手および部材の健全性評価技術を用い、新たな接合技術もしくは新たな構造形式を実用化する技術
継手健全性評価技術	Functional assessments technology	接合した継手に求められる静的強度、疲労強度と言った性能要素を確認し、継手の実用性を確証する技術
桁	Girder	構造体を構成する構造要素の一つであり、主に曲げ荷重に対応して配置される部材
柱	Pillar	構造体を構成する構造要素の一つであり、主に圧縮荷重に対応して配置される部材

[テーマ番号 08] 難接合性材料の線接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FSW（摩擦攪拌接合）	Friction Stir Welding	円柱状のツールと呼ばれる部材で摩擦熱を発生させて材料を接合する方法。
FSP	Friction Stir Processing	FSW の原理を金属材料の表面改質技術として利用する方法。
FSSW	Friction Stir Spot Welding	円柱状のツールと呼ばれる部材で摩擦熱を発生させて材料を点接合する方法。
AS（前進側）	Advancing Side	FSW において、ツールの回転方向と接合方向の幾何学的関係でツールと材料の相対速度が大きい側。
RS（後退側）	Retreating Side	AS の反対側。
TIG（ティグ）	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	タングステン電極からアークを発生させる溶接法。
適応制御ロボット FSW	adaptively-controlled robotic FSW	接合中に良好な接合状態へ適応するため、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フィードバック制御するシステムを備えた多関節ロボットを使用した FSW 方法。

EBSD（電子線後方散乱回折）	Electron backscatter diffraction	電子線をバルク試料表面に照射することで発生する非弾性散乱波がバルク試料の結晶構造に応じて回折する現象
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer	電子線が照射することで放出される特性 X 線を検出することで、微小領域における構成元素の同定や各構成元素の比率を分析するもの
SEM（走査型電子顕微鏡）	Scanning Electron Microscope	電子顕微鏡の一種であり、電子線を照射することで放出される二次電子・反射電子・X 線などを検出することで、試料の表面を観察するもの
TRIP（変態誘起塑性）	Transformation induced plasticity	変形によって相変態が誘発され、その結果として大きな塑性変形が発言する現象
残留応力	Residual stress	接合した後に部材内部に残る応力
疲労破壊抵抗	Resistance to fatigue failure	繰り返し負荷を受けるときの破壊に対する抵抗で、通常は疲労き裂進展速度の大きさによって表す
疲労強度	Fatigue strength	構造体あるいは材料が破損する現象で、多くある破損要因のうち最も大きな原因となる。輸送機器構造体においては特に重要となる
S-N 曲線	S-N curve	疲労寿命を表す工学的曲線で、破損繰返し回数と応力振幅の関係で表す。
応力比	R Ratio	疲労寿命は、応力振幅のみならず、最大応力と最小応力の比率にも大きな影響を受ける。後者の比率を応力比と呼び、S-N 曲線はしばしばこの比率の関数として表される。
き裂伝ば抵抗	Fatigue crack propagation resistance	疲労破壊が進む際の抵抗を表すもので、破壊力学的な量である応力拡大係数を介して表現される事が多い
不均質変態域	Inhomogeneously transformed area (band)	材料が不均一な構造変態や組織変化を受けるときに形成される領域で、FSW 構造体で課題となることがあるが、その影響度は明確でない

[テーマ番号 09] 水和物架橋低温接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
水和物架橋接合	Hydrate Bridge Joining	水和物架橋を用いた接合
異種材接合	Mixed material joining	異なった材料の接合
表面調整	Surface control	表層の改質などを含む表面の調整
低温接合	Low temperature joining	低温での接合
ポイド	Void	空孔
SPR	Self Piercing Riveting System	母材にした穴を開けずにリベットを打ち込み、リベットと母材の塑性変形により接合強度を得る機械的接合法
Tox(Tox [®])	Tox	リベットを使わずに、母材を塑性変形させるカシメ接合方法のひとつ
真空紫外線光・UVU	Vacuum Ultra Violet	電磁波の一種で、紫外線の中でもっとも波長の短い 10-200 nm 付近の領域
X 線光電子光 XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	サンプル表面に X 線を照射し、生じる光電子のエネルギーを測定すること。サンプルの構成元素とその電子状態を分析することができる
FAB	Fast atom beam	高速電子線

[テーマ番号 46] 摩擦接合共通基盤研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
EBSD	Electron Back Scatter Diffraction Patterns	電子線を分析対象とする結晶粒に照射し、反射電子として放出された際の回折パターンを検出器面上に投影し、そのパターンから結晶方位を解析する方法。
FEM	Finite Element Method	有限要素法。数値解析手法の一つ。空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算する。
KAM	Kernel Average Misorientation	注目するピクセルと隣接ピクセルとの方位差の平均値であり、微小領域の塑性ひずみ勾配を表す指標として用いる。
MPS 法	Moving Particle Semi-implicit Method	粒子法。数値解析手法の一つ。計算点を物理量とともに移動する粒子として連続体を扱う。

QT(焼入れ・焼き戻し)鋼	Quenched and Tempered Steel	焼入れ（鋼をオーステナイト組織の状態に加熱した後、水中または油中で急冷することによって、マルテンサイト組織の状態に変化させる熱処理）後に、焼き戻し（マルテンサイト組織の状態から鋼を再加熱し、一定時間保持した後に徐冷することで、焼入れによって硬化した鋼に靱性を与える目的で行われる熱処理）を行なった鋼。
S35C 鋼	S35C Steel	炭素含有量が 0.35mass%である炭素鋼。
S45C 鋼	S45C Steel	炭素含有量が 0.45mass%である炭素鋼。
S55C 鋼	S55C Steel	炭素含有量が 0.55mass%である炭素鋼。
SZ	Stir Zone	攪拌部。FSW において大きな塑性変形により形成された再結晶組織からなる領域。
TMAZ	Thermo-Mechanically Affected Zone	攪拌部（SZ）の外側で加熱と塑性加工を受けた領域。
TRIP(変態誘起塑性)鋼	Transformation Induced Plasticity Steel	加工によってマルテンサイト変態を誘発させ、それによって発現する大きな塑性を利用して強度－延性バランスを意図的に向上させた鋼。
WC	Tungsten Carbide	炭化タングステン
W-Mo-Re 合金	W-Mo-Re alloy	高強度、耐熱性および耐磨耗性を有するタングステンの一部を、加工性の良いモリブデンにおきかえ、レニウムを添加し、延性を改善した合金。
線形摩擦接合・LFW	Linear Friction Welding	材料同士を押し付け、線形運動で擦りあわせた際に生じる摩擦を熱源として材料の軟化・バリの排出により新生面の形成に伴う接合法。
線形摩擦攪拌接合・LFSW	Linear Friction Stir Welding	材料同士を押し付け、線形運動で擦りあわせ、界面にまで十分線形運動エネルギーを伝達することで強ひずみ加工を付与し、再結晶により接合する接合法。

超硬合金	Cemented carbide	高融点金属の炭化物を主成分とする耐摩耗性の優れた高い硬さの粉末冶金材料。最も代表的な超硬合金は、炭化タングステン (WC) と結合剤 (バインダ) のコバルト (Co) を混合して焼結したものである。
窒化ケイ素	Silicon nitride	化学式 Si_3N_4 の非酸化物セラミックス。高温耐熱性に優れ、高温強度が高く、耐摩耗性も優れる。
抵抗スポット溶接	Resistance Spot welding	2枚以上の母材 (被溶接材料) を圧着しつつ電流を流し、その抵抗熱で金属を溶かして接合する接合法。
ナゲット	Nugget	抵抗スポット溶接における熔融金属部。
摩擦攪拌接合・FSW	Friction Stir Welding	ツールを回転させながら、金属板に押し付け、その摩擦熱、加工発熱、材料流動により接合する接合法。
摩擦重ねスポット溶接・FLSW	Friction Lap Spot Welding	ツールを2枚重ね材料の片側に押し込んだ状態で回転による摩擦熱を利用して接合する重ね点接合法。
摩擦重ね溶接	Friction Lap Welding	2枚重ね材料の片側にツールを強く接触した状態で回転と平行移動をさせ、発生した摩擦熱を利用して接合する重ね線接合法。
両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法	Flat Friction Stir welding	FSW ツールの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 FSW 接合法。

[テーマ番号 53] 構造材料用接着技術の開発

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
ナノ有限要素法	NanoFEM	ナノスケールにおける有限要素法 (FEM) 解析。FEM は構造物を複数の有限個の要素に分割して行う数値解析のこと。
応力発光	Mechano luminescence	外部からの機械刺激による発光。機械刺激の種類としては摩擦、衝撃、圧縮、引っ張り、ねじりなど。
DCB 試験	Double Cantilever Beam Test	接着の評価等に用いられる双片持ちはり試験のこと。

STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	走査透過電子顕微鏡のこと、薄膜試料を透過した電子を検出して、走査像を得る装置
トモグラフィー	Tomography	試料を連続的に傾斜させて撮影した多数の投影像をコンピュータで画像処理し、3 次元的内部構造を再構成する手法
EELS	Electron Energy-Loss Spectroscopy	電子が薄片試料を透過する際に原子との相互作用により失うエネルギーを測定することによって、物質の構成元素や電子構造を分析する手法
EDX	Energy Dispersive X-ray spectrometry	電子線照射により発生する特性 X 線を検出し、元素分析や元素マッピングを行う手法
プラズマ処理	Plasma treatment	イオン化したガス（プラズマガス）を吹き付けて、接着性を改善する処理
火炎処理	Flame treatment	火炎を当てて、接着性を改善する処理
6-ナイロン	6-Nylon	ポリアミド 6 (PA6) のこと。汎用で高強度な熱可塑樹脂。
PEO	Polyethylene oxide	高分子化合物（ポリエーテル）の一種、直鎖状の構造をもつ
ポリロタキサン	Polyrotaxane	環状分子を棒状分子が貫通した構造によってつくられる高分子
コアシェルゴム粒子	Core-shell rubber	多層構造をもつ粒子で、中心がゴムのもの
凝集破壊	Cohesive failure	凝集破壊。接着した物が破壊したとき、接着剤層内部で破壊が生じている状態
Fick の拡散則	Fick's laws of diffusion	物質の拡散に関する基本法則
SAICAS	Surface and interfacial cutting analysis system	斜め切削加工により、接着性層（剥離強度）、膜強度（せん断強度）等の材料の機械的性質の評価するシステム
原子間力顕微鏡	Atomic Force Microscope	探針と試料に作用する原子間力を検出することによって表面形状や特性を測定する装置
破壊じん性	Fracture toughness	ぜい性的な破壊に対する材料の抵抗力

ENF 試験	End notched flexure test	端面切欠き曲げ試験。純粋なモードⅡ負荷におけるエネルギー解放率の限界値を求める方法
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy	サンプル表面に短パルスでレーザーを当てることで発生するマイクロプラズマを用いた高速な化学分析手法
SFG	Sum-Frequency Generation Spectroscopy	2次の非線形光学効果を利用した振動分光法で、表面・界面選択的な分光法
畳み込みニューラルネットワーク	Convolutional neural network	画像認識を行うための機械学習のモデル

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
摩擦攪拌接合・FSW	friction stir welding	接合ツールを回転させながら接合材に押圧し、摩擦熱と塑性流動により接合する方法。材料を固相で接合できるため他の手法には無い利点を有する
超ハイテン	advanced high strength steel	従来のハイテンと比較し更に引張強度を高めた鋼板。高強度と共に加工性が要求される。
テーラードブランク・TWB	Tailor-welded blank	差厚、差強度の鋼板を溶接したブランク材。
両面 FSW	double-sided friction stir welding	表裏面に回転ツールを配置した FSW 方法。
適応制御ロボット FSW	adaptively-controlled robotic FSW	接合中に良好な接合状態へ適応するため、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フィードバック制御するシステムを備えた多関節ロボットを使用した FSW 方法。
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer	電子線が照射することで放出される特性 X 線を検出することで、微小領域における構成元素の同定や各構成元素の比率を分析するもの
SEM	Scanning Electron Microscope	電子顕微鏡の一種であり、電子線を照射することで放出される二次電子・反射電子・X 線などを検出することで、試料の表面を観察するもの

異種金属 FSW 接合	Dissimilar metal FSWs	2つ以上の異なった種類の金属を FSW で接合する技術、あるいはそれによって製作した接合体。適材適所あるいは機能分離ともよべる接合体になる。
疲労強度	Fatigue strength	構造体あるいは材料が破損する現象で、多くある破損要因のうち最も大きな原因となる。輸送機器構造体においては特に重要となる
S-N 曲線	S-N curve	疲労寿命を表す工学的曲線で、破損繰返し回数と応力振幅の関係で表す。
応力比	R Ratio	疲労寿命は、応力振幅のみならず、最大応力と最小応力の比率にも大きな影響を受ける。後者の比率を応力比と呼び、S-N 曲線はしばしばこの比率の関数として表される。
き裂伝ば抵抗	Fatigue crack propagation resistance	疲労破壊が進む際の抵抗を表すもので、破壊力学的な量である応力拡大係数を介して表現される事が多い
不均質変態域	Inhomogeneously transformed area (band)	材料が不均一な構造変態や組織変化を受ける際に形成される領域で、FSW 構造体で課題となることがあるが、その影響度は明確でない
重ね合わせ接合	Lapped joint	実構造強度部材を製作する際の接合形状を表すものである。突合わせ接合体よりも頻繁に用いられるが、その強度には寸法依存があるため、評価方法は途上にある。

[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)

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
異材接合	Dissimilar joining	2種類以上の異なる材料を接合すること。
マルチマテリアル	Multi material	異なる金属や材料を接合し、併用することで材料特性を改善、高強度化や軽量化を実現する可能性を持つ素材のこと。

摩擦攪拌点接合 (FSSW)	Friction stir spot welding	先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を接合させる部材（母材）の接合部に貫入させ、これによって摩擦熱を発生させて母材を軟化させるとともに、工具の回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混ぜることで複数の部材を一体化させる接合法。
アーク溶接	Arc welding	気体中の放電現象（アーク放電）を利用して、金属同士をつなぎ合わせる溶接法。
抵抗スポット溶接	Resistance spot welding	2枚以上の母材（被溶接材料）を圧着しつつ電流を流し、その抵抗熱で金属を溶かして溶接する接合法。
レーザ溶接	Laser welding	レーザ光を熱源として主として金属に集光した状態で照射し、金属を局部的に熔融・凝固させることによって溶接する方法。
レーザブレイジング	Laser brazing	熱源にレーザを用いるろう付方法であり、従来のろう付方法と同様に、ろう材をあらかじめろう付部に設置してレーザを照射する置きろう方式と、ろう材を連続的に供給しながらレーザを照射する差しろう方式がある。
シミュレーション	Simulation	想定する場面を再現したモデルを用いて分析すること。
その場（In-Situ）観察	In situ observation	ある状態のまま組織等の観察を行うこと。例えば引張試験中の応力負荷状態で組織観察などを行うこと。
シャルピー衝撃試験	Charpy impact test	切り欠きのはいった角柱状の試験片に対して高速で衝撃を与えることで試験片を破壊し、破壊するのに要したエネルギーと試験片の靱性を評価するための衝撃試験。
FEM	Finite Element Method	有限要素法。数値解析手法の一つ。空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算をする。

6000系アルミニウム合金	6000 series aluminum alloy	主に Mg と Si を添加し、純アルミニウムの強度を増加させたアルミニウム合金。この合金系は強度、耐食性に優れており、微量な Cu(銅) を添加する事により強度を上げた 6061 材等がある。
ハイテン（高張力鋼）	High Tensile Strength Steel	合金成分の添加、組織の制御などを行って、一般構造用鋼材よりも強度を向上させた鋼板。
GA 鋼板（合金化亜鉛めっき鋼板）	Galvannealed steel	熔融亜鉛めっき鋼板に熱処理を施し、鉄・亜鉛合金を生成させた鋼板。
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で強化したプラスチック成形品（樹脂成形品）の総称。
TSS	Tensile Shear Strength	引張せん断強さ。引張でせん断負荷をかけた時の強さ。
CTS	Cross Tension Strength	十字引張強さ。引張で剥離負荷をかけた時の強さ。
疲労強度	Fatigue strength	材料の疲労において、物体が振幅一定の繰返し応力を受けるとき、何回負荷を繰り返しても疲労破壊に至らない、またはそのように見なされる応力値のこと。
界面反応	Interface reaction	二つの相の界面で起こる反応。主に異なる材料の接合界面で起こる。
金属間化合物	Intermetallic compound	2種類以上の金属からなる化合物。異材接合では原子拡散により接合界面部に形成しやすい。
めっき	Plating	所望の物質表面に金属の膜を形成させる手法。防食性、装飾性、機能性等を付与することが可能になる。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
接着接合	Adhesive joint	接着剤を使って物と物を繋ぎ合わせるこ と
炭素繊維強化プラスチック	Carbon fiber reinforced plastic: CFRP	樹脂を炭素繊維で強化することで、樹脂単体よりも高い強度や剛性を得る材 料
施工	Construction	計画された工事を実施すること

変形・破壊メカニズム	Deformation/fracture mechanism	どのようなメカニズムで変形・破壊していくのかということ
実証	Demonstration	確かな証拠をもって証明すること 事実によって明らかにすること
耐久性	Durability	ある材料が外部からの物理的・化学的な影響に対して、どれだけ長く抵抗できるかを示す性能のこと。
耐環境性	Environmental resistance	使用時に受ける熱的（温度・熱衝撃）や力学的（振動・衝撃）を想定した環境に耐える性能のこと
破壊形態	Fracture morphology	材料が分離してしまう破壊の形態のこと
ガルバニック腐食	Galvanic corrosion	異種の金属や材料が電解質溶液を介して電気回路ができたとき、両者の腐食電位の違いのため、よりひ（卑）な電位の金属の腐食が促進される現象
超強度鋼（高張力鋼）	High tensile strength steel	一般構造用鋼材よりも強度を向上させた鋼材、日本ではハイテン、高抗張力鋼
接合	Joining	つなぎ合わせること
レーザ溶着	Laser welding	レーザ光を照射し、被着物（樹脂・プラスチック）の境界面で熱を発生させて溶着・溶接する接合工法
力学的特性	Mechanical properties	材料力学・材料強度学などにおいて、材料がその種類の違いにより引張・圧縮・せん断などの外力に対してどの程度持つかなどの諸性質
マルチマテリアル	Multi material	鋼板、アルミニウム、CFRPなどがそれぞれ持つ優れた特性を活かしつつ、併用する概念
品質保証	Quality assurance	製品や部品が「決められた品質」であるかどうかを確かめること
表面処理	Surface treatment	材料表面の美化・硬化また耐食化などのために行う種々の処理の総称のこと
熱的特性	Thermal properties	耐熱性、熱吸収性、熱放熱性、熱伝導性、熱反射性などの性能
信頼性評価	Reliability assessment	与えられた条件下で定められた期間中、要求されている機能を問題なく行うことができるかどうかを判定すること

[テーマ番号 64] マルチマテリアル接合技術の基盤研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
異材接合	Dissimilar joining	2 種類以上の異なる材料を接合すること。
マルチマテリアル	Multi material	異なる金属や材料を接合し、併用することで材料特性を改善、高強度化や軽量化を実現する可能性を持つ素材のこと。
メゾスケール	Meso-scale	サブ mm オーダーのスケール。
マイクロスケール	Micro-scale	μm オーダーのスケール。
ナノスケール	Nano-scale	nm オーダーのスケール。
トランススケール	Trance-scale	マクロからメゾ、マイクロ、ナノレベルへと一貫したスケール。
摩擦攪拌点接合 (FSSW)	Friction stir spot welding	先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を接合させる部材（母材）の接合部に貫入させ、これによって摩擦熱を発生させて母材を軟化させるとともに、工具の回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混ぜることで複数の部材を一体化させる接合法。
アーク溶接	Arc welding	空気（気体）中の放電現象（アーク放電）を利用して、同じ金属同士をつなぎ合わせる溶接法。
抵抗スポット溶接	Resistance spot welding	2 枚以上の母材（被溶接材料）を圧着しつつ電流を流し、その抵抗熱で金属を溶かして溶接する接合法。
レーザ溶接	Laser welding	レーザ光を熱源として主として金属に集光した状態で照射し、金属を局部的に熔融・凝固させることによって溶接する方法。
レーザブレイジング	Laser brazing	熱源にレーザを用いるろう付方法であり、従来のろう付方法と同様に、ろう材をあらかじめろう付部に設置してレーザを照射する置きろう方式と、ろう材を連続的に供給しながらレーザを照射する差しろう方式がある。

シミュレーション	Simulation	想定する場面を再現したモデルを用いて分析すること。
集束イオンビーム装置	Focused ion beam	集束したイオンビームを試料に照射し、加工や観察を行う装置。
その場 (In-Situ) 観察	In situ observation	ある状態のまま組織等の観察を行うこと。例えば引張試験中の応力負荷状態で組織観察などを行うこと。
透過型電子顕微鏡 (TEM)	Transmission Electron Microscope	観察対象に電子線をあて、透過してきた電子線の強弱から観察対象内の電子透過率の空間分布を観察するタイプの電子顕微鏡のこと。
シャルピー衝撃試験	Charpy impact test	切り欠きのはいた角柱状の試験片に対して高速で衝撃を与えることで試験片を破壊し、破壊するのに要したエネルギーと試験片の靱性を評価するための衝撃試験。
FEM	Finite Element Method	有限要素法。数値解析手法の一つ。空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算をする。
6000 系アルミニウム合金	6000 series aluminum alloy	主に Mg と Si を添加し、純アルミニウムの強度を増加させたアルミニウム合金。この合金系は強度、耐食性に優れており、微量な Cu(銅) を添加する事により強度を上げた 6061 材等がある。
ハイテン (高張力鋼)	High Tensile Strength Steel	合金成分の添加、組織の制御などを行って、一般構造用鋼材よりも強度を向上させた鋼板。
GA 鋼板 (合金化亜鉛めっき鋼板)	Galvannealed steel	溶融亜鉛めっき鋼板に熱処理を施し、鉄-亜鉛合金を生成させた鋼板。
CFRP	Carbon Fiber-Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で強化したプラスチック成形品 (樹脂成形品) の総称。
TSS	Tensile Shear Strength	引張せん断強さ。引張でせん断負荷をかけた時の強さ。
CTS	Cross Tension Strength	十字引張強さ。引張で剥離負荷をかけた時の強さ。
疲労強度	Fatigue strength	材料の疲労において、物体が振幅一定の繰返し応力を受けるとき、何回負荷を繰り返しても疲労破壊に至らない、またはそのように見なされる応力値のこと。

界面反応	Interface reaction	二つの相の界面で起こる反応。主に異なる材料の接合界面で起こる。
金属間化合物	Intermetallic compound	2種類以上の金属からなる化合物。異材接合では原子拡散により接合界面部に形成しやすい。
めっき	Plating	所望の物質表面に金属の膜を形成させる手法。防食性、装飾性、機能性等を付与することが可能になる。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
抵抗スポット溶接	Resistance Spot Welding	溶接する金属母材の上下から電極をあて大電流を流し加熱し、冷却、母材を再凝固して2つの母材を溶接する圧接法
摩擦攪拌接合・FSW	Friction Stir Welding	先端に突起のある円筒状の工具を回転させながら強い力で押し付けることで突起部を接合させる部材（母材）の接合部に貫入させ、これによって摩擦熱を発生させて母材を軟化させるとともに、工具の回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混ぜることで複数の部材を一体化させる接合法
摩擦攪拌点接合・FSSW	Friction Stir Spot Welding	摩擦攪拌接合と同様、摩擦攪拌現象を利用した点接合法
レーザー樹脂溶着・レーザー溶着	Laser Plastic Welding	レーザー光により溶着界面で熱エネルギーを発生させ、非接触で溶融させる加工方法
S-N 線図	S-N Diagram (S-N Curve)	材料の疲労破壊において、一定の振幅で繰り返し負荷される応力と破断までの負荷の繰り返し数の関係を示した曲線
JASO 耐久試験	JASO Standards : M - Material and Surface Treatment	公益社団法人自動車技術会が定めた試験方法であり、本テーマでは、材料の腐食試験方法を示す
重ね継手	Lap Joint	締結されるものの端が互いに重なりあった状態で接合された継手
マルチマテリアル車体	Multi Material Car Body	鋼材、アルミニウムをはじめとする金属・非鉄金属や炭素繊維強化複合素材（CFRP）などの樹脂材料を組み合わせで作製される自動車

炭素繊維強化複合材料	Carbon Fiber Reinforced Composite	繊維強化複合材料の一種で、強化繊維に炭素繊維を用いた複合材料
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite	熱可塑性樹脂を用いて、炭素繊維で強化された複合材料
機械学習	Machine Learning	明示的な指示を用いることなく、その代わりにパターンと推論に依存して、特定の課題を効率的に実行するためにコンピュータシステムが使用するアルゴリズムおよび統計モデルの科学研究

8. 「戦略・基盤研究」

[テーマ番号 29] 新構造材料の技術・研究戦略
特に無し。

[テーマ番号 30] 技術動向調査分析
特に無し。

[テーマ番号 31] 高分子複合材料技術開発動向調査
特に無し。

[テーマ番号 32] 共通基盤技術の研究調査
特に無し。

[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
双晶変形	Twin deformation	特定の結晶原子面を境として両側が対称な原子構造をとる場合に現れる特殊な結晶構造で、あるせん断応力を受けた時にすべりによらず双晶形成によって変形する現象。
加工硬化	Work hardening	金属材料が、加工変形によって次第に硬くなる現象。原因は、材料結晶中の転位が加工応力で運動すると同時に増殖して内部応力を蓄積し、数が増えた転位同士の交切などの相互作用で転位が動きにくくなり、硬化が起こる。
双晶誘起塑性	Twinning-induced Plasticity	双晶変形などの変形中に発現する現象が加工硬化率を著しく増加させること。
ポーラス金属	Porous metal	内部に多数の気孔を有する金属で、気孔形態、気孔サイズ、気孔率が異なる様々な材料が含まれる。
摩擦攪拌インクリメンタル加工	Friction stir incremental forming	インクリメンタル加工と摩擦攪拌接合を組合わせた金属薄板成形用に提案された塑性加工プロセスであり、高速回転させた棒状工具を金属薄板に押し込んで移動させることで金属薄板を成形する。

プラトー応力	plateau stress	多孔質材料の破壊過程は、線形弾性領域、プラトー領域、緻密化領域に分けることができる。圧縮応力-圧縮ひずみ曲線において、プラトー領域内の応力で、通常 20~30% の圧縮ひずみでの圧縮応力の平均値。
--------	----------------	--

[テーマ番号 42] 材料・接合等技術動向調査研究
特に無し。

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
応力腐食割れ・SCC	Stress Corrosion Cracking	腐食性の環境におかれた金属材料に引張応力が作用して生ずる割れ現象であり、材料表面の酸化皮膜の保護性が局所的に失われることにより発生し、その形態から粒界型 SCC (IGSCC) と粒内型 SCC (TGSCC) に分けられる。
水素脆化	hydrogen embrittlement	鋼材中に吸収された水素により鋼材の強度（延性又はじん性）が低下する現象。水素脆化は、腐食、溶接、酸洗い、電気メッキなどによる水素吸収が原因とされる。この水素吸収による破壊は「遅れ破壊」とも呼ばれる。
破壊力学	fracture mechanics	材料力学をベースとしながらもそれでカバーできない分野に考え出された工学の一分野であり、欠陥もしくはき裂を有する部材・材料について、破壊現象を定量的に取り扱う工学的手法の一つである。
位相最適化	Topology optimization	構造物の位相（空間）を設計変数として最適化する方法。最も自由度の高い構造最適化手法で、既存概念にとられない設計案の導出が可能。

[テーマ番号 44] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
ブラッグエッジイメージング	Bragg-edge imaging	中性子を波長分解して透過イメージングするもので、結晶相、結晶歪み、結晶子サイズ、結晶配向などの情報を得ることができる手法である。
小角散乱	Small Angle Scattering	中性子や X 線を試料に入射し、散乱角度が数度以下の小角領域の散乱強度分布を計測する方法で、粒子サイズ等のマイクロ組織情報を得ることができる。

[テーマ番号 45] 構造用接着技術に関する Feasibility Study

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AFM	Atomic Force Microscope	探針と試料に作用する原子間力を検出するタイプの顕微鏡、原子レベルの分解能を有する。
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy	サンプル表面に短パルスでレーザーを当てることで発生するマイクロプラズマを用いた高速な化学分析手法。
SFG	Sum-Frequency Generation Spectroscopy	2 次の非線形光学効果を利用した振動分光法で、表面・界面選択的な分光法。
STEM-EELS	Scanning Transmission Electron Microscopy and Electron Energy-Loss Spectroscopy	細く絞った電子ビームを薄膜資料に照射し、電子が試料を透過する際に原子との相互作用により失うエネルギーを測定することによって、物質の構成元素や電子構造を分析する手法。
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	試料表面に X 線を照射し、試料表面から放出される光電子の運動エネルギーを計測することで、試料表面を構成する元素の組成、化学結合状態を分析する手法。
MD シミュレーション	Molecular Dynamics Simulation	原子ならびに分子の物理的な動きのコンピュータシミュレーション手法。

[テーマ番号 49] マルチマテリアル設計技術開発(FS 研究)

特に無し。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。
ブラッグエッジ イメージング	Bragg-edge imaging	中性子を波長分解して透過イメージングするもので、結晶相、結晶歪み、結晶子サイズ、結晶配向などの情報を得ることができる手法である。
小角散乱	Small Angle Scattering	中性子や X 線を試料に入射し、散乱角度が数度以下の小角領域の散乱強度分布を計測する方法で、粒子サイズ等のマイクロ組織情報を得ることができる。

9. 「マルチマテリアル技術開発」

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
BIW	Body-In-White	車体から、ドア、シート、ステアリング、内装材、ガラス、ステアリング等の部品を除いた部分。
CZM	Cohesive Zone Model	き裂前方に結合力を受ける細長い領域を仮定し、結合力の連続的な低下によってき裂の発生および成長を表現する破壊力学モデル。結合力モデルとも呼ばれる。汎用 FEM ソフトウェアにおいては、結合力を表現するための数値モデルを指すこともある。
FSSW	Friction Stir Spot Welding	FSW を利用した点接合法。
FSW	Friction Stir Welding	先端に突起のある工具を回転させながら部材（母材）の接合部に貫入させ、発生する摩擦熱によって母材を軟化させるとともに、回転によって接合部周辺を塑性流動させて攪拌し、部材を一体化させる接合法。
異材接合	dissimilar joining	異なる材料同士を接合すること。
界面評価	surface evaluation	材料界面に対する評価。主に異材接合を対象とした力学的な強度に注目している。
剛性	stiffness	曲げやねじりの力に対する、寸法変化（変形）のしづらさの度合いのこと。
構造最適化	structural optimization	機械的な構造物の剛性、質量などの特性を目標とする最適な値に近づけること。
固有振動数	natural frequency	振動系が自由振動を行う際、その振動系に働く特有の振動数のこと。
最適構造	optimal structure	数学・物理学に基づく最適設計法より得られた構造・形状のこと。
最適設計法	optimal design methodology	力学的境界条件を設定した構造モデルを用いて、数理的な方法により、あらかじめ決められた設計・境界条件から所望の性能を最大限得られる構造・形状を求める方法論のこと。

サブストラクチャリング手法	substructuring method	部分構造合成法とも呼ばれ、複数の要素を縮退することで、計算コストを縮小する解析手法。
車体	trimmed body	自動車からエンジン、トランスミッション、サスペンション、排気系を除いた部分。ただし、「車体の軽量化」という場合、ほぼ全ての部品を外した BIW の意味で使われることが多い。
衝突	crash	相対的に運動する 2 つの物体が微小時間の接触によって互いに強い負荷を及ぼし、相対速度を変える現象。
設計ツール	design tools	設計のための計算機のソフトウェアなどのこと。
接合手法	joining method	接合に用いられる方法のこと。
接着	adhesion	物体どうしが接合して離れないように作用する化学的ないし物理的な力。およびその現象。
ソルバー	solver	FEM 解析計算等で入力された条件に基づいて、結果を求める演算処理部のこと
大規模モデル	large scale model	数値計算をする際の自由度の数が大きい数値計算モデルのこと、通常数十万自由度以上のモデルのことを指すことが多い。
トポロジー最適化	topology optimization	形状だけでなく形態の変化も許容する最も自由度の高い最適設計法のこと。
パラメータ同定法	parameter identification method	例えば材料特性値を同定する際に用いる手法の総称。
プリポスト	pre-post	プリ：解析計算前の処理（メッシュ分割など）。 ポスト：解析計算結果の可視化処理（コンター表示など）。
マルチマテリアル	multi-material	特性が異なる金属や材料などを組み合わせて併用すること。
モデル化技術	modeling technique	有限要素法などを用いた解析モデルを構築する際の技術のこと。
有限要素法（FEM）	finite element method	偏微分方程式を解くための、数値計算手法の一つ。

リバースエンジニアリング	reverse engineering	通常のものづくりとは逆の流れで処理を行うこと。製品から諸元を求めることや、メッシュモデルから CAD データを作成すること。
レベルセット関数	level set function	ここでは、トポロジー最適化を行うための設計変数であり、 $[-1:1]$ で定義される関数。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置付け

1.1 事業の背景

我が国の CO₂ 排出総量（2018 年度）は約 11 億 38 百万 t であり、このうち運輸部門の排出量はこの 18.5%を占め 2 億 1 千万 t となっている。自動車はこの運輸部門のうち 86%の排出量を占め、日本全体の CO₂ 排出量の 16%を占めている事になる。

また国内のエネルギー使用量(2018 年度)は 1.4 万 PJ であり、この中の約 23%を運輸部門が占めており、そのうちガソリン、軽油、LP ガス等の石油由来エネルギーは 98%を占めている。

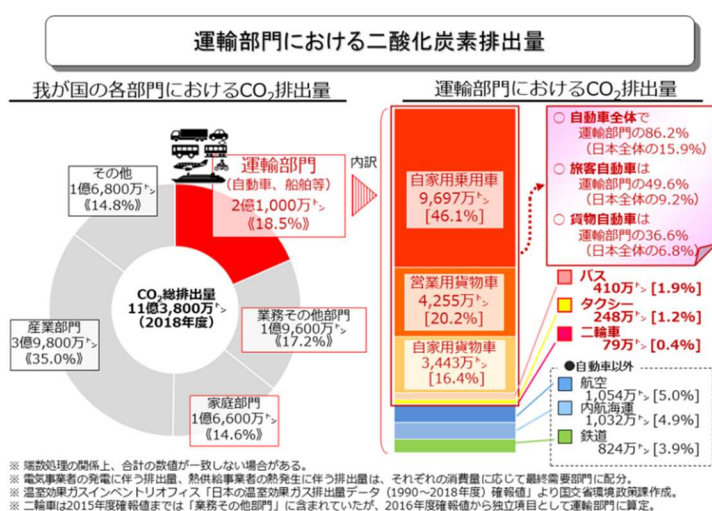


図 I-1 運輸部門における CO₂ 排出量

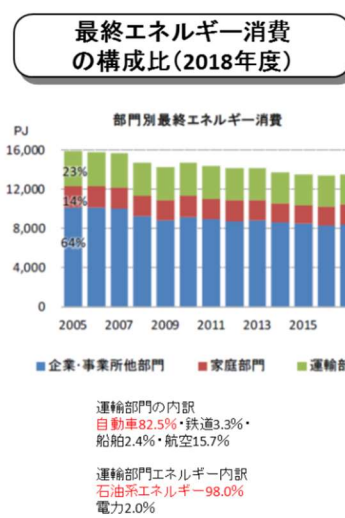
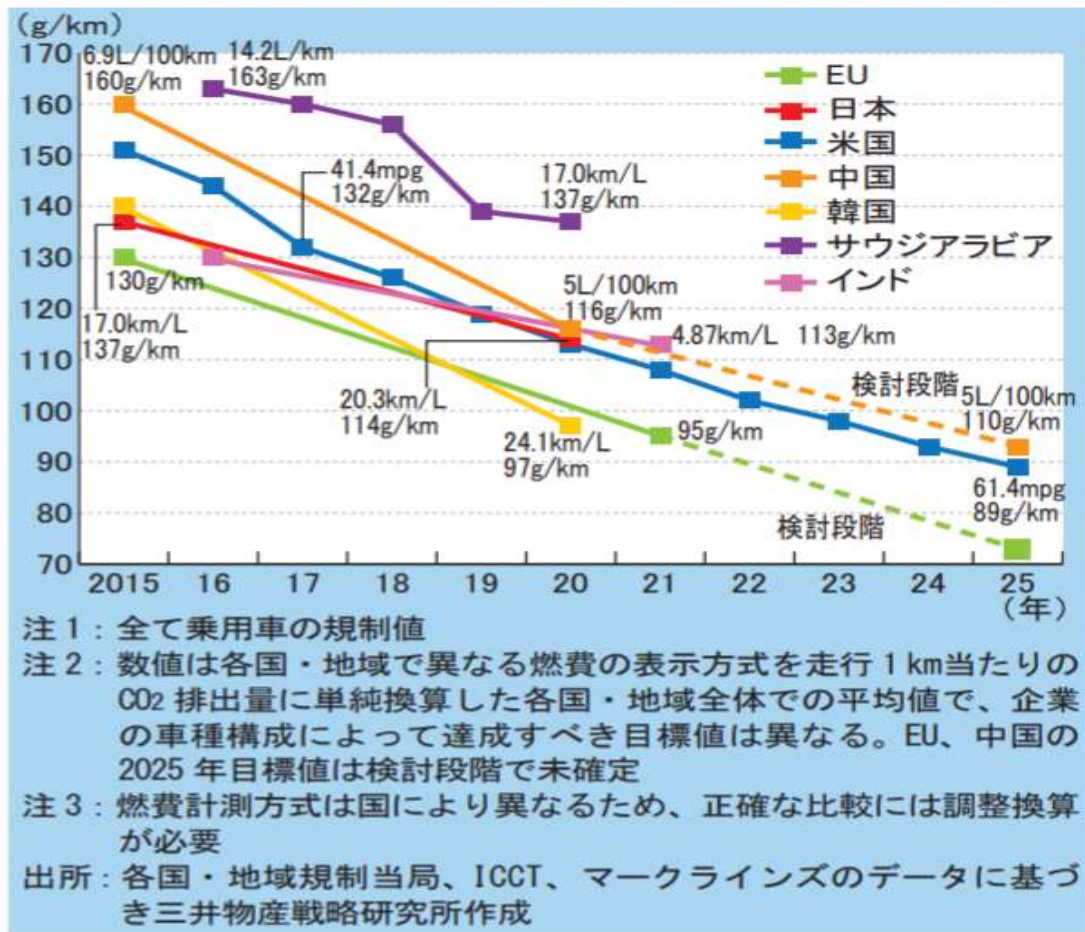


図 I-2 最終エネルギー消費の構成比の内訳

この中で特に自動車は 83%を占め、自動車の燃費改善は社会的に非常に大きな影響がある。自動車の燃費改善に関しては各国での取り組みが行われている中、特に欧米諸国での CO₂ 排出量規制の強化が進められており、自動車の CO₂ 排出量削減、燃費の向上が強く求められている。今後の CO₂ 排出量削減に向けて、自動車の燃費向上に係る技術開発が重要となる。このような中、自動車用内燃機関の効率向上やハイブリッド自動車の開発、電気自動車の開発により燃費改善が進められているが、これと共に自動車車体の軽量化が燃費の改善に非常に重要になる。

近年の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が進められている。その際、異種材料接合が鍵となるが、材質が大きく異なる材料間の接合や、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、今後克服すべき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、耐食性、耐衝撃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。それと同時に、これらの機能を損なうことのない接合技術や成形加工技術等の開発が求められる。



出展：三井物産戦略研究所戦略研レポート「世界の燃費規制の進展と自動車産業の対応」
 (https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2017/03/15/170315i_nishino.pdf)

図 I -3 世界の燃費規制動向 (CO₂ 排出量 g/km)

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）では、「革新的新構造材料等研究開発」において2014年から2022年まで、輸送器機の構造材料の軽量化を目指すこととした。このプロジェクトにおいては、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（Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」という。）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する。これにより、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、我が国の部素材産業及びユーザー産業の国際競争力強化を目指す。

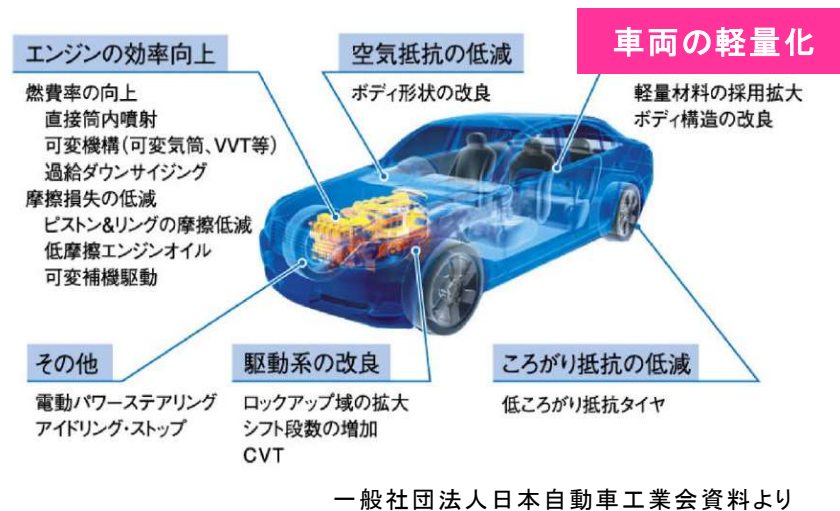


図 I -4 自動車の燃費向上に係る部位

1.2 事業の目的及び意義

我が国は高張力鋼では他国を圧倒する技術を有し、また炭素繊維においてもその市場シェアの 70~90%以上を占める等、輸送機器の軽量化に関わる素材の研究開発、事業化において強みを持っている。このような状況下で輸送機器、特に自動車の軽量化に関しては強みとしている素材を応用することで、CO₂排出量の削減に繋がる。

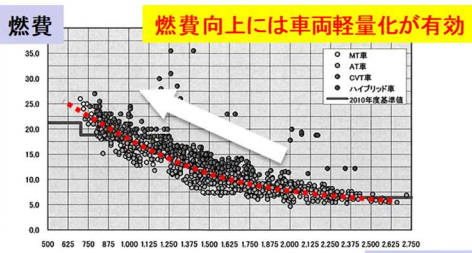
そこで、本プロジェクトでは車体等の構造材を形成する素材である、鋼材（鋼板）、アルミニウム材、マグネシウム材、チタン材、炭素繊維、炭素繊維強化樹脂とこれら構造材を接合する接合技術の研究開発を委託事業により輸送機器の CO₂ 排出量の削減を進める。

輸送機器(次世代自動車・航空機・高速鉄道)の燃費向上に向けた部素材開発

1. 各部素材を適材適所に使う**マルチマテリアル化**による**最適設計・軽量化**推進が国際的なトレンド。
2. マルチマテリアル化に伴う異種部素材の**接合技術**が重要に。

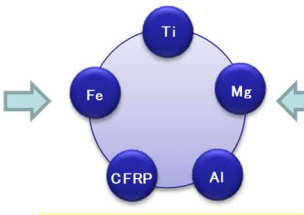
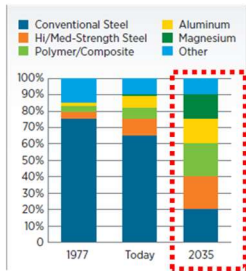
車両重量と燃費の関係

出典: 国土交通省



車両重量

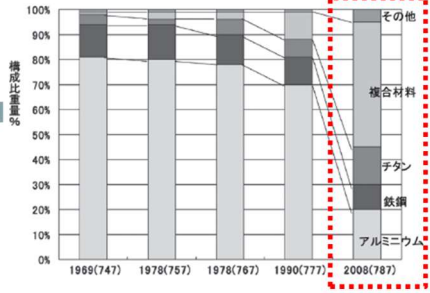
次世代自動車における各部素材の使用比率



マルチマテリアル化を推進

出典: Vehicle Technologies Program: Goals, Strategies, and Top Accomplishments (米国エネルギー省)

次世代航空機における各部素材の使用比率



ボーイング社における民間旅客機機体構造材料の推移

図 I -5 輸送器機軽量化とマルチマテリアル素材の活用

軽量化を実現するためのマルチマテリアル化を進める上で、我が国の素材産業を本プロジェクトで束ね、オールジャパン体制で研究支援をすることにより、軽量化とマルチマテリアルを実現する接合技術開発をシームレスに進める事が出来る。

また本事業は 2013 年度より経済産業省の直執行事業としてスタートした 10 年に渡る長期プロジェクトである。2014 年度にプロジェクトの円滑な推進のために NEDO にプロジェクト移管され、その際に軽量構造材料の素材としての炭素繊維の研究開発も本事業の委託の一部として加入し、現在のプロジェクトを構成している。図 I -6 に本プロジェクトのスケジュール概要を示す。

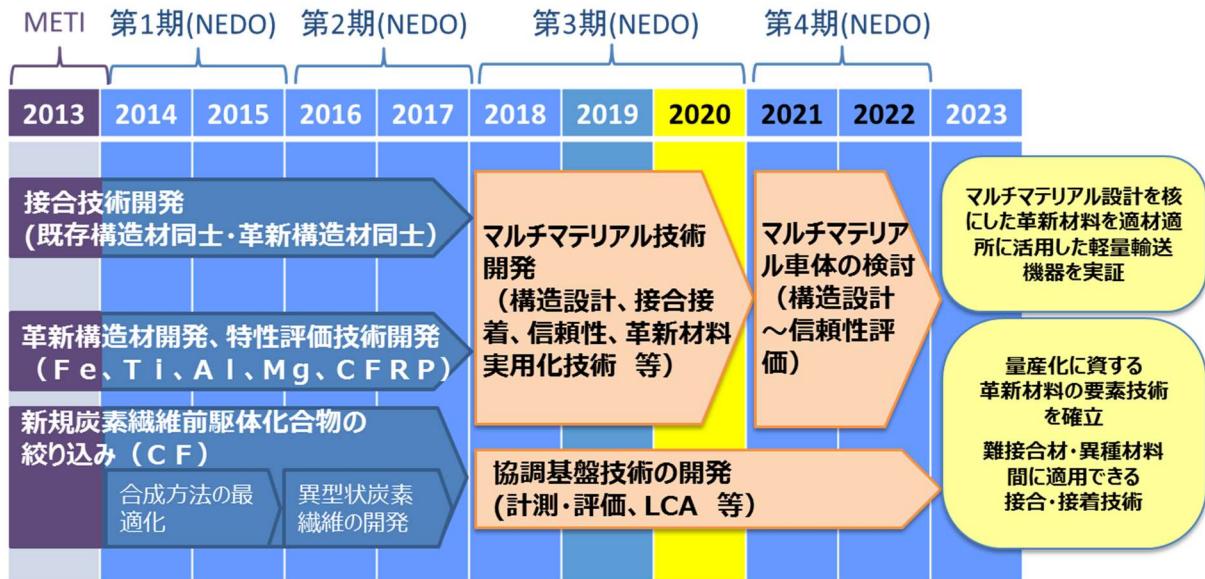


図 I-6 プロジェクトスケジュールの概要

1.3 事業の位置付け

1.3.1 政策的位置づけ

本事業は経済産業省が推進する、「未来開拓プロジェクト」の一つであり、本研究開発は既存技術の延長線上にない、夢のある「未来技術開拓」を実施するものである。内閣府総合科学技術会議では「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」により、重点的取組として「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を実現するものと登録されている。

○我が国が抱えるエネルギー・環境制約等の構造的課題を克服し、将来の成長の姿を描くために、**既存技術の延長線上にない、夢のある「未来開拓技術」**によって日本再生を果たすべく、国が研究開発で新たな道を切り開くべき分野を絞り込み、研究開発投資を重点化し、事業化に至るまで中長期的に推進する体制を構築する。

(総合科学技術会議)

本プロジェクトは「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」の2-3. 政策課題「エネルギー利用の革新」重点的取組④「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」の対象施策として登録されている。

(参考)「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」(抜粋)

2-3. 政策課題「エネルギー利用の革新」

(1) 政策課題のポイント

我が国では、東日本大震災以降のエネルギー制約に対して、省エネによりエネルギー消費量の削減及び電力需要の平準化に取り組んでいる。これらに取組むことは、実質的に新たなエネルギー供給源を確保することと同等の効果が期待でき、消費側での取組を更に強化することが重要である。その際には、生活の質を向上させながらもエネルギー消費量を削減するという、相反する課題も解決する必要がある。また、我が国は、産業・民生・運輸部門の各部門において、様々なエネルギー消費量削減に関する技術力を源泉に高い国際競争力を持っている。しかし、今後も国際競争に打ち勝ち成長するためには、エネルギー消費量削減に関する技術を更に進化させる必要がある。このような状況下、新たなエネルギー有効利用技術を通じて消費量の削減を目指し、「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を重点的取組に設定する。

(2) 重点的取組④「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」この取組では、例えば、未利用のまま排出されている熱エネルギー等を経済的に回収・変換・蓄積等を行う技術や情報量等の増大により増え続けるエネルギー消費量を根本的に低減する技術、産業・民生・運輸の各部門においてエネルギー消費量を飛躍的に削減する技術等、革新的なエネルギー消費量削減技術の研究開発を推進する。

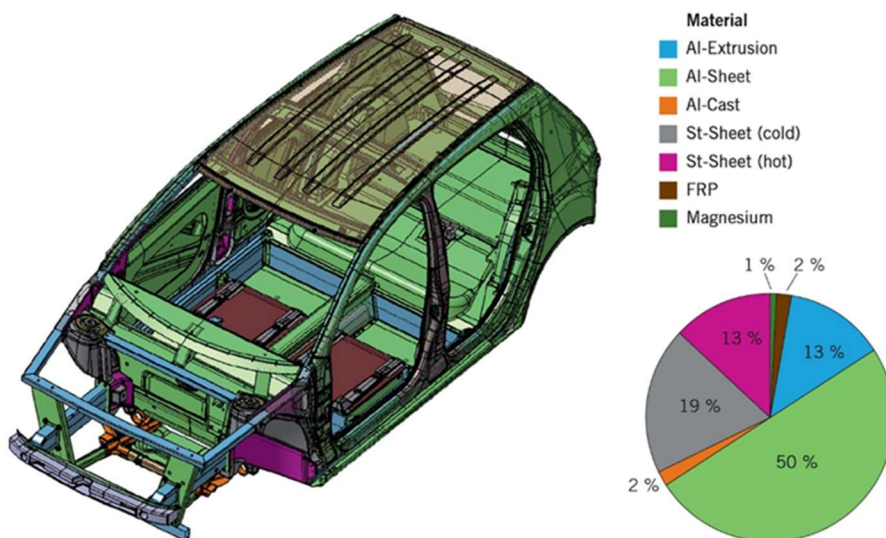
図 I-7 本プロジェクトの政策的位置づけ

1.3.2 国内外の研究開発の動向と比較

本事業に関わる研究開発を取り巻く状況と、国内外の主要なプレーヤーを表 I-1 に示す。この表からもわかる様に、炭素繊維や鋼材に関しては技術的、生産的優位に立っている事がわかる。しかし、製錬に大きなエネルギーを必要とする非鉄金属はエネルギーコストの安価な北米や中国に対して競争力が弱く、構造材のマルチマテリアル化を進める上で競争力を増す必要がある。

表 I-1 研究開発を取り巻く状況とプレーヤー

	取りまく状況	主要な技術及びプレーヤー	
①マルチマテリアル技術開発	-	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、設計ツールを開発しており、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を実現しようとしている。	京都大学、株式会社アルモニコス、株式会社メカニカルデザイン、トヨタ中研、ミシガン大学、JFE、自動車各社。
②接合技術開発	-	自動車のマルチマテリアル時代に向かって、異材接合・接着技術の開発が日本、欧州、米国中心に行われている。	新日鉄住金、JFE、神戸製鋼所、英国TWI、オークリッジ国立研究所、ノースウエスト国立研究所、3M、DOW、デュボン
③-1チタン材	LD ~ DH	欧州とシェア40~50%で市場を分け合っているが、中国・韓国の競争力も向上しつつあり、競争力低下が懸念。添加アマルの需要逼迫も懸念材料。	新日鉄住金、JFE、神戸製鋼所、東北大、ボスコ(韓国)、宝山鋼鉄(中国)、武漢鋼鉄(中国)、釜山大(韓国)、オークリッジ国立研究所(米国)、テルフト大(ドイツ)
③-2アルミニウム材	RA	日系企業のアルミ合金のシェアは14%。精錬・加工まで垂直統合している海外メジャーと比較して生産性が劣る。自動車メーカーと連携して海外進出。	神戸製鋼所、UACI、産総研、東北大、アルコア(米国)、アライドシグナル(米国)、コーラスアルミニウム(ドイツ)、ロシア科学アカデミー(ロシア)、中国科学院(中国)
③-3マグネシウム材	RA	マグネシウム合金の市場シェアは10%と低い状況。今後は、難燃性が鍵だが、日本や韓国にて性能改善の成果が出ている。	大阪富士工業、三協立山、熊本大、長岡技科大、アルコア(米国)、ACROSTAK(スイス)、上海交通集団(中国)、中国科学院(中国)、ベングリオン大学(イスラエル)、レイゼオン大学(カナダ)
③-4鋼板	DH	スポンジチタンのシェアは中国に次ぐ25%、延伸加工材のシェアは10%。航空機等の重要部材では優位を保っているが、高いエネルギーコストと複雑な生産工程がネック。	東邦チタニウム、神戸製鋼所、新日鉄住金、産総研、東北大、QUESTEK(米国)、ウエスティングハウス(米国)、ディボン(米国)、ロシア科学アカデミー(ロシア)、中国科学院(中国)、ハルビン工業大学(中国)
③-5熱可塑性CFRP	RA ~ DH	航空機、産業機器、スポーツ用品業界等では熱硬化性CFRPの需要が多く、加工技術も欧州が進んでいるが、熱可塑性CFRPは、我が国でも基盤技術が出来た段階で、材料も成形加工技術は、世界中がまだこれからの状況。	東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン、東洋紡、帝人、東京大学、名古屋大学、Tencate(オランダ)、Bond Laminates(ドイツ)、テルフト工科大学(ドイツ)、フ라운ホーファー研究所(ドイツ)
③-6炭素繊維	LD	材料開発技術力は極めて高く、世界の主要生産企業7社中、我が国の企業3社で市場シェアの約70%をほぼ独占しており、外国企業の追隨を許さない状況下にある。但し、消費エネルギー及びCO ₂ 排出量が多く、高コストは共通の課題。	東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン、東洋紡、帝人、東京大学、Hexcel(米国)、Cytec(米国)、SGI Carbon(ドイツ)



ALIVE Multi-Material Concept, Autotech Review WEBより

(<https://autotechreview.com/technology/multi-material-concept-for-a-battery-electric-vehicle>)

図 I-8 欧州委員会傘下 “ALIVE” プロジェクト 電気自動車の軽量化

欧州では輸送機器軽量化の研究開発が盛んである。図 I-8 に “ALIVE” プロジェクト

の電気自動車の軽量化部材 構成図を示す。

2.NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

車両軽量化のための革新的新構造材料の開発は、先に述べたように未来開拓プロジェクトの一つで有り、そのプロジェクトの特徴は、

1. リスクの高い中長期的テーマ
 - ・短期の対策に加え、事業化まで 10 年を超えるような、リスクが高い研究開発を国が主導
 - ・エネルギー・環境制約など、抜本的な対策が必要な分野に集中投資
2. 省庁の枠を超えた連携
 - ・経産省、文科省の局長級をヘッドとする合同検討会で連携テーマを設定
 - ・両省のプロジェクトを一体的に運営するガバニング・ボードを設置、基礎から事業化まで一気通貫
3. ドリームチーム
 - ・技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチーム
 - ・事業化促進のための適切な知財管理

であり、これを進めるためにはプロジェクトマネジメントを的確に実施し、定期的なテーマ成果の確認、新規課題の取り込み、事業化の促進をする必要があり、NEDO がこれまでに得た知識と実績を生かして推進すべきプロジェクトである。

2.2 実施の効果（費用対効果）

実施の効果は以下の通りである。なお、売上、効果は全て 2030 年度の推定値である。

- | | |
|-------------------------|---|
| (1)プロジェクト費用の総額 | 358 億円（10 年間推定） |
| (2)売上予測 | 719 億円／年
（原油使用量削減による費用削減効果として） |
| (3)CO ₂ 削減効果 | 373.8 万 t CO ₂ ／年
（車両軽量化の効果として） |

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

【アウトプット目標】

輸送機器の抜本的な軽量化（自動車の場合は半減）のために、必要な革新的構造材料技術や革新的接合技術及びマルチマテリアル技術を開発する。

研究開発項目は多岐にわたるため、具体的な開発目標は、各テーマ開発目標に記載する。

【アウトカム目標】

現在使用されている輸送機器の原材料を革新的新構造材料に置き換えることで軽量化を図り、2030年において、373.8万tのCO₂削減及び1.2兆円規模の売り上げが期待される。

【各テーマ開発目標】（第3期目標、第4期目標は2017年度末に設定した）

研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」（2017年度末設定の研究開発項目）

（1）マルチマテリアル設計技術開発

（a）トポロジー最適化システムの構築

【第3期目標（2020年度末）】

- ・複数の材料のトポロジー最適設計法を構築する。
- ・線形過渡応答問題の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・検討および他のCAEツールと連携可能なシステムを構築する。

（b）マルチマテリアル界面評価・モデル化

【第3期目標（2020年度末）】

- ・マルチマテリアル界面の評価方法の現状、および今後のニーズを調査する。
- ・数値解析技術により、マルチマテリアル界面をモデル化する。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。

（c）車体構造適用可能性検討

【第3期目標（2020年度末）】

- ・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。

（d）マルチマテリアル実設計への適用

【第4期目標（2022年度末）】

- ・開発材料を利用した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設計車体の提案を行う。

研究開発項目②「接合技術開発」

(1) チタン／チタン連続接合技術の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・接合深さ：5mm 以上
- ・接合強度：母材強度の90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・接合深さ：10mm 以上
- ・接合強度：母材強度の90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

(2) 中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発

【第1期目標 (2015年度年末)】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140:1989) の引張せん断荷重平均値の70%

(b) 連続接合技術開発

- ・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%

【第2期目標 (2017年度末)】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140:1989) の引張せん断荷重平均値の70%以上

(b) 連続接合技術開発

- ・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3期目標 (2020年度末)】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、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) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の70%以上

【第4期目標 (2022年度末)】

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、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) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.4mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の 90% 以上

(3) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術）

【第 1 期目標（2015 年度末）】

- ・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断
- ・電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立
- ・鋼板／アルミニウム間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法の確立

【第 2 期目標（2017 年度末）】

- ・高減衰接着剤の仕様決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

【第 3 期目標（2020 年度末）】

- ・接合強度：抵抗スポット溶接による剥離強度として十字引張荷重平均値が 1.5kN 以上

【第 4 期目標（2022 年度末）】

- ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値以上または母材破断
- ・接合時間：1 点あたり 5 秒以内

(4) アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

【第 1 期目標（2015 年度末）】

- ・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断
- ・電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立
- ・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の確立

【第 2 期目標（2017 年度末）】

〈当初の目標〉

- ・高減衰接着剤の仕様決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

〈2015 年度末修正後の目標〉

- ・高減衰接着剤の実用組成の決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・ポリアミド樹脂（PA）、ポリフェニレンスルファイド樹脂（PPS）など高融点樹脂をマトリックスとするCFRPの接合技術の確立
- ・電食の評価手法確立と防錆仕様検討への応用

【第4期目標（2022年度末）】

- ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値以上または母材破断
- ・接合時間：1点あたり5秒以内
- ・プロセスモニタリング技術の確立

（5）鋼材／CFRP等樹脂接合技術の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・接合強度：母材破断

【第2期目標（2017年度末）】

- ・接合強度：母材破断
- ・電食による接合部腐食の評価手法の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・鋼材／CFRP複合成形パネルの製作に向けた接合材料の仕様確定
- ・試験片レベルの接合強度：引張せん断強度15MPa以上

【第4期目標（2022年度末）】

- ・鋼材／CFRP複合成形パネルの製作
- ・成形パネルの接合強度：引張せん断強度20MPa以上

（6）構造材料用接着技術の開発

【第2期目標（2017年度末）】

- ・接合強度：引張せん断強度10MPa以上
- ・接合部劣化のメカニズム解明及び評価法の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・接合強度：金属用接着剤では引張せん断強度20MPa以上、プラスチック用接着剤に対しては7MPa以上。
- ・接着接合部の耐久性向上の検討

【第4期目標（2022年度末）】

- ・接合強度：金属用接着剤は引張せん断強度 28MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては 10MPa 以上。

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・鉄含有値：ばらつき範囲 50～500ppm 平均値 200ppm 以下
- ・酸素含有値：ばらつき範囲 100～200ppm 平均値 150ppm 以下
- ・塩素含有値：300ppm 以下

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

- ・薄板中の気孔率：1%以下
- ・引張強度・延性バランス：現行材より 20%向上

【第2期目標（2017年度末）】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・大型工業製品製造に不可欠な工程技術の要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

- ・工業的に薄板を製造するプロセスの要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・実機スケールで、 $Fe \leq 200ppm$ 、 $O \leq 150ppm$ 、 $Cl \leq 300ppm$ のスポンジチタンを製造可能な技術の確立
- ・A級スポンジチタンの歩留向上（85%を92%に向上）可能な技術の確立
- ・スポンジチタンの製造リードタイムを30%低減可能な技術の確立

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

- ・大型試験設備によりチタン薄板コイルを試作
- ・上記で試作したチタン薄板の気孔率 0.2%以下
- ・チタン薄板の強度・延性バランスを現行材よりも30%向上
- ・現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを15%低減

【第4期目標（2022年度末）】

(b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発

- ・第3期で作製した薄板を用いた自動車部品サンプルの試作

(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

- (a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開発
- ・精錬後の酸素含有値：300ppm 以下
- (b) 上述の溶解・精錬技術と鋳造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発
- ・引張強度：現行材より 20%向上

【第2期目標（2017年度末）】

- (a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開発
- ・実機プロセスにおける精錬後の酸素含有値を 300ppm 以下とする要素技術確立の見通しを得る。
- (b) 上述の溶解・精錬技術と鋳造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発
- ・高速高圧下箔圧延技術：生産性向上の達成に向けた要素技術を確立し、量産プロセスへの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

- ・引張強度が現行材より 20%向上した材の量産プロセス検証

【第4期目標（2022年度末）】

- ・引張強度が現行材より 20%向上した材を用いて実機相当部材を試作

(3) チタン新製錬技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

- 工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発
(ラボスケールで検証)
- ・鉄含有値：2000ppm 以下
 - ・酸素含有値：1000ppm 以下

【第2期目標（2017年度末）】

- 工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発
- ・製錬プロセス設計指針を構築し、量産プロセスへの見通しを得る。

【第3期目標（2020年度末）】

- ・工業化が可能と判断される $Fe \leq 2000ppm$ 、 $酸素 \leq 1000ppm$ で、現行クロール法よりコスト 20%削減に必要な要素技術を提示。
- ・大型化試験により、A4 判サイズ、数百 μm 厚さで、 $O \leq 1000ppm$ 、 $Fe \leq 2000ppm$ を試作。

【第4期目標（2022年度末）】

- ・第3期の成果をベースとした自動車部品サンプルの試作

研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・引張強度：660MPa以上（現状：600MPa）
- ・耐力（降伏強度）：600MPa以上（現状：550MPa）
- ・伸び：12%以上

【第2期目標（2017年度末）】

- ・引張強度：750MPa以上（現状：600MPa）
- ・耐力（降伏強度）：700MPa以上（現状：550MPa）
- ・伸び：12%以上

【第3期目標（2020年度末）】

- ・疲労強度を維持しながら高強度化した合金（引張強度：750MPa）の実機レベル（大型ねじり鍛造装置を用いた）の製造技術開発

【第4期目標（2022年度末）】

- ・開発合金の実機化製造条件の技術指針確立
- ・航空機の実機カットモデルの作製・評価と量産・事業化に向けた課題解決

(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・電解条件の確立
- ・電析メカニズムの解明

【第2期目標（2017年度末）】

〈当初の目標〉

- ・AlCl₃系イオン液体の大量合成手法の確立
- ・パイロットプラントによる実証実験

〈2015年度末修正後の目標〉

- ・AlCl₃系イオン液体の新合成法の開発及び量産法の提示
- ・パイロットプラントによる実証実験

【第3期目標（2020年度末）】

- ・新電析浴において、電析速度1.0μm/min以上の達成
- ・新電析浴を用いた量産ライン設計指針の確定

- ・従来溶製法では製造不可な新電析浴を用いた新 Al 合金および作製法の指針確定

【第 4 期目標（2022 年度末）】

- ・不純物濃度 10ppm 以下、電解コスト 10kWh/kg 以下（国内で 150 円/kg 以下）
- ・大型試験装置による実機化技術の検証

(3) 複層アルミ合金の開発

【第 2 期目標（2017 年度末）】

- ・熱処理後の耐力 600MPa 以上
- ・成形前の伸び 20%以上
- ・製造プロセス設計指針の提示

【第 3 期目標（2020 年度末）】

- ・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

【第 4 期目標（2022 年度末）】

- ・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 曲げ角度 40° 以上

研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

(1) 易加工性マグネシウム材の開発

【第 1 期目標（2015 年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：250MPa 以上
- ・伸び：15%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
- ・AZ31（マグネシウム材）と同程度以上の押出速度

【第 2 期目標（2017 年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：270MPa 以上
- ・伸び：20%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
- ・A6N01（アルミニウム材）と同程度以上の押出速度

(2) 高強度マグネシウム材の開発

【第 1 期目標（2015 年度末）】

- ・レアアース添加無し

- ・引張強度：350MPa 以上
- ・伸び：13%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性

【第2期目標（2017年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：360MPa 以上
- ・伸び：15%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性

(3) マグネシウム材の評価手法の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズム及び腐食メカニズムの解明と評価手法の導出

【第2期目標（2017年度末）】

〈当初の目標〉

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性に関するデータベース構築

〈2015年度末修正後の目標〉

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性及び疲労特性に関するデータベース構築

(4) マグネシウム材の接合技術の開発

【第2期目標（2017年度末）】

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム材を対象として、MIG、TIG、FSW等の接合技術の開発を行う。

(5) 革新的マグネシウム材の開発および長期性能評価

【第3期目標（2020年度末）】

- (5-1) 前期で開発した合金を用いて高速鉄道車両適用のための大型部材（長さ 5m 以上）の材料製造技術（押出技術、圧延技術、加工技術）を構築する。
- (5-2) 自動車への適用に必要な機械的特性、成形性を有するマグネシウム材の開発と製造技術を確立する。
- (5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として実用化に必要な長期性能（疲労特性等）データベースを構築する。

【第4期目標（2022年度末）】

- (5-1) 前期で開発した合金(6N01 もしくは 7N01 合金並みの機械的特性を有する合金)を用いて鉄道車両のための大型部材（長さ 25m 以上）の量産技術の技術指

針を構築する。

(5-2) 自動車への適用に必要な機械的特性、耐食性、成形性を有するマグネシウム材の適用技術（成形技術、スケールアップ技術）を確立する。

(5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として、実用化に必要な長期性能（疲労特性等）データベースを機械学習等のデータサイエンスを利用して構築する。

(6) マグネシウム製高速車両構体の開発

【第3期目標（2020年度末）】

(6-1) 革新的マグネシウム材を用いて高速車両構体を設計するための技術指針を、一般断面モックアップ構体の作製・評価を通じて構築する。

(6-2) 革新的マグネシウム材を用いて一般断面モックアップ構体を作製するための接合技術および表面処理技術を構築する。

【第4期目標（2022年度末）】

(6-1) 革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を設計するための技術指針を構築する。

(6-2) 革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を作製するための接合・組立技術および表面処理技術・施工技術を構築する。

(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開発

【第3期目標（2020年度末）】

・難燃性マグネシウム合金接合部の疲労性能・寿命を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールのプロトタイプを完成させる。

【第4期目標（2022年度末）】

・難燃性マグネシウム合金接合部の長期性能（疲労性能・寿命、耐食性等）を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールの検証を実施し、統合したワークフローとして完成させる。

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.2GPa以上
- ・伸び：15%以上

【第2期目標（2017年度末）】

〈当初の目標〉

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.2GPa以上
- ・伸び：20%以上

〈2015年度末修正後の目標〉

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.5GPa以上を目指す
- ・伸び：20%以上

〈2017年度末修正後の目標〉

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.5GPa以上
- ・伸び：20%以上

【第3期目標（2020年度末）】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満、引張強度：1.5GPa以上、伸び：20%以上の開発鋼において、汎用鋼（590MPa～980MPa級）と同等の耐食性と水素脆性を目指す

（2）中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・低濃度炭素検出技術
炭素定量下限：30ppm
- ・微細粒成長動的観察技術
像分解能：15nm
- ・加熱加工模擬技術の確立
- ・鋼の歪み挙動解析技術の確立

【第2期目標（2017年度末）】

- ・鋼組織の高速定量解析技術の確立
- ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・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
- ・微小電気化学計測技術、局所構造解析技術、マクロ腐食挙動との対比などによるマイクロおよびナノオーダー（ μm 以下）の腐食挙動解析技術の確立
- ・薄鋼板の水素脆化挙動に影響を及ぼす応力、ひずみ、水素濃度分布、組織損傷を数百 μm レベルで測定できる技術を確立し、自動車用構造部材としての薄鋼板の水素脆化挙動を適切に評価できる試験方法の確立

研究開発項目⑦「熱可塑性CFRPの開発」

（1）熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・CFRPと異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合の要素技術の見極めを行い、上記接合方式・接合形状における強度設計に必要なデータベースを構築する。

【第2期目標（2017年度末）】

- ・2015年度までに構築した異材接合データベースを基に、現行量産車において多用され一般的に用いられている接合方式（ボルト締結や接着接合）と同等以上の強度を達成するための要素技術及びその設計手法を確立する。また、最適な非破壊評価手法を確立する。

（2）熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発

【第1期目標（2015年度末）】

（a）熱可塑性CFRPの中間基材の開発

- ・中間基材のバリエーションを拡大し、車体の6割軽量化を実現する中間基材の製造に係る要素技術を確立する。

（b）熱可塑性CFRPの性能評価技術の開発

- ・開発材の静的及び動的力学特性把握のための標準試験法・試験片製作方法を提案する。

（c）熱可塑性CFRPを用いた構造設計技術の開発

- ・開発材の静的及び動的材料特性をCAE（Computer Aided Engineering）解析に適用した予測技術を確立し、予測精度を既存の鋼板製車体と同等以上とする。

（d）熱可塑性CFRPの成形加工技術の開発

- ・成形シミュレーション技術を構築する。

（e）LFT-D（Long Fiber Thermoplastics-Direct）成形の基礎技術の開発

- ・炭素繊維と熱可塑性樹脂の混練体の流動特性と材料特性の関係を解析し、混練プロセスの最適条件を解明し、基礎的力学的モデルを提案する。また、初歩的CAE解析技術を確立する。

（f）大物高速成形技術の開発

- ・初歩的なボディ部材を対象に高速プレス成形技術を確立する。また、構造材の剛性確保のためにLFT-D成形品の部分補強を試行する。ハイブリッド構造を達成するためのマテハン技術の概念を決定する。

（g）大物高速接合技術の開発

- ・熱可塑性CFRP使用部材同士の接合方法を見極め、最適手法を選択する。

（h）高意匠性外板製造技術開発

- ・高意匠性を支配する技術要因を分析し、基礎技術を見極める。

（i）実証評価

- ・実証評価の実施方法を策定する。

【第2期目標（2017年度末）】

（a）熱可塑性CFRPの中間基材の開発

- ・組立パーツの部品点数の半減を実現する中間基材の製造に係る要素技術を確立する。
- (b) 熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発
 - ・材料特性発現メカニズムを解明することにより、標準試験法による評価値の妥当性を検証する。
- (c) 熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発
 - ・CAE 解析予測技術を用いた複数部材の一体化設計技術を開発し、組立パーツの部品点数半減と車体の 6 割軽量化のための要素技術を確立する。
- (d) 熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発
 - ・成形シミュレーション技術を基にして、繊維配向や形状安定性の予測手法を確立する。
- (e) LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 成形の基礎技術の開発
 - ・量産化につながる混練・押出プロセスの要素技術を確立する。また、LFT-D の材料特性データベースの一部を構築するとともに、試験法標準化への道付けを実施する。さらに、力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトウェアに組込む。
- (f) 大物高速成形技術の開発
 - ・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。ハイブリッド成形技術を確立するとともに、高速マテハン技術の要素技術を確立する。
- (g) 大物高速接合技術の開発
 - ・熱可塑性 CFRP 使用部材同士の接合技術を確立する。
- (h) 高意匠性外板製造技術開発
 - ・選定した材料、プロセスを用いて、高意匠性付与技術を確立する。
- (i) 実証評価
 - 〈当初の目標〉
 - ・自動車構造体を想定して、軽量化及び量産性の検証を行う。
 - 〈2015 年度末修正後の目標〉
 - ・自動車構造体を想定して、自動車ボディの剛性試験などにより軽量化の検証を行うと共に、量産化に向けた課題の抽出を行う。

【第 3 期目標 (2020 年度末)】

- (j) LFT-D 高速成形実用化技術の開発
 - ・革新炭素繊維強化熱可塑 CFRP の LFT-D 成形性および力学特性を評価する。
 - ・LFT-D 材の混練 CAE シミュレーション技術の研究を行うと共に、成形流動および流動配向異方性を考慮した最適設計 CAE 解析技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。
- (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発
 - ・その場重合成形補強材と LFT-D とのハイブリッド成形技術を開発するとともに、新しく考案したフレーク法によるハイブリッド成形の基礎技術を開発する。
- (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発

- ・熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行う。
 - ・熱可塑性 CFRP の材料特性データベースの一部を構築する。
- (m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発
- ・リサイクル CF 回収技術の研究を行い、LFT-D 要件に適合する基本プロセスを開発するとともに、設備の改良開発を行う。
 - ・リサイクル CF を用いた LFT-D 成形プロセスおよび LFT-D 廃材の再利用技術、並びに設備システムの研究を行う。

【第 4 期目標 (2022 年度末)】

- (j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発
- ・革新炭素繊維強化熱可塑性 CFRP の LFT-D 成形性および力学特性を評価する。
- (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発
- ・多様な補強材と LFT-D とのハイブリッド成形技術について構造部材による技術検証を行い、技術を確立する。
- (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発
- ・熱可塑性 CFRP の破壊メカニズムを解明し、材料特性予測技術を確立するとともに、実設計への適用を想定した実用的な材料モデルを開発する。
 - ・熱可塑性 CFRP の材料特性データベースを構築する。
- (m) 自動車向回収 CF 適用化技術の開発
- ・リサイクル CF 回収技術を確立する。
 - ・リサイクル CF の LFT-D 成形技術、および LFT-D 廃材のリサイクル技術を開発する。

研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

(1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

【第 1 期目標 (2015 年度末)】

- ・下記 (2) の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

【第 2 期目標 (2017 年度末)】

- ・下記 (2) の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

【第 3 期目標 (2020 年度末)】

- ・アクリル繊維ポリマーをベースとする完全耐炎ポリマーを得る反応プロセスを確立する。これに伴い炭素繊維紡糸工程では、Large Tow (48K) の紡糸技術を確立すると同時に、炭化プロセスも革新炭素繊維に適合するよう処理条件など検討する。炭素繊維として、フィラメント径 7 μ m で、弾性率 240GPa、強度 4GPa を凌ぐ性能を目指す。

(2) 炭化構造形成メカニズムの解明

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・マイクロ波炭化のプロセス多段化など設備を改良すると共に処理条件を最適化し、従来の炭化炉方式に優る大規模生産のための製造技術を確立する。

(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告(TR)としてとりまとめる。さらに、新規炭素繊維前駆体から製造される炭素繊維を適用した複合材料の設計やライフサイクルアセスメント(LCA)に活用するためのデータを収集する。

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・研究開発のビジョンの明確化
- ・接合技術及び個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出
- ・プロジェクトの技術・研究戦略の策定
- ・新規材料の輸送機器への適用可能性の明確化
- ・新規材料の研究開発方針の明確化

【第2期目標 (2017年度末)】

〈当初の目標〉

- ・必要に応じて、平成27年度末に設定する。

〈2015年度末修正後の目標〉

- ・ 研究開発の実用化・事業化ビジョンの明確化
- ・ 接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・ 新規材料の実用化に向けた技術課題（構造体関連）の抽出
- ・ 異種材料接合技術の標準化・規格化の検討体制の構築

【第3期目標（2020年度末）】

- ・ 接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・ 新規材料の実用化に向けた技術課題の抽出
- ・ マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の抽出
- ・ 異種材料接合技術の標準化・規格化の検討

【第4期目標（2022年度末）】

- ・ 新規材料の実用化に向けた技術課題の明確化
- ・ マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の明確化
- ・ 異種材料接合技術の標準化・規格化取りまとめ
- ・ プロジェクト成果の取りまとめ及び検証

（2） 共通基盤技術の調査研究

【第1期目標（2015年度末）】

- ・ 構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズの顕在化
- ・ マルチマテリアル設計における、研究方向性の明確化
- ・ 材料と破壊の基礎メカニズム解明
- ・ 接合部の非破壊評価手法の確立
- ・ プロセスモニタリング／ヘルスマニタリング手法の確立

【第2期目標（2017年度末）】

〈当初の目標〉

- ・ 必要に応じて、平成27年度末に設定する。

〈2015年度末修正後の目標〉

- ・ 構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズ(腐食や水素脆化評価など)の顕在化
- ・ 小型中性子線などによる構造材料評価手法の構築
- ・ 軽量金属材料（アルミニウム、マグネシウム）に関する計測・評価手法の確立
- ・ 熱可塑性複合材料の損傷・強度評価手法の確立
- ・ 構造体接合部設計・評価手法の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・ 構造体接合部設計・評価手法の抽出
- ・ 新材料の材料代替効果定量技術の開発課題の抽出

- ・車体軽量化技術の集約化に関する課題の抽出
- ・異種材料接合における腐食課題の抽出

【第4期目標（2022年度末）】

- ・構造体接合部設計・評価手法の確立
- ・新材料の材料代替効果定量技術の確立
- ・車体軽量化技術の集約手法・実行体制の確立
- ・異種材料接合における腐食解析手法の確立

（3）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（2017年度末設定）

【第3期目標（2020年度末）】

- ・新規小型中性子装置を建設し、ブラッグエッジイメージング法による測定の分解能と統計精度を明らかにする。
- ・中性子小角散乱と X 線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を開発する。
- ・炭素の濃度分布を同定する技術および析出物と水素局所濃縮の関係を検出する技術を開発する。

【第4期目標（2022年度末）】

- ・ブラッグエッジイメージングのデータから、歪や金属組織のイメージング情報に変換する手法を確立し、接合部の2次元マッピングを実現する。
- ・中性子小角散乱と X 線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を確立する。
- ・オーステナイト中の炭素濃度分布を検出する技術を開発する。
- ・鋼中の水素局所的濃縮を検出する技術を開発する。

（4）低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発（2017年度末設定）

【第3期目標（2020年度末）】

- ・樹脂供給体における樹脂・基材の基本設計を完了する。
- ・低圧・高速成形の平板形状での成形条件を確立する。
- ・平板での樹脂含浸挙動解析シミュレーション技術を構築する。

【第4期目標（2022年度末）】

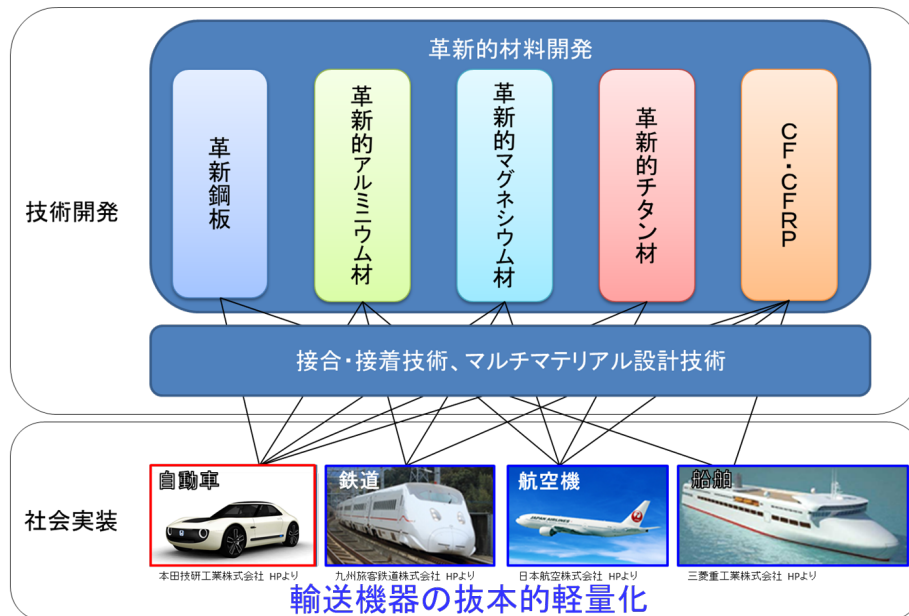
- ・樹脂供給体設計技術の確立
- ・低圧・高速成形の部材形状での成形条件を確立する。
- ・部材での樹脂含浸挙動シミュレーション技術を構築する。

2.事業の計画内容

2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算

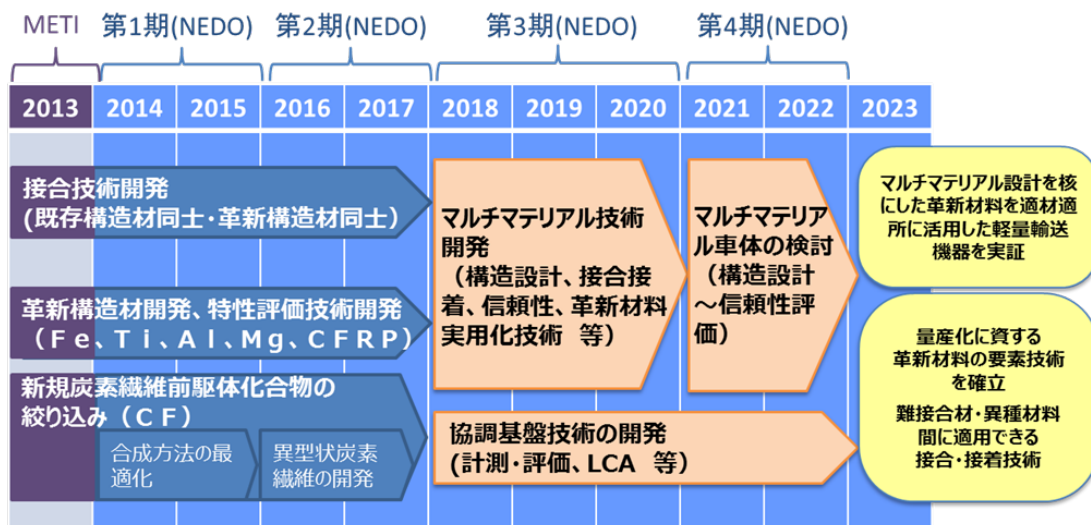
2.1.1 研究開発の内容

革新的構造材料の研究開発による輸送機器の抜本的軽量化を目指す、本事業の研究開発内容と社会実装先を図Ⅱ-1に示す。



図Ⅱ-1 本事業の技術開発内容と社会実装先

革新的構造材料開発（革新鋼板、革新的アルミニウム材、革新的マグネシウム材、革新的チタン材、革新炭素繊維（CF）、熱可塑性CFRP）および革新的接合技術（同種・異種）の開発をまずはプロジェクト前半 2013～2017 年度の 5 年間で実施した。それらの成果を基に後半 5 年間の目標の見直しを実施し、後半 5 年間ではマルチマテリアルで軽量化を実現するためのマルチマテリアル設計技術の開発、革新材料をマルチマテリアルで使いこなすための評価技術の開発を行う事とした。



図Ⅱ-2 本事業の全体スケジュール

(1)研究開発項目①「マルチマテリアル設計技術開発」

本研究開発では、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。具体的には、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、本プロジェクトの開発材料・接合手法による詳細設計を行い、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目① 「マルチマテリアル 技術開発」										
						(1)マルチマテリアル設計技術開発				

図 II-3 「マルチマテリアル設計技術開発」のスケジュール

(2)研究開発項目②「接合技術開発」

本研究開発では、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、中高炭素鋼を含む超ハイテン鋼やチタン材といった難接合材の接合、金属／CFRP間等の異種接合に適用できる革新的な固相摩擦攪拌接合技術や溶融接合技術等を開発する。また、異種接合固有の電食や熱歪みに関する評価技術の開発を行う。第2期より異材接合に対応するための構造材料用接着技術の開発を開始する。また、中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発については、共通基盤技術である摩擦攪拌接合について、実用化に向けた研究を加速する。さらに、第3期・第4期においては、コスト競争力に優れ、用途が想定された革新的接合技術を開発する。すなわち、マルチマテリアル設計技術と連携しながら、材料選択に応じた適切な継手性能を発揮する接合プロセスの技術開発とその基盤研究を実施する。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目② 「接合技術開発」	(1)チタン／チタン連続接合技術の開発									
	(2)中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発					(2)中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発				
	(3)鋼材／アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術)					(3)鋼材／アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術)				
	(4)アルミニウム／CFRP接合技術の開発					(3)鋼材／アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術)				
	(5)鋼材／CFRP等樹脂接合技術の開発					(5)鋼材／CFRP等樹脂接合技術の開発				
						(6)構造材料用接着技術の開発				

図 II-4 「接合技術開発」のスケジュール

(3)研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

本研究開発では、生産性を向上した新規のチタン製錬技術やチタン材加工技術開発（製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発、連続一貫製造プロセス技術など）を行うとともに、チタン材の構造制御や不純物濃度低減技術等による高機能チタン材の開発を行う。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目③ 「革新的チタン材の開発」	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発					(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発				
	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発					(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発				
	(3) チタン新製錬技術開発					(3) チタン新製錬技術開発				

図 II-5 「革新的チタン材の開発」のスケジュール

(4)研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

本研究開発では次世代航空機や自動車等の輸送機器への適用を目指した革新的アルミニウム材の開発を行う。具体的には、アルミニウム材の構造制御技術等を確立することで、強度や延性を向上させた革新的なアルミニウム材を実現する。また、海外メジャー企業並みの低価格を実現できる新規アルミニウム材製造プロセス等の開発を進める。第2期よりアルミニウム材を複層化した合金の開発を開始する。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目④ 「革新的アルミニウム材の開発」	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発					(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発				
	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発					(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発				
	(3) 複層アルミ合金の開発					(3) 複層アルミ合金の開発				

図 II-6 「革新的アルミニウム材の開発」のスケジュール

(5)研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

本研究開発では、可燃性や難加工性といった欠点を克服するため、マグネシウム材の組織制御により強度や延性、難燃性などの材料特性を向上させたレアアースフリーマグネシウム材の開発を行う。また、大型展伸材を製造するための革新的製造プロセス技術等の開発に加え、マグネシウム材の特性評価技術開発及び及び利用のための接合技術開発を併せて行う。さらに、第3期より疲労特性を始めとする長期性能を予測するため MI (マテリアルズ・インテグレーション) システムを適用し、上記性能を予測するためのモジュール及び統合されたワークフローを構築する。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目⑤ 「革新的マグネシウム材の開発」	(1) 易加工性マグネシウム材の開発									
	(2) 高強度マグネシウム材の開発					(5) 革新的マグネシウム材の開発および長期性能評価				
	(3) マグネシウム材の評価手法の開発									
	(4) マグネシウム材の接合技術									
						(6) マグネシウム製高速車両構体の開発				
						(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開発				

図 II-7 「革新的マグネシウム材の開発」のスケジュール

(6)研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

本研究開発では、レアメタル添加量が極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼板の開

発を目標とし、鋼板製造工程を精密制御し、レアメタルに代えて鋼材中の既存軽元素が強度や延性などの特性に及ぼす機能を最大限に発現させる技術や、鋼材中の結晶粒微細化・組織制御技術などの各種アプローチの高度化を図る。また同時に、中高炭素鋼開発の加速化に貢献する革新的な解析・評価技術を開発する。具体的には、中性子や放射光、電子線等を用いて、中高炭素鋼中の固溶炭素分布状態や、熱処理や加工プロセスにおける鋼微細組織変態挙動の動的解析技術等を開発する。さらに、第3期より高強度鋼板の異相界面腐食解析及び水素脆化に関する研究開発を開始し、構造用材料としての信頼性の向上を図る。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目⑥ 「革新鋼板の開発」	(1)高強度高延性中高炭素鋼の開発					(1)高強度高延性中高炭素鋼の開発				
	(2)中高炭素鋼の解析・評価手法の開発					(2)中高炭素鋼の解析・評価手法の開発				

図 II-8 「革新鋼板の開発」のスケジュール

(7)研究開発項目⑦「熱可塑性 CFRP の開発」

本研究開発では、量産プロセスに適用できるレベルの熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術を開発し、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立する。また、熱可塑性 CFRP の中間基材の開発と、その特性に基づいた構造設計、成形加工、性能評価等に係わる技術開発を包括的に実施する。

熱可塑性 CFRP の成形技術では、大型部材の高速成形技術の基盤技術を確立するとともに、多様な高強度・高機能材とのハイブリッド成形技術により、車体構造への適用拡大と実用化を図る。

また、熱可塑性 CFRP 材の動的特性、時間依存特性及びその破壊メカニズム解明のための材料特性評価解析技術を開発する。さらに、リサイクル炭素繊維及び革新炭素繊維の適用評価を行い、LCA 上優位な省エネルギー技術を開発する。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目⑦ 「熱可塑性CFRPの開発」	(1)熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発									
	(2)熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発					(2)熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発				

図 II-9 「革新的 CFRP 材の開発」のスケジュール

(8)研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

本研究開発では、我が国の炭素繊維の国際優位性を維持し、かつ、国内における炭素繊維の利用産業の競争力強化を図っていくため、環境負荷が少なく、かつ、生産性が大きく向上する新たな炭素繊維製造プロセスの基盤技術の研究開発を実施する。

高温長時間の加熱をマイクロ波に代替することなどにより、消費電力及び CO₂ 排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を行う。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施する。

第3期では、第2期までの成果と知見をもとに、アクリル系繊維用ポリマーベ

スの耐炎ポリマーの組成最適化を行い、紡糸プロセスの確立を目指す。さらに炭化工程をマイクロ波に代替する際の温度制御技術を多段化し、炭素化プロセスの革新を行う。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目⑨ 「革新炭素繊維基盤技術開発」	(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発					(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発				
	(2)炭化構造形成メカニズムの解明					(2)炭化構造形成メカニズムの解明				
	(3)炭素繊維の評価手法開発、標準化									

図 II -10 「革新炭素繊維基盤技術開発」のスケジュール

(9) 研究開発項目⑨ 「戦略・基盤研究」

材料、部品、自動車や航空機などのメーカーや、全材料を横断的に見渡せる有識者へのヒアリング、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、革新的新構造材料等研究開発の効果的な推進に繋げる。また、標準化・規格化活動にも取り組む。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目⑨ 「戦略・基盤研究」	(1)新構造材料の動向調査・技術・研究戦略					(1)新構造材料の動向調査・技術・研究戦略				
	(2)共通基盤技術の調査研究					(2)共通基盤技術の調査研究				
						(3)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				
						(4)低圧・超高速CFRP成形技術の開発				

図 II -11 「革新炭素繊維基盤技術開発」のスケジュール

2.1.2 研究開発予算

表 II -1 に本事業の 2022 年度までの予算を示す。2013 年度から本事業はスタートしているが、2013 年度のみ経済産業省の直執行事業として活動し、2014 年度から NEDO にて管理する事業となっている。なお、2015、2017、2020 年度にはいくつかの研究開発テーマに開発促進財源投入（加速）を行い、研究事業の加速を実施している。

表 II -1 本事業の予算（単位：百万円）

年度	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
研究開発項目											
新構造材料技術	2,212	3,780	3,496	3,708	3,544	3,512	2,827	2,738	(3500)	(3000)	32,317
熱可塑性CFRP	830										830
革新炭素繊維	918	980	804								2,702
合計	3,960	4,760	4,300	3,708	3,544	3,512	2,827	2,738	(3500)	(3000)	35,849
加速			1,570		185			412			2,167

2.2 研究開発の実施体制

本事業は、2013 年度に経済産業省の直執行事業としてスタートした。その後、2014 年度からプロジェクトの円滑なマネジメントを行うために NEDO へ移管され、その際に軽量構造材料の素材となる炭素繊維の研究開発も委託事業の一部として加わり研究開発を推進している。

図 II -12 に最新（2020 年度）の事業全体の実施体制を示す。

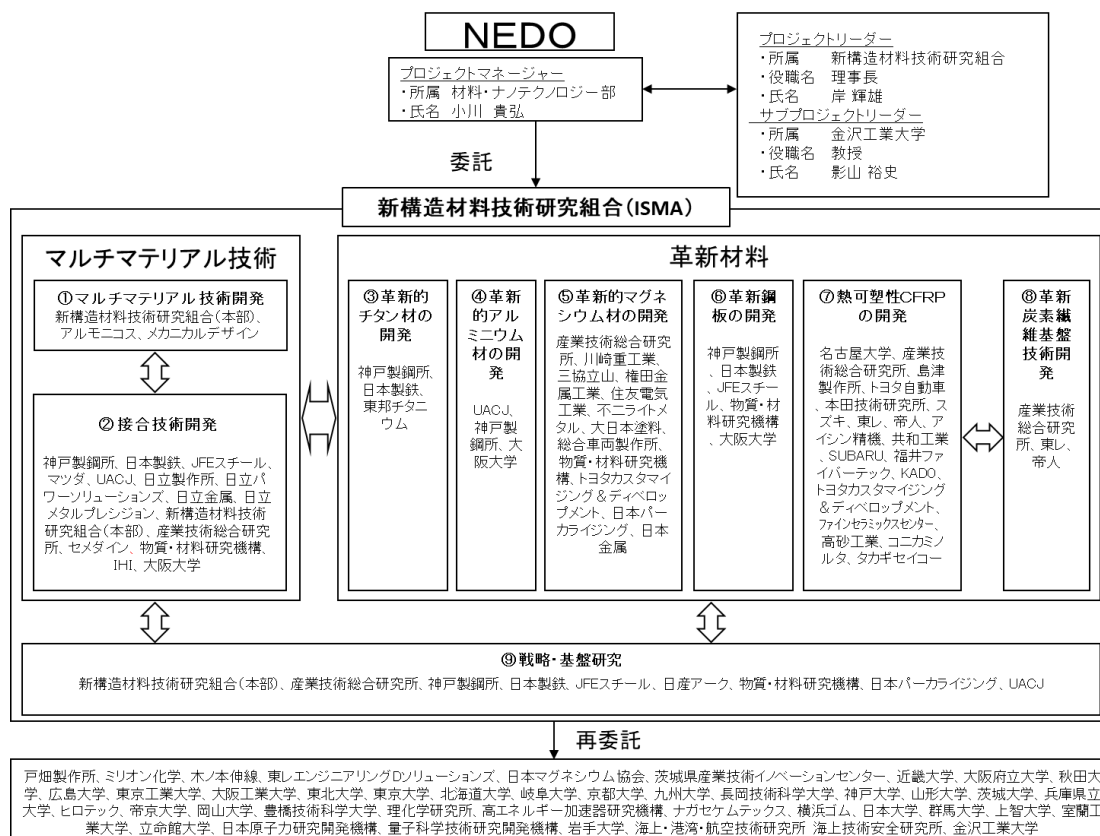


図 II -12 革新的新構造材料等研究開発プロジェクト実施体制

PL : 新構造材料技術研究組合 理事長 岸輝雄

SPL : 学校法人金沢工業大学 教授 影山裕史

PM : NEDO 材料・ナノテクノロジー部 主査 小川貴弘

2.3 研究開発の運営管理

①研究開発の進捗把握・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、全体の最終目標の効率的かつ効果的な研究開発の早期達成のため、(新たな課題の対応も含む) 関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、実施方針に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。早期実用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

②技術分野における動向の把握・分析

NEDO は、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

③ステージゲート方式の実施

研究開発を効率的に推進するため、ステージゲート方式を適用する。NEDO は、経済産業省と密接に連携し、外部有識者による審査を活用し、2021 年度以降の研究開発テーマの継続是非を 2020 年度に決定する。

表 II -2 外部有識者による審査（技術推進委員会）の実績と予定

年度	開催日	審議テーマ数	備考
2014	12 月 10、11、12 日	34	
2015	12 月 9、10、11 日	33	第 1 期中間評価
2016	11 月 30 日、12 月 1、2 日	32	
2017	10 月 3、4、5 日	35	第 2 期中間評価
2018	12 月 3、4、5 日	28	
2019	12 月 2、3、4 日	28	
2020	11 月 4、5、6 日 予定	29	第 3 期中間評価

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2013 年度に経済産業省において本プロジェクトが開始された時には、10 年かけて高強度・軽量材料の開発、接合技術の開発を行うという個別材料、技術の開発の側面の多いプロジェクトであった。しかしながら、地球温暖化を防止するための CO₂ 削減の必要性はますます強まり、本プロジェクトにおいても、高強度・軽量材料の開発はプロジェクト前半で極力完了または目途をつけ、後半はこれら高強度・軽量材料をマルチマテリアルで使いこなすための、接合技術、部材の設計技術、評価技術の開発、部材での実証へと移行するべく、テーマの終了、統合、新規テーマの立ち上げを行った。

特に、2017 年度末には新たな研究開発項目として「マルチマテリアル設計技術開発」を設定し、2018 年度より「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」というテーマを開始した。

また、高速鉄道を出口とする革新的マグネシウム材の開発においては、当初より鉄道会社をアドバイザーとし、また、2018 年度に開始した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おいては、自動車関連団体の技術者を推進委員会の委員とするなど、出口ユーザーの声を聞きながら実施している。

知的財産権については、「未来開拓研究プロジェクト（革新的新構造材料等技術開発）成果管理方針」に基づき、「革新的新構造材料等研究開発プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を制定し、知的財産権については原則技術研究組合の組合員に帰属させることとし、成果の実用化を促す。技術研究組合においては知的財産権取扱規定、知財委員会を整備し、成果の実用化に支障が生じないようにしている。

標準化については、本プロジェクトで直接標準化活動を行う事はないが、本プロジェクトで得られた成果が標準化を担う団体に提供され活用されることを前提にプロジェクト運営を行っている。

3. 情勢変化への対応

事業の運営管理として、研究開発の進捗状況や技術推進委員会の結果を踏まえ、研究開発事業の見直し、新規テーマの導入を随時行っている。2017 年度については、「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」及び「構造材料用接着技術の開発」の 2 テーマを、2018 年度には「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」、「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」、「超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発」、「超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発」、「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」の 5 テーマを、2019 年度には「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」の 1 テーマを新規に採択した。

また、2015 年のパリ協定の採択により、更なる CO₂ の削減、自動車においては更なる燃費向上による CO₂ 排出量の削減が求められるようになった。これを受けて、自動車車体の軽量化に対する要求はますます強くなり、本プロジェクトにおいては材料開発は早期に完成させ、社会実装を加速させるため、実使用時の特性評価技術の開発や部材での実証へとテーマの再編を行った。

4.中間評価結果への対応

表 II-3 2015 年度中間評価での指摘事項と対応状況

カテゴリー	指摘事項	対応状況
事業の位置付け・必要性	なし。	—
研究開発マネジメント	<p>①世界的な開発動向を調査し、目標値を見直すこと。</p> <p>②企業間でシナジー効果が生まれるよう、連携強化すること。</p>	<p>①毎年各研究分野の世界技術レベルの定点調査を実施している。</p> <p>②革新チタン材料で、スポンジチタン開発と薄板プロセス開発を統合し、垂直連携テーマとした。革新鋼板分野で、素材の腐食、水素脆性等の協調テーマを開始した。</p> <p>中高炭素鋼の接合技術分野は、大阪大学接合研を中心とした体制に統合した。</p>
研究開発成果	<p>③目標の早期達成が見込めるテーマは、計画変更を考慮すること。</p> <p>④今後、国際標準化・規格化等の検討が望まれる。</p>	<p>③革新鋼板分野は成果が顕著であり、最終目標を5年前倒しの2017年度末に再設定した。</p> <p>④素材研究開発分野毎、推進している。</p>
成果の実用化・事業化	<p>⑤早期にユーザー側企業と連携し、開発対象の目標レベルや必要時期、コストなどを具体化すること。</p>	<p>⑤革新鋼板分野は実用化を早々に進めるためプロジェクトからの卒業を促す。</p> <p>プロジェクト内にユーザー企業を取り込むとともに、外部専門家を招へいし目標レベルを見直している。</p>

表 II-4 2017 年度中間評価での指摘事項と対応状況

カテゴリー	指摘事項	対応状況
事業の位置付け・必要性	指摘事項なし	—
研究開発マネジメント	<p>各素材のテーマ設定は良好であるが、各素材間の連携について不明な部分があるため、リアルタイムで情報共有をしながら、方針決定と実行、そして評価に基づいて軌道修正できるように、全体を俯瞰しつつ、かつ小回りのきくマネジメントが望まれる。</p>	<p>「戦略基盤」研究の中で素材を超えた連携を推進してきた。「マルチマテリアル技術開発」を「戦略基盤」から特出しし、推進する過程で、異種材料のデータを集約するとともに連携を強化する取り組みを行っている。また、素材ごとに別々だった開発テーマを1つの部材開発テーマに集約するなど連携を図った。</p>
研究開発成果	<ul style="list-style-type: none"> ・最終的に材料を利用するユーザーがメンバーとして積極的に係わっている分野とそれほど明確でない分野があるため、横串を通す役割を担っていると考えられる「戦略基盤」と協力して、最終材料使用ユーザーとの連携についても更なる推進をはかってほしい。 ・各テーマの目標設定については、トップクラスの材料の創製を目指しているが、プロジェクトの後半では、最終的な目標である軽量化とコスト低減に向けて、ユーザーニーズをよく勘案し、材料特性バランスや開発コストの面から見直したほうが良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・従前からユーザーとの連携を進めてきた所であるが、「構造体接合部の設計・評価」テーマを新規に立ち上げ、自動車メーカーと材料メーカーが協調する仕組みを強化するという方針の下、自動車メーカーの技術者を委員とする委員会を設置し連携を図っている。 ・プロジェクト後半では、実用化により力点を置き、ユーザーニーズを勘案した開発内容・目標値に修正した。具体的には研究開発項目として「マルチマテリアル技術開発」を追加し、マルチマテリアルでの軽量化手法の検討を行っている。
成果の実用化・事業化	<ul style="list-style-type: none"> ・最終製品ユーザーとの関わりが薄いと感じるテーマもみられるため、「戦略基盤」などとも連携して、実用化・事業化に向けた検討を推し進めるべきである。 ・材料開発が進展してきたため、ユーザー企業に対して、より具体的に形状や設計に必要な物性値、材料の必要時期等を確認すべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・従前からユーザーとの連携を進めてきた所であるが、「構造体接合部の設計・評価」テーマを新規に立ち上げ、自動車メーカーと材料メーカーが協調する仕組みを強化するという方針の下、自動車メーカーの技術者を委員とする委員会を設置し連携を図っている。 ・マルチマテリアル設計を推進する中で、自動車メーカーからの必要情報取得を推進するため、自動車メーカーの技術者を委員とする委員会を設置した。

5.評価に関する事項

NEDO は、(1) 事業の位置付け・必要性、(2) 研究開発マネジメント、(3) 研究開発成果、(4) 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みの 4 つの評価項目について、外部有識者による中間評価及び事後評価を実施する。

中間評価は、プロジェクト期間の前半 5 年の中で 3 年目の 2015 年度及び 5 年目の 2017 年度に実施した。また後半 5 年も同様に 3 年目の 2020 年度に中間評価を行い、最終年度終了後に事後評価を実施する。なお、中間評価等の結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止、及び助成事業への移行等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

2015 年度、2017 年度の中間評価については以下の通り。

「革新的新構造材料等研究開発」（中間評価）

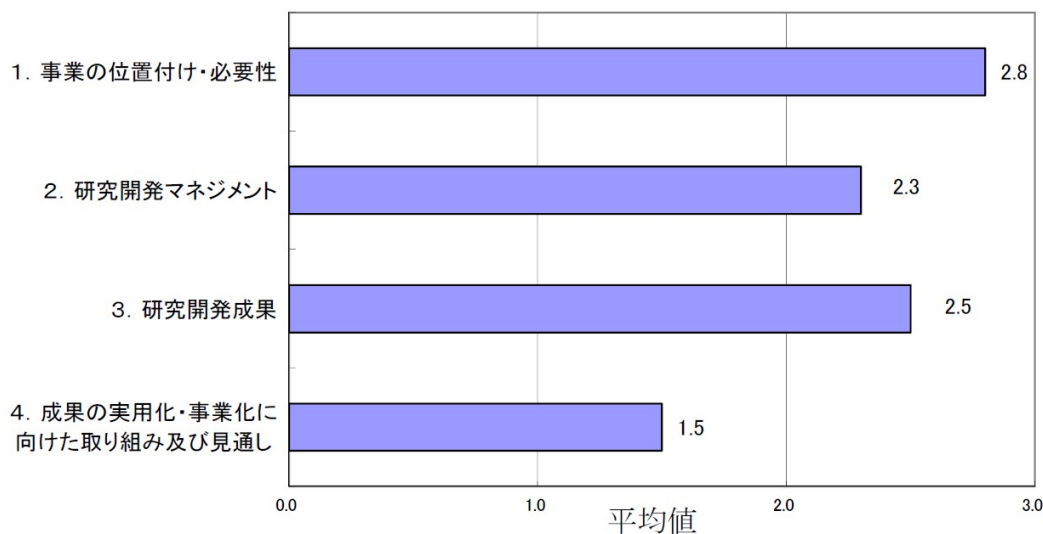
分科会委員名簿

（平成 27 年 10 月現在）

	氏名	所属、役職
分科 会長	おおくぼ みちのり 大久保 通則	日本大学生産工学部機械工学科 教授
分科 会長 代理	くぼ しろう 久保 司郎	摂南大学理工学部機械工学科 教授
委員	しみず かずみち 清水 一道	室蘭工業大学もの創造系領域機械工学ユニット 教授
	たかばし すすむ 高橋 進	日本大学生産工学部機械工学科 教授
	ひら ひろひと 平 博仁	大同大学工学部総合機械工学科 教授
	みうら ひろみ 三浦 博己	豊橋技術科学大学大学院機械工学専攻 教授

敬称略、五十音順

2015 年度中間評価結果



評価項目	平均値	素点 (注)					
		A	A	A	A	A	B
1. 事業の位置付け・必要性について	2.8	A	A	A	A	A	B
2. 研究開発マネジメントについて	2.3	B	A	A	B	A	C
3. 研究開発成果について	2.5	A	A	A	B	B	B
4. 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて	1.5	B	B	B	C	C	C

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

- | | |
|--------------------|--------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

2017 年度中間評価

「革新的新構造材料等研究開発」

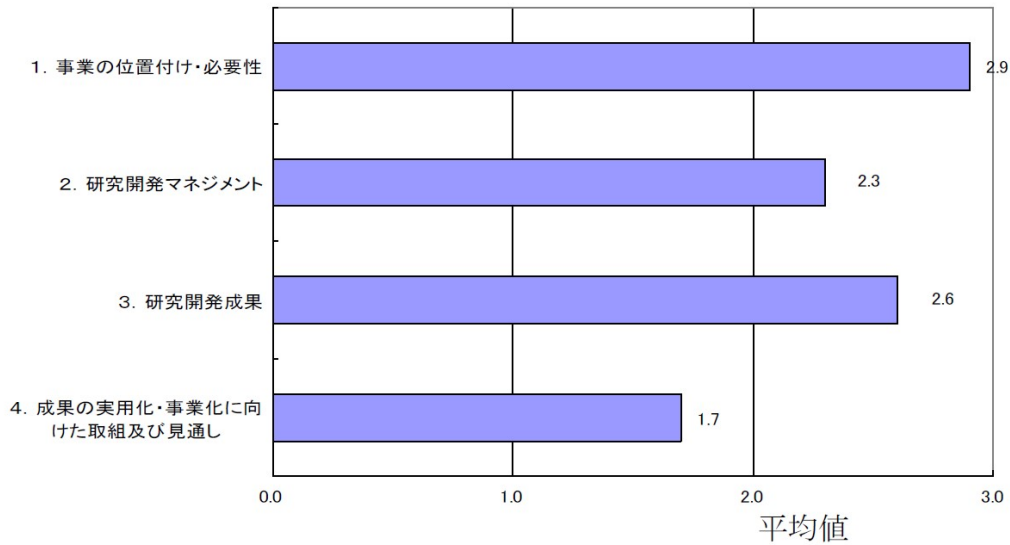
中間評価分科会委員名簿

(平成29年6月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	くぼ しろ 久保 司郎	摂南大学 理工学部 機械工学科 教授
分科会長 代理	たかはし すすむ 高橋 進	日本大学 生産工学部 機械工学科 教授
委員	おくだ あきのぶ 奥田 章順	株式会社三菱総合研究所 ものづくり革新事業センター 参与/チーフコンサルタント
	こばやし せんご 小林 千悟	愛媛大学大学院 理工学研究科 物質生命工学専攻 物性制御工学研究室 教授
	たなか かずと 田中 和人	同志社大学 生命医科学部 医工学科 教授
	ひら ひろひと 平 博仁	大同大学 工学部 総合機械工学科 特任教授
	まつだ けんじ 松田 健二	富山大学大学院 理工学研究部 ナノ・新機能材料学 域 ナノマテリアル・システムデザイン学系 教授

敬称略、五十音順

2017 年度中間評価結果



評価項目	平均値	素点 (注)						
1. 事業の位置付け・必要性について	2.9	A	B	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.3	B	C	A	B	B	A	A
3. 研究開発成果について	2.6	A	B	A	A	B	B	A
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	1.7	B	C	B	B	B	C	B

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

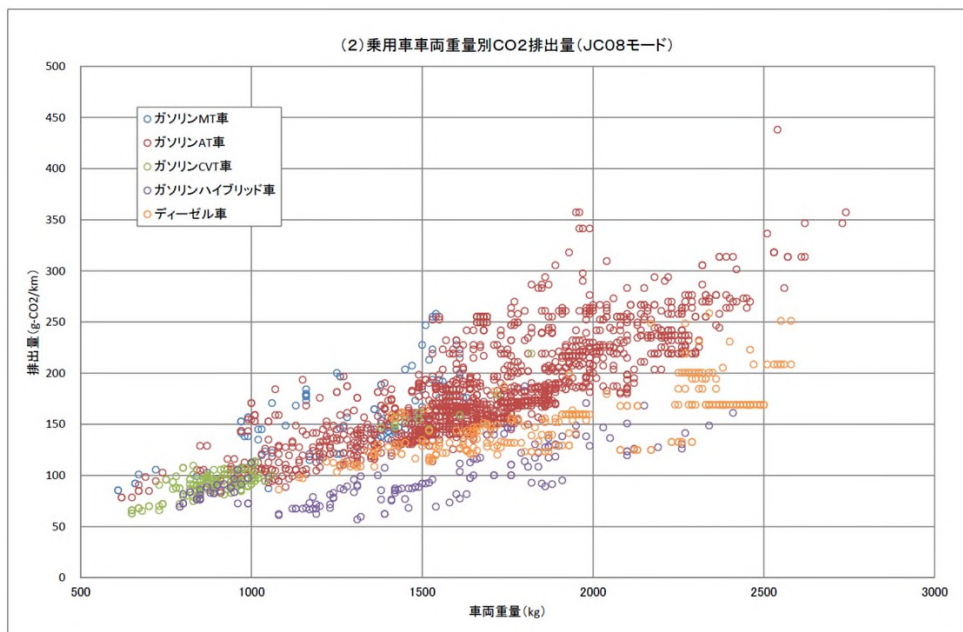
1.1 成果の概要

(1) 背景と目的

エネルギー消費量削減やCO₂排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。我が国においても、CO₂総排出量の20%近くが自動車からの排出であり、今後のCO₂排出量削減に向けて、自動車の燃費向上に係る技術開発が重要となる。

自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗軽減などがある。中でも動力機関の効率向上に向けた研究開発は精力的に取り組まれ、例えばハイブリッド車の普及に至っている。エンジンシステムの開発も必要だが、これに加えて車両の軽量化もまた、燃費改善効果が高いとされ、重要な取り組み課題の一つになっている。

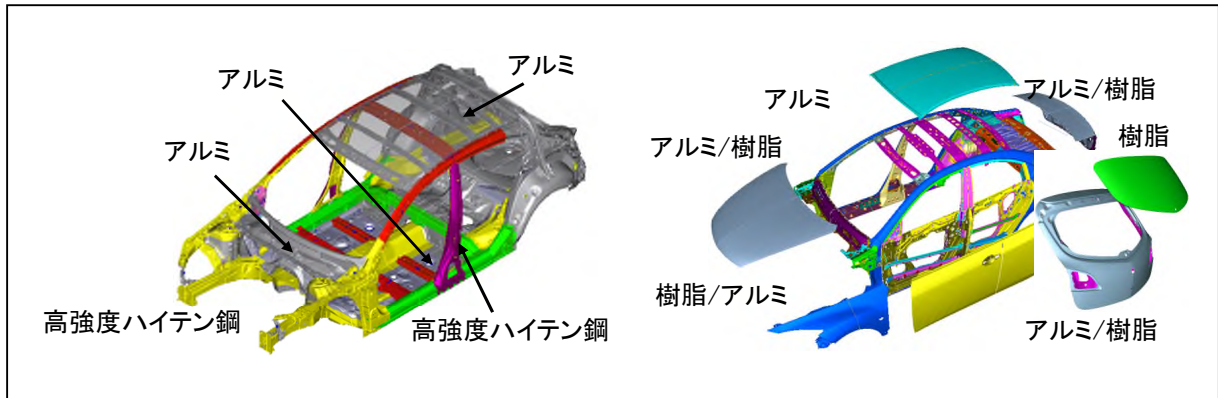
車体や材料の研究



図Ⅲ-1.1-1 自動車の重量とCO₂排出量の関係

近年の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が進められている。その際、異種材料接合が鍵となるが、材質が大きく異なる材料間の接合や、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、今後克服すべき数多くの技術課題が残されている。図Ⅲ-1.1-2 に鉄鋼材や軽量材を活用した例を挙げる。

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、耐食性、耐衝撃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。それと同時に、これらの機能を損なうことのない接合技術や成形加工技術等の開発が求められる。



(骨格:青、緑、茶;鉄鋼、鉄鋼材料 クロージャ:灰、緑;樹脂、黄;アルミニウム等)

図III-1.1-2 本プロジェクトで扱うモノコック車体の材料構成例

(2) 全体計画

本事業では自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）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 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する。これにより、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、我が国の部素材産業及びユーザー産業の国際競争力強化を目指す。

①アウトプット目標

輸送機器の抜本的な軽量化（自動車の場合は半減）のために、必要な革新的構造材料技術や革新的接合技術及びマルチマテリアル技術を開発する。目標を達成するために以下の研究開発項目について、開発を行う。

研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」

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、本プロジェクトの開発材料・接合手法による詳細設計に進展し、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。本研究開発では異種材料の開発成果の集約・連携が重要であるため、連携を促す体制・仕組みを構築し、活動を推進する。

研究開発項目②「接合技術開発」

中高炭素鋼を含む超ハイテン鋼やチタン材といった難接合材の接合、金属/CFRP 間等の異種接合に適用できる革新的な固相摩擦攪拌接合技術や熔融接合技術等を開発する。また、異種接合固有の電食や熱歪みに関する評価技術の開発を行う。さらに異材接合に対応するための構造材料用接着技術の開発を進め、中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発については、共通基盤技術である摩擦攪拌接合について、実用化に向けた研究を加速し、コスト競争力に優れ、用途が想定された革新的接合技術を開発す

る。最終的に、マルチマテリアル設計技術と連携しながら、材料選択に応じた適切な継手性能を発揮する接合プロセスの技術開発とその基盤研究を実施する。

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

生産性を向上した新規のチタン製錬技術やチタン材加工技術開発（製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発、連続一貫製造プロセス技術など）を行うとともに、チタン材の構造制御や不純物濃度低減技術等による高機能チタン材の開発を行う。

研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

アルミニウム材の構造制御技術等を確立することで、強度や延性を向上させた革新的なアルミニウム材を実現する。また、海外メジャー企業並みの低価格を実現できる新規アルミニウム材製造プロセス等の開発を進める。また、複層アルミ合金における設計、組織解析・制御技術の開発ではさらなる強度・伸びバランス向上のための合金組成の組み合わせ、クラッド構成の最適化を行なう。さらに、部材特性の向上策として、成形性向上のための材料設計指針を提示する。

研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

可燃性や難加工性といった欠点を克服するため、マグネシウム材の組織制御により強度や延性、耐熱性などの材料特性を向上させたレアアースフリーマグネシウム材の開発を行う。また、大型展伸材を製造するための革新的製造プロセス技術等の開発に加え、マグネシウム材の特性評価技術開発を併せて行う。さらに疲労特性を始めとする長期性能を予測するためMI（マテリアルズ・インテグレーション）システムを適用し、上記性能を予測するためのモジュール及び統合されたワークフローを構築する。

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

レアメタル添加量が極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼板の開発を目標とし、鋼板製造工程を精密制御し、レアメタルに代えて鋼材中の既存軽元素が強度や延性などの特性に及ぼす機能を最大限に発現させる技術や、鋼材中の結晶粒微細化・組織制御技術などの各種アプローチの高度化を図る。また同時に、中高炭素鋼開発の加速化に貢献する革新的な解析・評価技術を開発する。さらに、高強度鋼板の異相界面腐食解析及び水素脆化に関する研究開発を開始し、構造用材料としての信頼性の向上を図る。

研究開発項目⑦「熱可塑性CFRPの開発」

量産プロセスに適用できるレベルの熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術を開発し、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立する。また、熱可塑性CFRPの中間基材の開発と、その特性に基づいた構造設計、成形加工、性能評価等に係わる技術開発を包括的に実施する。さらに、リサイクル炭素繊維及び革新炭素繊維の適用評価を行い、LCA上優位な省エネルギー技術を開発する。

研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

アクリル繊維ポリマーをベースとする溶剤可溶性かつ完全耐炎化ポリマーにおいて、目標性能（フィラメント径 7 μ m、弾性率 240GPa、強度 4GPa）を満たす耐炎ポリマーの反応プロセスならびに湿式紡糸技術（3K または 6K）を確立する。また、マイクロ波による炭素化プロセス技術においては、マイクロ波による太繊維前駆体の安定的な炭素化を実現するため、炭素化過程における化学構造変化や電磁気学的な性質変化と機械特性との相関関係を明らかにする。

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

構造材料技術についてテーマ化のための重点調査を行うとともに、接合技術と個別課題（材料）に関する研究開発と、自動車等の輸送機器への適用との関係を踏まえた定点観測的な調査を実施する。また、低圧・超高速 CFRP 成形技術と戦略基盤の中で実施するライフサイクルアセスメント（LCA）とマルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究（拠点化）に関わる研究の取組を行い、課題を明確化する。マルチマテリアル化に伴う腐食に関しては、評価技術及び表面処理技術の開発を行う。

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は、小型中性子装置を完成させ観測を開始するとともに中性子分析法の更なる高度化を図る。

②アウトカム目標

現在使用されている輸送機器の原材料を革新的新構造材料に置き換えることで軽量化を図り、2030 年において、373.8 万 t の CO₂ 削減及び 1.2 兆円規模の売り上げが期待される。

(3)実施体制

NEDO から新構造材料技術研究組合（以下、ISMA という）が委託を受け、本プロジェクトを推進している。東京大学 岸輝雄名誉教授をプロジェクトリーダー、金沢工業大学 影山裕史教授をサブプロジェクトリーダーとし、NEDO との指示・協議の下で本プロジェクトを推進する。

ISMA は、事業概要に規定した研究開発テーマを、テーマ毎に再委託・共同実施先とともに遂行する。

(4)運営管理

本事業においては、事業の立ち上げ段階から現在に至るまで適宜適切な運営管理に努めている。また、本事業の進捗状況や成果、将来像について情報共有することを目的とした成果報告会などを実施している。

2.テーマ毎の成果

2.1「革新鋼板の開発」

2.1.1 [テーマ番号 22] 残留 γ 高度制御革新鋼板の開発

2.1.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

鉄鋼材料では、車両軽量化に向けて薄肉軽量化と衝突エネルギー吸収性の両立を可能にする高強度・高延性化が求められている。超高強度化・高延性化のために、低合金鋼で TRIP(Transformation Induced Plasticity)効果を活用した TRIP 鋼が開発された。また、2000 年頃には Mn 量を 30%程度添加した TWIP 鋼が開発された。ただ、TWIP 鋼はレアメタルである Mn を多量添加しており、製造プロセスで有害なヒューム発生等の安全面に係る問題やレアメタル多用の面から採用は限定的となっている。

そのため、レアメタルの使用量を抑えながら高延性化する技術開発に取り組まれている。ここでは、高強度組織であるベイナイトやマルテンサイトを母相として、高延性組織である残留 γ を多量に存在させることが基本思想となっており、具体的な研究事例としては、Mn 量を 5~10%にした中 Mn 鋼や、ベイナイト鋼や Q&P (Quench & Partitioning)鋼などが提案されている。こういった取組みで強度・延性の向上が実現されつつあるが、自動車部品への適用範囲を拡大し、軽量化効果を最大化させるためには、更なる強度・延性バランス向上が必要となる。

そこで、本研究項目では、炭素量 0.4%以上の中高炭素鋼を活用しつつ、TRIP 効果を最大化させることができる新しい材料設計指針として残留 γ の安定度分布制御技術を構築するとともに、その組織制御技術構築を実現するための各種評価技術を開発し、最終目標として強度 1.5GPa、伸び 20%の革新鋼板を創出することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

CO₂ 排出量低減を最終の狙いとした全体取組みの中における本研究開発の位置付けは、燃費低減のための自動車の軽量化の実現につながる鋼材の高度評価技術の開発と、その評価技術を活用した画期的な超高強度・超高延性材料の創出である。

革新鋼板の開発目標値については、プロジェクト開始時は最終目標を引張強度 1.5GPa、伸び 20%としていたが、2017 年度に強度 1.5GPa、伸び 20%を達成した。一方、実用化を見据えて取組みを発展させ、自動車用鋼板に求められる信頼性に関わる特性の目標として、耐水素脆化特性を兼備する革新鋼板の創出に取り組んだ。

表Ⅲ-2.1.1-1 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
高強度高延性中高炭素鋼の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・レアメタル添加量：10wt%未満 ・引張強度：1.5GPa以上 ・伸び：20%以上 	レアメタル添加量：10wt%未満、引張強度：1.5GPa以上、伸び：20%以上の開発鋼において、汎用鋼（590MPa～980MPa級）と同等の耐食性と水素脆性を目指す	—	自動車用部品に成形できる伸びと軽量化を実現可能な強度を兼備する
中高炭素鋼の解析・評価手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	—	革新鋼板の組織解析に供することができるレベル

(3)全体計画

2014年度までに1.2GPa級鋼で伸び25%を達成、その知見を基に各種方策を用いて残留 γ 安定度制御策を行い、強度・延性バランスの向上の実現について検討を行った。

2015年度は1.2GPa級鋼での特性向上メカニズムに関する仮説の検証を行い、中高炭素鋼の特性向上について考え方を構築する。また、ここまでに得られた知見を基に1.5GPa級鋼での特性向上策を導出した。

2017年度までに0.4C鋼にマイクロアロイを併用することで、強度-伸びバランスに加え、穴広げ率を向上できることを見出した。

2018年度からは1.5GPa 20%の革新鋼板について、実用化する際の課題となる水素脆化に関する対策技術の検討を行うことで、革新鋼板の実用化を促進させるための技術開発を進めた。

なお、2019年度以降はテーマ02に取組み内容を移管し、本テーマは完了とした。

(4)実施体制

実施体制としては、分担研である神戸製鋼所が、材料特性向上に必要な材料設計指針の導出に取り組む。ここで明確化した理想組織を実現するための要素技術として、熱力学データベースの見直しをNIMS、ベイナイト変態に伴う残留 γ 制御形成挙動の明確化を大学に再委託して技術開発を進めた。

また、解析技術としては、中性子を活用したマクロな組織解析技術を大学への再委託で実施すると共に、微視組織の解析技術については分担研自身で実施するような形で取り組んだ。

(5)運営管理

再委託先とは年3～5回の会議を行うことで進捗管理ならびに開発技術の分担研への取り込みを図った。再委託先で得られた知見は、材料開発にフィードバックして材料開発を促進できた。また、再委託先にて開発鋼の組織解析を実施し、材料開発の方向性を見直しによる目標早期達成に寄与させることができた。

(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）

革新鋼板開発では最終目標を達成させることにより、各種自動車部品への適用が可能となることが期待される。その際の軽量化効果は、現在の車体重量に対して、10%程度の軽量化効果が期待される。

売上については、国内の全汎用車を対象とすると約1000億円/年のマーケット創出が期待できる。神戸製鋼所では約30%の約30万t年、約30億円/年の売上が期待される。CO₂削減という観点では、車体重量約40kgの削減で約0.2kg/Lの燃費改善が期待される。そのCO₂削減効果は約2g/kmとなるため、鋼板開発全体で約14万t年、神戸製鋼として約4万t年のCO₂削減効果が期待される。

2.1.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.1-2 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
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	第3期に達成した TS-EL 目標達成材の残留 γ を安定化することで、成形を想定した加工後に水素添加時の破断強度を向上できることを示した。	◎	
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であるガスクラスターイオン銃を併設すると共に軽元素分析に有効な軟X線分光分析装置を活用することで空間分解能 140nm 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-2.1.1-3 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
革新鋼板の開発	目標を達成して 2019 年度で完了 (革新鋼板の検討はテーマ番号 02 で実施)	2019 年度で開発完了	達成済み
革新鋼板解析技術	目標を達成して 2019 年度で完了	2019 年度で開発完了	達成済み

(3)研究開発の成果と意義

(3-1)革新鋼板の開発

高強度・高延性化の取組みとして、0.4wt%C含む鋼において、Q&Pプロセスを付与し引張強度を1.5GPaに制御した鋼では残留 γ を多量に含むことで、良好な強度－延性バランスが得られる。しかし、Q&Pプロセスの過程で多くの炭素がマルテンサ

イト中に炭化物として析出することにより、伸びに寄与しない形で消費されてしまうことが分かった。そこで、炭化物の形成抑制に有効な元素を多量に添加することで、残留オーステナイト量の増量を試みた。その結果、TS 1.5GPa-EL 20%- λ 20%と第二期の目標に加え、穴広げ率も目標を達成した。

以上のように良好な特性を有する1.5GPa級革新鋼板をラボにて開発することができたが、このような鋼板を車体部品に使用する際には、腐食等で侵入する水素と応力により発生する水素脆化（遅れ破壊）に対する危険性が存在し、自動車メーカーで超高強度鋼板を使用する際の大きな課題となっている。

革新鋼板は高強度かつ高伸びを示すため、耐水素脆化特性が低位にある可能性がある。一方で、残留 γ の存在は、耐水素脆化特性の防止に有効との報告もある。そのため、この残留 γ の制御による耐水素脆化特性の制御の可能性について検討した。本検討では、これまでに検討してきた各種革新鋼板について、予ひずみの付与、耐水素脆化特性の評価を進めながら、残留 γ を多量に含む鋼での耐水素脆化特性への影響因子の明確化に取り組んだ。

評価方法としては、構造体として長期間、荷重がかかり続けた際の破断の危険性を評価するために、予ひずみ、水素付与の処理の後、定荷重試験を用いた。水素付与は陰極チャージ法により行った。

引張強度が同等の1.5GPaであっても水素付与後の破断強度は異なり、1000MPa以下の低位の値の革新鋼板と、1100MPaを超える良好な値を示す革新鋼板があることが分かった。耐水素脆化特性に寄与する組織因子を考えると、残留オーステナイトの組織因子が関連することを確認した。以上の知見を得ることで2018年度、本テーマは終了した。2019年度はテーマ02にて革新鋼板の開発を継続して実施した。

(3-2) 微小領域における残留 γ の形態・炭素濃度分布の評価・解析技術の構築

微視組織中の炭素濃度分布について、空間分解能と濃度分解能を改善するにあたり、1.5%C 鋼に Cr 膜を蒸着し、炭素の含まれる領域、炭素の含まれない領域を明確に切り分けたモデル合金を作製した。このモデル合金を用いて、SEM ベースで軟 X 線分光分析による炭素濃度分布の空間分析能の評価を行った。SEM ベースでの空間分解能評価では、特性 X 線の発生する領域を狭めるために低加速電圧、低照射電流化することで空間分解能を高められる。しかし、電子線照射時に試料に付着する C コンタミネーションが分析精度に悪影響を与えるためその対策が必要となる。ここでは、C コンタミネーションの悪影響を抑制する方法を用いることで空間分解能と濃度分解能を両立する方法を探索し、目標の解析を実現できることを見出した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.1-4 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			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	7	1	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	3	0	0	3	0	0	2
2018FY	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2019FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	1	0	16	1	0	3	0	0	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-2.1.1-5 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	2	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	3	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	1	0	0
2019FY	0	0	1
合計	6	0	1

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.2 [テーマ番号 23] 軽元素を有効に用いた革新鋼材の耐食性および成形性向上技術の開発

2.1.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

構造材料としての鉄鋼材料で求められる性質は、強度、延性、靱性、耐環境性、等であり、種々の合金元素の添加と組織制御法の選択により、特性の向上が図られている。しかしながら、上記の合金元素の中には埋蔵量が少なく、高価な上に資源リスクが懸念されるものがある。また、鉄中への均一分散が難しく、高温で長時間の熱処理が必要な元素もある。また、一旦、鉄中に固溶すると、分離が難しく、リサイクルの障害になる元素もある。したがって、これらの合金元素の使用量を極力低減しつつ、従来の鉄鋼材料を超える特性が得られれば、コスト削減、資源リスクの回避、易リサイクル性の観点で、社会へのインパクトは大きい。しかしながら、鉄鋼材料における省元素技術の確立のためには、各元素の機能の発現機構の解明とともに、合金元素の代替技術の確立が必要である。

本事業では、稀少元素の添加量を極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼の開発を目標とし、鋼材の金属組織を精密に制御し、稀少元素に代えて鋼材中の軽元素が強度や延性などの特性に及ぼす機能を最大限に発揮させる技術などの高度化を図る。また同時に、中高炭素鋼開発の加速化に貢献する革新的な解析・評価技術を開発する。さらに、中高炭素鋼の実用性評価のための成形性、潤滑加工性、耐食性、等の評価技術を開発する。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.2-1 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
革新鋼材の開発	<ul style="list-style-type: none">・レアメタル添加量：10wt%未満・引張強度：1.5GPa以上・伸び：20%以上 を有する中高炭素鋼の材料設計と組織制御を行う。	軽元素の有効利用により1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、工業化に向け諸特性の再現性を確認する。さらに現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を示す。	実質的な開発は2020年度末で終了し、マルチマテリアルを前提とする実用化に向けた準備と課題整理を行う。	高強度材を用いるマルチマテリアル化は実績が少ないため、相応の準備期間が必要。

革新鋼材の表面作りこみ技術の開発	高強度鋼材の腐食特性および摺動特性の評価技術を確立する。	1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、腐食特性および摺動特性の評価技術を確立するとともに、現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を示す。	実質的な開発は2020年度末で終了し、マルチマテリアルを前提とする実用化に向けた準備と課題整理を行う。	
------------------	------------------------------	--	---	--

(3)全体計画

本テーマでは、稀少元素添加量 10wt%未満で高強度を有する中高炭素鋼を実験室レベルでサンプルを試作し、引張強度、延性、熱間加工性に及ぼす微量元素の影響、等に関わるデータ採取を行う。また、微量元素単体およびその化合物は鋼の組織や特性に大きく影響することから、組織形成に及ぼす微量元素の影響を解明するためのその場観察装置（中・高温域の組織観察その場解析装置、等）の開発および、熱力学データの構築に必要な基礎データを取得する。

本検討では、さらに実装時の実用性能評価を見据え、超高強度鋼の成形性評価技術、耐食性評価技術の開発を行い、試作した革新鋼材を用いて、強度、延性、耐環境性、等々を評価し、実用材料としての可能性とマルチマテリアル化への発展性を見極める。

具体的な計画を以下に記す。

【第1期目標（2015年度末）】

- ・稀少元素添加量 10wt%未満で、引張強度 1.2GPa 以上、伸び 15%以上を有する中高炭素鋼を実験室レベルで二次試作し、引張特性、加工性、成形性、等々を評価。
- ・軽元素を利用して、耐環境性を向上させる材料設計手法を検討。
- ・高温での粒界移動、結晶方位変化の計測。
- ・小型サンプルを用いた成形限界ひずみおよび曲げ性に関する評価方法の検討。

【第2期目標（2017年度末）】

- ・稀少元素添加量 10wt%未満の中～高炭素鋼をベースにして、引張強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上を有する高強度鋼の材料設計と組織制御を行う。
- ・軽元素の有効利用による耐環境性を向上させる材料設計手法を確立する。
- ・高強度鋼材の腐食特性および摺動特性の評価技術を確立する。

【第3期目標（2020年度末）】

- ・軽元素の有効利用により 1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、工業化に向け諸特性の再現性を確認する。さらに現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を示す。

・ 1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、腐食特性および摺動特性の評価技術
を確立するとともに、現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指
針を示す。

【最終目標】

・ 軽元素の有効利用により 1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、工業化に向
け諸特性の再現性を確認する。さらに現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持
する表面設計指針を示す。

・ 1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、腐食特性および摺動特性の評価技術
を確立するとともに、現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指
針を示す。

・ 実質的な開発は 2020 年度末で終了し、マルチマテリアルを前提とする実用化に向
けた準備と課題整理を行う。

(4)実施体制

本テーマは、富津分室・尼崎分室（日本製鉄株式会社）が 3 再委託先と実施する。

(5)運営管理

日本製鉄内および再委託先間で定期的な進捗会議を実施し、適切な運営管理に努め
てきた。具体的には、1 回／年の頻度で、当社幹部（鉄鋼研究所所長、先端技術研究
所）へのキックオフおよび進捗報告会議を実施した。さらに、実務者間で、1 回／月
の進捗会議および、2～5 回／年の頻度で再委託先との進捗会議を実施した。

(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）

本プロジェクトで開発を目指す高強度高延性中高炭素鋼は、所謂、第 4 世代に該当
する高性能な鋼材であり、多分野での適用が期待される。また、資源枯渇のリスクを
有するレアメタルの使用量を削減することで、安定的な供給が可能となる。本プロジ
ェクトにおいて、開発鋼材の特性と製造方法が確定した後、具体的な費用対効果を算
出する。

2.1.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.2-2 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
革新鋼材の開発	1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、工業化に向け諸特性の再現性を確認する。さらに現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を示す。	軽元素の有効利用により1.5GPa×20%の特性を満足する革新鋼材を試作し特性の安定性を確認。さらに機械特性、耐食性、摺動性に有効な微量軽元素群を発見し、試作試験により諸特性を評価した。	◎	
革新鋼材の表面作りこみ技術の開発	1.5GPa×20%の特性を持つ革新鋼材において、現行汎用材と同等以上の耐食性と成形性を維持する表面設計指針を示す。	革新鋼材の耐食性評価技術および固溶軽元素の耐食性に及ぼす作用検討手法を開発し、耐食性と成形性を維持する軽元素群を見出し、これらの機能を明らかにした。	◎	

※◎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-2.1.2-3 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
革新鋼材の開発	軽元素の有効利用により1.5GPa×20%の特性を満足する革新鋼材を試作し特性の安定性を確認。さらに機械特性、耐食性、摺動性に有効な微量軽元素群を発見し、試作試験により諸特性を評価した。母材については、ほぼ安定して製造できることを確認した。	実質的な開発は2020年度末で終了し、マルチマテリアルを前提とする実用化に向けた準備と課題整理を行う。	達成の見込み

革新鋼材の表面作りこみ技術の開発	革新鋼材の耐食性評価技術および固溶軽元素の耐食性に及ぼす作用検討手法を開発し、耐食性と成形性を維持する軽元素群を見出し、これらの機能を明らかにした。現在、複数の軽元素に拡大し、特性の安定性を評価中である。	実質的な開発は2020年度末で終了し、マルチマテリアルを前提とする実用化に向けた準備と課題整理を行う。	達成の見込み
------------------	--	---	--------

(3)研究開発の成果と意義

本事業の独自性は、高機能を有する鉄鋼材料の設計において、軽元素の有効利用を目的とし、粒界偏析や表面偏析の最適化を図る点にある。軽元素は鋼材中での拡散速度が速いため、動的挙動は未解明である。しかしながら、高温での in-situ 解析技術などの先進解析技術と精緻な計算科学と有機的に融合すれば、鋼中での軽元素のダイナミクスに基づくマルチスケール設計が可能となり、軽元素の機能を最大限発揮するための革新的組織制御技術の提案が可能となる。

汎用鋼で、合金鋼以上の超高強度－高延性を保証するとともに、必要となる信頼性、加工性などの実用特性を発揮すれば、構造材料としての適用範囲が拡大し、鉄鋼製品の製造工程を含んだトータルエネルギー消費量ならびに CO₂ 排出量は格段に削減できる。また上記の基盤技術をベースに軽元素の合金元素を組み合わせれば、極めて高機能を有する鉄鋼材料の創製が可能となり、国際競争力の向上に大きく寄与するものと期待される。

本テーマでは、稀少元素添加量 10wt%未満で高強度を有する中高炭素鋼を実験室レベルでサンプル試作し、引張強度、延性、熱間加工性に及ぼす微量元素の影響、等に関わるデータ採取を行ってきた。微量元素単体およびその化合物は鋼の組織や特性に大きく影響することから、組織形成に及ぼす微量元素の影響を解明するためのその場観察装置（中・高温域の組織観察その場解析装置、等）の開発および、熱力学データの構築に必要な基礎データを継続して取得している。また、構造材料としての信頼性や製造性に影響するプレス摺動性といった利用特性を開発段階の小サイズの試験片を用いて把握・定量化するための解析・評価技術開発の検討を行った。

・革新鋼材の工業化のための熱力学データベースの整備

本プロジェクトでは、炭素を含めた軽元素の有効利用の可能性を検討した。具体的には、炭素量 0.5%以上を含む単純組成鋼に、複数の軽元素を添加した鋼材について、粒径を 1 μm 以下に微細化したオーステナイトを母相とするマルテンサイト組織において高強度－高伸び特性が実現することが明らかとなり、炭素添加量の範囲を拡大した改良成分系において、本プロジェクトの最終目標である、引張強度：1.5GPa、伸び 20%の達成が可能であることを、実験的に確認した。

一方、革新鋼材の工業化のためには、プロセスウィンドウを広げ、製造条件を緩和

しつつ、微細な組織を安定的に得る必要がある。そこで、各種特性とコストに悪影響を及ぼさず、オーステナイト粒の微細化に寄与する合金元素を種々検討し、有効な元素群について熱力学的データベースを確立した。

- ・革新鋼材の耐食性評価技術および固溶軽元素の耐食性に及ぼす作用検討手法開発
[革新鋼材の耐食性評価技術開発]

鋼材の耐食性は、実際の使用環境を模擬した環境中、もしくはこれをさらに過酷に制御した環境中における、暴露試験または電気化学的加速試験等により推し量られている。しかしながら、これらの加速試験結果が実際の腐食結果を精確に予想するものとはならない等、従来の耐食性評価には問題を抱えている。本研究では、軽元素による耐食性の向上及び稀少元素の代替技術の探索のためのその場観察技術を検討し、実際に中高炭素鋼及び稀少元素削減材について耐食性皮膜を評価した。

本研究では、耐食材料開発のため腐食過程のその場分析技術として、可視光を用いた分析技術の検討を行い、特に電気化学偏光反射顕微鏡の有効性を見出し、溶液フローセルとの組み合わせ分析法のレベルアップを図ってきた。結果、流体力学的な電気化学現象の解析が可能となりつつある。

- [革新鋼材中固溶軽元素の耐食性に及ぼす作用検討手法開発]

窒素(N)、炭素(C)、ホウ素(B)などの軽元素は、鋼材の機械的性質を改良する際の代表的な添加元素である。これらは、少量の添加であっても強度や延性が大きく変化するため、鋼にとって非常に有益な元素である。また、窒化や浸炭などの表面改質法を利用すると、容易にしかも多量に添加できるという利点もある。しかし、鋼の耐食性における軽元素の役割には不明な点も多い。特に、軽元素は鋼が腐食する際に、 NO_2^- 、 CO_3^{2-} 、 BO_3^{3-} などのオキシアニオンとして溶解することが多く、高い防食作用を発揮すると考えられている。しかし、その作用を系統的に解析した研究論文は見あたらない。また、軽元素と鉄(Fe)の電気陰性度には大きな差がある。このため、軽元素の添加によりFeの電子状態が大きく変化することが予想される。しかし、Feの電子状態と鋼材の溶解速度とを結びつけて解析した研究論文も見あたらない。そこで、Fe-N、Fe-C、Fe-B合金を作製し、これらの溶解速度を調査し、オキシアニオンの防食効果とFeの電子状態との関連性を解析した。

- ・革新鋼材の金型成形性向上のため、摺動性評価システム検討

革新鋼材社会実装にむけた議論を加速する中で、製造性、製造コストは大きな問題となっている。数多くのプロセスがある中で、主に材料供給メーカー以外が実施することになるプレス成型性について従来鋼材並みの特性を担保しておく必要があると考えられた。そこで、プレス加工時のコスト要因となる金型摩耗の減少のため、本項目では、鋼材表面の摺動特性の評価方法および摺動性向上のための技術開発を行う。

革新鋼材の高度な材料特性は、材料メーカー製造プロセスの中で実現されていることから、その材料特性を最大限生かすためには、材料出荷後に組織に影響を及ぼす高

温加熱は避ける必要がある。よって、プレス加工など後工程では、室温近傍での加工が理想とされる。よって本検討でも、室温近傍での評価、特性改善を目指す。具体的には、室温近傍では元素の拡散や変態といったバルク特性の変調を利用することは難しく、表面での酸化などを活用した特性改善を狙う必要がある。一方、潤滑特性改善のために用いられる潤滑油下では低酸素分圧環境であることが想定され、必ずしも鋼材の潤滑環境としては好ましいとは言えない。本検討では、想定される低酸素分圧環境下での摺動特性評価のための雰囲気制御摺動特性評価技術の開発をすすめ、2018年度 Fe に対して軽元素を添加されることで、潤滑油下のような低酸素分圧下での環境でも良好な摺動特性が発揮されることを確認できている。2019年度、その複数の軽元素添加の効果とその作用機構について検討を進めるとともに、革新鋼材で想定される他の添加元素についても探索範囲を広げた。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.2-4 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	3	0	0	0	0	0	1
2015FY	1	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	1	0	0	0	0	0	0	1	1
2017FY	1	0	6	0	0	0	0	0	2
2018FY	1	0	4	0	0	0	0	0	1
2019FY	2	0	9	0	0	0	0	4	1
合計	6	0	23	0	0	0	0	5	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-2.1.2-5 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	2	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.3 [テーマ番号 24] 炭素活用による革新的加工性を有する超高強度鋼板の開発

2.1.3.1 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ハイテンの適用拡大には、強度のみならず加工性（伸び特性）も抜本的に向上させる必要がある。本テーマでは、加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板におけるマイクロ組織微細化、炭素を活用した微細且つ安定な残留オーステナイトの確保、さらには焼鈍熱処理時の γ 粒径微細化といった冶金的制御因子の機械的特性に及ぼす影響を明確化することを通し、従来延長線上で見込まれる特性を大幅に上回る高強度・高延性鋼板の組織制御・製造プロセス指針を構築することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.3-1 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 (2017年度末)	根拠
鋼板開発	引張強さ (TS) \geq 1.2GPa、伸び (El) \geq 20% (TS \times El \geq 24,000)	TS \geq 1.2GPa、El \geq 25% (TS \times El \geq 30,000) 2015年度末に目標を5年前倒しし下記に修正 TS \geq 1.5GPa、El \geq 20% (TS \times El \geq 30,000)	TS \geq 1.5GPa、El \geq 20% (TS \times El \geq 30,000) (2015年度末に本目標を5年前倒しし、2017年度末目標とした)	1.2GPa および 1.5GPa 鋼板の需要急拡大
解析・評価手法開発	炭素の分析下限が 30ppm (点分析)	炭素の分析下限が 10ppm (点分析)	炭素の分析下限が 10ppm (点分析)	複相鋼板 α 相中の固溶炭素濃度

(3)全体計画

①高強度高延性中高炭素鋼の開発

自動車や輸送機器の軽量化を目的としたハイテンの適用拡大には、強度だけでなく加工性（伸び特性）も抜本的に向上させていく必要がある。本テーマでは、加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板において従来の延長線上で見込まれる値を大きく超える伸びを実現する。具体的なアプローチは、強度を担うマルテンサイトやベイナイトといった硬質相の超微細化による鋼の生地そのものの高延性化と、加工により変態して延性を高める残留オーステナイトの微細分散による伸びの向上である。従来は、ベイナイトの微細化技術が不十分であり、かつ残留オーステナイトによる高い延性を安定的に実現することができなかった。ここでは、これまであまり注目されてこなかったベイナイトやマルテンサイトの微細化を積極的に行うことで安定なオーステナイトを多量に残存させることによって、革新的な伸びの向上を目指す。2014年度は、現実的な加工熱処理プロセスを前提に、第一中間目標

特性（自主目標）である引張強さ 1.2GPa で伸び 20%を達成する加工熱処理法を 1 年前倒しで確立した。2015 年度は、さらに技術を発展させて、第二中間目標特性（自主目標）である引張強さ 1.2GPa で伸び 25%を有する鋼板を 2 年前倒しで開発した。本結果を受けて、2015 年度末に、最終目標特性（PJ 公募目標）達成を 5 年前倒しし、2017 年度末での達成を目指すこととした。よって、2016～17 年度は、最終目標である引張強さ 1.5GPa で伸び 20%を有する鋼板の実験室検討を実施する。

②中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

本プロジェクトでは、延性が従来の延長線上にない革新的なハイテンを開発するテーマとして、中高炭素鋼の開発を行う。この中高炭素鋼は従来の解析ツールでは解明できない微細組織を有することから、分析技術も同時に開発する必要がある。特に、微細構造と炭素の分配挙動の関係を解析する手法の開発が重要である。

この課題について、各種製造プロセスによる中高炭素鋼板開発を促進する革新的な解析技術として、電子線等を用いた中高炭素鋼中の炭素の分配状態を解析する炭素分配アナライザーを 2013 年度に導入した。この技術は、現状、点分析でも 0.1%を若干下回る程度に留まっている炭素の定量下限を、二次元分布評価の場合でも 100ppm 未満に維持できる世界初の炭素分析を実現させるものである。2014 年度は、試料前処理方法の検討を含めた炭素濃度分布評価手法の高度化を図り、点分析での炭素定量下限 30ppm を目指すと共に、素材開発への応用展開を行った。2015 年度は炭素定量下限 20ppm を当初予定の 2017 年度から 2 年前倒しで達成した。本結果を受けて、2015 年度末に、最終目標達成（炭素定量下限 10ppm）を 5 年前倒しし、2017 年度末での達成を目指すこととした。さらに、2016～17 年度は、複相組織の三次元解析や高速定量解析技術も開発し、素材開発の設計基盤を強化する。

また、これらの電子ビーム利用技術と並行して、初年度から、大学に委託して鋼材の微細組織評価のための中性子利用技術を探索し、小角散乱による微細析出物の定量評価技術および水素トラップ過程の観察技術の確立を目指した。この研究課題は協調領域として、各社および研究機関が協力して推進することとし、2015年度よりテーマ44に移行して実施した。

(4)実施体制

本テーマは千葉分室（JFE スチール株式会社）が 4 再委託先と共に実施する。

(5)運営管理

実務者進捗会議を 1 ヶ月に 1 回、運営会議を 3 ヶ月毎に開催。また、再委託先との進捗会議を 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）

自動車の燃費向上により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）である 10～20%相当の CO₂ 削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。

2.1.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.3-2 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
鋼板開発	TS \geq 1.5GPa、EI \geq 20% (TS \times EI \geq 30,000)	TS \doteq 1.5GPa、EI \doteq 23% 達成	◎	
解析・評価手法開発	炭素の分析下限が10ppm (点分析)	炭素の分析下限が10ppm (点分析)	○	
解析・評価手法開発	鋼組織の3D評価	3D-SEMにより、開発鋼の組織解析を行い、熱処理による組織変化を三次元的に評価	○	

※◎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-2.1.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 ^{注)} (2017年度末)	達成見通し
鋼板開発	TS \doteq 1.5GPa、EI \doteq 23%	TS \geq 1.5GPa、EI \geq 20% (TS \times EI \geq 30,000)	○達成
解析・評価手法開発	定量下限10ppm以下	炭素の分析下限が10ppm (点分析)	○達成

注) 最終目標達成を5年間前倒し、2017年度末達成とした。

(3)研究開発の成果と意義

1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発

自動車や輸送機器の軽量化を目的としたハイテンの適用拡大には、強度だけではなく加工性（伸び特性）も抜本的に向上させていく必要がある。本テーマでは、従来よりも炭素を積極的に添加した鋼の加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板において従来の延長線上で見込まれる値を大きく超える伸びを実現する。具体的なアプローチは、強度を担うマルテンサイトやベイナイトといった硬質相の超微細化による鋼の生地そのもの高延性化と、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微細分散による伸びの向上である。従来は、ベイナイトの微細化技術が不十分であり、かつ残留オーステナイトによる高い延性を安定的に実現することができなかった。ここでは、これまであまり注目されてこなかったベイナイトやマルテンサイトの微細化を積極的に行うことで安定なオーステナイトを多量

に残存させることによって、革新的な伸びの向上を目指す。

本研究では、組織単位としてベイナイトやマルテンサイトのブロック構造に着目することで、従来の結晶粒単位に比較して実質的に組織の微細化を実現することを基本方針とした。一般的に中高炭素鋼のベイナイトやマルテンサイトは、おおよそ数十 μm 程度のサイズの結晶粒（旧オーステナイト粒）の内部に数 μm のサイズでポケット構造を有し、さらにポケットの内部に1 μm 程度のサイズでブロック構造を有するか、これに類似した組織形態を呈している。ブロックの内部はさらに微細なラス構造を有している。この中で旧オーステナイト粒のみでなく、ポケットやブロック構造も境界の方位差が大きく、大角粒界により区分されている。したがって、ブロック構造を結晶粒単位として制御することで微細化による機械的特性向上の効果を享受することが期待される。すなわち、ブロック境界に残留オーステナイトを形成せしめることにより、硬質相の微細化と残留オーステナイトの均一、微細分散を具現化し、このような形態およびサイズの残留オーステナイトが機械的性質、特に延性の向上に及ぼす効果を検証することを研究目的とした。

2013年度には、1.2GPa級の超高延性高強度鋼板の開発を目的として、ベイナイトを主相とした新微細粒組織のための加工熱処理方法を立案した。汎用鋼程度の低炭素低合金鋼に対して、複合化した加工熱処理を実施することにより、従来鋼板の機械的特性を凌駕し、1.2GPa級の超高強度と590MPa級鋼に匹敵する延性を両立できる可能性が示唆された。そこで本基礎技術思想を更に発展することを基本方針として、中間目標特性を達成する加工熱処理法の探索を行った。アプローチとして、2014年度は、中高炭素添加を前提に合金成分組成を適正に調整した上で複合化した加工熱処理を組合せた。さらに、2015年度には、中高炭素添加鋼への加工熱処理条件の適正化を図り、1.2GPa級の超高延性高強度鋼板として理想的な複相組織形態に制御する手法を検討した。その結果、特殊な強加工プロセスを利用することなく、実機製造を想定した現実的な焼鈍プロセスによって、複相組織の主相であるベイナイトの組織サイズを数ミクロン程度に制御する手法を確立し、2013年度の検討鋼に対して格段に微細化を達成した。さらに、加工熱処理過程のミクロ組織変化の核心である炭素の拡散挙動や分布の変化を、新たに開発した炭素分配アナライザを利用して厳密に解析することにより、ベイナイト主相中に安定度の高いサブミクロンサイズの残留オーステナイトを多量に分散させる手法を確立した。上記の手法を用いた研究室実験の結果、図III-2.1.3-1に示すとおり、2014年度の開発鋼板では、プロジェクトの共通中間目標である引張強さ1.2GPa以上、伸び15%以上を大幅に上回り、2015年度第一中間目標（自主目標）である引張強さ1.2GPa以上と伸び20%以上を、さらに2015年度の開発鋼板では、2017年度第二中間目標（自主目標）である引張強さ1.2GPa以上と伸び25%以上の両立を、当初計画より前倒しで達成した。さらに、2016年度には、2015年度までの超高延性1.2GPa級鋼開発技術を1.5GPa級鋼に展開し、化学成分、製造条件を適正化することで、引張強さ約1.5GPa、伸び約19%と、最終目標に近い特性が得られた。2017年度は、焼鈍条件を最適化することで、最終目標の達成を目指した。熱処理条件を精緻にコントロールすることで、炭素の原子レベル制御とミクロ組織の微細制御を実現し、TS:約1.5GPa、EL:約23%と、同強度レベルの従来鋼のおよそ3倍の延性を有する鋼板

を実験室で開発し、1.5GPa 級鋼の最終目標特性を達成した。本技術の活用により、現在、自動車用構造材料の主要部材に用いられている 590MPa 級鋼を、今回開発した 1.2~1.5GPa 級鋼に置き換えることにより、大幅な車体軽量化による燃費向上と衝突安全性の向上が期待できる。

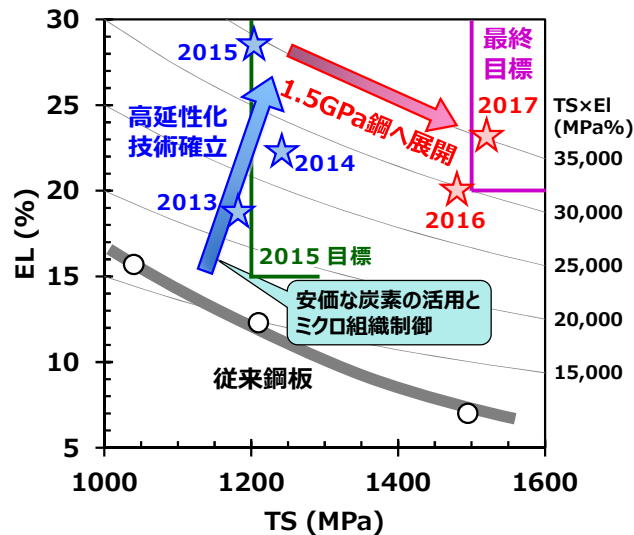


図 III-2.1.3-1 開発鋼の機械的特性

2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

本プロジェクトの中高炭素鋼は従来の解析ツールでは解明できない微細組織を有することから、分析技術も同時に開発する必要がある。特に、その詳細を学術的に解明するため、微細構造と炭素の分配挙動の関係を解析する手法の開発が重要である。

この課題について、各種製造プロセスによる中高炭素鋼板開発を促進する革新的な解析技術として、電子線等を用いた中高炭素鋼中の炭素の分配状態を解析する技術や、中性子を用いた熱処理や加工プロセスにおける鋼微細組織の変態挙動の動的解析技術等を開発した。初年度には、中高炭素鋼板の開発を促進する炭素分配アナライザを開発・設備化し、中炭素鋼中の組織形成に大きな影響を与える炭素を定量評価する基礎技術を確立した。

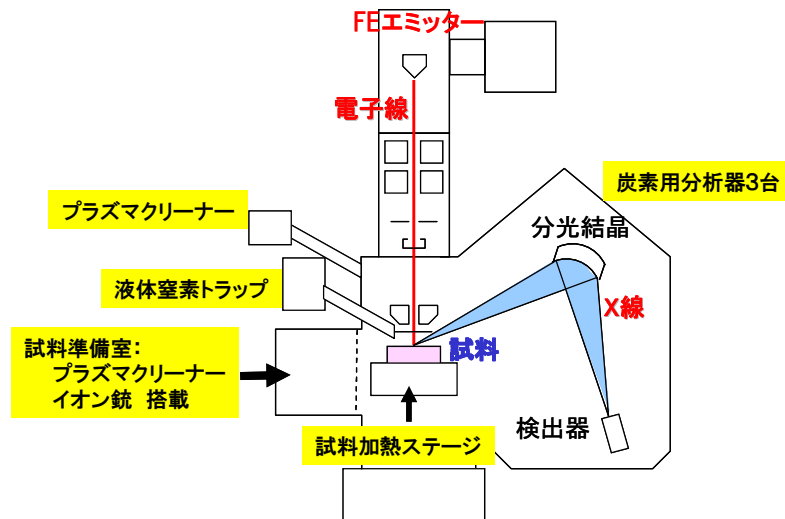
2).1 炭素分配アナライザの開発

本プロジェクトでは、革新鋼板開発のために必須である鋼板の組織に対応した炭素濃度を測定するために、プロジェクト初年度より測定の障害となるヒドロカーボンに起因したコンタミネーションを大幅に低減させる特殊仕様を組み込んだ独自の微小領域炭素分析装置を製作した。

本装置における鋼板組織に対応したCを測定する手法は、非破壊で、かつ、分析面積を結晶粒経よりも小さくする必要がある。フィールドエミッション型の電子線マイクロアナライザ(FE-EPMA)は電子線を照射するため分析面積が小さく、非破壊

分析で微小領域のC分析を行うのにもっとも適していると考えられる。そこで、FE-EPMAをベースとして、EPMAの炭素分析で問題となるカーボンコンタミネーションを低減・抑止する技術を開発した。

開発装置（Cアナライザー）のコンタミネーション削減技術概要を図Ⅲ-2.1.3-2に示す。



図Ⅲ-2.1.3-2 開発装置：Cアナライザーのコンタミネーション低減技術概要

Cアナライザーによる炭素濃度測定用の標準試料（C=0.089～0.460%）を用いて確立したコンタミネーション削減技術による測定条件にて N=16 回の繰り返し測定を行ったときの、それぞれの試料の標準偏差は約 0.01%、測定誤差は多くの試料で 0.002%以下であった。なお、これらの N=16 回の測定は照射電流量等の電子光学条件は同一であるが、試料の研磨は測定ごとに実施しているほか、測定日も複数日にまたがっており、試料調整におけるばらつきを加味してもなお、この測定精度を達成していることになる。

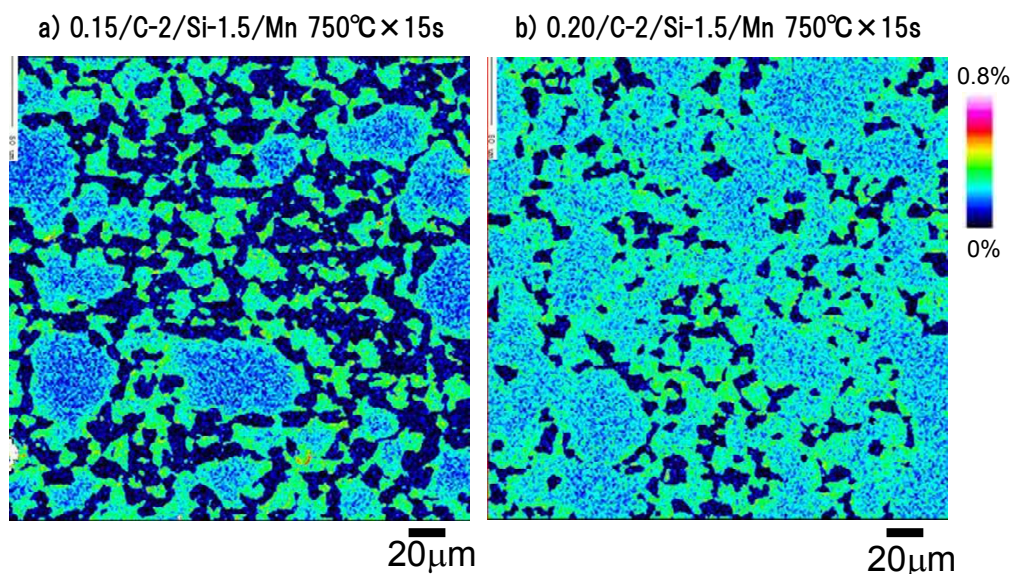
さらに、本装置を用いて鉄鋼材料測定の測定条件最適化による炭素定量精度の向上を図り、炭素量が 9ppm のオーステナイト単相鋼である Fe-Ni 合金を用いてポイント分析にて Cアナライザーで炭素濃度を定量したところ、9ppm という値を得た。これにより、本プロジェクト最終目標である定量下限 10ppm を達成した。

微小領域の炭素定量分析で10ppmを達成したのは世界初であり、本技術を鋼板開発における残留オーステナイト中への炭素分配挙動評価に活用した。

測定例としてDP鋼（Fe-0.15、0.20%/C-2%/Si-1.5%/Mn）を950℃でγ単相にした後、二相域の750℃で15s保持後水冷した試料のL断面を鏡面研磨し、CアナライザーにてCの定量分析を実施した。結果を図Ⅲ-2.1.3-3に示す。まず、いずれの試料も粒径の大きいγ粒の中心部分の炭素濃度はバルク濃度であるが、コンタミネーションの影響のほとんどないCアナライザーでは、マッピング結果より0.15%/C

鋼と0.20%/C鋼の0.05mass%というわずかなバルクの炭素濃度差は明確に測定可能である。また、炭素量の少ない0.15%/C鋼の方が、フェライト変態が進行して γ 粒径が小さい部分にC濃化していることが明確にとらえることができることが明らかになった。

Cアナライザーの測定結果は全面においてコンタミネーションネーションが抑制されたマップとなっており、正確な炭素の2次元分布の可視化に世界で初めて成功した。



図III-2.1.3-3 DP 鋼の 2 相域焼鈍後の C アナライザーによる炭素定量マッピング測定結果

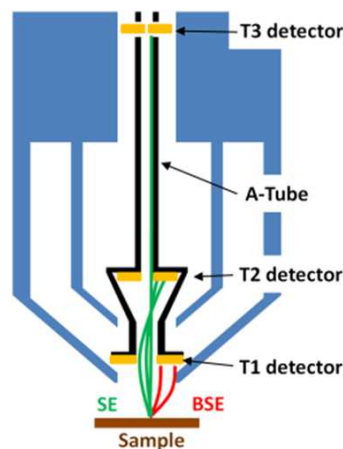
2).2 鋼組織の 3D 評価技術開発

2).2.1 パーライト鋼を用いた基礎検討

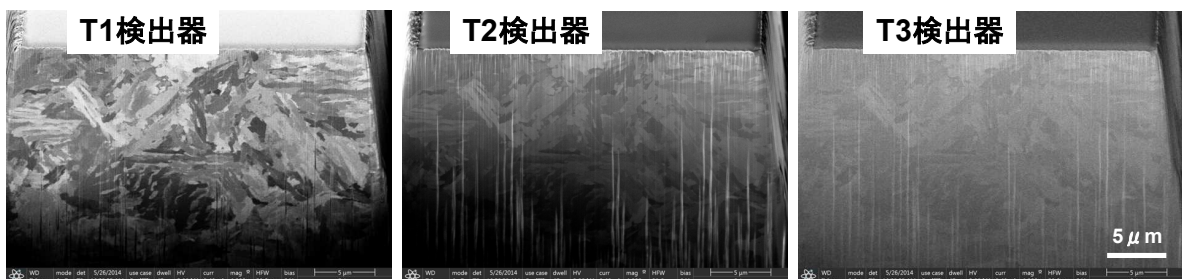
鋼板開発を行うにあたり、材料組織のうち γ 相の形態が非常に重要になる。そのために、前述のように γ 相、 α 相の C 分布の高精度な測定に加え、 γ 相の形態についての情報も重要である。従来から γ 相の形態については、走査電子顕微鏡(SEM)や透過電子顕微鏡(TEM)により評価してきた。しかし、今回の開発目標である高強度-高延性材の特性を達成するためには、 γ 相の形態や α 相の形態についても、二次元的な情報に加えて、三次元情報の取得が必要である。そのために、2013 年度から三次元マイクロ組織解析装置の仕様について検討を行い、2014 年度に導入を行った。装置は、SEM と集束イオンビーム(FIB)より構成され、FIB 加工で試料の断面組織を作製し、一断面の SEM 観察を行い、引き続き FIB 加工により新たな断面組織を作製し、連続して解析を続けることで三次元像を構築する。また、SEM による組織解析に加え、電子線後方散乱回折(EBSD)による観察機能を加えて、結晶組織情報の解析を行えるものとした。

FIB により作製した断面組織は、平滑なために従来の SEM 装置ではコントラストが

形成されずに連続像の観察が困難であった。このため、導入装置については、FIB 断面の SEM 像取得機能と EBSD 解析の安定性を重視して選定を行った。この結果、FEI 社製の Scios を 2015 年 1 月に導入した。今回導入した装置は、図Ⅲ-2.1.3-4 に示すように、カラム内に 3 つの検出器(T1、T2、T3)を持っている。この内、ポールピース内に新たに開発された反射電子検出器 (T1 検出器) により、これまでは困難であった FIB で作製した平滑面の組織観察が可能となった。図Ⅲ-2.1.3-5 に、SEM 加速電圧 2kV で撮像した、FIB で作製した同一断面の SEM 像を示す。図から、T1 検出器では結晶の形態について観察可能であるが、T2 および T3 検出器は、表面の凹凸等は観察できるが、結晶組織の情報を得ることが困難であることが分かる。このように T1 検出器を用いた SEM 連続像の観察から、三次元組織の構築が可能となった。



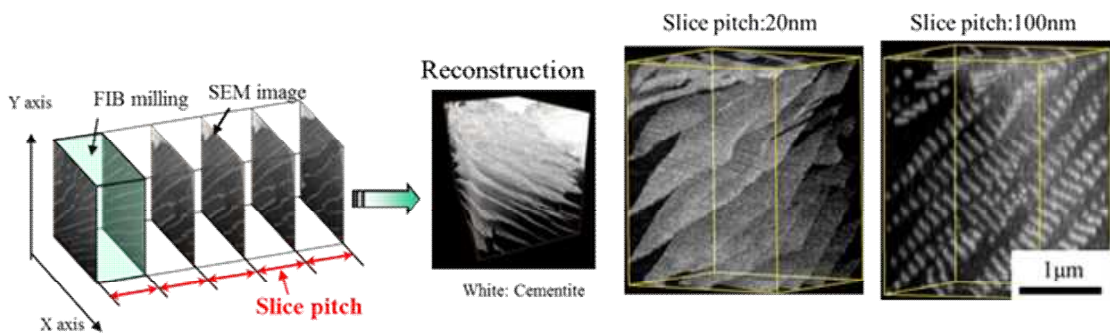
図Ⅲ-2.1.3-4 三次元マイクロ解析装置 (FEI 社製、Scios) の検出器模式図



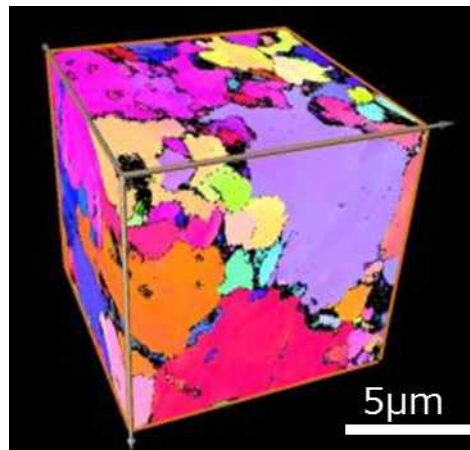
図Ⅲ-2.1.3-5 FIB で作製した同一断面 SEM 像の検出器による違い (加速電圧 : 2kV)

今回の開発材は、残留オーステナイトを含む鋼板であるために、鋼中の BCC 相 (フェライト、マルテンサイト、ベイナイト) と FCC 相 (オーステナイト) の識別

が必要となる。このため、組織の特定は非常に重要になる。そこで、対象となる組織の識別を行うために、三次元組織のスライス・観察方法について検討を行い、観察条件を最適化した。パーライト鋼での組織観察条件最適化の例を図Ⅲ-2.1.3-6 に示すが、3D 組織観察最適化により、パーライトラメラを連続的に捕え、的確な 3D 組織評価が実施されていることがわかる。同時に、EBSD を用いた三次元組織観察方法の検討も行い、組織の三次元 EBSD 像の取得が可能になった（図Ⅲ-2.1.3-7）。また、2015 年度に導入したメゾスケール高速アナライザーについては、測定条件について検討を行い、低倍から高倍のマルチスケールでの組織観察が可能となるとともに、元素分析の短時間化を行うことが出来た。この検討により、今後の三次元組織観察領域の選定や試料全体把握について適用が可能となり開発に寄与することが期待される。



図Ⅲ-2.1.3-6 三次元像観察の模式図及び 3D 組織像構築に及ぼす FIB 加工条件の影響



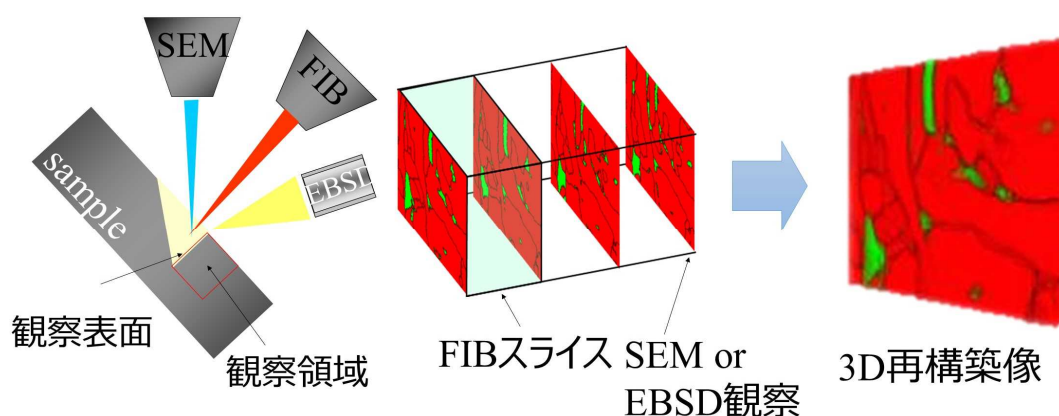
図Ⅲ-2.1.3-7 3D-EBSD を用いた三次元像

2).2.2 3D 組織解析、メゾスケール高速定量アナライザー組織評価

三次元マイクロ組織解析装置およびメゾスケール組織解析装置について、本プロジェクトで開発中の革新鋼板に適用するための最適化検討を行った。本開発鋼は、ベイナイトなどの bcc 相と fcc 相（残留 γ ）を含む複相鋼で、最終組織形態と機械的特性との関係明確化が重要である。なかでも伸び特性に大きく影響する残留 γ 相は、

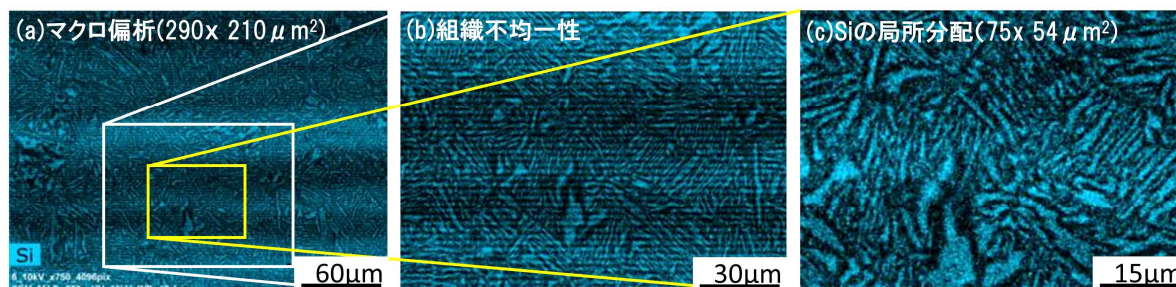
XRD 法や、SEM 等による、形態や体積分率等の情報だけでなく、その空間的分布、個々の γ 相の安定性に関する情報取得が望まれている。

三次元マイクロ組織解析装置は図Ⅲ-2.1.3-8 に例示するように、連続的な加工面の SEM 観察データからの再構築像により、材料内部組織をサブミクロンの空間分解能で三次元的に掌握可能である。しかし、鋼組織を構成する主要な結晶相間では、その組成的な変化が小さく、加工面の SEM 像から迅速に個々の相同定をすることは困難であるため、結晶方位同定機能 (EBSD) を組み合わせることによって粒界の認識と、残留 γ 相の抽出を行い、開発鋼中の残留 γ 組織の三次元分布を捉えることが出来るようになった。



図Ⅲ-2.1.3-8 三次元像観察のための FIB 装置内の加工・観察の模式図

次に、メゾスケール高速定量アナライザーについては、C、Si、Mn の主要元素分析条件について検討を行い、低倍から高倍のマルチスケールでの元素分析の短時間化を実現した。図Ⅲ-2.1.3-9 は低倍で取得した Si マッピングデータを高倍率までズームアップしたものを示している。高精細分析ピッチの実現により、鋼板板厚み方向に存在するマクロ偏析状態を把握するとともに、サブミクロンレベルの変態組織に応じた Si 分配の描像が明確にとらえられている。



図Ⅲ-2.1.3-9 残留 γ 含有鋼の Si 元素マップ取得例

以上のように、高伸び特性に効果のある残留 γ 相の空間的分布を明確にすること、さらに鋼板中の元素分布を広域かつ、サブミクロンレベルで明らかにする検討により、

本プロジェクトで導入した装置群が、この種の組織解析に効果的に適用できることが示され、開発鋼の最終目標達成に寄与した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.3-4 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 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	3	9	1	0	0	1	1
2015FY	0	0	6	0	0	0	0	0	1
2016FY	3	0	12	0	0	0	0	0	1
2017FY	3	0	14	0	0	0	0	0	1
合計	6	0	35	9	1	0	0	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）

表Ⅲ-2.1.3-5 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	2	0	1
2015FY	1	0	1
2016FY	5	0	1
2017FY	3	0	0
合計	11	0	3

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.4[テーマ番号 25] 中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発

2.1.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

複層鋼板は、従来の FRP や FRM の複合材料では設計に取り入れられていなかった「延性」の向上を材料の中心設計に取り入れ、異なる強度・延性を有する鋼板を複層化した金属-金属の複合材料である。これによって、これまで超高強度を達成できるも極めて延性が低いために構造材料への適用が困難であった焼入ままのマルテンサイト鋼を構成層として複層化によってその延性を向上させることができるとともに、従来の鉄鋼材料の設計で熱力学的に制約されていた複数の相の空間配置や分率、組成を自由に設計できることになり、モノリシックな鉄鋼材料では到達できない超高強度と高延性を両立する新規の鉄鋼材料を可能とするものである。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.4-1 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
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。	2015 年度までの FS 研究	—	高強度鉄鋼材料で 1.5GPa、伸び 20%以上を達成するのは難しく、単層の革新鋼板では、上記の特性を実現するための成分およびプロセスウィンドウが極めて狭い。それに対し、複層鋼板では比較的簡便な方法で上記特性を実現する可能性がある。
鋼／非鉄合金複層化の検討	中高炭素との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進め、その結果の複層材の特性評価にも取り組む。	2015 年度までの FS 研究	—	

(3)全体計画

研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。2015 年度まで FS 研究として可能性を見極める。

(4)実施体制

本テーマは尼崎分室（新日鐵住金株式会社）が、再委託先 1 大学とともに実施した、

(5)運営管理

新日鐵住金内部および再委託先との進捗会議を定期的を実施し、適切な運営管理に努めてきた。具体的には、1 回／年の頻度で、当社幹部（鉄鋼研究所所長、先端技術研究所所長）へのキックオフおよび進捗報告会議を実施した。さらに、実務者間で、1 回／月の進捗会議および、3 回／年の頻度で再委託先との進捗会議を実施した。

(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）

強度 1.5GPa、伸び 20%の複層鋼板が達成された場合、フロントメンバーに適用すれば約 30%の軽量化、B ピラーなどのサイドメンバーに適用すれば約 38%の軽量化が可能と試算している。他方、スクラップ鋼をはじめとする劣質原料から構成層を形成しても高性能な金属材料を達成可能であるため、資源の乏しい我が国の資源戦略、鉄鋼や金属の生産の環境負荷の低減、などの点から大きなインパクトにつながる。

2.1.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.4-2 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
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。	中高炭素 TRIP 鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を 3~5 層として試作し、1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認した。	○	
鋼／非鉄合金複層化の検討	中高炭素との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進める。	鋼と Mg 合金の接合を可能とする条件を導出	○	

※◎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-2.1.4-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	2015 年度で FS 研究を終了した。	—	—
鋼／非鉄合金複層化の検討	2015 年度で FS 研究を終了した。	—	—

(3)研究開発の成果と意義

本研究では、中高炭素鋼ベースのマルテンサイト鋼の高強度を活かしつつ高延性を達成する手段として、高延性層との複層化によるマルテンサイトの低延性克服を狙う。2015 年度までに、複層の界面強度の確保、構成層の幾何設計、各構成層の組織・力学特性とそのバランスの最適化により、モノリシックな鋼では未達の超高強度—高延性の両立と実用化の可能性を検討した。

1) 構成層の特性制御・複層幾何設計

複層鋼板の特性は、構成層の特性と幾何設計指針から予測可能である。複層材料の一様変形を阻害する変形形態は、高強度層が単独で脆性的に破断する形態（Tunneling crack）と、界面が剥離することにより高強度層が高延性層の力学的拘束を失い脆性的に破断する形態（H-shaped crack）の 2 種類が考えられている。Tunneling crack の発生を抑制する条件は、弾性体と仮定すると、

$$t_A \leq \frac{4K_{IC}^2}{\pi\sigma^2} \quad (1)$$

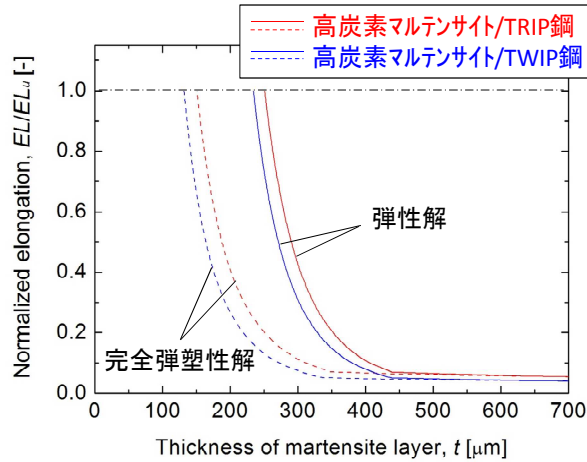
完全弾塑性体と仮定すると、

$$t_A \leq \frac{2\sqrt{3}K_{IC}^2\sigma_y}{\sigma^3} \quad (2)$$

で記述される。ここで、 K_{IC} は破壊靱性値、 σ は一軸引張応力、 t_A は高強度層の厚さである。図Ⅲ-2.1.4-1 に式(1)と(2)から求められる高強度層（マルテンサイト鋼）の破断伸びと高強度層の厚さの関係を示す。上式に従えば、高強度層の厚さが減少するに伴い、破断伸びが増加する。高炭素マルテンサイト鋼を高強度層とし、高炭素 TRIP 鋼または TWIP 鋼と組み合わせる場合には、マルテンサイト層の厚さが約 150 μm 以下の場合に脆性破壊が抑えられ、延性を持つと予測される。

つまり、高炭素マルテンサイト鋼／TRIP 鋼、または TWIP 鋼との複層鋼板の設計には、マルテンサイト層厚を 150 μm 以下にすることが望ましい。複層鋼板の層数は、板

厚が1mmの場合には7層、0.75mmの場合には5層に相当する。

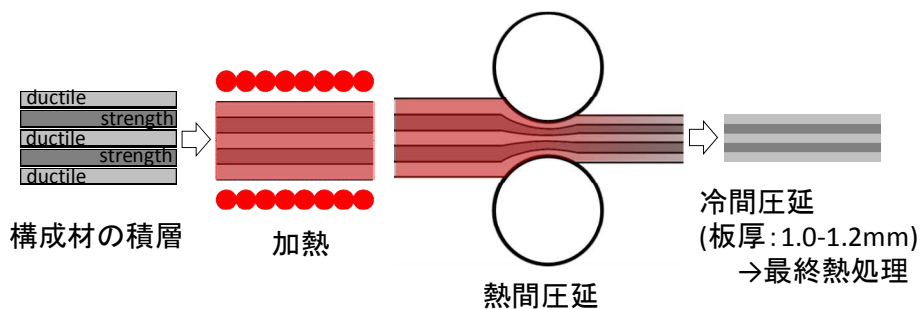


図Ⅲ-2.1.4-1 複層鋼板の破断伸びの予測

2) 複層鋼板の試作・評価

構成層を高炭素マルテンサイト鋼、高炭素 TRIP 鋼、高炭素 TWIP 鋼とし、1)幾何設計に従い、複層鋼板を試作した。

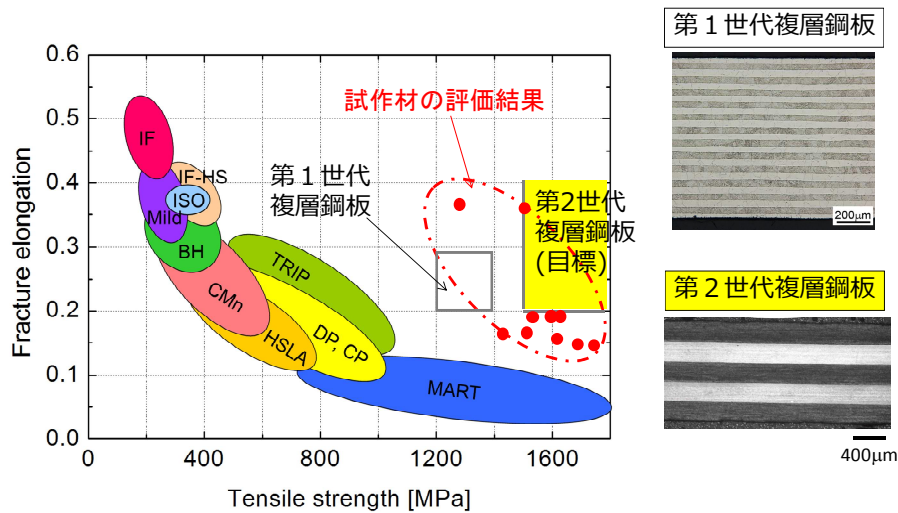
炭素を0.4~0.6%含む鋼において、複層鋼板生成後、各構成層がマルテンサイト、TRIP、TWIPになるよう成分設計を行った。まず、各鋼を真空溶製後、熱間圧延により2.5~6mmの板材を得た。これらの熱延材を5層積層し、四周溶接を行った後、1050℃で加熱後、図Ⅲ-2.1.4-2に示すような熱間圧延を行った。熱延後の板厚は3.0~3.5mmである。熱間圧延材は、焼き戻し後、冷間圧延を行い、1.0~1.2mmの板厚を得た。その後、適正な熱処理条件を選び、各層の組織制御を行った。



図Ⅲ-2.1.4-2 複層鋼板の試作方法

3) 第2世代複層鋼板の特性

図Ⅲ-2.1.4-3 に目標特性に対する複層鋼板試作材の引張特性を示す。一部、目標に到達しており、本研究で進めている材料設計指針は妥当であると判断される。



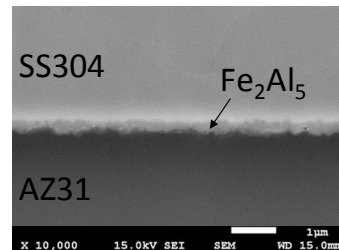
図Ⅲ-2.1.4-3 高炭素マルテンサイト／高炭素TRIP鋼またはTWIP鋼の積層鋼板の目標性能と結果

4) 鋼／非鉄金属の複層化

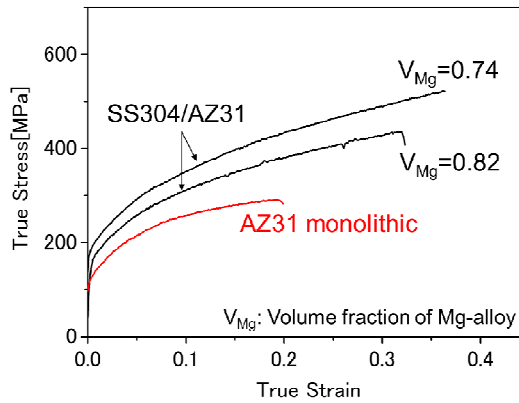
鋼と非鉄金属との複層化の検討を開始し、ステンレスと Mg 合金の複層化を試みた (図Ⅲ-2.1.4-4)。従来、鋼と Mg 合金の接合強度は弱く、複層材料としての延性確保が困難であった。しかしながら、反応型液相拡散接合 (TLP 接合) により、界面に Fe_2Al_5 反応相を生成させることにより (図Ⅲ-2.1.4-5)、界面強度が5倍程度向上することが明らかになった。そこで、TLP 接合により SUS304 と AZ31 合金の複層化を図り、引張特性を評価した。その結果、AZ31 単体の強度、伸びを大幅に超える特性を示すことが明らかとなった (図Ⅲ-2.1.4-6)。



図Ⅲ-2.1.4-4 鋼／Mg 合金の複層化



図Ⅲ-2.1.4-5 鋼／Mg 合金界面の化合物制御



図Ⅲ-2.1.4-6 鋼/Mg 合金複層材料の引張特性

5)まとめ

中炭素～高炭素をベースとした鋼板を構成層とし、製造性の観点から層数を 3～5 層に抑え、強度 1500MPa、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を検討した。具体的には、文部科学省の先行プロジェクトで確立した複層鋼板の設計原理に基づき、中高炭素 TRIP 鋼およびマルテンサイト鋼の複層化を検討し、目標特性達成のための材料およびプロセス条件の指針を提示した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.4-4 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 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	0
2015FY	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）

複層鋼板の基本特許はすでに日・米・韓・中・欧で成立。

表Ⅲ-2.1.4-5 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 [※]
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.5[テーマ番号 26] 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

2.1.5.1 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向けて開発が進められている革新的鋼板開発に際し、その有効な一つ的手段である複層鋼板について、その界面構造解析と特性調査や微細組織構造解析技術の確立により複層化による高強度・高伸び特性の発現機構や耐水素脆化特性や靱性向上といった高性能化に対する検討を行い、さらにFEMおよび第一原理計算などの解析手法により、複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル（プロトタイプ）を構築することで、複層鋼板の界面強度発現機構に対する検討を行うことを目的とする。

(2)位置付け、目標値

複層鋼板の界面構造解析と特性調査として、複層鋼板の微細組織構造解析技術とマルテンサイト鋼の3次元構造解明を通じたき裂伝播抑制に好適な組織指針の導出を通じた高機能化（高伸び、水素脆化特性等）を達成するための複層材料構成・層構成の追究、接合メカニズムの解明、FEMおよび第一原理計算などの解析手法による複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデルの構築を通じた複層鋼板の界面強度発現機構に対する検討を完了させる。

表Ⅲ-2.1.5-1 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
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	- マルテンサイト鋼の3次元構造の解明 - 複層化による高機能化検討 - 接合メカニズム解明	(2015年度末にてFS検討終了)	(2015年度末にてFS検討終了)	複層鋼板の構成・層構成の追究および製造プロセスの探索
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	- マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙の解明	(2015年度末にてFS検討終了)	(2015年度末にてFS検討終了)	変形破壊形態の明確化による、高強度・高延性化の指針の明確化
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	- FEMおよび第一原理計算によるモデルの構築	(2015年度末にてFS検討終了)	(2015年度末にてFS検討終了)	複層化による高性能化のクライテリア形成および高強度鋼における耐水素脆化特性向上の指針の明確化

(3)全体計画

① 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

高強度マルテンサイト鋼板ならびに複層鋼板を実験室的に作製し、その基本的な材料特性を調査する。本結果と後述する再委託研究結果を複合的に解析・評価することで、高機能化（高伸び、水素脆化特性等）を効果的に発現させるための諸条件を明確化する。

【2014 年度】

母材マルテンサイト鋼の変形・破壊機構解明に対して、高強度マルテンサイト鋼を対象として、その三次元構造解析を行う。これらの組織解析と平行してき裂伝播実験を行い、破壊機構に対する微視組織構造の影響を調査する。複層化による高機能化検討に対しては、複層鋼板に加えて、層厚比を変更した合わせ材を使用した複層鋼板を実験的に追加作製し、その変形挙動観察、および水素浸入実験を行う。複層界面の接合メカニズム解明に対しては、各種異種材料を使用したモデル拡散対を作製し、その剪断強度評価を行い、限界剪断エネルギーに及ぼす接合条件の影響を導出する。

【2015 年度】

母材マルテンサイト鋼の変形・破壊機構解明に対しては、微細マルテンサイト鋼に対しても同様のき裂伝播実験および三次元構造解析を行い、微視組織構造の差異が変形・破壊機構に対してどのように影響を及ぼすかを明確化する。複層化による高機能化検討に対しては特に水素脆化特性に対する合わせ材の影響を系統的に取りまとめる。複層界面の接合メカニズム解明に対しては、高精度の電子顕微鏡等を用いた界面構造解析を行い、接合条件、接合強度と界面構造との関係を明確化する。

② 複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立

本テーマは、母材となる高強度マルテンサイト鋼および低強度(低炭素)鋼をはじめとした各種合わせ材の組み合わせによる積層鋼板に対して、その変形挙動、き裂進展挙動を解析すると共に、最新の解析機器（SEM, 高分解能 TEM, EBSD 等）を用いた組織観察・方位解析を行い、高機能化に対して好適な微視組織構造や複層構成に対する知見を取得することを目的とする。

【2014 年度】

マルテンサイト鋼母材ならびに複層鋼板を用い、In-Situ 引張試験による変形挙動観察ならびに解析を継続して実施する。更に、各鋼板の結晶方位解析、すべり系解析を平行して行い、複層化により発現する高伸び特性に影響を及ぼす因子を明確化する。

【2015 年度】

微細マルテンサイト鋼母材および同鋼を母材とした複層鋼板に対して 2014 年度と同様の実験・解析を実施する。これらの実験・解析により、き裂伝播に対して好適なマルテンサイト組織構成、複層化による高機能化(特に高伸び特性)発現に影響する因子を明確化する。

③ 複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築

本テーマは、FEM や第一原理計算法などの数値計算法を用いて、複層鋼板の界面接

合モデル・水素拡散モデルのプロトタイプ構築に関する検討を行うことを目的とする。

【2014年度】

第一の技術課題である複層鋼板の水素拡散モデルのプロトタイプ構築に対しては、炭素を含む鋼中の水素拡散現象のモデル化を進める。第一原理計算法と経路積分計算法の連成解析を行うソフトウェアを使用して拡散現象のモデル化を行い、モデルの適正化を図っていく。

複層鋼板の界面接合モデルのプロトタイプ構築に対しては、異相界面のモデルとして BCC 鉄 - FCC ニッケル界面を取り上げ、分子動力学法により界面接合メカニズムを原子レベルで解析する。

【2015年度】

2014 年度に予定している各種数値計算を継続して行うと共に、JFE スチールにて実施する各種実験(水素浸入試験、拡散対の剪断強度試験等)結果と照らし合わせることで、複層鋼板の水素拡散モデル(プロトタイプ)、界面接合モデル(プロトタイプ)の双方を構築する。

(4)実施体制

本テーマは、千葉分室（JFE スチール株式会社）が再委託先 2 大学と共に実施する。

(5)運営管理

テーマ(26)登録研究員による実務者進捗会議を1ヶ月に1回開催。また、再委託先との進捗会議を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）

アジアなど新興国を中心に安価で、かつ自動車の軽量化・安全性向上効果の大きい超高強度鋼板のニーズは爆発的に拡大することが予想されており、1.5GPa 級冷間プレス用鋼板の需要は、2020 年で 200 万 t/年以上、2030 年で 300 万 t/年以上に達する可能性がある。また、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。

2.1.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.5-2 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
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	マルテンサイト鋼の3次元構造の解明、複層化による高機能化検討、接合メカニズム解明	3次元マイクロ組織解析装置を用いて三次元構造観察を実施、層構造を変化させた複層鋼を用いた評価によって複層化による特性向上を検討 FEMによる歪解析により接合界面の挙動を明確化	○	
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙動の解明	その場引張装置を用いた実験により、マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙動を解明	○	
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	FEMおよび第一原理計算によるモデルの構築	水素透過試験によって高強度鋼中の水素拡散現象を解明、モデル拡散対の評価およびFEMによる解析モデルを構築	○	

※◎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-2.1.5-3 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
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	2015年度末にてFS検討終了	—	—
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	2015年度末にてFS検討終了	—	—
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	2015年度末にてFS検討終了	—	—

(3)研究開発の成果と意義

複層鋼の母材となる高強度マルテンサイト鋼、および高強度マルテンサイト鋼を母材として用いオーステナイト系ステンレス鋼を合わせ材として板厚比を変化させた複層鋼板を作製し、強度特性を調べた。

その結果、複層鋼板の引張強度は合わせ材として使用したオーステナイト系ステンレス鋼の合わせ材板厚比に応じて低下する一方で、伸び特性は積層化により大きく向上した。複層鋼板による高強度・高延性化に関しては十分な界面強度を得ることが重要と考えられているが¹⁻⁷⁾、本研究で作製した複層鋼においては引張破断部の層界面近傍での剥離は生じておらず、複層鋼板による高強度・高延性化に関する界面強度の寄与を明確に示した。

また、高強度・高延性化のために必要な界面接合強度の指針を得ることを目的に、FEMによる複層鋼板の変形解析および界面接合の原子レベル解析を行ったところ、相当塑性歪は母材と合わせ材とで連続的に変化しており、試験片中心部で歪みが大きくなる一方で、せん断応力は母材と合わせ材で不連続であり、接合界面の母材側で大きな値になることが明らかとなった。

さらに、複層鋼の母材である高強度マルテンサイト鋼の高ひずみ域での変形挙動について詳細に観察を行った結果、延性亀裂は主に旧 γ 粒界を伝播する傾向が確認され、より高強度・高延性鋼板の開発に対する粒界制御の重要性を示した。

鋼中への水素侵入挙動を解明するため、高炭素マルテンサイトと極低炭素フェライトを複層化した鋼板を使用し、電気化学的水素チャージによる水素透過試験を実施した。その結果、複層材の水素拡散は拡散速度の遅いマルテンサイト鋼に律速されるのではなく、合わせ材の影響を強く受けることが判明した。また、実際の部材として使用される場合は様々な加工や応力場を受けるため、水素の拡散挙動も影響を受けることが予想され、FEMにより複層鋼板の弾塑性-水素拡散連成解析を行い応力場の影響を調査したところ、応力が付与されると接合界面近傍に水素が集積することが示され、接合界面での水素集積を考慮した材料設計の必要性を示した。さらに、実際の材料組織では転位や粒界などのトラップサイトとの相互作用も考慮に入れる必要があり、高強度材で見られる水素による粒界破壊等の現象を理解するには、分子動力学法 (MD) 等による原子レベルでの水素の挙動を解析することが有効であるが、本研究では第一原理計算によって求めた原子間ポテンシャルと MD シミュレーションにより解析を行った。

また、複層鋼の界面強度に対しては、接合部での合金元素の拡散によって整合性の高い界面を形成することの重要性を示し、炭素鋼と高 Ni 合金及びオーステナイトステンレス鋼からなるモデル拡散対を作製して剪断強度の評価を実施し、FEM モデルによって拡散接合モデルの構築を行った。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.5-4 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			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	4	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-2.1.5-5 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※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.6 [テーマ番号 47] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究)

2.1.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

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であり、超高強度鋼材の部材への適用拡大が車両軽量化の重要な手段の一つである。一方、中長期的視点では資源リスクや原料の品質劣化などの不安定要因が懸念されており、省資源、稀少元素代替の革新的技術開発も求められている。鉄鋼各社では、これら欲求に対応した革新的な次世代中高炭素鋼の開発を推進し、当初目標とした強度や延性などの特性についての実現めどを得た状態である。

今後、実用特性として重要な腐食特性の把握が必要となってくる可能性が高いことから、鉄鋼分科会の協調課題として腐食挙動解析のための基礎技術向上の必要性が指摘された。本事業では特に、革新鋼材に特徴的な異相界面を起点とする腐食の解析技術開発を目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二期目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
微小電気化学計測 技術開発	μmレベルの微細組織の腐食挙動解析技術確立	2017年度にてFS 終了	2017年度にてFS 終了	革新鋼板の微細組織サイズ対応
局所構造解析技術 開発	μmレベルの微細組織の腐食生成物解析技術検討	2017年度にてFS 終了	2017年度にてFS 終了	革新鋼板の微細組織サイズ対応
局所腐食電位計測 技術開発	μmレベルの微細組織の腐食電位解析技術検討	2017年度にてFS 終了	2017年度にてFS 終了	革新鋼板の微細組織サイズ対応

(3)全体計画

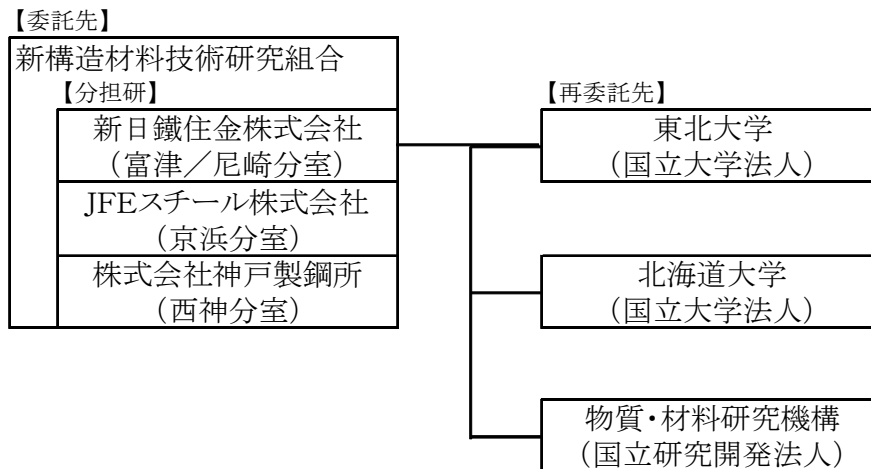
開発される革新鋼材の、構造材料としての実用化を可能とするための基礎技術として、腐食挙動解析技術の高度化に取り組む。多数の異相界面を有する微細組織鋼表面の腐食挙動についてはいまだ明らかとなっていない部分が多いため、そのような異相組織中の腐食挙動解明のための基礎研究に向けて、革新鋼材の耐食性を適切に把握・評価するための共有技術に関するFS研究を行う。

【第2期目標 (2017年度末)】

・共通試験片として S45C 相当材を用い、熱処理により数通りのフェライト/パーライト組織鋼を作製し、微細組織がマクロな腐食挙動に及ぼす影響を調査する。

・フェライト/パーライト組織の第2相であるセメンタイトに注目し、母相腐食に及ぼすセメンタイト相の影響を調査できる解析技術について検討する。

(4)実施体制



(5)運営管理

本研究ではテーマ番号 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）

各社で進めている革新鋼板の耐食性評価・向上に適用する。

2.1.6.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.6-2 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
微小電気化学計測 技術開発	μmレベルの微細 組織の腐食挙動解 析技術確立	ハイブリッド顕微鏡の早 期戦力化により高空間分 析能力達成	○	
局所構造解析技術 開発	μmレベルの微細 組織の腐食生成物 解析技術検討	マイクロ組織対応腐食挙動 その場分析技術により実 現可能性を提示した	○	
局所腐食電位計測 技術開発	μmレベルの微細 組織の腐食電位解 析技術検討	マルチスケール KFM 測 定により実現可能性を提 示	○	

※◎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-2.1.6-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
微小電気化学計測 技術開発	2017年度にてFS研究終了	テーマ61で推進中	技術向上により達成 する見込みを得た
局所構造解析技術 開発	2017年度FS研究終了	テーマ61で推進中	必要技術を確認し 達成した
局所腐食電位計測 技術開発	2017年度FS研究終了	テーマ61で推進中	必要技術を確認し 達成した

(3)研究開発の成果と意義

高張力鋼板の実用化研究においては、組織や粒界等に依存した選択的腐食、すなわち局部腐食が発生するリスクを抑止することが重要であり、本プロジェクトで開発に取り組む革新鋼板についても同様である。革新鋼板のような多数の異相界面を有する微細組織鋼表面の腐食挙動についてはいまだ明らかとなっていない部分が多い。そのような異相組織中の腐食挙動解明のための基礎研究に向けて、革新鋼板や高張力鋼板の耐食性を適切に把握・評価するための腐食解析技術について検討を進めた。

結果、目標としたμmオーダーの腐食解析は、現有技術のグレードアップで対応可能であることが確認された。その一方で、革新鋼板のもつサブμmから数10nmオー

ダーの微細組織の腐食特性については、さらなる技術開発が必要であることが指摘され、新規テーマ提案につながった（テーマ 61）。

本課題内では微小領域電気化学計測技術の開発を進め、数 $10\mu\text{m}$ ～数 μm オーダーの介在物、組織因子が起点となる腐食挙動のリアルタイム観察技術を完成した(図III-2.1.6-1)。目的領域の制限技術、観察技術のみならず、電気化学計測に必須の微小腐食電流計測、フィードバック技術など、必要技術を開発し、今後、革新鋼板の腐食特性評価のための、サブ μm オーダーを目指した性能向上研究を主導することが期待できる。



図III-2.1.6-1 微小領域電気化学計測技術と炭素鋼の腐食起点解析への適用例

腐食反応の結果、生成する腐食生成物の性状を理解することは、腐食反応に関与する各種因子（腐食環境、鋼組織、鋼組成など）への理解を助けるとともに、その後の腐食性を予測する上でも有用である。腐食生成物の解析には、各種真空分析法の他、電気化学測定法や分光分析技術が適用されるが、腐食反応そのものの理解を深化するためには、腐食反応過程での評価、すなわちその場解析が有利である。このための微小電極プローブを用いた走査型電気化学法とともに、主に可視光をプローブとした分光法、すなわちラマン散乱分光法による腐食生成物のその場解析技術の検討を進めた。

マイクロ組織ごとの腐食生成物のその場分析技術を開発し、革新鋼材の腐食特性の評価、腐食進展予測技術の開発を推進する

顕微ラマン散乱分光法による“ex situ”分析

- ・最新装置の機種選定およびデモ測定 (対象:7社10製品)
- ・不働態皮膜の化学組成がマイクロ組織に依存することを確認①②

初析フェライト: Fe_3O_4 リッチ

パーライト: 微量アモルファスカーボンの存在

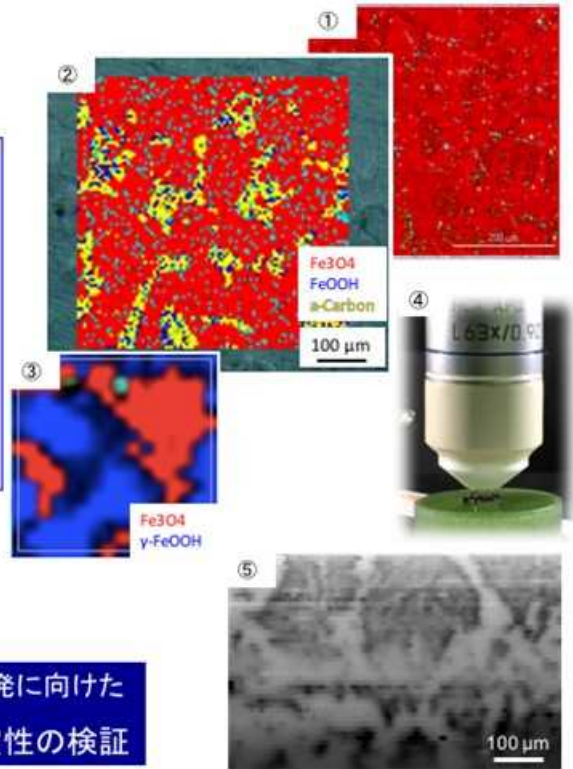
“in situ”分析

- ・デモ測定にて検討中③
- ・腐食生成物の化学組成分析に成功④

走査型電気化学顕微法による“in situ”分析

- ・不働態皮膜の電子伝導性がマイクロ組織に依存することを確認⑤
- ・高面分解能化を検討中(目標: $\sim 1 \mu m$)

腐食特性の評価、腐食進展予測技術の開発に向けた
腐食生成物の化学的・電気化学的安定性の検証

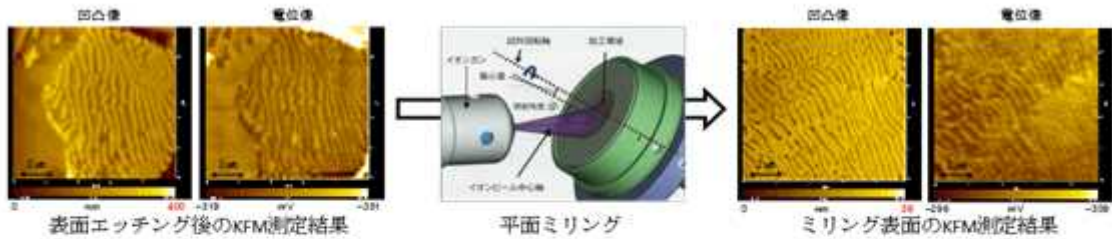


図Ⅲ-2.1.6-2 最新分光学・微小電気化学技術と炭素鋼不働態皮膜のその場解析への適用例

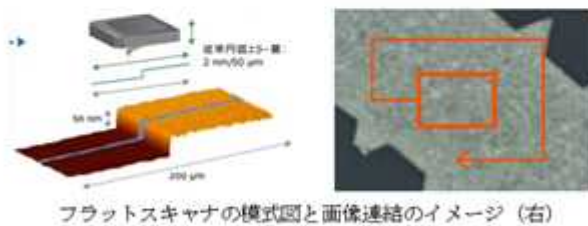
異相組織を有する鉄鋼材料の腐食起点をあらかじめ把握することができれば、その後の腐食進展、孔食成長に至る腐食因子の研究が進捗する。腐食電気化学反応は、腐食面内に発生する電位差をトリガーとし、進行する。革新鋼板の腐食環境として主に想定される大気腐食環境において、組織因子レベルのサイズに注目した電位分布を計測できる技術として代表的なものに、図Ⅲ-2.1.6-3に示すKFM法があり、本手法の腐食系への適用性が高いことを確認した。

KFM法とイオンミリング処理による表面電位測定の高度化

独自技術



パーライト中のフェライトとセメンタイトに明らかな電位差が見られ、異相組織を有する構造材料の腐食起点検出にKFM法が最適であること見出した。凹凸の影響を1/10に低減可能なイオンミリング処理確立により実現。



導入希望装置では、新開発のフラットスキャナにより、従来のチューブ型ピエゾスキャナで生じていた円弧運動の影響による誤差を1/10に低減可能であるとともに、従来比4倍以上の範囲を測定可能であり、本研究に必要なマルチスケール化に目途。

世界初の試み

NIMS 微小領域の表面電位測定

東北大 微小領域の電気化学測定

北大 腐食生成物の分析

マーキングによる測定位置決め

多拠点との試料の共通化により、腐食の起点から進展までマルチな視点からの調査を目指す。

図Ⅲ-2.1.6-3 KFM 法の炭素鋼の腐食起点予測への適用例

本事業では、開発される革新鋼板の、構造材料としての実用化を可能とするための基礎技術としての、腐食挙動解析技術の高度化可能性について検討した。得られた成果を元に、2018年度より新規テーマ（テーマ61）の中で検討を進める。本テーマの中で開発される評価技術を、鉄鋼各社は必要に応じて自社革新鋼板の改善、信頼性向上のための研究に活用し、革新鋼板の普及に役立てる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.6-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2018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			
2017FY	0	0	2	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	2	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-2.1.6-5 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

2.1.7 [テーマ番号 48] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発（FS 研究）

2.1.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

鋼板の引張強度（TS）が 1180MPa を超えると、自動車を使用される大気腐食環境において、環境から鋼板中に侵入する水素によって生じる遅れ破壊と呼ばれる水素割れが発生する可能性が生じる。自動車へ TS1500MPa 級鋼を適用するためには、水素割れの危険性を適切に評価、予測可能な技術の構築が必要となる。水素割れ危険性の評価に関する研究はボルト分野では種々あるが、塑性変形の影響を大きく受ける薄鋼板分野での検討は少なく、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測は現技術では困難である。そこで革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする要素技術の開発を目指し、本研究では、革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術を見極めることを目的とする。

(2)位置付け、目標値

本研究は革新鋼板の水素割れ感受性を適切に評価、予測するための共通基盤技術の確立を目指した FS 研究であり、鋼板成形時の塑性変形による組織損傷および、応力、ひずみ、水素の分布等の因子を定量的に把握するとともに、それらが水素割れに及ぼす影響を理解し、種々の試験条件が薄鋼板の水素割れ限界評価結果に及ぼす影響を明確化する。

表Ⅲ-2.1.7-1 研究開発目標と根拠

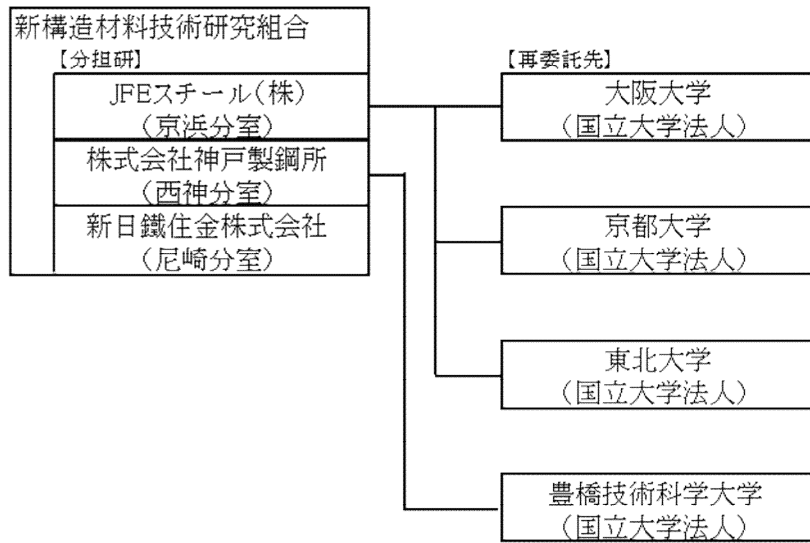
研究開発項目	最終目標 (2017 年度末)	—	—	根拠
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術見極め	—	—	革新鋼板の水素割れ評価に適用

(3)全体計画

研究開発項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発		技術検討委員会	FS 研究(テーマ 48)					
				本研究(テーマ 62)				

▲：基本原理確認、 ●：基本技術確立

(4)実施体制



(5)運営管理

実務者進捗会議を毎月開催し、再委託先との進捗会議を定期的を実施する。また、分担研及び再委託先の全体会議を2～3回／年開催する。

(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）

各社で進めている革新鋼板の水素割れ評価、予測に適用する。

2.1.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.7-2 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
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術見極め	2017年度からFS研究に着手し、水素割れ評価のために必要な要素技術を見極め、テーマ62を立ち上げ。	○	

※◎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-2.1.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	2017年度からFS研究に着手し、水素割れ評価のための課題の明確化を行う	革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする要素技術の確立	2018年度からの本研究実施によって要素技術を確立する見込み

(3)研究開発の成果と意義

分担研3機関及び再委託先4機関により以下の研究を分担して実施した。

①応力、ひずみ、水素濃度分布およびマイクロ組織損傷の定量的な把握に有用な要素技術の見極め

①-1 マクロ塑性ひずみ分布・応力分布特性及び水素割れ計測技術

①-2 ミクロ損傷明確化手法検討

②試験条件が水素割れ限界に及ぼす影響に関する基礎的検討

②-1 U曲げ試験片を用いた水素割れ評価時の水素分析領域の見極め

②-2 腐食環境における水素量レベルの把握

②-3 水素下の引張試験における影響因子の把握

②-4 打ち抜きブランク端面の遅れ破壊の影響因子の抽出

②-5 水素割れ限界におよぼすU曲げ試験条件の影響の明確化

上記により、以下の結果を得た。

・共通試料となる1500MPa級高強度薄鋼板を製造し各機関（分担研、再委託）に配布するとともに、U曲げ試験片を用いた水素割れ評価時の水素分析領域の見極めを

行った。また、曲げ加工部で受ける塑性歪みの影響と拡散性水素量との関係を、曲げ部のサンプル採取幅で評価し、曲げ R によって不均一な変形を生じ水素量が変わることや、曲げ内側と外側で応力状態の違いを硬さ分布の変化により理解することができた。これらの結果は、曲げ加工部の状態と水素量との関係を推察するために有益であり、今後、詳細な FEM 解析や水素拡散解析によって現象の解明が進むものと言える。

・ミクロな塑性変形挙動をノッチ先端の数 100 μm からマルテンサイト組織内部の数 μm までの異なるレベルで解析評価できる技術確立の目途付けを行った。これらの基礎技術は水素脆化割れ評価のための極めて重要な要素技術と言える。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.7-4 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			
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	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-2.1.7-5 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*
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.8 [テーマ番号 61] 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発

2.1.8.1 テーマの概要

(1)背景と目的

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であり、超高強度鋼材の部材への適用拡大が車両軽量化の重要な手段の一つである。一方、中長期的視点では資源リスクや原料の品質劣化などの不安定要因が懸念されており、省資源、稀少元素代替の革新的技術開発も求められている。鉄鋼各社では、これら欲求に対応した革新的な次世代中高炭素鋼材（以下「革新鋼材」と言う）の開発を推進し、当初の目標とした強度や延性などの特性についての実現のめどを得た状態である。

今後、実用特性として重要な腐食特性の把握は必要であることが指摘されたことから、鉄鋼分科会の協調課題として腐食挙動解析のための基礎技術向上に取り組む。本事業では特に、革新鋼材の組織に特徴的な異相界面を起点とする腐食の解析技術開発を目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.8-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第二期目標 (2017年度末)	第三中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)	根拠
マクロ腐食挙動との対比	未実施	開発技術の開発材への適用	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
マクロ腐食挙動との対比	未実施	開発技術の開発材への適用	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
マクロ腐食挙動との対比	未実施	開発技術の開発材への適用	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
微小電気化学計測技術開発	未実施	腐食に及ぼす異相界面の影響を把握できる電気化学評価手法の開発	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
局所構造解析技術開発	未実施	ミクロ組織ごとの腐食生成物のその場分析技術の開発	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
局所腐食電位計測技術開発	未実施	異相界面腐食起点検出のためのマルチスケール腐食電位計測技術開発	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応
多拠点間測定座標共有技術検討	未実施	拠点間での解析部位共有化技術開発	2020年度にて終了予定	革新鋼板の微細組織サイズ対応

(3)全体計画

高張力鋼板の実用化研究においては、組織及び粒界に依存した選択的腐食、すなわち局部腐食が発生するリスクを抑止することが重要であり、本プロジェクトで開発に取り組む革新鋼材についても同様である。本事業では、開発される革新鋼材の、構造材料としての実用化を可能とするための基礎技術として、腐食挙動解析技術の高度化に取り組む。多数の異相界面を有する微細組織鋼表面の腐食挙動についてはいまだ明らかとなっていない部分が多いため、そのような異相組織中の腐食挙動解明のための基礎研究に向けて、革新鋼材の耐食性を適切に把握・評価するための共有技術の研究開発を行う。

開発されるサブ $\mu\text{m}\sim\text{nm}$ レベルの腐食現象把握技術を共有基盤技術とし、鉄鋼各社は開発した革新鋼材の腐食特性の評価を進める。各研究機関は、開発した解析技術の普遍化につとめ、解析プラットフォーム化を進め、広く構造材料の腐食性評価手法として活用する。

① 異相組織を有するモデル鋼の作製とマイルドな大気腐食環境での腐食特性検証

開発技術の評価できる異相組織を有するモデル鋼を作製し、各分担研、再委託先研究機関と連携し、腐食特性把握技術の開発に用いる。また、本モデル鋼を用い、年平均塩分飛来量 0.04 mdd 以下のマイルド環境でのマクロな腐食特性を把握し、本提案で開発される測定技術の性能範囲を提示する。(mdd: $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ 、1日当たり 10cm 四方の面積に付着する塩分量)

② 異相組織を有する鋼材の過酷環境での腐食特性および水溶液中でのマクロな腐食特性の検証

開発技術の評価できる異相組織を有するモデル鋼を用い、年平均塩分飛来量 1mdd 超の過酷環境でのマクロな腐食特性を把握するとともに、ラボでのマクロな電気化学特性評価を行い、本提案で開発される測定技術の性能範囲を提示する。

③ 異相組織を有する鋼材の過酷環境での腐食特性およびラボ加速試験による腐食特性の検証

開発技術の評価できる異相組織を有するモデル鋼を作製し、各分担研、再委託先研究機関と連携し、腐食特性把握技術の開発に用いる。また、本モデル鋼を用い、年平均塩分飛来量 約 $1\sim 0.04\text{ mdd}$ 以下の塩分飛来環境でのマクロな腐食特性を把握するとともに、ラボでの CCT 試験を通じ、本提案で開発される測定技術の性能範囲を提示する。

④ 異相組織の腐食に及ぼす作用明確化技術開発

腐食発生に及ぼす異相界面および粒界偏析への影響を把握できる電気化学評価手法の開発を行う。具体的には、水溶液下腐食挙動可視化技術を高度化するため、リアルタイム観察技術、微小腐食電流計測・制御技術の開発を主導する。

⑤ 異相組織腐食生成物のその場分析技術開発

腐食電気化学反応の過程で形成される腐食生成物は、鋼材の腐食の進展に重要な役割を担う。特に、異相界面に着目し、マイクロ組織ごとの腐食生成物のその場分析技術を開発し、革新鋼材の腐食特性を評価、予測技術の高度化を推進する。腐食環境下での腐食生成物特性を解析可能とするための、分光分析技術、物質・電荷移動特性把握技術の高度化研究が中心となる。

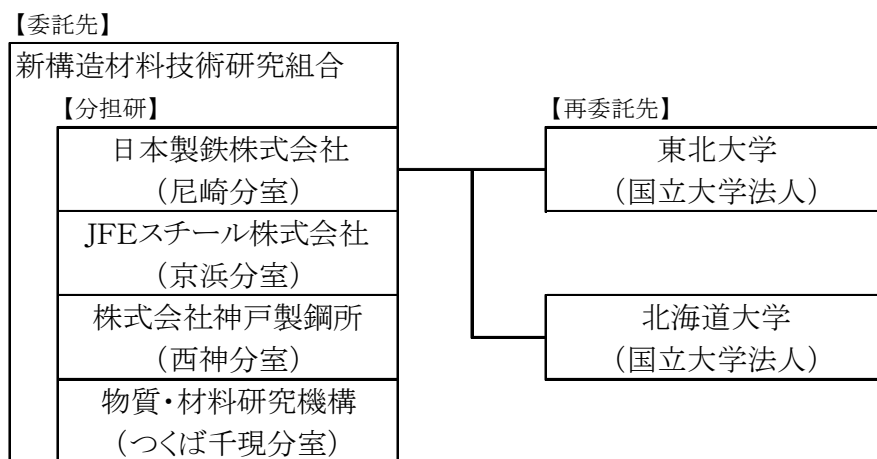
⑥ ミクロ・ナノ異相組織を有する構造材料の腐食起点解析技術の開発

異相組織を有する構造材料における腐食起点の検出のための、腐食電位計測技術を構築する。特に KFM (Kelvin Force Microscope) 法の腐食起点解析ツールとしての高度化を推進するとともに、マルチスケール化による測定範囲の拡大、適用環境として大気腐食環境への拡大を目指す。さらに解析の高度化の一環として、得られるケルビン電位の定量化技術を開発する。

⑦ 多拠点間分析位置共有化技術開発

分担研企業ごとに注目する組織因子が異なることから、評価解析位置を各企業（日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所）－各研究拠点（物質・材料研究機構、東北大学、北海道大学）間で共有化できる技術が必要となる。本技術の実現が、④、⑤、⑥技術の、革新鋼材腐食特性把握研究への適用、反映を後押しする。

(4)実施体制



(5)運営管理

全分担研および再委託先による技術検討会を7回/年程度開催し、進捗を管理している。

(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）

各社で進めている革新鋼板の耐食性評価・向上に適用する。

2.1.8.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.8-2 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
マクロ腐食挙動との対比	マイルドな大気腐食環境での腐食特性評価から開発技術の性能範囲を提示	<ul style="list-style-type: none"> ・フェライトパーライト組織鋼共通試験材作製、配布 ・2種の共通試験片の大気腐食特性評価開始。 	△	
マクロ腐食挙動との対比	海浜環境での腐食特性の評価から測定技術の性能範囲を提示	<ul style="list-style-type: none"> ・2種の共通試験片の海浜環境での大気腐食特性評価試験を、軒下と南面30度の2種の過酷度で開始 	△	
マクロ腐食挙動との対比	塩分飛来環境での腐食特性評価から測定技術の性能範囲を提示	<ul style="list-style-type: none"> ・残留γ含有共通試験材作製、配布 ・塩分環境下大気腐食特性評価 ・ラボ腐食加速試験条件探索 	△	
微小電気化学計測技術開発	残留 γ を含む微細組織の腐食特性を評価できる技術を提示	<ul style="list-style-type: none"> ・サブμm分解能を見据えた技術、マスキング法、新型ポテンシオスタットに目途。新SPM戦力化。 	△	
局所構造解析技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・異相組織間腐食定量解析技術開発 ・残留γ含有組織の腐食生成物解析技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・顕微ラマン散乱分光装置および、腐食溶出挙動その場解析技術の戦力化。組み合わせ運用する周辺装置開発。 	△	
局所腐食電位計測技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・共通試験片の腐食起点解析を、大気腐食環境に展開し、腐食起点解析技術を検証するとともに予測確度を向上せしめる 	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチスケール化可能な電位分布計測技術としてのKFM装置および表面処理装置戦力化。異相組織の中での腐食起点ピックアップを進めた。 	△	
多拠点間測定座標共有技術検討	<ul style="list-style-type: none"> ・全拠点間での注目部位共有化に向けた技術検討検証、改良 	<ul style="list-style-type: none"> 拠点間で同一部位の腐食解析を開始。 	△	

※◎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-2.1.8-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
マクロ腐食挙動との対比	季節要因をパラメータとした都市環境での大気腐食特性を評価中	開発技術の開発材への適用	各大学、国研の研究を活用することで達成見込み
マクロ腐食挙動との対比	季節要因をパラメータとした海浜環境での大気腐食特性を評価するとともにマクロな電気化学特性評価を実施	開発技術の開発材への適用	各大学、国研の研究を活用することで達成見込み
マクロ腐食挙動との対比	季節要因をパラメータとした塩分飛来環境での大気腐食特性を評価。ラボ CCT 試験法検討中。	開発技術の開発材への適用	各大学、国研の研究を活用することで達成見込み
微小電気化学計測技術開発	サブ μm 、 nm 対応のための周辺機器整備進めるとともに電気化学 SPM 戦力化	腐食に及ぼす異相界面の影響を把握できる電気化学評価手法の開発	測定技術開発に目途。試料前処理に課題。装置導入し課題解決に挑む。
局所構造解析技術開発	サブ μm 領域に対応した腐食、溶出物その場分析用顕微ラマン、ICP 装置戦力化すすめた	マイクロ組織ごとの腐食生成物のその場分析技術の開発	技術基盤確立。定量解析のための装置導入必要
局所腐食電位計測技術開発	マルチスケール化可能な電位分布計 (KFM) 戦力化達成	異相界面腐食起点検出のためのマルチスケール腐食電位計測技術開発	環境制御技術を開発し、達成目指す
多拠点間測定座標共有技術検討	拠点間で同一部位の腐食解析を開始。起点解析のために試料前処理の重要性を再認識した。	拠点間での解析部位共有化技術開発	これまでの大学、国研の研究を活用するとともに、研究拠点に装置導入することで達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

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であり、超高強度鋼材の部材への適用拡大が車両軽量化の重要な手段の一つである。一方、中長期的視点では資源リスクや原料の品質劣化などの不安定要因が懸念されており、省資源、稀少元素代替の革新的技術開発も求められている。鉄鋼各社では、これら欲求に対応した革

新的な次世代中高炭素鋼の開発を推進し、当初の目標とした強度や延性などの特性についての実現めどを得た状態である。

今後、実用特性として重要な腐食特性の把握が必要となってくる可能性が高いことから、鉄鋼分科会の協調課題として腐食挙動解析のための基礎技術向上の必要性が指摘された。超高強度鋼における腐食は、その特徴的な異相界面を起点とし進行する。本テーマは、必要に応じて超高強度鋼の材料製造プロセスまで立ち返った検討を可能とするため、その組織因子ごとの腐食特性を評価解析可能な技術の獲得と、開発技術の共有基盤技術化を目的として各研究項目を分担して推進する。

鉄鋼メーカーは、超高強度鋼板の腐食特性評価に適した素材を共通試験片として提供するとともに、マクロな腐食挙動を調査した。各研究機関は、サブ μm ~ nm レベルの腐食現象把握技術を開発し、共通試験片を用いた開発技術の向上と、高度な測定技術の普遍化につとめた。各鉄鋼メーカーは、開発技術の評価を行うとともに、各研究機関の腐食現象把握技術の技術開発の方向性を提示した。

以下に、各研究開発項目の内容及び成果を示す。

(3).1 共通試験片

鉄鋼各社および各研究機関で共通して用いる材料として、フェライトーパーライト組織鋼（以下、FP 鋼）および Si および Mn を添加され組織中に残留 γ 相を有する鋼（以下、SM 鋼）を作製し、共通試験片として以下の研究項目に用いた。

(3).2 結果

(3).2.1 異相組織を有するモデル鋼の作製とマイルドな大気腐食環境での腐食特性検証：尼崎分室

尼崎分室では、開発技術の評価できる異相組織を有するモデル鋼、FP 鋼を作製し、再委託先研究機関を含む各分室に配布した。本研究項目を分担する尼崎分室では、西神分室から提供された SM 鋼とともに、年平均塩分飛来量 0.04 mdd (mdd : $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ 、1 日当たり 10cm 四方の面積に付着する塩分量) 以下のマイルド環境で大気曝露試験を分担、実施した。曝露試験は季節要因を加味し、冬期：2018 年 12 月 21 日開始、夏期：2019 年 8 月 20 日開始の 2 回行った同時に、腐食と大きな相関のある温度、湿度、塩分、硫黄酸化物についての環境測定を行った。XRD 測定および断面 SEM 観察は次年度実施する。

(3).2.2 異相組織を有する鋼材の過酷環境での腐食特性および水溶液中でのマクロな腐食特性の検証：京浜分室

京浜分室では、開発技術の評価できる異相組織を有するモデル鋼を用いた年平均塩分飛来量 1mdd 超の過酷環境での腐食特性検証を行い、本提案で開発される測定技術の性能範囲を提示することを目的とし研究開発を実施する。

尼崎分室および西神分室で作製された標準試験材であるフェライトーパーライト組織からなる $0.45\%C$ 鋼（以下、FP 鋼）と Si-Mn 鋼（以下、SM 鋼）を用い、JFE スチール（株）の沖縄暴露試験場（以下、沖縄）および（財）日本ウエザリングテス

トセンター (JWTC) 宮古島暴露試験場 (内陸部) (以下, 宮古島) で大気暴露試験を実施した。

(3).2.3 異相組織を有する鋼材の過酷環境での腐食特性およびラボ加速試験による腐食特性の検証：西神分室

西神分室では、開発技術を評価できる異相組織(残留 γ)を有する SM 鋼を共通試験片として作製し、尼崎分室で作製された FP 鋼とともに、各分室、再委託先研究機関と連携し、腐食特性把握技術の開発に供した。

また、西神分室においては、これら共通試験片を用い、年平均塩分飛来量 約 1～0.04 mdd 以下の塩分飛来環境でのマクロな腐食特性を把握するとともに、ラボでの実環境加速試験である JASO-CCT 試験を通じ、重量減量と腐食生成物の相関を取ることによって共通試験片のマクロな腐食特性を明らかにすることを目的とし実施した。

これら試験を通じ、本事業で開発される測定技術の性能範囲を提示した。

(3).2.4 異相組織の腐食に及ぼす作用明確化技術開発：[再委託]東北大学

超高強度鋼板のもつ異相界面は非常に微細(数 μm 以下)であることから、腐食性に関連する電気化学特性はほとんど解明されていない。本研究では、サブミクロン・オーダーの微小領域の耐食性を電気化学的に解析できる技術を開発することを目標として実施した。

本事業により開発された手法により、超高強度鋼板の高耐食化に必要な金属組織学的知見を得ることができ、今後、長期大気暴露試験のデータが存在しない新規開発鋼種の耐久性を理論的に立証するデータを採取することが可能になることが期待できる。

(3).2.5 異相組織腐食生成物のその場分析技術開発：[再委託]北海道大学

腐食電気化学反応の過程で形成される腐食生成物は、鋼材の腐食の進展に重要な役割を担う。特に超高強度鋼板においては、異相界面に特徴付けられる腐食挙動の発現や加速が懸念される。そこで本事業では、異相界面上での腐食電気化学反応に着目し、鋼材のミクロ組織ごとの腐食生成物のその場分析技術を開発する。本開発技術の適用し、従前から使用されている腐食予測技術の高度化を推進する。本開発技術は腐食環境下、すなわち“その場”での腐食生成物特性の解析可能化を目標とするため、非破壊検査である分光分析技術および電気化学測定を駆使した物質・電荷移動特性把握技術の高度化研究を中心とし推進した。

(3).2.6 ミクロ・ナノ異相組織を有する構造材料の腐食起点解析技術の開発：つくば千現分室

つくば千現分室では、異相組織を有する構造材料における腐食起点の検出のための腐食電位計測技術を構築することを本テーマの目的として、特に KFM 法の腐食起点解析ツールとしての高度化を推進するとともに、マルチスケール化による測定範囲の拡大、適用環境として大気腐食環境への拡大を目指す。さらに解析

の高度化の一環として、得られるケルビン電位の定量化技術を開発する。

共通試験片の腐食起点解析について、マルチスケール腐食電位評価装置を用いて 10mV/nm の電位勾配を持つ組織因子の分布明確化技術の構築を行った。その結果、パーライト中のフェライト/セメンタイト相の異相界面について、nm オーダーでの電位プロファイルを得ることに成功した。さらに、この異相界面の電位差が他の部分と比較して大きく、腐食の起点になりやすいことを明らかとし、本テーマにおける技術開発の方向性の正当性が確認できた。

(3).2.7 多拠点間分析位置共有化技術開発：つくば千現分室他

材料メーカーごとに注目する組織因子が異なることから、評価解析位置を各企業（日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所）－各研究拠点（物質・材料研究機構、東北大学、北海道大学）間で共有化できる技術が必要と考えられた。本技術の実現が、各研究機関での開発技術の連携を実現し、各メーカーの開発する革新鋼板の腐食性評価と、必要に応じた母材改善研究を加速する。

本課題については、つくば千現分室が中心となり、評価解析位置を各分室、再委託先研究機関間で共有化するための多拠点間分析位置共有化技術を検討した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.8-4 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	1	0	7	0	0	0	0	0	1
2019FY	2	0	6	0	0	0	1	1	1
合計	3	0	13	0	0	0	1	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-2.1.8-5 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

2.1.9 [テーマ番号 62] 超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発

2.1.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

鋼板の引張強度（TS）が 1180MPa を超えると、自動車ที่ใช้される大気腐食環境において、環境から鋼板中に侵入する水素によって生じる遅れ破壊と呼ばれる水素割れが発生する可能性が生じる。自動車へ TS1500MPa 級鋼を適用するためには、水素割れの危険性を適切に評価、予測可能な技術の構築が必要となる。水素割れ危険性の評価に関する研究はボルト分野では種々あるが、塑性変形の影響を大きく受ける薄鋼板分野での検討は少なく、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測は現技術では困難である。そこで本研究では、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする基本技術の開発を目的とする。

(2)位置付け、目標値

【中間目標（2019 年度末）】

試験条件及び試験環境による応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化する。

【最終目標（2020 年度末）】

数百 μm 以下のオーダーでマイクロな応力・歪・水素濃度分布を評価解析する技術を開発することで、革新鋼板の水素脆化割れ危険性を適切に評価する試験方法構築のための基本技術を確立する。

表Ⅲ-2.1.9-1 研究開発目標と根拠

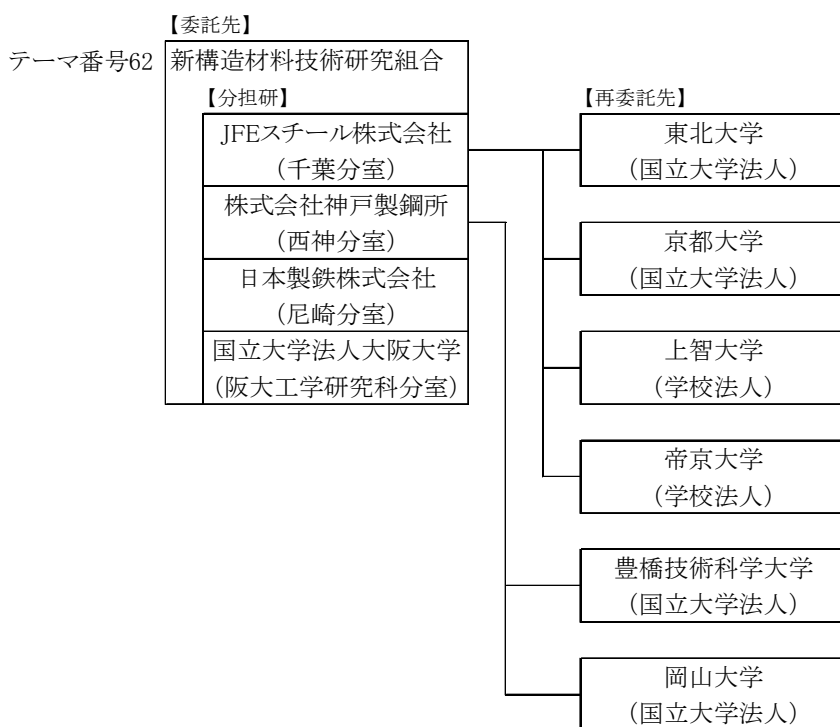
研究開発項目	中間目標 (2019 年度末)	最終目標 (2020 年度末)	—	根拠
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化	水素脆化による割れ発生の危険性を適切に評価・予測可能な基本技術の確立	—	革新鋼板の水素割れ評価に適用

(3)全体計画

研究開発項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発		技術検討委員会	FS 研究(テーマ 48)					
					本研究(テーマ 62)			

▲：基本原理確認、 ●：基本技術確立

(4)実施体制



(5)運営管理

実務者進捗会議を毎月開催し、再委託先との進捗会議を定期的を実施する。また、分担研及び再委託先の全体会議を2～3回/年開催する。

(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）

各社で進めている革新鋼板の水素割れ評価、予測に適用する。

2.1.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.9-2 中間目標と達成度

研究開発項目	中間目標 (2019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
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化	・ひずみ、応力と拡散性水素量 H(ppm)の関係を明確化 ・薄鋼板でも最大主応力と水素濃度で水素脆化破壊が生じることを明確化	○	

※◎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-2.1.9-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化	水素脆化による割れ発生の危険性を適切に評価・予測可能な要素技術の開発	数百 μm 以下オーダーでの応力・歪・水素濃度分布評価技術開発順調。達成見込み。

(3)研究開発の成果と意義

【課題①】試験条件及び試験環境による応力、ひずみ及び水素分布の変化が水素脆化割れに及ぼす影響の明確化

①-1 「曲げ試験片の曲げ加工部での水素濃度分布の影響明確化」

曲げ加工部の応力、ひずみ分布を明らかにするとともに、水素侵入挙動に及ぼす応力およびひずみの影響を明らかにし、曲げ加工部の水素濃度分布を評価する技術を検討し、以下の結果を得た。

R=10 mm の U 曲げ試験片の応力、ひずみ状態を FEA で解析した結果、U 曲げ加工後は、スプリングバックの影響で曲げ外周部に圧縮応力、内周部に引張応力が生じ、相当ひずみは外周部と内周部で最大、板厚中心部が最小であった。U 曲げ加工部の水素量推定のため、種々の圧下率で鋼板を圧延し、U 曲げ部内相当のひずみを加えた鋼板に水素チャージし、拡散性水素量を測定した。その結果、相当ひずみ ε と拡散性水素量 $H(\text{ppm})$ には

$$H(\text{ppm}) = 0.154 \ln(\varepsilon) + 1.348 \quad (1)$$

の関係が認められた。さらに応力 $\sigma(\text{MPa})$ の影響を考慮することで式(2)の関係式が得られた。

$$H(\text{ppm}) = 0.001073\sigma + 6.533\varepsilon + 0.3066 \quad (2)$$

①-2 「腐食環境における侵入水素量の定量評価技術確立」

これまでの取り組みにて水素侵入挙動に及ぼす前処理の影響を調査し、ブラストによって水素が鋼に侵入することを明らかにし、水素分析時における阻害因子であることを示した。今年度は、ブラスト砥粒の水分量に着目し、ブラストによる鋼への水素侵入の機構と抑制方法を調査した。その結果、ブラスト処理は鋼への水素侵入に対して影響を与えており、暴露試験で侵入する水素量レベルと比較して無視できない値であることから、水素分析時における阻害因子であるとわかった。また、ブラスト処理における鋼への水素侵入には、1 回あたりのブラスト時間を短くすることと、付着水分量が少ない砥粒の使用が有効であることを明らかにした。目標としていた腐食環境における侵入水素量の定量評価技術確立に対

して、水素量測定の影響要因として脱錆時におけるブラストを抽出し、適切な処理方法を提案できたことから目標を達成できた。

①-3 「水素下の引張試験における影響因子の明確化」

様々な板厚や切欠き形状を有する板状引張試験片を用いて、大気中と水素下で低ひずみ速度引張試験（SSRT）を実施して破壊発生条件を検討した。その結果、大気中、水素下共に試験片板厚の増加に伴い破壊応力は上昇するが、「水素下破壊応力／大気中破壊応力」として評価することで、その影響を小さくすることが可能であることを知見した。さらに、水素下引張では、ある応力集中係数以上の条件で急激に破壊応力が低下した。試験片形状が異なっても、応力や塑性ひずみの条件に差が無ければ、同様の最大主応力と水素濃度条件で水素脆化破壊が生じると考えられる。

①-4 「水素脆化割れ限界におよぼす U 曲げ試験条件の影響の明確化」

自動車用超高強度鋼板の耐水素脆化特性評価法の精度向上のため、SPring-8 の放射光 X 線を用いた U 曲げ試験片の応力分布、塑性ひずみ分布測定、および有限要素法による U 曲げ試験片の応力分布、塑性ひずみ分布解析を行った。U 曲げ試験片の U 曲げ頂点部の板厚方向には応力分布、塑性ひずみ分布が存在することが明らかとなった。すなわち、U 曲げ加工した試験片は、板厚中央部よりもわずかに外側で高い引張応力が作用し、わずかに内側では高い圧縮応力が作用した。また、U 曲げ外周表面、および内周表面で大きな塑性ひずみが生じ、板厚中央部付近で塑性ひずみはほとんど生じなかった。水素脆化試験後の U 曲げ試験片の縦断面き裂観察により、高引張応力位置で水素割れき裂が発生した。また、塑性ひずみ量は引張応力ほど水素脆化割れき裂発生に影響を及ぼさないと考えられた。

①-5 「打ち抜きブランク端面の水素脆化割れの影響因子の明確化」

打ち抜き加工された 1500MPa 超高強度鋼ブランク端面の水素脆化遅れ破壊の影響因子を調べ、水素脆化遅れ破壊の評価方法について研究した。打ち抜き加工されたブランキング端面には高い引張残留応力が作用して遅れ破壊が生じたが、レーザー切断された端面では残留応力は圧縮になって遅れ破壊は生じなく、遅れ破壊に及ぼす端面の引張り残留応力の影響は大きかった。

静的引張試験では、引張強さに及ぼす水素チャージの影響は小さかったが、全伸びには大きな影響を及ぼし、伸びの低下はレーザー切断の方が小さかった。疲労強度に及ぼす水素チャージの影響は大きく、その低下はレーザー切断の方が小さかった。

打ち抜きブランク端面の水素脆化遅れ破壊の評価方法を開発し、打ち抜きブランク端面の許容引張残留応力と拡散水素量の関係を求めることができた。穴抜き加工の遅れ破壊特性は打ち抜き加工と同様であり、トリミング加工では成形における塑性変形の影響は小さかった。

①-6 「ホットスタンプ材の水素脆化割れ挙動の解明」

ホットスタンピング鋼の遅れ破壊（水素拡散とトラッピング）について調査するた

め、さまざまな組織構造を持つ鋼材に、異なる速度で引張負荷を加えて、最終破壊までの水素脆化挙動を調査した。ホットスタンピング材は、BH 処理材と比較して、格子内不均一ひずみと C の過飽和固溶による bct 化により、水素が旧オーステナイト粒界にトラップしやすくなり、水素脆化を加速させたと考えられた。また、BH 処理や焼なまし材には炭化物が多く析出し、水素のトラップサイトになることが判明し、水素脆化率を低減させた。さらに、3D アトムプローブを用いた調査により、水素のトラップ状況を推測することができた。水素チャージ材は、組織構造の変化にかかわらず、水素脆化率は負荷速度に影響し、負荷速度が遅いほど強く脆化することが確認できた。

【課題②】応力、ひずみ、水素濃度分布およびマイクロ組織損傷の定量化のための要素技術の確立

②-1 「塑性ひずみ分布・応力分布の計測・評価技術と水素脆化割れ検出技術の確立」

超高強度薄鋼板の U 曲げボルト締め試験片の陰極水素チャージ法によって、水素割れ発生時の拡散性水素量を特定するべく、割れ位置と割れ発生までのチャージ時間を精度良く検出する手法について検討した。そこで、3次元デジタル画像相関法によって陰極水素チャージ中の曲げ加工部表面のひずみ変化を計測した結果、割れの発生に伴うひずみ変化を検出することができ、割れ発生場所・時期を検出することに成功した。ただし、割れ発生までに長時間要する場合には曲げ加工部表面に塗布したマーカの剥離が生じるため、比較的短時間で割れ発生が生じる陰極水素チャージ条件（電流密度）の設定が必要である。

②-2 「マイクロ損傷明確化手法の確立」

本研究では、塑性加工による応力、ひずみ及び水素濃度分布とマイクロ組織損傷の定量化のための技術構築を目指し、SEM 像を用いた DIC 法による局所ひずみ分布測定によって、複雑なラスマルテンサイト組織において、マイクロ組織レベルすなわち数百ミクロン以下のオーダーでのひずみ分布、マイクロ組織変化および組織損傷を正確に把握することを目的としている。前年度までに、DIC 法によってラスマルテンサイト組織の局所ひずみ分布を測定してきたが、測定されたひずみ量が非常に高いなどの種々の問題点があった。そこで本年度は、DIC 測定の精度を向上させるため、試験片作製方法や SEM 観察方法などを改善した。その結果、引張変形中の局所塑性ひずみ分布を精度よく測定することに成功し、局所塑性ひずみは旧オーステナイト粒界近傍にひずみが集中する傾向があるが、旧オーステナイト粒内に大きなひずみが集中している領域も存在することが明らかとなった。また、予変形が水素脆化特性におよぼす影響を調査し、予変形の負荷方法によって水素脆化特性が大きく変化することがわかった。

②-3 「塑性変形により導入される格子欠陥と水素トラップの関係解明」

曲げ応力を負荷した高強度鋼板の引張から圧縮状態に対応する各位置での応力誘

起水素拡散に伴う平衡水素濃度の比較、引張・圧縮部で形成された格子欠陥の種類と量の比較、応力によって助長された水素量・格子欠陥量と水素脆化感受性の関係解明を目的とした。U 曲げ加工した SCM435 鋼の外側（引張側）と内側（圧縮側）に形成された格子欠陥の種類と量を検討し、低温 TDS を用いた水素トレーサー法により以下の知見を得た。U 曲げ加工前、U 曲げ加工外側、内側について同一条件で平衡に達するまで水素添加し測定した結果、水素放出開始温度はいずれも $-30\sim-20^{\circ}\text{C}$ 、ピーク温度は $2\sim7^{\circ}\text{C}$ とほぼ一定である。一方、初期試料に比べ U 曲げ部の外側・内側では水素放出終了温度が 110°C と大きく上昇する。また、トレーサー水素量は、初期試料 0.448 ppm に対し外側 0.763 ppm 、内側 0.567 ppm と増加する。U 曲げ外側と内側のトレーサー水素放出スペクトル形状に大きな差がないことから、外側と内側で形成された格子欠陥の種類に変化がないことが判明した。また形成された格子欠陥の量は、若干、外側のトレーサー水素量が多いことから、形成した格子欠陥が多い可能性があった。

②-4 「き裂先端の水素拡散挙動と疲労特性の解析的検討」

水素環境下における繰返し応力負荷条件下での疲労き裂成長速度に及ぼす水素凝集効果をシミュレーションする解析プログラムを構築し、本手法が実際の現象を十分予測しうることを検証した。この手法により、疲労き裂成長速度の繰返し速度効果を明らかにした。具体的には、低繰返し速度条件ほど、水素凝集による da/dN の加速効果が促進される。また、水素のトラップ効果は、繰返し速度条件下では、さほど影響は大きくないが、一定応力条件下では、トラップ効果により水素濃度が顕著に減少する。したがって、疲労き裂成長挙動には、水素のトラップ効果の影響は少ないと考えられるが、低繰返し速度条件や遅れ破壊条件では、水素凝集効果とトラップ効果の両者が顕著になるので、水素凝集に関して、相反する両者の影響を組み合わせた解析による総合的な水素脆化感性評価が必要と考えられる。

②-5 「マイクロ組織損傷とき裂発生伝播挙動の関係解明」

亀裂伝播の三次元解析のため、亀裂先端部微小領域に限定して実験手法の最適化検討を行った。試験片表層から発生した亀裂の先端領域から直方体状の微小試料を採取し、この微小体積に対して 50nm ピッチでスライス加工を施し、個々の加工面に対して EBSD 測定を実施した。これより、IPF 像をベースに亀裂部分を黒く表わした 3 次元再構築像、および亀裂部のみを抽出した図の取得に成功した。その結果、亀裂が y, z 方向に進展しながら内部で分岐していること、各スライスにおける IPF 像から亀裂が二次元観察と同様に γ 粒界を伝播していることが検証された。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.9-4 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	8	1	0	0	0	1	1
2019FY	3	0	14	1	0	0	0	1	1
合計	5	0	22	2	0	0	0	2	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-2.1.9-5 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

2.2 「革新的アルミニウム材の開発」

2.2.1 [テーマ番号 13] 高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発

2.2.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

大型ねじり鍛錬加工装置で高機能化した新アルミニウム合金と、さらにその接合技術を併せて開発することで、自動車部材としての革新アルミニウム材料適用技術を確立する。さらに、これらの技術を適用した溶接構造自動車部材を試作・評価し、マルチマテリアルボディの実現につなげる。

(2)位置付け、目標値

2018年度までは航空機用材料を目標として、高強度アルミニウム合金の開発を進めた。2019年度以降は自動車のマルチマテリアルボディの実現に向け、アルミニウム合金の高機能化と、溶接構造自動車部材の試作、評価を進める。

表Ⅲ-2.2.1-1 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
高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	引張強さ $\geq 750\text{MPa}$ 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ 伸び $\geq 12\%$ ラボスケール	—	—	目標値の達成により Al-Li 合金の比強度を上回り大きな軽量化効果が得られる。
高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発	—	大型ねじり鍛錬加工装置によるアルミニウム合金の高機能化実証 溶接構造用合金の開発（引張強さ $\geq 250\text{MPa}$ ） ベンチマークとなる自動車部材のリバーエンジニアリング	ねじり鍛錬加工法による高強度アルミニウム合金を用いた溶接構造自動車部材の実証試作	ねじり鍛錬加工により高機能化したアルミニウム合金を用いた最適設計により大きな軽量化効果が得られる。

(3)全体計画

2019年度までに革新技術の要である、 $\phi 95\text{mm}$ 大型ねじり鍛錬加工装置の開発を行った。2020年度より大型ねじり鍛錬加工装置を用いた、アルミニウム合金の高機能化の実証を行う。さらに溶接構造自動車部品を想定した革新アルミニウム合金を開発し、溶接構造自動車部品への適用を進める。また実用化技術として、フィラードレーザ溶接技術開発を行い、革新アルミニウム合金の最適接合技術を確立する。さらに軽量化

実証のための自動車部材を決定し、リバースエンジニアリングを行い、2021年度に最適設計を行い実証試作を進める。

(4)実施体制

本テーマは千年分室（株式会社UACJ）が中心となり、3大学に再委託先として評価、解析を委託し、互いに協力しながら推進している。

(5)運営管理

個別課題に関する打合せを随時必要に応じて実施。

さらに、年度初めと年度末に全体で進捗報告・技術討議を行い全体進捗管理を実施している。

(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）

現状の自動車部材には、鉄、あるいはアルミ一般材が使用されており、大幅な重量軽減のためには軽量・高強度・高靱性合金の適用と、継手強度の向上が不可欠である。そこで航空機材向けに開発した革新アルミニウム合金、鍛錬加工により高機能化したアルミニウム合金（強度10%以上向上、伸びを維持）、さらに溶接構造用革新アルミニウム合金（TS \geq 250MPa）を開発・適用し、レーザ溶接技術開発と組み合わせることで、部材継手強度を従来比（BM；6005C-T5 MIG、引張強さ；190MPa）30%以上向上する。部材試作後、重量、強度、剛性等の評価を行い、CO₂削減効果、省エネルギー効果を明確にする。

2.2.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.2.1-2 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
高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発	大型ねじり鍛錬加工装置によるアルミニウム合金の高機能化実証 溶接構造用アルミ合金の開発（引張強さ \geq 250MPa） フィラードレーザ溶接技術の開発 ベンチマークとなる自動車部材のリバースエンジニアリング	ねじり+押出加工による高機能化の検証を完了。 Al-Mg合金をベースに、強度目標値を達成。 外注により、フィラードレーザ溶接条件の最適化を実施。 対象部材を決定し、リバースエンジニアリングを実施。	△	

※◎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-2.2.1-3 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
高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発	φ95大型ねじり鍛錬加工装置の製造が完了し、最終調整中。装置が稼働開始するまでは従来のφ50ねじり鍛錬加工装置で試験を継続。Al-Mg系合金で引張強さ230MPaを達成。さらに最適成分を調査中。 外注でのフィラードレーザ溶接試験の条件を検討中。 リバースエンジニアリングは対象を選定中。	ねじり鍛錬加工法による高強度/高性能アルミニウム合金を用いた溶接構造自動車部材の実証試作	2020年度内に適用材料開発、およびレーザ溶接技術開発を完了し、2021年度に革新アルミニウム合金を用いた最適設計および部材試作を実施することで達成できる可能性が高い。

(3)研究開発の成果と意義

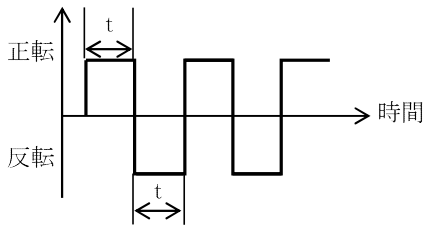
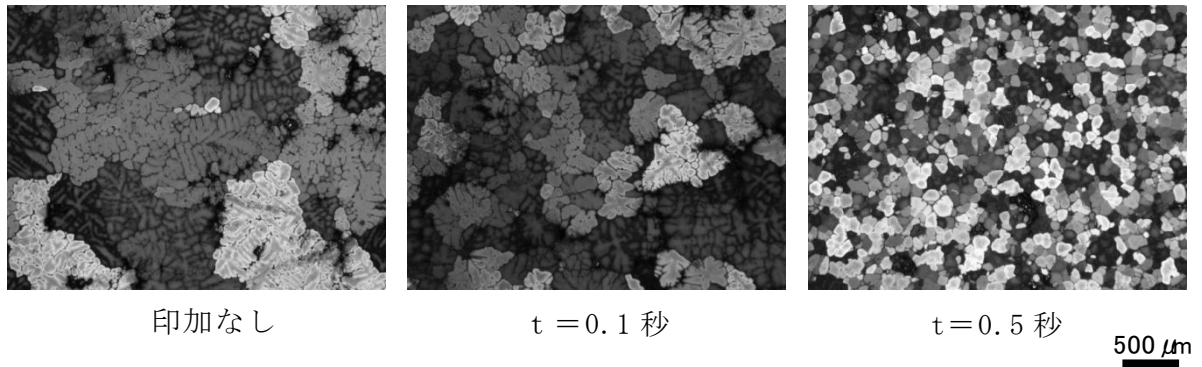
1. 合金開発

高強度・高延性が得られる7000系アルミニウム合金を設計・開発することを目標に合金元素や熱処理等について検討した。合金の添加元素として亜鉛、銅、マグネシウムの添加量を変化させた合金及びその合金への復元処理（熱処理）条件について検証し、強度、延性、破壊靱性、耐SCC性、疲労特性の最適化が得られる添加量や条件を決定することができた。特に、高強度・高延性・高耐食性を示す合金（Al-10Zn-Mg-Cu-Zr）は第二中間目標の強度を達成しており、目標である合金組成を得ることができた。

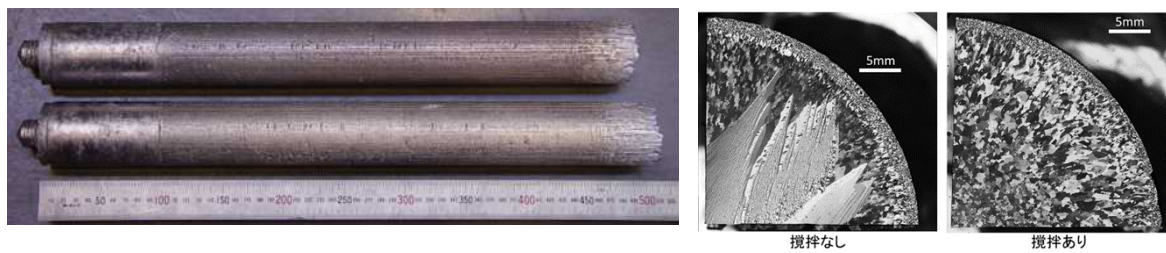
2. 鋳造および脱ガス技術開発

2-1 電磁攪拌による鋳造組織微細化

アルミニウム合金の最終特性は最も上工程である鋳造工程における凝固時の結晶組織に大きく依存する。このため更なる特性向上を目指して、凝固中のアルミニウム溶湯に電磁攪拌を印加し、得られる鋳造組織を微細化する技術を開発した。また、本プロセスを実生産プロセスである連続鋳造プロセスへ組み込むことを検討し、連続鋳造プロセスにおいても鋳造組織微細化が可能であることを確認した。さらに、工業生産への展開を目的に、大型鋳塊の鋳造割れに対する技術ポイントの明確化と、電磁攪拌プロセスを大型ビレットに適用する際の課題と必要技術の抽出を行い、大型鋳塊製造に関して目途付けを行うことができた。



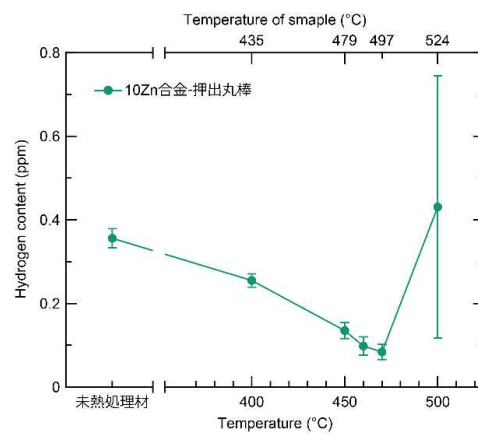
図Ⅲ-2.2.1-1 電磁攪拌による casting 組織微細化技術の開発



図Ⅲ-2.2.1-2 電磁攪拌を付与して作製した連続 casting ビレットとその組織

2-2 脱ガス処理による含有水素量の低減

アルミニウム合金の靱性向上のためには、材料中に含まれるガス、特に含有水素を低減することが非常に重要となる。従来のバブリング法では困難であった 0.1ppm 以下にまで水素量を低減する脱ガス技術を開発した。

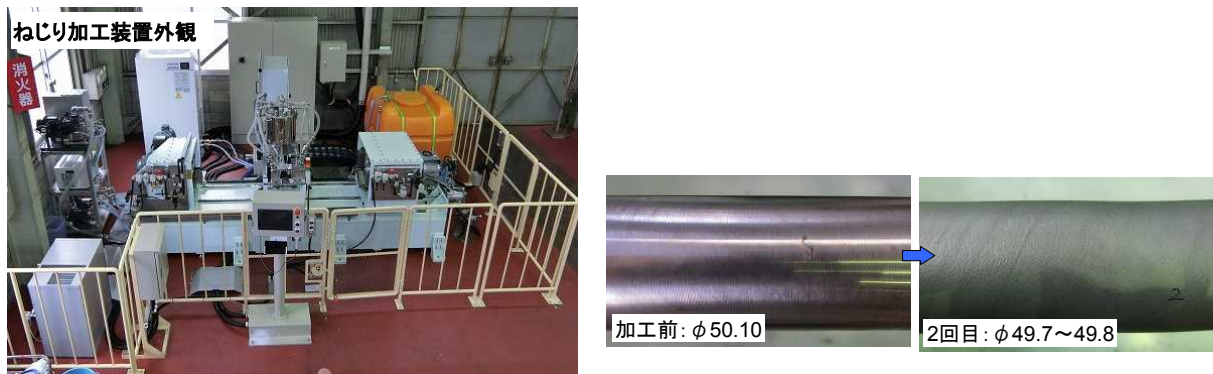


図Ⅲ-2.2.1-3 含有水素量に及ぼす脱ガス処理温度の影響

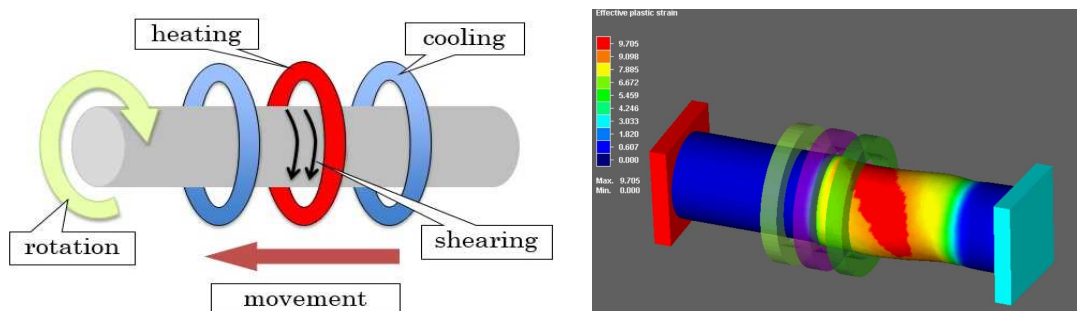
3. 鍛錬技術の開発

鋳塊に圧縮ねじり加工を施すことで組織の微細化および金属間化合物の微細分断化に非常に有効であることが確認された。続いてφ50 ねじり鍛錬加工機を導入し、シミュレーションと併せて、限界加工条件、最適加工条件の検討を行った。そして、鋳造⇒ねじり鍛錬加工⇒均質化处理⇒熱間押出⇒溶体化・焼入れ⇒人工時効処理の高機能化プロセスを開発した。本プロセスにより、7150 合金で約 30%の高強度化を達成した。一方、高強度・高靱性開発合金では強度向上効果が得られない事が明らかになった。本プロセスの適用により、開発合金よりも低濃度組成で強度目標値（引張強さ≥750MPa、耐力≥700MPa、伸び≥12%）を達成できる可能性があるため、今後検証を進める。

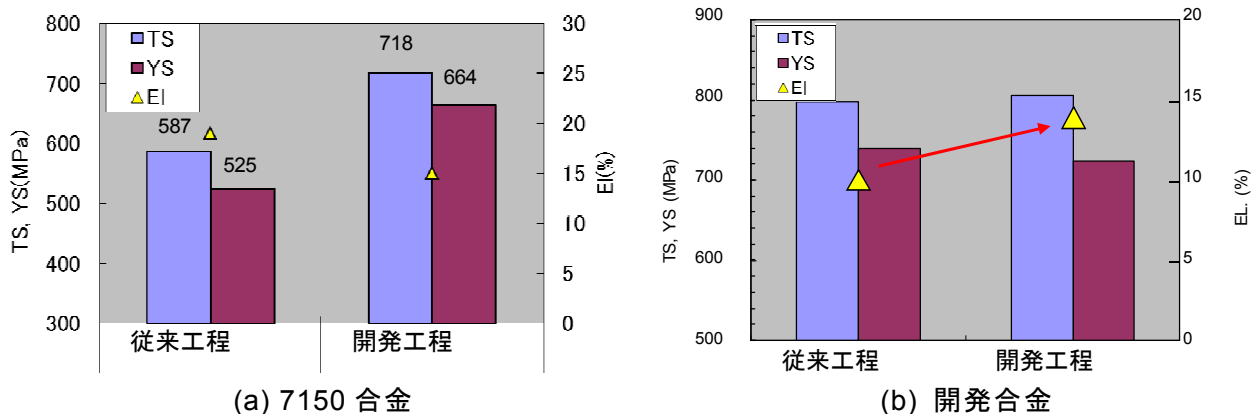
また、大型部材試作を目的に、2019 年度にφ95 大型ねじり鍛錬加工装置を製造した。今後、大型ねじり鍛錬加工装置を用いて材料の高機能化の検証を進める。



図Ⅲ-2.2.1-4 φ50mm ねじり鍛錬加工装置外観および条件検討例



図Ⅲ-2.2.1-5 連続ねじり加工シミュレーションモデルおよび解析例



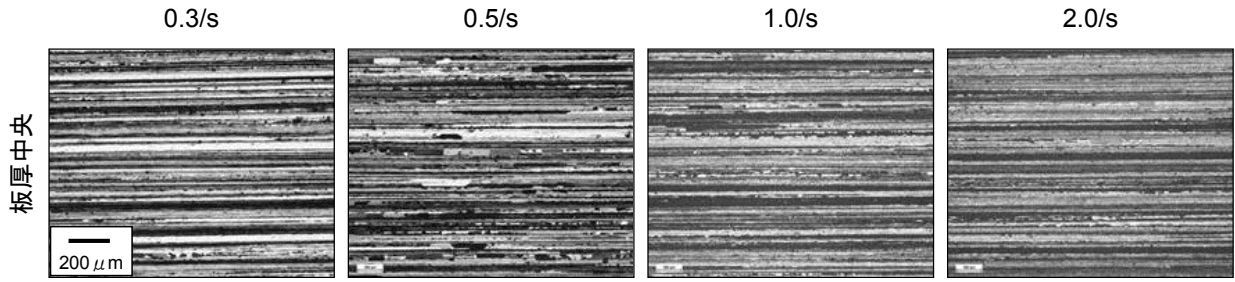
図Ⅲ-2.2.1-6 高機能化プロセスによる強度向上効果



図Ⅲ-2.2.1-7 φ95mm ねじり鍛錬加工装置の外観

4. 圧延技術開発

熱間圧延時の温度および歪み速度の条件によって最終製品のマイクロ組織や機械的性質が変化することが明らかとなっており、最終板材としての集合組織・安定なサブグレイン組織を得るための最適熱間圧延条件等を検討して研究を進めた。圧延加工技術についての検証を複数の課題について行い、加工度を高めるための方法として圧延途中での切断装置の導入、圧延中の温度分布の発生を防ぐための途中加熱装置の導入等を行って、試験及び生産技術的な視点から最良な圧延方法を開発した。また、この開発で得た技術を用いて開発合金を圧延した結果、第二中間目標の強度を有する圧延板材を試作することが可能であり、さらに耐食性、破壊靱性を維持しながら高強度な板材が開発できることを確認した。



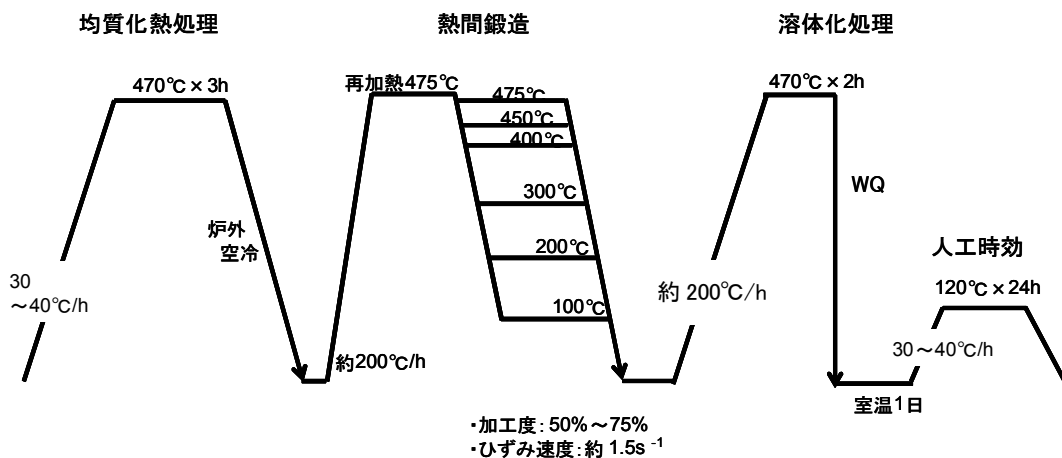
図Ⅲ-2.2.1-8 T6材のマイクロ組織におよぼす熱間圧延時の歪み速度の影響

5. 押出技術開発

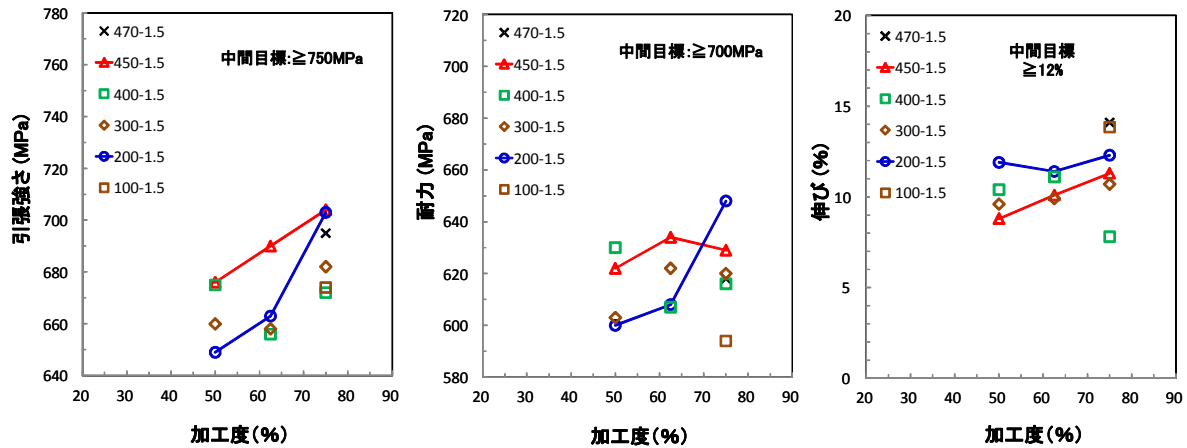
ねじり加工による組織の改善効果が大きい事が明らかとなり、ねじり加工と押出加工を組み合わせることで、アルミニウム合金の高強度化が達成できることを確認した。今後、φ95mm 大型ねじり鍛錬加工装置で加工したビレットを押し出加工して、疲労特性等について調査し、材料特性を最大化できる押出条件を調査する。

6. 鍛造技術の開発

高強度高延性鍛造材を得るための鍛造条件（温度，歪み速度，加工度）と機械的特性について検討し、方向性を見出した。特に 200℃の低温での鍛造では加工度に伴う強度の向上が大きいことが分かった。また、200℃鍛造材のマイクロ組織観察からこれらは未再結晶組織であり、さらに集合組織が集積した組織と推察された。一部の金属間化合物の周囲では再結晶を生じ、粒成長した領域も認められており、鍛造時に晶出物周りが強加工部となり再結晶の起点となったものと考えられる。再結晶による強度低下を防止するためには、金属間化合物の微細化が有効と考えられる。



図Ⅲ-2.2.1-9 鍛造条件の検討（供試材製造条件）



図III-2.2.1-10 鍛造条件と機械的性質の関係

7. 熱処理技術開発

溶体化処理時の固溶量増大を図り、人工時効時の析出強化の増大を目的として高温溶体化処理の検討を行った。局所溶融を起こさないように昇温速度の制御を行い480℃の溶体化処理を実施した結果、強度の向上が確認された。

さらに、耐食性に良好となるRRA処理条件を検討し、引張試験及び応力腐食割れ試験から、RRA処理の最適な条件を提示することができた。また、均質化処理・溶体化処理・人工時効の熱処理条件の最適化を行って、目標強度が得られる処理条件を提示することができた。

8-1 解析・評価—水素ポア制御技術開発

本研究では、含有水素の強度及び破壊特性に及ぼす影響が大きいため、水素ポアの含有量の定量評価と水素脆化条件および脆化抑制効果を検討した。その結果、水素ポアは casting中に晶出物上に発生し、熱処理で成長すること、晶出物の種類により水素ポアの生じ易さ・成長速度に大きな差があることを確認した。また、引張特性・破壊靱性は、通常材より水素量が多いと悪化するが、通常材以下の水素量では影響が少ないこと、疲労及び耐食性についても水素の影響があるが、0.05ppm以下では影響がないことを明らかにした。また、開発合金では500℃以上の処理で水素が増加するが、処理時間を長くすることにより水素量を0.05ppm以下にまで低減可能であることを明らかにした。

8b. 解析・評価—残留応力評価技術開発

厚肉の金属材料において、高温から急速冷却を行う溶体化処理時に表面と内部の温度勾配によって熱応力が発生し、残留応力が残存するため精密加工時にひずみやねじれが発生し問題となることがある。残留応力を定量的に把握することは非常に重要であり、材料内部における残留応力分布を評価するため、深穴穿孔法(DHD法)による残留応力測定装置を導入し、高精度に内部応力の分布を測定する技術を開発した。さらに深穴穿孔法では表面近傍の残留応力を正確に測定できないため、穿孔法装置を

導入し、穿孔法と深孔穿孔法を組み合わせることにより、表層から高深度までより正確な残留応力の評価を行える手法を開発した。また、中性子回折法による残量応力測定を行い、深孔穿孔法の測定結果と比較して、深孔穿孔法が十分な精度を有することを検証した。

8c 解析・評価－組織解析

ねじり鍛錬加工は外周部ほどひずみ量が大きく、中心部ではひずみ量はゼロに近い。断面内でのひずみ分布が大きいことから、 $\phi 50\text{mm}$ でのねじり鍛錬加工による機械的性質の不均一性について、微小引張試験により定量的に調査した。ねじり有無とも、最外周部分（中心から5mm）の位置において強度が大きく変動しており、今後その原因の検討が必要である。これを無視すると、引張強度は位置に依らずほぼ同じ値を採っており、その平均はねじり無の方が高い。

8d 解析・評価－用途開発

開発合金の用途開発を実施し、重工メーカーで部品に採用された。

2019年度より最終目標が高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発に変更になったため、今後は動向・市場調査を継続して行い、試作・検証のための自動車部品を選定し、ベンチマーク作成のためのリバースエンジニアリングを行う。

8e 解析・評価－微細組織解析

2020年度より溶接構造用革新アルミニウム合金について内部微細組織の解析を行い、組織最適化による性能向上を行う。さらにねじり鍛錬加工に伴う組織変化を解析し、特性向上メカニズムを明らかにする。

8f 解析・評価－接合技術開発

2020年度より革新アルミニウム合金に適用する溶接技術を開発する。特に入熱が少なく強度特性を最大化できるディスクレーザ溶接を適用し、さらにフィラード溶接によりアンダーカットやアンダーフィルを防止し、継手強度の最大化を検討する。

9. 接合用合金開発

最終目標とする自動車部品では、マルチマテリアル化による軽量化が求められており、優れた溶接性を具備することが望ましい。2017年度までに開発した高強度・高靱性合金は、Cu添加量の多い7000系であるため、アルミニウム合金の中では溶接性は比較的劣る。そのため高強度を必要とする部位への使用に留め、それ以外の部位には溶接性に優れたアルミニウム合金の適用が必要となるため、2020年度に溶接性に優れた溶接構造用革新アルミニウム合金の開発を行う。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.2.1-4 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	8	0	0	0	0	0	1
2015FY	4	0	11	1	3	0	0	0	1
2016FY	3	0	8	0	3	0	1	0	2
2017FY	1	0	2	1	0	0	0	0	2
2018FY	4	0	5	0	0	0	1	0	1
2019FY	0	0	5	1	0	0	0	0	1
合計	12	0	39	3	6	0	2	0	8

※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-2.2.1-5 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	0	0	0
2015FY	1	0	0
2016FY	2	0	0
2017FY	1	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	4	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.2.2 [テーマ番号 14] アルミニウム材新製造プロセス技術開発

2.2.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

日米欧の各地域における燃費規制により、軽量化のため自動車への AI 合金製部材の採用が加速し、今後も AI 材料の需要増大が見込まれている。一方で、膨大な電力を消費する AI 新地金製錬の環境負荷低減と低コスト化、さらに AI スクラップ増大への対応が課題となっている。そこで、本研究開発はエネルギー効率に優れた AI 新地金の革新的な製法「室温電解製錬（イオン液体法）」の実用化、イオン液体法を利用した独自の AI スクラップ再生技術の開発、および高機能 AI 合金を開発するという目標を掲げた。この AI の室温電解製錬プロセスは、ボーキサイトから水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) を従来の製法により合成し、その後、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を経て AI 地金を製造する（図 III-2.2.2-1）。上記プロセスにおいて、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の脱水反応により AlCl_3 を合成してから AI 地金を製造する方法と、 AlCl_3 を経由しないその他の方法とが考えられる。これらの室温電解製錬のプロセスの研究開発を進めた。また、AI スクラップの不純物を除去し、地金を再生する技術の開発、製造される AI 地金は箔の状態のため、その均一性向上および生産性と表面品質向上に関する開発を進めた。UACJ は、これら基盤技術の取りまとめと、パイロットプラントおよび製造設備の設計と構築を担った。2020 年度からはイオン液体法を利用した独自の AI スクラップ再生技術の開発に注力する。日本では年間約 400 万トンのアルミニウム製品が製造され、その約半分が展伸材として利用される。スクラップは年間約 130 万トン発生しており、そのうち約 100 万トンが主に輸送機器用の鋳物用途として再生利用される。このようなりサイクルは純度の低下を伴うカスケードリサイクルとよばれ、再生不可能なスクラップの蓄積を生じる。また、近年、輸送機器の軽量化に伴うアルミニウム製品の使用量の増加、EV 車の普及に伴う鋳物材使用量の減少が進むにつれてアルミニウムスクラップの発生量は増加していくことが予想される。このような課題を解決しうる新しい製造プロセスとして「イオン液体を用いたハイアップグレード技術」に着目した。この技術開発により、再生困難な低グレードアルミニウムスクラップを高純度のアルミニウムまでハイアップグレードする技術の開発を目指す。

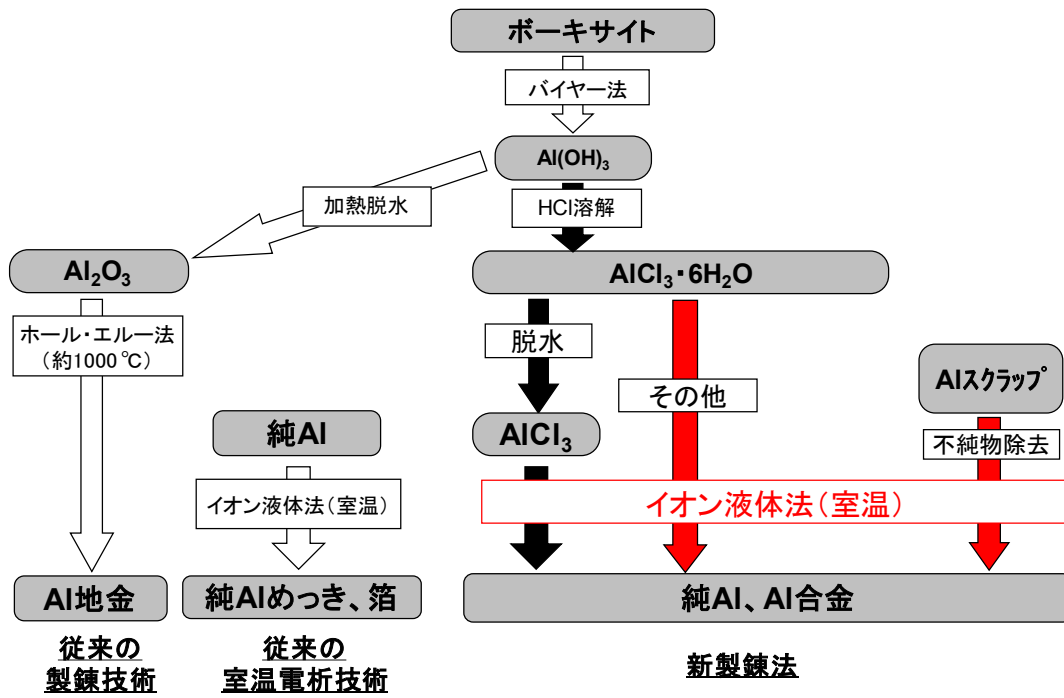


図 III-2.2.2-1 開発プロセスと従来プロセスの比較

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.2.2-1 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
連続電析技術	量産技術確立のため、パイロットプラントの構築し、実証試験を開始する。	新電解浴における攪拌法、液供給方法を改良し、長尺の電析箔を連続的に安定して回収可能な連続電析プロセスの指針を確定する。 新電解浴を用いた、電析速度 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上の指針を確定する。	Al の室温電解製錬プロセスの事業化 ・・・200 円/kg (対日プレミアム除き、従来より 50 円/kg 低減)	量産のため、連続電析技術の確立が必要
表面の平滑化	平滑性向上の技術（添加剤、基板素材、電析条件等）の確立。	添加剤、電解手法のさらなる最適化により、生産効率が良く、平滑性に優れた高品質の膜を製造可能な条件を見極める。		箔切れを防ぎ製造効率を向上するため、材料表面の品質向上が必須
無水 AlCl_3 新製法	AlCl_3 系イオン液体の大量合成法を開発、提案する。	新電解浴を用いた金属 Al 作製法の指針を確定する。		ボーキサイトを出発原料とする製造プロセスを完成させるため必須
共析の制御(1)	再生 Al を利用可能とする。	再生用電解液特性（限界電流密度および電析速度、操業電圧の調査、電解液の耐久性等）の把握と展伸材アノード使用時の不純物除去能力を把握する。	・ 鋳物級アノードから 99.9%以上の純度へのハイアップグレード技術の指針確定 ・ 電流密度 100 mA cm^{-2} 以上での高速電析技術の確立	低品質の Al を出発原料とする製造プロセスを確立するため必須
高速電析技術		電解手法（浴温、電流波形、攪拌手法等）と添加剤の最適化による平面方向と板厚方向の電析速度向上手法を調査する。	・ 電力原単位 7、000 kWh ton^{-1} 以下のハイアップグレード技術の開発	再生 Al を利用時の電析速度の向上に必要。

共析の制御(2)	連続電析による Al 合金製造法を確立する。	最終目標達成のため 中間目標設定なし	安定した高純度化 技術の確立・・・ 不純物濃度を 10 ppm 以下 高融点金属の高濃 度添加技術の確 立・・・Nb、 Ta を 5mass%以上	各種 Al 合金 製造のため、成分含 有量の制御 技術確立が 必要
----------	------------------------	--------------------	---	-----------------------------------

(3)全体計画

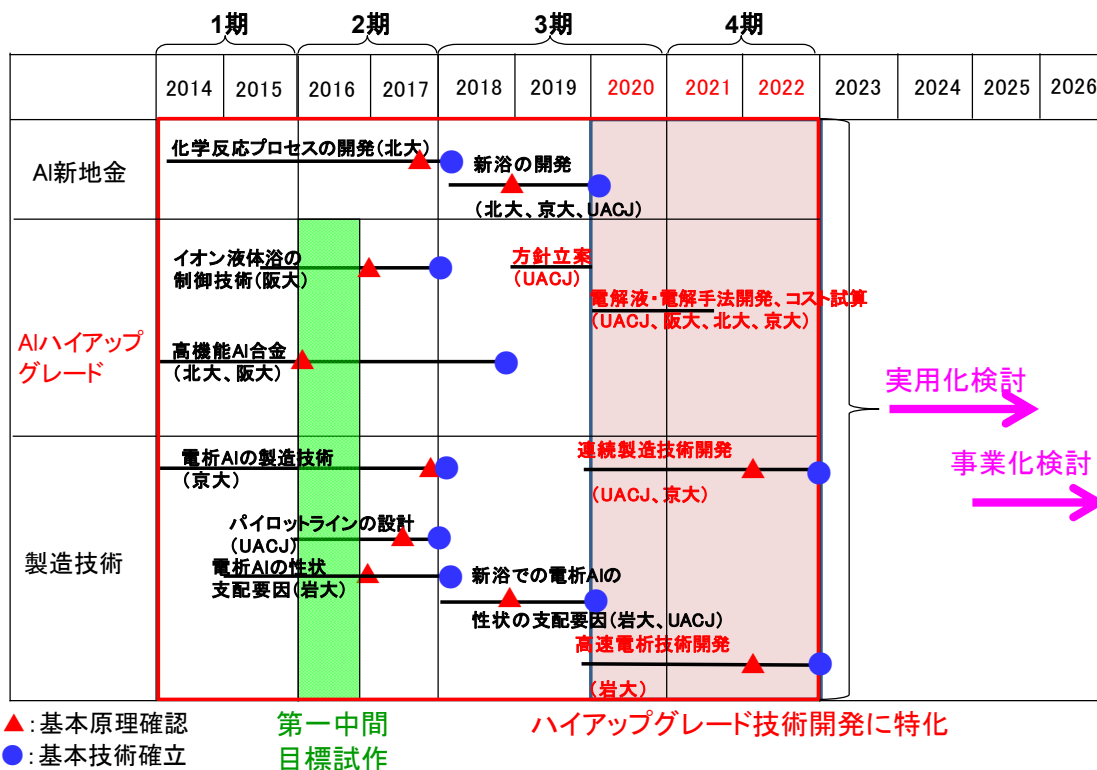


図 III-2.2.2-2 全体計画

(4)実施体制

深谷分室（株式会社 UACJ）と再委託先 3 大学（北海道大学、京都大学、岩手大学）、阪大工学研究科分室（大阪大学）とが共に実施する。

(5)運営管理

2018 年度までは深谷分室（株式会社 UACJ）が牽引役となり、再委託先に要素技術の開発を委託して、開発を推進した。定期的な会合を開催し、技術開発の進捗および事業戦略について協議し、課題と解決方法および目標の共有をはかった。2019 年度、深谷分室は、これら要素技術を組み合わせて連続電析装置の構築および高品質の Al 箔を製造する電析条件の確立に取り組んだ。2020 年度からはハイアップグレード技術開発のため、「(4) 実施体制」に示す体制で取り組む。

(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）

自動車の軽量化への寄与が大きい Al の需要は年々増大している。低コストの新地金製錬の事業化が達成されれば、自動車材用途だけでも経済効果は数百億円/年が見込まれる。また、日本では年間約 400 万トンのアルミニウム製品が製造され、その約半分が展伸材として利用される。スクラップは年間約 130 万トン発生しており、そのうち約 100 万トンが主に輸送機器用の鋳物用途として再生利用される。このようなりサイクルは純度の低下を伴うカスケードリサイクルとよばれ、再生不可能なスクラップの蓄積を生じる。また、近年、輸送機器の軽量化に伴うアルミニウム製品の使用量の増加、EV 車の普及に伴う鋳物材使用量の減少が進むにつれてアルミニウムスクラップの発生量は増加していくことが予想される。このような課題を解決しうる新しい製造プロセスとして「イオン液体を用いたハイアップグレード技術」に着目している。この技術開発により、鋳物級スクラップ（Al 純度 90%以下）を使用し、ホール・エルー法で製造される地金（約 99.7%）よりも高純度な地金（99.9%以上）を製造することが可能となれば、従来はホール・エルー法に加えて、三層電解法等の技術を併用しなければ製造できなかった高純度アルミニウムが、省エネルギーで製造可能となり、新規精製技術が確立される。また、電流密度が 100 mA cm² 以上であれば、従来技術により近い電流密度での電解が可能となるため、電解槽の設計と組み合わせることで工業化を見据えることができる。さらに、ホール・エルー法のような高温（約 1000 ℃）かつ炭素アノードを使用する技術¹⁾²⁾よりも低温かつアルミニウムアノードを使用する本技術が確立すれば、低電圧な電解に伴う省エネルギーかつ CO₂ 排出量の低いアルミニウム製造技術となることが期待される。

2.2.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.2.2-2 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
連続電析技術	新電解浴における攪拌法、液供給方法を改良し、長尺の電析箔を連続的に安定して回収可能な連続電析プロセスの指針を確定する。	新電解浴での電位、電流密度、温度の影響を調査し、Al 電析挙動を把握。適切な電解手法を確認。長時間の電解を試みた結果、電解液の変色が生じた。電解時に電析反応と電解液の分解反応が同時に進行するためと思われる。その結果、電析物中の Al 純度が低下することも確認。	△	連続操業における電解液の耐久性向上、電析 Al 純度の向上

表面の平滑化	添加剤、電解手法のさらなる最適化により、生産効率が良く、平滑性に優れた高品質の膜を製造可能な条件を見極める。	EMIC-AlCl ₃ 浴にて、添加剤を加えた電解浴で、高周波数でパルス電解を行うことで結晶粒径 60 nm 以下で平滑な電析物が得られた。	○	
無水 AlCl ₃ 新製法	新電解浴を用いた金属 Al 作製法の指針を確定する。	ボーキサイト由来の AlCl ₃ ・6H ₂ O から配位子（脱水剤）により水分子を完全に置換（脱水）した Al 塩を合成可能にした。この Al 塩を用いた新電解浴を作製し、適切な電解条件の制御により Al 電析が可能であることを確認。	○	
共析の制御(1)	再生用電解液特性（限界電流密度および電析速度、操業電圧の調査、電解液の耐久性等）の把握と展伸材アノード使用時の不純物除去能力を把握する。	Mg の共析メカニズムを解明し、制御手法を確立した。	△	ハイアップグレードを目的とした際に最適な電解液の選定した上で、実用化に向けた製造条件の決定、コスト試算を実施する。
高速電析技術	電解手法（浴温、電流波形、攪拌手法等）と添加剤の最適化による平面方向と板厚方向の電析速度向上手法を調査する。	EMIC-AlCl ₃ 電解浴を用いた際に添加剤、電解手法の制御により 1.0 μm min ⁻¹ 以上で電析可能であることを確認。電解手法については候補となる他の電解液にも適用可能であると考えられる。	△	電析速度と板厚増加を共に達成可能な手法の開発と限界値の見極め。
共析の制御(2)	最終目標達成のため中間目標設定なし。	最終目標達成済み。	○	

※◎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-2.2.2-3 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
連続電析技術	新電解浴での電位、電流密度、温度の影響を調査し、Al電析挙動を把握。適切な電解手法を確認。長時間の電解を試みた結果、電解液の変色が生じた。電解時に電析反応と電解液の分解反応が同時に進行するためと思われる。その結果、電析物中のAl純度が低下することも確認。	Alの室温電解製錬プロセスの事業化 ・・・200円/kg (対日プレミアム除き、従来より50円/kg低減)	第3期で判断する 予定
表面の平滑化	EMIC-AlCl ₃ 浴にて添加剤を加えた電解浴で、高周波数でパルス電解を行うことで結晶粒径60nm以下で平滑な電析物が得られた。		達成
無水AlCl ₃ 新製法	ボーキサイト由来のAlCl ₃ ・6H ₂ Oから配位子(脱水剤)により水分子を完全に置換(脱水)したAl塩を合成可能にした。このAl塩を用いた新電解浴を作製し、適切な電解条件の制御によりAl電析が可能であることを確認。		達成
共析の制御(1)	Mgの共析メカニズムを解明し、制御手法を確立した。今後はハイアップグレードを目的とした際に最適な電解液を選定し、実用化に向けた製造条件の決定、コスト試算を実施する。	・ 鋳物級アノードから99.9%以上の純度へのハイアップグレード技術の指針確定 ・ 電流密度100mA	達成見込み
高速電析技術	EMIC-AlCl ₃ 電解浴を用いた際に添加剤、電解手法の制御により1.0μm min ⁻¹ 以上で電析可能であることを確認。電解手法については候補となる他の電解液にも適用可能であると考えられる。今後は電析速度と板厚増加を共に達成可能な手法の開発と限界値を見極める。	cm ² 以上での高速電析技術の確立 ・ 電力原単位7,000kWh ton ⁻¹ 以下でのハイアップグレード技術の開発	達成見込み

共析の制御(2)	カソード電極上に不純物濃度 10 ppm 以下の Al 析出を確認。高融点金属の (Nb、 Ta) を 5mass%以上含む合金を作製。	安定した高純度化技術の確立・・・不純物濃度を 10 ppm 以下高融点金属の高濃度添加技術の確立・・・Nb、 Ta を 5mass%以上	達成
----------	--	--	----

(3)研究開発の成果と意義

1 新地金製造プロセス

AlCl₃・6H₂O から新たに合成した Al 源を用いた新浴の開発を進めた。合成後の塩では脱水が十分に進行していないことが示唆されており、昨年度はこの化合物を直接溶媒に溶解させていたが、今年度は配位子を用いた脱水を試みた。各種配位子の活用および脱水条件の最適化により、Al イオンの周囲に配位する水分量を 900ppm まで減少させることができ、Al イオンの周囲に配位する水分子を配位子で置換することができた。ここで得られた塩を、溶媒に溶解させて CV (サイクリックボルタンメトリー) を行ったところ、カソード電流が確認でき、定電位電解を行うことにより、Al を含有する電析物が再現性良く得られるようになった。量産技術に向けては、さらなる電析速度の向上、電析物中の Al 濃度の増加が課題となるため、種々のアノード材 (作用極) またはカソード材 (対極) を使用し、ポテンショスタットを用いたサイクリックボルタンメトリー (CV) により、反応機構を解析した。

種々の対極 (溶解性または非溶解性)、参照極、作用極に対して各電極は #400 から #2000 番までの耐水研磨紙で研磨後、アセトンで 5 分間超音波洗浄を行った後に使用した。浴温 40、60℃、走査速度 100 mV / s で走査範囲 -2.0 ~ 2.0 V vs. Al/Al (III) にて CV を行った。

いずれの対極を使用した場合においても、0 V vs. Al/Al (III) よりも卑な電位で還元電流が確認されたことから、Al 由来の電析が生じていることがわかった。また、浴温が高い方が大きな還元電流が確認された。しかしながら、非溶解性の対極を使用した際には還元電流に対応する酸化電流が確認できなかった。一方、溶解性の対極を使用した際は還元電流に対応する酸化電流を確認することができた。このことから、本浴では、対極側でのアノード反応によって酸化還元反応が律速していると考えられるため、非溶解性の対極よりも溶解性の対極を使用する方が良いことがわかった。次に溶解性の対極に対して各種作用極を使用して CV を行った結果、貴な電位に掃引した際に作用極が溶解する電極もあったが、0 V vs. Al/Al (III) よりも卑な電位ではいずれの電極でも還元電流が確認された。また、Al 塩無添加の電解浴中においては酸化還元電流が確認されないため、対極から供給される金属イオンのみで電析は生じないが、Al 塩添加後は溶解性の対極を用いることで Al 電析におけるアノード律速が

改善されることが確認できた。以上の結果から、溶解性の対極を用いることで電析時のアノード律速を解消し、電析速度が向上した。

次に対極に溶解性アノードを使用し、3 サイクル CV を行った際のボルタモグラムの結果から、サイクル数の増加にともない、酸化還元電流が減少していることがわかった。CV 後の作用極表面を SEM-EDS で分析した結果を Fig. 2 に示す。CV 測定面において、薄膜が形成されていることが SEM で確認でき、EDS で分析した結果、Al、O および電解液由来の成分が検出された。これらの結果から、CV のサイクル数増加にともなう酸化還元電流の減少は、電位を卑な方向から貴な方向へ掃引した際に、電析物がアノード溶解しきらず、作用極上に残った電析物上へ電析されてしまうことによるカソード電流の減少と、電析物がアノード溶解しにくい電析物であるためにアノード電流が減少することによるものであると考えられる。その一方で、本結果から、電解浴中で還元電流を制御することにより、Al 電析が安定して行える可能性も示唆された。

また、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を直接利用できる溶媒の探索も行った。無水 AlCl_3 との混合では溶解が確認されている溶媒であっても、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ との混合においては溶解できるものがほとんどなかった。溶解が確認できた溶媒も脱水および電析は確認できなかった。

2 地金再生プロセス

低グレード Al をアノードに用いて精錬すると、回収した Al に Mg が混入する。更なる高純度化を目指すには、Mg の電析挙動を明らかとする必要がある。このような背景から、電析物中の Mg 濃度を制御する方法の確立に取り組んできた。今年度は電解浴に添加する Mg 塩の化学結合状態が精錬プロセスに与える影響について検討し、Mg 塩の化学結合状態と Mg 混入量との間には、密接な関係があることを示唆する結果が得られた。

3 Al 箔の生産性と表面品質向上

新浴からの Al 電析および成膜速度向上を計画。 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 脱水技術の開発と並行して行っていたため、先行して無水 AlCl_3 を Al 源とし、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ からの脱水ができたものと仮定した浴を用いての調査を行った。無水 AlCl_3 で仮定した浴での溶解性、液体存在濃度を確認できた。電気化学挙動の調査および限界電流密度の調査が今後の課題となる。

また、生産性向上のための成膜速度向上技術について、昨年度までの成果により、従来浴である AlCl_3 -EMIC (モル比 2:1) 浴に添加剤とパルス電解を併用することで成膜速度を維持しつつ、平滑性を向上させることができている。今年度はパルス電解における周波数が平滑性に与える影響を調査した。高周波数の電解において、膜厚の薄い電解 Al 箔が得られ、表面粗さ S_a は周波数の増加にともない減少していた。電流の印加時間が短くなることで結晶核の成長が抑制されるためだと考えられる。また、添加剤添加浴または無添加浴におけるパルス電解時の周波数と結晶子サイズの関係

調査した結果、いずれの周波数でも添加剤有の方が結晶子サイズが小さくなり、周波数が増加することによりさらに結晶子サイズが小さくなった。拡散層の広がりが抑制され、電流密度が高くなり、核生成が優先されるためだと考えられる。EMIC-AlCl₃浴に添加剤を添加した浴における高周波数でのパルス電解において、より平滑な Al を電析可能となった。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.2.2-4 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	1	0	2	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	6	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	5	0	0	0	0	1	2
2018FY	2	1	3	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	1	5	0	0	0	0	0	0
合計	3	2	21	0	0	0	0	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-2.2.2-5 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	0	0	0
2015FY	1	0	0
2016FY	6	4	1
2017FY	4	2	3
2018FY	2	0	0
2019FY	0	0	0
合計	13	6	4

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.2.3 [テーマ番号 21] 複層アルミ合金の開発

2.2.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

地球温暖化抑制のためには CO₂ 排出量削減が重要課題であり、様々な策が講じられてきている。運輸部門では自動車をはじめとする輸送機器の軽量化による燃費向上が最も効果的な対策の一つである。自動車におけるアルミニウム材料の採用は軽量化に直結しており、アルミニウム材料の使用拡大が期待されている。しかし、現状の自動車へのアルミニウムの使用率はまだ低く、エンジン、ホイール、トランスミッションケース等の鋳造品が大半であり、飛躍的な軽量化を図るためには、アルミ化が十分に進展していない車体骨格部品へのアルミ板材の適用を加速する必要がある。しかしながら、軽量化とともに衝突安全性を要求する車体骨格部品へのアルミ化が十分に進展していない理由の一つは、鋼板と比較して延性に劣り、強度も低いという材料課題があるためである。また、既にアルミ板材が適用されている部位においても、部品としての剛性・強度を上げるための幾何学剛性に必要な複雑形状成形技術や厚肉板材の適用などから、軽量化効果も十分に得られていない。今後、アルミニウム板材を自動車ボディに広く適用するためには、強度と延性という、相反する素材特性を両立するとともに、部品の段階ではその構造に適したプレス材料（ブランク材）における板厚分布、強度分布を有する材料の活用が求められている。

そこで、本研究開発では、輸送機器の抜本的軽量化を目的に、強度と延性という、相反する特性を両立するための複層アルミ合金の研究開発と、その製造技術の開発を行う。これらの技術開発を推進することで、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。

(2)位置付け、目標値

本テーマの位置付けは、輸送機材の国際競争力強化のための、自動車軽量化、CO₂ 排出量削減につながるアルミニウム合金の創出である。目標に関しては、以下の表の通りである。

表Ⅲ-2.2.3-1 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
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	ラボサンプルでの成形前の伸び(20%以上)、成形・熱処理後の耐力(600MPa以上)の両立	成形前の伸び(20%以上)、平面ひずみ領域の破断限界ひずみ(0.15以上)、成形・熱処理後の耐力(700MPa以上)の両立	成形前の平面ひずみ領域の破断限界ひずみ(0.2以上)、成形・熱処理後のVDA 曲げ角度(40°以上)の達成	骨格部材で主に使用されている980MPa級高張力鋼板相当の部材強度・伸び以上に相当

複層合金製造技術の開発	ラボサンプルでの積層アルミ合金板の製造制御指針の提示			鉄鋼材料で用いられる溶接テープブランクの代替技術の検証
-------------	----------------------------	--	--	-----------------------------

(3)全体計画

第2期(2016～2017年度)として、引張特性の更なる向上策、プロセスの制御策をラボレベルで行う。第3期(2018～2020年度)では、実用化検討として、部材として要求される特性評価、向上策の検討をラボレベルで行う。

(4)実施体制

本研究開発は、西神分室（(株)神戸製鋼所）が実施し、複層アルミ合金の材料設計指針構築に必要な微細組織評価技術の構築を大学への再委託で行う（再委託は2019年度末で終了）。

(5)運営管理

西神分室内或いは再委託先との間において、担当者間で定期的な会議を行い、目標に向けた進捗の管理、情報の共有化を行い、効率的なテーマの推進及び再委託先の開発技術の分担研への取り込みを図ってきている。

(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）

本技術を適用できると考えられる部位は、自動車車体骨格部である。骨格部材に使用されている鋼材の重量は、部品によって異なるが、主な部品は数～20kg程度であることから、アルミニウムに置き換えることによる軽量化効果を約40%と見積もり、国内の乗用車の生産台数（約450万台/年）の20%の車種に本技術が適用されると想定した場合、約1万t/年のアルミニウムの使用量の増大に繋がる。

また、CO₂排出量抑制効果は、燃費改善効果を0.52L/kg、燃料1kL当たりのCO₂削減量換算を2.6t/kLと仮定すると、約1.3万t/年のCO₂削減効果が将来的に見込まれる。さらに、海外の自動車のアルミ化適用部位にも本技術が適用されれば、本技術によるアルミニウムの使用量及びCO₂削減効果はさらに増大すると予想される。

2.2.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.2.3-2 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
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	成形前の伸び(20%以上)、平面ひずみ領域の破断限界ひずみ(0.15以上)、成形・熱処理後の耐力(700MPa以上)の両立	クラッド構成の制御及びプロセス条件の最適化により、第三中間目標達成の目処を得た。	△	

※◎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-2.2.3-3 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
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	最終目標に向けた、強度と延性の両立のための取り組みは継続して推進中。	成形前の平面ひずみ領域の破断限界ひずみ(0.2以上)、成形・熱処理後のVDA曲げ角度(40°以上)を可能とする材料設計指針の提示	これまでの各種知見を活用することで達成可能と考える。

(3)研究開発の成果と意義

複層合金設計、組織解析・制御技術の開発

第三中間目標に向けての取り組みとして、開発材の更なる機械的特性向上策の検討と、部材特性としての評価、向上策の検討を行った。クラッド構成（合金組成、組合せ）とプロセス条件（クラッド材の圧延、熱処理、時効処理）の最適化を図ることで、機械的特性がさらに向上した。また、部材特性評価も行い、既存合金よりも特性向上効果を確認した。これらの取り組みにより、第三中間目標達成の目処を得た。

複層合金製造技術の開発

開発合金を用いたクラッド材で長手方向にクラッド率と板厚を制御するフレキシブ

ル

- ・テーラード圧延技術の開発により、ラボ実験装置を用いたフレキシブル・テーラードブランク材の試作に成功した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.2.3-4 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			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	5	0	0	2	0	0	1
2016FY	0	0	4	0	0	1	0	1	1
2017FY	0	0	5	1	0	2	0	0	2
2018FY	1	0	1	0	0	2	0	0	1
2019FY	1	0	4	0	0	1	0	0	0
合計	2	0	19	1	0	8	0	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-2.2.3-5 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	4	0	0
2015FY	3	0	2
2016FY	1	4	1
2017FY	1	2	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	9	6	3

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3 「革新的マグネシウム材の開発」

2.3.1 [テーマ番号 15] 難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価

2.3.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発されている。本合金は、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせる「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。

本研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術を開発することを目指す。また、開発した合金の信頼性（疲労特性、発火特性、衝撃変形特性、耐食性）を系統的に明らかにし、データベース化（一部標準化）することを目指す。さらに、開発された合金を用いて高速車両構体を設計するための指針を構築することを目指す。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。A6N01 合金は高い生産性（押し出し特性）を有すること、A7N01 合金は高い強度と延性のバランスを有することを特徴とする。本研究開発では、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性（押し出し速度）を有する合金（易加工性マグネシウム材）と、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する合金（高強度マグネシウム材）を開発することを目指す。テーマ 15 では、上記合金の設計指針を導出することを担当する。なお、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発された合金の接合技術および表面処理技術を確立する必要がある。また、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術を構築する必要がある。そこで、テーマ 15 では、開発された合金の信頼性を系統的に明らかにし、データベース化すること、一部標準化することも担当する。さらに、開発された合金を用いて高速車両構体を設計するための指針を構築することを担当する。

以下、テーマ 15 の研究開発項目および目標を表 III-2.3.1-1 に列記する。

表Ⅲ-2.3.1-1 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
① 易加工性マグネシウム合金材の開発	引張強度：270MPa以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311以上、押出速度：A6N01以上の特性を示す押出材を作製するための合金設計技術を構築。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	A6N01合金に匹敵する機械的特性→引張り強度：270MPa, 伸び：12% ²⁾
② 高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311以上の押出材および圧延材を作製するための合金設計技術を構築。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	A7N01合金に匹敵する機械的特性→引張り強度：370MPa, 伸び：13% ²⁾
③ マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	Mg-Al-Ca-Mn系合金の発火特性、腐食特性のデータベース構築・標準化。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	高速車両構体を設計する上で腐食特性及び発火特性のデータベース化・標準化は不可欠
④ 難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを作製する。	2018年度以降テーマ34,35,60で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34,35,60で研究を継続実施。	高速車両構体を設計する上で各種環境下の特性を明らかにすることは不可欠

⑤ 新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	疲労試験により得た適用可能なマグネシウム材料のクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした気密疲労試験構体の基本設計を行う。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34,35,60で研究を継続実施。	高速車両構体を設計する上で疲労特性を加味した構体設計技術を確立することは不可欠
--------------------------	--	---------------------------	------------------------------	---

(3)全体計画

研究開発項目①「易加工性マグネシウム材の開発」では、Mg-Al-(Zn)-Ca-Mn系合金をベースとして、A6N01合金に匹敵する機械的特性と押出し特性（易加工性マグネシウム材：引張強度：270MPa以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311以上、押出速度：A6N01以上の特性）を有する展伸材を開発することを目標とし、そのための合金設計指針を構築する。研究開発項目②「高強度マグネシウム材の開発」では、A7N01合金に匹敵する機械的特性（引張強度：360MPa以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311以上）を有する展伸材を開発することを目標とし、そのための合金設計指針を構築する。

研究開発項目③～④では、2015年度までに開発した合金の信頼性（発火特性、疲労特性、衝撃変形特性、耐食性）に関するデータを系統的に測定し、開発した合金を用いて高速車両構体を設計するために必要なデータベースを構築する。研究開発項目③「マグネシウム材の評価手法の確立」では、開発合金の発火特性や耐食性を評価することを目的として、評価手法を確立する上において不可欠な知見（発火現象に及ぼす環境因子や組織的因子の抽出、マグネシウム合金へのカルシウム添加が腐食現象に及ぼす影響）を明らかにする。研究開発項目④「難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築」では、開発した合金（母材および継手）の疲労特性及び衝撃変形特性を各種変形モードで系統的に測定し、データベースを構築する。また、開発した合金の上記特性に及ぼす組織因子・構造因子の影響を解明する。

研究開発項目⑤「新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築」に関しては、鉄道車両構体を設計するに当たり適用可能なマグネシウム材料のクライテリアを主に、疲労特性から決定する。また、得られたクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした気密疲労試験構体の設計を行う。

なお、本テーマは2018年度よりテーマ34、テーマ35、テーマ60に移行したため、テーマ15としての研究開発は2017年度までとなっている。2018年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(4)実施体制

本研究開発では、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。2015 年度までは、新規合金の開発・評価を主眼として、素材の開発を担当する「材料 WG」、難燃性マグネシウム合金の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「接合 WG」、「耐食性 WG」、「発火特性 WG」を形成し、各 WG が連携して課題の解決を目指した。2016 年度以降は、2015 年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素形材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

テーマ 15 に関しては、2015 年度までは、名古屋守山分室において易加工性マグネシウム材及び高強度マグネシウム材のための合金設計指針の導出を行った。2016 年度以降は、名古屋守山分室と明石分室が共同で、新たに開発された合金の信頼性（疲労特性、衝撃破壊特性、難燃性）を系統的に調査するとともに、発火特性に関しては、標準化作業にデータを提供している。また、明石分室では、新たに開発された合金を用いて高速車両構体を製造するための構体設計指針を構築している。

なお、本テーマは 2018 年度よりテーマ 34、テーマ 35、テーマ 60 に移行したため、テーマ 15 としての研究開発は 2017 年度までとなっている。2018 年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(5)運営管理

テーマ 15～20 に従事する組合員が全員参加できる分科会を定期的で開催している。2013～2015 年度は、材料 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を 3 ヶ月に 1 回開催した（発火特性 WG は不定期開催）。2016 年度以降は、素形材製造 WG、信頼性 WG、表面処理 WG、接合 WG の分科会を 3～4 ヶ月に 1 回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、開発した合金を用いて高速車両構体を製造するための技術を共同で構築している。

2015 年以降は、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速 WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、軽金属学会春期・秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を定期的（年 2 回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（2017 年 3 月までに計 6 回開催）。さ

らに、軽金属学会の会誌「軽金属」に特集号「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を組み、プロジェクトの成果を論文および解説として公表している。

なお、上記の通り、本テーマは 2018 年度よりテーマ 34, テーマ 35, テーマ 60 に移行したため、テーマ 15 としての研究開発は 2017 年度までとなっている。2018 年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(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）

アルミニウム合金製車両構体（新幹線を想定）をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果については幾つかの報告があり、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。また、明石分室では、これまでに、マグネシウム合金製構体の相当曲げ剛性を簡易的に試算しており、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで、アルミニウム合金製ダブルスキン構体とほぼ同じ相当曲げ剛性が得られることを確認している。さらに、アルミニウム合金製構体質量の実績値と比較して、30%の構体重量削減が見込まれることを確認している。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両重量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10~20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 両/年（2013 年）であり、四輪車の年間生産台数(約 1,000 万台：2013)の 0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である。上記部品を全てマグネシウムに置き換えた場合、1 両当たり約 6t の需要が生まれることになる（Mg 置換により車両重量が約 10%減少する場合）。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると（385 両：2013 年）⁵⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(2014 年)であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。

2.3.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.1-2 第中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (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易加工性マグネシウム合金材の開発	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄同様	
②高強度マグネシウム材の開発	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄同様	
③マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄同様	
④難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	2018年度以降テーマ34,35,60で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄同様	
⑤新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄同様	

※◎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-2.3.1-3 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
①易加工性マグネシウム合金材の開発	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	新難燃性マグネシウム合金製の実物長の高速車両構体を作製するための接合・組立技術を構築する。	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】

②高強度マグネシウム材の開発	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	各種難燃性マグネシウム合金押出型材及び圧延板材の長尺部材の連続MIG溶接を達成する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
③マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	摩擦攪拌接合技術を用いて、高品質な難燃性 Mg 合金接合継手（継手効率80%以上）を実現し、各種構造体の製造・生産技術へ展開する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
④難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	2018年度以降テーマ 34,35,60 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	既存解析手法を機械学習させた結果得られたスキームを実装し、小型の組み込み装置のみで接合欠陥をリアルタイムに可視化できるシステムを構築する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
⑤新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	車体長 25m（新幹線または海外の高速鉄道のサイズ）の難燃性マグネシウム合金製大型構体の基礎的設計技術を確立する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】

(3)研究開発の成果と意義

以下各研究項目の代表的な成果と意義を列記する。

① 易加工性マグネシウム合金材の開発

Mg-Al-Ca-Mn 系希薄合金の一層の押し出し性の向上を目的として、本系合金の押し出し性に及ぼす押し出し加工前の熱処理条件の影響を調べた。同時に、本系合金押し出し材のマイクロ組織および機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響を評価し、良好な機械的性質が得られる Al の最適添加量について検討した。はじめに、当該合金の押し出し性に及ぼす均質化処理方法の影響を調査した。その結果、適切な均質化処理を施すことによ

り最大荷重が小さくなり、表面割れの程度も軽減することを明らかにした。次に、Al 添加量の最適化を実施し、適度に Al を添加することで高い時効硬化と強い底面集合組織を得られることを明らかにした。上記の知見をベースとして最適な合金を抽出し、抽出した合金が優れた押出し特性(押出し速度：60m/min.)と A6N01 アルミニウム合金 (T6)材に匹敵する機械的特性 (0.2%耐力:280MPa) を兼備することを試験片レベルで確認した。

② 高強度マグネシウム材の開発

押出し材に関しては、高濃度の Al を添加した難燃性 Mg 合金 (Al 添加濃度約 9mass%) を対象として、主要添加元素 (Al、Zn、Ca) と微量添加元素 (Mn) の濃度が、押出材の機械的特性に及ぼす影響を調査した。Zn 添加濃度の影響を 0~3% (以下 mass%) の範囲内で調査した結果、Zn 濃度を 1%以上に設定すると延性が劣化することを明らかにした。Al 添加濃度の影響を 6~12%の範囲内で調査した結果、10%までは Al 濃度の増加とともに強度が向上するが、それ以上の添加は強度向上に有効に寄与しないことを明らかにした。Ca 添加濃度の影響を 0~3%の範囲内で調査した結果 (他の元素は基準合金と同じ濃度)、Ca 濃度を 2.5%以上にすると、延性が劣化することを明らかにした。Mn 添加濃度の影響を 0~0.6%の範囲で調査した結果 (他の元素は基準合金と同じ濃度)、過度な Mn の添加は耐力の低下をもたらすことを明らかにした。以上の結果より、高強度と高延性を同時に達成するための好適な合金組成を抽出し、試験片レベルで引張り強度 367 MPa、伸び 17%が得られることを確認した。圧延材 (薄板・厚板) に関しても、2017 年度目標値の特性を有する板材を試験片レベルで達成するための合金設計指針を提示することに成功した。

③ マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立

③-1 難燃性及び耐食性の評価

発火特性に関しては、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金 (AX41(押出材)、AX92 (押出材)、AX81(G) (圧延材)、AX81(S) (圧延材)) および従来の難燃性マグネシウム合金の発火温度を熱分析装置 (DTA) を用いて測定した (試料形状：厚み 0.1mm、昇温速度：10°C/min.)。横軸は試料のカルシウム濃度を示しており、カルシウム濃度の増加とともに、ほぼ線形的に発火温度が上昇していくことが確認できる。このように、一連の発火温度測定結果より、カルシウム濃度の大小が発火温度に支配的な影響を及ぼすことが確認できたなお、上記の発火温度に関するデータは、JIS H 0544:2017「マグネシウム合金の燃焼試験方法」において、マグネシウム合金の発火特性を評価するためのデータとして利用されている。

耐食性に関しては、難燃性マグネシウム合金の耐食性に及ぼす熱処理の影響を調査し、溶体化処理に伴い AZX612、AZ61 押出材・鋳造材の全ての試料においても耐食性が向上することを確認した。また、組織観察と腐食試験結果を照合した結果、溶体化処理により晶出物や Al 濃化相を母相に固溶させると、孔食サイトが減少し、耐食性が向上することが明らかとなった。応力腐食特性に関しては、0.01 M NaCl 環境下で定歪み速度引張試験を行い、AZX612、AZ61 押出材の応力腐食特性を評価した。

その結果、AZX612 押出材は AZ61 押出材よりも低い破断伸びを示した。なお AZX612 押出材に関しては、溶体化処理に伴い延性が改善することが確認され、塩水浸漬試験と同様に、溶体化処理に伴う孔食サイトの減少が延性の劣化を抑制するのに有効であることが示唆された。

③-2 標準化に関する技術動向調査

国内外における難燃性マグネシウム合金等の市場動向・研究動向を調査し、本事業において開発される難燃性マグネシウム合金や評価手法を標準化するための課題や問題点を抽出した。国外に関しては国際会議への参加及び二輪車メーカーや自動車メーカーの視察を行い、市場動向、開発動向等の最新情報を入手した。国内に関しては、セミナーや学会等により最新の研究開発動向の調査と、鉄道関連企業の視察を実施した。一連の調査結果より、本事業で開発される材料や評価手法を標準化するための課題や対応策として、以下の 5 つの項目を抽出することができた。(1)開発合金による押出材、板材の規定、(2)溶接用材料の規定、(3)耐食性評価のための促進試験の策定、(4)疲労や破壊に関する試験方法の策定、(5)燃焼性に関する判断標準の策定。また、今回の調査の結果、加工技術や評価手法の標準化に関しては、合金種への対応、メカニズムの解析、データの蓄積・整備などの課題解決が必要な状況であること、また、需要先に存在する規定等への対応も必要になることが分かった。

④ 難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築

④-1 疲労特性データベースの構築

既存合金(AZX611 (押出材))及び新たに開発した合金(AX41 (押出材)、AX92 (押出材)、AX81(G) (圧延材)、AX81(S) (圧延材))の疲労特性を回転曲げ疲労試験、平面曲げ疲労試験、軸疲労試験により評価した。

回転曲げ疲労試験に関しては、AZX611、AX41、AX92、AX81(G)の母材を対象として、高速車両構体がトンネル内を走行する時に付加される気密疲労条件に近い応力比 $R=-1$ (両振り) で疲労特性 (繰返し数: 10^7 回) を評価した。AZX611 に関しては、押出比の異なる試料の疲労特性を評価した。0°材(試験片長手方向と加工方向が平行)の疲労特性を評価した結果、疲労強度に及ぼす加工比の影響は比較的少ないことが確認された。また、他の合金に関しては 0°材と 90°材(試験片長手方向と加工方向が垂直)の特性を評価した。その結果、開発合金の疲労強度は AZX611 とほぼ同等もしくは高い値を示すことを明かにした。

平面曲げ疲労試験に関しては、各合金について分担を設定し (AX41: 三協立山・長岡技科大、AX92: 産総研、AX81(G): 権田金属、AX81(S)住友電工)、母材及び MIG 継手 (余盛り有り・無し) の疲労特性 (応力比: -1 及び 0) を評価した。名古屋守山分室において AX92 の疲労特性を評価した結果、AX92 母材の疲労強度は AZX611 (押出材) と同等もしくは高い値を示すことを確認した。また、MIG 継手の疲労強度を測定した結果、応力比が -1 、 0 の条件ともに、母材の結果と比較して約 50~60%の疲労強度が得られることを確認した。

TIG 溶接材の疲労限を調査した結果、MIG 溶接材の疲労限よりも低い値が得られた。

TIG 溶接材と MIG 溶接材の破壊は試験片中央部付近（溶接部）で生じており、TIG 溶接材と MIG 溶接材の疲労限の違いは、溶接部のマイクロ組織（結晶粒径、第二相粒子、溶接欠陥等）の違いに起因すると考えられる。

次に、FSW 材の疲労限を調査した結果、母材の疲労限よりも低いが、TIG 溶接材および MIG 溶接材の疲労限よりも高い値が得られた。これは FSW 材の組織が塑性加工材に相当する組織を有するとともに、溶接欠陥が少ないことに起因すると考えられる。

④-2 マグネシウム合金母材及び溶接継手の組織因子が疲労特性に及ぼす影響調査

組織因子に関する調査では、下限界応力拡大係数と溶接プロセスの関係について、き裂開閉口モデルにより検討した。そこでは、T110A 材の溶接部から切出した小型試験片による引張試験の結果を用いて、溶接材

のき裂開閉口応力比 σ_{op}/σ_{max} がとり得る値の範囲を検討した。T110A 材の ΔK_{th} 時の最大応力 $\sigma_{max} = 17.2\text{MPa}$ に対する σ_{op}/σ_{max} と降伏応力 σ_y の関係を図 III-2.3.1-1 中に破線で示す。 σ_{op}/σ_{max} は、この 2 つの破線と T110A 材および LD 材の σ_y の線で囲まれた範囲内の値をとると考えられる。図 III-2.3.1-1 から、T110A 材、T130A 材および MIG 材の実験値のプロットは、LD 材と T110A 材の σ_B および σ_y から予測した σ_{op}/σ_{max} の値がとり得る範囲内におおよそ位置している。言い換えると、適切な溶接条件の範囲では、図 III-2.3.1-1 に示した範囲内で溶接材の下限界応力拡大係数は変化すると考えられる。疲労亀裂伝播曲線を有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で整理した結果より、有効下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff,th}$ の値が求められるため、き裂開閉口モデルに基づく計算により σ_{op}/σ_{max} を見積もることで、 ΔK_{th} を推測できる。

以上の結果より、破壊原因の寸法（母材の場合は晶出物、溶接材の場合は溶接欠陥）、有効下限界応力拡大係数範囲、機械的性質（引張強度、降伏応力）のデータによって、母材および溶接材の疲労強度を評価できることが明らかとなった。

また、新規に開発した 3 種類の Mg-Al-Ca 系合金の疲労強度特性を一軸疲労試験により調査した。その結果、Al 添加量の多い順と等しく、AX92、AX81、AX41 の順に低い疲労強度を示した。AX41 および AX92 は、LD 材の方が TD 材よりもやや高い疲労強度を示したが、AX81 は疲労強度に異方性がほとんど認められなかった。AX92 は晶出物、AX81 は晶出物や欠陥が疲労破壊起点部に認められたが、AX41 の疲労破壊起点部に晶出物は認められなかった。AX92 については、疲労破壊起点となった晶出物の大きさと疲労き裂伝ば試験により得られた下限界応力拡大係数により、破壊力学的に疲労強度を整理することが可能であった。他方、AX41 については、き裂伝ば試験

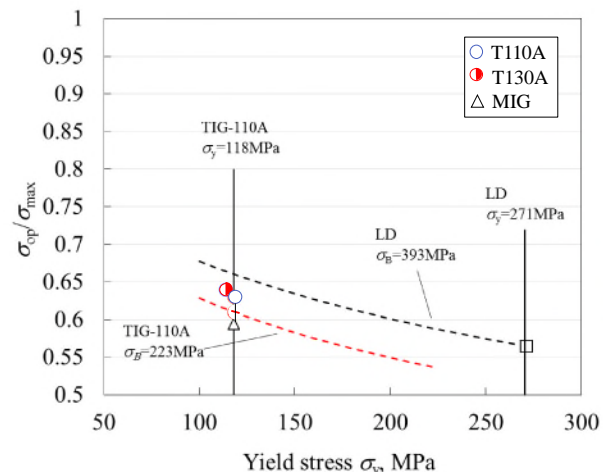


図 III-2.3.1-1 き裂閉口モデルによる σ_{op}/σ_{max} の予測 ($\sigma_{max} = 17.2\text{MPa}$)

により得られた下限界応力拡大係数から推定される、疲労破壊起点となり得る晶出物の最小寸法よりも、極値統計により推定した晶出物の最大寸法の方が小さかったことから、実験結果の妥当性を破壊力学的に確認することができた。

④-3 マグネシウム合金母材及び溶接継手の構造因子が疲労特性に及ぼす影響調査

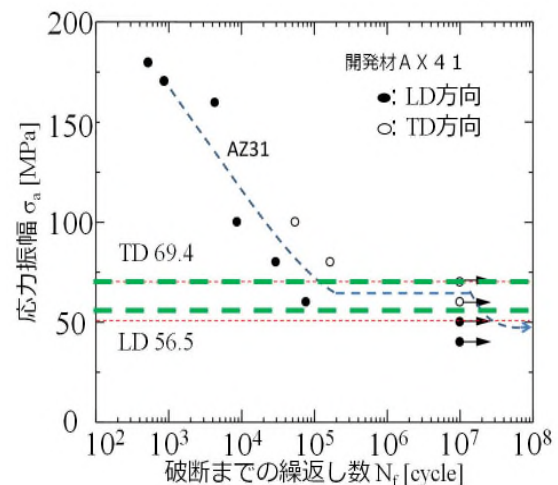
マグネシウム合金溶接継手の構造因子が疲労特性に及ぼす影響を破壊力学的検討により解明することを課題とした。2017年度は、これまでに開発してきた評価手法と、プロジェクトで取得した難燃性マグネシウム合金（開発合金）の疲労データを用いて、疲労強度を実際に予測・評価を行った。

本手法は、材料に含まれる晶出物（主に Al_2Ca 相）の大きさより危険体積中に存在する最大の非金属介在物の寸法を読み取る操作と、下式より導出される破壊力学特性から求められる疲労限度値から疲労強度を予測するものである。

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} \left(HV + 120 \frac{E_{Mg}}{E_{steel}} \right) (\sqrt{area})^{1/3}, \quad K_{I\ max} \cong 0.650 (2\sigma_w) \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

ここで、 ΔK_{th} は下限界応力拡大径数幅 [$MPa \cdot m^{1/2}$]、 HV はビッカース硬さ [kgf/mm^2]、はき裂寸法 [μm]、 E_{Mg} 、 E_{steel} は Mg および Steel のヤング率 [GPa]、 $K_{I\ max}$ は応力拡大係数 [$MPa \cdot m^{1/2}$]、 σ_w は疲労限度 [MPa] を表す。

図Ⅲ-2.3.1-2 は、開発合金 (AX41) 押出材の $R=-1$ における一軸疲労試験の結果と、上式より求められる疲労限度値（図Ⅲ-2.3.1-2 における緑の破線）をまとめた結果である。参考として、AZ31 合金の s-n 線図（図Ⅲ-2.3.1-2 における青の破線）も記されている。図Ⅲ-2.3.1-2 より、AX41 合金の寿命は、全領域において AZ31 合金のそれと同じであることがわかった。また、材料に含まれる晶出物の大きさと破壊力学特性から求められる疲労限度値はほぼ一致することがわかった。以上のことから、晶出物の大きさの特性と破壊力学特性を活用した疲労強度予測モデルが、品質管理や構体の強度予測に利用できることがわかった。



図Ⅲ-2.3.1-2 AX41 合金の疲労特性 (S-N 線図)(青の破線：AZ31 合金疲労特性、緑の破線：材料に含まれる晶出物の大きさと破壊力学特性からも求めた疲労極度値)

④-4 衝撃変形データベースの構築（高速圧縮・引張・三点曲げ変形挙動調査）

新たに開発された合金（AX41 合金）を対象として、2016 年度は高速圧縮変形挙動を調査し、A6N01 合金の結果と比較を行った。試験の結果、A6N01 合金と同様に AX41 合金の圧縮応力-ひずみ関係の異方性は低いこと、および、降伏応力のひずみ速度依存性は低いことを確認した。一方、同アルミニウム合金とは異なり降伏後に大きな加工硬化率を示すことがわかった。変形組織観察の結果、比較的

低い圧縮降伏応力と大きな加工硬化率の発現はマグネシウム展伸合金に特有の変形双晶形成に起因することを確認した。2017年度は、AX41合金を対象として、これまでに開発した評価技術を用いて、高速一軸引張変形挙動と衝撃三点曲げ試験による変形挙動を調査した。はじめに、AX41合金の高速一軸引張試験を実施した。LD方向(引張り方向//押出し方向)の結果に関しては、引張降伏応力は高い歪み速度依存性を示した。また、TD方向(引張り方向⊥押出し方向)の結果に関しては、引張降伏応力が歪み速度依存性を示さないことが確認された。また、変形方向に依存せず、歪み速度の増加に伴い、加工降下率が高くなるため、破断するまでに吸収するエネルギーは正の歪み速度依存性を示した。

次に、衝撃三点曲げ試験を実施した。その結果、亀裂発生時の荷重は押出平行方向と垂直方向で15%程度の差異を生じ、引張降伏応力で見られた大きな異方性を示さないことがわかった。また、亀裂進展速度の値に応じて、吸収エネルギーが変化することから、第二相粒子の分散状態を調整することにより、衝撃変形特性が向上する可能性があることを示唆する結果を得た。

以上の各種衝撃試験の結果から、A6N01合金と比較して、AX41合金は強度に高い異方性を有すること、衝撃引張荷重の作用に対して脆化することなく変形すること、亀裂の進展速度はカルシウムの添加により速くなるが、第二相粒子の分散状態を調整することにより、衝撃変形特性が向上する可能性があることがわかった。

④-5 衝撃変形データベースの構築（衝撃靱性評価）

板厚3mmからなる5種類の難燃性マグネシウム合金押出材および圧延材（AX41、AX92、AZX611、AZX612、AZX811）を用いて、衝撃靱性特性（シャルピー衝撃試験により得られる衝撃吸収エネルギー）に及ぼす試験温度の影響を調査した。

衝撃吸収応答に関しては、添加合金種および添加量に影響を受け、本測定温度域において、AX41やAX611合金の衝撃吸収エネルギーは、純マグネシウムよりも高い値を示した。一方、AZX811合金等は、純マグネシウムよりも低い衝撃吸収特性を呈した。（純マグネシウム押出材の値は以下の文献値を参考にした。

[Chino et al., Mater Trans 52 (2011) p.1123])

衝撃吸収エネルギーに関しては、試験温度に影響を受ける傾向にあり、前記合金群（AX41、AZX611）は、ある温度で急激な衝撃吸収エネルギーの上昇が確認できた。破面観察の結果、室温では変形双晶/母相界面の割れに起因した脆性的な破壊様相が観察されたが、180℃では、ボイド形成による延性破壊様相が確認された。一方、AZX811合金をはじめとする高濃度のアルミニウムもしくはカルシウムを添加した難燃性マグネシウム合金は、衝撃靱性応答に対する温度依存性が鈍感であり、純マグネシウムの衝撃吸収エネルギーよりも低かった。破面観察の結果、試験温度に関係なく、高温での試験においても、脆弱な破壊様相が確認された。上記の結果より、固溶量以上のアルミニウムやカルシウムが添加されると、Al-Ca系晶出物が破壊の起点となることが推測された。難燃性向上のためには、カルシ

ウム添加が必要であるが、過度の添加は、衝撃試験時における脆弱さを引き起こす要因になることが確認された。

室温近傍の衝撃吸収特性に関して注目すると、採取方向によって若干の違いがあるが、その差は極めて小さいことが確認された。また、遷移温度に関する傾向は、集合組織の違いを確認することは難しかった。以上のことから、衝撃靱性時の破壊形態や断面様相は、採取方向に依存した傾向を示さないことが確認された。なお、これまでに実施している純静的な靱性試験では、試験片の採取方向に依存した傾向が確認された。このことは、準静的および衝撃速度下の破壊メカニズムの違いに起因すると推測される。今後、衝撃引張や圧縮試験結果を交えた検証が必要である。

⑤ 新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築

疲労特性評価に関しては、ダブルスキン構体に適用される裏当て付開先溶接継手、開先隅肉溶接継手について疲労試験を実施した。その結果、これまで疲労試験が行われてきた突合せ溶接継手に比べて、約半分の時間強度となる結果が得られた。構体構造の設計指針に関しては、2軸応力状態における材料降伏条件の検証のため2軸引張試験によるデータを取得するとともに、2軸応力状態における疲労試験方法の検討をおこなった。さらに、2016年度の客室部一般断面の最大気密荷重に対する強度設計に加え、2017年度はJIS7106の各種荷重条件に対する構造検討を実施し、中ハリを除き1両分の構体構造として強度的な目途を得た。また、2016年度実施の一般断面の静的強度と車体曲げ剛性の各種検討結果を反映した簡易モックアップの設計を行った。上記検討に加え、床下機器を模擬した異種金属の機械締結部分を模擬した暴露試験を実施した。

⑤-1 構体の溶接部断面形状を用いた疲労試験

ダブルスキン構造に適用される溶接継手の疲労試験を実施した結果、2016年度までに得られた溶接部疲労強度よりも小さくなる結果が得られた。強度設計上、時間強度の向上が必要になったため、応力拡大係数の解析結果を基にした継手形状の改良検討を開始した。

⑤-2 材料の異方性を考慮した降伏評価

耐力の異方性を考慮した構造設計のために2軸引張試験を行い、張力場において、AX81Gについては、トレスカの降伏条件が、AX41については、押出方向、押出直角方向の耐力の比による修正を加えたトレスカの降伏条件で概ね安全側の評価ができる結果が得られた。

⑤-3 1車両構体の強度評価

2016年度に1車両構体のFEM解析モデルを作成し、JIS E7106：鉄道車両-旅客車用構体-設計通則に記載の荷重条件である垂直荷重、車端圧縮荷重、車端引張荷重、気密荷重、ねじり荷重、3点支持のそれぞれを用いた強度解析を実施した。その結果、構体の曲げ剛性を維持しながらアルミニウム合金製構体に対して約30%の軽量化の可能性のある結果が得られた。しかしながら、中ハリ、床板不連続部、妻構体、行き先表示機開口、ジャッキポイントにおいて、素材のAX41の耐力を超える応力値が発生

する結果が得られた。2017 年度はこれらの高応力発生部位の応力低減対策を検討し FEM 解析による強度評価を実施した。図Ⅲ-2.3.1-3 に 2016 年度の解析結果と 2017 年度の改良案の解析結果として車端圧縮(2017)、気密荷重(2017)、三点支持(2017)を比較して示す。中ハリについては、改良構造とすることで-400MPa 程度から-250MPa 程度まで低減することができたが、AX41、AX81G の耐力値を超えており、継続して応力低減の検討が必要である。

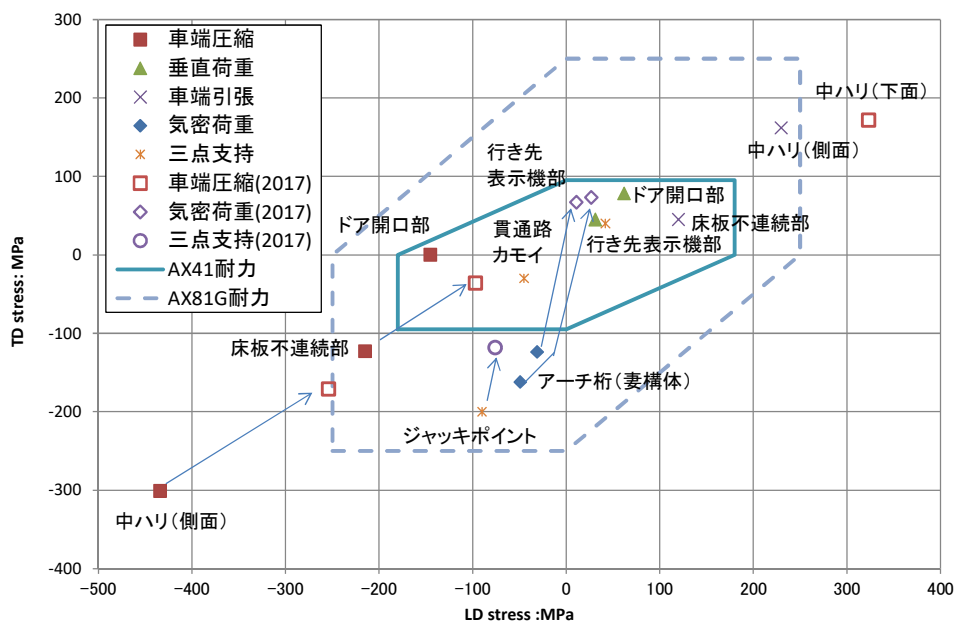
床板不連続部については、改良構造とすることで、応力値を AX41 の耐力以内とすることができた。妻構体のアーチ桁、行き先表示機開口部共に、改良案とすることで応力値を AX41 の耐力以内とすることができた。ジャッキポイントについては、改良案とすることで応力値を-200MPa 程度から-100MPa 程度まで低減することができたが、AX41 の耐力値を超える結果であった。この部位の材質を AX81G とすることで十分な強度が得られると考えられる。

⑤-4 モックアップ構体の設計

2016 年度に最大気密荷重と車体曲げ剛性の目途を付けた客室一般部構造を基に押出型材を試作した結果、内部リブの一部にメタルが流れない現象が発生した。このため一部の型材断面を見直し静強度と変形量を確認した上で客室一般部断面 1 窓開口長さのモックアップ構体を設計した。また、「ひとまわりした未来感」をコンセプトに Mg 合金構造をアピールする塗装エクステリアのデザインを行った。

⑤-5 暴露試験

2015 年度はリベット締結供試体、2016 年度は窓ガラス接着供試体の暴露試験体を作製し、2017 年度は床下機器吊下構造を模擬した供試体を製作し暴露試験を実施した。車両構体の床下に枕木方向に配置する Mg 製横梁の吊り溝に現行の新幹線車両と同様の特殊ボルト、ライナーを用いて機器を吊る構造を模擬した。機器箱の材質は鉄および AL に塗装を施した 2 種類を準備した。リベット締結および窓ガラス接着供試体と共に 2018 年 11 月に遮蔽暴露を実施した。



図Ⅲ-2.3.1-3 Mg 合金製構体の改良案 (2017) の強度評価

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.1-4 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	0	0	12	0	0	0	0	2	1
2015FY	0	0	26	0	0	0	0	3	1
2016FY	8	1	13	0	0	0	1	1	1
2017FY	4	0	19	0	1	0	2	2	2
合計	12	1	70	0	1	0	3	8	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-2.3.1-5 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	0	0	0
2015FY	1	0	0
2016FY	1	0	0
2017FY	0	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.2 [テーマ番号 16] 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討

2.3.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

エネルギー消費量削減や CO₂ 排出量削減は国際的な重要課題であり、運輸部門においては自動車に対する燃費規制や高速車両に対する省エネ化・高速化が求められている。なかでも高速車両においてはリサイクル性向上・メンテナンスコスト削減の観点からも実用金属中最も軽量であるマグネシウム (Mg) 合金の車両構体への適用が強く期待されている。適用のためには安全性 (難燃・不燃)、易加工性 (接合・補修が容易)、高耐食性、リサイクル性、低コストであることが求められるが、軽量化が求められる次世代高速車両用部材開発において、Mg 合金にカルシウム (Ca) を添加し発火特性を飛躍的に改善した「難燃性 Mg 合金」の材料特性 (機械的特性、生産性) を改善するための合金設計、構造体を作製するための大型展伸材 (型材・板材) の製造プロセス技術開発、開発した合金や展伸材の信頼性 (難燃性や耐食性) を確保するための評価技術およびデータベース(DB)の構築が重要となる。

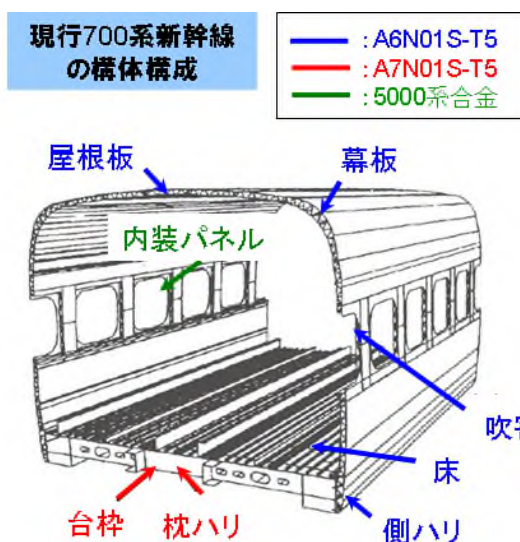
高速車両構体には現在、アルミニウム (Al) 合金が使用されている。構体を構成する主要部材 (屋根や側面) には Al 合金の中でも比較的中強度で生産性 (易加工性) に優れた A6N01 合金が適用され、現行の新幹線等では「ダブルスキン型材」と呼ばれる、複雑な断面形状を有する長さ 25m 程度の大型・長尺の押出型材が使用されている。しかしながら、当該押出型材に匹敵する強度と易加工性を兼備した Mg 合金押出材は未だ存在せず、大型化や長尺化を実現する押出プロセス技術も未構築である。一方、先頭構体や床部材にはより高強度の A7N01 合金押出型材や板材も求められる。板材では板厚 3 mm 以上の厚板を切削加工することで内装品やシングルスキン・インテグラルスキン材の作製が可能となる。さらに、作製板材の信頼性及び標準化の観点からは特性 DB 構築が重要であり、規格試験片適用のためには 3 mm 以上の板厚が望ましい。しかしながら、Mg 合金の板材作製に関してはこれまで薄板材の報告はあるものの、厚板材は皆無であり、塑性加工上では板材作製には圧延加工が向いている。しかしながら、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する Mg 合金中板・厚板圧延材は未だ存在せず、大型化や長尺化を実現する圧延加工プロセス技術も未構築である。

そこで本テーマでは、難燃性 Mg 合金展伸材の次世代高速車両用構体への実用化を目指し、強度と易加工性を両立する Mg 大型・長尺押出材と、高強度化を実現する Mg 圧延厚板材の工業レベルでの製造プロセス技術を確立することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体 (700 系新幹線) に使用されている Al 展伸合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。図Ⅲ-2.3.2-1 に示すように、A6N01 合金に関しては屋根板、幕板、側ハリ等に利用され、A7N01 合金に関しては台枠や枕ハリ等に利用されている。本研究開発では、開発材の次世代高速車両構体への実用化に主眼を置き、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性 (押出速度) を有する難燃性 Mg 合金押出材 (易加工性 Mg 押出材) と、A7N01 合金に匹敵する機械的

特性を有する難燃性 Mg 合金展伸材（高強度 Mg 材（押出材、板材（薄板・厚板））を開発することを目指す。また、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発合金をつなぎ合わせるための接合技術や、耐食性を付与するための表面処理技術が必要である。さらには、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術も構築する必要がある。そこで、開発した合金を接合するための技術、信頼性（疲労特性、発火特性、耐食性等）を評価するための技術についても開発を実施する。



図Ⅲ-2.3.2-1 現行の高速車両構体に使用される材料

表Ⅲ-2.3.2-1 に本テーマを担当する射水分室及び相模原分室における開発目標と根拠を示す。射水分室では A6N01 合金押出材に匹敵する押出加工性と機械的性質を有する易加工性 Mg 押出材を開発すること、相模原分室では A7N01 合金に匹敵する機械的性質を有する高強度 Mg 圧延厚板を得るための製造プロセス技術を開発することを目標として設定している。

これまでの先導研究において、易加工性 Mg 押出材の開発では Mg 合金（Mg-Al-Ca 系合金）の添加元素を希薄化させることにより、6000 系 Al 合金に匹敵する押出速度と機械的性質が得られることをラボレベルおよび工業レベルで実証できている^{1),2)}。また、高強度 Mg 厚板材作製の基礎的検討では、急速凝固に関する先導研究から急冷鋳造材は易加工性を有することを見出し、AMX1001（Mg-10Al-0.2Mn-1Ca mass%）合金材において、熱間多パス圧延による高強度化、加熱及び熱処理による延性向上及び耐熱性を有することをラボレベルにおいて確認している³⁾。本テーマの開発においてはこれら技術シーズを積極的に展開し、ターゲットとした各種車両構体部材に資する押出型材や圧延厚板材の製造プロセス技術を検討する。

表Ⅲ-2.3.2-1 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
易加工性 Mg 材 (押出材)の開発	引張強さ 270MPa 以上、伸び 20% 以上、AZX311 同等以上の難燃性、A6N01 合金同等以上の押出速度を達成する押出材を開発。	2018 年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	2018 年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	現行 A6N01 合金に匹敵する機械的性質を達成。 A6N01-T5(引張強さ 270MPa、伸び 12%)
高強度 Mg 材(厚板)作製の基礎的検討	A7N01 合金と同等以上の熱的安定性・機械的特性を有する引張強さ 360 MPa 以上、伸び 15% 以上の厚板材(板厚 6 mm)を作製するための鑄造、圧延手法調査。中板材は高強度高延性を有する幅広材(板幅 300 mm)を作製し、工業化と標準化を加速させる。	2018 年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	2018 年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	現行 A7N01 合金に匹敵する機械的性質を達成。 A7N01-T5(引張強さ 370 MPa、伸び 13%)

(3)全体計画

本研究開発においては、開発技術の輸送機器構造部材、特に高速車両構体用構造部材への適用可能性を絶えず評価・検証することにより研究開発を遂行する。

図Ⅲ-2.3.2-2 に射水分室、図Ⅲ-2.3.2-3 に相模原分室における研究開発全体計画をそれぞれ示す。「易加工性マグネシウム押出材の開発」に関しては、再委託先機関と連携し、Mg-Al-Ca (AX) 系合金を対象に、押出用素材となるビレットの量産製造プロセス技術と、A6N01 合金に匹敵する機械的性質と押出特性(引張強さ：270MPa 以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性)を有する大型・長尺押出型材の製造プロセス技術を工業レベルで構築することを最終目標とする。

「高強度マグネシウム厚板材の開発」に関しては、厚板の作製に必要な圧延用母材の製造プロセス技術と圧延・熱処理プロセス技術の開発において、名古屋守山分室(産業技術総合研究所)と合金開発・圧延基礎データについて連携をとり、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されているアルミニウム合金(A6N01、A7N01 など)との比較・検証を実施しながら最終目標を達成する研究開発を実施する。

目標:UTS \geq 270MPa、EI \geq 20%、難燃性:AZX311同等以上、押出速度:A6N01同等以上を満足する押出型材の製造を実現

【課題①】易加工性マグネシウム材(押出材)の開発
 ・開発合金のパフォーマンスを向上する押出材各種製造プロセス技術の高度化検討
 ・実機活用による実用化を見据えた押出型材の大型化・長尺化技術の検討

研究開発項目	概要、目標	担当
①高速押出合金の超大径ビレットの連続鍛造プロセス技術開発	開発合金の押出性を向上させるビレットの熱処理技術を開発し量産レベルへ展開、超大径ビレットの製造プロセス技術を構築する。	三協立山 再委託先
②輸送機器向け構造用大型・長尺出型材の高速押出加工プロセス技術開発	高速押出と難燃性を両立させる開発合金組成の調整を図りつつ、高速車両構体等の構造部材として適用可能な大型・長尺押出型材の製造プロセス技術を実機レベルで確立する。	三協立山 再委託先
③易加工性マグネシウム押出材の組織制御技術開発	難燃性と機械的性質を両立する開発合金の熱処理条件を最適化し、実機レベルでも目標の諸特性を発現するプロセス条件を組織学的観点から導出する。	再委託先 三協立山
④易加工性マグネシウム押出材組織の微視的解析	開発合金押出材のパフォーマンスに寄与する微細組織因子をマイクロスケールからナノスケールに及ぶ視野で解析し、各添加元素や析出物等が押出性や力学特性に及ぼす役割を解明する。	再委託先 三協立山

図Ⅲ-2.3.2-2 射水分室における技術開発の全体計画

【課題②】高強度Mg材(厚板)作製の基礎的検討(担当:権田金属工業(株))
 <最終目標>UTS \geq 360MPa、EI \geq 15%を達成する板厚6mm以上の幅広厚板材を作製するための鍛造、圧延プロセス技術を開発

研究開発項目	概要、目標	連携先
高速圧延合金作製のための溶解・鍛造・熱処理プロセス技術開発	鍛造時の冷却制御技術や熱処理技術の基本指針を確立。高強度・高延性を有する厚板材の作製に必要な幅広、厚板ビレットの製造プロセス技術を確立。	産総研
車両構体向け圧延厚板材開発のための加工プロセス技術開発	Al過剰添加難燃性Mg合金の強度と延性を両立する圧延プロセス指針をMg相の微細化や金属間化合物の微細分散、圧延加工前後の熱処理によって幅広厚板材で確立。	産総研

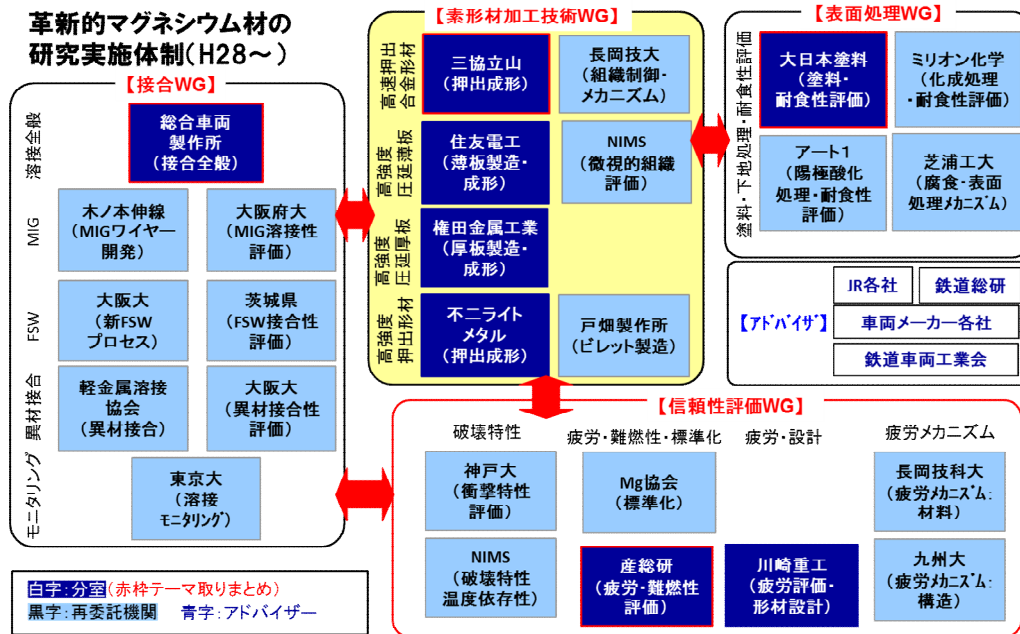
図Ⅲ-2.3.2-3 相模原分室における技術開発の全体計画

(4)実施体制

図Ⅲ-2.3.2-4 に革新的マグネシウム材の開発における研究開発体制を記す。本研究開発体制においては、8分室が共同で難燃性Mg合金展伸材を鉄道車両用部材(高速車両構体)に適用するための基礎技術を構築することを目指す。そこでは、素材の開発を担当する「素形材加工技術WG」、開発材料の接合技術を開発する「接合WG」、開発材料の耐食性評価技術と表面処理技術を開発する「表面処理WG」、開発材料の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「信頼性評価WG」を構成し、各WGが連携して課題の解決を目指す。なお、開発した合金の実用化に際しては、エンドユーザー(鉄道会社・車両メーカー)が低コストかつ安全に開発材を利用するための技術や、開発材を用いて構造体を設計するための技術等を見据えて研究開発を推進する必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーを参画研究機関(日本マグネシウム協会)のアドバイザーとしてプロジェクト内に招聘し、難燃性マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

本開発テーマを担当する射水分室及び相模原分室は素形材加工技術WGに属し、「易加工性マグネシウム材(押出材)の開発」を三協立山(株)、「高強度マグネシウム材(厚板)作製の基礎的検討」を権田金属工業(株)が担当する。易加工性マグネシウム

材（押出材）の開発では、押出材としての難燃性や機械的特性を維持しつつ、製造コストの大幅な低減を達成する易加工性マグネシウム押出材の特性調査と各種製造プロセス技術を開発する。また、高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討では、高強度厚板材の作製を実現するための凝固、熱処理、圧延加工プロセスについて調査、開発する。



図Ⅲ-2.3.2-4 革新的マグネシウム材の開発実施体制

(5) 運営管理

革新的マグネシウム材の開発に従事する全組合員（アドバイザーを含む）が参加できる分科会を毎月開催し、進捗の共有化と管理を図っている。具体的には、素形材加工技術WG、信頼性評価WG、接合WG、表面処理WGの分科会を順次開催、2015年度からは全組合員が参画するプロジェクト加速委員会も開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより研究開発を推進している（2017年3月末までに合計63回の分科会を開催）。また、分科会は研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、開発材料の機械的特性以外におさえておくべき特性、高速車両構体に難燃性Mg合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を議論する場としても機能しており、テーマ全体の進捗を調整する場としても機能している。

さらには、（一社）軽金属学会講演大会において、テーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を立ち上げ、開発テーマの遂行で得られた成果を集中して公開する場を設定している。2017年3月末までに計5回のテーマセッションを開催し、プロジェクトに関して合計70件の口頭発表を行い、プロジェクトの成果を対外に向けて定期的かつ積極的に配信している。また、2016年5月には、「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」と題した学会誌特集号にて、計10件の解説及び論文を掲載、成果の公表に努めている。

(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）

新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある⁴⁾。構体の軽量化は、CO₂排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を20%軽量化することができれば、それだけで10~20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある⁵⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は385台/年(2013年)であり、四輪車の年間生産台数(約1,000万台:2013年)の0.004%程度である^{6),7)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴うCO₂削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体(屋根・側構体、妻構体、台枠)に利用されるアルミニウム合金は1両当たり約7tである。上記部品を全てマグネシウムに置き換え、部品は同一形状であると仮定した場合、1両当たり約6tの需要が生まれることになる(マグネシウム置換により車両重量が10%減少する場合)。車両製造が1年当たり400両と仮定すると(385両:2013年)⁶⁾、2400tの需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約700t/年(2014年)であり⁸⁾、本開発テーマの成果により、仮に側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。それゆえ、本開発テーマの成果により輸送機器構造部材にマグネシウム合金の適用を加速させることが実現できれば、マグネシウムの産業構造自体を変革させることも可能である。

また、マグネシウム合金はリサイクル時の再生エネルギーが比較的低い環境配慮型の材料であり、本テーマの遂行においては切屑状で固化成形利用するか廃棄物処理する切削屑を溶解可能とする鋳造法も検討することで、省資源対策と環境負荷低減を推進している。このように、リサイクルに関する技術開発も先導的位置づけとして検討も進めており、本開発テーマを通して無駄なく素材を開発し、エンドユーザー側にはエネルギー効率の向上を通じた環境負荷低減を提案できつつある。

2.3.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.2-2に本開発テーマにおける第三中間目標とその達成度を示す。本テーマは2017年度末をもって他関連テーマと統合した。そのため、第三中間目標とその達成度については統合後のテーマ(テーマ34、35)の事業原簿を参照されたい。

「易加工性マグネシウム材(押出材)の開発」では、2015年度までに第一中間目標を達成し、かつ押出加工性や押出材の機械的特性、難燃性、接合性、耐食性(表面処理性)を総合的に考慮して開発した高速押出合金AX41合金を開発できた。2016年度は、第二中間目標の達成に向けて、当該合金の更なる高強度化を達成するプロセス技

術の高度化を推進した。その結果、ラボレベルにて第二中間目標を達成するビレット製造プロセス及び押出材製造プロセス条件を得た。同時に、当該開発材の高速車両構体用部材への実用化を想定した実機レベルの押出材の開発を実施し、開発合金 AX41 による部分側パネル構体に使用するダブルスキン型材の試作に成功している。2017 年度は実機レベルでの目標達成を見据え、AX41 合金の組成最適化と更なる高強度化プロセス技術を構築することにより、第二中間目標を実機レベルで達成できた。さらには、開発合金の高速車両構体への早期実用化を目指した実大サイズの簡易モックアップ構体（1/1 断面、長さ約 1m の車両部分構体）の具現化を実現すべく、開発合金による大型・長尺ダブルスキン型材の製造プロセス技術の開発を推進することにより、簡易モックアップ構体を構成する全 12 部材の作製を計画通り完遂した。

「高強度 Mg 材（厚板）作製の基礎的検討」では、難燃性、接合性などの諸特性に加え、トレードオフの関係にある引張強さと伸びを両立できる合金として AZX811（Mg-8Al-1Zn-1Ca mass%）を開発合金とした。2015 年度までに第一中間目標を達成し、2016 年度からは板厚 6 mm 以上で引張強さ 360 MPa、伸び 15%以上、AZX311 合金と同等以上の難燃性を有する Mg 厚板材作製に関する技術開発に着手した。2017 年度末には引張強さ 363 MPa、伸び 15%を得ることができ、第二中間目標値を達成した。

中板材（板厚 3 mm）は実機による圧延にて板幅 300 mm において引張強さ 357 MPa、伸び 14%を得たことから、板厚 3 mm 材において国内最大級幅の圧延材（板幅 520 mm）開発に着手し、機械的特性は現在高速車両構体に使用されている A6N01 合金相当の機械的特性を得ることができた。開発合金板材の難燃性は AZX311 合金を凌駕したことから、標準化するため JIS 規格化の提案を行い 2018 年 3 月 20 日に規格化された。開発合金の高速車両構体の早期実用化を目指し、技術開発を推進しながら側パネル構体、簡易モックアップ構体に資する部材を板材作製に加え、プレス加工による曲げ加工と切削加工を併用し予定通り作製した。

表Ⅲ-2.3.2-2 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
易加工性 Mg 材 (押出材) の開発	2018 年度以降、他 関連テーマと統合 しテーマ 34、35 に 移行。当該事業原 簿を参照。	—	—	—
高強度 Mg 材（厚 板）作製の基礎的 検討	2018 年度以降、他 関連テーマと統合 しテーマ 34、35 に 移行。当該事業原 簿を参照。	—	—	—

※◎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-2.3.2-3 に本担当テーマにおける最終目標の達成見込みを示す。本テーマは2017年度末をもって他関連テーマと統合した。そのため、最終目標の達成可能性については統合後のテーマ（テーマ 34、35）の事業原簿を参照されたい。

「易加工性マグネシウム材（押出材）の開発」では、大型実働機を使った工業レベルの技術構築が必須であり、実用化を見据えた極めて難易度の高い目標設定と言える。開発材の工業レベルでの更なる大幅な特性向上を目指し、当該テーマにおいては再委託先の長岡技術科学大学、物質・材料研究機構との連携を継続し、開発合金組成の調整も含めて、押出用ピレットの連続鑄造技術や熱処理技術を高度化するとともに、押出材の組織制御の最適化も考慮した押出ダイスの革新的な設計開発にも注力することにより、開発材の次世代高速車両用構体への実用化の実現を目指す。

「高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討」では、最終年度までに厚板幅広材を作製可能とする鑄造・圧延手法を調査するため、鑄造材作製時における溶湯清浄化や熱処理技術の適用、圧延時においては集合組織制御や加工プロセスのチューニングを行いながら指針を構築する。高強度高延性を有する厚板幅広材については、国内のみならず世界を見ても報告例が無く、実現できれば国際的に競争可能な技術を有することになる。幅広材は弊社所有の量産圧延機（幅 600 mm）を用いながら国内最大級幅 520 mm の圧延材にて技術構築しており、実用化のためには大型化に必要な作製プロセスの構築、板材の寸法精度向上の他に、接合性及び疲労特性に関するデータ、二次加工を可能とする成形性に関する特性取得が必要となる。特に Mg に関する疲労特性についてはデータ数に乏しいため、素材メーカーとして取得し、DB 構築に寄与する。また、板材の作製においては、接合や表面処理といった各 WG との連携によるフィードバックから、安全性及び信頼性を兼備する高強度 Mg 材（厚板）を開発することで、最終目標の達成をより現実的なものとする。

表Ⅲ-2.3.2-3 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
易加工性 Mg 材（押出材）の開発	2018年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	—	—
高強度 Mg 材（厚板）作製の基礎的検討	2018年度以降、他関連テーマと統合しテーマ 34、35 に移行。当該事業原簿を参照。	—	—

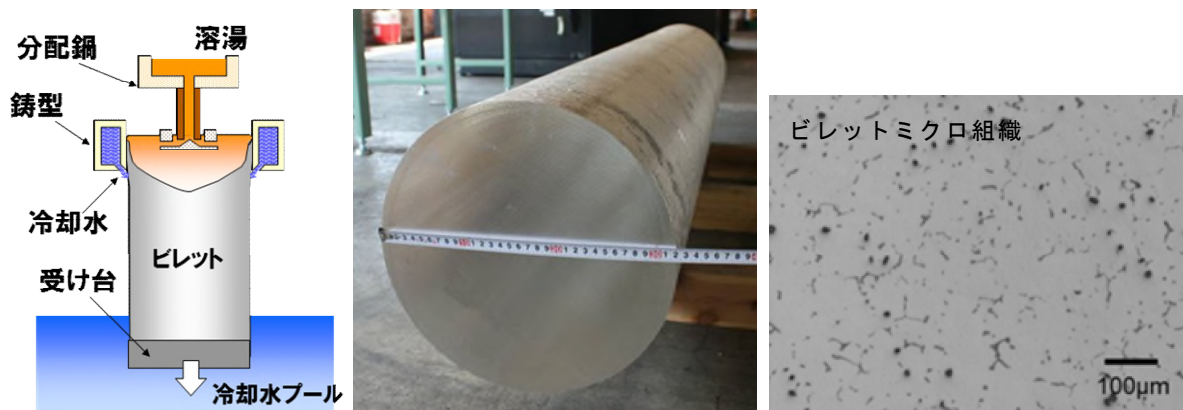
(3)研究開発の成果と意義

以下に本テーマ開発を担当する射水分室及び相模原分室における各研究開発の成果と意義について示す。

① 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【射水分室】

①-1. 高速押出合金の溶解～超大径ビレット連続铸造プロセス技術開発

2015 年度までに新規開発した、第一中間目標を達成する新規高速押出合金 AX41 (AXM40505) による超大径ビレットの連続铸造技術の構築を推進した。具体的には、当分室にて所有する実働量産設備を活用し、溶解量 700kg レベルでの溶湯を作製、押出加工性に特に多大な影響を及ぼす Ca、Mn といった添加元素の高精度成分制御技術や、酸化物等の不純物を分離・除去する溶湯清浄化処理技術の高度化を実施した。作製した溶湯はφ176mm（7 インチ）及びφ320mm（13 インチ）、φ377mm（15 インチ）の各鑄型に連続的に注湯し、DC 铸造ビレットを試作した。その結果、当該合金において各添加元素の溶解歩留まりを把握の上、Ca：狙い値±0.05wt.%、Mn：狙い値±0.1wt.%に成分を制御する技術を確立するとともに、フラックス精錬条件や脱ガス処理条件を改良、最適化することによりビレット品質の向上に繋げた。また、各鑄型サイズにおける铸造条件を見極め、直径φ320mm×長さ2300mm、同時2面铸造を実現するDC铸造プロセスを確立した（図Ⅲ-2.3.2-5）。また、2017年度においては第二中間目標を達成する開発合金 AX41 の添加元素量の最適化を試み、前記実働レベルにおいても内部品質を維持する AX41 (AXM4102) 合金 DC 铸造ビレットの作製を実証できた。



図Ⅲ-2.3.2-5 DC 铸造法の概略と作製した AX41 合金大径 DC 铸造ビレット（一例）

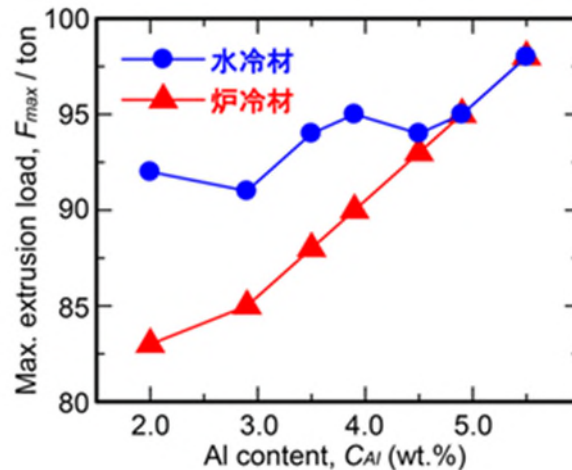
①-2. ビレット均質化処理プロセス技術開発

本研究開発では、押出加工性（押出荷重）に直接影響を及ぼすビレット均質化処理条件の最適化について検討した。再委託先機関と連携し、ビレット熱処理後の冷却速度に着目して押出加工性を向上させるメカニズム解明と処理条件の把握を試みた。実験では Ca、Mn 量一定とし、Al 量を変化させた各種 AXM 合金ビレットについて、均質化処理後に水冷もしくは炉冷を行い、押出加工に供した。その結果、Al 量が 3.9 wt.% 以下では、均質化処理後の炉冷により押出材の表面状態が改善する一方、4.5 wt.% 以上の Al 量では、均質化処理後の冷却条件を変えても押出材の表面状態に変化が認められないことを把握した。

また、Al 量と押出加工時の最大荷重の関係について調査した結果、Al 量が増える

ほど最大押出荷重は上昇する傾向があり、Al 量：3.9 wt.%以下の場合、均質化処理後の炉冷により最大押出荷重が顕著に小さくなる傾向が認められるものの、Al 量：4.5 wt.%以上では均質化処理後に炉冷を施しても最大押出荷重に変化が認められないことが分かった（図Ⅲ-2.3.2-6）。均質化処理後の炉冷により押出材の表面状態が改善し、最大押出荷重が低下したのは、炉冷により析出物が粗大化したことで押出時の変形抵抗が小さくなったことが要因として考えられる。

以上の知見は押出加工性を改善、向上させるマグネシウム合金の新規熱処理プロセス技術として特許出願済みである。



図Ⅲ-2.3.2-6 押出加工時の最大荷重に及ぼす Al 添加量の影響

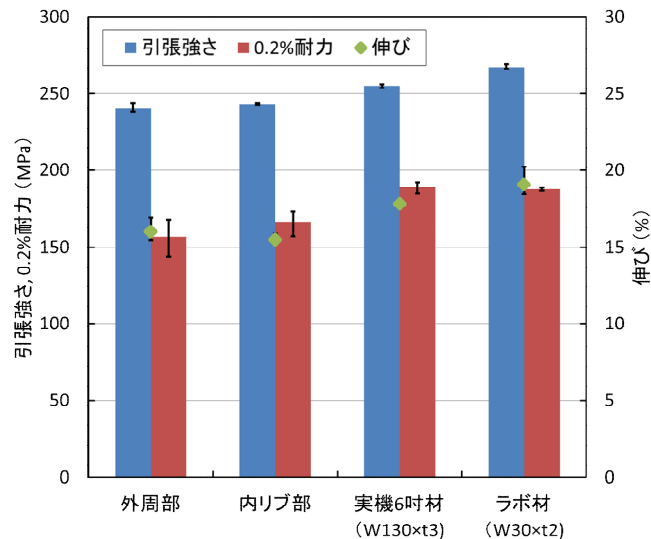
①-3. 輸送機器向け構造用押出型材の高速押出加工プロセス技術開発

第一期中間目標を達成した開発合金 AX41 (AXM40505) 合金による、実機レベルでの高速押出加工プロセス技術の構築を推進した。前述のビレット製造プロセスにて作製した AX41 合金 DC 鋳造ビレットを押出用素材として使用し、ラボレベルで得られた押出材との各種特性の比較評価を行った。

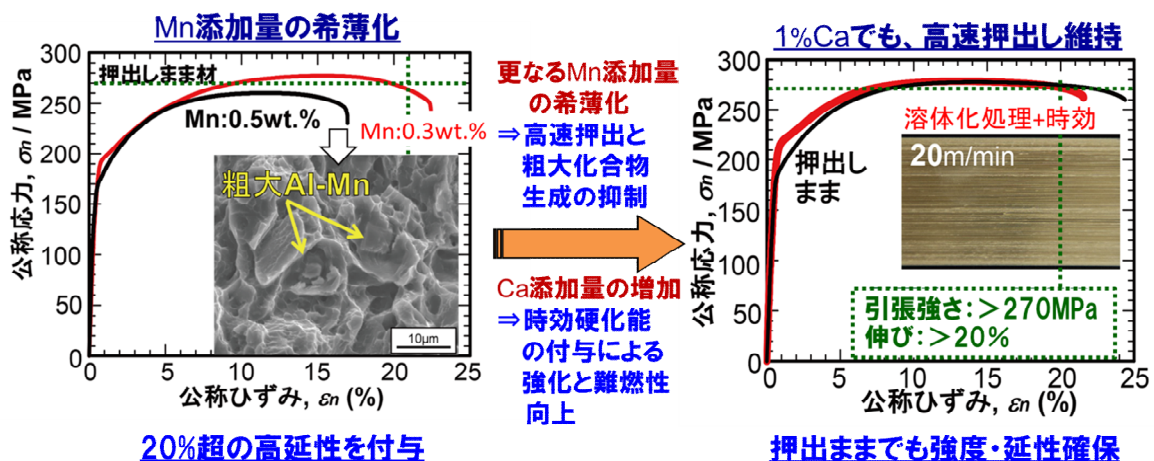
当分室で保有する 6 インチ 1500 トン実働押出機を用いて試作した AX41 合金押出材の諸特性を調査した。押出速度は AZ31 合金以上を確保し、得られた押出材の機械的性質もラボ試作材とほぼ同等レベル（第一期中間目標値）を維持することを実証した（図Ⅲ-2.3.2-7）。しかしながら、実機 6 インチ材の機械的性質においては、異方性が認められ、特に押出平行方向と押出垂直方向の 0.2% 耐力値に約 70MPa の差異が生じていることが分かった。この要因について、再委託先機関と連携し、押出材集合組織の EBSD による微視的解析を行った。その結果、実機押出材の耐力低下の要因として、実機押出材では結晶粒組織が粗大かつ比較的強い底面集合組織を呈しているため、押出垂直方向においては双晶変形の発生が活発化し、強度が低下したと推察された。

2017 年度は第二中間目標（引張強さ 270MPa 以上、伸び 20%、A6N01 合金同等以上の押出速度、AZX311 合金同等以上の難燃性）の達成を目指し、開発合金 AX41 の元素添加量の最適化を行った。再委託先の長岡技科大と密に連携し、難燃性の向上と時効硬化を活用するために Ca 添加量を 0.5mass% から 1mass% まで増やし、粗大な Al-Mn 系金属間化合物の形成を抑制するために Mn 添加量を 0.5mass% から 0.2mass% ま

で減らした AX41 (Mg-4Al-1Ca-0.2Mn ; AXM4102) 合金を設計した。図Ⅲ-2.3.2-8 に、AXM4102 合金押出材の引張応力-ひずみ曲線を示す。アルミニウム合金 (A6N01 合金) に匹敵する押出製品速度 20m/min において得られた押出材は、押出まま材において



図Ⅲ-2.3.2-7 AX41 合金における各種押出材の機械的性質

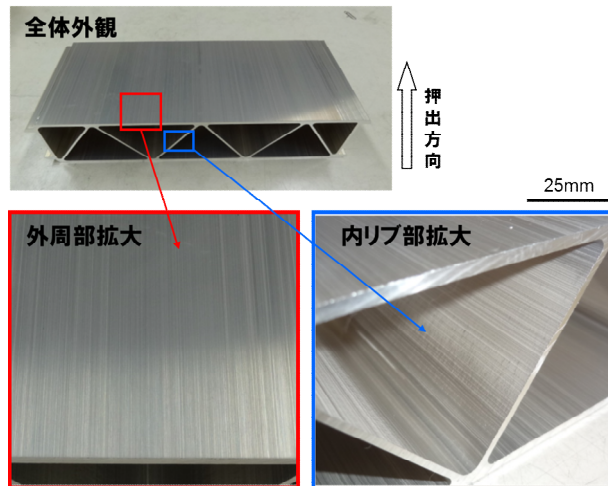


図Ⅲ-2.3.2-8 AX41 (AXM4102) 合金押出材の引張応力-ひずみ曲線

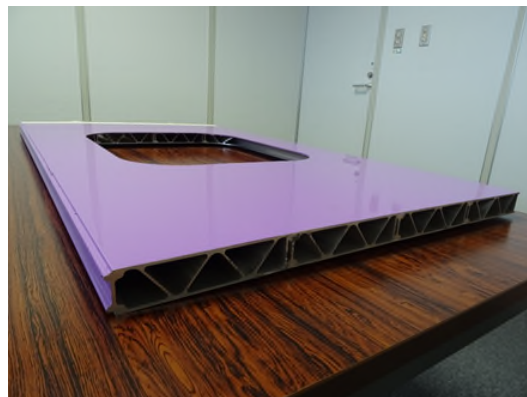
でも引張強さ 278MPa、伸び 23.6%を確保し、第二中間目標値を達成することを実証できた。また、名古屋守山分室と連携し開発材の発火温度を測定した結果、Ca 量を増量した AXM4102 合金は何れの昇温速度においても AZX311 合金以上の発火温度を示し、AZX311 合金以上の難燃特性を有することも実証している。

本研究開発では AX41 開発合金による車両構体への実用化を想定した複雑断面形状を有する大型中空押出型材の試作開発を推進した。当分室所有の 12 インチ 6000 トン実働押出機を使用し、従来からも検証を進めている幅 251mm、高さ 50mm の大型ダブルスキン形状の押出試作を当該開発合金にも適用した。その結果、AZ31 合金同等以上の押出速度 (1m/min.) にて外観品質及び JIS 規格を満足する高精度な型材の押出成形を実証できた (図Ⅲ-2.3.2-9)。しかしながら、図Ⅲ-2.3.2-7 でも示す通り、ダブルス

キン型材の外周部及び内リブ部の機械的性質はラボ材や実機 6 インチ材に比べて低い値となっている。本要因と対策については再委託先の物質・材料研究機構と連携し、ミクروسケールでの集合組織解析を実施しながら押出ダイスの設計改良等を継続検討し、特性向上を目指す計画である。なお、ダブルスキン型材の押出成形技術の開発で得られた知見は、本 Mg プロジェクトの参画機関と連携して試作開発を進めている部分側パネル構体向け部材の試作に展開、計画通り所定のダブルスキン型材を試作供給し、開発合金 AX41 による部分側パネル構体の具現化に貢献した（図Ⅲ-2.3.2-10）。



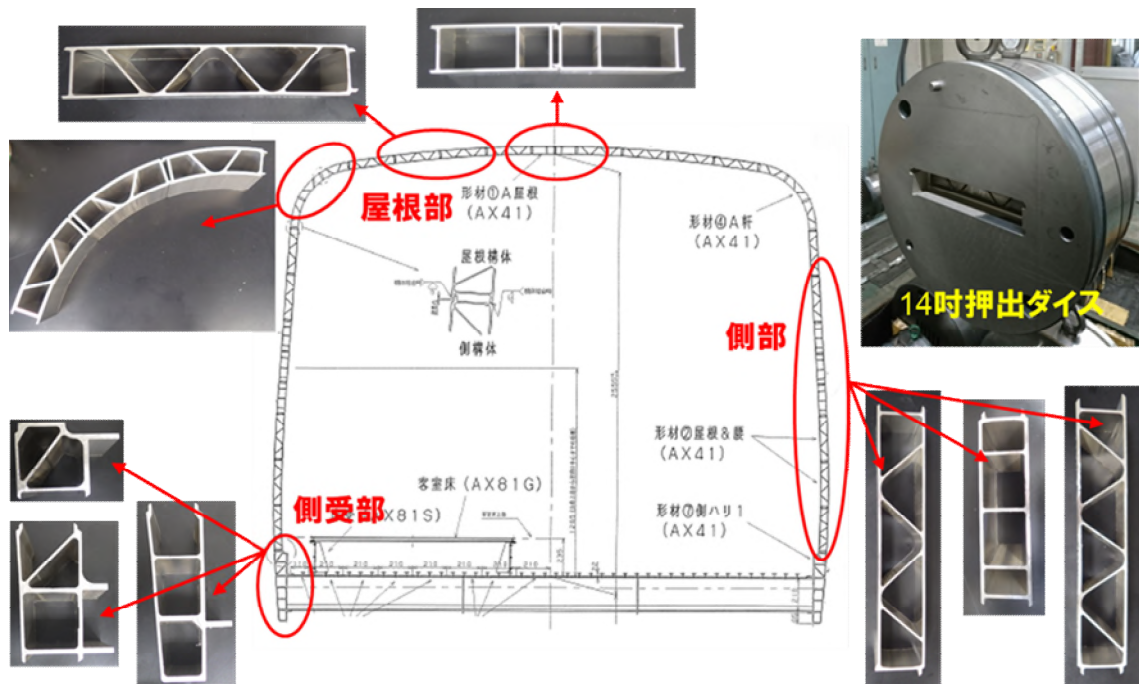
図Ⅲ-2.3.2-9 試作した AX41 合金ダブルスキン型材の概要



図Ⅲ-2.3.2-10 AX41 合金ダブルスキン型材で試作した部分側パネル構体の外観

さらに、2017 年度は開発合金による簡易モックアップ構体（1/1 断面、長さ 1040mm）の具現化を目標に、当該構造体を構成する大型・複雑断面形状を有した中空押出型材の製造プロセス技術を確立することを目指した。当分室では、簡易モックアップ構体を構成する部材の内、屋根部及び側部を構成する押出型材の試作開発を担当した。全ての部材は中空部を持つ複雑断面形状であり、ダブルスキン断面形状を有する型材の最大幅は 280mm を超える。当該構体の設計では、明石分室及び横浜金沢分室と密に連携し、最大気密荷重が負荷された際の最大変形量が 10mm 以下となるよう構造強度を確保するとともに、型材同士の継手形状においても組立時の MIG 溶接による変形を考慮し、調整がより容易にできるよう工夫を施した。また、使用する実働機（6000 トン直接押出プレス機）の性能と試作期間を考慮し、構成部材を全 12 型

として各部材の押出ダイス設計と押出型材の試作を実施した。図Ⅲ-2.3.2-11 に製作した押出ダイスの一例と試作した屋根部型材、側部型材、側受部型材の概要を示す。何れの押出型材においても、断面形状及び長手方向の曲がり量は JIS 規格値にて規定される型材精度を十分満足し、高精度の部材作製を実現できた。全ての部材は計画通り横浜金沢分室に供給し、目標通り簡易モックアップ構体の具現化に貢献できた。なお、当分室で試作、供給した大型中空型材は横浜金沢分室にて MIG 溶接により接合された。接合作業時において、各型材の精度上の問題は無く、良好な接合構造体が得られたことを確認できている。



図Ⅲ-2.3.2-11 製作した押出ダイスの一例と試作した大型中空型材の概要

また、大型・長尺中空型材の製造プロセス技術の確立に向けて、押出型材の真直度向上技術の開発を行った。当分室所有の温間ストレッチ矯正装置を活用し、図Ⅲ-2.3.2-8 で示した大型ダブルスキン型材の温間ストレッチ矯正を試行した。その結果、型材長さ 6m での温間ストレッチ矯正条件を把握、型材の曲がり量を JIS で規定される許容量 (2mm/m) の 1/4 (0.5mm/m) 以下に低減、真直度を大幅に向上させることに成功した。

①-4. 開発合金押出材の信頼性データ蓄積

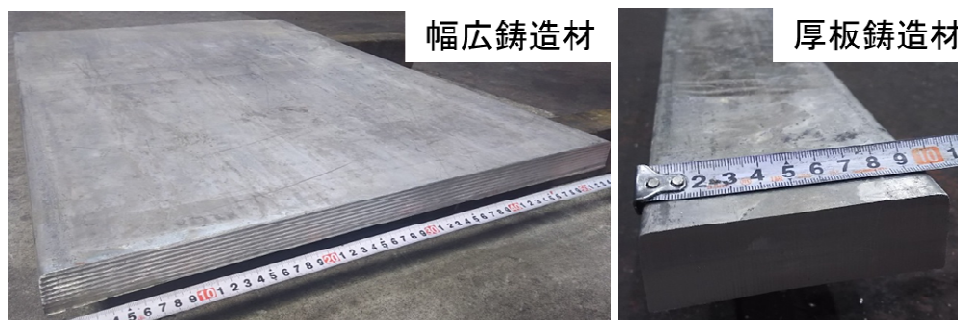
開発した新規高速押出合金による車両構体の試作開発を推進する上で、車両構体の設計時に必要となる開発合金の各種信頼性データ (疲労特性) を取得、蓄積することが極めて重要となる。本研究開発では、開発合金 AX41 押出材の疲労データを取得、蓄積することを目的に、押出材の疲労試験を開始、データの取得、蓄積を推進した。疲労試験では名古屋守山分室及び明石分室と連携し、押出材の平面曲げ疲労試験や回転曲げ疲労試験、軸疲労試験を効率的に行い、データの拡充、共有化を図った。今後

も押出材の接合試験体を主体に各種疲労試験を継続し、開発合金による車両構体の設計情報として活用していく計画である。

② 高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討【相模原分室】

②-1. 高速圧延合金作製のための溶解・鋳造・熱処理プロセス技術開発

2015年度までに得た溶解・鋳造・熱処理技術の知見を基に、開発合金 Mg-8Al-1Zn-1Ca (mass%、以下 AZX811 合金) の厚板・幅広鋳造材作製に関する技術開発を行った。鋳造材をスケールアップしてもラボスケール同様主要成分の濃度範囲を±0.2%以内、鉄分濃度を 30ppm 未満に制御できる溶解技術を確立した。鋳造時に晶出する金属間化合物は圧延加工時の動的再結晶粒の生成サイトとなり得るため、微細分散していることが望ましい。厚板鋳造材は冷却を付与することで Mg 相の粒径は 280 μm を示し β 相及び Al-Ca 化合物を微細分散できた。一方、幅広鋳造材 (図Ⅲ-2.3.2-12) は高温短時間の熱処理を施すことで β 相及び Al-Ca 化合物を固溶、微細分散させることができ、鋳造材を易加工化できた。ラボスケールで導出した熱処理技術は厚板・幅広鋳造材にも有効だった。作製した AZX811 合金は DTA により AZX311 合金以上の難燃性であることが確認できた。



図Ⅲ-2.3.2-12 AZX811 合金鋳造材外観像

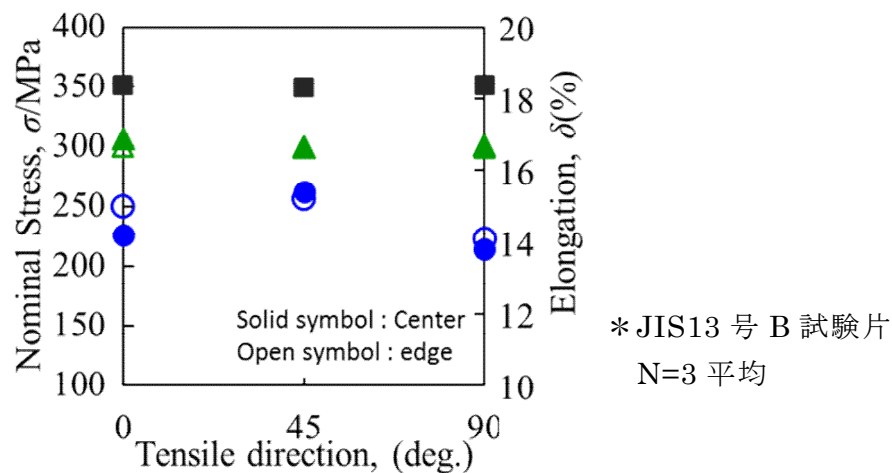
②-2. 車両構体向け圧延中板開発のための加工プロセス技術開発

②-2-1. 難燃性 Mg 合金板厚 3 mm 幅広材の機械的特性と工業化への取り組み

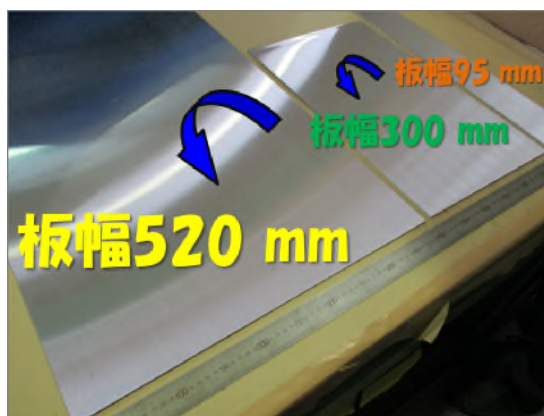
板厚 3 mm 材は 2015 年度までに開発した圧延加工プロセスの基礎的知見を基に、実機を用いた板幅 300 mm 材の加工プロセス技術開発を行った。圧延加工は粗圧延工程と仕上げ圧延工程に分け、高強度高延性化には粗圧延後の熱処理により Mg 相の粒径を 15~30 μm とすることが重要であった。このプロセスを適用することで板幅を 300 mm まで幅広化しても引張強さは 357 MPa、伸びは 14%を示し、高強度高延性を有する板幅 300 mm 材が作製できた。機械的特性の面内異方性も軽微であった (図Ⅲ-2.3.2-13)。実機による高強度高延性化を達成できたことから、国内最大級板幅 (板幅 520 mm) 圧延材の作製に着手した (図Ⅲ-2.3.1-14)。板幅中央および端部での機械的特性差は軽微であり、圧延方向に対し 0° 方向では引張強さは 330 MPa を示し、伸びは 13%であった。

なお、難燃性は AZX311 合金を凌駕したため、開発合金 AZX811 を標準化すべく JIS 規格化の提案を行い、2018 年 3 月 20 日付の改正により JIS H 4201 に定められる

展伸材規格に組み込まれた。



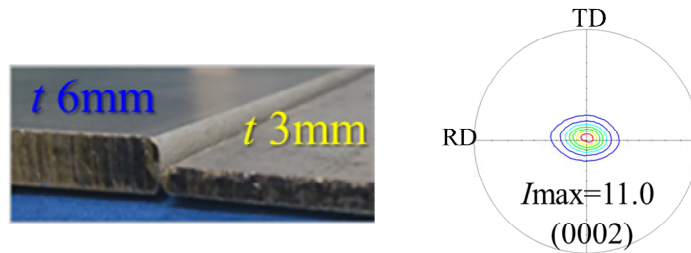
図Ⅲ-2.3.2-13 AZX811 合金板幅 300 mm 圧延板の機械的性質



図Ⅲ-2.3.2-14 AZX811 合金圧延板材の外観像

②-2-2. 難燃性 Mg 合金板厚 6 mm 厚板材の機械的特性

開発した板厚 3 mm 高強度高延性材作製のプロセスを基に、板厚 3 mm から板厚 6 mm への厚板化技術開発を 2016 度から着手した。厚板鋳造材の熱間多パス圧延のみでは高強度高延性化は困難であることから、2015 年度までの基礎的知見に基づき圧延条件をチューニングすることで引張強さと伸びは 363 MPa と 15%を示し、第二中間目標を達成した。この板材を XRD および EBSD による(0002)面集合組織の測定を行うと集合組織は圧延方向にわずかに広がりを見せた (図Ⅲ-2.3.2-15)。

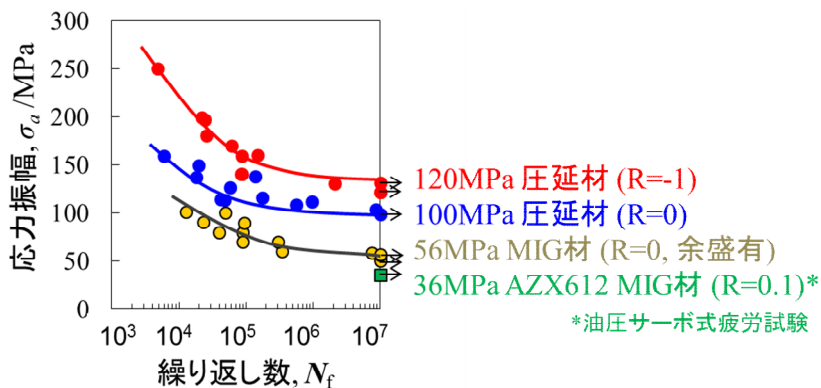


図Ⅲ-2.3.2-15 厚板圧延材の外観像及び板厚 6 mm 材の(0002)面集合組織

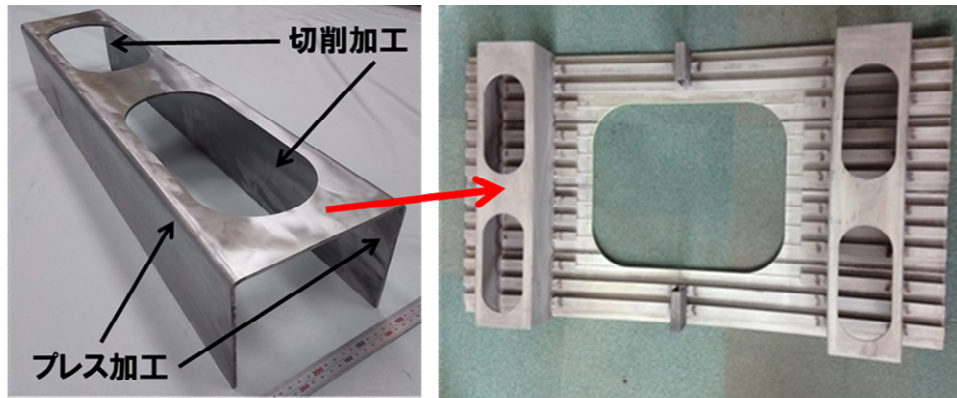
②-2-3. 難燃性 Mg 合金板厚 3 mm 幅広材の諸特性及び構体部材の作製

作製した板厚 3 mm 高強度高延性材の平面曲げ疲労強度は、繰返し数 10^7 回において、両振り（応力比 $R=-1$ ）で 140 MPa、片振り（応力比 $R=0$ ）で 85 MPa を示した。MIG 接合材では、余盛りを有していても $R=0$ および $R=-1$ の疲労強度は、汎用難燃性 Mg 合金以上であった（図Ⅲ-2.3.2-16）。TIG 材、FSW 材も同様に疲労強度を調査し、MIG 材と TIG 材は同等、FSW 材は母材と同等の結果を得たが、これは MIG 材は TIG 材と同様に熔融接合であり、FSW 材は摩擦攪拌接合により攪拌部の結晶粒と金属間化合物が微細化しているためと考えられる。

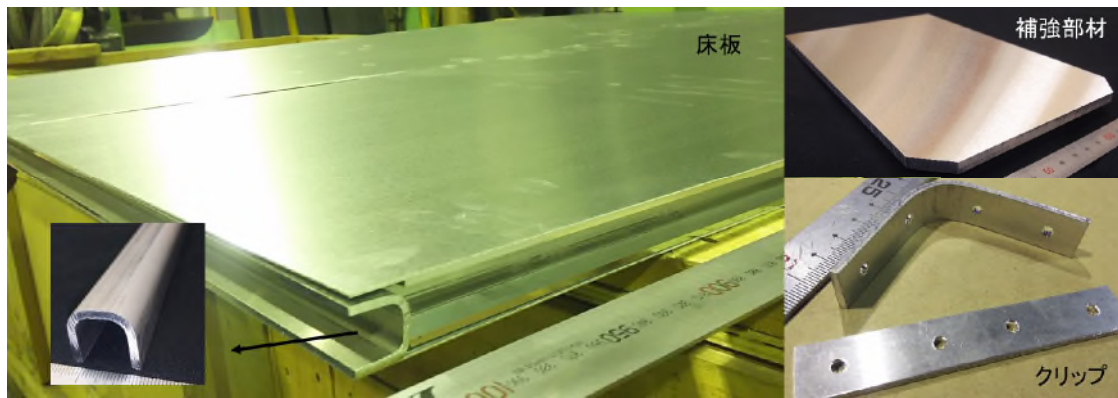
開発合金板材の高速車両構体の早期実用化を目指し、2016 年度は側パネル構体（シングルスキン）、2017 年度は簡易モックアップ構体の作製を通して技術構築を行った。側パネル構体に資する部材として側柱を作製し（図Ⅲ-2.3.2-17）、簡易モックアップ構体に資する部材として床板用板材、補強用板材、床板用骨組、クリップを作製した（図Ⅲ-2.3.2-18）。プレス加工を伴う部材は、加工温度を制御することで目的形状を得ることができ、開発合金を用いた構体製造を通して熔融接合等が可能であることが実証された。



図Ⅲ-2.3.2-16 板厚 3 mm 高強度高延性材の疲労試験（C 方向）



図Ⅲ-2.3.2-17 AZX811 合金側柱及びシングルスキン型材の側パネル構体の外観⁹⁾



図Ⅲ-2.3.2-18 AZX811 合金簡易モックアップ構体部材の外観像

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.2-4 に本テーマ開発において得られた論文、外部発表等の成果を示す。先にも示した通り、学会発表を中心に成果の外部発表を継続するとともに、2016年度は早期実用化（鉄道車両以外の用途開発）を想定し、プレス取材等による発表や雑誌掲載等、研究開発成果を積極的かつ戦略的に広くアピールしている。

表Ⅲ-2.3.2-4 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	1	0	1	0	0	0	3	0	0
2014FY	1	0	8	3	0	0	5	3	1
2015FY	2	0	21	2	2	2	5	1	1
2016FY	1	0	18	3	3	8	4	2	1
2017FY	2	0	9	1	0	4	5	0	2
合計	7	0	57	9	5	14	22	6	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-2.3.2-5 に本テーマ開発において得られた知的財産成果を示す。

表Ⅲ-2.3.2-5 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	1	0	0
2017FY	0	0	0
合計	3	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.3[テーマ番号 17] 高強度マグネシウム材(薄板)の開発

2.3.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金 (Mg-Al 系合金等) にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。

今後、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には2種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。A6N01 合金に関しては屋根板、幕板、側ハリ等に利用され、A7N01 合金に関しては台枠や枕ハリ等に利用されている。そこで、本研究開発では、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性(押し出し速度)を有する難燃性マグネシウム合金押し出し材(易加工性マグネシウム材)と、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金展伸材(押し出し材、板材(薄板・厚板))(高強度マグネシウム材)を開発することを目指す。

表Ⅲ-2.3.3-1 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
高強度難燃性 新合金の開発	・引張強さ $\geq 360\text{MPa}$ ・伸び $\geq 15\%$ ・AZX311 と同等以上の難燃性	2018年度以降、他関連テーマと統合しテーマ34、35に移行。当該事業原簿を参照。	2018年度以降、他関連テーマと統合しテーマ34、35に移行。当該事業原簿を参照。	7000系Al合金以上の比強度と伸びを実現

(3)全体計画

全体プロジェクトの中では、材料開発と並行して接合技術、表面処理技術開発を進めることで、2021年頃の早期実用化を目指す。

(4)実施体制

高強度マグネシウム合金薄板材の研究開発は大阪分室（住友電気工業株式会社）で実施している。

(5)運営管理

マグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる分科会を毎月開催し、具体的には、素形材加工技術 WG、接合 WG、表面処理 WG、信頼性評価 WG の分科会を4ヶ月に1回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、素材開発、接合技術、表面処理、信頼性評価技術の開発を共同で推進している。

(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）

新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある²⁾。構体の軽量化は、CO₂排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を20%軽量化することができれば、それだけで10～20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある³⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

2.3.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.3-2 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
高強度難燃性 新合金の開発	2018年度以降、他関連テーマと統合しテーマ34、35に移行。当該事業原簿を参照。	—	—	—

※◎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-2.3.3-3 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
高強度難燃性 新合金の開発	2018 年度以降、他関連テーマと統 合しテーマ 34、35 に移行。当該事 業原簿を参照。	—	—

(3)研究開発の成果と意義

Al 添加量の大きく異なる Mg-Al-Ca-Mn 系合金双ロール鋳造材に圧延加工を施し、圧延加工後の時効硬化特性や機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響を調べた。具体的には、Al を 0.7 mass% もしくは 9.0 mass%、Ca および Mn をそれぞれ 0.6 mass% および 0.15 mass% 添加した合金 (以下 0.7Al 合金、9.0Al 合金) を対象とした。検討合金の圧延まま材の機械的特性を調査した結果、0.7Al 合金は、仕上げ圧延温度 300℃ の場合、0.2 %耐力 268MPa の高い強度特性を示すが、仕上げ圧延温度を低く設定すると延性は大きく低下することを確認した。一方、9.0Al 合金の場合、仕上げ圧延温度を低く設定しても、10 %程度の延性を維持しつつ、350 MPa の引張強さと 295 MPa の高い 0.2 %耐力を得られることを明らかにした。さらに、検討合金の溶体化処理材およびピーク時効材の機械的特性を調査した結果、両合金とも溶体化処理を施すことで、20 %以上の延性が得られることを確認した。また、0.7Al 合金の場合、時効処理を施しても、25 %程度の高延性を維持したまま、0.2 %耐力は 80 MPa も向上することを明らかにした。一方、9.0Al 合金の時効処理に伴う 0.2 %耐力の強化量は 60 MPa と、0.7Al 合金よりも低く、さらに、延性は溶体化処理材の 1/2 以下にまで低下することを確認した。また、圧延 1 パスあたりの圧下率を大きくすることで、最終目標である引張強さ 360MPa 以上、伸び 15%以上の高強度、高伸びが得られることが明らかとなった。

以上より、Al を 7~10mass%程度、Ca を 0.5~1.5mass%程度添加した高 Al マグネシウム合金が難燃性高強度マグネシウム材として有望であると判断した。しかしながら、大きな圧下率での圧延は量産時には設備対応が難しいため、量産可能な水準でプロセス条件を検討する必要がある。1 パスあたりの圧下率(板厚減少量/圧延前板厚)及び圧延温度、熱処理温度のプロセス条件を最適化することで、量産可能な製造条件で引張強さ 360MPa、伸び 15.5%と 2017 年度目標値を達成した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.3-4 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	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	3	0	0	0	0	0	2
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	7	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-2.3.3-5 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	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

2.3.4 [テーマ番号 18] 高強度マグネシウム材（押出材）の開発

2.3.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材（型材・板材）を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術、及び耐食性を確保する技術が必要である。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目的とし、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、接合特性、耐食性等）を確保するための特性改善技術、評価技術の構築を目指す。

(2)位置付け、目標値

長洲分室では、高速車両構体のうち、床材、梁材といった、より高い機械的特性を要求される部材への適用を想定した、高強度材の研究開発を行っている。

表Ⅲ-2.3.4-1 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
高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa 以上 伸び：15% 以上 難燃性： AZX311以上を満 足する合金の開発	2018年度以降テー マ 34,35で研究を継 続実施。	2018年度以降テー マ 34,35で研究を継 続実施。	アルミニウム合金高強度材 A7N01に匹敵する機械的特性（引張強度：370MPa 伸び：13%） 2)

(3)全体計画

本研究開発では、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金（A7N01）に匹敵する機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金展伸材を開発することを目標としている。

(4)実施体制

本研究開発では、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。2016 年度以降は、2015 年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素形材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

各分室において 2016 年度までに得られた研究開発成果を結集し、2017 年度は鉄道車両構体の 1/1 断面形状モデル（構体長さ 1m）を作製するため 8 分室が協力して各部材の作製、組立、および表面処理を行った。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。長洲分室では、高強度材の研究開発を担当し、押出加工工程における研究開発を不二ライトメタル(株)が、溶解・鋳造工程における研究開発を再委託 1 機関が行う。また、ラボサイズの実験を名古屋守山分室（(国研)産業技術総合研究所）が行い、科学的根拠に基づく合金の設計指針、プロセス最適化において連携する。

(5)運営管理

本プロジェクトの研究開発における進捗報告および議論を行うプロジェクト特化会合、およびマグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる車両構体製作分科会を毎月開催している。具体的には、プロジェクト特化会合は素形材加工技術 WG、信頼性評価・標準化 WG、表面処理 WG、接合 WG を各 3 回ずつ、計 12 回開催している。この会合は、研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、合金組成を選定する上で機械的特性以外に押さえておくべき特性の抽出、高速車両構体に難燃性マグネシウム合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を行う場としても機能しており、プロジェクトの進捗を調整する場としても機能している。

また、2014 年 11 月に開催された軽金属学会秋期講演大会から設立されているテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」が継続して立ち上げられており、プロジェクトで得られた成果が公の場で議論されている。

2017年度は春期講演大会（2017年5月開催、名古屋大学）においてプロジェクトに関する口頭発表が計12件、秋期講演大会（2017年11月開催、宇都宮大学）において口頭発表が計13件報告され、以降も定期的に議論の場が設けられている。

(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）

新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。構体の軽量化は、CO₂排出量削減に寄与するばかりでなく、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を20%軽量化することができれば、それだけで10~20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は385台/年（2013年）であり、四輪車の年間生産台数（約1,000万台：2013年）の0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴うCO₂削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体（屋根・側構体、妻構体、台枠）に利用されるアルミニウム合金は1両当たり約7tである。上記部品を全てマグネシウムに置き換え、部品は同一形状であると仮定した場合、1両当たり約6tの需要が生まれることになる（Mg置換により車両重量が20%減少する場合）。車両製造が1年当たり400両と仮定すると（385両：2013年）⁵⁾、2,400tの需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約700t/年（2014年）であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。このように、本プロジェクトの成果により、輸送機器構造部材にマグネシウム合金の適用を加速させることができれば、マグネシウム合金産業構造自体を変革させることが可能である。

2.3.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.4-2 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
高強度マグネシウム材の開発	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。	—	—	—

※◎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-2.3.4-3 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
高強度マグネシウム材の開発	2018年度以降テーマ34,35で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	—	—

(3)研究開発の成果と意義

2017年度は、高強度の開発合金であるAX92合金ビレットの製造プロセスが合金組織に与える影響を調査した。従来の金型鋳造ビレット（以後、「従来方案ビレット」と記述する）と比較して、凝固組織が微細となるように鋳造方案を改良したビレットは、押出加工することでさらなる機械特性の向上が期待された。そこで、AX92合金について生産スケール材である直径12インチの大径ビレット（φ320×400mm）を上記の凝固組織が微細になる鋳造方案（以後、「改良方案ビレット」と記述する）により製作し、熱処理材の試作および評価を行った。製作したビレットを、熱処理炉を用いて熱処理時間および温度を変化させて熱処理を行い、組織観察およびビッカース硬さ測定を実施することで、化合物相の量や比率、マイクロ組織に及ぼす影響について評価を行った。その結果、改良方案ビレットは従来方案ビレットよりも凝固組織が微細であることを確認することができた。また、改良方案ビレットにおいても従来方案ビレットと同様に高温熱処理によってネットワーク状のAl₂Ca相が球状化することを確認することができた。

従来方案および改良方案ビレットにおけるビッカース硬さ測定を行った結果、改良方案ビレットは従来方案ビレットと比較して高い硬さが得られた。また、熱処理することにより硬さが上昇する結果が得られた。これは主要元素であるAlがMg母相中に固溶したことが原因であると考えられる。従来方案および改良方案ビレットを同一の押出条件で試験押出を行い、得られた型材の組織観察を行った。従来方案ビレット

押出材では、熱処理で球状化しきれなかった Al₂Ca が塊状に点在している。対して改良方案ビレットでは球状化・分散した Al₂Ca が支配的であり、明確な組織の差が確認された。AX92 合金について生産スケール材である 12 インチの改良方案ビレットは、その凝固組織が従来方案ビレットよりも微細であり、これまでと同様に高温熱処理を行うことで Al₂Ca 相が球状化する組織制御が可能であり、押出材組織も良好となることを確認した。

高速鉄道車両構体の 1/1 スケール断面簡易モックアップのうち、床材 2 種、横梁材 1 種の 3 種の形材について作製した。T リブ×3 床材は材料流動速度差が想定よりも大きく反りが発生したため、条件修正を行うことで JIS H 4204 を満足する形材を取得した。T リブ×1 床材は、溶接継手部の肉厚が厚く材料流動が速いため、断面の左から右に向かって曲がりが発生した。これに対して、押出条件を変化させることで良好な真直性を有する形材を取得した。これによって接合において問題となる隙間が無い良好な床板材の作製に成功した。

横梁材は長尺方向左右の反り曲がりが非常に激しくなる傾向にあったが、押出条件を繰り返し精査することで JIS H 4204 を満足する形材を取得することに成功した。当該部材の精度は押出速度に対する依存性が高く、適正な速度範囲を超過すると大きく曲がりが発生する傾向にあり、その速度範囲は非常に狭いことが判明した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.4-4 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	2	0	0	0	0	0	0
2015FY	0	0	3	0	0	0	0	0	0
2016FY	2	0	2	0	0	0	0	0	0
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	1	0	3	0	0	0	0	0	0
合計	4	0	10	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-2.3.4-5 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	0	0	0
2015FY	0	0	0
2016FY	1	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	1	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.5 [テーマ番号 19] 難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発

2.3.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。近年、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせる「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を統合的に実施する。

(2)位置付け、目標値

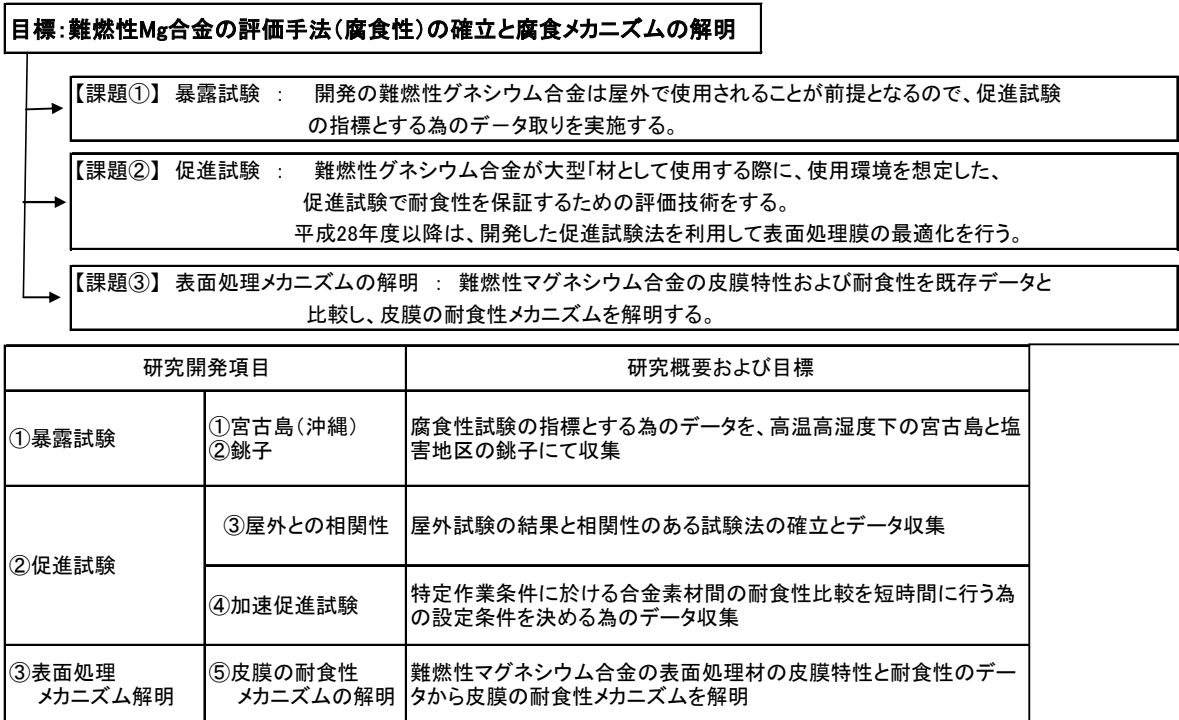
小牧分室（大日本塗料株式会社）と 3 再委託機関では、難燃性マグネシウム合金の信頼性を確保するための評価技術の構築することを目的として、屋外環境で難燃性マグネシウム合金展伸材を使用する際に耐食性を保証するための評価技術（評価基準）を構築する。具体的には、母材および表面処理材を対象として、実環境を想定した大気暴露試験及び腐食促進試験を実施し、実環境における耐食性、表面処理手法の効果に関するデータを取得する。また、大気暴露試験と腐食促進試験の結果を照合することにより、実用に則した促進試験手法を提案する。さらに、その過程において、難燃性マグネシウム合金大型展伸部材に耐食性を付与するために最適な表面処理方法を構築し提案する。また、難燃性マグネシウム合金表面処理材の腐食・耐食メカニズムを明らかにする。以下に、担当する研究内容について記す。

表Ⅲ-2.3.5-1 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
暴露試験	大気暴露試験1年目と追加試験のデータを取得。データ整理の実施。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	難燃性マグネシウム合金を屋外利用する基準を構築するために不可欠なデータ。
促進試験の策定と表面処理の適正化	大気暴露試験、促進試験の照合を行い、屋外で得られた結果に相関する結果を再現するための、腐食促進試験法を提案。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	既存の表面処理膜の性能を評価する上で促進試験法の策定は不可欠。また、表面処理法の最適化も、難燃性マグネシウム合金を屋外利用するためには不可欠。
耐食メカニズムの解明と防食効果の検証	化成処理皮膜の特性評価と防食効果の検証。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	表面処理膜（特に下地処理）を最適化するためには被膜構造の解明は不可欠。

(3)全体計画

本研究計画では、難燃性マグネシウム合金の信頼性を確保するための評価技術の構築することを目的として、屋外環境で難燃性マグネシウム合金展伸材を使用する際に耐食性を保証するための評価技術（評価基準）を構築する。



図Ⅲ-2.3.5-1 小牧分室における技術開発の全体計画

この研究開発項目を達成するために必要な計画を図Ⅲ-2.3.5-1に示した。

研究開発目標①「暴露試験」に関しては、宮古島（沖縄）および銚子において大気環境暴露試験を実施し、腐食性促進試験の指標となる基本データ（宮古島→高温多湿環境、銚子→塩害環境）を収集する。

研究開発目標②「促進試験」に関しては、塩水噴霧試験、塩水浸漬試験、サイクル試験等、各種促進試験を難燃性マグネシウム合金母材および表面処理材に実施し、大気暴露試験と照合を行うことにより、屋外環境を想定した促進試験法を提案する。

また、2016年度以降は、確立した促進試験法を用いて、大型車両構体に適した表面処理被膜(化成処理+塗料)の最適化を実施している。

研究開発目標③「表面処理メカニズム解明」に関しては、電気化学的手法や表面処理被膜の表面分析を介して、難燃性マグネシウムの腐食メカニズムを究明すると共に表面処理による効果特性を明らかにする。この際には、促進試験のデータ及び暴露に於ける腐食生成物の組成・構造を比較し、腐食メカニズムを解明する。なお、2015年度までは、対象とする母材は既存難燃性マグネシウム合金（AZX611合金やAZX612合金）とし、2016年度以降、材料WGにて新たに開発される新規開発難燃性マグネシウム合金を対象とする。

(4)実施体制

本研究開発体制は、これまで6つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指してきたが、その発展的見直しから、2016年度より実施体制を4つのWG体制に変更

している。そこでは、素形材の加工開発を担当する「素形材加工技術 WG」、開発材料の信頼性と標準化を目指す「信頼性・標準化 WG」、接合技術を開発する「接合 WG」、耐食性並びに表面処理を担当する「表面処理 WG」にて、各 WG が連携して課題の解決を目指す。

「表面処理 WG」では、小牧分室が主体となり、マグネシウム合金母材および表面処理材の耐食性を評価するための評価基準の策定と共に、及び耐食性の向上を目指す。この研究においては研究開発項目①大気暴露試験の実施を実施しデータ収集を行うと共に、データ解析を踏まえ研究開発項目②大気暴露試験と相関のある腐食促進試験方法の確立を目指す。また、塗装下地処理としての化成処理の最適化・それに合わせた塗料の最適化、陽極酸化皮膜の皮膜特性調査をも実施する。更に暴露結果等を基に研究開発項目③皮膜の特性調査、及び腐食メカニズムの検証を実施する。

一方で、他の WG との関係も重要視しながら開発を進めており、具体的には 2016 年度に新規開発されたマグネシウム合金の評価の為「素形材加工 WG」と、接合の耐食性評価の為「接合 WG」と、連携を取り評価と開発を進めている。

なお、開発した合金を実用化するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に開発合金を利用するための技術、および開発した材料を用いて構造体を設計するため技術等を見据えて、研究開発を推進する必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーを参画研究機関（日本マグネシウム協会）のアドバイザーとしてプロジェクト内に招聘し、難燃性マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

(5) 運営管理

マグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる分科会を毎月開催してきており、2017 年度以降も同様に討議を継続する予定である。具体的には、前述した実施体制の中で、「素形材加工 WG」「表面処理 WG」「接合 WG」「信頼性・標準化 WG」の 4WG が、2G 毎に隔月開催する分科会にて、各分室およびその再委託先の研究進捗を報告すると共に、非担当の WG ではその情報を聴講・質疑応答を重ねてゆく。この様にして、素材開発、信頼性評価技術の開発につき情報共有しながら推進してきている。分科会は、研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、合金組成を選定する上で機械的特性以外に押さえておくべき特性の抽出、高速車両構体に難燃性マグネシウム合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を行う場としても機能しており、プロジェクトの進捗を調整する場としても機能している。

また、軽金属学会秋期講演大会等でもテーマセッションを設立し、プロジェクトで得られた成果を公の場で議論する機会を設けてきた。今後も上記テーマセッションを定期的に継続し（年 2 回）、プロジェクトの成果を積極的に発信していく。

(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）

新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替した場

合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある¹⁾。構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を20%軽量化することができれば、それだけで10～20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある²⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

一方、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体（屋根・側構体、妻構体、台枠）に利用されるアルミニウム合金は1両当たり約7tである³⁾。上記部品を全てマグネシウムに置き換え、部品は同一形状であると仮定した場合、1両当たり約6tの需要が生まれることになる（置換により車両重量が10%減少する場合）。車両製造が1年当たり400両と仮定すると（385両：2013年）³⁾、2400tの需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約700t/年(2014年)であり⁴⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。この様に、本プロジェクトの成果により、輸送機器構造部材にマグネシウム合金の適用を加速させることができれば、マグネシウム合金産業構造自体を変革させることが可能である

2.3.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.5-2 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
暴露試験	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	—	—	
難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の耐腐食促進試験法の選定 難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の最適化	2018年度以降テーマ35で研究を継続実施。	—	—	

耐食メカニズムの 解明と防食効果の 検証	2018年度以降テーマ 35で研究を継続実 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-2.3.5-3 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
難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成、及び難燃性 Mg 合金製車両構体の表面処理仕様の確立（小牧分室：大日本塗料（株））	2018年度以降テーマ 35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】		
難燃性 Mg 合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発、及び難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成（ミリオン化学（株））	2018年度以降テーマ 35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】		
難燃性 Mg 合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明（芝浦工業大学）	2018年度以降テーマ 35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】		

(3)研究開発の成果と意義

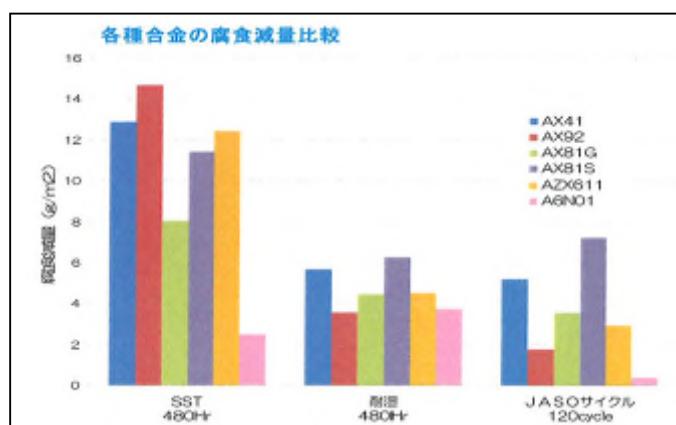
① 難燃性マグネシウム合金用塗装仕様の最適化及び腐食促進試験法の選定

【大日本塗料／ミリオン化学・アート1】

2016年度に確立した耐食性評価技術をもとに既存難燃性マグネシウム合金(AZX611、AZX612)母材および当該表面処理材の評価を継続すると共に、2015年度にその用途別に新規に開発された難燃性マグネシウム合金母材(展伸材：AX41、AX92、圧延材：AX81G、AX81S)についても追加評価を進めてきた。

<新合金の促進試験での比較評価結果（SST、耐湿、複合サイクル（JASOサイクル）>

=合金種別、母材の腐食減量評価=



表Ⅲ-2.3.5-4 腐食減量

素材	AX41	AX81G	AX81S	AX92	AZX611
試験後 外観					
腐食減量	5.18	3.56	7.21	1.77	2.96

図Ⅲ-2.3.5-2 CCT(JASO)での腐食状態

結果) 汎用マグネシウム合金 (AZX611) と比較し促進試験の種類によって、個々の合金で腐食減量のバラツキが認められた。但し、総じて比較対象とするアルミ(A6NO1)に比べると大きいものであった。(表Ⅲ-2.3.5-4、図Ⅲ-2.3.5-2)

=塗装品評価（塩水噴霧試験（SST）でのXカットからの糸状錆び評価）=

同じく、新開発合金に対する塗装の防錆に対する効果を確認する為、塩水噴霧試験（SST）での腐食性を確認した。なお、本工程は塗装2コートでの評価である
結果) ・圧延材では500Hではフクレ錆びなし。

・展伸材では、若干の糸錆発生（製造時の展伸工程の影響大と予測）

AZX611、AX41(共に車両外板材)においては、上記2コート（パテなし）仕様においては糸錆が若干発生した。よって化成処理工程に於ける脱脂剤強化と、実際に車両外板の接合部跡の被覆に供するパテ工程を組み入れた評価確認を進めた。その結果、脱脂剤強化見直しと、パテ工程を加えることで糸錆・フクレは改善され、且つ簡易化成処理と常温乾燥型塗料の組み合わせでも、従来の浸漬型の化成処理と焼付塗装を用いた試験片と同等の結果を得ることを確認した。

なお、2017年度末において、AZX611での評価では乾燥工程が組み込まれる複合サイクル試験（CCT）が屋外大気暴露試験と最も相関有るものと位置づけたが更に以下に記載する実暴露継続することで、新合金に対しても同様の傾向が確認されるかにつき暴露の継続にて更に詰める。

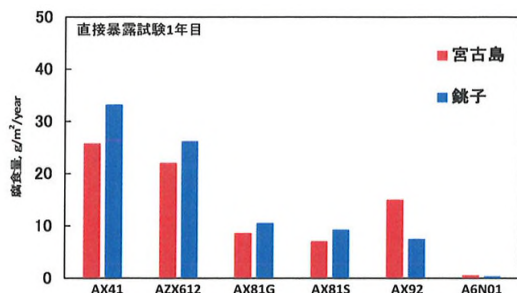
<屋外大気暴露状況と結果>

上記促進試験と共に屋外大気暴露は、沖縄(宮古島)・千葉(銚子)にて実施し気温・降雨・湿潤(結露)を加味し、直接暴露及び遮蔽暴露の2方式で実施した。

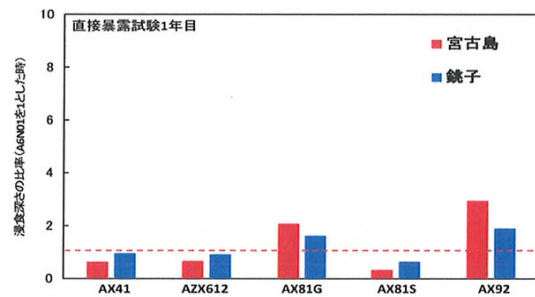
1) 新合金の暴露の結果について

新合金についてはまだ1年目であり、塗装品（表面処理品）については腐食等の著しい変化は認められていない。一方、母材の腐食減量は合金種別で差異が認められた。なお直接暴露では腐食量はアルミニウム合金より多いが、遮蔽暴露ではその差は少ない。腐食生成物（主に $Mg(OH)_2$ とそのLDH）が風雨で洗い流されたためと考える。尚、腐食深さについてはアルミニウム合金と同程度か浅めの傾向を示している。腐食深さ（＝孔食等）による強度低下に関し、同等若しくは有利に働く可能性もあり今後確認を継続する。（表Ⅲ-2.3.5-5・表Ⅲ-2.3.5-6）

=母材評価（腐食減量・及び腐食深さの評価）=



表Ⅲ-2.3.5-5 合金別腐食減量比較



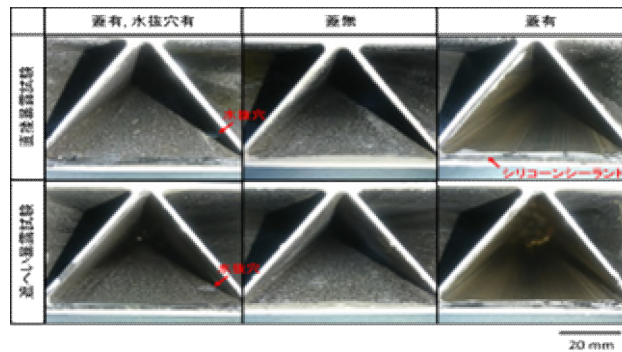
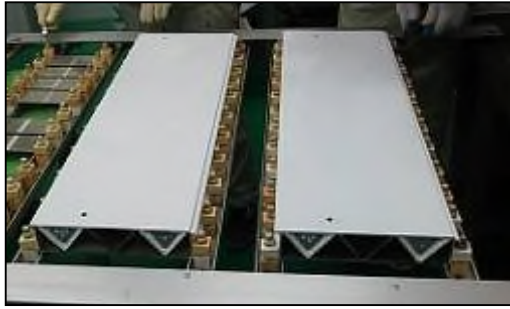
表Ⅲ-2.3.5-6 腐食深さ評価：アルミを1とした場合の深さ比

2) マグネシウム材の腐食の特徴（母材の腐食状況評価）

アルミニウム合金は腐食量が少ない一方で孔状腐食が見られ、マグネシウム合金は腐食量が多いが、浅く面積の広い腐食形態であった。

3) 新合金(AX41)ダブルスキン材の内面評価

車両外板のダブルスキン形状の内面腐食に関し、2016年度に引き続き同様に新規マグネシウム合金での1年後の腐食状態を評価した。



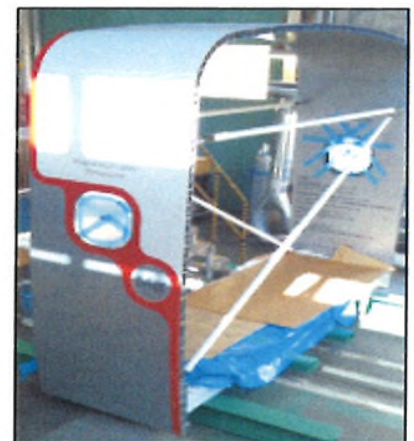
図Ⅲ-2.3.5-3 各種暴露試験条件による腐食の差

この内面腐食に関し、開発品は既存品と比べ大きな腐食の差異は見られていない。その評価は、『端面を封じたもの』『開放系のもの』『一部水抜き穴を設けたもの』につき評価実施したがいずれも試験条件でも 2016 年度報告したものとその傾向には差異は無かった。よって、新素材 (AX41) については、ほぼ既存品 (AZX611) とほぼ同レベルの腐食進行状況であると考ええる。

尚、2017年度は、これらの新合金に対しては接合技術も開発されたため、接合部位の腐食性評価も開始した。具体的には試験片は接合したAX41-AX41材、AX41-AX92材、AX92-AX92材、AZX611-AX81G材、AZX611-AX81S材、A6N01-A6NO1材での母材、塗装品についての沖縄・銚子での暴露評価の開始に至った。

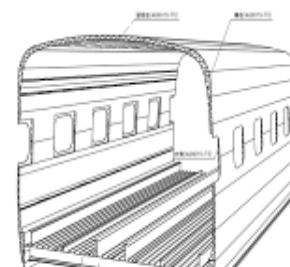
<実構体への表面処理適用にあたり>

加えて、実構体に於ける各種難燃性マグネシウム材の採用部位毎の要求特性とそれに対応する表面処理仕様の抽出を行ない、その塗装仕様別の耐食性評価を開始した。その前段として、2017年度末には1/1モックアップ構体の表面処理作業を通じ実用に即した課題抽出も実施してきた。モックアップの表面処理(化成処理、塗装)を実施する一方で、実構体を考えるとこれまで検討してきた外板部位以外にも様々な塗装部位が想定される中で、その仕様につき要求性能・コストも含め課題を抽出した。具体的には車両外板以外にも「梁」「床板」「底板外面・内面」部位が存在しパテ・サフ・上塗が不必要な部位も存在する。よってそれらの塗



装仕様につき、一部先行での屋外大気暴露も開始した。以下に想定しうる仕様につき表記した。

部位	素材	塗装仕様				
		化成処理	塗 装			
			プライマー	パテ	サフ	上塗
外板(表面)	AX41	●	●	●	●	●
外板(内面)		(○)	●			●
中空型材内部		(○)				
底板(外面)	AX81	●	●			●
底板(裏面)	AX92	(○)	●			
張部		(○)	●			●



表Ⅲ-2.3.5-7 追加評価する表面処理仕様について

今後、実用化に向けてのモデル構体の作成時にはこの確立した塗装仕様にて表面処理を実施し、作業性についても確認と適正化を行う。

② 難燃性マグネシウム合金の化成皮膜系塗装下地処理膜の最適化

【ミリオン化学】

2016年度に進めた新合金上の塗膜の適切な評価方法と下地処理の最適化をさらに詰めてきた。特に、年度末のモックアップ構体の化成処理工程を通じて実用化の課題の抽出も行った。

今後更に母材の腐食性のブレを含めた最適化を進める一方、接合部への化成処理の効果や、化成処理が困難である対象部位への対応につき表面処理仕様の確立を行う。

<AX41材に対する最適化検討>

前述の様に既存合金にて最適化した表面処理仕様では、展伸材 AX41 材において2コート（パテなし）仕様において若干の糸錆フクレが発生した。よって化成処理工程に於ける脱脂剤強化と、実際の車両外板の接合部凹凸を被覆する役目となるパテ工程を組み入れた評価確認を進めた。特に本化成処理工程は簡易処理であることから短い工程で如何に皮膜前の表面調整をするかも鍵となるため事前の脱脂強化を図り、且つ実工程であるパテ工程を加えた試験も併せて実施した

脱脂剤強化により耐食性が良化され、パテを加えた試験片からはフクレ幅(=0mm)が確認されなかった。これは簡易化成処理ながらも、従来の一般的なマグネシウムの表面処理方法である浸漬型の化成処理と焼付塗装を用いた試験片と同等結果でもある。また、パテを加えた試験片の密着性についても平均 2.4MPa と焼付塗装の密着性と同等の結果を得た。以上から AX41 に対する耐食性向上検討からパテを加えることで浸漬型の化成処理と焼付塗装を用いた試験片と同等の結果を得た。

<モックアップ構体へのシャワー型化成処理施工>

簡易モックアップ構体に対して現行のシャワー型化成処理を用いて施工を行った。ラボ試験との比較においては処理後にムラが多い外観となった。この要因として

は、外側の天井を処理しているときの化成処理液が側に垂れることによりムラが発生したものである。ムラの有無による皮膜量の差はあるものの性能に影響を与える程度ではないとは考えるが、今後確認を進める。本モックアップの処理を通じ知り得た課題としては、足場と構体の向きを確認すること。また噴霧機の噴霧可能長さとして足場から構体までの位置関係を明確にする事が挙げられる。



図Ⅲ-2.3.5-4 モックアップ構体へのシャワー型化成処理後外観

③ 難燃性マグネシウム合金の陽極酸化皮膜系塗装下地処理膜の性能評価 【アート1】

2015 年度に開発された新たな難燃性マグネシウム合金上での耐食性評価ならびに接合材上での陽極酸化を用いた塗装下地処理膜の性能について確認し、促進試験にて更にその上から塗装する焼付塗装膜との適正化(マッチング性)を進めた。その結果、塩水噴霧試験 600 時間以上：カット有りを確保した。よって「陽極酸化皮膜系塗膜下地処理」による防食技術は目標性能を達成しており今後はその陽極酸化処理工程（浸漬処理）から内装小物部品に適応するべく展開する。今後の車両構体に関しては、外装大型構体開発が主流となる為、本テーマにおける陽極酸化皮膜の研究開発は 2017 年度で終了とする。

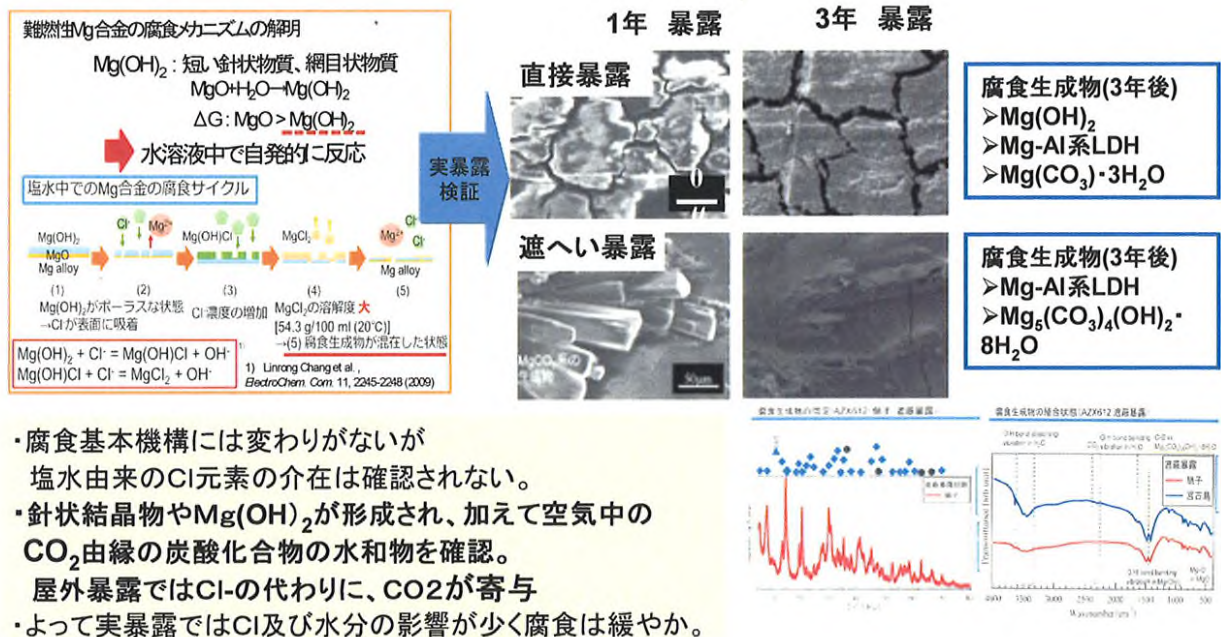
特に 2017 年度は、2016 年度に最適化を行ったノンマンガン系の陽極酸化膜を用い接合部位の最適化を行った。供試材としては AZX612 と AX81G または AX81S との接合材を用い、各種陽極酸化膜を作製し、常温硬化塗料系または焼付硬化塗料系にて塗装後カットを入れ塩水噴霧試験を実施した。試験時間は 600 時間まで行った。焼付硬化塗料系+陽極酸化の条件において、母材含め、MIG 接合材、TIG 接合材、FSW 接合材において、塩水噴霧試験 600 時間の目標を達成した。但し厳密な外観評価をすると合格範囲内ながらも TIG・FSW 溶接部位が若干悪く、腐食に対しては接合方式による差異が発生している。今後はこの傾向が AX41 を用いた車両構体接合部位にも発生されるかにつき確認する。

④ 難燃性マグネシウム合金表面処理材の耐食メカニズムの解明 【芝浦工業大学】

2016 年度に引き続き、開発した溶液種を用いた浸漬実験を行った。これにより、暴

露試験片の解析と加速試験溶液中（塩水）への浸漬実験、および電気化学的手法で得られた耐食性に関する特性データを突き合わせることで耐食性との関連性につき明らかにした。

特に 2015 年度では促進試験にて腐食のメカニズムにつき仮説を立てたが、2017 年度では 3 年間の暴露の結果が明確となった為、腐食性生物の解析と共に、その検証を実施した。(図 III-2.3.5-5)



- 腐食基本機構には変わりがないが塩水由来のCl元素の介在は確認されない。
- 針状結晶物や $Mg(OH)_2$ が形成され、加えて空気中の CO_2 由縁の炭酸化合物の水和物を確認。屋外暴露ではCl-の代わりに、 CO_2 が寄与
- よって実暴露ではCl及び水分の影響が少く腐食は緩やか。

図 III-2.3.5-5 腐食のメカニズム検証

また、マグネシウム材に対する難燃性付与の為の微量添加元素(Al,Mn,Ca)の影響に関し、表面電位の測定では晶出する Al_2Ca 部が α -Mg に対し表面電位差 (-0.1~-0.3V) を生じており、これが要因となって析出化合物はカソードサイトとして働く為に、局部電池の駆動力となり腐食を促進することが判明した。(図 III-2.3.5-6)

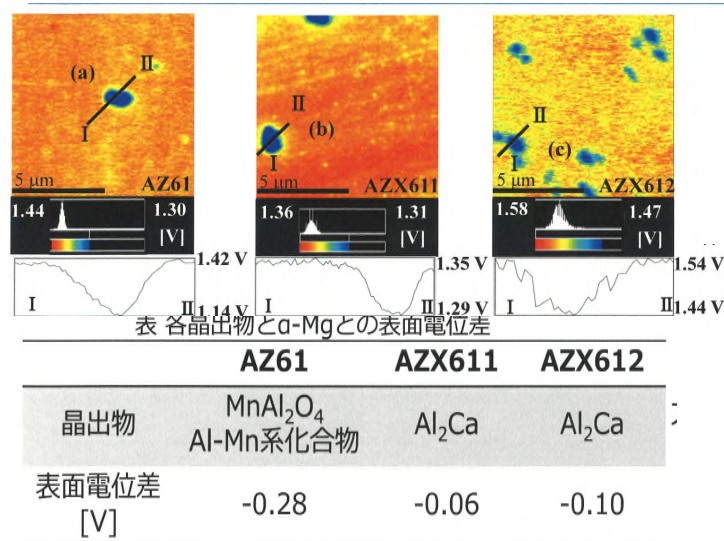


図 III-2.3.5-6 各種合金の表面電位

合わせて晶出物のサイズの増加に伴い電位差は増加傾向にある為、マグネシウム材の製造過程に於ける結晶構造の大きさでも腐食レベルが異なる可能性が存在する。（マグネシウムの腐食性能ブレの一因であるとも考える）又局部電池の駆動力のみならずその反応サイト数（晶出物の分布量・面積比率＝Al₂Ca）も腐食のレベルを左右する要因でもあることが判明した。

具体的には上図のような局部電池が形成され腐食が進行するものであるが、その駆動力は晶出する微量添加元素による電位差が影響するものであり、例えば AZX611 と AZX612 を比較した場合には、AZX612 が電位差が大きい。よって AZX612 が局部電池の駆動力が大きく腐食もしやすい。尚 AZ61 については駆動力が最も大きいものの、反応サイト（晶出物の分布）が少なく、腐食量は少ない。

よって、晶出物の面積率も腐食に対し影響する事がわかった。

よって特に今後実構体作成時に於けるマグネシウム母材のスケールアップ製造に関し腐食性変動が予測される中、その要因とプロセス因子についても予測すべく、今後実構体での皮膜作製および塗装処理の条件にフィードバックさせるものとする。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.5-8 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	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	4	0	0	0	0	1	1
2016FY	1	0	6	0	0	0	0	1	1
2017FY	0	0	5	1	0	0	0	0	2
合計	1	0	15	1	0	0	0	2	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-2.3.5-9 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

2.3.6[テーマ番号 20] 難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発

2.3.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材（型材・板材）を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術および耐食性を確保する技術が必要である。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目的とし、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、接合特性、耐食性等）を確保するための特性改善技術、評価技術の構築を目指す。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。A6N01 合金に関しては天井外板、妻外板、側外板等に利用され、A7N01 合金に関しては台枠やまくらばり等に利用されている。そこで、本研究開発では、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性（押し出し速度）を有する難燃性マグネシウム合金押し出材（易加工性マグネシウム材）と、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金展伸材（押し出材、板材（薄板・厚板））（高強度マグネシウム材）を開発することを目指す。

なお、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発合金をつなぎ合わせるための接合技術や、耐食性を付与するための表面処理技術が必要である。さらには、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術を構築する必要がある。そこで、開発した合金を接合するための技術、信頼性（疲労特性、発火特性、耐食性等）を評価するための技術についても開発を実施する。

横浜金沢分室では、上記研究開発要素の内、難燃性マグネシウム合金の接合技術の手法を開発する。構造部材の疲労特性・破壊靱性特性が最も低い部位は溶接継手部分であるため、新たに開発された合金の溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技

術（TIG 溶接法、MIG 溶接法、FSW 法）、接合モニタリング技術を開発する。

以下、横浜金沢分室の研究開発項目および目標を表Ⅲ-2.3.6-1 に列記する。2017 年度までは、開発された 4 種類の難燃性マグネシウム合金（AX41 合金，AX92 合金，AX81G 合金および AX81S 合金）を対象として溶接技術を開発する。さらに、2017 年度末までに開発合金を用いて、モックアップ構体を作製するための基礎技術を構築することを目指す。2017 年度までに開発した基礎技術を実用化技術に仕立て上げることを 2022 年度までの目標とする。

表Ⅲ-2.3.6-1 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
① TIG 溶接技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・最適な施工方法の把握と基礎接合技術の確立、継手効率 70%以上。 ・既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	2018 年度以降テーマ 34、35 で研究を継続実施。	2018 年度以降テーマ 34、35 で研究を継続実施。	<p>アルミニウム合金製鉄道車両構体では補修溶接を行う時の必須技術。</p> <p>アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上とした²⁾。</p>
② MIG 溶接技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・最適な施工方法の把握と基礎接合技術の確立、継手効率 70%以上。 ・既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	2018 年度以降テーマ 34、35 で研究を継続実施。	2018 年度以降テーマ 34、35 で研究を継続実施。	<p>アルミニウム合金製鉄道車両構体では連続接合を行う時の必須技術。</p> <p>アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上とした²⁾。</p>

③摩擦攪拌接合（FSW）法の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・最適な施工方法の把握と接合技術の確立、継手効率70%以上。 ・既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	2018年度以降テーマ34、35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34、35で研究を継続実施。	アルミニウム合金製鉄道車両構体では高品質な継手を得る連続接合を行う時の必須技術。アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の70%以上とした ²⁾ 。
④非破壊評価技術の開発	TIG溶接の接合品質モニタリング確立、長尺接合への対応。	2018年度以降テーマ34、35で研究を継続実施。	2018年度以降テーマ34、35で研究を継続実施。	高速車両構体を製造する上における生産工程内の品質管理手法。
⑤アルミ／マグネ合金の異材接合技術（FS）	2016年度～2017年度に実施。	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の70%以上の継手が得られる可能性を検証する ²⁾ 。	2017年度末までのFSで、実現の可能性が高い場合は実用化への反映を検討する。	実用化を加速できる可能性が極めて大きいため可能性を検証する。

(3)全体計画

本研究開発を行うに当たっては、開発技術の輸送機器構造部材への適用可能性を絶えず評価・検証することにより研究開発を遂行する。そこでは、開発技術の適用箇所の一例として高速車両（新幹線）構体を設定し、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されている実用金属（アルミ合金等）との比較・検証を実施しながら研究開発を実施する。

本研究テーマでは、溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技術（TIG溶接法、MIG溶接法、FSW法）、接合モニタリング技術を開発する。各々の接合法で、アルミニウム合金の接合法を基本として、接合条件範囲の調査をおこない接合特性を明確にする。使用する溶加材、溶接機などのプロセスの最適化をおこなうことにより最適な接合条件範囲の把握をおこなう。継手強度は継手効率が母材強度の70%以上が得られることを目標とする。さらに、実用化の可能性を確認するために一般的に困難であると考えられているアルミニウム合金との異材接合についてのフィジビリティスタディ

を行う。また、接合法の品質保証技術として、AE モニタリング法の開発を同時におこない、AE 計測装置、非破壊手法を用いて接合品質モニタリングを可能にする手法を開発する。

上記手法の開発を遂行するに当たり、2015、2016 年度には鉄道車両側構体の部分パネルを2017年度には実物大の簡易モックアップを試作することにより、開発した接合手法などを実証しながら進めていく。これらの試作品を作製する過程にある次のような要素技術の課題の抽出、その解決方法にも取り組んでいく。押出型材の製作精度、接合・加工などの作業性、表面処理性、シーリング性などの多くの実証項目を他の分室と連携して進めていく。2019 年度以降には難燃性マグネシウム合金製構体構造の実用化研究・実用化検討を行う。特に、合金特性を考慮した設計仕様等を含めて検討を進めることにより 2023 年度までには実用化検討をおこない、2030 年度までには事業化検討を完了する。

なお、本テーマは2018 年度よりテーマ 34、テーマ 35、テーマ 60 に移行したため、テーマ 20 としての研究開発は2017 年度までとなっている。2018 年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(4)実施体制

本研究開発体制においては、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。

2015 年度までは、新規合金の開発・評価を主眼として、素材の開発を担当する「材料 WG」、難燃性マグネシウム合金の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「接合 WG」、「耐食性 WG」、「発火特性 WG」を形成し、各 WG が連携して課題の解決を目指した。2016年度以降は、2015年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素材材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

テーマ 20 の横浜金沢分室（総合車両製作所）では、7 つの再委託研究機関とともに MIG 溶接法の開発、FSW 法の開発を行う。

横浜金沢分室で社 TIG 溶接法および FSW 法の基礎技術開発から実生産に近い技術開発、側構体部分パネル、実物大のモックアップ作製まで行う。接合継手の品質管理のために AE モニタリング法を利用した非破壊検査技術の開発を行い、アルミニウム合金との異材接合におけるフィジビリティスタディも行う。

なお、本テーマは2018 年度よりテーマ 34、テーマ 35、テーマ 60 に移行したた

め、テーマ 20 としての研究開発は 2017 年度までとなっている。2018 年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(5) 運営管理

テーマ 15～20 に従事する組合員が全員参加できる分科会を定期的で開催している。2013～2015 年度は、材料 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を 3 ヶ月に 1 回開催した（発火特性 WG は不定期開催）。2016 年度以降は、素形材製造 WG、信頼性 WG、表面処理 WG、接合 WG の分科会を 3～4 ヶ月に 1 回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、開発した合金を用いて高速車両構体を製造するための技術を共同で構築している。

2015 年以降は、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速 WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、軽金属学会春期・秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を定期的（年 2 回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（2017 年 3 月までに計 6 回開催）。さらに、軽金属学会の会誌「軽金属」に特集号「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を組み、プロジェクトの成果を論文および解説として公表している。

なお、本テーマは 2018 年度よりテーマ 34、テーマ 35、テーマ 60 に移行したため、テーマ 20 としての研究開発は 2017 年度までとなっている。2018 年度以降の成果は上記テーマの事業原簿を参照されたい。

(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）

アルミニウム合金製車両構体（新幹線を想定）をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果については幾つかの報告があり、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。また、2015、2016 年度には、パネルの構造は同じであり面外曲げ剛性が等しくなるように作製した側構体部分パネルで、アルミニウム合金製パネルより 9～10%の軽量化ができたことを確認した。さらに、明石分室ではこれまでに、マグネシウム合金製構体の相当曲げ剛性を簡易的に試算しており、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで、アルミニウム合金製ダブルスキン構体とほぼ同じ相当曲げ剛性が得られることを確認している。アルミニウム合金製構体質量の実績値と比較して、30%の構体重量削減が見込まれることを確認している。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両質量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10～20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 両/年（2013 年）であり、四輪車の年間生

産台数(約 1,000 万台：2013 年)の 0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであるといえる。

一方、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である⁷⁾。上記部品を全てマグネシウムに置き換えた場合、1 両当たり約 6t の需要が生まれることになる (Mg 置換により車両重量が 10%減少する場合)。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると (385 両：2013 年)⁵⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(2014 年)であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。

2.3.6.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.6-2 第三中間目標と達成度

研究開発項目	第三中間目標 (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
①TIG 溶接技術 の確立	2018 年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄 同様	
②MIG 溶接技術 の確立	2018 年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄 同様	
③摩擦攪拌接合 (FSW) 法の開発	2018 年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄 同様	
④非破壊評価技術 の開発	2018 年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。	左記テーマの【事業原簿参照】	左欄 同様	
⑤アルミ/マグ ネ合金の異材接 合技術 (FS)	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上の継手が得られる可能性を検証する ²⁾	MIG, TIG, FSW などの各種接合法で接合トライを行った結果、継手効率が上がらず、その原因が高い入熱による金属間化合物であることがわかった。	○	

※◎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-2.3.6-3 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
①TIG 溶接技術の確立	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	各種接合法の長所短所を把握して継手形状などの適材適所の接合法への適用を明確にする。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
②MIG 溶接技術の確立	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	母材および各種接合法で作製される継手を実構造物へ適用するため、破壊力学に基づいた評価・設計手法を構築する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
③摩擦攪拌接合 (FSW) 法の開発	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	母材および各種接合法で実構造物へ適用できる破壊靱性特性評価手法を構築する。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
④非破壊評価技術の開発	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】	実構造物生産ラインへの適用可能性の明確化。	2018年度以降テーマ 34,35 で研究を継続実施。上記テーマの【事業原簿参照】
⑤アルミ／マグネ合金の異材接合技術 (FS)	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上の継手を得るには入熱を下げた施工方法の検討が必要である。	2017年度末までの FS で、実現の可能性が高い場合は実用化への反映を検討する。	実用化を加速できる可能性を引き続き検証していく。

(3)研究開発の成果と意義

以下各研究項目の代表的な成果と意義を列記する。

① マグネシウム合金部材の TIG 溶接技術および FSW 接合技術の確立（総合車両製作所）

難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すために、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、形

材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材（型材・板材）を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術、及び耐食性を確保する技術が必要である。本研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術構築及びデータベース構築を統合的に実施する。研究開発を行うに当たっては、開発技術の適用箇所の一例として高速車両（新幹線）構体を設定し、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されている実用金属（アルミ合金等）との比較・検証を実施しながら研究開発を実施している。

本分担研では、溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技術（TIG溶接法、MIG溶接法、FSW法）、接合モニタリング技術を開発している。接合技術そのものが確立されていない、開発された4種の新たな難燃性マグネシウム合金AX41、AX92、AX81GおよびAX81SのTIG溶接法およびFSW法について、アルミニウム合金の接合法を基本として、継手の特性に及ぼす施工条件の影響を調査した結果、プロセスのパラメータが継手のマクロ組織や機械的特性に及ぼす影響を確認できた。TIG溶接法とFSW法とで難燃性マグネシウム合金展伸材を接合する基礎技術を確立、さらに、接合特性をモニタリングするための基礎技術を確立した。

② マグネシウム合金部材の MIG 溶接技術の確立（再委託研究機関 1）

2016年度は、2015年度までに得た木ノ本伸線および大阪府立大学のMIG溶接用ワイヤの最適加工プロセスに関する知見を元に、開発された4種類の新難燃性マグネシウム合金AX41、AX92、AX81G、AX81Sそれぞれについて、直径φ26mmの合金ビレットを出発材料として、極細径、高精度そして長尺の新難燃性マグネシウム合金MIG溶接用ワイヤを創製した。また、創製した4種類の新難燃性マグネシウム合金MIG溶接用ワイヤを用いて、同一組成の板厚t3mmの押出板材または圧延板材の突合せMIG溶接を行い、それぞれの適正溶接条件範囲を見出すとともに、溶接継ぎ手の静的機械強度や疲労特性等の評価を大学と連携して実施し、MIG溶接継ぎ手の信頼性を最適化するための技術開発も進めた。また、新難燃性マグネシウム合金を用いた小型モデル構体作製のためにMIG溶接条件を明らかにするとともに、下向、横向、立向、上向の各種溶接姿勢の可能性および溶接施工耐久性を明らかにした。

③ マグネシウム合金の MIG 溶接のプロセス因子が継手の特性に及ぼす影響の解明（再委託研究機関 2）

高速押出マグネシウム合金AXM030305、AX41、高強度マグネシウム合金AX92、AX81G、AX81SのMIG溶接を行った。MIG溶接のプロセス因子が継手の微細組織と機械的性質に及ぼす影響について検討した結果、昨年度までのAZX612、AZX611における結果と同様に、優れた溶接継手強度は低入熱量域にて得られることが明らかになった。高速押出合金については、溶加材としてAl含有量の多い合金を用いることにより継手効率は大きくなり、90%を越える非常に大きな継手効率が得られた。すなわ

ち、Al の固溶強化による継手効率の向上が有効であることがわかった。一方、高強度合金においてはAl含有量の増加による継手効率の向上はみられなかった。これは、高強度合金はいずれも固溶限に近いAlが固溶した合金であるためである。そこで、新たな固溶強化元素としてGaを提案し、Ga添加AX92合金を溶加材とした溶接を行った。その結果、いずれの高強度合金においても継手効率は向上し、75%以上の継手効率が得られた。また、Ga添加AX92合金を溶加材とした溶接体は、共材を溶加材とした溶接体と比較して疲労強度も向上することが明らかになった。これらの結果と昨年度までの結果から、Al含有量が6%以下の合金に対しては、Al含有量の多い溶加材を用いることにより、Alの固溶強化による継手効率の向上が有効であること、Alの含有量が8%以上の合金に対しては、Gaを添加した溶加材を用いることにより、Gaの固溶強化による継手効率の向上が有効であることが明らかになった。

④ マグネシウム合金のブローホール形成に及ぼす接合プロセスおよびプロセス条件の影響の解明（再委託研究機関3）

マグネシウムは高い蒸気圧を有するとともに、マグネシウム中への水素の溶解度およびその温度依存性が他の合金と比較して大きいため、溶接中にブローホールが発生しやすい材料である。本研究開発では、2015年度までに検討した非対称なツールレイアウトを有する両面摩擦攪拌接合において、良好な引張特性を得るための接合条件の最適化指針を明確にした。種々のツール回転速度にて厚さ3mmの難燃性マグネシウム合金（AZX612）板に対して両面摩擦攪拌接合を施し、得られた継手の引張試験を系統的に行うことで継手強度、伸び及び破断位置の評価を行った。非対称DFSWは、異なる二種類のツールを接合体の両面に同時に押し当てることにより実施した。上部ツールはプローブ付ツールで、ショルダー径、プローブ径はそれぞれ15mm、2.8mmであり、プローブはネジ山を有している。下部ツールはショルダー直径が15mmであるフラットツールで、プローブは有していない。また、上部ツールのみ3°の前進角を設定した。上下のツール回転速度に適当な差を設けることで、継手の引張特性が向上することが明らかとなった。具体的には、上側ツールの回転速度を600rpm、下側ツールの回転速度を500rpmとすることで、高い引張強度と延性を両立する難燃性マグネシウム合金（AZX612）継手の作製に成功した。小型試験片を用いてTD又はWDを引張軸とした場合の攪拌部の引張特性を調査すると、母材(BM)の場合はWDとTDはほぼ同じ引張強さを示しているが、非対称DFSWではWDで引張強さが大幅に向上し、伸びも従来FSW継手より増加した。特に、下側ツールの回転速度を500rpmの場合にはTDとWDの両方で最も良好な延性を示した。

⑤ 摩擦攪拌接合（FSW）による難燃性マグネシウム合金の接合条件の最適化（再委託研究機関4）

難燃性Mg合金で試作した押出型材（中空型材）への摩擦攪拌接合の適用を試みた。押出板材で得られた摩擦攪拌接合条件で接合評価を試みたが、押出板材での接合条件では健全な接合継手が得られないことが確認された。接合部には入熱不足で観察される溝欠陥が発生した。また、接合ツール回転数を大きくし入熱量を増加させたが、内

部欠陥が確認された。そこで、押出板材と押出型材との形状的な違いによる温度分布を検討した。また、接合部（突合せ部）の密着性（嵌め合い）が内部欠陥発生に与える影響についても検討した。

押出型材の断面形状は押出板材と比べ断面積が広く熱容量が大きく、中空構造であり接合部が中空に浮いている（バックプレートへ直接接触していない）ため、接合時に発生する摩擦熱の温度分布状態が異なることが予測される。そこで、中空型材の接合時における摩擦熱の温度分布を熱伝導解析により評価した。

押出型材では摩擦攪拌部の温度分布状態が押出板材と比較し温度上昇が小さいことが確認された。これは、入熱不足による溝欠陥が発生したことと一致する。また、押出型材は押出板材と比べバックプレートへの熱移動が少ないため、押出型材全体の温度上昇が押出板材より大きく、接合距離が長くなる長尺押出型材を接合する場合、接合時に発生する摩擦熱による熱歪が増大する可能性が懸念される。

押出板材の嵌め合い精度を、突合せ面に数ミリの隙間を故意的に設定し摩擦攪拌接合することで、接合ツール形状と隙間が欠陥（表面，内部）発生に与える影響を検討した。接合ツールのショルダー径が大きくなると、約 2mm の隙間を設けても欠陥の発生が減少することが確認された。しかし、嵌め合い精度が低下すると、特に内部欠陥の発生が増加する傾向があるため、押出型材の嵌め合い精度を高めることが接合特性の信頼性向上には重要である。

⑥ マグネシウム合金接合部の非破壊評価技術の開発（再委託研究機関 5）

難燃性 Mg 合金の摩擦攪拌接合（FSW）中の微小欠陥の生成と進展をアコースティック・エミッション（AE）法を用いてモニタリングする技術の開発を進めた。従来は AE センサを試料上に固定し、波形をセンサ→アンプ→計測装置と有線で接続していたが、本年度は昨年度に引き続き、接合ツールを固定する治具と一体化して試料上を滑りながら移動できるセンサの開発を進め、従来と同程度の感度を実現することができた。また、本年度は IoT（Internet of Things, モノのインターネット）技術の急速な進歩を受け、新たにスマートフォン用の小型モバイルバッテリーで駆動する連続波形記録装置を開発し、既存の連続波形解析装置との伝送を無線化した。これらの計測装置の開発により、長尺材の接合モニタリングも実用的に行える技術が確立できたと言える。また、位置標定においても昨年度開発した波の立ち上がりを複数検出し、これらとモードとの対応付けを自動化する方法において、誤りの自動検出と訂正が可能な処理方法を開発した。これにより、FSW 中の AE 事象の位置標定の成功率と標定精度がさらに高められた。

⑦ 難燃性 Mg 合金製部材によるモックアップ部分構体作製技術の開発（総合車両製作所）

これまでの接合技術を含めた要素技術を適用して、鉄道車両構体の側面にある窓穴周りを模擬した側構体：部分パネルを作製した。このパネルは、AX41 および AX92 材料の押出型材、AX81G および AX81S 材料の圧延板材、その塑性加工材、その切削・研削加工材を適用し、最後に表面処理、塗装を行って作製した。これらのパネルはダ

ブルスキン構造では AX41 合金を使用し、シングルスキン構造では AX92 合金、AX81G 合金および AX81S 合金の 3 種類の開発合金を使用した。同時に、アルミニウム合金製で実物同等サイズ、等価剛性で設計・作製を行い、完成したパネルの重量を比較したところ、9~10%の軽量化をすることができた。これら一連の作業を通じて、燃性マグネシウム合金を用いて構体を組み立てる際の問題点を総合的に洗い出した。これまでに接合に関する課題点、特徴等を明確にしてそれらを解決するために、試験片レベルの接合から始まり、部分パネルの製作、新合金を用いて実物大簡易モックアップ構体への作製へと進んだ。

構体組立は、MIG 溶接、TIG 溶接および摩擦攪拌接合 (FSW) を適材適所で使用した。車外側の MIG 溶接の余盛りの削除時にマグネシウム合金の粉塵が発生するため、湿式集塵機の吸込み口を直近に固定して作業をしたが、削られた粉塵を十分に集塵することはできなかった。したがって、安全のための集塵工具および設備を検討することは今後の必須課題である。

2016 年度までは以下のようなステップで開発を順調に進めてきた。

- 1) 試験片レベルでの接合技術開発
- 2) 既存の AZX611 合金による鉄道車両の側構体部分パネルの製作
- 3) 本プロジェクト開発合金による鉄道車両の側構体部分パネルの製作

2017 年度は、さらにステップアップして世界初、世界最大のオールマグネシウム合金製で、実物大の鉄道車両構体簡易モックアップを製作することができた。製作した簡易モックアップは、材質は、AX41 合金、AX92 合金、AX81G 合金、AX81S 合金、AZX611 合金を適用した。その寸法は、幅 3380mm、高さ 2880mm、長さ 1040mm である。

今後は、さらに実用に近づくために、気密疲労試験用モックアップの作製により、実用化に必要な要素技術を計画的に確立していく。気密疲労試験は、新幹線構体の評価試験の中では最も構体の耐久性に影響のある試験であるために次のステップとした。

⑧ Mg/Al 異材接合材の組織と機械的特性の関係調査 (再委託先研究機関 6)

Mg 合金と Al 合金の異材溶接の可能性を調査するために、熔融溶接である TIG および MIG アーク溶接、ならびにレーザー溶接、さらに固相接合である摩擦攪拌接合 FSW による溶接・接合実験を実施した。まず、熔融溶接では、Mg と Al の共晶反応により大量の金属間化合物が形成されて溶接金属が脆化し、溶接直後に溶接部に割れが発生する現象を明らかにすると共に、この割れ発生防止のための溶接条件範囲 (溶接電流あるいはレーザー出力と溶接速度との関係) を確定した。続いて、割れ発生を防止できた溶接条件において、Mg 合金と Al 合金の熔融量を変化させて溶接金属組成を変化させるために、溶接狙い位置、すなわちオフセット量を変化させた実験を行い、得られた溶接継手の継手強度とオフセット量との関係を明らかにした。オフセット量には最適範囲が存在し、いずれの溶接プロセスでも Al 合金側に溶接狙い位置を適量変化させることにより、最も高い継手強度が得られた。しかし、その値は、高々 25-30MPa であり、接合界面にはアーク溶接では 80 μ m 厚さ、溶接速度の速いレーザー溶接でも 20 μ m 厚さの金属間化合物層が形成されていた。一方、FSW では共晶温度以下の接合により割

れのない継手の形成が可能であり、継手強度は 130MPa 程度の強度が得られたが、接合界面での金属間化合物層厚さは数 μm 程度にまで減少した。これらのデータに基づき、金属間化合物層厚さと継手強度との関係図を作成し、より高い強度を得るためには金属間化合物層厚さをサブ μm にまで低減する必要があることを示した。次に、金属間化合物層の形成そのものを抑制する為に、溶加材組成の影響を検討した。状態図より、Al と反応するが Mg とは反応しない Ti と、Al とは化合物を作らず、また Mg ともなじみの良い Zn をそれぞれ溶加材候補として選定し、Ti 箔と Zn シート材を溶加材として接合部に予めインサートした継手に対して、オフセット量を変えてレーザー溶接を実施した。いずれも最適なオフセット量が存在し、ほぼ予測どおり形成組織が得られた場合には、Ti 箔材では 77MPa、Zn シート材では 135MPa の継手強度が得られ、今後の溶加材開発に向けた重要な指針を明らかにした。

⑨ Mg/Al 異材接合のプロセス因子が継手の特性に及ぼす影響の解明（再委託先研究機関 7）

難燃性マグネシウム合金（AZX611 及び AX41）と 6000 系アルミニウム合金

（A6061 及び A6N01）の板厚 6mm 及び 3mm の材料について MIG 溶接並びに CMT 溶接を用いた異材溶接の可能性を検討した。その結果、MIG 溶接では溶接注の高温割れを防止する溶接条件は見いだせたが、継手の強度に影響を与える金属間化合物相の厚さを $1\mu\text{m}$ 以下に抑制する溶接条件は、溶接速度を 3m 以上にすることが要求されることが結論された。そのためにはロボットを用いた高速溶接が必要と考えられるので、ロボットメーカーとの協業が必要であろう。また、低入熱溶接法として自動車産業でも使用されている CMT 溶接法を検討したが、細径ワイヤを安定して高速供給できるワイヤ供給装置が望まれる。溶接方法としては、溶射膜厚と溶接条件が継手の品質に及ぼす影響を一層詳細に検討する必要があると考えられる。

上記材料について、同じく摩擦攪拌接合による異材突合せ接合を検討した結果、板厚 6mm の場合には 1 パスでの接合は困難であることが確認された。一方、板厚 3mm の場合には、ツールをオフセットすることなく接合できる条件が確認され、継手の強度も最高値で 168Mpa が得られ、継手効率は 67% が得られた。この時 IMC 層の厚さは $1\mu\text{m}$ 程度に相当する。今後、接合条件と IMC 層の厚さ及び強度の関係をさらに詳細に検討する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.6-4 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	0	0	9	2	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	22	7	0	0	4	1	1
2017FY	0	0	5	1	0	2	1	0	0
合計	0	0	39	10	0	2	5	1	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-2.3.6-5 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	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

2.3.7 [テーマ番号 50] Mg 材の性能・寿命に関する MI (マテリアルズインテグレーション) 活用技術開発 (FS 研究)

2.3.7.1 テーマの概要

(1) 背景と目的

テーマ番号 15～20 では、難燃性マグネシウム合金展伸材を高速車両構体に適用するための研究開発を実施しており、難燃性マグネシウム合金展伸材の材料特性（機械的特性、生産性）を改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を統合的に実施している。これまでに、鉄道車両構体に利用するための新たな合金として、易加工性難燃性マグネシウム合金（AX41 合金）押出材、高強度難燃性マグネシウム合金押出材および圧延材（AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金）を開発することに成功している。現在、上記合金を用いて高速車両構体を製造するための部材化技術（複雑形状押し出し技術、プレス成形技術、接合技術、表面処理技術）を確立するための実用化研究を推進中である。

今後、開発したマグネシウム合金展伸材を用いて高速車両構体の軽量化を実現するためには、繰り返し荷重下での疲労特性や湿潤環境化での腐食特性、衝突時に起きうる衝撃変形挙動など、材料の信頼性を保証するためのデータを系統的に明らかにし、構体の設計指針に取り込む必要がある。なお、難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは、他の実用金属と比較して圧倒的に少なく、性能評価の長期化が懸念されており、いかに効率化するかが、今後の研究開発の鍵となっている。

一方、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の課題の一つ、革新的構造材料の中では、構造材料の組織と性能を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などを融合して予測可能とする手法、「マテリアルズインテグレーション (MI) システム」、の構築が産官学連携で進められている。MI システムでは、入力情報（材料製造・加工条件・使用環境条件）から、複雑系の材料の組織・性能の予測を行うとともに、予測された組織から、これまで長期を要した構造体の疲労・クリープ・遅れ破壊等の長期性能を出力することを目的としている。すでに、鉄鋼材料やアルミ合金を対象として上記の長期性能を予測するための MI システム (α 版) が開発されており、材料の組織や長期性能を予測し、材料の開発期間の短縮を図るためのツールとして利用されようとしている。また、今後、各種金属への適用にとどまらず、樹脂や CFRP への適用も検討されている。

本 FS 研究は、難燃性マグネシウム合金展伸材も含めたマグネシウム合金全般の長期性能を評価するための手段の一つとして、MI システム適用の可能性を検討することを目的とする。そこでは、マグネシウム合金の信頼性データの採取に際して、上記システムの技術的妥当性を評価し、マグネシウム合金により作製した構造物の性能・寿命を予測するに際しての技術的課題を抽出する。

なお、本 FS テーマは 2017 年度で終了し、2018 年度以降はテーマ 60 「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」において研究開発を継続している。2018 年度以降の成果の詳細はテーマ 60 の事

業原簿を参考にされたい。

(2)位置付け、目標値

本 FS 研究では、マグネシウム合金の構造物への適用に際して必要となる信頼性データ（疲労特性、衝撃変形特性等）を効率的に入手することを目的として、SIP プロジェクトで開発中である MI システムの利用可能性を検討する。具体的には、マグネシウム合金の組織や性能を予測するために必要となる開発アイテム（理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習）を絞り込むとともに、鉄鋼材料（BCC 金属）・アルミ合金（FCC 金属）用に作製された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を検討する。また、上記の作業と並行して、エンドユーザ及び素材メーカーへのヒヤリングを行い、信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。加えて、国内外のマグネシウムにまつわる計算科学にかかわる最新研究動向を調査し、MI システムに加えて、導入すべき計算ツールの有無を検証する。以下に、研究開発項目と目標を記す。

表Ⅲ-2.3.7-1 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 (2017 年度末)	根拠
(1) MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的な内容の検討	鉄鋼材料（BCC 金属）やアルミ合金（FCC 金属）用に作製された各種モジュールの新難燃性マグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	FS 研究のため無し。	MI システム及びその他システムで開発された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	研究テーマとしての妥当性を検討する項目
(2) マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	難燃性マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	FS 研究のため無し。	各種マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	研究テーマとしての妥当性を検討する項目
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	FS 研究のため無し。	文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	研究テーマとしての妥当性を検討する項目

(3)全体計画

以下、具体的な研究計画を以下に記す。

① MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討

MI システムの開発に従事している研究者へのヒヤリングを実施し、鉄鋼材料(BCC 金属)及びアルミ合金(FCC 金属)のための各種予測モジュールの詳細を調査する。調査結果を基に各種モジュールのマグネシウム合金(HCP 金属)への適用可能性を検討し、適用可能なモジュール群を抽出する。また、MI システムを稼働するために必要となる材料データベースの種類・規模を抽出する。

② マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み

エンドユーザ・素材メーカーへのヒヤリングを実施し、マグネシウム合金への MI システムの適用が望まれる材料性能および部材候補を抽出する。また、課題①から抽出される、予測モジュール、技術データベースの仕様と照合した上で、対象性能及び対象部材の絞り込みを行う。

③ マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査

文献調査、国際会議参加、研究機関訪問等により、国内外の MI 及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発に関する研究動向を調査する。

(4)実施体制

本テーマは名古屋守山分室（産業技術総合研究所）が実施する。テーマ番号 42 に設置する委員会およびテーマ番号 15～20 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。そこでは、マグネシウム合金の信頼性（疲労特性、耐食性、衝撃特性等）に精通するテーマ番号 15～20 の組合員を専門技術員として、テーマ 50 内に設置する委員会に招へいし、課題を共同で解決する。

(5)運営管理

専門技術員とテーマ 42 の FS 準備委員会メンバーを中心とする委員会を約 2 ヶ月毎に設置する。そこでは、マテリアルズインテグレーションに関する専門家に講演を依頼し、鉄鋼材料やアルミニウム合金への MI システム適用状況及び課題に関する情報収集を行う。情報収集と並行して、マグネシウム合金の信頼性データの採取に際して、MI システムの技術的妥当性を評価し、マグネシウム合金により作製した構造物の性能・寿命を予測するに際しての適用可能性を議論する。

(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）

難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは、他の実用金属と比較して圧倒的に少なく、性能評価の長期化が懸念されており、いかに効率化するかが、今後の研究開発の鍵となっている。仮に、MI システムを導入することにより、少ない実験データにより部材の寿命を含めた長期性能を把握することができれば、性能評価に要する時間を大幅に削減することができ、結果として、部品の設計・開発時間・コストを飛躍的に削減することが期待できる。

なお、上述の通り、本 FS テーマは 2017 年度で終了し、2018 年度以降はテーマ 60 「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」において研究開発を継続している。2018 年度以降の成果の詳細はテーマ 60 の事業原簿を参考にされたい。

2.3.7.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.7-2 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) MI システム適用に必要となる技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討	2017 年度終了テーマのため、第三中華目標はない。 (2018 年度よりテーマ 60 内で実施。)	2017 年度実施の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	○	
(2) マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	2017 年度終了テーマのため、第三中華目標はない。 (2018 年度よりテーマ 60 内で実施。)	2017 年度実施の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	○	
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	2017 年度終了テーマのため、第三中華目標はない。 (2018 年度よりテーマ 60 内で実施。)	2017 年度実施の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	○	

※◎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-2.3.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2017年度末)	達成見通し
(1) MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討	2017年度実施のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	MI システム及びその他システムで開発された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	達成済み。
(2) マグネシウム合金へのMI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	2017年度実施のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	各種マグネシウム合金の信頼性データの取得に際してMI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	達成済み。
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	2017年度実施のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行済み。	文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	達成済み。

(3)研究開発の成果と意義

本研究開発では、以下3つの研究テーマに関して調査研究を行った。

- ① MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討
- ② マグネシウム合金へのMI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み
- ③ マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査

テーマ②に関しては、マグネシウム研究者やマグネシウム素材メーカーおよび車両メーカーの技術者との議論を通じて、マグネシウム合金の部材開発において、MI システムの適用が望まれる分野についてニーズの抽出を行った。また、テーマ①及びテーマ

③に関しては、SIP-MI プロジェクトを推進している主要研究者を招聘して勉強会を実施し、金属材料の長期性能を予測するための計算科学手法に関する最新情報を入手するとともに、上記ニーズに適合する研究分野の有無について調査を実施した。その結果、テーマ②の活動（マグネシウムのための MI システムのニーズ抽出）からは、以下の2つのニーズが提示された。

②-1 疲労特性予測システムの構築

- ・ 鉄道車両構体（高速車両構体）の設計を行う際には、き裂の発生が集中する溶接部分を対象として、様々な条件（継手形状、溶接条件、応力負荷条件等）で疲労データを取得し、得られた疲労強度より許容応力を設定する必要がある。
- ・ 許容応力を設定する上で、MI システムにより疲労特性を予測できると疲労試験の工数を減らすことができる。溶接条件もしくは組織情報を入力すると疲労寿命が予測できるシステムを構築することが望まれる。それにより、疲労試験の本数が減るだけでなく、溶接トライの工数も減らすことができる。
- ・ 逆問題として、母材と期待継手効率や期待疲労強度を指定すると、推奨組織や推奨溶接プロセスが予測できるようになることも望まれる。

②-2 信頼性データベースの構築

- ・ （難燃性）マグネシウム合金の信頼性に関するデータは、鉄鋼材料やアルミニウム合金等の他の実用金属と比較して少なく、これまでに取得されているデータ（プロジェクトで取得したデータに加えて、文献等で獲得したデータ）を有効に活用して、データベースを構築する必要がある。
- ・ 難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労特性、耐食性等）データは、上述の「革新的マグネシウム材」プロジェクトにおいて、継手の特性も含めて系統的に採取しつつある。データベースの規模は他の実用合金と比較すると未熟ではあるものの、材料組成、組織（晶出物分布、結晶粒径、集合組織）、基本性能（機械的特性）、疲労特性（S-N 線図等）、耐食性（腐食速度、孔食深さ等）に関するデータのさらなる蓄積を実施し、上記情報の紐付けを行うことができれば、MI モジュールを構築する際に必要となるデータベースとして利用することができる。
- ・ 比較的少ないデータベース量で長期性能が予測できるシステムを機械学習等の手段を活用して構築することが望まれる。

他方で、テーマ①の活動（技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討）およびテーマ③の活動（マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査）として、SIP-MI プロジェクトを推進している主要研究者を招聘して勉強会を複数回開催した。勉強会より得られる計算科学に関連する最新情報を元に、以下のシーズが抽出された。また、鉄鋼材料やアルミニウム合金を対象として開発している予測システムをマグネシウム合金に展開する上での課題点も、以下の通り抽出された。

①-1 (③-1) 性能予測計算モジュールの開発

鉄鋼材料やアルミニウム合金溶接継手を対象として、継手の疲労寿命を予測する計算モジュールの開発を実施している。ここでは、物理モデルに基づき、順解析を行う計算手法が取られており、材料の組織情報をもとに、繰り返し荷重下の力学応答を再現するためのモデルの構築を行い、疲労き裂発生寿命と、進展寿命を高精度に予測している。き裂発生では、局所的な繰り返し塑性変形挙動が重要となり、有限要素法や転位論にもとづくモデルを利用した予測手法が開発されている。

上記の計算モジュールを難燃性マグネシウム合金に適用するためには、マグネシウム合金の結晶構造(HCP構造)に起因した塑性異方性をシミュレーションに取り込む必要がある。また、難燃性マグネシウム合金の内部に存在する晶出相がき裂発生・き裂伝播特性に及ぼす影響をシミュレーションに取り込む必要がある。

上記の計算モジュールを開発する過程では、計算モジュールの予測結果を常に実験結果と照合する作業が必要であり、難燃性マグネシウム合金継手のき裂発生特性および伝播特性をモジュール開発と連動して実施する必要がある。

①-2 (③-2) 性能予測データベースの構築

鉄鋼材料やアルミニウム合金を対象として、機械的特性や疲労特性に関連するデータベースより、未知の情報を予測する手法が検討されている。ここでは、鉄鋼材料溶接継手のサンプルを対象として、化学組成、加工条件、介在物寸法と言った入力条件と回転曲げ疲労強度との相関を調査しており、線形回帰およびニューラルネット等の手法を用いて適切な条件設定を用いた解析を行うことにより、疲労強度と相関のある入力条件を抽出できることや、精度の良い予測が可能であることが明らかとなっている。アルミニウム合金に関しても同種の調査が行われており、ここでは、理論や経験を元に作成した素材強度の予測式と、ニューラルネットワークを活用して導出した材料強度の予測結果の照合を行い、高い精度を有する予測式を導出することに成功している。

なお、難燃性マグネシウム合金展伸材の機械的特性に関するデータは比較的豊富に存在するが、理論や経験に基づくモデル式自体が存在しない。そのため、研究開発の序段では、難燃性マグネシウム合金の機械的特性を予測するための予測式を理論と経験により構築し、アルミニウム合金と同様に、データベースを活用した機械学習により上記モデル式の精度を高める作業を行うことが望まれる。次いで、上記作業で得られたワークフローを活用して、信頼性（疲労特性、耐食性、衝撃変形特性）を予測するためのシステムを構築することが望まれる。

①-3 (③-3) MIシステムの構築及びMIシステムの運用

MIシステムは、モジュールの多様化に対応して、多様な構造材料、多様な製造プロセスや加工プロセスに対応可能であり、また、予測の対象となる性能もさらに拡げることが可能である。さらに、時間・空間スケールやデータ構造の異なる様々なモジュールを自由に接続可能にすることによって、材料組成やプロセスから性能までの一貫した性能予測フローが可能になる。すでに、MIシステムの α 版は完成しており、

マグネシウムの信頼性を予測するための各種モジュールやデータベースに関しても、MIシステムに組み込むことが可能であり、マグネシウムのための計算モジュール及びデータベースを構築し、一連のワークフローを構築すれば、そのままMIシステムを利用することができる。

なお、開発した計算モジュールやデータベースをMIシステムに組み込む上では、新たな計算モジュールやデータベースを縦糸で結ぶ作業や、既存の計算モジュールやデータベースを横糸で結ぶ作業（ワークフローを構築する作業）が存在し、モジュールやデータベース構築と並行して、準備を進める必要がある。また、MIシステム内に構築したワークフローを素材メカ及び車両メカが自由に使いこなすためのトレーニングを並行して実施していく必要がある。

上記のFS研究から抽出されたニーズおよびシーズを受け、マグネシウム合金の長期性能を予測するためのシステムを構築するための研究開発項目として、以下の2つが抽出された。

研究開発項目① 難燃性マグネシウム合金溶接継手の寿命予測計算モジュールの開発

難燃性マグネシウム合金溶接部を対象として、疲労寿命を予測するための計算モジュールを構築する。ここでは、鉄鋼材料用に開発された物理モデルに立脚した計算モジュールを活用し、マグネシウム特有の結晶構造に起因する異方性や、難燃性マグネシウム合金特有の晶出物分布に起因する異方性を加味した様式でモデルを再構築する。そして、再構築したモデルを用いて、難燃性マグネシウム合金溶接継手の繰り返し荷重下の力学応答を再現し、疲労き裂発生寿命と、進展寿命を高精度に予測するモジュールを構築することを目指す。最終的に、開発した計算モジュールをMIシステムに組み込み、ワークフローを構築することにより一貫した予測システムを確立することを目指す。

研究開発項目② データベースに立脚した難燃性マグネシウム合金母材・継手の性能予測システムの構築

物理モデルに立脚した計算モジュールにより疲労き裂発生から破断までの寿命を予測することは必ずしも容易ではなく、溶接材などの複雑な組織や形状を有している場合は、その予測はさらに困難になる。そこで、本研究開発では、信頼性を予測するための補完的なアプローチとして、データベースを活用した予測システムの構築を目指す。

ここでは、「革新的マグネシウム材」の開発で収集しつつある難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労特性、腐食特性、衝撃特性）データを活用し、機械学習を活用して難燃性マグネシウム合金の長期性能を予測するためのシステムを構築する。具体的には、難燃性マグネシウム合金の信頼性を予測するための理論式や経験式に立脚したモデルを構築する作業と、機械学習を活用した予測システムを構築する作業を並行して実施し、相互にフィードバックすることにより、長期性能（疲労特性、腐食特性、衝撃特性）を予測するための高精度モデルを構築することを目指す。また、上記データ

ベースを MI システムに組み込み、ワークフローを構築することにより予測システムを確立することを目指す。

2018 年度以降、テーマ 60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」として、上記の研究開発項目を遂行中である。成果の詳細はテーマ 60 の事業原簿を参考にされたい。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.7-4 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			
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-2.3.7-5 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※
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.8 [テーマ番号 34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価

2.3.8.1 テーマの概要

(1)背景と目的

難燃性マグネシウム合金は、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた合金であり、高い難燃性が必要とされる鉄道車両において、小型鋳造部材を対象として、その適用が進みつつある¹⁾。NEDO 委託事業「革新的新構造材料等研究開発」では、難燃性マグネシウム合金展伸材を用いて大型構造物である鉄道車両構体を製造するための研究開発を推進し、これまでに、易加工性難燃性マグネシウム合金押出材（AX41 合金）、高強度難燃性マグネシウム合金押出材及び圧延材（AX92 合金及び AX81 合金）を開発することに成功した^{2,3)}。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて高速車両構体を実際に製造することを目指すためには、開発した合金を用いて、さらに大型のモデル構体を作製するための材料製造プロセス技術、接合技術、表面処理技術を構築していく必要がある。また、難燃性マグネシウム合金展伸材を用いて高速車両構体を製作するための設計技術や、設計に際して必要となる信頼性（疲労性能、耐食性、衝撃変形特性等）データベースを並行して構築していく必要がある。

そこで、本研究開発では、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材を利用して鉄道車両構体を作製するための材料製造技術、設計技術、表面処理技術の開発を統合的に実施する。また、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性等）を確保するためのデータベースを構築する。さらに、これまでに開発した技術を統合して、高速車両構体を模した気密疲労モックアップを製造・評価し、基礎技術の体系化を目指す。

本テーマ（テーマ 34）は 2014 年度から 2017 年度において、テーマ 15～18 において個別実施してきた研究開発を統合したテーマであり、開発技術の高速車両構体への適用可能性を評価・検証することを目指し、テーマ番号 35「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」と密に連携しながら研究開発を遂行するものである。

2018 年度は、これまでに開発した新難燃性マグネシウム合金を用い、車両構体の気密疲労試験に供するモックアップ構体を作製するための型材および板材の製造プロセス技術の開発を推進した。また、テーマ番号 60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」と連携し、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データを統合的に取得することを推進した。さらには、本テーマで得られたシーズを輸送機器全般（自動車等）に適用するための素形材開発を開始した。

なお、2019 年度以降は、本テーマとテーマ 35「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」を統合し、さらに、自動車部材開発を新たなテーマとして組み入れた形で、研究開発を推進している。そのため、2019 年度以降の成果はテーマ 35 に組み入れた形で記載を行っている。

(2)位置付け、目標値

本研究開発では、開発した難燃性マグネシウム合金を利用して構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を行う。また、開発したシーズを高速車両以外の用途（自動車等）に展開していく技術の検討を行う。なお、本研究では、開発した難燃性マグネシウム合金を利用して、高速車両構体を模した気密疲労モックアップを製造することを目的とする「[テーマ番号 35] 革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」、および、高速車両構体を製造する際に必要な知見（長期性能等）を効率的に取得することを目的とする「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」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。

以下、各サブテーマの研究開発の目標とその根拠を表Ⅲ-2.3.8-1 に記す。

表Ⅲ-2.3.8-1 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新難燃性マグネシウム合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性）の解明【名古屋守山分室：産業技術総合研究所】	テーマ 15 にて実施	開発した難燃性 Mg 合金展伸材及び継手の各種応力比、各種溶加棒組成における疲労特性を明らかにする。また、開発した難燃性 Mg 合金の電気化学的特性を明らかにする。	疲労特性、耐食性に加え、開発した難燃性 Mg 合金を輸送機器に適用するために必要な特性（成形性、衝撃靱性等）を系統的に取得し、工業的に利用するために必要なデータベースを体系化する。	高速車両構体を設計する上で目標に掲げた信頼性データの取得は不可欠であるため。
②難燃性マグネシウム合金の高機能化技術に関する技術動向調査【名古屋守山分室、再委託先：日本マグネシウム協会】	テーマ 15 にて実施	難燃性 Mg 合金等の材料開発・加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を調査し、開発される各種技術の汎用化、標準化へ向けた課題と問題点を明らかにする。	国内外における難燃性 Mg 合金等の材料開発、加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を把握した上で、開発される技術の標準化を図るためのデータ、情報を整備する。	開発されるマグネシウム合金や各種評価技術のベンチマークを作製する上で不可欠であるため。

<p>③易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【射水分室：三協立山】</p>	<p>テーマ 16 にて実施</p>	<p>気密疲労モックアップ構体（長さ 5m 想定）に資する新規難燃性高速押出合金による大型ダブルスキン形材の製造プロセス技術を確認し、実用化に向けた部材の大型化・長尺化を達成するための課題を明確化する。</p>	<p>次世代高速車両構体（長さ 25m 想定）への適用を実現する新規難燃性高速押出合金による大型・長尺押出形材の製造プロセス技術を工業レベルで確立するとともに、各種輸送機器用構造部材への実用化に向けた量産プロセス条件を明確化する。</p>	<p>現行 Al 合金製高速車両構体に使用される A6N01 合金押出形材の要求仕様に基づく。</p>
<p>④高強度マグネシウム材（中板・厚板）の開発【相模原分室：権田金属工業】</p>	<p>テーマ 16 にて実施</p>	<p>開発した難燃性 Mg 合金のスケールアップに伴う特性低下の原因を解明する。圧延板材の製造プロセス技術を開発し、実用化を目指す。圧延板材及び継手材の疲労特性、破壊挙動を明らかにする。また開発合金の組織制御因子と成形性の関係を調査する。</p>	<p>開発合金中板幅広材（板幅 500 mm、長さ 3 m）の寸法精度、信頼性の向上を目指す。また、鉄道以外にも輸送機器適用や多用途展開に必要な成形性に優れた幅広材の圧延組織制御技術と製造プロセスを開発する。</p>	<p>部材作製・設計には開発板材の諸特性と幅広化に伴う特性低下因子の早期抽出が信頼性を高めるため。用途開拓には更に成形性改善が強く望まれるため。</p>
<p>⑤マグネシウム合金の応力腐食特性・耐環境特性評価【相模原分室、再委託先：茨城大学】</p>	<p>2018 年度からの新規テーマ</p>	<p>新規開発 Mg 合金（AX81）の母材及び接合材（MIG、FSW）継手部の耐環境脆化特性を明らかにする。また耐環境脆化特性に及ぼす合金組成や金属組織の影響を明らかにする。</p>	<p>実用に際して必要となる耐環境脆化特性を付与させるために必要な接合部の合金組成および金属組織の管理範囲に関するデータを系統的に取得する。</p>	<p>高速車両構体を設計する上で目標に掲げた信頼性データの取得は不可欠であるため。</p>

<p>⑥高成形性マグネシウム材（薄板）の開発【伊丹分室：住友電気工業】</p>	<p>テーマ 17 にて実施</p>	<p>合金組成及びプロセス開発により張強さ$\geq 200\text{MPa}$、伸び$\geq 25\%$、成形性指標であるエリクセン値$\geq 8\text{mm}$（室温）の特性をもつ合金開発を目標とする。</p>	<p>引張強さ$\geq 230\text{MPa}$、伸び$\geq 28\%$、エリクセン値$\geq 8\text{mm}$（室温）の特性を有するマグネシウム合金板材を開発し、パイロット機にて上記目標を達成した長さ1m以上の板材を作製する。</p>	<p>自動車部材にマグネシウム合金板材を利用するためには、成形性と強度のバランスの確保が不可欠であるため。</p>
<p>⑦Mg合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【伊丹分室、再委託：長岡技術科学大学】</p>	<p>テーマ 17 にて実施</p>	<p>高強度高成形性 Mg合金の衝撃靱性、強度・延性、及び成形性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。また自動車の構造部材に必要な特性を満足するための組織因子を提案する。</p>	<p>高成形性高強度 Mg合金の動的な組織変化を調べ、板材の組織因子を制御するための知見を得る。また、衝撃靱性評価、成形加工に伴う高成形性高強度 Mg合金板材の組織変化も調べ、高靱性・高成形性発現機構も解明する。</p>	<p>マグネシウム合金板材の諸特性に及ぼすプロセスの影響が明らかにされていないため。</p>
<p>⑧高強度難燃性マグネシウム合金の押し出し成形技術開発【長洲分室：不二ライトメタル】</p>	<p>テーマ 18 にて実施</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた JIS H4204 を満足する気密疲労構体の床部材 2 種、横梁部材 1 種を作製する。また、長さ 12.5m の長尺押し出形材（床部材）を作製する。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた、長さ 25m の長尺押し出形材を製造するための各種製造プロセス条件を導出する。</p>	<p>高強度合金 AX92 を用いて高速鉄道車両（長さ 25m）に供する部材を作製するため。</p>
<p>⑨高強度難燃性マグネシウム合金ビレット製造技術開発【長洲分室、再委託：戸畑製作所】</p>	<p>テーマ 18 にて実施</p>	<p>テーマ⑧の押し出形材を作成するために必要なビレットの製造技術を確立する。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた、長さ 25m の長尺押し出形材を製造するためのビレット製造条件を確立する。</p>	<p>AX92 合金の押し出形材を作製するのに最適なビレットが必要のため。</p>

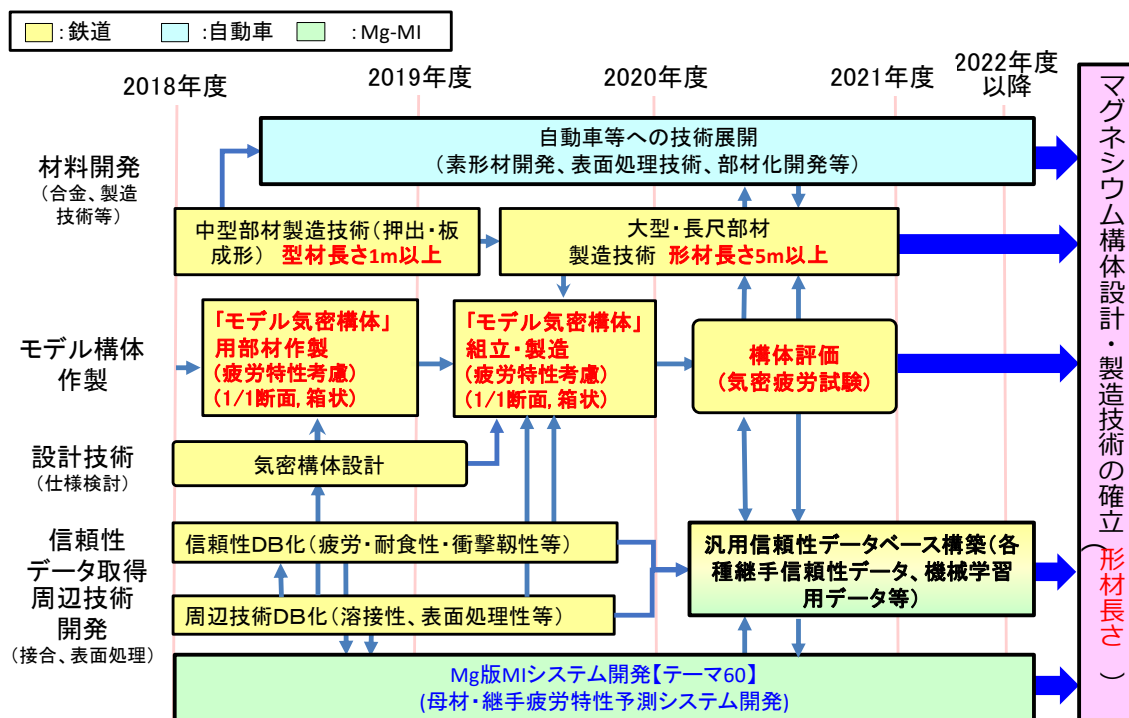
(3)全体計画

本研究開発では、開発した難燃性マグネシウム合金を利用して鉄道車両構体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を行うことを軸として計画を立案している。また、開発したシーズを高速車両以外の用途（自動車等）に展開していく技術の検討を行うことを軸として計画を立案している。

なお、本研究では、開発した難燃性マグネシウム合金を利用して、高速車両構体を模した気密疲労モックアップを製造することを目的とする【テーマ番号 35】「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」、および、高速車両構体を製造する際に必要な知見（長期性能等）を効率的に取得することを目的とする【テーマ番号 60】「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」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。

以下、全体計画を記した図を図III-2.3.8-1に記す。

なお、本テーマは2019年度よりテーマ35に統合したため、2019年度以降の成果はテーマ35の事業原簿を参照されたい。



図III-2.3.8-1 テーマ 34 の研究開発スケジュール

(4)実施体制

本テーマでは、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金を用いて、複雑形状部材を製造するためのプロセス技術開発、信頼性データベースの構築、開発シーズの他分野への適用検討を実施する。本テーマ（テーマ34）は、2014年度から2017年度において、以下のテーマ15～18において個別実施してきた研究開発を統合したテーマであり、開発技術の高速車両構体への適用可能性を評価・検証することを目指し、テーマ番号35「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」と密に連携しながら研究開発を遂行するものである。

- ・テーマ番号15「難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価」（名古屋守山分室、明石分室）の内、名古屋守山分室実施分
- ・テーマ番号16「易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討」（射水分室、相模原分室）
- ・テーマ番号17「高強度マグネシウム材（薄板）の開発」（伊丹分室・大阪分室）
- ・テーマ番号18「高強度マグネシウム材（押出材）の開発」（長洲分室）

また、テーマ番号60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」と連携し、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データを統合的に取得することを推進するものである。さらには、本テーマで得られたシーズを輸送機器全般（自動車等）に適用するための素形材開発を開始するものである。以下、テーマ15～20及びテーマ34,35の実施体制の関係を図III-2.3.8-2に記す。

なお、本テーマは2019年度よりテーマ35に統合したため、2019年度以降の成果はテーマ35の事業原簿を参照されたい。

【2017年度 開発体制】

No.	テーマ名	体制	
		分担研	再委託先
15	Mg合金設計と難燃性評価	産総研、川崎重工	長岡技大、九大、神戸大、NIMS、Mg協会
16	易加工性Mg押出材&高強度Mg板材の開発	三協立山、権田金属	長岡技大、NIMS
17	高強度Mg薄板材の開発	住友電工	長岡技大
18	高強度Mg押出材の開発	不二ライトメタル	戸畑製作所
19	難燃性Mg合金の耐食性	大日本塗料	ミリオン化学、アート1、芝浦工大
20	難燃性Mg合金の疲労特性	総合車両製作所	木ノ本伸線、大阪府大、阪大、東大、茨城県工技セ

【2018年度 開発体制】

No.	テーマ名	分担研（再委託）
34	革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価	産総研、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライトメタル (Mg協会、茨城大、長岡技科大、戸畑製作所)
35	革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発	総合車両製作所、川崎重工、大日本塗料、NIMS (木ノ本伸線、茨城産業技術イノベセ、ミリオン化学、芝浦工大)

技術アドバイザー：車両メーカ、JR各社

Mg材のMI(マテリアルズ・インテグレーション)活用技術開発【テーマ60】とも連携

図III-2.3.8-2 テーマ15～20及びテーマ34、35の実施体制の関係

(5)運営管理

本テーマでは、日本マグネシウム協会内のマグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会と連動した形で、テーマ 34 に従事する組合員が参加する分科会を定期的で開催している。そこでは、テーマ 35 「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」及び、テーマ 60 「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」と連携する形で、「素形材加工+MI」WG 及び「構体製造+MI」WG の分科会を 4 ヶ月毎に開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告し、車両エンドユーザや車両メーカーのアドバイスを頂くことを通じて、鉄道車両構体の試作に向けての研究開発の状況把握および摺り合わせを行っている。

また、上記の分科会に加えて、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、軽金属学会春期・秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を定期的（年1～2回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（2020年5月までに計9回開催）。また、各種論文誌にプロジェクトの成果を積極的に公表している。

なお、本テーマは2019年度よりテーマ35に統合したため、2019年度以降の成果はテーマ35の事業原簿を参照されたい。

(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）

プロジェクトにおいて、難燃性マグネシウム合金製車両用構体の設計指針の構築し、重量削減効果を検証している³⁾。

ここでは、整備新幹線を対象とし、利用するマグネシウム合金製ダブルスキン形材の諸元は、アルミニウム合金製形材の場合と同等とした。また、人体の固有振動数の計測結果を基に、車体の曲げ固有振動数が人体の固有振動との共振を回避することができるように相当曲げ剛性の目標値を $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ に設定した。

荷重条件については、トンネル通過時の気密荷重の検討から始めた。気密荷重はトンネルの長さや数、通過速度、すれ違いの有無により変動する様々な値と頻度を有する荷重スペクトルとなる。荷重スペクトルの決定に際しては、JR 各社に協力頂き、整備新幹線の平均的な値が設定された。解析の結果、荷重スペクトルにおける最大荷重は 6.4 kPa （内圧）であった。

次に、荷重スペクトルにおける最大荷重による塑性変形や座屈変形の防止について検討を行った。検討は、構体中央部から 1 窓分のリング状に切り出した構造を模擬した輪切りモデルを梁要素で構成し、内圧 6.4 kPa を負荷した時の構体の周方向のモーメント分布とせん断力分布を求め、ダブルスキン形材の面板の座屈強度を確保するための内部リブの間隔の最大値を求めた。この値を参考に、構体を構成するダブルスキン形材の内部リブの配置を決めた後、シェル要素による輪切り 3 次元 FEM モデルを作成し静強度解析と座屈固有値解析を行い、内圧 6.4 kPa 負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。

さらに、構体の相当曲げ剛性であるが、最大気密荷重に対して静強度と座屈強度が確認できた輪切り 3 次元 FEM モデルを車両長手方向につなげた一両モデルによる検証を行った。設計変数として窓開口寸法を選び、窓開口寸法により相当曲げ剛性の値が大きく変化することが判った。そして、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで設計目標の $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ 以下を達成することができた。その際の構体質量は、アルミニウム合金製ダブルスキン構体の構体質量の実績値と比較して約 30%の軽量化の可能性を示す結果となった。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両重量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10~20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

2.3.8.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.8-2 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新難燃性マグネシウム合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性）の解明【名古屋守山分室：産業技術総合研究所】	開発した難燃性 Mg 合金展伸材及び継手の各種応力比、各種溶加棒組成における疲労特性を明らかにする。また、開発した難燃性 Mg 合金の電気化学的特性を明らかにする。	開発した難燃性 Mg 合金展伸材及び継手の各種応力比、各種溶加棒組成における疲労特性を明らかにした。また、開発した難燃性 Mg 合金の電気化学的特性を明らかにした。 (一部は 2019 年度にテーマ 35 で実施。)	○	
②難燃性マグネシウム合金の高機能化技術に関する技術動向調査【名古屋守山分室、再委託先：日本マグネシウム協会】	難燃性 Mg 合金等の材料開発・加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を調査し、開発される各種技術の汎用化、標準化へ向けた課題と問題点を明らかにする。	難燃性 Mg 合金等の材料開発・加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を調査し、開発される各種技術の汎用化、標準化へ向けた課題と問題点を抽出した。 (一部は 2019 年度にテーマ 35 で実施。)	○	
③易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【射水分室：三協立山】	気密疲労モックアップ構体（長さ 5m 想定）に資する新規難燃性高速押出合金による大型ダブルスキン型材の製造プロセス技術を確認し、実用化に向けた部材の大型化・長尺化を達成するための課題を明確化する。	気密疲労モックアップ構体の設計仕様に基づく大型中空押出型材の設計を完了。当該型材を作製する押出金型の設計及び製作を順次遂行中。既存実機を使用して幅 300mm の大型ダブルスキン型材の押出成形を実現する拡大押出技術を確認。	△	気密疲労モックアップ構体に供する大型ダブルスキン型材の長尺化に伴う型材精度の確保は、既に技術確立した温間矯正技術により解決を見込む。

<p>④高強度マグネシウム材（中板・厚板）の開発【相模原分室：権田金属工業】</p>	<p>開発した難燃性 Mg 合金のスケールアップに伴う特性低下の原因を解明する。圧延板材の製造プロセス技術を開発し、実用化を目指す。圧延板材及び継手材の疲労特性、破壊挙動を明らかにする。また開発合金の組織制御因子と成形性の関係を調査する。</p>	<p>幅広板材の圧延加工を実機で行い、ラボスケールに比べて引張特性と組織のバラツキは大きくなった。母材とMIG継手材の平面曲げ疲労試験(R=0.5)を行い、MIG継手材は余盛が有り、引張応力作用側で破壊が生じた。板材の曲げ変形では、頭頂部にせん断変形が残存したが、試験温度 200℃から動的組織変化により加工が可能となった。</p>	<p>○</p>	
<p>⑤マグネシウム合金の応力腐食特性・耐環境特性評価【相模原分室、再委託先：茨城大学】</p>	<p>新規開発 Mg 合金（AX81）の母材及び接合材（MIG、FSW）継手部の耐環境脆化特性を明らかにする。また耐環境脆化特性に及ぼす合金組成や金属組織の影響を明らかにする。</p>	<p>高強度高延性を有する母材の機械的特性に及ぼす環境因子の影響について、低ひずみ速度引張応力腐食割れ試験と湿潤ガス応力腐食割れ試験により調査した。湿潤環境中での脆化挙動を調査し、評価手法の確立と妥当性を明らかにした。</p>	<p>○</p>	
<p>⑥高成形性マグネシウム材（薄板）の開発【伊丹分室：住友電気工業】</p>	<p>合金組成及びプロセス開発により張強さ$\geq 200\text{MPa}$、伸び$\geq 25\%$、成形性指標であるエリクセン値$\geq 8\text{mm}$（室温）の特性をもつ合金開発を目標とする。</p>	<p>マグネシウム合金圧延板材の微細組織や諸特性に及ぼす Al や Zn 添加量の影響を調べ、引張強さ200MPa、伸び25%、エリクセン値8mmを満足する合金組成を提案した。</p>	<p>○</p>	

<p>⑦Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【伊丹分室、再委託：長岡技術科学大学】</p>	<p>高強度高成形性 Mg 合金の衝撃靱性、強度・延性、及び成形性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。また自動車の構造部材に必要な特性を満足するための組織因子を提案する。</p>	<p>種々の加工熱処理条件により作製したマグネシウム合金の諸特性を評価し、靱性や引張特性、室温成形性に及ぼす各種組織因子の影響を明らかにし、高強度・高延性と優れた室温成形性を両立するマグネシウム合金滓恵板材の組織因子を提案した。</p>	<p>○</p>	
<p>⑧高強度難燃性マグネシウム合金の押出し成形技術開発【長洲分室：不二ライトメタル】</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた JIS H4204 を満足する気密疲労構体の床部材 2 種、横梁部材 1 種を作製する。また、長さ 12.5m の長尺押出型材（床部材）を作製する。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いて JIS H 4204 を満足する気密疲労構体の床部材 2 種、横梁部材 1 種を作製した。また、長さ 5.5m の長尺押出型材（床部材）を作製した。</p>	<p>△</p>	
<p>⑨高強度難燃性マグネシウム合金ビレット製造技術開発【長洲分室、再委託：戸畑製作所】</p>	<p>テーマ⑧の押出型材を作成するために必要なビレットの製造技術を確立する。</p>	<p>AX92 合金の押出型材を作製するのに好適なビレットの製造条件を確立した。</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-2.3.8-3 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新難燃性マグネシウム合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性）の解明【名古屋守山分室：産業技術総合研究所】	他の分室と共同で開発した難燃性 Mg 合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。得られたデータはテーマ 60 と共同で DB 化を推進中。易成形性 Mg 合金の成形性に関しても系統的に評価を実施中。2020 年度中に目標を達成見込み。	疲労特性、耐食性に加え、開発した難燃性 Mg 合金を輸送機器に適用するために必要な特性（成形性、衝撃靱性等）を系統的に取得し、工業的に利用するために必要なデータベースを体系化する。	順調に研究開発を遂行しており、期間内に目標を達成予定。
②難燃性マグネシウム合金の高機能化技術に関する技術動向調査【名古屋守山分室、再委託先：日本マグネシウム協会】	国内外で実施されるセミナー、学会等により、難燃性 Mg 合金等の材料開発・加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を調査し、開発される各種技術の汎用化、標準化へ向けた課題と問題点を抽出した。（一部は 2019 年度にテーマ 35 で実施。）	国内外における難燃性 Mg 合金等の材料開発、加工技術の動向、輸送機器への Mg 合金適用の動向を把握した上で、開発される技術の標準化を図るためのデータ、情報を整備する。	期間内に目標を達成予定。
③易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【射水分室：三協立山】	次世代高速車両構体への適用に資する新規高速押出合金（AX41 合金）を開発。 当該開発合金による大型・長尺押出材の製造プロセス技術の開発を工業レベルで推進し、気密疲労モックアップ構体に供する各種ダブルスキン材の製造プロセス技術を構築中。	次世代高速車両構体（長さ 25m 想定）への適用を実現する新規難燃性高速押出合金による大型・長尺押出材の製造プロセス技術を工業レベルで確立するとともに、各種輸送機器用構造部材への実用化に向けた量産プロセス条件を明確化する。	長さ 25m の大型・長尺押出材の実用化には大規模な設備投資が必須も、既存実機での製造プロセス技術の高度化により、最終目標の達成見通しを得ることは可能。

<p>④ 高強度マグネシウム材（中板・厚板）の開発【相模原分室：権田金属工業】</p>	<p>実機を用いた幅広板材の圧延加工により、圧延条件が圧延板材の特性と組織に及ぼす影響を板厚、板幅方向にて試片を採取し調査中。開発合金板材の成形性は室温から高温における変形特性に加え、V曲げ試験を中心にR/tと加工温度および加工速度について調査を実施中。継手材の疲労特性は各機関と連携して取得中。</p>	<p>開発合金中板幅広材（板幅 500 mm、長さ 3 m）の寸法精度、信頼性の向上を目指す。また、鉄道以外にも輸送機器適用や多用途展開に必要な成形性に優れた幅広材の圧延組織制御技術と製造プロセスを開発する。</p>	<p>実機による圧延加工を行い、課題抽出を実施中。作製板材の成形性調査結果を活用することで多用途展開に対応し、目標の達成を目指す。板材の信頼性は各分室と疲労試験を連携して実施中。目標は達成の見込み。</p>
<p>⑤ マグネシウム合金の応力腐食特性・耐環境特性評価【相模原分室、再委託先：茨城大学】</p>	<p>確立した評価手法により汎用マグネシウム合金と開発合金 AX81 を用いてデータを系統的に取得。環境脆化特性に関するデータを系統的に調査中。</p>	<p>実用に際して必要となる耐環境脆化特性を付与させるために必要な接合部の合金組成および金属組織の管理範囲に関するデータを系統的に取得する。</p>	<p>現在、確立した評価手法を用いて、系統的にデータを採取している最中であり、プロジェクト期間中に取得を完了する予定である。</p>
<p>⑥ 高成形性マグネシウム材（薄板）の開発【伊丹分室：住友電気工業】</p>	<p>合金組成を最適化したマグネシウム合金圧延板材の諸特性に及ぼす加工熱処理条件の影響を調べ、圧延板材のプロセスと引張特性・室温成形性の定量的な関係構築を進めている。</p>	<p>引張強さ $\geq 230\text{MPa}$、伸び $\geq 28\%$、エリクセン値 $\geq 8\text{mm}$（室温）の特性を有するマグネシウム合金板材を開発し、パイロット機にて上記目標を達成した長さ 1m 以上の板材を製作する。</p>	<p>一連の特性評価、組織解析は順調に進行しており、期間内に目標を達成予定。</p>

<p>⑦Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【伊丹分室、再委託：長岡技術科学大学】</p>	<p>マグネシウム合金圧延板材の成形加工中の組織変化を調べ、高成形性化に必要な変形機構を抽出した。また、この成果を基に、高強度・高延性、高成形性、高靱性の同時に付与に必要な微細組織因子を提案し、実証研究を進めている。</p>	<p>高成形性高強度 Mg 合金の動的な組織変化を調べ、板材の組織因子を制御するための知見を得る。また、衝撃靱性評価、成形加工に伴う高成形性高強度 Mg 合金板材の組織変化も調べ、高靱性・高成形性発現機構も解明する。</p>	<p>マグネシウム合金板材の微細組織と諸特性の関係構築は順調に進行中で、期間内に目標を達成予定。</p>
<p>⑧高強度難燃性マグネシウム合金の押出し成形技術開発【長洲分室：不二ライトメタル】</p>	<p>開発合金 AX92 を用いて JIS H 4204 を満足する気密疲労構体の床部材 2 種、横梁部材 1 種を作製した。また、長さ 5.5m の長尺押出型材（床部材）を作製した。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた、長さ 25m の長尺押出型材を製造するための各種製造プロセス条件を導出する。</p>	<p>要素技術の高度化によって達成可能</p>
<p>⑨高強度難燃性マグネシウム合金ビレット製造技術開発【長洲分室、再委託：戸畑製作所】</p>	<p>組織が微細化した AX92 合金ビレットの製造条件を確立した。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた、長さ 25m の長尺押出型材を製造するためのビレット製造条件を確立する。</p>	<p>AX92 合金の押出型材を作製するのに好適な長尺ビレットの作り込みによって達成可能</p>

(3)研究開発の成果と意義

以下に、本テーマの各研究開発項目における 2018 年度の成果を示す。

(1) 新難燃性マグネシウム合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性）の解明【産業技術総合研究所】

疲労特性の評価に関しては、AX92 押出材の母材および MIG 継手を対象として、応力比を-0.5 と設定した際の特性を評価した。MIG 継手の疲労強度は余盛無が 55MPa、余盛有が 46MPa であり、0° における母材の疲労強度（106MPa）と比較して約 50%の値を示した。この傾向は R=-1 および R=0 の時と定性的に同じであった。なお、一般に、R=-0.5 の疲労強度は R=-1 と R=0 の中間の値を取ることが知られているが、今回の R=-0.5 の結果はいずれの条件においても R=0 に近い疲労強度を示した。この理由については現在調査中である。

耐食性の評価に関しては、アルミニウム (Al) 濃度を 3~9wt%に調整し、亜鉛濃度およびカルシウム濃度を各々1, 2wt%に押出材を対象として、3wt%NaCl 溶液 (pH=10) に 72h 浸漬した際の重量減少腐食速度および電気化学特性を調査した。難燃性マグネシウム合金の腐食速度は Al 濃度の増大とともに急激に減少した。電気化学インピーダンス測定の結果、Al 濃度が 3wt%の場合は全面腐食、6wt%の場合は局部腐食、9wt%の場合は不働態化を示唆する軌跡が観察された。これらの知見は試験後の表面状態およびとよく一致していた。

(2) 難燃性マグネシウム合金の高機能化技術に関する技術動向調査【産業技術総合研究所、再委託先：日本マグネシウム協会】

国内外における難燃性マグネシウム合金等の材料開発、溶接等の加工技術の動向、輸送機器へのマグネシウム合金適用の動向を調査し、本事業において開発される高性能なマグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法等に関する課題や問題点を抽出した。

本事業で開発される材料や評価手法を標準化するために検討すべき項目として、①材料：開発合金による押出材及び板材の規定、②接合：溶接用の棒及び線の規定、使用先に合わせた作業基準、③耐食性：マグネシウム用の促進試験方法、④信頼性：疲労や破壊に関するマグネシウム用の試験方法、⑤燃焼性：材料または製品についての燃焼性の判断基準が挙げられる。①材料及び⑤燃焼性は JIS などの標準化が進められているが、加工技術や耐食性、信頼性などの評価手法については、標準化へ向けて各種データがまだ不十分という状況である。使用先の状況と対応させながら、メカニズムの解析や各種データの更なる蓄積と整備を迅速に進めていく必要がある。

(3) 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【三協立山】

テーマ番号 35「革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発」と密に連携し、気密疲労モックアップ構体（屋根部・側部・側ハリ部）に使用する大型ダブルスキン形材（全14型）の断面形状の設計を完了した。気密疲労条件に基づいて構体の構造解析を実施し、溶接部への応力集中を回避させることで疲労強度を向上させるダブルスキン形材専用の接手形状を設計した。また、疲労強度が著しく低下することが懸念さ

れる接合部位においては、構体組立時の作業性と疲労強度の向上を両立可能な構体結合用接手を検討し、隅肉溶接を行わない独自の接手形状を設計した。

開発合金 AX41 合金による大型・複雑断面形状を有するダブルスキン形材の押出成形プロセス技術の開発では、保有する大型実働機的能力を最大限に活かすべく、拡大押出加工技術の開発に取り組んだ。本研究開発では、14 インチクラスのダブルスキン形状を 12 インチで拡大押出加工するプロセス技術を検討し、低い押出面圧で材料流動バランスを制御しながら当該形状を押出成形する金型を新たに設計した。その結果、精度と外観が健全な押出形材の成形を実現すると共に、限界ビレット長さや限界形材長さの対応可能域を拡大させることに成功し、気密疲労モックアップ構体の屋根部材および側部材へ当該成果を適用させた。

構造部材への適用に資する開発材の信頼性データの蓄積では、車両構体の気密疲労試験条件を想定し、AX41 合金押出材の MIG 溶接材における疲労データ ($R=-0.5$) の取得を推進した。2018 年度は母材および MIG 溶接材の平面曲げ疲労特性の取得を実施し、開発材を用いて構造部材を設計する際のデータとして蓄積した。

(4) 高強度マグネシウム材（中板・厚板）の開発【権田金属工業】

板厚 3mm および 6mm 材を対象に、圧延加工プロセスと機械的特性の関係及び実作業機を用いての幅広板材の圧延加工を実施した。量産スケールではパイロットスケールに比べて、圧延加工条件が圧延板材の特性と組織に及ぼす影響が大きくなる事が分かった。疲労特性については平面曲げ疲労試験により母材および MIG・TIG・FSW 継手材の応力比 $R=0, -1$ について調査してきたが、2018 年度は母材および MIG 継手材の応力比 $R=-0.5$ における平面曲げ疲労試験を実施し、ビード止端部形状が疲労強度に及ぼす影響について調査した。平面曲げ疲労試験では平行部有り無し (R 形状) での疲労特性を比較したが、結果に差異は認められなかったものの、 10^7 回における疲労強度は応力比により差が見られた。高強度材の成形性調査を温度・ひずみ速度依存性を調査した。室温から高温における変形特性では、特性に対してひずみ速度依存性が試験温度 200°C から認められ、ひずみ速度が遅く、試験温度が高くなる程、動的再結晶により当軸微細組織を形成することが分かった。これら素材は、試験温度 200°C において V 曲げ試験では $R/t=1$ (R =パンチ径、 t =ブランク板厚) 程度までは成形可能であった。これら特性を有する AX81 合金継手材や気密構体作製に向けた試験用板材の提供を行った。

(5) マグネシウム合金の応力腐食特性・耐環境特性評価【権田金属工業、再委託先：茨城大学】

AX81 合金の母材の機械的特性に及ぼす試験環境の影響について、低ひずみ速度法引張試験 (SSRT 引張試験) と湿潤ガス応力腐食割れ試験 (HG-SCC 試験) により調査した結果、湿潤環境中での脆化挙動を確認でき、評価手法の信頼性も確立した。さらに、新規開発合金において、摩擦攪拌プロセス (FSP) 処理とその後の焼きなましにより結晶粒径を変化させ、結晶粒径が引張特性に及ぼす影響について検討した結果、結晶粒径だけで強度や延性が整理できないことが分かった。

(6) 高成形性マグネシウム材（薄板）の開発【住友電気工業】

2017 年度までに開発してきた高強度難燃性マグネシウム材（AMX801, AZX811）をベースとして Mg-Al-Zn-Ca-Mn 系合金圧延材の成形メカニズム調査および成形性の評価を最委託先である長岡技術科学大学と共同で実施した。長岡技科大では、後述の通りマグネシウム合金の成形性に及ぼす基礎検討をもとに成形性に優れた合金組成の絞込みを行った。

伊丹分室では、2017 年度まで開発を行ってきた AZX811（AX81S）の成形性評価を実施した。成形性指標としては、200℃および 250℃での平面領域での限界張出高さ（LDH₀）の評価を行った。平成 31 年度には長岡技術科学大学で組成の絞込みを行ったマグネシウム合金双ロール鋳造材及び比較材としてアルミ材（5052、6061）の評価を行う。

(7) Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【住友電気工業、再委託：長岡技術科学大学】

低温での成形性や機械特性に及ぼす Al や Zn 添加量の影響を調べた。Zn を含まない Mg-Al-Ca-Mn 合金圧延材は、強い底面集合組織を形成するため、低温での成形性は低い。Mg-Al-Ca-Mn 合金に Zn を添加すると、底面集合組織が弱化するために低温での成形性は改善する。また、強度・延性ともに Zn を添加しない場合と比較して向上する。Al 無添加の Mg-Zn-Ca-Mn 合金圧延材は、Al を含む圧延材よりも低温での成形性は優れている。但し、Mg-Zn-Ca-Mn 合金圧延材は結晶組織が粗大化しやすいため、構造部材として必要な強度特性（引張強さ \geq 230MPa）を得るのが困難であることが判明した。

(8) 高強度難燃性マグネシウム合金の押出し成形技術開発【不二ライトメタル】

2017 年度 AZX611 合金を用いて作製した簡易モックアップ構体の床材と同じ断面形状の型材を目標として、開発合金 AX92 合金を用いて床材の押出技術開発を行い、長さ 5.5m の押出材を取得した。当該型材は肉厚が均一であり、左右対称形状であるためメタルフローは比較的制御しやすいが、押出比が 90 と高い。さらに AX92 合金は AZX611 合金に比べて押出加工性に劣っており、押出時の最大荷重は非常に高い数値が記録された。そこで、押出荷重を低減する方策の検討を行った。その結果、押出荷重の低減に有効なダイス設計指針を得ることができた。

(9) 高強度難燃性マグネシウム合金ビレット製造技術開発【不二ライトメタル、再委託：戸畑製作所】

AX92 合金ビレットの製造プロセスにおいて機械攪拌を取り入れて合金組織に与える影響を調査した。得られたビレットの組織を観察すると、粒界に Al₁₂Mg₁₇ 相および Al₂Ca 相が見られる典型的な AX 系合金鋳造材のマイクロ組織であり、その結晶粒径は攪拌の効果により微細化して均一に分散していることを確認することができた。さらに、熱処理を行うことにより、ネットワーク状の Al₂Ca 相が分断されて球状化する傾

向が得られ、実機レベルでもラボレベルの試験と同様の結果を得られることが確認できた。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.8-4 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	4	1	24	6	0	0	2	0	1
合計	4	1	24	6	0	0	2	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-2.3.8-5 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

2.3.9 [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

2.3.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

難燃性マグネシウム合金は、汎用マグネシウム合金（Mg-Al系合金）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた合金であり、高い難燃性が必要とされる鉄道車両において、小型鋳造部材を対象として、その適用が進みつつある¹⁾。NEDO委託事業「革新的新構造材料等研究開発」では、難燃性マグネシウム合金展伸材を用いて大型構造物である鉄道車両構体を製造するための研究開発を推進し、これまでに、易加工性難燃性マグネシウム合金押出材（AX41合金）、高強度難燃性マグネシウム合金押出材及び圧延材（AX92合金及びAX81合金）を開発することに成功した^{2,3)}。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて高速車両構体を実際に製造することを目指すためには、開発した合金を用いて、さらに大型のモデル構体を作製するための材料製造プロセス技術、接合技術、表面処理技術を構築していく必要がある。また、難燃性マグネシウム合金展伸材を用いて高速車両構体を製作するための設計技術や、設計に際して必要となる信頼性（疲労性能、耐食性、衝撃変形特性等）データベースを並行して構築していく必要がある。

そこで、本研究開発では、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材を利用して鉄道車両構体を作製するための材料製造技術、設計技術、表面処理技術の開発を統合的に実施する。また、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性等）を確保するためのデータベースを構築する。さらに、これまでに開発した技術を統合して、高速車両構体を模した気密疲労モックアップを製造・評価し、基礎技術の体系化を目指す。

他方で、マグネシウム産業の裾野を拓げるためには、マグネシウム合金展伸材を他の輸送機器分野（特に自動車分野）に適用するための展開を推進することが不可欠である。マグネシウム合金の自動車部材への適用範囲は、国内ではステアリングホイールやオイルパン等の小型・中型鋳造部材に留まっているのが現状であり、鉄道車両構体のケースと似た状況にある。ゆえに、マグネシウム合金展伸材を用いて自動車構造部材を製造するためには、自動車部材製造に適した、展伸材の製造技術、（プレス）成形技術、接合技術、表面処理、部材の設計技術を統合的に開発していく必要がある。

そこで、本研究開発では、2019年度以降、鉄道車両構体を作製するための研究開発に加え、マグネシウム合金展伸材を自動車構造部材に適用するための技術開発も並行して実施する。具体的には、実際のアルミニウム合金製自動車部材をマグネシウム合金展伸材に置換する技術を構築することを通じて、マグネシウム合金展伸材を用いて部材を設計・製造するための技術を統合的に構築することを目指す。

本テーマは2014年度から2017年度は、テーマ15～20において鉄道車両用の合金開発と適用技術を個別に開発してきた。2018年度には、主に合金開発を実施してきたテーマ15～18を統合してテーマ34とし、主に適用技術開発を実施してきたテーマ19,20を統合してテーマ35として研究開発を遂行した。また、2019年度には、自動車

部材開発を新たなテーマとして組み入れるとともに、テーマ 34 とテーマ 35 に統合した上で研究開発を遂行している。なお、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データを取得する研究開発項目に関しては、2018 年度より新たに設定されたテーマ 60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」と連携して研究開発を推進している。

(2)位置付け、目標値

鉄道車両部材開発（サブテーマ①）に関しては、2015 年度まで基礎技術を開発した難燃性マグネシウム合金展伸材およびその適用技術（表面処理技術、接合技術、設計技術）を用いて、1/1 スケール（長さ 1m）のモックアップ構体（2017 年度末）、および 1/1 スケール（長さ 5m）の気密疲労試験構体(2019 年度末)を作製することを目標に研究開発を遂行した。2020 年度は、2019 年度に作製した気密疲労試験構体を用いて気密疲労試験を実施し、開発技術の妥当性を検証することを目標に研究開発を推進している。

自動車部材開発（サブテーマ②）に関しては、自動車用部材（フロントフードおよびドアビーム）の製造に最適化したマグネシウム合金展伸材を開発するとともに、自動車部材製造に必要な設計技術及び二次加工技術の確立を推進し、2021 年度までに、上記技術を用いて 1/1 の自動車部材（フロントフード及びドアビーム）を試作することを目標として研究開発を推進している。

マグネシウム合金部材開発（サブテーマ③）に関しては、鉄道車両構体および自動車部材に適用するためのマグネシウム合金大型展伸材の製造プロセス技術を確立するとともに、各種特性データベースを構築することを目標に研究開発を推進している。

以下、各サブテーマの研究開発の目標とその根拠を表Ⅲ-2.3.9-1 に記す。

表Ⅲ-2.3.9-1 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
①-1. Mg 合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体製作指針の確立（横浜金沢分室：(株)総合車両製作所）	テーマ 20 にて実施	新難燃性マグネシウム合金材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体の製作指針を確立する。	新難燃性マグネシウム合金製の実物長の高速車両構体を作製するための接合・組立技術を構築する。	鉄道車両構体は多くの部材から構成され、確実な安全性を確保するため。
①-2. Mg 合金部材の MIG 溶接技術の確立（木ノ本伸線（株））	テーマ 20 にて実施	新難燃性マグネシウム合金製の長尺部材による連続 MIG 溶接を達成する。	各種難燃性マグネシウム合金押出型材及び圧延板材の長尺部材の連続 MIG 溶接を達成する。	実構体を作製する上で、実材料を用いた長尺連続 MIG 溶接施工が必要なため。

<p>①-3. FSW による各種難燃性 Mg 合金の接合継手特性評価（産業技術イノベーションセンター）</p>	<p>テーマ 20 にて実施</p>	<p>摩擦攪拌接合による各種難燃性 Mg 合金の継手効率 80%以上を目指す。また、長尺部材を健全に接合できる摩擦攪拌接合ツールを開発する。</p>	<p>摩擦攪拌接合技術を用いて、高品質な難燃性 Mg 合金接合継手（継手効率 80%以上）を実現し、各種構造体の製造・生産技術へ展開する。</p>	<p>実構体を作製する上で、実材料を用いた長尺連続 FSW 施工が必要のため。</p>
<p>①-4 難燃性 Mg 合金大型展伸材の接合品質の非破壊評価技術の高度化（つくば千現分室：物質・材料研究機構）</p>	<p>テーマ 20 にて実施</p>	<p>接合欠陥の 2 次元位置標定を行う。また、無線 AE 計測システムと MI システムを接続し、計測データを活用できる基盤を整備する。</p>	<p>既存解析手法を機械学習させた結果得られたスキームを実装し、小型の組み込み装置のみで接合欠陥をリアルタイムに可視化できるシステムを構築する。</p>	<p>大型展伸材の接合では局所的に欠陥が生じる可能性が排除できず、簡便・リアルタイム・非破壊の検査技術が必要であるため。</p>
<p>①-5 難燃性 Mg 合金部材の構造物としての特性評価及び設計指針の構築（明石分室：川崎重工業（株））</p>	<p>テーマ 15 にて実施</p>	<p>新難燃性マグネシウム合金製構体の構造要素の強度、製作性及び耐食性を実証する。</p>	<p>車体長 25m（新幹線または海外の高速鉄道のサイズ）の難燃性マグネシウム合金製大型構体の基礎的設計技術を確立する。</p>	<p>構体製造の事業化のためには、構造要素のみの実証では不十分であり、素材寸法や溶接歪などの製造上の制約を考慮した上での一両全体の製造の実証が必要である。</p>

<p>①-6 難燃性 Mg 合金の二軸応力下における疲労強度特性評価（立命館大学）</p>	<p>2019 年度より研究開始</p>	<p>二軸疲労試験手法の構築ならびに多軸度および材料異方性を把握するための試験データを取得する。また、二軸応力下の疲労強度特性評価手法を提示する。</p>	<p>十字型試験片等を用いた二軸負荷での疲労試験を実施し、二軸疲労強度に及ぼす負荷の主軸変化の影響を把握し、それを強度評価手法に反映する。</p>	<p>二軸負荷における変形・破壊特性を実験的に知ることは、構造設計および維持管理を行う上で重要な強度情報となる。また、二軸負荷での疲労試験手法および強度評価手法を構築することは、強度信頼性保障の高度化につながる。</p>
<p>①-7 難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成、及び難燃性 Mg 合金製車両構体の表面処理仕様の確立（小牧分室：大日本塗料（株））</p>	<p>テーマ 19 にて実施</p>	<p>これまでに開発した表面処理法を車両に適用するための、部位別の塗装仕様を構築する。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータを DB 化する。</p>	<p>試作した気密疲労モックアップの表面処理を通じて課題を抽出し、実構体に対する化成処理施工技術の確立を目指す。</p>	<p>開発済みの表面処理の有効性につき、実際にモックアップに適用し、証明するため。</p>
<p>①-8 難燃性 Mg 合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発、及び難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成（ミリオン化学（株））</p>	<p>テーマ 19 にて実施</p>	<p>プロジェクトで開発した化成処理技術の確立を目指す。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータを DB 化する。</p>	<p>実構体に対する化成処理施工技術の確立を目指す。また、部位別の表面処理仕様を確立し、腐食データベースを基に信頼性の構築を目指す。</p>	<p>新規開発合金含めた腐食特性と共に、化成処理技術の有効性をデータベース化し、信頼性を担保するため。テーマ 60 とも連携。</p>

①-9 難燃性 Mg 合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明（芝浦工業大学）	テーマ 19 にて実施	耐食メカニズムの解明を継続して進めると共に、表面処理による耐食性への効果、及び微量添加元素や組織形状が及ぼす腐食挙動の影響について調査解明する。	表面処理による耐食性への効果や微量添加元素や組織形状が及ぼす腐食挙動の影響について調査解明する。	耐食性を付与する化成処理膜の腐食への有効性について腐食メカニズム解析より、その裏づけとするため。
②-1 Mg 合金による自動車部品試作、性能評価（湘南分室：(株) トヨタ C & D）	2019 年度より研究開始	実車に搭載されている自動車フロントフードを調査し、部品としての目標特性を明確化する。部分試作、実車部品製作を行い、設計、成型条件の構築を行う。	自動車フロントフードを製作し、部品としての性能評価を行い、自動車部品として実用化に向けた設計、技術の構築を目指す。	21 年度末までにフロントフード 1/1 スケールを試作・評価を実施し、マグネシウム適用の可能性を確認するため。
②-2 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理技術の開発（平塚分室：日本パークライジング(株)）	2019 年度より研究開始	マグネシウム合金板材の表面処理性を評価し、自動車フロントフードに最適な合金組成チューニングに連携する。また、異種材料同時処理可能な化成処理技術の基本設計を行う。	自動車フロントフード製作用の化成処理技術を提供し、フロントフードとしての性能評価結果を取得することを目指す。	自動車フロントフードは異種材料の組合せにより構成されるため、当該技術の構築が不可欠であるため。
②-3 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理条件の最適化（ミリオン化学(株)）	2019 年度より研究開始	提供されるマグネシウム合金板材の表面処理性を従来技術および②-2 で開発した技術を用いて最適化し、表面処理性を評価、明確化する。	自動車フロントフード製作用の化成処理薬剤や工法の最適化を行うことで、Mg-Al 同時化成処理技術の確立を目指す。	自動車フロントフードは異種材料の組合せにより構成されるため、当該技術の構築が不可欠であるため。

<p>③-1 Mg合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性、成形性等）データベースの構築（名古屋守山分室：産総研）</p>	<p>テーマ 15 にて実施</p>	<p>開発した難燃性マグネシウム合金の疲労特性、電気化学特性を評価する。また、自動車用マグネシウム合金の各種特性（成形性、耐食性）を系統的に評価する。</p>	<p>鉄道車両構体用に開発した合金および自動車用途に開発した合金の疲労特性、耐食性、成形性等に関するデータを集約し、工業的に利用するために必要なDBとして体系化する。</p>	<p>テーマ 35 で収集したデータがプロジェクト後に散逸することを避けるため。テーマ 60 とも連携。</p>
<p>③-2 Mg合金の輸送器機への適用に関する技術動向調査（日本マグネシウム協会）</p>	<p>テーマ 15 にて実施</p>	<p>国内外で実施されるセミナー、学会等による情報収集により、開発される鉄道用、自動車用マグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法の標準化へ向けた課題と問題点を明らかにする</p>	<p>国内外で実施されるセミナー、学会等による情報収集により、開発されるマグネシウム合金、加工技術及び評価方法の標準化を図るためのデータ、情報を整備する。</p>	<p>開発されるマグネシウム合金や各種評価技術のベンチマークを作製する上で不可欠であるため。</p>
<p>③-3 Mg合金の接合プロセスの開発と接合部の強度信頼性評価（長岡技術科学大学）</p>	<p>テーマ 15 にて実施</p>	<p>自動車部品を想定した接合部の応力状態に基づき、異なる接合プロセスにより得られた各種接合体の強度新信頼性を評価・比較する。強度支配因子と接合部の応力状態から接合部の設計法を提案する。</p>	<p>各種接合法により得られたマグネシウム合金接合体の強度支配因子を明らかにし、強度信頼性の高い接合体を得られる接合法を示す。</p>	<p>実構造では、構造、部材形状、応力状態等により、異なる接合法を適切に選択する必要があるため。</p>
<p>③-4 易加工性 Mg 押出部材の開発（射水分室：三協立山(株)）</p>	<p>テーマ 16 にて実施</p>	<p>新規難燃性高速押出合金による大型・長尺ダブルスキン形材の製造プロセス技術を確認する。また、自動車ドアビーム部材への適用を実現する、易加工性高強度押出形材の製造プロセス技術を確認する。</p>	<p>次世代高速車両構体および自動車構造部材への適用を実現する、新規難燃性高速押出合金による大型・長尺押出形材の製造プロセス技術を工業レベルで確立する。</p>	<p>現行の高速車両構体および自動車構造部材に使用される各種 Al 合金押出材の要求仕様に基づく。</p>

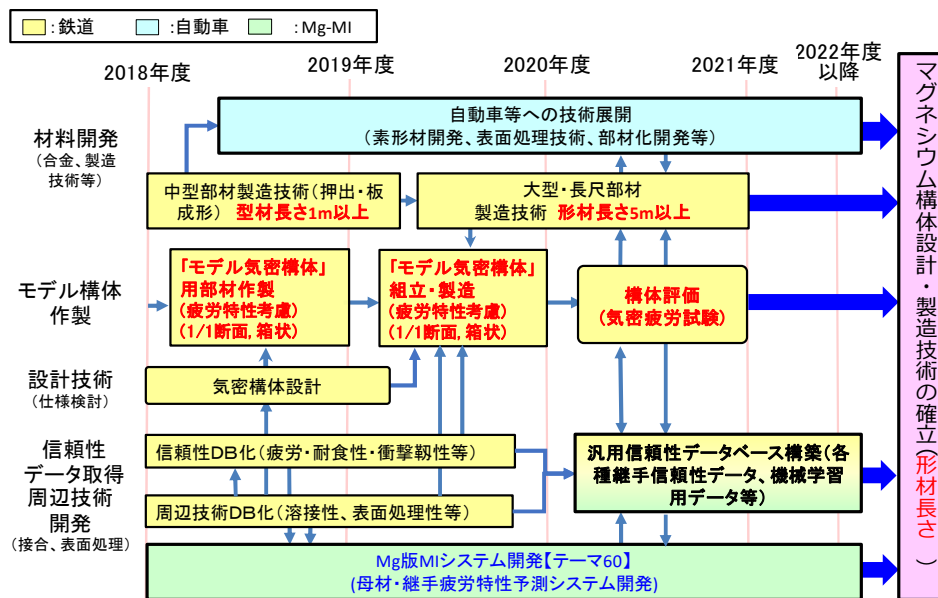
<p>③-5 高強度 Mg 材 (中板・厚板)の 開発(相模原分 室:権田金属工業 (株))</p>	<p>テーマ 16 にて実施</p>	<p>鉄道用材料では、開発合金のスケールアップ技術を開発し、実用化を達成するための課題を明確化する。自動車用材料では、合金組成と圧延プロセスの最適化により、フロントフードに要求される諸特性を持つ材料を開発する。</p>	<p>開発した難燃性マグネシウム合金広幅圧延材の製造プロセス技術を工業レベルで確立する。また、自動車等の輸送機器適用や多用途展開に向けて長さ 1m 以上の合金板材を作製する。</p>	<p>操業因子による特性低下が生じ、プロセス技術の調整が必要。添加金属の成分調整、集合組織制御で成形温度低下を目指すため。</p>
<p>③-6 高成形性 Mg 材(薄板)の適用技術開発(伊丹分室:住友電気工業(株))</p>	<p>テーマ 17 にて実施</p>	<p>自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金板材を開発する。また、作製し成形性、表面処理性の基礎特性を各々のプロセス開発担当機関と連携して評価する。</p>	<p>自動車フロントフード製作用の合金板材を提供し、フロントフードとしての性能評価結果を取得することを目指す。</p>	<p>開発されるマグネシウム合金や各種評価技術のベンチマークを作製する上で不可欠であるため。</p>
<p>③-7 Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明(長岡技術科学大学)</p>	<p>テーマ 17 にて実施</p>	<p>高強度高成形性マグネシウム合金の強度・延性、成形性、および表面処理性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。</p>	<p>自動車フロントフード用マグネシウム合金板材として必要な諸特性を具現化するための最適プロセスを提案する。</p>	<p>マグネシウム合金板材の諸特性に及ぼすプロセスの影響が明らかにされていないため。</p>
<p>③-8 高強度難燃性 Mg 合金の押出し成形技術開発(長洲分室:不二ライトメタル(株))</p>	<p>テーマ 18 にて実施</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた気密疲労試験構体の部材を作製する。また、AX92 を自動車構造部材向けにチューニングした合金を用いてドアピーム形材を試作する。</p>	<p>開発した高強度押出合金 AX92 及びチューニング合金を高速車両構体、自動車向け構造部材として量産化するための製造プロセス条件を導出する。</p>	<p>高強度開発合金による大型長尺材の押出量産化は初めての試みのため。テーマ 60 と連携。</p>

<p>③-9 高強度難燃性 Mg 合金ビレット製造技術開発 (戸畑製作所(株))</p>	<p>テーマ 18 にて実施</p>	<p>テーマ③-8 の押出型材を作成するために必要なビレットの製造技術を確立する。</p>	<p>開発合金 AX92 及びチューニング合金を用いた、高速車両構体、自動車向け構造部材を製造するためのビレット製造条件を確立する。</p>	<p>AX92 及びチューニング合金の押出型材を作製するのに好適なビレットが必要なため。</p>
<p>③-10 低温高成形性 Mg 合金展伸材の適用技術開発 (板橋分室：日本金属(株))</p>	<p>2019 年度より研究開始</p>	<p>プレス温度の低温化と強度特性を両立するマグネシウム合金展伸材の製造技術を確立する。自動車フロントフードの製造に必要な材料仕様を検証し、部材化に必要な特性を満たす板材の提供を目指す。</p>	<p>自動車フード部材を製作するのに最適な低温成形性、耐食性、強度特性を兼備したマグネシウム合金展伸材を提供する。</p>	<p>自動車部品にマグネシウム合金展伸材を適用するには、アルミ並みの機械的特性と低コストを達成する必要があるため。</p>
<p>③-11 Mg 合金の加工時の組織評価 (つくば千現分室：物質・材料研究機構)</p>	<p>2019 年度より研究開始</p>	<p>自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金として時効硬化を利用した合金の組織評価を行い上記部材に適した合金組成チューニングの指針を提供する。</p>	<p>成形加工や塗装を模した加熱処理時の詳細な組織変化を評価することで成形および強度変化のメカニズムを解明することを目指す。</p>	<p>目標とする特性を発現させるための合金・プロセスの設計指針を与えるため。</p>

(3)全体計画

鉄道車両部材開発（サブテーマ①、サブテーマ③）に関しては、テーマ 15~20、及びテーマ 34 で得られた知見を結集し、2019 年度までに 1/1（長さ 5m）の気密疲労試験構体を作製し、2020 年度にその試験構体を用いて気密疲労試験を実施することを軸として計画を立案している。また、テーマ 60 と連携して、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データをデータベース化することを軸として計画を立案している。

自動車部材開発（サブテーマ②、サブテーマ③）に関しては、2020 年度までに自動車部材用マグネシウム合金を開発するとともに、自動車部材製造にまつわる周辺技術（二次加工技術）や設計技術を確立し、2021 年度までに自動車部材（フロントフード及びドアビーム）を試作することを軸として計画を立案している。以下、鉄道車両構体および自動車部材の開発のための全体計画を記した図を図Ⅲ-2.3.9-1、図Ⅲ-2.3.9-2 に記す。



図Ⅲ-2.3.9-1 サブテーマ①、③の研究開発スケジュール

実施項目	2018	2019	2020	2021	2022
部品調査		（部品購入・分解）			
合金設計技術	高成形性、表面処理性				
板材・形材製造技術	スケールアップ技術				
適用技術開発	成形・加工技術	大型部品成形・加工			実用化検証
	接合技術	SPR、点溶接、接着剤			
	防食技術	Mg-Al同時処理			
自動車部材試作・評価			設計 試作 評価		

図Ⅲ-2.3.9-2 サブテーマ②、③の研究開発スケジュール

(4)実施体制

鉄道車両用部材開発（サブテーマ①、サブテーマ③）に関しては、2017年度までは鉄道車両用の合金開発および適用技術開発を軸として、テーマ 15~20 において個別研究開発を実施した。2018年度にはテーマを再編し、材料開発(テーマ 15~18)に関してはテーマ 34 に、適用技術開発(テーマ 15, 19, 20)についてはテーマ 35 に統合して研究開発を推進した。さらに、2019年度からは、テーマ 34 とテーマ 35 を統合し、一つのテーマとして研究開発を推進している。なお、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データを取得する件に関しては、2018年度より新たに設定されたテーマ 60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」と連携して研究開発を推進している。

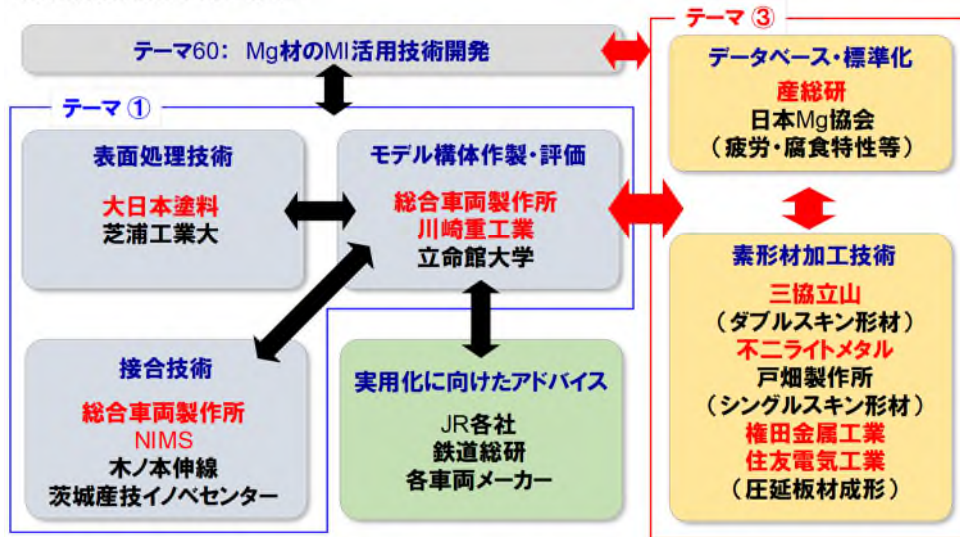
自動車用部材開発（サブテーマ②、サブテーマ③）に関しては、2019年度よりテーマ 35 において研究開発を開始し、2020年度までに自動車部材用マグネシウム合金を開発するとともに、自動車部材製造にまつわる周辺技術（二次加工技術）や設計技術を確立し、2021年度までに自動車部材（フロントフード及びドアビーム）を試作するために必要な実施体制を構築している。

以下、テーマ 34 およびテーマ 35 の 2018年度および 2019年度の開発体制を図Ⅲ-2.3.9-3 に、2019年度のテーマ 35 内部の鉄道車両構体および自動車部材の開発のための実施体制を図Ⅲ-2.3.9-4 および図Ⅲ-2.3.9-5 にそれぞれ記す。

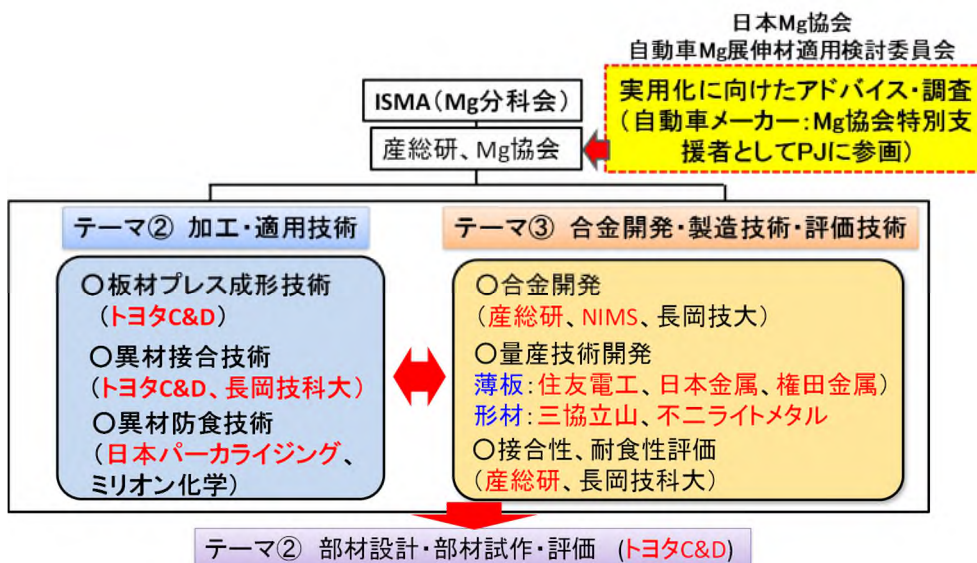
【2018年度 開発体制】			【2019年度 開発体制】(赤字:鉄道テーマ)		
No.	テーマ名	分担研 (再委託)	No.	テーマ名	分担研 (再委託)
34	革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価	産総研、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライトメタル (Mg協会、茨城大、長岡技科大、戸畑製作所)	35	①革新的Mg材の鉄道車両構体への適業技術開発	総合車両製作所、川崎重工、大日本塗料、NIMS (木ノ本伸線、茨城産業技術イノベセ、ミリオン化学、芝浦工大)
		革新的マグネシウム材製鉄道車両構体の応用開発		総合車両製作所、川崎重工、大日本塗料、NIMS (木ノ本伸線、茨城産業技術イノベセ、ミリオン化学、芝浦工大)	② 革新的マグネシウム材の自動車構造部材への適用技術開発
技術アドバイザー:車両メーカー、JR各社	③ 輸送機器の軽量化に資する革新的マグネシウム部材の開発	産総研、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライトメタル、日本金属、NIMS (Mg協会、長岡技科大、戸畑製作所)			

図Ⅲ-2.3.9-3 テーマ 34 およびテーマ 35 の 2018年度及び 2019年度の実施体制

テーマ35・テーマ60・ユーザーと密接に連携し、開発合金の輸送機器構造部材への実用化開発を効率的に推進



図Ⅲ-2.3.9-4 鉄道車両用部材開発（サブテーマ①、③）の2019年度以降の実施体制



図Ⅲ-2.3.9-5 自動車部材開発（サブテーマ②、③）の実施体制

(5)運営管理

鉄道車両用部材開発（サブテーマ①、サブテーマ③）に関しては、日本マグネシウム協会内のマグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会と連動した形で、テーマ35に従事する組合員が参加する分科会を定期的で開催している。2018年度以降は、テーマ60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」と連携する形で、「素形材加工+MI」WG及び「構体製造+MI」WGの分科会を4ヶ月毎に開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告し、車両エンドユーザや車両メーカーのアドバイスを頂くことを通じて、鉄道車両構体の試作に向けての研究開発の状況把握および摺り合わせを行っている。

また、上記の分科会に加えて、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、軽金属学会春期・秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を定期的（年1～2回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（2020年5月までに計9回開催）。また、各種論文誌にプロジェクトの成果を積極的に公表している。

自動車等部材開発（サブテーマ②、サブテーマ③）に関しては、日本マグネシウム協会内部に設置された自動車Mg展伸材適用検討委員会と連動した形で、テーマ35に従事する組合員が参加する分科会を定期的で開催している、そこでは、2021年度末までにマグネシウム合金製自動車部材を作製することをマイルストーンとして計画を設定し、その進捗状況を報告し、自動車メーカーのアドバイスを頂くことを通じて、自動車部材試作に向けての研究開発の状況把握および摺り合わせを実施している。自動車部材開発についても今後、積極的な成果配信を実施していく予定である。

(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）

鉄道車両用部材開発（サブテーマ①、サブテーマ③）に関しては、プロジェクトにおいて、難燃性マグネシウム合金製車両用構体の設計指針の構築し、重量削減効果を検証している³⁾。

そこでは、整備新幹線を対象とし、利用するマグネシウム合金製ダブルスキン形材の諸元は、アルミニウム合金製形材の場合と同等とした。また、人体の固有振動数の計測結果を基に、車体の曲げ固有振動数が人体の固有振動との共振を回避することができるように相当曲げ剛性の目標値を $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ に設定した。

荷重条件については、トンネル通過時の気密荷重の検討から始めた。気密荷重はトンネルの長さや数、通過速度、すれ違いの有無により変動する様々な値と頻度を有する荷重スペクトルとなる。荷重スペクトルの決定に際しては、JR 各社に協力頂き、整備新幹線の平均的な値が設定された。解析の結果、荷重スペクトルにおける最大荷重は 6.4 kPa （内圧）であった。

次に、荷重スペクトルにおける最大荷重による塑性変形や座屈変形の防止について検討を行った。検討は、構体中央部から 1 窓分のリング状に切り出した構造を模擬した輪切りモデルを梁要素で構成し、内圧 6.4 kPa を負荷した時の構体の周方向のモーメント分布とせん断力分布を求め、ダブルスキン形材の面板の座屈強度を確保するための内部リブの間隔の最大値を求めた。この値を参考に、構体を構成するダブルスキン形材の内部リブの配置を決めた後、シェル要素による輪切り 3次元 FEM モデルを作成し静強度解析と座屈固有値解析を行い、内圧 6.4 kPa 負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。

さらに、構体の相当曲げ剛性であるが、最大気密荷重に対して静強度と座屈強度が確認できた輪切り 3次元 FEM モデルを車両長手方向につなげた一両モデルによる検証を行った。設計変数として窓開口寸法を選び、窓開口寸法により相当曲げ剛性の値が大きく変化することが判った。そして、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで設計目標の $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ 以下を達成することができた。その際の構体質量は、アルミニウム合金製ダブルスキン構体の構体質量の実績値と比較して約 30%の軽量化の可能性を示す結果となった。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両重量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10~20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

次に、自動車用部材開発（サブテーマ②、サブテーマ③）に関しては、日本マグネシウム協会内部に設置された自動車 Mg 展伸材適用検討委員会において、自動車フロントフードをアルミニウムからマグネシウムに代替した場合の CO₂ 削減効果を試算している。そこでは、アルミニウムフード重量を 3.2 kg 、アルミニウムフードと等価剛性を有するマグネシウムフードの重量が 2.48 kg と仮定し、アルミニウムフードとマグネシウムフードを搭載した際の CO₂ 発生量を試算した。なお、計算の際には、製錬の際に発生する CO₂ 発生量と自動車走行時に発生する CO₂ 発生量の足し合わせにより評価を行った。

その結果、従来のピジョン法でマグネシウムを製錬する場合は $150,000 \text{ km}$ 以上自動車

を走行させると、マグネシウムフードが CO₂ 発生量の観点から優位になることが確認された。一方、従来の電解製錬法でマグネシウム合金を製錬する場合は製錬の観点からもマグネシウムフードの適用が CO₂ 発生量の観点からも優位となり、自動車を走行させればさせるほど CO₂ 発生量の観点から優位になることが明らかとなった。なお、マグネシウムダイカスト品に関する CO₂ 削減効果については、国際マグネシウム協会(IMA)の報告があり、ほぼ同じ結果が得られている⁵⁾。計算に利用した諸元については IMA の試算を参照されたい。

2.3.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.9-2 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
①-1. Mg 合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体製作指針の確立（横浜金沢分室：(株)総合車両製作所）	新難燃性マグネシウム合金材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体の製作指針を確立する。	各種接合方法が Mg 合金に適用可能であり，その接合技術を確立した。その各種接合方法を適用して鉄道車両構体の試作を実施することで，製作指針を実証確認することができた。	○	
①-2. Mg 合金部材の MIG 溶接技術の確立（木ノ本伸線（株））	新難燃性マグネシウム合金製の長尺部材による連続 MIG 溶接を達成する。	ローラ回転法のビードオン試験及びパラレル移動法の溶接試験により連続 MIG 溶接の可能性確認済み。2020 年度中に溶接試験部の評価予定。2020 年度中に達成見込み。	○	
①-3. FSW による各種難燃性 Mg 合金の接合継手特性評価（産業技術イノベーションセンター）	摩擦攪拌接合による各種難燃性 Mg 合金の継手効率 80%以上を目指す。また、長尺部材を健全に接合できる摩擦攪拌接合ツールを開発する。	平板において、提案しているツール形状で新規開発各種難燃性 Mg 合金での継手効率 80%以上は達成しており、その改良により、実型材（中空）への適応が可能である。	○	
①-4 難燃性 Mg 合金大型展伸材の接合品質の非破壊評価技術の高度化（つくば千現分室：物質・材料研究機構）	接合欠陥の 2 次元位置標定を行う。また、無線 AE 計測システムと MI システムを接続し、計測データを活用できる基盤を整備する。	1 次元標定を 2 軸組み合わせた 2 次元欠陥位置標定が可能となった。また、MI システムにワークフローを制御する API が実装され、計測データの解析が可能となった。	○	

<p>①-5 難燃性 Mg 合金部材の構造物としての特性評価及び設計指針の構築 (明石分室：川崎重工業 (株))</p>	<p>新難燃性マグネシウム合金製構体の構造要素の強度、製作性及び耐食性を実証する。</p>	<p>疲労強度改善が見込まれる溶接接手を開発し気密疲労試験構体に適用し製作性を実証した。また、気密疲労試験の環境における構体材料の耐食性についても実証した。2020年度末までに、構造要素として構体一般部の気密疲労強度を実証する見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>①-6 難燃性 Mg 合金の二軸応力下における疲労強度特性評価 (立命館大学)</p>	<p>二軸疲労試験手法の構築ならびに多軸度および材料異方性を把握するための試験データを取得する。また、二軸応力下の疲労強度特性評価手法を提示する。</p>	<p>二軸疲労試験を実施するために、試験体の形状決定・試作・検証および試験装置の製作を行った。</p>	<p>△</p>	
<p>①-7 難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成、及び難燃性 Mg 合金製車両構体の表面処理仕様の確立 (小牧分室：大日本塗料 (株))</p>	<p>これまでに開発した表面処理法を車両に適用するための、部位別の塗装仕様を構築する。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータを DB 化する。</p>	<p>部位別の塗装仕様は構築し現在大気暴露試験に懸架中。2020 年末の回収結果をもって判断し DB 化の上終了予定。2020 年度中に達成見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>①-8 難燃性 Mg 合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発、及び難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成 (ミリオン化学 (株))</p>	<p>プロジェクトで開発した化成処理技術の確立を目指す。また、大気暴露試験や促進試験で得られたデータを DB 化する。</p>	<p>化成処理技術については確立済み。促進試験での取得データも取得済み。屋外暴露結果については 2020 年末の回収結果をもって DB 化し終了予定。2020 年度中に達成見込み。</p>	<p>△</p>	

①-9 難燃性 Mg 合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明（芝浦工業大学）	耐食メカニズムの解明を継続して進めると共に、表面処理による耐食性への効果、及び微量添加元素や組織形状が及ぼす腐食挙動の影響について調査解明する。	腐食メカニズムの解明、および表面処理の有効性、処理剤の組成の硬化につき、信頼性の裏づけデータとしての解明終了。	△	
②-1 Mg 合金による自動車部品試作、性能評価（湘南分室：(株) トヨタ C & D）	実車に搭載されている自動車フロントフードを調査し、部品としての目標特性を明確化する。部分試作、実車部品製作を行い、設計、成型条件の構築を行う。	19 年度末までに、フロントフードの目標特性の明確化の完了済み。今年度以降、フロントフード 1/1 スケール製作の実施による、プレス成型条件の構築する予定。	○	
②-2 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理技術の開発（平塚分室：日本パークライジング (株)）	マグネシウム合金板材の表面処理性を評価し、自動車フロントフードに最適な合金組成チューニングに連携する。また、異種材料同時処理可能な化成処理時技術の基本設計を行う。	Zr 化成処理により、Mg-Al 同時化成処理が可能となることを見出した。自動車向け電着塗装に最適化することで適用が可能。	△	
②-3 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理条件の最適化（ミリオン化学 (株)）	提供されるマグネシウム合金板材の表面処理性を従来技術および②-2 で開発した技術を用いて最適化し、表面処理性を評価、明確化する。	他の金属と同様に、Mg 合金に対する皮膜付着量の制御が可能であることが確認できた。これにより、自動車向け電着塗装に最適化することができ、最適付着量範囲の明確化が可能になる。2020 年度中に達成見込み。	△	

<p>③-1 Mg合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性、成形性等）データベースの構築（名古屋守山分室：産総研）</p>	<p>開発した難燃性マグネシウム合金の疲労特性、電気化学特性を評価する。また、自動車用マグネシウム合金の各種特性（成形性、耐食性）を系統的に評価する。</p>	<p>他の分室と共同で難燃性Mg合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。易成形性Mg合金の成形性も系統的に評価中。2020年度中に目標を達成見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>③-2 Mg合金の輸送器機への適用に関する技術動向調査（日本マグネシウム協会）</p>	<p>国内外で実施されるセミナー、学会等により、開発される鉄道用、自動車用マグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法の標準化へ向けた課題と問題点を明らかにする</p>	<p>国内外で実施されたセミナー、学会等により、自動車等輸送機器部材向けマグネシウム合金等の材料開発、プレス成形・接合・表面処理等の二次加工技術の動向、適用動向を調査し、開発されるマグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法等に関する課題や問題点を抽出した。</p>	<p>○</p>	
<p>③-3 Mg合金の接合プロセスの開発と接合部の強度信頼性評価（長岡技術科学大学）</p>	<p>自動車部品を想定した接合部の応力状態に基づき、異なる接合プロセスにより得られた各種接合体の強度新信頼性を評価・比較する。強度支配因子と接合部の応力状態から接合部の設計法を提案する。</p>	<p>自動車で広く適用されている抵抗スポット溶接とセルフピアスリベット（SPR）接合を難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金の共材および異材接合に適用した。それぞれの接合体の強度特性や接合部の状態を明らかにした。破壊メカニズムおよび強度支配因子を継続して検討し、実用的な接合部の設計法を2020年度中に提案する見込み。</p>	<p>△</p>	

<p>③-4 易加工性 Mg 押出部材の開発 (射水分室：三協立山(株))</p>	<p>新規難燃性高速押出合金による大型・長尺ダブルスキン形材の製造プロセス技術を確立する。また、自動車ドアビーム部材への適用を実現する、易加工性高強度押出形材の製造プロセス技術を確立する。</p>	<p>気密疲労モックアップ構体の設計仕様に基づく大型中空押出形材(全 17 型)の作製を完遂。 自動車ドアビーム部材に要求される強度と易加工性を兼備した新規高速押出 Mg 合金を開発。実機による実部材の製造プロセス技術を構築中。</p>	<p>△</p>	
<p>③-5 高強度 Mg 材 (中板・厚板) の開発 (相模原分室：権田金属工業(株))</p>	<p>鉄道用材料では、開発合金のスケールアップ技術を開発し、実用化を達成するための課題を明確化する。自動車用材料では、合金組成と圧延プロセスの最適化により、フロントフードに要求される諸特性を持つ材料を開発する。</p>	<p>幅広圧延板材作製条件と各種特性および組織変化の関連付けにより、実機を用いて特性低下要因を調査中。他分室と連携し継手疲労試験は継続中。これまでに得た知見を基に気密構体部材の作製を行った。</p>	<p>△</p>	
<p>③-6 高成形性 Mg 材 (薄板) の適用技術開発 (伊丹分室：住友電気工業(株))</p>	<p>自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金板材を開発する。また、作製し成形性、表面処理性の基礎特性を各々のプロセス開発担当機関と連携して評価する。</p>	<p>他の分室と共同で難燃性 Mg 合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。易成形性 Mg 合金の成形性も系統的に評価中。2020 年度中に目標を達成見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>③-7 Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明 (長岡技術科学大学)</p>	<p>高強度高成形性マグネシウム合金の強度・延性、成形性、および表面処理性に及ぼす晶出物、析出物、結晶粒径などの組織因子の影響を明らかにする。</p>	<p>マグネシウム合金板材の強度・延性や成形性に及ぼす各種組織因子の影響を明らかにし、8mm を超えるエリクセン値と良好な引張特性を兼備した板材を開発した。</p>	<p>△</p>	

<p>③-8 高強度難燃性 Mg 合金の押出し成形技術開発 (長洲分室：不二ライトメタル(株))</p>	<p>開発合金 AX92 を用いた気密疲労試験構体の部材を作製する。また、AX92 を自動車構造部材向けにチューニングした合金を用いてドアビーム形材を試作する。</p>	<p>開発合金 AX92 を用いて気密疲労試験構体の部材(床材、梁材)を作製した。自動車構造部材向けにチューニングした合金で耐力の目標値を達成。伸びを改善して 2020 年度中にドアビーム形材を試作達成見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>③-9 高強度難燃性 Mg 合金ビレット製造技術開発 (戸畑製作所(株))</p>	<p>テーマ③-8 の押出形材を作成するために必要なビレットの製造技術を確立する。</p>	<p>AX92 合金の押出形材を作製するのに好適なビレットの製造条件を確立した。また、AX92 のチューニング合金ビレットの製造条件を評価し 2020 年度中に達成見込み。</p>	<p>△</p>	
<p>③-10 低温高成形性 Mg 合金展伸材の適用技術開発 (板橋分室：日本金属(株))</p>	<p>プレス温度の低温化と強度特性を両立するマグネシウム合金展伸材の製造技術を確立する。自動車フロントフードの製造に必要な材料仕様を検証し、部材化に必要な特性を満たす板材の提供を目指す。</p>	<p>合金開発によってプレス温度の低温化と高強度化に取り組んだ。結果、室温エリクセン値で 8.6mm と目標値(8.0mm)を大きく上回り、室温深絞りによる試作も成功した。また、小型フード形状試作においても 150℃(目標値)以下での成形を達成した。しかし、強度は目標値(耐力 130MPa 以上)を 120MPa と下回った。</p>	<p>△</p>	<p>強度実達の原因は結晶粒径が粗大であった事と考察。圧延条件の最適化によって、結晶粒径の微細化し強度目標達成を目指す。</p>
<p>③-11 Mg 合金の加工時の組織評価 (つくば千現分室：物質・材料研究機構)</p>	<p>自動車フロントフードに要求される諸特性を持つマグネシウム合金として時効硬化を利用した合金の組織評価を行い上記部材に適した合金組成チューニングの指針を提供する。</p>	<p>合金元素添加が室温成形性と引っ張り特性に及ぼす影響について検討し、8mm をこえるエリクセン値を発現させるための組織設計指針を導出。</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-2.3.9-3 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
①-1. Mg 合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体製作指針の確立（横浜金沢分室：(株)総合車両製作所）	2017年度にはオール Mg 合金製簡易モックアップ構体（1m）を、2019年度には気密疲労試験用構体を試作して、接合・組立技術を実証確認した。2020年度には気密疲労試験を実施して、試作した構体の評価を実施する。	新難燃性マグネシウム合金製の実物長の高速車両構体を作製するための接合・組立技術を構築する。	構体試作により明確化した課題解決の必要はあるが、接合・組立技術の基礎は構築できる。
①-2. Mg 合金部材の MIG 溶接技術の確立（木ノ本伸線（株））	ローラ回転法のビードオン試験及びパラレル移動法の溶接試験により連続 MIG 溶接の可能性確認済み。2020 度中に溶接試験部の評価予定。	各種難燃性マグネシウム合金押出形材及び圧延板材の長尺部材の連続 MIG 溶接を達成する。	2020 度中に溶接試験部の評価により達成見込み。
①-3. FSW による各種難燃性 Mg 合金の接合継手特性評価（産業技術イノベーションセンター）	継手効率 80%以上を達成し、接合ツールの形状・寸法の最適化を実施中である。	摩擦攪拌接合技術を用いて、高品質な難燃性 Mg 合金接合継手（継手効率 80%以上）を実現し、各種構造体の製造・生産技術へ展開する。	各種合金ごとのデータ及びこれまでの開発合金の継手特性により連続接合は可能である。
①-4 難燃性 Mg 合金大型展伸材の接合品質の非破壊評価技術の高度化（つくば千現分室：物質・材料研究機構）	2019 年度までに無線 AE 計測装置は本研究に必要な機能は開発を完了し、動作の安定性も確保している。機械学習による AE 事象の発生要因分類は、AE 事象パラメータでは不十分であり波形解析が必要との見通しである。解析結果のリアルタイム可視化は既に可能となっている。	既存解析手法を機械学習させた結果得られたスキームを実装し、小型の組み込み装置のみで接合欠陥をリアルタイムに可視化できるシステムを構築する。	無線 AE 計測装置・機械学習による AE 事象の分類・リアルタイム可視化等の要素技術は既に完成ないし目処が立っており、十分達成できる見通しである。

<p>①-5 難燃性 Mg 合金部材の構造物としての特性評価及び設計指針の構築（明石分室：川崎重工業（株））</p>	<p>構体構造には、剛性、静的強度、疲労強度などの構造物の特性が要求される。Al 合金と Mg 合金の比剛性がほぼ同じであることから剛性を維持して軽量化するには構造的な対策が必要で、窓開口寸法を小さくすることで Al 合金製構体に比べ約 30%の軽量化設計が可能となった。静的強度に関しては、車端圧縮荷重以外の荷重条件で異方性を考慮して必要強度が得られる設計案が得られた。疲労強度については、母材に比べ疲労強度が低下する溶接接手部の強度向上が課題となることから、構体構造に用いられる各種の溶接接手形式の疲労強度データを取得するとともに、疲労強度を改善する接手構造の開発を行い、気密疲労試験構体の設計に反映した。</p>	<p>車体長 25m（新幹線または海外の高速鉄道のサイズ）の難燃性マグネシウム合金製大型構体の基礎的設計技術を確立する。</p>	<p>静的強度に関して、車端圧縮荷重（連結器荷重）への対応が残っている。これまで素材の製造の容易さから比較的薄い板厚で構成していたので従来の Al 合金製構体程度の板厚まで増厚することで車端圧縮荷重についても対応が可能の見通し。疲労強度については、これまでは、試験片レベルの実証を行ってきたが、2020 年度の気密疲労試験で構造物としての疲労強度を実証する見通し。</p>
<p>①-6 難燃性 Mg 合金の二軸応力下における疲労強度特性評価（立命館大学）</p>	<p>十字型試験片用二軸疲労試験装置を用いた疲労試験を実施する。試験材料は、易加工性難燃性マグネシウム合金（AX41）と高強度難燃性マグネシウム合金（AX81G）の 2 種類のマグネシウム合金展伸材を予定している。</p>	<p>十字型試験片等を用いた二軸負荷での疲労試験を実施し、二軸疲労強度に及ぼす負荷の主軸変化の影響を把握し、それを強度評価手法に反映する。</p>	<p>二軸疲労試験に必要なジグの製作および試験装置の整備がほぼ整っているので、二軸疲労試験が予定通り開始できる見込み。</p>
<p>①-7 難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成、及び難燃性 Mg 合金製車両構体の表面処理仕様の確立（小牧分室：大日本塗料（株））</p>	<p>開発した表面処理につき、2018 年度の簡易モックアップ作成時における課題抽出と対策に基づいて 2019 年度の気密構体に適用済み。腐食データについては、現在最終暴露を懸架中であり、2020 年末の回収をもって確認予定。本年度中に目標達成見込み。</p>	<p>試作した気密疲労モックアップの表面処理を通じて課題を抽出し、実構体に対する化成処理施工技術の確立を目指す。</p>	<p>2020 年末の最終暴露回収をもって D B 化し、達成見込み。</p>

①-8 難燃性 Mg 合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発、及び難燃性 Mg 合金の腐食データベースの作成（ミリオン化学（株））	難燃性 Mg 合金製車両構体に必要な化成処理施工技術は、気密構体に適用し異常なし。（終了） 部位別処理仕様における腐食確認につき促進試験は終了 最終暴露を懸架中であり、2020 年末の回収をもって確認予定。	実構体に対する化成処理施工技術の確立を目指す。また、部位別の表面処理仕様を確立し、腐食データベースを基に信頼性の構築を目指す。	2020 年末の最終暴露回収をもって D B 化し、達成見込み。
①-9 難燃性 Mg 合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明（芝浦工業大学）	新規開発の塗布型化成処理皮膜の耐食メカニズムにつき、その組成との関連性なども含め解析終了。	表面処理による耐食性への効果や微量添加元素や組織形状が及ぼす腐食挙動の影響について調査解明する。	目標達成
②-1 Mg 合金による自動車部品試作、性能評価（湘南分室：（株）トヨタ C & D）	アルミニウム製フロントフードのベンチマークによる部品特性調査完了済み。開発合金でのフロントフードを詳細設計するにあたり、以下を検討中。プレス成型条件の検討中。SPR 接合性評価の検討中。フロントフード張り剛性試験と FEM 解析との合わせ込みの検討中。	自動車フロントフードを製作し、部品としての性能評価を行い、自動車部品として実用化に向けた設計、技術の構築を目指す。	概ね達成見込み。
②-2 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理技術の開発（平塚分室：日本パークライジング(株)）	Mg 合金組成と塗装後耐食性に最適値があるものと思われ、素材と処理剤の調整を行う。また、材料から溶出してくる Zn や Fe イオンのコンタミ対策が必須であるため、新たな対策技術を講じる必要がある。	自動車フロントフード製作用の化成処理技術を提供し、フロントフードとしての性能評価結果を取得することを目指す。	Zn や Fe イオンのコンタミ対策は非常に難易度が高いが、あらゆる可能性を追求し、対策を行うことで技術を確立する。
②-3 Mg 合金-Al 合金の同時化成処理条件の最適化（ミリオン化学(株)）	自動車向け電着塗装に対する皮膜付着量最適範囲を確認する必要がある。また、脱脂等の皮膜前処理についても Mg-Al 同時化成処理を考慮して最適化する必要がある。	自動車フロントフード製作用の化成処理薬剤や工法の最適化を行うことで、Mg-Al 同時化成処理技術の確立を目指す。	合金組成の最適化との連携すること、皮膜付着量制御が可能であることから、目標達成見込み。

<p>③-1 Mg合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性、成形性等）データベースの構築（名古屋守山分室：産総研）</p>	<p>他の分室と共同で開発した難燃性Mg合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。得られたデータはテーマ60と共同でDB化を推進中。易成形性Mg合金の成形性に関しても系統的に評価を実施中。今年度中に目標を達成見込み。</p>	<p>鉄道車両構体用に開発した合金および自動車用途に開発した合金の疲労特性、耐食性、成形性等に関するデータを集約し、工業的に利用するために必要なDBとして体系化する。</p>	<p>期間内に目標を達成予定。</p>
<p>③-2 Mg合金の輸送器機への適用に関する技術動向調査（日本マグネシウム協会）</p>	<p>国内外で実施されたセミナー、学会等により、自動車等輸送機器部材向けマグネシウム合金等の材料開発、プレス成形・接合・表面処理等の二次加工技術の動向、適用動向を調査し、開発されるマグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法等に関する課題や問題点を抽出した。</p>	<p>国内外で実施されるセミナー、学会等による情報収集により、開発されるマグネシウム合金、加工技術及び評価方法の標準化を図るためのデータ、情報を整備する。</p>	<p>期間内に目標を達成予定。</p>
<p>③-3 Mg合金の接合プロセスの開発と接合部の強度信頼性評価（長岡技術科学大学）</p>	<p>抵抗スポット溶接とセルフピアスリベット（SPR）接合を難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金の共材および異材接合に適用した。それぞれの接合体の強度特性や接合部の状態を明らかにした。接合部の設計法の提案を目指し、破壊メカニズムおよび強度支配因子の検討を継続して進めている。</p>	<p>各種接合法により得られたマグネシウム合金接合体の強度支配因子を明らかにし、強度信頼性の高い接合体を得られる接合法を示す。</p>	<p>自動車で広く適用されている2種類の接合体については検討が進んでいる。SPR接合との併用も考慮して接着接合に関する検討を進める。これら全体をまとめることで、目標を達成する。</p>
<p>③-4 易加工性Mg押出部材の開発（射水分室：三協立山(株)）</p>	<p>気密疲労モックアップ構体の設計仕様に基づく大型中空押出型材(全17型)の作製を完遂。自動車ドアビーム部材に要求される強度と易加工性を兼備した新規高速押出Mg合金を開発。実機による実部材の製造プロセス技術を構築中。</p>	<p>次世代高速車両構体および自動車構造部材への適用を実現する、新規難燃性高速押出合金による大型・長尺押出型材の製造プロセス技術を工業レベルで確立する。</p>	<p>高速車両構体向け大型・長尺押出型材の実用化には大規模な設備投資が必須も、既存実機での製造プロセス技術の高度化により、最終目標の達成見通しを得ることは可能。</p>

<p>③-5 高強度 Mg 材 (中板・厚板)の 開発(相模原分 室:権田金属工業 (株))</p>	<p>幅広板材は、実機を使用して圧延条件と各種特性を取得することで特性低下に影響を及ぼすプロセス因子の絞り込、工業化に向けたプロセスの調整を実施中。自動車用材料の開発は目標値を2019年度に達成したため研究を終了。得られたデータはテーマ60と連携しDB化を推進中。今年度に達成見込み。</p>	<p>開発した難燃性マグネシウム合金広幅圧延材の製造プロセス技術を工業レベルで確立する。また、自動車等の輸送機器適用や多用途展開に向けて長さ1m以上の合金板材を作製する。</p>	<p>板材の工業化に向けては設備投資の検討が必要。板材の2次加工は金型作製などを含め、他企業との連携も視野に入れた検討が必要。</p>
<p>③-6 高成形性 Mg 材(薄板)の適用技術開発(伊丹分室:住友電気工業(株))</p>	<p>他の分室と共同で開発した難燃性Mg合金の母材・継ぎ手の平面曲げ疲労特性を系統的に取得中。また、主要元素濃度が耐食性に及ぼす影響を調査中。得られたデータはテーマ60と共同でDB化を推進中。易成形性Mg合金の成形性についても系統的に評価を実施中。今年度中に目標を達成見込み。</p>	<p>自動車フロントフード製作用の合金板材を提供し、フロントフードとしての性能評価結果を取得することを目指す。</p>	<p>期間内に目標を達成予定。</p>
<p>③-7 Mg合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明(長岡技術科学大学)</p>	<p>2019年度までにマグネシウム合金板材の引張特性や室温成形性に及ぼす各種組織因子の影響を明らかにした。プロセス-微細組織の定量的な関係構築も進行中で、今年度中に最終目標を達成見込み。</p>	<p>自動車フロントフード用マグネシウム合金板材として必要な諸特性を具現化するための最適プロセスを提案する。</p>	<p>期間内に目標を達成予定。</p>
<p>③-8 高強度難燃性 Mg合金の押し成形技術開発(長洲分室:不二ライトメタル(株))</p>	<p>高強度合金AX92形材を量産化するための製造プロセス導出済み。チューニング合金は耐力:270MPa以上を達成(伸びを10%以上に改善する必要あり)</p>	<p>開発した高強度押出合金AX92及びチューニング合金を高速車両構体、自動車向け構造部材として量産化するための製造プロセス条件を導出する。</p>	<p>チューニング合金の機械的特性の目標値は鋳造ビレットの高品質化によって達成可能。</p>

<p>③-9 高強度難燃性 Mg 合金ビレット製造技術開発（戸畑製作所(株)）</p>	<p>AX92 合金の押出形材を作製するのに最適なビレットの製造条件を確立した。また AX92 のチューニング合金ビレットの製造条件を評価中。</p>	<p>開発合金 AX92 及びチューニング合金を用いた、高速車両構体、自動車向け構造部材を製造するためのビレット製造条件を確立する。</p>	<p>AX92 のチューニング合金ビレットの作り込みによって達成可能。</p>
<p>③-10 低温高成形性 Mg 合金展伸材の適用技術開発（板橋分室：日本金属(株)）</p>	<p>基本的合金設計(Mg-Zn-Al-Ca 系)は終了。室温成形性の目標値(エリクセン値 8.0mm 以上)及び小型フードの成形テスト(150℃)をクリア。強度特性は未達だが、達成に目処。量産性について実機レベルサイズの原料を製作。</p>	<p>自動車フード部材を製作するのに最適な低温成形性、耐食性、強度特性を兼備したマグネシウム合金展伸材を提供する。</p>	<p>合金組成及び生産条件(鑄造、押出し、圧延)のチューニングで達成可能。</p>
<p>③-11 Mg 合金の加工時の組織評価（つくば千現分室：物質・材料研究機構）</p>	<p>合金元素添加が室温成形性と引張り特性に及ぼす影響について検討し、8mm をこえるエリクセン値を発現させるための組織設計指針を導出。加工後の熱処理による組織変化の解析から強化メカニズムを解明。</p>	<p>成形加工や塗装を模した加熱処理時の詳細な組織変化を評価することで成形および強度変化のメカニズムを解明することを目指す。</p>	<p>2021 年 3 月までに達成できる見込み</p>

(3)研究開発の成果と意義

本テーマでは、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材を利用して鉄道車両構体を作製するための材料製造技術、設計技術、接合・表面処理技術の開発を統合的に実施している。2019年度は、これまでに開発した新難燃性マグネシウム合金を用い、車両構体の気密疲労試験に供するモックアップ構体の設計・素材製造・構体作製を実施した。また、テーマ番号 60「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発」と連携し、高速車両構体等の構造体を設計する際に必要となる部材の信頼性データを統合的に取得することを推進した。さらには、本テーマで得られたシーズを輸送機器全般（自動車等）に適用することを目的として、マグネシウム合金展伸材を用いて自動車部材を設計・製造するための技術を統合的に構築することを目指した。

以下に、本テーマの各研究開発項目における 2019年度の成果を中心に成果の詳細を示す。

① 革新的マグネシウム材の鉄道車両構体への適用技術開発

①-1 マグネシウム合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体の製作指針の確立【総合車両製作所】

開発した構体の構成は、屋根構体および側構体は、高速押出合金 AX41 のダブルスキン型材を使用し、台枠の床板・横はりには高強度合金 AX92 の中実型材を、ゴム継手の固定部に高強度圧延合金 AX81G を適用し、妻構体は鉄製の気密仕切りを使用した。今回の気密疲労試験用構体は、アルミニウム合金製車両構体の 25m 長さ一般部と剛性が同等になるように 3 分割で設計され、ダブルスキン型材の開先継手は前年度に開発した溶接継手にミグ溶接を適用して組立を行った。床板同士の接合には FSW（摩擦攪拌接合）を適用した。溶接ビードを研削する際に発生する切粉の取扱いは、安全のために専用の乾式集塵機とジャバラ式テントを使用し、切粉の飛散防止と一作業一清掃のルールを確実に実行した。

2019年度は、これまでの成果からステップアップして世界初、世界最長のオールマグネシウム合金製で、断面が実物サイズの鉄道車両気密構体を製作することができた。この構体の寸法は、幅 3480mm、高さ 2880mm、長さ 5000mm であり、質量 2,900kg である。試作した気密構体では長さ 3000mm の構体中央部は 200kg/m となり、アルミニウム合金製構体の 300kg/m と比較すると、33%の軽量化を達成することができた。さらに実用に近づくために、今回の構体を使用して、新幹線構体の評価試験の中では最も耐久性に重要である気密疲労試験を行うことにより、実用化に必要な要素技術に対する課題を明確にしていく。

①-2 マグネシウム合金部材の MIG 溶接技術の確立【総合車両製作所、再委託先：木ノ本伸線】

新難燃性マグネシウム合金の大型押出型材や圧延板材の使用を想定して、溶接ロボットを用いた平行移動法による長尺 MIG 溶接の連続溶接試験を行い、長尺連続溶接の可能性と課題を確認した。供試材は難燃性マグネシウム合金 AZX611 の圧延板材

および AXM4102 の押出板材とし、溶加材ワイヤは AZX611 を用いた結果、良好な接合継手を得ることができた。試験中のアーク状態、溶接ビード外観、断面マクロを観察し、溶け込み状態が良好であることを確認した。

①-3 摩擦攪拌接合（FSW）による各種難燃性マグネシウム合金の接合継手特性評価
【総合車両製作所、再委託先：茨城県産業技術イノベーションセンター】

新規開発難燃性マグネシウム合金では、一般的なマグネシウム合金と比べ健全な摩擦攪拌接合条件の範囲は狭いが、健全な接合継手を得ることができた。その継手強度は母材の 80%以上を示した。接合ツール形状の変化による接合部強度の大きな変化は確認されない。

今後は、得られた系統的な接合条件データを用いて、実際の車輛構体に使用されている型材を模擬し摩擦攪拌接合における接合条件を評価する。さらには、車輛構体に適した部材形状の検討を進め、安定した長尺の型材接合の実現をめざす。

①-4 難燃性マグネシウム合金大型展伸材の接合品質の非破壊評価技術の高度化【物質・材料研究機構】

2019 年度は、アコースティック・エミッション（AE）連続波形計測を無線化できる独自開発装置の改良と、同装置の難燃性マグネシウム接合プロセスのモニタリングへの適用による内部欠陥の検出および評価を行った。

無線 CWM は、2018 年度までに AE 計測に必要な性能を備えることができたが、データ欠落やハングアップが生じる等の安定性の課題があったが、機器のハードウェア挙動を精査し、これを解決した。また、無線化のため新開発した部分と既存部分との互換性が不十分であったため、計測にやや複雑な手順があった部分も改善し、簡便に計測可能とした。

この無線 CWM を用いて、難燃性マグネシウム合金展伸材の接合プロセスの AE モニタリングを行った。本モニタリングは材料や接合法に依存せず適用可能な手法だが、今年度も検証のため、機械制御で自動的に接合を行える（手作業に依存しない）FSW を扱った。FSW は入熱量を変化させながら行った。その結果、特に、入熱不足の際に板材内部に部分的に発生する空洞をとまなう接合欠陥が検出できることが示された。軽度の入熱不足の条件では、接合前半と接合後半で大きさの異なる、ツール回転ごとに繰り返す欠陥が生じていた。これに対し、AE が回転の中でいつ発生したものであるかタイミングを測ると、観察結果と同様の偏りが明確に見られた。このように、入熱不足ではツール回転の周囲で板材内部に欠陥が生じ、それが AE として検出できることが示された。本欠陥のように試料の一部分にしか発生せず、しかも表面から見えない欠陥がリアルタイムに検出できることは、今回開発した AE 計測手法の有用性を示したと言える。

①-5 難燃性マグネシウム合金部材の構造物としての特性評価及び設計指針の構築
【川崎重工業】

①-6 難燃性マグネシウム合金の二軸応力下における疲労強度特性評価【川崎重工業、

再委託先：立命館大学】（①-5、①-6 は成果をまとめて記載）

1. 研究開発の内容及び成果等

鉄道車両構体として運用される状態を模擬した条件における難燃性マグネシウム合金の構造物としての特性を取得し得られた知見を基に鉄道車両用構体の設計指針を構築する。具体的には、a)実構造に適用する際の継手構造の強度特性の把握とその改善方法の検討、b)圧延方向（押出方向）による強度特性の検証、c)異種材料との接触部の耐食性の検証などにより構造物としての特性を取得するとともに d)構体気密疲労試験の実施、e)車端圧縮荷重試験により強度を実証し、得られた知見を基に設計指針を構築する。

a)については、2018 年度に構体の最終組立（構体結合）に用いられてきた開先隅肉溶接継手の疲労強度が低いことが確認されたため、新たな構体結合用溶接接手の開発を行った。b)については、主応力比が 1 程度の応力場における 2 軸疲労試験を実施するために立命館大学（再委託先）にて十字型試験片を用いた二軸引張圧縮試験の計画と予備試験を実施した。c)については、窓取付部や床下機器の取付部を模擬した暴露試験により構造の経年データの取得を継続して進めている。d)については、2017 年度に設計した構体モックアップの構造を基に、設計寿命 20 年間の繰り返し気密荷重に対応できるように疲労強度を向上するための改設計を行った。また、試験構体は亀裂の有無の観察のため無塗装であるため、試験準備として、試験候補地における無塗装の構体材料の暴露試験を実施した。さらに、構体に繰り返し気密荷重を負荷するための試験装置を製作し模擬構体を用いた気密荷重試験を実施した。e)については、車端圧縮荷重として連結器荷重：980kN に対応する構造案を検討したが、目標の強度がまだ得られていないため 2020 年度に継続して検討を進める。

2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

a)実構造に適用する際の継手構造の強度特性の把握とその改善方法の検討に関しては、構体結合用溶接接手を新たに考案し疲労試験により従来の開先隅肉溶接接手に比べて強度向上を確認した。b)圧延方向（押出方向）による強度特性の検証に関しては、十字型試験片の形状を FEM 解析にて決定するとともにマグネシウムのヤング率に起因する低荷重大変位に対応するための試験装置の制御プログラムの改修を実施した。d)構体気密疲労試験の実施に関しては、気密疲労試験構体の設計に、疲労強度の向上のために 2018 年度に開発した裏当て付き開先溶接接手や今年度、開発した構体結合用溶接接手を適用するとともに、特に高応力が発生していた肩 R 部については、ダブルスキン構造の厚みを 10mm 大きくするなどの変更を行った。また、試験候補地における暴露試験では、想定される試験期間（半年から 1 年程度）では、腐食減量が小さく試験構体の板厚に腐食代を設ける必要が無いことを確認した。また、模擬試験構体を用いた気密荷重試験では、設計時のシミュレーション結果と同等の圧力サイクルを発生させることができることを確認した。

①-7 難燃性マグネシウム合金の腐食データベースの作成、及び難燃性マグネシウム合金製車両構体の表面処理仕様の確立【大日本塗料】

新規開発合金の母材、並びに塗装品の耐食性評価に関しては、暴露試験の結果を中

心に評価・解析を進めた。既存難燃性マグネシウム合金(AZX612 合金)の屋外暴露に関しては、2019年度で5年が終了し、アルミニウム合金(A6N01 合金)との比較を、1年・3年・5年の腐食減量・浸食深さにつき、評価を実施した。その結果、母材に関しては、A6N01 合金と比較して AZX612 合金の腐食減量は著しく大きい、浸食深さに関しては、腐食減量の差に比べて相対的に小さいことを確認した。塗装品に関しては、一般面からの著しい腐食は認められなかった。新規開発の各種マグネシウム合金(AZ41/AZ91/AZ81G/AZ81S)については、母材・塗装品共に暴露を継続中である(3年目)。

新規開発合金の接合部の評価に関しては、屋外暴露評価を開始するとともに促進試験(塩水噴霧試験)での評価を実施した。その結果、表面処理無しの接合部(TIG/MIG)周囲には、母材よりも顕著な腐食の進行が見られ、TIG 接合においてそれが顕著であることを確認した。なお、塗装工程を経れば問題が無いことも確認した。但し、化成処理工程を省略すると、カット部からのフクレが出る場合もあった。接合部の耐食性が劣化した原因については、ガルバニック腐食の可能性もあるが、接合方法による程度の差や、同一溶加材を使用するアルミ合金でもわずかであるがその傾向も認められることから、他の要因も考えられる。2020年度は、接合部分の状態についての分析とその原因の解析を継続実施する予定である。

①-8 難燃性マグネシウム合金製車両構体に必要な化成処理施工技術の開発【大日本塗料】

プロジェクトで開発した化成処理技術(大型車両に対する新規開発のスプレー式の化成処理)に関して、2019年度、横浜金沢分室で作成した1/1気密疲労試験構体の作成に適用した。具体的には、気密疲労構体の評価部と剛性調整部の接続部分に化成処理を適用し、問題なく施工できることを確認した。塗装(意匠付与)工程については、気密疲労試験後に、構体素地の欠陥評価を行う都合上、本構体への適用は除外した。

①-9 難燃性マグネシウム合金及び合金上に作製した皮膜の耐食性評価と耐食メカニズムの解明【大日本塗料、再委託先：芝浦工業大学】

プロジェクトで開発した化成処理技術(大型車両に対する新規開発のスプレー式の化成処理)は、化成処理溶液に特定元素を含有させることで耐食性を改善するところに特徴がある。2019年度は、上記化成処理技術を対象として、XPS、SEM-EDS等の評価技術を駆使して、化成処理皮膜の構造評価解析を実施した。その結果、化成処理液中に含有した特定元素①の化合物が表面処理皮膜に存在することや、当該化合物が化成皮膜の形成を安定化させ、且つ、防錆目的で加えた特定元素②の塗膜内の分散状態も、化成処理膜の緻密化や防錆顔料の偏在抑止に寄与にしたことが示唆された。

② 革新的マグネシウム材の自動車構造部材への適用技術開発

②-1 マグネシウム合金による自動車部品試作、性能評価【トヨタカスタマイジング&ディベロップメント】

マグネシウム開発合金を用いてフロントフードの試作を行うに当たって必要となる

7つの研究項目について研究開発を推進した。

- (1) アルミニウム製フロントフードの分解調査：ベンチマークとしたアルミニウム製フロントフードの分解調査を行い、部品としての目標特性を明確化した。
- (2) フロントフードのリバースエンジニアリング：ベンチマークのフロントフード形状にて試作を行うため、対象部品のリバースエンジニアリングを行った。3次元測定から得られたスキャンデータを使用し、CADデータの作成を完了した。
- (3) 開発合金のプレス成形トライ：フロントフードを模擬した小型の形状にて、フードアウトパネル、フードインナパネル、ヘミングの成形トライを行い、現状の開発合金の成形性を把握した。
- (4) フロントフードの張り剛性試験：ベンチマークのフロントフードの張り剛性試験を行い、得られた結果からFEM解析を実施中。
- (5) ストライカ・ヒンジリフォースの試作：フロントフードの構成部品であるストライカ、ヒンジリフォース(右側/左側)の試作を行い、両者ともプレス成形まで完了した。
- (6) SPR接合の評価：適用を検討しているSPR接合での引張せん断強度と接合部のガルバニック腐食性を評価するための試験片を作成し、引張せん断強度試験を実施した。ガルバニック腐食試験は、今後実施予定。
- (7) 簡易フードインナパネルの試作：実寸大のプレスを実施する際の問題点抽出を行うため、フロントフードを模擬した簡易フードインナパネルの試作を実施し、成形できることが確認できた。

②-2 マグネシウム合金-アルミニウム合金の同時化成処理技術の開発【日本パーカラライジング】

本検討は革新マグネシウム材を自動車に適用するものであることから、現在、自動車ラインで採用されている化成処理剤2種の適用を検討した。適用した化成処理剤はリン酸亜鉛処理（プレパレンX、パルボンドSX35：日本パーカラライジング製）とジルコニウム化成処理（パルシード2010D：日本パーカラライジング製）を用いた。また、化成処理性および電着塗装（自動車用カチオン電着塗装：15 μ 膜厚）を行った後の塩温水浸漬による塗装後耐食性を確認した。

化成処理性を確認したところ、リン酸亜鉛処理はマグネシウム材に析出するものの、塗装後耐食性が大幅に低下した。これは処理液中に含まれるNiやFeが金属析出し、卑なマグネシウムがガルバニック腐食により溶解したものと考えられる。これらの金属を除くと、化成処理の反応起点がなくなるためか皮膜が析出しなくなってしまう。一方、ジルコニウム化成処理はマグネシウム材にも析出し、ある程度良好な塗装後耐食性を示した。これより、本検討の趣旨となるマグネシウム-アルミニウム同時化成処理はジルコニウム系化成処理を中心に実施していくこととした。

次に、化成処理性は材料の表面状態に大きく影響されるため、材料に含まれる合金組成を変動させ、化成処理性と塗装後耐食性への影響を調査した。マグネシウム材はアルミニウム含有量を変動させたものを用い、比較材として合金化溶解亜鉛メッキ材(GA)を用いた。何れの材料も良好な結果を示したが、Al含有量が高いほど、良好な耐

食性となった。また、マグネシウム材の場合、1点であっても腐食起点から孔食が進みやすく、材料の穴あきに繋がりやすい。これらの孔食を防ぐためにもAl含有量をできるだけ高くし、表面状態を均一化させることや、材料の作り込み時に合金成分の分布をコントロールするなどの技術が求められることが明らかとなった。

②-3 マグネシウム合金-アルミニウム合金の同時化成処理条件の最適化【日本パーカライジング、再委託先：ミリオン化学】

マグネシウム材に好適な条件を探索するため化成処理の条件を変動させ、化成処理性を確認した。化成処理にはミリオン化学社製グラウンダーAL-80を用いた。本化成処理は②-2で用いた平塚分室の製品とは異なるが、基本的な析出機構は同様である。その結果、マグネシウム合金AZ31材への皮膜成分付着量はpHやフリーふっ素濃度（FF）によって変動することが分かった。これらの条件変動はマルチマテリアル処理時に、他材種へも影響するため、注意して条件を設定しなくてはならないことが分かった。

次に、エッチング工程（グラウンダーファイナーMG-104SX：ミリオン化学社製）とスマット除去工程（グラウンダーファイナーMG-15SX：ミリオン化学社製）を追加して化成処理を実施した。なお、スマット除去工程は高アルカリ溶液であり、アルミニウム合金はエッチングされるために有効なデータが得られないことから、AZ31材のみで確認を行った。

皮膜成分付着量の確認試験を実施したところ、エッチング工程およびスマット除去工程が無い場合と比べてZr付着量が低下した。エッチング工程とスマット除去工程を追加することで、表面が平滑化された影響を受けたものと思われ、析出皮膜量が減少した。これらの工程が増えることで処理コスト増大につながるため、皮膜性能に大きく影響するような効果が得られる場合への適用に限定されるべきであることが分かった。

③ 輸送機器の軽量化に資する革新的マグネシウム部材の開発

③-1 マグネシウム合金の各種信頼性（疲労特性、腐食特性、成形性等）データベースの構築【産業技術総合研究所】

疲労特性の評価に関しては、開発した難燃性Mg合金（AX41（押出材）：射水分室・長岡技科大、AX92（押出材）：長洲分室、名古屋守山分室、AX81(G)（圧延材）：相模原分室、AX81(S)（圧延材）伊丹分室）を対象として、母材および各種継手（MIG, TIG, FSW）の疲労特性を平面曲げ疲労試験により共同で評価している。2019年度は、上記合金の溶接継手を対象として、応力比を-0.5と設定した際の疲労特性を評価し、これまでのデータも利用して疲労限度線図として整理した。その結果、母材の疲労限度線図より、応力比-1.0から-0.5において応力振幅は平均応力の影響が少ないことが明らかとなった。一方、MIG接手に関しては、平均応力の増加とともに応力振幅が低下し、平均応力の影響が確認された。

難燃性Mg合金圧延材の耐食性に及ぼす合金成分の影響を調査した。Al濃度を6-11wt%に調整し、Ca濃度を1wt%に固定、Znを1wt%添加した合金（AZX）、添加しない合金（AXM）の圧延材を対象として、その重量減少腐食速度、侵食深さおよび電気化学

特性を評価した。AXM系合金の腐食速度はAl濃度7-8wt%で極小値を取る一方、AZX系合金の場合は同じ濃度レベルで極大値を取った。電気化学インピーダンスの測定結果も同様な傾向を示した。本現象を合金中に析出し始める $Al_{12}Mg_{17}$ (β 相)の観点から検討した。Znの添加は微細 β 相の析出を促進し、母相 α 中のAl濃度が低くなり、結果として α 相と微細 β 相との間でマイクロガルバニック腐食を生ずると推察した。EDX分析を用いてAXM合金およびAZX合金の α 相中のAl濃度を測定したところAZX合金中の濃度が低いことが判明し、予想を裏付けた。

成形性に関しては、Mg-Zn-Al-Ca-Mn系合金圧延材を対象として、主要元素組成と組織の関係を調査した。その結果、Alの少量の添加が粗大な Mg_2Ca 相の形成を抑制することや、Alの過度の添加は粗大な Al_2Ca 相の形成を促進することを明らかにした。また、Mg-Zn-Al-Ca-Mn系合金圧延材の耐食性を評価した結果、少量のMn添加が耐食性の改善に有効であることを確認した。

③-2 マグネシウム合金の輸送器機への適用に関する技術動向調査【産業技術総合研究所、再委託先：日本マグネシウム協会】

国内外における、自動車部材向けマグネシウム合金等の材料開発、二次加工技術の動向、鉄道車両等の輸送機器へのマグネシウム合金適用の動向を調査し、開発されるマグネシウム合金の汎用化、加工技術及び評価方法等に関する課題や問題点を抽出した。

海外動向に関しては、中国・欧米・韓国の状況を調査した。中国では、自動車だけでなく、鉄道車両関連へのマグネシウム適用も進んできている。実用化の例として、高速鉄道CR400（復興号）の内装品への適用が発表されている。中国はマグネシウム合金の製造に関わる全てを自国で賄えることができるという強みがあり、様々なアプリケーションへ積極的に応用していく実行力もある。コンテナ、パレット、建材など、輸送機器部品だけでなく、幅広い分野に展開されようとしている。欧米に関しては、自動車部品への適用が継続的に推進されている。板材に関しては、VW社が積極的に開発に取り組んでおり、幅広材を用いて外板部品の試作が行われている。板材の製造は、韓国POSCO社の双ロール鋳造圧延機によると、マグネシウム合金の圧延は、スラブ圧延に比べ2/3のコスト削減が可能となり、圧延材のコストは2000年の18~20 €/kgに比べ2015年に7~9 €/kgになっているとしている。工業生産レベルとしては、1.4m幅で重量3tの大型コイルの製造が可能である。韓国に関しては、車体軽量化対策により自動車へのマグネシウム合金適用が進んでいる状況となっている。特に圧延材に関しては、大手鉄鋼メーカーのPOSCO社が2m幅の鋳造圧延機と温間圧延機を導入し、2009年から約10年間の大型国家プロジェクト「WPM」の中で、自動車のルーフ、トラングリッド等のパネル部品を試作している。その他にも、EV車用のバッテリーケース、ドローンの機体、LEDライトカバー等のマグネシウム製品の試作を行っており、実用化へ向けた開発が進められている。

国内動向に関しては、マグネシウム合金の輸送機器への適用等に関連する国内各所における発表を調査した。鋳造に関する発表は、輸送分野で長く適用され続けていることもあり少なく、輸送分野での使用実績が少ない展伸材関連の発表が多くなっている。

る。本事業と共に、マグネシウム合金展伸材の製造技術、加工技術に関する研究開発が着実に進められることにより、輸送分野の軽量化ニーズに対応すべく技術が確立されていくことが期待される。

③-3 マグネシウム合金の接合プロセスの開発と接合部の強度信頼性評価【産業技術総合研究所、再委託先：長岡技術科学大学】

2019年度は、4%のAlと1%のCaを含むMg-Al-Ca-Mn系マグネシウム合金（以下、AX41）の抵抗スポット溶接およびSPR接合への適用を試みた。抵抗スポット溶接ではAX41およびAl-Mg-Si系アルミニウム合金（以下、AA6061）の共材および異材の接合、SPR接合ではAX41の共材接合を行い、得られた接合体の強度を引張せん断試験により評価した。また、実際の施工を考え、抵抗スポット溶接では表面研磨の影響についても検討した。

抵抗スポット溶接接合体の引張りせん断試験を実施した結果、今回の溶接条件範囲では電圧が高いほど引張せん断試験により得られた最大荷重の値が高くなった。AX41共材接合では、表面研磨を施した後溶接した継手の方が研磨を施さずに溶接した継手より最大荷重が低い。しかし、AA6061共材接合では表面研磨の影響は明確に確認できなかった。AX41共材溶接継手の引張せん断試験後の破面観察から得られたナゲット径に注目すると、ナゲット径は電圧が高い条件で得られた接合体ほど大きくなっていった。またナゲット径は表面研磨を施した後溶接した継手よりも表面研磨を施さずに溶接した継手のほうが大きかった。ナゲット径の大きさは、継手の強度差の一因と考えられる。次に、AX41とAA6061の異材抵抗スポット溶接継手の引張せん断試験を行った結果、異材継手では、表面研磨を施すと溶接性が著しく低下した。また、異材接合体は共材接合体とほぼ同じ強度を示すものの、相対的に強度のばらつきが大きかった。異材接合体の安定した接合部を得るためには、さらなる溶接条件の検討が必要と考えられる。

SPR接合部の断面観察例より、SPR接合中に生じたと考えられるき裂が下板に認められた。SPR接合および抵抗スポット溶接により得られたAX41共材接合体の引張りせん断試験では、SPR接合体の方が抵抗スポット溶接接合体（350V）より高い最大荷重および大きい最大変位を示した。SPR接合体の接合部の観察より、引張せん断負荷により上板が大きく変形し、リベットが下板から抜けた様子が認められた。また、接合体が大きく曲げ変形を示した箇所近傍のリベット接合端部の上板にはき裂が生じていた。ほかにも、下板の裏側には大きな円状き裂が認められた。これは、室温では変形が底面すべりにほぼ限られることや集合組織の影響等に起因すると考えられ、接合プロセスと合金開発の両者から引き続き検討する必要がある。

③-4 易加工性マグネシウム押出部材の開発【三協立山】

2018年度より設計を継続する気密疲労試験用モックアップ構体の作製を計画通り完遂すべく、2019年度は当該構体を構成するAX41合金大型中空型材の作製に取り組んだ。特に、明石分室（川崎重工業）と密に連携し、気密荷重を付加した際の接合部疲労強度を向上させる中空型材の継手形状の改良や、構体変形のFEM解析結果を踏ま

えた各種中空型材の断面形状の開発を進めた。従来の部分構体用中空型材に採用した溶接継手では、裏当て部の熱容量が大きく、開先のルート部まで十分な溶け込みを得ることが困難なため、接合不良や応力集中が発生し易く、突合せ溶接継手に比べて疲労強度が大幅に低下する課題があった。この課題を解決するため、本研究開発では、裏当て部の形状をテーパー状に薄くして熱容量を小さくし、十分な溶け込みが得られる形状に改良するとともに、ルート部の応力集中軽減策として、中空型材面板の厚さ(t)を開先深さ(h)よりも薄くする($t/h=0.7\sim 0.8$)ことにより、接合部の疲労強度を向上させることが可能な型材継手形状を開発した。なお、本成果は関係機関による共同特許として出願を完了した。また、実際の気密モックアップ構体に使用する合計17種類の押出中空型材の設計とその作製を完遂し、構体組立を実施する横浜金沢分室(総合車両製作所)への供給を完了した。屋根部および吹寄部を構成する中空型材の作製では、本研究開発で確立した直径12インチ($\phi 307\text{mm}$)のAX41合金DC鋳造ビレットによる拡大押出加工技術を適用し、幅280mm、高さ50mmのハモニカ断面形状を有する大型中空型材の押出成形に成功した。また、側受部に使用される押出難易度の高い非対称異形中空型材の作製においては、温間矯正加工を施すことにより、JIS H 4204に規定される型材の曲がりの許容値(2mm以下/m)を十分満足する高精度の中空型材を得ることに成功した。

自動車用構造部材の開発では、広島分室(マツダ)と連携し、ドアビーム部材を具体的開発ターゲットに設定して易加工性と高強度化を両立する部材開発を推進した。2019年度は6000系Al合金に匹敵する押出加工性と、時効硬化による高強度化が期待できるAXM10207(Mg-1Al-0.2Ca-0.7Mn, mass%)合金を設計し、ラボレベルにて押出製品速度20m/min、開発目標(耐力270MPa以上、伸び10%)を達成する高強度高速押出材の作製に成功した。さらに、現行のAl合金部材と等価剛性で20%以上の軽量化が達成可能なドアビーム型材を設計し、本開発合金による実機を用いた実部材の作製も試みた結果、ラボレベルと同等の押出製品速度においても健全な押出型材が得られることを実証できた。

構造部材への適用に資する開発材の信頼性データの蓄積では、2019年度は主にAX41合金押出材のFSW接合材における各種疲労特性データの取得を進め、開発材を用いて構造部材を設計する際のデータを拡充できた。

③-5 高強度マグネシウム材(中板・厚板)の開発【権田金属工業】

2019年度はAX81G合金幅広圧延材を操業実機により作製し、板幅を500mmに幅広化した際の特性低下因子を調査した。圧延加工は粗圧延と仕上げ圧延に分け、粗圧延後は中間熱処理を行った。中間熱処理後の平均粒径は $24\ \mu\text{m}$ 、板厚3mm材では $18\ \mu\text{m}$ であり、耐力と引張強さは280MPaと330MPaで伸びは5%を示した。ラボスケール材と比べ、強度は20MPaの低下に留まった。幅広化しても中間熱処理材の平均粒径は高強度高延性を両立するための閾値をクリアし、幅方向の組織や特性にバラツキは無かった。工業化に向けて素材循環を考慮したりサイクル鋳造も行った。乾式切削屑を溶湯に混合すると空隙形成が多くなり、通常、鋳造材の水素含有量は13ppmに対して42ppmまで増加した。溶解前での酸化物除去や溶湯処理の開発が必要なことが

分かった。AX81G 合金の平面曲げ疲労試験を TIG、FSW 材では応力比 $R=-0.5$ 、MIG 異材接合材（溶加材は AZX911）では $R=-1$ で実施した。TIG 材は $R=0$ と -0.5 、FSW 材は $R=-1$ と -0.5 が同等の疲労強度を示した。余盛りやバリがあると疲労強度は低下し、引張応力作用側で破断した。MIG 異材接合材は余盛りを除去して試験を行うと 107 回における疲労強度は 62 MPa から 74 MPa に向上した。気密疲労試験構体部材の作製ではゴム継手部に使用する部材を作製し、板厚 6 mm×幅 110 mm×長さ 650 mm、板厚 9 mm×幅 110 mm×長さ 600 mm の板材および構体に沿った曲率を有する曲げ部材を作製した。作製した板材や曲げ部材の端面は R3 の加工を施した。板厚 6 mm 材の一部は R8000 と R400 を有する金型にて温間曲げ加工した。板厚 6 mm 材からは補強板として板厚 6 mm×幅 60 mm×長さ 155 mm の板（四隅を R30 と C5 に切削加工）を加工した。

自動車構造部材への適用技術開発では、難燃性を生かしながら張出し試験は室温、深絞り は 150°C で成形可能な薄板圧延材の作製技術開発と成形性調査を行った。合金組成は AX81G 合金をベースに合金組成を希薄化させた Mg-3Al-0.7Zn-0.4Ca を板厚 1 mm まで圧延加工し、加工後に 450°C で 1 時間の熱処理をした。耐力は RD、TD 方向で 147 MPa と 120 MPa を示し、引張強さは共に 240 MPa を超えた。伸びは TD 方向で 25% 以上を示した。熱処理材の(0001)集合組織強度は 1.9 であった。目標とした板材の機械的特性、組織特性を達成することが出来た。成形性調査は張出しと深絞り試験で行い、パンチ速度は 0.6~600 mm/min とした。パンチ R20 で室温張出し試験を行うと、熱処理材では 11 mm まで成形できた。室温における張出し高さに顕著な速度依存性は認められなかった。深絞り試験はパンチ R1 と R3 で実施した。熱処理材の絞り加工温度 150°C で LDR2.0 を得た。張出し試験と異なり、速度依存性が深絞り加工で現れた。

③-6 高成形性マグネシウム材（薄板）の適用技術開発【住友電気工業】

フロントフードをターゲット部品としてアルミ A6061 と同等の強度特性をもつと同時に室温成形が可能な板材の開発に取り組んだ。開発の成果として、圧延方向と圧延垂直方向で異方性があるものの、強度の目標とする A6061 とほぼ同等の引張強度をもつマグネシウム合金板材の開発に成功した。

この開発合金板材の室温成形特性を評価したところ、張出特性（エリクセン値）は 7.2~7.6、深絞り性（LDR）は 1.5 であった。これらの値はあくまでも標準試験片で得られた値であり、実際の成形性を評価するためには実部品形状で確認する必要がある。部品形状での室温成形性を確認するために実際の部品金型を用いて開発合金板材を室温で成形試作した。その結果、比較的緩い形状ではあるが、曲げ、張出し、絞りの 3 要素をもつ形状を室温で成形できることを確認した。

上述の通り、2019 年度前半で強度と室温成形性を両立するマグネシウム合金板材の開発に成功したことから、本開発材を用いて実際にフロントフード形状に成形可能かを確認するために大型パイロット機で板材を作製し、湘南分室（株式会社トヨタカスタマイジング&ディベロプメント）に提供した。

湘南分室でフード形状の要素を盛り込んだミニチュアフード（アウター、インナー）金型で従来材（AZ91,AZ31）と比較しながら成形テストを実施した。

成形テストの結果、アウター形状のエッジ部分に微小な傷がみられるものの、従来

材では割れが発生して成形不可能である 150℃での成形がアウター形状、インナー形状の両方で可能であることが確認できた。

③-7 Mg 合金の組織制御、成形加工中の変形メカニズム解明【住友電気工業、再委託先：長岡技術科学大学】

優れた強度特性と成形性を兼備したマグネシウム合金板材の開発を目的として、異なる加工熱処理条件にて Mg-xZn-0.3Ca-0.1Al-0.2Mn(mass%, x=1, 2)合金圧延板材を作製し、板材の引張特性や室温張出し成形性、結晶粒径、集合組織を調べた。Zn 添加量が変わっても、結晶粒径や集合組織、引張特性、時効硬化特性に顕著な差異は認められなかったものの、2%の Zn 添加により、エリクセン値にして 8mm の優れた室温張出し成形性を付与できることがわかった。また、低温で均質化処理を行っても、圧延板材の室温張出し成形性や結晶粒径、集合組織に変化は認められなかったことから、Mg-Zn-Ca-Al-Mn 合金は、安価に製造可能な自動車パネル材の候補材料と言える。

③-8 高強度難燃性マグネシウム合金の押出し成形技術開発【不二ライトメタル】

鉄道車両用合金開発に関しては、高強度合金 AX92 の押出しに際し、設備負荷の大きい押出荷重を下げるため、ダイス形状を改良した。その結果、昨年度と比較して押出荷重を約 70%まで低減する成果が得られた。それにもなつて押出温度の低温化、押出速度の高速化を実現することができた。これらの条件を用いて、気密疲労構体の製作に必要な長さ 5m の床部材 2 種類および長さ 3.5m の横梁材となる型材を製造することができた。各部材は長尺な型材であるが曲がりや反りといった形状不良を改善する矯正は必要なく、安定した形状で取得することができた。

自動車用合金開発に関しては、動車構造部材向けにチューニングした合金組成を持つビレットの製造条件を調査するため、3 合金の鋳造ビレットを作製した。その結果、これら 3 種類のチューニング合金は AX92 合金の最適条件を応用することによって最適化できることの指針を得た。このビレットを押出し引張試験を行った結果、チューニング合金は AX92 合金よりも耐力を向上させることに成功しており、チューニング合金③については耐力の目標値を達成したことが明らかとなった。しかしながら、伸びは目標値に届かなかったため、耐力を維持したまま伸びを向上させることを 2020 年度の課題として取り組む。また、この合金を適用する自動車構造部材は中空部材であることから、高速車両構体用部材と比較して非常に大きな押出荷重となることが推測される。したがって、これまでに取得したデータを元に押出条件を調整することによって、当該製品を取得することを来年度の課題とする。

③-9 高強度難燃性マグネシウム合金ビレット製造技術開発【不二ライトメタル、再委託先：戸畑製作所】

AX92 合金鋳造ビレットの品質安定性を改善するための取組を実施した。そこでは、AX92 合金を溶製し、本事業により 2014 年度に導入した発光分析装置（島津製作所社製「PDA-7000」）を用いて合金組成を確認した。合金組成を確認した後、2018 年度に導入した攪拌機に攪拌棒をセットし、溶湯を攪拌して、冷却することによってビレッ

トを製作した。製作したビレットを 2016 年度に導入した熱処理炉（三共社製「SBH-600」）において熱処理に供した。これらのプロセスを繰り返し行うことによる合金組成の評価を行い安定して製造できていたことを確認した。

③-10 低温高成形性マグネシウム合金展伸材の適用技術開発【日本金属】

マグネシウム合金展伸材を自動車部品に適用するための障害である①低い室温プレス成形性と②低い強度を改善したマグネシウム合金の開発を目的として、これらの特性を満足するマグネシウム合金展伸材の最適成分及び工業生産を見据えた製造プロセスの検討・最適化を行った。当分室で開発中であった開発合金を、重力鋳造法にて 7inch.ビレットを製作、押出しによって 5.0mm 厚さの圧延母材を作製した。これを、量産圧延実機を用いた複数条件の単板圧延を行い 1.0mm 厚の圧延板を製作した。製作した圧延板は、底面が圧延幅方向(TD)に傾斜(ピーク強度は 4.0)したランダムな集合組織を示した。エリクセン値は 8.6mm と目標値(8.0mm 以上と設定)を大きく上回った。引張り試験を行ったところ、底面の TD 傾斜に伴う面内異方性が見られ、耐力値(YS)が RD で 181MPa、TD で 120MPa と TD で目標値を下回った。これは、結晶粒径微細化等で改善可能と考えられる。また、自動車外装部品用金型を用いた室温深絞りを実施し、一般的なクランクモーションで実部品に近い形状が得られた。さらに、湘南分室が行う基礎トライ用に試作材を提供し、小型フード(インナー/アウター)形状の成形テストを実施した。インナーは 130°C(2mm/sec.)で、アウターは 150°C(1mm/sec.)で無欠陥で成形が可能であった。インナーとアウターを組み合わせたヘム加工も実施したが、こちらでも 150°Cで成形が可能であった。以上の結果から、開発合金は本テーマ目標を満たす合金系である事が確認できたため、コイル試作用の大型ビレットを製作した。

③-11 Mg 合金の加工時の組織評価【物質・材料研究機構】

従来の商用圧延材として知られる Mg-3Al-1Zn (mass.%)合金は、圧延によって(0002)極が板厚方向に強く配向するため、優れた室温成形性を得ることができなかったため、マグネシウム合金板材の用途は皆無に近かった。これまでに、溶体化処理後にエリクセン値にして 7.7mm の優れた室温成形性を、変形後 170°Cで 20 分の熱処理によって 240MPa におよぶ優れた 0.2%耐力を発現するマグネシウム合金で初めてのベークハード性を有する Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-0.8Zn 合金(wt.%)を開発した。

本研究では、合金元素の役割についての検討を進め、Zn 添加が優れた室温成形性を発現させる上で極めて重要な元素であることを実証した。特に、Zn 添加量を 1.6wt.% 程度まで増加すると、エリクセン値は 8.2mm まで向上する。透過 EBSD を用いて溶体化処理中に生ずる組織変化を詳細に解析したところ、Zn を添加しない合金は板厚(ND)方向に強く配向した再結晶粒が結晶粒界上に形成し、Zn を添加した材料では、溶体化処理時に TD 方向に配向した再結晶粒が双晶界面上に形成することが明らかになった。これは、結晶粒界や双晶界面に偏析する合金元素の種類や量が Zn 添加によって変化することに起因する。しかし、(0002)極の極端な TD 配向は力学的異方性の増加につながるため、Zn 添加量は 0.8%程度とするのが好適との結論を得た。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.9-4 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	2	9	3	1	0	4	2	1
2019FY	4	2	45	3	0	0	4	2	1
合計	6	4	54	6	1	0	8	4	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-2.3.9-5 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	1	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.10 [テーマ番号 60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発

2.3.10.1 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、これまでに、難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両構体に適用することを目標とした研究開発を推進している。そこでは、生産速度（押出速度）を飛躍的に高めるための合金設計技術や、強度・延性を同時に改善するための合金設計技術に加え、難燃性マグネシウム合金の接合技術や表面処理技術、鉄道車両構体の設計技術、信頼性（疲労、耐食性、衝撃変形特性等）評価技術を統合的に構築中である。これまでに、鉄道車両構体に利用するための新たな合金として、易加工性難燃性マグネシウム合金押出材（AX41合金）、高強度難燃性マグネシウム合金押出材および圧延材（AX92合金およびAX81合金）を開発することに成功している。また、開発した合金を用いて高速車両構体を製造するための部材化技術（複雑形状押出技術、圧延技術、プレス成形技術、接合技術、表面処理技術、構体設計技術）を確立するための実用化研究を推進中である。

今後、開発した難燃性マグネシウム合金展伸材を用いて高速車両構体の軽量化を実現するためには、長期間の使用に耐えうる信頼性（疲労性能、耐食性、衝撃変形特性等）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して行く必要がある。なお、難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは、鉄鋼材料やアルミニウム合金等の他の実用金属と比較して少なく、いかに効率良くデータを取得していくかが、今後の実用化に向けた課題となっている。

一方、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の課題の一つ、革新的構造材料の中では、構造材料の組織と性能を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などを融合（インテグレーション）して予測可能とする手法、「マテリアルズ・インテグレーション (MI) システム」の構築が産官学連携で進められている。MI システムでは、入力情報（材料製造・加工条件・使用環境条件）から、複雑系の材料の組織・性能の予測を行うとともに、予測された組織から、これまで長期を要した構造体の疲労特性等の性能を出力することを目的としている。すでに、鉄鋼材料やアルミ合金を対象として上記の長期性能を予測するための MI システム (α 版) が開発されており、材料の組織や長期性能を予測し、材料の開発期間の短縮を図るためのツールとして利用されようとしている。

そこで本研究開発では、これまでに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材も含めたマグネシウム合金全般の信頼性を評価するための手段の一つとして、SIP で開発中の MI システムを積極的に活用し、マグネシウム合金の疲労特性や腐食特性等の長期性能や衝撃特性を効率的に予測するためのシステムを構築することを目指す。このシステムを活用し、PJ で開発した部素材の信頼性評価期間を短縮することで早期実用化を図る。

なお、本研究では、開発した難燃性マグネシウム合金を利用して、素形材を製造する技術を構築するとともに、信頼性（疲労特性、耐食性等）を確保するためのデータ

ベース構築することを目的とし、また、高速車両構体を模した気密疲労モックアップを製造することを目的とするテーマ 35「革新的マグネシウム材製鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」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している。

(2)位置付け、目標値

SIP では、鉄鋼材料やアルミニウム合金溶接継手を対象として、継手の疲労寿命を予測する計算モジュールの開発を実施している。そこでは、物理モデルに基づき、順解析を行う計算手法が取られており、材料の組織情報をもとに、繰り返し荷重下の力学応答を再現するためのモデルの構築を行い、疲労き裂発生寿命と、進展寿命を高精度に予測している。き裂発生では、局所的な繰り返し塑性変形挙動が重要となり、有限要素法や転位論にもとづくモデルを利用した予測手法が開発されている。一方で、鉄鋼材料やアルミニウム合金を対象として、機械的特性や疲労特性に関連するデータベースより、未知の情報を予測する手法も検討がなされている。そこでは、鉄鋼材料溶接継手のサンプルを対象として、化学組成、加工条件、介在物寸法と言った入力条件と回転曲げ疲労強度との相関を調査しており、線形回帰およびニューラルネット等の手法を用いて適切な条件設定を用いた解析を行うことにより、疲労強度と相関のある入力条件を抽出できることや、精度の良い予測が可能であることを明らかにしつつある。

本研究開発では、SIP で開発中の上記 MI システムを駆使して、難燃性マグネシウム合金母材・継手の長期性能を予測するための技術開発を実施している。具体的には、以下の2つの研究開発項目に取り組んでいる。

① 難燃性マグネシウム合金溶接継手の寿命予測計算モジュールの開発

鉄道車両構体の最弱部である溶接部を対象として、疲労寿命を予測するための計算モジュールを構築している。具体的には、SIP で鉄鋼材料用に開発された物理モデルに立脚した計算モジュールを活用し、マグネシウム特有の結晶構造に起因する異方性や、難燃性マグネシウム合金特有の晶出物分布に起因する異方性を加味した様式でモデルを再構築している。

2020 年度までには、テーマ 35「革新的マグネシウム材製鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」と連携して開発を行い、難燃性マグネシウム合金溶接継手の疲労寿命を予測するための計算モジュールのプロトタイプを完成させる。具体的には、(1) 熱弾塑性計算による溶接シミュレーションモジュール、(2) 結晶塑性計算による疲労き裂発生シミュレーションモジュール、(3) X-FEM による疲労き裂進展シミュレーションモジュールのプロトタイプを完成させる。また、上記計算予測モジュールの検証を行うために必要な微小疲労き裂の発生・進展寿命データベースを構築する。

さらに、2022 年度までには、2020 年度までに開発した各計算モジュール（プロトタイプ）の検証を完了させ、上記計算モジュール（プロトタイプ）の MI システムへの組み込みを完了し、統合したワークフローとして完成させる。

② データベースに立脚した難燃性マグネシウム合金母材・継手の性能予測システムの構築

物理モデルに立脚した計算モジュールにより疲労き裂発生から破断までの寿命を予測することは必ずしも容易ではなく、溶接材などの複雑な組織や形状を有している場合は、その予測はさらに困難になる。そこで、本研究開発では、信頼性を予測するための補完的なアプローチとして、データベースを活用した予測システムの構築を目指している。ここでは、「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトにおける「革新的マグネシウム材」の開発で収集した難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労特性、腐食特性、衝撃特性）データを活用し、機械学習を活用して難燃性マグネシウム合金の長期性能を予測するためのシステムを構築している。具体的には、難燃性マグネシウム合金の信頼性を予測するための理論式や経験式に立脚したモデルを構築する作業と、機械学習を活用した予測システムを構築する作業を並行して実施し、相互にフィードバックすることにより、長期性能（疲労特性、腐食特性、衝撃特性）を予測するための高精度モデルを構築することを目指している。また、上記データベースをMIシステムに組み込み、ワークフローを構築することにより予測システムを確立することを目指している。

2020年度までには、テーマ35「革新的マグネシウム材製鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」と連携して開発を行い、難燃性マグネシウム合金の信頼性（機械的特性、疲労特性、耐食性、衝撃特性）データベースを構築する。また、上記データベースを活用し、理論と経験に基づく特性予測式を導出する。また、上記データベースの構築と並行し、難燃性マグネシウム合金の信頼性を機械学習手法により予測するためのモデル式を導出する。

さらに2022年度までには、理論と経験より構築した予測式（概念駆動モデル）とデータベースより構築した予測式（データ駆動モデル）を比較する事により、難燃性マグネシウム合金の信頼性に寄与する記述子の抽出を行う。また、上記データベースシステムのMIシステムへの組み込みを完了し、統合したワークフローとして完成させる。

表Ⅲ-2.3.10-1 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
① -1 各種寿命予測計算モジュールの開発（物材機構、(再)東大/榎）	テーマ50で実施	熱弾塑性計算とX-FEMによる長い疲労き裂進展シミュレーションを組み合わせることで、難燃性マグネシウム合金継手の疲労性能の予測を行う。	難燃性マグネシウム合金溶接継手の疲労寿命を予測するための計算モジュールのプロトタイプを完成させ、その検証を行う。	母材における疲労予測は目途がついた。溶接継手についても目標を達成できる見通しである。

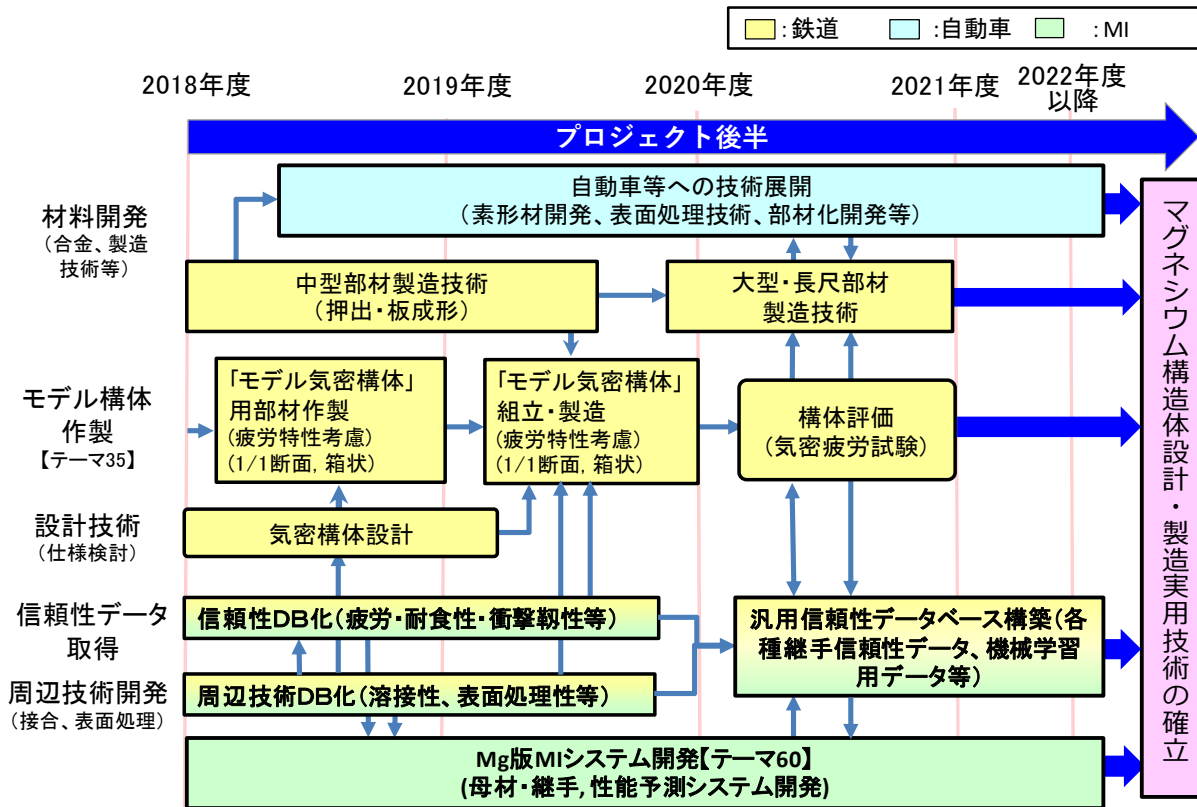
①-2 計算モジュールの実験的検証（物材機構）	テーマ 50 で実施	AX41,81,92 合金の微小疲労き裂発生・進展データベースの構築する。また、2019 年度に照合を終えた手法を用いて各種合金（母材・接合材）の残留応力の測定を実施し、残留応力測定手法の高度化を行う。	計算予測モジュールの検証に資する AX41, 81, 92 合金の微小疲労き裂発生・進展データベースを構築する。また、計算予測モジュールの検証及び高精度化を実現する残留応力解析手法を構築する。	自動化したその場観察システムを活用することで疲労 DB 構築を達成できる見通し。また、残留応力測定手法の高度化を実現した。
①-3 計算モジュールの MI システムへの組み込み及び使い込み（物材機構、川崎重工、総合車両）	テーマ 50 で実施	開発した性能予測システムが構体設計に適用できるかを評価する。	構体設計に適用する MI システムに要求される機能を明確にする。また、開発された MI システムを用いた性能予測システムが構体設計に適用できるのかを評価する。	研究開発項目①-1, 2 の成果物を随時 SIP-MI へ取り込める体制が構築されており、十分達成できる見通し。
②-1 信頼性予測のためのデザイン設計（産総研、(再)東大/白岩）	テーマ 50 で実施	難燃性 Mg 合金信頼性データベース構築および特性予測モデルの確立	予測モデルの活用により難燃性マグネシウム合金の長期性能を支配するプロセス・材料因子を抽出する。	プロセスを含む特性予測モデルを構築した。長期性能予測への展開が期待できる。
②-2 難燃性マグネシウム合金の機械的特性および疲労特性データベース及びモデル式の構築（産総研、物材機構、三協立山、権田金属、住友電工、不二ライトメタル）	テーマ 50 で実施	「革新的マグネシウム材」研究のデータを継続し DB を完成させる。また、完成した DB を利用して、理論と経験に基づく特性予測式の妥当性を検証する	完成した DB を用いて、数値シミュレーションや機械学習のワークフロー (WF) にデータを提供し、WF 利用者 (素材メーカーと車輻メーカー) の持つ課題を実行して素材と構体の開発に寄与する結果を得る。また、MI 技術 (実験・理論・数値演算・データ科学の統合的利用) によってモデル式を提供する。	DB 整備の初期から使用目的が明確であり、データ提供者・WF 開発者・WF 利用者が同一プロジェクト内でビジョンを共有しているため、効率の良い研究開発が進められると期待できる

<p>②-3 難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性モデル式の構築（総合車両，(再)大阪府大）</p>	<p>テーマ 50 で実施</p>	<p>難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性データベースの完成とそれを用いた理論と経験に基づく特性予測式（機械的特性）の妥当性検証</p>	<p>理論と経験より構築した予測式とデータベースより構築した予測式を比較する事により、難燃性マグネシウム合金溶接継手の信頼性（機械的特性、疲労特性）に寄与する項目の抽出を行う</p>	<p>長期性能予測のための理論式や経験式に立脚したモデルの構築と機械学習を活用した予測システムの構築を行っており、妥当である。</p>
<p>②-4 難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築（産総研，大日本塗料）</p>	<p>テーマ 50 で実施</p>	<p>データの紐付け作業を継続的に実施し、腐食データベースを完成させる。また、重回帰分析等によるモデル式を完成させる。</p>	<p>重回帰分析等により構築した腐食特性予測式（概念駆動モデル）とニューラルネットワーク等により構築した腐食特性予測式（データ駆動モデル）を比較する事により、難燃性マグネシウム合金の腐食特性に寄与する記述子の抽出を行う。また、上記データベースシステムの MI システムへの組み込みを完了し、統合したワークフローとして完成させる。</p>	<p>重回帰分析等による耐食性分析は順調に進行中。今後、データ駆動モデルの構築を推進することにより達成できる見込み。</p>
<p>②-5 マグネシウム合金母材および溶接継手の寿命予測式の構築（産総研，(再)九大）</p>	<p>テーマ 50 で実施</p>	<p>材料・溶接プロセスを考慮した疲労強度の予測法の提案、および設計法の実証、高精度化</p>	<p>材料・溶接プロセスを考慮した疲労強度の予測式の提案、および設計式の高精度化</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・疲労強度支配因子に基づき、材料・溶接プロセスの影響を破壊力学的に考慮することで疲労強度予測法を提案できる。 ・3つの疲労限度の物理的意味に基づき構造物の疲労限度に及ぼす因子の影響定量化は予定通り提案手着る見通しである。

<p>②-6 難燃性マグネシウム合金の衝撃特性評価技術開発（産総研，再委託先：神戸大）</p>	<p>テーマ 50 で実施</p>	<p>難燃性マグネシウム合金の継手材について、高速変形特性を予測するためのデータベースを構築し、難燃性マグネシウム合金および継ぎ手材について構築した特性予測式を完成させる。</p>	<p>理論と経験則をもとに構築した特性予測式とデータベースより構築した予測式を比較する事により、難燃性マグネシウム合金溶接継手の信頼性（衝撃特性）に寄与する組織因子の抽出を行う。</p>	<p>対象合金種を追加した試験を実施し、組織因子との相関説明も進んでいることから、目標を達成される見込みである。</p>
<p>②-7 データベースの MI システムへの組み込み及び使い込み（物材機構，三協立山，権田金属，住友電工，不二ライトメタル，大日本塗料，総合車両，川崎重工）</p>	<p>テーマ 50 で実施</p>	<p>WF のユーザテストと、MI システムによる入出力パラメータ空間の自動探索で各モジュールのロバスト性と精度の情報を開発者にフィードバックしながら完成度を高める。</p>	<p>完成した DB を用いて、機械学習と数値シミュレーションのワークフロー (WF) にデータを提供し、WF 利用者 (素材メーカーと車両メーカー) の持つ課題を実行して素材と構体の開発に寄与する結果を得る。また、MI システムが提供する入出力パラメータ空間の自動探索によって、各モジュールのロバスト性と精度を明らかにする。また、これらの情報を開発者にフィードバックしながら WF の完成度を高める。</p>	<p>DB 整備の初期から使用目的が明確であり、データ提供者・WF 開発者・WF 利用者が同一プロジェクト内でビジョンを共有している。また、PSPP 連関やプロセス条件取り込みの有用性は先行した SIP-MI でも確認されているため、達成は十分に可能であると期待できる。</p>

(3)全体計画

テーマ 50 で得られた知見を発展させ、マテリアルズ・インテグレーション技術を利用して鉄道車両構体用の難燃性マグネシウム合金材の構体設計に資するよう、母材と継手の疲労等の性能予測を行えるよう、計算科学主体のフロー（サブテーマ①）とデータ科学主体のフロー（サブテーマ②）の研究開発を行っている。当該材料に関する知見やデータは、テーマ 35 「革新的マグネシウム材製鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」の鉄道関係サブテーマと密接に連携して共有を図っている。以下、テーマ 60 とテーマ 35 を含む、ISMA のマグネシウム材関連テーマ全体の研究開発スケジュールの図を示す。



図Ⅲ-2.3.10-1 マグネシウム材関連テーマの研究開発スケジュール

(4)実施体制

サブテーマ①「難燃性マグネシウム合金溶接継手の寿命予測計算モジュールの開発」では、鉄道車両構体の最弱部である溶接部を対象として、疲労寿命を予測するための計算モジュールを構築する。具体的には、SIPで鉄鋼材料用に開発された物理モデルに立脚した計算モジュールを活用し、初期条件としての組成情報・組織情報・残留応力情報から、難燃性マグネシウム合金溶接継手の繰り返し荷重下の力学応答を再現するためのモデルの構築を行い、疲労き裂発生寿命と、進展寿命を高精度に予測するモジュールを構築することを目指す。上記の計算モジュールを難燃性マグネシウム合金に適用するためには、マグネシウム合金の結晶構造(HCP構造)に起因した塑性異方性をシミュレーションに取り込む必要がある。また、難燃性マグネシウム合金の内部に存在する晶出相(主にAl₂Ca相)がき裂発生・き裂伝播特性に及ぼす影響をシミュレーションに取り込む必要がある。また、上記の計算モジュールを開発する過程では、計算モジュールの予測結果を常に実験結果と照合する作業が必要であり、難燃性マグネシウム合金継手のき裂発生特性および伝播特性をモジュール開発と連動して実施する必要がある。

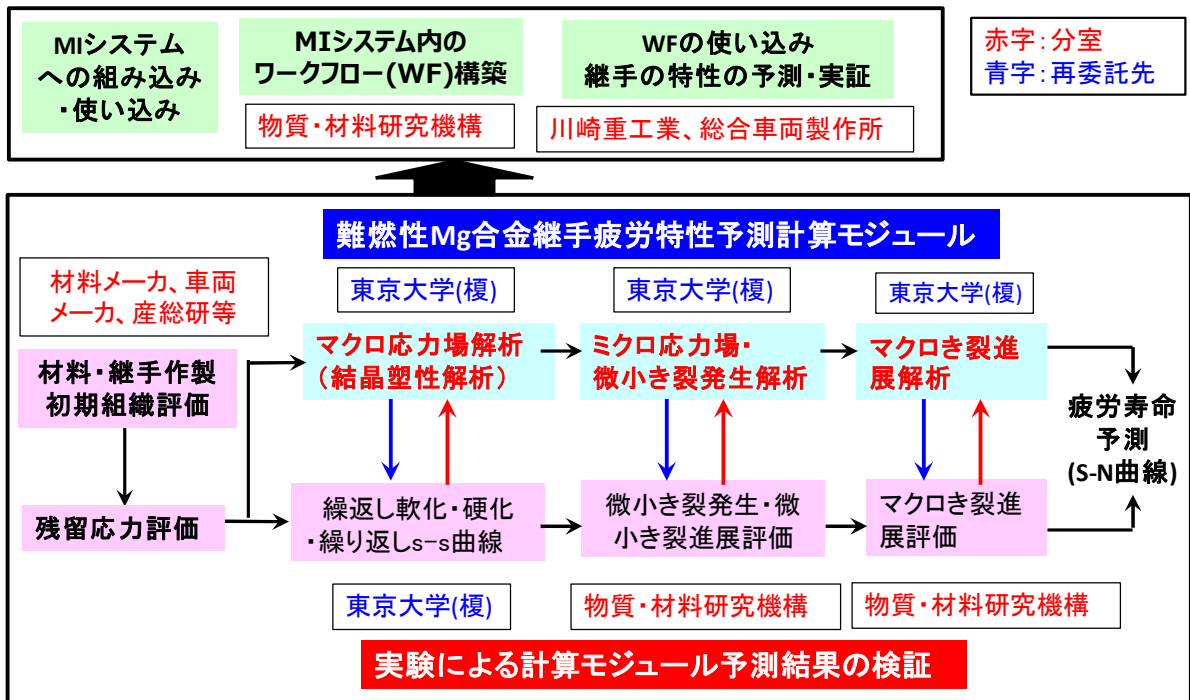
サブテーマ②「データベースに立脚した難燃性マグネシウム合金母材・継手の性能予測システムの構築」では、「革新的マグネシウム材」のデータを有効活用し、難燃性マグネシウム合金の信頼性(疲労特性、腐食特性、衝撃特性)を予測するためのシステムを構築する。プロジェクト前半は、比較的多くのデータが存在する難燃性マグネシウム合金母材の機械的特性(強度)を対象として、理論・経験を組み合わせ

た特性予測式（概念駆動モデル）を構築する。また、難燃性マグネシウム合金の機械的特性、組成、組織、プロセスの紐付けを行ったデータベースを構築する。さらに、機械学習を活用し、データベース由来の予測式（データ駆動モデル）を導出し、特性予測式（概念駆動モデル）との照合を行う。照合結果より予測への影響の強い材料パラメータ（記述子）を抽出し、効率的なデータベースの拡充および難燃性マグネシウム合金の機械的特性を予測するための高精度の汎用予測式を導出することを目指す。

上記の作業を、疲労特性、耐食性、衝撃変形特性についても実施する。また、対象材料を母材から継手へと拡張して行く作業を実施し、データベースに立脚した難燃性マグネシウム合金の信頼性予測システムを構築することを目指す。

以下、両サブテーマの実施体制図を示す。

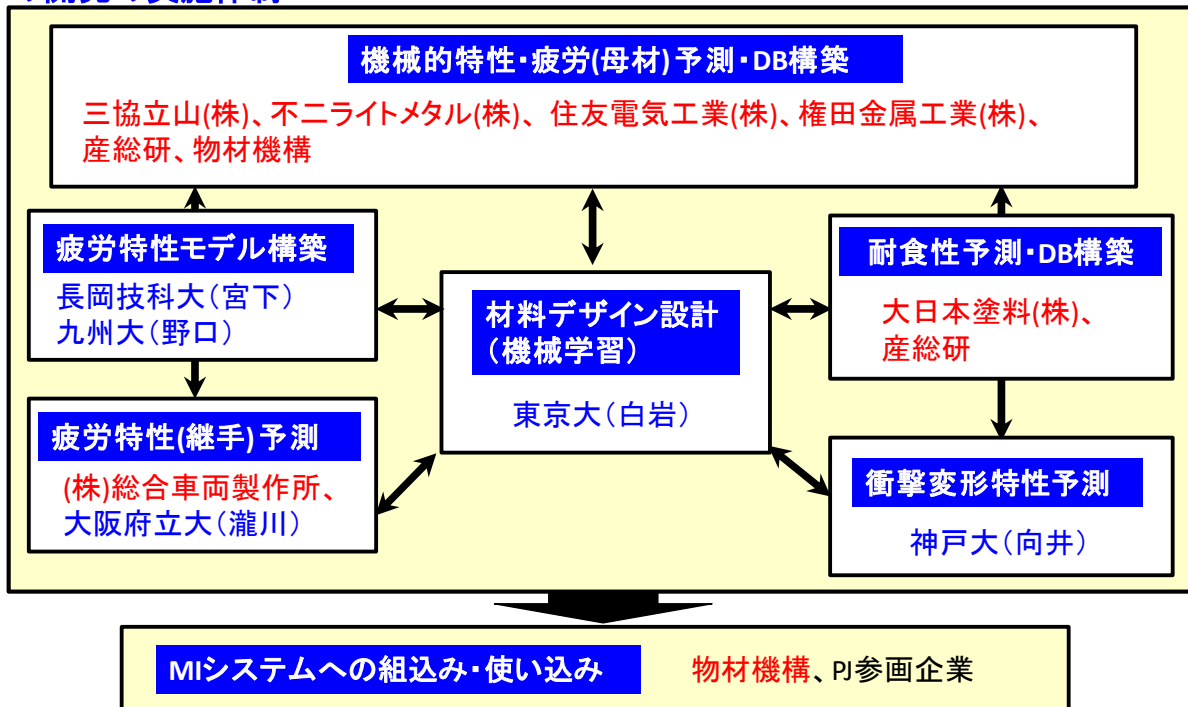
研究開発項目① 難燃性Mg合金(継手)疲労特性の性能予測計算モジュールの実施体制



図III-2.3.10-2 サブテーマ①の2020年度実施体制

研究開発項目② DBに立脚した難燃性Mg合金性能予測システムの開発の実施体制

赤字:分室
青字:再委託先



図Ⅲ-2.3.10-3 サブテーマ②の2020年度実施体制

(5) 運営管理

2018年度は6回、2019年度は4回(ただし2020年3月開催予定であった第4回は新型コロナウイルス感染症拡大の影響で中止)の会議を開き、各回でサブテーマ①と②の分科会を開催した。また、テーマ60は開始当初よりテーマ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」の鉄道側サブテーマと連携して研究開発活動を行っており、テーマ35側の分科会でも、テーマ60の進捗報告を行っている。2020年度はさらにテーマ35との連携を強化するため、会議体についても一体化を進め、合計で年7回程度の会議を開催予定である。

成果の発信に関しては、軽金属学会の春期および秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を開催し、プロジェクトの成果を発信している。また、国研・大学を中心に論文を公表している。

(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)

難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは他の実用金属と比較して圧倒的に少なく、性能評価の長期化が懸念されており、いかに効率化するかが今後の研究開発の鍵となっている。ここにテーマ60の実施によりマテリアルズ・インテグレーション(MI)技術を導入することにより、材料開発と、開発合金を用いた鉄道車両構体の設計への効果が期待される。

前者については、ISMAのマグネシウム関連テーマで蓄積されたデータを、材料のプロセス履歴や組織観察まで紐付けた信頼性データベースとして構築することで、材

料メーカーや表面処理メーカーが、生産現場で製品の機械的特性や信頼性を迅速に予測することや、開発過程で必要となる展伸材の疲労や腐食などのデータの採取に要する時間を大幅に短縮することが期待できる。一方、後者については、車両メーカーがデータベースを材料性能予測に利用し、計算モジュールを各種複雑形状の素形材に適用することで、各種溶接継手の基準応力を設定する際に、部品の設計・開発時間・コストを飛躍的に削減することが期待できる。

さらに、このようにして革新的マグネシウム合金製の高速車両構体が完成することにより、CO₂削減や省エネルギーの効果があるが、これはテーマ 35 の実施の効果として記載される通りである。

2.3.10.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.10-2 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
①-1 各種寿命予測 計算モジュールの 開発（物材機構、 (再)東大/榎）	熱弾塑性計算と X-FEM による長い疲労き裂進展シミュレーションを組み合わせることにより、難燃性マグネシウム合金継手の疲労性能の予測を行う。	結晶塑性有限要素解析による母材の疲労寿命予測手法を確立した。2020 年度末までに、熱弾塑性計算と X-FEM を組み合わせることにより、難燃性マグネシウム合金継手の疲労性能予測が達成される見込みである。	△	
①-2 計算モジュールの実験的検証 (物材機構)	AX41,81,92 合金の微小疲労き裂発生・進展データベースの構築する。また、2019 年度に照合を終えた手法を用いて各種合金（母材・接合材）の残留応力の測定を実施し、残留応力測定手法の高度化を行う。	AX41 合金の母材および再現 HAZ 熱処理材について、微小疲労き裂発生・進展データベースを構築し、0.1mm 以上のき裂進展は破壊力学に従うこと、溶接部を模擬した熱処理により有意な疲労強度差が生じないことを明らかにした。また、残留応力測定手法の高度化を前倒しで完了した。	△	

①-3 計算モジュールの MI システムへの組み込み及び使い込み（物材機構，川崎重工，総合車両）	開発した性能予測システムが構体設計に適用できるかを評価する。	MI システムを利用した計算が設計に資するテーマを設定し①-1 と開発を開始した。また、SIP-MI システムが利用できる体制を確立した。	△	
②-1 信頼性予測のためのデザイン設計（産総研，(再)東大/白岩）	難燃性 Mg 合金信頼性データベース構築および特性予測モデルの確立	プロセスデータから特性を予測するモデルを構築した。長期性能予測についての取り組みを開始した。	△	
②-2 難燃性マグネシウム合金の機械的特性および疲労特性データベース及びモデル式の構築（産総研，物材機構，三協立山，権田金属，住友電工，不二ライトメタル）	「革新的マグネシウム材」研究のデータを継続し DB を完成させる。また、完成した DB を利用して、理論と経験に基づく特性予測式の妥当性を検証する	サブテーマ②-7 と連携し、母材の機械的特性および疲労特性をデータベース化するためのテンプレートを作製済み。2020 年度中に打ち込みを終える見込み。また、機械的特性に関する特性予測式を導出できる見込み。	△	
②-3 難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性モデル式の構築（総合車両，(再)大阪府大）	難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性データベースの完成とそれをを用いた理論と経験に基づく特性予測式（機械的特性）の妥当性検証	様々な条件で作製した溶接継手の機械的特性および疲労特性データを取得し、溶接プロセス、継手組織、機械的特性、疲労特性に関するデータの紐付け作業を実施した。 MIG 溶接継手の機械的特性を予測するための、溶質元素固溶濃度と継手強度の関係、晶出物の体積分率と伸びおよび継手強度の関係などに関する理論と経験に基づく予測式を導出した。 溶接条件と継手強度の関係について、機械学習を用いた予測を行った。	△	

<p>②-4 難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築 (産総研, 大日本塗料)</p>	<p>データの紐付け作業を継続的に実施し、腐食データベースを完成させる。また、重回帰分析等によるモデル式を完成させる。</p>	<p>大気暴露試験 77 データ、加速試験 165 データをデータベース化した。大気暴露試験データの重回帰分析を実施し、相関係数 0.947 の高い精度で腐食減量を予測することができた。極値統計に基づく最大侵食深さを目的変数新たに追加し、結果の重回帰分析も併せて実施した。</p>	<p>○</p>	
<p>②-5 マグネシウム合金母材および溶接継手の寿命予測式の構築 (産総研, (再)九大)</p>	<p>材料・溶接プロセスを考慮した疲労強度の予測法の提案、および設計法の実証、高精度化</p>	<p>破壊力学に基づく疲労強度の予測法を提案した。合金元素の影響や溶接プロセスの影響などを下限応力拡大係数として考慮する手法の有効性を示した。実用上重要な平均応力の影響について明らかにした。</p>	<p>○</p>	
<p>②-6 難燃性マグネシウム合金の衝撃特性評価技術開発 (産総研, 再委託先: 神戸大)</p>	<p>難燃性マグネシウム合金の継手材について、高速変形特性を予測するためのデータベースを構築し、難燃性マグネシウム合金および継ぎ手材について構築した特性予測式を完成させる。</p>	<p>マグネシウムの高速変形特性に及ぼすカルシウムの添加効果について、応力とひずみの関係を定式化した。また、難燃性マグネシウム合金(AZX612, AX41, AX92) について、幅広いひずみ速度にわたる一軸圧縮および引張試験を実施し、衝撃特性に関するデータベースを作成した。</p>	<p>△</p>	
<p>②-7 データベースの MI システムへの組み込み及び使い込み (物材機構, 三協立山, 権田金属, 住友電工, 不二ライトメタル, 大日本塗料, 総合車両, 川崎重工)</p>	<p>WF のユーザテストと、MI システムによる入出力パラメータ空間の自動探索で各モジュールのロバスト性と精度の情報を開発者にフィードバックしながら完成度を高める。</p>	<p>プロセス・組織データを含んだデータベースの意義をプロジェクト内で確認し、各プロセスのテーブル設計を行い、データを収集した。収集されたデータは②-1 などへ提供され、プロセスデータを含めたことにより予測性能が高まることが示された。</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-2.3.10-3 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
①-1 各種寿命予測計算モジュールの開発 (物材機構, (再)東大/榎)	難燃性マグネシウム合金の母材における疲労寿命予測手法を確立した。さらに溶接中の熱弾塑性計算と X-FEM を組み合わせることで、溶接継手の疲労寿命を予測するための計算モジュールのプロトタイプ構築を開始した。	難燃性マグネシウム合金溶接継手の疲労寿命を予測するための計算モジュールのプロトタイプを完成させ、その検証を行う。	2020年度末までに溶接継手の疲労寿命予測を行い、2022年度末までに計算モジュールのプロトタイプ構築と検証を実施できる見込みである。
①-2 計算モジュールの実験的検証(物材機構)	AX41合金の微小疲労き裂発生・進展データベースの構築と残留応力解析手法の高度化を完了した。今後、AX81合金および92合金の微小疲労き裂発生・進展データベースの構築と評価を進める。	計算予測モジュールの検証に資する AX41, 81, 92合金の微小疲労き裂発生・進展データベースを構築する。また、計算予測モジュールの検証及び高精度化を実現する残留応力解析手法を構築する。	プロジェクト終了時には最終目標を達成できる見通し
①-3 計算モジュールのMIシステムへの組み込み及び使い込み(物材機構, 川崎重工, 総合車両)	MIシステムを利用した計算が設計に資することができるテーマ(ニーズ)を設定し、研究開発項目①-1, ①-2から提供可能なシーズとのマッチングをはかりながら開発を開始した。また、NIMS内のSIP-MIシステムでワークフローを実行し、一部の計算を東大の計算資源で行えるようになった。	構体設計に適用するMIシステムに要求される機能を明確にする。また、開発されたMIシステムを用いた性能予測システムが構体設計に適用できるのかを評価する。	研究開発項目①-1, 2の成果物を随時SIP-MIへ取り込める体制が構築されており、十分達成できる見通しである。
②-1 信頼性予測のためのデザイン設計 (産総研, (再)東大/白岩)	マグネシウム合金のプロセスデータから強度や伸びといった静的特性を予測するモデルを構築した。また長期性能予測に向けて、疲労性能を含む長期性能データの収集を行った。	予測モデルの活用により難燃性マグネシウム合金の長期性能を支配するプロセス・材料因子を抽出する。	長期性能データを収集できたので、予測モデルの構築と、支配因子の抽出が実施できると期待できる。

<p>②-2 難燃性マグネシウム合金の機械的特性および疲労特性データベース及びモデル式の構築（産総研，物材機構，三協立山，権田金属，住友電工，不二ライトメタル）</p>	<p>サブテーマ②-7と連携し、母材の機械的特性および疲労特性をデータベース化するためのテンプレートを製作済み。2020年度中に打ち込みを終える見込み。また、機械的特性に関する特性予測式を導出できる見込み。</p>	<p>完成したDBを用いて、数値シミュレーションや機械学習のワークフロー(WF)にデータを提供し、WF利用者(素材メーカーと車輜メーカー)の持つ課題を実行して素材と構体の開発に寄与する結果を得る。また、MI技術(実験・理論・数値演算・データ科学の統合的利用)によってモデル式を提供する。</p>	<p>2020年度までに達成予定の第三中期目標をクリアし、データベースを完成させ、MIシステムに入力することができれば、2021年度中に目標を達成出来る見通し</p>
<p>②-3 難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性モデル式の構築（総合車両，(再)大阪府大）</p>	<p>様々な条件で作製した溶接継手の機械的特性および疲労特性データを取得し、溶接プロセス、継手組織、機械的特性、疲労特性に関するデータの紐付け作業を実施した。 MIG溶接継手の機械的特性を予測するための、溶質元素固溶濃度と継手強度の関係、晶出物の体積分率と伸びおよび継手強度の関係などに関する理論と経験に基づく予測式を導出した。 溶接条件と継手強度の関係について、機械学習を用いた予測を行った。</p>	<p>理論と経験より構築した予測式とデータベースより構築した予測式を比較する事により、難燃性マグネシウム合金溶接継手の信頼性（機械的特性、疲労特性）に寄与する項目の抽出を行う</p>	<p>データベースについては完成の目途が立っており、理論と経験より構築した予測式とデータベースより構築した予測式もいくつか提案しつつある。難燃性マグネシウム合金溶接継手の信頼性に寄与する項目も明らかになりつつあり、最終目標は達成可能である。</p>
<p>②-4 難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築（産総研，大日本塗料）</p>	<p>加速試験（SST、サイクル、浸漬）で得られたMg合金母材の腐食減量・侵食深さの重回帰分析に着手した。表面処理品の耐食性を評価する目的変数を検討中。重回帰分析の予測精度を高めるための説明変数の導入について引き続き検討している。 DBのMIシステムへの組み込み作業にも積極的に関与している。</p>	<p>重回帰分析等により構築した腐食特性予測式（概念駆動モデル）とニューラルネットワーク等により構築した腐食特性予測式（データ駆動モデル）を比較する事により、難燃性マグネシウム合金の腐食特性に寄与する記述子の抽出を行う。また、上記データベースシステムのMIシステムへの組み込みを完了し、統合したワークフローとして完成させる。</p>	<p>達成見込み</p>

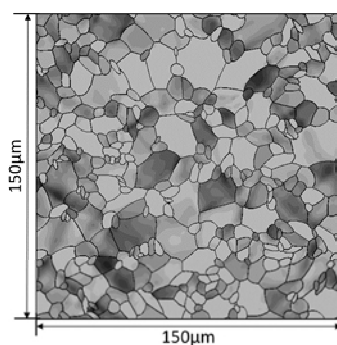
<p>②-5 マグネシウム合金母材および溶接継手の寿命予測式の構築 (産総研, (再)九大)</p>	<p>破壊力学に基づく疲労強度の予測法を提案した。合金元素の影響や溶接プロセスの影響などを下限界応力拡大係数として考慮する手法の有効性を示した。実用上重要な平均応力の影響について明らかにした。</p>	<p>材料・溶接プロセスを考慮した疲労強度の予測式の提案、および設計式の高精度化</p>	<p>疲労強度予測式の提案およびその有効性を示したことから、目標は達成した。</p>
<p>②-6 難燃性マグネシウム合金の衝撃特性評価技術開発 (産総研, 再委託先: 神戸大)</p>	<p>マグネシウム的高速変形特性に及ぼすカルシウムの添加効果について、応力とひずみの関係を定式化した。また、難燃性マグネシウム合金 (AZX612, AX41, AX92) について、幅広いひずみ速度にわたる一軸圧縮および引張試験を実施し、衝撃特性に関するデータベースを作成した。</p>	<p>理論と経験則をもとに構築した特性予測式とデータベースより構築した予測式を比較する事により、難燃性マグネシウム合金溶接継手の信頼性 (衝撃特性) に寄与する組織因子の抽出を行う。</p>	<p>対象合金種を追加した試験を実施しており、組織因子との相関を明らかにする研究が進んでいることから、目標は達成できる見込みである。</p>
<p>②-7 データベースのMIシステムへの組み込み及び使い込み (物材機構, 三協立山, 権田金属, 住友電工, 不二ライトメタル, 大日本塗料, 総合車両, 川崎重工)</p>	<p>プロセス・組織データを含んだデータベースの意義をプロジェクト内で確認し、鋳造・押出・接合・熱処理などのプロセス、組織観察、引張・圧縮・疲労・腐食などの特性・性能のテーブル設計を行い、データを収集した。収集されたデータは研究課題②-1 などへ提供され、プロセスデータを含めたことにより予測性能が高まることが示された。</p>	<p>完成したDBを用いて、機械学習と数値シミュレーションのワークフロー(WF)にデータを提供し、WF利用者(素材メーカと車輻メーカ)の持つ課題を実行して素材と構体の開発に寄与する結果を得る。また、MIシステムが提供する入出力パラメータ空間の自動探索によって、各モジュールのロバスト性と精度を明らかにする。また、これらの情報を開発者にフィードバックしながらWFの完成度を高める。</p>	<p>DB整備の初期から使用目的が明確であり、データ提供者・WF開発者・WF利用者が同一プロジェクト内でビジョンを共有している。また、PSPP 連関やプロセス条件取り込みの有用性は先行したSIP-MIでも確認されているため、達成は十分に可能であると期待できる。</p>

(3)研究開発の成果と意義

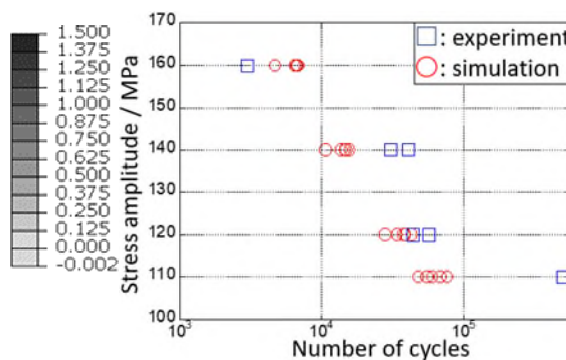
① 難燃性マグネシウム合金溶接継手の寿命予測計算モジュールの開発

①-1 各種寿命予測計算モジュールの開発【物質・材料研究機構、再委託先：東京大学】

難燃性 Mg 合金 AX41 及び AX92 押出材を用いた実験及び疲労き裂の発生、進展の解析を行った。疲労試験では試験片表面から複数のき裂発生が観察された。実験の結果、AX41 では TD の疲労寿命が ED のものと比べて短く、AX92 では両者に大きな違いがなかった。また、EBSD による観察の結果、き裂の主要な発生源が底面すべり及び双晶であることが分かった。結晶塑性解析では疲労試験中の AX92 の塑性ひずみを計算し(図Ⅲ-2.3.10-4)、塑性ひずみ振幅の値より FIP を求めた。ED の FIP が TD のものよりわずかに大きかったが、両者に大きな違いは見られなかった。これは AX92 の高サイクル疲労試験で ED と TD の疲労寿命の差が小さいことの原因であると考えられる。また、結晶塑性解析の結果、主に底面すべりと双晶が大きな塑性ひずみを発生させていた。これが実験において底面すべりと双晶が主要なき裂発生源となっていた理由であると考えられる。Paris 則を用いたき裂進展解析によりき裂進展寿命を計算した。そして疲労寿命を計算して実験結果と比較し(図Ⅲ-2.3.10-5)、比較的高い応力では精度よく予測できるとわかった。このように難燃性 Mg 合金押出材の高サイクル疲労試験及び疲労解析を行い、疲労寿命への押出方向の影響が小さいことが分かった。また、実験で得られた疲労寿命とき裂発生、進展解析の結果から予測した疲労寿命を比較し、両者の結果が概ね一致することを確認した。



図Ⅲ-2.3.10-5 AX92 押出材の応力振幅 160MPa の結晶塑性解析における塑性ひずみ振幅



図Ⅲ-2.3.10-6 AX92,TD の実験における疲労寿命と解析で予測した疲労寿命

①-2 計算モジュールの実験的検証【物質・材料研究機構、再委託先：茨城県産業技術イノベーションセンター】

ここでは、計算モジュールの実験的検証を目的として、2019 年度は、自動化したその場観察システム（オートフォーカス、自動パノラマ撮影、動的撮影）を用いて、AX41 合金の微小疲労き裂の発生、進展挙動のデータベースを構築した。また、画像相関法を活用して、さらに、溶接部の熱履歴を模擬した熱処理を行った試験片を作製し、その微細組織を確認するとともに、疲労特性の評価を進め

た。また、残留応力に関しては、四点曲げ試験により合金毎の X 線応力定数を明確にするとともに、計算モジュールの検証に必要な溶接継手の残留応力の計測を、計画を前倒しして行い、データを提供した。

図 III-2.3.10-7 に AX41 合金で観察された微小疲労き裂発生挙動の模式図を示す。疲労き裂は、結晶粒内のすべり帯と思われる箇所から発生することを確認した。また、疲労き裂発生直後のき裂進展速度にばらつきがあること、0.1 mm 以上のき裂長さでは巨視的なき裂の進展特性に概ね一致することを明らかにした。また、画像相関法と自動観察システムを組み合わせた独自の観察手法を活用して、通常検出することが難しい微小疲労き裂の開閉口挙動を実測した。

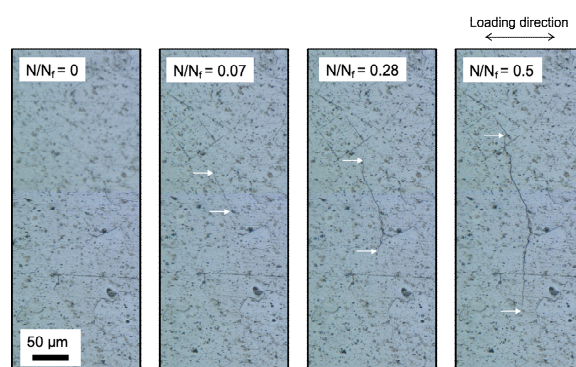


図 III-2.3.10-7 微小疲労き裂の発生挙動

①-3 計算モジュールの MI システムへの組み込み及び使い込み【物質・材料研究機構、川崎重工業、総合車両製作所】

内閣府 SIP 第一期「革新的構造材料」で開発された「マテリアルズ・インテグレーションシステム」(MInt システム) を、ISMA テーマ 60 (以下、本テーマ) 参画機関が利用できるよう調整し、本テーマで開発するモジュールとワークフローを搭載可能とした。

しかし、従来の MInt システムは、各モジュールの内部で動くソフトウェアやアクセスするデータなども、全て NIMS に設置された MInt システムのサーバ (以下 MInt サーバ) に搭載されている必要があったため、次のような問題があった。(1)モジュール内部で利用するソフトウェアが有償または非公開であった場合、MInt サーバに搭載できない。(2)本テーマ参画機関が機関外への持ち出しを禁止しているデータをモジュールから参照できない。(3)参画機関が有する高性能ないし特殊なハードウェアを活用できない。そこで 2019 年度は、SIP の MInt システム開発チームと緊密に連携し、モジュール内で MInt サーバ外のリモートコンピュータのソフトウェアを利用できる「外部計算資源の利用」機能の開発を開始した。これにより、商用・秘密・高負荷のソフトウェアは参画機関が自機関内に保持したまま、MInt サーバのワークフローから利用できるようになった。さらに、その自機関内に置かれたソフトウェアから、部外秘のデータにアクセスすることで、データ秘匿に関する問題にも対応可能となった。

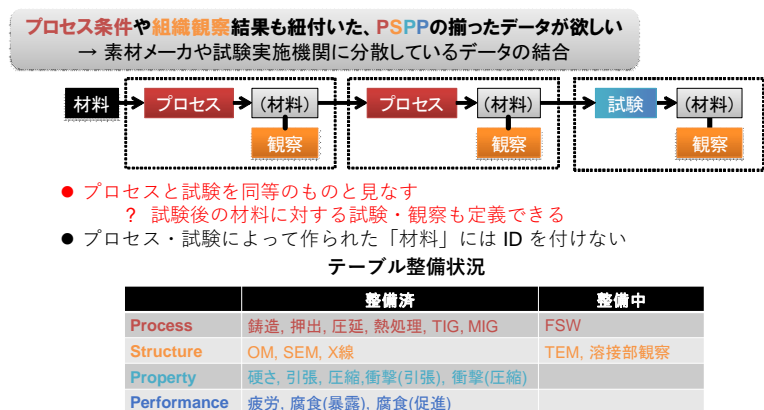
② データベースに立脚した難燃性マグネシウム合金母材・継手の性能予測システムの構築

②-1 難燃性マグネシウム合金データベースを活用した信頼性予測のためのデザイン設計【産業技術総合研究所、再委託先：東京大学】

本課題「難燃性マグネシウム合金データベースを活用した信頼性予測のためのデザイン設計」では難燃性マグネシウム合金（開発合金）の信頼性データベースを構築するとともに、信頼性予測に必要な材料の長期性能予測モデルの導出することを目的としている。2019年度は2018年度に設計および構築した開発合金データベースを用いて、開発合金の機械的特性予測モデルを導出した。2018年度に導出したFS研究データを対象とした予測モデルでは、定性的な傾向予測にとどまっていたが、開発合金データベースの活用により引張強度を始めとする機械的特性を高精度に予測可能なモデルを導出した。また、データベース中の各項目の予測精度に対する寄与を分析し、プロセスデータの拡充が予測精度向上に重要であることを明らかとした。今後については、得られた知見をもとに疲労特性を始めとする長期信頼性に関わるデータの拡充を図るとともに、信頼性データ予測モデルの構築を試みる。

②-2 難燃性マグネシウム合金の機械的特性および疲労特性データベース及びモデル式の構築【産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、三協立山、権田金属工業、住友電気工業、不二ライトメタル、再委託先：戸畑製作所、長岡技術科学大学】

2019年度は、2018年度に引き続き、「革新的マグネシウム材」の研究開発でこれまでに取得してきたデータの紐付け作業を実施した。具体的には、易加工性マグネシウム合金（押出材）および高強度マグネシウム合金（押出材、薄板材、中板材）を開発する過程で得られた材料組成、組織（晶出物分布、結晶粒径、集合組織）、プロセス（材料製造



図III-2.3.10-8 難燃性マグネシウム合金の機械的特性、疲労特性等統合テンプレートの作製状況イメージ図

条件)、機械的特性及び疲労特性に関するデータの紐付け作業を実施した。そこでは、はじめに、テーマ②-7「データベースのMIシステムへの組み込み及び使い込み」と連携し、上記の入力値及び出力値を入力するための統合テンプレートを作成した（テンプレートのイメージ図を図III-2.3.10-8に示す）。次に、作成した統合テンプレートに基づき、これまで蓄積してきた実験データ（材料組成、組織、プロセス、機械的特性及び疲労特性に関するデータ）の入力作業を実施した。さらに、理論と経験に基づく特性予測式（機械的特性）を導出するために必要となる情報を収集した。

②-3 難燃性マグネシウム合金溶接継手の機械的特性および疲労特性モデル式の構築【総合車両製作所、再委託先：木ノ本伸線、大阪府立大学】

様々な条件下における溶接継手の作製を総合車両製作所および木ノ本伸線にて行い、その機械的特性および疲労特性の評価を総合車両製作所、木ノ本伸線および大阪府立大学にて行うことにより、データを取得した。

また、「革新的マグネシウム材」の研究開発および本研究開発において継続的に取得中である難燃性マグネシウム合金 MIG (Metal Inert Gas) 溶接継手および TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接継手において得られた、溶接条件（溶接電流、溶接速度等）や母材組成、母材製造条件、溶加材組成などの溶接プロセス、結晶粒径、溶質元素種および濃度、晶出物分布、集合組織、欠陥分布などの継手組織、機械的特性、疲労特性に関するデータの紐付け作業を実施した。

さらに、これまでに収集した情報を元に、機械的特性を予測するための、理論と経験に基づく予測式を導出した。2019年度は、特に、MIG 溶接継手の機械的特性について検討を行った。MIG 溶接継手の機械的特性には、母材組成、溶加材組成、溶接電流、溶接速度などの溶接条件、それらに起因する結晶粒径、第 2 相量および分布、ミクロ欠陥などの微細組織、溶質元素固溶量などの因子が影響することが明らかになりつつある。そこで、いくつかの因子に着目し、予測式の導出を行った。具体的には、溶質元素固溶濃度と継手強度の関係、晶出物の体積分率と伸びおよび継手強度の関係などである。さらに、溶接条件と継手強度の関係については、機械学習を用いることにより、ある程度予測可能であることを見出した。

②-4 難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築【産業技術総合研究所、大日本塗料、再委託先：ミリオン化学】

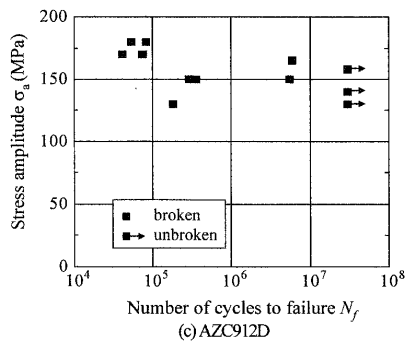
難燃性マグネシウム合金腐食データベースへの構築に関しては、合金素材の重量減少腐食速度について、大気暴露試験 77 データ、加速試験 165 データをデータベース化した。合金組成、不純物濃度の情報について、ICP にて定量分析を行った。表面処理材の腐食特性をデータベース化するにあたり、11 項目を追加した。

難燃性マグネシウム合金母材の耐食性を予測するためのモデル式の構築に関しては、暴露期間、設置場所、合金成分を説明変数、重量減少腐食速度を目的変数とする重回帰分析から腐食速度を予測する手法を提案した。観測値と予測値との間には R^2 が 0.947 の高い相関が得られた。腐食試験片の特定領域の侵食深さ分布を測定し、極値統計法に基づく試験片の最大侵食深さを求めた。最大侵食深さと平均の腐食深さの間には相関が認められ、従来の炭素鋼での知見と一致した。最大侵食深さについて重回帰分析を実施したところ、観測値と予測値の R^2 は 0.67 であった。環境因子を説明変数に導入することで更なる精度の向上を検討する。

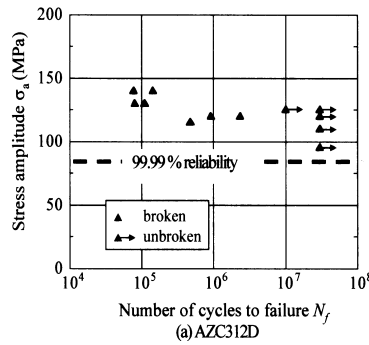
②-5 マグネシウム合金母材および溶接継手の寿命予測式の構築【産業技術総合研究所、再委託先：長岡技術科学大学、九州大学】

難燃性マグネシウム合金はカルシウムを添加するが、そのため種々の非金属介

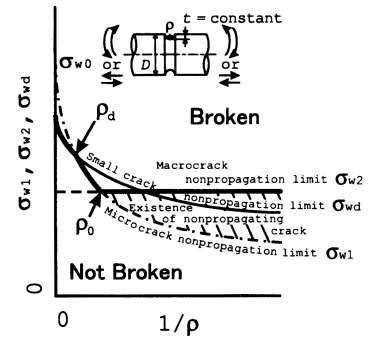
在物が材料中に存在する。疲労破壊は、その非金属介在物を起点に起こることが多い。図Ⅲ-2.3.10-9 に示す実験結果と、図Ⅲ-2.3.10-10 に示す介在物の大きさの極値統計と微小き裂の破壊力学特性からその疲労限度を予測した結果はよい相関が確かめられた。ダブルスキン構体は種々の応力集中部を有し、疲労破壊はそこから発生する。そこで、図Ⅲ-2.3.10-11 に示す σ_{w1} : 母材における疲労き裂発生限界、 σ_{wd} : 介在物起点の疲労限度、 σ_{w2} : 切り欠きをき裂とみなした時の疲労限度を導入した。これら3つの疲労特性は統計量として扱った。切り欠きや介在物による応力集中を無視した公称応力 σ_n を定義し、その応力振幅での上記の定義での疲労安全を $S_{\sigma w1}(\sigma_n)$, $S_{\sigma wd}(\sigma_n)$, $S_{\sigma w2}(\sigma_n)$ とする。図Ⅲ-2.3.10-12 に示す切り欠き底に固有な応力場を導入し、危険体積とそこに作用する応力の関係を定量化した。これらの危険体積での介在物の大きさの極値分布解析、破壊力学特性を用いてそれらの $S_{\sigma w1}(\sigma_n)$, $S_{\sigma wd}(\sigma_n)$, $S_{\sigma w2}(\sigma_n)$ を解析する方法を提案した。図Ⅲ-2.3.10-13 に切り欠き材の疲労試験結果、図Ⅲ-2.3.10-14 に予測結果（最頻値）と実験結果との比較を示す。両者にはよい相関がみられた。



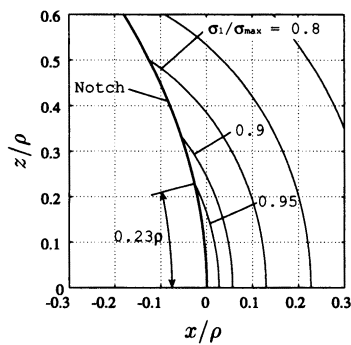
図Ⅲ-2.3.10-9 難燃性 Mg の S-N 曲線



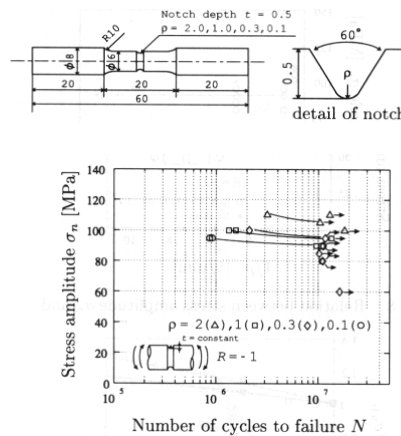
図Ⅲ-2.3.10-10 破壊力学特性からの疲労特性の予測



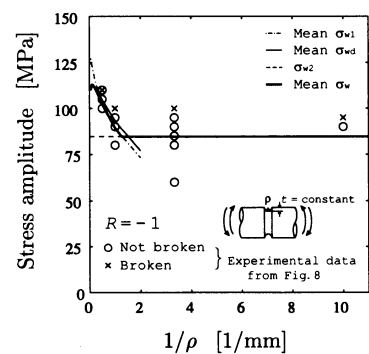
図Ⅲ-2.3.10-11 微小介在物を有する材料で作った構造物の疲労限度の意味



図Ⅲ-2.3.10-12 切り欠き底に固有な応力場



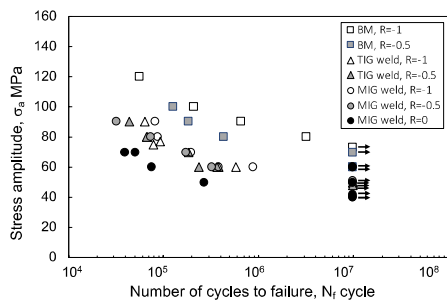
図Ⅲ-2.3.10-13 AZX912 切り欠き材の疲労特性



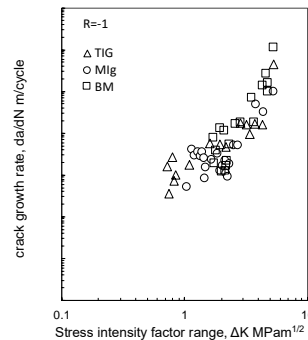
図Ⅲ-2.3.10-14 破壊力学特性からの予測結果と実験結果（図Ⅲ-2.3.10-13 から）

本研究プロジェクトで開発した Mg-Al-Ca-Mn 系合金 (AX41) の母材、MIG 溶接材および TIG 溶接材を供試材として平面曲げ疲労試験を行い、難燃性マグネシウム合金の疲労設計上重要な平均応力の影響および溶接部の疲労き裂伝ば挙動について検討し

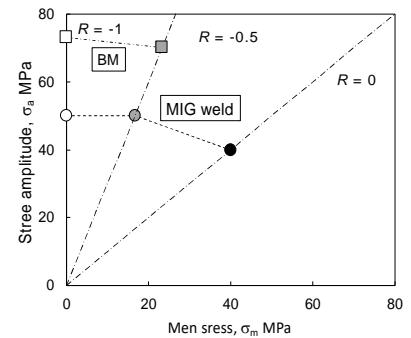
た。図Ⅲ-2.3.10-15 に示す母材および溶接材の $S-N$ 曲線より、いずれの溶接材も母材と比べて低い疲労強度を示した。 $R = -1$ および -0.5 では TIG 溶接材と MIG 溶接材のいずれも疲労強度はほぼ同程度であった。図Ⅲ-2.3.10-16 に示す疲労き裂伝ば曲線より、MIG 溶接材と TIG 溶接材を比べると、下限界近傍ではわずかに差があるが、全体的には大きな違いは認められなかった。 10^7 回で破断しなかった試験の応力振幅 σ_a とその際の平均応力 σ_m の関係を疲労限度線図としてまとめて図Ⅲ-2.3.10-17 に示す。なお、TIG 溶接材の応力比 $R = -1$ および -0.5 のデータは MIG 溶接材のデータと重なるため省略した。同図より、母材、溶接材ともに、平均応力の増加にともない 10^7 回で破断しなかった応力振幅 σ_a は低下する傾向が認められるが、今回実験を行なった応力比の範囲では平均応力の影響は小さい。この原因として、溶接材については、欠陥寸法のばらつきの影響が考えられる。なお、難燃性マグネシウム合金 Mg-6%Al-1%Zn-1%Ca の平面曲げ試験の結果でも、平均応力の影響が小さいことが報告されている（※参考文献：斎藤尚文ら，軽金属 67-12 (2017) pp.625-631）。



図Ⅲ-2.3.10-15 AX41 母材、MIG 溶接材、TIG 溶接材の異なる応力比(R)での平面曲げ疲労強度特性。



図Ⅲ-2.3.10-16 AX41 母材、MIG 溶接材、TIG 溶接材の疲労き裂伝ば曲線 ($R=-1$)。



図Ⅲ-2.3.10-17 AX41 母材、MIG 溶接材、TIG 溶接材の疲労限度線図。

②-6 難燃性マグネシウム合金の衝撃特性評価技術開発【産業技術総合研究所、再委託先：神戸大学】

本研究課題では、高い安全・信頼性を有する難燃性マグネシウム合金および継手材の創製を達成するために、衝撃荷重に対する強度および破壊エネルギーを評価する技術を利用して、難燃性マグネシウム合金の高速変形特性を予測するためのデータベース（フォーマット）を構築する。2019 年度は、量産試作された Mg-9mass%Al-2mass%Ca (AX92)合金押出材に対して広範囲にわたるひずみ速度で引張および圧縮試験を実施した。試験片は厚さ 8 mm の板材中心部より圧延方向 (LD) および圧延垂直方向 (TD) から採取した。平均粒径は 24 μm 程度の等軸結晶粒からなることを確認した。AX92 に対して準静的および高ひずみ速度にて圧縮試験を実施した結果、降伏応力の値に大きな差は見られなかった。また、TD 方向と LD 方向を比較すると、低ひずみ域での加工硬化率の増分が LD 方向の方が大きく、方向依存性を示した。これにより、TD、LD 方向によって変形機構が異なる可能性が示唆された。また、引張試験結果から、TD 方向において最大応力はひずみ速度の増加にともない

わずかに増加したものの、降伏応力と破断伸びの値に大きな変化はみられなかった。よって、TD 方向において降伏応力ならびに破断伸びのひずみ速度依存性は低いと考えられる。一方、LD 方向ではひずみ速度の増加に伴い降伏応力は増加したが、破断伸びの値にひずみ速度依存性は見られなかった。TD 方向と比較し、LD 方向の方が破断伸びの値が大きく、応力も高いことから、破断伸び、応力ともに方向依存性を示すことが明らかとなった。加工硬化率については TD 方向で $2.2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ は他のひずみ速度に比べ、高い加工硬化率を示した。LD 方向ではひずみ速度依存性は見られなかった。破面観察の結果、TD、LD 方向ともに圧延方向に亀裂が進展し、引張方向と亀裂方向の違いが応力および破断伸びの方向依存性に寄与したものと考えられた。SEM/EBSD 観察、XRD 解析および、EDS 観察結果から、 $20 \mu\text{m}$ 程度の粗大な金属間化合物は Al_2Ca であり、粒界に沿って分布する数 μm の微細な金属間化合物は Al_2Ca および Mg_2Ca で構成されていることが確認された。AX41 合金の変形特性と比較した結果、商用 AX 合金の高強度化には、結晶粒微細化より粒子分散の効果が大きいと考えられた。今後は強度増加を定量的に理解し、構成則を導出するため、TEM を用いた析出物のサイズおよび分布の定量化が重要となることを確認した。

②-7 データベースの MI システムへの組み込み及び使い込み 【物質・材料研究機構、三協立山、権田金属工業、住友電気工業、不二ライトメタル、大日本塗料、総合車両製作所、川崎重工業】

2019 年度は、マテリアルズ・インテグレーション (MI) 技術に適した材料データベースについて、各テーブルのテンプレート策定・データ収集・データベースの設計・収集データのデータベースへの格納、MI 担当者へのデータ提供を行った。MI では構造材料の性能予測にプロセス・組織・特性・性能 (Process - Structure - Property - Performance) の連関モデルを考えている。MI のためのデータベースを開発する本テーマでも、データ収集用の各分野のテンプレートは、このモデルに基づき、材料組成のほか、各プロセス、組織観察、特性・性能試験について整備を行った。また、材料(鋳造材、押出材、圧延材、これらの接合材)の入出荷情報を突き合わせて、材料がたどったプロセス履歴を極力追跡できるようにした。材料は分岐・合流も可能とした。例えば途中からプロセス条件を変えた場合は複数の材料が枝分かれするし、逆に、例えば接合プロセスでは被接合材 2 種とワイヤや溶加棒の材料を合流させる形でプロセスを記述することになる。こうすることで、材料に影響を及ぼしたプロセス条件の情報が全て得られるため、機械学習でプロセス条件や観察結果を説明変数、材料の特性や性能を目的変数として、強く影響した因子を求めることが容易なデータベースとなる。

本データベースは、設計・運用に関する詳細なドキュメントが整備された。これにより、将来的な拡張に際しても対応できるようになっている。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.10-4 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			
2018FY	1	0	10	0	0	0	0	3	1
2019FY	4	0	23	0	0	0	0	0	1
合計	5	0	33	0	0	0	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-2.3.10-5 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※
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4 「革新的チタン材の開発」

2.4.1 [テーマ番号 10] チタン材一貫製造プロセス技術開発

2.4.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

チタン材の素材・部材の低コスト化と、輸送機軽量化のための材料高強度化を狙い、本プロジェクトでは、スクラップ等のチタン低廉材料を活用可能とする溶解脱酸プロセスを含む革新的なチタン材一貫製造プロセス技術の開発と、強度と加工性に優れたチタン材の開発を目的とする。第3期は、強度と加工性に優れたチタン材の開発に取り組む。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.4.1-1 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 (2020年度末)	根拠
1. チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	・溶解脱酸を実現する実機プロセスの技術課題明確化 (酸素濃度：300ppm以下)	・2017年度で終了	・2017年度で終了	—
2. 一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	・一貫製造プロセスと、現行材比で強度20%向上させる材料コンセプトのラボレベルでの抽出。	・現行材比で強度20%向上のスケールアップ検証。	・現行材比で強度20%向上のスケールアップ検証。	・コスト低減と、ユーザーニーズに応える性能差別化。

(3)全体計画

第1期 (2013年度～2015年度)

一貫製造プロセス開発に必要な技術課題に対する、ラボレベル検討での解決コンセプト抽出

第2期 (2016年度～2017年度)

ラボ実験による実機化への課題抽出

第3期 (2018年度～2020年度)

スケールアップ検証

(4)実施体制

以下の体制で研究を推進している。

2018年度 : 神戸製鋼所に4機関の再委託先を加えた体制

2019年度以降 : 神戸製鋼所

(5)運営管理

再委託先とは個別課題毎に定期的(数か月に1度の頻度で)打ち合わせを行い、研

究の方向性の共有化に努めることで、効果的な研究推進を図った。

(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）

国際競争力に優れる低コストで高性能なチタン材を製造でき、引き続き拡大が確実に視されるチタン需要を取り込み、日本のプレゼンスを拡大できる。

2.4.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.4.1-2 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
1.チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	・2017年度で終了。	・2017年度で終了。	—	
2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	・現行材比で強度20%向上のスケールアップ検証。	・スケールアップ向け基礎検討は完了し、今後、検証の見込み。	△	

※◎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-2.4.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
1.チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	・2017年度で終了。	・2017年度で終了。	—
2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	・スケールアップ向け基礎検討は完了し、今後、検証の見込み。	・現行材比で強度20%向上のスケールアップ検証。	達成の見込み。

(3)研究開発の成果と意義

第2期までに抽出した技術コンセプトを踏まえ、強度と加工性に優れたチタン材に対して、スケールアップ検証を進めており、これまでに必要な基礎検証を完了させ、今後検証させる見込みである。本プロジェクトで検証する強度と加工性に優れたチタン材により、チタン部材のコスト低減を図れ、国際競争力を獲得できる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.4.1-4 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			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	13	1	0	0	0	0	1
2016FY	3	0	5	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	2	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2019FY	1	0	9	0	0	0	0	0	1
合計	4	0	32	1	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-2.4.1-5 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	2	0	0
2015FY	6	0	3
2016FY	5	0	1
2017FY	4	0	1
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
合計	17	0	5

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4.2 [テーマ番号 11] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発

2.4.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

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、輸送機器の軽量化が重要な取り組み課題の一つである。チタン材は、現在自動車に主に使用されている鋼材に比べ、密度が小さく比強度に優れているため、チタン材を有効に活用することにより輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量とCO₂排出量の削減ができると期待されている。しかしながら、チタン材は、鋼材に比べて複雑で非常に多くの工程によって製造されているために高価であることから、航空機分野では多用されているものの、自動車等の陸上輸送機器への適用は限定的である。

チタン材の利用を促進するためには、チタン製錬やチタン展伸材製造プロセスの生産性向上が必要となる。これら課題に対処する技術として、チタン鉱石から得られる最初の金属チタンであるスポンジチタンから薄板を製造する工程を革新的に短縮を図る「A.高効率チタン薄板製造技術開発」および、チタン鉱石を現行クロール法とは異なる新しい製錬技術により金属チタン化する「B.チタン新製錬技術開発」および、現行のクロール法における不純物元素の汚染を低減する「C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」を行う。これらの技術開発により、チタン薄板を低コストで製造できる製造工程の確立を目指す。

(2)位置付け、目標値

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

チタン薄板のコストを低減するために、現行プロセスにある溶解工程を省略することで革新的に工程短縮を図る。得られるチタン薄板は、低コストだけでなく現行材と同等以上の特性を有することも求められる。このため、チタン薄板の気孔率や引張特性に関する目標を設定した。

B. チタン新製錬技術開発

現行のクロール法以外の新たな製錬方法を開発する。開発初期3年間は、チタン製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある基盤シーズを探索する。得られた結果を、チタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討する。将来の工業化を検討するに足る目標値として、得られたチタンの不純物とコストダウンを目標に設定した。

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

スポンジチタンの生産性および品質低下をまねく不純物汚染を低減する技術を開発する。不純物汚染低減は、A.高効率チタン薄板製造技術開発に必要な要素である。加えて、生産性向上と不純物汚染低減に伴う歩留り向上に寄与する技術を開発しスポンジチタンでのコストダウンも実現する。そのための目標を設定した。開発されたスポンジチタンは、A.高効率チタン薄板製造技術開発で開発された技術と

組み合わせることで、チタン材の革新的なコストを実現でき、チタン材の新市場開拓が期待できる。また、当該スポンジチタンは低コストかつ高品質であるため、単体でも、既存の一般スポンジチタン市場や、高品質スポンジチタン市場での国際競争力の向上を期待できる。

【第1期目標（2015年度末）】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、実験室規模の試験を行い、基本設計指針の確認および検証を行う。その際、第2期で実施する工業化に必要な要素技術の検討に向け、小型の梱包体を用いて効率的に課題を抽出する。この検討の成果として、実験室規模で冷間圧延までに行い作製した冷間圧延板の気孔率1%以下を目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、本研究開発は、チタン製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある基盤シーズ探索として、上記の4課題の研究を、共同研究先として各々4機関と実施する。その結果を、チタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討し、2016年度以降の進め方を決定する。

将来の工業化を検討するに足る目標値として、Fe含有量：2000ppm以下、O含有量：1000ppm以下を、ラボスケールで検証することを目標とする。

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、スポンジチタンの不純物であるFe、O、Cl濃度を低減できる要素技術を開発する。具体的には下記の値を目標とする。

Fe：ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm以下

O：ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm以下

Cl：300ppm以下

【第2期目標（2017年度末）】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、実験室規模の試験にて、異なる成分のチタン材とスポンジチタンの組み合わせを検討して、冷間圧延までに行い、高機能化チタン薄板を試作する。この検討の成果として、薄板の引張強度・延性のバランスを現行材より20%向上させることを目標とする。

さらに、2015年度までに実験室規模での試験で得られた成果をもとに、工業化に必要な要素技術の検討を行う。この検討の成果として、工業的に薄板を製造するプロセスを提案することを目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、2015年度までの結果を受けてチタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボード等の議論を経て決定される方針に従い、工業化の可能性があると判断された技術シーズないし要素技術の組み合わせ技術の研究開発を、再度大学と共同研究する。有望なシーズ技術のひとつである「2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析」に関しては大型ラボ設備を導入し、大型化時の技術検証、課題抽出及びその対策検討を行う。これらの取組みにより製錬プロセス設計指針を提案することを目標とする。

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、2015年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化するための問題点を抽出することを目標とする。

【第3期(最終)目標 (2020年度末)】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、これまでに得られた知見を基に、大型試験設備を用いて大型梱包体の組立条件の検討、熱間圧延および冷間圧延における適正な条件を検討し、幅200mm以上の大型チタン薄板コイルを試作し、低コスト製造技術確立のために最適な製造プロセスの検討を行う。これらの検討の成果として、薄板の気孔率0.2%以下とし、現行プロセスに比べてチタン薄板製造のリードタイムが15%減少することを目標とする。また、異なる成分のチタン材とスポンジチタンの積層組合せを検討し、本プロセスの特徴を活かした高機能チタン薄板を提案する。この検討の成果として、薄板の引張強度・延性のバランスを現行材より30%向上させることを目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、これまでに得られた知見を基に、大型試験設備を用いて、A4サイズ、数百μm厚さで、O≤1000ppm、Fe≤2000ppmのチタン箔を試作する。また、大型試験で、実用化の課題抽出及び対策検討と、自動車部品製造に向けた課題検討を行う。また、工業化が可能と判断されるFe≤2000ppm、O≤1000ppmの純度で、現行クロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を提示する。

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、実機スケールで、Fe≤200ppm、O≤150ppm、Cl≤300ppmのスポンジチタンを製造可能な技術、A級スポンジチタンの歩留りを85%から92%に向上可能な技術、スポンジチタンの製造リードタイムを30%低減可能な技術を確立する。

研究開発目標とその根拠を表Ⅲ-2.4.2-1に示す。

表Ⅲ-2.4.2-1 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 (2020年度末)	根拠
高効率チタン薄板製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 高機能化チタン薄板を試作し、引張強度・延性バランスを現行材より20%向上 工業的に薄板を製造するプロセスの提案 	<ul style="list-style-type: none"> 大型試験設備を用いた試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率0.2%以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より30%向上。 	<ul style="list-style-type: none"> 大型試験設備を用いた試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率0.2%以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より30%向上。 	<ul style="list-style-type: none"> 引張特性に悪影響しない気孔率 海外顧客への納品輸送期間に相当する工期が短縮でき、対海外メーカー競争力を確保できる JIS2種(高強度)材でJIS1種材なみの成形加工が可能で、高強度要求製品を従来の成形加工方法で成形できる

チタン新製錬技術開発	2015年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための問題点を抽出	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、$Fe \leq 2000ppm$、$O \leq 1000ppm$のチタン箔の試作 ・実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討 ・$Fe \leq 2000ppm$、$O \leq 1000ppm$の純度で、現行クロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、$Fe \leq 2000ppm$、$O \leq 1000ppm$のチタン箔の試作 ・実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討 ・$Fe \leq 2000ppm$、$O \leq 1000ppm$の純度で、現行クロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・チタン薄板を製造可能なFe、O含有量 ・為替レートによらず、海外メーカーとのコスト競争に勝てるコスト安定性が確保できる
高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	2015年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための問題点を抽出	<ul style="list-style-type: none"> 実機スケールで以下を実現可能な技術を確立 ・$Fe \leq 200ppm$、$O \leq 150ppm$、$Cl \leq 300ppm$のスポンジチタンを製造 ・A級スポンジチタンの歩留まりを85%から92%に向上 ・製造リードタイムを30%低減 	<ul style="list-style-type: none"> 実機スケールで以下を実現可能な技術を確立 ・$Fe \leq 200ppm$、$O \leq 150ppm$、$Cl \leq 300ppm$のスポンジチタンを製造 ・A級スポンジチタンの歩留まりを85%から92%に向上 ・製造リードタイムを30%低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・Aの開発成功に必要な要素であるため ・高品質化による国際競争力強化のため ・歩留まり向上に寄与するため

(3)全体計画

複雑で高コスト要因となっているチタン薄板製造工程を革新的に改良し、チタンの利用促進に寄与する、チタン精練～チタン材製造プロセスの生産性向上技術ならびに、さらなるチタン材の高機能化を達成する技術を開発する。

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、溶解工程を省略し、スポンジチタン（高空隙率のチタン塊）を直接展伸してチタン薄板を製造する技術開発を行う。

初期の3年間（2013～2015年度）は、現行スポンジチタンを用いて実験室規模の試験を行い、本開発プロセスの基本設計指針の確認およびラボ検証を行う。この実験室規模の試験を通して得られた知見より、その後の2年間（2016～2017年度）は、工業化に必要な要素技術の課題の抽出を行う。後半の6年目（2018年度）以降では、大型薄板コイルの製造から実用化に向けた検討を行う。大型試験設備を用いた試験による検証、最適設備設計による低コスト製品特性付与技術の確立を実施する。

また、2016年度からは、本プロセスの特徴を活かした高機能材の開発も実験室規模で推進し、引張強度・延性バランスを向上させた高機能チタン板を提案する。

B. チタン新製錬技術開発

工業展開可能な低コスト新製錬技術の開発のため、製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある下記の4つの基盤シーズ探索を、共同研究先として各々4機関と、まず3年間（2013～2015年度）実施する。

- ・高温熔融塩を用いた液体Ti電解製造技術の研究開発
- ・酸化物還元原料のCaTiO₃を鉱石から製造する技術の研究開発
- ・2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析技術の研究開発
- ・チタン製造技術へのマイクロ波活用技術の研究開発

これらの結果をチタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題の明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討し、2016年度以降の進め方を決定する。

2016年度以降は、基盤シーズ探索の成果をもとに可能性がある判断された有望技術を、再度大学と共同研究を行い、さらに基盤強化の研究開発を実施するとともに、チタン製錬メーカーである東邦チタニウム株式会社（茅ヶ崎分室）に大型ラボ設備を導入して工業化に必要な要素技術の検討を行う。

2016年度以降は、れまでに得られた知見を基に、大型試験設備を用いて、A4寸法、数百μm厚さで、Fe≤2000ppm、O≤1000ppmのチタン箔を試作する。大型試験で、実用化の課題抽出及び対策検討と、自動車部品製造に向けた課題検討を行う。また、工業化が可能と判断されるFe≤2000ppm、O≤1000ppmの純度で、現行クロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を提示する。

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

2015年度までに、各目標を達成するための要素技術開発を、主にラボスケール試験や数値シミュレーション等によって凡そ完成させ、2015年度以降、完成した各要素技術の、実機スケール試験を行ない、その効果の実証と最適化を行なう。これにより、2020年度までに、各目標を実機スケールで達成できる技術を確立する。

(4)実施体制

新構造材料技術研究組合（ISMA）の富津分室である日本製鉄株式会社と、茅ヶ崎分室である東邦チタニウム株式会社が共同で実施する。

(5)運営管理

主たる研究実施場所である新構造材料技術研究組合（ISMA）の富津分室および茅ヶ崎分室に、業務管理者および経理責任者を配置して、研究開発業務を適切に運営している。運営に必要な事務作業に関しては、ISMA 事業管理部の管理下にあり、事業管理部の指示のもと着実に作業を行なっている。

技術面に関しては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や ISMA 技術企画部に対して所定の報告会を実施している。

また、再委託先とは少なくとも半年に1回、研究進捗打合せを行った。

(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）

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」により、スポンジチタン製造コスト全体の約10%コストダウンを見込む。これにより世界最高水準の高品質と低コストを同時達成できることとなり、既存のスポンジチタン市場で高い国際競争力を得ることが出来る。また、省エネルギー化と言う観点では、約9%の電力削減効果を見込む。これにより、その他の汎用金属に比べて製造時の消費電力が多いチタンの省エネルギー化に貢献する。

また、溶解工程を省略する「高効率チタン薄板製造技術開発」、チタン鉱石を現行クロール法とは異なる新しい製錬技術により金属チタン化する「チタン新製錬技術開発」と合わせて、チタン薄板を低コストで製造できるようになる。さらに、本プロセスの特徴を活かして引張強度・延性バランスを向上させる等、従来にない高機能チタン板が得られる。

これらにより、品質特性を向上しつつある海外製チタン薄板に対し、十分競争力のある、低コストで強度・延性バランスの優れたチタン薄板の製造が可能になる。

本研究開発の対象市場は、高耐食性が主な要求特性である用途（板式熱交換器、電力、化学向け等）や高価ゆえに活用が進まなかった用途（自動車向け（足回り、マフラー等）、民生品）である。また、現行のチタン市場の置き換えではなく、新たなメガ市場を創出することも期待される。

2.4.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.4.2-2 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
高効率チタン薄板 製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・実機規模の試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率0.2%以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 ・高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より30%向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率0.2%以下)を達成。 ・スポンジチタンからチタン梱包体(熱間圧延用の素材)を製造する方法を提案。 ・高機能化のために適正な材料選定をおこなうことで、薄板の引張強度・延性バランスの目標(現行材より30%向上)を達成。 	<p>○</p> <p>△</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・大型ラボ試験により、最適な薄板製造プロセスの検討を行い、本開発プロセスにおけるチタン薄板製造のリードタイムを求める。
チタン新製錬技術 開発	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、Fe\leq2000ppm、O\leq1000ppmのチタン箔の試作 ・実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討 ・Fe\leq2000ppm、O\leq1000ppmの純度で、現行クロール法より20%コスト削減に必要な要素技術を提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4寸法、数百μm厚さで、O\leq1000ppm、Fe\leq2000ppmのチタン箔を製造 ・実用化の課題抽出および対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討を実施。 ・Fe\leq2000ppm、O\leq1000ppmの純度となる製造技術を確立 	<p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>	<p>—</p> <p>—</p> <p>20%コスト削減に必要な要素技術を未提示</p>

高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	実機スケールで、 ・ Fe ≤ 200ppm, O ≤ 150ppm, Cl ≤ 300ppm のスポンジチタンを製造 ・ A 級スポンジチタンの歩留まりを 85% から 92% に向上 ・ 製造リードタイムを 30% 低減	実機スケールで、以下を実現可能な技術を確立 ・ Fe ≤ 200ppm, O ≤ 150ppm, Cl ≤ 300ppm のスポンジチタンの製造技術を確立	○	—
		・ A 級スポンジチタンの歩留まりを 85% から 93% に向上する技術を確立	○	—
		・ 還元反応と真空分離のリードタイムを、それぞれ 30%、18% 低減に成功。	△	真空分離のリードタイムは、残り 12% 分の低減を要す

※◎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

実験室規模の試験や実機規模の試験にて、各技術の最適化を行なうことにより、いずれの最終目標についても 2020 年度までに達成できる見込みである。

表 III-2.4.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020 年度末)	達成見通し
高効率チタン薄板製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率 0.2% 以下)を達成。 ・ 幅 200mm 以上のチタン薄板コイルを試作。さらに、実用化を想定した大型ラボ試験を実施中。最適な薄板製造プロセスを検討中。 ・ 高機能化のために適正な材料選定をおこなうことで、薄板の引張強度・延性バランスの目標（現行材より 30% 向上）を達成。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実機規模の試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率 0.2% 以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 ・ 高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より 30% 向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気孔率 0.2% 以下は達成済み。 ・ 大型ラボ試験により、最適な設備設計を行い、リードタイム減少は達成できる見通し。 ・ 引張強度・延性バランスを現行材より 30% 向上は達成済み。

チタン新製錬技術 開発	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4 寸法、数百 μ m 厚さで、$O \leq 1000\text{ppm}$、$Fe \leq 2000\text{ppm}$ のチタン箔を製造 ・実用化の課題抽出および対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討を実施。 ・$Fe \leq 2000\text{ppm}$、$O \leq 1000\text{ppm}$ の純度となる製造技術を確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・大型試験で、A4 寸法、数百 μ m 厚さで、$Fe \leq 2000\text{ppm}$、$O \leq 1000\text{ppm}$ のチタン箔の試作 ・実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討 ・$Fe \leq 2000\text{ppm}$、$O \leq 1000\text{ppm}$ の純度で、現行クロール法より 20%コスト削減に必要な要素技術を提示 	2020 年度中に、生産性向上技術の試験を実施し、現行クロール法より 20%コスト削減に必要な要素を技術を提示し、最終目標達成見込み。
高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 実機スケールで、以下を実現可能な技術を確立 ・$Fe \leq 200\text{ppm}$、$O \leq 150\text{ppm}$、$Cl \leq 300\text{ppm}$ のスポンジチタンの製造技術を確立 ・A 級スポンジチタンの歩留まりを 85%から 93%に向上する技術を確立 ・還元反応と真空分離のリードタイムを、それぞれ 30%、18%低減。 	<ul style="list-style-type: none"> 実機スケールで、 ・$Fe \leq 200\text{ppm}$、$O \leq 150\text{ppm}$、$Cl \leq 300\text{ppm}$ のスポンジチタンを製造 ・A 級スポンジチタンの歩留まりを 85%から 92%に向上 ・製造リードタイムを 30%低減 	2020 年度中に、真空分離のリードタイムをさらに 12%低減可能な技術を確立し、最終目標達成見込み

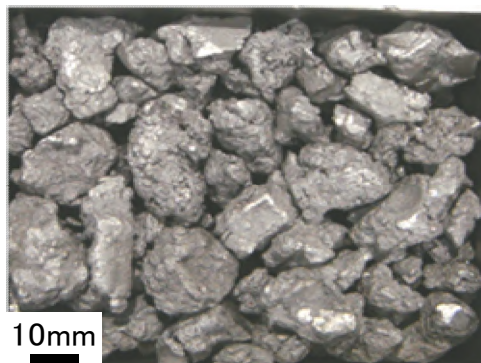
(3)研究開発の成果と意義

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

富津分室が担当している「高効率チタン薄板製造技術開発」は、チタンの溶解・鍛造工程を省略しスポンジチタンを直接圧延して薄板を製造する方法の開発である。スポンジチタンを圧縮成形してブリケットとし、そのブリケットをチタン板（梱包材）で組立てたチタン箱に入れて、内部を真空にしたチタン梱包体とする。チタン梱包体は、熱間圧延用の素材（スラブ）である。以降の工程は現行のチタン薄板の製造工程と同様、熱間圧延、酸化層除去（酸洗）、冷間圧延を行って、チタン薄板となる。

現行プロセスから溶解工程の省略を図る「高効率チタン薄板製造技術開発」は、現

行のクロール法で製造した種々の品質のスポンジチタン（図Ⅲ-2.4.2-1）を出発原料として、実験室規模の大きさの試験材（チタン梱包体）を溶解工程を省略して試作し、一連の薄板製造工程にて薄板を作製し評価を行った。

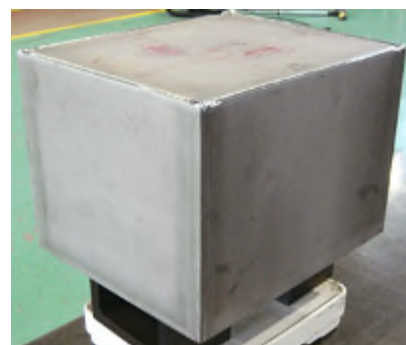


図Ⅲ-2.4.2-1 現行のスポンジチタン

2019年度に購入した専用の金型を用いて、スポンジチタンを圧縮成形し、実用サイズの直方体形状のチタンブリケットを試作した（図Ⅲ-2.4.2-2）。熱間圧延用の素材となるチタン梱包体は、チタン板で構成されたチタン箱の中に、このチタンブリケットを挿入して、チタン板で蓋をして組み立てた。チタン梱包体の大きさは、厚さ75mmから順次大きくしてきた。2019年度には、試験時の取り扱いやすさを考慮しつつ、工業化時の厚さまで大きくして製作した（図Ⅲ-2.4.2-3）。チタン梱包体は、所定の温度に加熱後、熱間圧延を行った。チタン梱包体の大型化にともない、熱間圧延中に大きな割れが発生していたが、これまでに見出した対策を施すことにより、厚さ40mm、幅340mm、長さ約1.4mの良好な形状のチタン厚板が得られた（図Ⅲ-2.4.2-4）。



図Ⅲ-2.4.2-2 チタンブリケット



図Ⅲ-2.4.2-3 大型チタン梱包体



図Ⅲ-2.4.2-4 大型チタン梱包体から製作したチタン厚板



図Ⅲ-2.4.2-5 冷間圧延の状況

チタン厚板は、さらに熱間圧延して、厚さ 6mm 熱間圧延板を得た後、表面のスケールを除去して冷間圧延した（図Ⅲ-2.4.2-5）。この際、製造する課題は認められず、厚さ 0.5mm、幅 250mm のチタン薄板コイルが得られた。

これまでに小型のチタン梱包体から製作した熱間圧延板を切板で冷間圧延したチタン薄板の断面ミクロ組織を観察した結果、現行製造工程と同じ溶解工程を経て製作したチタン薄板（現行材）には認められない気孔が見つかった。ただ、チタン梱包体の製造条件や熱間圧延条件を適正にすることにより、その量は 0.2%未満にすることができた。また、上記で得られた厚さ 0.5mm、幅 250mm のチタン薄板コイル（開発材）でも気孔率は 0.2%未満であり、最終目標（気孔率 0.2%以下）を達成することができた。

さらに、引張試験を行った結果、開発材の 0.2%耐力、引張強度および伸びのいずれも、現行材と同等の値であった。ただし、試作条件や上記の気孔率とは無関係に、開発材特有の表面疵が見つかり、この部分で伸びが低くなった。この原因を調査した結果、原料のスポンジチタン粒の一部に不純物の多いスポンジチタン粒が存在していたためであることがわかった。原料のスポンジチタンの改良を下記C.で進めた結果、現行材に見られない開発材特有の表面疵は低減することができた。

以上のように、実験室規模の試験から、目標を達成するミクロ組織が得られ、引張特性も現行材と同等であることがわかり、本開発プロセスの妥当性を確認できた。一方で、本開発で使用するスポンジチタンは、不純物の少ない高品質のスポンジチタンが必要であることが明らかになった。

チタン薄板の高機能化として、強度・延性バランスを向上させるために、チタン梱包体の構造を検討した。中型のチタン梱包体（厚さ 120mm）を所定温度まで加熱して、熱間圧延した後、表面のスケールを除去して、厚さ 0.6mm まで冷間圧延した。この間、大きな問題なく、高機能チタン薄板を製作できることを確認した。得られたチタン薄板は、焼鈍後に引張特性を調査した。異なる成分のチタン材とスポンジチタンの組合せを適正化した結果、現行材と比べて、延性はわずかに低下するものの、引張強

度を大幅に増やすことができ、強度－延性バランスは30%以上向上させることができた。

B. チタン新製錬技術開発

「チタン新製錬技術開発」は、現行クロール法とは異なる新しい製錬技術によって、チタン鉱石等の原料を金属チタン化する革新的な技術の開発である。このテーマでは、工業展開可能な低コスト新製錬技術の開発のため、工業化の可能性のある複数の基盤シーズ探索を、共同研究先の各機関と実施した。また、基盤シーズ探索の成果をもとに工業化に必要な要素技術の検討を茅ヶ崎分室で行った。

b-1. チタンの電析技術の研究開発（2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析）

3機関の共同研究先と探索したシーズ技術のうち、有望なシーズ技術のひとつである「2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析」に関しては、茅ヶ崎分室に小型および大型のラボ試験装置を導入し、チタン箔に影響する因子の調査、実用化の課題抽出及び対策検討、自動車部品製造に向けた課題検討を行った。

b-1-1. チタン箔に影響する因子の調査

健全なチタン箔を作製する適正な電析条件の検討のため、種々の電析条件で電析チタン箔を作製し、比較評価し、チタン箔の性状に影響する因子を調査した。その結果、電流密度および電解浴温度は、チタン箔の性状に大きく影響することがわかった。得られた知見から「はがき」寸法の電析を行い、デンドライトは微少で、貫通孔はなく、電極からの易剥離性を有した100 μ m厚のチタン箔を製造した。このチタン箔のO濃度とFe濃度は、原料の値よりも低下しており（O濃度；原料700ppm→製造したチタン箔185ppm、Fe濃度；原料600ppm→製造したチタン箔6ppm）高純度化していることが確認された。

b-1-2. 実用化の課題抽出及び対策検討

「はがき」寸法の易剥離性チタン箔製造条件をもとに、大型電析試験装置を用い、実用化を想定したA4寸法の電析チタン箔の電析を行った。浴温度の適正化（520→500℃）およびパルス電流の停止時間の延長により、易剥離性を有する平滑なA4寸法の電析チタン箔を製造することができた。また、浴温度の低減により、剥離性が向上し、パルス電流の停止時間の延長により、剥離性および平滑性が向上することがわかった。

b-1-3. 自動車部品製造に向けた課題検討

得られたチタン箔は、陰極から容易に剥離することができなければ、量産プロセスを構築することは困難である。すなわち、この方法の工業化に向けての最大の技術ポイントは、電析チタンの陰極からの剥離である。これまで感覚的な人の手による評価に頼っていた電析チタン箔のMo陰極からの剥離性を、剥離強度測定機を用い

て評価した。その結果、本装置で剥離性の定量的な評価を行うことができ、剥離可能な試料においても、その難易を把握することが可能であることがわかった。

b-2. チタン新製錬技術開発基盤シーズ探索

「B.チタン新製錬技術開発」では、工業展開可能な低コスト新製錬技術の開発のため、3つの基盤シーズ探索を3機関の共同研究先と実施した。

b-2-1. 高温熔融塩を用いた液体 Ti 電解製造技術の研究開発（関西大学）

Ti 化合物を含む高温熔融塩中での電解による液体 Ti 金属の直接製造プロセスの検討を行った。CaF₂-CaO -TiO₂ 浴を用い、1500℃および Ti 融点(1668℃)以上の 1720℃で電解を行い、電解電位と電析物組成の関係を調べるとともに、Ti 金属の電解を試みた。その結果、限定された電位条件において Ti 金属は得られたが、坩堝との反応により TiN が形成され、液体の Ti 金属を得るには至らなかった。液体 Ti 金属を得るためには、BN 以外の坩堝等を用いて、さらに電解条件を精査する必要がある。なお、工業化の可否検討に十分な成果が得られたので、2016 年度までに終了した。

b-2-2. 高酸素含有チタン化合物から Ti を製造する技術の研究開発（北海道大学）

イルメナイト鉱石から中間原料 CaTiO₃を製造する方法の検討と、CaTiO₃を還元して金属チタンを製造する条件の検討を行った。前者は Fe の選択除去により 2000ppm 以下まで低減可能なプロセスを見出した。後者は、CaCl₂-CaO 電解浴を用いて、熔融塩浴中の CaO 濃度、原料粉末の凝集状況、電解時雰囲気圧力による影響による O 濃度への影響等を調査した。これらの条件を最適化することにより、金属 Ti 中の O 濃度は従来より低下した。理論的に過不足なく還元する為に必要な理論電気量に対する電気量が 200~300%の時の O 濃度は 1.5%程度であり、500%の時の塊状試料の O 濃度は 0.2%程度であった。また TiO₂を出発原料とした場合も同様の結果が得られた。このことから、TiO₂や高 O 含有金属チタンに適した条件を探索することにより、低 O 濃度化が見込まれることがわかった。そこで電解還元条件の適正化や塩浴中の脱水強化を実施した結果、安定電流を低く保つことができ、チタン中の残留 O 濃度を最低で 0.15mass%に到達させることができた。なお、工業化の可否検討に十分な成果が得られたので、2018 年度までに終了した。

b-2-3. 2 価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析技術の研究開発（京都大学）

熔融塩中におけるチタンの平滑電析に着目して、チタンの箔や板材の効率的な新生産プロセスの検討を行った。その概要は、(i)四塩化チタンから二塩化チタンを作製し、(ii)二塩化チタンを含む熔融塩中での電解によってカソード基板上にチタンを平滑に析出させ、(iii)電析チタンを基板から剥離することにより、チタンを箔や板材の形状で回収するプロセスである。まずは、700℃の NaCl-KCl 共晶塩あるいは 500℃の MgCl₂-NaCl-KCl 共晶塩中で電析を行い、平滑電析に必要な条件を把握した。また電極基板からチタンを剥離して回収でき、電析で得られたチタン中の不純物濃度は、Fe 含有量 2000ppm 以下、O 含有量 1000ppm 以下で、極めて高純度であることを確認した。つい

で、LiI-CsI-KI からなる混合塩が低い共晶点（204 °C）を有することに着目しこの熔融塩の利用を検討した。その結果、平滑な組織ではないものの、300 °C および 250 °C において Ti の電解析出が可能であることが実証され、新たな低温での Ti 電析プロセスの可能性が示唆された。加えて、水素発生法による Ti²⁺の定量およびサイクリックボルタンメトリーによる調査から、300 °C の LiI-CsI-KI 熔融塩のアニオンの一部をフッ化物に置換することにより熔融塩中の Ti²⁺溶解度が向上することが示唆された。なお、工業化の可否検討に十分な成果が得られたので、2018 年度までに終了した。



図Ⅲ-2.4.2-6 電析によって得られたチタン

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

高品質化(Fe、O、Cl 濃度半減、A 級歩留向上)および高効率化(リードタイム削減)に関する各項目について、以下の成果を得られた。

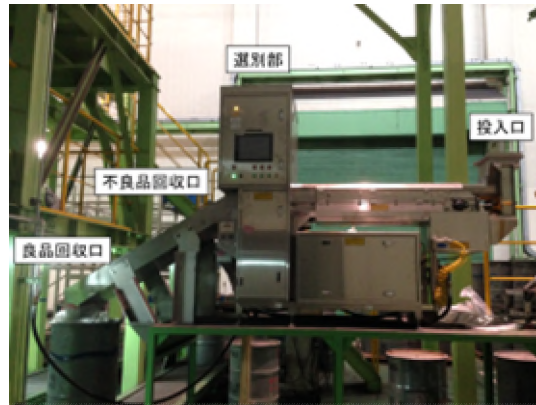
c-1. Fe 汚染防止技術の開発

スポンジチタン塊中の Fe 濃度分布、Fe 汚染経路を調査するとともに、種々基礎実験を行なうことで汚染機構を把握した。その上で、主要な汚染経路である以下の三つについて、汚染を低減するための要素技術を開発した。

- ・ 反応開始時点で熔融マグネシウムに溶解している Fe
- ・ 反応途中で、反応容器から熔融マグネシウムに溶出する Fe
- ・ 反応容器に接触したチタンに直接、固相拡散する Fe

開発した要素技術の実機スケールでの実証試験を行なった結果、チタン構造材用スポンジチタンの Fe 濃度と、そのばらつき範囲は大幅縮小され、最終目標として掲げた、ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm 以下を達成すると共に、A 級歩留まりも向上した。

加えて、さらなる Fe 濃度低減と A 級歩留まり向上のため、高 Fe 粒(容器と反応することで 10mass%以上の Fe 汚染を受けたスポンジチタン)を自動で識別・除去する技術を開発し、パイロット試験機(図Ⅲ-2.4.2-7)を導入して、Fe 濃度低減効果と A 級歩留まり向上効果を実証した。尚、当該技術は、単独での工業化効果が期待できるため、2016 年度に、パイロット試験機を母体企業である東邦チタニウム(株)へ有償譲渡し、同社で実用化されている。



図Ⅲ-2.4.2-7 自動選別のパイロット試験機

c-2. O 汚染防止技術開発

約 300ppm の O を有する一般的なスポンジチタンを対象に、O の存在形態を調査し、①固溶 O、②表面酸化膜、③MgCl₂ 吸湿水分、④分析用溶解時の汚染といった形態別に定量化した。各形態の O について、汚染低減のための要素技術を開発し、実機スケールでのトンオーダーの低 O スポンジチタンを試作する実証試験を行なったところ、最終目標として掲げた、ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm 以下を達成できた。

c-3. 還元工程高速化技術開発

Kroll 法の還元反応は反応容器中の Mg(l)の上に、TiCl₄(l)を投下し、目的物である Ti(s)と副生成物である MgCl₂(l)を得る工程であるが、実機スケールでの反応機構には不明な点が多かった。そこで本研究では、実機反応容器を対象とした種々調査を行い、還元反応機構を調査した。その結果、還元反応では TiCl₄(g)が Mg 浴面で反応する浴面反応だけでなく、TiCl₄(g)が Mg 蒸気と空間中で反応する気相反応が少なからず生じていると推定された(図Ⅲ-2.4.2-8)。また、反応を高速化した際には、Mg 蒸気量の増加に伴って気相反応の割合が増えることが示唆された。また、推定した反応機構を反映した数値シミュレーションモデルも作成した。

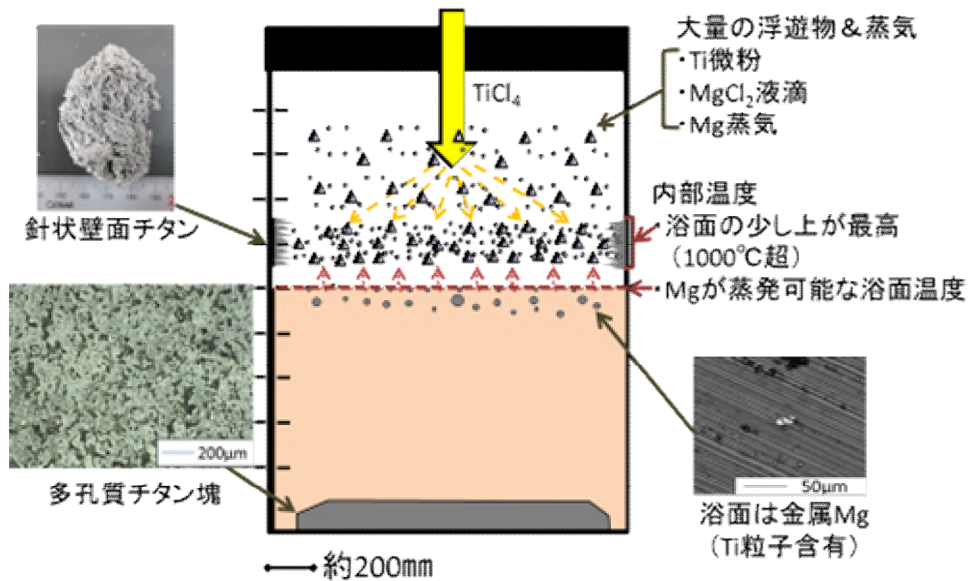
この調査結果および数値シミュレーションモデルを基に、反応速度を向上させるための反応装置を設計・製作し、実機スケールでの実証試験を行った。その結果、当該装置を使うことで、高速反応を長時間に渡って可能なことが確認され、最終目標に掲げた還元反応リードタイム 30%減を達成した。

c-4. 分離工程高速化および Cl 汚染防止技術の開発

真空分離工程に関しても、実機スポンジチタン塊内の温度分布推移を実測するなどして真空分離機構を調査した上で、推定した分離機構を反映した数値シミュレーションを作成した。この結果を基に、分離時間短縮のための実機スケール試験を行い、分離リードタイムを 18%削減可能と期待される要素技術の実証に成功した。

加えて、Cl 汚染についても、Cl 濃度低減に必要な還元反応条件および真空分離条件を把握し、最終目標に掲げた Cl 濃度 300ppm 以下のスポンジをトンオーダーで量産

する技術を確立した。



図Ⅲ-2.4.2-8 推定した反応機構

c-5. 直接圧延用高品質スポンジチタンの試作

直接圧延用の高品質スポンジチタンを試作し、「A. 高効率チタン薄板製造技術開発」に供給し評価を受けたところ、原料のスポンジチタン粒の一部に不純物の多いスポンジチタン粒が存在していたため、直接圧延で製作した開発材特有の表面疵が発生したことがわかった。そこで、不純物の多いスポンジチタン粒の混入を極力防ぐための改良型の高品質スポンジチタンを試作し、直接圧延による評価を受けたところ、現行材に見られない開発材特有の表面疵は低減することができた。

以上、A.高効率チタン薄板製造技術開発、B.チタン新製錬技術開発および、C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発の各項で記載したとおり、チタン鉱石から得られる最初の金属チタンであるスポンジチタンを溶解して鑄塊とした後、鍛造、圧延してチタン薄板を製造する複雑な現行プロセスに対して、新しい製錬方法で金属チタンを得ることや、溶解工程を省略することにより、チタン薄板を低コストで製造することができる。さらに、本プロセスの特徴である素材の組合せを適正化することにより、強度・延性バランスの向上等、高機能なチタン薄板も製造することができる。

本開発によって得られるこれらの成果により、これまで高コストがゆえに採用されていなかった自動車等の輸送機器等への適用が拡大し、チタン材の特徴である軽量や高耐食性を活かした燃費改善や長寿命化を図ることができる。

さらに、近年、品質特性を向上しつつある海外製チタン薄板に対し、十分競争力のある、低コストで強度・延性バランスの優れたチタン薄板の製造が可能になり、国際競争力の強化に資する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

下記の表には、2016年度よりテーマ番号11に統合された[テーマ番号12]高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発に関する件数も合わせて記載している。

表Ⅲ-2.4.2-4 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	1	0	9	0	0	0	0	0	2
2015FY	0	2	16	1	0	0	0	0	2
2016FY	5	0	8	3	0	0	0	0	1
2017FY	2	2	16	3	0	0	0	0	2
2018FY	1	0	13	2	0	0	0	1	1
2019FY	1	0	7	1	0	0	0	0	1
合計	10	4	69	10	0	0	0	1	9

※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）

本開発に関して知的財産権を確保するために、国内はもとより海外にも積極的に特許出願を進めている。

なお、下記の表には、2016年度よりテーマ番号11に統合された[テーマ番号12]高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発に関する件数も合わせて記載している。

表Ⅲ-2.4.2-5 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	10	0	1
2016FY	9	1	10
2017FY	2	2	3
2018FY	7	0	0
2019FY	4	0	3
合計	33	3	16

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4.3[テーマ番号 12] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術開発

テーマ番号 12 は 2016 年度よりテーマ番号 11 に統合された。本来は 2015 年度以前の成果資料はテーマ番号 12 として記載すべきであるが、簡潔明瞭な記載とするため全年度の成果資料をテーマ番号 11 にまとめて記載する。

2.5 「革新炭素繊維基盤技術開発」

2.5.1 [テーマ番号 51] 革新炭素繊維基盤技術開発

2.5.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量・高強度の特徴を持つ炭素繊維は、自動車等の輸送機器の材料として利用することにより大幅な燃費向上が可能となる等、低炭素社会の実現に貢献できる画期的な素材であり、今後の大幅な需要拡大が期待されている。しかしながら、現在の炭素繊維の製造プロセスでは、消費エネルギー及び CO₂ 排出量が大きく、生産性の向上も困難であることが課題となっている。

本テーマは、我が国の炭素繊維の国際優位性を維持し、かつ、国内における炭素繊維の利用産業の競争力強化を図っていくため、環境負荷が少なく、かつ、生産性が大きく向上する新たな炭素繊維製造プロセスの基盤技術の研究開発を実施する。

(2)位置付け、目標値

現在の炭素繊維製造方法(進藤方式)は、アクリル繊維を空气中高温で耐炭化(焼成)するもので、製造時における消費エネルギー及び CO₂ 排出量はいずれも鉄の約 10 倍と高い。また、製造装置の除熱効率の限界から生産性もなかなか高められないのが現実であり、これらは大きな課題となっている。今後の自動車の軽量化に向けた普及拡大を考えると、近い将来見込まれる炭素繊維の大量需要に的確に対応していくことが必要である。

本研究開発では、高温長時間の加熱をマイクロ波に代替することなどにより、消費電力及び CO₂ 排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を行う。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施する。

表Ⅲ-2.5.1-1 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 (2020年度末)	根拠
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	新規炭素繊維前駆体化合物から異形状炭素繊維を製造するための基盤技術を確立する。	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立	革新炭素繊維の高い生産性を生かし、ラージトウ製造を行うことにより、製造エネルギーならびに CO ₂ 排出量の大幅な低減が見込まれることが、LCA 評価により示されている。

(2) マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発	マイクロ波により大繊維前駆体繊維の炭素化を可能とするため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進め、炭素化条件の最適化を図る。	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	同上
(3)炭素繊維の評価手法開発、標準化	熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。	(第二期で終了)		

(3)全体計画

研究開発の全体計画について示す(図Ⅲ-2.5.1-1)。

事業項目	2016年度				2017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 新規炭素繊維前駆体化合物の開発 【産業技術総合研究所、東京大学】 ①-1 「新規前駆体化合物Aの開発」 【産業技術総合研究所】 ①-2 「新規前駆体化合物Bの開発」 【産業技術総合研究所、東京大学】								
	異形状炭素繊維の製造				熱可塑性樹脂との界面特性評価			
②炭素化構造形成メカニズムの解明 【産業技術総合研究所、東京大学】 ②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」 【産業技術総合研究所】 ②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」 【産業技術総合研究所、東京大学】								
	炭素化メカニズムの解明・繊維構造と機械特性との相関解明				マイクロ波炭素化条件最適化			

③ 炭素繊維の評価手法開発、標準化 【東京大学】												
	界面特性発現メカニズムの解明								界面特性の力学試験法の確立			

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	第1	第2	第3	第4	第1	第2	第3	第4	第1	第2	第3	第4
	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期
①新規炭素繊維前駆体化合物 (溶剤可溶性耐炎ポリマー)の 開発【産業技術総合研究所、東レ】	溶剤可溶性耐炎ポリマーの高性能化				新規前駆体繊維製造のプロセス性検討				新規炭素繊維の品質目標達成 (単糸7μm、弾性率240GPa、強度4GPa)			
									コンボジット評価			
②マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発【産業技術総合研究所、帝人】 ②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」【産業技術総合研究所】 ②-2 「マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発」【産業技術総合研究所、帝人】	炭素化プロセスメカニズム解析・構造物性評価				メカニズムの装置設計への反映							
	大繊維炭素繊維製造プロセス技術開発				多段プロセス技術開発				大規模量産プロセスへの適用性評価 (単糸7μm、弾性率240GPa、強度4GPa)			
									コンボジット評価			
	炭素繊維の高性能化・性能評価											

図Ⅲ-2.5.1-1 革新炭素基盤技術開発 全体計画

(4)実施体制

第1期(2015年度末)までの実施体制において、NEDOは国立大学法人東京大学と委託契約を締結し、東京大学は産業技術総合研究所、東レ株式会社、東邦テナックス(帝人)、三菱レイヨン株式会社、プラスチック工業連盟、金沢工業大学へ再委託契約を締結した。委託事業では、国立大学法人東京大学内に集中研を設置し、基盤技術である研究開発項目(1)~(3)を実施した。この中で、産総研及び東レ株式会社は(1)新規前駆体化合物の開発を、産総研および東邦テナックスは(2)炭素構造メカニズムの解明を、産総研、三菱レイヨン、プラスチック工業連盟と金沢工業大学は(3)炭素繊維の評価手法開発・標準化をそれぞれ担当した。各研究テーマにおいては、参画企業がそれぞれ得意とする要素技術及びノウハウ、さらには研究開発インフラ等を勘案し、研究開発項目毎に個別の要素技術について特に優れた技術力を有する企業を選定し機動的かつ効率的に研究開発を推進してきた。また、外部の有識者をアドバイザーとした推進委員会を設けており、専門家の意見を吸収して研究開発を推進する体制をとってきた。

第2期の実施体制については、NEDOはISMAと委託契約を締結し、ISMAは組合員である産総研内につくば小野川分室を設置するとともに、国立大学法人東京大学と再委託契約を締結している。2015年度までと同様に、東京大学(2017年度から一部産

総研)を集中研として炭素繊維メーカーから研究者を派遣(出向等)し、東京大学影山研究統括及び産総研羽鳥 PL の指示・協議のもと機動的にプロジェクトを推進する体制を取っている。

第 3 期の実施体制は図Ⅲ-2.5.1-2 の通りである。NEDO は ISMA と委託契約を締結し、ISMA は組合員である産総研、東レ、帝人に、それぞれつくば小野川分室、伊予分室、三島分室を設置する体制をとり、①新規炭素繊維前駆体化合物（溶剤可溶性耐炎ポリマー）の開発については産総研-東レが、②マイクロ波炭素化プロセス技術の開発については、産総研-帝人が共同で実施する体制となっている。

新構造材料技術研究組合 (ISMA)	
【分担研】	
	産業技術総合研究所 : テーマ51-①, ② (つくば小野川分室)
	東レ: テーマ51-① (伊予分室)
	帝人: テーマ51-② (三島分室)

図Ⅲ-2.5.1-2 実施体制 (2018~2020 年度)

(5) 運営管理

1) 第 2 期まで

① 産官学の ALL JAPAN チームによる効率的な研究開発の実施

研究者が東京大学に集まり、同じ屋根の下で一丸となって研究を実施。

コンソーシアムを形成し、機密保持・成果取扱規約について基本合意済み。

東京大学・産総研の研究開発ポテンシャルの活用(若手研究者の育成)。

低炭素工学イノベーション拠点(2009 年度産業技術研究開発施設整備費補助金)による研究環境整備。

2011 年度 - 2017 年度 研究会・検討会実施状況

推進委員会 8 回実施

研究全体会議 66 回実施

個別研究会(3 件のテーマ毎) それぞれ 66 回実施

② 国立大学法人東京大学に知的財産管理を一元化

特許のパッケージ化、海外企業に買収される心配のない国立大学法人を中心とする。

発明委員会 6 回実施

知財 WG 25 回実施

2) 第 3 期 (2018-2020 年度)

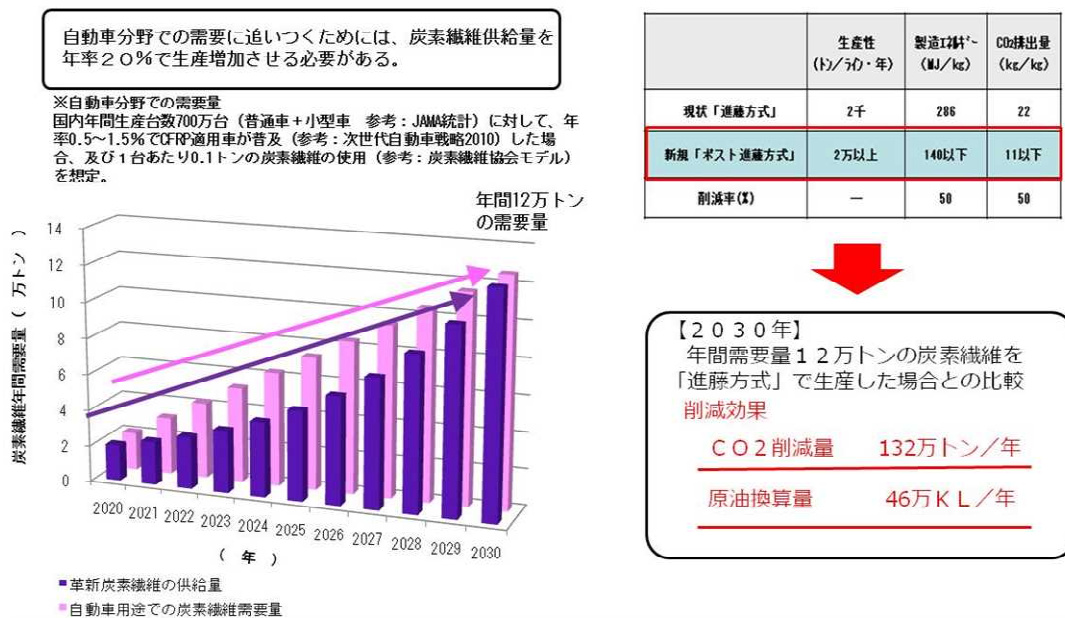
NEDO/ISMA による進捗管理（NEDO 推進委員会、ISMA 成果報告会、テーマリーダー会議等）に加え、ISMA プロジェクトマネージャーによる進捗報告会（4 半期ごと）、ならびにテーマリーダーによる月 1 回の月例報告会を、①新規炭素繊維前駆体化合物の開発、②マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発、それぞれについて個別に実施して研究開発の進捗管理を行っている。

(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）

本技術開発のアウトプットからアウトカムへの展開としては、現行の炭素繊維製造における原料(炭素繊維前駆体)、製糸、焼成の技術について、抜本的な見直しを行うことにより、製造エネルギー及び CO₂ 排出量を半減させるとともに生産性も飛躍的に向上させる技術を確立し、自動車等への炭素繊維の普及拡大はもとより新市場の創出・獲得の実現を目指す。アウトカムとしては、我が国の炭素繊維及び関連産業の国際競争力の強化、低炭素社会への実現及び安全性等を確保した自動車などの普及による生活の豊かさへの貢献が挙げられる。

なお、本技術開発のさらなる展開に当たっては、欧米に遅れをとっている製品評価技術等の応用技術や標準化も同時に進めるとともに、本技術開発による研究開発成果の取り扱いへの配慮も必要である。

2030 年における自動車分野での炭素繊維需要量と供給量



革新的製造技術の確立により、CO₂排出量・製造エネルギーは半減する

図Ⅲ-2.5.1-3 実施の効果

2.5.1.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.5.1-2 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
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立	完全耐炭化した前駆体ポリマーからなる繊維を焼成した炭素繊維物性は直径 5.5 μ m で強度 3.7GPa、弾性率 210GPa まで達することができた。さらに、ラージトウ（48K）製造基盤技術を検討し、安定凝固した後低速で巻取可能であることがわかった。	△	
マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	PAN 系前駆体繊維を耐炭化した耐炭繊維を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウの炭素化実験において、プロセス技術の深化によって引張強度 3.4GPa、引張弾性率 230GPa を有する炭素繊維の安定的な製造に成功した。また、弾性率の調整を可能とする技術を開発し、260GPa を示す高弾性率の炭素繊維を製造することに成功した。ラージトウの炭素化実験においても、引張弾性率 250GPa を示す炭素繊維の製造に成功しており、本プロセス技術がラージトウにも適用可能である見通しを得た。このプロセス技術を深化させる過程で、炭素化をコントロールするキーデバイスの開発や、新設計のマイクロ波炭素化炉の追加など、それに伴う加熱メカニズムや構造形成過程の仮説を検証し解明した。確立したプロセス技術を用い、コンボジット評価用の炭素繊維の長尺品の試作に漕ぎつけた。	△	

※◎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

下記の表Ⅲ-2.5.1-3 に示すように、各研究開発項目における今後の課題が明確になっていることから、今後は逐次解決に向けて計画的に研究開発を遂行していく。今まで同様に関係機関と協議しながら進行していくという前提のもとに、最終目標達成の見通しがあると判断している。今後はより実用化の促進に目を向け、各企業との連携を強化した体制も築いていく予定であり、将来のユーザーへのサンプル提供なども通して、実用化・事業化を目指して、基盤技術の骨太化と裾野拡大を図っていく。

表Ⅲ-2.5.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (2020年度末)	達成見通し
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	完全耐炭化した前駆体ポリマーからなる繊維を焼成した炭素繊維物性は直径5.5 μ mで強度3.7GPa、弾性率210GPaまで達することができた。 さらに、ラージトウ（48K）製造基盤技術を検討し、安定凝固した後低速で巻取可能であることがわかった。	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立	達成可能と考える。
(2) マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発	第一期までに、PAN系前駆体を耐炭化した耐炭繊維を用いたマイクロ波炭素化実験において、引張弾性率247GPa、破断伸度1.7%を示す炭素繊維の製造に成功している。プラズマ表面処理技術については、計画を前倒して、実用化に必要なスケールアップ技術の開発ステージに移行している。第二期までに、装置構造や運転条件の改良により、ラージトウの炭素繊維のバッチ焼成に成功し、標準弾性タイプの工業製品並の引張弾性率250GPaの発現や品質の向上が得られた。第三期では、複合材料物性評価のための試作に向けた製造プロセスの確立を目指すとともに、マイクロ波加熱により得られたレギュラートウおよびラージトウの炭素繊維の性能向上と品質改善に関する検討を行った。その結果、連続焼成プロセス技術の確立を達成し、レギュラートウで引張強度3.4GPa、引張弾性率230GPaの炭素繊維を安定的に製造可能なプロセスおよび高弾性率260GPaを示す炭素繊維の製造、さらにはラージトウで引張弾性率250GPaを示す炭素繊維の製造に成功し、本プロセス技術の広範な適用可能性を見出した。確立したプロセス技術を用い、コンポジット評価用の炭素繊維の長尺品の試作に漕ぎつけた。	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	達成可能と考える。

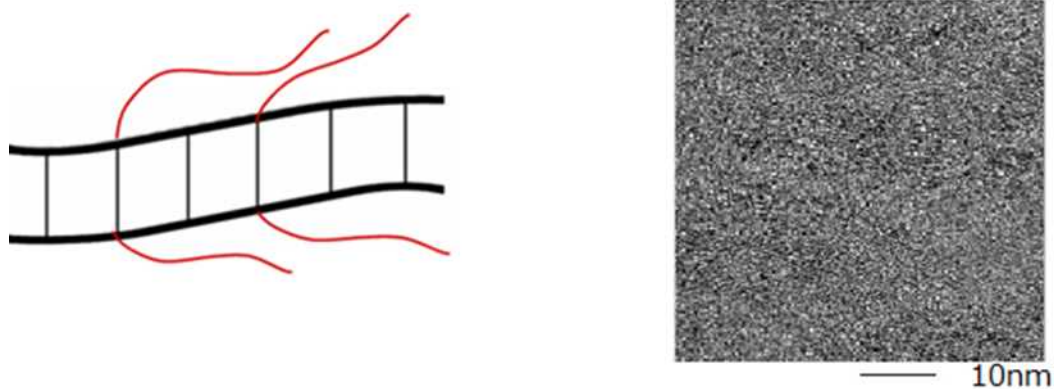
(3) 研究開発の成果と意義

①新規炭素繊維前駆体化合物の開発

耐炎化工程を不要とする新たな炭素繊維前駆体高分子化合物の探索、設計、合成を行った結果、溶解剤が酸化ポリマー鎖に振り袖状に結合した柔軟構造をもつ新規前駆体化合物を開発した。

PAN を原料とし液相反応で得られる溶媒可溶性耐炎ポリマーの反応条件をさらに見直し、完全耐炎化と製糸性向上を両立させることができた。得られた前駆体繊維の品位は向上し、焼成後の炭素繊維物性は直径 $5.5\mu\text{m}$ で強度 3.7GPa 、弾性率 210GPa まで達することができた。また該炭素繊維の微細構造を透過電顕で解析し、炭素微結晶が配向していることを確認した。

さらに、ラージトウ（48K）製造基盤技術を検討し、安定凝固した後低速で巻取可能であることがわかった。



図III-2.5.1-4 溶媒可溶性耐炎ポリマーのモデル構造と新規炭素繊維の微細構造



図Ⅲ-2.5.1-5 ラージトウ(48K)の検討

②炭素化構造形成メカニズムの解明

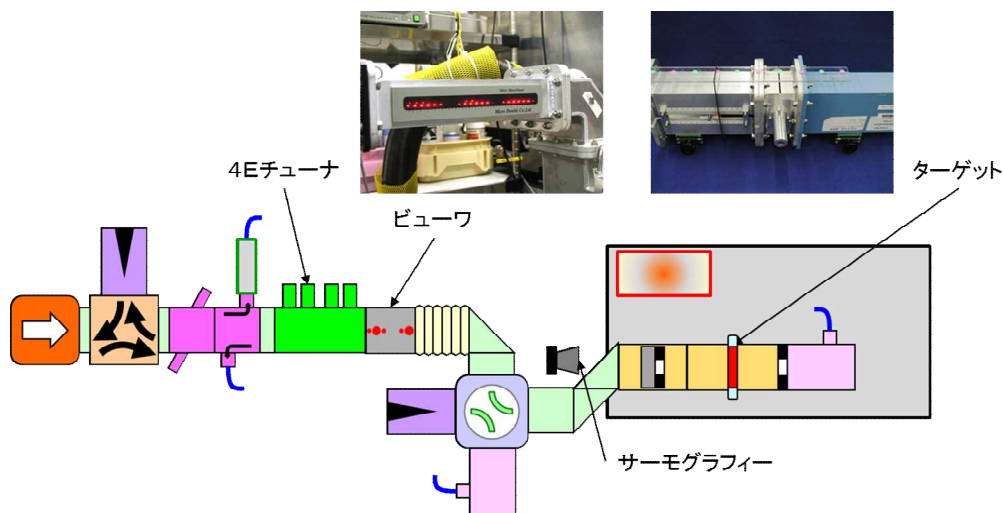
②-1「炭素化過程における構造・物性変化の解明」

マイクロ波等による大繊維度繊維の炭素化を可能とするため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関関係を解明する。これにより、大繊維度繊維束において、市販の PAN 系炭素繊維と同等の引張弾性率の新規炭素繊維を製造することを目標としている。本テーマでは、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関関係を解明するため、PAN 系前駆体を耐炭化した耐炭繊維（以下、前駆体繊維と呼ぶ）のマイクロ波に対する特性を把握し、照射過程における炭素繊維の化学構造変化や電磁気学的な性質変化、力学的な性質変化との相関関係を検討している。

2017 年度までに、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進め、炭素化条件の最適化を図った。固体発振器を用いたマイクロ波照射が前駆体繊維に対し、どのような構造変化をもたらすかを、周波数に対する加熱装置の散乱パラメータおよび小型共振器による集中照射によって検討した。固体発振器による周波数帯域の狭いマイクロ波を用い、炭素繊維単糸に対する照射と温度上昇の相関を調べたところ、到達温度は照射出力によって調整でき、印加電力による制御が可能であることが示された。また前駆体繊維束の加熱では、照射電力の精密な制御によって温度分布を調整できることが示された。前駆体繊維を搬送させながら照射した場合は、数十秒という短時間内で連続的に発光を伴う加熱を行う事が

出来た。

高温化および大繊維度を検討するため、レギュラートウの前駆体繊維に対して図Ⅲ-2.5.1-6に示す装置で照射検討を行ったところ、発光を伴う加熱が行われたと共に、石英ガイド管が熔融する高温に至った。大繊維度繊維束に対して搬送させながら連続的に照射する検討として高搬送用焼成装置の設計を行い、その基本特性である散乱パラメータを測定した。



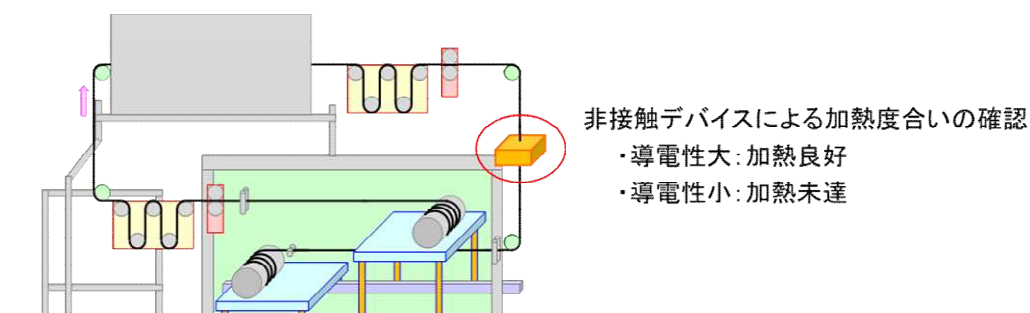
図Ⅲ-2.5.1-6 装置構成

2018年度は、レギュラートウの前駆体繊維のマイクロ波に対する特性を把握し、炭素化過程における電磁気学的及び力学的な性質変化を検討し、大繊維度繊維の炭素化に向けた基礎データを取得・蓄積した。2017年度にて製作した集中照射型小型炉を用いた検討では、誘電体である前駆体繊維を連続的に導電性繊維に変換することが可能であった。この時の物性変化は、焼成時の繊維の位置及び電磁界との調和によって大きく影響される。検討の結果、加熱時の張力調整の影響が大きいことが判明し、搬送条件を見直すことで長さ方向に平均的な良導電性を示す繊維が得られた。さらに加熱時に、より高い張力下で印加することにより、強度向上の傾向も見られた。

2019年度は、大繊維度の前駆体繊維のマイクロ波に対する特性を把握し、炭素化の長時間運転に向けた装置改良を検討した。誘電体繊維の導電化過程において、長時間連続運転を検討するとともに、保温断熱管の種類及び設置方法の差異が連続運転時にもたらす影響を検討した。その結果、初期の不安定状態からの安定化への復帰が速く、3時間の連続運転においても停止することなく加熱が可能となった。運転において加熱の進行状況を把握することはプロセス検討の上でも重要となる。共振器による摂動法を用いることにより、運転中に、加熱直後の生成糸の評価を行うデバイスを作製した(図Ⅲ-2.5.1-7)。非接触で加熱度合いが目視でき、運転状態が良好か否かをその場で把握することができた。

以上のように、炭素繊維の性能向上と安定的な連続生産に向けた要素技術を開発したため、2020年度はこの結果をもとにプロセス技術への導入を図りサポート

を行う。特に、ラージトウの製造プロセスは技術的なハードルが高いことが予想されるため、有機的に連携しながらこの知見を横展開させていく。



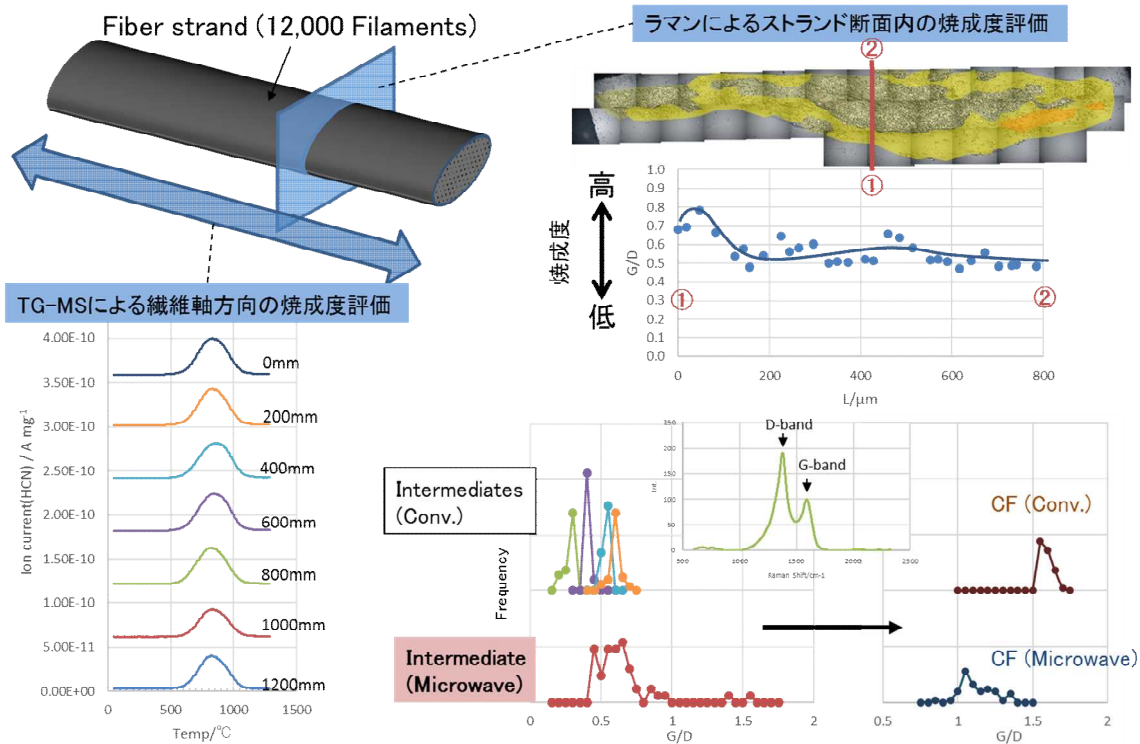
図Ⅲ-2.5.1-7 ラボ装置構成と開発した非接触デバイスの導入

②-2「マイクロ波等による炭素化技術の確立」

マイクロ波エネルギーによる大繊維（ラージトウ）前駆体繊維の炭素化を実現するため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めながら炭素化条件を探索し、本プロセス技術の確立を目指している。

2017年度までに、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めるとともに、マイクロ波加熱による炭素化工程の安定化に必要な技術の検証と炭素化条件の最適化を図った。PAN系前駆体を耐炎化した耐炎繊維（以下、前駆体繊維と呼ぶ）を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウの炭素化実験において、既に、引張弾性率 247GPa、破断伸度 1.7%を示す炭素繊維の製造に成功していたが、今回、炉体構造の改良や運転条件の適正化等により、炭素繊維の機械特性や品質の向上が得られた。この技術を確立する過程で、マイクロ波の照射方式や照射過程に関わる前駆体繊維の加熱メカニズムやそれによる構造の形成過程を精緻に解析する新たな分析評価法が開発された（図Ⅲ-2.5.1-8）。

前駆体繊維の大繊維化に向けて、マイクロ波の照射過程による物質構造変化や電磁界-熱-物質連成解析シミュレーションを通じて、目的に適合した炉体構造を実現した。ラージトウの炭素化実験によって炭素化条件を検討中であり、目標とする機械特性や品質を達成できる目処が得られた。更に、2段階のマイクロ波炭素化システムを連動させたプロセスでの炭素繊維製造と目標物性の達成を目指した。特に、工程2に最適な性状を有する高吸収性繊維の安定的な供給を目的に、前駆体繊維の大繊維化に対応した工程1の炉体構造の開発を行った。



図III-2.5.1-8 マイクロ波による炭素化メカニズム解明に向けた分析評価法の一例

前駆体繊維を用いたマイクロ波加熱によるレギュラトウの炭素化実験において、プロセス技術の深化によって引張強度 3.4GPa、引張弾性率 230GPa を有する炭素繊維（図III-2.5.1-9）の安定的な製造に成功した。また、引張弾性率の調整を可能とする技術を開発し、引張弾性率 260GPa を有する炭素繊維を製造することに成功した。ラージトウの炭素化実験においても、引張弾性率 250GPa を有する炭素繊維の製造に成功しており、本プロセス技術がラージトウにも適用可能である見通しを得た。このプロセス技術を深化させる過程で、炭素化をコントロールするキーデバイスの開発や、新設計のマイクロ波炭素化炉の追加など、それに伴う加熱メカニズムや構造形成過程の仮説を検証し解明した。

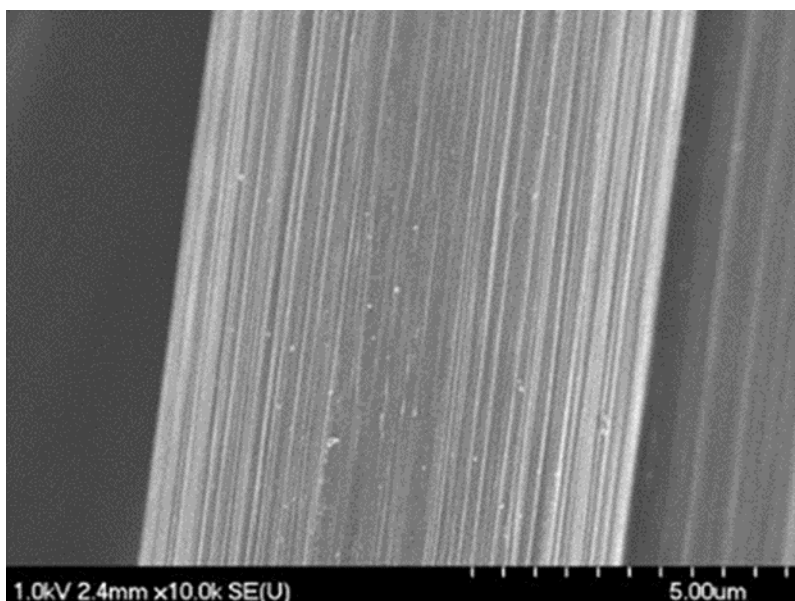
2018年度は、レギュラトウの炭素化において、これまでよりも高度な炭素化制御により、得られる炭素繊維の引張強度は 12K の炭素化に対し低下がみられていた期初の 2.3GPa から 3.2GPa と向上させることに成功した。マイクロ波加熱により得られた炭素繊維の分析・解析を進め、強度低下の要因に関するいくつかの知見を得た。更なる炭素化制御によりこれらの要因を排除していくことが今後重要であることを確認した。

2019年度は、多段プロセスのための新たなマイクロ波炭素化炉を導入し、既存のマイクロ波炭素化炉との連動プロセスを実現することで、炭素化技術を深化させて、炭素繊維の性能向上について検討した。2018年度までにマイクロ波炭素化により得られる炭素繊維は、構造欠陥を内包した粗密構造をとり平均密度が全体的に低いことにより、炭素繊維の機械物性が十分に発現しないという問題を明らかにしており、プロセスの多段化により物性を向上させる仮説を立てた。そこで、

プロセスの多段化によって炭素繊維の構造の調整を行いこの構造欠陥を除去することの検証を目的として、新たなマイクロ波炭素化炉を追加導入した。既存のマイクロ波炭素化炉と組み合わせ、繊維の物性の変化に合わせて炭素化制御する多段プロセスによって、2018年度までのプロセスで炭素化時に起こっていた密度の低下を抑制しながら前駆体繊維を炭素化することが可能になった。表Ⅲ-2.5.1-4に得られた炭素繊維の代表的な樹脂含浸ストランドの引張特性を示す。この中で、CF1 および CF2 がこれまでの単プロセス、CF3 が多段プロセスによる引張弾性率制御の結果である。引張強度は未だ目標に到達していないが、繊維内部の構造欠陥が 2018 年度に得られていた繊維よりもかなり減少していたことから、表面欠陥などの影響を減少させることがさらなる高強度化のための課題となった。

ラージトウについては、既存の炉および新設の炉のそれぞれでの炭素化試験を行っており焼成技術に目処を得た。レギュラートウを用いた多段化した炉の連動プロセスにおける CF 性能向上技術をさらに深化させ、ラージトウの炭素化技術に横展開する。

以上のように、性能および品質が改善された炭素繊維が安定的に製造できるようになってきたため、2020 年度は補強繊維としての性能すなわち炭素繊維複合材料を作製し材料データを取得する。またレギュラートウの試作実績をもとに、ラージトウのプロセス技術の深化に着手し、実用化に向けた課題抽出を行う計画である。



図Ⅲ-2.5.1-9 マイクロ波加熱により炭素化した炭素繊維の電子顕微鏡像

表Ⅲ-2.5.1-4 代表的な樹脂含浸ストランドの引張特性（平均値）

	目標値	CF1	CF2	CF3
引張強度 / GPa	4.0	3.7	3.4	2.8
引張弾性率 / GPa	240	240	230	260

(4)成果の普及(論文、外部発表等)

表Ⅲ-2.5.1-5 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 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	12	0	0	0	0	0	1
2014FY	4	0	15	1	0	0	0	1	1
2015FY	1	0	14	4	23	0	1	0	1
2016FY	3	1	14	3	0	0	1	0	1
2017FY	2	0	4	1	0	0	1	0	0
2018FY	1	0	5	1	0	0	1	0	0
2019FY	0	0	2	2	0	0	1	0	1
合計	11	1	66	12	23	0	5	1	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-2.5.1-6 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	6	5	1
2014FY	5	12	3
2015FY	1	11	3
2016FY	1	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	1	0	0
2019FY	0	0	0
合計	14	28	7

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.6 「熱可塑性 CFRP の開発」

2.6.1 [テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発

2.6.1.1 テーマの概要

(1) 背景と目的

① 背景

世界的な環境規制の拡大を背景に、CO₂削減および燃費向上ニーズが増大しつつある。欧州では2021年から新車のCO₂排出量は95g/kmとなり、要求を満足できない場合、2019年からCO₂ 1gあたり95€のペナルティが課されている。一方で安全性や快適性のための装備が増え車の重量は重くなっている。最近ではEV化および知能化に伴う重量増要因も加わり、自動車構造への軽量化ニーズ、そのためのCFRP適用の動きが加速しつつある。

すでに欧州では量産車へのCFRP適用が開始されているが、主構造には高コストの連続繊維複合材、非構造用にはGF/PPが主体である。BMW i3ではAll CFRPであったが、最新モデルではマルチマテリアル化の動きがみられる。一方、国内では一部の高級スポーツ車など、限定的な適用にとどまっていたが、最近では部分的ではあるが一般車への適用の兆しがみられる。

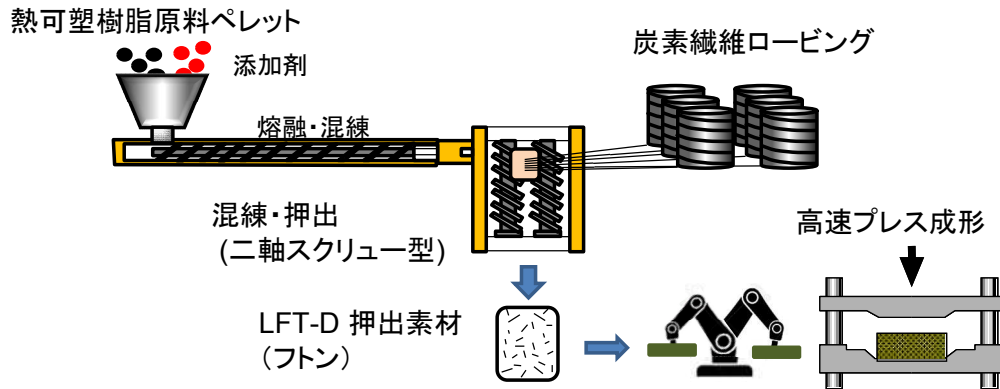
低コスト複合材の有力技術であるLFT-D (Long Fiber Thermoplastics - Direct) 技術は、繊維長の比較的長い炭素繊維と熱可塑樹脂を混練して得られる押出素材を高速プレス成形することで軽量・低コストな部材を得る技術であるが、現在は、非構造用GF/PPが主流であり、CF/PAはまだ研究段階にある。

② 目的

LFT-D工法は、炭素繊維と樹脂原料をインラインでコンパウンドし高速プレス成形することで軽量・低コストな構造部材を得る技術で、材料供給から最終製品までのダイレクトな一貫自動生産システムにより、中間加工材を不要とした短時間成形を可能とし、CFRP製法としてはこれまでにない低コストな方法である。基本的にプレス金型が抜ければ形状制約はなく、ネット成形が可能である。また、熱可塑樹脂の持つ、再成形性、リサイクル性、融着接合性の特長を有する。(図III-2.6.1-1)

一方、LFT-D成形材は連続繊維に比べて強度・剛性が低く、繊維長・配向のバラツキが大きいことが挙げられ、素材の特性を見極めると共に、最適かつ安定的なプロセス確立及び設計手法の開発が課題である。

本プロジェクトでは、世界に先んじてCF/PA6を用いた構造用のLFT-D技術の実用化を目指し、NEDO/ISMAの委託を受け、産官学連携で研究開発に取り組んでいる。

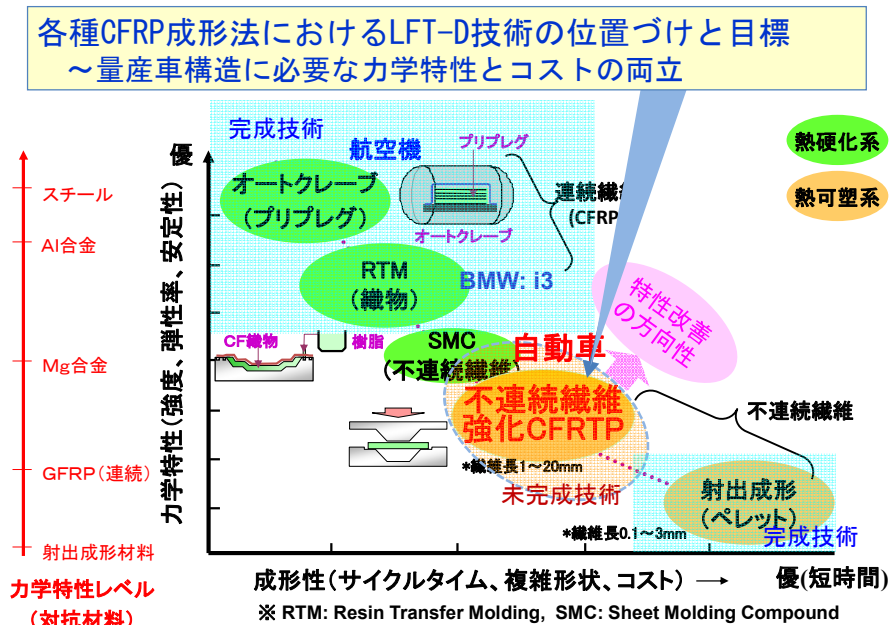


図Ⅲ-2.6.1-1 LFT-D 成形プロセス概要

(2) 位置付け、目標値

① 位置付け

CFRP の成形法は多く存在するが、航空機等に主用される連続繊維を用いたオートクレーブや RTM 成形法に対し、不連続繊維による LFT-D 成形は量産自動車用としてコストと強度性能を両立する技術として位置付けられる。(図Ⅲ-2.6.1-2)



図Ⅲ-2.6.1-2 CFRP 成形法の位置づけ

② 目標

下記をプロジェクトの全体目標とし、従来車両を凌駕する軽量・低コストな

LFT-D 構造技術を開発する。

- ・ 軽量化：従来アルミ車より軽量の車体構造
- ・ 低コスト化：量産車（月産 8000 台レベル）に対応する生産性
- ・ 実車モデル LFT-D 構造の剛性試験による技術実証

目標設定の考え方：

- ・ 基準とする従来車として、実績のあるアルミ構造車を基準とする。
- ・ アルミ構造車は従来スチール車に対し、 $\Delta 30\sim 40\%$ の軽減を達成しており、CFRP 構造の BMW i3 も同等レベルにある。従って、アルミ車を凌ぐ軽量化と従来 CFRP 工法よりはるかに生産性の良い LFT-D 構造を実現できれば、新規の事業化に繋がる。
- ・ 上記の目標について、1・2 期では Lotus Elise 構造（アルミ）をモデルにした LFT-D 構造の実証試験にて実証した。（図Ⅲ-2.6.1-3）3・4 期では、最近の技術動向を踏まえて、電気自動車をモデルにしたマルチマテリアル LFT-D 構造の技術実証を進めている。

将来的には、炭素繊維の需要急拡大による量産化効果、及び革新炭素繊維基盤技術開発で進められているような新たな低廉 CF 材の実用化により、材料コストの大幅低減による市場拡大が期待できる。

表Ⅲ-2.6.1-1 に研究項目ごとの研究開発目標とその根拠を示す。

実証目標：ロータスエリーゼ実車シャーシ構造を対象モデルとしてLFT-D構造を試作、強度試験により技術実証

Elise現状構造：

アルミ押し出し部材+アルミパネル部材の複数部品を接着+リベット/ボルト締結。



実証構造：

LFT-Dの特長を活かした構造設計、補強材を効果的に組合せたハイブリッド構造、成形性を考慮した金型設計、高速接合による実証構造の組立製作



図Ⅲ-2.6.1-3 技術実証（1・2期）

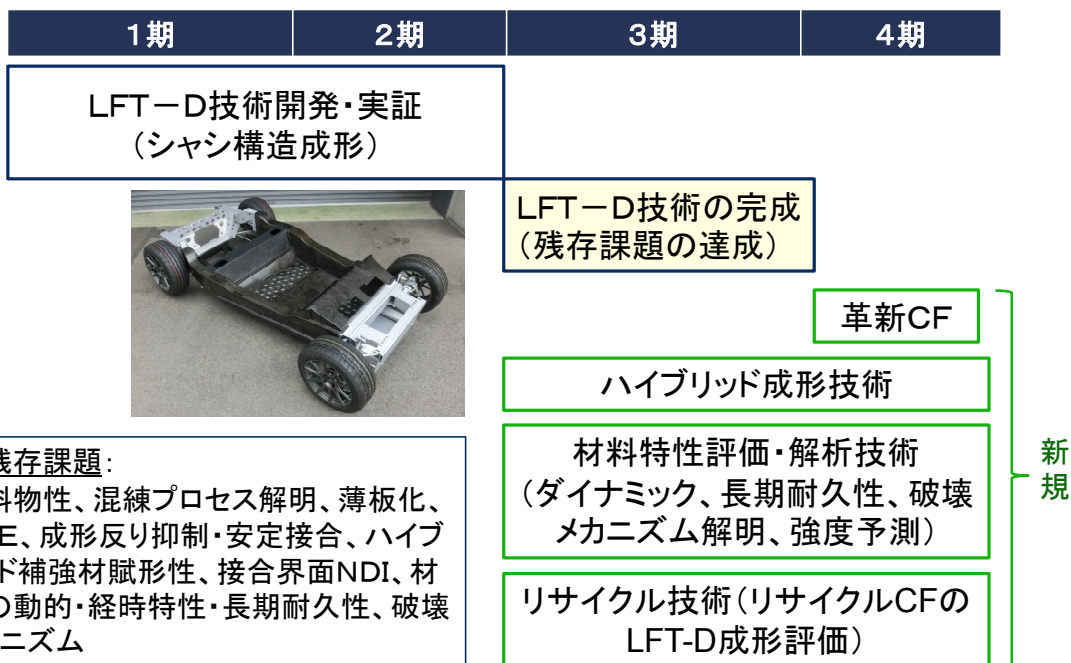
表Ⅲ-2.6.1-1 研究開発目標と根拠

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
(j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・混練プロセスを完成し、LFT-D 中間基材と成形部材の材料特性 DB の一部を構築。 ・試験法標準化の道付けを実施。 ・成形プロセスも扱う力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトに組込む。 ・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。 ・高速マテハン技術の要素技術を確立する ・非破壊検査技術の要素技術を開発する。 ・熱可塑性 CFRP 使用部材同士の高速接合技術を確立する。 	<p>(j1) LFT-D 成形材の物性向上の研究を行う。弾性率 25GPa を目標とする。</p> <p>(j2) LFT-D 中間素材の繊維分散等の繊維性状の定量的評価法を開発する。</p> <p>(j3) LFT-D 混練 CAE 技術の研究を行う。また、プレス成形 CAE 技術を確立するとともに、プレス成形に伴う繊維配向異方性を考慮した最適設計 CAE 技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。</p> <p>(j4) プレス成形に伴う反り変形の抑制技術を開発するとともに、LFT-D 成形材同士の溶着接合界面の NDI 法を開発し、安定品質を得る高速溶着接合技術を確立する。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維 LFT-D 成形に関する検討を行う。</p>	<p>(j1) LFT-D 材料物性について下記目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・弾性率：25GPa ・強度：200MPa ・ばらつき的大幅改善 <p>新 LFT-D 大型成形設備システムによる物性検証および成形プロセス確立。</p> <p>LFT-D 薄板化：2mm (Vf30%、標準大板)</p> <p>(j2) タルボ・ロー干渉計による繊維性状（繊維配向ベクトル、Vf、分散性）の定量評価、表示技術の確立。</p> <p>(j3) 成形・設計連成 CAE による剛性最適設計技術の開発・検証、強度最適化 CAE の検討。</p> <p>(j4) 品質と強度要件を満足する接合条件を確立。EV 車をモデルとした構造実証。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維を用いた LFT-D 成形性評価</p>	外部動向／企業ニーズ
(k) 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル成形技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ハイブリッド成形技術を詳細まで含めて確立する。 	<p>(k1) その場重合成形による連続繊維プリフォームと LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形技術を開発する。また、新創案の非混練フレーク法によるフレーク繊維と LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形法の基礎技術を開発する。</p> <p>(k2) ハイブリッド成形の高速マテハン技術・設備を開発するとともに、ハイブリッド成形を適用したマルチマテリアル自動車部品の設計および試作評価を行う。</p> <p>(k3) 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル設計法に関する基礎データを取得する。</p>	<p>(k1) その場重合成形 (T-RTM) による NCF プリフォーム補強材成形技術および LFT-D 中間素材 (フトン) とのハイブリッド成形技術の確立。</p> <p>T-RTM 連続引抜成形によるフレーク製造技術開発およびフレーク／LFT-D ハイブリッド成形技術の確立。</p> <p>(k2) T-RTM プリフォーム補強材成形および補強材とフトンとのハイブリッド成形用設備、マテハンシステムの構築。</p> <p>(k3) T-RTM 補強材／LFT-D ハイブリッド成形構造の設計基礎データの取得</p>	外部動向／企業ニーズ

<p>(l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発</p>	<p>(該当なし)</p>	<p>(l1) 熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行い、材料特性予測の基礎技術を開発する。</p> <p>(l2) 材料データベースの一部を構築する。</p> <p>(l3) 熱可塑性 CFRP 試験法標準化の調査・検討を行う。</p> <p>(l4) 構造設計 CAE に用いる実用的な材料モデルを提案する。</p>	<p>(l1) X線 CT およびタルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性解明。理論モデル、大規模シミュレーションおよびマルチスケールモデルシミュレーションによる LFT-D 材料特性予測技術の開発・検証。</p> <p>(l2) LFT-D 物性向上材の材料データベースの一部の構築。</p> <p>(l3) LFT-D 材の疲労試験法確立、標準化提案。</p> <p>(l4) 実設計への適用を想定した LFT-D の実用的な非線形材料モデルを提案。</p>	<p>外部動向／企業ニーズ</p>
<p>(m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発</p>	<p>(該当なし)</p>	<p>(m1) 航空機 CFRP 廃材および自動車用水素タンク廃材等の多様な CFRP 廃材からリサイクル CF を効率的に回収できる過熱水蒸気処理プロセスの開発を行う。</p> <p>(m2) リサイクル CF および LFT-D 工程内廃材を用いた LFT-D 成形技術を開発する。</p> <p>(m3) LCA 評価法に関する基礎的な調査を行い、LFT-D 成形 CFRP に関する LCA の予備的な評価を行う。</p>	<p>(m1) LFT-D 要件に適合する水素タンク廃材および航空機 CFRP 廃材からの CF 回収処理プロセスの確立。新フラグメンテーション試験法によるリサイクル CF の評価技術の確立、標準化提案。</p> <p>(m2) リサイクル CF および工程内廃材の LFT-D 成形技術確立。リサイクル CF とバージン CF とをミックスした LFT-D 成形性評価。</p> <p>(m3) CF 回収～LFT-D 成形工程における LCA 基礎評価。</p>	

(3)全体計画

1・2期で LFT-D 成形の基本技術を開発、シャシ構造による技術実証を達成したが、実用化に向けて多くの解決すべき課題も明らかになった。これらの LFT-D 残存課題のクリアおよび新たに設定された新規課題の開発を目標に、3・4期の課題設定を行った。(図 III-2.6.1-4) 3・4期の研究開発の項目、内容について表 III-2.6.1-2 に示す。



図Ⅲ-2.6.1-4 研究開発の全体計画

表Ⅲ-2.6.1-2 3・4期の研究開発項目

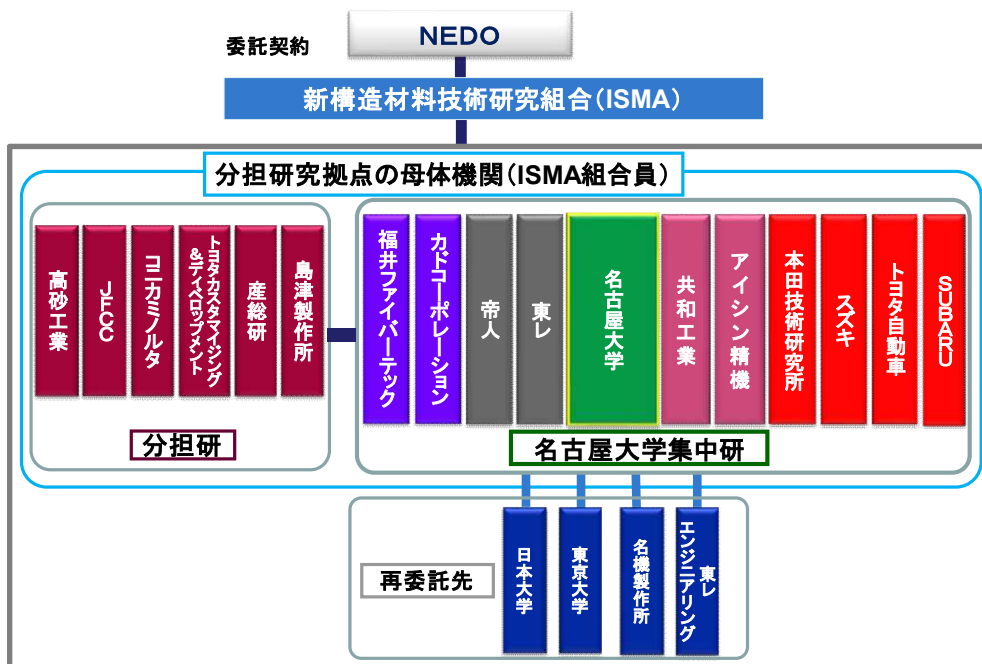
研究開発課題 (大項目)	研究開発課題(中・小項目)	
(j) LFT-D高速成形最適化技術の開発	(j1) LFT-D材料物性向上及び薄板化技術の開発	(j11)材料物性向上
		(j12)薄板化
	(j2) LFT-D材繊維性状の定量的評価法の開発	
	(j3) LFT-D成形および設計CAE技術の開発	(j31)混練CAEの研究
		(j32) 成形CAEの開発
(j33) 設計CAEの開発		
(j4) 高速溶着接合技術の開発		
(k) 熱可塑性CFRP高速ハイブリッド成形技術の開発	(k1) その場合ハイブリッド成形技術の開発	(k11)その場合重合成形技術/Hybrid成形技術
		(k12)非混練フレーク法成形技術/Hybrid成形技術
	(k2)ハイブリッド高速成形マテハン技術の開発	
(k3)LFT-Dハイブリッド構造設計技術の研究		
(l) 熱可塑性CFRP評価・解析技術の開発	(l1) 熱可塑性CFRPの材料特性予測技術の研究	
	(l2) 熱可塑性CFRP材料のデータベースの一部の構築	
	(l3) 熱可塑性CFRPの試験法標準化の研究	
	(l4) 非線形性を考慮した材料モデルの開発	
(m) 自動車向きリサイクルCF適用化技術の開発	(m1) リサイクル炭素繊維回収技術の開発	
	(m2)リサイクル炭素繊維のLFT-D適用技術の研究	(m21)回収CFのLFT-D成形性の評価
		(m22)LFT-D工程内廃材リサイクルの研究
	(m3) 熱可塑性CFRPのLCA評価法の研究	

(4)実施体制(2020 年度)

集中研 10 社および分担研 6 機関、再委託先 5 機関が関係するプロジェクトを円滑に遂行するため（図Ⅲ-2.6.1-5）、下記の会議体による推進体制で進めている。

- ・ ステアリング委員会（月次）：プロジェクト方針事項、重要事項の審議、決定。
- ・ ワーキンググループ（WG）：材料、成形、設計・接合、ハイブリッド、評価・解析、リサイクルの 6 つの WG を組織、実務作業を推進。
- ・ 合同 WG：WG 間の問題議論、情報共有。必要に応じ開催。
- ・ 成形トライチーム：NCC 及び分担研、再委託先での成形試験を実行指揮。
- ・ 分析・評価チーム：物性測定、結果の分析、評価実施。関連 WG へ報告。
- ・ 事務局（アドミニストレーション業務管理事務局、知財事務局）

さらに、プロジェクト活動の学術的な支援を行うために、名古屋大学を中心とする学術支援 WG を設置し、LFT-D 物性事象の学術的な同定、理論的裏付けの研究を実施し、プロジェクトへフィードバックしていく。分担研、再委託先については、実施項目に応じて、各 WG に参画する体制とした。（表Ⅲ-2.6.1-3）



図Ⅲ-2.6.1-5 プロジェクト推進体制

表Ⅲ-2.6.1-3 分担研及び再委託先の体制

	機関名	委託作業	関連項目	所属WG
分担研	産総研	リサイクルCFの物性測定・試験法	(j), (m)	材料WG、リサイクルWG
	島津製作所	疲労強度試験法、評価・解析	(l)	評価・解析WG
	トヨタカスタマイジング & ディベロップメント	構造設計・解析・試験(マルチマテリアル技術実証)、接合技術	(j), (k)	設計・接合WG
	JFCC	CF回収技術開発(過熱水蒸気処理システム、基本プロセス)	(m)	リサイクルWG
	高砂工業	CF回収技術開発(過熱水蒸気処理設備構築、条件最適化)	(m)	リサイクルWG
	コニカミノルタ	ターボ・ロー干渉計による繊維性状評価技術	(j)	材料WG
再委託先	東レエンジニアリング Dソリューションズ	CAE技術開発	(j)	成形WG、設計・接合WG
	東京大学	熱可塑CFRP特性評価・解析技術開発	(l)	評価・解析WG
	日本大学	その場重合成形プロセス研究	(k)	ハイブリッドWG
	海上技術安全研究所	可塑CFRP特性評価・解析技術開発	(l)	評価・解析WG
	金沢工業大学	LFT-D活用マルチマテリアル要素技術開発	(j),(m)	リサイクルWG

(5) 運営管理：

- ・ プロジェクト運営管理のツールとして、期初にプロジェクト全体の実施計画（マスタープラン）を策定し、ステアリング委員会で承認を得て各 WG に展開、毎月のステアリング委員会で進捗報告を行うことにより、PDCA を回している。またマスタープランに基づき、各 WG 活動計画が策定され、具体的な実行に落とし込んでいる。
- ・ 分担研、再委託先については、実施内容および担当 WG を決め、基本的に各 WG で管理している。
- ・ 各ワーキンググループは、月 1 回程度の頻度で開催。NCC、集中研企業、分担研及び再委託先の研究員を中心に、個別テーマについて具体的な検討、議論、意思決定を行うなど、実務作業を推進。
- ・ 合同 WG：各 WG 間にまたがる課題等について、各 WG からの報告と議論を通じて、問題解決と情報共有を行う。
- ・ 成形トライ：NCC の成形設備（3500 トンプレス機大型 LFT-D 成形システム、300 トン小型 LFT-D 成形装置および T-RTM 成形用 800 トンプレス機システム）を用いた NCC での成形試験は月 1 ～ 2 回ペースで実施。分担研、再委託先での成形試験は関連 WG の計画に基づき実施。
- ・ 分析・評価チーム：毎週開催。材料 WG の集中研企業および NCC を中心に測定、評価手法について検討し、活動へ反映。
- ・ 学術支援WG：年 2 回開催。担当の先生方から各テーマの研究計画と成果報告を行い、企業との意見交換、議論を通じて、企業ニーズや要望等を研究に反映。

(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）

① 基本前提条件

- ・ 費用としては、現国プロ段階から LFT-D 実車開発段階における集中研
カーメーカー5社（1・2期）における研究開発投資（推定）を対象とす
る。
- ・ 効果としては、集中研カーメーカー5社による国内販売、輸出及び海外生
産合計台数の売上（推定）を対象とする。（LFT-D 部品に関わる材料を含
む総生産＝総付加価値と解釈）
- ・ LFT-D 適用車は 2026 年市場投入され、2026 以降 5 社が販売する新型車に
は全て LFT-D 適用車とし、各年の販売車の 12%が新型車とする。

② 費用（2030年までの LFT-D 関連研究開発総費用）：総額 615 億円

- ・ NCC 導入設備費：15 億円
- ・ プロジェクト費用（2013～2022）：50 億円
- ・ 国プロ期間中の企業投資総額（5社）：50 億円（想定）
- ・ 国プロ終了後の LFT-D 研究開発費（5社）：約 500 億円（想定）

③ 効果

- ・ LFT-D 適用車台数推算：約 1540 万台@2030 年（世界全体の販売台数
@2030 の 13%に相当）
- ・ LFT-D 適用部品重量 100kg と想定（平均車体重量 1500kg と想定しその
の中の構造重量 390Kg の 25%）（40kg 軽量化）
- ・ LFT-D 部品売上総額(2026～2030)：約 2 兆 3000 億円（総付加価値：約
5800 億円）
- ・ 燃費削減：0.3km/L→ガソリン削減総量@2030：約 262,000kl
- ・ CO₂ 排出削減総量@2030：約 6 億 t

2.6.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.1-4 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
(j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発	<p>(j1) LFT-D 成形材の物性向上の研究を行う。弾性率 25GPa を目標とする。</p> <p>(j2) LFT-D 中間素材の繊維分散等の繊維性状の定量的評価法を開発する。</p> <p>(j3) LFT-D 混練 CAE 技術の研究を行う。また、プレス成形 CAE 技術を確立するとともに、プレス成形に伴う繊維配向異方性を考慮した最適設計 CAE 技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。</p> <p>(j4) プレス成形に伴う反り変形の抑制技術を開発するとともに、LFT-D 成形材同士の溶着接合界面の NDI 法を開発し、安定品質を得る高速溶着接合技術を確立する。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維 LFT-D 成形に関する検討を行う。</p>	<p>(j1) LFT-D 物性向上の新アプローチによる LFT-D 成形により、実験レベルで従来比約 30%向上、ばらつき約半減の結果を得た。本成形法の大型高速化のため新 LFT-D 大型成形設備システムを構築した。本設備を用いた物性向上度について 2021 年度に検証する。</p> <p>LFT-D 薄板化に取り組みリアパネル一般部板厚が約 20%~30%改善した。</p> <p>(j2) タルボ・ロー干渉計による繊維性状（繊維配向、Vf、分散性）の高速測定、定量評価、可視化・表示技術を新規開発した。</p> <p>(j3) 小型 LFT-D 機での繊維長サンプリングデータにより混練 CAE の精度検証を行った。プレス成形 CAE について実用レベルの技術を確立した。繊維配向異方性を考慮した成形・設計連成 CAE を開発し、剛性最適設計を検証した。</p> <p>(j4) 反り変形の CAE 予測による金型修正等の方策により面隙度が改善した。溶着接合界面の NDI 基準を明確化し、品質と強度要件を満足する接合条件を設定、検証した。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維を用いた LFT-D 成形性評価について検討を行った。</p>	100%	

<p>(k) 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル成形技術の開発</p>	<p>(k1) その場重合成形による連続繊維プリフォームと LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形技術を開発する。また、新創案の非混練フレック法によるフレック繊維と LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形法の基礎技術を開発する。</p> <p>(k2) ハイブリッド成形の高速マテハン技術・設備を開発するとともに、ハイブリッド成形を適用したマルチマテリアル自動車部品の設計および試作評価を行う。</p> <p>(k3) 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル設計法に関する基礎データを取得する。</p>	<p>(k1) その場重合成形 (T-RTM) による NCF 連続繊維プリフォーム補強材の成形技術および LFT-D 中間素材 (フトン) とのハイブリッド成形技術を開発した。</p> <p>T-RTM 連続引抜成形の基礎技術を開発するとともに、UD テープから製作した非混練フレック繊維と LFT-D フトンとのハイブリッド成形法の基礎評価を行った。</p> <p>(k2) T-RTM プリフォーム成形用 800 トンプレス機および付帯設備の設置を完了した。プリフォーム補強材と LFT-D フトンとのハイブリッド成形用に、1・2 期に構築した 3500 トンプレス機ハイブリッド成形用設備およびマテハンシステムの改良検討を行った。</p> <p>(k3) ハイブリッド成形ドア構造の設計を行い、ハイブリッド構造の優位性を確認するとともに、設計・成形データを取得した。EV 車の CFRTP 実証構造の設計、部品試作を実施し、マルチマテリアル設計に関する基礎データを取得した。</p>	<p>100%</p>	
<p>(l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発</p>	<p>(l1) 熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行い、材料特性予測の基礎技術を開発する。</p> <p>(l2) 材料データベースの一部を構築する。</p> <p>(l3) 熱可塑性 CFRP 試験法標準化の調査・検討を行う。</p> <p>(l4) 構造設計 CAE に用いる実用的な材料モデルを提案する。</p>	<p>(l1) LFT-D 材の疲労特性の評価を実施した。X 線 CT およびタルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性 (V_f, ひずみ分布、配向) 評価に関する精度向上の研究を行った。</p> <p>引張・圧縮強度予測理論モデルの検証 (海技研)、大規模シミュレーションによる強度予測の検証 (東京大学)、およびマルチスケールモデルによる力学特性シミュレーション (名古屋大学) を行い、材料特性予測の基礎技術を開発した。</p> <p>(l2) 成形トライ水準と紐づけた LFT-D 材の物性データを収録したマスタテーブルを更新するとともに、圧縮、疲労特性に関する基礎データを取得、評価した。</p> <p>(l3) LFT-D 材の疲労試験法 (両振曲げ) の有効性を確認するとともに、有意な SN データを作成した。</p> <p>(l4) 粘弾塑性モデルと損傷則を用いた LFT-D の応力-ひずみ非線形特性の予測、評価を行い、材料モデルを作成した。</p>	<p>100%</p>	

<p>(m) 自動車向リサイクルCF適用化技術の開発</p>	<p>(m1) 航空機 CFRP 廃材および自動車用水素タンク廃材等の多様な CFRP 廃材からリサイクル CF を効率的に回収できる過熱水蒸気処理プロセスの開発を行う。</p> <p>(m2) リサイクル CF および LFT-D 工程内廃材を用いた LFT-D 成形技術を開発する。</p> <p>(m3) LCA 評価法に関する基礎的な調査を行い、LFT-D 成形 CFRP に関する LCA の予備的な評価を行う。</p>	<p>(m1) 水素タンク廃材および航空機 CFRP 廃材からリサイクル CF を高効率に回収可能な新過熱水蒸気処理炉を導入し、CF 回収処理プロセス・条件を確立した。</p> <p>回収 CF の単糸強度および界面強度を同時評価できる新フラグメンテーション試験法を開発するとともに、標準化の検討を行った</p> <p>(m2) リサイクル CF の LFT-D 成形用のサイドフィーダを開発し、NCC 大型 LFT-D 押出機に装着するとともに、成形性の基礎評価を行った。また工程内廃材の LFT-D 成形性を評価した。</p> <p>(m3) CF 回収～LFT-D 成形工程における消費エネルギーの基礎データを取得した。</p>	<p>100%</p>	
--------------------------------	---	---	-------------	--

(2) 最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.6.1-5 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
<p>(j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発</p>	<p>(j1) LFT-D 物性向上の新アプローチにより、実験レベルで従来比約 30%向上、ばらつき約半減。 本成形法の大型高速化のため新 LFT-D 大型成形設備システムを構築。 LFT-D 薄板化に取組み約 20%~30%改善。</p> <p>(j2) タルボ・ロー干渉計による繊維性状の広域高速測定、定量評価、可視化・表示技術を開発。</p> <p>(j3) 実用レベルのプレス成形 CAE を確立。成形・設計連成 CAE を開発し、剛性最適設計を検証。</p> <p>(j4) 反り変形 CAE 予測による金型修正等の方策により面隙度改善。 溶着接合界面の NDI 基準を明確化し、品質と強度要件を満足する接合条件を設定、検証。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維を用いた LFT-D 成形性評価の検討。</p>	<p>(j1) LFT-D 材料物性について下記目標達成 ・引張弾性率：25GPa ・引張強度：200MPa ・ばらつき的大幅改善 新 LFT-D 大型成形設備システムによる物性評価および成形プロセス確立。 LFT-D 薄板化：(Vf30,標準大板) 2mm 達成</p> <p>(j2) タルボ・ロー干渉計による繊維性状（繊維配向ベクトル、Vf、分散性）の定量評価、表示技術の確立。</p> <p>(j3) 成形・設計連成 CAE による剛性最適設計技術の開発・検証、強度最適化 CAE の検討。</p> <p>(j4) 品質と強度要件を満足する接合条件を確立。EV 車実証構造の溶着接合および軽量化実証。</p> <p>(j5) 革新炭素繊維を用いた LFT-D 成形性評価</p>	<p>見通しあり (物性向上について、実験レベルよりも好条件が期待できる新 LFT-D 大型成形設備システムにより達成可能範囲にあると見ている。)</p>

<p>(k) 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル成形技術の開発</p>	<p>(k1) その場重合成形 (T-RTM) による NCF 連続繊維プリフォーム補強材の成形技術および LFT-D 混錬材 (フトン) とのハイブリッド成形技術を開発。 T-RTM 連続引抜成形およびフレック繊維とフトンとのハイブリッド成形法の基礎技術を開発。 (k2) T-RTM プリフォーム補強材成形用 800 トンプレス機および付帯設備の設置を完了。上記補強材と LFT-D フトンとのハイブリッド成形用設備、マテハンシステムについて検討。 (k3) ハイブリッド構造の設計・成形プロセスデータを取得。 EV 車の CFRTP 実証構造の設計、部品試作を実施し、マルチマテリアル設計に関する基礎データを取得。</p>	<p>(k1) その場重合成形 (T-RTM) による NCF プリフォーム補強材成形技術および LFT-D 混錬材 (フトン) とのハイブリッド成形技術の確立。 T-RTM 連続引抜成形によるフレック繊維製造技術開発およびフレック繊維/LFT-D ハイブリッド成形技術の確立 (k2) T-RTM プリフォーム補強材成形および補強材と LFT-D フトンとのハイブリッド成形用設備、マテハンシステムの構築。 (k3) T-RTM 補強材およびハイブリッド成形材の力学特性データおよびマルチマテリアル設計データの取得</p>	<p>見通しあり (これまでの研究成果・知見により、基本的なリスクは排除、ハイブリッド成形技術を駆使した EV 車 CFRTP 構造の試作で実証の計画)</p>
<p>(l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発</p>	<p>(l1) LFT-D 材の疲労特性を評価。X 線 CT およびタルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性評価の精度向上。 引張・圧縮強度予測理論モデル、大規模シミュレーション、およびマルチスケールモデルシミュレーションによる LFT-D 材料特性予測の基礎技術を開発。 (l2) LFT-D 材の基本物性データを収録したマスタテーブル整備・更新。圧縮、疲労特性に関する基礎データを取得、評価。 (l3) LFT-D 材の疲労試験法の有効性を確認、SN データを作成。 (l4) LFT-D の応力-ひずみ非線形特性の材料モデルを作成。</p>	<p>(l1) X 線 CT およびタルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性解明。 理論モデル、大規模シミュレーションおよびマルチスケールモデルシミュレーションによる LFT-D 材料特性予測技術の開発・検証。 (l2) LFT-D 物性向上材の材料データベースの一部の構築。 (l3) LFT-D 材の疲労試験法確立、標準化提案。 (l4) 実設計への適用を想定した LFT-D の実用的な非線形材料モデルを提案。</p>	<p>見通しあり (強度予測技術については、これまでの研究成果・知見により検証に目途)</p>

<p>(m) 自動車向リサイクルCF適用化技術の開発</p>	<p>(m1)リサイクルCF回収可能な高効率過熱水蒸気処理炉を導入、水素タンク廃材および航空機CFRP廃材からのCF回収処理プロセス・条件を開発。 回収CFの単糸強度および界面強度を同時評価できる新フラグメンテーション試験法を開発、標準化の検討を実施。 (m2) リサイクルCFのLFT-D成形用サイドフィーダを開発、NCC大型LFT-D押出機に装着し、成形性の基礎評価を実施。工程内廃材のLFT-D成形性を評価。 (m3) CF回収～LFT-D成形工程における消費エネルギーの基礎データを取得。</p>	<p>(m1)水素タンク廃材および航空機CFRP廃材からのCF回収処理プロセス・条件の確立。 新フラグメンテーション試験法によるリサイクルCFの評価技術の確立、標準化提案。 (m2) リサイクルCFおよび工程内廃材のLFT-D成形技術確立。 リサイクルCFとバージンCFとをミックスしたLFT-D成形性評価。 (m3) CF回収～LFT-D成形工程におけるLCA基礎評価。</p>	<p>見通しあり (リサイクル回収技術はほぼ達成レベルにある。導入したサイドフィーダによるリサイクルCFの部品成形により技術実証の計画)</p>
--------------------------------	--	--	--

(3)研究開発の成果と意義

(ア) 研究開発の成果

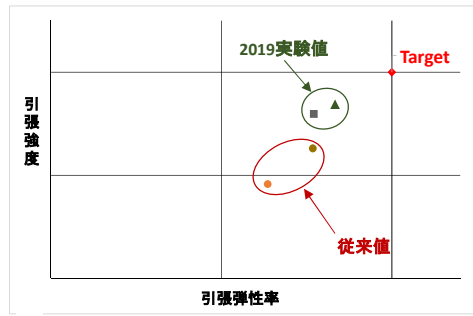
- ・ 第4期が終了する2022年度での目標達成と技術実証を見据えた具体的な活動計画を策定し、各研究課題に取り組んだ。
- ・ 初年度に構築したプロジェクト推進体制とマネジメントのPDCAを回す仕組みに基づき、プロジェクトを運営するとともに、知財成果の権利化に関するルールを整備、運用した。また名古屋大学を中心とする学術支援研究を推進し、技術課題の解明に資する知的成果を得た。
- ・ 表Ⅲ-2.6.1-6に示す技術成果を得た。

以下、3期を中心とした研究成果の主な内容について示す。

(j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発

(j1)LFT-D 材料物性の向上

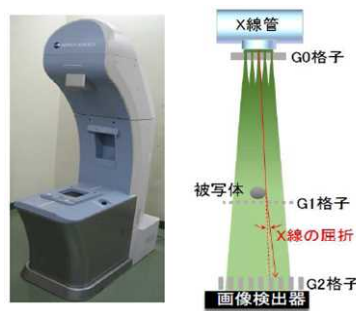
LFT-D 力学特性の支配因子である LFT-D 押出素材（フトン）内の CF 繊維長（分布）と分散性の最適条件を探るべく、CF 種、繊維体積含有率（Vf）、混練スクリュ条件を振った実験を実施した。その結果、実験値で力学特性は約 30%向上、バラツキも改善し得る条件を把握した。（図Ⅲ-2.6.1-6）さらに本条件を再現するための新 LFT-D 大型成形設備システムを構築した。今後、向上物性を検証する。



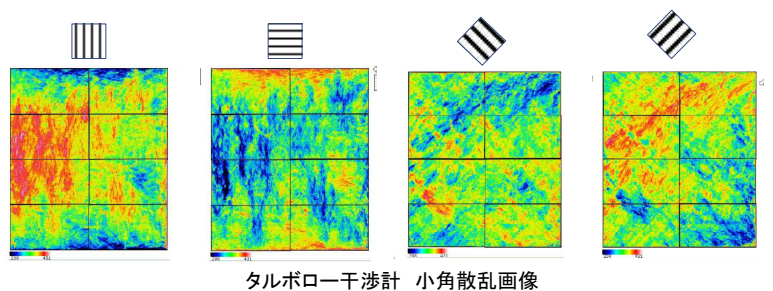
図Ⅲ-2.6.1-6 LFT-D 物性向上（実験値）

(j2) LFT-D 繊維性状の定量的評価方法の開発

LFT-D 材料開発には、繊維性状の精確な測定評価法が必須である。新たにタルボ・ロー干渉計による測定技術の研究を実施し、広域の LFT-D 成形材の繊維量分布および繊維配向の測定を効率良く評価できるめどを得た。タルボ・ロー干渉計の原理を図Ⅲ-2.6.1-7 に、LFT-D 成形板のタルボ・ロー干渉計撮影画像を図Ⅲ-2.6.1-8 に示す。今後、繊維分散状態の定量評価指標および表示技術の開発を行う。



図Ⅲ-2.6.1-7 タルボ・ロー干渉計の原理

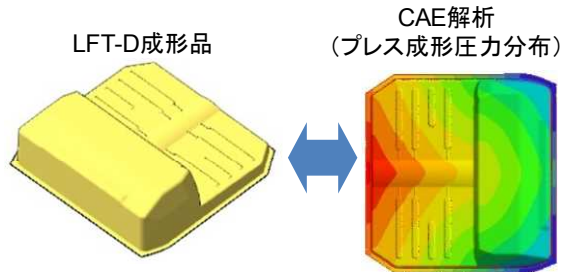


図Ⅲ-2.6.1-8 LFT-D 成形板のタルボ・ロー干渉計撮影画像

(j3) LFT-D 成形および設計 CAE 技術の開発

(j31) 成形 CAE

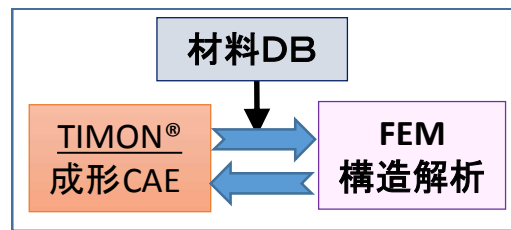
これまでに開発した LFT-D のプレス成形流動解析 CAE について、精度検証および精度向上を実施し、実用ツールとして完成させた。成形トライにおける金型設計や成形水準設定に活用した。(図Ⅲ-2.6.1-9)。



図Ⅲ-2.6.1-9 成形 CAE 解析例（リアパネル）

(j32) 設計 CAE

LFT-D は混錬およびプレス成形に伴う繊維配向の異方性をもつ。従って、LFT-D 部品の最適設計を行うためには、異方性を考慮する必要がある。(図Ⅲ-2.6.1-10) そのため、LFT-D 繊維配向異方性と構造解析をリンクした成形・設計連成 CAE の基本プログラムを試作し、検証した。今後の実証構造の設計に応用する。



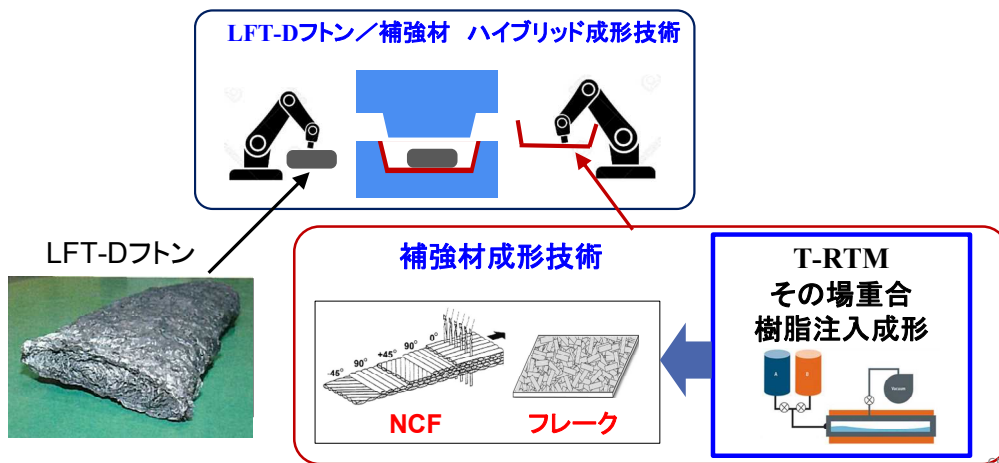
図Ⅲ-2.6.1-10 成形 CAE と設計 FEM との連成 CAE

(k) 熱可塑性 CRFP マルチマテリアル成形技術の開発

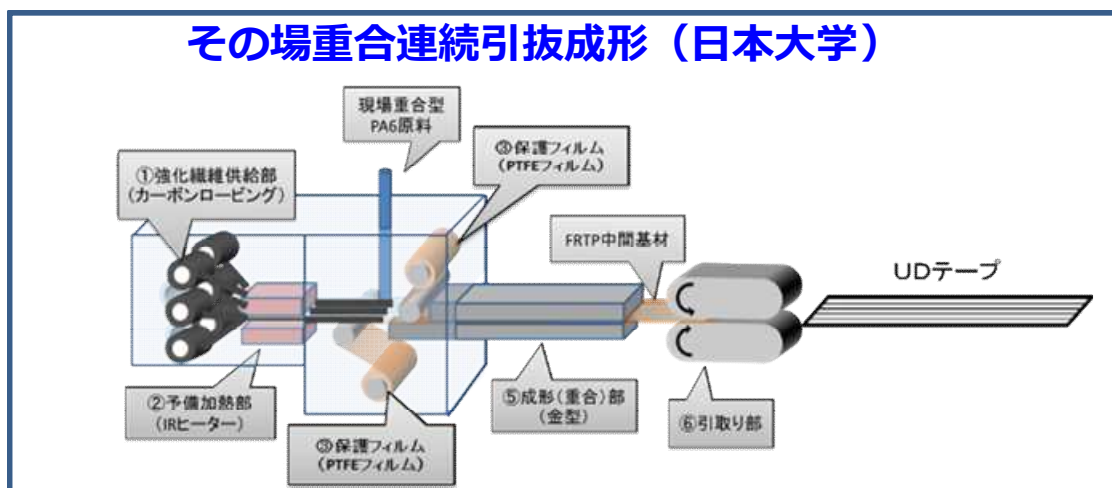
(k1) その場重合 (T-RTM) 成形ハイブリッド成形技術の開発

1.2 期では補強材として熱可塑スタンプブルシートを使用した。3 期からは高速成形の特徴を持つ ε-カプロラクタム PA6 その場重合 (T-RTM) 成形による補強材と LFT-D とのハイブリッド成形に取り組んでいる。(図Ⅲ-2.6.1-11)

具体的には、T-RTM 成形の基礎データ取得および連続引き抜き成形法の研究を実施し、基礎技術を開発した。今後、実証部品による技術実証を行う。



図Ⅲ-2.6.1-11 その場重合 (T-RTM) 成形補強材と LFT-D とのハイブリッド成形のイメージ



図Ⅲ-2.6.1-12 その場重合連続引抜成形法の概要

(k2) ハイブリッド高速成形マテハン技術の開発

T-RTM 用の 800 トンプレス機の設置、樹脂注入機（RTM/T-RTM）その他付帯設備の設置が完了した。（図Ⅲ-2.6.1-13）。本設備を用いて T-RTM 成形部品の試作を実施した。



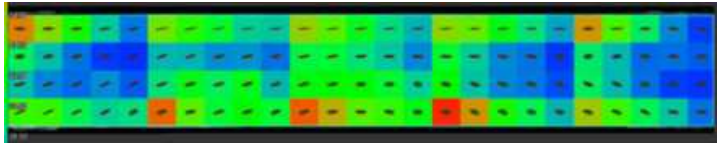
図Ⅲ-2.6.1-13 800 トンプレス機システムの構築

(I) 熱可塑性 CFRP（材料特性）評価・解析技術の開発

(I11) 材料特性の評価

LFT-D 平板から引張試験用の試験片を切り出し、引張試験におけるひずみ分布計測を DIC によって調査し、また、同じ板から別途切り出した試験片の内部観察を三次元 X 線 CT によって可視化して各種繊維強化特性の定量評価を行った。

引張試験片を 5mm 格子毎に区切って、個々の配向係数をベクトル表示し、Vf を色で区別した結果を図Ⅲ-2.6.1-14 に示す。



図Ⅲ-2.6.1-14 X線CTによるグリッド毎の配向テンソルと V_f 分布

(112) 熱可塑性 CFRP の材料特性予測技術の研究

(1121) 理論式による強度予測

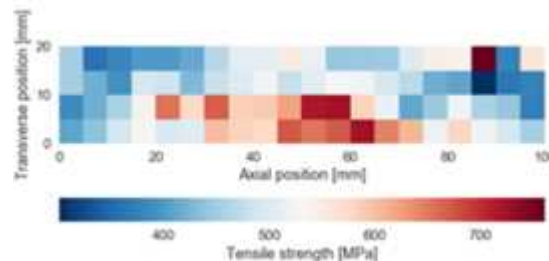
・引張特性発現メカニズムについて、三次元 X 線 CT 画像解析により繊維配向と V_f を数値化し、力学特性理論モデルを検証した。(図Ⅲ-2.6.1-15)

・ASTM D3410 により圧縮強度を適切に取得できることが分かった。また 0° および 90° 圧縮試験との関係性から、弾性率と強度に強い相関関係を確認、これにより、繊維配向度によって圧縮強度を予測する理論モデルの見通しを得た。

・樹脂単体の高速引張試験によって、応力ひずみ関係に明らかな速度依存性が存在することが判明した。

・ピンホール式引き抜き試験法を採用して、界面せん断挙動の温度依存特性を評価した。その結果、樹脂特性を主要因とする温度依存性が明らかになった。

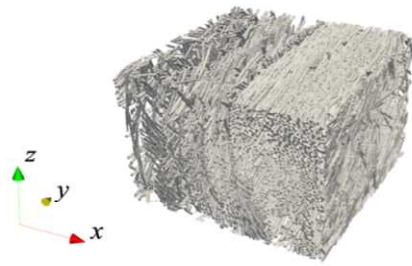
今後、引張特性発現メカニズムの研究、圧縮強度発現メカニズムの研究、速度依存特性把握のための樹脂単体試験法の検討、温度依存を考慮した界面せん断特性に関する研究に取り組む。



図Ⅲ-2.6.1-15 繊維配向解析結果から求めた強度分布予測

(1122) 熱可塑性 CFRP の不確定強度モデル・成形モデルの確立

ミクロスケール破壊シミュレーションにより、繊維方向と荷重方向と最大強度の関係性のデータが得られ、全体領域モデル・単位領域モデルとも定性的な一致が見られた。また、応力が高い領域および応力集中部の分布に関するデータを得た。(図Ⅲ-2.6.1-16) 今後、設定した不確定性強度モデルは、全体領域のミクロスケール有限要素モデルの計算結果と照合することで、その有効性を検証する。



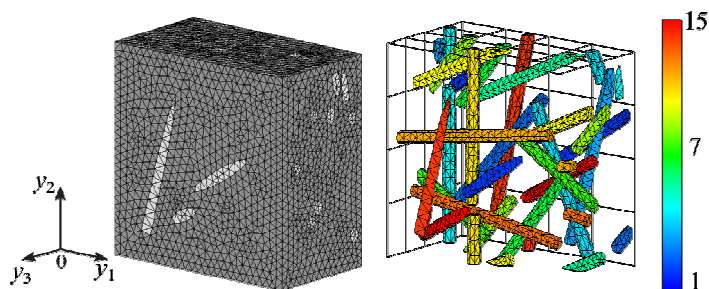
図Ⅲ-2.6.1-16 成形 CAE 解析例（リアパネル）

(1123) マルチスケールミュレーションモデルによる強度予測

本研究では LFT-D の内部構造、繊維長、配向特性等について X 線 CT 観察結果より、内部構造で重要となるパラメータの評価手法を確立するとともに、内部構造を再現した幾何モデルを構築することを目的とする。

X 線 CT 画像をもとに画像処理ソフトウェア Avizo（Thermo Fisher Scientific 製）を用いて画像解析を行い、輝度値フィッティングを適用した結果から、3 段階のマルチスケールモデルを検討し、LFT-D は各スケールにおいて特徴的な内部構造を有していると考え、モデル化を実施した。図Ⅲ-2.6.1-17 に LFT-D のメゾスケールモデルを示す。

今後は作成した各スケールの幾何モデルを使用し、均質化法などのマルチスケール解析により LFT-D の力学特性シミュレーションを実施する予定である。



図Ⅲ-2.6.1-17 LFT-D のメゾスケールモデル

(13) 熱可塑性 CFRP の試験法標準化の研究

疲労特性は、静的特性との相関性確認、静的強度に対する比率として評価することが可能であり、また応力比の影響については、疲労限度線図において評価することが可能であり、従来指標の修正 Goodman 線図が適用できることが確認された。さらに、破壊起点、疲労亀裂の進展経路を観察することで、LFT-D 材の疲労破壊メカニズムの解明を推進している。また温度依存性を測定し、その影響を評価する指標を見出すことに取り組む。

(14) 非線形性を考慮した材料モデルの開発

現状、X 線 CT 測定、タルボ・ロー干渉計による測定、X 線回折などによって試験

片の各部位における配向や Vf の把握はある程度可能となっているが、成形板の各部における弾性定数、さらには非線形特性を考慮した応力-ひずみ特性（構成方程式）を得ることは極めて困難である。

そこで材料の超音波共振を利用して異方性を有する弾性特性さらには粘弾性特性を評価する手法として共鳴超音波スペクトロスコピー法（Resonant Ultrasound Spectroscopy: 以下 RUS 法）を採用し、一連の検討を行った。

今後、せん断弾性定数に関しても RUS 法により求められた値の精度を検証するとともに、線形な範囲での弾性定数のみでなく、減衰性を考慮した粘弾性定数の同定、さらには非線形性を表現する材料パラメータの同定について検討していく。

(m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発

対象とする CFRP 廃材としては、航空機 CFRP および LFT-D 工程内廃材に加え、今年度から燃料電池車用の水素タンクを追加対象とした。

航空機は 20 数年の寿命を終えた機体が今後続々と退役する。水素タンクは、現状多量の工程内廃材の問題に加え、圧力容器の寿命を迎える 2030 年代には大量に用廃になる。それらの廃材の再利用は喫緊の課題である。

CFRP 廃材からの過熱水蒸気法による CF 回収、回収 CF の評価および回収 CF の LFT-D 成形に供するプロセスフローのイメージを図 III-2.6.1-18 に示す。

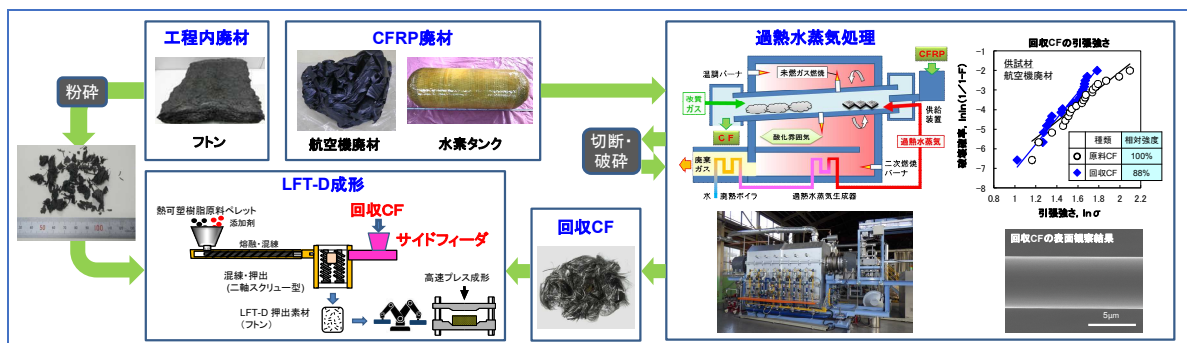


図 III-2.6.1-18 CFRP リサイクルプロセスフロー概要

(m1) リサイクル炭素繊維回収技術の開発

(m11) 過熱水蒸気による CF 回収プロセスの開発

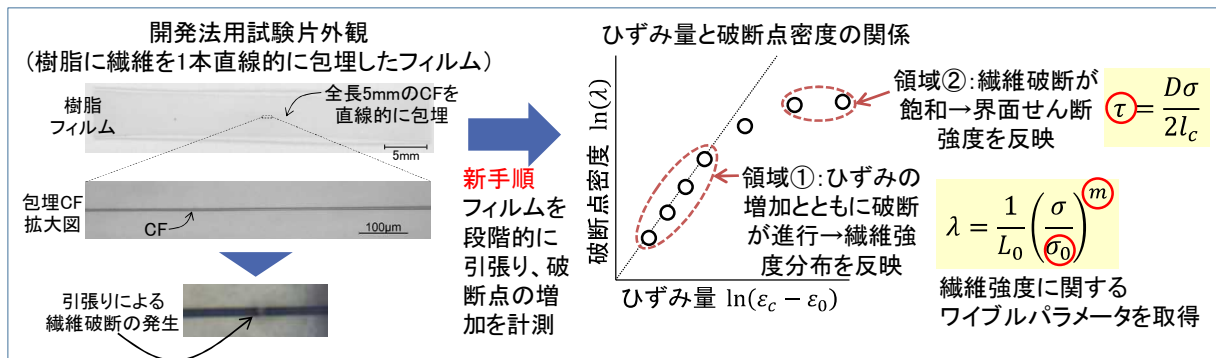
CFRP 水素タンクは大型かつ肉厚のため、その状態で破砕や切断等を行うのは困難であることから、一旦、過熱水蒸気のみで処理（1 次処理）して樹脂の大部分を除去し、脆性化した材料を破砕して、酸素を含む過熱水蒸気で処理（2 次処理）して樹脂残渣を除去する方法を開発した。また新設処理炉の仕様検討～導入、CFRP 水素タンク廃材の処理プロセスの開発、航空機 CFRP 廃材の処理条件検討を実施した。

(m12) フラグメンテーション試験による回収 CF の物性評価

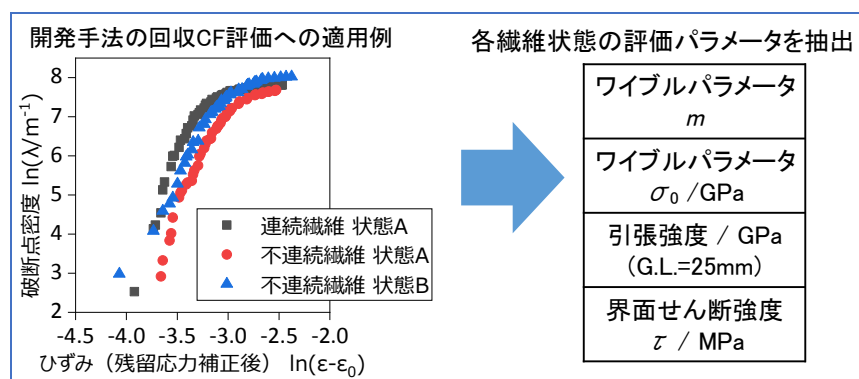
フラグメンテーション試験結果から繊維強度および繊維／樹脂界面せん断強度を精度よく評価するための解析方法について検討した。

炭素繊維の【引張特性】と【界面せん断強度】を同時に評価可能な新フラグメン

テーション試験・解析手法を開発した。本手法は、適切な試料作製により不連続繊維にも適用可能であることを実証、回収 CF の新評価法として確立した。(図Ⅲ-2.6.1-19) また標準化の検討を行うとともに、課題として試料作成・評価に手間がかかるため、効率化に取り組んでいる。



図Ⅲ-2.6.1-19 炭素繊維の引張特性と界面せん断強度を同時評価可能な新フラグメンテーション試験・解析手法



図Ⅲ-2.6.1-20 新フラグメンテーション試験による回収CFの物性評価

(イ) 研究開発の意義

上記成果の意義としては下記が挙げられる。

- ・ 中期目標である LFT-D 要素技術の確立と共に、プロジェクト最終目標達成の見通しが得られた。
- ・ 集中研企業との実効的な連携体制が構築できたと共に、研究成果に対する評価を得、求心力を保つことができた。
- ・ 産官学ドリームチームによる相乗的成果の創出とその有効性が示され、今後のコンソーシアム雛型になりうる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.6.1-7 特許、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	25	1	0	7	1	0	4
2014FY	2	0	16	12	0	2	2	0	5
2015FY	1	0	13	2	0	0	4	0	5
2016FY	4	0	20	4	1	2	3	1	6
2017FY	2	0	20	11	1	2	6	0	8
2018FY	1	0	24	8	0	1	9	0	10
2019FY	2	2	30	3	0	0	5	0	7
合計	12	2	148	41	2	14	30	1	45

※：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-2.6.1-8 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※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	2	0	0
2016FY	2	0	2
2017FY	5	0	4
2018FY	1	0	4
2019FY	0	0	0
合計	10	0	10

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約
以上

2.6.2[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤の開発

2.6.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

エネルギー消費量削減、CO₂ 排出量削減は国際的な重要課題であり、産業・運輸・民生の各部門でさまざまな対応が図られており、運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。このような世界情勢の中、我が国においても、運輸部門のエネルギー消費量の 9 割を占める自動車をはじめ、鉄道車両等の大量生産される輸送機器の軽量化による省エネに取り組むことが必要である。

炭素繊維と樹脂の複合材料である炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」という。）は、航空機の構造材等に使用され、機体の軽量化によって省エネに貢献している素材であるが、現在、航空機の構造材等として使用されている CFRP は、主に熱硬化性 CFRP であり、樹脂の特性上加工に時間がかかり、生産コストも高いため、大量生産型製品への適用は困難な状況である。さらに、将来的に様々な素材を適材適所に使用していくためには CFRP と金属材料の接合が必要であるが、熱膨張率の差に起因する変形や電食等の課題がある。

これらの課題を解決するため、本事業では「熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発」及び「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発」により、大量生産される自動車の構造材等に熱可塑性 CFRP を使用することで軽量化による燃費向上を実現するとともに、我が国が競争力を有する素材である炭素繊維及び CFRP の新規需要の創出を目指す。また、材料、加工、装置、ユーザーの各メーカー、大学等が垂直連携体制を構築し、実用化までを視野に入れた一貫通貫の開発を行う研究体制とすることにより、素材のみならず、最終製品、部品、加工装置等の関連産業を含めた国内産業の競争力の維持・強化を図る。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.6.2-1 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
① 熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	熱可塑性 CFRP と異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合に必要な要素技術の見極め 各種接合方式、接合形状における強度設計に必要なデータベースの構築 構造の接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を ±10% 以下とする接合技術の指針の策定と供試体による検証	現行のスチール製量産車と同等の接合部強度の実現 接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで ±10% 以下とする接合技術の確立 現行のスチール製量産車と同等のライン速度 1 台/分を実現する指針の策定と供試体による検証	2017 年度でテーマ終了のため同左	量産プロセスに適用することを目的として、熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術、及び接合部の耐久性等評価解析技術に関する開発項目と目標値を設定した

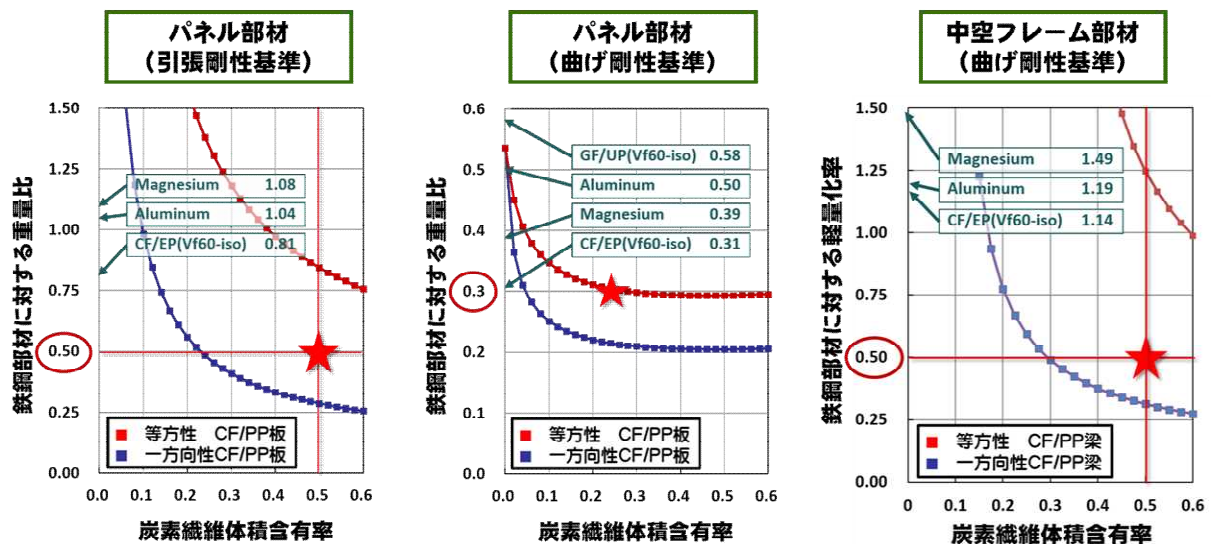
② (a) 熱可塑性 CFRP の中間基材の開発	当該年度の② (b)(c)(d) の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立 曲げ剛性でスチール対比 60%軽量化	当該年度の② (b)(c)(d) の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立 重要特性の変動係数 5%以内	2017 年度でテーマ終了のため同左	自動車部材の多様なニーズ（加工性、強度、剛性、耐衝撃性、耐熱性、意匠性、振動吸収性など）を満たすことを目的とし、構造設計・成形加工・性能評価からのフィードバックを重視した開発とした
② (b) 熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発	静的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（面内せん断強度、面外せん断強度）の測定誤差（変動係数）が 10%以下となる試験法の確立 特性評価値の CAE 設計パラメータへの適用性の検証	開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究 動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（ひずみ速度依存係数、温度依存係数）の測定誤差（変動係数）が 10%以下となる試験法の確立	2017 年度でテーマ終了のため同左	材料特性発現メカニズムの解明は開発技術の発展に不可欠であり、また高精度な性能評価試験方法と CAE のためのデータベース構築は実用化を加速させるために極めて重要と考えて開発項目と目標値を設定した
② (c) 熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発	開発部材における予測精度を剛性で±5%、強度で±10%とする CAE 解析技術の確立	スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを 60%軽量化する構造の提案 開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチマテリアルボディで 30%以上の軽量化を実現する構造の提案	2017 年度でテーマ終了のため同左	熱可塑性 CFRP における CAE 解析による予測技術をスチール並とし、部材一体化設計や最適トポロジー技術を適用することで、部品点数大幅削減と大幅軽量化を実現する最適構造設計技術を開発することが不可欠と考えて開発項目と目標値を設定した
② (d) 熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発	開発した中間基材の加熱・加圧・二次加工方法などを検討し、現行数 10MPa のハイサイクル成形圧力を 10MPa 以下とするための周辺要素技術基盤の構築	② (c) で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基にした、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間 1分以内での成形加工技術の開発	2017 年度でテーマ終了のため同左	② (c) で提案される部材・構造に対応可能な成形シミュレーション技術を開発し、成形加工プロセスの最適化技術を確立することが不可欠と考えて開発項目と目標値を設定した

(3)全体計画

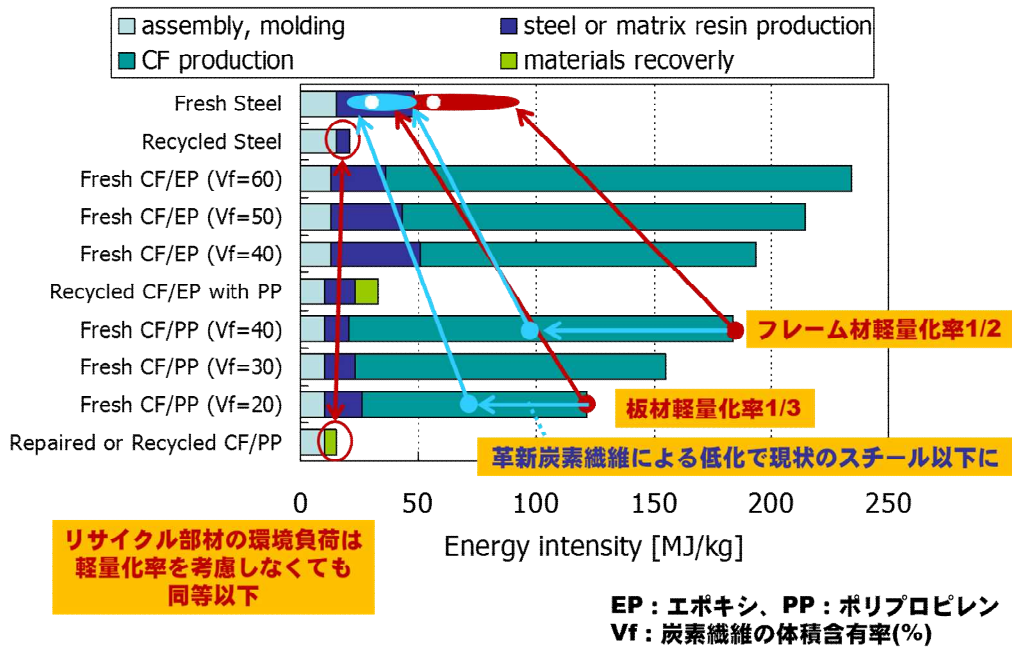
本事業では事業化を見据えて「熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発」及び「熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発」について以下の各研究開発内容を実施する。

① 熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

熱可塑性 CFRP は図Ⅲ-2.6.2-1 に示されるように構造材料の中で最も軽量化効果が高く、特にその異方性を活用することでさらなる軽量化が期待できる。また、図Ⅲ-2.6.2-2 に示されるようにライフサイクルアセスメント的に見ても環境負荷を小さくできる可能性を持つ優れた材料であるが、耐熱性や長期耐久性の観点から、実際の車体構造を設計・製造する際には、車体構造材料として現在の主流である鉄鋼や軽量構造材料として一部実績のあるアルミ合金などの金属材料との接合が必要となる。しかし、熱可塑性 CFRP と金属材料との接合においては、電食や熱膨張率の差に起因する問題などにより、実構造に適用できる可能性までは見極められていない。本研究開発項目では、異材接合技術として有力視されている機械的接合と接着接合を、熱可塑性 CFRP の特性や自動車組立プロセスへの適合性を考慮して開発する。また、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立する。



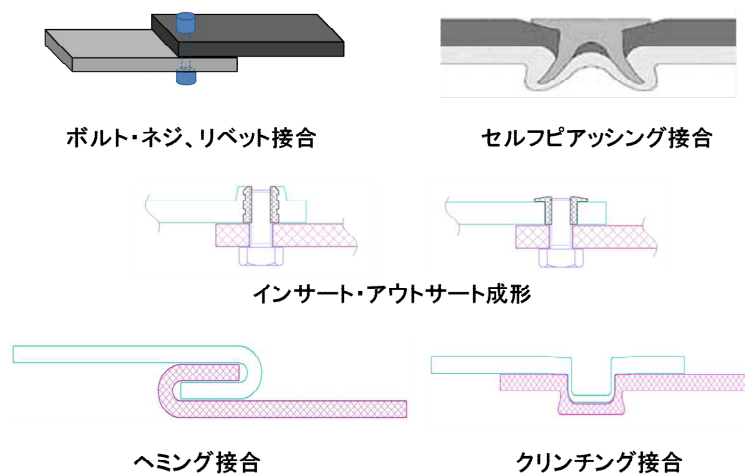
図Ⅲ-2.6.2-1 熱可塑性 CFRP の軽量性



図Ⅲ-2.6.2-2 鉄鋼部材、熱硬化性 CFRP 部材、熱可塑性 CFRP 部材の製造エネルギー比較

(a)機械的接合技術

熱可塑性 CFRP の適用箇所拡大や適材適所への材料配置のため、金属材料と併用する部分において高い接合強度と長期耐久性を持つ接合方法の開発を行う。具体的には、熱可塑性 CFRP の延性的な性質を利用し、図Ⅲ-2.6.1-3 に示されるようなボルト・ネジ、リベット、セルフピアスリベットなどの機械的接合技術、機械的接合技術を補助するインサート・アウトサート成形技術及び熱による二次加工が容易である熱可塑性 CFRP の特性を生かしたヘミングやクリンチング等のかんごう技術を開発する。さらに、接合部の強度信頼性を確保するため、電食対策技術及び衝撃や疲労に対する耐久性等の評価解析技術を開発する。



図Ⅲ-2.6.2-3 検討する機械的接合技術

(b) 接着技術

一般的に難接着性であり、接着剤の硬化に必要な高温での加熱硬化処理が難しい熱可塑性樹脂において、短時間で接合するため、熱膨張差を吸収し、高強度・高耐久性を実現する低温速硬化性の接着剤の開発及び熱可塑性 CFRP と金属材料の表面処理を含む接着技術を開発する。また、接合部に生じる接着剤の熱歪み・熱応力（図 III-2.6.2-4）や耐久性の評価法、並びに寿命予測法や非破壊検査法を含む評価解析技術を開発する。

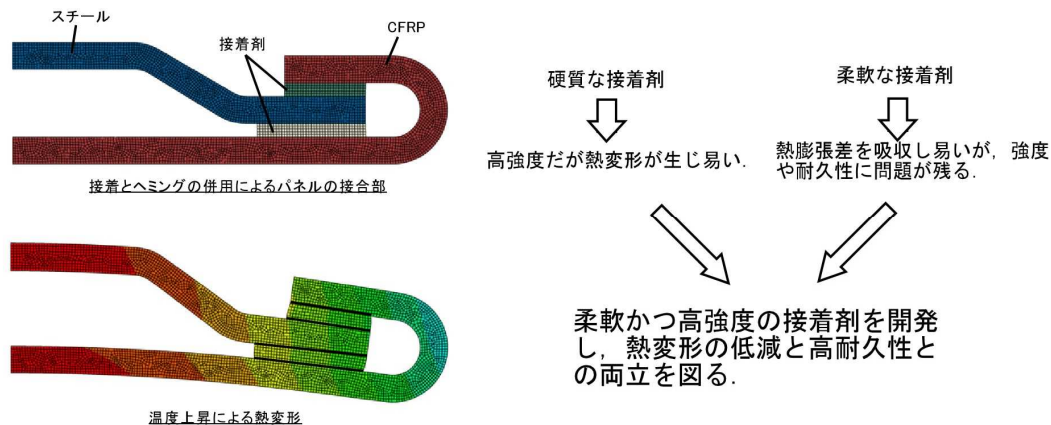
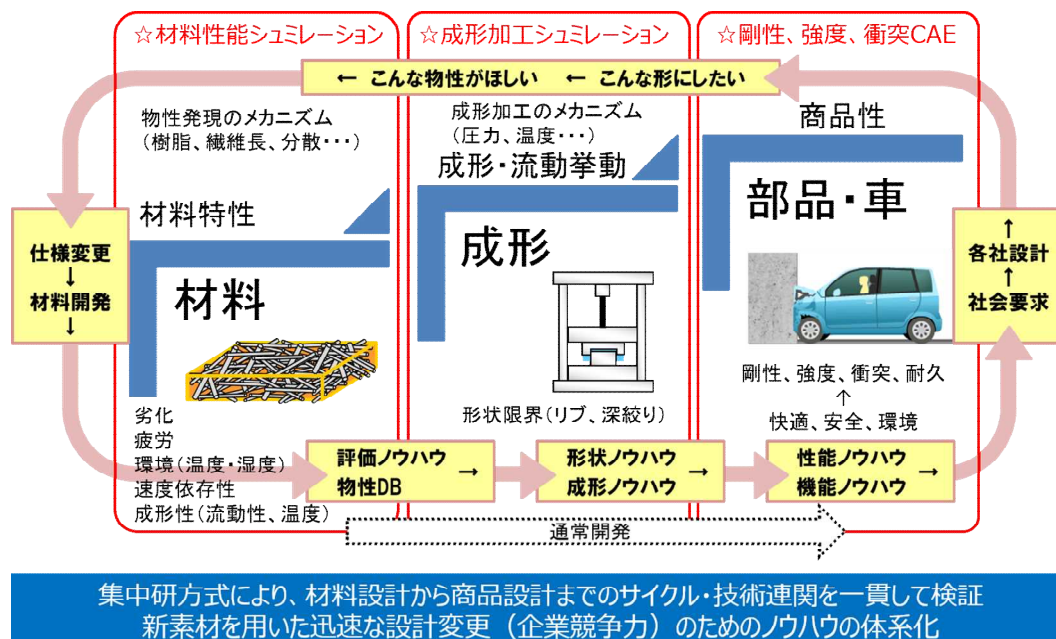


図 III-2.6.2-4 接着接合部に生じる熱歪み・熱応力と接着剤の特性による緩和

② 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発

鉄鋼製車体での構造・材料配置から熱可塑性 CFRP に適した構造・材料配置とし、かつ、高速・低コスト成形加工が可能となる作り易さも追求しながら、熱可塑性 CFRP の異方性も十分に活用するための関連技術を包括的に開発する。さらに実施に当たっては、専門設備と専門人材を集結した集中研方式により、図 III-2.6.2-5 に示すとおりテーマ間のフィードフォワード・フィードバック連携を図る。



集中研方式により、材料設計から商品設計までのサイクル・技術連関を一貫して検証
新素材を用いた迅速な設計変更（企業競争力）のためのノウハウの体系化

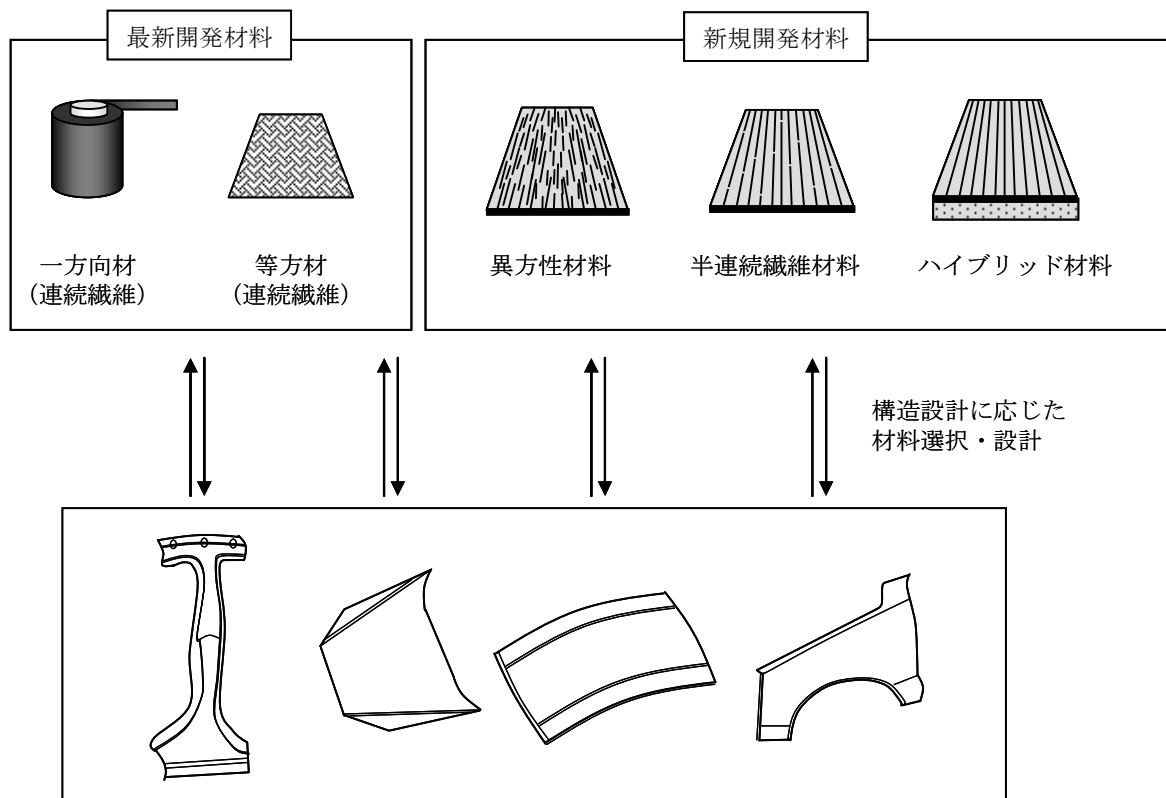
図 III-2.6.2-5 集中研方式による技術連関の体系化

(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発

車体構造は様々な性能を持つ部品の集合体であり、材料への要求特性は部品により異なるため、ニーズに合わせて多種多様な材料を設計する技術が求められる。しかし、車体の軽量化は、材料設計と構造設計の綿密な連携によってはじめて最適化されるため、本研究開発項目では、構造設計と成形加工の両者からのニーズを迅速かつ最適に実現するための材料基盤技術を構築する。具体的には、図Ⅲ-2.6.2-6 に示すとおり既存の最新中間基材に加え、半連続繊維や異方性の活用、それらのハイブリッド化等を進め、加工性・強度・剛性・耐衝撃性・耐熱性・意匠性・振動吸収性などの設計上の要求を満たす新規の中間基材を構造設計からのフィードバックを反映させながら開発する。

また、集中研方式を活かし、材料特性・成形データベースを基に、素材物性・基材形態・成形加工条件・部材性能について理論的解釈を深め、材料・加工・構造設計の相互のフィードバックが迅速かつ適切に行える材料の共通基盤技術として体系化する。

さらに、中間基材のハイブリッド化やリサイクル繊維の活用、一般産業用途のニーズに幅広く応えられる中間基材設計法を構築する。



図Ⅲ-2.6.2-6 熱可塑性 CFRP 中間基材の開発概要

(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発

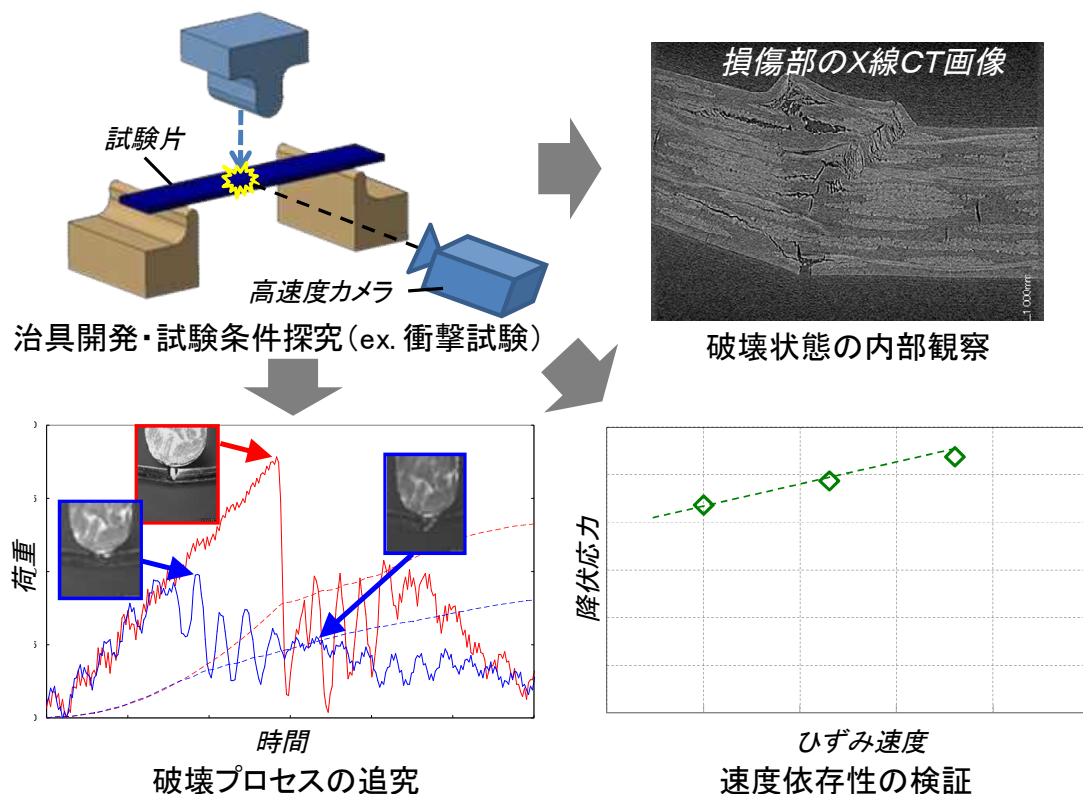
熱可塑性不連続 CFRP の材料性能評価技術は、圧縮特性、衝撃特性、長期耐久性などのメカニズムの解明にまでは至っていないため、本研究開発項目において、まず、図Ⅲ-2.6.2-7 に示すように、熱可塑性 CFRP (連続繊維、不連続繊維、等方性、異方

性)を対象として、変形・破壊・劣化挙動の可視化と材料特性発現メカニズムの解明のための高性能な治具の開発や最適試験条件の探究を行う。

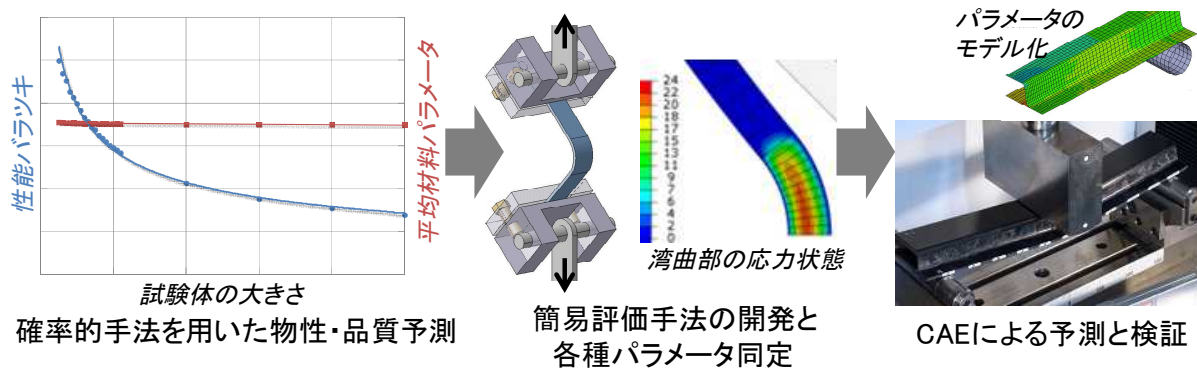
次に、開発する材料・構造設計手法・成形加工方法を実際に量産車開発に使用する際に不可欠となるコンピューター支援エンジニアリング (Computer Aided Engineering、以下「CAE」という。)への入力パラメータを効率的に整備する手段として、金属材料や樹脂材料並みの手間で材料特性を評価する簡易評価手法を開発する。具体的には、異方性を有する中間基材やそのハイブリッド材料群を活用していくため、CAEに入力すべきパラメータが増えることから、より効率的な評価手法のみならずデータの内挿・外挿理論などを開発する必要がある。そこで、確率論・統計学の手法を駆使して、基材形態と評価パラメータごとに合理的な試験条件・試験片寸法・試験本数を決定するロジックを構築し、実証試験によりその有効性を検証する (図III-2.6.2-8 参照)。

さらに、車体設計に必要な材料特性 (弾性率、強度、靱性、衝撃、クリープ、疲労、接合性、シールド、遮音、耐雷等) の評価手法開発とラウンドロビンテストを通じた材料特性データベース構築を行う。その上で、海外の動向も見極めながら、必要に応じて標準材料や国際標準試験法策定のためのドラフト作成も行う。

また、当該分野は世界的に開発競争の激しい分野であるため、程度の悪い便乗基材が出回ることが想定されることから、そのような基材を用いることでユーザーが不利益を被ることの無いよう、基材段階でのスクリーニング技術も同時に開発する。



図III-2.6.2-7 材料特性発現メカニズムの解明

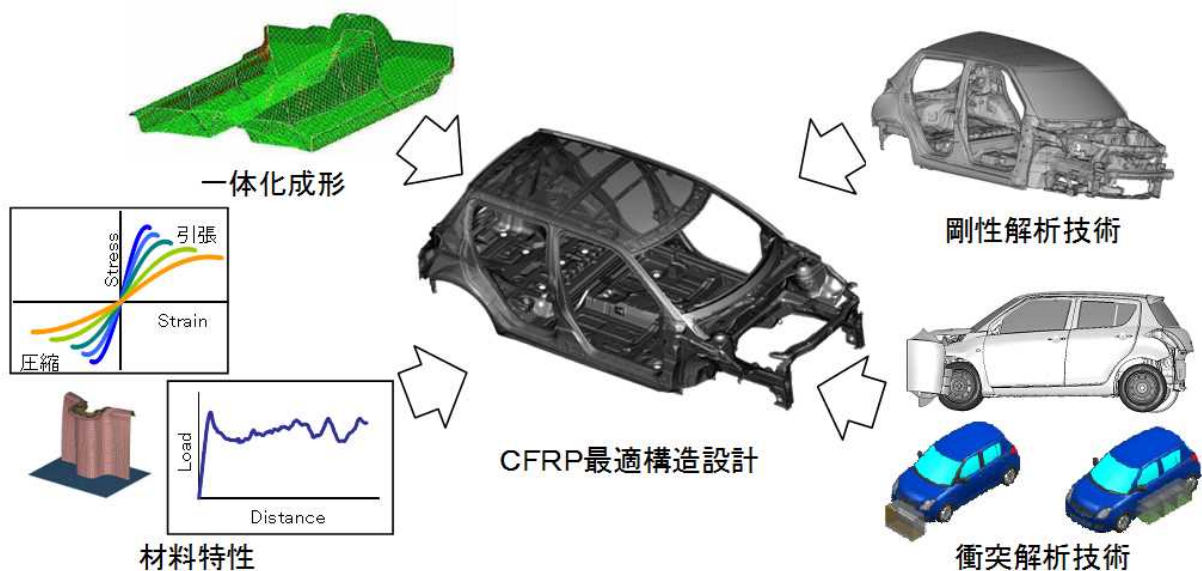


図Ⅲ-2.6.2-8 CAE パラメータの整備と予測及び設計技術への適用性検討

(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発

現在の熱可塑性 CFRP の CAE 解析においては、様々な材料特性パラメータ（圧縮特性や速度・温度・時間依存性など）を適用するには至らず、構造解析による予測技術は限定的であり、多種多様な材料群に応じた解析用材料モデルは構築されていないため、本研究開発項目では、まず、速度依存及び環境依存を考慮した材料モデルを構築し、CAE 解析による予測技術の適用範囲を拡大する（図Ⅲ-2.6.2-9 参照）。

また、さらなる軽量化や部品点数削減、軽量化率向上とのトレードオフとなる成形加工速度の低下も解決する設計指針の構築を目的として、熱可塑性 CFRP を用いた車体構造全体の最適化を達成できるシミュレーション技術の確立と設計理論の構築を行う。具体的には、車両性能・コスト・乗り心地・乗員安全性・歩行者保護などの要求度に応じて最適な構造デザイン（材料配置、板厚、寸法、形状）を提供するため、最適トポロジー（形状付与）技術等を取り入れた理論的な共通基盤を構築する。



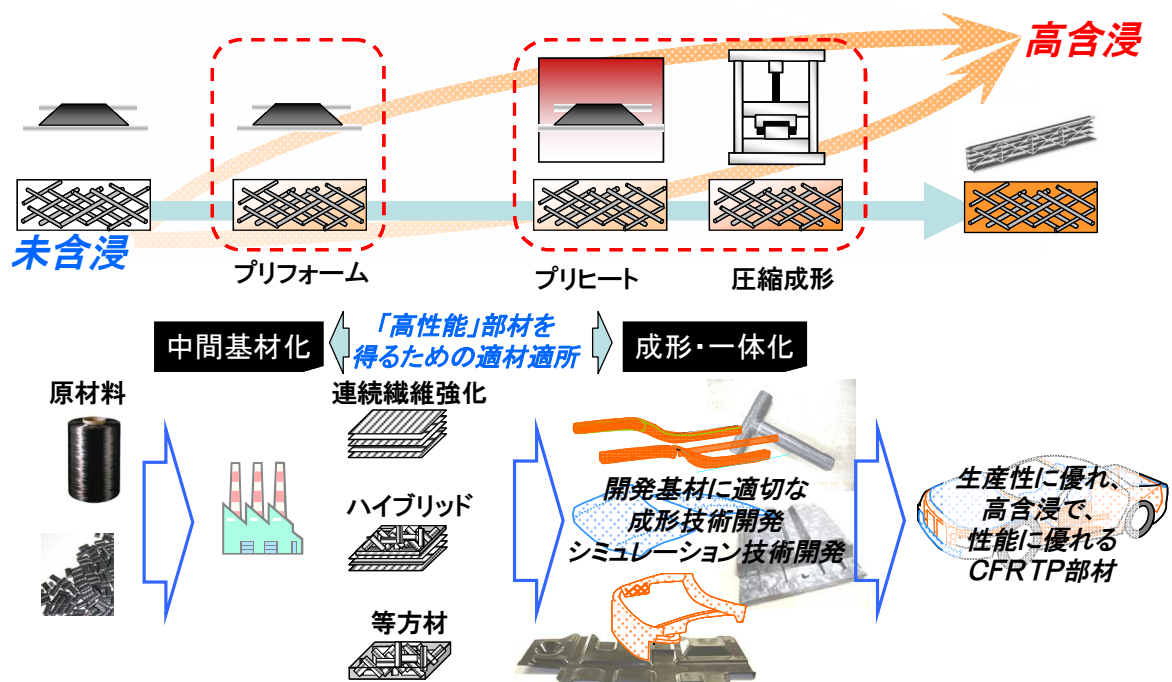
図Ⅲ-2.6.2-9 構造設計技術開発

(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発

最適設計された車体が予定通りの性能を発現するためには再現性の良い成形加工技術の確立が必要であり、部材性能、部材形状、複合成形に適した多種多様な新規中間基材、さらに、これらを組み合わせてハイブリッド化した基材に対応した成形加工プロセスの開発・最適化が不可欠となる。しかしながら、本事業で開発する多種多様な中間基材は、それぞれが従来に無い強化メカニズムや熱可塑性樹脂特有の性質を持つため、成形加工方法を体系的に見直す必要がある。そこでシミュレーション技術の採用が不可欠となるが、従来のシミュレーション技術では、これらの成形加工後の繊維配向等を精度良く予測することができない。本研究開発項目では、図III-2.6.2-10 に示すように、開発された基材を用いて、構造設計が要求する軽量形状を実現するための成形加工技術を開発するとともに、成形加工・物性予測シミュレーション技術を開発する。具体的には、開発された基材の加熱・加圧・二次加工方法などの成形基盤技術を整えるとともに、複数の材料のハイブリッド成形に関する基盤技術を確立する。

また、複雑な部材の高精度かつ再現性の良い成形のための流動解析シミュレーション手法を開発して、成形条件の見極めだけでなく金型設計に適用できる技術を確立する。

さらに、研究開発項目(a)(b)(c)での検討を踏まえて、素材から構造体までのトータルの成形加工サイクルを最短とするプロセスパターンを体系化すると同時に、今後の設計変更にも迅速に対応できる技術基盤を構築する。



図III-2.6.2-10 高生産性・高性能部材を得るための熱可塑性 CFRP の成形加工技術開発

(4)実施体制

PL：高橋淳教授を集中研究拠点として、22 機関が以下のように WG を組織して実施している。

【分担研：13社】		接合	5 基材	評価	設計	成形
東レ株式会社	(伊予分室)	○	幹事	○	○	
三菱レイヨン株式会社	(豊橋分室)	○	幹事	○		○
東洋紡株式会社	(大津分室)		幹事	○	○	
株式会社タカギセイコー	(高岡分室)		○			○
スズキ株式会社	(浜松分室)	○		○	○	○
株式会社本田技術研究所	(芳賀分室)			○		
三菱自動車工業株式会社	(岡崎分室)				○	
日産自動車株式会社	(追浜分室)	○			○	○
株式会社島津製作所	(京都分室)			○		
福井ファイバーテック株式会社	(豊橋中原分室)		○			○
株式会社カドコーポレーション	(たつの分室)	○				○
住友重機械工業株式会社	(横須賀分室)					○
株式会社 I H I	(瑞穂分室)					○

(5)運営管理

共同研究契約における各種規定に基づき、22 機関（82 名）が共同研究を行っている。

研究開発は接合・評価・設計・成形と 5 つの基材（マット材、連続材、テープ材、薄層テープ材、リサイクル材）の計 9 個の WG で機動的に行い、以下の通り全体会合を年 4 回、WG 別会合を年 7 回（+臨時会合）行っている。

- 4 月：WG 別会合
- 5 月：全体会合（東大集中研のみ）
- 6 月：WG 別会合
- 7 月：WG 別会合
- 8 月：WG 別会合
- 9 月：WG 別会合
- 10 月：全体会合（名大集中研との合同会合）
- 11 月：WG 別会合
- 12 月：全体会合（東大集中研のみ）
- 1 月：WG 別会合
- 2 月：全体会合（名大集中研との合同会合）

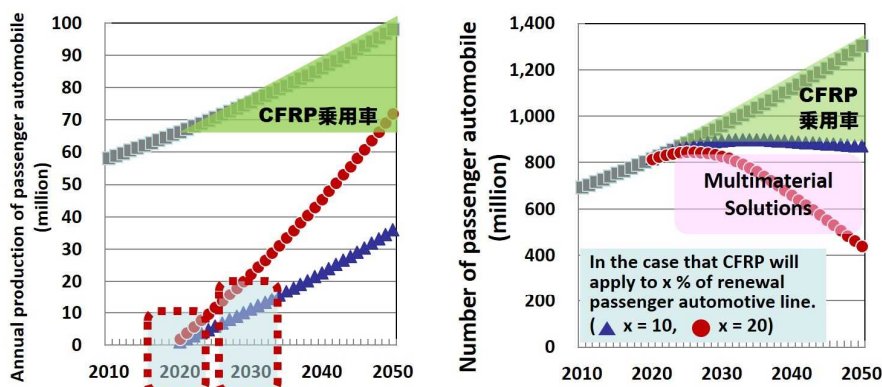
(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトの目標は車体の 50%軽量化であり、これにより現行車両の走行時の石油消費量（1000L/年）と CO₂ 排出量（2.32t-CO₂/年）がそれぞれ 37.5%（一台あたり石油 375L/年、0.87t-CO₂/年）削減される。なお、図Ⅲ-2.6.1-2 に示されるように、部材製造までの環境負荷は現行車両と同じになるので、LCA で考えても結果は同じである。

そして、図Ⅲ-2.6.2-11 に示されるように、本プロジェクトの開発技術は 2030 年に

CFRP 量産乗用車 1,000 万台に適用されることを目標としているので、2030 年に生産される技術適用車による石油削減量は 375 万 kL/年、CO₂ 削減量は 870 万 t-CO₂/年（2020 年から生産されるすべての技術適用車による効果は石油削減量 1,875 万 kL/年、CO₂ 削減量は 4,350 万 t-CO₂/年）となる。

また、本プロジェクトで開発される技術による車両一台あたりの熱可塑性 CFRP 部材は 240kg（24 万円）であることから、これが 1,000 万台に適用される 2030 年の市場創出効果は 2.4 兆円（2020 年からの累積では 12 兆円）となる。



2020年から本格適用
2030年に
CFRP車1000万台生産
CF需要量100万トン



開発目標とスケジュール

- CF : コスト、生産量
- CFRP : 製造コスト、製造速度、3R
- 周辺 : CAE、試験法標準化・・・

図Ⅲ-2.6.2-11 革新炭素繊維プロジェクトと共有している開発目標

2.6.2.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.2-2 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熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	<p>現行のスチール製量産車と同等の接合部強度の実現</p> <p>接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで±10%以下とする接合技術の確立</p> <p>現行のスチール製量産車と同等のライン速度 1 台/分を実現する指針の策定と供試体による検証</p>	<p>各種機械締結法・接着での接合方式、接合形状における表面処理・耐久性を含めた強度データベースの構築を行った</p> <p>上記の実験結果と有限要素法（FEM）解析から、供試体レベルで予測結果と実験結果の誤差が±10%以内の精度となる接合部強度予測接合技術の確立を見出した</p> <p>実装／高信頼性な高速プロセスに焦点を絞り、検討した</p>	△	<p>実験データを充実させて、成果の汎用化を図っていくこと</p> <p>湿度環境下での試験、動的粘弾性特性等の温度・周波数（時間）の関係を検討すること</p> <p>供試体レベルで接合部の幾何学形状をより正確に加味すること</p> <p>最適条件の検討を行うこと</p>

<p>②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発</p>	<p>当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立</p> <p>重要特性の変動係数 5%以内</p>	<p>①および②(b)(c)(d)からの要請に基づく中間基材を提供し、各々目標達成した</p> <p>重要特性の変動係数 5%以内を達成した</p> <p>特に CMT では長期耐久性（疲労）シミュレーション技術構築するとともに、クラッシュカンを成形し、GMT 比エネルギー吸収量 60%向上を達成した</p>	<p>○</p>	
<p>②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発</p>	<p>開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究</p> <p>動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（ひずみ速度依存係数、温度依存係数）の測定誤差（変動係数）が 10%以下となる試験法の確立</p>	<p>開発材料の曲げ損傷メカニズムや温度・速度・時間依存といった動的特性を実験的に解明した</p> <p>また、それを CAE 用の材料モデルとして定式化し、数値シミュレーションでの再現性を確認した</p> <p>開発した試験法によって動的特性（強度・弾性率の温度速度依存関係）の理論値に遜色ない実験結果を得た</p>	<p>○</p>	
<p>②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発</p>	<p>スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを60%軽量化する構造の提案</p> <p>開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチマテリアルボディで 30%以上の軽量化を実現する構造の提案</p>	<p>②(a)、並びに、②(b)の検討を元に、汎用 CAE ソフトウェアを用いながら、これまで実現されなかった構造 CAE 解析技術を開発し、60%軽量化を実現するための設計技術を確認した</p> <p>中空部材およびパネル部材の使用割合を最適にすることで、剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、60%軽量化可能な構造を提案した</p> <p>また、現時点で想定される長期耐久性リスクを考慮した、30%軽量化達成可能な構造を提案した</p>	<p>○</p>	
<p>②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発</p>	<p>②(c)で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基にした、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間 1 分以内での成形加工技術の開発</p>	<p>開発した中間基材で 800 トンプレス機及びロボット周辺機器を使用し、10MPa 以下成形技術開発に取り組んでいる</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-2.6.2-3 最終目標の達成可能性

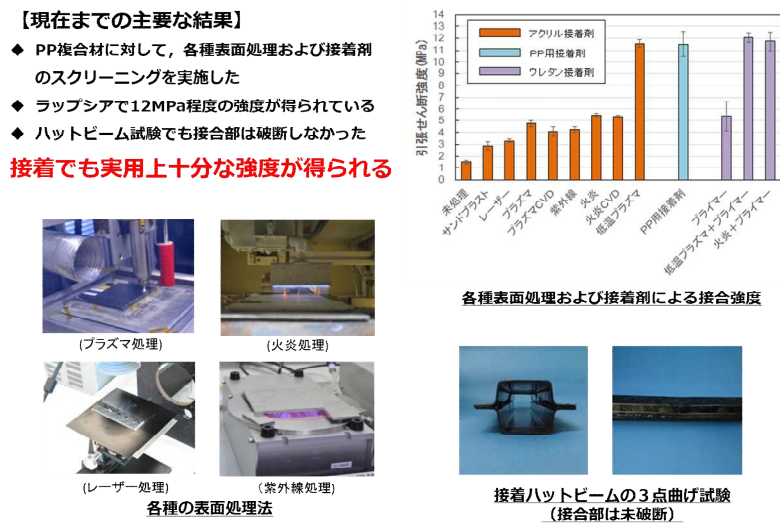
研究開発項目	現状	最終目標 (2017年度末)	達成度※
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	<p>設備導入計画の変更により、全体プロセス最適化のための生産・組立技術の開発は困難</p> <p>同理由によりライン速度 1 台/分を実現する接合工程の実証は困難</p> <p>実装／高信頼性な高速プロセスの最適化検討および誤差±10%で接合部の長期耐久性（長期曝露後の残存強度）を予測可能な確率論的評価法の確立に焦点を絞る</p>	<p>現行のスチール製量産車と同等の接合部強度の実現</p> <p>接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで±10%以下とする接合技術の確立</p> <p>現行のスチール製量産車と同等のライン速度 1 台/分を実現する指針の策定と供試体による検証</p>	△
②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発	<p>多様な中間基材の要素技術は構築完了。CAE 向けデータの取得も進んでいる</p> <p>SHC 材を用いた設計・実証試験を繰り返すことにより、目標達成に向けた技術課題を明確にして材料設計に必要な知見を得た。これらの結果を活用して材料開発を継続していく</p>	<p>当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立</p> <p>重要特性の変動係数 5%以内</p>	○
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発	<p>開発した動的試験法や面外せん断試験法、また、検証中の特性発現メカニズムやそれを基にした CAE 用材料モデルが、強化形態の異なる 3 種類以上の開発材料に一律適用可能であるかを探求中</p> <p>SHC 材を用いた設計・実証試験を繰り返すことにより、目標達成に向けた技術課題を明確にすると共に、構造 CAE 解析精度の向上を検討している</p>	<p>開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究</p> <p>動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（ひずみ速度依存係数、温度依存係数）の測定誤差（変動係数）が 10%以下となる試験法の確立</p>	○
②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発	<p>開発材料の性能の統計的性質は既に明らかにし、成形時の基材流動シミュレーション手法を開発するなど、再現性と予測可能性の向上に注力している</p>	<p>スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを60%軽量化する構造の提案</p> <p>開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチマテリアルボディで30%以上の軽量化を実現する構造の提案</p>	○
②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発	<p>2015 年度加速予算にて導入した 800 トンプレス機及びロボット周辺機器の構築が完了し、10MPa 以下での成形加工技術開発を行う</p>	<p>②(c)で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基にした、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間 1 分以内での成形加工技術の開発</p>	○

(3)研究開発の成果と意義

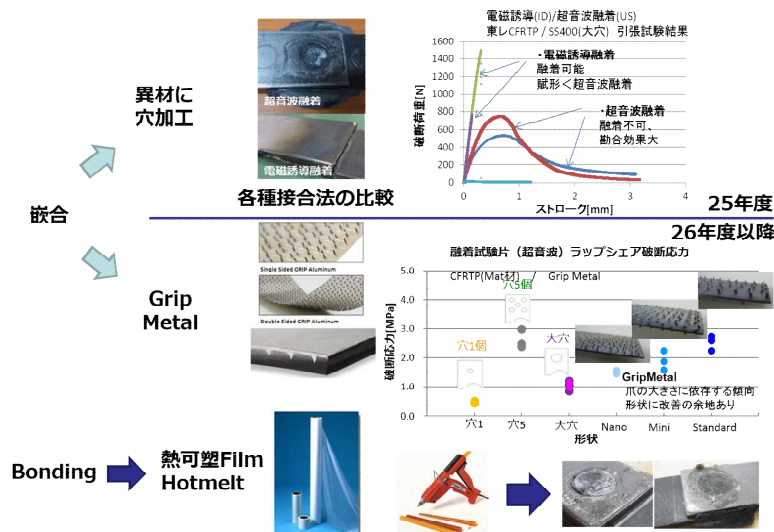
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

熱可塑性 CFRP 同士の融着技術の検討は前プロジェクトで完了しているため、本テーマでは、熱可塑性 CFRP 同士、さらには熱可塑性 CFRP と金属の接着剤での接合を検討している。図Ⅲ-2.6.2-12 に示されるように、これまでに、様々な表面処理方法の比較検討を完了し、接着剤の絞り込みと、モデル部材での有効性の検証ができています。

一方で、特に、接着に広い面積が使えないような所や、高い強度・耐久性が求められる箇所での強固な接合を想定した機械的接合の検討も行っている。図Ⅲ-2.6.2-13 に示されるように、こちらも様々な機械接合法の比較検討が完了し、有望とみられるグリップメタルや熱可塑性フィルム接着剤との併用についての検討を行っている。



図Ⅲ-2.6.2-12 接合技術（接着接合）



図Ⅲ-2.6.2-13 接合技術（機械的接合）

②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発

このテーマでは、各素材の最高性能や特性発現メカニズムの検討はほぼ完了し、他のテーマからの要望、例えば評価しやすい材料、成形しやすい材料、等への対応、さらには異材とのハイブリッド化による問題解決などを進めている。

マット材 (CMT: Carbon fiber Mat reinforced Thermoplastics)

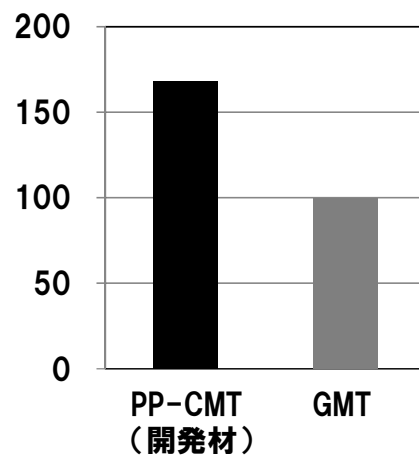
CMT は、繊維長が制御された炭素繊維を、単繊維レベルで等方・均質に分散させたマットに、熱可塑性樹脂を含浸させた中間基材である。連続繊維強化に匹敵する強度利用率を特徴とし、この性質は強度理論でも証明されている。本研究期間では、① CMT のエネルギー吸収能力の実証、②長期耐久性シミュレーション、③マルチマテリアルへの展開に向けた予備検討を進めた。

熱可塑性樹脂をマトリックスとしている CMT は、優れたエネルギー吸収能力が期待できる。自動車の軽衝突時の乗員保護を目的としたクラッシュボックスを想定し、デモンストレーターを成形して衝撃圧縮（軸圧縮）時のエネルギー吸収を評価した。まず、CMT をスタンピング成形してハット形状のパーツを成形し、これを2枚貼り合わせて中空形状のクラッシュボックスを成形した。接合部はフランジ破壊が支配的となることを回避するため、熱板溶着とファスニングを併用した。得られた成形品の衝撃圧縮試験では、狙いどおりの逐次圧壊が見られ、重量あたりのエネルギー吸収量は、同じ形状で同様に逐次圧壊した GMT と比較し、60%向上した。



図Ⅲ-2.6.2-14 CMT 製クラッシュボックス

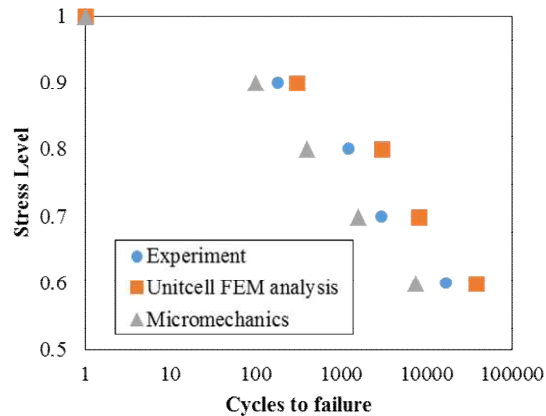
重量あたりの
エネルギー吸収量



図Ⅲ-2.6.2-15 重量あたりのエネルギー吸収
(GMT を 100 とした場合の相対値)

CMT の強度発現機構および破壊メカニズムは再委託先（東北大学）で研究を進めており、静的機械強度理論は構築済みである。本研究期間では、長期耐久性（疲労）予測を進めた。破壊メカニズムを追跡できる FEM に加え、計算コストに優れるマイクロメカニクスのアプローチでも、実験結果をよく再現できる手法を構築した。一般

に不連続繊維強化材料は、繊維、樹脂および界面破壊が混合して破壊様相が複雑になり、解析が難しいとされる。材料研究（等方・均質性確保）と強度理論研究を両輪とする手法で、高い精度と信頼性をもった解析手法の確立に成功した。



図III-2.6.2-16 CMTの引張疲労試験

また、マルチマテリアルへの展開を考慮し、アルミとCMTの一体成形を検討した。アルミとCFRPは成形法が全く異なり、これらの複合化は、個別成形後の接着が主流である。これに対し、熱可塑性樹脂の伸張とアルミの変形を同期させ、凹凸形状を持つアルミ/CFRTPを一体成形する試みを、再委託先（山形大学）で検討した。

基礎検討段階ではあるが、材料および加工条件を適切に選択することで、凹凸形状を有するアルミ/CFRTPサンドイッチや、厚肉の成形品を得ることに成功した。材料間は成形の過程で強固に接合しており、成形と接合を同時に行える手法として注目している。



図III-2.6.2-17 アルミ/CFRTP一体成形品

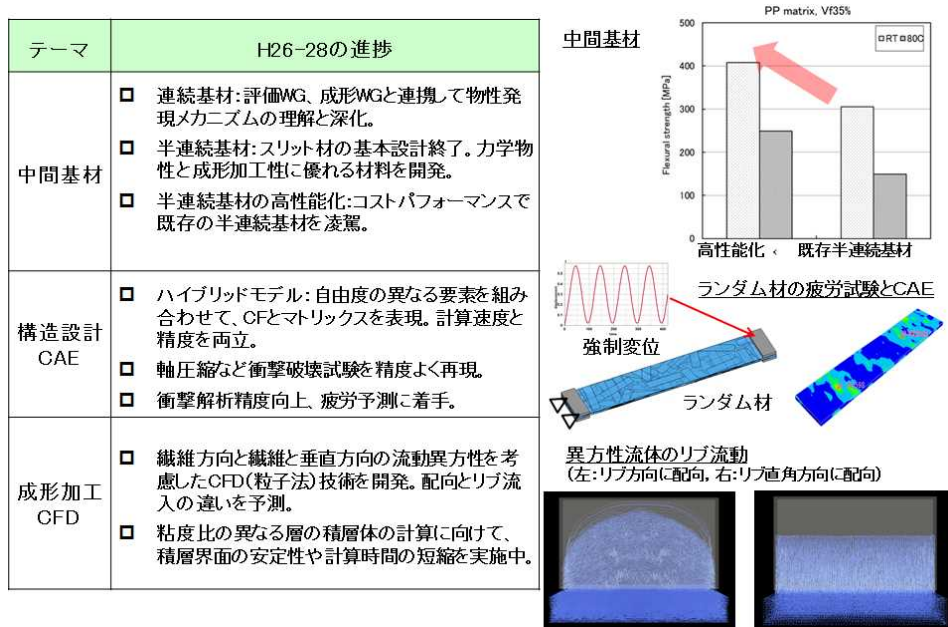
材料の応用展開として、CMTをスキン層とし、新規なCFRTPフォーム材をコアに用いた、曲げ剛性に優れたサンドイッチ構造体の成形技術を構築した。コアとスキンをプレスで一体成形し、凹凸面を持ったサンドイッチ構造体を得ることに成功した。



図III-2.6.2-18 CMTを用いたサンドイッチ成形体

連続・半連続中間基材

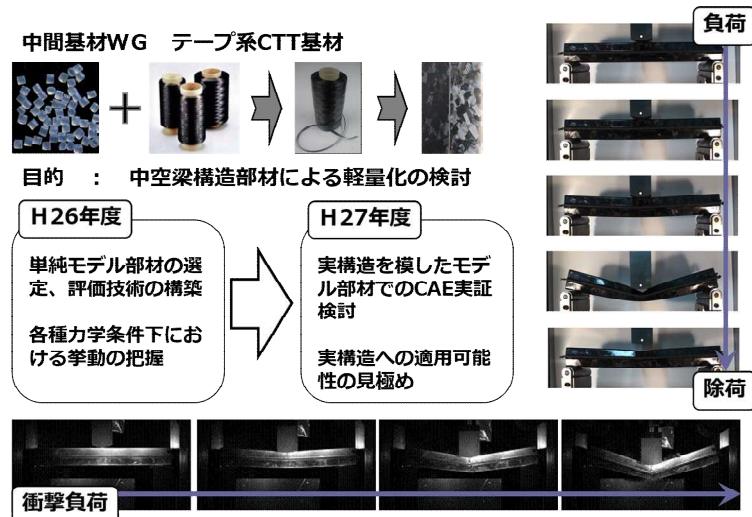
図III-2.6.2-19 は航空機や F1 カーで使われている連続状態での炭素繊維シートに切り込みを入れてランダム化し、乗用車の複雑形状に対応させようという基材である。この基材でも基本検討は完了し、CAE 成立性や流動シミュレーションによるさらなる成形性の向上を目指した検討を進めている。



図III-2.6.2-19 中間基材 (連続・半連続系)

テープ材 (CTT: Carbon fiber Tape reinforced Thermoplastics)

「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」で開発した CTT 材を用いて、②(b)、②(c)の課題解決に向けた検討を行うとともに、大型モデル部材や実物大モデル部材を成形・評価して、材料開発にフィードバックを行い、中間目標である「60%軽量化を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立」の見込みを得た。さらに、岐阜大学と協業で、シームレス中空部材の成形技術開発の検討を行っている。



図Ⅲ-2.6.2-20 中間基材（テープ系）

テープ系基材のもう一つの検討として、その低コスト化も進めている。図Ⅲ-2.6.2-21は炭素繊維シートを薄くすることで樹脂含浸の必要圧力を下げて生産性を10倍にしたものである。層が薄くなることにより、部材の性能がさらに上がり、ばらつきも小さくなるなどのメリットが確認されている。また、さらにCAEの精度をあげたり、成形時のプレス圧を下げて設備投資コスト削減を実現するための検討も進められている。学術的にも、この不連続繊維の力学特性モデリング関連で複数の学会賞を受けている。

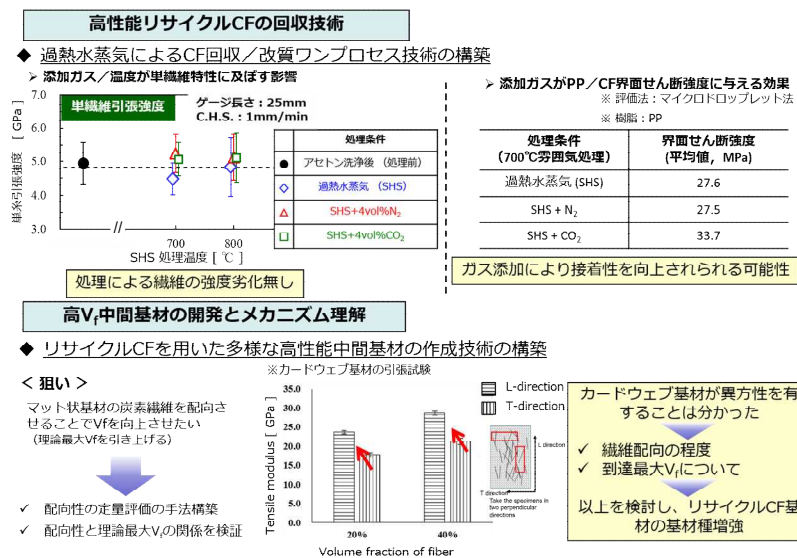


図Ⅲ-2.6.2-21 中間基材（薄層テープ系）

リサイクル材

以上、マット、連続、テープとそのハイブリッド基材を紹介したが、リサイクル基

材の検討も行っている。自動車の量産を考えた場合、鉄の場合もそうだが、ロール状の素材をカットしてプレス・接合する際に必ず端材が出る。炭素繊維は高価な材料なので、その端材を使ってバージン材と同等の自動車部材が製造できれば、コスト面での大きなメリットになるし、もちろんこの技術は市場ゴミのリサイクルにも活用できる。そこで、図Ⅲ-2.6.2-22 に示されるように、樹脂を除去しながら同時に炭素繊維表面の官能基を回復する手法の検討を進める一方で、リサイクル繊維を用いてバージン材同等の自動車部材を作るための手法を絞り込んだ。既にマット系ではバージン材同等の性能の部品がリサイクル材から製造できることが明らかになっており、引き続きテープ系での実現を目指した検討を進めている。



図Ⅲ-2.6.2-22 中間基材 (リサイクル材系)

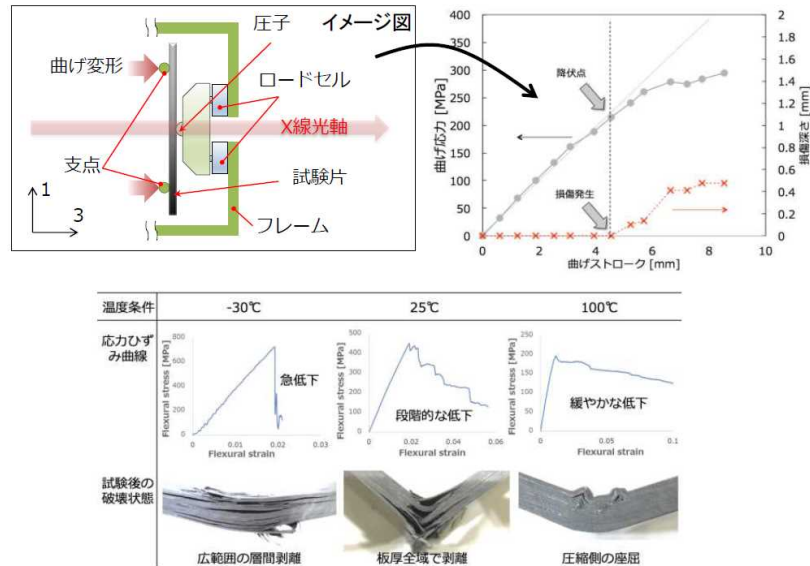
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発

性能評価技術開発のテーマでは、新たに開発した試験法と既存の試験法を適宜組み合わせ、強化形態の異なる数種類の開発材料の材料特性値を高精度に取得するとともに、その特性発現メカニズムを解明し、それによって理論モデルの構築・定式化を達成してきた。また、そのモデルを数値解析シミュレーションに適用して、部材性能や材料特性の予測技術の開発に取り組み、シミュレーション上での再現性を検証中である。

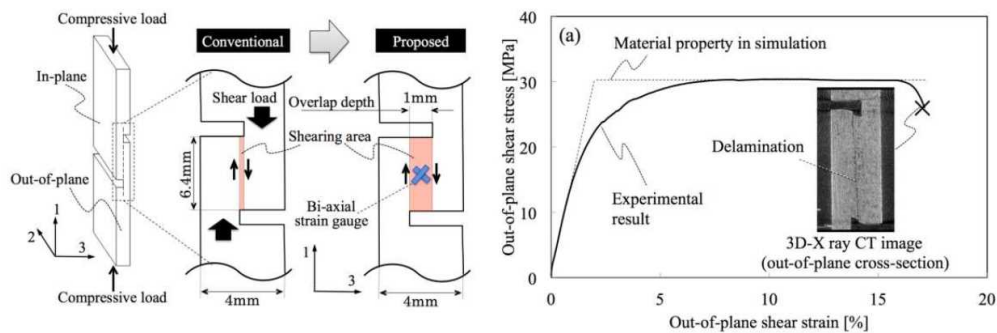
図Ⅲ-2.6.2-23 は、曲げ負荷中に試験片の内部を X 線 CT により可視化できる新しい分析システムであり、曲げ非線形挙動と損傷深さの関係性を明らかにすることができた。また、温度・速度の違いによって曲げ損傷の様子が異なることが明確化され、材料モデルの定式化に貢献している。

図Ⅲ-2.6.2-24 は、面外せん断の応力ひずみ特性を検出する新たな試験法であり、従来の試験法では計測が難しかった非線形特性を取得するのに成功した。特に、開発材の面外方向の破断ひずみは CAE モデル構築に重要な材料パラメータであり、CAE 予測精度の向上に役立った。引き続き計測精度を様々な観点から検証していく。

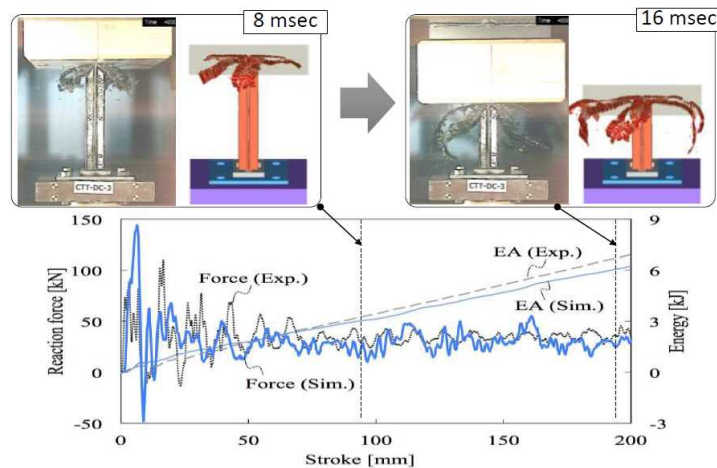
図Ⅲ-2.6.2-25 は、新たに取得した面外せん断非線形特性も活用し、中空クラッシュボックスの落錘軸圧潰挙動の数値解析モデルによる再現性を実験結果と比較したものである。プログレッシブ破壊進展の様子を再現できただけでなく、衝撃エネルギー吸収性能も実験とほぼ一致させることができた。ここで培った解析モデルの構築ノウハウは、具体的な衝撃部材の設計・実用化に貢献することが期待できる。



図Ⅲ-2.6.2-23 性能評価技術(開発中の曲げ試験法と損傷メカニズム)



図Ⅲ-2.6.2-24 性能評価技術(開発中の面外せん断試験法)



図Ⅲ-2.6.2-25 性能評価技術(軸圧潰挙動の数値解析と実験の比較)

②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発

構造設計のテーマでは、熱可塑性 CFRP に適した構造形状のあり方を検討している。複合材料は面内方向と面外方向の特性差が 1 桁から 2 桁あることで、航空機や圧力容器など主に面内方向の特性だけを使う用途では圧倒的な軽量性を発揮する。しかし自動車のようにコーナー部や突起がたくさんあり、曲げやねじり荷重もふんだんに受ける複雑構造では、この極端な異方性を正しく考慮した設計を行う必要がある。

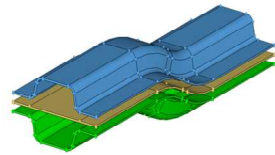
そこで、図Ⅲ-2.6.2-26 に示されるように、金属材料用に開発されている構造最適化ソフトを異方性が使えるように改造したが、上述のように複合材料には性能の大きく異なる基材があり、また実際にハイサイクル成形できる形で無ければならないので、それらも含めた最適化を考える必要がある。現在の所、最も軽量化が困難とされている中空ビーム部材において、構造最適化により 50%以上の軽量化デザインができるようになっている。

また、強度設計においても、極端な強度の異方性を考慮する必要があり、板厚方向の破壊を想定していないシェル要素が使えないという問題がある。そこで、図Ⅲ-2.6.2-27 に示されるように、ソリッド要素とシェル要素のハイブリッド要素を開発し、層間剥離を伴う破壊プロセスも精度良く、かつ高速にシミュレーションできるようになった。また、そもそもこのような層間剥離現象が起こらなければ、素材の持つ高い性能を使い切ることができ、かつ CAE の難易度も大幅に下げることが出来ることから、層間剥離が起こらない部材形状の提案も行っている。

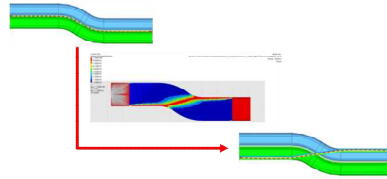
以上を踏まえ、②(a)で示したように、各種大型モデル部材や実物大モデル部材を試作し、構造 CAE 解析との比較を行った結果、汎用の解析ソフトを用いているが、②(b)で開発した技術を用いることによって、部材剛性が設計できることが示された。

複合材への構想最適化手法の活用方法を検討する。

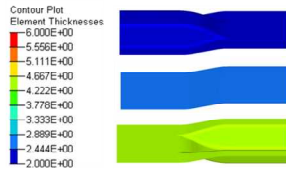
※複合材の特徴：「繊維の向きをコントロールすることで特性が変わる」、
「接合部は一般部に比べ、性能が低い」



検討題材（軸圧縮を受ける場合）



トポロジー最適化による接合面の変更



寸法最適化解析による板厚の最適化

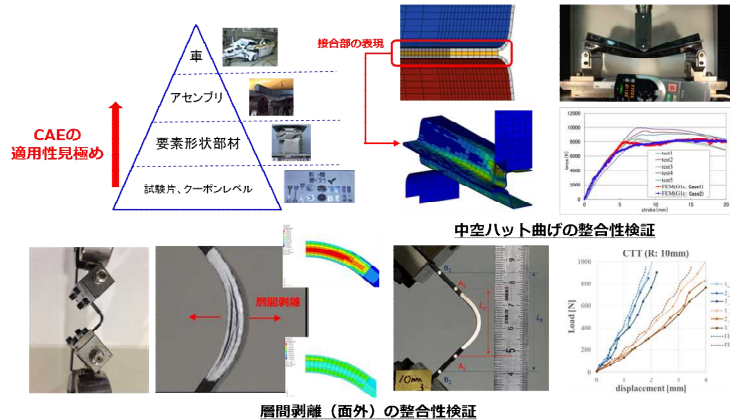


検討題材では、
・ CTT単独で47.5%軽量化を達成見込み。
・ CTT+UDで50.0%軽量化を達成見込み。

◆ 剛性設計する場合、複合材に適する構造最適化手法が見出せた。

図Ⅲ-2.6.2-26 構造設計技術(1)

実車のCAEを実施するには、材料特性を正しく表現することに加えて、実部品を表現するためのCAE解析手法が必要である。



◆ 中空ハット部材の接着部の材料特性を表現することで、曲げを精度良く再現できた。
◆ 層間剥離現象を精度良く再現できた。

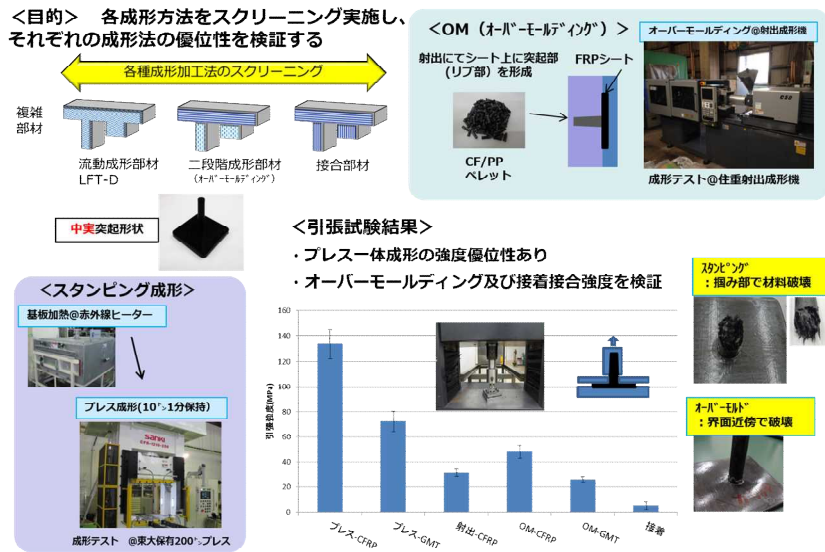
図Ⅲ-2.6.2-27 構造設計技術(2)

②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発

最後に、成形加工のテーマでは、図Ⅲ-2.6.2-28 に示されるように、これまでに世界中で提案されている各種成形手法を比較検討することからはじめて、量産車の低コスト成形に適した成形方法を絞り込んだ。特に、複雑な形状を1分以内のサイクルで成形する方法としては、本プロジェクトで開発しているような不連続繊維を用いた基材が不可欠である。現在は、さらに低い圧力での成形が可能となる方法を検討しており、これにより生産ラインでのプレス機の容量が1000t以下と小さくなって、設備投資コスト削減から、部材単価がさらに下がることにつながると期待できる。

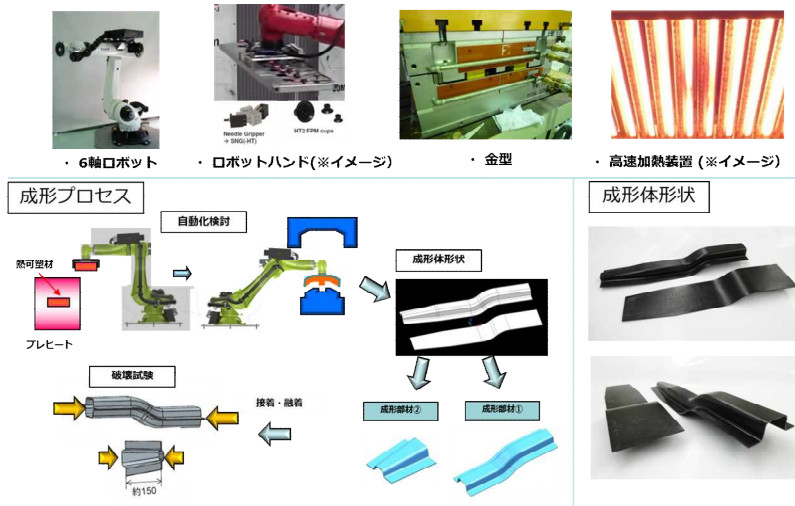
また、基礎検討を行うテーマでは、個々の基材用の非常に管理された良い条件のもとで、素材の持つ性能を十分に発揮する検討を行っているが、実際の成形では様々な

材料が同じ装置で成形加工されることから、マルチマテリアル化に向けてはそのような現実的な状況下での科学的な解決方法も研究対象となる。そこで、図Ⅲ-2.6.2-29に示されるように、種々の基材、あるいはそれらのハイブリッド材を同じヒーターで加熱する場合や、さらに金属材料との同時成形や後加工としての接合を行う場合の温度制御、成形・接合時の圧力制御についての検討を行っている。この検討は 2014 年度末に装置の一部の導入が完了し、また最適形状や接合検討のための装置も 2015 年度の NEDO 加速予算で導入した。



図Ⅲ-2.6.2-28 成形加工技術(1)

- ◆ 成形プロセス検討に必要な装置の一部が導入完了し、検討を開始。
- ◆ 構造設計WGの提案形状、接合WGの提案接合をNEDO加速予算で本年度導入予定。



図Ⅲ-2.6.2-29 成形加工技術(2)

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.6.2-4 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	7	0	47	5	0	0	0	1	0
2014FY	8	0	27	8	0	0	3	1	1
2015FY	2	2	37	4	1	0	2	0	0
2016FY	16	2	32	1	1	0	1	0	1
2017FY	10	1	25	0	0	0	0	0	0
合計	43	5	168	18	2	0	6	2	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-2.6.2-5 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	0	0	0
2015FY	1	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.6.3 [テーマ番号 27B] リサイクル炭素繊維の評価技術開発

2.6.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量で丈夫な CFRP は、輸送機器の軽量化に伴う燃費向上により、温暖化ガス排出量削減を実現させるための有望な素材である。一方、炭素繊維は製造時に多くのエネルギーを投入しているため、使用済みの製品を繰り返し使用することで、エネルギー原単位の低減を図ることが求められている。炭素繊維のリサイクルを促進させるためには、多様なリサイクル炭素繊維を適切に評価する手法の開発が不可欠であった。本テーマでは、CFRP から回収されたリサイクル炭素繊維の平均的機械特性や各種不純物の評価分析手法を開発し、リサイクル炭素繊維の品質評価法を確立させることを目的とする。

(2)位置付け、目標値

リサイクル炭素繊維の性状は、CFRP の使用環境、回収状態、回収プロセスの条件等に応じて変化すると考えられる。リサイクル炭素繊維を再び強化繊維として活用するためには、強度劣化や不純物の混入が少ないことを、簡便に実施できる手法で評価することが求められるが、既存の炭素繊維の評価手法はリサイクル炭素繊維の評価には適用できない。そこで、以下の目標を設定し、開発に取り組む。

表Ⅲ-2.6.3-1 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
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発	2019年度から開始	リサイクル炭素繊維の平均的な機械特性を効率的に評価するための評価試料の作製手法を確立し、評価解析手法を開発する。	多様なリサイクル炭素繊維に対応する機械特性評価解析手法を開発し、種々の実サンプルへの適用可能性を検証する。	リサイクル炭素繊維を再び強化繊維として活用するためには、機械特性の評価が必要であるため
リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発	2019年度から開始	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を同定・定量するための評価手法および不純物元素分析の原理手法を確立する。	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を定量し、後段のリサイクルプロセスで炭素繊維として活用できるかを評価する手法を開発する。回収された炭素繊維中に含まれる不純物元素の分析法を確立する。	リサイクル炭素繊維を再び強化繊維として活用可能かどうかの判断には不純物の混入状態の把握がひつよであるため

(3)全体計画

リサイクル炭素繊維の機械特性の評価に関しては、配向を揃えた繊維束を用いた引張試験法に基づく評価法の開発を行う。リサイクル炭素繊維からの適切な配向繊維束試験片の作製法、引張試験実施方法、評価解析手法を開発し、リサイクル炭素繊維の平均的機械特性を評価する手法を確立する。また、配向繊維束にマトリックスとなる樹脂を含浸させた複合材料を用いて、界面特性を評価する手法を開発する。

不純物分析法としては、炭素残渣の簡易・高精度分析法として、炭素繊維と炭素残渣の反応性の差異を利用した定量手法の開発を進める。また、環境規制への対応および素材評価の両面から求められる各種不純物元素の混入量の分析法として、ICP-MS法を検出手段とし、リサイクル炭素繊維に適した前処理法を開発することで、幅広い不純物元素を簡便かつ一斉定量する分析法を開発する。

(4)実施体制

本テーマは名古屋守山分室（産業技術総合研究所）が再委託先1大学と実施する。

(5)運営管理

産総研中部センター（機械特性評価）とつくばセンター（不純物分析）にて研究を進めており、月1回程度の頻度で双方を訪問あるいはウェブ会議で、各担当課題の進捗状況および課題等の共有を図っている。2020年度からは京都大学への再委託も開始し、同程度の頻度での進捗状況の共有を図る。

(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）

CFRPは軽量構造材料として年率12%以上の成長を期待されており、2030年時点で、リサイクル材の活用市場としても1,000億円規模となることが予想されている。本開発によりリサイクル炭素繊維の評価技術を確立し、標準化等を通じて評価基盤を整備することにより、リサイクル炭素繊維市場の拡大に貢献する。

2.6.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.3-2 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
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発	リサイクル炭素繊維の平均的な機械特性を効率的に評価するための評価試料の作製手法を確立し、評価解析手法を開発する。	配向繊維束を用いた引張試験の開発において、試験片作製、試験方法、解析技術の開発により、機械特性に関するパラメータを効率的に抽出する手法の基盤を確立した。配向繊維束と樹脂を複合化した複合材料を用いた界面強度の評価手法の開発を進めている。	○	
リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を同定・定量するための評価手法および不純物元素分析の原理手法を確立する。	CFRP から回収した CF に付着している炭素残渣量を定量するため、CF および炭素残渣の酸化反応性を検討し、CO や CO ₂ の発生量を GC で定量分析するための技術を開発している。不純物元素の分析について、不揮発性元素と揮発性元素それぞれに適した前処理法の開発を進め、種々の不純物元素が検出可能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-2.6.3-3 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
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発	目標に対して順調に開発を進めている。	多様なリサイクル炭素繊維に対応する機械特性評価解析手法を開発し、種々の実サンプルへの適用可能性を検証する。	確実
リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発	目標に対して順調に開発を進めている。	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣量を定量し、後段の炭素繊維リサイクルプロセスで利用できるかを評価する手法を開発する。回収された炭素繊維中に含まれる不純物元素の分析法を確立する。	確実

(3)研究開発の成果と意義

(3)-1. 配向炭素繊維束を用いた平均的機械特性評価技術の開発

リサイクルされる炭素繊維は、使用時および回収過程で様々な損傷を受ける可能性があり、新品と比較して機械特性、特に強度の低下が懸念される。また、マトリックスポリマーの除去の際に、炭素繊維の表面状態も新品の状態からは変化すると考えられることから、新たなマトリックスとの密着性についても、新品とは異なると想定される。リサイクル炭素繊維を再度強化繊維としてCFRP部材に活用するためには、繊維自体の強度に加え、新たなマトリックスとの間の界面特性（密着強度）を評価する必要がある。リサイクル炭素繊維は、CFRP部材製造、解体、回収の各段階で破断され、一般に短くなっている。従来の炭素繊維の機械特性評価法は、新品の連続繊維を前提として定められているため、短く破断しているリサイクル炭素繊維には、そのままでは適用が困難な場合が多い。本研究では、そのようなリサイクル炭素繊維の性状を想定して、機械特性の評価を簡便に行うことのできる手法の開発を行う。2019年度は、まず、繊維強度の評価手法の開発について取り組んだ。

数 10mm 以上の繊維長がある場合には、既存の評価法の中で、単繊維引張試験（JIS R 7606）の適用が検討される。しかし、新品よりもばらつきが大きくなることが想定されるリサイクル炭素繊維の評価においては、信頼性のあるデータを得るためには試験数を増さなければならず、非常に手間が掛かり、現実的ではない。そこで、より効率的に機械特性を評価する手法として、配向の揃った炭素繊維の束の引張試験について検討を行った。繊維束を引張ることは一度に多数の繊維の引張試験を行うことに相当するため、効率的な力学物性評価が可能になると期待される。一般的な繊維束を用いた引張試験に対しては欧州規格 EN1007-5 が定められている。しかし、試長 100mm の繊維束による試験を対象としており、必ずしも十分な長さを確保できないリサイクル炭素繊維には適用できないという課題があった。本研究開発では短い試長でも試験を行うために必要な試験システムと解析方法について検討した。

繊維束の引張試験では、すべての繊維をたるみなく引張る必要がある。また、繊維束を試験機に取り付ける際に繊維破断が起きないようにする必要がある。そこで、配向繊維束の両端にタブをエポキシ樹脂で固定する形状の試験片を開発した。タブとタブの間の距離が試長である。繊維の配向は両端を引張ることによって確保される。エポキシ樹脂を繊維間に含浸させて固定することで、すべての繊維に荷重が伝達できるようになっている。またタブを取り付けることで繊維をつぶさずに試験片をグリップすることが可能である。

精度よく繊維束の引張試験を行うためには、タブ等を含めた試験片の剛性だけでなく、試験機側の剛性も重要である。一般に試験機の本体の剛性は非常に高いが、使用する治具やジョイントの剛性はそれに比較すると低い場合が多い。この剛性の低さはコンプライアンス補正で試験片の変形量を計算する際に問題になる。また繊維束に均等に荷重を加えるためには、試験機と試験片のアライメント調整も重要である。本研究では、各部分の剛性やアライメントの影響を評価し、最適化を図った。治具部の変形を抑制する対策により、1500N 程度で破壊する炭素繊維束の試長 10 mm の引張試験において、破断時の装置の表示変位を 0.9 mm 程度から 0.7 mm 以下と、0.2mm 以上改善することができた。また、治具等による非線形な挙動を抑え、正確な荷重変位線図を計測可能とした。

ワイブル分布に従う応力 σ -ひずみ ε 線図の理論式を用いて、得られた応力-ひずみ線図をフィッティングし、引張弾性率、ワイブルパラメータを算出した。この方法の利点は、ワイブルパラメータを得るために必要だった累積分布関数作成の工程を省略できることに加え、応力-ひずみ線図のすべての情報からワイブルパラメータを計算するため、より精度の良いパラメータ抽出が可能になる点である。理論式でのフィッティングは実測に概ねよく一致していることが分かった。また、繊維束の引張試験の結果を利用することで、ばらつきの少ないワイブルパラメータを得ることができた。

(3)-2. リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発

(3)-2-1. 炭素繊維に付着した残留炭素の定量評価技術の開発

CFRP から炭素繊維を回収するプロセスにおいて、マトリックスポリマーの残留の程度を簡便に評価する手法は、リサイクルプロセスの改善にとっても、リサイクル炭

素繊維を素材として活用する際の指標としても重要である。本研究では、マトリックスポリマーの分解過程で生じる有機残渣（炭素残渣）の定量法として、炭素残渣と炭素繊維の酸化反応性の差を利用し、熱分解ガスの生成速度から定量する手法の開発を行った。

2019年度は、種々の条件での熱分解によるCFRPの重量減少を詳細に解析し、CFRPの熱分解プロセスから適切な評価温度条件を定めるための知見獲得を進めた。試料としては、航空機等に広く使用されている炭素繊維T800SC-24K-10E（東レ社製）およびT800に未重合のエポキシ樹脂を塗布して製造したプレプリグ（トレカプレプリグ（P2255S-15））を130℃で2時間硬化させたCFRPを用いた。熱分解に伴う重量減少の評価は、熱天秤（リガク、Thermo plus TG8120）を用い、窒素または空気を200 ml/minで流し5~25℃/minで昇温して行った。

テトラヒドロフラン（THF）で表面のサイジング剤を除去した炭素繊維（T800）およびCFRPを窒素または空気雰囲気中10℃/minで加熱した際の試料の重量変化を測定した。炭素繊維の重量は窒素中1000℃まで昇温してもほとんど一定で、分解反応による重量減少は観測されなかった。一方、炭素繊維を空気中で加熱すると600℃付近から酸化反応による重量減少が観測され、900℃付近で全て酸化分解した。550℃で昇温を止め回収した炭素繊維表面には、酸化分解によるとみられる多くの窪みが観察された。CFRPを窒素中で加熱すると300℃以上でエポキシ樹脂の熱分解が始まり、450℃に達するまでに大部分の分解反応は完了し、エポキシ樹脂重量の10%~20%に相当する残渣が炭素繊維表面に残留した。CFRPを空気中で加熱すると、300℃付近でエポキシ樹脂の熱分解が始まり、400℃以上で残渣が酸素を取り込む酸化反応が起こり、500℃以上で残渣が酸化分解し、600℃以上では炭素繊維の酸化分解に由来する急激な重量減少が観測された。

CFRPを窒素雰囲気中で加熱した場合に生成する残渣の酸化分解反応性を詳細に検討するため、CFRPを空気雰囲気下5, 10, 15, 20, 25℃/minで昇温した場合の試料の重量変化測定を行った。試料の重量変化から、CFRPの分解は(1)304-393℃,(2)393-479℃,(3)479-654℃,(4)654-952℃の4段階で進行していると考えられる。熱天秤において異なる昇温速度で加熱した場合、活性化エネルギー（ E_a ）は(1)式から表せることが知られており、本研究でも $\ln(\beta)$ と $1/T_a$ との関係が直線関係になることを確認し、その傾きから各反応の活性化エネルギーを(1) 93.8 kJ/mol, (2) 132.7 kJ/mol, (3) 64.5 kJ/mol, 85.3 kJ/molと算出した。

$$\beta/(T_a^2) = \ln[(AE_a)/RG(\alpha)] - E_a/(RT_a) \quad (1)$$

CFRPを酸素雰囲気下で熱分解すると4段階で分解することが分かった。また、700℃以上では残渣は消失し、炭素繊維の酸化反応が主に観測された。

(3)-2-2. 不純物元素分析技術の開発

リサイクル炭素繊維中には、CFRP部材の製品構造、解体、廃棄、炭素繊維回収の各プロセスの際に混入する金属粉、ガラス繊維、ほこりなどに由来するさまざまな不純物元素が含まれており、リサイクル炭素繊維を利用して再度製品を製造する際に障害となる懸念がある。環境規制対応の面では、例えば、水銀、ひ素、臭素といった有

害元素の管理が必要であり、また、素材評価の面では、アルカリ金属や鉄などの元素の管理が必要となると考えられる。そこで本研究では、これらの不純物元素の管理に資するリサイクル炭素繊維中の不純物元素の分析法を開発する。本研究の第3期目標は、リサイクル炭素繊維中に含まれる不純物元素分析の原理手法を確立し、また、最終目標は本分析法の確立を目指すものである。

開発する分析法は、不純物元素の揮発性に応じた適切な分析前処理法を開発し、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)による多種類の元素の一斉検出法と組み合わせて手法を確立するものである。不揮発性元素の分析前処理法は、マイクロ波分解法によるリサイクル炭素繊維を分解する方法で、この前処理により分析対象元素を溶液中に移行した後に ICP-MS 装置に導入して分析する。また、揮発性元素の分析前処理法は、熱分解法によるリサイクル炭素繊維中の揮発性元素を気化し、ICP-MS 装置に導入して分析する。

2019年度は、分析前処理法のマイクロ波分解法によるリサイクル炭素繊維の分解条件、および熱分解法によるリサイクル炭素繊維からの元素の気化条件を検討し、本研究開発の不純物元素分析の原理手法を確立した。

マイクロ波分解法については、操作の長時間化・煩雑さ、および元素分析の妨害となるフッ酸を使用しない条件でリサイクル炭素繊維を分解できる条件を見出した。また、分解液の ICP-MS 装置への直接導入を可能し、14種類の元素を検出することができた。また、熱分解法については、リサイクル炭素繊維からの揮発性元素の気化条件を検討し、3元素を気化する条件を見出し、ICP-MSにより検出を可能にした。以上の検討から、マイクロ波分解法および熱分解法の分析前処理法と ICP-MS を組み合わせることで、簡便な不純物元素分析が可能となる原理手法が確立されたと考える。

今後は、最終目標である本分析法の確立に向けて、分析精度等の分析性能の評価および元素適用範囲の拡大を図っていくため、分析前処理および ICP-MS 検出について条件検討を行う。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.6.3-4 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	0	0	0	0	0	0	1	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	1	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-2.6.3-5 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

2.6.4 [テーマ番号 27C] 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発

2.6.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

温室効果ガス排出削減に向けた自動車軽量化の流れを受け、材料を適材適所に配置し、無駄を省いて軽量化するマルチマテリアル化技術が、環境規制の厳しい欧州を軸に進んでいる。軽量性に特に優れる炭素繊維材料は BMW や Audi などのマルチマテリアル車体に適用されているが、熱硬化性 CFRP (CFRP) が主流である。一方、熱可塑性 CFRP (CFRTP) と CFRP では特徴が異なり、現状の車体設計では CFRTP を使いこなしているとはいえない。本事業は、これまで開発してきた CFRTP の材料および成形技術を元に、必要箇所に必要な形で CFRP を組み合わせた超軽量の CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発を通し、CFRTP の軽量化効果を実証することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.6.4-1 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
① CFRTP/CFRP 複合パネルの開発	複合パネルの曲げ剛性 で、スチール比 50%軽量 化の実現	疲労、クリープ等の長 期耐久性データの整備	新材料の有意性を、軽量 性、信頼性両面から示す 必要がある
② CFRTP/CFRP 複合パネルの形 状賦形	CFRTP フォーム材の形状 賦形限界の見極め 複合パネルの技術課題抽 出	部材性能評価結果との 理論的整合の確保	部材性能は、材料性能と 設計から合理的に導かれ る必要があり、理論整合 が求められる
③ CFRTP/CFRP ハイブリッド部 材の形状設計	50%軽量化を実現できる部 材の見極め	部材としての 50%軽量 化の実現	軽量化の極限追求とし て、重量半減は必要
④ CFRTP/CFRP ハイブリッド部 材の成形	なし (2021 年度開始)	ハイブリッドモデル部 材の成形と、基本特性 の評価	机上理論に加え、実部材 での性能実証が望ましい

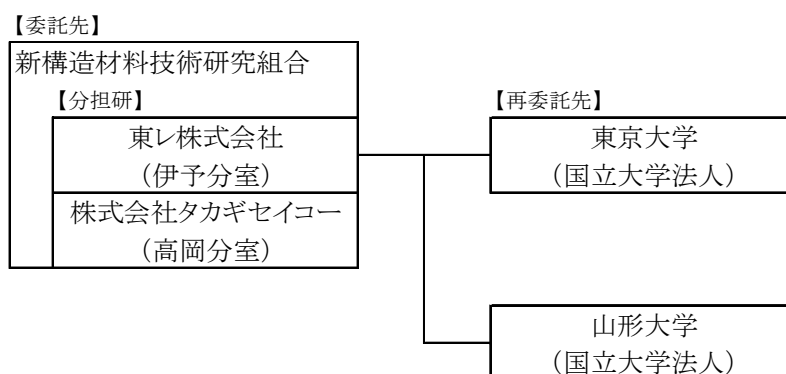
(3)全体計画

過去の研究開発テーマ ([テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発) で、炭素繊維を均質に分散・配置させた低比重・高剛性の CFRTP フォーム材が、プレス成形により形状賦形できることを示した。このフォーム材は、構造が炭素繊維で保持されている多孔質体であり、低比重・高弾性の性質を示し、強いスプリングバック性能から、プレスによる形状賦形も可能である。一方で、一般に CFRP は静的機械特性で CFRTP より優れており、これらの適切な組み合わせは、単独の材料よりも優れた軽量性を確保できる。これを意図して、2018~2019 年度に実施し

た「[テーマ番号 54] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)」では、熱可塑のサイクルタイムに同期できる CFRP の材料ならびに低圧・高速成形技術を構築している。本事業では、これらの技術を適切に組み込んだ、超軽量の CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の研究開発を行う。

(4)実施体制

図Ⅲ-2.6.4-1 に示す体制で推進する。材料技術は東レが、成形技術はタカギセイコーが、それぞれの専門性を活かして構築する。特殊な装置を要する評価技術や高い専門性を要する研究は、大学（東京大学、山形大学）に再委託する。



図Ⅲ-2.6.4-1 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、1回／月の頻度で共同試作・開発を行い、技術開発を共有する（新型コロナによる緊急事態宣言を受け、開始時期は未定）。再委託先とは、定期的な連絡・情報共有と半期ごとの直接面談で、成果と課題を共有する。

(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。

2.6.4.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.4-2 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 CFRTP/CFRP 複合パネルの開発	複合パネルの曲げ剛性 で、スチール比 50%軽量 化の実現	本テーマは 2020 年 4 月に開始してお り、特記事項なし	△	
② CFRTP/CFRP 複合パネルの形状 賦形	CFRTP フォーム材の形 状賦形限界の見極め 複合パネルの技術課題抽 出	同上	△	
③ CFRTP/CFRP ハイブリッド部材 の形状設計	50%軽量化を実現できる 部材の見極め	同上	△	
④ CFRTP/CFRP ハイブリッド部材 の成形	なし (2021 年度開始)	同上	△	

※◎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-2.6.4-3 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 CFRTP/CFRP 複合パ ネルの開発	本テーマは 2020 年 4 月 に開始しており、特記事 項なし	疲労、クリープ等の長期 耐久性データの整備	
② CFRTP/CFRP 複合パ ネルの形状賦形	同上	部材性能評価結果との理 論的整合の確保	
③ CFRTP/CFRP ハイブ リッド部材の形状設計	同上	部材としての 50%軽量化 の実現	
④ CFRTP/CFRP ハイブ リッド部材の成形	同上	ハイブリッドモデル部材 の成形と、基本特性の評 価	

(3)研究開発の成果と意義

本テーマは2020年4月より開始しており、研究に着手した段階のため特筆成果はない。本研究開発の意義は、マルチマテリアルの概念をモデル部材で実証することにある。熱可塑性CFRP（CFRTP）と熱硬化性CFRPはそれぞれに特徴があり、適材適所の使用が有効である。また、部材としての性能は、材料、成形、設計、接合を変数とする最適な組み合わせで実現される。モデル部材による性能の実証は、これまで行ってきた材料および成形技術の価値を実証する作業といえる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

2020年4月より開始されたテーマであり、特記事項なし。

(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）

2020年4月より開始されたテーマであり、特記事項なし。