

# 「次世代構造部材創製・加工技術開発」

## 事後評価報告書（案）概要

### 目 次

分科会委員名簿 .....	1
評価概要（案） .....	2
評点結果 .....	4

## はじめに

本書は、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき研究評価委員会において設置された「次世代構造部材創製・加工技術開発」（事後評価）の研究評価委員会分科会（2020年11月4日）において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、第65回研究評価委員会（2021年3月3日）にて、その評価結果について報告するものである。

2020年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会「次世代構造部材創製・加工技術開発」分科会  
（事後評価）

分科会長 出井 裕

「次世代構造部材創製・加工技術開発」

(事後評価)

分科会委員名簿

(2020年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科 会長	いづい ひろし 出井 裕	日本大学 理工学部 非常勤講師 (航空宇宙工学科 元教授)
分科 会長 代理	さとう てつや 佐藤 哲也	早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科 教授
委員	きたおか さとし 北岡 諭	一般財団法人ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 副所長 主幹研究員
	しぶたに ようじ 渋谷 陽二	大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授
	たなか ひろあき 田中 宏明	防衛大学校 システム工学群 航空宇宙工学科 教授
	みうら ひろみ 三浦 博己	豊橋技術科学大学大学院 機械工学系 教授
	みたらい ようこ 御手洗 容子	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授

敬称略、五十音順

# 「次世代構造部材創製・加工技術開発」(事後評価)

## 評価概要(案)

### 1. 総合評価

航空機産業は、認証が必要で利益が短期間で見えないなどの特徴があるため、国の支援が必要であり、NEDOが事業を先導して行うことは妥当である。また、企業による研究は、社会情勢、コスト、実用性を含めて十分に考えられており、大学発祥の研究は、実用性のみならず、新規性、挑戦性の高いものであり、それぞれが評価できるとともに、それらを融合できている点も高く評価できる。また、ほとんどの研究テーマについて、当初目標以上の成果が得られ、一部未達の項目についても原因と対策について示されており、本事業は当初の目的を達成したと高く評価する。

一方、大学が参加しているわりに、論文がほとんど出ていない。テーマによっては、成果を知的財産化して海外に進出していくことも想定されるが、その際、特許や論文発表は、客観的評価として重要であるため、次期プロジェクトでは、どのようにして客観的に成果を示すかも留意していただきたい。さらに、優れた素材や加工技術が開発されたが、市場化に重要なニーズ・コスト面での課題が少し残されている。今後は、これらの課題解決に加え、開発した素材や技術を用いた新産業分野の独自開拓も目指していただきたい。

航空機産業は裾野が広い産業であり、また関連する技術は他産業へのスピノフが期待できるものの、トップランナーだけが先に進んでしまい、実用化に必要な人材・産業・研究の裾野が広がらないのがやや気がかりであるため、実用化や産業の裾野を広げるための働きを期待する。

### 2. 各論

#### 2.1 事業の位置付け・必要性について

本事業は、国際的な成長分野である航空機産業の競争力強化と地球温暖化対策に貢献することから、事業の目的は妥当である。さらに、航空機の実用化には高度な技術と認証が必要であり、膨大な費用・時間を要し、リスクが高いことから、産学官の密接な連携の下で、効率良く開発することが不可欠であるため、NEDO事業として実施すべきである。

また、裾野が広い航空機産業に関連する当該事業は、他産業へのスピノフを期待することができるとともに、国策として取り組むべきテーマであるため、NEDOの関与は適切である。

#### 2.2 研究開発マネジメントについて

研究開発項目および委託先の選定については、必要かつ将来我が国が世界をリードできるものを選択し、再委託先に大学を入れることで、より挑戦的な研究を実施し、また企業

を入れることで裾野を広げられている点は評価できる。さらに、具体的にターゲットを絞り込み、目標を数値化しているところも評価できる。

一方、研究開発項目および再委託先が多岐にわたっていることから、研究開発項目間の連携、委託先と再委託先との連携、さらに再委託先の研究内容を把握しづらい状況となっていた。次期プロジェクトでは、事業者間の状況をより把握できるよう、合理的な研究開発体制の組み立てが柔軟に実施されることが望まれる。また、製造側から素材側への成果のさらなるフィードバックも期待したい。

## 2. 3 研究開発成果について

ほとんどの研究テーマについて、当初目標以上の成果が得られており、また、目標未達であっても、ほとんどの場合その対策が明記されていることから、評価できる。企業による研究は、社会情勢、コスト、実用性を含めて十分に考えられており、大学発祥の研究は、実用性のみならず、新規性、挑戦性の高いものであり、それぞれが評価できるとともに、それらを融合できている点も高く評価できる。

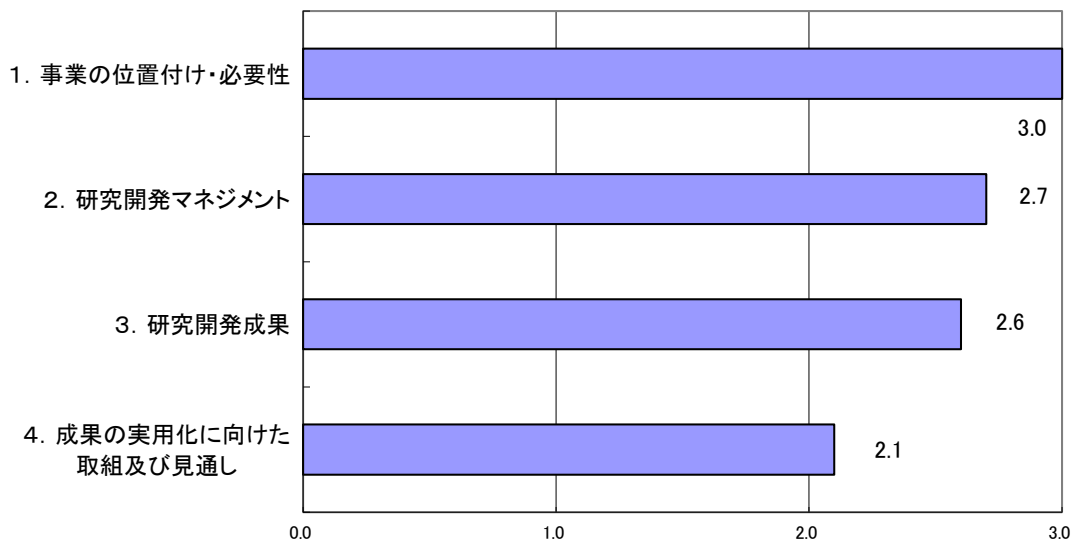
一方、大学が参加しているわりに、論文がほとんど出ていない。テーマによっては、成果を知的財産化して海外に進出していくことも想定されるが、その際、特許や論文発表は、客観的評価として重要であるため、次期プロジェクトでは、どのようにして客観的に成果を示すかも留意していただきたい。

## 2. 4 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

参画企業・大学は、各種開発材の試作品やパーツ製造と、それらの加工技術開発に強力で取り組んでいる。また、海外 OEM との共同研究を実施し、開発部品の認証取得も計画していることから、本事業の開発技術を基に、次のステージである実用化開発にシームレスに移行できるものと期待される。

一方、優れた素材や加工技術が開発されたが、市場化に重要なニーズ・コスト面での課題が少し残されている。今後は、これらの課題解決に加え、開発した素材や技術を用いた新産業分野の独自開拓も目指していただきたい。また、新しい材料は、すぐには利用できないかもしれないが、戦略的に認証を行い、実機搭載を目指して欲しい。

## 評点結果〔プロジェクト全体〕



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメント	2.7	A	A	A	A	B	B	B	A
3. 研究開発成果	2.6	A	A	B	B	A	B	B	A
4. 成果の実用化に向けた取組及び見通し	2.1	B	B	B	B	B	B	B	A

(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               |

# ◆事業実施の背景と事業の目的

## 【事業の必要性】

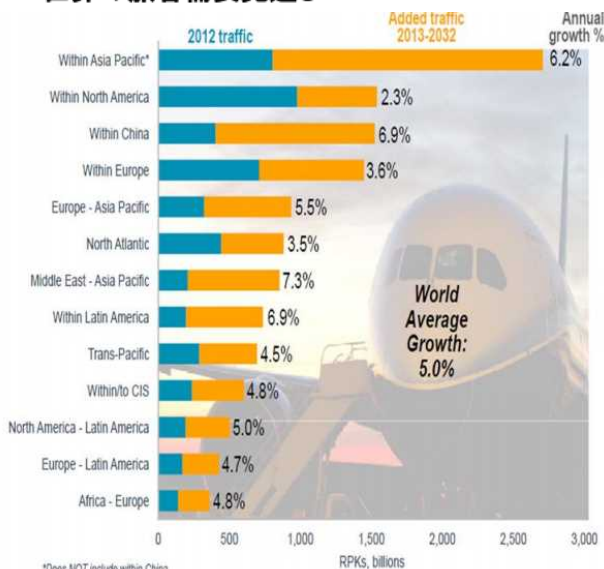
世界の民間航空機市場は、**年率約5%で増加**する旅客需要を背景に今後20年間で、累計約3万から3万5千機（4～5兆ドル程度）となる見通しである。「産業構造ビジョン2010」では、国内航空機産業を2020年迄に2兆円にほぼ倍増させるとともに、2030年には売上高3兆円を達成すると謳われている。国際的な産業競争が激化する厳しい競争の中で、航空機産業では高度な先進技術開発が進められてきており、**サプライヤービジネスにおいても今後激しい競争にさらされていくことが予想されるため**、我が国においても航空機産業の国際競争力を維持・拡大していく必要がある。また、航空機は、幅広い分野の技術の組み合わせた複雑なシステムを有しており、その部品点数は、自動車の2～3万点の約100倍に及ぶ300万点もの部品から成り立っており、**産業構造の裾野が広い**。

燃費改善、環境適合性等の市場のニーズに応えるため、近年の航空機（機体・エンジン・装備品）では、**軽量化のために構造部材として複合材及び軽金属等が積極的に導入**されており、**先進的な素材開発及び加工技術開発等が急務**となっている。我が国の強みを活かしつつ、民間航空機に求められる安全性、環境適合性、経済性という課題において、他国より優位な技術を獲得し航空機産業の国際競争力を維持・拡大していくことは、極めて重要である。また、これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進める上で、重要な役割を果たすことも期待されている。

複合材料を始めとした我が国が強みを持つ**材料分野における技術革新**を促進し、産官学の密接な連携の下での我が国の**航空機産業基盤の構築及び関連産業の成長**を実現する。

○世界の民間航空機市場は、**年率約5%で増加する旅客需要**を背景に、今後20年間の市場規模は、約3万機・4～5兆ドル程度（ほぼ倍増）となる見通し。最も旅客需要が伸びるのはアジア太平洋地域。**最も機体需要が多いのは150席級（737、A320）**。

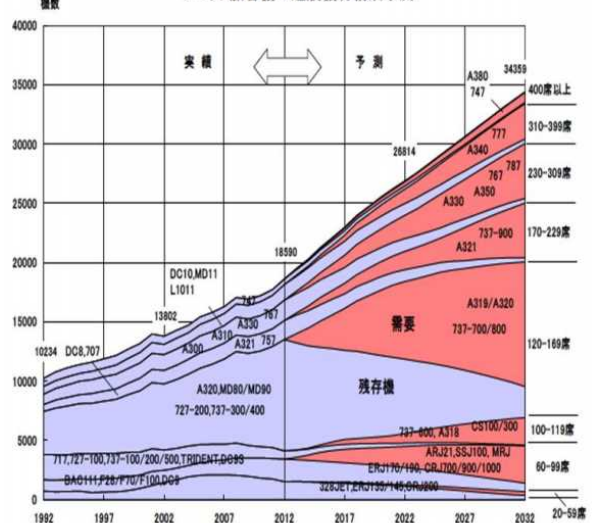
### 世界の旅客需要見通し



出典：航空機素材・製造技術の革新について（経済産業省，2013）

有償旅客キロ (RPK)  
各有償旅客が搭乗し、飛行した距離の合計。  
有償旅客数 × 輸送距離 (キロ)。

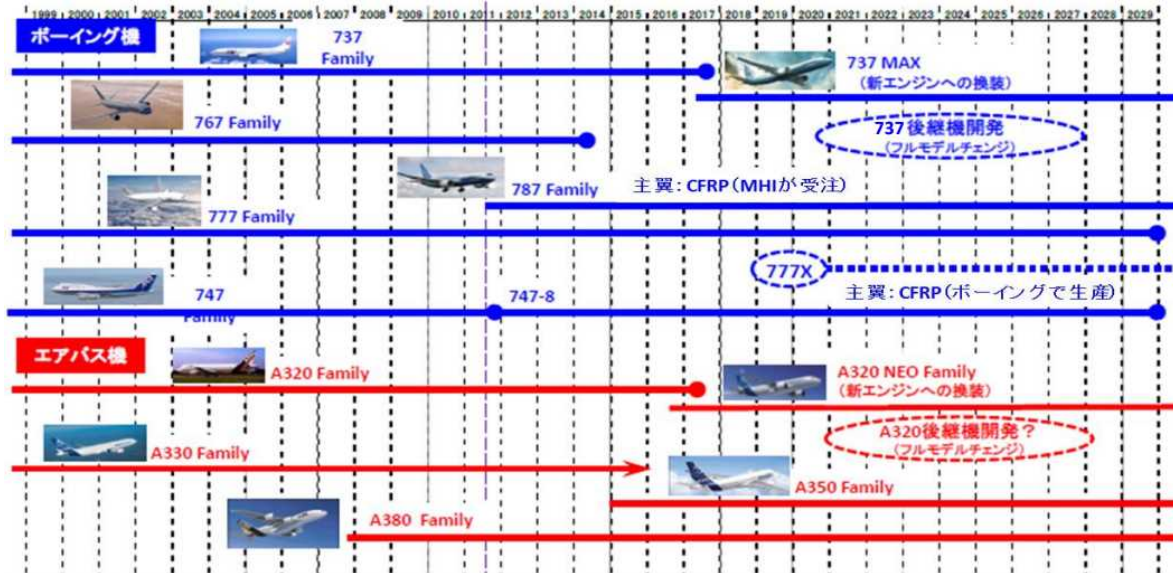
### ジェット旅客機の運航機材構成予測



出典：航空機素材・製造技術の革新について（経済産業省，2013）

本事業は、海外主要OEMの次期量産機の開発計画にリンクさせて、各テーマの技術開発を推進することが極めて重要である。

次期量産機のEIS（運航開始）は2030年代と予想されている。開発計画に合わせた技術開発と製造プロセスの認証取得を目指していくこととする。



出典: 我が国航空機産業の現状と課題 NEDO一部改編

## 2. 政策的位置付け

### ◆政策的位置付け

本事業は、総合科学技術・イノベーション会議により策定されている「科学技術イノベーション総合戦略」、「エネルギー・環境イノベーション戦略」等に則り、構造材料の飛躍的な軽量化等によって**航空機のエネルギー利用効率の向上を目指すために実施する**ものである。

また、「新産業構造ビジョン」（産業構造審議会）には、2030年度に**運輸部門のエネルギー起源CO2排出量を28%減**（2013年度比）とすることが謳われている。

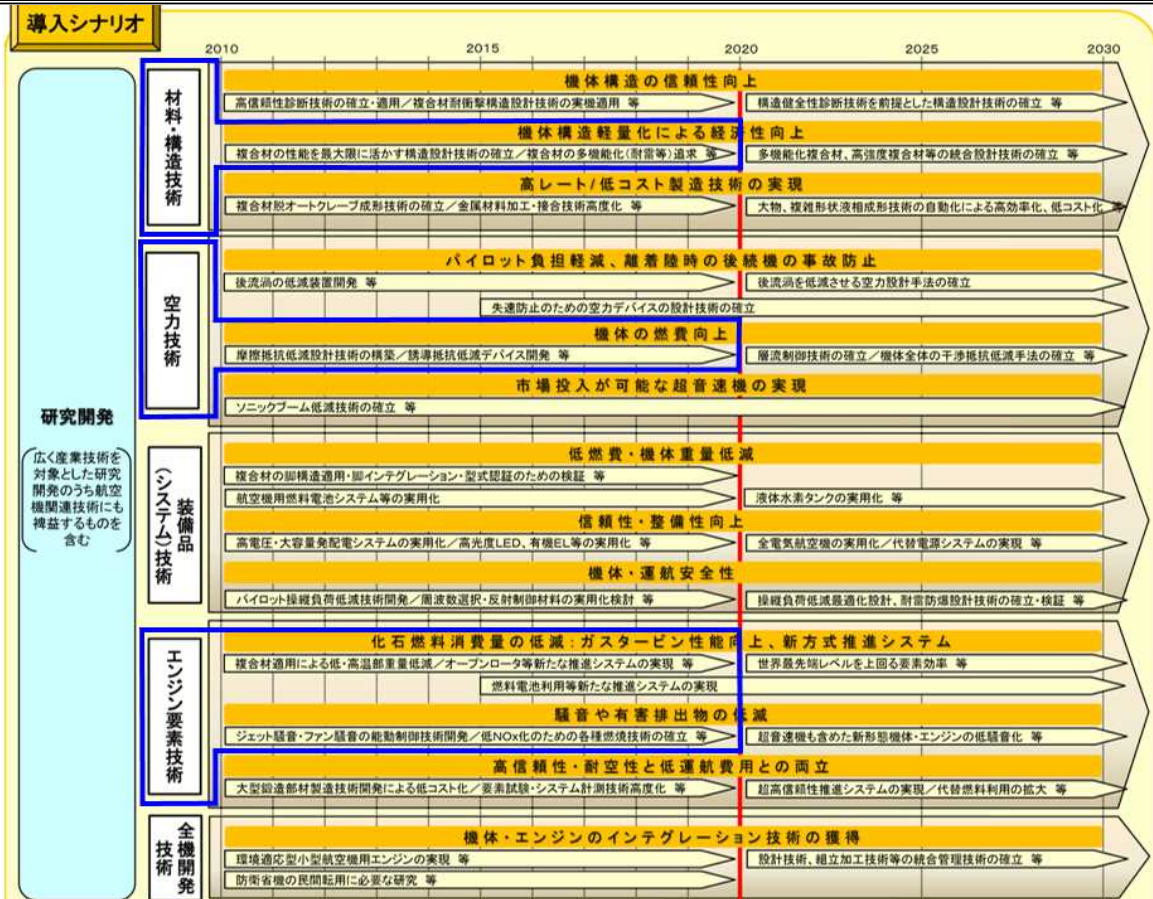
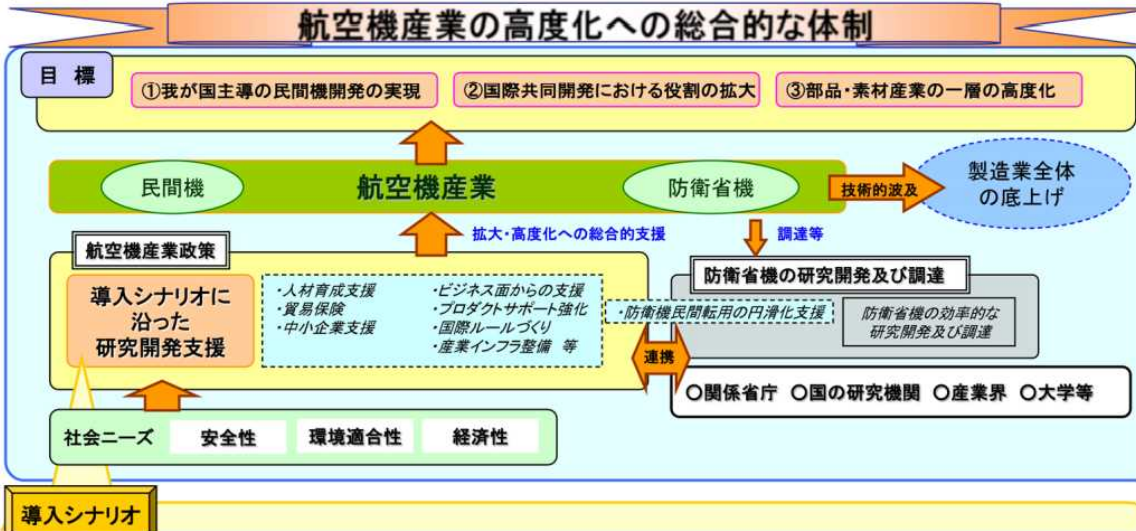
さらに、「革新的環境イノベーション戦略」（統合イノベーション戦略推進会議）には、運輸分野の温室効果ガス削減のため、航空機分野で**燃費向上に資する機体やエンジンの材料軽量化等の開発を進める**ことが謳われている。

本事業はこれらの政策を進めるために実施するものである。



◆技術戦略上の位置付け

経済産業省策定「技術戦略マップ2010」における航空機産業の研究開発



◆ 研究開発目標と開発内容

① – 2次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発（第二期）

研究開発項目	研究開発目標（2019年度最終目標）	主な開発内容及び成果
<p>(1)複合材構造部材</p> <p>アルミニウム合金構造と同等の<b>高生産性・低コスト生産技術</b>の研究開発、複合材構造に由来する内部剥離等の<b>検査技術</b>確立、及び複合材本来の特性を生かした軽量化技術開発を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 確立した高生産性・低コスト生産技術の要素技術を、航空機の適用部位を明確にして、想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>● 確立した複合材本来の特性を生かした軽量化を可能とする基礎技術を用いて、航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>● 複合材由来の欠陥等の検査技術の外部審査によるTRL7を取得する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ボルトレス組立の処理条件の最適化により、目標である接着剤凝集破壊(せん断強度30MPa相当)を達成。</li> <li>● 高速成型技術開発、本研究の試作結果に基づく試算により、従来部品の半分以上の成形時間および70%程度の製造コストで製造可能なことを確認。</li> <li>● 広域歪み分布計測システムにより、メンテナンスコストを20%低減できることを確認。</li> <li>● 超音波ラム波を用いたSHM技術により、飛行実証を行い、ユーザーが容易に計測できることを確認。</li> </ul>
<p>(2)軽金属構造部材</p> <p>マグネシウム合金の開発、加工法の開発とその信頼性の向上検討を実施し、<b>マグネシウム合金の航空機構造材料への適用技術開発</b>を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● マグネシウム合金において、明確にした航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 押出速度については、 casting 不燃押出材、急冷凝固耐熱押出材共に最終目標を達成した。</li> <li>● casting 不燃押出材の特性(引張降伏強さ、伸び、腐食速度、発火温度)は、最終目標を達成した。</li> <li>● 急冷凝固耐熱押出材の材料特性(強度、伸び、腐食速度、発火温度、破壊靱性値、亀裂進展速度)は、最終目標を達成した。</li> <li>● スケールアップに伴い生じる品質のバラつきや特性低下の要因を特定し、品質の安定化と特性改善を達成。</li> </ul>
<p>(3)総合調査研究</p> <p><b>国内外の研究開発動向や政策支援の状況</b>、ボーイング、エアバス等OEM、及びエアラインの動向等を<b>調査・分析</b>し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していくための調査を実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 航空機の材料評価から設計、製造、運航に至るまでの各フェーズにおいて、実用化のために解決すべき課題を整理するとともに、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等を明確化する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 「SHM実用化」では、TRL7達成に貢献するとともに、認証取得・実用化への道筋を明らかにした。</li> <li>● 「高レート設計・製造技術開発」では、研究開発期間途中での体制強化を行い、TRL5達成に貢献した。</li> <li>● 「マグネシウム合金開発と航空機への適用研究」では、研究開発期間途中での体制強化(材料メーカー参画)を行い、目標達成に貢献した。</li> </ul>

② – 2航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発（第二期）

研究開発項目	研究開発目標（2019年度最終目標）	主な開発内容及び成果
<p>(1)小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発</p> <p><b>小型タイプ自動積層装置</b>について、その製造適用に向け、障壁となる技術課題を要素技術の深化・成熟化を通して解決し、複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な安価で<b>汎用性・量産性を持った装置を開発</b>する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 種々の複雑形状の積層に対し、作業者による手積層と同等の品質を確認する。</li> <li>● 将来の複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な積層速度で、連続積層可能で、製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプ自動積層装置を開発して装置仕様を決定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプの自動積層装置を開発。</li> <li>● 試作部材積層時の積層不良発生頻度を半減</li> <li>● 積層検査を無人で実施し、積層作業に関わる時間を低減</li> <li>● 適用部材拡大(半径3m×周長3m程度の湾曲部材)への積層検査自動化に対応</li> </ul>
<p>(2)実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発</p> <p>小型タイプ自動積層装置による中小型複雑形状部材の設計・製造技術について、適用部材拡大を念頭に置き、<b>実機部材形状に適用可能な設計・製造技術を開発</b>する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 種々の複雑形状に対し、開発した装置を用いて部材の試作を実施し、その品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 開発した小型タイプ自動積層装置を用いた試作・品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認した。</li> <li>● 湾曲部材を設計・積層・製作し、品質を評価(ボイド率2%以下)</li> </ul>

### ③ - 2航空機用難削材高速切削加工技術開発（第二期）

研究開発項目	研究開発目標（2019年度最終目標）	主な開発内容及び成果
<p>航空機用難削材の高速切削、ロボット切削、並びに、切削・金属ディポジション複合加工において、予測が必要なものは、加工力、工具や工作物の温度、仕上げ面残留応力、工具摩耗、炭素繊維複合材の剝離寸法、クーラントの流れ、熱応力などであるが、難削材の種類や加工プロセスによって、最低限必要なものが異なる。加工プロセスの予測には多大な時間とコストが必要となるため、各プロセスの最適化や高性能な工具の開発にあたっては、最低限必要な物理量を効率的に求められるよう、<b>有限要素法や有限体積法に基づくシミュレーション技術及び切削理論に基づくコンパクトでかつ高度な解析技術を開発</b>する。これにより、予測技術をベースとしたスマートな航空機難削材高速切削加工技術の高度化を図り、革新的な切削加工技術開発を促進する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 予測技術の精緻化を図り、発展させて、加工費あるいは加工時間を30%以上削減する高性能加工技術を確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発 シミュレーションの妥当性ととも、CFPRおよびチタン合金との重積材の穿孔や切抜きに対して、有効な工具切削条件を見出した。</li> <li>● 先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発 有限要素法解析を用いて反転バニング切削の加工条件を最適化することで、Al-Li合金の平面大型薄物部材へのポケット加工後の変形を現状比で80~120%軽減した。</li> <li>● チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発 圧縮性残留応力を改善する工具形状を最適化して、マシンニングセンタおよびオービタル加工装置での切削条件を最適化し、疲労寿命試験を行い、現状のドリル加工+リーマ加工と同等あるいはそれ以上を得た。</li> <li>● ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発 アルミニウム合金製フレーム部品に対して、深さ精度±0.1mmのポケット加工を行った。</li> <li>● 切削-金属ディポジション複合化技術の開発 アルミ合金母材上に中間層Ni-Cu合金および最上層ステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかとした。また、積層造形と切削加工の二つの工程をオンマシンで実施し、プッシュ部品のプロトタイプを製作した。</li> </ul>

### ④ - 2軽量耐熱複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

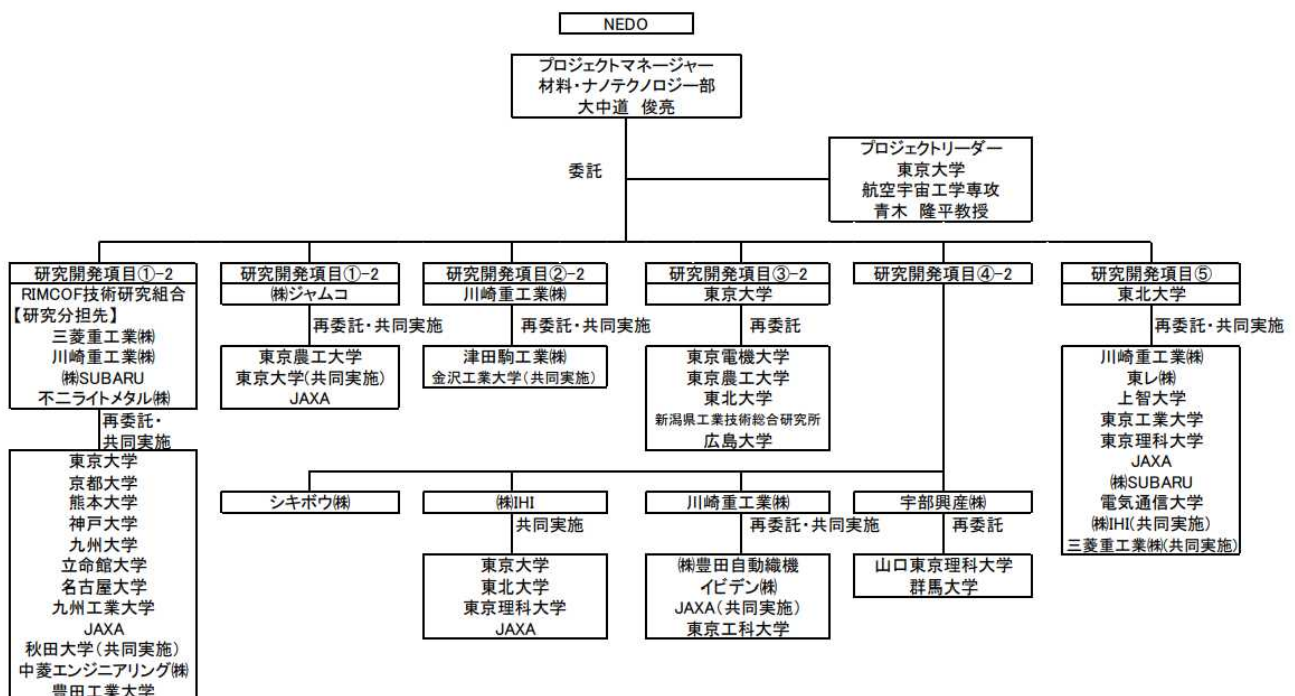
研究開発項目	研究開発目標（2019年度最終目標）	主な開発内容及び成果
<p>(1)CMC材料の開発 耐熱温度1400℃を達成する<b>第3世代SiC繊維の生産技術を確立</b>するとともに、<b>CMC材料を開発</b>する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を製造可能な、引張強度2.0GPa以上のSiC繊維の低コスト量産プロセスを確立する。</li> <li>● 室温引張強度200MPa以上、1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● SiC繊維の欠陥を低減する対策を実施した結果、強度2GPa以上、ばらつき低減を達成。</li> <li>● 強度ばらつきを抑制するためのポリマー改良を目的に、強度低下の要因となるポリマー中の異物除去方法を確立。</li> <li>● バッチ焼結プロセスを確立し、CMC部材開発用にSiC繊維を供給するため、新規バッチ式焼結設備を設置。</li> <li>● 連続焼結プロセスを確立し、低コスト量産プロセスを実現するため、連続焼結プロセスを検討。実現可能性を見出した。</li> <li>● 室温引張強度200MPa以上を達成。燃焼器内のCMCパネル近傍相当の水蒸気分圧、1400℃、400Hr曝露後の平均強度低下率20%以下を達成。</li> </ul>
<p>(2)高性能SiC繊維の開発 応力負荷が大きく環境条件の厳しい部材に適用可能な<b>高性能SiC繊維を開発</b>する。開発したSiC繊維を用いてCMC材料の適用可能性を検証する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れたSiC繊維を開発、さらに試作条件を確立し、CMC部材評価用試料を供給する。</li> <li>● 高性能SiC繊維における三次元プリフォームの量産を可能とするプロセスを開発し、繊維体積割合30%以上のプリフォームを試作する。</li> <li>● 開発したSiC繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高性能SiC繊維用ポリマーの開発は、高強度と高温クリープ特性を両立する焼結助剤成分の基本的な化学組成を決定した。</li> <li>● 高性能（高強度）SiC繊維の開発は、合成したポリマーの繊維化を実施し、強度3.0GPa以上のSiC繊維が得られた。</li> <li>● 目標である繊維体積含有比率30%以上を大きく上回る36%の三次元プリフォームの作製に成功した。</li> <li>● 開発したSiC繊維の特性を評価し、CMCへ適用可能であることを確認した。また、開発繊維を用いたCMCの材料特性を評価した。</li> </ul>

## ⑤航空機用構造設計シミュレーション技術開発

研究開発項目	研究開発目標（2019年度最終目標）	主な開発内容及び成果
航空機用構造設計シミュレーション技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析検証を終了し、数値シミュレーションの実用性を確認する。</li> <li>数値シミュレーションツールをソフトウェア化し、最適設計技術として確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分野横断（空力・構造・強度）シームレス機体設計シミュレーターの開発</li> <li>これまで逐次的に翼形や設計条件を変えながら実行せざるを得なかった解析を、自動で行うことが可能となった。</li> <li>シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化</li> <li>OHT 強度試験に関して、供試体の種類で4分の1以上が削減可能となり、供試体数においても約19%の削減が可能となることを見込まれた。</li> <li>複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証</li> <li>簡易AFP 装置を作製し、最適化された曲線繊維複合材が、従来の直線繊維複合材よりも高い強度を有することを実験的に示した。</li> <li>層流化技術開発</li> <li>後退翼における圧縮性三次元境界層の乱流遷移を高い精度で予測するためのツール開発を行い、安定解析と直接数値解析を組み合わせた統合遷移解析システムを構築し、大規模かつ詳細な遷移予測が可能となった。</li> <li>複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション</li> <li>VaRTM、OoA プリプレグによる異種材料ハイブリッド一体構造の変形予測技術開発を達成した。</li> <li>エンジン-機体統合性能予測CFD技術の構築</li> <li>機体と稼働エンジンとの統合解析を達成し、機体とエンジン・ナセルとの相互作用の予測を可能とする基盤技術を開発した。</li> <li>非巡航時における高精度非定常流体解析</li> <li>構築した高精度LES データベースを基に平衡/非平衡壁面モデルLESを実施し、壁面モデルLESの予測精度および非平衡効果のモデル化について問題点や改善点を明らかにし、当初の目的を達成した。</li> </ul>

## 5. 実施体制

### ◆研究開発の実施体制



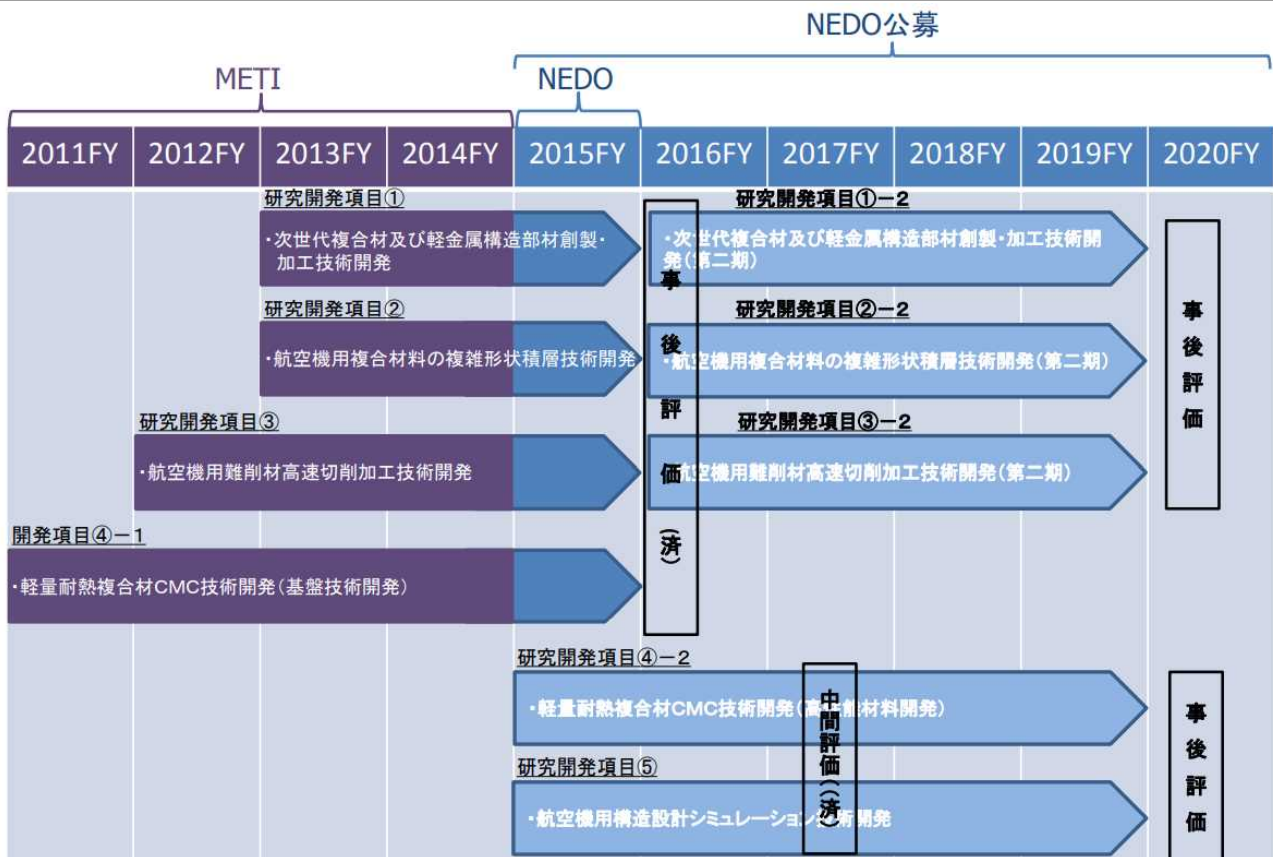
6. 費用予算

◆プロジェクト費用

(単位：百万円)

研究開発項目	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
①-2次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発（第二期）	-	202	458 うち 加速予算 55	554 うち 加速予算 9	585 うち 加速予算 22	1,798
②-2航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発（第二期）	-	100	280 うち 加速予算 80	280	285	945
③-2航空機用難削材高速切削加工技術開発（第二期）	-	50	195 うち 加速予算 15	141	167 うち 加速予算 6	552
④-2軽量耐熱複合材CMC技術開発（高性能材料開発）	642 うち 加速予算 182	885	1,990 うち 加速予算 300	2,165 うち 加速予算 31	1,636 うち 加速予算 49	7,319
⑤ 航空機用構造設計シミュレーション技術開発	37	37	37	75	76	262
合計	679	1,274	2,961	3,214	2,749	10,877

7. 計画



① KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

【最終目標】

- ① 鑄造不燃および急冷凝固耐熱押出材の押出速度は、500mm/min以上
- ② 鑄造不燃押出材の特性は、引張降伏強さ:250MPa以上、伸び:5%以上、腐食速度:0.6mm/y以下、発火温度750°C以上。
- ③ 急冷凝固耐熱押出材の特性は、引張降伏強さ:400MPa以上、伸び:5%以上、腐食速度:0.6mm/y以下、発火温度750°C以上、破壊靱性:20MPa√m以上、き裂進展速度特性:p6に示すレベル。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	押出速度については、鑄造不燃押出材、急冷凝固耐熱押出材共に最終目標を達成した。	◎	なし	
②	鑄造不燃押出材の特性(引張降伏強さ、伸び、腐食速度、発火温度)は、最終目標を達成した。	○	なし	
③	急冷凝固耐熱押出材の材料特性(強度、伸び、腐食速度、発火温度、破壊靱性値、亀裂進展速度)は、最終目標を達成した。	○	製造研究	

➤ 鑄造不燃(Mg-Al-Ca-Mn)合金の開発

- ✓ Mn添加(0.03 at%)により耐食性向上。
- ✓ Mg-6at%Al-4at%Ca-0.05at%Mn成分により、高強度と高延性を両立。

➤ 急冷耐熱(Mg-Zn-Y-Al)合金の開発

- ✓ 押出前熱処理条件および押出加工条件の最適化により高破壊靱性(20 MPa√m)と高強度(400 MPa)を達成。
- ✓ 押出前熱処理に適した合金成分Mg-0.9Zn-2.05Y-0.15Al (at%)を開発。

② KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

【最終目標】

- 介在物の少ない大型素材を製造し、大型素材製造における品質(強度250MPa以上、伸び5%以上)の安定化と低コスト化を達成する。
- 高品質低コスト大型素材製造技術を確立した上で、実用化の妥当性を確認する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	スケールアップに伴い生じる品質のバラつきや特性低下の要因を特定し、合金組成・鑄造条件の最適化、プロセス改善(フィルタリング)を実施。品質の安定化と特性改善を達成。	○	製造コストの検証	量産時の製造コストを試算・検証する。
②	強度と延性の両立に苦労したが、どちらも目標を超える押出条件の導出に成功。	○	なし	
③	Lアングル、Cチャンネル材の押出試作を4回実施。目的の材料特性を有する形材の試作に成功。素材特性は、A値・B値で目標を達成。	○	なし	
④	試作部品の抽出 部品試作及び評価完了	○	適用候補部品の選定 防食システム・組立工法	実機適用方針の整理 防食システム・組立工法検討

◆ 材料特性評価

機械特性評価 – Mg-8Al-4Ca押出#2 引張試験

基本合金組成 : Mg-8Al-4Ca  
Mn添加量 : 0.015%



押出条件のチューニングにより

耐力=272MPa(平均)

伸び=7.0%(平均) を達成

## ② KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

### 押出技術開発

大型素材の品質向上・安定化を図るため、製造条件の最適化を実施。

#### 押出条件の導出、最適化

- ☑ 押出温度および成形速度を最適化し、目標の強度特性が得られる成形条件を獲得できた。
- ☑ ダイデザインの改良により、①集合組織発達の緩和（延性の改善）、②押出成形速度の向上、③押出圧力の低減が可能となった。
- ☑ 目標特性を満足する大型押出素材（20m超）の製造ができた。



図 大型素材（20m超）の押出の様子（写真：左）とCチャンネル押出材の外観写真（写真：右）

表 大型素材（Cチャンネル）の引張試験結果

	0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
MAX	284	307	6.3
MIN	263	299	4.6
Average	276	303	5.5
A値相当	250	295	-
B値相当	261	298	-
データ数	10	10	10

## 次世代軽量カーボンハニカムパネルの開発

研究開発テーマ(もしくは研究開発項目): 次世代軽量カーボンハニカムパネルの開発

#### 【最終目標】

- ① 航空機内装品のハニカムパネルに必要な耐火性や機械的性質等の特性を満たし、ガラスハニカムパネルの60%の重量を実現したカーボンハニカムパネルを完成させる。
- ② ガラスハニカムパネルと同等のコストでの量産化に目途を付ける。
- ③ 従来の複合材製スキン・ストリング胴体構造に対し、ラティス構造適用により15%の軽量化を達成する。胴体以外の3次元湾曲構造への適用性のための設計製作技術を確立し、部分構造を試作して力学的特性を評価し、実用化の妥当性を確認する。(TRL5)

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	軽量化目標をおおよそ達成したカーボンハニカムパネルを開発し、耐空性評価(耐火・強度)を実施することで実用化の妥当性について確認した。	○		
②	低コスト材料・製造方法の検討により、ガラスハニカムパネルと同等のコストでの量産化に目途を付けた。	△	開発したハニカムコアのハンドリング性に課題があり、更なる検証を要する。	適用する紙・樹脂の検討を進める。見込み時期(2022年3月)
③	3次元湾曲パネルの製造技術を確立し、試験片の製作を完了した。	△	3次元湾曲パネル設計技術に試行錯誤があり、評価試験が未完了である。	2020年度中に実施を計画している。見込み時期(2021年3月)

次世代軽量カーボンハニカムパネルの開発

早期の実用化を見据え2種類の構成について評価した。

- 開発パネル①: 開発プリプレグ + 既存ハニカムコア
- 開発パネル②: 開発プリプレグ + 開発ハニカムコア

- ・2、3次元湾曲構造の量産化を見据えた低コスト製造技術を確立した。
- ・2次元湾曲構造については、理論値と実験値が概ね一致した。
- ・3次元湾曲構造の評価試験は2020年度内を計画する。

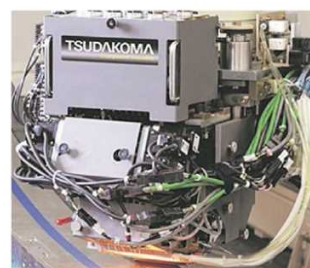


研究開発項目②-2

「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」

- 研究開発の目的: 民間航空機の中小型複雑形状部材に対応可能な小型タイプ自動積層装置による、航空機用複合材料の積層技術を開発する。

研究開発の目標	最終目標(2019年度)
(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発	製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプの自動積層装置を開発する。 ・試作部材積層時の積層不良発生頻度を半減 ・積層検査を無人で実施し、積層作業に関わる時間を低減 ・適用部材拡大(半径3m×周長3m程度の湾曲部材)への積層検査自動化に対応
(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発	開発した小型タイプ自動積層装置を用いた試作・品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。 ・上記湾曲部材を設計・積層・製作し、品質を評価(ポイド率2%以下)



開発した積層ヘッド部の外観



8. 研究開発成果 ③-2 航空機用難削材高速切削加工技術開発（第二期）

**【最終目標】**

①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発

炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発: CFRPおよびCFRPとチタン合金の重積材の穿孔と切抜き加工に対し、切削シミュレーションの高度化を図り、これを併用することで、高精度な加工を実現し、能率またはコストを従来よりも30%改善する。

②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発

②-1.Al-Li合金の平面大型薄物部品の加工後の変形(歪み)を、現状比で50%以上軽減し、矯正のための後工程をゼロとすること。また、有限要素解析による残留応力および変形状態の予測技術を確立すること。②-2.実部品を想定した標準的な形状モデルについて、加工時間を30%以上短縮する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	シミュレーションの妥当性ととも、CFRPおよびチタン合金との重積材の穿孔や切抜きに対して、有効な工具切削条件を見出した。	◎	複雑工具形状や工具経路に対するシミュレーションの高速演算対応。開発工具の品質管理・安定供給	高速演算用計算機の導入。工具成形工程の改善
②	1.歪みを低減可能な加工技術として、反転仕上げ切削とバニシング加工を合わせた反転バニシング切削を開発した。また、有限要素法解析を用いて反転バニシング切削の加工条件(特に一刃送り量と切込み深さ)を最適化することで、Al-Li合金の平面大型薄物部材へのポケット加工後の変形を現状比で80~120%軽減した。 2.研究開発したびびりを生じにくい仕上げ加工用工具や高速化・高切込み化を可能とする工具ホルダーの適用により、モデル部品加工における加工時間を30%以上短縮した。	1.◎ 2.○	1.目標を大きく上回る80~120%の歪みを低減できた。また、実部品に適用するには、より複雑な形状、加工経路における最適加工条件を継続的に検討する必要がある。	1.歪みをほぼゼロ(100%低減)にするために、実際の生産条件の目標形状や加工工程に合わせて最適な反転バニシング条件をチューニングする。

47

8. 研究開発成果 ③-2 航空機用難削材高速切削加工技術開発（第二期）

**【最終目標】**

③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発 オービタル加工においてドリル加工と同等の孔壁面の圧縮残留応力となる加工技術を開発

④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発 ケミカルミリング法による加工と同等の精度をロボット加工で得る

⑤切削-金属ディポジション複合化技術の開発 アルミ合金母材上に中間層としてNi-Cu合金、最上層にステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかにする。金属AM-切削加工の複合化によりトータルの加工時間の短縮、加工コスト削減を実現する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
③	圧縮性残留応力を改善する工具形状を最適化して、マシンニングセンタおよびオービタル加工装置での切削条件を最適化し、疲労寿命試験を行い、現状のドリル加工+リーマ加工と同等あるいはそれ以上を得た。	○	なし	なし
④	縦1 m、横2 mの大きさのアルミニウム合金製フレーム部品に対して、深さ精度± 0.1 mm のポケット加工を行った。	○	事前の測定動作無しでのロボット動作	ロボット誤差要因の詳細な解析による計算による補正 動作中の測定による補正
⑤	応答曲面法を基にした実験計画法により、アルミ合金母材上に中間層Ni-Cu合金および最上層ステンレス鋼を積層するための最適条件を明らかにした。また、積層造形と切削加工の二つの工程をオンマシンで実施し、プッシュ部品のプロトタイプを製作した。	○	切削加工後の仕上げ面上への再積層時の熱変形発生	シミュレーションを活用した熱変形挙動予測

48

8. 研究開発成果 ④-2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

実施項目1：SiC繊維の生産技術開発  
 (最終目標：2019年度)

実施項目1 ・引張強度2.0GPa以上のSiC繊維の低コスト量産プロセスを確立する。  
 (連続プロセス不可の場合の代替案：バッチ焼結プロセスで低コスト量産プロセスを確立する)

成果	達成度	今後の課題	研究方針
① SiC繊維の欠陥解析を実施し、欠陥の要因と強度への影響を明らかにした。さらに、欠陥を低減する対策を実施した結果、強度2GPa以上、ばらつき低減を達成。	○	完了	—
② 焼結機構の解明を行い、SiC繊維の焼結において重要となるパラメータを見出し、その最適化を行った。この知見を基に、バッチ焼結試作設備の設計を実施。 再委託成果含む。特殊無機材料研究所(H27-29)	○	完了	—
③ 強度ばらつきを抑制するためのポリマー改良を目的に、強度低下の要因となるポリマー中の異物除去方法を確立。 再委託成果含む。群馬大学	○	完了	—
④ バッチ焼結プロセスを確立し、CMC部材開発用にSiC繊維を供給するため、新規バッチ式焼結設備を設置。 再委託成果含む。山口東京理科大学	◎	完了	—
⑤ 連続焼結プロセスを確立し、低コスト量産プロセスを実現するため、連続焼結プロセスを検討。実現可能性を見出した。 再委託成果含む。山口東京理科大学	○	完了	—

達成度：◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

8. 研究開発成果 ④-2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

連続焼結プロセス確立に関する成果の一例

バッチ焼結法で昇温速度、保持温度等の最適化を実施しており、このような温度プロファイルの実現が可能な多ゾーンからなる連続焼結炉を設計し、連続焼結プロセスの開発を実施した。  
 生産能力はバッチ焼結法：200kg/年から、連続焼結法：>1t/年に向上、SiC繊維の特性は同等を確認。



バッチ焼結設備



連続焼結設備

連続焼結法で試作したSiC繊維の特性

	強度(GPa)	弾性率(GPa)
連続焼結法	2.53 (σ:0.14)	378 (σ:5)
バッチ焼結法	2.53 (σ:0.15)	377 (σ:13)

8. 研究開発成果 ④-2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

研究開発テーマ1: 材料開発

【最終目標】

- ①複数バッチの材料データを取得する。
- ②室温引張強度200MPa以上、1400℃×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。
- ③1400℃で高温タービン部品の耐環境コーティングに要求される耐久性を満足する。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	第3世代繊維と耐水蒸気性に優れたマトリクスを用いてCMCを作製し、1 <sup>st</sup> バッチ(2018FY)と2 <sup>nd</sup> バッチ(2019FY)の強度特性を取得し、同等の強度特性を確認。目標を達成した。	○		
②	高温高圧水蒸気(1400℃)に400Hr曝露した後の強度低下が12%となるマトリクスを開発し、マトリクスの形成技術を部品形状に適用。目標を達成した。	○		
③	1400℃水蒸気雰囲気にも安定なEBC施工条件を見出し、ガス流試験(エロージョン)とラッピング試験にて要求される耐久性を持つことを確認。目標を達成した。	○	飛行中に付着する砂(CMAS)等への耐性の確保。	次期プロジェクトでの改良を行う。

研究開発テーマ2: 部品試作・評価

【最終目標】

- ①織物形状不良や繊維配向を予測可能な解析ツールを開発
- ②第3世代SiC繊維を用いたCMC部品をエンジン搭載数程度製造し、製造性・組み付け性等を確認することで、エンジン搭載部品が製造可能であることを実証する。
- ③試作したCMC供試体・部品を用いた要素試験、およびエンジン搭載を想定した環境試験(1000回熱サイクル、400Hrガス流試験(コロージョン))を実施し、高圧タービンへの適用に目途を得る。

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	形状不良を無くす織物展開形状や、繊維配向を予測可能なシミュレータを世界初で開発した。	○		
②	形状検討により部品形状を選定し、応力解析にて設計の成立性を確認。部品製造性と組付け性を確認し、搭載部品が製造可能であることを実証。目標を達成した。	○		
③	部品形状を模擬した供試体を製造し、要素試験、およびエンジン搭載を想定した環境試験(熱サイクル、ガス流;コロージョン)を実施した。要素試験でCMCの強度が十分であることを確認。熱サイクル、ガス流試験ではEBCに一部損傷が見られたものの、概ね目標を達成した。	△	熱サイクル、ガス流試験における耐久性の向上。	耐CMAS性向上と合わせ、次期プロジェクトでの改良を行う。

8. 研究開発成果 ④-2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

研究開発テーマ(もしくは研究開発項目): 軽量耐熱複合材CMC技術開発(高性能材料開発)

【最終目標】

- ① SiC繊維が製織時の負荷に耐えられるような繊維コーティング方法を開発する
- ② 高性能SiC繊維を用いた繊維体積含有比率30%以上の三次元プリフォームの製造方法の開発  
および高性能SiC繊維の三次元プリフォームの量産を目指した装置を開発する

	成果	達成度	今後の課題	解決方針
①	脆性特性を有するセラミック繊維を用いて複雑なプリフォームを作り上げるために、摺動および繊維ダメージ抑制特性に優れたサイジング剤(糊剤)が開発できた。 また、同サイジング剤は水洗で容易に除去可能。	○	低コスト化	製造工程の低コスト化の為、より安定した製造が行えるよう、繊維へのダメージをさらに減らすサイジング剤やサイジングプロセスの開発を行う。
②	第3世代SiC繊維および高性能SiC繊維のような非常に折れやすい繊維を用いて、複雑な三次元プリフォームを形作るための製造プロセスおよび自動化装置を開発できた。 特に、目標である繊維体積含有比率30%以上を大きく上回る36%の三次元プリフォームの作製に成功した。	◎		生産性(製造速度・省力化)を上げる開発を行う。 実際の用途・形状を明確にした開発を行う。

8. 研究開発成果 ④-2 軽量耐熱性複合材CMC技術開発（高性能材料開発）

研究開発テーマ：CMC材料の開発

【最終目標】

- ① 室温引張強度200MPa以上、1400°C×400Hr暴露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。
- ② 中小型クラスの航空機用エンジンで燃焼器パネルがさらされる実環境を模擬した条件での燃焼評価試験を行い、健全に機能することを確認する。
- ③ CMC製燃焼器パネルに適した健全性評価手法を確立する。

成果	達成度	今後の課題	解決方針
① 室温引張強度200MPa以上を達成。 燃焼器内のCMCパネル近傍相当の水蒸気分圧、1400°C、400Hr暴露後の平均強度低下率20%以下(11.6%)を達成。	○		
② 複数サイクルの燃焼試験を実施。目視および寸法検査で健全であること、IF(Indentation Fracture)法による母材の劣化評価において、健全であることを確認した。	○		
③ 深層学習を用いた新規検査手法の開発を実施。特許取得に向けて活動中。種々の検査手法の長所短所を考慮し、複数の検査手法を組み合わせた健全性評価手法を確立。	○		

研究開発テーマ：CMC材料の開発

【最終目標】

- ① 開発した繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。

成果	達成度	今後の課題	解決方針
① 繊維の化学的性質については変化が無い場合、プリフォーム製織可否の確認がなされれば、CMC材料としての適用可否についても判定できる。 繊維単独での簡易評価により、製織性を定性的に評価する技術開発を実施。開発繊維に対し、簡易評価手法を適用することで製織性が従来と同等であることを確認。これによりこれまでと同品質のプリフォームの製織が可能であり、CMC材料としても適用可能であると確認できた。	○		

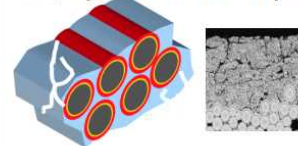
プリフォーム設計・製造



連続製織可能なパネル形状および織組織、製織技術を開発

マトリックス形成

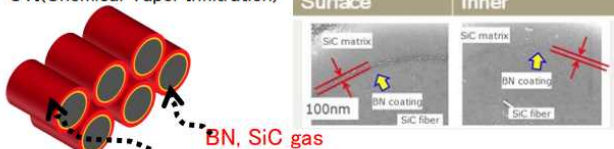
PIP(Polymer infiltration and Pyrolysis)



高密度、高熱伝導率を達成するマトリックス形成技術を開発

繊維界面コーティング

CVI(Cheical Vapor Infiltration)



パネルプリフォームを対象に均一な繊維界面コーティングを行う技術を開発

燃焼器パネル向けCMC仕様



中小型エンジン用燃焼器相当の温度・圧力条件で燃焼試験を行い、健全性を確認

開発項目の成果

(1) 分野横断(空力・構造・強度)シームレス機体設計シミュレーターの開発

・これまで逐次的に翼形や設計条件を変えながら実行せざるを得なかった解析を、自動で行うことが可能となった。

(2) シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化

・OHT 強度試験に関して、供試体の種類で4分の1以上が削減可能となり、供試体数においても約19%の削減が可能となることを見込まれた。

(3) 複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証

・簡易AFP 装置を作製し、最適化された曲線繊維複合材が、従来の直線繊維複合材よりも高い強度を有することを実験的に示した。

(4) 層流化技術開発

・後退翼における圧縮性三次元境界層の乱流遷移を高い精度で予測するためのツール開発を行い、安定解析と直接数値解析を組み合わせた統合遷移解析システムを構築し、大規模かつ詳細な遷移予測が可能となった。

(5) 複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション

・VaRTM、OoA プリプレグによる異種材料ハイブリッド一体構造の変形予測技術開発を達成した。

(6) エンジン-機体統合性能予測CFD技術の構築

・機体と稼働エンジンとの統合解析を達成し、機体とエンジン・ナセルとの相互作用の予測を可能とする基盤技術を開発した。

(7) 非巡航時における高精度非定常流体解析

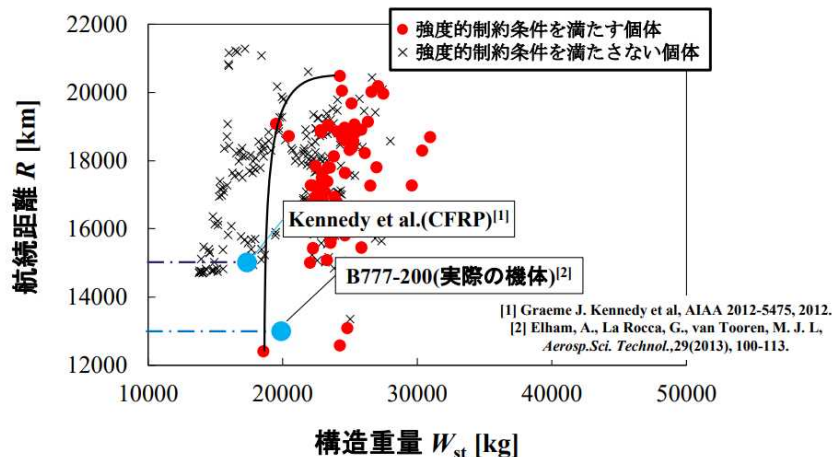
・構築した高精度LES データベースを基に平衡/非平衡壁面モデルLES を実施し、壁面モデルLES の予測精度および非平衡効果のモデル化について問題点や改善点を明らかにし、当初の目的を達成した。

研究開発項目⑤-1分野横断(空力・構造・強度)シームレス機体設計シミュレーターの開発

【最終目標】

- ① 2019年度までに検証と最適設計を実施
- ② 空力・構造設計パラメータの収収に必要な時間を50%、設計全体に必要な時間を25%低減する

	成果	達成度
①	川崎重工業にツールボックスを渡し、検証と最適設計を開始している。	○
②	ポテンシャルコードを実装し、計算時間の効率化を開始した。	○



・同様の航続距離を想定したKennedyら(CFRP)と比較しておおよそ一致した。  
→ 材料選択による軽量化と航続距離についての統一的な議論が可能。

### ◆成果の普及

	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			
2015年度	0	0	11	0	0	0	0	0	0
2016年度	3	0	23	1	0	0	3	0	1
2017年度	5	0	44	1	0	0	3	1	2
2018年度	5	0	53	3	0	1	3	1	3
2019年度	9	0	58	3	2	1	3	1	1
合計	22	0	189	8	2	2	12	3	7

※2020年3月31日現在

### ◆知的財産権の確保に向けた取り組み

	特許出願		
	国内	外国	PCT出願*
2015年度	1	0	0
2016年度	0	0	2
2017年度	8	0	0
2018年度	13	8	5
2019年度	22	32	7
合計	44	40	14

\*Patent Cooperation Treaty:特許協力条約

※2020年度3月30日現在

概要

最終更新日 2020年9月15日

プログラム（又は施策）名			
プロジェクト名	次世代構造部材創製・加工技術開発	プロジェクト番号	P15006
担当推進部/ PM、担当者	材料・ナノテクノロジー部 PM 氏名 長島敏夫（2020年8月～2020年9月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 飯山和堯（2019年9月～2020年9月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 松井克憲（2020年4月～2020年9月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 桑原智彦（2020年7月～2020年9月現在）		
0. 事業の概要	航空機の燃費改善、環境適合性向上、整備性向上、安全性向上といった要請に応えるため、複合材料を始めとした我が国が強みを持つ材料分野における技術革新を促進し、航空機に必要な信頼性・コスト等の課題を解決するための要素技術を開発する。これにより、航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO <sub>2</sub> 排出量の削減、整備性向上、安全性の向上並びに我が国の部材産業及び川下となる加工・製造産業の国際競争力強化を目指す。産学官の密接な連携の下での我が国基盤の構築及び関連産業の成長を実現する。		
1. 事業の位置付け・必要性について	<p><b>【事業の必要性】</b>                  世界の民間航空機市場は、年率約5%で増加する旅客需要を背景に今後20年間で、累計約3万から3万5千機（4～5兆ドル程度）となる見通しである。「航空構造ビジョン（平成27年12月11日）」では、国内航空機産業は2020年までに売上高2兆円に、2030年には3兆円を達成としている。国際的な産業競争が激化する厳しい競争の中で、航空機産業では高度な先進技術開発が進められてきており、サプライヤービジネスにおいても今後激しい競争にさらされていくことが予想されるため、我が国においても航空機産業の国際競争力を維持・拡大していく必要がある。航空機は、幅広い分野の技術の組み合わせた複雑なシステムを有しており、その部品点数は、自動車の2～3万点の約100倍に及び300万点もの部品から成り立っており、産業構造の裾野が広い。                  燃費改善、環境適合性等の市場のニーズに応えるため、近年の航空機（機体・エンジン・装備品）では、軽量化のために構造部材として複合材及び軽金属等が積極的に導入されており、先進的な素材開発及び加工技術開発等が急務となっている。我が国の強みを活かしつつ、民間航空機に求められる安全性、環境適合性、経済性という課題において、他国より優位な技術を獲得し航空機産業の国際競争力を維持・拡大していくことは、極めて重要である。これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進める上で、重要な役割を果たすことも期待されている。</p> <p><b>【政策的位置づけ】</b>                  本事業は、総合科学技術・イノベーション会議により策定されている「科学技術イノベーション総合戦略」、「エネルギー・環境イノベーション戦略」等に則り、構造材料の飛躍的な軽量化等によって輸送機器のエネルギー利用効率の向上を目指すために実施するものである。</p> <p><b>【NEDOが関与する意義】</b>                  NEDOは第三期中期目標におけるミッションとして、「我が国の経済社会が必要とする具体的成果を創出するとともに、我が国の産業競争力の強化、エネルギー・環境制約の克服に引き続き貢献するものとする。」ことを掲げている。                  本プロジェクトの狙いは、産業構造の裾野が広い航空機産業の国際競争力を維持・拡大し、これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進めることで日本の主要産業の競争力を強化し、新たな産業創成を目指すものであることから、NEDOのミッションと合致する。さらに、素材開発から材料、部材と航空機に採用されるまでには長い研究開発期間を要するためリスクが大きく、また単独企業での開発ではなく産学官の密接な連携の下で激化する厳しい国際的な産業競争に勝つ必要があることから、NEDOプロジェクトとしての実施が妥当である。</p>		

2. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>本事業の目的は、航空機の燃費改善、環境適合性向上、整備性向上、安全性向上といった要請に応えるため、複合材料を始めとした我が国が強みを持つ材料分野における技術革新を促進し、航空機に必要な信頼性・コスト等の課題を解決するための要素技術を開発することである。本事業で開発した成果が次世代航空機に搭載され、軽量化とエンジンの高効率化による燃費改善が図られることにより、2030年において、25万トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減することを目標としている。</p> <p>研究開発項目①-2においては、複合材構造部材に関して、アルミニウム合金構造と同等の高生産性・低コスト生産技術の研究開発、複合材構造に由来する内部剥離等の検査技術確立、及び複合材本来の特性を生かした軽量化技術開発を実施する。軽金属構造部材に関しては、マグネシウム合金の開発、加工法の開発とその信頼性の向上検討を実施し、マグネシウム合金の航空機構造材料への適用技術開発を実施する。総合調査研究に関しては、国内外の研究開発動向や政策支援の状況、ボーイング、エアバス等OEM、及びエアラインの動向等を調査・分析し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していくための調査を実施する。</p> <p>研究開発項目②-2においては、民間航空機の中小型複雑形状部材の製造に適用可能な小型タイプ自動積層装置による、航空機用複合材の積層技術を開発する。</p> <p>研究開発項目③-2においては、航空機用難削材の加工プロセスについて、有限要素法や有限体積法に基づくシミュレーション技術及び切削理論に基づくコンパクトでかつ高度な解析技術を開発する。</p> <p>研究開発項目④-2においては、耐熱性に優れ、金属材料よりも軽量の部材として開発が期待されているCMCの実用化を加速し、その普及拡大による低炭素・省エネルギー社会の実現に寄与するため、CMC材料及び高性能SiC繊維を開発する。</p> <p>研究開発項目⑤においては、設計初期段階から空力と構造及び強度解析をシームレスに連成することで、高い次元での多目的最適設計が可能なシミュレーターを開発する。</p>						
<p>事業の計画内容</p>	<p>実施事項</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	
	<p>研究開発項目①-2</p>						
	<p>研究開発項目②-2</p>						
	<p>研究開発項目③-2</p>						
	<p>研究開発項目④-2</p>						
	<p>研究開発項目⑤</p>						
<p>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)</p> <p>契約種類: ○をつける (委託(○) 助成( ) 共同研究(負担率( )))</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	<p>総額</p>
	<p>一般会計</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>
	<p>特別会計 (電源・需給の別)</p>	<p>679</p>	<p>1,274</p>	<p>2,961</p>	<p>3,214</p>	<p>2,749</p>	<p>10,877</p>
	<p>開発成果促進財源</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>
	<p>総予算額</p>	<p>679</p>	<p>1,274</p>	<p>2,961</p>	<p>3,214</p>	<p>2,749</p>	<p>10,877</p>
	<p>(委託)</p>	<p>679</p>	<p>1,274</p>	<p>2,961</p>	<p>3,214</p>	<p>2,749</p>	<p>10,877</p>
	<p>(助成) : 助成率△/□ (共同研究) : 負担率△/□</p>						
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>製造産業局 航空機武器宇宙産業課</p>					



	プロジェクト リーダー	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻教授：青木 隆平
	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）	<p>研究開発項目①-2 委託先：RIMCOF 技術研究組合—再委託 東京大学、京都大学、熊本大学、神戸大学、九州大学、立命館大学、名古屋大学、九州工業大学、JAXA、三菱エンジニアリング、豊田工業大学 —共同実施 秋田大学 委託先：ジャムコー再委託 東京農工大学、JAXA —共同実施 東京大学</p> <p>研究開発項目②-2 委託先：川崎重工業—再委託 津田駒工業 —共同実施 金沢工業大学</p> <p>研究開発項目③-2 委託先：東京大学—再委託 東京電機大学、東京農工大学、東北大学、新潟県工業技術総合研究所、広島大学</p> <p>研究開発項目④-2 委託先：宇部興産—再委託 群馬大学、山口東京理科大学 委託先：IHI—共同実施 東京大学、東北大学、JAXA、東京理科大学 委託先：川崎重工業—再委託 豊田自動織機、イビデン、東京大学、東京工科大学、—共同実施 JAXA 委託先：シキボウ</p> <p>研究開発項目⑤ 委託先：東北大学—再委託 川崎重工業、東レ、東京工業大学、上智大学、東京理科大学、JAXA、SUBARU、電気通信大学 —共同実施 三菱重工業、IHI</p>
情勢変化への対応		<p>研究開発項目④-2 は、CMC を取り巻く環境の変化から、部材開発を加速するために、2015 年度に宇部興産の再委託先であった IHI、シキボウ、川崎重工業を委託先とした。</p> <p>研究の進捗に合わせて、再委託先・共同実施先を追加して必要な研究体制を構築した。具体的には、2016 年度に川崎重工業㈱の共同実施先として JAXA を、㈱IHI の共同実施先として東京理科大学を加えた（研究開発項目④-2）。2017 年度に川崎重工業㈱の再委託先として東京工科大学を（研究開発項目④-2）、㈱ジャムコの共同実施先として東京大学を、再委託先として JAXA を加えた（研究開発項目①-2）。2018 年度に RIMCOF 技術研究組合内の分担先として不二ライトメタル㈱を（研究開発項目①-2）、RIMCOF 技術研究組合の再委託先として九州大学を（研究開発項目①-2）、東北大学の再委託先として㈱SUBARU 及び電気通信大学を、共同実施先として三菱重工業㈱及び㈱IHI を（研究開発項目⑤）、東京大学の再委託先として広島大学を（研究開発項目③-2）追加した。</p> <p>研究開発項目毎に行われた技術委員会や NEDO 主催の技術推進委員会を通して、研究開発方針の修正等情勢変化に対する対応を行った。</p>
中間評価結果への対応		<p>・中間評価（研究開発項目④-2 及び⑤）のポイント</p> <p>①各グループ間での連携が希薄に感じられるため、研究成果の相互の関連性を認識する機会を出来るだけ設けて情報の共有化を行うなど、有機的な連携体制の構築を望む。</p> <p>②実用化に向けては使用する際の制約や条件に対応した信頼性が求められるため、定量的な指標を用い、客観的表現で研究結果を評価する必要がある。</p> <p>・反映（対処方針）のポイント</p> <p>①基本的に部材開発は競争領域であるが、協調できる領域については、現在実施している年 2 回の実施者横通しの技術会議を利用してサプライチェーンの上下間での素材への要求特性、材料の特性等の情報共有をより一層進め、連携ができる目標設定を検討する。</p> <p>②ユーザーメーカーとの情報交換を行い、実用化に必要な特性に関する数値目標を検討し、各実施者の目標設定に反映する。</p>
評価に関する事項	事前評価	2015 年 2 月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
	中間評価	2017 年 9 月実施 担当部 材料・ナノテクノロジー部
	事後評価	2020 年 11 月実施予定 担当部 材料・ナノテクノロジー部

<p>3. 研究開発成果について</p>	<p>1. 研究開発項目①-2「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発（第二期）」 【最終目標（2019年度）】</p> <p>複合材構造部材</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>確立した高生産性・低コスト生産技術の要素技術を、航空機の適用部位を明確にして、想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>確立した複合材本来の特性を生かした軽量化を可能とする基礎技術を用いて、航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> <li>複合材由来の欠陥等の検査技術の外部審査によるTRL7を取得する。</li> </ul> <p>軽金属構造部材</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>マグネシウム合金において、明確にした航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。</li> </ul> <p>総合調査研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>航空機の方法評価から設計、製造、運航に至るまでの各フェーズにおいて、実用化のために解決すべき課題を整理するとともに、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等を明確化する。</li> </ul> <p>【研究開発成果の概要】</p> <p>(1) 複合材構造部材開発・軽金属構造部材開発・総合調査研究</p> <p>① 広域歪み分布計測システム</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>従来機へのSHMシステム適用により、メンテナンスコストを20%低減できることを確認した。また、エアラインとの情報共有、協議を通じて実用化に向けた技術課題を明確化し、更に、BOCDA-SHMシステム仕様をまとめ、有識者ヒアリング・ディスカッションを通じてBOCDA-SHMで想定される認証プロセス及び今後の開発課題について明らかにした。</li> </ul> <p>② 複合材構造衝撃損傷検知システム</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実用化データ取得のために必要な検討および予備試験を実施し、装置の機能／安全性を確認した。更に、SHM認証の有識者、関係者と共に設定した実証試験計画に基づき、航空機搭載を模擬した地上実証試験および飛行実証試験を通じて実用化データを取得し、実機適用に向け大きく前進した。</li> <li>適用構想の構造様式・荷重条件・変形モード等を考慮に入れた最適な損傷検知手法を設定し、適用構想の一つであるBOI損傷検知について、試験・解析、損傷検知方法の評価を実施し、分析用データベース構築を含む分析手法を検討した。また、システム構成要素であるFBGセンサ、計測装置、記録・分析装置の改良、試作、評価を実施し、継続的にハードウェアおよびソフトウェアの改良を進めると共に、将来に向けたシステムの改良構想についても検討を行った。更に、航空機搭載を模擬した地上実証試験および飛行実証試験を通じて実用化データを取得し、実機適用に向け大きく前進した。</li> </ul> <p>③ 超音波ラム波を用いたSHM技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実機を用いた確認試験および有識者との協議より、飛行試験で実証すべきことを洗い出し、必要なシステムの改良を行った後、飛行実証を行い、飛行前後においてシステムが不具合無く動作することに加えて、本SHMシステムを用いてユーザーが容易に計測できることも飛行試験により確認することができた。また、飛行試験で取得したデータを用い、運用、飛行環境下においても波形の分析結果を見るだけでユーザーが容易に損傷の診断をできることも確認することができた。更に、有識者との協議を通じ、実機適用や認証に必要な様々な知見も得ることができた。</li> <li>損傷、MFCアクチュエータ等、解析に必要な種々要素を簡易にモデル化する手法を考案し、また、考案した手法を適用したより複雑な補強パネル中に伝搬する超音波の挙動の解析を通じ、共に、実測と良く一致する結果を得ることができた。また、損傷を有する補強パネルの解析を実施し、損傷による波形の変化がどの程度の範囲で起こるかを推測することができた。これらの知見を活用することで最適なセンサ/アクチュエータ配置が可能となった。更に、反解析的有限要素法により、補強パネルにおける超音波の理論的な挙動を解析し、同手法がSHMシステムのアクチュエータ/センサ配置器および波形分析の理論的裏付けとして有用であることを確認した。</li> </ul> <p>④ ボルトレス組立</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>プロセスの異なる二種類の手法の特性を評価し、それぞれの処理条件の最適化により、目標である接着剤凝集破壊(せん断強度30MPa相当)を達成、及び従来手法(プラズマ処理)と同等以上の強度特性(実用接着剤凝集破壊レベル)が得られることを確認した。</li> <li>コミングル材の編成によるプリフォーム技術を活用した複雑形状(I型ストリン</li> </ul>
----------------------	---

ガ)の製造性を評価し、強度試験により従来材と同等以上の強度を確認した。また、従来のオートクレーブ成形に代わる電磁場急速昇温成形技術によって、コニングル材C型プリフォームを用いた連続成形試作(長さ600mm)を行い、技術コンセプトの成立性を実証した。また、成形後にPad-UP付与やコンター付与などの後加工技術の基礎検証を行い実用化に向けての課題整理を実施した。

⑤ 高速成形技術開発

- ・熱硬化材の特性および解析技術等を活かして部品の板厚や形状を工夫し、高速成形可能かつ強度特性を向上させた部品の設計・試作・評価を通じて、航空機の適用部位を明確にした
- ・開発した高速成形技術を用いて成形した小型・中型の模擬部品に対して強度試験を行い、従来の部品に対して同等の重量かつ同等の強度特性を持ち、航空機構造部品として適した強度特性を持つことを確認した。
- ・適用先部品として選定したシアタイおよびスタンションの模擬部品に対して、実機量産部品の実績と本研究の試作結果に基づく試算により、従来部品の半分以下の成形時間および70%程度の製造コストで製造可能なことを確認した。

⑥ 一体成形翼構造

- ・重量同等で製造コストを48%削減できるボックス一体ハイブリッドコキユア技術について、複合材ボックス構造の成形プロセスを確立するとともに、ボックス強度試験より技術的成立性を確認し、目標を達成した。また、従来の複合材ボックス構造に対して、生産設備コスト34%低減について実現の目途を得た。
- ・試験時間を70%以上削減可能であることを確認し達成した。現状の国際標準による試験法(SAE試験標準)に本システムを反映するべくSAE委員会に参加・調整し、放電探知試験技術に係る試験法を標準に盛り込む目途を得た。
- ・本研究にて提案するハイブリッド積層構造が雷撃損傷度合いを82%抑制できることを確認するとともに、コスト80%、重量4kgを削減できる耐雷システムの成立性を明らかにした。

⑦ KUMADAIマグネシウム合金の材料開発

- ・φ29mm小型押出ビレットを用いた実験結果を基にしたφ69mm大型押出ビレットを用いた試作実験により、Mg-0.9 at%Zn-2.05 at%Y-0.15 at%Al成分を持つ合金により、押出速度約870 mm/min、引張降伏応力407 MPa、伸び14%、腐食速度 0.6 mm/year以下、発火温度750℃以上を達成するとともに、追加目標値である破壊靱性値( $K_{Ic}$ 値) 20 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>以上、き裂進展速度目標を達成した。
- ・大型素材製造工程を考慮し、最適化学成分としてMg - 8at% Al - 4at% Ca - 0.02 at%Mnを明らかにした。これにより押出速度500 mm/min、引張耐力250 MPa、伸び5%、1 w/v%NaCl水溶液浸漬試験における腐食速度 0.6 mm/year以下、発火温度750℃以上を達成した。

⑧ KUMADAIマグネシウム合金の航空機構造適用

- ・鑄造不燃マグネシウム合金の大型素材製造における品質の安定化と低コスト化を達成する技術の確立を目指し、押出ビレットの鑄造プロセス及び熱間押出プロセス条件の最適化を行った。その結果、実部材を想定したアングルやチャンネル、Tバーなどの型材において、耐力250MPa以上、伸び5%以上の機械的特性を有する20m超の大型素材の製造が可能となる技術開発に成功した。
- ・鑄造不燃マグネシウム合金が適用可能な部品としてクリップなどの二次構造部品を選定し、10%以上の軽量化が可能であることを確認した。また、これらの二次構造部品の試作評価を行い、既存の工程にて製作可能であり、表面処理、塗装を施工することにより、部品としての耐食性も良好であることを確認できた。材料特性の評価を行い、引張耐力250MPa、伸び5%以上のプロジェクト目標をクリアしていることを確認した。また、発火温度は1000℃以上であり、目標を大幅にクリアしている。最後に材料スペック要求内容を検討し、今後、実機適用に必要なスペック要求を整理できた。

⑨ 総合調査研究

- ・「SHM実用化」では、エアバスとの協同研究(JASTAC-II)やJAXA保有機体での飛行試験をとりまとめてTRL7達成に貢献するとともに、米国・Sandia研究所との連携をとりまとめて、認証取得・実用化への道筋を明らかにした。
- ・「高レート設計・製造技術開発」では、欧州機関との共同研究(EFFICOMP)のとりまとめや、研究開発期間途中での体制強化(新規再委託先追加等)を行い、TRL5達成に貢献した。
- ・「マグネシウム合金開発と航空機への適用研究」では、研究開発期間途中での体制強化(材料メーカー参画)、第三者計測機関を活用した試作材特性の客観的評

備とりまとめを行い、目標達成に貢献した。

(2) カーボンハニカムパネル開発

- ・軽量化目標をおおよそ達成したカーボンハニカムパネルを開発し、耐空性評価(耐火・強度)を実施することで実用可能性の妥当性について確認した。
- ・複合材本来の特性を生かした軽量化パネルの開発に関しては3次元湾曲パネルの製造技術を確認し、試験片の製作を完了した。

2. 研究開発項目②-2「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」

【最終目標(2019年度)】

(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発

- ・種々の複雑形状の積層に対し、作業者による手積層と同等の品質を確認する。
- ・将来の複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な積層速度で、連続積層可能で、製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプ自動積層装置を開発して装置仕様を決定する。

(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発

- ・種々の複雑形状に対し、開発した装置を用いて部材の試作を実施し、その品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。

【研究開発成果の概要】

- ・本開発の成果として、国産初となる小型ロボットタイプのCFRP曲面積層機を開発した。
- ・本積層機は、高精度アームロボットに小型積層ヘッドを搭載することで、曲面など複雑形状のCFRP部品の自動積層を、国産機として初めて実現した。

3. 研究開発項目③-2「航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)」

【最終目標(2019年度)】

- ・予測技術の精緻化を図り、発展させて、加工費あるいは加工時間を30%以上削減する高性能加工技術を確認する。

【研究開発成果の概要】

①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発

この課題における成果としては、シミュレーションによる切削過程と剥離の解析が可能であることと、これを併用して開発された技術が、工具メーカーが推奨している従来の切削条件や工具寿命の実績に対して大幅な改善が得られたことである。

難削材の切削における作業改善には、被削材が高価であり、適用可能な工具や切削条件を得るには、人件費も含めて多くの試験費が必要である。このような現状に対して、難削材であるCFRPやチタン合金の切削を対象としたシミュレーションにより、切削条件や工具の選定に対する時間とコストを削減し、作業改善を図った。このことは航空機産業だけでなく、他の製造メーカーにおいても適用可能であり、デジタルツインに基づく技術開発に発展できる。

一方、その成果として得られた穿孔技術は、いずれも目標よりも高いレベルでの改善を達成している。そのため開発技術は、航空機製造において大幅なコストダウンが期待でき、経済性に対するインパクトがある程度見込まれる。この成果は航空機産業だけでなく、CFRPやチタン合金を部材として使用する自動車等の他の産業における製造プロセスにも適用可能であるため、開発技術の波及効果は大きい。

②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発

次世代アルミリチウム合金の平面大型薄物部材の加工において現状の課題となっている切削加工後の歪みに対して、切削残留応力を制御することで歪みを軽減可能な革新的な加工技術として、反転バニシング切削技術を開発した。また、反転バニシング切削の加工条件を最適化するために、バウシング効果を考慮することで反転バニシングを再現可能な有限要素法解析モデルを開発した。これにより、Al-Li合金の平面大型薄物部材の切削加工後の歪みを大幅に低減することが可能となり、歪み矯正のための後工程を省略し製造コストの削減が可能となる。

工具開発を主としたミスマッチやびびりの発生を無くす手仕上げ不要な加工技術や加工条件の高能率を可能とする工具ホルダー設計技術開発により、ほぼすべての機体に適用されているアルミ合金のポケット形状部品を想定した標準的なモデルについて、30%以上の加工時間短縮を実証し、生産コスト削減の要求への対応を可能とした。また本開発技術は国内の中小企業が多く保有する中小型加工機での高能率化が可能であることから、今後の生産増における新規参入にもつながる。

③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発

機体製造企業では、疲労試験結果から現状レベルと同等あるいはそれ以上の疲労寿命が期待

できるとの見通しを得られたことから、現状のドリル加工＋リーマ加工の代替に適用できる可能性が高いと判断している。そのため Boeing777-X の中央翼への展開として、チタン部品の大口径孔専用加工機からオービタル加工機への置き換えを検討している。期待される効果として、ドリルステップを削減できるため工具コスト削減の可能性、バリ取り時間の削減による組立時間の削減、品質の安定化、加工環境（切削油剤飛散防止、切屑のパキューム吸出し）がある。これは作業効率の向上と労働作業現場の改善にもつながる。

企業では中央翼等 難削材、厚板 構造組立を対象とし、オービタル穿孔適用箇所することで従来ドリル加工に対し約 10%程度のコスト削減が見込めると試算している。

本方法を大口径、厚板等の類似の条件であれば航空機機体以外への適用の可能性があり、穿孔加工品で疲労寿命を期待する軸受等に EV 用モータ等の部品にも展開が期待できる。

#### ④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発

市販のロボットは搬送や組立を主目的として開発されており、その位置決め精度や軌跡精度は一般のマシニングセンターなどの工作機械に対して大きく劣っている。本研究ではレーザートラッカーでロボット手先の指令軌跡と実際の動作軌跡との誤差を測定し、指令手先経路を補正することによって、ロボットの軌跡精度や実際に加工した際のポケットの深さ精度をロボット可動範囲のうち大きな範囲（縦 1m × 横 2m）で改善することができた。ロボットでの加工精度が向上したことにより、大型部材である航空機フレーム用アルミニウム押出材へのポケット加工を、将来的に現在行われているようなアルカリ溶液によるエッチングではなく、より環境負荷の小さい切削加工で、大型 5 軸マシニングセンターを使用するよりも小さい設備投資やランニングコストとなるロボットで実現できる端緒ができた。ロボットによる加工が浸透すれば、ロボットの利用用途や市場を大きく広げることができるようになる。

また、加工後に行われるワーク板厚測定作業を自動化するシステムを開発した。このシステムは ATC で利用できるように、測定以外のふき取り動作などはプローブ押し付け力を利用して作動するよう設計製作された。これにより、現在手作業で行われている加工後の切りくずふき取り作業や板厚測定作業を自動システム化しロボットに置き換えることが可能となった。また、将来的にロボットが加工も担うようになった際も、切削工具と測定システムを持ち替えながら作業を進めることが可能となった。

#### ⑤切削－金属ディポジション複合化技術の開発

応答曲面法を基にした実験計画法により、アルミ合金母材上に中間層 Ni-Cu 合金および最上層ステンレス合金を積層するための最適条件を明らかとした。アルミ合金母材上への Ni-Cu 合金の積層造形では、レーザー出力を大きく、粉末供給量を小さくした場合に安定した造形物が得られることが明らかとなった。また、送り速度に関しては適正な範囲が存在し、小さすぎる場合はレーザー走査時に造形物が母材上から剥離して凹部が形成され、表面性状は劣悪となった。一方、Ni-Cu 合金上へのステンレス合金の積層造形では、レーザー出力を小さく、送り速度を大きくした場合に安定した造形物が得られることが明らかとなった。粉末供給量に関しては適正な範囲が存在し、小さすぎる場合は造形物内部にクラックが発生して大きな空隙が形成され、大きすぎる場合はレーザー走査時に造形物が母材上から剥離する現象が認められた。造形物の剥離が発生する条件では造形物/母材界面で金属間化合物が形成されており、線膨張係数など材料特性の違いから欠陥が発生することが明らかとなった。したがって、これらの欠陥を抑制するためには、母材や供給材の組み合わせによりレーザー出力や送りなどの造形条件を選定することが重要である。また、積層造形と切削加工の二つの工程をオンマシンで実施することにより、各工程での段取替えが不要となり、トータルの加工時間の短縮が実現できた。LMD による金属 AM-切削加工の複合化技術は、粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion: PBF）と切削加工の複合化技術と比較して高能率であり、時間的制約などにより PBF では造形が不可能と考えられる大型部品の製造において能力を発揮できることが明らかとなった。本技術の欠陥発生時の現象観察や発生した欠陥のデータベース化により欠陥生成機構の解明を図ることにより、金属 AM の高度化に大きく寄与できたと考えられる。

### 4. 研究開発項目④-2「軽量耐熱複合材 CMC 技術開発（高性能材料開発）」

#### (1) CMC 材料の開発

##### 【最終目標（2019 年度）】

- ・ 1400℃×400Hr 曝露後強度低下 20%以下を満足する CMC 材料を製造可能な、引張強度 2.0GPa 以上の SiC 繊維の低コスト量産プロセスを確立する。
- ・ 室温引張強度 200MPa 以上、1400℃×400Hr 曝露後強度低下 20%以下を満足する CMC 材料を開発する。

##### 【研究開発成果の概要】

- ・ 連続焼結プロセスを確立し、低コスト量産プロセスを実現するため、連続焼結プロセスを検討した。連続焼結プロセス設備を設置し、強度 2GPa 以上の SiC 繊維の試作が可能となっ

た。

- ・平均室温引張強度として292MPaが得られる材料を開発した。EBC施工後のCMCに対し、1400°C×400Hr水蒸気環境に暴露し、曲げ強度の低下率を計測し、平均強度低下率5%であることを確認した。

## (2) 高性能 SiC 繊維の開発

### 【最終目標（2019年度）】

- ・引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発、さらに試作条件を確立し、CMC部材評価用試料を供給する。
- ・高性能SiC繊維における三次元プリフォームの量産を可能とするプロセスを開発し、繊維体積割合30%以上のプリフォームを試作する。
- ・開発したSiC繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。

### 【研究開発成果の概要】

- ・ラボスケールで合成したポリマーの繊維化を実施。強度3GPa以上かつ耐クリープ特性に優れたSiC繊維が得られた。上記ポリマーの試作及び紡糸・焼結等の試作条件を確立し、少量サンプルを試作。CMC部材評価用として提供を行った。
- ・高性能SiC繊維においても必要とされるVf30%を大きく上回る約35%の良質な三次元プリフォームを製造することに成功した。
- ・耐熱温度1400°Cをさらに向上させた高性能SiC繊維のCMC適用化を繊維の特性評価によって検討した。繊維の耐熱性と屈曲性を両立したことで、CMCへの適用可能性を見出し、1400°C級CMCのさらなる耐熱性向上の可能性を示した。

## 5. 研究開発項目⑤「航空機用構造設計シミュレーション技術開発」

### 【最終目標（2019年度）】

- ・解析検証を終了し、数値シミュレーションの実用性を確認する。
- ・数値シミュレーションツールをソフトウェア化し、最適設計技術として確立する。

### 【研究開発成果の概要】

#### (1) 分野横断（空力・構造・強度）シームレス機体設計シミュレーターの開発

- ・本項目で開発したシミュレーターは、空力・構造・破壊解析をシームレスに連成することで、これまで逐次的に翼形や設計条件を変えながら実行せざるを得なかった解析を、パラメータ設定から構造サイジングによる非破壊機体解の取得まで自動で行うことが可能となった。
- ・これにより高並列計算機の利用が初めて可能となり、数百機クラスの解析を同時並行で行えるようになったことで、CFRP主翼の多目的設計のパレート面を得るための空力・構造設計パラメータ収斂に要する時間は数百分の一に短縮された。
- ・さらに、解析時間のボトルネックとなる空力解析において簡易解析手法の高度化により大幅な時間短縮が実現され、航空機開発の時間的コストを削減可能な技術の開発という観点で大きく寄与があった。
- ・また本項目で開発した機体設計シミュレーターは川崎重工業に引き渡しシミュレーターの実行検証を行った。

#### (2) シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化

- ・ストリンガーパネル試験片の衝撃後圧縮試験に関して、強度低下量に対しても解析結果と試験結果との差異は10%以下となることを見込まれた。
- ・OHT強度試験に関して、供試体の種類8種類中2種類（4分の1）以上が削減可能となり、供試体数においても77体中15体（約19%）の削減が可能となることを見込まれた。

#### (3) 複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証

- ・流線モデルと深層学習を利用した低計算コストの曲線繊維配向最適化シミュレーターを開発した。
- ・トウプリプレグを切断・積層する小型のヘッドと、コンピュータ数値制御を用いた位置決め装置を持つ簡易AFP装置を作製し、最適化された曲線繊維複合材が、従来の直線繊維複合材よりも高い強度を有することを実験的に示した。

#### (4) 層流化技術開発

- ・後退翼における圧縮性三次元境界層の乱流遷移を高い精度で予測するため、直接数値計

算コードおよび非線形安定性解析ツールの開発を行い、安定解析と直接数値解析を組み合わせた統合遷移解析システムを構築し、大規模かつ詳細な遷移予測が可能となった。

- これにより、翼面の孤立粗度 (Discrete Roughness Elements ; DRE) による乱流遷移の抑制効果 (層流化効果) を検証し、配置や形状の最適性やロバスト性を調査し、実旅客機の抵抗低減に関し画期的なデバイスの概念を創出した。

(5) 複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション

- 実機規模の複雑形状に適用可能な高速含浸解析およびフローメディア配置を調整する事による含浸条件最適化技術の開発を目標とし、ツールを完成させた。従来ツールでは困難だった実機レベルの大規模解析を実施し、解析結果が得られることを確認した。
- VarTM、OoA プリプレグによる異種材料ハイブリッド一体構造の変形予測技術開発を達成した。単一樹脂よりも大きな変形を生じた補強パネルの試作品と変形量の比較を行い、よく一致する結果が得られた。

(6) エンジン-機体統合性能予測 CFD 解析技術

- 機体と稼働エンジンとの統合解析を達成し、機体とエンジン・ナセルとの相互作用の予測を可能とする基盤的な技術を開発した。

(7) 非巡航時における高精度非定常流体解析

- 大規模 LES 解析では、レイノルズ数や衝撃波強さの異なる解析ケースを完了し、高速飛行時の非定常剥離流れにおける高精度 LES データベースの構築に成功した。
- また構築した高精度 LES データベースを基に平衡/非平衡壁面モデル LES を実施し、壁面モデル LES の予測精度および非平衡効果のモデル化について問題点や改善点を明らかにし、当初の目的を達成した。
- 実機設計への適用を見据え、航空機設計で用いられている複雑形状に対応可能な解析手法と壁面モデル LES 技術を組み合わせた手法について、非定常剥離流れにおける解析精度検証を実施した結果、非定常剥離流れに対する推算精度を向上できることが明らかとなった。

(8) 着氷に関する非定常空力設計シミュレーターの開発

- 着氷が発生した三次元翼の流れ場を数値計算で解き、三次元性のある着氷形状が流れ場に与える影響を考察し、性能に対する数値計算の精度を検証した。前縁着氷の直後での剥離領域の渦構造を詳細に捉えることができた。また、着氷によって減少する揚力を実験値と比較して良い精度で予測することができた。
- 前縁の防氷システムで溶けた水が後方の翼面上で再凍結する Runback Ice 現象の防止システムを検討した。翼面加熱機構を実現するためには、主翼の構造などにより決定された加熱領域に対し、その前端付近で乱流遷移が起こるような翼型を選定することで、翼型の空力性能への影響を抑えながら良好な加熱性能を得ることが有望であることが示唆された。
- 開発は非常に成功し、5年の計画のところを3年で終了した。研究成果は、共同実施先の企業で実用化され、開発中の航空機の2017年の飛行試験に役立てられた。

投稿論文	22 件
特 許	44 件
その他の外部発表 (プレス発表等)	200 件

4. 実用化に向けた取組及び見通しについて

1. 研究開発項目①-2 「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発 (第二期)」

(1) 複合材構造部材開発・軽金属構造部材開発・総合調査研究

① SHM 実用化 広域分布歪み計測システム

TRL9 を目指した SHM 技術開発において、機体製造を行う OEM、ユーザであるエアライン・MRO、サプライチェーンを構成する計測器メーカー・ファイバメーカー等とコンソーシアムを組み、航空局などの意見聴取も行いつつ SHM システムを TRL9 まで引き上げ、認証を取得する。その後、具体的な各機種へのカスタマイズ等の開発を目指す。

② SHM 実用化 複合材構造衝撃損傷検知システム

航空機搭載システムを用いた整備サービス事業の確立には、運用機体でのパイロットケースを通じた実証作業が欠かせない。実用化に向けた課題の解決を行っ

た上で、開発システムによる計測データの取得機会確保・拡大により技術、データの蓄積を行うため、OEM への協業・ソリューションの提案、適用構想・事業成立性に関する再協議に取り組む。

③ SHM 実用化 超音波ラム波を用いた SHM 技術

当面は、技術部において業界動向を調査しながら、エアライン、航空局 (JCAB、FAA、EASA 等)、及び機体メーカーとの協業の機会を探求する。同時に、航空以外の分野の調査も行い、当該システムの優位性を生かし、実用化を目指す。

なお、今後の取り組みにおいては、社内有識者等によるゲートチェックを設け、その後の対応を適宜判断することとする。

④ 高レート設計・製造技術開発 ボルトレス組立

複合材製航空機構造において、現状のボルト組立と同等の安全性を確保しつつ、低コスト、且つ信頼性の高いボルトレス組立の実用化に向け、平成 31 年 3 月までに以下項目の目途付けを完了した。今後は社内研究として引続き取り組み 5~10 年後の実用化を目指す。

a) 複合材表面活性プロセスの確立 (エポキシ/PEEK 複合材)

b) コミング材プリフォームによる One Shot 成形技術の開発

⑤ 高レート設計・製造技術開発 高速成形技術開発

高速成形技術開発において得られた高レート製造要素技術の適用先拡大を図るため、2020 年度以降の NEDO プロジェクト等において研究を継続すると共に、自社の航空宇宙機製品への適用検討及び主要航空機メーカーへの適用提案を行う。

⑥ 高レート設計・製造技術開発 一体成型翼構造

ボックス一体ハイブリッドコキュア技術は、当初の目標通り TRL5 の開発を完了した。今後は実用化に向け TRL7 相当の評価を行うため新たなスキームを模索し、フルスケールでの成形性及び製造性の確立を行う。

放電探知技術は、SAE 標準 (米国)、EUROCAE 標準 (欧州) 及び RTCA 標準 (米国) の標準改訂活動を実施しており、2021 年に、放電探知技術が盛り込まれた標準 (SAE ARP5416B) が完成する計画である。

⑦ マグネシウム合金開発と航空機への適用研究

KUMADAI マグネシウム合金の材料開発

KUMADAI マグネシウム合金の材料開発においては、材料の設計指針の確立とその提案を学界の立場から進めるとともに、産業界と連携してサプライチェーンの構築を行っている。

現在、マグネシウム合金の高い溶解・鋳造技術と急冷薄帯製造技術を有する企業と高精度な型押し技術とを有する企業と有機的連携を構築し、一貫製造技術の設計を行っている。また、機体設計・製造技術を有する企業とも連携し、航空機部材での適用先を検討した。

⑧ マグネシウム合金開発と航空機への適用研究

KUMADAI マグネシウム合金の航空機構造適用

材料メーカーにて、海外競争力のある高品質・低コスト材料製造技術を開発した上で、スペック化・許容値取得の検討を行い、将来機種での二次構造部材への適用を目指していく。

(2) カーボンハニカムパネル開発

BFE 製品の場合としてギャレーの実用化・事業化スケジュールについては、2020 年度に社内の材料標準に登録し、2021 年度にターゲットプロダクトを選定する。2022 年度に設備投資及び仕様検討/製品設計を行い、2023 年度に耐空性証明試験を経て生産を開始する。

SFE 製品の場合としてラバトリーの実用化・事業化スケジュールについては、2021 年度に社内の材料標準に登録し、航空機製造会社と協議を行う。2022 年度に設備投資及び仕様検討/製品設計を行い、2023 年度に耐空性証明試験を経て生産を開始する。

2. 研究開発項目②-2 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発 (第二期)」

今回開発したロボット AFP では、炭素繊維に樹脂を染み込ませた中間材料 (熱硬化プリプレ



グ)を1/4インチ程度の細幅にカットした材料(スリットトウ)を用いる。計16本のスリットトウを個別に制御して高速積層することにより、複合材部品の高生産性を実現した。

また、高精度のアームロボットに、小型化した積層ヘッドを搭載することにより、これまで適用が難しかった曲面のある複雑形状にも対応した。さらに、CFRPの積層作業をロボットが自動で実施することにより、製造工程の低コスト化が見込めるため、航空機や自動車をはじめとする輸送機器分野などへのCFRP部品の利用拡大に貢献する。

### 3. 研究開発項目③-2「航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)」

#### ①炭素繊維複合材の高速高品質切削加工技術の開発

##### (1)CFRPとチタン合金の重積材に対する標準直径の穿孔技術

開発工具の製品化のために、協力企業と工具の製造管理と生産能力を図っている。すでに具体的な取り組みを進めているため、1~2年以内に製品化が整う予定である。

##### (2)CFRPとチタン合金の大口径の穿孔

工具寿命に対するさらなる改善に対して工具メーカからの協力を研究開発を進めている。PCD工具によるオービタル加工のフィジビリティスターディを進めているが、実用化の可能性に対する見極めには3年程度必要である。

##### (3)CFRPのトリミング

企業側に開発工具を提供し、実践的な状況で比較を進めたい。現時点では、協力企業を選定している段階である。企業からの要請にもよるが、今後5年程度の期間で、実用化に対する検証と改良を検討したい。

##### (4)切削シミュレーションとCFRPの剥離シミュレーション

シミュレーションについては、ほぼ完成している段階である。切削シミュレーションに関しては、すでに協力企業であるBoeing、川崎重工業、三菱重工業でも使用されており、その他、自動車、工具、工作機械メーカでも実績がある。今後は、さらなる汎用化、高度化を目指していく予定であり、2021年度には、企業に対して有償でのライセンス提供をする予定である。

#### ②先進アルミ合金の高速高品質切削加工技術の開発

Al-Li合金の切削技術開発については、サブスケール部材での残留応力とゆがみの低減について、加工条件を最適値に近づけることができた。2020年度からは企業内において反転バニング切削の実部品スケールでの評価試験を実施する計画であり、航空機全般の平面大型部品のポケット加工への実用化を図っていく。

コンソーシアムメンバー内の機体メーカが中心となり、成果の落とし込みや水平展開の検討を進める。

#### ③チタン合金の高速高品質切削加工技術の開発

これまでに確立したオービタル穿孔技術に関して、企業と検証実験を重ね、孔品質、疲労寿命を維持した上での穿孔時間の短縮を目指す。2020年以降検証実験による実用化を評価、とくに現行加工法の穿孔時間レベルを目指す。その後、疲労寿命を維持しながら、穿孔時間と疲労寿命試験を評価して実機適用機器を選定する。

#### ④ロボット切削システムによる高速切削加工技術の開発

東京大学生産技術研究所及び再委託先の広島大学が、CMIメンバー企業5社(うち、SMEメンバー2社)と連携し実施する。計画期間は2016年度より2019年度までの4年間である。中間目標として、平成29年度内に縦0.5m、横1mの大きさのアルミニウム合金のフレーム部品に対して、深さ精度±0.1mmのポケット加工技術を、最終目標として縦1m、横2mの大きさのアルミニウム合金製フレーム部品に対して、深さ精度±0.1mmのポケット加工技術を開発する。

#### ⑤切削-金属ディポジション複合化技術の開発

本課題では、実用化に向けて異種合金の切削-金属ディポジション造形試作評価を実施した。航空機の構造部材として用いられているアルミ合金を母材とし、ステンレス鋼を最上層とした造形を行うための中間層の材質選定、並びに造形条件の最適化を行った。

### 4. 研究開発項目④-2「軽量耐熱複合材CMC技術開発(高性能材料開発)」

#### (1)繊維開発(宇部興産株式会社)

チラノ繊維SAグレードに関しては、航空機エンジンメーカのエンジン搭載計画に即して高品質で安定供給を実施していく。課題は、航空機エンジンメーカでのSiC/SiC複合材料の部材開発の加速である。そのために、この繊維を安定的に高品質でタイムリーに提供し、顧客側での開発を促進していく。

高性能SiC繊維に関しては、これから量産技術を確立し、高品質なものを安定して供給していく。その後、顧客からの材料認定を頂き、安定して当該高性能SiC繊維を供給していくようになる。なお、実用化の計画に関しては、航空機エンジンメーカのエンジン搭載計画に即す

るようになる。課題は、本事業で達成したラボ品を、さらに性能を改善し、加え量産で安定的に高品質で提供できるようにすることである。そのために、品質のばらつきの要因となる製造プロセスの前工程側を今後検討していく予定である。

(2) 材料開発 (株式会社 IHI)

2020 年度から 2022 年度の NEDO 助成事業の体制も活用しながら、エンジン試験による技術実証ならびに、製造コストの大きな割合を占める EBC と織物についても技術開発を進める。また、これと並行して、量産を見据えた設備投資や生産体制等の検討を進めながら、本事業により開発した CMC の OEM への提案と議論を継続し、2020 年代半ばのエンジン実機開発のプログラムローンチ時点での採用を目指す。

(3) 材料開発 (シキボウ株式会社)

本事業での開発成果を基に 2021 年度から量産に向けた取り組みを開始し、2026 年度から市場投入を開始する。三次元プリフォームの製造方法については、実用化に際してはまだまだ量産性 (速度・自動化等) を上げる開発を行う必要があると考えられる。また、脆性材料である SiC 繊維を用いる為、安定した製造を行うには繊維へのダメージを更に減らす必要があるが、製造プロセスやサイジング工程などの工数増加に繋がり、結果としてコストが増加すると考えられる為、全体的なコストダウンも課題となる。解決策として、三次元プリフォーム自身のコストダウンを検討するのではなく、原材料のロスがより少なくなる方法、後工程を短縮する方法 (例えばより最終形状に近い形状での三次元プリフォーム製造方法の開発) 等について開発を行う。

(4) 部材開発 (川崎重工業株式会社)

2030 年頃 EIS (Entry In Service) が想定されている次期エンジンへの実装を目標に開発作業を進める。CMC 材料製造の高レート・低コスト化については、各製造プロセスに対して、費用項目の抽出を行い、高レート・低コスト化に対する対策案を検討し、効果・難易度より改良の実施内容を決める。CMC 燃焼器パネルの実証レベルの向上については、自社エンジンでの実証試験を計画するとともに、OEM でのエンジン実証試験を行うべく OEM の開発計画に含めるための提案活動を実施する。

5. 研究開発項目⑤「航空機用構造設計シミュレーション技術開発」

(1) 分野横断 (空力・構造・強度) シームレス機体設計シミュレーターの開発

本項目で開発した機体設計シミュレーターは川崎重工業に引き渡しシミュレーターの実行検証を行った。より詳細な設計要求を含む実機開発において、十分な精度を有するツールとなっているかを検証する必要がある、国内航空産業界にて積極的に利用してもらうことでこれを解決したい。

(2) シミュレーション援用による認証プロセスの低コスト化

プロジェクトで開発した解析プログラムを、既存の CAE システムに組み込んだものをメーカーで実際に利用してもらう。様々な実験との比較を積み重ね、解析手法の妥当性の確認を継続し、実験を数値シミュレーションに置き換えられる事例を増やししながら、開発した解析手法の信頼性を向上させる。

(3) 複合材の特性を活かした機体構造設計シミュレーターの開発と実験的検証

現時点で具体的な計画の立案には至っていないが、簡易 A F P 装置の安定化と性能向上、力学試験による理論の実証を行う。続いて、必要な材料特性を明らかにし、材料メーカーと協力の上、本技術に適した材料の開発に取り組む。簡易 A F P 装置での基材配置の際にポイドが発生することが多いため、配置精度を向上させ、基材を隙間なく配置し、ポイドを低減する。また、検討対象が既存材料のみであったため、本技術に適した材料の開発も必要である。

(4) 層流化技術開発

実用化に向けた具体的取り組みの一つとして、飛行試験による実飛行条件での実証可能性の探索が挙げられる。国内試験として、まず JAXA あるいは DAS などの機体を用い、表面加工を施したグラブを主翼に取付けるなどして飛行実験を実施する。成果が得られれば、Boeing 社の Eco Demonstrator などを活用し、より大型の機体での飛行実験を実施することも考えている。実用化に向けて、現時点で TRL2、本研究を実施することで 5 年後に TRL5 を達成、継続して飛行試験研究を実施することで更に 5 年後に TRL8 を達成、従って、10 年後に実機への適用が可能となる見込みである。課題として、飛行試験による実飛行条件下での実証がされない場合、実機への適用にあたってはリスクが高い。国内試験から開始し、実績を積みながらより大きな機体へ飛行試験を拡大する。

(5) 複合材構造部材ライフサイクルシミュレーション

現在、本技術を応用するに当たり社内の量産機事業の設計部門及び生産技術部門と連携し、

	<p>過去の治具設計データを参考に解析の検証を行い、更なる実用化を進めている。2025年に電動小型航空機の試験機への使用を目指している。複雑形状の含浸シミュレーション技術については実機相当の大規模モデルに適用可能となっているが、樹脂の注入点等の製造条件の最適化を行うためには更なる高速化が課題となる。樹脂硬化収縮による変形・残留応力シミュレーションについては他の材料への応用も可能であるため、ハイブリッド成型のみならず既存材料等へ解析技術の適用を拡大し、当該技術の検証を行うことが課題となる。</p> <p>(6) エンジン-機体統合性能予測 CFD 解析技術  実用化に向けて、必要な以下の要素技術を設定した。  ・ 超高バイパス比対応技術（ショートナセル/スリムナセル）空力荷重特性予測技術  ・ インレット+ファン空力荷重影響予測技術  ・ エンジン-機体統合空力荷重特性予測解析技術</p> <p>(7) 非巡航時における高精度非定常流体解析  東北大学は壁面モデル LES のさらなる検証と計算コストの削減について学術的観点により研究を進める。川崎重工業は壁面モデル LES を航空機の空力解析ツールに適用し、実機形状での解析精度検証を実施後、段階的に実機開発を想定した空力設計作業への適用を試行する。また、産業利用の観点により課題の抽出を行う。抽出した課題は東北大学にもフィードバックし、必要に応じて共同で課題解決に向けた検討を実施する。壁面モデル LES の検証について、本プロジェクトにおいて基礎的な流れ条件における検証を実施しその有効性が確認できたものの、異なる流れ条件や実機形状における複雑な流れ条件における検証は不足している。今後、さらに幅広い流れ条件での検証を進めるとともに、実機形状において検証を実施していく。計算コスト削減について、壁面モデル LES は航空機の部分解析については可能であるが、全機解析については未だ実用が難しい。本プロジェクトにおいては、この課題を解決するために新しいスキームを開発した。本スキームを用いることで従来スキームに比べて計算コストの削減が可能である。今後、本スキームが航空機設計で用いられるツールにおいて適用可能であることを確認し、その有効性を検証していく。</p> <p>(8) 着氷に関する非定常空力設計シミュレーターの開発  飛行試験に実用化した。今後は設計段階から着氷システムを考慮した開発を行うこと見据えて実用化を図る。</p>	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2015年2月 作成</p> <p>2016年2月 改訂</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 独立行政法人を国立研究開発法人に変更。</li> <li>・ 平成 27 年度技術推進委員会の審議を踏まえ、研究開発項目①の最終目標値（急冷凝固 KUMADAI マグネシウム合金の引張強度 (Fty) ) を 500MPa から 400MPa に変更し、伸び (EL) の目標値として、5%以上を追加。</li> <li>・ 研究開発項目④-2 の SiC 繊維開発及び CMC 部材開発を加速するため、中間目標及び最終目標を変更。</li> <li>・ 研究開発項目①の継続テーマとして公募するに際して、①-2 を追加。</li> <li>・ 研究開発項目②の継続テーマとして公募するに際して、②-2 を追加。</li> <li>・ 研究開発項目③の継続テーマとして公募するに際して、③-2 を追加。</li> </ul> <p>2020年2月 改訂</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ プロジェクトマネージャーの変更。</li> <li>・ 表記を西暦に変更。</li> </ul>