

航空機関連プロジェクト（2）  
事後評価報告書  
（案）

平成28年〇月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

## はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成24年12月6日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成26年4月改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施している航空機関連研究開発は、我が国の航空機産業の将来を見据えた航空機産業政策の実現を目指した、安全性、環境適合性、経済性といった社会的ニーズの高い下記の技術に関する事業である。

### 平成26年度終了事業

- 1 炭素繊維複合材成形技術開発（平成20年度から平成26年度）
- 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）（平成22年度から平成26年度）
- 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）（平成24年度から平成26年度）
- 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）（平成25年度から平成26年度）
- 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）（平成24年度から平成26年度）

今回の評価は、この航空機関連研究開発の事後評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる航空機関連プロジェクト（2）事後評価検討会（座長：李家 賢一 東京大学大学院工学系研究科教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会 評価ワーキンググループ（座長：小林 直人 早稲田大学研究戦略センター副所長・教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成28年〇月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会

評価ワーキンググループ

産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会  
評価ワーキンググループ

委 員 名 簿

|    |        |                                    |
|----|--------|------------------------------------|
| 座長 | 小林 直人  | 早稲田大学研究戦略センター副所長・教授                |
|    | 大島 まり  | 東京大学大学院情報学環教授<br>東京大学生産技術研究所教授     |
|    | 太田 健一郎 | 横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター長<br>・特任教授  |
|    | 亀井 信一  | 株式会社三菱総合研究所政策・経済研究センター長            |
|    | 高橋 真木子 | 金沢工業大学工学研究科教授                      |
|    | 津川 若子  | 東京農工大学大学院工学研究院准教授                  |
|    | 西尾 好司  | 株式会社富士通総研経済研究所主任研究員                |
|    | 森 俊介   | 東京理科大学理工学研究科長<br>東京理科大学理工学部経営工学科教授 |

(座長除き、五十音順)  
事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

航空機関連プロジェクト（２）事後評価検討会  
委員名簿

|    |       |                              |
|----|-------|------------------------------|
| 座長 | 李家 賢一 | 東京大学大学院工学系研究科教授              |
|    | 岩田 拓也 | 産業技術総合研究所主任研究員               |
|    | 岡部 朋永 | 東北大学大学院航空宇宙工学専攻教授            |
|    | 奥田 章順 | 株式会社三菱総合研究所参与・チーフコンサルタント     |
|    | 山田 圭一 | 株式会社ANA総合研究所航空・産業政策グループ主席研究員 |

（敬称略、五十音順）

事務局：経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課



## 航空機関連プロジェクト（２）の評価に係る省内関係者

### ○ 炭素繊維複合材成形技術開発

#### 【事後評価時】

（今回）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 健太（事業担当課長）  
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）  
産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 岩松 潤

#### 【中間評価時】

（平成２４年度）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 陽一（事業担当課長）  
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

#### 【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 片瀬 裕文（事業担当課長）

### ○ 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）

#### 【事後評価時】

（今回）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 健太（事業担当課長）  
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）  
産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 岩松 潤

#### 【中間評価時】

（平成２４年度）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 陽一（事業担当課長）  
産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

#### 【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 近藤 智洋（事業担当課長）

### ○ 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）

#### 【事後評価時】

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 健太（事業担当課長）  
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）  
産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 岩松 潤

#### 【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 近藤 智洋（事業担当課長）

### ○ 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）

#### 【事後評価時】

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 健太（事業担当課長）  
大臣官房参事官（イノベーション推進担当）  
産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 岩松 潤

#### 【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 陽一（事業担当課長）

○ 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）

【事後評価時】

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 飯田 健太（事業担当課長）

大臣官房参事官（イノベーション推進担当）

産業技術環境局 研究開発課 技術評価室長 岩松 潤

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 航空機武器宇宙産業課長 近藤 智洋（事業担当課長）

## 航空機関連プロジェクト（２）事後評価

### 審 議 経 過

#### ○第１回事後評価検討会（平成２７年１１月１６日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・評価の進め方について

#### ○第２回事後評価検討会（平成２８年１月１９日）

- ・評価報告書(案)について

#### ○産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ（平成２８年〇月〇日）

- ・評価報告書(案)について

## 目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ  
委員名簿

航空機関連プロジェクト事後評価検討会 委員名簿

航空機関連プロジェクトの評価に係る省内関係者

航空機関連プロジェクト事後評価 審議経過

|                 |          |
|-----------------|----------|
| 事後評価報告書概要 ..... | ページ<br>i |
|-----------------|----------|

### 第1章 評価の実施方法

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. 評価目的 .....                      | 1 |
| 2. 評価者 .....                       | 1 |
| 3. 評価対象 .....                      | 2 |
| 4. 評価方法 .....                      | 2 |
| 5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準 ..... | 2 |

### 第2章 プロジェクトの概要

平成26年度終了事業

- 1 炭素繊維複合材成形技術開発
- 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）
- 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）
- 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）
- 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）

### 第3章 評価

平成26年度終了事業

- 1 炭素繊維複合材成形技術開発
- 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）
- 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）
- 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）
- 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第4章 評点法による評点結果 ..... | 171 |
|----------------------|-----|

### 参考資料

参考資料1 経済産業省技術評価指針

参考資料2 経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準

参考資料3 航空機関連プロジェクト中間評価報告書（概要版）

## 事後評価報告書概要

## 事後評価報告書概要

|         |                    |
|---------|--------------------|
| プロジェクト名 | 1 炭素繊維複合材成形技術開発の概要 |
| 上位施策名   | ものづくり産業振興          |
| 担当課     | 製造産業局 航空機武器宇宙産業課   |

### プロジェクトの目的・概要

メタル材に比べ軽量である炭素繊維複合材を用いた部材・製品の普及を図る為、強度・品質安定性を保持しつつ複雑な設備を要しない炭素繊維複合材成形技術（VaRTM 成形技術）開発や、従来プリプレグ材を用いた成形方法の高度化技術開発等を実施し、小型航空機サイズの試作機（供試体）による実証を通じて当該技術を確立する。

### 予算額等（補助）

（単位：千円）

| 開始年度        | 終了年度      | 中間評価時期    | 事後評価時期      | 事業実施主体      |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 平成 20 年度    | 平成 26 年度  | 平成 24 年度  | 平成 27 年度    | 三菱航空機(株)    |
| H24FY 予算額   | H25FY 予算額 | H26FY 予算額 | 総予算額        | 総執行額        |
| 1, 158, 000 | 54, 000   | 64, 000   | 6, 977, 000 | 6, 977, 000 |

### 目標・指標及び成果・達成度

#### (1) 全体目標に対する成果・達成度

| 個別要素技術                  | 目標・指標                           | 成果                                                                   | 達成度 |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| (1) VaRTM 材料仕様の設定       | 材料特性試験を完了し材料仕様を確立する。            | VaRTM の材料スペックについて航空局に規定適合性証明計画と共に、三種の材料スペックについて審査いただき、内容について合意を得た。   | 達成  |
| (2) VaRTM プロセスの製造安定性確立  | プロセススペックを制定するとともに、製造時欠陥影響を確認する。 | 成形プロセスや NDI プロセスについて、各種成形・評価試験を実施し、スペックにフィードバックをかけ、大きなリスクはないことを確認した。 | 達成  |
| (3) 実大規模の供試体設計のための設計許容値 | 試験により設定した許容値に対する低下リスクを排除する。     | 設定した VaRTM 尾翼桁間仕様の中で大きな強度低下リスクのあった、インパクト付与後のパネル強                     | 達成  |

|                   |                                               |                                   |    |
|-------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|----|
| 確立                |                                               | 度や二軸荷重試験で許容値に大きく影響を与えないことを確認した。   |    |
| (4) 実大規模での技術成立性実証 | 小型航空機サイズの試作機（供試体）を製作し、開発した成形法の成立性・妥当性を最終検証する。 | 周辺構造との関連も含め実大実証の基になる尾翼設計仕様を設定できた。 | 達成 |

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

< 共通指標 >

| 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | 特許権の実施件数 | ライセンス<br>供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-----|----------|------------------|----------|--------------|----------|----------|
| 1   | -        | 13               | 0        | 0            | 0        | -        |

評価概要

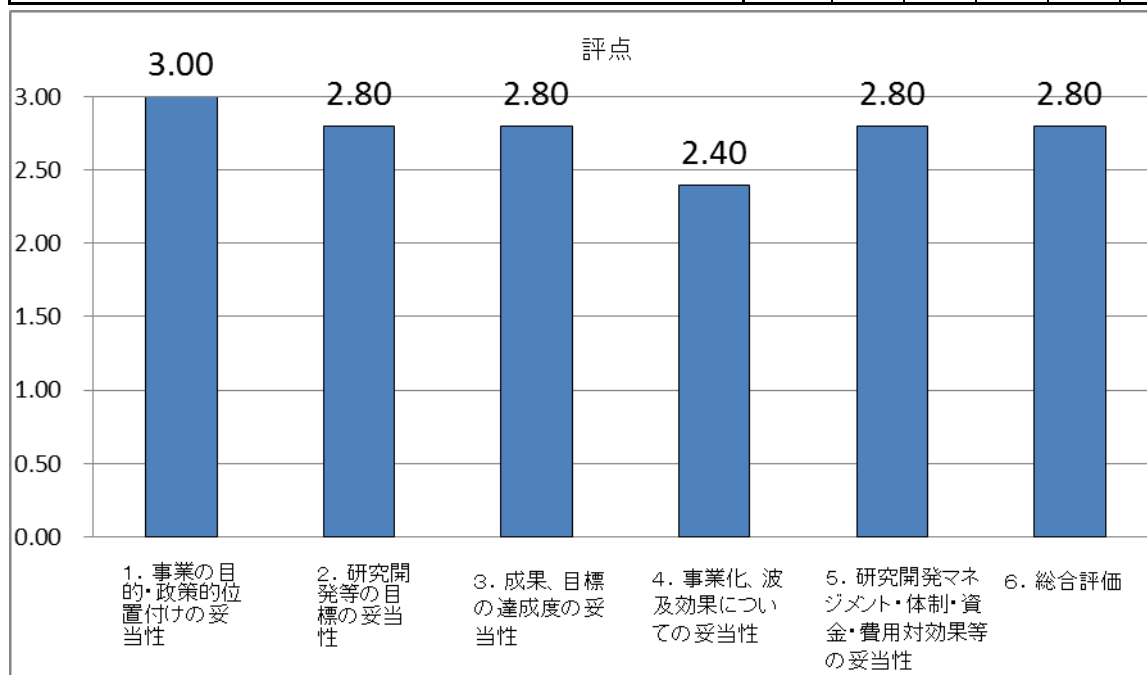
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性
2. 研究開発等の目標の妥当性
3. 成果、目標の達成度の妥当性
4. 事業化、波及効果についての妥当性
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性
6. 総合評価
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

## 評点結果

### 評点法による評点結果

#### (1 炭素繊維複合材成形技術開発)

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |





|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| プロジェクト名 | 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発） |
| 上位施策名   | ものづくり産業振興                         |
| 担当課     | 製造産業局 航空機武器宇宙産業課                  |

#### プロジェクトの目的・概要

従来、航空機の設計においては、落雷・帯電等によりスパークが発生して燃料引火に至ることが無いよう、防爆性の確保には十分に配慮をしてきた。ところが近年、低燃費化や環境適合性のための機体軽量化を狙った炭素繊維複合材料の適用拡大が進み、防爆性の確保という点で従来の金属構造の設計と異なる技術課題が浮上してきている。そこで、本事業では航空機構造における落雷／帯電等の電氣的現象とその影響を、解析および実験により調査解明し、複合材料を適用した将来航空機の安全性を確保するための耐雷・防爆技術を確立することを目的とする。

#### 予算額等（委託費）

（単位：千円）

| 開始年度      | 終了年度      | 中間評価時期    | 事後評価時期  | 事業実施主体   |
|-----------|-----------|-----------|---------|----------|
| 平成22年度    | 平成26年度    | 平成24年度    | 平成27年度  | 富士重工業(株) |
| H24FY 予算額 | H25FY 予算額 | H26FY 予算額 | 総予算額    | 総執行額     |
| 110,000   | 190,500   | 173,600   | 654,000 | 654,000  |

#### 目標・指標及び成果・達成度

##### (1) 全体目標に対する成果・達成度

| 個別要素技術       | 目標・指標                                               | 成果                                                                                    | 達成度 |
|--------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ①<br>解析手法の開発 | ①実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る。 | ・翼胴結合供試体において試験と解析の比較検証を実施し、試験に対して誤差30%以内で解析が合うことを確認した。<br>これより、試験期間を30%以上低減できる見通しを得た。 | 達成  |
|              | ②複雑な構造での電流経路及び放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系を確立する。          | ・複雑な電流経路をつくる複合材繊維の導電率の異方性を、層ごとに表現した解析手法を開発して検証した。                                     | 達成  |

|              |                                     |                                                                                                                                                                  |          |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
|              | ③TRL5 相当                            | ・複雑な電流経路をつくる複合材繊維の導電率の異方性を、層ごとに表現した解析手法を開発して検証した。                                                                                                                | 達成       |
|              | ④国際標準への提案                           | ・SAE 標準へ解析および試験法を報告したが、未だハイレベルの規定の見直しの最中であり、組織化には至っていない。                                                                                                         | 達成       |
| ②<br>放電現象の研究 | ①放電開始箇所および条件の確立。                    | ・雷電流量と構造の接合方式の相関を試験にて確認し、放電開始しきい値としてまとめた。<br>・試験でのデータ取得方法は FAA DER 有資格者のレビューを受け、妥当との評価を受けた。                                                                      | 達成       |
|              | ②航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理の解明。 | ・構造の抵抗による電流密度と電位分布が主要な放電発生原因と特定した。<br>・機体の各種構造部位での放電開始条件を試験にて確認した。                                                                                               | 達成       |
|              | ③放電検出技術の確立。                         | ・放電光によるエネルギー分析手法を開発し、引火する恐れのある放電を探知する技術を開発した。                                                                                                                    | 達成       |
|              | ④国際標準への提案。                          | ・標準化団体 SAE International へ放電探知標準の見直しを提案し、標準見直し活動が具体的に開始された。                                                                                                      | 達成       |
| ③<br>帯電現象の研究 | ①航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理解明。  | 帯電による電位分布の発生原理を研究し、以下の成果を得た。<br>・3次元での電荷移動原理を解明し、解析手法を開発した。燃料の帯電現象の傾向を推定可能となった。<br>・燃料の流体運動を含めた電荷の移動を研究し、解析手法を開発した。流体運動が電位分布へ与える影響を推定可能となった。<br>・艤装等を含む燃料タンク供試体を | 一部<br>達成 |

|              |                                           |                                                                                              |    |
|--------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|              |                                           | 用いた帯電試験手法を開発した。<br>・ただし、解析の主要パラメータである電荷の移動度の測定精度に課題が残り、精密な解析を得るには至っていない。                     |    |
| ④<br>検証方法の検討 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得。                 | ・構造および材料の導電率等のデータを得た。また、取得データを解析に適用し、有効性を確認した。<br>・複合材繊維の異方性の影響を測定する手法を開発し、炭素繊維複合材の特性データを得た。 | 達成 |
|              | ②実大燃料タンク・システム供試体にて耐雷／静電気防爆試験を実施し、解析結果を実証。 | ・機体に着雷した位置により、複数の雷電流経路が発生する。これら電流経路を燃料タンク部で再現する試験手法を開発した。試験にて電流経路が異なる場合の電流分布の傾向を取得した。        | 達成 |
|              | ③国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立。                   | ・試験方法および解析の検証法は、FAA DER 有資格者のレビューを受け、妥当な適合範囲との評価を受けた。                                        | 達成 |
| ⑤<br>測定方法の開発 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の測定方法確立              | ・耐雷材と複合材の相関関係や、複合材繊維方向等の特性を測定可能とする供試体／治具を設計し、試験にて有効性を確認した。                                   | 達成 |

## (2) 目標及び計画の変更の有無

なし

### <共通指標>

| 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | 特許権の実施件数 | ライセンス<br>供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-----|----------|------------------|----------|--------------|----------|----------|
| 2   | 4        | 8                | 0        | 0            | 0        | 1        |

### 評価概要

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

2. 研究開発等の目標の妥当性

3. 成果、目標の達成度の妥当性

4. 事業化、波及効果についての妥当性

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

6. 総合評価

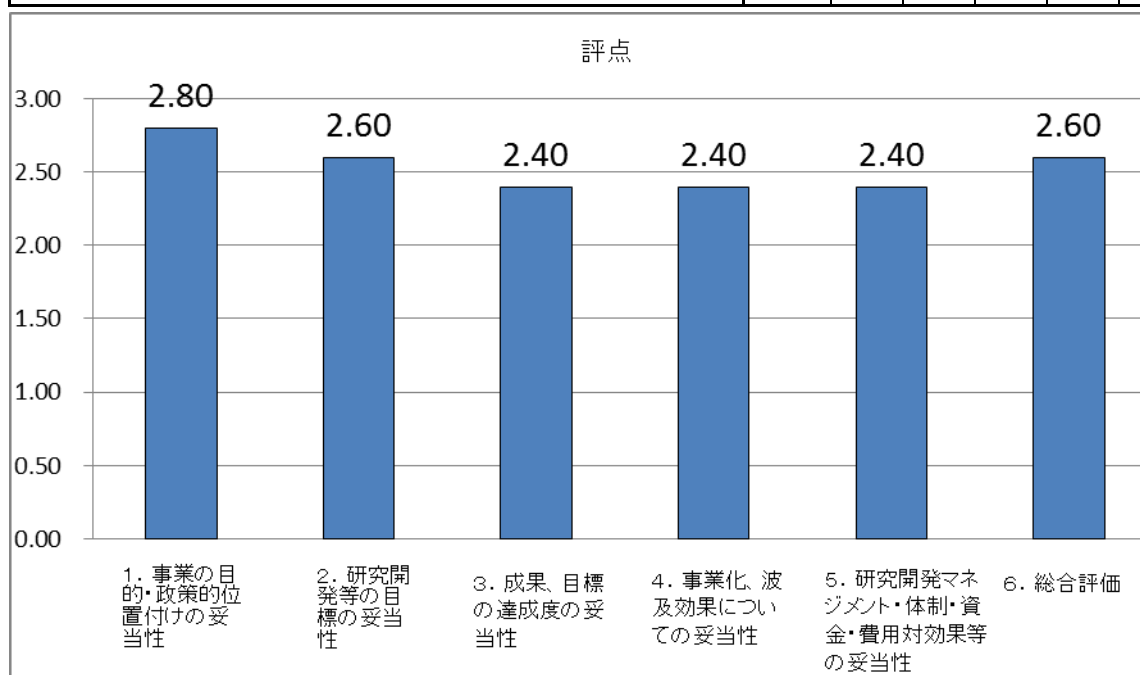
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

## 評点結果

### 評点法による評点結果

(2 航空機用先進システム基盤技術開発(耐雷・帯電特性解析技術開発))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 2       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.40 | 3       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 3       | 2       | 2       | 3       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.40 | 3       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |



|         |                              |
|---------|------------------------------|
| プロジェクト名 | 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術） |
| 上位施策名   | ものづくり産業振興                    |
| 担当課     | 製造産業局 航空機武器宇宙産業課             |

#### プロジェクトの目的・概要

航空機にとって着氷と呼ばれる現象は飛行安全上、大変な脅威であり、死亡事故に繋がるケースも報告されている。その為航空会社は着氷に対し、既存の防除氷システムを利用する等、非常に大きな労力を払っている。航空機に搭載されている既存の防除氷システムが抱える主たる課題として、安全性、燃費効率、環境問題の3点が挙げられる

省エネルギーな新たな防除氷技術開発を世界に先駆けて取り組み、信頼性が高く、経済性に優れた、革新的防除氷システムのコンセプトを実現させることを目指す。

#### 予算額等（委託）

（単位：千円）

| 開始年度      | 終了年度      | 中間評価時期    | 事後評価時期  | 事業実施主体   |
|-----------|-----------|-----------|---------|----------|
| 平成24年度    | 平成26年度    | —         | 平成27年度  | 富士重工業（株） |
| H24FY 予算額 | H25FY 予算額 | H26FY 予算額 | 総予算額    | 総執行額     |
| 38,000    | 38,000    | 37,000    | 113,000 | 113,000  |

#### 目標・指標及び成果・達成度

##### (1) 全体目標に対する成果・達成度

| 個別要素技術                          | 目標・指標                                                                    | 成果                                                                                                                           | 達成度 |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの有効性を実証する | 防除氷コーティング、防除氷装置、及び着氷センサを組み合わせた革新的な防除氷システムのコンセプトを立案し、各種地上試験にて、その有効性を実証する。 | 翼最前縁部に高耐久性塗料を、それより後縁部に超撥水性コーティングを適用するという Dual surface※1 と、電熱ヒータによる除氷システムとを組み合わせた革新的な防除氷システムを提案し、風洞試験にて、7割の消費電力低減が可能なことを実証した。 | 達成  |
| 防除氷コーティングの耐久性を向上する              | 撥水特性：<br>・接触角＞130°<br>・転落角＜10°<br>耐久性：<br>・レインエロージョン試験後撥水性を維持していること。     | 開発品の撥水特性：<br>・接触角＝154.1°<br>・転落角＝4.2°<br>耐久性：<br>・レインエロージョン試験後の撥水性に変化は見られず、高い耐久性を確認した。                                       | 達成  |

|                                                |                                                           |                                                                 |    |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法を設定する | 防除氷コーティングの標準的な評価法、及び、米国耐空性審査基準(1)の着氷条件を再現できる信頼性の高い試験法設定する | 防除氷コーティングの特性を評価するための評価法を設定すると共に、米国航空規格に基づく着氷条件を設定できる風洞試験法を設定した。 | 達成 |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----|

(2) 目標及び計画の変更の有無  
なし

< 共通指標 >

| 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | 特許権の実施件数 | ライセンス<br>供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-----|----------|------------------|----------|--------------|----------|----------|
| 0   | 0        | 1                | 0        | 0            | 0        | 0        |

評価概要

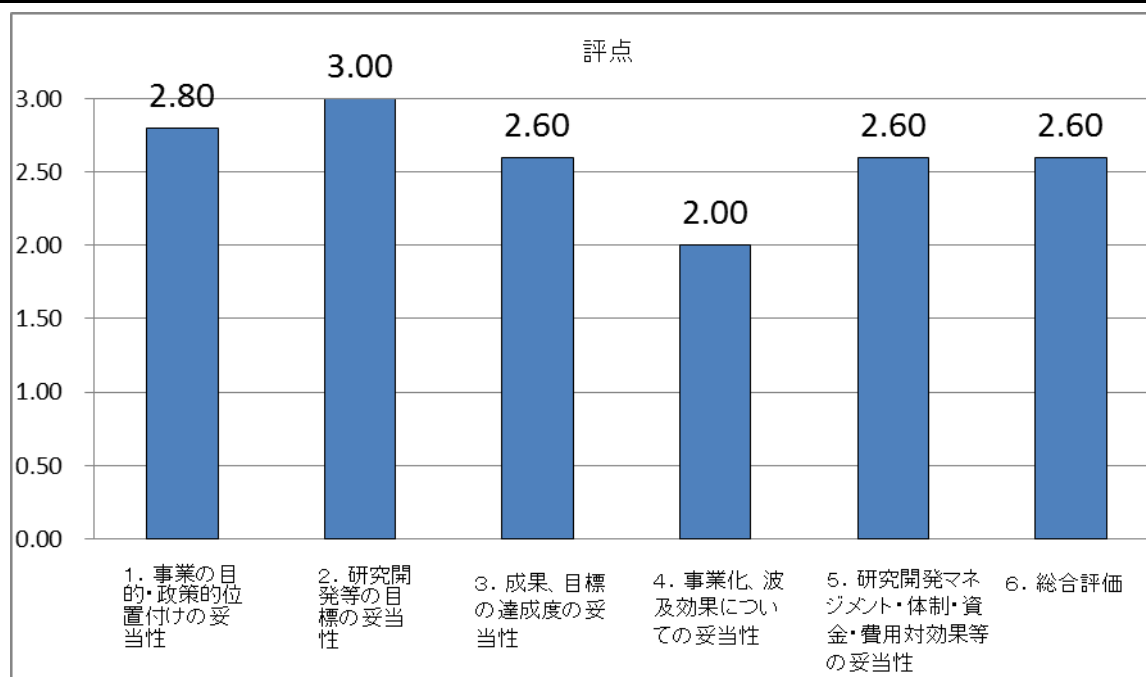
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性
2. 研究開発等の目標の妥当性
3. 成果、目標の達成度の妥当性
4. 事業化、波及効果についての妥当性
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性
6. 総合評価
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

## 評点結果

### 評点法による評点結果

#### (3 航空機用先進システム基盤技術開発(革新的防除氷技術))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.80 | 3       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.00 | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 3       | 2       | 2       | 3       | 3       |



|         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| プロジェクト名 | 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発） |
| 上位施策名   | ものづくり産業振興                             |
| 担当課     | 製造産業局 航空機武器宇宙産業課                      |

#### プロジェクトの目的・概要

次世代ブレーキシステムとして、磁性流体を磁界により磁化させてブレーキ力を発生させる電磁ブレーキを、地上走行システムとして、前脚ホイール内にモータを組み込んだ電動タキシングシステムを、それぞれ開発する。

予算額等（委託）

（単位：千円）

| 開始年度      | 終了年度      | 中間評価時期 | 事後評価時期  | 事業実施主体    |
|-----------|-----------|--------|---------|-----------|
| 平成25年度    | 平成26年度    | —      | 平成27年度  | 住友精密工業(株) |
| H25FY 予算額 | H26FY 予算額 | —      | 総予算額    | 総執行額      |
| 39,000    | 125,000   | —      | 164,000 | 164,000   |

#### 目標・指標及び成果・達成度

##### (1) 全体目標に対する成果・達成度

| 個別要素技術      | 目標・指標                              | 成果                                                                                                   | 達成度 |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 電磁ブレーキシシステム | 電磁流体の基礎特性データを取得する。                 | 電磁流体の磁化特性（与えた磁場の強さに対する磁化の度合い）と、回転速度・与えた磁場の強さに対する発生トルクの基礎特性データを取得した。                                  | 達成  |
|             | ブレーキ試験供試体を設計、製作する。                 | ブレーキ試験供試体を設計、製作した。                                                                                   | 達成  |
|             | ブレーキトルク確認試験を実施する。                  | ブレーキ試験を実施し、実機サイズのディスク1枚のブレーキで得られるトルク値と、非使用時のトルクや発熱の傾向のデータを取得した。                                      | 達成  |
| 電動タキシングシステム | 使用するモータについて、形式のトレードオフスタディと基礎設計を行う。 | モータに必要な仕様を検討、設定した。モータ形式のトレードオフスタディを実施し、巻線界磁形フラックススイッチングモータが最適、との結論を得た。基礎設計を行い、仕様を満足するモータが設計できる目途を得た。 | 達成  |



|  |                                              |                                                                                                                                                                                                                                        |      |
|--|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|  | 想定する機体を駆動できる出力をもち、前脚ホイール内に収まるモータ供試体を設計、製作する。 | モータのプロトタイプを製作した。外径は目標を達成したが、長さは仕様を 15mm 越え、出力は現時点で仕様の 94%と、目標に到達していない。<br><br>目標出力に到達しなかったのはモータがセンサに及ぼすノイズが原因である事が判明しており、センサをモータから離すと共に間に非磁性材料をはさむ事で解決できる目途がついている。これにより寸法が目標を上回ったが、将来はセンサの小型化により目標寸法を満たしつつ目標出力を発揮できるモータが製作できる見通しを得ている。 | 一部達成 |
|  | 走行状態を模擬した試験を実施する。                            | 3年間を想定していた研究開発が2年間で終了したため、走行模擬試験は未実施である。                                                                                                                                                                                               | 未達成  |

## (2) 目標及び計画の変更の有無

無し

### <共通指標>

| 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | 特許権の実施件数 | ライセンス<br>供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-----|----------|------------------|----------|--------------|----------|----------|
| 0   | 0        | 0                | 0        | 0            | 0        | 0        |

### 評価概要

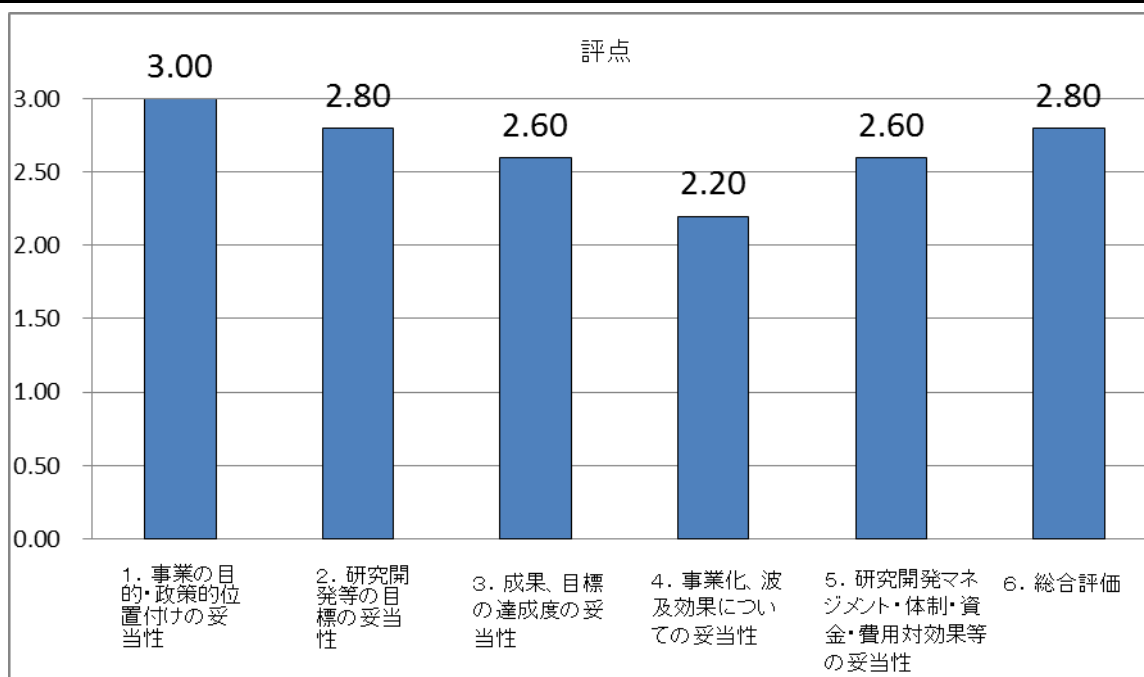
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性
2. 研究開発等の目標の妥当性
3. 成果、目標の達成度の妥当性
4. 事業化、波及効果についての妥当性
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性
6. 総合評価
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

## 評点結果

### 評点法による評点結果

#### (4 航空機用先進システム基盤技術開発(次世代航空機用降着システム技術開発))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.20 | 2       | 3       | 2       | 2       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 2       | 3       |
| 6. 総合評価                        | 2.80 | 3       | 3       | 2       | 3       | 3       |



|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| プロジェクト名 | 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置） |
| 上位施策名   | ものづくり産業振興                           |
| 担当課     | 製造産業局 航空機武器宇宙産業課                    |

#### プロジェクトの目的・概要

次世代航空機エンジン用潤滑油冷却装置 Advanced Structural Surface Cooler (ASSC) を開発する。ASSC の基となる技術はサーフェイスクーラーと呼ばれている熱交換器である。サーフェイスクーラーとは、熱交換器の内部を流れるエンジンの潤滑油をその表面に流れるファン・エアによって適切な温度に保つタイプの熱交換器である。なお、サーフェイスクーラーは従来エンジン外周のファンケースに搭載されているが、Advanced Structural Surface Cooler は、従来のファンケースからエンジン本体の外殻を構成するコアフェアリングに搭載して従来と同等の性能を有する「コアフェアリングと一体化された熱交換器」を設計・製造することで、ファンケース重量を低減し燃費向上及びエミッション低減を可能とし、航空機の CO2/NOx 排出量低減、騒音低減及び燃料消費率低減を図ることを事業目的とする。

#### 予算額等（委託）

（単位：千円）

| 開始年度      | 終了年度      | 中間評価時期    | 事後評価時期 | 事業実施主体    |
|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|
| 平成24年度    | 平成26年度    | —         | 平成27年度 | 住友精密工業(株) |
| H24FY 予算額 | H25FY 予算額 | H26FY 予算額 | 総予算額   | 総執行額      |
| 6,000     | 40,000    | 40,000    | 86,000 | 86,000    |

#### 目標・指標及び成果・達成度

##### (1) 全体目標に対する成果・達成度

| 要素技術                             | 目標・指標                                                                                         | 成果                                                                                                                                             | 達成度  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ASSC の試作<br>設計技術<br>試験技術<br>製造技術 | Rolls-Royce社が、Clean Sky Project で進めているLarge 3-Shaft ALPS Demonstratorエンジンに搭載可能なASSCの試作品を製作する。 | ASSC の試作品を製作し ASSC 単体での性能、強度に関する試験を実施しエンジン搭載可能なレベルであることを確認した。<br>Rolls-Royce 社の Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに試作した ASSC を搭載し、技術実証を完了した。 | 達成   |
|                                  | 製品重量9.75kg以下を達成する。                                                                            | 試作品を設計製造し製品重量13kgであることを確認した。目標重量に達成していないが、振動環境下における強度、及び油通路の圧                                                                                  | 一部達成 |

|                       |                                                   |                                                                                                                                                                                |      |
|-----------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                       |                                                   | 力強度にはマージン（安全率）を残しており、今後、強度と重量のトレードオフスタディによる最適化で軽量化を図る。                                                                                                                         |      |
|                       | 離陸時の熱交換性能58.55KWを達成する。<br>巡航時の熱交換性能35.35KWを達成する。  | 製品単体試験で、離陸時の熱交換性能 31.34KW を確認した。<br>巡航時の熱交換性能 13.84KW を確認した。<br>目標熱交換性能に達していないが、数値解析による調査により空気側の冷却フィンの性能向上に資する種々の知見と冷却性能の向上を図るための設計指針を得ることができており、今後、空気冷却フィンの最適化により熱交換性能の向上を図る。 | 一部達成 |
|                       | 潤滑油が120℃、流量2.335lb/s流れた時の圧力損失34psid以下を達成する。       | 製品単体試験で、潤滑油が 120℃、流量 2.335lb/s 流れた時の圧力損失は 34psid 以下を達成した。                                                                                                                      | 達成   |
|                       | 圧力サイクル 610psig ⇄ 0psig × 120,000回に耐える構造を達成する。     | 試作品単体試験で圧力サイクル 610psig⇄0psig×120,000 回の試験に供しクリアした。                                                                                                                             | 達成   |
|                       | 40Gの振動レベルに耐える構造を達成する。                             | 試作品単体試験で 40G レベルの振動試験に供しクリアした。                                                                                                                                                 | 達成   |
| ASSC の熱交換性能計算プログラムの開発 | 様々な環境条件におけるASSCの熱交換性能について精度を持って予想できる計算プログラムを開発する。 | 数値流体解析により得られた空気側冷却フィンの伝熱特性に関連する流れ場の知見と、試作した ASSC による熱交換性能試験の結果から ASSC の熱交換性能計算プログラムを改善し計算精度を向上させることができた。                                                                       | 達成   |
| 空気冷却フィンの高性能化検討        | 数値流体解析により空気フィンの最適設計を可能にする基礎的な知見を得る。               | 様々な冷却フィン形状について流れ場の検討と冷却性能の比較考察を行った。これらの結果から、冷却フィンの放熱性能向上に資する種々の知見を獲得するとともに、冷却性能の向上を図るための設計指針を得ることができた。                                                                         | 達成   |

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

<共通指標>

| 論文数 | 論文の<br>被引用度数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | 特許権の<br>実施件数 | ライセンス<br>供与数 | 取得ライセ<br>ンス料 | 国際標準へ<br>の寄与 |
|-----|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 3   | 0            | 0                | 0            | 0            | 0            | 0            |

評価概要

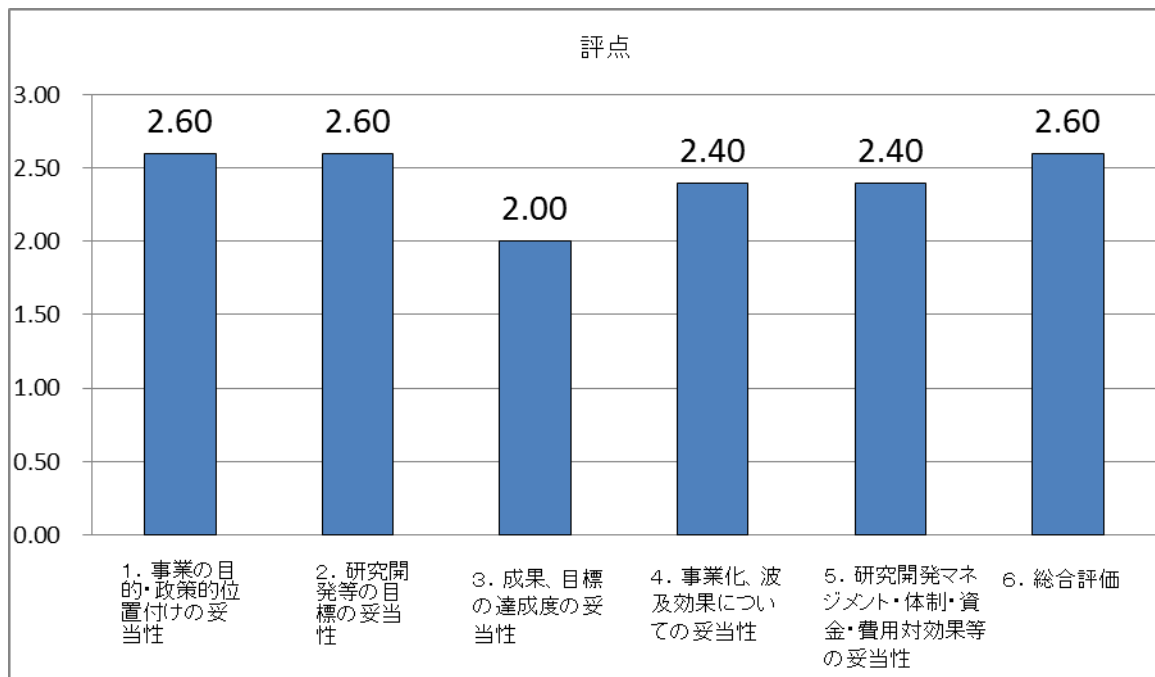
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性
2. 研究開発等の目標の妥当性
3. 成果、目標の達成度の妥当性
4. 事業化、波及効果についての妥当性
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性
6. 総合評価
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

評点結果

評点法による評点結果

(5 航空機用先進システム基盤技術開発(次世代航空機エンジン用冷却装置))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.00 | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 3       | 2       | 2       | 3       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.40 | 2       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |



## 第 1 章 評価の実施方法

# 第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成26年4月改定、以下「評価指針」という。）に基づき、以下のとおり行われた。

## 1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) より良い政策・施策への反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への技術に関する施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

## 2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即



した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある5名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省航空機武器宇宙産業課が担当した。

### 3. 評価対象

下記の航空機関連研究開発事業を評価対象として、研究開発実施者から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

平成26年度終了事業

- 1 炭素繊維複合材成形技術開発（平成20年度から平成26年度）
- 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）（平成22年度から平成26年度）
- 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）（平成24年度から平成26年度）
- 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）（平成25年度から平成26年度）
- 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）（平成24年度から平成26年度）

### 4. 評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等及び要素技術について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

### 5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価室において平成25年4月に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価（中間・事後評価）に沿った評価項目・

評価基準とした。

### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

- (1) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
  - ・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
  - ・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
  - ・社会的・経済的意義（実用性等）
- (2) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
  - ・国民や社会のニーズに合っているか。
  - ・官民の役割分担は適切か。

### 2. 研究開発等の目標の妥当性

- (1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
  - ・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
  - ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

- (1) 成果は妥当か。
  - ・得られた成果は何か。
  - ・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
  - ・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。
- (2) 目標の達成度は妥当か。
  - ・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

- (1) 事業化については妥当か。
  - ・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。
- (2) 波及効果は妥当か。

- ・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

- (1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。
  - ・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。
  - ・採択スケジュール等は妥当であったか。
  - ・選別過程は適切であったか。
  - ・採択された実施者は妥当であったか。
- (2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。
  - ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
  - ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
  - ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
  - ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。
- (3) 資金配分は妥当か。
  - ・資金の過不足はなかったか。
  - ・資金の内部配分は妥当か。
- (4) 費用対効果等は妥当か。
  - ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
  - ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
- (5) 変化への対応は妥当か。
  - ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
  - ・代替手段との比較を適切に行ったか。

## 6. 総合評価

## 第2章 プロジェクトの概要

# 1 炭素纖維複合材成形技術開発

## 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け .....           | 5  |
| 1－1 事業目的 .....                   | 5  |
| 1－2 政策的位置付け .....                | 5  |
| 1－3 国の関与の必要性 .....               | 7  |
| 2－1 研究開発目標 .....                 | 8  |
| 2－1－1 全体の目標設定 .....              | 9  |
| 2－1－2 個別要素技術の目標設定 .....          | 10 |
| 3－1 成果 .....                     | 11 |
| 3－1－1 全体成果 .....                 | 11 |
| 3－1－2 個別要素技術成果 .....             | 11 |
| 3－1－3 特許出願状況等 .....              | 21 |
| 3－2 目標の達成度 .....                 | 23 |
| 4. 事業化、波及効果について .....            | 24 |
| 4－1 事業化の見通し .....                | 24 |
| 4－2 波及効果 .....                   | 24 |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ..... | 26 |
| 5－1 研究開発計画 .....                 | 26 |
| 5－2 研究開発実施者の実施体制・運営 .....        | 27 |
| 5－3 資金配分 .....                   | 28 |
| 5－4 費用対効果 .....                  | 28 |
| 5－5 変化への対応 .....                 | 28 |

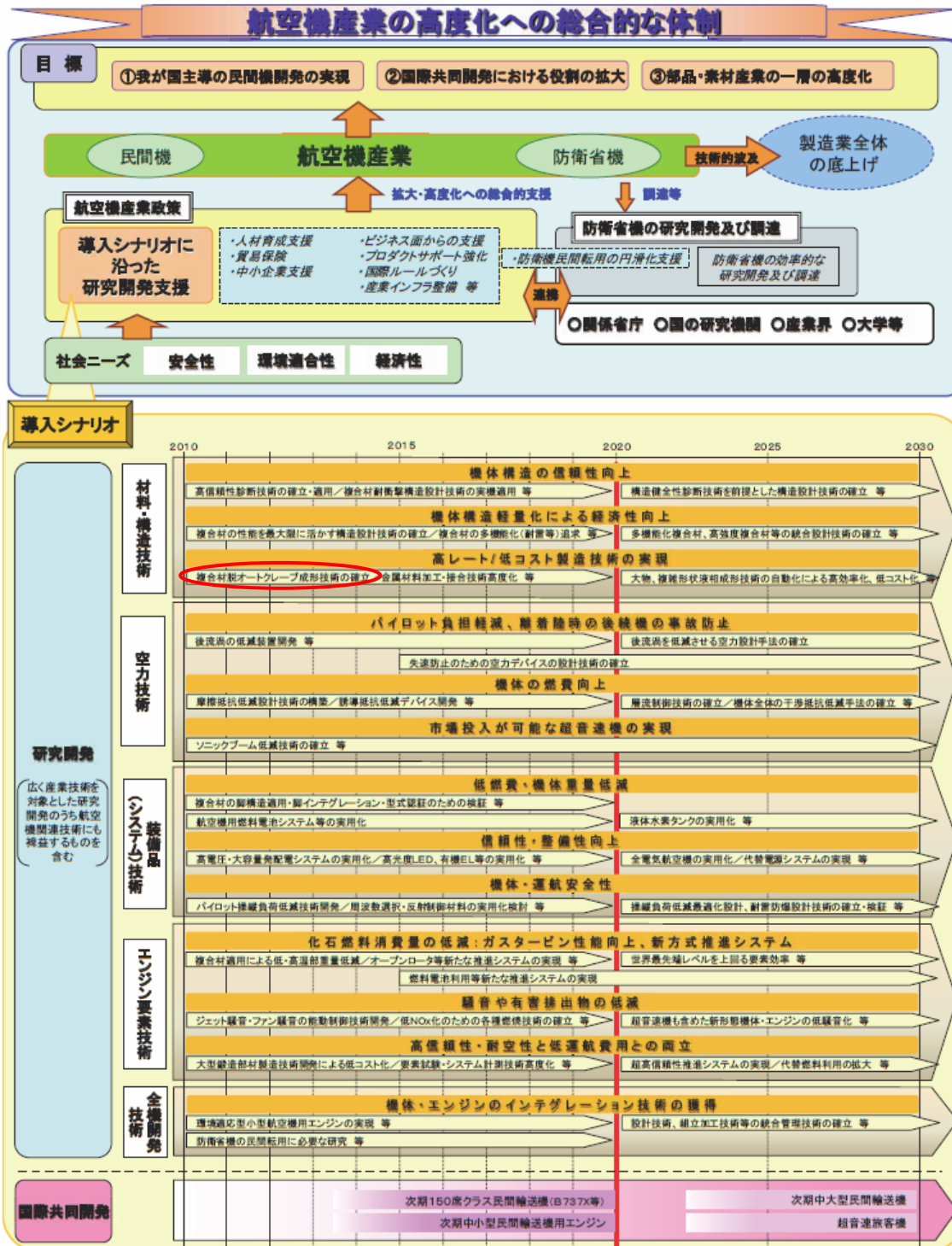
## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1－1 事業目的

航空機、自動車及び鉄道から船舶に至るまでの幅広い輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大することにより、エネルギー使用の合理化に資することを目的とし、VaRTM と呼ばれるオートクレーブを用いない先進的な炭素繊維複合材成形技術の研究開発及び実大規模の実証を行うことを目的としている。

### 1－2 政策的位置付け

本事業はオートクレーブを用いない炭素繊維複合材成形技術の開発を目指しており、経済産業省が策定している『技術戦略マップ2010』の航空機分野の導入シナリオ（図1－1）において「複合材脱オートクレーブ成形技術の確立」として記載されている研究開発項目の一つと位置づけられる。



出所：技術戦略マップ2010

図1-1. 航空機分野の導入シナリオ



### 1－3 国の関与の必要性

今般の燃料価格高騰の折、輸送機器やエネルギー機器に対する省エネ要求は以前にも増して高まっており、これら機器の軽量化を図ることが必要となっている。炭素繊維複合材は金属材料に比べて軽量かつ高強度という特色を有しているため、炭素繊維複合材の適用範囲を拡大することにより、これら機器の軽量化を図ることが可能である。しかしながら、現在主に用いられているプリプレグを使用した成形方法では、大型・高価でエネルギー消費も大きい設備（オートクレーブ）を必要とするうえ、曲率の大きなものなど複雑な形状の部品を品質や強度を保ちながら成形することに困難が伴うといった問題がある。

本事業は、こうした課題を克服する先進的な炭素繊維複合材成形技術を開発するものである。

一方、本事業においては“机上の技術”ではなく真に実用的な技術とすべく、開発した炭素繊維複合材成形技術を実大規模の供試体（航空機）にて技術実証する計画となっている。このような実機での検証（設計・製造・試験）を含む開発においては、開発期間が長期に亘る上、多大なリソースを要するとともに、関係省庁との調整も必要となり、民間企業単独での実施はリスクが非常に大きい。

以上のような観点から、本事業については国の関与が必要である。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

メタル材に比べ軽量である炭素繊維複合材を用いた部材・製品の普及を図る為、強度・品質安定性を保持しつつ複雑な設備を要しない炭素繊維複合材成形技術（VaRTM 成形技術）開発を実施し、小型航空機サイズの試作機（供試体）による実証を通じて当該技術を確立する。これにより、幅広い輸送機械等における炭素繊維複合材の適用拡大を図り、エネルギー使用合理化に資することを目的とする。

本炭素繊維複合材成形技術を適用することにより、製品のレベルにおいて、アルミ材と比較して 15%以上の重量軽減、アルミ材と同等の生産性を実現することを目標とする。

## 2-1-1 全体の目標設定

表 2-1. 全体の目標

| 目標・指標<br>(事後評価時点)                     | 目標・指標<br>(中間評価時点)                                                                                                                 | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 小型機尾翼に適用して、アルミ材と比較して 15%以上の重量軽減を実現する。 | <p>本成形技術を小型機尾翼に適用するのに必要な材料スペック設定、プロセス設定、設計許容値確立を行うとともに、小型機の尾翼の設計を完了する。</p> <p>設計した小型機尾翼において、アルミ材と比較して 15%以上の重量軽減を実現できる見通しを得る。</p> | <p>一般的に、炭素繊維複合材（プリプレグ法）を用いた場合、従来アルミ構造より比強度が高く、20%を超える重量低減も理論的には可能である。</p> <p>実際に航空機の構造部材に適用する際には、適用部位の置かれる環境条件や衝撃損傷等の外的影響及び様々な製造上の制約等を考慮する必要があり、重量低減効果は凡そ 15%程度になると言われている。</p> <p>さらに、汎用的に用いられる VaRTM 法はプリプレグ法に比べて品質の安定性の確保が難しく、設計時の許容値をかなり低く設定する必要があり重量軽減効果が大きく低下してしまう。</p> <p>本研究開発では材料の改良や厳密なプロセスコントロール及び適用構造での強度低下リスク検証とその最小化検討等に加え、本技術の航空機への適用の妥当性を担保する指標として航空局による規定適合性審査を受審することにより、プリプレグ法と同等の 15%程度の重量低減効果を目指す。</p> <p>プリプレグ法と同等の重量軽減を実現することは、成形法としてより高効率な VaRTM 法の普及に必要な達成目標である。</p> |

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

表 2-2. 個別要素技術の目標

| 要素技術                      | 目標・指標<br>(事後評価時点)                             | 目標・指標<br>(中間評価時点)           | 設定理由・根拠等                                                                                     |
|---------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) VaRTM<br>材料仕様の設定      | 材料特性試験を完了し材料仕様を確立する。                          | 同左                          | 航空機の一次構造へ適用するには、物理・化学・機械特性を再現性よく満足する必要がある、それを実現する材料仕様を設定する。                                  |
| (2) VaRTM<br>プロセスの製造安定性確立 | プロセススペックを制定するとともに、製造時欠陥影響を確認する。               | 同左                          | 航空機の一次構造への適用には、安定的に製品を製造可能なプロセススペックの制定が必要である。                                                |
| (3) 実大規模の供試体設計のための設計許容値確立 | 試験により設定した許容値に対する低下リスクを排除する。                   | 同左                          | 設計許容値試験を実施して設計許容値を設定する必要がある。                                                                 |
| (4) 実大規模での技術成立性実証         | 小型航空機サイズの試作機（供試体）を製作し、開発した成形法の成立性・妥当性を最終検証する。 | 実大工作試験等を通じて試作機の製作プロセスを確立する。 | 開発した成形法の成立性・妥当性を最終検証するには、実大規模の航空機を供試体として用いた実証を行い、所定の安全性審査をクリアすることにより、それらの技術的成立を確認することが必要である。 |

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

本研究開発では VaRTM 法で成形した複合材を航空機の一次構造に適用することを目指しているが、その為には強度・剛性等の特性を再現性よく満足する必要がある。そこで材料とプロセスに対し、品質管理上満たすべき基準を検討し、それぞれをスペックとして定めるとともに、試験を行いそれぞれのスペックの妥当性を確認した。

また小型航空機の尾翼への適用を想定し、設計許容値を設定するとともに、その妥当性については設計許容値試験を通じて確認している。

加えて、実大工作試験、初品認定試験を通じて試作機の製作プロセスを確認し、それに続いて試作機部品の製作を開始した。

##### 3-1-2 個別要素技術成果

###### (1) VaRTM 材料仕様の設定

航空機構造のうち、主翼・尾翼桁間構造等、機体において空気力等の主荷重を支持する構造を一次構造（もしくは PSE (Principal Structural Element) 構造）と称する。一次構造の強度・剛性不足は機体の安全性に大きな影響を与えるため、民間航空機一次構造体に適用される材料・成形法は、我が国では耐空性審査要領等の規定への適合性を示すことが必須である。そこで、確実に材料品質の安定性を確保するためには、材料仕様をスペックという文書の形で明確化する必要があり、特に複合材料の場合はスペックに準拠した材料が物理特性、化学特性、機械特性ともに、十分満足するものかを評価しなければならない。

VaRTM 材料の試作機における適用想定部位を尾翼桁間構造と設定し、(3) 項で示す設計許容値取得試験結果を反映した尾翼桁間仕様に供するに足る、材料スペックを炭素繊維材料スペック・織物基材材料スペック・樹脂材料スペックの三種類の構成とした。VaRTM 技術は(2) 項に示すプロセスで示されるとおり、最終製品形状の炭素繊維織物基材積層体に後から樹脂を流し込む成形手法をとるため、従来複合材技術であるプリプレグ材料と異なり、炭素繊維織物基材と樹脂の二つの材料スペックにて管理することが必要である。また織物基材は、炭素繊維方向が最終製品の強度・剛性を支配する NCW (Non Crimp Woven) 織物という、従来一方向材プリプレグに似た特性を持つ材料構成としている(図 3-1)。当然ながら、織物基材中の炭素繊維自体も材料の特性に大きな

影響を与える材料要素であるため、今回炭素繊維そのものについても材料スペック化を実施した。尚、炭素繊維自体を材料スペック化する動きはプリプレグ材でも同様に航空機業界で一般的な流れとなりつつある。

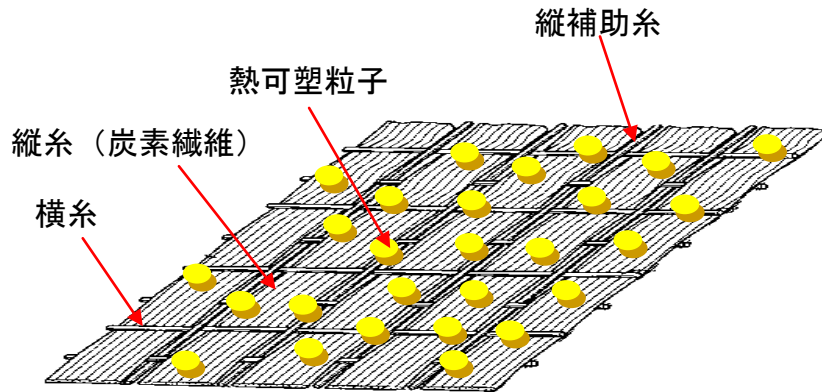


図 3 - 1. VaRTM 織物基材の構成 (NCW 織物)

上記に従い三種類（炭素繊維・織物基材・樹脂）の材料スペックを作成し、更に現状の VaRTM 材料が、物理特性・化学特性・機械特性の各材料スペックの要求値を全てにおいて満たしているかを評価するための、材料特性試験（Material Characterization（マテキャラ）試験）の試験方案を作成した。本材料特性試験を実施するにあたり、どのように VaRTM 材料が民間航空機として遵守すべき規定に適合するか、を記載した Certification Plan（適合性証明計画書）を国土交通省航空局技術審査センターにて説明した上で、航空局にて材料スペックや材料特性試験方案を審査いた。

炭素繊維・織物基材・樹脂のスペック及び試験方案については、適合性判定書を取得した。また、東レ株式会社とともに、上記試験方案に従い材料特性試験を実施し、完了した。織物基材については樹脂を合わせた複合材料パネルによる機械特性試験も実施し、取得データの一部は材料許容値（Material Allowable）試験で取得予定の統計解析データへ適用した。

## （２）VaRTM プロセスの製造安定性確立

（１）項で示した材料仕様設定と同様に VaRTM 技術を安定的に航空機一次構造部品に適用するためには、工手法（プロセス）の安定性を確立することも必須である。また、安定した品質確保のためには、VaRTM 成形プロセススペックの制定と成形時の品質低下を確実に検知できる検査スペック、特に非破壊検査（NDI）プロセススペックの確立が必要である。

VaRTM の成形プロセスの概要を図 3－2 に示す。VaRTM プロセスでは織物基材の表面に配置した熱可塑粒子を活用し、樹脂を含浸していない「ドライ」な状態でも従来プリプレグと同等の成形性が確保できるよう工夫している。樹脂含浸前にホットコンパクションという工程を設けることにより、樹脂含浸および硬化後の板厚変動量をコントロールし、従来 VaRTM 工法で課題となる大気圧との差圧のみでの繊維体積含有率 ( $V_f$ =Volume of Fiber) のばらつきを最小化し、安定して生産するプロセススペックを制定し、航空局へ説明し適合性判定書を取得した。

またプロセススペックに規定されるプロセスウィンドウ等の妥当性を検証する為、温度条件等を考慮した試験を行い、安定した品質を確保できることを確認するとともに、必要に応じてプロセススペックへのフィードバックを行った。

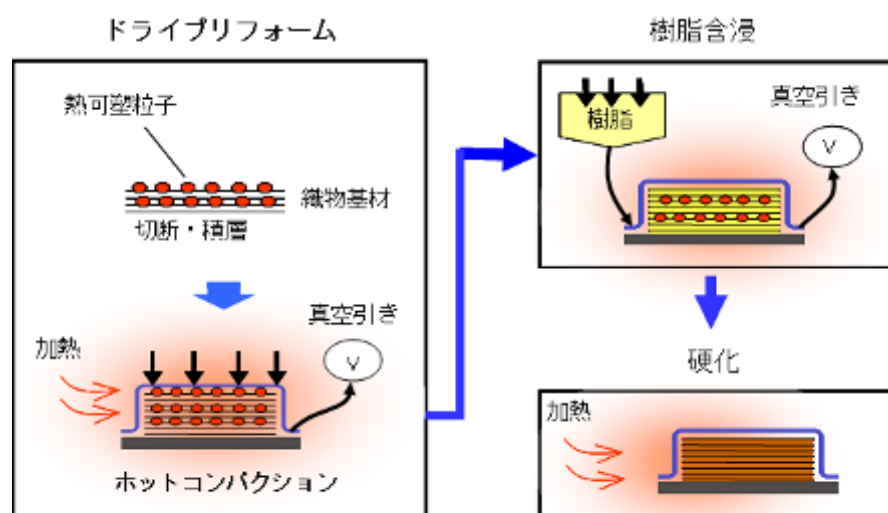
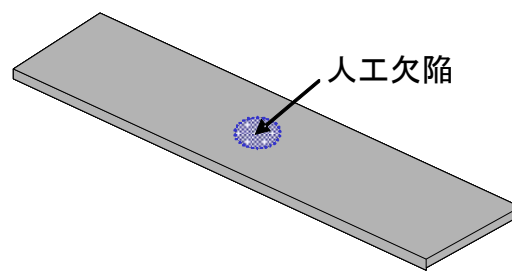


図 3－2. VaRTM 成形プロセスの概要

VaRTM プロセスの製造安定性の確立のためには、製造中に生じる各種欠陥に対して、強度維持の観点から許容される欠陥（許容欠陥）のサイズを規定するとともに、それ以上の欠陥については検査で確実に検出することが必要である。

本事業以前に実施した実大強度試験および試験後の断面観察評価等の検討結果に基づき、許容欠陥サイズを規定するスペックを制定した。また、この許容欠陥により強度の大きな低下等の事象を起こさないことを確認するため、人工欠陥を挿入した供試体を作成し、強度評価試験（図 3－3）を実施した。



人工欠陥を挿入した供試体

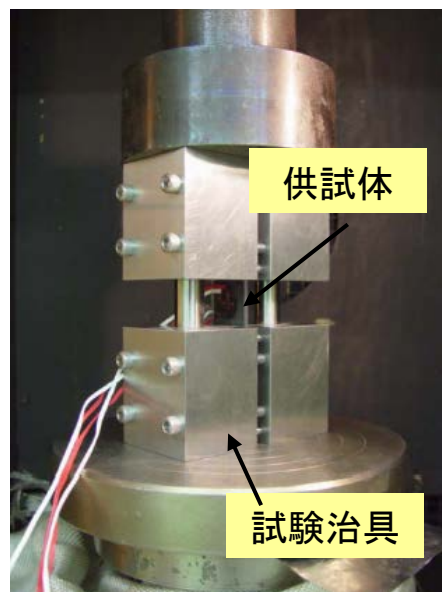


図 3－3. 人工欠陥を挿入した供試体と強度評価試験



強度低下等を引き起こすような欠陥を検査で確実に検出するために、非破壊検査（NDI）プロセススペックの制定も必要である。これまでに基本的な平板構造を模擬した供試体を用いて実施したNDIの検出性評価試験の結果をもとに、有効な手法を設定し、NDI プロセススペックを制定した。また、当該プロセススペックは適合性判定書を取得した。制定したNDI プロセススペックの有効性を確認するため、試作機の板厚のバリエーション及び板厚変化を模擬し、定めた許容欠陥サイズ的人工欠陥を挿入した供試体（図3－4）を作成し、評価試験を実施した。良好な検出結果（図3－5）が得られ、制定したスペックに基づくプロセスで所望の欠陥を検出できることを確認し、検証を完了した。

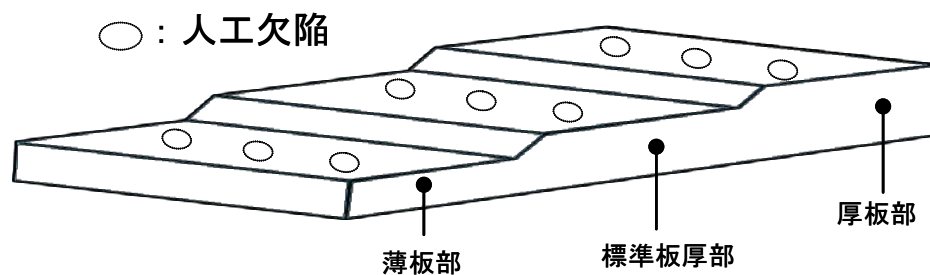


図3－4. 評価用供試体模式図

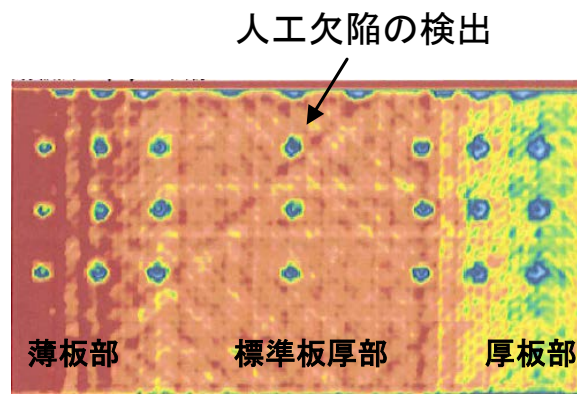
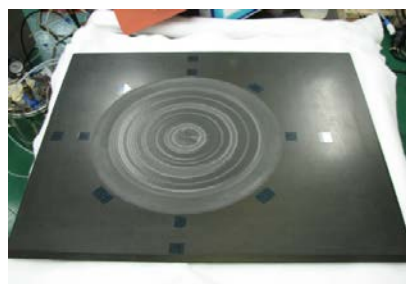


図3－5. 検出結果

更に、VaRTM 成形法によって製造された部品が何らかの理由で損傷を受けた場合に、規模に応じた修理が必要となる。比較的損傷規模が小さく、強度回復を必要としない損傷に関しては樹脂の塗布・硬化などといった簡易な修理方法（コスメティック修理法）の適用が一般的である。一方、比較的損傷規模が大きく、強度回復を必要とする損傷に関しては、損傷箇所及びその周辺部をテーパ状に切削して損傷を除去し、当該部位を埋めるように修理材を積層、硬化する方法（スカーフ修理）の適用が一般的である。このうち、安全性の観点で重要となるスカーフ修理については、VaRTM 成形法の特性を考慮し、従来のプリプレグ材とは異なる VaRTM 成形法特有の修理方法を開発してきた。

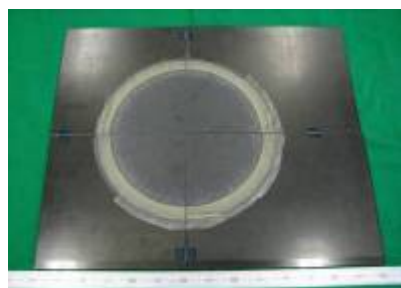
この修理方法の開発は、基本プロセスの設定、設計許容値の設定、プロセスウィンドウの設定、修理後の品質確認方法設定、実大レベルでの工作性確認、修理後の強度証明といった流れで進める。このうち、基本プロセスの設定は完了し、そのプロセスを用いた強度データの取得も完了した（図3－6）。



(1) スカーフ加工



(2) パッチの適用



(3) 修理完了



(4) 強度データ取得試験

図3－6. スカーフ修理の基本プロセス及び強度データ取得試験

### （３）実大規模の供試体設計のための設計許容値確立

これまでに仮設定した設計許容値に対し、クーポンレベルや実大構造における強度試験等を行いその妥当性を確認し、これにより設計許容値を確立する。

設計許容値確立のためには、クーポンレベルでの試験をベースとして、統計的手法を用い、材料ばらつきによる影響や環境影響などを評価する必要がある。図３－７に示すように、複数の異なる製造バッチの材料を用いた供試体を準備し、それぞれ強度試験を実施し、データを統計処理することで、材料ばらつきを加味した許容値評価を行う。また一般的に複合材の特性は温度や湿度により影響を受けるため、許容値確立に際しては、環境（温度・湿度）による影響を評価することが必要である。そこで図３－８に示すように、試作機がさらされる環境条件を模擬した環境下で強度試験を実施し、設計許容値に環境による影響を反映した。

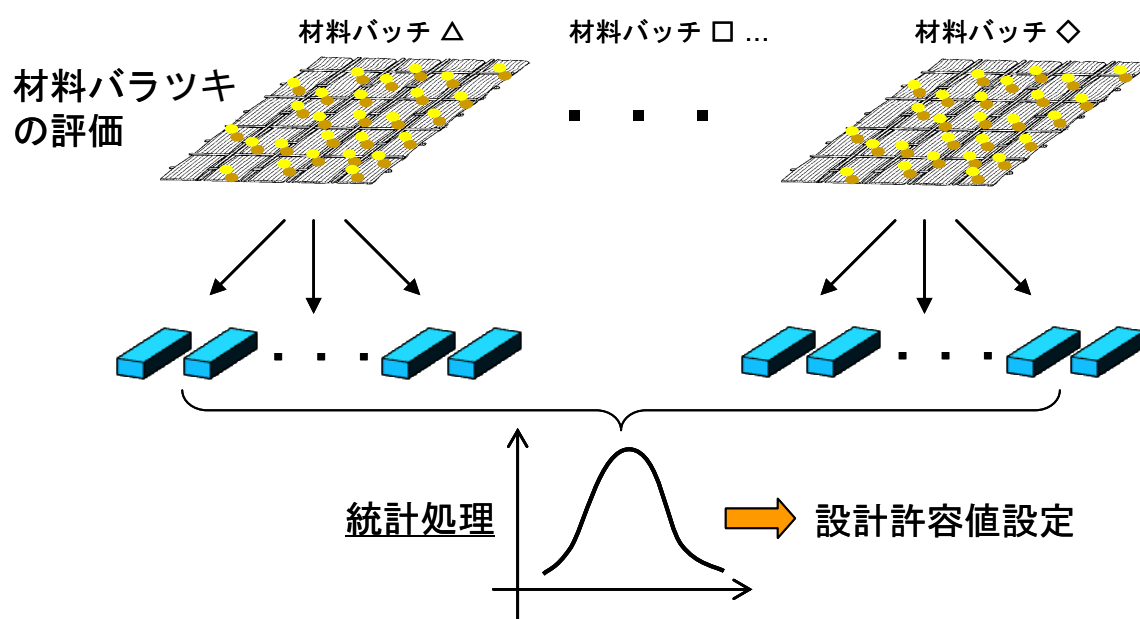


図３－７． 許容値試験における材料ばらつきの評価および統計処理の模式図

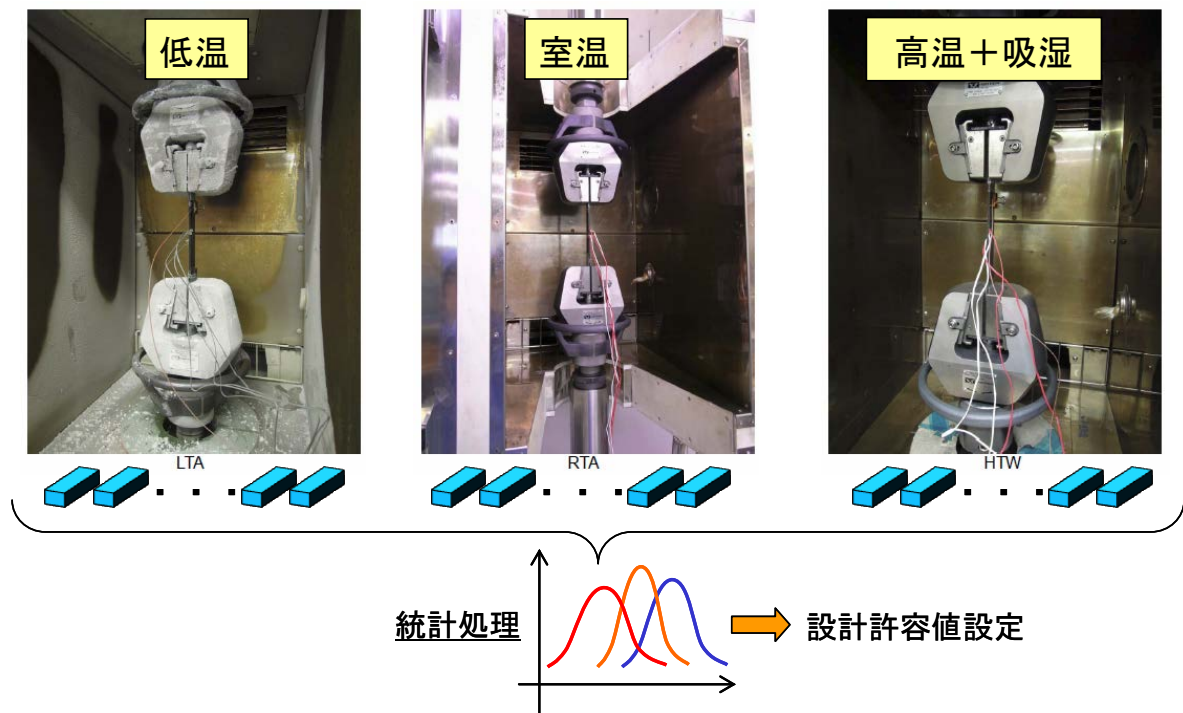


図 3－8． 許容値試験における環境影響評価試験

上記設計許容値評価は、クーポンレベルの試験による評価だが、具体的な構造仕様における有効性を評価するべく、試作機の翼根部の継手を模擬した大口径・厚板・異種材結合の供試体を作成し、強度試験を行った（図 3－9）。評価の結果、設定した設計許容値が試作機の構造仕様に対して有効であることが確認できた。

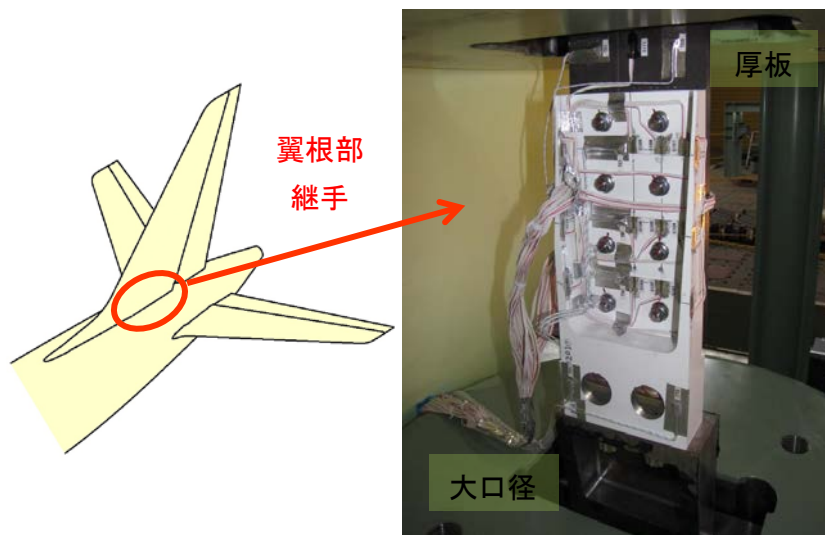


図 3－9． 大口径継手構造を模擬した供試体

#### （４）実大規模での技術成立性実証

本事業では、開発した VaRTM 成形技術の成立性を実証するために、本技術を尾翼構造に適用した試作機を製作し、それを用いた強度試験等を行う計画となっている。

試作機の製作に先立ち、これまでに設定した材料スペックおよび成形プロセスを用いて実大工作試験を実施し（図３－１０、１１、１２）、部品製造および組立における VaRTM 成形法に起因する問題点を抽出した。その結果をフィードバックし、改善された成形手順を用いて部品を製作し、非破壊検査及び破壊検査を行い必要な品質を実現していることを確認した（初品認定試験、図３－１３）。

これらの検討結果を受け、試験機部品の製作を開始した。

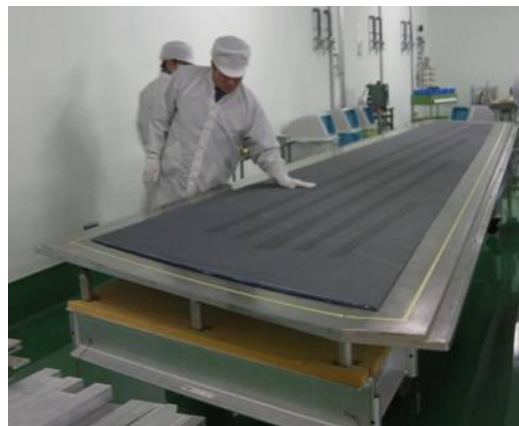


図３－１０． 工作試験の様子（SKIN の成形後品質確認）



図３－１１． 工作試験の様子（SPAR と RIB の組み付け検証）





図 3－1 2. 工作試験の様子（全体組立後）

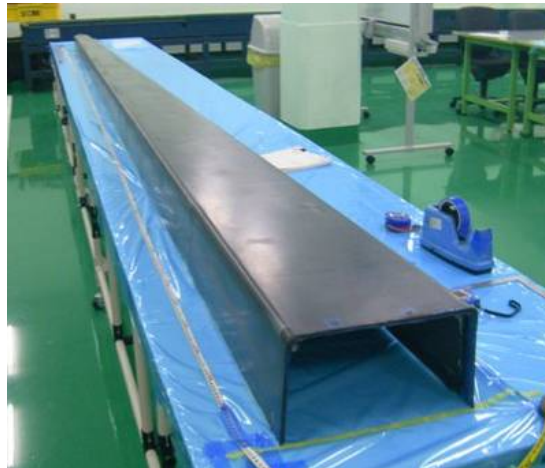


図 3－1 3. 初品認定試験の様子（SPAR）

### 3-1-3 特許出願状況等

表 3-1. 特許・論文等件数

| 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数（出願を含む） | 特許権の実施件数 | ライセンス供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | —        | 13           | 0        | 0        | 0        | —        |

※特許 9 件は審査請求中

表 3-2. 論文、投稿、発表、特許リスト

|    | 題目・メディア等                                                                                            | 時期     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 論文 | ICCM2009「A-VARTM TECHNOLOGIES FOR FABRICATION OF AIRCRAFT PRIMARY STRUCTURES」                       | H20.11 |
| 投稿 | NHK「クローズアップ現代」（インタビュー）                                                                              | H20.5  |
|    | 高分子学会機関紙「航空機構造用複合材料の成形プロセス」                                                                         | H20.5  |
|    | 2009ICAF National Review「A-VaRTM Technology Application on Primary Aircraft Structures」             | H20.9  |
|    | High Performance Composites (March)「A-VaRTM Takes Flight in Japan」                                  | H21.2  |
|    | 第 34 回複合材シンポジウム「航空機構造用・A-VaRTM 成形技術」                                                                | H21.9  |
|    | 強化プラスチック協会「特別企画 FRP60 年の歩み」                                                                         | H26.11 |
|    | この他多数投稿あり                                                                                           |        |
| 発表 | （東レ）総合科学技術会議「科学技術政策に対する意見交換（炭素繊維）」                                                                  | H21.4  |
|    | 第 34 回複合材シンポジウム「航空機構造用・A-VaRTM 成形技術」                                                                | H21.9  |
|    | International committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2009)「A-VaRTM for Primary Aircraft Structures」 | H21.5  |
|    | National Review 発表「A-VaRTM for Primary Aircraft Structures」                                         | H21.5  |
|    | 複合材設計ソリューションセミナー講演「「航空機構造への CFRP 適用の歩み」と「民間機への適用例」                                                  | H27.2  |
|    | この他多数発表あり                                                                                           |        |
|    |                                                                                                     |        |

|    |                                                                        |         |
|----|------------------------------------------------------------------------|---------|
| 特許 | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(日本出願特許：特願 2010-038990)<br>日本出願特許⇒特許 5598842 号    | H26. 8  |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(日本出願特許：特願 2010-038989)<br>日本出願特許⇒特許 5653634 号    | H26. 11 |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(基礎出願特許：特願 2010-038989)<br>米国出願特許⇒8696842 (登録番号)  | H26. 4  |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(基礎出願特許：特願 2010-038989)<br>欧州出願特許                 |         |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(基礎出願特許：特願 2010-038989)<br>カナダ出願特許⇒2789363 (登録番号) | H27.4   |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(基礎出願特許：特願 2010-038989)<br>ブラジル出願特許               |         |
|    | 繊維強化樹脂からなる部材の補修方法<br>(基礎出願特許：特願 2010-038989)<br>米国出願特許 (分割出願)          |         |
|    | VaRTM 通気シート<br>(日本出願特許：特願 2015-108083)                                 |         |
|    | VaRTM 樹脂注入部・吸引部構造<br>(日本出願特許：特願 2015-108084)                           |         |
|    | VaRTM 織物<br>(日本出願特許：特願 2015-131378)                                    |         |
|    | VaRTM リーク防止コネクタ<br>(日本出願特許：特願 2015-131379)                             |         |
|    | VaRTM プリフォーム接着方法<br>(日本出願特許：特願 2015-108082)                            |         |
|    | VaRTM プリフォーム接着方法処理条件<br>(日本出願特許：特願 2015-108081)                        |         |



### 3-2 目標の達成度

表 3-3. 目標に対する成果・達成度の一覧表

| 要素技術                                  | 目標・指標                                                         | 成果                                                                                              | 達成度 |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (1) VaRTM<br>材料仕様の設定                  | 材料特性試験を完了し<br>材料仕様を確立する。                                      | VaRTM の材料スペックについて航空<br>局に規定適合性証明計画と共に、三<br>種の材料スペックについて審査い<br>ただき、内容について合意を得た。                  | 達成  |
| (2) VaRTM<br>プロセスの製<br>造安定性確立         | プロセススペックを制<br>定するとともに、製造<br>時欠陥影響を確認す<br>る。                   | 成形プロセスやNDI プロセスについ<br>て、各種成形・評価試験を実施し、<br>スペックにフィードバックをかけ、<br>大きなリスクはないことを確認し<br>た。             | 達成  |
| (3) 実大規<br>模の供試体設<br>計のための設<br>計許容値確立 | 試験により設定した許<br>容値に対する低下リス<br>クを排除する。                           | 設定した VaRTM 尾翼桁間仕様の中で<br>大きな強度低下リスクのあった、イ<br>ンパクト付与後のパネル強度や二<br>軸荷重試験で許容値に大きく影響<br>を与えないことを確認した。 | 達成  |
| (4) 実大規<br>模での技術成<br>立性実証             | 小型航空機サイズの試<br>作機（供試体）を製作<br>し、開発した成形法の<br>成立性・妥当性を最終<br>検証する。 | 周辺構造との関連も含め実大実証<br>の基になる尾翼設計仕様を設定で<br>きた。                                                       | 達成  |

## 4. 事業化、波及効果について

### 4-1 事業化の見通し

本事業で開発した VaRTM 成形技術は航空機の一次構造に適用することにより事業化を図る。

VaRTM 成形技術は尾翼桁間構造等の一次構造への適用を期待できる。メタル構造に比して軽量の構造体を実現できる為、本事業の上位目的であるエネルギー使用合理化政策に合致する。

なお、VaRTM 技術は、厚板含浸性など幾つかの技術課題が解決されれば、大型航空機で適用が拡大しつつあるプリプレグ複合材を代替することも可能であり、様々な航空機へ適用が拡大していく可能性がある。

### 4-2 波及効果

研究開発対象となっている要素技術は、それぞれ、他製品／他分野に応用可能な汎用的技術を内包している。適用対象個々の拘束条件に合わせる為の開発要素を生じる可能性はあるものの、他分野／他製品に波及が可能である。

複合材は炭素繊維引張強度がメタルに対して大きい点に最大の特徴がある。反面、面外曲げや圧縮には弱いので、各種タンクや風力発電ブレード等、引張強度の大きさを活かせる構造体に適用すれば軽量化メリットを享受できる。適用対象それぞれに存在する固有の技術課題が解決されれば、製造効率に優れた VaRTM 等の複合材成形法が波及する可能性がある。

以下、波及シナリオを記載する。

#### ・自動車構造

自動車が消費する燃料量は航空機よりも遥かに多く、燃費効率向上の必要性もまた遥かに大きい。自動車にも一部車種・部材に複合材適用が始まったが、価格が見合わず、普及が進んでいないのが現状である。本研究開発の成果を踏まえ、航空機特有の強度・品質要求を緩和して価格を下げれば、フレームなど主要構造部材への適用が可能となり、普及が進む可能性がある。

#### ・船舶構造

喫水線上部の重量を減らして荒れた海上での船のロールを減少させる為に隔壁やデッキに軽量複合材料の使用が始まっているが、船体主構造への複合材適用の試みは未だ本格化していない。本研究開発の成果を踏まえ、自動車と同様に品質要求を緩和して価格を下げれば、船体主構造への普及が進む可

能性がある。軽量化によってエンジン出力を減じて燃料消費量を減じる方向と、日韓／日中間のニーズが高まる高速コンテナ船等に適用、速度向上を図るニーズが存在する。

- ・ 風力発電／潮流発電ブレード等

既に風力発電ブレードへの複合材適用は始まっているが、ガラス繊維が主体であり、重量削減効果は炭素繊維複合材よりも小さい。本研究開発の成果を受け、自動車・船舶の場合と同様、品質要求を適宜緩和して価格を減じれば、炭素繊維複合材ブレードの普及が進む可能性がある。ブレード重量の削減は、それを支える構造体の重量削減を導き、雪だるま式に必要な材料が減少する効果を持つ。単位発電電力に要する風力エネルギーも小さくなる為、発電効率が上昇する事となる。

- ・ タンク類、建て材等

引張強度特性に優れる複合材特性を活かして、高圧ガスタンク（タンクローリー等を含む）等の圧力容器への適用が進む可能性がある。また、高層ビル等、上部構造の軽量化が必要な建築物への適用も期待される。

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

本事業は、表5-1に示すように、平成20年度からH25年度の6年計画で実施する計画である。

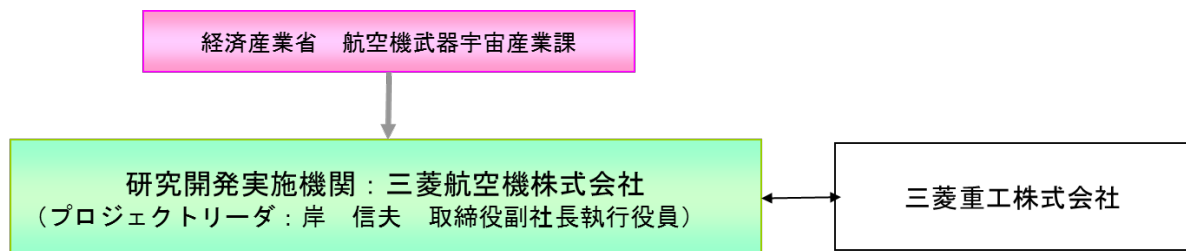
表5-1 研究開発スケジュール

| 年度<br>実施項目                    | 2008<br>20年度         | 2009<br>21年度 | 2010<br>22年度 | 2011<br>23年度 | 2012<br>24年度 | 2013<br>25年度 | 2014<br>26年度 |
|-------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (1) 材料仕様の設定                   | 材料仕様の設定              | 材料特性試験       |              |              |              |              |              |
| (2) プロセスの製造安定性                | プロセススペック設定           | プロセス確認試験     |              |              |              |              |              |
| (3) 実大規模の供試体設計<br>のための設計許容値確立 |                      | 設計許容値確認試験    | 設計許容値証明試験    |              |              |              |              |
| (4) 実大規模での<br>技術成立性実証         | 実大規模の供試体(試験機等)の設計・製造 |              |              |              | 実証試験         |              |              |

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱航空機株式会社が経済産業省からの補助を受けて実施した。

三菱航空機株式会社において本研究開発の管理者として統括責任者、推進責任者としてプロジェクトリーダーを置くとともに、三菱重工業株式会社等の外注先を活用しながら本事業を実施している。



また当社の親会社である三菱重工業株式会社は、官需機の主翼に関してスキン・ストリングスを同時に成形する一体成形技術を採用しており、その複合材に関する技術力は米国からも高い評価を受けている。本事業の実施に当たっては、前述の機体開発に関わった経験豊富な人員を起用し、これまで培われてきた技術や経験を存分に活かせる体制を整えて開発に臨んだ。

加えて、三菱重工業株式会社は官需機の他にも、大型民間旅客機の複合材主翼の開発を担当しており、複合材に関する技術で世界をリードしている。

これらの背景から、当社は本事業を実施する事業者として唯一の国内企業である。

### 5-3 資金配分

評価対象年度における研究開発に係る経費及び補助金交付額は下表の通り。

表 5-2. 資金度配分 (単位：百万円)

| 年度 平成      | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25  | 26  | 合計     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|--------|
| 補助事業に要する経費 | 1,924 | 4,238 | 2,924 | 2,316 | 2,316 | 108 | 127 | 13,953 |
| 補助対象経費     | 1,924 | 4,238 | 2,924 | 2,316 | 2,316 | 108 | 127 | 13,953 |
| 補助金交付申請額   | 962   | 2,119 | 1,462 | 1,158 | 1,158 | 54  | 64  | 6,977  |

### 5-4 費用対効果

各年度において、成果を着実にあげることができており、費用対効果は適切だったと考える。

また、本研究での VaRTM による供試体の製作の外注先として東レを利用したが、同社は複合材において、国内トップレベルの試作・試験を実施した経験を有しており、同社に本研究を依頼することが最も効率的であったと考える。

### 5-5 変化への対応

平成 20 年度より本事業を開始し、これまでのところ本事業に直接的な影響が生じるような技術動向、社会情勢、市場ニーズの変化などはないが、今後も技術動向や市場ニーズなどの動向についての情報収集を継続し、変化に対して適切に対応できるよう事業を進めていく。

## 2 航空機用先進システム基盤技術開発 (耐雷・帯電特性解析技術開発)

## 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け .....           | 29 |
| 1－1 事業の目的 .....                  | 29 |
| 1－2 政策的位置付け .....                | 29 |
| 1－3 国の関与の必要性 .....               | 31 |
| 2. 研究開発目標 .....                  | 32 |
| 2－1 研究開発目標 .....                 | 32 |
| 2－1－1 全体の目標設定 .....              | 33 |
| 2－1－2 個別要素技術の目標設定 .....          | 35 |
| 3. 成果、目標の達成度 .....               | 39 |
| 3－1 成果 .....                     | 39 |
| 3－1－1 全体成果 .....                 | 39 |
| 3－1－2 個別要素技術成果 .....             | 40 |
| 3－1－3 特許出願状況等 .....              | 48 |
| 3－2 目標の達成度 .....                 | 52 |
| 4. 事業化、波及効果について .....            | 54 |
| 4－1 事業化の見通し .....                | 54 |
| 4－2 波及効果 .....                   | 55 |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ..... | 56 |
| 5－1 研究開発計画 .....                 | 56 |
| 5－2 研究開発実施者の実施体制・運営 .....        | 59 |
| 5－3 資金配分 .....                   | 63 |
| 5－4 費用対効果 .....                  | 63 |
| 5－5 変化への対応 .....                 | 63 |



## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1-1 事業の目的

従来、航空機の設計においては、落雷・帯電等によりスパークが発生して燃料引火に至ることが無いよう、防爆性の確保には十分に配慮をしてきた。ところが近年、低燃費化や環境適合性のための機体軽量化を狙った炭素繊維複合材料の適用拡大が進み、防爆性の確保という点で従来の金属構造の設計と異なる技術課題が浮上してきている。そこで、本事業では航空機構造における落雷／帯電等の電氣的現象とその影響を、解析および実験により調査解明し、複合材料を適用した将来航空機の安全性を確保するための耐雷・防爆技術を確立することを目的とする。

複合材料は、我が国が世界をリードするコア技術であり、特に、機械的特性に関する設計・製造の知見は豊富である。しかし、複合材構造への落雷や帯電等を起因とする燃料タンク内での放電等の、安全性を確保するための電氣的特性の解明が課題となってきた。このような問題に対し、先進的な耐雷帯電解析手法を世界に先駆けて開発し、設計技術として標準化を図ることは、我が国の航空機産業の競争力向上に大きく寄与するものである。

また、近年、航空機産業においては急速にグローバル化が進み、多くの新興国が先端技術のキャッチアップを図っており、機体主材料の複合材料もまた各国が国をあげてその研究開発や製造技術の向上に力を入れている。このような環境において、今後我が国の航空機産業における国際競争力を維持・向上をするためには、環境適合性、運航経済性、安全性といった将来航空機に必須となるニーズに応える複合材構造の耐雷・防爆技術を確立することが極めて重要である。

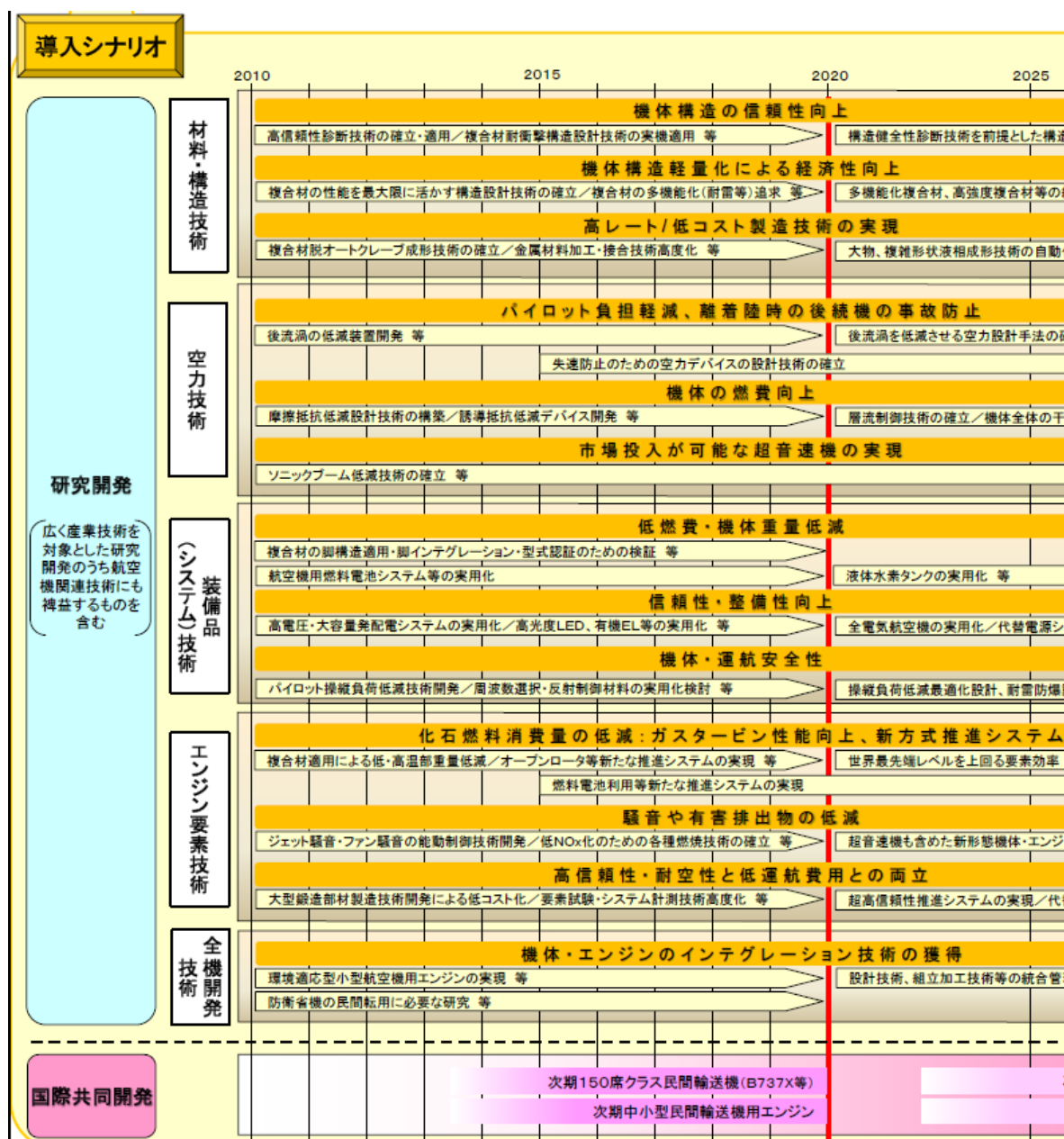
### 1-2 政策的位置付け

本事業は、我が国の強みである複合材料技術を活かした航空機機体の開発技術を獲得することであり、機体メーカーのみならず、我が国の複合材料メーカーにとっても、技術競争力を更に向上する絶好の機会である。本事業により、将来の国際共同開発においても我が国の機体・素材産業の役割を更に拡大することにも繋がると期待される。さらに、高い信頼性を求められる航空機産業において、我が国機体・複合材料メーカーがその技術的水準を向上させることは、高度信頼性産業を中心とした我が国の産業基盤全体の高度化に繋がることが期待される。

上述の方向性のために、重点的に推進すべき中核的要素技術のひとつとして材料・構造技術があげられている。具体的には地球温暖化問題の顕在化や燃料価格高騰といった環境変化によって重要性が増している複合材料適用拡大による機体構造軽量化に伴って必要となる、省エネ用炭素繊維複合材料技術や安全

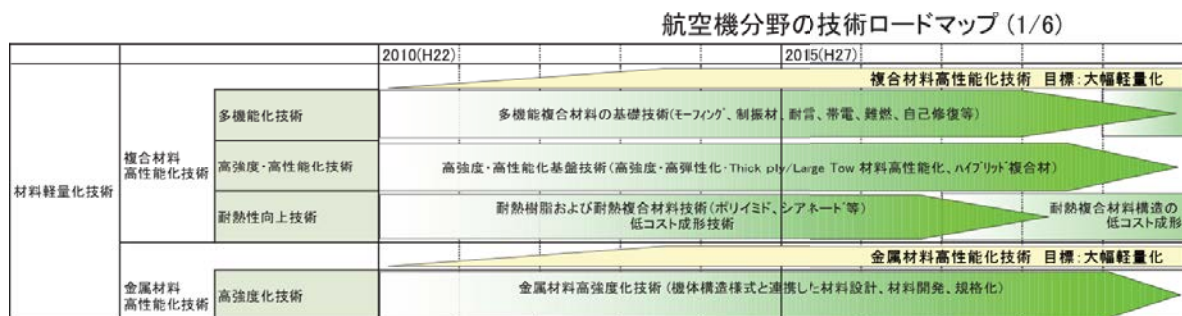
性向上技術等であり、本事業の目的はこれら技術の獲得である。

上記の目的を達成するため、個別の技術開発の進め方等について経済産業省は技術戦略を立て、図1-1に示す航空分野の導入シナリオおよび図1-2に示す技術ロードマップを策定し、施策に反映している。



出所：技術戦略マップ2010

図1-1 航空分野の導入シナリオ



出所：技術戦略マップ2010

図1-2 技術ロードマップ

### 1-3 国の関与の必要性

近年開発される航空機は、低燃費化や環境適合性のための機体軽量化を狙った炭素繊維複合材料の適用拡大が加速している。この状況において、複合材料技術分野では、素材技術から構造組立技術等までを統合した総合力による技術競争の時代に突入しており、欧州やアジアにおいては、国の主導による大規模な産学官連携による、総合的な複合材料技術開発体制が構築されている。この外的環境において、我が国も対抗するべく、産学官連携による複合材料の新技术の開発を推進することが重要である。

本事業は、航空機の複合材料構造の詳細レベルにて、落雷や帯電で発生する電磁気現象から雷電流経路や放電箇所を導く耐雷帯電解析手法の開発を目指している。複合材料構造の詳細レベルでの解析は、航空機開発の先進国である米国の技術開発に伍する世界最先端の技術であり、航空機分野を越えた異分野、特に我が国が得意とする電気電子分野における我が国トップクラスの研究機関との産学官連携が、諸外国の開発体制に対抗するには必須である。

また、本事業で開発する技術は、航空機設計に適用する上での安全性や信頼性の技術実証や保障に大きな費用や時間を伴い、開発の事業リスクも大きい。

以上より、国の積極的な研究開発の指導と投資により、我が国トップクラスの産学による複合材料技術開発体制を構築と、開発の事業リスクの分担を推し進める必要がある。

さらに、本事業で開発する解析技術は、航空機への適用のみならず、電気エネルギーによる防爆性が要求される産業機器やシステムにも適用できる。複合材料の適用による軽量化は、航空機のみならず自動車、車両、船舶等の輸送機器から風力発電、石油タンク等まで多くの産業分野に拡大していく。今後の産業界における安全設計の担保としても、耐雷帯電解析手法の確立は今後必須であり、多くの産業分野に貢献できると考えら、国が積極的に研究開発投資を実施し、その成果を他分野の産業界へも普及していく必要がある。

## 2. 研究開発目標

### 2－1 研究開発目標

我が国の総合的な複合材料技術開発において、国際的にリードするためには、我が国発の技術提案として国際標準に提案できるレベルの技術獲得が必須である。世界最先端の研究開発である、複合材料構造の詳細レベルでの放電箇所を特定する耐雷帯電解析技術を獲得するため、以下の研究開発を目標とする。

- ①解析手法の開発： 複雑な電気特性の複合材料でも解析を可能とする解析手法を開発する。また、航空機のような複雑な構造に適し、かつ高速で解析できる手法は未だ確立されて無いため、この課題を解決する解析手法を開発する。
- ②放電現象の研究： 解析にて電流の集中等が解けても、放電は周辺的环境や形状に左右され特定が困難である。特定手法の確立として、実験確認法にて環境、形状および電位差等による放電開始の特性を把握することが目標である。
- ③帯電現象の研究 現在の航空機開発において、静電気による帯電および除電の解析法及び試験法が確立しておらず、安全の証明に多くの時間を費やしている、複雑な構造における、帯電箇所推定手法を開発する。
- ④検証方法の検討： 航空機の耐雷機体構造を考慮した材料・構造の仕様を検討し、解析手法の開発結果の実証を可能とするモデルおよび評価用供試体の設計手法を確立する。
- ⑤測定方法の開発： 航空機のような複雑な構造の場合、電界分布や放電箇所の計測が困難である。この課題を解決する複雑な構造に対応した測定方法の確立を目標とする。

以上を踏まえ、国際標準化を視野に入れた技術開発計画を立案し、開発を推進する。図 2－1 に技術開発計画案を示す。

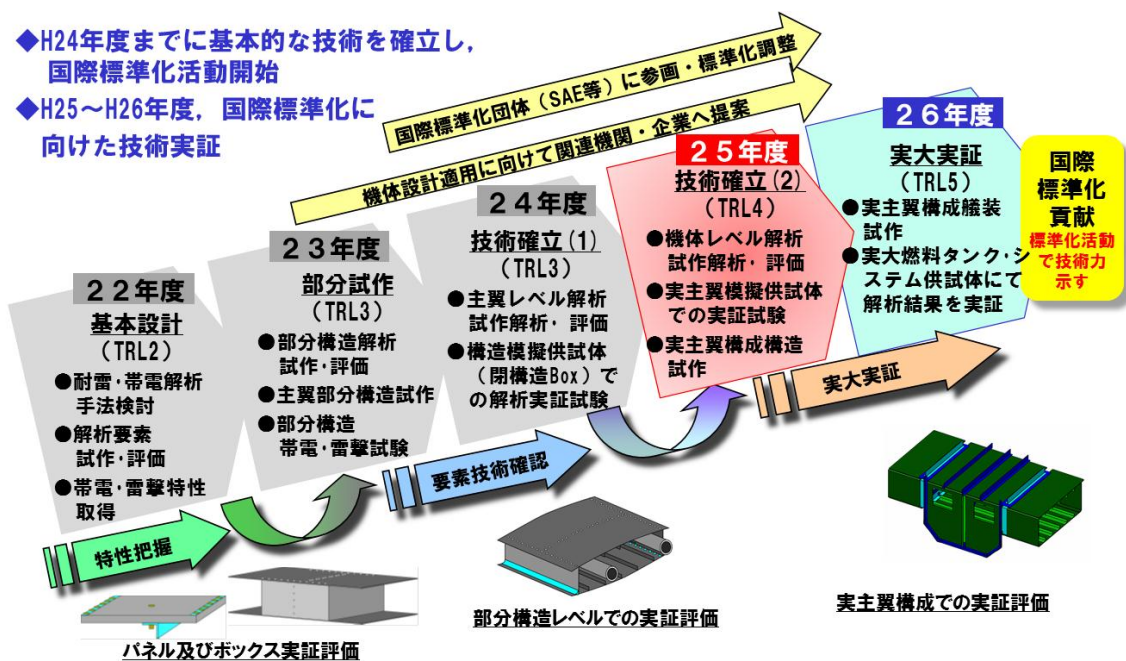


図 2 - 1 国際標準化を視野に入れた技術開発計画案

### 2 - 1 - 1 全体の目標設定

開発目標設定に際し、現状の課題との比較として耐雷帯電解析に係る航空機開発の流れの現状と目標を図 2 - 2 に示す。現状では、粗い機体形状のモデルを使用した雷電流の概算と、定性的な耐雷設計により機体開発を実施している。設計の確認は、設計を基にした供試体による試験に頼っているため、数多くの試験のトライアルと再設計が繰り返され、開発期間の増大が予想される。

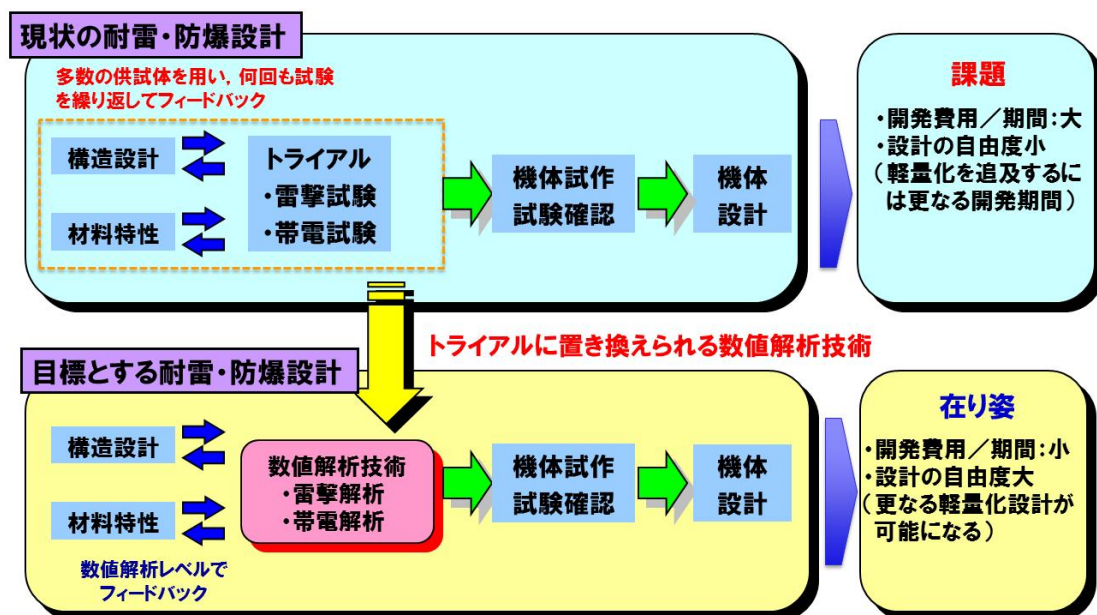


図 2 - 2 技術開発目標の有り姿



本事業の目標は、この数多い試験と再設計の繰り返しを削減するため、設計結果にて耐雷帯電現象をシミュレーションでき、かつ、放電等の問題が生じる箇所を事前に確認できる解析手法を構築することである。これにより、炭素繊維複合材航空機の設計開発期間を短縮することにより、容易に機体軽量化を目指した航空機の開発を促進可能とすることを目標とする。

解析手法の具体的な技術開発の最終目標は表２－１である。

表２－１ 全体の目標

| 目標・指標                                                          | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ファスナ（リベット、ボルト等）や複合材構造の細部要素レベルでの落雷で発生する電磁気現象を解く解析手法を開発する。       | 現状、解析誤差が50%程度であり、安全性の証明データの殆どが部分機体試作による雷撃試験のトライアルで実施され、開発費用／期間を押し上げている。この状況を改善するため、解析技術の高精度／高速化を目指し、かつ効率の良い検証試験法の開発を目標とする。具体的には以下の個別要素にて実施する。<br>①解析手法の開発 |
| 雷電流・帯電試験にて構造要素ごとのデータを蓄積して解析パラメータを設定し、全機解析を可能とする。               | 解析技術の高精度／高速化を狙うため、複雑な炭素複合材構造における電気特性を蓄積し、解析の効率を上げるパラメータ化をノウハウとして得ることを目標とする。具体的には以下の個別要素にて実施する。<br>④検証方法の検討<br>⑤測定方法の開発                                    |
| 放電および帯電現象の研究と、雷電流・帯電試験結果を比較して、解析パラメータを設定し、電磁気解析で放電箇所の特定を可能とする。 | 解析結果より放電箇所を判定するため、放電発生メカニズムと発生のしきい値を把握し、解析結果と放電開始の関係を得ることを目標とする。具体的には以下の個別要素にて実施する。<br>②放電現象の研究<br>③帯電現象の研究                                               |

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

全体目標を達成するため、図2-3に示す4項目の個別要素技術を開発し、航空機全体から構造の詳細レベルまでの全般に対応した解析技術を確立する。

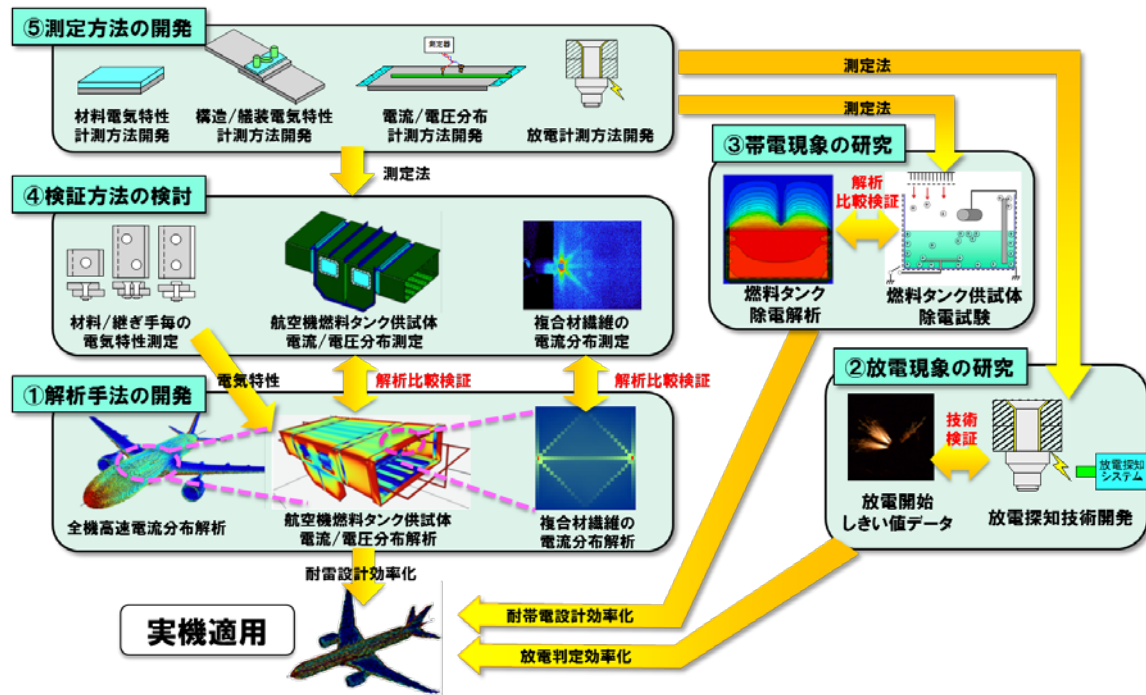


図2-3 耐雷帯電解析技術の流れ

個別要素技術ごとの目標を表2-2に示す。

また、個別要素技術ごとの目標の年度展開を表2-3に示す。

表2-2 個別要素技術の目標

| 要素技術             | 目標・指標                                                                                                     | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①<br>解析手法<br>の開発 | <p>①実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る</p> <p>②複雑な構造での電流経路および放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系の確立</p> | <p>①現状の耐雷設計は、構造の故障も含め耐雷性を保証する必要があるが、複雑で数多い故障モードから最悪ケースを選択して、試験により認証を受けている。この故障モードの選択において、現状の解析精度は50%程度であるため、耐雷設計の検証のために多く試験が必要である。この課題を解決するために、解析精度を70%に引き上げるとともに高速化し、試験に要する時間を30%以上短縮することを目標として設定した。</p> <p>②高精度な解析により放電箇所を事前に特定</p> |

| 要素技術             | 目標・指標                                                                           | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | ③TRL 5 相当<br>④国際標準への提案                                                          | <p>し、最小限の認証試験にて耐雷性を証明して、設計作業を低減するのが本事業の目的である。この目的を達成するためには、航空機耐雷性認証に使用できることを証明する必要がある、設計標準化した体系的な放電箇所特定プログラムの確立が必要であり、解析ツール体系化を目標とした。</p> <p>③本研究開発における技術の到達目標は、実機へも適用可能なレベルであることを検証すること目標とし、実機の構造様式での解析と、試験での実証を設定した。</p> <p>④解析手法を国際標準化し、航空機設計に使用可能とするための提案活動を実施し、標準化の目処をつけるのを目標として設定した。</p>                                                                                                                                                                                                                  |
| ②<br>放電現象<br>の研究 | ①放電開始箇所および条件の確立<br>②航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理解明<br>③放電検出技術の確立<br>④国際標準への提案 | <p>①放電開始箇所の特定は、前項の「①解析手法の開発」の電磁界解析等で得られる電流／電圧集中の推算結果を基に、放電現象が発生する諸条件を適用する手法で実施する。従って、解析を適用する範囲を明確にするため、放電の開始箇所および条件の確立を目標とした。</p> <p>②解析と放電発生条件を組み合わせ、放電発生箇所の特定技術を開発するには、放電のメカニズムまで解明した上で放電を支配するパラメータを明確にする必要がある。このため、放電時に発生する現象のパラメータを特定することを目標とした。</p> <p>③放電箇所の検出の課題としては、現状の国際標準ではフィルム・カメラ撮影法およびガス引火法であり、複雑な構造内部での放電箇所の特定では撮影法だとブラインドが多く、またガス引火法では放電の発生は分かるが、放電箇所の特定は困難である。このような国際標準上での課題を解決するため、構造内部にセンサを巡らせて、放電箇所を特定する検出技術の確立を目標とした。</p> <p>④開発した放電技術が航空機設計で使用可能になるよう国際標準へ提案活動を実施し、標準化の目処をつけることを目標とした。</p> |



| 要素技術         | 目標・指標                                                                                        | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ③<br>帯電現象の研究 | ①航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理解明                                                            | ①燃料タンクにおける帯電原理は、燃料の流動による摩擦および引き剥がし等により電荷が発生することを起因している。このため、動的な電荷の移動を解析する必要があるが、計算は困難であり、未だ確立していない。本研究は、電荷の移動の計算方法を研究し、解析手法の開発に反映することを目標とする。また、解析と同様に動的な電荷の移動の試験方法も確立していないため、本研究は、試験方法も研究し、電荷の移動の計算方法の有効性を確認することも目標とする。                                                                                                                                      |
| ④<br>検証方法の検討 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得<br>②実大燃料タンク・システム供試体にて耐雷／静電気防爆試験を実施し、解析結果を実証<br>③国際標準レベルの解析技術証明方法の確立 | ①解析技術の高精度／高速化を狙うためには、解析パラメータとなる炭素繊維複合材料の積層方法や、材料と継手の組合せ等の数値化がノウハウとなる。よって、燃料タンクの材料と構造の各種組合せを網羅した電気特性データベースを確立することを目標とした。<br>②解析技術の高精度を証明するには、実際の航空機と同等な供試体での比較実証が必要である。そのためには実際の航空機設計と同等なレベルの設計・製造が必要となる。よって、実際の航空機と同等の形状／寸法の燃料タンク・システムを模擬し、かつ、解析を証明するデータが取得可能となる供試体での実証を目標とした。<br>③国際標準への提案には、解析技術の実証方法が国際標準に適合することを証明する必要がある。よって、国際標準レベルの解析技術証明方法の確立を目標とした。 |
| ⑤<br>測定方法の開発 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の測定方法確立                                                                 | ①解析には、炭素繊維複合材構造の電気特性の数値化が必要である。ただし炭素複合材料は、導電特性が複雑であり、精度の高い測定技術がノウハウとなる。よって、精度良く複合材料の電気特性を取得する測定方法の確立を目標として設定した。                                                                                                                                                                                                                                              |

TRL : Technology readiness levels

表 2－3 技術開発目標年度展開

| 年度             | フェーズ            | 達成目標                                                                                                                                                                             |
|----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平成<br>22<br>年度 | 基本<br>設計        | ①解析結果と、簡易的形狀レベルの試験結果の一致を確認<br>②放電開始条件の体系化と基本則確認<br>③炭素繊維複合材料の電気的基本特性の取得<br>④TRL2 相当                                                                                              |
| 平成<br>23<br>年度 | 部分<br>試作<br>試験  | ①複雑な構造での電流経路および放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系の確立<br>②部分構造レベルにおいて従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る<br>③炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得<br>④有効な放電開始条件の取得<br>⑤放電検出の要素技術にて放電開始が検出できること。<br>⑥TRL3 相当     |
| 平成<br>24<br>年度 | 技術<br>確立<br>(1) | ①国際標準への提案<br>②翼システム様式を模擬した解析技術確認試験において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る<br>③航空機燃料タンク部での放電原理の目処をつける<br>④放電検出技術の仕様化の目処を得る<br>④帯電解析および試験技術の目途を得る。<br>⑤TRL3 相当                          |
| 平成<br>25<br>年度 | 技術<br>確立<br>(2) | ①国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立<br>②証明用の実構造主翼模擬供試体（翼胴結合燃料タンク）の製作<br>③燃料タンク部の実構造供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る<br>④放電開始箇所および条件の確立<br>④放電検出技術の技術実証<br>④帯電解析および試験技術の開発と評価<br>⑤TRL4 相当 |
| 平成<br>26<br>年度 | 標準化<br>実証<br>試験 | ①実大燃料タンク・システム供試体での耐雷／静電気防爆試験にて、解析結果を実証<br>②実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る<br>③放電検出技術仕様化<br>④TRL5 相当                                                           |

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

本事業の全体の最終目標における妥当性を表3-1に示す。

表3-1 全体の目標における妥当性

| 達成目標                                                           | 成果の妥当性                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ファスナ（リベット、ボルト等）や複合材構造の細部要素レベルでの落雷で発生する電磁気現象を解く解析手法を開発する。       | 解析を試験にて検証した結果、解析誤差を従来の50%から30%に減らすと伴に、複雑なモデルでも高速計算を可能とした。検証結果はFAA DER有資格者のレビューを受け、妥当な適合範囲との評価を受けた。これより、開発時間を30%以上短縮する解析手法の見通しを得た。                                                                                                                                                                                                                           |
| 雷電流・帯電試験にて構造要素ごとのデータを蓄積して解析パラメータを設定し、全機解析を可能とする。               | 解析技術の高精度／高速化を狙うため、平成22年度～26年度にかけて、複雑な炭素複合材構造における電気特性を蓄積し、解析に有効なパラメータをまとめた。これにより、全機からファスナ周辺の局所部位までの解析を実現した。また、放電箇所を判定するため取得した放電開始のしきい値データを標準化団体SAE Internationalへ提案して標準化活動を開始し、新たな標準制定の見通しを得た。                                                                                                                                                               |
| 放電および帯電現象の研究と、雷電流・帯電試験結果を比較して、解析パラメータを設定し、電磁気解析で放電箇所の特定を可能とする。 | <p>雷電流解析においては、ファスナ周辺の局所部位の解析手法を開発して試験にて検証し、放電箇所の特定の精度を高めた。</p> <p>放電の研究においては、放電による引火開始を試験にて観測し、雷電流のエネルギーと引火の相関チャートを開発し、複合材構造における放電が開始するしきい値をまとめた。また、光ファイバによる光強度検出により従来手法であるカメラ撮影よりも高精度な放電検出技術を確立し、標準化団体SAE Internationalへ提案して標準化活動を開始して、新たな標準制定の見通しを得た。</p> <p>帯電現象の研究においては、航空機の各種燃料タンク内壁を模擬した供試体による帯電／除電試験法の開発とともに、燃料タンクの内部の電荷の移動を解析する手法を開発し、有効性を確認した。</p> |

### 3-1-2 個別要素技術成果

#### (1) 解析手法の開発

複合材航空機の電流分布の解析手法は、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法が最も一般的に使われている手法であり、また本研究においてもこの手法を採用し、様々な計算テクニックを検討し、高精度かつ高速な解析手法を開発した。これらの計算テクニックを分類すると、「複合材機体構造のモデル化テクニック」、「高速化のテクニック」および、「異方性導電材料の影響を受ける局所的な部位解くテクニック」に分けられる。

「複合材機体構造のモデル化テクニック」は、一般的な FDTD 計算手法を使用する上で、どのような電氣的なモデルが複合材航空機を解析するために適しているかという枠で検討したものであり、図3-1に示すように、部分構造から、航空機の最も複雑な構造である翼胴結合に至るまでの実験および解析を実施し、実験から得られた構造接合部の導電率を適切に配置することにより、誤差 30%以下に抑えた解析が可能であることを示した。

解析モデルは詳細であるほど精度良い解析が得られるが、計算資源が十分に得られない場合、「高速化のテクニック」無しには現実的な時間内に計算を完了させることができない。そこで数値計算の「高速化のテクニック」を検討し、概略の電流分布を粗い解析で解いておき、その結果、問題があると判断される部位について、粗い解析結果を詳細モデルの境界条件として計算するという「ズーミング手法」を開発した。図3-2にこのズーミング手法のプロセスを示す。この手法により、予め詳細に解析したい部分が不明であっても、粗い解析の結果を見て、詳細に解析したい部分のみをモデル化し、後からリーズナブルな解析時間で計算することを実現し、全体の解析時間を大幅に短縮できることを示した。

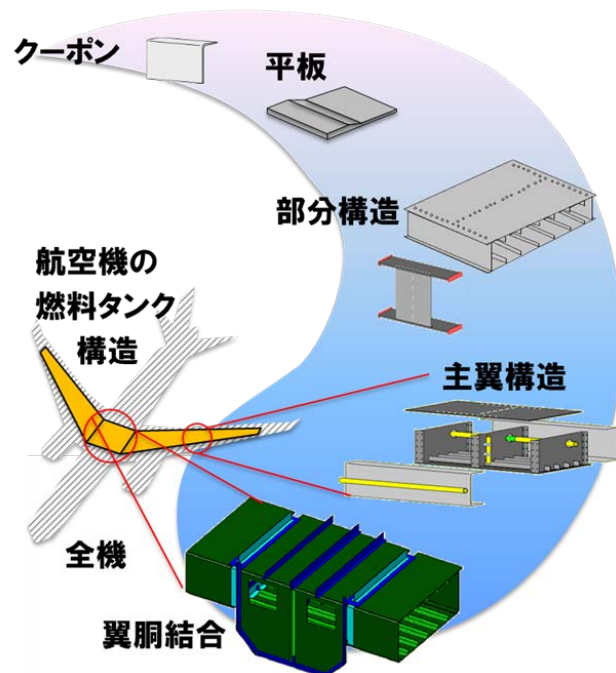


図3-1 解析検証のステップアップ

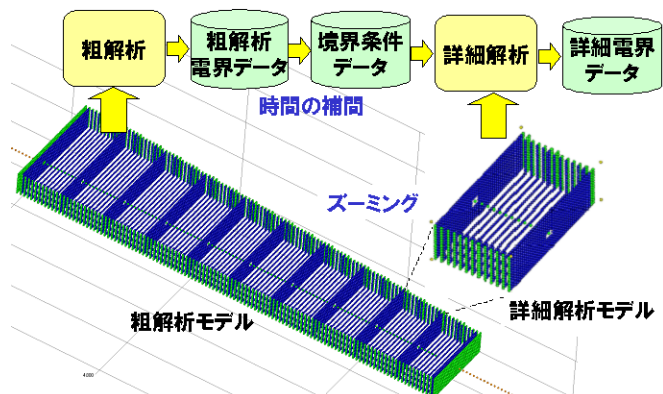


図3-2 翼解析におけるズーミング手法

一方、解析精度に注目すると上述した解析モデルの工夫だけでは一定以上に解析精度を向上させることはできない。それは、複合材料が異方性導電率をもった導電性繊維から構成されるためであり、特にファスナ等の局所的に電流が複合材へ伝わる際のファスナ周りの電流分布は解析モデルの工夫だけでは一致しない。

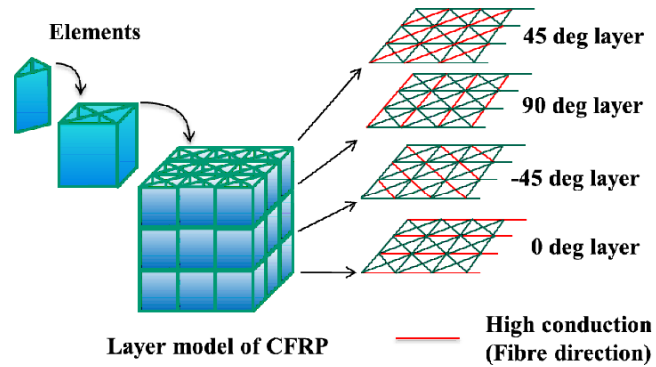


図3-3 複合材層毎の解析モデル

この導電性繊維の影響が現れる局所的電流分布を正確に解析するには、導電繊維の配置により現れる導電率の異方性を考慮した解析を解く必要性があった。そこで、「異方性導電材料を解くテクニック」として、三角柱の計算格子を使った解析手法を考案し、層毎に同じ導電異方性を持つ複合材層の1層1層の電流分布を解析する手法を開発した。図3-4に解析例を示す。このように、比較的小さなエリア内で、ファスナから流入する電流が繊維の異方性により極端な電流経路を形成することを解析することができるようになった。この複合材の層毎の電流分布を解く方法は、

通常のFDTD法による解析では解けなかったファスナ周りの電流分布を正確に解析可能であるばかりでなく、複合材板エッジ部のどこからスパークし易いのか、雷撃を受けた箇所の各層の熱分布がどうなるのか、複合材表面に金属メッシュなどを施す耐雷材料の効果、ファスナと複合材の層毎の電流分布によるファスナ接触状態の効果等、様々な分野に応用可能であることがわかった。ただし、計算量が多いため、大規模な構造の電磁界解析には不適である。

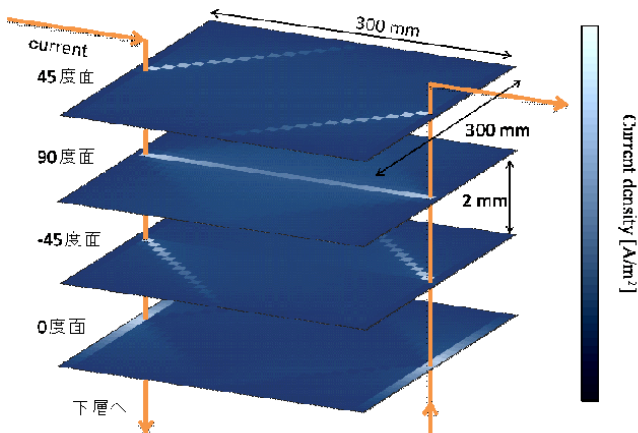


図3-4 複合材層毎の解析結果

2015年の国際的な研究状況としては、これらの複合材層レベルの解析を行う研究発表が出てきており、本研究の複合材電流解析技術はトップレベルにあると表現可能と思われる。今後は、このような異方性導電材料を解く計算速度も向上させる必要があるが、これらの解析手法を用いて、より多くの設計上の問題を解き、耐雷設計技術を伸ばしていくことが望まれる。



## (2) 放電現象の研究

放電現象の定義として、雷撃および帯電現象に伴い発火の要因となる発熱、アーク放電および電氣的スパーク (Voltage Spark) として捉え、どの放電現象が燃料引火につながるのかを検討した。アプローチとしては、放電のメカニズムについての4つの放電メカニズムと、帯電現象についての2つの放電メカニズムに分類した。

### 1) 落雷

1-1) 落雷による電位上昇が直接起因して放電する事象

1-2) 落雷電流と構造物の抵抗による局部電位差に起因して放電する事象

1-3) 落雷電流が引き起こす誘導起電力に起因して放電する事象

1-4) 落雷電流と構造物の抵抗によるジュール熱を起因とする放電事象

### 2) 帯電

2-1) 燃料摩擦により帯電した電荷が局部絶縁破壊によって放電する事象

2-2) タンク外部で帯電した電荷が局部絶縁破壊によって放電する事象

これら放電現象の中で、1-2の落雷電流と構造物の抵抗による局部電位差に起因した電氣的スパークの検討から着手した。平成22年度に炭素繊維複合材構造の局部電位差の電氣的スパークの電気特性を試験にて確認し、雷インパ



図3-5 雷インパルス試験状況写真 (東京大学)

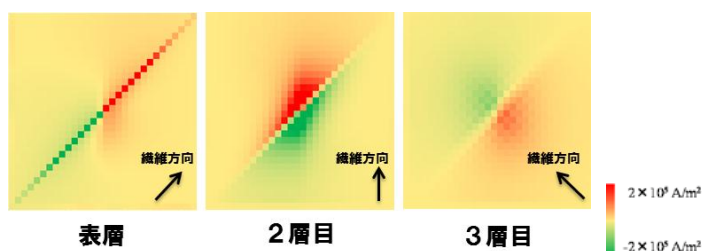


図3-6 複合材パネルのファスナ周辺の熱分布解析例

ルス電界下において、炭素繊維複合材はマクロには抵抗体と扱える見通しを得た。図3-5に試験状況を示す。

平成23年度は、1-1～1-3に係る電氣的スパークの可能性を検討した。結果、電位上昇、抵抗による局部電位差、誘導起電力での航空機構造内部での電氣的スパークの可能性は、現在の航空機設計では低いことを確認した。

本検討において、直撃雷の場合に電氣的スパークが発生するファスナ仕様の見通しを得た。

電氣的スパークの可能性が低いことが判明した結果、電氣的な放電で無く、

電流と抵抗による、ジュール発熱を起因とするアーク放電が支配的であると考え、アーク放電発生メカニズムの解析を実施した。図3-6にファスナ周辺の熱分布解析例を示す。結果、現状の炭素繊維複合材構造でのファスナへの直撃雷の場合はアーク放電を回避することは極めて困難であるという結論に至った。

よって、燃料に引火するアーク放電発生メカニズムのしきい値とその探知方法を研究し、アーク放電に対する耐雷構造設計や認証試験を低コスト化する手法を開発した。従来の試験標準では、放電探知をカメラ撮影やガス引火で実施しており、そのため複雑な構造での試験では放電箇所の特定に多大な労力と時間がかかる。本事業では従来には無い放電発光によるエネルギーの測定技術を開発した。

図3-7に放電発光測定実験装置の構成、図3-8に放電発光の測定例を示す。結果、図3-9に示すように、光強度と放電現象の関係を測定することに成功した。

また、放電と引火(SAE ARP5416標準ガス引火法)の相関関係のデータを体系化し、このデータを基に現状の航空機の耐雷試験で使用されている試験標準(SAE ARP5416)の見直しを提案した。

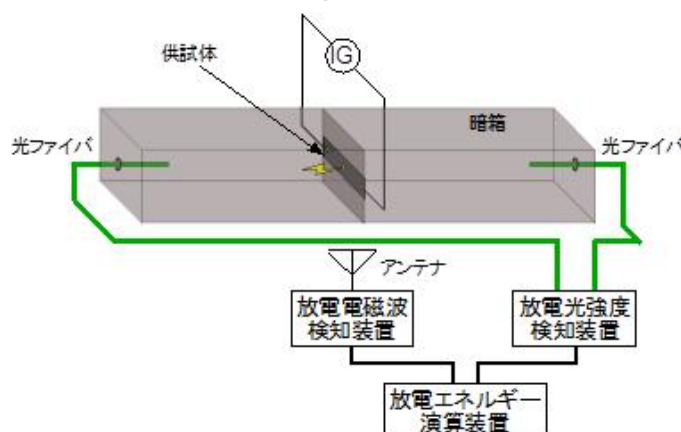


図3-7 放電発光測定実験装置構成

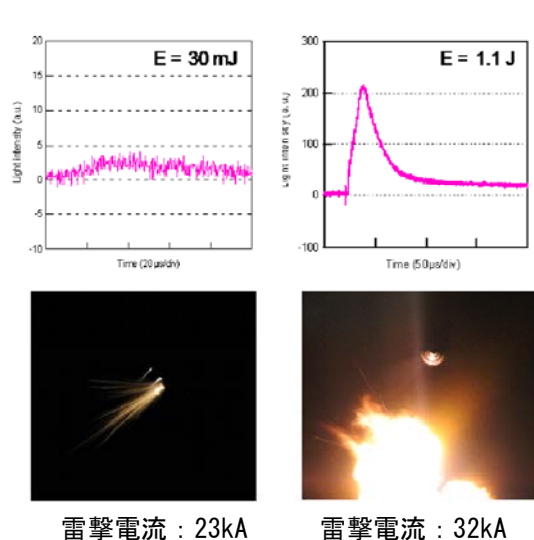


図3-8 放電発光強度波形（上）と  
発光静止像（下）の一例

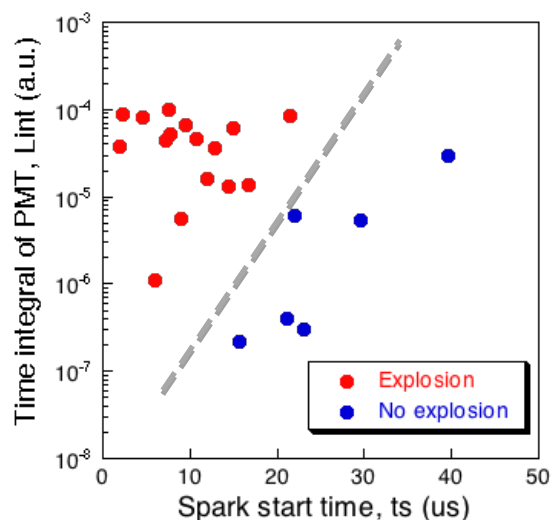


図3-9 放電発生タイミングと発光  
強度による放電とガス引火の相関関係

### (3) 帯電現象の研究

燃料タンクの静電気爆発に関する研究は 1950 年代より数多くなされ、多くの研究論文が報告されており、航空機燃料タンクに限らず実験的な調査により対策がなされてきた。航空機燃料タンクの複合材化により金属構造の燃料タンクよりも静電気が蓄積しやすい状況があるのではないかとの懸念により研究を開始した。その結果、金属燃料タンクと比較して静電的な振舞いに大きな違いがないことが判明した。また、静電気の時間変位や分布については、前述の電流解析の FDTD 法のような解析的なアプローチが確立されていない状況の中、新規開発を試み、おおよその帯電現象が再現可能な解析手法を開発した。

まず実験では、腐食防止のためのプライマの塗り方を変えた複合材製および金属製の模擬燃料タンクを複数製作した。図 3-10 に一例を示す。次に模擬燃料を入れた状態で帯電させ、模擬燃料の表面電位の時間変化を計測することにより、帯電した静電気がどの程度の時定数で緩和されていくのかを調査した。

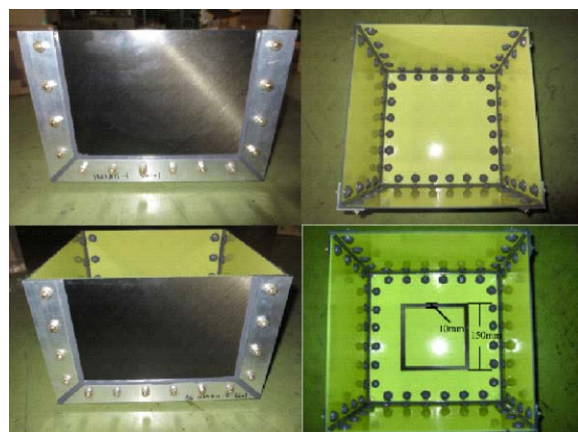


図 3-10 燃料タンク実験供試体

その結果、図 3-11 に示すように、各モデルにおいて静電気の緩和時定数に特徴的な差異はみられず、おおよそ数百秒オーダーであることが判明した。この理由は、以下のように説明することができた。まず、燃料タンクの内側に数十ミクロンの厚さで塗布されるプライマの絶縁破壊電圧を測定したところ、1kV 程度であった。この数値より、気中放電等に至る前にプライマが絶縁破壊し、燃料タンク壁に静電気の通り道が生成されと考えられる。つまり、プライマの絶縁破壊により生成された電気的な通り道によって静電気が排出されたと考えられる。この実験結果から、複合材製の航空機燃料タンクにおいても、従来の金属製燃料タンクと比較して何ら特別な処置を施す必要性はないという結論を得ることに成功した。

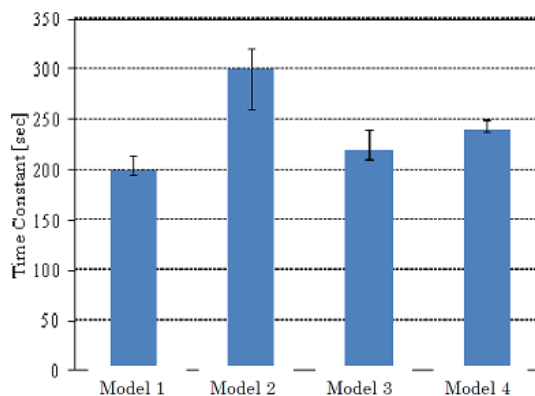


図 3-11 緩和時定数

一方解析では、燃料に帯電した静電気の振舞いについて、差分法を基本とした解析手法で解く方法を立案し、燃料が流動していない状態で確認したのち、燃料の流動も含める形で解析を実施した。解析の結果、流動なしの燃料中の電荷の振舞いにおいて、静電気は燃料が有する移動度の特性によって燃料タンク壁面へ移動し、そ



の後に壁面から徐々に緩和されていく現象が判明した。これは、壁面から流出する静電気よりも、壁面へ集まる静電気の移動が早いためである。模擬燃料では導電率をほぼ燃料と一致させているが、解析の結果、数秒オーダーで壁面へ集まる様子が観察された。実験においては、静電気量や帯電状態を計測することは非常に難しく、完全な検証が完成したわけではないが、図3-12に示すよう

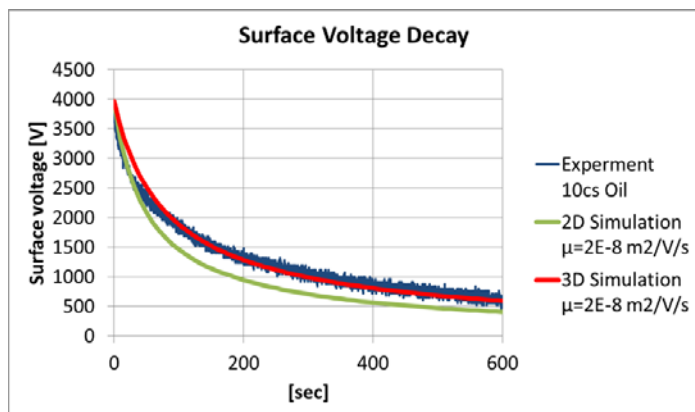


図3-12 表面電位の減衰計算例

に、急激に減衰したのちに、緩やかに減衰していくカーブを描く実験結果とほぼ同様な表面電位の変化を解析し、これらの時間的変位の傾向を一致させた。これらの解析は、燃料タンク内部に燃料計などの浮遊金属材料が存在する場合にも適用され、同様に傾向が一致することを確認することができた。

また、実験上の設定ではあるが、燃料が対流を起こしているときの帯電分布を、ナビエストークスの式を連成して解くことに成功し、図3-13に示すように、対流によって溜まった電荷が剥かれて対流する様子を計算できることがわかった。実験では、表面電位を計測する際に様々なゆ

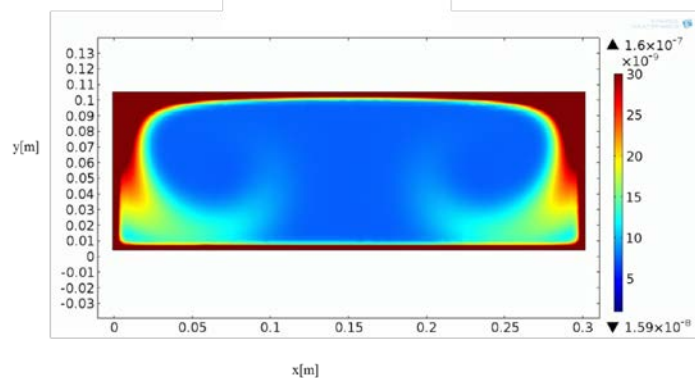


図3-13 燃料流動時の電荷密度分布

らぎが計測されたが、これの原因の一つとして考えられるのは対流であり、代表的な例としては、帯電電圧が数kVの幅で不安定になる現象があり、そのような電位変動が対流から説明可能であることを図3-14のように解析結果から示した。このような解析手法を使って、帯電した燃料が燃料タンクに入るときの対流から対流が収まるまで

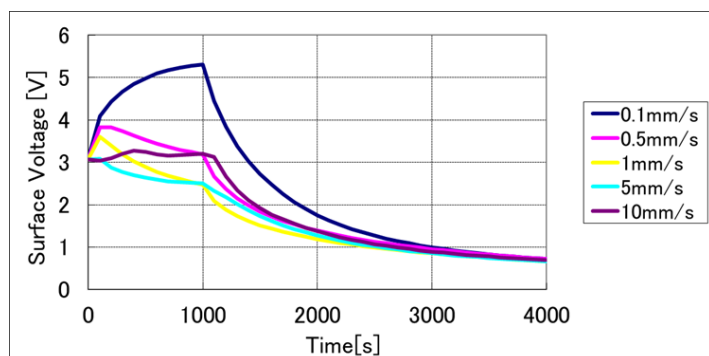


図3-14 対流速度と表面電位

の燃料流動を考慮した上で、最も危険な電位分布を把握することが可能であることが示唆される。従って、実験的対流ではなく、帯電燃料の燃料タンク流入を模擬した実験の解析と比較をしていくことが必要である。

#### (4) 検証方法の検討

本事業の目標は、航空機の複合材機体構造の設計に適用できる電流経路解析手法の確立である。この目標を達成するためには、下記が必要である。

- 複合材機体構造における電流の流れ方を理解するために必要なパラメータ（複合材の種類、構造様式、炭素繊維の積層方向、ファスナの種類等）の選定、感度が高いパラメータに対するデータベースの構築
- 解析結果の検証のため、電流の流れ方、部材周辺の電磁場の状況を忠実に測定できる試験データの取得

以上を実現させるため、図3-15に示す構造要素の要素レベルから翼システムまで、ステップ・バイ・ステップで確実にデータ取得と検証を実施していく計画で推進した。また、解析の検証とともに今後の構造および材料の方向性を得て、試験計画へ順次反映し、国際的競争力を得られるよう遂行した。

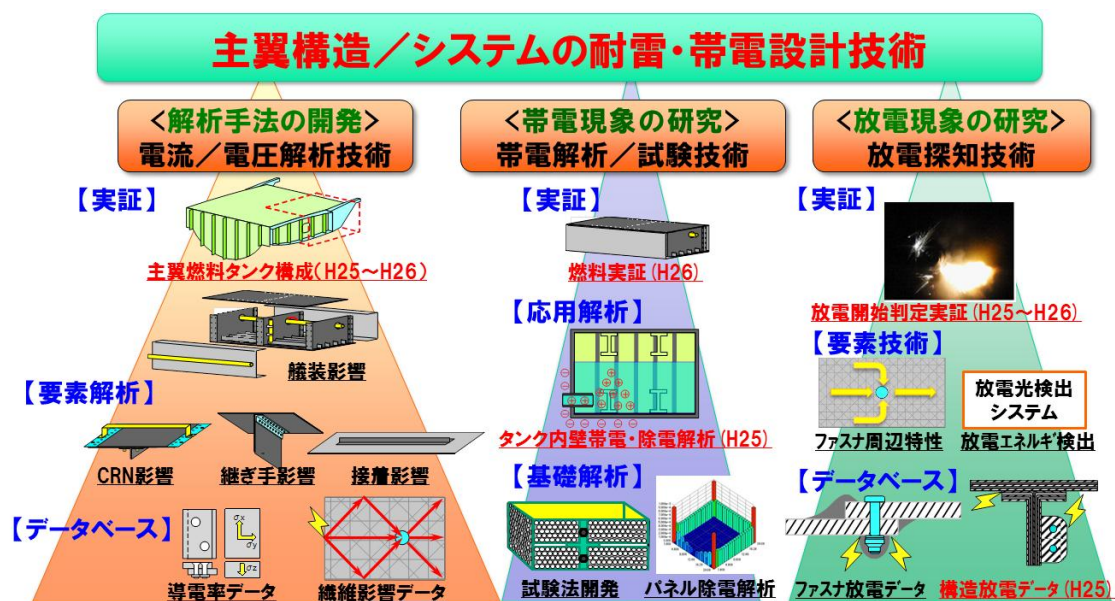


図3-15 検証計画

基本設計段階においては、図3-15に示す実証計画の前に複合材の特性把握をクーポン試験にて事前にデータベース化し、実証計画に反映した。平成23～25年度は燃料タンクを構成するパネルやBox構造等の基本的な構造様式にて試験と解析を比較して検証した。平成25～26年度は、航空機の燃料タンクで最も複雑な電流経路となる主翼と胴体が結合する翼胴結合部の構造を模擬した供試体を用い、実証試験を実施し、解析の有効性を確認した。図3-16に翼胴結合供試体を示す。



図3-16 翼胴結合供試体

#### (4) 測定方法の開発

CFRP は、導電性の炭素繊維と非導電性の樹脂を組み合わせた複合構造であるため、複雑な電気特性を示す。また、航空機への落雷箇所により、雷電流の入り方が異なり、複雑な電流経路を辿る。電気特性の取得試験や解析の比較検証試験においては、これらの複雑な電流経路の再現や、複雑な電気特性を計測するため、測定方法の開発は重要である。

複雑な電流経路の再現としては、複合材の断面の各層に雷電流が流入した場合や、表面からファスナ等の1点へ流入した場合等を試験治具等で再現し、特性の違いを把握することが、可能な測定方法を開発した。例として複合材の断面の各層に均等に流入するよう開発した試験概要を図3-17に示す。これらの試験法の開発により、安定したデータの取得を実現できた。

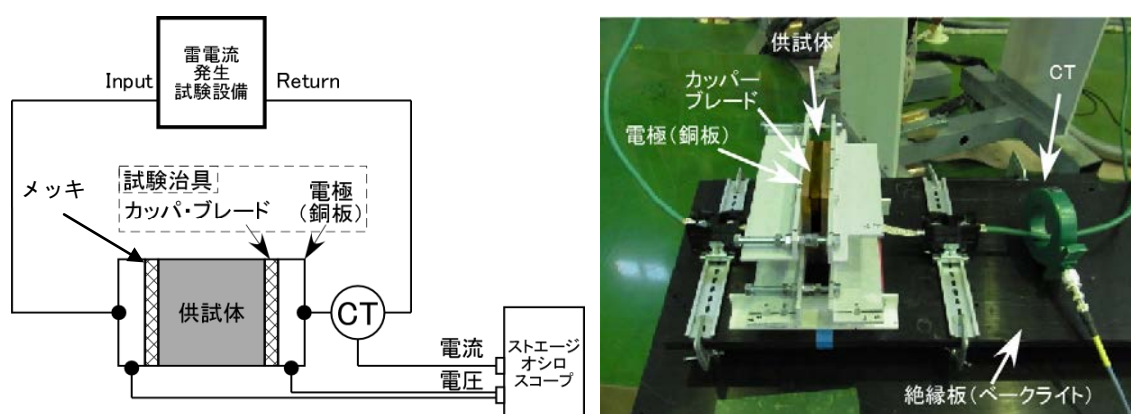


図3-17 複合材辺入力電気特性試験概要

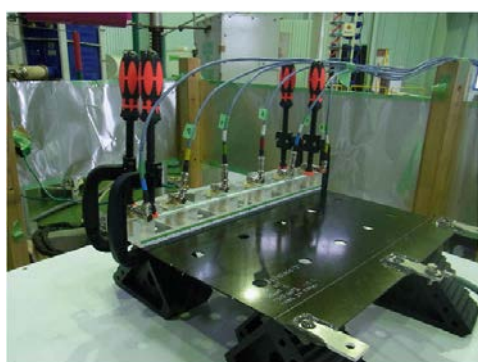


図3-18 構造表面電流分布測定概要

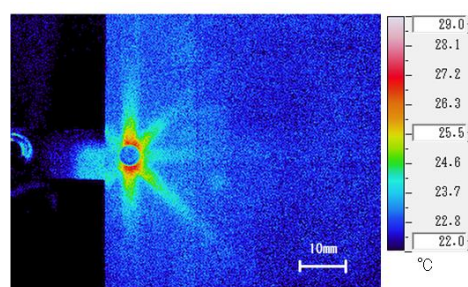


図3-19 温度による電流分布測定

また、解析との比較検証に必要となる構造上の電流分布および電流集中等の測定方法を、各種センサを用いて検討し、CFRPの繊維方向の影響やファスナ挿入による影響を電流ベクトルで分布を計測可能とする測定方法に目処をつけた。

図3-18に構造表面の電流分布を磁界で測定する測定装置概要を、図3-19に構造表面の温度分布により、炭素複合材繊維による電流分布の異方性の測定を示す。

### 3-1-3 特許出願状況等

表3-4に特許・論文等件数を、表3-5論文、投稿、発表、特許リストを示す。

表3-4 特許・論文等件数

| 要素技術    | 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数（出願を含む） | 特許権の実施件数 | ライセンス供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|---------|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 解析手法の開発 | 1   | 3        | 1            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 放電現象の研究 | 0   | 1        | 4            | 0        | 0        | 0        | 1（注1）    |
| 帯電現象の検討 | 1   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 検証方法の検討 | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 測定方法の開発 | 0   | 0        | 3            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 計       | 2   | 4        | 8            | 0        | 0        | 0        | 1        |

（注1）SAE International（Society of Automotive Engineers）で協議中。

表3-5 論文、投稿、発表、特許リスト

| 種類 | 題目・メディア等                                                                                                                                                                | 時期      |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 論文 | 静電気学会誌 Vol. 38, No. 1, pp. 59-64（2014-1）<br>「CFRP 製模擬燃料タンクにおける帯電液体の電荷挙動」                                                                                                | H26. 1  |
| 論文 | IEEE EMC Transactions<br>” FDTD Simulation of Lightning Current in a Multilayer CFRP Panel with Triangular-prism Cells”                                                 | H27. 7  |
| 投稿 | スバル技報 No. 40, pp. 189-195<br>「航空機複合材構造の耐雷設計低コスト化技術の開発」                                                                                                                  | H25. 6  |
| 投稿 | スバル技報 No. 41, pp. 178-181<br>「航空機用 CFRP 製燃料タンク内の静電気解析手法の開発」                                                                                                             | H26. 6  |
| 投稿 | 航空技術 2014 11 月, pp. 24-31<br>「航空機における耐雷対策の歩み」                                                                                                                           | H26. 11 |
| 発表 | International Conference on Lightning and Static Electricity ICOLSE 2011<br>” The analytical method of lightning and electrostatic charge protection for the aircrafts” | H23. 9  |



| 種類 | 題目・メディア等                                                                                                                                                                                                                           | 時期      |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 発表 | 第3回 日本複合材合同会議<br>「雷電流印加によるCFRPの電気的特性」                                                                                                                                                                                              | H24. 3  |
| 発表 | 電気関係学会九州支部 第65回 連合大会<br>「CFRP 製翼をもつ次世代航空機の耐雷試験における放電<br>検出技術に関する基礎検討」                                                                                                                                                              | H24. 9  |
| 発表 | 第50回 飛行機シンポジウム<br>「雷撃による複合材構造の電気特性解析」                                                                                                                                                                                              | H24. 11 |
| 発表 | 第50回 飛行機シンポジウム<br>「CFRP ファスナ部の雷撃試験におけるスパーク現象の<br>光学測定」                                                                                                                                                                             | H24. 11 |
| 発表 | 平成25年 電気学会全国大会<br>「CFRP を用いた次世代航空機雷撃試験におけるスパーク<br>現象評価への光学測定技術の適用」                                                                                                                                                                 | H24. 3  |
| 発表 | 第37回 静電気学会全国大会<br>「航空機用CFRP 製燃料タンクにおける帯電液体の電荷<br>挙動」                                                                                                                                                                               | H25. 9  |
| 発表 | International Conference on Lightning and Static<br>Electricity ICOLSE 2013<br>“Novel Estimation Method of Spark Phenomena of The CFRP<br>Sample with A Fastener by Optical Measurement<br>Technique Under Lightning Strike Test.” | H25. 9  |
| 発表 | International Conference on Lightning and Static<br>Electricity ICOLSE 2013<br>“Lightning Current Flow Analysis and Measurement of The<br>Composite Structure.”                                                                    | H25. 9  |
| 発表 | 第51回 飛行機シンポジウム<br>「複合材構造における被雷時の電流分布の解析および試験」                                                                                                                                                                                      | H25. 11 |
| 発表 | 第51回 飛行機シンポジウム<br>「雷撃試験におけるCFRP ファスナ部のスパーク検出とその<br>エネルギー評価」                                                                                                                                                                        | H25. 11 |
| 発表 | 第26回 航空安全シンポジウム<br>「航空機への雷撃」                                                                                                                                                                                                       | H26. 3  |
| 発表 | 平成26年電気学会全国大会<br>「CFRP を用いた航空機模擬燃料タンクの帯電電荷の緩和」                                                                                                                                                                                     | H26. 3  |

| 種類 | 題目・メディア等                                                                                                                                                                                    | 時期      |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 発表 | 平成 26 年電気学会全国大会<br>「ファスナ付 CFRP 供試体への雷撃試験におけるスパーク発光の分光測定」                                                                                                                                    | H26. 3  |
| 発表 | 平成 26 年電気学会全国大会<br>「ファスナ付き CFRP 供試体の間接雷および直撃雷試験におけるスパークエネルギーの非接触評価」                                                                                                                         | H26. 3  |
| 発表 | 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会<br>「FDTD 法を用いた CFRP 積層板ファスナ近傍の電界解析」                                                                                                                                 | H26. 9  |
| 発表 | 平成 26 年度 第 67 回 電気・情報関係学会九州支部連合大会<br>「航空機雷撃試験を考慮した大気および Ar 混合ガス中スパーク現象の発光特性の基礎検討」                                                                                                           | H26. 9  |
| 発表 | 平成 26 年度 第 67 回 電気・情報関係学会九州支部連合大会<br>「発火性混合ガス雰囲気でのファスナ付 CFRP 供試体のスパーク発光計測」                                                                                                                  | H26. 9  |
| 発表 | SAE AE-2 Lightning Committee (U.S.A.)<br>“Estimation method of Spark generation and its energy by detecting the spark light emission intensity waveform with an optical technique”          | H26. 9  |
| 発表 | 第 52 回 飛行機シンポジウム<br>「発火性混合ガス試験法におけるファスナ付 CFRP 供試体スパーク現象の光学計測」                                                                                                                               | H26. 10 |
| 発表 | 第 52 回 飛行機シンポジウム<br>「雷撃試験におけるファスナ付 CFRP 供試体のスパーク現象の分光測定による基礎検討」                                                                                                                             | H26. 10 |
| 発表 | 第 52 回 飛行機シンポジウム<br>「複合材構造の繊維層による雷電流分布の影響」                                                                                                                                                  | H26. 10 |
| 発表 | 2014 年度 放電学会 年次大会<br>「CFRP 製模擬燃料タンクにおける帯電液体の荷挙動」                                                                                                                                            | H26. 12 |
| 発表 | SAE AE-2 Lightning Committee (U.S.A.)<br>“SAE AE2 ARP5416 Ignition Detection Test Method Revision Round-Robin Test Program Phase Uno – 200uJ Voltage Arc Digital Photo”                     | H27. 5  |
| 発表 | International Committee on Aeronautical Fatigue and structural Integrity ICAF2015<br>“Development of Analysis and Test Methods for Lightning Current Flow on Composite Fuel Tank Structure” | H27. 6  |

| 種類 | 題目・メディア等                                                                                                                                                                                                                          | 時期      |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 発表 | 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会<br>「三角柱セルを用いた FDTD 法による異方性物質の<br>過渡電磁界解析」                                                                                                                                                                 | H27. 8  |
| 発表 | International Conference on Lightning and Static<br>Electricity ICOLSE 2015<br>“FDTD SIMULATION OF LIGHTNING CURRENT IN A<br>MULTI-LAYERED CFRP MATERIAL”                                                                         | H27. 9  |
| 発表 | International Conference on Lightning and Static<br>Electricity ICOLSE 2015<br>“Estimation of spark ignition phenomena on CFRP model<br>sample with a fastener by a novel optical system in the<br>ignitable mixture test method” | H27. 9  |
| 発表 | 平成27年度 第68回 電気・情報関係学会九州支部連合大会<br>「発火性混合ガス中雷撃試験における航空機CFRP供試体の<br>スパーク特性」                                                                                                                                                          | H27. 9  |
| 発表 | 平成 27 年度 第 68 回 電気・情報関係学会九州支部連合大会<br>「航空機雷撃試験用インパルス電流源の導入と出力電流波形<br>に回路パラメータが及ぼす影響に関する検討」                                                                                                                                         | H27. 9  |
| 発表 | 第 53 回 飛行機シンポジウム<br>「複合材構造における雷撃時の電流密度の試験と解析」                                                                                                                                                                                     | H27. 11 |
| 発表 | 第 53 回 飛行機シンポジウム<br>「CFRP 航空機燃料タンク環境下での雷撃試験における<br>火花点火現象の評価技術開発」                                                                                                                                                                 | H27. 11 |
| 発表 | 第 53 回 飛行機シンポジウム<br>「CFRP 航空機燃料タンク環境下での雷撃試験における<br>電磁環境評価に関する基礎検討」                                                                                                                                                                | H27. 11 |
| 特許 | 特願 2011-186705<br>局所放電の可視化試験法及び当該可視化試験法に用いられる<br>供試体の製造方法                                                                                                                                                                         | H23. 8  |
| 特許 | 特願 2011-190235<br>複合材の電気特性測定装置及び電気特性測定方法                                                                                                                                                                                          | H23. 9  |
| 特許 | 特願 2012-068770<br>発光位置特定システム                                                                                                                                                                                                      | H24. 3  |
| 特許 | 特願 2013-004497<br>非接触放電試験方法及び装置                                                                                                                                                                                                   | H25. 1  |

| 種類 | 題目・メディア等                                     | 時期    |
|----|----------------------------------------------|-------|
| 特許 | 特願 2013-025296<br>光観測システム及び光観測方法             | H25.2 |
| 特許 | 特願 2013-177872<br>電流測定装置及び電流測定方法             | H25.8 |
| 特許 | 特願 2015-062483<br>異方性導電物質の電磁界解析方法            | H27.3 |
| 特許 | 特願 2015-170339<br>爆発性スパーク評価システム及び爆発性スパーク評価方法 | H27.8 |

### 3-2 目標の達成度

最終目標に対する達成度を表 3-6 に示す。

表 3-6 最終目標に対する成果・達成度の一覧表

| 要素技術             | 目標・指標                                                | 成果                                                                                      | 達成度  |
|------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ①<br>解析手法<br>の開発 | ①実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を 30%以上短縮する見通しを得る。 | ・翼胴結合供試体において試験と解析の比較検証を実施し、試験に対して誤差 30%以内で解析が合うことを確認した。<br>これより、試験期間を 30%以上低減できる見通しを得た。 | 達成   |
|                  | ②複雑な構造での電流経路及び放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系を確立する。           | ・複雑な電流経路をつくる複合材繊維の導電率の異方性を、層ごとに表現した解析手法を開発して検証した。                                       | 達成   |
|                  | ③TRL5 相当                                             | ・翼胴結合供試体を用いた検証結果にて、妥当の評価を得た                                                             | 達成   |
|                  | ④国際標準への提案                                            | ・SAE 標準へ解析および試験法を報告したが、未だハイレベルの規定の見直しの最中であり、組織化には至っていない。                                | 一部達成 |



| 要素技術             | 目標・指標                               | 成果                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 達成度      |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ②<br>放電現象<br>の研究 | ①放電開始箇所および条件の確立。                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・雷電流量と構造の接合方式の相関を試験にて確認し、放電開始しきい値としてまとめた。</li> <li>・試験でのデータ取得方法はFAA DER有資格者のレビューを受け、妥当との評価を受けた。</li> </ul>                                                                                                                                                                | 達成       |
|                  | ②航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理の解明。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造の抵抗による電流密度と電位分布が主要な放電発生原因と特定した。</li> <li>・機体の各種構造部位での放電開始条件を試験にて確認した。</li> </ul>                                                                                                                                                                                       | 達成       |
|                  | ③放電検出技術の確立。                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・放電光によるエネルギー分析手法を開発し、引火する恐れのある放電を探知する技術を開発した。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                  | 達成       |
|                  | ④国際標準への提案。                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・標準化団体 SAE International へ放電探知標準の見直しを提案し、標準見直し活動が具体的に開始された。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                    | 達成       |
| ③<br>帯電現象<br>の研究 | ①航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理解明。  | <p>帯電による電位分布の発生原理を研究し、以下の成果を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・3次元での電荷移動原理を解明し、解析手法を開発した。燃料の帯電現象の傾向を推定可能となった。</li> <li>・燃料の流体運動を含めた電荷の移動を研究し、解析手法を開発した。流体運動が電位分布へ与える影響を推定可能となった。</li> <li>・艀装等を含む燃料タンク供試体を用いた帯電試験手法を開発した。</li> <li>・ただし、解析の主要パラメータである電荷の移動度の測定精度に課題が残り、精密な解析を得るには至っていない。</li> </ul> | 一部<br>達成 |
| ④<br>検証方法<br>の検討 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得。           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造および材料の導電率等のデータを得た。また、取得データを解析に適用し、有効性を確認した。</li> <li>・複合材繊維の異方性の影響を測定する手法を開発し、炭素繊維複合材の特性データを得た。</li> </ul>                                                                                                                                                             | 達成       |

| 要素技術     | 目標・指標                                     | 成果                                                                                    | 達成度 |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|          | ②実大燃料タンク・システム供試体にて耐雷／静電気防爆試験を実施し、解析結果を実証。 | ・機体に着雷した位置により、複数の雷電流経路が発生する。これら電流経路を燃料タンク部で再現する試験方法を開発した。試験にて電流経路が異なる場合の電流分布の傾向を取得した。 | 達成  |
|          | ③国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立。                   | ・試験方法および解析の検証法は、FAA DER 有資格者のレビューを受け、妥当な適合範囲との評価を受けた。                                 | 達成  |
| ⑤測定方法の開発 | ①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の測定方法確立              | ・耐雷材と複合材の相関関係や、複合材繊維方向等の特性を測定可能とする供試体／治具を設計し、試験にて有効性を確認した。                            | 達成  |

注)「達成度」の欄には、達成、一部達成、未達成、を選択して記述。

「一部達成」とは、当該技術開発が複数のテーマで構成され、テーマ毎に目標値が設定されている場合において、テーマ毎に達成、未達成がある場合に選択（成果がおおよそ得られていても、すべてのテーマの目標値が未達成の場合は、「未達成」を選択する）。

#### 4. 事業化、波及効果について

##### 4-1 事業化の見通し

今後の航空機の複合材使用率を鑑みると、図4-1に示すように、全機レベルに複合材を使用した航空機の開発が必至であり、高度な複合材設計技術を有することが国際開発への必須条件になることが予想される。しかし、航空機への炭素繊維複合材の適用拡大は、雷リスクが阻害要因となっている。

本事業で得られる耐雷帯電解析技術により、複合材構造の高度な設計技術の獲得とともに、開発・設計期間の短縮が可能となり、雷リスクを小さくすることが可能となる。これは単純なコスト競争でなく、他には無い技術力による開発期間の短縮での低コスト化であり、国際的な航空機製造のアドバンテージを得られとともに、炭素繊維複合材適用の更なる拡大を見込める。

具体的なこの成果の活用目標としては、図4-1に示す次世代の複合材構造の航空機開発において、我が国のシェア拡大を狙うものである。

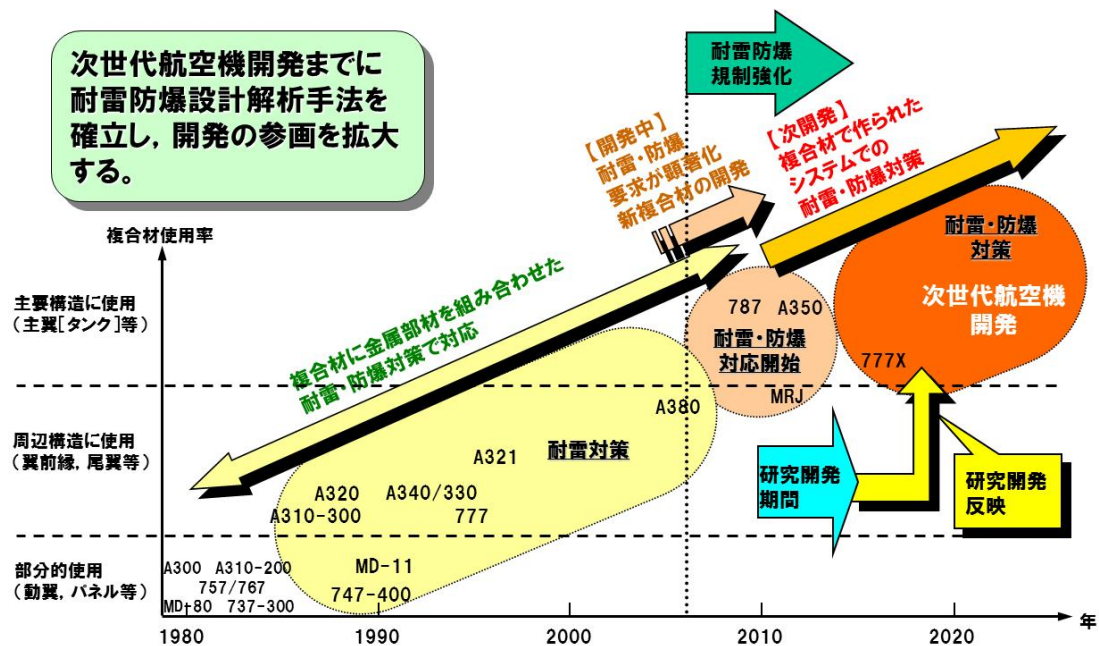


図 4－1 次世代航空機開発への参画

#### 4－2 波及効果

経済・環境対策を目指した複合材多用による軽量化は、航空機のみならず自動車、車両、船舶等の輸送機器から風力発電、石油タンク等まで多くの産業分野に拡大していく。今後の安全設計の担保としては、耐雷・防爆解析手法の確立は必須であると考え。また、本事業で得られる複雑な構造での解析技術や、放電特性の知見は、同様に複雑な線路網を有する送電網の耐雷設計や、今後の水素社会での防爆設計にも貢献できる。このように、図 4－2 に示すような、航空機以外の産業分野にも波及するものと考え。

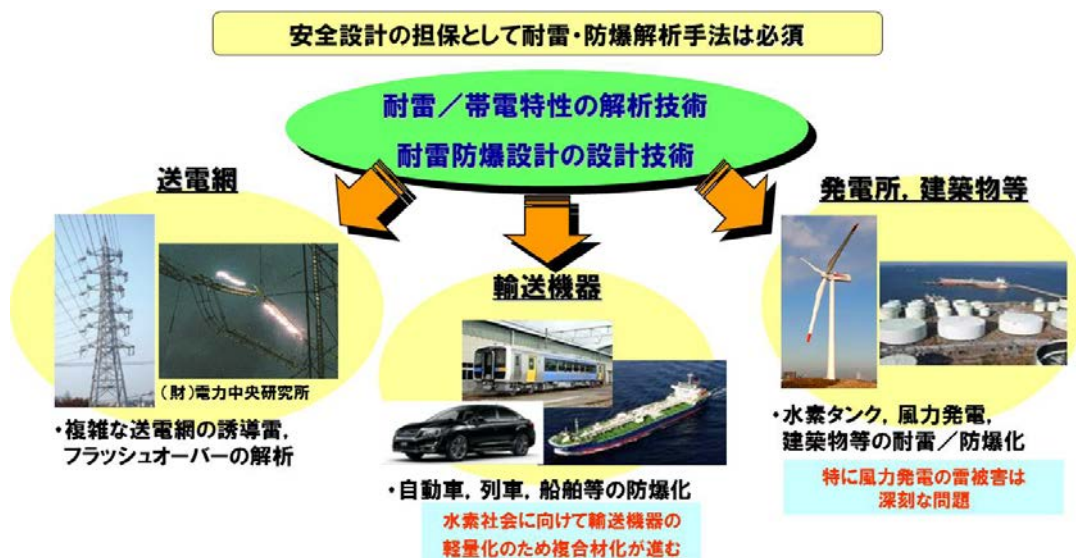


図 4－2 技術波及効果

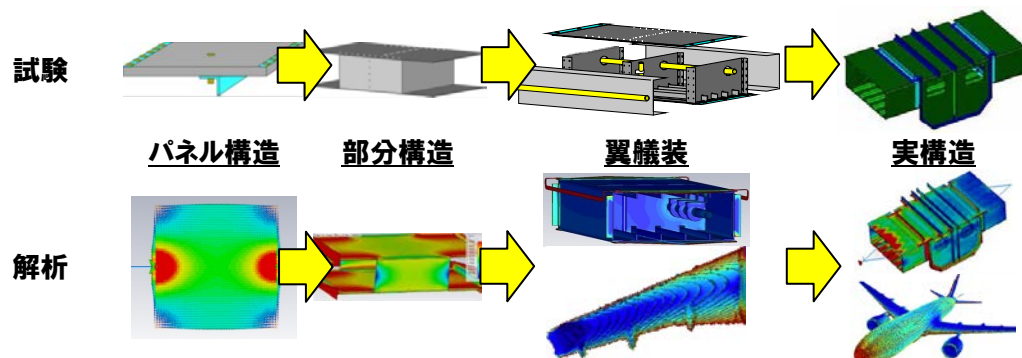
## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

本事業は、表5-1に示すように平成22年度～26年度の5年計画で実施している。

表5-1 研究開発計画

| 年度       | FY22                     | FY23                       | FY24                         | FY25                        | FY26                    | 国際<br>標準化<br>提案 |
|----------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|
| マイルストーン  | 基本設計<br>(TRL2)<br>解析手法検討 | 部分試作<br>(TRL3)<br>部分構造解析評価 | 技術確立(1)<br>(TRL3)<br>翼臓装解析評価 | 技術確立(2)<br>(TRL4)<br>全機解析開発 | 実証試験<br>(TRL5)<br>実構造実証 |                 |
| ①解析手法の開発 | 手法検討                     | パネル解析                      | 翼Box解析                       | 全機解析                        | 機体実証                    |                 |
| ②放電現象の研究 | ファスナ電位                   | 放電検出確認                     | 光学検出技術<br>発生しきい値             | 電磁検出技術<br>引火特性              | 検出技術実証<br>データベース化       |                 |
| ③帯電現象の研究 | ファスナ電位                   | 構造電位                       | タンク壁面電位                      |                             | 燃料タンク電位                 |                 |
| ④検証方法の検討 | パネル構造                    | 部分構造                       | 翼臓装                          |                             | 翼構造/臓装                  |                 |
| ⑤測定方法の開発 | 特性確認法                    | 部分構造試験法                    | 主翼試験法                        | 技術実証法                       |                         |                 |



TRL : Technology Readiness Level

#### ① 解析手法の開発

- ・複雑な電流経路を有する複合材構造に適した電磁界解析手法を検討する。
- ・解析ツールの設計・評価のため構造の電気的特性等を測定する。
- ・解析ツールを用いた解析結果と供試体を用いた試験結果が一致することを確認する。また、放電箇所推定手法の有効性を評価する。
- ・平成22年度は静電界解析手法と過渡解析手法の両面から解析を検討し、CFRP平面板を用いた雷電流試験結果を計算機上にて再現できる解析手法に目処をつける。
- ・平成23年度は平成22年度に得たCFRP平面板を用いた電磁界解析手法を基にし、立体構造での電磁界解析手法を静電界解析手法と過渡解析手法の両面から検討し、航空機の部分構造を模した供試体を用いた雷撃および雷電流試験結果を計算機上にて再現できる解析手法に目処をつける。また、解析ツ

ルのモデル構築技術に必要となる構造・材料の電気特性パラメータを検討し、試験にてパラメータを取得して、解析での有効性を確認する。

- ・平成24年度は平成23年度に得た主翼構造における電磁界解析の手法と構造・材料の電気特性データベースを基にし、主翼燃料タンク内の艤装品も含む複雑な形態での電流分布の発生を検討して電磁界解析手法にまとめ、燃料タンクを模した供試体を用いた雷電流試験結果を計算機上にて再現できる解析手法に目処をつける。
- ・平成25から平成26年度は、平成24年度までに構築した電磁界解析の手法を基に、実際の航空機主翼に相当する曲線構造および艤装品と、主翼以外の全機体構造を網羅した形態での電流分布の発生を検討して電磁界解析手法にまとめ、主翼を模した供試体を用いた雷電流試験結果を計算機上にて再現できる解析手法であることを実証する。

## ② 放電現象の研究

- ・複雑な構造における、放電箇所推定手法を検討する。
- ・平成22年度は航空機機体の電界の影響による電位について解析し、CFRP平面板の雷電流試験によるデータの取得や放電特性試験による局所的な機体構造の形状および環境条件における放電開始箇所および条件を静電界解析で明確にする。
- ・平成23年度はCFRP平面板の電位的特性データを基にし、局所的な機体構造の形状や、CFRPの通電による特性変化における放電開始箇所および条件の解析を静電界解析で確認する。
- ・平成24年度は放電検出技術および電流集中による熱的放電の発生条件データを基にし、放電開始の検出技術を取得するとともに、放電開始のしきい値等の放電開始箇所および条件を確認する。また主翼燃料タンク内の帯電発生を検討して電磁界解析手法にまとめ、燃料タンクを模した供試体を用いた帯電試験結果を計算機上にて再現できる解析手法に目処をつける。(以降、要素技術を帯電現象の研究に分ける。)
- ・平成25から平成26年度は、放電開始の検出技術の実用化開発を進めるとともに、検出技術の裏づけとなる放電開始メカニズムを検討し、放電開始箇所および条件の仕様化を行う。また、放電開始条件の検出技術の実用化に向けた開発を実施して仕様にまとめ、航空機の複雑な内部構造でも有効であることを試験にて実証する。

## ③ 帯電現象の研究

- ・現在の航空機開発において、解析法及び試験法が確立しておらず、安全の証明に多くの時間を費やしている、複雑な構造における、帯電箇所推定手法を開発する。

- ・平成２５年度は除電解析技術及び試験手法を基にし、複雑な構造における帯電／除電解析技術を開発して、有効性を試験にて確認する。
- ・平成２６年度は箱状構造での除電解析技術及び試験手法を基にし、複雑な航空機構造における帯電／除電解析技術を開発するとともに、評価試験方法を開発し、解析の有効性を試験にて実証する。

#### ④ 検証方法の検討

- ・航空機の耐雷機体構造を考慮した材料・構造の仕様を検討し、解析ツールのモデルおよび評価用供試体を設計製作する。
- ・平成２２年度は従来手法の複合材機体構造の再現したＣＦＲＰ平面板供試体を設計製作し、雷電流試験を通してデータを取得することにより、今後の構造および材料の方向性を得る。
- ・平成２３年度は航空機の部分構造における耐雷構造を検討し、従来手法の複合材機体構造を再現した立体的供試体と耐雷構造の立体的供試体を設計製作し、雷撃および雷電流試験を通してデータを取得することにより、今後の構造様式および材料の方向性を得る。
- ・平成２４年度は主翼燃料タンク内の艀装品を含めた耐雷構造を検討し、耐雷構造の主翼燃料タンク供試体を設計製作して雷電流試験を通してデータを取得することにより、今後の構造様式および材料の方向性を取得するとともに、耐雷実証のための評価用供試体の有り姿を得る。
- ・平成２５から平成２６年度は、平成２５年度までに検討した耐雷実証のための評価用供試体の有り姿を基に設計し、主翼を模した供試体を設計製作する。

#### ⑤ 測定方法の開発

- ・耐雷試験方法の確立に向けて、複雑な複合材構造に適した雷電流および構造電気的特性等を測定する試験手法を検討する。
- ・平成２２年度は局所的な機体構造や材料における雷電流の測定を可能とする試験方法を確立する。
- ・平成２３年度は航空機の部分構造における雷撃および雷電流時の測定を可能とする試験方法を確立する。また、局所的な機体構造における放電等の電気特性の測定を可能とする試験方法を確立する。
- ・平成２４～２５年度は主翼燃料タンク艀装品を模擬した供試体での測定を可能とする試験方法を確立する。また、放電開始条件の検出および測定を可能とする試験方法を確立する。



## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

### (1) 平成22年度の実施体制

本事業は、平成22年の経済産業省の公募による選定審査手続きを経て、富士重工業株式会社航空宇宙カンパニーが経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として東京大学日高邦彦教授および熊田亜紀子准教授が参加した。

本事業のプロジェクト管理は、航空機の複合材構造の知見を有する富士重工業株式会社航空宇宙カンパニーが実施した。また、研究開発の実施に当たっては、研究開発の技術評価と計画・進捗指導のため、航空気分野にとどまらない雷、強電および材料に係る各研究機関の有識者からなる技術委員会を設置し、東京大学 石井勝 教授（当時、平成26年より名誉教授）を技術開発評価の統括として委員長に選任した。図5-1に平成22年度の研究開発実施体を示す。

本事業で取り組む耐雷帯電解析技術は、航空機機体構造を対象にしている。したがって、対象となる機体構造検討、供試体製作および試験は富士重工業および三菱重工業の機体メーカーが実施する。解析の要素である電磁気現象においては大学の協力を得て実施する。すなわち、大学等で電磁気現象の解析、検知手法の検討等を行い、機体メーカーで解析ツール製作、供試体準備および試験等を行うという体制で各開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

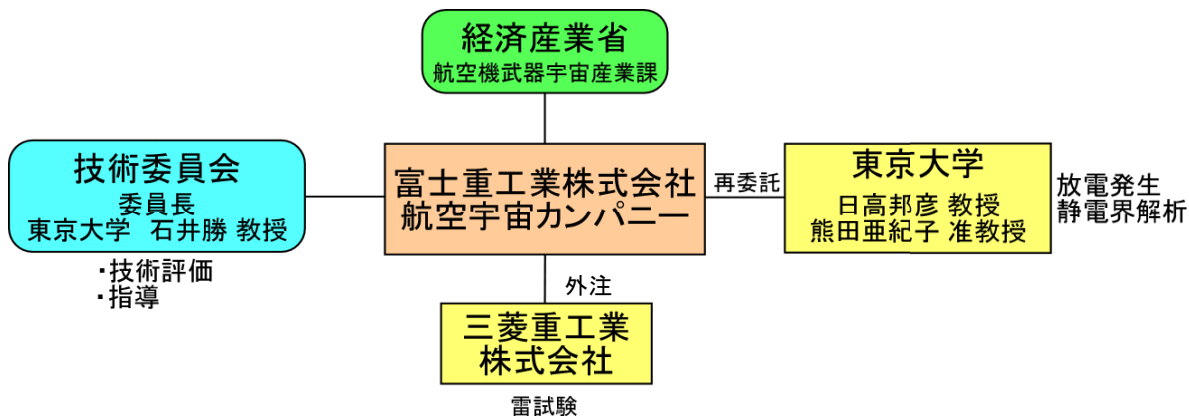


図5-1 平成22年度研究開発実施体

東京大学 日高邦彦教授および熊田亜紀子准教授は、我が国の放電帯電現象のセンシング研究においての我が国の第一人者であり、国内外で数多くの受賞記録を有しており、また強電分野の国際標準においては我が国のメンバーとして貢献している。放電帯電解析方法の確立と国際標準化を目標とした本事業の研究者として最適である。

技術委員会委員長の東京大学 石井勝 名誉教授は、雷放電物理および高電圧現象測定研究においての我が国の第一人者であり、国内外の多くの学会で委員長を歴任しており、本事業の技術評価統括者として最適である。

## （２）平成２３年度の実施体制

本事業の推進にあたり，研究開発の段階に応じて実施体制を見直して研究開発の最適化を図る方針としている。平成２３年度は，解析手法のアプローチとして，「静電界解析手法」と「過渡解析手法」の両解析手法の各々の有効性を明確にするため，芝浦工業大学松本聡教授に静電界解析手法での航空機解析協力として新たに再委託した。また，放電現象に関しては放電の測定段階に入ったため，九州工業大学大塚信也准教授に放電エネルギーの検出技術開発協力として新たに再委託した。図５－２に平成２３年度の研究開発実施体を示す。平成２３年度の研究開発段階において開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

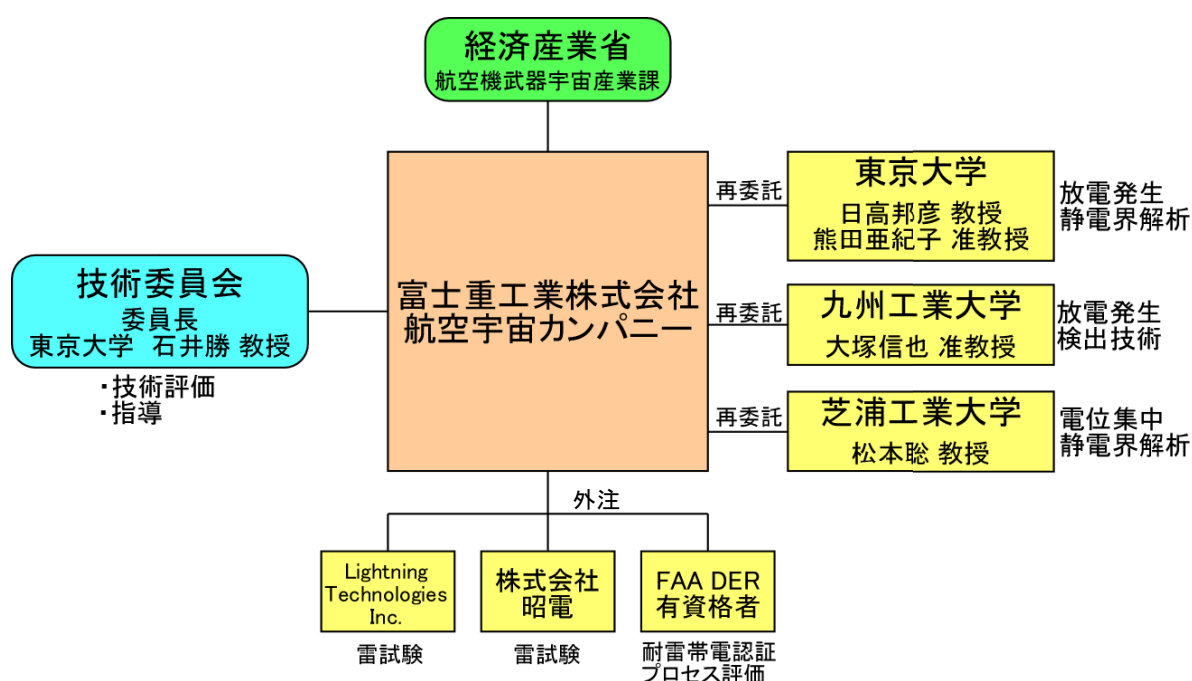


図５－２ 平成２３年度研究開発実施体

芝浦工業大学 松本聡教授は，高電圧・放電の研究をしており，特に雷インパルス電圧波形の影響やシミュレーションの分野において国内で多くの受賞記録を有している。本事業の「静電界解析手法」における航空機機体構造の電位差解析の研究者として最適である。

九州工業大学 大塚信也准教授は，放電発光検出の分野においての我が国の第一人者であり，国内外で多くの受賞記録を有しており，本事業の放電発生検出技術開発における研究者として最適である。

また主要請負としては，放電試験と国際標準との比較の段階に入ったため，試験場として米国のFAA認証試験に使用されているLightning Technologies Inc.の試験場を使用するとともに，国内でも比較検証および試験開発を可能とするために航空機の雷撃標準での雷撃試験能力を有する株式会社 昭電の試験場を使用した。



試験計画の遂行に際しては、FAA DER (Federal Aviation Administration Designated Engineering Representative) 有資格者のレビューを受け、現行の国際標準を確実にキャッチアップできる体制とした。

### (3) 平成24～25年度の実施体制

平成24年度の解析手法の研究結果として「静電界解析手法」と「過渡解析手法」の有効性の確認が終了したため、解析手法をFDTD法での開発にリソースを絞り込み研究開発を推進するため体制を見直した。また、放電現象に関して研究内容が詳細化したため、帯電分野と落雷分野に分け、東京大学日高邦彦教授および熊田亜紀子准教授に帯電分野を、九州工業大学大塚信也准教授に落雷分野を再委託した。図5-3に平成24～25年度の研究開発実施体を示す。平成24～25年度の研究開発段階において開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

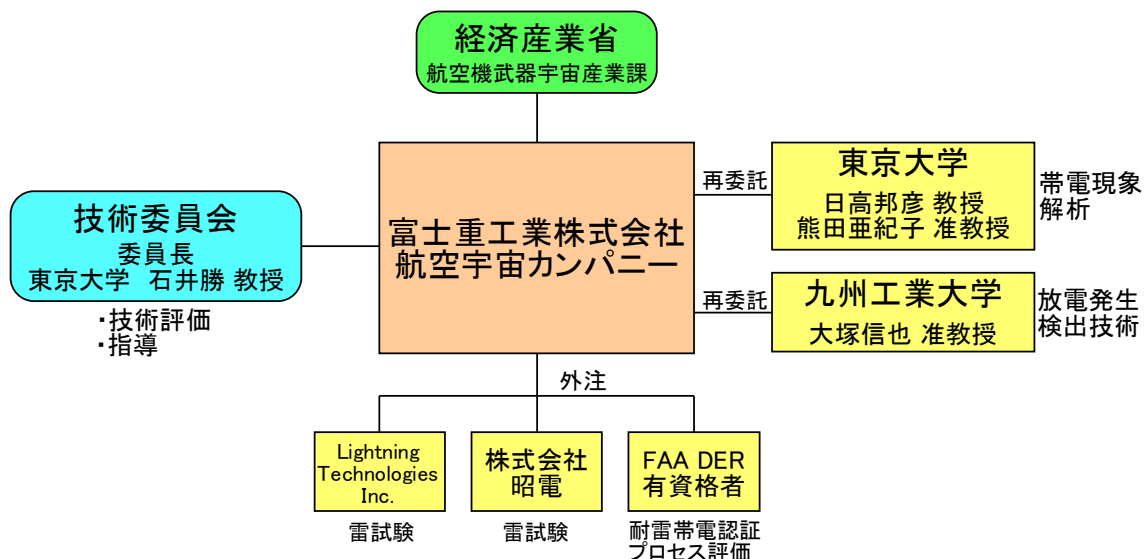


図5-3 平成24～25年度研究開発実施体

### (4) 平成26年度の実施体制

平成25年度の解析手法の研究結果として、炭素繊維による導電率の異方性の影響が課題となり、FDTD法による異方性導電構造の解析手法の開発として、同志社大学 馬場吉弘教授を解析手法の開発協力として新たに再委託した。また主要請負としては、最終年度の解析検証試験と国際標準への提案用データ取得試験の段階に入り、試験数が増大したため、新たに名古屋大学ナショナル・コンポジット・センターの雷撃試験場を使用した。図5-4に平成26年度の研究開発実施体を示す。平成26年度の研究開発段階において開発項目の実施責任体制は明確で妥当である。

同志社大学 馬場吉弘教授は雷の電磁界の研究をしており、特に複雑な形状の構造物における雷撃の電磁界シミュレーションの分野においての我が国の第

一人者であり、国内外の学会で役員を務めると共に多くの受賞記録を有しており、本事業の異方性導電構造における解析技術開発の研究者として最適である。

名古屋大学ナショナル・コンポジット・センターは、平成25年8月に開設された国内唯一の航空機試験用雷波形標準（SAE ARP5412）に合致した公的試験設備であり、国内で低コストの試験を可能とするため使用した。但し、燃料タンクでの引火性を確認するガス引火試験は行えないため、ガス引火に係る試験は米国のLightning Technologies Inc.の試験場を引き続き使用した。また、放電開始を確認する低電流の試験は行えないため、放電開始確認に係る試験は低電流でSAE ARP5412に合致する株式会社 昭電の試験場を使用した。

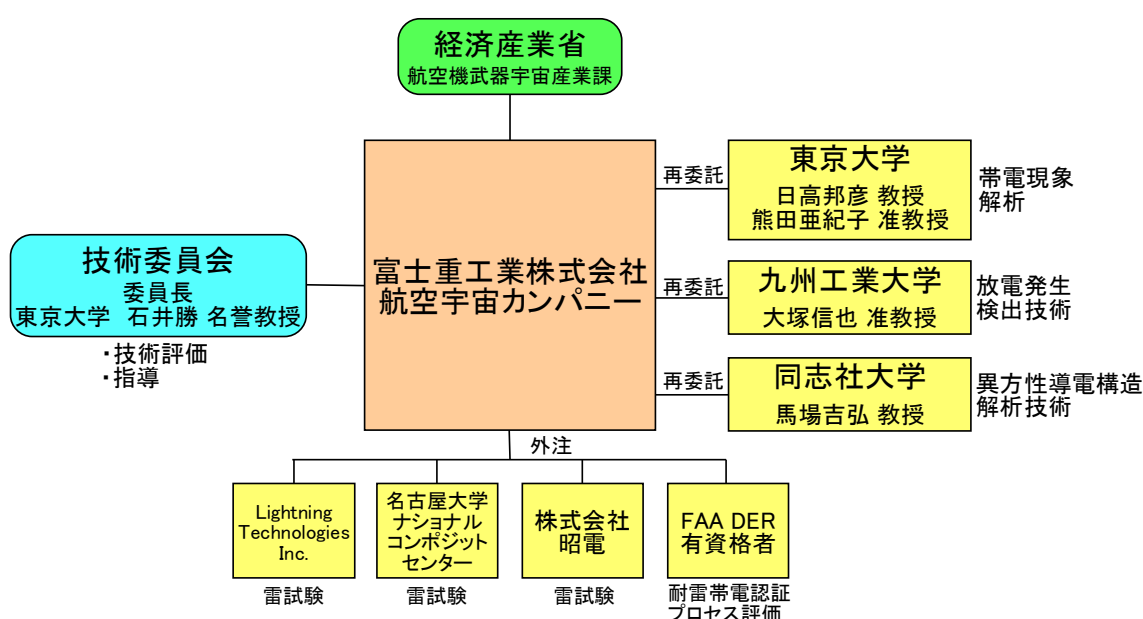


図5-4 平成26年度研究開発実施体

#### （5）実施者間の連携

目標達成および効率的実施のため、技術委員会における外部有識者の意見を反映できる体制を設け運営管理に反映させた。また、研究計画立案、試験方案立案および研究成果の要処ごとに技術委員と研究者が会合し、本事業の進捗把握および方向付け等を実施した。これら技術委員会活動により、実施者間の連携は十分とれている。

#### （6）成果の普及および関与の取り組み

国内外の学会にて研究開発の状況を発表し、成果の普及に努めている。また、国際標準化団体 SAE International に参加し、本事業での研究開発成果が関与するよう努めている。さらに前述の技術委員会においてオブザーバー枠を設け、耐雷帯電解析および試験法に係る関係者の参加を呼びかけている。

### 5-3 資金配分

本事業の平成26年度までの予算配分を表5-2に示す。

個別要素技術研究は年度ごとに作業計画を勘案し、内部配分を各機関と十分調整の上決定しており、妥当なものである。

表5-2 資金度配分 (単位：百万円)

| 年度 平成   | 22   | 23    | 24    | 25    | 26    | 合計    |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 解析手法の開発 | 16.1 | 34.7  | 28.1  | 27.8  | 22.9  | 129.6 |
| 放電現象の研究 | 3.2  | 5.8   | 4.2   | 15.0  | 34.2  | 62.4  |
| 帯電現象の研究 | -    | -     | -     | -     | 10.0  | 10.0  |
| 検証方法の検討 | 12.9 | 56.0  | 47.3  | 113.2 | 64.9  | 294.3 |
| 測定方法の開発 | 0.0  | 8.1   | 8.2   | 7.8   | -     | 24.1  |
| 試験の実施   | 6.6  | 33.1  | 20.2  | 25.1  | 40.1  | 125.1 |
| その他運営費  | 0.7  | 2.7   | 2.0   | 1.5   | 1.5   | 8.5   |
| 合計      | 39.5 | 140.4 | 110.0 | 190.5 | 173.6 | 654.0 |

### 5-4 費用対効果

計測や物理現象に関する学術的な要素技術の検討は大学、航空機複合材構造設計情報、解析ツール製作および試験は企業と分担を明確にし、連携しながら機能的に開発している。又、標準化に必要な機能、仕様情報を国際標準化団体 SAE International への参加や FAA DER 有資格者のレビューから入手することにより、本事業は非常に効率的に進められており、投入資源以上の効果が得られている。

### 5-5 変化への対応

航空機への炭素繊維複合材料の適用は、平成22年度の本事業開始から技術動向、社会情勢および市場ニーズの変化等本事業に影響を及ぼすような変化はない。依然、落雷及び帯電の対策による重量増加が、炭素繊維複合材料の適用拡大を妨げる大きな要因の1つである。よって、欧米を中心に本事業に係る研究開発が活発であり、近年は中国も開始した。

これら各国の研究開発の結果は米国 SAE International と欧州 EUROCAE (European Organization for Civil Aviation Equipment) の標準化団体で討議され、標準化が進められており、これら活動と連携して米国 FAA 等で法案化の検討が進んでいる。日本もこれら欧米の動きに適切に対応していく必要があるため、本事業において SAE International の標準化委員会に参加し、各国の動向を把握するとともに、日本からの標準化提案を行う等、国際動向に対応している。

### 3 航空機用先進システム基盤技術開発 (革新的防除氷技術)

## 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け .....           | 64 |
| 1－1 事業目的 .....                   | 64 |
| 1－2 政策的位置付け .....                | 65 |
| 1－3 国の関与の必要性 .....               | 66 |
| 2. 研究開発目標 .....                  | 68 |
| 2－1 研究開発目標 .....                 | 68 |
| 2－1－1 全体の目標設定 .....              | 68 |
| 2－1－2 個別要素技術の目標設定 .....          | 69 |
| 3. 成果、目標の達成度 .....               | 70 |
| 3－1 成果 .....                     | 70 |
| 3－1－1 全体成果 .....                 | 70 |
| 3－1－2 個別要素技術成果 .....             | 71 |
| 3－1－3 特許出願状況等 .....              | 73 |
| 3－2 目標の達成度 .....                 | 74 |
| 4. 事業化、波及効果について .....            | 75 |
| 4－1 事業化の見通し .....                | 75 |
| 4－2 波及効果 .....                   | 75 |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ..... | 76 |
| 5－1 研究開発計画 .....                 | 76 |
| 5－2 研究開発実施者の実施体制・運営 .....        | 77 |
| 5－3 資金配分 .....                   | 78 |
| 5－4 費用対効果 .....                  | 79 |
| 5－5 変化への対応 .....                 | 79 |

## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1-1 事業目的

航空機にとって着氷と呼ばれる現象は飛行安全上、大変な脅威であり、死亡事故に繋がるケースも報告されている。為航空会社は着氷に対し、既存の防除氷システムを利用する等、非常に労力を払っている。航空機に搭載されている既存の防除氷システムが抱える主たる課題として、以下の3点が挙げられる（図1）。

1. 安全性 着氷が原因の航空機事故が毎年発生してしまっている。
2. 燃費効率 小型～大型民間機で多く利用されている防除氷装置（Bleed 式）は燃費効率を著しく悪化させている。
3. 環境問題 米国では冬季に使用される防除氷液による、水質汚染が深刻な問題となっている。

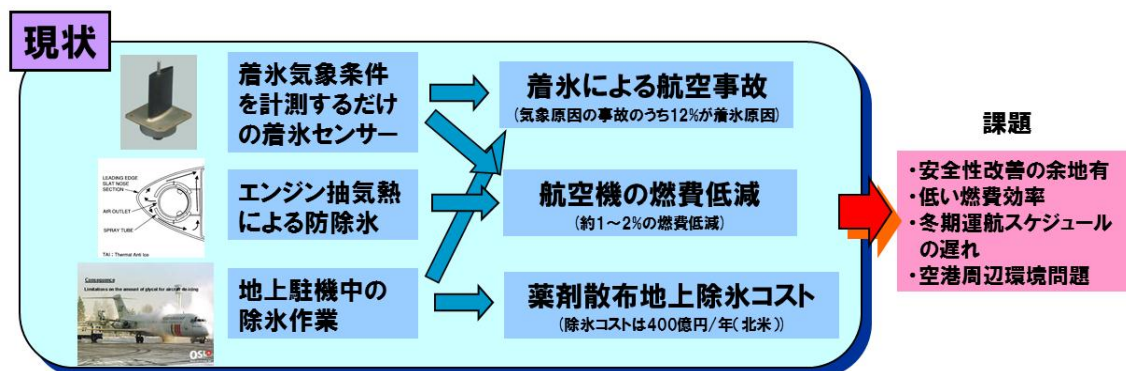


図1 航空業界における現状と課題の概要

さらに、航空機の着氷に関連した耐空性基準（FAR 14 CFR part 25 appendix 0<sup>(1)</sup>）が2015年に改訂され、基準が厳格化された。これに伴い、これまでよりも更に過酷な着氷環境にも対応できる防除氷システムが求められている。

よって、新しい耐空性基準にも対応できる、省エネルギーな新たな防除氷技術開発を世界に先駆けて取り組み、信頼性が高く、経済性に優れた、革新的防除氷システムのコンセプトを実現させることを目指すこととした。

尚、本事業は欧州の第7次研究枠組み計画（FP7）において、日欧共同公募を経て欧州のパートナーと日本のパートナーが JEDI ACE（Japanese-European De-Icing Aircraft Collaborative Exploration）と呼ばれるコンソーシアムを組み、研究開発に取り組む、国際共同研究プロジェクトである。図2に本プロジェクトの体制図を示す。

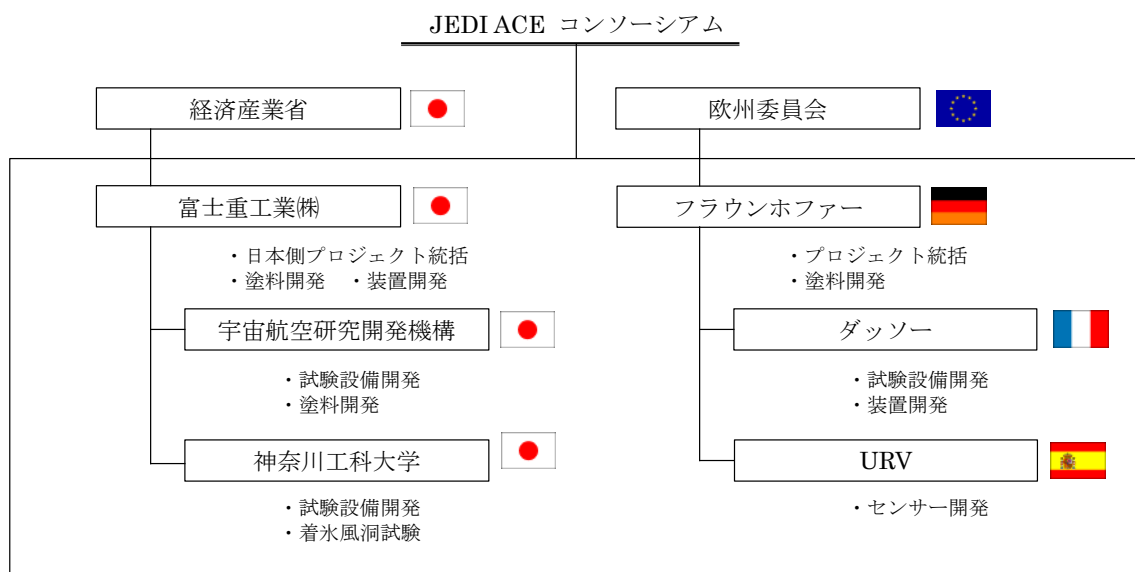


図 2 革新的防除氷システム開発の全体体制図

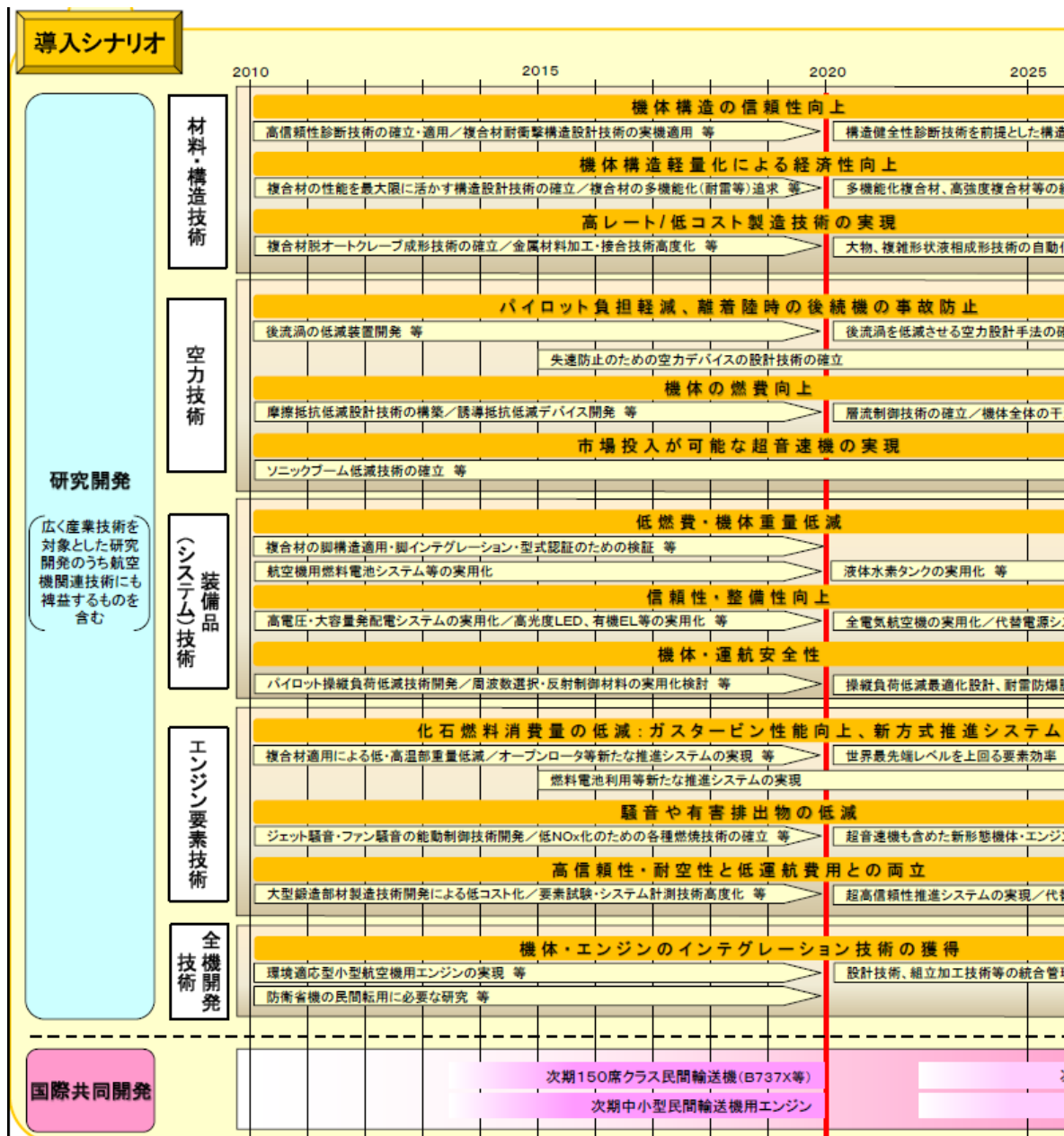
## 1-2 政策的位置付け

航空産業は、今後も年数%の割合で成長が見込まれる産業分野である。また、安全性の観点から高い信頼性が求められるため、様々な領域の先端技術を用いて技術開発や製品保証が実施されており、非常に広い裾野産業を伴う。航空産業において適切な技術開発を進め、関連する技術力を向上することは、我が国の産業基盤全体の高度化に繋がることが期待される。

上記を踏まえて経済産業省は、図3に示す航空分野の導入シナリオを策定し、施策に反映している。本事業で開発する「革新的防除氷システム」は装備品技術に該当するものであり、図2に記載の要素技術の開発で改善しようとする社会ニーズ「安全性、環境適合性、及び経済性」のいずれにも貢献できる技術と考えられる。

- ・ 安全性：航空機への着氷は重大事故を引き起こす可能性があり、耐空性基準<sup>(1)</sup>が適宜見直される等、航空機認証機関も大きな関心を示している。
- ・ 環境適合性：空港での除氷作業に環境負荷の高い防除氷液が適用されている。
- ・ 経済性：空港での防除氷作業に多大なコストを要している。また、防除氷作業が民間航空機の定時運行の阻害要因になっている。





出所：技術戦略マップ2010

図3 航空分野の導入シナリオ

### 1-3 国の関与の必要性

図3に示した「航空分野の導入シナリオ」の研究開発分野のうち、材料・構造技術とエンジン要素技術の分野では、我が国はある一定の存在感を示すことができている。一方、本事業が含まれる装備品技術の分野では、スーパーTier1と称されるUTC等の大手サプライヤが大きな存在感を示しており、我が国の優れた技術力を十分に発揮できていないのが現状である。

また、技術開発の世界的な状況では、ドイツの炭素繊維複合材料クラスター



(CFK バレー) やシンガポールの MRO 事業等、航空産業を中心に他の産業にも波及すると考えられる技術や航空産業の主要な一角にかかわる技術を国の重要技術と捉え、国家的なプロジェクトとして系統的な技術開発体制を構築している例も存在する。

このような外的環境の中、我が国産業もこれらに対抗すべく、産学官連携による新技術の開発を推進することが重要である。

本事業で開発を行う「防除氷システム」は飛行安全上重要なシステムであり、各国で様々な開発が行われているが、塗料やコーティングを適用した防除氷システムを実現した例は皆無であり、一社単独での技術開発では、開発期間と費用の面からリスクが高く、技術開発の面からも産学官の例系体制が必要不可欠と判断できる。また、「防氷コーティング」技術は、着氷、着雪現象による安全性や経済性の低下を余儀なくされている他産業分野、例えば、自動車、車両、船舶等の輸送機器から、橋梁や風車等の社会インフラ設備まで、多くの産業分野に波及しうる技術と考えられる。日本発の技術をあらゆる産業分野において世界中へ展開していくためにも、国が積極的に研究開発を実施し、その成果をあらゆる分野へ普及していく必要がある。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

#### 2-1-1 全体の目標設定

事業目的に記載した「安全性向上，燃費効率改善，及び環境負荷低減」を実現するために、本プロジェクトでは、飛行条件を模擬した地上実証試験において革新的な防除氷システムコンセプトの有効性を実証することを目標に開発を行った。表1に、本目標を設定した理由・根拠を示す。また、図4に、目標に掲げている革新的な防除氷システムの概要を示す。

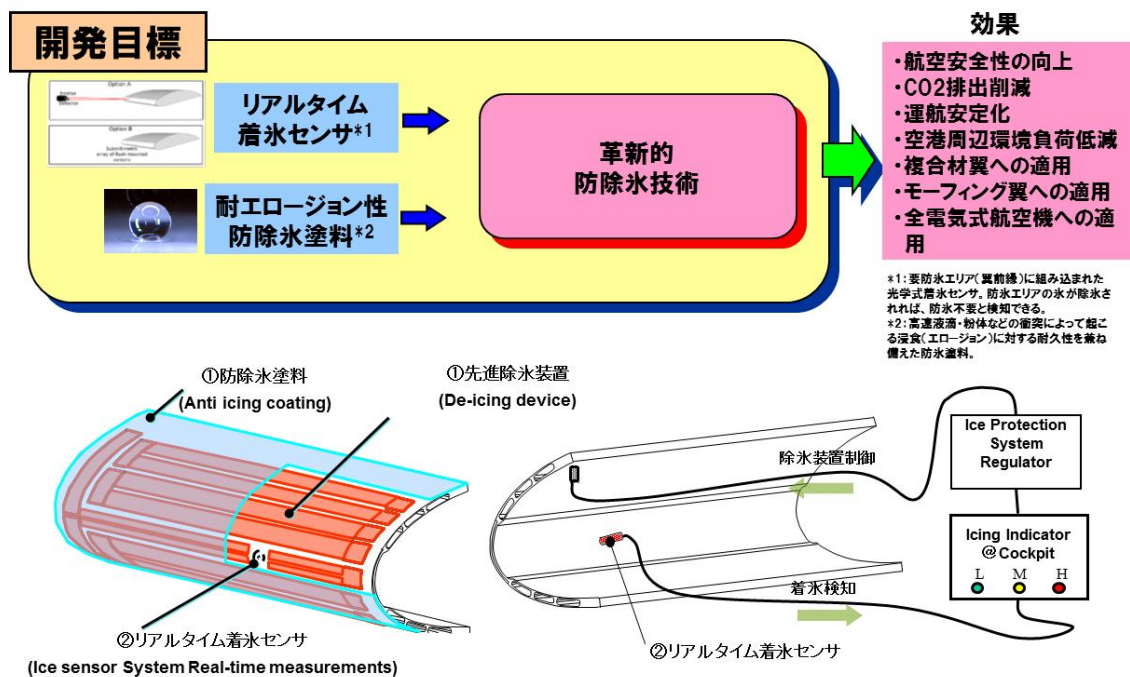


図4 革新的な防除氷システムの概要

表1 全体の目標

| 目標・指標                                        | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 飛行条件を模擬した地上実証試験において革新的な防除氷システムコンセプトの有効性を実証する | <p>気象が原因の航空事故のうち 12% が着氷に起因するものであり、安全性改善の余地があること、防除氷技術の改善により航空機の燃費効率を改善できる可能性があること、薬剤散布による地上除氷作業を低減することにより冬季運航スケジュールの遅れを改善でき、かつ、除氷液の使用量削減により空港周辺の環境影響を低減できることを考慮して目標を設定した</p> |

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

先に示した全体目標を達成するために、本プロジェクトでは、防氷コーティング、防除氷装置、リアルタイム着氷センサを組み合わせた革新的防除氷システムのコンセプト技術を開発することを目的として、以下3つの要素技術の確立を行うこととした。下記要素技術を確立するために設定した目標・指標と、その設定の妥当性・設定理由・根拠等を表2に示す。

1. 省エネルギーな革新的防除氷システムのコンセプトを実証する。
2. 防除氷コーティングの耐久性を向上する。
3. 信頼性のある着氷現象を再現可能な試験法を確立する。

なお、リアルタイム着氷センサは欧州主導の要素技術であり、平成27年度末にコンセプト実証試験の結果が出る予定のため本資料での報告は割愛する。

表2 要素技術とその目標、及び目標設定の妥当性・設定理由

| 要素技術                            | 目標・指標                                                                                                                                                                                                                           | 妥当性・設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの有効性を実証する | 防除氷コーティング、防除氷装置、及び着氷センサを組み合わせた革新的な防除氷システムのコンセプトを立案し、各種地上試験にて、その有効性を実証する                                                                                                                                                         | <p>飛行安全上大きな脅威と成り得る着氷現象に対して、着氷に伴う事故防止の観点から、より過酷な着氷環境にも対応可能な防除氷システムが求められている</p> <p>既存の防除氷システムは、エンジン抽気熱を利用するシステムをはじめ、燃費低減をきたすものである</p> <p>このようなシステムの改善を図ると共に、防除氷コーティング、及び着氷センサを組みわせることにより省エネルギー化と安全性を同時に両立できるシステムは革新的な技術と考えられる</p> |
| 防除氷コーティングの耐久性を向上する              | <p>撥水性：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・接触角<math>&gt;130^{\circ}</math></li> <li>・転落角<math>&lt;10^{\circ}</math></li> </ul> <p>耐久性：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・レインエロージョン試験後撥水性を維持していること</li> </ul> | <p>富士重工業（株）が開発した超撥水コーティング（世界トップレベル）をベースに、その撥水特性を保ちつつ、耐久性の向上を主目的として開発を行うこととした</p>                                                                                                                                                |

|                                                |                                                                         |                                                                                                                              |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法を設定する | 防除氷コーティングの標準的な評価法、及び、米国耐空性審査基準 <sup>(1)</sup> の着氷条件を再現できる信頼性の高い試験法を設定する | 航空機への適用実績がなく、その評価方法も設定されていない防除氷コーティングの特性を評価するための専用装置を開発し、標準的な評価法を設定すると共に、米国耐空性審査基準に基づく着氷条件を実現し、防除氷システムの評価を可能とする試験法を設定することとした |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

飛行条件を模擬した地上実証試験において、提案する革新的防除氷システムの有効性を実証することを目指し開発を進め、以下の成果を得ることができた。

- ・本プロジェクトで開発した耐久性に優れる防除氷コーティングを適用した防除氷システムのコンセプトを提案した。
- ・提案した防除氷システムを適用した翼型模型を製作し、風洞試験において、当該システムと従来塗装を適用したシステムとの比較を行った結果、翼型への着氷を防止するために必要となる電力量を約7割削減できた（図5）。

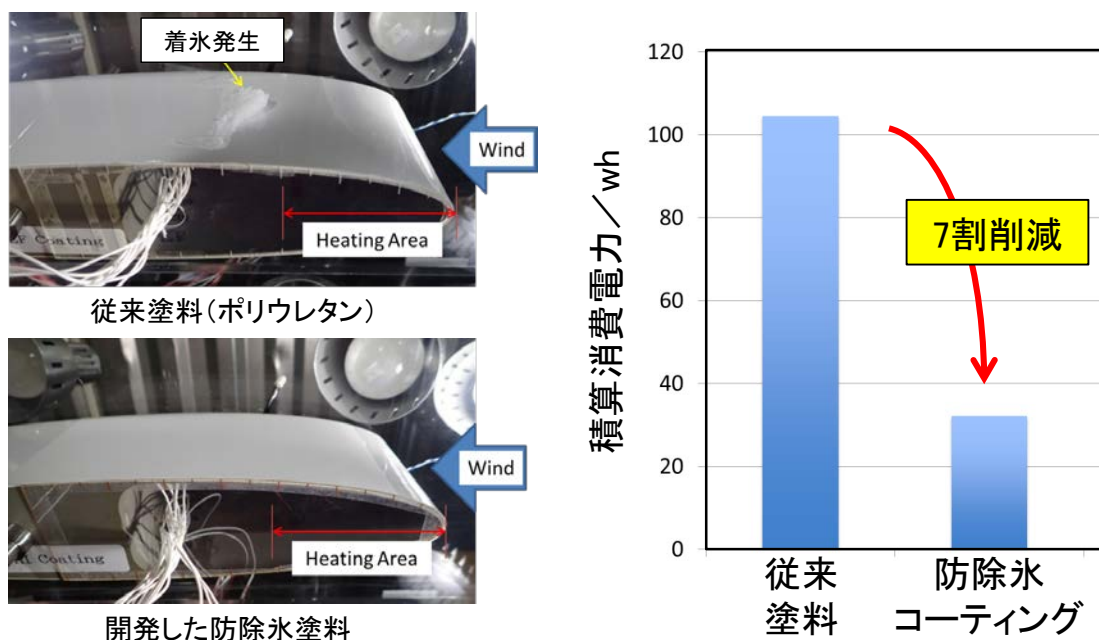


図5 風洞内の試験状況の一例と消費電力の比較

### 3-1-2 個別要素技術成果

#### (1) 省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの証明

本プロジェクトでは、耐久性を向上した防除氷コーティングを適用することによる省エネ化を実現するために、電熱式防除氷システムと組み合わせるコンセプトを立案した。表3に現在航空機に適用されている防除氷システムと防除氷コーティングとの組み合わせのトレードスタディを示す。

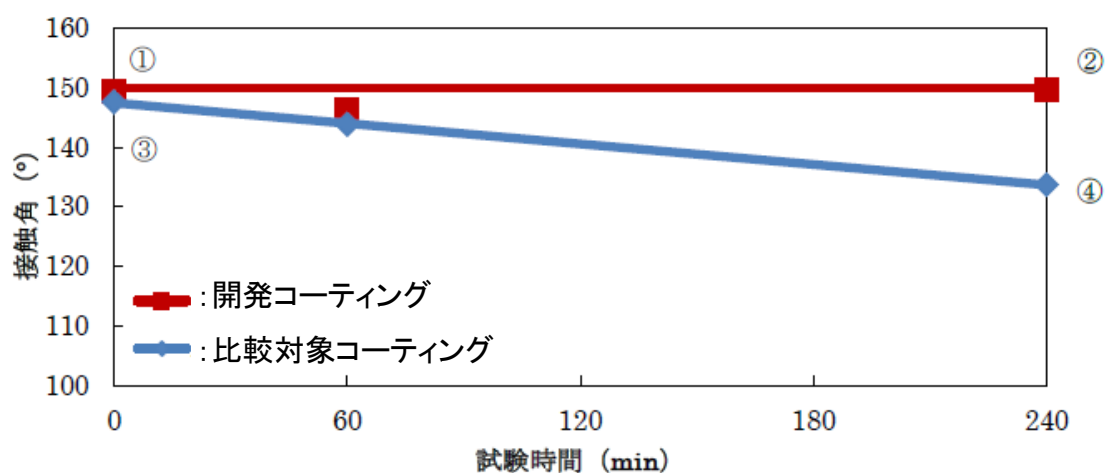
表3 防除氷コンセプト立案のためのトレードスタディ

|        | 熱的防除氷システム                  |                            | 機械的防除氷システム                 |                 | 化学的防除氷システム     |
|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------|
|        | Bleed Air                  | 電熱式                        | ラバーブーツ                     | 電磁パルス方式         |                |
| 制御性    | ×                          | ○                          | ×                          | ○               | ×              |
| 塗料の塗布性 | 翼の変形などはないため適用可。<br>(要耐高温性) | 翼の変形などはないため適用可。            | 翼が変形するため適用不可               | 適用可。(要耐衝撃性)     | 不凍液散布用孔のため適用困難 |
| 効果     | 低着氷剪断力による除去性能UP<br>⇒消費電力低下 | 低着氷剪断力による除去性能UP<br>⇒消費電力低下 | 低着氷剪断力による除去性能UP<br>⇒消費電力低下 | 低着氷せん断性<br>⇒除氷性 | 不凍液分布を妨げるため効果無 |
| 塗料への要求 | —                          | 撥水性<br>⇒防氷性                | —                          | 低着氷せん断性<br>⇒除氷性 | —              |

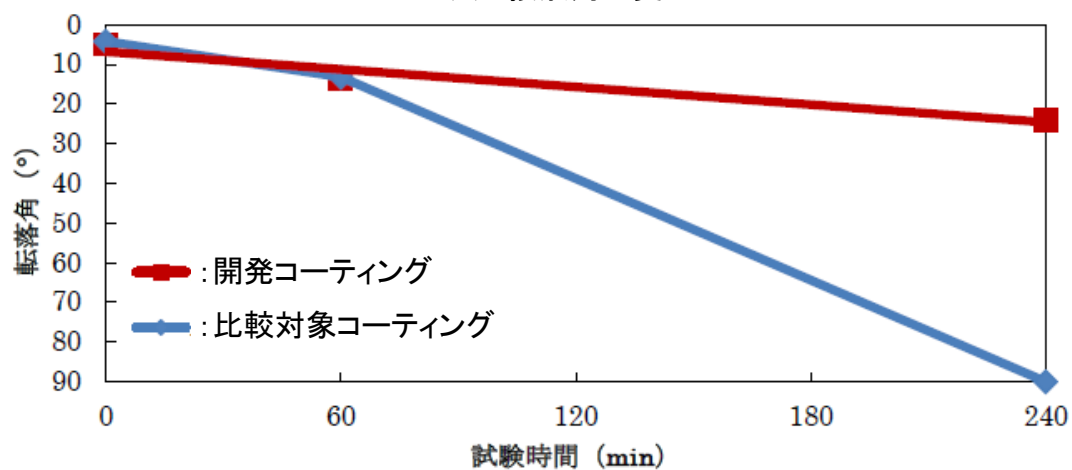
ここで選定したコンセプトに基づき製作した供試体を用いて評価を行った結果、3-1-1 項に示す成果を得ることができた。

#### (2) 防除氷コーティングの耐久性向上

耐久性の向上に着目して開発を行った。先導研究にて開発した防除氷コーティングはアクリル樹脂に PTFE 粒子を分散させた構成であった。ここでベースとなるアクリル樹脂はコーティングの耐久性に、PTFE 粒子は撥水性に、主として影響を及ぼすと考えられる。そこで耐久性向上のため、ベースとなる樹脂の選定、及び混合する PTFE 粒子の最適量を検討した。その結果、ベースをフッ素樹脂として所定の配合量で PTFE 粒子を分散させることにより、目標とする撥水特性と耐久性を両立する防除氷コーティングを開発することができた(図6, 7)。なお、本評価に使用した装置は、本プロジェクトで開発した防除氷システム評価用装置である。



(a) 接触角の変化



(b) 転落角(滑水性)の変化

図6 レインエロージョン試験による撥水特性の変化

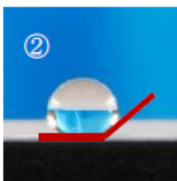
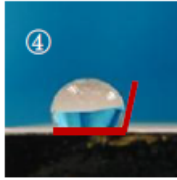
| サンプル名          | 試験前                                                                                   | 試験後<br>(240min)                                                                        |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 開発<br>コーティング   | ①  | ②  |
| 比較対象<br>コーティング | ③  | ④  |

図7 レインエロージョン試験前後の撥水角の比較

(3) 防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法の設定

着氷温度下での接触角と転落角を自動で計測する装置を構築した。計測の自動化により、人的要因による実験誤差の排除と作業効率の向上が実現できた。

飛行環境を模擬した実証試験を行うための風洞の着氷環境設備を改修すると共に、風洞測定部に翼型模型を設置した際の気流の二次元性を確認し、本風洞を用いた実証試験が適正に実施できることを確認した。なお、ここでコンセプト提案を行った防除氷コーティングを適用した防除氷システムの評価は、欧州パートナーであるダッソー社製のビジネスジェット機に対する要求値を活用した。また、着氷風洞試験の条件は、米国耐空性審査基準に基づき設定した。

### 3-1-3 特許出願状況等

表4に特許・論文等の件数を、表5に論文、投稿、発表、特許リストを示す。

表4 特許・論文等件数

| 要素技術              | 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数(出願を含む) | 特許権の実施件数 | ライセンス供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-------------------|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 革新的防除氷システムコンセプト   | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 防除氷コーティングの耐久性向上   | 0   | 0        | 1            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 地上評価を可能とする試験法等の設定 | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 計                 | 0   | 0        | 1            | 0        | 0        | 0        | 0        |

表5 論文、投稿、発表、特許リスト

|    | 題目・メディア等               | 時期    |
|----|------------------------|-------|
| 特許 | 高撥水性の塗膜を形成可能な混合塗料の製作方法 | H25.5 |
| 投稿 | なし                     |       |
| 発表 | なし                     |       |

### 3-2 目標の達成度

表 6 に、各要素技術の目標、成果、及びその達成度を示す。表 6 より、全ての要素技術において目標を達成している。

表 6 要素技術とその目標、及び目標設定の妥当性・設定理由

| 要素技術                                           | 目標・指標                                                                                   | 成果                                                                                                                                       | 達成度 |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの有効性を実証する                | 防除氷コーティング、防除氷装置、及び着氷センサを組み合わせた革新的な防除氷システムのコンセプトを立案し、各種地上試験にて、その有効性を実証する                 | 翼最前縁部に高耐久性塗料を、それより後縁部に超撥水性コーティングを適用するという Dual surface <sup>※1</sup> と、電熱ヒータによる除氷システムとを組み合わせた革新的な防除氷システムを提案し、風洞試験にて、7 割の消費電力低減が可能なことを実証した | 達成  |
| 防除氷コーティングの耐久性を向上する                             | 撥水特性：<br>・接触角 $>130^{\circ}$<br>・転落角 $<10^{\circ}$<br>耐久性：<br>・レインエロージョン試験後撥水性を維持していること | 開発品の撥水特性：<br>・接触角 $=154.1^{\circ}$<br>・転落角 $=4.2^{\circ}$<br>耐久性：<br>・レインエロージョン試験後の撥水性に変化は見られず、高い耐久性を確認した                                | 達成  |
| 防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法を設定する | 防除氷コーティングの標準的な評価法、及び、米国耐空性審査基準 <sup>(1)</sup> の着氷条件を再現できる信頼性の高い試験法を設定する                 | 防除氷コーティングの特性を評価するための評価法を設定すると共に、米国航空規格に基づく着氷条件を設定できる風洞試験法を設定した                                                                           | 達成  |

※1 Dual surface：翼前縁部分には耐久性の高い塗膜または素材を適用し、それより後縁表面に撥水性に優れる開発コーティングを適用する方法。「着氷防止構造を有する翼構造体（特開 2010-234989）」に基づく。



#### 4. 事業化、波及効果について

##### 4-1 事業化の見通し

本プロジェクトにて開発した要素技術の1つである「耐久性のある防除氷コーティング」について、航空機への適用を目指し、飛行試験を計画中である。本飛行試験にて実環境での評価を行い、本プロジェクトにおいて評価を行った地上実証試験の結果の妥当性を検証するとともに、開発した防除氷コーティングの性能評価を行う計画である（図8）。

事業化については、飛行試験結果の評価・反映はもちろんのこと、競合技術の分析やサプライチェーンに関する検討等を行い、早期の実現を目指したい。

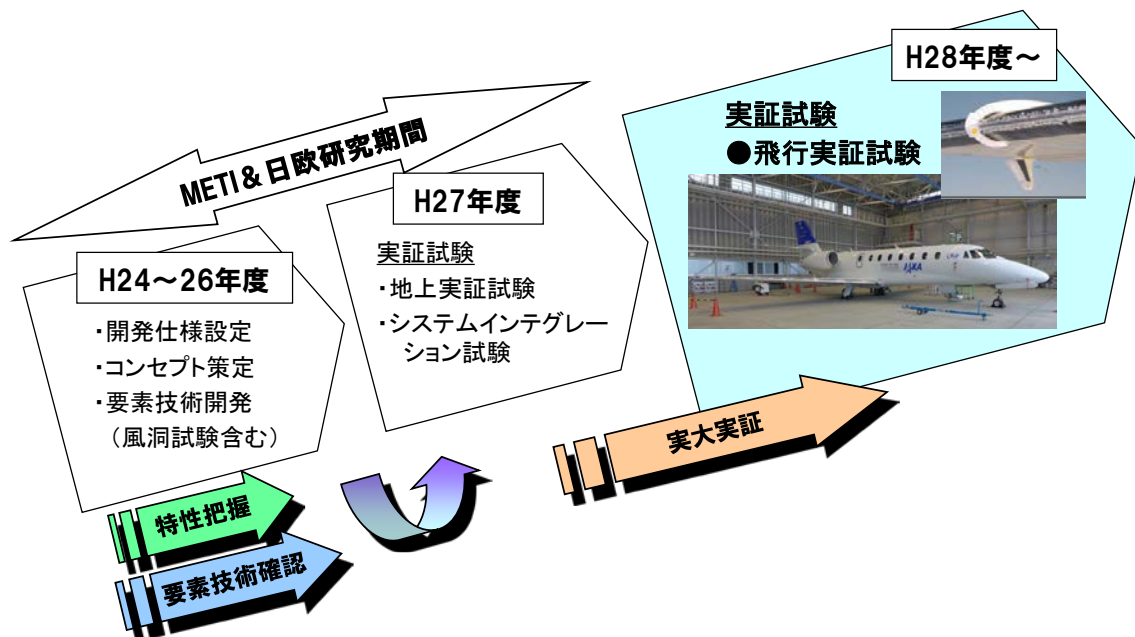


図8 開発ステップ概要

##### 4-2 波及効果

着氷に伴う経済性的損失は、航空機のみならず、風力発電ブレード、送電線、車両、船舶等多くの産業分野に影響を与えている。本プロジェクトで開発した防除氷コーティングは、図9に示す分野等への波及が見込まれる。これらの分野に属する事業者が開発したコーティングの特性や適用のメリットを紹介し、可能性のある分野において、事業化の道筋を策定したい。

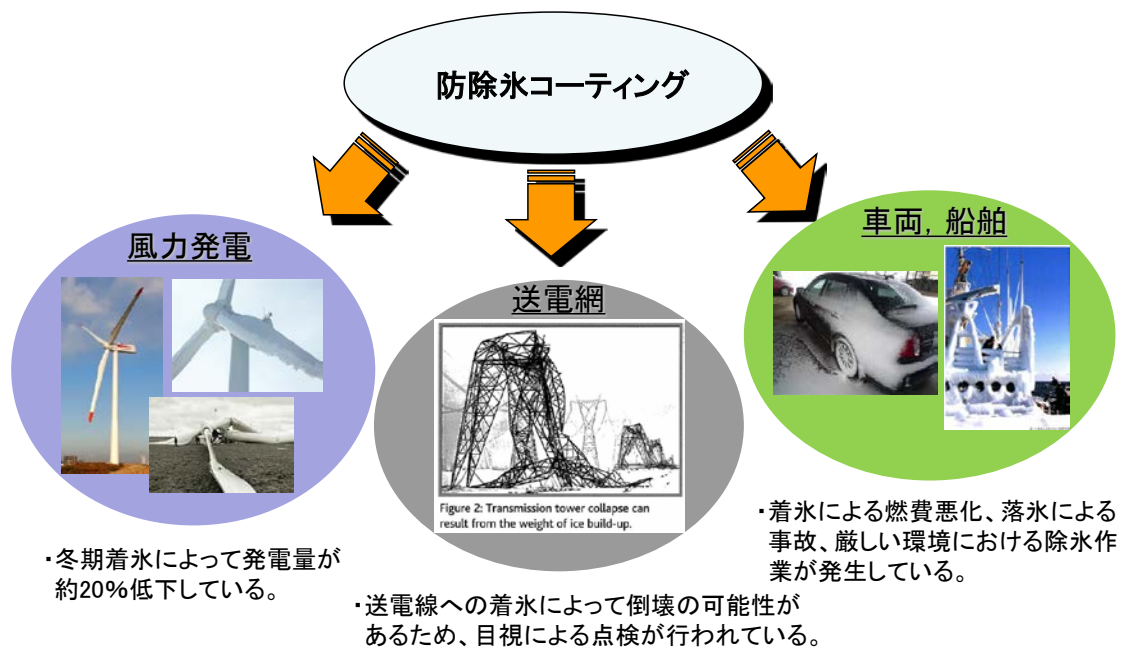
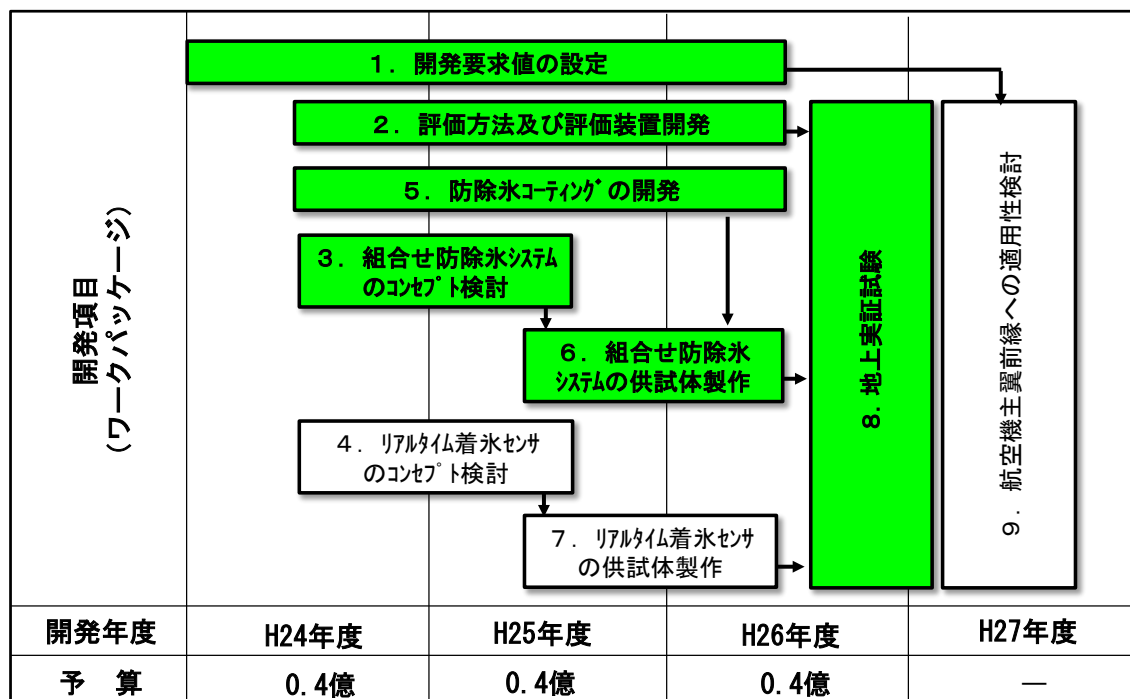


図9 ニーズがあると考えられる分野

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

目標達成のために、本プロジェクトでは、開発項目を図10に示す9つのワークパッケージに分割して取り組んだ。また、効果的に開発を進められるように、国内の参画機関を中心に年3回の技術委員会を開催するとともに、欧州パートナーとも年2回の日欧合同会議を開催し、計画調整／進捗確認／情報共有等を適宜行った。その結果、ほぼ計画通りに開発を進めることができた。



※表中の緑色の部分を、日本側にて主導的に実施した。

※平成 27 年度については富士重工業（株）の持ち出しで実施中である。

図 10 研究開発計画

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、富士重工業株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として宇宙航空研究開発機構と神奈川工科大学が参加した。

研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（富士重工業株式会社 研究部長）を設置するとともに、プロジェクトを計画通り進捗するため、また、開発の方向性を見誤らないため、開発担当機関以外の有識者からなる技術委員会（東京理科大学 山本委員長）を設置した。

図 11 に具体的な実施体制を示す。富士重工業株式会社がプロジェクト全体の統括を行い、研究開発のマネジメントを実施した。先に示した通り、研究開発の目標・計画の妥当性、研究開発の進捗確認、及び技術的内容の精査について、年 3 回の技術委員会を開催し、開発担当機関以外の有識者の評価を頂きながら開発を進めてきた。

これと同時に、欧州パートナーと共に、年 2 回の日欧合同会議を開催し、開発の総合調整や技術に関する詳細な議論を行った。更に、着氷関連のワークショップや航空関連の委員会等に参加し、開発成果の発表等を行った。

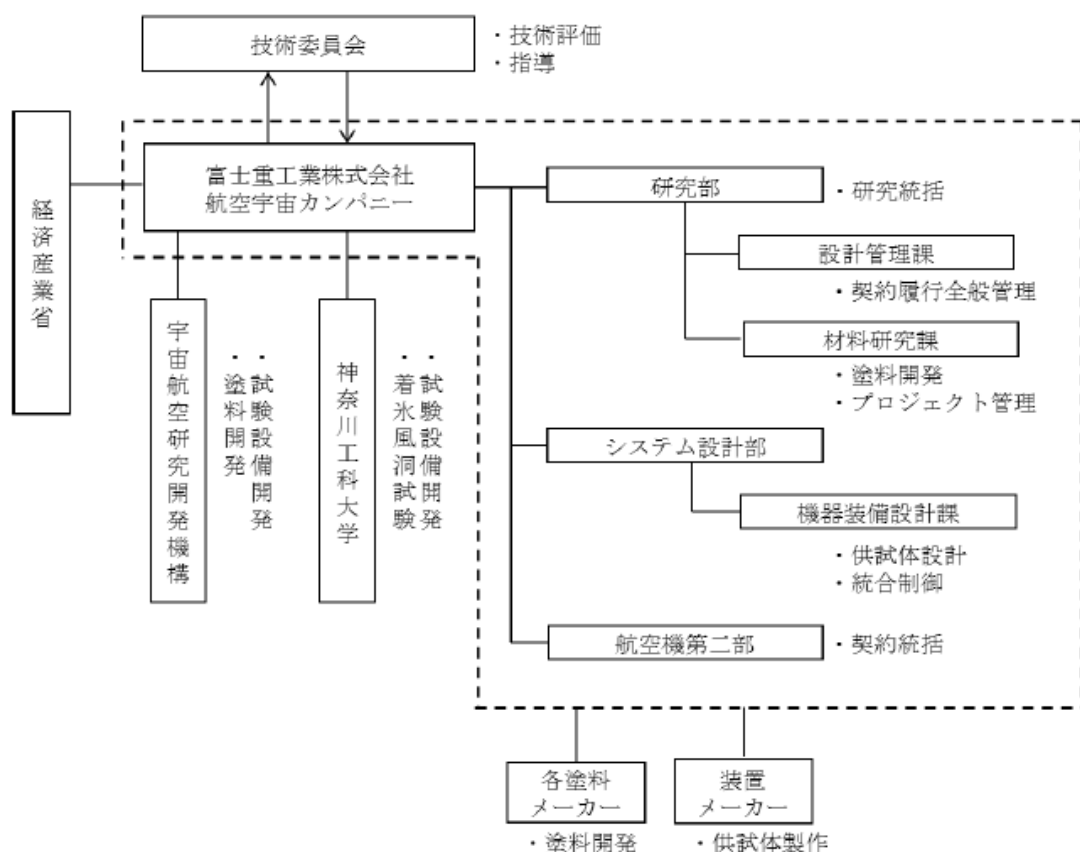


図 11 日本側の実施体制

### 5-3 資金配分

当初の計画通り開発を進捗できたため、資金配分も妥当であったと判断する。

表 7 資金度配分 (単位：百万円，税抜)

| 年度 平成                 | 2 4  | 2 5  | 2 6  | 合計   |
|-----------------------|------|------|------|------|
| 革新的防除氷システム技術開発        |      |      |      |      |
| 革新的防除氷システムコンセプトの有効性実証 | 11.7 | 17.0 | 20.0 | 48.7 |
| 防除氷コーティングの耐久性向上       | 14.5 | 11.0 | 16.0 | 41.5 |
| 防除氷システムの評価法設定         | 11.8 | 10.0 | 1.0  | 22.8 |
| 合計                    | 38   | 38   | 37   | 120  |

#### 5－4 費用対効果

プロジェクトの期間内で、当初の目標を達成できたことを考えると、本研究開発の費用対効果は妥当と判断できる。今後は、早期の実用化を実現して事業的にも優れた費用対効果を実現できるよう開発を進めていく。

#### 5－5 変化への対応

プロジェクトの2年目で、航空機の着氷に関する耐空性基準<sup>(1)</sup>が改訂されたが、当初の目標設定が適切であったため、本基準の変更にも適応可能な防除氷システムを開発することができた。

#### 参考文献

- (1) FAA FAR Part 25 : Federal Aviation Administration Federal Aviation Regulation Part 25。米国連邦航空局が定める規格で、Part 25 は輸送機に関連する規格がまとめられている。

#### 4 航空機用先進システム基盤技術開発 (次世代航空機用降着システム技術開発)

## 目 次

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け .....           | 80  |
| 1－1 事業目的 .....                   | 80  |
| 1－2 政策的位置付け .....                | 80  |
| 1－3 国の関与の必要性 .....               | 84  |
| 2. 研究開発目標 .....                  | 85  |
| 2－1 研究開発目標 .....                 | 85  |
| 2－1－1 全体の目標設定 .....              | 85  |
| 2－1－2 個別要素技術の目標設定 .....          | 87  |
| 3. 成果、目標の達成度 .....               | 89  |
| 3－1 成果 .....                     | 89  |
| 3－1－1 全体成果 .....                 | 89  |
| 3－1－2 個別要素技術成果 .....             | 89  |
| 3－1－3 特許出願状況等 .....              | 93  |
| 3－2 目標の達成度 .....                 | 94  |
| 4. 事業化、波及効果について .....            | 96  |
| 4－1 事業化の見通し .....                | 96  |
| 4－2 波及効果 .....                   | 97  |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ..... | 98  |
| 5－1 研究開発計画 .....                 | 98  |
| 5－2 研究開発実施者の実施体制・運営 .....        | 100 |
| 5－3 資金配分 .....                   | 101 |
| 5－4 費用対効果 .....                  | 103 |
| 5－5 変化への対応 .....                 | 103 |

## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1-1 事業目的

次世代降着システムに向けて、電磁ブレーキシステムと前脚用電動タキシングシステムを開発する事を目的とす

従来のブレーキシステムでは、ホイールと共に回転するカーボンディスク（ロータ）と、車軸に固定されたカーボンディスク（ステータ）とをピストンで押し付けて、カーボンディスク間に摩擦力を発生させることによってブレーキ力を発生させる方式が一般的である。しかし、この方式ではカーボンディスクの磨耗が避けられず、定期的な磨耗状態の点検と頻繁なカーボンディスク交換が必要となっている。本研究では、次世代ブレーキシステムとして、磁性流体 (Magneto-Rheological Fluid) を外部磁界により磁化させ、ディスクとの間にブレーキ力を発生させることにより、寿命が長く整備費用の削減が期待できる主脚用の電磁ブレーキシステムの技術開発を実施する。

磁性流体は、制振ダンパやエクササイズ器具の負荷調整用には既に実用化されているが、これをブレーキに用いた実用例は未だなく、わずかに数例の研究室レベルの研究があるのみであり、本システムは世界的にも類を見ないものとなる見込みである。

現状、機体が地上を走行する際はエンジンの推力を利用しており、ゲートから離れる際にも牽引車でプッシュバックが必要になるなど、地上での燃料費や人件費がエアラインの負担となっている。欧州では既に、地上走行を電動モータで行い、燃料費や人件費を削減する事を目的とした電動タキシングシステムの研究が盛んに行われている。本研究では、次世代地上走行システムとして、高性能な高トルクモータを前脚ホイール内に収めた電動タキシングシステムの技術開発を実施する。

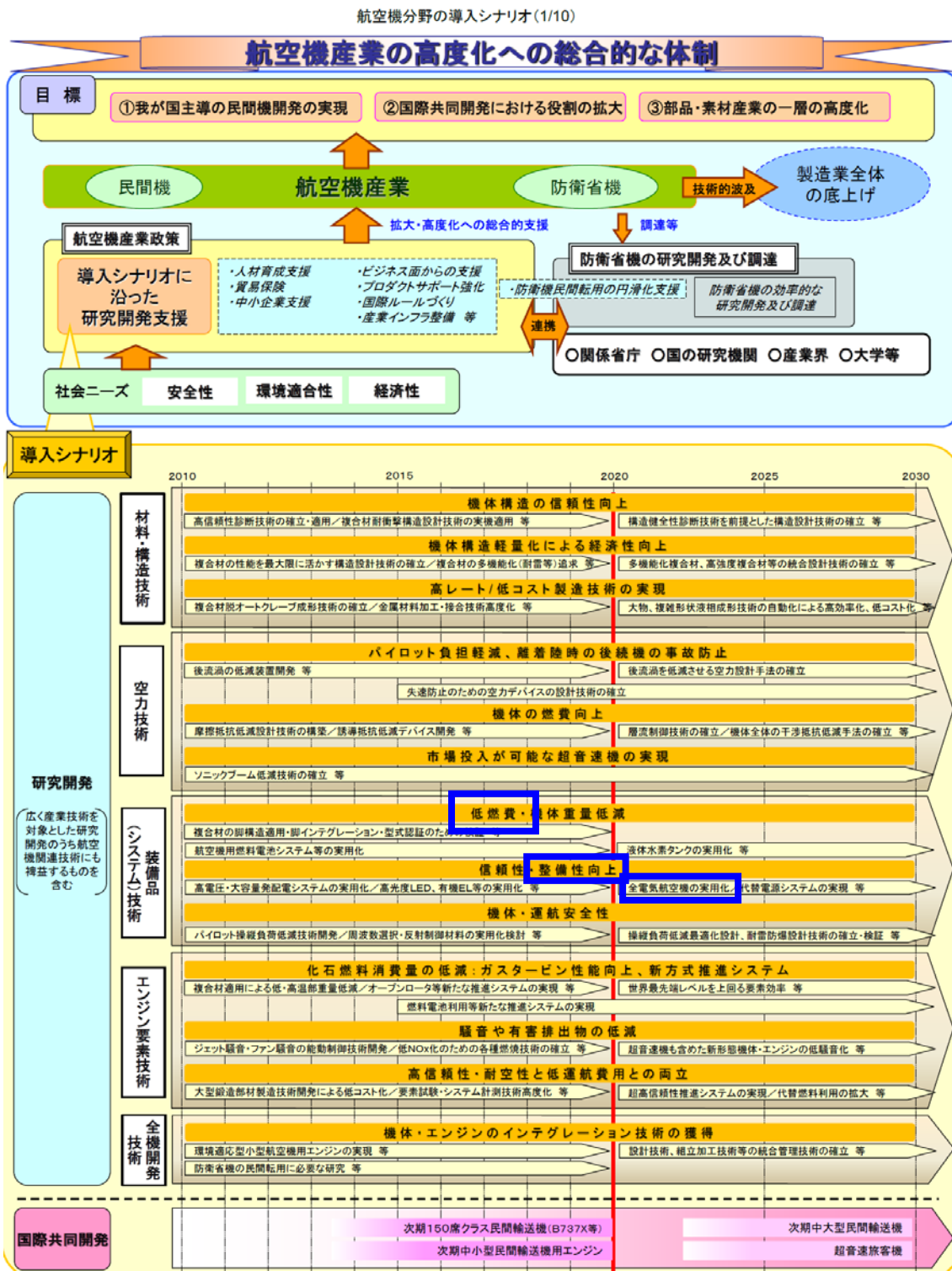
上述の通り、欧州には類似の研究で先行している会社もあるが、いずれも実用化はされておらず、またボーイング 737 或いはエアバス A320 をターゲットとしたものであり、リージョナルジェット向けのシステムは世界に先駆けて実用化できる可能性がある。

### 1-2 政策的位置付け

図 1-1. ～ 1-3. に示す通り、技術戦略マップ 2010 において、低燃費、整備性向上や全電気航空機の実用化は重要課題の一つに位置付けられてお



り、低燃費に寄与する電動タキシングシステムや整備性向上寄与する電磁ブレーキシステムは、上位施策にも合致するものとする。また、これらシステムはいずれも、全電気航空機の実用化にも貢献するものである。



出所：技術戦略マップ2010

図1-1. 航空機分野の導入シナリオ

## 装備品(システム)技術分野 ー概要及び課題ー

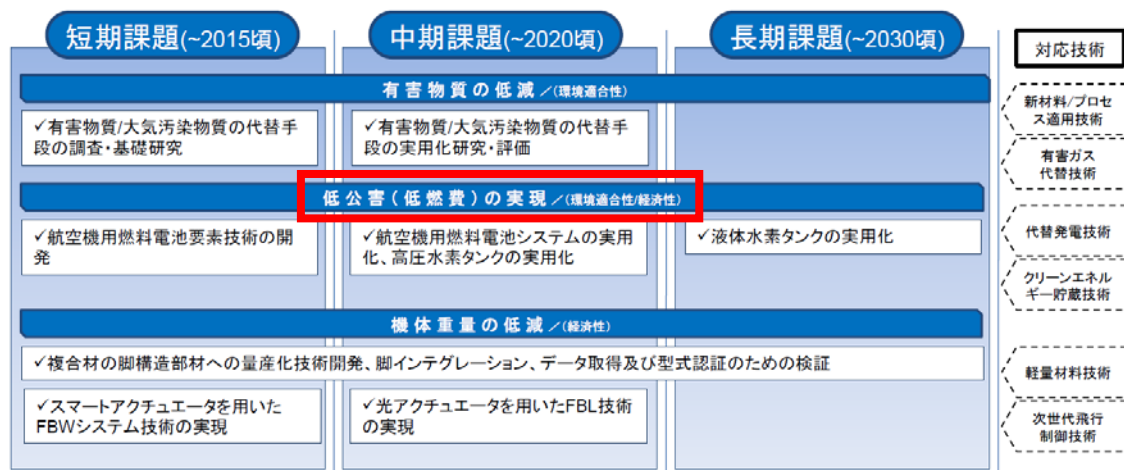
### 技術の概要

航空機用装備品の開発においては、航空機の利便性を向上させつつ、安全性、環境適合性、経済性を高度に両立しなければならない。その際、先進操縦／コックピットシステム等の飛行安全性向上技術、全電氣化を主体とする低燃費化／整備性向上技術、代替発電／クリーンエネルギー貯蔵等の環境性適合技術、ならびに高い安全性と経済性を両立する設計・製造・試験基盤技術等の高度化を図る必要がある。

### 国際競争力

海外の装備品サプライヤはM&Aを繰り返し巨大な企業に成長してきている。その巨大なビジネスを背景にシステム単位で受注してきており、わが国のサプライヤは国際共同開発機においてもビジネス機会が縮小し、技術蓄積の面で不利になる状況が拡大している。さらに、EUでは、航空機の耐環境性改善を戦略的アイテムとし、全電氣式航空機などの研究開発に国家レベルで巨額の予算を投入して推進しており、技術レベルの差がますます増大しつつある。

### 主要技術課題(1/3)



出所：技術戦略マップ

図1-2. 装備品(システム)技術分野ー概要及び課題ー

## 主要技術課題(2/3)

航空機分野の導入シナリオ(7/10)



出所：技術戦略マップ2010

図1-3. 装備品（システム）技術分野一概要及び課題一

### 1－3 国の関与の必要性

一般的に航空機ビジネスは投資から回収までの期間が他業種に比べて極めて長く、事業上のリスクが大きい。電磁ブレーキシステムの開発は世界に類を見ない研究であり、特に実用化までに長い時間がかかる事が予想され、事業上のリスクが大きい。それに加えて電磁ブレーキシステムは技術開発要素も多いため、技術上のリスクも大きい。

電動タキシングシステムは、地上走行中の燃料消費や CO2 排出を大幅に削減するもので、地球環境保全の観点からも国を挙げて取り組むべき課題であり、また一方、従来の航空機にはないシステムであり、技術的課題が多いだけでなく、型式承認についてはまず考え方・方法から確立する必要がある、国の支援なくしては解決困難な課題も多い。

このように、事業上、技術上のリスクが大きいこれら技術開発は、国の支援が求められ、また認証の問題などもあり国を挙げての取り組みが必要と考えられる。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

#### 2-1-1 全体の目標設定

全体の目標を表2-1. に示す。

表2-1. 全体の目標

| 目標・指標                                                                                                                                                                                   | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>全電気航空機などの流れにマッチした次世代の降着システムの開発に向けて、下記の要素技術の実用化に向けての目途づけを行う。</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 電磁ブレーキシステム</li><li>2. 電動タキシングシステム</li></ol> <p>各要素技術の個別の目標は2-1-2項で詳述する。</p> | <p>技術戦略マップ等にも示される通り、航空機の低燃費化や整備性向上は重要な課題であり、また航空機の電氣化ひいては全電気航空機の実用化は市場全体の流れである。</p> <p>脚システムの中で、使用時に激しく摩耗するブレーキは特に整備コストがかかり、整備性向上のために改善が必要な装備品である。現在多くのディスクブレーキは油圧力で駆動され、全電気航空機に向けた流れの中で電動モータで駆動されるタイプが実用化されつつあるが、ディスクを接触させてブレーキ力を得るという点では従来のものと変わりはなく、整備コストがかかる事に大きな変化はない。全電気航空機に向けた流れに合わせ、かつ非接触式とする事で摩耗を極端に減らせる全く新しいシステムとして、電磁ブレーキシステムを開発する事を目指す。</p> <p>現在の航空機は一般的に、地上走行時にはエンジンを使用するが、ジェットエンジンは高高度を高速で飛行するのに最適のように設計されていて地上を低速で走行する時の燃費は非常に悪く、大量の燃料を消費し、CO2</p> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>などの排出量も多い。空港周辺の環境の観点からも、地上走行時の排気は問題視されており、特に環境問題に対する意識の高いヨーロッパでは既に電動タキシングシステムの開発が行われており、将来は標準装備品となる可能性もある。また後進可能なタキシングシステムを導入することで、自力でのプッシュバックが可能となり、タグカーやそれに付随する人員・作業が削減でき、エアラインの地上ハンドリングコストの削減にも貢献できる。ヨーロッパの先行他社がいずれもボーイング 737 或いはエアバス A320 といった単通路機を対象にしているため、先行・競合のないリージョナルジェット機向けの電動タキシングシステムを世界に先駆けて開発し、住友精密工業が既に設計・製造している同クラス機の脚構造・ステアリング制御システムや上述の電磁ブレーキシステムと組み合わせた新たな脚システムを構築し、Tier-1 サプライヤ（機体メーカーに対する一次サプライヤ）として供給する事を目指す。</p> |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

2-1-1 項の目標を達成するため、各個別要素技術に対して表 2-2. の通り目標を設定した。

表 2-2. 個別要素技術の目標

| 要素技術       | 目標・指標              | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                       |
|------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電磁ブレーキシステム | 電磁流体の基礎特性データを取得する。 | 電磁流体 (Magnetorheological Fluid) は未知の部分も多く、特にブレーキに使用する研究例は少なくブレーキ力を発生させる手段としてのデータがほとんどないため、電磁流体の磁化特性（与えた磁場に対してどれだけ磁化するか）と、印加磁場、回転速度等に対して発生するブレーキトルクのデータを取得し、電磁流体を評価すると共に、以後のブレーキ開発のための基礎データとする。 |
|            | ブレーキ試験供試体を設計、製作する。 | 上記で得られた特性データを活用し、実機相当のサイズのディスク 1 枚をもったブレーキを設計する事で、ブレーキ設計技術を向上させる。また下記試験のための供試体を得る。                                                                                                             |
|            | ブレーキトルク確認試験を実施する。  | 上記で製作したブレーキ供試体を用いて試験を実施し、得られるトルクを確認し、実機相当の枚数（12 枚と想定）のブレーキが必要トルクを発生させられる可能性があるか検証す                                                                                                             |

|             |                                              |                                                                                    |
|-------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                              | る。併せて、発熱や非使用時のトルクを計測し、以後のブレーキ開発のための課題を抽出する。                                        |
| 電動タキシングシステム | 使用するモータについて、形式のトレードオフスタディと基礎設計を行う。           | 機体を自走させるのに必要なモータの仕様を明確化し、その仕様を満足するモータの概念検討を行い、最適なモータの形式を選定し、また基礎設計を行い、供試体設計の基礎とする。 |
|             | 想定する機体を駆動できる出力をもち、前脚ホイール内に収まるモータ供試体を設計、製作する。 | 上記の基礎設計に基づいてモータのプロトタイプの詳細設計を行い、供試体を製作し、設計を検証するとともに、下記の試験のための供試体を得る。                |
|             | 走行状態を模擬した試験を実施する。                            | 走行状態を模擬した試験を実施する事で、課題を抽出し、以後の電動タキシングシステムの開発の基礎とする。                                 |



### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

電磁ブレーキシステムについては、実物大のディスク 1 枚をもつブレーキ試験供試体を用いて試験を行った。試験結果の分析から、試験供試体では磁気飽和が起きており、磁気回路の設計を最適化しディスクを多板とすれば、想定される必要トルクの 95%のトルクが得られる見込みを得た。今後、電磁流体の改善などを加えれば、必要なトルクが得られる目途はついたと考えられる。

電動タキシングシステムについては、現時点で確認できた出力は仕様として設定したモータ出力の 94%であり、寸法も外径は仕様寸法に収まっているものの長さが 15mm オーバーしているが、ほぼ必要なサイズ・出力のモータを得られており、一定の目途はついたと考えられる。

##### 3-1-2 個別要素技術成果

###### (1) 電磁ブレーキシステム

電磁ブレーキシステムについて、以下の成果を得た。

- ・リージョナルジェットに搭載する事を想定し、電磁ブレーキシステムに必要なサイズ、ブレーキ力、吸収エネルギーなどの仕様を検討、設定した。
- ・既存の電磁流体数種について、磁化特性（与えた磁場の強さに対してどれだけ磁化されるか）とブレーキ力の基礎データを取得した。ブレーキ力は、電磁流体中で回転する円板に対して磁場を印加し、回転数、磁場強度とトルクの関係性を求めた。
- ・上記で設定した仕様の寸法に収まるブレーキディスクの直径と枚数（12 枚と想定）のブレーキにて得られるトルクを解析によって求め、必要なトルクを得られる可能性のある事を確認した。
- ・実機サイズのロータを 1 枚有する MR ブレーキにてブレーキトルク確認試験を実施した。磁気飽和の影響を考慮し、実機で想定しているロータ枚数（12 枚）に換算すると、必要な値の 95%のトルクを得られる可能性がある。ブレーキトルク確認試験の様子を図 3-1. に示す。
- ・電磁流体の粘性により、ブレーキを使用していない時にもトルクが発生するが、このトルクを低減する方法を考案し、試験を実施したが、効果は確認できなかった。ただし、原因調査の結果、磁界のかけ方に問題があることが分かったため、改善の方向性は見出せた。
- ・電磁流体の温度による磁化特性の違いを利用して移動させ、熱せられた部

分を冷却部に送り、冷却の補助とするアイデアを試験で実証しようと試みたが、循環効果は確認できなかった。試験装置の磁界分布を再設計することで循環を実現できる可能性はあるが、限定的な循環・冷却効果しか期待できないため今後は、MR 流体の冷却について別の方法も検討する必要があることが分かった。

- ・試験にて得られたブレーキの応答性などのデータを用いて、想定している機体サイズにて MR ブレーキシステムの Anti-skid 性能解析を実施し、十分な Anti-skid 性能が得られる可能性があることを確認した。
- ・上記で試験した既存の電磁流体がいずれも純鉄微粒子を用いているのに対して、新たに高い磁気特性をもつ合金の微粒子を製造し、磁化特性を測定した。10%程度の磁化特性の向上を期待していたのに対して、常温では鉄（Fe）微粒子と性能に大差はない事が分かったが、温度上昇による性能低下が鉄（Fe）微粒子に比べて非常に小さく、広い温度範囲で高いブレーキ力を発揮できる可能性のあることが確認できた。更に、この微粒子と耐熱性の高い油を用いた新たな電磁流体を作成した。電磁流体としての評価は未実施であるが、油の耐熱性が上がることにより、既存品に比べて高い温度域でも使用可能となる事が期待される。

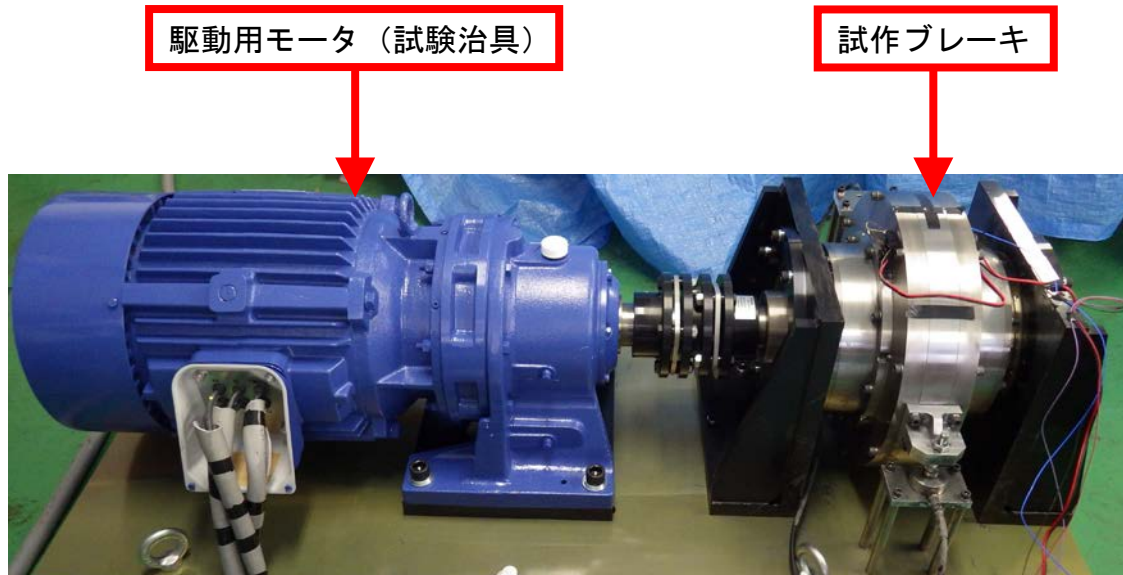


図 3 - 1. ブレーキトルク確認試験供試体

## (2) 電動タキシングシステム

電動タキシングシステムについて、以下の成果を得た。

- ・リージョナルジェットの前輪ホイール内にモータを装着する事を想定した電動タキシングシステムの仕様を検討し、モータのサイズ、出力など必要な仕様を設定した。

- ・ 各種のモータ方式の間でトレードオフスタディを実施し、本用途には巻線界磁形フラックススイッチングモータが最適、との結論を得た。
- ・ 上記で選択した形式で、上記仕様を満たすモータと減速機の仕様を検討し、構造案を得た。
- ・ 上記仕様に基づき、実機装着を想定した形状・大きさのモータの試験供試体（プロトタイプ）を設計、製作した。寸法については、外径は設定した仕様通りとできたが、長さは仕様を 15mm 越えたものとなった。試験供試体の外観を図 3-2 に示す。
- ・ 上記モータを駆動するモータ・ドライバを設計、製作した。
- ・ 上記モータとドライバを組み合わせ、モータを駆動できることを確認した。
- ・ 無負荷状態で、仕様から算出した必要最大回転速度でモータを回転させることを確認した。
- ・ 仕様から算出した必要トルクの 94%まで発揮できることを確認した。
- ・ 高トルク印加時に計測系の誤作動が発生したため、仕様トルクが発揮できることの確認には至らなかったが、必要なトルクにかなり近い値まで発揮できており、今後の改善により必要なトルクが得られる目途はついたと考えられる。

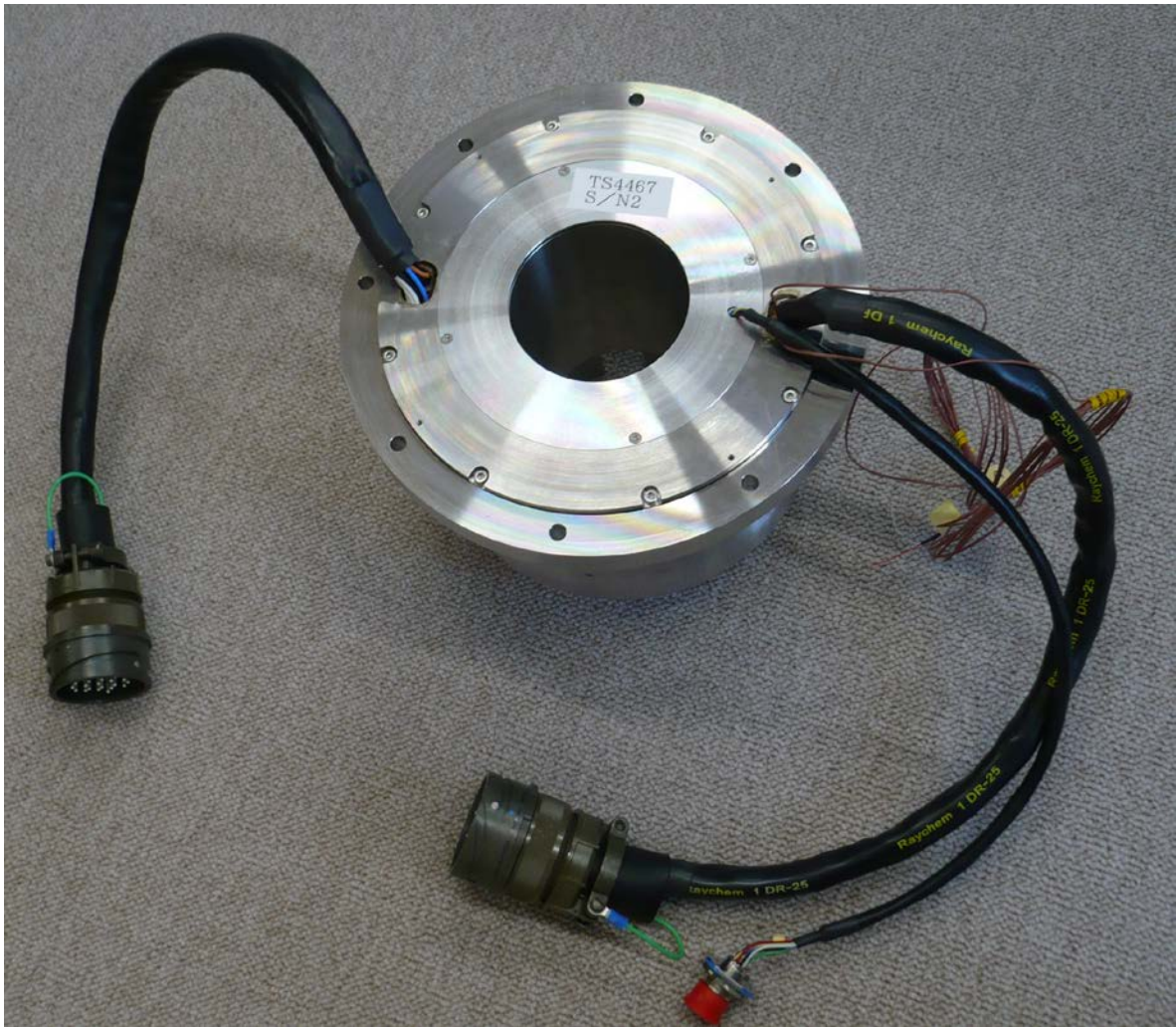


図 3－2. プロトタイプモータ

### 3-1-3 特許出願状況等

本研究に関する特許・論文等の件数は表3-1. の通り、0件である。

表3-1. 特許・論文等件数

| 要素技術        | 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数（出願を含む） | 特許権の実施件数 | ライセンス供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|-------------|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 電磁ブレーキシステム  | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 電動タキシングシステム | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 計           | 0   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |

本研究に関する論文、投稿、発表、特許は、表3-2. に示す通り0件である。

表3-2. 論文、投稿、発表、特許リスト

|    | 題目・メディア等 | 時期 |
|----|----------|----|
| 論文 | なし       | —  |
| 投稿 | なし       | —  |
| 発表 | なし       | —  |

この他、電磁ブレーキシステムの研究開発にて実物大のディスク1枚を持つブレーキの試験供試体を、電動タキシングシステムの研究開発にてプロトタイプのコモータを、それぞれ製作した。また、電磁ブレーキシステムについて、エアバス社へのプレゼンテーションを実施した。

### 3-2 目標の達成度

本研究の目標に対する成果・達成度を表3-3. に示す。

表3-3. 目標に対する成果・達成度の一覧表

| 要素技術        | 目標・指標                                        | 成果                                                                                                           | 達成度  |
|-------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 電磁ブレーキシステム  | 電磁流体の基礎特性データを取得する。                           | 電磁流体の磁化特性（与えた磁場の強さに対する磁化の度合い）と、回転速度・与えた磁場の強さに対する発生トルクの基礎特性データを取得した。                                          | 達成   |
|             | ブレーキ試験供試体を設計、製作する。                           | ブレーキ試験供試体を設計、製作した。                                                                                           | 達成   |
|             | ブレーキトルク確認試験を実施する。                            | ブレーキ試験を実施し、実機サイズのディスク1枚のブレーキで得られるトルク値と、非使用時のトルクや発熱の傾向のデータを取得した。                                              | 達成   |
| 電動タキシングシステム | 使用するモータについて、形式のトレードオフスタディと基礎設計を行う。           | モータに必要な仕様を検討、設定した。<br>モータ形式のトレードオフスタディを実施し、巻線界磁形フラックススイッチングモータが最適、との結論を得た。<br>基礎設計を行い、仕様を満足するモータが設計できる目途を得た。 | 達成   |
|             | 想定する機体を駆動できる出力をもち、前脚ホイール内に収まるモータ供試体を設計、製作する。 | モータのプロトタイプを製作した。外径は目標を達成したが、長さは仕様を15mm越え、出力は現                                                                | 一部達成 |

|  |                   |                                                                                                                                                                                                |     |
|--|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  |                   | <p>時点で仕様の 94%と、目標に到達していない。</p> <p>目標出力に到達しなかったのはモータがセンサに及ぼすノイズが原因である事が判明しており、センサをモータから離すと共に間に非磁性材料をはさむ事で解決できる目途がついている。これにより寸法が目標を上回ったが、将来はセンサの小型化により目標寸法を満たしつつ目標出力を発揮できるモータが製作できる見通しを得ている。</p> |     |
|  | 走行状態を模擬した試験を実施する。 | <p>3年間を想定していた研究開発が2年間で終了したため、走行模擬試験は未実施である。</p>                                                                                                                                                | 未達成 |

## 4. 事業化、波及効果について

### 4-1 事業化の見通し

一定の目途のついた電磁ブレーキシステム、電動タキシングシステムであるが、電磁ブレーキシステムについてはブレーキに適合した電磁流体の開発、非使用時の抵抗低減、冷却機構の確立など、電動タキシングシステムについてはモータの小型軽量化、高出力化、冷却機構の確立などの課題がある。図4-1. に示すようなスケジュールでこれらの課題を解決し、実証試験を行い、製品化することを想定している。

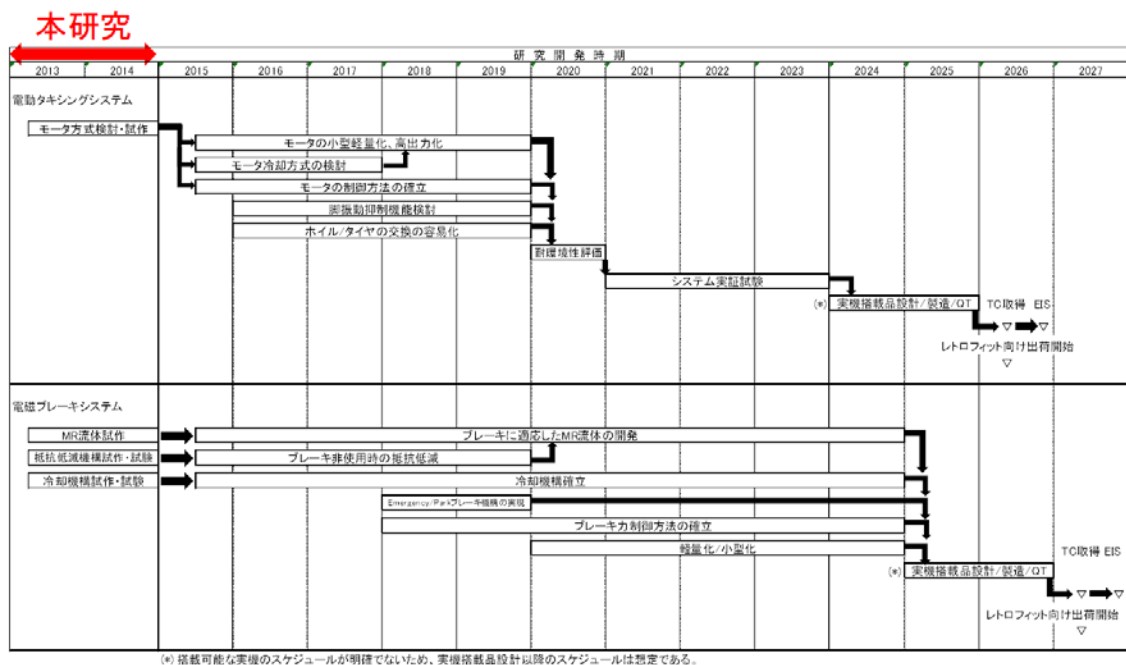


図4-1. 事業化までの想定スケジュール



## 4-2 波及効果

本研究のアウトカムのイメージを図4-2. に示す。電磁ブレーキシステム、電動タキシングシステムともに、航空機以外に鉄道や自動車への適用の可能性がある。特に電磁ブレーキシステムはこれらの用途にも前例のないものであり、波及効果が期待できる。

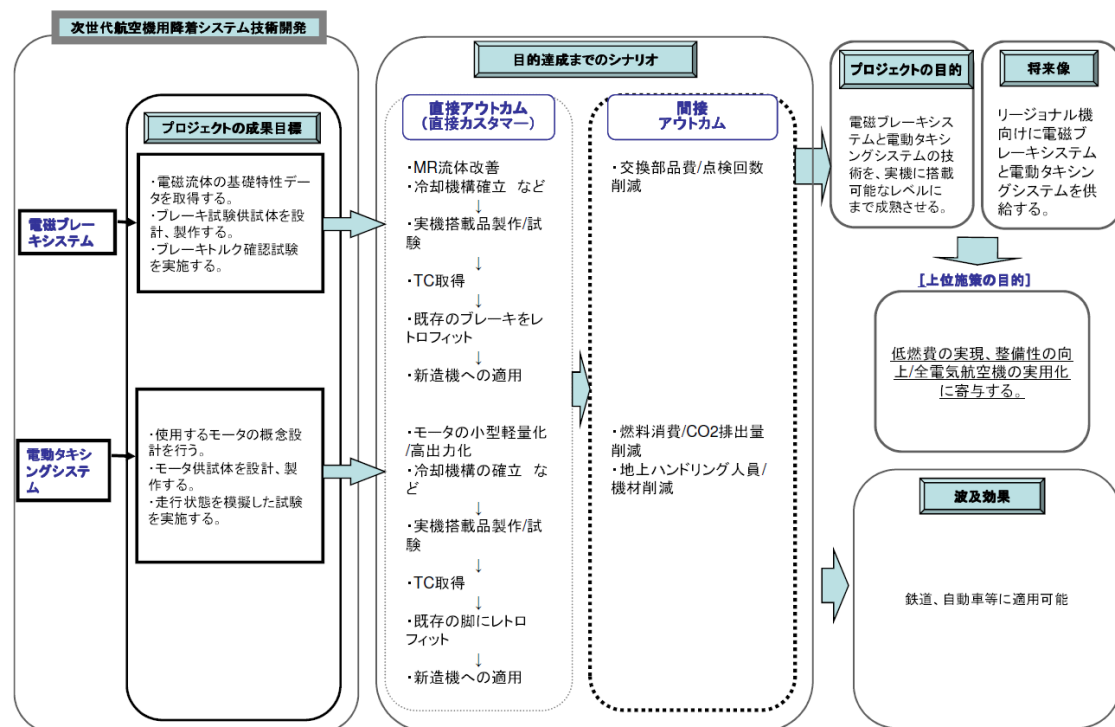


図4-2. 本プロジェクトのアウトカム

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

当初の研究開発計画は表5-1. の通りであったが、各年度の計画は25年度研究着手時点での同年度計画が表5-2.、26年度研究着手時点での同年度計画が表5-3. の通りである。当初は3年間を想定していた研究期間の2年間への変更（契約は年度ごと）などに伴い、若干のスケジュールの見直しと、電動タキシングシステムにおける機体インターフェース調整、電磁ブレーキシステムと電動タキシングシステム両方におけるシステム試験など、一部の実施項目を省略している。

電磁ブレーキシステムについては、25年度に電磁流体の基本特性を取得する試験を行い、26年度には実機相当のディスク1枚をもつブレーキの供試体を製作し、発生トルクを確認する試験を実施した。

電動タキシングシステムについては、25年度にモータの形式のトレードオフスタディを含む基礎設計を行い、26年度にモータの詳細設計と試験供試体（プロトタイプ）の製作を行った。

表5-1. 研究開発計画（当初計画）

| 項目           | 平成25年度 |     |       |     |        |     |       |     |
|--------------|--------|-----|-------|-----|--------|-----|-------|-----|
|              | 4-6    | 7-9 | 10-12 | 1-3 |        |     |       |     |
| 開発着手         |        | ▽   |       |     |        |     |       |     |
| 次世代ブレーキシステム  |        | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| 磁気回路解析       |        | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| 基本特性試験装置     |        |     | →     | →   |        |     |       |     |
| 基本特性試験       |        |     |       | →   |        |     |       |     |
| 電磁流体調査       |        | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| 地上走行システム     |        | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| モータの基礎設計     |        | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| 報告書提出        |        |     |       | ▽   |        |     |       |     |
|              |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 項目           | 平成26年度 |     |       |     | 平成27年度 |     |       |     |
|              | 4-6    | 7-9 | 10-12 | 1-3 | 4-6    | 7-9 | 10-12 | 1-3 |
| 次世代ブレーキシステム  |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 電磁ブレーキ設計試作   | →      | →   | →     | →   |        |     |       |     |
| 制御部設計製作      |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 電磁流体の開発      |        |     |       |     |        |     |       |     |
| システム設計/試験    |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 地上走行システム     |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 試験用脚設計製作     |        |     |       |     |        |     |       |     |
| モータ/制御部試作    |        |     |       |     |        |     |       |     |
| モータ/制御部試験    |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 試験供試体製作      |        |     |       |     |        |     |       |     |
| システム設計/試験    |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 機体インターフェース調整 |        |     |       |     |        |     |       |     |
| 報告書作成        |        |     |       |     |        |     |       |     |

表 5－2. 研究開発計画（平成 25 年度分）

| 項目          | 平成25年度 |     |        |     |
|-------------|--------|-----|--------|-----|
|             | 4-6    | 7-9 | 10-12  | 1-3 |
| 開発着手        |        |     | ▽      |     |
| 次世代ブレーキシステム |        |     | システム設計 | →   |
| 磁気回路解析      |        |     | →      |     |
| 基本特性試験装置    |        |     | →      |     |
| 基本特性試験      |        |     |        | →   |
| 電磁流体調査      |        |     | →      |     |
| 地上走行システム    |        |     | システム設計 | →   |
| モータの基礎設計    |        |     | →      |     |
| 報告書提出       |        |     |        | ▽   |

表 5－3. 研究開発計画（平成 26 年度分：平成 26 年度初め時点）

| 項目          | 平成26年度 |     |       |     |
|-------------|--------|-----|-------|-----|
|             | 4-6    | 7-9 | 10-12 | 1-3 |
| 次世代ブレーキシステム |        |     |       |     |
| 電磁ブレーキ設計    | →      | →   | →     |     |
| 制御部設計       | →      | →   | →     |     |
| 電磁流体の開発     | →      | →   | →     |     |
| 試験供試体製作     |        |     |       | →   |
| システム設計      | →      | →   | →     |     |
| 地上走行システム    |        |     |       |     |
| モータ詳細設計     | →      | →   |       |     |
| 制御部設計       |        |     | →     |     |
| 試験供試体製作     |        |     |       | →   |
| システム設計      | →      | →   | →     |     |
| 試験用脚設計      | →      | →   | →     |     |
| 報告書作成       |        |     |       | →   |

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、住友精密工業株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として信州大学が、主要な協力先（外注先）として多摩川精機が参加した。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（住友精密工業株式会社航空宇宙技術部 高田正之）を設置した。

図5-1. 研究開発実施体制（当初計画）

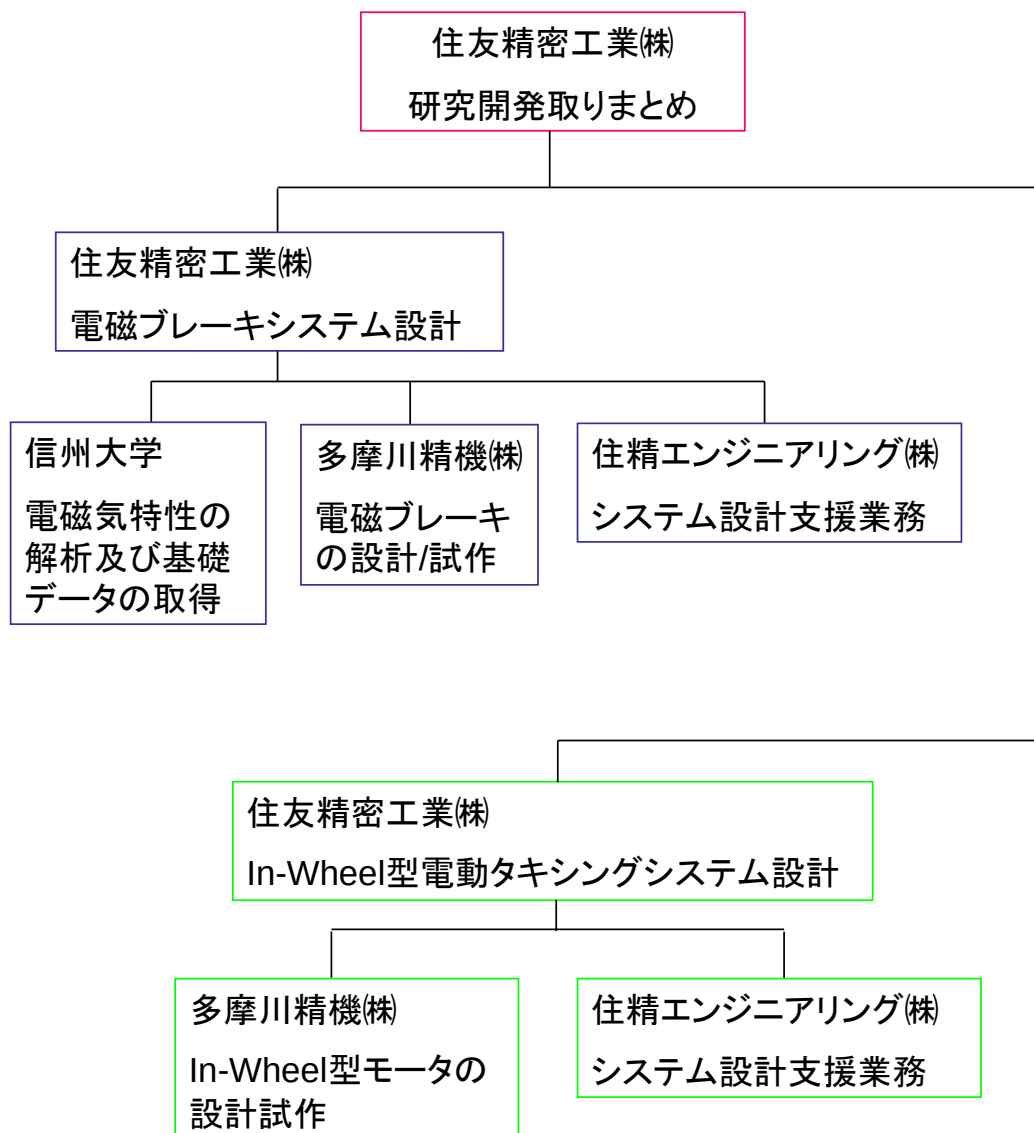
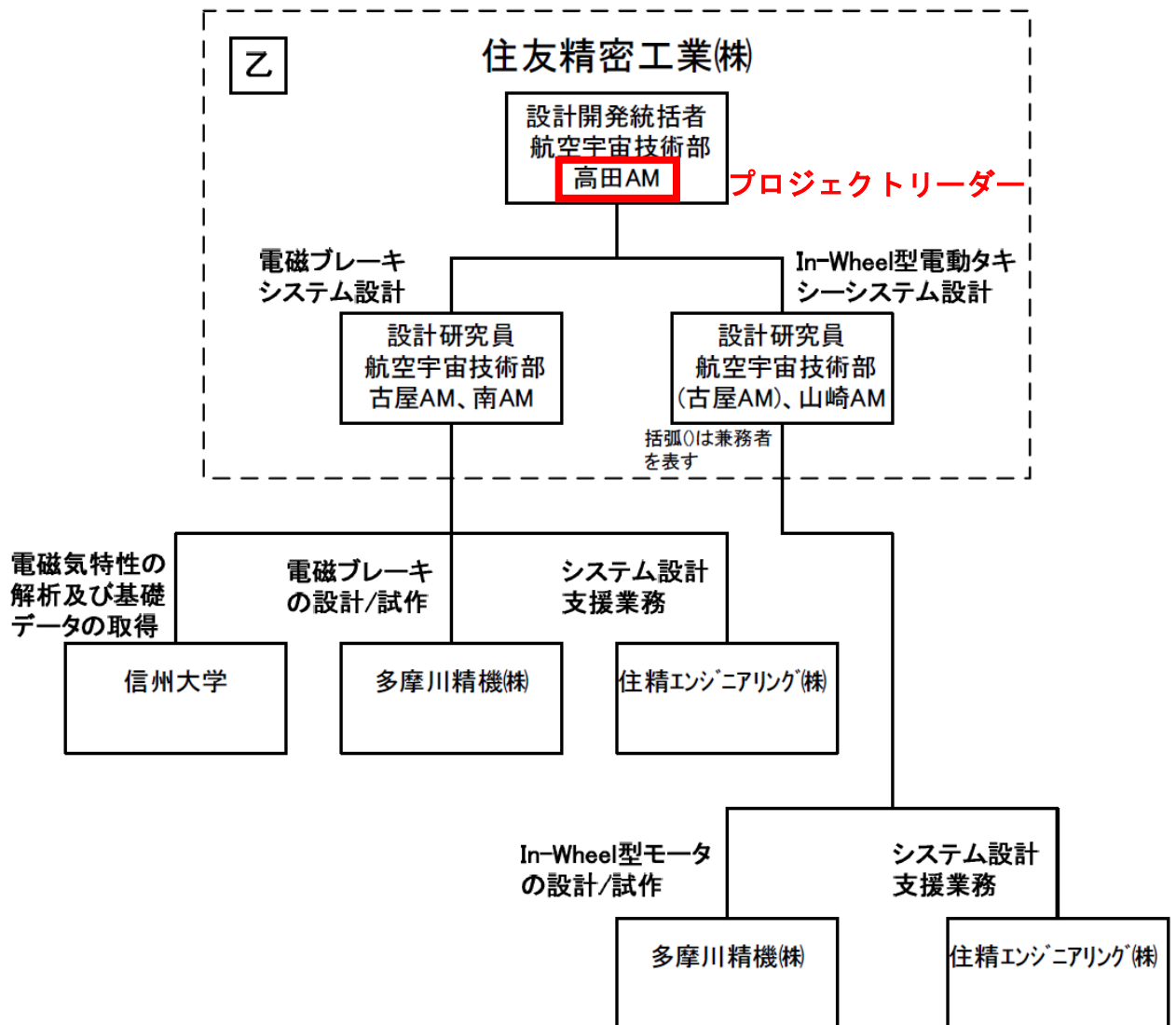


図 5－2. 研究開発実施体制（平成 26 年度当初）



### 5－3 資金配分

資金配分は表 5－4. の通りである。電磁ブレーキシステムはブレーキの試作と試験の実施、非使用時のトルク低減の供試体製作と試験、冷却方法の案出・供試体製作と試験、電動タキシングシステムはモータ形式の検討、設計と製作、といずれの開発項目もほぼ予定の成果を挙げており、資金の配分は適切であったと考える。

表 5－4．資金度配分 （単位：百万円、税込）

| 年度 平成           | 2 5 | 2 6 | 合計  |
|-----------------|-----|-----|-----|
| 電磁ブレーキシステム研究開発  | 26  | 54  | 80  |
| 電動タキシングシステム研究開発 | 13  | 71  | 84  |
| 合計              | 39  | 125 | 164 |

#### 5－4 費用対効果

電磁流体に知見を有する信州大学や電動モータの設計・製作に豊富な経験を有する多摩川精機とチームを組む事で、費用に対する効果を最大化できたと考える。

#### 5－5 変化への対応

事業計画、目標、開発体制等の修正を要するような情勢の変化はなかった。研究開発活動の一環として、More Electric Aircraft やタキシングシステムに関する国際会議への出席や機体メーカーへの紹介を通じて情報収集を行い、電磁ブレーキシステムや電動タキシングシステムに対する高い需要と関心がある事を確認し、また対応すべき情勢の変化のない事を確認した。

## 5 航空機用先進システム基盤技術開発 (次世代航空機エンジン用冷却装置の研究開発)



## 目 次

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け .....           | 104 |
| 1－1 事業目的.....                    | 104 |
| 1－2 政策的位置付け .....                | 105 |
| 1－3 国の関与の必要性 .....               | 106 |
| 2. 研究開発目標 .....                  | 107 |
| 2－1 研究開発目標 .....                 | 107 |
| 2－1－1 全体の目標設定 .....              | 107 |
| 2－1－2 個別要素技術の目標設定 .....          | 107 |
| 3. 成果、目標の達成度 .....               | 109 |
| 3－1 成果.....                      | 109 |
| 3－1－1 全体成果.....                  | 109 |
| 3－1－2 個別要素技術成果.....              | 109 |
| 3－1－3 特許出願状況等 .....              | 125 |
| 3－2 目標の達成度 .....                 | 126 |
| 4. 事業化、波及効果について .....            | 128 |
| 4－1 事業化の見通し.....                 | 128 |
| 4－2 波及効果.....                    | 129 |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 ..... | 130 |
| 5－1 研究開発計画 .....                 | 130 |
| 5－2 研究開発実施者の実施体制・運営 .....        | 131 |
| 5－3 資金配分.....                    | 131 |
| 5－4 費用対効果 .....                  | 131 |
| 5－5 変化への対応 .....                 | 131 |

## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1-1 事業目的

次世代航空機エンジン用潤滑油冷却装置\_\_Advanced Structural Surface Cooler (ASSC)を開発する。ASSCの基となる技術はサーフェスクーラーと呼ばれる熱交換器である。サーフェスクーラーとは、熱交換器の内部を流れるエンジンの潤滑油をその表面に流れるファン・エアによって適切な温度に保つタイプの熱交換器である。なお、サーフェスクーラーと呼ばれる航空機エンジン用熱交換器は従来エンジン外周のファンケースに搭載されているが、Advanced Structural Surface Coolerは、従来のファンケースからエンジン本体の外殻を構成するコアフェアリングに搭載して従来と同等の性能を有する「コアフェアリングと一体化された熱交換器」を設計・製造することで、ファンケース重量を低減し燃費向上及びエミッション低減を可能とし、航空機のCO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>排出量低減、騒音低減及び燃料消費率低減を図ることを事業目的とする。

## 1-2 政策的位置付け

本研究では、航空機エンジン重量を低減し燃費向上及びエミッション低減を目標としており、ガスタービン性能向上に資するものである。本研究の成果により次世代航空機エンジンから排出される有害物質低減され、よりクリーンな生活環境を提供する。

技術戦略マップ（2010）



本研究は、日欧共同の国際研究開発のテーマとして、英国の Rolls-Royce 社と共同開発を行っており、Rolls-Royce 社が、欧州 Clean Sky Project として進めている Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジン開発の一部として実用化を目指している。

### 1－3 国の関与の必要性

新興国の経済発展を背景に、世界の旅客・貨物輸送量・距離は、成長・延伸し続ける状況において、航空機旅客輸送は毎年５％の成長が見込まれており、航空機の需要が大幅に増加していくことが確実視されている。一方で航空機のビジネスは投資から回収までの期間が他産業と比べ非常に長く、民間企業にとって研究開発や、事業上の大きなリスクを伴う。このため、航空機産業は、欧米だけでなく、中国のような新興国でも国の基幹産業の一つとして戦略的かつ積極的に支援し技術開発、産業発展を国家が主導している。

本事業は、当社が競争力を保持する航空機エンジン用熱交換器の設計開発・製造技術を更に発展進化させて英国が開発する次世代航空機エンジンに適用し、低燃費な高性能エンジンの実現に取り組み、国際共同開発において高度な開発・設計・製造能力を有するパートナーとしての地位を確保するものである。

本事業の成果は航空機の燃費改善につながるものであり、航空機から排出される二酸化炭素を減らし地球環境保護と温暖化防止に貢献するばかりでなく、航空機の直接運航コストを改善することによって経済発展効果にも貢献するものである。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

#### 2-1-1 全体の目標設定

表 1. 全体の目標

| 目標・指標                                                                      | 設定理由・根拠等                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 従来のサーフェイスクーラーより小型軽量で高性能な ASSC を開発する。                                       | 昨今の民間旅客機用エンジンはエンジン内部の各種機器での発熱量が大幅に増大している。このためエンジンの排熱管理に利用される潤滑油の冷却装置（オイルクーラー）の冷却能力増大は重要な技術課題となっている。 |
| エンジン外周のファンケースの内側に搭載されていた従来のサーフェイスクーラーからエンジン内部のコアフェアリングの外側に搭載する ASSC を開発する。 | コアフェアリングに冷却装置（オイルクーラー）を設置することにより配管を短縮しエンジンの軽量化を図ることができる。                                            |

#### 2-1-2 個別要素技術の目標設定

表 2. 個別要素技術の目標

| 要素技術                             | 目標・指標                                                                                              | 設定理由・根拠等                                                                                                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASSC の試作<br>設計技術<br>試験技術<br>製造技術 | Rolls-Royce 社が、Clean Sky Project で進めている Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載可能な ASSC の試作品を製作する。 | Rolls-Royce 社の Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載し ASSC 技術実証を行う。                                                                       |
|                                  | 製品重量 9.75kg 以下を達成する。                                                                               | 共同研究パートナーで、航空機エンジン製造開発メーカーである Rolls-Royce 社と調整し、200 席クラスの双発機体用のエンジン（モデルエンジン: B787 用エンジン Trent 1000、推進力 72,000lb）用サーフェイスクーラーをベースに要求される仕様を決定。 |
|                                  | 離陸時の熱交換性能 58.55KW を達成する。<br>巡航時の熱交換性能 35.35KW を達成する。                                               |                                                                                                                                             |
|                                  | 潤滑油が 120°C、流量 2.335lb/s 流れた時の圧力損失 34psid 以下を達成する。                                                  |                                                                                                                                             |

| 要素技術                             | 目標・指標                                               | 設定理由・根拠等                                                                                                                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASSC の試作<br>設計技術<br>試験技術<br>製造技術 | 圧力サイクル 610psig ⇔ 0psig × 120,000 回に耐える構造を達成する。      | 共同研究パートナーで、航空機エンジン製造開発メーカーである Rolls-Royce 社と調整し、200 席クラスの双発機体用のエンジン（モデルエンジン: B787 用エンジン Trent 1000、推進力 72,000lb）用サーフェスクーラーをベースに要求される仕様を決定。 |
|                                  | 40G の振動レベルに耐える構造を達成する。                              |                                                                                                                                            |
| ASSC の熱交換性能計算プログラムの開発            | 様々な環境条件における ASSC の熱交換性能について精度を持って予想できる計算プログラムを開発する。 | 航空機エンジンは様々な環境での飛行を想定した性能検証が必要であり、これをサポートすることを可能とするため、考えられるすべての環境条件に対応した ASSC 冷却性能を精度よく予想できる熱交換性能計算プログラムを開発することが必要である。                      |
| 空気冷却フィンの高性能化検討                   | 数値流体解析により空気フィンの最適設計を可能にする基礎的な知見を得る。                 | ASSC はできるだけ小さい面積、軽い重量、低流体損失で必要な冷却を実現することが求められ、ASSC の合理的な最適設計をするためには、冷却フィン周りの流れ場と冷却性能との関係についての理解が必要である。                                     |

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

Rolls-Royce 社が、Clean Sky Project で進めている Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載可能な ASSC を試作し技術確認試験を実施した。本 ASSC は、Rolls-Royce 社の Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載されエンジン試験が実施された。

##### 3-1-2 個別要素技術成果

###### (1) ASSC の試作品設計

Rolls-Royce 社が、Clean Sky Project で進めている Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載可能な ASSC 試作品の設計をまとめた。試作する ASSC のイメージを図 1 に示す。構造及びサイズの詳細を図 2 に示す。

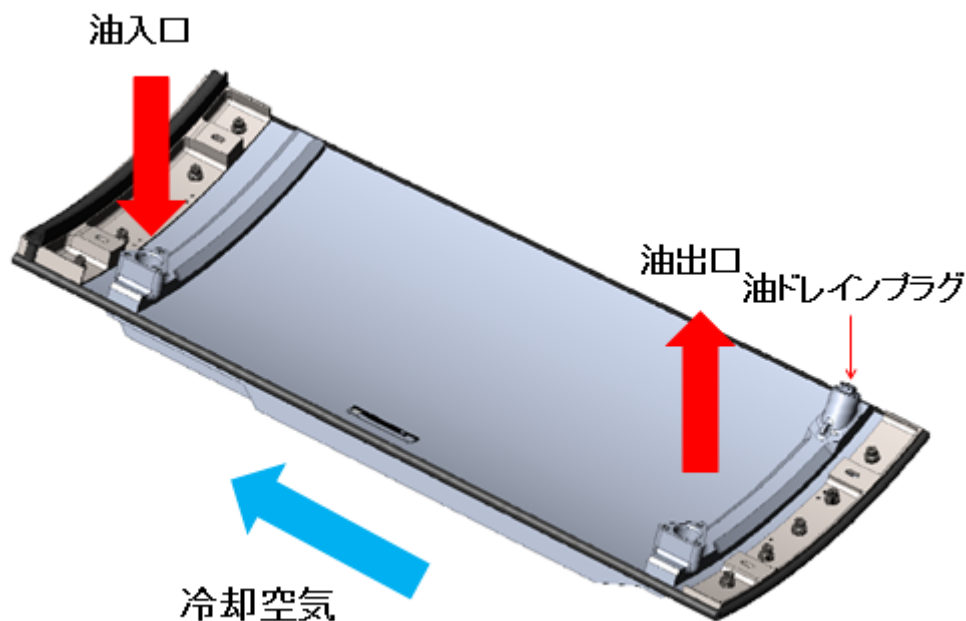


図 1 ASSC の完成イメージ

### Oil Side Passage

Fin (250P1818)

Type : Plane

Fin pitch : 18 fins / inch

Fin thickness : 0.45 mm

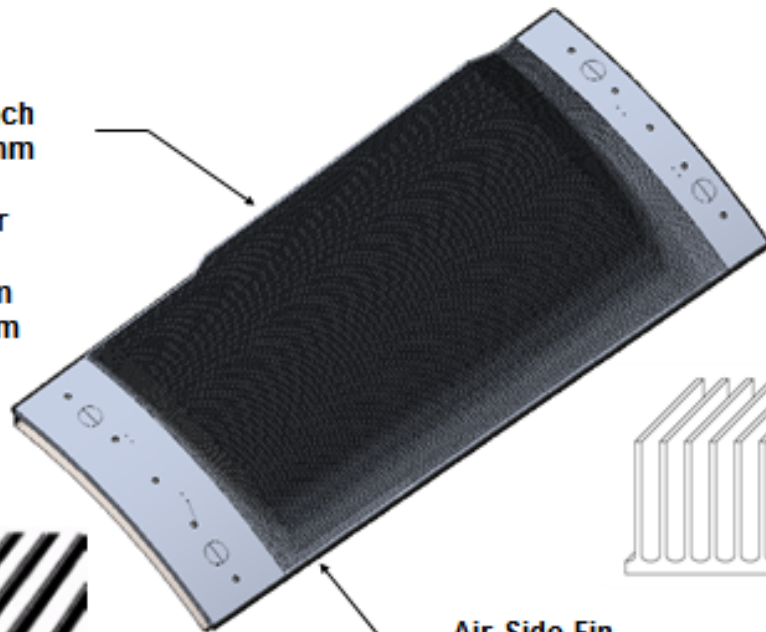
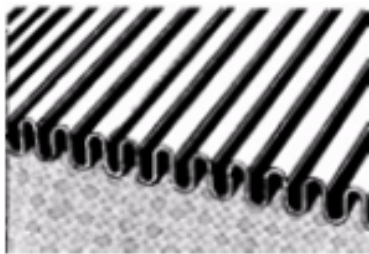
Fin height : 6.35 mm

Pass Number : 1 layer

Pass width : 280 mm

Pass Length : 660 mm

Port inlet dia :  $\Phi 21$ mm



### Air Side Fin

Height : 25 mm

Pitch : 6.00 – 6.35 fins / inch

Thickness : 0.8 mm

Width : 370 – 396 mm

Length : 730 mm

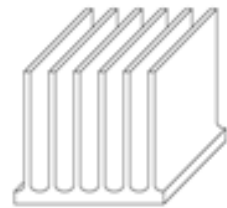


図2 ASSC の概要

## (2) ASSC の試作品製作

重量が軽く高い圧力強度を持った熱交換器にするために、材料としてアルミ合金を使い、各部の板厚、肉厚を極限まで薄くした部品を結合することが可能なアルミ合金の真空ロウ付けを採用した。試作品の構造を図3に示す。

圧力強度を高めるためにはロウ付け部の品質が不可欠であり、高品質のロウ付けを実現するために最も適したロウ付け条件の決定とロウ付けジグの開発をした。ロウ付けは、ASSC の最終形状である円筒形状ではなく平板形状で各部品を接合し、ロウ付け後、曲げ加工により円筒形状を実現した。曲げ加工後、円筒形状した ASSC に油ヘッダーを溶接接合した。ASSC の主要工程マップを図4に示す。試作品の完成写真を写真1に示す。



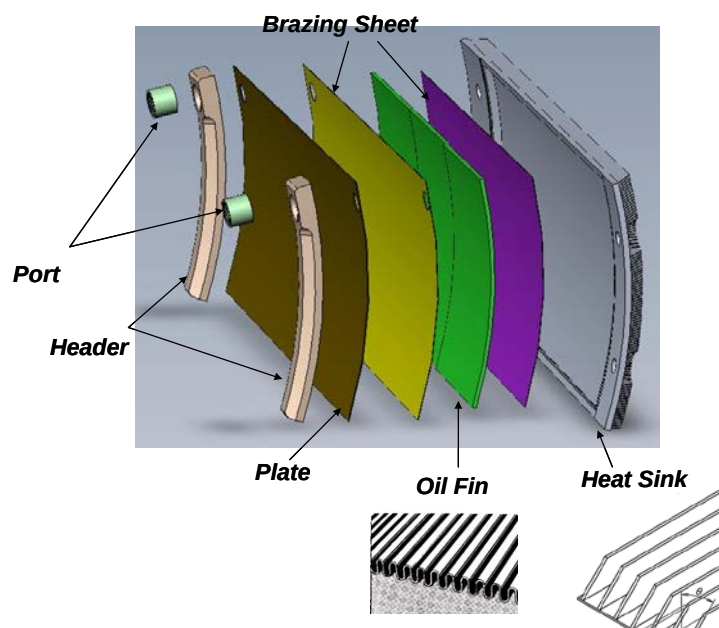


図3 ASSC の構造

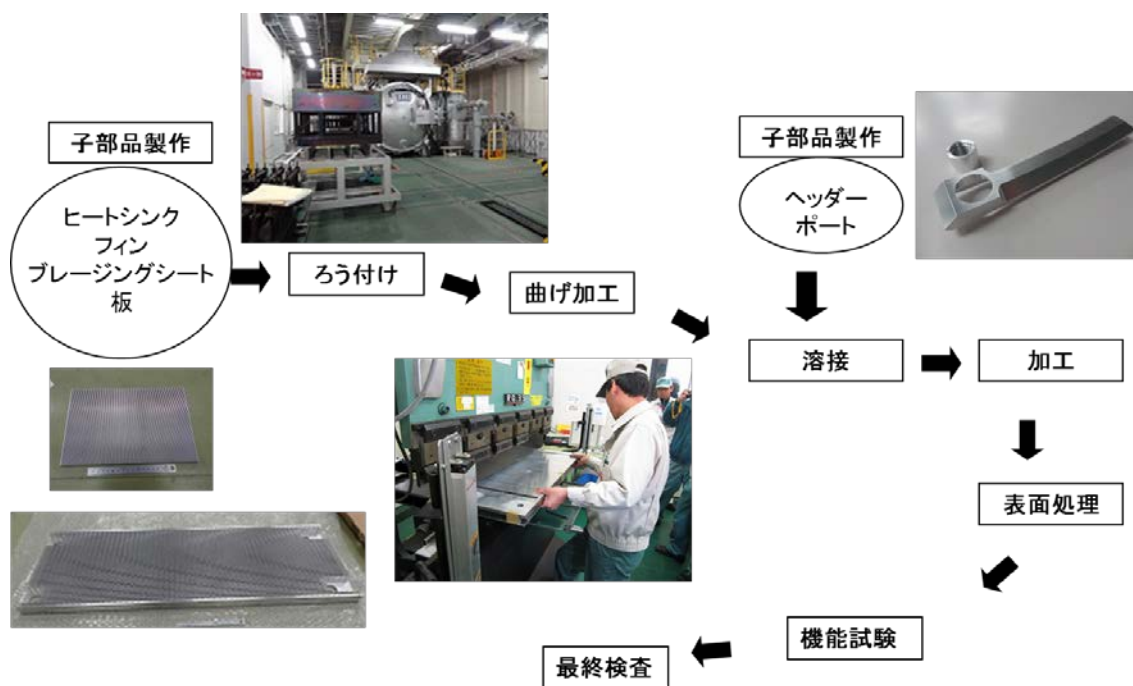


図4 ASSC の主要工程マップ



写真 1 ASSC の試作品

### (3) ASSC 試作品の性能試験

ASSC の熱交換性能試験を実施した。航空機エンジンのさまざまな運用条件での熱交換性能を確認するために、油温度、油流量、空気温度、空気流量を変化させて熱交換性能を計測した。熱交換性能試験セットアップを写真 2 に示す。熱交換性能試験結果を図 5 に示す。

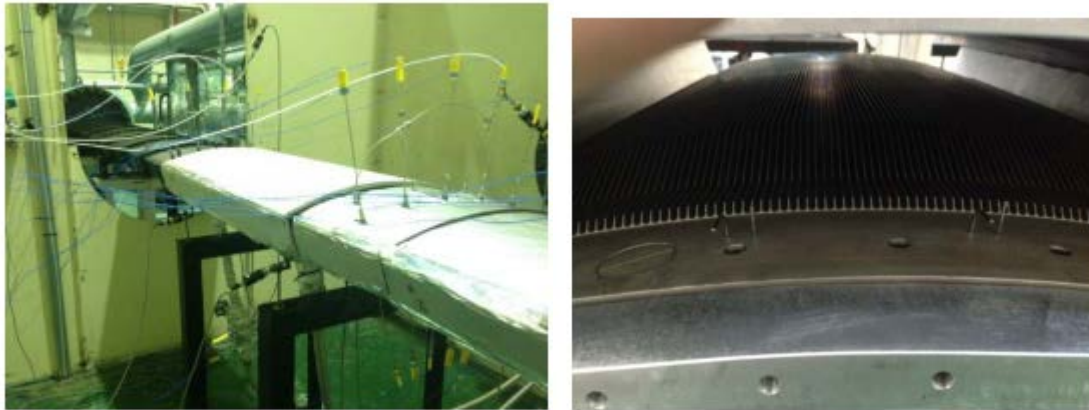


写真2 ASSC 試作品の熱交換性能試験セットアップ

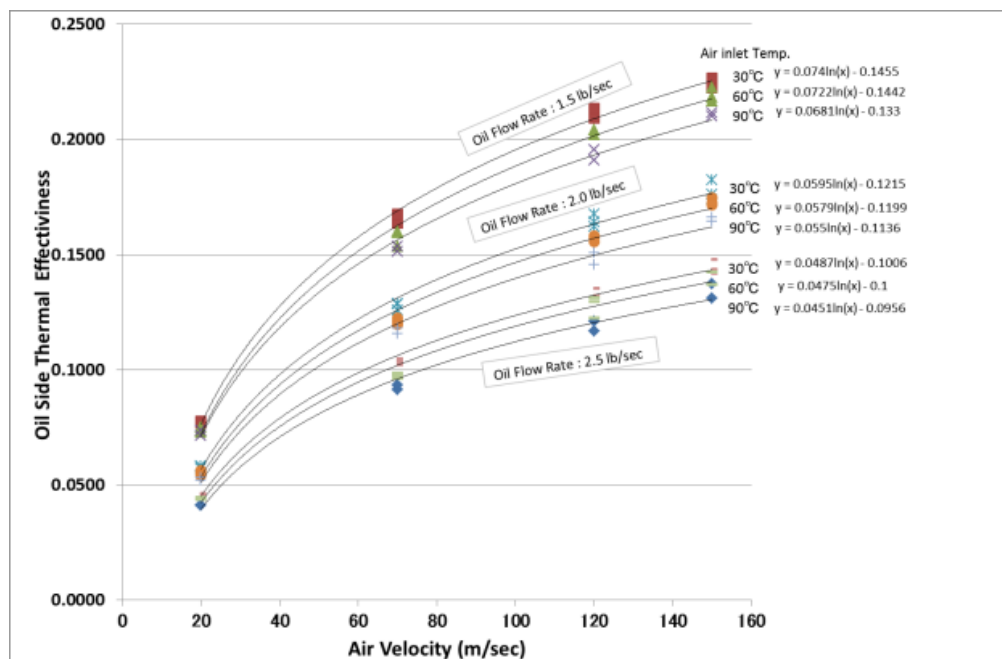


図5 ASSC の性能試験結果

#### (4) ASSC の試作品油側圧力損失試験

ASSCの油側圧力損失試験を実施した。航空機エンジンのさまざまな運用条件での油側圧力損失を確認するために、油温度、油流量、を変化させて油側圧力損失を計測した。ASSCの油圧力損失試験のセットアップを写真3に示す。油側圧力損失の試験結果を図6に示す。

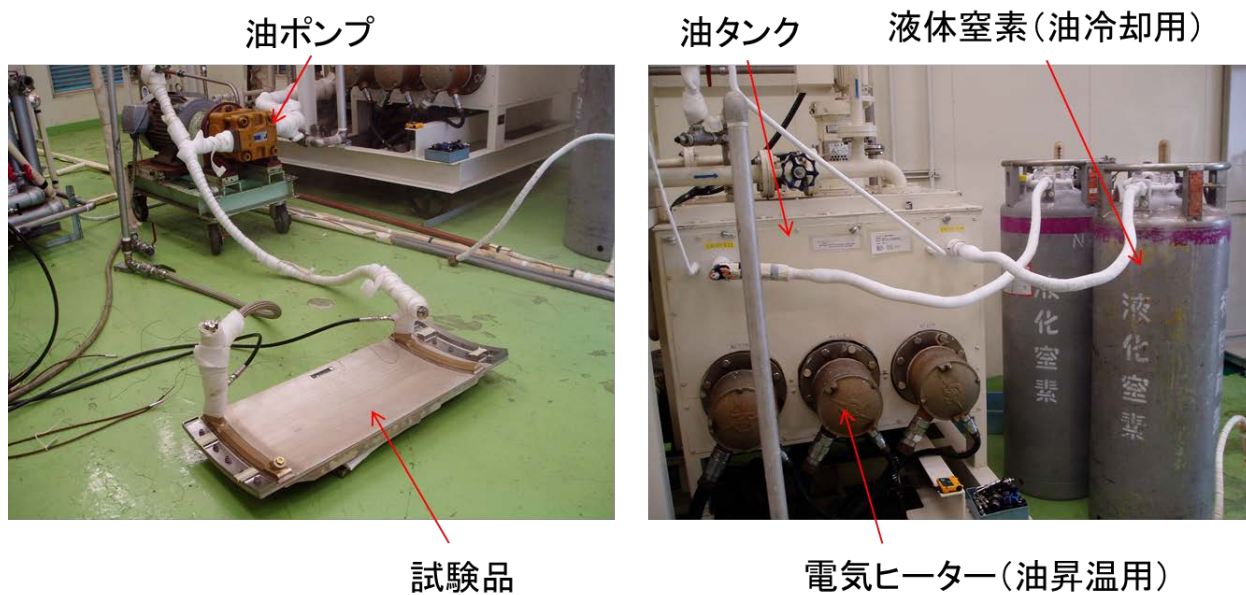


写真5 油圧力損失試験セットアップ

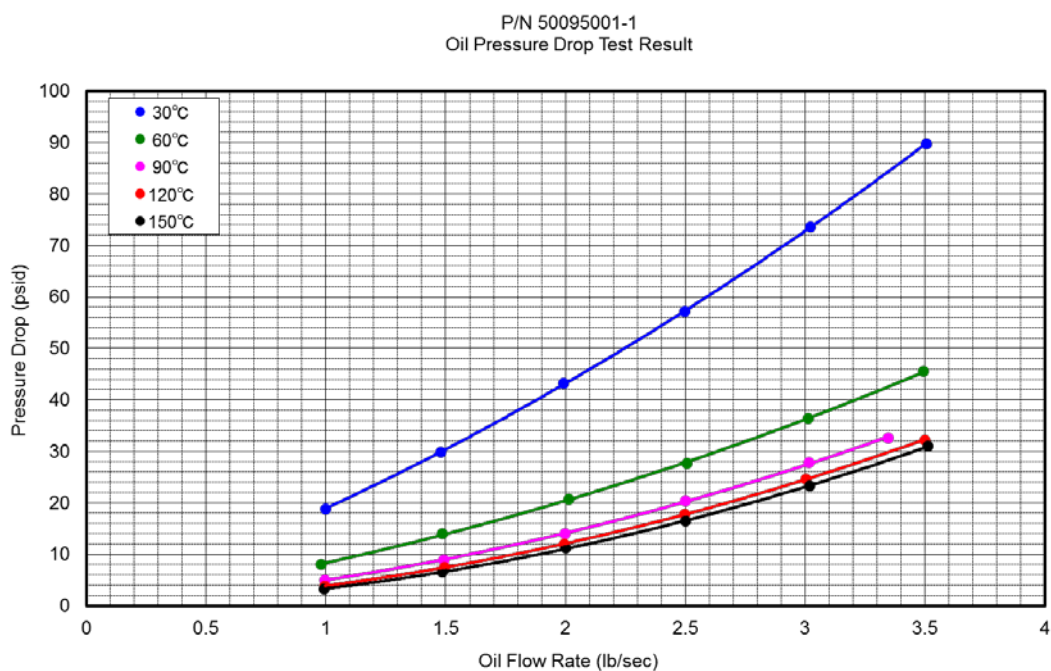


図6 油圧力損失試験結果 (油温度 30～150℃)

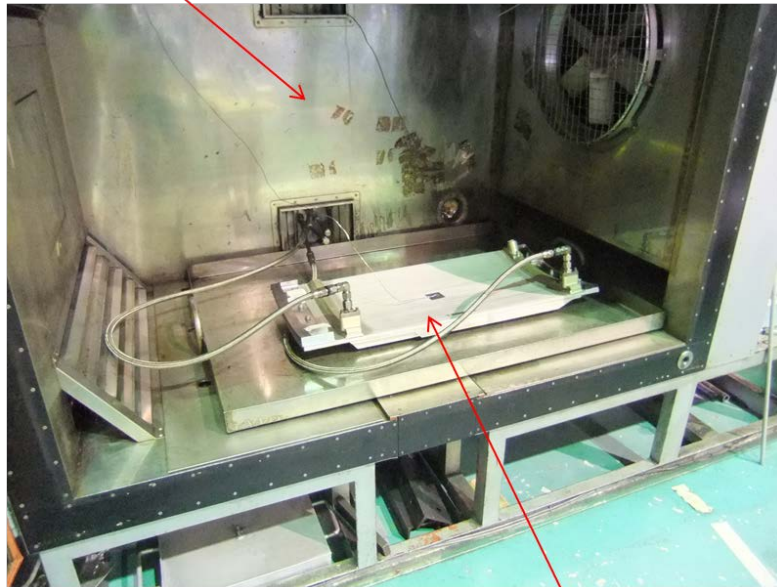
#### (5) ASSC の試作品の圧力サイクル試験

ASSCの油側圧力サイクル試験を実施した。航空機エンジン運用条件での強度と寿命を確認するために、環境温度、油側運用圧力、要求されるサイクル数と条件を図7に示す。ASSCの油圧力損失試験のセットアップ



を写真6に示す。

温度槽



試験品

写真6 油圧力サイクル試験セットアップ

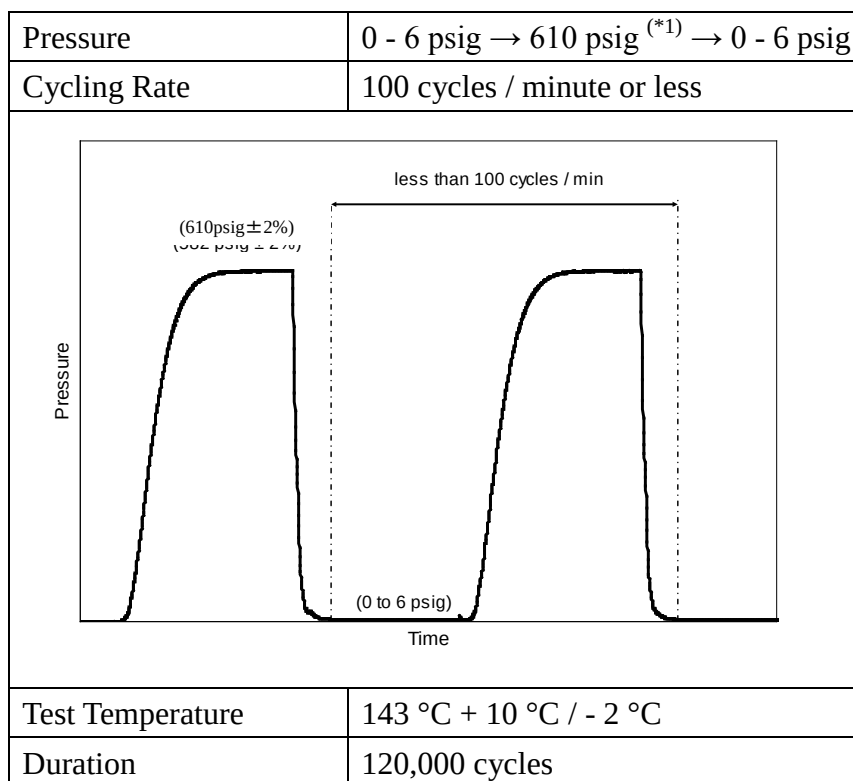


図7 油圧力サイクル試験条件

(6) ASSC の試作品の振動試験

ASSCの振動試験を実施した。写真7～10に試験セットアップを示す。  
振点サベイの結果を図8～10に示す。

共振点加振試験、10⇒2,000Hz掃引試験の条件を表3～5に示す。

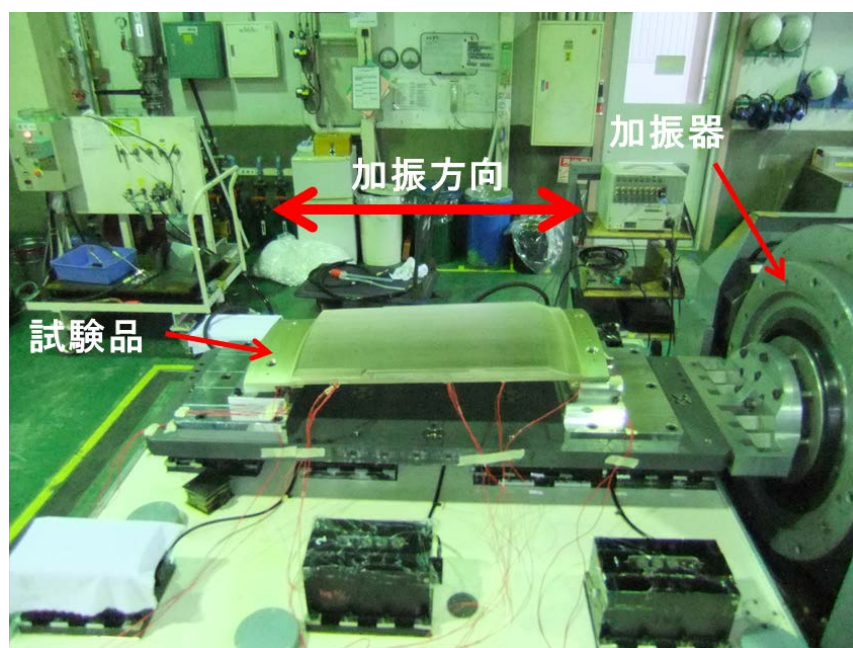


写真7 振動試験セットアップ X軸

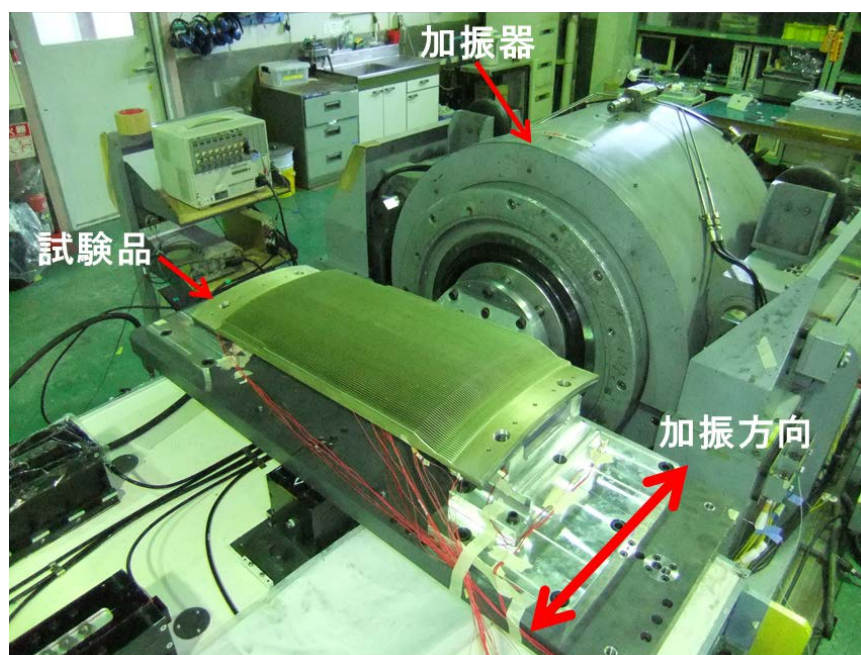


写真8 振動試験セットアップ Y軸

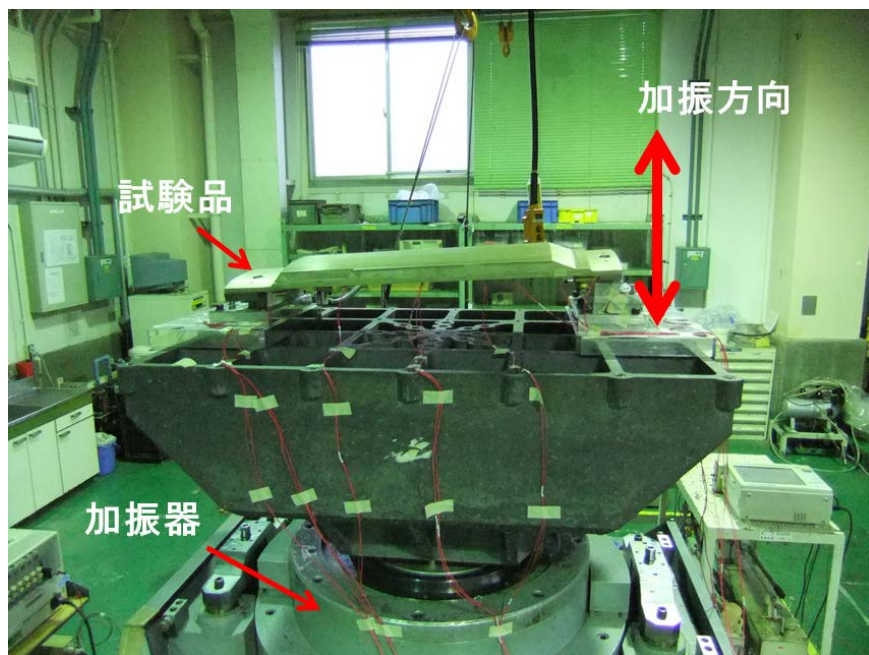
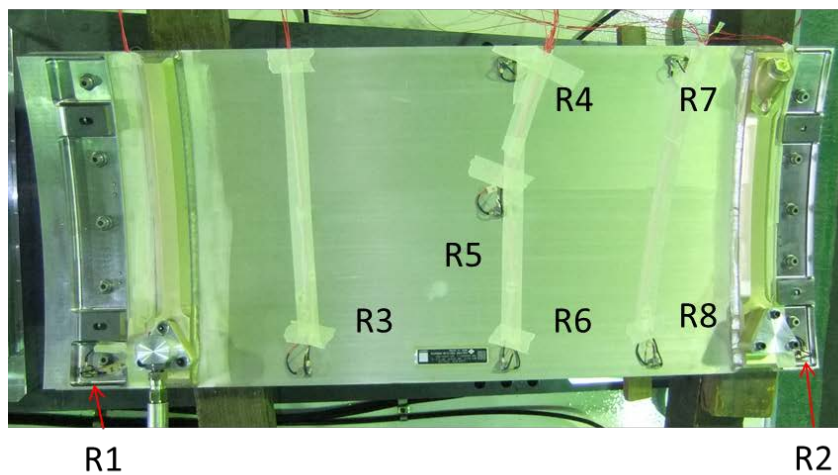


写真 9 振動試験セットアップ Z軸

R1 ～ R8 3軸加速度計と位置



3軸加速度計

写真 10 振動試験セットアップ レスポンス加速度計の位置



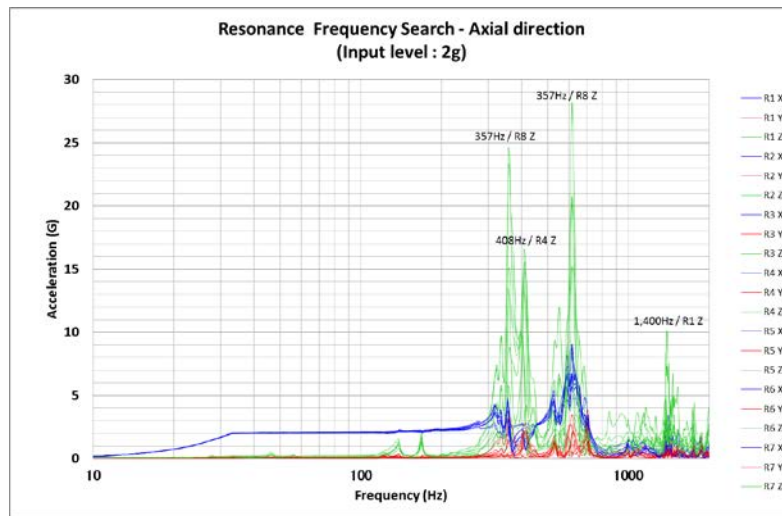


図 8 共振点サーチ結果 X軸

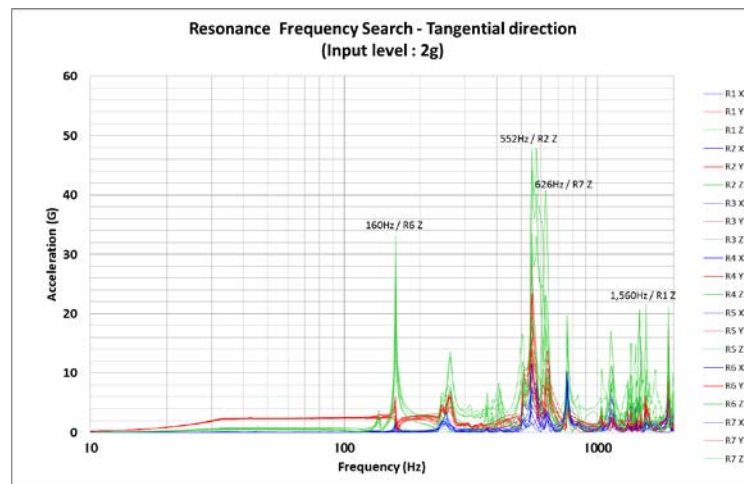


図 9 共振点サーチ結果 Y軸

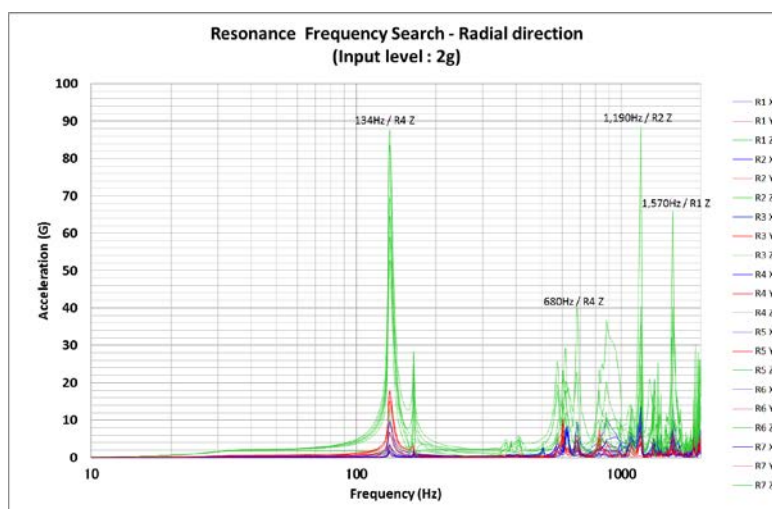




図 10 共振点加振条件 10⇒2,000Hz 掃引試験条件 Z軸

表 3 共振点加振条件 10⇒2,000Hz 掃引試験条件 X軸

| Resonance Frequency Endurance Test |                                             |                                             |                        |
|------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| Frequency (Hz)                     | Duration for 3x10 <sup>6</sup> cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g) |
| 356                                | 140                                         | Axial                                       | 1.2                    |
| 406                                | 123                                         |                                             | 0.9                    |
| 610                                | 82                                          |                                             | 5.7                    |
| 1,380                              | 36                                          |                                             | 15.72                  |

| Frequency Sweep Endurance Test |                               |                                             |                                                                                  |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Frequency (Hz)                 | Duration for 1.5 cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g)                                                           |
| 10-2,000                       | 225                           | Axial                                       | 0.030 in. pk-pk 10 – 37 Hz<br>3.5 in/sec pk 37 – 351 Hz<br>20 g pk 351 – 2000 Hz |
| Total (min)                    |                               | 607                                         |                                                                                  |

表 4 共振点加振条件 10⇒2,000Hz 掃引試験条件 Y軸

| Resonance Frequency Endurance Test |                                           |                                             |                        |
|------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| Frequency (Hz)                     | Duration for $3 \times 10^6$ cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g) |
| 160                                | 313                                       | Tangential                                  | 6.9                    |
| 550                                | 91                                        |                                             | 8.7                    |
| 620                                | 81                                        |                                             | 5.4                    |
| 755                                | 66                                        |                                             | 15                     |

| Frequency Sweep Endurance Test |                               |                                             |                                                                                                           |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frequency (Hz)                 | Duration for 1.5 cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g)                                                                                    |
| 10-2,000                       | 225                           | Tangential                                  | 0.030 in. pk-pk 10 - 37 Hz<br>3.5 in/sec pk 37 - 263 Hz<br>15 g pk 263 - 1300 Hz<br>20 gpk 1300 - 2000 Hz |
| Total (min)                    |                               | 775                                         |                                                                                                           |

表 5 共振点加振条件 10⇒2,000Hz 掃引試験条件 Z軸

Resonance Frequency Endurance Test

| Frequency (Hz) | Duration for $3 \times 10^6$ cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g) |
|----------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| 134            | 373                                       | Radial                                      | 2.8                    |
| 675            | 74                                        |                                             | 2.2                    |
| 1,180          | 42                                        |                                             | 13.4                   |
| 1,560          | 32                                        |                                             | 4.6                    |

Frequency Sweep Endurance Test

| Frequency (Hz) | Duration for 1.5 cycles (min) | Direction of Controlled input accelerometer | Controlled g-level (g)                                                           |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 10-2,000       | 225                           | Radial                                      | 0.030 in. pk-pk 10 - 37 Hz<br>3.5 in/sec pk 37 - 351 Hz<br>20 g pk 351 - 2000 Hz |

|             |     |
|-------------|-----|
| Total (min) | 747 |
|-------------|-----|

### (7) 数値流体解析を用いた空気フィンの高性能化検討

フィンの形状を変化させた場合の放熱特性の変化を確認した。フィンの基本的な形状を PLANE タイプとして、フィンの形状を、OFFSET タイプ、NOTCH タイプ、SLANTED タイプ、STEP タイプ、DIFFUSER タイプの 5 通りの、放熱性能を相対的に比較検証した。検証結果を図 1 1 に示す。

OFFSET タイプや SLANTED タイプでは、下流側の放熱フィン間に速度境界層が急速に発達し、放熱フィン間から流体の流出をもたらすため、放熱特性が悪化することが確認された。SLANTED タイプでは、下流側の放熱フィンからの流体の流出は抑制できるものの、フィン前端部で機体される熱伝達率が伝熱面積の減少により損なわれ放熱特性が悪化することが確認できた。STEP タイプでは各 STEP 部にて、DIFFUSER タイプでは、DIFFUSER 部でフィン間に新しい空気が流入することにより放熱特性が上昇することが確認できた。

PLANEタイプ:292.3W

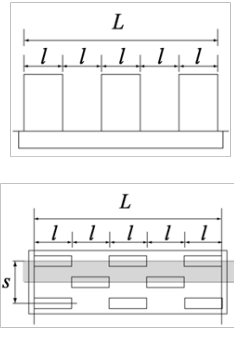
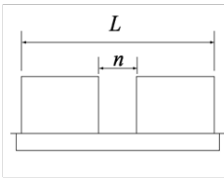
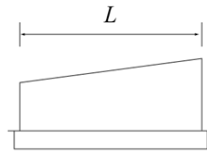
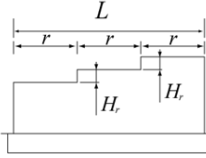
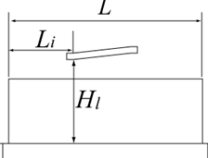
| OFFSET<br>タイプ                                                                     | NOTCH<br>タイプ                                                                      | SLANTED<br>タイプ                                                                    | STEP<br>タイプ                                                                        | DIFFUSER<br>タイプ                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |
| 278.3W<br>-4.8%                                                                   | 293.4W<br>+0.4%                                                                   | 273.5W<br>-6.4%                                                                   | 306.8W<br>+5%                                                                      | 299.1W<br>+3%                                                                       |

図 1 1 フィン形状の差による放熱特性への影響

フィン形状を特徴づけるフィンピッチを変化させて検討を行った。  
 長さが 900mm の場合に同じ底面積ではピッチ 4mm の場合に一番放熱特性が高い  
 ということになる。 一方、放熱量の上流側からの推移を比較すると前縁から  
 の距離ごとに最も放熱量の多いフィンピッチが異なることが分かる。 狭いフ  
 ィンピッチは放熱量の立ち上がり速いものの直に飽和するが、広いピッチほど  
 立ち上がりは遅れるものの下流側でも放熱量が伸び続ける。 この推移につい  
 て放熱量や流量、フィン間平均温度の分布を見ることで詳しく考察した。  
 フィンピッチを変化させた時の単位幅あたりの総放熱量を図 1 2 に示す。 放  
 熱量を流れ方向に積算した推移を図 1 3 に示す。

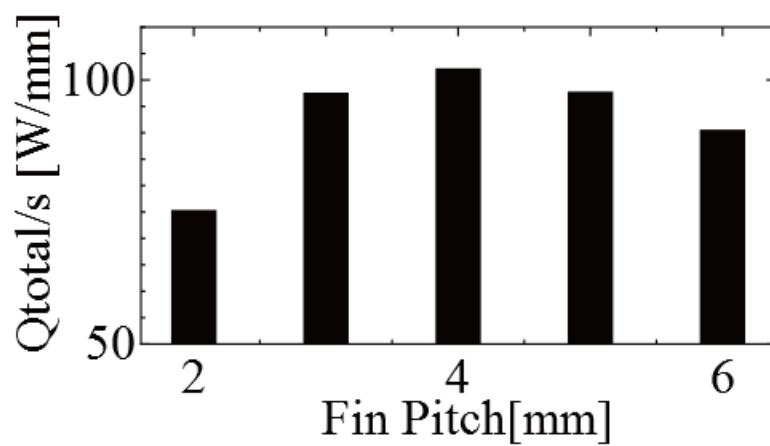


図 1 2 フィンピッチを変化させた時の単位幅あたりの総放熱量

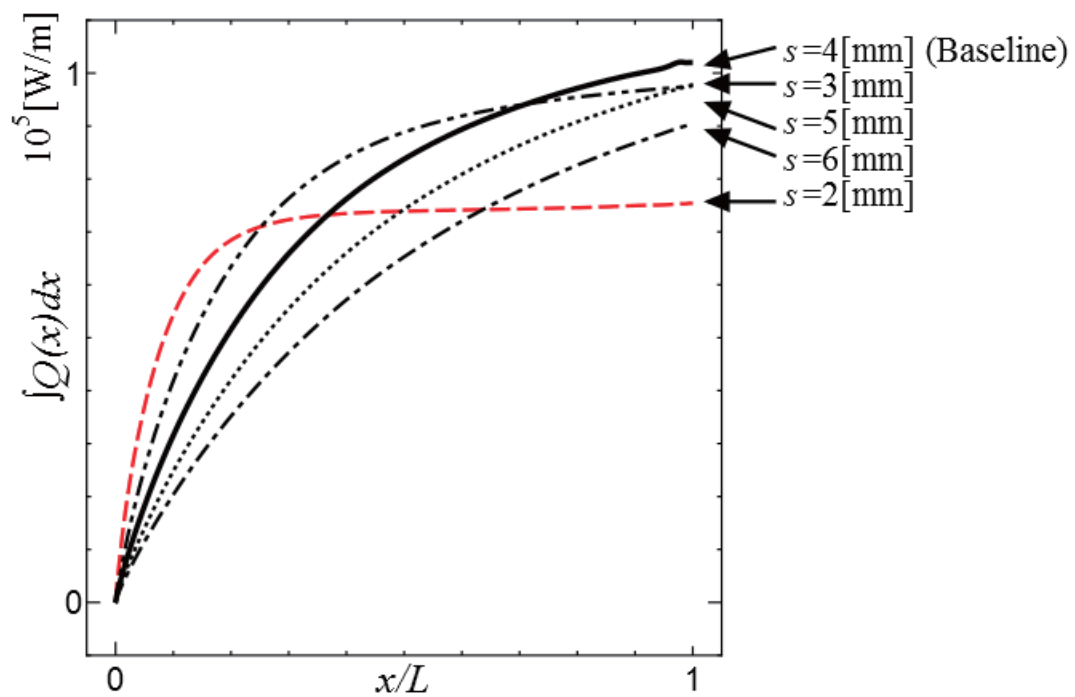


図 1 3 放熱量を流れ方向に積算した推移

## 補足情報

計算コードを表 6 に示す。

表 6 計算コード

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| Governing equation | 3D-RANS                         |
| Variables          | $u, v, w, T, P$ (cell-centered) |
| Flux interpolation | HUS+3rd MUSCL                   |
| Time integration   | Euler implicit LU-SGS           |
| Turbulent model    | $k-\omega$ (wilcox1998)         |

座標系は原点を図 1 4 のようにフィン前縁フィン厚さ中心部にとり、クーラー長さ方向に  $x$  軸、フィン高さ方向に  $y$  軸、フィンピッチ方向に  $z$  軸を取る。

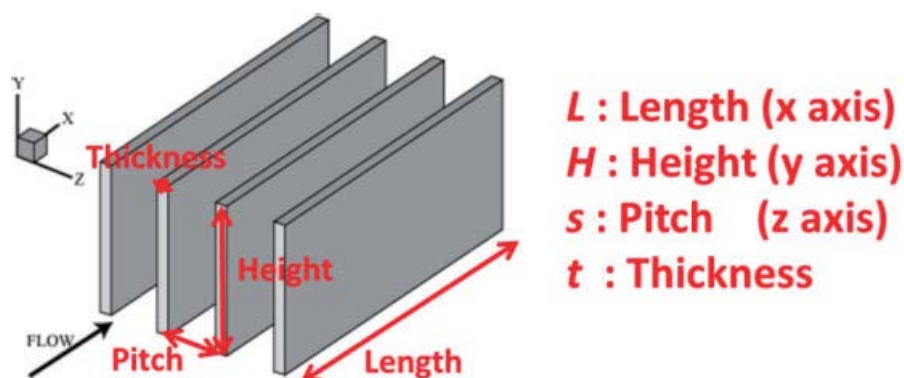


図 1 4 計算モデル

計算領域を図 1 5 に示す。

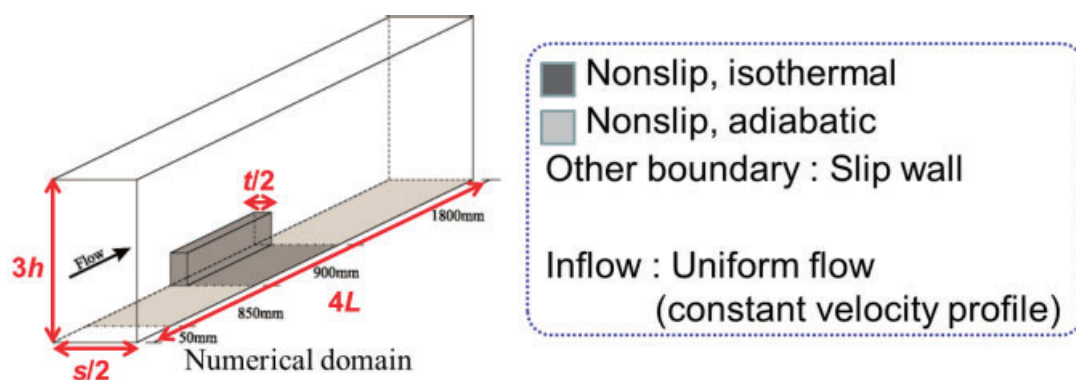


図 1 5 計算領域

計算対象のフィン形状の Baseline を表 7 に示す。

表 7 Baseline のフィン形状

|                   |        |
|-------------------|--------|
| Fin length $L$    | 900 mm |
| Fin height $H$    | 25 mm  |
| Fin thickness $t$ | 0.8 mm |
| Fin pitch $s$     | 4 mm   |

流れ場の条件を表 8 に示す。

表 8 流れ場の条件

|                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Inlet velocity $U_\infty$    | 147.67m/s (M=0.44) |
| Re ( $U_\infty s/\nu$ )      | $3.2 \times 10^4$  |
| Wall temperature $T_w$       | 403.05K            |
| Inlet temperature $T_\infty$ | 337.65K            |

### 3-1-3 特許出願状況等

表 9. 特許・論文等件数

| 要素技術         | 論文数 | 論文の被引用度数 | 特許等件数（出願を含む） | 特許権の実施件数 | ライセンス供与数 | 取得ライセンス料 | 国際標準への寄与 |
|--------------|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| ASSC<br>設計技術 | 3   | 0        | 0            | 0        | 0        | 0        | 0        |

表 10 論文、投稿、発表、特許リスト

|    | 題目・メディア等                                                                                                                                         | 時期      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 論文 | 第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会<br>「フィン周囲流れ場に着目したサーフェイスクーラーの放熱特性に関する数値解析」                                                                                  | H25. 10 |
|    | 第 55 回航空機原動機・宇宙推進講演会<br>「フィン周囲流れ場に着目したサーフェイスクーラーの放熱特性に関する数値解析」                                                                                   | H27. 3  |
|    | 2015 年国際ガスタービン会議<br>「Numerical Study on Heat Exchange Characteristics of Surface Air Cooled oil Cooler Focused on Flow Field around Cooking Fin」 | H27. 11 |
| 投稿 | なし                                                                                                                                               | H17. 4  |
| 発表 | 第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会<br>「フィン周囲流れ場に着目したサーフェイスクーラーの放熱特性に関する数値解析」                                                                                  | H25. 10 |
|    | 第 55 回航空機原動機・宇宙推進講演会<br>「フィン周囲流れ場に着目したサーフェイスクーラーの放熱特性に関する数値解析」                                                                                   | H27. 3  |
|    | 2015 年国際ガスタービン会議<br>「Numerical Study on Heat Exchange Characteristics of Surface Air Cooled oil Cooler Focused on Flow Field around Cooking Fin」 | H27. 11 |
|    | ・ ・ ・ ・                                                                                                                                          |         |

### 3-2 目標の達成度

表 1 1. 目標に対する成果・達成度の一覧表

| 要素技術                             | 目標・指標                                                                                              | 成果                                                                                                                                                                             | 達成度  |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ASSC の試作<br>設計技術<br>試験技術<br>製造技術 | Rolls-Royce 社が、Clean Sky Project で進めている Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに搭載可能な ASSC の試作品を製作する。 | ASSC の試作品を製作し ASSC 単体での性能、強度に関する試験を実施しエンジン搭載可能なレベルであることを確認した。<br>Rolls-Royce 社の Large 3-Shaft ALPS Demonstrator エンジンに試作した ASSC を搭載し、技術実証を完了した。                                 | 達成   |
|                                  | 製品重量 9.75kg 以下を達成する。                                                                               | 試作品を設計製造し製品重量 13kg であることを確認した。<br>目標重量に達成していないが、振動環境下における強度、及び油通路の圧力強度にはマージン（安全率）を残しており、今後、強度と重量のトレードオフスタディによる最適化で軽量化を図る。                                                      | 一部達成 |
|                                  | 離陸時の熱交換性能 58.55KW を達成する。<br>巡航時の熱交換性能 35.35KW を達成する。                                               | 製品単体試験で、離陸時の熱交換性能 31.34KW を確認した。<br>巡航時の熱交換性能 13.84KW を確認した。<br>目標熱交換性能に達していないが、数値解析による調査により空気側の冷却フィンの性能向上に資する種々の知見と冷却性能の向上を図るための設計指針を得ることができており、今後、空気冷却フィンの最適化により熱交換性能の向上を図る。 | 一部達成 |



| 要素技術                             | 目標・指標                                               | 成果                                                                                                       | 達成度 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ASSC の試作<br>設計技術<br>試験技術<br>製造技術 | 潤滑油が 120℃、流量 2.335lb/s 流れた時の圧力損失 34psid 以下を達成する。    | 製品単体試験で、潤滑油が 120℃、流量 2.335lb/s 流れた時の圧力損失は 34psid 以下を達成した。                                                | 達成  |
|                                  | 圧力サイクル 610psig⇔0psig×120,000 回に耐える構造を達成する。          | 試作品単体試験で圧力サイクル 610psig⇔0psig×120,000 回の試験に供しクリアした。                                                       | 達成  |
|                                  | 40G の振動レベルに耐える構造を達成する。                              | 試作品単体試験で 40G レベルの振動試験に供しクリアした。                                                                           | 達成  |
| ASSC の熱交換性能計算プログラムの開発            | 様々な環境条件における ASSC の熱交換性能について精度を持って予想できる計算プログラムを開発する。 | 数値流体解析により得られた空気側冷却フィンの伝熱特性に関連する流れ場の知見と、試作した ASSC による熱交換性能試験の結果から ASSC の熱交換性能計算プログラムを改善し計算精度を向上させることができた。 | 達成  |
| 空気冷却フィンの高性能化検討                   | 数値流体解析により空気フィンの最適設計を可能にする基礎的な知見を得る。                 | 様々な冷却フィン形状について流れ場の検討と冷却性能の比較考察を行った。これらの結果から、冷却フィンの放熱性能向上に資する種々の知見を獲得するとともに、冷却性能の向上を図るための設計指針を得ることができた。   | 達成  |

#### 4. 事業化、波及効果について

##### 4-1 事業化の見通し

本事業における成果物はエンジン試験に供されるが、事業化商品化にあたっては、以下に示す技術課題の解決に取り組む必要がある。

(1) 高効率化

民間航空機用エンジンは大型化、GTF 技術導入、航空機の電動化による発電容量の大容量化に伴い、エンジン潤滑油の冷却負荷容量、エンジンは発電機の冷却負荷容量が増大する一方、エンジンの低燃費化に伴いエンジン潤滑油の冷却冷媒として利用されている燃料の冷却能力が低下する傾向にあるため、空気を冷媒とする ASSC の高効率化を図る必要がある。

(2) 小型軽量化

航空機の燃費向上に貢献するために小型軽量化を図る必要がある。

(3) 信頼性向上

航空機エンジンに搭載され過酷な環境な下、長時間運航に耐える耐久性を持たせる必要がある。

(4) コスト低減化

事業化にあたり、ASSC の新規性と性能とバランスした国際競争力のあるコストとする必要がある。

本事業はユーザーであるエンジンメーカーの Rolls-Royce 社との共同開発であり、エンジン性能を最適にする為の ASSC の詳細仕様、形態を協議する。材料・部品調達については国内のみならず、アジア、北米、ヨーロッパ諸国より最適な材料・部品をグローバル調達することにより低コストを実現させる。販売については共同開発のパートナーであるロールス・ロイス社からの受注が期待でき、現在までに培ってきた価格競争力・技術・製造・品質・販売・カスタマー・サポート体制と、さらなる改善及びグローバル展開にて、競合他社との差別化を図り、シェア拡大を図る。

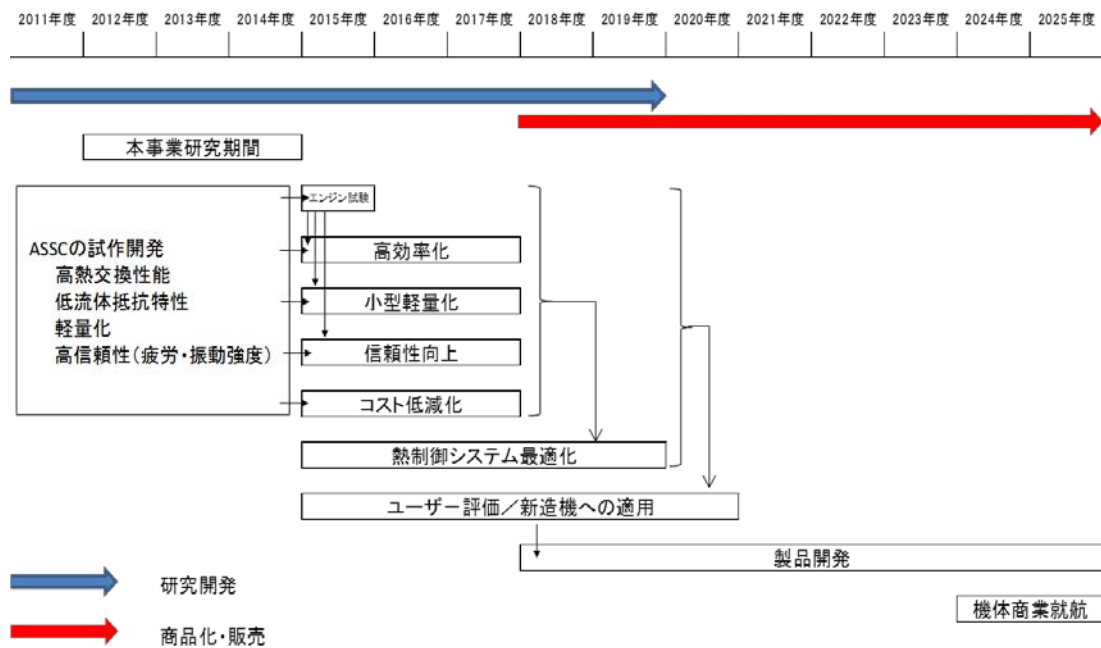


図 1 6 事業化に向けての展望

#### 4-2 波及効果

本プロジェクトでは、推進力 72,000lb クラスのエンジンの熱交換器 (ASSC)を開発したが、すべてのクラスのターボファンエンジン用の熱交換器に応用できる技術である。

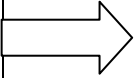
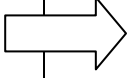
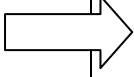
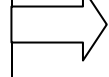
また、本プロジェクトでは、熱交換器の高効率化、小型軽量化の技術開発であり、対象となったエンジン潤滑油の冷却装置のみならず、航空機に搭載されるすべての熱交換器の設計開発に利用できる可能性が期待できる。

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

本事業の全体の研究開発計画を表12に示す。

表12. 研究開発計画

| 実施項目／年度                      | H24                                                                               | H25                                                                               | H26                                                                                | H27                                                                                  |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 試作品の仕様設定                     |  |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                      |
| 試作品の基本設計                     |                                                                                   |  |                                                                                    |                                                                                      |
| 試作品の製作                       |                                                                                   |                                                                                   |   |                                                                                      |
| 試作品の試験                       |                                                                                   |                                                                                   |  |                                                                                      |
| 試作品のエンジン試験<br>Rolls-Royce 担当 |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |  |
| 研究開発費用                       | 6 百万円                                                                             | 40 百万円                                                                            | 40 百万円                                                                             | 0 百万円                                                                                |

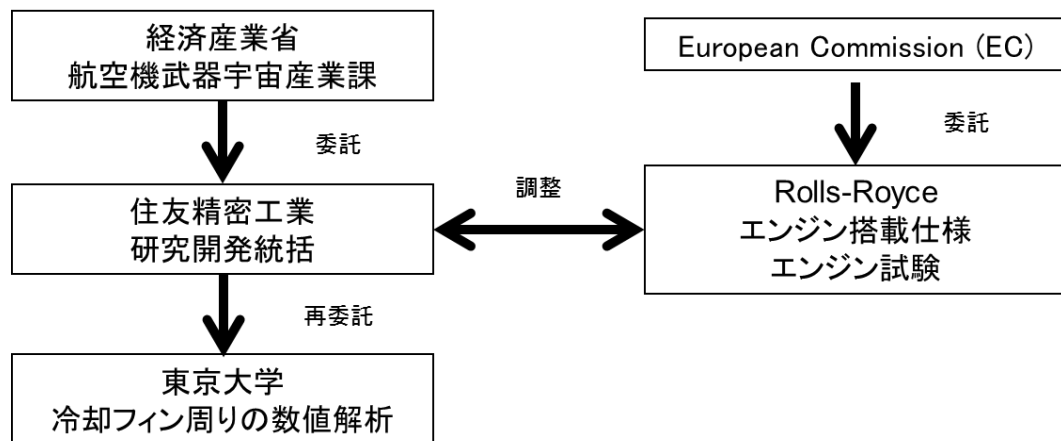
## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

研究開発体制を図17に示す。

本事業の研究開発は、住友精密工業株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として東京大学が参加した。

また、研究開発の実施に当たっては、英国の Rolls-Royce 社とエンジン搭載仕様についての調整を実施した。研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（航空宇宙熱制御システム部 技術課 富田 進）を設置した。

図17. 研究開発実施体制



## 5-3 資金配分

本事業の各研究開発項目に対する資金配分状況を表12に示す。実施内容から判断し、資金配分は妥当だったと考える。

## 5-4 費用対効果

各年度において、成果を上げることができており、費用対効果は適切だったと考える。また、Rolls-Royce 社から必要な、仕様情報を入手、調整することにより、本事業は効率的に進められて、当社単独では非常に困難かつ費用が掛かるエンジン試験を実現することができて投資以上の効果が得られた。

## 5-5 変化への対応

本事業期間内において、本事業に影響を与える情勢変化は生じなかった。

## 第 3 章 評価

## 第3章 評価

### 1 炭素繊維複合材成形技術開発

#### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

我が国の得意とする炭素繊維複合材技術の更なる発展につながる事業であり、国際競争力の維持・向上、また長期にわたる開発リスクの緩和という観点から、国の関与の必要性が認められる。複合材の脱オートクレーブの流れにも合致するものである。

なお、生産効率の向上、知財の蓄積・活用のための体制作り等についても引き続き検討すべきである。

#### 【肯定的意見】

- ・ 我が国が得意とする炭素繊維複合材技術の更なる発展につながる事業であり、かつ長期間にわたる開発リスクを緩和するという意味で国の関与は必要と認められる。（委員A）
- ・ 全産業分野から俯瞰しても航空分野は国が関与する必要性は大きい。（委員B）
- ・ 大変重要な課題である。（委員C）
- ・ コンポジットの OOA（Out Of Autoclave）へのニーズの流れに合致し、かつ日本が優位性をもつ。（委員D）
- ・ 航空機における複合材技術の国際競争力は国として維持向上すべきである。（委員E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 関係省庁との調整が必要であったということであるが、その点の種々の経験を、今後の同種の事業実施の際に生かしていただきたい。（委員A）
- ・ 生産効率。（委員B）
- ・ もっと投資すべき。（委員C）
- ・ 本研究で獲得した知財をきちんと蓄積、かつ、必要な範囲で共有、有効に活用する体制作り。（委員D）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

航空機の経済性という付加価値を左右する重量軽減を達成目標とし、その目標の達成により燃費改善を目指している点は適切である。

なお、将来の波及効果をにらんだ他分野適用に役立つような目標については不明確である。また、認証取得についても検討するとともに、軽量化、生産コスト低減目標についても明確化すべきである。

### 【肯定的意見】

- ・ 航空機の性能を確実に向上させ得る重量軽減を達成することを目標としており、その目標の達成により燃費軽減を実現することを目指している点は極めて適切である。（委員 A）
- ・ まさに商用航空機の最も大きい経済性という付加価値を左右する課題に取り組んでいる。（委員 B）
- ・ 妥当である。（委員 C）
- ・ 研究開発にとどまらず、具体的な事業の出口が明確。（委員 D）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 本事業で対象とする供試体に関する技術実証のために研究開発の目標が制定されているようで、将来の波及効果をにらんだ他分野への適用に役立つような目標はあまり明確には認められない。（委員 A）
- ・ 材料密度分布のユニフォーミティ。（委員 B）
- ・ 現状仕方がない部分もあるが、本当はもっと大きな目標が必要かもしれない。（委員 C）
- ・ 同技術の認証取得（製造、検査、修理等の基準の規格がとれるか）。（委員 D）
- ・ 事後評価時点での目標であり、中間評価でも指摘された軽量化目標等への取組みが不明確である。一方、研究では製造安定性に関する取組みが中心である。もともと、この技術開発によって達成する優位性は生産コストの低減であり、事後評価の目標の立て方をより明確化すべきではないか。（委員 E）



### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

材料仕様設定、製造安定性、設計許容値確立、実大規模実証と実用化に必要な領域をカバーできている。また、目標としていた重量軽減を上回る成果が得られたと考えられる。

今後は、大量生産時の品質維持などの面での更なる努力を期待する一方、海外の動向なども踏まえ、本技術を活用した我が国航空機産業の目指す方向性を明確にしていくべきである。

#### 【肯定的意見】

- ・ 航空機の開発に資する重要な技術開発成果であり、目標とする重量軽減を更に上回る成果となっており、想定した以上の成果が得られたと判断される。（委員 A）
- ・ 枠組みの中ではストーリーができている。（委員 C）
- ・ 材料仕様設定、製造安定性、設計許容値確立、実大規模実証と実用化に必須領域をカバーしている。（委員 D）
- ・ 成型技術の確立等の目標設定には一定程度の成果を示した。（委員 E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 今後予想される大量生産時の品質の維持といったような面でも更なる努力を続けていていただきたい。（委員 A）
- ・ 予算規模からみると妥当な成果ではあるが、これでドイツに追いついたとは思えない。（委員 C）
- ・ 我が国の航空機産業の方向（完成機、Tier 1 ビジネス）の中での位置づけをより明確化する。（委員 D）

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

実用化の目処はついており、今後も自動車等他分野含めた着実な事業化を実施して欲しい。また引き続き、仕様、許容値設定、実証等や知財整理を継続いただきたい。

なお、波及シナリオは考えられているものの、VaRTM 特有の優位性や、競合技術に対する優位性の整理等も踏まえ、更に詳細な検討を継続していただきたい。また、多様な出口戦略を考えると、規模の拡大についても検討いただきたい。

##### 【肯定的意見】

- ・実用化への目処はついており、今後も着実な事業化を行っていただきたい。（委員 A）
- ・テーマとしては自動車応用がありうる。（委員 C）
- ・仕様、許容値設定、実証等、考えた方、データ等知財関連を自ら実施。（委員 D）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・波及シナリオは考えられているものの、詳細な検討は未だ行われておらず、この点での努力も必要である。（委員 A）
- ・規模が小さすぎて出口戦略が見えにくい。（委員 C）
- ・競合する他の 00A 技術に対する優位性とその維持、特に樹脂技術。（委員 D）
- ・波及効果については、複合材の一般的な特徴が書かれており、VaRTM 開発で得られた技術的優位性が不明である。今回の技術開発で得られた優位性が何なのかを明確にした上で、波及効果の可能性を探る必要がある。（委員 E）

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

目標は達成されており、適切な開発計画、体制であったと認められる。

なお、今後起こり得るリスクに備えた体制を維持できるよう努力を継続いただくとともに、脱オートクレーブ技術を組み込んだ次世代尾翼、主翼等の開発プログラムについても検討いただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 目標を達成したことに鑑み、適切な開発計画、体制であったと認められる。（委員 A）
- ・ 真面目に取り組んでいる（委員 C）
- ・ 日本独自の認証を念頭としている。（委員 D）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 変化への対応を迫られる状況ではなかったということであるが、起こりうるリスクに備えた体制を今後も維持できるように努力を続けてほしい。（委員 A）
- ・ VaRTM 等 OOA 技術を組み込んだ次世代尾翼、主翼等のプログラムの必要性（装備品等を含め）。（委員 D）
- ・ 基礎研究である VaRTM を実用化する際には適切なマネジメントが必要。（委員 E）

## 6. 総合評価

輸送機械の発展に極めて有効な目標を立て、目標とした成果を達成したという点で、優れていると評価される。航空機のみならず、自動車などへの波及効果は大きいと考えられる。

なお、今後も幅広い輸送機械に適用拡大できるよう努めていただきたい。また、厚みのある製品量産・品質確立ができるよう、引き続き努力いただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 輸送機械の発展に極めて有効な目標を立て、目標とした成果を達成したという点で、優れていると評価される。（委員 A）
- ・ 直近の課題に対してはこれで問題ない。（委員 C）
- ・ 航空機のみならず、自動車など波及対象需要が大きいと考えられる。（委員 D）
- ・ 航空機における複合材技術の国際競争力は国として維持向上すべきである。（委員 E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 幅広い輸送機械への適用という点で、今後もその適用範囲を拡大できるように努めてもらいたい。（委員 A）
- ・ もう少し大きなコミュニティで取り組むべきでは。（委員 C）
- ・ 重要課題として、例えば主翼に適用できるだけの厚みがある製品量産・品質を確立する。（委員 D）

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

大型部材の量産・品質確立に向けた取組を継続いただきたい。また、航空機以外の分野への適用も含めて、事業化戦略を構築いただきたい。その際、重量軽減のみならず、製造コスト・工期の低減についても、目標を明確にする必要があると考えられる。認証、標準化においても、日本の基準が採用されるような戦略的アプローチを検討いただきたい。

### 【各委員の提言】

- ・ 航空機を対象とした研究開発成果という点では、本事業は高く評価される。一方で、幅広い輸送機械等への炭素繊維複合材の適用範囲を広げるという大きな目的という点では、まだ明確な方向性が見えていないように感じられる。この面での今後の努力に期待する。  
(委員A)
- ・ 航空宇宙用炭素繊維の製造量が世界一の日本にとって、炭素繊維材料を用いた大型の航空機の構造材の製造法の確立は製造産業を先端技術で牽引する効果がある。着実に大型の構造材の製造に挑戦していて高く評価できる。(委員B)
- ・ 高効率な複合材構造の成形には欠かすことの出来ない技術であり、国からの支援は妥当である。一方で、ドイツ等欧米の施設規模と比べた時にあまり小規模であり、一般産業への普及の可能性は明確でない。本プロジェクトのように規模を絞って開発することは技術ガラパゴス化につながるおそれもある。今後、低い設備投資で高付加かつ汎用性のある技術シーズが重要となると感じた。(委員C)
- ・ 第一に同技術の認証取得・標準化において、できるだけ日本の認証基準・標準がグローバルに採用されるような戦略的なアプローチが必要となると考えます。完成機メーカーとして、認証基準、標準を提言できる戦略的なアプローチを実施してください。その際、本研究などで取得したデータや安全性に対する考え方が非常に重要となるため、是非、データ、情報蓄積・活用を進めてください。第二に本技術が例えば航空機の主翼に適用できるために、厚さのある製品の製造ができる技術としてください。加えて、従来のアルミニウムなどの金属系材料の特性に基づく設計のみならず、コンポジットの特性を活かした設計・製造技術の開発・実用化にも注力していただきたいと思います。第三に認証・標準関連の情報・データ、例えば主翼など重要構造部位に適用できるVaRTM技術を核としながら、主翼であれば単にウィングボックスだけではなく、フラップ等の制御舵・制御システム、降着システム関連、防氷システム、空力改善のための層流制御技術やリブレット技術、ヘルスマモニタリング技術、高量産技術などを総合的に組み合わせ、次世代プログラムを早急に立ち上げることが重要です。その成果をボーイングなどの次世代小型機に対して早い段階に提案し、可能であれば、ボーイングなど海外企業を取り込んだ体制構築が有効と考えます。(委員D)
- ・ 航空機における複合材技術の国際競争力は国として維持向上すべきであり、取り組んだテーマについては評価できるし、製造安定性等の目標に対しての成果も評価できる。一

方、事後評価時点での目標・指標として「アルミ材と比較して15%以上の重量軽減の実現」としていたが、実際の取組みは製造安定性に対する研究である。もともとVaRTMの開発により実現したかったことは、従来の複合材からの製造コスト（&工期）低減と思われることから、この点についても明確化いただきたい。基礎研究であるVaRTMを実用化するには適切なマネジメントが必要である。（委員E）

## 2 航空機用先進システム基盤技術開発（耐雷・帯電特性解析技術開発）

### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

複合材料への落雷時の安全確保は、航空機への複合材料適用を拡大するためには非常に重要な技術であり、耐雷、帯電特性の解析等を実施する本事業は、国際競争力を高める上でも重点をおいて技術開発すべき位置付けにあると判断できる。

なお、事業目的については、完成機メーカーとの議論も必要であると考えられる。また、他分野への普及についても積極的に進めていただきたい。

#### 【肯定的意見】

- ・ 航空機に多用されることとなった複合材料への落雷時の安全確保は、我が国が得意とする複合材料の航空機への適用を益々向上させるためには、非常に重要な技術であり、本事業は特に重点をおいて技術開発すべき位置づけにあると判断される。（委員A）
- ・ 全産業分野から俯瞰しても航空機製造産業分野は国が関与する必要性大。（委員B）
- ・ 大変重要なテーマである。（委員C）
- ・ 耐雷、帯電特性の解析はコンポジットなどで重要（委員D）
- ・ 航空機分野での複合材技術は国際競争力においても重要であり、国の事業として妥当である。（委員E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 他分野の産業界への普及を国とともに積極的に進めていっていただきたい。（委員A）
- ・ 具体的な解法まで踏み込めるところまで到達すると素晴らしい。（委員B）
- ・ OEM（完成機メーカー）との間ですべき議論ではないかと感じる。（委員C）
- ・ 解析手法のあとに放電現象、帯電現象を研究する手順が分かりにくい。（委員D）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

非常に難しいが安全上避けては通れない課題であり、必要な項目を体系的に構築、整理し、そこから明確な目標群を作り上げており、評価できる。目標設定により、基礎的な研究の積み上げがなされている。実大の燃料タンク・システム供試体での検証が実施されている点についても評価できる。

なお、目標の項目が多過ぎるために、プロジェクトの進捗管理が煩雑にならないよう、今後、同種の計画を立てる際には今回得たノウハウを活用すべきである。また、競合技術等との関係を整理すべきである。

### 【肯定的意見】

- ・ 本事業の目標達成のために必要な項目を体系的に構築、整理し、そこから明確な目標群を作り上げた点は、評価される。（委員A）
- ・ 非常に難しいが安全上避けては通れない課題に取り組んでいる。（委員B）
- ・ システムティックに課題設定がなされている。（委員C）
- ・ 実大の燃料タンク・システム供試体で実施。（委員D）
- ・ 複合材における耐雷・帯電は航空機での複合材利用が進む中での新たな課題であり、多岐にわたる目標設定で基礎的な研究の積み上げがされている。（委員E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 目標を立てるにあたり、あまりに多くの項目を設定したために、各項目の進捗を管理するプロジェクト管理は苦勞されたのではないかとと思われる。成果をきちんと出されており、特に問題とは考えないが、今後、同種の計画をたてる際は今回の経験で得たノウハウを生かしていただきたい。（委員A）
- ・ タイムスパンが多少長いと感じる。（委員C）
- ・ 本研究がコンポジット翼などにどのように活かされるか、競合技術等との関係がよくわからない。（委員D）



### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

多くの項目について目標通りの成果が得られているとともに、各種専門家から評価を受けており、また論文や発表、特許等に反映されている点が評価できる。また、国際標準への提案の取組についても評価できる。

なお、国際標準への提案では、外部組織による活動の中での提案という形になり、事業担当者の努力のみでは目標達成が容易ではないと考えられるが、計画立案段階から多方面の情報収集を行う必要性を認識すべきである。標準化の具体的な方法、手順が現時点では不明確な部分があるが、活動を継続し、実現していただきたい。

#### 【肯定的意見】

- ・ほとんどの(多くの)項目について、目標どおりの成果が得られたことは評価される。(委員A)
- ・誠実な取り組みであり、十分な成果が得られている。(委員C)
- ・国際標準への提案。(委員D)
- ・成果については、各種専門家からの評価を得ており、論文や発表、特許等に反映されている。(委員E)

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・一方で、国際標準への提案という点では、外部組織による活動の中での提案ということもあり、本事業担当者の努力のみで目標を達成するということが容易でないことは理解されるが、提案に当たっては、多方面からの情報収集の必要性が強く認識される。(委員A)
- ・国際標準提案の具体的な方法、手順が明らかではない。(委員D)
- ・国際的なリーダーシップや標準化についての活動を継続し、実現してほしい。(委員E)

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

事業化見通しの点で、将来航空機開発の流れと事業成果の適用の関係、ロードマップがきちんと整理されている。また、完成機メーカーとの連携強化が期待される。

なお、今後も事業化や標準化に向けた課題や道筋を明確にしていく必要性はある。また、他分野に適用する場合、安全設計等で期待される事項も異なると考えられることから、他分野の状況を把握する必要性もある。

##### 【肯定的意見】

- ・ 事業化の見通しの点で、将来の航空機開発の流れと本事業の成果の適用の関係やロードマップはきちんと考えられている。（委員 A）
- ・ OEMとの連携強化につながり得る。（委員 C）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 波及効果という点では、検討されている他分野は航空機開発とは、安全設計の面で期待されている事柄が異なることが推察され、そのような他産業分野の状況をウォッチする必要性も感じられる。（委員 A）
- ・ 波及というよりは至急解決すべき特定課題である（委員 C）
- ・ 検証がいかに事業化に有効か、さらにいかに事業化に結び付けるかが明らかでない。（委員 D）
- ・ 幅広い研究で成果を出している一方、事業化や標準化に向けての残る課題について不明確のように思える。（委員 E）

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

年度毎の計画進捗に合わせて、研究開発体制の見直しがきちんとなされ、効率的な事業運営がなされてきたと判断される。

なお、標準化団体の動向を把握する努力がなされてきた点は評価できるが、今後も多くの国際標準化活動が予定されているとのことであり、更なる取組を期待したい。また、一部達成となっている項目についても、引き続き検討を進めていただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 年度毎の計画の進捗にあわせて、研究開発体制の見直しがきちんとなされ、効率的な運営が行われてきたと判断される。（委員A）
- ・ OEMとの連携強化につながり得る。（委員C）
- ・ 多くの課題に対応し、開発体制も適宜見直されている。（委員E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ SAE（標準化団体）の動向を把握する努力は多くされてきたことは評価されるが、本事業終了後に、多くの国際標準化活動が予定されているとのことであり、益々の努力をお願いしたい。（委員A）
- ・ 成果に一部達成がある（すべて達成されていない）。（委員D）

## 6. 総合評価

本事業の成果は、我が国の今後の航空機開発の質を向上・維持するために重要であり、それに役立つ成果が得られたと評価できる。技術向上に確実につながっている。

なお、国際標準化については引き続き今後の努力を期待する。できる限り早急に実用化できるよう、引き続きの取組に期待したい。

### 【肯定的意見】

- ・ 本事業の成果は、我が国の今後の航空機開発の質を向上・維持するために重要な技術成果であり、それに役立つ成果が得られたと評価できる。（委員 A）
- ・ 技術向上には確実につながっている。（委員 C）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 国際標準化という分野での今後の努力に期待する。（委員 A）
- ・ 先延ばしせず、今後 2～3 年にて目処づけをすべき（委員 C）

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

今後の航空機産業の国際競争力の向上、安全性向上に非常に重要な課題であり、取組は評価できる一方、研究開発の内容は基礎的段階でアカデミックなアプローチとなっていることから、実用化や国際標準化含めた事業化の戦略について、更なる詳細な検討を実施していただきたい。この事業で得られた国際標準化活動の経験・ノウハウは、今後、他分野の事業でも生かされることが期待される。

### 【各委員の提言】

- ・ 今後の航空機産業の国際競争力を向上させていくために、本事業の成果をどのように生かしていくかについて、是非検討していただきたい。複合材料を単に航空機に適用するというだけでは他国からの進出を許すことになるので、特に重要な本事業のような技術成果を更に発展していってもらうことが強く望まれる。国際標準化活動という、通常の技術開発とは少し異なる活動の重要性は、益々増しており、この面での経験やノウハウを是非今後の他分野の事業にも生かしていただきたい。（委員A）
- ・ 特に、日本周辺の地域では航空機への落雷が多いと聞いている。近年の炭素繊維複合材を多用する航空機においては、安全上非常に重要な解決すべき課題であり、それに取り組もうとした発想や姿勢は高く評価できる。道なき道を探して探求する状況は、航空産業がいつも直面する状況であり、研究開発から航空産業に携わることが可能な国であるためには、それを克服していける実力が必要である。（委員B）
- ・ 航空機への複合材適用が進む中、必要不可欠な評価技術であることは異論がない。一方で、金属からの代替に関する過渡期にあらわれた問題であるとの感が強い。出来るだけ早くかつ簡易手法の確立を行い、その後は必要に応じて更新するといった戦略が良いのではないかと感じた。（委員C）
- ・ 耐雷、帯電性の研究がコンポジットなどで重要であることは十分に理解できますが、本研究はかなり基礎的な研究で、これが本当にコンポジットの主翼や中央翼などの製造に活かされるか、ロードマップがいまひとつよく見えません。難易度が高く、アカデミックなアプローチをとっていますが、事業化との結びつきが希薄な感じを受けます、コンポジットの耐雷性という観点では、山形大やJAXAなどが関与して研究開発されている導電性樹脂の研究はわかりやすいのですが、こうした国内の関連技術との連携やその中で本研究の位置づけなどをきちんと整理することも必要かと考えます。国際標準化の取り組みは非常に良いことだと考えますが、現段階の成果でいかに国際標準としていくかがやはりよく見えません。おそらく提案や発表だけで標準とするのは難しいと考えられます。（委員D）
- ・ 複合材における耐雷・帯電は航空機での複合材利用が進む中での新たな課題であり、また、日本は世界的にも落雷のレベルが強く、航空機の運航に対する影響が大きい。国際的なリーダーシップや標準化に対する取組みを継続して、複合材技術に関する我が国の

優位性を向上してほしい。（委員E）

### 3 航空機用先進システム基盤技術開発（革新的防除氷技術）

#### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

着氷は航空機の安全性を阻害する重大な要因の一つであり、それを解決するために日欧共同研究の枠組みを活用して実施された本事業は、本分野で我が国が航空機システム開発に参入するために有効なものであったと判断される。

なお、事業終了後も欧州サイドと研究協力を継続することが可能であれば、着氷分野での我が国の貢献につながると考えられる。一方、欧米での防氷・着氷の競合技術に対する優位性の明確化が望まれる。また、メンテナンス性にまで踏み込んだ検討がなされると更に良い。

#### 【肯定的意見】

- ・ 着氷は航空機の安全性を阻害する重大な要因の一つであり、それを解決するために国際共同研究プロジェクトとして実施された本事業は、本分野での今後の我が国の存在感を少しでも示すために大変有効であったと判断される。（委員 A）
- ・ 全産業分野から俯瞰しても航空分野は国が関与する必要性大。（委員 B）
- ・ 実際に課題となっているテーマである。（委員 C）
- ・ 撥水性を活かした防除氷コーティングという独自の技術。（委員 D）
- ・ 防除氷システムは航空機の安全上非常に重要であり、日欧共同研究の仕組みを活用して、わが国が航空機システム開発に参入することに意義がある。（委員 E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 国際共同研究プロジェクトとして実施された本事業において共同研究先の相手方とも本事業終了後も研究協力を続けていくようなことが可能であれば、着氷分野での我が国の今後の貢献につながると思われる。（委員 A）
- ・ 耐久性塗料のメンテナンス性にまで踏み込むとさらに良い。（委員 B）
- ・ 欧米で研究開発している防氷・着氷の競合技術に対する優位性が不明確。（委員 D）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

現状に対する的確な分析に基づき、目標とする項目を立案し、定量的な目標も含みながら明確な事業の指標が立てられている。また、日欧の役割分担についても明確となっている。防除氷コーティングと電熱システムの組合せによる省電力の実現と、着氷の課題を通じて航空機の塗装をシステムで考えるきっかけを与えた点は評価できる。

なお、第三者から見た際にも、得られる効果がわかりやすい目標設定とするとより良い。また、事業化に向けた更なる検討が必要と考えられる。

### 【肯定的意見】

- ・現状に対する的確な分析に基づき、目標とする項目を立案し、一部には定量的な目標を設定することで、明確な事業の指標がたてられている。（委員A）
- ・着氷の課題を通じて旅客航空機の塗装をシステムで考えるきっかけを与えている。（委員B）
- ・防除氷コーティングと電熱システムとの組み合わせによる省電力性能。（委員D）
- ・日欧の役割分担とそれぞれの目標設定がなされている。（委員E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・国際共同研究プロジェクトとして実施された本事業において共同研究先の相手方とも本事業終了後も研究協力を続けていくようなことが可能であれば、着氷分野での我が国の今後の貢献につながると思われる。（委員A）
- ・少し外部からわかりにくい目標設定に感じた。（委員C）
- ・事業化に向けての具体的な出口が見えていない。（委員D）



### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

撥水特性については、目標を上回る成果が得られており、評価できる。

なお、実運用に向けては、事業化の方向性を明確にしつつ、エアラインの整備コスト等長期的な視点から、耐久性の更なる性能向上の必要性等を検討いただきたい。

#### 【肯定的意見】

- ・ 撥水特性については、目標を大きく上回る成果が得られており、高く評価される。（委員 A）
- ・ 欧州パートナーと連携した体制。（委員 D）
- ・ 目標に対しては成果が確認されている。（委員 E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 耐久性については、現時点では目標を十分に達成しており、問題はないが、今後実運用に用いられるようになったときに、エアラインの整備コスト等長期的な視点から、耐久性に関して更に性能を向上させる必要性を生じる等の状況が考えられる。（委員 A）
- ・ 認定をどのように関わり合うのかが不明。（委員 C）
- ・ 本技術に限定した事業化の事業性が不明（欧州はシステムの一部として研究開発）。（委員 D）

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

事業化に向けた計画が立てられており、また様々な産業分野での波及効果が見込まれる。  
なお、事業化、波及効果ともに、今後も継続した検討をお願いしたい。また、試験法等の標準化のアプローチを明確にすることが望まれる。

##### 【肯定的意見】

- ・事業化に向けた計画は立てられている点は認められる。（委員A）
- ・試験法・評価法の設定（委員D）
- ・実証試験はこれからであるが、様々な産業分野での波及効果が見込まれる。（委員E）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・事業化、波及効果共に、未だ検討段階ということであり、今後もこの面での努力をお願いしたい。（委員A）
- ・あまり期待できない。（委員C）
- ・試験法を標準化するアプローチが不明確。（委員D）

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

国際共同研究の面でも的確な情報共有を行っており、本事業の実施体制も適切である。  
また、今後計画されている飛行実証に期待したい。

航空機の安全性に大きく関わる分野であり、今後も常に世界の情勢を注視いただきたい。  
また、事業化に向けた欧州サイドの研究開発との統合等の方向性を明確にするよう検討を進めていただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 国際共同研究の面でも的確な情報共有を行っており、また本事業としても適切な実施体制にあると評価される。（委員 A）
- ・ 飛行実証を計画している。（委員 D）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 変化への対応という面で、特に大きく問題となる変化はなかったようであるが、航空安全に大きく関わる分野であることに鑑み、今後も常に世界の状況を注視しつづけていただきたい。（委員 A）
- ・ ニッチである。（委員 C）
- ・ 実証試験や事業化に向けては、日欧コンソーシアム全体での取組みと思われるが、それぞれの役割がどのように統合されるのか、明確にした方が良いと思われる。（委員 E）

## 6. 総合評価

航空機の安全性に非常に重要な分野であり、革新的なシステムを提案、着実にその効果を確認できたことは高く評価できる。また、航空機システム開発に参入する観点から日欧の共同研究としてもふさわしい取組である。

なお、欧州側の成果と組み合わせたシステム実証においても、確実に成果が得られるよう、検討を継続いただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 航空安全に非常に重要な本分野において、革新的なシステムを提案し、その効果を確認できたことは特に高く評価される。（委員 A）
- ・ 着実に取り組んでいる点は評価できる。（委員 C）
- ・ 日欧共同研究としてふさわしい取組みである。（委員 E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 欧州側の成果と組み合わせたシステムを飛行実証するのは、本事業終了後となっているが、その段階でも確実な成果が得られるように、今後も益々の努力をお願いしたい。（委員 A）
- ・ 国のプロジェクトでやるにはもう少し大きなテーマ設計が良いのではないか。（委員 C）

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

共同研究で得られた欧州サイドとのチャンネルを維持しつつ、今後の事業化戦略については、単独技術だけでなく、システムとしての開発、実証の検討を進めていただきたい。また、エアラインでの運用も考慮し、ビジネスモデルの検討を行うとともに、オペレータとの連携も検討いただきたい。本事業中で実施されていないエロージョン試験等は、引き続き取組を継続いただきたい。

### 【各委員の提言】

- ・ 本事業を通じて構築された国際共同研究体制に関して、事業終了とともに、その体制は無くなると認識しているが、本事業を通じて国際共同研究の相手方と接触する多くのチャンネルが出来たものと思われる。着氷分野は、今後も益々重要性を増す分野であり、これからの技術開発に備えて、このような情報チャンネルは是非維持できるように努めていただきたい。（委員A）
- ・ 着氷は、翼の表面の課題を解決する課題であり、塗料による解決はエアラインによるボディ塗装の周期や作業工程などと連動した課題解決法があるとコマーシャルベースに乗った実用的なシステムになる可能性がある。多くの表面積をもつ旅客機全体の塗装も考慮しつつ、そのメンテナンスコストの中で同時に翼への着氷が防止できるというようなビジネスモデルがあると良いかもしれない。（委員B）
- ・ 大事な技術であると思うが、ここまでの投資が必要である意図が今一つ見出せなかった。自動車への普及という話が出たが、それでは”単なるくもり止め的一种？”という疑念がぬぐえない。今後、技術プレゼンの仕方にも工夫してほしい。（委員C）
- ・ VaRTM技術などと同様、防除氷技術単独での研究開発にとどまらず、主翼システムなど全体システムの開発に組み込んだ開発、実証に結び付けることが重要と考えます。このことで国内の装備システム関連の技術・産業基盤全体の底上げが可能となると考えます。また、単独技術ではなく、たとえば、主翼システム全体として海外の主要航空機メーカーに売り込むことが、今後は重要かと考えます。防氷技術（コーティング＋電熱システム）の必要性・効果等は、航空機の飛行経路や天候などによって変化すると考えられます。このため、本研究の防氷技術をより有効に活用するための飛行環境（地域や季節などによる違い等）やその日の天候などとの関係のデータを取得分析し、その結果をもってシミュレーションを行い、顧客により有益な提案ができるようにすることが、事業化の視点からは重要と考えます。その意味で、今後はエアラインなどのオペレータとの連携も重視すべきと考えます。（委員D）
- ・ 日欧共同研究という仕組みを活用して、日本が航空機システム分野での存在感を増す取組みであり、継続して成果を追求してほしい。防除氷システムは航空機の安全上非常に重要であるが、あまり技術的な革新がなく、研究テーマとしてもユニークである。コーティングについては、コーティングの劣化が性能を左右する為、エロージョン試験（特

に空気中の粉塵）が大切になると思われるので、計画に反映してほしい。さらに、実用化には、コーティングの効果（＝着氷していないこと）を常時モニターできる技術が必須であると思われ、欧州側のテーマである着氷センサー等の開発との連携強化や相乗効果が重要と思われる。欧州パートナーとは年2回の会議開催とあるが、常時連携が取れるような工夫が必要ではないだろうか。地上駐機中の防除雪氷作業に対しても研究テーマとしていて、ぜひ取り組んでほしいが、どの研究がこのテーマに対する取組みなのか、よく分からない。（委員E）

#### 4 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機用降着システム技術開発）

##### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

我が国が国際的に競争できる降着システムにおける、ユニークかつチャレンジングなテーマであり、航空機システム分野の発展に寄与する可能性があるという点から高く評価できる。

なお、電動タキシングシステムは世界的に多くの機関で研究開発が実施されており、差別化は必要と考えられる。

##### 【肯定的意見】

- ・世界に類を見ないアイデアを活用して、寿命の長いブレーキシステムを実用化することができれば、欧米に比べて一歩遅れていると言わざるを得ない我が国の航空機システム分野の発展に寄与する可能性があり、その点から高く評価される。（委員A）
- ・全産業分野から俯瞰しても航空分野は国が関与する必要性大（委員B）
- ・チャレンジングなテーマであり国が取り組むのは妥当。（委員C）
- ・電磁流体を使った航空機向けブレーキ技術のユニークさ。（委員D）
- ・降着システムは我が国が国際的に競争できる数少ない航空機システムであり、その競争力を伸ばすことは有意義である。（委員E）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・電動タキシングシステム自体は、世界の多くの機関で研究開発が進められており、何らかの差別化は必要であると思われる。（委員A）
- ・降着装置は使用している時間と使用していない時間をどのように効率化するか。（委員B）
- ・出口戦略がいま一つに感じる。（委員C）
- ・電磁流体を使ったブレーキはまだ基礎的だが、事業化年が2025年とやや長い。（委員D）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

電磁ブレーキの適用に関しては、基礎特性から着実に調べる必要があり、目標は妥当。また、電動タキシングシステムについても、環境負荷低減に資する重要な技術開発であると認められる。

なお、電動タキシングについては、電力の供給方法や重量の問題にも留意しつつ、研究開発の加速が望まれる。電磁ブレーキについては、ブレーキ非使用時の抵抗についての目標値設定や、重量に対する目標値を検討すべき。

### 【肯定的意見】

- ・ 世界で数例しかない電磁流体のブレーキへの活用に関しては、基礎特性から着実に調べていく必要があり、その点で目標は妥当である。（委員A）
- ・ 地上の空港内での大量の化石燃料の燃焼という人の社会環境負荷の低減にも取り組む課題。（委員B）
- ・ 電動タキシングシステムは今後の重要な装備システム技術である。（委員D）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 1項と同じく電動タキシングシステムに関しては、何か特徴のある目標が設定されてもよかった（委員A）
- ・ 電力を利用したシステムは、電力の出し方を考えた設計が必要。（委員B）
- ・ 重量の問題が残っているように感じる。（委員C）
- ・ 電動タキシング技術の事業化年が 2025 年となっているのは長すぎる（欧米は 2020 年までに実用化）。（委員D）
- ・ 電磁流体ブレーキについては、非使用時（＝離陸時）の抵抗増について許容可能な目標値設定や重量増に対する目標値、タキシングシステムについても重量増に対する目標値が必要ではないか。（委員E）



### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

電磁ブレーキシステムに関しては、目標とした基礎特性の取得及び試作を完了している点は評価されるとともに、継続的な研究が期待される。電動タキシングについても、ホイール内蔵型モータの開発が着実に実施されていると評価できる。

なお、電動タキシングについては、全ての項目を達成した訳ではないが、継続研究による達成を期待したい。また、前脚だけでなく、メインギアの電動化の必要性の検討が望まれる。

#### 【肯定的意見】

- ・ 電磁ブレーキシステムに関しては、目標とした基礎特性の取得と試作は完了しており、その点は評価されるとともに、今後の継続的な研究が期待される。（委員A）
- ・ 着実に実施されている。（委員C）
- ・ モータを外付けにするのではなく、ホイールインモータ形態をとっている（委員D）
- ・ 未達のものについても研究の継続で達成は可能と思われる。（委員E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 電動タキシングシステムについては、未だすべての目標を達成した訳ではないが、継続された研究テーマのもと、是非達成していただきたい。（委員A）
- ・ 電動タキシングが前輪を対象としている点（メインギアの電動化が必要ではないか）。（委員D）

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

事業化に向けた長期的な計画が明確にされている点や、試験供試体で着実に成果が確認されている点は評価できる。電磁ブレーキについては、航空機に限らない波及効果の検討を行っていただきたい。

なお、今後も想定している長期的な事業計画は着実に実施いただきたい。競合他社の動向分析を実施するとともに、新造機、レトロフィットとともに認証取得に早めに取り組むべきである。

##### 【肯定的意見】

- ・事業化に向けた長期的な計画が明確にされている点が評価される。また電磁ブレーキシステムに関しては、航空機に限らない広汎な波及効果が期待され、その点での今後の検討も強くお願いしたい。（委員A）
- ・電磁ブレーキの試験供試体で成果を確認。（委員D）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・想定している長期的な事業計画を計画通りに着実に実行していただきたい。（委員A）
- ・波及効果についてはあまり期待できないのではないかと。（委員C）
- ・新造機向け、レトロフィットとともに認証の問題を早めに手掛けることが必要。（委員D）
- ・タキシングシステムについての競合他社の動向分析がもう少し必要ではないかと。（委員E）

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

計画は現実的なもので適切であり、各専門分野での確な再委託や外注を行う体制となっており、適切な実施体制であると判断される。

なお、更に取組を強化するために、研究機関や航空機メーカー、エアラインとの連携も検討すべきである。また、長期の事業計画であり、情勢の変化には常に注意を払っていただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・それぞれの専門分野に分けて的確な再委託や外注を行う体制となっており、適切な実施体制になっていると判断される。（委員A）
- ・事業化のシナリオ（ロードマップ）が比較的現実的である。（委員D）
- ・研究計画や実施体制は適切であるが、更に強化していくためには研究機関との連携も必要ではないか。（委員E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・変化への対応を必要とする情勢の変化はなかったとのことであるが、今後も長期的な事業計画となっていることもあり、常に注意を怠らないようにしていただきたい。（委員A）
- ・体制に航空機メーカーや顧客（エアライン）が加わっていない点。（委員D）

## 6. 総合評価

電磁ブレーキについては、全く新しいアイデアを実用化する事業であり、基礎的な特性については確認ができている点は評価できる。今後の更なる発展が期待される。

なお、電動タキシングについては、それ自身の消費する電気エネルギーや重量増加など、燃費改善とのバランスを踏まえた検討が必要である。事業化については、より具体的検討が望まれる。

### 【肯定的意見】

- ・ 全く新しいアイデアを実用化しようとする事業であり、基礎的な特性については目標どおり把握することができており、今後の発展が強く期待される。（委員 A）
- ・ 興味深いテーマであるのは認める。（委員 C）
- ・ レトロフィットまで考えている。（委員 D）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 電動タキシングシステムについては、それ自身が要する電動エネルギーあるいは機体重量増加といったように、このシステムを利用することによる燃費改善とのバランスが重要であり、このような航空機全体を見据える観点からの検討が必須であると考える。（委員 A）
- ・ 出口がはっきりしない印象を受けた。プレゼンか成果の見せ方に問題があるかもしれない。（委員 C）
- ・ 成果に一部達成がある。（委員 D）

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

電磁ブレーキについては、全く新たなアイデアであり、長期的な視点に立って研究開発を継続していただきたい。技術的に基礎段階だが、運用データ取得の必要性もあると考えられ、できるだけ早い段階で実証試験にもっていくことが重要であることから、スケジュールの前倒しが望まれる。ブレーキ非使用時の抵抗については、目標値の設定を検討いただきたい。

また、電動タキシングについては、航空機全体の電動化の流れと整合的であり、引き続き総合的に取り組むべき技術課題である。消費電力、重量の増加と燃費改善がトレードオフの関係にあり、その点を踏まえた検討は必要である。事業化に向けては、認証取得のために機体メーカーやエアラインとの連携を図るとともに、メインギアへの適用や、その他装置の電動化との統合システムについても検討を行っていただきたい。事業化のタイミングは、開発の進捗状況も踏まえつつ、電磁ブレーキとは別途、できる限りのスケジュールの前倒しが望まれる。

### 【各委員の提言】

- ・繰り返しになるが、全く新しいアイデアによる、ブレーキシステムの検討ということで、是非この種を絶やさないように（かつすぐには成果が出にくいとは思うが）、長期的な視点にたって是非研究開発を続けていただきたい。電動タキシングに関しては、航空機全体をみたときの効果という点が重要だと思っている。重量のある電動タキシングシステムは空港での短時間のみ有効であり、巡航中は単なる dead weight にしかならないという点が問題である。ただし将来的に極端な場合は環境保全のためにタキシング中はエンジンの使用を極力控えるといったような事態もあり得ないとは言えない訳であり、そのような事態も想定した上で研究開発を進めていっていただきたい。（委員A）
- ・旅客航空機の降着装置や操舵装置などのアクチュエータなどの装置は電動化が進みつつあるのと、エコな電動タキシングは、進歩の方向が同じでうまく統合システムを考えると効率化することが期待される。APUによる発電量、空港からの給電・充電量、降着装置の電動走行時間・出力、巡航飛行時のAPUの負荷の平滑化などの観点から航空機の電力システムの総合的な最適化を牽引するポジションに、電動降着装置は位置していると考えられ、波及効果が期待される。そういう視点と、自動車の自動運転のような技術の融合といった視点からの電動降着装置の開発を期待している。（委員B）
- ・興味深い技術ではあるが製品化までの距離があまりにもあり、現実感がとぼしいという感を受けた。このような研究あるいは技術は航空機のような保守的な分野ではなく、他分野の方が適しているのではないか。（委員C）
- ・電磁流体を使ったブレーキシステムは、海外でも個人が特許を出している程度と理解しています。その意味で、技術のユニークさは非常に高く評価されるものと考えます。技術的に基礎段階ですが、運用データ取得の必要性もあるとみられ、できるだけ早い段階

で実証試験にもっていくことが重要かと考えます。その意味で、スケジュール感はもう少し早められないでしょうか。一方の電動タキシングシステムは、航空機の電動化の流れから見て、日本の航空機産業として取り組むべき技術と認識しております。ただし、以下の点に問題を感じます。

① 前輪を対象としている点

航空機の運用や海外での事業開発例をみると、やはりメインギアでの電動化を考えるべきではないでしょうか。もし、メインギアで電動化できれば、VaRTMや防氷技術などと組み合わせた次世代小型機向けなどの主翼システムのプログラムとしてまとめることができます。

② 実用化時期

現状、実用化時期が2025年頃となっていますが、これは電磁流体ブレーキとの組み合わせを考えたためと理解しております。電磁流体ブレーキのユニークさは評価されますが、電動タキシングについては、2020年までにおそらく欧米の複数のシステムが実用化されるであろうことを考えると、できるだけ早く実証、実用化にもっていったほうが良いと考えます。例えば、MRJにオプションとして組み込むなど、具体的な事業化計画をあるといいと思います。

③ 事業化に向けては認証取得が必要となりますが、その意味で実機での実証やオペレータなどの考え方を取り込むことが有効と考えます。その意味で、どこかの段階で完成機メーカーやエアラインをメンバーに加えることも検討していただければと思います。（委員D）

- ・ 航空機用ブレーキはスチールからカーボンディスクに進化したが、カーボンディスクの交換に関わる整備費は膨大であり、そのコスト削減が期待できる電磁流体ブレーキの研究は是非進めてほしい。実用化に向けては、離陸時に電磁流体による抵抗増がどの程度あるのか、どの程度なら問題ないのか、目標値を明確にする必要がある。電動タキシングについては、タキシング時の低公害というのは分かりやすいが、重量増とのバーターとしての要素が強く、重量に対する目標値を分かりやすく設定する必要があると思われる。（委員E）

## 5 航空機用先進システム基盤技術開発（次世代航空機エンジン用冷却装置）

### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

ファンケース重量を低減し、燃費向上とエミッション低減を目指すという考えは理解できる。また、日欧共同研究で技術的優位性を伸ばす取組は評価できる。

なお、サーフェス・クーラーをコア・フェアリングに移すことについての定量的な利点、また波及効果については更なる検討が必要である。

#### 【肯定的意見】

- ・ ファンケース重量を低減し、燃費向上とエミッション低減を目指すという考えは理解できる。（委員 A）
- ・ 全産業分野から俯瞰しても航空分野は国が関与する必要性大（委員 B）
- ・ 興味深いテーマではある。（委員 C）
- ・ ロールスロイス／EU の CleanSky で実施、事業の出口が見えている点（委員 D）
- ・ 我が国の技術的優位性を日欧共同開発で伸ばす取組みであり、非常に良い。（委員 E）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ サーフェス・クーラーをコア・フェアリングに移すことで、新たな装置を作る手間に見あった効果が得られるのかという点については、もっとはっきりとした定量的な利点を明確にすべきである。（委員 A）
- ・ 3次元形状などが今後の課題となるが克服後の応用に期待が持てる。（委員 B）
- ・ 実用化への見通しが必ずしも立っておらず、短期間のサポートが妥当かどうかは判断しかねる（委員 C）
- ・ 事業化の出口は明確だが、ひろがりがよく見えない（サプライヤで終わりそうである）（委員 D）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

エネルギー効率、燃費に直結する重要な課題である。エンジンメーカーとの協議の上で、事業化を前提として具体的に個々の目標を設定している点は、計画的であり評価できる。

個々の目標達成と、事業目的の達成の関係については、更なる明確化が必要である。

### 【肯定的意見】

- ・ 具体的に個々の目標を設定している点は、計画的であり評価出来る。（委員A）
- ・ 冷却の効率の向上は地味だがエネルギー効率、燃費に直結する重要な課題。（委員B）
- ・ エンジンメーカーとの協議の上であり妥当である。（委員C）
- ・ 要求仕様をエンジンメーカーとともに作成している。（委員D）
- ・ 事業化を前提にした具体的目標が明確であり、非常に良い。（委員E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 個々の目標を達成することでサーフェース・クーラー自体の開発に資することは理解できるが、それらの目標をすべて達成することで、本事業の目的を達成につながるのかという点があまりはっきりしない。（委員A）
- ・ ロールスロイスのALPSは既に終了していると理解しており、次のAdvanceあるいはUltrafan等への展開可能性がよく見えない（委員D）



### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

次世代の航空機エンジンに向けて、日本の要素技術の強みとなるものであり、重要課題にしっかりと取り組み、多くの目標を達成した点は評価できる。

なお、一部未達成となっている項目については、今後も達成に向けた努力を継続いただきたい。熱交換性能の向上については、引き続き、より具体的な検証が望まれる。

#### 【肯定的意見】

- ・多くの目標を達成した点は、評価される。（委員A）
- ・その重要な課題にしっかり取り組んでいる。（委員B）
- ・所定の成果は得られている。（委員C）
- ・次世代の航空機エンジンに向けて、日本の要素技術の強みとなる（委員D）

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・一部の目標で未達成となっているが、間違いなく達成できるように今後も努力を続けていただきたい。（委員A）
- ・成果に一部達成がある（委員D）
- ・熱交換性能については目標値に対して成果は大幅に下回っており、『冷却フィンの最適化』だけで達成できる見込みなのか不明である。（委員E）

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

共同研究先との調整がしっかり行われており、事業化に向けての展望が明確となっている点は評価できる。汎用性、波及効果については、更なる検討が期待される。

なお、今回の事業で想定しているものとは異なるクラスのエンジンに応用するための技術的検討も継続いただきたい。

##### 【肯定的意見】

- ・ 共同開発先との調整はしっかりされているようであり、今後の事業化に向けての展望が明確になっている点は評価される。（委員 A）
- ・ 事業化が研究の当初からの目的であり、また汎用性ある技術で波及効果も期待される。（委員 E）

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 他のクラスのエンジンに応用するためにどのようなことが必要かの技術的検討も続けていく必要がある。（委員 A）
- ・ きわめて閉鎖的な航空機エンジンの分野技術の波及効果には疑問がある。（委員 C）
- ・ ロールスロイス以外への展開可能性がよく見えない。（委員 D）

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

開発体制は、問題無く構築されていたと評価できる。

今後も、常に情勢変化に対する注視を継続いただきたい。また、熱交換システム事業の更なる育成のためには、産学官で幅広く裾野を広げた体制が望まれる。

### 【肯定的意見】

- ・ 開発体制等は、問題なく構築されていたと評価される。（委員A）
- ・ 真面目な取り組みであったと感じた。（委員C）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 情勢の変化はなかったとのことであるが、今後も常に対外的な面を含めて、状況の注視は続けていただきたい。（委員A）
- ・ 熱交換システムを我が国の競争力として育成するためには、産官学に幅広く裾野を広げた研究体制が求められる。（委員E）

## 6. 総合評価

サーフェス・クーラーの着実な開発が実施されたと考えられる。エンジンの高性能化に寄与する事業であり、優れた取組であったと評価できる。

なお、目標設定については、定量的な視点から更なる明確化を図っていただきたい。

### 【肯定的意見】

- ・ 本サーフェス・クーラー装置の開発としては着実な実行がなされたと考えている。（委員 A）
- ・ 中長期的には有望な分野であるとする。（委員 C）
- ・ エンジンの高性能化に寄与できる事業であり、取組みは優れていた。（委員 E）

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 繰り返しになるが、そもそもの目標について、是非定量的な視点からも明確にしていきたい。（委員 A）
- ・ 航空分野は採用まで長い時間が必要で、それまで継続的に開発を続けられるかどうかがかギになると感じた。（委員 C）

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

今後のエンジン高性能化において、熱交換システムの開発は有意義であるが、エンジン全体、航空機全体に与える定量的効果については、引き続き詳細な検討をお願いしたい。今後の事業化については、サーフェス・クーラーから始めてより大きなシステムに参入するための戦略について、引き続き検討を行っていただきたい。また、他のエンジンメーカーへの展開可能性も踏まえ、知財の確保等には留意いただきたい。熱交換性能の向上については、今後も具体的分析に基づいた改良が望まれる。

### 【各委員の提言】

- ・ 本サーフェスクーラーの技術開発には、着実な成果を挙げられたと判断されるが、これが、エンジン全体あるいは航空機全体に対してどのような効果があるかという点からも、もう少し詳細な検討をしていただきたい。（委員A）
- ・ エンジンに付加するタイプから提案を初めて、やがてエンジンのチャンバー部品との一体化などに伸展することが期待される。エンジンの設計を変えるインパクトがあるが、エンジンの設計に歩み寄る3次元形状化への技術開発があると、エンジンメーカーにはWINWINの関係で入っていく技術になる可能性がある。冷却装置の導入効果として、様々な3次元形状の冷却壁面の実現と壁面との一体化による部品点数の低減などがあると波及効果が期待できる。（委員B）
- ・ 取り組みは興味深いが、オリジナリティがはっきりせず、他技術との差が明確でなかった。（委員C）
- ・ 航空機エンジン向けの熱交換器で強いポジションをとることは重要と考えます。また、本研究はエンジン・メーカーであるロールスロイスとともに実施しているため、事業の出口が具体的である点は高く評価されると考えております。一方で、国内の装備関連事業を拡大するとき、エンジン向け熱交換器からどのように装備システム事業を広げていくかが見えると良いと思います。一方、製品開発時期が2025年とすると、ロールスロイスのAdvaceプログラムへの参加を考える必要もあるのではないのでしょうか。また、ロールスロイス以外のエンジンメーカーへの展開可能性、知財の確保等についても検討が必要かと考えます。（委員D）
- ・ 今後のエンジンの高性能化で、冷却装置の小型化、高効率化が求められる。熱交換システムは我が国の航空機産業の中でも数少ない競争力ある分野であり、この技術を伸ばすことは有意義である。エンジンメーカーも参加する日欧共同研究として実施され、実用化が明確になっており、良い取り組みと思われる。ただし、熱交換性能が大幅に未達であることに対し、空気冷却フィンの最適化しか言及されておらず、どのように目標を達成するのか具体的な分析が必要ではないか。（委員E）

## 第4章 評点法による評点結果

## 第4章 評点法による評点結果

航空機関連プロジェクト（2）事後評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

### 1. 趣 旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成 11 年度に評価を行った研究開発事業（39 プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第 9 回評価部会（平成 12 年 5 月 12 日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1) 数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2) 個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1) 評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2) プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

### 2. 評価方法

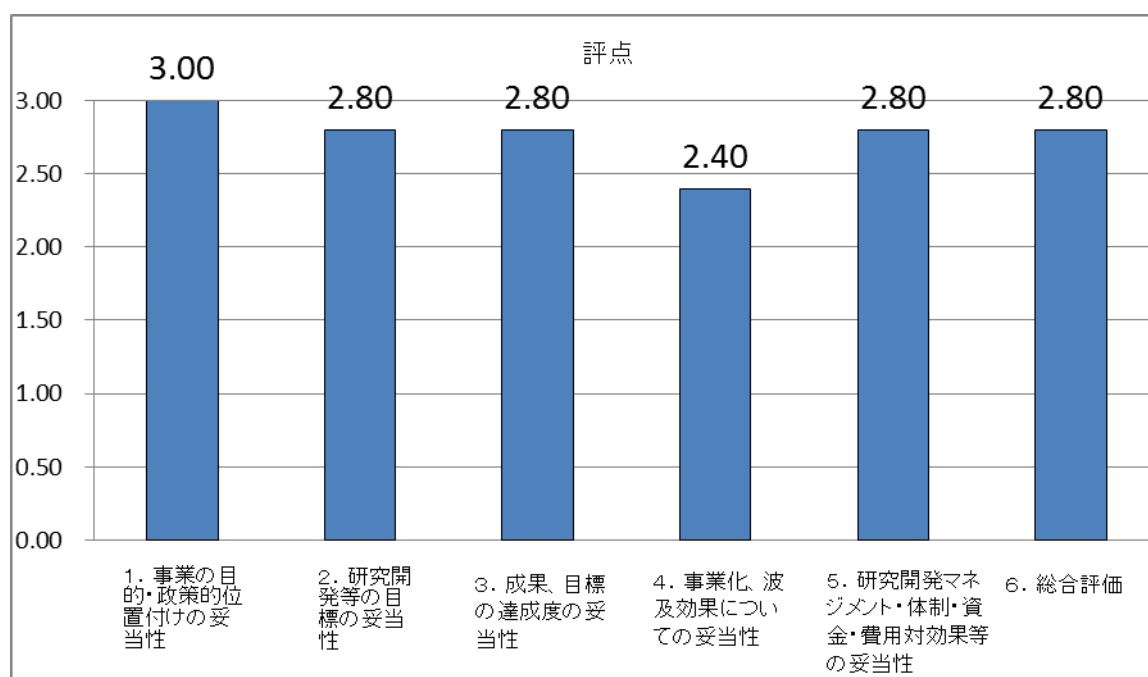
- ・ 各項目ごとに4段階（A（優）、B（良）、C（可）、D（不可）〈a, b, c, d も同様〉）で評価する。
- ・ 4段階はそれぞれ、 $A(a)=3$  点、 $B(b)=2$  点、 $C(c)=1$  点、 $D(d)=0$  点に該当する。
- ・ 評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に○を付ける。
- ・ 大項目（A, B, C, D）及び小項目（a, b, c, d）は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・ 総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

### 3. 評点結果

#### 評点法による評点結果

##### (1 炭素繊維複合材成形技術開発)

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |

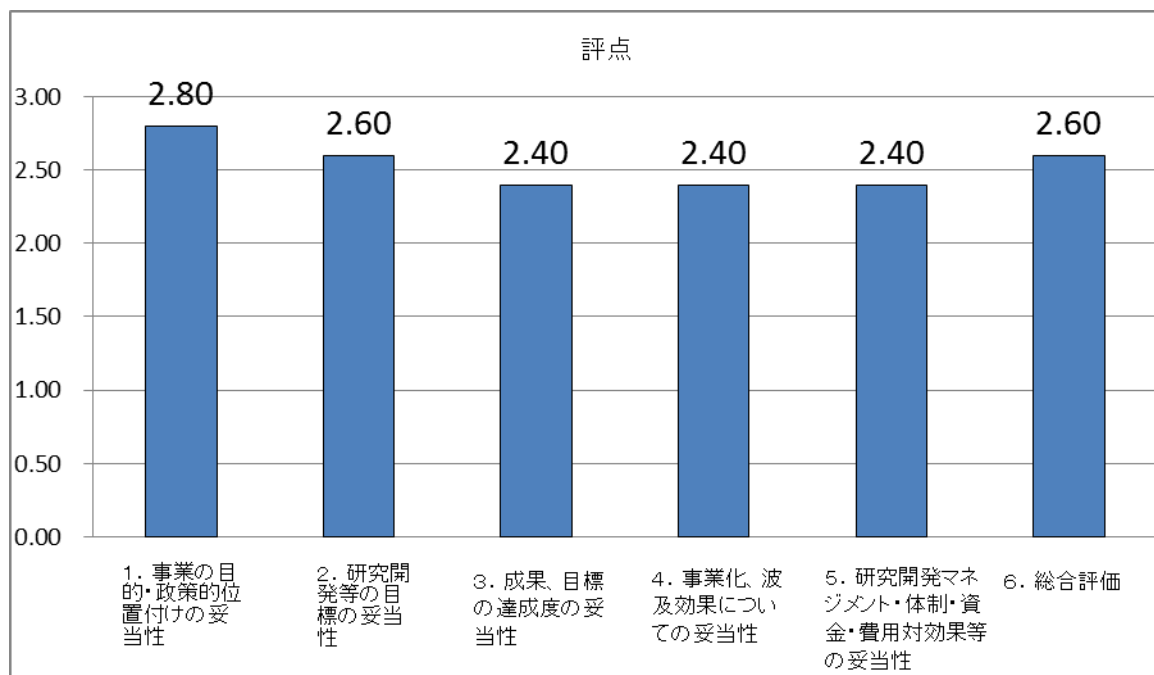




## 評点法による評点結果

### (2 航空機用先進システム基盤技術開発(耐雷・帯電特性解析技術開発))

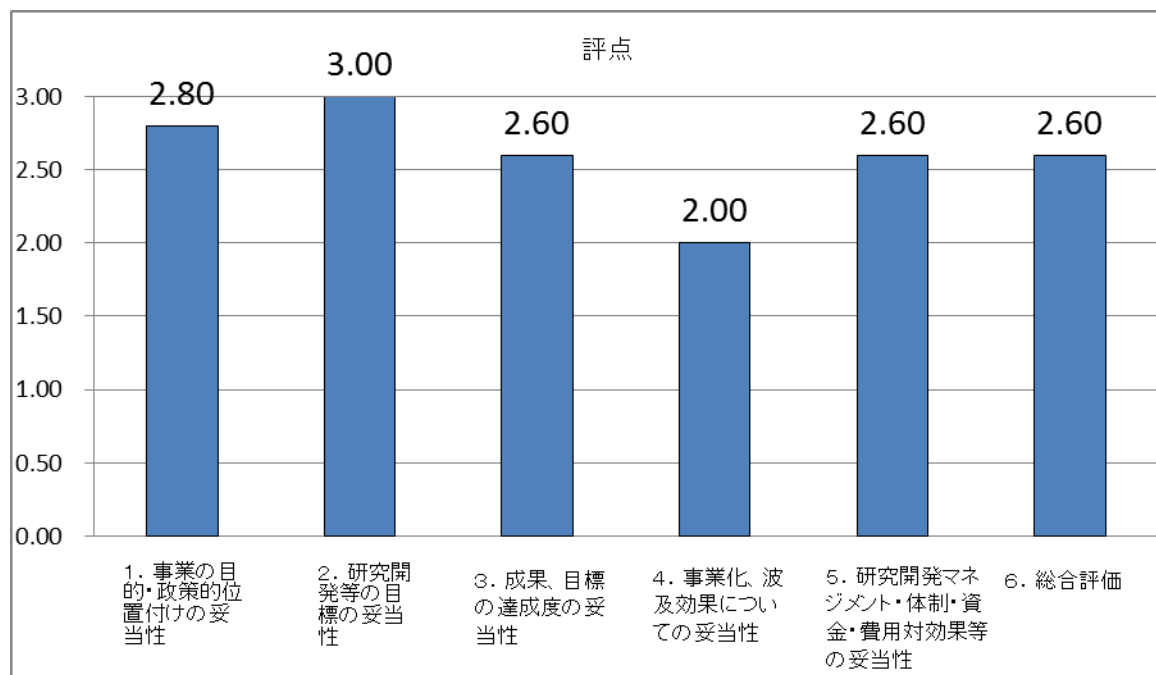
|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 2       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.40 | 3       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 3       | 2       | 2       | 3       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.40 | 3       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |



## 評点法による評点結果

### (3 航空機用先進システム基盤技術開発(革新的防除氷技術))

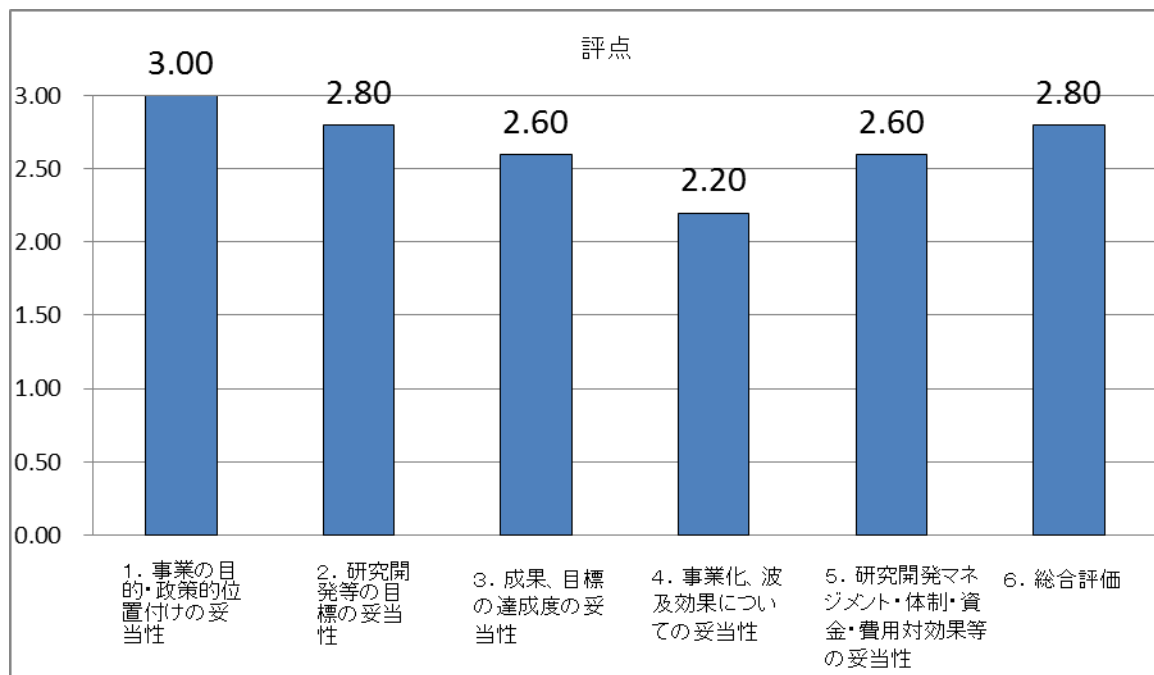
|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.80 | 3       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.00 | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 3       | 2       | 2       | 3       | 3       |



## 評点法による評点結果

### (4 航空機用先進システム基盤技術開発(次世代航空機用降着システム技術開発))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 3.00 | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.80 | 3       | 3       | 3       | 3       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.60 | 3       | 3       | 3       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.20 | 2       | 3       | 2       | 2       | 2       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.60 | 3       | 2       | 3       | 2       | 3       |
| 6. 総合評価                        | 2.80 | 3       | 3       | 2       | 3       | 3       |



## 評点法による評点結果

### (5 航空機用先進システム基盤技術開発(次世代航空機エンジン用冷却装置))

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.00 | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 2.40 | 2       | 3       | 2       | 2       | 3       |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 | 2.40 | 2       | 2       | 3       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.60 | 2       | 3       | 2       | 3       | 3       |

