

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）

評価用資料

平成27年11月16日

経済産業省 製造産業局 航空機武器宇宙産業課

富士重工業株式会社 航空宇宙カンパニー

目次

1. 事業の目的・政策的位置付け	1
1－1 事業の目的	1
1－2 政策的位置付け	1
1－3 国の関与の必要性	3
2. 研究開発目標	4
2－1 研究開発目標	4
2－1－1 全体の目標設定	5
2－1－2 個別要素技術の目標設定	7
3. 成果、目標の達成度	11
3－1 成果	11
3－1－1 全体成果	11
3－1－2 個別要素技術成果	12
3－1－3 特許出願状況等	20
3－2 目標の達成度	24
4. 事業化、波及効果	26
4－1 事業化の見通し	26
4－2 波及効果	27
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	28
5－1 研究開発計画	28
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営	31
5－3 資金配分	35
5－4 費用対効果	35
5－5 変化への対応	35

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。

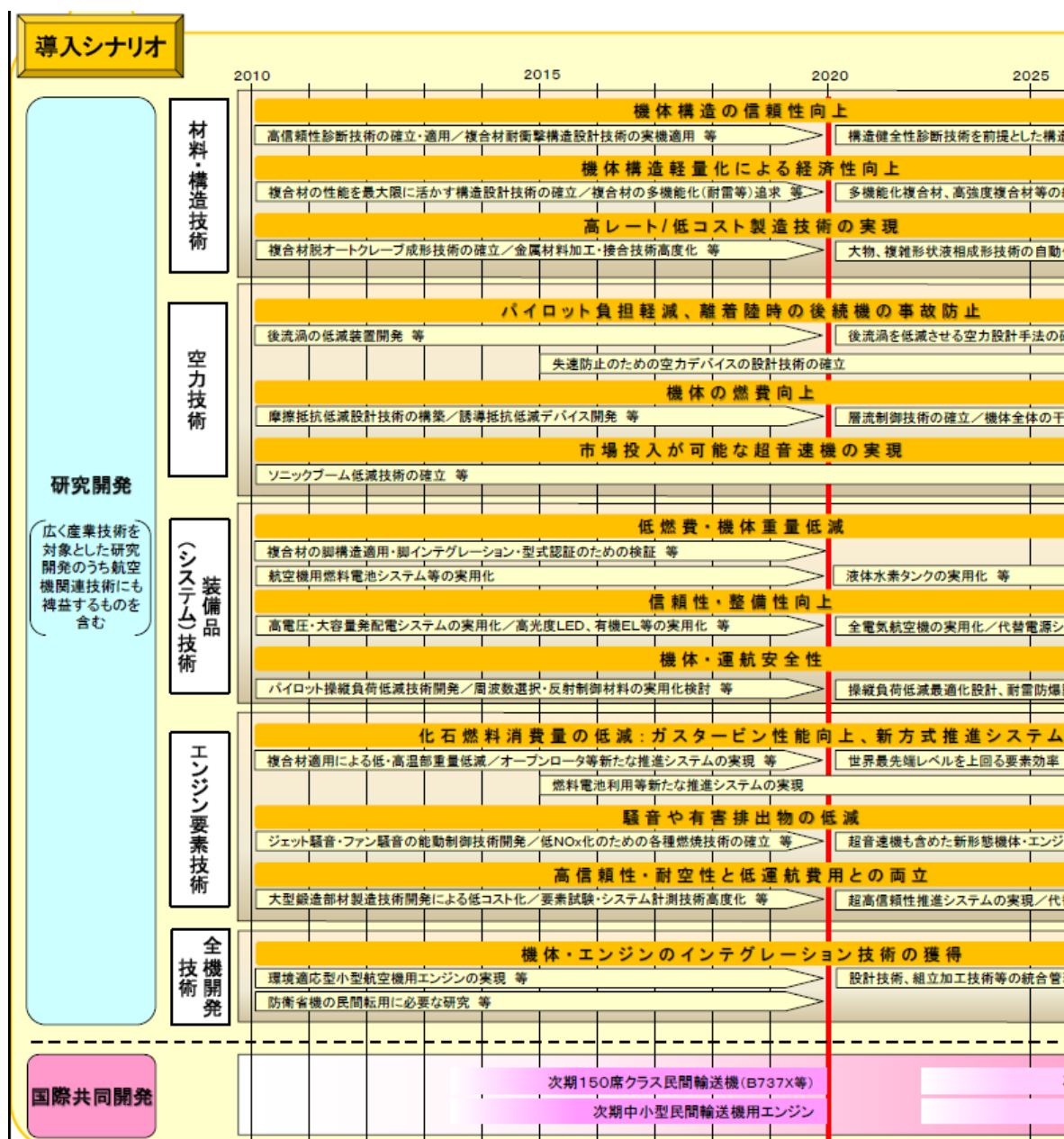
1-2 政策的位置付け

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

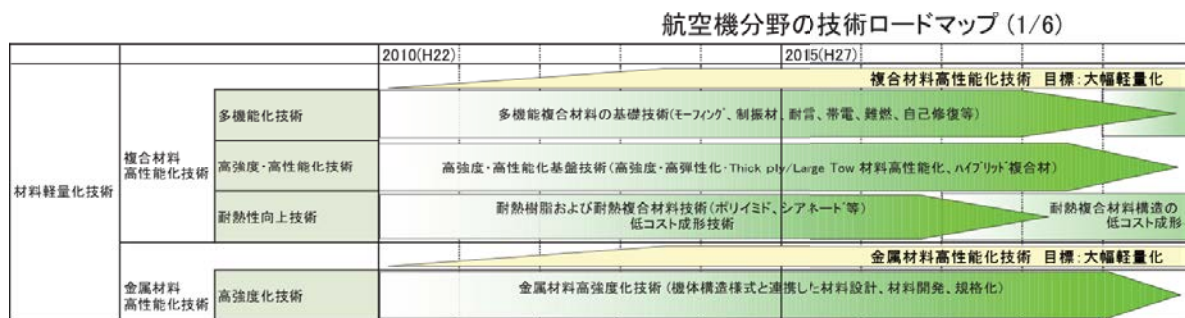
性向上技術等であり、本事業の目的はこれら技術の獲得である。

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。

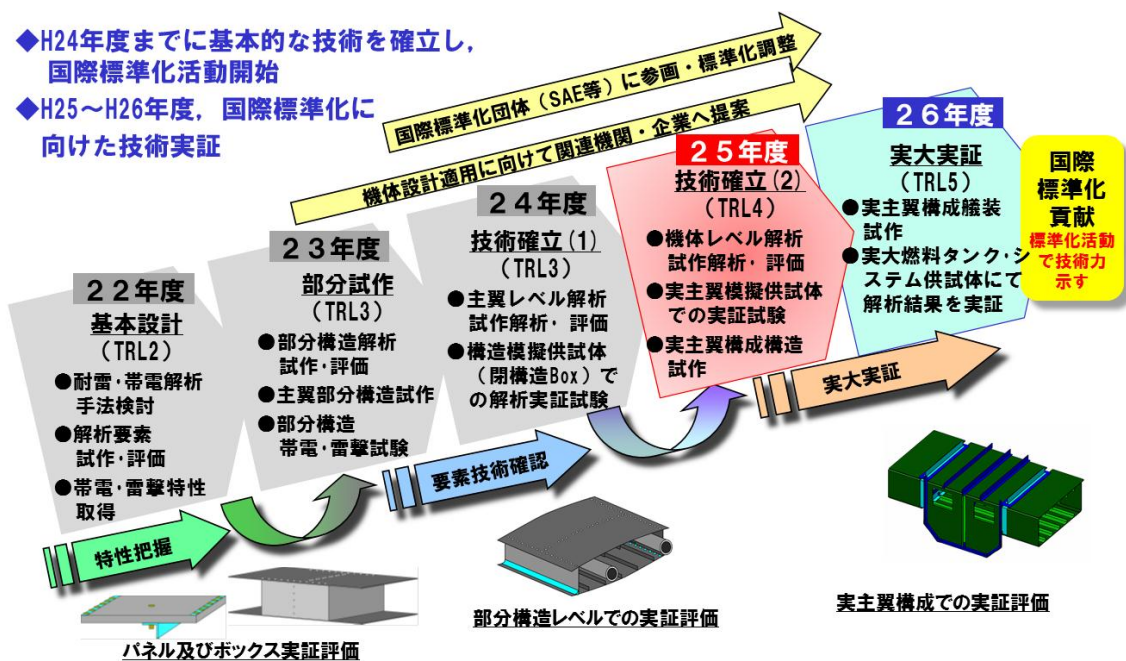


図 2 - 1 国際標準化を視野に入れた技術開発計画案

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。

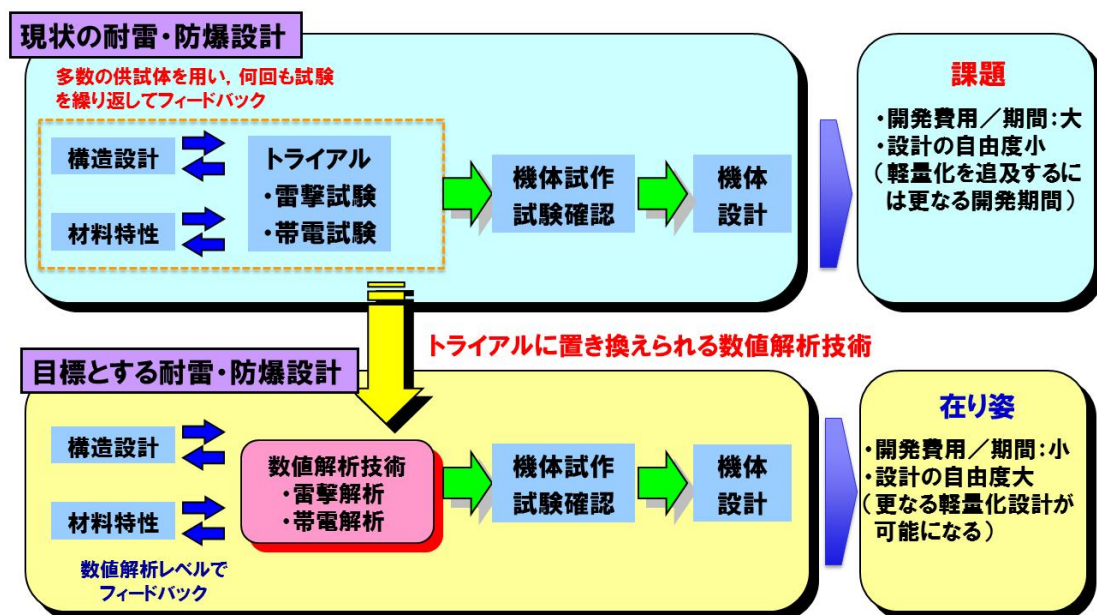


図 2 - 2 技術開発目標の有り姿

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。 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。 ④検証方法の検討 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。 ②放電現象の研究 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。

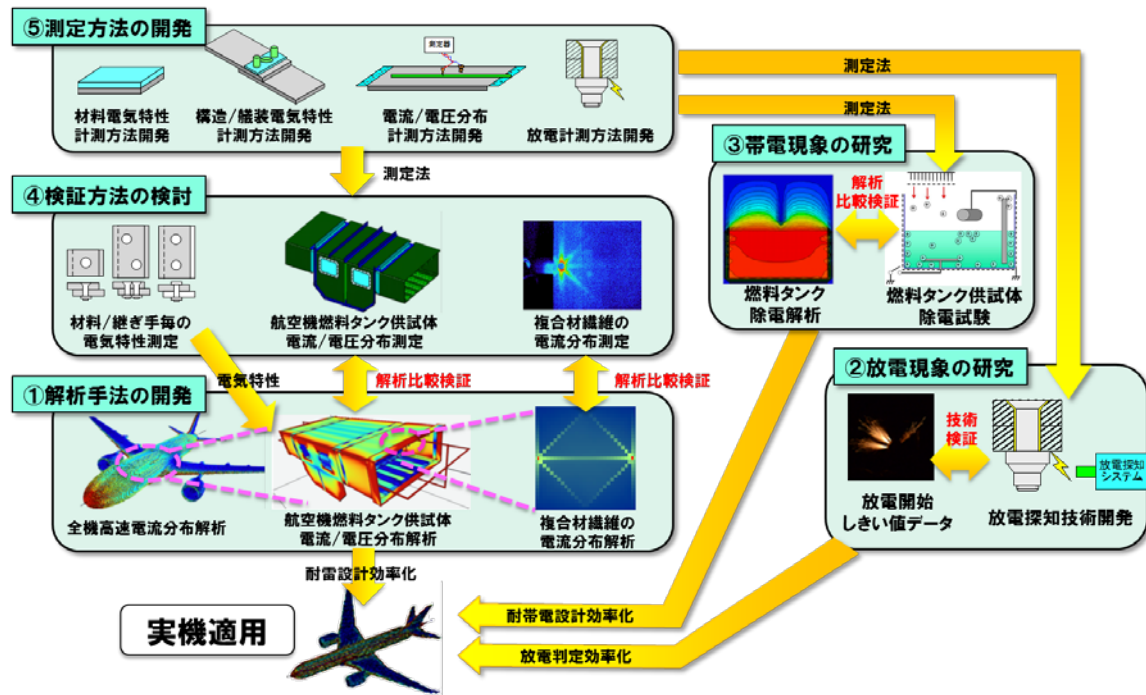


図2-3 耐雷帯電解析技術の流れ

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 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	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。 ②高精度な解析により放電箇所を事前に特定

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
	③TRL 5 相当 ④国際標準への提案	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。 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。 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。
② 放電現象 の研究	①放電開始箇所および条件の確立 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 ③放電検出技術の確立 ④国際標準への提案	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。 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。 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。 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。

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
③ 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 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 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 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。 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。 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 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 22 年度	基本 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 ②放電開始条件の体系化と基本則確認 ③炭素繊維複合材料の電気的基本特性の取得 ④TRL2 相当
平成 23 年度	部分 試作 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 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 ③炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得 ④有効な放電開始条件の取得 ⑤放電検出の要素技術にて放電開始が検出できること。 ⑥TRL3 相当
平成 24 年度	技術 確立 (1)	①国際標準への提案 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 ③航空機燃料タンク部での放電原理の目処をつける ④放電検出技術の仕様化の目処を得る ④帯電解析および試験技術の目途を得る。 ⑤TRL3 相当
平成 25 年度	技術 確立 (2)	①国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立 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 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 ④放電開始箇所および条件の確立 ④放電検出技術の技術実証 ④帯電解析および試験技術の開発と評価 ⑤TRL4 相当
平成 26 年度	標準化 実証 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 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 ③放電検出技術仕様化 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。	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。 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。 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。

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。

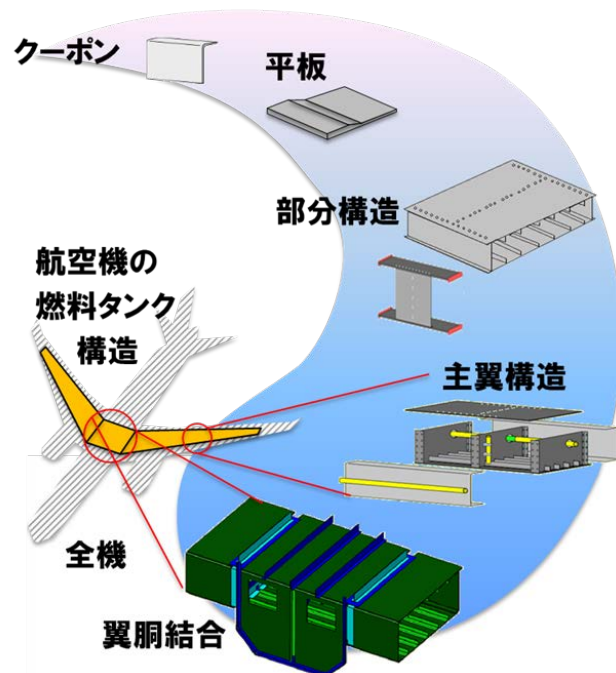


図3-1 解析検証のステップアップ

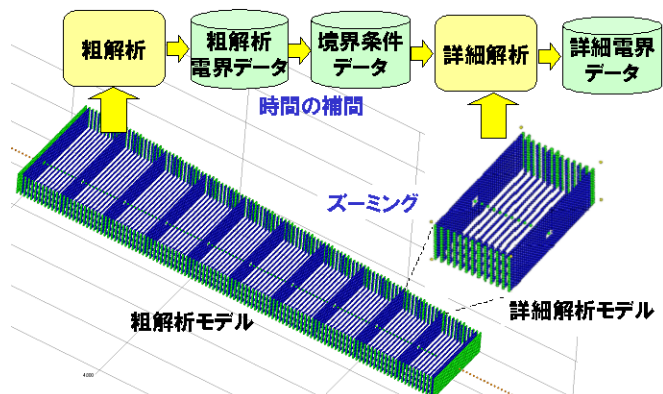


図3-2 翼解析におけるズーミング手法

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。

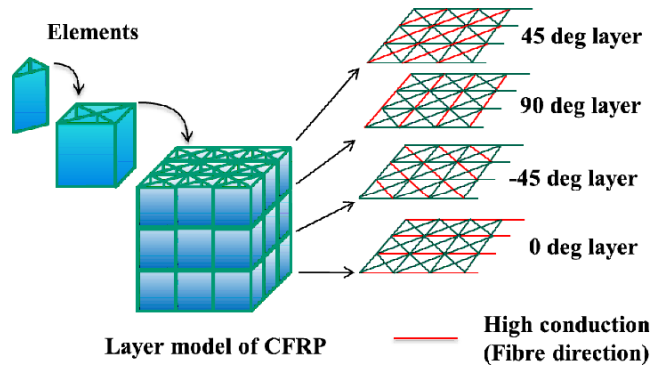


図 3-3 複合材層毎の解析モデル

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。

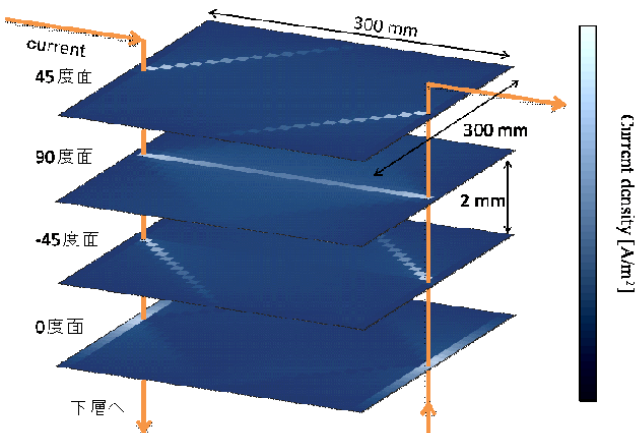


図 3-4 複合材層毎の解析結果

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)

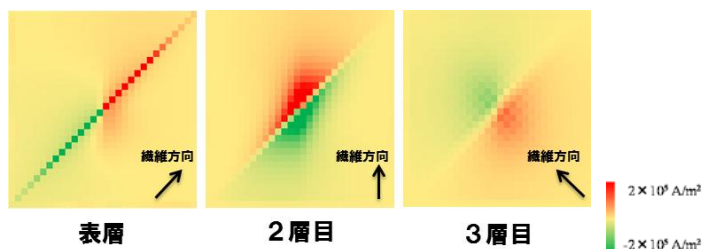


図3-6 複合材パネルのファスナ周辺の熱分布解析例

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。

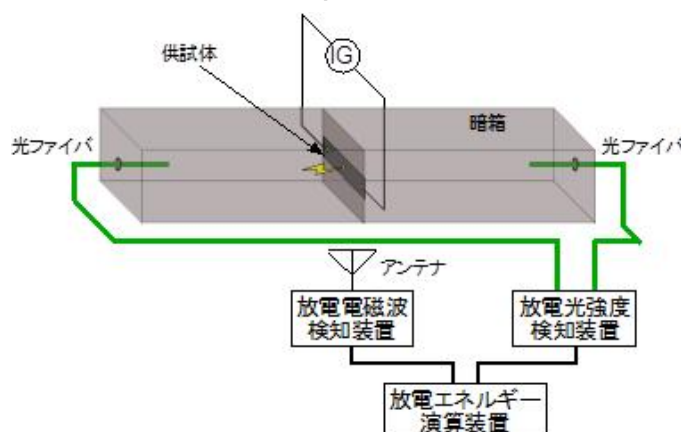


図3-7 放電発光測定実験装置構成

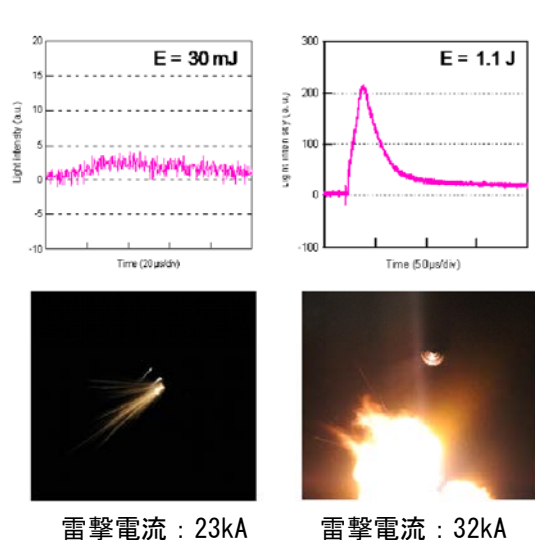


図3-8 放電発光強度波形（上）と
発光静止像（下）の一例

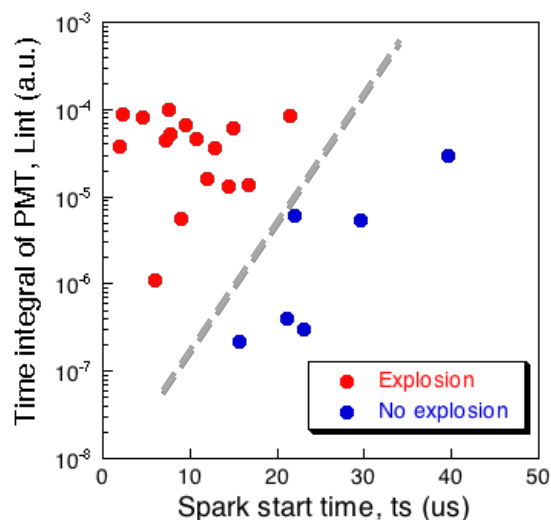


図3-9 放電発生タイミングと発光
強度による放電とガス引火の相関関係

(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。

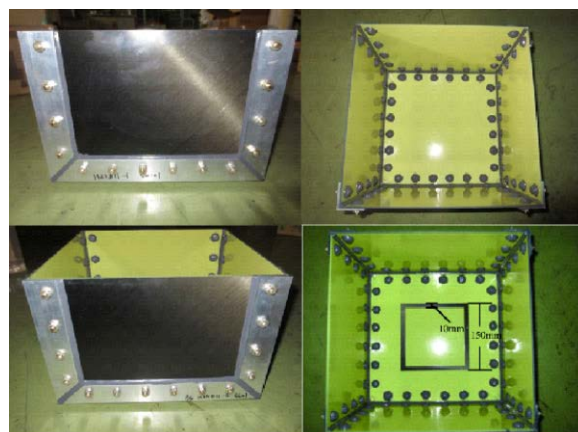


図 3-10 燃料タンク実験供試体

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ると考え

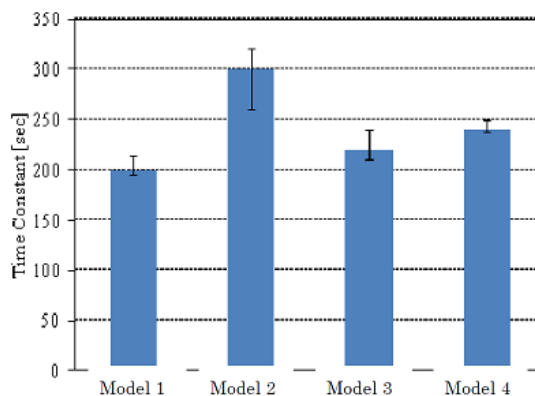


図 3-11 緩和時定数

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。

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

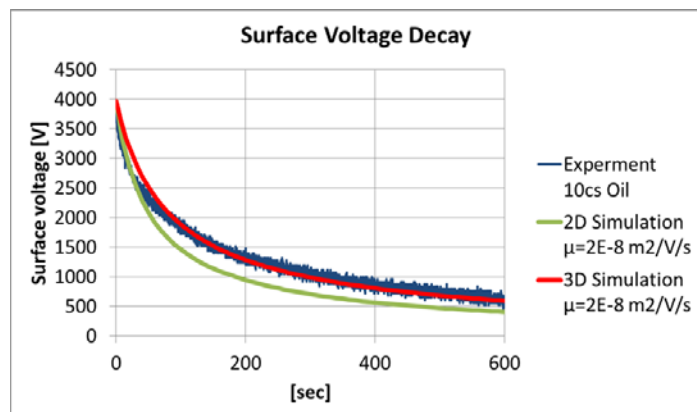


図3-12 表面電位の減衰計算例

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

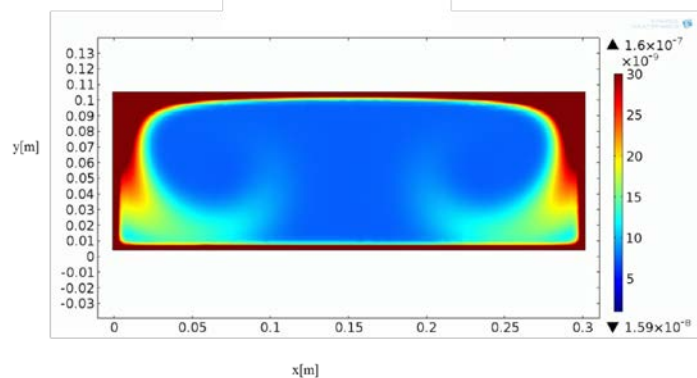


図3-13 燃料流動時の電荷密度分布

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

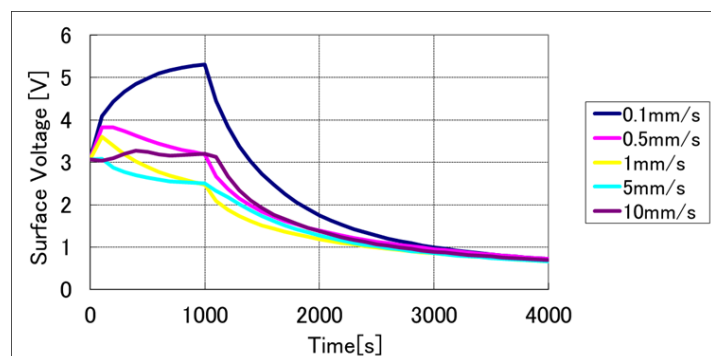


図3-14 対流速度と表面電位

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。

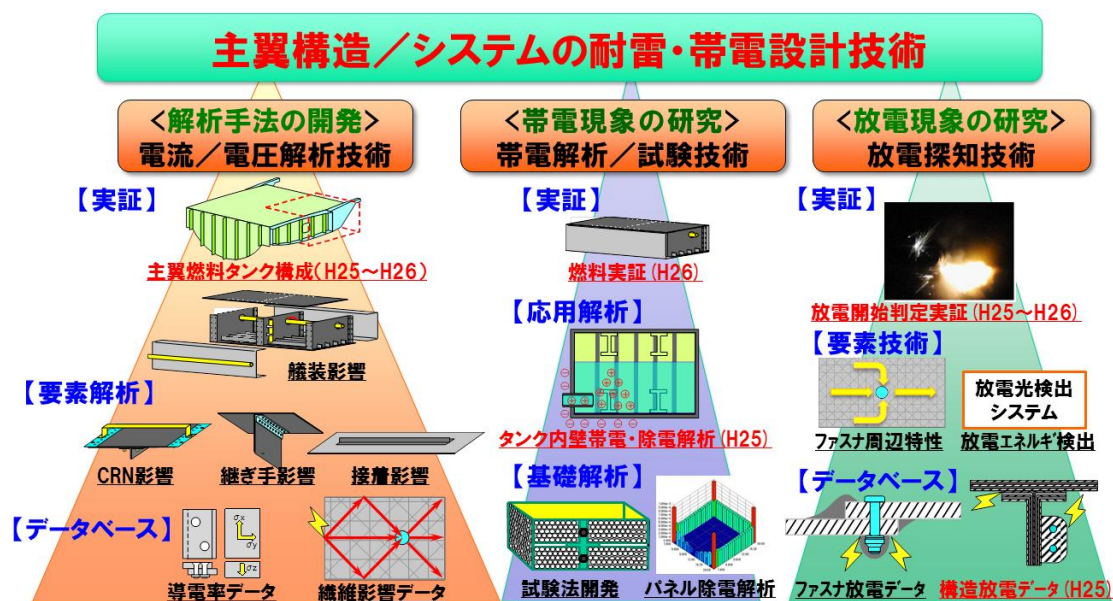


図3-15 検証計画

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。

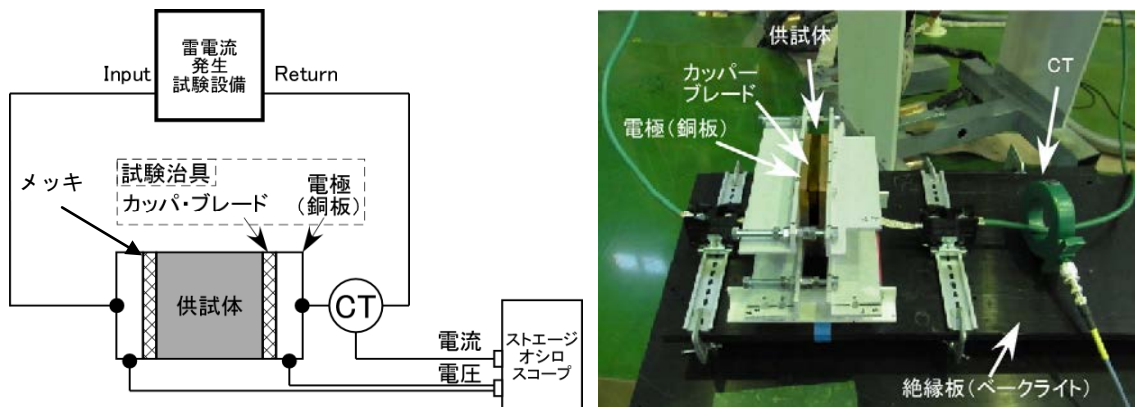


図3-17 複合材辺入力電気特性試験概要

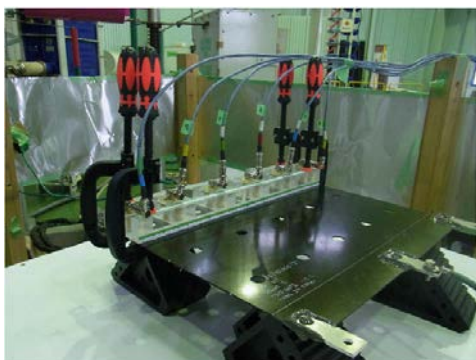


図3-18 構造表面電流分布測定概要

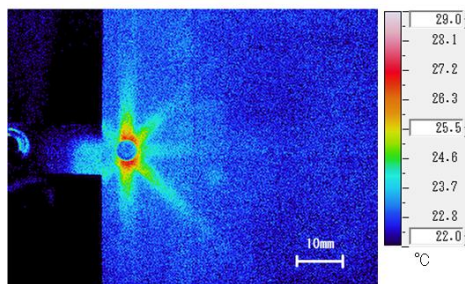


図3-19 温度による電流分布測定

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） 「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 ” 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 「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 「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 「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 ” 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 「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 「CFRP 製翼をもつ次世代航空機の耐雷試験における放電 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 「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 「CFRP ファスナ部の雷撃試験におけるスパーク現象の 光学測定」	H24. 11
発表	平成25年 電気学会全国大会 「CFRP を用いた次世代航空機雷撃試験におけるスパーク 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 「航空機用CFRP 製燃料タンクにおける帯電液体の電荷 挙動」	H25. 9
発表	International Conference on Lightning and Static Electricity ICOLSE 2013 “Novel Estimation Method of Spark Phenomena of The CFRP Sample with A Fastener by Optical Measurement Technique Under Lightning Strike Test.”	H25. 9
発表	International Conference on Lightning and Static Electricity ICOLSE 2013 “Lightning Current Flow Analysis and Measurement of The Composite Structure.”	H25. 9
発表	第51回 飛行機シンポジウム 「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 「雷撃試験におけるCFRP ファスナ部のスパーク検出とその エネルギー評価」	H25. 11
発表	第26回 航空安全シンポジウム 「航空機への雷撃」	H26. 3
発表	平成26年電気学会全国大会 「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 「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 「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 「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 「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 「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.) “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 「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 「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 「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 「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.) “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 “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 「三角柱セルを用いた FDTD 法による異方性物質の 過渡電磁界解析」	H27. 8
発表	International Conference on Lightning and Static Electricity ICOLSE 2015 “FDTD SIMULATION OF LIGHTNING CURRENT IN A MULTI-LAYERED CFRP MATERIAL”	H27. 9
発表	International Conference on Lightning and Static Electricity ICOLSE 2015 “Estimation of spark ignition phenomena on CFRP model sample with a fastener by a novel optical system in the 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 「発火性混合ガス中雷撃試験における航空機CFRP供試体の 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 「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 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 「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 「CFRP 航空機燃料タンク環境下での雷撃試験における 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 「CFRP 航空機燃料タンク環境下での雷撃試験における 電磁環境評価に関する基礎検討」	H27. 11
特許	特願 2011-186705 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 供試体の製造方法	H23. 8
特許	特願 2011-190235 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 発光位置特定システム	H24. 3
特許	特願 2013-004497 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 光観測システム及び光観測方法	H25.2
特許	特願 2013-177872 電流測定装置及び電流測定方法	H25.8
特許	特願 2015-062483 異方性導電物質の電磁界解析方法	H27.3
特許	特願 2015-170339 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 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。 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 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。 ・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。 ・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 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。 ・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。 ・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。 ・艙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。 ・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。	一部 達成
④ 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。 ・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

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／構造の電氣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。

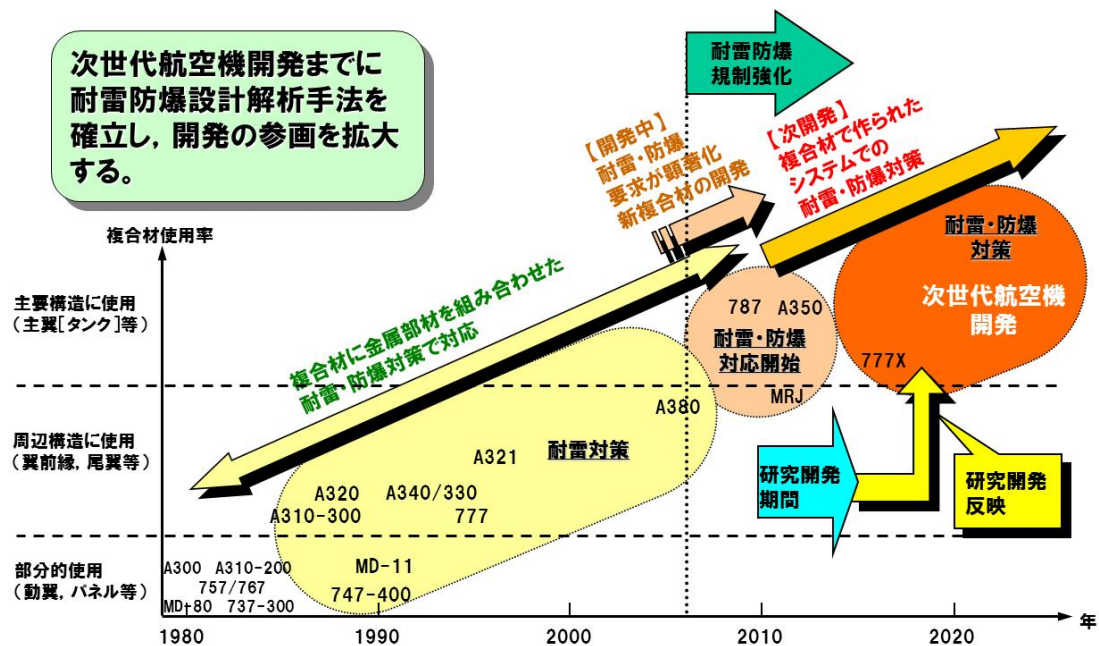


図 4 - 1 次世代航空機開発への参画

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。

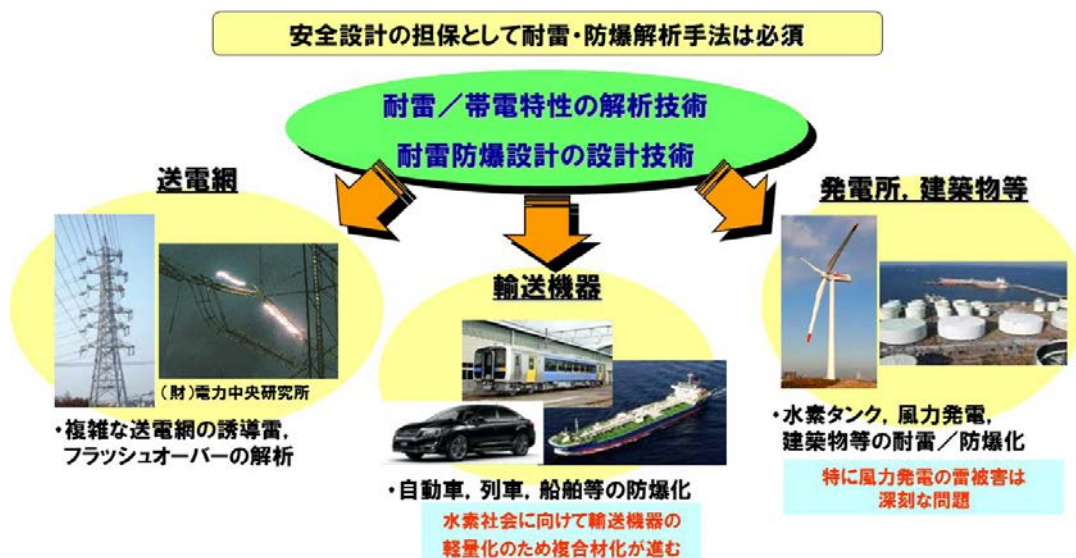


図 4 - 2 技術波及効果

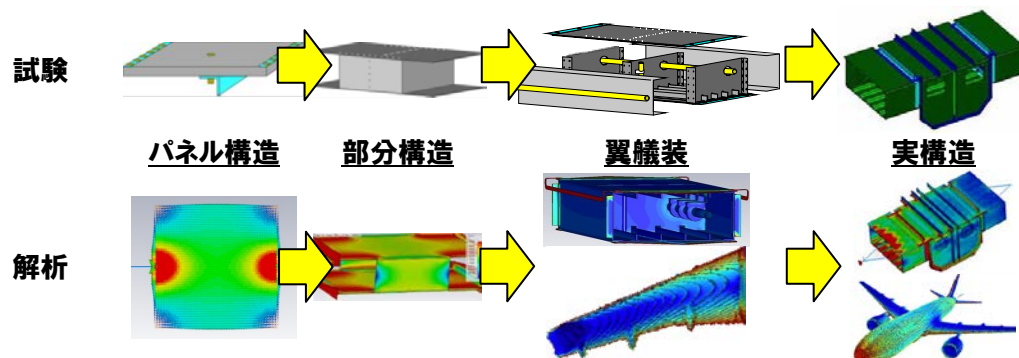
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

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 標準化 提案
マイルストーン	基本設計 特性把握 (TRL2) 解析手法検討	部分試作 要素技術確認 (TRL3) 部分構造解析評価	技術確立(1) 技術確立 (TRL3) 翼臓装解析評価	技術確立(2) 実構造実証 (TRL4) 全機解析開発	実証試験 (TRL5) 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 発生しきい値	電磁検出技術 引火特性	検出技術実証 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。

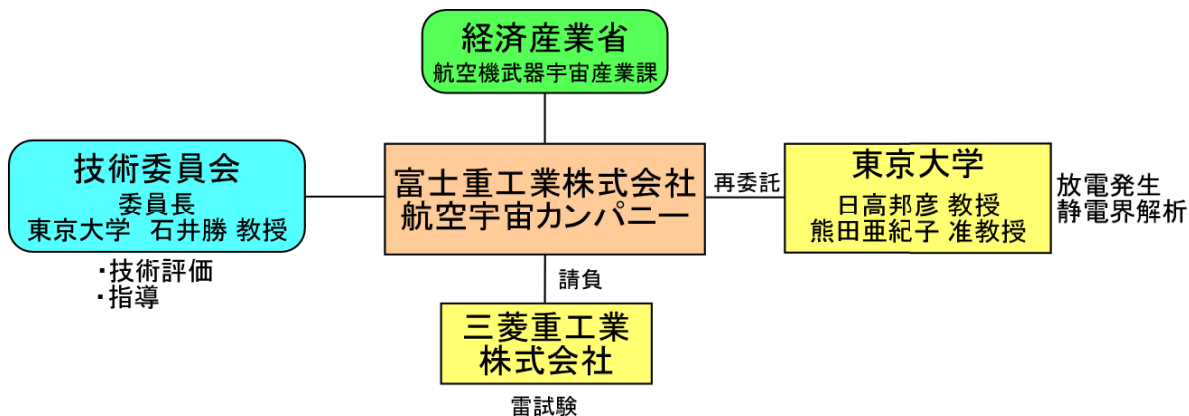


図5-1 平成22年度研究開発実施体

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。

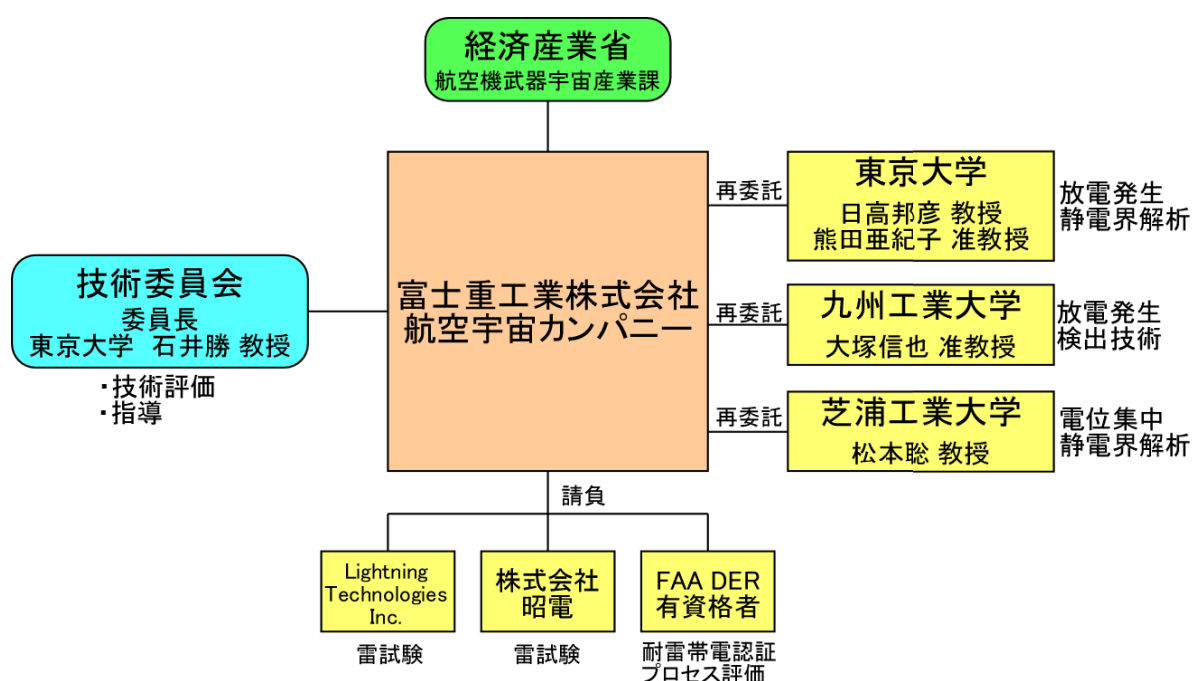


図５－２ 平成２３年度研究開発実施体

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。

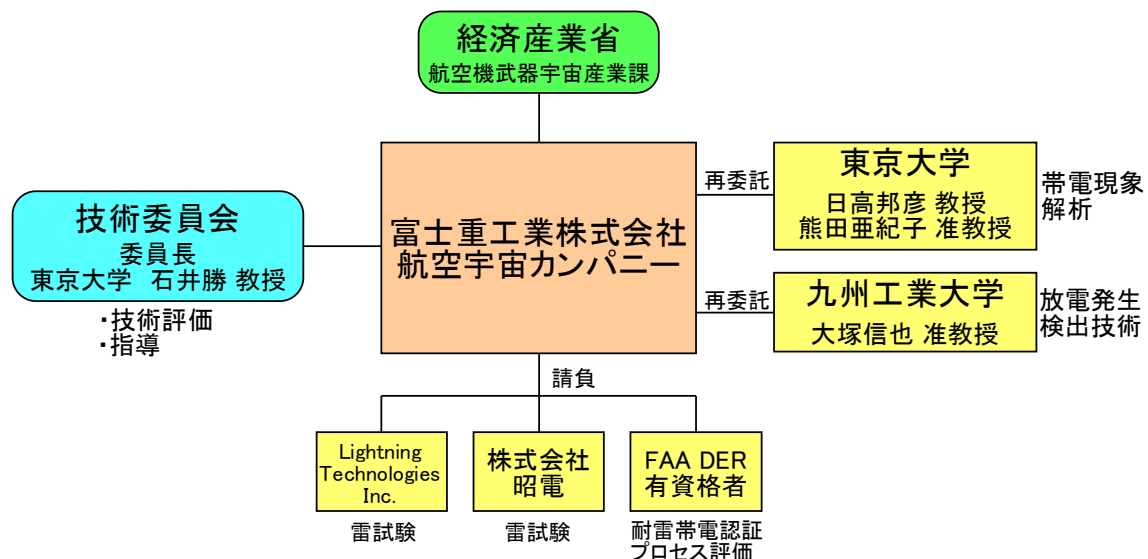


図5-3 平成24～25年度研究開発実施体

(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。

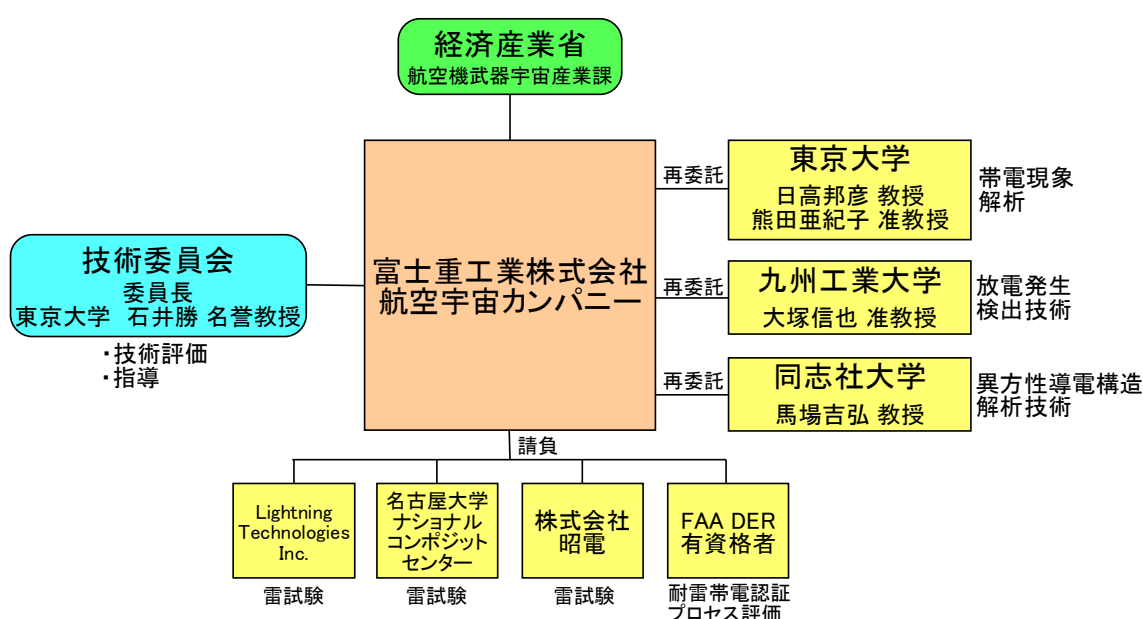


図5-4 平成26年度研究開発実施体

（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。