

# 航空機・エンジン電動化システムの技術開発

## A Study on the More Electric Architecture for Aircraft and Propulsion ( MEAAP ) Concept

大 依 仁 航空・宇宙・防衛事業領域技術開発センター制御技術部 部長 博士（工学）  
桑 田 巖 技術開発本部基盤技術研究所振動・トライボロジー研究部 課長 技術士（機械部門）  
森 岡 典 子 航空・宇宙・防衛事業領域技術開発センターエンジン技術部 部長 博士（工学）

航空機・エンジン電動化システム ( MEAAP ) は人と地球にやさしい理想の航空機の姿の一つとして、エアラインや機体メーカーから、その実現に向けた活動に対し多くのエールをいただいている。本稿では、革新的なシステムの創造を目指して、機械四力学を中心に電気工学や化学分野を学際的エンジニアリングで融合しながら、企業の枠を越えたオープンイノベーションにより取り組んだ技術開発の概要について、電動化の喫緊の課題である大電力発電を中心に述べる。

The use of more electric aircrafts will improve safety, ecology and economic benefits through innovations designed to integrate their power and thermal management. Under this concept, high power generation is the crucial issue. The More Electric Architecture for Aircraft and Propulsion ( MEAAP ) consortium is working with IHI to exploit the electrification system for future engines and aircrafts over the next decade or two. This paper introduces the latest resolution approach developed by IHI and the results of Japanese interactive open innovation.

### 1. 緒 言

航空機の電動化は環境負荷低減、経済性に向けた取り組みとして進展したが<sup>(1)</sup>、さらなるエアラインの期待は、安全性・信頼性の向上に加えて、操作性（エンジン応答性）、整備性の向上、騒音や排ガスを最小限に抑制した地球環境にやさしいオペレーションの実現にある、との声をいただいている<sup>(2)</sup>。航空技術の進歩は、安全確保への人類の挑戦でもあり<sup>(3)</sup>、航空機の電動化もその一翼を担っている。航空機電動化の拡張・深化、システムの拡大は、エネルギーの最適化にとどまらず、エネルギー供給のための複雑な油圧系統、空気圧系統、機械式機構が不要になり、設計自由度の向上、整備性の向上および質量軽減が可能となる。設計自由度の向上はシステムの多重化を容易とし、航空機の基本的かつ普遍的な要求である安全性に対して、信頼性の向上を図ることができる<sup>(4)</sup>。さらには、電動機がもつ特性である、トルク応答が高速であり、発生トルクを正確に把握でき、駆動源の分散配置が容易であるという三つの要素<sup>(5)</sup>は、制御性の向上によるエアラインのすべての期待に応える潜在力を有している。ところが視野を広げると、自動車の電動化がすでに空飛ぶクルマへと飛躍する時代<sup>(6)</sup>において、民間航空機はモビリティのなかで電動化の発展から取り残された領域となってきた。電動

与圧・空調を採用したボーイング社（アメリカ）の 787 型機、大出力電動操舵装置や電動スラストリバーサ駆動装置を採用したエアバス社（フランス）の A380 型機が就航したときには、世界中が今後の航空機電動化の製品戦略は急速に成長していくものと予想していた<sup>(7)</sup>。しかし、現実には新たな電動化機体の出現に至っていない。

民間航空機における新たな電動化のパラダイムシフトを先導するためには、機体、エンジン、航空機システムに関連する技術分野間の横断的かつ統合的なネットワークを構築したうえで、電動化の評価の高度化とエンジン・機体統合解析が必要である<sup>(8)</sup>。そこから導出される航空機電動化の領域拡大に向けた課題は、機体と電動化航空機システムの結節点となるエンジンにおいて、一次動力・推進力 ( Propulsion ) と二次動力・電力 ( Power Plant ) を担う動力源としての問題を先攻して解決する必要がある、以下の項目が指摘されている<sup>(9)</sup>、<sup>(10)</sup>。

#### (1) エンジン側の課題

- ・ 抽出馬力増大によるエンジン作動性への影響
- ・ 同ギヤボックスにおける損失増大
- ・ 大容量発電機とシャフト系の共振

#### (2) 発電機側の課題

- ・ 増加する発熱に対応する排熱システムの負荷増大とそれに伴う燃費の悪化

- ・ 大型化による質量、<sup>※</sup> 艤装、整備性の問題やエンジン前面面積の増大による空気抵抗増加
- ・ エンジンとの連成を考慮したロータダイナミクス設計
- ・ 航空機搭載の実績がない、永久磁石発電機などの新技術適用

すなわち、モビリティ共通の小型・軽量化やコスト削減はもとより、航空機用途における二つの主要な課題として、大容量発電機のエンジン搭載および増加する排熱のマネジメントの解決が重要となる。

当社は 2010 年代に入り航空用エンジンの電動化の促進 (MEE: More Electric Engine) の研究を開始し、エンジン作動性の問題解決のため従来の航空エンジンの高圧軸発電機から低圧軸発電機への移行を提唱し、エンジン制御に関する研究を続けてきた<sup>(11)</sup>。高パワー密度が期待される永久磁石発電機の航空機適用を可能とするため、その具体的な課題である故障時の安全化処置としての発電停止手段技術に、シンプルな回路ロジックによる遮断手法を提示している<sup>(12)</sup>。

本稿は残る諸課題への技術開発を以下の三つの観点で述べるとともに、その解決を経て現実となる電動化のビジョンを提案する。

- ① 大型発電機の搭載構造
- ② ヒートシンクと排熱方法
- ③ 発電容量増加の抑制

## 2. 大型発電機の搭載構造

抽出馬力増大による諸課題は、現状の発電機搭載構造において顕著となる。エンジンの回転軸から、エンジン内部のギヤで分力して抽出馬力を回転軸で外部へ導出し、その力をアクセサリギヤボックスにて分配し発電機を駆動する機械構造の成立性は、抽出馬力増大に伴い困難が生じる可能性がある。これに対し、抽出力軸、ギヤボックスを介さずに発電する様式が根本的な解決策になることは容易に想定できる。すなわちエンジン軸直結構造であり、その場合の搭載位置はエンジン前方、エンジン内部、エンジン後端が考えられる。エンジン前方搭載は発電機を固定するストラットが空気抵抗を生じ、またエンジン内部搭載は発電機の整備にエンジン分解が必要となるため、いずれの搭載位置も適切ではない。

一方、先行研究例でエンジン後端を候補としない理由は、エンジン直結に伴うエンジン部品としての機械性能要

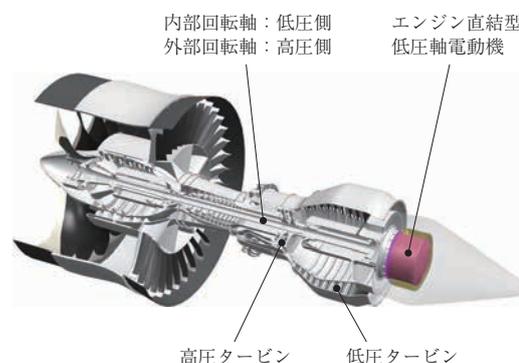
求と排熱設計上の制約を満足しつつ、高温となるタービン後流のセクションで自らも発熱する発電機の高耐熱絶縁性に、難しい技術課題が存在するからである。

### 2.1 エンジン内蔵型電動機 (E3M)

エンジン低圧タービン後方に位置するテールコーン内部に電動機/発電機を搭載する。第 1 図にエンジン内蔵型電動機の構想図を示す。この部位は前述のとおり高温となるが、寒冷地でのエンジン運用では極寒にさらされる場合があり容易には水冷を採用することはできない。したがってエンジン内蔵型電動機 (発電機を含む) ではその排熱にエンジンベアリングの冷却と同様にエンジンオイルを使用する。エンジンオイルは運用上 100℃を超える程度まで上昇することを想定する必要がある。このオイルによる冷却に耐えられる電動機/発電機、特に巻線の耐熱被膜は重要な課題となる。その解決のため当社は、住友精化株式会社と共同して高耐熱の絶縁被膜を開発した。耐熱性能を大幅に向上した巻線は、高い温度の流体を冷媒とせざるを得ない機器でも飛躍的にその排熱容量を向上させることが可能となる。

### 2.2 耐熱性向上

耐熱性を向上させたこの耐熱絶縁被膜は、住友精化株式会社と国立研究開発法人産業技術総合研究所が共同研究で開発した材料であるタフクレスト<sup>®</sup>を基本材料としている。本稿では、電動機/発電機内部の締結巻線はもとより、エンジン内部の大電力配線のブスバーなどの導体にも適用することを想定し、電着被膜用塗料として開発に取り組んだ。この塗料は実用化を見越した品質安定性を高めるための生産技術としてサンコール株式会社の協力を得て評価を受けながら、導体に電着された状態で 300℃、1 000 h 以上の耐熱性を実証した。さらに、実用化に必要な電動機/発電機の生産技術面ではシンフォニアテクノロジー株

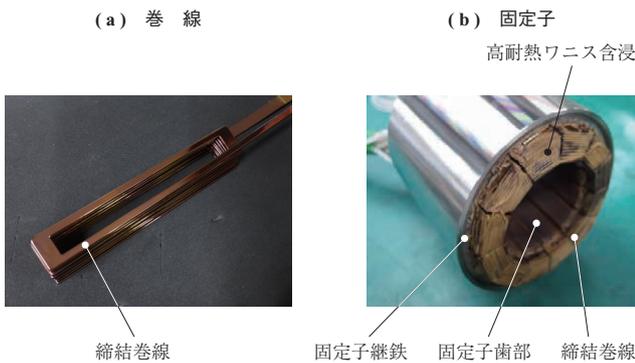


第 1 図 エンジン内蔵型電動機構想図  
Fig. 1 Concept for the Engine Embedded Electric Machine (E3M)

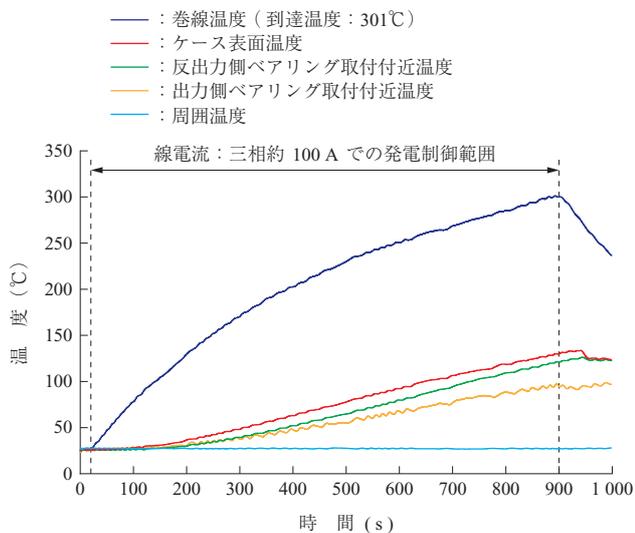
株式会社の工程評価を受けてシステム構築を進めている。

これらの技術は大容量電動機／発電機の実用化開発のステップアップとして、かつ、航空機内で使用される中小型電動機への適用拡大も見越し、小型モデルによる段階的な適用評価を実施した。中小型向けには高密度締結巻線技術が要件となることから、この技術分野では株式会社アスターの協力を得て、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の戦略的省エネルギー技術革新プログラム「アスター製締結コイルによる高密度・高出力モーターの研究開発」の成果によって製作された締結巻線へ適用し、直径約 110 mm × 長さ約 130 mm のステータで約 100 A の三相電流を発電し、巻線温度 300°C での運転を実証した。第 2 図に高耐熱被膜締結巻線および高耐熱ワニス施工した高密度電動機固定子、第 3 図に高耐熱被膜の発電機試験結果を示す。

なお、本章の耐熱絶縁被膜の開発は NEDO の航空機用



第 2 図 高耐熱被膜締結巻線および高耐熱ワニスを施工した高密度電動機固定子  
Fig. 2 High-density electric motor stator with high heat-resistant coating coil



第 3 図 高耐熱被膜の発電機試験結果  
Fig. 3 Results for the 100-A generator test at 300°C

先進システム実用化プロジェクト「次世代エンジン電動化システム研究開発」の委託によって実施したものである。

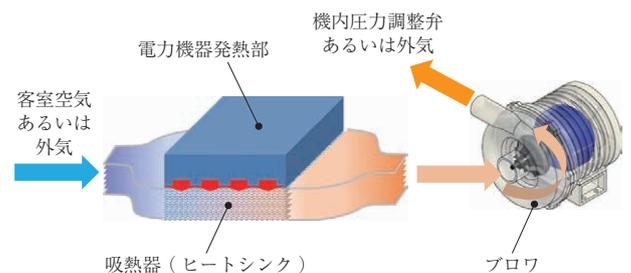
### 3. ヒートシンクと排熱方法

従来の航空機における排熱はラム空気（空気抵抗によって押し込まれる圧力で取り込んだ空気）との熱交換、もしくは搭載燃料やエンジンファン出口空気への熱交換に限られていた。システム排熱の増加は航空機の空気抵抗の増加、エンジン燃費の悪化にとどまらず、限られた場所にあるヒートシンク（空気や燃料）に向かって熱を運搬する手段を必要として、質量の増加やメンテナンス性の低下の原因となっていた。電動化は軽量化やメンテナンス性の向上を図るものであり、その相反する現実には重要な改善点とエアラインも捉えている。株式会社島津製作所と当社は、航空機の多くの排熱を担う空調とエンジンシステムの連携からこれらの問題に取り組んでいる<sup>(13)</sup>。

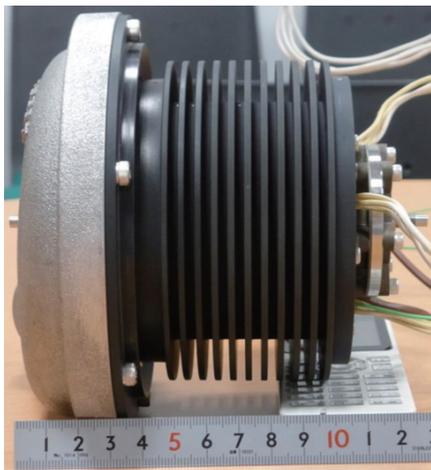
さらに当社は、自律型分散空冷システムや電動燃料システムの研究をとおして、新たな排熱先（ヒートシンク）と排熱方法を獲得して発電機の大容量化にも貢献する。

#### 3.1 自律型分散空冷システム (AACS)

自律型分散空冷システムは、一般的な強制空冷と同じ原理であるが、航空機搭載のパワーエレクトロニクスを対象とした小型軽量・高効率の冷却システムを特徴とする。第 4 図に自律型分散空冷システム構想図を示す。パワーエレクトロニクス特有の高密度発熱体（パワー半導体のダイ）からの抜熱を実現するため、小型高密度のヒートシンクを適用することと、ヒートシンクに大量の空気を送り込むブロワの小型化が課題であった。当社は、10 kW 超級の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを想定した、非与圧／与圧両用の空冷システムを住友精密工業株式会社と協同で実証した。第 5 図に高速電動ブロワ (100 000 rpm) を示す。このブロワは 100 000 rpm レベ



第 4 図 自律型分散空冷システム構想図  
Fig. 4 Concept for the Autonomous Air-Cooling System (AACS)



第 5 図 高速電動ブロウ (100 000 rpm)  
Fig. 5 100 000 rpm electric blower

ルを設計想定し、超小型のガス軸受を新たに開発し適用している。

今後はさらに大型のパワーモジュールへの適用を目指した研究開発によって、大容量発電システムへの分散空冷適用による排熱効率化に貢献する。

### 3.2 電動燃料システム (Miffee)

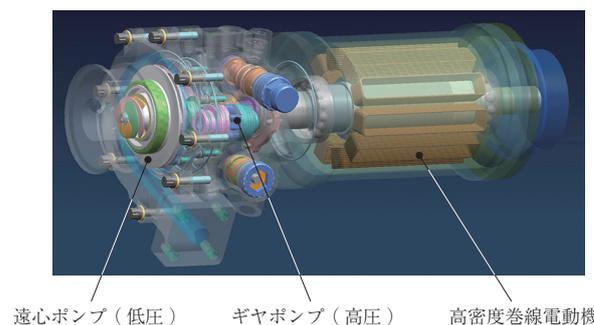
当社が提案する電動燃料システムは、定容積型のギヤポンプ様式である燃料ポンプを電動サーボモータで駆動し、エンジンが必要とする燃料流量をモータ回転数で制御する。この技術は、燃料計量装置という多くの油圧部品 (バルブなど) で構成された精密機器が不要となり、メンテナンスやコスト面のメリットが期待できる。さらに、余剰な燃料の循環がなくなり、エンジン抽出力を削減することができるため、燃料システム効率の向上による燃料消費率改善が見込まれる<sup>(12)</sup>。また、燃料の循環による温度上昇の抑制はエンジンヒートマネジメントを改善し、燃料ヒートシンクの排熱性能を向上させることができる。

当社は燃料計量装置を排除した本システムにおいて、モータダイレクトドライブのギヤポンプでエンジン始動時の低流量の低速回転から離陸時の大流量の高速回転まで、モータ応答性と回転数制御精度だけで、エンジンに必要な燃料流量制御が実現できることをリグ試験で実証した。第 6 図に電動燃料システム試験、第 7 図に電動ポンプ構想図を示す。

今後は燃料ヒートシンクの効率的な利用を図り、エンジンヒートマネジメントと機体のサーマルマネジメントの統合化による大容量発電システムの排熱システム拡張に貢献する。



第 6 図 電動燃料システム試験  
Fig. 6 Test rig for metering-integrated fuel-feeding electrification ( Miffee )



第 7 図 電動ポンプ構想図  
Fig. 7 Concept for the electric gear pump mechanism

## 4. 発電容量の抑制

フライトコントロールシステム (FCS) をはじめとして多くのシステムや機器の電動化が促進され、電力需要はますます増大する。すでに電動化したボーイング 787 でもほぼ 1.5 MW に達する発電能力を搭載し、将来機体の効率的な給配電による需給の最適化は、質量抑制の課題である。ただし電力の統合管理が必要となっても、機体全体として質量・コスト・信頼性の面を優先するため、高機能化を目的とした周辺機器の増加は抑制しなければならない。ナブテスコ株式会社と当社の研究は<sup>(14)</sup>、機体内共通の電力バスへ分散電源を容易に接続でき、バス間のクロスフィードができる強くしなやかな (レジリエントな) DC 電力バスシステムに着目し、電力需給の最適化と機体整備性向上を実現する分散電源システムの導入を共通概念としている。

さらに、この課題をエンジンの視点で掘り下げていくと、電動機特有のトルク応答の高さが反作用として、エンジンおよびその伝達機構へ急激なトルク変動として伝搬し、悪影響を及ぼす原因となることもワークショップでのエアラインの報告から明らかとなっている<sup>(15)</sup>。また、取

り扱う電動機はモータと発電機の両面をもつため、空力舵面からのパワーバックが、エネルギー回生として電流を電源側へ逆流させ、行き先のない電流は急激に過大な電圧上昇を生ずる。当社は短周期の電力需要変動を吸収するため、フライホイールを活用した電力バスシステム構築に取り組んできた。当初は産業用実績をスケールダウンした集中管理方式を構想していたが、ユーザからの期待に現実的な期間で応えるため、比較的风险の低い小型分散型のフライホイールシステム構想にシフトしている。

このフライホイールシステム (CFS) は質量約 3 kg で 3 kW のアクチュエータ駆動電力を想定している。フライホイールは、一本のロータシャフトで同軸駆動される電動機と発電機から成る。第 8 図に小型フライホイールシステム構想図を示す。発電機のコントローラはアクチュエータのデマンドに応じて電流を供給し、電動機側のコントローラは低い時定数で電力バスから電流を供給する。アクチュエータからの瞬時の大電流デマンドが生じた場合は、発電機はロータの運動エネルギー (フライホイール効果) から瞬時に供給する。反対に、アクチュエータからパワーバックされる場合は、発電機はモータとしてロータを加速し運動エネルギーとして吸収する。

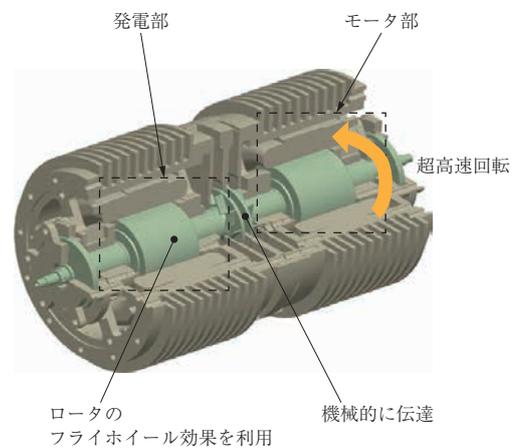
フライホイールシステムの二つの絶縁されたステータは仕様を変えることで、電力バス電圧とアクチュエータ供給電圧を昇圧/降圧変換することができる。電力バスと負荷側を機械的に分離しているため、故障の波及などを阻止す

る役割も果たす。このシステムは、分散空冷システムで開発した高回転小型空冷モータ技術を応用することにより高パワー密度化し、一般的なフライホイールバッテリーが具備する低損失蓄電という機能を省くことで、低メンテナンスで高密度な運動エネルギー/電気エネルギー変換デバイスをコンパクトに実現するものである。第 9 図に電動機-発電機直結機構 (構想図) を示す。

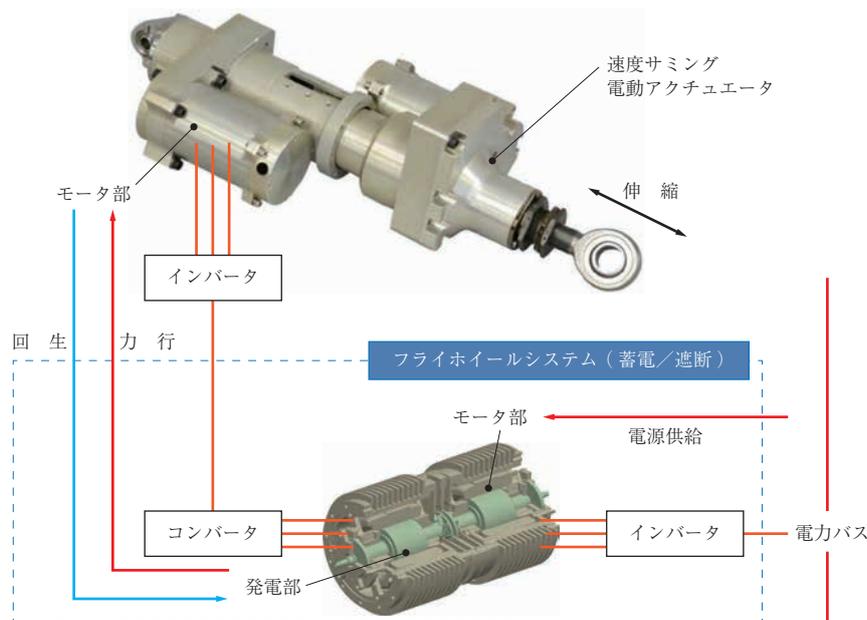
## 5. システムの将来性

### 5.1 エネルギーの最適化から信頼性の向上へ

航空機システム動力の電気エネルギーへの統合は、先導する多様な産業における一般的なエネルギーマネジメント



第 9 図 電動機-発電機直結機構 (構想図)  
Fig. 9 Concept for the Cascaded Flywheel System (CFS) mechanism



第 8 図 小型フライホイールシステム構想図  
Fig. 8 Concept for power management in the flight control system

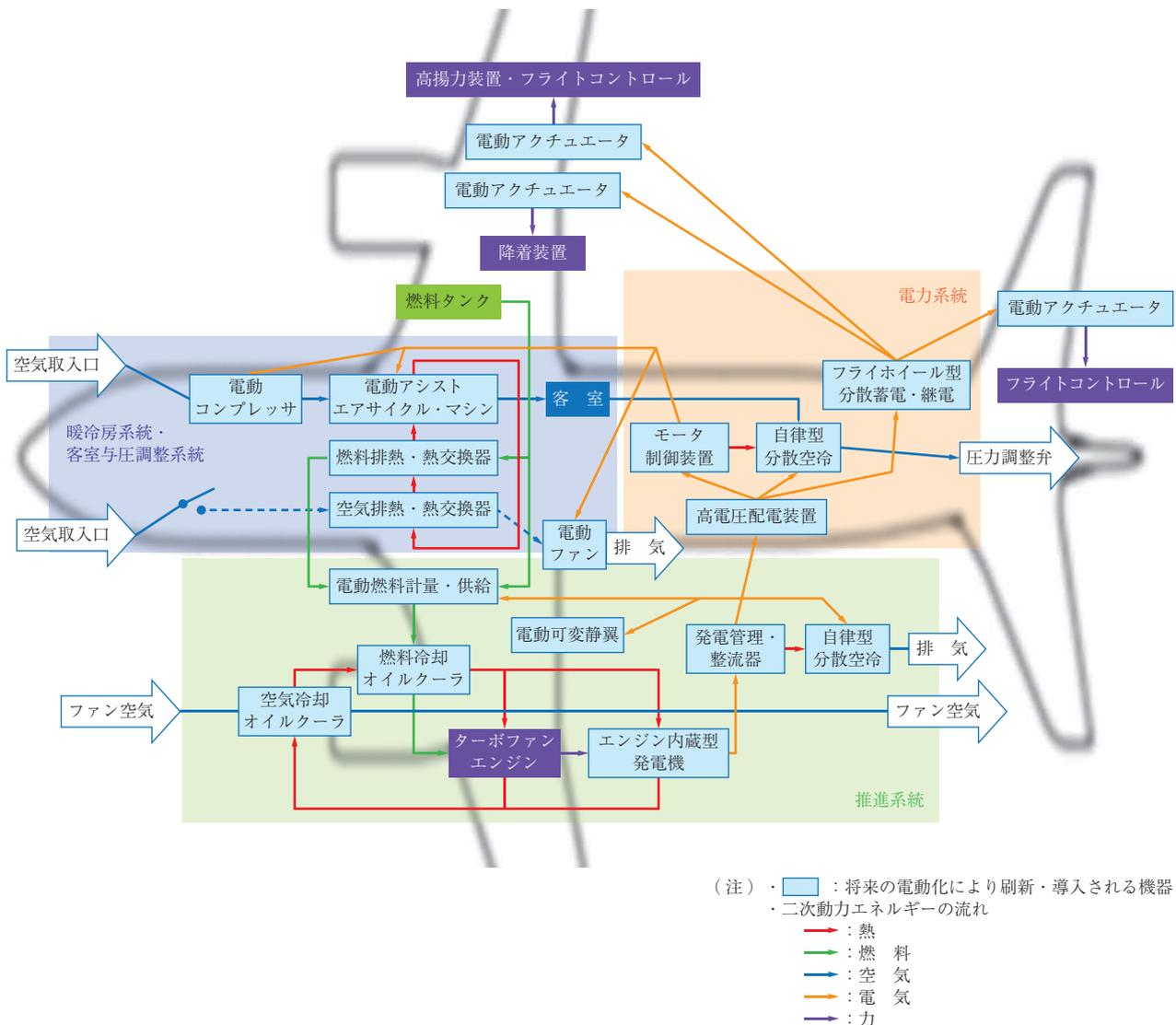
や整備性の向上にとどまらない価値を提供する。分散化した駆動源であるモータは、その設計自由度から機体構造質量を抑制し燃料消費の最小化に貢献する。また、航空機では排熱が質量負担および機体の空気抵抗に変換され、これらがさらに燃料消費へ変換されるため、排熱抑制は重要である。機外に排出する客室空気や、エンジンで消費する燃料などに熱を載せて捨てる努力も、ラム空気取り入れによる空気抵抗を低減し燃費の改善に貢献する。第10図に統合化された航空機・エンジン電動化システムの例を示す。

電動化が目指す統合を実現した高度に接続する System of Systems は、いまだ民間航空機では経験のないレベルになることが機体メーカーから指摘されている。その解決には、ハードウェア技術の進展による機器の信頼性向上と小型化で、多重化によるシステム信頼性の向上を支えつつ、ソフトウェア技術が高度な制御技術を明瞭簡潔なロジック

で集積することが必要である。それら双輪の技術を手に入れることが、日本の工業製品が本来得意とする高い信頼性・安全性<sup>(3)</sup>のもとに究極の信頼を得た航空機システムに到達する十分条件である。

## 5.2 エネルギーの最適化から操作性の向上、騒音や排ガスの最小化へ

航空機における電動化の効果を最大限に活かす究極の方向性に電動推進がある。高密度の二次電池やリフィール可能な一次電池あるいは燃料電池などの将来電源システムの登場によって、格段にCO<sub>2</sub>削減が進む可能性がある。しかし、技術開発の連続性を考えた場合、不連続な技術革新の不確実性に頼らずとも、日々の技術進歩を享受しつつ実用化するシステム構想が重要となる。電動推進方式のなかでも、電池技術開発に将来を委ねないターボエレクトリックに注目が高まる理由はそこにある。しかし、航空機搭載



第10図 統合化された航空機・エンジン電動化システムの例  
 Fig. 10 Example of an electric aircraft system

大型ガスタービン発電機からの電力を、電動ファンに供給する方式であってもまだ、分散ファンを含む機体構造の見直しや機体・推進器統合コンセプト（たとえば、推進器を胴体の後部に設置し、胴体表面の境界層を積極的に吸い込むことで、機体の摩擦抵抗低減効果を期待する Boundary layer ingestion fan）など課題は山積している。

筆者らは実現性に焦点を当てたシステムの一案として、極力現状の機体構造を継承しながら、複合的なエネルギー需給を行う電動推進アーキテクチャの提供を構想している。第 11 図に電動推進へのシステム拡張の例を示す。前述のエンジン低圧軸・高圧軸の発電機を電動機としても活用しつつ、補助動力装置（APU）を過渡的な推進系のエネルギーブースタとして利用することも考慮する。離陸時の加勢あるいは降下中・地上滑走中など、エンジン回転数低下時の燃費改善や制御安定性確保のためには、互いにパワーを需給する複合的なシステムの設計が必要となるが、そこに至る検討段階において種々の形式の利点や欠点についての議論を世界の中で続けていく。

システム革新の連続性は、安全を第一とする航空機において、実績を積んだ技術の継承を未来に担保する。蓄積を重ねたシステムが将来の発展を実現し、電動化は安全性・信頼性・操作性・整備性と、人と地球にやさしい航空機を提供する技術となる。

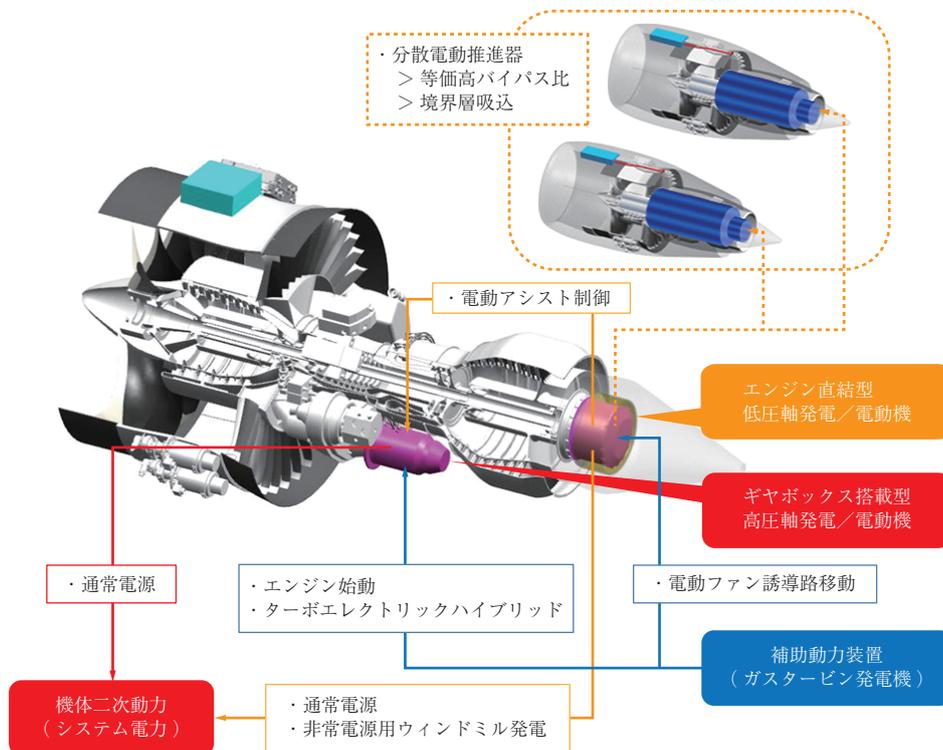
## 6. 今後の課題

### 6.1 電動化技術開発

5 章までの議論をとおして、電動化の最適化・統合化のすべてにおいて、回転機械がエネルギーや熱の問題と密接に関連付けられるキーテクノロジーであることが明らかとなった。動力源としてのガスタービンからの軸出力抽出や二次動力としての油圧・空気圧技術、速度調整としての増減速歯車やバルブなどの調節機構、転がり軸受やすべり軸受などの軸支持技術は、今後も技術の主流であるものの限界への挑戦に到達しようとしている。

エンジン内蔵型発電機やビルトインモータ方式超高速プロワ、電動モータ直結型燃料ポンプなどのダイレクトドライブ化は、低損失高速インバータによる速度調整の飛躍的な制御性向上や軸受の適用範囲拡大を技術の裏付けとして、航空機システムの要請に貢献する回転機械の高速化、高出力化、オイルフリー化などのブレイクスルーを待望される理由となっている。

航空機電動化の技術開発は機械四力学を中心に、電気設計との壁を取り払い、磁性材料、化学や熱、生産技術などのオープンイノベーションによる競争力とスピードを得て、学際的エンジニアリングで融合させていく。



第 11 図 電動推進へのシステム拡張の例  
Fig. 11 Example of the concept for hybrid propulsion beyond E3M

## 6.2 システム化技術開発

5章に示した複雑化し統合化されたシステムの開発には、膨大なソフトウェアが関わる。海外の国際会議における議論を経て、ソフトウェア開発は電動化の最大の課題の一つであると指摘されており、数多くの人的リソースとそのマネジメント、コストとスケジュールの各リスクを抑制しなくてはならない。アメリカ連邦航空局 (FAA) のエンジニアは、一般論としてソフトウェア開発における障壁の多くは、ソフトウェア能力成熟度モデル (現在のCMMI®: Capability Maturity Model® Integration (能力成熟度モデル統合) に相当) のレベル1 (初期段階) 以下にある開発主体が、認証のガイドラインである RTCA DO-178 (ソフトウェア開発保証プロセス: 以下 DO-178) による開発を立ち上げる場合にある、とのコメント<sup>(16)</sup>をだしている。CMMI vs. DO-178 は前者がソフトウェア・システム開発のプロジェクト管理やリスク管理、調達やサービス、パーソナルマネジメントなど企業活動全般の改善指針および評価であり、後者が航空機ソフトウェア認証のための開発と統合化プロセスであることから、CMMI が DO-178 を代替するものではない。しかし、CMMI レベル2 (管理された)、3 (定義された)、4 (定量的に管理された)、5 (最適化された) という事業体は、DO-178 の開発プロセスが確実に遂行できるレベルにあるとともに、レベルが高まるにつれてプロセスの見える化、定量化と最適化によってコスト抑制、スケジュール短縮、当局の高い信頼などのプロジェクト利益を得るとされている。

当社は DO-178 の開発プロセス経験を活かし、株式会社日立ソリューションズ (CMMI Institute 公式パートナー) と協同して航空機システム化開発技術の革新に向けた研究を進めている。

## 6.3 システム評価技術開発

システムやそのミッションの複雑化が妥当性評価や検証 (V&V: Validation and Verification) の負荷を増やし、各タスクは期間短縮とコスト削減が求められる。手段の一つとして分散化した資産 (設備、リグ、シミュレータ、ソフトウェア、人材) の有効活用が課題となる。その実現には地理的に離れた場所の既存資産を相互接続し、分散して並行開発を進めつつも固有の技術情報を全く外に出すことなく協同評価できる基盤アーキテクチャが必要とされている。

インテグレーションの過程で必ず発生する手戻り工数のリスクに対して、開発ループを高回転にするアジャイル型

開発が存在感を高めているが、大型システム開発におけるスケジュール管理の困難さが解決されない現状においては、従来のウォーターフォール型開発での生産効率向上を急がねばならない。効率的に実行するため、V字モデル検証を前提に一般化するモデルベース開発 (MBD: Model Based Development) を起点とし<sup>(17)</sup>、ハードウェア、ソフトウェア、モデルなど各レベルのイン・ザ・ループ・シミュレーション (HILS, SILS, MILS) をミッションレベルで共有する。ただし、各エネルギーをモデルのみで統合することは長い年月にわたり学術的な課題であり、従来の制御ロジック HILS (C-HILS) を、実物の電気・力・熱の相互変換をシミュレータに戻すエネルギーおよびパワー HILS (E&P-HILS) へ拡張し、開発期間の短縮を図る必要がある。

## 6.4 システム信頼性向上技術開発

航空機においては鉄道車両や自動車と異なり、飛行を続けることが第一の安全の要件であるため、設計様式として多重構成を要求するとともに安全な遷移状態を確保しなくてはならない。フライ・バイ・ワイヤや FADEC (エンジンのデジタル電子制御) などは、フライトクリティカルな制御で冗長機能や耐故障設計が達成できている。電動化システムの冗長設計・耐故障設計の課題は、電動化特有の電力変換システムやモータ出力を駆動力に変える機構伝達装置である。

当社は、電動化システムが飛行中に故障した際も、航空機の運航に支障を与えないように、故障で喪失した機能を速やかに補い復旧できる設計手法の構築を目指している。ただ単純に多重化した冗長方式では達成できない、より安全な電動化システムをコンパクトな設計で達成するため、①部品点数の抑制 ②ジャミング発生の排除 ③故障遷移時間の縮減、を設計コンセプトとし、①アクティブ・アクティブ制御と円滑・速やかな切り替え ②突合せ部切り離し部の機械的・電氣的耐ジャミング機構 ③スーパバイザや相互監視不要の故障遮断、の実証を報告してきた<sup>(12)</sup>。実用化の段階に至り、これらの新技術にかかる航空システムが特徴づけるリスク・安全性工学領域は重要性を増している。

## 7. 結 言

六つの章にわたり、発電機の大容量化を起点に航空機電動化への取組みについて述べた。MEAAP コンセプトの特徴<sup>(18)</sup>は、個々のシステム議論のみならず、航空機全

体のシステム検討にある。すなわち、電気を二次動力に統合管理し、電力需給の最適化を可能とし、また、電力の増大に伴う発熱が増加するため、この排熱を効率良く行うための冷却システムを電力マネジメントとともに排熱マネジメントとして統合化・最適化する。また、安全性の確保向上は航空機最優先課題であり、電動化システムの高機能化や多重構成化も検討してきた。その MEAAP の技術ポリシーが本論の基盤となっている。

MEAAP の一翼を担う当社は、新たな航空機電動化に向けたソリューションの創造を目指す。産業機械分野で培った最高効率の追求や長寿命設計を基礎に、小型軽量、分散、高ダイナミックレンジという航空機特有の新たな要請を、未来を信じチャレンジすべき目標と見据えて、要素レベルの技術進化と統合化技術・最適化技術開発に、組織が一体となって切磋琢磨しながら邁進することで Engineered Systems（計算し尽されたシステム）を実現する。その未来に、次世代のエンジニアたちが地球に最もやさしい航空機・エンジン電動化システムの Contrail（飛行機雲）を必ず描くはずである。

#### — 謝 辞 —

ナブテスコ株式会社、住友精密工業株式会社、株式会社島津製作所、シンフォニアテクノロジー株式会社の皆さまと株式会社 IHI は、2012 年の初夏に「航空機・エンジン電動化システム研究会」“MEAAP”を発足いたしました。約 5 年間 40 回近い研究会活動を続けております。その中間成果の一部として当社の研究活動を技術報告させていただきました。

航空機では複合材がそうであるように電動化についても大きく動き出している時代に、われわれ“MEAAP”は、10 年、20 年先を見据えて世界に先駆けて、そして各社の力を合わせる形で技術開発し世界の中での実力、地位を上げていきたいという思いにあり、この研究会を設立し、さらにはエアラインや大学の皆さまなど世界のあらゆる知恵を集めてともに「姿」を描きつづけております。ご協力くださいました皆さまに厚く御礼申し上げます。

最後に、本稿への情報提供をいただきました、株式会社アスター、住友精化株式会社、サンコール株式会社、株式会社日立ソリューションズ、三菱プレジジョン株式会社のほか、本研究に当たって、多大なご支援をいただいている関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産

業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

#### 参 考 文 献

- (1) 森岡典子, 大依 仁: ‘More Electric’ Engine の現状と動向 — Propulsion と Power plant を担う将来の航空機エンジン制御 — 日本ガスタービン学会誌 第 42 巻 第 1 号 2014 年 1 月 pp. 30 - 35
- (2) 桂田 健: 航空機システムの電動化 — エアラインからの視点 日本ガスタービン学会誌 第 42 巻 第 1 号 2014 年 1 月 pp. 42 - 44
- (3) 鈴木真二: 落ちない飛行機への挑戦 航空機事故ゼロの未来へ 化学同人 2014 年 3 月
- (4) 大依 仁: 航空機・エンジン電動化システムの信頼性向上に関する研究 学位論文 東京大学 2014 年 1 月
- (5) 堀 洋一: 電気と制御で走る近未来車両に関する研究 FED Review Vol. 3 No. 4 2004 年 2 月 pp. 1 - 21
- (6) 日経 BP 社: 特集「空飛ぶクルマ」の衝撃 見えてきた次世代モビリティ — 日経ビジネス 2017 年 6 月 12 日号
- (7) 高山雅人: 航空機の電動化技術の動向 日本航空宇宙学会誌 第 63 巻 第 1 号 2015 年 1 月 pp. 8 - 11
- (8) 渡辺紀徳: 将来航空推進システム技術創成社会連携講座 日本ガスタービン学会誌 第 41 巻 第 6 号 2013 年 11 月 pp. 525 - 527
- (9) 渡辺紀徳: 航空エンジンの電動化とエネルギーマネジメント概要 日本ガスタービン学会誌 第 42 巻 第 1 号 2014 年 1 月 pp. 22 - 23
- (10) 五井龍彦: MEA 化と航空機発電装置 日本ガスタービン学会誌 第 42 巻 第 1 号 2014 年 1 月 pp. 36 - 37
- (11) 大依 仁: 航空エンジン電動化システムの動向 日本航空宇宙学会誌 第 63 巻 第 2 号 2015 年 2 月 pp. 38 - 39
- (12) 森岡典子, 垣内大紀, 小沢寛二, 関 直喜, 大依 仁: More Electric Engine 制御技術の実用化研究 IHI 技報 第 52 巻 第 1 号 2012 年 3 月 pp. 43 - 52
- (13) 齋藤英文: 空気調和/冷却システム 日本航空

- 宇宙学会誌 第63巻 第2号 2015年2月  
pp. 35 - 37
- (14) 山本洋一, 中川伸吾: フライトコントロールシステムと電源システム 日本航空宇宙学会誌 第63巻 第2号 2015年2月 pp. 40 - 41
- (15) 安良岡悟, 西澤敏雄, 陶山修二, 栞川宏樹: パネル討論「航空エンジン技術開発プロジェクトの将来展望」 第4回将来航空推進システム技術創成オープンワークショップ 2017年3月29日
- (16) L. K. Rierson : Using the software capability maturity model for certification projects Digital Avionics Systems Conference ( 1998. 10-11 )17th DASC Proceedings
- (17) 下浦美那, 辻本圭史, 大依 仁, 森田康志: 大規模システムへのモデルベース開発手法の適用 先進的な設計・検証技術の適用事例報告書 2015年版 独立行政法人情報処理推進機構 15-A-13 2015年11月 pp. 1 - 11
- (18) 鈴木真二, 森岡典子: 航空機・エンジン電動化システム研究特集に向けて 日本航空宇宙学会誌 第63巻 第1号 2015年1月 pp. 7 - 8