

論文の内容の要旨

論文題目 航空機用エンジン・システム電動化に関する研究

氏名 森岡 典子

1. 本研究の目的

地球環境と人にやさしい航空機を実現するために、CO₂などのエミッション削減および、航空機の安全で効率的な運航に貢献することは航空機技術の使命である。本研究は、それらの要請に基づく技術革新となる、航空機用エンジン・システム電動化に関する研究を行い、その実現性を明らかにすることを目的とする。

航空機用エンジン・システムの電動化（MEE：More Electric Engine）は、従来の機械あるいは油圧・空気圧を用いたシステムを、先進の電気・電子技術を取り入れた電動化システムに統合するものであり、電動モータ駆動の燃料ポンプを用いた電動燃料システムを中核として、可変機構駆動用の電動アクチュエーション・システム、電動化システムの動力源として電気を発電・供給するジェネレータ・システムを主な構成要素とする。本研究では、MEEの基本概念を定めたうえで電動燃料システムの基本構想を研究し、この新たなシステムの導入がエンジンにもたらす改善効果として燃料消費削減効果を明らかにするとともにエンジンの信頼性・安全性向上への貢献を示す。さらに電動燃料システムの実現において課題となる技術要素を明確にし、これらの課題を克服するための検討過程を明示しながら機構設計・評価を行い、その実現性について述べる。また、将来の航空機システムのより効率的・安全な運用に資する、MEEの貢献についても提案する。

2. 従来の技術と課題

2.1 従来のエンジン制御および補機の駆動技術

デジタル電子技術の進歩に伴い、エンジン制御方式は油圧機械式から FADEC (Full Authority Digital Electronic Control) へと変遷を遂げたが、エンジン補機は現在に至るまで、エンジン動力を抽出して AGB (Accessory Gear Box) を介して駆動する方式が主流である。世界において 1980 年代後半からエンジン燃料ポンプ電動化のコンセプトが検討開始され、さらにその後、航空機の電動化システム (More Electric Aircraft) 技術の発展とともにこれと協調した、より広範囲のエン

ジン・システム電動化の研究がおこなわれるようになった。しかしながら、MEE はエンジン効率向上による燃料消費削減、ひいては航空機全体の効率改善が示唆されながらも、実際の航空機への適応が顕著に進展するに至っていない。本研究においては、この要因を考察し技術課題を明確にしたうえで、課題解決のアプローチを見出さなければならない。

2.2 MEE システム研究の課題

第一番目の課題は、MEE システムがエンジンあるいは航空機にもたらす効果に関して定性的な議論はあるものの、未だ定量化が行われていないことである。まず、従来の AGB 駆動・油圧機械式の制御システムを電動化することによって、システムの無駄を排除し燃料消費を削減する効果を定量化する必要がある。つぎに、電動化という新たな駆動方式を取り入れることによる質量等への影響を考察する必要がある。MEE システム構想を定めたうえで、エンジン・航空機に対するメリット・デメリットを明らかにすることが、MEE システム研究の第一歩として重要な課題である。

第二番目の課題は、航空機用エンジンにおける電動化特有の課題が整理されていないことである。従来の油圧機械式を中心としたエンジン制御システムは、長年にわたる使用実績のもとで民間航空機用として信頼を得るに足りる安全性を提供している。これに対して MEE におけるシステムおよび機器の使用方法や使用条件は今まで検討されたことさえなく、例えば燃料ポンプの駆動方式が AGB 駆動から電動モータ駆動に代わることは、新たな使用条件や運用条件を考察し、未開の適用範囲について実現性を検討する必要性を生ずる。当然ながら、定常のみならず過渡状態においてもエンジンが正常作動するように、燃料流量の制御精度や制御応答性が確保されなくてはならない。従来技術の適用範囲を超えて新しい技術革新を導入する MEE において、システムとしての機能・性能そして安全性・信頼性を確保することが、航空機技術の前提として重要な課題である。

3. 本研究で得られた知見

以上の課題に対し、本論文では第 2 章にて航空機用エンジン電動化システム構想、第 3 章では MEE 電動燃料システム導入によるシステム改善効果の検討結果を記述し、第 4 章には MEE 燃料システムの機構設計と評価について記述した。

3.1 航空機用エンジン電動化システム構想

MEE は、航空機用エンジンの制御システムに、従来の機械・油圧による駆動源に代えて電動モータを用いた電動化コンセプトを導入する概念である。最初のステップとなる電動燃料システムとして、ギア・ポンプをモータ駆動とし、モータ回転数制御と流量フィードバック・システムによってエンジン燃焼燃料流量 (W_f) 制御を行うシステム (図 1) を基本構成として定めた。このシステム構成は、AGB 駆動燃料ポンプで余剰燃料を循環させる無駄を省いてシステム効率を改善し、燃費向上を可能とする。また、従来研究されてきた航空機エンジン用の電動燃料システム構成と比べて以下の点で技術的な独自性を有する。

(1) 加圧バルブと差圧センサを用いた流量フィードバック・システムを用いて高精度な燃料流量計量を実現する。これにより、従来の燃料制御機構を削除することができる。

(2) 電動モータで駆動する1台のギア・ポンプの回転数制御のみで、エンジン着火時の最小燃料流量から離陸時の最大燃料流量までの全流量域のWfを制御・供給する。

これらの導入によってシステムのシンプル化を究極まで追求し、従来の燃料システムより機構が簡単で信頼性の高いシステムとすることを、本研究の電動燃料システムの大きな特長とする。

3.2 MEE 電動燃料システム導入によるシステム効率効果の検討

MEE 電動燃料システム導入による燃費改善効果の評価方法を検討し、改善効果の定量的把握を行った。小型ターボファン・エンジンを想定した場合、巡航条件で約1%のSFC (Specific Fuel Consumption) 改善効果が得られることを示した(図2)。このうち、燃料ポンプ電動化によるエンジン抽出馬力削減による改善効果が約0.4%、ヒート・マネジメント改善によってACOC (Air-Cooled Oil Cooler) が不要となりファン出口空気圧力低下がなくなったことによる改善効果が約0.6%である。一方でシステムの質量増加は7kg程度にとどまり、この影響を考慮に入れても電動燃料システムの導入がSFC改善をもたらすことを明らかにした。さらに、中型・大型ターボファン・エンジンを想定して同様な検討を実施し、これらのエンジンにおいても効率改善の効果が得られることを確認した。

また、システム信頼性の評価として、エンジンを起因とする機体の致命的故障の発生確率の算出を行い、電動化システムは従来システムに比べて信頼性・安全性向上を図れる可能性があることを示した。

3.3 MEE 電動燃料システムの機構設計と評価

小型ターボファン・エンジンを想定し、電動燃料システムの具体化・実用化に際して課題となる事項について洗い出し、これらの課題を克服すべく検討を行ったうえで新たな実用化手法を提案した。

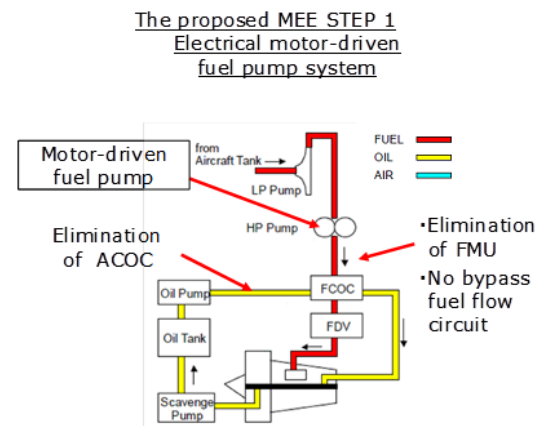


図1 MEE 電動燃料システム

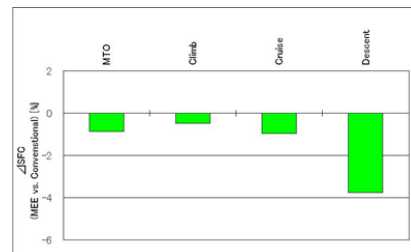


図2 小型エンジンにおけるSFC改善効果

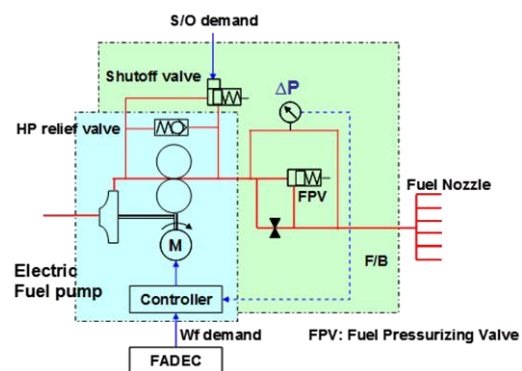


図3 電動燃料システム基本構成

(1) 高精度燃料流量計量

一番目の課題は、高精度の燃料流量計量である。MEE 電動燃料システムは、電動モータにより燃料ポンプを駆動し、回転速度を変化させることにより燃料計量を行う。この方式で燃料を高精度に計量するためには、長時間使用に伴うポンプ容積効率の変化等を補償する必要がある。本研究における電動燃料システムの機構設計においては、燃料システム構成を最大限簡素化することも考慮し、ポンプ後流に並列配置の加圧バルブとオリフィスを設置し、その差圧を計測して燃料流量のフィードバックに用いるシステムを新たに提案した(図3)。この方式により、全流量域で高精度の流量計量を可能とした。

(2) シングル・シャフト・ポンプ

二番目の課題は、広範囲の燃料供給に対応する電動燃料ポンプ・システムの構築である。ポンプ自体の構造をシンプルにするため、高圧ポンプと低圧ポンプの組み合わせからなる燃料ポンプをモータに直結した1本のシャフトで同軸駆動するシングル・シャフト・ポンプの実現を目指す。この実現における課題は、従来の AGB 駆動燃料ポンプでは用いられない低回転領域において、燃料を供給し、連続運転することである。低回転数領域における低圧ポンプの昇圧性能確保および、連続運転する場合のポンプ軸のベアリング潤滑性能などの課題に対して定量的な検討を行ったうえで、シングル・シャフト・ポンプに成立性があることを示した。

そのうえで、小型エンジンを想定した電動燃料システムの試作・評価を実施した。試験によってエンジン始動から最大流量までの全流量域の Wf 供給が可能なることを確認し、また、流量フィードバック制御による高精度燃料計量の成立性を確認した。

4. 将来航空機システムにおける MEE の貢献に関する提案

将来の航空機において MEE が導入され、機体とエンジンの双方におけるシステム電動化が進展することによって、従来の機体とエンジンの枠を超えたシステム統合化が進む可能性を示した。MEE システムの導入ならびに機体・エンジンのシステム統合化は、より高い効率と信頼性・安全性を目指す将来の航空機システムの実現に貢献する技術革新であると考えられる。

本論文ではこれらの可能性の提案にとどめ、実現性の検討は今後の課題とする。

5. まとめ

本研究において、航空機用エンジン・システムの電動化(MEE)がエンジンの効率改善をもたらすことを明確にしたうえで、シンプルで信頼性・安全性の高い電動燃料システムの実現が可能であることを示した。このシステム構想をより具体化して研究を進め、システム試作・評価を行って MEE システムの実現性を高めることを、今後の課題とする。

将来、電動化システムの発展に伴って、航空機とエンジンが制御、システム構成、機器構成などの広い範囲で統合化されていくと考えられる。人と地球にやさしく、安全で柔軟な航空機の実現に向けて MEE がより一層、貢献することを目指して研究を続けていく。