

2017 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
職位または役職	助教
氏名	寺尾 悠

1. 研究題目

電動航空旅客機に搭載する高出力密度超電導モータの電磁設計と周辺システム

2. 研究目的

本研究では、将来の電気推進式航空旅客機に搭載する高い出力かつ軽量(高出力密度)なモータを実現するため、超電導技術を用いた「超電導モータ」に関する研究を行なう(図 1)。具体的には、超電導モータを搭載する航空旅客機及びシステムの条件等を設定した上で、超電導モータの電磁設計を行い、出力密度、交流損失をはじめとするモータの電磁特性を評価する。超電導モータによって達成する出力密度の目標値は 20 kW/kg とする。

モータの電磁設計に関しては、電気機器学及び超電導工学をベースにした解析式及び有限要素法を用いて行う。本設計において解析式ベースでモータの出力、極数、直径、軸方向長等の設計パラメータを変化させた場合の超電導モータの出力密度や損失(鉄損、交流損失、etc...)に関してその傾向を調べる。そしてこれらにより得られた結果を更に、有限要素法を用いた電磁界解析を行う。具体的には超電導モータのバックヨーク部分(磁気シールド部分)に着目し、解析式による初期設計からバックヨーク厚さを径方向に低減させ、ある程度の磁束漏れを許容した上で軽量化を図った場合の出力密度の変化やモータ周囲の漏れ磁束を調べる。

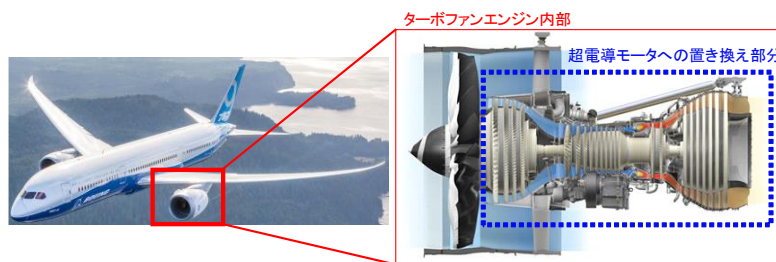


図 1. 航空機エンジンの電気モータへの置き換えイメージ
(一部引用: <http://www.boeing.com/commercial/787/#/technical-specs>)

3. 研究内容及び成果

本研究では、**130人乗り程度の航空旅客機を前提とし、離陸時の最大出力44 MWを複数の超電導モータで賄うことを考える。**推進システムとしてはタービンにて発電機を回し、発電電力を機内の電力系統及びファン駆動部分まで直流で送電し、モータをインバータにて駆動してファンを回す(図2)。本システムに組み込む超電導モータとして、**界磁コイルにYBCO線材、電機子コイルにMgB₂線材を用いた全超電導モータを提案する(図3)。**本構造は直流強磁界がかかる界磁コイル部分に高いJ_c-B特性及び温度マージンを有するYBCO線材、交流磁界が掛かる電機子コイル部分に細線・多芯構造のMgB₂線材を用いることにより低交流損失化が期待できる。本モータの基本特性を表1に示す。出力は航空機1機の離陸時出力(44 MW)を8基のモータで賄うことを考え、6.0 MWとする。またモータ回転数は5000 rpmとした。モータの冷却温度は20 Kとし、**冷却には液体水素を使用することを考える。**将来的には、**モータ冷却によって蒸発した水素をタービン燃料としてシステム中で循環させることも考える。**これらの前提条件ベースに、有限要素法による電磁界解析にて得られた結果を図4~6に示す。**モータ直径は400 mmからバックヨークを削減したことによりわずかに減少する一方、漏れ磁束の増加によるモータトルク減少を補うため、軸方向長が800 mm→1100 mmに増加していることが分かる(図4)。**ただし、径方向厚さの減少効果は大きく、**バックヨーク厚さを初期設計の35 mmから17.5 mmまで低減させた際には出力密度が17.9 kW/kg、さらに初期設計から25%程度まで厚さを低減させた8.8 mmの場合は22.9 kW/kgまで増加していることが分かる(図5)。**これは現状の永久磁石モータの出力密度が5 kW/kg程度であることを考えると、超電導技術の導入に大きなメリットがあることが分かる。ただし、図6に示すように初期設計においては、モータ周辺の漏れ磁束は最大で40 mT程度であったが、**バックヨーク厚が8.8 mmまで削減された場合には周囲100 mmにて0.1 T近くまで増加しており、出力密度の向上を図る一方で周辺機器の配置等には十分注意する必要がある。**

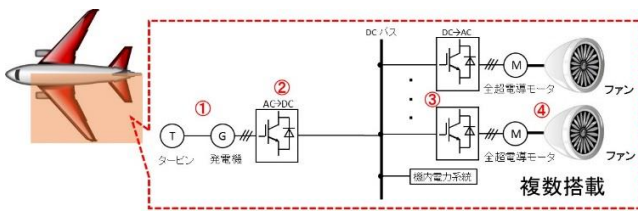


図2. 前提とする航空旅客機の電気推進システム

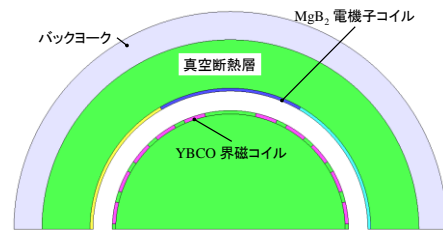


図3. 提案する超電導モータ

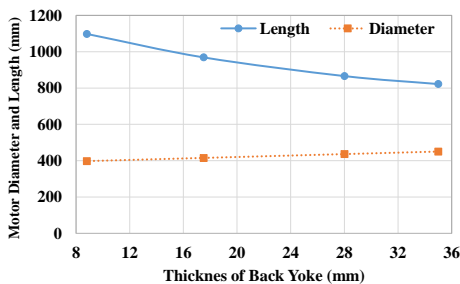


図4. バックヨーク削減によるモータ直径-軸方向長変化

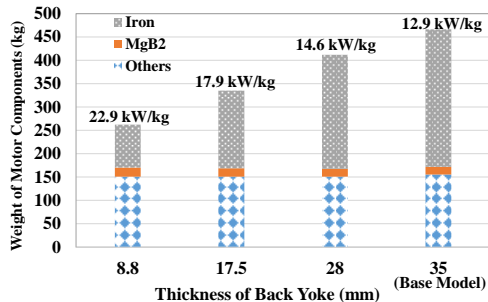


図5. バックヨーク削減でのモータ出力密度変化

表1. 全超電導モータの基本特性

定格出力	6.0 MW
極数	2
回転数	5000 rpm
界磁巻線	YBCO
電機子巻線	MgB ₂
冷却温度	20 K (液体水素利用)

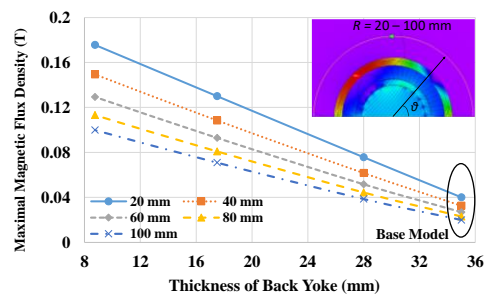


図6. バックヨーク削減によるモータ周辺の漏れ磁束

4. 今後の研究の見通し

今回の研究において、電気推進式航空旅客機の駆動システムに用いる超電導モータ、特に界磁/電機子巻線双方を超電導化した全超電導モータに関する電磁設計を行った。本研究により

- 全超電導モータの設計条件（特にバックヨーク部分）次第では出力密度を最大で **22.9 kW/kg** まで増加させることが可能であり、既存の永久磁石型と比較して 4 倍以上の出力密度を達成できる可能性がある。
- バックヨークの低減による出力密度の大幅な向上が望める一方、モータ周囲への磁束漏れが増加し 0.1 T 程度の漏れ磁界となる。すなわちモータ周辺の磁気遮蔽や機器配置を注意深く考える必要がある。

以上を踏まえて、超電導技術の導入が将来の電気推進式航空旅客機の実現に貢献できる可能性を定量的に示すことが出来た一方、今回は「液体水素(20 K)冷却」及び「全超電導モータ構造」という2つの要素を中心に研究を行なった。よって今後は超電導モータ実現の可能性を更に深く議論する上で以下の様なことを行っていく必要がある。

- 液体窒素温度(77 K)など更に高温域での超電導材料を使用した際の超電導モータ並びにシステムの成立可能性
- 界磁コイルのみを超電導化した超電導モータ構造の検討

これらは「研究助成 2018」における研究対象である。冷却コストに関して考えた場合、液体窒素(～77 K)は液体水素(～20 K)よりも高温である分、冷却システムの簡易化が期待できる。また、界磁コイルのみを超電導化した場合にも冷却構造が全超電導構造よりも簡単となる。現状、全超電導構造の研究が世界において多く行なわれているため、これらのカウンターパートとして、また超電導モータを組み込んだシステムについて幅広く議論する上でこれらの検討を行なうことは有用である。

以上を踏まえ、今後も電気推進航空旅客機及び高出力密度な超電導モータの実現に向けて幅広く検討・議論を行なっていく予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 寺尾 悠, 大崎 博之: “電気推進式航空旅客機に搭載する高出力密度全超電導モータの電磁特性,” 第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会, 3A-a02, 2018 年 5 月
2. 寺尾 悠, 大崎 博之: “電気推進用航空旅客機のための高出力密度全超電導モータの電磁設計,” 平成 30 年電気学会全国大会, 5-186, 2018 年 3 月
3. 寺尾 悠, 大崎 博之: “解析式に基づく航空旅客機向け電気推進用超電導モータの電磁設計,” 第 95 回 2017 年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p08, 2017 年 11 月