

# 航空機の電気推進化に向けたREBCO全超伝導同期機の研究開発

佐々， 滉太

<https://hdl.handle.net/2324/4475158>

---

出版情報：九州大学，2020，博士（工学），課程博士  
バージョン：  
権利関係：

氏 名 : 佐々 滉太

論 文 名 : 航空機の電気推進化に向けた REBCO 全超伝導同期機の研究開発

区 分 : 甲

### 論 文 内 容 の 要 旨

20 世紀後半から、二酸化炭素が多くを占める温室効果ガスに起因する地球温暖化が問題視されており、地球環境保全の観点から、航空機の電気推進化が求められている。しかし、従来の回転機ではコイルに銅線を用い、バックヨークや鉄心等に多くの鉄が使用されており、航空機が要求する厳しい重量制限を満たすことができない。超伝導線材は電気抵抗ゼロに起因して銅線に比べ電流密度が非常に高く、超伝導コイルは鉄心なしで銅線コイルより大きな磁界を発生させることができる。航空機を電気推進化するにあたり、大幅な軽量化が期待できる超伝導回転機の適用が必須である。界磁巻線および電機子巻線の両方に超伝導線材を用いる全超伝導同期機は、超伝導回転機の中でも特に小型・軽量化が可能であり、出力密度や効率において優れている。しかし、全超伝導同期機に適用する REBCO 超伝導線材の交流損失特性の詳細は明らかになっておらず、巻線内で発生する損失の見積もりが困難であり、交流損失を定量的に考慮して設計を行うことが不可能であった。交流損失による温度上昇は超伝導線材の臨界電流の低下を引き起こし、場合によっては超伝導巻線を焼損させる大事故を引き起こすため、発熱を見積もり、適切な冷却方法を選択することが機器設計には必須である。また、交流損失は回転機の効率に直接的に影響するため、推進システムを設計するにあたり、その見積もりは極めて重要である。

本論文では、まず電気推進航空機用の全超伝導同期機の実現に向け、REBCO 超伝導線材の交流損失特性を定量的に明らかにし、回転機内の超伝導巻線にて発生する交流損失を見積もる手法を確立した。次に、この手法により見積もられた交流損失を基に航空機用 10 MW 全超伝導同期機の概念設計を行い、回転機設計や冷却方式の選択について指針を示した。さらに、これらを基に 1 kW 級全超伝導同期機を設計・試作し、特性評価試験を行って、これらの設計指針の妥当性を検証した。本論文はこれらの研究をまとめたものであり、下記の 5 章から構成されている。

第 1 章では、航空機の電動化が求められる背景や、これまでに行われた超伝導回転機の研究開発について述べる。また、航空機用の超伝導回転機における問題点を説明し、本論文の目的および意義を述べている。

第 2 章では、磁界中の REBCO 超伝導線材に発生する交流損失の特性について述べている。回転機中の巻線において REBCO 超伝導線材は積層された状態にあるため、特に線材積層枚数依存性に着目し、その交流損失特性を表す定量的理論表式を実験・理論の両面から導出した。また、積層される超伝導線材の隙間距離が交流損失に及ぼす影響についても実験結果を用いて論じており、距離を小さくしていくと交流損失は減少し、ある値に収束することを説明している。この特性を考慮し、交流損失低減の観点から全超伝導同期機において推奨される積層間隔を述べている。得られた交流損失特性を基に、積層された超伝導線材の交流損失について、ある温度条件下において測定を行えば、その結果を用いて任意の温度における超伝導巻線において発生する交流損失の総量を予測する手法を確立した。

第3章では、第2章で得られた予測手法を用いることで交流損失を定量的に考慮して航空機用全超伝導同期発電機の設計検討を行った。出力を一定とし、動作温度と回転数が異なる複数のモデルについて二次元有限要素法を用いた磁界解析を行った。その結果、出力密度および効率の観点からは低温での運転が好ましく、一方で回転数には厳しい制限はないことを明らかにした。また、電機子巻線、界磁巻線の交流損失を前章の予測手法を用いて算出したところ、交流損失は電機子巻線で大きく界磁巻線では小さいことが明らかになった。そこで、前者の冷却には冷却能力の高い液体冷媒を用い、後者は風損を考慮してガス冷媒を用いることを決定した。さらに、算出された交流損失を用いて熱解析を実施することで交流損失に起因する温度上昇を算出し、低温に比べ高温運転の場合に温度上昇が小さいことを明らかにした。超伝導線材の臨界電流特性は温度により変化するため、安定した運転を行うためには高温運転が好ましいことを示した。

第4章では、ここまでで得られた設計指針を基に1 kW級全超伝導同期機の設計・製作を行い、その妥当性を検証するために評価試験を実施した。第2章で得られた予測手法を用いて電機子および界磁巻線の交流損失量を見積もり、それぞれに適した冷媒として液体窒素およびヘリウムガスを用いた。また、第3章で得られた知見から、温度安定性を考慮して動作温度は65 Kとした。モータ運転試験を実施し、500 rpmでの回転に成功したことで設計指針の妥当性を検証した。また、各試験を通してクエンチ等の想定外の不具合は見られず、回転機設計および冷却方式の妥当性を示した。

第5章では、全体の総括を行っている。