

重希土類フリーな高磁力・高耐熱サマリウムコバルト磁石を用いた高出力密度モーター

High-Power-Density Motor for Aircraft Electrification Using Heavy-Rare-Earth-Free SmCo Magnets Possessing Both High Magnetic Force and High Heat Resistance

高耐熱性磁石を開発・適用して大出力モーターを空冷化し、高出力密度化により航空機推進系の電動化を可能にする

航空機の電動化には、モーターの出力密度向上が不可欠です。東芝は、高温でネオジム磁石以上の高い磁力を持つ独自開発のサマリウム(Sm) コバルト(Co) 磁石と、冷却機構を簡素化できる空冷方式を組み合わせ、大幅な軽量化を図った高出力密度モーターを開発しています。開発した磁石は、約300℃の高い耐熱性があり、一般的な高耐熱ネオジム磁石には必須で資源リスクの高い重希土類を含みません。2 MW級モーターで検討した設計コンセプトを生かし、100 kW級を試作して、航空機環境を模擬した条件での空冷成立性を検証し、出力とフィンの放熱が見込みどおりであると確認しました。今後、MW級電動推進システムへの搭載を目指します。

背景

近年、様々な業界でカーボンニュートラル実現への取り組みが進められ、航空機業界でも2050年ネットゼロカーボンを目指し、運航時の二酸化炭素(CO₂)削減技術の開発が活発です。重要施策の一つは、推進系の電動化です。航空機推進用モーターは、大出力かつ極めて軽量であること、つまり出力密度が高いことが求められます。

単通路旅客機は、運用機体数が多く、CO₂排出量が多くなります。そのハイブリッド電動化には、MW級出力と約10 kW/kgの出力密度が必要とされ⁽¹⁾、出力密度は一般的な電気自動車(EV)駆動用の2倍以上です。候補は、出力ポテンシャルが非常に高い超電導モーターや、EVなどで実績のある永久磁石モーターで、軽量化が検討されています。

永久磁石のネオジム磁石は、室温で最も強力ですが、熱に弱く、EV用モーターなど温度が上がる用途では、一般的に、ジスプロシウムなど重希土類の添加が必須です。しかし、重希土類の産出は特定の国に偏っているため、資源の価格高騰や入手困難のリスクが懸念され、重希土類フリーな磁石が求められています。

高出力密度化のコンセプト

東芝は、航空機向けの高い出力密度の要求に応えるため、高磁力・高耐熱なSmCo磁石を用いた空冷モーター

を開発しています。EV用の高出力密度モーターなどは冷却方式が液冷ですが、MW級出力に大型化するには、冷媒を冷やすための熱交換器や冷媒循環用ポンプなどの補器が大きくなり、冷却機構を含めたモーター全体の質量低減が困難です。そのため、空冷にして冷却機構を簡素化し、モーター質量の大幅な低減を図りました(図1)。

一方で、空冷は液冷に比べて冷却能力が低く、モーターが高温化しやすいことへの対策が課題です。航空機が飛行する高い高度では空気密度が低く、冷却は地上に比べて難しくなります。重希土類を含む高耐熱なネオジム磁石でも、高温下では、熱減磁により大きく磁力が低下して高出力を得ることが困難です。そこで、140℃以上でネオジム磁石を超える磁力を持つ高鉄(Fe)濃度SmCo磁石を鉄道車両用に開発、実用化した⁽²⁾ことを生かし、航空機モーター用に改良し、耐熱性を更に高めました。

SmCo磁石の高耐熱化

永久磁石の耐熱性を表す指標に、高温での保磁力があります。SmCo磁石は、磁石合金中に形成されるナノスケールの微細組織によって保磁力が発現します。微細組織は、Sm、Fe、Coを主成分としてジルコニウム(Zr)及び銅(Cu)を微量に添加した合金に、多段階の熱処理をして形成します。各元素の配合比や熱処理条件によって形成される微細組織が異なり、得られる保磁力も変化します。

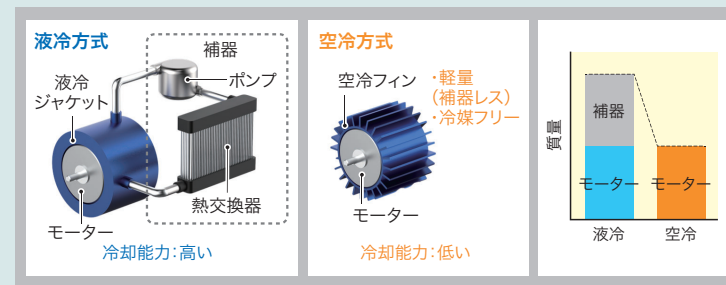


図1. モーターの冷却方式による冷却能力・質量の違い
液冷方式に比べ、空冷方式は質量の大幅な低減が見込めます。

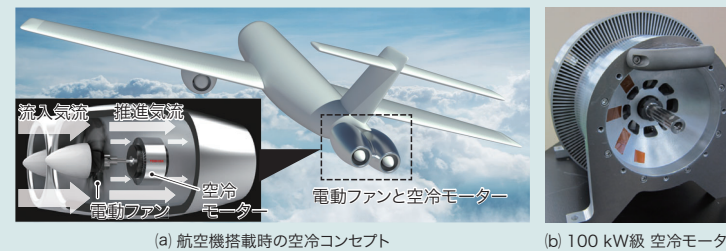


図3. 航空機搭載用の設計コンセプトと試作したモーター

空冷方式で軽量化してフィン配置などのモーター形状を最適化した設計コンセプトを確認し、100 kW級モーターを設計・試作しました。

保磁力を高めることを主眼に元素の配合比や熱処理条件を検討した結果、Zr添加量の多い組成で、高温(250℃)での保磁力が従来の約1.5倍に増大し(図2)、約250℃であった耐熱性を約300℃まで高めることに成功しました。高温でネオジム磁石を上回る磁力があり、資源リスクの高い重希土類を含んでいません。

開発したSmCo磁石適用空冷モーターの設計・試作

開発したSmCo磁石を適用した2 MW級の空冷モーターを、航空機の胴体尾部に電動ファンとともに配置する方式で設計を検討しました。モーター外周面に配置したフィンに推進気流の一部を取り込み、効率的に空冷できる構成です(図3(a))。目標出力に必要な大トルクと高速回転の両立のため、大きな磁石トルクを得やすい表面磁石型モーターとし、構造部材は軽量・高強度な複合材料で形状を最適化して高速回転化を図りました。その結果、2 MWに必要な大トルク約1,400 Nmと高速回転約14,000 rpmに対応可能であることを構造シミュレーションで確認しました。

また、熱シミュレーションから、この設計では磁石の温度が最も高温化しやすく、磁石の耐熱性が高出力化に重要と分かりました。300℃耐熱の磁石は、250℃耐熱に比べ、約2 kW/kg出力密度向上の可能性があります。

これから、航空機の電動推進に必要な出力密度達成の可能性のある設計コンセプトを解析で確認できました。この

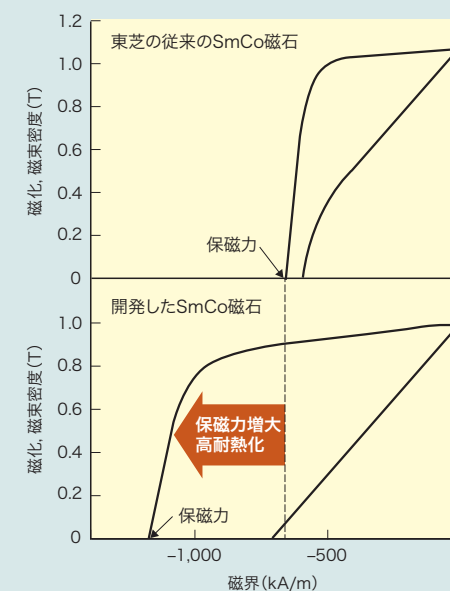


図2. 開発した磁石と従来磁石の250℃での代表的な磁化-磁界特性

印可磁界に対する磁化、磁束密度の挙動で磁石性能を表す特性図で、開発した磁石は保磁力が増大(耐熱性が向上)しました。

設計コンセプトを生かし、小型の100 kW級モーターを設計・試作して(図3(b))性能検証した結果、安定に回転して設計どおりの電流-トルク特性で、出力とフィンの放熱性能が、見込みどおりであると確認できました。

今後の展望

100 kW級モーターの試作で得た知見を基に、モーターとしての完成度を高め、開発したSmCo磁石適用の空冷高出力密度モーターを早期に社会実装することで、航空機のカーボンニュートラル実現への貢献を目指します。

この研究は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)との共同研究「JAXA航空イノベーションチャレンジ 2020 powered by DBJ」で得られた成果を含みます。

文献

- JAXA. “航空機電動化 将来ビジョン ver.1”. 航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム 第1回オープンフォーラム, 2018-12, p.1-42. <https://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair_vision.pdf>. (参照 2024-03-12).
- 萩原将也, ほか. 耐熱モーター用高鉄濃度サマリウムコバルト磁石の製造技術. 東芝レビュー. 2017, 72, 2, p.45-48. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2017/02/72_02pdf/f03.pdf>. (参照 2024-03-12).

萩原 将也

研究開発センター 研究企画統括部 企画部
日本磁気学会・日本金属学会会員