

藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2025 年 2 月 15 日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 行彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関	長岡技術科学大学
職 名	准教授
氏 名	日高 勇気



【提出書類】

(1)研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4 版 3 枚以内):研究状況を示す写真等の資料

(2)収支報告書

添付書類:助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合:支払一覧表と支払部門担当者記名捺印

(1)テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

絶縁用エポキシ樹脂の再利用を可能とする樹脂ユニット構造を備えた高速モータの開発

(2)本研究の期間

(西暦) 2024 年 4 月 ～ 2025 年 3 月

(3)本研究の目的

【背景】カーボンニュートラル社会実現のキーパーツである電気自動車・電動航空機用モータでは、金属・樹脂材料が使用される。金属の再利用は様々な方法が提案されているが、樹脂材の再利用は実績が乏しく、大量廃棄の要因となっている。

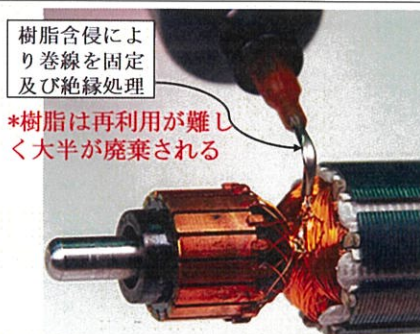
【目的】絶縁材として使用されるエポキシ樹脂を再利用した、新たなモータを実現する。これまで、従来金属が用いられていた構造部品に樹脂材を使用した、樹脂ユニット型モータを考案した。数値検証を実施し、金属部品を用いた従来モータよりも、高い磁気特性を実現可能な見通しを得た。本研究では、同モータの高速回転時の耐久性を検証し、基礎技術確立を目指す。

【社会課題】世界のプラスチック生産量は増加の一途であり、廃棄物増大が課題である。モータでは、高耐熱・耐久性の観点から、熱硬化性樹脂が主として用いられ、同樹脂はリサイクルが困難な性質がある。また、絶縁に使用されるエポキシ樹脂は、耐電圧性能確保のため、金属などの不純物混入が許容されない。そのため、絶縁含侵後の微鉄を含んだ残液は、再利用されず廃棄されていた。

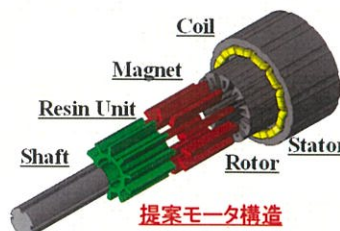
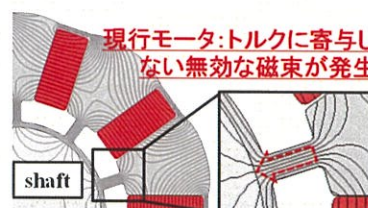
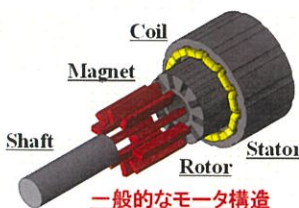
【本研究の必要性】モータの構造部品は高い純度が求められず、微鉄を含んだ残液樹脂でも充分利用できる。本研究が実現されることで、モータの環境性能が飛躍的に改善される。一方、従来金属で製造されていた構造部品を、樹脂に置換えるには、基本磁気特性及び回転強度の検証が必要である。同課題に基礎から取組む本研究は、電気自動車など、カーボンニュートラル社会実現のキーパーツである製品の、環境性能を改善する重大なテーマである。

【現行モータの課題】現行モータの構造を右図に示す。現行モータでは、ロータとシャフトを、ロータコア(鉄)を介して締結する。これまでの検討で、本構造の課題として、シャフト締結部のコアで、トルクに寄与しない無効磁束が発生することを見出した。

【提案モータの新規性・革新性】上記背景から、コアでなく、樹脂ユニットでシャフトとロータを締結する構造を考案した(右図)。コアと異なり、樹脂は非磁性材のため、上述の無効磁束は発生しない。また、構造部品であるため、絶縁性の確保が不要であり、純度の高い樹脂を使用する必要がない。ロータに樹脂ユニットを使用するアイデアは、他に類を見ない独自のアイデアであり、樹脂の再利用と性能改善を両立する本研究は、革新的な研究テーマである。



モータでの樹脂材料利用シーン



(4)本研究の概要

【研究スケジュール】本研究のスケジュール及びマイルストーンを図 1 に示す。以降では、下図スケジュールの各実施項目・目標値について詳細に記述する。

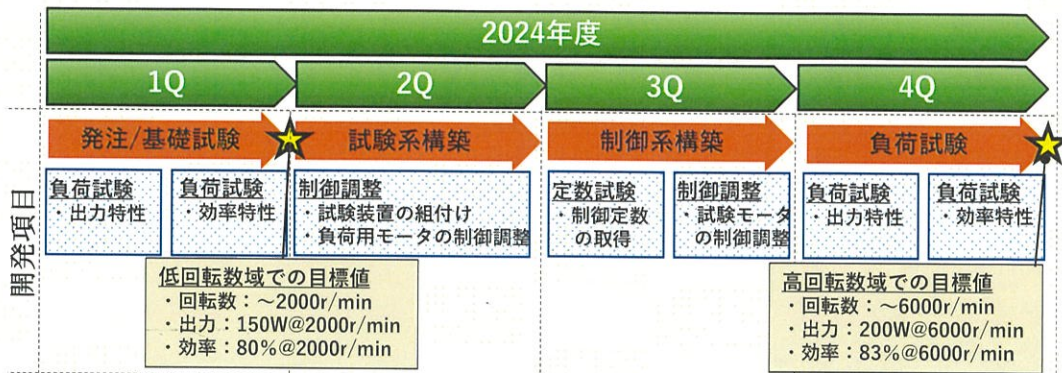


図 1 本助成研究のスケジュール及びマイルストーン

【実施項目】

○発注/基礎試験：申請者はこれまで、図 2 に示す試作モータを製作してきた。本モータは、ロータコア(図 2 左)に樹脂を注型(図 2 右)しシャフトと締結する。本項目では、既保有の負荷試験装置を使用し、同試作モータの基礎試験を実施する。具体的には、図 1 内の目標値を達成可能か検証する。本目標値は、従来モータを上回る数値を選定し、これまで実施してきた数値検証の、妥当性を明らかにする。また、同モータを高回転数域で試験するため、試験モータを高速駆動するための、高周波・高電圧に対応した電力変換器を、本申請経費で外注製作する。

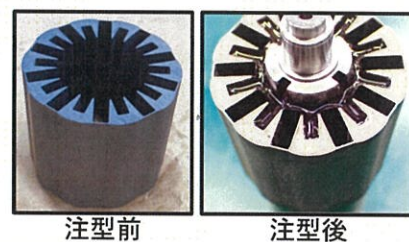


図 2 試作モータ

○試験系構築：同モータの高回転数条件での試験を実施するため、図 3 に示す負荷試験系を構築する。同装置では、高速駆動用の電力変換器を除き、既保有の設備を使用する。本助成費用は、研究に直接必要となる、高速駆動用の電力変換器に使用する。また、負荷供試モータの制御調整を実施する。具体的には、負荷モータの制御定数を測定し、各種制御パラメータを高回転駆動用に調整する。本研究では、試験モータの回転数目標値を 6000r/min とするため、制御調整は同回転数を考慮し実施する。

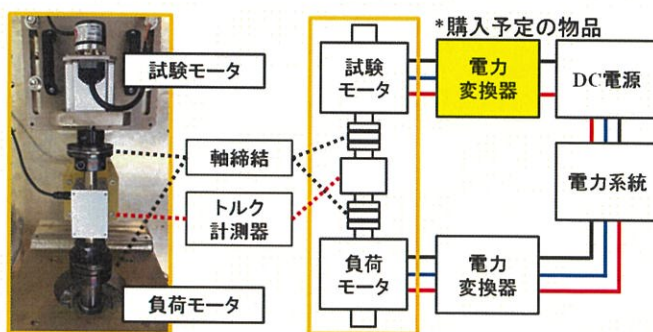


図 3 本助成研究で構築する負荷試験装置

○制御系構築：試験モータの制御調整を実施する。具体的には、高速回転に必要な各種制御定数を実機取得し、購入した電力変換器の制御プログラムを改造する。同電力変換器には既設の制御コードが組み込まれているため、試験モータに合わせて同プログラムを改造する。

○負荷試験：提案モータの有効性を検証するため、図 1 に示した目標値が達成可能か、負荷試験により明らかにする。6000r/min は、従来モータと同等の回転数であり、出力・効率は従来モータを上回る数値を選定した。同目標値を達成することで、樹脂ユニットを用いた提案モータの有効性を示すことができる。また、絶縁用の熱硬化樹脂を再利用した提案モータ構造の有効性が確立され、環境性能の大幅な改善が実現される。

(5)本研究の内容及び成果

各実施項目で実施した内容及びその成果について以下記述する。

○発注/基礎試験

本研究では、モータを高速駆動するため、強度性を鑑み試作機の製造方法を見直した。具体的には、樹脂を硬化する過程で、ロータの軸芯がずれるため、固定治具を製作し、ステータとロータの軸芯が揃うようにした。また、同工程では磁石の減磁が懸念される。そこで、樹脂を硬化するプロセスでは、ダミーの磁石を配置し、樹脂硬化後に同部品を抜き取り、その後着磁済の磁石を挿入する構造とした。これら変更により、軸芯のずれが最小化され、安定した回転駆動が可能となる。また、磁石への熱の影響を排除でき、提案モータの高トルク特性を最大限獲得できる。これらプロセスで製作した試作モータを、本予算で購入した負荷試験装置で高速駆動し、負荷試験を実施する。



図4 試作モータ

○試験系/制御系構築

本予算を活用し、右図試験装置を構築した。回転数は、負荷用モータで指定し、試験モータには図中の回生直流電源及びインバータを用いて電力供給した。高速駆動時にはモータ制御が不安定となるため、高周波用のインバータ及び回生直流電源を本予算で購入し、試験モータへの安定した電力供給を実現した。また、試験条件としては 6000r/min までの条件で回転駆動させた。

本項目では、試験モータに合わせて制御定数を調整した。具体的には、6000r/min の条件で、低電流を印加し、端子電圧の値から安定駆動可能な制御定数を模索した。得られた制御定数を用いて、電流ベクトル制御のプログラムを書き換え、任意の周波数・電流振幅で 3 相電流を供給できる状態とした。本項目で構築した、制御/試験系で負荷試験を実施し、高回転時の提案モータの磁気特性を取得した。

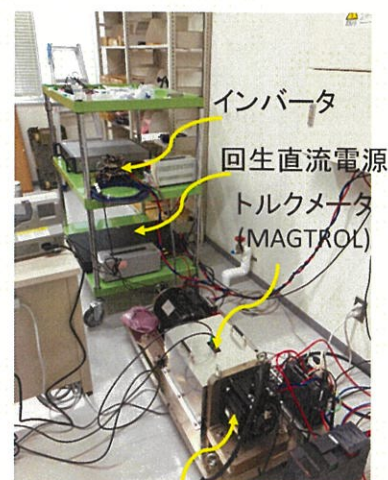


図5 負荷試験装置

○負荷試験

図5の負荷試験装置を用いて、負荷試験を実施した結果を図6に示す。回転数条件を 600～6000r/min まで変化させ、各回転数において、制限電圧内で出力可能な最大トルクを取得した。回転数とトルクの乗算が出力であるため、本モータの出力特性とも同義である。また、高速回転数域では、制限電圧内の駆動を実現するため、3 相電流の位相を調整した。

図6より、得られた磁気特性は、解析結果と十分な精度で一定しており、高速回転駆動時にも、安定した機械出力を実現できている。本結果から、提案する樹脂ユニット構造のモータは、これまで検証していた低回転数域だけでなく、高回転数域でもその高トルク特性を実現可能であることが示された。

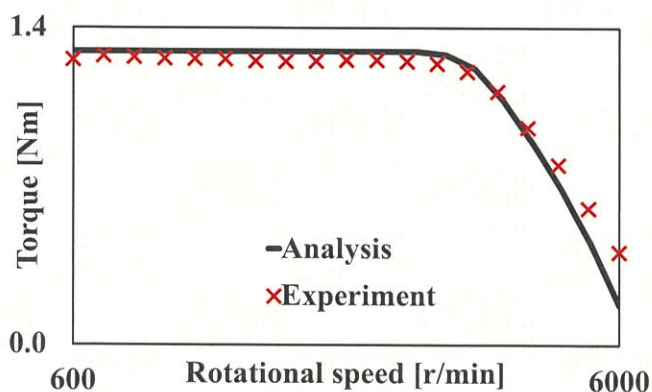


図6 試作モータの磁気特性

(6)本研究の考察

図 4 に示す通り、提案モータは製造工程が従来よりも複雑となる。そこで、提案研究の優位性を確認するために、樹脂ユニットを持ちない場合の高トルク化法を模索した。

○トポロジー最適化による優位性の検討

トポロジー最適化を用いて、磁石形状に自由度を設けて設計した場合の磁気特性を取得した。得られた結果を図 7 に示す。本結果より、樹脂ユニットを用いた本提案と、今回得られた結果は、同磁石量での平均トルクに差が見られなかった。今回検討した構造では、薬莖のような形状を有しており、通常使われる長方形磁石とは異なる形状を有す。産業用モータでは、ネオジム焼結磁石が使われることが多く、このような形状は製造面で課題が大きい。提案する樹脂ユニット構造は、工程は複雑となるが、材料構成は従来と変わらないため、材料調達面で提案構造に優位性があると考えられる。すなわち、製造面における課題は、提案構造も検討構造もあるが、樹脂の再利用を含めた材料調達という観点において、提案構造は優位であると考えられる。

(※黄色矢印は着磁方向を示す。)

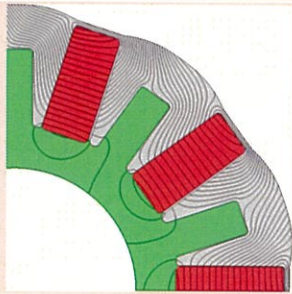
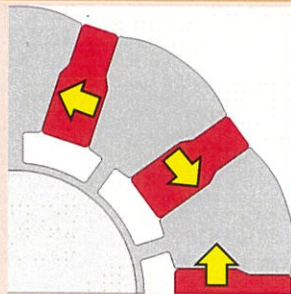
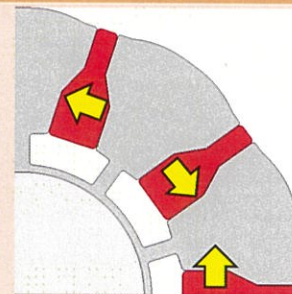
	樹脂ユニット(本提案)	検討構造 - 薬莖型磁石 -	
		同磁石量	Type B
形状			
平均トルク [Nm]	1.30	1.32	1.17
磁石量 [mm ²]	113	113	90
ミーゼス応力 [MPa]	104	98	71

図 7 トポロジー最適化を用いた検討結果

○今後の予定

今後は、提案する樹脂ユニット構造の、適用製品の拡充が必要である。今回対象としたのは FA 用サーボモータであるが、例えば自動車部品やロボット用アクチュエータなど、様々なモータに対して提案する樹脂ユニット構造の適用検討を進める。

(7)共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

なし

(8)本研究の成果の公表先

*査読付学術論文

[1]. Shoki Nakagoshi, Yuki Hidaka, “Torque Improvement in Spoke-Type Interior Permanent Magnet Motors Using Resin-Unit-Type Shaft Fastening Structures”, IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 13, no. 4, pp. 445-452, 2024.

*国内学会

[2]. 中越翔暉, 日高勇氣, “トポロジー最適化を用いたスポーク型 IPM モータの内周部漏れ磁束抑制と省磁石化に関する基礎検討”, 電気学会 産業応用部門大会, 2024

[3]. 中越翔暉, 日高勇氣, “樹脂ユニット型シャフト締結構造を用いたスポーク型 IPM モータの実機検証”, 電気学会 全国大会, 2024

[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。