静音・オイルレス・小型軽量で大トルク駆動を実現可能な磁気ギヤードモータの開発

Development of a Magnetic-Geared Motor for Low-Noise, Oil-Free, Compact, Lightweight, and High-Torque Drive Applications

佐々木 幹人[*1] Mikito Sasaki
池見 健[*1] Takeshi Ikemi
三舩 智也[*2] Tomoya Mifune
青木 泰高[*3] Yasutaka Aoki
左海 将之[*4] Masayuki Sakai
河野 浩幸[*5] Hiroyuki Kono

脱炭素化や機械システムの高付加価値化に伴い電気駆動システムの重要性が高まっており，実現にはモータドライブシステムの小型化が必要である。特に低速・大トルク用途のダイレクトドライブでは，モータが大型化するため，ギヤ等を組み合わせたシステム検討が課題となる。本報では，システム小型化に有効と考えられる磁気ギヤードモータを英国Magnomatics社保有の特許技術を活用して設計・製作した事例を紹介する。台上モータベンチでの評価で設計値と実測値の一致と，目標最大トルク6400 Nmの達成を確認し，磁気ギヤードモータの実用化に向けた見通しを得た。

1. はじめに

脱炭素化や環境規制への対応，制御による柔軟な運用など，機械システムの高付加価値化を目的に電気駆動システムの需要性が高まっている。電気駆動システム実現には，キーコンポーネントであるモータの小型化が重要であるが，機械式ギヤによってモータを高速・小型化し，モータ出力の低速・大トルク駆動を実現すると，機械式ギヤの保守・メンテナンスが必要となり，また信頼性の低下や振動・騒音の増加といった課題がある。

そこで，低速・大トルク用途に親和性が高いと考えられる高調波型磁気ギヤと永久磁石式モータを一体化させた磁気ギヤードモータに着目した。磁気ギヤードモータは磁性体と永久磁石により機械式ギヤの機能を内包し，機械式ギヤレスのため高効率化，静粛性向上，オイルレス，小型・軽量等のメリットがある。そのため，船舶・鉄道推進器，航空機タキシングモータなど，様々な分野のモビリティ用途への応用が期待できる。

本報では，磁気ギヤードモータの構成について述べ，電磁気，強度及び冷却設計の事例を述べる。また，設計したモータ仕様で試作を行い，試作機を用いて三菱重工業株式会社（以下，当社）総合研究所名古屋地区の電化システム検証設備で台上モータベンチ評価を行った結果について報告する。

2. 磁気ギヤードモータ

磁気ギヤードモータの構成について説明する。本報で対象とする高調波型磁気ギヤは，2001年に英国シェフィールド大学のK. Atallahらによってコンセプトが発表され，その成果をもってスピ

*1 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席チーム統括
*2 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部
*3 総合研究所 伝熱研究部 主席研究員
*4 総合研究所 伝熱研究部
*5 成長推進室 電化新事業プロジェクト室 室長 技術士（機械部門）

ンアウトして設立された英国 Magnomatics 社(以下，M 社)をはじめ，各大学，企業，研究機関で研究開発が活発化している。

図 1 に高調波型磁気ギヤードモータの構成を示す。磁気ギヤードモータは，一般的な永久磁石式同期モータに対して，①磁性体で構成された低速ロータ，②ステータの内側に永久磁石を配置する 2 つの特徴的な部品をもつことが特徴である。モータを制御するインバータは高速ロータに同期した周波数の電流を制御し，ステータコイルに通電するが，①，②の部位が追加されることで，磁束が変調され，任意のギヤ比で低速ロータを回転させることが可能となり，機械式ギヤレスで低速大トルク運転を実現できる。磁気ギヤードモータは，機械式ギヤと一般的なモータを組み合わせた構成と機能面は同一である。磁気ギヤードモータの高速ロータが機械式ギヤの太陽歯車，低速ロータが遊星歯車，ステータが内歯車の機能と捉えることができ，磁性体と磁石による電磁力によって非接触で機械式ギヤの機能を実現する。インバータから見ると，高速ロータに同期した周波数で電流を制御しているが，低速ロータの回転数は設計時に設定したギヤ比に応じて減速されており，低速大トルク運転が可能である。

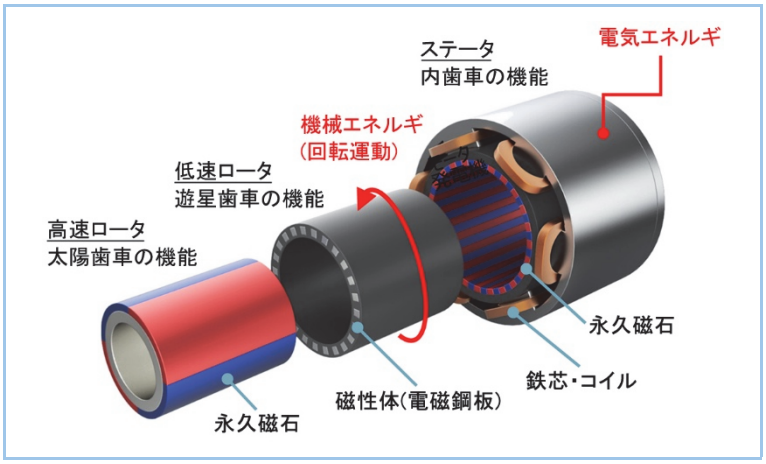

図1 磁気ギヤードモータの構成

3. 設計検討

(1) 設計仕様

本報で対象とした磁気ギヤードモータの諸元を表 1 に示す。表中の最大トルクや最高回転数は出力軸である低速ロータを基準とした値である。基本諸元は，M 社と共同で検討して決定した。

表1 磁気ギヤードモータの諸元表

ステータコア外径[mm]	570
最大トルク[Nm]	6 400
最大出力[kW]	150
最高回転数[rpm]	680
ギヤ比	4.33

(2) 高速ロータ形状

高速ロータは磁気ギヤードモータで最も回転数の高い部品のため，磁石配置やロータコア形状の設計が重要である。まず，磁石配置について円弧型，V 字型，▽字型の 3 種類を候補として検討した。磁界解析で特性を評価した結果，最大出力トルク，最大伝達トルク，モータ損失の点で円弧型に優位性があることから，円弧型を選定した。

また，トルク出力増加のため，磁石の有効磁束を最大化し，かつ高速回転時のコアに発生する遠心応力を抑制するためのバランス設計を磁界解析と応力解析を併用して検討した。特に

磁石端部付近のロータコア形状に切欠きを設けることで，切欠きがない形状に対してロータコア鉄損を13%減，最大伝達トルクを4%向上させることができた。また，応力評価により，切欠きを設けたことでの応力増加はなく，遠心応力にも耐えられる設計とした。図2に切欠き有無での鉄損密度コンタ図とミーゼス応力コンタ図を示す。

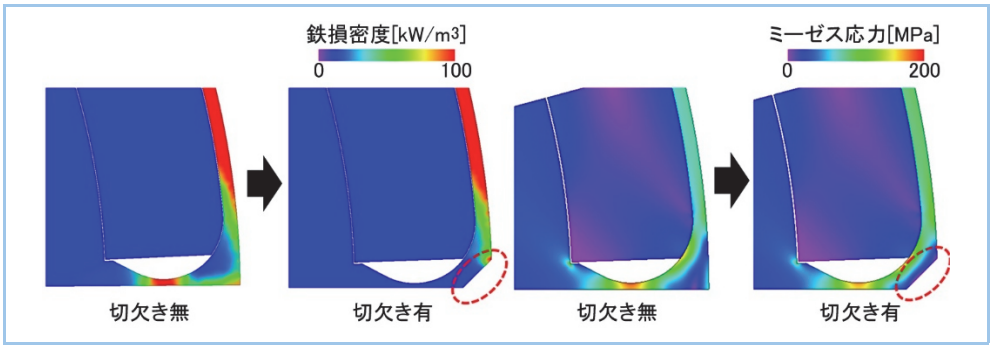

図2 切欠き有無での鉄損密度コンタ図（左）とミーゼス応力コンタ図（右）

(3) 冷却設計

モビリティ向けモータは小型・軽量でありながら大出力を発揮することが求められるため，十分な冷却性能の確保が不可欠である。これに対応するため，本開発ではメンテナンス性を向上し，かつ冷却性能を確保する狙いから強制空冷方式を採用した。強制空冷方式は大きく分けて，外気を機内に直接取り込む開放形と外気を取り込まない全閉形の 2 種類が存在する。開放形では外気を取り込む際に微細な塵埃や異物が混入するリスクがあり，定期的なメンテナンスや分解清掃が必要となる。一方で，今回のモータではギヤレス化によるメンテナンス性の向上を目指しているため，塵埃混入のリスクを低減できる全閉形を採用した。

本試作機の冷却構造の基本コンセプトとモータ内部の通風経路を図 3 に示す。高速ロータの高い回転数を生かすため，自冷式ファンを高速ロータに直結させた全閉外扇方式を採用した。自冷ファンは内扇及び外扇の二重構造とし，それぞれ異なる冷却役割を担わせた。内扇は密閉された機内の空気を循環させ，主にロータの冷却を担当する。一方，外扇はハウジング外周に外気を導入し，ステータの冷却に加え，ロータ通過後に高温となった機内空気の冷却も行う。なお，モビリティ向けのモータでは正回転・逆回転に対応する必要があることから，内扇・外扇のインペラは回転方向に送風性能が依存しないラジアルファン構造を採用した。

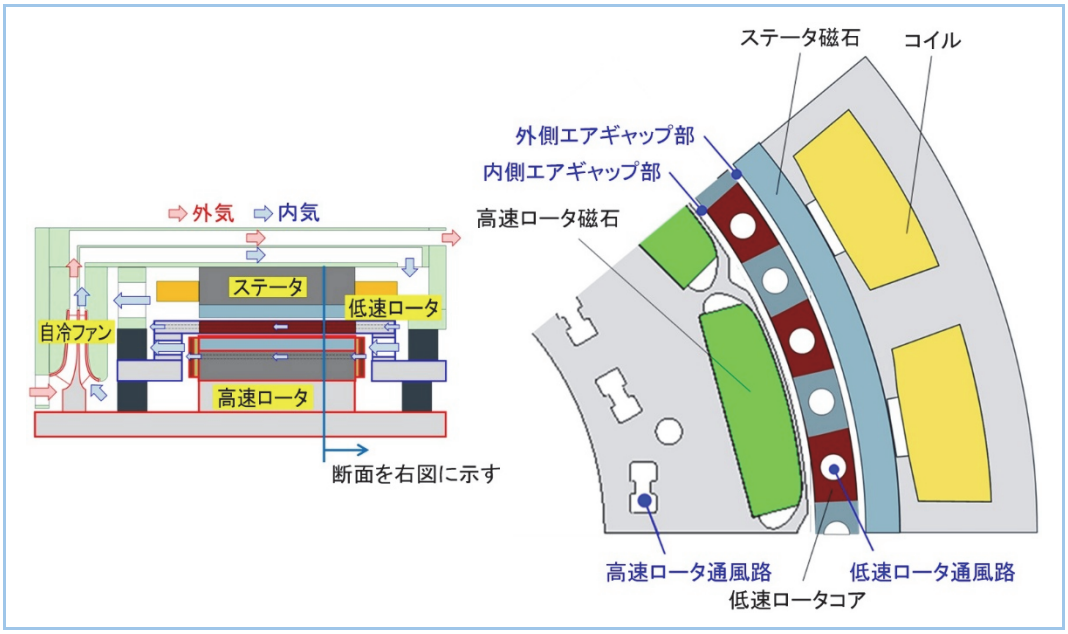

図3 冷却構造基本コンセプト（左）とモータ内部の冷却通風路（右）

また，磁気ギヤードモータでは減磁の観点からステータ磁石の熱管理が重要であるため，ステータ磁石と対向する位置にある低速ロータコアについても積極的に除熱する必要がある。そこで，図 3 に示すように，内外エアギャップ部を軸方向に通風させるだけでなく，低速ロータや高速ロータにも通風路を設けることで，ロータ冷却性能のさらなる向上を図った。通風路の圧力損失を抑えつつ各ロータに発生する損失に応じた適切な風量配分を実現するため，自冷ファンを含む内部循環通風路全体を対象とした CFD 解析を実施し，各通風路の個数及び流路断面積を適正化した。CFD 解析結果の一例として，低速ロータ通風路を有する断面での静圧及び流速のコンタ図を図 4 に示す。なお，図 4 で示した断面には高速ロータ通風路が存在していないが，これは 3 次元モデルで CFD 解析を実施し，高速ロータ通風路は別断面に存在するためである。モータの各部温度については電磁気解析で算出した損失と CFD 解析で得られた流量分配結果をもとに，熱回路網解析によって予測・評価し，磁石温度やコイル温度が絶縁や減磁の観点から定まる温度許容値以下になる見込みであることを確認した。

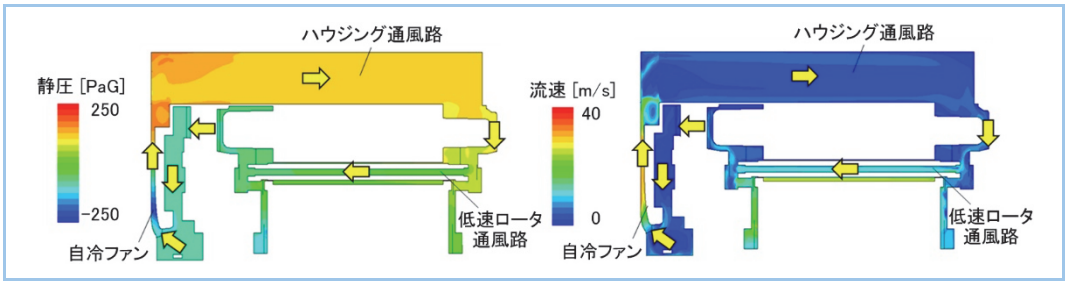

図4 CFD 解析結果

4. 台上ベンチ評価

(1) 試作機と試験装置

設計した仕様に基づき磁気ギヤードモータの試作を行った。図 5 に試作機の外観とステータ，低速ロータ，高速ロータを示す。

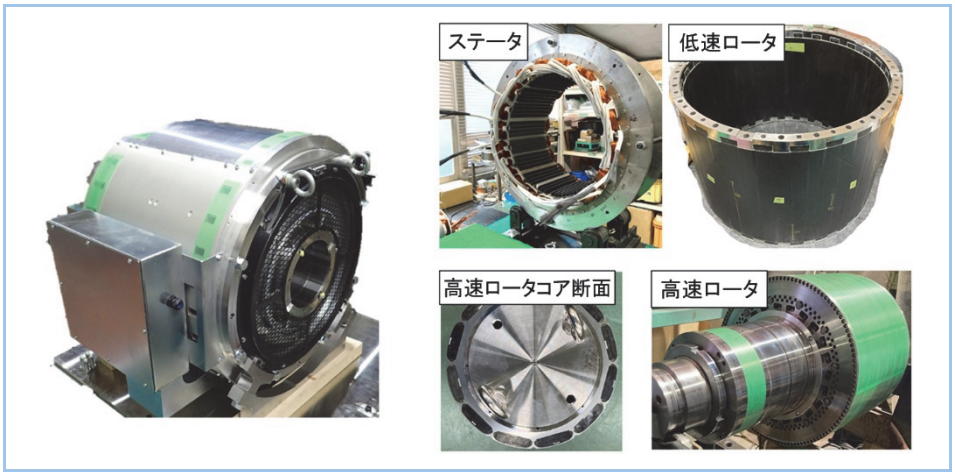

図5 試作機(左)と各部品(右)の外観写真

ステータコイルは放熱性向上を目的に樹脂モールドを含浸し，温度評価のために熱電対を複数設置した。また，内周側にはステータ磁石を取り付けるためのスロットを設けている。ステータ磁石は磁束変動が大きいギャップ近傍に配置されているため，渦電流が発生しやすく，渦電流損失により大きな温度上昇が発生する。そのため，磁石を軸方向に分割することで損失低減を図っている。

低速ロータは磁性体コアの内外周を炭素繊維強化プラスチックにより被覆し，機械的支持を行っている。高速ロータ磁石は振動や衝撃，ならびに片当たりによる応力集中を抑制するた

め，電磁鋼板の磁石スロット内に接着剤を充填し，加熱硬化により固定している。

図 6 にモータベンチに試作機を組み付けた際のセットアップを示す。試作機の出力軸（低速ロータ軸）にカップリングを取り付け，試験ベンチに接続した。

図6　試作機を台上試験ベンチに設置した状態

(2) 無負荷誘起電圧とトルク定数測定

無負荷特性の設計値妥当性検証のため，誘起電圧を測定した。テストベンチダイナモと試作機はカップリングを用いて回転軸を結合し，ダイナモで外部駆動することで，試作機の無負荷誘起電圧を測定した。また，テストベンチのダイナモで回転数を一定制御し，供試モータである磁気ギヤードモータに通電する電流を変化させて，電流 vs トルク特性を取得し，トルク特性を確認した。

図 7 に 300 rpm で駆動した際の無負荷誘起電圧波形と 100rpm 一定制御で取得した電流 vs トルク特性を示す。無負荷誘起電圧定数は実測値と設計値を比較した所，2.5%の差異であり，両者が良好に一致していることを確認した。また，電流 vs トルク特性についても実測値と設計値は良好に一致することを確認した。また，最大トルクである 6400Nm の運転点においても，想定通りのトルク定数であった。

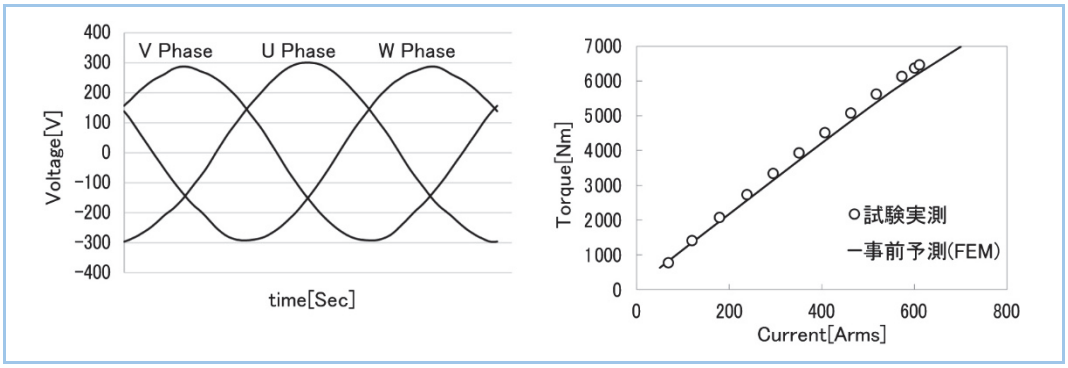

図7　無負荷誘起電圧＠300rpm（左）と電流 vs トルク特性＠100rpm（右）

(3) モータ損失分析

図 8 にモータ損失の実測値と予測値の比較を示す。予測値は，銅損，低速ロータ・高速ロータ・ステータ鉄損，高速ロータ磁石損，コアの面内渦電流損，ファン動力損，軸受損を考慮して算出している。一方，試験で測定した損失は，トルク T，回転数 N の測定結果からモータ出力を算出し，モータ入力電力との差分から導出している。図 8 に示すとおり，いずれのポイントでも，10%以内の精度で損失予測ができていることを確認した。

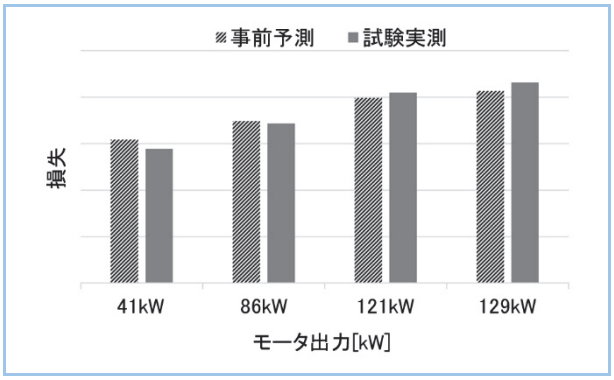

図8 損失分析結果

(4) 温度評価

冷却設計の妥当性評価を目的として，所定の運転点にて連続運転し温度上昇試験を実施した。ステータコイル温度は熱電対によって直接測定し，複数の測定点のうち最大値を評価指標とした。また，高速ロータ磁石及び低速ロータコア温度についても熱電対によって直接計測し，テレメータを介して計測信号を取得した。

トルク・回転数の異なる 2 つの代表運転点における温度測定結果を図 9 に示す。図 9 より，いずれの条件でもコイル・ステータ磁石・低速ロータコアの温度が事前に実施した熱回路網解析による予測値と±5℃の精度で一致していることがわかる。また，ファン入口からハウジング出口までの間で外気と熱交換することによって機内空気が十分に冷却できていることも確認できた。

以上の結果から，本冷却設計の妥当性が実証され，全閉形でありながら目標とする冷却性能を満足していることが確認された。

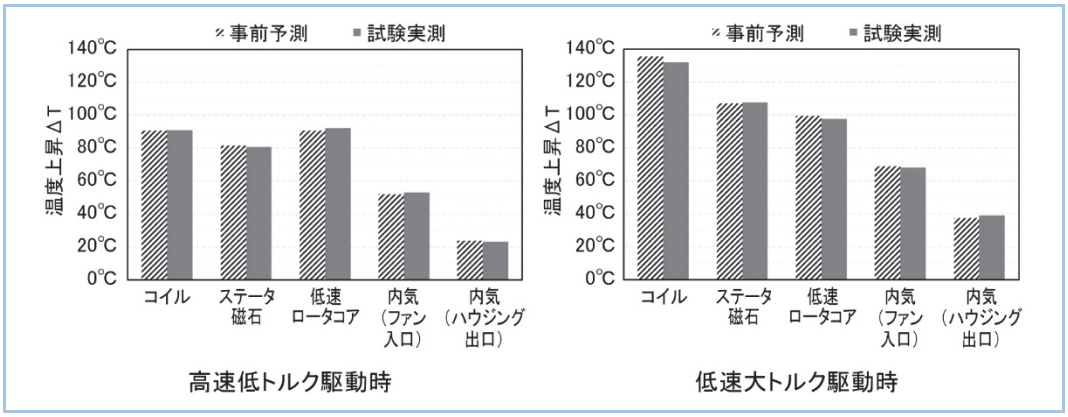

図9 温度測定結果

5. まとめ

本報では，低速・大トルク用途の機械システムの電気駆動に有望な磁気ギヤードモータの設計及び試作機の台上評価試験結果を紹介した。電磁気，強度，冷却設計のプロセスについて述べ，設計仕様に従って試作機を製作し，台上テストベンチでの試験結果を述べた。

今後，民生から防衛用途の様々なモビリティ用途の適用に期待できるため，親和性の高い製品への適用検討を進める。本技術を電気駆動システムへ適用し，製品の高付加価値化に貢献する。

謝辞

本報で紹介した磁気ギヤードモータの開発に関して，英国 Magnomatics 社の皆様に多大なる助言とご協力を賜りましたことをこの場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

(1) K. Atallah, D. Howe, “A Novel High-Performance Magnetic Gear”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, No. 4, July 2001
(2) 三舩ほか, “低速大トルク磁気ギヤードモータの設計及び試作評価”, 電気学会産業応用部門大会 2026