

(技術資料)

三次元磁極構造を用いた船舶向け低速大電磁力直動電動機の設計技術

林 俊平^{*1}

Design Technology for a Low-speed, High-electromagnetic-force, Direct-drive Motor for Ships Using a 3D Magnetic Pole Structure

Shumpei HAYASHI

要旨

船舶電動化に適した高電磁力密度特性を有する当社の独自三次元磁極構造を用いた電動機と、その設計技術について具体的な事例を挙げて紹介する。高電磁力密度を指向した設計事例では平板型の直動電動機において、質量当たりの電磁力が従来比約3倍まで向上する結果を得ている。またシステム全体の小型化に向けて低銅損を志向した設計事例では、モータ定数二乗密度を指標として最適化した結果を紹介している。これら当社が保有する三次元磁極構造を用いた電動機設計技術を用いて、船舶向け駆動装置の電動化適用範囲拡大に貢献していく。

Abstract

This paper introduces specific examples of motors using Kobe Steel's unique 3D magnetic pole structure, which has high electromagnetic force density characteristics suitable for electrifying ships, and its design technology. In a design example aimed at high electromagnetic force density, the electromagnetic force per mass of a flat plate-type direct-drive motor has been improved approximately three times compared with the conventional model. The optimization results using motor constant squared density as an index are presented in a design example aimed at low copper loss to downsize the entire system. Kobe Steel's motor design technology, based on a 3D magnetic pole structure, will contribute to expanding the scope of electrification of drive units for ships.

検索用キーワード

高電磁力密度, 電動機, モータ, 船舶, 三次元磁極, 永久磁石

まえがき＝船舶電動化のドライビングフォースとなりうる変化の一つに世界的な脱炭素の取組が挙げられる。我が国においても2050年にカーボンニュートラル実現が表明され温室効果ガス（GHG）ゼロ排出に向けた目標が掲げられており、ゼロエミッションバッテリー推進タンカー¹⁾が竣工するなど社会ニーズ変化の兆しが見られる。くわえて海運業界では、船員の高齢化、船員不足が顕在化している。そのソリューションとして期待される自動・自律運航、遠隔支援技術は電動機との親和性が高い²⁾ことも、船舶電動化のドライビングフォースになりうる。

これまでも船舶電動化に関する技術開発は進められてきていたが、回生電力の発生機会が少ない駆動条件に起因して、自動車や鉄道などほかの輸送分野に比べ電動化の利点に乏しかった。そのため静粛性や低速時の操船性を活かせる客船や調査船、砕氷船などの用途で利用³⁾されてきた。今後は脱炭素に加えて省人化を目的に船舶電動化が進展する場合、推進システムのみならず装備品や補器を含めた駆動装置の電気駆動化ニーズが拡大していくと想定している。

本稿では、船舶電動化に適した電動機の質量もしくは体積当たりに発生可能な力が高い特性（高電磁力密度）を有する当社の独自三次元磁極構造を用いた電動機と、

その設計技術について具体的な事例を挙げて紹介していく。

1. 船舶電動化の課題

船舶に使用される装備品や補器などの駆動系は大きな負荷や重量物を扱うことから低速かつ大きな駆動力が必要となる。そのため、装備品の一つである操舵装置の駆動系には油圧駆動装置が広く利用されており、電動機を使用する場合でも減速機など機械的な動力伝達機構を介して出力する構成が主となる。電動機は非接触で駆動力を出力できるため一般的にはメンテナンスフリーであるが、電動機と出力軸間の動力伝達機構内にあるギアやグリスは摩耗・劣化するため、メンテナンスが必要となる。ギアを用いて減速すると、電動機側から発揮される力が小さくてもギアによって大きな力に変換して出力軸側を駆動できるようになる。その反面、出駆動装置の一部に何らかの不具合があったとき、出力軸側から駆動させるには大きな力が必要になる。とくに高減速比の場合は、大きな力にギアが耐えられないため、外部から駆動させることができなくなる。これは、本来の働きを維持するための予備の機能を付けること（冗長性の確保）を困難にする。

今後、船舶の自動・自律航行を実現するうえでは機器

^{*1} 技術開発本部 応用物理研究所

のメンテナンス性、破損時の冗長性の向上が重視されると想定している。そのため、電動機と出力軸間に設けられる動力伝達機構を低ギア比に構成するか、理想的にはギアレス化による非接触駆動が望ましい。通常、大きい力を発揮するには大型の電動機が必要になるため、大きさや形状に制約が大きい装置の電気駆動化は困難である。つまり電気駆動に置換可能な船舶駆動系を拡大するには、より小型軽量で大きな力を非接触で低ギア比で伝達可能にする高電磁力密度を有する電動機が必要となる。

2. 電磁力密度向上の方策

電動機の駆動方式のうち永久磁石式同期電動機と呼ばれるものは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する過程で介する磁場の一部を着磁済みの永久磁石が担う。そのため、電流のみで磁場を形成する場合に比べて低電流でも（永久磁石の作る磁場と合算して）高磁場を形成できるため、電気エネルギーを高電圧低電流で電動機内に投入することができる。この特性によって電磁力密度に優れた電動機を実現することができる。

電動機の質量もしくは体積当たりに発揮可能な電磁力を向上する方策は種々提案されている。電動機の構造的な工夫に関しては、電動機のうちで電磁力が作用する面を大きくする構成が提案されている。スパイラルモータ⁴⁾は可動子をらせん状に構成することで電磁力の作用面を確保している。また可動子を構成する永久磁石を扁平（へんぺい）にし、両面に電機子を配置する構成⁵⁾も提案されている。

しかし、いずれも電磁力が作用される面を際限なく増加することはできず、さらなる性能向上が困難である。くわえて装置の搭載要件によっては、電動機の形状が制約される場合がある。したがって、体積当たりの電磁力作用面が小さい円筒型のような構造においても電磁力を確保できることが望ましい。

電動機構造に依らない手段として、永久磁石の形状や配置の工夫によって作用面あたりに発揮可能な電磁力を向上する構成が提案されている。鉄芯と永久磁石を組み合わせたHalbach配列⁶⁾や、形状自由度の高いボンド磁石を利用して永久磁石表面積を最大化して配置した構造⁷⁾では、二次元面内の磁気回路を最大限に活用した工夫がなされている。しかし、これら構造についても電動機や使用する永久磁石のサイズや質量で制約されるため、性能向上には限界がある。

3. 三次元磁極について

永久磁石を用いた電動機は磁極子と電機子に対向配置して構成される。磁極子（Magnetic pole）は主に永久磁石と鉄芯から構成され、電機子（Armature）はコイルと鉄芯から構成される。図1に永久磁石を用いた電動機内で形成される磁場分布を模式的に示す。永久磁石から生じる磁場は空隙を介して電機子と相互作用することで電磁力が得られるように配置される。このとき、永久磁石が作る磁場は電磁力に寄与する磁場と磁極内部に

留まる磁場に分けられる。電磁力に寄与する磁場の割合は永久磁石の磁気抵抗と電動機全体の磁気抵抗によって決まるため、電機子と相互作用する磁場成分を増加させるためには、電動機全体の磁気抵抗を下げる的同时に永久磁石の磁気抵抗を高くすることが有効である。しかし永久磁石の磁気抵抗を高くするには、永久磁石の厚みを増やすか永久磁石の表面積を小さくする必要がある、そのいずれも電動機の電磁力密度を向上させることは困難である。

当社グループで独自開発した三次元磁極構造⁸⁾は、図2に示す構成を最小単位とする構造を基本として、これを単位胞と呼んでいる。単位胞の中には三つの磁気回路が独立した方向に配置されることで磁極内に等方的な磁場分布が形成される。各永久磁石を磁極内で立体的に配置することで永久磁石表面積の総和を大きくすることができる。くわえて各永久磁石は三つに分割されているため、各表面積は小さく構成できる。このため、永久磁石表面積の総和を大きくしながらも各経路の磁気抵抗が高く、全体の磁気抵抗は低い磁極を構成することができる。この効果によって永久磁石を薄くしても磁極内部に留まる磁場を低減することができる。つまり、使用する永久磁石量を減らしても電磁力に寄与する磁場の割合を大きくすることができ、電動機の電磁力密度向上が可能になる。

前述の効果を電動機に適用した場合にも得るためには、従来の電動機と同様に設計最適化が必要になる。効率的な設計解探索を行うためには構造の特徴を把握して

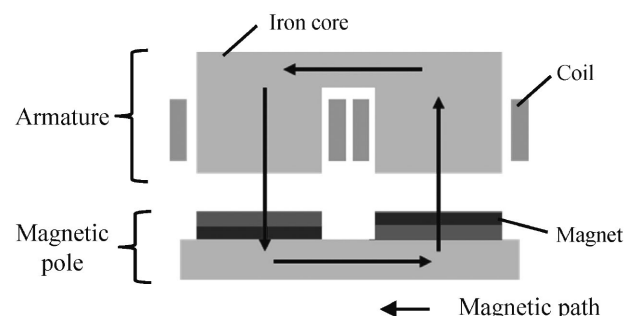


図1 電動機の磁気回路
Fig.1 Motor components and magnetic circuits

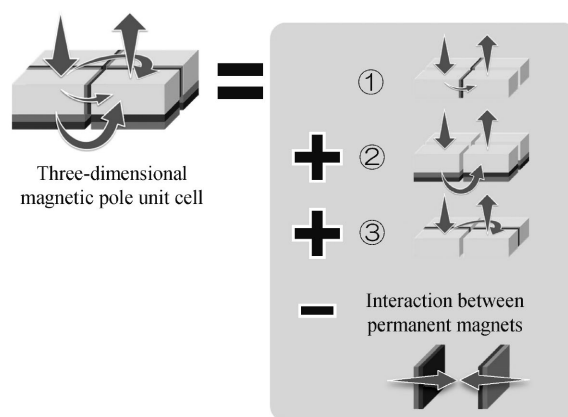


図2 三次元磁極構造と、内在する3つの磁気回路
Fig.2 Three-dimensional magnetic pole unit cell and three magnetic circuits formed inside

設計を行うことが有効であるため、つぎに三次元磁極構造を用いて発生する磁場の傾向について述べる。

一般的な永久磁石付きの電動機においては、電磁力に寄与する磁場を磁極子から電機子の間にある空隙の磁束密度を用いて評価することができる。くわえて電動機の磁気抵抗は永久磁石と空隙の厚みが支配的であることを用いて、空隙の磁束密度 B_g を次式で見積もることができる。

$$B_g = B_r \frac{1}{1 + g/l} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B_r ：残留磁束密度 [T]
 g ：有効空隙長 [m]
 l ：永久磁石の厚み [m]

また、磁石の磁気特性を式(2)で表すことができる。

$$B = B_r + \mu_0 H \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 B ：永久磁石中の磁束密度 [T]
 H ：永久磁石中の磁場の強さ [A/m]

磁石厚みを空隙長に比べ大きくしていくと永久磁石内に生じる反磁場が低減されることで空隙の磁束密度が増加するが、(1)式からその大きさは残留磁束密度を超えない。

対して三次元磁極構造では空隙の磁束密度 B_g を次式で見積もることができる。

$$B_g = B_r \frac{3}{1 + 5g/l} \dots\dots\dots (3)$$

ここでは各経路の永久磁石の厚みと表面積を一定としている。

(1)式と(3)式を用いて、図3に一般的な永久磁石配置と三次元磁極構造における空隙幅と永久磁石厚みの比に対する空隙中に生じる磁束密度の依存性の比較を示す。いずれも永久磁石厚みに対する空隙長が短くなることで空隙の磁束密度が単調増加する傾向がみられる。とくに、永久磁石厚みに対して空隙長が小さいときには、一般的な永久磁石配置に比べて、三次元磁極構造ではより多くの空隙の磁束密度が得られる。

対して、永久磁石厚みに対して空隙長が大きいとき、三次元磁極構造は一般的な永久磁石配置に比べて空隙の磁束密度が劣る傾向にある。これは隣接する永久磁石間で生じている互いを減磁させる相互作用が、空隙長が大

きくなることで顕著に表れるために生じる。

この傾向から三次元磁極構造で、一般的な永久磁石配置に比べて大きな磁束を得るには、永久磁石厚み以下の空隙幅が構成可能な電動機が目安となる。つまり三次元磁極構造を電動機に適用する場合は、鉄芯付きの電機子を用い、かつ空隙を狭くすることで電動機全体の磁気抵抗を小さく構成することが可能な要件への適用が好適と考えられる。

これまでに当社では三次元磁極構造を用いた電動機を複数開発しているため、つぎに具体的な電動機構造を挙げながら三次元磁極構造の適用事例について紹介していく。

4. 高電磁力密度を指向した設計事例

まずは、これまで設計した電動機の中で電磁力密度に特化した平板型直動電動機の設計事例を紹介する。

電磁力は電機子と磁極子の対向する面で生じるため、図4に示すような平板直動型の電動機は電動機の質量当たりの対向面積を最大化することが有利な構造と考えられる。そこで本構造を前提に三次元磁極構造を適用し、寸法最適化を行った。

三次元磁極構造では、磁石間の相互作用や永久磁石の作る磁場による磁気飽和の影響が大きい磁性材料の非線形性を考慮する必要があるため、電磁場FEM解析を用いた設計と性能予測を行っている。電磁力密度を最大化する設計案の探索のため、各部品寸法を変数として寸法最適化を行っているが、3DのFEM解析は計算負荷が高い。そこで、あらかじめ数値モデルを用いた寸法最適化を行うことで設計候補を絞り込んだうえでFEM解析にて詳細確認を行う。

本設計における目的関数は電動機質量当たりに発揮可能な電磁力としている。数値モデルにおいて、電磁力に寄与する磁場を電動機の寸法と永久磁石の残留磁束密度から見積もることとしている。この計算で磁気飽和を考慮すると繰り返し計算が必要となり設計候補の探索速度が低下する。そこで、磁気飽和による非線形性は3DのFEM解析にて確認することとして、設計候補の絞り込みを行う数値モデルでは磁気飽和を考慮しない線形モデル

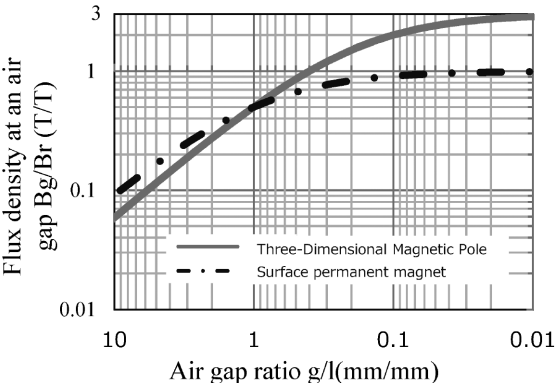


図3 空隙中の磁束密度
 Fig.3 Flux density at an air gap

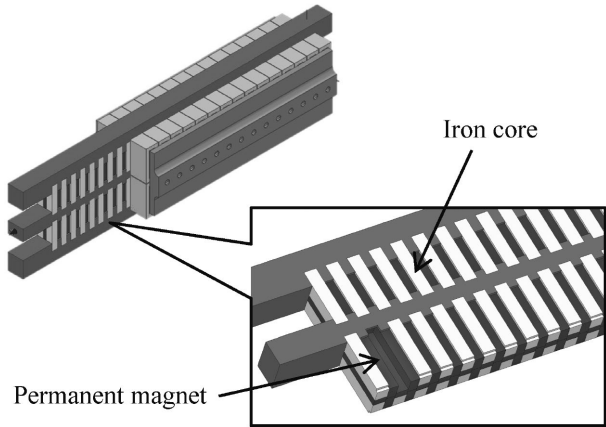


図4 三次元磁極を用いた平板型直動電動機
 Fig.4 Flat plate type linear motor with three-dimensional magnetic pole

ルをベースに構築した。ただし、非線形性が生じやすい高飽和磁束側の解を除外するため、電磁力が作用する面あたりに生じる電磁力を制約条件に設定して線形領域内での探索を行っている。図5に数理モデルで試算した最良案と3DFEM解析結果の世代ごとの推移を示す。図の丸点は各世代における数理モデルの最良案、ひし形の点は数理モデルと同じ最良案をFEM解析した結果を示す。世代は値が低い方が探索する計算回数が少ない時点での結果を示し、世代が大きくなるにつれて設計後期の結果を示す。数理モデルは3DFEM解析結果を逐次反映しているため、世代を追うごとに修正した制約条件で寸法最適化を行っている。制約条件は電磁力が作用する面あたりに生じる電磁力のほか、漏れ磁場を数理モデルで再現するための係数などが含まれる。

使用する永久磁石はネオジム磁石として設計しており、その残留磁束密度 (B_r) は1.32 Tに設定している。そのため、磁束密度を最大化する方向での設計では磁気飽和が生じ、永久磁石使用量の増加のわりに得られる電磁力が小さくなる。よって、鉄芯の飽和磁束密度以下の範囲内で電磁力に寄与する磁場の最大化だけでなく、永久磁石の使用量を最小化しつつ電磁力密度を向上させる方向に設計解探索が進んだ。

最適化結果をもとに試作した直動電動機と他社製品の直動電動機^{9),10)}の電磁力密度を比較した結果を図6に示す。電動機の中でも磁力密度が重視される用途である直動電動機製品群との比較において、約3倍以上の電磁力密度を発揮することが確認できている。

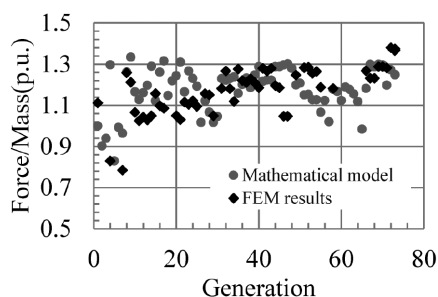


図5 寸法最適化の過程
Fig.5 Size optimization process

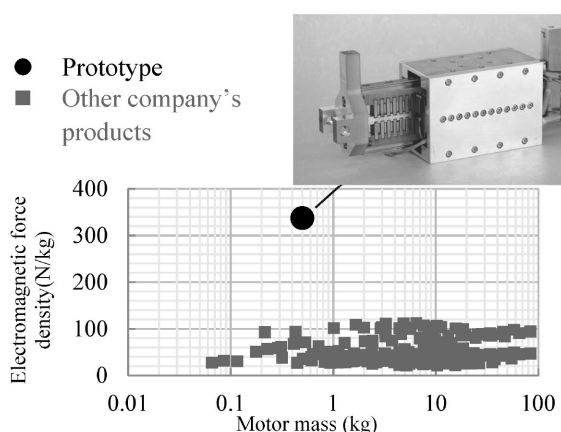


図6 試作品と他社製品の性能比較
Fig.6 Performance comparison of prototype and other company's products

5. 低銅損を指向した設計事例

つぎに駆動システムを含めた最小化を実現するために、円筒型直動電動機の銅損最小化を指向した設計事例について紹介する。電磁力密度向上によってスペース内に搭載可能となった場合、つぎの課題は電源含めた駆動システム最小化である。電動機を設計するうえでは必要となる最大電力の最小化によって駆動システム最小化に貢献することができるが、ギアなしで直接駆動する電動機の場合、非常に低速での駆動が主となるため、損失はコイル励磁時の銅損が支配的となる。つまり最大推力発生時の銅損最小化を目指すことで、駆動システム含めた最小化が実現できる。

銅損最小化を目指す場合の設計指標としてモータ定数二乗密度¹¹⁾が提案されている。この指標は大きさや形状が異なる電動機の性能比較する際に用いられるが、これまでの当社における経験から電機子と磁極子の対向面当たりの電磁力が100 kN/m²を超える範囲においては、電磁力密度の低い設計案が優位な傾向が見られた。これは透磁率に非線形性物性を有する鉄芯材料を使用し、高磁場側では透磁率が低下する磁場範囲となることで生じたと想定している。電磁力密度を上げた場合、透磁率の低下が主因となってモータ定数が低下し、透磁率が最大化する電流密度の低い範囲での解が有利となったと考える。そのため今回のように高い電磁力密度が要求される場合は、電磁力密度に係る条件を揃えたうえで評価する必要があると考える。今回は電動機体積と発揮可能な電磁力を制約条件とすることで、目的関数を銅損最小化として探索と設計解同士の比較評価を行った。

電動機が発生可能な電磁力は極数に比例するため、電磁力密度の向上に向けては、極数の増加が有効とされる¹²⁾。そこで極ピッチを変化させて特性変化を調査しており、結果を図7にまとめている。軸長を同じとした場合、極ピッチを短くすることで極数を大きくすることができるが、極ピッチ変化によって極値が現れる。これは極ピッチが短い構造では漏れ磁束が増加することで生じる。数理モデルでもティース間の対向面積とティース間距離をもとに漏れ磁束を考慮することで銅損最小となる極値を予測することができている。最適化前後の電動機モデル形状の変化とモータ定数二乗密度を図8に示す。いずれも円筒型の直動電動機の軸方向一周期かつ周

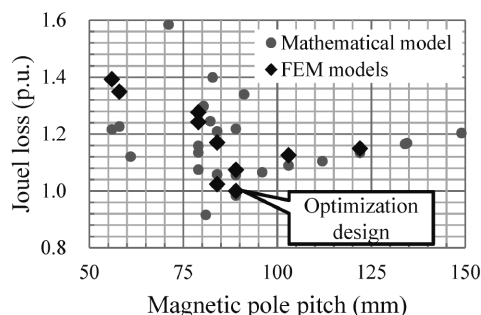


図7 銅損最小化における数理モデルとFEM解析結果の比較
Fig.7 Comparison of linear models and FEM analysis results in copper loss minimization

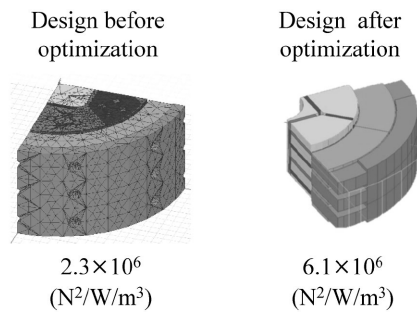


図8 銅損最小化設計の前後比較

Fig.8 Comparison before and after copper loss minimization design

方向に4分の1とした形状のみ図示している。探索の結果、搭載要件を満足する電磁力密度を維持しながら、損失低減が実現する設計案を複数抽出することができた。モータ定数二乗密度は最適化前から約2倍以上に向上している。同じ条件下で生じる損失は、モータ定数二乗密度に反比例することから、今回は損失を半減以下にすることができた。

むすび＝当社グループで独自開発した三次元磁極構を活用した電動機の性能向上に関する研究開発を進めている。今後船舶の自動・自律運航、遠隔支援の実現に有利な駆動装置開発に貢献できると考えている。

独自の三次元磁極構造に特有の複雑な磁場分布を考慮した数理モデル構築をもとにした設計技術と3DFEM

解析技術の組合せによって、現在までも優れた性能をもつ電動機を設計開発することができている。

今回、電動機質量当たりの発揮可能な電磁力を指す電磁力密度に特化した設計を行うことで、既存製品と比較して約3倍以上の性能向上を実現した。さらに、寸法変化による漏れ磁束の挙動を数理モデル上で再現することで、低速駆動時に電動機で生じる損失の主要因である銅損を半減する設計案を見出した。

今後も非接触で大きな電磁力を発揮可能な電動機の利用は拡大していくと想定しており、さらなる性能向上に向けて開発を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 平松雄樹ほか, ClassNK技報, 2022, No.6, p.41-47.
- 2) 坂本大輔ほか, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2021, 第56巻, 第5号, p10-14.
- 3) 山田英城ほか, IHI技報, 2010, Vol.50, No.4, p.28-32.
- 4) 藤本康孝, 日本ロボット学会誌, 2013, Vol. 31, No.6, p.556-559.
- 5) 青山康明ほか, 電気学会論文誌D, 2013, Vol.133, No.9, p.894-901.
- 6) 伊藤誠ほか, 電気学会論文誌D, 2023, Vol.143, No.5, p.398-404.
- 7) 吉川祐一ほか, 電気学会論文誌D, 2016, Vol.136, No.12, p.997-1004.
- 8) 林俊平ほか, 電気学会論文誌D, 2019, Vol.139, No.7, p.645-651.
- 9) ハイウィン株式会社, リニア ガイドウェイ技術情報, 第21版, 2023, p.12-65.
- 10) 株式会社安川電機, ACサーボドライブΣ-7シリーズ, 2017, p.231-347.
- 11) 鹿山透ほか, 電気学会論文誌D, 2003, Vol.123, No.6, p.746-753.
- 12) 大西和夫, 電気学会論文誌D, 1995, Vol.115, No.7, p.930-935.