

令和元年6月20日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06190

研究課題名(和文)高出力球面誘導モータの効率改善のための球面ロータ改良

研究課題名(英文) Refinement of Spherical Rotor of Spherical Induction Motor for Improving Efficiency

研究代表者

熊谷 正朗 (KUMAGAI, Masaaki)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70323045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：球面誘導モータの電力変換効率の向上を目的として、回転側である銅と鉄によって構成される球殻ロータの構造の改良を試みた。

ロータを単純な銅と鉄の2層構造から、亀甲模様の銅メッシュ構造として、ロータ表面に鉄部が現れる構造に変更することで、磁束密度を高める方法を取り、平面モータモデルの電磁場シミュレーションによって、同構造で出力が増すこと、および設計パラメータの傾向に関する知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

球面誘導モータは、連続回転が可能な球面モータの各種方式の中では出力の大きさの面で有望であり、かつ当方式は移動ロボットの駆動に使える程度の特性を持っている。一方で効率の悪さが先行研究で確認されており、その改善の方策および設計パラメータに関する知見が得られたことは実用化へのステップの一つである。今後、本成果を元に実機試験を行うことで、より実用性が高まると期待される。

研究成果の概要(英文)：Modification of rotor of a spherical induction motor for improving efficiency (mainly torque per current) is examined in this work.

Previous model of the rotor consists of iron spherical shell covered by copper shell, whose copper shell prevented magnetic coupling of armatures and the iron part of the rotor, which decreased the magnetic flux density, causing lower torque. Therefore a mesh structure of copper embedded in the iron shell was proposed, which was examined through 3D magnetic simulation. The result showed effectiveness of the idea, and also provided suggestion for dimensional design parameters.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：球面誘導モータ 球面モータ 誘導モータ ロータ 電磁場シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は先行して行った球面誘導モータの開発およびその効率向上の試みが背景にある。開発した球面誘導モータは、任意の軸まわりに  $4[\text{Nm}]$  という、従来の連続回転式の球面モータと比較して大きなトルクを持ち、またトルクの応答性も数  $[\text{ms}]$  程度と高応答で出力に線形性があり、米カーネギーメロン大学ではこの手法を用いたモータで1球バランス式移動ロボット (SIMbot) が開発された。しかし、このモータは動作時の発熱が多く、効率の悪さが推定された。これを定量化するため、回転軸(角速度ベクトル)とトルク軸(トルクベクトル)が任意である、すなわち1軸モータのように平行同軸ではない、球面モータ用に回転中のトルクの測定手法を提案し、モータの動特性の測定と共に、効率の算出を行ったところ、わずか2%と非常に低効率であることが確認された。実用性を目指すには効率の改善は必須である。

この低効率の原因はロータ構造にあると考えられた。球面誘導モータはロータに特性の等方性が求められるため、ロータは鉄の球殻の上に均一な厚さの銅の球殻を重ねた、誘導モータとしては最も原始的な構造であった。一方、実用的な通常の誘導モータは銅部と鉄部を種々の形状で組み合わせる工夫をしている(ただし軸方向と回転方向に自明な異方性がある)。これは、誘導モータでは鉄部分で電機子と磁気回路を構成して回転磁束を生じ、その磁束によって銅部に誘導電流が流れて、それらの相互作用で動作する原理によっており、磁束の最大化=磁気回路の閉じ具合と、誘導電流の流れやすさ=十分な銅部・経路などが重要なためである。従前方法のフラットな2層構造は、表面の銅層が磁気的には空気と同様で、銅層の厚さがギャップに追加される。一方で誘導電流確保のためには銅を薄くすることに限度があり、結果的に一般的な誘導モータに比べて、電流当たりの磁束密度が低く、出力のためには大電流が必要で効率の悪化に繋がっている、と考えられ、ロータの改善が必要と結論づけた。

## 2. 研究の目的

以上の背景から、ロータ球殻の構造の検討と実証を本課題の目的に据えた。上記の磁気回路の閉塞と電流経路の確保を両立でき、かつ現実的に成形可能なもの(ある程度量産しうる構造)を目指すことにした。

## 3. 研究の方法

まず、ロータの構造を検討し、図1に示すような亀甲構造を採用することとした。第一に、磁気回路をより閉じるためには、ロータ表面まで鉄部が露出する必要がある。それとともに、銅によって電流が流れる経路を構成する。実用機に見られるかご型誘導モータでは、銅部は表面より深いところにあるが、球殻でこれを実現することは極めて困難であるため、表面を鉄領域と銅領域に区分、かつ、誘導電流が明確にループを形成する形として、本構造を採用した。なお、一般的な誘導モータの解説でも、フラットな銅板に比べて銅によるループ構造があるほうが良いことが説明されている。

六角形をベースにした亀甲構造としたことは球であることにも関係している。平面のモータであれば、六角形他に、四角形、三角形、円の等間隔配置など平面を埋め尽くす模様が様々にあるが、球では均等配置をどこかで絞っていく必要がある。そこで、サッカーボールにみられる32面体をベースにこれを六角形で細分する(五角形面の中央にのみ小五角形がある)ようにすれば、ほぼ均等な模様で球面をカバーしうる。

一方で、実際にこれを加工することは(量産時にはプレスなどの手法も想定されとしても)コストが高いため、まずは平面で実証し(球面誘導モータも前段階で同じ3自由度の平面誘導モータを経ている)、さらに、その前段階で電磁場シミュレーションである程度のパラメータ検討をすることとした。電磁場シミュレーションと実機で同じ数値がでるとは考えられないが、傾向については相応の対応が得られるため、実機設計において、どのパラメータがどのような効果を持つかは確認できる(球面誘導モータ開発時には、2次元の電磁場シミュレーションを用いて、十分参考になる程度の傾向の一致があることを確認している)。

電磁場シミュレーションに用いたモデルを図2に示す。これはこれまでの研究で用いたリニアモータ電機子実機的设计モデルである(球面モータはこの設計を元に曲面化している)。コアは鉄、3色の線状構造が3相コイルで、シミュレーションモデルではこの断面に25本の電流経路を設定してある。今回新たに3次元シミュレーションソフト(Field Precision社製Aether)を導入したため、まず、従来の銅と鉄の平板で、実機実験と対応する結果が得られるかを検証し、以前用いた2次元シミュレーションより値が実機に近くなることを確認した(2次元は奥行き方向が無制限とするため、電機子の両サイドの端部の効果が評価されないことに対し、3次

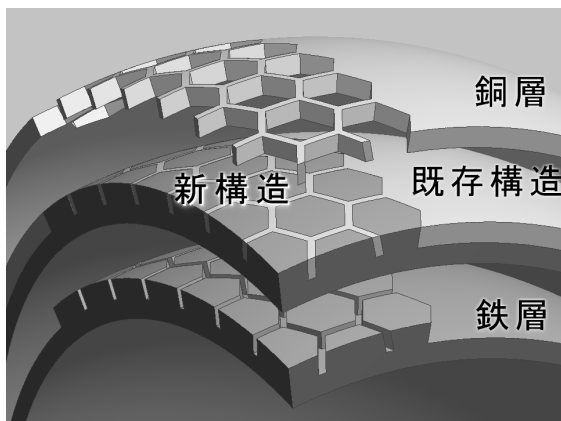


図1 検討した球面誘導モータロータ構造の概要図

元はそこも計算に入る)。この電機子に対して図2に示す亀甲形状のリアクションプレートに対応させて計算した。なお、計算範囲は概ね電機子に対して2倍程度、メッシュ間隔は0.33~0.5[mm]とし、1条件(後述の結果の1点)当たり20時間程度の時間を要した。

プレートの設計パラメータは、従来研究をもとに{六角形寸法=格子を構成する六角形の外接円直径=対向する頂点間距離[mm], 銅部の幅[mm], 銅部の厚さ=鉄部溝の深さ[mm], 鉄部全体の厚さ[mm]}とした。

以上を元にプレートおよび球殻の実機製造を進める計画であったが、本課題の期間では実機開発まで完了していない。CNC切削により溝部を形成し、表面をマスクした上で、溝内部に硫酸銅系溶液内での電解めっきで厚めっきをする手法で形成できる目処まで得ている。

#### 4. 研究成果

図3に諸条件でシミュレーションで得た、周波数に対する推力を示す。電機子コイルに流す電流は10[A]振幅の3相交流電流であり、横軸はその周波数である。凡例にある条件は「P格子寸法W銅幅D銅深さt全体厚さ」(P,tは[mm], W,Dは[0.1mm]単位)である(紙面の関係上、関連する物を1枚に全て載せた)。

このグラフの見方を解説する。誘導モータはその簡略化したモデルにおいて、電機子交流電流が、90度位相のずれた二つの成分、 $i_d$ と $i_q$ からなるとし、 $i_d$ はロータの磁極励磁の成分、 $i_q$ はこれに対して推力(回転モータでは接線方向の牽引力)を生じる成分である。電機子電流の振幅は $\sqrt{i_d^2+i_q^2}$ であり、出力される力は $i_d, i_q$ の積に比例する。また、 $i_q$ は $i_d$ および周波数に比例する。この $i_d, i_q$ 成分を分離し、独立して制御することが誘導モータのベクトル制御である(主には、 $i_d$ を一定値に保ち、 $i_q$ を指令出力に応じて変化させる)。電機子電流を一定とすると、 $i_d, i_q$ は同電流を半径とする円上の点であり、その上での $i_d \cdot i_q$ 積の最大値は $i_d=i_q$ となる点で得られ、それ以外の条件では推力が落ちる。つまり、電流振幅一定で周波数を変化させると、ある周波数( $i_d=i_q$ となる周波数)でピークとなる推力が得られ、図3のような傾向を示す。なお、 $i_d$ と $i_q$ の比例関係もあって、周波数を対数軸とした場合には、ピーク周波数を軸として対称なグラフとなる。

さて、本研究の目的は、効率の最大化であり、その主要部は電流当たりの推力をなるべく大きくすることである。その観点では比較対象である従来型平板の“Simple Copper”に対して、4倍程度の推力が得られている条件がある。それとともに、ピークとなる周波数に違いが見られる。このピーク周波数も誘導モータ制御時の主要パラメータの一つ( $i_d$ と $i_q$ の周波数に対する比例定数で定まる)であり、制御の観点では「ピーク出力を出すためにはどれだけの周波数まで上げる必要があるか」を示す。なお、相対的に移動(回転)している場合にはその移動と同期する周波数に、このグラフ横軸の周波数が上乘せされる(減速時は引かれる)。端的には、この周波数は低いほどよい。励磁周波数が上がるとモータのインダクタンス分により、より高い交流電圧を印加する必要がある(ただし、移動に同期する周波数がある程度高いため、このグラフ変化の程度なら大きな影響はない)。一方、これまでの知見で、磁気回路が閉じ、電機子とロータの結合が強いほど(従来モデルでは電機子と鉄層の間隔が狭いほど)低下する傾向があり、その指標として見ることもできる。たとえばこれらの条件の中で最高出力の出た、P6W20D30t6(Bの有無で2本重なっている)条件はW30条件よりも鉄部の露出が多く、磁氣的結合が強いと定性

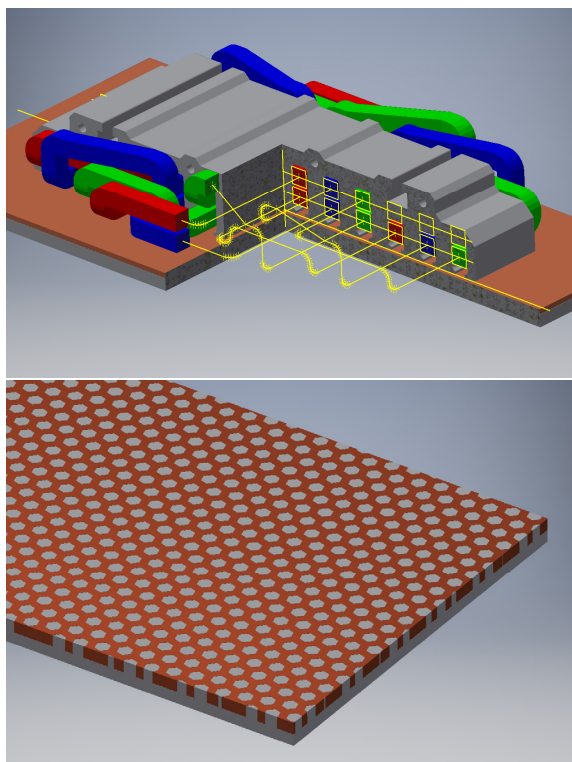


図2 シミュレーションモデル

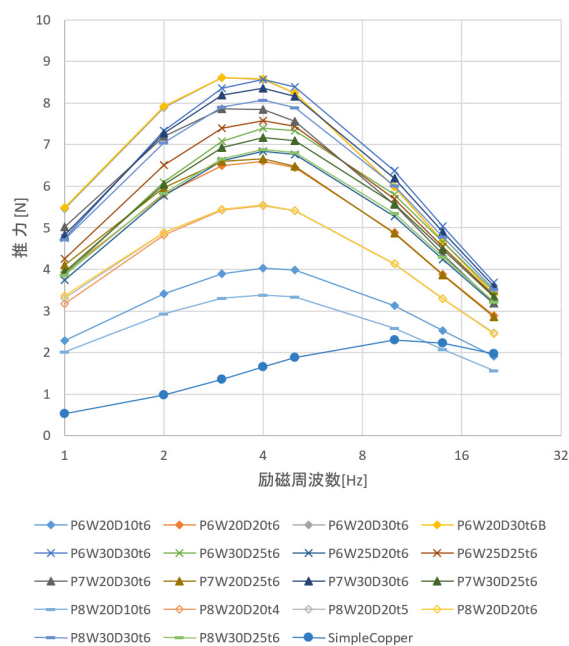


図3 シミュレーションによる推力比較

的にも符合している。ただし、この周波数が低いほど良いかは別の視点がある。円筒型のモータに比べて、リニアモータおよびその延長にある本球面誘導モータは電機子の「端」があり、その効果によって推力リップルが避けられない。このリップルは励磁周波数に一致して生じるため、このグラフが左に寄るほど、より低い周波数で明確な推力変動が出ることになる。

以上を元に、この結果を見ると以下の知見が得られた。(1) 鉄部の表面への露出は明確に効果がある。(2) 推力の向上に大きく寄与するものは、鉄部の露出面積、銅部の幅  $W$  (=鉄部の少なさ)ではなく、銅部の深さ  $D$  である。(3) 六角ピッチ  $P$  は大きくは影響しない(ただし、今回の条件はすべて、電機子のピッチ 12.5mm より小さくした)(4) 鉄部のトータルの厚さは性能にはあまり寄与しない。また、当然ながら、球面(および平面モデル)では動作に伴って、メッシュの向きと電機子の向きが変化する。それを考慮して、図2に示すように、メッシュの向きは電機子の方向に対して半端な角度で傾けてあったが、そこからさらに回転させても、P6W20D30t6 と同Bに示すように特性にほとんど違いが生じないことも確認した。

ただし、一部については、本シミュレーションはソフトウェアの制約から鉄部の磁気飽和が加味されていないことに留意する必要がある。出力を上げるために電流を増やすと、いずれは飽和が起これ、そこからは磁束密度が上がらなくなる。この観点も加えると、性能に大きく影響しない範囲で鉄部の面積を大きくすべきである(狭ければそれだけ集中しやすい)。トータル厚さについては、機械的強度を保つことを考慮すれば同時に満たされる。

以上の結果、および、機械加工の条件、深溝のめっき条件などを加味すると、ピッチ 6mm, 同幅 2.5mm, 深さ 3.0mm (P6W25D30) を中心としてその周囲で複数のサンプルを製作して比較評価することが妥当であると結論づけた。

## 5. 主な発表論文等

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: Spherical Induction Motor

発明者: Ralph L. Hollis, Masaaki Kumagai

権利者: Carnegie Mellon University

種類: 米国特許

番号: US9853528B2

取得年: 2017 (本件に関連して期間中に成立)

国内外の別: 国外

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。