

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206030
 研究課題名（和文） 磁束集束配列永久磁石型高トルク密度モータの開発
 研究課題名（英文） Development of High Torque Density Motor with Magnetic Flux Concentration of Permanent Magnet

研究代表者
 榎園正人（ENOKIZONO MASATO）
 大分大学・工学部・教授
 研究者番号：40136784

研究成果の概要（和文）：高トルク密度モータを開発するため、以下の諸課題を解決した。

- （1）高磁束密度ベクトル磁気特性の測定
- （2）磁束集束配列永久磁石の改良
- （3）動的ベクトル磁気特性解析法の改良
- （4）永久磁石の着磁過程解析法の改良

以上により、パワーレート 1.5 の永久磁石モータを試作した。

研究成果の概要（英文）：

Various following problems were solved in order to develop the high torque density motor.

- (1) Measurement of vector magnetic property under high induction level.
- (2) Improvement of arrangement of permanent magnet for flux concentration.
- (3) Improvement of dynamic vector magnetic characteristic analysis.
- (4) Improvement of magnetizing process simulation of permanent magnet.

From them, the permanent magneto motor of power rate 1.5 was produced experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2008 年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2009 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
年度			
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気工学・電気機器

キーワード：高効率、高密度、モータ、永久磁石、磁束集束

1. 研究開始当初の背景

2007年に国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が発表した報告書にみられるように、急激な環境変化に関する懸念とエネルギー問題がクローズアップされ始めた。そしてよく2008年には急激な原油価格の高騰が進み、代替エネルギー、省エネルギーの機運が高まり、かつ、環境への

配慮が重要視され始めた。そのような中で、本研究は時代を先取りした形でモータの高効率・高出力化（高トルク）を掲げ、その基本的技術として、ベクトル磁気特性理論並びに、永久磁石の磁束集束化法をベースとした高効率高トルク密度モータの開発に着手した。また、研究開始後、急激に環境問題の面から省エネルギー・高効率化が注目を浴びる

に至った。

2. 研究の目的

我が国は磁性材料の開発において、その磁気特性の高品質性は国際的にも高く評価されている。ところが必ずしもそれが電気機器の高性能化に直結していない。これはこれまで量産化と低価格化が重要視され過ぎ、技術本来の良い材料を使って良い製品を創るということから遠ざかっていたことによるのではないかとこれは「言うは易いが行うは難しく」、多くの新たな技術の創出が必要とされる。

本研究では高密度トルク電気機器の開発を目的とするもので、具体的には1.8T以上の磁束密度で駆動できる永久磁石を使用したモータの制作を目標とする。モータのトルクは固定子と回転子の間のギャップ中の磁束密度に比例するが、狭くすると損失が増大するなど相反する関係にある。

我々はこの基礎技術となるベクトル磁気特性理論に基づく新しい構造の基本特許を取得している。それは磁束収束配列永久磁石型モータ(CSPMモータと名付けた：図1参照)で1.8T実現していることと、我々の提唱する磁束制御法、新しい概念であるベクトル磁気特性、ベクトル磁気特性のE&Sモデルによる磁気特性解析、我々の考案によるVSWM法による異方性永久磁石解析法を基本とする。この成果を踏まえて、本研究計画では100W~200W級の小型低速高トルクギアレスモータの開発を行う。これによってアクチュエータ、ロボットの駆動力アップにつながる。

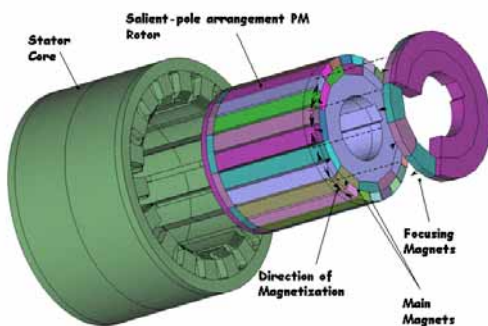


図1 磁束収束配列永久磁石型(CSPM)モータ

(1) 高磁束密度下のベクトル磁気特性の把握

(2) ベクトル磁気特性を考慮したベクトル磁気特性解析法を確立する。

具体的には、これはダイナミックE&S(Enokizono&Soda, Shimoji)モデルによるベクトル磁気特性解析法で、磁性材料中のベクトル磁気特性、磁気損失分布を直接解析することができる方法である。このプログラム

を誰でも手軽に使えるように汎用化する。

(3) 異方性永久磁石の着磁・減磁過程の解析は最適着磁を行う上で必要不可欠で、当研究グループによって開発された手法(可変磁化ストナー・ウォルハース:VMSW法)の確立。

上記にあげた主要な技術は、電磁材料を活用するためのレシピの開発とその活用ツールに相当する。これまで、このようなレシピの技術向上が果たされようとしなかったことが、今日の電気機器分野の停滞を招いているともいえる。この小型化は一段と困難な問題を抱えているが、小型低速高トルクギアレスモータが実現できれば、強力なギアレスのサーボモータを開発することができ、ダイレクトドライブ方式の駆動を可能にし、自動車産業のみならずロボット、工作機械、福祉機械に多大な影響と効果をもたらすであろうことは疑いない。また、同様の方式で磁束収束型のIPMモータの開発、並びに高出力発電機の製作をも可能にする。本研究計画でにおける目的は、「低速回転高トルクのダイレクトドライブの可能な、磁束収束配列永久磁石型モータの試作」を行うものである。

3. 研究の方法

研究計画・方法

低速高トルクギアレスモータの最適構造設計を行い、高効率化のため適切な材料の活用技術を構築していくことを最大の目標に置く。

コア技術として、材料技術・計測技術からなる高密度電気機器開発のための材料活用技術が必要。

高磁束密度二次元ベクトル磁気特性による電磁鋼板の選定：これまでの研究から、高磁束密度領域1.6T以上になると圧延方向と異なる方向に磁気困難方向が出現するため、この低減を図る材料の選定が必要で、この把握ができるような技術の確立。

磁束収束配列磁石の着磁法の開発：

本研究で提案する磁束収束による磁石配列は5kW~10kW級であれば、着磁後の磁石を強力なジグにより貼り合わせることが可能であったが、小型モータにおいては非常な困難を伴う。そこで、我々は着磁コイルを複数複合的に配置して、数段階に分けた着磁方式をここに提案する。この方式を2色成形着磁法と呼ぶことにした。この方式はフェライト磁石レベルでは容易な技術であるが、Fe-Nd-B系の強力異方性磁石においては、異方性を把握した方式の開発が望まれる。

ベクトル磁気特性解析(ダイナミックE&Sモデルによる有限要素解析)シミュレー

シジョンによる最適構造設計

ベクトル磁気特性は磁性材料の磁気特性をベクトル関係で捕らえるもので、例えば従来保磁力はスカラー量としていたものがベクトル量として把握される。このようなベクトル磁気特性を導入した解析手法の構築は磁性材料を活用する上で必要不可欠であり、この技術を主体とするハイブリッドコンピューティングシステムを使って、シミュレーションによる最適構造を設計する。本システムで解析する因子は以下の通りである。

1. ギャップ中磁束を1.8T以上にする磁路構成
2. 最適スキュー角度の探査
3. 磁気損失の低減化構造の探査
4. 発生トルクと磁気損失の推定

収束永久磁石ロータの挿入ジグの作成

1.8T級の磁束密度領域における機器の製造は非常に危険を伴い、手作業で行うことは不可能である。そこで、組み立て時に磁路を一時的に迂回させる磁気回路制御法が必要となる。この基本方式は以下の方式が考えられる。

(a) .アルニコ磁石は残留磁化が大きく保磁力が小さいため、パルス磁界の印加により容易に時局の反転を行うことができる。(当研究室考案の磁束制御法)

(b) .永久磁石と励磁系を含む偏磁状態下の組み立てようジグを開発する。

既に、偏磁ベクトル磁気特性測定法は確立済みで製造・組み立て支援用の簡易偏磁特性評価システムの構築が課題としてあげられる。

試作一号機の構造設計とシミュレーションによる特性評価

100W~200Wクラスの磁束収束配列型(CSPM)永久磁石モータの仕様は200V,発生トルクは従来機の3倍以上を想定する。初年度において、1号機として既存機を改良する。この本システムの構築と特性測定・解析用ソフトウェアの開発を行い、次年度からの試作機性能評価に備える。併せて、既設の温度分布測定システム、サーモグラフィシステムとの併用を計り、総合的な性能評価をおこなう。

本研究開発による電磁応用機器の高密度化技術の目標は

- () 高磁束密度レベルの電磁応用機器の開発技術の構築により、高磁束密度効果を明確にすること。
- () 高磁束密度磁気特性のベクトル磁気特性測定法の確立。
- () 高磁束密度化設計技術の確立

である。本研究の推進によって得られる周辺技術は、今後の電気自動車用モータ、風力発電機、ロボット用高トルクモータ、ダイレクトドライブ方式のアクチュエータ開発などの重要な基盤技術となるものである。

特に本年11月に大分県で開催された第11回2D-MAGワークショップ(二次元ベクトル磁気特性に関する国際会議)ではこれまでの20年に渡る同会議の成果を明確にし、課題を明らかにする予定である。

4. 研究成果

モータの表面磁石の配列を磁束集束化させて、ギャップ中の磁束を1.8Tの高磁束密度レベルの実現をはかるため、新たな磁束集束化構造を検討した。その結果以下の点が成果としてあげられる。

(1) 永久磁石-軟質磁性材料(電磁鋼板)のハイブリッド構造鉄心による高磁束密度化の実現した。本モータ構造はロータ側に深溝型集束構造とし、電磁鋼板からなる鉄心を挟んでいる。これにより、高調波の発生を防ぎ、高効率化をも実現できる。

(2) 安川電機の協力の下パワーレート1.5のモータの試作に成功(体積・重量は従来品と同じでトルク出力1.5倍)試作器の評価結果、高効率を維持し、高トルク化を実現した。

(3) 高磁束密度ベクトル磁気特性の測定。1.9Tまでのベクトル磁気特性の測定を可能にし、解析用データベースを作成した。測定の結果、高磁束密度領域になると圧延方向から50度方向に磁化困難性が出現することが明らかとなった。

(4) 3次元磁気ひずみ特性とベクトル磁気特性の関連の明確化。従来法の測定は不十分で、磁束密度ベクトルと異なる方向に磁気ひずみが最大になることがある。

(5) ダイナミックE&Sモデルによる磁束波形高調波による渦電流効果を考慮できる動的ベクトル磁気特性解析法の確立。この手法は磁束波形がひずんだ場合においても、それによる渦電流の効果を解析することができ、モータの高磁束密度レベルでの設計の指針を明らかにすることができる。解析の結果、第3高調波成分は鉄心材料の異方性に依存し、第5高調波成分は鉄心の構造に、第7高調波成分は固定子歯部先端に分布することがわかった。

(6) モータのスロットリップルによる脈動高調波によるダイナミックE&Sモデルを用いたベクトル磁気特性解析法の確立。これにより、回転駆動時の磁気特性解析が可能となった。

(7) 永久磁石の着磁過程(着磁-残留磁

化 - 減磁過程) の VMSW 法によるシミュレーション法の確立。永久磁石モータにとって重要な減磁効果の解析並びに後着磁法の励磁器設計に有用な知見を与える。

(8) 局所ベクトル磁気特性測定用プロブの開発によりモータ鉄心中のベクトル磁気特性を把握できるようになった。

(9) モータのビルディングファクター評価システムの確立によって、モータの作成、加工、組み立て工程ごとの問題点を明らかにした。これにより、低応力加工・組み立て技術の構築に知見を与える。

(10) X線によるモータ鉄心中の残留応力の分布を明らかにした。延べ3000時間に及ぶ測定の結果これまで全く未知であった残留応力の分布を明らかにすることができた。

本研究計画の実施に際し、平成20年1月より開始された「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」プロジェクト(平成24年まで)にも組み込まれ、一部その成果を活用した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

若林大輔、戸高孝、榎園正人、任意方向交番磁束条件下での3次元磁気歪みとベクトル磁気特性、電気学会論文誌、査読有、Vol.130、No4、2009、S387-393

S. Zeze、T. todaka、M. Enokizono、Magnetic Field Analysis of Concentrated Surface Permanent Magnetic Synchronous Motor、日本AEM学会誌、査読有、Vol.17 Supplement、2009、S121

M. Enokizono、Vector Magnetic Property and Magnetic Characteristic Analysis by Vector Magneto-Hysteretic E&S Model、IEEE Trans. on Magnetics、査読有、Vol.45、No3、2009、1148-1153

佐藤尊、下地広泰、戸高孝、榎園正人、高磁束密度領域におけるベクトル磁気特性

日本AEM学会誌、査読有、Vol.17、No3、2009、515-521

戸高孝、下地広泰、佐藤尊、榎園正人、積分型ダイナミックE&Sモデルを用いた磁界解析、日本AEM学会誌、査読有、Vol.17、No2、2009、200-205

T. Todaka、Y. Maeda、M. Enokizono、

“Counterclockwise/clockwise (CCW/CW) Rotational Losses under High Magnetic Field、Przeglad Elektrotechniczny Proc. 2DM19 ISSN 0033-2097、査読有、Vol. 85、No1、2009、

20-24

M. Enokizono、T. Todaka、S. Urata、Dynamic Vector Magneto-hysteretic E&S Model Considering Eddy Current Effect、The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering ISTSE COMPEL、査読有、Vol.28、No2、2009、85-97

Y. Kai、Y. Tsuchida、M. Enokizono “Magnetic Evaluation of Hardening Effect for Carbon Steel”、Journal of Optoelectronics and advanced Materials、査読有 vol.10、No. 5、pp. 1078-1084、2008

中畑和、戸高孝、榎園正人

「3次元VMSW法を用いた希土類永久磁石の残留磁化分布の評価」日本磁気学会誌、査読有 vol. 32、No. 3、pp. 269-274、2008

M. Enokizono、S. Urata “Magnetic Characteristics Analysis by Dynamic Vector Magneto-hysteretic E&S Model”、Journal of Optoelectronics and advanced Materials、査読有 vol.10、No. 5、pp. 1075-1077、2008

T. Todaka、M. Sonoda、Y. Sato、M. Enokizono “Multi-Functional Properties of Iron-based Ferromagnetic Shape Memory Ribbons”、Journal of Magnetism and Magnetic Materials、査読有 vol. 320、pp. 678-682、2008

Y. Maeda、H. Shimoji、T. Todaka、M. Enokizono、 “Study of the Counterclockwise/ Clockwise (CCW/CW) Rotational Losses Measured with a Two-dimensional Vector magnetic Property Measurement System”、IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering、査読有、Vol. 3、No. 2、pp.222-228、2008

Y. Nakahata、T. Todaka、M. Enokizono、 “Magnetization Process Simulation of Anisotropic Permanent Magnets by using the Three-dimensional VMSW Method”、IEEE Transactions on Magnetics、査読有、Vol. 44、No. 6、pp.169-174、2008

前田義隆、下地広泰、戸高孝、榎園正人、二次元ベクトル磁気特性におけるセンサコイルの影響の検討、電気学会誌A、査読有、Vol. 127-A、No. 4、pp.159-164、2007

[学会発表](計9件)

中崎修、戸高孝、榎園正人、実機回転機

ステーターコアの各製造工程における
気特性比較、電気学会マグネティックス
研究会、平成21年7月15日、石川県
金沢市

若林大輔、下地広泰、戸高孝、榎園正人
、任意方向交番磁束条件下での3次元磁
気歪みの測定、電気学会マグネティックス
研究会、平成21年7月15日、石川
県金沢市

榎園正人、佐藤尊、下地広泰、戸高孝、
磁束密度における回転磁束条件下の磁
気特性、電気学会マグネティックス研究
会、平成21年7月15日、石川県金沢
市

戸高孝、前田義隆、榎園正人、高磁束条
件下のベクトル磁気特性、SEAD21、
平成21年5月20日、長野市

淵陽二、戸高孝、榎園正人
三相誘導電動機モデル鉄心中の局所ベ
クトル磁気特性分布の測定、電気関係学
会九州支部連合大会、電気学会、大分、
2008、9

S. Zeze, T. Todaka, M. Enokizono,
Magnetic Field Analysis of
Concentrated Surface Permanent
Magnet Motor

Asia-Pacific Symposium on Applied
Electromagnetics and Mechanics
JSAEM Thailand 2008 7

S. Ishikawa, T. Todaka, M. Enokizono
Magnetic Characteristic Analysis of
Rotating Machines utilizing Dynamic
E&S Model, Asia-Pacific Symposium on
Applied Electromagnetics and
Mechanics, JSAEM

Thailand, 2008年7月

岩崎則久、戸高孝、槌田雄二、榎園正人、
回転機固定子鉄心の各製造工程におけ
る鉄損評価、電気学会マグネティックス
研究会

電気学会、名古屋、2008年6月

瀬々真吾、戸高孝、榎園正人、磁束集束
配列型永久磁石のSPMモータへの適用、
第20回電磁力関連のダイナミクスシン
ポジウム、日本AEM学会、大分、2008年
5月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称：電磁ホーン型電子スピン共鳴装置
発明者：榎園正人、小林正
権利者：大分県産業創造機構
種類：

番号：2009-255036
出願年月日：2009/11/9
国内外の別：国内

名称：電磁ホーン型電子スピン共鳴装置
発明者：榎園正人、小林正
権利者：大分県産業創造機構
種類：

番号：2009-255965
出願年月日：2009/11/9
国内外の別：国内

名称：電磁ホーン型電子スピン共鳴装置
発明者：榎園正人、小林正
権利者：大分県産業創造機構
種類：

番号：2010-019956
出願年月日：2010/2/1
国内外の別：国内

名称：磁気歯車装置
発明者：榎園正人、長屋幸助(群馬大)
藤田智之(ニッセイ)

権利者：大分県産業創造機構
種類：

番号：2010-063129
出願年月日：2009/11/9
国内外の別：国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mag.eee.oita-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎園正人(ENOKIZONO MASATO)

大分大学 工学部 教授

研究者番号：40136784

(2) 研究分担者

戸高孝(TODAKA TAKASHI)

大分大学 工学部 准教授

研究者番号：50163994

(3) 研究分担者

槌田雄二(TSUCHIDA YUJI)

大分大学 工学部 助教

研究者番号：80284785

(4) 連携研究者

下地弘泰、浦田信也、前田義隆、甲斐裕一郎、
中畑和