

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号:12101

研究種目:基盤研究(B)

研究期間:2008 ~ 2011

課題番号:20360106

研究課題名(和文)高磁束密度を使ったローレンツ浮上モータの開発と応用

研究課題名(英文)Development and Application of Lorentz type Self-bearing Motor using High Field Flux

研究代表者

岡田 養二(OKADA YOHJI)

茨城大学・名誉教授

研究者番号:90007774

研究成果の概要(和文):

- (1) モータと磁気軸受を一体化する浮上モータで、浮上性能と回転性能の両立するローレンツ型を研究してきた。今回はこれに磁束集束技術を応用し、きわめて高性能なセルフベアリングモータを開発した。
- (2) 応用としては、非接触型の人工心臓ポンプと、歩行補助ロボットなど小型で高トルクモータをターゲットに開発した。

研究成果の概要(英文):

- (1) Lorentz type self-bearing motor had been developed which had good combination of high levitation force and rotation torque. This research applied high flux concentrated technology and developed high quality levitated motor.
- (2) The application includes noncontact centrifugal artificial heart pump and compact high torque motor to power assist leg with good results.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野:制御機器、特に電磁力制御機器

科研費の分科・細目:機械工学 機械力学・制御

キーワード:制御機器、運動制御、振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

回転する機械は、軸を支持する必要がある。しかし機械式の軸受を使うと、摩擦や摩耗、メンテナンスを必要とする欠点がある。これらの問題を解決するため、磁気力で支持する磁気軸受が使われてきた。しかし回転を与えるモータを別個に取り付けると、軸が長くなり振動を起こすなどの問題を起こす。

これらの問題を一気に解決するため、筆者らは磁気軸受と交流モータの構造が似ていることに着目し、セルフベアリングモータを考案した。その中で、ローレンツ型の浮上モータは、強い浮上力と回転トルクの両立が可能である。しかし十分に高性能な浮上モータは開発されていなかった。

一方、共同研究者である大分大学の榎園教授は、磁石の配列を工夫することで強力な磁

束密度を実現することを考案し、実用化を図っていた。

## 2. 研究の目的

(1)本研究は、大分大学が保有する磁束収束技術と、茨城大学で研究を進めているセルフベアリングモータを融合して、世界に例を見ない強力なセルフベアリングモータを開発することを目的とする。

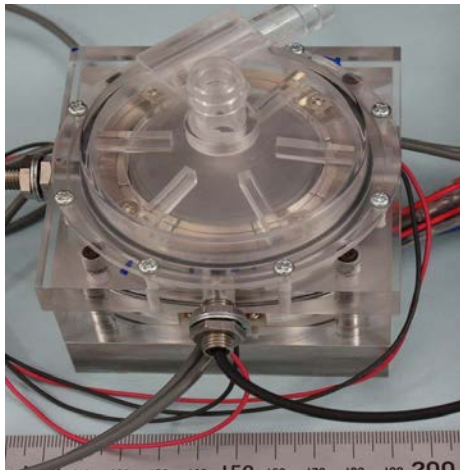
(2)高性能な磁気浮上回転モータが開発できれば、今までにない小型で体内埋め込みが容易な人工心臓ポンプの開発を行う。

(3)また従来は高減速機を使わないと実現できなかった小型で高トルクなロボット用モータを開発する。本研究では下半身麻痺者を対象とした歩行補助ロボット用のモータを開発する。

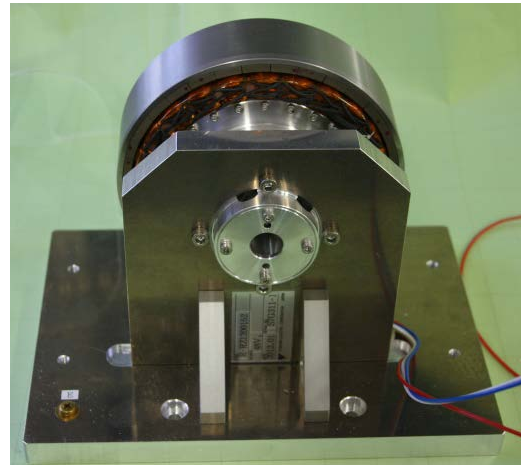
## 3. 研究の方法

(1)セルフベアリングモータは、浮上力の発生と回転トルクの発生が磁気特性の線形性を前提として発展してきた。そのため磁束収束技術を単純に適用しても、磁束飽和などによって思ったように性能があがらないことがある。モータの構造や極数、使用する磁性材や巻き線構造などを最適に設計する必要がある。この目的のために、実験のしやすい大きさのセルフベアリングモータを設計・製作し、強力なセルフベアリングモータの設計技術を確認した。

(2)セルフベアリングモータの応用技術として、回転型人工心臓ポンプの開発を取り上げた。人工心臓ポンプは、体内埋め込みが可能なように小型で非接触回転する必要がある、セルフベアリングモータの応用には最適である。小型化のためにアウターロータ型のセルフベアリングモータを開発した。その結果、インナーロータ型と異なり、4極モータが性能がよいことが判明した。浮上モータとしては十分な性能があったので、遠心型人工心臓ポンプを製作した。



(3)モータは高速回転が得意で発生トルクは小さいが、ロボットなどに応用する場合には低速・高トルク回転が求められる。通常はハーモニック減速機などの高減速機が使われるが、信頼性や効率の悪化などの問題がある。そこで小型偏平な高トルクモータの開発を行った。磁束収束技術と高密度巻き線技術を用いて、歩行補助用の20Nmの高トルクモータの設計と製作を行い、写真のモータを開発した。これは試作モータなので余分なものも付いているが、モータ本体は足の関節に取り付けられる大きさである。また内部に1段の遊星歯車減速機(減速比1/6)を取り付けられるように設計している。



## 4. 研究成果

(1)セルフベアリングモータの基礎的な研究に関しては、少し大型のインナーロータ型のモータを製作し、8極で強力なモータの開発に成功した。磁束収束技術と高巻き線密度技術を適用し、スロットレスモータで20Nm弱のトルクと、3000rpmを越える安定した浮上回転に成功している。

(2)回転型人工心臓ポンプへの応用としては、外径63.2mm 厚み10mmの小型偏平セルフベアリングモータを開発し、最大トルク70mNm、最大回転数9000rpm、最大効率70%以上の強力なモータを開発した。これを使って左写真のような回転型遠心血液ポンプを作成した。ポンプとしてのテストを行うまでには至っていないが、隙間や工作精度の問題を解決して、ポンプ性能を確認する予定である。

(3)ロボット用高トルクモータの開発に関しては、下半身麻痺者の歩行を補助するモータを対象として開発を行った。すなわち足の関節に装着可能な薄く(25mm強)、外径が140mmのモータを想定し、アウターロータで内部に1段の遊星歯車減速機が入れられるものを設計・試作した(上の写真)。試作のため大きめのモータになってしまったが、ほぼ20Nmのトルクは出せそうなデータを得た。しかし

トルクリップルが大きく、精密な測定には至っていない。研究に協力してくれる企業があるので、今後精密な測定と改良を行い、実用化を目指していきたい。

#### 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 13 件)

- ① 岡田養二, 三好理文, 増澤徹, 榎園正人, 小型ローレンツ型磁気浮上モータのサーボモータ制御, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 1, pp.40-46, 2012、査読有り
- ② 松田健一, 岡田養二, 鈴木浩成, 竹中智哉, 榎園正人, 永久磁石併用磁気軸受システムの研究, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 1, pp.213-219, 2012、査読有り
- ③ Masato Enokizono, Vector Magnetic Property for Development of High Efficiency and Density Machines, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 3, pp.432-438, 2011、査読有り
- ④ Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Effect of Stress on Vector Magnetic Property of Non-oriented Electrical Steel Sheet, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 3, pp.540-543, 2011、査読有り
- ⑤ Shohei Ueno, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Measurement of Vector Magnetic Properties of Fe-Si-B Amorphous Material, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 47, No. 10, pp.3188-3191, 2011、査読有り
- ⑥ Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 47, No. 10, pp.4344-4347, 2011、査読有り
- ⑦ 北郷将史, 増澤徹, 西村隆, 許俊鋭, 治療用人工心臓のためのアキシタル型磁気浮上モータの開発, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 2, pp.280-285, 2011、査読有り
- ⑧ 江口慶祐, 瀬々真吾, 戸高孝, 榎園正人, 磁束集束型ハイブリッド表面磁石モータの磁界解析, 電気学会論文誌 A, Vol. 130, No. 7, pp. 698-703, 2010、査読有り
- ⑨ 岡田養二, 北郷将士, 伊佐川公平, 増澤徹, 榎園正人, 磁束集束ローレンツ型磁気浮上モータの研究, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 2, pp.98-103, 2010 査読有り
- ⑩ 江口慶祐, 瀬々真吾, 戸高孝, 榎園正人: 「磁束集束型ハイブリッド表面磁石モ-

タの磁界解析」、電気学会論文誌 A、基礎・材料・共通部門誌、Vol.130, No.7, pp.698-703, 2010、査読有り

- ⑪ 増澤徹, 佐々木瑛祐, ダニエル L ティムス, 両心補助人工心臓 BiVACOR Bi-VAD 用磁気浮上モータ, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 78-84, 2010、査読有り
- ⑫ S. Zeze, T. Todaka, M. Enokizono, Magnetic Field Analysis of Concentrated Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, J. of JS AEM, 17, S121-S124, 2009、査読有り
- ⑬ T. Masuzawa, A. Ohta, N. Tanaka, Y. Qian, T. Tsukiya, Estimation of changes in dynamic hydraulic force in a magnetically suspended centrifugal blood pump with transient computational fluid dynamics analysis, Artificial Organs, 12, 150-159, 2009、査読有り

[学会発表] (計 19 件)

- ① 青木悠介, 中嶋将仁, 酒井千明, 近藤良, 立位安定化試験システムの開発, 機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 2012 年 3 月 10 日, 日本大学津田沼キャンパス
- ② Masato Enokizono, Vector Magnetic characteristic technology for development of Super Premium Efficiency(IE4 Level) Motor, 第 20 回 MAGDA コンファレンスプロシーディング, 2011 年 11 月 14-16 日, Kaohsiung in Taiwan
- ③ K. Ukita, T. Masuzawa, H. Onuma, T. Nishimura, S. Kyo, A radial type self-bearing motor for small maglev regenerative blood pump, 第 20 回 MAGDA コンファレンスプロシーディング, 2011 年 11 月 14-16 日, Kaohsiung in Taiwan
- ④ T. Ichinose, T. Masuzawa, U. Steinseifer, D. Timms, Development of Lorentz force type tilt control motor for rotary blood pumps, 第 20 回 MAGDA コンファレンスプロシーディング, 2011 年 11 月 14-16 日, Kaohsiung in Taiwan
- ⑤ Y.Nakahata, B.E.Borkowski, H.Shimoji, K.Yamada, T.Todaka, M.Enokizono, Precise Measurement of Magnetization Characteristics in High Pulsed, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Program, 2011 年 10 月 31 日, Scottsdale, Arizona, USA
- ⑥ Y.Kai, Y.Tsuchida, T.Todaka, M.Enokizono, Measurement of Vector

- Magnetic Property and 2D Magnetostriction of Non-oriented Electrical Steel Sheet under Stress Condition, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Program, 2011年10月31日、Scottsdale, Arizona, USA
- ⑦ 榎園正人、IE4 クラス高効率モータの開発に必須のベクトル磁気特性技術、大分発新技術説明会、2011(10月11日)、大分
- ⑧ 岡田養二、近藤良、松田健一、榎園正人、永久磁石併用磁気軸受の開発と応用、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011 in 高知、2011年9月8日、高知工科大学
- ⑨ 西村宣彦、増澤徹、寺山昌幸、D. L. Timms、補助人工心臓用アキシナル型磁気軸受の最適化に関する研究、第19回茨城講演会講演論文集、第19回茨城講演会、2011年8月26日、茨城大学工学部
- ⑩ 須田佳裕、増澤徹、一ノ瀬高紀、D.ティムズ、W. タインセイファー、動圧軸受血液ポンプのための傾き制御機構の研究開発、第19回茨城講演会、2011年8月26日、茨城大学工学部
- ⑪ 峯岸祐太、鈴木利充、Do Manh Hung、近藤良、岡田養二、マニュアル制御に基づく装着型脚支援システム — Manipuleg-2の開発 —、第19回茨城講演会、2011年8月26日、茨城大学工学部
- ⑫ 岡田養二、三好理文、増澤徹、榎園正人、小型ローレンツ型磁気浮上モータのサーボモータ制御、第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2011年5月18日、愛知県産業労働センター
- ⑬ 松田健一、岡田養二、鈴木浩成、竹中智哉、榎園正人、永久磁石併用磁気軸受システムの研究、第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2011年5月18日、愛知県産業労働センター
- ⑭ Yohji Okada, Masashi Kitagou, Toru Masuzawa, Masato Enokizono, Development of Flux Concentrated type Self-Bearing Motor, the 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Cambridge MA, USA, Sept., 14, 2010
- ⑮ 秋山陽祐、峯岸裕太、鈴木俊充、岡田養二、近藤良、マニュアル制御に基づく装着型脚支援システム ～椅子への座り込み・立ち上がり動作の検証～、第18回茨城講演会、2010、2010年8月27日、茨城大学水戸キャンパス
- ⑯ Keisuke Eguchi, Takashi Todaka, Masato Enokizono, “Magnet Arrangement of Magnetic Flux

Concentrating Type Surface Magnet Motors”, The 12<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2009), November 15-18, LS6B, 2009年11月16日、タワーホール船堀(東京)

- ⑰ 岡田養二、北郷将史、増澤徹、榎園正人、磁束集束ローレンツ型磁気浮上モータの研究、第18回電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス、2009年11月20日、東京都市大学
- ⑱ 原澤和樹、西口真、近藤良、腰部駆動型ホッピングロボットの安定化制御 --- ロバスト性の向上 ---、日本機械学会関東支部茨城講演会、2009年8月25日、筑波大学
- ⑲ 北郷将史、増澤徹、岡田養二、榎園正人、ローレンツ磁気浮上モータの高度化に関する研究、日本機械学会関東支部総会、2009年3月6日、茨城大学水戸キャンパス

[図書] (計1件)

- ① Hannes Bleuler, Matthew Cole, Patrick Keogh, Rene Larsonneur, Eric Maslen, Rainer Nordmann, Yohji Okada, Gerhard Schweitzer, Alfons Traxler, “Magnetic Bearings”, pp. 1-535, 2009, Springer, 査読有

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称: 磁気浮上電動機  
 発明者: 金箱秀樹、岡田養二  
 権利者: 岡田養二  
 種類: 特許  
 番号: 特許第4750965号  
 取得年月日: 平成23年5月27日  
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.ipc.ibaraki.ac.jp/~y.okada/kenkyu.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡田 養二 (OKADA YOYJI)  
 茨城大学・名誉教授  
 研究者番号: 90007774

### (2) 研究分担者

榎園 正人 (ENOKIZONO MASATO)

大分大学・工学部・教授  
研究者番号：40136784

増澤 徹 (MASUZAWA TORU)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：40199691

近藤 良 (KONDO RYOU)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号：90186867

松田 健一 (MATSUDA KENICHI)  
大分大学・工学部・准教授  
研究者番号：30302326