

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12401
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：20H02096
研究課題名（和文）交流磁気浮上モータの開発

研究課題名（英文）Development of AC magnetic suspension motor

研究代表者
水野 毅（Mizuno, Takeshi）
埼玉大学・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：20134645
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：自己平衡性を持つ交流磁気浮上を利用して「完全無制御」でロータの支持と回転とを同時に実現する交流磁気浮上モータ（ベアリングレスモータ）を開発した。開発した磁気浮上モータは、アキシヤル形とラジアル形に大別できる。いずれの場合も、モータ機能を実現するのに、リラクタンス形同期モータの原理を利用した。アキシヤル形磁気浮上モータでは、駆動波形を工夫することによって、完全非接触な状態で約600rpmの回転を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自己平衡性を持つ交流磁気浮上を利用して「完全無制御」でロータの支持と回転とを同時に実現する交流磁気浮上モータを開発した。磁気浮上モータ（ベアリングレスモータ）は、産業用ポンプや人工心臓への応用が進展し、活発に研究・開発が行われている。しかしながら、従来は、ロータの支持に直流制御式磁気浮上の原理を用いているので、ロータの位置を検出する変位センサ及びコントローラが不可欠であった。これに対し、開発した磁気浮上モータは、高コスト化の要因となるこれらの要素を必要としない。本研究の成果は、「磁気浮上モータには制御が不可欠」という常識を覆し、今後の研究開発の方向を大きく転換させる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Self-bearing motors using AC magnetic suspension have been designed and manufactured. The developed self-bearing motors are classified into radial and axial types. Both have used the principle of variable reluctance synchronous motor to achieve rotation. The axial self-bearing motor has achieved approximately 600rpm rotation in levitation without any mechanical contact by using sophisticated waveforms for motor drive.

研究分野：機械工学

キーワード：磁気浮上 磁気軸受 磁気浮上モータ ベアリングレスモータ メカトロニクス

1. 研究開始当初の背景

大規模なデータストレージセンターなどでは、冷却用に多量のファンモータが用いられている。通常のファンモータは、回転軸を機械式軸受で支持しているため、定期的なメンテナンスが必要となる。このことは、特に多数のモータを対象とする場合、コストや信頼性の面で、大きな問題である。これに対し、磁気浮上モータ（ベアリングレスモータ）は、ロータを磁気力によって非接触で支持するので、このような問題が原理的に生じない。しかし、従来の磁気浮上モータは、直流制御形磁気浮上の原理に基づいて浮上を達成している。直流電磁石を利用した磁気浮上系は、無制御では不安定である。このため、能動制御によって浮上系を安定化しなければならないので、応答の良い変位センサや高速演算可能なコントローラが必要となる。そのため、高コスト化が避けられない。また、電磁ノイズによって、コントローラが誤動作（暴走）する危険性もある。

一方、交流電磁石を利用して浮上力を得る交流形磁気浮上では、電磁石コイルと直列にコンデンサを結合して LCR 共振回路を構成し、交流電源周波数を回路の共振周波数より高く設定することによって、自己平衡性と呼ばれるユニークな特性を実現することができる。具体的には、回路の自己インダクタンス L が小さくなったときに回路の共振周波数が高くなり電源周波数に近づくように設定されていれば、支持用電磁石と支持する対象物体（浮上体）とのギャップが大きくなると回路電流が増加し、支持電磁石の吸引力が増加する。逆に、ギャップが小さくなると、吸引力が減少する。すなわち、浮上体には、元の位置へ戻そうとする復元力が作用する。これが自己平衡性の原理である。

交流磁気浮上に関しては、1970 年代に活発に研究・開発が進められていたが、その後のエレクトロニクス技術と信号処理技術の飛躍的な発展に伴って技術的な関心が失われ、最近では、新規の研究がほとんど報告されていない。しかしながら、磁気浮上・磁気軸受の実用化の妨げとなっているのは、依然、高コスト・故障リスクの問題である。これらのことを鑑みると、完全無制御でも非接触支持を実現できるのは大きなメリットである。さらに圧粉磁心など新しい磁性材料が開発されるなど、交流磁気浮上の実用化に繋がる諸条件が整いつつある。

さらに、磁気軸受の分野では、浮上と回転とを同時に実現する浮上回転モータに関する研究・開発が活発に行われている。しかしながら、従来の研究では、ロータの非接触支持を達成するのに直流制御式磁気浮上の原理を用いており、自己平衡性を持つ交流磁気浮上とモータ機能とを同時に実現した例は、国内外を問わず、これまでに報告されていない。

そこで、学術的に問われるのは、果たして「交流磁気浮上モータ」を実現できるのか、実現できるのであれば、その性能はどれ位で、どのような応用が可能か、という点である。

2. 研究の目的

本研究では、自己平衡性を持つ交流磁気浮上を利用することによって、完全無制御で磁気力による安定な非接触支持を実現しながら、複数の一次側（支持側）コイルの励磁に多相交流を用いることによって、ロータに回転トルクを与える。すなわち、モータの駆動に必要な電源だけを用いて、ロータの完全非接触支持とモータ機能とを同時に達成する。これによって、従来の磁気浮上モータと比較して、遙かに簡単な構成で磁気浮上モータを実現する。

さらに、開発した磁気浮上モータを利用した磁気浮上式遠心血流ポンプの可能性を探ることも目的の一つである。

3. 研究の方法

提案する交流磁気浮上式モータを設計・製作し、無制御で安定な非接触支持と回転とを同時に達成できることを実証する。

(1) ラジアル形磁気浮上モータの設計・製作

基本的な構造としては、3 相ラクタンス形同期モータの構造を採用する。固定子コイルの突極の先端にも回転子と同じピッチの歯を刻み、各相の歯は 1/3 ピッチずつずれるようにする。例えば U 相の歯と回転子の歯が正対して揃っているときには、V 相の突極の歯と回転子の歯は 1/3 ピッチだけずれており、W 相の突極の歯は、さらに 1/3 ピッチずれている。このような構造のモータにおいて 3 相交流電源で励磁すると連続して回転子にトルクが発生する。

(2) 基本特性の測定

各回転位置において、回路のインピーダンス、相互インダクタンス、磁石間に作用する力及びトルクなど諸特性を測定する。

(3) 磁気浮上の実現

各相に印加する交流電圧の位相を合わせた状態で、自己平衡性を利用した磁気浮上を実現する。具体的には、印加する交流電圧の周波数を共振周波数よりやや高く設定する。このとき、ロータ・ステータ間のギャップが大きくなると、コイルのインダクタンスが減少し、共振周波数が増加して駆動周波数に近づくので、コイル電流が増大し、復元力が作用する。浮上特性は、印加電圧の振幅と周波数及び回路のインピーダンスで調整する。

(4) 回転の実現と性能評価

3相巻線に印加する交流電圧の位相を 120° ずらして回転磁界を生成し、浮上回転を実現する。そして、起動特性及びトルク特性などの性能を評価する。十分な性能が得られない場合には、ロータの構造を変更するなど、最適化を図る。

(5) アキシアル形浮上回転モータの設計・製作

磁気浮上モータの有力な応用例が遠心血流ポンプである。現在使用されているポンプは、ロータの支持にモノピボット軸受を用いているが、溶血や血栓の発生という問題がある。これに対し、軸受を交流磁気浮上機構に置換することが提案されている。この装置で必要となるのはアキシアル形磁気浮上モータである。そのため、遠心血流ポンプへの応用を想定したアキシアル形磁気浮上回転モータの設計・製作を行う。

(6) 基本特性の測定

製作したアキシアル形交流磁気浮上モータの基本特性を測定し、数学モデルを導出する。

(7) 浮上・回転の実現

まず、各相に印加する交流電圧の位相を合わせた状態で、自己平衡性を利用した磁気浮上を実現する。つぎに、3相巻線に印加する交流電圧の位相を 120° ずつずらして回転磁界を生成し、浮上回転を実現する。

4. 研究成果

ここでは、完全非接触での浮上回転に成功したアキシアル形交流磁気浮上モータについての結果を示す。図1に設計・製作したアキシアル形交流磁気浮上モータ装置の写真を示す。ステータは、3組のバネと磁気ダンパによって粘弾性支持している。このような構造とすることによって、ロータに間接減衰を与え、無制御での動的安定性を確保している。なお磁気ダンパは、ボイスコイルモータの巻線を短絡することによって、実現している。

ステータはアクリル円板に浮上用電磁石が3相、1相あたり3個の合計9個取り付けられている。これは各相に回転信号を印加し、浮上体に回転力を与えるためである。ステータをロータ側から撮影した写真を図2に示す。3相の電磁石のペアをボビンの色分けで表している。また、浮上力を補助するため、ステータと浮上体中央にディスク状の永久磁石を設置している。

ロータには磁気ターゲットが取り付けられている。この磁気ターゲットはI型積層鋼板を数枚ずつ1組とし、75組 4.8° となるように配置している。実験での観測を容易にするため、磁気ターゲットは 24° ごとに赤黄青に色分けされた固定具によってロータに固定されている。これら電磁石と磁気ターゲット間に働く吸引力により、円板状ロータの鉛直方向の1自由度の並進運動及び2自由度の回転運動を、交流磁気浮上による自己平衡性と粘弾性支持による間接減衰によって、無制御で安定化している。また、半径方向の2自由度の並進運動は、ステータ電磁石とロータの磁気ターゲットとの間に生じる端効果によって、受動的に安定化している。

図3に浮上回転時の写真を示す。着目すべき点は、写真左右端の電磁石先端とロータの隙間に、背後の白い板が見えること、回転速度とシャッタースピードの関係から、赤黄青に色分けされたロータ磁気ターゲット固定具がグラデーションのように見えることである。またこの時の変位を図4に示す。これは 120° ごとに配置された3個の変位センサによって、ロータの変位を

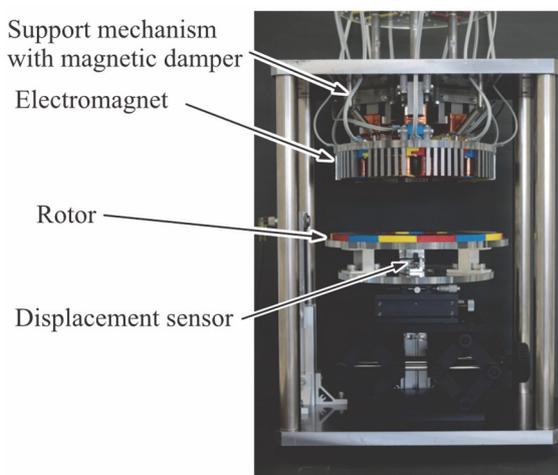


図1 アキシアル形交流磁気浮上モータ実験装置

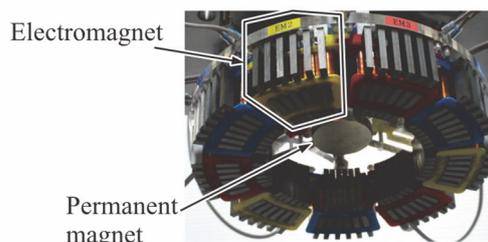


図2 アキシアル形交流磁気浮上モータステータ部（下から見た図）

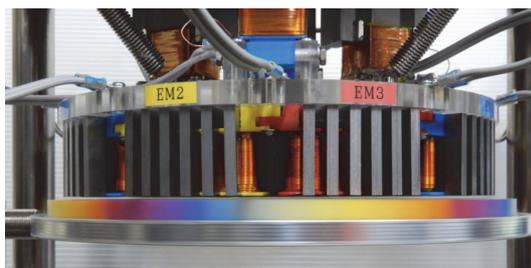


図3 浮上・回転時の様子

測定した結果である。色分けは各センサの値を示す。この時ロータの回転数は1.5rps(=90 rpm)である。図に示されるように浮上体は、ギャップ 2.8mm から 3.8mm の間で安定して浮上している。

以上の結果により、自己平衡性を持つ交流磁気浮上を利用することによって、完全無制御で安定な非接触支持と回転とを同時に達成できることが実証された。

<引用文献>

- ① 水野 毅, 彦根 克哉, 石野 裕二, 高崎 正也: 交流磁気浮上モータの開発 (第2報: アキシタル型セルフベアリングモータの試作), 第66回自動制御連合講演会, 2023, pp.247-249.

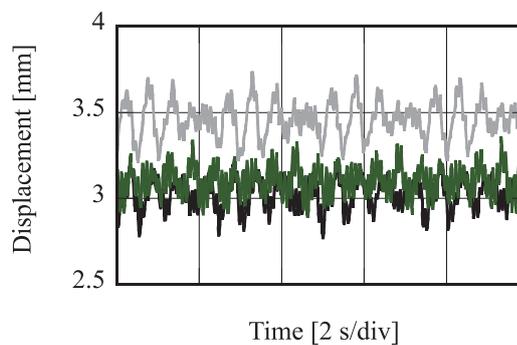


図4 浮上・回転時のロータ変位

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Rahman Arifur, Mizuno Takeshi, Takasaki Masaya, Ishino Yuji	4. 巻 9
2. 論文標題 An Equivalent Circuit Analysis and Suspension Characteristics of AC Magnetic Suspension Using Magnetic Resonant Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 52 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act9030052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 RAHMAN Arifur, MIZUNO Takeshi, ISHINO Yuji, TAKASAKI Masaya, YAMAGUCHI Daisuke	4. 巻 28
2. 論文標題 Suspension Characteristics of Differentially Operated AC Magnetic Suspension System Using Magnetic Resonant Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 94 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.28.94	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古林 拓真, 彦根 克哉, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二
2. 発表標題 多自由度交流磁気浮上システムにおける干渉の低減と浮上の実現
3. 学会等名 第31回MAGDAコンファレンスin鹿児島
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 彦根 克哉, 水野 毅, 石野 裕二, 高崎 正也
2. 発表標題 負性抵抗を用いた交流磁気浮上系における特性改善の試み
3. 学会等名 第65回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 彦根 克哉, 古林 拓真, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二
2. 発表標題 交流磁気浮上を用いた遠心血液ポンプの開発 (第二報: 磁心材料の検討)
3. 学会等名 第30回MAGDA コンファレンス in 広島 (MAGDA2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古林 拓真, 彦根 克哉, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二
2. 発表標題 交流磁気浮上を用いた遠心血液ポンプの開発 (第三報: 磁石間干渉の実験的検討)
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第28期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野 毅, 彦根 克哉, 石野 裕二, 高崎 正也
2. 発表標題 交流磁気浮上モータの開発 (第2報: アクシシャル型セルフベアリングモータの試作)
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	高崎 正也	埼玉大学・理工学研究科・教授	
	(Takasaki Masaya)		
	(10333486)	(12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------