

平成30年6月4日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14182

研究課題名(和文) エネルギー伝送機能を備えた磁界共振結合形交流磁気浮上機構の開発

研究課題名(英文) AC magnetic suspension and energy transfer system using magnetic resonant coupling

研究代表者

水野 毅 (Mizuno, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20134645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁界共振結合を利用した交流磁気浮上によって完全非接触支持を実現する装置を開発した。この装置には3組の磁気浮上機構を設け、さらに、浮上体上部の3個の1次側電磁石を3本のばねにより弾性支持されたステータに取付けた。ステータ・ベース間に減衰を与えるため、ボイスコイルモータ(VCM)を3組設置した。また、諸特性を精密に測定するための1自由度形実験装置も製作した。諸特性の測定結果に基づき、磁気浮上機構の数学モデルを構築し、受動安定となる条件を探索した。また、VCMの巻線を短絡することによって減衰を与えて、安定な磁気浮上を実現した。さらに、2次側回路を二つ持つ交流磁気浮上機構についても諸特性を測定した。

研究成果の概要(英文)：An experimental apparatus was designed and fabricated to achieve noncontact suspension by the alternate-current (AC) magnetic suspension using magnetic resonant coupling. This apparatus has three magnetic suspension mechanisms whose stator electromagnets were supported by three springs and voice coil motors (VCMs). In addition, a single-degree-of-freedom system was fabricated to study the characteristics of the magnetic suspension mechanism elaborately. A mathematical model was constructed based on the measured characteristics. The stability conditions were studied analytically in this model. Stable suspension was achieved by shunting the coils of the VCMs. In addition, an AC magnetic suspension with two secondary circuits was studied experimentally.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：磁気浮上 磁気軸受 磁界共振 エネルギー伝送 自己平衡性

1. 研究開始当初の背景

磁気浮上方式の一つとして電力伝送機能を備えた交流磁気浮上が提案されている。この方式では、磁気浮上と同時に浮上体に対して非接触電力伝送が可能であり、これを利用した磁気浮上列車やクリーンルーム内の搬送装置なども提案されている。このように磁気浮上と非接触電力伝送の同時実現は達成されているが、従来の方式では、電磁誘導を利用しているため、伝送効率が低いという問題がある。一方、近年、磁界共振結合と呼ばれる新しい非接触電力伝送方式が注目されている。この方式は大ギャップ、大電力、高効率での電力伝送が可能であるという特徴を持つ。さらに、電力送受電にはコイルを用いていることから、交流磁気浮上に応用が可能である。

研究代表者らは、磁界共振結合を利用した新しい方式の交流磁気浮上を提案している。この浮上方式は、共振を積極的に利用している。そのため、従来の LCR 共振形交流磁気浮上と同様に、自己平衡性を持つことが実証されており、さらに支持側電磁石を粘弾性支持することによって完全に非接触な状態で安定な磁気浮上を実現されている。

しかしながら、これまでに安定した浮上が実現されているのは、以下の場合だけである。

- ・基本実験装置において浮上体が一端を回転支持されている
- ・ステータ（1次側）電磁石が粘弾性支持されている

したがって、外部からの機械的な減衰が全くない場合に、提案する方式によって動的な安定性が確保できるかについては、明らかになっていない。注目すべきことは、提案する方式では、浮上体（2次側）の LCR 回路の特性によって、浮上特性が変化し、減衰の大きさも変えられることである。したがって、完全非接触で機械的な減衰がない状態でも、回路定数の調整によって、動的な安定性が得られる可能性がある。さらに、浮上体側に複数の特性の異なる2次側巻線を設けることも可能であり、従来の交流形磁気浮上に比べて、設計・調整の自由度が大きく、これまでの交流磁気浮上では不可能であった機能を実現できる可能性を秘めている。

2. 研究の目的

本研究では、動的な安定性を含めて、完全に無制御で安定な磁気浮上を達成する浮上機構を開発し、この機構を磁気支持ジャイロに適用することによって、非接触給電と非接触支持とを同時に達成する実システムを実現することを目的とする。この目的を達成するため、まず、磁気浮上機構を3組備えた磁気浮上実験装置を試作し、その基本特性を把握して、正確な数学モデルを導出する。つぎに、導出した数学モデルに基づいて、2次側共振回路の特性を変化させたときの安定性を評価し、2次側共振回路を工夫することや、

特性の異なる複数の2次側共振回路を用いることによって、動的安定性を確保できる可能性があることを示す。さらに解析結果に基づいて、実際の装置において動的にも安定な磁気浮上を実現し、その特性を把握するとともに浮上機構の最適化を図る。そして、最適化された磁気浮上機構を磁気支持ジャイロに適用して、浮上体に内包されるモータへの非接触給電を行いながら、完全非接触支持を実現し、浮上体への配線による悪影響のない高精度ジャイロを実現する。

3. 研究の方法

磁界共振結合を利用した交流磁気浮上システムの特性を把握するために、磁気浮上機構を3組備えた磁気浮上実験装置を試作し、各種パラメータを同定して、正確な数学モデルを導出する。つぎに、導出した数学モデルを基に、2次側共振回路の特性を変化させたときの安定性を評価し、動的安定性が確保できる条件を探索する。その解析結果に基づいて、実際の装置において、動的にも安定な磁気浮上を実現することを試みる。さらに、特性の異なる複数の2次側共振回路を用いた場合についても解析し、浮上機構の最適化を行う。そして、最適化された磁気浮上機構を磁気支持ジャイロに適用して、浮上体に内包されるモータへの非接触給電を行いながら、完全非接触支持を実現し、浮上体への配線による悪影響のない高精度ジャイロを実現する。

計画された研究手順を以下に記す。

(1) 実験装置の設計・製作

提案する磁気浮上機構の最も基本的な概念図を図1に示す。磁界共振結合を利用した電力送電回路では、1次側回路が送電用、2次側回路が受電用となり、共通の共振周波数を持っている。交流磁気浮上では1次側電磁石をステータ、2次側電磁石を浮上体に取付ける。試作する装置では、完全非接触浮上を行うため、3組の磁気浮上機構を設ける。ま

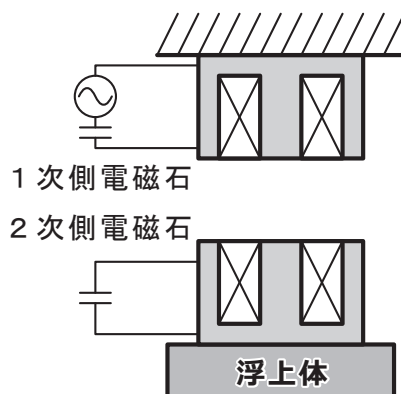


図1 磁界共振結合を利用した交流磁気浮上の原理図

た、浮上体上部の3個の1次側電磁石は、3本のばねにより弾性支持されたステータに取り付け、さらにステータ・ベース間に減衰を与えるため、ボイスコイルモータ(VCM)と変位センサを3組設置し、粘弾性支持を模擬することにする。

(2) 基本特性の測定とモデル化

回路のインピーダンス、相互インダクタンス、1次側電磁石と2次側電磁石間に作用する力など諸特性を測定する。これらの結果に基づいて、浮上体の運動方程式を含む磁界共振結合を用いた交流磁気浮上機構の数学モデルを導出し、モデル中に現れる係数を正確に同定する。磁気浮上状態でのエネルギー伝達効率、浮上精度、動的応答などの諸特性を測定した結果と比較して、提案する磁気浮上機構のより精緻なモデルを構築する。

(3) 安定条件の探索 (2次側回路が単数の場合)

各パラメータをいろいろと変化させて、それぞれの場合に安定性を評価する。特にポイントとなるのが2次側回路の容量及び抵抗の値であるので、これらについての根軌跡を求め、各パラメータが安定性に及ぼす影響について詳しく調べる

(4) 安定な磁気浮上の実現

(3)の結果、動的に安定になる条件が見つかった場合には、その条件と合うような回路を構築し、実際に浮上を実現する。見つからない場合には、VCMを利用してステータ・ベース間に減衰を与えて安定な磁気浮上を実現し、安定浮上に必要な減衰の大きさを実験的に求める。

(5) 安定条件の探索 (2次側回路が複数の場合)

対象とする交流磁気浮上機構では、浮上体側に複数の特性の異なる2次側回路を設けることも可能である。この場合、調整できるパラメータは、コイルの数、その巻線比、それぞれの共振回路の容量と(外部)抵抗となる。本研究では、2次側回路が二つの場合について、安定条件を探索する。

(6) 磁気支持ジャイロへの適用

磁気支持ジャイロでは、回転円板とそれを駆動するモータを内包する浮上体を磁力によって非接触支持しているが、モータへの配線が計測誤差の一つの要因となっていた。その半径方向の支持に交流磁気浮上機構を用いることによって、浮上体に内包されるモータへの非接触給電を行いながら、完全非接触支持を実現し、浮上体への配線による悪影響のない高精度ジャイロを実現する。

4. 研究成果

本研究の成果は、以下のように纏められる。

(1) 磁界共振結合を利用した交流磁気浮上機構の数学モデルの構築

磁界共振結合を利用した磁気浮上機構の等価回路を図2に示す。この等価回路を基に構築した数学モデルの妥当性を検証するため、図3に示す実験装置を試作し、回路のインピーダンス、相互インダクタンス、1次側電磁石と2次側電磁石間に作用する力など諸特性を測定した。これらの結果に基づいて、先に導出したモデル中に現れる係数を同定した。そして、磁気浮上状態に相当するギャップを与えて、吸引力などの諸特性を測定した結果と比較した。その結果の一例を図4に示す。この結果では、解析結果と実験結果に

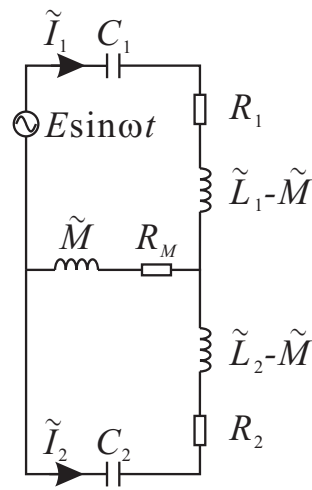


図2 浮上機構の等価回路

$E \sin \omega t$: 電圧源, \tilde{L}_k : 回路 k の自己インダクタンス, M : 相互インダクタンス, R_k : 回路 k の抵抗, \tilde{C}_k : 回路 k の容量, \tilde{I}_k : 回路 k の電流 ($k=1,2$)

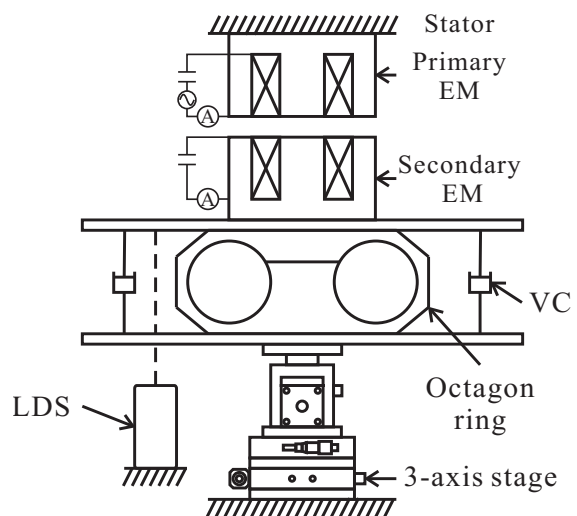
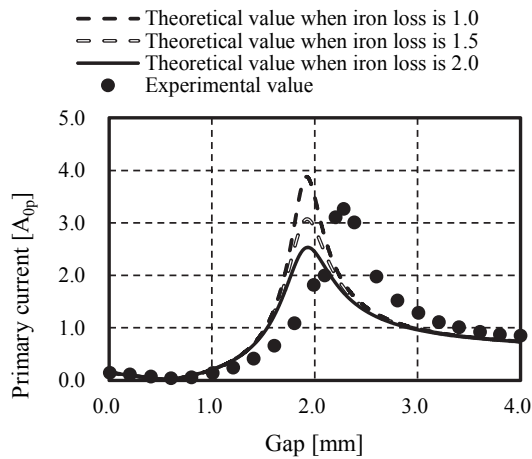


図3 特性測定用実験装置の模式図

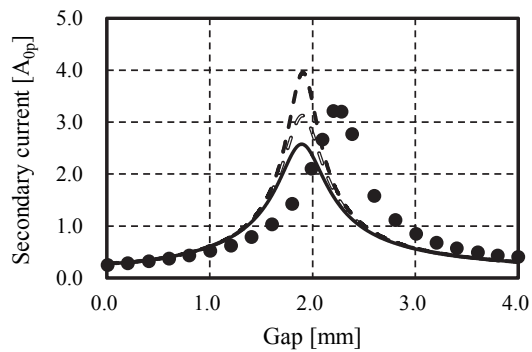
差異が見られたが、係数を再同定するなどのプロセスを経て、提案する磁気浮上機構のより精緻なモデルを構築した。

(2) 安定条件の探索 (2次側巻線単数の場合)

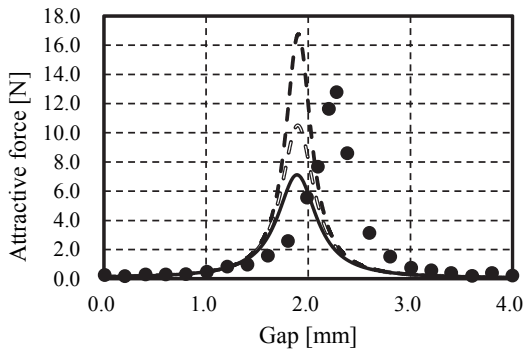
数学モデルにおいて各パラメータをいろいろと変化させて、それぞれの場合に安定性を評価した。特に、2次側回路の容量及び抵抗の値についての根軌跡を求め、各パラメータが安定性に及ぼす影響について詳しく調べることができた。その結果、動的に安定に



(a) 一次側コイル電流



(b) 2次側コイル電流



(c) 吸引力

図4 解析結果と実験結果の比較

なる条件が見つからなかった。

(3) 完全非接触支持の実現

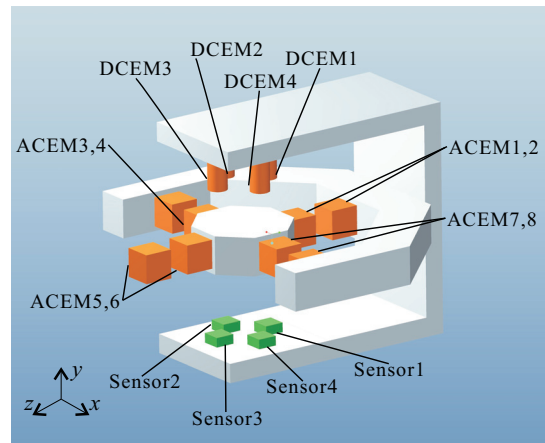
VCMの巻線を短絡することによってステータ・ベース間に減衰を与えて、安定な浮上機構を実現した。

(4) 安定条件の探索 (2次側巻線2個の場合)

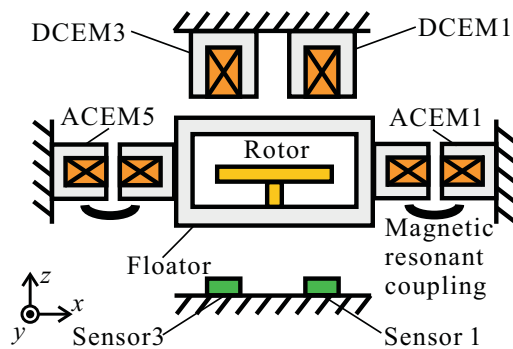
2次側回路が二つの場合について、ほぼ同じ巻き数で、一方だけに抵抗を直列接続して、減衰効果を高めることを試みた。しかしながら、安定な磁気浮上の達成には至らなかった。

(5) 非接触支持・非接触給電の実現

対象とした磁気支持ジャイロの模式図を図5、写真を図6に示す。このジャイロにおいて、非接触支持の状態では、浮上体に給電し、内包したLEDを発行させることに成功した。



(a) 概略斜視図



(b) 断面図

図5 磁気支持ジャイロの構造

ACEM k : 交流電磁石 ($k=1, \dots, 8$)
 DCEM k : 直流電磁石 ($k=1, \dots, 4$)

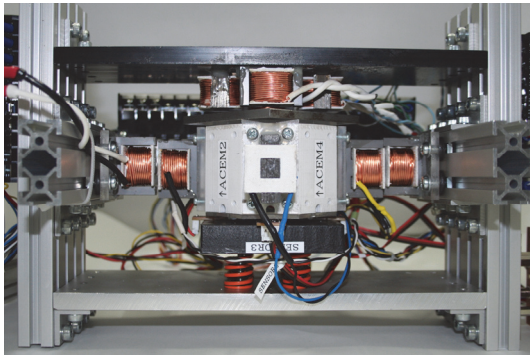


図6 磁気支持ジャイロの外観

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 0件)

[学会発表] (計 3件)

- [1] Takeshi MIZUNO, “Recent advances in magnetic suspension technology,” Proc. the 13th International Conference on Motion and Vibration Control and the 12th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics (MoViC and RASID 2016), Plenary speech (2016).
- [2] 清藤温, 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, 原正之, 山口大介: 磁界共振結合を用いた交流磁気浮上に関する研究 第6報: 基本特性の実験的評価, 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会, OS1401-01, (2017).
- [3] 水野毅: 無制御で浮かしながら電力も供給する技術, 製造技術～材料/計測・制御関連～新技術説明会予稿集, 独立行政法人科学技術振興機構, pp.9-11 (2017)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 1件)

名称: 磁気浮上装置
発明者: 水野 毅
権利者: 国立大学法人埼玉大学
種類: 特許
番号: 第 6097102 号
取得年月日: 2017年2月24日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://control.mech.saitama-u.ac.jp/home-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 毅 (MIZUNO, Takeshi)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20134645

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高崎 正也 (TAKASAKI, Masaya)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 10333486

石野 裕二 (ISHINO, Yuji)

埼玉大学・総合研究機構・技師
研究者番号: 50645968

(4) 研究協力者

清藤 温 (SEITO, Atsushi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・博士前期課程