

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289048

研究課題名(和文)磁気浮上を利用した回転球体風洞試験装置の開発

研究課題名(英文)Development of wind tunnel for spinning body using magnetic suspension

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) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：ゴルフボールのようにスピンを伴う球体に作用する流体力を高精度に測定し、高速回転する球体の周りで起きている流体力学的現象を連続的かつ精密に観測することを可能とする磁気浮上式回転球体風洞試験装置を新たに開発した。開発した風洞装置では、測定部の大きさ(断面積)を従来の装置の約3倍としている。磁場解析と特性測定とを併用して、この装置に関する数学的モデルを構築した。さらに、安定な磁気浮上及び浮上体の回転を実現し、風洞試験も実施した。また、風洞測定部がさらに大きな装置を大きな電力消費を伴うことなく実現するために、集束形磁路制御式磁気浮上機構及びセルフスピニング方式浮上体も合わせて開発した。

研究成果の概要(英文)：A new wind-tunnel system for spinning body such as golf ball was developed to measure hydrodynamic forces acting on the body and observe phenomena around the body continuously and accurately. It was characterized by using magnetic suspension for the noncontact support and rotation of the body. In the newly developed system, the test section area was approximately three times that of the conventional system. A mathematical model for the system was derived based on predictions by magnetic fields analysis and measured characteristics. Stable noncontact suspension and rotation of the body were achieved in the developed system. Then wind tunnel tests were carried out. In addition, flux-path magnetic suspension systems using flux concentration and a self-spinning floater were fabricated to realize larger-size wind tunnel systems without much increase of the consumed electrical power in future.

研究分野：制御工学・メカトロニクス

キーワード：磁気浮上 風洞 回転球体 磁気軸受 スポーツ工学

1. 研究開始当初の背景

ゴルフボールや野球のボールなど回転する球体の運動は、我々の身近に存在する興味深い物理現象の一つで、野球の変化球などは学術的立場からの研究もなされている。しかしながら、回転球体の周りの流れは、未だ完全には解明されていない。例えば、ゴルフボールでは、飛距離を伸ばすために、表面に多数のディンプル（窪み）が設けられている。この効果は、高速回転中に小さな乱流を境界層内に多数発生させ、境界層の剥離地点を後部へ移動させることによって、渦流の影響を受ける面積を極力小さくすると説明されている。しかしながら、既存の流体解析プログラムは、回転のようなマクロの運動をモデルに組み込んで解析することができないので、ボール表面を固定した境界として扱わざるを得ない。一般に、流体工学的なマイクロのダイナミクスと回転運動のようなマクロのダイナミクスとが絡み合う現象を厳密に解析することは、シミュレーション技術が発達した現在でも、相当に困難な課題である。また、シミュレーションの妥当性を検証するためにも、現象の正確かつ精密な観測が必要である。

前述したゴルフボールに関しては、実際にゴルフボールを打ち出して、飛んでいる状態をビデオや高速度カメラで撮影することが行われている。しかしながら、前者は解像度が低く、後者は基本的に離散時間的な情報しか得られない。また、再現性に乏しいという問題も抱えている。

このような現象を再現性良く連続的に観測するには、風洞実験が有効である。通常の風洞装置では、観測対象物を支持する機構としてワイヤや支持棒が用いられる。しかし、このような機械的な支持機構は、気流との干渉があるため、物体周りの流れに影響を与えてしまう。ワイヤを用いる場合は、干渉を小さくできるが、対象物を高速回転させることは難しい。支持棒を用いる場合は干渉が大きく、支持棒周りの回転速度は容易に与えられるが、回転方向を任意に変えられない。また、いずれの場合も、ボールが揺れる現象など、3次元的な現象を捉えることはできない。

上述したような機械的な支持機構による干渉の問題を抜本的に解決する方法として、観測対象を非接触で支持する磁力支持天秤が開発されている。磁力支持天秤では、流れ方向に対し垂直な方向には風洞外部に設置された電磁石によって磁気浮上を行い、風洞軸方向に対しては風洞外部に設置したコイルによって支持する。そのため、支持棒による流れへの影響が原理的に存在しない。また、コイルに流れる電流を観測することにより、揚力、抗力などの観測対象に及ぼす力を非接触で測定できる。しかしながら、従来の磁力支持天秤は、観測対象として飛行機のような飛翔体を想定しているため、構造上、観測対象を高速回転させる機能を備えていない。し

たがって、ゴルフボールのようにスピンを伴う球体に作用する流体力を測定することができない。

2. 研究の目的

本研究では、ゴルフボールや野球ボールのようにスピンを伴う球体に作用する流体力を高精度に測定し、高速回転する球体の周りで起きている流体工学的現象を連続的かつ精密に観測することを可能とする磁気浮上式回転球体風洞試験装置を開発する。開発する磁気浮上式風洞は、気流送出・排出機能を備えた風洞部及び回転球体支持部から構成される。回転球体支持部は、風洞外部に設置され、強磁性体を含む球体を磁気浮上させ、かつ回転させるための回転磁場を発生する電磁石を備えている。揚力や抗力など観測対象に作用する流体力は、電磁石の制御信号から推定するので、非接触で高精度の測定が可能となる。さらに、回転の方向及び速度は、原理的に任意に設定できるので、様々な条件での風洞試験が可能となる。さらに、現象を連続的に高解像度で記録することができる。

開発する装置では、推定した流体力から球体の飛行軌跡を計算し、それをバーチャル空間に3次元的に表示するシステムも構築する。これによって、揺れながら落ちるような運動もバーチャル空間で表示できるようになるので、ボールが実際に飛んでいる様子を実感できるようになる。例えば、打者の視点から変化球がどのように見えるかを、自在に再現できるようになる。

風洞装置では、一様流を発生させ、風洞壁面が観測対象物周りの流れに影響を与えないようにしなければならない。一般的には、ブロッグージ比（測定対象の前面面積÷風洞の開口部断面積）を5%以下とするのが良いとされている。本研究では、まず、ゴルフボール相当の回転球体の実大実験を行うことを目標とした風洞装置を開発する。そして、実際にゴルフボールを模した鉄球を浮上・回転させて風洞実験を行い、回転中にディンプル周りでどのような現象が起きているかを解明する。

上述した風洞装置では、電磁石と測定対象物のとのギャップが非常に大きくなり、磁気浮上と回転を実現するのに大電力を必要とする。野球ボール相当の回転球体の風洞試験を行うときには、倍近いギャップとなるので、単純に見積っても数倍以上の電力が必要となる。これは、実際に風洞試験を行う場合には大きな障害となる。本研究では、第2段階として、磁路制御形磁気浮上とセルフスピニング機能を持った浮上体を組合わせて、低電力で風洞試験を行えるようにする。そして、その技術を利用して、最終的には野球ボール相当の回転球体を対象とした磁力支持風洞装置を開発する。

3. 研究の方法

(1)ゴルフボール相当の大きさの回転球体を対象とした風洞装置を開発する。

①風洞装置の設計・製作

試作する風洞試験装置は、気流送出・排出を行う風洞部と回転球体支持装置とから構成される。回転球体支持装置は、強磁性体を含む球体を磁気浮上させ、かつ回転させるための磁界を発生する電磁石を備えている。この磁気浮上装置は、つぎの二つの課題を克服しなければならない。

- ・磁路中に断面積が大きな風洞を挿入するため、大ギャップでの磁気浮上が必要となる。
- ・変位検出部を風洞内部に置くことができないので、渦電流センサなどを用いることができない。

本研究では、前者の課題に対して、電磁石の磁極の材質や構造及びコイルの配置を工夫することによって、後者の課題に対しては、3自由度変位検出光センサを開発することによって克服する。

電磁石の磁極の材質や構造に関しては、有限要素法による磁場解析を利用して、最適化を図る。まず、現有する磁気支持風洞装置において、磁束の分布を測定し、磁場解析結果との比較を行い、磁気回路設計を机上で進められるようにする。つぎに、磁場解析を利用して、電磁石の磁極の材質や構造及びコイルの配置などの最適化を図る。また、電磁石のコイルに関しては、複数のコイルを組み合わせる分割形とする。分割形にはつぎのような利点がある。

- ①浮上制御用と回転磁場発生用とで別々のコイルを用いることができる。
- ②並列・直列接続を組み合わせることによってインピーダンスを調整できる。

浮上体の位置検出には、全差動式光学変位センサを製作して用いる。このセンサでは、浮上体の両側に発光源のLEDおよび受光するフォトトランジスタを設置する。片側のLEDから放出された光は、逆側に設置された四つのフォトトランジスタで受光される。合計8個のフォトトランジスタの出力を組み合わせることによって3軸方向の変位を推定する。

②浮上・回転実験

製作した磁気浮上機構を用いて大ギャップ磁気浮上を実現する。浮上対象物としては、ゴルフボール大の鋼球を用いる。制御としてはPID制御を適用し、鋼球に外力が作用しても、位置を一定に保つ制御系を実現する。つぎに、制御信号に2相交流信号を重畳させることによって、水平面内での浮上体の回転を実現する。つぎに駆動周波数を変化させた時の浮上体回転速度の測定を行う。また、重畳する信号を変えて、別の軸周りの回転も実現する。

③風洞実験

開発した磁気浮上機構を風洞観測部の外側に設置して風洞実験を行う。ディンプルの影響を調べるために、測定対象物として、鋼

球の外側にディンプルを設けた回転体またはゴルフボールのセンタを強磁性体とした回転体を用いる。まず、測定対象物に風をあて、その位置を一定に保つようにする制御系の制御入力から抗力を推定する。つぎに、一定速度で回転させている測定対象物に風をあて、風と垂直方向の力(揚力)を測定する。風速・回転速度を変化させて、これらと揚力との関係を求める。さらに、送風する空気に煙を混ぜて可視化実験を行い、ディンプルを持つ回転球体周りの気流を観測する。

(2)磁路制御形磁気浮上による大ギャップ支持を実現する。

①磁路制御形磁気浮上機構の設計・製作

(1)で開発する風洞装置では、アクチュエータとして電磁石を用いているので、大ギャップで磁気浮上を達成するには、大電力を必要とする。このことは、従来の磁気支持天秤でも実用化を妨げる大きな要因となっている。研究代表者が提案している磁路制御形磁気浮上では、永久磁石と浮上体との間に一对の制御板を挿入し、その開閉により磁路を変化させて浮上力を制御する。その特徴の一つは、トランジスタと類似した動作、すなわち発生力の小さなアクチュエータで、大きな吸引力を制御できることである。最近、制御板の材質を強磁性体から永久磁石に換え、磁束集中を利用することによって、従来の方式に比べて数倍の浮上力を発生させることに成功している。本研究では、この磁束集中を利用した磁路制御形磁気浮上を導入することによって、低電力化を実現する。

②基本特性の測定とモデル化

試作した磁路制御式磁気浮上機構において、制御系設計に必要なパラメータを測定する。そして、測定した結果に基づいて、実験装置の数学的なモデルを構築する。

③制御システムの構築

②で導出したモデルに基づいて、安定な磁気浮上を達成する制御系を構築する。

④浮上実験と諸特性の測定

構築した制御システムによって完全非接触磁気浮上を実現し、浮上・位置決め精度などの基本特性を把握する。また、磁気浮上天秤へ適用する場合、制御信号から制御対象物に作用する力が推定できることが重要になるので、実際に推定を行い、その精度を検証する。精度がよくない場合には、オブザーバ理論を適用するなどの工夫をして改良を図る。

(3)セルフスピニング機能を持つ球体の設計・製作

①野球ボール相当の大きさの球体を観測対象物とする場合、浮上体の容積に余裕がある。また、空力特性を評価するには、ボール自体が回転する必要がなく、空気と接する箇所が回転すれば十分である。これらのことに着目して、駆動用モータ、アンプ、電源などを内

部に搭載し、外側だけが回転する球体を開発する。これによって、回転磁場を生成する必要がなくなるので、消費電力を大幅に低減できることを実証する。

②風洞試験

まず、開発した磁気浮上機構を用いて、セルフスピニング機能を持つ球体の磁気浮上を実現する。さらに、磁気浮上を達成した状態で、外殻だけを回転させ、この状態でも磁気浮上が維持できることを実証する。つぎに、開発した風洞装置において及びセルフスピニング機能を持つ対象物を用いて、風洞実験を行う。

4. 研究成果

(1)風洞測定部断面積が従来の装置の約3倍となる磁気浮上式風洞装置を設計・製作し、この装置において、大ギャップでの磁気浮上及び回転を実現し、回転球体の風洞試験を実施した。

①磁場解析を利用した設計

ゴルフボール相当の大きさの回転球体を対象とした風洞装置について検討を行った。磁気浮上式風洞装置では、磁路中に断面積が大きな風洞を挿入するため、従来の磁気浮上装置に比べて、大ギャップでの磁気浮上が必要となる。そこで、有限要素解析ソフトを用いて、磁気回路設計を机上で進められるようにすることを試みた。そのため、風洞測定部の大きさが60×60mmの既存の装置において、浮上対象物に作用する力を測定し、解析結果と比較した。その結果、磁場解析ソフトによってかなりの精度で発生力などが予測できることを確認した。

つぎに、磁場解析ソフトによる解析に基づいて、電磁石の磁極の材質や構造及びコイルの配置などを含めて検討したところ、現有する電力設備では、供給電力が不足することが予測された。そのため、風洞測定部が100×100mmの大きさの風洞を開発することとした。そして、さらに解析に基づいて新たな磁極構造を持つような設計を行った。製作した装置の外観を図1に示す。

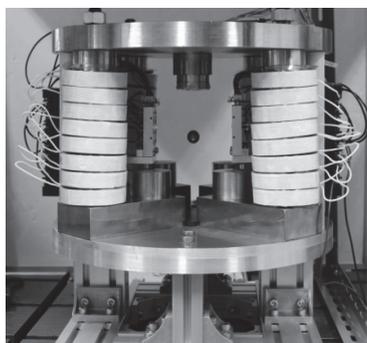


図1 風洞装置磁気浮上機構部

②基本特性の測定とモデル化

試作した装置において、浮上力や電磁石の

特性係数など制御系設計に必要なパラメータを測定した。そして、測定した結果に基づいて、実験装置の数学的なモデルを構築した。

③浮上・回転実験と諸特性の測定

製作した磁気浮上式風洞装置において大ギャップ磁気浮上を実現した。その様子は、図1にも示されている。浮上対象物としては、直径19.5mmの鋼球を用いた。制御則としてはPI-D制御を適用し、鋼球に外力が作用しても、位置を一定に保つ制御系を実現した。

つぎに、制御信号に2相交流信号を重畳させることによって、水平面内での浮上体の回転を実現した。つぎに駆動周波数を変化させた時の浮上体回転速度の測定を行った。図2は、駆動周波数と実際の回転速度との関係を示している。誘導モータの原理を利用しているので、回転速度が速くなると、すべりの影響が顕著となっていることが確認された。

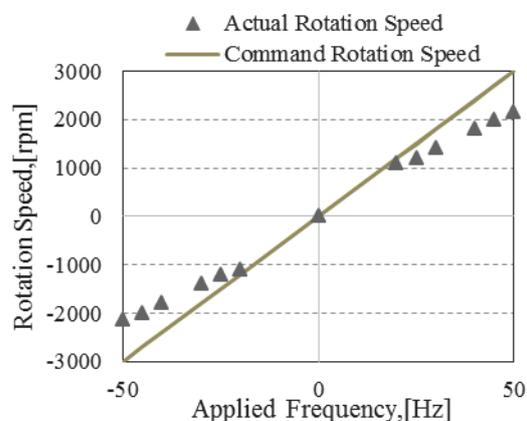


図2 回転駆動特性

④風洞実験

開発した装置を用いて、回転球体の風洞実験を行った。ディンプルの影響を調べるために、測定対象物として、鋼球の外側にディンプルを設けた回転体を用いた。まず、測定対象物に風をあて、その位置を一定に保つようにする制御系の制御入力から抗力を推定した。つぎに、一定速度で回転させている測定対象物に風をあて、風と垂直方向の力(揚力)を測定した。そして、風速・回転速度を変化させて測定することによって、これらと揚力との関係が求められた。

(2)ワイドギャップ磁気浮上に適した磁路制御式磁気浮上機構の開発を行った。

①磁路制御式磁気浮上機構の設計・製作

磁気浮上風洞に適用するため、磁路制御式磁気浮上において、永久磁石を制御板として用いて、磁束集束の原理に基づいて、従来の方式よりも大きな浮上力を持つ磁気浮上機構の開発に取り組んだ。

安定な磁気浮上を達成するには、浮上力の大きさだけではなく、制御板の変位に対する吸引力の変化量(これを可制御力と呼ぶ)を十分大きくすることも重要である。集束型にお

いて、可制御力を決定づける要因には、制御板の運動方向・配置・形状の三つが考えられる。そこで、可制御力が大きくなる条件を調べるために、磁場解析ソフトで有限要素解析を行い、最適な運動方向・配置・形状についての知見を得た。この結果に基づいて、設計を行い、実際に実験装置を試作した。図3に試作した実験装置の外観を示す。

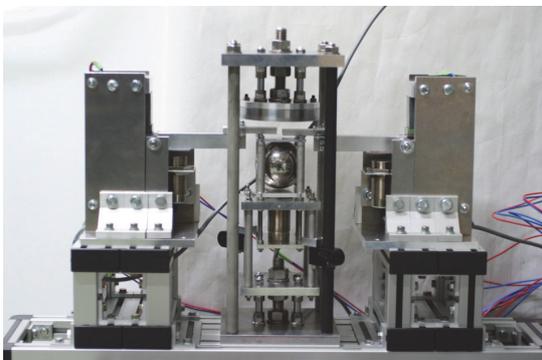


図3 集束形磁路制御式磁気浮上機構

②基本特性の測定とモデル化

試作した装置において、浮上力や可制御力などの諸特性を測定し、従来の装置の数倍の可制御力が得られていることを確認した。また、測定結果から、制御系設計に必要な数学的なモデルを導出した。

③磁気浮上の実現

磁力源である永久磁石と浮上体との間のギャップを28mmに設定して、浮上実験を行い、安定な磁気浮上の実現に成功した。また、浮上体に風などの外乱を加えても、安定的に浮上していることが確認した。これによって、磁路制御式磁気浮上機構が風洞に利用できるとの知見が得られた。

(3)セルフスピニング機能を持つ磁気浮上球体を開発した。

①セルフスピニング方式浮上体の設計・製作

回転機構を内蔵し、磁気浮上ターゲットとなる内部構造体とその外側に絶縁材料を用いた外枠を配置し、それらをモータにより接続することで外枠のみを回転させるセルフスピニング方式浮上体を試作した。図4に試作した浮上体の内部の構成を示す。



図4 セルフスピニング方式浮上体

②磁気浮上・回転実験

セルフスピニング方式浮上体を用いた浮上実験を行い、安定な磁気浮上に成功した。さらに、外枠を回転させた状態でも、安定な磁気浮上が維持されることを確認した。

(4)電磁石の吸引力を利用して直接球体を支持・回転する方式では、実現できる風洞の大きさが制約される。(2),(3)によって、磁路制御形磁気浮上機構によってセルフスピニング機能を持つ球体を支持するという形式の風洞装置の実現可能性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

[1] Shahajada Mahmudul HASAN, Takeshi MIZUNO, Masaya TAKASAKI, Yuji ISHINO, Electromagnetic Analysis in Magnetic Suspension Mechanism of a Wind Tunnel for Spinning Body, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, IOS Press, to appear, 2016.

[2] 高林 篤, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二: 集束型磁路制御式磁気浮上機構の開発, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 79巻, 801号, pp1483-1494, 2013.

〔学会発表〕(計14件)

[1] Shahajada Mahmudul HASAN, Takeshi MIZUNO, Masaya TAKASAKI, Yuji ISHINO, Design of an Enlarged Wind Tunnel System for Spinning Body Using Magnetic Suspension, Proc. The 15th International Symposium on Magnetic Bearings, 査読有, to appear, 2016.

[2] Shahajada Mahmudul HASAN, Takeshi MIZUNO, Masaya TAKASAKI, Yuji ISHINO, Electromagnetic Analysis in Magnetic Suspension Mechanism of a Wind Tunnel for Spinning Body, Proc. The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 2P1-A-3, 2015.

[3] 清藤 温, 山口 大介, 石野 裕二, 原正之, 高崎 正也, 水野 毅: 非接触給電機能を備えた磁気支持ジャイロセンサの開発, 日本機械学会関東学生会第54回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, pdf.506, 2015.

[4] 竹内 倭, 原 正之, 山口 大介, 石野 裕二, 高崎 正也, 水野 毅: 遮束型可変磁路式磁気浮上機構のゼロパワー制御に関する研究, 日本機械学会関東学生会第54回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, pdf.505, 2015.

[5] 田名部 淳, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二: 吸引型磁気浮上系における横ずれ方向の制振制御(第1報)原理の提案, 第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 査読無, pp.275-276, 2014.

[6] 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二: 磁路制御式磁気浮上におけるゼロパワー制御について, 第56回自動制御連合講演会講演論文集, 査読無, CD-ROM 702, pp.551-553, 2013.

[7] 地引 陽之助, 水野 毅, 高崎 正也, 石野 裕二: 磁気浮上風洞におけるセルフスピニング方式浮上体の開発, 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集, 査読無, B09, 2013.

[8] Takeshi Mizuno, Advances in Magnetic Suspension Technology --- Towards Smart Mechatronics ---, Proceedings of International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2013 (ICMIME2013), *Keynote speech*, 査読無, pdf KL-01, 2013.

[9] Takeshi Mizuno, Yuuki Yoneno, Yuji Ishino and Masaya Takasaki, Proposal of Flux-Path Control Magnetic Suspension using Flux Concentration, proceedings of 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, 査読有, pdf submissions 4, 2013.

[10] Takeshi Mizuno, Masaya Takasaki and Yuji Ishino, Applicability of Zero-Power Control to Flux-path Control Magnetic Suspension System, Proc. SICE Annual Conference 2013, 査読有, pp.2610-2612, 2013.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔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: 2 0 1 3 4 6 4 5

(2) 研究分担者

平原 裕行 (HIRAHARA, Hiroyuki)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 2 0 2 0 1 7 3 3

(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: 1 0 3 3 3 4 8 6

石野 裕二 (ISHINO, Yuji)

埼玉大学・総合研究機構・技師

研究者番号: 5 0 6 4 5 9 6 8