

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K17851

研究課題名(和文) 回転する球状物体に作用する臨界レイノルズ数付近の流体力計測

研究課題名(英文) Measurement of Aerodynamic Forces near Critical Reynolds Number Acting on a Rotating Sphere

研究代表者

奥泉 寛之 (Okuizumi, Hiroyuki)

東北大学・流体科学研究所・技術専門職員

研究者番号：60647957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、東北大学流体科学研究所の1-m 磁力支持天秤装置(1-m MSBS)を用いて、ゴルフボールの様な球体にディンプルが付いた回転飛翔体について、臨界レイノルズ数領域を含んだ流れ場での支持干渉のない空力特性を明らかにすることを目的として実施した。

本研究では、1-m MSBSのセンサー系を回転球に適したものに改修し、平滑な表面の球模型の磁気浮揚技術とエアジェット吹付による回転試験技術を開発し、回転球の空力計測を実施した。直径142 mmの球模型を用いて、風速7 m/s(レイノルズ数 = 65000)、回転数600 rpm以下の条件で、抗力やマグナス力の急激な減少を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁力支持天秤装置による回転球の空力試験技術を開発したことで、今までほとんど例のなかった、支持干渉のない真の回転球の空力特性を調査する環境が整った。最初の風洞試験では、回転する球模型に働く空気抵抗やマグナス力が、その回転数の変化に伴って劇的に変化する様子を捉えた。今後この技術を用いることで、回転球の空力現象解明や、スポーツ分野でよく目にするディンプル状やシーム状の表面性状をもつ球状物体の回転時の空力特性解明が期待される。また、本技術を発展させ、球から形状が大きく異なる強風災害の飛散物形状である角柱などにも応用を広げることで近年増加する強風被害対策にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The objective was to clarify the aerodynamic characteristics of a rotating sphere with dimples on the surface using the 1-m magnetic suspension and balance system (1-m MSBS) at the Institute of Fluid Science, Tohoku University.

A magnetic suspension and balance system is an effective way to avoid support interference in wind tunnel testing.

I made it possible with magnetic levitation of the rotating sphere by improving the position sensor system. And I adopted air-jet nozzles to rotate the sphere model suspended magnetically. Applying this method, a wind tunnel test was conducted at the wind speed of 7m/s (Reynolds number = 6.5×10^5) and rotational speed within 600 rpm. An occurrence of the drag crisis was confirmed, and drastically decreasing the Magnus force was also measured.

研究分野：実験流体力学

キーワード：回転球 マグナス効果 負のマグナス効果 支持干渉 磁力支持天秤装置

1. 研究開始当初の背景

身近な野球ボールから甚大な強風被害をもたらすフライングデブリといった回転飛翔物体の流体力学的特性については未だ十分に解明されているとは言い難い。例えば、野球ボールの縫い目と回転の関係、ゴルフボールのディンプル形状と飛距離の関係等は、正確な空力特性を得て初めて理解できるものである。また、高所からの飛散物の落下は多くは回転を伴うため、それらの空力特性は安全域の確保のためには重要な情報である。特に、フライングデブリのような複雑形状の物体の特性は殆ど計測できていないのが実情である。実際には、これらの特性は模型を何らかの機械的支持装置に取付け模型を強制的に回転させながら風洞試験で測定するか、実際に対象物体を飛翔させその飛行ルートから空力特性を評価している[1, 2]。風洞試験では、模型を支持している支持装置の影響(支持干渉)が有り、その信頼性を著しく損なう場合がある。実際にボールを飛翔させる場合は、刻一刻、ボール周りの流れがどの様に変化しているかを観測することは困難であり、推定される空力特性の値の精度は風洞実験と比べると低くなると言わざるを得ない。例えば、回転球における負のマグヌス力が現れる領域(回転数とレイノルズ数の関係による)も、風洞試験と飛翔試験では異なる結果が報告されている(図1)。

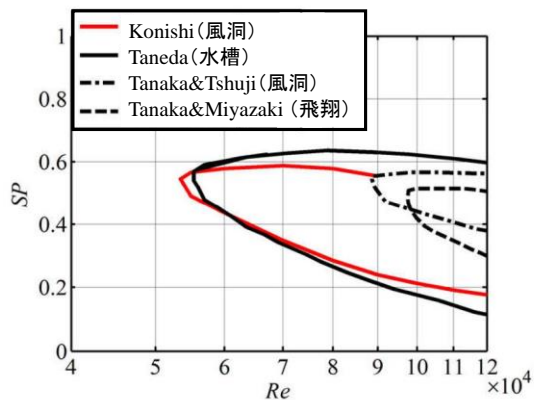


図1 試験方法(風洞・飛翔)による負のマグヌス力領域の違い[1-3]

2. 研究の目的

前節の問題を克服できる装置として、磁力支持天秤装置(Magnetic suspension and balance system, MSBS)がある。この装置は、模型内部に強力な永久磁石を固定し、測定部外部に配置したコイル(電磁石)の電流を制御することで、測定部内の磁場を制御して磁石に作用させる磁気力を調整し測定部に模型を非接触支持するとともに、その電流値から模型に働く力も同時に計測できる装置である。東北大学流体科学研究所には世界最大の1-m 磁力支持天秤装置(1-m MSBS、図2)が整備され、既に、非回転球の臨界レイノルズ数を超えて超臨界領域での球に作用する非定常力の計測を実現していた(図3)[4]。しかしながら、回転球の時期浮揚技術は未開発であった。

よって、本研究では、ゴルフボールの様な球体にディンプルが付いた回転体の流体力計測技術を獲得することによって、物体まわりの流れが変化する臨界レイノルズ数領域を含んだ流れ場で、球状回転物体の支持干渉のない空力特性を明らかにすることを目的とした。

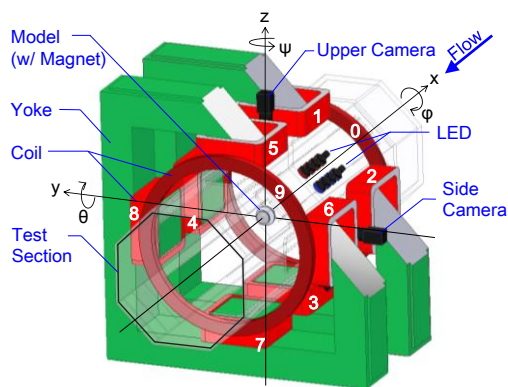


図2 1-m MSBS 概略図

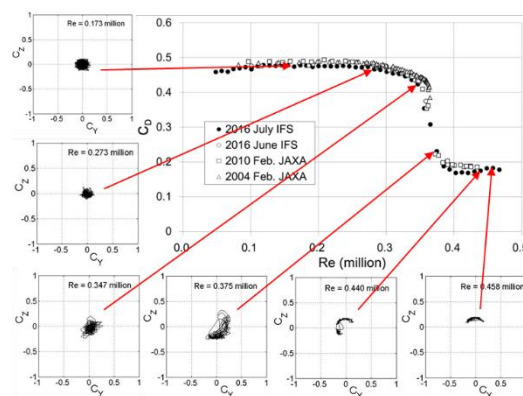


図3 レイノルズ数と抵抗係数の関係ならびに流れに垂直な方向の力の変動[4]

3. 研究の方法

1-m MSBS の既存の模型位置姿勢センサーでは、外形の僅かな変化を捉えて、その位置姿勢を

評価しているが、ゴルフボールのディンプルや野球ボールのシームの様なものが物体表面にあると、ボールが回転した時、それらの影響を受けて正しくボールの位置姿勢を評価できなくなる。こうした影響を低減させるようにボール外径を測定するセンサーへの入力に対してレンズ焦点を調整して空間的平均化を行い、同時にセンサー出力に対して時間的平均化を行ってボールの回転の位置姿勢への影響を空間的・時間的平均化により大幅に減じる方法を新たに採用することとした。この空間的・時間的平均化処理により、通常非回転物体の場合と同じ様に磁力支持する機能を付加することによって、回転物体に作用する流体力を支持干渉の無い状態で計測し、その空力特性を評価する技術を獲得する計画とした。まず第1段階では、平滑な表面の球を回転状態で磁力支持する技術を開発し、臨界レイノルズ数を含む条件で風洞実験を実施することとし、第2段階でディンプル等の平滑球から異なる表面形状をもつ回転球状物体に対して、上記の空間的・時間的平均化処理を適用して磁力支持を達成し、風洞実験を行うこととした。

4. 研究成果

第1段階では、東北大学流体科学研究所の1-m MSBS に対して1) 球の回転角を計測しないパッシブな磁気力による姿勢安定化法と2) 回転球に特化した位置姿勢計測システムを導入することで、回転する球の風洞実験法を開発した。

1) パッシブな姿勢安定化方法の概念を図4に示す。球殻部と永久磁石とをシャフトとベアリングを介して接続することで、回転の自由度をもたせ、さらに空気ジェットを回転軸に対して対称に吹き付けることで回転させる。本研究では球殻部の回転軸は図4の z 軸にとった。球の外形は姿勢角 ϕ によらず一定なので位置姿勢測定手順を簡単にするため、球殻の z 軸まわりの回転角を計測せずに、主磁石の ϕ 姿勢のみをパッシブ制御することにした。これは1-m MSBS で通常用いる制御方法とは異なる方式である。主磁石の ϕ 姿勢を 0° 付近に安定化する磁気力は図1のコイル#0と#9に一定のバイアス電流を常時付加し、 x 軸制御用磁場とは別に一定の強さの姿勢安定用磁場を作ることにより発生させる。これにより、模型の制御に必要な位置姿勢情報は、図4の x 、 y 、 z 、 θ 、 ϕ となる。

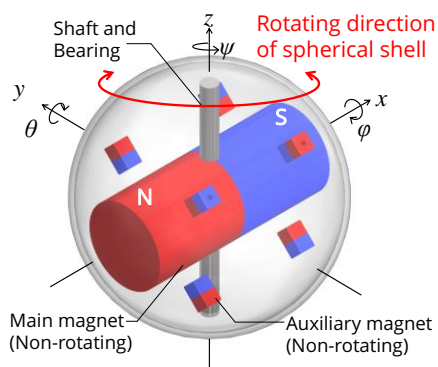


図4 回転球の磁気支持法の概念図

この模型の制御に必要な位置姿勢情報 x 、 y 、 z 、 θ 、 ϕ を測定するために、2) 回転球に特化したセンシング方法を開発した。1-mMSBS では模型表面の外形やマーカーの位置を単レンズとCharge-coupled device (CCD) line camera (ラインセンサー) を用いて光学的に測定することで、模型の位置姿勢を推定している。本装置のラインセンサーは $4.7 \mu\text{m}$ 四方の受光素子が7450個並んだものである。図5に回転球模型用に開発した位置姿勢測定センサーシステムの概略図を示す。球模型は北極付近のある緯度以上の範囲を青色に、赤道を中心とする一定幅の帯を赤色に塗装することとし、その他の領域はすべて白く塗装する。測定部上方には赤色波長を通すフィルター付きレンズを設置し、その結像面をラインセンサーで読み取る。センシングする結像面は仮のスクリーンで示してある。横にも同様に、青色波長を通すフィルター付きレンズとセンシングスクリーンが示してある。模型に適切に赤と青の光を照射すれば、上方のスクリーンには図6 a) に示す明暗が投影され、横スクリーンには図6 b) の明暗が投影される。

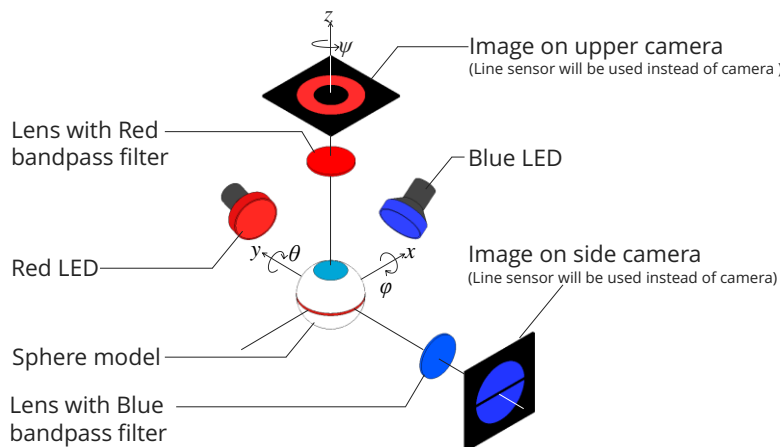


図5 回転球のための位置姿勢計測システム概略図

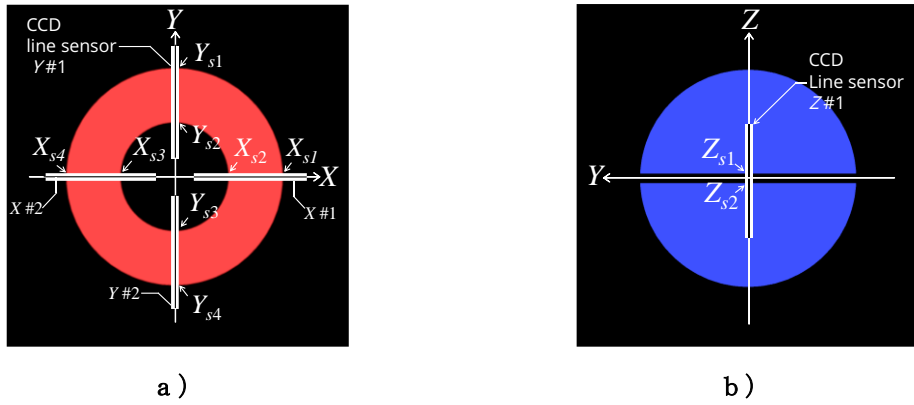


図 6 a) 上方センサー像と読み取りエッジ位置 b) 側方センサー像と読み取りエッジ位置

図 6 a) に示すように、上方センサー像に対してはラインセンサーを 4 台組み合わせて、その明暗の境界位置 X_s と Y_s を検出し、側方のスクリーン画像は図 6 b) のように 1 台のラインセンサーを用いて明暗の境界位置 Z_s を検出している。下に示す式 (11) から式 (15) のように境界位置の平均値を定義すると、MSBS 原点に対する模型位置姿勢の変位量が、その二乗項が 1 に対して無視できる程度微小な範囲において、模型の位置姿勢はラインセンサーの境界読み取り位置に対して線形関係と評価でき、式 (16) のように記述できる。

$$\frac{X_{s1} + X_{s4}}{2} \equiv \bar{X}_o \quad (11)$$

$$\frac{X_{s2} + X_{s3}}{2} \equiv \bar{X}_{in} \quad (12)$$

$$\frac{Y_{s1} + Y_{s4}}{2} \equiv \bar{Y}_o \quad (13)$$

$$\frac{Y_{s2} + Y_{s3}}{2} \equiv \bar{Y}_{in} \quad (14)$$

$$\frac{Z_{s1} + Z_{s2}}{2} \equiv \bar{Z} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{xx} & \cdots & a_{\phi} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{\phi x} & \cdots & a_{\phi\phi} \end{pmatrix}_{5 \times 5} \begin{pmatrix} \bar{X}_o \\ \bar{Y}_o \\ \bar{Z} - (\bar{Y}_{in} - \bar{Y}_o) \\ \bar{X}_{in} - \bar{X}_o \\ \bar{Y}_{in} - \bar{Y}_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ b_{\theta} \\ b_{\phi} \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここで、左辺 x 、 y 、 z の下付き添字の o は MSBS 座標系における模型重心位置を表し、 ϕ と θ は MSBS 座標系 x 、 y 各軸周りの回転角と定義した。模型の姿勢は MSBS 固定座標系にて $\phi - \theta$ の順番に回転させることで表される。式 (16) の右辺第 1 項の 5×5 行列がセンサー出力と模型位置の線形関係に基づく変換行列であり、 b は模型の位置姿勢が MSBS 原点に一致しているときの明暗の境界位置である。これら定数項は模型の位置姿勢に既知の変位を与えた時のセンサー出力との関係を確認するセンサー較正試験から取得できる。

この手法を直径約 142 mm の球模型に適用した。製作した模型を図 7 に、球を回転させるジェットノズルの配置を図 8 に示す。球殻部、主磁石と補助磁石、それら固定するための磁石ホルダー、球殻部と磁石ホルダー間に回転自由度を持たせるためのシャフト・ベアリング部からなり、組立時の球直径は 141.8 mm となる。主磁石は直径 50 mm × 長さ 120 mm の円柱で、材質は N-55 のネオジム磁石とした。補助磁石は、10 mm × 10 mm × 15 mm の角柱で直径 3.2 mm の固定用貫通穴が長手方向に設けられており、材質は N-52 のネオジム磁石である。これを合計 48 個、A6061 アルミ製磁石ホルダーに装着した。磁石ホルダーの上下には、真鍮製シャフトとセラミック製ラジアルベアリングならびにスラストベアリングを取り付けた。球殻部は磁場中で回転させるため、誘導電流が生じず靱性の高い樹脂材料であるポリカーボネートで製作した。

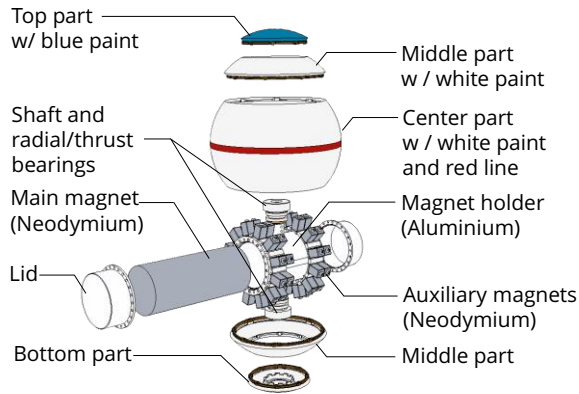


図7 回転球模型の構造

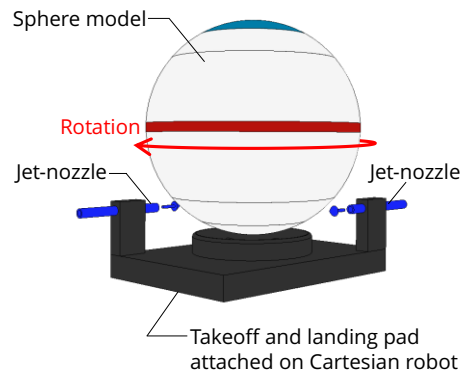


図8 球回転のためのエアジェットノズル

これら手法を用いて、球の直径に基づくレイノルズ数 6.5×10^4 にて風洞実験を行い、スピンパラメーター (SP) 0.6 以下で支持干渉のない空気力を取得した。さらに、取得した空力係数に対してローパスフィルターを施すことで、スピンパラメーターの変化に応じてマグナス力が発生し、さらに正のマグナス力が減少する様子を定性的に捉えた。その結果を図9に示す。

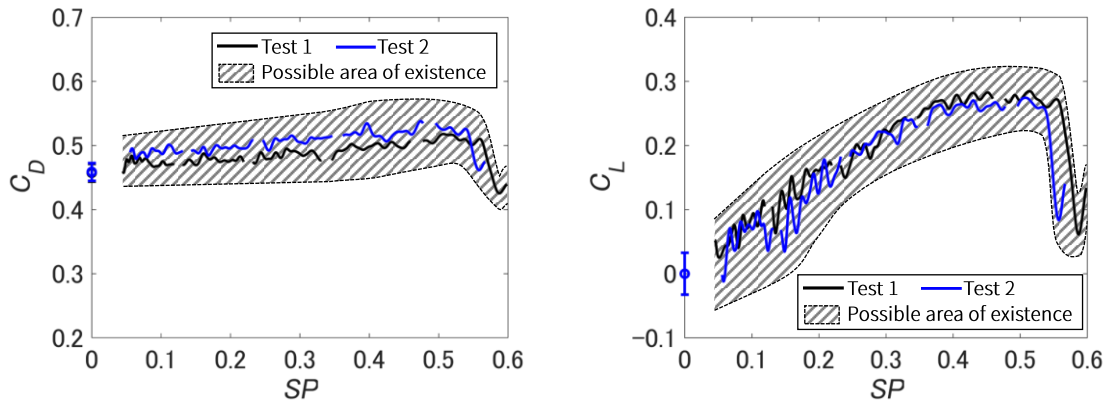


図9 SP の変化に伴う C_D と C_L の変化 ($Re = 6.5 \times 10^4$)

しかしながら、その空気力評価については、パッシブ制御による主磁石姿勢の不安定さや模型製作精度、ならびに試験回数の不足や断続的な計測等によって、定量評価に耐える精度を担保するには至らなかった。今後、これらを改善することにより、図1に示したような負のマグナス力発生領域の解明も進めることができる。

本研究では、東北大学流体科学研究所の1-m MSBS に対して球の回転角を計測しないパッシブな磁気力による姿勢安定化法と回転球に特化した位置姿勢計測システムを導入することで、回転する球の風洞実験を行った。第1段階の目標を達成したものの、第2段階の目標であるディンプル状の表面形状を持つ回転球の空力特性評価には至らなかった。今後本研究で開発した回転球の風洞実験方法をもとに、ディンプルやシーム状の形状に対しても有効な位置姿勢計測方法へと改修し、球状回転飛行物体の空力現象解明へと貢献すべく研究を進める予定である。

参考文献

1. Taneda S., 1957, Negative Magnus effect, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, 5(20), pp. 123-128.
2. 田中晃平, 福重 貴之, 宮寄武, 姫野龍太郎, 卓球ボールの空力特性, ながれ, Vol133, (2014), pp. 37-45.
3. 小西康郁, 奥泉寛之, 大野智之, 大林茂, 卓球ボールにおける負のマグナス力の測定, シンポジウム・スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, USB, 2013年11月.
4. 奥泉寛之, 澤田秀夫, 小西康郁, 大野智之, 高橋正嘉, 太田福雄, 東北大学流体科学研究所1-m 磁力支持天秤装置を用いた球の抵抗測定, 日本機械学会東北支部第52期総会・講演会, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroyuki Okuizumi, Hideo Sawada, Yasufumi Konishi, Shigeru Obayashi, Keisuke Asai
2. 発表標題 Position Sensing Method for Rotating Sphere in 1-m Magnetic Suspension and Balance System
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥泉 寛之, 澤田 秀夫, 小西 康郁, 大林 茂, 浅井 圭介
2. 発表標題 1-m磁力支持天秤装置を用いた回転する球の風洞実験法の開発
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Okuizumi, Hideo Sawada, Yasufumi Konishi, Shigeru Obayashi, Keisuke Asai
2. 発表標題 WIND TUNNEL TEST METHOD USING A 1-M MAGNETIC SUSPENSION AND BALANCE SYSTEM FOR MEASURING AERODYNAMIC FORCE ACTING ON ROTATING SPHERE
3. 学会等名 The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------