

令和元年5月28日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06065

研究課題名(和文) 低レイノルズ領域における球の後流構造に関する研究

研究課題名(英文) Experimental study on wake structure of a sphere in the low Reynolds number

研究代表者

小西 康郁 (Konishi, Yasufumi)

東北大学・流体科学研究所・学術研究員

研究者番号：20552540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：球の後流は、三次元的な複雑な構造をしており、特に実験的研究においては、模型を気流中に保持するために必ず支持部材が必要であることから、これらの部材による影響が少なからず発生することが問題とされている。そこで、本研究では支持部材の代わりに磁場を用いることで模型を支持部材なしで保持することが可能な磁力支持天秤装置を用い、風洞試験では難しい低速流れを同装置を曳航することにより実現して、流れ場をステレオPIVを用いて計測した。実験結果とCFDを比較検討し定性的に一致した流れ場であることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次元物体において円柱や角柱が鈍体の基本形状として扱われるように三次元物体においては、球が基本形状のひとつであり、理論の予測を検証するためには、球周りの流れ場を正確に求めることが求められている。また球は、卓球、野球、ゴルフなどに代表されるようにスポーツ競技においても利用されており、工学的な観点から飛翔体と見なしても重要であり、本成果で得られる結果は軌跡の精度向上、モデルデザインにおいて役立つものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The wake of a sphere has a complex flow structure. In the experimental study, there always appears some interference from the support, such as sting, strut, and wires. In this study, this problem is solved by using the Magnetic Suspension and Balance System, which has ability to hold a model in the space with magnetic forces. And to perform the qualitative low speed flow, the system is towed and a stereo PIV measurement were conducted. The result is qualitatively agreed with the result of CFD which was conducted as verification.

研究分野：風洞実験

キーワード：球 抗力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

球の後流は、三次元的な複雑な構造をしており、高レイノルズ数領域においては、らせん状の構造とヘアピン状の構造が存在することが観察されている。一方、低レイノルズ数領域においては、球の後流は、定常な剥離渦を形成しており、あるレイノルズ数を超えると2本の平行な渦が対になって下流へ伸びた構造となる。さらにレイノルズ数を増加すると全体安定性解析では、螺旋渦が予想されるのに対し、実験においては平行な渦対が観察されたり、螺旋形の定常な渦構造が見られたりする。この違いは、位相の異なる複数のモードが非線形効果によって結合するためと解釈されている。このように実験毎に結果が異なって見られるのは、主流乱れや支持干渉の影響が考えられているが未だ十分な理解に至っていない。

2. 研究の目的

球周りの流れは、流体力学の基礎的な現象としても工学的な観点から飛翔体としてみても、また球技としてスポーツの分野においても重要である。しかしながら、この軸対称な物体周りの流れを風洞試験で調べる場合、かならず支持部材が必要でありその影響がどの程度あるのかははっきりとはわかっていない。特に低レイノルズ数領域における渦構造は、理論から予測されるモードと実験で観察されるモードが異なっており、支持部材の存在により導入された攪乱によって特定のモードが励起された可能性がある。そこで、本研究では、支持干渉のない測定装置として磁気力を用いて模型を支持することが出来る世界最大の磁力支持天秤 (Magnetic Suspension and Balance System, 以下 MSBS) を用いてこの問題を克服し、理論と実験の相違点を明らかにするためのより信頼できるデータを取得することを目的とした。

3. 研究の方法

まず本実験の前に予備実験として、気流の質と球模型の表面粗さが十分に滑らかであることを示すために球の抗力が急激に低下する臨界レイノルズ数を Achenbach の結果ならびに澤田らによって行われた 60-cm MSBS による球の抗力計測結果と比較を行った。本条件は、臨界レイノルズ数前後で大きく抗力が変化するため制御に十分な応答が求められ MSBS の制御の上では最も難しい。つまり、本条件で十分なデータが取得できれば、今回の主目的である低レイノルズ数での制御は何ら問題が生じない。また模型の表面精度も保証されることになる。

低レイノルズ数の実験は、1-m MSBS 装置に備わっている磁気回路を気流軸方向に移動させるための駆動機構を用いて曳航試験とすることで行った。本機構は、リニアガイドにより磁気回路を支持しており、ボールねじと減速機付サーボモータによって直線駆動し、サーボモータのエンコーダを使用して1.3トンの磁気回路を任意の位置に移動させることができる(図1)。この駆動機構の移動最高速度は、50mm/s であり、ストロークは800mm である。MSBS 測定部を風洞から切り離し、上流端、下流端を端板で塞ぐことによって測定部を密閉空間とし、この機構により球模型を曳航することによって目的とする低レイノルズ数を達成した。しかしながら、この低レイノルズ数で発生する抗力・揚力は小さいため MSBS の1つのメリットである力計測は残念ながら期待できない。そこで、本研究では、非接触で速度場の計測が可能な PIV 装置を用いて流れ場を計測し、臨界レイノルズ数の特定および渦放出パターンの同定を行うことを目的とした。

MSBS でセンサー系として利用している光源は PIV で用いる Nd:YAG レーザーの緑の波長と干渉しないよう赤および青の光源を用いており、これまでも2次元 PIV については、60-cm MSBS において多数実績がある。本研究ではこれを発展させてステレオ PIV にて計測を行った。

4. 研究成果

1-m MSBS を用い支持干渉の無い状態での保持性能・球模型の表面粗さを確認するために球の抗力とレイノルズ数の関係を計測した。測定値は亜臨界域では0.48前後、超臨界域では0.19程度となり、JAXA の試験結果とほぼ同じであった(図2)。また、同時に計測した気流に直角方向の流体力変化の様子も過去に JAXA の60cm で得られた結果と同等であった。また、計測された揚力・横力方向の力の変化にも、臨界レイノルズ数付近で急激に大きくなり、完全に乱流に

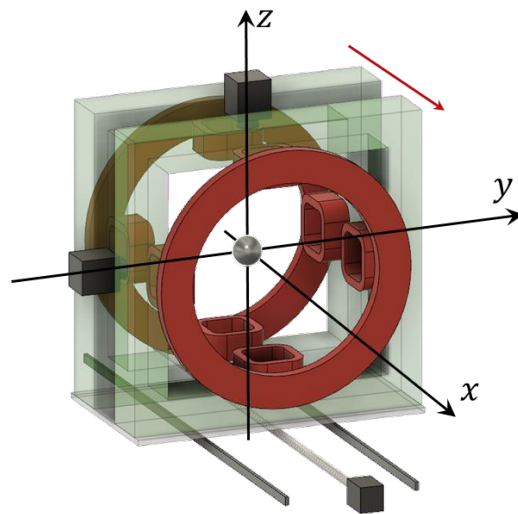


図1. 磁力支持天秤と曳航装置

遷移すると落ち着くことも観察された。この変動は、気流軸周りに回転しており、高レイノルズ数領域において観察されているらせん状の構造に対応していると考えられる。また、この現象は、JAXA の 60-cm MSBS でも観察されており、より詳細な検証を今後行う必要がある。

本研究で目的としている低レイノルズ数領域では、磁力支持天秤装置に備わっている天秤機能では、浮遊に要する時気力に対し、空気力による磁気力が非常に小さくなるため、空気力を計測することは困難である。そこで、模型内に圧力センサーを導入し無線伝送にて背圧を計測するシステムを 1-m MSBS に導入することを進めた。本センサーの確認試験として、正確な背圧が計測しやすい流れ方向に軸を持つ二次元円柱の試験を実施し、力計測から得られる細長比の変化に伴う傾向と、背圧計測システムから得られる傾向が一致し、システムが正常に動作することが確認できた。

磁力支持天秤装置に備わる曳航機能の性能を評価するために磁気回路ならびに模型の運動に与える影響を評価した。曳航に用いる PID 制御のパラメータを調整することで、模型の振動は $20\ \mu\text{m}$ 以下にまで抑えることが可能となった(図3)。この変動の大きさは、直径 150mm の模型に対して 0.013% の変位量であり、曳航速度 32mm/s、レイノルズ数で約 320 に対しては 0.06% であり、一般的な風洞試験よりも変動が小さく曳航試験の優位性が確認された。一方で振動を抑制するのに有する時間が長くなったことから、計測時間は 2 秒程度しか取れないことがわかり、定常状態を観測するには少し短い可能性が判明した。

磁力支持天秤における 2 次元 PIV 計測は、円柱模型に対して JAXA にてすでに実施されており、今回実施する球模型に対するステレオ PIV 計測に関してもなんら問題なく計測できるものと想定していたが、模型の構造上の問題が発生した。

1-m MSBS では、模型表面を白色に塗装し模型のエッジならびに模型中央に描かれた 5mm 幅程度の黒帯を組み合わせたラインセンサーを用いて計測することによって検出している。球模型では、外形が円となることから、この白色塗装面が下流側から見える形となる。このため、今回試みた下流にカメラを設置した場合、シート光により照らされた白色塗装面がカメラ側に移り込み模型下流の速度場が検出できないことがわかった。この対策として、模型の塗装の白黒を反転させ、制御プログラムを変更することにより、大幅に模型の映り込みを抑えることができステレオ計測が可能となった。レイノルズ数 300 において計測された下流断面の速度場から上向きに吹き上げる渦対が観察された(図4)。

PIV 計測結果の検証のため CFD による解析を実施した。CFD の解析ソフトウェアは、OpenFOAM を用い、精度検証のためにまず $Re=100$ から SimpleFOAM による定常計算を実施した。この結果から得られる抗力係数を比較したところ、定常解が得られるレイ

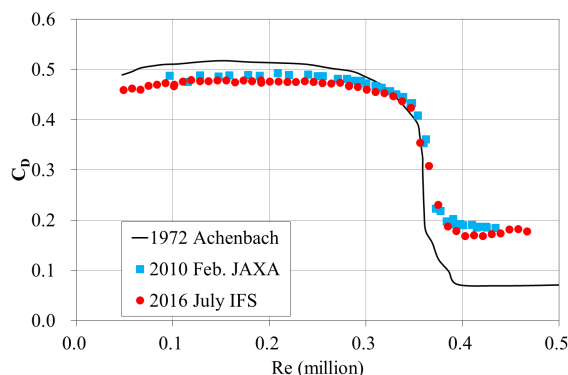


図2．レイノルズ数と球の抗力係数の関係

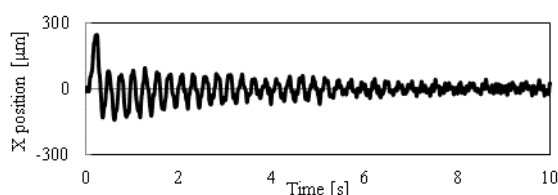


図3．曳航中の模型の振動減衰の様子

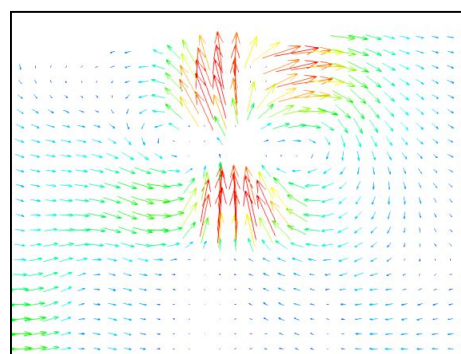


図4．PIV による計測された球後流に見られる渦構造

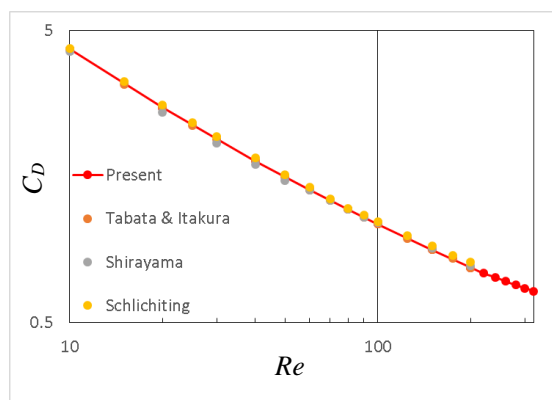


図5．本解析に用いた CFD と実験結果の比較

ノルズ数範囲において、過去の実験結果、他の CFD から得られている結果と良い一致を示した (図5)。PIV 計測の結果と比較するため実験条件に合わせてレイノルズ数 300 において PimpleFOAM による非定常計算を実施した。この結果、実験結果と同じく渦対による吹き上げが観察され定性的には一致する結果が得られた (図6)。

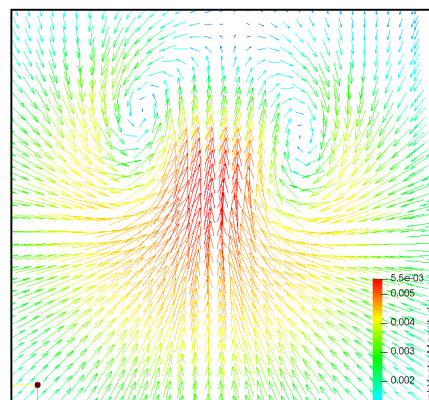


図6 . CFD による球後流の渦構造

定性的には実験と CFD の一致が見られえたが、実験回数が限られていたため未だ十分な結果とは言い難い。また、曳航可能な計測時間の問題から定常解と見なせるかどうか、模型位置検出に用いる光源により模型が熱せられることによる熱対流や酸素が磁性を持つことから低速時には磁場によって誘起される流れ場も少なからず存在すると考えられ、これらの検証を今後行う必要があると考えている。これらの問題については連成問題が取り扱える COMSOL を別途導入し、現在、磁場の解析を進めている。

参考文献

- Natrajan, R. & Acrivos, A., The stability of the steady flow past spheres and disks, J. Fluid Mech., 254, pp.323-344,1993.
 木谷勝, 石川仁, 望月修, 3 次元ブラフ・ボディエアロダイナミクス, 日本風工学研究会誌, 83, pp.11-18, 2000.
 Achenbach, E, Vortex shedding from spheres, J. Fluid Mech. , 62(2), pp.209-221,1974.
 Sawada, H., & Suda, S., Study on aerodynamic force acting on a sphere with and without boundary layer trips around the critical Reynolds number with a magnetic suspension and balance system, Experiments in Fluids 50 (2) , pp. 271-284, 2011.
 Higuchi, S., Sawada, H. & Kato H., Sting-free measurements on a magnetically supported right circular cylinder aligned with the free stream, J. Fluid mech., 596, pp.49-72,2008.

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 6 件)

H. Okuizumi, H. Nagaike, Y. Konishi, S. Obayashi, Introduction of 1-m MSBS in Tohoku University, new device for aerodynamic measurements of the sports tools, The 12th Conference of the International Sports Engineering Association, 2018.

H. Okuizumi, H. Sawada, Y. Konishi, The Measurement of Sphere Drag using 1-m MSBS, Forteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017.

S. Oyama, H Nagaike, Y. Konishi, H. Sawada, H. Okuizumi, S. Obayashi, Low Speed Towing Test Using 1-m Magnetic Suspension and Balance System, Forteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017.

奥泉寛之、澤田秀夫、小西康郁、大野智之、高橋正、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、機会学会東北支部 第 52 期総会・講習会、2017 年。

佐藤慶一郎、奥泉寛之、澤田秀夫、小西康郁、野々村拓、浅井圭介、1m 磁力支持天秤装置による円柱の細長比に関する空力特性の研究、日本航空宇宙学会北部支部 2017 年講演会、2017 年。

K. Sato, H. Okuizumi, Y. Konishi, K Asai, H Sawada, An Experimental Study on the Effect of Fineness Ratio on the Aerodynamic Drag of Cylindrical Bodies using a MSBS, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016.

〔その他〕

ホームページ

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/windtunnel/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：奥泉 寛之

ローマ字氏名：Hiroyuki Okuizumi

所属研究機関名：東北大学

部局名：流体科学研究所

職名：技術専門職員

研究者番号（8桁）：60647957

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。