

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870065

研究課題名(和文)負のマグナス力の発生と境界層遷移との関係の解明

研究課題名(英文)experimental investigation on the negative Magnus force

研究代表者

小西 康郁 (KONISHI, Yasufumi)

東北大学・流体科学研究所・研究支援者

研究者番号：20552540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：球技においてマグナス力は、飛翔中のボールを曲げる上で大きな役割を果たしている。真球の場合、ある特定のレイノルズ数において、通常の向きとは逆向きに働く負のマグナス力の存在が報告されている。球技の中で真球に近いものとして卓球がある。そこで本研究においては、卓球ボールを用いて風洞試験を実施し、卓球ボールにおける負のマグナス力の発生領域を明確にした。また飛翔試験の結果、風洞試験の結果が再現されず、より速い速度域において負のマグナス力が発生することがわかった。これは、卓球ボールのような軽い球の場合、空気抵抗による減速が大きく影響するためと思われる。

研究成果の概要(英文)：The Magnus force plays important role in the ball games. There are some reports that this Magnus force tends to become opposite at some Reynolds number. It is called negative Magnus force. To identify the mechanism of this phenomenon, wind tunnel test and flying test was conducted. The region of negative Magnus force is clarified through the wind tunnel test using a table tennis ball. And also it is observed that the negative Magnus force does not appear in the actual flying table tennis ball under the condition of where it appeared on the wind tunnel test. It seems that the deceleration affects the transition phenomena.

研究分野：流体力学

キーワード：球 マグナス力

1. 研究開始当初の背景

野球、サッカー、ゴルフなど球技は多岐に渡っており、球技によりボールの直径や表面の縫い目などが違うため、様々な不思議な軌跡を伴う球種が存在し、実験や数値計算が行われてきている。また球は、基本的な三次元形状であることから物理的な側面でも古くから研究がなされており、ドラッグクライシスやマグナス力の発生は、球に働く不思議な力の2大要因となっている。特に真球の場合、特定のレイノルズ数において、通常マグナス力とは逆向きに揚力が発生する負のマグナス力の存在が報告されている。しかしながらその発生領域については大きなばらつきがある。これらの試験結果の相違は、負のマグナス力の発生が、球表面の境界層遷移と密接に関係しており、主流乱れの大きさや球の表面粗さが大きく影響するためと考えられるが、実験結果に乏しく、十分、現象を理解できていたとは言い難い。

真球を用いた球技として卓球が存在する。Weiらの実測によるデータに寄れば、フォアハンドスマッシュにおける球速はTanedaが示した負のマグナス力が発生する範囲に含まれており、負のマグナス力を利用した球種が存在し得る。

2. 研究の目的

負のマグナス力の発生領域を明らかにし、これまで定性的に述べられてきた境界層遷移と負のマグナス力の関係を定量的に評価し、負のマグナス力の発生機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 風洞試験

実験は、東北大学流体科学研究所所有の小型低乱風洞にて行った。測定部は密閉型とし、このとき測定部入口断面は、正八角形対辺距離290mmである。主流乱れは、約0.2%であり乱れによる遷移への影響はないと考えられる。球モデルには、44mmの卓球ボールを利用し、図1のように密閉胴を囲うように組まれたアルミフレームにブラシレスDCモーターを取り付け、ピアノ線により風洞中心につりさ

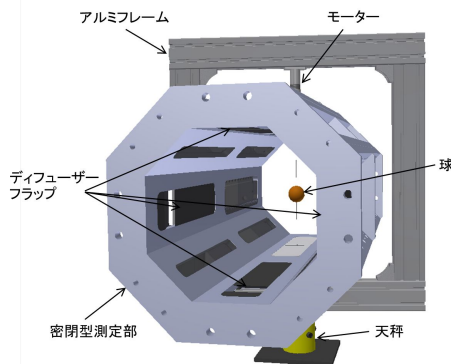


図1. 風洞試験装置

げた。本実験で使用したピアノ線は、直径0.55mmであり、約300Nの張力をかけて使用した。このフレームを3分力天秤に取り付けることにより、球に働く揚力および抗力を計測した。このため、揚力・抗力について、ピアノ線の抵抗も含まれるが、これは、別途、ピアノ線のみでの計測を行い揚力係数、抗力係数を求めてから、気流に曝される投影面積分を計測結果から差し引くことによって、球のみに働く力とした。また、PIVを用いて球後流の流れ場を測定した。

(2) 飛翔試験

風洞試験においては、一様な流れの中に設置された物体に働く流体力を測定している。一方、飛翔中のボールは空気抵抗により減速しながら進行する。卓球ボールは非常に軽く作られているため(約4g)この空気抵抗により他の球技に比べ大きく減速する。この影響を確認するため飛翔試験を行う。ここでは、2ローター式の射出マシンを作成し、飛翔経路ならびに飛翔中の球周りの流れ場を時系列PIVを用いて測定した。

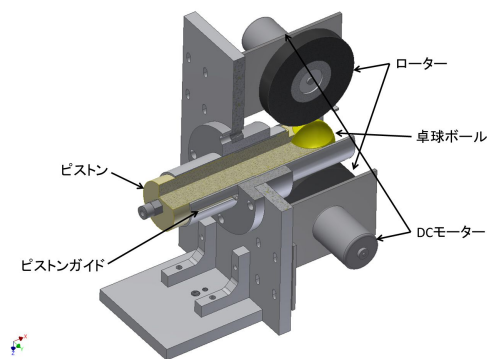


図2. 2ローター式射出マシン

4. 研究成果

(1) 風洞試験

図3に風洞試験に得られた各レイノルズ数(Re)における回転数と揚力の関係を示す。ここで、回転数は、周速度を風速で割ることにより無次元化しスピンパラメータ(SP)として示している。 SP が小さい場合、 Re 数に依存せず一本の直線の上であり、このときの傾き dCL/dSP は、約1.0である。負のマグナス力は、 $Re=5.5 \times 10^4$ 以上で見られ、急激な CL の減少ののち、緩やかに回復していくことがわかる。またこのとき、再び Re 数に依存せずほぼ同一の曲線に乗るようになる。このような揚力の急激な落ち込みは抵抗にも関係しており、揚力の減少と同時に抵抗も減少する。このような抵抗の急激な落ち込みは、無回転球の抗力係数に見られるドラッグクライシスによく似ており、球表面の境界層遷移が大きく関係していることを示唆している。

図4にPIV計測により得られた平均速度場

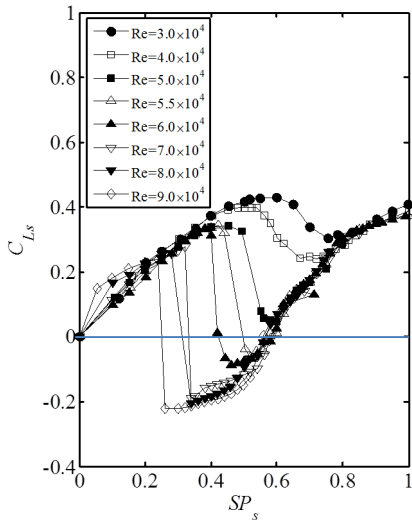


図 3 . 揚力と回転数の関係

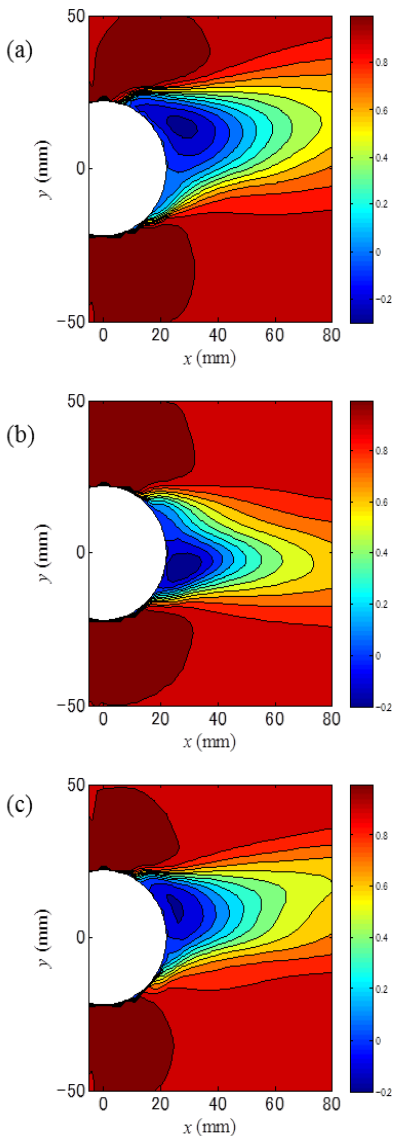


図 4 . 風洞試験における PIV 計測結果 .

(a) $SP = 0.4$, (b) $SP = 0.55$, (c) $SP = 0.75$,
 $Re = 6.0 \times 10^4$

を示す . 揚力が負となる前後においては ,

後流は図中上側に傾いているのに対し , 揚力が負となる領域においては , 後流が下向きとなり揚力の向きと後流の向きが対応していることがわかる . これらの結果から , 負のマグナス力が発生する領域を Re 数と SP のマップ上に示すと図 5 のようになる . この結果は , 過去に行われた種子田の実験結果と良く一致している . また図中に示した水色の領域は , 卓球におけるスマッシュが打たれる領域であり , 卓球ゲームにおいて同様の現象が起きている可能性を示唆している .

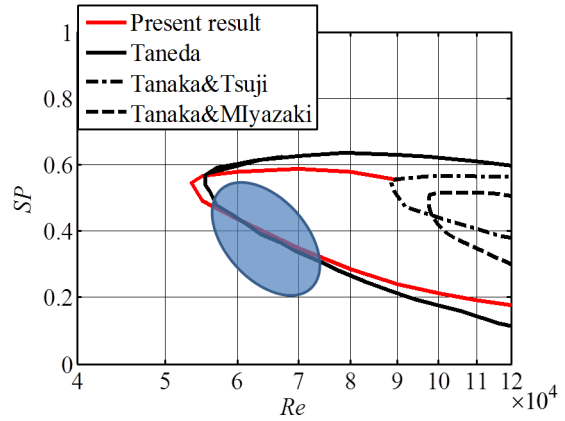


図 5 . 負のマグナス力の発生領域 . 水色の領域は卓球のスマッシュの領域を示す .

(2) 飛翔試験

ハイスピードカメラを用いて撮影した画像から Hough 変換⁽⁷⁾を利用することにより予測される半径を持つ円を抽出し , 求めた円の中心を球の位置として軌跡を求めた . また , 回転数は , ボールに付与したマーカー (T の字) を ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム⁽⁸⁾を用いて検出した . この結果 , 飛翔中の球は , 回転数は一定のまま飛翔していることがわかった . 飛翔試験から直接 , 揚力・抗力を算出するのは精度上難しいと考えたため , ここでは風洞試験から得られている揚力・抗力を用いて初期条件を合わせて軌跡をシミュレーションし , 飛翔試験結果と比較した . この結果 , 正のマグナス力が発生している領域においては , ほぼ一致した結果が得られたが , 風洞試験において負のマグナス力の発生する領域において

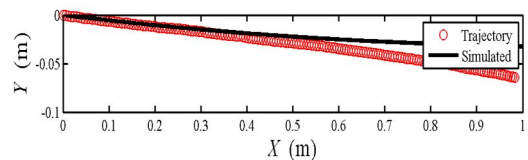


図 6 . 飛翔軌跡と風洞試験結果に基づくシミュレーションの比較 . $(Re , SP) = (8.5 \times 10^4 , 0.42)$.

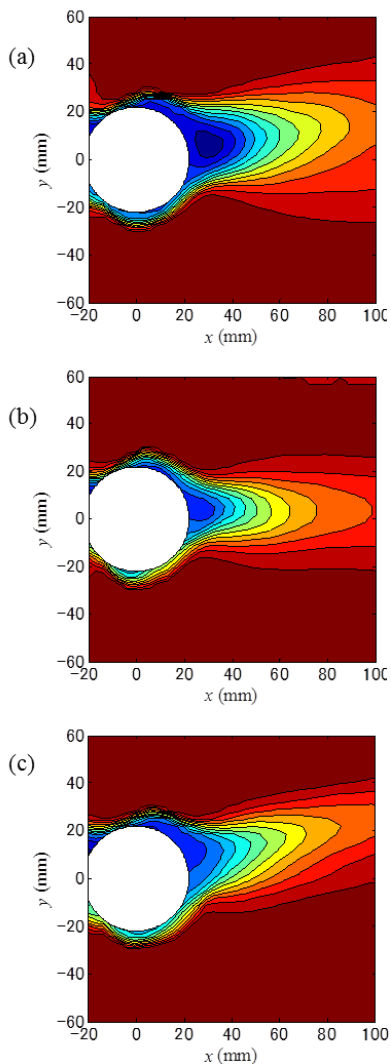


図7．飛翔試験における PIV 結果

(a) $SP = 0.4$, (b) $SP = 0.65$, (c) $SP = 0.86$,
 $Re = 6.5 \times 10^4$

は、図6に示すように一致が見られなかった。そこで、飛翔中の球の周りの流れを調べるために飛翔中の球に対しても PIV 計測を行った。図7は飛翔中の球周りの平均速度場である。風洞試験において負のマグヌス力が発生する領域において、後流の向きはほぼ水平となっており揚力は減少するものの負にまでは至っていない。

このことは、飛翔試験と風洞試験において負のマグヌス力の発生、言い換えれば球表面の流れの遷移に大きな違いがあることを示唆している。

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)

[学会発表](計 6 件)

Yasufumi Konishi, Hiroyuki Okuizumi, Tomoyuki Ohno, PIV measurement of flying table tennis ball, International Sports Engineering Association 2016), 2016 年 7 月

11 日～13 日, Delft, the Netherlands.

小西康郁, 奥泉寛之, 大野智之, 飛翔中の卓球ボール周りの PIV, シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015, 2015 年 10 月 31 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市)。

小西康郁, 奥泉寛之, 大野智之, 卓球ボールの空力特性の風洞試験と飛翔試験の比較, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2014, 2014 年 10 月 23 日, アオーレ長岡 (新潟県新潟市)。

Yasufumi Konishi, Hiroyuki Okuizumi, Tomoyuki Ohno, PIV measurement of the rotating sphere under the condition of a negative Magnus force, The 16th International Symposium on Flow Visualization, 2014, Jun. 26, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan.

奥泉寛之, 小西康郁, 太田福雄, 大林茂, 回転三次元角柱の空力計測, 機械学会東北支部第 49 期秋季講演会, 2013 年 9 月 20 日, 岩手大学工学部 (岩手県盛岡市)。

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ヌス力の測定, スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2013, 2013 年 11 月 3 日, 工学院大学新宿キャンパス (東京都新宿区)。

[その他]

ホームページ

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

6．研究組織

(1) 研究代表者

小西 康郁 (KONISHI, YASUFUMI)

東北大学・流体科学研究所・研究支援者

研究者番号: 20552540