

卓球ボールにおける負のマグナス力の測定

小西 康郁^{*1}, 奥泉 寛之, 大野 智之, 大林 茂

The Measurement of the Negative Magnus Force on a Table Tennis Ball

Yasufumi Konishi^{*1}, Hiroyuki Okuizumi, Tomoyuki Ohno, Shigeru Obayashi

^{*1} Tohoku Univ. Inst. of Fluid Mechanics
Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577, Japan

The negative Magnus force was observed on a sphere at the moderate Reynolds number and the moderate spin rate which is defined by the ratio of the circumferential velocity to the free stream velocity. This region matches the forehand smash in a table tennis game according to the result of Taneda's experiments. To confirm the possibility of the existence of this negative Magnus force on the table tennis game, the wind tunnel test was conducted. As the result, it was observed at Reynolds numbers higher than 5.35×10^4 . And we also provide a simple approximation of the lift and drag force to simulate a motion under the condition affecting a negative Magnus force.

Key Words : Magnus force, Table tennis, Force measurement, Rotating sphere

1. 緒 言

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, 通常の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⁽¹⁻⁵⁾. この現象を最初に報告したのは, Maccoll⁽¹⁾による風洞実験であり, 近年では数値シミュレーションによっても Muto ら⁽²⁾によって負のマグナス力の発生が確認され, 球表面の圧力分布および後流の渦構造から現象の解明が試みられている. Taneda⁽³⁾は, 水槽を用いた実験を通じて, マグナス力が負となる領域を示し, 可視化を用いて上記の内容を説明した. 同様に Briggs⁽⁴⁾や Davies ら⁽⁵⁾も負のマグナス力が表れることを実験的に示しているが, その発生領域についてはばらつきがある. Tanaka ら⁽⁶⁾は, 真球と扁平球に対して風洞試験を行いレイノルズ数とスピンパラメータの関係を求めているが, その領域は Tanada のものより高 Re 数域に寄っており, 一致していない. 高見ら⁽⁷⁾は, ピッチングマシンを用いて回転を与えたボールの飛翔より, 負のマグナス力が発生する領域を求めているが, この場合も負のマグナス力が表れる領域は Taneda のものよりも高 Re 数側であるとしている. 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るとは言い難い.

真球を用いた球技として卓球が存在する. 卓球ボールは, 半球を接合するためのシームが内側に形成されているものの公式球として利用される 3 スターボールにおいては, 直径 40mm に対し, 真球度は, 0.35mm 以下 (平均で 0.25mm 以下) であり外観上は真球と考えられる. ここで真球度は, 最大直径と最小直径の差で定義される. また, ボールの規定変更により, 今後はシームレスのプラスチック球となることから, さらに重量バランスも含め真球に近づくものと思われる. 卓球ボールに関する研究は, 2000 年前後に公式球の直径が 38mm から 40mm へ変更されるに辺り盛んにおこなわれ, 直径の変化に伴う球速と回転数の関

^{*1} 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)
E-mail: konishi@edge.ifs.tohoku.ac.jp

係や球の軌跡のシミュレーションなど多方面から検討されている⁽⁸⁾。Wei ら⁽⁹⁾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 21.7~27.4m/s、このときの回転数は、49.5~84.3 回転/s である。これは、 Re 数 $5.8 \times 10^4 \sim 7.3 \times 10^4$ 、回転数を表す無次元量スピンパラメータで $SP=0.23 \sim 0.49$ に相当する。この領域は、先に述べた Taneda が示した負のマグヌス力が発生する範囲に含まれており、負のマグヌス力をうまく利用している可能性がある。

そこで本実験では、実際に卓球ボールを用いて力計測を行い卓球競技において負のマグヌス力が発生する可能性があるか調べた。

2. 実験装置および方法

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⁽¹⁰⁾。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。密閉胴内の圧力を大気圧に出来るだけ近くするために、密閉型測定部の後方側測定窓 4 辺にディフューザーフラップを取り付けてある。この状態での主流乱れは、約 0.2% であった。球模型は、鳴尾ら⁽¹¹⁾がゴルフボールの抵抗を測定した装置を参考に図 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（日章電機 LMC-3501-50N）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する。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。

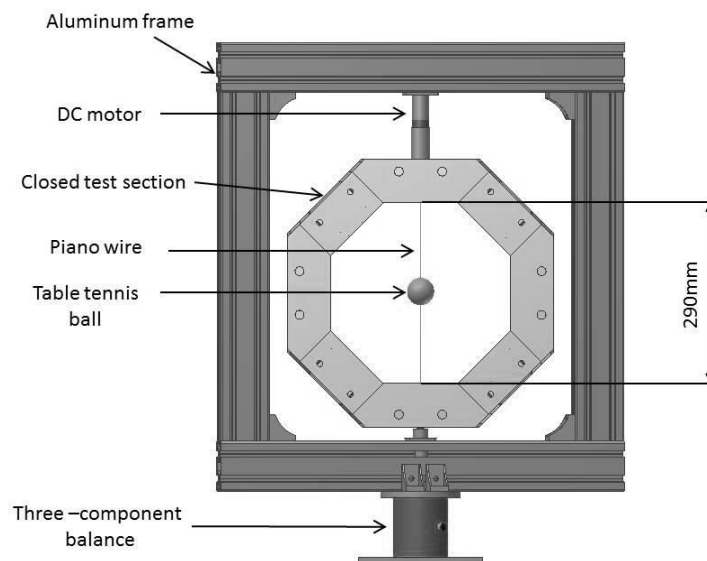


Fig. 1 Experimental Setup.

使用した卓球ボールは、公式球（40mm 球）およびラージボール（44mm 球）である。公式球は、国際ルールに基づき直径 40mm、重量 2.67g~2.77g、色は白またはオレンジと規定されている。本実験では、3 スターのものを利用した。ラージボールは、1988 年に日本で発案され日本が先導して行われている競技に用いる球であり、基本直径 44mm、基本重量 2.20g ~ 2.40g、色がオレンジのみと規定されている。本実験で用いたラージボールは、日本卓球協会使用指定球としてスリースターに選定されているものを利用した。卓球ボールは薄肉の中空であり、ピアノ線との接触面積が小さくそのままでは固定が難しいため、球に回転を与え重心を出した後、外径 1.5mm 内径 0.9mm のアルミパイプを通し、球の上面下面でエポキシ系の接着剤で固定した。その後、アルミパイプ内にピアノ線を通し瞬間接着剤で固定した。

座標系は、原点を球の原点として右手系に取り、流れ方向に x 、水平面内で x 軸に対し直角方向に y 、球の回転軸方向に直角な方向に z とする。

3. 実験結果および考察

使用した天秤は、市販の天秤であり、予想されるマグヌス力に対して測定レンジが最大 50N と大きいため、0.5%FS の天秤精度では不十分である。そのため本実験においては、天秤を自作したものとして考え、測定荷重範囲内において新たに較正試験を行い天秤の精度を決定した。較正試験は、ピアノ線の球固定位置から水平になるように細い糸を引き出し、滑車を通じて垂らした秤皿に分銅をのせることによって行った。過去の件研究における実験結果⁽¹⁻⁶⁾を参考にラージボールに働く抗力係数を $C_{D_s}=0.6$ と仮定すると計測した $Re_s=9.0 \times 10^4$ における力は、0.5N 程度であることから、最大荷重は、50g とした。結果は表 1 に示したとおりであり、本天秤を用いても 1g までの荷重変化は捉えられることがわかった。

Table 1 Accuracy of the balance between 0 to 50g

axis	Non linearity		Hysteresis		Precision Limit	
	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
F_x	1.6	0.78	0.4	0.22	2.0	0.99
F_y	1.4	0.73	0.6	0.31	2.1	1.04

球の揚力測定に際し、球を固定するピアノ線も流れにさらされることから計測した揚力、抗力にはピアノ線分も含まれる。このため、ピアノ線のみを計測を行った。図 2(a)(b)はそれぞれ、横軸にピアノ線の直径に基づくスピンパラメータ SP_c と縦軸に抗力係数 C_{D_c} および揚力係数 C_{L_c} を示している。流入一様流速 U と公式球の直径 ($D_s=40\text{mm}$) または、ラージボールの直径 ($D_s=44\text{mm}$) に基づく Re_s 数で考えた場合、それぞれ 5.5×10^4 および 6×10^4 の計測時に相当する。ピアノ線の直径 $D_c=0.55\text{mm}$ に基づく Re_c 数では、約 770 となる。ここでスピンパラメータ SP は、周速度と主流速度の比であり、

$$SP = \frac{V}{U} = \frac{r\omega}{U} \quad (1)$$

で定義される無次元角速度である。ここで、 V は周速度、 r は球の半径、 ω は回転角速度である。また、揚力係数ならびに抗力係数は、次式のように定義した。

$$C_L = \frac{F_y}{1/2\rho U^2 S} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{F_x}{1/2\rho U^2 S} \quad (3)$$

ここで、 S は、投影面積であり、 F_x, F_y はそれぞれ添え字方向の力である。球とピアノ線を区別するために各パラメータにそれぞれ添え字 s (sphere), c (cylinder) を付けることとする。

図 2 には、天秤の精度に基づくエラーバーも示してあるが、ピアノ線の回転に伴い揚力係数、抵抗係数が変化する傾向はみられるもののすべて測定誤差内であり、本計測系では判断できない。これは、測定したすべての Re_c 数範囲において同様の傾向を示した。また、計測した各 Re_c 数における平均の抵抗係数と Wieselsberger による実測値に基づく円柱の抵抗係数は、ほぼ同じ値を示したため、本実験においては、ピアノ線の抵抗として Wieselsberger の値を用いることとした。揚力に関しては、すべての Re_c 数においてほぼ $C_{L_c}=0$ であったことから、本実験においては、0 として扱った。

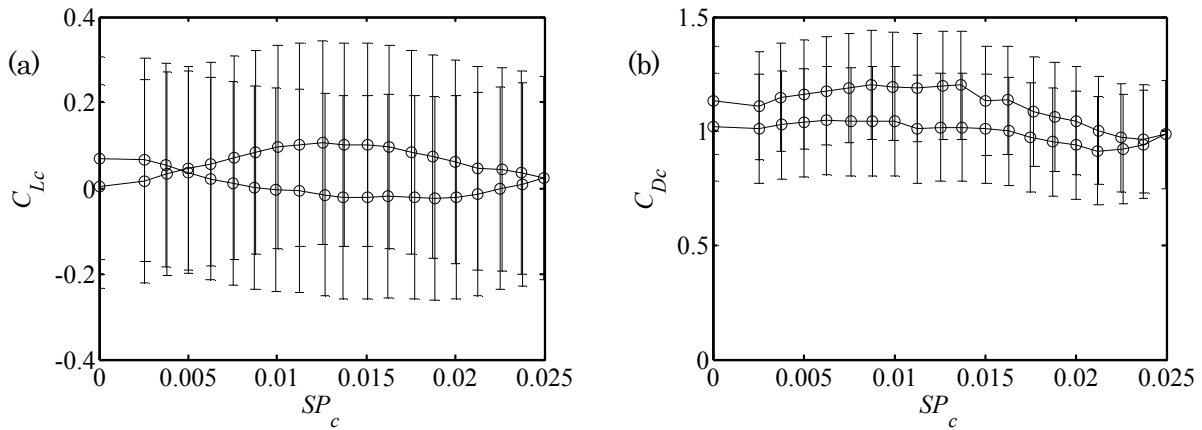


Fig. 2 Coefficient of Lift and Drag of the piano wire against Spin parameter.
(a) Lift, (b) Drag.

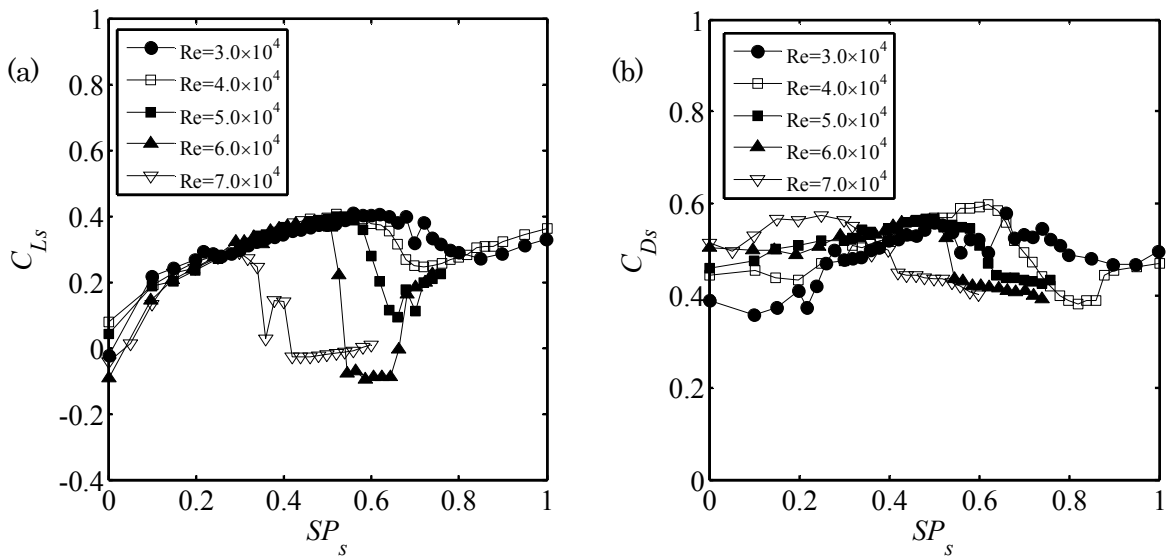


Fig. 3 Coefficient of Lift and Drag of the table tennis ball ($D_s=40\text{mm}$) against Spin parameter.
(a) Lift, (b) Drag.

図3に公式球における計測した各 Re_s 数における SP_s と C_{L_s} , C_{D_s} の関係を示す. 計測は, Re_s 数を一定とし, スピンパラメータの値を増加させながら行った. 揚力係数について見ると, SP_s が小さい場合, Re_s 数に依存せず一本の直線にのることがわかる. さらにスピンパラメータを増加させると, C_{L_s} は急激に減少し, ある Re_s 数以上では, 負の揚力が発生することがわかる. 抗力係数について見ると, SP_s が小さい領域では, 測定精度の問題で値のばらつきが大きくでているが, ある SP_s において, 揚力係数同様に抵抗が減少する傾向が見られる.

より精度よく高 Re 数域まで計測するためにラージボールを用いて同様に計測を行った. 図4は, 図3と同様に SP_s と C_{L_s} , C_{D_s} を示したものである. 揚力係数をみると, 公式球と同様に SP_s が小さい場合, Re_s 数に依存せず一本の直線にのっており, このときの傾き dC_{L_s}/dSP_s は, 約 1.0 である. 負のマグヌス力は, $Re_s=5.5 \times 10^4$ 以上で見られ, 急激な C_{L_s} 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_s 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. 抗力係数に関して Re_s 数に応じて急激な落ち込みをみせる SP_s の値が異なるのみで, SP_s の小さな領域では, 傾き $dC_{L_s}/dSP_s=0.154$ の一本の直線になっており, 急激な落ち込み後の曲線も一つの曲線となっている. このような揚力係数, 抗力係数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.

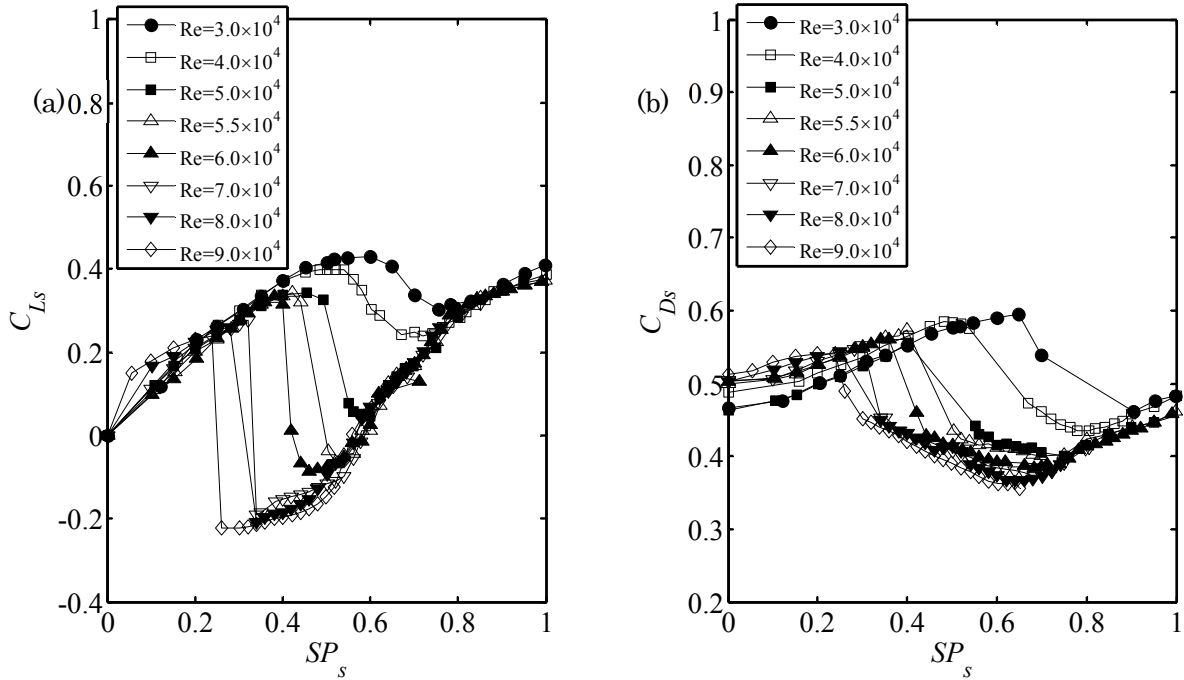


Fig. 4 Coefficient of Lift and Drag of the table tennis ball ($D_s=44\text{mm}$) against Spin parameter.
(a) Lift, (b) Drag.

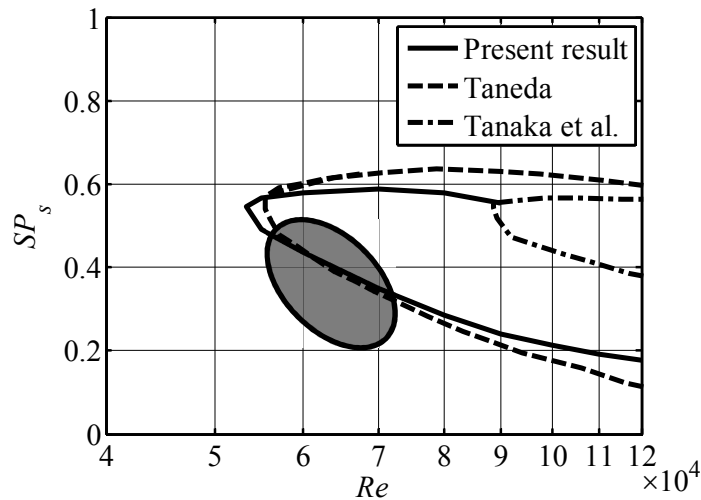


Fig. 5 Region of the negative Magnus force.
Gray circle denoted expected region in table tennis games.⁽⁹⁾

本実験結果で得られた負のマグナス力の表れる領域を横軸に Re_s 数, 縦軸にスピンパラメータ SP_s として示したのが図5である. 線上で揚力がゼロとなることを示しており, この線で囲まれた領域の内側では, 負のマグナス力となる. 図中には, Taneda⁽³⁾および Tanaka ら⁽⁶⁾によって求められた領域と Wei ら⁽⁹⁾の計測した卓球競技におけるフォアハンドスマッシュの結果から予測される範囲を合わせて示してある. 本実験結果から得られた臨界 Re_s 数は, 約 5.35×10^4 であり, この値は Taneda の結果とほぼ一致しており, また, Wei らのデータから予測される値も含まれることから, 卓球競技において負のマグナス力が何らかの役割を果たしていると考えられる.

回転球上の境界層は, 球表面が回転に伴い引きずられることから, 球の周速度にも関係している. そこ

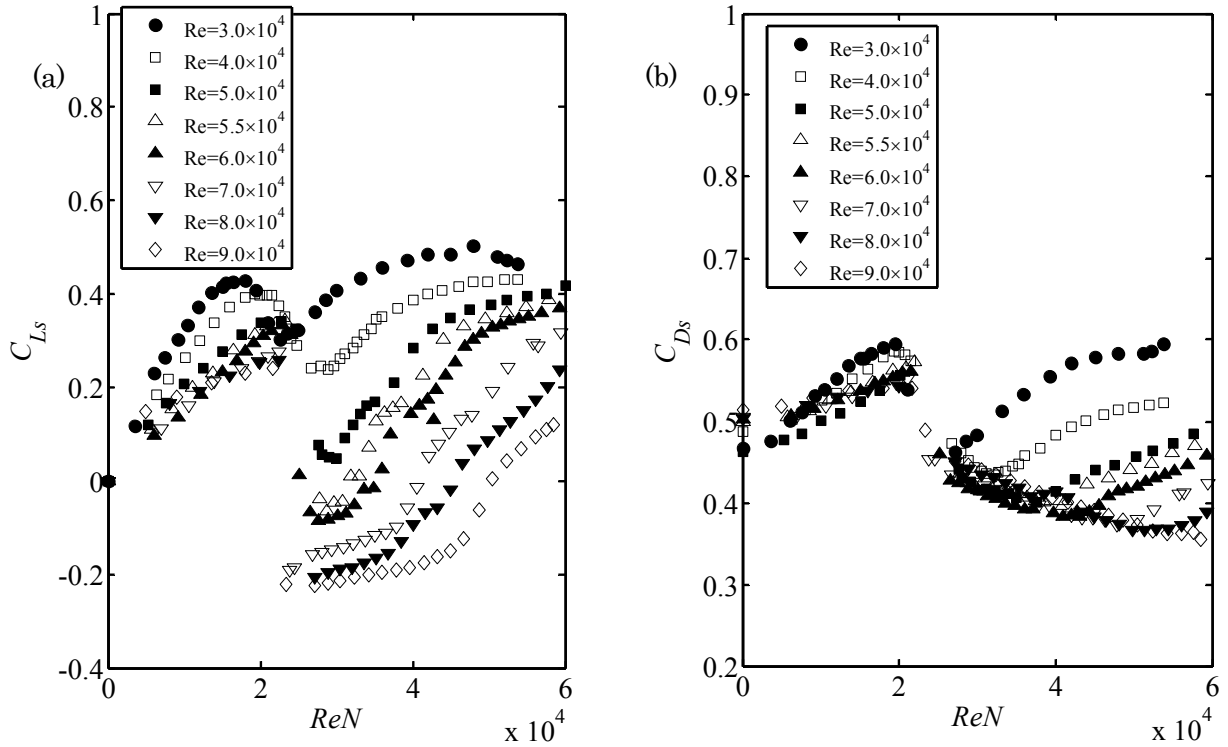


Fig. 6 Coefficient of Lift and Drag of the table tennis ball ($D_s=44\text{mm}$) against ReN .
(a) Lift, (b) Drag.

で、 Re 数として新たに球の直径 D_s と周速度 V に基づく ReN を次のように定義する。

$$ReN = \frac{VD_s}{\nu} = Re \times SP_s \quad (4)$$

この定義に基づいて、揚力係数を整理したのが図6である。遷移と思われる急激な揚力の低下が ReN がほぼ同じ約 2.4×10^4 で見られることがわかる。つまり、回転球における遷移において球表面の速度が大きな役割をしていると考えられる。

最後に、今回の実験結果から、卓球ボールにおける球の運動を記述するために揚力係数および抗力係数に対して次の式を提案する。揚力係数、抗力係数が急激に変化する $ReN=2.4 \times 10^4$ を境として、 $ReN \leq 2.4 \times 10^4$ においては先に述べたように CL_s 、 CD_s とともに SP_s に対して一本の直線に乗ることから、一次式で近似する。

$$CL_s = SP \quad (5)$$

$$CD_s = 0.154SP + 0.5 \quad (6)$$

$ReN > 2.4 \times 10^4$ の領域においては、遷移後の曲線は、 SP_s に対して一つの曲線となっていること、および CL_s 、 CD_s が SP_s の無限大でそれぞれ一定の値へ漸近していると考えられることから、それぞれ以下のように近似する。

$$CL_s = \frac{-1}{e^{(3.55SP_s - 1.3)}} + 0.5 \quad (7)$$

$$CD_s = \frac{-1}{e^{1.8SP_s}} + 0.65 \quad (8)$$

上記2つの直線と曲線を結ぶ遷移領域においては、揚力係数が負とならない低 Re_s 数における緩やかな変化を見せる場合を除き、図4ではわかりにくいですが、 Re_s に応じて切片が異なる傾き一定の直線とみなせる。よって、次のように近似する。

$$CL_s = 0.36SP_s - (1.7Re_s \times 10^{-6} + 0.185) \quad (9)$$

$$CD_s = -0.345SP_s + (e^{-\frac{Re_s}{2.2} \times 10^{-4}} + 0.55) \quad (10)$$

例として、 $Re_s = 4.0 \times 10^4$ および 7.0×10^4 に当てはめた場合を図7に示す。マグナス力が負とはならない低い Re_s 数である $Re_s = 4.0 \times 10^4$ の揚力係数以外は、非常に良い近似となっていることがわかる。 $Re_s = 4.0 \times 10^4$ の揚力係数が完全に近似しきれないのは、先にも述べたように上記提案式では、低い Re_s 数における遷移期の揚力係数の緩やかな減少を考慮しなかったためである。

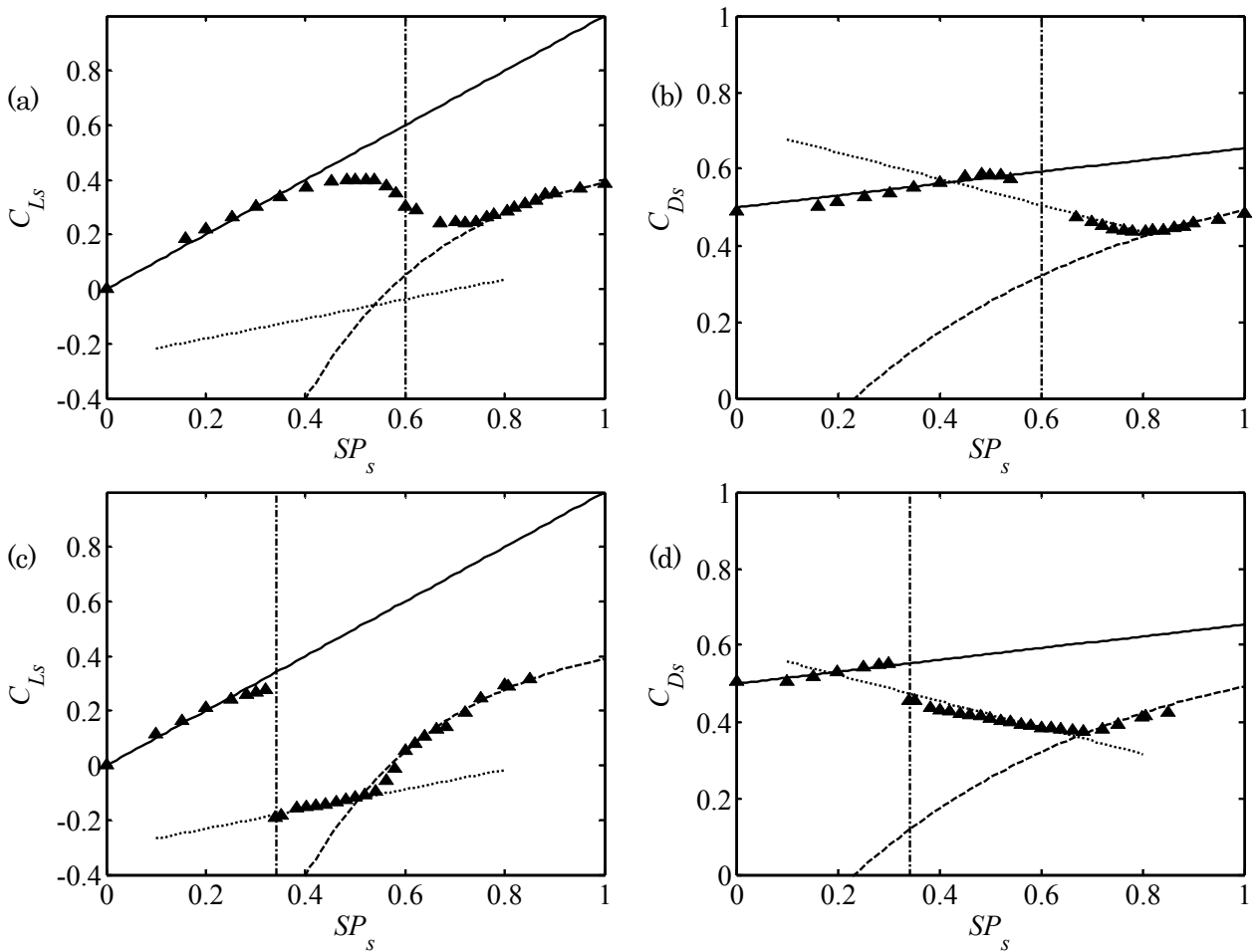


Fig. 7 Example of the fitting curve at $Re_s = 7.0 \times 10^4$.
(a) Lift, (b) Drag at $Re_s = 4.0 \times 10^4$, (c) Lift, (d) Drag at $Re_s = 7.0 \times 10^4$.
dashed-dotted line shows SP_s correspond to a critical $ReN = 2.4 \times 10^4$.

4. まとめ

卓球競技における負のマグナス力の存在を調べるために、卓球ボールを用いて力計測を行った。結果、負のマグナス力が発生する臨界 Re_c 数は、約 5.35×10^4 であり、卓球のゲーム中に負のマグナス力が発生している可能性が高いことがわかった。このとき、揚力係数は、スピンパラメータの増加とともに直線的に増加したのち急激に減少し、その後、再び緩やかに揚力が増加する。揚力の減少が起こるスピンパラメータは、 Re_c 数の増加とともに減少し、また抗力係数も同様の傾向を示すことがわかった。この点は、球の周速度に基づく ReN を用いると $ReN=2.4 \times 10^4$ の一定値となり、球の表面の境界層が大きな役割を果たしていることが示唆される。これらの結果をもとに揚力係数、抗力係数を求める式を提案した。妥当性については今後、実際の卓球ボールの運動との比較を通じて検証が必要である。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究（B）25870065）の助成により実施された。また、東北大学流体科学研究所共用リエゾン室 澤田秀夫客員教授には、装置の製作から解析に至るまで様々な助言を賜りました。謹んで謝意を表します。

文 献

- (1) Maccoll, J. H., "Aerodynamics of a spinning sphere", *J. Roy. Aero. Soc.*, Vol. 32 (1928), pp.777-798.
- (2) Muto M., Tsubokura M., and Oshima N., "Negative Magnus lift on a rotating sphere at around the critical Reynolds number", *Physics of Fluids*, Vol.24, No.1 (2012), 014102.
- (3) Taneda S., "Negative Magnus effect," *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, Vol. 5 No.20 (1957), pp. 123-128.
- (4) Briggs L., "Effect of spin and speed on the lateral deflection (curve) of a baseball; and the Magnus effect for smooth spheres", *Am. J. Phys*, Vol.47, No.8 (1959), pp. 589-596.
- (5) Davies J. M., 1949, "The Aerodynamics of Golf Balls", *Journal of Applied Physics*, Vol.20, No.9 (1949), pp. 821-828.
- (6) Tanaka T., and Yamagata K., 1990, "Experiment of fluid forces on a rotating sphere and spheroid," *Proc. of the 2nd KSME-JSME Fluids Engineering*,(1990), pp. 366-369.
- (7) 高見圭太, 宮寄武, 姫野龍太郎, "バックスピンする球体に働く負のマグナス力~飛翔実験による測定~, *ながれ*, Vol.28,(2009), pp. 347-356.
- (8) Tsuji Y., Muguruma Y., "Numerical simulation of motion of table tennis ball; Effect of ball diameter", *Int. J. Table Tennis Sci.*, No.4 (2002), pp.38-53.
- (9) Wei X., The C., Qin Z., "Speed and spin of 40mm table tennis ball and the effects on elite players", 20th Int. Symp. Biomechanics in Sports, (2002), pp.623-626.
- (10) 小濱泰昭, 小林隆二, 伊藤英寛, "小型低乱風洞の性能測定結果について", 東北大学高速力学研究所報告, Vol.48, No.422 (1982), pp.119-142.
- (11) 鳴尾丈司, 溝田武人, "ゴルフボールの空気力測定と 3次元飛翔起動解析", *ながれ*, Vol.23 (2004), pp. 203-211.