

〔原著論文〕

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 ～

*電気通信大学大学院 高見 圭太[†]
電気通信大学大学院 宮 寄 武^{††}
**理化学研究所 姫野 龍太郎^{†††}

ピッチングマシンにより投球されたバックスピンストレートボールを、高速度ビデオカメラを用いて撮影し、その抗力係数および揚力係数を求めた。試験球には縫目のない真球と日本プロ野球公認球を用いた。測定は、 $0.6 \times 10^5 < Re < 2.4 \times 10^5$ および $0 < SP < 0.7$ で行い、 C_D と C_{LZ} の Re 数、 SP (スピンパラメータ) 依存性を調べた。真球では、 C_{LZ} が正から負へと切り替わる $Re - SP$ 領域を捉え、『負のマグナス効果』の発生を確認した。一方、硬式野球ボールでは『負のマグナス効果』は確認できなかった。また、真球と硬式野球ボールの空力特性を比較して、縫目が空力特性に及ぼす影響を議論する。

Negative Magnus Force Exerted on a Back-spinning Spherical Body ～ Measurement by Flight Experiments ～

Keita TAKAMI, Takeshi MIYAZAKI, University of Electro-Communications

Ryutaro HIMENO, RIKEN

(Received 14 April, 2009; in revised form 1 July, 2009)

Using a high-speed video camera, we measured the trajectory and the rotation of a sphere and a hard baseball thrown by a pitching machine. We determined the drag- and lift- coefficients (C_D, C_{LZ}) by analyzing the video images. The measurements were performed in the range of $0.6 \times 10^5 < Re < 2.4 \times 10^5$, and $0 < SP < 0.7$ (SP : dimensionless spin rate). The dependence of C_D and C_{LZ} on the parameters Re and SP is investigated in detail. Negative Magnus force is exerted on a back-spinning sphere in a relatively wide $Re-SP$ parameter range, whereas only usual Magnus force works on a back-spinning hard baseball. The influence of seam patterns on the aerodynamical properties is discussed.

(KEY WORDS): Negative Magnus Effect, Sphere, Back Spin, Hard-Baseball, Drag coefficient, Lift coefficient

1 緒言

バックスピンする球には揚力が働くことが知られているが、これは『マグナス効果』と呼ばれる^{1,2)}。回転の影響によって球上下面での剥離が非対称になることで

圧力差が生じ、後流が下向きになり、球には鉛直上向きに揚力が加わる。「カーブは本当に曲がっているのか」という議論がなされた時期もあったが、こうした変化球も『マグナス効果』で説明される。その一方で、通常とは逆向きに働く『負のマグナス効果』も知られている。球下面の境界層が乱流遷移して剥離点が後方に移動し、後流が上向きに発生するため、球には鉛直下向きの揚力が働く現象と考えられている。回転する真球において、Taneda³⁾は水槽実験から、谷口ら⁴⁾は飛翔実験から、中

* 〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

†E-mail: takami@miyazaki.mce.uec.ac.jp

††E-mail: miyazaki@mce.uec.ac.jp

** 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

†††E-mail: himeno@riken.jp

川ら⁵⁾は風洞実験から、それぞれ『負のマグナス効果』の発生を報告している。特に、中川らは通常の『マグナス効果』と『負のマグナス効果』の発生する流れ場の可視化を行い、後流の向きがそれぞれ下向き、上向きとなることを確認した。また、これまで行われてきた真球に働く揚力に関する実験には、 C_{LZ} を広いパラメータ領域にわたって系統的に測定したものはない。縫目のある硬式野球ボールでも『負のマグナス効果』が発生するかについては意見が分かれている。Watts & Bahill⁶⁾は『負のマグナス効果』は滑面球でのみ発生するとし、谷⁷⁾も同様の解説をしているが、谷口ら⁴⁾は硬式野球ボールでも発生する可能性を示唆した。

一方、飛翔する物体は進行方向と逆向きの抗力を受ける。この抗力の大きさを示す無次元係数を抗力係数 C_D ($C_D = 2F_D/\rho U^2 A$ 、 F_D :抗力、 ρ :空気の密度、 A :断面積、 U :流速)と呼ぶ。無回転の真球の C_D が、臨界 Re 数($Re_c \approx 3.0 \times 10^5$)で急激に減少する現象は『ドラッグクライシス』と呼ばれる⁸⁾。 Re 数の増加に伴い球体まわりの境界層が乱流遷移して、剥離点が後方へ移動すると後流領域が縮小する。それが『ドラッグクライシス』のメカニズムである。一般に、境界層の乱流遷移は表面の状態に非常に敏感である。Achenbach⁹⁾や Wieselseberger¹⁰⁾は球に粗度を与えることによって、境界層の乱流遷移が促進され、 Re_c 数が低減することを示している。また、Luthander & Rydberg¹¹⁾は球をライフル回転させることにより、 Re_c 数が低減することを報告している。

『負のマグナス効果』と『ドラッグクライシス』はともに境界層の乱流遷移に伴う現象であるので、両者の間には関連性があると、Adair¹²⁾は指摘した。彼は、真球に働く揚力が正から負に切り替わる Re 数を捉えたBriggs¹³⁾の風洞実験結果を吟味し直して、この Re 数で球まわりの境界層が乱流遷移して抗力が減少すると説明している。

縫目を持つ硬式野球ボールの空力特性は、Watts & Ferrer¹⁴⁾や Alaways & Hubbard¹⁵⁾によって調べられてきた。Alaways & Hubbardは野外における飛翔実験から、硬式野球ボールのバックスピストレートボールの『ドラッグクライシス』が $Re = 1.4 \times 10^5$ で発生したとしている。これらの報告は、縫目および球の回転が境界層の乱流遷移を促進させる効果を持つことを示唆する。しかし、Watts & Ferrerの風洞実験ではボールの固定具の影響が無視できず、また Alaways & Hubbardの飛翔実験では空力特性の Re 数とスピンパラメータ(SP :回転無次元速度、 $SP = 2\pi r f/V$ 、 f :ボールの回転数、 r :ボール半径、 V :ボール速度)に対する依存性が系統的に整理されていない。

こうした背景から、谷口ら⁴⁾は高速度ビデオカメラを

用いた野外飛翔実験によって、バックスピストレートとジャイロボールの2シーム及び4シーム(一般に回転軸まわりの縫目の数が2本である時2シーム、4本であるとき4シームという。バックスピストレートでは、進行方向正面を通過する縫目の数に応じて2シーム、4シームになる。図1)の空力特性を調べ、人間が投球したものとピッチングマシンを用いて投球したものを比較した。さらに横山ら¹⁶⁾は、谷口らの測定よりも Re 数、 SP 領域を拡張して、ライフル回転するジャイロボールの2シーム及び4シームの空力特性を調べ、ドラッグクライシスを捉えた。

本研究では、高速度ビデオカメラを用いた野外飛翔実験によって、バックスピンする球体の抗力係数 C_D および揚力係数 C_{LZ} ($C_L = 2F_L/\rho U^2 A$ 、 F_L :揚力)を計測する。真球と硬式野球ボールの2種類に対して、これらの係数の Re 数依存性とスピンパラメータ依存性を詳細に調べた。また、各係数の測定精度を向上させるために、谷口ら⁴⁾や横山らの測定¹⁶⁾よりもスリットライトの数を増やし、解析方法に数値計算を用いたデータ処理法を導入する。第2節では測定方法について、第3節では C_D 、 C_{LZ} の解析方法について、第4節では測定精度について、第5節では解析結果を述べる。第6節では実際のゲームに与える影響を考察し、第7節で本報告の結果をまとめる。

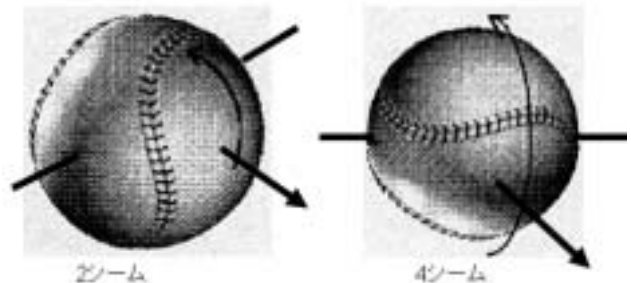


図1 2シームと4シームの回転状態(細矢印は回転方向を、太矢印は進行方向をそれぞれ指す)

2 測定手法

2.1 測定装置のレイアウト

ボールの投球にはピッチングマシン(JUGGS社製)を用いた。ボールの位置の時間情報を得るために、下部から光を照射するスリットライト(Nobbytech製メタルハライドランプ963A002)4台とポリカーボネイトボードを、3.5m間隔でバッテリーライン上に並べた。この様子を高速度ビデオカメラ(Vison Research社製「Phantom」)撮影は1秒間に1901フレーム。)で撮影し、ボールがスリットライトを通過する時間とボードに当たる時間を

求めた。また、ボールの飛翔軌道を算出するために、ボールの中心座標を読み取った。これらの測定装置の配置を(図2)に示す。スリットライト1を座標原点として x 軸をピッチングマシンからボードの方向に、 y 軸を水平面内に、 z 軸を鉛直方向とした。

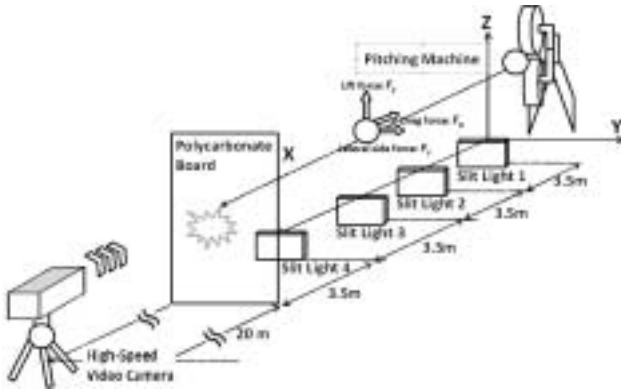


図2 実験装置の配置図

2.2 試験球

今回使用した試験球の詳細な情報を表1に示す([]内は標準偏差)。なめらかな表面を持つ真球と縫目を持つ硬式野球ボール(日本プロ野球公式球、JPN ボールと略。)を用意した(図3)。これらの試験球で測定を行い、縫目が球周りの流れに及ぼす影響を検証した。



図3 試験球(左):真球,(右):硬式野球ボール

表1 試験球の詳細データ [三次元測定器(東京精密社製『XYZAX GC600 D-34S』)による測定結果]

| | JPN | 真球 |
|---------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| サンプル数 | 24 | 1 |
| 縫目を含まない直径 [m] | 7.20×10^{-2} [0.43×10^{-3}] | 7.16×10^{-2} |
| 縫目の高さ [m] | 7.3×10^{-4} [0.50×10^{-4}] | — |
| 縫目の高さ/直径 | 1.0×10^{-2} [0.92×10^{-3}] | — |
| 重量 [kg] | 0.145 [1.8×10^{-3}] | 0.1349 |

3 解析方法

3.1 抗力係数 (C_D) の算出方法

抗力は $F_D = \rho A C_D u^2 / 2$ (A は球の断面積で $A = \pi r^2$) で与えられるので、

$$D = \frac{\rho A C_D}{m} \tag{1}$$

とおく (m :ボールの質量) と、ボールの運動方程式の x 方向成分は、

$$\frac{dx}{dt} = u \tag{2}$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{2} D u^2 \tag{3}$$

で表される(ただし $|u| \gg |w|$ を仮定した)。ここで u, w は、それぞれ速度の x 成分、 z 成分である。式(2)、(3)から、

$$x = \frac{2}{D} \log\left(1 + \frac{u_0 D}{2} t\right) \tag{4}$$

が導かれる。ここで u_0 は $x = 0$ での u の値である。ボールが $x = 0$ を通過する時刻を時間の原点とし、スリットライト2, 3, 4およびボード位置の通過時間 $t_1 \sim t_4$ の測定値と、原点からスリットライト2, 3, 4およびボード位置までの距離 ($x_1 \sim x_4$) を上式に代入し、最小2乗法により u_0, C_D を求めた。また、 Re 数もこの u_0 より算出した。

初速 u_0 の測定精度を確認するために、スリットライト1の真横にカメラを設置して、スリットライト1を通過する瞬間のボールの速度を測定した。この結果、最小2乗法で求めた u_0 と横カメラから求めた u_{0s} は、相対誤差0.7%で一致した。

本研究では、スリットライトの数を先行実験^{4,16)}の3個から4個に増やした。抗力係数 C_D の精度を調べるために、揚力が働かないジャイロボールを投球して統計データを得た(表2)。フィッティングポイントを増やした結果、測定精度は2%程度向上した。

表2 C_D の平均値と標準偏差 ($Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$, [] は標準偏差)

| | ライト3台 | ライト4台 |
|------------|-----------------|-----------------|
| サンプル数 | 25 | 21 |
| C_D の平均値 | 0.52 [0.030] | 0.53 [0.019] |

3.2 揚力係数 (C_{LZ}) の算出方法

揚力は $F_{LZ} = \rho A C_{LZ} u^2 / 2$ で与えられるので、

$$L = \frac{\rho A C_{LZ}}{m} \tag{5}$$

とおくと、 D, L を一定としたときのボールの運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u, \quad \frac{dz}{dt} = w \\ \frac{du}{dt} &= -\frac{1}{2}Du\sqrt{u^2 + w^2} - \frac{1}{2}Lw\sqrt{u^2 + w^2} \\ \frac{dw}{dt} &= -g - \frac{1}{2}Dw\sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{2}Lu\sqrt{u^2 + w^2} \end{aligned} \quad (6)$$

と表される。これを、数値積分することでボールの理論軌道を求めることができる。時刻 t_i におけるボールの z 座標を \bar{z}_i とする。また、カメラの映像から読み取った時刻 t_i のボールの位置を z_i とする。ここで、関数

$$R(w_0, L) = \sum (z_i - \bar{z}_i)^2 (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

を最小にするときの w_0, L を反復法により求めた。このとき時刻 t_i に関しては、スリットライト通過時刻 ($t_1 \sim t_3$) とボードへの衝突時刻 (t_4) 以外に 10 点程度読み取った。

3.3 スピンパラメーター SP の算出方法

カメラ映像からボールの回転数: f [rps] を読み取る。また、最小 2 乗法によって求めた u_0, w_0 から、

$$SP = 2\pi r f / \sqrt{u_0^2 + w_0^2} \quad (8)$$

よりスピンパラメータ SP を算出した。

4 測定精度の検証

4.1 C_D の精度

C_D の測定精度を確認するために、JPN ボール (2 シーム, 4 シーム) 及び真球のストレートボール ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$) をそれぞれ 20 球程度測定し、ヒストグラムにまとめた (図 4, 表 3)。

標準偏差より、JPN ボールの測定結果に含まれる相対誤差はおよそ 6%、真球ではおよそ 3% である。JPN ボールでは、微妙な縫目の高さや位置のズレが C_D に影響を与えているので、縫目のない真球の相対誤差がこの実験系全体の測定誤差と考えることができる。真球については、前報での測定精度 (相対誤差 5%) に比べて、若干ではあるが精度が向上した。真球と JPN ボールの C_D を比較すると、真球は JPN ボールよりも大きな値であることから、縫目の効果によるボールまわりの境界層の乱流遷移促進の結果と考えられる。また、 C_D に関しては 2 シームと 4 シームとで有意な差が見られない。

4.2 C_{LZ} の精度

同様に C_{LZ} の測定精度を確認するために、JPN ボール (2 シーム, 4 シーム) 及び真球のストレートボール ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$) で 20 球程度の測定を行

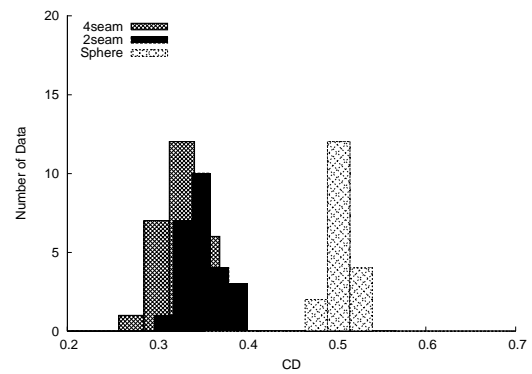


図 4 C_D のヒストグラム ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$)

表 3 C_D の平均値 ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12, []$ は標準偏差)

| | 2seam | 4seam | Sphere |
|------------|------------------|------------------|------------------|
| サンプル数 | 25 | 26 | 18 |
| C_D の平均値 | 0.349 [0.022] | 0.328 [0.021] | 0.502 [0.014] |

い、ヒストグラムにまとめた (図 5, 表 4)。 C_{LZ} の絶対値は小さいので、その測定値の相対誤差は 10% 以上となり、 C_D の場合に比べて大きい。

真球と JPN ボールの C_{LZ} の値を比較すると、硬式野球ボールの方が大きな値をとる。この Re 数・ SP ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$) では、真球には揚力がほとんど働かないことがわかる。硬式野球ボールにおいては、縫目の付き方による C_{LZ} の値に顕著な差が見られる。縫目 (粗度) がついている野球ボールに働く揚力は、真球に働く揚力よりも大きい。また、2 シームより 4 シームの方が大きな揚力が働くことから、縫目の有無や縫目の付き方に応じて揚力の値が変化する。 C_D よりも C_{LZ} の方が縫目の影響を強く受ける。

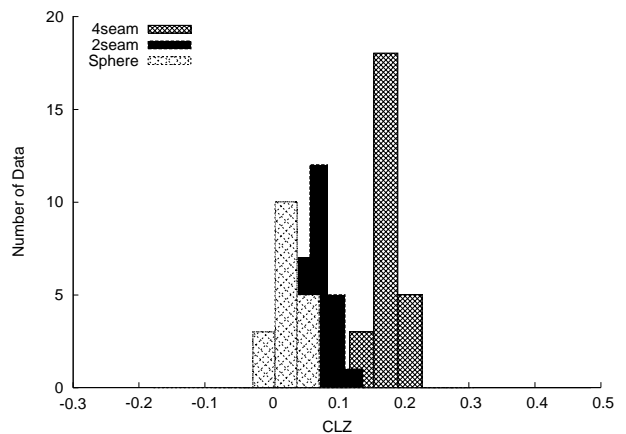


図 5 C_{LZ} のヒストグラム ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$)

表4 C_{LZ} の平均値と標準偏差 ($Re = 1.25 \times 10^5, SP = 0.12$, [] は標準偏差)

| | 2seam | 4seam | Sphere |
|---------------|------------------|------------------|------------------|
| サンプル数 | 25 | 26 | 18 |
| C_{LZ} の平均値 | 0.072 [0.021] | 0.174 [0.019] | 0.023 [0.023] |

4.3 風洞実験との比較

真球について, $C_D = 0.5$ 付近で一定である $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ と, C_{LZ} の正負が切り替わる領域である $Re = 1.45 \times 10^5, SP = 0.23$ と, $C_{LZ} < 0$ である $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$ の3点で統計データ (20~30 球程度測定) をまとめた. これを, 図 6, 7 および表 5, 6 に示す. $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ と, $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$ については, 中川ら⁵⁾ の風洞実験の結果と比較した.

4.3.1 C_D の統計データ

まず, 本実験で得られた C_D と中川らの風洞実験によって得られた C_D の定量的な比較を行う. $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ では $C_D = 0.503$, $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$ では $C_D = 0.394$ となる (図 6). 本実験で求めた C_D と中川らによる風洞実験の C_D はおよそ 5% 程度の差で一致する.

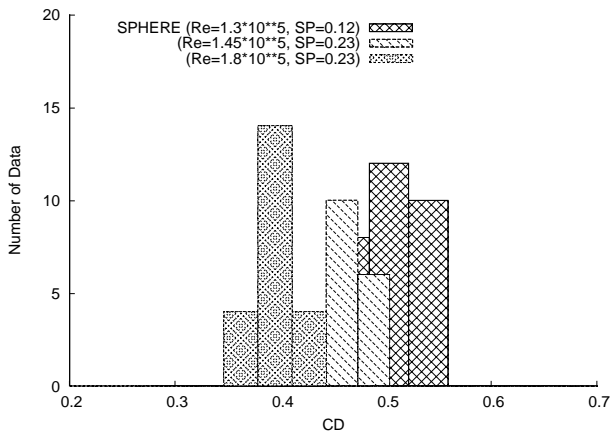


図6 C_D のヒストグラム ($Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ および $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$)

4.3.2 C_{LZ} の統計データ

次に, 本実験で得られた C_{LZ} と中川らの風洞実験によって得られた C_{LZ} の定量的な比較を行う. $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ では $C_{LZ} = 0.022$, $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$ では $C_{LZ} = -0.179$ をとる (図 7). 同じ領域における中川らの実験値と比較すると, $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$ ではよい一致をみせる. したがって, 本実

表5 図6における C_D の平均値と標準偏差

| $Re(\times 10^5)$ SP | サンプル数 | C_D 平均値 [標準偏差] | Nakagawa |
|----------------------------|-------|---------------------|----------|
| $Re = 1.3$ $SP = 0.12$ | 30 | 0.503 [0.022] | 0.478 |
| $Re = 1.45$ $SP = 0.23$ | 20 | 0.458 [0.022] | — |
| $Re = 1.8$ $SP = 0.23$ | 22 | 0.394 [0.017] | 0.412 |

験においても真球の『負のマグナス効果』を定量的に捉えることができる. しかし, $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ では大きく異なる. Taneda による水槽実験の結果では, $Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ の付近は, C_{LZ} が正から負へと切り替わる境界であるため, $C_{LZ} = 0$ である可能性が高い (図 13). 後述 (5.1 節) する我々の結果では, 図 8 に示すようになめらかな Re 数依存性が見られる. 低い Re 数領域における中川らの風洞実験結果には固定具の影響があるのではないかと考えられる. このことから, これまで行われてきた真球に働く揚力に関する風洞実験で, ボールの固定具の影響を受けている可能性がある.

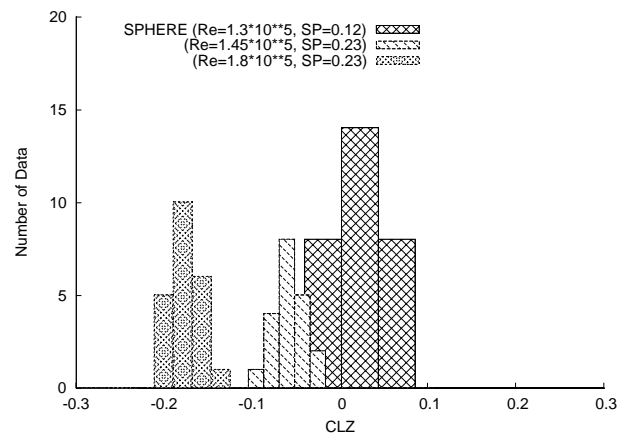


図7 C_{LZ} のヒストグラム ($Re = 1.3 \times 10^5, SP = 0.12$ および $Re = 1.8 \times 10^5, SP = 0.23$)

表6 図7における C_{LZ} の平均値と標準偏差

| $Re(\times 10^5)$ SP | サンプル数 | C_{LZ} 平均値 [標準偏差] | Nakagawa |
|----------------------------|-------|------------------------|----------|
| $Re = 1.3$ $SP = 0.12$ | 30 | 0.022 [0.023] | -0.182 |
| $Re = 1.45$ $SP = 0.23$ | 20 | -0.061 [0.018] | — |
| $Re = 1.8$ $SP = 0.23$ | 22 | -0.179 [0.018] | -0.177 |

5 解析結果

真球および JPN ボールの空力特性を図 8～図 12 および図 14～図 17 に示す。前節のように 20 球程度測定してヒストグラムを作成した場合には、平均値とエラーバーを図中に記載した。その他のデータは 1 球ごとのデータである。また、 $C_D = 0.5$ および $C_{LZ} = 0$ のラインを図中に記載した。また、図 13 に Taneda³⁾ の『負のマグナス効果』の発生領域と本研究の測定結果を比較した。

5.1 真球の空力特性の Re 数依存性

真球の C_D, C_{LZ} の Re 数依存性を $SP = 0.12, 0.23, 0.35$ に固定して測定した (図 8～図 10)。

$SP = 0.12$ (図 8) では、 C_D は $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ で $C_D = 0.5$ でほぼ一定で、 $1.7 \times 10^5 \leq Re$ で、 Re 数の増加とともに減少する。 $Re = 2.1 \times 10^5$ では $C_D = 0.38$ をとる。一方、 C_{LZ} は $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$ で、 $C_{LZ} = 0.1$ から緩やかに減少して $C_{LZ} = 0$ に近づく。 $1.4 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ では、ほぼ $C_{LZ} = 0$ となり、 $1.7 \times 10^5 \leq Re$ で $C_{LZ} < 0$ となる。 $Re = 2.1 \times 10^5$ では $C_{LZ} = -0.2$ となる。

$SP = 0.23$ (図 9) でも同様の傾向が見られる。 C_D は $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$ では $C_D = 0.5$ となり、ほとんど Re 数依存性はなく、 $Re = 1.4 \times 10^5$ より大きくなると Re 数の増加とともに減少する。 $Re = 2.0 \times 10^5$ では $C_D = 0.38$ となる。一方 C_{LZ} は、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$ で $C_{LZ} = 0.2$ から減少し $C_{LZ} = 0$ に近づき、 $1.4 \times 10^5 \leq Re$ で $C_{LZ} < 0$ となり、 $Re = 1.8 \times 10^5$ では $C_{LZ} = -0.2$ となる。

$SP = 0.35$ (図 10) では、低 Re 数での振る舞いは少し異なるが、全体的によく似た傾向が見られる。 C_D は $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ で $C_D = 0.6$ 付近から減少し、 $Re = 1.2 \times 10^5$ で $C_D = 0.5$ に近づく。 $1.2 \times 10^5 \leq Re$ で再び減少して、 $Re = 1.8 \times 10^5$ で $C_D = 0.38$ となる。一方、 C_{LZ} は $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ で $C_{LZ} = 0.17$ から Re 数と共に減少し、 $Re = 1.2 \times 10^5$ で正負が切り替わる。 $1.2 \times 10^5 \leq Re$ で $C_{LZ} < 0$ となり、 $Re = 1.8 \times 10^5$ で $C_{LZ} = -0.2$ となる。

Re 数の増加に伴って C_D は一定 減少、 C_{LZ} は正負の変化が各 SP で見られる。 C_D の変化が始まる Re 数と、 C_{LZ} の変化が始まる Re 数はほぼ一致し、 C_D と C_{LZ} の変動に密接な関連性が見られる。Briggs¹³⁾ の風洞内での落下実験の結果に基づいて、Adair¹²⁾ は真球の C_D の減少が起こる Re 数 (回転数 1200rpm および 1800rpm では $100 \leq v \leq 125$ ft/sec) で C_{LZ} が正から負へと切り替わると指摘している。今回の結果を、Briggs の単位 (rpm, ft/sec) に合わせたものを表 7 に示す。 $SP = 0.12$ および $SP = 0.23$ の測定結果は Briggs の結果とよく一致する。

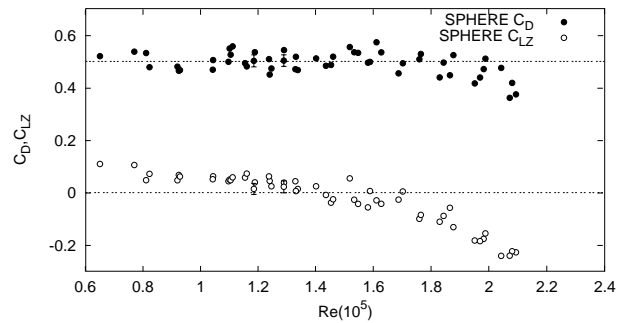


図 8 $C_D, C_{LZ}-Re$ 数関係図 (Sphere: $SP = 0.12$)

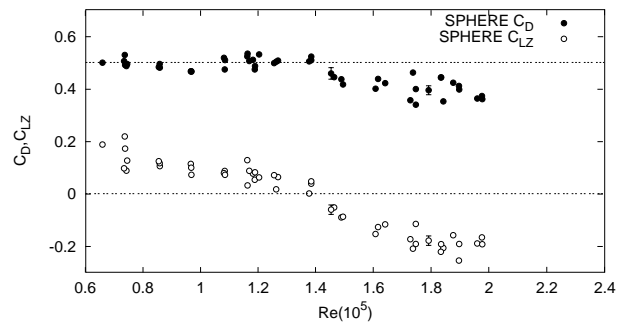


図 9 $C_D, C_{LZ}-Re$ 数関係図 (Sphere: $SP = 0.23$)

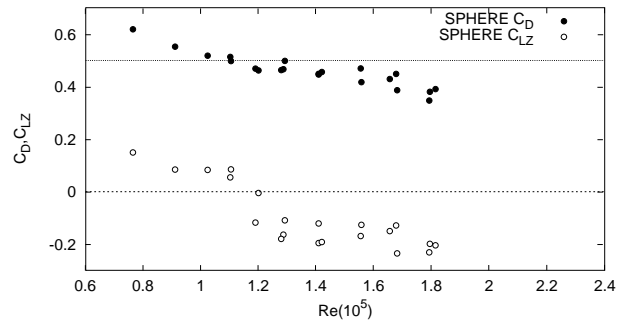


図 10 $C_D, C_{LZ}-Re$ 数関係図 (Sphere: $SP = 0.35$)

Briggs の風洞実験も支持具を用いない落下 (ミニ飛翔) 実験であるため、両者が同じ結果を与えることは当然かもしれない。

表 7 C_{LZ} が正から負へ切り替わる領域 (温度 $T = 20$, ボール半径 $r = 0.035$ m で計算)

| SP | $Re(\times 10^5)$ | f [rpm] | U [ft/sec] |
|------|-------------------|-----------|--------------|
| 0.12 | 1.7 | 1170 | 117 |
| 0.23 | 1.4 | 1843 | 96 |
| 0.35 | 1.2 | 2400 | 83 |

以上のように、本飛翔実験においても C_{LZ} の正負が切り替わる Re 数を捉えられることがわかる。この Re 数を超える領域では、 C_D は $C_D = 0.5$ から Re 数とともに減少する。この Re 数領域では下面の境界層が乱流化し、剥離点が後方に移動して後流が上向きになるとともに、さらに後流領域が狭まっていると推測される。 C_D の減少と $C_{LZ} < 0$ となる『負のマグナス効果』は球下

面の境界層の乱流遷移に関連する現象である。

5.2 真球の空力特性の SP 依存性

$Re = 1.1 \times 10^5, 1.6 \times 10^5$ に固定して、真球の C_D, C_{LZ} の SP 依存性を測定した (図 11, 図 12)。

$Re = 1.1 \times 10^5$ (図 11) の場合、 $0 \leq SP \leq 0.4$ の領域では、ほぼ $C_D = 0.5$ となり、 SP 依存性が見られない。 $0.4 \leq SP \leq 0.5$ では C_D が SP とともに減少し、 $SP = 0.5$ を超えると、およそ $C_D = 0.3$ で一定となる。一方、 C_{LZ} は $0 \leq SP \leq 0.4$ では $C_{LZ} = 0.1$ から減少し、 $SP = 0.4$ で C_{LZ} の正負が切り替わる。 $0.4 \leq SP \leq 0.5$ では『負のマグナス効果』が発生し、 $SP = 0.45$ 付近で極小値 $C_{LZ} = -0.07$ をとる。また、 $SP = 0.5$ で C_{LZ} が正に切り替わり、 SP が大きくなるにつれて C_{LZ} も増加する。 $SP = 0.65$ では $C_{LZ} = 0.2$ となる。

$Re = 1.6 \times 10^5$ (図 12) の場合にも、同様の傾向が見られる。 $0 \leq SP \leq 0.23$ では、ほぼ $C_D = 0.5$ と一定で、これより SP が大きくなると C_D が減少する。 $0.45 \leq SP$ で、再び SP 依存性がなくなり、およそ $C_D = 0.3$ の一定値をとる。一方、 $0 \leq SP \leq 0.23$ では $C_{LZ} = 0$ となる。 $SP = 0.23$ で C_{LZ} が負に替わり、 $0.23 \leq SP \leq 0.45$ の領域で『負のマグナス効果』が見られる。 $SP = 0.25$ で極小値 $C_{LZ} = -0.2$ をとる。 $SP \geq 0.25$ では SP とともに C_{LZ} が増加し、 $SP = 0.45$ で正に替わり、 $SP = 0.58$ では $C_{LZ} = 0.28$ となる。

SP の増加に伴って C_D は一定 減少 一定、 C_{LZ} は正 負 正の変化が各 Re 数で見られる。 C_D の変化が始まる SP と、 C_{LZ} の正負が入れ替わる SP はほぼ一致する。この SP 依存性では、 C_D と C_{LZ} で 2 度の変化が見られる。 C_{LZ} が正 負に転じる SP で、先に真球下面の乱流遷移が生じていると推測される。その結果、後流が上向きに発生し、後流域が狭まると考えられる。さらに SP が増加すると、 C_D が減少 一定、 C_{LZ} が負 正となる。この変化が見られる領域では、回転の影響が強くなり、真球上面の剥離点が後方に引きずられ、後流が下向きに生じると推測される。これらの現象は Re 数と SP に敏感に依存しており、境界層の乱流遷移に関連する現象であろう。

5.3 回転する真球に対する『負のマグナス効果』

緒言で述べたように、従来から『負のマグナス効果』の発生する $Re - SP$ 領域が存在することが知られている。本研究でも、 C_{LZ} の解析結果を整理して、 $C_{LZ} > 0$ を通常のマグナス効果、 $C_{LZ} < 0$ のデータを『負のマグナス効果』と分類する。ただし、本実験における C_{LZ} の標準偏差 (4.2 節参照) を勘案して、 $|C_{LZ}| < 0.03$ のデータは $C_{LZ} = 0$ と見なすこととした。

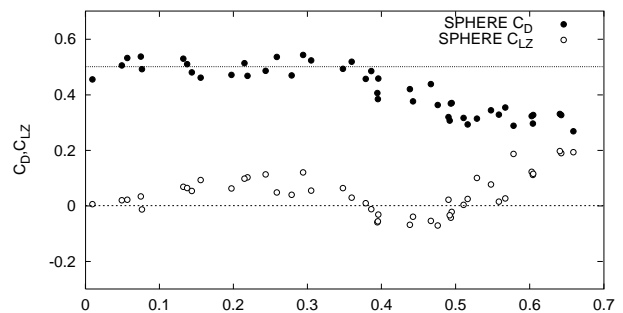


図 11 C_D, C_{LZ} - SP 関係図 (Sphere: $Re = 1.1 \times 10^5$)

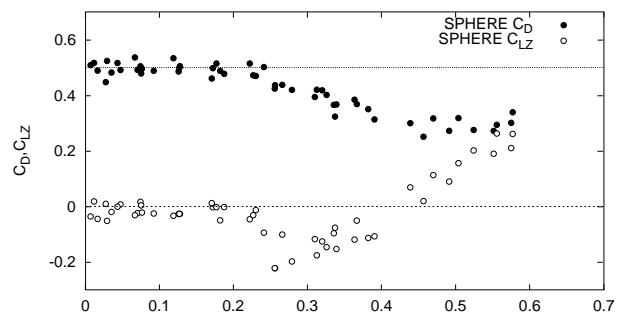


図 12 C_D, C_{LZ} - SP 関係図 (Sphere: $Re = 1.6 \times 10^5$)

5.3.1 Taneda の『負のマグナス効果』発生領域との比較

本実験で測定した真球の C_{LZ} (図 8 ~ 図 12 のデータを用いた) を、 $C_{LZ} > 0, C_{LZ} < 0, C_{LZ} = 0$ の 3 つに大別して、負のマグナス効果の発生領域を $Re - SP$ 平面でまとめた (図 13)。図中では、本実験での『負のマグナス効果』発生領域と Taneda³⁾ の発生領域と比較した。

図 13 に示すように、 $C_{LZ} < 0$ となった領域は、Taneda が示す『負のマグナス効果』の発生領域の中にほぼ含まれる。一方で、 C_{LZ} が正から負へと切り替わる Re 数、 SP は Taneda の境界とは一致しない。本実験で測定された『負のマグナス効果』の発生領域は Taneda の示す領域よりも狭くなる。

Taneda の結果と異なる要因の 1 つには、水槽実験での支持具が影響を与えていた可能性が考えられる。また、谷⁷⁾ は、Taneda の実験結果の解説の中で、現象の非正常性のために負のマグナス力が発生する状態に落ち着くまでには一定の時間を要することを紹介している。飛翔実験での真球の飛翔時間は約 0.5 秒ほどであるため、負のマグナス効果が発生するまでの時間がなかった可能性も考えられる。

また、球上面と下面付近の境界層が乱流遷移する Re 数はボールの回転により異なると考えられる。そこでボール下面の局所 Re 数を Re_+ 、上面の局所 Re 数を Re_- として、これらを SP との関数として以下のように定義

する。

$$Re_+ = (1 + SP)Re \quad (9)$$

$$Re_- = (1 - SP)Re \quad (10)$$

式(9),(10)から Re_+ と Re_- を一定値として図13に記入した。 C_{LZ} の正負が切り替わるような局所 Re 数を決定するため、図10から(仮に) $Re_+ = 1.4 \times 10^5, 1.7 \times 10^5$, $Re_- = 0.5 \times 10^5$ として、図13にそれぞれ一点鎖線(2本)、鎖線(1本)で示す。本研究のデータでは、 C_{LZ} の正負が逆転する球下面の局所 Re 数が $1.4 \times 10^5 < Re_+ < 1.7 \times 10^5$ の範囲に存在するようである。一方、球上面の局所 Re 数 (Re_-) はあまり有意な情報を与えない。

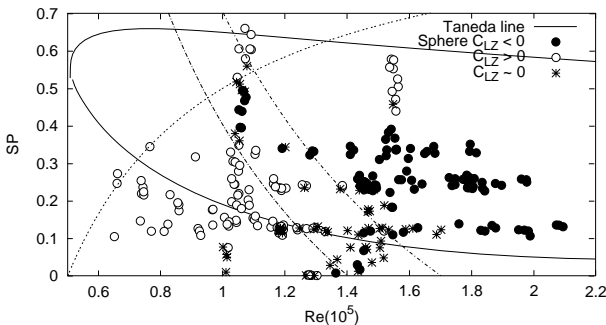


図13 負のマグナス効果発生領域

5.4 硬式野球ボールの空力特性の Re 数依存性

硬式野球ボールの C_D, C_{LZ} の Re 数依存性を $SP = 0.12, 0.23$ に固定して測定した(図14, 図15)。

$SP = 0.12$ (図14)では、 C_D は2シーム・4シームともに、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$ で $C_D = 0.5$ から減少する。 $1.6 \times 10^5 \leq Re$ では Re 数に依存せず、ほぼ $C_D = 0.38$ で一定値をとる。 $Re \leq 1.4 \times 10^5$ では、2シームよりも4シームの C_D がやや小さい値となる。一方、2シームでは $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.8 \times 10^5$ の領域で $C_{LZ} = 0$ から C_{LZ} が Re 数とともに増加する。 $1.8 \times 10^5 \leq Re$ では Re 数依存性がなくなり、 $C_{LZ} = 0.2$ で一定となる。4シームも同様に、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$ の領域では Re 数の増加に伴い $C_{LZ} = 0$ から増加する。そして、 $1.6 \times 10^5 \leq Re$ では $C_{LZ} = 0.2$ と一定値になる。 $Re \leq 1.8 \times 10^5$ では2シームよりも4シームのほうが C_{LZ} が大きい。特に、 $Re = 1.25 \times 10^5$ では、2シーム： $C_{LZ} = 0.072$, 4シーム： $C_{LZ} = 0.174$ と顕著な差が見られる。

$SP = 0.23$ (図15)の場合も、 Re 数依存性は $SP = 0.12$ の場合とよく似ている。2シームの C_D は、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ の領域で、 $C_D = 0.5$ から Re 数の増加とともに減少し、 $1.2 \times 10^5 \leq Re$ で Re 数依存性が

なくなり、 $C_D = 0.38$ の一定値をとる。また、4シームの C_D は同じ Re 数領域でほぼ一定値をとった。測定した Re 数領域においては2シームと4シームの C_D 値に顕著な差は見られない。一方、2シームの C_{LZ} は、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ で、 $C_{LZ} = 0$ から増加する。 $1.7 \times 10^5 \leq Re$ では Re 数に関わらず $C_{LZ} = 0.25$ で一定値をとる。4シームでは、 $0.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$ で、 $C_{LZ} = 0$ から $C_{LZ} = 0.25$ まで Re 数とともに増加し、これより大きな Re 数で一定となる。これらの領域では2シームと4シームの C_{LZ} には顕著な差は見られない。

$SP = 0.12, SP = 0.23$ で共通して、低 Re 数域においては、 C_D が $C_D = 0.5$ から Re 数とともに減少する。真球の場合(5.1節)と同様に、この減少も境界層の乱流遷移に伴う結果と考えられる。しかし、この領域では $C_{LZ} = 0$ であるため、明確な『負のマグナス効果』は見られない。野球ボールの場合、回転がない場合でも縫目の位置で境界層の乱流遷移が促進される^{6,10)}。したがって、バックスピンする硬式野球ボールにおいては、ボール下面の境界層だけが乱流遷移する Re 数領域が存在するとしても極めて狭く、後流が上向きになりにくいと考えられる。 Re 数の増加に伴い C_{LZ} も増加していることから、ボール上面の剥離点が後方に移動し、下向きの後流が生じる。したがって、縫目やディンプルなどの粗度を持つ球体には、その粗度が境界層の乱流遷移を促進させる要因であるので、『負のマグナス効果』は発生しにくい。もし、『負のマグナス効果』が発生するとしても、その Re 数領域は真球に比べてずっと狭いであろう。本研究では測定しなかった低 Re 数領域 ($Re \leq 0.6 \times 10^5$) で『負のマグナス効果』が発生する可能性もあり、また $SP = 0.23$ の測定値には $C_{LZ} < 0$ のデータもあるため、まだ『負のマグナス効果』の完全な否定はできない。しかし、確実な結論を出すためには測定系の精度を向上させることが必要である。また、 C_D が減少 一定に切り替わる Re 数と C_{LZ} が増加 一定に切り替わる Re 数はほぼ一致する ($SP = 0.12$ では $Re = 1.6 \times 10^5$, $SP = 0.23$ では $Re = 1.4 \times 10^5$)。これより、 C_D の減少と C_{LZ} の増加は、真球の場合(5.1節)と同様に境界層の乱流遷移に関わる現象であると考えられる。

次に、縫目の付き方が空力特性に及ぼす影響に注目する。両シームの C_D, C_{LZ} の Re 数依存性は、各 SP で定性的にほぼ一致する。 $SP = 0.12$ の $1.0 \times 10^5 < Re < 1.6 \times 10^5$ では、2シームと4シームの C_{LZ} の値に顕著な差が見られる。4シームの C_{LZ} がより大きい(4.2節)。 $SP = 0.23$ では、2シームと4シームの C_D, C_{LZ} に有意な差は見られない。また、各 SP で Re 数の増加に伴って空力特性に差がなくなる。 Re 数や SP が小さい領域で

は境界層の状態が縫目の付き方に敏感に影響されるが、 Re 数と SP が大きな領域ではその影響が弱まると考えられる。

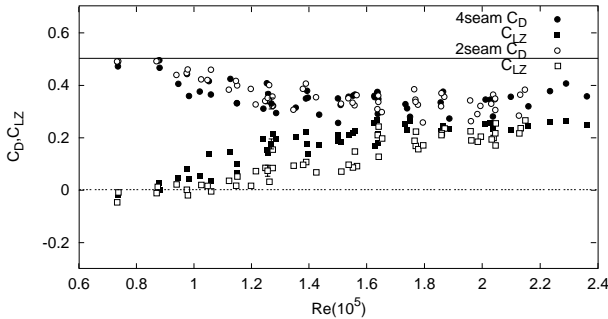


図 14 C_D, C_{LZ} - Re 数関係図 (JPN: $SP = 0.12$)

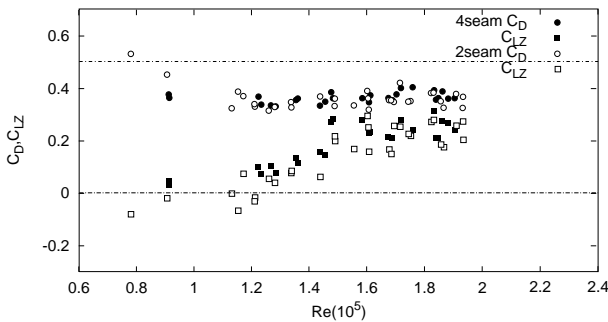


図 15 C_D, C_{LZ} - Re 数関係図 (JPN: $SP = 0.23$)

5.5 硬式野球ボールの空力特性の SP 依存性

次に、硬式野球ボールの C_D, C_{LZ} の SP 依存性を図 16, 図 17 に示す。

$Re = 0.65 \times 10^5$ (図 16) では、2 シーム・4 シームともに、 $0 \leq SP \leq 0.3$ の領域で SP の増加とともに $C_D = 0.5$ から C_D 値が減少する。 $0.3 \leq SP$ では SP に依らず $C_D = 0.40$ の一定値をとる。 $0 \leq SP \leq 0.3$ では、2 シームより 4 シームの C_D がやや小さい。一方 C_{LZ} は、2 シーム・4 シームともに $0 \leq SP \leq 0.45$ で $C_{LZ} = 0$ から SP の増加関数となる。 $0.2 \leq SP$ では、2 シームよりも 4 シームのほうが C_{LZ} が大きく、縫目の付き方で顕著な差が見られる。

$Re = 1.1 \times 10^5$ (図 17) では、2 シームの C_D は、 $0 \leq SP \leq 0.2$ で SP の増加に伴い $C_D = 0.45$ 付近から減少する。 $0.2 \leq SP \leq 0.4$ では SP への依存性がほとんどなくなり、 $C_D = 0.4$ でほぼ一定値となる。注意深くみると、 $0.4 \leq SP$ で C_D は SP とともに微増する。4 シームの C_D は測定範囲において微増する。測定した SP 領域では 2 シームと 4 シームの C_D に顕著な差は見られない。一方、 C_{LZ} は 2 シーム・4 シームともに $0 \leq SP \leq 0.4$ で SP の明確な増加関数 ($C_{LZ} = 0$ から増加) となる。

$SP \geq 0.4$ ではその増加傾向が弱まるが、 $SP = 0.7$ 付近では $C_{LZ} = 0.4$ に達する。また、 $SP \leq 0.4$ では 2 シームよりも 4 シームのほうが C_{LZ} が大きい。

$Re = 0.65 \times 10^5$ および $Re = 1.1 \times 10^5$ の結果はどちらも、低 SP 域においては SP とともに C_D が減少する。真球の場合 (5.2 節) と同様に、 SP の増加にともなって、境界層の乱流化がもたらされる。しかし、この領域における C_{LZ} に着目すると、 $C_{LZ} < 0$ となる『負のマグナス効果』は発生していない。やはりバックスピンする硬式野球ボールでは、ボール下面のみが乱流遷移する $Re - SP$ 領域は極めて狭く、後流は上向きになりにくい。 SP の増加に伴って C_{LZ} が単調に増加し、通常マグナス効果が見られる。また、 C_D が減少する SP 領域では同時に C_{LZ} が顕著に増加する傾向が見られる。真球の場合 (5.2 節) と同様に、 SP 増加に伴う C_D の減少と C_{LZ} の増加が境界層の乱流遷移に関わる現象であることは確かである。 $Re = 1.1 \times 10^5$, $0.4 \leq SP$ の領域で C_D が C_{LZ} とともに微増するのは誘導抵抗に対応する可能性もある。

最後に、シームの違いによる空力特性に注目する。両シームの C_D, C_{LZ} の SP 依存性は、各 Re で定性的にほぼ一致する。 $Re = 0.65 \times 10^5$, $0.2 < SP < 0.5$ の領域では、2 シームと 4 シームの C_{LZ} の値に顕著な差が見られ、4 シームの C_{LZ} が大きい。一方、 $Re = 1.1 \times 10^5$ では、2 シームと 4 シームの C_D, C_{LZ} に有意な差が見られるのは、 $0.15 < SP < 0.3$ の領域だけである。その他の領域ではほとんど差が見られない。また、各 Re 数で SP の増加に伴って空力特性に差がなくなる。前述したように、境界層の状態に縫目が影響を及ぼすのは Re 数と SP が小さい領域においてのみである。

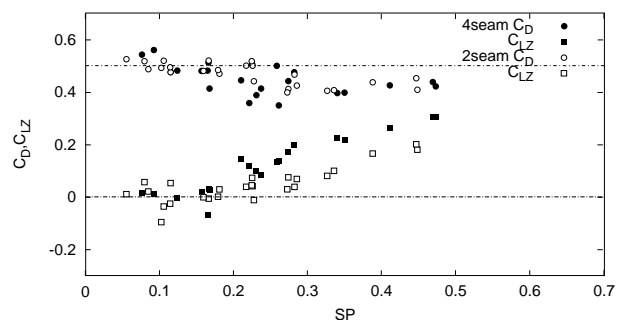


図 16 C_D, C_{LZ} - SP 関係図 (JPN: $Re = 0.65 \times 10^5$)

6 実際のゲームへ与える影響

実際のプロ野球のゲームに、本研究で得られた結果を反映させ考察する。プロ野球において投球されるバックスピンストレートでは、 $SP \approx 0.23$ であることが知られている。また、球速は $120 \sim 160 \text{ km/h}$ であり、 $1.6 \times 10^5 <$

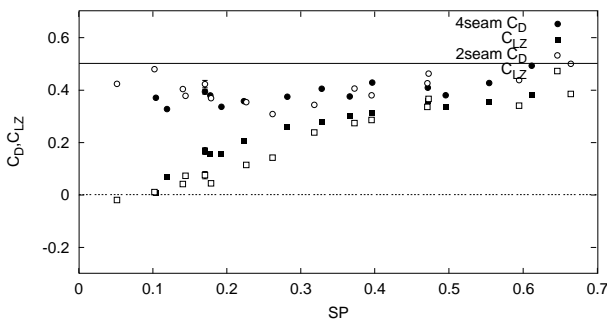


図 17 C_D, C_{LZ} - SP 関係図 (JPN: $Re = 1.1 \times 10^5$)

$Re < 2.1 \times 10^5$ に相当する (温度 20℃ として計算). 仮に, プロ野球の投手が真球を 145km/h で投げたとすれば, この領域は『負のマグナス効果』発生領域に含まれるため, 18m (投手と捕手の距離) を飛翔する間におよそ 1.7m 落下する. 一方, 硬式野球ボールで 4 シームのバックスピストレートを投げた場合, 鉛直上向きの通常の『マグナス効果』により 0.45m しか落下しない. 真球と硬式野球ボールでは落下距離に 1.25m 近くの差が生じる.

また, プロ野球投手の中には 2 シームと 4 シームを投げ分ける投手がいる. 彼らは空力特性を変化させる意図を持って投球するわけであるが, 本論文の測定結果では $SP = 0.23, 1.6 \times 10^5 < Re < 2.1 \times 10^5$ の領域では, 2 シームと 4 シームのバックスピストレートに有意な空力特性の差は見られない. したがって, 彼らは 2 シームと 4 シームで指のかかり具合を調整して, 回転数 (SP) や回転軸を変化させて, 投球の空力特性を変えているのであろう.

7 結言

本報告では, 回転する真球と硬式野球ボールの空力特性を飛翔実験によって調べ, 『負のマグナス効果』の発生とそれに伴う『抗力の減少』を確認した. 真球においては, Re 数の増加とともに C_{LZ} が正から負に切り替わる際に, C_D も減少へ転じるという関連性が見られ, 『負のマグナス効果』は球下面の境界層の乱流遷移に関わる現象であることが示唆される. 一方, 硬式野球ボールにおいては, 縫目 (粗度) の効果により 『負のマグナス効果』が発生しにくい. 少なくとも実投球されるパラメータ領域では発生しない. もし 『負のマグナス効果』が発生するとしても, その Re - SP 領域は狭いと考えられる.

謝辞: 本研究に協力して下さった電気通信大学の田中潤一郎君と内園謙介君に深く感謝いたします.

引用文献

- 1) G. Magnus : *Poggendorfs annual on Physics and Chemistry*, **88** (1853).
- 2) L. Rayleigh : On the irregular flight of a tennis ball, *Messenger of Mathematics*, **7** (1877) 14-16. Reprinted in *Scientific Papers*(Cambridge, 1899), **1** 344-346.
- 3) S. Taneda: Negative Magnus Effect, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*(1957) 123-128
- 4) 谷口哲也, 宮崎武, 清水鉄也, 姫野龍太郎: 硬式野球ボールに働く空気力の測定, 日本流体力学会会誌「ながれ」, **25** (2006) 257-264.
- 5) 中川順達, 矢部孝, 三崎雅也, 馬目和人, 山田哲理 : バックスピン時のディンプル球の空力特性, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集
- 6) ベース「ボール」の科学 : R.G.Watts・A.T.Bahill, サイエンス社 (1993)
- 7) 谷一郎: 再び野球のカーブについて, *科学*, **49** (1979) 51-53.
- 8) E.Achenbach : Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, *J.Fluid Mech*, **54** (1972) 565-575.
- 9) E.Achenbach : The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres, *J.Fluid Mech*, **65** (1974) 113-125.
- 10) C.Wieselsberger : Weitere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes, *Phys.Z.* **23** (1922) 219-224
- 11) S. Luthander and A. Rydberg : Experimentelle untersuchungen über den luftwiderstand bei einer um eine mit der windrichtung parallelen achse rotieren kugel, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* **36** (1935) 552-558.
- 12) R.K.Adair : THE PHYSICS OF BASEBALL, 3rd ed. HarperCollins, New York (2002).
- 13) L.J.Briggs : Effect of Spin and Speed on the Lateral Deflection (Curve) of a Baseball; and the Magnus Effect for Smooth Spheres, *Am.J.Phys.* **27**, 589-596 (1959).
- 14) R.G.Watts and R.Ferrer : The Lateral Force on a Spinning Sphere, *Amer.J.Physics*, **55**, No.1(1987) 40-44.
- 15) L.W.Alaways and M.Hubbard : Experimental determination of baseball spin and lift, *Journal of Sports Sciences*, **19** (2001) 349-358.
- 16) 横山佳之, 宮崎武, 姫野龍太郎: ジャイロボールのドラッグクライシス, 日本流体力学会会誌「ながれ」, **27** (2008) 403-409.