

# 硬式野球ボールの空力特性に対する縫目の影響

横山 佳之(電通大院), 高見 圭太(電通大院), 田中 潤一郎(電通大院)  
宮 寄 武(電通大院), 姫野 龍太郎(理研)

## Effect of seams on the aerodynamical properties of a hard baseball

Y. Yokoyama\*, K. Takami\*, J. Tanaka\*, T. Miyazaki\*, and R. Himeno\*\*

\* Dept. Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Univ. Electro-Commun.

\*\* RIKEN Advanced Computing and Communication Center

### ABSTRACT

Using a high-speed video camera, we measured the trajectory and the rotation of a hard baseball thrown by a pitching machine. We determined the drag and lift coefficients of gyro-balls and backspin straight balls, by analyzing the video images. Two kinds of seam pattern, i.e., 2- and 4-seams, relative to the translational direction are investigated for  $0.6 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$ . The spin parameter ( $SP$ ) is set to be 0.12, 0.23 and 0.35. The drag coefficient of a 4-seam gyro-ball decreases gradually with  $Re$ . In contrast, the drag coefficient of a 2-seam gyro-ball with  $SP = 0.12$  and that with  $SP = 0.23$ , decrease in two steps, and their minima (about 0.2) are attained at  $Re = 2.2 \times 10^5$  and  $1.8 \times 10^5$ , respectively. The drag coefficient of a backspin straight ball with  $SP = 0.12$  and that with  $SP = 0.23$  attain their minima (about 0.3) at  $Re = 1.5 \times 10^5$  and  $1.35 \times 10^5$ , respectively. The lift coefficient of a backspin straight ball increases monotonically with  $Re$ , approaching a constant value 0.2 for  $SP = 0.12$ , 0.25 for  $SP = 0.23$ , and 0.3 for  $SP = 0.35$ , respectively. No significant difference in the  $Re$ -dependence of the drag and lift coefficients is observed between 2- and 4-seams backspin straight balls.

Keywords: Hard-Baseball, Drag coefficient, Lift coefficient, Gyro-ball, Backspin straight ball, Drag crisis, Negative magnus effect

## 1 緒言

硬式野球ボールは粗度として縫目を持ち、またその投球は様々な回転状態にある為、その空力特性はスポーツ科学の観点ばかりではなく、流体力学的にも興味深い。

球に働く抗力がある  $Re$  数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。球体に粗度を与えたり、回転を加えることにより、発生する  $Re$  数(臨界  $Re$  数)が低減する[1, 2]。ドラッグクライシスが硬式野球ボールのストレートボールで発生したという報告もある[3]。一方、回転する真球では負のマグナス効果という現象が知られており[4]、この現象の硬式野球ボールでの発生については意見が分かれている[5, 6]。

また、近年「ジャイロボール」と呼ばれる変化球が話題になっている。この変化球は進行方向と回転軸方向が一致し、ライフル回転をしているボールである。姫野は  $Re = 2.0 \times 10^5$  においてジャイロボールの直接数値計算を行い、進行方向へ向けている縫い目の違い(2シーム、4シーム)によりその抗力係数が大きく異なることを示唆した[7]。

本研究では高速度ビデオカメラを用いた野外実験によって、バックスピンするストレートボールとライフル回転するジャイロボールの空力特性を計測した。また、硬式野球ボールの表面の縫い目の影響、球の種類による空力特性の差異を検証するために、試験球を三種類用意し、その空力特性の  $Re$  数依存性・スピンパラメータ:  $SP$ <sup>1</sup> 依存性を検証した。それらの結果より、ジャイロボールのドラッグクライシスがプロ野球投手の投球し得る  $Re$  数領域で起きること、そしてストレートボールに負のマグナス力が働く可能性について示す。

## 2 野外測定

### 2.1 測定レイアウト

測定装置の配置を図1に示す。ボールの投球にはピッチングマシンを用いた。これをピッチングプレートの位置に配置し、スリット光を照射できる特殊な照明装置3台を、4.50m 間隔でバッテリーライン上に並べ、ポリカーボネイトボードをホームベース頂点上に設置する。ボールを撮影する高速度ビデオカメラ<sup>2</sup> をバッテリーラインの延長線上20mに配置し、ボードに向かって発射されたボールをボード越しに撮影した。

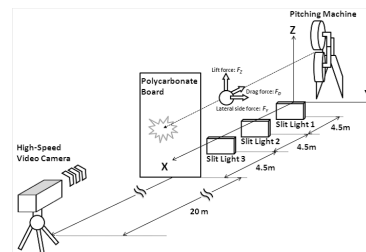


図1: 実験装置の配置図

### 2.2 試験球

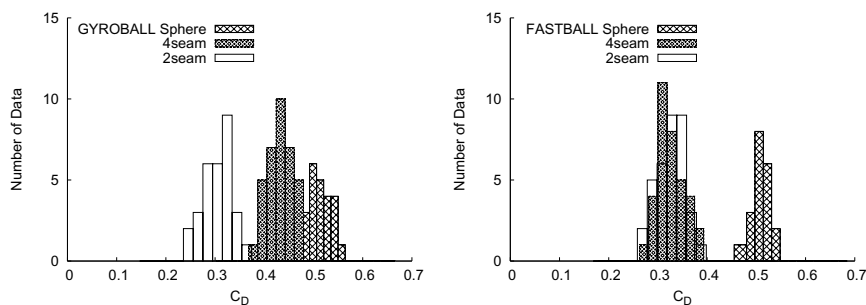
今回使用した試験球の詳細な情報を表1に示す([ ]内は標準偏差)。試験球は日本プロ野球公式球(以降JPNボールと表記)、メジャーリーグ公式球(以降USAボールと表記)、真球の三種類を用意した。表1よりUSAボールはJPNボールより  $C_{SH}$ (縫い目の高さを直径で規格化した値)が大きいことが分かる。この3種類のボールを使用し、縫い目が球周りの流れに及ぼす影響について検証を行った。

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Vison Research社製「Phantom」。撮影は1900f/sで行った。

表 1: 試験球の詳細データ [測定は本学所有の三次元測定器(東京精密社製『XYZAX GC600 D-34S』)]

	JPN(Unitex)	USA(Rawlings)	真球
直径(m)	$7.203 \times 10^{-3} [4.3 \times 10^{-4}]$	$7.321 \times 10^{-3} [7.9 \times 10^{-4}]$	$7.159 \times 10^{-3}$
重量(kg)	$0.145 [1.8 \times 10^{-3}]$	$0.142 [2.5 \times 10^{-3}]$	0.1349
縫目の高さ(m)	$0.730 \times 10^{-4} [0.50 \times 10^{-5}]$	$1.17 \times 10^{-4} [1.8 \times 10^{-5}]$	—
$C_{SH}$	$1.0 \times 10^{-2} [0.92 \times 10^{-3}]$	$1.6 \times 10^{-2} [1.0 \times 10^{-3}]$	—

図 2:  $C_D$  ヒストグラム:(左) ジャイロ, (右) ストレート

## 2.3 解析手法

$C_D$ ,  $u_0$  はスリットライト及びボード(図1)の通過時間を映像から算出し, 運動方程式の  $x$  成分から導かれる式から最小二乗法を用いて算出した. また  $C_{LZ}$  は, 映像からボールの  $z$  座標の時間変化を読み取り, 運動方程式からべき級数展開により導かれた式から最小二乗法を用いて算出した. 解析手法の詳細は谷口ら[6]に譲る.

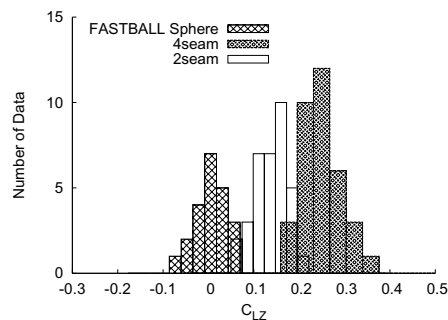
## 3 誤差の検証

### 3.1 $C_D$ : ライト読み取り誤差

$C_D$  算出の際の読み取り誤差は, 意図的にライト通過フレームをランダムに  $\pm 0.5$  フレーム動かし, 10,000 回計算することで見積もった. 読み取り誤差は速度にほぼ比例し, 最大で 12% 程度となった. 4 章以降の結果にエラーバーとして記載した. また, 測定系全体の誤差を確認するために JPN ボールと真球を用いて  $Re \approx 1.4 \times 10^5$ ,  $SP \approx 0.12$  のジャイロボールとストレートボールを約 30 球測定した(図2). 両球種の硬式野球ボールの測定結果に含まれる誤差は 10% 程度, 真球においては 5% 程度と見積もられた. 野球ボールでは, スリットライト読み取り誤差よりも少し大きな値となったが, 真球ではほぼ読み取り誤差と一致した. 野球ボールの場合では, 投球ごとにシームが僅かにばらつき, それが誤差を大きくしていると考えられる.

### 3.2 $C_{LZ}$ 読み取り誤差

$C_{LZ}$  の読み取り誤差は, 映像から読み取ったピクセルを乱数を用いて故意に  $\pm 0.5$  ピクセルばらつかせ, 10,000 回計算することで見積もった(図3). その際,  $C_D$  の読み取り誤差を考慮し, 解析で用いる  $C_D$  も乱数を用いて標準偏差内でばらつかせた. 読み取り誤差は全てのデータでほぼ 10% 以下となった. 4 章以降の結果ではエラーバーとして記載した. また,  $C_D$  と同様に測定系全体としての誤差を検証した. 測定結果に含ま

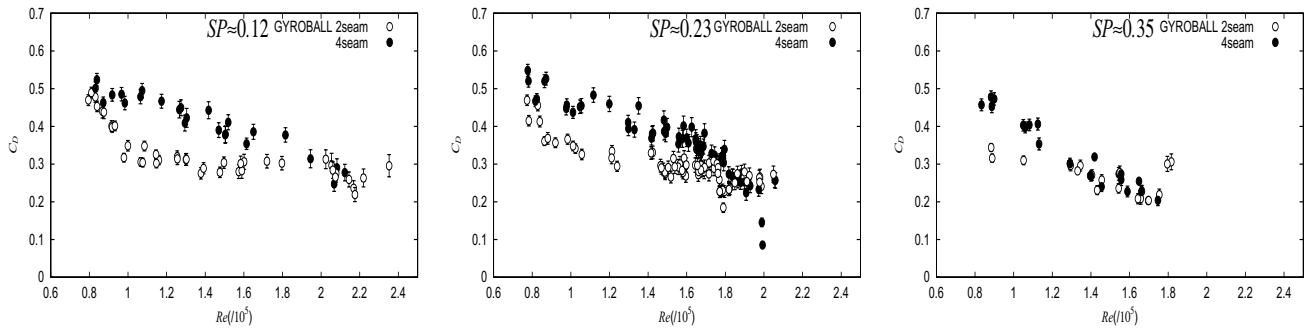
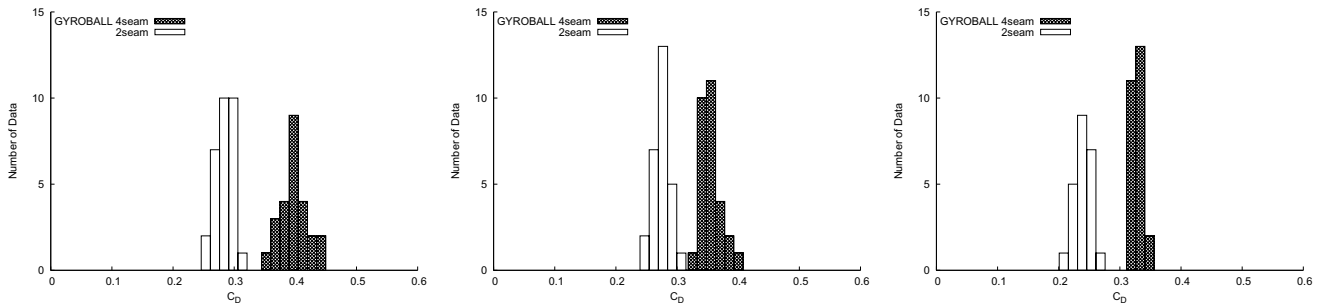
図 3:  $C_{LZ}$  ヒストグラム(ストレート)

れる  $C_{LZ}$  の測定誤差は  $C_D$  に含まれる測定誤差よりも大きく, 硬式野球ボールで 20% 程度となった. この値は, 読み取り誤差よりもかなり大きくなり, 「僅かなシーム位置の違い」の影響で測定誤差が大きくなったと考えられる.

## 4 解析結果

### 4.1 ジャイロ(JPN)

ジャイロボール(JPN ボール:  $SP \approx 0.12, 0.23, 0.35$ ) における  $C_D$  の  $Re$  数の依存性を図4に示す. 全ての  $SP$  において  $C_D$  に  $Re$  数依存性が見られた. また, シームの違いにより  $Re$  数への依存性に大きな差が出た. 4 シームでは  $C_D$  は  $Re$  数の増加に伴い, 徐々に減少した. 一方, 2 シームにおいては  $C_D$  が 2 段階に減少した.  $SP \approx 0.12$  では  $0.8 \times 10^5 < Re < 1.1 \times 10^5$  と  $2.0 \times 10^5 < Re < 2.2 \times 10^5$ ,  $SP \approx 0.23$  では  $0.7 \times 10^5 < Re < 1.0 \times 10^5$  と  $1.7 \times 10^5 < Re < 1.8 \times 10^5$  の二つの領域で急激に減少し,  $Re \approx 2.2 \times 10^5$  で  $C_D \approx 0.20$ ,  $Re \approx 1.8 \times 10^5$  で  $C_D \approx 0.18$  の極小値を取った. また,  $SP \approx 0.35$  では  $Re < 1.3 \times 10^5$  の領域では  $C_D \approx 0.3$  でほぼ一定の値となるが  $1.3 \times 10^5 < Re < 1.7 \times 10^5$  の領域で急激に減少し,  $Re \approx 1.7 \times 10^5$  で  $C_D \approx 0.2$  の極小値を取った. この  $SP$

図4:  $C_D$ - $Re$  数関係図(ジャイロ): (左) $SP \approx 0.12$ , (中) $SP \approx 0.23$ , (右) $SP \approx 0.35$ 図5:  $C_D$  ヒストグラム(ジャイロ): (左) $Re \approx 1.45 \times 10^5$ , (中) $Re \approx 1.65 \times 10^5$ , (右) $Re \approx 1.78 \times 10^5$ 

では  $Re < 0.9 \times 10^5$  の領域で、2シームジャイロボールが他の  $SP$  と同様に  $C_D$  の値が減少する傾向が見られる可能性がある。

Luthander *et al.* [2] は、ライフルスピンをする真球に対して風洞実験を行い、 $SP$  が大きくなるほど臨界  $Re$  数が低減することを見出している。この結果と我々の結果は定性的に一致した。各  $SP$  における  $C_D$  が  $Re$  数の増加とともに減少する現象はジャイロボールのドラッグクライシスであり、シームの違いにより境界層の乱流遷移過程に差異が生じるため、ドラッグクライシスの現象が異なると解釈することもできる。しかし我々の測定では、推測の域を出ることができないので、ジャイロボールに対して直接数値計算や風洞実験などで境界層の乱流遷移過程の詳細、後流の詳細な構造を調べていく必要があると考えられる。

投手が投球可能な  $Re$  数領域で、シームの違いによる  $C_D$  値に差が出ることを確認するために、 $SP \approx 0.23$  のジャイロボールに対して測定を別に行った。 $Re \approx 1.45 \times 10^5$ ,  $1.65 \times 10^5$ ,  $1.78 \times 10^5$  において2シーム、4シームそれぞれ30球程度測定を行い、結果をヒストグラムにまとめた(図5)<sup>3</sup>。それぞれの結果より、2シームの方が4シームよりも  $C_D$  が小さいことが確認された。また、 $SP \approx 0.23$  で、2シームの  $C_D$  が極小値を取る  $Re \approx 1.78 \times 10^5$  でのヒストグラムからも、この  $Re$  数域で2シームの  $C_D$  が  $C_D \approx 0.23$  付近の小さい値を取ることもわかる。

## 4.2 ストレートボール

### 4.2.1 $C_D$ , $C_{LZ}$ の $Re$ 数依存性(JPN, Sphere)

まず JPN ボールと真球(Sphere)の  $C_D$  の  $Re$  数依存性を図6に示す。JPN ボールの  $C_D$  は  $SP \approx 0.12, 0.23$  において、 $Re$  数の増加に伴い減少し、 $SP \approx 0.12$  では  $Re \approx 1.5 \times 10^5$ ,  $SP \approx 0.23$  では  $1.3 \times 10^5 < Re < 1.4 \times 10^5$  で両  $SP$  とも  $C_D \approx 0.3$  程度の最小値を取った。その後は、

両  $SP$  共に  $Re$  数と共に  $C_D$  は徐々に増加した。 $SP \approx 0.35$  では  $Re < 1.0 \times 10^5$  では  $C_D$  は  $Re$  数と共に増加するが、 $Re > 1.0 \times 10^5$  では  $C_D \approx 0.35$  で一定の値を取った。 $SP \approx 0.35$  については、 $Re < 0.7 \times 10^5$  において他  $SP$  と同様の  $Re$  数依存性が見られる可能性が高い。また全ての  $SP$  において有意なシームによる差は見られなかった。

次に、JPN ボールと真球の  $C_{LZ}$  と  $Re$  数依存性を図7に示す。JPN ボールの  $C_{LZ}$  は、 $SP \approx 0.12, 0.23$  では  $Re$  数と共に増加した。 $SP \approx 0.12$  では  $Re > 1.5 \times 10^5$  で、 $SP \approx 0.23$  では  $Re > 1.4 \times 10^5$  では  $C_{LZ}$  の値が  $C_D \approx 0.2, 0.27$  で一定の値を取った。 $SP \approx 0.35$  では  $Re$  数と共に増加するが、 $Re > 1.0 \times 10^5$  では  $C_{LZ} \approx 0.3$  で一定の値を取った。全ての  $SP$  において、2シームよりも4シームの方が  $C_{LZ}$  の値が大きい傾向が見られた。

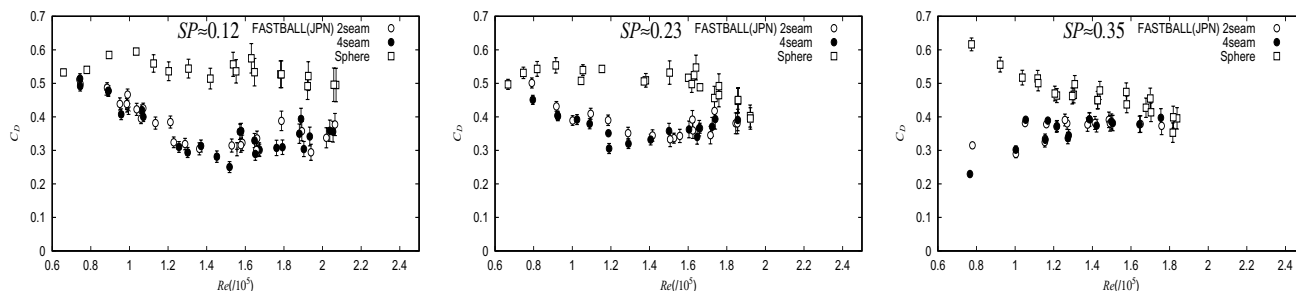
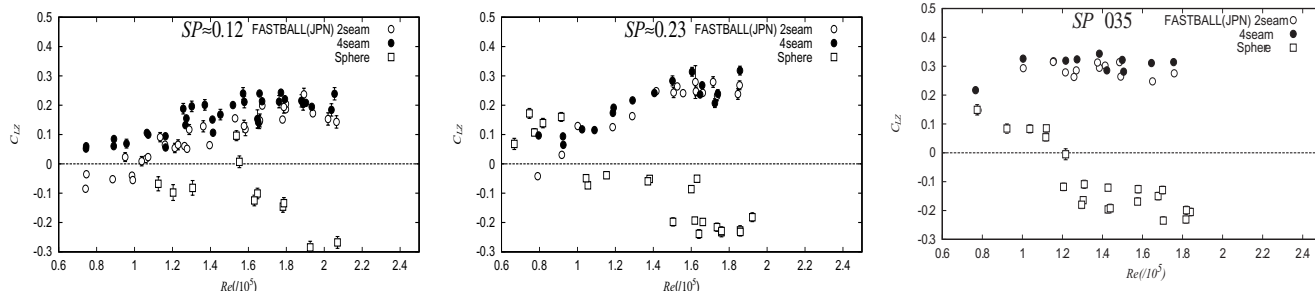
$C_{LZ}$  の増加が鈍化し、一定の値に漸近した。このときの  $Re$  数は「 $C_D$  が最小値を取る  $Re$  数」と概ね一致した。この  $Re$  数域で、境界層の性質が変化している可能性がある。

真球の  $C_D$  は、 $SP \approx 0.12$  では  $C_D \approx 0.5$  でほぼ一定の値となった。一方、 $SP \approx 0.23$  では  $C_D \approx 0.5$  でほぼ一定の値を取るが、 $Re > 1.6 \times 10^5$  において減少した。また  $SP \approx 0.35$  では、 $C_D$  は  $Re$  数に増加に伴い減少していき、 $1.2 \times 10^5 < Re < 1.7 \times 10^5$  で  $C_D \approx 0.37$  の一定の値をとり、その後  $C_D$  は若干減少する傾向が見られた。この結果は回転する真球のドラッグクライシスと推測され、この  $Re$  数領域で境界層の性質が変化していると思われる。

真球の  $C_{LZ}$  は測定した  $Re$  数域の大部分で負の値を取った。Taneda[4]は真球に対し水槽実験を行い、 $SP = 0.12$  では  $Re \approx 1.2 \times 10^5$ ,  $SP = 0.23$  では  $Re \approx 0.9 \times 10^5$  さらに  $SP = 0.35$  では  $Re \approx 0.7 \times 10^5$  付近で負のマグナス効果が発生するとしている。我々の結果と比較すると  $SP \approx 0.12$  及び  $SP \approx 0.23$  では正から負への切り替わる  $Re$  数に一致が見られた。

<sup>3</sup>  $Re$  数は  $\pm 2000 \sim 3000$  程度のばらつきを含む。



図 6:  $C_D$ - $Re$ 関係図(ストレート): (左) $SP \approx 0.12$ , (中) $SP \approx 0.23$ , (右) $SP \approx 0.35$ 図 7:  $C_{LZ}$ - $Re$ 関係図(ストレート): (左) $SP \approx 0.12$ , (中) $SP \approx 0.23$ , (右) $SP \approx 0.35$ 

#### 4.2.2 $C_D$ , $C_{LZ}$ の $SP$ 依存性(JPN, Sphere)

次に,  $Re \approx 0.65 \times 10^5$ ,  $1.1 \times 10^5$ ,  $1.6 \times 10^5$  に  $Re$  数を固定して,  $SP$  依存性を調べた。

JPN ボールの  $C_D$  は,  $SP$  の増加に伴い徐々に減少し,  $C_{LZ}$  は徐々に増加していく傾向が見られた。また,  $Re \approx 1.1 \times 10^5$ ,  $1.6 \times 10^5$  ではシームによる  $C_D$  の値の明確な差は見られなかったが,  $Re \approx 0.65 \times 10^5$  の  $SP \approx 0.1$  付近において, 4シームの方が大きな値となった。さらに,  $Re \approx 0.65 \times 10^5$  の  $C_{LZ}$  は,  $SP < 0.3$  の領域で負となった。2シーム, 4シーム共に  $SP$  の増加と共に  $C_{LZ}$  の増加, つまり「正のマグナス力」への立ち上がりが見られた。そのときの  $SP$  は, 2シームが  $SP \approx 0.30$  付近であるのに対し, 4シームでは  $SP \approx 0.25$  と違いが見られた。

真球の  $C_D$  は  $SP$  に依存せず一定の値を取るが, ある  $SP$  を境に真球の  $C_D$  の方が野球ボールよりも小さくなった。Aoki *et al.* [8] は USA ボール(4シームのみ)と真球の空力特性の  $SP$  依存性を風洞実験により求めているが, 我々の得た「真球の  $C_D$  の方が野球ボールよりも小さくなる  $Re$  数,  $SP$  領域」は, Aoki *et al.* の結果と概ね一致した。 $SP$  の増加により, ドラッグクライシスのような現象が起きている可能性がある。 $C_{LZ}$  は,  $Re \approx 1.6 \times 10^5$  において,  $SP > 0.1$  領域では負のマグナス力が観測できた。Taneda [4] によれば,  $Re \approx 1.1 \times 10^5$  では  $0.2 < SP < 0.6$  の領域で,  $Re \approx 1.6 \times 10^5$  では  $SP \approx 0.1$  の領域で負のマグナス力が発生するとしており,  $Re \approx 1.6 \times 10^5$  の場合では, 我々の結果と概ね一致した。

#### 4.2.3 $C_D, C_{LZ}$ の $Re$ 数依存性(USA)

USA ボールの  $C_D, C_{LZ}$  はともに, JPN ボールと同様の  $Re$  数依存性が見られた。各  $SP$  毎に比較すると, JPN ボールと同様の現象が,  $C_D, C_L$  共に  $Re$  数が約  $2 \times 10^4$  低い領域で見られた。原因として,  $C_{SH}$  が大きい試験球の方が球周りの境界層の乱流遷移を促進させ, 現象が低い  $Re$  数域にシフトした結果と考えられる。しかし USA ボールは,  $C_{SH}$  などの個体差が大きく, 品質のばらつきが大きい為, 今後詳しく検証していく必要がある。

## 5 結言

ジャイロボール:我々はジャイロボールのドラッグクライシスのような現象を捉えた。 $C_D$  の  $Re$  数依存性はシームにより明確に異なることを発見した。特に, 2シームでは2段階に  $C_D$  値が激減する結果を得た。今後, 風洞実験や数値計算により現象の詳細を解明したい。

ストレートボール(JPN, Sphere):JPN ボールの  $C_D$  は測定範囲において, 全ての  $SP$  において同様の  $Re$  数依存性を示した。これはストレートボールのドラッグクライシスとも考えられる。またこの  $C_D$  は  $SP$  へも依存する。 $C_{LZ}$  の  $Re$  数依存性及び  $SP$  依存性を確認し,  $C_{LZ}$  は  $Re$  数もしくは  $SP$  が増加すると一定となる現象を確認した。 $C_D$  が最小値を取る  $Re$  数と  $C_{LZ}$  が一定となる  $Re$  数は概ね一致した。真球の  $C_D$  では  $SP \approx 0.23, 0.35$  において, ドラッグクライシスのような現象を確認し, さらに  $SP$  にも依存し, ある  $SP$  に達すると  $C_D$  は減少した。 $C_{LZ}$  には負のマグナス力の発生を確認し, その発生領域は Taneda [4] の水槽実験結果と概ね一致した。

ストレートボール(USA):USA ボールの  $C_D, C_{LZ}$  ともに JPN ボールと同様の  $Re$  数依存性を確認した。またこれらの現象は, JPN ボールよりも低い  $Re$  数域で発生した。この原因として,  $C_{SH}$  が大きい方が乱流遷移を促進させた結果であると考えられる。

## 参考文献

- [1] E.Achenbach, *J.Fluid Mech*, **65** (1974) 113.
- [2] S. Luthander *et al.*, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* **36** (1935) 552-.
- [3] L.W.Alaways *et al.*, *Journal of Sports Sciences*, **19** (2001) 349.
- [4] S.Taneda, Reports of Research Institute for Applied Mechanics (1957) 123-.
- [5] R.G.Watts *et al.*, **55**, No.1 (1987) 40-.
- [6] 谷口哲也ら, 日本流体力学会誌「ながれ」, **25** (2006) 257.
- [7] 姫野龍太郎, (2002), 私信
- [8] K.Aoki *et al.*, *J. of Visualization*, **6**, No.2 (2003) 185-.