

# 硬式野球ボールに働く流体力の測定

丸山純, 横山佳之, 宮寄武(電通大), 姫野龍太郎(理研)

## Measurement of Aerodynamics Forces Exerted on Baseballs by a High-Speed Video Camera

J.MARUYAMA\*, Y.YOKOYAMA\*, T.MIYAZAKI\*, and R. HIMENO\*\*

\* University of Electro-Communications,  
\*\* Advanced Computing and Communication Center

### ABSTRACT

Using a high-speed video camera, we have recorded the trajectory and the rotation of a hard baseball and a sphere thrown by pitching machines. We measured the drag and lift coefficients by analyzing the video images. We altered pitching machines on the market in order to throw a 'gyro-ball', whose rotational axis lies almost in the translational direction. The drag coefficient of a gyro-ball decreases with the Reynolds numbers ( $Re$ ). For a fast-ball, the drag coefficient doesn't depend on  $Re$  and the lift coefficient is increases with the  $Re$  and the spin parameter ( $SP$ ). The drag coefficient of a sphere is larger than that of a baseball for fast- and gyro-pitches, indicating that seams on the ball surface have substantial influence on the flow field.

Key Words: baseball, gyro-ball, fast-ball, Reynolds number, drag, lift, pitching machine, Magnus force

### 1 緒言

真球を過ぎる一様流の実験において、レイノルズ数( $Re$ 数)を増加していくと抗力係数が急激に減少するドラッグクライシスという現象が知られている。Achenbach<sup>1)</sup>は無回転球に対する風洞実験を行い、ドラッグクライシスが発生する $Re$ 数(臨界 $Re$ 数)が約 $3 \times 10^5$ である事を示した。また、球に粗度を与える事で臨界 $Re$ 数が低くなる事を見出した<sup>2)</sup>。Luthanderら<sup>3)</sup>は、一様流中の真球に流れ方向と一致する回転軸を持つ回転(ライフルスピン)を与えた場合、無回転球の場合よりも低い時点で臨界 $Re$ 数を迎えることを示した。

野球では一種の粗度としての縫い目(シーム)をもつ球を用いており、これがどのような空力特性を持つのかという点は興味深い。近年ではWatts and Ferrer<sup>4)</sup>が風洞実験によりストレートの揚力係数を求め、ボールの回転数( $SP$ :スピンパラメータ)との間に比例関係が成り立つとしている。しかし風洞実験ではボールをシャフトで固定する必要があり、これの影響により正しい値が出ないと指摘される事がある。風洞実験以外の方法では、Himeno<sup>5,6)</sup>が数値計算を行い様々な球種の空力特性を求めている。これに対し溝田ら<sup>7)</sup>は径の小さいピアノ線を用いて風洞実験を行い、その結果が姫野の計算値と異なるとしている。回転しない野球ボールに関してはAokiら<sup>8)</sup>が風洞実験を行い、臨界 $Re$ 数が流れに対するシームの向きによって大きく変化する事を示しているが、回転する球の臨界 $Re$ 数に関する文献は我々が調べた範囲では無かった。

野球の球種として多くの人が思い浮かべるものは、ストレートボール(Fastball)だろう。これは進行方向に対し垂直な水平軸回りにバックスピンをしている球種であり、バックスピンボールとも形容される。毎秒30回転程度で投球される事が多く、この回転数を減らしたものがフォークボール(Forkball)と呼ばれる球種となる。一方、進行方向に回転軸を持つ(ライフルスピンをしている)球種がジャイロボール(Gyroball)であり縦スライダとも呼ばれる。また、それぞれの球種において、ボールが一回転する間に縫い目が4回現れる4シーム回転と2回現れる2シーム回転の2種類に大別することが出来る(Fig.1)。

本研究では、鉛直面内で変化する球種について様々な $Re$ 数や回転数を与えて投球を行い、その様子を高速ビデオカメラで撮影し、映像から野球ボールの空力特性(特に $Re$ 数依存性)を調べた。ここではページ数に限りがある為、測定及び解析方法については必要最低限の記述に留めることとする。これら及び人間による投球の解析結果の詳細については谷口ら<sup>9)</sup>を参照とされたい。



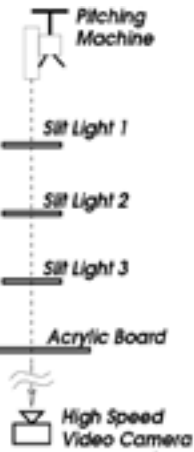
Fig.1 4シーム回転と2シーム回転

## 2 測定・解析方法

### 2.1 測定方法

#### 2.1.1 測定装置

測定はスリット光を照射することが出来る特殊な照明装置3台を、透明強化アクリルボードから4.50m間隔で直線上に並べ、ピッチングマシンから発射された硬球がライト上を通過しアクリルボードに衝突するまでの様子をボードから20m後方に置いた高速度ビデオカメラ『Phantom』で撮影するという手法で行われた(Fig.2)。また、実験が屋外で行われるため、風速計を用いて背景風を測定し、解析に組み込んでいる。 Fig.2 実験装置配置図



#### 2.1.2 ボールの投球

従来の研究では人間による投球を解析していたが、ボールの空力特性を決定する4要素( $Re$ 数,  $SP$ , 回転軸, シーム)の設定に難があったため、市販の投球マシンに改造を施した投球マシンを使用した(Fig.3)。



Fig.3 改造前(左)と改造後(右)のマシン

### 2.2 解析方法

#### 2.2.1 抗力係数 $C_D$ の算出

ボールの進行方向を  $x$  方向とし、 $u$ :  $x$  方向の速度成分、 $u_0$ :  $L_1$  (投手側に一番近いスリット光) 地点での  $u$  の値、 $v$ :  $y$  方向の速度成分、 $w$ :  $z$  方向の速度成分、 $\rho$ : 空気密度、 $m$ : ボールの重さ、 $r$ : ボールの半径とする。また、ボールが  $L_1$  を通過した瞬間を  $t=0$ ,  $x=0$  とする。

ボールの運動方程式の  $x$  成分を近似的に解くと

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

を導く事が出来る。また、

$$D = \frac{C_D \rho \pi r^2}{m} \quad (2)$$

とおき、これを理論値  $\overline{x}(t_i)$  とし測定値  $x_i$  との関数

$$R(u_0, D) = \sum (x_i - \overline{x}(t_i))^2 \quad (3)$$

から最小2乗法により  $D, u_0$  を求め、その値から  $C_D$  を算出した。風の影響を受ける場合、式(1)を

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

とし、誤差を補正した。ここで、 $u_B$ :  $x$  方向の風速とする。全ての実験は  $|u_B| < 1$  (m/sec) の状況で行った。

#### 2.2.2 揚力係数 $C_L$ , 揚力係数 $C_z$ の算出

カメラ映像において、ボールが  $L_1$  を通過する時間から10~20フレーム毎に  $t$  と  $z$  方向のピクセル数を読み取る。

その値と  $x$  座標、ボード上に引いてある基準線から  $z$  座標を求める。 $x$  座標は  $C_D$  を算出する際に用いた  $x$  の理論式(1)もしくは(4)を使用する。次に、

$$L_z = \frac{C_z \rho \pi r^2}{m} \quad (5)$$

としてボールの運動方程式のべき級数解を考えると

$$z \approx z_0 + w_0 t + \left(-\frac{g}{2} + \frac{L_z u_0^2}{4} - \frac{D u_0 w_0}{4}\right) t^2 \quad (6)$$

を得ることが出来る。 $w_0$  を  $L_1$  地点での  $w_0$  の値、 $z_0$  を  $L_1$  地点での  $z$  座標として、式(6)に  $t, z_0, z, u_0, D$  を代入し、 $w_0, L_z$  を最小2乗法によりフィットさせ、 $C_L$  を導出した。ここで、 $u_0, D$  は  $C_D$  を算出した際の値を用いた。

同様に運動方程式のべき級数解

$$y \approx y_0 + v_0 t + \left(\frac{L_y u_0^2}{4} - \frac{D u_0 v_0}{4}\right) t^2 \quad (7)$$

から  $v_0, L_y$  を導出し、 $C_L$  を求めた。ただし、 $v_0$ :  $L_1$  地点での  $v$  の値、 $g$ : 重力加速度とする。

#### 2.2.3 スピンパラメーター $SP$ の算出

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  $u_0$  と、 $C_L$  及び  $C_z$  を算出するときに使った  $w_0, v_0$  を用いて、

$$V = \sqrt{(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)} \quad (8)$$

とする。これらを次の式に代入し、 $SP$  を求めた。

$$SP = \frac{2\pi f}{V} \quad (9)$$

#### 2.2.4 回転軸の決定

回転軸は、ボールの空力特性を決定する重要な要素の一つであり、その見極めは非常に重要となる。本研究では以下の方法で回転軸を決定している。

カメラ映像からボール表面上の特徴ある点の  $y, z$  座標を、それが一回転するまで読み取る。これを楕円に近似し、その重心を回転軸の位置として決定した。

## 3 解析結果

### 3.1 ジャイロボール

$SP=0.23$  は真球・硬式野球ボールの2種類、 $SP=0.12$  は硬式野球ボールのみを用い実験を行った。

#### 3.1.1 縫い目の影響

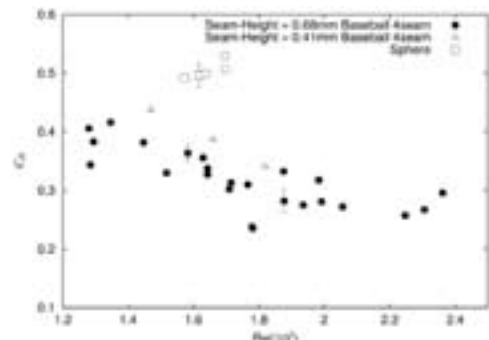


Fig.4 縫い目の影響 ( $C_D - Re$  関係図)

ボールの縫い目の有無及び縫い目の高さが空力特性にどのような影響を与えるのかを比較した結果を Fig.4 に示す。ここで、境界層の厚さが約0.6(mm)に対し、縫い目の

高さはそれぞれ、真球: 0(mm), 硬式野球ボール(マシン用): 約 0.41(mm), 硬式野球ボール(試合用): 約 0.68(mm)である。グラフから、ボールの縫い目の有無及び高さが大きな影響を与えることが分かる。この結果を受け、実験で使用する球を試合用硬式野球ボール(UNITEX 製)で統一した。

### 3.1.2 $C_D$ - $Re$ 依存性

$SP=0.23$  の結果を Fig.5 に示す。2シームと4シームの間で  $C_D$  の値に有意な差は見られず、どちらの球種においても  $Re$  数が増加するにつれ  $C_D$  が徐々に減少していき、 $Re$  数が  $2.0 \times 10^5$  以降では 0.3 付近で一定となった。また、 $Re$  数が  $1.8 \times 10^5$  付近で  $C_D$  は約 0.2 となり最小値を取った。

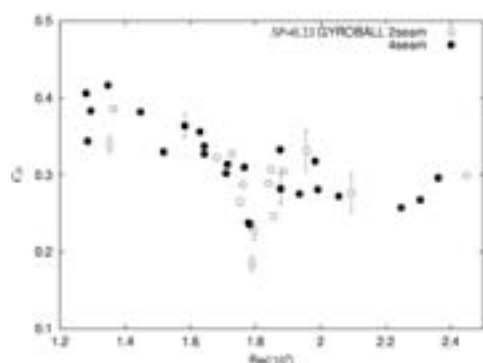


Fig.5  $C_D$  -  $Re$  関係図 ( $SP=0.23$  Gyroball)

$SP=0.12$  の結果を Fig.6 に示す。 $SP=0.23$  の時とは異なり、2シームと4シームで  $C_D$  の値に違いが現れた。 $Re$  数が  $1.4 \sim 2.0 \times 10^5$  の間、2シームでは  $C_D$  はほぼ一定であるのに対し、4シームでは徐々に減少した。 $Re$  数が  $2.0 \times 10^5$  以降になると2シームにも減少傾向が見られるようになり  $Re = 2.15 \times 10^5$  で  $C_D$  は約 0.2 となり最小値を取った。

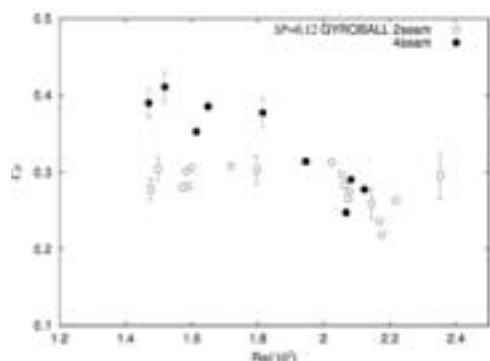


Fig.6  $C_D$  -  $Re$  関係図 ( $SP=0.12$  Gyroball)

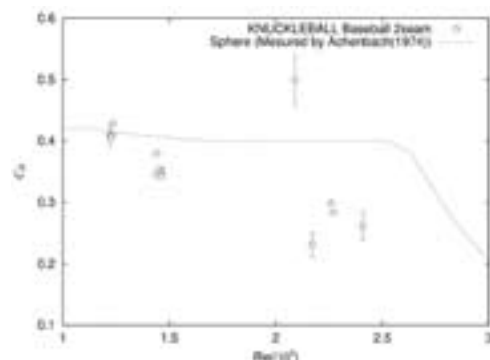


Fig.7  $C_D$  -  $Re$  関係図 ( $SP=0$  Knuckleball)

ナックルボールの結果を Fig.7 に示す。ここで、破線は真球・無回転での結果<sup>1)</sup>である。両者とも  $Re < 1.5 \times 10^5$  ではほぼ同じ値を取るが、野球ボールでは破線よりも早く ( $Re = 2.2 \times 10^5$  付近で)  $C_D$  が減少しており、縫い目が粗度として影響していることが分かる。また、ナックルボールをジャイロボールの  $SP=0$  の場合として他の  $SP$  の結果と比較すると、 $C_D$  が最小値となる  $Re$  数が  $SP$  が大きくなるにつれて低くなっていることが分かる。Luthander et al.<sup>3)</sup>によると、 $SP$  の値が大きいほど臨界  $Re$  数の値は減少するとされており、我々の結果との整合性がある。

### 3.1.3 $C_L$ - $Re$ 依存性

ライフルスピンをするジャイロボールには揚力(横力)は発生しないため、 $C_L$  及び  $C_{L_y}$  はほぼ 0 となる。ライフルスピンの判断は、回転軸が球の中心から 5(mm)以内に入っていることを基準とした。

## 3.2 ストレートボール

### 3.2.1 $C_D$ - $Re$ 依存性

真球は  $SP=0.23$  のみ、硬式野球ボールは  $SP=0.23$ ,  $SP=0.12$  の2つの場合において実験を行った。

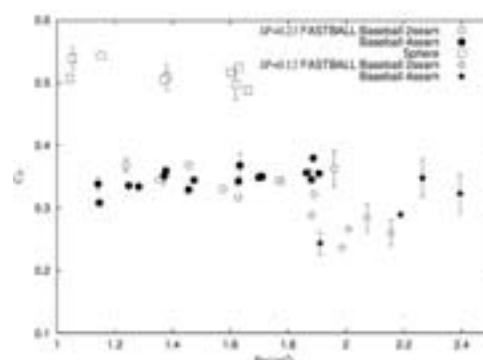


Fig.8  $C_D$  -  $Re$  関係図 (Fastball)

$C_D$ - $Re$  関係図を Fig.8 に示す。真球の  $C_D$  は 0.5 付近の値となり、硬式野球ボールの結果とは有意に異なり、縫い目の影響を示す結果となった。また、真球及び硬式野球ボールの  $SP=0.23$  の場合は  $Re$  数に関係なく  $C_D$  が一定なのに対し、 $SP=0.12$  では  $Re > 1.8 \times 10^5$  の範囲で  $C_D$  が右上がりとなった。ただし、 $C_D$ - $Re$  依存性について結論付けるには測定した  $Re$  数の範囲が狭く、特に  $SP=0.12$  ではもっと低い  $Re$  数での測定が必要である。また、いずれの  $SP$  においてもシームによる違いは現れなかった。

### 3.2.2 $C_L$ - $Re, SP$ 依存性

$C_L$ - $Re$  関係図を Fig.9 に示す。野球ボールの場合は  $Re$  数に対する依存性が見られ、 $Re$  数が大きくなるにつれて  $C_L$  も増加した。 $C_L$  は  $SP$  にも依存し、 $SP=0.23$  の方が  $SP=0.12$  よりも  $C_L$  が大きくなった。4シームと2シームの違いに着目すると  $SP=0.23$  の場合は4シームの方が2シームよりも若干大きい値をとったのに対し、 $SP=0.12$  では違いは見られなかった。しかし 3.2.1 の項でも指摘した通り、測定したデータの  $Re$  数領域が狭いため今後さらなる検証が必要である。

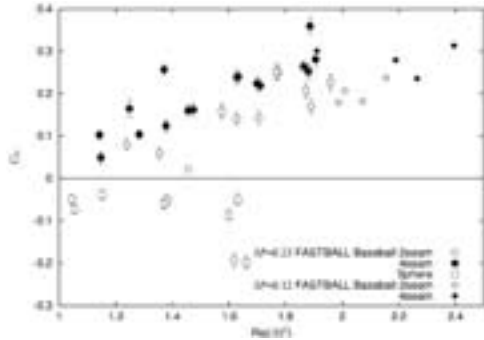


Fig.9  $C_L - Re$  関係図(Fastball)

これに対し真球の結果は  $C_L < 0$  となった。これは負のマグナス効果と呼ばれるもので、Maccoll<sup>10)</sup>によって報告されている。その後 Taneda<sup>11)</sup>による水槽実験でその詳細が調べられ、 $SP < 0.6$ ,  $5 \times 10^4 < Re < 5 \times 10^6$  の領域で発生すると報告されている。今回の測定は全てこの領域内で行われており、この結果は負のマグナス効果を示すと考えられる。硬式野球ボールでも  $Re$  数を減少させた場合  $C_L$  は減少し、いずれ  $C_L < 0$  となる可能性がある。Fig.8 には  $SP$  の値が揃わず載せられなかったが、 $SP=0.18$ ,  $Re=1.2 \times 10^5$  で  $C_L$  が負の値を示すことを確認している。

#### 4 結言

本研究では硬式野球ボールの空力特性を調べるため、鉛直面で変化する以下の変化球についてマシンを用いて投球し、高速度ビデオカメラによって撮影された映像から  $C_D$  及び  $C_L$  の解析を行なった。また、硬式野球ボールとの比較のため、真球を用いてストレートボールとジャイロボールの解析も行った。

##### 4.1 ジャイロ(ライフルスピン)ボール

- 縫い目の高さによって  $C_D$  の値が異なった。
- $SP=0.23$
- 4シームと2シームで  $C_D$  の値に違いは現れなかった。
- いずれの場合も  $C_D$  は  $Re$  数に依存して徐々に減少し、 $Re=1.8 \times 10^5$  付近で  $C_D$  は最小値を取った。
- $SP=0.12$
- 4シームと2シームで  $C_D$  の値に違いが現れた。
- 4シームでは  $Re$  数に依存し徐々に減少したのに対し、2シームでは  $Re < 2.0 \times 10^5$  ではほぼ一定となり、その後減少し  $Re=2.15 \times 10^5$  付近で  $C_D$  の値が最小値を取った。
- $SP=0$  (ナックルボール)
- $Re=2.20 \times 10^5$  付近で  $C_D$  の値が激減した。

これらの結果より、 $SP$  の値が大きくなるにつれ  $C_D$  が最小値を取る  $Re$  数が小さくなることが分かった。この時の  $Re$  数が臨界  $Re$  数である可能性が考えられる。

##### 4.2 ストレート(バックスピン)ボール

###### 4.2.1 真球

- $C_D$  は硬式野球ボールよりも大きい値をとった。

- 測定範囲内では  $Re$  数依存性は見られず、ほぼ一定の値を取った。
  - $C_L$  は負となった。
- #### 4.2.2 硬式野球ボール
- $SP=0.23$
  - $C_D$  に  $Re$  数依存性は見られなかった。
  - 4シームと2シームで  $C_D$  の値に違いは現れなかった。
  - $C_L$  は  $Re$  数に依存して増加した。
  - 4シームの方が2シームより  $C_L$  が大きくなる傾向が見られた。
  - $SP=0.12$  より  $C_L$  が大きくなった。
  - $SP=0.12$
  - $Re > 1.90 \times 10^5$  の範囲で  $Re$  数が増加するにつれ  $C_D$  の値が増加した。
  - 4シームと2シームで  $C_D$  に違いは現れなかった。
  - $C_L$  は  $Re$  数に依存して増加した。
  - 4シームと2シームで  $C_L$  に違いは見られなかった。
  - $SP=0.18$ ,  $Re=1.2 \times 10^5$  の時、硬式野球ボールで  $C_L$  の値が負となる結果を得た。

#### 参考文献

- E.Achenbach: Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, J. Fluid Mech. **54**, (1972), pp.565-575.
- E.Achenbach: The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres, J. Fluid Mech. **65**, (1974), pp.113-125.
- S.Luthander and A.Rydberg, Eingegangen: 1. Juni(1935), pp 552-558.
- R.G.Watts and R.Ferrer: The Lateral Force on a Spinning Sphere, Amer.J.Physics, Vol.55, No.1(1987)pp.40-44.
- 姫野龍太郎: 野球が面白くなる変化球の大研究, 岩波書店(2002)
- R.Himeno: Computational Study of Influences of a Seam Line of a Ball for Baseball on Flows, Journal of Visualization, Vol. 4, No.2(2001),pp.197-207.
- 錦織, 溝田, 小西, 下園, 内村, 河村: 日本流体力学会 2003 74.
- K.Aoki, Y.Kinoshita, J.Nagase, Y.Nakayama: Dependence of Aerodynamic Characteristics and Flow Pattern on Surface Structure of a Baseball, Journal of Visualization, Vol.6, No.2(2003), pp.185-193.
- 谷口哲也, 宮寄武, 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), pp.257-264
- Maccoll: Aerodynamics of a spinning sphere, Journal of the Royal Aeronautical Society, **28**,(1928)777-798
- S. Taneda: Negative Magnus Effect, Reports of Research Institute for Applied Mechanics (1957)123-128