

〔原著論文〕

硬式野球ボールに働く空気力の測定

* 電気通信大学大学院 谷 口 哲 也 †
 電気通信大学大学院 宮 寄 武 † †
 ** 理化学研究所 清 水 鉄 也
 理化学研究所 姫 野 龍太郎 † † †

高速度ビデオカメラを用いて、人間とピッチングマシンによって投げられた硬式野球ボールと真球の撮影を行い、その抗力係数と揚力係数を求めた。進行方向に回転軸をもつ「ジャイロボール」を投球する為に、市販のピッチングマシンを改造した。硬式野球ボールの場合、ストレートの抗力係数は測定されたレイノルズ数 (Re 数) 領域 ($1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^5$) でほぼ一定値であったが、ジャイロボールの抗力係数は Re 数とともに減少傾向を示し、 $Re = 1.8 \times 10^5$ の周辺で最小値をとることが分った。真球の場合、ストレートとジャイロボールともに抗力係数が硬式野球ボールのものよりも大きく、ボールの縫い目が流れに影響することが確認された。

Measurement of Aerodynamic Forces Exerted on a Hard Baseball

Tetsuya TANIGUCHI, Takeshi MIYAZAKI, University of Electro-Communications

Tetsuya SHIMIZU, Ryutaro HIMENO, Advanced Computing and Communication Center

(Received 27 January, 2006; in revised form 6 April, 2006)

Using a high-speed video camera, we have recorded the trajectory and the rotation of a hard baseball and a sphere thrown by real pitchers and 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 number (Re) and attains its minimum at $Re = 1.8 \times 10^5$, while the drag coefficient of a straight ball is independent of Re in the range $1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^5$. The drag coefficient of a sphere is larger than that of a hard baseball for straight- and gyro-pitches, indicating that seams on the ball surface have substantial influence on the flow field.

(KEY WORDS): baseball, drag coefficient, pitching machine, gyro-ball, Reynolds number

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の存在が知られている。Achenbach¹⁾ は無回転球に対する風洞実験を行い、 Re 数が約 3×10^5 時にドラッグクライシスが発生することを示した。また

非常に小さいガラスの玉を球の表面に貼り付けて粗度を与えた実験を行い、 Re 数がより小さいところでドラッグクライシスが発生することを見いだした²⁾。Luthander and Rydberg³⁾ は回転軸が進行方向と一致する回転 (以降、ライフル回転と呼ぶ) をしている真球を過ぎる一様流の風洞実験を行い、球が非常に速くライフル回転している場合、無回転球の場合よりも低い Re 数でドラッグクライシスが発生することを示した。

さて、野球において投手が主に投げるボールとしてストレート (直球) が挙げられるが、これはバックスピンストレートとも表現されるように、進行方向に垂直な

* 〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

† E-mail: taniguti@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

水平軸の周りにバックスピンするボールのことである。ボールの回転数は毎秒 30 回転くらいで投げられることが多い。その他にもいろいろな球種があるが、その中にフォークボールがある。このボールは人指し指と中指で挟んで投げるボールである。これはボールの回転数を抑えるための工夫であると言える。回転数は毎秒 10 回転以内で投げるピッチャーが多い。

一方、近年『ジャイロボール⁴⁾』という球種が注目されている。ジャイロボールとはライフル回転するボールのことで、その回転数はストレートと同じで毎秒 30 回転程度である。また、ボールが一回転する間にボールの縫い目が 4 回現れる 4 シーム回転と、縫い目が 2 回現れる 2 シーム回転の 2 種類に分けることができる (図 1)。

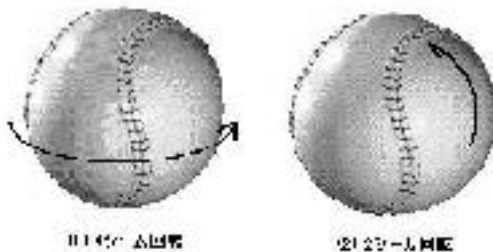


図 1 4 シーム回転と 2 シーム回転の回転方向

野球ボールに関する研究はこれまでにいくつか行われてきた。近年では Watts and Ferrer⁵⁾ が風洞実験により、Alaways and Hubbard⁶⁾ は実際に投げられたボールから、ストレートの揚力係数を求めた。しかし風洞実験の場合、図 2 のようにボールをシャフトで固定しながら実験を行う必要があるため、そのシャフトの影響で正しい値が出ないのではないかと指摘されることがある。

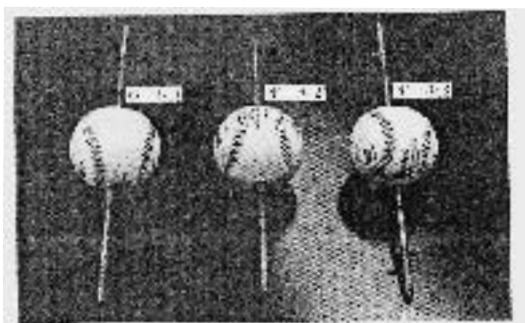


図 2 ボールとシャフトのようす (Watts らの論文から引用)

また、姫野^{7,8)} は数値計算によりストレート、フォークボール、ジャイロボール、ナックルボール等の抗力係数・揚力係数を求め、ジャイロボールの抗力係数は他のどの球種よりも小さいことを示した。これに対し、溝田ら⁹⁾ はボールを支持する為に従来用いられるシャフト

の代わりに径の小さいピアノ線を用いて風洞実験を行い、ジャイロボールの抗力係数を求めたが、実験値は姫野の計算値よりも高い値をとった。筆者らが調べた範囲内では、回転する野球ボールにおけるドラッグクライシスの存在を明確に示した文献はなかった^{注1)}。

そこで本研究では、ストレート、フォークボール、ジャイロボールのように鉛直面内で変化する 3 種類の球種について、実際に投球されたボールを高速度ビデオカメラで撮影し、その映像からボールにかかる抗力係数・揚力係数などの解析を行い、その Re 数依存性を調べた。

2 測定

2.1 測定方法

本研究には毎秒 1800 フレームで撮影することが可能な高速度ビデオカメラ (米 Vision Research 社製) を使用した。測定装置の配置は図 3 に示した。

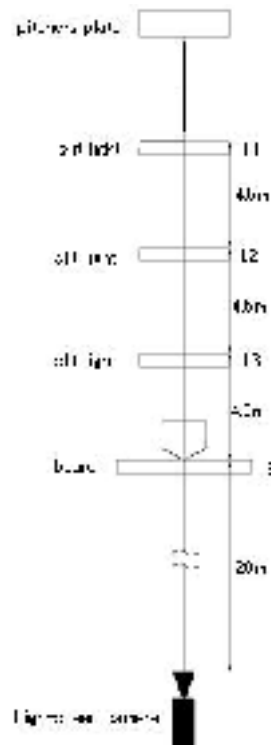


図 3 測定装置の配置図

まず、スリット光を照射できる照明装置 (ノビテック製、型番: 963A002) を 3 台用意し、それをホームベースから 4.50m 間隔で並べ、スリット光をボールが通過するようにした。次にホームベース上に、ボールが当たっても割れないアクリル製の透明強化ボードを設置し、さらにホームベース後方 20m の所に高速度ビデオ

^{注1)} 回転しない野球ボールに関しては、Aoki ら¹⁰⁾ が風洞実験を行い、ドラッグクライシスが起る Re 数がシームによって大きく変化することを見いだした。

カメラを置いて、ボード越しに投球されたボールを撮影することとした。またボードには解析の為に基準線を引いてある。ボールには回転を調べるためにマークをいれておく。

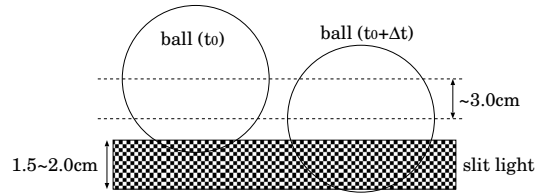


図5 ボールがスリット光を通過するようす

2.2 測定結果

図4が実際に撮影した投球映像の一例である。この



図4 投球映像：筆者（谷口）のストレート
($Re = 1.54 \times 10^5$, $SP = 0.22$, $C_D = 0.28$)

ように撮影された映像から、ボールが各スリット光を通過する時間と、ボードに当たった時間を特定することができる。ボールがスリット光を通過する時、図5のように各スリット光により必ず1回以上照射されるので、必要があれば0.5フレーム分の補正を入れた（例えば51フレーム目、52フレーム目に光が当たっていたら51.5フレーム目とした）^{注2)}。これにより、ボールの x 座標（プレートからホームベース方向への座標）とその通過時間 t のデータが4点分得られた。

また、各時間における y 方向（横方向）、 z 方向（高さ方向）の画面上のピクセル数も同時に得た。

^{注2)}読み取りには細心の注意を払っているが、0.5フレーム分違った値を読み取ると、 C_D に最大で5%程度の誤差が生じる。

3 解析

3.1 解析方法

3.1.1 抗力係数 C_D の算出方法

まず、 u : x 方向の速度成分、 u_0 : L_1 地点（ピッチャーが一番近いスリット光の地点）での u の値、 v : y 方向の速度成分、 w : z 方向の速度成分、 ρ :空気密度、 m :ボールの重さ、 r :ボールの半径とし、

$$D = \frac{C_D \rho \pi r^2}{m} \quad (1)$$

とする。ボールの運動方程式の x 成分を近似的に解くと、

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

を導くことができる^{注3)}。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。ここで、ボールが L_1 地点を通過した瞬間を $t = 0$ 、 $x = 0$ とした。

また野外で実験しているため、抗力係数が風の影響を受ける場合がある。そのため、風が x 方向に吹いていた場合は、式(2)を

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

とし、風による誤差を補正した。ここで、 u_B : x 方向の風速とする。風速は風速計（CUSTOM社製、型番：AHLT-100）を用いて測定した。全ての測定は $|u_B| < 1\text{m/sec}$ の状況で行われた。

3.1.2 横力係数 C_{L_y} 、揚力係数 C_{L_z} の算出方法

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フレーム（もしくは20フレーム）ごとに t と y

^{注3)}ボールの軌道に沿う長さを x で近似している為、ボール速度が遅く軌道が山なりになる場合は誤差が生じる。しかし、 $Re = 1 \times 10^5$ でのボール速度では C_D の相対誤差は0.5%未満にとどまるので、本論文中のデータ解析手法では前述の読み取り誤差と比較して無視することができる。

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 y 座標を求める。ここで $(y, z) = (0, 0)$ は図 4 の中心である基準線が交わっているところとした。 x 座標は、 C_D を算出する際に用いた x の理論式 (2) もしくは式 (4) を使用する。

次に、

$$L_y = \frac{C_{L_y} \rho \pi r^2}{m} \tag{5}$$

として、ボールの運動方程式のべき級数解を考えると、

$$y \approx y_0 + v_0 t + \left(\frac{L_y u_0^2}{4} - \frac{D u_0 v_0}{4} \right) t^2 \tag{6}$$

を得ることができる。 v_0 を L_1 地点での v の値、 y_0 を L_1 地点での y 座標として、式 (6) に t, y_0, y, u_0, D を代入し、 v_0, L_y を最小 2 乗法によりフィットさせ、 C_{L_y} を導出した。ここで u_0, D は、 C_D を算出した時の値を用いた。

同様の方法を用いて、運動方程式のべき級数解

$$z \approx z_0 + w_0 t + \left(-\frac{g}{2} + \frac{L_z u_0^2}{4} - \frac{D u_0 w_0}{4} \right) t^2 \tag{7}$$

から w_0, L_z を導出し、 C_{L_z} を求めた^{注4)}。ただし、 $w_0: L_1$ 地点での w の値、 g : 重力加速度とする。

3.1.3 スピンパラメーター SP の算出方法

スピンパラメーター (SP) とは、ボールの回転数と速度の比を表す無次元数のことであるが、Watts and Ferrer⁵⁾ によると、ストレートで SP が 0.3 以内の場合、 $C_{L_z} \approx SP$ であるとされている。

まずカメラ映像からボールの回転数を読み取る。また、最小 2 乗法によって求めた u_0 と、 C_{L_y}, C_{L_z} を算出するときに使った v_0, w_0 を用いて、

$$V = \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + w_0^2} \tag{8}$$

とする。これらを次の式に代入して、 SP を求める。

$$SP = 2\pi r f / V \tag{9}$$

ここで、 f : ボールの回転数 [rps] とする。

3.2 解析結果

3つの球種についての Re 数と C_D, C_{L_z} の関係図をそれぞれ図 6, 図 7 に示した。ただし、 Re 数は L_1 地点での速度から算出した。以降の Re 数が関係する図は全て同じように決定している。

図 6 において、ストレートの C_D が約 0.3、ジャイロボールの C_D はストレートより若干小さい約 0.28、

^{注4)} C_{L_y}, C_{L_z} 共にピクセルの読み取り誤差により、 Re 数が高い所では 5% 以下、 Re 数が低い所では 10% 以下の誤差が生じる。

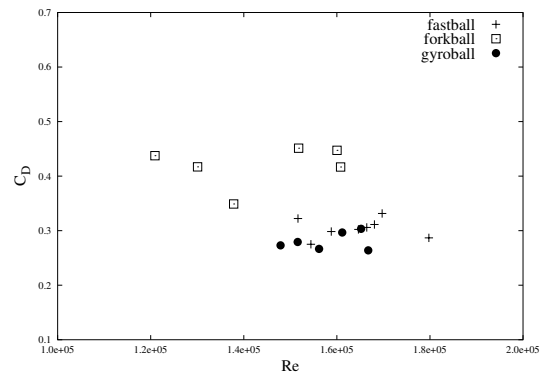


図 6 $Re-C_D$ の関係図

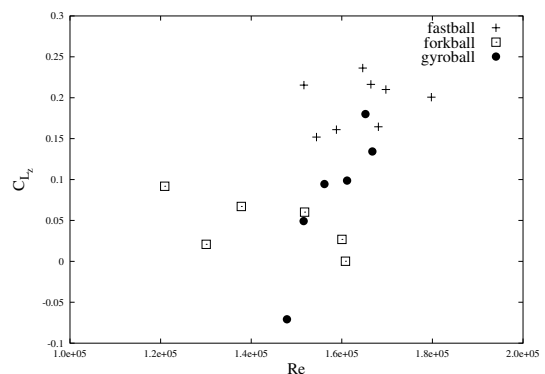


図 7 $Re-C_{L_z}$ の関係図

フォークボールの C_D はそれらより 0.1 ほど大きい約 0.4 の値をとった。また、3種類ともこの範囲内の Re 数では、 C_D の Re 数に対する依存性は見られない。ここで、ストレートは全て 4 シーム回転だった。

C_{L_z} に関しては、図 7 からストレートは約 0.2 の値を示し、フォークボールの場合は約 0.05 あたりで、ストレートよりも揚力が生じていないことが分かる。また、ストレートの場合の SP との関係を図 8 に示したが、Watts ら⁵⁾ や Allaways ら⁶⁾ の結果と一致しているのが分かる。

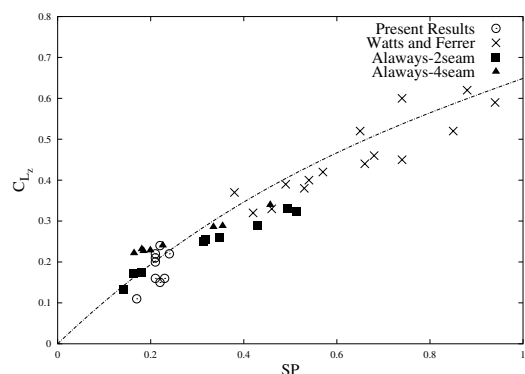


図 8 $SP-C_{L_z}$ の関係図

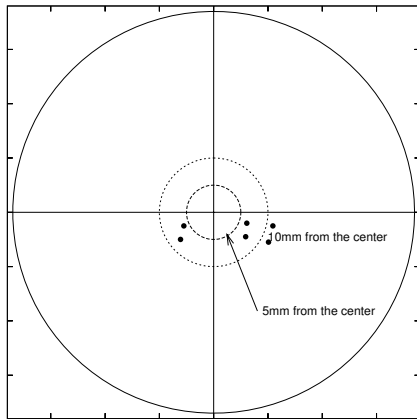


図9 ジャイロボールの回転軸

一方、ジャイロボールに関しては、 C_{Lz} の値が-0.1~0.2の領域に散らばっている。この理由を探るために我々は、ボールの回転軸がきちんと進行方向を向いているかを確認することにした。

3.3 回転軸の決定

ボールの回転軸を以下の方法で決定した。まずカメラ映像から数フレームごとにボール表面上の特徴のある点の位置座標を一回転するまで読み取る。それらの位置座標の重心をボールの回転軸の中心とした。

図9に人が投げたジャイロボールの回転軸を示した。一番小さな円が半径5mmの円、次が半径10mmの円であるが、図9から分かるように、軸が進行方向からずれてしまっていることが分かる。それによって C_{Lz} の値が散らばってしまったと考えられる。軸の整ったジャイロボールの解析を行う為、我々はジャイロボールを投球可能なピッチングマシンを造ることにした。

4 ピッチングマシンの製作

製作するピッチングマシンに要求される性能は、ボールにライフル回転を与えられることである。そこで我々は、図10のように左右のローラーを相互に傾け、ライフル回転を与えることにした。またローラー角を可変にすることで様々な回転数(SP値)のボールを投げることができるようにした。

しかし、図10のマシン(1号機)が投球可能な Re 数は $Re = 1.6 \times 10^5$ に留まったため、より高性能なモーターを有する2号機(図11)を作製した。1号機では可変ローラー角構造を実現するために、大幅な重量増が必要であった。ローラーやモーターなどを三本の棒で支える軽量構造の2号機では、改造後の重量増が許されないため、ローラー角を固定した軽量アームを作製することとした。ローラーの傾き角度は、人間の投球で実現



図10 Pitching Machine1
(ミズノ製、品番：2MA-676を改良したもの)

される $SP \approx 0.23$ (球速30m/s, 回転数30rps)を再現するように、

$$\theta = \arctan 0.23 \approx 13^\circ \quad (10)$$

に設定した。2号機は $Re = 2.0 \times 10^5$ 以上の投球が可能である。



図11 Pitching Machine2
(JUGS製のピッチングマシンを改良したもの)

また4シーム回転のジャイロボールと、2シーム回転のジャイロボールの投げ分けができるように挿入口にも工夫を施した。従来のピッチングマシンではボールを転がして挿入しているが、そうすると4シームジャイロと2シームジャイロの投げ分けができない。そこで我々はボールを陰圧で吸引しながら挿入できるような挿入装置を作製した(図12)。これにより、ボールは一点で保持されたままローラーに接触するので、挿入された面がそのままボールの進行方向の面になると考えられる。

5 マシンで投げたボールの解析結果

マシンでは野球ボールと真球を用いて、ジャイロボールとストレートの測定をそれぞれ行った。



図12 挿入装置

5.1 ジャイロボールの結果

図13より、マシンにより投げられたジャイロボールは、人が投げた場合よりも回転軸がきちんと進行方向を向いていることが分かる。

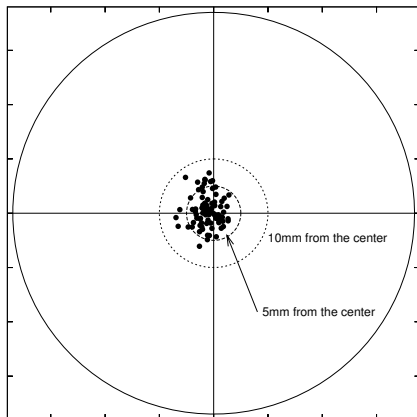
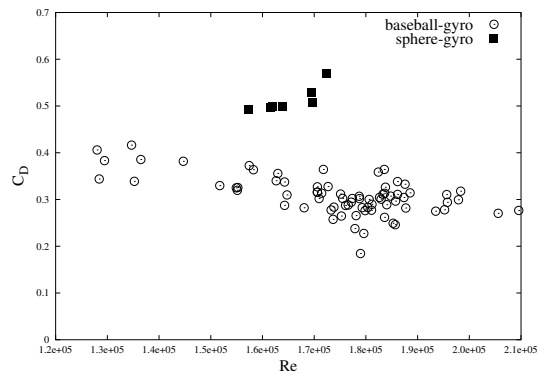
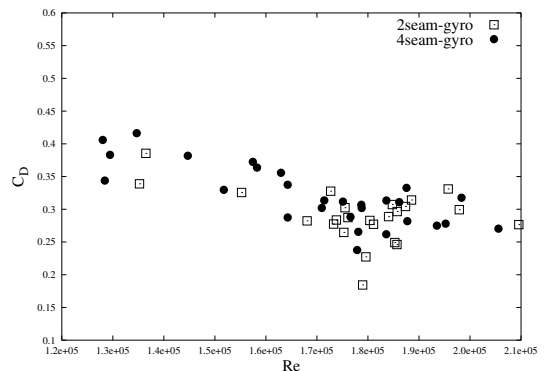


図13 マシンによるジャイロボールの回転軸

今回は回転軸がきちんと進行方向を向いているものだけをジャイロボールと呼ぶこととし、また $C_L (= \sqrt{C_{L_y}^2 + C_{L_z}^2})$ の値が0.1を越えるものは回転軸がずれているものとみなし、結果から除外する。

ジャイロボールにおける、 Re 数と C_D の関係を図14に載せる。野球ボールの場合では、 Re 数が増加すると C_D が徐々に減少していき、 Re 数が 2×10^5 付近になると0.3を下まわる結果となった。また、 $Re \approx 1.8 \times 10^5$ で約0.2の小さい値が見られた。回転軸がずれているなど原因があるかと考えたが、回転軸は非常にきれいで、これらのデータを除外する要因が見つからなかった。したがって、ドラッグクライシスとまでは言い切れないが、 $Re = 1.8 \times 10^5$ あたりで境界層の乱流遷移に関連した現象が起きている可能性がある。本研究ではボールの飛翔中に Re 数が変化している^{注5)} ので、 Re 数と C_D の関係が平均

図14 $Re-C_D$ の関係図 (ジャイロボール)図15 $Re-C_D$ の関係図 (2シームジャイロと4シームジャイロの比較)

化されている恐れがある。このため風洞実験でももう少し詳しく調べれば、より鮮明な結果が得られる可能性がある。

それに対し、真球の場合は野球ボールの時より大きく、0.5付近にまとまった。また、野球ボールのような Re 数の増加にともなう減少は見られなかった。このことから、ボールの縫い目がボール回りの流れに大きな影響を与えていることが分かる。

図15に、2シームジャイロと4シームジャイロを区別した $Re-C_D$ の関係図を載せる。この図から分かるように、2シームの場合と4シームの場合では大きな差は見られなかった。この事実は姫野の計算結果 ($Re = 2 \times 10^5$ の時、2シームジャイロでは $C_D = 0.292$ 、4シームジャイロでは $C_D = 0.162$) とは一致しない。このため、数値計算結果も再度検証する必要がある。

5.2 ストレートの結果

次に改造前の2台目のピッチングマシンによって投げられたストレートの抗力と揚力を考える。図16は、野球ボールと真球の Re 数と C_D の関係図である。野球ボールの C_D は2シームと4シームで差はなく約0.35

注5) 初速と終速では Re 数に5~10%程度の差が生じる。

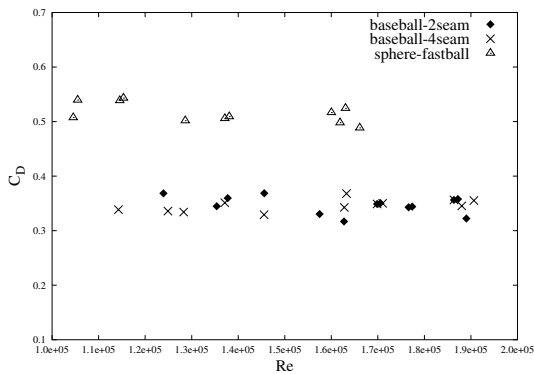


図 16 $Re-C_D$ の関係図 (ストレート)

となり、溝田ら⁹⁾による風洞実験の結果に近い値を示した。また、真球は0.5付近の値をとり、両者とも Re 数に対する依存性は見られなかった。

Re 数と C_{Lz} の関係図を図 17 に載せる。尚、 SP は 0.20~0.26 である。野球ボールの場合は、 Re 数に対す

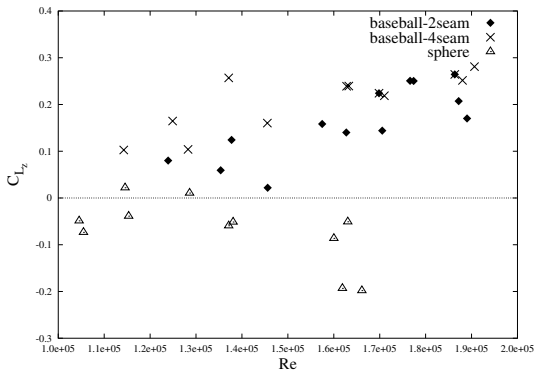


図 17 $Re-C_{Lz}$ の関係図 (ストレート)

る依存性が見られ、 Re 数が大きくなるにつれて C_{Lz} も増加した。また 2 シームの場合の方が 4 シームの場合より若干小さい値をとった。

これに対し、真球の場合では 0 もしくは負の値となった。Maccoll¹¹⁾によると、 $0 < SP < 0.4$ では C_{Lz} が負になる (負のマグナス効果)。その後、負のマグナス効果は Taneda¹²⁾ による水槽実験によって詳細に調べられ、 $SP < 0.6$, $5 \times 10^4 < Re < 5 \times 10^6$ の領域で生じることが示された。今回の測定は、いずれも Taneda の負領域内で行われた。負のマグナス効果は球下面の境界層が乱流遷移するために剥離点が後方に移動し、後流が上向きに発生することにより起こる現象であるとされている。野球ボールの場合でも、 Re 数をそのまま減少させていくと C_{Lz} が負になる可能性がある。実際、 SP が多少小さかったため図 17 には掲載していないが、今回の実験で $SP \approx 0.18$, $Re \approx 1.2 \times 10^5$ で C_{Lz} が負の値を示すのを確認した。

尚、本研究では人間が投げた場合とピッチングマシンによって投げられた場合の測定を行ったが、図 6, 14, 16 から分かるように、同じ Re 数ではジャイロボール、ストレート共に人間が投げた場合の方が C_D が若干小さい値をとっていることが分かる。(ジャイロボールの場合は人間が投げた時は回転軸のずれが大きいので単純には比較できないが、) その原因としてピッチングマシンで投げる際に、ローラーがボールの表面を傷付けることにより何らかの影響を受けている可能性も考えられる。

6 結言

本論文では、野球ボールが鉛直面内で変化する 3 種類の球種の空力特性について解析を行った。また比較のために真球の空力特性の解析も行った。

人間が投げた場合のジャイロボールの C_D は約 0.28, ストレートは約 0.3, フォークボールは約 0.4 となった。しかし、人間が投げたジャイロボールは回転軸が進行方向からずれていたため、ジャイロボールを投球可能なピッチングマシンを製作した。

マシンによるジャイロボールの C_D は Re 数に依存し、 $Re = 2 \times 10^5$ では 0.3 を下まわる結果となった。また $Re = 1.8 \times 10^5$ あたりで C_D が最小値 0.18 をとる。真球の場合は約 0.5 となり Re 数に対する有意な依存性は見られなかった。

マシンによるストレートの C_D は、野球ボール、真球ともに測定の範囲内では Re 数に対する依存性は見られず、野球ボールの時は約 0.35, 真球の C_D はおよそ 0.5 の値をとった。また C_{Lz} に関しては、野球ボールの場合は Re 数に対して依存性が見られ、2 シームの場合の方が 4 シームの場合より小さい値をとった。それに対し真球の場合は揚力が負になるという結果を得た。

謝辞：本研究に協力して下さった電気通信大学の丸山純君、三浦拓馬君、横山佳之君に深く感謝致します。

引用文献

- 1) E.Achenbach: Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, J.Fluid Mech.**54** (1972) 565-575
- 2) E.Achenbach: The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres, J.Fluid Mech.**65** (1974) 113-125
- 3) S.Luthander and A.Rydberg, Eingegangen 1.Juni(1935)552-558
- 4) 魔球の正体：手塚一志，姫野龍太郎，ベースボールマガジン社 (2001)

- 5) R.G.Watts and R.Ferrer: The Lateral Force on a Spinning Sphere, Amer.J.Physics, Vol.55, No.1(1987)40-44
- 6) L.W.Alaways and M.Hubbard: Experimental determination of baseball spin and lift, Journal of Sports Sciences **19** (2001) 349-358
- 7) 野球がおもしろくなる変化球の大研究： 姫野龍太郎, 岩波書店 (2002)
- 8) 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)197-207
- 9) 錦織, 溝田, 小西, 下園, 内村, 河村: 日本流体力学会 2003 74
- 10) K.Aoki, Y.Kinoshita, J.Nagase, and Y.Nakayama: Dependence of Aerodynamic Characteristics and Flow Pattern on Surface Structure of a Baseball, Journal of Visualization, Vol.6, No.2(2003)185-193
- 11) Maccoll: Aerodynamics of a spinning sphere, Journal of the Royal Aeronautical Society, **28**, (1928)777-798
- 12) S.Taneda: Negative Magnus Effect, Reports of Research Institute for Applied Mechanics(1957)123-128