A18 実投球された野球ボールの軌道と縫い目位置の影響 The trajectories of the actually pitched baseball with different seam-positions

○学 山田 啓輔 (九工大・院) 富成 亮介 (九工大・学)
正 平木 講儒 (九工大・工) 正 井上 昌信 (九工大・工)

Keisuke YAMADA, Kyushu Institute of Technology, Sensuicho1-1, Tobata-ku, Kitakyushu-shi

Ryosuke TOMINARI, Kyushu Institute of Technology

Koju HIRAKI, Kyushu Institute of Technology

Masanobu INOUE, Kyushu Institute of Technology

A gyroball was actually pitched to investigate the influence of seam-positions. The differences due to the lift force were found in the trajectories of gyroball and fastball obtained by the high-speed video cameras. The gyroball dropped 20cm deeper than the fastball. However it was unable to distinguish the influence of seam-positions of gyroball in the trajectories. The drag coefficient can be estimated from the initial and final velocities of the pitched baseball which were obtained by the high-speed video cameras. The drag coefficients of the gyroballs were smaller than that of the fastballs. Furthermore, the drag coefficient for the 2seam-position was smaller than that for the 4seam-position.

Key Words: Gyroball, Seam-positions, Trajectory, Drag coefficient

1. 序論

現在、野球の変化球の中で「ジャイロボール」という球種が注目を集めている。ジャイロボールとは、進行方向と回転軸が一致（ライフル回転）するように投げられるため揚力が働かず、縦に落ちるように変化する。また、抗力係数も他の球種と比べ小さいとされているため、打者の予測した到達時間より速く到達するとされている。^{1)~6)}

ジャイロボールに関する研究は近年盛んに行われており、ジャイロボールの縫い目の位置による空力特性の相違も研究されている。主に研究されているジャイロボールの縫い目位置は、Fig.1に示すようにボールが1回転する間に2回縫い目が現れる2シームと、4回現れる4シームがある。姫野は数値計算により、抗力係数が2シームでは0.29、4シームでは0.17と他の球種より小さいことを示した²⁾。溝田らは径の小さいピアノ線を用いてボールを支持した風洞実験を行い、抗力係数が2シームでは0.28、4シームでは0.35という結果を示した³⁾。姫野の数値計算結果では、4シームが2シームより抗力係数が小さくなっているが、溝田らの風洞実験結果では、その逆となっている。また、4シームの抗力係数にいたっては、姫野と溝田らの結果に2倍の差がある。そのため、ジャイロボールの縫い目位置の効果に関しては、まだ少なからず研究の余地がある。

そこで本稿では、ジャイロボールの縫い目位置による空力特性の相違を確かめるために、実投球された2シームと4シームのジャイロボールをハイスピードビデオカメラにより撮影し、軌道及び初速と終速の差の観点より評価した。比較のためにジャイロボールと同じ鉛直面内で変化するストレート、フォークも実験の対象とした。

Fig.1 Typical seam-positions

2. ジャイロ回転

Fig.2に筆者の投じたジャイロボールの回転の様子を示す。縫い目の位置は2シームである。撮影は、ピッチャーの後方から毎秒240フレームで行った。1~8 (0.033[s])でボールがほぼ1回転しており、ボールに付けられているマークが常に中心に位置し、回転の軸が進行方向と一致していることが分かる。

今回の実験では、このような回転が得られた投球のみジャイロボールとして実験結果の評価をしている。

Fig.2 Rotation of actually pitched gyroball

3. 軌道による評価

ジャイロボールは、揚力が働かず、縫い目位置の違いで抗力係数が異なるとされている^{2),3)}。そのためジャイロボールの軌道は、2シームと4シームで抗力係数の差により異なると考えられる。そこでハイスピードビデオカメラで軌道を撮影し、縫い目位置の影響を評価した。

3-1. 軌道の測定方法

実験装置の配置図をFig.3に示す。実験場所の都合により、軌道の撮影距離は、キャッチャー側から13mとした。ボールの軌道と回転を同時に撮影するため、2台のハイスピードビデオカメラを使用した。軌道の撮影には、ノビテック社製 Phantom (毎秒300フレーム)、回転の撮影には、

フォトリソ社製 FASTCAM-Rabbit-mini(毎秒 240 フレーム)を用いた。回転を同時に撮影することで、ボールの回転軸と回転数を読み取り、軌道の評価の参考にした。撮影した軌道の映像から動画解析ソフト (VideoPoint2.5) を用いて軌道を解析した。

3.2. 軌道の測定結果

ほぼ同じ球速と投射角度で投げられたジャイロボール、ストレート、フォークの初速と回転数を Table1 に、軌道を Fig.4 に示す。

Fig.4 より、ジャイロボールがストレートとフォークに比べ、より大きく落ちていることが分かった。ジャイロボールがより大きく落ちる要因は、ストレートとここでのフォークは揚力が働くような回転をしているためであると考えられる。また、この実験の条件では、ジャイロボールとストレートの落差の差は約 20[cm]あることが分かった。

次に、Fig.5 に示すように 2 シームジャイロと 4 シームジャイロのみの軌道を比較した。この 2 つの軌道は、きれいにジャイロ回転しており、投射角、初速共にかなり近いものを比較したが、2 シームと 4 シームによる縫い目位置の違いによる軌道への影響はほぼ見られなかった。ジャイロボールは縫い目位置の違いで抗力係数が違うとされているため、その抗力係数の違いにより、2 シームと 4 シームで軌道に差が生じると予測していたが、抗力係数の違いによる軌道への影響はほとんどないと考えられる。

Table1 Velocity and number of revolution

	Velocity [km/h]		Number of revolution [rps]
	Initial	Final	
2seam-Gyro	98	91	36
4seam-Gyro	96	87	31
Fastball	98	90	24
Forkball	97	87	11

3.3. シミュレーションによる軌道

3.3.1. 運動方程式⁷⁾

飛翔中の野球ボールに働く力は、大別して重力と空気力があり、空気力は抗力、揚力、横力に分けられる。Fig.6 のように軸を定義すると、これらの空気力は式 (1) のように表され、また、野球ボールの運動方程式は式 (2) のように表される。

$$\begin{cases} \mathbf{D} = -\frac{1}{2}\rho C_D A \mathbf{V} \\ \mathbf{L} = -\frac{1}{2}\rho C_L \sin \gamma A V^2 \frac{\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}}{|\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}|} \\ \mathbf{Y} = -\frac{1}{2}\rho C_Y \sin \gamma A V^2 \frac{\mathbf{L} \times \mathbf{D}}{|\mathbf{L} \times \mathbf{D}|} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = D_x + L_x + Y_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = D_y + L_y + Y_y \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = D_z + L_z + Y_z - g \end{cases} \quad (2)$$

Fig.3 Location of experimental equipments (Trajectory)

Fig.4 Comparison of trajectories

Fig.5 Comparison of trajectories (Gyroball)

Fig.6 Definition of axis⁷⁾

ここで、 D は抗力[N], C_D は抗力係数, L は揚力[N], C_L は揚力係数, Y は横力[N], C_Y は横力係数, ρ は空気密度 [kg/m^3], A はボールの投影面積 [m^2], V はボールの速度 [m/s], ω はボールの回転角速度 [rad/s], m はボールの質量 [kg]である。

式 (1) と式 (2) を展開すると,

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \frac{\rho AV}{2m} \left[\frac{C_L}{\omega} (V_z \omega_y - \omega_z V_y) - C_D V_x \right. \\ \quad \left. + \frac{C_Y}{\omega V} (V_y^2 \omega_x - V_x V_y \omega_y - V_x V_z \omega_z + V_z^2 \omega_x) \right] \\ \dot{V}_y = \frac{\rho AV}{2m} \left[\frac{C_L}{\omega} (V_x \omega_z - \omega_x V_z) - C_D V_y \right. \\ \quad \left. + \frac{C_Y}{\omega V} (V_z^2 \omega_y - V_y V_z \omega_z - V_y V_x \omega_x + V_x^2 \omega_y) \right] \\ \dot{V}_z = \frac{\rho AV}{2m} \left[\frac{C_L}{\omega} (V_y \omega_x - \omega_y V_x) - C_D V_z \right. \\ \quad \left. + \frac{C_Y}{\omega V} (V_x^2 \omega_z - V_z V_x \omega_x - V_z V_y \omega_y + V_y^2 \omega_z) \right] - g \end{cases} \quad (3)$$

となる。式 (3) をルンゲクッタ法を用いて数値積分し、軌道を求める。

3-3-2. 計算結果

Fig.7に2シームと4シームのジャイロボールの軌道と速度の計算結果を示す。このとき、 C_D は風洞実験で得られた0.28 (2シーム) 0.35 (4シーム)³⁾, C_L は0, C_Y は0, 初速は100[km/h], 回転数は30[rps]として計算した。

Fig.7より、ボールが投げられて12[m]の位置では、2シームと4シームの軌道の差は、僅か1[cm]程度しかないことが分かった。これは、Fig.5で示した実投球の結果で軌道の差が見られなかったこととほぼ一致する。このため、ジャイロボールの縫い目位置の影響を軌道で評価することは難しい。しかし、2シームと4シームの終速の差は約1.5[km/h]あり、この差を測定することはできるのではないかと考えた。

Fig.7 Simulated trajectories and velocities of gyroball

4. 初速と終速の差による評価

ジャイロボールの縫い目位置の影響を、初速、終速、到達時間をハイスピードビデオカメラより撮影し、それらの関係から抗力係数を算出し評価した。

4-1. 初速、終速、到達時間の測定方法

実験装置の配置図を Fig.8 に示す。初速の測定にはノビテック社製 Phantom (毎秒 400 フレーム), 終速の測定にはフォトロン社製 FASTCAM-Rabbit-mini (毎秒 400 フレーム), 回転の様子とボールの飛翔時間の測定には、ナック社製 HSV-400 (毎秒 200 フレーム) を用いた。参考のために、スピードガンで球速を測定した。

Fig.8 Location of experimental equipments (C_D)

初速と終速の算出のために、2 台のハイスピードビデオカメラ (Phantom: 初速測定と FASTCAM-Rabbit-mini: 終速測定) の横方向距離のフルスケールを 3[m] になるように校正した。Fig.9 に示すように、ボールがカメラにフレームインした直後の距離と時間を x_1, t_1 とし、フレームアウトする直前の距離と時間を x_2, t_2 とすると、初速 V_{xi} と終速 V_{xf} は式 (4), (5) のようになる。

$$V_{xi} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{ピッチャーサイドのカメラ画像}) \quad (4)$$

$$V_{xf} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{キャッチャーサイドのカメラ画像}) \quad (5)$$

Fig.9 Measurement of velocity

しかし、Fig.10 の (b) (c) に示すような軌道の場合、ハイスピードビデオカメラの横方向距離のフルスケールが較正值の 3[m]ではなくなるため、速度を正確に測定できていない。そこで、Fig.11 に示すようにハイスピードビデオカメラの視野と奥行きとの関係を求め、式 (6)、(7) に表されるような方法 (Fig.12 参照、 a_1 と a_2 はカメラに近い方を正とする) で、より正確な速度を求めた。ここで、 V_{xi} は補正後の初速[m/s]、 V_{xf} は補正後の終速[m/s]である。

ボールの奥行き方向のずれの測定は、ピッチャー後方に設置してあるハイスピードビデオカメラ (HSV-400) で行った。

$$V_{xi}' = V_{xi} \left[3.0 - \frac{0.1}{0.3} \left(a_1 - \frac{a_1 - a_2}{b} \frac{l}{2} \right) \right] \quad (6)$$

$$V_{xf}' = V_{xf} \left[3.0 - \frac{0.1}{0.3} \left(a_2 - \frac{a_2 - a_1}{b} \frac{l}{2} \right) \right] \quad (7)$$

Fig.10 Trajectory of pitched baseball

Fig.11 Calibrated length by the depth variation in camera image

Fig.12 Correction by depth effect

この実験の初速と終速の差は、ボールが 2 台のハイスピードビデオカメラ設置間隔 14[m]を飛行したときに生じている。ピッチャー後方から撮影した映像からではボールの投射後からストライクゾーン到達までの時間しか分からない。そこで、式 (8) に示すように 14[m]を飛行したときの時間を求めた。

$$t' = t - \left(\left[\frac{t_2 - t_1}{2} \right] (\text{ピッチャー側}) + \left[\frac{t_2 - t_1}{2} \right] (\text{キャッチャー側}) \right) \quad (8)$$

ここで、 t' は 14[m]を飛行したときの時間[s]、 t はボールの投射後からストライクゾーン到達までの時間[s]である。

4.2. 抗力係数 C_D の算出方法

ボールに抗力のみが働いたときの運動方程式は、式 (9) ように表される。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{1}{2} \rho C_D A V_x^2 \quad (9)$$

これを積分すると、

$$C_D = -\frac{2m}{\rho A t} \left(\frac{1}{V_{xf}} - \frac{1}{V_{xi}} \right) \quad (10)$$

となる。これより、初速、終速、ボールの飛行時間を実験により測定することで抗力係数を求めることができる。

4.3. 抗力係数 C_D の算出結果

Table2 に今回実験を行った球種の実験結果の一例を示す。Fig.13 にジャイロボール、ストレート、フォークの抗力係数の測定結果を示す。この結果より、ジャイロボールがストレート、フォークに比べ抗力係数が小さい傾向があることが分かる。

	V_{xi} [km/h]	V_{xf} [km/h]	t' [s]	C_D
2seam-Gyro	97.4	91.4	0.490	0.29
4seam-Gyro	97.5	90.8	0.496	0.32
2seam-Fast	98.9	91.4	0.489	0.36
4seam-Fast	98.7	91.8	0.485	0.33
Forkball	97.1	87.9	0.516	0.44

Fig.13 Drag coefficient

次に、Fig.14 にジャイロボールの 2 シームと 4 シームを区別した測定結果を、Fig.15 にストレートの 2 シームと 4 シームを区別した測定結果を示す。ジャイロボールでは、2 シームが 4 シームに比べ抗力係数は小さく、ストレートでは、2 シームが 4 シームに比べ抗力係数は大きくなった。これは、ジャイロボールでは、4 シームが左右対象の縫い目位置で回転しながら飛翔するのに対して、2 シームは左右非対称の縫い目位置で回転しながら飛翔するため、2 シームは 4 シームに比べ、ボール周りの流れが不規則的となり、後流が乱れ、はく離点が後方になり、抗力係数が小さくなったのではないかと考えられる。ストレートでは、2 シームが左右対象の縫い目位置で回転しながら飛翔するのに対して、4 シームは左右非対称の縫い目位置で回転しながら飛翔するため、ジャイロボールと同様に 4 シームは 2 シームに比べ、抗力係数が小さくなったのではないかと考えられる。

それぞれの球種において平均値をとった結果を Table3 に示す。この結果は、ジャイロボールに関しては溝田らの風洞実験結果³⁾とほぼ一致しており、ストレートに関しても既知の値とほぼ一致している。

Table3 Average of drag coefficient

2seam-Gyro	0.29
4seam-Gyro	0.33
2seam-Fast	0.36
4seam-Fast	0.33
Forkball	0.43

Fig.14 Drag coefficient (Gyroball)

Fig.15 Drag coefficient (Fastball)

5. 結論

本稿では、ジャイロボールの縫い目位置による空力特性の相違を確かめるために、野球ボールを実際に投げ、ハイスピードビデオカメラを用いて、軌道及び初速と終速を測定する実験を行った。比較のためにジャイロボールと同じ鉛直面内で変化するストレート、フォークについても実験を行った。その結果以下のことが得られた。

軌道を測定した実験から、揚力が働かないジャイロボールが、ストレートとこの実験でのフォークに比べ、大きく落ちる軌道を描くことが分かった。ストレートとの落差の差は球速 100[km/h]で約 20[cm]であった。しかし、2 シームジャイロと 4 シームジャイロの軌道の差は、ほとんど見られなかった。また、飛翔中の野球ボールの運動方程式と既知の空力係数を基に数値計算した結果も同様に軌道の差はほとんど見られなかった。このことから、ジャイロボールの縫い目位置の影響を軌道から捉えることは難しいことが分かった。

初速と終速を測定し抗力係数を算出した実験から、ジャイロボールがストレート、フォークに比べ抗力係数が小さいことが分かった。さらに、ジャイロボール、ストレート共に縫い目位置の違いで抗力係数が異なることが分かった。実験結果を平均すると、ジャイロボールでは、2 シームが 0.29、4 シームが 0.33 となり、2 シームが 4 シームに比べ抗力係数が小さくなった。これは溝田らの風洞実験結果とほぼ一致した。ストレートでは、2 シームが 0.36、4 シームが 0.33 となり、4 シームが 2 シームに比べ抗力係数が小さくなった。

【謝辞】

本研究の実投球にご協力いただいた九州工業大学生命体工学研究科の藤井健太郎君、九州工業大学工学研究科の比良拓郎君、榎木賢一君に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 手塚一志、姫野龍太郎：魔球の正体、ベースボールマガジン社 (2001)
- 2) 姫野龍太郎：野球がおもしろくなる変化球の大研究、岩波書店、(2002)
- 3) 溝田武人、小西弘明、錦織大介：硬式野球ボールの変化球に関する研究(縦スライダの空気力測定と飛翔軌道解析)、日本機械学会講演論文集 No.038-1 (2003)
- 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、ながれ 25, p257-264 (2006)
- 5) 清水鉄也、姫野龍太郎、谷口哲也、桶田史朗、宮崎武：野球ボールにかかる空気力の測定、日本風工学会誌 (2004)
- 6) 姫野龍太郎：野球の変化球とながれ、ながれ 20, p430-434 (2001)
- 7) LEROY WARD ALAWAYS and MONT HUBBARD : Experimental determination of baseball spin and lift , Journal of Sports Sciences 19 , p349-358 (2001)