

野球の実投球における球速や回転数、回転軸を用いた 飛翔軌道シミュレーション

森山 幸平^{*1} 藤田 颯雲^{*2} 大久保 雅俊^{*2} 岡永 博夫^{*3}

Flight Trajectory Simulations Using Ball Speed, Rotation Speed and Rotation Axis on Actual Pitching of Baseball

by

Kohei MORIYAMA^{*1}, Soun FUJITA^{*2}, Masatoshi Okubo^{*2} and Hiroo OKANAGA^{*3}

(Received on Mar. 18, 2022 and accepted on Jul. 7, 2022)

Abstract

In baseball, the pitching trajectory is rarely exactly the same due to factors such as the axis of rotation, number of revolutions, ball speed, and release point. Since the reduction rate of the actual pitching speed and ball speed due to such factors has not been clarified, the accuracy of pitching trajectory simulation remains questionable. Therefore, in this study, the orbit and rotation speed were measured by conducting experiments involving actual pitching of a ball. In addition, using the drag coefficient and lift coefficient obtained by wind tunnel experiments, we simulated four-seams and sliders with different ball speeds and rotation speeds. From the results, the reduction rate of the ball speed and number of revolutions, as well as their influence on the pitching trajectory, were clarified. It was found that the difference in the reduction rate of the number of revolutions is small between four-seams and curves, but that the deceleration rate of the ball speed is higher in the four-seams. In addition, the change in the horizontal direction of sliders increases with larger number of revolutions, and decreases with lower ball speed. In other words, if the ball speed approaches four-seam, it is difficult for the batter to determine.

Keywords: Baseball, Aerodynamics, IoT-ball, Serial photographs, Flight trajectory simulation

1. 緒言

野球というスポーツは、世界的に人気のあるスポーツであり、広く親しまれているスポーツの1つである。ピッチャーが投げるボールはその試合の勝敗を分ける大きな要因となる。投球軌道は回転軸、回転数、球速、リリースポイントといろいろな要素が複雑に絡み合うため、まったく同じ投球軌道を描くボールはほとんどない。ボールの空力特性や飛翔軌道の研究は数多く行われているが、その一例を参考文献の(1)と(2)に示す¹⁾²⁾。村田らの研究^{3,4)}ではIoTボールという球速と回転数、回転軸などが測れるボールを用いて実投球を評価した。その結果、回転軸の傾きが小さいほど上下の変化量が大きくなり、傾きが大きいほど左右の変化量が大きくなるとの報告がされている。また、鈴木らの研究⁵⁾ではプロ野球選手のデータと風洞実験の結果をもとにしたストレートの投球軌道シミュレーションが行われている。球速が速いほど落ちない軌道を描き、球速が同じでも回転数が多いほど落ちない軌道を描くことが報告されている。しかし、鈴木氏らの研究ではストレートの投球軌道シミュ

レーションは行われているが、変化球の投球軌道シミュレーションは行われていない。また実投球の回転数や球速の減少率が解明されていないため投球軌道シミュレーションの精度に疑問が残る。

そこで本研究では、実投球による飛翔軌道実験及び風洞実験で得られた抗力係数、揚力係数を用いて、ストレートとスライダーを球速と回転数を変化させたシミュレーションを行い、それらが投球軌道に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

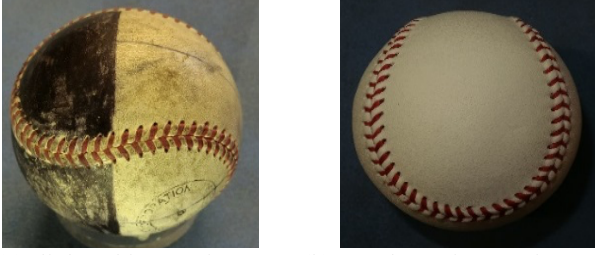
2.1 実験球

本実験で使用する実験球をFig. 1に示す。回転数および球速測定の飛翔軌道実験での実験球を(a)に示す。投球の回転数を判別しやすくするためにボールの半面を黒塗りにして実験を行った。風洞実験での実験球を(b)に示す。風洞実験では(b)の縫い目の位置を風洞吹き出し口に向けて固定する。風洞実験ではミズノ製の社会人試合球JABAを使用する。日本国内での公式使用されているボールの直径約74 mm、重量は約145 gの硬式野球ボールである。

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 工学部機械工学科

*3 工学部機械工学科教授



(a)Flight orbit experiment (b)Aerodynamic experiment
Fig. 1 Experimental balls.

2.2 ボールの球速及び回転数の測定

Fig. 2 に実投球測定の投手、捕手、カメラ保護用のアクリル板とネット、高速度カメラの配置図を示す。球種はストレートとカーブで、カメラに収まった 10 球を画像解析した。本研究のストレートは 4 seam とする。投手は本研究室の野球経験者 3 名を採用し、撮影した動画から連続写真を作製する。写真から得られたボールの球速と回転数の減速率と減少率を算出した。最初の回転数は投手の手からボールが離れた瞬間から約 300 フレーム以内で 1 回転しているコマを算出する。最後の回転数はボールがカメラからフレームアウトした瞬間から直前の約 300 フレーム以内から 1 回転しているコマを算出する。作製した画像から初速と終速を算出した。高速度カメラはカトウ光研株式会社製の MEMRECAM GX-1F を使用した。高速度カメラの設定はフレームレート 2000 fps で撮影を行った。

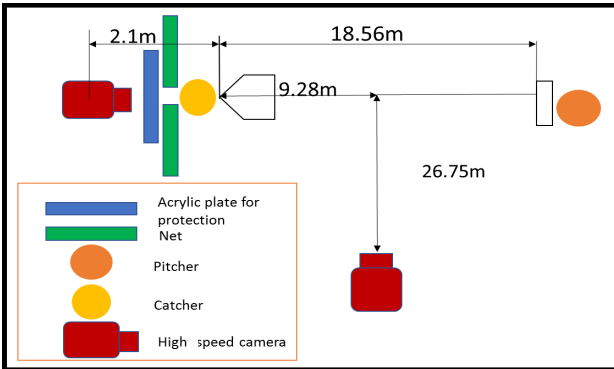


Fig. 2 Image of field experiment.

2.3 空気力測定

本実験で使用した風洞装置およびボールの支持装置を Fig. 3 に示す。Fig. 3 はピアノ線支持装置の概略図である。風洞装置の吹き出し口の大きさは $400 \times 400 \text{ mm}$ である。フレームは風洞の吹き出し口から 90 mm 離して設置した。実験球は Fig. 1(b)を使用した。回転時ボールの空気力測定ではピアノ線支持装置を用い、ピアノ線で $500 \times 500 \text{ mm}$ のフレームの中心に固定して実験を行った。ピアノ線支持装置のピアノ線の直径に、A.J.Smith 氏らの研究⁹⁾よりボール直径を d 、ピアノ線の直径を d_p とした場合、 d/D が 0.037 より小さければピアノ線の影響を無視

することができる。硬式野球ボールの直径は 74 mm であるため、測定の影響が出ない直径 2 mm のピアノ線を使用した。ボールは可変直流安定化電源とフレーム下部に設置したモーターを用いて、Fig. 3 のように時計回りに回転させる。測定時のサンプリング周波数は 1000 Hz 、測定秒数は 2 秒 、収録データ数は 2000 である。これを 5 回行い、平均値と誤差を求めた。得られたデータを用いて式(1)式(2)より抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L を算出する。無次元量の S_p : スピンパラメータを式(3)に示す。ここで、 D : 抗力、 L : 揚力、 A : 投影断面積、 ρ : 空気密度、 U : 流速、 d : ボール直径、 N : ボールの回転数である。なお、本実験の流速は 40 m/s とし、ボールの回転数は、スピンパラメータを実際の競技領域に合わせるために、 $1500 \sim 3000 \text{ rpm}$ で 100 rpm ごとに回転数を増加させた。

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 A} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho U^2 A} \quad (2)$$

$$S_p = \frac{\pi d N}{U} \quad (3)$$

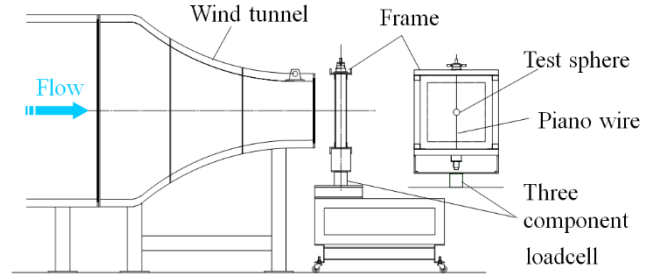


Fig. 3 Schematic diagram of wind tunnel and piano support.

2.4 投球軌道シミュレーション

風洞実験で得られた抗力係数および揚力係数の値を基に 4 次のルンゲ・クッタ法を用いて Table 1 の条件で投球軌道シミュレーションを行う。また、以下の支配方程式を用いた³⁾。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -k \cdot V \cdot u + \frac{l}{H} \cdot V^2 \cdot (v A_z - w A_y) + \frac{s}{F} \cdot V^2 \{ (A_z u - A_x w) w - (A_x v - A_y u) v \} \quad (4)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -k \cdot V \cdot v + \frac{l}{H} \cdot V^2 \cdot (w A_x - u A_z) + \frac{s}{F} \cdot V^2 \{ (A_x v - A_y u) u - (A_y w - A_z v) w \} \quad (5)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -k \cdot V \cdot w + \frac{l}{H} \cdot V^2 \cdot (u A_y - v A_x) + \frac{s}{F} \cdot V^2 \{ (A_y w - A_z v) v - (A_z u - A_x w) u \} - mg \quad (6)$$

$$F = \left[\begin{aligned} &\left\{ (A_z u - A_x w)w \right\}^2 + \left\{ (A_x v - A_y u)u \right\}^2 \\ &- (A_x v - A_y u)v \\ &+ \left\{ (A_y w - A_z v)v \right\}^2 \\ &- (A_z u - A_x w)u \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$H = \left\{ (A_z v - A_y w)^2 + (A_x w - A_z u)^2 + (A_y u - A_x v)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$V = (u^2 + v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$k = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_D \quad (10)$$

$$l = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_L \quad (11)$$

$$s = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_S \quad (12)$$

$$u = V \cos \theta \cos \gamma \quad (13)$$

$$v = V \cos \theta \sin \gamma \quad (14)$$

$$w = V \sin \theta \quad (15)$$

ここで、

m :ボールの質量[kg]

d :ボール直径[m]

V :ボール速度の大きさ[m/s]

u, v, w :それぞれ x, y, z 軸方向の速度[m/s]

A_x, A_y, A_z : 回転軸ベクトルの x, y, z 軸方向成分

θ :鉛直方向角度[°]

γ :水平方向角度[°]

C_s :横力係数

である。球種はストレートとスライダーとし、村田氏らの研究^{3,4)}データのIoTボールで測定した球速と回転数を使用した。計算条件をTable 1に示す。

Table 1 Condition for simulation.

Type of pitch	Slider	Straight
Initial velocity[km/h]	95,114,145	114,148
Number of rotations[rpm]	1712,2085,2406	2085,2478
Azimuth[°]	140	90
Depression angle[°]	15	0

3. 実験結果

3.1 ボール回転数と球速の測定

Table 2 にストレートの球速減速率、Table 3 にカーブの球速減速率の結果を示す。ストレートの減速率は14.2%減少しており、カーブは10.3%減少していることが確認できた。このことからストレートはカーブより減速していることが確認された。

Table 2 Velocity of ball (pitcher2 straight).

Straight	Initial velocity	Final velocity	Deceleration
Pitcher2	102.6 km/h	88.02 km/h	14.2 %

Table 3 Velocity of ball (pitcher2 curve).

Curve	Initial velocity	Final velocity	Deceleration
Pitcher2	90.72 km/h	81.36 km/h	10.3 %

Table 4 にストレートの回転数減少率、Table 5 にカーブの回転数減少率の結果を示す。回転数は、高速度カメラの映像を著者らのうち2名が目視で観測して回転数を測っている。個人差による測定誤差は1%以内であり、ピッチャーごとの回転数の変動は最大で6%であった。ストレートの減少率は1.42~2.09%の範囲で減少しており、カーブの減少率は1.17~2.06%の範囲で減少していることが確認できた。また、ストレートとカーブの減少率の差は変わらないことが確認された。

Table 4 Rotation number of ball (pitcher2.3 straight).

	Initial rotation	Final rotation	Deceleration
Pitcher2	1127 rpm	1111 rpm	1.42 %
Pitcher3	1481 rpm	1450 rpm	2.09 %

Table 5 Rotation number of ball (pitcher1.2.3 curve).

	Initial rotation	Final rotation	Deceleration
Pitcher1	1747 rpm	1711 rpm	2.06 %
Pitcher2	1191 rpm	1172 rpm	1.60 %
Pitcher3	1283 rpm	1268 rpm	1.17 %

3.2 風洞実験結果

Fig. 4, Fig. 5 に抗力・揚力係数測定の結果を示す。Fig. 4 より抗力係数は0.34~0.36で、スピンパラメータが増加しても抗力係数の値は変化しなかった。Fig. 5 より揚力係数は0.18~0.22の範囲で、スピンパラメータが増加するにつれ、揚力係数は増加した。これらは坂本氏らの4シームの研究結果¹⁾と同様な結果が得られている。

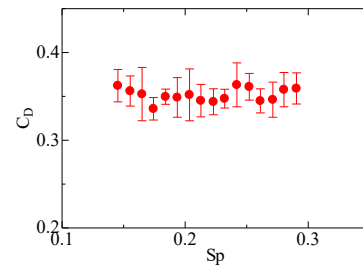


Fig. 4 Drag coefficient of rotating of ball.

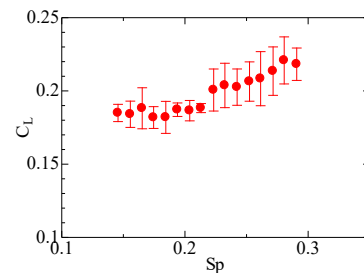


Fig. 5 Lift coefficient of rotating of ball.

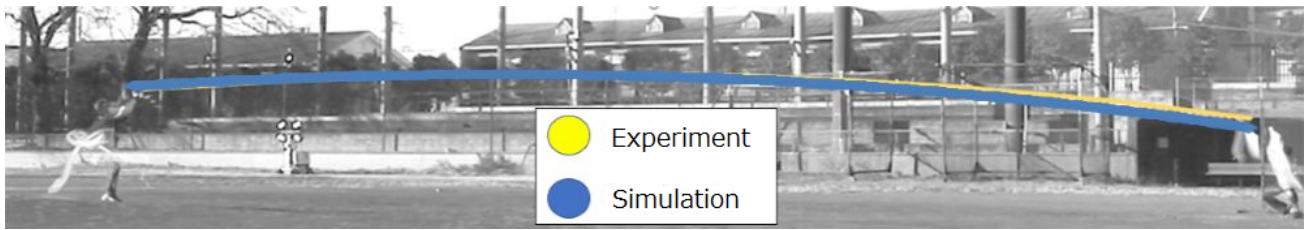


Fig. 6 Trajectory of experiment and simulation (viewed from the side).

3.3 実投球の飛翔軌道及びシミュレーション比較

実際に IoT ボールでストレートを投げ、それと同時に投げたボールを高速カメラで撮影した。IoT ボールのデータより、球速 112 km/h、回転数 1467 rpm、回転軸 9° であった。このデータと、風洞実験で得られた抗力係数、揚力係数のデータを用いてシミュレーションを行った軌道と動画から抽出した連続写真から得られた軌道を Fig.6 に示す。実際に投げられた投球の連続写真とシミュレーションを比較すると軌道はおおよそ一致しており、実際の投球軌道を再現できていることが確認できた。

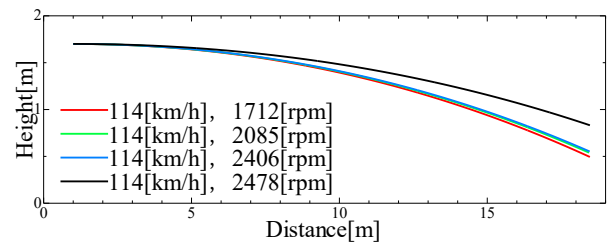
3.4 飛翔軌道シミュレーション比較

Fig. 7 はストレートのシミュレーションとスライダーの球速 114 km/h で固定し、回転数を変えたシミュレーションの結果を示したものである。図中の(a)はストレートの軌道を横から見た図、図中の(b)はスライダーの軌道を上から見た図である。回転数がバックspinであるストレートにおいては Fig. 7(a)より 2406 rpm は 2085 rpm と比較すると 0.01m 高く、1712 rpm と比較すると 0.06 m 高い軌道になった。スライダーにおいては Fig. 7(b)より 2406 rpm は 2085 rpm と比較すると 0.02 m 横方向に大きく変化し、1712 rpm と比較すると 0.05 m 横方向に大きく変化した。以上の結果から、スライダーは回転数が多いほど落ちない軌道であり、横方向に変化が大きくなることが明らかになった。

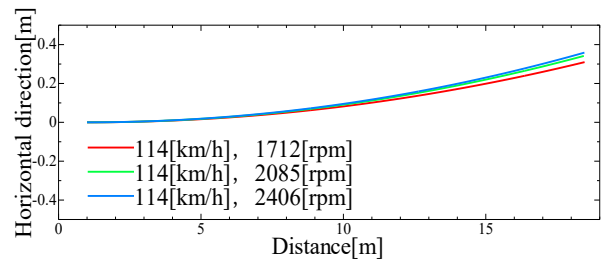
Fig. 8 はストレートのシミュレーションとスライダーの回転数 2085 rpm で固定し、球速を変えたシミュレーションの結果を示す。ストレートの場合、Fig. 8(a)より 145 km/h は 114 km/h と比較すると 0.41 m 高く、95 km/h と比較すると 0.7 m 高い軌道になった。スライダーの場合、Fig. 8(b)より 145 km/h は 114 km/h と比較すると 0.02 m 横方向に曲がらなく、95 km/h と比較すると 0.05 m 横方向に曲がらなかった。以上の結果から、スライダーは球速が速いほど落ちない軌道であり、横方向の変化が小さくなることが明らかになった。

Fig. 7(a), Fig. 8(a)よりストレートとスライダーの到達点において大きな差があり、回転数よりも球速の方が軌道に大きな影響を及ぼしており、球速を上げた方が打者はストレートとの見極めが難しくなる。MLB のすべてのピッチングデータを取得できるサイト [7](#) を見ると、クレイトン・カーショウはスライダーの球速は速く 143 km/h で被打球率は 0.192 を記録しており、ストレートとの球速の差は約 7 km/h である。それに対し、田中将大のスライダー

の球速は約 135 km/h で被打球率は 0.260 を記録しており、ストレートとの球速の差は約 13 km/h である。球速差が少ないほど被打球率が低くなっているため見極めが難しいと考えられる。

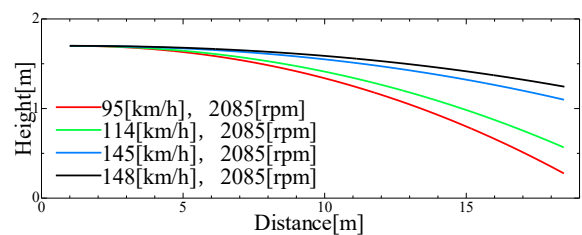


(a) viewed from the side (straight)

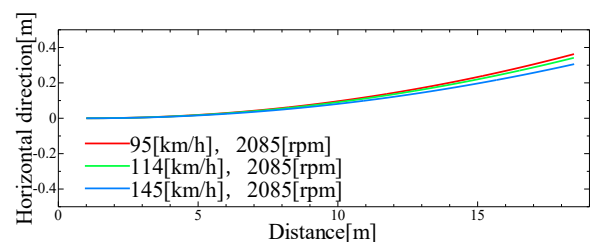


(b) viewed from the top (curve)

Fig. 7 Trajectory simulation (fixed speed ball).



(a) viewed from the side (straight)



(b) viewed from the top (curve)

Fig. 8 Throw trajectory simulation (fixed rotation).

4. 結言

球速において、ストレートとカーブでは、ストレートの方が減速率は高く、回転数ではストレートとカーブともに減少率の差はなかった。つまり、回転数は空力特性に影響はほぼないことが確認できた。また、高速度カメラによる連続写真と IoT ボールのデータと、風洞実験データの軌道シミュレーションはおおよそ一致したため、実際の投球軌道を再現できていることが確認できた。そして、飛翔軌道シミュレーションにより、スライダーは回転数が多いほど落ちない軌道で横方向に大きく変化し、球速が多いほど落ちない軌道だが、横方向への変化は小さいことが確認できた。ここで、回転数を上げるよりも、球速をストレートの球速に近づけた方が、より打者が見極めづらいボールになることも明らかになった。

参考文献

- 1) 坂本誠馬, 長谷川淳哉, 溝田武人, 統一球と日米硬式野球ボールの特性, 日本機械学会シンポジウム:
- 2) 溝田武人: スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学 (生物流体力学における計測問題), 数理解析研究所講究録, pp.40-58 (2015).
- 3) 村田遼平, 伊藤慎一郎, 平塚将起, 岡永博夫: IoT ボールを用いた変化球の実投球データの測定と軌道シミュレーション, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2020 講演論文集 [2020.11.13-11.15, オンライン].
- 4) 村田遼平, 伊藤慎一郎, 岡永博夫: IoT ボールを用いた硬式野球ボールの実投球データの測定と軌道シミュレーション, 日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集 [2020.9.13-16, 名古屋].
- 5) 鈴木悠太, 坪井一洋, 野球ボールの投球軌道シミュレーション, 茨城大学卒業論文 (2010).
- 6) A. J. Smits and D. R. Smith: A new aerodynamic model of a golf ball in flight, Science and Golf II, E.&F.N. Spon, London, pp.340-347 (1994).
- 7) <https://www.brooksbaseball.net/> [2021.9.28 閲覧].