110 野球投手が投じる様々な球種の飛翔軌道を決定する要因

Factors to determine the flight trajectory in various kinds of baseball pitch.

○永見 智行 (早稲田大学)
矢内 利政 (早稲田大学)

樋口 貴俊 (早稲田大学)
彼末 一之 (早稲田大学)

Tomoyuki NAGAMI, Waseda University, 2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama
Takatoshi HIGUCHI, Waseda University
Toshimasa YANAI, Waseda University
Kazuyuki KANOSUE, Waseda University

The purpose of this study was to investigate the relationship between the flight trajectory of the ball and ball spin in various kinds of baseball pitch. Each subject thrown various kinds of their own pitches for three throws each. The pitched balls were recorded using 4 high-speed video cameras. The flight trajectory, ball spin rate, and direction of spin axis were obtained from the video images, and hypothetical flight trajectory with free fall was calculated from ball initial velocity. Equations were obtained to estimate the displacement of the flight trajectory from that of the free fall ball using “decomposed spin parameter” which consists of the ball spin rate, direction of spin axis, and initial velocity ($p < 0.001$). The findings showed that the displacement of the flight trajectory depended on the ball spin rate and direction of spin axis, thereby accurately predictable from the spin. The characteristics of ball spin can be utilized to develop a strategy to alter the flight trajectory.

Key Words: <ball spin, 3d videography, fastball, slider >

1. 緒言

野球の投手は直球や様々な変化球を投げ分け、打者を打ち取ろうとする。こういった投球の種類(球種)の差異は、ボールの飛翔軌道の差異で表される。ボールの飛翔軌道を決定する要因として、リリース直後の1) ボール移動速度、2) ボール回転速度、3) ボール回転軸の向き、4) 回転軸に対するボール縫目の向きが挙げられ(Nathan¹)、特に投手はボールの回転を調節し、飛翔するボールの変位の大きさやその方向を変化させようとする。しかし回転をどのように変化させれば理想的な飛翔軌道が実現するのかが分からず、うまく投球できないことも多い。

ボールの回転が飛翔軌道に与える影響を検討した研究には、風洞内でボールを回転させ、その空力特性を計測したものが多く、これらの実験からは、ボールの回転軸が進行方向と直交するとき、発生する揚力の大きさはスピンパラメータ(Sp, 回転速度と移動速度の比、後述)の大きさに依存することが明らかとなっている(Briggs², Watts and Ferrer³, Alaways and Hubbard⁴, Nathan¹)。一方でボールの回転軸が進行方向を向く場合は、揚力が発生しないことが分かっており(溝田ら⁵)、必ずしも揚力はスピンパラメータに依存するわけではない。また、回転軸に対するボールの縫目の向きの違いが発生する揚力に影響を与えるとする報告(Alaways and Hubbard⁴, 溝田ら⁵)もあるが、影響は無いとする研究(高見ら⁶)もあり、見解は一致していない。

一方実際に投手が投じたボールの回転を詳細に分析した研究では、直球やカーブ(Jinji et al.⁷, Nagami et al.⁸)に関するものがあり、投手によって、また球種によって回転軸の向きや回転速度が異なることが分かっている。しかし様々な異なる回転軸の向きや回転速度の違いが、飛翔軌道にどの程度の影響を与えているかは不明である。以上のことから、そもそも投手が投球することが可能な変化球や、理想とする飛翔軌道を実現するために必要なボールの回転を把握することは、投手の指導や練習に役立つと考えられる。

本研究では、実際に投手が投じる様々な球種のボール回転(回転速度、回転軸角度、縫目の向き)と飛翔軌道の関係を明らかにする。その際、指導や実践の現場への応用を念頭に、ボールに働く力そのものではなく、どれだけ曲がるか、落ちるかといったボールの変位量に着目する。またボールの回転はサイドスピン成分とトップ/バックスピン成分に分解し、

水平、垂直方向への変位量との関係を明らかにする。

2. 方法

2-1 被験者

被験者は大学野球部投手7名とした。被験者の身長は 1.80 ± 0.04 m, 体重は 74.6 ± 4.1 kgであり、全員右投げであった。被験者には文章及び口頭で実験内容を十分に説明し、実験参加の同意を得た。なお本研究は早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得て行われた。

2-2 実験手順

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、実験用に設置された正規規格の投球マウンドから捕手に向けて、直球とその他投球可能な変化球を3球ずつ投球させた。

この際、リリースから捕手が捕球するまでのボールの飛翔する様子を3台の同期された高速度ビデオカメラ(Fig. 1内カメラA, B, C。撮影速度: 125 fps, 露光時間: 1/2500 s, ピクセル数: 1280×1024, Fastec Imaging社製)で撮影した。また、リリース直後約100 ms間でボールが回転する様子を、投球マウンド後方(2塁側)に設置した高速度ビデオカメラ(Fig. 1内カメラD。撮影速度: 1000 fps, 露光時間: 1/20000 s, ピクセル数: 640×480, Fastec Imaging社製)で撮影した。投球終了後、映像の較正点として、放射状に68点のマーカ一が配置された較正器(直径2.4 m, 較正点間隔: 0.50 m)を5箇所に設置し、カメラA, B, Cで撮影した。

Fig. 1 Cameras setting.

Fig. 2 Recorded images

2-3 データ処理

2-3-1 ボール飛翔軌道の解析

カメラ A, B, C の映像から、解析ソフト (Frame-Dias 4, DKH 社製) を用い、3D-DLT 法 (Abdel-Aziz et al.⁹⁾) によってボール中心の 3 次元座標値を算出した。空間座標系はピッチャープレートの長軸中央、捕手寄りの点の直下で、ホームベースの置かれた水平面上を原点とした空間座標系 (投球方向を Y 軸 (捕手に向かって正)、左右方向を X 軸 (3 塁に向かって正)、垂直方向を Z 軸 (上方に向かって正)) とした (Fig. 3)。座標値の各成分はバターワース型のローパスデジタルフィルタで平滑化した。遮断周波数 (6~8 Hz) は残差分析法 (Winter¹⁰⁾) を用いて決定した。リリース直後とその 2 コマ後 (16 ms 後) のボール中心座標から、移動速度 (v) と X-Y 平面 (Y 軸方向を 0° とし、3 塁方向が正)、Z-Y 平面 (水平方向を 0° とし、上方が正) における投射角度を算出した。この初期条件から、自由落下すると仮定した飛翔軌道を算出し、ホームベースの頂点 ($Y = 18.44$ [m]) を通る X-Z 平面を通過する際の座標値 (自由落下捕球位置) を算出した。また実際にこの面を通過する際の座標値 (実際の捕球位置) を、捕球直前 10 コマの座標値を最小二乗法により算出された二次近似式から算出した。実際の捕球位置と自由落下捕球位置との水平成分、垂直成分の差をボールの変位量 (ΔX , ΔZ) とした (Fig. 3)。

Fig. 3 Global coordinate system and the definition of the ΔX and ΔZ .

2-3-2 ボール回転の解析

カメラ D の映像から、ボール中心を原点とし、映像横方向を X_B 軸、垂直方向を Z_B 軸、奥行き方向を Y_B 軸とするボール座標系を設定した。カメラレンズの光軸を空間座標系の Y 軸と概ね一致しているため、ボール座標系の各軸は空間座標

系の各軸と平行であると考えた。この映像から特製の測定器を用い、ボールの回転速度 (revolutions per second, rps)、回転軸角度 (方位角 θ (進行方向 (Y_B 軸正方向) が正)、仰俯角 ϕ (上方方向 (Z_B 軸正方向) が正, Fig. 4)) を算出した (Nagami et al.⁸⁾)。回転軸の向きは右ねじの方向とした。また同じ映像から目視により、ボールの回転を 4 シーム回転、2 シーム回転、それら以外に分類した。

2-3-3 回転軸角度及びスピパラメータの分解

計測されたボール移動速度、回転速度から、以下の式によりスピパラメータ (Sp) を算出した。

$$Sp = \pi \cdot d \cdot \omega / v$$

$d = 0.072$: ボール直径 [m]
 ω : ボール回転速度 [rps]
 v : ボール移動速度 [m/s]

また、回転軸を Z_B 軸成分、 X_B 軸成分に分解し、スピパラメータの水平方向成分 (Sp_{hor})、垂直方向成分 (Sp_{ver}) を算出した (Fig. 4)。

$$Sp_{hor} = Sp \cdot \sin \phi$$

$$Sp_{ver} = Sp \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi$$

Fig. 4 Definition of the azimuth (θ) and elevation (ϕ) angle for calculating the Sp_{hor} and the Sp_{ver} .

2-3-4 統計処理

全投球における Sp_{hor} と ΔX , Sp_{ver} と ΔZ について、最小二乗法により直線回帰分析を行った。同様に 4 シーム回転の全投球、2 シーム回転の全投球における Sp_{hor} と ΔX , Sp_{ver} と ΔZ についてもそれぞれ直線回帰分析を行い、それぞれの回帰係数 (傾き, y 切片) を比較した。また 4 シームの直球と 2 シームの直球の双方を投げていた被験者 (6 名) の結果から、それらの移動速度、回転速度、回転軸角度 (方位角, 仰俯角) Sp , Sp_{hor} , Sp_{ver} , ΔX , ΔZ を、対応のある t 検定を用いて比較した。各処理には統計ソフト (SPSS ver. 20, IBM 社製) を用いた。

3. 結果

Table 1 には、球種毎の縫目の向き、平均移動速度、投射角度、変位量 (ΔX , ΔZ)、回転速度、回転軸角度 (方位角 θ , 仰俯角 ϕ)、 Sp , Sp_{hor} , Sp_{ver} を示した。Figure 5 にはボール座標系における X-Z 平面、X-Y 平面における回転軸の向きを球種毎に示した。図中の 1 つの回転軸は、一人の被験者の投じた同一球種 3 球を平均したものであり、矢印の先端部は代表的なもののみ付加した。Figure 6 には、投手 A の投じた 5 つの球種の X-Y 平面、Z-Y 平面に投影した飛翔軌道 (実線) と、自由落下したと仮定した際の放物線 (点線) を示した。4 シーム直球と 2 シーム直球については、 ΔX 及び方位角にのみ、それぞれ有意差 (ΔX : $p < 0.01$, 方位角: $p < 0.05$) が認められ、2 シーム直球のほうが右打者方向へと変位していた。7 名の被験者が投じた全 75 球において、 ΔX は Sp_{hor} を、 ΔZ は Sp_{ver} をそれぞれ独立変数とした回帰式で表された。

Table. 1 Ball characteristics of each kind of pitches.

n	Seam orientation				Ball speed				Projection angle				Amount of displacement				Spin rate		Direction of spin axis				Spin parameter					
	4-seam	2-seam	?		Initial		Final		Horizontal		Vertical		ΔX		ΔZ		(rpm)	θ		φ		Sp		Sp hor		Sp ver		
					(m/s)	SD	(m/s)	SD	(deg)	SD	(deg)	SD	(mm)	SD	(mm)	SD		(deg)	SD	(deg)	SD							
4-seam FB	7	7	-	-	35.5	3.0	32.3	2.5	-4.1	0.6	0.0	2.0	272	82	362	120	32.8	4.5	23	25	-31	8	0.209	0.016	-0.106	0.024	0.149	0.040
2-seam FB	6	-	6	-	32.8	2.7	29.9	2.4	-2.7	1.3	0.9	1.0	348	84	261	73	27.6	4.2	20	33	-41	12	0.190	0.021	-0.123	0.034	0.109	0.024
Slider	6	1	3	2	31.1	2.5	28.5	2.1	-2.8	0.8	1.3	1.2	-149	70	6	72	35.9	5.2	96	12	19	9	0.261	0.029	0.084	0.042	-0.028	0.052
Forkball	3	-	3	-	32.8	2.2	30.4	2.3	-3.3	0.4	-0.8	1.8	188	74	-39	63	14.9	5.7	80	25	-24	15	0.101	0.034	-0.043	0.035	0.020	0.035
Curveball	1	1	-	-	31.1	-	28.5	-	-1.8	-	2.1	-	-200	-	-257	-	37.6	-	129	-	23	-	0.273	-	0.107	-	-0.158	-
Cut FB	1	1	-	-	34.8	-	32.7	-	-3.0	-	-1.7	-	-98	-	68	-	41.9	-	84	-	7	-	0.272	-	0.031	-	0.026	-
Change-up	1	1	-	-	30.6	-	28.5	-	-3.4	-	-0.7	-	280	-	220	-	16.5	-	27	-	-40	-	0.122	-	-0.079	-	0.083	-

Fig. 5 Direction of spin axes of the seven kinds of pitches.

Fig. 6 Flight trajectories of the balls thrown by Sub. A.

Fig. 7 Relationship between A) Sp_{hor} and ΔX , and B) Sp_{ver} and ΔZ . Open marks are pitches with four-seam spin, black closed marks are pitches with two-seam spin, and gray closed marks are pitches which spins were unjudged whether four- or two-seam.

(ΔX : $R^2 = 0.902$, $p < 0.001$, ΔZ : $R^2 = 0.869$, $p < 0.001$, Fig. 7).一方で、4 シーム回転の球種のみでの回帰係数 (傾き, 切片) と 2 シーム回転の球種のみでの回帰係数との間に差は認められなかった。

4. 考察

4-1 変位量を決定する要因

投球の左右, 上下方向への変位量 (ΔX , ΔZ) は, サイドスピン成分とトップ/バックスピン成分に分解したスピンパラメータ (Sp_{hor} , Sp_{ver}) によってそれぞれ 90%, 87% 説明できることが分かった。このことから, 本研究における回転軸方向の分解とこれを用いたスピンパラメータの分解法が, 変位量の算出に有効であると言える。

また変位量とスピンパラメータ分解成分の関係において, 縫目の向きの違い (4 シーム, 2 シーム) による回帰係数の違いは認められなかった。このことから縫目の向きの違いそのものがボールに働く揚力に与える影響は小さいものと考えられる。一方で 4 シーム直球と 2 シーム直球では左右方向への変位量に群間差が認められたが, これは仰俯角の大きさの違いによって生じたものであると考えられ, 縫目に対する指の掛け方の違いが投げられたボールの回転軸の向きに影響を与えたものと推察できる。

4-2 直球の“伸び”

4 シーム直球は最も基本となる球種であり, その評価は移動速度の速さだけでなく, “伸び” の良い悪いによって表現される。本研究の被験者の中では, 特に被験者 A の 4 シーム直球が “伸び” が良いと評価される投球である。実際, 被験者 A の 4 シーム直球の ΔZ は 498 mm で被験者中最大であった。これは, 一流プロ野球投手, 大学野球投手計 22 名の 4 シーム直球の移動速度, 回転速度, 回転軸角度 (Nagami et al.⁸⁾) を回帰式に代入して得られた ΔZ (平均 365 ± 61 mm, 最大 486 mm) と比べても大きい。以上のことから, 直球の “伸び” は垂直上方向への変位量の大きさによって決定されることが考えられ, 回転速度を高め, かつ仰俯角, 方位角を 0° に近づけることでより良い “伸び” を獲得することができると考えられる。

4-3 スライダーの“曲がり”

一般に右投げ投手の投じるスライダーは左打者方向へと変位する, “鋭く大きく曲がる” 投球と考えられている。しかし本研究で投げられたスライダーは, 回転軸が概ね進行方向を向いているため Sp_{hor} , Sp_{ver} がともにほぼゼロであり, ΔX は平均 -149 ± 70 mm で, 最も大きく左打者方向へ変位した投

球でも -313 mm であった。先行研究 (永見ら¹¹⁾) におけるプロ野球投手の投じるスライダーの回転速度, 回転軸角度も本研究と同様の傾向であり, 一流投手の投じるスライダーでも同程度の変位量であると言える。一方で, 一般的に左右方向への変位がほとんど生じないと考えられている 4 シーム直球は, スライダーとは反対方向 (右打者方向) へ変位していた上, その変位量 (平均 272 ± 82 mm) はスライダーよりも大きい傾向にあった。4 シーム直球を “まっすぐに向かってくる” ように感じている打者にとって, スライダーが実際よりも大きく左打者方向へ変位をしているように感じられ, スライダーを “鋭く大きく曲がる” 投球であると錯覚している可能性が示唆された。

ただし, 仮に空間座標系での回転軸の向きが飛翔中に変化していないとしても, 重力に従って落下していくことで進行方向がより下向きとなれば, 進行方向に対する回転軸の相対的な向きが変わり, サイドスピン成分が発生すると推察できる。実際, 捕球直前のスライダーは約 10° 下向きに進んでいたことから, 左打者方向へと変位している可能性も考えられる。また長谷川ら¹²⁾ は, サイドスピン以外の成分, すなわち方位角の違いによってボールに横向きの揚力が働くことを明らかにしており, こういった要因が少なからず影響していることも否定できない。

4-4 変位量を改善するための方策

得られた回帰式より, 投球の左右方向への変位量を大きくするには, 仰俯角を $\pm 90^\circ$ に近づけ, 回転速度を高めることが有効であると言える。また垂直上方向への変位量を大きくするには, 仰俯角, 方位角を 0° に, 下方向への変位量を大きくするためには仰俯角を 0° , 方位角を 180° に近づけ, 回転速度を高めることが有効であると言える。またこういった回転の変更によって変わる変位量の大きさも推定できるようになった。

例えば, 被験者 A の投じるスライダーを 72 mm (ボール直径分) 大きく落ちるような軌道に改善するためには, 方位角を 95° から 102° へ変更することが必要となる。また被験者 G のスライダーでは, 仰俯角を 20° から 28° へ変更することで, 左方向への変位を 72 mm 増加させられることが分かる。

また被験者 D, E が投じる 4 シーム直球はどちらも同程度の ΔZ であったが, これをボール直径分増加させるには異なる方策が有効であると考えられる。被験者 D の場合, 仰俯角が平均よりも大きく下向きに傾いており, これを -45° から -30° へ変更することで ΔZ は 72 mm 大きくなる。被験者 D が回転速度の改善によって同じ効果を得ようとするとして, 45

rps まで増加させなければならず、現実的ではない。一方の被験者 E は回転速度を 29.4 rps から 36.0 rps まで増加させれば同程度の ΔZ が得られる。一方で、仮に 0° まで仰俯角を変更できたとしても同じだけの効果は得られない。このように、飛翔軌道を改善しようとする際は個人々々の回転の特徴を考慮する必要があることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、実際に投手が投じる様々な変化球について、ボールの回転が飛翔軌道に与える影響を検討した。その結果、縫目の向きに関わらず、サイドスピン成分及びトップ/バックスピン成分に分解したスピンパラメータによって、捕手捕球位置までの変位量を説明できることが分かった。これにより、個々が理想とする変位量を実現するために必要なボール回転を知ることができ、個々の特性に合わせた回転の目標値を設定できるようになった。

参考文献

- 1) Nathan AM. The effect of spin on the flight of a baseball. *Am J Phys.* 2008;76(2):119-124.
- 2) Briggs LJ. Effect of spin and speed on the lateral deflection (curve) of a baseball; and the Magnus effect for smooth spheres. *Am J Phys.* 1959;27(8):589-596.
- 3) Watts RG, Ferrer R. The lateral force on a spinning sphere: Aerodynamics of a curveball. *Am J Phys.* 1987;55:40-4.
- 4) Alaways LW, Hubbard M. Experimental determination of baseball spin and lift. *J Sport Sci.* 2001;19(5):349-358.
- 5) 溝田武人, 錦織大介, 小西和明. 硬式野球ボールの縦スライダに関する流体力測定と飛しょう軌道解析. 日本機械学会論文集 (B 編). 2007;73(734):1987-1992.
- 6) 高見圭太, 宮寄武, 姫野龍太郎. バックスピンする球体に働く負のマグナス力～飛翔実験による測定～. *ながれ*. 2009;28:347-356.
- 7) Jinji T, Sakurai S. Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. *Sports Biomech.* 2006;5(2):197-214.
- 8) Nagami T, Morohoshi J, Higuchi T, Nakata H, Naito S, Kanosue K. The spin on fastballs thrown by elite baseball pitchers. *Med Sci Sport Exer.* 2011;43(12):2321-2327.
- 9) Abdel-Aziz YI, Karara HM. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *ASP Symposium on Close Range Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA. 1971;1-19.
- 10) Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement, John Wiley and Sons. 1990: 41-43.
- 11) 永見智行, 矢内利政, 彼末一之. 野球投手が投じる変化球の回転の特徴. 第 22 回日本バイオメカニクス学会大会発表. O2-B04.
- 12) 長谷川淳哉, 坂本誠馬, 田多輝洋, 鳴尾丈司, 溝田武人. 風洞実験による硬式野球ボールの空力特性 (回転軸の方向の違い). スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクスシンポジウム 2011 講演論文集. No11-17:31-34.