Journal of High Performance Sport 6(2020)88-100

原著論文

一流女子ソフトボール投手が投じているボールの回転と飛翔軌道の特徴

Characteristics of the rotation and flight trajectory of balls thrown by elite female softball pitchers

森下義隆 [1),2)]，村田宗紀 [1),3)]
Yoshitaka Morishita[1),2)], Munenori Murata[1),3)]

Abstract : In this study, we investigated the kinematic characteristics of various pitch types thrown by skilled softball pitchers. Nine female softball pitchers from the national Japanese softball team were requested to throw various pitch types that are used in competition and practice using the windmill style, while a three-dimensional motion capture system consisting of 20 infrared cameras (500 Hz) recorded reflective markers attached to the ball. The kinematic characteristics, such as the ball speed, spin rate, and direction of spin axis (angular velocity vector) were calculated from the measured coordinate values. The types of pitches (fastball, riseball, drop, and changeup) thrown by more than 5 pitchers were analyzed. The spin axes of all the analyzed trials were mostly oriented in the direction of the ball and upwards. The average ball speed of the fastball pitched by all pitchers had the highest, and in the case of the right-handed pitcher, the displacement of flight trajectory on the home plate changed by approximately 0.17 m downward and 0.06 m toward the left-handed batter under the influence of the lift force, as compared to that of the balls that were projected without rotation. Furthermore, when the flight trajectories of other pitch types were compared with that of fastball, the riseball, drop, and changeup types were shown to change in the upward, downward, and upper left directions, respectively. Our findings can be used as a guide to develop new pitch types or improve those that are currently employed in the game.

Key words：direction of spin axis, spin rate, breaking ball, windmill style
キーワード：回転軸の向き，回転数，変化球，ウィンドミル投法

[1)] 国立スポーツ科学センター，[2)] 立命館大学，[3)] 鹿屋体育大学
[1)]Japan Institute of Sports Sciences, [2)]Ritsumeikan University, [3)]National Institute of Fitness and Sports in Kanoya
E-mail : ymorishi@fc.ritsumei.ac.jp

受付日：2020 年 2 月 25 日
受理日：2020 年 7 月 16 日

Ⅰ．緒言

野球やソフトボールにおいて、投手は打者を打ち取るために速度や回転を変化させた様々なボールを投じ、ホームベースまでのボールの到達時間やその飛翔軌道を操る。野球の投手がボールにどのような回転を生じさせ飛翔軌道を操っているかを明らかにすることは投手と打者の勝負を左右する重要な課題であると考えられる。そのため、先行研究では硬式野球ボールの空気力学的な特性や様々な球種の速度や回転の特徴について、風洞実験、およびピッチングマシンから発射されたボールや実際に投手が投じたボールが分析されてきた[1), 5), 6), 7), 11), 12), 13), 18), 19)]。これらの研究では、例えばオーバースローの右投げ投手の場合、ストレートは純粋なバックスピンをしておらず、ボールの角速度ベクトルが進行方向に対して3塁方向に約60°かつ下方向に約20°傾いており、その回転の影響（マグヌス効果）により、ボールには投手からみて右上方向に揚力が作用することが示されている[6), 11), 12), 19)]。また、ストレートを含め、野球投手が投じる様々な球種は、実際の回転や飛翔軌道などの特徴が指導書等の説明と一致しないことが報告されている[12)]。ただし、これらの研究結果は全て野球競技に特化したものであり、投手のパフォーマンス向上やピッチングマシンの開発などに役立つ知見であるが、これらの知見がソフトボール競技にそのまま活用できるかどうかは不明である。

ソフトボールの投球は、ルール上、投球腕側の手部が体側に沿った状態でボールをリリースする必要がある[8)]。つまり、野球のように投球腕の肩関節を外転させて投げることができないため、野球のアンダースローと同じ下手投げではあるものの、投じられたボールの回転や軌道は全く異なることが予想される。試合の投球を分析した研究をみてみると、多くの投手が投じていたボールは揚力の生じないボール（無回転で投射されたボール）と比較して、鉛直方向に変化していることが報告されている[15)]。そして、ボール軌道が鉛直方向に変化する要因として、ソフトボール特有の投球動作が関係していると考察されている。しかしながら、この研究では各投手が投じたボールを初速度と鉛直方向のボール軌道の変化から球種を4種類に分類しているため、投手自身が申告した球種とは異なる。そのため、実践現場においてストレートや変化球として認識されている様々な球種が、それぞれどれだけの速度でどのような軌道の特徴を有しているかを特定するまでに至っていない。このことから、野球において永見ら[12)]が指摘しているように、球種の呼称が異なるだけで、運動学的特徴が変わらない球種がソフトボールにおいても存在するかもしれない。

野球の投球と同様にソフトボールの投球においても、様々な球種のボールの回転や飛翔軌道の特徴が数値化されることは、これまでに存在しない新しい球種を開発したり、既に習得している球種を改善したりする際の目安になるため、練習や指導において有効に活用できるものと考えられる。そこで、本研究では熟練したソフトボール投手が投じる様々な球種の回転や飛翔軌道の特徴を明らかにすることを目的とした。

Ⅱ．方法

1．被験者

女子ソフトボール日本代表の投手9名を対象とした。被験者の身長、体重、年齢の平均±標準偏差は、それぞれ167.5 ± 5.0cm、69.8 ± 7.1kg、22.8 ± 2.6歳であった。全ての被験者がウィンドミル投法であった。被験者には左投げ投手が1名いたが、全被験者が右投げ投手とみなせるように分析ではデータを座標変換して用いた。なお、本研究は、「独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センターにおける人間を対象とする研究実施要綱」に定められた倫理審査委員会において承認が得られた上で実施した。被験者には事前に本研究の目的や測定内容について説明を行い、書面によって実験参加への同意を得た。

2．データ収集

データ収集は屋内実験場で実施した。被験者

には全力で投球するために必要なウォームアップを各自で行わせた。その後、投手板から女子の規定投球距離（13.11m）に設置した的に向かって、投球可能な球種を各2～5球投じさせた。使用したボールは革製のソフトボール用試合球（2OS15000、ミズノ社製、質量：188g）であった。ボールがリリースされてからホームベース付近に到達するまでのボールの運動を分析するため、半球状（直径：8mm、質量：0.27g）の反射マーカをボール表面に6点、投球腕の手指部に3点貼付した。反射マーカの3次元座標は、専用カメラ20台からなる光学式モーションキャプチャシステム（VICON-MX、Vicon Motion Systems社製）を用いて、サンプリング周波数500Hzで計測した。本研究では投手板における捕手側の一辺の中点を原点とし、捕手方向をY軸、鉛直上方向をZ軸、両軸に直交する3塁方向をX軸とする右手直交座標系を基準座標系として定義した。投じられたボールについては、投手板からY方向に約10mの範囲を記録した。各球種は被験者の自己申告とした。自己申告された球種は、「ストレート（Fastball）」（9名）、「ライズボール（Riseball）」（9名）、「ドロップ（Drop）」（8名）、「チェンジアップ（Changeup）」（9名）、「シュート（Shoot）」（2名）、「スライダー（Slider）」（2名）、「カーブ（Curveball）」（1名）の7種であった。このうち、同じ球種名でも投法を変えて投じるという被験者がライズボールで1名、チェンジアップで2名いた。投法を変えた場合、同じ球種名でも球速や回転軸の向きが明らかに異なっていたため、この2球種については同じ被験者が投じたものでも別の被験者が投じたものとみなした。

3．データ処理

本研究では、①実験から得られたデータから、ボールの軌道、リリースパラメータ（リリース位置、初速度、角速度）を算出し、②測定したボールの軌道を再現するフライトシミュレータを作成した。そして、③揚力が作用しない場合（無回転のボール）のボール軌道をシミュレートすることで、ボールの軌道に対する揚力の影響を推定した。なお、本研究ではナックリングエフェクトについては考慮していない。次節からは、以上の各ステップについて説明する。

A. ボールの各物理量の算出

ボール表面の反射マーカの座標から、ボール中心の座標とボールの半径を最小二乗法によって算出した[10]。ボールの角速度ベクトルは村田・藤井[10]の方法と同様に、ボール表面の反射マーカからボールと共に運動する移動座標系を定義し、移動座標系の時間変化から求めた。なお、飛翔中にボールの角速度ベクトルは変化しないものとし、その大きさ（回転スピード）は測定した全てのフレームの平均値として算出した。また、角速度ベクトルの向き（回転軸の向き）は方位角（Azimuth angle）と仰俯角（Elevation angle）で表した（図1）。

B. ボールの揚力・抗力係数の推定

飛翔中のボールには、重力 $\boldsymbol{F_G}$、揚力 $\boldsymbol{F_L}$、抗力 $\boldsymbol{F_D}$ が作用する。したがって、ボールの加速度 $\boldsymbol{a}$ は以下のように求まる。

$$\boldsymbol{a} = \frac{1}{m}\left(\boldsymbol{F_G}+\boldsymbol{F_L}+\boldsymbol{F_D}\right)$$

上式の m はボールの質量を表す。一般に、抗力と揚力は以下のように求まる。

$$\boldsymbol{F_D} = \frac{1}{2} C_D \rho S v^2 \hat{\boldsymbol{F}}_D$$

$$\boldsymbol{F_L} = \frac{1}{2} C_L \rho S v^2 \hat{\boldsymbol{F}}_L$$

ここで、ρ は空気密度、S は代表面積、v は流体と物体の相対速度（本研究では流体速度は0と仮定）、C_D は抗力係数、C_L は揚力係数、$\hat{\boldsymbol{F}}_D$ は抗力の方向の単位ベクトル、$\hat{\boldsymbol{F}}_L$ は揚力の方向の単位ベクトルを表す。また、揚力はスピンパラメータ（角速度の大きさと球体の半径の積を球体のスピードで除した無次元量）に依存することが知られている。そのため、揚力をスピンパラメータで除すことにより、

$$C_L' = \frac{C_L v}{r\omega}$$

と表現できる。今後、本研究では C_L' を揚力係数として用いる。したがって、揚力は

$$\boldsymbol{F_L} = \frac{1}{2} C_L' \rho r \omega S v \hat{\boldsymbol{F}}_L$$

と書き換えることができる[4]。これらの式から、

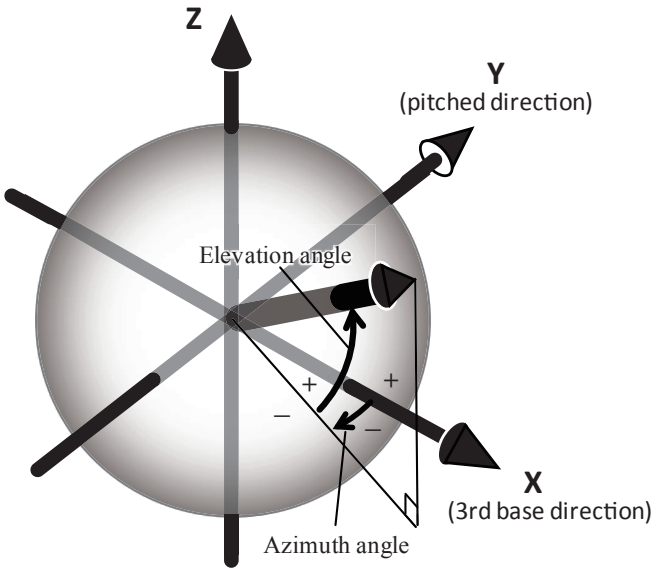

Figure 1. Definition of the angle representing the direction of the angular velocity.

飛翔中のボールに作用する各時刻の揚力と抗力を求めることでボールの加速度を算出することができる。また、各時刻のボールの速度と位置は、加速度を 4 次の Runge-Kutta 法で時間積分することで求めることができる。

次に、揚力・抗力係数の推定方法について述べる。本研究では、取得したデータを平滑化していないため、揚力係数、抗力係数だけでなく、ボールの初期位置、初速度についても最適化計算によって推定した。初期位置と角速度の初期値は、ボールリリース時のボール中心座標と前節で求めた角速度を用いた。初速度の初期値は以下の手順で求めた。まず、リリース時から 50 フレーム後までのボールの座標データを、最小二乗法（3 次多項式）によって時間の関数として近似した [9]。そして、得られた多項式を解析的に微分し、時間に 0（リリース時刻）を代入することでボールの初速度を求め、最適化計算の初期値とした。また、揚力･抗力係数の初期値は、ボールの軌道にフィットする揚力・抗力係数の組み合わせを遺伝的アルゴリズムで探索し、初期値として用いた。目的関数は、シミュレーションから得た各時刻のボール座標と、ボール座標の実測値の二乗和最小とした。最適化計算には MATLAB optimization Toolbox（MathWorks 社製）を用いた。以上の手順により、各試技のボール軌道を再現し、ボールのリリース位置、初速度、揚力係数、抗力係数を推定した。

C. 揚力による軌道の変化量

これまでに求めたリリース位置、初速度、角速度を初期値とし、ボールに作用する空力のうち、①揚力と抗力を作用させた条件、②抗力のみを作用させた条件でシミュレートし、Y 座標が 13.11m（ホームプレートの捕手側の頂点）に達した瞬間のボール座標の差（条件②のボール到達位置から，条件①の到達位置に向かうベクトル）を揚力によるボール軌道の変化量（⊿X、⊿Z）と定義した。具体的な算出手順は以下の通りである。まず、Y 座標が 13.11m を確実に超える 1.5 秒間のボール軌道を各条件でシミュレートした。そして、X 座標と Z 座標をそれぞれ Y 座標の関数として 3 次スプラインで近似し、Y 座標に 13.11m を代入することで、Y 座標が 13.11m に達した瞬間の X、Z 座標を算出した。なお、本研究では事前にボールに半球状のマーカを貼付したことが軌道の変化量に与える影響について検討した。ボールの進行方向に対して最大でもマーカ 4 点分の影

響しか受けないと仮定し､この分の横断面積（1.01 × $10^{-4}m^2$：ソフトボールの横断面積の約 1.4% の大きさ）を増加させた条件で、上述した方法と同様のシミュレート行った。結果として、⊿X、⊿Z ともにマーカの影響は± 1cm 未満になることを確認した。

4．統計処理

前節で算出した各試技の投球パラメータ（初速度の大きさ〈移動スピード〉、回転スピード、回転軸の向き、軌道の変化量）は、各被験者で球種ごとに平均値を求め、それを各被験者の代表値とした。そして、各パラメータにおいて球種ごとに全被験者の平均値と標準偏差を算出した。各球種の回転軸（方位角、仰俯角）の平均値は、方向統計学の手法に基づいて、角速度ベクトルを単位ベクトルに変換し、それらを合成することによって算出した。また、方位角と仰俯角の標準偏差は Angular deviation（円周上における角度の広がりの大きさ）として算出した[2)]。全被験者の半数以上（5 名以上）が投じた球種（ストレート、ライズボール、ドロップ、チェンジアップ）において球質の違いを検討するために、移動スピード、回転スピード、軌道の変化量について、それぞれ対応なしの一元配置分散分析で比較した。主効果が認められたパラメータには、事後検定として Games-Howell の多重比較検定を用いた。各検定における統計的有意差の判定は危険率 5% 未満に設定した。

Ⅲ．結果

1．全試技における投球パラメータの分布

被験者によって自己申告された 7 球種の球数は全部で 129 球であり、その内訳はストレートが 33 球、ライズボールが 28 球、ドロップが 24 球、チェンジアップが 30 球、シュートが 4 球、スライダーが 8 球、カーブが 2 球であった。全試技の移動スピードと回転スピードの範囲は、それぞれ 12.6 ～ 28.9m/s、11.0 ～ 27.0rps であった（図 2）。

ボールの回転軸の向きは、方位角が -177 ～ 177°、仰俯角が -16 ～ 79° の範囲であった（図 3）。平均値で回転軸の分布をみると、方位角 0 ～

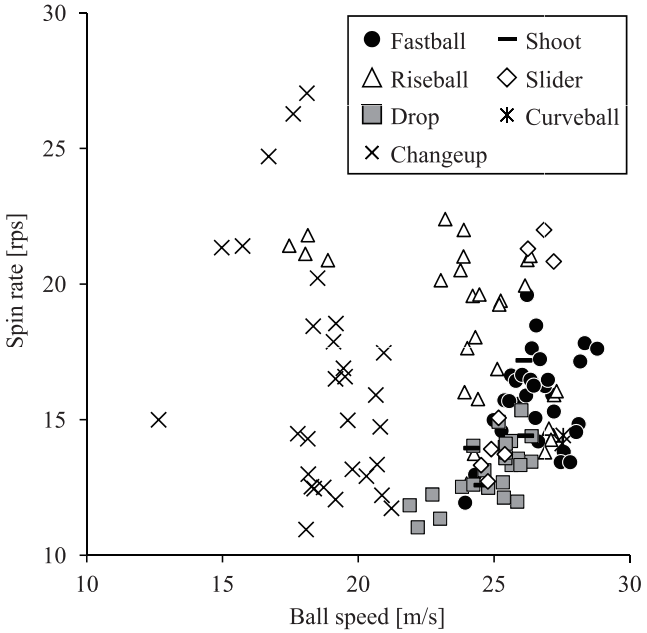

Figure 2. Relationship between the ball speed and the spin rate of ball in all trials.

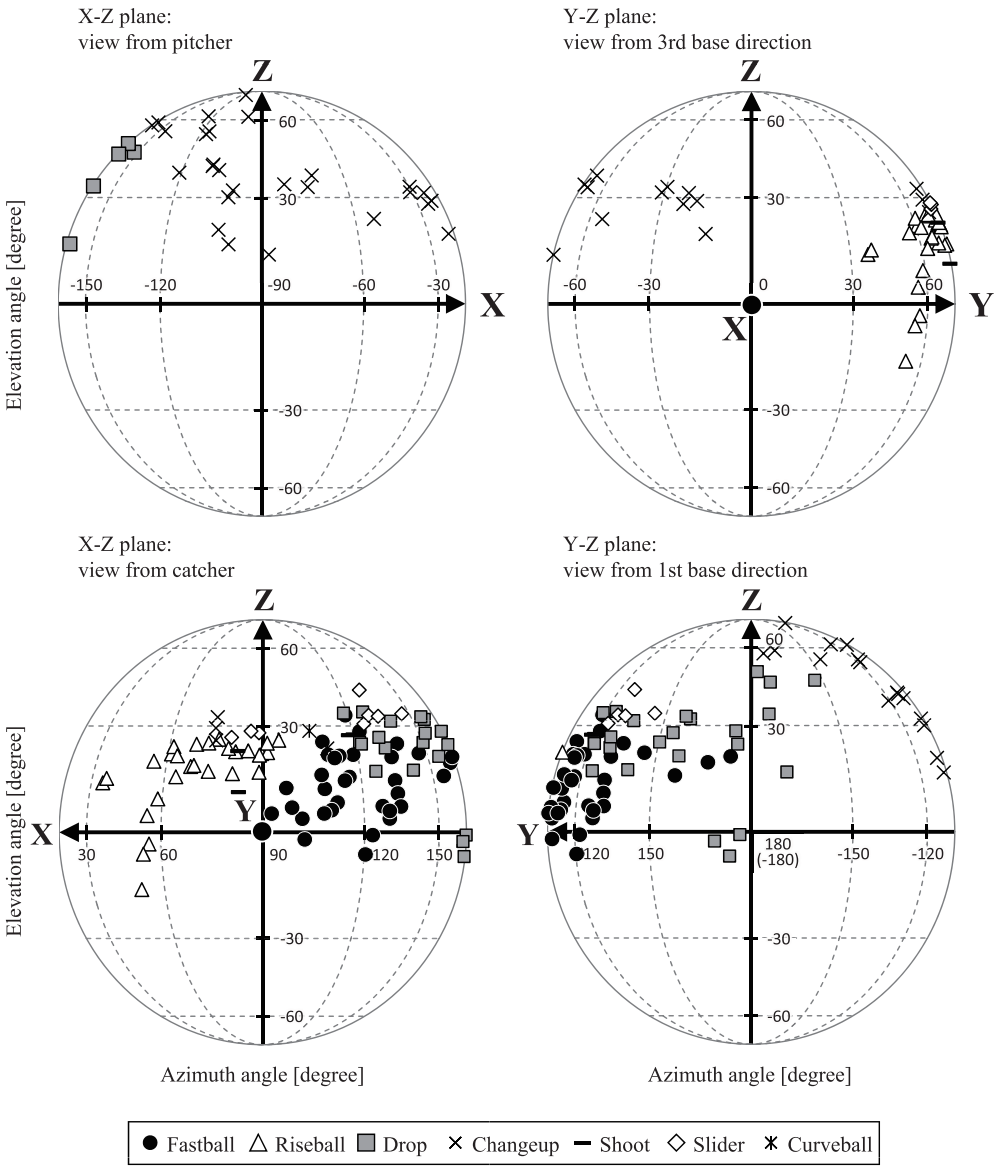

Figure 3. Distribution of the angular velocity vector of all trials.

180° の投球が 75%、仰俯角 0 ～ 90° の投球が 93% を占めており、ほとんどの角速度ベクトルがボールの進行方向かつ上方向を向いていた。

揚力によって生じるボール軌道の変化量は、⊿X が -0.38 ～ 0.16m、⊿ Z が -0.34 ～ 0.44m の範囲であった（図 4）。また、この分布を平均値でみると、揚力が生じないボール軌道に対して、60% が投手からみて左下方向（第 3 象限）に、33% が左上方向（第 2 象限）に変化するボールであった。

2．各球種の比較

各球種の投球パラメータの平均値、標準偏差、統計結果を表 1 に示した。また、分散分析に用いた球種の平均的な回転軸の向きを図 5 に示した。分散分析の結果、移動スピード、回転スピード、

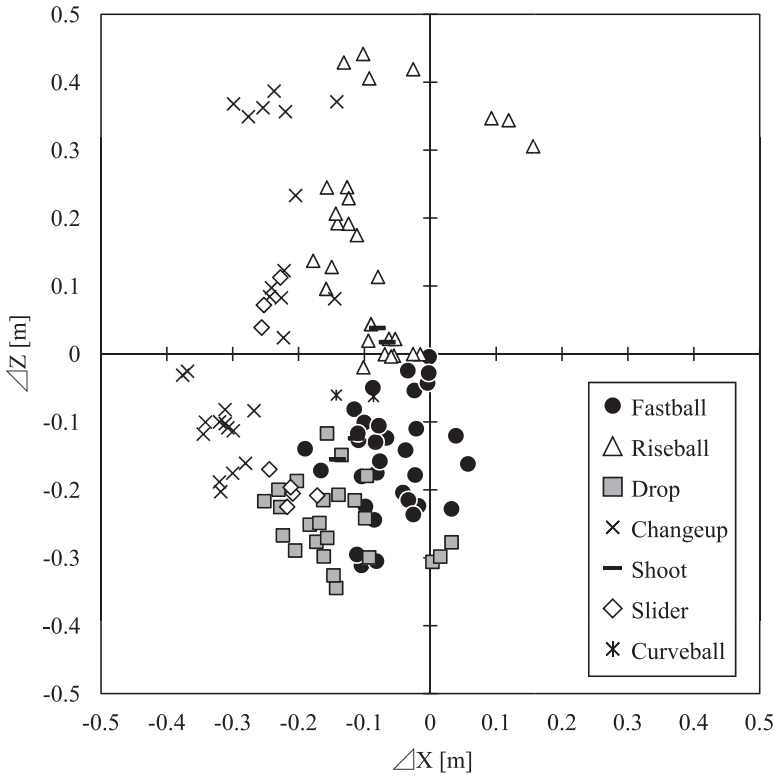

Figure 4. Horizontal and vertical displacement of the ball trajectory in all trials.

2 方向の変化量の 4 要因において、球種の主効果が認められた（移動スピード:F=28.3、回転スピード：F=5.2、⊿ X：F=12.8、⊿ Z：F=16.2、全て $p<0.01$）。多重比較検定を行った結果、移動スピードは、ストレート、ストレート、ライズボール、ドロップが同程度であり、この 3 球種とチェンジアップとの間には、それぞれ有意差が認められた（全て $p<0.001$）。回転スピードは、ストレートとライズボールがドロップに比べて有意に大きかった。⊿ X は、4 球種とも負の値であり、ストレート、ライズボール、ドロップの大きさは同程度であった。また、この 3 球種に比べてチェンジアップは有意に負の方向に大きかった。⊿ Z は、ライズボール、チェンジアップ、ストレート、ドロップの順に正の方向に大きい傾向であったが、ライズボールとチェンジアップの間と、ストレートとドロップの間には有意差は認められなかった。

Ⅳ．考察

本研究の目的は、ソフトボールで投じている様々な球種の運動学的特徴を明らかにし、ソフトボール投手の球種の改善や新球種の開発等に役立てるための基礎データを得ることであった。日本代表の女子ソフトボール投手 9 名のうち半数以上（5 名以上）が投じていた球種は、ストレート、ライズボール、ドロップ、チェンジアップの 4 球種であった。全試技のボールの回転を概観すると、回転軸は進行方向かつ上方向を向いている投球が大半を占めていた。考察では、ソフトボール投手が投じるボールの移動スピード、回転スピード、回転軸の分布や各球種の運動学的特徴を説明し、球種の運動学的特徴を規定している因子や野球の投球との違いについて検討する。

なお、本研究に参加した被験者が投じた球種は全部で 7 種であったが、ソフトボールでは他にも

Table 1. Kinematic parameters for each pitch type.

Pitch type	n		Ball speed [m/s]	Spin rate [rps]	Azimuth angle [degree]	Elevation angle [degree]	Displacement of ball trajectory [m] ⊿X	⊿Z
Fastball	9	Mean	26.4	15.6	125	13	-0.06	-0.17
		SD	(1.2)	(1.5)	(18)	(9)	(0.05)	(0.07)
Riseball	9	Mean	24.4	18.4	71	17	-0.07	0.16
		SD	(2.6)	(2.5)	(14)	(10)	(0.08)	(0.14)
Drop	8	Mean	24.9	13.2	157	25	-0.14	-0.25
		SD	(1.2)	(0.9)	(25)	(13)	(0.07)	(0.05)
Changeup	9	Mean	18.6	16.6	-87	38	-0.26	0.05
		SD	(1.8)	(4.1)	(55)	(14)	(0.07)	(0.19)
Shoot	2	Mean	27.8	14.5	101	18	-0.10	-0.06
		SD	(1.0)	(1.3)	(18)	(3)	(0.03)	(0.08)
Slider	2	Mean	25.9	17.6	109	23	-0.23	-0.06
		SD	(0.9)	(3.8)	(23)	(4)	(0.02)	(0.14)
Curveball	1	Mean	27.5	14.3	108	26	-0.11	-0.06
		SD	—	—	—	—	—	—
Multiple comparison test	1. Fastball		>4	>3			>4	<2
	2. Riseball		>4	>3			>4	>1,3
	3. Drop		>4	<1,2			>4	<2,4
	4. Changeup		<1,2,3				<1,2,3	>3

様々な球種を投じることが可能である[20]。また、本研究では日本代表レベルの女子ソフトボール投手を被験者としたが、男子選手になるとボールの移動スピードが120km/h（33.3m/s）を超えることが報告されている[3]。これは、本研究で投じられた球種の中で最も移動スピードが大きかったストレートの平均値より20km/h以上も大きい。したがって、本研究の結果は全てのソフトボール投手の特徴を網羅したものではなく、熟練した女子ソフトボール投手における球種の運動学的特徴を部分的に表したものとして理解する必要がある。

1．ソフトボールで投じられるボールの移動スピード・回転スピード・回転軸

野球におけるストレートの移動スピードと回転スピードとの関係を調べた研究では、両パラメータには正の相関関係が認められており、移動スピードが大きい投球ほど回転スピードが大きくなることが知られている[6, 13]。移動スピードが大きい投手は、ボールへ加えられる力も大きく[16]、これはリリース直前にボールが指先を転がり、指先がボールに加えていた力がボール中心を外れることによってボールを回転させる効果が生じるためである。しかし、様々な球種の運動学的特徴を調べた研究[12]では、ボールの移動スピードと回転スピードとの間には相関関係は認められていない。その原因としてはストレートよりも移動スピードが小さいが、ストレートと同等の回転スピードを有する球種（カットボール、スライダー、カーブ）があるためであり、これらの球種は移動スピードと回転スピードを獲得する動作がそれぞれ独立している可能性を示唆している。

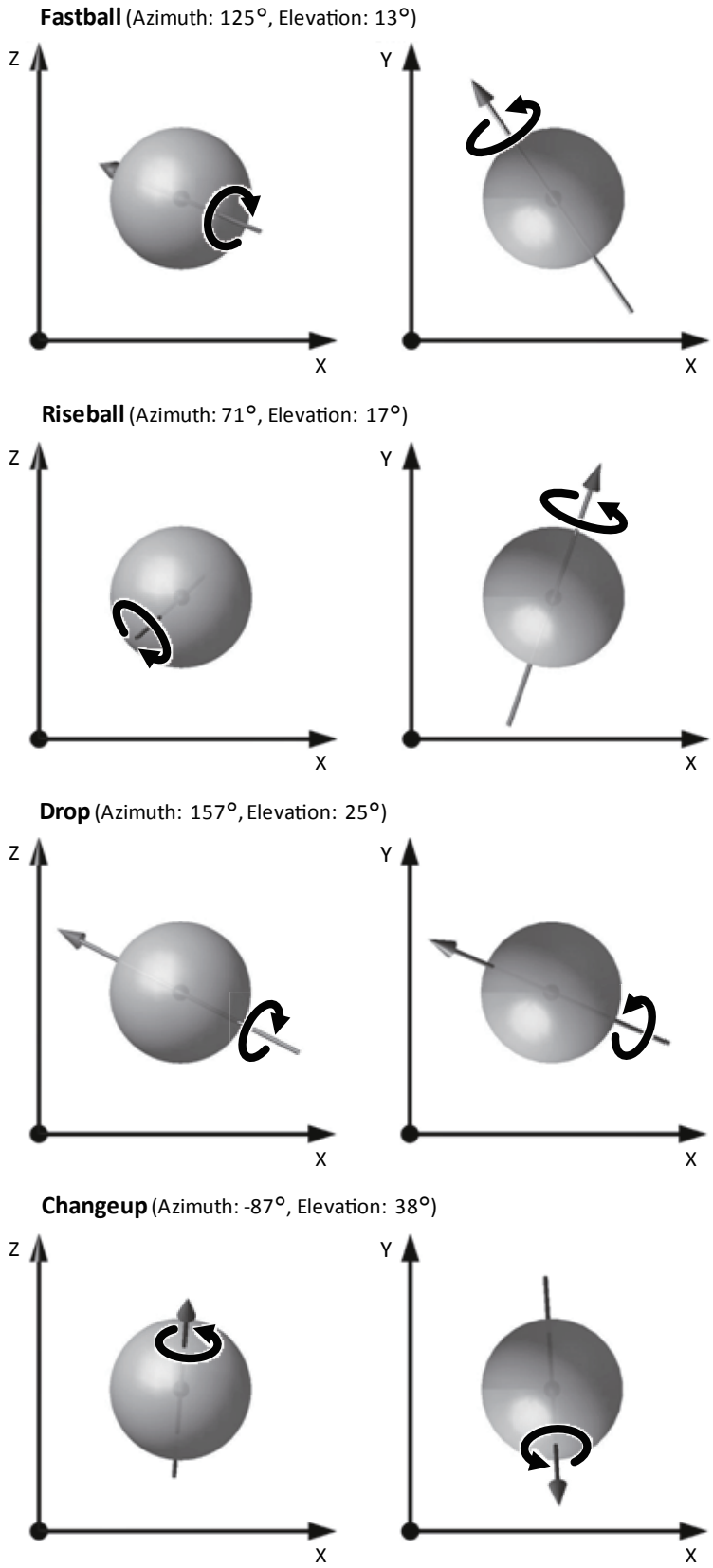

Figure 5. Average direction of spin axis of each pitch type.

ソフトボール投球を調べた本研究でも、各被験者の代表値におけるボールの移動スピードと回転スピードとの間には相関関係は認められなかった（p=0.156）。しかしながら、球種ごとに相関係数を見てみると、ストレートとドロップは正の値（それぞれ、r=0.52、0.74）、ライズボールとチェンジアップは負の値（それぞれ、r=-0.62、-0.46）であった。このうち、相関係数の有意性が認められたのはドロップのみであった（p=0.036）ことから、この球種は野球のストレートと同様に、移動スピードと回転スピードが共通した動作に起因して獲得されている可能性が示された。

ボールの回転軸の向きは、ほとんどが投手からみて進行方向かつ上方向を向いていた（図 3）が、これは左打者方向へ揚力を生じるボールが全投球の大部分を占めていることを示すものである。また、推定したボール軌道の変化量は主に投手からみて左上方向（第 3 象限）と左下方向（第 4 象限）に変位する投球であった（図 4）。野球投手の場合、様々な球種のボール軌道の変化は、主に左下方向（第 3 象限）か右上方向（第 1 象限）に変位し、この原因は捕手方向へ十分な移動スピードを獲得しつつボールをリリースする際、リリース時の手掌の向きに制約が生じるためであると推察されている[12]。本研究において全投手が行っていたウィンドミル投法は、投球腕が肩関節を中心とした円運動となる。またこの投法では、移動スピードを高めるために投球腕の前腕尺側部を体側に接触させ、末端（手部）を加速させてボールリリースを迎えるため、投球腕の運動の自由度が低い。一方、野球の投球では、オーバースローからアンダースローまで様々な位置でボールをリリースすることができるため、投球腕の運動の自由度が高い。そのため、本研究において右打者方向へ揚力が生じるボールがほとんど存在しなかった理由としては、上述したようなソフトボール投球特有の投球腕の制約により、ボールの角速度ベクトルが鉛直下向きの成分を有するようなボールリリースが困難であるか、そのような投げ方をする投手が本研究の被験者に含まれていなかったためと推察される。

2．各球種の運動学的特徴

ソフトボールの指導書では、ストレートは移動スピードが最も大きく、ピッチングの基本となる球種であると記されている[17]。本項では、ストレートの運動学的特徴およびそれを基準とした際の他球種の特徴について説明する。

ストレートはその名称から、内外角方向へは変化せず、真っ直ぐに飛翔するボールというイメージがある。指導現場では、一概にストレートといっても投手によって個性があり、ライズ系、ドロップ系、スライダー系といった変化があると述べられている[14]。本研究結果をみると、ストレートは指導書に記されているように全ての球種の中で最も移動スピードの平均値が大きいボールであった。しかし、軌道の変化量をみると下方向かつわずかに左打者方向に変化しており、揚力が作用しないで飛翔するボールより上方向に変化するようなライズ系のボールは存在しなかった。ボール軌道の変化量の⊿Zがプラスになる場合、方位角は± 90° 未満である必要がある。本研究で対象とした競技レベルの高い女子ソフトボール投手には、そのような回転軸となるストレートを投じる投手はおらず、平均的な回転軸は投手からみて左上前方近辺を向いていた。なお、このような回転軸の向きは、永見ら[12]が報告している野球投手が投じるスライダーに類似していることが分かった。

ライズボールは、バックスピンをかけることでボールを浮き上がらせ、空振りやフライアウトを取るための球種と言われる[14, 17]。しかし、本研究における平均的な回転軸をみてみると、純粋なバックスピン（方位角、仰俯角がともに 0°）はしておらず、投手からみて右上前方近辺を向いているボールが多く、YZ 平面を挟んでストレートと対称的な位置で回転していることが示された。⊿Zの平均値がプラスの値になった（浮き上がるような変化を示した）のは、方位角と仰俯角がともに -90° ～ 90° の範囲で飛翔したことにより、

揚力が上方向に作用したことが関係したと考えられる。また、ストレートに比べて、⊿Xは同程度であったが、⊿Zは約0.33mの違いがみられた。この違いはソフトボールの直径（約0.097m）の約3.4倍に相当するため、打撃においてライズボールをストレートのつもりで打ちにいった場合、ボール中心の下側をバットが通過する可能性が高く、指導現場で述べられているように空振りやフライアウトになりやすい球種であると言える。一方で、上方向へほとんど変化しないボールを投じている投手が3名おり、この投手達のボールは方位角が90°に近く、回転軸がYZ平面と近似していた。ただし、この3名のストレートの⊿Zの平均値が-0.18mであったことから、ライズボールはストレートに対して約ボール2個分の変化を生じさせていたと言える。つまり、上方向への変化が小さいライズボールであっても、他の投手が投じるライズボールと同様の効果が得られる球種であると推察される。

ドロップはストレートと移動スピードはあまり変わらないが、打者の手元で沈むボールであり[15]、ゴロアウトを取りやすい球種として認識されている[14]。実際に本研究では、移動スピードの平均値はストレートの次に大きい球種であり、⊿Zはストレートと有意差はないものの、その平均値が負の方向に最も大きいボールであった。この原因は、回転軸の向きがボールの進行方向に対して直交（方位角が180°）かつ水平（仰俯角が0°）に近かったことで、マグヌス効果による下向きの揚力が大きくなったことが関係していると考えられる。また、⊿Xはストレートよりも約0.09m小さく、より左打者方向へ変化するボールであり、このような軌道の変化は野球におけるカーブの特徴[6), 12)]に似ていると言える。ただし、ドロップはストレートに対する移動スピード比が野球のストレートに対するカーブの移動スピード比よりも大きいことから、打者にとってストレートとの見分けの判別は野球のカーブよりも難しい球種であると推察される。永見ら[12]は、カーブはストレートよりも大きく上向きに投射する必要があるため、打者に球種を見破れる可能性があると示唆しており、Jinji and Sakurai[6]のデータでは、リリース直後における上下方向の投射角度が約3.7°異なることが読み取れる。本研究におけるストレートとドロップの投射角度の差を算出すると約0.8°であったことから、ソフトボールにおいてドロップはストレートの球質に類似しており、打者に球種が見破られる危険性は野球と比較して低いと考えられる。打者にとってドロップがストレートとの判断がつきにくい球種であるならば、ドロップを打撃する際、ボール中心の上側をインパクトする可能性が高く、指導現場で認識されているようにゴロを打たせる効果が見込めると予想される。また、ストレートよりも左打者方向へ軌道が変化するため、バットの芯を長軸方向に外す効果もあるかもしれない。

チェンジアップは、全球種の中で最も移動スピードが小さく、左打者方向への⊿Xが大きい球種であった。また、回転スピードや回転軸の方位角と仰俯角の標準偏差も最も大きかったため、ボールリリースにおいて回転の掛け方の投手間差が大きい球種であることが分かった。左打者方向への⊿Xが最も大きくなった要因は、回転軸の向きがYZ平面と平行（方位角が90°または-90°）に近く、仰俯角が他の球種より大きいことにより、左打者方向への揚力が大きくなったことが挙げられる。また、移動スピードが小さいために揚力の作用時間が長くなったことも一因だと考えられる。しかしながら、平均的な回転軸や軌道の変化量で投じている投手がほとんどいないことから、他球種との軌道の違いによって一定方向にバットの芯を外す球種ではないと推察される。指導書では、チェンジアップはストレートと全く同じフォームで投じ[17]、打者のタイミングを外す球種である[14]と記されており、ボール軌道の変化については触れられていない。ストレートに比べて移動スピードが最も小さい球種であることから、指導書の記述は概ね正しいと考えられる。そして、回転スピードや回転軸のばらつきが大きかったのは、移動スピードを小さくするための投げ方が被

験者によって様々であったと考えられる。

3．野球の投球との比較

本研究で得られた結果からソフトボールの投球と野球の投球との違いについて考察する。ボールの移動スピードに着目すると、ストレート、ライズボール、ドロップの3球種には有意差が認められなかったが、ストレートに対するライズボール、ドロップ、チェンジアップの移動スピード比は、それぞれ92%、94%、71%であった（表1）。また、全試技のボール軌道の変化量をみると、⊿Xが0.53mの範囲で分布しているのに対して⊿Zはその約1.5倍（0.79m）であった（図4）。野球ではストレートに対して他球種の移動スピードが78～97%であり、⊿Xと⊿Zの範囲はどちらも1.2m程度である[12]。したがって、ソフトボールは野球に比べて、最も移動スピードが小さい球種とその他の球種との速度差が大きいことと、ボールの変化量が左右・上下方向ともに小さく、左右方向よりも上下方向の変化の方が大きいことが分かる。これらの原因には、ソフトボールは野球よりも投球距離が短いことや、ボールの直径が大きいことに起因して回転スピードが小さくなることが挙げられる。また、回転軸の分布（図3）の考察でも述べたように、投球腕の運動の自由度が小さいことも左右方向への軌道の変化が上下方向に比べて小さい一因になったと考えられる。

以上のことから、ソフトボールは野球よりボール軌道の変化量が小さいため、バットの長軸方向の芯を外して打ち取ることが難しい可能性がある。そのため、他球種よりボールの移動スピードが大きく異なるチェンジアップを投じることで、スイングのタイミングを外し、バットにボールを当てさせない投球をしていることが予想される。また、上下方向の軌道の変化量の範囲が左右方向よりも大きいという特徴があるため、打者にとって上下方向のストライクゾーンの見極めが左右方向よりも難しくなる。さらにストレートより上下方向に変化するライズボールやドロップは、ストレートとの移動スピード差が比較的小さい。ソフトボールの投球はこれらの特徴を利用し、打者にストレートが投じられたと錯覚させることで、空振りや打ち損じを生じさせていると推察される。

Ⅴ．まとめ

本研究では、一流女子ソフトボール投手9名が投じた7球種のうち半数以上の投手が投じた球種（ストレート、ライズボール、ドロップ、チェンジアップ）の運動学的特徴を分析した。その結果、①ストレートに対する移動スピード比の範囲が野球よりも大きいこと、②右投手の場合、ライズボールとチェンジアップの軌道は投手からみて左上方向に変化し、ストレートとドロップは左下方向に変化すること、③ボール軌道の変化量は野球より小さく、左右方向より上下方向の方が大きく変化するということが明らかになった。

謝辞

本研究は、公益財団法人日本ソフトボール協会の協力のもと実施された。ここに感謝の意を表する。

文献

1）Alaways L, Hubbard M. Experimental determination of baseball spin and lift. J Sports Sci, 19: 349-358, 2001.

2）Berens P. CircStat: A MATLAB toolbox for circular statistics. J Stat Softw, 31(10): 1–21, 2009.

3）Flyger N, Button C, Rishiraj N. The science of softball. Sports Med, 36(9): 797-816, 2006.

4）Goff JE. A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles. Sports Engineering, 16: 137-154, 2013.

5）神事努，森下義隆，平山大作，平野裕一．投球されたボールの軌跡―「動くボール」の正体―．バイオメカニクス研究，16(1): 41-46, 2012.

6）Jinji T, Sakurai S. Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. Sports

Biomech, 5(2) : 197-214, 2006.

7）Jinji T, Sakurai S, Hirano Y. Factors determining the spin axis of a pitched fastball in baseball. J Sports Sci, 29(7) : 761-767, 2011.

8）丸山克俊 . わかりやすいソフトボールのルール . 成美堂出版 , pp.38-41, 2016.

9）Mecheri S, Rioult F, Mantel B, Kauffmann F, Benguigui N. The serve impact in tennis: First large-scale study of big Hawk-Eye data. Stat Anal Data Min, 9(5) : 310-325, 2016.

10）村田宗紀 , 藤井範久 . 上肢および上胴に着目したテニスサーブにおける回転の打ち分け . 体育学研究 , 59: 413-430, 2014.

11）Nagami T, Higuchi T, Nakata H, Yanai T, Kanosue K. Relation between lift force and ball spin for different baseball pitches. J Appl Biomech, 32(2) : 196-204, 2016.

12）永見智行 , 木村康宏 , 彼末一之 , 矢内利政 . 野球投手が投じる様々な球種の運動学的特徴 . 体育学研究 , 61, 589-605, 2016.

13）Nagami T, Morohoshi J, Higuchi T, Nakata H, Naito S, Kanosue K. Spin on fastballs thrown by elite baseball pitchers. Med Sci Sports Exerc, 43(12) : 2321-2327, 2011.

14）二瓶雄樹 . 身になる練習法 ソフトボール 得点を奪うための攻撃強化練習 . ベースボール・マガジン社 , pp.37-50, 2018.

15）岡本亘能 , 前田正登 . ソフトボールの試合における投球ボールの軌道に関する研究 . 体育・スポーツ科学 , 27: 29-38, 2018.

16）高橋佳三 , 阿江通良 , 藤井範久 , 島田一志 , 尾碕哲郎 . 野球のピッチングにおける手および指の動きとボール速度増加の関係 . バイオメカニクス研究 , 4(2) : 116-124, 2000.

17）宇津木妙子 . いちばんわかりやすい [ワイド版] ソフトボール入門 . 大泉書店 , pp.22-29, 2013.

18）Watts RG, Ferrer R. The lateral force on a spinning sphere: Aerodynamics of a curveball. Am J Phys, 55: 40-44, 1987.

19）Whiteside D, McGinnis R, Deneweth J, Zernicke R, Goulet G. Ball flight kinematics, release variability and in-season performance in elite baseball pitching. Scand J Med Sci Spor, 26(3) : 256-265, 2016.

20）吉村正 . ソフトボール変化球バイブル . ベースボール・マガジン社 , 2004.