

2013年度 修士論文

野球の投手が投じる様々な変化球の特徴
～移動速度，回転速度，回転軸の向きに着目して～

Characteristics of various breaking ball thrown by baseball pitchers:

Focus on ball speed, spin rate and direction of the spin axis

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5012A017-1

木村 康宏
Yasuhiro KIMURA

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第1章 緒言	1
1-1 序 変化球とは	
1-2 研究小史	
1-2-1 ボールに作用する抗力	
1-2-2 ボールに作用する揚力	
1-2-3 縫い目の向きの差異がボールに働く揚力に与える影響	
1-2-4 投手が実際に投じるストレートの回転	
1-2-5 ストレートの回転を決定する要因	
1-2-6 変化球の回転	
1-3 目的	
第2章 方法	10
2-1 被験者	
2-2 測定方法	
2-3 ボール回転の解析	
2-4 ボール飛翔軌道の変位量の推定	
2-5 統計処理	
第3章 結果・考察	19
3-1 主成分分析による球種の分類	
3-2 主成分分析によって分類された6種類の特徴	
3-3 投法の違いによるボールの回転の違い	
3-4 ストレート, ツーシーム, シュート	
3-5 シンカーとツーシーム	
3-6 フォークとチェンジアップ	
3-7 球種の投げ分け	
第4章 結論	42
参考文献	43

謝辞

第1章 緒言

1-1 序 変化球とは

野球において、投手は相手チームの得点を最小限に抑えるため、打者を打ち取りアウトを積み重ねなければならない。一方、打者はボールを打ちかえすために、投手が投じたボールの到達する時間と場所を予測しバットを振る。そのため、投手は打者が予測するボール飛翔軌道と異なるボールを投げることを要求される。そこで、投手はストレートだけでなくスライダーやカーブ、フォークと呼ばれる飛翔軌道の異なる様々な変化球を投げ分けようとする。変化球はカーブ系、スライダー系、シュート系、チェンジアップ系、落ちる系のように主にその飛翔軌道の違いによって分類されている（矢野ら，2013）。しかし、変化球の名称はボールの握り方や投げ方によって変わり、さらに投手によってその呼び方が異なることもあり、数ある変化球の球種間にどのような差があるのかについて明確にされていない。

また、投手はボールの握り方や投げ方を変えることで、様々な変化球の投げ分けを実現していると考えられる。しかし、それによって具体的に何をどのように変化させることによって飛翔軌道の異なる球種を投げ分けているのかは明らかではない。投手が様々な変化球をどのように投げ分けているのかを明らかにするためには、ボールの飛翔軌道に影響を及ぼす要因について明らかにし、各球種で飛翔軌道に影響を及ぼす変数にどのような差異が生じているのかを定量的に明らかにする必要がある。

1-2 研究小史

回転しながら飛翔するボールに働く力は重力、抗力、そして揚力である (Nathan. 2007) . 抗力は進行方向と反対向きに作用する力であり、ボールの速度を減少させる効果を持つ。揚力は進行方向に対して垂直方向に作用する力で、ボールの進行方向を変える効果を持つ。飛翔中のボールに働く重力は常に一定であるため、ボールの飛翔軌道の違いは、ボールに働く抗力と揚力の違いによって生じる (Nathan. 2007) . 飛翔するボールの運動を評価するために、抗力と揚力の発生メカニズムや実際の投手が投じたボールの回転に関して研究がなされてきた。

1-2-1 ボールに作用する抗力

ボールが空気中を飛翔する時、ボールの後方には空気の渦 (乱流) が発生する。この時、ボール前面の空気は圧縮されるため圧力が高くなり、反対にボール後方の圧力は減少する。この圧力差によって抗力が生じ、その大きさは下記の式によって表される (阿江と藤井, 2002) .

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$$

F_D はボールに働く抗力 [N] , C_D は抗力係数, ρ は空気密度 [kg/m^3] , A はボールの断面積 [m^2] , V はボールの移動速度 [m/s] である。抗力係数は物体表面の形状や回転速度などによって様々である。溝田ら (2007) は、風洞を用いた実験によって、進行方向と垂直かつ地面と水平の回転軸周りに回転する野球ボールでは、抗力係数はスピンパラメータ (Sp) に正比例することを明らかにした。抗力係数とスピンパラメータの関係は下記の式によって表される。

$$C_D \propto Sp = \pi \cdot d \cdot \omega / V$$

d はボールの直径 (0.072 m) , ω はボールの回転速度 [rps] , V はボールの移動速度 [m/s] である。つまり、ボールの回転速度が大きくなると抗力係数が増加し、ひいてはボールに働く

抗力が増加する。しかし、ボールの回転軸がボールの進行方向を向く場合では、抗力係数はスピンパラメータの影響を受けず、回転軸が進行方向と直行するボールの抗力係数に比べて小さい傾向にあることが報告されている (Nathan. 2007, 溝田, 2008)。

1-2-2 ボールに作用する揚力

球形のボールでは飛翔中のボールの回転によって揚力が発生する。図 1-1 のように進行方向に対して垂直な軸周りにバックスピンして飛翔するボールでは、回転によってボール下方の流速が減少し、反対に上方の流速は加速する。流速の速いボール上方の圧力が減少することで、上向きの力が発生する。このような現象をマグナス効果と呼ぶ。飛翔する物体に働く揚力の大きさは下記の式によって表される (阿江と藤井, 2002)。

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$$

F_L はボールに働く揚力 [N] , C_L は揚力係数, A はボールの断面積 [m^2] , ρ は空気密度 [kg/m^3] , V はボールの移動速度 [m/s] である。風洞を用いた実験やハイスピードカメラを用いた分析により、ボールの揚力係数はスピンパラメータが大きくなるほど増加することが明らかとなっている (溝田ら, 2007, Nathan. 2007)。しかし、これは回転軸が進行方向に対して直行するように設定された条件下での結果である。Jinji and Sakurai (2006) は、実際に投手が投じたストレートとカーブのビデオ分析によって、これらの回転軸の向きが進行方向に対して直行しないこと、さらには揚力係数とスピンパラメータとの間に相関関係はなく、揚力係数はボールの進行方向と回転軸とのなす角との相関が強いことを明らかにした。また、溝田ら (2008) は風洞を用いて回転軸の向きが進行方向と一致して回転するボールには揚力が働かないことを明らかにした。

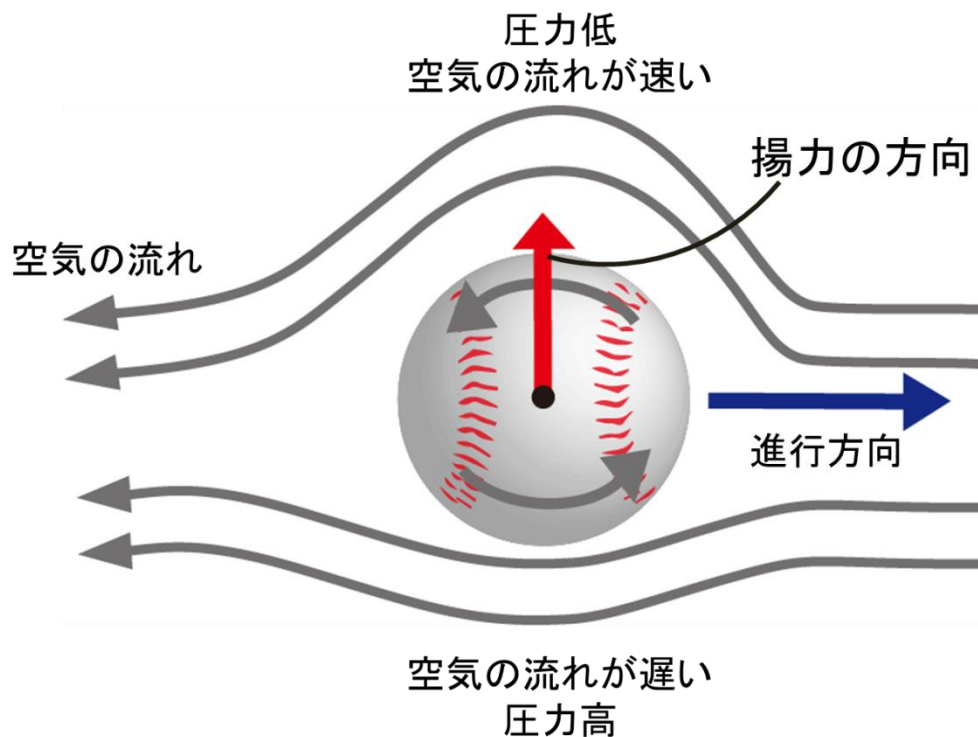


図 1-1 ボールの回転と揚力の関係

Bahill and Baldwin (2007) はボールを上下左右に変化させる揚力が働く方向は回転軸とボールの移動方向それぞれに直行する方向であると報告している。そして、右手の法則によって回転軸の向き、回転の影響でボールが変化する方向を説明している。図 1-2 のように、拇指が回転軸の向き、示指がボールの進行方向を表しているならば、中指が回転によってボールが変化する方向を指し示す。以上の知見を用いて、ボールの回転軸の向きを 2 つの角度、回転軸をボール座標系 X, Y 平面に投影したベクトルと X 軸とのなす角（方位角）、投影したベクトルと回転軸とのなす角（仰俯角）で表す（図 1-3）と、仰俯角が 90° の場合、ボールの上方向に揚力が働かず、その代りに進行方向に向かって左方向への揚力が増加し、ボールは左方向へと逸れていく。

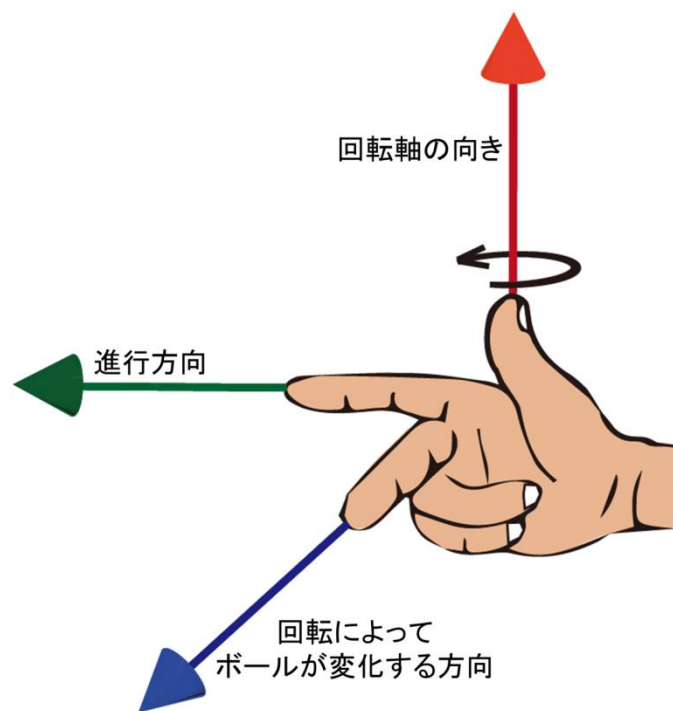


図 1-2 野球ボールにおける右手の法則 Bahill et al (2007) より改編

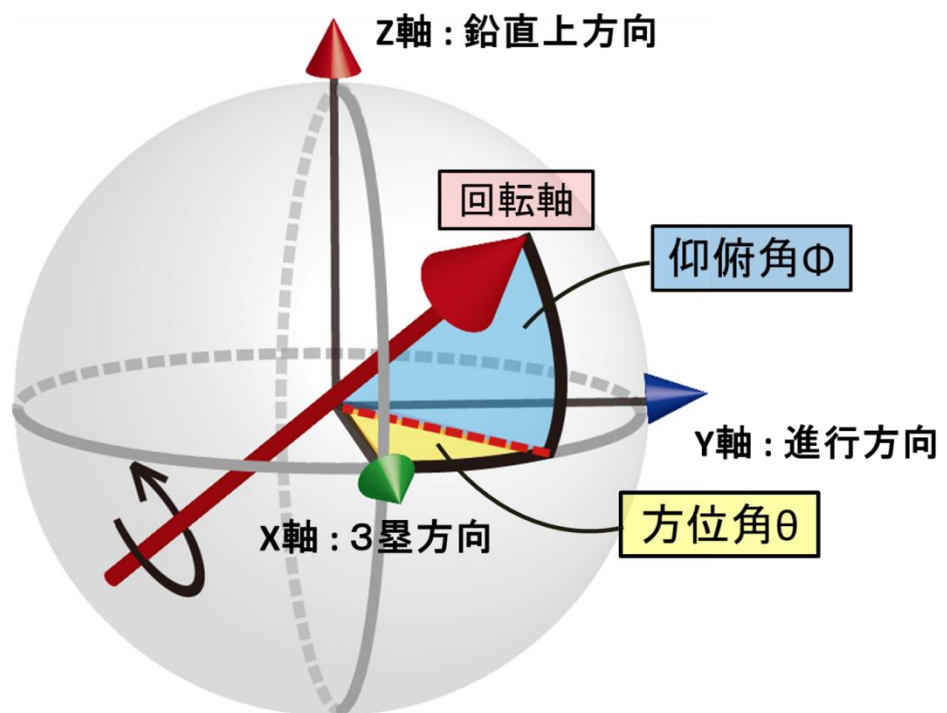


図 1 回転軸の向きを表す方位角 θ と仰俯角 Φ

1-2-3 縫い目の向きの差異がボールに働く揚力に与える影響

野球ボールには縫い目があり，回転との関係からボールが1回転する中で縫い目が4回現れる時（フォーシーム）と，2回現れる時（ツーシーム）がある（図1-4）．投手は縫い目の現れ方の変化によってボールの空力特性を変え，飛翔軌道を変えるという意図でフォーシームのストレートとツーシームを投げ分けている（伊良部と吉井，2010）．Alaways and Hubbard (2001) はピッチングマシンより投射されたフォーシームとツーシームのストレートでは，スピンパラメータが同じ場合，ツーシームの方がフォーシームに比べて揚力係数が小さいことを報告している．一方，高見ら（2009）は同様にピッチングマシンから投射されたツーシームとフォーシームの揚力係数を測定したところ，プロ野球において投球されるバックスピンのストレートのスピンパラメータの領域（ $Sp = 2.3$ ）では両者の間に差がなかったことを報告している．また，永見ら（2012）はボールの飛翔軌道の変位量とスピンパラメータのサイドスピン成分とトップ・バックスピン成分の関係において，フォーシームとツーシームによる回帰係数の違いが認められず，縫い目の違いがボールに働く揚力に与える影響が小さかったことを報告している．以上のように，ボールに働く揚力とボールの縫い目との関係について明確な知見は得られておらず，投手が投じるフォーシームのストレートとツーシームの違いについての統一された見解は得られていないのが現状である．

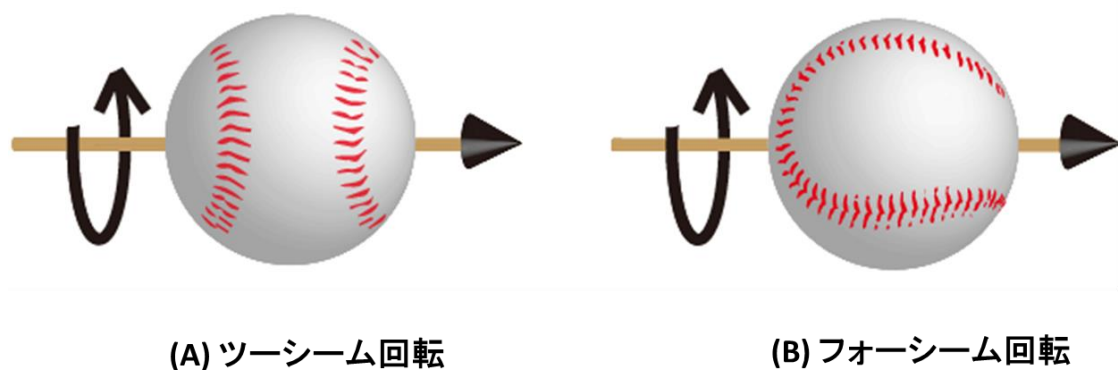


図 1-4 ボールの縫い目と回転の関係

1-2-4 投手が実際に投じるストレートの回転

最近まで実際の投手が投じたボールがどのような回転をしており、いかなる飛翔軌道でキャッチャーまで到達しているのか明らかとなっていなかった。そのため、ストレートの回転軸が風洞実験での設定のように進行方向と直行し、かつ地面と水平な純粋なバックスピンのように、真っ直ぐに飛翔すると考えられてきた。Jinji and Sakurai (2006) は大学生投手が投じたストレートは純粋なバックスピンではなく、回転軸の向きが進行方向、鉛直下向きに近づいていたことを明らかにした。この報告では、ストレートの平均移動速度は 33.8 ± 1.7 m/s, 平均回転速度は 31.4 ± 2.7 rps であり、回転軸の向きを表す平均方位角は $31 \pm 13^\circ$, 平均仰俯角は $-26 \pm 11^\circ$ であった。また、ボールの飛翔軌道は空気の影響がない自由落下の軌道に対して上方向に 0.37 ± 0.12 m, それに加えて全ての右投手において、投手から向かって右方向 (3 塁方向) に 0.20 ± 0.12 m 変化しており、ピッチングマシンから投射したストレートとの間に有意な差があることを明らかにし、回転軸の向きの違いが両者の変位量に大きな影響をもたらしたと報告している。また、Nagami et al. (2011) は競技レベルの高いプロ野球投手および大学生投手が投じたストレートの回転を分析し、両者の回転軸の向きには有意な差がないことを明らかにした。この報告では、大学生投手とプロ野球投手が投じたストレートの平均移動速度は 37.7 ± 1.2 m/s, 平均回転速度は 34.3 ± 3.5 rps であり、平均方位角は $19 \pm 14^\circ$, 平均仰俯角は $-32 \pm 9^\circ$ であった。Nagami et al. (2011) の研究においても Jinji and Sakurai (2006) と同様にストレートの回転軸の向きは進行方向、鉛直下向きに近づいており、方位角、仰俯角ともに 0° の純粋なバックスピンのように飛翔するボールがなかったことが示された。しかし、競技レベルの高い選手のボールはスピンパラメータの値が高く、ボールの回転軸の向きが進行方向に対して垂直かつ地面に対して水平に近い (純粋なバックスピンに近い) 回転で飛翔していたことを報告している。また、方位角は個人差が大きく、これはリリース位置の違いによる影響を受けること、さらにはサイドスローの投手が投じたストレートの仰俯角はオーバースローやスリークウォータースローの投手が投じたものよりも鉛直下向きに近づいており、回転軸の向きが投法による影響を受けることを示唆している。

1-2-5 ストレートの回転を決定する要因

ストレートにおいて、ボール初速度と回転速度の間には強い正の相関関係があり、ボールの移動速度が大きいほど回転速度が大きいことが明らかとなっている (Jinji et al. 2006, Nagami et al. 2011) . 桜井ら (2007) はボール移動速度が大きい投手ほどボールに作用させる力が大きくなり、ボールを回転させるトルクが大きくなったため、ボール初速度と回転速度の間には強い正の相関関係が生まれたと報告している.

Jinji et al. (2011) はボール回転軸角度においては、ボールリリースの 6 ms 前の手の方向との間に強い相関関係が認められ、リリース直前の手の方向は回転軸の向きを決定する重要な要因であると報告している. また、サイドスローの投手はオーバースローの投手よりも手の方向が地面と水平な方向へ傾くため、回転軸がより鉛直下向きに近づき、右投手の場合より右方向 (3 塁方向) にボールが変化していくと報告している.

1-2-6 変化球の回転

これまで、変化球の回転とその飛翔軌道に関する研究は風洞 (溝田ら 2006) やシミュレーション (Bahill et al. 2007) を用いたものが主であった. 実際の投手が投じた変化球の回転を詳細に分析した研究は比較的少ないが、いくつかの興味深い報告がなされている. Jinji et al. (2006) は大学生が投じたカーブの回転と飛翔軌道の分析を行っている. この報告では、カーブの平均移動速度は 27.2 ± 1.9 m/s, 平均回転速度は 31.0 ± 4.2 rps であり、回転軸の向きを表す平均方位角は $132 \pm 14^\circ$, 平均仰俯角は $27 \pm 7^\circ$ であった. カーブの回転はトップスピンであり、空気の影響がない自由落下の軌道よりも投手から捕手に向かって左方向 (1 塁方向) に 0.20 ± 0.10 m, 下方向に 0.29 ± 0.09 m 変化し、変化の方向がストレートと反対方向になることが明らかとなった. 永見ら (2008) は高速度カメラを用いて一人のプロ野球投手が投じる 8 球種のボールの回転を分析し、球種によって回転速度や回転軸の向きが様々であることを明らかにした. この投手が投じるスライダーの回転軸はボールの進行方向とほぼ一致しており、ボールに働く揚力が極めて小さいため重力によって自由落下するボールであったと報告している. この研究に

より、投手は回転速度や回転軸の向きを変化させることで様々な変化球を投げ分けていると考えられるが、他の投手も同様に投げ分けているかについては疑問が生じる。

永見ら（2012）は投球の左右、上下方向への変位量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によって正確に推測できることを示した。これにより、スピンパラメータの分解法が変位量の算出に有用であること、および投手が投じたボールの移動速度、回転速度、回転軸の向きからボールの飛翔軌道の変位量を推定できることが明らかになった。

1-3 目的

これまでの研究で、投手が投じるボールの飛翔軌道を決定する主な要因はボールの移動速度、回転速度、回転軸の向きであること、そして投手はそれらを変化させることで様々な変化球を投げ分けていることが明らかとなっている。したがって、投手が投じる様々な球種の特徴を明らかにするためには、飛翔軌道の変位量に影響を及ぼすボール移動速度、回転速度、回転軸の向きを総合した指標によって評価する必要があると考えられる。しかし、多種多様な変化球それぞれの特徴は明らかとなっておらず、投手が各球種を投げ分ける際に、特にどの変数を変化させているかは明らかでない。さらに、変化球の名称が投手の宣言によって決定されること、同一球種であっても投手によって回転軸の向き等が異なることがあるため、そもそも大勢の投手が投じる変化球のそれぞれが独立した特徴を有するのかどうか明らかではない。各球種の特徴を明らかにすることが、投手が様々な球種を投げ分ける際の指標や、新たな指導法の構築、そして投手のパフォーマンスの向上につながると考えられる。そこで本研究の目的は、ボールの移動速度、回転速度、回転軸の向きに基づいて、大勢の一流投手が投じる様々な変化球が独立した球種として分類されるのかを明らかにし、さらにそれらの球種間差を比較検討することによって、各球種の特徴を明らかにすることとした。

第2章 方法

2-1 被験者

被験者はプロ野球投手 16 名，社会人野球投手 11 名，大学野球投手 9 名の計 36 名（右投げ：25 名，左投げ：11 名）とした。被験者には実験内容を十分に説明し，実験参加の同意を得た上で実験を行った。なお本実験の実施にあたり，早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得た。

2-2 測定方法

被験者には十分なウォーミングアップを実施させた後，正規規格マウンドから座位の捕手に向けて，投球可能と各被験者が宣言した変化球（各被験者 2 ～5 球種）とストレート を各 1 ～2 球投じさせた。ボールは被験者が所属する機関の公認球に回転解析時の特徴となるマーカを印したものを使用した。マウンド後方（2 塁側）にハイスピードカメラ（Fastec Imaging 社製，撮影速度：1000 fps）1 台をボールリリース時の手と同じ高さで，画面上の右方向へ向かう X 軸が水平面と平行で，投球方向とカメラの光軸とが一致するように設置し，リリース前後のボールの運動を記録した（図 2-1）。また，キャッチャー後方に設置したレーダー式スピードガン（JUGS 社製）を用いてボール移動速度を計測した。ワンバウンドなどの明らかにストライクゾーンから逸脱せずに捕手に到達した 1 球を分析対象とした。

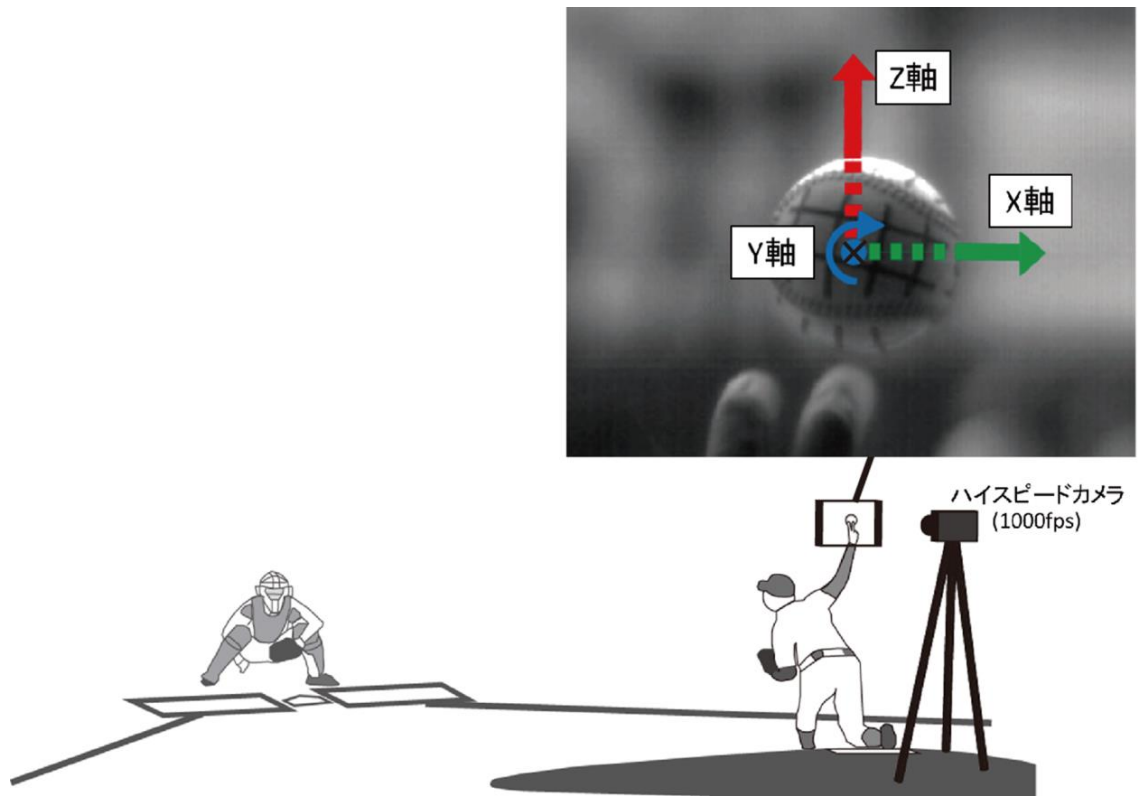


図 2-1 実験設定およびボール座標系 BG

2-3 ボール回転の解析

ハイスピードカメラによって記録された映像をもとに特製のボール回転測定装置（図 2-2）を用いてボールの回転軸角度と回転速度を算出した。

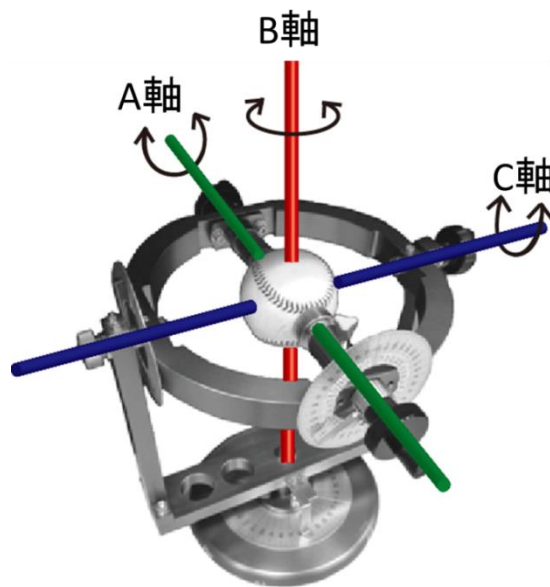


図 2-2 ボール回転測定装置

映像を撮影した際に用いたボールを装置の中心に設置し、ボールを A 軸, B 軸, C 軸回りにそれぞれ回転させ、各軸周りの回転角を装置に設置した分度器により測定した。モニターを 2 つ用いて、一方にはハイスピードカメラによって撮影された映像、もう一方には装置の上方に設置したカメラによって撮影された映像を映し出した。リリース直後の映像と装置の映像をそれぞれ見比べ、ボールに印されたマーカの位置が一致するようにボールを 3 つの軸回りに回転させ、各軸の角度 ($\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$) を記録した。図 2-1 に示すように、撮影した映像においてボールの中心を原点としたボール座標系 BG を設定した。リリース直後 (B_0) のボールの向きは、ボール座標系 BG から B_0 のボール座標系への変換を定められた順序で連続して行うカーダン角として定義した。ボール座標系 BG (x_{G0}, y_{G0}, z_{G0}) を Y 軸周りに β_0 回転させ、次に 1 度目の回転で得られた座標系 B_{01} (x_{01}, y_{01}, z_{01}) を Z 軸周りに γ_0 回転させ、2 度目の回転で得られた B_{02} (x_{02}, y_{02}, z_{02}) を X 軸周りに α_0 回転させ、 B_{03} (x_{03}, y_{03}, z_{03}) を算出した。 B_{01} の回転行列を $A_{B_{01}/BG}$, B_{02} の回転行列を $A_{B_{02}/B_{01}}$, B_{03} の回転行列を $A_{B_{03}/B_{02}}$ とした。そして、以下の行列を用いてボール座標系 BG に対する B_{03} の回転行列 $A_{B_{03}/BG}$ を算出した。

$$A_{B_{01}/BG} = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & 0 & \sin \beta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 \end{bmatrix}$$

$$A_{B_{02}/B_{01}} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & -\sin \gamma_0 & 0 \\ \sin \gamma_0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{B_{03}/B_{02}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 \\ 0 & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \end{bmatrix}$$

$$A_{B_{03}/BG} = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & 0 & \sin \beta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & -\sin \gamma_0 & 0 \\ \sin \gamma_0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 \\ 0 & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta_0 \cos \gamma_0 & \sin \alpha_0 \sin \beta_0 - \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \sin \gamma_0 & \cos \alpha_0 \cos \beta_0 - \sin \alpha_0 \cos \beta_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \gamma_0 & \cos \alpha_0 \cos \gamma_0 & -\sin \alpha_0 \cos \gamma_0 \\ -\sin \beta_0 \cos \gamma_0 & \sin \alpha_0 \cos \beta_0 - \cos \alpha_0 \sin \beta_0 \sin \gamma_0 & \cos \alpha_0 \cos \beta_0 - \sin \alpha_0 \sin \beta_0 \sin \gamma_0 \end{bmatrix}$$

次に B_0 から 10ms 後 (B_{10}) のボールの向きを映し出し、同様に映像とマーカの位置が一致するようにボールを回転させ、各軸の角度 (α_{10} , β_{10} , γ_{10}) を記録した。 B_{10} のボールの向きは、ボール座標系 BG から B_{10} のボール座標系への変換を定められた順序で連続して行うオイラー角として定義した。ボール座標系 BG (x_{G0} , y_{G0} , z_{G0}) を Y 軸周りに β_{10} 回転させ、次に 1 度目の回転で得られた座標系 B_{101} (x_{101} , y_{101} , z_{101}) を Z 軸周りに γ_{10} 回転させ、2 度目の回転で得られた B_{102} (x_{102} , y_{102} , z_{102}) を X 軸周りに α_{10} 回転させ、 B_{103} (x_{103} , y_{103} , z_{103}) を算出した。 B_{101} の回転行列を $A_{B101/BG}$, B_{102} の回転行列を $A_{B102/B101}$, B_{103} の回転行列を $A_{B103/B102}$ とした。そして、以下の行列を用いてボール座標系 BG に対する B_{103} の回転行列 $A_{B103/BG}$ を算出した。

$$A_{B101/BG} = \begin{bmatrix} \cos \beta_{10} & 0 & \sin \beta_{10} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_{10} & 0 & \cos \beta_{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{B102/B101} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{10} & -\sin \gamma_{10} & 0 \\ \sin \gamma_{10} & \cos \gamma_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{B103/B102} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{10} & -\sin \alpha_{10} \\ 0 & \sin \alpha_{10} & \cos \alpha_{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{B103/BG} = \begin{bmatrix} \cos \beta_{10} & 0 & \sin \beta_{10} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_{10} & 0 & \cos \beta_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_{10} & -\sin \gamma_{10} & 0 \\ \sin \gamma_{10} & \cos \gamma_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{10} & -\sin \alpha_{10} \\ 0 & \sin \alpha_{10} & \cos \alpha_{10} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta_{10} \cos \gamma_{10} & \sin \alpha_{10} \sin \beta_{10} - \cos \alpha_{10} \cos \beta_{10} \sin \gamma_{10} & \cos \alpha_{10} \cos \beta_{10} - \sin \alpha_{10} \cos \beta_{10} \sin \alpha_{10} \\ \sin \gamma_{10} & \cos \alpha_{10} \cos \gamma_{10} & -\sin \alpha_{10} \cos \gamma_{10} \\ -\sin \beta_{10} \cos \gamma_{10} & \sin \alpha_{10} \cos \beta_{10} - \cos \alpha_{10} \sin \beta_{10} \sin \gamma_{10} & \cos \alpha_{10} \cos \beta_{10} - \sin \alpha_{10} \sin \beta_{10} \sin \gamma_{10} \end{bmatrix}$$

以上 2 つの回転行列より， B_0 に対する B_{10} の回転行列 $A_{B_{103}/B_{03}}$ を下記の式を用いて算出した。

$$A_{B_{103}/B_{03}} = A_{B_{03}/B_G}^{-1} \cdot A_{B_{103}/B_G} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

B_0 から B_{10} までの角変位 ($\Psi_{B_{103}/B_{03}}$ [degrees]) および回転軸 ($\underline{u}$) は螺旋軸を用いて算出した。

$$\Psi_{B_{103}/B_{03}} = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} [a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1] \right) \times 180 \div \pi$$

これより， B_0 から B_{10} の間の回転速度 ω_{0-10} [revolution per second (rps)] は下記の式を用いて算出した。

$$\omega_{0-10} = \Psi_{B_{103}/B_{03}} \times 100 \div 360$$

B_0 に対する角速度ベクトルの向きを示す単位ベクトル (ボール回転軸) は下記の式を用いて算出した。

$$\underline{u} = \frac{1}{2 \sin \Psi_{B_{103}/B_{03}}} \begin{bmatrix} a_{32} - a_{23} \\ a_{13} - a_{31} \\ a_{21} - a_{12} \end{bmatrix}$$

ボール座標系 BG におけるボール回転軸 ($\underline{u}$) の各軸成分 (u_x , u_y , u_z) を算出した.

$$A_{B0/BG} \cdot \underline{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}$$

回転軸の向きはボール座標系 X, Y 平面に回転軸を投影したベクトルと X 軸とのなす角 (方位角), 投影したベクトルと回転軸とのなす角 (仰俯角) の 2 つパラメータで表し (図 1-3), 方位角 (θ_{0-10}), 仰俯角 (Φ_{0-10}) は下記の方程式より算出した.

$$\theta_{0-10} = \tan^{-1} \frac{u_y}{u_x}$$

$$\Phi_{0-10} = \tan^{-1} \frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}$$

より精度の高い値を得るため, B₀ から 5ms 後 (B₅) と B₅ から 10ms 後 (B₁₅) においても同様にボールの回転速度 (ω_{5-15}) および方位角 (θ_{5-15}), 仰俯角 (Φ_{5-15}) を算出した. そして, それらを用いてボール回転速度 (ω) および方位角 (θ), 仰俯角 (Φ) は以下の式に示すようにそれぞれの平均値を求めることで算出した.

$$\omega = \frac{\omega_{0-10} + \omega_{5-15}}{2}$$

$$\theta = \frac{\theta_{0-10} + \theta_{5-15}}{2}$$

$$\varphi = \frac{\varphi_{0-10} + \varphi_{5-15}}{2}$$

また, 左投手のボール回転軸角度は, 右投手のものと同様にするため座標変換を行い算出した.

2-4 ボール飛翔軌道の変位量の推定

ボールの自由落下運動の推定軌道に対する飛翔軌道の水平成分，垂直成分の差をボールの変位量の推定値 (ΔX , ΔZ , 図 2-2) とし，永見ら (2012) によるスピンパラメータの分解法を用いて算出した．

回転軸を Z 軸成分，X 軸成分に分解し，スピンパラメータの水平方向成分 (Sp_{hor}) ，垂直方向成分 (Sp_{ver}) を下記の式を用いて算出した．

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

$$Sp_{hor} = Sp \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi$$

ボールの自由落下運動の推定軌道に対する水平成分の変位量の差 (ΔX) および垂直成分への変位量の差 (ΔZ) は，永見ら (2012) が，大学生投手 7 名が投じた 75 球 (7 球種) の飛翔軌道の実測値から得た下記の回帰式を用いて算出した．

$$\Delta X = -2283 \cdot Sp_{hor} + 50.2$$

$$\Delta Z = 2092 \cdot Sp_{ver} + 33.1$$

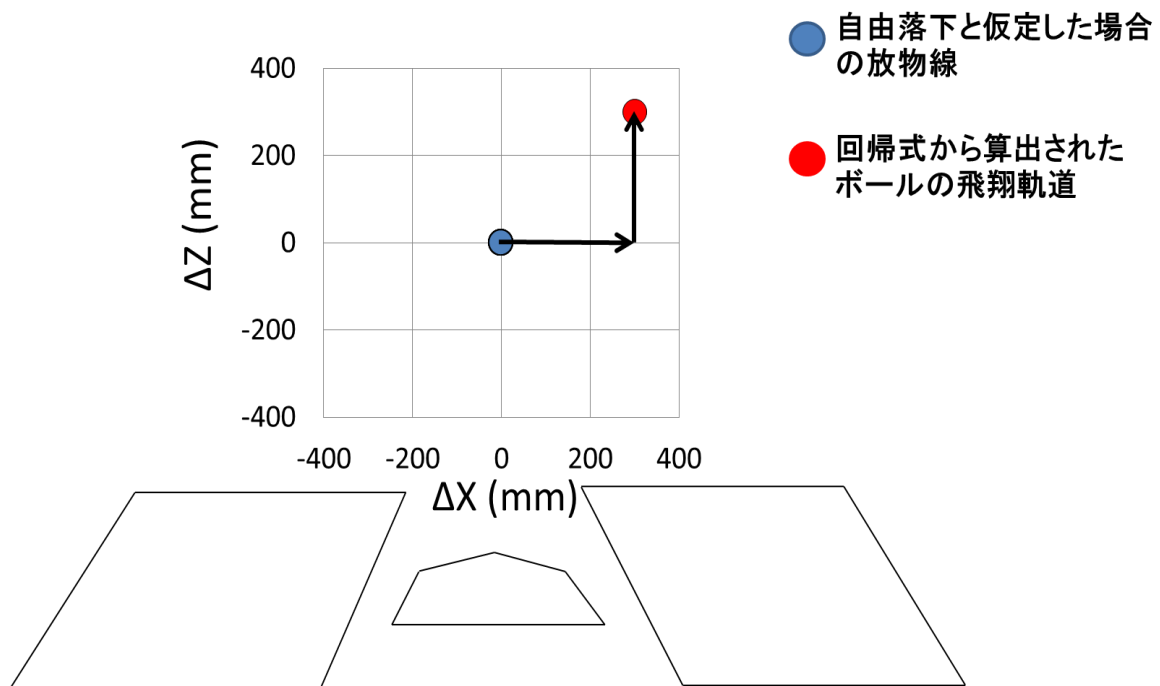


図 2-3 飛翔軌道の変位量 (ΔX , ΔZ)

2-5 統計処理

飛翔軌道の変位量に影響を及ぼす 4 変数（ボール移動速度、回転速度、方位角 θ 、仰俯角 Φ ）を縮約した総合的な指標を設定し、投手によって申告された各球種を特徴づけるために、全投球の 4 変数に対して主成分分析を行った。統計ソフト（SPSS, IBM 社製）を用いて主成分の固有値、寄与率、各主成分に対する因子負荷量、主成分得点を算出した。固有値は各主成分がデータ全体の分散をどれくらい説明するのかを表す指標であり、寄与率は固有値を比率に直したものを表す。固有値が 1.0 以上となると、各主成分の寄与率が変数 1 つ分以上となることを示す。また、因子負荷量は主成分と変数の相関係数を表し、主成分得点はデータの個々の標本が、抽出された各主成分上でとる値を示している。主成分の固有値が 1.0 以上であり、累積寄与率が 80 % 以上となったところまでの主成分を抽出し、全投球の総合特性値を表す指標として採用した。抽出された主成分上の全投球の主成分得点を投手が宣言した球種毎に分け、球種毎の

平均値の差を比較するため、対応のない一元配置の分散分析を行い、主効果が認められた場合は、その後の検定として **Bonferroni** の多重比較検定を行った。その結果、抽出された全ての主成分上の得点の平均値に有意差が認められず、全体から見て類似した球種とみなされた球種については、同一グループ内の球種間差の有無を確認するため、類似した球種の各変数の比較を行う必要がある。そこで、有意差の認められなかった球種が 2 球種の場合、各球種におけるボールの移動速度、回転速度、方位角、仰俯角の差の分析には、それぞれ対応のない **t** 検定を行った。また、分類された球種が 3 球種以上の場合、それぞれの変数の差の分析には一元配置の分散分析を行い、主効果が認められた場合にはその後の検定として **Bonferroni** の多重比較検定を行った。いずれの検定も有意水準は 5%未満とした。ボール飛翔軌道の変位量 ΔX , ΔZ は移動速度、回転速度、方位角、仰俯角の差が球種間にどのような差異を生じさせたのかを表す指標として使用した。

第3章 結果・考察

3-1 主成分分析による球種の分類

本研究で分析対象とした投球数は 154 球であった（表 3-1）．投手が宣言して投じた球種はストレート，ツーシーム，シュート，カットボール，スライダー，カーブ，シンカー，フォーク，チェンジアップの 9 球種であった．その中でシュートとシンカーを投じた投手は少なかった．全投球の移動速度，回転速度の範囲は，移動速度で 24.7 m/s から 42.5 m/s，回転速度で 4.6 rps から 47.6 rps であり，様々な球種が投げられたため広い範囲のデータが得られた．各球種の方位角と仰俯角の関係を図 3-1 に示した．方位角と仰俯角は $0 < \theta < 90^\circ$ ，仰俯角 $-60 < \Phi < 0^\circ$ の範囲と $90 < \theta < 180^\circ$ ， $0 < \Phi < 60^\circ$ の範囲に多く分布していた．

表 3-1 9 球種のボール移動速度，回転速度，回転軸角度

	n	移動速度 (m/s)		回転速度 (rps)		回転軸角度			
		平均	SD	平均	SD	方位角($^\circ$)		仰俯角($^\circ$)	
		平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
ストレート	36	37.4	2.4	34.2	2.5	33	23	-32	13
ツーシーム	12	36.8	1.9	30.3	4.4	23	29	-45	14
シュート	7	35.9	1.5	29.2	3.5	32	45	-38	12
カットボール	14	34.4	2.5	34.1	3.1	73	12	-4	10
スライダー	31	32.7	2.0	36.9	3.7	102	18	21	10
カーブ	21	29.0	2.1	35.4	5.2	140	30	26	14
シンカー	6	33.9	3.1	28.9	5.7	-61	72	-59	13
フォーク	15	34.3	2.2	15.2	5.4	21	69	-40	21
チェンジアップ	12	32.7	2.2	19.9	5.7	22	46	-57	21
全投球	154	33.9	4.4	31.0	8.4	58	61	-16	34

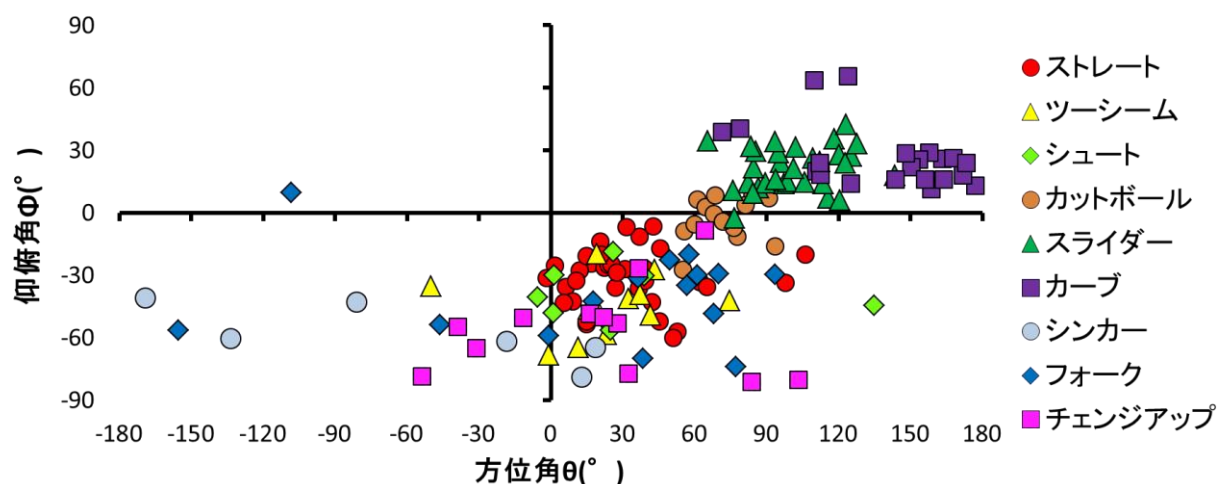


図 3-1 各球種の方角角と仰俯角の関係

以上に示した全投球に対するボールの移動速度，回転速度，回転軸の向きを表す方位角と仰俯角を変数とした主成分分析によって固有値 1.0 以上の主成分が 2 個抽出された（表 3-2）．第 1 主成分は，抽出された主成分の中で 2.32 と最も大きな固有値（全分散の 57.9 %）を示した．第 2 主成分の固有値は 1.07（全分散の 26.8 %）であり，第 2 主成分までの累積寄与率は 84.7 % であった．このことから，投げられた全てのボールは第 1，2 主成分によって説明可能であると考えられる．

表 3-2 主成分ごとの固有値，寄与率および累積寄与率

	固有値	寄与率(%)	累積寄与率(%)
第1主成分（回転軸を表す）	2.32	57.9	57.9
第2主成分（並進・回転の速さを表す）	1.07	26.8	84.7

第 1 主成分に対する因子負荷量の絶対値は，全ての変数で 0.5 を超えていた（表 3-3）．その中でも仰俯角の因子負荷量は 0.91，方位角の因子負荷量は 0.86 と，移動速度や回転速度の因子負荷量に比べて高かった．また，移動速度の因子負荷量は -0.64 であり，移動速度は第 1 主成分と負の相関があることが示された．以上より，第 1 主成分は 4 変数の中でも特に方位角と

仰俯角という回転軸の向きを表す指標であると考えられる。そして、全投球の平均値に対して特に回転軸の向きを表す方位角、仰俯角が大きいボールほど高い主成分得点となることが分かった。また、第 2 主成分に対し、回転速度の因子負荷量は 0.76 と最も高く、次いで移動速度の因子負荷量が 0.69 と高かった（表 3-3）。一方で方位角、仰俯角の因子負荷量は回転速度や移動速度の因子負荷量に比べて小さかったため、第 2 主成分に対する影響は小さいことが示された。以上より、第 2 主成分は回転速度と移動速度との関係が強く、並進・回転の速さを表す指標であると考えられる。そして、回転速度が大きく、かつ移動速度の大きいボールほど高い主成分得点となることが分かった。

表 3-3 各変数の第 1, 2 主成分に対する因子負荷量

	因子負荷量	
	第1主成分	第2主成分
移動速度	-0.64	0.69
回転速度	0.58	0.76
方位角	0.86	-0.11
仰俯角	0.91	0.10

図 3-2 には各球種の第 1, 2 主成分の得点を、表 3-4 には各球種の主成分得点を一元配置の分散分析を行い比較した結果を示した。カットボール、スライダー、カーブはそれぞれ他の全ての球種との間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。ストレートと有意差の認められなかった球種はツーシームとシュートであった。フォークとチェンジアップの間には各主成分得点に有意差が認められなかった。また、シンカーとツーシームでも有意差が認められなかった。以上より、36 名の投手が投じた 154 球は 6 種類に分類されることが分かった。全体の中でカットボール、スライダー、カーブは各投手が自己申告した通り、それぞれが異なる特徴を有していることが示された。一方、ストレート、ツーシーム、シュートの 3 球種（計 55 球）は全球種（計 154 球）の中では類似した球種であることが示された（ストレート群）。同様にフォークとチェンジアップ（計 27 球）も類似した球種であることが示された（チェンジアップ群）。シンカーはツーシームと類似した球種であることも示された（シンカー群）ことは、シンカーとストレ

ート、シュートが類似した球種として分類されていないものの、これら 4 球種は近い傾向を示すものであると考えられる。以上のように 36 名の投手が投じた 9 種類の球種を縮約すると 6 種の球種に分類できることが示された。

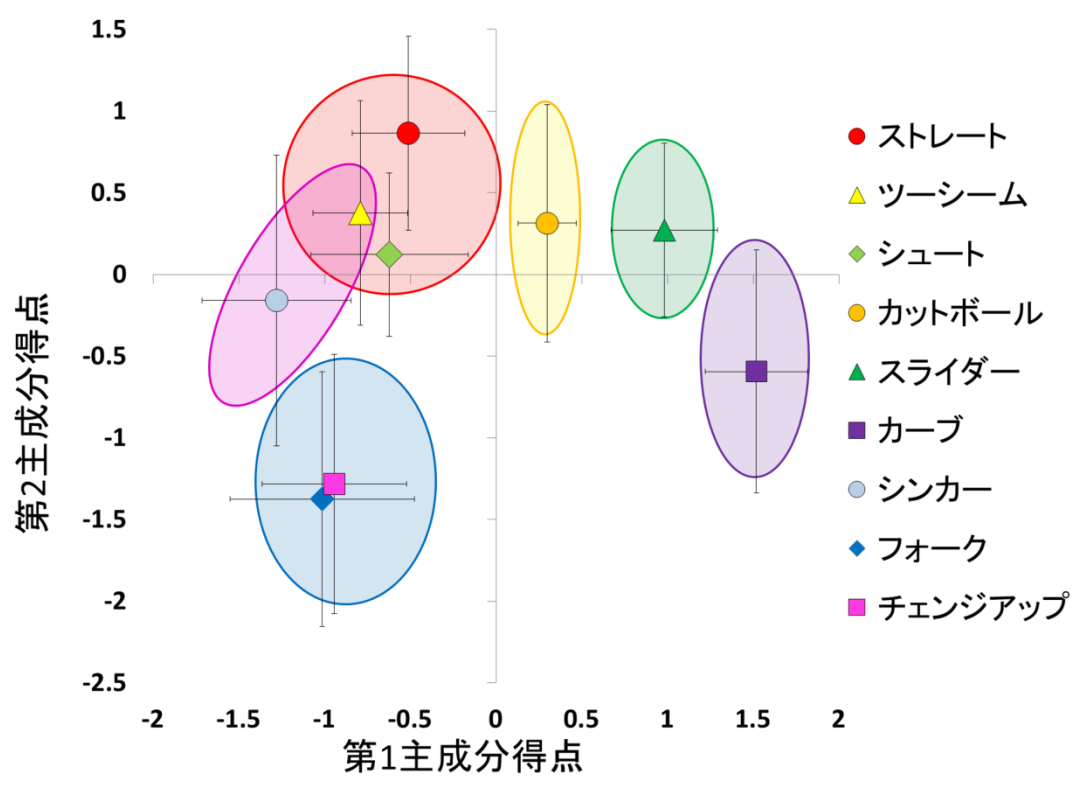


図 3-2 各球種の第 1, 2 主成分の得点

表 3-4 主成分得点の有意差の有無

St	Ts	Sh	Ct	Sl	Cv	Si	Fo	Ch
St	×							
Ts	×	×						
Sh	×	×	×					
Ct	○	○	○	○				
Sl	○	○	○	○	○			
Cv	○	○	○	○	○	○		
Si	×	○	○	○	○	○	×	
Fo	●	●	●	●	●	●	●	×
Ch	●	●	●	●	●	●	●	×

× : 有意差なし

○ : 第1主成分にのみ有意差あり

● : 第2主成分にのみ有意差あり

◎ : 両主成分に有意差あり

(p < 0.05)

St : ストレート

Ts : ツーシーム

Sh : シュート

Ct : カットボール

Sl : スライダー

Cv : カーブ

Si : シンカー

Fo : フォーク

Ch : チェンジアップ

3-2 主成分分析によって分類された 6 種類の特徴

カットボール、スライダー、カーブの 3 球種はそれぞれ他の全球種と第 1, 2 主成分の得点のいずれか、または両者に有意差が認められた ($p < 0.05$, 表 3-4) . 第 1 主成分の得点はいずれも正の値であり、その大きさはカットボール、スライダー、カーブの順に大きくなっていた (図 3-2) . また、全球種の中で第 1 主成分の得点の平均値が正を示したのはこの 3 球種のみであった . そして、第 2 主成分の得点はカットボールとスライダーでは正の値であり、カーブは負の値を示した . また、カーブはカットボールとスライダーの両球種と第 1, 2 主成分ともに主成分得点に有意差が認められ ($p < 0.05$) , スライダーとカットボールとの間には第 1 主成分の得点に有意差が認められた ($p < 0.05$) が、第 2 主成分の得点には有意差が認められなかった (表 3-4) . 以上から、カットボール、スライダー、カーブの 3 球種は回転軸の向きに大きな違いがあり、スライダーとカットボールでは移動速度と回転速度が同じ傾向で、カーブはカットボールとスライダーの両者と移動速度に違いのみられる球種であることが主成分分析によって示された .

平均移動速度はカットボールでは 34.4 ± 2.5 m/s, スライダーでは 32.7 ± 2.0 m/s, カーブでは 29.0 ± 2.1 m/s であった (表 3-1) . カーブは全球種の中で最も移動速度の小さい球種であり、カーブを投じた全ての投手で他に投げ分けた球種よりもカーブの移動速度が最も小さかった . 方位角はカットボール、スライダー、カーブの順に大きくなり、スライダーとカーブでは方位角が 90° を超えていた (表 3-1) . 仰俯角でも同様にカットボール、スライダー、カーブの順で大きくなっており、カットボールとスライダー、カーブとの間には大きな差が見られたが、スライダーとカーブでは同程度であった .

カットボールの平均方位角は $73 \pm 12^\circ$, 仰俯角は $-4 \pm 10^\circ$ であり回転軸が進行方向に近い向きであった (表 3-1) . また方位角が 90° 以内であるため、ボールに働く揚力の大きさは小さいながらも上方向に働くと推察される . 飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で 83 ± 90 mm, ΔZ で 168 ± 90 mm であり、全球種の中では自由落下に近い飛翔軌道の球種であることが示された (表 3-5) .

表 3-5 9 球種のボールの変位量(ΔX , ΔZ)

	ボールの変位量			
	ΔX (mm)		ΔZ (mm)	
	平均	SD	平均	SD
ストレート	294	88	308	118
ツーシーム	340	82	243	68
シュート	304	70	229	187
カットボール	83	90	168	90
スライダー	-165	111	-60	149
カーブ	-219	130	-322	225
シンカー	408	42	34	180
フォーク	183	86	98	78
チェンジアップ	300	119	136	61

スライダーの平均方位角は $102 \pm 18^\circ$ 、平均仰俯角は $21 \pm 10^\circ$ であり、回転軸が進行方向に近い向きであった (表 3-1)。しかし、カットボールと比べると方位角、仰俯角ともに大きく、方位角が 90° を超え、かつ仰俯角が大きいため、より左下方に揚力が働くと推察される。飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で -165 ± 111 mm、 ΔZ で -60 ± 149 mm であり、カットボールよりもさらに左下方へ変化する球種であると言える (表 3-5)。

カーブの平均方位角は $140 \pm 30^\circ$ 、平均仰俯角は $26 \pm 14^\circ$ であり、スライダーに比べて方位角が大きく、回転軸が投手から向かって左方向 (1 塁方向) に近い向きであった (表 3-1)。また、移動速度が他の球種に比べて小さいため、揚力がボールに働いている時間が長く、より左下方へ軌道が変化することが推察される。飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で -219 ± 130 mm、 ΔZ で -322 ± 225 mm であり、全球種の中で最も左下方へ変化することが示された (表 3-5)。

ストレート群の 3 球種はいずれも第 1 主成分の得点は負の値を示し、一方で第 2 主成分の得点は正の値を示した (図 3-2)。このことから、ストレート群は他の種類のボールに比べ方位角、仰俯角が小さく、移動速度、回転速度が大きいと言える。ストレートの平均方位角は $33 \pm 23^\circ$ 、平均仰俯角は $-32 \pm 13^\circ$ であり、ツーシームでは平均方位角が $23 \pm 29^\circ$ 、平均仰俯角が $-45 \pm 14^\circ$ 、シュートでは平均方位角が $32 \pm 45^\circ$ 、平均仰俯角が $-38 \pm 12^\circ$ であり回転軸の向きが進行方向、鉛直下向きに近づいて、バックスピンの飛翔することが示された。このように、ストレート群

の球種はカットボールやスライダー、カーブと回転軸の向きが大きく異なる。そして、ストレート群の球種はボールの右上方に揚力が働くと推察され、その飛翔軌道は右上方に変化するものであることが示された (表 3-5)。

シンカー群では、シンカーの主成分得点が第 1, 2 主成分いずれに対しても負の値を示した (図 3-2)。このことから、ストレート群よりも方位角や仰俯角が小さく、かつ移動速度や回転速度が小さいと言える。シンカーの平均方位角は $-61\pm 72^\circ$ 、平均仰俯角は $-59\pm 13^\circ$ であり、全球種の中で最も小さく、鉛直下向きに近いことが示された。そのため、ボールの右方向へ働く揚力が大きくなり、ストレート群よりも右下方に変化すると考えられる (表 3-5)。

チェンジアップ群ではどちらの球種でも第 1, 2 主成分の得点はいずれも負の値を示していた (図 3-2)。このことから、全体よりも方位角や仰俯角が小さく、かつ回転速度が小さい球種であることが示された。平均方位角はフォークで $21\pm 69^\circ$ 、チェンジアップでは $22\pm 46^\circ$ であり、平均仰俯角はフォークで $-40\pm 21^\circ$ 、チェンジアップでは $-57\pm 21^\circ$ であり、ストレート群と同様に回転軸の向きが進行方向、鉛直下向きに近づいていた。平均回転速度はフォークでは 15.2 ± 5.4 rps、チェンジアップでは 19.9 ± 5.7 rps であり、全体の中で特に小さい値を示していた。回転速度が小さいため、他の球種と第 2 主成分の得点に差が認められたと言える。チェンジアップ群は回転軸の向きはストレート群と近いものの、全体の中でも特に回転速度の小さい群であることが示された。回転速度が小さいことによりボールに働く揚力が小さくなるため、ボールの飛翔軌道は自由落下に近いものとなると言える (表 3-5)。

以上のように 36 名の投手が投じた 9 種類の球種を縮約するとそれぞれが独立した特徴を有する 6 種類に分類できることが示された。この結果は投手が自己申告した球種数を下回るものであり、いくつかの球種については投手が自己申告した球種として区別することが困難であることを示唆している。このような結果となった理由として、類似した球種とみなされた球種同士がそもそも同じ特徴を有する球種であったこと、そして、各投手が投じる複数球種の違いが小さいことに起因するものではなく、様々な投手が投じる同一球種間のばらつきが大きいことに起因する可能性が考えられる。

3-3 投法の違いによるボール回転の違い

被験者の中には、リリース時にボールを持つ手が水平面を上回る位置でボールを投じるオーバースローやスリークウォータースローの投手だけでなく、サイドスローやアンダースローの投手が含まれていた。ストレート群の球種はバックスピンの球種であることが示されたが、ストレートとシュートの中には方位角が 90° を超えているものがあった (図 3-3)。このストレートを投じた投手はサイドスローとアンダースローの投手であり、シュートを投じた投手はストレートを投じたアンダースローの投手であった。アンダースローの投手が投じたストレートの方位角は 107° 、仰俯角は -21° であり、サイドスローの投手が投じたストレートの方位角は 98° 、仰俯角は -34° であった。方位角が 90° を超えることによって、ボールの下方に揚力が働くため、飛翔軌道は自由落下よりも下方に変化することが示された (図 3-4)。オーバースローの投手の手の向きが上向きであることに対して、アンダースロー、サイドスローの投手の手は下向きとなっていた。リリース時の手の向きは回転軸を決定する重要な要因である (Jinji et al. 2011) ため、手の向きが下を向くと回転軸が左下方を示すこととなる。そのため、ボールに働く揚力の方向は右下方となり、それに伴ってボールは大きく右下方へ変化すると推察される。しかし、アンダースローとサイドスローの投手は方位角を 90° に近づけ、回転軸の向きをより進行方向に向けることで、ボールに働く揚力を小さくし、ボールがより右下方へ大きく変化することを防いでいると考えられる。以上から、ストレートでは投法の違いによって回転軸の向きが大きく異なることが示唆された。

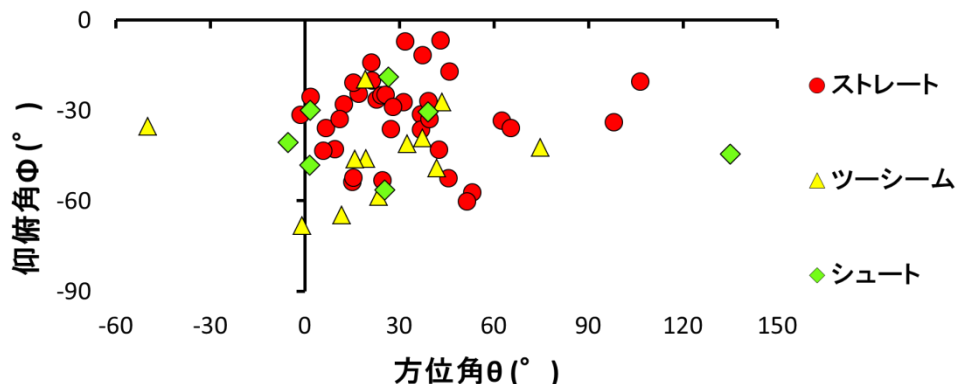


図 3-3 ストレート，ツーシーム，シュートにおける方位角と仰俯角の関係

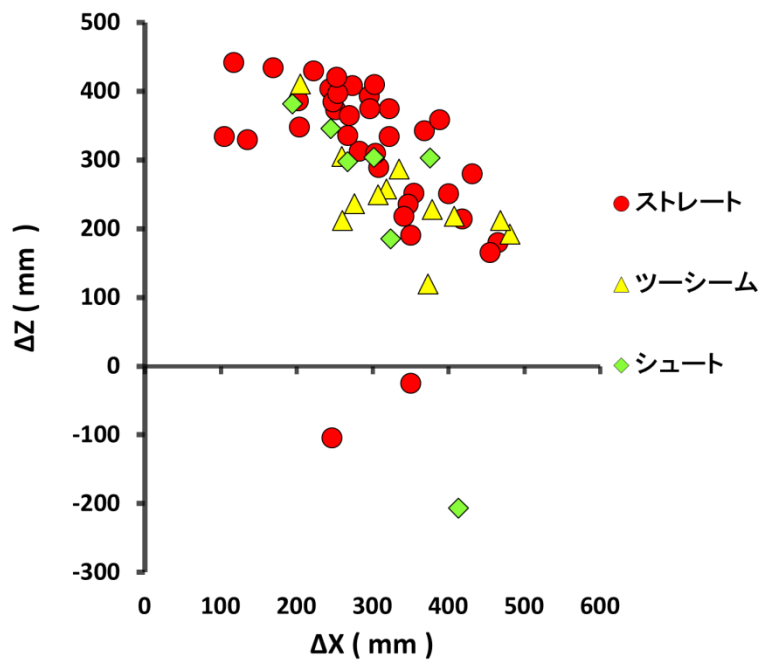


図 3-4 ストレート，ツーシーム，シュートにおける飛翔軌道の変位量

アンダースローの投手が投じたシュートの方位角は 135° 、仰俯角は -44° であった。そして、その飛翔軌道の変位量は自由落下よりも下方へ変化しており（図 3-4）、この投手が投じたストレートよりも右下方に変化していた。これは、仰俯角を鉛直下向きに近づけることに加え、ストレートでは進行方向であった方位角をより大きくし、回転軸の向きを 1 塁方向に向けることで、ボールに働く揚力が大きく、かつ右下方へ働くためであると考えられる。このように、アンダースローの投手は他の投手とは異なり、意図的に回転軸の向きが大きく異なるストレート

とシュートを投げ分けていると考えられる。

次にシンカーでは方位角のばらつきが大きく、トップスピンで飛翔するボールとバックスピ
ンで飛翔するボールとが見られた (図 3-5) 。それに伴って、飛翔軌道の変位量も自由落下に対
する上下方向の変化にも大きな差が生じていた (図 3-6) 。自由落下の軌道よりも下方へ変化す
るボールを投じた投手は、ストレートと同様にアンダースローとサイドスローの投手であった。
アンダースローの投手が投じたストレートの方位角は 107° 、仰俯角は -21° であり、一方でシ
ンカーの方位角は -168° 、仰俯角は -41° であった。サイドスローの投手が投じたストレート
の方位角は 52° 、仰俯角は -60° であり、一方でシンカーの方位角は -133° 、仰俯角は -61° で
あった。アンダースローの投手は、仰俯角を鉛直下向きに近づけるだけでなく、方位角を進行
方向に対して垂直に近づけ、ボールを右下方へ変化させる揚力を大きくすることで投げ分けて
いると考えられる。一方で、サイドスローの投手はストレートを投じる際の仰俯角が既に鉛直
下向きに近いため、それを維持した上で、方位角を変え、トップスピンとすることによって右
下方に変化するシンカーを投げ分けていると考えられる。このように、シンカーにおいても投
法の違いによって、ボールの回転の換え方が大きく異なることが示唆された。

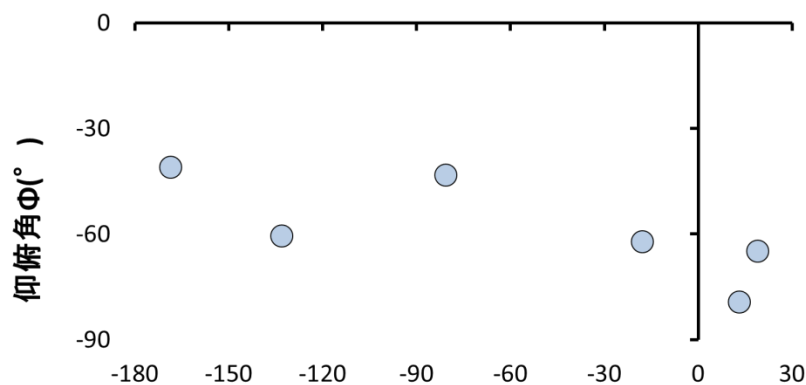


図 3-5 シンカーにおける方位角と仰俯角の関係

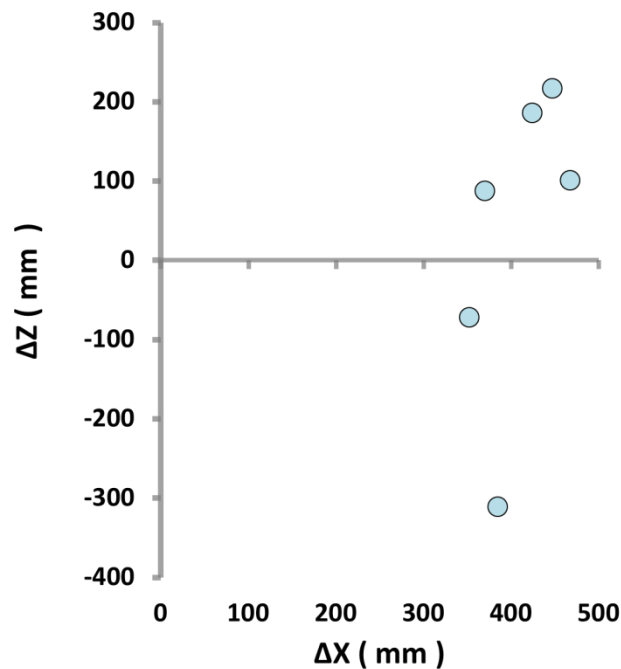


図 3-6 シンカーの飛翔軌道の変位量(ΔX, ΔZ)

カーブは主成分分析によって投手が自己申告した通り、他の球種と異なる特徴を有していることが明らかとなったが、カーブの飛翔軌道の変位量は他の球種と比べてばらつきが大きく、左方向への変化が大きい下方へはあまり変化しないボールや、左方向への変化は小さいが下方への変化が大きいボールがあった(図 3-7)。左方向に変化するボールを投じた投手は全てサイドスローの投手であり、それに対して下方へ変化するボールを投じた投手はオーバースローやスリークウォータースローの投手が主であった。図 3-8 にはオーバースローの投手とサイドスローの投手がカーブを投じる際のリリース時の典型例を示した。オーバースローの場合にはボールの上部に中指および示指をかけ、それらによってボールに大きな回転速度を与える。このように投じる場合、ボールの回転軸は近位指節間関節よりも遠位の指の向きと水平になることが推察される。したがって、リリースポイントが高くなるほど回転軸の向きが地面と水平で進行方向と垂直に近いトップスピンのように飛翔すると考えられる。一方、サイドスローの投手が同様の握り方、投げ方で投じる場合、指のかかる場所はボールの側面となる(図 3-8)。それによって、回転軸の向きは、より進行方向上方となると推察される。以上より、カーブを投じる

際の回転軸の向きは投法によって異なり、オーバースローの投手が投じた場合にはボールはより下方に、サイドスローの投手が投じた場合にはより左方向に変化するボールになることが示唆された。

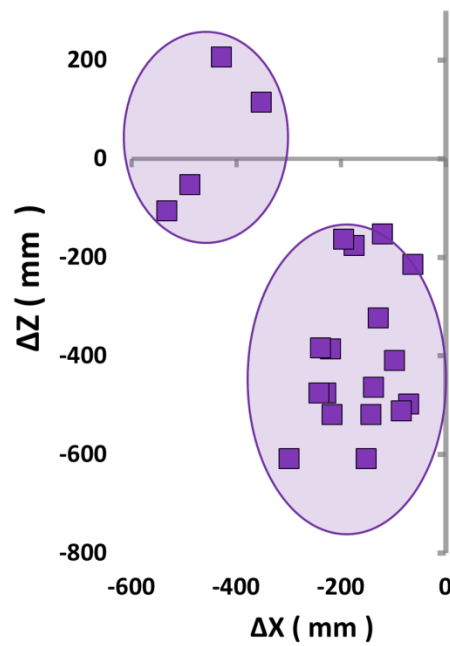


図 3-7 カーブの飛翔軌道の変位量(ΔX , ΔZ)

オーバースロー



サイドスロー



図 3-8 オーバースロー投手とサイドスロー投手がカーブを投じる際のリリース時の典型例

一方で、カットボールとスライダーでは、オーバースロー、サイドスロー、アンダースローなど様々な投法の投手が投じたにも関わらず、どちらの球種も他の球種と比べて回転軸の向きのばらつきが小さかった（表 3-1）。どちらの球種も回転軸の向きが進行方向に近く、その回転をボールに与えるために、どの投法の投手でもボールの側方に指をかけてリリースしていた（図 3-9）。以上から、カットボールやスライダーのように回転軸の向きが進行方向を向く傾向にある球種は、投法の影響を受けないことが示唆された。

オーバースロー



サイドスロー



図 3-9 オーバースロー投手とサイドスロー投手がスライダーを投じる際のリリース時の典型例

以上のように、球種によっては投法の違いにより同一球種と呼ばれるものであってもその特徴が大きく異なることが示された。様々な投手が投じた同一球種内のばらつきが大きかったため、いくつかの球種では投手が自己申告した球種として区別することが困難となったと考えられる。そこで、類似した球種として分類された 3 種類のグループについては各変数の比較を行い、同一グループとして分類された複数の球種にどのような特徴があるのか、またその特徴は球種を区別するほど顕著な差をもたらし、異なる飛翔軌道のボールとなるのかについて考察した。

3-4 ストレート、ツーシーム、シュート

ストレートの平均移動速度は 37.4 ± 2.4 m/s であり、全球種の中で最も大きかった（表 3-1）。また、36 人中 31 人で他の球種に比べて最も高い移動速度であった。これまでの研究によって、ストレートの回転軸は投球方向に直行し、かつ地面に対して水平な、いわゆる純粋なバックスピンはなく、進行方向、鉛直下向きに近づいていることが報告されている（Jinji et al. 2006, Nagami et al. 2011）。本研究で得られたストレートの平均方位角は $33 \pm 23^\circ$ 、平均仰俯角は $-32 \pm 13^\circ$ であり、先行研究と同様の傾向にあった（表 3-1）。また、飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で 294 ± 88 mm、 ΔZ で 308 ± 118 mm であり、 ΔZ は全球種の中で最も大きかった。ストレートは大きな移動速度で右上方に変化する球種であることが示された。

ツーシームの平均移動速度は 36.8 ± 1.9 m/s であり、ストレートとの間に有意差は認められなかった。平均回転速度は 30.3 ± 4.4 rps であり、ストレートよりも有意に小さかった（ $p < 0.05$, 図 3-10）。回転軸の向きでは平均方位角が $23 \pm 29^\circ$ 、平均仰俯角が $-45 \pm 14^\circ$ であり、仰俯角にのみストレートとの間に有意差が認められ（ $p < 0.05$, 図 3-10）、ストレートよりも小さかった。飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で 340 ± 82 mm、 ΔZ で 243 ± 68 mm であり、右投手の場合、ストレートよりも投手から見て右下方へ変化していた（表 3-5）。以上から、ツーシームはストレートに比べて移動速度が同程度であるものの回転速度が小さく、仰俯角が鉛直下向きに近づいているため、ボールに働く揚力の大きさが小さく、かつ右方向に働くことにより右下方へ変化すると推察される。永見ら（2012）はストレートとツーシームでは飛翔軌道の左右方向への変位量に違いがあり、それは縫い目と回転による影響ではなく、仰俯角の大きさの違いにより生じるものであることを示唆している。本研究でも同様の結果が得られ、ツーシームはストレートと握り方を変えることで、同程度の移動速度でありながらボールの回転に変化を与え、打者が予測するボールの飛翔軌道からわずかに変化させることでバットの芯を外し、打者を打ち取る球種であると言える。

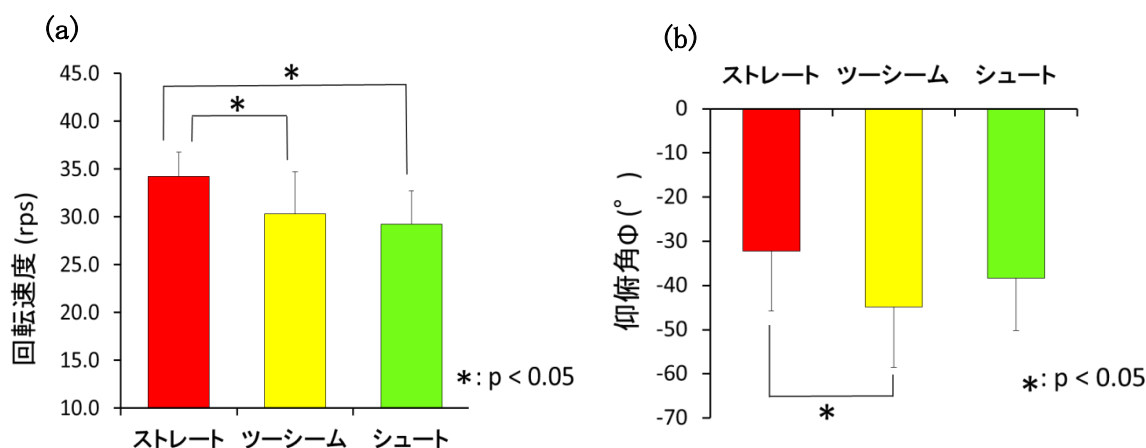


図 3-10 ストレート，ツーシーム，シュートの回転速度 (a)と仰俯角(b) の比較

シュートの平均移動速度は 35.9 ± 1.5 m/s であり，ストレートとの間に有意差は認められなかった．平均回転速度は 29.2 ± 3.5 rps であり，ストレートよりも有意に小さかった ($p < 0.05$) ．回転軸の向きでは，平均方位角が $32 \pm 45^\circ$ ，平均仰俯角が $-38 \pm 12^\circ$ であり，いずれもストレートとの間に有意差は認められなかった．飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX で 304 ± 2 mm， ΔZ で 229 ± 187 mm であり，ストレートと同様に自由落下の軌道よりも右上方へ変化するが，ストレートに比べ，より下方に変化していることが示された (表 3-5) ．投手がストレートとツーシームを投げ分ける際に変更する点は握り方だけであり，投げ方は同様で，シュートに関してもツーシームと同様の握り方，投げ方であると言われている (伊良部と吉井，2010) ．また，本研究においてシュートを投じた 7 名中 6 名の握り方がツーシームと同様の握り方であり，さらにツーシームとシュートを投げ分けた投手はいなかった．これは，ツーシームとシュートでは握り方，投げ方ともに同じであり，飛翔軌道に大きな差が生まれないことを投手が経験的に理解しているために投げ分けていないのだと考えられる．これらから，ツーシームとシュート

では、ストレートを投じる際と握り方を変更し、ボールの縫い目に対する指のかかり方が変わることによって、ストレートと同程度の移動速度ではあるが、ボールの回転に差異を生じさせ、飛翔軌道をわずかに変化させることで、打者を打ち取る球種であると考えられる。

3-5 シンカーとツーシーム

シンカーの平均移動速度は 33.9 ± 3.1 m/s であり、ツーシームよりも有意に小さかった ($p < 0.05$, 図 3-6) . 平均回転速度は 28.9 ± 5.7 rps であり、ツーシームとの間に有意差は認められなかった. シンカーの平均方位角は $-61 \pm 72^\circ$, 平均仰俯角は $-59 \pm 13^\circ$ であり, 方位角, 仰俯角ともに全球種の中で最も小さい値であり (表 3-1) , ツーシームとの間に方位角にのみ有意差が認められ ($p < 0.05$) , 仰俯角はシンカーでより小さくなる傾向が認められた ($p < 0.1$, 図 3-11) . シンカーの回転軸の向きがより鉛直下向きに近い傾向があるため, 方位角に大きな差が生じたと考えられる. 以上のことから, シンカーはツーシームと移動速度, 回転軸の向きが異なることが分かった. そして, シンカーはバックスピンの, かつ回転軸が鉛直下方向に近い向きであるため, ボールに対して右上方へ揚力が働くと推察される. 飛翔軌道の変位量の平均値は ΔX が 408 ± 42 mm, ΔZ が 34 ± 180 mm であり, 全球種の中で最も自由落下の軌道に対して右方向に変化し, ストレートに対して右下方に変化する球種であることが示された (表 3-5) . 以上より, 投手はストレートやツーシーム, シュートを投じる際よりも回転軸を鉛直下向きに近づけることによって, より右下方に変化するボールを投げ分けると考えられる.

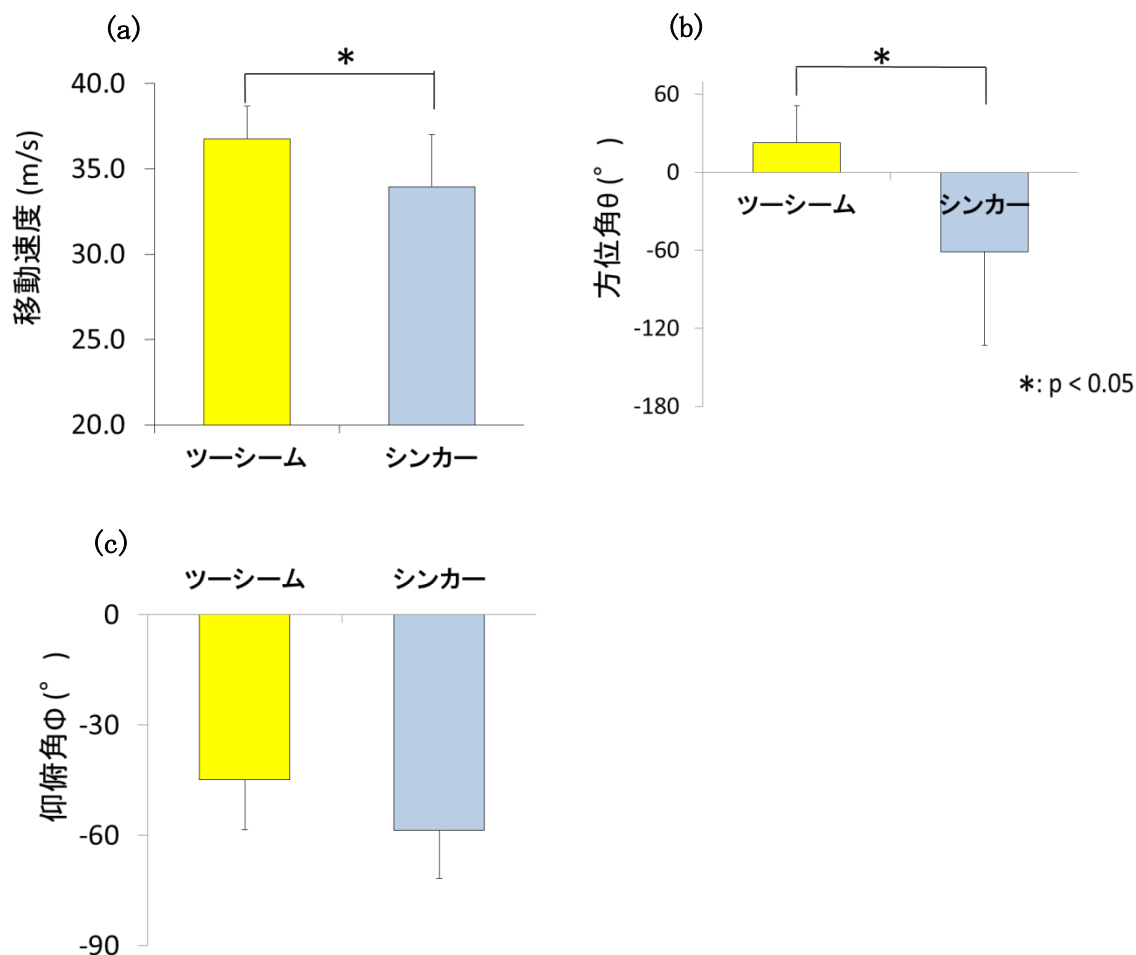


図 3-11 ツーシームとシンカーにおける移動速度 (a), 方位角 (b), 仰俯角(c) の比較

3-6 フォークとチェンジアップ

平均移動速度はフォークでは 34.3 ± 2.2 m/s, チェンジアップでは 32.8 ± 2.0 m/s であり, 両者の間に有意差は認められなかった (表 3-1). 平均回転速度はフォークでは 15.2 ± 5.4 rps, チェンジアップでは 19.9 ± 5.7 rps であり, フォークの回転速度が有意に小さかった ($p < 0.05$, 図 3-6). また, フォークの回転速度は全球種の中で最も小さかった (表 3-1). 平均方位角はフォークで $21 \pm 69^{\circ}$, チェンジアップで $22 \pm 46^{\circ}$ であり, 両者の間に有意差は認められなかった.

そして、平均仰俯角はフォークで $-40 \pm 21^\circ$ 、チェンジアップで $-57 \pm 21^\circ$ であり、チェンジアップの回転軸はより鉛直下向きに近づく傾向が認められた ($p < 0.1$, 図 3-12) .

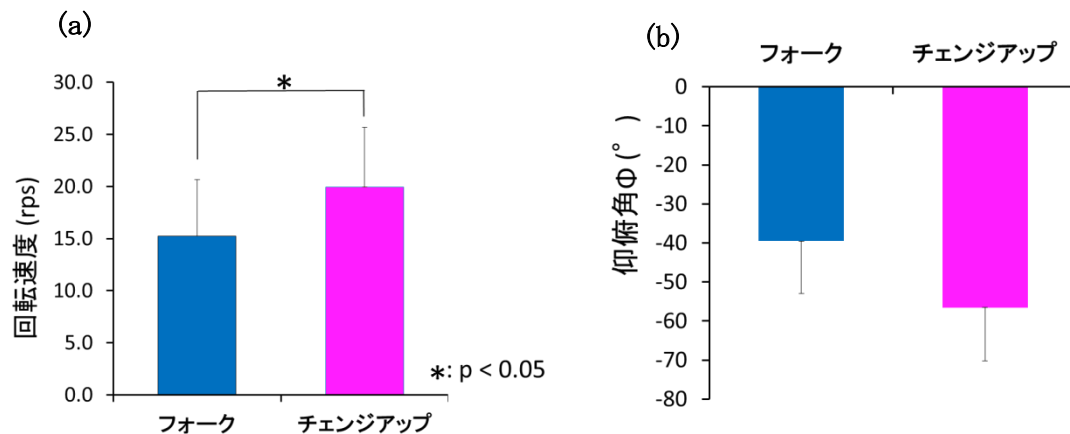
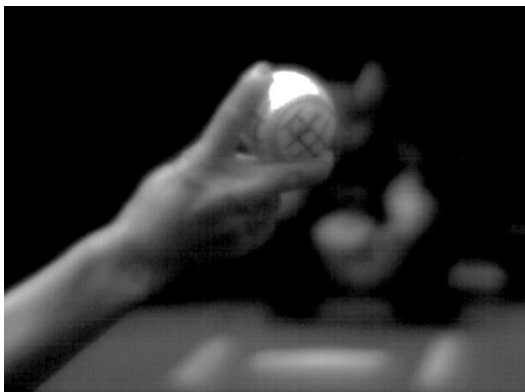


図 3-12 フォークとチェンジアップにおける回転速度 (a) と仰俯角 (b) の比較

回転速度が小さくなるほどボールに働く揚力の大きさが小さくなる (溝田ら, 2007) . したがって、どちらの球種も回転による揚力の影響が他の球種に比べて小さいと考えられる. しかし、チェンジアップの方がより回転速度が大きく、仰俯角が鉛直下向きに近づく傾向にあるのでボールに対して右方向に働く揚力が大きくなると推察される. 飛翔軌道の変位量の平均値はフォークでは ΔX が 183 ± 86 mm, ΔZ が 98 ± 78 mm, チェンジアップでは ΔX が 300 ± 119 mm, ΔZ が 136 ± 61 mm であり、どちらの球種も上下方向の変化は自由落下に近いが、チェンジアップの方がより右方向へ変化していることが示された (表 3-5) . また、フォークの方位角のばらつきがチェンジアップに比べて大きく (表 3-1) , 投手はフォークを投じる際に回転軸の向きよりも回転速度を小さくすることに重きをおいて投じていると推察される. そしてこれは、フォークとチェンジアップの握り方が異なるものであるために実現されることであると考えられる. 図 3-13 にフォークとチェンジアップの握り方の典型例を示した. フォークではボールを示指と中指で挟むように握る. それに対して、チェンジアップではボールに与える回転を大きくする役割を担う示指と中指をあまり使わないように、全ての指でボールをつかむような握り

や、示指と中指に加えて薬指を加えた握り方などがある。そして、投手はチェンジアップを投じる際にはストレートを投げるように腕を振ると言われている（伊良部と吉井，2010）。ストレートを投じる際の前腕はリリースに向かって回内するため、リリース時においてより指とボールとの接触面の大きいチェンジアップでは、手の方位の影響を受け、前腕の回内と同様の回転、つまり回転軸が鉛直下向きに近い回転になると考えられる。しかし、チェンジアップの握り方は様々であり、本研究ではフォークと同様の握り方でチェンジアップを投げ分けていた投手が見られた。その投手のチェンジアップとフォークはチェンジアップの回転速度が大きく、それに加えて回転軸がより鉛直下向きに近づいていた。以上より、投手は握り方だけではなく、リリース時にボールの回転を細かく調節することによって、フォークと異なる飛翔軌道のチェンジアップを投げ分けていると推察される。



(a) フォーク



(b) チェンジアップ

図 3-13 フォークとチェンジアップの握り方の典型例

3-7 球種の投げ分け

本研究で、主成分分析によって 36 名の投手が投じた 154 球は 6 種類に分類されることが分かった。この結果は投手が自己申告した球種数を下回るものであり、いくつかの球種については自己申告した球種を区別することが困難であることを示唆している。これは各投手が投じる複数球種の違いが小さいことに起因するものではなく、様々な投手が投じる同一球種間のばらつきが大きいことに起因すると考えられたため、類似した球種と判定された球種について、各

変数の比較を行ったところ、ツーシームとシュート以外の球種はそれぞれに移動速度、回転速度、回転軸の向きの少なくとも1項目について異なる特徴を有していることが明らかとなった。これらによって、投手はそれらを変化させることによって大きく飛翔軌道の異なる球種やわずかな差を生じさせることで打者を打ち取る球種を投げ分けていることが示された。ストレートは大きな移動速度で右上方に変化する球種であることが示されたが、投手はそれに対してシュートを投じる際には回転速度を小さくすることで、より下方へ変化させ、ツーシームでは回転速度を低下させることに加えて、回転軸の向きを鉛直下向きに近づけることで、より右下方に変化するボールを投じていた。また、これらは意図的に手の向きなどを変化させることで実現するものではなく、ストレートとの握り方の違いで、ボールの縫い目に対する指のかかり方が異なることによって生じる変化であると推察される。シンカーでは回転軸の向きをツーシーム以上に鉛直下向きに近づけることによって、より右下方へ変化するボールを実現していた。

カットボール、スライダー、カーブは他の球種と回転軸の向きが大きく異なり、カットボール、スライダーでは回転軸を進行方向に近づけることにより、ボールに働く揚力を小さくし、それによって自由落下に近い飛翔軌道のボールを実現していた。また、スライダーでは、カットボールよりも回転軸の向きを上向きにすることによって、左方向に働く揚力を大きくし、カットボールよりも左下方へ変化するボールを実現していた。カーブはスライダーよりも方位角が大きく、回転軸の向きを一塁方向に近づけることによって、下方に働く揚力が大きくなり、スライダーよりも左下方へ変化するボールを実現していた。また、カーブでは回転軸の変化に加えて移動速度にも変化を与え、打者にとって飛翔軌道の予測が困難となるボールとして投げ分けられていた。

フォーク、チェンジアップでは他の球種よりも回転速度を小さくすることにより、ボールに働く揚力を小さくし、自由落下に近い飛翔軌道のボールとしていた。また、チェンジアップではフォークよりも回転速度を大きくし、それに加えて回転軸の向きを鉛直下向きに近づける傾向が見られ、より右方向に変化するボールとして投げ分けられていた。

以上のような方法によって、投手は様々な変化球の投げ分けを実現していることが示唆され

たが、サイドスローやアンダースローの投手では球種によって回転軸の向きが他の投手が投げたものと異なり、それに伴って飛翔軌道の変位量も異なることが示された。平均のストレートはバックスピンで飛翔するのに対して、アンダースローとサイドスローの投手はリリース時の手の向きが異なるため、ストレートの方位角は 90° を超え、かつ鉛直下向きに回転軸が近づく。そのため、ボールの下方に揚力が働き、飛翔軌道は自由落下よりも下方に変化することが示された。

ストレートは真っ直ぐ飛翔するボールであると打者には認識されているが、実際にはボールの回転によって生じる揚力の影響で右上方に変化する。このこと、又は投法の違いによってストレートの変位量が大きく異なることを踏まえると、打者の視点で変化球の軌道変化を評価するためには、個々のストレートに対して、その投手が投じた変化球がどのように変化しているのかを示す必要があると考えられる。表 3-6 にはそれぞれの投手が投じた変化球とその投手が投じたストレートとの変位量 ΔX , ΔZ の差の平均値と標準偏差を示した。カットボール、スライダー、カーブはストレートに対して、大きく左方向へ変化していることが示され、これらの球種に比べてツーシーム、シュート、シンカー、フォーク、チェンジアップの水平方向への変位量は小さいことが示された。また、全ての球種がストレートよりも下方へ変化していることが示された。カットボールやスライダーの飛翔軌道は自由落下に近く左右への軌道変化は小さいものとなっていたが、ストレートが右上方へ変化する分、打者には左方向へ変化する球種として認識されるのだと考えられる。また、フォークやチェンジアップはカットボールのように自由落下に近い飛翔軌道となっていたが、カットボールよりも水平方向の変化がストレートに近く、より上下方向の変化が自由落下に近いため、軌道が右方向へ変化するにも関わらず、単に落下する球種であると打者に認識されているのだと考えられる。アンダースローとサイドスローの投手が投じたスライダー、サイドスローの投手が投じたカーブはそれぞれの投手が投じたストレートと比べて飛翔軌道が左上方へ変化することが示された (図 3-14)。これは、投手が手部の回内外によって回転軸の調節を行っているためであると考えられる。リリース時に手が下方を向くアンダースローやサイドスローの投手の場合、手部が回外した肢位でボールをリ

リリースすることによって回転軸が進行方向に近づく。そして、さらに大きく回外した肢位でボールをリリースすることで方位角が 90° を下回り、それとともに仰俯角が 0° を上回るため、ボールの左上方に働く揚力が大きくなるボールになると考えられる。そのため、アンダースローやサイドスローの投手が投じるカーブやスライダーは、ストレートとの水平方向への変位量の関係が他の投手と同様であるが、より上方へ変化するのだと考えられる。以上より、変化球のストレートに対する水平方向の変位量の関係はどの投法においても同様であるが、投法によって上下方向の変位量の関係が大きく異なることが示された。

表 3-6 ストレートに対する各球種の変位量

	ボールの変位量			
	ΔX (mm)		ΔZ (mm)	
	平均	SD	平均	SD
ツーシーム	41	46	-84	58
シュート	43	69	-53	32
カットボール	-209	82	-152	112
スライダー	-464	130	-360	223
カーブ	-488	189	-660	316
シンカー	44	88	-171	89
フォーク	-87	96	-257	79
チェンジアップ	26	84	-211	68

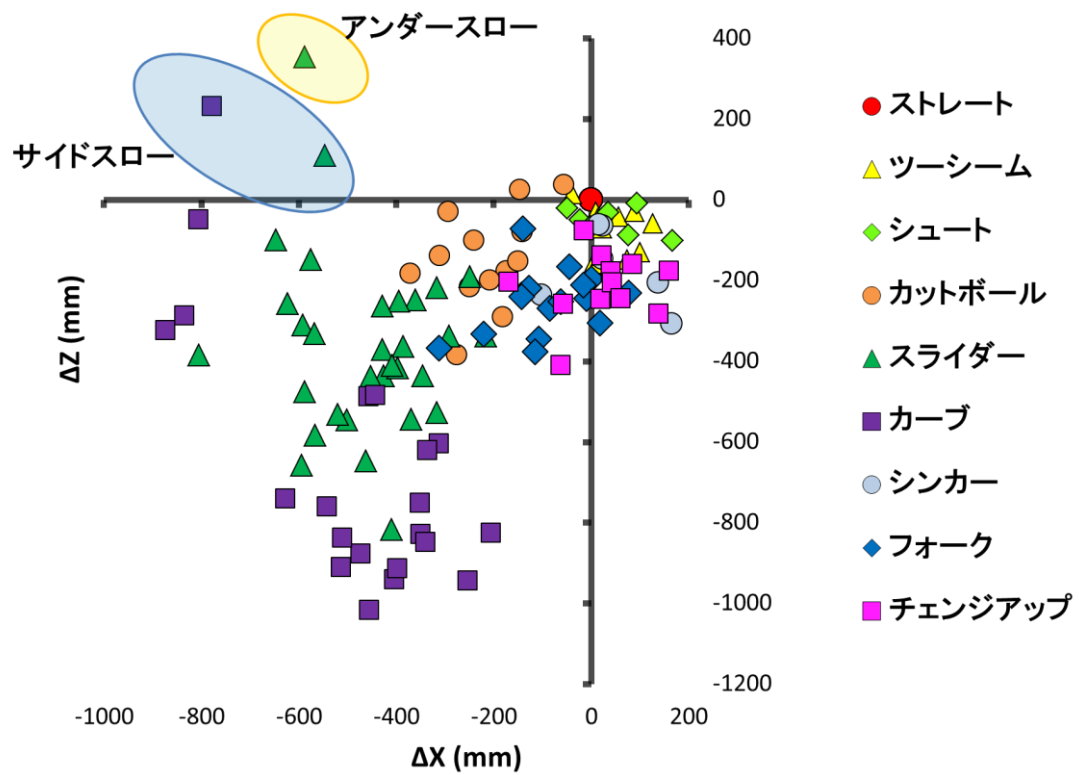


図 3-14 ストレートに対する各球種の変位量 ΔX と ΔZ の関係

第4章 結論

本研究の目的は、ボールの移動速度、回転速度、回転軸の向きに基づいて、大勢の一流投手が投じる様々な変化球が独立した球種として分類されるのかを明らかにし、さらにそれらの球種間差を比較検討することによって、各球種の特徴を明らかにすることであった。全投球の移動速度、回転速度、回転軸の方位角と仰俯角に対して主成分分析を行い、球種毎の主成分得点を比較した結果、全9球種として自己申告された154球は6種の独立した球種として分類された。全体の中でカットボール、スライダー、カーブは投手によって申告された通り、それぞれが異なる特徴を有していることが示された。一方、ストレート、ツーシーム、シュートの3球種、同様にフォークとチェンジアップは全体の中でそれぞれが類似した球種であることが示された。また、シンカーはツーシームと類似した球種であり、シンカーとストレート、シュートは類似した球種として分類されていないものの、これら4球種は近い傾向を示すものであることが示唆された。主成分分析によって縮約された6球種は投手が自己申告した球種数を下回るものであり、いくつかの球種については自己申告した球種を区別することが困難であることが示された。これは様々な投手が投じる球種間のばらつきが大きいことに起因すると考えられるため、類似した球種と判定された球種について各変数の比較を行ったところ、ツーシームとシュート以外の球種はそれぞれに移動速度、回転速度、回転軸の向きの少なくとも1項目について異なる特徴を有していた。投手は小さな差異を生み出すことで打者を打ち取るボールを投げ分けているものの、球種間の差以上に被験者間の差が大きいため、全体ではいくつかの球種は独立した特徴を有するものとはみなせないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 阿江通良, 藤井範久 (2002) 「スポーツバイオメカニクス 20 講」朝倉書店
- 2) A. Terry Bahilla, David G. Baldwin (2007) : Describing baseball pitch movement with right-hand rules. *Computers in Biology and Medicine* 37 : 1001 - 1008
- 3) A. Terry Bahill, William J. Karnavas (1993) : The Perceptual Illusion of Baseball's Rising Fastball and Breaking Curveball. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 19 (1) : 3-14
- 4) Alan M. Nathan (2007) : The effect of spin on the flight of a baseball. *Am J Phys* 76 : 119-124
- 5) 伊良部秀輝, 吉井理人 (2010) 「最新最強のピッチングメカニクス」長岡書店
- 6) James H. Braatz, Prem P. Gogia (1987) : The mechanics of pitching. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy* 9 : 56-69
- 7) Jinji T, Sakurai S (2006) : Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. *Sports Biomechanics* 5 (2) : 197-214
- 8) 神事努, 桜井伸二 (2008) 「投球されたボールの球質はどのような動作によって決定されるのか」 *バイオメカニクス研究* 12 (4) : 267-277
- 9) Jinji T, Sakurai S, Hirano Y (2011) : Factors determining the spin axis of a pitched fastball in baseball. *Journal of Sports Sciences* 29 (7) : 761-767
- 10) Leroy W. Alaways, Mount Hubbard (2001) : Experimental determination of baseball spin and lift. *Journal of Sports Sciences* 19 : 349-358
- 11) Leroy W. Alaways, Sean P. Mish, Mont Hubbard (2001) : Identification of Release Conditions and Aerodynamic Forces in Pitched-Baseball Trajectories. *Journal of applied biomechanics* 17 : 63-76
- 12) 溝田武人 (2004) 「魔球の流体力学--硬式野球ボールの変化球のなぞ解き」 *科学* 74 (6) :

740-746

- 13) 溝田武人, 錦織大介, 小西和明 (2007) 「硬式野球ボールの縦スライダに関する流体力測定と飛翔軌道解析」 日本機械学会論文集 73 (734) : 1987-1992
- 14) 溝田武人 (2008) 「硬式野球ボールの変化球に観る空力現象」 バイオメカニクス研究 12 (4) : 259-266
- 15) 永見智行, 彼末一之 (2008) 「一人のプロ野球投手が投げる 8 球種の投球のボール回転」 日本機械学会 シンポジウム講演論文集 : 108-111
- 16) Nagami T, Morohoshi J, Higuchi T, Nakata H, Naito S, Kanosue K (2011) : Spin on fastballs thrown by elite baseball pitchers. *Medicine and science in sports and exercise* 43 (12) : 2321-2327
- 17) 永見智行, 樋口貴俊, 矢内利政, 彼末一之 (2012) 「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」 日本機械学会 シンポジウム : スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集 : 74-78
- 18) Robert G. Watts, Ricardo Ferrer (1987) : The lateral force on a spinning sphere : *Aerodynamics of a curveball. American Journal of Physics* 55 (1) : 40-44
- 19) 桜井伸二, 神事努, 笹川慶, 塚田卓巳, 山崎剛盛 (2007) 「ボールの回転と飛翔軌道」 東海保健体育科学 29 : 1-16
- 20) 高見圭太, 宮寄武, 姫野龍太郎 (2009) 「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* 28 : 347-356
- 21) 谷口哲也, 宮寄武, 清水鉄也, 姫野龍太郎 (2006) 「硬式野球ボールに働く空気力の測定」 *ながれ 日本流体力学会誌* 25 (3) : 257-264
- 22) 上田尚一 (2003) 「主成分分析」 朝倉書店
- 23) 矢野耀大 (2013) 「変化球バイブル」 ベースボールマガジン社 : 100-104

謝辞

本研究は、指導教員である矢内利政教授のご指導の下行われました。矢内教授には研究に関する様々な事柄はもちろん、日常の中で人として大切にすべき心構えなど、様々な面で熱心にご指導いただきました。心より感謝の意を表します。また、副査を快く引き受けてくださった川上泰雄教授、彼末一之教授には研究に関する貴重なご意見を賜りました。心より感謝を申し上げます。

さらに近田彰治先生には日頃から研究に関するご意見だけでなく、激励の言葉をいただきました。心より感謝いたします。そして、永見智行先生には実験実施から論文執筆に関する全てをサポートしていただきました。永見先生のご尽力がなければ、本研究の成立はなかったと思っております。心より感謝の意を表します。

また、バイオメカニクス研究室の皆様には、本研究を遂行するにあたり、多くのご指導をいただきました。野球グループの森下義孝さん、城所収二さん、谷中拓哉さん、さらには上坂学さん、丸山祐丞さんにはデータの解釈や様々な面でご指導いただきました。そして、同期の中でも特に苦楽を共にした谷茂樹くん、菱川啓太くんには多くのことをサポートしていただきました。このほかにも多くの方に本研究にご協力いただきました。心から感謝をいたします。この2年間の素晴らしい出会いに感謝し、皆様の今後のご活躍をお祈りいたします。

また、本実験を実施するにあたり、被験者を引き受けてくださった選手の皆様には心よりお礼申し上げます。そして、皆様の更なるご活躍を心よりお祈りいたします。

最後に、いつも私の意見を尊重し大学院への進学も快諾してくれた両親には感謝の気持ちでいっぱいです。この2年間という素晴らしい時を糧に、今後もまた日々精進していきたいと思っております。