

研究報告

## 投球動作における目標の方向変更が正確性に及ぼす影響

—地面反力からの検討の試み—

中島 健登<sup>1)</sup>・若月 翼<sup>1)</sup>・山田 憲政<sup>2)</sup>

The Effect of Target Direction Change on Accuracy in Pitching Motions  
— An Attempt to Study from Ground Reaction Force —

Kento NAKAJIMA, Tsubasa WAKATSUKI, Norimasa YAMADA

### 1. 緒言

スポーツ場面では状況の変化に応じて、瞬時に対応しなければならないことが多々見られる。例えば、野球やソフトボールにおいて走者の動きによってどの塁に投げるかを、瞬時にかつ適切に判断する必要がある、状況によっては投げる方向を急に変更しなければならない。これまで方向を変更させる必要のない単一課題と方向の変更が必要となる可能性を有する二重課題を用いた実験から、急な方向変更の成功率を検討した研究がいくつかある。例えば、中島・山田(2019)の研究では、サッカーのキック動作を用いてゴールに入ったか否かを判断し、成功率を検討している。また、バスケットボールにおけるシュートとパスの選択変更課題を用いた研究(日比野ら、2019)では、ボールがリングに当たったか否かで成功率を検討している。

しかしこれらの研究は、キックやショットの成功率を、予め実験者により決定されたゴールや的の範囲に入ったか否かという2段階のみで評価することに留まっており、正確な定量化には至っていない。しかし、人は感覚運動系のノイズや運動野の背景活動の揺らぎによって、運動出力には必ず一定のばらつきが生じる

(Chaisanguanthum et al., 2014; Harris & Wolpert, 1998)。つまり、野球の投球を例に挙げると、人が実際に投球した場合、狙った的からの誤差を伴い分布してしまう。そのため、単に的の中心の距離から正確性を検討するには問題があると考えられ、動きのばらつきを考慮した正確性の定量化が必要である。この問題を解決するため、進矢(2017)は、2次元正規分布モデルを用いて95%確率楕円を計算することによって、投球の誤差分布を定量化した。そして山田(2020)は、この95%確率楕円を元に、投球の成否を定量的に判別した。この方法を用いることによって、対象者が有する元々の投球の正確性を基準とした方向変更課題時の正確性の検討が可能となると考えられる。

さらに上述した日比野ら(2019)は、選択変更課題時のショット動作に関する失敗のメカニズムにまで言及しており、この研究では肘関節の角度に着目し、運動学的特徴を導出している。しかしながら、表出する動きは自身が発揮する力の地面からの反力で生成されるので、動きのメカニズムにまで言及するには地面反力の検討が必要であると言える。

そこで本研究では、対象者の基本的な投球能力を反映した単一課題の投球誤差分布をもとに

<sup>1)</sup>中京大学大学院スポーツ科学研究科

<sup>2)</sup>中京大学スポーツ科学部

成否の境界線を顕在化させる。こうして事後的に作り出された95%確率楕円を用いて、単一課題による投球の正確性を基準とした二重課題における投球の正確性を検討する。さらに、失敗のメカニズムを地面反力データから検討する試みをする。

## 2. 方法

### 2.1 実験参加者

対象者は野球及びソフトボールの経験者10名とした。また、利き手は右利き（右投げ）で統一した。

### 2.2 実験方法

図1に実験構成図を示す。対象者は2枚のフォースプレート上に片足ずつ乗せて立ち、実験者からトスされたボールをキャッチし、対象者の左前方及び右前方に設置された2つの的のうち、LEDが点灯している方の的にボールを投じる。この際、以下に示す2つの課題を設定した。

#### 2.2-1 単一課題

単一課題では、試技開始前からどちらか一方

のLEDが点灯しており、対象者はその方的にボールを投じる。最初の10球は左前方（的1）に、続く10球は右前方（的2）とした。尚、的に当たらなかった試技は分析対象から除外することとした。

#### 2.2-2 二重課題

課題は、以下に示す2つの条件を設けた。尚、この課題は、実験者が試技開始前に的1、2どちらか一方のLEDを点灯させておき、これを一次送球先とする。

- ①投球動作中に送球先が変更しない条件（以下、変更なし条件）
  - ・的1から変更なし
  - ・的2から変更なし
- ②投球動作中に送球先が一次送球先から変更する条件（以下、変更あり条件）
  - ・的1からの的2への変更
  - ・的2からの的1への変更

以上、変更あり条件の2パターン、変更なし条件の2パターンを設け、これらを10試技ずつランダムに決定された順番で計40試技行う。

この時、対象者には送球先が変更する場合があることのみを伝え、最終的にLEDが点灯している的に送球を行うよう指示をした。変更あり条件では、投球動作に移行する瞬間からボールをリリースする前までのいずれかの局面で実験者が一次送球先のLEDを消灯し、もう一方の的のLEDを点灯させた。

### 2.3 取得データ

地面反力のデータは2枚のフォースプレート（Bertec社製、1000Hz）を用いて取得した。この時、LEDとフォースプレートを同期させることにより刺激呈示のタイミングをデータとして取得した。また、全試技を2台の高速カメラ（CASIO、EX-F1、300Hz）を用いて撮影し、それらのデータをデジタイズソフト（DKH社製、Frame-DIAS V）に取り込み、2次元DLT法によりサンプリング周波数300Hzでデジタイズすることで、ボールが的に当たった位置の座標値を取得した。地面反力のサンプリング周波数

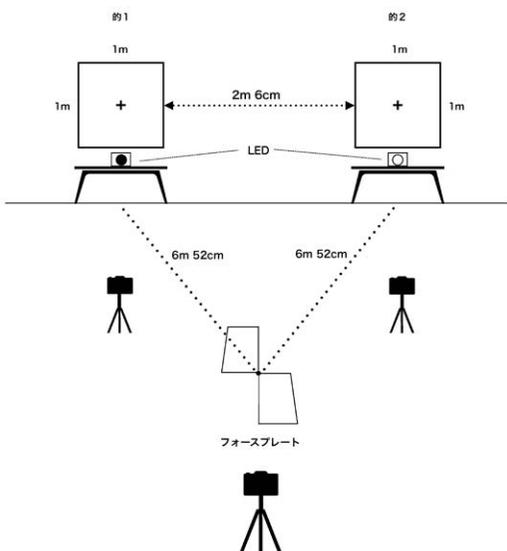


図1. 実験構成図

は1000Hzであったため、カメラデータのサンプリング周波数である300Hzに線形補間することで、地面反力と映像のデータ数を揃えた。

## 2.4 分析方法

### 2.4-1 変更あり条件における成否の定義

変更あり条件は、単一課題で的に当たった試技によって生成された95%確率楕円内に入った試技を成功、入らなかった試技を失敗と定義した。なお、確率楕円は分析のために事後的に生成した境界であるため、対象者の実験中には提示されていない。

### 2.4-2 変更あり条件における分析区間について

変更あり条件の分析区間の決定方法について、図2を用いて示す。図2は変更あり条件の静止状態から試技が終了するまでの地面反力の代表例であり、黒線は後ろ足の地面反力、灰色は前足の地面反力を示す。

分析区間の開始から終了は、各試技の静止状態の前足と後ろ足のそれぞれの平均値を算出し、その平均値より加重（前足の場合）した区間と抜重（後ろ足）した区間を特定した。（図2-黒破線、灰色破線）。分析区間の開始は、前足の地面反力が静止状態の地面反力の平均値よりも抜重した瞬間（図2-A）、後ろ足の地面反力が静止状態の地面反力の平均値よりも加重した瞬間（図2-C）と定義し、これは投球動作に移行する瞬間であった。分析区間の終了は、前足の地面反力が静止状態の地面反力の平均値よりも加重した瞬間（図2-B）、後ろ足の地面反力が静止状態の地面反力の平均値よりも抜重した瞬間（図2-D）と定義した。そして、これら4つの瞬間を時系列順に並べた時に最も時間が長くなる区間を分析区間とする。図2の代表例では、4つの瞬間を時系列順に並べるとC、A、B、Dとなるため、C-Dが分析区間となる。

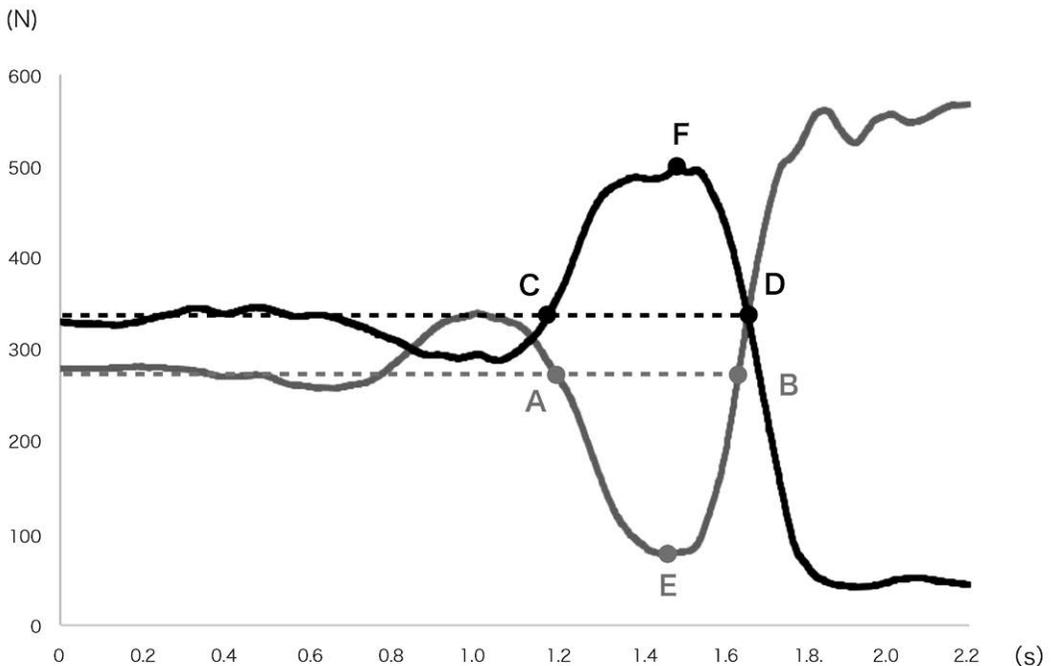


図2. 変更あり条件における分析区間

この図は実際に観測された変更あり条件の静止状態から試技終了までの地面反力の代表例である。縦軸が鉛直方向の地面反力、横軸が時間である。黒線は後ろ足の地面反力、灰色は前足の地面反力を示す。点A、Cはそれぞれの足の投球動作に移行する瞬間を、点B、Dは分析区間の終了を示している。また点Fは前足の分析区間の地面反力の最大値、点Eは後ろ足の分析区間の地面反力の最小値。

### 2.4-3 分析区間のパフォーマンス変数

分析区間のパフォーマンス変数は、以下の4変数である。これらの変数について、図2を用いて示す。

1. 前足の運動時間 (図2 A-B)：時点Aから時点Bまでの時間。
2. 後ろ足の運動時間 (図2 C-D)：時点Cから時点Dまでの時間。
3. 前足の地面反力の最小値：図2のA-Bにおける地面反力の最小値 (図2-E)。
4. 後ろ足の地面反力の最大値：図2のC-Dにおける地面反力の最大値 (図2-F)。

#### 2.4-4 変更あり条件における送球先変更タイミングについて

変更あり条件において、対象者の投球動作中のどのタイミングで送球先が変更されているかを詳細に検討するために、変更あり条件の全200試技の分析区間を均等に5区間に分割した(図3)。すなわち、各区間の時間は全体運動時間の20%である。そして、LED点灯の変更が起きたタイミングを分析区間内のどの区間に含まれるのか検討した。

### 2.5 統計処理

正確性は各区間での成否について、2 (成否) × 5 (区間) のクロス集計表を作成し、 $\chi^2$ 検定を行った。その後、 $\chi^2$ 検定の結果から、クロス表のどのセルに有意差があるかを特定するために、残差分析を行った。 $\chi^2$ 検定及び残差分析はいずれも統計的有意確率を $p < 0.05$ とした。また、 $\chi^2$ 検定によって有意差が認められた場合、その区間の正確性 (成功試技と失敗試技) の2要因による二元配置分散分析を用い、主効果が認められた場合には、Bonferroni法により多重比較を行った。尚、上記の全ての統計分析にはMathematica (Version 11.3, Wolfram Research, IL, United States) を使用した。

## 3. 結果

### 3.1 無効試技

単一課題における200試技 (20試技 × 10名) のうち、的に当たらなかった4試技は無効試技として分析対象から除外した。また、二重課題の変更あり条件における200試技 (20試技 × 10名) のうち、カメラデータが破損した1試技とボールが的に当たった衝撃で的に落ちた1試技、LEDの点灯変更タイミングが定めた5区間の中

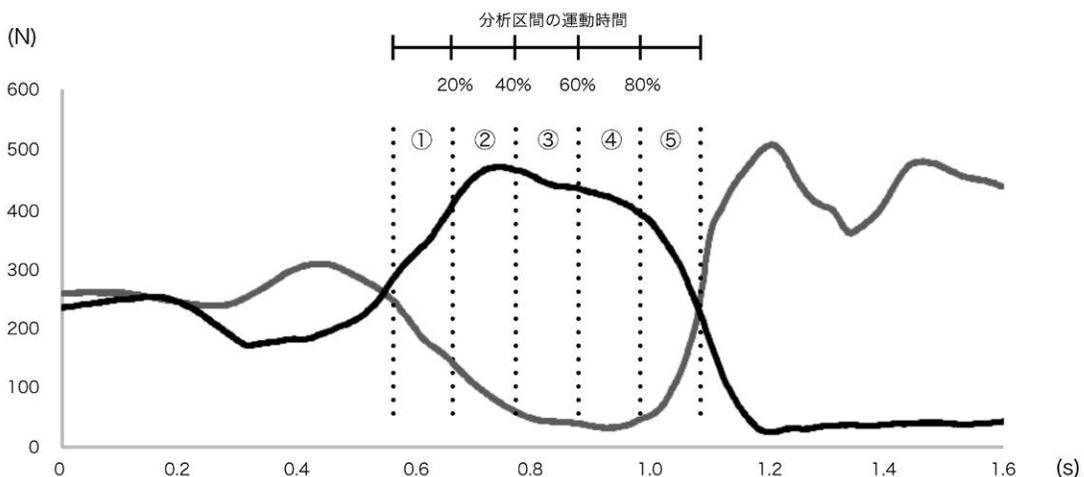


図3. 変更あり条件における送球先変更のタイミング

この図は変更あり条件における分析区間を均等に5分割したものである。5区間に分割し、どの区間でLEDの点灯が切り替わるかを特定した。また各区間の境界を分析区間の20%、40%、60%、80%とした。

で行われなかった2試技は無効試技として分析対象から除外した。その結果、最終的な有効試技は単一課題196試技、二重課題196試技となった。

### 3.2 変更あり条件における送球先変更タイミング

無効試技を除いた二重課題・変更あり条件の

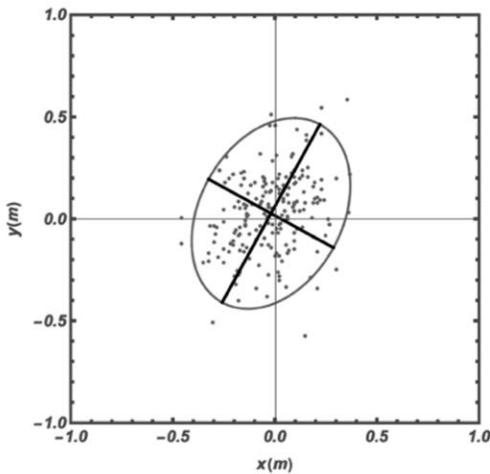


図4. 単一課題の196試技から生成された95% 確率楕円

この図は、単一課題の196試技を、デジタイズすることによって得られた座標値から生成された95% 確率楕円である。縦軸はy方向、横軸はx方向の座標を示しており、中心(0, 0)は的自体の中心である。

試技において、送球先変更のタイミングが分析区間内のどの区間に含まれるか分類した。その結果、区間1は4試技、区間2は20試技、区間3は成功試技が97試技、区間4は57試技、区間5は8試技であった。

### 3.3 変更あり条件における成功率と失敗率

図4は、単一課題の196試技から生成された95% 確率楕円である。この95% 確立楕円から、この範囲内に入る試技を成功試技、範囲外の試技を失敗試技とし、区間ごとに変更あり条件の成功試技数と失敗試技数を求めた。結果を表1に示す。また、各区間での成功率及び失敗率を比較するために $\chi^2$ 検定及び残差分析を行った(表2)。その結果、区間3の成功率と区間5の失敗率が有意に高いことが明らかとなった( $p < 0.01$ )。

### 3.4 区間4と区間5のパフォーマンス変数

変更あり条件の成功率と失敗率から、区間3の成功率と区間5の失敗率に有意な差があることを示した。しかし、本研究は失敗のメカニズムを検討することが目的であるため、その中でも失敗率が高かった区間5がより重要な結果となる。そこで、区間5および成功率と失敗率に有意な差が認められなかった区間4に着目し、その2つの区間におけるパフォーマンス変数を検討した。

表1. 二重課題における各区間の成功試技数と失敗試技数

	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5
成功試技	3	13	76	35	10
失敗試技	1	7	21	22	8
計	4	20	97	57	18

表2. 二重課題の変更あり条件における全196試技を対象としたカイ二乗検定および残差分析の結果

	実測値					計
	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	
成功率	75	65	78**	61	56	335
失敗率	25	35	22	39	44**	165
計	100	100	100	100	100	500

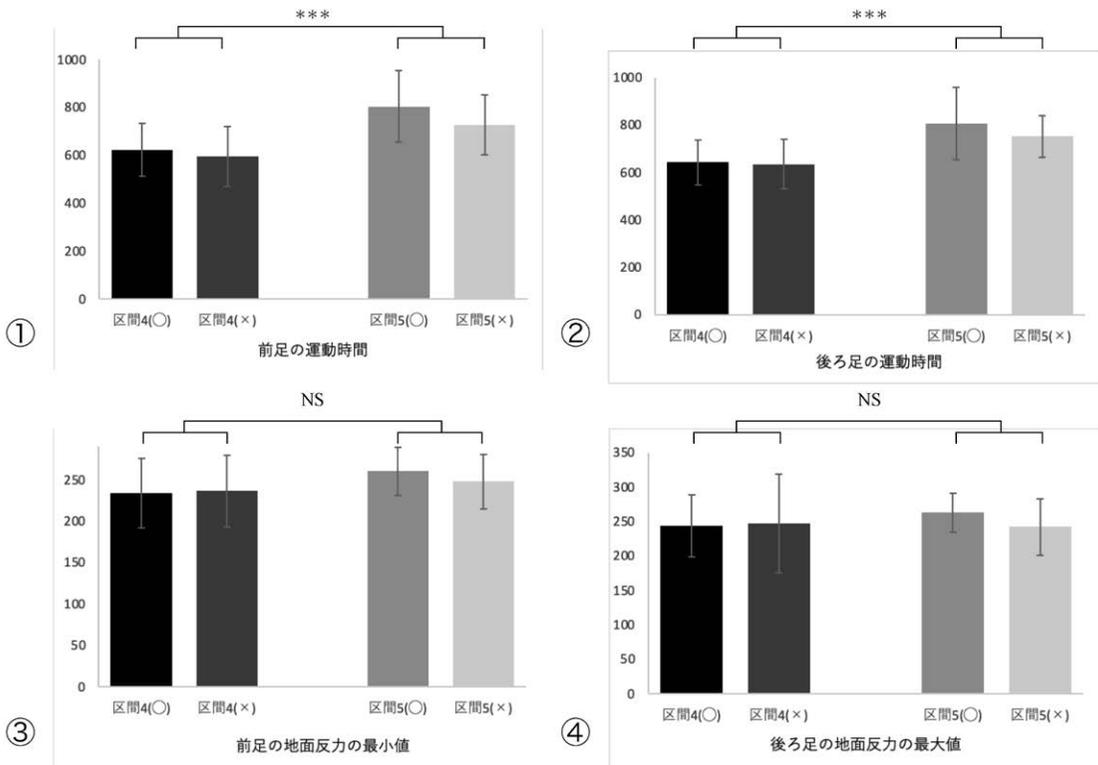
\*\* :  $p < 0.01$  .  $\chi^2 = 15.6$

図5に示すように、二元配置分散分析の結果、前足の運動時間は、2つの区間において主効果はあった ( $F(1, 71) = 23.459, p < 0.001$ )。後足の運動時間についても、2つの区間において主効果はあった ( $F(1, 71) = 13.317, p < 0.001$ )。前足の地面反力の最小値は、交互作用及び主効果は認められなかった。後ろ足の地面反力の最大値は、交互作用及び主効果は認められなかった。

### 3.5 分析区間の投球動作とその時間

変更あり条件において分析区間を5つの区間に分割し、各区間における動作を地面反力のデータとカメラデータを同期させ、検討した。図6は、各区間における動作の代表例を示した

図である。区間1ではボールをキャッチする動作、区間2はテイクバック開始前動作、区間3はテイクバック動作、区間4はテイクバック完了動作、区間5では腕を振り上げる動作を示している。変更あり条件の全196試技の分析区間の時間の平均とその標準偏差は  $630 \pm 110\text{ms}$  であった。また、3.3で着目した区間4と区間5の境界は分析区間の運動時間の80%に相当し、これはボールをキャッチしてから504ms後に対応する。



NS : Not Significant \*\*\* :  $p < 0.001$

図5. 分析区間のパフォーマンス変数の4変数

この図は、区間4と区間5の2つの区間におけるパフォーマンス変数の結果である。①は前足の運動時間、②は後ろ足の運動時間、③は前足の地面反力の最大値、④は後ろ足の地面反力の最大値を示している。いずれも、括弧内の○が成功、×が失敗を示している。

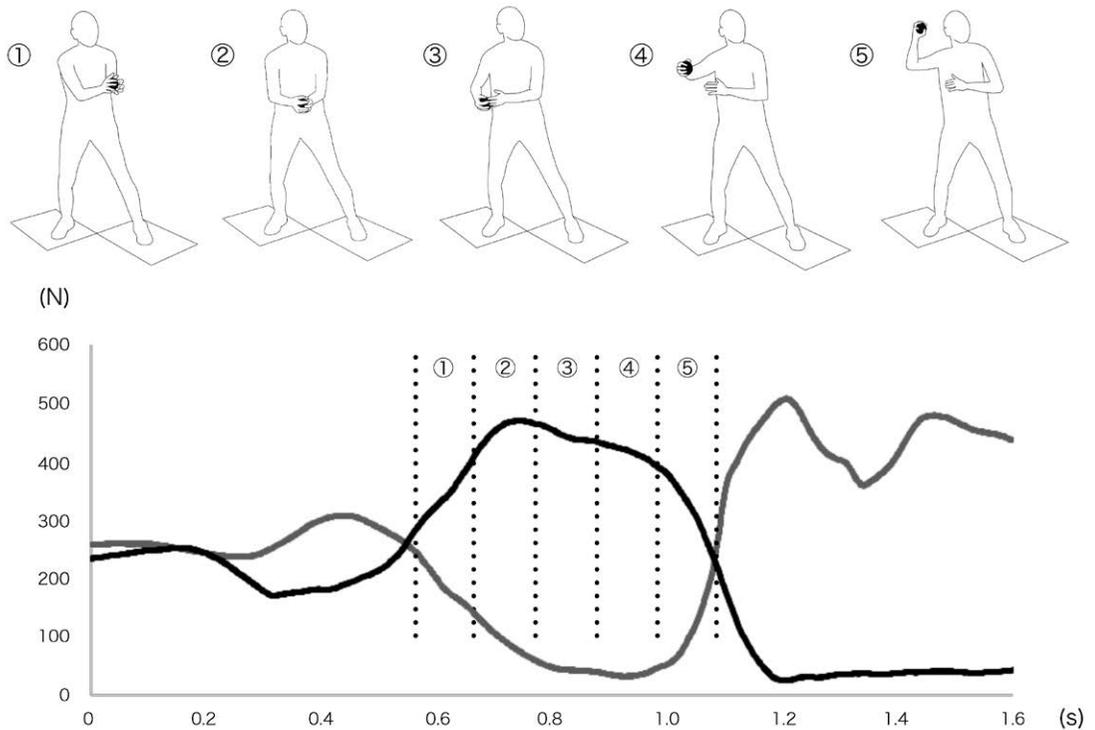


図6. 変更あり条件の5区間における動作

この図は、各区間における投球動作の代表例である。区間1から区間5までの動作は、投球動作に移行する瞬間である、ボールをキャッチする動作から腕の振り上げまでであった。

## 考察

### 4.1 選択変更可能時間域と各区間における投球動作

投球動作において、投げる方向を変更できる時間域がいつまでなのかを検討する。日比野ら(2019)は、バスケットボールのジャンプシュートの離地時を0%、着地を100%とし、0%から70%を10%間隔で区切ることで選択変更可能時間域を区間分けした。この区間分けから、離地時から100msと150msの間に選択変更可能時間域があることを明らかにしている。そこで本研究では、変更あり条件における送球先変更のタイミングを詳細に検討するために、日比野ら(2019)を参考に、変更あり試技の全試技を5区間に分割した。 $\chi^2$ 検定の結果から、区間3の成功率および区間5の失敗率に有意な差が出た。また、地面反力のデータとカメラデータを同期

させることにより、各区間における動作を合わせて検討した。その結果、成功率の高い区間3では、テイクバック動作、失敗率の高い区間5では腕を振り上げる動作が行われており、それぞれ分析区間の40%と80%に該当する。変更あり条件の全試技の分析区間における時間の平均とその標準偏差は $630 \pm 110\text{ms}$ であることから、区間3および区間5を実際の時間に換算すると区間3は、252msから378msの間であり、区間5は、504msから630msである。以上のことから、本研究に参加した対象者の場合、テイクバック動作からテイクバック完了動作(252msから378ms)の間に選択変更可能域があると考えられ、一方で、腕を振り上げる動作以降に送球先の変更が行われると選択変更が極めて困難になることが示唆された。

## 4.2 運動時間と正確性の関係

失敗率が高かった区間5が失敗のメカニズムを検討する上で重要であるため、成功率と失敗率に有意な差が認められなかった区間4と失敗率が有意に高い区間5の間で失敗率が上昇する要因があると考えられる。したがって、失敗率が上昇する要因を検討するために区間4と区間5を2つのパフォーマンス変数から検討する。

その結果、前足の運動時間と後ろ足の運動時間については、区間5の方が有意に大きいことが認められた ( $p < 0.001$ )。つまり、区間4より区間5の方がより時間をかけて投球していることがわかる。しかし、速度と正確性のトレードオフを意味するフィッツの法則 (Fitts, 1954) を鑑みると、より時間をかけた、つまり速度の大きさを小さくした区間5の正確性が低くなることは一般に考えにくい。これに関連して、中尾ら (2018) は、スポーツ動作における運動時間と正確性の関係について、バスケットボール競技の3ポイントショットに着目し、検討した。その結果、ショット時間の増大とともにショットの成功率が低下することが明らかとなった。このことから、人間の基本法則と認められているフィッツの法則がスポーツ動作では必ずしも適用されるとは限らないと報告している。本研究においても、区間4から区間5において運動時間が増加したにもかかわらず、失敗率が増加したことから、フィッツの法則が投球動作においても適用されないと考えられる。また、送球先が変更された場合の状況に対応するために、運動時間を長くして対応しようとするが、対象者の個々に最適な投球時間が確立されているため、本来のリズムを維持できなくなり、正確性が低下した可能性があると考えられる。

## 4. 結論

本研究は投球動作における送球先が変更されない課題と送球先が変更されるかもしれない課題を用いて、その変更されたタイミングによる投球の正確性を検討した。さらに、地面反力データから失敗のメカニズムの検討を試みた。

その結果、以下の結論が導かれた。

- 1) 投球動作における腕を振り上げる局面以降では、送球先の変更に対応できなくなる。本研究に参加した対象者であれば、ボールのキャッチからおおよそ500ms後に該当する。
- 2) 送球先変更という状況に対応するために運動時間が長くなるが、対象者の個々の最適な運動時間が確立されていることから、本来のリズムを維持できなくなり、結果的に正確性が低下した可能性がある。

## 5. 今後の課題

本研究では、送球先の変更に伴う課題について地面反力データを用いて検討する試みをした。しかし、この結果は運動時間や最大値などの時間や大きさに関するパフォーマンス変数に留まっており、力と動きの関係を明らかにするまでには至らなかった。

## 5. 謝辞

本研究は、2021年度本学の山田憲政ゼミ所属の勝木優花さん、若林梨果さんによる卒業研究を発展させたものである。また、本研究は、2021年度中京大学先端研体育研究所研究プロジェクト研究費を受けて行われ、今後一般ジャーナルに投稿するための中間研究報告に位置づける。

## 参考文献

- Chaisanguanthum, K. S., Shen, H. H., & Sabes, P. N. (2014). Motor variability arises from a slow random walk in neural state. *Journal of Neuroscience*, 34(36), 12071-12080.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780-784.

- 日比野朋也, 平川武仁, & 山田憲政. (2019). バスケットボールにおける空中局面での選択変更可能時間域. 中京大学体育研究所紀要, 33, 65-71.
- 中島健登・山田憲政. (2019). サッカーのパスにおいて遅延時間が生じる要因の解明. 中京大学体育研究所紀要, 33, 59-63.
- 中尾綾, 橋本泰裕, & 山田憲政. (2018). スポーツ動作における運動時間と正確性の関係—バスケットボール競技3ポイントショットによる検討. コーチング学研究, 32 (1), 33-40.
- 進矢正宏. (2017). 野球における投球誤差分布. 日本神経回路学会誌, 24 (3), 116-123.
- 山田紀史. (2020). 野球の内野手の送球ミス発生原因へのアプローチ. 国際武道大学. 修士論文.