

東海大学大学院令和6年度博士論文

バドミントンバックハンドドライブの  
技術特性と運動制御方略の解明

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| 指導 | 山田 | 洋  | 教授 |
|    | 内山 | 秀一 | 教授 |
|    | 八田 | 有洋 | 教授 |

東海大学大学院体育学研究科  
体育学専攻

清水 幹弥

## 目次

|                                                      |         |
|------------------------------------------------------|---------|
| 第1章 緒言 .....                                         | - 1 -   |
| 1.1 本論の構成と概要 .....                                   | - 2 -   |
| 1.2 バドミントン競技について .....                               | - 3 -   |
| 1.3 バドミントン競技におけるバックハンドドライブショットについて ....              | - 7 -   |
| 1.4 バイオメカニクス研究における運動の調節 .....                        | - 9 -   |
| 1.5 本研究の目的 .....                                     | - 11 -  |
| 第2章 熟練度の違いによるショットパフォーマンスおよびスイングの調節.                  | - 12 -  |
| 2.1 緒言 .....                                         | - 13 -  |
| 2.2 方法 .....                                         | - 16 -  |
| 2.3 結果 .....                                         | - 33 -  |
| 2.4 考察 .....                                         | - 60 -  |
| 2.5 小括 .....                                         | - 71 -  |
| 第3章 熟練者における Speed Accuracy Trade-off の成否とその制御方略 .... | - 73 -  |
| 3.1 緒言 .....                                         | - 74 -  |
| 3.2 方法 .....                                         | - 75 -  |
| 3.3 結果 .....                                         | - 87 -  |
| 3.4 考察 .....                                         | - 105 - |
| 3.5 小括 .....                                         | - 111 - |
| 第4章 総合考察.....                                        | - 112 - |
| 4.1 ショットパフォーマンスにおける熟練度の影響 .....                      | - 114 - |
| 4.2 スイング動作における運動連鎖.....                              | - 116 - |
| 4.3 シャトル速度の制御方略の違い .....                             | - 117 - |
| 4.4 コーチングへの示唆.....                                   | - 118 - |
| 4.3 本研究の限界 .....                                     | - 119 - |
| 4.4 結言 .....                                         | - 120 - |
| 引用参考文献.....                                          | - 121 - |
| 謝辞 .....                                             | - 131 - |

## 図一覧

|      |                                 |         |
|------|---------------------------------|---------|
| 図 1  | 基本的なショットにおけるシャトルの軌道.....        | - 5 -   |
| 図 2  | バドミントンにおけるストロークの種類.....         | - 6 -   |
| 図 3  | 実験設定 .....                      | - 20 -  |
| 図 4  | マーカー貼付位置 .....                  | - 21 -  |
| 図 5  | 正確性スコアの定義.....                  | - 23 -  |
| 図 6  | シャトル打ち出し角度の定義.....              | - 26 -  |
| 図 7  | 関節角度定義 .....                    | - 28 -  |
| 図 8  | 典型的な上肢関節角速度の時系列データ .....        | - 29 -  |
| 図 9  | 各努力度におけるインパクト高 .....            | - 36 -  |
| 図 10 | 各群のインパクト位置のばらつき .....           | - 38 -  |
| 図 11 | 努力度と規格化されたシャトル速度の関係.....        | - 40 -  |
| 図 12 | 各群の水平面および矢状面における打ち出し角度 .....    | - 45 -  |
| 図 13 | 肘関節角度の時系列データと SPM 解析の結果.....    | - 47 -  |
| 図 14 | 前腕角度の時系列データと SPM 解析の結果 .....    | - 49 -  |
| 図 15 | 手関節角度の時系列データと SPM 解析の結果.....    | - 51 -  |
| 図 16 | 肘関節角速度の時系列データと SPM 解析の結果 .....  | - 53 -  |
| 図 17 | 前腕角速度の時系列データと SPM 解析の結果.....    | - 55 -  |
| 図 18 | 手関節角速度の時系列データと SPM 解析の結果 .....  | - 57 -  |
| 図 19 | 各関節の最大角速度の出現時刻 .....            | - 59 -  |
| 図 20 | 実験における器材の配置およびマーカー貼付位置 .....    | - 78 -  |
| 図 21 | 対数カーブフィッティングによるインパクト時点の推定 ..... | - 81 -  |
| 図 22 | 指向性と再現性の定義 .....                | - 82 -  |
| 図 23 | 分析範囲およびスイングの局面定義 .....          | - 85 -  |
| 図 24 | テイクバック局面の手関節掌屈-背屈運動および筋活動.....  | - 100 - |
| 図 25 | スイング局面の手関節掌屈-背屈運動および筋活動.....    | - 101 - |
| 図 26 | テイクバック局面における筋放電量 .....          | - 103 - |
| 図 27 | スイング局面における筋放電量 .....            | - 104 - |

## 表一覧

|     |                                     |        |
|-----|-------------------------------------|--------|
| 表 1 | 熟練者群の被験者情報 .....                    | - 17 - |
| 表 2 | 正確性スコアの $\chi^2$ 検定の結果 .....        | - 34 - |
| 表 3 | 水平面におけるショットの打ち出し角度の結果 .....         | - 42 - |
| 表 4 | 矢状面におけるショットの打ち出し角度の結果 .....         | - 44 - |
| 表 5 | 各努力度における打球相対速度および正確性 .....          | - 88 - |
| 表 6 | インパクト時における上肢関節角度および関節角速度 .....      | - 90 - |
| 表 7 | 各局面における上肢関節角度の最大値および最小値 .....       | - 93 - |
| 表 8 | テイクバック局面における上肢関節角速度の最大値および最小値 ..... | - 97 - |
| 表 9 | スイング局面における上肢関節角速度の最大値および最小値 .....   | - 98 - |

# 第 1 章

## 緒言

## 1.1 本論の構成と概要

本博士論文では第1章として、研究対象である高速スイング動作としてのバックハンドドライブについて整理し、バイオメカニクス分野における動作の調節に関する研究を概観した。

第2章では、実験室環境におけるバックハンドドライブ動作をモーションキャプチャシステムにて記録した。ショットパフォーマンスとして、シャトルの打ち出し速度および設置された的への命中した回数を分析した。同時に運動学的分析を行い、スイング動作中の上肢関節の最大角速度とその出現タイミングを算出した。熟練者および未熟練者の試技を分析することで、熟練度の違いによるスイング動作の調節について考察した。

第3章では第2章で得られたデータをもとに、熟練バドミントン競技者の行うバックハンドドライブ動作におけるスイング制御方略を表面筋電図と運動学的観点からより詳細に分析した。熟練者のショットでは努力度の増大にともなう正確性の変化を明らかにするため、ショットの正確性を指向性と再現性を算出した。その際の運動学的特徴および上肢4筋の筋電図データをテイクバック局面とスイング局面に分けて分析した。

第4章では第2章および第3章で得られた知見から高速スイング動作における運動制御方略について総合的に考察した。

## 1.2 バドミントン競技について

バドミントンは2人（シングルス）もしくは4人（ダブルス）のプレイヤーがネットで2つに区切られたコート内に入り，シャトルをラケットで打ち合う競技である．

バドミントンはテニスや卓球などの他のラケットスポーツとは違い，高速で飛翔するシャトルが地面に接触しない間に迅速な反応が必要であるとされる．同じラケットスポーツであるテニスや卓球がコート内でのバウンドがルール上問題ないことを踏まえると，ユニークなスポーツであると言える[1]．

バドミントンのようなシャトル遊びは世界各国で古くから行われていた．競技としてのバドミントンは19世紀のイギリスの発祥であるとされている[2]．その後，バドミントンは1992年のバルセロナオリンピックから正式競技として男女シングルスおよび男女ダブルスが正式競技として採用されている．1996年のアトランタオリンピックからは混合ダブルスが追加され，現在では5種目が行われている．

バドミントンは年齢や性別に関係なく，すべての人が楽しめるスポーツであり[3, 4]，世界各国で楽しまれている．現在，バドミントンの国際統括団体である世界バドミントン連盟（Badminton World Federation: BWF）には201の国と地域のバドミントン協会が加盟しており[5]，バドミントンは，世界で人気のあるスポーツの一つであると言われている[6]．

バドミントンでは様々な軌道のショット（図1）を打ち，ラリーを展開する．そのためラリーで優位に立つためには様々なストロークを駆使する必要がある．ストロークには図2に示すようにオーバーヘッドストローク，サイドアームストローク，アンダーハンドストロークがある[7]．それぞれのストロークから異なるショットを打つことができるため，選手は競技場面では様々なショットの技術レベル向上が求められる．それにもかかわらず，定量的なバドミントンのパフォーマンス分析はテニスなどの他のラケット競技と比較すると少ない[8]．

オーバーヘッドストロークによって打たれるスマッシュでは打ち出されたシャトルの初速度が565 km/h (156.94 m/s) を記録しており，バドミントンは世界最速のスポーツの一つとして知られている[9]．スマッシュは，ラリーの勝敗を決定するショットとなりうるため，重要

な役割を果たす[8, 10]. そのためスマッシュにおけるシャトルの速度やそれを打ち出すスマッシュ動作については非常に関心が高く、様々な研究が行われてきた. 例えば, Tang et al.はジャンピングスマッシュ動作を3次元的に分析することで、スマッシュにおけるインパクトに向かう動きの中で前腕の回内動作が最も短時間に最も大きな角度範囲を回転していることを明らかにした[11]. これにより、経験的に手関節の背屈-掌屈（コック-アンコック）で行われていると考えられていたスマッシュ動作において、むしろ前腕の回内動作が重要であることが明らかとなり、スマッシュ動作の指導に大きな影響を与えた. 同様に、ジャンピングスマッシュ動作における高いシャトル速度はテイクバック時の体幹の捻転（X-factor）を大きくし、体幹と上肢でムチのような動きを行っていることが示されている[12, 13]. このほかにもスマッシュをはじめとするオーバーヘッドストロークに関する研究は多く行われている[12, 14-20].

これまでのバドミントンのスイング動作に関するバイオメカニクス的研究の多くがオーバーヘッドストロークを対象としたものであり[21-23], そのほかのストロークについてはほとんど行われていない. しかしながらバドミントンは様々なストロークを用いて多様なコース・ショットを行うことでラリーを有利に進める競技であるため、様々なショット技術のバイオメカニクスを定量的に明らかにすることも重要である[24].

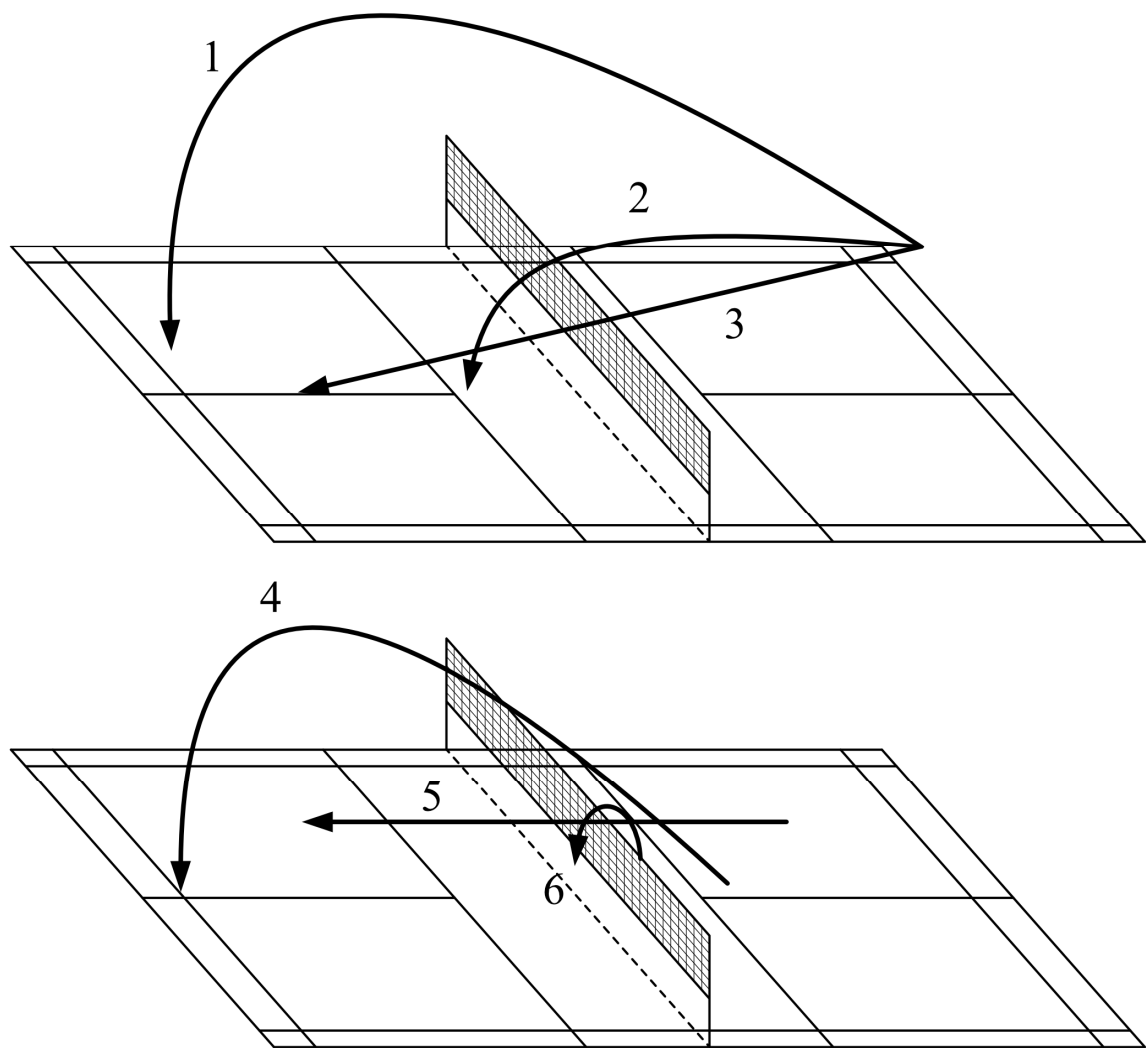
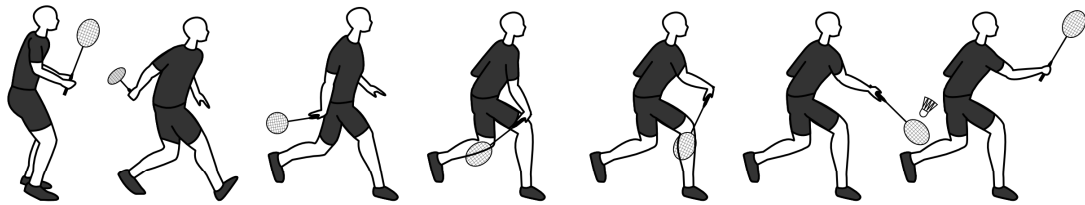
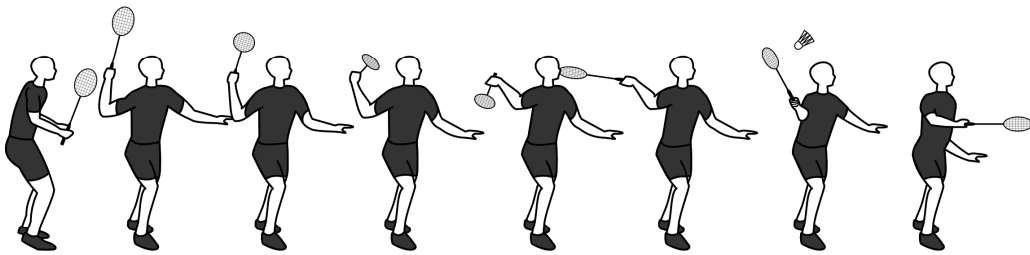


図1 基本的なショットにおけるシャトルの軌道

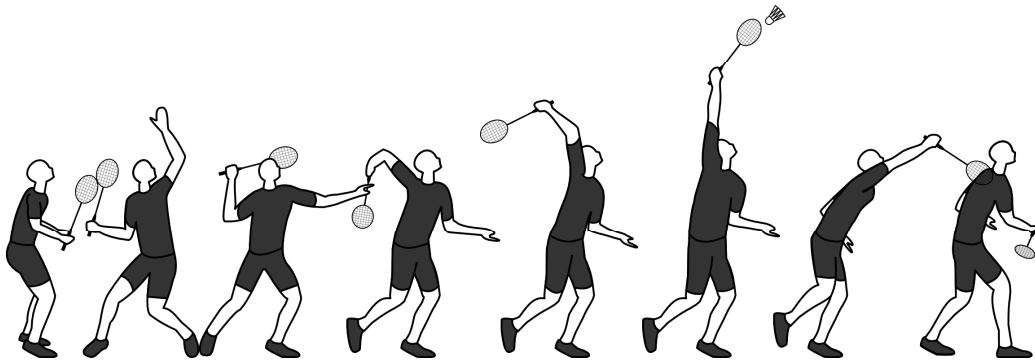
シャトルの飛翔によるショットの主な分類を示した。バドミントンには 6 種類の基本的なシャトルの飛翔があり、シャトルを打ち分けるためのショットも 1: クリア, 2: ドロップ, 3: スマッシュ, 4: ロブ (ロビング), 5: ドライブ, 6: ネットショット (ヘアピン) の 6 種類に大別される。



1: Underhand stroke



2: Sidearm stroke



3: Overhead stroke

図2 バドミントンにおけるストロークの種類

バドミントンのストロークはシャトルをインパクトする位置によって、1: アンダーハンドストローク, 2: サイドアームストローク, 3: オーバーヘッドストロークの主に3種類に分類される [7].

### 1.3 バドミントン競技におけるバックハンドドライブショットについて

前項で述べた通り、オーバーヘッドストロークから打ち出されるスマッシュショットは非常に高速であり、ラリーの得点源となりうるショットである[25-27]。ラケットに使用される素材の変化により、「軽く」「しなる」ラケットの開発が進んだ影響で[28, 29]、オーバーヘッドストロークから放たれるスマッシュショットは高速化している。スマッシュを連続で打たれることを避けなければ、有利にラリーを進めることができないため、スマッシュを連続して打たれないように打ち返す（レシーブする）ことが、バドミントンにおいては非常に重要である。

スマッシュを返球する際にロブ（図1-4）を用いると、ネットを越えて上方向にシャトルが飛翔するため、連続してスマッシュを打たれる危険がある。よってスマッシュをレシーブする際にはシャトルを上方に打ち上げるのではなく、コート面と平行に打ち出すか、ネットを越えて沈む軌道で返球する必要がある。その際に使用されるのがドライブやネットショットである。特にドライブはシングルス、ダブルスの両方で多く用いられるショットである[27, 30]。

ドライブショットはシャトルを自身の体の前や横で打つショットであり[10]、ドライブショットのシャトルの軌道は床と平行もしくは相手に対してやや下向きである[31]。サイドアームストロークから放たれるドライブショットはバドミントンにおける基本的なショットであり（図2-2）、打ち込まれるスマッシュに対するカウンターとして使用されることが多い[32]。ドライブショットはシャトルを素早くコート面と平行に打ち出すショットである[33]ことから、競技者はスマッシュなどの攻撃的なショットを連続で打たれることを防ぎつつ、相手とイーブンなラリーを展開する際に役立つショットである。

ドライブショットにはフォアハンドドライブショットとバックハンドドライブショットの2種類がある。フォアハンドドライブショットとバックハンドドライブショットはそれぞれ利き手側と非利き手側でシャトルを打つショットである。バックハンドドライブショットはレシーブの構えの体勢から打つことが可能であり、近年の低空でのラリーを展開する上では欠かすことのできないショットであるが、初心者にとっては難しいショットである[34]。

また、ドライブショットでは毎回のスイングを全力で行えば良いという訳ではなく、シャト

ルを打ち出す速度や角度・コースを細かく調節する必要がある。たとえば、速いドライブは相手の反応時間を短くすることができるため、主に自身が攻撃するときに使われる。逆に遅いドライブは、自身の体勢を直す時間を作り出せるため、守備的である。ドライブをより効果的に用いるには、ラリー状況や得意な戦術によってショットの速度を調節する必要がある。

また、ドライブショットによるシャトルの軌道が上方向に逸れると相手にスマッシュやプッシュなどの攻撃的なショットを打たれることになる。逆に狙いが下方向に逸れるとネットに掛かってしまい、相手の得点となってしまうため、コースの調節は不可欠である。実際、ドライブにおける良いショットとは、ネットを越えた後にシャトルが上方への飛翔をしないことであるとされており[35]、打ち返す際にはシャトルの軌道の調節が求められる。

このように実際の試合で用いられるドライブでは速度と正確性を調節しなければならない。高い技術を持つバドミントン選手にとって、ショットパフォーマンスの調節を容易に行っているが、初心者にとって安定したパフォーマンスを発揮することは難しい。しかし、バドミンントンの動作について熟練した選手と初心者とを比較し運動の調節という観点での研究は行われていない[36]。よって異なる熟練度で行われるバックハンドドライブショットのシャトル速度や正確性といったパフォーマンスを比較することで、熟練度の違いによるショットパフォーマンスの特徴を明らかにすることができる。さらに、ショットのパフォーマンスを調節するスイング動作の違いを明らかにすることは、バドミンントンのショットパフォーマンス調節に関する指導に対する知見を得られると考えられる。

#### 1.4 バイオメカニクス研究における運動の調節

ヒトは日常動作やスポーツ動作において、その時々目的に合わせて運動を巧みに制御している。特に対人スポーツにおいては、対応すべきゲーム状況が時々刻々とダイナミックに変化するため、運動を適切に制御し、最適な運動を行う必要がある。これまで、歩行動作[37]のような日常生活に必要な動作から、バスケットボール[38, 39]、サッカー[40]、バレーボール[41]などのスポーツ動作を対象に運動の制御方略に関する研究が行われている。これらの研究は動作の速さやボールを飛ばす距離を変化させた際の課題動作を分析することで、特定の条件における運動制御方略や熟練度による運動制御方略の違いについて明らかにしたものである。

打具を用いたスイング動作では、ラケットやバットなどの身体から延長された打具を、目標物（ボールやシャトル）に対して時間的・空間的に正確に移動させる必要がある。特にラリーを行うネット型競技では、相手が打った球に合わせてスイングする必要がある。さらに常に全力のスイング動作を行えばよいわけではなく、様々な打球速度、コースを正確に打ち分ける必要がある。このように、高速で行われるスイング動作を適切に制御し、打球の速度やボール（シャトル）を打ち出す方向を調節することは、球技において非常に重要な要素であると言える[42]。

また実際の試合におけるパフォーマンスの調節は、選手自身の主観的な感覚や努力度によって調節される。球技においては、ボール（シャトル）の速度やコースを思い描いた通りに調節することがゲームを有利に展開する上での基本的な技能として重要である。したがって、様々な努力度によって行われるスイング動作やそれによって変化する打球のパフォーマンスを比較することで、どのようにスイング動作を調節しているのかを明らかにすることができると考えられる。

バドミントンのラケットは他の競技で用いられる打具と比較すると非常に軽量であり、プレイヤーはラケットの特性に応じたスイング動作を行っていると考えられる[43]。しかし、バドミントンのスキルに関する研究は比較的少ないのが現状である[44]。さらに、様々な努力度で行われるバドミントンのスイング動作における運動制御方略について明らかにした研究も見

当たらない。バドミントンにおいては前述のバックハンドドライブショットのようにシャトルの速度と正確性をラリー中に調節する必要のあるショットがあり、これらのショットのパフォーマンスの調節には高度な運動制御方略が行われていると考えられる。

### 1.5 本研究の目的

本研究では、バドミントンのバックハンドドライブショットを試技としてスイング動作の制御方略を検証することを目的とした。中でも初学者にとって習得が難しく、ラリー中には繊細な調節が求められるバックハンドドライブショットを対象とした。

また、熟練度ごとのスイングの制御方略を明らかにするため、異なる熟練度の被験者が行う最大努力および最大下努力でのショットパフォーマンスとスイング動作を比較し、熟練度によるスイング動作の制御方略の違いについて明らかにすることを目的とした。

## 第 2 章

熟練度の違いによるショットパフォーマンス

およびスイングの調節

## 2.1 緒言

バドミントンをはじめとするネット型球技では、対戦相手の苦手とするコースやコート上のスペースを狙ってシャトルを打つ必要がある。バドミントンの指導書においても「いろいろなコースへ打つ」ことはポイントを重ねるにあたって重要な要素であるとされている[35]。バドミントンはネット型の競技としては比較的小さなコートで行われることから、ショット（打球）を正確に打つことはラリーを有利に進め、勝敗を分ける大きな要因である。しかし初心者にとってはショットをコントロールすることが難しく、ラリーやトレーニングをうまく行うことができない。

バドミントンにおけるショットの正確性についての研究は、シャトルの速度と正確性のトレードオフ（Speed Accuracy Trade Off）に関する研究が行われている[45, 46]。これらの研究はショットの速度とその落下位置から、バドミントン選手の放つショットは高い速度でも安定した正確性であったことを明らかにしている。

しかし、Vial et al. [47]はバドミントンのサーブの正確性を評価するにあたり、シャトルがコート面に接する前に相手によって返球されるため、着地精度の測定は不適切であると述べている。サーブに限らず、バドミントンはコート面にシャトルが接触した時点でラリーが終わることから、そのほかのショットに関してもシャトルの落下位置によらないショットパフォーマンスの評価が必要である[48]。バドミントンにおいてプレイヤーがシャトルに力を加えることができるのは、インパクトのタイミングのみである。そのためインパクト時のシャトルの打ち出し角度はシャトルの軌道に影響を与える可能性があることが報告されている[49]。シャトルがラケットから離れた後にシャトルに加わる外力は空気抵抗と重力のみであることから、インパクト時のシャトルの速度と打ち出しの方向がショットのパフォーマンスを決定している要因であると考えられる。実際、円盤投げでは円盤の速度、角度、リリース高がリリースパラメータとして扱われ、このうちリリース時の円盤の速度が最も飛距離に影響することが明らかとなっている[50]。また野球のバッティングにおいて、水平面上でのバットの向きの調節とバットの傾斜の調節という2つのメカニズムによって打球を調節していると報告されている[51]。バ

ドミントンはショットの細かな調節が必要であるにも関わらず、打ち出された角度に関しての検討は行われていない。

バドミントンには様々なショットがあるが、基本的なショットの一つにバックハンドドライブショットがある。バックハンドドライブショットはコート面と平行にシャトルが飛行し、ネットのすぐ上を通過するショットである[52]。バックハンドドライブショットは試合でも使用されることが多く、シングルスにおいては、スマッシュ、ネットショットに次いで、ラリーの最後のショットとして選択される[26]。バックハンドドライブショットは相手に攻め込まれないようにするために、ネットとほぼ同じ高さを狙う必要がある。また、サイドライン近くを狙うこともあり、左右方向へも細かなコントロールが求められるが、非日常的なスイング技術やフットワークによる移動を伴うためバックハンドドライブショットは未熟練者にとって難しいショットの一つである[34]。

相手とのラリーの中でシャトルを打ち返す試合場面では、プレイヤーは相手のポジション、予想されるラリー展開などの要素を考慮してショットを打ち分ける必要がある。加えてプレイヤーは相手のショットの落下点に素早く移動し、スイングの体勢を整える必要がある。バックハンドドライブショットにおいてもスイングを行うポジションに素早く移動することが重要であり[53]、シャトルと身体の距離がバドミントンのショットの成否に大きくかわる[54]。多くの要素がかかわるラリー中の分析では熟練者や未熟練者の基本的なショットパフォーマンスに関する分析は難しい。

スマッシュ動作の分析により、上肢の近位関節は腕をターゲット方向に動かすが、遠位関節はショットの正確性とラケット速度に寄与する可能性が示されている[55]。よってスマッシュショットでインパクト後のシャトルの速度を上げるには、上肢の関節における角速度を高めなければならない[54, 56]。加えてバドミントンのスマッシュにおいて、熟練選手は未熟練選手よりも上肢遠位筋の活動が高いことが報告されている[19]。これらの研究は、バドミントンのショットにおいて、上肢における肘、前腕、手首などの関節運動や筋活動がスイング動作におけるパフォーマンス調節に重要であることを示唆している。熟練者および未熟練者で最大努力

および最大下努力における肘関節、前腕、手関節の動きを明らかにすることで、異なる熟練度におけるバックハンドドライブショットの上肢運動の調節の特徴を明らかにできると考えられる。

そこで、本研究では異なる熟練度の被験者が行う様々な努力度によるバックハンドドライブショットを対象に、インパクト直後のシャトルの打ち出し方向および上肢運動を定量的に分析することで、熟練者と未熟練者のショットパフォーマンスの特徴と上肢運動の特徴を明らかにすることを目的とした。その際、フットワークやそれによるポジショニングの影響を可能な限り抑えることで、ラリーやトレーニングの状況によらない基本的なショットパフォーマンスおよびスイング動作について明らかにすることとした。

## 2.2 方法

### 1) 被験者

本研究の被験者は競技歴 8 年以上の男子大学バドミントン競技者 10 名（熟練者）、バドミントンの専門的トレーニング経験のない成人男性 10 名（未熟練者）の合計 20 名であった（表 1）。熟練者は関東大学 2 部リーグの大学バドミントン部に所属する選手であった。熟練者の競技実績は都道府県大会レベルの競技者から全国大会レベルの競技者であった。未熟練者はバドミントンを含むラケットスポーツの専門的なトレーニング経験がない者とした。未熟練者がこれまで実施してきたスポーツ種目を表 1 に示した。

本研究はヘルシンキ宣言に基づき、被験者には研究の趣旨および方法を事前に書面、口頭にて説明し同意を得た。なお本研究は東海大学「人を対象とする研究」倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：22042）。

表 1 熟練者群の被験者情報

| Skilled<br>(n=10) | Age<br>(year) | Height<br>(cm) | Weight<br>(kg) | Badminton<br>Experience<br>(years) | Competition results                             |
|-------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| A                 | 21            | 172            | 60             | 13                                 | Last 16 in national tournament                  |
| B                 | 19            | 166            | 66             | 12                                 | Last 8 in regional tournament                   |
| C                 | 20            | 178            | 62             | 8                                  | Last 16 in prefectural tournament               |
| D                 | 18            | 172            | 60             | 10                                 | Last 16 in prefectural tournament               |
| E                 | 21            | 172            | 67             | 9                                  | Last 16 in prefectural tournament               |
| F                 | 19            | 180            | 73             | 11                                 | 1 <sup>st</sup> round in national tournament    |
| G                 | 19            | 171            | 64             | 10                                 | 1 <sup>st</sup> round in national tournament    |
| H                 | 20            | 176            | 65             | 12                                 | 3 <sup>rd</sup> place in prefectural tournament |
| I                 | 19            | 167            | 60             | 10                                 | Last 8 in prefectural tournament                |
| J                 | 18            | 179            | 65             | 10                                 | 1 <sup>st</sup> round in national tournament    |
| Mean ± SD         | 19.4 ± 1.0    | 173.3 ± 4.5    | 64.2 ± 3.8     | 10.5 ± 1.4                         |                                                 |

| Unskilled<br>(n=10) | Age<br>(year) | Height<br>(cm) | Weight<br>(kg) | Badminton<br>Experience<br>(years) | Specific Sports |
|---------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------------------|-----------------|
| K                   | 22            | 167            | 71             | —                                  | Judo            |
| L                   | 21            | 176            | 65             | —                                  | Track and Field |
| M                   | 21            | 178            | 58             | —                                  | Track and Field |
| N                   | 22            | 172            | 57             | —                                  | Track and Field |
| O                   | 20            | 163            | 48             | —                                  | Track and Field |
| P                   | 22            | 176            | 68             | —                                  | Basketball      |
| Q                   | 22            | 177            | 74             | —                                  | Bort            |
| R                   | 22            | 178            | 68             | —                                  | Baseball        |
| S                   | 21            | 170            | 54             | —                                  | Track and Field |
| T                   | 22            | 178            | 82             | —                                  | Rugby           |
| Mean ± SD           | 21.5 ± 0.6    | 173.5 ± 5.0    | 64.5 ± 9.7     | —                                  |                 |

被験者の基本属性およびバドミントン競技経験年数を表に示した。熟練者についてはこれまでの競技成績を記載した。未熟練者については日常的に行っている競技を表に示した。参考文献[57]より引用，一部改変。

## 2) 実験方法

参加者は十分なウォーミングアップを行った後、バックハンドドライブショットを行った。シャトルと身体的位置関係やステップ動作は、スイング動作やシャトルの速度に影響を与える[12, 16, 44, 54]ことから、本研究では被験者が可能な限り上肢のスイングのみで返球できるよう、試技はシャトルノックマシンから打ち出されたシャトルを座位で打ち返させることとした(図3)。

シャトルは被験者から 7.0 m 離れた地点に設置した電動シャトルノックマシン (CT-015, サクライ貿易社製) で射出された。被験者から 3.0 m 離れた位置に的を設置し、被験者には射出されたシャトルを設置された的の中心に狙って打ち返すよう指示した。的は 1 辺 1.0 m の正方形のアクリル板で作成し、中央に 1 辺 0.5 m の正方形を示した。シャトルノックマシンの横にハイスピードカメラ (GC-LJ25B2, ケンウッド社製) を配置し、シャトルの命中位置を 240Hz の映像データで記録した。

試技は 5 回のバックハンドドライブショットを 1 セットとして、セット間に休憩をはさみつつ 10 セット行わせた。先行研究[45]を参考に、被験者自身の主観的な最大努力で行われるバックハンドドライブショットのシャトル速度 100% 努力度とし、試技のシャトル速度を被験者自身の主観的な努力度で調節させた。試技では指定する努力度は 60%, 70%, 80%, 90%, 100% の順に漸増させて行う Up セット方式と、100%, 90%, 80%, 70%, 60% の順で漸減させる Down セット方式の 2 種類をランダムに 5 セットずつ行わせた。被験者には実験開始に先立ち、2 種類の試技の練習を 5~10 セット行わせた。その際、未熟練者の被験者にはバックハンドドライブショットにおけるラケットの握り方を指導した上で、熟練者の行うスイングの映像を見せ練習を行わせた。被験者からの練習完了の申告後に 10 回試技を行わせ、10 回の試技うち空振りが 1 球以下の場合、実験が可能と判断し試技を行わせた。その際、空振りが 2 回以上の場合、追加で最大 5 セットの練習を行わせた。実験には水鳥シャトル (エアロセンサ 400, YONEX 社製) を使用した。実験中にシャトルが破損し正常な飛行ができなくなった場合、直ちに使用を中止し新たなシャトルを使用した。

スイング動作を計測するため、被験者の体表には体表解剖の特徴点に基づき反射マーカを貼付した。貼付位置は SIMM モデルに基づき、頭部 3 点、体幹 6 点、左右上肢 7 点ずつ、左右下肢 8 点ずつの合計 39 点であった[58] (図 4)。ラケットにはグリップ、シャフト、フレームに合計 7 点の反射マーカまたは反射テープを貼付した。シャトルのコルクは反射テープで覆われていた。バックハンドドライブ動作とシャトルの動きは、3 次元モーションキャプチャシステム (Mac3D, Motion Analysis 社製) を用いて記録した。撮影には 10 台の赤外線カメラを使用し、500Hz で記録された。実験室内の基本座標系は水平面内の的と平行の向き (左右方向) を X 軸、水平面内の的に正対した際に的と直交する向き (前後方向) を Y 軸、X 軸と Y 軸の外積を Z 軸 (垂直軸) と設定した。

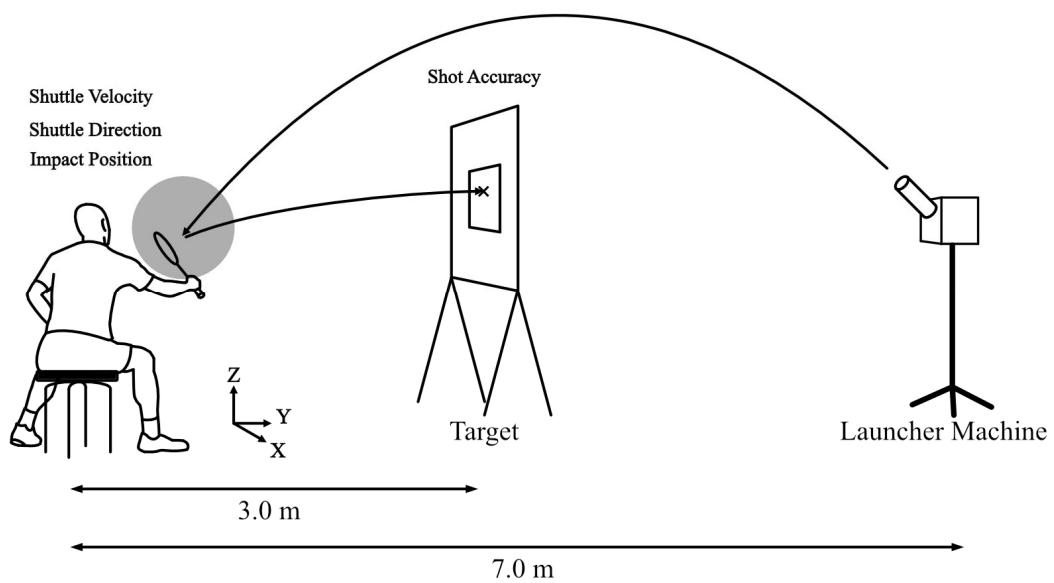


図3 実験設定

シャトルは 7.0 m 離れた位置にある電動のシャトルノックマシンを用いて打ち出した。被験者は 3.0 m 離れた位置に設置された 1 辺 1.0 m の的の中心を狙ってバックハンドドライブショットで返球した。参考文献[57]より引用。

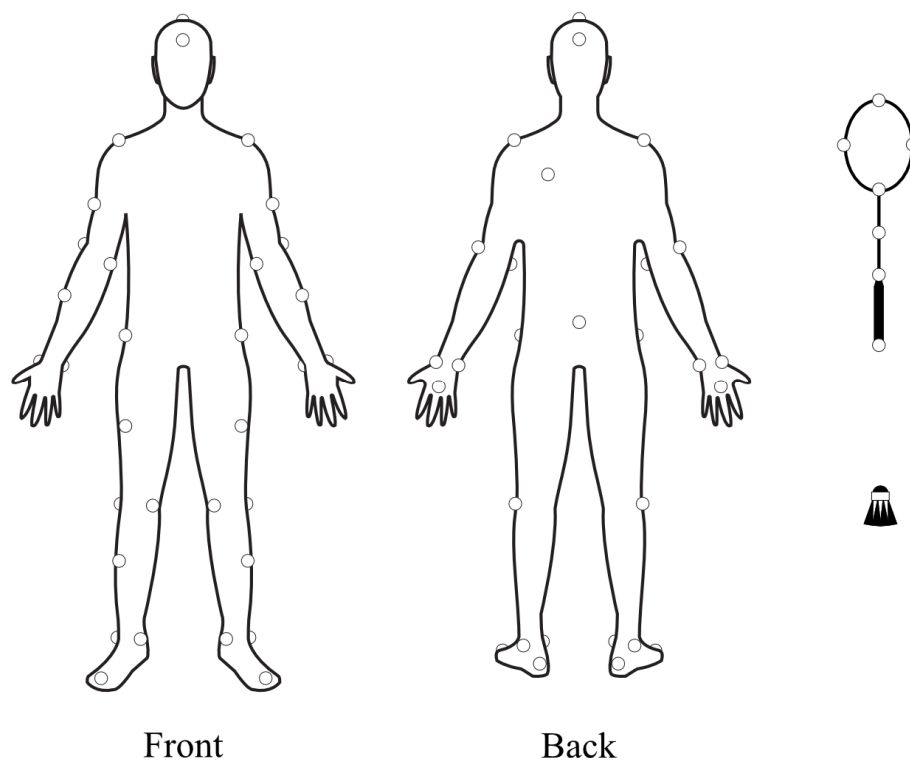


図4 マーカー貼付位置

実験時に反射マーカーを貼付した位置を示した。被験者の体表には SIMM モデルに従い 39 点を貼付した。ラケットはフレーム、シャフト、グリップに合計 7 点貼付した。ラケットのフレームおよびシャトルのコルク部には反射テープを貼付した。

### 3) 分析項目

異なる熟練度によるバックハンドドライブショットのパフォーマンスを比較するため、ショットの正確性とシャトルの速度、シャトルの打ち出し角度を以下の手順に従い算出した。

#### (1) 正確性について

ショットの正確性は被験者が打ち返したバックハンドドライブショット後のシャトルの飛翔および命中位置で評価した（図 5）。正確性スコアは、①空振りおよびインパクト時にシャトルがフレームに接触した試技、②正常にインパクトをしたが的に当たらなかった試技、③的の外枠（1 辺 1.0 m の正方形）に当たった試技、④的の内枠（中心に描かれた 1 辺 0.5 m の正方形）に当たった試技の 4 段階（0～3）で評価した。正確性スコアは実験時に撮影したハイスピードカメラの映像データをもとに判断した。

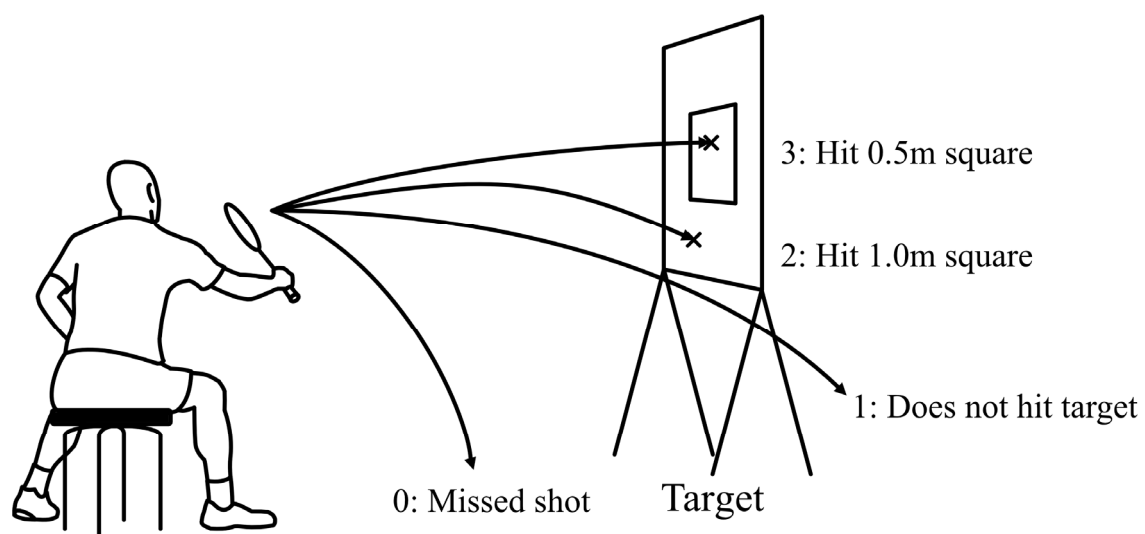


図5 正確性スコアの定義

バックハンドドライブショットの正確性については、シャトルの飛翔および目標への命中位置により4段階で得点化した。設置した目標は1辺1.0 mの亚克力板であり、中央に1辺0.5 mの正方形を示した。的の中心に示された1辺0.5 mの正方形内に命中した試技は、最も正確なショットであり3点とした。中央の正方形内には命中しなかったが、亚克力板に命中した場合は2点とした。亚克力板に命中しなかった試技は1点とした。ノックマシンから打ち出されたシャトルを空振りした試技、および亚克力板の設置した位置まで飛翔しなかった場合は不正確として0点とした。正確性スコアの評価についてはシャトルのコルク部の命中位置とし、ハイスピードカメラの映像をもとに判断した。参考文献[57]より引用。

## (2) インパクト位置について

シャトルは速度が速く、独特の減速機構を持つため[59]，カメラから得られたデータのみからではインパクト位置およびシャトル速度を算出することはできなかった．そこでインパクト位置とシャトルの速度は先行研究に基づき，シャトルの変位を推定するための対数カーブフィッティング手法を参考にシャトル速度を推定した[16, 60-62]．モーションキャプチャシステムから得られたシャトルの位置座標データを以下の式に代入し，シャトルの各軸方向の変位を関数形式で推定した．

$$x = \frac{1}{k} \cdot \ln(1 + k \cdot v_0 \cdot t) \cdots \text{式(1)}$$

$$x = \frac{1}{2k} \cdot \ln \cdot \frac{(g - k \cdot v_0^2)}{\left[ g - k a^2 \frac{\left(1 - \frac{a+v_0}{a-v_0} e^{2 \cdot a \cdot k \cdot t}\right)^2}{\left(1 - \frac{a+v_0}{a-v_0} e^{2 \cdot a \cdot k \cdot t}\right)^2} \right]} \cdots \text{式(2)}$$

ここで， $x$ はシャトルの変位， $t$ は時間， $g$ は重力加速度， $a = \sqrt{\frac{g}{k}}$ である． $k$ と $v_0$ は最小二乗法によるカーブフィッティング中に決定される定数である．グローバル座標系におけるX軸とY軸のデータは式(1)を用い，Z軸成分には式(2)を用いた．対数カーブフィッティングの結果，シャトルの変位は時間に対する関数として表される．インパクト前後で推定されたY軸方向成分のシャトル変位関数が交わった時点をインパクト時と定義し，その時点の位置座標をインパクト位置とした[61]．カーブフィッティングの計算は数式処理ソフト (Mathematica Ver.13.2, Wolfram 社製) にて行った．

### (3) シャトル速度およびシャトルの打ち出し角度

インパクト時からシャトルと平均的なラケットの接触時間である 1 msec 後の瞬間速度をシャトル初速度として算出した[52]。シャトルの速度は各軸のシャトル変位関数を微分することで求められた速度を成分とする 3 次元ベクトルの大きさである。被験者ごとのシャトル速度の違いを考慮し、シャトル速度は各被験者の 100% 努力度における最大速度の試技で規格化した。

シャトルの打ち出し角度は算出した 3 次元ベクトルの方向と定義することができる。バドミントンにおいては、サイドラインアウトを避けるため左右方向の打ち出し角度と、ネットフォルトを避けたりシャトルの高さを調節したりするための上下方向の打ち出し角度の調節が重要である。左右方向、上下方向の打ち出し角度は 3 次元空間における XY 平面（水平面）と YZ 平面（矢状面）の角度で示される。各平面におけるシャトルの打ち出し角度は平面上に投影された単位ベクトルの角度とした（図 6）。

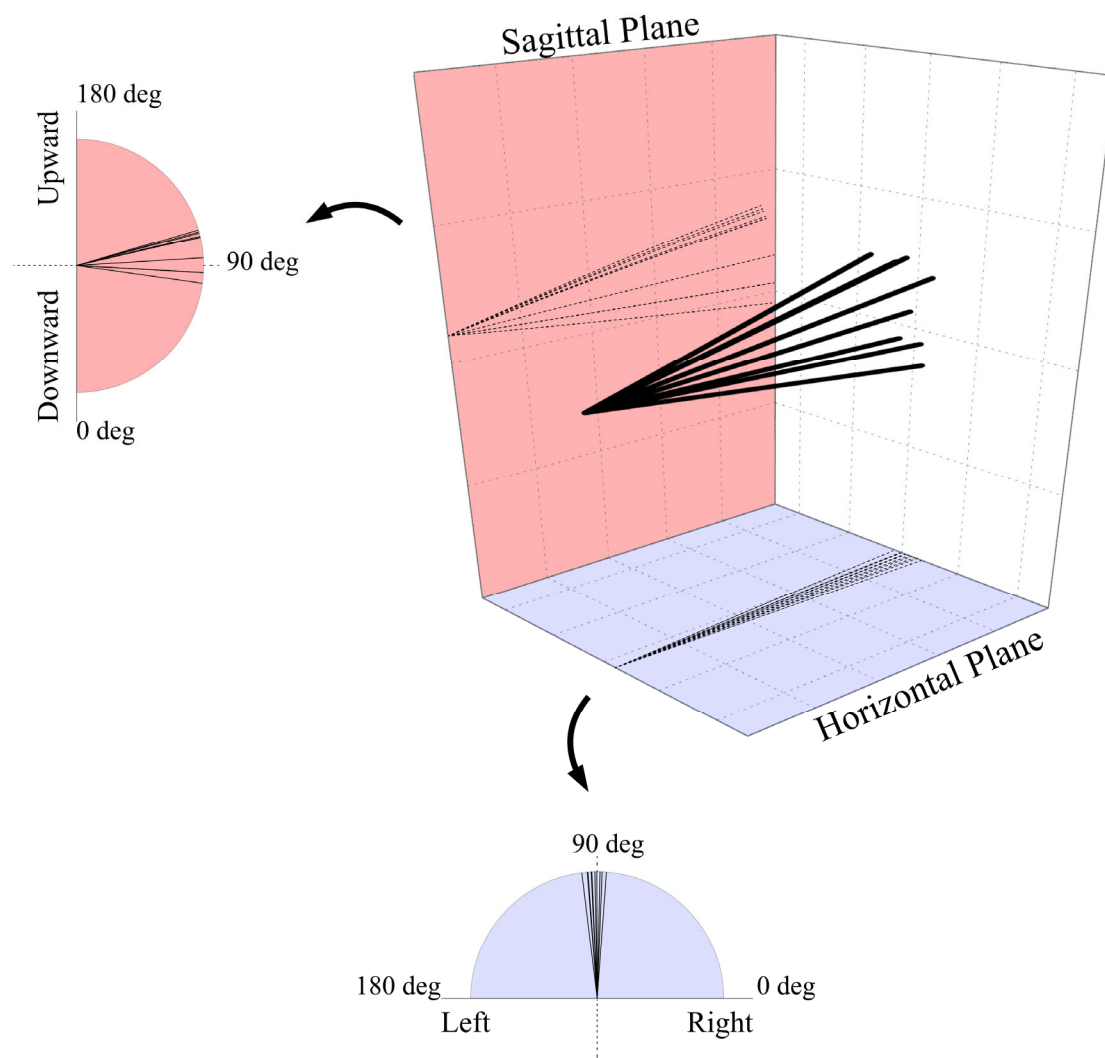


図6 シャトル打ち出し角度の定義

水平面および矢状面におけるシャトルの打ち出し角度の定義を示した。水平面上の打ち出し角度はシャトルの飛翔の左右方向成分を表しており、90 deg が実験室座標内における Y 軸方向（設置した的への方向）である。矢状面上の打ち出し角度はシャトルの飛翔の上下方向成分を表しており、矢状面の打ち出し角度の 90 deg は水平軸である。対数カーブフィッティング法により推定されたインパクト直後のシャトルの速度ベクトルを、インパクト位置を(0, 0, 0)として 3 次元空間に表示した。3 次元空間に表示された速度ベクトルを水平面および矢状面に投影し、各基本面上における平均の打ち出し角度を算出した。参考文献[57]より引用。

#### (4) 上肢キネマティクス

キネマティクスデータは、筋骨格モデル解析ソフトウェア (nMotion muscular Ver 1.57, nac Image Technology Inc.) を使用して算出した。解析の時間範囲は、推定されたインパクト時を 0 sec とし、インパクト前 0.5 sec (-0.5 sec) からインパクト後 0.5 sec を分析対象範囲とした。本研究ではバックハンドドライブ動作に関連する関節運動の変数として、肘関節角度（屈曲/伸展）、前腕角度（回内/回外）度、手関節角度（掌屈/背屈）の時系列データを算出した[63]（図 7）。また関節角度の時系列データを微分することで各関節の角速度を算出した。関節角速度に関しては典型的な熟練者がインパクトに向けて行う肘関節伸展方向、前腕回外方向、手関節掌屈方向の最大角速度が出現したタイミングを算出した（図 8）。

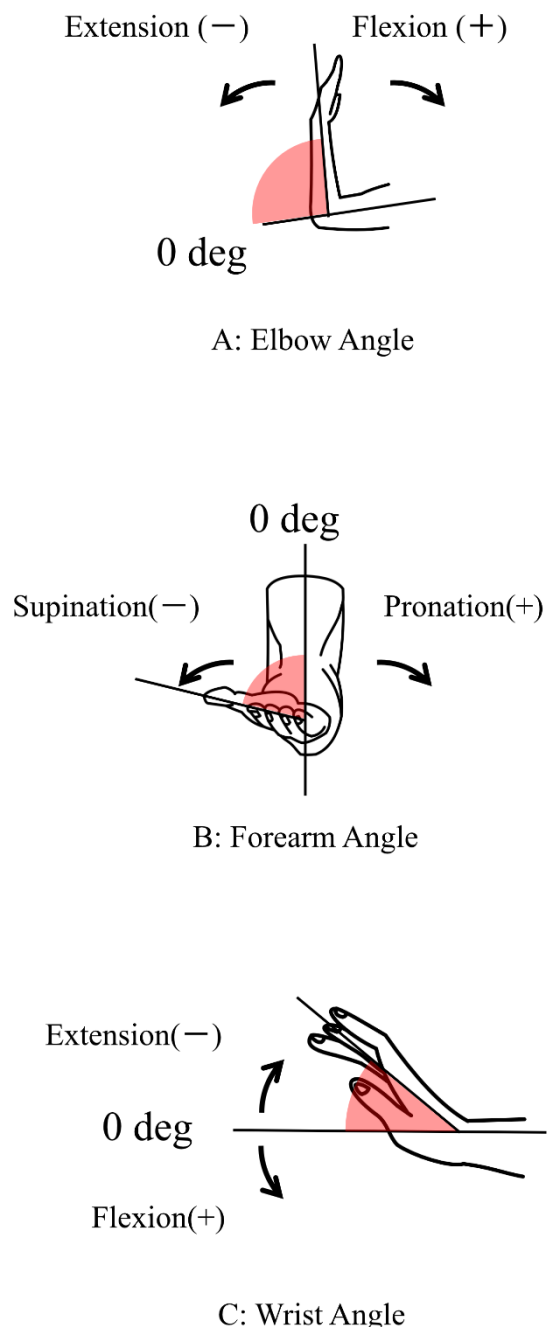


図7 関節角度定義

関節角度定義は日本リハビリテーション医学会の定義に従った[63]. A: 肘関節（屈曲/伸展）は上腕の長軸と前腕の長軸が平行になった際を 0 deg とした. B: 前腕角度（回内/回外）は上腕の長軸と手部が平行になった際を 0 deg とした. C: 手関節（掌屈/背屈）は前腕と手部が平行になった際を 0 deg とした.

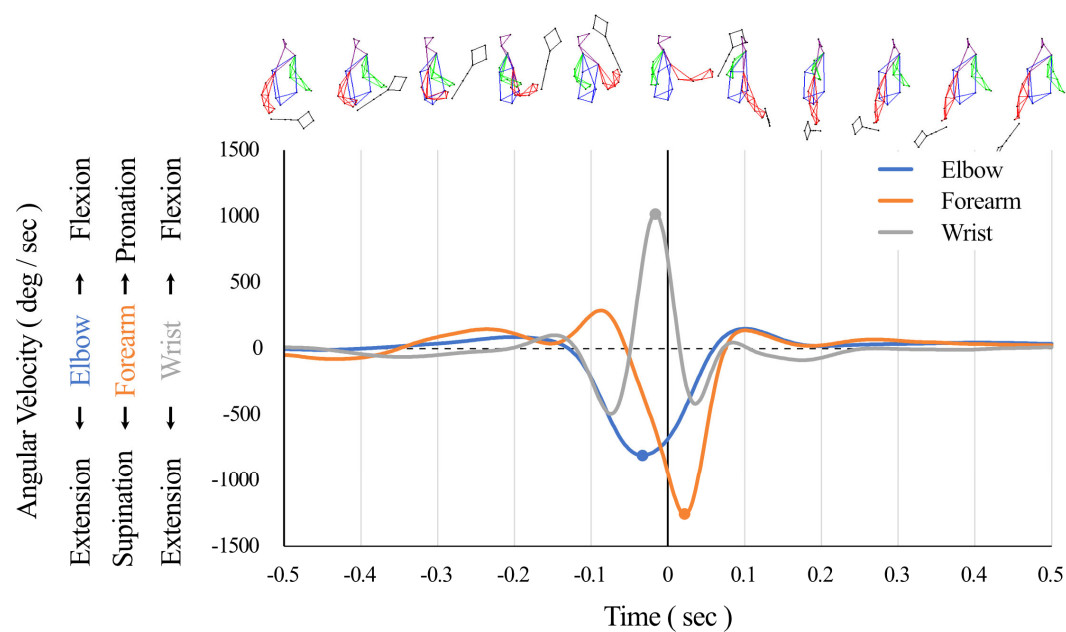


図8 典型的な上肢関節角速度の時系列データ

典型的な熟練者のスティックピクチャと上肢関節角速度の時系列データを示した。熟練者はインパクトに向けて肘関節伸展運動，前腕回外運動，手関節掌屈運動を行っていた。スイング動作の特徴を表す項目として，肘関節伸展角速度，前腕回外角速度，手関節掌屈角速度の最大値が出現した時点をプロットした。

#### 4) 分析対象試技

ショット正確性の評価が0の試技は、インパクトが導出できない（空振り）試技も含まれているため、シャトル速度および打ち出し角度の分析対象から除外した。またバイオメカニクスの解析については、シャトルがラケットのフレームに当たった試技は除外した。その結果、ショットの正確性の分析対象は全1000試技（熟練者500試技、未熟練者500試技）、シャトル速度と打ち出し角度の分析対象は記録した全1000試技中の965試技であった（熟練者500試技、未熟練者465試技）、バイオメカニクスの解析には963試技（熟練者：500試技、未熟練者：463試技）を対象とした。

## 5) 統計処理

ショットの正確性を比較するため、 $\chi^2$ 検定を用いて各被験者群の正確性スコアを比較した。また、各正確性スコアの度数から残差分析を行い、調整済み残差およびそれに対応する  $p$  値を算出した。残差分析における多重比較の  $p$  値の調整には Holm 法を用いた。

インパクト位置について、各被験者のインパクト位置のばらつきを評価した。平均インパクト位置から各試技のインパクト位置の標準偏差をばらつきの代表値として、熟練者と未熟練者の群間比較を行った。インパクト位置については正規性が仮定できなかったため、Mann-Whitney 検定を用いた。

インパクト時の高さ、シャトルの速度および打ち出し角度については努力度ごとの平均値を代表値として、熟練度と努力度を要因とする 2 元配置分散分析を行った。本研究では指定された努力度に対して被験者が行うバックハンドドライブショットのショットパフォーマンスに着目するため、Up セット方式と Down セット方式の違いは考慮せず、指定された努力度ごとの平均値を分析に用いた。打ち出し角度について、事前に行った Levene 検定により等分散性が仮定できなかったことから、ノンパラメトリックのデータに対して分散分析を適用するため、整列ランク変換を行った[64]。分散分析にて有意な結果が得られた場合には多重比較検定を行った。多重比較検定における  $p$  値の調整には Holm 法を用いた。

上肢キネマティクスに関しては、時系列データに対する有意差検定が可能な手法である Statistical Parametric Mapping: SPM 解析を用いた。SPM 解析はランダムフィールド理論を応用することで、時間的・空間的に連続して変化する 1 次元データの連続的な統計解析を行うことができる手法である[65]。解析は MATLAB(MathWorks 社製, R2023b)用に開発されたオープンソースコード (spm1d ver.0.4.10, [www.spm1d.org](http://www.spm1d.org)) を使用して行った。

本研究では熟練度と努力度の違いによるスイング動作パターンの違いを明らかにすることを目的としており、2つの要因の交互作用を検討する必要がある。そのため熟練度と努力度の2つを要因とした1要因反復測定の2元配置分散分析を行った。SPMによる2元配置分散分析では、時系列データの各時点におけるSPM {F} 値と、設定した統計学的有意水準に対応し

たしきい値が算出される。算出された SPM{F} 値がしきい値を越える区間で  $p$  値が算出され、対立仮説を採用する。

2 元配置分散分析により有意な交互作用が認められた場合には、熟練度によるスイング中の関節角度および角速度の時系列パターンの違いを明らかにするため、多重比較検定を行った。

本研究では、バックハンドドライブショットのスイング動作における各熟練度の動作パターンの調節の違いについて明らかにすることを目的としている。そのため多重比較検定は各熟練度群内における努力度の影響を検討した。すなわち、各熟練度内における努力度間の比較を行った。多重比較検定における  $p$  値の調整には Bonferroni 法を使用した。交互作用が認められず、主効果に有意差が認められた場合には、各要因内で多重比較検定を行った。

SPM 解析におけるすべての多重比較検定では 2 群間比較に用いる時系列データの組み合わせによって、2 元配置分散分析で有意差が認められた区間以外でも有意差が認められる可能性がある。多重比較検定は 2 元配置分散分析にて有意差が認められたことを前提として行うべきである。そこで多重比較検定において、2 元配置分散分析で有意差が認められた区間を含まない区間で有意差が認められたとしても、有意差がないものと判断した。

インパクトにかけて行われる肘関節伸展、前腕回外、手関節掌屈の最大角速度の出現タイミングについては、各関節に対して熟練度と努力度を要因とした 2 元配置分散分析を行った。熟練度と努力度の交互作用が認められた場合は、各熟練度内における努力度の影響を明らかにするため多重比較検定を行った。交互作用が認められず有意な主効果が認められた場合は、各要因内で多重比較検定を行った。多重比較検定による  $p$  値の調整には Holm 法を用いた。

なお全ての統計処理に関して、統計学的有意水準は 5%未満とした。

## 2.3 結果

### 1) 各被験者の身体的特性

熟練者と未熟練者における身長、体重の平均値には有意差は認められなかった（身長： $p = 0.930$ ，体重： $p = 0.932$ ）。熟練者の年齢は未熟練者より，有意に低値であった（ $p < 0.001$ ）。

### 2) ショット正確性

表 2 には各群の正確性スコアの度数を示した。熟練者は正確性スコア「3」（的中心 0.5 m 内に命中）が最も多く，全体の 54.4%であった。正確性スコア「0」（空振りもしくはラケットのフレームに当たった）はなく，全てのショットを正常にインパクトできていた。一方で未熟練者は正確性スコア「1」（的に命中せず）が全体の 59.4%で最も高く，正確性「0」の試技も全体の 7.0%であった。

表 2 において  $\chi^2$  検定を行った結果，熟練度間で有意差が認められた（ $p < 0.001$ ）。各セルの残差について両側検定を行った結果，熟練者の正確性スコア 0 および 1 の度数が期待度数より有意に少なく（0:  $p < 0.001$ , 1:  $p < 0.001$ ），正確性スコア 2 および 3 の度数が期待度数より有意に多かった（2:  $p < 0.001$ , 3:  $p < 0.001$ ）。未熟練者においては正確性スコア 0 および 1 の度数が期待度数より有意に多く（0:  $p < 0.001$ , 1:  $p < 0.001$ ），また正確性スコア 2 および 3 の度数が期待度数より有意に少なかった（2:  $p < 0.001$ , 3:  $p < 0.001$ ）。

表 2 正確性スコアの  $\chi^2$  検定の結果

|           |                          | Accuracy Score |                    |                  |                  |
|-----------|--------------------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|
|           |                          | 0              | 1                  | 2                | 3                |
|           |                          | missed shot    | did not hit target | Hit 1.0 m square | Hit 0.5 m square |
| Skilled   | Trials (n)               | 0              | 36                 | 192              | 272              |
|           | Percentage of trials (%) | 0.0%           | 7.2%               | 38.4%            | 54.4%            |
|           | Expected Frequency       | 17.5           | 168.5              | 151.0            | 163.0            |
|           | Adjusted residual        | -6.022 *       | -17.729 *          | 5.648 *          | 14.707 *         |
| Unskilled | Trials (n)               | 35             | 297                | 113              | 55               |
|           | Percentage of trials (%) | 7.0%           | 59.4%              | 22.6%            | 11.0%            |
|           | Expected Frequency       | 17.5           | 168.5              | 151.0            | 163.0            |
|           | Adjusted residual        | 6.022 **       | 17.729 **          | -5.648 **        | -14.707 **       |

Skilled vs Unskilled  $\chi^2(3) = 404, p\text{-value} < 0.001$   
\*: Significantly lower by residual analysis ( $p < 0.001$ )  
\*\*: Significantly higher by residual analysis ( $p < 0.001$ )

記録された全試技の結果を示した。試技数は、熟練者 500 試技と未熟練者 500 試技であった。 $\chi^2$  検定において、熟練者と未熟練者に  $p < 0.001$  で有意差が認められたため、各項目に対し残差分析を行った。各項目の記録された試技数、各群の試技の割合、期待値、残差分析により得られた調整済みの標準化残差を示した。参考文献[57]より引用、一部改変。

### 3) インパクト高

図 9 には対数カーブフィッティング法で推定されたインパクト位置の鉛直方向成分（実験室座標系 Z 成分）を示した。熟練者のインパクト高は 60%努力度から順に  $1.13 \pm 0.18$  m,  $1.16 \pm 0.17$  m,  $1.16 \pm 0.20$  m,  $1.14 \pm 0.17$  m,  $1.18 \pm 0.14$  m であった。未熟練者は  $1.05 \pm 0.19$  m,  $1.04 \pm 0.17$  m,  $1.05 \pm 0.17$  m,  $1.03 \pm 0.16$  m,  $1.06 \pm 0.18$  m であった。2 元配置分散分析の結果、交互作用は  $p = 0.676$  で認められなかった。努力度 ( $p = 0.158$ ) と熟練度 ( $p = 0.175$ ) で主効果も認められなかった。

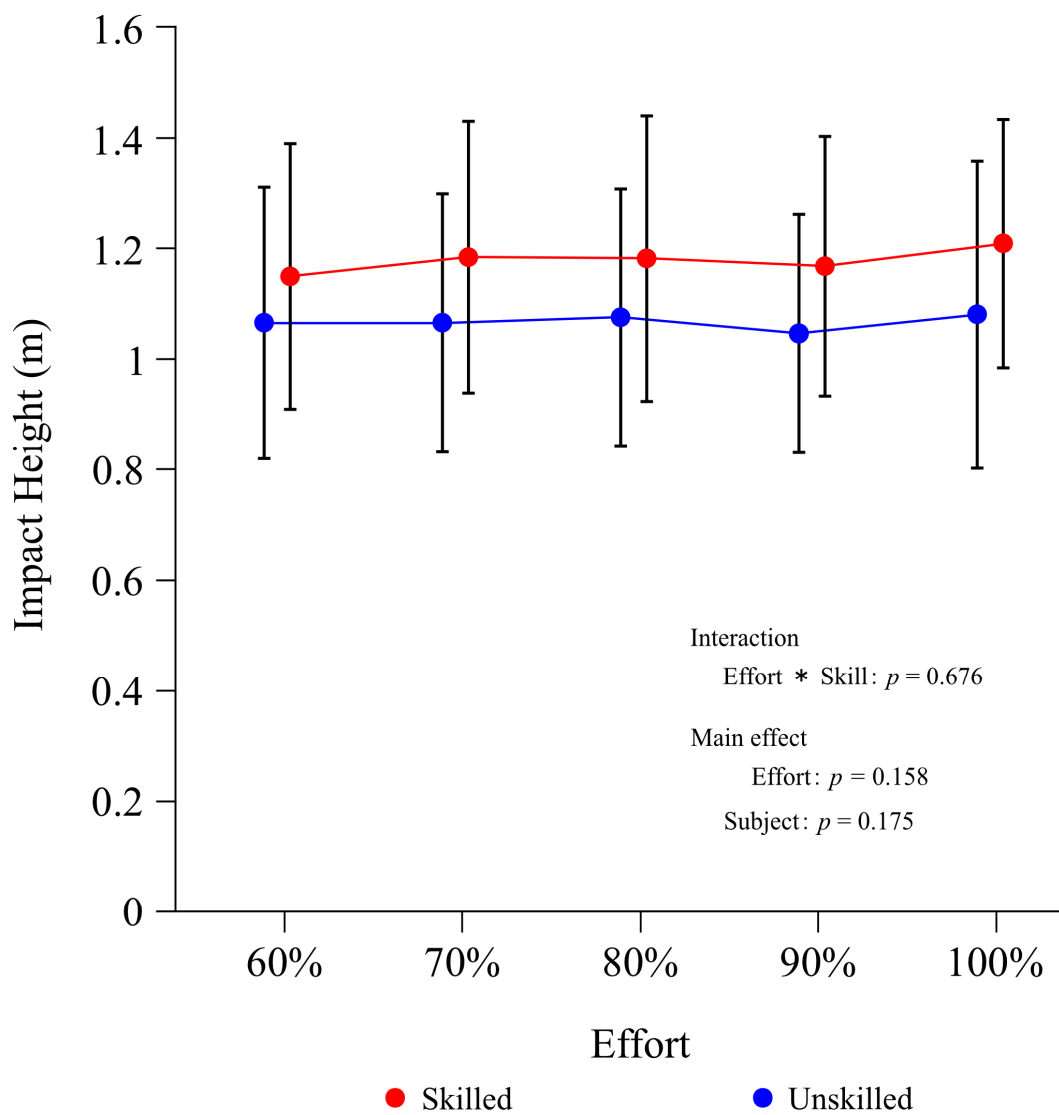


図9 各努力度におけるインパクト高

各熟練度における指定された努力度のインパクト高を示した。

#### 4) インパクト位置のばらつき

図 10 に熟練者と未熟練者のインパクト位置のばらつきを示した。熟練者のインパクト位置のばらつきは  $0.085 \pm 0.039$  m であった。未熟練者のインパクト位置のばらつきは  $0.101 \pm 0.009$  m であった。熟練者と未熟練者におけるインパクト位置のばらつきに関して、Mann-Whitney 検定の結果、 $p = 0.288$  となり有意差は認められなかった。

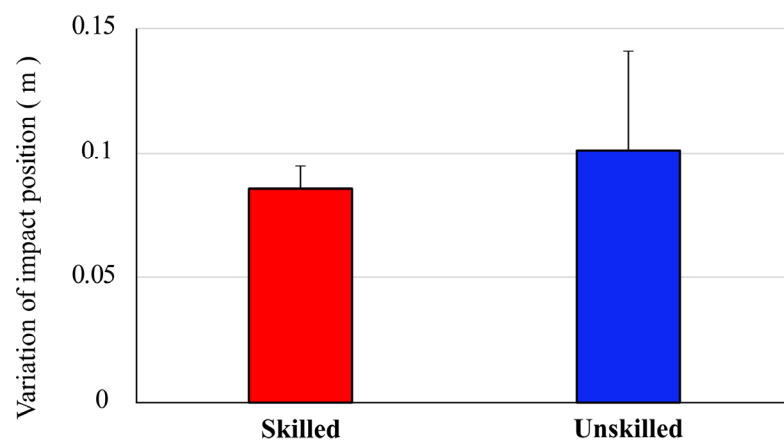


図 10 各群のインパクト位置のばらつき

各熟練度における平均インパクト位置から各試技のインパクト位置までの距離の標準偏差をインパクト位置のばらつきとして示した。未熟練者の方がばらつきの値は大きかったが、Mann-Whitney 検定の結果、有意差は認められなかった。参考文献[57]より引用、一部改変。

#### 5) 規格化されたシャトル速度

図 11 には各努力度における規格化された打ち出し時のシャトル速度の平均値を示した。各被験者のシャトル速度は 100%努力度における最も高値を示したシャトル速度で規格化されたものである。シャトル速度は各被験者の 100%努力度における最大値を用いて規格化したものを示した。熟練者は 60%努力度から順に  $71.7 \pm 5.1\%$ ,  $77.1 \pm 5.7\%$ ,  $80.4 \pm 5.4\%$ ,  $83.1 \pm 4.6\%$ ,  $89.9 \pm 3.8\%$  であった。未熟練者は  $63.0 \pm 7.3\%$ ,  $62.2 \pm 8.0\%$ ,  $66.0 \pm 6.2\%$ ,  $72.0 \pm 4.7\%$ ,  $79.1 \pm 2.8\%$  であった。2 元配置分散分析の結果、交互作用は  $p = 0.129$  で認められなかったが、努力度 ( $p < 0.001$ ) と熟練度 ( $p < 0.001$ ) で有意な主効果が認められた。努力度に関して多重比較検定を行った結果、60%努力度と 70%努力度間では  $p = 0.076$  で有意差は認められなかった。そのほかの群間ではすべて有意差が認められた。

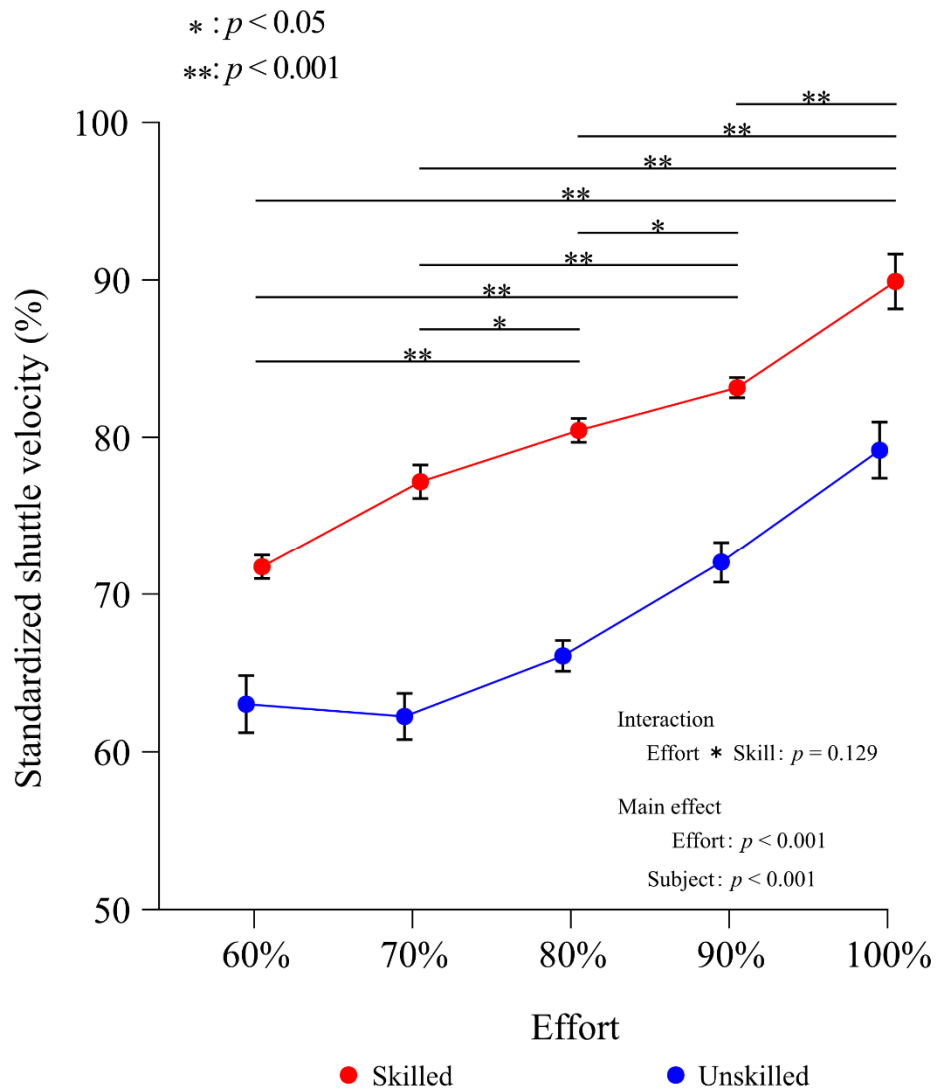


図 11 努力度と規格化されたシャトル速度の関係

各熟練度における指定された努力度と 100%努力度における最大速度で規格化したシャトル速度の平均値を示した。熟練度と努力度の交互作用は認められなかったが、熟練度と努力度の各要因における主効果が認められた。参考文献[57]より引用。

6) 水平面上におけるシャトルの打ち出し角度（左右方向）

表3には各群の水平面上の打ち出し角度を示した。熟練者では努力度60%は  $90.7 \pm 2.9$  deg, 70%は  $90.8 \pm 2.0$  deg, 80%は  $91.3 \pm 1.9$  deg, 90%は  $91.0 \pm 2.1$  deg, 100%は  $89.4 \pm 1.8$  degであった。未熟練者では努力度60%は  $89.6 \pm 3.9$  deg, 70%は  $89.8 \pm 2.5$  deg, 80%は  $90.6 \pm 2.9$  deg, 90%は  $89.2 \pm 3.1$  deg, 100%は  $89.6 \pm 4.9$  degを示した。両群ともすべての努力度において、平均打ち出し角度はおおよそ90 deg程度であり（図12-A）、2元配置分散分析の結果、水平面上の打ち出し角度について、交互作用（ $p=0.824$ ）および主効果は認められなかった（努力度:  $p=0.203$ , 熟練度:  $p=0.498$ ）。

表 3 水平面におけるショットの打ち出し角度の結果

|           | Subjective effort |            |            |            |            |
|-----------|-------------------|------------|------------|------------|------------|
|           | 60%               | 70%        | 80%        | 90%        | 100%       |
| Skilled   | 90.7 ± 2.9        | 90.8 ± 2.0 | 91.3 ± 1.9 | 91.0 ± 2.1 | 89.4 ± 1.8 |
| Unskilled | 89.6 ± 3.9        | 89.8 ± 2.5 | 90.6 ± 2.9 | 89.2 ± 3.1 | 89.6 ± 4.9 |

Interaction (effort × subject):  $p = 0.824$

Effort:  $p = 0.203$

Subject:  $p = 0.498$

各努力度の水平面での平均打ち出し角度を示した。データは整列ランク変換を行った後に2元配置分散分析を行った。交互作用および主効果は認められなかった。参考文献[57]より引用。

#### 7) 矢状面上におけるシャトルの打ち出し角度（上下方向）

表 4 には各群の矢状面上の打ち出し角度を示した。熟練者では努力度 60%は  $6.7 \pm 4.7$  deg, 70%は  $5.8 \pm 3.9$  deg, 80%は  $5.1 \pm 3.7$  deg, 90%は  $5.3 \pm 4.0$  deg, 100%は  $3.3 \pm 3.6$  deg であった。未熟練者では努力度 60%は  $16.4 \pm 5.9$  deg, 70%は  $13.4 \pm 5.5$  deg, 80%は  $13.5 \pm 6.1$  deg, 90%は  $15.9 \pm 7.2$  deg, 100%は  $13.8 \pm 7.6$  deg であった。熟練者はすべての努力度でおおよそ 5 deg 程度を示し、未熟練者は 15 deg 程度を示した。2 元配置分散分析の結果、交互作用は認められなかった ( $p = 0.361$ )。熟練度間で有意な主効果が認められ ( $p < 0.001$ )、未熟練者は熟練者に対して有意に高く（上方向に）シャトルを打ち出していた（図 12-B）。努力度間においても有意な主効果が認められた ( $p = 0.014$ )、多重比較検定の結果、100%努力度が 60%努力度に対して有意に低い値を示した ( $p = 0.021$ )。

表 4 矢状面におけるショットの打ち出し角度の結果

|           | Subjective effort |            |            |            |            |
|-----------|-------------------|------------|------------|------------|------------|
|           | 60%               | 70%        | 80%        | 90%        | 100%       |
| Skilled   | 6.7 ± 4.7         | 5.8 ± 3.9  | 5.1 ± 3.7  | 5.3 ± 4.0  | 3.3 ± 3.6  |
| Unskilled | 16.4 ± 5.9        | 13.4 ± 5.5 | 13.5 ± 6.1 | 15.9 ± 7.2 | 13.8 ± 7.6 |

Interaction (effort × subject):  $p = 0.361$

Effort:  $p = 0.014$

Subject:  $p < 0.001$

各努力度の矢状面での平均打ち出し角度を示した。データは整列ランク変換した後、2 元配置分散分析を行った。努力度と熟練度に有意な主効果が認められた。努力度についてホルム法を用いた多重比較検定を行ったところ、100%努力度は 60%努力度よりも有意に低い値を示した ( $p = 0.021$ )。参考文献[57]より引用。

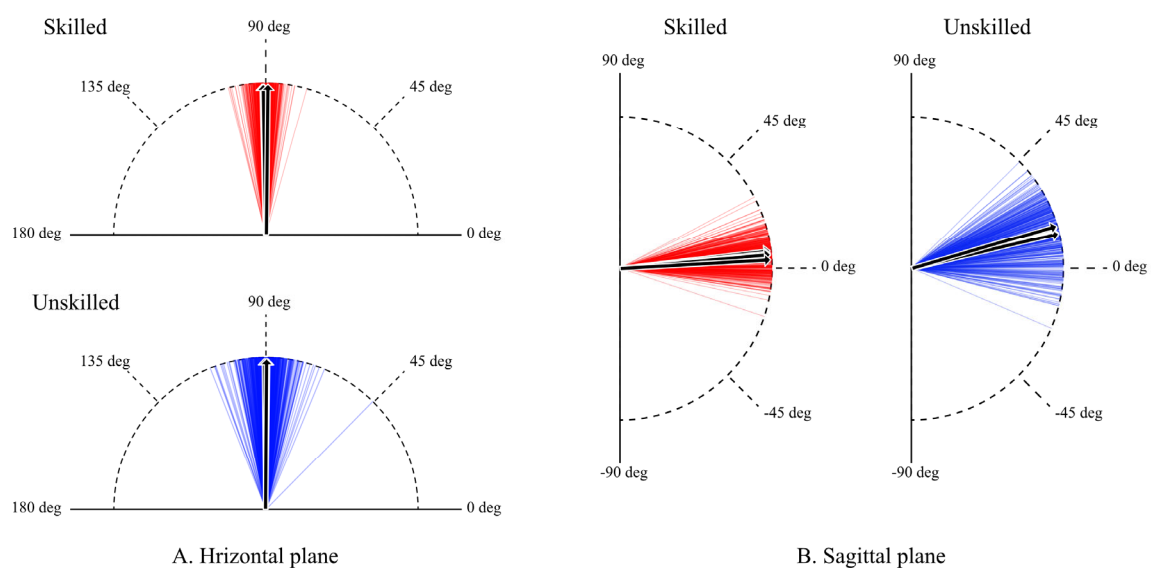


図 12 各群の水平面および矢状面における打ち出し角度

A は水平面上における打ち出し角度, B は矢状面上における打ち出し角度を示した. 各群の全試技 (熟練者群: 500 試技, 未熟練者群: 465 試技) の打ち出し角度および平均打ち出し角度を示した. 図中の黒の矢印は各努力度の平均打ち出し角度である. 参考文献[57]より引用, 一部改変.

#### 8) 上肢関節の運動パターンの違い

図 13 には肘関節角度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、熟練度と努力度の交互作用および、熟練度の要因による主効果は認められなかった。努力度の要因による主効果については-0.137 sec から-0.034 sec の区間で認められた ( $p=0.034$ )。

交互作用が認められず努力度を要因とした主効果が認められたため、努力度を要因とした多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、60%努力度と 80%努力度における-0.119 sec から-0.059 sec の区間 ( $p=0.035$ ) および 60%努力度と 90%努力度における-0.116 sec から-0.047 sec の区間 ( $p=0.027$ ) で有意差が認められた。

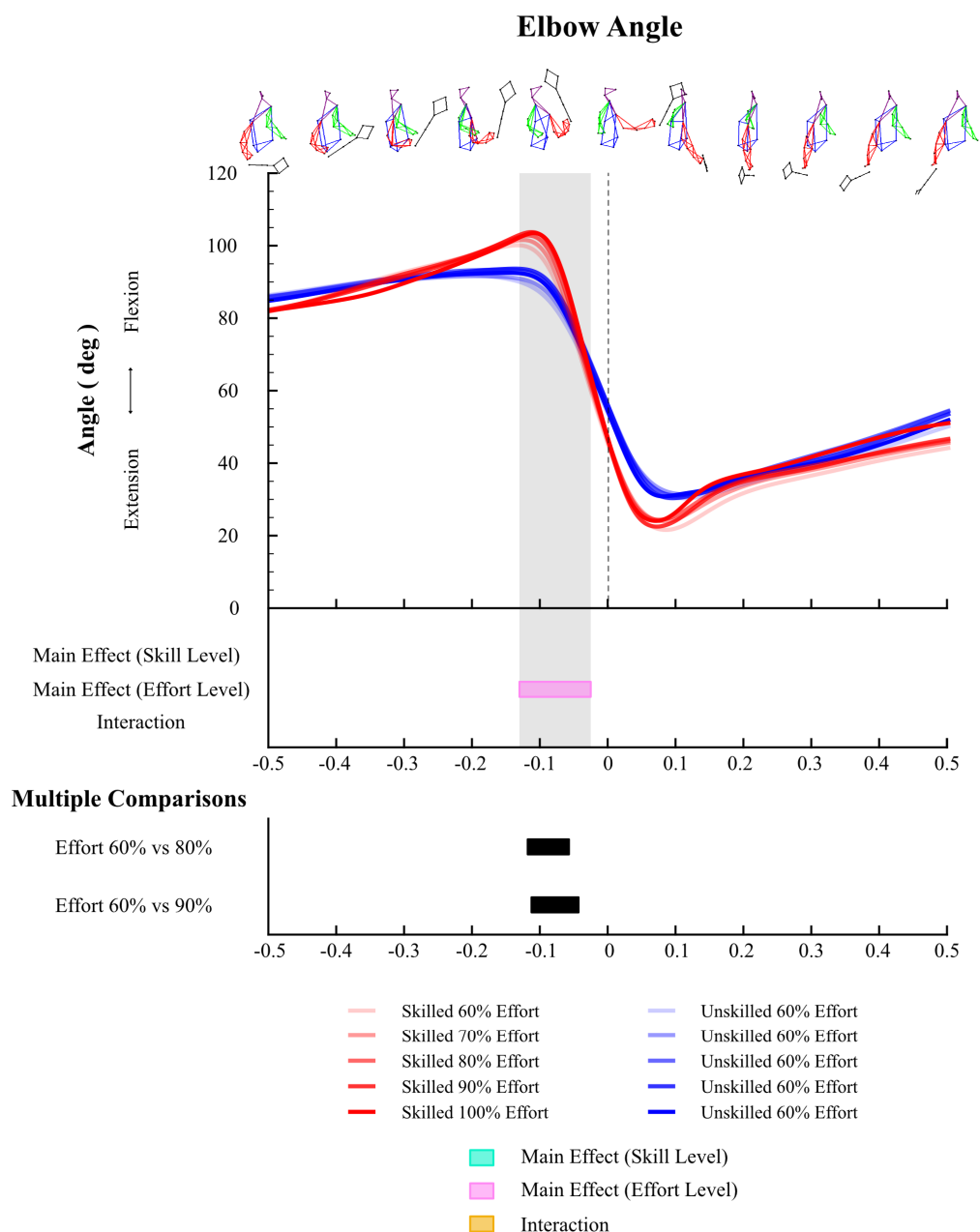


図 13 肘関節角度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における肘関節角度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて努力度を要因とする有意な主効果が認められたため、努力度ごとに多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 14 には前腕角度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、熟練度と努力度の交互作用は-0.5 sec から-0.463 sec 区間 ( $p = 0.049$ ), -0.145 sec から-0.068 sec 区間 ( $p = 0.046$ ), 0.004 sec から 0.033 sec 区間 ( $p = 0.049$ ) で認められた。熟練度の要因による主効果は-0.287 sec から-0.015 sec の区間 ( $p = 0.016$ ) で認められた。努力度の要因による主効果については-0.128 sec から-0.096 sec 区間 ( $p = 0.049$ ) および 0.002 sec から 0.128 sec 区間 ( $p = 0.041$ ) で認められた。

熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内における全努力度間で多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、熟練者の 60%努力度と 100%努力度における 0.023 sec から 0.042 sec 区間 ( $p = 0.039$ ) で有意差が認められた。

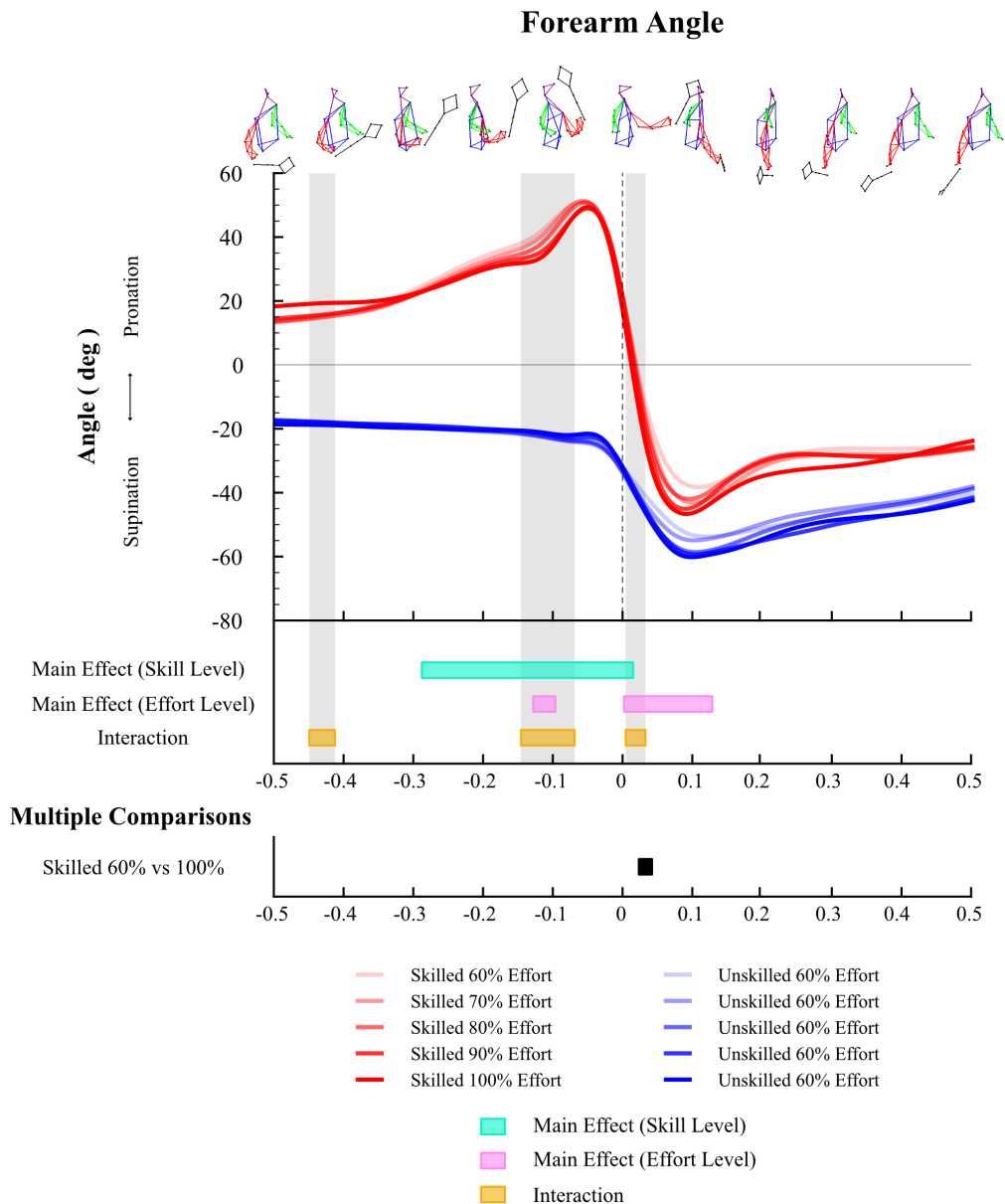


図 14 前腕角度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における前腕角度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内で全努力度間の多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 15 には手関節角度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、熟練度と努力度の交互作用は-0.167 sec から-0.077sec 区間 ( $p = 0.024$ )、-0.002 sec から 0.014 sec 区間 ( $p = 0.049$ )、0.085 sec から 0.253 sec 区間 ( $p = 0.004$ )、0.278 sec から 0.386 sec 区間 ( $p = 0.018$ ) で認められた。熟練度の要因による主効果は-0.419 sec から-0.200 sec 区間 ( $p = 0.001$ )、-0.094 sec から-0.025 sec 区間 ( $p = 0.033$ ) で認められた。努力度の要因による主効果については、-0.129 sec から-0.100 sec 区間 ( $p = 0.046$ )、-0.065 sec から-0.018 sec 区間 ( $p = 0.041$ )、0.005 sec から 0.017 sec 区間 ( $p = 0.049$ ) で認められた。

熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内における全努力度間で多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、熟練者の 80%努力度と 90%努力度における-0.099 sec から-0.084 sec 区間 ( $p = 0.036$ ) で認められた。

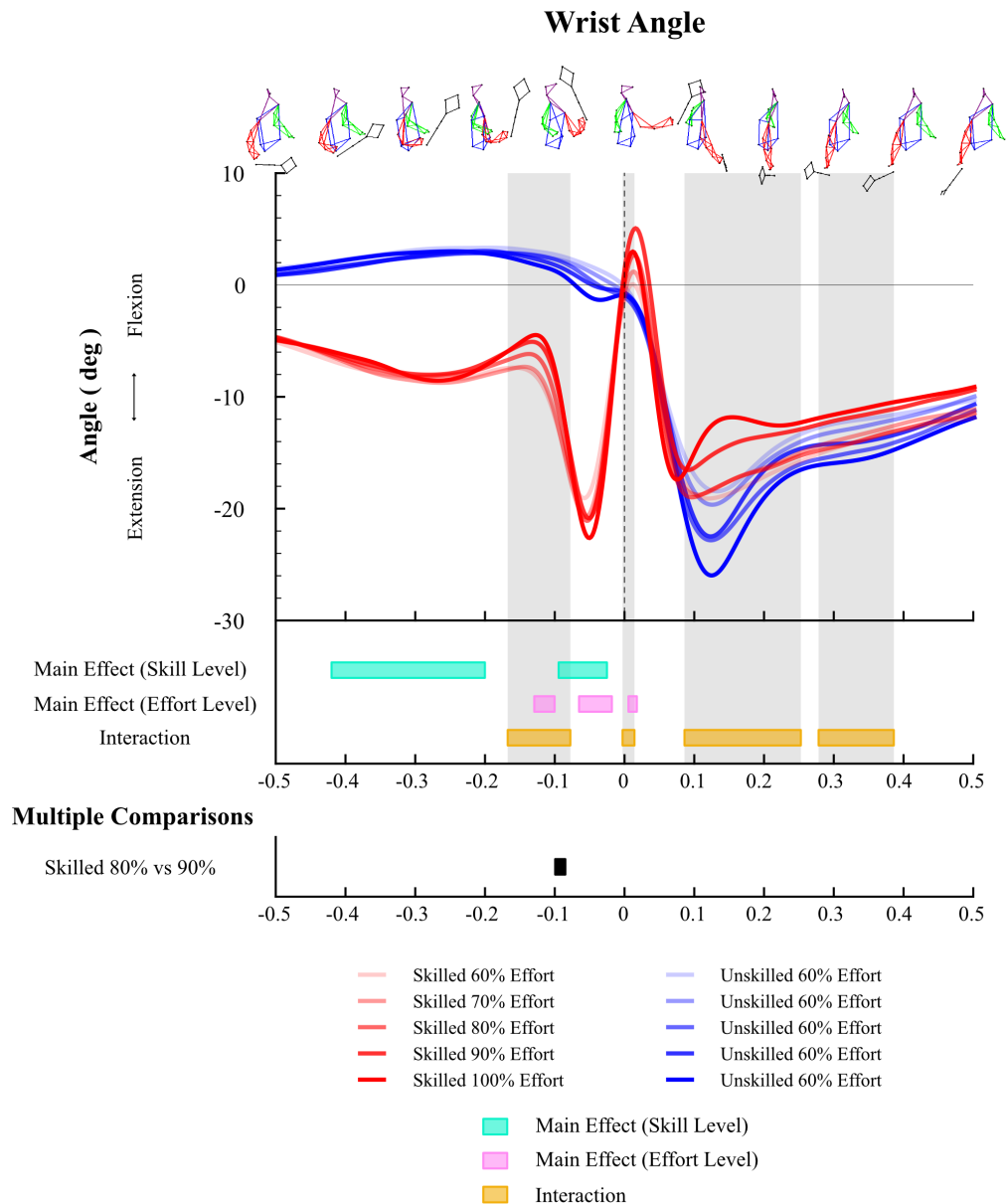


図 15 手関節角度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における手関節角度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内で全努力度間の多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 16 には肘関節角速度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、熟練度と努力度の交互作用は-0.1274 sec から-0.087 sec 区間 ( $p = 0.027$ ), 0.265 sec から 0.317 sec 区間 ( $p = 0.017$ ) で認められた。熟練度の要因による主効果は-0.232 sec から-0.167 sec 区間 ( $p = 0.009$ ), -0.076 sec から-0.027 sec 区間 ( $p = 0.019$ ) で認められた。努力度の要因による主効果については-0.246 sec から-0.091 sec 区間 ( $p < 0.001$ ), -0.054 sec から 0.026 sec 区間 ( $p = 0.002$ ), 0.066 sec から 0.125 sec 区間 ( $p = 0.013$ ) で認められた。

熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内における全努力度間で多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、熟練者の 60%努力度と 90%努力度における-0.122 sec から-0.104 sec 区間 ( $p = 0.017$ ), 熟練者の 60%努力度と 100%努力度における-0.115 sec から-0.101 sec 区間 ( $p = 0.021$ ) で認められた。

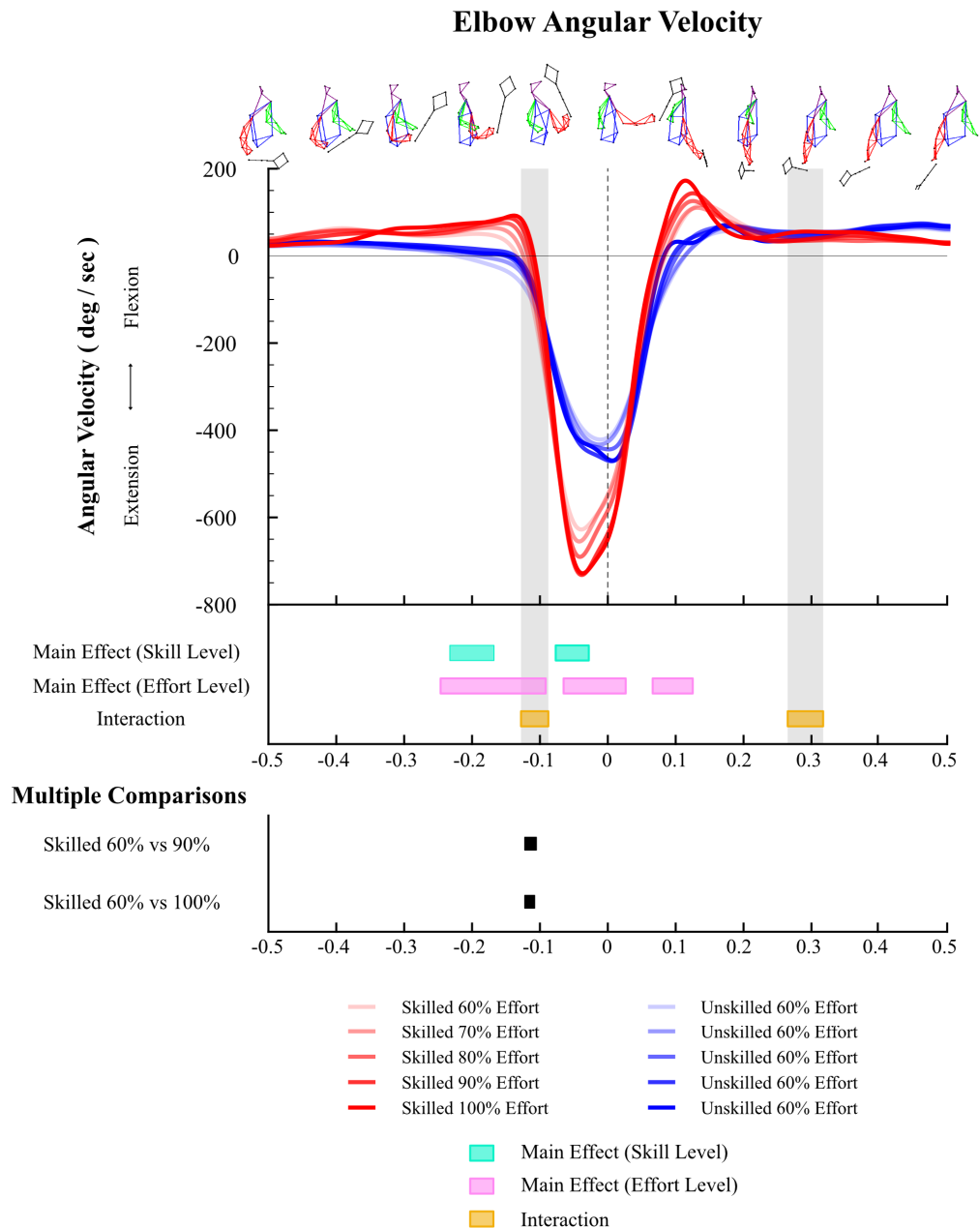


図 16 肘関節角速度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における肘関節角速度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角速度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内で全努力度間の多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 17 には前腕角速度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、熟練度と努力度の交互作用は-0.186 sec から-0.124 sec 区間 ( $p = 0.003$ ), -0.094 sec から-0.062 sec 区間 ( $p = 0.025$ ), 0.292 sec から 0.367 sec 区間 ( $p = 0.001$ ) で認められた。熟練度の要因による主効果は-0.309 sec から-0.202 sec 区間 ( $p < 0.001$ ), -0.126 sec から-0.075 sec 区間 ( $p = 0.007$ ), -0.034 sec から 0.033 sec 区間 ( $p = 0.002$ ) で認められた。努力度の要因による主効果については-0.160 sec から-0.132 sec 区間 ( $p = 0.029$ ), -0.099 sec から-0.043 sec 区間 ( $p = 0.005$ ), -0.026 sec から 0.039 sec 区間 ( $p = 0.002$ ), 0.084 sec から 0.141 sec 区間 ( $p = 0.005$ ) で認められた。

熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内における全努力度間で多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、熟練者の 60%努力度と 90%努力度における-0.087 sec から-0.066 sec 区間 ( $p = 0.002$ ), 熟練者の 60%努力度と 100%努力度における-0.090 sec から-0.077 sec 区間 ( $p = 0.021$ ), 熟練者の 70%努力度と 90%努力度における-0.084 sec から-0.056 sec 区間 ( $p < 0.001$ ), 熟練者の 70%努力度と 100%努力度における-0.172 sec から-0.153 sec 区間 ( $p = 0.004$ ), 熟練者の 80%努力度と 90%努力度における-0.070 sec から-0.054 sec 区間 ( $p = 0.005$ ) で認められた。

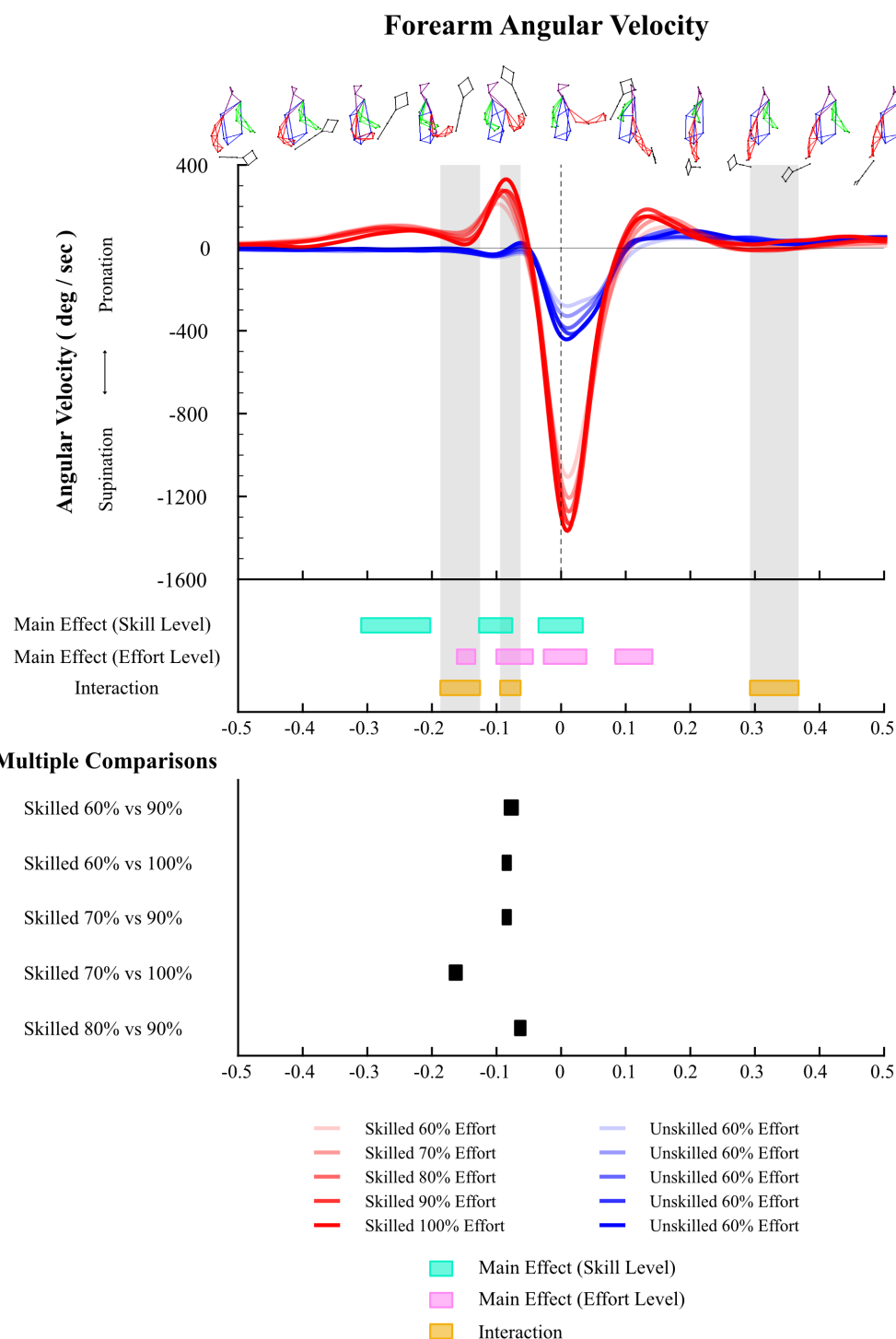


図 17 前腕角速度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における前腕角速度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角速度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内で全努力度間の多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 18 には手関節角速度の時系列データおよび SPM 解析の結果を示した。SPM 2 元配置分散分析の結果、努力度と熟練度の交互作用は-0.230 sec から-0.122 sec 区間 ( $p < 0.001$ ), -0.092 sec から-0.049 sec 区間 ( $p = 0.005$ ), -0.027 sec から-0.006 sec 区間 ( $p = 0.030$ ), 0.027 sec から 0.031 sec 区間 ( $p = 0.049$ ), 0.059 sec から 0.112 sec 区間 ( $p = 0.002$ ), 0.144 sec から 0.214 sec 区間 ( $p < 0.001$ ) で認められた。熟練度の要因による主効果は-0.5 sec から-0.462 sec 区間 ( $p = 0.010$ ), -0.110 sec から-0.067 sec 区間 ( $p = 0.005$ ), -0.045 sec から 0.002 sec 区間 ( $p = 0.003$ ) で認められた。努力度の要因による主効果については-0.152 sec から-0.135 sec 区間 ( $p = 0.037$ ), -0.098 sec から-0.049 sec 区間 ( $p = 0.003$ ), -0.035 sec から 0.005 sec 区間 ( $p = 0.007$ ), 0.025 sec から 0.061 sec 区間 ( $p = 0.011$ ) で認められた。

熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内における全努力度間で多重比較検定を行った。多重比較検定の結果、熟練者の 60%努力度と 90%努力度における-0.066 sec から-0.063 sec 区間 ( $p = 0.036$ ) で認められた。

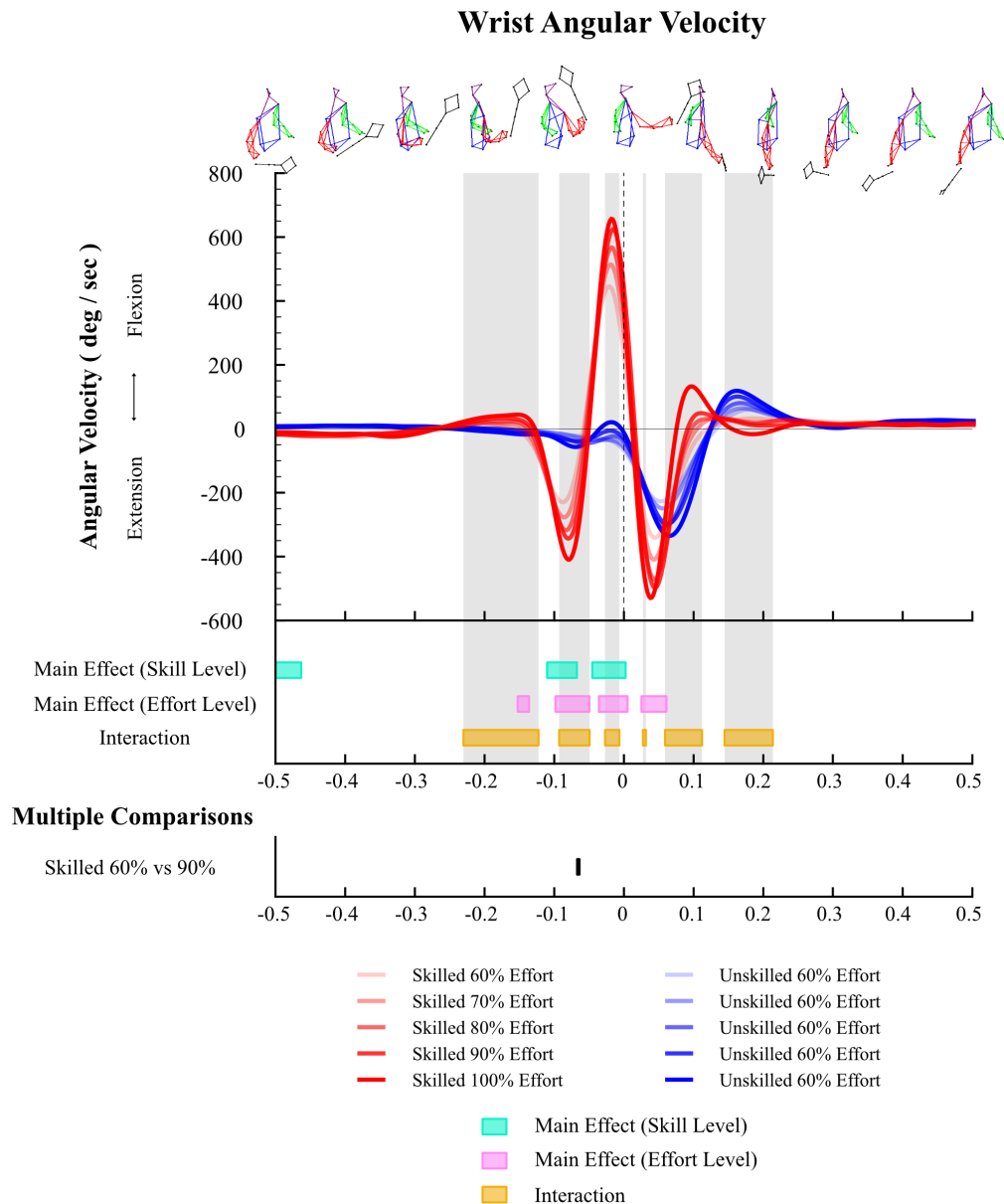


図 18 手関節角速度の時系列データと SPM 解析の結果

インパクト前後 0.5 sec における前腕角速度および SPM1 d における 2 元配置分散分析の結果を示した。関節角速度データは各群の努力度における平均値を示した。2 元配置分散分析にて熟練度と努力度の交互作用が認められたため、各熟練度内で全努力度間の多重比較検定の結果を下段に示した。2 元配置分散分析および多重比較検定の結果は有意水準 5%未満の区間を示した。

図 19 に各関節のスイング方向の最大角速度が出現するタイミングを示した。

熟練者の肘関節伸展角速度の最大値について、60%努力度では $-0.035 \pm 0.022$  sec, 70%努力度では $-0.035 \pm 0.025$  sec, 80%努力度では $-0.035 \pm 0.025$  sec, 90%努力度では $-0.032 \pm 0.025$  sec, 100%努力度では $-0.031 \pm 0.025$  sec を示した。熟練者の前腕回外角速度については、60%努力度で $0.010 \pm 0.014$  sec, 70%努力度で $0.011 \pm 0.012$  sec, 80%努力度で $0.010 \pm 0.012$  sec, 90%努力度で $0.011 \pm 0.012$  sec, 100%努力度で $0.007 \pm 0.011$  sec を示した。熟練者の手関節掌屈角速度については、60%努力度では $-0.023 \pm 0.007$  sec, 70%努力度では $-0.021 \pm 0.006$  sec, 80%努力度では $-0.019 \pm 0.007$  sec, 90%努力度では $-0.018 \pm 0.008$  sec, 100%努力度では $-0.020 \pm 0.005$  sec を示した。

未熟練者の肘関節最大角速度について、60%努力度では $-0.021 \pm 0.023$  sec, 70%努力度では $-0.015 \pm 0.024$  sec, 80%努力度では $-0.010 \pm 0.031$  sec, 90%努力度では $-0.006 \pm 0.027$  sec, 100%努力度では $-0.014 \pm 0.031$  sec を示した。未熟練者の前腕回外角速度については、60%努力度で $-0.028 \pm 0.058$  sec, 70%努力度で $-0.012 \pm 0.047$  sec, 80%努力度で $-0.013 \pm 0.049$  sec, 90%努力度で $-0.011 \pm 0.047$  sec, 100%努力度で $-0.012 \pm 0.045$  sec を示した。未熟練者の手関節掌屈角速度については、60%努力度では $-0.077 \pm 0.052$  sec, 70%努力度では $-0.074 \pm 0.057$  sec, 80%努力度では $-0.071 \pm 0.052$  sec, 90%努力度では $-0.063 \pm 0.049$  sec, 100%努力度では $-0.064 \pm 0.047$  sec を示した。

2 元配置分散分析の結果、肘関節伸展角速度では熟練度と努力度の交互作用 ( $p = 0.360$ ), 熟練度を要因とした主効果 ( $p = 0.076$ ), 努力度を要因とした主効果 ( $p = 0.152$ ), 全てに有意差は認められなかった。前腕回外角速度では熟練度と努力度の交互作用 ( $p = 0.228$ ), 熟練度を要因とした主効果 ( $p = 0.115$ ), 努力度を要因とした主効果 ( $p = 0.231$ ), 全てに有意差は認められなかった。手関節掌屈角速度では、熟練度と努力度の交互作用 ( $p = 0.357$ ) と努力度を要因とした主効果 ( $p = 0.079$ ) には有意差は認められなかったが、熟練度を要因とした主効果には  $p = 0.006$  で有意差が認められた。

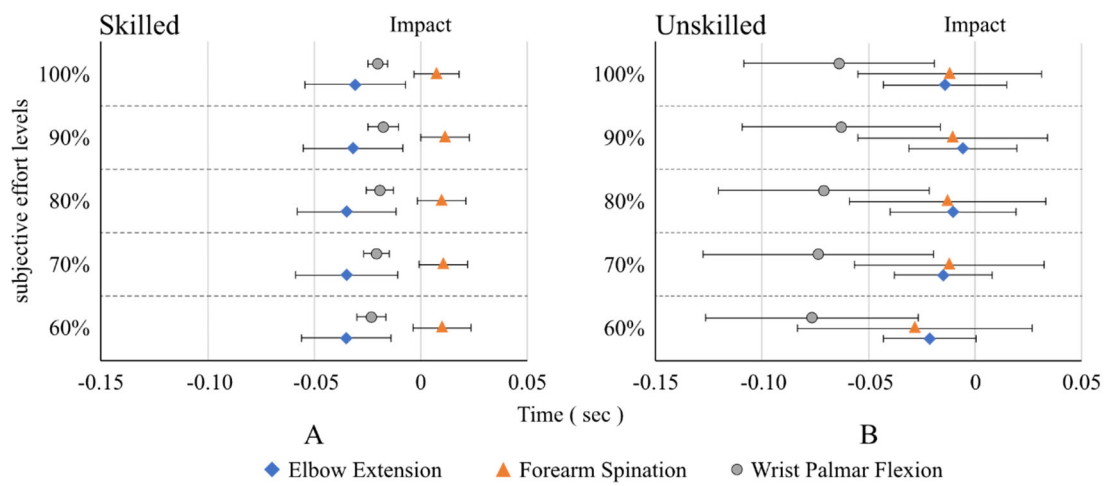


図 19 各関節の最大角速度の出現時刻

各被験者の関節角速度のうち、フォワードスイングで行われる肘関節伸展，前腕回外，手関節掌屈の最大角速度の出現タイミングを示した．横軸の 0 は対数カーブフィッティング法により推定されたインパクトタイミングである．有意差が認められたのは手関節掌屈角速度における熟練度を要因とした主効果のみであった ( $p = 0.006$ ) ．

## 2.4 考察

### 1. 実験方法の妥当性について

本研究の課題は 3.0 m 離れた位置にある 1 辺 1.0 m の正方形の的の中心をめがけて打つものとした。本実験での被験者からの的までの距離はバドミントンコートにおける自陣中央からネットまでの距離とほぼ同程度であった。実際のラリーにおいては、プレイヤーはフットワークを用いてポジションを調節しスイングを行う必要があるが、本研究では座位で試技を行わせることに加えてシャトルノックマシンで被験者の目の前にシャトルを射出した。これによりフットワークや相手のショットの予測といった要因を取り除き、バックハンドドライブショットにおける上肢のスイング技術のみで試技を遂行することができるものとした。本研究で記録されたショットパフォーマンスは実際のラリーと比較し被験者はスイング前のフットワークや踏み込み動作を行う必要がない。そのため、本研究の結果は被験者の上肢によるスイングの特徴を反映していると考えられる。

加えて、シャトルノックマシンによるシャトル打ち出しのばらつきに関して評価するために、実験試技とは別に 5 セット分 (25 球) のシャトルを打ち出してその着弾位置のばらつきの指標としてシャトルの落下位置の標準偏差を算出した。落下位置の標準偏差は左右方向で  $\pm 0.136$  m, 前後方向で  $\pm 0.178$  m であった。使用するシャトルの個体差により、打ち出されたシャトルの軌跡は完全には一致しないが、被験者がバックハンドドライブショットを行うには十分な再現性であったと考えられる。

## 2. ショットパフォーマンスについて

正確性スコアについて、残差分析の結果、熟練者は高い正確性の試技が期待度数より有意に高く、低い正確性の試技は期待度数より有意に低いことが示された。対照的に、未熟練者の正確性スコアは、高い正確性は期待度数より有意に低く、低い正確性の試技は有意に高かった(表2)。また未熟練者は全体の7.0%が空振りやシャトルがフレームと接触する試技であり、正常なインパクトができていなかった。加えて未熟練者は試技の59.4%が正常なインパクトをしたが、1.0mの正方形の的に当たらなかった。これらのことから熟練者は未熟練者に比べ、より正確にバックハンドドライブショットを行うことができていたと考えられる。スマッシュに関する先行研究においても、熟練した選手は未熟練の選手に比べ正確にショットを行っており、的中心から平均して0.4mの距離にスマッシュを命中させていると報告されている[19]。ショットの種類は異なるが本研究の結果は先行研究と同様の結果であった。

シャトル速度に関して、努力度に有意な主効果が認められたことから( $p<0.001$ )、指定された努力度によってシャトル速度の強弱を調節できていたと考えられる(図11)。金子ら[45]は女子中学生を対象とした研究において被験者自身の主観的な努力度とシャトル速度の関係を検討しており、バドミントンを始めたばかりの選手は指定された努力度に対してシャトル速度が過剰に上回り、バドミントンの経験が1.5年程度の選手は指定された努力度の変化に対応してシャトル速度を調節できることを報告した。本研究では未熟練者についても指定された努力度にともないシャトルの速度の強弱を調節することができており、先行研究とは異なる結果であった。本研究の未熟練者は日ごろから運動を行っている大学生であり、身体操作能力が高かったため、努力度の変化をシャトル速度に反映することができた可能性がある。だが未熟練者は60%努力度から70%努力度にかけて、シャトル速度が低下しており、低い努力度でのシャトル速度のコントロールが難しいと考えられる。緩急のついたラリーが求められるバドミントンにおいては、シャトル速度を自在にコントロールする必要がある。そのため特に低い努力度(60%から70%)でのシャトル速度の調節能力は、未熟練者指導における重要な課題であると言える。最大努力度でのショットのみならず、最大下努力度におけるショットについても未

熟練者指導においては積極的に取り入れ、比較的低いシャトル速度のコントロールスキルを向上させる必要があると考えられる。またシャトル速度では熟練度においても主効果が認められ ( $p<0.001$ )、熟練者は未熟練者に比べ、高いシャトル速度で打ち出していた。本研究の熟練者の規格化されたシャトル速度は同じバックハンドドライブショットを対象とした研究と同程度のものではあった[66]。未熟練者の規格化されたシャトル速度は熟練者に比べ、すべての努力度で 10%程度低かった。未熟練者の規格化速度が未熟練者に比べて低い原因として、100%努力度における最大速度に対して安定したパフォーマンスが達成できていないことが考えられる。

### 3. シャトルの打ち出し角度について

本研究では水平面上および矢状面上におけるシャトルの打ち出し角度について着目した。水平面上の打ち出し角度は両群ともすべての努力度でおよそ 90 deg であり、全ての試技間に有意差は認められなかった。熟練者および未熟練者のどちらも、実験室座標系における Y 軸方向（設置した的への方向）に対して打ち出すことができていたことから、未熟練者にとっても水平面上での打ち出し角度の調節は達成可能な課題であったと考えられる。

バドミントンの試合における攻撃側の引き起こす失点のうち、サイドラインフォルトに関する失点とネットによる失点はそれぞれ全体の 20.4%, 58.1%であると報告されている[67]。水平面上の打ち出し角度はサイドラインフォルトに影響し、矢状面上の打ち出し角度はネットフォルトに影響すると考えられるが、試合状況においてサイドラインフォルトはネットフォルトより少ない。このことから熟練者にとっても水平面上の打ち出し角度の調節は矢状面上の打ち出し角度を調節するよりも容易に行えると考えられる。ただし、本研究の試技は、正面から打ち出されたシャトルを一直線（ストレート方向）に打ち返す試技であった。コートの対角線方向（クロス方向）にショットを打つ際にはインパクト位置を変えることが先行研究で示唆されており[68, 69]、ストレート方向とクロス方向では打ち出し角度の制御方略が異なる可能性がある。そのため、今後の研究ではストレート方向のみならず、クロス方向へのショットについても検討する必要があると考える。

矢状面上の打ち出し角度については、熟練者の打ち出し角度は水平に近く、シャトルをコート面と平行に飛翔させるドライブを打つことができたと考えられる。一方で未熟練者は 15 deg 程度で打ち出しており、山なりに打ち出していた。矢状面上における打ち出し角度に関しては、熟練度において有意な主効果が認められ ( $p<0.001$ )、平均的な打ち出し角度は、未熟練者が有意に上方向に打ち出していることが明らかとなった（図 12）。体育授業におけるバドミントン初心者の主観的技能課題を分析した結果、初心者はスマッシュに次いでドライブを難しい技能であると捉えていることが明らかとなっている[70]。同時に、ドライブにおいては「コート面と平行に打つ」ことが未熟練者自身の考える技能課題として抽出された。矢状面上の打ち出し

角度において未熟練者は熟練者に対し、およそ 10 deg 程、上方向に打ち出しており、コート面に対して平行に打ち出すことができないという未熟練者の主観的技能課題の結果と一致していた。

バドミントンの指導書においても、初心者が陥る特徴として、シャトルに対してラケット面を調節できないことが挙げられている[53]、インパクト時の矢状面（上下方向）におけるシャトルの打ち出し角度については、より水平に近い角度で打ち出すために、未熟練者が狙っている位置よりも低い位置を狙わせることも有効であると考えられる。

ほかの競技における打動作を対象とした研究でもショットパフォーマンスはインパクト時の位置や速度に左右されることが明らかになっている[71, 72]。矢状面上の打ち出し角度に影響を与える要因としてインパクト位置の高さが挙げられる。インパクト高が高くなった場合は水平に（場合によっては下向き）に打ち出すことができる。未熟練者が熟練者に対して 0.1 m 程度低い位置でインパクトしていたが、全ての項目で有意差は認められなかった ( $p=0.175$ )。よって熟練度の違いによるインパクトの高さには大きな違いがないことに加え、全ての努力度でほぼ一定の値を保っていることから、インパクトの高さがショットパフォーマンスに与える影響も小さいことが考えられる。このことからショットパフォーマンスはシャトル速度および打ち出し角度により調節されていると考えられる。

シャトル速度と矢状面上のシャトルの打ち出し角度について、的の中心に当てるためにはシャトルの速度が大きくなると、矢状面上の打ち出しの角度は水平に近くなると考えられる。本研究でも熟練者と未熟練者で全体として努力度に応じてシャトル速度が高まった上に、矢状面上の打ち出し角度については努力度 100%が 60%に対して有意に低い値を示した。このことから熟練者と未熟練者はともにシャトルの速度に合わせて矢状面上の打ち出し角度を調節しようとしていたと考えられる。特に熟練者において、正確性の高い試技が多く記録されていたことから、熟練者は自身のシャトル速度に合わせた適切な打ち出し角度を調節できていたと考えられる。一方で未熟練者に関しては正確性の低い試技が多く、シャトル速度については調節ができていたが、打ち出しの角度については的の中心を捉えるための適切な調節ができていなか

ったと考えられる。

空間におけるインパクト位置のばらつきについて、熟練者と未熟練者で有意差は認められなかった。一般的に未熟練者のショットが安定しない主な原因はシャトルと身体的位置をうまく調整できないことである[44]。本研究の試技はフットワークを用いず、ノックマシンを使用してシャトルを打ち出しており、被験者は事前にスイングを行いやすい位置を決定し、その場でスイングを行った。そのため、シャトルに合わせて移動する必要がなく、シャトルと身体の距離は試技ごとに大きく変化しなかったため、インパクト位置が安定したと考えられる。

一方で、未熟練者は試技全体の 7.0%が空振りやシャトルがフレームと接触した試技であり、スイングのタイミングの調節ができていない可能性がある。ラケットスポーツでは、ボールの動きを予測し、スイングのタイミングを合わせる必要がある[73, 74]。未熟練者がシャトルの動きを予測するには、相手から打たれたシャトルのフライト後半における正確な情報が必要だが[74]、バドミントンのシャトルは非常に高い減速特性を有しており、ショットの軌道は放物線ではなく、非対称の軌道となる[49, 75]。シャトルのように減速する軌道に対する反応タイミングの変動は未熟練なプレイヤーの方が大きいことが先行研究より明らかになっており[76]、バドミントンのシャトルの変位を捉えることは未熟練者にとって難しい。その結果、スイングのタイミングを正確に調整することができずに、不正確なショットが熟練者より多くなったと推察される。そのため、未熟練者においてはスイングの技術指導なども重要であるが、同時にシャトルを視覚的に正確に捉えるためのトレーニングが必要であると考えられる。

#### 4. 努力度によるスイング動作の調節について

上肢関節角度の時系列データでは、肘関節角度は努力度を要因とした主効果のみが認められた ( $p = 0.034$ )。このことからバックハンドドライブ動作中の肘関節角度については、努力度に応じた調節が、熟練者と未熟練者で共通して行われていると考えられる。肘関節角度において努力度による主効果が認められたのは、 $-0.137 \text{ sec}$  から  $-0.034 \text{ sec}$  である (図 13)。この区間では、熟練者と未熟練者は両群とも肘関節を屈曲させ、各努力度で最大屈曲を迎えてから伸展運動に切り替えている。よって努力度の違いによる肘関節運動の調節の特徴は、テイクバックが完了する (肘関節最大屈曲) 前後に現れると示唆された。本研究では努力度を増大させるとテイクバック時 (おおよそインパクト前  $0.1 \text{ sec}$ ) の最大肘関節屈曲角度が大きな値を示している。テイクバック動作が大きいほど続くスイング動作を大きく行うことができ、より大きな運動エネルギーを獲得できる [77, 78]。すなわち努力度の増大に従いテイクバック動作を大きくすることで、より速いスイングを行うことができる。実際に肘関節におけるもっとも大きな伸展角速度が出現する時期 (おおよそインパクト前  $0.08 \text{ sec}$  からインパクト後  $0.01 \text{ sec}$ ) では努力度による主効果が認められており、高い努力度では肘関節伸展角速度が大きな値を示している (図 16)。よってインパクト前に行われる肘関節の屈曲運動はテイクバック動作であり、努力度の違いによる肘関節運動の違いはテイクバック動作の大きさを調節することで続くスイング動作における角速度を高めることにつながると考えられる。

前腕角度および手関節角度においても、スイング前に行われるテイクバック動作時に有意差が認められた。前腕角度では  $-0.145 \text{ sec}$  から  $-0.068 \text{ sec}$ 、手関節角度では  $-0.167 \text{ sec}$  から  $-0.077 \text{ sec}$  の区間で熟練度と努力度の交互作用が認められた。交互作用が認められた区間では熟練度と努力度の要因が関連しており、努力度の違いによる関節運動の変化パターンが熟練度によって異なっていることを示唆している。交互作用が認められた区間で、熟練者はスイング動作とは逆方向の運動である前腕回内運動と手関節背屈運動を急激に行い始めている (図 14 および図 15)。熟練者の前腕角度および手関節角度に見られた、スイング方向とは逆方向への動作はテイクバック動作である。熟練者の前腕回内運動と手関節背屈運動は高い努力度ほど急激に行われてお

り、努力度によってテイクバック動作初期の前腕および手関節の運動を変化させていると考えられる。一方でインパクト前 0.3 sec から熟練度を要因とした主効果が認められていることから、未熟練者は熟練者に比べて前腕回内運動が小さい（図 14）。手関節角度において、未熟練者も熟練者と同様に背屈運動を行っていたが、未熟練者の背屈運動はインパクトにかけて緩やかに行われていた（図 15）。

前腕角速度および手関節角速度においても熟練度と努力度の交互作用が認められた（図 17 および図 18）。前述の通り、熟練者はテイクバック動作を行っていたが、未熟練者のテイクバック動作は小さかった。そのため角速度の時系列パターンには大きな違いが見られた。前腕角速度について、熟練者は-0.15 sec 付近で一度回内角速度を小さくし、その後急激に回内角速度を大きくしていた。この-0.15 sec 付近の回内角速度の減少は高い努力度ほど減少が大きく、その後のテイクバック動作における最大回内角速度に関しても高い努力度ほど高い値を示した。熟練者の手関節角速度は、-0.23 sec から-0.12 sec で掌屈方向から背屈方向に切り替わっていた。手関節におけるテイクバック動作である背屈角速度は高い努力度ほど大きな角速度を示した。一方、未熟練者のテイクバック動作は小さかったため、-0.15 sec から-1.0 sec 付近での前腕角速度の変化は熟練者と比べて小さい。多重比較検定においても未熟練者は異なる努力度による角速度時系列パターンの違いは見られなかった。手関節角速度について、未熟練者は-0.08 sec 付近で背屈角速度を高めているが、熟練者の背屈角速度と比べると非常に小さかった。未熟練者の手関節角速度における異なる努力度による時系列パターンは、高い努力度ほど背屈角速度が高まっていたが、その変化は熟練者に比べると小さく、多重比較検定では未熟練者に有意差は認められなかった。

テイクバック動作の目的の一つとして、続くスイング動作で用いる筋をあらかじめ伸張させることで伸張-短縮サイクル（Stretch-Shortening Cycle: SSC）の活用が挙げられる[79, 80]。SSC 伸張性の収縮中に筋と腱に弾性エネルギーを蓄積し、その後の短縮性収縮時に蓄積した弾性エネルギーを利用することにより、短縮性収縮のみの場合よりも大きな力を生み出すことができる[81]。SSC は下肢や体幹の大きな筋で活用されていることが示唆されている[16, 82]。

近年ではバレーボールのオーバーハンドパスにおける手関節掌屈筋などの上肢における筋での SSC の活用も報告されている[83]. SSC に関しては伸張性収縮時の運動の角速度が高ければ、短縮性収縮時の収縮力を高めることができることも明らかになっている[84].

これらのことから考えると、熟練者はテイクバック動作としての前腕回内と手関節背屈を行うことで、SSC を活用していると考えられる。熟練者における SSC は、努力度を増大させるとテイクバック方向への角速度を高めたことで、より効率的に活用されていると考えられる。一方で未熟練者に関しては、努力度を増大させたとしても、全ての努力度でテイクバック動作が熟練者に比較して小さく、関節角速度も大きくなかった。そのため、未熟練者は SSC を活用した爆発的な筋力を発揮できていなかったと考えられる。

## 5. バックハンドドライブ動作中の上肢運動パターンについて

努力度に基づく角速度タイミングの有意差は、手関節掌屈角速度における熟練度を要因とした主効果のみに認められた ( $p = 0.006$ )。このことから、手関節掌屈角速度について未熟練者が熟練者より早いタイミングで最大角速度を迎えていることが明らかとなった。Sakurai と Ohtsuki はバドミントンのスマッシュにおいて、熟練した選手は非熟練者よりも上肢の遠位部の筋肉の活動が高いことを報告している[19]。スイング動作では、上肢における近位関節（肩関節や肘関節）が腕をターゲットに向かって動かす一方で、遠位関節（前腕回外や手関節）がショットの正確性に寄与することが示されている[55]。本研究においては肘関節角度の時系列データについては熟練度間の主効果が認められず、未熟練者は熟練者と同じようなふるまいをしていた（図 13）。一方で遠位の関節である前腕角度や手関節角度に関しては交互作用が熟練度と努力度の交互作用が認められた（図 14 および図 15）。特に手関節運動の時系列データは熟練者のものと大きく異なっていた（図 15）。このことから、未熟練者はスイングの最終的な正確性を決定する遠位の関節のコントロールを適切に行うことができなかったことで、シャトルの打ち出し角度の調節ができなかった可能性がある。

## 6. 本研究の限界

本研究では熟練者と未熟練者のバックハンドドライブショットについて、ショットの正確性、インパクト位置、シャトルの打ち出し角度から分析を行ったが、各被験者のスイング動作の分析はしていない。また試合場面におけるバックハンドドライブショットはスイングと同時に側方または前方に踏み込む動作を伴い、下肢および体幹の動きも重要であるとされている。本研究の試技はゲーム場面とは異なり、座位で行ったことにより、下肢や体幹の動きを制限した。また、対戦相手やネットなどのショットに影響を与える要素も取り除かれた環境での試技であった。バドミントン選手が行うサーブについて、対戦相手の有無によってのサーブの軌道が異なっていることが明らかになっており[85]、特に熟練者においては無意識のうちにショットの軌道を調節している可能性がある。よって今後の研究ではより実際のラリーに近づけた試技を対象にショットパフォーマンスとスイング動作を含めて検証する必要があると考える。

また、本研究では指定した努力度におけるショットパフォーマンスを分析対象としており、Up セットと Down セットの教示の仕方によるパフォーマンス調節の特徴については分析を行っておらず、教示の仕方によるパフォーマンス調節が異なる可能性は否定できない。

## 2.5 小括

第2章では熟練度の異なる競技者の行うバックハンドドライブショットにおける基本的なショットパフォーマンスの違いを明らかにすることを目的に、フットワークを含まない上肢のみで行われる的あて課題時のショットパフォーマンスとシャトル打ち出し角度を比較した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 正確性スコアの残差分析の結果、熟練者は高い正確性の試技数が期待度数より有意に多く、低い正確性の試技数は期待度数より有意に少なかった。一方で未熟練者は高い正確性の試技数が期待度数より有意に少なく、低い正確性の試技数は期待度数より有意に多かった。
2. シャトルの速度は努力度間で有意な主効果が認められ ( $p < 0.001$ )、指定された努力度によってシャトルの速度調節が行われていた。また熟練度間においても有意な主効果が認められ ( $p < 0.001$ )、熟練者は未熟練者に比べて有意に高い規格化速度で打ち出していた。
3. 熟練者と未熟練者のインパクト位置のばらつきの大きさに有意な差は認められなかった。
4. 水平面におけるシャトルの打ち出し角度は、熟練者および未熟練者の全ての試技間で有意差は認められなかった。矢状面におけるシャトルの打ち出し角度では、熟練者と未熟練者間で有意な主効果が認められ ( $p < 0.001$ )、未熟練者が有意に上方向へ打ち出していた。また努力度間では 100%努力度が 60%努力度に対して有意に低く（水平に近い）打ち出していた ( $p = 0.021$ )。
5. 熟練者と未熟練者の肘関節角度ではテイクバック動作時に努力度による主効果が認められた。前腕角度および手関節角度の角速度では、テイクバック動作に当たる区間に熟練度と努力度の交互作用が認められ、関節角度と角速度における時系列パターンの変化が異なっていた。

これらのことから、熟練者は努力度に応じてシャトル速度を調節することができていること

が明らかになった。その際上下方向の打ち出し角度を適切に調節することで正確なショットを打つことができていると考えられる。一方で未熟練者はシャトル速度を低い努力度で調節することが難しい可能性が考えられる。左右方向における打ち出し角度は熟練者と同程度であったにもかかわらず、ショットの正確性が低かったことから、未熟練者は上下方向の打ち出し角度をシャトル速度に合わせて適切に調節することができなかったと考えられる。テイクバック動作に相当する時間に熟練度と努力度の交互作用が認められことから、異なる熟練度のバックハンドドライブ動作の調節はテイクバック動作で行われると考えられる。

## 第 3 章

# 熟練者における Speed Accuracy Trade-off の 成否とその制御方略

### 3.1 緒言

バドミントンのシャトルは非常に高速であり、ラリーを有利に進めるためには打球の速度と正確性が重要である。特にコート面と平行にシャトルを打つストロークであるドライブは、ネット際の攻防で多く使用され、高い速度と正確性が求められる。

一般的に、球技型スポーツにおける打動作や投動作にともなう球の速度と正確性には、一方が上昇すると他方が低下するという、トレードオフの関係(Speed Accuracy Trade Off:SATO)があると考えられている[46, 86]。一方で、テニスやハンドボールを対象にした研究では SATO は成立せず、高い打球速度においても正確性は悪化しないと報告しているものもある[87, 88]。

バドミントンのストロークについては、金子らはシャトル速度が高まって正確性の値には有意差は認められなかったと報告している[66]。しかしながら、金子らの報告では打球パフォーマンスを被験者 1 人につき 9 球の結果から考察しており、他の先行研究[46, 86-88]に比べ試技数が少ない。加えて、動作のバイオメカニクスの検討も行われていないという課題が挙げられる。

そこで第 3 章では、バドミントンのストロークの中でも特に高い打球速度と正確性が求められるバックハンドドライブショットを対象とし、打球における SATO が成立するか否かを決定することを第一の目的とした。さらに、素早い動きで行われるバックハンドドライブ動作中の上肢運動について、三次元動作解析および筋電図学的な観点から分析を行うことで、バックハンドドライブ動作における打球速度と正確性を調節するメカニズムを明らかにすることを第二の目的とした。

### 3.2 方法

#### 1. 対象

被験者は男子大学バドミントン競技者 10 名（年齢： $19.4 \pm 1.0$  歳，身長： $1.73 \pm 0.04$  m，体重： $64.6 \pm 3.99$  kg，競技歴： $10.6 \pm 1.58$  年）であった．

被験者には本研究の趣旨と測定内容について事前に書面および口頭にて説明し，同意を得た．なお，本研究は東海大学「人を対象とする研究」倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：21067）．

## 2. 測定試技

試技はバックハンドドライブショットとし、下肢運動の影響を抑えるため、椅子に座らせて行わせた。その際上肢運動への影響を考慮し、体幹の固定は行わなかった。実験時には被験者から 3.0 m 地点に、1 辺 0.5 m の正方形を示した的を配置し、被験者には的の正方形の中心を狙うよう指示をした。

シャトル（エアロセンサ 400, YONEX 社製）は被験者から 7.0 m 離れた地点から、電動ノックマシン（CT-01, サクライ貿易社製）で打ち出した。使用するシャトルは実験直前に実験者、被験者による目視で飛翔に問題がないことを確認した。シャトルが破損、もしくは正常な飛行ができなくなった場合は使用を中止し、新たなシャトルを使用した。

本研究の打球速度の調節は努力度を指定することで行った。被験者には 60% から 100% の間で 10% 間隔の努力度でバックハンドドライブショットを打ち返させた。各被験者で努力度ごとに 10 球ずつ記録した。

### 3. 映像データの測定および分析

10 台の赤外線カメラ (Raptor-E, Motion Analysis 社製) を設置し, 光学式モーションキャプチャシステム (Mac3D System, Motion Analysis 社製) を用いてフレームレート 500 fps, シャッタースピード 1/1000 sec で試技を記録した (図 20). 関節角度及び角速度の算出には筋骨格モデル動作解析ソフトウェア (nMotion muscular ver.1.52, nac Image Technology 社製) を用いた. バックハンドドライブ動作は, 肘関節伸展, 前腕回外, 手関節掌屈をともなうラケットを前方へ振りぬくショットである [89]. またスイングの直前には肘関節屈曲, 前腕回内, 手関節背屈を行いながらテイクバックをあらかじめ行うスイングである. そこで肘関節, 前腕回旋角, 手関節を分析対象とした. 本研究では肘関節は屈曲, 前腕は回内, 手関節は掌屈を正方向とした. 加えて, 肩関節位置を示す指標として, 肩峰に貼付したマーカーの移動距離を算出した. キネマティクスデータは後述する各分析局面の時間を 100 % として規格化した.

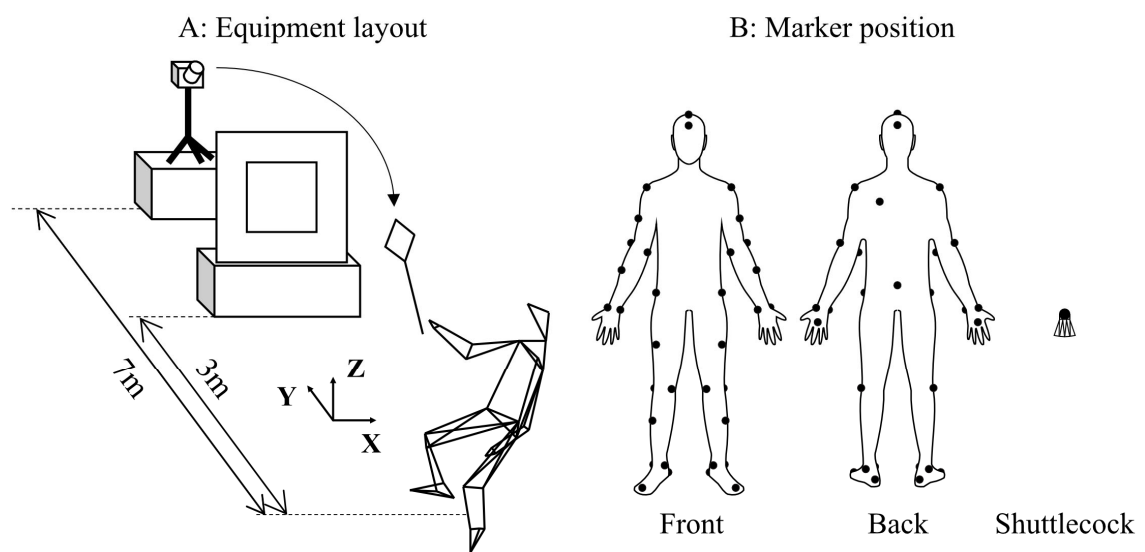


図 20 実験における器材の配置およびマーカー貼付位置

実験室の座標系は、左右方向を X 軸、前後方向を Y 軸、垂直方向を Z 軸として定義した。SIMM の推奨モデルに従い、反射マーカーを体表に 39 点貼付した。シャトルのコルク部分に反射テープを貼付した。参考文献[90]より引用。

## 筋電図データの測定および分析

被験筋は、橈側手根伸筋 (Extensor Carpi Radialis: ECR), 尺側手根屈筋 (Flexor Carpi Ulnaris: FCU) の 2 筋とした。各被験筋には、剃毛および皮膚表面の研磨処理後に Active 電極 (DL-141, S&ME 社製) を貼付し、表面筋電図法により筋電図 (Electromyography: EMG) を導出した。なお電極間距離は 12 mm の双極誘導であった。記録条件は時定数 0.03 sec, サンプリング周波数 2000 Hz とし、映像データと同期して記録した。筋活動量を正規化して比較するため、各被験筋における最大随意収縮 (Maximum Voluntary Contraction: MVC) 試技を実験試技とは別に記録した。MVC 試技は徒手抵抗による等尺性収縮にて 5 秒間行わせた。

EMG データは 10 Hz~500 Hz のバンドパスフィルターでモーションアーチファクトを除去し、後述する各分析局面の二乗平均平方根 (Root Mean Square: RMS) を算出した。続いて各筋の MVC 試技の RMS で除すことで、%RMS を算出した。なお、MVC 試技の RMS は 0.05 sec 間の振幅が最大になる区間から算出した。%RMS は角度データと同様に各分析局面(後述)の時間を 100 % として規格化した。

#### 4. 打球の速度および正確性の算出

各試技においてモーションキャプチャで得られたインパクト前後のシャトルの情報を以下の式 1 に代入し、対数カーブフィッティング法[16, 61]を用いて打球速度を算出した。

$$x = \frac{1}{k} \cdot \ln(1 + k \cdot v_0 \cdot t) \cdots \text{式(1)}$$

式(1)で、 $x$ はシャトルの実験室座標系の Y 座標値 (m)、 $t$ は時間 (sec) である。数式処理ソフト (Mathematica Ver.12.0, Wolfram 社製) で各値を代入した式 1 にフィットする定数  $k$  および  $v_0$  を求め、シャトルの Y 方向の変位を時間に対する関数として算出した (図 21)。打球速度はインパクト後の曲線を時間微分して算出し、各被験者の努力度 100% 試技の最大値を 100 とした相対速度を算出した。

打球の命中位置は 3 台のハイスピードカメラ (GC-LJ25B2, ケンウッド社製) にてフレームレート 240 fps, シャッタースピード 1/300 sec で撮影した。三次元動作解析システム (Frame-DIAS6, Q'sfix 社製) で的の中心を原点とする直交座標系 ( $X_t, Y_t$ ) を設定し、各打球の命中位置の位置ベクトルから平均命中位置 ( $X_t, Y_t$ ) および、打球の正確性の指標として各努力度における指向性と再現性の値を算出した (図 22)。

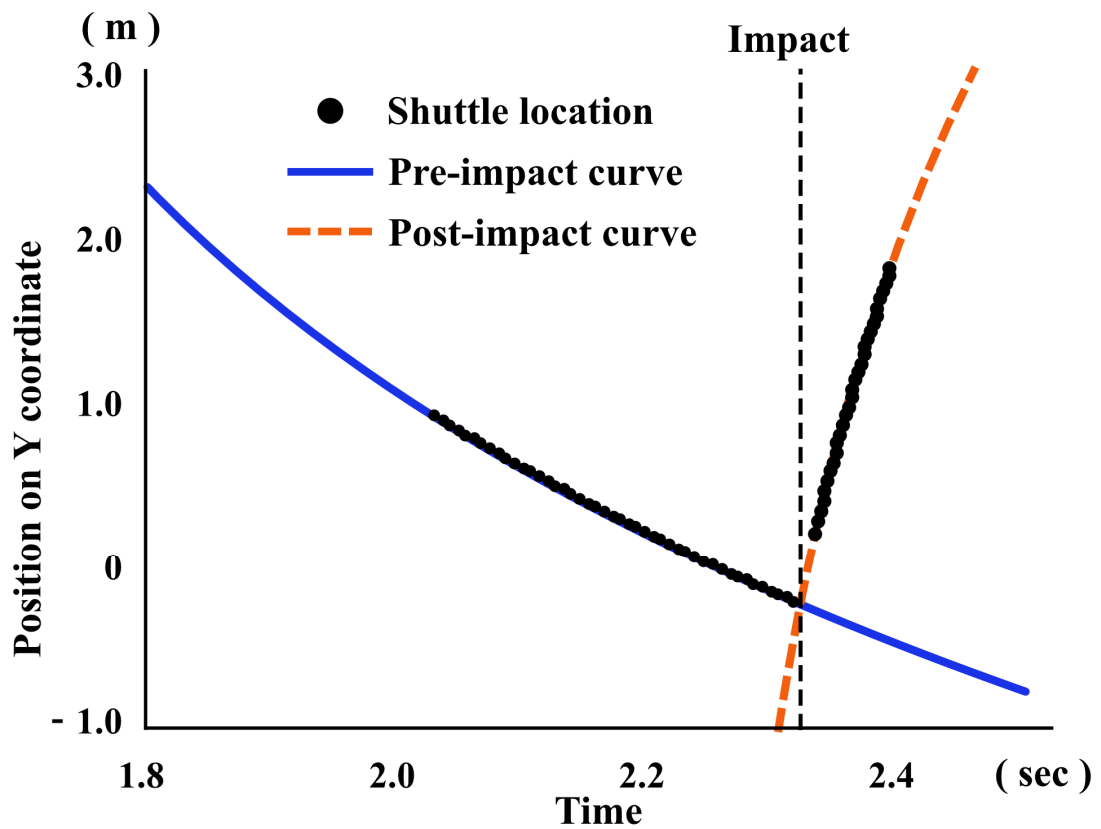


図 21 対数カーブフィッティングによるインパクト時点の推定

シャトルの変位を算出するため，対数カーブフィッティングを用いた．インパクト前およびインパクト後における実験室座標系の Y 軸方向成分のデータに対して，対数カーブフィッティングを行った．インパクト前の曲線とインパクト後の曲線の交点をインパクト時と定義した．参考文献[90]より引用一部改変．

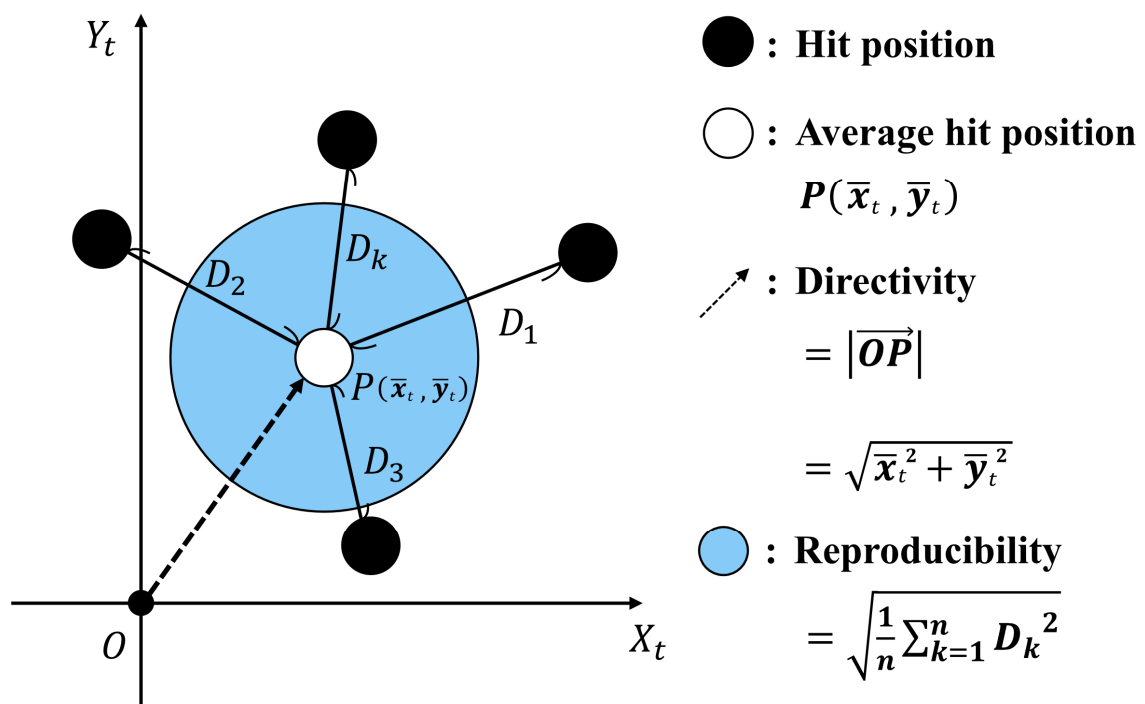


図 22 指向性と再現性の定義

打球の正確性としての指向性と再現性の定義を示した。指向性は目標と平均的な命中位置の誤差、再現性は平均命中位置に対する各命中位置のばらつきを示す。的の中心を原点  $O$  として、平均命中位置までの距離を指向性として算出した。再現性は平均命中位置から各試技の命中位置までの距離の二乗平均平方根として算出した。図は先行研究[91]をもとに作成した。参考文献[90]より引用、一部改変。

## 5. 分析試技の選定および分析範囲

本研究では SATO の成否を明らかにするため、打球パフォーマンスの分析は記録した全 500 試技を分析対象とした。

同一の努力度による試技においても、被験者のバイオメカニクスの変数にはばらつきが存在する[92, 93]。そのため、被験者内での変数のばらつきを考慮し、複数回のデータから取得する必要がある。本研究ではシャトルの速度を努力で調節させているため、指定された努力度に対して過剰に高い速度の試技や、逆に低すぎる速度の試技が含まれている可能性がある。よって各努力度の試技のうち、指定された努力度を代表する試技を選定する必要がある。分析に適した試技数については対象とする動きによって異なることが示されている[94-96]。そこで、本研究では角度データおよび EMG データは各努力度の特徴を抽出するため、打球速度の高い試技と低い試技を 3 試技ずつ除いた 4 試技を分析対象とした。これは、打球速度の高い試技と低い試技は、各努力度の特徴からはずれた動きをしている可能性があるためである。ただし、EMG データについては被験者 1 名の実験中に電極が外れ、データの収録ができなかったため、EMG データは 9 名分を分析対象とした。その結果、角度データは計 200 試技、EMG データは計 180 試技が分析対象として選定された。

抽出された 200 試技の精度と信頼性を示すため、先行研究を参考に各努力度における平均シャトル速度の級内相関係数 (intraclass correlation coefficients : ICC) を算出した[95, 97, 98]。ICC は試技間の再現性を示すため、記録した全 500 試技における各努力度の ICC (3, 1) と抽出した ICC (3, 1) を算出し比較した[98, 99]。

全 500 試技における ICC (3, 1) は 60%努力度から順に、0.887, 0.927, 0.923, 0.863, 0.770 であった。一方で抽出された 200 試技における ICC (3, 1) は 60%努力度から順に、0.964, 0.971, 0.960, 0.940, 0.954 であった。ICC は 0 から 1 の値をとり、値が大きくなるほど試技間の再現性が高いことを示す。ICC は 0.75 以上の値を示す場合、良好な再現性があると判断することができる[100, 101]。本研究において、抽出した 200 試技における ICC はいずれも 0.9 を超えており、再現性は高いと判断できる。全 500 試技の ICC と比較しても、抽出した

200 試技の ICC は改善されていたことから、各努力度においてシャトル速度が高い試技と低い試技を取り除くことで、シャトル速度の再現性が高まっている。よって抽出された試技の動作を分析することで、各努力度の特徴を明らかにすることができると考えられる。

分析範囲に関して、バドミントンの技術解説書では、バックハンドドライブ動作の主動作が前腕の回外であると示されている[102]。そこでラケット保持腕の手に貼付したマーカの Y 方向への速度が負方向に 0.1 m/sec を超えた時点をテイクバック開始、インパクトにかけて行われる前腕回旋動作の角速度が負（回外方向）の値をとった時をスイング開始とし、テイクバック開始からスイング開始をテイクバック局面、スイング開始からインパクト推定時刻までをスイング局面とした（図 23）。

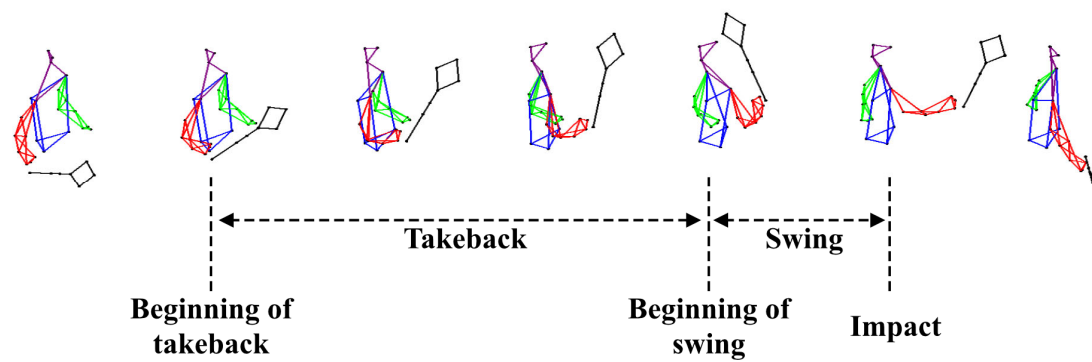


図 23 分析範囲およびスイングの局面定義

被験者 1 名の実験データから作成したスティックピクチャを示した。テイクバック開始時からインパクト時までとした。分析範囲のうちフォワードスイング開始時より前をテイクバック局面、フォワードスイング開始時より後をスイング局面として定義した。参考文献[90]より引用，一部改変。

## 6. 統計処理

測定項目における値は平均値 (Mean)  $\pm$  標準偏差 (SD) で示した。統計処理には各被験者の努力度ごとの平均値を用いた。各努力度間の差の比較には統計処理ソフト R ver.4.0.3 を使用し、努力度を要因とする対応のある一元配置分散分析を行った。要因に有意な主効果が認められた場合は多重比較検定を行った。多重比較検定における  $p$  値の調整には Bonferroni 法を用いた。なお、統計学的有意水準は 5%未満とした。

### 3.3 結果

#### 1. 打球パフォーマンス

表 5 には打球相対速度、指向性、再現性の値および平均命中位置の座標値 ( $X_t$  軸成分,  $Y_t$  軸成分) を示した. 打球相対速度について, 60%試技は  $72.7 \pm 7.9\%$ , 70%試技は  $77.7 \pm 8.5\%$ , 80%試技は  $80.6 \pm 9.2\%$ , 90%試技は  $83.3 \pm 7.7\%$ , 100%試技は  $89.5 \pm 9.6\%$  であった. 多重比較検定の結果 70%試技と 80%試技間, 80%試技と 90%試技間, 90%試技と 100%試技間以外のすべての努力度間で有意差が認められた ( $p < 0.05$ ).

指向性について, 60%試技は  $0.212 \pm 0.092$  m, 70%試技は  $0.203 \pm 0.104$  m, 80%試技は  $0.192 \pm 0.075$  m, 90%試技は  $0.169 \pm 0.095$  m, 100%試技は  $0.139 \pm 0.083$  m を示した. 再現性について, 60%試技は  $0.288 \pm 0.093$  m, 70%試技は  $0.285 \pm 0.077$  m, 80%試技は  $0.298 \pm 0.067$  m, 90%試技は  $0.241 \pm 0.097$  m, 100%試技は  $0.321 \pm 0.075$  m, を示した.

平均命中位置の座標値として,  $X_t$  軸成分および  $Y_t$  軸成分を算出した.  $X_t$  軸成分について, 60%試技は  $-0.080 \pm 0.090$  m, 70%試技は  $-0.070 \pm 0.109$  m, 80%試技は  $-0.072 \pm 0.120$  m, 90%試技は  $-0.076 \pm 0.095$  m, 100%試技は  $-0.017 \pm 0.133$  m を示した.  $Y_t$  軸成分について, 60%試技は  $0.149 \pm 0.136$  m, 70%試技は  $0.158 \pm 0.107$  m, 80%試技は  $0.109 \pm 0.114$  m, 90%試技は  $0.132 \pm 0.078$  m, 100%試技は  $0.052 \pm 0.085$  m を示した.

指向性, 再現性, 平均命中位置の  $X_t$  軸成分および  $Y_t$  軸成分については, 一元配置分散分析の結果, 有意差は認められなかった.

表 5 各努力度における打球相対速度および正確性

|                                                                                                                                                                            | Effort level |              |              |              | Significant difference |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                            | 60%          | 70%          | 80%          | 100%         |                        |
| Shuttle Speed (%)                                                                                                                                                          | 72.7±7.9     | 77.7±8.5     | 80.6±9.2     | 83.3±7.7     | 89.5±9.6               |
| Directivity (m)                                                                                                                                                            | 0.212±0.092  | 0.203±0.104  | 0.192±0.075  | 0.169±0.095  | 0.139±0.083            |
| Reproducibility (m)                                                                                                                                                        | 0.288±0.093  | 0.285±0.077  | 0.298±0.067  | 0.241±0.097  | 0.321±0.075            |
| Average hit position $X_t$ (m)                                                                                                                                             | -0.080±0.090 | -0.070±0.109 | -0.072±0.120 | -0.076±0.095 | -0.017±0.133           |
| Average hit position $Y_t$ (m)                                                                                                                                             | 0.149±0.136  | 0.158±0.107  | 0.109±0.114  | 0.132±0.078  | 0.052±0.085            |
| Significant difference for, ①:60% vs 70%, ②:60% vs 80%, ③:60% vs 90%, ④:60% vs 100%, ⑤:70% vs 80%, ⑥:70% vs 90%, ⑦:70% vs 100%, ⑧:80% vs 90%, ⑨:80% vs 100%, ⑩:90% vs 100% |              |              |              |              |                        |
|                                                                                                                                                                            |              |              |              |              | ①,②,③,④,⑥,⑦,⑨          |
|                                                                                                                                                                            |              |              |              |              | n.s.                   |
|                                                                                                                                                                            |              |              |              |              | n.s.                   |
|                                                                                                                                                                            |              |              |              |              | n.s.                   |
|                                                                                                                                                                            |              |              |              |              | n.s.                   |

各努力度における速度, 指向性, 再現性,  $X_t$ 方向の平均命中位置,  $Y_t$ 方向の平均命中位置を示した. 一元配置分散分析の結果, 打球相対速度以外の項目では有意差は認められなかった. 参考文献[90]より引用.

## 2. インパクト時の関節角度および角速度

表 6 にはインパクト時における上肢関節角度および関節角速度を示した。肘関節角度は 60% 試技から順に  $17.9 \pm 13.7$  deg,  $17.9 \pm 14.8$  deg,  $18.1 \pm 12.8$  deg,  $17.2 \pm 12.6$  deg,  $17.9 \pm 14.6$  deg を示した。前腕角度は 60% 試技から順に  $11.1 \pm 19.5$  deg,  $9.3 \pm 21.5$  deg,  $7.5 \pm 19.3$  deg,  $4.5 \pm 21.8$  deg,  $4.9 \pm 18.4$  deg を示した。手関節角度は 60% 試技から順に  $-3.0 \pm 3.5$  deg,  $-4.4 \pm 4.5$  deg,  $-3.6 \pm 3.3$  deg,  $-2.8 \pm 3.2$  deg,  $-4.0 \pm 3.0$  deg を示した。インパクト時の前腕角度において、60% 試技と 100% 試技間で有意差が認められた ( $p < 0.05$ ) が、肘関節角度と手関節角度は努力度間で有意差は認められなかった。

関節角速度について、肘関節角速度は 60% 試技から順に  $-520.2 \pm 157.1$  deg / sec,  $-480.0 \pm 155.7$  deg / sec,  $-507.1 \pm 175.0$  deg / sec,  $-542.6 \pm 156.4$  deg / sec,  $-562.1 \pm 173.4$  deg / sec を示した。前腕角速度は 60% 試技から順に  $-781.3 \pm 156.7$  deg / sec,  $-848.0 \pm 134.6$  deg / sec,  $-896.0 \pm 175.0$  deg / sec,  $-935.5 \pm 144.8$  deg / sec,  $-983.2 \pm 192.2$  deg / sec を示した。手関節角速度は  $145.8 \pm 67.0$  deg / sec,  $143.8 \pm 81.4$  deg / sec,  $151.8 \pm 90.4$  deg / sec,  $189.9 \pm 136.2$  deg / sec,  $167.0 \pm 106.5$  deg / sec を示した。

関節角速度に関して、前腕角速度において 90% 試技と 100% 試技が 60% 試技に対して負方向に有意に大きな値を示した ( $p < 0.05$ )。肘関節角速度と手関節角速度では努力度間で有意差は認められなかった。

表 6 インパクト時における上肢関節角度および関節角速度

|                                                                                                                                                                            | Effort level |              |              |              | Significant difference |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                            | 60%          | 70%          | 80%          | 100%         |                        |
| Elbow angle<br>(deg)                                                                                                                                                       | 17.9±13.7    | 17.9±14.8    | 18.1±12.8    | 17.2±12.6    | 17.9±14.6              |
| Forearm angle<br>(deg)                                                                                                                                                     | 11.1±19.5    | 9.3±21.5     | 7.5±19.3     | 4.5±21.8     | 4.9±18.4               |
| Wrist angle<br>(deg)                                                                                                                                                       | -3.0±3.5     | -4.4±4.5     | -3.6±3.3     | -2.8±3.2     | -4.0±3.0               |
| Elbow angular velocity<br>(deg/sec)                                                                                                                                        | -520.2±157.1 | -480.0±155.7 | -507.1±175.0 | -542.6±156.4 | -562.1±173.4           |
| Forearm angular<br>velocity<br>(deg/sec)                                                                                                                                   | -781.3±156.7 | -848.0±134.6 | -896.0±175.0 | -935.5±144.8 | -983.2±192.2           |
| Wrist angular velocity<br>(deg/sec)                                                                                                                                        | 145.8±67.0   | 143.8±81.4   | 151.8±90.4   | 189.9±136.2  | 167.0±106.5            |
| Significant difference for, ①:60% vs 70%, ②:60% vs 80%, ③:60% vs 90%, ④:60% vs 100%, ⑤:70% vs 80%, ⑥:70% vs 90%, ⑦:70% vs 100%, ⑧:80% vs 90%, ⑨:80% vs 100%, ⑩:90% vs 100% |              |              |              |              |                        |

対数カーブフィッティング法を用いて推測されたインパクト時における上肢関節角度および角速度を示した。各関節の回転方向について、肘関節は屈曲、前腕は回内、手関節は掌屈を正方向として示した。参考文献[90]より引用、一部改変。

### 3. 各局面における上肢関節角度および肩峰移動距離

表 7 には各局面の関節角度の最大値と最小値を示した。テイクバック局面における肘関節角度に関して、60%の最大値は  $76.9 \pm 11.0$  deg, 最小値は  $49.5 \pm 11.5$  deg, 70%の最大値は  $77.3 \pm 10.5$  deg, 最小値は  $48.4 \pm 12.7$  deg, 80%の最大値は  $77.8 \pm 9.5$  deg, 最小値は  $48.1 \pm 9.7$  deg, 90%の最大値は  $77.9 \pm 8.9$  deg, 最小値は  $48.4 \pm 12.0$  deg, 100%の最大値は  $78.6 \pm 8.2$  deg, 最小値は  $49.8 \pm 12.1$  deg を示した。前腕角度に関しては60%の最大値は  $39.0 \pm 18.3$  deg, 最小値は  $1.1 \pm 21.8$  deg, 70%の最大値は  $39.0 \pm 17.9$  deg, 最小値は  $-4.6 \pm 18.9$  deg, 80%の最大値は  $37.2 \pm 17.7$  deg, 最小値は  $-1.7 \pm 21.0$  deg, 90%の最大値は  $34.6 \pm 17.4$  deg, 最小値は  $-3.3 \pm 19.7$  deg, 100%の最大値は  $36.0 \pm 18.3$  deg, 最小値は  $-0.8 \pm 20.3$  deg を示した。手関節角度に関しては60%の最大値は  $-2.1 \pm 6.1$  deg, 最小値は  $-16.7 \pm 6.5$  deg, 70%の最大値は  $-1.4 \pm 6.9$  deg, 最小値は  $-18.4 \pm 7.4$  deg, 80%の最大値は  $-2.1 \pm 6.4$  deg, 最小値は  $-17.5 \pm 7.2$  deg, 90%の最大値は  $-1.8 \pm 5.8$  deg, 最小値は  $-17.6 \pm 6.6$  deg, 100%の最大値は  $-1.3 \pm 5.7$  deg, 最小値は  $-18.2 \pm 5.8$  deg を示した。

スイング局面における肘関節角度に関して、60%の最大値は  $56.8 \pm 11.5$  deg, 最小値は  $17.9 \pm 13.7$  deg, 70%の最大値は  $55.8 \pm 12.7$  deg, 最小値は  $17.9 \pm 14.8$  deg, 80%の最大値は  $55.4 \pm 11.1$  deg, 最小値は  $18.1 \pm 12.8$  deg, 90%の最大値は  $55.6 \pm 11.3$  deg, 最小値は  $17.2 \pm 12.6$  deg, 100%の最大値は  $56.9 \pm 10.9$  deg, 最小値は  $17.9 \pm 14.6$  deg を示した。前腕角度に関しては60%の最大値は  $39.0 \pm 18.3$  deg, 最小値は  $11.1 \pm 19.5$  deg, 70%の最大値は  $39.1 \pm 18.0$  deg, 最小値は  $9.3 \pm 21.5$  deg, 80%の最大値は  $37.3 \pm 17.7$  deg, 最小値は  $7.5 \pm 19.3$  deg, 90%の最大値は  $34.7 \pm 17.5$  deg, 最小値は  $4.5 \pm 21.8$  deg, 100%の最大値は  $36.1 \pm 18.3$  deg, 最小値は  $4.4 \pm 18.4$  deg を示した。手関節角度に関しては60%の最大値は  $-2.8 \pm 3.2$  deg, 最小値は  $-16.8 \pm 6.3$  deg, 70%の最大値は  $-4.1 \pm 4.1$  deg, 最小値は  $-18.8 \pm 7.1$  deg, 80%の最大値は  $-3.2 \pm 3.1$  deg, 最小値は  $-17.8 \pm 6.8$  deg, 90%の最大値は  $-2.7 \pm 3.2$  deg, 最小値は  $-17.6 \pm 6.5$  deg, 100%の最大値は  $-4.0 \pm 3.0$  deg, 最小値は  $-18.5 \pm 5.5$  deg を示した。

テイクバック局面のすべての項目では努力度間に有意差は認められなかった。一方、スイン

グ局面では、前腕角速度の最小値で 60%試技に対して 100%試技が有意に低い値を示した ( $p<0.05$ ) が、肘関節および手関節では有意差は認められなかった。

肩峰移動距離はテイクバック局面で努力度 60%から順に  $0.11\pm0.05$  m,  $0.12\pm0.05$  m,  $0.12\pm0.04$  m,  $0.11\pm0.04$  m,  $0.16\pm0.06$  m であった。スイング局面で  $0.03\pm0.05$  m,  $0.03\pm0.04$  m,  $0.04\pm0.08$  m,  $0.05\pm0.08$  m,  $0.04\pm0.06$  m を示した。肩峰移動距離では、テイクバック局面の 100%試技が 60%試技と 90%試技に対して有意に大きな値を示した ( $p<0.05$ )。

表 7 各局面における上肢関節角度の最大値および最小値

|                                                                                                    |                        | Effort level |           |           |           | Significant difference |           |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-----------|------|
|                                                                                                    |                        | 60%          | 70%       | 80%       | 90%       | 100%                   |           |      |
| Take-back                                                                                          | Elbow angle<br>(deg)   | Max          | 76.9±11.0 | 77.3±10.5 | 77.8±9.5  | 77.9±8.9               | 78.6±8.2  | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | 49.5±11.5 | 48.4±12.7 | 48.1±9.7  | 48.4±12.0              | 49.8±12.1 | n.s. |
|                                                                                                    | Forearm angle<br>(deg) | Max          | 39.0±18.3 | 39.0±17.9 | 37.2±17.7 | 34.6±17.4              | 36.0±18.3 | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | 1.1±21.8  | -4.6±18.9 | -1.7±21.0 | -3.3±19.7              | -0.8±20.3 | n.s. |
|                                                                                                    | Wrist angle<br>(deg)   | Max          | -2.1±6.1  | -1.4±6.9  | -2.1±6.4  | -1.8±5.8               | -1.3±5.7  | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | -16.7±6.5 | -18.4±7.4 | -17.5±7.2 | -17.6±6.6              | -18.2±5.8 | n.s. |
| Swing                                                                                              | Elbow angle<br>(deg)   | Max          | 56.8±11.5 | 55.8±12.7 | 55.4±11.1 | 55.6±11.3              | 56.9±10.9 | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | 17.9±13.7 | 17.9±14.8 | 18.1±12.8 | 17.2±12.6              | 17.9±14.6 | n.s. |
|                                                                                                    | Forearm angle<br>(deg) | Max          | 39.0±18.3 | 39.1±18.0 | 37.3±17.7 | 34.7±17.5              | 36.1±18.3 | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | 11.1±19.5 | 9.3±21.5  | 7.5±19.3  | 4.5±21.8               | 4.4±18.4  | ④    |
|                                                                                                    | Wrist angle<br>(deg)   | Max          | -2.8±3.2  | -4.1±4.1  | -3.2±3.1  | -2.7±3.2               | -4.0±3.0  | n.s. |
|                                                                                                    |                        | Min          | -16.8±6.3 | -18.8±7.1 | -17.8±6.8 | -17.6±6.5              | -18.5±5.5 | n.s. |
| Significant difference for, ①:60% vs 70%, ②:60% vs 80%, ③:60% vs 90%, ④:60% vs 100%, ⑤:70% vs 80%, |                        |              |           |           |           |                        |           |      |

テイクバック局面およびスイング局面における各関節の最大値と最小値を示した。各関節の回転方向について、肘関節は屈曲、前腕は回内、手関節は掌屈を正方向として示した。参考文献[90]より引用。

#### 4. 関節角速度の最大値および最小値

表 8 および表 9 には各局面の関節角速度の最大値と最小値、およびその出現した規格化時間を示した。テイクバック局面の関節角速度の最大値と最小値、および出現時間（規格化時間）について、肘関節角速度では 60%の最大値は  $100.7 \pm 40.5 \text{ deg / sec}$  を示し、 $59.6 \pm 24.1\%$  に出現した。60%の最小値は  $-528.5 \pm 131.6 \text{ deg / sec}$  を示し、 $100.0 \pm 0.0\%$  に出現した。70%の最大値は  $118.9 \pm 52.5 \text{ deg / sec}$  を示し、 $67.3 \pm 23.3\%$  に出現した。70%の最小値は  $-554.4 \pm 148.9 \text{ deg / sec}$  を示し、 $100.0 \pm 0.0\%$  に出現した。80%の最大値は  $117.1 \pm 46.7 \text{ deg / sec}$  を示し、 $60.6 \pm 23.0\%$  に出現した。80%の最小値は  $-589.6 \pm 152.8 \text{ deg / sec}$  を示し、 $100.0 \pm 0.0\%$  に出現した。90%の最大値は  $123.1 \pm 40.1 \text{ deg / sec}$  を示し、 $72.2 \pm 21.0\%$  に出現した。90%の最小値は  $-623.3 \pm 145.9 \text{ deg / sec}$  を示し、 $100.0 \pm 0.0\%$  に出現した。100%の最大値は  $121.3 \pm 48.7 \text{ deg / sec}$  を示し、 $68.6 \pm 21.4\%$  に出現した。100%の最小値は  $-646.8 \pm 151.8 \text{ deg / sec}$  を示し、 $100.0 \pm 0.0\%$  に出現した。

前腕角速度では 60%の最大値は  $228.7 \pm 78.3 \text{ deg / sec}$  を示し、 $82.0 \pm 19.5\%$  に出現した。60%の最小値は  $-37.5 \pm 37.2 \text{ deg / sec}$  を示し、 $46.4 \pm 35.2\%$  に出現した。70%の最大値は  $275.0 \pm 94.3 \text{ deg / sec}$  を示し、 $87.3 \pm 11.9\%$  に出現した。70%の最小値は  $-62.2 \pm 64.3 \text{ deg / sec}$  を示し、 $46.0 \pm 31.7\%$  に出現した。80%の最大値は  $268.8 \pm 84.2 \text{ deg / sec}$  を示し、 $88.6 \pm 17.9\%$  に出現した。80%の最小値は  $-59.2 \pm 52.8 \text{ deg / sec}$  を示し、 $30.9 \pm 30.8\%$  に出現した。90%の最大値は  $265.7 \pm 75.1 \text{ deg / sec}$  を示し、 $88.3 \pm 13.7\%$  に出現した。90%の最小値は  $-55.6 \pm 45.1 \text{ deg / sec}$  を示し、 $36.7 \pm 29.5\%$  に出現した。100%の最大値は  $293.7 \pm 75.0 \text{ deg / sec}$  を示し、 $95.0 \pm 0.9\%$  に出現した。100%の最小値は  $-67.2 \pm 50.3 \text{ deg / sec}$  を示し、 $49.4 \pm 33.6\%$  に出現した。

手関節角速度では 60%の最大値は  $37.2 \pm 23.8 \text{ deg / sec}$  を示し、 $64.0 \pm 24.4\%$  に出現した。60%の最小値は  $-169.6 \pm 66.2 \text{ deg / sec}$  を示し、 $95.8 \pm 1.8\%$  に出現した。70%の最大値は  $51.4 \pm 30.3 \text{ deg / sec}$  を示し、 $65.1 \pm 31.4\%$  に出現した。70%の最小値は  $-187.7 \pm 77.7 \text{ deg / sec}$  を示し、 $96.1 \pm 1.7\%$  に出現した。80%の最大値は  $45.2 \pm 25.4 \text{ deg / sec}$  を示し、 $76.3 \pm 16.5\%$

に出現した。80%の最小値は $-214.4 \pm 87.9 \text{ deg/sec}$ を示し、 $95.8 \pm 1.4\%$ に出現した。90%の最大値は $42.5 \pm 22.2 \text{ deg/sec}$ を示し、 $70.3 \pm 22.3\%$ に出現した。90%の最小値は $-227.7 \pm 78.7 \text{ deg/sec}$ を示し、 $96.1 \pm 1.1\%$ に出現した。100%の最大値は $54.8 \pm 23.2 \text{ deg/sec}$ を示し、 $73.3 \pm 20.1\%$ に出現した。100%の最小値は $-268.5 \pm 68.0 \text{ deg/sec}$ を示し、 $95.8 \pm 1.0\%$ に出現した。

テイクバック局面における肘関節角速度では最小角速度の60%試技と100%試技間、70%試技と90%試技間で有意差が認められた( $p < 0.05$ )。前腕角速度では最大値の60%試技と70%試技、90%試技、100%試技間、および90%試技と100%試技間で有意差が認められた( $p < 0.05$ )。手関節角速度の最大値では90%試技と100%試技間で有意差が認められた( $p < 0.05$ )。また最小値に関して、60%試技と80%試技、90%試技、100%試技間および70%試技と80%試技、90%試技、100%試技間で有意差が認められた( $p < 0.05$ )。テイクバック局面の関節角速度の最大値および最小値が出現した規格化時間には有意差は認められなかった。

スイング局面の関節角速度の最大値と最小値、および出現時間(規格化時間)について、肘関節角速度では60%の最大値は $-474.0 \pm 152.6 \text{ deg/sec}$ を示し、 $50.5 \pm 49.5\%$ に出現した。60%の最小値は $-648.1 \pm 115.0 \text{ deg/sec}$ を示し、 $42.7 \pm 24.6\%$ に出現した。70%の最大値は $-435.7 \pm 145.0 \text{ deg/sec}$ を示し、 $70.3 \pm 45.4\%$ に出現した。70%の最小値は $-661.7 \pm 107.1 \text{ deg/sec}$ を示し、 $33.1 \pm 20.8\%$ に出現した。80%の最大値は $-472.8 \pm 172.6 \text{ deg/sec}$ を示し、 $80.2 \pm 39.6\%$ に出現した。80%の最小値は $-693.7 \pm 125.7 \text{ deg/sec}$ を示し、 $35.8 \pm 26.9\%$ に出現した。90%の最大値は $-506.1 \pm 151.9 \text{ deg/sec}$ を示し、 $70.3 \pm 45.4\%$ に出現した。90%の最小値は $-738.2 \pm 116.8 \text{ deg/sec}$ を示し、 $37.2 \pm 26.8\%$ に出現した。100%の最大値は $-525.4 \pm 170.3 \text{ deg/sec}$ を示し、 $90.1 \pm 29.7\%$ に出現した。100%の最小値は $-771.8 \pm 152.6 \text{ deg/sec}$ を示し、 $37.7 \pm 24.7\%$ に出現した。

前腕角速度では60%の最大値は $-8.8 \pm 2.8 \text{ deg/sec}$ を示し、 $0.0 \pm 0.0\%$ に出現した。60%の最小値は $-815.9 \pm 163.2 \text{ deg/sec}$ を示し、 $96.5 \pm 5.4\%$ に出現した。70%の最大値は $-12.6 \pm 6.7 \text{ deg/sec}$ を示し、 $0.0 \pm 0.0\%$ に出現した。70%の最小値は $-858.9 \pm 121.7 \text{ deg/sec}$ を示し、

96.4±5.7%に出現した。80%の最大値は-13.4±5.4 deg / sec を示し、0.0±0.0%に出現した。80%の最小値は-903.6±165.7 deg / sec を示し、97.5±4.6%に出現した。90%の最大値は-13.1±5.5 deg / sec を示し、0.0±0.0%に出現した。90%の最小値は-943.0±139.0 deg / sec を示し、98.1±3.9%に出現した。100%の最大値は-13.8±4.7 deg / sec を示し、0.0±0.0%に出現した。100%の最小値は-994.6±186.0 deg / sec を示し、96.8±5.3%に出現した。

手関節角速度では60%の最大値は314.3±92.2 deg / sec を示し、64.4±6.2%に出現した。60%の最小値は-10.8±61.5 deg / sec を示し、10.9±29.7%に出現した。70%の最大値は329.8±119.1 deg / sec を示し、62.9±7.9%に出現した。70%の最小値は-10.8±87.2 deg / sec を示し、10.9±29.7%に出現した。80%の最大値は345.9±98.1 deg / sec を示し、62.0±6.8%に出現した。80%の最小値は-0.1±80.9 deg / sec を示し、20.8±39.6%に出現した。90%の最大値は377.1±102.5 deg / sec を示し、63.8±7.6%に出現した。90%の最小値は-3.7±64.3 deg / sec を示し、10.9±29.7%に出現した。100%の最大値は379.5±111.9 deg / sec を示し、60.4±5.3%に出現した。100%の最小値は-8.0±70.4 deg / sec を示し、10.9±29.7%に出現した。

スイング局面では、肘関節角速度の最小値の60%試技と90%試技、100%試技間、70%試技と90%試技、100%試技間、80%試技と90%試技間で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。前腕角速度では最大値の60%試技と100%試技間と最小値の60%試技と90%試技、100%試技間で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。手関節角速度の最大値は、60%試技と80%試技、90%試技、100%試技間で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。スイング局面の関節角速度の最大値および最小値の出現した規格化時間には有意差は認められなかった。

表 8 テイクバック局面における上肢関節角速度の最大値および最小値

|           | Subjective effort                     |     |                |                |                | Significant difference |                |             |
|-----------|---------------------------------------|-----|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|-------------|
|           | 60%                                   | 70% | 80%            | 90%            | 100%           |                        |                |             |
| Take-back | Elbow angular velocity<br>(deg/sec)   | Max | 100.7 ± 40.5   | 118.9 ± 52.5   | 117.1 ± 46.7   | 123.1 ± 40.1           | 121.3 ± 48.7   | n.s.        |
|           |                                       |     | 59.6 ± 24.1%   | 67.3 ± 23.3%   | 60.6 ± 23.0%   | 72.2 ± 21.0%           | 68.6 ± 21.4%   | n.s.        |
|           |                                       | Min | -528.5 ± 131.6 | -554.4 ± 148.9 | -589.6 ± 152.8 | -623.3 ± 145.9         | -646.8 ± 151.8 | ④,⑥         |
|           |                                       |     | 100.0 ± 0.0%   | 100.0 ± 0.0%   | 100.0 ± 0.0%   | 100.0 ± 0.0%           | 100.0 ± 0.0%   | n.s         |
|           | Forearm angular velocity<br>(deg/sec) | Max | 228.7 ± 78.3   | 275.0 ± 94.3   | 268.8 ± 84.2   | 265.7 ± 75.1           | 293.7 ± 75.0   | ①,③,④,⑩     |
|           |                                       |     | 82.0 ± 19.5%   | 87.3 ± 11.9%   | 88.6 ± 17.9%   | 88.3 ± 13.7%           | 95.0 ± 0.9%    | n.s.        |
|           |                                       | Min | -37.5 ± 37.2   | -62.2 ± 64.3   | -59.2 ± 52.8   | -55.6 ± 45.1           | -67.2 ± 50.3   | n.s.        |
|           |                                       |     | 46.4 ± 35.2%   | 46.0 ± 31.7%   | 30.9 ± 30.8%   | 36.7 ± 29.5%           | 49.4 ± 33.6%   | n.s.        |
|           | Wrist angular velocity<br>(deg/sec)   | Max | 37.2 ± 23.8    | 51.4 ± 30.3    | 45.2 ± 25.4    | 42.5 ± 22.2            | 54.8 ± 23.2    | ⑩           |
|           |                                       |     | 64.0 ± 24.4%   | 65.1 ± 31.4%   | 76.3 ± 16.5%   | 70.3 ± 22.3%           | 73.3 ± 20.1%   | n.s.        |
|           |                                       | Min | -169.6 ± 66.2  | -187.7 ± 77.7  | -214.4 ± 87.9  | -227.7 ± 78.7          | -268.5 ± 68.0  | ②,③,④,⑤,⑥,⑦ |
|           |                                       |     | 95.8 ± 1.8%    | 96.1 ± 1.7%    | 95.8 ± 1.4%    | 96.1 ± 1.1%            | 95.8 ± 1.0%    | n.s.        |

Significant difference for, ①:60% vs 70%, ②:60% vs 80%, ③:60% vs 90%, ④:60% vs 100%, ⑤:70% vs 80%,

⑥:70% vs 90%, ⑦:70% vs 100%, ⑧:80% vs 90%, ⑨:80% vs 100%, ⑩:90% vs 100%

テイクバック局面における肘関節, 前腕角度, 手関節角度の角速度を示した. 各関節の回転方向について, 肘関節は屈曲, 前腕は回内, 手関節は掌屈を正方向として示した. 参考文献[90]より引用, 一部改変.

表9 スイング局面における上肢関節角速度の最大値および最小値

|       |                                       | Subjective effort |                |                |                |                | Significant difference |           |
|-------|---------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|-----------|
|       |                                       | 60%               | 70%            | 80%            | 90%            | 100%           |                        |           |
| Swing | Elbow angular velocity<br>(deg/sec)   | Max               | -474.0 ± 152.6 | -435.7 ± 145.0 | -472.8 ± 172.6 | -506.1 ± 151.9 | -525.4 ± 170.3         | n.s.      |
|       |                                       |                   | 50.5 ± 49.5%   | 70.3 ± 45.4%   | 80.2 ± 39.6%   | 70.3 ± 45.4%   | 90.1 ± 29.7%           | n.s.      |
|       |                                       | Min               | -648.1 ± 115.0 | -661.7 ± 107.1 | -693.7 ± 125.7 | -738.2 ± 116.8 | -771.8 ± 152.6         | ③,④,⑥,⑦,⑧ |
|       |                                       |                   | 42.7 ± 24.6%   | 33.1 ± 20.8%   | 35.8 ± 26.9%   | 37.2 ± 26.8%   | 37.7 ± 24.7%           | n.s.      |
|       | Forearm angular velocity<br>(deg/sec) | Max               | -8.8 ± 2.8     | -12.6 ± 6.7    | -13.4 ± 5.4    | -13.1 ± 5.5    | -13.8 ± 4.7            | ④         |
|       |                                       |                   | 0.0 ± 0.0%     | 0.0 ± 0.0%     | 0.0 ± 0.0%     | 0.0 ± 0.0%     | 0.0 ± 0.0%             | n.s.      |
|       |                                       | Min               | -815.9 ± 163.2 | -858.9 ± 121.7 | -903.6 ± 165.7 | -943.0 ± 139.0 | -994.6 ± 186.0         | ③,④       |
|       |                                       |                   | 96.5 ± 5.4%    | 96.4 ± 5.7%    | 97.5 ± 4.6%    | 98.1 ± 3.9%    | 96.8 ± 5.3%            | n.s.      |
|       | Wrist angular velocity<br>(deg/sec)   | Max               | 314.3 ± 92.2   | 329.8 ± 119.1  | 345.9 ± 98.1   | 377.1 ± 102.5  | 379.5 ± 111.9          | ②,③,④     |
|       |                                       |                   | 64.4 ± 6.2%    | 62.9 ± 7.9%    | 62.0 ± 6.8%    | 63.8 ± 7.6%    | 60.4 ± 5.3%            | n.s.      |
| Min   |                                       | -10.8 ± 61.5      | -10.8 ± 87.2   | -0.1 ± 80.9    | -3.7 ± 64.3    | -8.0 ± 70.4    | n.s.                   |           |
|       |                                       | 10.9 ± 29.7%      | 10.9 ± 29.7%   | 20.8 ± 39.6%   | 10.9 ± 29.7%   | 10.9 ± 29.7%   | n.s.                   |           |

Significant difference for, ①:60% vs 70%, ②:60% vs 80%, ③:60% vs 90%, ④:60% vs 100%, ⑤:70% vs 80%, ⑥:70% vs 90%, ⑦:70% vs 100%, ⑧:80% vs 90%, ⑨:80% vs 100%, ⑩:90% vs 100%

スイング局面における肘関節、前腕角度、手関節角度の角速度を示した。各関節の回転方向について、肘関節は屈曲、前腕は回内、手関節は掌屈を正方向として示した。参考文献[90]より引用、一部改変。

## 5. 筋電図データ

図 24 および図 25 には各局面の手関節角度と ECR, FCU の %RMS の時系列データを示した。テイクバック局面の手関節角度は徐々に負（背屈）方向に増大しており，特に規格化時間 90%から 100%で大きく背屈運動を行っていた（図 24 上段）。ECR の %RMS は規格化時間 80%以降では急激に増加しており，テイクバック局面の後半で活動量が増加していた（図 24 中段）。FCU の %RMS はテイクバック局面において，規格化時間 80%まではすべての努力度でほぼ変化がなく，規格化時間 80%以降に増加していた（図 24 下段）。スイング局面中の手関節角度は正（掌屈）方向へ増大しているが，すべての努力度で負の値（背屈位）を示した（図 25 上段）。ECR はすべての努力度で 40%前後の値を維持しており（図 25 中段），FCU の %RMS ではすべての努力度で減少していた（図 25 下段）。

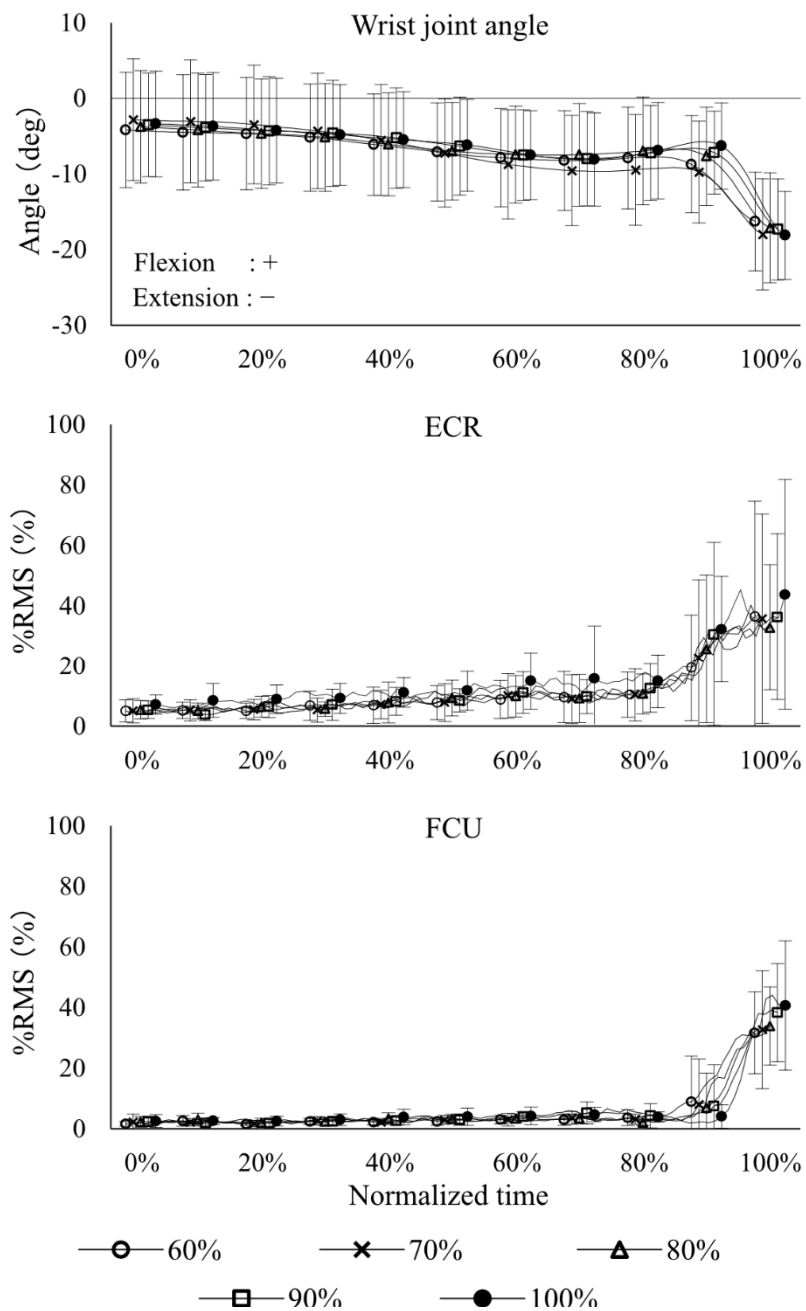


図 24 テイクバック局面の手関節掌屈-背屈運動および筋活動

手関節角度（上段）および橈側手根伸筋: ECR（中段）と尺側主根屈筋: FCU（下段）における筋活動量の時系列データを示した。筋活動量は徒手抵抗による等尺性最大随意収縮時の各筋の筋放電量を 100%として規格化した。横軸について 0%がテイクバック開始時, 100%がスイング開始時である。参考文献[90]より引用, 一部改変。

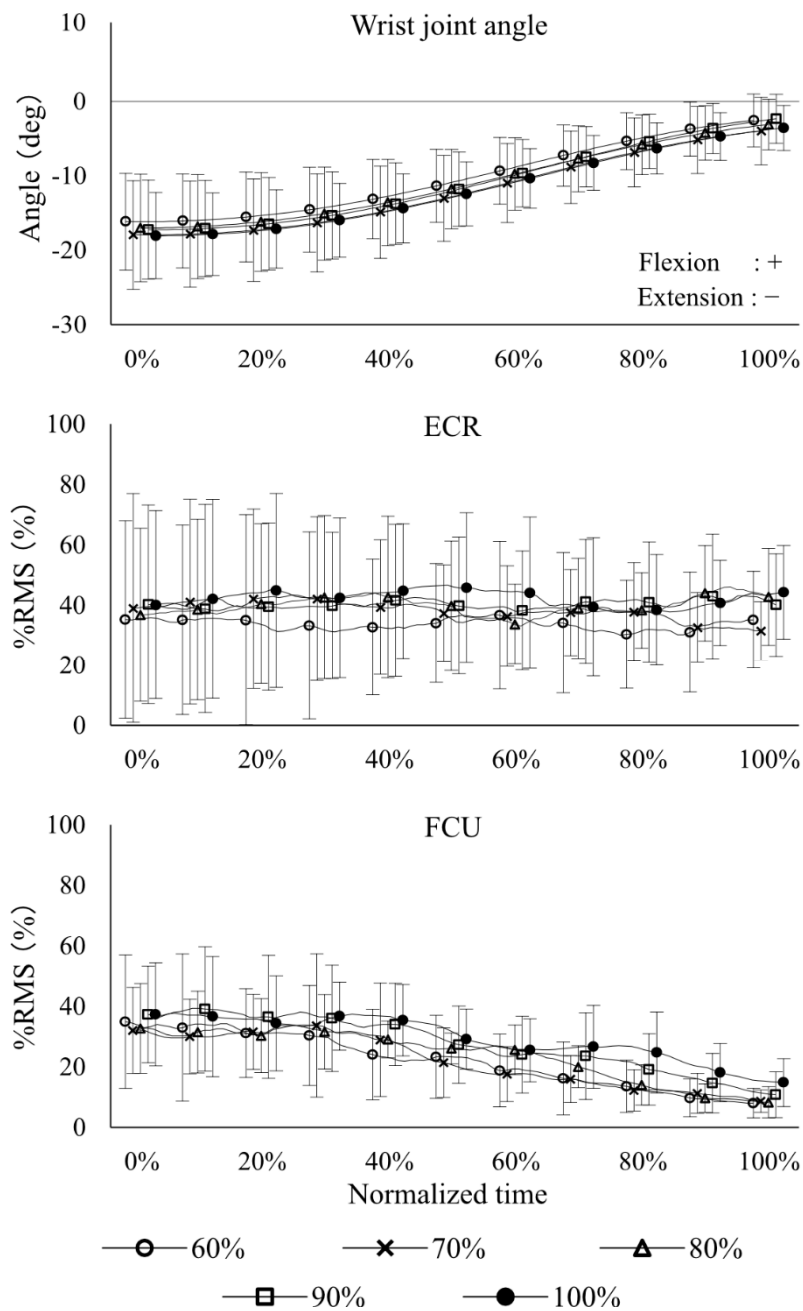


図 25 スイング局面の手関節掌屈-背屈運動および筋活動

手関節角度（上段）および橈側手根伸筋: ECR（中段）と尺側主根屈筋: FCU（下段）における筋活動量の時系列データを示した。筋活動量は徒手抵抗による等尺性最大随意収縮時の各筋の筋放電量を 100% として規格化した。横軸について 0% がスイング開始時, 100% が推定されたインパクト時である。参考文献[90]より引用, 一部改変。

図 26 にはテイクバック局面における各努力度の ECR と FCU の %RMS の平均値を示した。テイクバック局面の ECR における %MVC の平均値は 60%試技で  $10.37 \pm 6.63\%$ , 70%試技で  $10.33 \pm 6.49\%$ , 80%試技で  $11.11 \pm 5.84\%$ , 90%試技で  $11.70 \pm 5.28\%$ , 100%試技で  $14.48 \pm 7.35\%$ を示した。テイクバック局面の FCU の %MVC の平均値は 60%試技で  $4.95 \pm 3.01\%$ , 70%試技で  $4.65 \pm 2.40\%$ , 80%試技で  $4.93 \pm 2.12\%$ , 90%試技で  $5.54 \pm 2.45\%$ , 100%試技で  $6.18 \pm 1.62\%$ を示した。テイクバック局面における ECR において 60%試技, 70%試技, 80%試技と 100%試技の間で有意差が認められ, 低い努力度に対して 100%試技が有意に高い値を示した ( $p<0.05$ )。一方, FCU の %RMS はすべての努力度で有意差は認められなかった。

図 27 にはスイング局面における各努力度の ECR と FCU の %RMS の平均値を示した。スイング局面の ECR における %MVC の平均値は 60%試技で  $33.64 \pm 20.87\%$ , 70%試技で  $38.25 \pm 18.06\%$ , 80%試技で  $39.34 \pm 18.59\%$ , 90%試技で  $40.34 \pm 19.67\%$ , 100%試技で  $42.18 \pm 21.57\%$ を示した。スイング局面の FCU の %MVC の平均値は 60%試技で  $4.95 \pm 3.01\%$ , 70%試技で  $4.67 \pm 2.40\%$ , 80%試技で  $4.93 \pm 2.12\%$ , 90%試技で  $5.54 \pm 2.45\%$ , 100%試技で  $6.18 \pm 1.62\%$ を示した。スイング局面の %RMS の平均値については, ECR と FCU のどちらも努力度間で有意差は認められなかった。

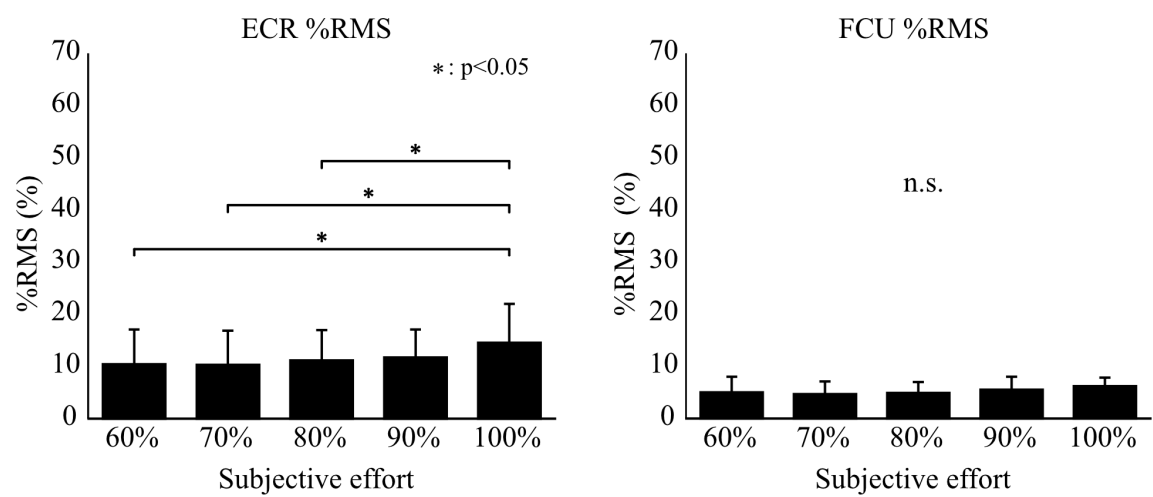


図 26 テイクバック局面における筋放電量

テイクバック局面における橈側手根伸筋: ECR と尺側主根屈筋: FCU の筋放電量の平均値を示した。筋活動量は徒手抵抗による等尺性最大随意収縮時の各筋の筋放電量を 100% として規格化した。参考文献[90]より引用。

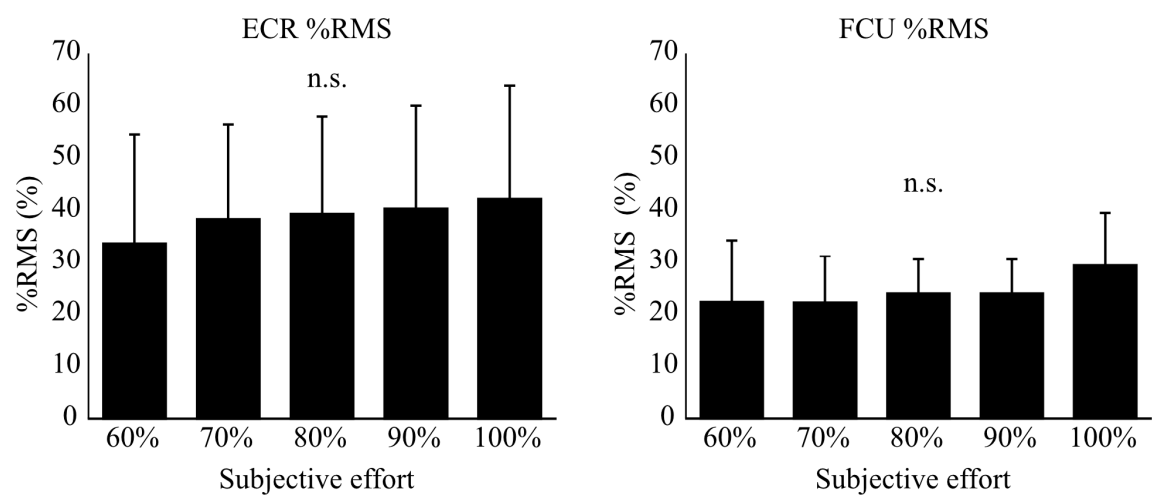


図 27 スイング局面における筋放電量

スイング局面における橈側手根伸筋: ECR と尺側主根屈筋: FCU の筋放電量の平均値を示した。筋活動量は徒手抵抗による等尺性最大随意収縮時の各筋の筋放電量を 100%として規格化した。参考文献[90]より引用。

### 3.4 考察

#### 1. 打球速度と正確性

打球の相対速度は努力度の増大にともない有意に高い値を示す傾向が見られたが、隣り合う努力度間では 60%試技と 70%試技間を除いて有意差は認められなかった。金子らは、10%の努力度間では有意差は認められなかったと報告していることから[66]、本研究の結果は先行研究を支持するものであった。

本研究では正確性に関わる指標として、指向性と再現性および平均命中位置を算出したが、すべての項目で努力度間に有意差は認められなかった。

打球速度が高い値を示しても、正確性の指標に努力度間で有意差がみられなかったことから、バドミントン選手のバックハンドドライブ動作においては、SATO は成立せず、正確性を維持したままシャトルの速度を増大させることができると考えられる。

## 2. インパクト時の関節角度および角速度に関して

バドミントンではインパクト時以外にシャトルに力を加えることができない。よってインパクト時の関節角度によって打球の正確性が決定され、関節角速度によって打球速度が決定されることが考えられる。

本研究ではインパクト時の前腕角度に関して、努力度 60% 試技が 100% 試技に対して有意に大きな値を示したが、肘関節角度と手関節角度では有意差は認められなかった。一方で、打球の正確性は努力度が增大しても維持されていた。打球の初速が異なる場合、その後のフライトも異なるためインパクト時に打球方向を調節しなければならない。仮に同じ角度で異なる速度のシャトルを打ち出したとすると、打球速度が小さいほうが水平速度は小さく、的に到達するまでの時間は長くなる。その際、同じ角度で打ち出しているのに鉛直速度も小さくなり、的に到達した時点では、打球速度が小さいほうがより低い位置で的に到達する。以上のことから、バドミントン熟練者は異なる努力度では、主にインパクト時の前腕角度を調節することによって打球の正確性を維持していると推察される。

また、インパクト時の関節角速度に関しては、前腕角速度において 60% 試技に対して 90% 試技、100% 試技が負方向（回外方向）に有意に大きな値を示した。一般に打球速度を高めるには、打撃時の打具の速度を大きくする必要があることから[103]、バドミントン競技者はインパクト時の前腕の回外角速度を大きくすることで打球速度を高めていると考えられる。

### 3. 動作中の関節角度および角速度に関して

テイクバック局面の関節角度の最大値と最小値では、有意差が認められなかった。またスイング局面では前腕角度の最小値の努力度 60%試技と 100%試技間以外では有意差は認められなかった。動作範囲は努力度間で違いがなかったことから、熟練者は同様のスイングから異なるシャトル速度のバックハンドドライブショットを行うことができていたと考えられる。桜井らは投動作に関して、動作全体の再現性が高いことが的当て技術の正確性に直結するとしている[104]。本研究ではテイクバック局面とスイング局面における関節角度の動作範囲を算出し、努力度の違いによる各関節の動作範囲にはほとんど違いがないことを示した。時系列データの評価を行っていないため、本研究の結果は先行研究の動作の再現性とは全く同一ではない。しかしながら、全ての努力度において正確性が維持されている上、各関節がスイング動作全体を通して動作範囲をほぼ一定に維持していることから、スイング動作における打球の正確性を維持する要因のひとつに動作範囲を維持することがショットの正確性に関連していると考えられる。

実際のゲーム場面について考えると、バドミントンは平均して 0.93 秒で相手のショットを返球しなければならない[105]ため、バドミントン選手は試合中に素早く判断を下さなければならない[106]。そのためラリー中には相手が打つショットを予測しておく必要があり、逆に自身がショットを打つ場合は相手にショットの種類やコースなどを予測されないようにする必要がある。バドミントン競技者は対戦相手の上肢の動きによってショットを予測している[107]。本研究の被験者は競技年数が8年以上であり実際のラリー経験も豊富であった。そのため熟練者はバックハンドドライブ動作の動作範囲を一定にすることで、対戦相手にシャトル速度を正確に予測させないようにスイングを行っていた可能性がある。

関節角速度に関して、最大値と最小値の出現タイミングでは、各局面のすべての項目で有意差が認められず、努力度の増大にともなう出現タイミングの変化はみられなかった。一方で関節角速度の最大値と最小値は多くの項目で有意差が認められた。テイクバック局面では肘関節角速度の最小値（伸展方向）、前腕角速度の最大値（回内方向）、手関節角速度の最小値（背屈

方向)で努力度が増大した際に、角速度が各方向に有意に大きな値を示した。スイング局面では肘関節角速度の最小値(伸展方向)、前腕角速度の最小値(回外方向)、手関節角速度の最大値(掌屈方向)で努力度の増大にともない角速度が各方向に有意に大きな値を示している。これらのことからバドミントン競技者は、バックハンドドライブショットの努力度を増大させた際に、各関節角速度の最大値や最小値の出現するタイミングではなく、関節角速度によってスイングを調節していると考えられる。升らはバドミントンのスマッシュ動作に関して模擬的な前腕回内動作とスマッシュショットのシャトル速度が正の相関関係にあることから、スマッシュ動作中の前腕回内角速度を高めることでシャトル速度を大きくすることができると考察している[108]。野球投球動作においてもボール相対速度が大きくなる際の動作中の角速度は高値を示すことが明らかになっており[109, 110]、関節角速度を高めることで打具やボールの速度を高められることが考えられる。本研究においても努力度の増大にともない、各局面の関節角速度が有意に高値を示す傾向がみられた。

以上のことからバドミントン競技者はバックハンドドライブ動作において、動作範囲を一定に保ち打球の正確性を維持する一方で、テイクバック局面の前腕回内角速度、手関節背屈角速度、スイング局面の肘関節伸展角速度、前腕回外角速度を増大させることで打球速度を高めていることが考えられる。

#### 4. EMG データ

筋電図データに関して、時系列データから ECR はテイクバック局面後半に活動度を高めており、その結果手関節が急激に背屈していることが分かる。ここで、手関節掌屈筋である FCU も規格化時間 90% から 100% にかけて活動度を高めており、テイクバック局面の終末にかけて FCU は伸張性収縮をしていると考えられる。また、その後の手関節掌屈運動と合わせて、伸張 - 短縮サイクル (stretch-shortening cycle : SSC) 運動を行っていると考えられる。上肢運動における SSC 運動に関して高松らや Newton et al. が、比較的軽い負荷により引き起こされる SSC 運動においても、その後の運動の角速度やパワーが増大すると報告している [111, 112]。加えてバレーボールのオーバーハンドパス時の細かな手関節動作においても SSC 運動が活用されることが報告されている [83]。以上のことから、手関節掌屈筋の SSC 運動を活用し、スイング局面中の手関節角速度を制御している可能性が考えられる。

%RMS の平均値ではテイクバック局面の ECR は努力度 100% が有意に高い値を示した。一方で FCU の %RMS の平均値では有意差が認められないことから、テイクバック局面後半の FCU ではいずれの努力度においても SSC 運動を行っていると考えられる。

## 5. 本研究の限界

本研究では、バックハンドドライブ動作中の上肢運動および筋活動を分析対象とした。試技は座位によるものとしたが、体幹の固定を行っていない。肩峰移動距離はテイクバック局面において、100%試技が60%試技と90%試技に対して有意に大きな値を示しており、努力度によって体幹の運動が多少異なっており、これが肘関節、前腕角度、手関節の運動に影響を与えた可能性は否定できない。

また、EMGデータの分析に関して、分析対象となったのはFCU、ECRの手関節掌屈および背屈に関連する2筋であった。バックハンドドライブ動作は前腕の回内、回外および肘関節の屈曲、伸展を伴う動作であることから、これらに関わる筋の関与も考えられ、今後の課題である。

### 3.5 小括

第3章では、バドミントン熟練者の行うバックハンドドライブショットで SATO が成立するか否かを決定すると同時に、その技術特性を抽出することを目的とした。バドミントン選手に指定した努力度でバックハンドドライブショットを行わせた。分析の結果以下のことが明らかになった。

1. 打球速度は努力度の増大にともない、有意に高い値を示した ( $p<0.05$ ).
2. 努力度が増大しても打球の指向性と再現性では努力度間で有意差は認められなかった.
3. テイクバック局面およびスイング局面での関節角度の最大値および最小値はほぼすべての項目で有意差が認められなかった.
4. テイクバック局面の前腕回内角速度、手関節背屈角速度、スイング局面における肘関節伸展角速度、手関節掌屈角速度において努力度の増大にともない有意に大きな値を示した ( $p<0.05$ ).
5. テイクバック局面において撓側手根伸筋の %RMS の平均値は努力度 100% 試技が 60%, 70%, 80% 試技に比べて有意に高い値を示した ( $p<0.05$ ).

以上のことからバドミントン選手の行うバックハンドドライブショットにおいては Speed Accuracy Trade-Off は成り立たず、正確性を維持したまま打球速度を増大させることができることが明らかとなった。その技術特性として、異なる努力度でもストローク全体の動作範囲を一定に保ち打球の正確性を維持する一方で、手関節の SSC 運動を合目的的に使用して関節角速度を高めることで打球速度を大きくしている可能性が示唆された。

## 第 4 章

### 総合考察

本研究はバドミントンのバックハンドドライブショットにおけるショットパフォーマンスおよびスイング動作のバイオメカニクスの検討を行い、バックハンドドライブ動作における運動制御方略を明らかにすることを目的とした。バドミントンの専門的競技経験8年以上の熟練者とバドミントンの専門的トレーニング経験を持たない未熟練者に、異なる努力度でショット速度をコントロールさせ、的あて課題を行わせた。実験において、被験者は座位で試技を行い、シャトルは一定の位置からノックマシンによって射出された。これにより、上肢のスイング技術以外の要因の影響を可能な限り少なくした。

第2章ではスキルレベルの違いによるショットパフォーマンス調節の違いを検討した。ショットパフォーマンスとして、ショットの正確性スコア、ショットスピード、ショットの打ち出し角度を算出した。その結果、熟練者は未熟練者に対して、より高い確率で的の中心に近い位置に命中させることができていた。またシャトル速度を努力度で調節させた際に、熟練者は努力度に応じてシャトル速度を調節することができていた。しかしながら未熟練者は特に60%から70%の低い努力度では、努力度が増加してもシャトル速度が低下しており、低い努力度におけるシャトル速度の調節は難しい可能性があった。

第3章では第2章で取得したデータのうち熟練者に着目し、バックハンドドライブショットにおけるSpeed Accuracy Trade-Offの成否と動作データとEMGデータを組み合わせた分析を行った。より詳細なショットの正確性として、目標として狙わせた的の中心から各試技の命中した位置までの距離を用いて、命中位置の指向性と再現性を算出した。加えてスイング開始からインパクトまでの上肢キネマティクスおよび上肢筋活動量を算出した。その結果、熟練者は努力度を調節することによりショットスピードを調節できていたが、指向性と再現性については努力度を変化させてもほぼ一定の値を保っていた。その際、ストローク中の各関節の動作範囲を一定に保っていた。一方で関節角速度を努力度に合わせて調節することで、打球速度を調節していたことが明らかになった。

第2章および第3章で得られた知見をもとに高速スイング動作であるバドミントンスイングの運動制御方略について以下のような結論が導き出せる。

#### 4.1 ショットパフォーマンスにおける熟練度の影響

本研究で観察された熟練者と未熟練者のショットパフォーマンスには違いが見られた。未熟練者はショットの正確性が低く、特に低い努力度でのシャトル速度の調節が困難である可能性が明らかになった。加えて未熟練者は、空振りやフレームショットの割合が高く、さらに約 60% の試技が的に当たらなかったことから、ショットの正確性は低いことが分かる。バドミントンは飛翔してくるシャトルや目的とするショットに合わせて動きを調節する必要がある。動作の巧みな調節にはサイバネティクス系の体力が大きくかわり[113]、中でも巧緻性は目標とする方向に上肢を移動させるスペーシング、運動の時間的調整を行うタイミング、適切な力加減に調整するグレーディングの 3 つの基本的要素から構成される[114, 115]。シャトル速度の調節は巧緻性におけるグレーディングと大きく関連すると考えられる。矢状面状の打ち出し角度についてはラケット（およびラケットを握る上肢）を適切な位置に移動し、正しいタイミングでラケットを振る必要がある。つまりスペーシング能力とタイミング能力によって矢状面上の打ち出し角度が決定される。未熟練者については 60% 努力度と 70% 努力度ではシャトル速度に違いが見られなかったものの、全体としてグレーディングを行うことができると考えられる。一方で未熟練者は、空振りなどの不正確な試技が熟練者に比べて多かったことから、スペーシング能力とタイミング能力については十分な能力を持っていなかったと考えられる。よって、未熟練者には、低い努力度でのシャトル速度の調節能力の向上とともに、ショットの精度を高めるためのスペーシング能力とタイミング能力に関するトレーニングが重要であると考えられる。

対して、熟練者は、10% の努力度の変化を、シャトルの微妙な速度変化に反映させることができた。これは先行研究と一致しており[116]、熟練者は未熟練者に比べより細かなシャトル速度の調節が可能であると示唆された。加えて、第 3 章で明らかになった通り、指向性と再現性は各努力度で一定の値を示していた。熟練者はすべての努力度で的の中心に近い位置に高い確率で命中させることができおり、熟練者のバックハンドドライブショットにおける Speed Accuracy Trade-Off は成立しないと考えられる。

ショットの正確性に直接影響する矢状面におけるシャトルの打ち出し角度(上下方向)では、熟練者と未熟練者ともに 100%努力度が 60%努力度に対してより水平に近い角度で打ち出していた。シャトルが打ち出される角度はインパクト時のラケットとそれを保持する上肢の姿勢で決定される。熟練者は実際にシャトルの打ち出し角度およびインパクト時の前腕回内角度は努力度に対応して細かく変化しており、インパクト時の前腕回内角度を調節することで、シャトルの打ち出し角度を打ち出す速度に合わせて適切に調節していたと考えられる。バドミントンと同様にラケットを使用するテニスのサーブにおいて、慣性モーメントが比較的小さい前腕の回内/回外動作によって打球方向の微調節が行われていたことが示されており[117]、バックハンドドライブ動作においてもインパクト時の前腕角度を調節することでシャトルの打ち出し角度を微調節していたと考えられる。このことから本研究における分析対象である、肘関節角度、前腕角度、手関節角度のうち、ショットの正確性に影響を与えるのはインパクト時の前腕の角度であると考えられる。

#### 4.2 スイング動作における運動連鎖

テニスサーブを対象とした研究では、上肢関節の最大角速度は、肘関節伸展、手関節掌屈、肩関節内旋の順に生じることを報告されている[118]。テニスやスカッシュでのスイングでは完全に近位から遠位にかけて角速度が最大値を迎えるわけではなく、上腕の内外旋や前腕の回内外といった長軸周りの最大角速度が遅れて出現する[119]。本研究においても、熟練者では肘関節伸展、手関節掌屈、前腕回外という順序で現れており、先行研究と同様に長軸回転である前腕回外動作が最後に行われている。スマッシュショットにおいても、インパクトの直前に前腕の回転が起こることが報告されている[20]。これらのことから、バックハンドドライブ動作中の上肢運動は他のラケット競技のスイングにおける上肢運動と同様の方略で行われていると考えられる。加えて、各関節の最大角速度の出現タイミングのばらつきが小さく、特に手関節掌屈動作のタイミングのばらつきは最も小さかった(60%:  $-0.023 \pm 0.007$  sec, 70%:  $-0.021 \pm 0.006$  sec, 80%:  $-0.019 \pm 0.007$  sec, 90%:  $-0.018 \pm 0.008$  sec, 100%:  $-0.020 \pm 0.005$  sec)。バドミントンの熟練者はショットのための運動プログラムを確立しており[19]、特に手関節の運動に関しては共通の運動パターンを持っていると考えられる。

一方で未熟練者の上肢関節における最大角速度の平均的な出現順序は、最も遠位である手関節の掌屈動作が最も早く出現していた。未熟練者では熟練者で見られた長軸回転が遅れる運動連鎖も、投球などのラケット競技以外でみられる近位から遠位にかけての運動連鎖も見られなかった。また、未熟練者は関節角速度の出現タイミングのばらつきが大きかった。これは、未熟練者では適切な運動プログラムを確立できていないことによるものと考えられる。手関節角度および手関節角速度の時系列データは熟練者と未熟練者で大きく異なっており、未熟練者の特徴として、遠位の関節の運動が熟練者に対して小さい、またはほとんど行われていないことが挙げられる。

#### 4.3 シャトル速度の制御方略の違い

第2章において、前腕角度および手関節角度の時系列データに熟練度と努力度の交互作用が認められたことから、熟練者と未熟練者のバックハンドドライブ動作における調節の違いは上肢の遠位の関節運動に現れると考えられる。一般的にバックハンドドライブショットのスイング動作において、前腕の回外動作はスイングを行う上では重要な動作であるため前腕の回外運動が主に指導されることが多い[53]。しかしながら関節角度の時系列データの分析結果から、インパクトにかけて行われる前腕回外運動および手関節掌屈運動が開始される前の時点で、スイング調節の特徴が表れると考えられる。すなわちテイクバック動作としての前腕回内運動および手関節背屈運動である。多関節で行われる運動では、運動の基盤を生成する関節と運動の目的に合わせて運動を調節する関節に分けることができる先行関節制御仮説がある[120]。野球の投球動作においては、近位関節(肩関節・肘関節)でボールの速度の調節を行い、遠位関節(手関節・手指)で正確なボールリリースを調節していることが示されている[121]。これらの先行研究に則り本研究の結果を解釈すると、熟練者は先行する運動である肘関節運動でスイングの速度を決定し、前腕回外運動と手関節掌屈運動でショットの正確性を決定していた可能性がある。一方で未熟練者は肘関節角度については熟練者と同様であったが、それ以外の関節角度および関節角速度についてはテイクバック動作中に交互作用が認められたことから、熟練者とは異なる調節を行っていた可能性がある。未熟練者の前腕角度および手関節角度については努力度間での差が未熟練者に比べて非常に小さいことから、努力度による制御がほとんど行えていなかったと考えられる。

#### 4.4 コーチングへの示唆

従来のバドミントンの指導においては、バックハンドドライブショットの指導において最も重要視されているのは前腕回外運動である[53]。熟練者の行うバックハンドドライブ動作で最も角速度の大きかったのは前腕回外運動であった。そのため指導者は前腕回外運動を強調して指導していると考えられる。しかし、テイクバック動作時に熟練度による努力度調節の特徴が見られたことから、スイング動作の調節という観点ではテイクバック動作が重要であると考えられる。第3章の結果から熟練者はテイクバック時の前腕回内運動と手関節背屈運動の角速度を調節することで達成していると考えられる。この努力度によってテイクバック動作における角速度を高めるという調節は、SSCを活用することで達成されることが考えられる。そのためテイクバック動作における急激な角速度の増大と、テイクバック動作からスムーズにスイング動作に移ることでSSCを活用した爆発的なパワーを利用したスイングができると考えられる。

一方で未熟練者においては、特に遠位の関節での運動がそもそも熟練者とは異なっていた。よって未熟練者は第一にスイングの運動パターンを学習する必要がある。その際には、まずテイクバック動作を大きく行うことが一つの目標となるだろう。そのうえで、未熟練者についてはテイクバック動作における前腕回内運動および手関節背屈運動の調節がほとんどできていなかったことから、シャトル速度の調節に関するトレーニングを別に行う必要があると考えられる。

#### 4.3 本研究の限界

本研究ではシャトルはノックマシンで射出した。実際の試合におけるパフォーマンスの調節は、「相手が打ったショットに合わせて」、「フットワークを用いて移動しつつ」、「スイングの準備」を行う必要がある。本研究では上肢の運動に着目したため、下肢での踏み込みやシャトルとの位置関係の調節に関しては明らかにできていない。相手がスマッシュなどの攻撃的なショットを打った場合、プレイヤーは素早く判断・実行しなければならず、スイング動作の難易度は高くなるはずである。そのため本研究で得られた結果が実際の競技に近い環境でも応用されているかについては今後明らかにされるべきである。前述の通り、実際の試合については様々な段階で知覚された情報をもとに様々なスキルを用いる必要がある。よって段階的に条件を統制した環境下での熟練者、未熟練者のショットパフォーマンスの調節について分析することで、未熟練者のショットパフォーマンス調節を阻害する要因について明らかにできると考えられる。

同様にショットを狙う方向の違いによる運動制御方略についても本研究では触れられていない。バドミントンやテニスなどのネット型の競技において、ショットのコースを自在にコントロールできることはゲームを進める上で必須の条件であるため、ショットの方向や異なる努力度の組み合わせについても検討することで、バックハンドドライブ動作の運動制御方略についての理解が深まるであろう。

#### 4.4 結言

本博士論文ではバドミントンのバックハンドドライブショットのショットパフォーマンスと上肢関節運動を分析することで、バックハンドドライブ動作における運動制御方略を明らかにすることを目的とした。バドミントン熟練者および未熟練者の行う努力度 60%から 100%で調節するバックハンドドライブショットのショットパフォーマンスと動作を分析した結果以下のことが明らかになった。

- 1). シャトル速度については熟練度に関係なく、概ね強弱をつけることができていたが、未熟練者に関しては低い努力度におけるシャトル速度の調節ができていなかった。
- 2). シャトルの打ち出し角度は、未熟練者が有意に上方向へ打ち出しており、上下方向の適切な打ち出し角度の調節ができていなかった。
- 3). 努力度の増大にともない、前腕回内/回外角度および手関節掌屈/背屈角度におけるテイクバック時に交互作用が認められ、熟練者と未熟練者で異なるスイング調節を行っていることが示された。
- 4). 熟練者はスイング全体の動作範囲をほぼ一定に保ちつつ関節角速度を高めることで高いシャトル速度でも正確性を維持していた。
- 5). 熟練者はテイクバック局面からスイング局面に切り替わる際に、手関節の SSC 運動を活用してスイングを行っている可能性が示唆された。

以上のことから、バックハンドドライブショットにおけるスイングの調節の特徴として、上肢における前腕および手関節の運動が重要であることが明らかになった。特に熟練者はテイクバック時の前腕回内角速度および手関節背屈角速度を高め、スイング時に用いる筋の SSC を活用していた。未熟練者はスイング中の上肢における遠位の関節運動が熟練者と大きく異なっていることが明らかとなった。加えて未熟練者は熟練者と比較して、テイクバック動作が小さく、努力度の違いによる角速度の違いも熟練者に比べて小さかった。よってバックハンドドライブショットにおけるスイングの調節は主にテイクバック時に行われており、テイクバック動作の大きさや関節角速度を調節することで行われていたことが明らかになった。

## 引用参考文献

1. Gómez, M. Á., Rivas, F., Leicht, A. S., & Buldú, J. M. (2020). Using network science to unveil badminton performance patterns. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109834>
2. Nauright, J., & Zipp, S. (2020). *Routledge Handbook of Global Sport* (1 st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315714264>
3. Hashman, J. D., & Jones, C. M. (1977). *Beginning badminton*. Arco Publishing Company.
4. Masu, Y., & Muramatsu, K. (2017). Characteristics of Center-of-gravity Sway in Middle-aged Females Playing Badminton as a Lifelong Sport. *Human Performance Measurement*, 14, 1-7. <https://doi.org/10.14859/hpm.14.1>
5. BWF. *About BWF*. Retrieved 08/12 from <https://corporate.bwfbadminton.com/about/>
6. Kaldau, N. C., Kerr, S., McCaig, S., & Holmich, P. (2021). Training and injuries among world elite junior badminton players - Identifying the problems. *Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol*, 26, 21-26. <https://doi.org/10.1016/j.asmart.2021.07.003>
7. 日高正博, 佐藤未来, 後藤幸弘. (2015). バドミントンのショット (技術) の構造化の試み. *宮崎大学教育文化学部附属教育協働開発センター研究紀要*, 23, 107-113. <http://hdl.handle.net/10458/5393>
8. Tan, D., Ting, H., & Lau, S. (2016). A review on badminton motion analysis. 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS),
9. YONEX. (2023). 世界最速のスポーツ バドミントンにおける偉業達成！ S・ランキレディ、P・タン スマッシュ初速スピードギネス世界記録™樹立. Retrieved 08/12 from <https://www.yonex.co.jp/badminton/news/2023/07/2307181000.html>
10. Lo, D., & Stark, K. (1991). Sports performance series: the badminton overhead shot. *Strength & Conditioning Journal*, 13(4), 6-15. [https://journals.lww.com/nsca-scj/Citation/1991/08000/SPORTS\\_PERFORMANCE\\_SERIES\\_\\_The\\_badminton\\_overhead.1.aspx](https://journals.lww.com/nsca-scj/Citation/1991/08000/SPORTS_PERFORMANCE_SERIES__The_badminton_overhead.1.aspx)
11. Tang, H.-p., Abe, K., & Katoh, K. (1993). Three-dimensional cinematographical analysis of the badminton forehand smash : movent of the forearm and hand. *Taiikugaku kenkyu (Japan Journal of Physical Education, Health and Sport Sciences)*, 38(4), 291-298. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.KJ00003391958>
12. Zhang, Z., Li, S., Wan, B., Visentin, P., Jiang, Q., Dyck, M., Li, H., & Shan, G. (2016). The Influence of X-Factor (Trunk Rotation) and Experience on the Quality of the Badminton Forehand Smash. *J Hum Kinet*, 53, 9-22. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0006>
13. Li, F., Li, S., Zhang, X., & Shan, G. (2023). Biomechanical Insights for Developing Evidence-Based Training Programs: Unveiling the Kinematic Secrets of the Overhead Forehand Smash in Badminton through Novice-Skilled Player Comparison. *Applied Sciences*, 13(22).

- <https://doi.org/10.3390/app132212488>
14. Koike, S., & Hashiguchi, T. (2014). Dynamic Contribution Analysis of Badminton-smash-motion with Consideration of Racket Shaft Deformation (A Model Consisted of Racket-side Upper Limb and a Racket). *Procedia Engineering*, 72, 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.135>
  15. Rusdiana, A., Subarjah, H., Imanudin, I., Kusdinar, Y., M Syahid, A., & Kurniawan, T. (2020). Effect of Fatigue on Biomechanical Variable Changes in Overhead Badminton Jump Smash. *Annals of Applied Sport Science*, 8(3), 0-0. <https://doi.org/10.29252/aassjournal.895>
  16. King, M., Towler, H., Dillon, R., & McErlain-Naylor, S. (2020). A Correlational Analysis of Shuttlecock Speed Kinematic Determinants in the Badminton Jump Smash. *Applied Sciences*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041248>
  17. Shan, C. Z., Ming, E. S. L., Rahman, H. A., & Fai, Y. C. (2015). Investigation of upper limb movement during badminton smash. 2015 10th Asian Control Conference (ASCC),
  18. Ahmed, M., & Ghai, G. D. (2020). Joints Activity and Its Role in the Upper Extremity in Badminton Strokes: A Biomechanical Perspective of Sports Education. *Humanities & Social Sciences Reviews*, 8(4), 522-529. <https://doi.org/10.18510/hssr.2020.8451>
  19. Sakurai, S., & Ohtsuki, T. (2000). Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice. *J Sports Sci*, 18(11), 901-914. <https://doi.org/10.1080/026404100750017832>
  20. Tang, H., Abe, K., Katoh, K., & Ae, M. (2013). Three-dimensional cinematographical analysis of the badminton forehand smash: movements of the forearm and hand. In *Science and Racket Sports I* (1st ed., pp. 113-118). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315024752>
  21. Pardiman, P., Sugiharto, S., & RC, A. R. (2018). The Effects of Exercise & Coordination Eyes-Hand against Drop Shot Accuracy in Badminton Athletes. *Journal of Physical Education and Sports*, 7(1), 68-72. <https://doi.org/10.15294/jpes.v7i1.23328>
  22. Zhao, X., & Li, S. (2019). A Biomechanical Analysis of Lower Limb Movement on the Backcourt Forehand Clear Stroke among Badminton Players of Different Levels. *Appl Bionics Biomech*, 2019, 7048345. <https://doi.org/10.1155/2019/7048345>
  23. 升佑二郎, 駒形純也, 藤野和樹. (2017). バドミントン競技におけるスマッシュ, クリアおよびドロップの上肢動作様式の違い. *コーチング学研究*, 30(2), 193-204.
  24. Lees, A. (2003). Science and the major racket sports: a review. *J Sports Sci*, 21(9), 707-732. <https://doi.org/10.1080/0264041031000140275>
  25. 清水幹弥, 植村隆志, 小河原慶太, 伊藤栄治, 山田洋. (2021). バドミントン競技経験者と未経験者のスマッシュ動作中の運動連鎖に関する研究. *東海大学スポーツ医科学雑誌*, 33, 7-14.
  26. Abián, P., Castanedo, A., Feng, X. Q., Sampedro, J., & Abian-Vicen, J. (2017). Notational

- comparison of men's singles badminton matches between Olympic Games in Beijing and London. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 14(1), 42-53. <https://doi.org/10.1080/24748668.2014.11868701>
27. Abian-Vicen, J., Castanedo, A., Abian, P., & Sampedro, J. (2017). Temporal and notational comparison of badminton matches between men's singles and women's singles. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 13(2), 310-320. <https://doi.org/10.1080/24748668.2013.11868650>
  28. 大熊伸江, 大谷和也. (2020). アスリートを支えるバドミントンラケット. バイオメカニズム学会誌, 44(1), 10-15. [https://doi.org/10.3951/sobim.44.1\\_10](https://doi.org/10.3951/sobim.44.1_10)
  29. 橋口友洋, 小池関也. (2013). バドミントン・スマッシュ動作のヘッドスピード獲得メカニズムにおけるラケットシャフト部のしなりの影響(スイング動作の力学). シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 2013, \_320-321\_- \_320-310\_. [https://doi.org/10.1299/jsmeshd.2013.\\_320-1\\_](https://doi.org/10.1299/jsmeshd.2013._320-1_)
  30. Paup, D. C., & Fernhall, B. (2017). *Skills, Drills & Strategies for Badminton*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315212951>
  31. Phomsoupha, M., & Laffaye, G. (2015). The science of badminton: game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Med*, 45(4), 473-495. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0287-2>
  32. 阿部一佳, & 岡本進. (1986). バドミントン (大石三四郎, 浅田隆夫, Eds. 2nd ed.).
  33. Brahms, B.-V. (2014). *Badminton handbook* (2nd ed.). Meyer & Meyer Sport.
  34. Adiluhung, R., Kristiyanto, A., & Kunta, S. (2020). The Development of backhand Drive Stroke Technique Training in Audiovisual Based for Beginner Badminton Athletes. *Quality in Sport*, 6(2), 14-27. <https://doi.org/10.12775/qs.2020.008>
  35. 日本バドミントン協会. (2001). バドミントン教本基本編 (日本バドミントン協会, Ed. 1 ed.). ベースボールマガジン社.
  36. Lee, G., & Kim, H. (2024). SHOULDER-ELBOW COORDINATION PATTERN DURING BADMINTON FOREHAND DRIVE IN TRAINED AND UNTRAINED PEOPLE. ISBS Proceedings Archive,
  37. Igarashi, K., Yamada, H., & Koganezawa, K. (2020). Difference of lower limb control by foot strike pattern during walking on irregular surface. *Journal of the Society of Biomechanisms*, 44(3), 179-186. [https://doi.org/10.3951/sobim.44.3\\_179](https://doi.org/10.3951/sobim.44.3_179)
  38. Iwami, M., & Kizuka, T. (2010). Effect of Skill Level and Joint Stiffness on Ball-Bouncing Tasks at Different Speeds. *Biomechanisms*, 20(0), 21-30. <https://doi.org/10.3951/biomechanisms.20.21>
  39. 岩見雅人, 木塚朝博. (2011). ボールバウンス課題の速度増加局面における動作特性の変容. 体育学研究, 56(2), 313-323. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.10042>
  40. Nunome, H., Inoue, K., Watanabe, K., Iga, T., & Akima, H. (2018). Dynamics of submaximal

- effort soccer instep kicking. *J Sports Sci*, 36(22), 2588-2595.  
<https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1470216>
41. Ozawa, Y., Yamada, H., Ozawa, S., Vogt, T., & Kanosue, K. (2022). Biomechanical analysis of distance adjustment in volleyball overhead pass. *Sports Biomech*, 1-18.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2125427>
  42. Molina, S. L., Bott, T. S., & Stodden, D. F. (2019). Applications of the Speed-Accuracy Trade-off and Impulse-Variability Theory for Teaching Ballistic Motor Skills. *J Mot Behav*, 51(6), 690-697. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1565526>
  43. 小池関也, 橋口友洋. (2012). ラケットシャフト部の変形を考慮したバドミントン・スマッシュ動作の動力学的分析: ラケットの慣性パラメータがスイング動作に及ぼす影響 (スイング動作). シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2012,
  44. Li, S., Zhang, Z., Wan, B., Wilde, B., & Shan, G. (2017). The relevance of body positioning and its training effect on badminton smash. *J Sports Sci*, 35(4), 310-316.  
<https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1164332>
  45. 金子元彦, 古川寛, 伊藤浩志, 村木征人. (2008). バドミントンにおける打つ強さの調節: 女子中学生の経年的変化. *コーチング学研究*, 21(2), 157-165.  
[https://doi.org/10.24776/jcoaching.21.2\\_157](https://doi.org/10.24776/jcoaching.21.2_157)
  46. Afzal, I. A., McErlain-Naylor, S. A., Hiley, M., & King, M. (2020). Spatial speed-accuracy trade-off in international badminton players performing the forehand smash. *ISBS Proceedings Archive*, 38(1), 240. <https://commons.nmu.edu/isbs/vol38/iss1/62/>
  47. Vial, S., Cochrane, J., Blazeovich, A., & Croft, J. (2018). Using the trajectory of the shuttlecock as a measure of performance accuracy in the badminton short serve. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 14(1), 91-96. <https://doi.org/10.1177/1747954118812662>
  48. Shen, L., Zhang, H., Zhu, M., Zheng, J., & Ren, Y. (2020). Measurement and performance evaluation of lob technique using aerodynamic model in badminton matches. Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019),
  49. Chen, L., Pan, Y., & Chen, Y. (2009). A study of shuttlecock's trajectory in badminton. *Journal of sports science & medicine*, 8(4), 657-662. <https://www.jssm.org/jssm-08-657.xml%3Eabst>
  50. Hay, J. G., & Yu, B. (1995). Critical characteristics of technique in throwing the discus. *J Sports Sci*, 13(2), 125-140. <https://doi.org/10.1080/02640419508732220>
  51. 城所収二, 矢内利政. (2017). 野球打撃における左右への打ち分けに寄与する2つのインパクトメカニズム: 打球速度と各メカニズムの貢献. *体育学研究*, 62(2), 475-490.  
<https://doi.org/10.5432/jjpehss.16005>
  52. Cohen, C., Texier, B. D., Quéré, D., & Clanet, C. (2015). The physics of badminton. *New Journal of Physics*, 17(6). <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/6/063001>
  53. Grice, T. (2008). *Badminton: Steps to Success* (2nd edition ed.). Human Kinetics.

54. Ramli, A. S. S., Kamalden, T. F. T., Sharir, R., Harith, H. H., Hanafi, M., Gasibat, Q., & Samsudin, S. (2021). Mechanical interaction within badminton forehand shot technique: A review paper. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 9(3), 28-37. <https://doi.org/10.7575/aiac.ijkss.v.9n.3p.28>
55. Teu, K. K., Kim, W., Tan, J., & Fuss, F. K. (2005). Using dual Euler angles for the analysis of arm movement during the badminton smash. *Sports Engineering*, 8(3), 171-178. <https://doi.org/10.1007/bf02844017>
56. Kwan, M., Andersen, M. S., Cheng, C.-L., Tang, W.-T., & Rasmussen, J. (2010). Investigation of high-speed badminton racket kinematics by motion capture. *Sports Engineering*, 13(2), 57-63. <https://doi.org/10.1007/s12283-010-0053-0>
57. 清水幹弥, 山田洋. (2024). 異なる熟練度のプレーヤーにおけるバドミントンのショットパフォーマンス特性. *体力科学*, 73(5), 193-204. <https://doi.org/10.7600/jspfsm.73.193>
58. 佐藤幸一郎, 山田洋, 内山秀一, 小河原慶太. (2021). 熟練度の違いによるサッカーボールリフティングの運動制御機構. *バイオメカニズム学会誌*, 45(2), 95-101. [https://doi.org/10.3951/sobim.45.2\\_95](https://doi.org/10.3951/sobim.45.2_95)
59. Cooke, A. (2002). Computer simulation of shuttlecock trajectories. *Sports Engineering*, 5(2), 93-105. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2687.2002.00100.x>
60. Peplow, C., McErlain-Naylor, S. A., Harland, A. R., & King, M. A. (2018). The relationships between impact location and post-impact ball speed, bat torsion, and ball direction in cricket batting. *J Sports Sci*, 36(12), 1407-1414. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1389484>
61. Peplow, C., McErlain-Naylor, S. A., Harland, A. R., Yeadon, M. R., & King, M. A. (2017). A curve fitting methodology to determine impact location, timing, and instantaneous post-impact ball velocity in cricket batting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*,
62. McErlain-Naylor, S. A., Towler, H., Afzal, I. A., Felton, P. J., Hiley, M. J., & King, M. A. (2020). Effect of racket-shuttlecock impact location on shot outcome for badminton smashes by elite players. *J Sports Sci*, 38(21), 2471-2478. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1792132>
63. 日本リハビリテーション医学会, 日本整形外科学会, 日本足の外科学会. (2021). 関節可動域表示ならびに測定法改訂について (2022 年 4 月改訂) . *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, 58(10), 1188-1200. <https://doi.org/10.2490/jjrmc.58.1188>
64. Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*,
65. Pataky, T. C. (2010). Generalized n-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping. *J Biomech*, 43(10), 1976-1982. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.008>

66. 金子元彦, 伊藤浩志, 村木征人, 古川覚. (2007). 異なる二種類の打動作における主観的努力度と客観的達成度の対応関係: 中級から初級レベルのバドミントン・プレーヤーの場合. *コーチング学研究*, 20(1), 57-70. [https://doi.org/10.24776/jcoaching.20.1\\_57](https://doi.org/10.24776/jcoaching.20.1_57)
67. Yüksel, M. F. (2019). A notional analysis in badminton sport: How the hit preferences affect the competition performance? *Journal of Athletic Performance and Nutrition*, 6(2), 29-43. <https://doi.org/10.31131/japn-2019-0002-4>
68. 道上静香, 阿江通良. (2002). 世界一流女子テニス選手のフォアハンド・グラウンド・ストロークのキネマティクスの分析—クロス打ちとストレート打ちの比較—. *バイオメカニクス研究*, 6(4), 259-269. [https://doi.org/10.32226/jjbse.2002\\_009](https://doi.org/10.32226/jjbse.2002_009)
69. 升佑二郎. (2018). バドミントン競技におけるフォア奥からのクリア, ドロップ, スマッシュによる ストレートとクロス方向への打ち分け動作の比較. *コーチング学研究*, 31(2), 219-230. [https://doi.org/10.24776/jcoaching.31.2\\_219](https://doi.org/10.24776/jcoaching.31.2_219)
70. 藤野和樹, 木内敦詞, 八田直紀, 升佑二郎, 林直樹. (2022). 大学体育バドミントン授業受講者の主観的技能課題に基づくループリックが主観的恩恵に及ぼす効果. *体育学研究*, 67(0), 143-156. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.21059>
71. Neal, R., Lumsden, R., Holland, M., & Mason, B. (2007). Body Segment Sequencing and Timing in Golf. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 2(1\_suppl), 25-36. <https://doi.org/10.1260/174795407789705497>
72. Williams, B. K., Sanders, R. H., Ryu, J. H., Graham-Smith, P., & Sinclair, P. J. (2024). Racket orientation angle differences between accurate and inaccurate squash shots, as determined by a racket embedded magnetic-inertial measurement unit. *Sports Biomech*, 23(6), 817-829. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1892175>
73. Akpinar, S., Devrilmez, E., & Kirazci, S. (2012). Coincidence-Anticipation Timing Requirements are Different in Racket Sports. *Perceptual and Motor Skills*, 115(2), 581-593. <https://doi.org/10.2466/30.25.27.Pms.115.5.581-593>
74. Muller, S., & Abernethy, B. (2012). Expert anticipatory skill in striking sports: a review and a model. *Res Q Exerc Sport*, 83(2), 175-187. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599848>
75. Chan, C. M., & Rossmann, J. S. (2012). Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory. *Sports Engineering*, 15(2), 61-71. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0086-7>
76. Ripoll, H., & Latiri, I. (1997). Effect of expertise on coincident-timing accuracy in a fast ball game. *J Sports Sci*, 15(6), 573-580. <https://doi.org/10.1080/026404197367001>
77. Dowling, B., & Fleisig, G. S. (2016). Kinematic comparison of baseball batting off of a tee among various competition levels. *Sports Biomech*, 15(3), 255-269. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1159320>
78. Robb, A. J., Fleisig, G., Wilk, K., Macrina, L., Bolt, B., & Pajaczkowski, J. (2010). Passive

- ranges of motion of the hips and their relationship with pitching biomechanics and ball velocity in professional baseball pitchers. *Am J Sports Med*, 38(12), 2487-2493. <https://doi.org/10.1177/0363546510375535>
79. Miyaguchi, K., & Demura, S. (2008). Relationships between stretch-shortening cycle performance and maximum muscle strength. *J Strength Cond Res*, 22(1), 19-24. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31815f2f94>
  80. BOBBERT, M. F., GERRITSEN, K. G. M., LITJENS, M. C. A., & VAN SOEST, A. J. (1996). Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28(11), 1402-1412. [https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/1996/11000/why\\_is\\_countermovement\\_jump\\_height\\_greater\\_than.9.aspx](https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/1996/11000/why_is_countermovement_jump_height_greater_than.9.aspx)
  81. Kubo, K., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1999). Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 87(6), 2090-2096. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.6.2090>
  82. Ishikawa, M., & Komi, P. V. (2004). Effects of different dropping intensities on fascicle and tendinous tissue behavior during stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 96(3), 848-852. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00948.2003>
  83. Ozawa, Y., Uchiyama, S., Ogawara, K., Kanosue, K., & Yamada, H. (2021). Biomechanical analysis of volleyball overhead pass. *Sports Biomech*, 20(7), 844-857. <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1609072>
  84. Fukutani, A., Kurihara, T., & Isaka, T. (2015). Influence of joint angular velocity on electrically evoked concentric force potentiation induced by stretch-shortening cycle in young adults. *Springerplus*, 4, 82. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-0875-0>
  85. Vial, S., Croft, J. L., Schroeder, R. T., Blazeovich, A. J., & Wilkie, J. C. (2020). Does the presence of an opponent affect object projection accuracy in elite athletes? A study of the landing location of the short serve in elite badminton players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 15(3), 412-417. <https://doi.org/10.1177/1747954120915670>
  86. 鬼澤範子, 北村哲, 本道慎吾, 伊佐野龍司, 城間修平, 青山清英. (2011). テニスのグラウンドストロークにおける主観的努力度と客観的達成度の対応関係に関する研究. *コーチング学研究*, 25(1), 91-98. [https://doi.org/10.24776/jcoaching.25.1\\_91](https://doi.org/10.24776/jcoaching.25.1_91)
  87. van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2006). A comparison between novices and experts of the velocity-accuracy trade-off in overarm throwing. *Percept Mot Skills*, 103(2), 503-514. <https://doi.org/10.2466/pms.103.2.503-514>
  88. Landlinger, J., Stöggl, T., Lindinger, S., Wagner, H., & Müller, E. (2012). Differences in ball speed and accuracy of tennis groundstrokes between elite and high-performance players. *European Journal of Sport Science*, 12(4), 301-308. <https://doi.org/10.1080/17461391.2011.566363>
  89. 有田圭一, 加藤達男, 渋谷公次, 吉岡照悦, 西島吉典. (1998). バドミントンのバックハン

- ド・ストロークに関する一考察-筋電図・ゴニオグラムからの検討-. 大阪教育大学紀要 第IV部門：教育科学, 46(2), 291-301. <https://doi.org/10.32287/TD00003279>
90. 清水幹弥, 山田洋, 植村隆志, 伊藤栄治, 八田有洋. (2023). Speed Accuracy Trade Off からみたバドミントンバックハンドドライブの技術特性. *バイオメカニズム*, 26, 137-147.
  91. 大道等. (1993). *動きを測る: スポーツ・サイエンスの扉*. 大修館書店.
  92. Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomech*, 6(2), 224-243. <https://doi.org/10.1080/14763140701322994>
  93. Preatoni, E., Hamill, J., Harrison, A. J., Hayes, K., Van Emmerik, R. E., Wilson, C., & Rodano, R. (2013). Movement variability and skills monitoring in sports. *Sports Biomech*, 12(2), 69-92. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700>
  94. Racic, V., Pavic, A., & Brownjohn, J. M. (2009). Number of successive cycles necessary to achieve stability of selected ground reaction force variables during continuous jumping. *J Sports Sci Med*, 8(4), 639-647.
  95. Gore, S. J., Marshall, B. M., Franklyn-Miller, A. D., Falvey, E. C., & Moran, K. A. (2016). The Number of Trials Required to Obtain a Representative Movement Pattern During a Hurdle Hop Exercise. *J Appl Biomech*, 32(3), 295-300. <https://doi.org/10.1123/jab.2015-0121>
  96. Severin, A. C., Barnes, S. G., Tackett, S. A., Barnes, C. L., & Mannen, E. M. (2021). The required number of trials for biomechanical analysis of a golf swing. *Sports Biomech*, 20(2), 238-246. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1554085>
  97. Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull*, 86(2), 420-428. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.86.2.420>
  98. Mok, K. M., Bahr, R., & Krosshaug, T. (2018). Reliability of lower limb biomechanics in two sport-specific sidestep cutting tasks. *Sports Biomech*, 17(2), 157-167. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1260766>
  99. Milner, C. E., Westlake, C. G., & Tate, J. J. (2011). Test-retest reliability of knee biomechanics during stop jump landings. *J Biomech*, 44(9), 1814-1816. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.04.005>
  100. Cicchetti, D. V. (1994). Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychological Assessment*, 6(4), 284-290. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.6.4.284>
  101. Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med*, 15(2), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
  102. 阿部一佳, 渡辺雅弘. (2005). *バドミントンの指導理論 1* (日本バドミントン指導者連盟, Ed.).

103. 平野裕一, 宮下充正. (1992). *打つ科学*. 大修館書店.
104. 桜井伸二, 高槻先歩. (1991). *投げる科学*. 大修館書店.
105. Cabello Manrique, D., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2003). Analysis of the characteristics of competitive badminton. *Br J Sports Med*, 37(1), 62-66. <https://doi.org/10.1136/bjsm.37.1.62>
106. Yuksel, M. F., & Tunc, G. T. (2018). Examining the Reaction Times of International Level Badminton Players Under 15. *Sports (Basel)*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.3390/sports6010020>
107. Alder, D., Ford, P. R., Causer, J., & Williams, A. M. (2014). The coupling between gaze behavior and opponent kinematics during anticipation of badminton shots. *Hum Mov Sci*, 37, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.07.002>
108. 升佑二郎, 角田直也. (2011). 中学バドミントン選手におけるスマッシュショット速度に関わる能力の一考察. *体育の科学= Journal of health, physical education and recreation*, 61(11), 879-884. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1520853834902027520>
109. Hirashima, M., Kudo, K., Watarai, K., & Ohtsuki, T. (2007). Control of 3D limb dynamics in unconstrained overarm throws of different speeds performed by skilled baseball players. *J Neurophysiol*, 97(1), 680-691. <https://doi.org/10.1152/jn.00348.2006>
110. 浦田達也, 田邊智, 福田厚治, 植松梓, 伊藤章. (2014). 投動作における投球速度を調節する上腕および上肢関節運動の貢献度. *生体医工学*, 52(2), 71-79. <https://doi.org/10.11239/jsmbe.52.71>
111. 高松薫, 会田宏, 岡子浩二. (1991). Isometric および eccentric な予備緊張が肘屈曲速度に及ぼす影響: Concentric な収縮中の負荷重量および動作範囲に着目して. *体育学研究*, 36(2), 127-139. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.KJ00003391806>
112. Newton, R. U., Murphy, A. J., Humphries, B. J., Wilson, G. J., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (1997). Influence of load and stretch shortening cycle on the kinematics, kinetics and muscle activation that occurs during explosive upper-body movements. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 75(4), 333-342. <https://doi.org/10.1007/s004210050169>
113. 長澤吉則, 出村慎一, 山次俊介, 島田茂. (2001). 中・高年者における筋力発揮調整能と体力との関係及びその性差. *体力科学*, 50(4), 425-435. <https://doi.org/10.7600/jspfsm1949.50.425>
114. 福意武史, 井上桂子, 常久謙太郎. (2008). 上肢巧緻性評価機器の開発: 臨床適応の検討. *川崎医療福祉学会誌*, 17(2), 389-394. <https://doi.org/10.15112/00012949>
115. 福意武史, 井上桂子, 常久謙太郎, 山形隆造. (2020). 上肢巧緻性における基礎的 3 要素の分析—速度変化による考察—. *川崎医療福祉学会誌*, 30(1-1), 165-172. <https://kwmw.repo.nii.ac.jp/records/14774>
116. Hasegawa, Y., Fujii, K., Miura, A., & Yamamoto, Y. (2017). Resolution of low-velocity control in golf putting differentiates professionals from amateurs. *J Sports Sci*, 35(13), 1239-1246.

- <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1218037> (Journal of sports sciences)
117. 村田宗紀, 藤井範久. (2014). 上肢および上腕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(2), 413-430. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.14007>
  118. Fleisig, G., Nicholls, R., Elliott, B., & Escamilla, R. (2003). Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Sports Biomech*, 2(1), 51-64. <https://doi.org/10.1080/14763140308522807> (Sports Biomechanics)
  119. Marshall, R. N., & Elliott, B. C. (2000). Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *J Sports Sci*, 18(4), 247-254. <https://doi.org/10.1080/026404100364983>
  120. Dounskaia, N. (2010). Control of human limb movements: the leading joint hypothesis and its practical applications. *Exerc Sport Sci Rev*, 38(4), 201-208. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181f45194>
  121. Hirashima, M., Ohgane, K., Kudo, K., Hase, K., & Ohtsuki, T. (2003). Counteractive relationship between the interaction torque and muscle torque at the wrist is predestined in ball-throwing. *J Neurophysiol*, 90(3), 1449-1463. <https://doi.org/10.1152/jn.00220.2003>

## 謝辞

本論文は私が東海大学大学院体育学研究科体育学専攻在学中に行った研究をまとめたものです。自身が専門としてきたバドミントンをテーマに、研究を進めることができた博士課程の3年間は、自身の人生において最も学びが多く楽しい時期であったと同時に、多くの方々の支えがなければ乗り越えることができなかった時期であったと感じています。

研究指導教員である山田洋先生には研究計画や論文執筆について細かく指導していただきました。修士課程（当時）に入学してからの5年間で研究活動以外にも多くのことを体験させていただき、そのたびに懇切丁寧に指導をしていただき、非常に感謝しております。

次に、本論文の審査委員をお引き受けいただきました内山秀一先生、八田有洋先生に深く御礼申し上げます。内山教授、八田教授には予備審査の段階から本論文を隅々までご覧いただき、論文全体の方向性や考察など、多くのご指摘をいただきました。また NTT コミュニケーション科学基礎研究所の木村聡貴先生、松下宗洋先生には追加のデータ分析、結果の記載、考察の内容に関して多くの示唆をいただき、本博士論文はもちろんのこと、今後の研究活動に関しても可能性を見出していただきました。先生方の的確なご指摘により、本論文をより充実したものにすることができました。

さらにスポーツ医科学研究所の小澤悠先生、古屋良祐先生、五十嵐健太先生にも感謝いたします。先生方にはデータ分析や考察の内容、論文執筆に至るまで、多くの場面で相談に乗っていただきました。先生方とのディスカッションの時間は本当に楽しく、多くの学びに溢れていました。本当にありがとうございました。

快く被験者を引き受けてくださった実験協力者の皆様、研究、測定を手伝っていただいたスポーツバイオメカニクス研究室所属の大学院生、学部生の皆様にもこの場を借りて感謝申し上げます。

最後に、一番近くで支えてくれた家族にも心からの感謝を示したいと思います。特に博士課程後期への進学の意思を相談した際に、「頑張れよ」と心の底から応援していただいた両親には感謝してもしきれません。両親からの精神的な支援は何よりの支えとなりました。研究が思

うように進まない苦しい時間や、実験・論文執筆に追われ夜遅くまで研究室に残る日々を過ごした博士課程でしたが、挫けそうなときにあたかな言葉をかけ、励ましてくれる両親のおかげで、何とか乗り越えることができました。今日に至るまで常に私を信じ、励ましてくれた両親に最大限の感謝の意を示し、謝辞を結びたいと思います。