

中京大学博士審査学位論文
大学院体育学研究科

フライングディスクにおけるフォアハンド遠投動作の
バイオメカニクス

Biomechanics of forehand throwing motion for distance of a flying disc

2018年3月19日学位授与
笹川 慶

目次

第1章	緒言	1
第1節	研究背景	1
第2節	先行研究のレビュー	6
第3節	本研究の目的および研究課題	12
第4節	本研究の構成	14
第2章	フライングディスクの遠投距離とリリース時の力学的変量の関係性 (研究課題1)	16
第1節	目的	16
第2節	方法	17
第3節	結果	23
第4節	考察	26
第5節	まとめ	29
第3章	フォアハンド遠投動作におけるフライングディスクの 3次元剛体力学：ディスクに作用する回転力とスピン速度の関係性 (研究課題2)	30
第1節	目的	30
第2節	方法	32
第3節	結果	39
第4節	考察	45
第5節	まとめ	47

第4章	フライングディスクのフォアハンド遠投動作における 上肢関節運動の運動学：熟練者と未熟練者の比較 (研究課題3)	48
第1節	目的	48
第2節	方法	49
第3節	結果	54
第4節	考察	57
第5節	まとめ	59
第5章	総合考察	60
第1節	未熟練者の遠投距離増加のための要因	60
第2節	指導現場への示唆	61
第3節	本研究の制約と今後の研究課題	62
第6章	総括	64
	参考・引用文献	67

第 1 章 緒言

第 1 節 研究の背景

フライングディスク（通称”フリスビー”、以下ディスクとする）とは、『空中に投げて飛距離などを競うポリエチレン製の円盤（大辞泉）』の総称であるが、これは 1930 年代前半から広くアメリカ国内でポップコーンの缶のフタや、ケーキを焼く皿を子どもや若者たちが投げ合って遊んだことが始まりとされている（Victor 1998）。その投げ方としては、一般に広く知られている“バックハンドスロー（図 1-1a）”や利き手側から投げ出す“フォアハンドスロー”（図 1-1b）の他に、野球のオーバーアームスローのように頭の上から投げ出す“ハンマースロー”など数多くの方法がある。

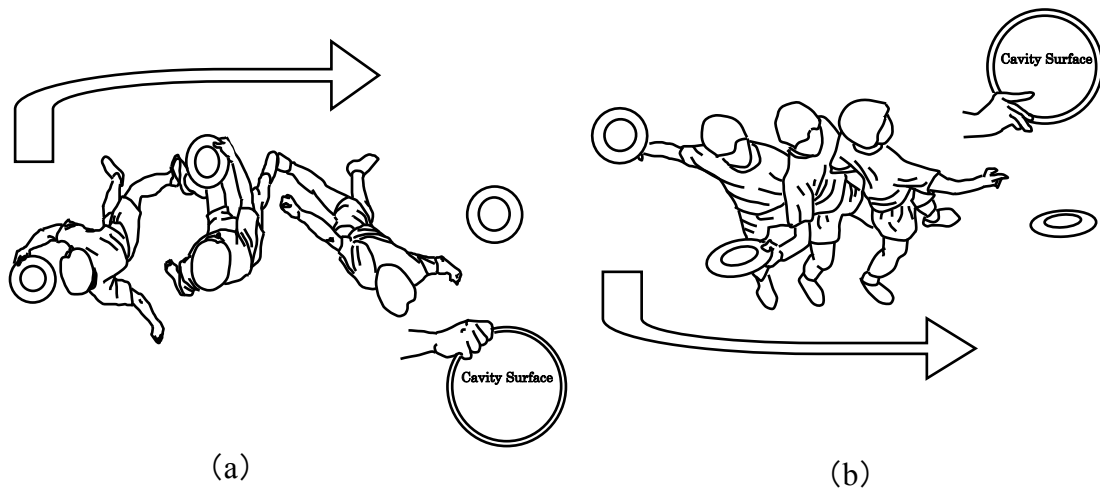


Figure 1-1. Schematic of forms and grip involved in backhand throws (left: a) and forehand throws (right: b). This schematic is shown for a right-hand dominant thrower. Forms are shown at the instants of maximum external shoulder rotation (MER) and disc release (DRL).

ディスクを用いたスポーツとしては11種目の競技が存在する（日本フライングディスク協会 2015）。その中でも“アルティメット”は1968年にアメリカ・ニュージャージー州メープルウッドにあるコロンビア高校で考案されたチームスポーツで、古くから広く行われてきた代表的な競技の一つである（日本フライングディスク協会 1992）。現在、アルティメットはディスク競技の中で最も競技人口の多い競技となり、国際オリンピック委員会（IOC）が後援する4年に1度の非オリンピック種目の国際スポーツ大会「ワールドゲームズ」の正式競技種目として、2001年の第7回大会（秋田）以降実施されている（日本フライングディスク協会 2015）。さらに、75の国と地域のフライングディスク協会を統括する世界フライングディスク連盟は、2015年にIOCの準公認団体として認定された（International Olympic Committee 2016）。そのため、アルティメットは2024年以降のオリンピック種目入りを目指すことが可能となり、競技人口の更なる増加が期待されている。

アルティメットは“走る”、“捕る”、“投げる”という3つの技術によって競技が遂行される。このスポーツは両端にゴールエリアを持つ縦100m×横37mのフィールドを使用し、2つのチーム（1チーム7人で構成される）が1枚のディスクを奪い合うチームスポーツである。スローワーがディスクを保持した状態での歩く・走るといった移動とディスクの手渡しはルール上禁止されている。そのため、パスのみによってディスクを相手ゴールエリアへ運ばなくてはならない。

ディスタンス種目では投てき方向の正確性はほとんど必要なく、投てき距離のみが問題にされる。それに対して、アルティメットではディスクを保持している攻撃側のチームはショートパスとロングパスを様々な状況で正確に使い分ける。これらを組み合わせることで相手ディフェンダーを巧みに欺き、相手ゴールエリアへディスクを近づけていく。中でもロングパスは一度のパスで得点

に繋がる可能性があり、広いコートで効率良く得点を重ねるための重要な手段として使われる。したがって、アルティメットではディスクを正確に、かつ素早く投げることに加えて、遠くへ投げるという能力を習得することが不可欠である。

上述した多様な投てき技術は、味方レシーバーと相手ディフェンダーの位置や相手が仕掛けてくるディフェンスの種類、また風の強さや風向きなどの様々な環境に合わせて使い分けられる。その中でも、利き手側から投げ出すフォアハンドスローは、最もよく使用される基本技術のひとつである。熟練者によるフォアハンドスローは遠投距離を最も大きくすることが出来るバックハンドスローに近い距離を投げる事が可能である。しかも、他のどの投てき動作よりも、素早い動作で正確にディスクを投げる事ができる。そのため、フォアハンドスローは試合の勝敗を左右する重要な技術と考えられている。しかし、競技初心者はもちろん、競技経験の長い選手でも、フォアハンドスローによってディスクを遠くへ飛ばすことが出来ない選手は多い。そのため、フォアハンドスローはバックハンドスローに比べて難しいテクニックとされている (Danna & Poynter 1979)。

ディスクをより遠くへ飛ばすために、数多くの指導書や啓蒙書ではディスクへ強いスピンを与えることを強調している。スピンの増加は揚力を増加させる直接的な要因ではないが、スピンしていない状態ではその姿勢の安定性が著しく低下し、ディスクはすぐに地面へ落ちてしまう (Potts & Crowther 2002)。そのため、ディスクのスピンは安定した飛行について力学的に重要な役割を持っている。また、ディスクはその平面的な形状により、投てき方向に対する姿勢の角度によって空気抵抗が大きく異なる。そのため、リリース時にその姿勢の変化を最小限に抑えることも重要であることは容易に想像される。しかし、ディス

クを対象にした先行研究のほとんどは風洞実験やコンピューターシミュレーションによるもので、実際に投げ出されたディスクやその投動作に着目した研究は非常に少ない。このようにディスクの-spin速度の増加やその姿勢を維持することの重要性は認識されているものの、それらの生成メカニズムについて、バイオメカニクスの観点から検討した研究は見当たらない。

多くの指導書においてフォアハンドスローの動作は、「手のひらを上方へ向けた状態を保ちながら手関節の尺屈動作によって投げ出すこと」(Stancil 1979 p.48)、「リリースは手首を鋭くまわし、スナップを効かせる」(日本フライングディスク協会 1992, pp.32-33)、「手首だけでディスクを投げる。手のひらを最初から最後まで常に上向きし、ボールを投げるように手首をタテにスナップするのではなく横に動かしてディスクを投げる」(Danna & Poynter 1979, p.40)などと記述されている。また、指導の現場では「手首で投げる」、「スナップを効かせて投げる」と表現されることが多い。

指導時におけるフォアハンドスローの説明は、主に手関節の運動に焦点が当てられている。また、それらの表現は手関節の運動やその回りの筋力のみを使って投げる動作を彷彿させる。しかし、フォアハンドスローについてのバイオメカニクスの研究は見当たらない。したがって、フォアハンドスローの指導方法は非常に乏しい。また、上記の表現は選手や指導者の経験に基づいて作られたもので、熟練者の動作を正確に表しているかは疑問である。

バイオメカニクスは運動を定量的に記述し、またその運動の原因を究明することが可能である。そのため、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作をバイオメカニクスの観点から研究することは、熟練者の卓越した投動作の特徴を明確にすることが可能である。さらに、未熟練者の遠投距離増加のための要因を客観的に探し出し、それらに優先順位をつけることも可能である。したがって、

フォアハンド遠投動作の特徴をバイオメカニクスの的に明らかにすることは、初心者やフォアハンド遠投動作を不得意とする選手の課題を明確にし、指導方法の構築と改善に寄与するものと考えられる。

第2節 先行研究のレビュー

これまで、ディスクの飛行特性は流体力学の側面から幅広く調査されてきた。また、投てき方法については様々な指導書で説明されてきた。ここでは、ディスクに関する先行研究と指導書、および他の競技種目における投げ動作の先行研究を“ディスクの飛行特性に関する研究”、“遠投距離に重要なリリース時の力学的変量に関する研究”、“ディスクのスピン速度増加に関する研究”および“フォアハンド遠投動作に関する研究”に分けて再考する。これによって、ディスクの遠投距離増加の観点から、これまで行われてきたディスク研究の問題点を整理し、本研究の課題と研究手法を明確にする。

第1項 ディスクの飛行特性に関する研究

これまでディスクの飛行特性は、小型のトンネル内にディスクを固定し、そこに人工的に風を流すことで、空気からディスクに作用する力を計測する風洞実験によって調査されてきた。Stilley & Carstens (1972)はこの実験方法を用いて、スピンしていないディスクに作用する揚力と抗力を計測している。安田 (1999)は、様々な飛行速度とスピン速度、および迎え角に設定されたディスクに作用する、揚力と抗力を計測している。Potts & Crowther (2002)は、揚力と抗力の測定に加え、進行方向のエッジを上下方向に回転させるピッチングモーメントを実測している。Nakamura & Fukamachi (1991)は煙を利用した風洞実験によってディスク周辺の空気の流れを可視化している。

コンピューターシミュレーションもまた、ディスクの飛行特性を明らかにするために使用されてきた。Yamashita & Kawamura (2007)は飛行中のディスク周辺の空気の流れをコンピューターシミュレーションによって再現している。Hubbard & Hummel (2000)とHummel & Hubbard (2002)はコンピューターシミュレーションを用いて、ディスクの飛行特性を明らかにしている。

ミレーションによってディスクに作用する力とその姿勢や移動軌跡を3次元的に推定した。彼らは3次元画像解析法を用いて、実際に人がバックハンドスローで投げ出したディスクの飛行軌跡やリリース時の力学的変量（初速度、姿勢の角度とその角速度）を算出し、それらを用いてディスク飛行の数理モデルの構築を試みた。しかし、この研究で実測された力学的変量はバックハンドスローによって投げ出された18mという短い飛行によるもので、長距離飛行のための数理モデルについては検証されていない。

以上のように、これまでのディスクに関する研究は、風洞実験やコンピューターシミュレーションによってディスクの飛行特性を明らかにしたものが多い。しかし、実際に人がフォアハンドスローで投げ出したディスクに着目した研究は見当たらない。したがって、実際にフォアハンド遠投動作によって投げ出されたディスク、およびその投動作に着目し、科学的な観点から研究が行われるべきであろう。

第2項 遠投距離に重要なリリース時の力学的変量に関する研究

空気から投射体に作用する力が無視できる場合、遠投距離はリリースの瞬間の速度と投射角、および投射高という力学的変量によって決定される。これまで多くの研究者が陸上競技の投てき種目やボール投げの遠投距離とリリース時の力学的変量の関係性について、バイオメカニクスの観点から報告している。Komi & Mero (1985) と Mero et al. (1994) は世界トップレベルのやり投げ選手の投てき距離とリリース時の力学的変量の関係性を分析した。その結果、初速度は投てき距離を決定する主要因であることを報告している。また、ハンマー投げや砲丸投げ、円盤投げの場合でも投てき距離と初速度に非常に強い相関関係が確認されている (Dapena 1985、Dessureault 1978、Dyson 1972)。このよう

に、空気力の影響下であっても陸上競技の投てき種目や球技の遠投の場合、初速度が遠投距離に大きな影響を与える（桜井 1992）。

第1項で述べたように、実際のフォアハンド遠投動作によって投げ出されたディスクに着目した研究は見当たらない。ディスクは上面が平らで裏面が空洞という上下非対称な円板状であるため、その特徴的な形状により、他の投射体とは異なった飛行特性を有することが考えられる。つまり、ディスクにおいても他の投てき物と同様に、初速度が遠投距離に最も大きな影響を与えるとは考えにくい。しかし、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性について明らかにされていない（**問題点1**）。したがって、指導時の着眼点を明確にするために、まずは、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作によって実際に投げ出されたディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性を、バイオメカニクスの観点から明らかにするべきであろう。

第3項 ディスクのスピンの速度増加に関する研究

これまでディスクは流体力学の観点からその飛行特性について研究されてきたことを前項において説明した。その中でも、安田（1999）は、ディスクのスピンは揚力を増加させる直接的な要因ではないが、姿勢を安定させるという力学的に重要な役割を持っていると報告している。Potts & Crowther（2002）は、スピンしていない状態ではピッチングモーメントの影響によって、ディスクは進行方向のエッジが下向き方向に回転し、それに伴う空気抵抗の増加によって地面に落下するが、スピンはピッチングモーメントの影響を小さくする効果を持つことを報告している。

ディスクの指導書では、フォアハンドスローの投てき距離を増加させるために「強い回転をディスクに与える」（日本フライングディスク協会 1992, pp.32-33）

「ディスクにうまく回転をかける」（日本フライングディスク協会 2003, p.16）と説明されている。また、指導の現場においても、「スピンをかける」という表現が頻繁に使用されている。

以上のように、スピン速度を増加させることは指導者や選手にとって大きな関心事であり、流体力学という科学的な観点からもその役割が重要視されている。しかし、フォアハンド遠投動作ではどのような力の作用によってディスクのスピン速度を増加させているのか、つまり、スピン速度増加のための力学的メカニズムは明らかにされていない（問題点2）。したがって、リリース時のディスクの運動を明らかにした次は、その運動の原因である手・指先からディスクに作用する力を定量化し、両群のフォアハンド遠投動作における力学的な違いを明らかにするべきであろう。

第4項 フォアハンド遠投動作に関する研究

フォアハンドスローの場合、競技初心者はもちろん、競技経験の長い選手でもディスクを遠くへ飛ばすことが出来ない選手は多い。そのため、フォアハンドスローはバックハンドスローに比べて難しいテクニックとされている（Danna & Poynter 1979）。指導の現場において、フォアハンドスローは「手首で投げる」、「スナップを効かせて投げる」という表現によって指導されることが多い。指導書では、「手掌を上方へ向けた状態を保ちながら手関節の尺屈動作によって投げ出す」（Stancil1975, p.48）、「リリースは手首を鋭くまわし、スナップを効かせる」（日本フライングディスク協会 1992, pp.32-33）、「手首だけでディスクを投げる。手のひらを最初から最後まで常に上向きし、ボールを投げるように手首をタテにスナップするのではなく横に動かしてディスクを投げる」（Danna &

Poynter1979, p.40)、「手掌を空に向けて、スナップでディスクをリリースする」(Baccarini & Booth 2008, p14) と説明されている。

上記のこれまで使用されてきた指導上の表現は、選手や指導者の経験に基づいて作られたもので、熟練者の動作を表したものとして認識されている。また、それらは主として手関節の運動に焦点が当てられており、投動作を伴う他の競技に比べて指導方法が乏しく、手関節の運動やその回りの筋力のみを使って投げる動作を彷彿させる。さらに、投動作における上肢の運動は非常に高速となるため視覚では捉えることが難しい。つまり、これまで未熟練者の指導時に使用されてきた表現が、フォアハンド遠投動作を正確に説明できているかは疑問である。しかし、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における投てき腕の各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにした研究は見当たらない (**問題点 3**)。そこで、ディスクの運動とその原因となるディスクに作用する力を明らかにした次は、それらを作り出す投てき腕の運動に着目する。したがって、指導時の着眼点をより明確にするために、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における投てき腕の各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにされるべきだろう。

第 5 項 フォアハンド遠投動作における既存研究の問題点

ここまで示した先行研究のレビューより、ディスクのフォアハンド遠投動作に関する研究の問題点は、以下のようにまとめられる。

- (1) 熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性については明らかにされていない (**問題点 1**)。
- (2) 熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作におけるスピン速度増加のための力学的な仕組みは明らかにされていない (**問題点 2**)。
- (3) 熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における投てき腕の各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにした研究は見当たらない (**問題点 3**)

第 3 節 本研究の目的および研究課題

第 1 項 本研究の目的

本研究の目的は、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作をバイオメカニクスの観点から比較し、両群のフォアハンド遠投動作における運動学的・運動力学的な違いを明らかにすることである。

第 2 項 本研究の課題

上記の目的を達成するため、本研究では以下の 3 つの研究課題を設定した。

【研究課題 1】

熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性について明らかにする。

【研究課題 2】

熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作におけるスピン速度増加のための力学的な仕組みを明らかにする。

【研究課題 3】

熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における投てき腕の各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにする。

投射体の遠投距離はリリースの瞬間の力学的変数によって決定される。そのため、未熟練者の遠投距離増加ためには、リリース時のディスクの様々な力学

的変量のうち、どの変量が遠投距離と強く関係しているのか明らかにする必要がある。そこで研究課題1では、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作における、ディスクの初速度、スピン速度、上・下向き角、左・右傾き角、迎え角、上・下向き角および左・右傾き角の角速度というリリース時の力学的変量と遠投距離の間にある関係性を評価する。

スピン速度を増加させることは指導者や選手にとって大きな関心事であり、流体力学という科学的な観点からもその役割が重要視されている。しかし、フォアハンド遠投動作におけるスピン速度増加のための、力学的メカニズムは明らかにされていない。また、リリース時のディスクの運動は、投てき腕の手・指からディスクに作用する力によって作り出される。そこで、研究課題2では、投てき腕の肩の最大外旋からディスクがリリースされるまでのディスク加速局面に着目し、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作におけるスピン速度増加のための力学的な仕組みを明らかにする。

ディスクの運動やディスクに作用した力は、投てき者の身体運動によって作り出された結果である。よってディスクの運動を分析するのみでは未熟練者の遠投距離の増加を促すためには不十分である。そこで、研究課題3では、投てき腕の肩の最大外旋からディスクがリリースされるまでのディスク加速局面に着目し、熟練者群と未熟練者群の投てき腕における7つの関節角度の変化を比較することで、両群の運動学的な違いを明らかにする。

第 4 節 本研究の構成

本論文は、以下の 2 編の論文に基づいて構成されている。

1. Kei Sasakawa, Shinji Sakurai. (2008). Biomechanical analysis of sidearm throwing motion for distance of a flying disc: A comparison of skilled and unskilled Ultimate players. *Sports Biomechanics*, Vol. 7, pp. 311-321. (主として第 4 章を構成)
2. Kei Sasakawa, Koji Umegaki, Shinji Sakurai. (2018). Biomechanics of increased spin velocity of flying discs during forehand throws by skilled and unskilled throwers, *Journal of Sports Sciences*, Vol. 36, pp. 843-851.

DOI:[10.1080/02640414.2017.1344778](https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1344778)

受理日：2017 年 6 月 15 日、公表日（オンライン）：2017 年 6 月 20 日

(主として第 2 章および第 3 章を構成)

第 1 章「緒言」では、前述したとおりディスクの飛行特性の究明に焦点を当てた流体力学における先行研究と様々な投射体の投げ動作のバイオメカニクスにおける先行研究、およびディスクの投動作の指導書をレビューすることにより、フォアハンド遠投動作の指導上の問題点と研究目的を明らかにした。第 2 章と第 3 章および第 4 章では、第 1 章で得られた 3 つの研究課題に取り組み、その成果をそれぞれの章で示した。第 2 章「フライングディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性」（研究課題 1）は、上記の論文 2 (Sasakawa et al. 2018) および笹川と桜井 (2011) の実験に参加した被験者の分析結果を組み合わせることによって構成されたものである。第 3 章「フォアハンド遠

投動作におけるフライングディスクの 3 次元剛体力学：ディスクに作用する回転力とスピン速度の関係性」(研究課題 2) は、主として上記の論文 2 (Sasakawa et al. 2018) によって構成されている。第 4 章「フライングディスクのフォアハンド遠投動作における上肢関節運動の運動学：熟練者と未熟練者の比較」(研究課題 3) は、主として上記の論文 1 (Sasakawa & Sakurai 2008) によって構成されている。第 5 章「総合考察」では、上記の 3 つの研究課題に取り組むことによって得られた結果を総合的に考察し、未熟練者における遠投距離増加のための有用な知見を示した。第 6 章「総括」では、本研究によって得られた知見がディスクスポーツ、さらには体育学およびスポーツ科学の領域の更なる発展に有益な情報となることを示唆した。本研究は以上の内容によって構成されたものである。

第2章 フライングディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性

(研究課題1)

第1節 目的

第1章で前述したように、これまでディスクの飛行特性は流体力学の側面から調査されてきた。そのほとんどは風洞実験やコンピューターシミュレーションによって空気からディスクに作用する力を測定または推定し、検討したものである。そのため、実際にフォアハンド遠投動作によって投射されたディスクに着目した研究は見当たらない。また、陸上競技の投てき種目や野球のようなボール投げの場合、投射体の遠投距離はリリース時の初速や姿勢の角度などの力学的変数によって決定される。その中でも、遠投距離を決定する主要因は初速度であることが、数多くのバイオメカニクス研究によって明らかにされてきた。しかし、ディスクのフォアハンド遠投動作では、リリース時のどのような力学的変数がディスクの遠投距離に大きく影響を与えているのか明らかにされていない。フォアハンド遠投動作によるディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性を明らかにすることができれば、指導のための着眼点に優先順位をつけることが可能となり、指導方法の改善に役立つと考えられる。

本研究の目的は、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性について明らかにすることである。

第2節 方法

第1項 対象

本研究は、熟練者群として全日本アルティメット選手権大会5位および6位(測定当時)のチームに所属する選手27名(年齢 21.5 ± 2.7 歳;体重 65.2 ± 5.2 kg;身長 171.3 ± 5.6 cm)(競技歴:3~4年)、未熟練者群としてディスクの競技経験の無い大学生20名(年齢 22.2 ± 1.9 歳;体重 66.9 ± 8.9 kg;身長 172.0 ± 7.2 cm)を対象とした。全ての被験者は右利きであった。実験に際して、各被験者には予め実験の目的及び試技内容の説明を行い、協力への同意を得た上で実験を行った。なお、本研究は中京大学大学院体育学研究科倫理審査委員会の承認を得て行われた。

第2項 実験環境の設定

各被験者にはアルティメットの公式ディスク(質量 175g;直径 27.3cm; Ultrastar, Discraft, Michigan)を助走なしで、できる限り遠くへ投げるように指示した。十分なウォーミングアップ後、それぞれの被験者においてフォアハンドスローを10試技行なった。実験は風の影響を無くすために、縦72m×横32mの体育館で行なった。リリース時のディスクの各力学的変量を算出するため、ディスクの上面に半球型の反射マーカー(直径:14mm)を3つ取り付けた(重量:約合計1g)。3つのマーカーのうちひとつはディスクの中心(点C)に、他のふたつ(点AとB)は3つのマーカーが一直線に並ばないように取り付けられた(図2-1)。また、各被験者の投てき腕の第三指末節骨遠位端(FT)に反射マーカーを装着した。FTは直径7mmの反射マーカーを使用した。各マーカーの3次元座標は光学式3次元自動動作分析装置(Oxford Metrics Inc., Oxford, UK、VICON MX)を用いて計測された。記録に使用された10台の専用カメラは、リリ

ース前後のディスクと投てき腕の運動を撮影できるよう投てき者を囲むように設置され、サンプリング周波数は一度目の実験では 600Hz、二度目の実験では 500Hz に設定された。右手系の基準座標系 (R_G) は 10 台のカメラの中央を原点とし、基準座標系のベクトル Y_G と Z_G はそれぞれ投てき方向と鉛直方向とし、それらに直行するベクトルを X_G とした。遠投距離は各被験者の右足つま先からディスクが地面に接触した地点の直線距離とし、巻き尺を用いて測定した。

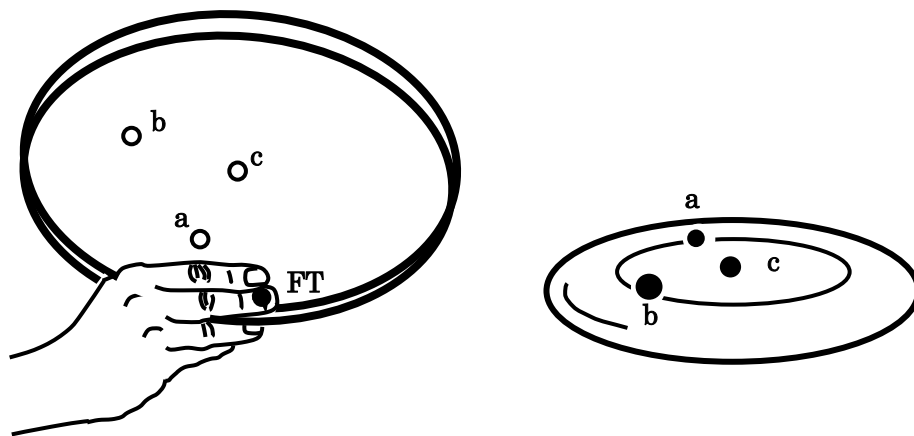


Figure 2-1. Reflective markers (black circles) attached to the dorsal aspect of the distal third phalanx of the throwing hand (FT), disc centre (c), and the other 2 (a, b).

第 3 項 平滑化処理

最適遮断周波数 (25~31Hz) はそれぞれ計測された位置データごとに Yu et al. (1999) の方法を用いて決定され、4 次のバターワース型ローパスデジタルフィルターを用いて計測点の 3 次元座標を平滑化した(Winter 1990)。

第 4 項 リリース時のディスクの力学的変量の算出

図 2-2 は基準座標系 (R_G) の各軸の X_G 、 Y_G 、 Z_G と、ディスク上に設定した移動座標系 (R_{disc}) を表している。ディスクの並進速度はディスク中心点 c の速度

とした。ディスクの姿勢角を算出するためにディスクの中心点 c を原点とした移動座標系 R_{disc} を以下のように定義した。

$$Z_{disc} = ca \times cb \quad (2.1)$$

$$X_{disc} = v \times Z_{disc} \quad (2.2)$$

$$Y_{disc} = Z_{disc} \times X_{disc} \quad (2.3)$$

なお、(2.1) 式の ca と cb はディスク中心点の c からディスク上に位置する点 a と点 b にそれぞれ向かうベクトル、(2.2) 式の v は点 c の速度ベクトルを表している。

ディスクの Pitch 軸まわりの角度の上・下向き角、Roll 軸まわりの角度の左・右傾き角およびディスク中心点 c の移動軌跡とディスクの平面との間の角度の迎え角は以下の方法を用いて算出された。

$$\text{左・右傾き角度} = \cos^{-1} \left(\frac{X_{disc} \cdot X_G}{|X_{disc}| \cdot |X_G|} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{上・下向き角度} = \cos^{-1} \left(\frac{Y_{disc} \cdot Y_G}{|Y_{disc}| \cdot |Y_G|} \right) \quad (2.5)$$

$$\text{迎え角} = \cos^{-1} \left(\frac{v \cdot Y_{disc}}{|v| \cdot |Y_{disc}|} \right) \quad (2.6)$$

図 2-2 に(2.4) (2.5) (2.6) 式で算出された、ディスクの姿勢角についての角度定義を示した。上・下向き角は水平面に対してディスクの進行方向の先端が上方に傾いた場合を正の角度として表した。右傾き角は、水平面に対し、進行方向を向いてディスク右側の先端が、下方に傾いた場合を正の角度として表した。迎え角はディスクの速度ベクトルに対して、上・下向き方向の姿勢が上向きになった姿勢を正の値とし、下向きになった姿勢を負の値として表した。なお、図 2-2 において、上向き角は Nose up、下向き角を Nose down、右傾き角を Bank right、左傾き角を Bank left、迎え角を Angle of attack と表した。

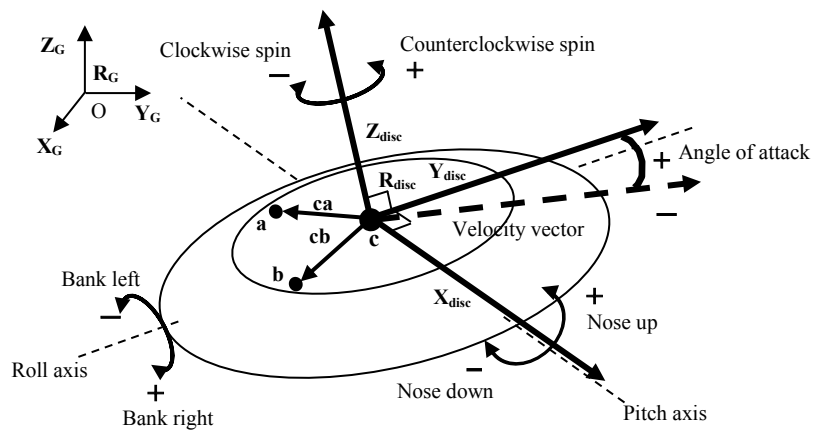


Figure 2-2. Definitions of the disc conditions (R_{disc}) and attitude angles.

X_{disc} 、 Y_{disc} 、 Z_{disc} ベクトルの単位ベクトルをそれぞれ i_{disc} 、 j_{disc} 、 k_{disc} とし、ディスク移動座標系 (R_{disc}) の X_{disc} 軸まわりの上・下向き角速度($\omega_{pitch/R_{disc}}$)および Y_{disc} 軸まわりの左・右傾き角速度($\omega_{roll/R_{disc}}$)を以下の計算式によって算出した。

$$\omega_{Pitch/R_{disc}} = k_{disc} \cdot \frac{d}{dt} j_{disc} \quad (2.7)$$

$$\omega_{\text{Roll/Rdisc}} = \dot{\mathbf{i}}_{\text{disc}} \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{k}_{\text{disc}} \quad (2.8)$$

また、ディスクのスピンの速度 (ω_{Spin}) を算出するためにディスクの中心点 \mathbf{c} を原点とした移動座標系 $\mathbf{R}_{\text{disc-spin}}$ を以下のように定義した。

$$\mathbf{Z}_{\text{disc-spin}} = \mathbf{c}_a \times \mathbf{c}_b \quad (2.9)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{disc-spin}} = \mathbf{Z}_{\text{disc}} \times \mathbf{c}_b \quad (2.10)$$

$$\mathbf{X}_{\text{disc-spin}} = \mathbf{Y}_{\text{disc}} \times \mathbf{Z}_{\text{disc}} \quad (2.11)$$

$\mathbf{X}_{\text{disc-spin}}$ 、 $\mathbf{Y}_{\text{disc-spin}}$ 、 $\mathbf{Z}_{\text{disc-spin}}$ ベクトルの単位ベクトルをそれぞれ $\dot{\mathbf{i}}_{\text{disc-spin}}$ 、 $\dot{\mathbf{j}}_{\text{disc-spin}}$ 、 $\dot{\mathbf{k}}_{\text{disc-spin}}$ とし、ディスク移動座標系 ($\mathbf{R}_{\text{disc-spin}}$) の $\mathbf{Z}_{\text{disc-spin}}$ 軸まわりの角速度 ($\omega_{\text{Spin/Rdisc-spin}}$) を以下の計算式によって算出した。

$$\omega_{\text{Spin/Rdisc-spin}} = \dot{\mathbf{j}}_{\text{disc-spin}} \cdot \frac{d}{dt} \dot{\mathbf{i}}_{\text{disc-spin}} \quad (2.12)$$

なお、本研究ではディスクの中心から中指先端 (FT) の距離がディスクの半径の 0.137m より大きくなった瞬間をディスクリリース (DRL) と定義し、その瞬間における各力学的変量を抽出した。

第 5 項 統計分析

本研究は SPSS ソフトウェアバージョン 22 (SPSS, Chicago, IL, USA) を用いて全ての変数の正規性を確認した。その後、遠投距離と各力学的変量の間

計学的な関係性の検定、および両群間における各変量の平均値の差の検定は、同様のソフトウェアを使用してそれぞれピアソンの積率相関係数と独立二群のt検定を使用した。なお、これらの方法における有意水準はそれぞれ5%未満とした。

第3節 結果

表 2-1 は各力学的変量（平均値±標準偏差）における両群間の差の検定結果を表している。熟練者群と未熟練者群の遠投距離はそれぞれ 51.9m と 26.2m、初速度は 22.4m/s と 18.0m/s、スピン速度は 11.5rps と 8.3rps であった。遠投距離とスピン速度、および初速度にはそれぞれ約 2 倍と 1.4 倍、約 1.2 倍の差が熟練者群と未熟練者群の間に認められた。上・下向き角速度と右・左傾き角速度は熟練者群に比べ未熟練者群で有意に大きい値が確認された。上向き角と迎え角は両群間でそれぞれ有意な差が認められなかった。

Table 2-1. Statistical comparison of kinematic variables of disc between groups at release.

Variables	DRL	
	Skilled (n=27)	Unskilled (n=20)
Throwing Distance (m)	51.9±4.1*	26.2±8.1
Linear Velocity (m/s)	22.4±1.3*	18.0±1.6
CCW (+) / CW (-) Spin Velocity (rps)	11.5±1.1*	8.3±1.3
Nose-up (+) / Down (-) Angle (deg)	13.7±3.0	17.0±10.0
Right (+) / Left (-) Bank Angle (deg)	19.4±5.7*	11.7±13.8
Angle of Attack (deg)	- 0.6±4.2	3.2±11.0
Angular Velocity of Nose-up (+) / Down (-) (rad/s)	2.9±5.8*	- 7.1±15.0
Angular Velocity of Right (+) / Left (-) Bank (rad/s)	- 2.7±5.7*	- 7.6±6.9

Values are expressed as mean ± SD for each group. Statistical significance was set at $P < 0.05$.

*significant difference on t-test. DRL, disc release

図 2-3 の (A) から (G) は遠投距離とリリース時の各力学的変量の関係性を表す。熟練者群で遠投距離と有意な相関関係が認められた変量は、初速度（図 2-3A）とスピン速度（図 2-3B）であった。未熟練者群では遠投距離とスピン速度の間に有意な相関関係が認められたが、初速度との間に有意な相関関係は認められなかった。遠投距離とディスクの姿勢角（上向き角：図 2-3C、右傾き角：

図 2-3D、迎え角：図 2-3E)の間には両群ともにそれぞれ有意な相関関係が認められなかった。遠投距離と上・下向き角速度 (図 2-3F)、左・右傾き角速度 (図 2-3G)の間にはそれぞれ両群ともに有意な相関関係が認められなかった。

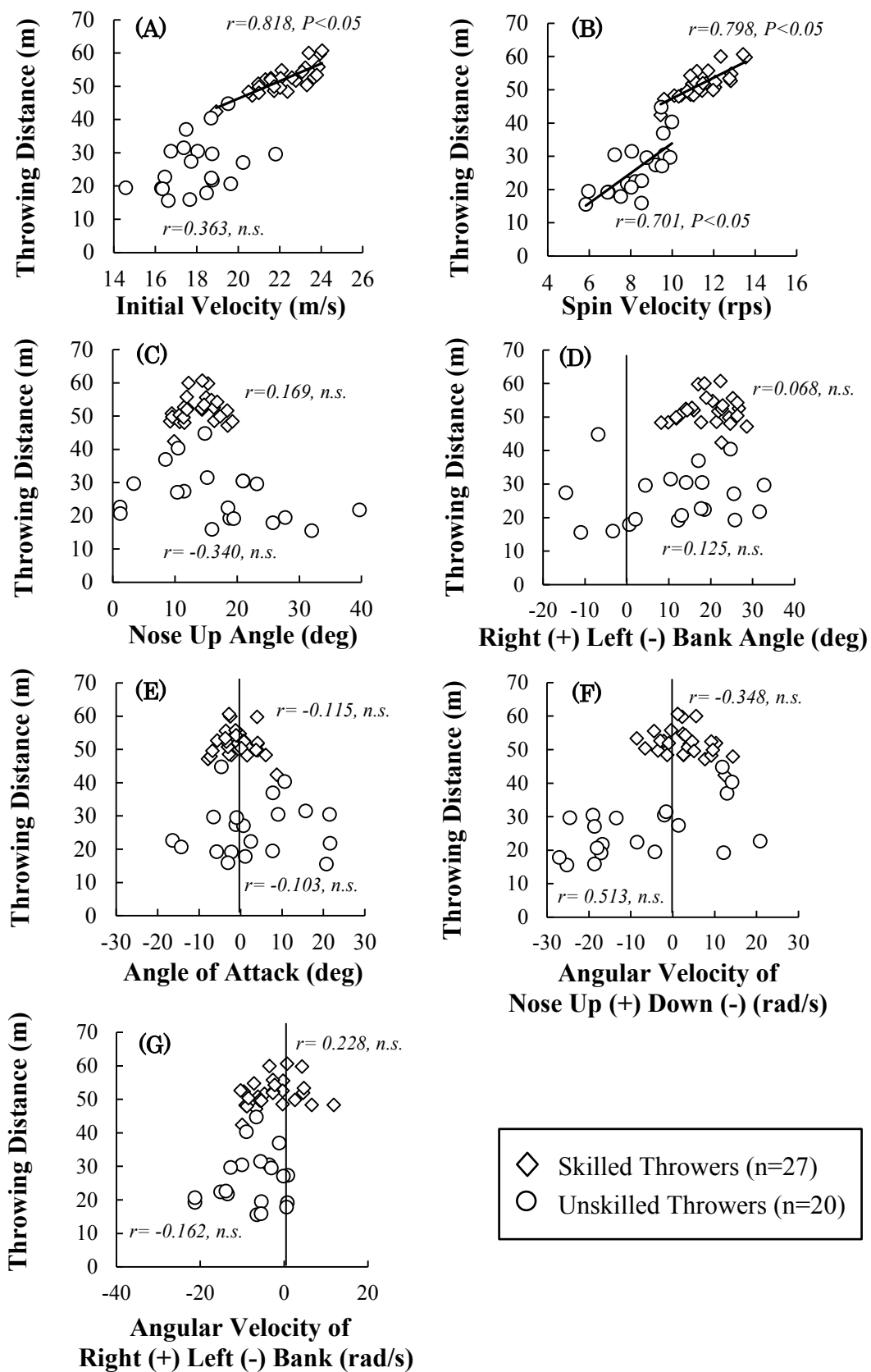


Figure 2-3. Relationship between the throwing distance and each kinematic variable of the disc at release.

第4節 考察

Potts & Crowther (2002) は、風洞実験によって空気からディスクに作用する力を実測し、流体力学の観点からディスクの飛行特性について報告している。それによると、風速 20m/s の場合に空気からディスクに作用する抗力（ディスクの進行方向とは逆向きに働く力）は、迎え角が-2度から-3度の時に最小になることを報告している。さらに、迎え角が±10度および±20度の時、抗力の大きさは、それが最小になる-2度から-3度の場合と比べ、それぞれ2倍および6倍に増加することが報告されている (Potts & Crowther 2002)。つまり、ディスクが加速およびリリースされる際、その迎え角を小さくすることは、ディスクに作用する空気抵抗を抑え、効果的に加速するための姿勢および減速の少ないリリース姿勢を作るために重要となる。

円板が高速でスピンしている時、円板の平面に対して垂直方向に、回転中心を外して力が作用すると、円板の角運動量ベクトルと与えられた外力による回転力ベクトルの両方に直交する軸まわりに円板は回転し始める (黒須 1996)。その回転方向は、角運動量ベクトルを90度回転させて回転力ベクトルに重ねる時の方向である。つまり、円板の姿勢は角運動量ベクトルが回転力ベクトルを追いかけるように右ねじの方向に回転する。また、その回転速度の大きさはスピン速度の大きさと反比例の関係にある (廣瀬 1987)。これをジャイロ剛性という。すなわち、円板のスピン速度が高まれば高まるほど、その姿勢を変化させようとする外力の影響を小さくすることができる。

一方、ディスクは迎え角0度という空気抵抗の小さい姿勢で投げ出されたとしても、上下非対称なその形状により、上面前方部分と裏面後方部分に空気的作用によって高い圧力が生じる (Potts & Crowther 2002)。その上面と裏面における圧力の不均衡が Pitch 軸回りに姿勢を回転させる力 (ピッチングモーメント)

となる。迎え角が+8度以下の場合、下向きに姿勢を回転させるピッチングモーメントがディスクに作用し、迎え角が0度を下回る負の値になると急速に増加する (Potts & Crowther 2002)。もしスピンの無ければその力は Pitch 軸回りに下向きに姿勢を回転させ、負の迎え角を増加させる。それは進行方向から受ける空気抵抗を急増させ、ディスクは地面へ落下する。それに対し、ディスクの高速の-spinは、ピッチングモーメントの作用によって生じる Pitch 軸まわりの下向き回転を抑える (Potts & Crowther 2002)。つまり、ディスクの高速の-spinは、そのジャイロ剛性を高める。したがってディスクの場合、spin速度を増加させることによって空気抵抗の少ない姿勢をリリースの瞬間およびその後の飛行において維持することが可能となり、飛行距離は増加する。

本研究において、熟練者群のspin速度は未熟練者群に比べて約1.4倍大きい値を示した (熟練者群 11.5rps、未熟練者群 8.3rps)。これは、リリース時の熟練者群のディスクは未熟練者群に比べて、高いジャイロ剛性を有していることを意味している。熟練者群の迎え角の平均値は-0.6度および標準偏差は±4.2度と共に小さく (表 2-1)、+8度以下に分布していた (図 2-3E)。また、未熟練者群では、標準偏差が±11.0度と広範囲に分布していたが、6名を除き、熟練者群と同様に+8度以下に分布していた。つまり、リリース時の未熟練者群のディスクには、熟練者群と同様にその姿勢を下向き方向に回転させるピッチングモーメントが作用している。さらに、リリース時における熟練者群の上・下向き角速度は、2.9rad/sとわずかに上向き方向であったのに対し、未熟練者群では-7.1rad/sと大きな下向き方向の姿勢の変化が確認された。リリース時における、未熟練者群の急速な下向き方向の姿勢の変化は、リリース時に空気からディスクに作用するピッチングモーメントの影響によるものであると考えられる。ディスクはその並進速度が最も大きくなるリリース直前に、大きなピッチングモーメン

トがディスクに作用すると推測されるが、未熟練者群のディスクはリリースされた瞬間のスピン速度が不十分であったため、スピンの効果を十分に得ることができず、下向き方向に姿勢が大きく変化したと考えられる。これによって、ディスクの空気抵抗は急速に増加し、未熟練者は遠投距離を伸ばすことができなかった。したがって、未熟練者にとってスピン速度の増加は、遠投距離を増加させるために重要な要因であることが示唆された。

本研究において、リリース時のスピン速度が熟練者とほぼ同じ値を示した未熟練者の場合においても、遠投距離は熟練者よりも小さい値を示す傾向が認められた (図 2-3B)。この未熟練者のリリース時の迎え角は、熟練者群の迎え角の範囲を大きく超えるものであった (図 2-3E)。前述したように、ディスクは迎え角の増加に伴って、大きな抗力がディスクに作用する (Potts & Crowther 2002)。つまり、このような傾向を持つ未熟練者はリリース直前の迎え角が大きかったため、リリース時においてディスクに作用する空気抵抗が急速に増加したことが推測される。したがって、リリース時のスピン速度が熟練者とほぼ同等であったとしても、ディスクはスムーズな飛行が困難となり、遠投距離が伸びなかったと考えられる。また、未熟練者群の遠投距離と初速度の間に有意な相関関係を確認することができなかった (図 2-3A)。これは、リリース直前までディスクの並進速度を高めたとしても、大きい迎え角を有する未熟練者が多かったため、リリース時に大きな空気抵抗がディスクに作用し、遠投距離を伸ばすことができなかったことが要因のひとつとして考えられる。以上のことから、未熟練者群はリリース時のスピン速度を増加させることに加え、迎え角を小さくすることが遠投距離を増加させるために重要であると推察される。

第5節 まとめ

フライングディスクのフォアハンド遠投動作では、ディスクの遠投距離の増加のための優先されるべき力学的要因が明らかになっていない（問題点1）。したがって、指導時の着眼点は不明確なままであった。そこで本研究の目的は、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作における、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性について明らかにすることであった。

本研究の結果から、未熟練者群の遠投距離を増加させるために優先されるべき要因は、スピン速度の増加であることが明らかとなった。高速度のスピンはリリース時のディスク姿勢の変化を抑える効果を持つ。そのため、ディスクはリリース時に進行方向から受ける空気抵抗を増大させることなく、スムーズに飛び出すことが可能となる。したがって、未熟練者群はスピン速度を増加させることによってより大きい遠投距離を得ることが可能になると考えられる。また、リリース時のスピン速度が熟練者とほぼ同じ値を示した未熟練者の場合においても、遠投距離が熟練者よりも小さい値を示す傾向が認められた。このような傾向を持つ未熟練者の場合、リリース時の迎え角は、熟練者群の迎え角の範囲を大きく超えるものであった。つまり、スピン速度が同じであったとしても、迎え角の増加に伴って生じるリリース時の空気抵抗の急増が、遠投距離を小さくした要因のひとつと推察された。したがって、未熟練者群の遠投距離を増加させるために、リリース時のスピン速度の増加に加え、迎え角を小さくすることもまた重要であると考えられた。

第 3 章 フォアハンド遠投動作におけるフライングディスクの 3次元剛体力学：ディスクに作用する回転力とスピン速度 の関係性（研究課題 2）

第 1 節 目的

前述したように、これまで指導者や選手の間では、フォアハンドスローの投てき距離を増加させるために、スピン速度を増加させることが重要であると主観的な観点から注目されてきた。また、風洞実験を用いてディスクの飛行特性を調べた流体力学研究では、スピンはディスクの姿勢を安定させる重要な役割を持つことが報告されてきた。しかし、実際に人がフォアハンドスローで投げ出したディスクを対象とし、スピンの重要性を明らかにした研究は見当たらない。そこで、第 2 章（研究課題 1）では、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作における、ディスクの遠投距離とリリース時の力学的変数の関係性について検討した。その結果、両群間の遠投距離は約 2 倍、スピン速度は約 1.4 倍の差がそれぞれで確認され、熟練者群は未熟練者群より有意に大きい値を示した。さらに、未熟練者群では遠投距離とスピン速度に有意な相関関係が確認された。このような傾向は他の変数で確認することができなかった。したがって、第 2 章（研究課題 1）の結果からスピン速度の増加は、未熟練者群の遠投距離増加のために優先される要因であることが明らかとなった。

ディスクのような円板体にスピンを与える方法は二つある。一つはディスクの縁（外周）に中心をはずした方向の力を加える、すなわち押ししたり引いたりすることによって生じる回転力（力のモーメント）を与える方法である。もうひとつはディスクを直接捻じることによって生じる回転力（トルク）を与える

方法である。しかし、フォアハンド遠投動作において、上記の2つの回転力がディスクのスピンの速度に与える影響については明らかにされていない。

本研究の目的は、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作においてディスクに作用する力のモーメントとトルクを定量化し、それら2つの回転力とスピンの速度の関係性を明らかにすることである。

第2節 方法

第1項 対象

全日本アルティメット選手権大会第6位の大学アルティメットチームに所属している男性10名（競技歴：3～4年）を熟練者群（年齢 21.7 ± 3.9 歳；体重 65.8 ± 4.7 kg；身長 174.7 ± 3.4 cm）とし、ディスクスポーツの競技歴のない男子学生11名（年齢 21.4 ± 1.5 歳；体重 68.4 ± 7.1 kg；身長 174.3 ± 6.9 cm）を未熟練者群とした。全ての被験者は右利きであった。実験に際して、各被験者には予め実験の目的及び試技内容の説明を行い、協力への同意を得た上で実験を行った。なお、本研究は中京大学大学院体育学研究科倫理審査委員会の承認を得て行われた。

第2項 実験環境

本研究は第2章（研究課題1）と同様のディスクを使用した（p.17参照）。また、遠投を行う際の各被験者に対する指示、実験場所、ディスク上面の反射マーカの装着方法についても第2章（研究課題1）と同様の方法で行った。本研究では、各被験者の投てき腕と体幹部の各特徴点に反射マーカを装着した（図3-1）。反射マーカは各被験者の体幹部の左右の肋骨下端（それぞれ LLB と RLB）、胸骨上縁（JN）、第7頸椎（C7）、左右の肩峰点（それぞれ LAC と RAC）、投てき腕の肘関節の外側上顆（EL）と内側上顆（EM）、尺骨茎状突起（US）と橈骨茎状突起（RS）、第三指中手骨遠位端（MP3）、第三指末節骨遠位端（FT）にそれぞれ装着された。なお、MP3 と FT は直径 7mm の反射マーカを、それ以外では直径 14mm の反射マーカを使用した。体幹部と投てき腕上の反射マーカは皮膚上に直接装着された。各マーカの3次元座標は光学式3次元自動動作分析装置（Oxford Metrics Inc., Oxford, UK、VICON MX）を用いて計測された。

記録に使用された 10 台の専用カメラは、リリース前後のディスクと投てき腕の運動を撮影できるよう投てき者を囲むように設置され、サンプリング周波数は 500Hz に設定された。右手系の基準座標系 (R_G) は 10 台のカメラの中央を原点とし、基準座標系のベクトル Y_G と Z_G はそれぞれ投てき方向と鉛直方向とされ、それらに直行するベクトルを X_G とした。遠投距離は各被験者の右足つま先からディスクが地面に接触した地点の直線距離とし、巻き尺を用いて測定した。

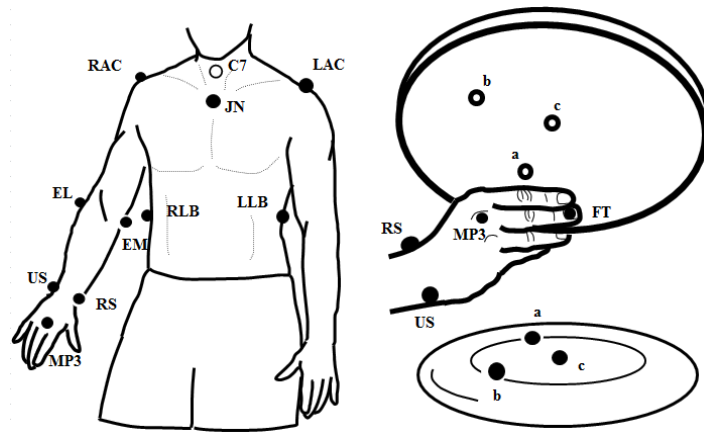


Figure 3-1. Reflective markers (black circles) attached to spinous processes of the 7th cervical vertebra (C7), deepest point of the jugular notch (JN), lower end of the 10th right (RLB) and left rib (LLB), lateral superior tip of the right (RAC) and left acromion (LAC), most caudal point on the lateral epicondyle (EL), most caudal point on the medial epicondyle (EM), most caudal-lateral point on the radial styloid (RS), most caudal-medial point on the ulnar styloid (RS), third metacarpals on the dorsal aspect (MP3), the dorsal aspect of the distal third phalanx of the throwing hand (FT), disc centre (c), and the other 2 (a, b).

第 3 項 平滑化处理

第 2 章 (研究課題 1) と同様の方法を使用した (p. 18 参照)。使用された最適遮断周波数 (27~31Hz) はであった。

第4項 ディスクのスピンの算出方法

第2章（研究課題1）と同様の（2.9）（2.10）（2.11）（2.12）式を使用し、算出した（p. 21 参照）。

第5項 肩の最大外旋とディスクリリースの時刻の決定方法

握ることが可能な投射体を最大努力で投げる場合、リリース直前に生じる投てき腕の肩の外旋は、その直後に肩の急速な内旋運動を引き起こすため、投射体の速度を高めるために重要な動作となる（桜井 1992）。したがって、野球ややり投げ、アメリカンフットボールで用いられる投動作を対象としたバイオメカニクス研究では、肩の最大外旋からリリースまでを重要な区間として分析されてきた（Feltner & Dapena 1986、Fleisig et al. 1995、桜井 1992、Rash & Shapiro 1995、吉田 2008）。しかし、ディスクの投動作を対象としたバイオメカニクス研究は、これまで行われていないため、分析区間を決定するため知見がない。そこで本研究は、様々な投動作の研究で着目されている、肩の最大外旋時からリリースまでをディスクの加速局面と定義し、分析区間とした。

肩の外旋運動が最大に達した時刻を決定するため、計測された反射マーカークの位置データをもとに体幹部と上腕部の移動座標系を構築した（図3-2）。体幹部の部分座標系(R_{trunk})は、LLB と RLB を結ぶ線分の midpoint から RAC と LAC を結ぶ線分の midpoint に向かうベクトルを Z_{trunk} 軸、 Z_{trunk} ベクトルと LLB から RLB へ向かうベクトルの外積によって算出されたベクトルを Y_{trunk} 軸、 Y_{trunk} ベクトルと Z_{trunk} ベクトルの外積によって算出されたベクトルを X_{trunk} 軸として定義した。

上腕部の部分座標系($R_{upper arm}$)は、EM と EL を結ぶ線分の midpoint から RAC へ向かうベクトルを $Z_{upper arm}$ 軸、 $Z_{upper arm}$ ベクトルと RS と US を結ぶ線分の midpoint か

ら EM と EL を結ぶ線分の midpoint へ向かうベクトルの外積によって算出されたベクトルを $X_{upper\ arm}$ 軸、 $Z_{upper\ arm}$ ベクトルと $X_{upper\ arm}$ ベクトルの外積によって算出されたベクトルを $Y_{upper\ arm}$ 軸として定義した。

体幹部に対する上腕部の相対的な方向はオイラー角で示された。上腕座標系 ($R_{upper\ arm}$) の回転の順序は $Z_{upper\ arm} - Y_{upper\ arm} - Z_{upper\ arm}$ であった。一度目の回転を肩の内旋・外旋、二度目の回転を外転・内転、三度目の回転を水平外転・水平内転と定義した。算出された肩の外旋角度がピークに達した時刻を肩の最大外旋時 (MER) と定義した。また、本研究ではディスクの中心から中指先端の距離がディスクの半径 (0.137m) より大きくなった瞬間をディスクリリース (DRL) と定義した。また、リリースの瞬間を 0 秒として、MER から DRL までをフォアハンド遠投動作の腕の加速局面と定義し、分析区間とした。

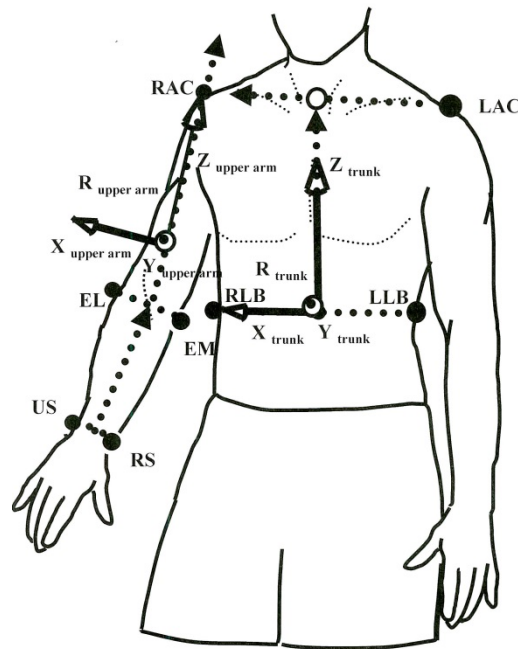


Figure 3-2. Schematic of coordinate systems of trunk (R_{trunk}) and upper arm ($R_{upper\ arm}$) segments.

第6項 ディスクに作用する力の算出方法

本研究では、ディスクが握られている局面において力の作用点を決定することは出来ない。したがって、リリース直前までディスクのリムに接している中指遠位端を仮想的に力の作用点として設定した。基準座標系上のディスクに作用した合力を中指先端からディスクへ作用した力($F_{\text{finger/global}}$)と仮定し、ニュートンの運動方程式を用いて算出した。

$$F_{\text{finger/global}} = m_{\text{disc}} a_{\text{disc}} - m_{\text{disc}} g \quad (3.1)$$

なお、(3.1)式の m_{disc} はディスクの質量、 a_{disc} はディスク中心点の並進加速度、 g は重力加速度を表している。

本研究では、ディスクに作用する力学的変数がスピン速度増加に与える影響を確認するために力のモーメント(N_{Rdisc})とトルク(T_{Rdisc})を算出した。ディスクへ作用する力のモーメント(N_{Rdisc})はディスク中心点(点 c) から中指先端(点 FT)を指すディスク座標系上のモーメントアームベクトル($r_{cFT/Rdisc}$)とディスクへ作用する基準座標系上の合力ベクトル($F_{\text{finger/global}}$)をディスク座標系の値に変換した合力ベクトル($F_{\text{finger/Rdisc}}$)の外積によって算出した。

$$N_{\text{Rdisc}} = r_{cFT/Rdisc} \times F_{\text{finger/Rdisc}} \quad (3.2)$$

ディスク座標系上のディスクの角運動量は以下の式によって算出した。

$$H_{\text{disc/Rdisc}} = I_{\text{disc}} \omega_{\text{Rdisc}} \quad (3.3)$$

(3.3)式の I_{disc} はディスクの慣性モーメントを表している。 I_{disc} は二本吊り法を使用して実測した (渋谷 1970)。10 回実測し、その平均値を I_{disc} の値とした。 $X_{disc}, Y_{disc}, Z_{disc}$ 軸周りの慣性モーメントはそれぞれ 0.0013 kgm^2 、 0.0013 kgm^2 、そして 0.0025 kgm^2 であった。

ディスクへ作用するトルク (T_{Rdisc}) は、以下のオイラーの運動方程式を用いて算出した。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{H}_{disc/Rdisc} + \boldsymbol{\omega}_{Rdisc} \times \mathbf{H}_{disc/Rdisc} \\ = \mathbf{r}_{cFT/Rdisc} \times \mathbf{F}_{finger/Rdisc} + \mathbf{T}_{Rdisc} \end{aligned} \quad (3.4)$$

本研究において、 $\frac{d}{dt} \mathbf{H}_{disc/Rdisc}$ はディスク移動座標系上の角運動量ベクトルを時間微分した外部モーメントベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_{Rdisc}$ はディスク移動座標系上の角速度ベクトル、 $\mathbf{H}_{disc/Rdisc}$ はディスク移動座標系上の角運動量ベクトル、 $\mathbf{r}_{cFT/Rdisc}$ はディスク座標系上のモーメントアームベクトル、 $\mathbf{F}_{finger/Rdisc}$ はディスクへ作用するディスク座標系上の合力ベクトルを表している。それらを用いてディスク移動座標系上のトルク (T_{Rdisc}) を算出した。なお、中指先端の一点を作用点とした場合、実際にはその作用点周りにトルクを作り出すことは出来ないが、本研究ではディスクに作用するトルク (T_{Rdisc}) の作用点を仮想的に中指先端とし、(3.2)式および(3.4)式によって算出された \mathbf{N}_{Rdisc} と \mathbf{T}_{Rdisc} をそれぞれディスクへ作用する力のモーメントおよびトルクとした。 Z_{disc} 軸方向の力のモーメントとトルクを抽出し、分析に使用した。また、力のモーメントとトルクのそれぞれの角力積はそれらとスピン速度の関係性を評価するために算出された。MER から DRL の区間にお

ける角力積は N_{Rdisc} と T_{Rdisc} の Z_{disc} 軸方向の値を時間積分することで算出した。以後、本研究において力のモーメントとトルクは Z_{disc} 軸成分の値のことを示す。

第7項 統計分析

SPSS ソフトウェアバージョン 22 (SPSS, Chicago, IL, USA) を用いて全ての変数の正規性を確認した。その後、分析区間における力のモーメントとトルクのそれぞれ角力積と同区間におけるスピン速度の変化量との統計学的な関係性の検定、および両群間における各変量の平均値の差の検定は、それぞれピアソンの積率相関係数と独立二群の t 検定を使用した。なお、これらの方法における有意水準はそれぞれ 5%未満とした。

第3節 結果

図 3-3 は、両群の MER 時から DRL までのスピンの速度の変化 (A: 上段) と、力のモーメントの変化 (B: 中段)、およびトルクの変化 (C: 下段) を表している。黒色の太い実線と太い破線は、それぞれ熟練者群と未熟練者群の平均値を表している。また、グレー色の細いラインは各被験者の値を表している。

図 3-3A において、熟練者群のスピンの速度は MER 直後に正の値となり、その後急速に増加していた。未熟練者群では、MER 以前から正の値をとり、緩やかに増加していた。DRL 時のスピンの速度は未熟練者群 ($52.2 \pm 8.2 \text{ rad/s} = 8.3 \pm 1.3$ 回転/秒) に比べ、熟練者群 ($78.9 \pm 3.5 \text{ rad/s} = 12.6 \pm 0.6$ 回転/秒) で有意に高い値を示した。

図 3-3B において、熟練者群の MER 時の力のモーメントは、ほぼ 0Nm であった。その後急速に増加し、DRL 直前にピークに達していた。未熟練者群の力のモーメントは、MER 以前から正の値を示し、緩やかに増加傾向を示しながら DRL 直前にピークに達していた。

図 3-3C において、熟練者群のトルクは MER 直前から急速に増加し、MER 直後にピークに達していた。MER 前後において未熟練者群のトルクはほぼ 0Nm であった。

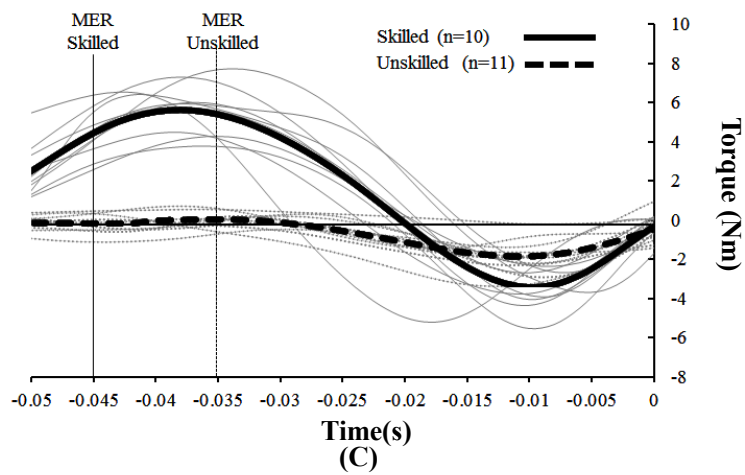
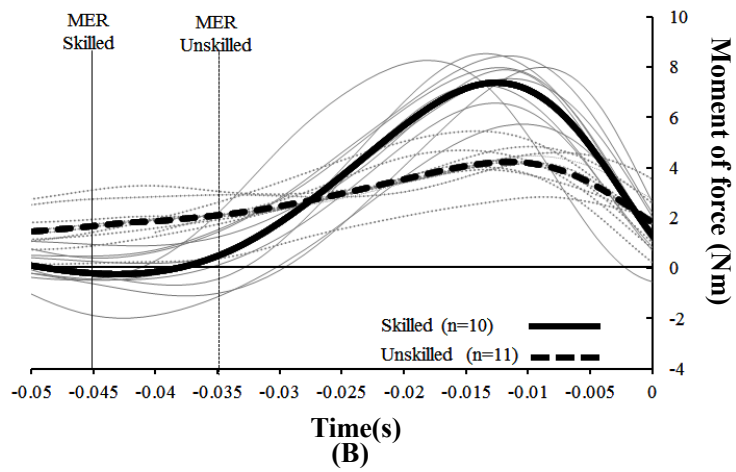
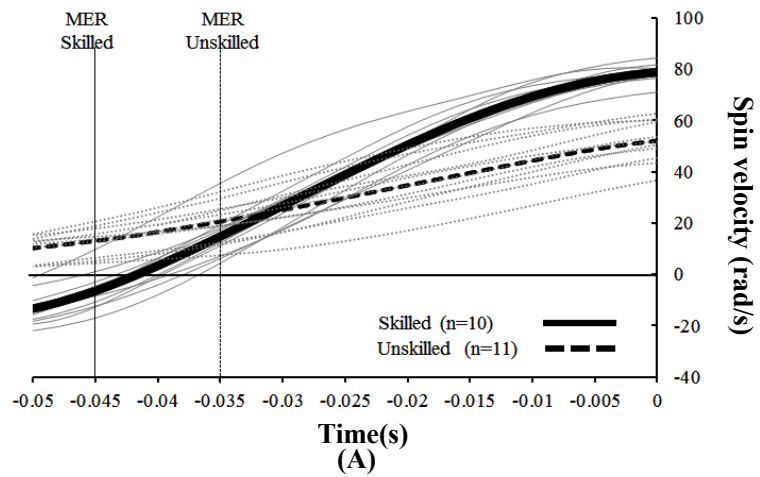


Figure 3-3. Changes in mean disc spin velocity (A: top), moment of force (B: middle), and torque (C: bottom) in skilled throwers (black solid line) and unskilled throwers (black dashed line). Grey lines indicate for each thrower. The instance of disc release is denoted as $t = 0$ s. MER, maximum external shoulder rotation

表 3-1 には分析区間（MER から DRL の区間）における、スピン速度の変化量と力のモーメントの角力積、およびトルクの角力積を示した。また、それらを両群間で統計学的に比較した結果を表している。力のモーメントの角力積は未熟練者群に比べ熟練者群で有意に大きい値を示した。トルクの角力積は未熟練者群に比べ熟練者群で有意に大きい値を示した。

Table 3-1. Statistical comparison of change in spin velocity and kinetic variables between groups of analysis interval.

Variables	MER - DRL	
	Skilled (n=10)	Unskilled (n=11)
Change in Spin Velocity (rad/s)	82.8±16.0*	31.1±4.5
Angular Impulse of Moment of Force (Nm·s)	0.16±0.03*	0.11±0.03
Angular Impulse of Torque (Nm·s)	0.06±0.04*	-0.03±0.02

Values are expressed as mean ± SD for each group. Statistical significance was set at $P < 0.05$. *significant difference on t-test

表 3-2 は、MER 時とディスクに作用した力がピークに達した時点(Peak)における、両群の指先からディスクに作用した力の大きさと、ディスクに対する力ベクトルの接線角度の平均値を表している。図 3-4 は MER 直前から DRL までの熟練者と未熟練者のディスク中心と中指遠位端 (FT)、および中指近位端 (MP3) の水平面内の移動軌跡（典型例）を表している。図中の矢印の長さはディスクに作用した力の大きさを、矢印の角度は力ベクトルのディスクに対する接線角度を表している。それらの MER 時とディスクに作用する力の大きさがピークに達した時点の値を図 3-4 に示した。なお、基準座標系 (R_G) の Y_G 方向をリリース方向として、最上部の終点がリリースのポイントを表している。

MER 時におけるディスクに作用したカベクトルの大きさについて、両群の値に有意な差は確認されなかった。MER 時におけるカベクトルの接線角度は、熟練者群に比べて未熟練者群で有意に大きい値を示した。カベクトルの大きさがピークに達した時点における、カベクトルの大きさは未熟練者群に比べて熟練者群で有意に大きい値を示した。カベクトルの大きさがピークに達した時点のカベクトルの接線角度について、両群の値に有意な差は確認されなかった。

Table 3-2. Statistical comparison of magnitude of resultant force acting on disc and angle of tangent of resultant force vector against disc between groups at selected instants.

Variables	MER		Peak	
	Skilled (n=10)	Unskilled (n=11)	Skilled (n=10)	Unskilled (n=11)
Magnitude of Resultant Force (N)	59.1±18.1	56.2±14.1	120.0±9.5*	82.9±16.3
Angle of Tangent of Resultant Force against disc (deg)	-1.1±14.9*	28.3±11.1	34.7±8.4	32.5±7.0

Values are expressed as mean ± SD for each group. Statistical significance was set at $P < 0.05$. *significant difference on t-test

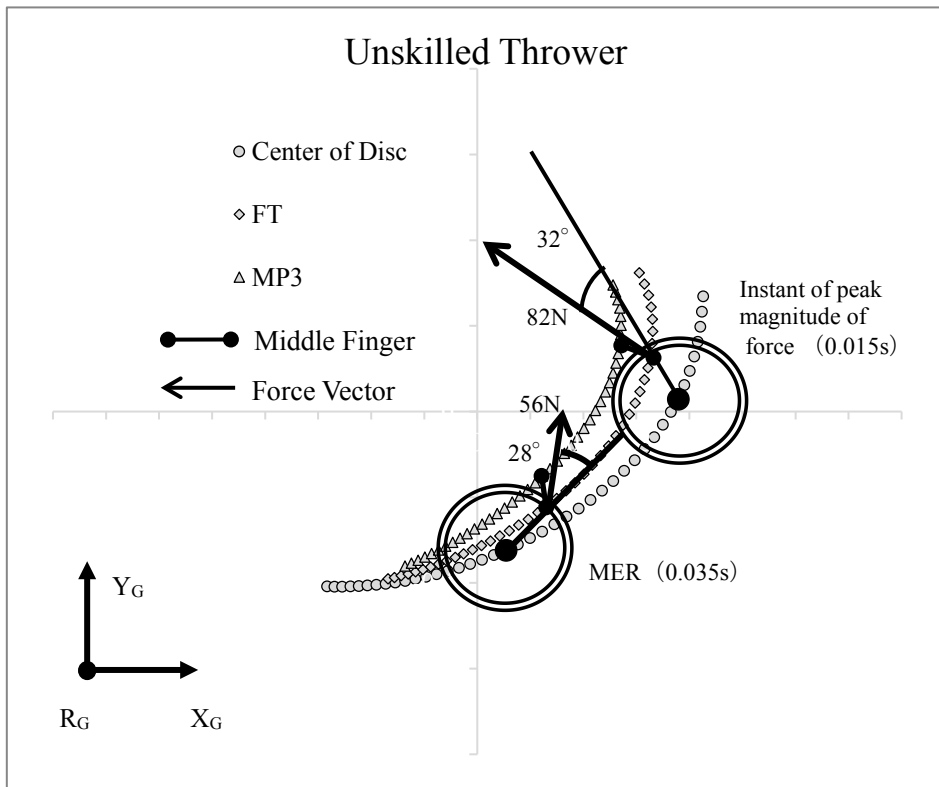
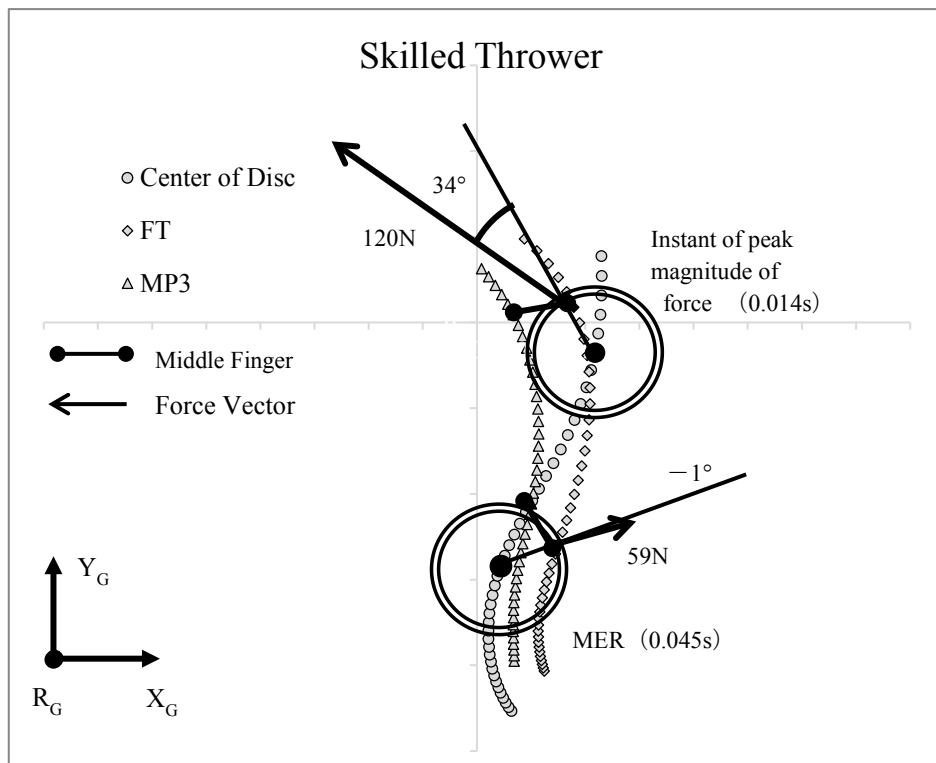


Figure 3-4. Trajectory of disc, FT and MP3 of skilled thrower (top) and unskilled thrower (bottom) in horizontal plane. Arrows indicate magnitude of resultant force acting on disc and angle of tangent of resultant force vector against disc from FT.

図 3-5 はスピン速度の変化量と力のモーメントの角力積、およびトルクの角力積の関係性をそれぞれ表している。図 3-5A の力のモーメントの角力積とスピン変化量の関係性に着目すると、未熟練者群で有意な相関関係が確認されたのに対し、熟練者群ではそのような関係性を確認することができなかった。図 3-5B のトルクの角力積とスピン速度の変化量の関係性に着目すると、未熟練者群では有意な相関関係が確認されなかったのに対し、熟練者群では有意な相関関係が確認された。

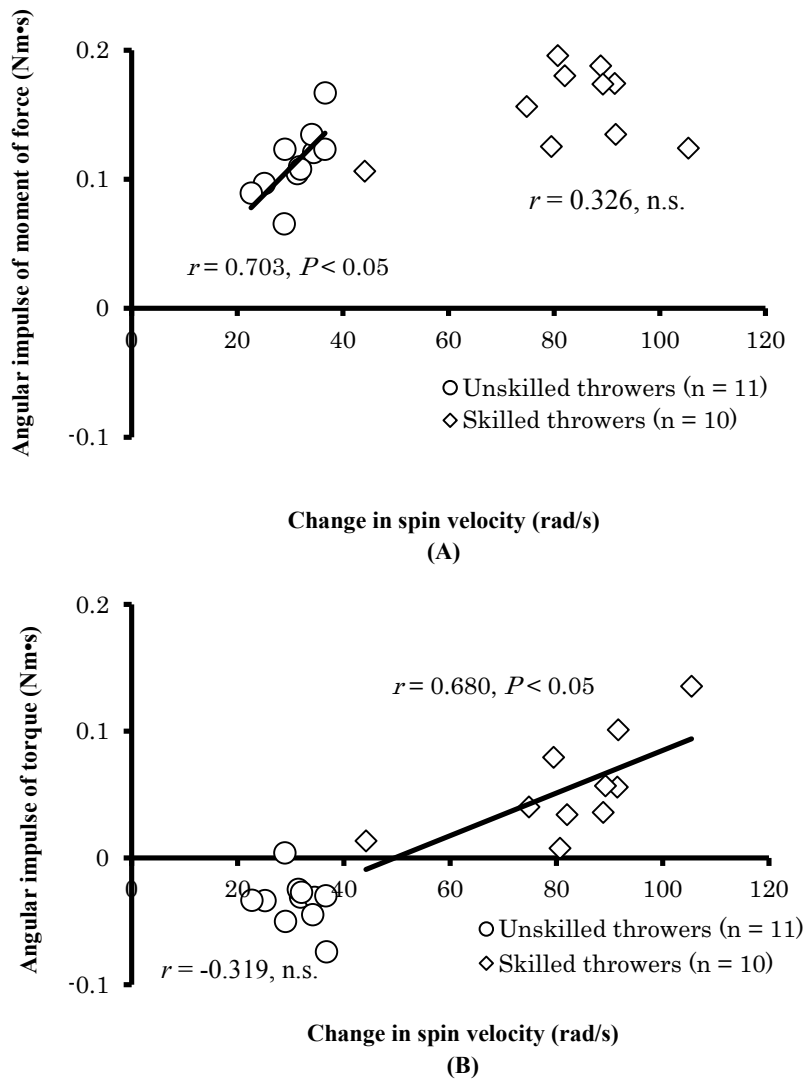


Figure 3-5. Relationship between the change in spin velocity and angular impulse of the moment of force (A: upper), and angular impulse of torque (B: lower) between MER and DRL.

第 4 節 考察

熟練者群の結果に着目すると、肩の最大外旋時にディスクに作用する力ベクトルの傾きは、ほぼディスクの回転中心を通る方向を向いていた(図 3-4 上段)。そのため、力のモーメントは 0Nm に近い値を示したと考えられる(図 3-3B)。しかし、同時刻において、トルク由来の大きな回転力が手の内からディスクに作用していた(図 3-3C)。そのため、ディスクはリリース方向にスピンを開始し、さらに急速なスピン速度の増加を引き起こしていたと考えられる(図 3-3A)。また、トルクが減少し始めると同時に、熟練者群は指先で内側の縁を押すことによって力のモーメントを増加させ、スピンを更に加速させていたと考えられる。したがって、熟練者群はこれら 2 つの回転力を順次にディスクに与えることによって、スピン速度を増加させていたことが示唆された。その中でも、熟練者群のスピン速度の変化量とトルクの間に関連関係が得られた(図 3-5B)。このことから、熟練者群は主として最大外旋前後に生じていたトルク由来の回転力を大きくすることで、スピン速度を急速に増加させていたと考えられる。

それに対し、肩の最大外旋時における未熟練者群のトルクは極めて小さい値を示した(図 3-3C)。また、肩の最大外旋時の力ベクトルは、中指近位端方向を向いていた(図 3-4 下段)。さらに、未熟練者群のスピン速度の変化量と力のモーメントに、有意な相関関係が得られた(図 3-5A)。これらの結果から、肩の最大外旋からディスクリリースまでの区間において、未熟練者群は常に指先でディスクの縁を中指近位端方向に引くことによって力のモーメントを生成していたと考えられる。つまり、未熟練者群は主に力のモーメント由来の回転力によってスピンを作り出していたと考えられる。したがって、未熟練者はディスクを握っている最大外旋前後で、手掌からディスクにトルク由来の回転力を与えることによって、スピン速度の増加が可能になると推察される。

分析区間における力のモーメントの角力積は未熟練者群に比べ熟練者群で有意に大きい値を示した（表 3-1）。力の大きさがピークに達した時点において、熟練者群のカベクトルは未熟練者群と比べて有意に大きい値を示した（表 3-2）。また、同時刻において、カベクトルの接線角度に、両群間で有意な差は確認されなかった。このことから、熟練者群と未熟練者群の力のモーメントの角力積の差は、力の大きさによって生じたものと考えられる。したがって、未熟練者が更にスピン速度を増加させるためには、肩の最大外旋前後でトルクを大きくすることに加え、リリース直前に中指先端でより強くディスクを押すことも重要であると考えられる。

第5節 まとめ

フライングディスクのフォアハンドの遠投において、ディスクのスピンの速度の増加は指導者や選手にとって大きな関心事である。また、流体力学研究の観点からもその役割が重要視されている。しかし、スピン速度増加のための力学的な仕組みは明らかにされていない（問題点2）。そこで本研究の目的は、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作においてディスクに作用する回転力とスピン速度の関係性を明らかにすることであった。

熟練者群は最大外旋前後のディスクを握っている局面において、トルク由来の回転力をディスクに与えることでスピン速度を急速に増加させていた。また熟練者群は、リリース直前に力のモーメントによる回転力をディスクに与えることによって、スピン速度をさらに加速させていた。それに対して、未熟練者群はトルク的作用はほぼ無く、常に力のモーメントによってスピン速度を増加させていた。したがって、未熟練者は肩の最大外旋前後のディスクを握っている局面で手の内からディスクにトルクを与えることでスピン速度が増加すると考えられた。

第 4 章 フライングディスクのフォアハンド遠投動作における 上肢関節運動の運動学：熟練者と未熟練者の比較 (研究課題 3)

第 1 節 目的

第 2 章 (研究課題 1) より、両群のフォアハンド遠投動作におけるディスクのリリース時の力学的変量に着目することによって、未熟練者の遠投距離増加のためにはスピン速度の増加が重要であることが明らかとなった。また第 3 章 (研究課題 2) より、未熟練者のスピン速度はディスクが握られている肩の最大外旋前後の局面で、手掌から作用するトルク由来の回転力をディスクに与えることで増加することが推察された。

第 2 章 (研究課題 1) で得られたディスクの運動、および第 3 章 (研究課題 2) で得られたディスクに作用する回転力は、身体の様々な関節における複合的な運動によって生じたものである。つまり、熟練者と未熟練者のディスクの運動学的・運動力学的な違いは、両群の投動作に違いがあることを意味している。しかし、フォアハンドスローにおける上肢関節運動のバイオメカニクスの研究は見当たらない。したがって、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における身体各関節運動に着目し、両群の運動学的な違いを明らかにすることができれば、指導方法やトレーニング方法の改善・構築のためにより有用な知見が得られると考えられる。

本研究の目的は、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作における投てき腕各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにすることである。

第2節 方法

第1項 対象

全日本アルティメット選手権大会第6位の大学アルティメットチームに所属している男性10名（競技歴：3～4年）を熟練者群（年齢：21.8±1.0歳、体重：66.5±6.2kg、身長：1.73±0.06m）とし、ディスクスポーツの競技歴のない男子学生7名（年齢：25.1±2.4歳、体重：72.7±8.5kg、身長：1.78±0.05m）を未熟練者群とした。全ての被験者は右利きであった。

第2項 実験環境の設定

被験者にはアルティメットの公式ディスク（質量 175g；直径 27.3cm；Ultrastar, Discraft, Michigan）を高さ 0.85mの台上から助走なしで、できる限り遠くへ投げるように指示した（図 4-1）。十分なウォーミングアップ後、それぞれの被験者においてフォアハンドスローを10試技行なった。実験は風の影響を無くすために、縦 72m×横 32mの体育館で行なった。遠投動作の撮影では2台の高速ビデオカメラ（ナックイメージテクノロジー社製、HSV-500C³）を使用し、予備実験によりディスクと投てき腕の運動が最もよく観察が可能であった地点（投てき方向に向かい前下方と右前下方、光軸間の角度約 70度）に設置した。撮影スピードは 250コマ/s、露光時間は 1/2000秒であった。2台のカメラの同期は同期ユニット（ナックイメージテクノロジー社製、V-719）を使用することによって行った。本研究では右足の爪先を原点 O、Z軸は鉛直上向きに、Y軸は投

てき方向に水平に向く右手系の基準座標系を定義した。撮影範囲は投てき方向に向かって $X=-2.23\sim 0.91\text{m}$ 、 $Y=-1.41\sim 0.85\text{m}$ 、 $Z=0.92\sim 3.0\text{m}$ とした。DLT法により測定点の3次元座標を算出するため、撮影の前後にキャリブレーションポール（高さ3m、8個のコントロールポイントを取り付けたポール）を撮影範囲内の13箇所に垂直に立て、順に撮影した。

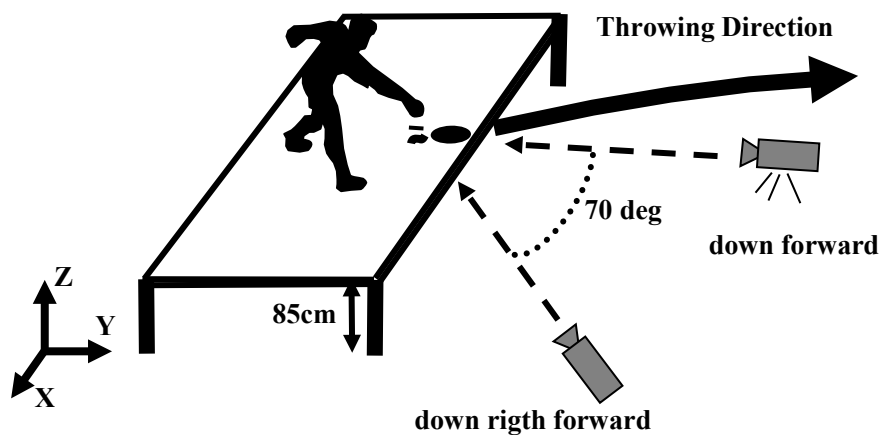


Figure 4-1. Diagrammatic view of the testing environment.

関節角度を算出するため被験者の投てき腕の各関節周辺の皮膚にマークをつけた（図 4-2A）。さらに上腕部、前腕部、手部の動きの解析を容易にするため、肩峰、前腕手背部側、手背部にはそれぞれ3つ、1つ、2つの部分からなる小ポールを固定した（図 4-2B）。小ポールは先端に発泡スチロールの球を取り付けた木製の棒と塩化ビニル製の板で製作した（重量：約計 30g）。肩に装着するための3本の小ポールは互いに直交するように作製された。投てき方向を向いた体幹部に対して側方を向く小ポールは両肩の肩峰点を結んだ直線の延長線上、また上方を向く小ポール（Shoulder-up stick）は直立姿勢時の胴体と平行になるよ

う肩峰の皮膚上に固定した。手背部上の Finger stick は中指を伸ばした時にそれと同じ方向を向くように固定した。前腕上の Wrist stick は前腕部の長軸と直交するように前腕部手背部側に固定した。本研究ではこのうち Finger stick、Wrist stick、Shoulder-front stick、Shoulder-up stick の小ポールを分析に用いた。

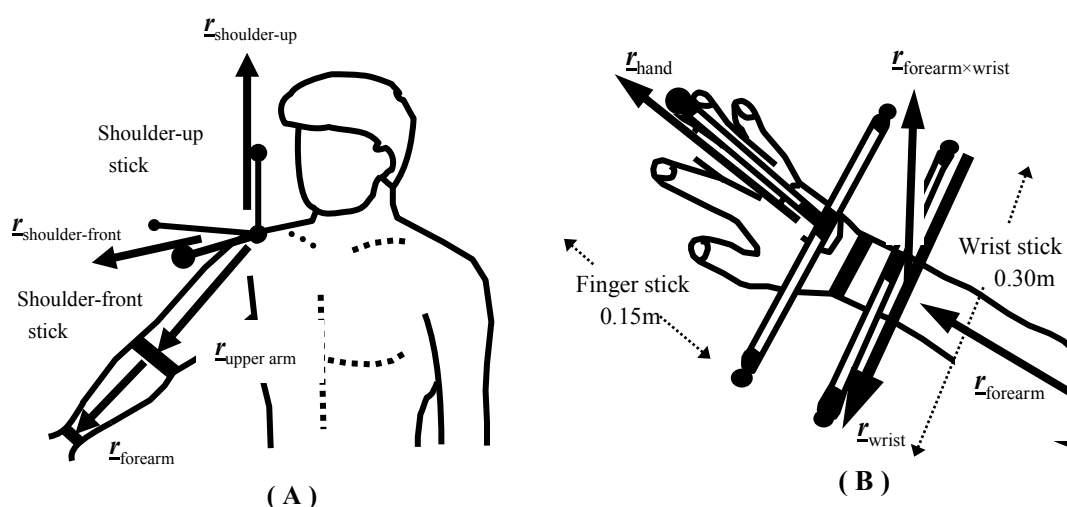


Figure 4-2. Small reference sticks for detection the motion of upper arm (A: left), forearm, and hand (B: right), and definitions of the vectors used to calculate the joint angles.

なお本研究では、各被験者の 10 投のうち最も遠投距離が大きかった各 1 試技を分析対象とした。撮影によって得られた 2 本のビデオテープのそれぞれについて、身体各部位のマークを参考にデジタイズを行った。また、肩と前腕部および手部の小ポール上のマークについてもデジタイズを行い、DLT 法を用いて各点の 3 次元座標を求めた (Abdel-Azis & Karara 1971)。3 次元座標の算出はビデオ動作解析装置 (FRAME-DIAS II, DKH 社) を用いた。実験時のコントロールポイント実測値と計算値の平均誤差は X 方向 : 0.5cm、Y 方向 : 0.9cm、Z 方向 : 0.8cm であった。ディスクのリリースはディスクが手から離れた瞬間の時刻とし、その時刻をビデオテープの映像から決定した。各被験者のリリースの時刻を 1.0

秒として 0.7 秒から 1.02 秒を分析の対象とした。また、熟練者群の前腕部、手関節の動作に関しては 0.796 秒までデジタイズポイントを確認できなかったため 0.8 秒から 1.02 秒を分析の対象とした。なお、平滑化は行わなかった。

第 3 項 関節角度の算出と角度定義

身体各部の 3 次元座標値から、7 つの上肢関節角度（肩関節の水平位内転－水平位外転、肩関節の外転－内転、肩関節の内旋－外旋、肘関節の伸展－屈曲、前腕部の回内－回外、手首の尺屈－撓屈、手首の掌屈－背屈）の変化を、ディスクを投げる側の腕について計算で求めた（図 4-3）（Sakurai et al. 1993）。本研究においては各身体部分および小ポールをベクトルで代表させた。各関節角度は、ベクトルとベクトルのなす角度として算出した。肘関節と手関節のマークの中心を便宜的にそれぞれの関節中心と仮定した。

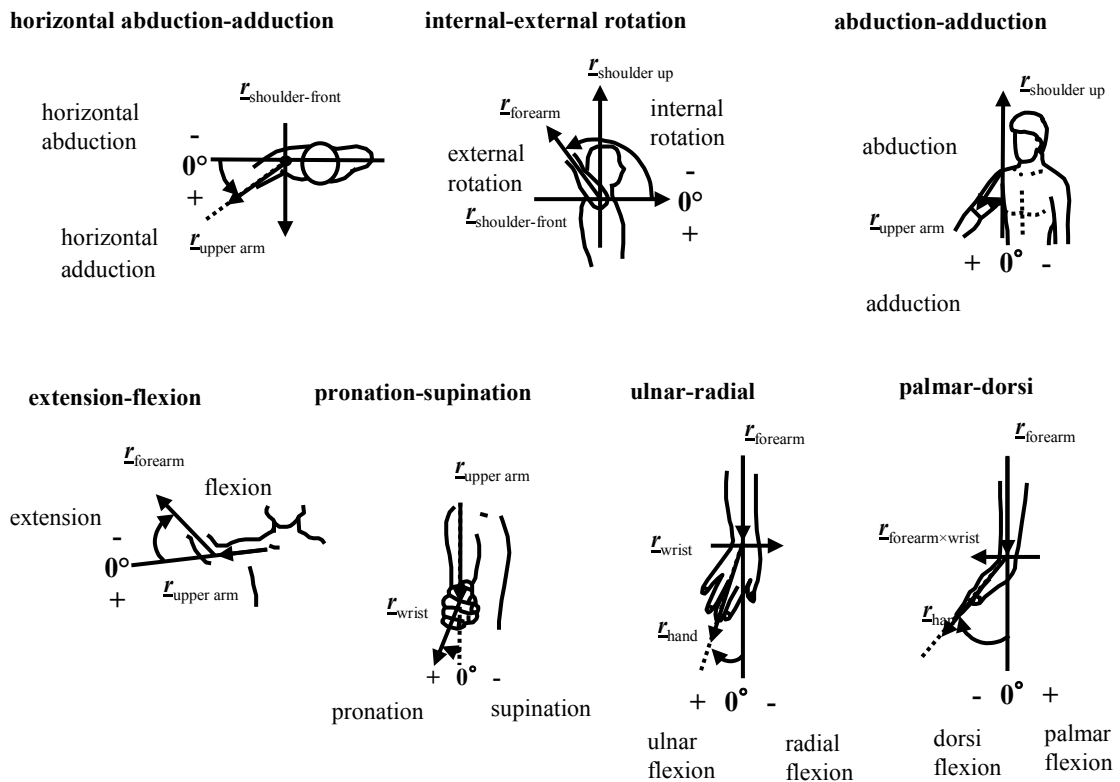


Figure 4-3. Definitions of the seven joint angles of the throwing arm.

ベクトル $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ は投てき腕側の肩峰から肘関節の中心へ向かうベクトルとして、またベクトル $\underline{r}_{\text{forearm}}$ は肘関節の中心から手関節の中心へ向かうベクトルとして定義された。ベクトル $\underline{r}_{\text{hand}}$ と $\underline{r}_{\text{wrist}}$ は小ポールの c-a と e-g によってそれぞれ定義された。肩の水平外転・水平内転角度は、ベクトル $\underline{r}_{\text{shoulder-front}}$ と $\underline{r}_{\text{shoulder-up}}$ の外積によって算出されるベクトルとベクトル $\underline{r}_{\text{shoulder-up}}$ と $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度から 90 度を引くことによって算出した。外転・内転角度はベクトル $\underline{r}_{\text{shoulder-front}}$ と $\underline{r}_{\text{shoulder-up}}$ の外積によって算出されるベクトルとベクトル $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ と $\underline{r}_{\text{shoulder-front}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度とした。肩の内旋・外旋角度は $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ と $\underline{r}_{\text{shoulder-front}}$ の外積によって算出されるベクトルと $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度とした。肘の屈曲・伸展角度は $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm}}$ のベクトルがなす角度とした。上橈尺関節の回内・回外角度は $\underline{r}_{\text{upper arm}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm}}$ の外積によって算出されるベクトルと $\underline{r}_{\text{forearm}}$ と $\underline{r}_{\text{wrist}}$ の外積を $\underline{r}_{\text{forearm} \times \text{wrist}}$ とし、ベクトル $\underline{r}_{\text{forearm} \times \text{wrist}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度から 90 度引くことによって算出した。手関節の尺屈・橈屈角度はベクトル $\underline{r}_{\text{wrist}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm} \times \text{wrist}}$ の外積によって算出されるベクトルと $\underline{r}_{\text{forearm} \times \text{wrist}}$ と $\underline{r}_{\text{hand}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度から 90 度を引くことによって算出した。手関節の掌屈・背屈角度は $\underline{r}_{\text{wrist}}$ と $\underline{r}_{\text{forearm} \times \text{wrist}}$ の外積によって算出されるベクトルと $\underline{r}_{\text{wrist}}$ と $\underline{r}_{\text{hand}}$ の外積によって算出されるベクトルがなす角度から 90 度を引くことによって算出した。

第3節 結果

表 4-1 は肩の最大外旋時とディスクリリース時における、両群の投てき腕の各関節角度を表している。肩の最大外旋時とディスクリリース時における肩関節、および肘関節の関節角度について、いずれも両群間に有意な差は確認されなかった。肩の最大外旋時において、上橈尺関節の回外・回内角度および手関節の尺屈角度に両群間で有意な差が確認された。最大外旋時において、熟練者群の上橈尺関節は回外位であったのに対し、未熟練者群はほぼ0度の肢位であった。肩の最大外旋時において、手関節の尺屈角度に両群間で有意な差が確認された。最大外旋時において、熟練者群の尺屈・橈屈角度はほぼ0度の肢位であったのに対し、未熟練者群の手関節は尺屈位であった。リリース時では手関節の尺屈角度と掌屈角度に両群間で有意な差が確認された。リリース時の手関節の尺屈・橈屈角度において、両群共に尺屈位であったが、未熟練者群は熟練者群に比べて有意に大きい値を示した。リリース時の手関節の掌屈・背屈角度において、両群共に背屈位であったが、未熟練者群は熟練者群に比べて有意に小さい値を示した。

図 4-4 は両群の投てき腕各関節における関節角度の変化を表している。肩関節では両群ともに、水平内転運動、内転運動、内旋運動によってリリースに達していた。肘関節では両群ともに、伸展運動によってリリースに達していた。手関節の尺屈・橈屈と掌屈・背屈運動では、両群共にそれぞれ尺屈と掌屈動作によってリリースに達していた。上橈尺関節の回内・回外運動には両群間で顕著な違いが認められた。熟練者群の上橈尺関節は回外位からリリース直前に回内することによってリリースに達していた。それに対し、未熟練者群の上橈尺関節は回内位から回外することによってリリースに達していた。

Table 4-1. Joint angles at selected instants of the throwing motion disc release.

Angular position	Subject	MER (deg)	DRL (deg)
Horizontal abduction(+)-adduction(-)	Skilled	68.5 ± 14.7	62.1 ± 14.5
	Unskilled	63.5 ± 27.6	59.2 ± 24.4
Internal(+)-External(-) rotation	Skilled	- 107.1± 19.7	- 74.3 ± 13.3
	Unskilled	- 91.7 ± 20.7	- 80.7 ± 24.7
Abduction(+)-Adduction(-)	Skilled	59.1 ± 9.7	57.6 ± 7.8
	Unskilled	44.3 ± 19.3	51.3 ± 12.7
Extension(+)-Flexion(-)	Skilled	- 88.7 ± 7.4	- 36.2 ± 6.5
	Unskilled	- 79.1 ± 20.2	- 42.3 ± 14.5
Pronation(+)-Supination(-)	Skilled	- 26.2 ± 22.7*	- 26.7 ± 13.3
	Unskilled	0.3 ± 14.2	- 25.4 ± 18.9
Ulnar(+)-Radial(-) deviation	Skilled	0.7 ± 9.6*	14.0 ± 6.1*
	Unskilled	16.1 ± 16.8	21.4 ± 6.6
Palmar(+)-Dorsi(-) flexed	Skilled	- 50.0 ± 9.5	- 28.3 ± 8.4*
	Unskilled	- 46.1 ± 13.0	- 18.6 ± 8.8
Time (s)	Skilled	0.948± 0.009	1.000
	Unskilled	0.972± 0.019	1.000

Values represent mean ±SD. MER = maximum external rotation of the shoulder. DRL = disc release. *Indicates a significant difference between skilled and unskilled (*p<0.05).

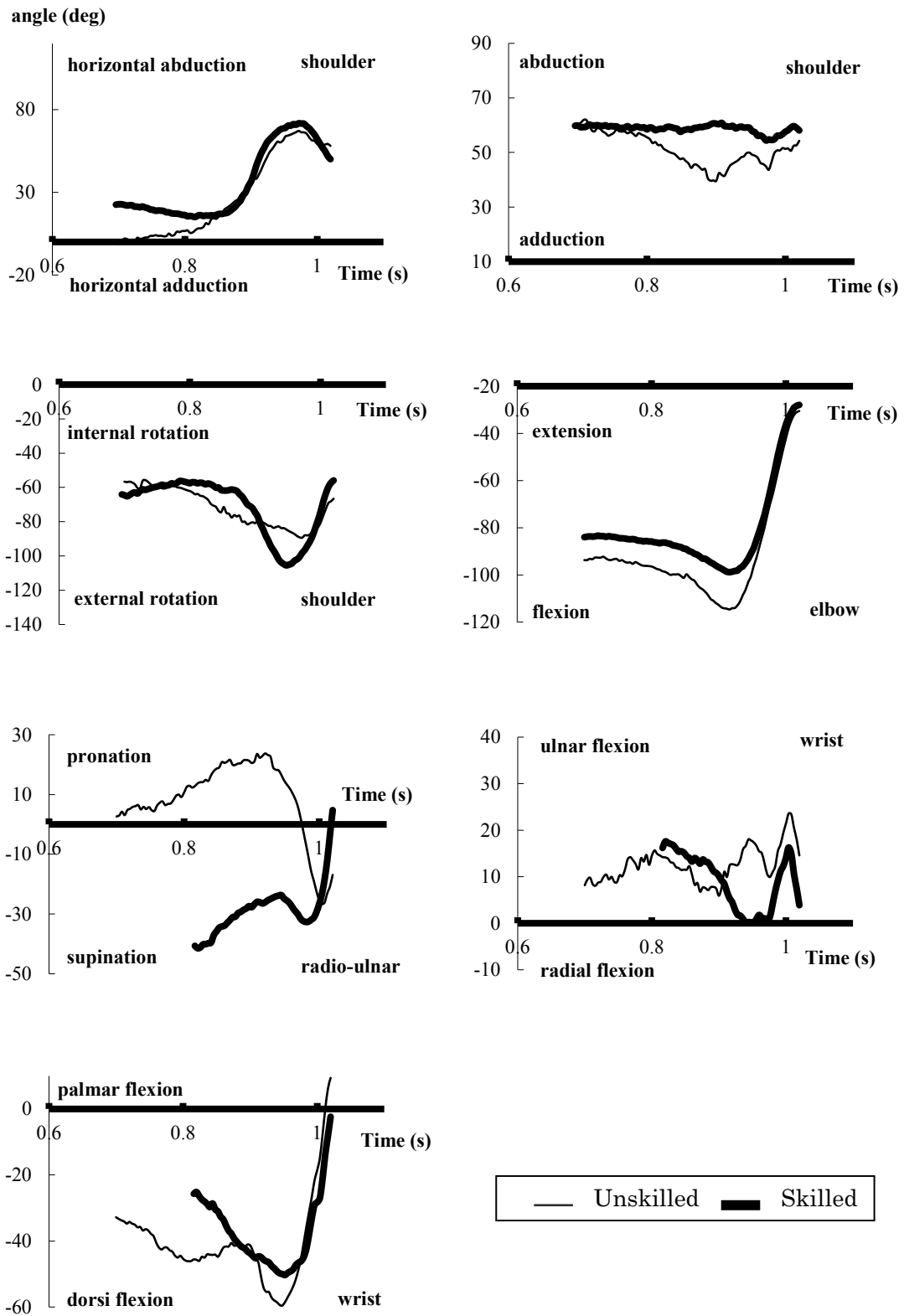


Figure 4-4. Two lines show the changes of mean values of seven joint angles of the throwing arm for unskilled and skilled throwers synchronized with the disc release time ($t = 1.000$ s).

第4節 考察

フライングディスクの指導書によると、一般的にフォアハンドスローにおけるスナップ動作とは、上橈尺関節の回外動作と手関節の尺屈動作による一連の動作とイメージされているようである (Stancil 1975、Danna & Poynter 1979、Baccarini & Booth 2008)。フライングディスクのフォアハンド遠投動作を対象とした本研究における肩や肘、および手首の関節のリリース直前の関節角度の変化は両群間にほぼ同様の傾向がみられた。しかし、上橈尺関節の回内・回外運動に両群間で顕著な違いが認められた。

上橈尺関節の動作に着目すると、未熟練者群は肩の最大外旋以前から回内位を保ち、リリース直前からリリースまで回外運動を引き起こしていた。それに対し、熟練者群は肩の最大外旋以前から回外位を保ち、最大外旋直後に一度より回外した後、回内動作中にディスクをリリースしていた。つまり本研究の結果によると、リリース直前から未熟練者群の上橈尺関節と手関節の運動はそれぞれ回外と尺屈および掌屈という一連の動作によって構成されていたのに対し、熟練者群では上橈尺関節の回内動作、手関節の掌屈および尺屈動作によって構成されていた。したがって、ディスクのフォアハンド遠投動作における末端部の効果的な動作とは、回内と掌屈、尺屈による一連の動作であると特徴づけられる。

熟練者群のリリース直前の回内運動において、リリースまでの角度変動が極めて小さかった。また、フォアハンドの握り方からみて、上橈尺関節の回転軸はディスク平面と平行に近いと推測される。したがって、上橈尺関節の回内運動は直接的にディスクのスピン速度の増加へ貢献しているとは考えにくい。未熟練者群の回外動作は手掌を上空に向けたまま、関節可動域の小さい手関節の尺屈動作をリリース方向の動作へ加えることとなる。一方、熟練者群の回内動作

は手の平をリリース方向へ向けることが可能となる。これは可動範囲の大きい掌屈運動をリリース方向の動作へ加えることとなる。つまり、この掌屈動作がスピン速度を向上させるという直接的な役割を果していると推測される。この両群の上肢末端部における運動違いが、両群間の1.4倍というスピン速度の差を作り出していた大きな要因のひとつと考えられる。したがって、フォアハンド遠投動作において、肩の最大外旋前後で上橈尺関節を回外位にし、リリース直前から上橈尺関節を回内することは、可動範囲が大きく高速な掌屈運動を効果的に利用してディスクの高速度のスピンを作り出し、かつ遠投距離を増加させるために重要な技術であると考えられる。

第5節 まとめ

フライングディスクのフォアハンド遠投動作の指導において、これまで手関節の運動に焦点が当てられてきた。その指導上の表現は、手関節の運動やその回りの筋力のみを使って投げる動作を彷彿させるものであった。投動作の上肢の運動は非常に高速となるため視覚では捉えることが難しい。そのため、これまで使用されてきた表現がフォアハンド遠投動作を正確に説明できているかは疑問である。しかし、フォアハンドスローにおける上肢関節運動の科学的な研究は見当たらない。つまり、フォアハンド遠投動作とはいったいどのような投てき技術なのか明らかにされていない（問題点3）。そこで本研究の目的は、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作における投てき腕各関節角度の変化を比較し、両群間の運動学的な違いを明らかにすることであった。

熟練者群の上橈尺関節は回外位の姿勢から回内運動によってリリースに向かっていた。これは可動範囲の大きい掌屈動作をリリース方向の動作に加えることを可能とする。この上肢末端部における一連の動作は、スピン速度の増加に対して、重要な技術であると考えられる。それに対して、未熟練者群の上橈尺関節は回内位の姿勢から回外運動によってリリースに向かっていた。これは可動範囲の小さい手関節の尺屈運動をリリース方向の動作に加えることになる。したがって、未熟練者は肩の最大外旋前後で上橈尺関節を回外位に保つこと、およびリリース直前に回内を含めた手関節の運動を行うこと、これらによってスピン速度を高めることが可能になると推察された。

第5章 総合考察

本研究では、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作をバイオメカニクスの観点から比較し、両群のフォアハンド遠投動作における運動学的・運動力学的な違いを明らかにすることを目的とし、3つの研究を行った。本章では、これらの研究結果を総合的に考察し、未熟練者における遠投距離増加のための有用な知見を示す。

第1節 未熟練者の遠投距離増加のための要因

第2章（研究課題1）では、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作におけるディスクのリリース時の力学的変量に着目した。その研究結果から、未熟練者の遠投距離増加のためにはスピン速度の増加が優先的な要因であることが明らかとなった。リリース直前に速度が最大に達するため、ディスクはリリース時に大きな力が空気から作用する。それはディスクの姿勢を大きく変化させる。しかし、スピン速度を高めることができれば空気から作用する力の影響を抑えることが可能となり、リリース時、およびその直後において空気抵抗の少ない姿勢が維持され、遠投距離は増加する。

第3章（研究課題2）では、手・指先からディスクに作用する回転力とスピン速度の関係性を明らかにし、スピン速度増加の力学的メカニズムについて検討した。リリース直前では両群ともに、ディスクの縁を指先で直線的に押すことによって力のモーメントを作り出し、スピン速度を増加させていた。しかし、肩の最大外旋時に着目すると、熟練者は手の内からディスクに作用するトルクによってリリース方向のスピンを開始、急増させていた。それに対し、未熟練者ではトルクの作用がほぼ確認することができなかった。したがって、未熟練

者のスピン速度はディスクが握られている肩の最大外旋前後で、手の内からディスクに回転力を与えることで増加することが明らかとなった。

第4章（研究課題3）では、フォアハンド遠投動作における投てき腕の各関節角度の変化に着目し、それらを両群間で比較することで未熟練者の遠投距離増加のための要因について検討した。その結果によると、肩、肘、手首の運動では両群でほぼ同様の傾向を示した。それに対し、上橈尺関節の回内、回外運動では両群間で明らかな違いが確認された。肩の最大外旋前後において、熟練者群は上橈尺関節を回外位に保っていた。その後、リリース直前では熟練者群は回外位からの回内、掌屈動作によってディスクをリリースしていた。それに対し、肩の最大外旋前後において、未熟練者群は上橈尺関節を回内位に保ち、リリース直前で回外および尺屈動作によってディスクをリリースしていた。熟練者群は手部を回内方向に回転させることで手掌をリリース方向に向け、可動範囲の大きい掌屈動作をリリース方向の動作に加えることが可能となる。これによってスピン速度を増加させていたと考えられる。したがって、未熟練者は上橈尺関節を回外位から回内し、手首の尺屈ではなく掌屈動作によってディスクをリリースすることでスピン速度が増加すると推測された。

第2節 指導現場への示唆

ここまで示した考察から、未熟練者の遠投距離の増加を目指す指導現場に対して、実践的な提言を示す。

ディスクの運動やディスクに作用した力は、投てき者の身体運動によって作り出された結果である。着目されるべき最も重要な指導のポイントとしては、投てき腕の手関節と上橈尺関節の運動であろう。

指導書では、フォアハンドスローは「手掌を上方へ向けた状態を保ちながら手関節の尺屈動作によって投げ出すこと (Stancil 1975)」「手首だけでディスクを投げる。手のひらを最初から最後まで常に上向きし、ボールを投げるように手首をタテにスナップするのではなく横に動かしてディスクを投げる (Danna & Poynter 1979)」、「手掌を空に向けて、スナップでディスクをリリースする

(Baccarini & Booth 2008)」と説明されている。つまり、フォアハンドスローにおけるリリース直前の投てき腕末端部の運動は、指導者や選手の中で上橈尺関節の回外と手関節の尺屈とイメージされている。指導者や選手のこのイメージと実際の運動の違いがスピン速度の増加を阻み、フォアハンド遠投動作の習熟速度を遅延させている要因のひとつと推測される。したがって、指導者や選手が先ず行うべきことは、熟練者と未熟練者で実際に行われているリリース直前の上橈尺関節と手関節の運動をそれぞれ理解し、これまで説明されてきた投てき腕末端部の動作のイメージを改善することが重要であると考えられる。また、未熟練者を指導する場合、上橈尺関節と手関節の回外・尺屈によってリリース後に手掌が上向きになっているのではなく、手部が回内・掌屈方向に回転して動作が終了しているかどうかを確認することが、動作を評価するポイントとなるであろう。

第3節 本研究の制約と今後の研究課題

本研究の結果は、“実験環境の設定における制約”と“力学モデルの構築における制約”という2つの制約のもとに算出されたものである。1つ目の制約は、第2章（研究課題1）において、ディスク上面に3つの半球型反射マーカを装着したことである。3つのマーカの合計重量は約1グラムであるため、それらはディスクの飛行特性を大きく変化させるものではないと推測されるが、多少の

影響が考えられる。したがって、より精度の高いデータを取得するために、今後の課題として取り組まれるべきである。

2つ目の制約は、第3章（研究課題2）で、加速局面の力の作用点を中指先端と仮定したことである。そのため、算出されたトルクは手のどのような運動によって生じたものなのか明らかにすることは出来なかった。今後の研究では、肩の最大外旋からディスクが手掌から離れるまでのディスクが握られている局面と、ディスクが手掌から離れた時点からディスクリリースまでの中指先端のみでディスクに接している局面の二つに分けて、分析を行う。この二つの局面に着目し、第三中手指関節を含めた上肢関節の運動を力学的観点から検討する。

本研究では上肢の関節運動に着目し、未熟練者の遠投距離増加のための知見を得た。しかし、これらのことは、ディスクのフォアハンド遠投動作において、投てき腕以外の身体部分の運動が重要でないことを意味するものではない。一般にディスクの投動作では投てき腕と同じ側の脚が踏み出し脚となるため、準備局面（投てき開始時から踏み出し脚の接地時まで）における下肢と体幹部の運動は、野球の投手などにおける投球動作とは全く異なる動作になると考えられる。つまり、ディスクの投動作における体幹部、および下肢の投動作では、ディスクを加速するための特有の仕組みがあると考えられる。したがって、フォアハンド遠投動作の指導の質をより向上させるためには、体幹部と下肢の運動についても運動学および運動力学の両側面から着目し、遠投距離増加のためのメカニズムを研究することも必要であろう。

第6章 総括

フライングディスクを用いた競技の中で最も競技人口の多いアルティメットでは、利き手側から投げ出すフォアハンドスローが頻繁に使用される。この投てき技術は、他のどの投てき動作よりも素早い動作で正確にディスクを味方レシーバーに運ぶことができる。そのため、フォアハンドスローによるロングパスは、試合の勝敗を左右する重要な技術と考えられている。しかし、競技初心者はもちろん、競技経験の長い選手でもフォアハンドスローによってディスクを遠くへ飛ばすことが出来ない選手は多い。その理由の1つとして、フォアハンドスローに関する科学的な研究がほとんど行われてこなかったことが考えられる。そのため、フォアハンドスローの指導では「スナップをきかせて投げる」という表現のみが使用されている。つまり、フォアハンドスローの指導方法は非常に乏しく、指導上の着眼点はコーチや選手の経験や勘のみに委ねられている。したがって、本研究は、熟練者と未熟練者のフォアハンド遠投動作をバイオメカニクスの観点から比較し、未熟練者のフォアハンド遠投動作における遠投距離増加のための要因を明らかにすることを目的とした。この目的を達成するために、熟練者群と未熟練者群のフォアハンド遠投動作によって投げ出された瞬間のディスクの力学的変量の比較および各群内におけるそれぞれの変量と遠投距離の関係性の評価（研究課題1）、肩の最大外旋からディスクリリースまでのディスク加速局面における両群間の手・指からディスクに作用する回転力の比較（研究課題2）、肩の最大外旋からディスクリリースまでのディスク加速局面における両群のフォアハンド遠投動作の比較（研究課題3）を行った。それらの結果は、以下のようにまとめられる。

(1) ディスクのリリース時の力学的変量における両群間の相違

未熟練者群の遠投距離は熟練者群に比べて小さかった。未熟練者群のリリース時のスピン速度は熟練者群に比べて低く、未熟練者群のディスクの姿勢の角速度は熟練者群に比べて高かった。また、未熟練者群の遠投距離はリリース時のスピン速度に有意な相関関係が確認された。

(2) スピン速度増加の力学的メカニズムにおける両群間の相違

熟練者はディスクを握っている最大外旋前後で、ディスクに手掌から作用するトルク由来の回転力の増加が確認された。未熟練者では同時期においてトルクがほぼ増加しないことが確認された。

(3) フォアハンド遠投動作における上肢関節運動の両群間の相違

リリース直前において、熟練者は上橈尺関節を回外位から回内、手関節を掌屈していた。それに対し、未熟練者は上橈尺関節を回内位から回外、手関節を尺屈していた。

本研究は、習得の難しいフォアハンド遠投動作について3つの（バイオメカニクスの）研究課題から分析を行った。その結果として練習・指導の着眼点についての示唆を得た。これらはより良い指導方法の構築や改善に有益な情報であると考えられる。今後、フォアハンドスローの習得がこれまでより簡単なものとなれば、さらに多くの人々がディスクスポーツを深く、継続的に楽しむことが可能になるだろう。それはディスクスポーツの更なる発展に寄与するものと考えられる。したがって、これまで研究がなされていなかったスポーツの特徴

を、バイオメカニクスの観点から明らかにした本研究は体育学およびスポーツ科学の領域の更なる発展に貢献するものと考えられる。

参考・引用文献

- Abdle-Aziz, Y., & Karara, H. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In papers from the American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, ASP, 1-18.
- Baccarini, M. & Booth, T. (2008). Essential Ultimate: teaching, coaching, playing. Ontario, Human Kinetics. 14.
- Danna, M. & Poynter, D. (1979). Frisbee Handbook. Santa Barbara, California, U.S.A, Quick Fox Company (translated by Kobayashi, S.), 40.
- Dapena, J. (1985). Factors affecting the fluctuations of hammer speed in a throw. In Winter, D. A. (Eds.) Biomechanics IX-B. Human Kinetics, Illinois, 499-503.
- Dessureault, J. (1978). Kinetic and Kinematic factors involved in shot putting. Biomechanics VI-B, 51-60.
- Dyson, G. H. G. (1962). The mechanics of athletics. University of London Press, Ltd., London. (金原勇, 渋川侃二, 古藤高良訳, 陸上競技の科学, 大修館書店, 1972) .
- Feltner, M. & Dapena, J. (1986). Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. International Journal of Sport Biomechanics, 2, 235-259.
- Fleisig, G. S., Andrews, J. R., Dillman, C. J., and Escamilla, R. F. (1995). Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanics. The American Journal of Sports Medicine, 23, 233-239

- Gregory, S. R. & Robert, S. (1995). A three-dimensional dynamic analysis of the quarterback's throwing motion in American football. *Journal of applied biomechanics*, 11, 443-459.
- 廣瀬 茂男 (1978) ロボット工学 ー機械システムのベクトル解析ー, 裳華房, 50-76.
- Hubbard, M and Hummel, S. (2000) Simulation of Frisbee Flight, 5th Conference on Mathematics and Computers in Sport, G Cohen (Ed.), University of Technology, Sydney, Australia, paper No. 14-16.
- Hummel S. & Hubbard M. (2002). Identification of Frisbee Aerodynamic Coefficients using Flight Data, 4th International Conference on the Engineering of Sport, Kyoto, Japan.
- International Olympic Committee. (2016). Recognised Sports Federations. Retrieved from <http://www.olympic.org/content/the-ioc/recognised-sport-federations/419/>
- 吉田 陽平, 小池 関也 (2008) やり投げにおけるやり加速メカニズムに関する動力学的分析 (受動的関節トルクの機能とその発生要因), 日本機械学会ジョイント・シンポジウム2008 講演論文集, 264-269.
- Komi, P. V., & Mero, A. (1985). Biomechanical Analysis of Olympic Javelin Throwers. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1, 139-150.
- 黒須 茂 (1996) コマの不思議, 山文社, 97-103.
- Mero, A., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E. & Gregor, R., J. (1994) Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *Journal of Applied Biomechanics*. 10, 166-177.
- Nakamura Y. & Fukamachi N. (1991). Visualisation of Flow Past a Frisbee, *Fluid Dynamics Research*, 7, 31-35.

- 日本フライングディスク協会 (1992) フライングディスク入門アルティメットのすすめ, タッチダウン株式会社, 21-26, 32-33.
- 日本フライングディスク協会 (2003) フライングディスク指導者テキスト, タッチダウン株式会社, 16.
- 日本フライングディスク協会 (2015) 日本フライングディスク協会公式ハンドブック ～IOC 公認競技 11 種目の概要～, 一般社団法人日本フライングディスク協会, 24.
- Potts, J. R. & Crowther, W. J. (2002). Frisbee aerodynamics. Proceedings of the 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, 2002-3150 (pp. 1-14). St. Louis, MO: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Retrieved from <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2002-3150> doi: 10.2514/6.2002-3150
- 桜井 伸二 (1992) 投げる科学, 大修館書店, 41-42, 56,59, 119.
- Sakurai S, Ikegami Y, Okamoto A, Yabe K, and Toyoshima S. (1993). A Three-Dimensional Cinematographic Analysis of Upper Limb Movement During Fastball and Curveball Baseball Pitches. Journal of Applied Biomechanics, 9, 47-65.
- 笹川 慶, 桜井 伸二 (2011) フライングディスクと投擲腕各関節の水平速度と水平加速度の変化からみたサイドアーム遠投動作の特徴 - アルティメットにおける熟練者と未熟練者の比較 -, 中京大学体育研究所紀要, 25, 1-12.
- 笹川 慶, 桜井 伸二 (2017) フライングディスクの誕生と変遷 - ポップコーン缶のフタからディスク・スポーツへ -, 体育の科学, 67, 590-597.
- 渋川 侃二 (1970) 運動力学, 大修館書店, 141-149.
- Stancil, E.D.J. (1975). Frisbee. New York: Workman Publishing Company, pp. 48, 165.

Stilley G.D. & Carstens D.L. (1972). Adaptation of Frisbee Flight Principle to Delivery of Special Ordnance, AIAA 2nd Atmospheric Flight Mechanics Conference, Palo Alto, California, USA, paper No. 72-982.

Victor A. (1998). The Complete Book of Frisbee: The History of the Sport & the First Official Price Guide, Oceanside, CA, American Trends Publishing Co.

Winter, D.A. (1990). Biomechanics and motor control of human movement (4nd ed.). New York, Wiley Interscience.

World Flying Disc Federation. (2015). 2015 Member Associations Census Results.

Retrieved from

http://www.wfdf.org/downloads/doc_download/541-2015-member-association-census-information-

Yamashita, Y. & Kawamura, T. (2007). Computation of Flow around a Rotating Flying Disk. Natural Science Report, Ochanomizu University, 58, 39-44

安田 邦男 (1999). フライングディスクの飛行・空力特性について, 日本航空宇宙学会論文集, 47, 16-22. doi: 10.2322/jjsass.47.314.

Yu, B., Gabriel, D., Nobel, L., & Kai-Nan, A. (1999). Estimate of optimal cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter. Journal of Applied Biomechanics, 15, 318–329. doi: <http://dx.doi.org/10.1123/jab.15.3.318>