

フライングディスクのスピンの生成に対する体幹部と 投てき腕の各関節運動の貢献度

——アルティメット選手のフォアハンド遠投動作に着目して——

Contribution of each joint movement of trunk and
throwing arm to generation of spin velocity of flying disc:
Focusing on forehand long-throwing motion of Ultimate players

笹川 慶

Kei SASAKAWA

Abstract

The purpose of this study was to determine the magnitude of the disc spin velocity generated by each joint angular velocity of the trunk and throwing arm in the forehand long throw movement of experienced Ultimate players and the contribution of each joint angular velocity to the generation of spin velocity. The study was conducted on 20 experienced members of a university Ultimate team. A three-dimensional motion capture system was used in a gymnasium to eliminate wind effects and to obtain the three-dimensional coordinates of the disc thrown by the forehand long throw motion. Disc kinematic variables, joint angular velocities, and disc spin velocities derived from each joint angular velocity were calculated. The top five joint angular velocities with the largest contribution to increasing disc spin velocity were shoulder internal rotation velocity, FT joint flexion velocity, trunk forward rotation velocity, wrist palmar flexion velocity, and elbow extension velocity, which accounted for approximately 83% of the total. Therefore, these joint movements were considered to be a particularly important kinematic factor for the generation of disc spin velocity in experienced Ultimate players.

1. 緒言

アルティメットはフライングディスク（以下、ディスクという）を用いたスポーツの中で最も競技人口の多いチームスポーツである。これ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、バスケットボールやアメリカンフットボールのように2つのチームが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。

様々な投てき技術の中で、利き手側から投げ出す“フォアハンドスロー”（図1）は最もよく使用される基本技術のひとつである。フォアハンドスローは、他の投てき技術に比べ素早い動作で正確にディスクを投げるができる。そのため、広いコートで効率よく得点を重ねることができ、試合の勝敗を左右する重要な技術とされている。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く、難しい技術とされている（Baccarini & Booth, 2008; Danna & Poynter, 1979; Moran, 1982; Poynter, 1977; Roddick & Knudsen, 1980; Sasakawa & Sakurai, 2008; Sasakawa, Umegaki & Sakurai, 2018; Stancil, 1975）。

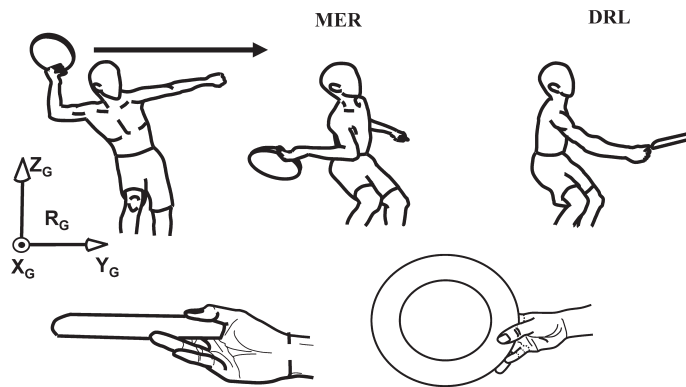


図1 フォアハンドスローによる遠投動作(上段)とディスクの握り方(下段)。肩の最大外旋(MER)直前からディスクリリース(DRL)までの投てきフォームを表す。Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) より引用。

Potts & Crowther (2002) は、高速度のスピンは飛行中におけるディスクの姿勢の剛性を高めることを報告している。また、熟練者のフォアハンド遠投動作を対象とした研究は、ディスクの遠投距離とスピン速度の間に正の相関関係があったことを報告している（Sasakawa, Umegaki & Sakurai, 2018）。したがって、ディスクのスピンは飛行距離に対して重要な役割を持っている。しかし、熟練者はどのような仕組みによってスピン速度を生成しているのか明らかにされていない。

腕や脚のように剛体が関節構造を介して接続している剛体リンク系の場合、近位の剛体に対する遠位の剛体の相対角速度はそれぞれ末端部の回転速度の構成値となる（Kane & Levinson, 1985）。ディスクのフォアハンドスローにおいてもこの力学的原則を用いることで体幹部と投てき腕の各関節角速度がどれだけスピンの生成に貢献しているのかを知ることができると考えられる。これによって得られた知見はフォアハンドによる遠投の指導・練習方法の改善に寄与すると考えられる。

本研究の目的は、アルティメット経験者のフォアハンド遠投動作において、1) 体幹部と投てき

腕の各関節角速度が生成するディスクのスピンの速度の大きさを明らかにすること、2) スピン速度の生成に対する各関節角速度の貢献度を明らかにすることである。

2. 方法

2.1. 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20名(競技歴1年4名;2年4名;3年6名;4年6名)を経験者群(年齢 20.8 ± 1.2 歳;体重 65.7 ± 3.9 kg;身長 173.0 ± 5.8 cm)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。

2.2. 実験環境の設定

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。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。ディスクの運動学的変数を算出するため、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)。また、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ーを装着した。反射マーカー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

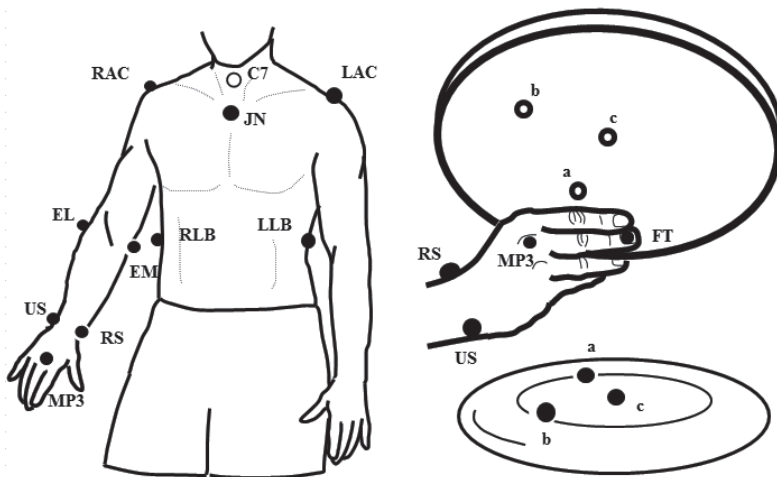


図2 体幹部と投てき腕、およびディスクに取り付けられた反射マーカー。
Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) より引用。

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に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した。また, 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。

2.3. データの平滑化処理

最適遮断周波数 (27 ~ 31Hz) は各投てき者の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を用いて計測点の 3 次元座標を平滑化した (Winter 1990)。

2.4. ディスクの運動学的変数

本研究は, Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) の方法を用いてディスクに局所座標系 (R_{disc}) を構築し, ディスクの運動学的変数 (初速度, スピン速度, Nose-up down 角度, 左・右傾斜角度, 迎え角) を算出した (図 3)。なお, 上記の方法で算出されるディスクのスピンの速度は, ディスクに添付された反射マーカを使用して算出されることから, 本研究はこのスピン速度をディスクマーカ由来のスピン速度 ($\omega_{Spin, disc\ mark/R_{disc}}$) と定義した。

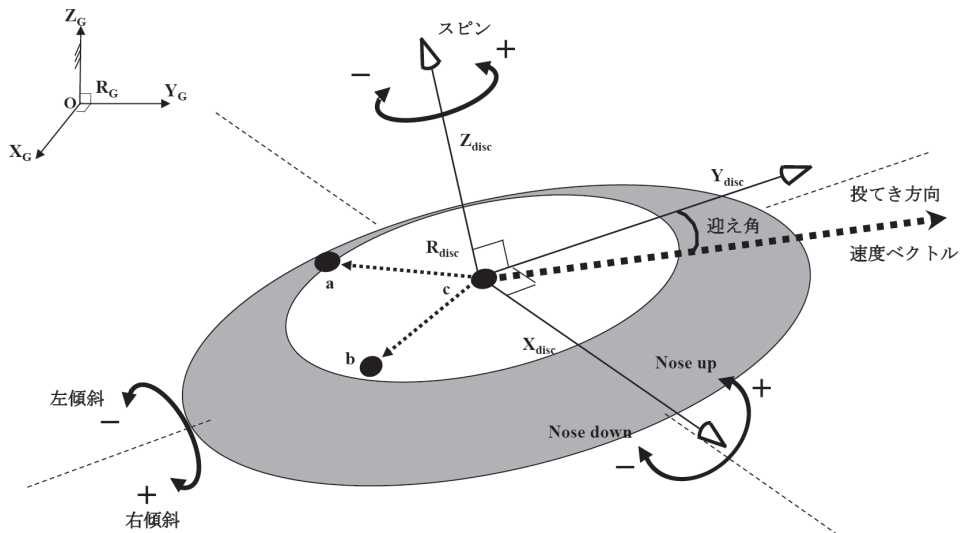


図 3 ディスクの運動の定義。Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) をもとに作図。

2.5. 体幹部と投てき腕のセグメント座標系

体幹部座標系 (R_{trunk}) は, X_{trunk} , Y_{trunk} , Z_{trunk} から構成される。 X_{trunk} は, C7とJNを結ぶ線分の中点からRACに向かうベクトルと定義された。 Y_{trunk} は, LLBとRLBを結ぶ線分の中点からC7とJNを結ぶ線分の中点に向かうベクトルと X_{trunk} の外積からなるベクトルとして定義された。 Z_{trunk} は, X_{trunk} と Y_{trunk} の外積からなるベクトルとして定義された。上腕部座標系 ($R_{upper arm}$) は, $X_{upper arm}$, $Y_{upper arm}$, $Z_{upper arm}$ から構成される。 $Z_{upper arm}$ はEMとELを結ぶ線分の中点からRACへ向かうベクトルとして定義された。 $Y_{upper arm}$ は $Z_{upper arm}$ と, EMとELを結ぶ線分の中点からRSとUSを結ぶ線分の中点に向かうベクトルの外積からなるベクトルとして定義された。 $X_{upper arm}$ は $Y_{upper arm}$ と $Z_{upper arm}$ の外積からなるベクトルとして定義された。前腕部座標系 ($R_{forearm}$) は, $X_{forearm}$, $Y_{forearm}$, $Z_{forearm}$ から構成される。 $Z_{forearm}$ は, RSとUSを結ぶ線の中点からEMとELを結ぶ線の中点に向かうベクトルと定義された。 $Y_{forearm}$ は, $Z_{forearm}$ とUSからRSに向かうベクトルとの外積によって算出されたベクトルとして定義された。 $X_{forearm}$ は $Y_{forearm}$ と $Z_{forearm}$ の外積からなるベクトルとして定義された。手部座標系 (R_{hand}) は, X_{hand} , Y_{hand} , Z_{hand} から構成される。 Z_{hand} は, MP3からRSとUSを結ぶ線分の中点に向かうベクトルとして定義された。 Y_{hand} は, Z_{hand} とUSからRSに向かうベクトルの外積からなるベクトルとして定義された。 X_{hand} は Y_{hand} と Z_{hand} の外積からなるベクトルとして定義された。第三指部座標系 (R_{finger}) は X_{finger} , Y_{finger} , Z_{finger} によって構成される。 Z_{finger} は, FTからMP3に向かうベクトルとして定義された。 Y_{finger} は, Z_{finger} と X_{hand} の外積からなるベクトルとして定義された。 X_{finger} は, Y_{finger} と Z_{finger} の外積からなるベクトルとして定義された。本研究はディスクを第三指末節骨遠位端 (FT) で仮想的に接続している投てき腕のセグメントのひとつ (FT-disc セグメント) として仮定した。FT-disc セグメント座標系 ($R_{FT-disc segment}$) は, $X_{FT-disc segment}$, $Y_{FT-disc segment}$, $Z_{FT-disc segment}$ から構成される。 $X_{FT-disc segment}$ は, ディスクの点cから点aに向かうベクトルと点cから点bに向かうベクトルの外積からなるベクトルとして定義された。 $Y_{FT-disc segment}$ は, 点cからFTに向かうベクトルと $X_{FT-disc segment}$ の外積からなるベクトルとして定義された。 $Z_{FT-disc segment}$ は, $X_{FT-disc segment}$ と $Y_{FT-disc segment}$ の外積からなるベクトルとして定義された。

2.6. 体幹部と投てき腕の関節座標系

体幹部と投てき腕の関節角速度を算出するために, 体幹部と投てき腕の各関節に座標系 (関節座標系) を定義した。本研究は体幹部の関節座標系として R_{trunk} を使用した。肩関節座標系 ($R_{shoulder}$) は $X_{shoulder}$, $Y_{shoulder}$, $Z_{shoulder}$ によって構成された。 $Z_{shoulder}$ は, EMとELを結ぶ線分の中点からRACへ向かうベクトルによって定義された。 $Y_{shoulder}$ は, $Z_{shoulder}$ とJNからRACに向かうベクトルの外積からなるベクトルとして定義された。 $X_{shoulder}$ は, $Y_{shoulder}$ と $Z_{shoulder}$ の外積からなるベクトルとして定義された。肘関節座標系 (R_{elbow}) は X_{elbow} , Y_{elbow} , Z_{elbow} によって構成された。 Z_{elbow} は $Z_{forearm}$ として定義された。 Y_{elbow} は $Z_{forearm}$ と $Z_{upper arm}$ の外積からなるベクトルとして定義された。 X_{elbow} は Y_{elbow} と Z_{elbow} の外積からなるベクトルとしてそれぞれ定義された。手関節座標系 (R_{wrist}) は X_{wrist} , Y_{wrist} , Z_{wrist} によって構成された。 Z_{wrist} は, MP3からUSとRSの中点に向かうベクトルとして定義した。 Y_{wrist} は, Z_{wrist} とUSからRSに向かうベクトルの外積によって得られたベクトルとして定義した。 X_{wrist} は, Y_{wrist} と Z_{wrist} の外積によって得られたベクトルとして定義した。第三指中手骨遠位端関節座標系 (R_{MP3}) は X_{MP3} , Y_{MP3} , Z_{MP3} によって構成された。 Z_{MP3} は, FTからMP3に向かうベクトルとして定義された。 Y_{MP3} は, Z_{MP3} と X_{hand} の外積によって得られたベクトルとして定義された。 X_{MP3} は, Y_{MP3} と Z_{MP3} の外積からなるベクトルとして定義された。本研究は関節角速度由

来のスピン速度について詳細に分析するために、FT に仮想的な関節座標系 (FT 関節座標系) を構築した。FT 関節座標系 ($R_{FT\ joint}$) は $X_{FT\ joint}$ と $Y_{FT\ joint}$, $Z_{FT\ joint}$ によって構成された。 $X_{FT\ joint}$ は、点 c から点 a に向かうベクトルと点 c から点 b に向かうベクトルの外積によって得られたベクトルとして定義された。 $Y_{FT\ joint}$ は、点 c から FT に向かうベクトルと $X_{FT\ joint}$ の外積からなるベクトルとして定義された。 $Z_{FT\ joint}$ は、 $X_{FT\ joint}$ と $Y_{FT\ joint}$ の外積からなるベクトルとして定義された。

2.7. 関節角速度

体幹部と投てき腕における各セグメント座標系の絶対角速度ベクトル ($\omega_{ab, segment\ i\ x/R\ segment\ i}$, $\omega_{ab, segment\ i\ y/R\ segment\ i}$, $\omega_{ab, segment\ i\ z/R\ segment\ i}$) は、以下の式によって算出した。

$$\omega_{ab, segment\ i\ x/R\ segment\ i} = d/dt (j_{segment\ i}) \cdot k_{segment\ i} \quad (1)$$

$$\omega_{ab, segment\ i\ y/R\ segment\ i} = d/dt (k_{segment\ i}) \cdot i_{segment\ i} \quad (2)$$

$$\omega_{ab, segment\ i\ z/R\ segment\ i} = d/dt (i_{segment\ i}) \cdot j_{segment\ i} \quad (3)$$

ここで、 $i_{segment\ i}$, $j_{segment\ i}$, $k_{segment\ i}$ はそれぞれセグメント i 座標系の X, Y, Z 軸の単位ベクトルである。 $d/dt (i_{segment\ i})$ と $d/dt (j_{segment\ i})$, および $d/dt (k_{segment\ i})$ は、単位ベクトルの時間微分から得られる値である。式 (1)~(3) によって算出された絶対角速度ベクトルは慣性系の値に変換された。次に、慣性系におけるセグメント i の近位端に接続するセグメント $i-1$ の絶対角速度ベクトルをセグメント i の絶対角速度ベクトルから減算することによって、慣性系におけるセグメント i の相対角速度ベクトルを算出した。セグメント $i-1$ に対するセグメント i の相対角速度ベクトルを、これらの間の関節に設置された関節座標系の各軸に投影することによって関節角速度の大きさを求めた。笹川 (2023) は、フォアハンド遠投動作においてリリース直前から FT-disc セグメント座標系の回転速度がディスク座標系の回転速度より増加することを報告している。また、これはスピン軸回りの回転速度にのみ生じていたことから、第三指遠位端はディスク内側の縁に沿って滑るように移動していると推察している (笹川, 2023)。以上のことから、本研究は慣性系におけるディスクマーカー由来の絶対角速度ベクトルから第三指部の絶対角速度ベクトルを減算した値を、第三指部に対する FT-disc セグメントの相対角速度ベクトルとして使用した。なお、本研究における関節運動の定義は図 4 に示した。

2.8. 関節角速度由来のディスクのスピン速度

全ての関節角速度の大きさは、それに対応する関節座標系の各軸の単位ベクトルを乗じることによってそれぞれベクトル化された。その後、ディスク座標系 (R_{disc}) の値に変換された全ての関節角速度ベクトルの Z 成分を合計することによって、全関節角速度由来のディスクのスピン速度 ($\omega_{Spin, all\ joint/Rdisc}$) を算出した (式 4)。

$$\begin{aligned} \omega_{Spin, all\ joint/Rdisc} = & \omega_{anterior-posterior\ tilt\ z/Rdisc} + \omega_{left-right\ tilt\ z/Rdisc} + \omega_{backward-forward\ rotation\ z/Rdisc} \\ & + \omega_{horizontal\ abduction-adduction\ z/Rdisc} + \omega_{abduction-adduction\ z/Rdisc} + \omega_{internal-external\ rotation\ z/Rdisc} \\ & + \omega_{flexion-extension\ z/Rdisc} + \omega_{supination-pronation\ z/Rdisc} + \omega_{dorsi-palmar\ flexion\ z/Rdisc} + \omega_{radial-ulnar\ deviation\ z/Rdisc} \\ & + \omega_{finger\ extension-flexion\ z/Rdisc} + \omega_{radial-ulnar\ adduction\ z/Rdisc} + \omega_{FT\ extension-flexion\ z/Rdisc} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\omega_{anterior-posterior\ tilt\ z/Rdisc}$ と $\omega_{left-right\ tilt\ z/Rdisc}$ および $\omega_{backward-forward\ rotation\ z/Rdisc}$ はそれぞれ局所座標系 R_{disc} 内における体幹部の前方・後方傾斜角速度ベクトルの z 成分、左・右傾斜角速度ベクトルの

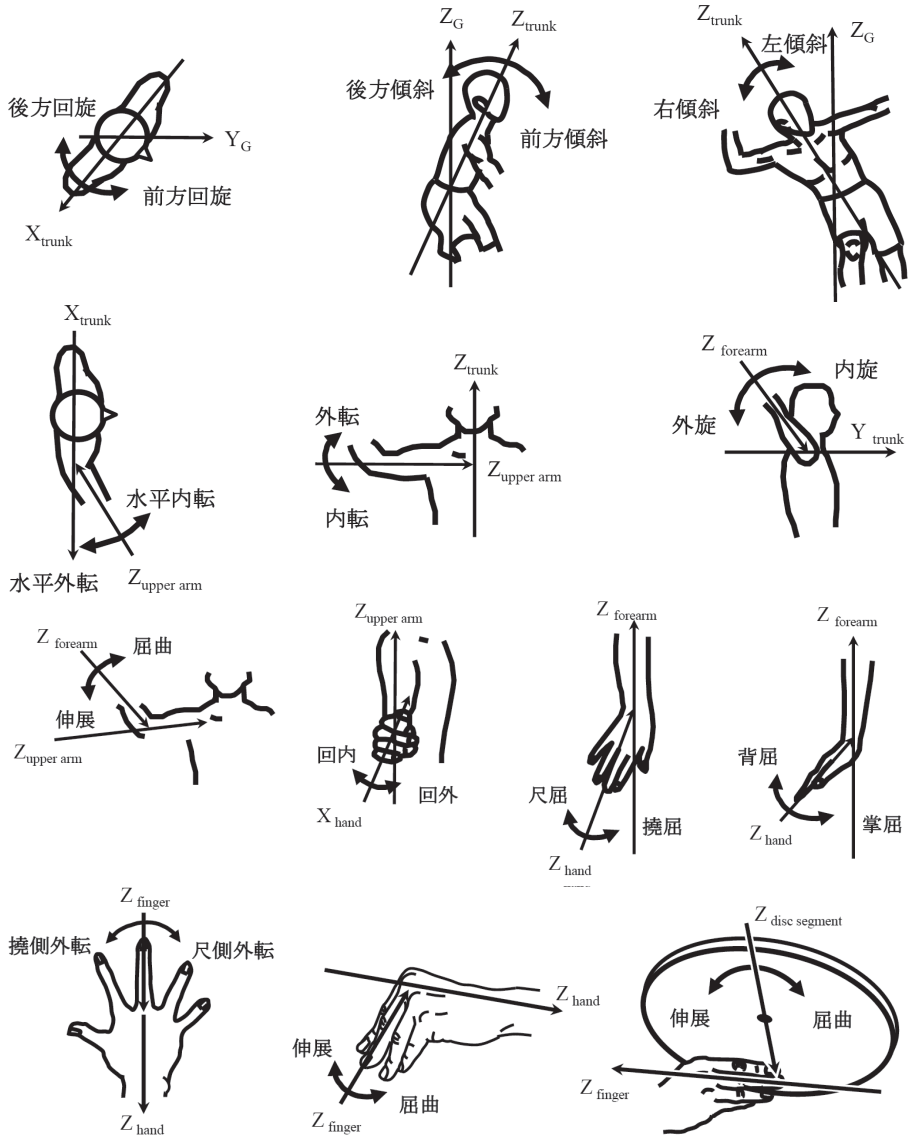


図4 体幹部と投てき腕各関節，およびFT関節における関節運動の定義。

z成分，後方・前方回旋角速度ベクトルのz成分を示す。 $\omega_{horizontal\ abduction-adduction\ z/Rdisc}$ と $\omega_{abduction-adduction\ z/Rdisc}$ および $\omega_{external-internal\ rotation\ z/Rdisc}$ はそれぞれ局所座標系 R_{disc} 内における肩の水平外転・内転角速度ベクトルのz成分，外転・内転角速度ベクトルのz成分，外旋・内旋角速度ベクトルのz成分を示す。 $\omega_{flexion-extension\ z/Rdisc}$ と $\omega_{supination-pronation\ z/Rdisc}$ はそれぞれ局所座標系 R_{disc} 内における肘の屈曲・伸展角速度ベクトルのz成分，上撓尺関節の回外・回内角速度ベクトルのz成分を示す。 $\omega_{dorsi-palmar\ flexion\ z/Rdisc}$ と $\omega_{radial-ulnar\ deviation\ z/Rdisc}$ はそれぞれ局所座標系 R_{disc} 内における手首の背屈・掌屈角速度ベクトルのz成分，撓屈・尺屈角速度ベクトルのz成分を示す。 $\omega_{MP3\ extension-flexion\ z/Rdisc}$ と $\omega_{MP3\ radial-ulnar\ adduction\ z/Rdisc}$ はそれぞ

れ R_{disc} 内における MP3 関節の伸展・屈曲角速度ベクトルの z 成分, 撓側外転・尺側外転角速度ベクトルの z 成分を示す。 $\omega_{FT\ extension-flexion\ z/Rdisc}$ は R_{disc} 内における FT 関節の伸展・屈曲角速度ベクトルの z 成分を示す。なお, 本研究は式 (4) の左辺の値を全関節角速度由来のディスクのスピン速度 ($\omega_{Spin, all\ joint/Rdisc}$) と定義した。また, 式 (4) の右辺の各項を各関節角速度由来のスピン速度 ($\omega_{Spin, joint\ i/Rdisc}$) と定義した。

本研究は, ディスクの中心から第三指末節骨遠位端 (FT) 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, ディスクの運動学的変数は DRL 時の値を抽出した。また, DRL の 1 フレーム前をディスクリリース直前 (JBDR) と定義し, 関節角速度由来のスピン速度の分析区間は, ディスクのスピン速度が正の値になった時刻 (スピン開始時刻) から JBDR までとした。なお, 関節角速度由来のスピン速度の分析区間は 100% になるように各投てき者の時系列データを 3 次のスプライン関数を用いた内挿補間によって正規化された。また, 本研究は分析区間における全関節角速度由来のスピン速度 ($\omega_{Spin, all\ joint/Rdisc}$) の妥当性を評価するためにディスクマーカー由来スピン速度 ($\omega_{Spin, disc\ mark/Rdisc}$) を正解値とし, これと全関節角速度由来スピン速度の平均絶対誤差 (MAE), 平均絶対誤差率 (MAPE), 決定係数 (R^2) を算出した。

2.9. スピン速度の生成に対する各関節角速度の貢献度

本研究は, 各関節角速度がどれだけディスクのスピン速度の生成に貢献しているのかを知るために, 全関節角速度由来のスピン速度に対する各関節角速度由来のスピン速度の比率 (%) を“貢献度”と定義し, 以下の式によって求めた。

$$\text{貢献度 (\%)} = \frac{\sum_{t=0}^{100} \omega_{Spin, joint\ i / Rdisc, t}}{\sum_{t=0}^{100} \omega_{Spin, all\ joint / Rdisc, t}} * 100 \quad (5)$$

ここで, $\sum_{t=0}^{100} \omega_{Spin, all\ joint / Rdisc, t}$ は全関節角速度由来のスピン速度を正規化時刻 (t) の 0% から 100% まで累積した値, $\sum_{t=0}^{100} \omega_{Spin, joint\ i / Rdisc, t}$ は各関節角速度由来のスピン速度を正規化時刻 (t) の 0% から 100% まで累積した値を表す。

3. 結果

3.1. リリース時のディスクの運動学的変数

表 1 はリリース時 (DRL) におけるディスクの運動学的変数を表している。本研究の投てき者の遠投距離と初速度, スピン速度, Nose-up / down 角度, 右 / 左傾斜角度, 迎え角の平均値と標準偏差は, それぞれ $47.3 \pm 9.7\text{m}$, $21.1 \pm 1.9\text{m/s}$, $74.9 \pm 11.2\text{rad/s}$, $11.1 \pm 2.6\ \text{deg}$, $20.9 \pm 7.4\text{deg}$, $0.9 \pm 5.8\text{deg}$ であった。

表1 リリース時のディスクの運動学的変数

変数	経験者群 (n=20)
	DRL
遠投距離 (m)	47.3 ± 9.7
初速度 (m/s)	21.1 ± 1.9
スピン速度 (rad/s)	74.9 ± 11.2
Nose-up (+) / down (-) 角度 (deg)	11.1 ± 2.6
右 (+) / 左 (-) 傾斜角度 (deg)	20.9 ± 7.4
迎え角 (deg)	0.9 ± 5.8

変数は平均値 ± 標準偏差で表されている。DRL, ディスクリリース

3.2. 関節角速度由来のディスクのスピン速度の妥当性

本研究は、ディスクマーカー由来のスピン速度を正解値とし、分析区間における全関節角速度由来のスピン速度の妥当性を平均絶対誤差と平均絶対誤差率、および決定係数によって評価した (表2)。全投てき者の平均絶対誤差と平均絶対誤差率、および決定係数は、それぞれ 0.238rad/s, 1.55%, 0.9998 であった。

表2 体幹部と関節角速度由来のディスクのスピン速度の評価

変数	経験者群 (n=20)
MAE (rad/s)	0.238
MAPE (%)	1.55
R ²	0.9998

MAE, 平均絶対誤差; MAPE, 平均絶対誤差率; R², 決定係数

3.3. 関節角速度

図5は体幹部と投てき腕の各関節角速度の経時的変化を表している。体幹部の後方傾斜速度と前方回旋速度は分析区間を通して確認され、緩やかな減少傾向を示した。肩の内転角速度は正規化時刻の0%から約40%の区間で減少傾向を示した。その後、肩の外転速度は増加傾向を示した。内旋速度は分析区間を通して確認され、急速な増加傾向を示した。肘の伸展速度は分析区間を通して確認され、正規化時刻の0%から80%まで急速な増加傾向を示した。手首の掌屈速度は正規化時刻の20%直前から発生し、JBDR(100%)まで急速な増加傾向を示した。MP3関節の屈曲角速度は正規化時刻の約70%からJBDR(100%)まで急速な増加傾向を示した。FT関節の屈曲角速度は正規化時刻の約20%から80%直前まで急速な増加傾向を示した。

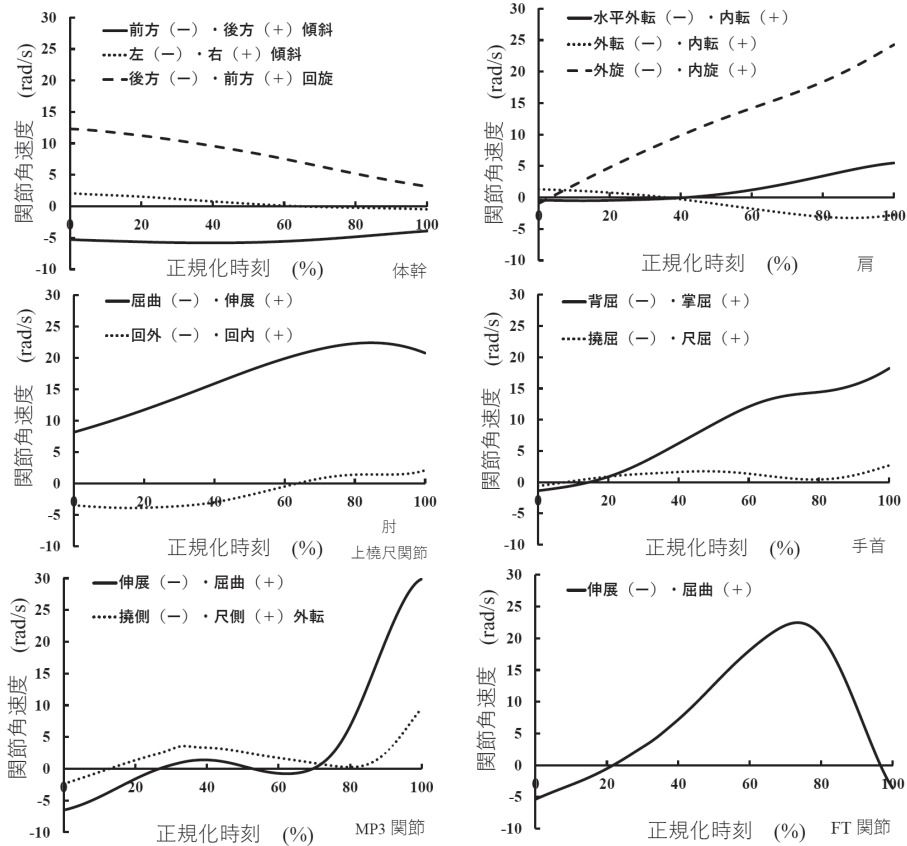


図5 体幹部と投てき腕各関節角速度の経時的変化。正規化時刻 100% = JBDR

3.4. 関節角速度由来のディスクのスピンの速度

図6は体幹部と投てき腕の各関節角速度由来のスピンの速度の経時的変化を表している。体幹部の左・右傾斜速度由来のスピンの速度は分析区間を通して低い値を示した。肩の水平外転・内転速度由来のスピンの速度と外転・内転速度由来のスピンの速度はそれぞれ分析区間を通して低い値を示した。肩の外旋・内旋速度由来のスピンの速度は正規化時刻の0%から生じており、急速な増加傾向を示した。手首の背屈・掌屈速度由来のスピンの速度は正規化時刻の20%直前から生じており、急速な増加傾向を示した。手首の撓屈・尺屈速度由来のスピンの速度は分析区間を通して低い値を示した。MP3関節の伸展・屈曲速度由来のスピンの速度は正規化時刻の約70%から100%(JBDR)まで急速な増加傾向を示した。MP3関節の撓側・尺側外転速度由来のスピンの速度は分析区間を通して低い値を示した。FT関節の伸展・屈曲速度由来のスピンの速度は正規化時刻の約20%から80%直前まで急速な増加傾向を示した。

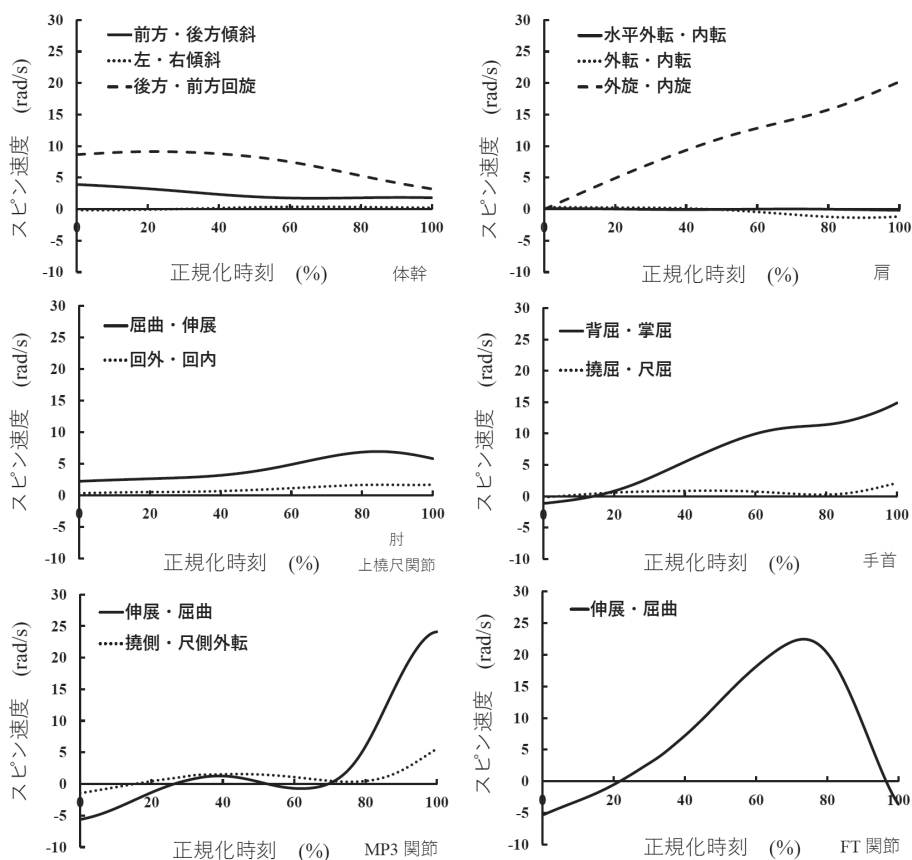


図6 体幹部と投てき腕各関節角速度由来のスピンの速度。正規化時刻 100% = JBDR

3.5. ディスクのスピンの速度に対する各関節角速度の貢献度

表3は、全関節角速度由来のスピンの速度を正規化時刻 (t) の0%から100%まで累積した値と各関節角速度由来のスピンの速度を正規化時刻 (t) の0%から100%まで累積した値、および全関節角速度由来のスピンの速度の生成に対する各関節角速度由来のスピンの速度の貢献度を表している。肩の外旋・内旋速度由来のスピンの速度の累積値と貢献度は最も大きい値を示した。これに続いて、FT関節の伸展・屈曲、体幹部の後方・前方回旋、手首の背屈・掌屈、肘の屈曲・伸展、MP3関節の伸展・屈曲、体幹部の前方・後方傾斜、MP3関節の撓側・尺側外転、上橈尺関節の回外・回内、手首の撓屈・尺屈、体幹部の左・右傾斜、肩の水平外転・内転、肩の外転・内転の順にこれら由来のスピンの速度の累積値と貢献度は大きい値を示した。肩の水平外転・内転と外転・内転由来のスピンの速度の累積値と貢献度はそれぞれ負の値を示した。体幹部の3つの関節角速度由来のスピンの速度のうち後方・前方回旋速度由来のスピンの速度が最も大きい値を示した。同様に、肩では外旋・内旋、肘・上橈尺関節では屈曲・伸展、手首では背屈・掌屈、MP3関節では伸展・屈曲由来のスピンの速度が各関節で最も大きい値を示した。

表3 全関節角速度由来のスピン速度累積値と各関節角速度由来のスピン速度累積値, および各関節角速度の貢献度

変数	経験者群 (n=20)	
	スピン速度累積値 (rad/s)	貢献度 (%)
全関節角速度 ($\sum_{t=0}^{100} \omega_{Spin, all\ joint/Rdisc, t}$)	4573.0 ± 976.6	
体幹		
前方・後方傾斜	242.2 ± 123.4	5.3
左・右傾斜	16.1 ± 88.1	0.4
後方・前方回旋	742.9 ± 281.0	16.3
肩		
水平外転・内転	-2.3 ± 38.7	-0.1
外転・内転	-36.5 ± 65.0	-0.8
外旋・内旋	1068.6 ± 532.5	23.4
肘		
屈曲・伸展	440.0 ± 223.7	9.6
上橈尺関節		
回外・回内	100.5 ± 112.5	2.2
手首		
背屈・掌屈	689.6 ± 322.6	15.1
撓屈・尺屈	65.6 ± 75.1	1.4
MP3 関節		
伸展・屈曲	297.5 ± 249.0	6.5
撓側・尺側外転	103.9 ± 165.3	2.3
FT-disc 関節		
伸展・屈曲	845.1 ± 478.5	18.5

累積値は平均値 ± 標準偏差で表されている

4. 考察

4.1. リリース時のディスクの運動学的変数

表1はリリース時(DRL)のディスクの運動学的変数を表している。本研究の投てき者の遠投距離(47.3 ± 9.7m)は, Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018)の熟練者群の遠投距離(53.3 ± 2.9m)に比べて約11%短かった。また, 本研究の投てき者の初速度(21.1 ± 1.9m/s)とスピン速度(74.9 ± 11.2rad/s)は, Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018)の熟練者群の初速度(21.6 ± 1.0m/s)とスピン速度(78.9 ± 3.5rad/s)に対してそれぞれ約2%と約5%低い値を示した。本研究のNose up角度(11.1 ± 2.6 deg), 右傾斜角度(20.9 ± 7.4deg), 迎え角(0.9 ± 5.8deg)は, Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018)によって報告されたNose up角度(14.6 ± 3.1deg), 右傾斜角度(23.1 ± 5.7deg), 迎え角(1.6 ± 3.6deg)とそれぞれ近い値を示した。以上のことから, 本研究の投てき者の遠投能力は先行研究の熟練者に比べてやや劣るが, 熟練者に近い遠投能力を持った投てき者であったと考

えられる。また、Nose up 角度以外の運動学的変数の標準偏差は先行研究の熟練者群の標準偏差よりも大きい値を示した。Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) は競技歴 3～4 年の熟練者を対象にしたのに対し、本研究は競技歴 1～4 年の投てき者を対象にした。そのため Sasakawa, Umegaki & Sakurai (2018) に比べて遠投能力の低い投てき者が多く含まれていたと考えられる。この遠投能力の劣る投てき者の初速度とスピン速度がやや低かったため、それに伴って遠投距離も減少したのだろう。

4.2. 全関節角速度由来のスピン速度の妥当性

表 2 は全関節角速度由来のスピン速度の妥当性の評価値を表している。全投てき者のディスクマーカー由来のスピン速度と全関節角速度由来のスピン速度の平均絶対誤差率、および決定係数はそれぞれ 1.55% と 0.9998 であった。つまり、本研究における全関節角速度由来のスピン速度は平均して約 1.6% の誤差を含んでいるが、ディスクマーカー由来のスピン速度を約 99% 説明している。したがって、本研究で算出された全関節角速度由来のスピン速度はディスクマーカー由来のスピン速度を表していることが確認された。

4.3. ディスクのスピン速度の生成に対する各関節角速度の貢献度

表 3 は、全関節角速度由来のスピン速度の累積値と各関節角速度由来のスピン速度の累積値、および各関節角速度由来のスピン速度の貢献度を表している。本研究において、肩の外旋・内旋速度の貢献度は約 23.4% と最も大きい値を示した(表 3)。また、スピン開始時刻(0%)から JBDR(100%)まで肩内旋速度が生じていたことから(図 5)、肩の外旋・内旋速度由来のスピン速度は内旋速度によって生成されていたと考えられる。以上のことから、アルティメット経験者の場合、肩の内旋運動はディスクのスピン速度の生成に最も重要な運動学的要因であると考えられる。

FT 関節の伸展・屈曲速度の貢献度は約 18.5% と 2 番目に大きい値を示した(表 3)。また、FT 関節において、約 20% の時刻から JBDR 直前まで屈曲速度が生じていたことから(図 5)、FT 関節の伸展・屈曲速度由来のスピン速度は主に屈曲によって生成されていたと考えられる。したがって、第三中手指に対するディスクのスピン方向の回転速度もまたスピン速度の生成に重要な要因であると考えられる。経験者は第三手指部遠位端(中指先端)をディスク内側の縁に引掛けてディスクを振り回すような技術を使用することによって第三中手指に対するディスクのスピン速度を高めていたのではないだろうか。この技術に優れている経験者ほどディスクのスピン速度は高いかもしれない。しかし、この仮説を明らかにするには更なる研究が必要だろう。

体幹部の後方・前方回旋、手首の背屈・掌屈、肘の屈曲・伸展速度の貢献度はそれぞれ 3 番目(16.3%)、4 番目(15.1%)、5 番目(9.6%)に大きい値を示した(表 3)。また、体幹部では前方回旋速度、手首では掌屈速度、肘では伸展速度が分析区間を通して生じていた(図 5)。これらの結果から、体幹部の後方・前方回旋速度由来のスピン速度は前方回旋によって、手首の背屈・掌屈速度と肘の屈曲・伸展速度由来のスピン速度はそれぞれ手首の掌屈と肘の伸展によって生成されていたと考えられる。したがって、アルティメット経験者において体幹部の前方回旋、手首の掌屈、肘の伸展もまたディスクのスピン速度の生成にとって重要な運動学的要因であると考えられた。

5. 本研究の限界

本研究は各関節の角速度ベクトルが作り出すスピン速度の大きさについて着目し、スピン速度の生成に対する各関節速度の貢献度を求めた。しかし、スピン速度ベクトルに対する関節角速度ベクトルの角度もまたスピン速度の大きさに影響を与える。したがって、アルティメット経験者のフォアハンド遠投動作において、スピン速度生成の運動学的メカニズムを明らかにするためにはさらなる研究が必要だろう。

6. まとめ

本研究の目的は、アルティメット経験者のフォアハンド遠投動作に着目し、体幹部と投てき腕の各関節角速度が生成するディスクのスピン速度の大きさを明らかにすること、およびスピン速度の生成に対する各関節角速度の貢献度を明らかにすることであった。本研究において、13の関節角速度のうちディスクのスピン速度の生成に対する貢献度が大きかった上位5つの関節角速度は、肩の内旋速度、FT関節の屈曲速度、体幹部の前方回旋速度、手首の掌屈速度、肘の伸展速度であった。これら5つの関節角速度の貢献度は約83%に達していた。したがって、アルティメット経験者のフォアハンド遠投動作において、これらの関節運動はディスクのスピン速度の生成に特に重要な運動学的要因であると考えられる。

参考文献

- Baccarini, M., & Booth, T. (2008). *Essential ultimate: Teaching, coaching, playing* (p. 14). Ontario: Human Kinetics Publishers.
- Danna, M., & Poynter, D. (1979). *Frisbee handbook* (pp. 22-24). Santa Barbara, CA: Quick Fox Company.
- Kane, T. R., & Levinson, D. A. (1985). *Dynamics: Theory and Applications*. McGraw-Hill, New York.
- Moran, T. (1982). *Frisbee disc flying is for me* (p. 15). Minneapolis: Lerher Publications.
- Potts, J. R., & Crowther, W. J. (2002). Frisbee (TM) Aerodynamics. Retrieved from <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2002-3150>doi, *Proceedings of the 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, 2002-3150 (pp. 1-14). doi: 10.2514/6.2002-3150. St. Louis, MO: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Poynter, M. (1977). *Frisbee fun* (p. 19). New York: Julian Messner.
- Roddick, D., & Knudsen, A. (1980). *Frisbee disc basics* (pp. 9-10). NJ: Prentice Hall.
- Sasakawa, K., & Sakurai, S. (2008). Biomechanical analysis of the sidearm throwing motion for distance of a flying disc: A comparison of skilled and unskilled Ultimate players. *Sports Biomechanics*, 7(3), 311-321. doi: 10.1080/14763140802270936
- Sasakawa, K., Umegaki, K., & Sakurai, S. (2018). Biomechanics of increased spin velocity of flying discs during forehand throws by skilled and unskilled throwers. *Journal of Sports Sciences*, 36(8), 843-851. doi: 10.1080/02640414.2017.1344778
- 笹川慶 (2023). 体幹部と投てき腕のセグメント角速度を用いて算出されるフライングディスクの回転速度の妥当性: 手指とフライングディスクの角速度を利用して, *アカデミア人文・自然科学編*, 26, 149-162.

- Stancil, E. D. J. (1975). *Frisbee* (p. 56, 171, 172). New York: Workman Publishing Company.
- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement* (fourth edn.). New York: Wiley Interscience.
- Yu, B., Gabriel, D., Nobel, L., & Kai-Nan, A. (1999). Estimate of optimum cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter. *Journal of Applied Biomechanics*, *15*(3), 318-329. doi: 10.1123/jab.15.3.318