

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——

Validation of flying disc rotational velocity calculated using the
trunk and throwing arm segmental angular velocity:
Using the angular velocities of the finger and flying disc

笹川 慶

Kei SASAKAWA

Abstract

This study aimed to validate the disc angular velocity (AV) calculated using the trunk and throwing arm segmental AV. The trunk, throwing arm, and disc movements of 15 skilled (competition history; 3–4 years) and nine unskilled (no disc sports experience) throwers were recorded using a motion capture system. The discs AV were calculated using the trunk, throwing arm, and disc segmental AV. No consentaneity was found between the z-component of the disc AV derived from the segmental AV and z-component of the actual disc AV. Moreover, systematic errors were contained in the peak values of all components of the disc AV calculated from the trunk and throwing arm segmental AV of the skilled throwers and peak value of the z-component of the unskilled throwers. Therefore, improving the experimental method and correcting for over-calculated AV to accurately determine the disc AV from the trunk and throwing arm segmental AV are necessary.

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ディスクスポーツである。これは両端にゴールエリアを持つ縦 100 m×横 37 m 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。その際に使用される様々な投てき方法の中で、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。熟練者によるフォアハンドスローは他の投てき方法に比べ素早い動作で正確にディスクを投げることができる。そのため、これによるロングパスは広いコートで効率よく得点を重ねることができるため、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いことから、難しい技術ともされている（Baccarini & Booth, 2008; Danna & Poynter, 1979; Moran, 1982; Poynter, 1977; Roddick & Knudsen, 1980; Sasakawa & Sakurai, 2008; Sasakawa et al., 2018; Stancil, 1975）。

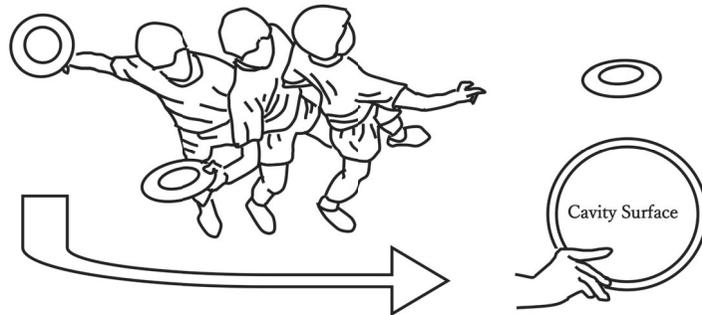


Figure 1. Schematic of forms and grip involved in forehand throws.
This schematic is shown for a right-hand dominant thrower.
Based on Sasakawa and Sakurai 2008.

フォアハンド遠投動作において、初心者はディスクの姿勢を大きく変化させて投げ出す傾向が確認されている（Sasakawa et al., 2018）。これはディスクの迎え角を増加させるため、飛行中のディスクに対する空気抵抗が高まり、飛行距離の減少や正確性の低下を引き起こす（Potts & Crowther, 2002）。また、初心者のフォアハンド遠投動作によるディスクのスピンの速度は著しく低かったことが報告されている（Sasakawa & Sakurai, 2008; Sasakawa et al., 2018）。高速度のスピンはディスク姿勢の安定性を高めるため、飛行距離に対して重要な役割を持っている（Potts & Crowther, 2002）。したがって、初心者の場合、フォアハンドによって飛行距離を伸ばすためには、ディスクの姿勢回転速度を減少させ、かつスピン速度を増加させることが重要となる。しかし、そのための運動学的メカニズムについては明らかにされていない。

投てき物や打具、または四肢末端部の回転速度は多くのスポーツでパフォーマンスを決定する重要な要因である。そのため、投てき物・打具・四肢末端部の回転速度増加のメカニズムは選手や指導者および研究者にとって大きな関心事とされている（宮西 他, 1996; Springings et al., 1994）。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、その末端部の回転速度は以下の力学式(1)によって表すことができる（Kane & Levinson, 1985）。

$${}_{K1}\omega_{Ki} = {}_{K1}\omega_{K2} + {}_{K2}\omega_{K3} + {}_{K3}\omega_{K4} + {}_{K4}\omega_{K5} + \dots + {}_{K(i-1)}\omega_{Ki} \quad (1)$$

ここで、 $K1$ から Ki はそれぞれ剛体を表している。 ${}_{K1}\omega_{Ki}$ は剛体 $K1$ に対する末端の剛体 Ki の回転速度、 ${}_{K1}\omega_{K2}$ は剛体 $K1$ に対する剛体 $K2$ の回転速度、 ${}_{K2}\omega_{K3}$ は剛体 $K2$ に対する剛体 $K3$ の回転

速度, …… $_{K(i-1)}\omega_{K_i}$ は剛体 $K(i-1)$ に対する末端の剛体 K_i の回転速度を表している。つまり, 式 (1) の右辺の各項 (相対角速度) は末端部の回転速度 $_{K_i}\omega_{K_i}$ の構成値となる。ディスクのフォアハンドスローにおいて, リリース直前までディスクと指先は1点で接続していると仮定できる場合, 式 (1) によって体幹部と投てき腕の各セグメントの回転速度がどれだけディスクの回転速度を生成しているのかを正確に知ることができる。一方, もしこの仮定が成り立たない場合, 式 (1) によって算出されるセグメント角速度由来のディスク回転速度には誤差が生じ, 実際のディスクの回転速度と一致しない。このようなモデルの誤りによって生じる誤差は系統誤差と呼ばれ, 全ての測定結果に決まった関係で導入されるため, 算出される平均値をずらし研究に重大な影響を与える (下井, 2011)。しかし, その原因が分かれば実験・計算方法の改善や算出値の補正によって系統誤差を完全に取り除くことが可能となる (下井, 2011)。体幹部と投てき腕の各セグメント角速度からディスクの回転速度を正確に算出できれば, 初心者の課題 (ディスクの姿勢回転速度の減少とスピン速度の増加) を解決するための手がかりを, バイオメカニクスの観点から得ることができると考えられる。それは, 指導や練習方法を改善するための新しい視点をコーチや選手に与えるだろう。

本研究の目的は, フォアハンド遠投動作においてディスクは手指先と1点で接続された投てき腕のセグメントの一つであるという仮定のもとに算出される体幹部と投てき腕の各セグメント角速度由来のディスク回転速度の妥当性を検証することである。理論上, 実際のディスクの回転速度と式 (1) によって算出される体幹部と投てき腕各セグメント由来のディスクの回転速度, および手指先と接続したディスクの力学モデルの回転速度は一致する。そこで, 本研究はこれら3つのディスクの回転速度に一致性が存在すると仮説を立てた。

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15名 (競技歴3~4年) を熟練者群 (年齢 21.7 ± 3.4 歳; 体重 65.7 ± 4.2 kg; 身長 172.2 ± 5.2 cm) とし, ディスクスポーツの競技歴のない男子学生9名 (年齢 21.6 ± 1.4 歳; 体重 68.0 ± 7.5 kg; 身長 173.9 ± 7.0 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。

2.2. 実験環境の設定

実験は風の影響を無くすために, 縦 72 m \times 横 32 m 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 175 g; 直径 27.3 cm; 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。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: 14 mm) を3つ取り付けた (重量: 約合計 1 g)。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 7 mm の反射マーカーを，それ以外では直径 14 mm の反射マーカーを使用した。体幹部と投てき腕上の反射マーカーは皮膚上に直接装着された。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 500 Hz 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。

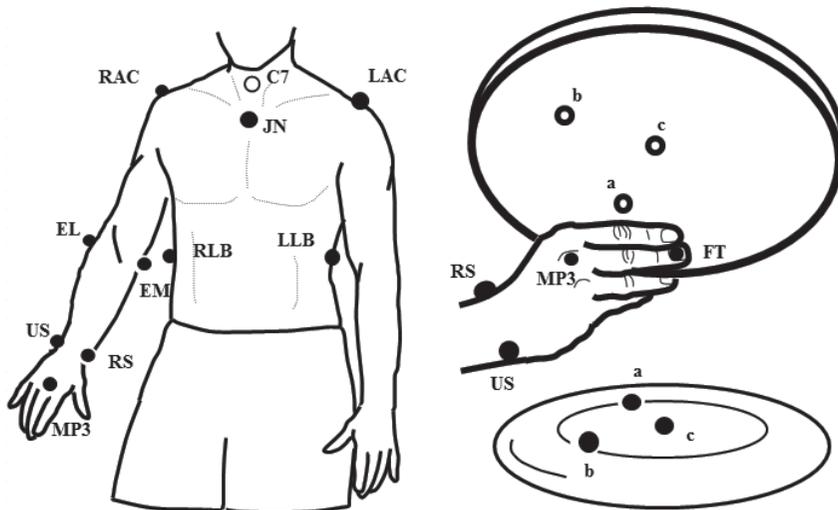


Figure 2. Reflective markers (black circles) attached to trunk, throwing arm and disc. Adapted from Sasakawa et al. 2018.

2.3. 平滑化処理

最適遮断周波数（27～31 Hz）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）。

2.4. 体幹部と投てき腕各セグメントの座標系

体幹部のセグメント座標系（ 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した。 Z_{trunk} の外積からなるベクトル， 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。上腕セグメント座標系（ $R_{upper arm}$ ）は， $X_{upper arm}$ ， $Y_{upper arm}$ ， $Z_{upper arm}$ から構成される。 $Z_{upper arm}$ は EL と EM

を結ぶ線の中点から右肩峰 (RAC) へ向かうベクトルと定義した。Y_{upper arm} は、ME と LE の中点から RS と US の間の線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。前腕のセグメント座標系 (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 ME と LE 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。手セグメント座標系 (R_{hand}) は、X_{hand}, Y_{hand}, Z_{hand} から構成される。Z_{hand} は手の MP3 背面から RS と US を結ぶ線の中点までのベクトルとして定義された。Y_{hand} は、Z_{hand} と US から RS への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。本研究では、ディスクは第三指末節骨遠位端 (FT) で仮想的に接続しており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、ディスク上面の点 c から点 a へのベクトルと点 c から点 b への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。

2.5. ディスクの角速度

ディスクの局所座標系 R_{disc} の角速度を算出するためにディスクの中心点 c を原点とした局所座標系 R_{disc} を以下の式 (2)~(4) のように定義した。

$$Z_{disc} = ca \times cb \tag{2}$$

$$Y_{disc} = Z_{disc} \times cb \tag{3}$$

$$X_{disc} = Y_{disc} \times Z_{disc} \tag{4}$$

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、ディスク局所座標系 (R_{disc}) の X_{disc} 軸まわりの角速度成分 (ω_{disc x/Rdisc}) と Y_{disc} 軸まわりの角速度成分 (ω_{disc y/Rdisc})、および Z_{disc} 軸まわりの角速度成分 (ω_{disc z/Rdisc}) を以下の式によって算出した。

$$\omega_{disc\ x/Rdisc} = k_{disc} \cdot \frac{d}{dt} j_{disc} \tag{5}$$

$$\omega_{disc\ y/Rdisc} = i_{disc} \cdot \frac{d}{dt} k_{disc} \tag{6}$$

$$\omega_{disc\ z/Rdisc} = j_{disc} \cdot \frac{d}{dt} i_{disc} \tag{7}$$

なお、本研究は式 (5)~(7) によって得られた角速度を実際のディスクの角速度と定義し、更に式 (5) と (6) によって得られた角速度を実際のディスクの姿勢角速度、(7) によって得られた角速度を実際のディスクのスピンの角速度と定義した。また、図 3 にディスクの局所座標系 R_{disc} の定義を示した。

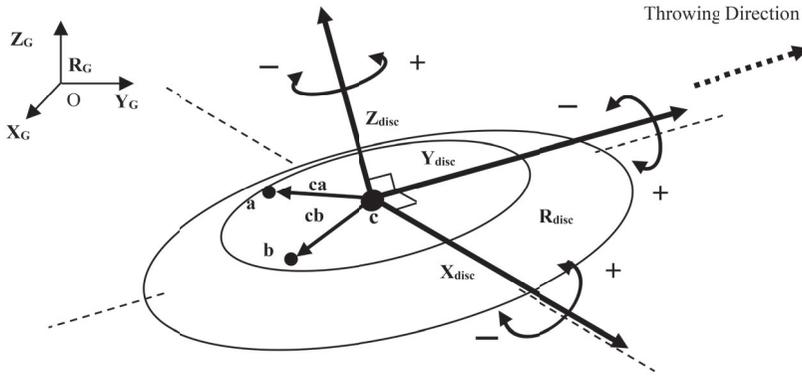


Figure 3. Definitions of the disc conditions (R_{disc}) and attitude angular velocities. Based on Sasakawa and Sakurai 2008.

2.6. 体幹部と投てき腕の各セグメントの角速度

セグメント i に固定されたセグメント i 座標系における絶対角速度ベクトルの各成分 ($\omega_{ab, segment i x/R segment i}$, $\omega_{ab, segment i y/R segment i}$, $\omega_{ab, segment i z/R segment i}$) は、以下の式によって算出した。

$$\omega_{ab, segment i x/R segment i} = d/dt(j_{segment i}) \cdot k_{segment i} \quad (8)$$

$$\omega_{ab, segment i y/R segment i} = d/dt(k_{segment i}) \cdot i_{segment i} \quad (9)$$

$$\omega_{ab, segment i z/R segment i} = d/dt(i_{segment i}) \cdot j_{segment i} \quad (10)$$

これらの式において、 $i_{segment i}$, $j_{segment i}$, $k_{segment i}$ はそれぞれ、セグメント i に固定したセグメント座標系の 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 (8)~(10) によって算出された局所座標系の絶対角速度ベクトルを慣性系の値 ($\omega_{ab, segment i x/RG}$, $\omega_{ab, segment i y/RG}$, $\omega_{ab, segment i z/RG}$) に変換した。セグメント i の相対角速度ベクトル ($\omega_{rel, segment i x/RG}$, $\omega_{rel, segment i y/RG}$, $\omega_{rel, segment i z/RG}$) は、セグメント i の絶対角速度から隣接する近位セグメント $i-1$ の絶対角速度を減算することによって計算された。セグメント i の相対角速度ベクトルの各成分はセグメント i に取り付けられた局所座標系の各軸の単位ベクトルを乗じることでそれぞれベクトル化された。その後、算出された全ての慣性系におけるセグメント相対角速度ベクトルをディスクの局所座標系 R_{disc} の値に変換した。このベクトルの x 成分, y 成分, z 成分をそれぞれセグメント i 由来のディスクの X_{disc} と Y_{disc} , および Z_{disc} まわりの角速度 ($\omega_{rel, segment i x/Rdisc}$, $\omega_{rel, segment i y/Rdisc}$, $\omega_{rel, segment i z/Rdisc}$) として定義した。局所座標系 R_{disc} における FT-disc セグメントの角速度 ($\omega_{ab, FT-disc segment x/Rdisc}$, $\omega_{ab, FT-disc segment y/Rdisc}$, $\omega_{ab, FT-disc segment z/Rdisc}$) は、上記の方法によって算出された慣性系における FT-disc セグメントの絶対角速度ベクトル ($\omega_{ab, FT-disc segment x/RG}$, $\omega_{ab, FT-disc segment y/RG}$, $\omega_{ab, FT-disc segment z/RG}$) をディスクの局所座標系 R_{disc} の値に変換することによって求めた。

以下の式 (11) を用いて体幹部と投てき腕のセグメント角速度由来のディスク角速度 ($\omega_{discSAV/Rdisc}$) を算出した。また、式 (11) の右辺から各セグメントが生成したディスクの角速度の大きさを抽出した。

$$\begin{aligned} \omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}} = & \omega_{\text{trunk/Rdisc}} + \omega_{\text{trunk}} \omega_{\text{upper arm/Rdisc}} + \omega_{\text{upperarm}} \omega_{\text{forearm/Rdisc}} \\ & + \omega_{\text{forearm}} \omega_{\text{hand/Rdisc}} + \omega_{\text{hand}} \omega_{\text{finger/Rdisc}} + \omega_{\text{finger}} \omega_{\text{FT-disc segment/Rdisc}} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\omega_{\text{trunk/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内における体幹部の角速度ベクトル、 $\omega_{\text{trunk}} \omega_{\text{upper arm/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内の体幹部に対する上腕部の相対角速度ベクトル、 $\omega_{\text{upperarm}} \omega_{\text{forearm/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内の上腕部に対する前腕部の相対角速度ベクトル、 $\omega_{\text{forearm}} \omega_{\text{hand/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内の前腕部に対する手部の相対角速度ベクトル、 $\omega_{\text{hand}} \omega_{\text{finger/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内の手部に対する第三指の相対角速度ベクトル、 $\omega_{\text{finger}} \omega_{\text{FT-disc segment/Rdisc}}$ は局所座標系 R_{disc} 内の第三指に対する FT-disc セグメントの相対角速度ベクトルを表している。なお、本研究で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 (0.137 m) 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、便宜上、DRL を 0 秒 (0 s) とし、-0.1 s から 0 s (DRL) までの区間における角速度を算出した。

2.7. 統計分析

統計分析は全て SPSS ソフトウェアバージョン 22 (SPSS, Chicago, IL, USA) を用いて行われた。本研究は $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ が最大になった時刻の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ に対して Bland-Altman 分析を行い、系統誤差である固定誤差と比例誤差の有無をそれぞれ調べた (Bland & Altman, 1986)。なお、この時の有意水準はそれぞれ 5% 未満とした。また、同時刻における $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ および $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の一致性をそれぞれ Bland-Altman plot を用いて確認した。この時、各群において誤差許容範囲 (Limits of Agreement, 以下 LOA という) 内の人数が 95% 以上の場合、一致性があると判断された (Bland & Altman, 1986)。

3. 結果

3.1. ディスクの角速度

図 4 は熟練者群と未熟練者群の $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ および $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ における x 成分 (上段)、y 成分 (中段)、z 成分 (下段) の経時の変化を表す。熟練者群の $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ における x 成分、および y 成分はそれぞれ同様の傾向を示した (図 4-A と B)。熟練者群において $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の各成分の経時変化はそれぞれ同様の傾向を示した。熟練者群の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の z 成分は -0.02 秒頃からリリース直前まで $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の z 成分に比べて大きい値を示した (図 4-C)。未熟練者群の $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ の x 成分、および y 成分はそれぞれ同様の傾向を示した (図 4-D と E)。未熟練者群の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の各成分においてもそれぞれ同様の傾向を示した。未熟練者群の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の z 成分は -0.1 秒から -0.05 秒頃まで、および -0.02 秒頃からリリース直前まで $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の z 成分に比べて大きい値を示した (図 4-F)。

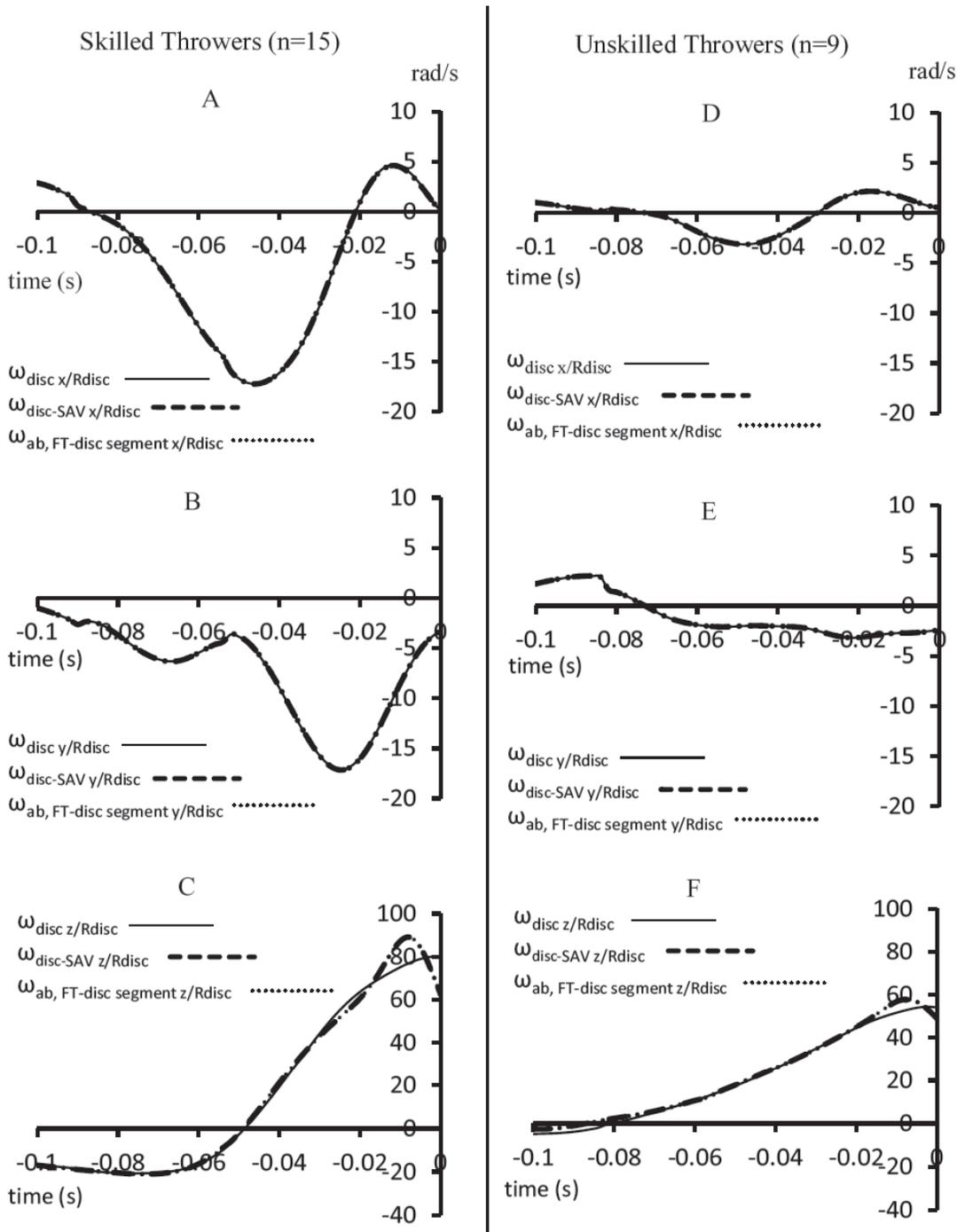


Figure 4. Changes in each component in $\omega_{disc/Rdisc}$, $\omega_{disc-SAV/Rdisc}$, and $\omega_{ab, FT-disc\ segment/Rdisc}$ for the skilled and unskilled throwers. The instance of disc release is denoted as $t = 0$ s.

3.2. $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ のピーク値発生時刻における角速度

表1は $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ のピーク値発生時刻における $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ 、 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ 、 $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の各成分を表している。 $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ 、および $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の各成分は違う値を示した。 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の各成分は同じ値を示した。

Table 1. Angular velocities at the time of occurrence of the peak value of $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$

Variables	ω_{disc}		$\omega_{\text{disc-SAV}}$		$\omega_{\text{ab, FT-disc segment}}$	
Skilled						
x	-4.267	± 12.313	-4.254	± 12.203	-4.254	± 12.203
y	-9.760	± 11.932	-9.744	± 12.034	-9.744	± 12.034
z	71.803	± 19.864	76.973	± 29.975	76.973	± 29.975
Unskilled						
x	1.273	± 14.962	1.214	± 14.729	1.214	± 14.729
y	-4.168	± 14.309	-4.351	± 14.382	-4.351	± 14.382
z	52.117	± 8.385	68.895	± 36.177	68.895	± 36.177

Values are expressed as mean ± SD for each group.

3.3. 系統誤差

表2は $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ のピーク値発生時刻における $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の系統誤差（固定誤差と比例誤差）の有無を表している。なお、この時の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ は同値であったため、表内ではひとつの値で表した。熟練者群の各角速度成分では固定誤差または比例誤差のどちらかが確認された。一方、未熟練者群ではz成分にのみ固定誤差が確認され、比例誤差は確認されなかった。

Table 2. Systematic errors (fixed and proportional errors) in $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ and $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ at the time of the peak value of $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$

Variables	95% CI for Difference		Fixed Error	t-value for Test of no Correlation	Proportional Error	LOA (Limits of Agreement)	
Skilled							
x	-0.03	~ 0.038	n.s.	2.228	$p < 0.05$	-0.117	~ 0.125
y	0.013	~ 0.104	$p < 0.05$	-2.789	$p < 0.05$	-0.102	~ 0.219
z	-14.468	~ -11.837	$p < 0.05$	-0.669	n.s.	-23.816	~ -5.120
Unskilled							
x	-0.001	~ 0.038	n.s.	-0.232	n.s.	-0.031	~ 0.068
y	-0.007	~ 0.02	n.s.	-0.534	n.s.	-0.028	~ 0.041
z	-14.284	~ -6.92	$p < 0.05$	0.39	n.s.	-19.991	~ -1.214

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

3.4. 実際のディスク角速度に対する一貫性

図5は $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ のピーク発生時刻における $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$, および $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ のBland-Altman plotを成分(x成分:上段, y成分:中段, z成分:下段)ごとに表している。なお, 各図における上・下部の破線はLOAの上限と下限を表している。各群の $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ のBland-Altman plot, および $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{FT-disc segment/Rdisc}}$ のBland-Altman plot

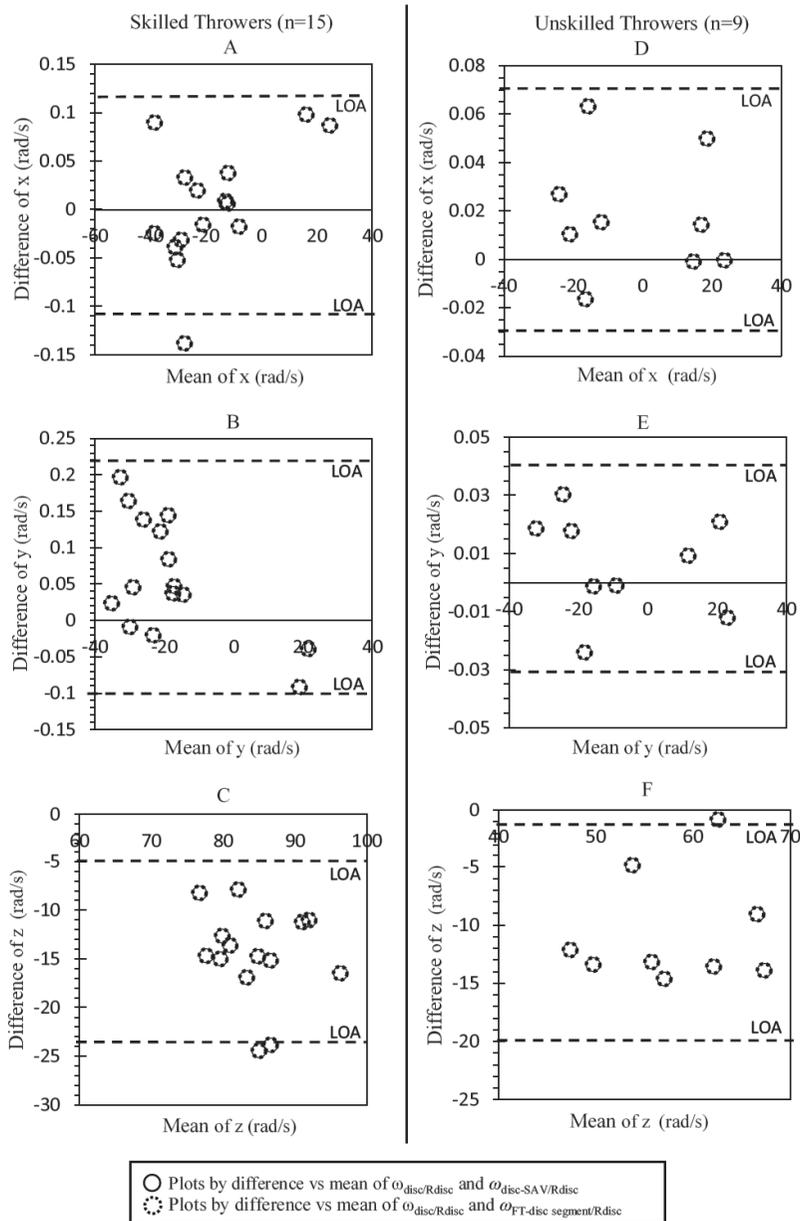


Figure 5. Consentaneity of $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ and $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$, and $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ and $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$.

は一致していた。熟練者群の LOA は x 成分で $-0.117 \sim 0.125$, y 成分で $-0.102 \sim 0.219$, z 成分で $-23.816 \sim -5.120$ であった。未熟練者群の LOA は x 成分で $-0.031 \sim 0.068$, y 成分で $-0.028 \sim 0.041$, z 成分で $-19.991 \sim -1.214$ であった。全ての投てき者の x 成分と y 成分は LOA 内であった。また、熟練者群と未熟練者群の z 成分において、LOA 内の人数は各群ともに 95% 未満であった。

4. 考察

本研究は、実際のディスクの角速度 $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と体幹部と投てき腕のセグメント角速度由来のディスク角速度 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$, および FT-disc セグメントの角速度 $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ に一致性が存在すると仮説を立てた。熟練者群において、これらの x 成分はほぼ同様の傾向を示した (図 4-A)。このうち $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の x 成分のピーク値は完全に一致し (表 1), それぞれに系統誤差が確認された (表 2)。しかし、これらの系統誤差は誤差許容範囲内であったため、 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の x 成分と $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の x 成分のピーク値の間に一致性の存在が示唆された (図 5-A)。上記の傾向は y 成分においても同様に確認された。次に未熟練者群に着目すると、 $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ および $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の x 成分はほぼ同様の傾向を示した (図 4-D)。さらに、未熟練者群の $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の x 成分のピーク値に系統誤差は確認されず (表 2), $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の x 成分と $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の x 成分のピーク値の間に一致性の存在が示唆された (図 5-D)。また、未熟練者群の上記の傾向は y 成分においても同様に確認された。以上の結果から、本研究の仮説は両群の x 成分と y 成分において正しいと結論付けられた。したがって、式 (11) によって算出された体幹部と投てき腕のセグメント角速度由来のディスク姿勢角速度は、実際のディスクの姿勢角速度を表していると考えられる。

熟練者群の z 成分に着目すると、 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ は同様の傾向を示したが (図 4-C と表 1), これらは $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の z 成分に比べて -0.02 s 頃から過大に算出されていた。また、 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の z 成分のピーク値に系統誤差が確認され (表 2), 誤差許容範囲内にある熟練者の数は 95% 未満であった (図 5-C)。そのため、本研究では $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の z 成分と $\omega_{\text{disc/Rdisc}}$ の z 成分の間に一致性を確認することができなかった。この傾向は未熟練者群の z 成分においても同様であった。したがって、本研究の仮説は両群の z 成分において棄却され、式 (11) によって算出された体幹部と投てき腕のセグメント角速度由来のディスクスピン角速度は、実際のディスクのスピン角速度を表していなかったと考えられる。

各群で $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ と $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ の z 成分の経時的変化は同様の傾向を示し (図 4-C), ピーク値は完全に一致していた (表 1)。つまり、 $\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$ に含まれる系統誤差は投てき腕末端部の FT-disc セグメントの角速度である $\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$ に含まれる誤差によって生じたものであると考えられる。本研究ではディスクと第三指はリリースまで第三指末節骨遠位端の 1 点で接続しており、第三指末節骨遠位端とディスク内側の接触点の位置はリリースまで変化しないと仮定した。この仮定のもと、ディスクのマーカーと FT を用いて FT-disc セグメントをモデル化し、この角速度 ($\omega_{\text{ab, FT-disc segment/Rdisc}}$) を利用して投てき腕のセグメント角速度由来のディスク角速度 ($\omega_{\text{disc-SAV/Rdisc}}$) を算出している。しかし、実際には指先はディスク内側の縁と接触しているだけで完全に接続されていない。投動作時の指先はリリース直前に非常に高速になることから、指先がディスク内側の縁を沿うように滑りながらディスクのスピンよりも速い速度で移動する可能性がある。この場合、計算

上 $\omega_{ab, FT-disc\ segment/Rdisc}$ のz成分は $\omega_{disc/Rdisc}$ のz成分に比べて増加する。ディスクのフォアハンド遠投動作では実際にこの現象が両群で生じていたと考えられる。これに伴って、投てき腕のセグメント角速度由来のディスクスピン角速度は、実際のディスクのスピン角速度に比べて増加したのだろう。以上のことから、ディスクと第三指末節骨遠位端に取り付けたマークによるディスクのモデル化が不完全であり、これがリリース直前に $\omega_{disc-SAV/Rdisc}$ のスピン角速度成分を過剰に大きくした主な要因であると考えられる。したがって、式 (11) によって体幹部と投てき腕各セグメントの角速度から実際のディスクのスピン速度を正確に求めるためには、実験方法や過大に算出された角速度の補正方法について更なる研究が必要だろう。

5. まとめ

熟練者群と未熟練者群のディスクのフォアハンド遠投動作において、体幹部と投てき腕の各セグメント角速度からディスクの角速度を算出した。その結果、両群において体幹部と投てき腕のセグメント角速度由来のディスクスピン角速度に系統誤差の存在が示唆された。また、このスピン角速度と実際のディスクのスピン角速度の間に一致性を確認することができなかった。この系統誤差は第三指末節骨遠位端に取り付けられたマークの3次元座標を利用したディスクのモデル化が不完全であったため生じたと考えられた。したがって、ディスクのフォアハンド遠投動作において、体幹部と投てき腕のセグメントの回転運動がそれぞれどれだけディスクのスピン速度を構成しているのかをより正確に知るためには、実験方法の改善や過剰に算出された角速度の補正方法の考案が必要であると考えられた。

参考文献

- Bland, J. M., & Altman D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*, 1, 307-310.
- 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.
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1996). 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および東急湾の貢献度に関する3次元的研究. *体育学研究*, 41, 23-37.
- Moran, T. (1982), *Frisbee disc flying is for me* (p. 15). Minneapolis: Lerher Publications.
- Potts, J. R., & Crowther, W. J. (2002). Frisbee (TM) Aerodynamics. *Proceedings of the 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA-2002-3150*, 1-14. <https://doi.org/10.2514/6.2002-3150>
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1344778>
- 下井俊典 (2011). 評価の絶対信頼性. *理学療法科学*, 26, 451–456.
- Springs, E., Marshall, R., Elliott, B., & Jennings, L. (1994). A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *Journal of Biomechanics*, 27(3), 245–254. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(94\)900019](https://doi.org/10.1016/0021-9290(94)900019)
- 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 edition.). 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. <https://doi.org/10.1123/jab.15.3.318>