

2015 年度 修士論文

水球競技の投球動作におけるボール速度に対する 体幹および上肢の貢献

Contributions of torso and upper extremity for generating ball velocity
in water polo throwing motion

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5013A036-3

塩田 義裕

Yoshihiro SHIOTA

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第1章 緒言	1
第2章 方法	
2.1. 被験者特性	7
2.2. 実験試技	7
2.3. セグメントおよび各関節の座標系の定義	11
2.4. セグメントの角速度の算出	12
2.5. 関節の角速度の算出	13
2.6. 各関節運動が生み出し得るボール速度の算出	14
2.7. 貢献度の算出	17
2.8. 方法論の妥当性検証および統計手法	17
第3章 結果	
3.1. ボール速度の算出値と測定値	19
3.2. リリース直前のボール速度に対するセグメントおよび 各関節の運動による貢献度	20
3.3. 下腕および各関節が生み出した手部の速度	22
3.4. 下腕の回転および各関節の解剖学的な関節運動が 生み出した手部の速度	23
3.5. 下腕および各関節の解剖学的な回転運動における各速度	28
第4章 考察	
4.1. 本研究の妥当性	32
4.2. リリース直前のボール速度に対する下腕および各関節の 運動による貢献度	33
4.3. 欧米人の大学生を対象とした先行研究との比較	36
4.4. 本研究の剛体リンクモデルについて	38
4.5. 貢献度の異なる投げ方について	40
第5章 結論	43
参考文献	44
謝辞	46

第1章 緒言

水球競技は、相手チームよりも多くの得点を得ることによって勝敗が決まるゴール型の球技である。そのため、得点に直結する動作であるシュートは、水球競技において重要な動作の一つと言える。洲（2008）は、2007年のメルボルン世界選手権においてスピードガンで計測された171本のシュートを分析し、放たれたボールがゴールラインを通過するまで水面に接しないシュートを「ストレート」、水面に接するものを「バウンド」、ゴールキーパーの手の届かない山なりの軌道のものを「ループ」と分類した。その結果、試合中に放たれたシュートはストレートが最も多く106本、続いてバウンドが63本、ループは2本であったと報告している。また、平均シュート速度は、ストレートとバウンドが共に65.3km/h、ループが50.0km/hであったという。高木（2007）がまとめた先行研究における水球の投球初速度の平均値が69.2km/hであることを考慮すると、水球選手は試合中、ループシュートを除いた殆どのシュートを、全力に近い速度で投球していると考えられる。選手が高いボール速度のシュートを放つのは、ゴールキーパーがシュートに反応してブロックを行うまでの時間を短縮させることができ、より高い確率で得点できるためと考えられる。そのため、水球選手にとって高いボール速度のシュートを放つことは、重要な課題となる。

高速度のシュートを放つための投球技術は、日本水泳連盟公認の水泳コーチ用の教本に「投球方向へ身体重心を移動させること」、「身体の捻りや肩の回転動作をスムーズに行うこと」、「ボールをできるだけ長い距離を加速させること」と記述されている（財団法人日本水泳連盟,2005）。これらの記述を力学的観点で捉えると以下のように解釈できる。まず、「投球方向へ身体重心

を移動させること」は、投球方向への身体重心の速度を高めることの重要性を述べていると解釈できる。ボール速度は静止座標系からみた身体重心の速度と身体重心に対するボールの相対速度の和であるため、身体重心に対するボールの相対速度が一定の場合、身体重心の速度を高めることによって、ボール速度をより高める事ができる。そのため、水球競技の投球動作では、下半身を安定させたまま上半身を投球方向へ倒す等、身体重心の速度を高める技術を習得することの重要性を述べていると考えられる。次に、「身体の捻りや肩の回転動作をスムーズに行うこと」は、身体重心に対するボールの相対速度を高めるための方法を記述したものと考えられる。身体の捻りや肩の回転動作をスムーズに行うことを力学的に解釈すると、末端の速度を高めるために運動連鎖を生じさせるような動作であると考えられる。運動連鎖とは、身体部分を連結した鎖に例え、身体の中心部にある体幹や下肢によって生み出された力や速度をタイミング良く順次加算あるいは伝達させ、末端部へ伝えることで、末端の力や速度を大きくすることである（阿江 & 藤井,2002）。つまり、水球競技の投球動作では、下肢が水を蹴る事によって得たモーメントを身体の中枢である体幹から投球腕にタイミング良く伝達させることによって、身体重心から見たボールの速度を高めていると考えられる。加えて、「ボールをできるだけ長い距離を加速させること」は、手部がボールになす力学的な仕事を大きくするための方法論であり、投球動作を通じてボールに大きなエネルギーを与える技術を習得することの重要性を述べたものと考えられる。これらの投球技術を駆使することにより、水球競技の投球動作において高速度シュートを放つことができると考えられる。

これまでに、水球競技の投球動作を分析した研究はいくつか行われている。Elliott & Armour (1988) は、オーストラリアの水球選手を対象に、水球競

技のペナルティーシュートの 3 次元動作分析を行った。その結果、ボールを下から救い上げるようなテイクバック動作を行う選手に比べて、ボールを上から掴み、野球のようなテイクバック動作を行う選手は、ボール速度が高いことを明らかにした。加えて、女性選手に比べて男性選手は、リリース時の肘関節や手関節の角速度が高いことが報告されている。高木ら (1990) は、ハンドトゥーハンドと呼ばれるパスを空中で受け取り一度も水面にボールをつけることなく一連の動作で行うシュート動作を対象に 3 次元動作分析を行った。その結果、右利きの選手の場合、最大テイクバック時において、左右の大転子を結んだラインに対して左右の肩峰を結んだラインが、頭上から見て時計回りに大きく回転していたことを明らかとしている。このことは、テイクバック時に大きく体幹を捻ることで、ボールを加速させる距離を稼いでいたことを示すものと考えられる。しかしながら、これらの研究で算出されているキネマティクスの変数は、ボール速度の生成にどの程度の影響を及ぼしているかを直接説明するものではない。さらに、これらの研究はテイクバック動作を、静止座標系からみた鉛直軸周りの運動としており、関節の回転運動とみなしていない。

宮西ら (1996) は、野球の投球動作においてボール速度に対する体幹および上肢の各関節の回転運動が生み出し得るボール速度を貢献度として算出している。この研究により、動作の特徴と投球動作の良し悪しを結びつけるだけでなく、その瞬間におけるボール速度が、身体各関節のどのような回転運動によって生み出し得るのが明らかとなった。この研究のように投球動作において関節運動が生み出し得るボール速度を貢献度として算出する方法は Sprigings et al. (1994) の方法論を応用したものであった。Sprigings et al. (1994) はテニスのサービス動作において、身体各部の運動が及ぼす影響を末

端の速度と関連付ける方法論を開発した。この方法論は、関節角速度と関節中心に対するラケット先端の位置ベクトルとの外積によって、各関節の回転運動が生み出し得るラケットヘッド速度を算出する方法論であった。この方法論の特徴は、①算出した関節角速度と相対位置ベクトルから構成される基本式によってラケットヘッド速度を示していることからラケットヘッド速度を直接的に説明する変数を扱っていること、②関節トルクなどを算出していないため、微分を繰り返すことによる誤差が少ないこと、③扱う変数が角速度と相対位置ベクトルであるため、映像によって選手やコーチが対象となる動作を異なる選手間で比較しやすいことなどがあげられる。また、末端の速度に対して各関節の回転運動が生み出し得る速度を表すことができることから、テニス以外の種目にも応用が可能である。そのため、Sprigings et al. (1994) の方法論は末端部の速度がパフォーマンスを説明し得る、野球のバッティング (森下ら, 2013) やピッチング (宮西ら, 1996, 浦田ら, 2014), 卓球のバックハンド (Iino et al., 2008) などの動作を対象とした研究に応用されている。

水球競技の投球動作に Sprigings et al. (1994) の方法論を応用した Feltner & Nelson (1996) は、アメリカの大学に所属する水球選手を対象に、ボール速度に対する体幹および投球腕の関節の回転運動の貢献度を算出した。その結果、リリース時のボール速度に対する貢献度が大きかった関節運動は、肘関節の伸展 (26.6%), 体幹の回旋 (24.2%), 肩関節の内旋 (13.2%) であることを明らかにした。しかし、この結果は欧米人の大学生を対象としており、身体的特徴が異なる日本人に対しても一般化できる結果とは限らない。実際に日本人と欧米人の体格を比較すると、Feltner & Nelson (1996) の研究における被験者は身長が $185.4 \pm 7.0 \text{ cm}$ 、体重が $81.3 \pm 9.5 \text{ kg}$ であるのに対し、大

学生の世界大会である 2013 年ユニバーシアード競技大会に出場した日本代表選手は身長が $176.3 \pm 3.7 \text{ cm}$ 、体重が $74.3 \pm 5.7 \text{ kg}$ であり、身長は約 5%、体重は約 9%の違いがある。また、大学生の日本代表のみならず、2014 年アジア大会に出場した日本代表選手は、身長が $178.2 \pm 5.8 \text{ cm}$ 、体重が $78.8 \pm 10.5 \text{ kg}$ と欧米人の大学生に体格で劣ることから先行研究と同等の競技レベルの被験者であった場合、大きな体格差が生じると考えられる。また、欧米人との身体的特徴における差は、身長と体重だけではなく身体部分の慣性特性においても見られる。阿江ら (1992) は、日本人アスリートにおける身体部分慣性特性を推定し、ロシア人のプロスポーツ選手の身体部分慣性特性と比較することで、日本人はロシア人に比べ上肢の回転半径比が小さいことを明らかにした。つまり、日本人はより上肢が回転しやすい特徴があると考えられる。このように、日本人は体格や身体部分の慣性特性が欧米人と異なるため、ボール速度を高めるために行う身体動作も欧米人と異なると考えられる。そのため、Feltner & Nelson (1996) の研究における結果が日本人大学生の投球動作においても一般化できる結果であるか再検討する必要がある。

さらに、Feltner & Nelson (1996) の研究では水面より上にある身体部分を対象としているが、体幹の回旋の貢献度は水面上で見えているセグメントが回転することによる貢献度を表しており、水中で運動している下胴および下胴に対する上胴の運動（体幹関節の運動）による貢献度については示されていない。下胴を考慮せずに水球競技の投球動作を水面上から捉えることは、水面上の動きを見ているコーチが評価する選手の動作と実際に選手が行っている動作との間に大きなズレを引き起こす可能性がある。例えば、下胴と上胴が共に同じ角速度で回転している場合と下胴に対して上胴が回転している場合では、水面下の運動は異なる運動をしているにも関わらず、水面上で観

察できる上胴の動きは同じになる．このことは，コーチや選手が水球競技の投球動作を理解する上で誤った解釈を生じさせる可能性がある．そのため，水中での選手の動きを反映するにあたり，水中で運動する身体部分を撮影し，下胴や体幹関節の動きを考慮した方法論を開発する必要がある．体幹部を2つのセグメントに分けて分析することによって，これまで明らかとなっていなかった下胴や体幹関節の貢献度が算出できる．下胴や体幹関節といった水中の動きを把握することは，水球競技の投球動作の基礎的知見になると考えられる．加えて，水中の動きを把握することで，リリース時に下胴と上胴が共に同じ角速度で回転している場合では，体幹をより固定させるためのスタビライズトレーニングを重視させ，下胴に対して上胴が回転している場合では，体幹を捻る動きを取り入れた動的なトレーニングを重視させるといった新たなトレーニングの着目点となる資料を得ることができると考えられる．そこで，本研究では **Sprigings et al. (1994)** の方法を応用し，日本の大学水球選手を対象に，ボール速度に対する下胴の回転および体幹，上肢の関節運動の貢献度を明らかにすることを目的とした．

第2章 方法

2.1. 被験者特性

被験者は、大学生水球選手 12 名（身長 $171.2 \pm 5.1\text{cm}$ ，体重 $68.2 \pm 5.3\text{kg}$ ，競技歴 10.1 ± 3.2 年）であった．このうち，右利きの選手は 11 名であり，左利きの選手は 1 名であった．本研究では，全被験者が右利きとみなされるよう変換して分析を行った．本実験の実施にあたり，早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得た．また，被験者には本研究の目的や実験方法などを事前に説明し，実験参加への書面による同意を得た．

2.2. 実験試技

被験者には，ゴールから 5m 離れた位置からゴール中央上部に向かって全力投球を 5 回行わせた．その際，投げられたボールの到達位置がゴール中央上部から大きく外れた場合，再度試技を行わせた．シュート毎に自身の投球について 5 段階で評価させ，最も自己評価が高かった試技を 5，低かった試技を 1 とした．分析試技は 5 回のシュートの内，最も自己評価の高かった試技とした．また，5 回のシュート全てにおいて自己評価が 3 以下であった場合は，自己評価が 4 もしくは 5 の試技が現れるまで試技を繰り返した．全被験者の試技数の平均値は 5.3 ± 0.7 回であった

投球動作は 4 台のビデオカメラによって撮影した．全てのカメラの撮影速度は 60fps，シャッター速度は $1/1000\text{s}$ に設定した．4 台のビデオカメラの内，2 台は水中と水上を同時に撮影することが可能な潜望鏡システム（図 1）に取り付けた．水中の運動は潜望鏡システムに設置した 2 台のビデオカメラ（cam1, 2）と水中窓越しに設置したビデオカメラ（cam4）を用いた計 3 台の

ビデオカメラによって撮影した．水上の運動は潜望鏡システムに設置した 2 台のビデオカメラ（cam1, 2）とプールサイドに設置したビデオカメラ（cam3）による計 3 台のビデオカメラによって撮影した（図 2）．

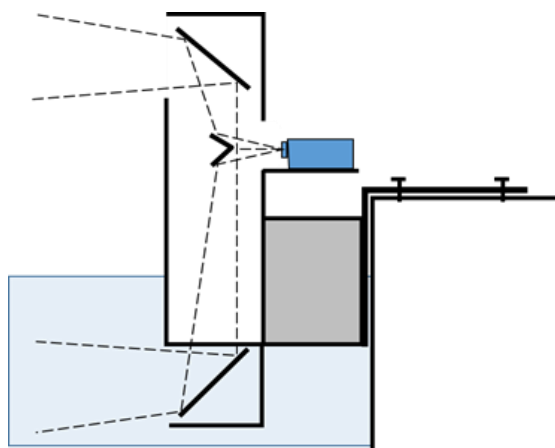


図 1 潜望鏡システム

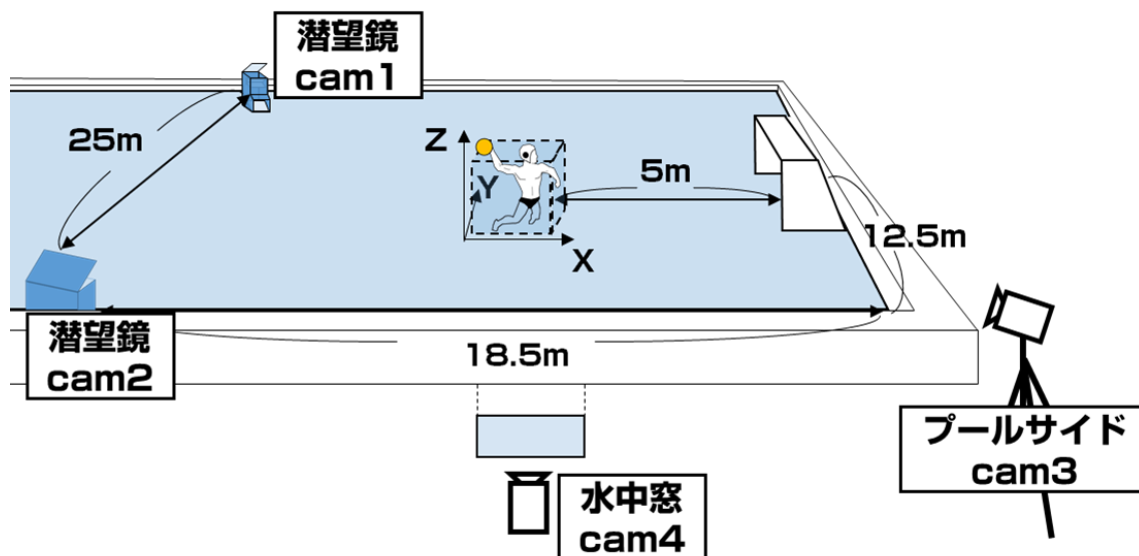


図 2 実験環境

投球動作中の身体標認点を認識しやすくするため、身体に 11 点のマーカ―を貼付した。左右大転子と左右肋骨下端は、主に水中で撮影されることから、水中計測用自発光マーカ―（煌、ノビテック社製）を貼付した。左右肩関節と投球側の肘関節、手関節、手部には白色テーピングを巻き、関節や部分の中心を判断しやすくした。また、投球側の前腕や手部を定義するため、手関節には、発泡スチロール製の球体を先端に取り付けたアルミニウム製の棒をテーピングで固定した。

DLT 法によって 3 次元空間を再構築するため、10 個のマーカ―を取り付けた長さ 2.5m のキャリブレーションポールを撮影した。キャリブレーションポールは試技を行う 2.0m×2.0m×2.5m の空間上の 9 箇所鉛直に立てた（図 3）。これにより水上 45 点、水中 45 点、計 90 点の校正点を撮影した。各カメラを同期するため、ワイヤレス全周囲 LED ランプを水上にて発光させ、水上を撮影している各ビデオカメラの映像内に映した。水中窓越しに設置したビデオカメラは、プールサイドに設置したビデオカメラとケーブルで繋いだ LED ランプを用いて同期させた。これら同期信号は、キャリブレーションポールの撮影時だけでなく、試技の撮影時にも各試技の前後に 1 度ずつ点滅させた。

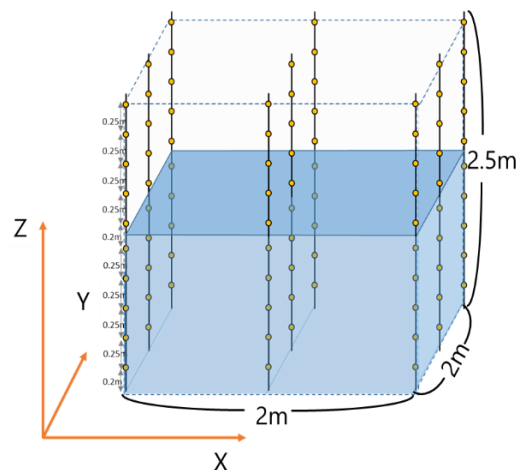


図 3 キャリブレーションポールと校正点

ボールと身体標認点の 3 次元座標は, 3 次元動作分析ソフト (Frame-DIAS V, DKH 社製) を用いて手動デジタイズすることで算出した. デジタイズ位置は, 左右大転子 (RGT,LGT), 左右肋骨下端 (RR,LR), 左右肩関節中心 (RS,LS), 投球側の肘関節中心 (EL), 手関節中心 (WR), 第三中手骨頭 (ME) と手部に取り付けたアルミニウム製の棒の尺側点 (UL), 撓側点 (RA) とボール中心 (b) の計 12 箇所であった (図 4). デジタイズにより得られた, 各カメラにおける身体標認点の 2 次元座標から身体標認点の 3 次元座標を算出した. その際, 各試技の前後で点灯, 消灯させたフレーム番号によって各カメラで対応するフレーム番号を求めた.

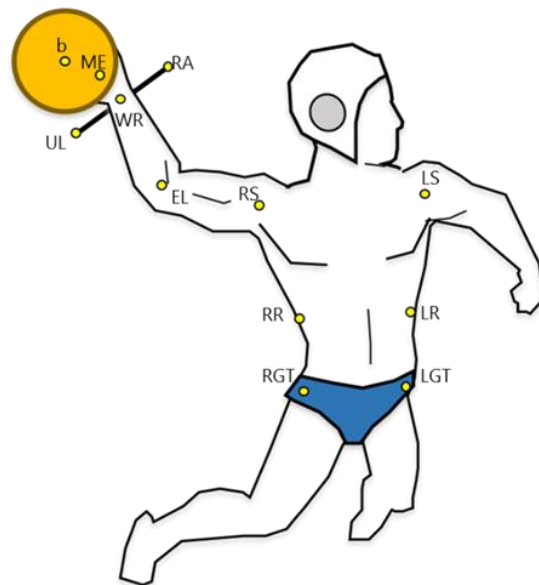


図 4 デジタイズ箇所

3 次元動作分析システムによって算出した身体標認点とボールの 3 次元座標データにおける手動デジタイズに伴うノイズを取り除くため, 4 次の Butterworth Low Pass Filter 法 (Winter,2009) を使用し, 水球競技の投球動作における動作分析を行った, 高木ら (1990) を参考に遮断周波数 10Hz にて平滑化を行った.

2.3. 座標系の定義

鉛直上向きに向かうベクトルを Z 軸，水平面上のゴール方向に向かうベクトルを X 軸， Z 軸と X 軸を外積させたベクトルを Y 軸として静止座標系 R_G を定義した (図 2). また，剛体リンクモデルを下胴，上胴，上腕，前腕，手部の 5 つのセグメントが連結したモデルとして定義した. 各セグメントには右手直交座標系を定義した. 下胴座標系 R_L は， LGT から RGT に向かうベクトルを X_L ， RGT と LGT の中点から RR と RL の中点に向かうベクトルと X_L の外積を Y_L ， X_L と Y_L の外積を Z_L とした. ここで，下胴の軸を解剖学的な回転運動における回転軸として表すと下胴座標系 R_L における X_L は下胴の前方・後方傾斜， Y_L は下胴の左右傾斜， Z_L は下胴の左右回転の軸と一致する. 上胴座標系 R_T は， LS から RS に向かうベクトルを X_T ， RR と LR の中点から RS と LS の中点に向かうベクトルと X_T の外積を Y_T ， X_T と Y_T の外積を Z_T とした. 上胴座標系 R_T における X_T は体幹関節の前屈・後屈， Y_T は体幹関節の左右側屈， Z_T は体幹関節の左右回旋の軸と定義した. 上腕座標系 R_U は， EL から RS に向かうベクトルを Z_U ， EL から WR に向かうベクトルと Z_U の外積を X_U ， Z_U と X_U の外積を Y_U とした. 上腕座標系 R_U における X_U は肩関節の挙上・下制， Y_U は肩関節の水平内転・水平外転， Z_U は肩関節の内旋・外旋の軸として定義した. 前腕座標系 R_F は， WR から EL に向かうベクトルを Z_F ， Z_F と UL から RA に向かうベクトルの外積を Y_F ， Y_F と Z_F の外積を X_F とした. 肘関節の屈曲・伸展の軸は Z_U と Z_F を外積して求め，肘関節の回内・回外の軸は Z_F として定義した. 手部座標系 R_H は， ME から WR に向かうベクトルを Z_H ， Z_H と UL から RA に向かうベクトルの外積を Y_H ， Y_H と Z_H の外積を X_H とした. 手部座標系 R_H における X_H は手関節の屈曲・伸展， Y_H は手関節の撓屈・尺屈の軸として定義した.

2.4. セグメントの角速度の算出

本論文では、ベクトルを太字、スカラーを斜体にて表記する．また、セグメント座標系および関節座標系について表されたベクトルについては ' を添えて表記する．各セグメント角速度は、セグメント座標系と同様の添字を用いて区別した．セグメントの角速度 (ω) は、各セグメント座標系の単位ベクトル ($\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$) を時間微分することによって算出した．

下胴の各軸方向の単位ベクトルを時間微分すると以下の式 (1) となる．

$$\frac{d\mathbf{i}_L}{dt} = \omega_L \times \mathbf{i}_L, \frac{d\mathbf{j}_L}{dt} = \omega_L \times \mathbf{j}_L, \frac{d\mathbf{k}_L}{dt} = \omega_L \times \mathbf{k}_L \quad (1)$$

式 (1) において、 $\omega_L = \omega_{Li} \cdot \mathbf{i}_L + \omega_{Lj} \cdot \mathbf{j}_L + \omega_{Lk} \cdot \mathbf{k}_L$ である．

$\mathbf{j}_L$ を時間微分した式 (1) の両辺に $\mathbf{k}_L$ を掛けると

$$\mathbf{k}_L \cdot \frac{d\mathbf{j}_L}{dt} = \mathbf{k}_L \cdot (\omega_L \times \mathbf{j}_L) \quad (2)$$

となり、スカラー三重積の公式 (阿江 & 藤井, 2002) を利用し、式 (2) を変形すると ω'_{Li} 求めることができる． ω'_{Li} は下胴の角速度を静止座標系における下胴座標系の X_L (下胴の前方・後方傾斜の軸) に投影した値を示している．

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_L \cdot \frac{d\mathbf{j}_L}{dt} &= \mathbf{k}_L \cdot (\omega_L \times \mathbf{j}_L) \\ &= \omega_L \cdot (\mathbf{j}_L \times \mathbf{k}_L) \\ &= \omega_L \cdot \mathbf{i}_L \\ &= \omega'_{Li} \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) と同様に ω'_{Lj} , ω'_{Lk} は, 次のように求められる.

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_L \cdot \frac{d\mathbf{k}_L}{dt} &= \omega'_{Lj} \\ \mathbf{j}_L \cdot \frac{d\mathbf{i}_L}{dt} &= \omega'_{Lk}\end{aligned}$$

つまり, 下胴の角速度ベクトル ($\boldsymbol{\omega}'_L$) と角速度ベクトルの大きさ ($|\boldsymbol{\omega}'_L|$) は次のようになる.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}'_L &= \begin{bmatrix} \omega'_{Li} \\ \omega'_{Lj} \\ \omega'_{Lk} \end{bmatrix} \\ |\boldsymbol{\omega}'_L| &= \sqrt{\omega'^2_{Li} + \omega'^2_{Lj} + \omega'^2_{Lk}}\end{aligned}\tag{4}$$

下胴以外のセグメント角速度の算出も式 (4) と同様の方法で行なった.

2.5. 各関節の解剖学的な回転運動の角速度の算出

各関節の角速度は, 隣接するセグメントの相対角速度として算出し, 遠位のセグメント座標系について表した. 隣接するセグメントの相対角速度は, 静止座標系について表された各セグメントの角速度の差分として算出した. そして, 下胴に対する上胴の角速度を $\mathbf{R}_T$ について表すことにより体幹関節角速度 ($\boldsymbol{\omega}'_T$) を, 上胴に対する上腕の角速度を $\mathbf{R}_U$ について表すことにより肩関節角速度 ($\boldsymbol{\omega}'_U$) を, 上腕に対する前腕の角速度を $\mathbf{R}_F$ について表すことにより肘関節角速度 ($\boldsymbol{\omega}'_F$) を, 前腕の角速度に対する手部の角速度を $\mathbf{R}_H$ について表すことにより手関節角速度 ($\boldsymbol{\omega}'_H$) を求めた. 下記に体幹関節の角速度を求める式 (5) を示す.

$$\begin{aligned}
A_{R_L/R_G} \cdot \omega'_L &= \omega_L \\
A_{R_T/R_G} \cdot \omega'_T &= \omega_T \\
\omega_{R_T/R_L} &= \omega_T - \omega_L \\
\omega'_T &= A_{R_T/R_G}^T \cdot \omega_{R_T/R_L}
\end{aligned} \tag{5}$$

式 (5) と同様に他の関節の角速度を求めた．式 (5) における A は，座標変換行列を示しており， A_{R_L/R_G} は下胴座標系 R_L で表された座標値を静止座標系 R_G の座標値に変換する行列である．式 (5) で求めた体幹関節の角速度 (ω'_T) の各軸成分が体幹関節の解剖学的な回転運動における角速度を示す．つまり， ω'_{Ti} が体幹関節の前屈・後屈の角速度， ω'_{Tj} が体幹関節の左右側屈の角速度， ω'_{Tk} が体幹関節の左右回旋の角速度を示す．

2.6. 各関節の解剖学的な回転運動が生み出し得るボール速度の算出

Sprigings et al. (1994) の方法に基づき，水球競技の投球動作において下胴および体幹関節，肩関節，肘関節，手関節の回転運動からボール速度を算出するための基本式 (6) を次に示す．

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{V}_{MT} + \mathbf{V}_{MR/MT} + \mathbf{V}_{RS/MR} + \mathbf{V}_{EL/RS} + \mathbf{V}_{WR/EL} + \mathbf{V}_{ME/WR} + \mathbf{V}_{b/ME} \tag{6}$$

ここで， $\mathbf{V}$ は速度ベクトルを表しており，添字の MT は RGT と LGT の中点， MR は RR と LR の中点を示している．つまり， $\mathbf{V}_{MR/MT}$ は MT に対する MR の速度を表している．この式 (6) で相対速度として表されている項を各セグメントの角速度ベクトルを用いて表すと以下の式 (7) となる．

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_b = & \mathbf{V}_{MT} + \boldsymbol{\omega}_L \times \mathbf{r}_{MR/MT} + \boldsymbol{\omega}_T \times \mathbf{r}_{RS/MR} + \boldsymbol{\omega}_U \times \mathbf{r}_{EL/RS} + \boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{r}_{WR/EL} \\ & + \boldsymbol{\omega}_H \times \mathbf{r}_{ME/WR} + \mathbf{V}_{b/ME} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで， $\mathbf{r}$ は各標認点間の相対位置ベクトルを示す．つまり， $\mathbf{r}_{MR/MT}$ は MT から MR に向かうベクトルを表している．また， $\mathbf{r}_{MR/MT}$ は，次の式 (8) のように示すことができる．

$$\mathbf{r}_{MR/MT} = \mathbf{r}_{b/MT} - \mathbf{r}_{b/MR} \quad (8)$$

他の相対位置ベクトルも同様に求めることができる．これらを先ほどの式 (7) に代入すると，

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_b = & \mathbf{V}_{MT} + \boldsymbol{\omega}_L \times (\mathbf{r}_{ME/MT} - \mathbf{r}_{ME/MR}) + \boldsymbol{\omega}_T \times (\mathbf{r}_{ME/MR} - \mathbf{r}_{ME/RS}) + \boldsymbol{\omega}_U \\ & \times (\mathbf{r}_{ME/RS} - \mathbf{r}_{ME/EL}) + \boldsymbol{\omega}_F \times (\mathbf{r}_{ME/EL} - \mathbf{r}_{ME/WR}) + \boldsymbol{\omega}_H \times \mathbf{r}_{ME/WR} \\ & + \mathbf{V}_{b/ME} \end{aligned} \quad (9)$$

となり，式 (9) において $\mathbf{r}$ を同類項でまとめると，以下の式 (10) のようになる．

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_b = & \mathbf{V}_{MT} + \boldsymbol{\omega}_L \times \mathbf{r}_{ME/MT} + (\boldsymbol{\omega}_T - \boldsymbol{\omega}_L) \times \mathbf{r}_{ME/MR} + (\boldsymbol{\omega}_U - \boldsymbol{\omega}_T) \times \mathbf{r}_{ME/RS} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_F - \boldsymbol{\omega}_U) \times \mathbf{r}_{ME/EL} + (\boldsymbol{\omega}_H - \boldsymbol{\omega}_F) \times \mathbf{r}_{ME/WR} + \mathbf{V}_{b/ME} \end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) における $(\boldsymbol{\omega}_T - \boldsymbol{\omega}_L)$ といった隣接するセグメントの相対角速度を静止座標系における関節角速度として表すと，次の式 (11) となる．

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_b = & \mathbf{V}_{MT} + \boldsymbol{\omega}_L \times \mathbf{r}_{ME/MT} + \boldsymbol{\omega}_T \times \mathbf{r}_{ME/MR} + \boldsymbol{\omega}_U \times \mathbf{r}_{ME/RS} + \boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{r}_{ME/EL} \\ & + \boldsymbol{\omega}_H \times \mathbf{r}_{ME/WR} + \mathbf{V}_{b/ME} \end{aligned} \quad (11)$$

このようにして得られた式 (11) は，水球競技の投球動作において下胴および体幹関節，肩関節，肘関節，手関節の回転運動によって生み出し得るボール速度を算出するための基本式である．式 (11) は，任意の瞬間のボール速度を，その瞬間の①下胴中心の速度 ($\mathbf{V}_{MT}$)，②下胴の回転が下胴以遠の身体部位全体（上胴，上腕，前腕，手部）とボールを同姿勢のまま移動・回転させたと仮定した場合に生み出し得る手部の速度 ($\boldsymbol{\omega}_L \times \mathbf{r}_{ME/MT}$)，③各関節がその関節以遠の身体部位全体とボールを同姿勢のまま回転させたと仮定した場合に生み出し得る手部の速度 ($\boldsymbol{\omega}_T \times \mathbf{r}_{ME/MR}$ ， $\boldsymbol{\omega}_U \times \mathbf{r}_{ME/RS}$ ， $\boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{r}_{ME/EL}$ ， $\boldsymbol{\omega}_H \times \mathbf{r}_{ME/WR}$)，④手部に対するボール速度 ($\mathbf{V}_{b/ME}$) の和とみなして表したものである．さらに，各関節の解剖学的な回転運動が生み出し得るボール速度を算出するため式 (11) における関節角速度を，静止座標系における下胴および各関節座標系の各軸周りの角速度として表すと，次の式 (12) となる．

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_b = & \mathbf{V}_{MT} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{Li} + \boldsymbol{\omega}_{Lj} + \boldsymbol{\omega}_{Lk}) \times \mathbf{r}_{ME/MT} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{Ti} + \boldsymbol{\omega}_{Tj} + \boldsymbol{\omega}_{Tk}) \times \mathbf{r}_{ME/MR} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{Ui} + \boldsymbol{\omega}_{Uj} + \boldsymbol{\omega}_{Uk}) \times \mathbf{r}_{ME/RS} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{Fi} + \boldsymbol{\omega}_{Fk}) \times \mathbf{r}_{ME/EL} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{Hi} + \boldsymbol{\omega}_{Hj}) \times \mathbf{r}_{ME/WR} \\ & + \mathbf{V}_{b/ME} \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) における ω_{Ti} は，体幹関節の前屈・後屈方向の角速度を静止座標系について示しており， $\omega_{Ti} \times \mathbf{r}_{ME/MR}$ は，体幹関節が身体部位全体とボールを同姿勢のまま前屈もしくは後屈したと仮定した場合に生み出し得る手部の速度を表している．本研究では，式 (12) に実測した各セグメントの位置や速度，角速度を入力値としてボール速度を算出した．分析区間はリリース直前（ボールが手部と接している最後のフレーム）を 0s とし，リリース直前から 20 フレーム前までを分析区間とした．

2.7. 貢献度の算出

ボール速度に対する下胴および各関節運動の貢献度は，各関節が生み出したボール速度をボールの合成速度方向へ投影し，その投影ベクトルの大きさをボールの合成速度で除すことによって求めた．例えば，肩関節の回転運動の貢献度は次の式 (13) となる．

$$\text{貢献度 (\%)} = \frac{(\omega_U \times \mathbf{r}_{ME/RS}) \cdot \mathbf{V}_b}{|\mathbf{V}_b|} \times 100 \quad (13)$$

式 (13) と同様に他の関節運動の貢献度を求めた．

2.8. 方法論の妥当性検証および統計手法

本研究で定義した 5 つのセグメントが連結した剛体リンクモデルを用いてボールの速度を算出する方法論の妥当性を検証するため，ボールの 3 次元座標を時間微分することによって求めたボール速度の測定値と，式 (12) によって得られたボール速度の算出値の時系列データの間を相互相関係数によって検討した．また，リリース直前のボール速度の測定値と算出値の違いを

対応ありの t 検定によって検討した． t 検定における有意水準は 5%未満とした． 結果は，全被験者の平均値 $\pm$ 標準偏差として記した．

第3章 結果

3.1. ボール速度の算出値と測定値

本研究で用いたモデル（式(12)）によって算出したボール速度の平均値と，ボールの3次元座標を時間微分することによって求めたボール速度の測定値の平均値の経時変化を図5に示す．式(12)を用いて求めたリリース直前におけるボール速度の算出値は $14.9 \pm 1.0 \text{ m/s}$ ，ボールの3次元座標を時間微分することによって求めた全被験者のリリース直前におけるボール速度の測定値は $15.3 \pm 0.8 \text{ m/s}$ であった．リリース直前におけるボール速度の算出値と測定値について対応ありのt検定を行なった結果，両データの間には有意な差が見られた ($p < 0.05$)．また，ボール速度の算出値と測定値の差が最も大きかった時刻は -0.05 s であり，その瞬間における算出値と測定値の差は 1.0 m/s であった．ボール速度の算出値と測定値との相互相関係数の平均値は 0.997 ± 0.001 であり，両データの回帰直線の係数は 0.994 ± 0.003 ，切片は -0.063 ± 0.233 であった．

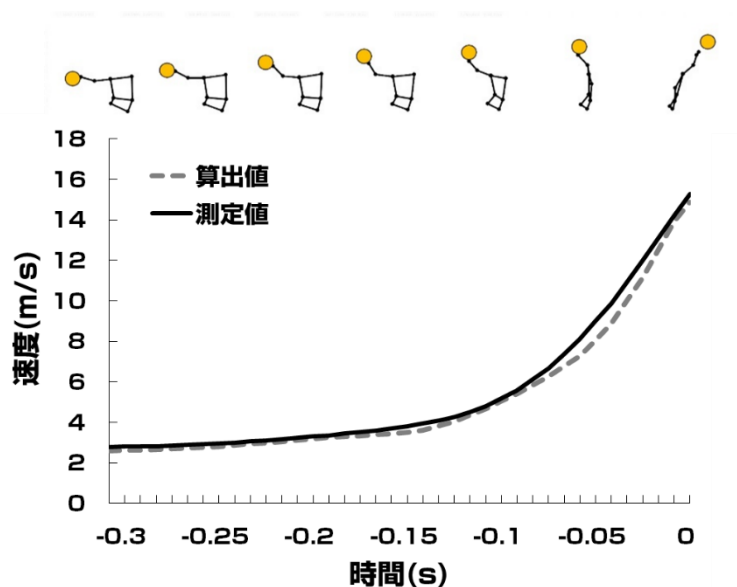


図5 ボール速度の算出値と測定値の平均値の経時変化

3.2. リリース直前のボール速度に対するセグメントおよび各関節の運動による貢献度

リリース直前のボール速度に対するセグメントおよび各関節の運動による貢献度を図 6 に示す。リリース直前のボール速度に対する貢献度が正の値を示したセグメントおよび関節を，その数値が大きい順に表すと，体幹関節が $34.3 \pm 11.8\%$ であり，次に手部に対するボール速度が $27.6 \pm 4.7\%$ ，続いて肩関節が $23.8 \pm 7.4\%$ ，肘関節が $21.7 \pm 4.3\%$ であった。貢献度が負の値を示したのは下胴の並進運動と回転運動，および手関節であり，それぞれ $-0.1 \pm 1.7\%$ ， $-6.0 \pm 8.3\%$ ， $-1.2 \pm 5.5\%$ であった。解剖学的な関節運動の貢献度は，肘関節の屈曲・伸展 ($22.2 \pm 4.1\%$) が関節運動の中で最も貢献度が大きく，続いて体幹関節の左右回旋 ($18.3 \pm 8.5\%$)，体幹関節の前屈・後屈 ($16.4 \pm 5.3\%$)，肩関節の挙上・下制 ($9.0 \pm 4.4\%$)，肩関節の水平内転・水平外転 ($7.9 \pm 5.1\%$)，肩関節の内旋・外旋 ($6.9 \pm 3.3\%$) であった。また，負の貢献度を示していた下胴は，前方・後方傾斜が $-10.9 \pm 6.6\%$ であり，左右回転が $5.3 \pm 3.3\%$ であった。下胴と同様に負の貢献を示していた手関節は掌屈・背屈が $-2.0 \pm 5.7\%$ であった (図 7)。その他の解剖学的な回転運動は，下胴の左右傾斜が $-0.5 \pm 1.7\%$ ，体幹関節の左右側屈が $-0.4 \pm 2.8\%$ ，肘関節の回内・回外が $-0.5 \pm 0.7\%$ ，手関節の掌屈・背屈が $0.7 \pm 1.1\%$ とそれぞれ小さな値を示した。

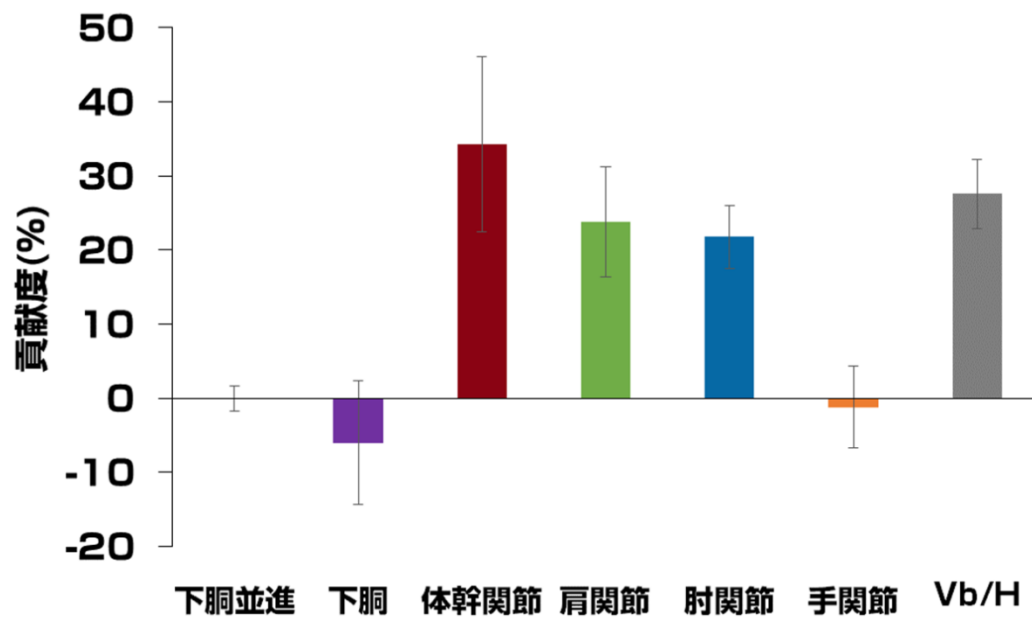


図 6 リリース直前のボール速度に対する下胴および各関節運動の貢献度

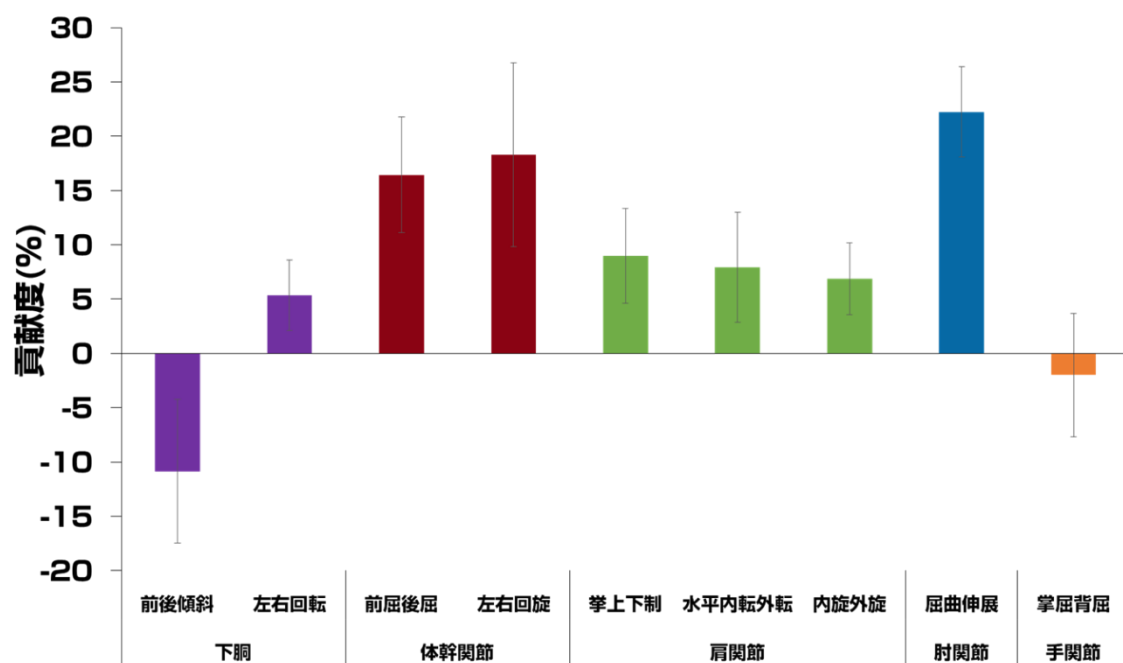


図 7 リリース直前における下胴の回転および各関節の解剖学的な回転運動による貢献度

3.3. 下腕および各関節が生み出した手部の速度

各関節運動が生み出した手部の速度を全被験者について平均した値を図 8 に示す。下腕の並進運動が生み出した手部の速度は分析開始時には、 $0.1\pm0.2\text{m/s}$ であり、分析開始時から -0.15s まで緩やかに上昇した。その後、リリースに向かって緩やかに減少し、リリース直前には $0.0\pm0.2\text{m/s}$ を示した。下腕の回転運動が生み出した手部の速度は、分析開始時には $-1.7\pm1.2\text{m/s}$ であり、この瞬間における最も大きな負の値であった。 -0.1s では $2.6\pm2.1\text{m/s}$ とこの瞬間における最も大きな正の値を示した。その後、再び負の値となり、リリース直前にはその瞬間において最も大きな負の値 ($-0.9\pm1.3\text{m/s}$) を示していた。体幹関節が生み出した手部の速度は、分析開始時において $1.8\pm1.1\text{m/s}$ であり、他の関節と比べ大きい正の値を示した。その後、緩やかに減少し、 -0.15s 付近から急激に増加し始めた。 -0.1s からリリース直前まで他の関節運動の中で最も大きな値を示し、リリース直前には $5.1\pm1.8\text{m/s}$ を示した。肩関節が生み出した手部の速度は、分析開始時において $1.9\pm0.7\text{m/s}$ であり、この瞬間における最も大きな正の値を示した。その後、徐々に減少していき、 -0.15s から -0.1s の間は負の値を示した。その後、リリースまで増加し続け、リリース直前には $3.6\pm1.2\text{m/s}$ を示した。肘関節が生み出した手部の速度は、分析開始時では $0.3\pm0.4\text{m/s}$ と小さな値を示した。 -0.2s では $1.4\pm0.6\text{m/s}$ であり、この瞬間における最も大きな正の値を示した。その後、一度減少し、 -0.1s を経過したあたりから急激に増加し始めたものの、リリース直前で再び減少し、リリース直前には $3.2\pm0.5\text{m/s}$ を示した。手関節が生み出した手部の速度は、分析開始時からリリース直前まで小さな値を保ったままリリースを迎え、リリース直前には $-0.2\pm0.8\text{m/s}$ であった。

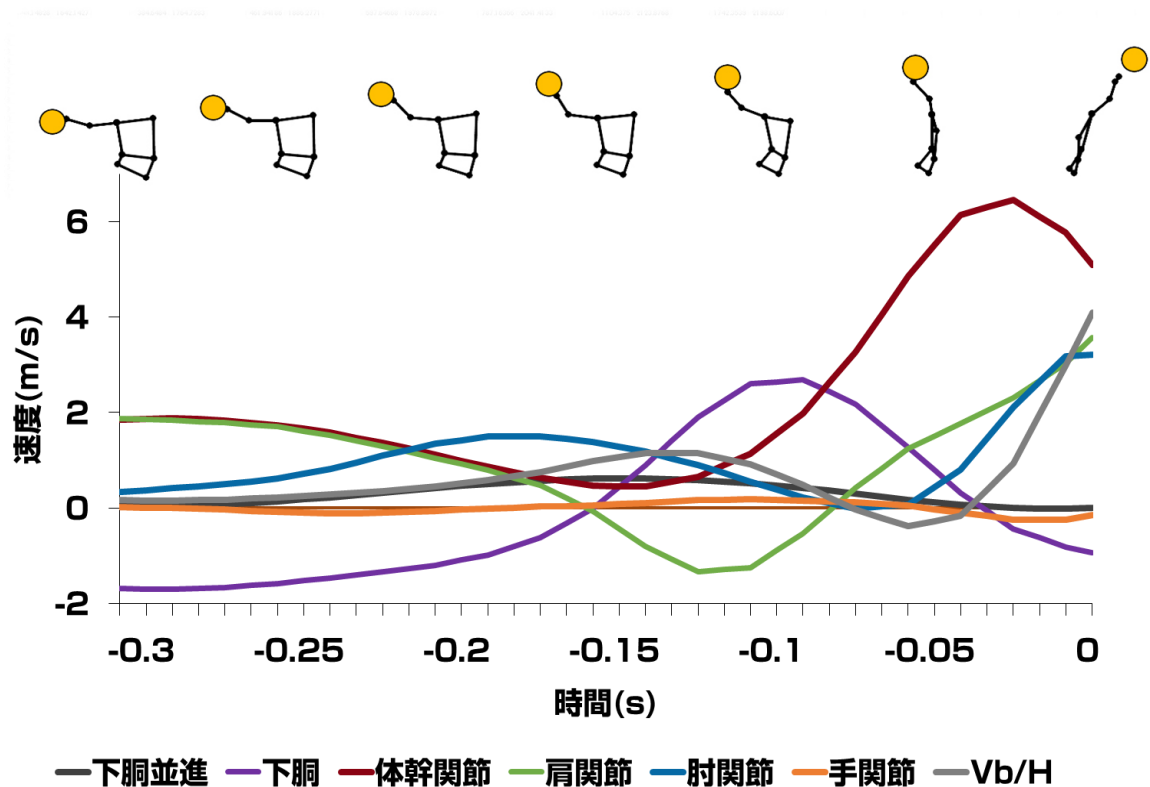


図 8 下胴および各関節が生み出した手部の速度の平均値

3.4. 下胴の回転および各関節の解剖学的な関節運動が生み出した手部の速度

リリースに至るまでの過程において、各関節がどのような運動によってボール速度を生み出していたかを明らかにするため、解剖学的な回転運動によって生み出された手部の速度を全被験者の各瞬間において平均した値を各関節ごとに図 9 に示す。図 9 の a はボールと下胴の並進速度、b は下胴、c は体幹関節、d は肩関節、e は肘関節、f は手関節と手部に対するボール速度を表している。

a. ボールと下胴の並進運動

ボールの速度は-0.1s 付近まで緩やかに増加していた。その後、大きな加速度でリリースまで増加し、リリース直前に最大値 ($14.9 \pm 1.0 \text{ m/s}$) を迎えた。

下胴の並進運動が生み出した手部の速度は，関節運動ではないため，3.3.で説明したとおりである．

b. 下胴

下胴の前方・後方傾斜が生み出した手部の速度は，分析開始時には $-0.3 \pm 0.4 \text{ m/s}$ であり， -0.2 s から増加し始めた． -0.1 s 付近では $0.7 \pm 1.7 \text{ m/s}$ となり，その後リリースに向かい減少し始め，リリース直前には $-1.6 \pm 1.1 \text{ m/s}$ とこの瞬間において最も大きな負の値を示した．下胴の左右傾斜が生み出した手部の速度は，分析開始時には $-0.6 \pm 0.6 \text{ m/s}$ であり，リリース直前には $-0.1 \pm 0.2 \text{ m/s}$ を示した．下胴の左右回転が生み出した手部の速度は，分析開始時には $-0.8 \pm 1.0 \text{ m/s}$ と，この瞬間における最も大きな負の値であった． -0.1 s では $1.8 \pm 0.8 \text{ m/s}$ となり，その後，ゆるやかに減少するもののリリース直前には $0.8 \pm 0.5 \text{ m/s}$ を示した．下胴は，分析開始時点において解剖学的回転運動における3軸すべての運動において負の値を示した．しかし， -0.1 s では3軸すべての運動が正の値を示していた．

c. 体幹関節

体幹関節の前屈・後屈が生み出した手部の速度は，分析開始時には， $0.6 \pm 0.8 \text{ m/s}$ であり， -0.2 s 付近から急激に減少し始め， -0.1 s では $-1.2 \pm 2.4 \text{ m/s}$ を示した． -0.1 s 以降は急激に増加し，リリース直前には $2.4 \pm 0.8 \text{ m/s}$ を示した．体幹関節の左右側屈が生み出した手部の速度は，分析開始時には $0.7 \pm 0.6 \text{ m/s}$ であり，リリース直前には $-0.1 \pm 0.4 \text{ m/s}$ となった．体幹関節の左右回旋が生み出した手部の速度は，分析開始時には $0.6 \pm 0.8 \text{ m/s}$ であり， -0.2 s から増加し始め，リリース直前には $2.7 \pm 1.4 \text{ m/s}$ を示した．

d. 肩関節

肩関節の挙上・下制が生み出した手部の速度は，分析開始時に $0.9\pm0.9\text{m/s}$ であった．その後，緩やかに減少するものの 0.1s 付近から増加し，リリース直前には $1.4\pm0.7\text{m/s}$ を示した．肩関節の水平内転・水平外転が生み出した手部の速度は，分析開始時には $0.9\pm0.7\text{m/s}$ であり，その後，リリース直前で増加し，リリース直前には $1.2\pm0.8\text{m/s}$ を示した．肩関節の内旋・外旋が生み出した手部の速度は，分析開始時には $0.1\pm0.4\text{m/s}$ であり， -0.15s から減少し， -0.1s では $-1.3\pm0.4\text{m/s}$ となった．その後，増加しリリース直前に $1.0\pm0.5\text{m/s}$ となった．

e. 肘関節

肘関節の屈曲・伸展が生み出した手部の速度は，分析開始時に $0.3\pm0.4\text{m/s}$ であった．その後， -0.2s から減少を始めるが， -0.1s を経過してから再び増加し，リリース時には $3.3\pm0.5\text{m/s}$ と，この瞬間の解剖学的な回転運動において最も大きな値を示した．肘関節の回内・回外は分析区間において常に 0m/s に近い値を示していた．

f. 手関節と手部に対するボール速度

手関節の運動は掌屈・背屈，撓屈・尺屈共に分析区間において常に 0m/s に近い値を示していた．手部に対するボールの速度は，分析開始時には $0.2\pm0.3\text{m/s}$ であった． -0.1s を経過すると急激に増加し，リリース直前には $4.1\pm0.7\text{m/s}$ を示した．

図 9 で示した下腕および各関節の回転運動によって生み出された手部の速度（全被験者の平均値）の傾向は，各被験者におけるピークの発生時刻や最大値，最小値に多少のズレがあるものの，ピークの発生時刻が著しく異なることや，平均値で示した各時刻の値の正負を大きく覆すような値を示すことはなかった．そのため，ほぼすべての被験者において下腕および各関節の回転運動によって生み出された手部の速度を全被験者の各瞬間において平均した値と同様の傾向を示していたと考えられる．

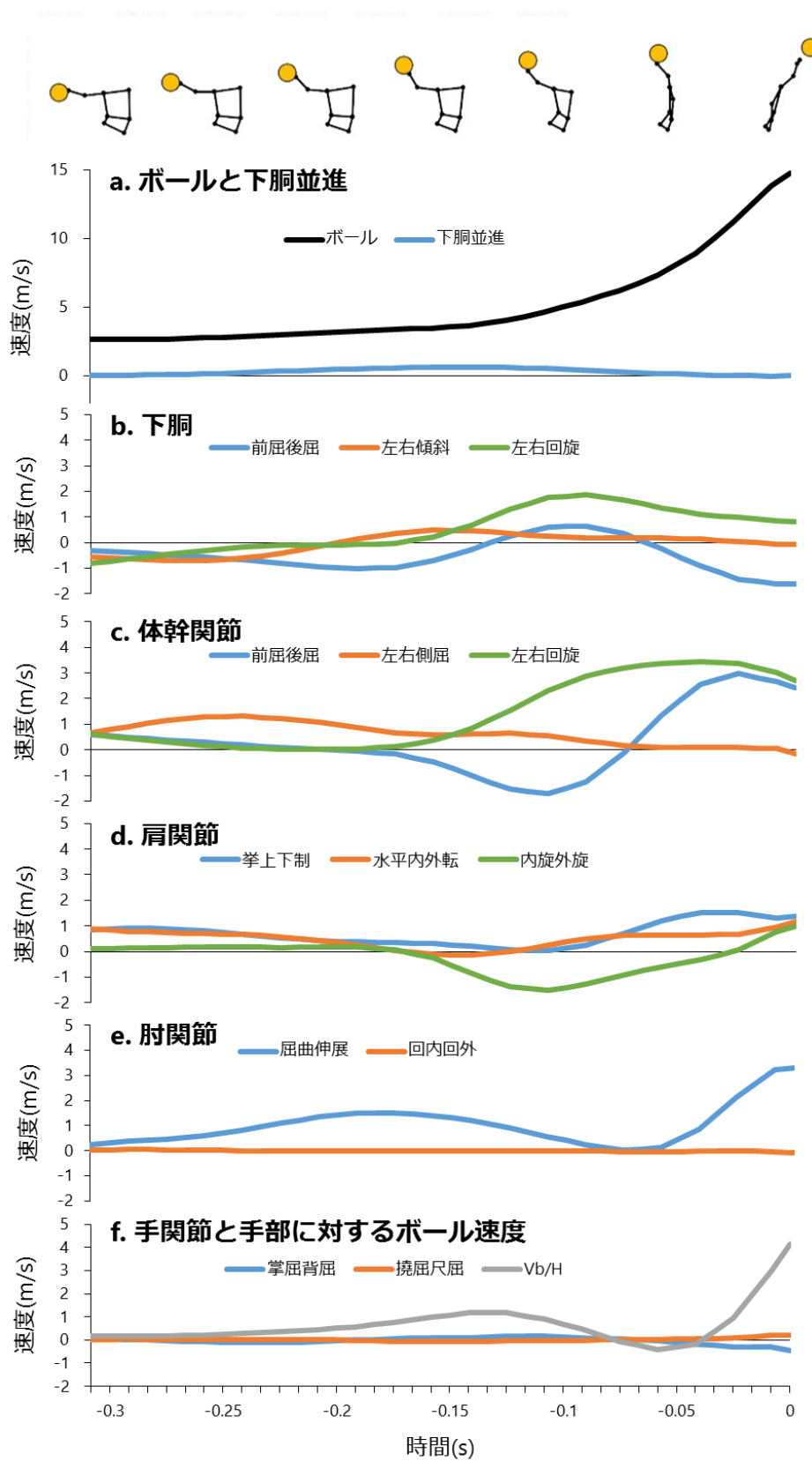


図 9 下腕の回転および各関節の解剖学的な回転運動が生み出した手部の速度の平均値

3.5. 下胴および各関節の解剖学的な回転運動における角速度

各関節の解剖学的な回転運動が生み出した手部の速度がどの方向への回転によって生み出されていたかを明らかにするため、各関節運動の角速度を全被験者の各瞬間において平均した値を図 10 に示す。図 10 の a は下胴、b は体幹関節、c は肩関節、d は肘関節、e は手関節を表す。

a. 下胴

下胴の前方・後方傾斜の角速度は、後方傾斜を正とすると、分析開始時には $1.2 \pm 1.7 \text{ rad/s}$ であった。その後、 -0.1 s で $-0.9 \pm 2.3 \text{ rad/s}$ であり、再び正の値となり、リリース直前には $2.1 \pm 1.2 \text{ rad/s}$ で回転していた。下胴の左右傾斜の角速度は、右傾斜の方向を正とすると、分析開始時には $1.1 \pm 1.0 \text{ rad/s}$ であり、 -0.2 付近から -0.1 s にかけて減少し、負の値を示した。その後、増加し始め、リリース直前には $0.1 \pm 1.0 \text{ rad/s}$ を示した。下胴の左右回転の角速度は、左回転方向を正とすると、分析開始時からリリースに至るまで常に正の値を示していた。分析開始時には 1.4 rad/s であり、 -0.1 s 付近でピークを迎え、 5.3 rad/s であり、その後減少を始めるもののリリース直前には下胴の中で最も大きな正の値 (3.0 rad/s) を示していた。

b. 体幹関節

体幹関節の前屈・後屈の角速度は、後屈方向を正とすると、分析開始時には $1.7 \pm 1.9 \text{ rad/s}$ であり、正の値を維持していたが、 -0.1 s から急激に減少し、リリース直前には $-5.7 \pm 1.4 \text{ rad/s}$ となった。体幹関節の左右側屈の角速度は、右側屈方向を正とすると、分析開始からリリースに至るまで常に負の値を示し、リリース直前には $-4.1 \pm 1.8 \text{ rad/s}$ であった。体幹関節の左右回旋の角速度

は、左回旋方向を正とすると、分析開始時には $-1.2 \pm 1.7 \text{ rad/s}$ であり、 -0.25 s を経過すると正の値を示し増加し続け、 -0.1 s で最大値となり、リリースに向かって減少するものの、リリース直前には $4.5 \pm 2.1 \text{ rad/s}$ と正の値を示した。

c. 肩関節

肩関節の挙上・下制の角速度は、挙上方向を正とすると分析開始時に $1.4 \pm 2.2 \text{ rad/s}$ であり、減少し続け、 -0.05 s に最小値となった。その後、やや増加し、リリース直前には $-4.6 \pm 1.6 \text{ rad/s}$ であった。肩関節の水平内転・水平外転の角速度は、水平内転方向を正とすると、分析開始時は $-1.9 \pm 1.4 \text{ rad/s}$ であり、常に増加をしていき、リリース直前には $3.7 \pm 2.0 \text{ rad/s}$ であった。肩関節の内旋・外旋の角速度は、内旋方向を正とすると、分析開始時から -0.05 s 付近まで常に負の値を示し、 -0.15 s 付近では最小値となった。リリース直前に急激に増加しリリース直前には $10.2 \pm 4.0 \text{ rad/s}$ と肩関節の運動の中で最も大きな角速度を示した。

d. 肘関節

肘関節の屈曲・伸展の角速度は、伸展方向を正とすると、分析開始時から -0.05 s 付近まで負の値を示していたが、その後急激に増加し、リリース直前には、 $19.3 \pm 1.9 \text{ rad/s}$ と全ての関節運動の中で最も大きな角速度を示した。肘関節の回内・回外の角速度は、回内方向を正とすると分析開始時には小さな負の値を示していたが、ゆるやかに増加し、 -0.15 s 付近で正の値となり、リリース直前には $10.1 \pm 5.3 \text{ rad/s}$ を示した。

e. 手関節

手関節の掌屈・背屈の角速度は、掌屈方向を正とすると、分析開始時には、 $0.1 \pm 1.7 \text{ rad/s}$ を示し、その後増加していった。 -0.1 s 付近から減少し始め、リリース直前には $-2.2 \pm 5.1 \text{ rad/s}$ を示した。手関節の橈屈・尺屈の角速度は、尺屈方向を正とすると、分析開始には $0.1 \pm 2.5 \text{ rad/s}$ を示していた。その後、 -0.05 s から増加し、リリース直前には $3.2 \pm 3.1 \text{ rad/s}$ であった。

図 10 に示した各関節運動の角速度を全被験者の各瞬間における平均値は、手関節を除く関節の角速度は、各被験者におけるピークの発生時刻や最大値、最小値に多少のズレがあるものの、ピークの発生時刻が著しく異なることや、平均値で示した各時刻の値の正負を大きく覆すような値を示すことはなかった。手関節の角速度は、各瞬間における被験者間のばらつきが大きかった。しかしながら、リリース直前の手関節における掌屈・背屈の角速度と尺屈・橈屈の角速度の正負はほぼすべての被験者において平均値で示した値と同様であり、掌屈・背屈の角速度が負の値、尺屈・橈屈の角速度が正の値を示していた。そのため、ほぼすべての被験者において下胴および各関節の角速度を全被験者の各瞬間において平均した値と同様の傾向を示していたと考えられる。

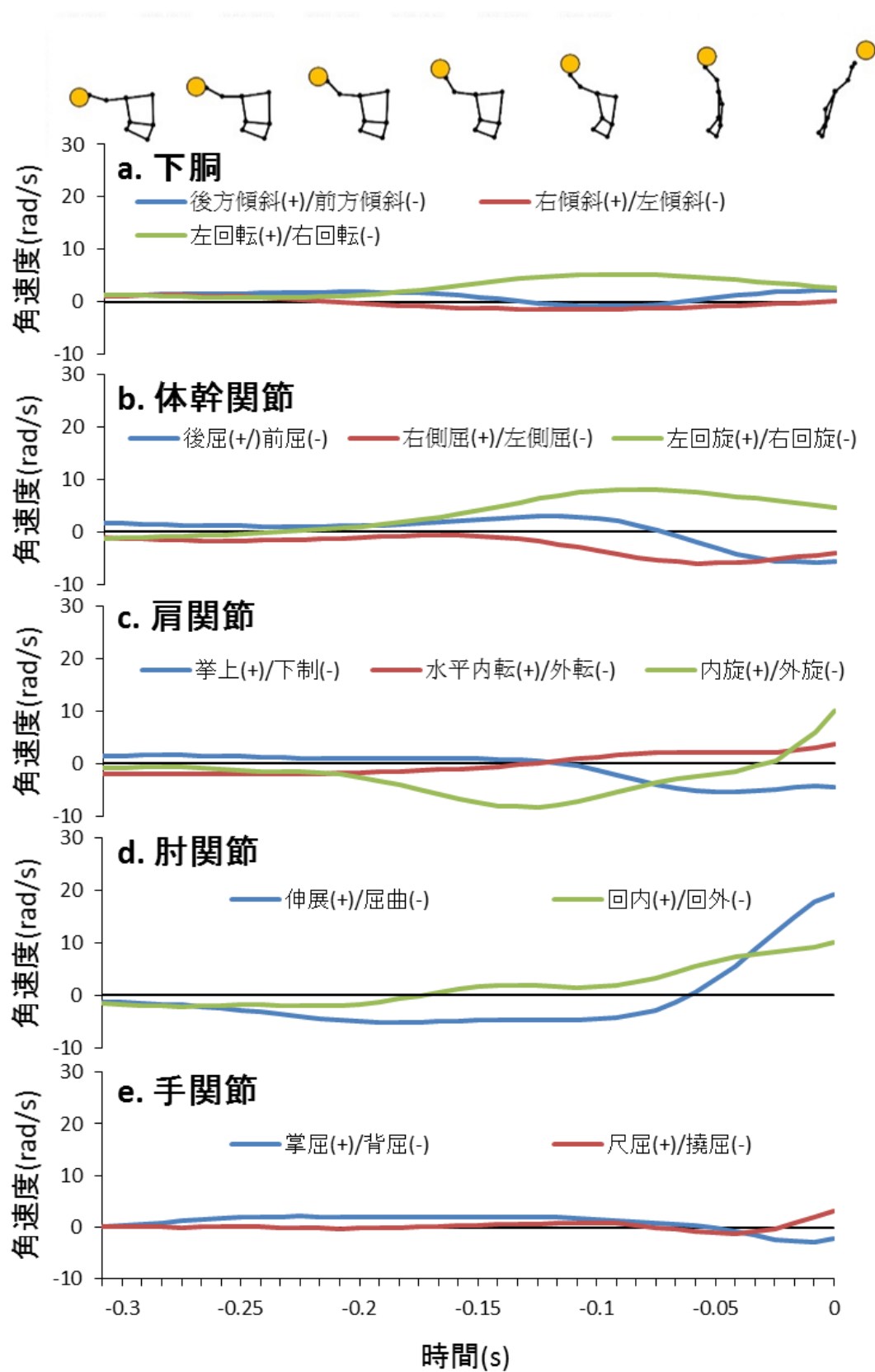


図 10 下腕の回転および各関節の解剖学的回転運動の角速度の平均値

第4章 考察

4.1. 本研究の妥当性

リリース直前のボール速度を方法論で示した式 (12) によって求めた算出値とボールの 3 次元座標を時間微分することによって求めた測定値について対応ありの t 検定を行った結果、両データには有意な差が認められた ($p < 0.05$). また、ボール速度の算出値と測定値の差が最も大きかった時刻は、 -0.05 s であり、その瞬間における算出値と測定値の差は 1.0 m/s であった. この結果は、マニュアルデジタイズの誤差によって生じたことを示すものである. 本研究では 3 次元空間を構築するためのキャリブレーションを、計 90 点のポイントからなる校正点を用いて行なった (図 3). その結果、デジタイズによる既知座標との標準誤差は最小で 2.0 mm、最大で 4.3 mm であった. 分析の正確性を検証するために、手首に固定したアルミニウム製の棒の既知の長さ (0.17 m) とデジタイズによって得た棒の長さを比較した. その結果、最も大きかった誤差は 11.7 mm であった. また、本来であれば頸椎、胸椎、腰椎、仙椎、尾椎の約 30 個の椎骨が連なることによって構成される脊柱が湾曲することによって変形する上胴や下胴を、本研究で使用したモデルでは剛体として定義したことによる誤差が考えられる. そこで、上胴の長さを分析区間において算出したところ平均で 0.04 ± 0.02 m 変化していた ($0.35 \sim 0.39$ m). すなわち、上胴の長さは分析区間中、約 10% 変化していたこととなる. この長さ変化によるボール速度への影響を見るために、体幹関節に対する肩関節の速度 ($\omega_T \times r_{RS/MR}$) において $|r_{RS/MR}|$ を最小値、最大値で固定して計算したところ、その差は最大でも 0.5 m/s であった. 仮に RR と LR の中点から RS へ向かうベクトルが常に最大の誤差を生じていたとしても、

隣接する RGT と LGT の中点から RR と RL の中点へ向かうベクトルもしくは RS から EL へ向かうベクトルのどちらか，あるいは両方のベクトルの大きさが小さくなるため，結果として最終的なボール速度に大きな影響を与えるものではないと考えられる．これらのことから，マニュアルデジタイズおよび本研究で使用したモデルにより生じた誤差によって算出値が測定値を過小評価していたと考えられるが，算出値は測定値の変化をほぼ正確に反映できていると考えられるため，本研究で定義したモデルは信頼に足るものであったと言える．

4.2. リリース直前のボール速度に対する下胴および各関節の運動による貢献度

リリース直前のボール速度に対する貢献度は，体幹関節 ($34.3 \pm 11.8\%$)，肩関節 ($23.8 \pm 7.4\%$)，肘関節 ($21.7 \pm 4.3\%$) が大きな値を示し，これらの関節でリリース直前のボール速度の $79.8 \pm 8.2\%$ を生み出していた．これは，リリース直前にこれらの関節がボール速度を生み出す方向へ回転していることを示している．体幹関節は前屈，左側屈，左回旋方向，肩関節は下制，水平内転，内旋方向，肘関節は伸展，回内方向へ回転していることが示された (図 10)．つまり，解剖学的な回転運動において最も貢献度が大きい肘関節は伸展によって $22.2 \pm 4.1\%$ ，続いて体幹関節は左回旋によって $18.3 \pm 8.5\%$ ，前屈によって $16.4 \pm 5.3\%$ ，肩関節は下制によって $9.0 \pm 4.4\%$ ，水平内転によって $7.9 \pm 5.1\%$ のボール速度を生じさせたものであることが明らかとなった．コーチ教本によると，体幹関節の前屈は，身体重心を前方へ移動させることを目的として行うとされている．しかしながら，本研究によって体幹関節の前屈は身体重心を前方へ移動させることだけでなく，ボール速度の約 16% を生み出していることが明らかとなった．また，体幹関節の左回旋や肩関節の下制，水平内

転と言った動作は、選手が身体の捻りや肩関節の回転をスムーズに行おうとしている結果、大きな貢献度を示したと考えられる。

投げ型の開放型運動連鎖の代表例として挙げられる野球の投球動作を対象にした先行研究（宮西ら,1996）では，最も貢献度が大きかった関節は肩関節（41.5%）であり，投球腕の関節の貢献度を合成すると 80.8%であると報告されている．一方で，本研究において投球腕の貢献度の合計は 71.9%であり，同じ投球動作であっても，水球競技は野球に比べ末端の関節運動による貢献度が小さい投球動作であると考えられる．このことは，水球競技の投球動作は，身体の中枢である下胴と体幹関節を合わせた体幹部の運動によってボール速度を生み出しており，リリース直前においても体幹部の運動による貢献度が高いことを示唆している．Kreighbaum et al. (1996) は，中枢から末端に向けてセグメントの角速度を順次加算させ，最終的に末端の速度を大きくするような動きを投げ型動作，中枢から末端のセグメントの角速度を同時に生み出すことによって，より大きな力を発揮する動きを押し型動作と定義している．そこで，本研究のリリース直前における投球腕の貢献度を野球の投球動作を対象にした先行研究と比較すると，本研究では，肩関節，肘関節，手関節の順で末端ほど貢献度が小さくなっているのに対し，先行研究（宮西ら 1996）では，肩関節，手関節，肘関節の順で小さくなっていた．さらに，手関節の貢献度は，本研究では小さな負の値（ $-1.2 \pm 5.5\%$ ）であり，先行研究では大きな正の値（18.2%）であった．これらの結果は，野球の投球動作では，末端部へ角速度を順次加算させることができしており，末端の関節角速度における貢献度が大きいのに対し，水球の投球動作では，末端部へ角速度を伝達することができずにリリースを迎えており，リリース直前では中枢の関節角速度における貢献度が大きいことを示すものである．しかしながら，本研究

における各関節の角速度の変化パターンは、先行研究（宮西ら,1996）と類似しており、中枢から末端のセグメントの角速度を同時に生み出すといった押し動作の特徴はみられなかった。つまり、水球競技の投球動作は、野球と比べてより押し型に近い投げ型動作であることが示唆される。

本研究では、水中で運動する下胴の回転運動による貢献度が負の値（ $-6.0 \pm 8.3\%$ ）となることが明らかとなった。これは、リリース直前において、下胴は投球方向と逆方向へ回転していることを示すものである。下胴の回転方向に着目すると、下胴は後方傾斜・左回転していた（図 10-a）。リリース直前における下胴の左回転はボール速度を生み出す方向への回転である。しかしながら、下胴の後方傾斜が生み出す負のボール速度の絶対値が、左回転によって生み出したボール速度を上回ることによって、下胴の回転運動によって生み出されたボール速度が負の値となり、貢献度においても負の値を示したのである。このような下胴の回転運動は、下胴より上の身体部分が運動する反作用によって生じた回転と下肢が水を蹴る事で得たモーメントにより生じる回転であると考えられる。つまり、体幹関節が前屈することによる反作用によって、下胴は後方傾斜していたと考えられ、同様に、体幹関節が左回旋することによる反作用で、下胴は右回転すると考えられる。しかしながら、下肢が水を蹴ることによって得たモーメントが、体幹関節が左回旋することによる反作用を上回ることによって、下胴は左回転していると考えられる。

4.3. 欧米人の大学生を対象とした研究との比較

本研究は日本の大学水球選手を対象に行なった。しかしながら、本研究で得られた水球競技の投球動作におけるボール速度に対する各関節運動の貢献度の結果が、日本人特有のものであるのか、水球選手全般に当てはまるものなのかは分からない。そこで本研究の結果を踏まえ、欧米人の大学生を対象とした先行研究（Feltner & Nelson, 1996）の結果と比較する。先行研究では、上腕、上腕、前腕、手部の4つのセグメントが連結したモデルを用いて貢献度が算出されていたため、そのモデルに合わせて、本研究の結果を再計算した。ボール速度に対する関節運動の貢献度が5%以上であるものについて図11に示す。

再計算した結果と先行研究の結果を比較したところ、ボール速度に対する体幹の回転運動の貢献度に5%以上の違いは生じていなかった。つまり、水面上で観察できる体幹の回転運動は日本人大学生と欧米人大学生に大きな差はなく、ボール速度に対して同等程度の貢献を示していると考えられる。一方で、肩関節や肘関節の貢献度において、日本人大学生と欧米人大学生の違いが見られた。先行研究における肩関節の回転運動における貢献度は、内旋・外旋、水平内転・水平外転、挙上・下制の順で大きかったのに対し、本研究の結果は、挙上・下制、水平内転・水平外転、内旋・外旋の順で大きかった。特に肩関節の挙上・下制の貢献度は、先行研究では $0.3 \pm 11.5\%$ 、本研究では $9.0 \pm 4.4\%$ と大きな違いを示した。また、先行研究における肘関節伸展の貢献度は $26.6 \pm 6.3\%$ であり、本研究の結果よりも4.5%大きかった。これらは、ボールが握れるか否かの違いによるものと考えられる。星川（1982）は、様々な大きさのボールを上手投げで投げさせた場合、握れるか否かによって、身体の動きに大きな差異が見られると報告している。その特徴として握ること

ができるボールを投球する際には、テイクバック時に屈曲させた肘関節をリリース直前に一挙に伸展させるといった動作が見られるのに対し、握れないボールを使用した場合は、肘関節をテイクバック時からリリースまで連続的に伸展させていることをあげている．水球ボールは、周囲 68~71cm、重量 400~450g と規定されており、欧米男子でも完全に握ることが難しい．そのため、体格で劣る日本人が水球ボールを握ることは、さらに難しいことであると考えられる．つまり、ボールを握ることができない多くの日本人の投球動作はリリース直前に一挙に肘関節を伸展させることができないため、リリース直前において肘関節伸展の角速度を十分に獲得できず、肘関節の貢献度が先行研究と比べ低い値を示したと考えられる．加えて、ボールを握ることができないことによって、リリース時に肩関節の内旋角速度がピークを迎えるといった野球の投球動作に代表される特徴が見られず、肩関節の内旋角速度がピークに達する前にボールをリリースしてしまうことが考えられる．このことにより、本研究における肩関節の内旋運動の貢献度が肩関節の関節運動の中でもっとも小さかったと考えられる．一方、欧米人の大学水球選手を対象とした先行研究の被験者は身長が $185.4 \pm 7.0\text{cm}$ 、体重が $81.3 \pm 9.5\text{kg}$ と、本研究の被験者よりも身長が約 14cm、体重が 13kg 大きいという体格差があるため、多くの被験者がボールを握ることができていたことが推察される．そのため、肘関節をリリース直前に一挙に伸展させることができ、リリース直前の肘関節の伸展による貢献度が大きくなったと考えられる．

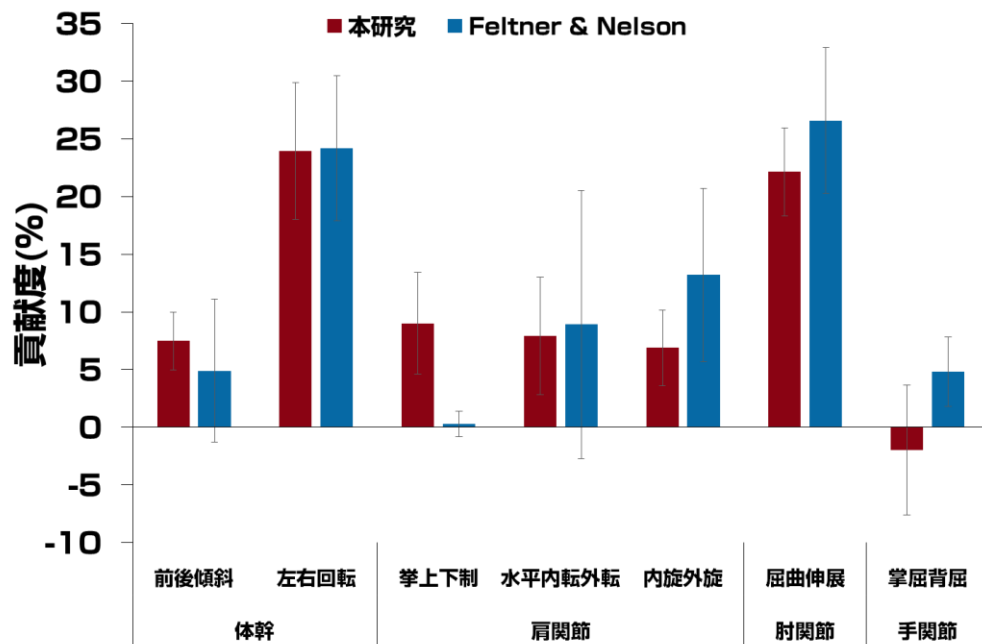


図 11 先行研究との比較

4.4. 本研究の剛体リンクモデルについて

本研究では、Feltner & Nelson (1996) が使用していた上腕、上腕、前腕、手部の 4 つのセグメントが連結した剛体リンクモデルに下腕を含めた 5 セグメントリンクモデルを用いてボール速度を算出した。先行研究のモデルを使用して体幹の回転運動による貢献度を算出した場合、前方・後方傾斜が $7.5 \pm 2.5\%$ であり、左右傾斜 $-0.1 \pm 3.1\%$ 、左右回転 $23.9 \pm 5.9\%$ であった。これを本研究のモデルと比較すると、先行研究のモデルと比べ、体幹関節の前屈・後屈の貢献度は 8.9% 小さく、左右回旋は 5.6% 大きかった。これは、先行研究では上腕のセグメントの角速度によって決まっていた体幹関節の角速度を、本研究では下腕がモデルに加わることによって、下腕に対する上腕の角速度として体幹関節の角速度を求めたことによると考えられる。実際に、リリース直前に下腕は後方傾斜かつ左回転しており、上腕は前屈・左回旋していた。

このことを考慮すると、体幹関節の前屈・後屈の角速度は、上胴の前方傾斜に下胴の後方傾斜の角速度が加わることで、上胴の前方傾斜の角速度に比べて大きくなると考えられる。一方、体幹関節の左右回旋の角速度は、上胴と共に下胴が左回転することから、上胴の左回転の角速度よりも小さくなると考えられる。このことによって、先行研究との体幹関節の解剖学的回転運動の貢献度の違いが生じていたと考えられる。

先行研究のモデルは、水上から観察できる上胴の動きによって貢献度を判断できるため、水中の運動を容易に観察できないコーチの立場からすると簡便で、映像などから選手へのフィードバックをし易いモデルであった。しかしながら、このモデルは水中で運動する身体部分が考慮されていないため、水中で運動する下胴や下胴に対する上胴の動きについて明らかとなっていなかった。そこで本研究のモデルを用いて、下胴の運動を含めた結果、下胴や下胴に対する上胴による貢献度を明らかにすることができた。このことにより、体幹関節の前屈運動における貢献度は下胴が後方傾斜することによって過小評価されていたことが示された。このことは、これまで水球競技の投球動作の指導において重要視されていた体幹の捻りに加えて、体幹関節の前屈の重要性を示唆するものである。トレーニングの現場においても体幹関節を前屈させる腹筋トレーニングをより重視することが必要であると考えられる。また、下胴の後方傾斜による負の貢献度を小さくすることで相対的に体幹関節の前屈による貢献度が大きくなることから、リリース直前に下胴を後方傾斜させないような下肢の動きを身につけることによって、球速の増加が見込まれると考えられる。

4.5. 貢献度の異なる投げ方について

Feltner & Nelson (1996) は、肩関節の内旋・外旋の貢献度の標準偏差が関節運動の中で 2 番目に大きく、他の関節運動との相関関係を見たところ、肩関節の内旋・外旋の貢献度が大きい選手ほど、肩関節の水平内転・水平外転の貢献度が低い傾向を示した。しかしながら本研究では、そのような傾向が見られなかった。その要因として、肩関節の内旋・外旋の貢献度の標準偏差が先行研究と比べて小さく、ばらつきが見られなかった事が考えられる。一方、本研究ではボール速度に対する体幹関節の貢献度が 34.3%と関節運動の中で最も大きな値を占めており、体幹関節の左右回旋における貢献度の標準偏差がもっとも大きかった（最大値 31.4%，最小値 2.0%）。本研究では、下胴および各関節の角速度や関節運動に起因するボール速度について、各被験者におけるピークの発生時刻が著しく異なることや、平均値で示した各時刻の値の正負を覆すような値を示すことはなかったにも関わらず、体幹関節の左右回旋における貢献度にばらつきがみられた。これは、ピークが発生した時刻や、各瞬間における正負が同様であった場合においても、リリース直前の運動における下胴および各関節の角速度や関節運動に起因するボール速度の大小は異なることによって生じたものであると考えられる。そこで、体幹関節の左右回旋における貢献度が大きく異なる 2 名の被験者 (sub7, sub8) を比較することとした。sub7 と sub8 の体幹関節の左右回旋が生み出したボール速度のピーク時刻は -0.05s と -0.1s であり、リリース直前における値はどちらも正の値を示していた。しかしながら、リリース直前における体幹関節の左右回旋が生み出したボール速度の値は sub7 が 4.5m/s であり、sub8 は 0.3m/s と大きく異なる値であった。他の関節運動においても、角速度や関節運動に起因するボール速度の変化パターンは同様でも、その値の大小が異

なることによってリリース直前の貢献度に差が見られると考えられる。そこで、sub7 と sub8 の体幹関節の解剖学的な回転運動による貢献度に着目すると、sub7 は体幹関節の左右回旋の貢献度が前屈・後屈の貢献度よりも約 16% と大きな値を示し、sub8 は前屈・後屈が左右回旋よりも約 17% 大きな値を示していた。さらに、この 2 名の肩関節の貢献度を比較すると、sub7 は sub8 と比べて肩関節の水平内転・水平外転の貢献度が大きく、肩関節の内旋・外旋の貢献度が低かった。これらの貢献度の違いは、運動面の違いによるものであると考えられる。体幹関節の左右回旋の貢献度が大きかった sub7 は、体幹関節の回旋に加え、肩関節の水平内転・水平外転といった、水平面上での回転運動によって投球を行っており、体幹関節の前屈・後屈の貢献度が大きい sub8 は、体幹関節の前屈・後屈に加え肩関節の内旋・外旋といった、矢状面上での回転運動によって投球を行っていると考えられる。また、水中で運動する下胴の貢献度を比較すると、sub7 は sub8 に比べて、下胴の左右回旋の貢献度が低かった。このことは、上半身が水平面上で左回転した反作用として、水中で運動する下胴の左回転の角速度が小さくなったと考えられる。一方、sub8 は上半身の水平面上の回転が小さいため、下胴が反作用を受けることなく回転することができ、sub7 よりも大きな貢献度を示したと考えられる。しかしながら、矢状面上での動きである体幹関節の前屈・後屈と下胴の前方・後方傾斜では作用、反作用の関係が見られなかった。これは、体幹関節が前屈することによる反作用を、下胴が後方傾斜することではなく、下肢が水から受ける反力によって打ち消していたと考えられる。これらの結果から、水球競技における日本人大学生の投球動作は、選手によって体幹関節の運動が様々であり、特に体幹関節の回旋の貢献度に個人差があることが示唆された。本研究では、水球競技における日本人大学生の投球動作の全体の傾

向を把握するため，リリース直前のボール速度に対する各関節の貢献度を明らかにすることを目的とした．そのため，ボール速度に対する各関節の貢献度の違いによってボール速度が高い選手の特徴や投球動作の熟練度を検討するには至らなかった．今後は，各関節の貢献度における個人差に着目し，ボール速度と各関節の貢献度との相関関係を見ることによって，ボール速度を高めるための関節運動を明らかにすることが課題となるであろう．

第5章 結論

本研究の目的は Sprigings et al. (1994) の方法を応用し，日本の大学水球選手を対象としたボール速度に対する下胴および体幹，上肢の関節運動の貢献度を明らかにすることであった．分析の結果，日本人大学生の投球動作におけるリリース直前のボール速度 (14.9m/s) に対する貢献度は，体幹関節 (34.3%) が最も大きく，手部に対するボール速度 (27.6%)，肩関節 (23.8%)，肘関節 (21.7%) の順に大きいことが示された．最も大きな貢献度を示した体幹関節では，下胴を水中で後屈・左回旋，上胴を前方傾斜・左回転させる運動によってボール速度を生み出していることが明らかとなった．一方で，下胴の並進運動と下胴の回転運動および手関節は負の貢献度 (-0.1%， -6.0%， -1.2%) を示すことが明らかとなった．加えて，日本人選手は，欧米人選手と比較して肩関節の貢献度が異なり，挙上・下制の貢献度が欧米人選手より 8.7% 大きな値 ($9.0 \pm 4.4\%$) を示した．さらに，日本人選手は欧米人選手と比較して肘関節の屈曲・伸展の貢献度が 4.5% 小さな値 ($22.2 \pm 4.1\%$) を示すことが明らかとなった．

参考文献

- 阿江通良, 藤井範久. (2002) スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店
- 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志. (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定 (1 部 形態と運動の計測). バイオメカニズム 11: 23-33.
- Elliott, B. C., Armour, J. (1988) The penalty throw in water polo: a cinematographic analysis. *Journal of sports sciences* 6 (2), 103-114.
- Feltner, M. E., & Nelson, S. T. (1996) Three-dimensional kinematics of the throwing arm during the penalty throw in water polo. *Journal of Applied Biomechanics*, 12, 359-382.
- 星川保. (1982). 大きさと重さの異なるボールの投げ. *JJ Sports sci*, 1 (1), 104-109.
- Iino, Y., Mori, T., & Kojima, T. (2008). Contributions of upper limb rotations to racket velocity in table tennis backhands against topspin and backspin. *Journal of sports sciences*, 26 (3), 287-293.
- Kreighbaum, E. (1996). *Biomechanics. A qualitative approach for studying human movement.*
- 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投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究. *体育学研究*, 41 (1), 23-37.
- 森下義隆; 平野裕一; 矢内利政. (2013) 野球のバッティングにおけるバットヘッド速度に対する体幹および上肢のキネマティクスの貢献. *バイオメカニクス研究*, 17. (4) : 170-180.

Sprigings, 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.

洲雅明. (2008). 水球競技のシュートスピードに関する研究: 2007 年メルボルン世界選手権のスピードガンデータより. 大分県立芸術文化短期大学研究紀要, 45, 41-50.

高木英樹. (2007). 水球競技のバイオメカニクス. バイオメカニクス研究, 11 (2), 68-82.

高木英樹, 本間正信, 阿江通良, 洲雅明. (1990). 水球競技におけるシュート動作の 3 次元的分析. バイオメカニクス研究, 90, 261-266.

浦田達也, 田邊智, 福田厚治, 植松梓, 伊藤章. (2014). 投動作における投球速度を調節する上腕および上肢関節運動の貢献度. 生体医工学, 52 (2), 71-79.

Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.

財団法人日本水泳連盟. (2005). 水泳コーチ教本: 公認水泳コーチ用. 大修館書店.

謝辞

本研究は、早稲田大学スポーツ科学学術院 矢内利政教授 の指導の下行われました。矢内先生には、私が学部 2 年生のときから約 5 年間ご指導頂きました。先生のご指導のおかげで、研究のことだけでなく人として成長できたと実感しております。誠にありがとうございました。早稲田大学スポーツ科学学術院 川上泰雄教授 ならびに 金岡恒治教授 には、快く副査を引き受けて頂き、励ましのお言葉を頂きました。心より感謝申し上げます。

森下義隆さんには、ご多忙にもかかわらず、方法論やデータの解釈といった本学位論文に関する多くのことをサポートして頂きました。本当にありがとうございました。水泳研究を一緒に行なってきた丸山祐丞さん、杜唐慧子さんには本研究の研究計画、研究デザインに関する多くの助言と意見を頂きましたこと、感謝しております。永見智行さん、佐藤隆彦さん、谷中拓哉さんには、日頃から数々のアドバイスを頂きました。また、私の些細な疑問にも的確かつ親切に回答して頂いたおかげで、より良い研究活動を行うことができたと感じています。本当にありがとうございました。安田武蔵君、そして矢内研究室 OB であり、同期の小平信之介君と羅劉星君には、実験実施にあたり検者を何度もお願いし、いつも快諾して頂き、ありがとうございました。バイオメカニクス研究室のみなさんには、大変お世話になりました。優秀な先輩方のもとで研究活動を行えたことで、成長することができました。金岡研究室の飯塚哲司さんは、私が大学院進学を考えるきっかけを与えて下さいました。大学院入学後も数々の心配りをして頂き、ありがとうございました。同期の金岡研究室 OB の梶原慶裕君、上野彬恵さん、木野彩奈さん、福林研究室 OB の板花俊希君は、私が研究活動に追い込まれたとき、心の拠り所となってくれました。貴方達がいたことで、とても充実した大学院生活を送ることができました。本当に感謝しています。

実験を行うにあたり、協力していただいた早稲田大学水泳部水球部門の皆様は心より感謝申し上げます。早稲田大学水泳部水球部門の今後の活躍を大いに期待するとともに、私も早稲田大学水泳部水球部門に貢献できるよう努力していききたいと思います。

最後に、私の大学院への進学を快諾し、いつも私の好きなことを自由にやらせてくれた父と母、私が人生の岐路に立たされたとき、的確なアドバイスをくれる長兄、私が水球競技を始めるきっかけであり、目標であった次兄、私をいつも気にかけて、心配してくれる姉、たまの帰省時に癒しを与えてくれた甥子、姪子たち、そして家族全員に心からの感謝の気持ちを込めて謝辞を終わります。

2016 年 2 月 塩田 義裕