論文種別：原著論文

表題：短距離クロール泳における肩・腰ローテーション動作の解明

Elucidation of shoulder and hip rotation in short-distance front crawl swimming

著者名：

- 1) 兵頭 洋樹 HYODO Hiroki
- 2) 古賀 大樹 KOGA Daiki
- 3) 和田 匡史 WADA Tadashi
- 2) 仙石 泰雄 SENGOKU Yasuo

所属先：

- 1) 国士舘大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kokushikan University
- 2) 筑波大学体育系 Faculty of Health and Sport Science, University of Tsukuba
- 3) 国士舘大学理工学部 Faculty of Science and Engineering, Kokushikan University

所属先住所：

- 1) 〒154-8515 東京都世田谷区 4-28-1
4-28-1 Setagaya-ku, Tokyo 154-8515
- 2) 〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8547
- 3) 〒154-8515 東京都世田谷区 4-28-1
4-28-1 Setagaya-ku, Tokyo 154-8515

キーワード：水泳，バイオメカニクス，キネマティクス，3次元動作分析

Key word : swimming, biomechanics, kinematics, three-dimensional motion analysis

ランニングタイトル：泳速度とローテーション動作の関係

連絡先担当者：兵頭 洋樹 hyodo.h@kokushikan.ac.jp

Abstract :

In this study, we investigated the rotation motion performed in the trunk during a sprint front crawl swimming. The shoulder and hip rotation movements at different swimming velocity were compared and analyzed. Ten male swimmers specializing in front crawl sprinting participated. The two trials were conducted in front crawl without breathing for 10 seconds each. The one was with a swimming velocity of 50 m race average and the other was a swimming velocity of 100 m race average. For swimming motion, the actual coordinate values were collected by three-dimensional motion analysis. The stroke frequency (SF), shoulder and hip rotation angle (ShR, HiR), and the time until ShR and HiR show the maximum values in the pull phase were calculated. As a result, in swimming velocity of 50 m race average, the value of ShR was significantly smaller than in that of 100 m race average. In addition, the time to reach the maximum value in HiR was significantly shorter in the swimming velocity of 50 m race average. Therefore, it is probable that the timing of the shoulder and hip rotation movements will be different between 50 m and 100 m race by changing the time to the peak of ShR and HiR since swimming velocity in the 50 m front crawl reaches the higher swimming velocity than that of the 100 m front crawl.

I 緒言

青年期や壮年期の一般男性における、体幹部を占める筋量は、全身筋量の約 50%前後である（原田ほか, 2018）。大きな筋量を持つ体幹部は、競泳の泳動作において重要な役割を果たしていることが考えられる。クロール泳は水中で水平姿勢を保持しながら、上肢および下肢を動かして推進力を得る運動であるが（Hollander et al., 1986）、固定された支持点の存在しない環境下で力を発揮しなければならない。体幹部の安定化に作用する腹腔内圧は、腹部筋群、腹横筋および骨盤底筋の協働的収縮によって変化し（Norris, 2000）、泳速度を上昇させた際には、腹腔内圧も同時に上昇させ、体幹部を剛体化し、抵抗の削減に貢献することを報告している（Moriyama et al., 2014）。また体幹部は、キック動作の蹴る方向にも影響を与え、その結果、体全体の左右方向へのブレを軽減する（Counsilman, 1968）。つまり、体幹部は泳動作中の身体の安定性を高める役割がある。

一方では、体幹部は推進力にも影響を及ぼすことが報告されている。クロール泳では、体幹の長軸を中心とした体幹の回転運動を、体幹ローテーションとして定義されている（Yanai, 2003）。Payton et al. (2002) は、クロール泳中の体幹ローテーションと手部の関係について調査しており、手部が入水し肩の真下に移動するまでの局面である Pull 局面において、体幹ローテーションは手部の内外への移動方向へ影響を及ぼし、同時に手部速度との関連を報告している。さらに、流体力は速度の 2 乗に比例するため、手部速度の増加は、手部で発揮される推進力の増加に寄与し、結果的に泳速度を上昇させる（Narita et al., 2017; 角川ほか, 2019; Tsunokawa et al., 2019）。また体幹ローテーションは、手部で発生する推進力に影響することも報告されている（Kudo et al., 2017）。それ故、泳速度を向上させるためには、泳動作中の体幹ローテーションの特徴を明らかにする必要があるが、泳速度と関連させた体幹ローテーションについての研究は多くは報告されていない。

Psycharakis and Sanders (2008)は、体幹ローテーション動作は肩と腰で、それぞれ異なる角度で回転運動を行っていることを報告している。また、Yanai (2003) は体幹ローテーションを、肩と腰のローテーション動作に区別して調査しており、ストローク頻度の増加に伴い、肩と腰のローテーション角度がそれぞれ低下することを報告している。これらのことから、体幹ローテーションの特徴を詳細に解明するためには、肩と腰のローテーション動作をそれぞれ分けて調査する必要があることがいえる。しかしながら、Yanai(2003)の先行研究で設定された泳速度は、100 m 自由形のベストタイムの 60~80%と、レースにおける中長距離種目程度の泳速度であった。短距離種目においては、高い泳速度での動作であるため、

水しぶきや、水面の反射などの影響を受け、データの収集が困難であることから先行研究は存在しない。そのため、短距離種目を対象とした速い泳速度での体幹ローテーション動作は分析されていない。

泳速度と泳動作の関係について、生田ほか (1998) は、泳速度の変化に伴い、ストローク頻度が増えることで、泳ぎの特性が変化することを報告している。競泳において同じ短距離種目と呼ばれる、50 m 自由形と 100 m 自由形それぞれのレースにおける平均泳速度は、世界記録から算出すると、50 m 自由形は世界記録が 20.91 s であり平均泳速度が 2.39 m/s、100 m 自由形は 46.91 s であり平均泳速度が 2.13 m/s と、0.26 m/s の差があることが確認できる。国内の全国大会に出場するレベルの泳者においても、短距離種目では泳速度が 2.0 m/s 以上になる。成田ほか (2018) は、泳中に身体が流体から受ける抵抗は、泳速度の約 3 乗に比例し大きくなることを報告していることから、高い泳速度環境ではより大きな抵抗が生じることが考えられる。これらのことから、50 m 自由形と 100 m 自由形では、泳速度の違いによって泳ぎの特性が大きく異なる可能性が考えられる。したがって体幹ローテーション動作においても、50 m 自由形と 100 m 自由形では、泳動作の特徴をそれぞれ区別して調査する必要がある。以上のことから本研究では、短距離クロール泳中の 3 次元動作を分析し、50 m 自由形と 100 m 自由形それぞれのレース泳速度における、肩と腰のローテーション動作の特徴を明らかにし、各レース距離に応じたトレーニング戦略への貢献を目的とする。

近年、様々なスポーツ種目において、体幹トレーニングがトレーニングの中に組み込まれており、体幹部の安定性の向上を目的とした体幹スタビライゼーショントレーニングが運動能力の向上につながることが多くの先行研究により示唆されている (Oliver and Brezzo, 2009 ; Durall et al., 2009 ; 宮下ほか, 2012 ; Imai et al., 2016)。競泳の体幹トレーニングにおいては、泳距離に関わらず推進方向からの前面投影面積を減少させ、抵抗の削減を目的とした、体幹部を固定させる陸上トレーニング (Moriyama et al., 2014 ; Weston et al., 2015) が多く行われている。そのため、近年競泳においても体幹の安定性や固定を目的としていた体幹トレーニングが多く行われている。しかしながら、Andresen et al. (2019) は、クロール泳において泳速度の増加に伴い、内腹斜筋の活動が増加することを報告しており、同時に内腹斜筋の活動は体幹ローテーション動作の角速度への影響を示唆している。競泳においては先行研究により泳中の体幹筋群の重要性は報告されているが、実際の短距離クロール泳中における動作との関連は明確にされていない。これらを明らかにすることで、50

m 自由形と 100 m 自由形, それぞれの距離特性の目的に応じたトレーニング考案の一助につながる事が考えられる.

II 方法

1. 対象者

10 名の対象者 (Table. 1) が, 本研究に参加した (年齢: 21.0 ± 2.5 歳, 身長: 179.8 ± 6.7 cm, 体重: 77.3 ± 5.9 kg). 全ての対象者は週 6 日間のトレーニングに励んでおり, 全員が全国大会への出場経験を有している.

*Table. 1

実験参加の同意に関しては, 対象者が未成年の場合はその保護者の自由意志によって, 研究への参加に同意した後であってもいつでも撤回でき, そのことによって対象者が不利益な取扱いを受けることはない旨を実験実施日より前に説明した. さらに, 研究の実施に伴って取得された個人情報等は, 漏えい, 滅失防止のため, 適切な取り扱いを行う旨を伝えた. その上で, 対象者には, 本研究を行うにあたって研究の目的および方法を説明し, 実験参加の同意を得た.

2. 測定方法

実験は, T 大学実験用回流水槽 (五十嵐工業社製) にて行った. 実験試技中の泳速度は, 対象者の 50 m および 100 m 自由形のベストタイムから算出した. 飛び込みによる影響を省くため, スタートのシグナルから 15 m 地点を通過するまでをスタート局面とし, 各ベストタイムからスタート局面を除いた局面の平均泳速度を設定泳速度とした. 十分なウォーミングアップを行ったのち, 1 回目に 100 m 自由形の平均泳速度試技 (以下「V100 m」と略す), 2 回目に 50 m 自由形の平均泳速度試技 (以下「V50 m」と略す) を各 10 秒間ずつ行った. 試技中の泳速度が変化しないよう, プール底にマーカーを設置し, 対象者が計測区間から移動しないよう設定した. また, 対象者のキック動作は, レース時と同様に 6 ビートキックで行い, 呼吸によるストローク動作への影響を排除するために呼吸無しでの試技を行った. 座標系は, 対象者が泳ぐ姿勢をとった際の左右方向を X 軸, 進行方向を Y 軸, 鉛直方向を Z 軸とした. また, 軸の正負は, X 軸は対象者右腕の方向を正, Y 軸は進行方向を正, Z 軸は水面を境に天井方向を正とした右手系固定座標系を用いた (Figure 1).

*Figure. 1

2.1 上肢ストロークの局面分け

本研究では、各変数と泳動作との関連を分析するため、Chollet et al. (2000) の方法を参考に上肢ストローク動作を局面分けした (Figure 2). なお、泳動作の局面分けは泳者に固定した移動座標系ではなく絶対座標系を用いて行った. ストロークの 1 周期を下記のように、4 つの局面に分けた. **Glide** 局面は、第 5 中手指節関節の Z 座標が水面を 0 とした際に、マイナスになった点 (入水点) から、第 5 中手指節関節の Y 座標が泳者進行方向と逆向きに動き始める間の期間とした. **Pull** 局面は、**Glide** 局面の終わりから、第 5 中手指節関節の Y 座標が肩峰の Y 座標の真下に到達するまでの期間とした. **Push** 局面は、**Pull** 局面の終わりから、第 5 中手指節関節の Z 座標がプラスになる (出水点) までの期間とした. **Recovery** 局面は、**Push** 局面の終わりから、**Glide** 局面の開始までの期間 (1 周期の終わり) とした.

* Figure. 2

2.2 三次元動作分析測定項目

対象者の上肢及び体幹動作などの変数を調査するため、身体の 7 か所 (頭頂, 左右肩峰, 左右第 5 中手指節関節, 左右大転子) に無線自発光 LED マーカー (煌, Nobby Tech Inc) を用いてマーキングを施した (Figure 3). モーションキャプチャカメラ (VENUS 3D, Nobby Tech Inc) を実験用回流水槽の周りに設置した. 水中動作を計測するため、泳者の左右に 5 台ずつ、下側に 8 台設置し、計 18 台のカメラで水中動作を撮影し、水上動作は回流水槽の上から 4 台のカメラを設置し、キャリブレーションボリューム内の LED マーカーの実座標値を取得した (Figure 4). サンプル周波数 100 Hz にて撮影し、回流水槽面のガラスによる屈折を減らすため、カメラを投影面であるガラスに対して平行に設置した. また、試技中とキャリブレーション中は、水面とガラス面での光の反射による LED マーカーの誤認識を防ぐため、試技中は外部からの光を遮断し室内を暗転させた.

* Figure. 3, Figure. 4

実験に先立ち、測定範囲の 3 次元座標空間構築のため、専用のキャリブレーションワンドを使用したダイナミックキャリブレーションを、各カメラの画角内でワンドを振り、1500 以上のサンプルを取得した. ダイナミックキャリブレーションは、水面による光の屈折を無くするため、水中と水上で別々に行った. キャリブレーション時のモーションキャプチャの標

準誤差は、水中と水上共に 0.5 mm 以下であった。その後、水中と水上の 3 次元座標空間を合成するため、水面に L 字型に 3 点配置したキャリブレーション用 LED マーカープレートを浮かべ、30 秒間のキャリブレーションを行った。水中と水上からマーカーの位置を撮影することで水面を同定し、水中と水上の座標軸を合わせ空間の原点を決定した。実際にはプレートに厚みがあり、水中と水面上に配置されたマーカーの間には隙間があるため、隙間の長さを測定し、座標軸を合わせる際に差を埋めるよう反映した。加えて、キャリブレーション後に画角内の複数位置でサイズの決まったワンドの長さを計測することで、計算誤差を算出した（古賀ほか, 2021）。測定範囲内の 3 か所（前、中、後）それぞれでワンドの長さを 100 サンプル計測し、その誤差は最大で 0.5mm 以下であった。

本研究における分析項目は、以下のとおりである。また、各項目の略称を示す。ストローク頻度 (stroke/s), 以下「SF (Stroke Frequency)」と略す。SF は、手部の Z 軸方向が負になった位置から、正になり再び負になる位置までをストロークを 1 周期とし、1 周期に要した時間から 1 秒あたりの回転数を算出した。ストローク長 (m/stroke), 以下「SL (Stroke Length)」と略す。Kennedy et al. (1990) の方法を参考に、設定した泳速度から、SF を除することでストローク長を算出した。

肩ローテーション角度 (degree), 以下「ShR (Shoulder Roll)」と略す。ShR は、左右肩峰を結ぶ直線を XZ 平面に投影した際の、水平面となす角度を肩のローテーション角度とした。ローテーション角度については、泳者の両肩が水平面と並行な位置の場合を 0°とし、右肩が下がる方向の値を負の方向のローテーション角度と定義した。腰ローテーション角度 (degree), 以下「HiR (Hip Roll)」と略す。HiR は、左右大転子を結ぶ直線を XZ 平面に投影した時の、水平面となす角度を腰のローテーション角度とした。ローテーション角度については、泳者の両腰が水平面と並行な位置の場合を 0°とし、右腰が下がる方向の値を負の方向のローテーション角度と定義した。

肩と腰のローテーション角度が最大値を示すタイミングについて分析した。以下「Peak Time」と略す。ローテーション角度が最大値を示すタイミングが観察された局面において、局面の開始からローテーション角度が最大値を示すまでの時間を、相対時間 (%) で示した。局面の開始を 0 %, 局面の終了を 100 % とし、肩ローテーション角度が最大値を示すタイミング (ShR Peak Time %) と、腰ローテーション角度が最大値を示すタイミング (HiR Peak Time %) を算出した。異なる泳速度での比較を行うため、各試技の対象の局面に要した時間を 100 % に正規化し、局面の開始からローテーション角度が最大値を示すまでの時間を

局面割合 (%) で示した。

肩ローテーション角速度 (rad / s), 以下「ShRAV (Shoulder Roll Angular Velocity)」と略す。腰ローテーション角速度 (rad / s), 以下「HiRAV (Hip Roll Angular Velocity)」と略す。ShR と HiR の変位を時間微分することで, 肩と腰のローテーション角速度を算出した。また, Pull 局面において移動方向が負から正へと切り替わるため, 右肩がプール底に向かって移動し, 負の方向へ回転する局面を Roll 局面, 水上に向かって移動し, 正の方向へと回転する局面を RollBack 局面, Pull 局面の終わりから手部の出水までを Push 局面とし, それぞれの局面における平均角速度を算出した。

2.3 統計解析

データの正規性を Shapiro-Wilk 検定で確認した。泳速度を変化させた際の試技間の有意差を対応のある t 検定を用いて分析した。すべての統計分析は SPSS Statistics ver.25 (IBM, USA) を使用し, 危険率 5 %未満を統計的有意性の基準とした。

III 結果

Table 2 には, 各試技における泳速度, SF, SL を示す。また, Table 3 には, ShR, HiR の結果を示す。Table 4 には, Peak Time %の平均値と標準偏差を示した。Table 5 と Table 6 には, ShRAV, HiRAV の結果をそれぞれの局面毎に示した。

ベストタイムから算出した泳速度の平均値は, V50m 試技で 1.97 ± 0.06 m/s, V100m 試技で 1.87 ± 1.87 m/s であり, V50 m 試技の方が有意に高い値であった ($t = 7.21, p < 0.01$)。SF は, V50m 試技で 63.08 ± 3.93 m/min, V100m 試技で 56.69 ± 3.26 m/min であり, 泳速度の変化に伴い, 全ての対象者で V50 m 試技が有意に高い値を示した ($t = 7.29, p < 0.01$)。SL は, V50m 試技で 1.88 ± 0.14 m/stroke, V100m 試技で 1.98 ± 0.11 m/stroke であり, V50m 試技が有意に低い値を示した ($t = 4.25, p < 0.01$)。

泳速度の変化に伴う, ShR と HiR のそれぞれ変数の差は, ShR で -2.9 ± 3.9 deg, HiR で -1.8 ± 5.0 deg であり, V50m 試技において ShR のみで有意に低い値が認められた ($t = 2.22, p < 0.05$)。また ShR と HiR とともに, 両試技において Pull 局面で最大値を示した。そのため, Pull 局面における ShR, HiR が最大値を示すまでの時間を局面割合で算出した。その結果, ShR Peak Time で -2 ± 10 % , HiR Peak Time で -5 ± 3 %であり, HiR Peak Time のみで V50m 試技が有意に低い値が認められた ($t = 4.45, p < 0.01$)。 (Figure 5)

角速度について、ShRAV の各局面での試技間の差は、Pull Roll 局面で 0.3 ± 1.2 rad/s, Pull RollBack 局面で 0.0 ± 1.0 rad/s, Push 局面で 0.3 ± 0.8 rad/s であり、Push 局面のみで有意な差が認められた ($t = 3.69, p < 0.01$)。また、HiRAV においては、Pull Roll 局面で 0.1 ± 0.8 rad/s, Pull RollBack 局面で -0.1 ± 0.4 rad/s, Push 局面で 0.1 ± 0.4 rad/s であり、試技間における有意差は認められなかった。

*Table. 2, Table. 3, Table. 4, Table. 5, Table. 6

IV 考察

本研究は、短距離クロール泳における、肩と腰のローテーション動作の特徴を明らかにすることを目的とした。本研究で用いた泳速度は、50 m 自由形と 100 m 自由形のベストタイムを参考にし、スタート局面を除く平均泳速度から算出した。SF は、V50 m 試技が V100 m 試技と比較して有意に高い値が認められた (Table. 2)。SL では、V50 m 試技が V100 m 試技と比較して有意に低い値が認められた (Table. 2)。Potdevin et al. (2006) は、クロール泳において、泳速度、SF、SL の関係について分析した。その結果、SF の高い場合、泳速度も高く、SL は低い値を示すことを報告している。本研究においても、泳速度が高い試技において、全ての対象者で SF の高い値が認められた。SL においては V50 m 試技で有意に低い値が認められたものの、V50m 試技の方が高い値を示す対象者が 1 名存在した。

1. 肩のローテーション動作

各試技における体幹ローテーションの最大角度について、Yanai (2003) は、SF が高い場合、ShR は低い値を示すことを確認しており、ShR は SF と関連があることを報告している。本研究においても、SF は、V50 m 試技が V100 m 試技と比較して有意に高い値を示し、同時に ShR は V50m 試技で有意に低い値を示した。このことから本研究では、Yanai (2003) の先行研究を支持する結果となった。しかしながら、先行研究で対象とした泳者の泳速度は、1.3 m/s から 1.6 m/s までであり、本研究では、1.87 m/s から 1.97 m/s と設定された泳速度に両研究で大きな差があった。泳速度が異なるにも関わらず、同様の結果が認められたことから、ShR は距離特性に関わらず、個人内の変化では泳速度が高い場合、有意に低い値を示すことが示唆された。その要因として、泳者は高い泳速度を獲得するため、SF を上昇させ 1 ストロークあたりの時間を短縮させた。つまり、1 ストロークあたりの時間の短縮は、上肢のストローク動作と連動して行われる体幹ローテーション動作の時間も短縮させることが考えられる。したがって、短縮された時間内に肩のローテーション動作を完了

させるため、ShR を低下させることで動作範囲を小さくし、動作時間の短縮に対応していることが推察される。

2. 腰のローテーション動作

各試技における HiR においては、泳速度の変化に伴う、試技間での有意な差は認められなかった (Table. 3)。Yanai (2003) は、SF が高い値の場合、HiR は低い値を示すことを報告している。しかしながら本研究においては、SF の変化に伴う、試技間での HiR の有意差は認められなかった。本研究で先行研究と異なる結果が示された要因として、先行研究で対象とした泳者の泳速度は、1.3 m/s から 1.6 m/s であり、その差は 0.3 m/s 程度であった。対して本研究では、レースにおける 50 m 自由形と 100 m 自由形の短距離種目での泳速度を対象としたため、対象者の泳速度の平均値は、V50 m 試技で 1.97 m/s、V100 m 試技で 1.87 m/s であり、試技間の泳速度の差は 0.1 m/s 程度であった。2 試技間の泳速度の差は、先行研究で設定された泳速度の差と比較して、3 分の 1 程度と小さいことから、試技間での HiR の変化も小さく、顕著な差が確認されなかった可能性が推察される。Sanders and Psycharakis (2009) は、HiR には下肢でのキック動作が影響しており、キック動作が腰のローテーション動作を減少させることを報告している。また、McCabe et al. (2011) は、泳速度によるキック動作の変化を報告していることから、本研究では先行研究と比較して、試技間の泳速度の差が小さいことから、キック動作の変化も小さく、HiR についても有意差が認められなかった可能性が推察される。また ShR の平均値は、V50 m 試技で 52.9°、V100 m 試技で 55.8°、HiR の平均値は、V50 m 試技で 29.0°、V100 m 試技で 30.8°であり、どちらの試技においても ShR は HiR と比較して、1.8 倍以上大きく回転していることが確認された。このことから、HiR は ShR よりも動作範囲が小さく、試技間での角度の変化も小さいため、泳速度による影響は ShR の方が大きい可能性が示唆された。

3. 肩と腰ローテーション動作のタイミング

体幹ローションが最大値を示したタイミングについて、ShR と HiR はともに、Pull 局面で最大値を示した。そのため、それぞれが最大値を示すタイミングを肩 (ShR Peak Time%)、腰 (HiR Peak Time%) とし、Pull 局面の開始からローテーション角度が最大値を示すまでの時間を算出した。分析の結果 (Table. 4)、HiR が最大値を示すまでの Pull 局面時間において、V50 m 試技が V100 m 試技と比較して、有意に低い値を示した。このことは、HiR において、Pull 局面の開始から HiR が最大値を示すまでの局面内での相対時間が有意に短縮していることを示している。つまり、高い泳速度の場合、腰がプール底 (腹側) に向かう

負の方向への回転から、水面（背側）に向かい正の方向へと回転が切り替わる動作が、より早期へとシフトしていることが示唆された（Figure 5）。一方で、Pull 局面における ShR が最大値を示すまでの相対時間においては、試技間で有意な差は確認されなかったことから、泳速度の変化に伴い、肩と腰のローテーション動作で、正の方向から負の方向へ切り替わるタイミングが変化していることが考えられる。また、肩と腰のローテーション角速度について、Pull 局面で回転方向が正から負へ切り替わるため、Pull 局面で負の方向へ移動する局面を Pull Roll 局面、正の方向へ移動する局面を Pull RollBack 局面、Pull RollBack 局面の終わりから手部の出水までを Push 局面とし、局面分けを行い角速度について調査した。その結果、Push 局面のみににおいて、ShRAV で V50 m 試技が有意に高い値を示した。Push 局面で有意差が確認されたことから、腰のローテーション動作が正から負へ切り替わる局面が早期にシフトした要因には、手部に対して腰のローテーション動作のタイミングの変化が影響していることが推察された。また、Push 局面で肩のローテーション角速度が有意な変化を示したことについて、Kudo et al. (2017) は、体幹ローテーションは Pull 局面では、手部の左右方向に影響を及ぼすことで揚力に貢献し、Push 局面で鉛直方向への手部速度に影響を及ぼすことで手部推進力に貢献することを報告している。このことから、V50 m 試技は V100 m 試技と比較して、腰のローテーション動作が切り返すまでの時間が早期にシフトすることで、Push 局面の肩のローテーション角速度に影響を及ぼし、その結果、Push 局面の鉛直方向の手部速度への寄与が示唆された。

* Figure. 5

4. 現場への示唆

本研究において、V50 m 試技の方が V100 m 試技と比較して、ShR のみで有意に低い値が示されたことから、泳速度と肩のローテーション動作との関連が示唆された。また、ShR と HiR が最大値を示すまでの時間に着目すると、肩と腰のローテーション動作が最大値を示すまでの時間差において、V50 m 試技の方が、差が大きくなることが確認された（Figure. 5）。Welch et al. (1995) は、体幹のローテーション動作について、肩よりも先に腰のローテーション動作の切り返しを行うことで、肩のローテーション動作の主運動開始前に、主動筋である外腹斜筋や広背筋などの活動を増大させ、体幹筋群の伸長・短縮サイクル（SSC：Stretch Shortening Cycle）運動が行われることを確認している。これにより、肩で発揮されるモーメントを増大させ、角速度を増加させることを報告している。また、Andersen et

al. (2019) は、泳速度の増加に伴い、内腹斜筋の活動が増加することを報告している、同研究において体幹筋はローテーション角度が最大化した後、逆側へローテーション動作を行う際に体幹部を水平位置に戻すための筋活動が行われることを示した。このことは、伸長・短縮サイクルにおける、短縮時に内腹斜筋を収縮させることで、捻り戻しの際の角速度に貢献していることが推察される。本研究においても、HiR が最大値を示すまでの時間で、V50 m 試技が V100 m 試技と比較して早期にシフトすることで、肩のローテーション動作よりも先に腰のローテーション動作の切り返しが実施されていた。肩と腰のローテーション動作が最大値を示すまでの時間差は、体幹部の捻り動作を生じさせ、SSC 運動を発揮していることが考えられる。Kudo et al. (2017) は、肩のローテーション角速度は、Push 局面における鉛直方向の手部速度に影響を及ぼし、その結果、推進力への寄与を報告している。本研究においても、Push 局面における肩のローテーション角速度のみが V50 m 試技で有意に高い値を示した。しかしながら、Yanai (2001) は水中環境下でのローテーション動作の発生には、水からの流体力と浮力が影響している可能性を示唆している。このことから、肩のローテーション角度が大きくなり、半身がより深い位置に水没することで浮力が高まり、流体力によるローテーション動作への影響が大きくなることが推察される。本研究では、高い泳速度条件において、肩のローテーション角度は有意に低い値が示されたにも関わらず、Push 局面における肩のローテーション角速度は有意に高い数値を示した。このことは、ローテーション動作に影響する浮力以外の身体動作によって、Push 局面における肩のローテーション角速度が増加したことが推察できる。その結果、鉛直方向の手部速度に影響することで、推進力に寄与することが考えられる。しかし、流体力や浮力を泳者がどのように調整し、肩と腰をそれぞれ回転させているかは不明である。今後は、体幹部における筋活動とローテーション動作の関係を調査することで、ローテーション動作と推進力の関係を明らかにできると考える。これらのことから、肩と腰のローテーション動作が最大値を示すまでの時間差を調査することは、間接的に手部推進力の向上に貢献する可能性が考えられる。よって、短距離クロールを専門とする選手の体幹トレーニングにおいては、体幹筋群の SSC 運動を伴う、捻り戻しの際の角速度を引き出すトレーニングの考案が必要であることが考えられる。

V 本研究の限界と今後の発展

短距離クロール泳においては、肩と腰のローテーション動作をそれぞれ異なるタイミン

グで動作させることで、肩ローテーション角速度を上昇させている可能性が考えられ、推進力の増加に寄与することが示唆された。今後は、短距離クロール泳中における、肩と腰のローテーション動作が最大値を示すまでの時間差から生じる、体幹部の捻転動作に影響を及ぼす体幹筋の調査が必要である。

また、本研究での限界として、実験用回流水槽を用いて実験を行ったため、手部が出水してから入水するまでのリカバリー局面において、水面による光の反射により、手部が水面上から水中に入るエントリーの際に、一部正確なデータを算出することができなかった。今後は、水面の反射による影響を削減し、リカバリー局面も含めたより詳細なデータの算出と、肩と腰のローテーション角度の差である体幹部の捻り動作に着目し、実際のパフォーマンスとの関連について調査していく必要がある。

VI 結論

本研究は、短距離クロール泳中における、距離特性に応じた泳速度と肩と腰のローテーション動作の特徴を明らかにすることを目的とした。V50 m 試技と V100 m 試技の 2 試技の動作を解析した結果、V50 m 試技の方が ShR で有意に低い値が示されたが、HiR では有意差が認められなかった。しかしながら、HiR のピークを示す時間のみににおいて、V50 m 試技で HiR のタイミングが早期に変化していることが認められた。このことから、短距離クロール泳である 50 m 自由形と 100 m 自由形の異なる泳速度では、ShR と HiR のピークまでの時間が変化させることで、肩と腰のローテーション動作のタイミングを変化させている可能性が示唆された。

文献

- Andersen, J. T., Sinclair, P., Fernandes, R., Vilas-Boas, J. P., and Sanders, R. (2019). Do the torso muscles produce torso twist in front crawl?. ISBS Proceedings Archive., 37(1) : 340.
- Imai, A., Kaneoka, K., Okubo, Y., and Shiraki, H. (2016). Immediate effects of different trunk exercise programs on jump performance. International Journal of Sports Medicine., 37(03) : 197-201.
- Oliver, G. D., and Di Brezzo, R. (2009). Functional balance training in collegiate women athletes. The Journal of Strength & Conditioning Research., 23(7) : 2124-2129.

- Chollet, D., Chabies, S., and Chatard, J. C. (2000). A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *International journal of sports medicine.*, 21(01) : 54-59.
- Counsillman, J. E. (1968). *The science of swimming*. Prentice Hall : New Jersey.
- 原田脩平・佐野幸子・井上貴裕.(2018). 体組成計による筋肉量・脂肪量の測定報告. *理学療法-臨床・研究・教育*, 25(1) : 98-102.
- Hollander, A. P., De Groot, G., van Ingen Schenau, G. J., Toussaint, H. M., De Best, H., Peeters, W., and Schreurs, A. W. (1986). Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of sports sciences.*, 4(1) : 21-30.
- 生田泰志・奥野景介・松井健・寺田晶裕・小堀優子・若吉浩二・野村照夫.(1998). 自由形短距離種目における泳速度, ストローク頻度およびストローク長の関係. *日本体育学会大会号 (第 49 回)*, 478.
- Kennedy, P., Brown, P., Chengalur, S. N., and Nelson, R. C. (1990). Analysis of male and female Olympic swimmers in the 100-meter events. *International Journal of Sport Biomechanics.*, 6(2) : 187-197.
- Kudo, S., Sakurai, Y., Miwa, T., and Matsuda, Y. (2017). Relationship between shoulder roll and hand propulsion in the front crawl stroke. *Journal of sports sciences.*, 35(10) : 945-952.
- 古賀大樹・角川隆明・仙石泰雄・本間三和子・高木英樹.(2021). クロール泳におけるストローク頻度と手部推進力の関係. *体育学研究*, 20123.
- Durall, C. J., Udermann, B. E., Johansen, D. R., Gibson, B., Reineke, D. M., and Reuteman, P. (2009). The effects of preseason trunk muscle training on low-back pain occurrence in women collegiate gymnasts. *The Journal of Strength & Conditioning Research.*, 23(1) : 86-92.
- McCabe, C. B., Psycharakis, S., and Sanders, R. (2011). Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at sprint pace. *Journal of Sports Sciences.*, 29(2) : 115-123.
- Moriyama, S., Ogita, F., Huang, Z., Kurobe, K., Nagira, A., Tanaka, T., and Hirano, Y. (2014). Intra-abdominal pressure during swimming. *International journal of sports medicine.*, 35(02) : 159-163.

- 宮下智・和田良広・鈴木正則.(2012). 効果的な体幹筋トレーニング方法の検討-異なる運動における腹横筋と内腹斜筋の収縮厚から. 日本橋学館大学紀要., 11 : 41-51.
- Narita, K., Nakashima, M., and Takagi, H. (2017). Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. *Journal of biomechanics.*, 54 : 123-128.
- 成田健造・中島求・仙石泰雄・本間三和子・椿本昇三・高木英樹.(2018). 多段階の泳速度におけるクロール泳中の自己推進時抵抗とストリームライン姿勢中の受動抵抗の比較. 体育学研究., 63(2) : 505-515.
- Norris, C. M. (2000). Back stability. *Human Kinetics Publishers*, pp.55-57.
- Payton, C., Baltzopoulos, V., and Bartlett, R. (2002). Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. *Journal of Applied Biomechanics.*, 18(3) : 243-256.
- Potdevin, F., Bril, B., Sidney, M., and Pelayo, P. (2006). Stroke frequency and arm coordination in front crawl swimming. *International Journal of Sports Medicine.*, 27(3) : 193-198.
- Psycharakis, S. G., and Sanders, R. H. (2008). Shoulder and hip roll changes during 200-m front crawl swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise.*, 40(12) : 2129-2136.
- 角川隆明・萬久博敏・荻田太. (2019). クロールにおける泳速度の変化とストロークパラメーターの関係. 体育学研究., 64(1) : 385-400.
- Tsunokawa, T., Mankyu, H., Takagi, H., and Ogita, F. (2019). The effect of using paddles on hand propulsive forces and froude efficiency in arm-stroke-only front-crawl swimming at various velocities. *Hum. Movement Sci.*, 64 : 378-388.
- Welch, C. M., Banks, S. A., Cook, F. F., and Draovitch, P. (1995). Hitting a baseball: A biomechanical description. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy.*, 22(5) : 193-201.
- Weston, M., Hibbs, A. E., Thompson, K. G., and Spears, I. R. (2015). Isolated core training improves sprint performance in national-level junior swimmers. *International journal of sports physiology and performance.*, 10(2) : 204-210.
- Yanai, T. (2001). What causes the body to roll in front-crawl swimming?. *Journal of*

Applied Biomechanics., 17(1) : 28-42.

Yanai, T. (2003). Stroke frequency in front crawl: its mechanical link to the fluid forces required in non-propulsive directions. Journal of Biomechanics., 36(1) : 53-62.

Table 1. Physical characteristics performance level of subjects.

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Best Record of 50 m FreeStyle (s")	Best Record of 100 m FreeStyle (s")
A	21	189.0	80.0	23"37	51"74
B	20	169.0	71.0	23"94	53"04
C	23	180.0	83.0	23"41	51"34
D	18	180.0	76.0	24"06	51"72
E	22	180.0	74.0	23"59	51"91
F	18	185.0	72.0	23"40	52"11
G	21	169.0	72.0	23"87	50"95
H	20	183.0	75.0	24"26	51"43
I	20	175.0	79.0	23"95	51"33
J	27	188.0	91.0	21"67	48"35
mean	21.0	179.8	77.3	23"54	51"37
SD	2.5	6.7	5.9	0.63	1.09

Table 2. Mean value of each variables at V50 m and V100 m.

Subject	SV (m / s)		SF (stroke / s)		SL (m / stroke)	
	V50 m	V100 m	V50 m	V100 m	V50 m	V100 m
A	1.97	1.85	1.09	0.98	1.81	1.89
B	1.94	1.81	1.04	0.89	1.86	2.03
C	1.97	1.86	0.99	0.91	1.99	2.05
D	1.92	1.86	1.09	0.99	1.77	1.88
E	1.98	1.85	1.12	0.97	1.76	1.91
F	1.99	1.84	1.03	0.86	1.93	2.13
G	1.93	1.88	1.16	1.01	1.66	1.86
H	1.90	1.86	0.93	0.88	2.05	2.12
I	1.94	1.88	1.06	1.02	1.82	1.84
J	2.14	1.98	1.00	0.93	2.14	2.12
mean	1.97 * *	1.87	1.05 * *	0.94	1.88 * *	1.98
SD	0.06	0.04	0.06	0.05	0.14	0.11

SV = Swimming Velocity

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 3. Mean value of ShR and HiR at V50 m and V100 m.

Subject	ShR (deg)			HiR (deg)		
	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference
A	40.8	36.3	4.5	22.4	25.0	-2.5
B	64.6	72.3	-7.7	38.1	39.6	-1.5
C	76.6	81.1	-4.5	44.3	50.5	-6.2
D	51.5	54.0	-2.5	41.6	30.0	11.6
E	49.1	50.9	-1.8	27.4	26.3	1.1
F	53.0	49.5	3.5	24.4	27.1	-2.7
G	71.0	73.4	-2.4	30.4	34.9	-4.5
H	46.1	52.5	-6.4	19.1	23.6	-4.5
I	35.8	42.0	-6.2	18.8	26.3	-7.5
J	40.6	46.3	-5.6	23.8	25.1	-1.3
mean	52.9 *	55.8	-2.9	29.0	30.8	-1.8
SD	12.9	14.0	3.9	8.8	8.1	5.0

Significant difference between conditions. * $p < 0.05$

Table 4. Mean value of ShR Peak Time and HiR Peak Time at V50 m and V100 m.

Subject	ShR Peak Time (%)			HiR Peak Time (%)		
	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference
A	46	20	26	15	15	0
B	33	44	-11	36	40	-4
C	49	49	0	51	52	-1
D	39	41	-2	26	29	-3
E	33	42	-9	31	42	-11
F	42	47	-5	43	48	-5
G	27	27	0	22	26	-4
H	37	48	-11	38	43	-5
I	17	22	-5	12	22	-10
J	30	34	-4	16	22	-6
mean	35	37	-2	29 **	34	-5
SD	9	10	10	12	12	3

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 5. Mean value of ShRAV at V50 m and V100 m.

Subject	Pull Roll (rad / s)			Pull RollBack (rad / s)			Push (rad / s)		
	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference
A	-2.0	-3.4	1.4	3.9	1.8	2.1	4.7	3.3	1.4
B	-4.5	-4.7	0.2	2.1	3.1	-1.0	6.3	5.6	0.7
C	-4.0	-4.1	0.1	6.7	6.2	0.5	4.2	3.6	0.6
D	-3.9	-3.7	-0.2	2.3	2.3	0.0	4.7	5.0	-0.3
E	-4.9	-4.2	-0.7	1.0	1.9	-0.9	5.6	4.7	0.9
F	-3.8	-3.4	-0.4	3.9	3.2	0.7	5.0	4.1	0.9
G	-3.5	-5.4	1.9	1.1	0.7	0.4	5.2	4.3	0.9
H	-2.5	-2.4	-0.1	3.7	5.0	-1.3	3.6	2.6	1.0
I	-2.0	-4.3	2.3	1.2	1.2	0.0	5.4	5.7	-0.3
J	-3.8	-2.1	-1.7	0.9	1.6	-0.7	5.8	5.0	0.8
mean	-3.5	-3.8	0.3	2.7	2.7	0.0	5.0 **	4.4	0.7
SD	1.0	1.0	1.2	1.8	1.6	1.0	0.7	1.0	0.5

Significant difference between conditions. ** p<0.01

Table 6. Mean value of HiRAV at V50 m and V100 m.

Subject	Pull Roll (rad / s)			Pull RollBack (rad / s)			Push (rad / s)		
	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference	V50 m	V100 m	difference
A	-2.8	-2.7	-0.1	1.4	1.6	-0.2	2.5	2.1	0.4
B	-2.9	-2.5	-0.4	2.4	2.6	-0.2	3.0	3.1	-0.1
C	-2.0	-2.2	0.2	4.8	4.5	0.3	2.4	2.5	-0.1
D	-3.1	-2.1	-1.0	2.3	2.2	0.1	3.1	2.6	0.5
E	-3.1	-2.5	-0.6	1.5	2.6	-1.1	3.3	2.7	0.6
F	-2.0	-2.1	0.1	3.6	3.1	0.5	2.3	1.9	0.4
G	-2.5	-3.1	0.6	1.6	1.5	0.1	1.9	2.3	-0.4
H	-0.5	-0.6	0.1	2.4	2.6	-0.2	0.7	0.9	-0.2
I	-1.5	-3.6	2.1	1.4	1.5	-0.1	3.3	3.6	-0.4
J	-2.3	-2.0	-0.3	1.7	1.5	0.2	2.1	2.1	0.0
mean	-2.3	-2.3	0.1	2.3	2.4	-0.1	2.5	2.4	0.1
SD	0.8	0.7	0.8	1.0	0.9	0.4	0.7	0.7	0.4

Figure 1. Coordinate axis definition.

Figure 2. Phase division of upper limb stroke.

Figure 3. Diagram of marking points.

Figure 4. Diagram of experimental setting.

Figure 5. Peak HiR of normalized time.