

クロール泳における身体セグメントの姿勢・動作速度と抵抗力の関係： 圧力抵抗に着目した事例的検討

成田健造¹⁾，高木英樹²⁾

Relationship between posture, movement of various body parts and active drag in front crawl: A case study focusing on pressure drag

Kenzo NARITA¹⁾, Hideki TAKAGI²⁾

欧文要約：

The purpose of this study was to examine the posture and movement velocity of each body segment related to the active drag during front crawl swimming from the standpoint of pressure drag. Specifically, the relationship between the kinematics information and the measured active drag was investigated in a case study. Four male swimmers swam front crawl at 1.20 m/s in a swimming flume. The three-dimensional motion and active drag were evaluated using a motion capture system and the measuring residual thrust method, respectively. The 3D coordinates of the joints on the right and left arms (i.e., ulnar styloid process, medial epicondyle, acromion) and legs (i.e., greater trochanter, lateral epicondyle, lateral malleolus), as well as the superior margin of the sternum, were obtained by LED active markers attached on each joint, and each segment was regarded as a line connecting the joints. The frontal segment length (*FSL*) and relative value of the centre velocity of each body segment in the propulsive direction and the flow velocity (*RVS*) were established using 3D motion data. The *FSL* was obtained as the length of each body segment on the Y-Z plane. The *FSL* of the whole body was calculated by summing the *FSLs* of the body segments, and the average values during three stroke cycles were used in the analysis. Results showed that among the swimmers, the order of the height of the active drag values and the height of the *FSL* values did not match. They also highlighted the importance of evaluating not only the posture (*FSL*) of each body segment but also the movement velocity in the propulsion direction (*RVS*) in the same time series. A future task is to create an index that considers the size and area of each body segment and to verify the relationship between the index and the resistance force in swimming.

キーワード： 競泳競技，自己推進時抵抗，前面投影面積，リンクセグメントモデル，MRT 法

1. 緒言

水泳において、泳者を推進させる力（推進力）も、その推進を妨げる力（抵抗力）も空気約800倍の密度を有する水から作用される。そのため、泳者がどのような動作をすると、身体が水からどのような力を受けるかについて調査することは、水泳を理解する上での基礎的なテーマといえる。泳者の泳速度は、泳者が四肢を動作させることで発揮した推進力と、泳者の全身が受けた抵抗力の

関係に左右される。そのため、いかに推進力を大きくし、抵抗力を小さくできるかが競技現場では重要視され、泳者の泳動作や姿勢の観点から指導が行われている。また、クロール泳中の抵抗力は泳速度の約2乗から3乗に比例するため(Narita et al., 2018b; 成田ら, 2018; Toussaint et al., 1988)、速く泳ぐことを目指す上で低抵抗技術の獲得は競技結果を向上させる上でも重要な課題である。しかしながら、「抵抗力の小さい泳者の動作・姿勢

¹⁾ 鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

²⁾ 筑波大学 体育系

はどのような特徴を有するか」について客観的に調査した研究は少なく、実践現場で各コーチ・選手が低抵抗技術の獲得を目指す際にはそれぞれの主観に頼った技術指導・改善が行われているのが現状である。

水泳時の泳者に働く抵抗力は、圧力（形状）抵抗、造波抵抗、摩擦抵抗などによって構成され、その中で圧力抵抗に着目した研究が行われてきた（Gatta et al., 2015; Morais et al., 2020）。圧力抵抗の大きさ（ D ）は以下の式によって表される。

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \quad \text{式①}$$

ρ は密度（28℃の水では996.2 kg/m³）、 A は物体の前面投影面積（進行方向前方から見た際の断面積）、 C_D は抵抗係数、 V は流体に対する物体の移動スピードをそれぞれ表している。Gatta et al. (2015)は、泳者の水中での圧力抵抗に着目し、水泳中の泳者を進行方向前方から撮影することで前面投影面積を算出し、その時の泳者の平均泳速度と併せて式①に代入することで泳者の全身に働く抵抗力の評価を試みた。その研究では、抵抗力が最も大きい局面を前面投影面積が最も大きくなる局面として定義しており、クロール泳であれば手部が肩の真下にある局面がそれに当たるとされている。ただし、この理論が成立するのは、泳者が何も動作せずに静止している時のみである。式①の V は流体に対する物体の移動スピードであるため、実際には泳者が推進方向に進む速度（泳速度）に対する各身体セグメントの推進方向での動作速度を考慮する必要がある。泳者の手部が肩の真下に位置する局面は、泳者が上肢で推進力を発揮するために手部や前腕を後方へ加速させて動かしている局面であり（Gourgoulis et al., 2008）、またこの局面で泳者が発揮した推進力が最も大きいと報告されている（Tsunokawa et al., 2018）。つまり、例え前面投影面積が大きいたとしても、その身体部位を泳速度よりも高い速度で後方に動作させている場合、その部位は抵抗力の増大に直接的には影響しないことが圧力抵抗の観点から推察される。このように、水泳中の前面投影面積の大き

いことが必ずしも抵抗力の大きさに関与しないと推論されるが、クロール泳を対象として前面投影面積と抵抗力の関係について実験的に調査した研究は未だない。さらに、前面投影面積を計測する場合、泳者の下半身は上半身（上肢や体幹部）よりも後方（下流側）に位置するため隠れてしまう。Narita et al. (2018a)はクロール泳での下肢動作の利用が泳者に働く抵抗力を増大させる可能性について指摘していることから、泳者の下肢の動作、姿勢についても考慮する必要がある。これらのことから、圧力抵抗の観点からクロール泳の抵抗力に関連する身体動作を評価する際、前面投影面積に代表する身体姿勢だけに着目するのではなく、「各身体セグメント」の「動作速度」も踏まえて分析することが必要であると考えられる。

そこで本研究は、クロール泳中の抵抗力に関連する各身体セグメントの姿勢と動作速度について、圧力抵抗の観点から検討することを目的とした。さらに、それらのキネマティクス情報と、実測された抵抗力との関係について4名の泳者を対象に事例的に調査した。

2. 方法

2.1. 対象者

本研究には、4名の男子大学生競泳選手が参加した。対象者の身長は1.77±0.07 m、体重は69.9±7.3 kgであった。全ての対象者が各自の専門種目で日本選手権に出場した経験を有する、国内トップレベルの競技者である。本研究はヘルシンキ宣言に則って実施され、参加者には事前に研究の目的、実験手順及び危険性について説明し、書面にて参加の同意を得た。なお、この研究は鹿屋体育大学倫理審査委員会の承認を得ている（第4-34号）。

2.2. 実験試技

実験は、流速を正確に制御できる実験用回流水槽（五十嵐工業）で実施し、MRT法（Narita et al., 2017）を用いた抵抗力評価と、モーションキャプ

チャシシステムを用いた3次元動作分析をおこなった。本研究では上肢と下肢の両方を用いたクロール泳を対象とし、泳速度は1.20 m/sとした。なお、図1に本実験の実施手順を掲載する。

2.2.1. MRT法を用いた抵抗力評価

MRT法 (measuring residual thrust method) とは、様々な泳速度、泳法での抵抗力評価ができる方法である。この方法は、同じ泳ぎを維持した泳者が様々な流速で泳いだ際に生じる余剰推進力 (residual thrust; 推進力と抵抗力の差) を計測し、その時の流速と余剰推進力の関係から抵抗力を推定する、というものである。なお、回流水槽の前方と後方にロードセル (LUX-B-2KN-ID, 共和電業) を設置し、それらのロードセルと泳者の腹部に装着したベルトをワイヤーでそれぞれ接続することで、余剰推進力を計測した (図1の右下写真)。

実験の初めに、回流水槽の流速を1.20 m/s に設定し、泳者は30秒間その流速で回流水槽の一定位置を保持して泳いだ (図1の②)。この時、ワイヤーの張力による外力が泳者に働かないよう、泳者の腰部に装着したベルトにワイヤーを接続しなかった。MRT法的前提条件である「1.20 m/sの泳動作を異なる流速でも維持すること」を満たすために、泳者には1.20 m/sで泳いでいる時のテンポや泳ぎ方を記憶するように伝えた。また、この時のストロークテンポを計測し、そのテンポと同様の間隔で電子音が鳴るように防水小型電子メトロノーム (テンポトレーナープロ, FINIS) を設定した。そのメトロノームを泳者の頭部表面とキャップの間に装着し、泳者の主観に加えその電子音を参考にするすることで、泳者には一定のリズムで泳ぐように指示した。

次に、泳者の腰部のベルトとワイヤーを接続した状態で泳者はもう一度1.20 m/sで泳ぎ、余剰推進力がほぼ0 (つまり、泳者がワイヤーの牽引力を頼らずに一定の位置を維持して泳いでいる状況) であることを確認した後に、泳者には続く試

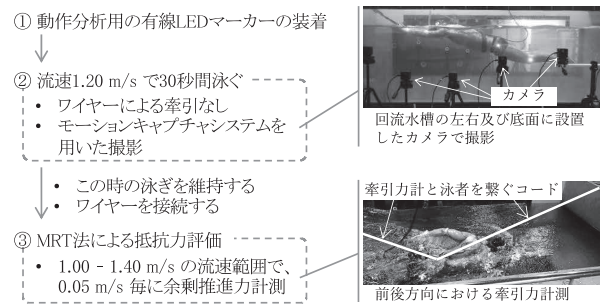


図1. 実験の実施手順とその風景

技中もその泳ぎを維持するように指示した。泳者がその泳ぎを維持しているとの前提条件のもと、流速を±0.2 m/s の範囲で0.05 m/s 毎に変化させ、各流速での余剰推進力を10秒ずつ計測した (図1の③)。余剰推進力は回流水槽の後方に設置したロードセルで計測された値から、前方に設置したロードセルの値を減ずることで算出した。流速毎に算出された余剰推進力の平均値を分析に使用し、流速と余剰推進力の関係から各泳者が1.20 m/sで泳いだ際の抵抗力を算出した。

2.2.2. モーションキャプチャシステムを用いた3次元動作分析

実験で使用した回流水槽には左右側面と底面にガラス窓があり、その窓を介して泳者の泳動作をサンプリング周波数 100 Hz で撮影した。モーションキャプチャカメラ (Prime13, Optitrack) を回流水槽の左右側方に5台ずつ、底面に6台を配備し、ガラス窓の屈折による影響を考慮し、各カメラの光軸をガラス窓に対して直交するように設置した。泳者がワイヤーを接続せずに1.20 m/sで30秒間泳いでいる時の、15秒から30秒までの15秒間を撮影した (図1の②)。試技の前に泳者の右上肢の尺骨茎状突起、上腕骨内側上顆、肩峰、左右下肢の大転子、大腿骨外側上顆、外果、及び胸骨上縁の計13点に有線 LED マーカーを貼付し (図1の①)、モーションキャプチャ用ソフトウェア (VENUS3D R, 株式会社ノビテック) を用いて、3ストローク分を動作解析した。1ストロークの定義は、右上肢の尺骨茎状突起が入水してから、

再度同部位が入水するまでとした。LED マーカーのコードが泳者の動作を阻害したり、水の抵抗による断線や抵抗の増大を防いだりするため、束ねられたコードを泳者の身体表面を這わせ、泳者の背中でそれらのコードをまとめて泳者の直上から保持した。座標軸は右手座標系とし、回流水槽の長軸方向を X 軸（上流側を正方向）、鉛直方向を Y 軸（水槽底を正方向）、泳者の左右方向を Z 軸とした。

2.3. データ分析

身体に貼付した LED マーカーの位置座標から、左右の上肢（前腕、上腕）、下肢（下腿、大腿）と体幹の計 9 つの身体セグメントから構成されるリンクセグメントモデルを作成した。前腕は尺骨茎状突起と上腕骨内側上顆、上腕は上腕骨内側上顆と肩峰、大腿は大転子と大腿骨外側上顆、下腿は大腿骨外側上顆と外果、体幹部は左右大転子の中点と胸骨上縁を結ぶ線分としてそれぞれ定義した。各セグメントの長軸を Y-Z 平面（泳者の進行方向前方から見た平面）に正射影し、その長さを求めた（frontal segment length : FSL ）。例えば、あるセグメントが X 軸と完全に一致していればそのセグメントの FSL は 0 m であり、一方で X 軸と直交する場合には FSL とセグメント長は等しいとみなされる。 FSL の単位は長さ (m) であり、前面投影面積 (m^2) とは異なるものの、本研究では泳者の姿勢を示す指標として FSL を採用した。そのため、 FSL の値が大きいくほど泳者に働く圧力抵抗も大きくなると仮定した。

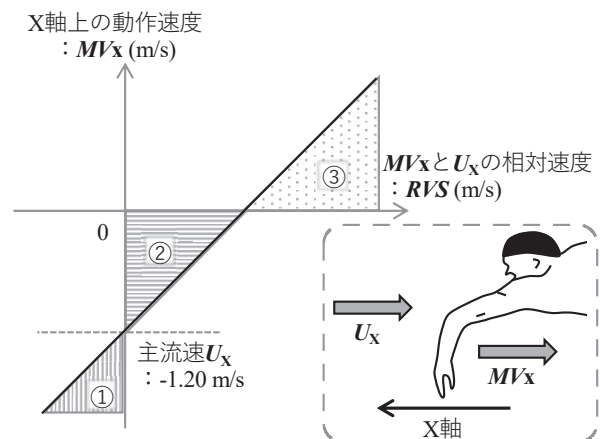
各体節に働く力が泳者を加速させるための推進力か、それとも減速させる抵抗力になるかは、その身体部位と流速の相対速度に依存する（図 2 を参照）。本研究では、各身体セグメントの中心位置を代表点と定義し、その位置の X 軸上の動作速度（movement velocity on x component: MV_x ）を求め、流速 (U_x) との相対速度（relative velocity of each body segment: RVS ）を算出した。

$$RVS = MV_x - U_x \quad \text{式②}$$

本研究の軸定義では、回流水槽の上流方向を X 軸の正としているため、回流水槽の上流側から下流側へ流れる水の速度（流速）は必ず負の値を示す。また、泳者が推進力を生成するために回流水槽の後方に身体を動作させた場合、 MV_x は負の値を示す。 $MV_x < U_x < 0$ m/s の場合、 RVS は負の値になり、圧力抗力の観点においてその身体部位は泳者を加速させる推進力として関与するとみなされる（図 2 の①）。一方で、 MV_x が U_x よりも高い場合 ($U_x < MV_x \leq 0$ m/s, または $U_x < 0$ m/s $< MV_x$)、その身体部位は泳者を減速させる抵抗力として関与するとみなすことができる（図 2 の②及び③）。本研究での流速は 1.20 m/s であるため、 $MV_x < -1.20$ m/s であれば RVS は負の値、 -1.20 m/s $< MV_x$ であれば RVS は正の値を示し、 $MV_x = -1.20$ m/s (U_x と MV_x が等しい) の時には RVS は 0 m/s であり、その身体セグメントは推進力にも抵抗力にも関与していないとみなされる。

以上の FSL と RVS を 3 次元動作分析から算出した。なお、本研究では水中局面のみ分析対象としたため、上肢が水上に位置する局面（リカバリ局面）でのそれらのデータは欠損値とした。

MRT 法で計測された抵抗力が全身に働く抵抗力を反映していることを鑑み、計 9 つの身体セ



- ① $MV_x < U_x < 0$: RVS は負の値（推進力として貢献）
- ② $U_x < MV_x \leq 0$: RVS は正の値（抵抗力として貢献）
- ③ $U_x < 0 < MV_x$: RVS は正の値（抵抗力として貢献）

図 2. MV_x (X 軸上の動作速度) と RVS (MV_x と U_x の相対速度), U_x (主流速) に関する模式図。X 軸が RVS , Y 軸が MV_x を示し、流速 U_x が -1.20 m/s 時を例示。

グメントの *FSL* を同一時系列毎に合計し, 全身の *FSL* を算出した. さらに, MRT 法での抵抗力がある一定時間における平均値を表すため, 動作分析区間である 3 ストロークを通した全身の *FSL* の平均値を算出し, その値と MRT 法による抵抗力の関連性を事例的に調査した. なお, 全身の *FSL* の平均値は, 全身の *FSL* を時間積分し, その積分範囲となる時間で除することで算出した.

表 1. 各泳者の身長・体重, 抵抗力, 全身の *FSL* の結果

		泳者			
		A	B	C	D
身長	(m)	1.85	1.82	1.70	1.69
体重	(kg)	79.0	75.0	61.5	64.0
抵抗力	(N)	58.8	74.6	66.3	59.4
<i>FSL</i>	(m)	0.77	0.83	0.68	0.72

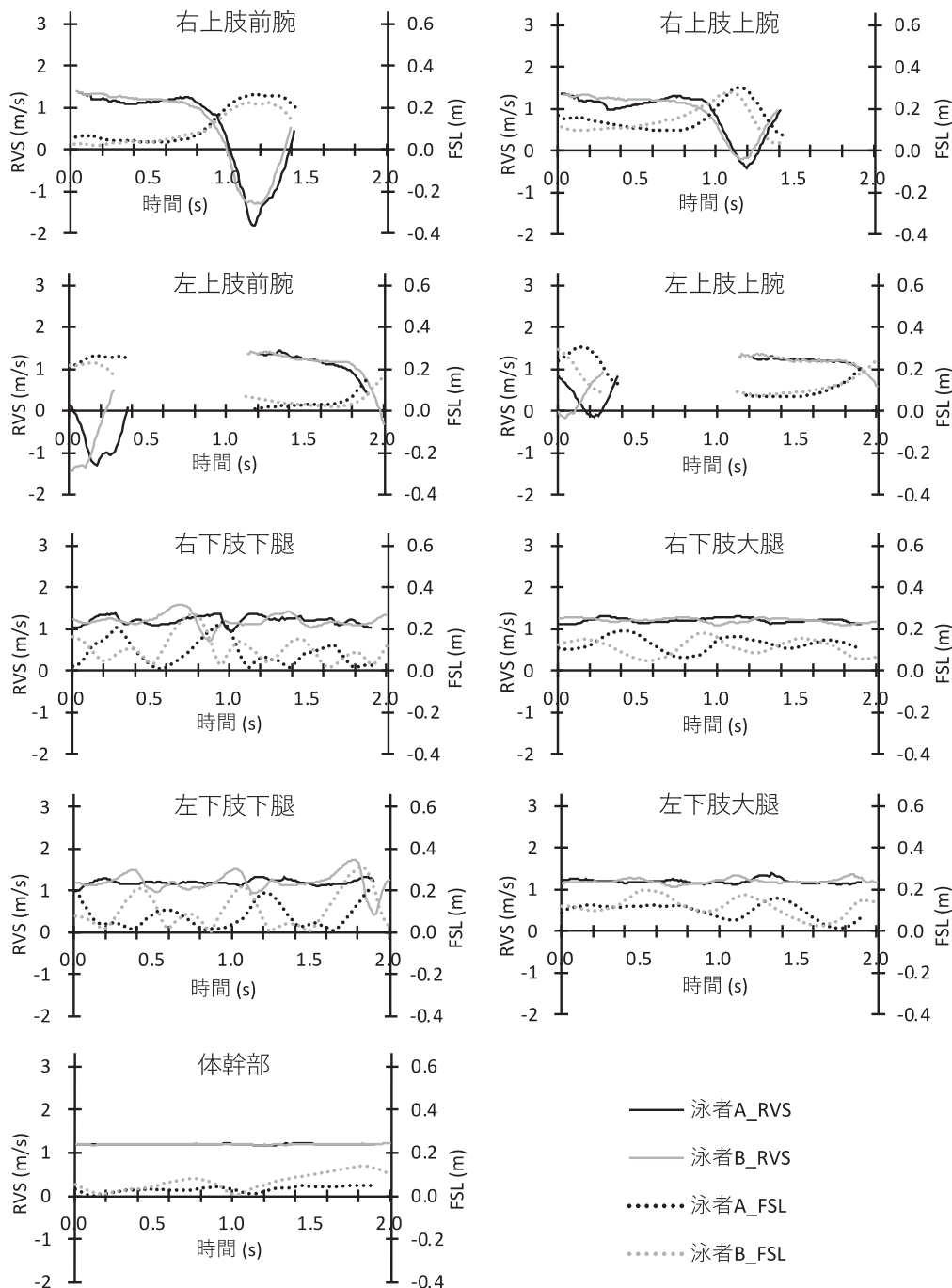


図 3. 泳者 A (黒) と泳者 B (グレー) における身体セグメント毎の *RVS* (実線) と *FSL* (点線) の時系列データ. なお, 右上肢の尺骨茎状突起が入水し, 再入水するまでの 1 ストローク期間を示しており, 水中局面のみを分析対象としている.

3. 結果

各泳者の身長・体重, MRT法による抵抗力, 全身の*FSL*の結果を表1に掲載した。抵抗力の値が高い泳者の順番は泳者B, C, D, Aであった一方で, 全身の*FSL*の値が高い泳者の順番は泳者B, A, D, Cであった。

図3は身体サイズが類似した泳者AとBの, 身体セグメント毎の*FSL*と*RVS*の時系列データを示している。なお, 図3には右上肢の尺骨茎状突起が入水し, 再入水するまでの1ストローク期間を図示し, 水中局面のみを分析対象としているため, 上肢がリカバリー動作をしている局面中の前腕と上腕のデータは欠損している。

4. 考察

本研究では, 圧力抵抗の観点から, 各身体セグメントの姿勢(*FSL*)と動作速度(*RVS*)に着目し, 抵抗力との関係について評価した。その結果, MRT法で計測された抵抗力の最も大きい泳者Bが最も高い全身の*FSL*を示したものの, 他の3名の泳者においてはMRT法の抵抗力と全身の*FSL*の大小関係は一致しなかった。*FSL*は各セグメントの幅や厚みを考慮していないため, 前面投影面積と同様の解釈ができないことには留意しつつ, 例え全身の*FSL*が高い値を示したとしても, 泳者の全身に働く抵抗力の大きいことに必ずしも関連する訳ではない可能性が本研究で示唆された。

前面投影面積の観点から水泳中の抵抗力を評価した先行研究(Gatta et al., 2015; Morais et al., 2020)は, 抵抗力の大きさを決める主要因が前面投影面積と仮定した場合, 手部が水中の最深部に位置するときの前面投影面積が最も広くなり, その結果抵抗力も最大になると報告している。また, それらの研究では, 全身の前面投影面積の変動に最も影響する部位が上肢であると指摘している。図3を参考に, その上肢の*FSL*(点線)を見てみると, ストローク後半における前腕や上腕の*FSL*が高い値を示しており, これは手部が最深部

に位置する局面と一致する。一方で, この時の*RVS*(実線)を見てみると, 泳者A, B共に*RVS*は低い値を示し, 特にストローク後半部分での前腕の*RVS*は負の値を示していた。*RVS*が負の値ということは流速よりも高い速度で前腕を後方に動作させていることを意味し, 圧力抵抗の観点においてこの時の前腕は推進力として泳者の加速に貢献し, 抵抗力の増大には直接的に影響していないことが推察される。そのため, 水泳中の泳者に働く抵抗力を考える場合, 圧力抵抗の式には身体セグメント毎の動作速度を採用することが適しており, 先行研究(Gatta et al., 2015; Morais et al., 2020)のように身体代表点の速度を採用することは適さないと考えられる。

以上のように, 水泳中の抵抗力に関与する泳動作を考える上で, 身体姿勢の観点のみに着目するのではなく, その時の身体セグメントの動作速度も考慮することが重要であると推察される。これを実践現場でのクロール泳の指導に当てはめると, 手部や前腕を推進方向に対して垂直にする「ハイエルボーポジション」が重要視されているが, ハイエルボーポジションを作るだけでは前面投影面積が増え, 抵抗力の増大に関与する可能性もあることには留意する必要があるだろう。そのため, 上肢に働く抵抗力を抑えつつ, 大きな推進力を上肢で発揮するためには, ハイエルボーポジションを作った上で上肢を素早く後方へ加速させることが大切である。一方で, 体幹部や下肢の*RVS*は常に正の値であることが図3より観察される。クロール泳での上肢動作とは異なり, 下肢動作は主に上下運動を繰り返す動作である。Narita et al. (2018a)はクロール泳での下肢動作の利用が抵抗力を増大させる可能性について指摘していることも踏まえると, 圧力抵抗を低減するという観点では, 下肢を可能な限り水平姿勢で維持し, 下肢の*FSL*の値を小さくすることが重要であると, 本研究結果より提言できるだろう。

5. 研究の限界と今後の展望

本研究では、身体姿勢の指標として *FSL* を採用して評価したが、この指標が前面投影面積と異なることには留意すべきである。*FSL* は各身体セグメントを線分としてみなしているため、身体の厚さや幅は考慮されていない。例えば、図3において体幹部の *FSL* は他の部位と比較して低い値であるが、体幹部は他の身体セグメントと比べて幅が広く、厚みがあり、全身の身体表面積の約24%を占めると報告されている(富田ら, 1999)。また、体幹の傾き(Zamparo et al., 2009)や身体の浸水体積の大きさ(Gonjo et al., 2020)が抵抗力に関与することを報告した先行研究を踏まえると、身体姿勢と抵抗力の関係を評価する上で、各身体セグメントのサイズを考慮することは今後の課題となる。さらに、本研究では手部や足部を分析対象としていない。全身に対して手部が約5%、足部が7%と他の部位と比べ表面積は狭いものの(富田ら, 1999)、それらの部位は平面的であるため、円柱のような形状の前腕や上腕よりも圧力差が生じやすく、圧力抵抗による影響も大きいと推察される。そのため、本研究で作成したリンクセグメントモデルに身体サイズや形状も踏まえた重み付けをして、動作と抵抗の関係について調査することが今後の課題として挙げられる。

また、本研究では圧力抵抗の観点に着目し、各身体セグメントの姿勢と動作速度を分析したが、圧力抵抗以外の影響を考慮できていないことは留意すべきである。水泳中の泳者には、圧力抵抗以外に造波抵抗や摩擦抵抗が働き、特に造波抵抗は速度の増加に伴い全抵抗力に占める割合が大きくなることが指摘されている(Toussaint et al., 2002b)。他にも、Pumped-up 効果(Toussaint et al., 2002a)など多くの流体现象が泳者周りで生じ、それらが統合された結果として泳者は水から力を受ける。しかしながら、それらの複合的な流体现象を時々刻々と変化する動作と併せて正確に把握することは不可能であり、その形状や動作の変化を全て考慮した抵抗力への影響について詳細に分

析することは現実的ではなく、ましてやプールサイドにて選手のタイム計測や他にもマネジメント業をこなす指導者に求められるものではない。その点、本研究のようにリンクセグメントモデルとして動作・姿勢を単純化し、簡易的に観察する視点は有用と考えられる。抵抗力と泳動作の関係に着目した先行研究として、抵抗力と両上肢の協調性に正の相関係数があること(Seifert et al., 2015)や、ストローク頻度の増加が抵抗力の増大に関与すること(Toussaint et al., 1988)が報告されている。しかしながら、それらの研究は泳者の具体的な泳動作や姿勢に言及したのではなく、実際の指導現場での泳法指導・改善とは乖離していると考えられる。そのため、上述した課題を踏まえつつ、「低抵抗技術の獲得」に関連する各身体セグメントの具体的な姿勢や動作を分析し、それに関わる指標の作成及び妥当性の検証をすることは、競技・指導現場への科学的根拠を元にした具体的かつ実践的なフィードバックを可能にすると考えられる。

6. 結論

本研究ではクロール泳中の抵抗力に関連する身体動作についての理解を深めることを目的に、圧力抵抗の観点から各身体セグメントの動作速度と姿勢を分析し、実測された抵抗力との関係を事例的に調査した。その結果、抵抗力と全身の *FSL* の値が高い泳者の順番は、双方で一致しなかった。さらに、各身体セグメントの姿勢(*FSL*)だけでなく、その時の推進方向における動作速度(*RVS*)も評価することが大切であると示唆された。本研究で得られた知見を実践現場に還元するために、各身体セグメントのサイズや形状なども考慮した評価指標の考案が今後の課題として挙げられる。

文献

Gatta, G., Cortesi, M., Fantozzi, S., & Zamparo, P. (2015) Planimetric frontal area in the four

- swimming strokes: Implications for drag, energetics and speed. *Human movement science* 39: 41-54.
- Gonjo, T., Narita, K., McCabe, C., Fernandes, R. J., Vilas-Boas, J. P., Takagi, H., & Sanders, R. (2020) Front crawl is more efficient and has smaller active drag than backstroke swimming: Kinematic and kinetic comparison between the two techniques at the same swimming speeds. *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 8: 570657.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Vezos, N., Kasimatis, P., Antoniou, P., & Mavromatis, G. (2008) Estimation of hand forces and propelling efficiency during front crawl swimming with hand paddles. *Journal of biomechanics* 41: 208-215.
- Morais, J., Sanders, R., Papic, C., Barbosa, T., & Marinho, D. (2020) The influence of the frontal surface area and swim velocity variation in front crawl active drag. *Medicine & science in sports & exercise* 52: 2357-2364.
- Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2017) Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. *Journal of biomechanics* 54: 123-128.
- Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2018a) Effect of leg kick on active drag in front-crawl swimming: comparison of whole stroke and arms-only stroke during front-crawl and the streamlined position. *Journal of biomechanics* 76: 197-203.
- Narita, K., Ogita, F., Nakashima, M., Gonjo, T., & Takagi, H. (2018b) The relationship between active drag and swimming velocity during front-crawl swimming. *Proceedings of XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*.
- 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: 505-515.
- Seifert, L., Schnitzler, C., Bideault, G., Alberty, M., Chollet, D., & Toussaint, H. M. (2015) Relationships between coordination, active drag and propelling efficiency in crawl. *Human movement science* 39: 55-64.
- 富田明美, 宮本征一, 堀越哲美 (1999) 日本人青年男女の体表面積に関する研究. *日本生気象学会雑誌* 36: 43-51.
- Toussaint, H. M., De Groot, G., Savelberg, H., Vervoorn, K., Hollander, A. P., & van Ingen Schenau, G. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *Journal of biomechanics* 21: 435-438.
- Toussaint, H. M., Van den Berg, C., & Beek, W. J. (2002a) " Pumped-up propulsion" during front crawl swimming. *Medicine and science in sports and exercise* 34: 314-319.
- Toussaint, H. M., van Stralen, M., & Stevens, E. (2002b) Wave drag in front crawl swimming. *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- Tsunokawa, T., Tsuno, T., Mankyu, H., Takagi, H., & Ogita, F. (2018) The effect of paddles on pressure and force generation at the hand during front crawl. *Human movement science* 57: 409-416.
- Zamparo, P., Gatta, G., Pendergast, D. R., & Capelli, C. (2009) Active and passive drag: the role of trunk incline. *European journal of applied physiology* 106: 195-205.