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： 圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用いた分析

角川 隆明¹⁾ 萬久 博敏¹⁾ 荻田 太²⁾

Takaaki Tsunokawa¹, Hiroto Mankyu¹ and Futoshi Ogita²: Relationship between swimming velocity and stroke parameters during the front-crawl: Analysis using pressure measurement and underwater motion capture. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

Abstract: Through pressure measurement and underwater motion capture analysis, the aim of this study was to clarify how propulsive forces, Froude efficiency, and stroke parameters change with swimming velocity during front-crawl swimming. Eight male swimmers performed 2 trials, once using pressure measurement and underwater motion capture analysis and once using a MAD system. In the analysis using pressure measurement and underwater motion capture, each swimmer performed 16-m front-crawl swimming 10 times at various velocities. During the trials, pressure forces acting on the hand and hand kinematics were analyzed to obtain the hand propulsive forces at each velocity. In the analysis using the MAD system, each swimmer performed 25-m front-crawl swimming 10 times at various velocities while pushing the pad set under the water, and the propulsive force at each velocity was obtained from the pushing force of the pad. This revealed that the mean propulsive force increased exponentially with the increase in mean swimming velocity, and the propulsive index n was 2.62 on average for the 8 participants. Maximal propulsive forces and maximal propulsive powers at maximum were significantly correlated with the results obtained using the MAD system. Froude efficiency varied considerably among the participants, being 0.54 ± 0.05 on average for all trials.

Key words : fluid force, active drag, Froude efficiency, MAD system

キーワード : 流体力, 自己推進時抵抗, フルード効率, MAD システム

I 緒 言

競泳競技において、推進力や抵抗力は競技成績を決定する主要な要因であることから、水泳に関する研究では、古くから泳者の身体に働く抵抗 force や、泳者が発揮する推進力を定量化する試みがなされてきた (Formosa et al., 2011; Hollander et al., 1986; Kolmogorov and Duplishcheva, 1992; Kudo et al., 2008; Morouço et al., 2011; Narita et al., 2018a, 2018b; Schleihaut et al., 1983; 清水 ほか, 2000; Takagi and Wilson, 1999; Tsunokawa et al., 2015; 角

川ほか, 2012; Xin-Feng et al., 2007). Kolmogorov and Duplishcheva (1992) は、泳者が全力で泳いでいるときに発揮する最大パワーは常に等しいと仮定し、抵抗値が既知の浮力体を泳者が牽引して全力で泳いだ場合の泳速度と浮力体を牽引せずに全力で泳いだ場合の泳速度、および浮力体の抵抗値から泳者の身体に働く抵抗力を推定する速度摂動法を提案した。この方法では、泳者が牽引する浮力体の他は特別な測定機器を必要としないため、抵抗力を簡易的に評価することができる。その一方で、全力で泳いだそれぞれの試技で泳者が発揮するパワーは等しいという仮定に基づいて抵

1) 鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

〒 891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町 1

2) 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

〒 891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町 1

連絡先 角川隆明

1. *Coaching of Sports and Budo, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

1 Shiromizu-cho, Kanoya, Kagoshima 891-2393

2. *Sports and Life Science, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

1 Shiromizu-cho, Kanoya, Kagoshima 891-2393

Corresponding author t.tsunokawa.729@gmail.com

抗力が算出されるため、全力で泳いでいない場合（最大下泳時）の抵抗力の評価をすることはできない。また、速度摂動法と同じ理論に基づき、水上に張ったワイヤに設置された滑車と泳者を接続し、滑車に働く抵抗力と泳速度から抵抗力を推定する方法（Xin-Feng et al., 2007）や、牽引装置を用いて泳者が達成できる最大泳速度よりも高い速度で泳者を牽引し、牽引力と泳速度から抵抗力を推定する方法（Formosa et al., 2011）も報告されているが、いずれの方法においても全力で泳いだ場合の抵抗力の評価に限定される。さらに、ワイヤを介して泳者の腰部とフォースゲージを接続し、泳者が 30 秒間全力で泳いだときにワイヤに生じる張力を計測した先行研究（Morouço et al., 2011）では、計測された張力と競技会での泳記録との間に有意な相関関係が認められたと報告されているが、泳者が前方へ推進しない点で実際の泳動作とは異なり、泳速度と張力との関係を検討することもできない。

以上のような推進力や抵抗力の測定上の制限に対し、実際の競泳競技では 50m から 1500m までの距離で競技が行われ、競技時間は 21 秒から 15 分を超える時間となるため、選手は泳距離や競技時間に応じて泳速度やペース配分を調整し、それぞれの泳距離における競技記録が最短になるようにレースに臨んでいる。そのため、先行研究のように全力で泳いだ場合の推進力や抵抗力の評価に限らず、様々な泳速度で測定可能な抵抗力の評価方法の確立が望まれる。

様々な泳速度における推進力や抵抗力を評価できる方法として、泳動作中の自己推進時抵抗を計測する Measuring Active Drag system（以下「MAD システム」と略す）が開発された（Hollander et al., 1986; Toussaint et al., 1988; Van der Vaart et al., 1987）。MAD システムでは、一定間隔で水面下に設置された固定板を 1 ストローク毎に押しながら泳ぎ、固定板を押す力を計測する。理論上は、泳者が加減速のない定常速度で泳いでいるときの推進力は抵抗力と等しいことから、MAD システム上において定常速度で泳いでいるときに固定板を押す力は、泳者が発揮する推進力や泳者の身体

に働く自己推進時抵抗と等しいと考えることができる。測定の際は、最大下速度から最大速度に至るまで泳速度を変えながら 10 回ほど泳ぐことで、推進力と泳速度の関係や、泳者が発揮したパワーを算出することができ、トレーニングやパフォーマンスの評価に用いられてきた。しかしながら、MAD システムでは水に対して力を加えるのではなく水中に設置された固定板を押すという点で実際の泳動作とは異なり、水を後方へ押して推進力を得る水泳独特の泳技術が反映されない。また、通常は泳速度の変化に伴ってストローク長やストローク頻度が変化するが、MAD システムでは固定板の間隔が一定であるため、実際の泳ぎと同じとはいえない。このように、MAD システムでは泳動作中の自己推進時抵抗を様々な泳速度で評価できる一方で、それぞれの泳者の動作の特徴を完全には反映することができないという点が問題視されている。

それに対し、近年では身体表面の圧力分布を計測して身体に働く流体力を推定し、推進力を定量化する試みがなされている（Kudo et al., 2008; Takagi and Wilson, 1999; Tsunokawa et al., 2015; 角川ほか, 2012, 2015）。泳者が水中で身体を動かしたとき、流体力として身体表面に対して接線方向に作用する摩擦抵抗と、垂線方向に作用する圧力抵抗が作用する。そのため、流体中の身体に生じる力を正確に評価するには全身体表面の摩擦抵抗と圧力抵抗を計測すれば良いことになる。しかしながら、実際には摩擦抵抗は圧力抵抗と比較して小さいため（Marinho et al., 2009）、これらの先行研究では摩擦抵抗は取り扱わずに圧力抵抗に焦点を当て、流体力の定量化を試みている。この方法では、身体に小型の圧力センサを貼付する以外に泳動作は妨げられないため、それぞれの泳者の特徴を反映して実泳中の流体力を明らかにすることができる。

しかしながら、泳者の身体に働く流体力は全てが推進に貢献するのではなく、抵抗力として身体に作用して推進に貢献しない流体力も含まれる。そのため、圧力分布計測を用いて泳動作中の身体に働く流体力を定量化する際には、流体力の作用

方向を分析するために泳動作の三次元動作分析が必要となる。そのような中で、近年では水中モーションキャプチャ技術が発展し、水泳に関する研究にも導入され始めている (Ceccon et al., 2013; Dubois et al., 2012; Monnet et al., 2014; Tsunokawa et al., 2018)。この技術を圧力分布計測と併用して泳動作を分析すれば、身体に働く流体力の分析と身体の三次元動作分析を同時に実施することが可能となり、流体力の作用方向を明らかにすることができる。さらに、このような分析により身体に働く流体力と身体の三次元座標が得られれば、泳者が抵抗に抗して進むための機械的パワー（以下「 P_D 」と略す）と、泳者が水に対して手部で作用させる機械的パワー（以下「 P_K 」と略す）を分析することができる。このように、泳者が泳ぐときに発揮している機械的パワーの合計（以下「 P_O 」と略す）は、 P_D と P_K を合計したものと考えることができるため (Cappaert et al., 1995; 荻田, 2012; Toussaint et al., 1990), P_D と P_K を足し合わせたパワーに対する P_D の比率から、泳者の推進に有効に使われた機械的パワーの比率を示すフルード効率を求めることができる (Zamparo et al., 2002, 2005)。泳者がより高い泳速度を達成するには、 P_O に対する P_D の比率を高め、フルード効率を高めることが求められる。しかしながら、前述のように泳動作中の身体に働く抵抗力や、泳者が発揮する推進力を求めることは難しく、未だに方法論が確立されていない。泳動作におけるフルード効率を報告している先行研究においても、推定した流体力が大きな誤差を含むことが指摘されている準定常解析法 (Schleihauf et al., 1983) を用いた報告 (Cappaert et al., 1995; Gourgoulis et al., 2008) や、シミュレーションモデルを用いた報告 (中島, 2005) に留まっており、実泳中の身体に働く流体力や推進力を計測し、フルード効率を分析した研究は報告されていない。

そこで本研究では、圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用い、クロールの泳速度変化に伴って推進力やフルード効率、ストロークパラメーターがどのように変化するか明らかにすることを目的とした。本研究により、泳速度の変化に伴

って泳者が発揮する推進力や P_D , P_K , フルード効率、ストロークパラメーターがどのように変化するのか明らかにすることができれば、圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用いた分析方法の有用性が示されるだけでなく、水泳の推進力や抵抗力に関する研究において有益な資料となると考えられる。なお、本研究ではこれまで泳動作中の身体に働く抵抗力や泳者が発揮する推進力と泳速度との関係、泳者が発揮するパワーを定量化する方法として長く利用されてきた MAD システムを用いた分析を実施し、分析方法の有用性に関する検討を合わせて実施することとした。

II 方法

1. 対象者

大学水泳部に所属する男子競泳選手 8 名（年齢 20.4 ± 1.3 歳、身長 1.75 ± 0.06 m、体重 69.2 ± 7.9 kg、右手部平面積 0.0161 ± 0.0011 m²）が本研究に参加した。対象者の 100m 自由形自己最高記録は 52.9 秒から 55.0 秒であった。対象者には実験の趣旨とその危険性を事前に説明し、書面にて参加の同意を得た。本研究は筆者の所属する機関の研究倫理審査委員会の承認を得て実施された（承認番号 3-16）。

全ての対象者が、圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用いた推進力とストロークパラメーターの分析 (Determination of Propulsion from Pressure measurement and Motion capture: 以下「DPPM 法」と略す) のための試技と、MAD システムを用いた泳動作中の推進力の分析のための試技に参加した。

2. DPPM 法による分析

DPPM 法による分析は 50 m 屋内プール（水深 2.0—4.0 m、水温 27.5℃）で行った。対象者はブッシュオフスタートで泳ぎ始め、可能な限り定常速度で 16 m をクロールで泳ぎ試技を 10 回繰り返した。呼吸による影響を排除するため、全ての試技は無呼吸で行った。実験を実施した屋内プールは最深部の水深が 4.0 m であり、水中モーション

キャプチャ用カメラを設置できる位置や水中モーションキャプチャの分析範囲が制限されたため、試技は16mのクロールとし、分析範囲内では定常速度で泳いでいると仮定した。対象者には、10回の試技における泳速度を任意に変化させ、 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ より低い泳速度から徐々に泳速度を上げ、10回目の試技を全力で泳ぐように指示した。なお、試技中は5mから15mの10m区間のタイムを計測し、各試技の終了時に対象者に伝えた。また、現時点ではクロールのキック動作中に発揮される推進力や、下肢や足部に作用する機械的パワーを定量化する手法が確立されておらず、これらを考慮してフルード効率を算出することができないことに加え、キック動作を行わないクロールを対象として測定が行われるMADシステムで得られた推進力との比較を行うため、試技中はキック動作を行わないように指示し、競泳のトレーニングで一般的に用いられるプルブイ（浮力：22.5 N, ARN100, ARENA）を大腿部で挟んで試技を実施した。

試技中は、手部表面の圧力分布を計測するため、右手部3カ所の手掌側と手背側の計6点に小型圧力センサ（PS05-KC、共和電業）を貼付した。圧力センサの貼付位置は、圧力分布計測を用いて手部の推進力を分析した先行研究（Tsunokawa et al., 2018）に従い第2中手指節間関節、第3中手指節間関節、第5中手指節間関節とし、それぞれ手掌側と手背側に対して貼付した。圧力センサが出力した信号は移動用の台車に搭載したセンサインターフェース（PCD430A、共和電業）を経由し、サンプリング周波数200HzでPCに記録した。本研究で用いた圧力センサは有線で計測を行ったため、試技中は泳者の移動に合わせて台車を移動させて計測を行った。実験に用いた圧力センサのキャリブレーションのため、それぞれの圧力センサを水深0.1mから1.3mまで0.2mずつ水中に沈め、静水圧を計測した。計測された静水圧の値と理論上の静水圧の誤差は2.5%未満であることが確認された。

また、水中モーションキャプチャによる三次元動作分析を行うため、ネオジウム磁石と伸縮性の

ある医療用コットン製テープを用いて左右の大転子と右手部5点に直径19mmのモーションキャプチャ用の反射マーカを貼付した。反射マーカの貼付位置は先行研究（Gourgoulis et al., 2008）に従い右第3指末節骨頭、右第2中手指節間関節側面、右第5中手指節間関節側面、右尺骨茎状突起、右橈骨茎状突起、左右の大転子の計7点とした。実験を実施した屋内プールの中中には15台の水中モーションキャプチャカメラ（Qualisys Opus Underwater, Qualisys, Sweden）を設置し、モーションキャプチャ用ソフトウェア（Qualisys Track Manager, Qualisys, Sweden）を用いてサンプリング周波数200Hzにて泳者に装着した反射マーカの位置を自動で認識した。反射マーカはカメラのLEDから発せられる光を反射し、カメラのCCDセンサが反射された光を認識した。水中モーションキャプチャシステムと圧力センサによるデータ集録は、同時に入力した電圧変化点をトリガとして開始されるように設定して同期した。本研究では、泳者の左右方向をX軸、推進方向をY軸、鉛直方向をZ軸とした右手系固定座標を用い、分析範囲はX軸方向に2.0m、Y軸方向に7.0m、Z軸方向に2.0mとし、Y軸方向は試技のスタートを行った壁から8.0mから15.0m地点が分析範囲となるように設定した。試技の実施前には、両端に反射マーカを取り付けたグラスファイバー製の棒を水中モーションキャプチャカメラに映るように移動させ、キャリブレーションを行った。なお、キャリブレーション時には分析範囲内での水中モーションキャプチャの精度が誤差0.5%未満であることが確認された。また、モーションキャプチャで計測された身体の座標データおよび圧力センサで計測された圧力データはButterworth型のLow-pass デジタルフィルタを用い、座標データは遮断周波数6Hz、圧力データは遮断周波数20Hzで平滑化した。Fig.1に反射マーカと圧力センサを貼付した右手部を示す。

本研究では、水中モーションキャプチャの分析範囲内で行われた1ストロークを分析の対象とし、反射マーカを貼付した右第3指末節骨頭が入水してから水中ストローク動作やリカバリー動

Fig. 1 Photographs of hand with reflecting markers and pressure sensors

作を行い、再び入水するまでの1周期を分析した。各周期の同じタイミングでの姿勢が完全になるとなる場合、身体重心移動速度と身体各部位の移動速度は等しくなる。そのため、本研究では各周期の同タイミングであれば、泳者の身体は毎周期で等しい姿勢となると仮定し、左右の大転子の中点の座標のY軸方向への移動距離と1ストロークに要した時間から平均Y軸方向泳速度（以下「平均泳速度」と略す）を算出した。また、各試技におけるストロークパラメーターとして、ストローク頻度と平均手部スピードを算出した。ストローク頻度は1秒間あたりのストローク回数とし、平均手部スピードは手部5点に貼付した反射マーカーが全て入水している局面において、手部5点に貼付した反射マーカーの中点の平均合成スピードとして算出した。

手部表面の圧力分布と手部の平面積から手部に働く流体力を推定する方法（Takagi and Wilson, 1999）に従い、手掌側と手背側の圧力差（ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ）に手部の平面積（ m^2 ）を乗じて流体力（N）の合力を算出した。手部の平面積は、事前に撮影した写真から画像分析ソフト（Image J, NIH, USA）を用いて算出した。手掌側と手背側の圧力差は、手掌側の圧力値から手背側の圧力値を減じ、動圧のみを算出した。本研究では、手部を3つのセグメントに分割し、各セグメントの手掌側と手背側に圧力センサを対にして貼付した。そして、各セグ

メントで算出された手掌側と手背側の圧力値が各セグメントを代表する圧力差と仮定した。各セグメントに働く流体力はこれらの圧力差に各セグメントの面積を乗じて算出し、手部に働く流体力は各セグメントで算出された流体力を足し合わせたものとした。なお、圧力データについては、右第3指末節骨頭が入水した時点では圧力センサが水上にあるため、手部5点に貼付した反射マーカーが全て入水した局面を分析の対象とした。

手部の座標から手部平面に対して垂直な法線ベクトルを算出し、算出した流体力の合力を各方向成分に分解した。本研究では、各方向成分に分解した流体力のうち推進方向（Y軸方向）に働く流体力を推進力と定義した。Fig.2に推定した流体力の概略図を示す。

Fig. 2 Schematic of pressure forces and propulsive forces acting on a hand

3. MAD システムによる推進力の分析

MAD システムを用いた推進力の分析では、水中に設置された固定板をクロールのストローク動作によって1ストローク毎に押しながら、可能な限り定常速度で25 m 泳いだ。呼吸による影響を排除するため、全ての試技は無呼吸で行った。試技中はキック動作を行わないように指示し、DPPM 法による分析と同様にプルブイ（浮力：22.5 N, ARN100, ARENA）を大腿部で挟んで試技を実施した。MAD システムの固定板は、水面から0.66 m の深さに設置された23.0 m の水平ロッドに15枚装着された。固定板の間隔は1.30 m とし、プールの壁から第1固定板までの距離は4.0 m とした。通常の泳動作では泳速度の変化に伴ってストローク長が変化するが、本研究では先行研究と同様に固定板の間隔は全ての試技において1.30 m に設定した。泳者が後方へ固定板を押した力は、プールの壁と水平ロッドの連結部分に設置されたトランスデューサーによって測定され、100 Hz で PC に取り込まれた。

各対象者は、固定板を押しながら25 m 泳ぐ試技を10回繰り返した。対象者には、10回の試技における泳速度を任意に変化させ、 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ より低い泳速度から徐々に泳速度を上げ、10回目の試技を全力で泳ぐように指示した。全ての試技の平均推進力は、得られた力信号の総積分値を要した泳時間で除することによって算出した。ただし、第1固定板を押した力は壁を蹴ってスタートしたときの影響を除くために、第15固定板を押した力は壁際における減速の影響を避けるために、推進力算出のための計算には用いなかった。また、平均泳速度は第2固定板に手が触れた時点と第15固定板に手が触れた時点までに要した時間と固定板距離から算出した。

4. データ分析と統計処理

DPPM 法による分析とMAD システムによる分析によってそれぞれ推進力を算出した後に、各対象者の各試技における平均泳速度と平均推進力との関係を示す帰式を最小二乗法によって以下のように求めた。

$$F_P = A \cdot v^n \quad (1)$$

F_P は平均推進力、 v は平均泳速度、 A と n は帰式の比例定数である。本研究では A を推進力係数、 n を推進力指数と定義した。

さらに、泳者が水に対して手部で作用させる機械的パワーを P_K 、泳者が抵抗に抗して進むための機械的パワーを P_D と定義し、以下の式を用いて推進に有効に使われた機械的パワーの比率を示すフルード効率 (η_P) を算出した (Gourgoulis et al., 2008) :

$$\eta_P = \frac{P_D}{P_D + P_K} = \frac{F_P \cdot v_{\text{body velocity}}}{(F_P \cdot v_{\text{body velocity}}) + [F_R \cdot v_{\text{hand velocity}} \cdot \cos(\alpha)]} \quad (2)$$

P_K は泳者が水に対して手部で作用させる機械的パワーであり、手部に働く流体力の合力と手部合成速度、手部に働く流体力の合力ベクトルと手部合成速度ベクトルのなす角度から算出した。角度 α は手部に働く流体力の合力ベクトルと手部合成速度ベクトルのなす角度であり、手部に働く流体力の合力ベクトルは手部平面に対して垂直な法線ベクトルとした。また、 P_D は水の抵抗に抗して進むための機械的パワーとし、平均推進力と平均泳速度から算出した。 F_P は平均推進力、 F_R は手部に働く流体力の合力、 $v_{\text{hand velocity}}$ は手部の平均合成速度、 $v_{\text{body velocity}}$ は平均泳速度である。

また、これまでのMAD システムを用いた先行研究では、全力で泳いだ試技で計測された平均推進力に平均泳速度を乗じて最大推進パワーを算出し、泳者が発揮した機械的パワーの指標として評価している。そのため、本研究では全力で泳いだ試技における平均泳速度を最大泳速度、平均推進力を最大推進力と定義し、それぞれの分析方法で計測された最大泳速度に最大推進力を乗じて全力で泳いだ試技における P_D を算出し、最大推進パワーと定義した。その後、それぞれの方法で計測された最大推進力や最大推進パワーの関係を検討するため、Pearson の方法を用いて相関係数を求めた。また、分析方法の違いによる平均値の差を

検討するため、それぞれの分析方法における最大泳速度と最大推進力、最大推進パワーの対象者8名の平均値を対応のあるt検定を用いて比較した。なお、データの正規性および球面性の仮定は、それぞれ Shapiro-Wilk 検定および Mauchly の検定を用いて検証した。また、本研究では対象者が比較的少なかったため、Cohen の方法を用いて効果量 d を算出した。

回帰式の算出および統計分析には、IBM SPSS Statistics 25 for Windows (IBM, USA) を用い、有意水準は危険率 5% 未満とした。

III 結 果

Table 1 に各対象者における推進力係数 A と推進力指数 n 、決定係数 R^2 、全力での試技における最大泳速度と最大推進力、最大推進パワーとを示し、Fig.3 にそれぞれの測定方法における各対象者の泳速度と平均推進力との関係を示す。その結果、どちらの分析方法においても平均推進力は泳速度の増加に伴って指数関数的に増加し、DPPM 法を用いた分析における推進力指数 n は平均で 2.62 を示した。また、全ての対象者において、MAD システムを用いた分析における推進力係数 A が高い値を示し、Fig. 3 に示す通り MAD システムを用いた分析における平均推進力が高い

値を示した。全力で泳いだ試技における最大泳速度と最大推進力、最大推進パワーの平均値には分析方法の違いによる有意な差が認められ、いずれも MAD システムを用いた分析において高い値を示した（最大泳速度： $t = 12.48$, $p < 0.01$, $d = 2.48$, 最大推進力： $t = 16.23$, $p < 0.01$, $d = 3.45$, 最大推進パワー： $t = 15.78$, $p < 0.01$, $d = 3.32$ ）。

Fig.4 に各泳速度における P_k と P_D を示し、Fig. 5 に P_k と P_D から算出した各泳速度におけるフルード効率を示す。その結果、 P_k と P_D はともに泳速度の増加に伴って増加する傾向が見られた。フルード効率は、どの泳速度においても同程度の値を示す対象者や泳速度の増加に伴って値が微増する対象者、試技によってばらつきが見られる対象者が確認され、一貫した傾向は見られなかった。

Fig.6 に、最大推進力と最大推進パワーにおける DPPM 法と MAD システムとの相関図を示す。相関分析の結果、それぞれの分析方法で計測された最大推進力や最大推進パワーの間には有意な強い相関関係が認められた（最大推進力： $r = 0.84$, $p < 0.01$, 最大推進パワー： $r = 0.90$, $p < 0.01$ ）。

Fig.7, Fig. 8, Fig. 9 に全ての試技における平均推進力とストローク頻度、手部の平均合成スピードと泳速度との関係を示す。その結果、泳速度の増加に伴って平均推進力やストローク頻度、平

Table 1 Parameters of the power function A , n , R^2 , p -value, and maximal swimming velocity, maximal propulsive force, maximal propulsive power for each method at all participants

Participants	Pressure measurement & Motion capture (DPPM)						MAD system					
	A	n	R^2	Maximal swimming velocity ($m \cdot s^{-1}$)	Maximal propulsive force (N)	Maximal propulsive power (w)	A	n	R^2	Maximal swimming velocity ($m \cdot s^{-1}$)	Maximal propulsive force (N)	Maximal propulsive power (w)
1	15.06	2.09	0.92	1.67	55.8	93.4	21.66	2.38	0.99	1.90	105.3	199.8
2	14.77	2.58	0.99	1.56	45.8	71.4	25.31	2.11	0.99	1.76	88.7	156.1
3	14.66	2.92	0.91	1.53	47.8	72.9	19.90	2.11	0.99	1.84	76.6	141.0
4	8.31	2.89	0.96	1.60	30.0	48.0	10.89	2.96	0.99	1.80	67.2	121.2
5	9.39	3.61	0.87	1.56	50.1	77.9	21.06	2.38	1.00	1.83	92.4	168.6
6	14.04	2.45	0.97	1.60	52.3	83.8	19.23	2.38	0.99	1.93	99.8	193.0
7	13.97	2.22	0.96	1.59	52.2	83.0	27.61	1.96	0.97	1.81	96.8	175.3
8	14.03	2.18	0.96	1.59	43.7	69.6	29.02	1.67	0.98	1.77	85.8	151.7
Mean	13.03	2.62		1.59	47.2	75.0	21.83	2.24		1.83	89.1	163.3
SD	2.62	0.51		0.04	8.0	13.4	5.71	0.38		0.06	12.5	26.3

Fig. 3 Relationship between mean propulsive forces and mean swimming velocity for all participants

Fig. 4 P_K and P_D at each swimming velocity for all participants

Fig. 5 Froude efficiency (η_F) at each swimming velocity for all participants

Fig. 6 Relationship between DPPM method and MAD system for mean propulsive force (left) and P_D (right) at maximal trial

Fig. 7 Mean propulsive force at each swimming velocity for all participants

Fig. 9 Mean hand speed at each swimming velocity for all participants

Fig. 8 Stroke rate at each swimming velocity for all participants

均手部スピードは高くなった。また、泳速度が $1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超えると平均推進力とストローク頻度の増加が大きくなったのに対し、平均手部スピードは直線的に増加した。

IV 考 察

本研究では、圧力分布計測と水中モーションキ

ャプチャを用い、クロールの泳速度変化に伴って推進力やフルード効率、ストロークパラメーターがどのように変化するか明らかにすることを目的とした。その結果、DPPM法を用いて算出した推進力指数 n は平均で 2.62 ± 0.51 、MADシステムを用いて算出した推進力指数 n は平均で 2.24 ± 0.38 を示し、ともに泳速度の増加とともに推進力が指数関数的に増加した。回流水槽を用いた新たな方法（以下「MRT法」と略す）によりクロール泳中の泳者の身体に働く抵抗力を推定した研究（Narita et al., 2018b）では、6名の対象者の平均の推進力指数は 2.53 ± 0.40 と報告されており、本研究においてDPPM法を用いて算出した推進力指数と同等の値であった。また、泳動作中の身体に働く抵抗力を分析した先行研究（Mollendorf et al., 2004; Vennell et al., 2006）では、閾値となる泳速度には違いが見られるものの、高い泳速度では造波抵抗の影響が大きくなることが報告されている。さらに、MRT法を用いて推定したクロール

ル泳中の自己推進時抵抗と、ストリームライン姿勢での受動抵抗を比較した先行研究（成田ほか，2018）においても，四肢の動作によって造波抵抗が増大し，自己推進時抵抗が指数関数的に増大することが示唆されている．これらのことから，本研究においても泳速度の増加に伴って造波抵抗の影響が大きくなり，増大した抵抗力に抗して推進するために泳速度が $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えると手部で発揮する推進力が大きく増加したと考えられる．さらに，MRT 法を用いてクロール中の自己推進時抵抗を推定した先行研究（Narita et al., 2018b）では，クロール泳中の自己推進時抵抗はストローク頻度と有意な相関関係にあることも報告されている．本研究においても，泳速度が $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えるとストローク頻度や推進力が泳速度とともに大きく増加する傾向が見られ，泳者はストローク頻度を高めることで推進力を増加させ，高い泳速度を達成していると考えられる．それに対し，平均手部スピードは泳速度の増加とともに直線的に増加する傾向が見られ，ある泳速度を超えると平均手部スピードが大きく増加するような傾向は見られなかった．つまり，泳者は手部スピードとストローク頻度をともに高めることで推進力を増加させているが，本研究では $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えるような高い泳速度ではストローク頻度の増加による推進力の増加が大きいことが示唆された．Chollet et al., (2000) は，泳者は速く泳ぐためにストロークコーディネーションを調整しており，高い泳速度では推進局面の割合が増加して非推進局面の割合が減少すると報告している．つまり，低い泳速度では手部スピードを高めることでストローク頻度が高くなり，推進力や泳速度が増加するのに対し，高い泳速度では手部スピードの増加だけでなくストロークコーディネーションの変化の要因も加わってストローク頻度が高くなり，推進力や泳速度が増加すると推察される．

また，DPPM 法を用いて算出した推進力係数 A は平均で 13.03 ± 2.62 ，MAD システムを用いて算出した推進力係数 A は平均で 21.83 ± 5.71 を示し，Fig.3 に示す通り DPPM 法を用いて計測した推進力と比べて MAD システムを用いて計測され

た推進力が高い値を示した．推進力指数 n と推進力係数 A は回帰式の比例定数であり，推進力指数 n は推進力が泳速度の増加に伴ってどのように増加していくかを示し，推進力係数 A は泳速度に関わらず推進力の大小を示すこととなる．つまり，推進力係数 A が高いことは，どの泳速度においても推進力が高いことを示し，体格が大きい泳者や泳動作中に身体が受ける抵抗力が大きい泳者のように，同じ泳速度において身体が受ける抵抗力が大きい泳者はその抵抗力に抗するための推進力が大きくなり，推進力係数 A が高くなると考えられる．また，推進力係数 A が高くなる他の要因として，計測方法の違いも影響していると考えられる．本研究のようにキック動作を行わないクロールでは，推進力は主に上肢動作によって発揮されることとなる．MAD システムでは，水中に設置された固定板を押しながら泳ぐため，手部で固定板を押している間は手部や前腕，上腕はほとんど移動しないこととなり，上肢動作で発揮される推進力のほぼ全てが固定板を押す力として計測される．それに対し，DPPM 法では上肢が水中を移動しながら推進力を発揮することとなるため，手部だけでなく前腕や上腕にも流体力が生じ，推進力となっている可能性がある．そのため，手部で発揮される推進力の計測に限定される DPPM 法では推進力が過小評価され，推進力係数 A が小さくなると考えられる．Narita et al. (2018b) は，回流水槽において泳動作中の身体に働く自己推進時抵抗を計測する MRT 法と MAD システムの比較を行い，MRT 法を用いて算出された推進力係数 A は平均で 34.5 ± 2.9 ，MAD システムを用いて算出された推進力係数 A は平均で 29.1 ± 0.4 と報告している．本研究において，MAD システムを用いて算出された推進力係数 A の平均値は 21.83 ± 5.71 だったことから，先行研究と比較して本研究の対象者の推進力係数 A が低かったと考えられるものの，DPPM 法を用いて算出された推進力係数 A は他の計測手法と比較して低いと言える．このように，DPPM 法を用いて算出された推進力や推進力係数 A は他の方法を用いて算出された値より低く，泳者が発揮する推進力の全てを計測

できていないと推察される。そのため、自己推進時抵抗のような泳者の全身に働く抵抗力を計測する方法や、MAD システムのように泳者が発揮する推進力の全てを計測できる方法と比較する際には注意が必要である。

それに対し、Narita et al. (2018b) が MRT 法を用いて算出した推進力指数 n は平均で 2.53 ± 0.40 と報告されており、本研究において DPPM 法を用いて算出された推進力指数 n の平均値 2.62 ± 0.51 と同等の値であった。これらのことから、DPPM 法を用いて算出された推進力は泳者が発揮する推進力の全てを計測できておらず、推進力係数 A は低くなるものの、泳速度とともに指数関数的に増加する推進力の変容を評価できており、推進力指数 n は先行研究で報告されている他の計測手法で算出された値と同程度となったと考えられる。

さらに、全力で泳いだ試技における最大泳速度や最大推進力、最大推進パワーの平均値には分析方法の違いによる有意な差が認められ、いずれも MAD システムを用いた分析において高い値を示した（最大泳速度： $t = 12.48$, $p < 0.01$, $d = 2.48$, 最大推進力： $t = 16.23$, $p < 0.01$, $d = 3.45$, 最大推進パワー： $t = 15.78$, $p < 0.01$, $d = 3.32$ ）。MAD システムでは、水中に設置された固定板を押しながら泳ぐため、固定板を押して推進力を発揮している間は手部の速度が 0 になり、 P_k が 0 となるため、フルード効率は 1.00 となる。それに対し、Fig. 5 に示すように DPPM 法を用いて算出されたフルード効率は全ての試技における平均値が 0.54 ± 0.05 であったことから、このようなフルード効率の違いによって全力で泳いだ時の最大泳速度や最大推進力、最大推進パワーに分析方法による差が見られたと考えられる。また、泳者が加減速のない定常速度で泳ぐ場合は、泳者が発揮する推進力と泳者の身体に働く抵抗力は等しいと考えることができるため（Hollander et al., 1986; Toussaint et al., 1988; Van der Vaart et al., 1987）、MAD システムを用いた計測において同じ泳速度での推進力が高くなったことは、同時に抵抗力が大きかったことを示唆している。流体中

の物体に働く抵抗力の大きさには、流れに対する物体の投影面積が関与するため、泳動作中の身体に働く抵抗力の大きさには身体の高さや形状だけでなく、身体の姿勢や泳フォームも関与している。特に、本研究では同じ対象者が 2 種類の分析方法での計測に参加し、身体の高さや形状は同じであったことから、それぞれの分析方法における試技で対象者が行った動作が異なっていたことが、算出された推進力の大きさに差が見られた要因として考えられる。

その一方で、全力で泳いだ試技において計測された最大推進力や最大推進パワーには、それぞれの分析方法の間に有意な強い相関関係が認められた（最大推進力： $r = 0.84$, $p < 0.01$, 最大推進パワー： $r = 0.90$, $p < 0.01$ ）。つまり、計測された絶対値には差が見られたが、どちらかの分析方法において最大推進力や最大推進パワーが高い対象者は、もう一方の分析方法においても高い値であったことを示しており、各対象者の特徴を反映していたと考えられる。MAD システムは、泳者が固定板を押す力を測定して推進力を定量化する方法であり、これまで長年にわたって推進力の評価に用いられてきた（Hollander et al., 1986; Toussaint et al., 1988; Van der Vaart et al., 1987）。DPPM 法を用いた分析では、このような MAD システムを用いて算出された最大推進力や最大推進パワーと有意な相関関係が認められ、さらに圧力センサと反射マーカを身体に貼付する他は泳動作を妨げずに評価できた点で有用な方法であると考えられる。

また、本研究では泳者が水に対して作用させる機械的パワー P_k と、水の抵抗に抗して進むための機械的パワー P_D を算出し、 P_k と P_D からフルード効率を算出した。泳速度は、泳者が発揮する推進力と、泳者の身体に働く抵抗力によって決まるため、推進力を大きくするだけでは高い泳速度を達成することはできず、抵抗力を削減すると同時に推進力を大きくする必要がある。つまり、泳者には水に対して作用させる機械的パワー P_k を大きくすることだけでなく、身体に働く抵抗力を小さくし、 P_D に対する P_k の比率であるフルード

効率を高めることが求められる。本研究では、圧力分布計測によって手部に働く流体力を分析すると同時に、水中モーションキャプチャによって平均泳速度や手部のスピードを分析し、 P_k や P_D 、フルード効率から泳動作を評価することができた。これまでもフルード効率を分析した研究は報告されているが (Cappaert et al., 1995; Gourgoulis et al., 2008), これらの先行研究では推定値の誤差が大きいことが指摘されている準定常解析法を用いて手部の画像分析結果と定常状態で得られた抵抗係数から推進力を推定しており、実泳中の身体に働く流体力の実測値からフルード効率を求めた研究は報告されていない。本研究では、身体に圧力センサや反射マーカーを貼付する他は泳動作を妨げることはなく、様々な泳速度での分析も可能であるため、泳動作中の推進力やフルード効率を分析できる新たな方法として、今後の活用が期待できる。

しかしながら、本研究ではクロール泳における上肢動作で発揮される推進力に着目しており、試技では下肢動作を行っていない。そのため、下肢動作を伴う通常のクロール泳において、下肢動作によって発揮される推進力や下肢が水に対して作用させる機械的パワー、水の抵抗に抗して進むための機械的パワーを評価することはできず、下肢動作がフルード効率へ与える影響も明らかにできていない。MRT法を用いてクロールの下肢動作が自己推進時抵抗に与える影響について調査した研究 (Narita et al., 2018a) では、下肢動作を行うことで同泳速度での自己推進時抵抗が増加すると報告されていることから、下肢動作を行うことで泳動作中に身体が受ける抵抗力やそれに抗するための推進力が変化し、フルード効率にも影響があると考えられる。しかしながら、現時点ではクロールの下肢動作によって発揮される推進力を定量的に評価する方法論は確立されておらず、フルード効率を分析した先行研究においても下肢動作を行わないクロール泳を対象としている (Cappaert et al., 1995; Gourgoulis et al., 2008)。シミュレーションモデルを用いて下肢動作を伴うクロール泳におけるフルード効率を分析した先行研究 (中

島, 2005) では、推進効率は約 20% と報告されており、本研究やフルード効率を分析した他の先行研究より低い値となった。この要因として、下肢動作によって推進力に直接的には貢献しない鉛直方向へのエネルギーロスが大きいことが挙げられているが、下肢動作によって下半身を持ち上げる効果が得られていることも指摘されており、泳者が水に対して作用させる機械的パワー P_k だけでなく、水の抵抗に抗して進むための機械的パワー P_D も下肢動作の影響を受けることになると考えられる。このように、水泳に関する研究では泳者の身体に働く自己推進時抵抗の定量化だけでなく、泳者が水に対して作用させる機械的パワーや、全身で発揮されている推進力を定量化することにも課題が残されている。今後の研究により、これらの課題が解決されれば、泳動作のより正確な評価や理解に貢献するものと考えられる。

V 結 論

本研究では、圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用い、様々な泳速度のクロールにおける推進力やストロークパラメーターを分析した。その結果、泳速度の変化に伴って平均推進力が指数関数的に増加し、回帰分析の結果、推進力指数 n の 8 名の平均値は 2.62 を示した。また、全力で泳いだ試技における最大推進力や最大推進パワーは、MAD システムを用いて計測した値との間に有意な強い相関関係が認められた。フルード効率は対象者や泳速度によってばらつきが見られ、全ての試技における平均値は 0.54 ± 0.05 を示した。

付記

本研究は、JSPS 科研費 JP17K13139 の助成を受けて行われたものです。

文 献

- Cappaert, J. M., Pease, D. L., and Troup, J. P. (1995) Three-dimensional analysis of the men's 100-m freestyle during the 1992 Olympic games. *J. Appl. Biomech.*, 11: 101-112.
- Ceccon, S., Ceseracciu, E., Sawacha, Z., Gatta, G., Cortesi,

- M., Cobelli, C., and Fantozzi, S. (2013) Motion analysis of front crawl swimming applying CAST technique by means of automatic tracking. *J. Sport Sci.*, 31: 276-287.
- Chollet, D., Chaliès, S., and Chatard, J. C. (2000) A new index of coordination for the crawl: Description and usefulness. *Int. J. Sports Med.*, 21: 54-59.
- Dubois, R.P., Thiel, D.V., and James, D.A. (2012) Using image processing for biomechanics measures in swimming. *Procedia Engineering*, 34: 807-812.
- Formosa, D. P., Mason, B., and Burkett, B. (2011) The force-time profile of elite front crawl swimmers. *J. Sport Sci.*, 29: 811-819.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Vezos, N., Kasimatis, P., Antoniou, P., and Mavromatis, G. (2008) Estimation of hand forces and propelling efficiency during front crawl swimming with hand paddles. *J. Biomech.*, 41: 208-215.
- Hollander, A. P., de Groot, G., van Ingen Schenau, Toussaint, H. M., Best, D. H., Peeters, W., Meulemans, A., and Schreurs, A. W. (1986) Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *J. Sport Sci.*, 4: 21-30.
- Kolmogorov, S. V. and Duplishcheva, O. A. (1992) Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *J. Biomech.*, 25: 311-318.
- Kudo, S., Yanai, T., Barry, Wilson., Takagi, H. and Ross, V. (2008) Prediction of fluid forces acting on a hand model in unsteady flow conditions. *J. Biomech.*, 41: 1131-1136.
- Marinho, D. A., Reis, V. M., Alves, F. B., Vilas-Boas, J. P., Machado, L., Silva, A. J., and Rouboa, A. I. (2009) Hydrodynamic drag during gliding in swimming. *J. Appl. Biomech.*, 25: 253-257.
- Mollendorf, J. C., Termin, A. C., Oppenheim, E., and Pendergast, D. R. (2004) Effect of swim suit design on passive drag. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36: 1029-1035.
- Monnet, T., Samson, M., Bernard, A., David, L., and Lacouture, P. (2014) Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study. *Sports Eng.*, 17: 171-181.
- Morouço, P., Keskinen, K. L., Vilas-Boas, J. P., and Fernandes, R. J. (2011) Relationship between tethered forces and the four swimming techniques performance. *J. Appl. Biomech.*, 27: 161-169.
- 中島求 (2005) 水泳人体シミュレーションモデルによる標準的 6 ビートクロール泳の力学的考察. 日本機械学会論文集 B 編, 71 : 1370-1376.
- 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, <https://doi.org/10.5432/jjpehss.17051>.
- Narita, K., Nakashima, M., and 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. *J. Biomech.*, 76: 197-203.
- Narita, K., Ogita, F., Nakashima, M., and Takagi, H. (2018b) Comparison of active drag using the MRT-method and the MAD-system in front crawl swimming. *Proceedings of ISEA2018*, 2: 287-292.
- 萩田太 (2012) 水泳の効率測定. 体育の科学, 62 : 761-766.
- Schleithauf, R. E., Gray, L., and DeRose, J. (1983) Three-dimensional analysis of hand propulsion in the sprint front crawl stroke. In: Hollander, P. A., Huijing, P. A., and de Groot, G. (eds.) *Biomechanics and medicine in swimming III. Human Kinetics*, pp.173-183.
- 清水幸丸・高木英樹・倉島浩章 (2000) 人体手部の流体力学的特性に関する考察—手部回りの圧力分布測定および流れの可視化—. 日本機械学会論文集 B 編, 66 : 166-173.
- Takagi, H. and Wilson, B. (1999) Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming. In: Keskinen, K. L., Komi, P. V., and Hollander, A. P. (eds.) *Biomechanics and medicine in swimming VIII. University of Jyväskylä*, pp.101-106.
- Toussaint, H.M., De Groot G., Savelberg, H.H.C.M., Vervoorn, K., Hollander, A.P., and van Ingen Schenau. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J. Biomech.*, 21: 435-438.
- Toussaint, H. M., Knops, W., De Groot, G., and Hollander, A.P. (1990) The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22: 402-408.
- Tsunokawa, T., Nakashima, M., and Takagi, H. (2015) Use of pressure distribution analysis to estimate fluid forces around a foot during breaststroke kicking. *Sports Eng.*, 18: 149-156.
- 角川隆明・仙石泰雄・椿本昇三・高木英樹 (2015) 平泳ぎキック動作中に働く非定常流体力と足部表面の圧力分布の関係. 体育学研究, 60 : 165-175.
- 角川隆明・高木英樹・仙石泰雄・椿本昇三 (2012) 平泳ぎ泳パフォーマンスと圧力分布から推定した足部流体力との関係. 体育学研究, 57 : 515-525.
- Tsunokawa, T., Tsuno, T., Mankyu, H., Takagi, H., and Ogita, F. (2018) The effect of paddles on pressure and force generation at the hand during front crawl. *Hum. Movement Sci.*, 57: 409-416.
- Van der Vaart, A.J.M., Savelberg, H.H.C.M., de Groot G., Hollander, A.P., Toussaint, H.M., and van Ingen Schenau.

- (1987) An estimation of drag in front crawl swimming. *J. Biomech.*, 20: 543-546.
- Vennell, R., Pease, D., and Wilson, B. (2006) Wave drag on human swimmers. *J. Biomech.*, 39: 664-671.
- Xin-Feng, W., Lian-Ze, W., Wei-Xing, Y., De-Jian, L., and Xiong, S. (2007) A new device for estimating active drag in swimming at maximal velocity. *J. Sport Sci.*, 25: 375-379.
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, A., and Minetti, A. E. (2002) How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *J. Exp. Biol.*, 205: 2665-2676.
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Mollendorf, J., Termin, A., and Minetti, A. E. (2005) An energy balance of front crawl. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 94: 134-144.

(2018 年 6 月 29 日受付)
(2018 年 11 月 13 日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2019/2/25