

水中モーションキャプチャと圧力分布計測を用いた クロール中に発揮される推進力の分析

角川隆明¹⁾, 萬久博敏¹⁾, 萩田 太²⁾

Analysis of propulsive forces acting on a hand using pressure measurement and underwater motion capture during the front-crawl

Takaaki Tsunokawa¹⁾, Hirotooshi Mankyu¹⁾, Futoshi Ogita²⁾

Abstract

The aim of this study was to clarify the relationship between swimming velocity and propulsive forces during the front crawl through pressure distribution measurement and underwater motion capture. Eight male swimmers performed ten trials of front crawl swimming with various velocities, and last trial was with maximal effort. During trials, pressure sensors and underwater motion capture cameras were used together to analyze hand kinematics and pressure forces acting on the hand. Six pressure sensors were attached to the right hand, and pressure forces acting on the right hand were estimated by multiplying the areas and the pressure differences between the palm side and dorsal side of the hand. And five reflective markers were attached to landmark points on the right hand. The markers reflected the light of the LEDs, so it could be captured by the CCD sensors of cameras. Acting directions of pressure forces were analyzed using a normal vector perpendicular to the hand, calculated from coordinates of the right hand. In this study, pressure forces acting on the propulsive axis direction were defined as propulsive forces. As a result, mean resultant pressure forces showed 56.7 ± 10.6 N, and mean propulsive forces showed 44.6 ± 9.0 N at maximal trial. These values of forces were higher than those reported in previous studies on robotic arm, hand model, and imitation stroke motions. As reported in previous studies, propulsive forces increased with increasing swimming velocity. In some swimmers the propulsive forces increased in proportional to the cube of swimming velocity. Since underwater motion capture and pressure measurement were used in combination, it was possible to evaluate swimming motions not only from the force magnitude but also from the acting direction of forces. It was confirmed that by combining underwater motion capture and pressure measurement, it is possible to analyze propulsive forces without problems and obtain useful information for swimmers and coaches.

Keywords: swimming, fluid force, 3-D analysis, drag force

要 約

本研究は、圧力分布計測と水中モーションキャプチャを用い、クロールの実泳中に泳者の手部に働く流体力や推進力を推定し、泳速度との関係を明らかにすることを目的とした。実験には男子大学競泳選手8名が参加し、泳速度を変化させながら泳ぐ試技を10回繰り返した。なお、10回目の試技は全力で泳ぐように指示した。試技中は、圧力分布測定とモーションキャプチャを用いて手部に働く流体力と手部のキネマティクスを分析した。泳者の右手部6箇所には圧力センサを貼付し、手掌側と手背側の圧力差に手部の平面

¹⁾ 鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

²⁾ 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

積を乗じて手部に働く流体力を算出した。さらに、右手部5箇所にはモーションキャプチャ用の反射マーカーを貼付し、泳動作中の手部の実座標を取得した。そして、取得した実座標から、手部平面に対して垂直な法線ベクトルを算出し、圧力分布から算出した流体力の作用方向を決定した。なお、本研究では推進方向に働く流体力を推進力と定義した。その結果、全力で泳ぐように指示した10回目の試技での流体力の合力は 56.7 ± 10.6 N、推進力の平均値は 44.6 ± 9.0 Nを示した。これらの値は、ロボットアームや手部模型、ストローク動作を模倣した動作を対象とした先行研究で報告されている値よりも高い値であった。また、先行研究で報告されている通り、泳速度の増加に伴って推進力が増加し、推進力が泳速度の3乗に比例する対象者も見られた。モーションキャプチャを併用したことで、流体力の大小だけでなく力が働く方向からも泳動作を評価することができた。このように、本研究では水中モーションキャプチャと圧力分布計測を併用し、実泳中の手部に働く流体力や推進力を分析し、選手や指導者に有用な情報を得られることが確認された。

キーワード：知水泳、流体力、3次元分析、抵抗力

1. 緒言

水泳では、上肢や下肢の動きによって水に力を伝えて推進力を得る一方で、常に水から抵抗力を受けながら推進するため、泳速度は推進力と抵抗力によって決定する。そのため、より高い泳速度を達成するには、水にうまく力を伝えて推進に用いる技術と、身体が水から受ける抵抗力を低減する技術の両方が必要とされる。これらのことから、水泳に関する研究では古くから様々な方法によって泳者の身体に働く水の力である流体力を計測し、推進力や抵抗力を定量化する試みがなされてきた (Schleihat et al., 1983; Hollander et al., 1986; Toussaint et al., 1988; Kolmogorov and Duplishcheva, 1992; Takagi et al., 1999; Xin-Feng et al., 2007; Kudo et al., 2008; Formosa et al., 2011; Tsunokawa et al., 2015)。

特に、クロールでは上肢によって発揮される推進力の割合が高いため、流れや運動がほぼ定常状態であることを前提とした準定常解析法 (Schleihat et al., 1983) を用いて手部に働く流体力に関する研究が行われてきた (Berger and Hollander, 1995)。しかしながら、泳動作中の手部は加減速しながら移動方向が変化する動きをするため、手部周りには流れや渦による短時間で不規則に変動する非定常な流体力が生じることが、先行研究において報告されている (Matsuuchi et al.,

2009; Takagi et al., 2014)。準定常解析法では、手部周りの非定常な流れや渦、さらに物体に付随して加減速する水の質量 (付加質量) を考慮することはできないため、これまでの準定常解析法を用いた研究では、推定された流体力に誤差が生じることが報告されている (Berger et al., 1999; Pai and Hay, 1988)。

このような研究の過程において、身体表面の圧力分布を計測する手法を用いて泳動作中に働く流体力について分析する研究が進められている (Kudo et al., 2008; Kudo et al., 2013; Lauder and Dabnichki, 2005; Matsuuchi et al., 2009; Takagi and Wilson, 1999; Takagi et al., 2014; Tsunokawa et al., 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ため、泳動作中の流体力を正確に定量化するには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、圧力分布を計測する方法によって圧力抵抗の定量化を試みている。

さらに、近年ではこのような圧力分布計測を用いた流体力の分析に水中モーションキャプチャを用いた動作分析が応用され始めている。圧力分布

計測を用いた泳動作中の流体力の分析では, 身体に働く流体力の大きさやその変動を明らかにすることはできるが, 流体力の作用方向を明らかにすることはできない. 流体力は, その作用方向によって推進に貢献する推進力となるか, 推進を妨げる抵抗力となるかが決まるため, 流体力がどの方向に作用するか明らかにすることは, 泳動作中の流体力を分析する上で重要となる. これまでは, 流体力の作用方向を明らかにするために, 水中にデジタルビデオカメラを設置して泳動作を撮影し, 3次元 DLT 法を用いて手動デジタイズにより身体の実座標を算出する方法が一般的であったが, この方法では分析に多大な時間と労力を要するため, 多くの試技を分析することは難しかった. それに対し, モーションキャプチャでは従来よりも短時間で泳動作の三次元分析ができ (Ceccon et al., 2013; Dubois et al., 2013; Monnet et al., 2014), 圧力分布計測で推定した流体力の作用方向を明らかにすることができる. 角川ほか (2017) は, 水中モーションキャプチャと圧力分布計測を用い, 水中で手部を動かしたときに働く流体力の分析を行った. その結果, 手部の移動速度や移動方向, 手部平面の角度と手部に働く流体力との関係を検討することができたと報告している. しかしながら, 圧力分布計測に有線の圧力センサを用いたため, 泳者が前方に推進する通常の泳動作で試技を行うことができず, 立位にてクロールの上肢動作を模した動作を対象として分析を実施している. そのため, 水中モーションキャプチャと圧力分布計測を併用して実際の泳動作を対象とした分析はできておらず, 泳者が推進する通常の泳動作における流体力や推進力を明らかにできていない.

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, クロールの実泳中に泳者の手部に働く流体力や推進力を推定し, 泳速度との関係を明らかにすることを目的とした.

2. 方法

2.1 対象者

本研究には, 大学水泳部に所属する男子競泳選手 8 名 (年齢: 20.4 ± 1.3 , 身長: $1.75 \pm 0.06\text{m}$, 体重: $69.2 \pm 7.9\text{kg}$, 手部平面積: 0.0161m^2) が参加した. 対象者の長水路での競技会における 100 m 自由形自己最高記録は 52.9 秒から 55.0 秒 (53.6 ± 0.7 秒) であり, FINA ポイントは 620 ポイントから 697 ポイント (672.3 ± 25.1 ポイント) 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. 本研究は鹿屋体育大学研究倫理委員会の承認を得て実施された.

2.2 実施試技

実験は 50m 屋内プール (水深 2.0m, 水温 27.5°C) にて行った. 対象者はプールの側壁を蹴って泳ぎ始め, 可能な限り定常速度で 16m をクロールで泳ぐ試技を 10 回繰り返した. 対象者には, 10 回の試技を異なる泳速度で泳ぎ, 10 回目の試技は全力で泳ぐように指示した. なお, 各試技で泳速度が変化しているか確認するため, ストップウォッチを用いて 5.0m から 15.0m の 10.0m 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, 試技中はキック動作を行わないように指示し, プルブイを大腿部で挟んで試技を実施した.

2.3 水中モーションキャプチャ

試技中は, 対象者の左右の大転子および右手部 5 点に直径 19.0mm のモーションキャプチャ用反射マーカールを取り付けた. 反射マーカールの貼付位置は右第 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水中には 15 台のモーションキャプチャカメラ (Opus Underwater, Qualisys) を設置し, モーションキャプチャ用ソフトウェア (Track Manager, Qualisys) を用いてサンプリング周波数 200Hz にて泳者に貼付した反射マーカールを自動追尾した. 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 8.0–15.0m 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% 未満であることを確認した.

2.4 圧力分布計測

試技中は, 右手部 3 カ所の手背側と手掌側の計 6 点に防水加工を施した小型圧力センサ (PS05-KC, 共和電業) を貼付した. 圧力センサの貼付位置は, 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た. 反射マーカと圧力センサを取り付けた右手部を図 1 に示す. 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. 実験設定の概略図を図 2 に示す.

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同期した. また, 水中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, 遮断周波数 20 Hz で平滑化した.



図 1 反射マーカと圧力センサを貼付した右手部

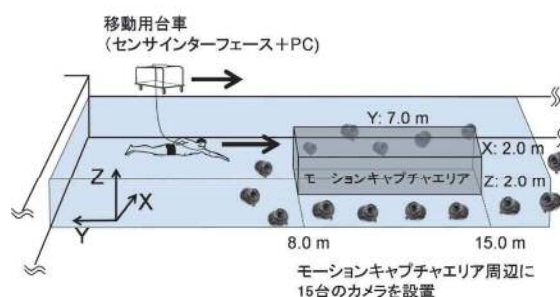


図 2 実験設定の概略図

2.5 データ分析

本研究では, モーションキャプチャの分析範囲内で行われた 1 周期の動作を分析の対象とし, 手部が入水して水中でストローク動作を行い, 水上に手部が出水するまでの動作を分析した. なお, 手部に取り付けた圧力センサや反射マーカが水上にある期間の分析をすることはできないため, 全ての圧力センサと反射マーカが水中にある局面を分析した.

右手部に働く流体力は, 先行研究 (Takagi and Wilson, 1999; Tsunokawa et al., 2015) の方法に従い, 手部の平面積に手掌側と手背側の圧力差を乗じて算出した. 手部の平面積は, 事前に撮影した手部の写真から画像分析ソフト (Image J, NIH) を用いて算出した. 手掌側と手背側の圧力差は, 各計測ポイントにおいて手掌側で計測された圧力値から手背側で計測された圧力値を差し引いて算出した. さらに, 水中モーションキャプチャで得た手部の座標から, 手部平面に対して垂直な法線

ベクトルを算出し, 算出した流体力を各方向成分 (X, Y, Z) に分解した. なお, 本研究では各方向成分に分解した流体力のうち, 推進方向である Y 軸方向に働く流体力を推進力とした. 右手部に働く流体力の概略図を図 3 に示す.

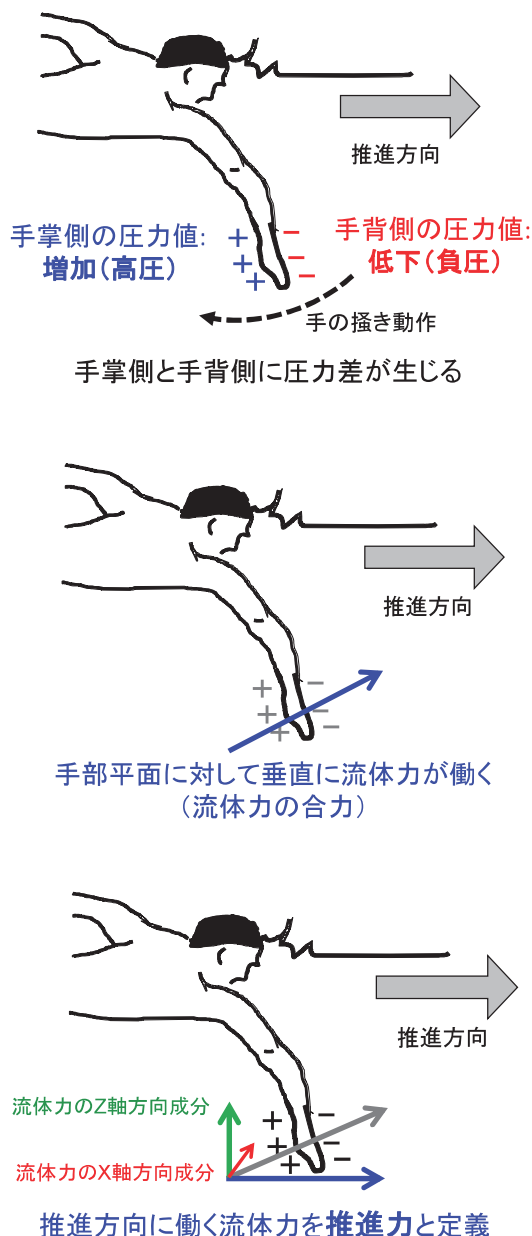


図 3 右手部に働く流体力と推進力の概略図

また, 水中モーションキャプチャを用いて算出した左右の大転子の座標から, 左右の大転子の中点の座標を算出し, 大転子の中点の推進方向 (Y 軸方向) への移動距離を所要時間で除することで 1 ストローク中の平均泳速度を算出した. なお,

平均泳速度は右第 3 指末節骨頭に取り付けた反射マーカーが入水してから水中でのストローク動作や水上でのリカバリー動作を行い, 再び入水するまでのストローク動作 1 周期における泳速度の平均値とした.

本研究では, 泳速度を変化させて行われた 10 回の試技における平均泳速度と平均推進力を算出し, 最小二乗法を用いてそれぞれの対象者における平均泳速度と平均推進力の関係を以下のように求めた. なお, 先行研究において泳動作中の抵抗力は泳速度のおよそ 2 乗に比例するという報告 (Van der Vaart et al., 1987; Toussaint et al., 1988) や, 3 乗から 4 乗に比例するという報告 (Narita et al., 2017) がなされているため, 本研究においても同様に指数関数を用いた.

$$F_p = A \cdot v^n$$

ここで F_p は平均推進力, v は平均泳速度, A (推進力係数) と n (推進力指数) はこの回帰式の比例定数である. A (推進力係数) は身体の大きさや形状の特徴を示し, 同じ身体の種類であれば身体が大きな泳者の方が高くなる. また, 同じ身体の種類であれば, 凹凸が小さく流線形に近い身体の種類の方が, A は低くなる. また, n (推進力指数) は泳速度の変化と推進力の関係を示しており, 泳速度が高くなると急激に推進力が大きくなるような場合は n が高い値を示し, 泳速度が高くなっても推進力が急激には大きくならない場合は n が低い値を示す.

3. 結果

表 1 に各対象者における推進力係数 (A) と推進力指数 (n), 全力泳とした 10 回目の試技における平均泳速度と流体力の合力の平均値, 推進力の平均値を示す. また, 図 4 に全ての対象者の 10 回の試技における平均泳速度と平均推進力の関係を示す. その結果, 推進力指数 (n) は対象者によってばらつきが見られたが, 全ての対象者において

泳速度が高くなるにつれて推進力が増加する傾向が見られた。推進力指数は2.1から3.6を示し、泳者の手部に働く推進力は泳速度のおよそ2乗から3乗に比例して増加した。

表1 各対象者における推進力係数と推進力指数、全力泳試技における泳速度と合力、推進力

対象者	A 推進力係数	n 推進力指数	全力泳試技		
			泳速度 (m/s)	合力 (N)	推進力 (N)
A	15.0	2.1	1.67	56.9	51.8
B	14.7	2.6	1.56	55.0	45.8
C	14.6	2.9	1.53	72.3	47.8
D	8.3	2.9	1.60	43.6	30.0
E	9.4	3.6	1.56	68.5	53.1
F	14.0	2.5	1.60	62.1	52.3
G	14.0	2.2	1.49	43.0	32.2
H	14.0	2.2	1.59	52.5	43.7
Mean	13.0	2.6	1.58	56.7	44.6
SD	2.6	0.5	0.06	10.6	9.0

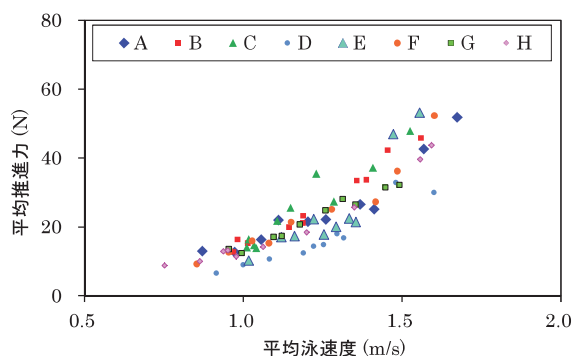


図4 全試技における平均泳速度と平均推進力の関係

図中のデータAからHは対象者によって色分けされており、各対象者が繰り返し実施した10試技における平均泳速度と平均推進力の関係を示している。

4. 考察

本研究では、水中モーションキャプチャと圧力分布計測を併用し、ヒトが実際に泳いでいる際の手部に働く流体力や推進力を分析した。これまで、手部模型の回転動作を対象とした研究や (Kauder and Dabnichki, 2005; Kudo et al., 2008)、泳動作を再現できるロボットアームを用いた研究 (Takagi et al., 2014) は報告されていたが、泳動作を完全には再現できていなかった。また、角川ほか (2017) は、本研究と同様に水中モーションキャプチャと圧力分布計測を併用した分析を実施したが、有線の圧力センサを用いたため、泳者が前方に推進せず、立位にて行った動作を対象とした。このように、泳動作に近い動作を対象とした

研究は報告されているが、実際の泳動作中にどのような流体力が手部に働いているかは明らかにされていなかった。それに対し、本研究では圧力測定機器一式を移動させるための台車を作成し、前方に推進する泳者の動きに合わせて移動させ、実際に泳いでいる際の計測を可能とした。その結果、手部に働く流体力の合力の平均値は 56.7 ± 10.6 N、手部に働く推進力の平均値は 44.6 ± 9.0 N を示した。ロボットアームを対象とした研究 (Takagi et al., 2014) では、手部模型に働く流体力は最大値で20 N程度と報告されており、泳者が立位にて行った動作を対象とした研究 (角川ほか, 2017) では、手部に働く流体力の合力の平均値は21.32 Nから28.26 Nと報告されていることから、本研究で得られた実際の泳動作中に働く流体力の合力や推進力の値が高いことがうかがえる。水中で身体を動かしたときに生じる流体力の大きさは、身体周りに生じる水の流れに影響されており、特に身体周りに非定常な速い流れが生じると大きな流体力が作用することとなる。ロボットアームを対象とした先行研究 (Takagi et al., 2014) では、モーターの出力制限により動作速度が遅かったことに加え、関節の自由度が実際のヒトよりも少なく、ヒトの泳動作を完全には再現できていなかった。このような動作の違いがロボットアーム周りに生じる水の流れに影響し、本研究と比べて流体力の値が小さくなったと考えられる。また、泳者が立位にて行った動作を対象とした研究 (角川ほか, 2017) では、泳者が前方に推進していない状況での動作であったことや、泳動作を模した単純な動作であったことが影響して身体周りに生じた水の流れが実際の泳動作とは異なり、流体力の値が小さくなったと考えられる。このように、泳動作中の手部周りに生じる非定常な流れやそれによって生じる流体力は、動作のわずかな違いに影響を受けるため、実際に泳いでいる際の計測が可能な方法は、正確な知見を得る上で有用であると考えられる。先行研究において、手部の移動方向の変化や加速度が、手部に働く流体力や

手部周りに生じる非定常流と関与することが報告されていることから (Kudo et al., 2013; Takagi et al., 2014), 実際の泳動作に近い動作を対象とした分析を実施することは, 泳動作の推進メカニズムを理解する上で重要と考えられる。

また, 推進力指数 (n) は 2.6 ± 0.5 を示し, 全ての泳者において泳速度が高くなるにつれて推進力が増加する傾向が見られた。これまで, 泳動作中の身体に働く抵抗力は泳速度の 2 乗に比例すると考えられてきたが, 本研究では従来の考えよりも高い指数を示した。近年ではクロール中の身体に働く抵抗力は泳速度の 3 乗に比例するという研究報告もされており (Narita et al., 2017), 本研究ではこれを支持する結果となった。抵抗力が泳速度の 2 乗に比例するという従来の考えは, 流体中の物体の形状が変化せず, 物体まわりに非定常な流れが生じない状況での理論に基づいているが, 実際の泳動作では動作によって身体のまわりに渦や波, 水しぶきといった非定常な流れが生じて造波抵抗の影響が大きくなるため, 推進力指数が 2 乗よりも高くなったと考えられる。

また, 推進力指数 (n) は泳者によってばらつきが見られ, 最も低い泳者が 2.1, 最も高い泳者は 3.6 を示した。このように泳者によってばらつきが大きくなった要因として, 本研究での測定方法では泳者の動きが制限されず, 実際の泳動作に近い状況で測定が行われることが考えられる。泳動作中の抵抗力を測定できる方法として長く利用されてきた Measuring Active Drag system (MAD システム, Van der Vaart et al., 1987; Toussaint et al., 1988) では, 水中に等間隔に設置された固定板を手で押しながら泳ぎ, 固定板を押す力を計測する。そのため, 泳速度を変化させてもストローク長や固定板を押す深さは変化せず, 泳中の姿勢や動きは大きく変化しないと推察される。それに対し, 本研究で用いた水中モーションキャプチャと圧力分布計測を用いた方法では, 泳者の手部に反射マーカーと圧力センサを貼付する他は泳動作が制限されず, 実際の泳動作に近い状況で測定が行われ

る。そのため, 推進力指数 (n) が高くなった泳者は, 高い泳速度において泳動作や姿勢が変化して身体が受ける抵抗力が増加し, それに打ち克つために必要な推進力が大きくなったと推察される。つまり, 推進力が大きくなったとしても, 身体が受ける抵抗力が同時に増加すれば泳速度は高まらず, 結果的に推進力指数 (n) が急増したと考えられる。

表 1 に示したように, 対象者 E は推進力指数 (n) が 8 名の中で最も高い 3.6 を示し, 全力泳試技における泳速度は 1.56 m/s と 8 名の対象者の平均値よりも低い値を示した。対象者 E の平均泳速度と平均推進力の関係を図 4 で確認すると, 泳速度が 1.50 m/s を超えると推進力が大幅に増加しており, 1.50 m/s 以上の泳速度では抵抗力の大きな泳動作に変化していると推察される。また, 対象者 A は推進力指数 (n) が 8 名の中で最も低い 2.1 を示し, 全力泳試技での泳速度は 8 名の対象者の中で最も高い 1.67 m/s を示した。対象者 A の平均泳速度と平均推進力の関係を図 4 で確認すると, 対象者 E と同様に 1.50 m/s を超えてから推進力が大幅に増加しているが, 同時に泳速度も高まっている。対象者 A と対象者 E を比較すると, 表 1 に示すように全力泳試技における推進力は対象者 A が 51.8 N, 対象者 E が 53.1 N と同程度の推進力を発揮しているが, 泳速度は対象者 A が 1.67 m/s, 対象者 E が 1.56 m/s と差が見られ, 対象者 A の方が同程度の推進力で高い泳速度を達成している。また, 図 4 に示したように, 対象者 E の全力泳試技での平均推進力は, 他の対象者の同程度の平均泳速度における平均推進力よりも高く, 対象者 E の身体に働く抵抗力が大きいことが推察される。このように, 本研究では泳速度と推進力の関係を分析することができたため, 推進力の大きさや全力泳試技での泳速度だけでなく, 推進力と泳速度の関係からそれぞれの泳者の特徴を明らかにすることができた。実際の競技場面においては, 泳者は泳ぐ距離によって泳速度を調整しており, それぞれの泳速度で異なる動作をしている。さら

に、それぞれの泳者の特性によって短距離が得意な選手や長距離が得意な選手、クロールが得意な選手や苦手な選手が存在し、全ての泳者の身体に働く抵抗力や発揮される推進力が泳速度の2乗に比例するとは考えられない。このようなことから、本研究で用いた方法では泳動作を制限せずに測定することができるため、それぞれの泳者の特性が測定結果に表れたと考えられる。

さらに、本研究では8名の泳者が10回の試技を行い、合計80試技における動作を分析対象とした。流体力の作用方向を決定して推進力を分析するには、手部に複数のマーカーを貼付して実座標を取得する必要があるが、従来の手動デジタイズによる画像分析では分析に多大な時間を要するため多くの試技を分析することはできなかった。それに対し、本研究では水中モーションキャプチャを利用したため、従来よりも多くの試技における動作を分析することができ、回帰式を求めて平均泳速度と平均推進力の関係を明らかにすることができた。水中モーションキャプチャでは水中に15台のモーションキャプチャカメラを設置するため、測定の準備には約1日を要するが、データ処理に要する時間が大幅に削減されたことで測定全体に要する時間が大幅に削減された。このようにデータ処理に要する時間が削減されたことは、これまで実施できなかった研究を実施できるようになるだけでなく、分析した流体力や動作に関するデータを選手や指導者に対して迅速にフィードバックすることに繋がると考えられ、今後の活用が期待される。

5. 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、クロールの実泳中に泳者の手部に働く流体力や推進力を推定し、泳速度との関係を明らかにすることを目的とした。得られた知見をまとめると以下ようになる。

1) 水中モーションキャプチャと圧力分布計測を併用し、クロールの実泳中に手場で発揮される

推進力を問題なく分析できることが確認された。

2) クロールの実泳中に手場で発揮される推進力は、ロボットアームや手部模型、立位姿勢でストローク動作を模倣した動作を対象とした先行研究よりも高い値を示した。

3) クロールの実泳中に手場で発揮される推進力は、泳速度の2乗から3乗に比例することが明らかとなった。

文献

- Berger, M.A.M. and Hollander, A.P. (1995) Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. *Journal of Biomechanics*, 28: 125-133.
- Formosa, D.P., Mason, B., and Burkett, B. (2011) The force-time profile of elite front crawl swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 29: 811-819.
- Hollander, A.P., de Groot, G., van Ingen Schenau, G.J., Toussaint, H.M., de Best, H., Peeters, W., Meulemans, A., and Schreurs, A.W. (1986) Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 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. *Journal of Biomechanics*, 25: 311-318.
- Kudo, S., Yanai, T., Wilson, B., Takagi, H., and Vennell, R. (2008) Prediction of fluid forces acting on a hand model in unsteady flow conditions. *Journal of Biomechanics*, 41: 1131-1136.
- Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakakibara, J., Shintani, H., and Ungerechts, B.E. (2009) Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming. *Journal of Biomechanics*, 42: 42-47.

- 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.
- Schleihauf, R.E., Gray, L., and de Rose, J. (1983) Three-dimensional analysis of hand propulsion in the sprint front crawl stroke. In: Hollander, A.P., Huijing, P.A., and de Groot, G. (Eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming III. Human Kinetics*, Champaign, Illinois, pp. 173-183.
- 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. Department of Biology of Physical Activity University of Jyväskylä*, Jyväskylä, pp. 101-106.
- Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., and Matsuuchi, K. (2014) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic arm and its flow field: Application to the crawl stroke. *Journal of Biomechanics*, 47: 1401-1408.
- Toussaint, H.M., de Groot G., Savelberg, H.H.C.M., Vervoorn, K., Hollander, A.P., and van Ingen Schenau, G.J. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *Journal of Biomechanics*, 21: 435-438.
- Tsunokawa, T., Nakashima, M., and Takagi, H. (2015) Use of pressure distribution analysis to estimate fluid forces around a foot during breaststroke kicking. *Sports Engineering*, 18: 149-156.
- 角川隆明・津野天兵・萬久博敏・萩田太・高木英樹 (2017) 水中モーションキャプチャと圧力分布計測を用いた手部に働く流体力の分析, *鹿屋体育大学学術研究紀要*, 55: 17 - 25.
- Xin-Feng, W., Lian-Ze, W., Wei-Xing, Y., De-Jian, L., Xiong, S. (2007) A new device for estimating active drag in swimming at maximal velocity. *Journal of Sports Sciences*, 25: 375-379.