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

角川 隆明 仙石 泰雄 椿本 昇三 高木 英樹

Takaaki Tsunokawa, Yasuo Sengoku, Shozo Tsubakimoto and Hideki Takagi: The relationship between the unsteady fluid force and the pressure distribution around the foot during breaststroke kicking. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 60: 165-175, June, 2015

Abstract : The purpose of this study was to identify the characteristics of the pressure distribution around the foot during breaststroke kicking and the relationship between the fluid force and the pressure distribution by comparison among different swimmers. Eight male elite swimmers, whose specialties were breaststroke and individual medley, participated in this study. In trials conducted in a water channel, swimmers performed breaststroke kicking for 10 seconds at individually controlled flow velocity determined in prior time trials without upper limb motion. During the trials, 8 pressure sensors were attached to the left foot to measure the pressure distribution around the foot, and the fluid forces were estimated using the procedure reported by Tsunokawa et al. (2012). To identify the relationship between the fluid force and the pressure distribution around the foot, raw pressure values and the pressure differences between the plantar side and the dorsal side were indicated. This revealed significant differences in the absolute values of pressure between the plantar and dorsal sides ($p < 0.01$), except for the area around the fifth toe. The dorsal side pressure for high-level swimmers decreased to about -25 kN/m^2 , and that for slightly low-level swimmers decreased to about -12 kN/m^2 . These results suggest that a decrease of dorsal side pressure is closely related to an increase in the fluid force acting on the foot, and that the kicking motions of high-level swimmers create a rapid decrease of dorsal side pressure. Furthermore, unsteady vortex-like flow is closely related to an increase in the fluid force acting on the foot. Therefore, swimmers and coaches should be aware of these influences of unsteady fluid forces.

Key words : swimming, drag, propulsive force, vortex

キーワード : 水泳, 抵抗, 推進力, 渦

1. 緒 言

平泳ぎは、競泳競技における他の3泳法と異なり、上肢動作よりもキック動作によって得られる推進力が大きく、泳者の身体が最も加速する局面はキック動作によって水を蹴り出す局面であることが報告されている (Cappaert et al., 1996 ; Maglischo et al., 1987 ; Persyn et al., 1992 ; Ungerechts, 1992). そのため、キック動作の改善は平泳ぎの泳パフォーマンス向上にとって最重要課題とされており、これまでに多くの水泳

指導書に動作改善の要点が記述されている (Maglischo, 1993 ; 宮下ほか, 1973 ; 杉原・林, 1982). しかしながら、先行研究や指導書では画像分析を用いたキネマティック分析による報告がなされているに過ぎず (Fritzdorf et al., 2009 ; Thompson et al., 2004), キック動作改善の指針となる流体力学的データは乏しい.

平泳ぎに限らず、水泳は水に対して運動量を与えることで推進力を得る一方、常に水から抵抗力を受けて移動する身体運動である. そのため、高い泳速度を達成するには水にうまく力を伝え、推進に用いる技術が重要となる (宮下, 1970). こ

これらのことから、水泳に関する研究では様々な方法によって泳者の身体に働く流体力を定量化し、泳技術を検討する試みがなされている (Formosa et al., 2011; Hollander et al., 1986; 市川ほか, 2009; Kolmogorov & Duplishcheva, 1992; Kudo et al., 2008; Schleihau et al., 1983; 清水ほか, 2000; Takagi and Wilson, 1999; Xin-Feng et al., 2007). Kudo et al. (2013) は、手部模型を用いて回流水槽内でクロールのストローク動作を模した動作を再現し、泳動作中の手部の加速度と作用する流体力との関連を明らかにしている. その結果、手部模型が加速する局面だけでなく、減速する局面においても推進方向に作用する流体力が非定常的に増加する現象が確認された. この現象は、キネマティックデータから準定常解析法を用いて推定した流体力とは異り、手部模型周りに生じた非定常な流れの影響であると結論付けている. 泳動作中に発生する非定常な流れを分析する研究として、粒子流速計測法 (Particle Image Velocimetry, 以下「PIV」と略す) を用いた泳者の身体周りに生じる水の流れの可視化 (Matsuuchi et al., 2009; Takagi et al., 2013, 2014) が進められている. これらの研究においては、泳動作によって身体周りには非定常な流れが発生して圧力差が生じ、流体力が急激に増大する現象を報告している. Takagi et al. (2014) は、泳動作の再現が可能なロボットを用いて実験を行い、ロボットがクロールのストローク動作を再現した際の手部模型周りの流れの可視化を行った. その結果、大きく分けて2つの流体力発揮メカニズム (カルマン渦発生による抗力の発生と、手部周りの循環渦の回転方向反転による揚力の発生) が確認され、手部周りに発生する非定常な流れが推進力発揮に関与していることが明らかとなった. 同様の現象は主に上肢動作によって推進力を発揮するバタフライや背泳ぎだけでなく、下肢動作によって大きな推進力を発揮する平泳ぎにおいても生じていると考えられることから、今後は他の泳法や身体部位における非定常流体力の発生メカニズムに関する分析が必要とされている. しかしながら、現時点のPIVを用いた研究

では $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 程度の限られた二次元平面における流れ場しか分析することはできず、ロボットのような高い動作の再現性が望めないヒトを対象として、1ストローク全般に渡る手部周りや平泳ぎキック動作中の足部周りの流れに関する研究は行われておらず、泳動作中の推進力発揮メカニズムの全容は未だ明らかにされていない.

このように、非定常な流体力発揮が注目される中、泳者の身体表面の圧力分布から流体力を推定する研究 (Kudo et al., 2008; 角川ほか, 2012; Takagi and Wilson, 1999) が進められている. 泳者の身体表面の圧力分布は、泳動作によって生じる非定常な渦の発生を反映するため、キネマティック分析や現時点でのPIV技術では明らかにできない非定常な流れの影響を考慮した泳動作の流体力学的な分析が可能である. Kudo et al. (2008) は、圧力センサを埋め込んだ手部模型を用いて、回流水槽内でクロールの動作を模した回転動作を行わせ、計測された圧力分布から手部模型に働く流体力を推定するための回帰式を導出した. その結果、ロードセルによって計測した流体力と圧力分布回帰式から推定した流体力との間の誤差は最大で20%以下であり、非定常な流れを考慮した流体力の推定が可能であると報告している. しかしながら、この方法では各圧力センサの水深を明らかにして静水圧の影響を考慮する必要がある. そこで角川ほか (2012) は、Takagi and Wilson (1999) が報告した手部での流体力推定法を足部に応用し、熟練した大学競泳選手を対象として足底と足背の圧力差から平泳ぎキック動作中の足部に働く流体力を推定した. これらの方法では、手掌と手背の圧力差や足底と足背の圧力差から流体力を推定するため、画像分析によって各圧力センサの位置を明らかにして静水圧を考慮する必要が無く、推定した流体力データを泳者や指導者に即座にフィードバックすることが可能である. その結果、推定した流体力と試合での100 m平泳ぎの泳速度との間に有意な相関関係が認められ ($r = 0.63 - 0.78$, $p < 0.05$), キネマティック分析では差を

明らかにすることができないような僅かな動作の違いにより生じた流体力の差を定量的に評価できたと報告している。しかしながら、この研究では流体力推定の方法論確立や、泳パフォーマンスとの関連を明らかにすることを主眼としており、足部周りに生じる非定常な水の流れや、それに伴う圧力分布の変動には着目していない。

身体周りの圧力分布は水の流れや渦の状態を反映して変動するため、PIVでは分析が困難とされる広範囲でかつ三次元的動作である平泳ぎのキック動作が対象であっても、圧力分布の変動から非定常な流れの様相を推察することができる。さらに、圧力分布の計測は圧力センサを装着する以外に泳動作を妨げず、力を計測するためのケーブルを接続する必要などがないため、高い泳技能を有する泳者の泳動作を妨げずに分析でき、その特徴を明らかにできると考えられる。

そこで本研究では、泳技能の異なる泳者を対象として平泳ぎキック動作中の足部周りの圧力分布と流体力の分析を行い、足部周りの圧力分布の特徴や流体力との関係を明らかにすることを目的とした。本研究により、従来の準定常理論に基づく流体力発揮メカニズムとは異なる新たな知見が得られることが期待される。

2. 方 法

2.1 対象者

大学水泳部に所属する男子競泳選手8名が本研究に参加した。対象者の競技レベルは、平泳ぎもしくは個人メドレーにて日本選手権の出場資格を有する選手であり、日本選手権で上位入賞経験のある選手6名も含まれていた。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。本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て実施された。

2.2 実験設定

実験は、側面に観察用窓を有するT大学実験用回流水槽(五十嵐工業、長さ5.0 m、幅2.0 m、水深1.2 m、水温26.0度)にて行った。対象者に

は、下肢動作のみを評価するためにビート板を持たせ、対象者別に設定された泳速度で10秒間できる限り同じ場所に留まるように平泳ぎのキック動作を行うよう指示した。回流水槽の流速は、実験に先立って行われた50 m平泳ぎキック泳の泳タイムから決定した。タイム計測は50 m室内プール(最浅部水深1.3 m、最深部水深3.8 m、水温28.5度)にて行い、対象者はビート板を持った状態でプッシュオフスタートからの50 m平泳ぎキック全力泳を行った。タイム計測は3名の検者がストップウォッチを用いて手動で行い、3名の計測結果の平均値を泳タイムとした。計測された泳タイムから、50 m平泳ぎキック泳の平均泳速度を算出し、算出された平均泳速度を回流水槽の流速とした。各対象者の試技流速を対象者の年齢、身長、体重、専門種目、100 m平泳ぎ自己最高記録、100 m平泳ぎのFina Pointとともに表1に示す。なお、Fina Pointは短水路や長水路といった試合環境の違いや、男女差、種目差を超えて泳記録を比較するために国際水泳連盟が定めた指標であり、各種目の世界記録をもとに算出される。具体的には、 $1000 \times (\text{基準記録} / \text{計算する記録})^3$ によって計算され、基準記録と同記録である場合は1000となる。基準記録は最新の世界記録をもとに国際水泳連盟が決定している。

回流水槽で行った試技では、角川ほか(2012)やTsunokawa et al.(2014)が報告した足部の流体力推定法を用いて試技中の左足部に働く流体力を推定した。本研究で用いた流体力の推定法では、大学競泳選手を対象とした実験において推定した流体力と泳パフォーマンスとの間に高い相関関係が認められており(角川ほか, 2012)、ロボットを使用した検証実験によって再現性や妥当性が確認されている(Tsunokawa et al., 2014)。よって、本研究で用いた方法論の再現性や妥当性は確認済みである。

試技中は、足部6点を基点として規定される4平面の足背側と足底側に1つずつ、計4対8個の圧力センサ(PS05-KC, 共和電業)を装着した。圧力センサの装着ポイントは、第1中足骨頭、第3中足骨頭、第5中足骨頭、中足趾節関

表1 対象者の身体特性と自己最高記録, Fina Point, 試技流速

対象者	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	専門種目	100 m 平泳ぎ 自己最高記録 (分・秒)	100 m 平泳ぎ Fina Point	試技流速 (m/s)
B1	20	174.5	63.5	平泳ぎ	1'02"1	833	1.37
B2	21	181.0	79.0	平泳ぎ	1'01"4	862	1.22
B3	24	183.5	80.5	平泳ぎ	1'01"7	849	1.23
B4	19	179.5	71.0	平泳ぎ	1'02"5	818	1.25
B5	19	169.0	59.5	平泳ぎ	1'04"1	759	1.21
I1	22	179.0	70.0	個人メドレー	1'03"1	795	1.22
I2	20	170.0	63.0	個人メドレー	1'07"1	664	1.16
I3	21	170.0	62.0	個人メドレー	1'05"5	711	1.13
平均	20.8	175.8	68.6		1'05"2	786.4	1.22
標準偏差	1.7	5.7	7.9		2"0	70.0	0.07

図1 足部を規定する4平面と圧力センサ装着位置

節頭とし、それぞれ足底側を p1, p2, p3, p4, 足背側を d1, d2, d3, d4 とした. 図1に足部を規定する4平面と圧力センサの装着ポイントを示す. 圧力センサが出力した信号はセンサインターフェース (PCD330B-F, 共和電業) を経由し, サンプリング周波数 200 Hz で PC に記録した. 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 0.1 m から 1.1 m まで 0.1 m 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値の誤差は $1.0 \pm 0.4\%$ であった. 計測した圧力データは, Butterworth 型の Low-pass デジタルフィルタを用い, 遮断周波数 30 Hz で平滑化を行った. キック動作によって生じる動圧は, 足底側の圧力値から足背側の圧力値を差し引くことで算出し, 算出した圧力差は各平面を代表する圧力差とした. 圧力差を算出する際は, 足部の形状や

傾きを考慮するため, 対をなす圧力センサ間の角度 (θ) を事前に計測し, 三角関数を用いて足底面に対して垂直となる成分を求めた. 算出した圧力差に各平面の面積を乗じることで各平面に働く流体力を算出し, 4平面に働く流体力を全て足し合わせることで足部全体に働く流体力 (以下「 F_{foot} 」と略す) を算出した. また, 泳者の左側面の観察用窓に1台のビデオカメラ (Bcam, DKH) を設置し, 露光時間 1/500秒, サンプリング周波数 100 Hz で泳動作を撮影し, 映像を PC に記録した. 撮影した画像と圧力データとの同期は, デジタルビデオカメラに付属する同期装置 (PH-1461A, DKH) が出力した電気信号をセンサインターフェースに取り込み, 圧力データの集録開始トリガとすることで図った. 撮影した映像から, Seifert and Chollet (2005) の方法を用い, 平泳ぎのキック動作1周期を脚伸展期, イ

図2 実験設定の概略図

ンスイープ期，グライド期，脚屈曲期の4期に分けた．なお，本研究では回流水槽の流速を対象者の全力泳時の泳速度に設定したため，流れによる振動を避けることができず，回流水槽内にビデオカメラを設置して動作を撮影することができなかった．そのため，三次元動作分析によって推定した流体力の作用方向を明らかにすることはできず，流体力の合力のみを示すこととした．図2に実験設定の概略図を示す．

2.3 測定項目

本研究では，平泳ぎキック動作中の足部に働く流体力と足部表面の圧力分布との関係を明らかにするため，足底 (p1, p2, p3, p4) と足背 (d1, d2, d3, d4) の計8箇所で計測された圧力値，足部の4平面それぞれで対応する足底と足背の圧力差 ($p_i - \cos \theta d_i$, $i=1-4$)，そして F_{foot} を次の式(1)によって算出した．

$$F_{\text{foot}} = \sum_{i=1}^4 (p_i - \cos \theta d_i) S_i \quad (1)$$

なお，各対象者は10秒間の試技中に7回から10回のキック動作を行っていたが，流体力の最大値と平均値の周期間での級内相関係数はともに0.98

($p < 0.01$) であり，ほぼ同様のキック動作が繰り返されていたことが確認された．そのため，本研究では繰り返し行われたキック動作のうちの1周期分を分析対象とした．足部表面の圧力分布や各計測ポイントでの圧力差，推定した流体力に関する各変数は，それぞれ1周期中の変動，ピーク値，平均値として示した．なお，足底で水を蹴り出す平泳ぎキック動作の場合は，足底の圧力値が高まり，足背の圧力値が低下するときに圧力差が増大するため，足底の圧力値は最大値，足背の圧力値は最小値をピーク値とした．

2.4 統計処理

F_{foot} と泳速度の関係を検討するため，Pearsonの方法を用いて F_{foot} と100 m 平泳ぎ自己最高記録および試技流速の間の相関係数 (r) を求めた．また，足底と足背のどちらが流体力に大きな影響を与えているかを検討するため，対にして計測した足底側の圧力値と足背側の圧力値の差を対応のないt検定を用いて比較した．なお，足底の圧力値がより高い値，足背の圧力値がより低い値となるときに足底と足背の圧力差が増大するため，各計測ポイントにおける圧力の絶対値を用いて比較した．なお，本研究の統計処理では SPSS19.0 を

用い、有意水準はいずれも危険率 5%未満とした。

3. 結 果

3.1 推定した流体力と圧力差、圧力分布

F_{foot} の最大値と 1 周期中の平均値、各計測ポイントでの圧力差の最大値と 1 周期中の平均値、各計測ポイントでの圧力値のピーク値と平均値の対象者 8 名の平均値と標準偏差を表 2 に示す。各計測ポイントでの圧力値は、ピーク値については全て足底側が正の値、足背側が負の値を示し、平均値についてもほぼ同様の傾向であったが、第 5 趾周辺の足底側である p3 のみ正の値ではなく負の値を示した。

3.2 推定した流体力と自己最高記録、試技流速の関係

相関分析の結果、 F_{foot} の平均値と試技流速との間 ($r=0.87$, $p<0.01$) および、100 m 平泳ぎ自己最高記録との間 ($r=-0.73$, $p<0.05$) に有意な相関関係が認められた。さらに、 F_{foot} の最大値と 100 m 平泳ぎ自己最高記録との間 ($r=-0.81$, $p<0.05$) に有意な相関関係が認められた。しかし、 F_{foot} の最大値と試技流速との間 (r

$=0.39$, $p>0.05$) には相関関係は認められなかった。

3.3 足底と足背の圧力値

足底と足背の圧力値のどちら側が流体力増大に大きな影響を与えているか検討するため、各計測ポイントの足底と足背の圧力の絶対値を対応のない t 検定を用いて比較した。図 3 に各計測ポイントにおける圧力値の絶対値のピーク値と平均値を示す。その結果、圧力値のピーク値については 4 箇所全てにおいて足背の圧力値の絶対値が足底の圧力値の絶対値と比較して大きな値を示した ($p<0.01$)。さらに、圧力値の平均値については、第 5 趾周辺である p3 と d3 を除き、足背の圧力値の絶対値が足底の圧力値の絶対値と比較して大きな値を示した。

3.4 F_{foot} と圧力値の周期中の変動

本研究に参加した 8 名の対象者の F_{foot} や圧力値の周期中の変動は、大きく 3 つのパターンを示した。図 4 にそれぞれのパターンの典型例として、B1, B2, I2 の結果を示す。1 つの目のパターンは、試技流速と F_{foot} の周期中の平均値が最も高い B1 のみが示したパターンであり、周期中に F_{foot} が 2 度のピーク値を示す二峰性の変動であった。2 つ目のパターンは、B2, B3, B4, B5, I1 の 5 名が示したパターンであり、周期中に F_{foot} が 1 度のピーク値を示すものであった。2 つ目のパターンの典型例としては、100 m 平泳ぎの自己最高記録が最も速く、 F_{foot} の最大値が最も高い B2 の結果を示した。そして 3 つ目のパターンは、I2 と I3 の 2 名が示したパターンであり、 F_{foot} が他の 2 パターンのように著しく増加して鋭いピーク値を示さないものであった。3 つ目のパターンの典型例としては、100 m 平泳ぎの自己最高記録が最も遅く、 F_{foot} の周期中の平均値と最大値が最も低い I2 の結果を示した。 F_{foot} の周期中の平均値は、B1 が 35.5 N, B2 が 31.7 N, I2 が 23.4 N であり、 F_{foot} の最大値は、B1 が 251.6 N, B2 が 363.0 N, I2 が 177.8 N であった。

圧力値に関しては、各計測ポイントにおける足

表 2 F_{foot} と各計測ポイントでの圧力差、圧力値

	unit	ピーク値 (n=8)		平均値 (n=8)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
F_{foot}	N	245.6	26.6	63.9	6.4
圧力差 p1-d1	kN/m ²	19.6	6.5	5.3	2.4
圧力差 p2-d2	kN/m ²	16.7	3.2	5.0	0.8
圧力差 p3-d3	kN/m ²	7.9	2.8	1.6	1.7
圧力差 p3-d4	kN/m ²	15.3	4.7	4.6	2.3
圧力 p1	kN/m ²	4.9	0.7	0.7	0.4
圧力 p2	kN/m ²	5.1	1.2	0.7	0.4
圧力 p3	kN/m ²	2.7	1.9	-1.8	1.3
圧力 p4	kN/m ²	3.4	0.9	0.9	0.9
圧力 d1	kN/m ²	-16.6	7.7	-2.6	1.3
圧力 d2	kN/m ²	-13.8	3.9	-2.3	0.9
圧力 d3	kN/m ²	-9.3	2.9	-1.9	1.0
圧力 d4	kN/m ²	-17.6	5.9	-2.5	1.4

図3 各計測ポイントでの足底と足背の圧力値の絶対値

底と足背の圧力値の変動をそれぞれ示した。本研究で用いた方法では、対にして計測した圧力値の差に足部を規定する各平面の面積を乗じることで流体力を算出したため、グレーで着色した足底と足背の圧力差が大きくなるほど流体力が増大することとなる。3パターンともに、足底と足背の圧力差は脚伸展期からインスweep期にかけて増大する傾向が見られたが、圧力差がピーク値を示すタイミングや大きさはパターン間や計測ポイント間で違いが見られた。

4. 考 察

4.1 足底と足背の圧力値

本研究にて推定した足部に働く流体力と泳速度との間に有意な相関関係が認められたことや ($r=0.87$, $p<0.01$), 先行研究にて泳者が発揮し

た流体力と泳パフォーマンスとの間に有意な相関関係が認められていることから (Takagi and Wilson, 1999; 角川ほか, 2012), 泳者が発揮する流体力を増大させることは泳速度や泳パフォーマンスの向上に大きく関与していると言える。しかしながら, F_{foot} の最大値と試技流速との間に有意な相関関係は認められなかった。これは、より大きな流体力を短期間発揮することのみが泳速度を高めるのではなく、より大きな流体力を継続して発揮し、力積や平均値が高まることで泳速度が高まることを示している。平泳ぎのキック動作の場合、足底の圧力値が高まるか、足背の圧力値が低下することで圧力差が増大し、足部に働く流体力が増大する。本研究において、足底と足背の圧力値の絶対値を比較すると、どの計測ポイントにおいても足背の絶対値が足底の絶対値と比較して有意に大きな値を示した。また、図4の典型

図4 圧力値と流体力の変動

例に示すように足背側の圧力値が大きく負圧となるとときに圧力差が増大して流体力がピーク値を示しており、足背の圧力値の低下が流体力の増大に強く関与していることが明らかとなった。この結果は、キック動作に伴い足底で水を押したとき、押されて移動した水の塊の運動量（水の塊の質量×速度）の反作用としての力が足底に働き、これが推進力となるという従来の解釈では説明できない。なぜなら、反作用により足底の圧力が上昇することは必然だが、足背側の圧力が大きく低下する理由が説明できないからである。

PIVを用いた研究では、クロールやスカーリング中の手部周りに生じる渦を伴った非定常な流れは、手部の手背側に生じることが確認されており（Takagi et al., 2013）、その発生機序は大きく2つに分けられることが報告されている。1つ

は、大きな手部の迎角を保って直線的に移動させたときに手背側に発生するカルマン渦、もう1つは手部を翼として考えた際に、手部の移動方向の変化に伴って流入角が親指側から小指側に変化したときに発生する、手部周りの循環渦の反転である。どちらの場合においても、手背側に生じる非定常な流れは手部での流体力発揮に関与しており、これらの流れをうまく利用することがより速く泳ぐ上では重要である。本研究では、平泳ぎキックの動作においても手部と同様に足背側の圧力値が低下することが初めて確認され、キック動作による流体力発揮に関与していることが推察された。PIVによる流れの可視化は実施していないため、どのような機序によって足背側の圧力値が低下したかを明らかにすることはできないが、大きな流体力を発揮した対象者の動作では足背側で

の圧力の低下を推進にうまく利用していたと推察される。今後、PIVの技術的課題を解決し、非定常な流れと動作の関係やその発生機序を明らかにすることができれば、平泳ぎのキック動作中に働く流体力を増大させるための示唆が得られると考えられる。それに対し、これまでの指導書や指導場面において非定常な流れは考慮されておらず、準定常理論に基づいてキック動作について論じられてきた。準定常理論では、流体力の大きさは、流れに対する物体の断面積に比例し、相対速度の二乗に比例するとされるため、平泳ぎのキック動作においては、断面積を増加させるための足部の向きや蹴り出す方向の調整、足部の移動速度が重要とされることとなる。それに対し非定常理論では、水中で身体を回転運動させること(Toussaint et al., 2002)や、身体が加速度を伴って水中を移動すること(Kudo et al., 2013)で、身体周りに非定常な流れが発生して流体力が増大することが報告されており、足部の回転運動や加速度についても着目すべきであると考えられる。

4.2 泳者間の比較

本研究では、平泳ぎもしくは個人メドレーにて日本選手権の出場資格を有する大学競泳選手を対象とし、全ての対象者が一定程度以上の泳技能を有していたが、その中でも試技中の F_{foot} や足部表面の圧力分布には違いが見られた。特に、1つ目と2つ目のパターンの典型例として示したB1とB2は、ともに平泳ぎにて日本選手権の上位入賞経験を有する泳者であり、平泳ぎの泳技能差は小さいと考えられるが、 F_{foot} や圧力分布の変動パターンは異なっていた。B1の F_{foot} は、脚伸展期に1度251.6 Nのピーク値を示した後、再び小さなピーク値を示す二峰性の変動を示したのに対し、B2は脚伸展期に363.0 Nのピーク値を示し、その後は徐々に値が低下する変動を示した。同様に、周期中の圧力値の変動にも違いが見られ、B1は脚伸展期に圧力差が増大した後、脚伸展期の終盤からインスweep期の前半に再び圧力差がわずかに増大したのに対し、B2はB1と比較すると常に大きな圧力差が生じていた。これらのこ

とから、高い泳技能を有する泳者間であっても、圧力分布や流体力には違いがあり、各泳者が独自の技術で高い流体力を発揮していることが確認された。そのような中で、足背側の圧力値の低下が流体力発揮に大きく寄与している点は共通しており、足底側の圧力値の増加よりも足背側の圧力値が大きく低下する局面において圧力差が増大し、流体力がピーク値を示した。特に、高い競技力を有するB1やB2と、競技力がやや低いI2とを比較すると、B1やB2の方が足背側の圧力値の低下が顕著であり、足背の圧力低下が流体力発揮に大きく関与していると推察される。

本研究の対象者の中では、平泳ぎの泳技能が比較的低く、3つ目のパターンの典型例として示したI2の F_{foot} や圧力分布は、泳技能の高いB1やB2とは異なっていた。 F_{foot} については、周期中の平均値や最大値が低いだけでなく、B1やB2の F_{foot} の変動と比較して値の変動が緩やかであり、はっきりとしたピークを示さなかった。また、足底側の圧力値の変動や値の大きさは、B1やB2と比較して差が見られないのに対し、足背側の圧力値がB1やB2と同様に負圧となったのはd4のみであり、より遠位で移動速度が高くなる足部先端ではほぼ負圧とならなかった。これらのことから、I2のキック動作では足部先端にて足背の圧力低下が生じなかったことが、流体力が大きくならなかった要因として推察される。

Toussaint et al. (2002)は、クロールのストローク動作中の上肢の圧力分布を計測し、タフトを用いて上肢周りの流れを可視化した研究において、肩関節を中心として上肢を回転運動させることで速度勾配による非定常な流れが生じ、先端で遠位となる手部での圧力差が増大すると報告している。さらに、下肢においても同様の現象が生じることを示唆しており、平泳ぎのキック動作においても下肢を回転運動させることで遠位となる足部の圧力差が増大すると考えられる。I2のキック動作では、d4が負圧となったにも関わらず足部先端で圧力差が増大しなかったことから、下肢の回転運動をうまく利用できなかった可能性が考えられる。平泳ぎのキック動作において下肢を回

転運動させるには、股関節、膝関節、足関節の動作をうまく組み合わせる必要がある点で技術的難度は高いが、足背の圧力を低下させて足部での流体力を増大させるには習得すべき動作であると言える。また、これらの動作によって生じる下肢周りの非定常な流れの様相は、Toussaint et al. (2002) が行ったタフトを用いた実験を下肢に应用することである程度明らかにすることができる。よって、これらの方法論と合わせて流体力を分析することで、足部だけでなく、足部の側面や下腿、大腿周りの流れと圧力分布や流体力の関係についても分析できると考えられる。

4.3 今後の課題

本研究では実験設定上の制限からキック動作を三次元分析することはできなかった。今後、水中でのカメラ設置についての課題を解決し、三次元動作分析と圧力分布の計測を同時に実施することが可能となれば、足部に働く流体力と動作の関係やその発生機序についての示唆が得られると考えられる。

また、本研究では角川ほか (2012) や Tsunokawa et al. (2014) が報告した平泳ぎキック動作中の足部に働く流体力推定法を用いて流体力を推定した。この方法論では、平泳ぎのキック動作での推進力発揮に貢献すると考えられる足部の側面や下腿に働く流体力は推定できず、キック動作によって働く流体力を過小評価している可能性がある。しかしながら、現時点で平泳ぎのキック動作によって生じる流体力を推定でき、実際のヒトを対象とした研究やロボットを用いた研究により、推定値の妥当性が検証されている方法論は他に見当たらない。今後、さらなる方法論の改善によって流体力を推定する範囲を拡大させられれば、より正確にキック動作による推進力を定量化できると考えられる。

5. 結 論

本研究では、泳技能の異なる泳者を対象として平泳ぎキック動作中の足部周りの圧力分布と流体

力の分析を行い、足部に働く流体力と圧力分布の関係や、流体力が増大する際の圧力分布の特徴を明らかにすることを目的とした。足部表面の圧力分布は8箇所で計測し、得られた圧力値から流体力を推定した。得られた知見をまとめると、以下ようになる。

①平泳ぎのキック動作では、足背の圧力低下によって足部に働く流体力が増大しており、足部周りに生じる非定常な流れが関与していることが示唆された。

②技能差の小さな泳者間であっても、足部に働く流体力や足部表面の圧力値の変動には差異が見られた。さらに、泳技能の低い泳者のキック動作では、足背の圧力低下が小さいことが明らかとなった。

文 献

- Cappaert, J. M., Pease, D. L., and Troup, J. P. (1996) Biomechanical highlight of world champion and olympic swimmers. In: Troup, J. P., Hollander, A. P., Strasse, D., Trappe, S. W., Cappaert, J. M., and Trappe, T. A. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VII*. E & FN Spon, pp. 76-80.
- 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.
- Fritzdorf, S. G., Hibbs, A., and Kleshnev, V. (2009) Analysis of speed, stroke rate, and stroke distance for world-class breaststroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 27 (4): 373-378.
- 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. *Journal of Sports Science*, 4(1): 21-30.
- 市川 浩・三輪飛寛・武田 剛・高木英樹・椿本昇三 (2009) 圧力計測と画像分析から推定したクロール泳1ストローク中の抵抗力推移. 日本水泳・水中運動学会2009年次大会論文集: 44-46.
- 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., Barry, Wilson., Takagi, H., and Ross, V. (2008) Prediction of fluid forces acting on a hand model in unsteady flow conditions. *Journal of Biomechanics*, 41: 1131–1136.
- Kudo, S., Vennell, S., and Wilson, B. (2013) The effect of unsteady flow due to acceleration on hydrodynamic forces acting on the hand in swimming. *Journal of Biomechanics*, 46: 1697–1704.
- Maglischo, C. W., Maglischo, E. W., and Santos, T. R. (1987) The relationship between the forward velocity of the center of gravity and forward velocity of the hip in the four competitive strokes. *Journal of Swimming Research*, 3(2): 11–17.
- Maglischo, E. W. (1993) *Swimming even faster*. Mayfield Publishing Company, pp. 491–543.
- 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.
- 宮下充正 (1970) 水泳技術と筋力. 水泳の科学. 杏林書院, pp. 5–25.
- 宮下充正・波多野勲・林 裕三 (1973) 競泳のコーチング. 大修館書店, pp. 221–234.
- Persyn, U., Colman, V., and Tilborgh, L. V. (1992) Movement analysis of the flat and the undulating breaststroke pattern. In: Maclaren, D., Reilly, T., and Lee, A. (eds.) *Swimming Science VI*. E & FN Spon, pp. 75–80.
- 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.
- Seifert, L. and Chollet, D. (2005) A new index of flat breaststroke propulsion; A comparison of elite men and women. *Journal of Sports Sciences*, 23: 309–320.
- 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(644): 166–173.
- 杉原潤之輔・林 利八 (1982) 小学校の水泳. 泰流社, pp. 44–65.
- 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.
- Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., and Matsuuchi, K. (2013) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic hand and its flow field. *Journal of Biomechanics*, 46: 1825–1832.
- 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.
- Thompson, K. G., Donald, P. M. Maclaren., Adrian, Lees., and Greg, Atkinson. (2004) The effects of changing pace on metabolism and stroke characteristics during high-speed breaststroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 22: 149–157.
- Toussaint, H. M., van den Berg, C., and Beek, W. J. (2002) “Pumped-up propulsion” during front crawl swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(2): 314–319.
- 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., Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsubakimoto, S., and Takagi, H. (2014) A new method to evaluate breaststroke kicking technique using a pressure distribution analysis. In: Mason, B., Barnes, D., Jukes, D., and Vlahovich, N. (eds.) *Proceedings of the XII International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*. Australian Institute of Sport, pp. 263–269.
- Ungerechts, B. E. (1992) The interrelation of hydrodynamic forces and swimming speed in breaststroke. In: Maclaren, D., Reilly, T., and Lee, A. (eds.) *Swimming Science VI*. E & FN Spon, pp. 69–73.
- 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. *Journal of Sports Sciences*, 25: 375–379.

(平成26年11月11日受付)
(平成27年2月5日受理)