

# 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

角川隆明<sup>1</sup>, 津野天兵<sup>2</sup>, 萬久博敏<sup>1</sup>, 荻田 太<sup>3</sup>, 高木英樹<sup>4</sup>

## Use of underwater motion capture system and pressure distribution measurement to analyze the fluid forces acting on a hand

Takaaki TSUNOKAWA<sup>1</sup>, Tempei TSUNO<sup>2</sup>, Hirotooshi MANKYU<sup>1</sup>, Futoshi OGITA<sup>3</sup>, Hideki TAKAGI<sup>4</sup>

### abstract

The purpose of this study was to clarify possibilities and problems of the method that could analyze the kinematics, pressure distribution, and fluid forces during swimming by using a motion capture system and pressure distribution measurement. One male swimmer participated in this study. A participant imitated the front crawl upper limb stroke motion at standing position with changing the stroke patterns and the stroke speeds. During trials, six pressure sensors were attached at a swimmer's right hand to measure the pressure distributions around the hand, and to estimate the fluid forces acting on the hand. The pressure data collected from the pressure sensors were processed via sensor interface which synchronized to the motion capture system, and these data were sampling at 100 Hz. Fluid forces acting on the right hand were calculated by taking the product of measured pressure values and area of hand. And five reflecting markers were attached at the right hand to analyze the hand kinematics by using the motion capture system. The sampling rate of the motion capture system was set at 100 Hz. As results, hand velocity, hand acceleration, attack angle, and pitch angle during the imitated stroke motions could be analyzed automatically by using the motion capture, and could assess the relationship between the pressure distribution and the fluid forces. The hand velocities significantly correlated with the pressure values and the fluid forces ( $r = 0.76 - 0.99$ ,  $p < 0.05$ ). And the hand acceleration significantly correlated with the pressure valued at dorsal side ( $r = -0.74 - -0.76$ ,  $p < 0.05$ ). However, the relationship between the hand kinematics and the unsteady flow could not be analyzed because the fluctuations of the hand kinematics, the pressure distribution, and the fluid force did not synchronize. From these results it was expected that this methodology would be applied to actual swimming motions.

**Keywords:** Swimming, Unsteady hydrodynamic force, Acceleration, front crawl

### 要約

本研究は、泳動作モーションキャプチャと圧力分布計測を用い、手部のキネマティクスと圧力分布、流体力を同時に計測できるシステムの構築を目指し、その可能性と課題を明らかにすることを目的とした。本研究では、1名の男子大学競泳選手を対象とした。対象者は、動作速度と動作パターンを変化させながら立位姿勢にてクロールの上肢動作を模擬した動作を行った。試技中は、対象者の右手部6点に圧力センサを貼付し、手部表面の圧力分布を計測して手部に働く流体力を推定した。圧力データは、モーションキャプチャシステムと同期したセンサインターフェースを経由し、サンプリング周波数100Hzで集録された。手部に働く流体力は、手部平面積に圧力分布を乗じることで算出した。さらに、モーションキャプチャ

<sup>1</sup> 鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

<sup>2</sup> 鹿屋体育大学体育学研究科

<sup>3</sup> 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

<sup>4</sup> 筑波大学体育系

システムを用いて手部のキネマティクスを分析するため、右手部5点には反射マーカーを貼付した。モーションキャプチャシステムのサンプリング周波数は100 Hzに設定した。その結果、モーションキャプチャシステムを用い、クロールの上肢動作を模擬した動作中の手部速度、手部加速度、手部迎角、手部ピッチ角を自動で分析することができ、手部表面の圧力分布や流体力との関係を検討することができた。手部速度と手部表面の圧力分布や流体力との間には有意な相関関係が認められた ( $r = 0.76 - 0.99, p < 0.05$ )。また、手部加速度と手背側の圧力値との間に有意な相関関係が認められた ( $r = -0.74 - -0.76, p < 0.05$ )。しかしながら、手部のキネマティクスの変動と、圧力分布や流体力の周期中の変動は完全には一致せず、手部周りに生じる非定常な流れとの関係を分析することができなかつた。今後は、本研究で用いた方法論を実際の泳動作に応用することが期待される。

キーワード：水泳, 非定常流体力, 加速度, クロール

## 1. 緒言

泳動作中の身体に働く流体力は、泳速度を決定する重要な要因である。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く、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、手部周りには非定常な流れや渦による短時間で不規則に変動する非定常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、かなりの誤差が生じると報告されている (Berger et al., 1999; Pai and Hay, 1988)。Pai and Hay (1988) は、加速度や渦の影響を無視した場合に、最大で抗力を4倍程度過小評価すると報告し、Berger et al. (1999) は準定常解析法を用いて推定された推進力はMADシステム (Measuring Active Drag System) を用いて計測された力より17%低いと報告している。

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の流体力や流れ場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)。Kudo et al. (2008) は、流れの非定常性を考慮しながら流体力を推定する方法として、手部表面の圧力分布計測を用いた方法を提案した。さらにKudo et al. (2013) は手部模型を用いた研究において、加速度と流体力が密接に関与することや、手部模型が減速する局面においても流体力が增大する現象が見られたことを報告した。またTakagi et al. (2014) は、クロールのストローク動作を模したロボットアームの動作を対象として、圧力分布計測と粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, 以下PIVと略す) による流れ場の分析を行った。その結果、手部模型の加速度や移動方向といったキネマティクスの変化が手部周りの非定常流発生に大きく関与し、水の掻き方が異なると流体力の発揮メカニズムも異なることが明らかとなった。

しかしながら、これまでの研究では実験設定上の制限により、模型やロボットを用いた分析に留まっていた。Lauder and Dabnichki (2005) やKudo et al. (2008) は上肢を模した模型を用いて実験を行い、動作によって生じる流体力やトルクについて分析したが、実際のヒトが行う複雑なストローク動作と比較して単純化された回転運動が対象であった。また、Takagi et al. (2014) はロボットアームを用い、ヒトのクロール動作を再現させて分析を実施したが、モーターの出力の制限により動作

速度が低く(最大速度で50%以下), 完全にはヒトのストローク動作を再現できていなかった。

そのような中で, 近年では泳動作中の身体ポイントを自動で認識し, キネマティクスデータを取得できるモーションキャプチャシステムが発展している(Ceccon et al., 2013; Dubois et al., 2013; Monnet et al., 2014; Simojo et al., 2014)。このシステムを用いれば, 従来の手動デジタイズを用いた画像分析法と比較して分析に要する時間や労力を大幅に削減することができ, 複雑な動きをするヒトの動作を対象として多くの分析を実施することが可能である。さらに, これまでよりも多くの身体ポイントの位置座標を簡便に分析することができれば, 流体力の発生に関与する手部平面の角度の算出や, 身体に生じた流体力が推進に貢献するか否かを判断するために必要な流体力の作用方向の算出に応用でき, 泳動作の詳細な分析が可能となる。しかしながら, 水中での動作を対象としたモーションキャプチャシステムは近年開発されたものが多く, 現時点では得られたデータの信頼性を検証する研究に留まっている。また, 泳動作中の身体に働く流体力の分析にモーションキャプチャシステムが応用された研究は実施されておらず, 流体力の分析に必要な身体ポイントをモーションキャプチャによって問題なく分析できるかは明らかになっていない。

そこで本研究では, 泳動作モーションキャプチャと圧力分布計測を用い, 手部のキネマティクスと圧力分布, 流体力を同時に計測できるシステムの構築を目指し, その可能性と課題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, 自由形短距離を専門とする男子大学競泳選手1名(身長1.78m, 体重68.0kg, 年齢21歳, 50m自由形23秒87)が参加した。対象者には実験の趣旨と危険性について事前に説明し, 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 実験設定

実験は水深2.0m, 水温27.5℃の屋内50mプールにて実施した。モーションキャプチャシステムを用いた手部の分析と, 有線の圧力センサを用いた手部表面の圧力分布計測を同時に実施するため測定範囲が制限され, 泳者が水中を前方へ推進する試技での測定を行うことができなかった。そのため, 泳者は水中に設置された0.8mの台上に立ち, 右上肢にてクロールのストローク動作を模した動作を行った。先行研究において, 手部の移動速度や動作パターンが変化すると, 非定常な水の流れや渦が異なるメカニズムで生じることや(Takagi et al., 2014), 手部の加速度が手部に働く流体力に関与すること(Kudo et al., 2013)が報告されているため, 本研究では動作速度と動作パターンを変化させて試技を実施した。泳者は, 主観によって動作速度を3段階(Slow, Middle, Fast), ストロークパターンを3パターン(I-shaped, Small S-shaped, Large S-shaped)に変化させた計9試技を行った。I-shaped ストロークパターンは, 手部の軌跡がI字を描くように前方から後方へまっすぐと水を掻く動作, Small S-shaped および Large S-shaped ストロークパターンは, 軌跡が逆S字を描くように左右へ移動しながら水を掻く動作とし, Small S-shaped ストロークパターンは Large S-shaped ストロークパターンと比較して左右への移動が小さい動作となるように指示した。Fig. 1に試技の概略図を示す。

屋内プールには, 水中に15台のモーションキャプチャカメラ(Opus Underwater, Qualisys)を設置

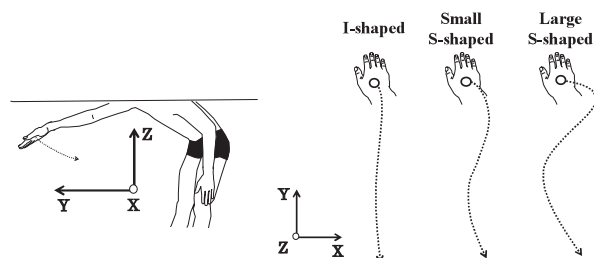


Fig.1 The schematic of trials



し, サンプリング周波数100Hzにて泳者に貼付した反射マーカを自動追尾した. 反射マーカの貼付位置は右第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, 右橈骨茎状突起の計5点とした. 本研究では, Fig. 1に示す通り, 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た. モーションキャプチャシステムを用いた分析範囲内の精度を検証するため, ステンレス製ポールに間隔が0.50cmとなるように反射マーカ2個を取り付け, 実験に先立って反射マーカ間の距離の分析を行った. その結果, 反射マーカ間の距離の誤差は分析範囲内 (X, Y, Z) で3.0mm未満であることが確認された.

泳者の右手部3箇所の手掌側と手背側には, 防水加工を施した小型圧力センサ (PS05-KC, 共和電業) を対にして貼付し, 試技中の手部表面の圧力分布をサンプリング周波数100Hzで計測した. 手部の移動方向が変化すると, 水の流れに対する前縁と後縁が第2指側と第5指側とで入れ替わるため, 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. なお, 圧力センサはセンサインターフェース (PCD330B-F, 共和電業) を介してPCに接続され, 有線で計測を実施した. 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0.1mから1.2mまで0.1mずつ水中に沈め, 静水圧を計測した. 計測された静水圧と理論上の静水圧の誤差は $2.4 \pm 2.1\%$ であった. Fig. 2に反射マーカおよび圧力センサ

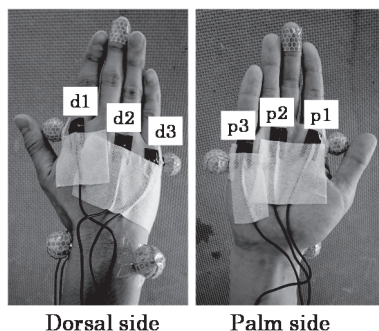


Fig.2 Reflecting markers and pressure sensors attached at right hand

(d1 - d3, p1 - p3) を貼付した右手部を示す.

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, 得られた座標データおよび圧力データは, それぞれ 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.

### 2.3 分析項目

本研究では, モーションキャプチャシステムを用いて算出した手部5点の座標から, 水中ストローク動作中の手部速度  $V_h$  (m/s), 手部加速度  $\dot{V}_h$  ( $m/s^2$ ), 手部迎角  $\alpha$  ( $^\circ$ ), 手部ピッチ角  $\varphi$  ( $^\circ$ ) を算出した. 手部速度及び手部加速度は, 手部5点の座標の midpoint の速度と加速度とした. 手部迎角は, 右第5中手指節間関節側面から右第2中手指節間関節側面へのベクトルと, 手部5点の midpoint の速度ベクトルがなす角度とし, 手部ピッチ角は右第3指末節骨頭から右尺骨茎状突起と右橈骨茎状突起の midpoint へのベクトルと, 手部5点の midpoint の速度ベクトルがなす角度とした. Fig. 3に手部迎角, 手部ピッチ角の模式図を示す.

さらに, 右第2中手指節間関節側面と右第5中手指節間関節側面の座標からそれぞれの圧力センサの水深を算出し, 計測された圧力値から静水圧を差し引いた. そのため, 本研究にて報告する圧力値 (d1 - d3, p1 - p3) は静水圧を含まず, 動作によって生じる圧力のみ示している. また, Takagi and Wilson (1999) が報告した手部に働く流体力の推定法を用い, 手背側と手背側の圧力差 ( $kN/m^2$ )

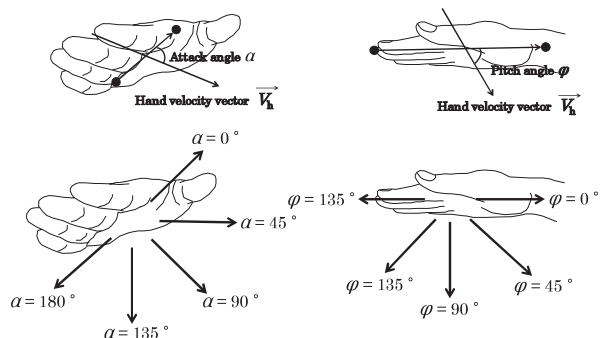


Fig.3 Schematic of hand angles

に手部の平面積 ( $m^2$ ) を乗じて流体力 (N) を算出した。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。さらに、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。法線ベクトルは、手部平面に対して垂直なベクトルであり、右尺骨茎状突起と右橈骨茎状突起の midpoint から右第2中手指節間関節側面へのベクトルと、右尺骨茎状突起と右橈骨茎状突起の midpoint から右第5中手指節間関節側面へのベクトルの外積として算出した。

## 2.4 統計処理

本研究では、水中ストローク中の手部速度  $V_h$  と手部に働く流体力の合力に関しては最大値と平均値で示し、手部加速度  $\dot{V}_h$  に関しては最大値と最小値を示した。また、全ての計測ポイントでの圧力値をそれぞれの平均値で示し、手背側での圧力値は最小値、手掌側での圧力値は最大値を示した。さらに、動作速度が最も高い Fast 試技における手部速度  $V_h$ 、手部迎角  $\alpha$ 、手部ピッチ角  $\varphi$ 、各計測ポイントでの圧力値、手部に働く流体力の水中ストローク中の変動を、ストロークパターン

別に示した。なお、本研究では手部が入水後に Y 方向の移動速度が負の値を示してから、手部が出水するまでの局面を分析対象とした。

手部のキネマティクスと流体力、圧力分布の関係を検討するため、動作パターンと動作速度を変化させた9試技において手部速度、手部加速度と流体力、圧力値との間の相関係数を Pearson の方法を用いて求めた。統計処理には IBM SPSS Statistics 22を用い、有意水準は危険率5%未満とした。

## 3. 結果

Table1に各試技における手部速度  $V_h$ 、手部加速度  $\dot{V}_h$ 、手部に働く流体力、手部表面の圧力値 ( $d1 - d3, p1 - p3$ ) を示す。動作速度が最も高い Fast 試技では、I-shaped 試技は Large S-shaped 試技よりも手部速度が高かったが、推定した流体力の最大値は Large S-shaped が高く、流体力の平均値は同程度だった。手部表面の圧力値は、手背側となる  $d1, d2, d3$  で負の圧力値が計測され、手掌側となる  $p2, p3$  で正の値が計測されたが、 $p1$  については平均値が負の値を示す試技も見られた。

Table 2に手部の速度、加速度と流体力、圧力値との間の相関係数を示す。流体力については、最大値、平均値ともに手部速度  $V_h$  と有意な高い

Table 1 Kinematic parameters, fluid forces and pressure distribution of a hand for each trial

Stroke Speed	Stroke Pattern	Slow			Middle			Fast		
		I	Small_S	Large_S	I	Small_S	Large_S	I	Small_S	Large_S
Maximum Hand Velocity	(m/s)	2.20	1.45	1.95	2.19	2.45	2.42	3.65	3.22	3.04
Mean Hand Velocity	(m/s)	0.96	0.87	1.14	1.41	1.45	1.49	2.57	2.10	2.24
Maximum Hand Accerelation	( $m/s^2$ )	8.03	3.73	6.15	4.44	4.72	10.55	10.15	21.77	12.57
Minimum Hand Accerelation	( $m/s^2$ )	-6.34	-3.07	-5.21	-3.36	-0.78	-11.49	-4.27	-16.64	-6.93
Maximum Fluid Force	(N)	12.40	14.46	20.93	24.61	31.88	30.03	57.08	59.21	78.85
Mean Fluid Force	(N)	5.73	8.53	7.77	8.50	13.87	12.51	27.94	21.32	28.26
Mean Pressure	d1 ( $kN/m^2$ )	-0.71	-0.97	-1.15	-0.96	-1.72	-1.50	-3.97	-2.78	-3.33
	d2 ( $kN/m^2$ )	-0.67	-0.57	-0.98	-1.19	-1.55	-1.67	-3.75	-3.08	-3.80
	d3 ( $kN/m^2$ )	-0.68	-0.55	-1.43	-1.52	-2.16	-2.04	-4.25	-3.90	-4.44
	p1 ( $kN/m^2$ )	0.07	0.21	-0.09	0.19	0.15	0.20	-0.33	0.02	0.46
	p2 ( $kN/m^2$ )	0.63	0.69	0.92	1.34	1.48	1.50	3.73	2.99	3.09
Minimum Pressure	p3 ( $kN/m^2$ )	0.42	0.58	0.23	0.68	0.67	0.33	2.93	1.33	1.05
	d1 ( $kN/m^2$ )	-1.35	-1.78	-3.84	-2.21	-3.59	-3.71	-6.79	-7.37	-8.04
	d2 ( $kN/m^2$ )	-1.18	-1.29	-4.02	-2.43	-3.82	-4.01	-6.44	-7.94	-8.87
Maximum Pressure	d3 ( $kN/m^2$ )	-1.56	-1.71	-4.53	-3.20	-4.61	-5.15	-7.93	-9.12	-10.83
	p1 ( $kN/m^2$ )	0.92	0.63	1.64	1.54	1.36	1.11	2.13	3.39	3.16
	p2 ( $kN/m^2$ )	1.34	1.32	2.39	3.09	3.63	3.06	7.44	6.19	4.93
	p3 ( $kN/m^2$ )	0.79	1.09	1.53	1.67	2.22	1.12	6.63	3.24	2.94

Table 2 Pearson's correlation coefficient ( $r$ ) between kinematic parameters and fluid forces, pressure distribution

			Hand Velocity (m/s)		Hand Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	
			Maximum	Mean	Maximum	Minimum
Fluid Force	Maximum	(N)	0.84 **	0.92 **	0.68 *	-0.37
	Mean	(N)	0.89 **	0.96 **	0.60	-0.26
Mean Pressure	d1	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.91 **	-0.97 **	-0.59	0.25
	d2	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.93 **	-0.98 **	-0.67 *	0.35
	d3	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.93 **	-0.98 **	-0.70 *	0.38
	p1	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.33	-0.23	-0.07	-0.01
	p2	(kN/m <sup>2</sup> )	0.95 **	0.99 **	0.66	-0.34
	p3	(kN/m <sup>2</sup> )	0.81 **	0.83 **	0.36	-0.34
Minimum Pressure	d1	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.85 **	-0.91 **	-0.75 *	0.46
	d2	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.82 **	-0.89 **	-0.76 *	0.49
	d3	(kN/m <sup>2</sup> )	-0.83 **	-0.90 **	-0.74 *	0.47
Maximum Pressure	p1	(kN/m <sup>2</sup> )	0.76 *	0.80 **	0.81 **	-0.54
	p2	(kN/m <sup>2</sup> )	0.95 **	0.97 **	0.64	-0.33
	p3	(kN/m <sup>2</sup> )	0.85 **	0.88 **	0.38	-0.03

\*\*: $p < 0.01$ , \*: $p < 0.05$ 

正の相関関係が認められた ( $r = 0.84 - 0.96, p < 0.01$ ). 流体力の最大値と加速度  $\dot{V}_h$  の最大値との間には有意な正の相関関係が認められたが ( $r = 0.68, p < 0.05$ ), 加速度  $\dot{V}_h$  の最小値や流体力の平均値との間には有意な相関関係は認められなかった. 圧力値については, p1で計測された圧力値を除き, 手部速度  $V_h$  との間には有意な高い相関関係が認められた. また, 手背側となる d2, d3で計測された圧力値の平均値や, d1, d2, d3で計測された圧力値の最小値と手部加速度の最大値との間に有意な負の相関関係が認められた ( $r = -0.67 - -0.76, p < 0.05$ ).

Fig. 4に動作速度が最も高い Fast 試技における手部速度  $V_h$ , 手部迎角  $\alpha$ , 手部ピッチ角  $\varphi$ , 各計測ポイントでの圧力値 (d1 - d3, p1 - p3), 手部に働く流体力の水中ストローク中の変動をストロークパターン別に示す. I-shaped ストロークパターンは水をまっすぐ後方に掻くよう指示した試技であったため, S-shaped ストロークパターンと比較して, 泳者の左右方向となる x 方向の手部速度や手部の迎角の変動が小さくなっていたが, ピッチ角には顕著な違いは見られなかった. 圧力値については, どのストロークパターンにおいても手背

側の圧力値が低下して負の値を示した.

#### 4. 考察

本研究では, 実際のヒトを対象として実験を行い, 手部の移動速度は Fast 試技で 3.04-3.65 m/s, 流体力の最大値は 57.08-78.85 N であった. Takagi et al. (2014) がロボットを用いて実施した研究では, ロボットの出力の制限により手部模型の移動速度は最大で 1.5m/s 程度, 手部模型に働く流体力の最大値は 20N 未満であったことから, 本研究ではロボットを用いた先行研究と比較して高い動作速度で試技を実施することができ, それに伴い手部に生じる流体力も高い値を示した. また, Kudo et al. (2008) や Lauder and Dabnichki (2005) は手部模型の回転動作を対象に実験を行ったのに対し, 本研究では実際のヒトの動作を対象としたため, 手部の速度や角度が連続的に変化する動作を分析することができた. 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。

さらに, 本研究で用いたモーションキャプチャシステムでは, 高い動作速度で不規則に変化する手部の動きが対象であっても, 手部5点に貼付した反射マーカの位置座標を精度よく自動で認識することができた。泳動作中の手部に働く流体力には, 手部の速度や加速度だけでなく, 迎角やピッチ角といった水の流れに対する手部平面の向きが関与することや, 泳動作中の手部に働く流体力は全てが推進力として作用するのではなく, その作用方向によって推進力にも抵抗力にもなりうることから, 手部に働く流体力を分析する場合には複数のポイントの位置座標を分析する必要がある。そのため, モーションキャプチャシステムによってこれらの角度や作用方向を分析できることが確認されたことは, モーションキャプチャシステムが泳動作中の流体力分析に応用できることを示唆している。

しかしながら, 本研究では実験設定上の制限により泳者が立位にて行った動作を対象とした。実際の泳動作では, 身体が推進しながら四肢の動作を行うため, 実際の泳動作と手部の移動軌跡や水との相対速度が異なると考えられ, このような違いが手部に働く流体力に影響すると推察される。また, 実際の選手を対象とし, 泳動作の定量的な評価や分析に用いるには, 泳動作を制限しない実験設定とする必要がある。現時点では, 圧力分布計測を有線で行うことが実験設定を制限しているため, 圧力分布計測に用いる機器を泳者の推進に依拠して移動させることができれば, 泳者の身体が推進する通常の泳動作を対象とした分析が可能になると考えられる。

手部表面の圧力分布は, 手掌側と手背側ともに手部の速度との間に有意な相関関係が認められ, 手背側の圧力値は手部の加速度との間にも有意な相関関係が認められた。手部モデルを用いた Kudo

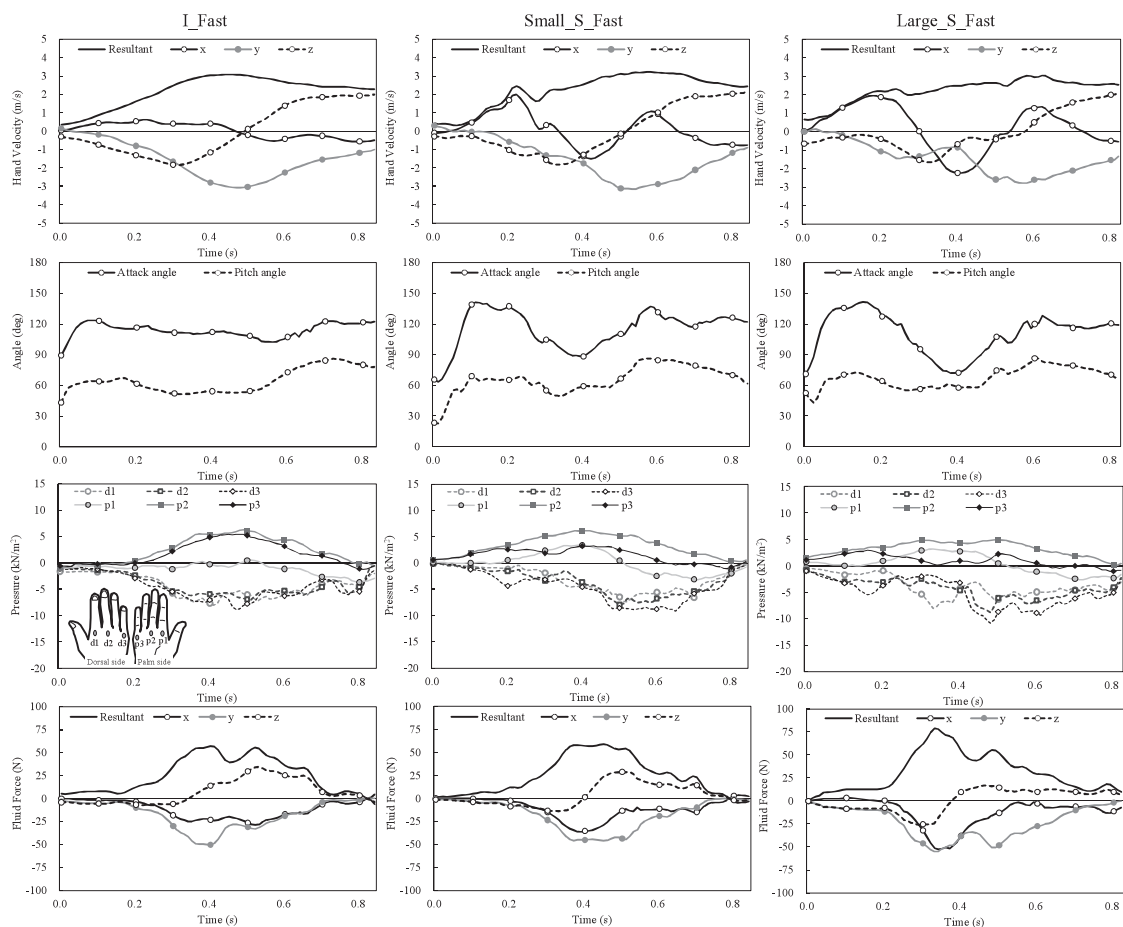


Fig. 4 Temporal profiles of hand velocity, hand angle, and fluid force



et al. (2013) の研究において、手部の加速度が流体力に関与すると報告されていることや、PIV を用いて手部模型周りの流れを可視化した Takagi et al. (2014) の研究において、クロールのストローク動作中の手背側に非定常流が発生すると報告されていることから、本研究においても方向転換を伴う手部の動作によって手背側に非定常流が生じ、圧力が低下したものと推察される。また、Fig. 4に示すように、I-shaped ストロークパターンでは各ポイントで計測された圧力値は同様の変動をしているが、Large-S-shaped ストロークパターンでは計測するポイントによって圧力値がピークを示すタイミングは異なっており、ストロークパターンによって圧力分布の変動が異なることが明らかとなった。Takagi et al. (2014) は、ロボットと PIV を用いた研究において、手部模型の軌跡が I 字を描くストロークパターンと S 字を描くストロークパターンでは、異なる機序によって流体力が生じていると報告しており、本研究で計測された圧力分布も同様の現象を反映していたと推察される。しかしながら、本研究は手部の速度や角度の変動の分析や手部周りの圧力分布の分析に留まっており、手部の動きの変化によって周辺の水の挙動がどのように変化し、手部周りの圧力分布や手部に働く流体力にどのような影響を及ぼすかといった流体力の発揮メカニズムについて解明することは困難である。よって、流体力の発揮メカニズムについて分析するには、手部周りの水の流れを PIV を用いて可視化することが望ましいが、現時点では分析範囲の制限や分析可能な動作速度の制限により、手部周りの流れ場の全容を分析することは難しい。このように、本研究で用いた泳動作モーションキャプチャや圧力分布計測と、PIV 分析にはそれぞれ長所と課題が残されており、現時点で泳動作中に手部で発揮される流体力の発生機序や推進機序の全容を明らかにすることはできない。今後は、それぞれの分析方法で分析可能な点と限界を踏まえて研究を進めるとともに、残された課題を解決し、様々な分析方法を組

み合わせて泳動作の分析を実施できるようにすることが、泳動作中の手部における推進メカニズムの解明に寄与すると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、泳動作モーションキャプチャと圧力分布計測を用い、手部のキネマティクスと圧力分布、流体力を同時に計測できるシステムの構築を目指し、その可能性と課題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のようになる。

- 1) 泳動作モーションキャプチャによってストローク動作中の手部の速度や加速度、迎角、ピッチ角を簡便に算出することができ、圧力分布や流体力との関係を検討することができた。
- 2) ストローク動作中の手部の速度や加速度と圧力分布や流体力との間に有意な相関関係が認められたが、流体力の発揮メカニズムの全容を分析することはできなかった。

## 文献

- Berger, A.M. and Hollander, A.P. (1995) Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. *Journal of Biomechanics*, 28 (2): 125-133.
- Berger, A.M., Hollander, A.P., and de Groot, G. (1999) Determining propulsive force in front crawl swimming: A comparison of two methods. *Journal of Sports Sciences*, 17: 97-105.
- 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. *Journal of Applied Biomechanics*, 11: 103-112.
- 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. *Journal of Sports Sciences*, 31 (3): 276-287.
- Dubois, R.P., Thiel, D.V., and James, D.A. (2012) Using image processing for biomechanics measures



- in swimming. *Procedia Engineering*, 34: 807–812.
- 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.
- 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.
- Lauder, M.A. and Dabnichki, P. (2005) Estimating propulsive forces - sink or swim? *Journal of Biomechanics*, 38: 1984–1990.
- 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.
- 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 Engineering*, 17: 171–181.
- Pai, Y.C. and Hay, J.G. (1988) A hydrodynamic study of the oscillation motion in swimming. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4: 21–37.
- 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. et al. (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming III. Human Kinetics*, pp. 173-183.
- Simojo, H., Sengoku, Y., Miyoshi, T., Tsubakimoto, S., and Takagi, H. (2014) Effect of imposing changes in kick frequency on kinematics during undulatory underwater swimming at maximal effort in male swimmers. *Human Movement Science*, 38: 94–105.
- Takagi, H. and Wilson, B. (1999) Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming. *Proceedings of the XIII International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*. Jyväskylä, Finland, 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.
- 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.