

クロールにおけるキック頻度の違いと手部推進力との関係

角川隆明^{1),2)}岩下幸平²⁾

¹⁾ 筑波大学体育系

²⁾ 鹿屋体育大学大学院

キーワード: 水泳, 競泳競技, バタ足, 流体力, モーションキャプチャ

【要旨】

本研究は、2種類のキック頻度でのクロール泳中における手部の推進力を様々な泳速度で分析し、キック頻度の違いが手部の推進力と泳速度との関係に及ぼす影響を検討することを目的として実施した。試技では、1ストローク中に左右でのキック動作を2回行う2ビート泳法と、6回行う6ビート泳法にてそれぞれ25 mを10回泳がせた。泳速度と手部推進力との関係を検討するため、10回の試技は異なる泳速度で泳ぐように指示した。試技中は、水中モーションキャプチャと圧力分布計測によって手部で発揮される推進力を分析した。その結果、同泳速度では2ビート泳法と比較して6ビート泳法での平均手部推進力が低いことが明らかとなった。また、全力で泳いだ場合は、キック頻度の違いによる平均手部推進力の差は見られなかったが、キック動作による推進力発揮により、6ビート泳法の方が高い泳速度を達成できることが明らかとなった。しかしながら、対象によってはキック頻度の違いによる差が小さかったため、キック動作の有効性を高めることの重要性が示された。

スポーツパフォーマンス研究, 12, 180-192, 2020年, 受付日: 2020年1月29日, 受理日: 2020年4月15日

責任著者: 角川隆明 305-8574 つくば市天王台1-1-1 筑波大学体育系

tsunokawa.takaaki.ke@u.tsukuba.ac.jp

Influence of kick frequency on the relation between hand propulsion force and swimming speed during front crawl swimming

Takaaki Tsunokawa¹⁾, Kohei Iwashita²⁾

¹⁾ University of Tsukuba

²⁾ Graduate School, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Key words: swimming, swimming race, flutter kick, fluid force, motion capture

【Abstract】

The present study examined influences of kick frequency on the relation between hand

propulsion force and swimming speed. Hand propulsion force was measured during front crawl swimming at various speeds with two different kick frequencies. The participants did a 25-meter swim 10 times each in 2-beat style with 2 kicks per stroke, and in 6-beat style with 6 kicks per stroke. In order to examine the relation between swimming speed and hand propulsion force, 10 trials were done at different swimming speeds. During the trials, hand propulsion force was measured with an underwater motion capture and pressure distribution meter. It was found that, at the same swimming speed, the average hand propulsion force in 6-beat swimming was lower than that in 2-beat swimming. At the maximum swimming speed, no difference was found in average hand propulsion force between the two kick frequencies studied, but a higher swimming speed was obtained with 6-beat swimming due to the higher propulsion force from the 6 kicks per stroke motion. However, the small difference found between the two kick frequencies suggests that it may be important to increase the effectiveness of the kick motion.

I. 緒言

競泳競技のクロール泳では、泳者は上肢によるストローク動作と下肢によるキック動作によって推進力を発揮して前方へ推進している。特に、上肢によるストローク動作では、前方から後方に手部が移動して水を押し出す動作をするため、手部に働く流体力が推進することに直接的に関与することとなり、キック動作による推進力よりも貢献度が高いとされている (Hollander et al., 1988)。それに対し、下肢によるキック動作では、左右の脚部を上下へ交互に動かすため、脚部周りの水を前方から後方へ移動させるような動作とはならず、泳者の身体の推進に直接的に関与しているかは不明である。さらに、近年のクロール泳中の身体に働く自己推進時抵抗を推定した研究では、キック動作を行うことでキック動作を行わない場合と比べて身体に働く自己推進時抵抗が増大することが報告されており (Narita et al., 2018)、クロール泳におけるキック動作は推進力ではなく抵抗力となっている可能性が示唆されている。

しかしながら、全力でのクロール泳において、キック動作を行わない場合と比較してキック動作を行う場合の方が高い泳速度を達成できることが報告されており (Deschodt et al., 1999)、実際の競技会においてもほぼ全ての選手が下肢によるキック動作を行っている。つまり、クロール泳のキック動作が何らかの役割を果たし、泳速度の向上に貢献していることが推察される。これまでのクロール泳におけるキック動作に関する先行研究では、キック動作は身体の水平姿勢を維持する役割を果たしていると報告されている。Yanai (2001) は、上肢のストローク動作によって下肢が沈むような鉛直方向のトルクが生じ、そのトルクを相殺して下肢が沈まないようにするトルクをキック動作が生成していると報告している。また、Correia et al. (2018) は、競技力の高い泳者は大転子の位置が高いことを報告し、大転子位置を高めるためにキック頻度を高めることを提案している。このように、いくつかの研究ではクロール泳におけるキック動作は推進力として直接的に貢献するのではなく、身体の水平姿勢を維持し、抵抗力を低減する役割を果たしていると報告されており、キック動作の役割や推進への貢献について一致した見解が得られていない。

そのような中で、実際の競技会では泳距離に応じて異なる頻度でのキック動作を見ることができる。競技会においてクロール泳は自由形種目で用いられており、50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1500m の距離で競われている。長水路男子の世界記録は、50 m 自由形が 20 秒 91, 1500 m 自由形が 14 分 31 秒 02 であり、競技の距離によって競技時間は大きく異なる。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、それぞれの泳距離に応じた泳動作を行うこととなり、泳距離によって頻度が異なるキック動作が用いられている。特に、短距離種目では上肢の 1 ストローク動作中に左右の下肢で 6 回のキック動作を行う 6 ビートキックが主に用いられる一方で、長距離種目では上肢の 1 ストローク動作中に左右の下肢で 2 回のキック動作を行う 2 ビートキックを見ることができる。しかしながら、クロール泳におけるキック動作の役割や貢献は明らかになっていないため、それぞれの泳距離でのキック頻度の選択は客観的なデータや知見に基づいているとは考えられない。クロール泳のキック動作の役割や貢献に関する客観的な知見が得られれば、キック頻度の選択や、トレーニングに応用できる有益な情報になると考えられる。

近年のクロール泳に関する研究では、手部表面の圧力分布から手部に働く流体力を推定し、モーションキャプチャから得た手部の三次元座標値から流体力の作用方向を明らかにする研究が行われてい

る (Tsunokawa et al., 2018; Tsunokawa et al., 2019; 角川ほか, 2019). この方法を用いれば, 様々な泳速度における手部の推進力を定量的に評価することができる. 依然として, クロール泳におけるキック動作を分析することは困難であるが, 様々な泳速度における手部の推進力と, キック頻度の違いの関係を明らかにすることができれば, クロール泳におけるキック動作の役割や貢献に関する新たな知見が得られると考えられる.

そこで本研究では, 2 種類のキック頻度におけるクロール泳中における手部の推進力を様々な泳速度で分析し, キック頻度の違いが手部の推進力と泳速度との関係に及ぼす影響を検討することを目的とした.

II. 方法

1. 対象者

大学水泳部に所属し, よくトレーニングを行っている男子競泳選手 6 名 (身長 1.74 ± 0.06 m, 体重 70.7 ± 6.5 kg, 年齢 21.2 ± 1.3 歳, 右手部平面積 0.0159 ± 0.0012 m², 左手部平面積 0.0162 ± 0.0006 m²) が本研究に参加した. 対象者の短水路における 400 m 自由形自己最高記録は 228.1 秒から 250.0 秒であり, 世界記録が 1000 ポイントとなるように計算され, 種目や性別の違いによらず泳記録のレベルを表す FINA ポイントは 735.2 ± 70.8 ポイントであった. Table 1 に対象者の身体特性および短水路における 400 m 自由形自己最高記録, FINA ポイントを示す. 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.

Table 1 対象者の身体特性および短水路における 400 m 自由形自己最高記録, FINA ポイント

Participant	Height (m)	Weight (kg)	Age (years)	Area of right hand (m ²)	Area of Left hand (m ²)	Best record of 400 m Freestyle (s)	FINA point of 400m Freestyle (point)
A	1.70	68	22	0.0174	0.0167	235.0	737
B	1.74	67	21	0.0155	0.0160	228.5	801
C	1.78	73	19	0.0163	0.0170	234.5	742
D	1.72	66	23	0.0141	0.0162	237.5	714
E	1.86	83	21	0.0150	0.0155	228.1	806
F	1.68	67	21	0.0168	0.0158	250.0	612
Mean	1.75	70.7	21.2	0.0159	0.0162	235.6	735.2
SD	0.07	6.5	1.3	0.0012	0.0006	8.0	70.8

2. 実施試技

実験は, 縦 50 m, 横 25 m の屋内プール (水深 2.0 m, 水温 27.5 ° C) を長さ 25 m のプールとなるように用いて実施した. クロール泳におけるキック頻度の違いによる影響を明らかにするため, 対象者は左右の上肢による 1 回のストローク動作中に左右の脚を合計 2 回上下させる泳法 (以下「2 ビート泳法」と略す) と, 左右の上肢による 1 回のストローク動作中に左右の脚を合計 6 回上下させる泳法 (以下「6

ビート泳法」と略す)の2種類の泳法にて試技を行った。試技の実施内容は、それぞれの泳法にてプッシュオフスタートから25 mを10回泳ぐこととし、2種類の泳法にて合計20回の試技を実施した。2ビート泳法による試技と、6ビート泳法による試技の実施順はランダムとした。なお、競技会では50 m種目を除き、泳者は必ず呼吸しながら泳ぐこととなるため、本研究では1回のストローク動作中に呼吸動作を左右どちらかで1回行うよう指示し、呼吸動作を含んだ動作が分析対象となるようにした。泳速度と手部の推進力との関係を明らかにするため、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、泳速度を変化させる際の目安とするため、試技中はプッシュオフスタートで対象者の足部が壁から離れてから手前で壁をタッチするまでの25 m区間のタイムをストップウォッチで手動計測し、各試技の終了時に対象者へ口頭で伝えた。

3. 実験設定

試技中は、手部表面の圧力分布を計測するため、左右の手部それぞれ3ヵ所の手掌側と手背側の計12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ユニバーサルレコーダー(EDX-100A, 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。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、試技実施前にそれぞれの圧力センサを水深0.1 mから1.3 mまで0.2 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左右の手部それぞれ5点に直径19 mmのモーションキャプチャ用半球状反射マーカーを貼付した。反射マーカーの貼付位置は先行研究(Gourgoulis et al., 2008)に従い第3指末節骨頭、第2中手指節間関節側面、第5中手指節間関節側面、尺骨茎状突起、橈骨茎状突起、左右の大転子とした。実験を実施した屋内プールの水中には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200 Hzにて泳者に装着した反射マーカーの位置を自動で認識した。反射マーカーはカメラの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2.0 m、Y軸方向に7.0 m、Z軸方向に2.0 mとし、Y軸方向は試技のスタートを行った壁から8.0 mから15.0 m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、両端に反射マーカー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

シオ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。Fig. 1 に反射マーカ―と圧力センサを貼付した手部を示す。



Fig. 1 反射マーカ―と圧力センサを貼付した手部

4. データ処理

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て平滑化した。遮断周波数は、残差分析法 (Winter, 2009) を用いて決定し、座標データは 17 Hz, 圧力データは 19 Hz とした。

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等しくなる場合、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、1 ストロークにおける左右の大転子の中心の座標の 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。

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 (N/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。左右それぞれの手部の平面積は、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、左右の手部をそれぞれ 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、左右それぞれの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。

手部に貼付した反射マーカ―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。なお、本研究では左右それぞれの手部での推進力を推定したため、左右の手部での推進力を合計し、1 周期中の平均値 (以下「平均手部推進力」と略す)

を算出した. Fig. 2 に推定した流体力と推進力の概略図を示す.

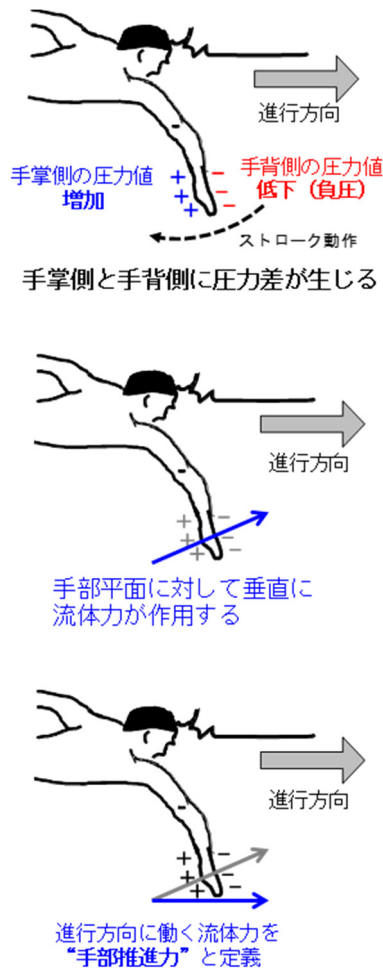


Fig. 2 推定した流体力と推進力の概略図

本研究では、推進力と泳速度との関係を検討するため、先行研究（角川ほか，2019）と同様の方法を用い、最小二乗法にて各対象者における平均手部推進力と平均泳速度との関係を示す回帰式を以下のように求めた。

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

F_p は平均手部推進力， v は平均泳速度， A と n は回帰式の比例定数であり， A を推進力係数， n を推進力指数と定義した。本研究では、各条件における 10 回の試技を任意の泳速度で実施したため、条件によって実際に泳いだ泳速度が異なり、同じ泳速度における平均手部推進力を比較することができなかった。そのため、先行研究（成田ほか，2018；角川ほか，2019）と同様に、回帰式を求めて推進力係数 A と推進力指数 n を算出し、条件間で比較することとした。なお、推進力係数 A は泳速度に関わらず推進力の大小を示し、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すこととなる。

5. 統計処理

キック頻度の違いによる平均値の差を検討するため、全力で行うように指示した 10 試技目における平均泳速度と平均手部推進力、および推進力係数 A 、推進力指数 n の対象者 6 名の平均値を対応のある t 検定を用いて比較した。なお、データの正規性の仮定は、Shapiro-Wilk 検定を用いて検証した。回帰式の算出および統計分析には、IBM SPSS Statistics 26 (IBM, USA) を用い、有意水準は危険率 5%未満とした。

III. 結果

Fig. 3 に各対象者における平均泳速度と平均手部推進力との関係を示す。なお、実線は 2 ビート泳法での試技、点線は 6 ビート泳法での試技を示している。また、Table 2 に各対象者における推進力係数 A 、推進力指数 n 、全力で行った 10 試技目における平均泳速度および平均手部推進力を示す。その結果、推進力指数 n については、6 ビート泳法での試技と比較して 2 ビート泳法での試技が有意に高い値を示した ($t = 11.13, p = .00$)。また、全力で行った 10 試技目における平均泳速度については、2 ビート泳法での試技と比較して 6 ビート泳法での試技が有意に高い値を示した ($t = 8.15, p = .00$)。推進力係数 A と 10 試技目における平均手部推進力については、いずれも試技間で有意な差は認められなかった。

Table 2 各対象者における推進力係数 A 、推進力指数 n 、全力で行った 10 試技目における平均泳速度および平均手部推進力

Participant	2 beat kick trial				6 beat kick trial			
	A	n	Maximal swimming velocity (m/s)	Maximal propulsive force (N)	A	n	Maximal swimming velocity (m/s)	Maximal propulsive force (N)
A	24.98	1.67	1.45	45.8	24.74	1.29	1.55	44.0
B	20.50	1.85	1.60	51.4	17.85	1.61	1.70	44.6
C	21.89	1.58	1.59	47.5	21.70	1.35	1.74	49.2
D	18.19	2.11	1.36	34.6	16.72	1.75	1.50	31.1
E	15.72	2.12	1.47	32.3	16.45	1.87	1.54	36.3
F	22.95	1.66	1.43	42.7	14.93	1.34	1.51	25.7
Mean	20.71	1.83*	1.48*	42.4	18.73	1.54*	1.59*	38.5
SD	3.34	0.24	0.09	7.5	3.73	0.24	0.10	9.0

Note: *Significant differences.

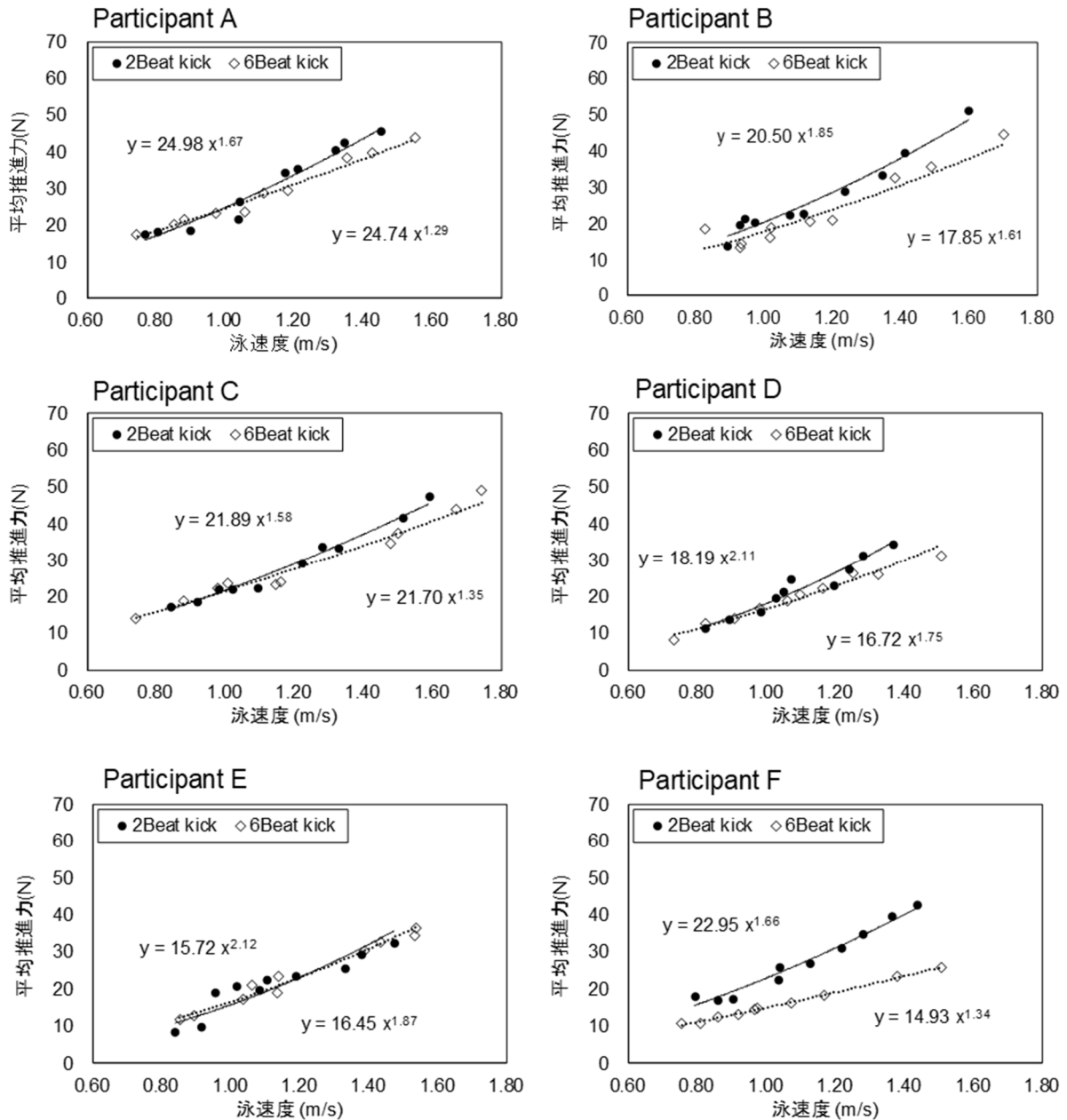


Fig. 3 各対象者における平均泳速度と平均手部推進力との関係

IV. 考察

本研究は、2種類のキック頻度でのクロール泳中における手部の推進力を様々な泳速度で分析し、キック頻度の違いが手部の推進力と泳速度との関係に及ぼす影響を検討することを目的として実施した。その結果、推進力指数 n は、6ビート泳法での試技と比較して2ビート泳法での試技が有意に高い値を示し ($t = 11.13, p = .00$)、全力で行った10試技目における平均泳速度は、2ビート泳法での試技と比較して6ビート泳法での試技が有意に高い値を示した ($t = 8.15, p = .00$)。本研究と同様の測定方法を用いた先行研究では、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と記述されている (角川ほか, 2019)。例えば、推進力指数 n が小さけ

れば泳速度が増加しても手部推進力は緩やかに増加するが、推進力指数が高ければ泳速度の増加に伴って手部推進力 n が指数関数的に増加する。つまり、2 ビート泳法での試技における手部推進力の回帰曲線は、6 ビート泳法での試技の回帰曲線と比較して、泳速度の増加に伴って大きく増加したことを示している。Fig. 3 に示した各対象者の平均泳速度と平均手部推進力の関係からも、低い平均泳速度では2 ビート泳法と6 ビート泳法との差が小さいのに対し、平均泳速度が高くなるにつれて差が増大していくことがわかる。

このような結果は、高い泳速度で泳いだ場合、6 ビート泳法での試技と比較して2 ビート泳法での試技の方が手部で発揮する推進力が大きいことを示している。一方で、クロール泳中の泳者の身体に働く自己推進時抵抗を計測した先行研究 (Narita et al., 2018) において、キック動作によって自己推進時抵抗が増大することが報告されていることから、本研究においてもキック頻度の高い6 ビート泳法での試技における自己推進時抵抗が2 ビート泳法での試技の自己推進時抵抗と比較して大きかったことが推察される。しかしながら、本研究では、同じ泳速度で比較した場合、自己推進時抵抗が大きいと推察される6 ビート泳法での試技の方が手部で発揮する推進力が小さい結果を示した。泳動作では、一定泳速度で推進している状況では泳者が発揮する推進力と泳者の身体に働く自己推進時抵抗が等しいとみなすことができる。よって、自己推進時抵抗が大きいと推察される6 ビート泳法での試技では、その自己推進時抵抗に打ち勝って前に進むために手部以外の部位で推進力を発揮していたと推察される。クロール泳の上肢動作では、手部以外には前腕部で推進力が発揮されることが考えられるが (Toussaint et al., 2002)、手部に近接し、手部とほぼ同じスピードで水中を移動する前腕部のみの推進力が増加するとは考え難い。よって、6 ビート泳法での試技では、2 ビート泳法での試技と比較して大きな自己推進時抵抗に打ち勝って前に進むため、キック動作によって推進力が発揮された可能性が考えられる。自己推進時抵抗増大の要因となるキック動作が推進力を発揮するという考えは、一見すると矛盾するように考えられるが、クロール泳の上肢動作も自己推進時抵抗増大の要因になることは明らかとなっているように、泳動作では推進力を発揮するための動作自体が抵抗力を生み出すこととなる。そのため、水泳におけるエネルギー消費の大部分が抵抗力に打ち勝つために費やされることとなり (Prampero, 1986)、水泳のパフォーマンスを制限するひとつの要因となっている。

一方で、キック動作によって身体が水平に保たれ、身体位置が高くなることにより、自己推進時抵抗が低減することも考えられる。先行研究では、上肢のストローク動作によって下肢が沈むような鉛直方向のトルクが生じ、そのトルクを相殺して下肢が沈まないようにするトルクをキック動作が生成しているという報告 (Yanai, 2001) や、競技力の高い泳者は大転子の位置が高く、大転子位置を高めるためにキック頻度を高めることが有効と提案している報告 (Correia et al., 2018) がなされている。本研究においては、2 ビート泳法と6 ビート泳法における自己推進時抵抗の比較をできていないが、近年開発されたMRT法 (成田ほか, 2018; Narita et al., 2018) などを用い、身体に働く自己推進時抵抗とキック頻度との関係を調査できれば、クロール泳におけるキック動作は推進力を発揮しているのか、もしくは抵抗力を低減する役割を果たしているのか明らかにすることができる。さらに、現状では水泳中の泳者の身体周りの水の流れを3次元的に可視化する分析技術が確立されていないため、どのようなメカニズムによってキック動作が推進力を発揮しているか説明することはできない。今後、PIVといった分析技術がさらに発展し、泳者周りの流れ場を3次元的に分析できるようになれば、クロール泳におけるキック動作が

どのように推進力を発揮し、どのような動作によって抵抗が増大するのか明らかにすることができるだろう。

本研究での推進力係数 A は、MAD システムや MRT 法を用いて全身に働く自己推進時抵抗を推定した先行研究（成田ほか, 2018; 角川ほか, 2019）と比較して低い値を示した。これは、実施した試技の違いや、推定した推進力が発揮される部位の違いによるものと考えられる。クロール泳において泳者は前腕やキック動作といった手部以外の部位でも推進力を発揮している可能性がある。そのため、本研究では泳者が全身で発揮する推進力の全てを推定することはできておらず、推進力の大きさに関係する推進力係数 A が低くなったと考えられる。一方で、本研究と同様に圧力分布計測とモーションキャプチャを用い、脚部にブイを挟んで上肢動作のみを行った試技における手部の推進力を推定した先行研究（Tsunokawa et al., 2019; 角川ほか, 2019）と比較すると、本研究での推進力係数 A は高い値を示した。先行研究においてキック動作によって自己推進時抵抗が増大することが報告されている（Narita et al., 2018）ことから、本研究ではキック動作によって自己推進時抵抗が増大し、推進力係数 A が高くなったと考えられる。また、推進力指数 n は自己推進時抵抗や手部推進力を推定した先行研究（Narita et al., 2018; 成田ほか, 2018; Tsunokawa et al., 2019; 角川ほか, 2019）と比較して低い値を示した。本研究では、全身で発揮する推進力の全てを推定してはいないため、例えば泳速度が高くなってキック動作による推進力の貢献度が高くなる場合は、手部での推進力指数 n は低くなると考えられる。

本研究では全力で行った 10 試技目における平均泳速度は、6 ビート泳法での試技が有意に高い値を示した。一方で、10 試技目における平均手部推進力にはキック頻度の違いによる有意な差は認められず、全力で泳いだ場合はどちらのキック頻度においても手部で同程度の推進力を発揮していたと考えられる。泳動作中の身体に働く自己推進時抵抗は泳速度の増加に伴って増加することや、前述の通り 6 ビート泳法での自己推進時抵抗が 2 ビート泳法と比較して高いと推察されることから、全力で行った 10 試技目において 6 ビート泳法の方が高い推進力を発揮していたと推察される。つまり、全力で行った試技においてもキック動作が推進力として貢献し、平均泳速度を高める結果となったと考えられる。

しかしながら、クロール泳ではキック動作によって推進力が発揮されるからと言って、レースにおいて必ずしもキック頻度を高めて泳ぐことが最善とは言えない。クロール泳における上肢と下肢の動作を考えると、上肢動作では手部が前方から後方へと移動するため直接的に推進に貢献し、エネルギーの有効性が高いと考えられるが、下肢によるキック動作では、左右の脚部を上下へ交互に動かすため、水しぶきや造波といったロスされるエネルギーが多く、有効性が低いと考えられる。このような理由から、競泳選手はレース距離に応じて自然にキック頻度を選択し、長距離種目では低いキック頻度、短距離種目では高いキック頻度を用いていると考えられる。特に短距離種目では、有効性や経済性を犠牲にしても、より高い泳速度を達成することが勝敗を左右するため、多くの選手が 6 ビート泳法でレースに臨んでいると考えられる。

また、本研究では 2 ビート泳法と 6 ビート泳法を比較し、推進力指数 n に有意な差が認められたものの、Fig. 3 に示す通り対象者によって泳法間の差の大小には差が見られた。例えば、対象者 E は泳法間の差が小さく、6 ビートキックを行って脚部を多く動作させたとしても、キック動作による推進力の貢献が低く、2 ビート泳法と同程度の手部推進力を発揮する必要があったと推察される。このように、キック動

作の技能によってはキック動作が推進に貢献するのではなく、自己推進時抵抗の増大につながり、レースでの体力の消耗や泳速度向上の妨げになる可能性がある。そのため、キック動作による抵抗力増大を防ぐため、水しぶきや造波を抑え、足部周りの水を後方へ効率よく押し出すことができる動作を習得することが大切である。

V. まとめ

本研究は、2種類のキック頻度でのクロール泳中における手部の推進力を様々な泳速度で分析し、キック頻度の違いが手部の推進力と泳速度との関係に及ぼす影響を検討することを目的として実施した。その結果、同泳速度では2ビート泳法と比較して6ビート泳法での平均手部推進力が低いことが明らかとなった。また、全力で泳いだ場合は、キック頻度の違いによる平均手部推進力の差は見られなかったが、キック動作による推進力発揮により、6ビート泳法の方が高い泳速度を達成できることが明らかとなった。しかしながら、対象によってはキック頻度の違いによる差が小さかったため、キック動作の有効性を高めることの重要性が示された。

文献

- Correia, R. A., Feitosa, W. G., Franken, M., Matos, C., and Castro, F. A. S. (2018) Hip depth and performance in 400 m front crawl test. In Japanese Society of Sciences in Swimming and Water Exercise (eds.), Proceedings of the XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming. Impress R & D: Tokyo, pp.36–39.
- Deschodt, V. J., Arsac, L. M., and Rouard, A. H. (1999) Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology*, 80(3): 192-199.
- 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. *Journal of Biomechanics*, 41: 208–215.
- Hollander, A. P., De Groot, G., van Ingen Schenau, G. J., Roel kahman., and Toussaint, H. M. (1988) Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. *Swimming Science*, V: 39-43.
- 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.
- Narita, K., Nakashima, M., and Takagi, H. (2018) 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.
- Prampero, P. E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine*, 7, 55-72.

- 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 Jyvaskyla: Jyvaskyla, pp. 101–106.
- 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.
- 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. *Human Movement Science*, 57: 409–416.
- Tsunokawa, T., Mankyu, H., Takagi, H., & Ogita, F. (2019). The effect of using paddles on hand propulsive forces and Froude efficiency in arm-stroke-only front-crawl swimming at various velocities. *Human movement science*, 64, 378-388.
- 角川隆明・萬久博敏・荻田太 (2019) 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. *体育学研究*, 64: 385–400.
- Yanai, T. (2001) Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: does it really cause the legs to sink? *Journal of Biomechanics*, 34(2): 235-243.
- Winter, D. A. (2009) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.