

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11384

研究課題名(和文) 身体各部位に働く流体力評価による泳動作の推進機序の解明

研究課題名(英文) Analysis of propulsive mechanism of swimming motion by evaluating fluid forces acting on each body segment

研究代表者

角川 隆明 (Tsunokawa, Takaaki)

筑波大学・体育系・助教

研究者番号：00740078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、クロール泳中のキック動作を変化させることで、手部推進力や全身に働く自己推進時抵抗がどのように変化するか調査し、泳動作における上肢動作、下肢動作の役割をそれぞれ評価した。その結果、キック動作を増加させることで手部推進力や自己推進時抵抗が減少することが明らかとなった。これまで、クロール泳におけるキック動作の役割について一致した見解は得られていなかったが、本研究の結果によりキック動作が推進力を発揮し、さらに全身に働く自己推進時抵抗を減少させる役割を担っていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水泳は水中で行われる運動であるため、身体が水から受ける抵抗力や、四肢の動作によって発揮される推進力によって泳パフォーマンスが決定する。これまで、泳動作中の手部によって発揮される推進力は評価されてきたが、キック動作が推進力を発揮しているのか、さらには抵抗力増大の要因になるのか否かが明らかにされていなかった。本研究では、圧力分布計測を用いた手部推進力の評価に加え、近年考案されたMRT法を用いて、全身に働く自己推進時抵抗を評価し、キック動作の間接的な評価を試みた。その結果、クロール泳においてキック動作が推進力を発揮するだけでなく、抵抗削減の役割も担っている可能性を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the effects of changing the kicking motion on hand propulsive forces and active drag acting on whole body during front-crawl swimming and evaluated the roles of upper and lower limb motions. The results showed that hand propulsive forces and active drag were decreased by increasing the kicking motions. Previous studies have not reached a consensus on the role of kicking motions in front-crawl swimming. In the present study, we found that the kicking motion has a role in providing propulsive forces and decreasing the active drag acting on the whole body.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：水泳 推進力 抵抗力 圧力 競泳競技 クロール キック

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水泳運動では、泳者は水に運動量を与えて推進力を得る一方で、泳者の身体は水から抵抗力を受けて常に推進を妨げられている。そのため、水泳運動に関するバイオメカニクス的研究では、泳者の身体に働く流体力や推進力、抵抗力の評価が試みられてきた。

しかしながら、クロール泳中のキック動作に関しては気泡や乱流によって下肢の視認性が低く、推進力や抵抗力の評価が困難であった。そのため、クロールのキック動作が推進に貢献しているのか、または抵抗増大の要因となっているのか明らかにされていなかった。そのような中で、近年では小型圧力センサを用いて泳者の身体表面の圧力分布を計測して流体力を評価し、泳者が手部で発揮する推進力を評価する研究や、回流水槽にて泳者とロードセルを接続し、余剰推進力から泳者の全身に働く抵抗力を評価する研究が進められている。

現状では、キック動作によって生じる流体力を定量化し、推進力や抵抗力を検討する方法論は確立されていないが、泳動作中の全身に働く抵抗力や手部で発揮される推進力から、間接的にキック動作を評価できる可能性が考えられる。キック動作による推進力や抵抗力を明らかにし、泳動作の推進メカニズムを明らかにすることができれば、水泳選手が競技力を向上させる上で重要な知見が得られると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、泳動作中の身体各部位に働く流体力を評価して推進メカニズムを明らかにし、水泳選手の競技力向上に資する知見を得ることを目的とした。目的を達成するため、泳者の全身に働く抵抗力の評価と、泳者が手部で発揮する推進力の評価を実施し、キック動作によって発揮される推進力や、キック動作に伴って生じる抵抗力を明らかにした。さらに、キック動作の変化が全身に働く抵抗力や手部で発揮する推進力に及ぼす影響について調査し、身体各部位に働く流体力から泳動作の推進メカニズムについて検討した。

3. 研究の方法

(予備実験) クロール泳中の上肢の各部位における圧力変動の調査

クロール泳での上肢による推進力発揮の調査に先立ち、小型圧力センサを用いてクロール泳中の手部、前腕部、上腕部の圧力変動を計測した。実験では男子大学競泳選手 1 名を対象とした。その結果、クロールの上肢動作に伴って各部位の圧力値に変動は見られたが、前腕部と上腕部は手部と比較して変動が大幅に小さいことが明らかとなった。これは、手部は平板に近い形状であるのに対し、前腕部や上腕部は円柱に近い形であることが関連していると推察された。

さらに、リカバリー動作後に上肢が入水するタイミングで各部位の圧力値が大きく変動し、上肢に抵抗力が生じていることが示唆されたが、入水直後には圧力値の変動は小さくなり、水中ストローク動作中には大きな抵抗力は作用していないことが示唆された。

これらのことから、クロール泳において前腕部や上腕部には大きな推進力や抵抗力が生じないことが示唆された。そのため、本研究では上肢動作によって発揮される推進力の大部分は手部によって発揮されると仮定し、手部に着目して推進力を推定することとした。

(課題 1) クロール泳のキック動作の違いが手部推進力に与える影響の調査

男子大学競泳選手 4 名を対象として、クロール泳中の手部で発揮される推進力を推定した。実験は回流水槽にて実施し、流速は全身に働く抵抗力の測定と統一するため、全ての対象者において 1.40 m/s に設定した。実験では、上肢による左右のストローク動作 1 周期中に左右の脚で 6 回のキック動作を行う 6 キック条件と、2 回のキック動作を行う 2 キック条件の 2 条件で実施した。いずれの条件においても 10 秒間のクロール泳を行い、回流水槽内での位置を一定にすることで設定した流速である 1.40 m/s に泳いでいる状況に設定した。さらに、各条件においてキック動作以外の動作を統一するため、ストローク頻度は事前に測定した泳速度 1.40 m/s における 2 キック泳法でのストローク頻度に統一して試技を実施した。

試技中は左右それぞれの手部 3 ヶ所の手背側と手掌側に計 12 個の小型圧力センサを対にして貼付し、手掌側と手背側の圧力差を計測した。そして、手掌側と手背側の圧力差に手部平面積を乗じて手部に働く流体力を算出した。さらに、手部 4 点には LED 自発光マーカーを貼付し、モーションキャプチャーにて試技中の手部各点の 3 次元実座標を取得した。取得した 3 次元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、法線ベクトルと流体力の作用方向は一致しているものと仮定し、手部に働く流体力を作用方向に分解した。本研究では、推進方向に働く流体力を手部推進力と定義し、10 秒間の平均値を算出した (図 1)。

(課題 2) クロール泳のキック動作の違いが全身に働く抵抗力に与える影響の調査

男子大学競泳選手 4 名を対象として、クロール泳中の全身に働く抵抗力を推定した。実験は回流水槽にて実施し、抵抗力を計測する基準流速は手部推進力の測定と統一するため、全ての対象者において 1.40 m/s に設定した。実験では、上肢による左右のストローク動作 1 周期中に左

右の脚で 6 回のキック動作を行う 6 キック条件と、2 回のキック動作を行う 2 キック条件の 2 条件で実施し、ストローク頻度は手部推進力の測定と統一して実施した。

クロール泳中の全身に働く抵抗力は、先行研究 (Narita et al., 2018) にて報告されている MRT 法 (Measured values of Residual Thrust: MRT) を用いて推定した。泳者がある泳速度で泳ぐための泳動作を維持している際、回流水槽の流速のみを変化させると、推進力と抵抗力は流速に対応して変化する。このような流速の変化による推進力と抵抗力の差が余剰推進力であり、MRT 法ではこの余剰推進力と流速との関係から自己推進時抵抗を推定する。本研究では、全ての試技において 1.40 m/s を評価対象泳速度とした。対象者は、まず自由泳で 1.40 m/s にて 2 ビート条件でのクロール泳を 10 秒間実施し、その際の平均ストローク頻度をストップウォッチにて手動で測定した。その後、小型の防水メトロノーム (Tempo trainer Pro, FINIS) を 2 ビート条件の自由泳試技で測定したストローク頻度に設定し、余剰推進力測定のための試技を 2 条件のキック頻度でそれぞれ 9 回繰り返し実施した。対象者は、メトロノーム音を参考にしながら同じストローク頻度で泳動作を維持するように努めた。回流水槽の流速は、1 回目の試技を自由泳試技と同じ 1.40 m/s に設定し、その後は 1.40 m/s を除いた 1.20 m/s から 1.60 m/s の範囲内で流速を 0.05 m/s 間隔で 8 段階に設定して試技を実施した。各試技ではストップウォッチを用いて手動で平均ストローク頻度を測定し、メトロノームで設定したストローク頻度から ±2% 以内の誤差で泳げていることを確認した。ストローク頻度の誤差が大きい場合は同じ流速での試技を再び実施した。試技中は余剰推進力を計測するため、泳者の腰部に取り付けたベルトと前後に設置したロードセル (LUX-B-2KN, 共和電業) をワイヤーで接続し、前後方向から泳者を牽引した。ロードセルで計測された力はユニバーサルレコーダ (EDX-100A, 共和電業) を介して 100 Hz で PC にデータ集録した。各試技では泳動作が安定してから 10 秒間の余剰推進力を計測した。条件における自己推進時抵抗は、それぞれの条件にて測定された計 9 流速における余剰推進力に最も近似するように回帰曲線を導出して決定した。x 軸を流速、y 軸を余剰推進力として回帰曲線を導出したとき、回帰曲線の y 切片が自己推進時抵抗、x 切片が泳速度となる (図 2)。

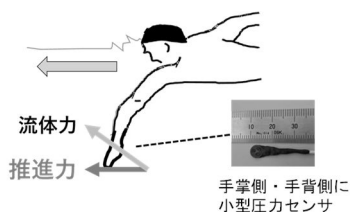


図 1 圧力測定による手部推進力の推定

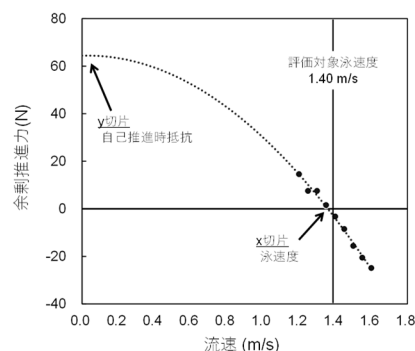


図 2 全身に働く抵抗力算出の概略 (回帰曲線)

4. 研究成果

(課題 1) クロール泳のキック動作の違いが手部推進力に与える影響の調査

圧力分布計測とモーションキャプチャーを併用し、泳速度 1.40 m/s における 2 キック条件と 6 キック条件での手部推進力を計測した。その結果、4 名の対象者の平均値は 2 キック条件において 31.8±4.5 N、6 キック条件において 24.7±6.5 N であり、1 ストローク周期中のキック数を増加させることで手部推進力が減少した。

キック動作の有無がクロール泳中の自己推進時抵抗に与える影響について調査した先行研究 (Narita et al., 2018) では、キック動作を行うことで全身に働く自己推進時抵抗が増加すると報告されているため、1 ストローク周期中のキック数が多い 6 キック条件では手部推進力が大きくなると仮説を立てたが、それに反する結果となった。このことから、先行研究での結果に反し、1 ストローク周期中のキック数を増加させることで全身に働く自己推進時抵抗が減少するか、もしくはキック動作が推進力を発揮し、手部で賄われる推進力が減少したと推察された。課題 1 での結果を踏まえ、課題 2 では 1 ストローク周期中のキック数を増加させることで、全身に働く自己推進時抵抗が増加するか否か調査することを課題とした。

(課題 2) クロール泳のキック動作の違いが全身に働く抵抗力に与える影響の調査

回流水槽にて MRT 法を用い、泳速度 1.40 m/s における 2 キック条件と 6 キック条件での全身に働く自己推進時抵抗を計測した。その結果、4 名の対象者の平均値は 2 キック条件において 60.9±5.6 N、6 キック条件において 47.2±7.9 N であり、1 ストローク周期中のキック数を増加させることで全身に働く自己推進時抵抗が減少した。これは、同様の方法を用いて測定を実施した先行研究 (Narita et al., 2018) と異なる結果であった。

Narita et al. (2018) の先行研究では、ストローク頻度を統一していないため、キック動作の有無以外にも泳動作の違いがあったと考えられる。それに対し、本研究では泳速度、ストローク頻度、ストローク長を統一し、1 ストローク周期中のキック数のみを変化させたため、先行研究と異なる結果が得られたと考えられる。また、キック数以外の要因を統制したことにより、キッ

ク動作の変化が自己推進時抵抗に及ぼす影響について正確に評価できたと考えられる。

課題 1 および課題 2 の結果から、1 ストローク周期中のキック数を増加させることで、手部推進力と全身に働く自己推進時抵抗が共に減少することが明らかとなった。さらに、課題 1 で明らかとなった手部推進力の減少の程度と比較して自己推進時抵抗の方が大幅に減少することが明らかとなった。これらのことから、キック動作によって推進力が発揮されただけでなく、身体が受ける抵抗力自体が減少したものと考えられる(図 3)。特に、6キック条件では絶え間なくキック動作を行うことで、上肢のストローク動作によって推進力を発揮していない期間においてもキック動作によって推進力が発揮され、身体に加減速や上下動に影響を及ぼした可能性が考えられる。泳動作中は身体周りの水も身体の動きとともに加減速しており、付加質量と呼ばれている。この付加質量は自己推進時抵抗の大きさや、泳動作の効率にも影響を及ぼすこととなる。キック動作によって身体に加減速が抑制され、それに伴って付加質量も減少したと考えれば、より少ない生理的エネルギーで泳ぐことが可能となり、泳パフォーマンス向上に貢献すると考えられる。

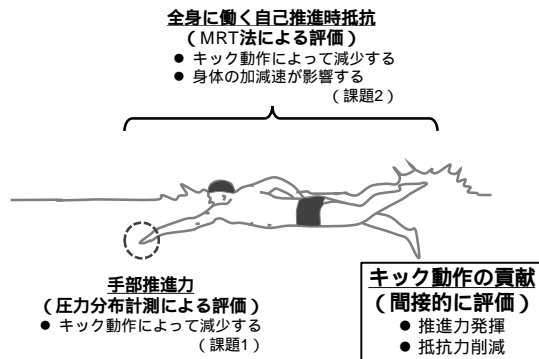


図3 研究成果の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koga Daiki, Tsunokawa Takaaki, Sengoku Yasuo, Homoto Kenta, Nakazono Yusaku, Takagi Hideki	4. 巻 4
2. 論文標題 Relationship Between Hand Kinematics, Hand Hydrodynamic Pressure Distribution and Hand Propulsive Force in Sprint Front Crawl Swimming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fspor.2022.786459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 古賀大樹・角川隆明・仙石泰雄・本間三和子・高木英樹	4. 巻 66
2. 論文標題 クロール泳におけるストローク頻度と手部推進力の関係	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 体育学研究	6. 最初と最後の頁 207～218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5432/jjpehss.20123	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kadi Tomoya, Wada Tomohito, Narita Kenzo, Tsunokawa Takaaki, Mankyu Hirotooshi, Tamaki Hiroyuki, Ogita Futoshi	4. 巻 22
2. 論文標題 Novel Method for Estimating Propulsive Force Generated by Swimmers' Hands Using Inertial Measurement Units and Pressure Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6695～6695
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22176695	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 角川 隆明	4. 巻 26
2. 論文標題 泳動作における泳速度と手部推進力の関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 バイオメカニクス研究	6. 最初と最後の頁 12～17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32226/jjbse.2022_003	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 角川隆明, 甫本研太, 中園優作
2. 発表標題 クロールにおけるキック頻度の違いが自己推進時抵抗に与える影響
3. 学会等名 2022年日本水泳・水中運動学会年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------