

背泳ぎの下肢キック動作が推進に貢献する可能性の検討

市川 浩¹⁾ 栗木 明裕¹⁾ 田場 昭一郎¹⁾ 田口 正公¹⁾

Contribution to propulsion of kicking in back stroke swimming

Hiroshi ICHIKAWA¹⁾ Akihiro KURIKI¹⁾ Shoichiro TABA¹⁾ Masahiro TAGUCHI¹⁾

Abstract

The purpose of the study was to quantify propulsive force of kicking motion and to clarify the contribution of the kicking motion to propulsion in back stroke swimming.

A male well-trained college swimmer was participated the experiment as subject. Trials were towing swimming with five different velocities under two conditions as follows, i) keeping gliding posture on his back and ii) kicking in back stroke swimming. The towing system could measure the towing tension F_t and velocity. The accelerometer was attached on swimmer's low back and measured acceleration \ddot{x} along with swimming direction. Passive drag F_d of whole body during kicking trials was quantified by the results of gliding trial and the towing velocity in the kicking trials. The equation of motion was formulated as $m\ddot{x} = F_t + F_d + F_p$ in the swimming direction, where m was the swimmer's mass. The propulsive force of kicking F_p was calculated from the equation and the measurements in kicking trials, when the towing velocity was steady.

The mean propulsive forces of kicking were positive, and the durations of positive propulsive force were more than the durations of negative, although it was more difficult to accelerate water backward in faster swimming. It was observed that the kicking motion produced propulsive force twice in one downbeat and upbeat motion. The findings for back stroke swimming were different from the previous reports for front crawl swimming. It was suggested that the kicking of back stroke swimming would have characteristic propulsive mechanism, which was different from front crawl swimming, and contribute substantially to propulsion.

1) 福岡大学スポーツ科学部

Faculty of Sports and Health Science, Fukuoka University

序論

水泳運動は上肢および下肢動作によって推進力を発生させ、全身の抵抗力との大小関係により、加速減速を繰り返しながら前進する(市川ほか, 2012)。競泳競技種目で用いられるクロール泳(自由形)、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライの4泳法における全身重心の加減速についてはMaglischo et al. (1987)が報告しており、平泳ぎおよびバタフライは下肢によるキック動作局面での加速が観察されている。また平泳ぎについては市川ほか(2010a)もキック動作による加速の様子を報告している。このように平泳ぎおよびバタフライはキック動作が推進へ貢献することが認識されていることから、下肢動作やその推進力発揮に関する報告が見受けられる(杉本ほか, 2008; 角川ほか, 2012)。4泳法中、最速の泳法であるクロール泳については、その推進に上肢が大きく貢献していることが早くから報告され(Hollander et al., 1988)、上肢の推進力発揮に関する研究報告は多数存在する(Schleihauf, 1979; Berger et al., 1999; Lauder et al., 1997; 清水ほか, 2000; 中島ほか, 2005a; Takagi et al., 2002; Kudo et al., 2008; 市川ほか, 2010b)。一方、クロール泳の下肢によるキック動作に関しても近年その役割が議論されており、クロール泳中のキック動作が発揮する推進力は小さく(中島, 2005b)、高速になるほど発揮時間は短い(市川ほか, 2012)ことが報告されている。下肢の役割は、上肢の水中動作が脚を下げる方向に発生した力のモーメントを蹴り下ろし動作(ダウンビート)によって相殺し、全身の水平を保つことにあることが提案されている(Yanai, 2001)。

クロール泳と背泳ぎは上肢によるストローク動作に合わせて全身が加速することから(Maglischo et al., 1987)、背泳ぎに関しても主要な推進力発揮は上肢によるものと考えられるものの、背泳ぎの四肢動作や推進に関する研究報告は少ない(中島, 2005c; 伊藤ほか, 2006)。中島(2005c)はSWUMと呼ばれる水泳人体モデル

(中島ほか, 2005a)による背泳ぎの全身シミュレーションから、推進効率がクロールと同等であることを報告している。伊藤ほか(2006)は手掌部モデルの流体力学的特性を調べ、効率を最大化するためには手掌部を斜めに移動させるS字型プルが、推進力を最大化するためには直線的な軌跡を描くI字型プルが最適な軌跡であることを報告している。背泳ぎの推進に関しては、以上のように全身もしくは上肢に関する報告は存在するものの、下肢によるキック動作の役割についての報告は見受けられない。背泳ぎは全身の向きこそクロール泳と上下逆であるものの、下肢動作は左右を交互に上下させる点では同様であり、キックに関しても一見同様の役割を果たしているようにも感じられる。しかし、クロール泳の上肢動作が水中で体幹部の下方でその軌跡を描く一方で、背泳ぎは身体側方を通過する(財団法人日本水泳連盟ほか, 2006)。また、背泳ぎの足背部で水を押す動作はアップビートにあたり、クロール泳で報告されている様に(Yanai, 2001)全身のバランスをとるために上下肢が力のモーメントを打ち消す関係にない。また背泳ぎのキック動作が推進力発揮に直接貢献していることを裏付けた報告も見受けられない。背泳ぎのキック動作がどのように推進に貢献しているかについての議論やその役割の解明は、技術的なトレーニングやコーチングにおける視点においても重要であるものと考えられる。

本研究は、背泳ぎの下肢キック動作の推進力発揮を実験により定量的に調査し、どのように推進に貢献しているかを力学的に検討することを目的に行った。

方法

対象被験者

背泳ぎを専門種目とする男子学生競泳選手1名(身長: 1.65m, 体重: 62.5kg, 年齢: 22.3yrs, 競技歴: 12yrs, 100m背泳ぎ記録: 58.5sec)を被験者とした。被験者の100m背泳ぎの記録は、国際水泳連盟(Federation Internationale de Nation:

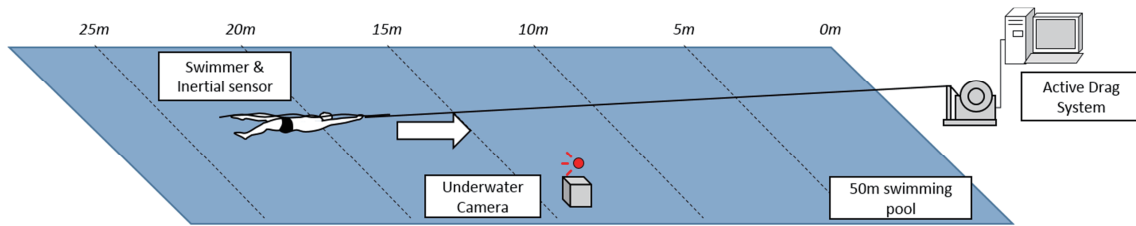


Fig. 1 Experimental settings for gliding and kicking trials.

FINA, 2013) が異なる競技種目間の競技成績を比較するために定めたFINAポイントに換算すると699ポイントにあたる。なお、被験者には事前に実験に関する内容を十分に説明し、参加の同意を得た上で実験を行った。

実験手順

ワイヤの張力および牽引速度を測定可能な牽引装置である Active Drag System (森山製作所製 MDL-G1-1型) を用い、下永田ほか (1998) の手法を参考に泳者を牽引する実験を行った。被験者は上肢を頭部側に挙上し、両手部で牽引用ワイヤ端に取り付けられたグリップを保持した状態で牽引された (Fig. 1)。試技は、i) 仰向けの状態のけのび姿勢 (けのび試技) と ii) 背泳ぎキックの全力泳 (キック試技) の2条件で行った。各条件において25mの牽引泳を5回ずつ実施し、試技ごとに牽引用モーターの出力を漸増した。試技中に Active Drag System から出力される牽引速度を観察し、いずれの条件においても試技の最低平均速度 (第1試技) と最高平均速度 (第5試技) の間に、被験者の100m背泳ぎ最高記録から算出した平均泳速度 (1.71m/s) が含まれるようモーターの出力を調整した。けのび試技後にキック試技を実施し、全力泳であるキック試技は試技間に十分な休息をとるよう考慮した。試技中の牽引張力と牽引速度はサンプリング周波数50Hzで記録した。被験者腰部にワイヤレス慣性センサロガー (ロジカルプロダクト社製 LP-WS0905) を装着し、被験者の体幹長軸方向の加速度をサンプリング周波数200Hzで測定した。試技中の水中動作を観察できるよう、泳者右側方から水中ムービーカ

メラ (Sanyo社製 DMX-WH1E) を用いて59.97Hzで撮影した。それぞれの測定および撮影は、同期信号発生装置 (ロジカルプロダクト社製 LP-WSY11) とLED発光装置 (DKH社製 PH-110A) を用いることで、分析の際に測定および撮影時刻を一致できるように設定した。

分析手順

けのび姿勢を牽引した試技で得られる牽引張力は泳者全身の受動抵抗 F_{pd} と一致する。けのび姿勢時の泳速度 v と受動抵抗 F_{pd} の関係は、抵抗係数を C_d 、水の密度を ρ 、泳者の代表面積を S とすることで、

$$F_{pd} = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2 \quad (式1)$$

とおくことができる (高木ほか, 1997)。同一環境、同一被験者、姿勢一定であれば、水の密度と代表面積、抵抗係数を一定のものとして扱えることからこれらの積を定数 $C_d' = \frac{1}{2} \rho C_d S$ とし、さらに清水ほか (2004) の報告に基づいて、速度の指数部分を変数 n とすることで、

$$F_{pd} = C_d' v^n \quad (式2)$$

の形に整理できる。けのび試技で得られた牽引速度 v と牽引張力 F_{pd} との関係から、最小二乗法によりこの係数 C_d' と速度の指数部分 n を算出した。

キック試技に関しては、泳者の身体に働く力の推進方向成分のみを対象に分析を行った。Active Drag System による牽引張力を F_t 、泳者全身の抵

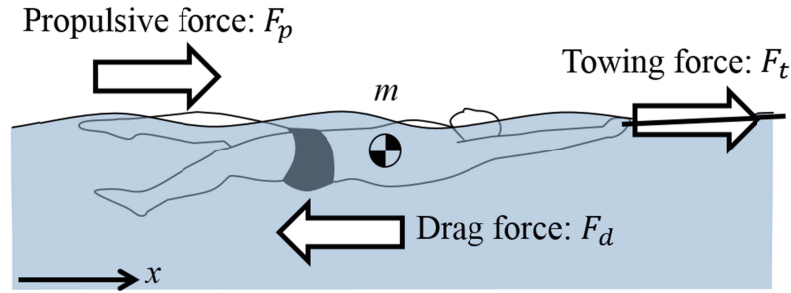


Fig. 2 Hydrodynamic model to calculate propulsive force by kicking motion in back stroke swimming.

抗を F_d , キック動作によって発揮される推進力を F_p とする. 泳者の質量を m とし, 全身重心の加速度の推進方向成分を \ddot{x} とすると, 泳者に関する運動方程式は,

$$m\ddot{x} = F_t + F_d + F_p \quad (式3)$$

となる (Fig. 2) . ただし, 抵抗力 F_d は進行方向と逆向きに働くため, $F_d < 0$ となる. 本研究では, キック試技時の全身の抵抗力 F_d を受動抵抗で代替するものとし, キック試技時に Active Drag System で測定した牽引速度 v を式2に代入することで算出した. また, 加速度 \ddot{x} は慣性センサロガーで測定した泳者加速度の体幹長軸方向成分を用いるものとした. 各測定結果を元に, 式3を変形した

$$F_p = m\ddot{x} - F_t - F_d \quad (式4)$$

により, 泳者のキック動作による推進力 F_p を算出した. なお, F_p の算出は泳速度が定常状態となった区間を対象とするために, 測定した牽引速度 v の連続した4秒間の標準偏差が最小となる区間を扱うものとした.

結果

けのび試技による受動抵抗算出式の決定

けのび姿勢を牽引した5試技の牽引速度はそれ

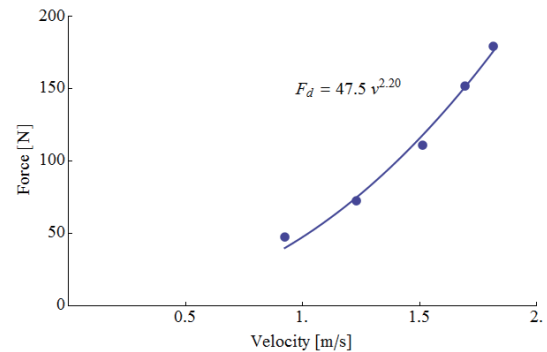


Fig. 3 Relationship between towing velocity and force in gliding trials.

ぞれ 0.92, 1.23, 1.51, 1.69, 1.82m/s であった. また牽引張力は 47.24, 72.64, 111.1, 151.9, 179.1N であった. これにより受動抵抗を得るための式2の係数 C_d' は 47.5, 速度の指数部分 n は 2.20 となった. 速度-張力平面上に測定結果と得られた式2を描いたものをFig. 3に示した.

キック試技における推進力の算出

キック全力泳を牽引した5試技において, 牽引速度が安定した区間の平均速度は 1.32, 1.62, 1.82, 1.90, 1.95m/s であった. キック試技によって得られた, 安定速度区間の牽引張力・受動抵抗・加速度の挙動を試技別にそれぞれFig. 4に示した. この区間における平均牽引張力は各試技において 10.37, 44.46, 113.4, 142.9, 166.2 N であり, 受動抵抗の平均値は -87.22, -136.5, -177.9, -195.2, -205.2 N であった. 加速度の推進方向成分は各試技で,

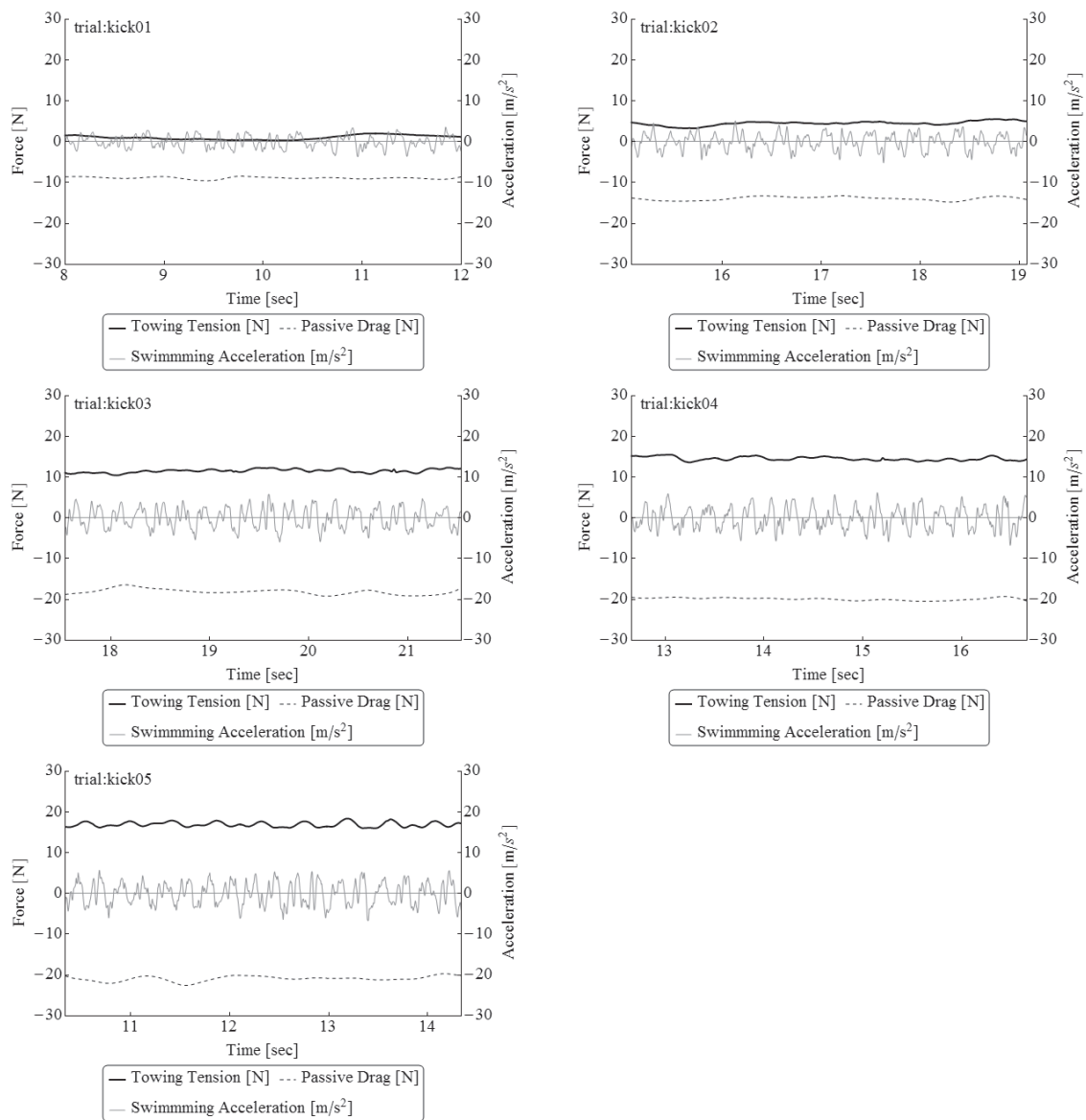


Fig. 4 Towing tension, passive drag and swimming acceleration measured during kicking trials in back stroke.

-3.22~3.58, -4.41~4.59, -5.39~5.63, -5.81~5.48, -6.66~5.55m/s² の範囲で増減を繰り返していた。

キック動作による推進力の算出結果を試技別にFig. 5に表した。それぞれの試技の安定区間における平均推進力は 77.07, 92.01, 64.65, 52.01, 39.63N であり、最大値が 315.4, 434.5, 442.2, 474.7, 437.4N, 最小値が -174.3, -254.9, -339.1, -398.1, -396.3N であった。算出した推進力の推移は正弦波のように単純な波形ではなく、1周期の間に増減を繰り返し、またその様子は不安定なも

のであった。安定区間において推進力が正となる時間は各試技で、76.2, 74.1, 60.7, 57.7, 57.3% であり、高速試技ほど推進力発揮の時間が相対的に短くなる様子が見て取れた。1周期は概ね正と負の2局面に区別できるが、正の局面中に急減し、0N以下に達する場合があることも観察された。推進力推移と水中映像を合わせて観察したところ、左右下肢を上下に最も開く前後の時間帯で推進力は正の値をとっており、最も開いたときに急減する様子が見てとれた。また推進力が負の局面

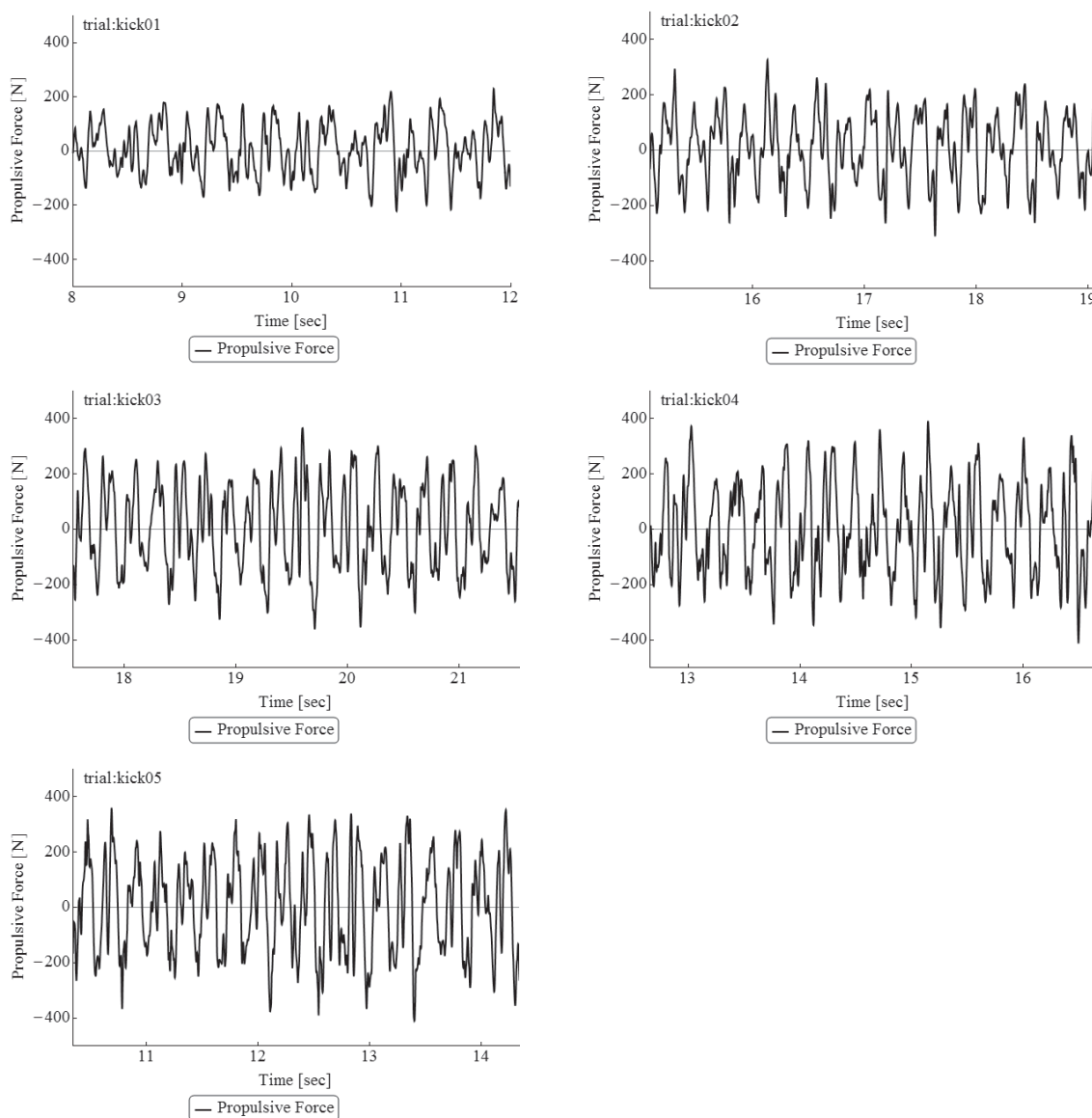


Fig. 5 Calculated propulsive force during kicking trials in back stroke.

をとるのは、左右下肢が近づき、すれ違う時間帯であった。下肢動作と推進力に関する、これらの時刻の一致はいずれの試技においても確認された。

考察

けのび試技による受動抵抗の算出

けのび姿勢時の牽引抵抗に関する報告はいずれも腹臥位つまり下向きに姿勢よるものであり（野

村ほか, 1993; 清水ほか, 2004）, 本研究のように背泳ぎを対象にした仰臥位のけのび姿勢に関する牽引抵抗の報告は見受けられない。腹臥位によるけのび姿勢を牽引することによる速度と張力の測定結果を用いて、本研究と同様の計算式（式2）から係数と速度の指数を求めた報告に、清水ほか（2004）と野村ほか（1993）によるものがある。清水ほか（2004）は男性13名女性11名の学生競泳選手を対象に調査し、平均係数は男女それぞれ 30.84 ± 3.14 と 24.89 ± 2.67 であり、平均指数

は 2.15 ± 0.11 と 2.19 ± 0.12 であったことを報告している。野村ほか(1993)は男子水泳選手4名を対象とした調査で、係数は 33.5 ± 3.2 、指数は 1.68 ± 0.19 と報告している。今回得られた仰臥位のけのび姿勢時の係数はこれらよりも比較的大きな値が得られており、同じけのび姿勢でもその向きによって流体力学的な特性が異なる可能性もある。ここで姿勢の向きの違いと牽引抵抗の関係について議論はできないものの、背泳ぎに関する力学的な報告や情報が少ないことから今後の調査が望まれる。

キック試技による推進力算出

キック試技において、牽引張力の増加に伴い、泳速度・受動抵抗が増加している様子が見てとれる。いずれの試技においても牽引張力に比して受動抵抗が大きい (Fig. 4)。もし下肢によるキック動作を行わなければ、より低い速度で牽引張力と受動抵抗が釣り合うこととなるが、キック試技では、下肢動作が受動抵抗と牽引張力の差を補う形で推進力を発揮する役割を果たし、より高い泳速度を維持したものと考えられ、その結果、いずれの試技においても平均推進力が正の値をとったものと考えられる。

市川ほか(2012)は本研究と同様の手法によりクロール泳のキック動作が発揮する推進力を算出している。比較的低速で推進している場合、下肢によるキック動作が水を後方に加速することで泳速度を維持することでは可能であると考えられるが、上肢を合わせて動作させることで推進速度が高くなるほど、下肢が水を加速させ推進力を発揮することは困難であることが予想される。市川ほか(2012)によるクロール泳における報告はこのことを裏付ける結果となっており、高速になるほど下肢が発揮する推進力は低下し、抵抗となる時間が長くなることを示している。またクロール全力泳に相当する速度以上の試技では、平均推進力は負となり、キック動作が抵抗の要因にもなりうることを報告している。これらは、クロール泳における下肢の役割は推進力を発揮することより

も、ダウンビート時の脚を持ち上げる方向へ働く力のモーメントが全身の水平を保ち、全身の抵抗を減少させることで推進に貢献するという Yanai (2001) や中島 (2005b) の報告を支持するものであった。背泳ぎを対象とした本結果においても、高速試技では推進力発揮の時間が相対的に短くなり、下肢が水を後方に加速することの技術的な難しさを裏付けている。しかし、被験者の100m背泳ぎ最高記録から算出した泳速度 (1.71m/s) を超える高速条件下であっても (第3～第5キック試技)、推進力発揮時間は50%を超え、平均推進力も正の値を維持している。これらの結果はクロール泳の報告とは大きく異なる。背泳ぎのキック動作には水を後方へ加速する、クロール泳とは異なる技術が存在していることを示唆している。

算出されたキック動作による推進力の推移はかなり不安定ではあるものの、キック動作半周期中に2回の正の極大値が存在することが観察できる。それら2回の極大の間に急減する時間帯があり、この時刻付近は左右下肢が最も開いた状態となっていた。左右下肢が上下に開いた状態から、左右それぞれの下肢が蹴り下ろし動作 (ダウンビート) と蹴り上げ動作 (アップビート) を開始する。2回目の極大値はダウンビートとアップビート開始直後に観察され、減少後、両下肢がほぼ水平に揃う時刻付近から負となる。再度増加し正の極大となるのはダウンビートとアップビートが終了する直前であった。Maglischo (2003) はアップビートで膝を伸ばし始めた直後に推進力を発揮し、ダウンビートでは推進力は発揮しないと述べているが、それでは今回観察された2回の正の極大値の出現は説明できない。アップビート開始時だけでなく、左右下肢が最も開く直前、つまりそれぞれの下肢がダウンビートとアップビートを終える直前の動作が推進力を発揮しているものと考えられる。水中映像を観察した限りでは、アップビート終盤に足部が水面付近を蹴り上げる動作が水を効果的に後方に加速するように見受けられたものの推察の域を出ない。

ここで得られた知見は、対象となった被験者固有の現象である可能性がある。背泳ぎの下肢キック動作の一般的な特性と位置づけるためには、十分な数の泳者に対しての調査が必要であろう。しかし、クロール泳とは異なる推進メカニズムや推進貢献の仕方が背泳ぎのキック動作にはあることを本研究結果は十分に示しているものと考えられる。ここで用いられた手法はキック動作による推進力発揮の様子を定量的に得ることはできるが、左右下肢どちらの動作によるものか、またはそれ以外の要因によるものかについては区別ができない。背泳ぎのキック動作に関する従来の説明 (Maglischo, 2003) 以外に推進力発揮を生み出す動作を特定するために、各要因を区別する手法による調査が必要と考えられる。推進力発揮動作が明らかとなることで、クロールを反転させた動作 (財団法人日本水泳連盟ほか, 2006) とされていた背泳ぎの泳技術指導上のポイントが明確となることが期待できる。また、高速泳時においてもキック動作が推進力を十分に発揮できることの一般性が裏付けられれば、主要な推進力発揮源とされていた上肢に重点を置いた技術論から新たに下肢動作の活用を目指す技術・体力トレーニング手法が検討され、最終的な目標である泳記録の向上に貢献できるものと考えられる。これらのような背泳ぎ固有の技術についての議論が展開されることは、学術的な興味関心も高め、これまで質・量ともに不足していた背泳ぎに関する調査・研究がより促進されることも期待できるものと考えられる。

結論

本研究は背泳ぎの下肢キック動作による推進力発揮の様子を、牽引装置を用いた実験により定量化し、どのように推進に貢献しているかを力学的に検討することを目的に行われた。これにより以下の知見を得た。

- ・背泳ぎ全力泳を上回る泳速度においてもキック

動作が推進力を発揮する技術が存在し、推進力発揮源としての役割を有する。

- ・背泳ぎの下肢による1回のアップビートとダウンビート動作中に2回の推進力発揮局面が存在し得る。
- ・これらの特徴は過去に報告されたクロール泳におけるキック動作の推進貢献の仕方とは大きく異なる。

今後、背泳ぎ技術に関する力学的な情報の蓄積と、左右下肢それぞれの推進力発揮に関する詳細な調査が進められることで、下肢による推進メカニズムを解明することが望まれる。また、それらの成果が泳法指導やトレーニングの場で活用されることでパフォーマンス向上の一助となり、背泳ぎ技術に関する調査・研究が一層促進されることが期待される。

文献

Berger, M.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.

Hollander, A.P., De Groot, G., Van Ingen Schenau, G.J., Kahman, R., Toussaint, H.M. (1988) Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. *Swimming science V*: 39-43.

市川浩, 三輪飛寛, 下門洋文, 下山好充, 大庭昌昭 (2010a) 肘・膝・大転子の3点デジタイズによる平泳ぎの全身重心速度推定. 日本水泳・水中運動学会2010年度年次大会講演論文集: 76-77.

市川浩, 三輪飛寛, 武田剛, 高木英樹 (2010b) クロール泳の推進における前腕の貢献. *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2010講演*

論文集: 110-114.

市川浩, 田原亮二, 田場昭一郎, 田口正公
(2012) クロール泳のキック動作が推進に貢献する可能性の検討. 日本水泳・水中運動学会2012年度年次大会講演論文集: 120-123.

伊藤慎一郎, 樋口竜也 (2006) 背泳ぎの最適ストローク. 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集2006: 405.1-405.4.

Kudo, S., Yanai, T., Wilson, B., Takagi, H., Vennelf, R. (2008) Prediction of flude forces acting on a hand model in unsteady flow conditions. *Journal of Biomechanics*, 41: 1131-1136.

Lauder, M.A., Dabnichki, P., Bartlett, B.M., McKee, T. (1996) Direct measurement of propulsive forces in swimming using a mechanical arm. *The Engineering of Sport*: 131-138.

Maglischo C.W., Maglischo E.W., Santos T.R. (1987) The relationship between the forward velocity of the center of gravity and the forward velocity of the hip in the four competitive strokes. *Journal of Swimming Research*, 3(2): 11-17.

Maglischo, E.W. (2003) *Swimming fastest. Human Kinetics.*

中島求, 佐藤憲, 三浦康郁 (2005a) 全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルの開発. 日本機械学会論文集B編, 71(705): 1361-1369.

中島求 (2005b) 水泳人体シミュレーションモデルによる標準的6ビートクロール泳の力学的考察. 日本機械学会論文集B編, 71(705): 1370-1376.

中島求 (2005c) 水泳人体シミュレーションモデル

SWUMによる平泳ぎ・背泳ぎ・バタフライの解析. 流体工学部門講演会講演論文集2005: 233.

野村照夫, 合屋十四秋, 松井敦典, 高木英樹 (1993) Reel up systemを用いた水泳時抵抗の評価. 日本体育学会大会号: 771.

Schleihauf, R.E. (1979) A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. *Swimming III*: 70-83.

清水潤, 田口正公, 森誠護 (2004) クロール泳における passive drag, active drag, 最大泳パワーの男女差の検討. 福岡大学スポーツ科学研究, 34: 63-72.

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): 1112-1119.

下永田修二, 田口正公, 田場昭一郎, 青柳美由季 (1998) クロール泳における Active Drag の定量化の試み. 福岡大学体育研究, 28(2): 65-79.

杉本誠二, 中島求, 市川浩, 野村武男 (2008) 水中ドルフィンキックの推進力と関節トルクのシミュレーション解析. *バイオメカニズム学会誌*, 32(2): 90-97.

高木英樹, 野村照夫, 松井敦典, 南隆尚 (1997) 日本人競泳選手の抵抗係数. *体育学研究*, 41: 484-491.

Takagi, H., Sanders, R. (2002) Propulsion by the hand during competitive swimming. *The engineering of Sport 4*: 631-637.

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.

Yanai, T. (2001) Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: does it really cause the legs to sink? *Journal of Biomechanics*, 34: 235-243.

財団法人日本水泳連盟, 社団法人日本スイミングクラブ協会編 (2006) 水泳教師教本. 大修館書店: 東京, 25-28.