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

成田　健造[1)]　　中島　求[2)]　　仙石　泰雄[3)]
本間　三和子[3)]　　椿本　昇三[3)]　　高木　英樹[3)]

Kenzo Narita[1], Motomu Nakashima[2], Yasuo Sengoku[3], Miwako Homma[3], Shozo Tsubakimoto[3] and Hideki Takagi[3] : A comparison between active drag in front-crawl and passive drag on the body with a streamlined position at various velocities. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

Abstract: The purpose of this study was to compare active drag during front-crawl swimming performed by competitive swimmers with passive drag acting on the same group of swimmers with a streamlined position at various velocities. Seven male competitive swimmers participated in this study, and the testing was conducted in a swimming flume. Active drag was evaluated for front-crawl swimming with upper and lower limb motion using a methodology that estimates the drag in swimming using measured residual thrust values (MRT method). Passive drag was measured by a load cell connected to the swimmers with a streamlined position using a stainless-steel wire. In each case, drag was estimated at six staged velocities ranging from 1.0 to 1.5 m/s. To compare the drags at various velocities, we calculated coefficients a and b by applying the measured force value at each velocity to the equation $D = a\ v^b$ (D: drag, v: velocity). The active drag estimated from the MRT method ($a = 35.7 \pm 5.3$, $b = 2.80 \pm 0.22$) was larger than passive drag ($a = 23.6 \pm 3.1$, $b = 2.08 \pm 0.23$). Furthermore, the difference between active and passive drag was large at high velocities. Therefore, it is possible that the effects of factors other than posture and/or body shape have a large influence on active drag, especially at high velocity.

Key words : swimming, MRT-method, residual thrust, stroke rate
キーワード：水泳，MRT法，余剰推進力，ストローク頻度

Ⅰ　緒　言

流体である空気や水の中で生じる物理現象を研究対象とする流体力学分野において，物体に働く抵抗力を正確に評価することは重要な課題と言える．特に水泳は水中で行われる身体運動であり，水は空気の約 800 倍の密度を有するため，泳者が受ける抵抗力は陸上での運動とは比較にならないほど大きくなる．そのため，「抵抗を制する者，勝負を制す」（高木，2001）と言われるように，水泳中の泳者に働く抵抗力の評価は水泳研究の最重要課題の 1 つとして位置づけられている．

泳速度は泳者の発揮した推進力と泳者の受ける抵抗力の関係性によって決定される．推進力とは泳者が前方へ推進するために四肢を動作させることで生成された力のことであり，抵抗力とは泳者が前方へ移動する際，推進を妨げる方向に働く力のことである．例えば船の場合，主にプロペラを駆動することによって推進力を生成する一方で，

1）筑波大学大学院人間総合科学研究科
　305-8574　茨城県つくば市天王台 1-1-1
2）東京工業大学工学院システム制御系
　152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-2
3）筑波大学体育系
　305-8574　茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先　高木英樹

1. *Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba*
   1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. *Department of Systems and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology*
   2-12-2 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552
3. Fa*culty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*
   1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author　takagi.hideki.ga@u.tsukuba.ac.jp

主に抵抗力を受けるのは船体である．船は形状が不変の剛体であるため，推進体と抵抗体を区別して評価することが可能である．一方でヒトの水泳の場合，自己推進するために四肢を動作させるが，その動作が抵抗体にもなるため，それぞれを分離して評価することはできない．さらに，泳者の形状や動作速度は時々刻々と変化することや，性質の異なる空中と水中を身体が何度も往来するなど，一般的な流体力学分野における研究対象とはかなり異なる特徴を有している．そのため，四肢を動作させ自己推進する泳者に働く抵抗力（以下「自己推進時抵抗」と略す：Active drag）の評価は困難を極め，いまだ正確に自己推進時抵抗を実測する方法論は存在しない．もし自己推進中の泳者の身体に働く抵抗力を正確に計測するのであれば，泳者の身体全表面の圧力分布及び摩擦分布に加え，それらの作用方向まで明らかにする必要があり，これらを計測することは現在の技術では非常に難しく，ましてや泳者の泳動作を妨げずに計測することは不可能と言える．そのため，水泳中の抵抗力の評価が学術的のみならず，競技現場におけるパフォーマンスの向上において重要視されているにもかかわらず，いまだ十分にその特徴や性質が理解されていないのが現状である．

自己推進時抵抗を実測することが困難であることから，形状が不変の船体や翼を対象とした先行研究を参考にして，ある一定の姿勢を維持した泳者に働く抵抗力の評価が試みられてきた．この抵抗力は受動抵抗（Passive drag）と呼称され，水泳の基本姿勢とされるストリームライン姿勢（けのび姿勢）を対象に数多く研究されてきた．受動抵抗は自己推進時抵抗に比べ実測が簡便であるため，競技パフォーマンス（Chatard et al., 1990; Havriluk, 2005）や水着の性能（Mollendorf et al., 2004）を評価する際の指標として様々な先行研究で用いられてきた．例えば，受動抵抗と身体特性の関係性を調査した Chatard et al.（1990）の研究では，泳者の身長と体重から算出された身体表面積と受動抵抗との間には正の相関関係があり，さらには受動抵抗と競技レベルとの間には，競技レベルの高い泳者ほど受動抵抗が大きいという関係が認められたと報告している．しかしながら，体格に優れた泳者は必然的に身体表面積が大きくなるので，身体特性による影響を排除するために受動抵抗を身体表面積で除した相対的抵抗力と競技レベルの相関を見ると，競技レベルの高い泳者ほど相対的抵抗力は低い値を示した．受動抵抗に関して包括的に調査した Havriluk（2005）によると，受動抵抗には身体特性が強く影響し，その影響を取り除いた時の抵抗力は競技レベルの高い泳者ほど低く，それは姿勢の優劣による影響であると報告している．また，対象者や測定環境が異なっていても，ストリームライン姿勢時の受動抵抗はいずれの先行研究（例えば，Zamparo et al.（2009）で 47 ± 4 N（1.42 m/s），Chatard et al.（1990）で 50 ± 10 N（1.40 m/s））でも同様の値を示しており，簡易的にヒトの抵抗力を評価する指標として定着している．

一方自己推進時抵抗に関しては，多くの研究者により様々な推定方法が提案され，その評価が試みられてきた．しかしながら，受動抵抗とは異なり，自己推進時抵抗の推定は非常に困難であるため，用いられた方法論によって自己推進時抵抗の値はかなり異なる．そのため，受動抵抗と自己推進時抵抗の値を比較した場合，方法論によって両者の大小関係に違いが見られた．例えば Zamparo et al.（2009）による報告では，同一泳者を対象に自己推進時抵抗と受動抵抗を比較した結果，自己推進時抵抗（1.20 m/s で 60 ± 23 N）は受動抵抗（1.22 m/s で 36 ± 4 N）よりも高い値を示したとされている．当該研究では，水泳時とストリームライン姿勢時の体幹の傾きの比率からクロール泳の自己推進時抵抗を推定しており，クロール泳時の体幹の傾きが大きいことから自己推進時抵抗は受動抵抗よりも大きくなると結論付けている．しかしながら，双方の抵抗力の違いは体幹の傾きにのみ依存するのではなく，時々刻々と変化する身体形状や四肢の動作速度を考慮する必要があり，本結論にはやや疑義が残る．その他 Hollander et al.（1986）は MAD-system と呼ばれる抵抗力測定装置を開発し，実際に泳動作をおこなっている泳者に働く抵抗力を直接測定することを試みた．こ

の方法では，水面下に設置された固定板を押して泳者は推進し，その押した力をロードセルによって計測した．さらに，測定中の泳者の泳速度が一定であれば泳者が発揮した推進力（つまり，固定板を押した力）と抵抗力が等しいとの前提条件から，自己推進時抵抗を評価している．その結果，自己推進時抵抗は受動抵抗と等しい，もしくは低いことが報告されている（Toussaint et al., 1988, 2004; Van der Vaart et al., 1987）．しかしながら，測定機器の構造上の制限により，評価対象は下肢動作を制限したクロール泳に限定され，キック動作による影響は自己推進時抵抗値に反映されない．さらに，水面下に固定された固定板を押して進むため，泳者や泳速度が異なってもストローク長は一定となってしまい，流体である水を押して推進する水泳独特の泳技術の要因が反映されていない可能性がある．また他の評価方法（Di Prampero et al., 1974; Formosa et al., 2011; Kolmogorov and Duplishcheva, 1992）においても，泳法や泳速度を制限せざるを得ないなど，いまだ確立された自己推進時抵抗の評価方法は見当たらず，それゆえ自己推進時抵抗と受動抵抗の大小関係について統一した見解は存在しない．

このような中，余剰推進力の計測から自己推進する泳者の抵抗力を推定する方法論（Measured values of Residual Thrust：MRT）が Narita et al.（2017）によって新たに開発された．この方法論では理論上，泳法や泳速度に関する制限を有していない．そのため，MRT 法を用いて同一対象者における自己推進時抵抗と受動抵抗の比較を様々な泳速度において行うことができれば，自己推進時抵抗や受動抵抗に関する知見の蓄積が可能となる．さらに，MRT 法では MAD-system と異なり，泳者や泳速度によってストローク長が変化する．泳速度はストローク頻度とストローク長の積によって構成され，それらのストローク変数は水泳に関する基本的な評価指標として，研究分野のみならず競技現場においても多用されている．そのため，ストローク変数と自己推進時抵抗の関係性を分析することは自己推進時抵抗に関する理解を深める上で有益と言える．これまでは，競技パフォーマンスや水着の性能を評価する際，自己推進時抵抗の代わりに受動抵抗がその役割を担ってきた．しかしながら本来，自らの四肢を駆動させて推進するのと受動的に牽引されているのでは生じている現象はまったく異なるはずで，必然的に泳者に働く抵抗力も違うはずである．加えて，船がプロペラの回転数を上げることで航行速度を高めるように，泳者においても四肢の回転数を増加させることで泳速度を高めているが，その回転数（ストローク頻度）と自己推進時抵抗との関係性も明らかにされておらず，自己推進時抵抗を決定する要因に関する研究が待たれている．

そこで本研究では，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を多段階の泳速度において比較検討することを目的とした．さらに，泳速度の増加に伴う自己推進時抵抗の変化について，自己推進時抵抗とストローク変数（ストローク頻度，ストローク長）との関連から分析し，これらを踏まえてクロール泳時のパフォーマンス向上に資する提言を行いたい．

II 方 法

1. 対象者

本研究では，競泳競技を専門とし，大学水泳部に所属する男性泳者 7 名を対象とした．全ての対象者は週 6 日間のトレーニングに励んでおり，全員が全国大会への出場経験を有している．Table 1 は対象者の身体特性及び長水路での 200 m 自由形の自己最高記録を示している．なお本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会によって承認され，参加者には事前に書面による同意を得た．

2. 実験試技

本研究では，自己推進時抵抗の評価を上肢と下肢の両方を用いたクロール泳を対象に行い，一方で受動抵抗は伏臥位姿勢で両腕を挙上したストリームライン姿勢を対象とした．自己推進時抵抗と受動抵抗の双方とも，評価対象となる速度（V_{Si}）は 1.0—1.5 m/s の 6 段階とした．なお，全ての測定において，呼吸動作による影響を除外するため

Table 1. Anthropometric data for swimmers and long-course front-crawl performance

Swimmer	Age (year)	Height (cm)	Mass (kg)	200 m-Freestyle Best record (min'sec")
A	19	173.5	77.5	1'52"2
B	21	169.0	70.5	1'53"2
C	19	169.0	63.0	1'53"7
D	21	169.5	59.5	1'54"2
E	19	177.0	72.0	1'55"5
F	21	170.0	63.0	1'57"3
G	20	170.5	72.5	2'02"0
Mean	20.0	171.2	68.3	1'55"5
SD	0.9	2.8	6.0	3"0

スノーケルを用い，さらに水着の違いによる抵抗力への影響を考慮し全て同一の水着を用いて測定した．

3. 実験設定

本研究での測定は全て，流速分布の不均一性を解決するための制御システムが施され，流速を正確に制御できる実験用たて型回流水槽（五十嵐工業，水深 1.2 m）にて実施された．水温は 28.0±0.3°C であった．全ての対象者は本回流水槽で泳ぐことには既に慣れているものの，本実験設定を用いた各測定に馴化するために実験に先立って準備期間を設定した．

自己推進時抵抗は Narita et al.（2017）によって開発された方法論（Measured values of Residual Thrust：MRT）を用いた．泳者がある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，泳者の発揮した推進力と泳者が受けた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によって生じる力が余剰推進力である．MRT 法とは，この余剰推進力と流速との関係性から，自己推進時抵抗を推定する方法である．

余剰推進力の計測に先立ち，評価対象となる速度（V_{Si}）で自己推進する際の泳動作を対象者に記憶させ，そのストローク頻度を記録した．回流水槽の流速を V_{Si} に設定し，泳者には流速が変化した際も V_{Si} 時の泳動作及び身体姿勢を維持するように指示した．さらに，一定間隔で音が鳴る小型の防水メトロノーム（Tempo trainer Pro, FINIS, USA）に V_{Si} 時のストローク頻度を設定し，泳者はその音を参考にしながら，流速が変化した場合でも泳動作の維持に努めた．その後，各流速における余剰推進力を計測するために，回流水槽の前後方向に取り付けられたロードセルと泳者の体幹部に装着したベルトをワイヤーで接続し，前後方向から泳者を牽引した（Fig. 1）．本研究で使用したロードセル（LUX-B-2KN-ID，共和電業）は定格容量が ± 2 kN，測定誤差は ± 0.15% であり，サンプリング周波数を 50 Hz とした．ロードセルで計測された力はセンサーインターフェース（PCD-330B-F，共和電業）を介し，PC にインストールされた専用のソフトウェア（DCS-100A，共和電業）を用いて数値化された．各流速における力データを 10 秒間計測し（全ての試技で右手入水より計測開始），後方より牽引された力（推進力と定義，Fig. 2：右図の点線）から前方より牽引された力（抵抗力と定義，Fig. 2：右図の破線）を差し引くことで余剰推進力（Fig. 2：右図の実線）を算出した．流速は V_{Si} の ± 0.2 m/s の範囲内を 0.05 m/s ずつ変化させ，計 8 流速における余剰推進力を計測した．その後，各流速で実測された余剰推進力に最も近似するように回帰曲線を導出し，その回帰曲線から自己推進時抵抗を導出した（詳細は Narita et al.（2017）を参照）．以上の手順を 1.0—1.5 m/s の 6 段階の V_{Si} で実施し，異なる V_{Si} での自己推進時抵抗を評価した．なお，Fig. 2 の左図には泳者 F の $V_{S1.00}$ と $V_{S1.20}$ における回帰曲

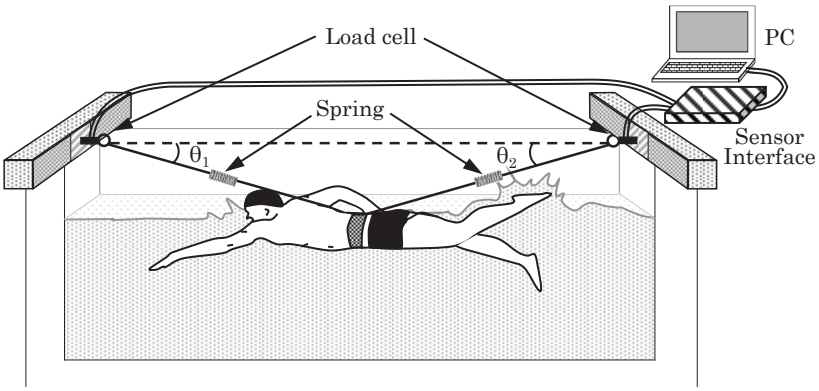


Fig. 1. Top view of the measurement process. To measure only the horizontal component forces, the angles of inclination of each wire, θ_1 and θ_2, were considered. Furthermore, springs were used to prevent slack in the wire, caused by fluctuations in the longitudinal direction, and the effects of tension caused when a swimmer alternates acceleration and deceleration in a stroke cycle.

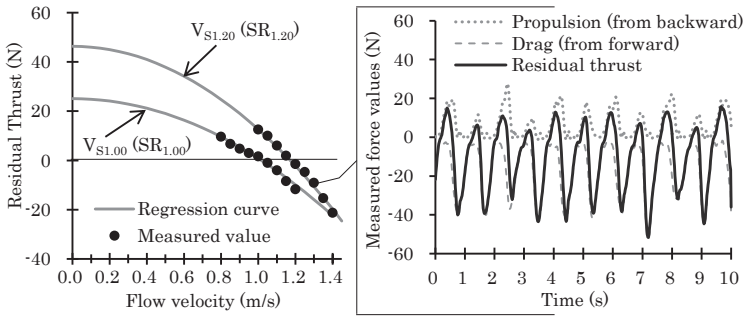


Fig. 2. Relation between flow velocity and residual thrust at $V_{S1.00}$ and $V_{S1.20}$ (left panel) and measured force values at flow velocity = 1.30 m/s (right panel) for swimmer F. In the right panel, residual thrust (the solid line) is calculated by subtracting the forward towing forces (defined as drag; dashed line) from the backward towing forces (defined as propulsion; dotted line).

線を示しており，V_{Si} の違いによって余剰推進力を計測するための流速及びストローク頻度は異なる．

受動抵抗ではストリームライン姿勢（けのび姿勢）を維持した泳者を，自己推進時抵抗の計測時に使用した装置を用いて計測した．なお，測定は 5 秒間とし，測定途中で姿勢が崩れた場合はやり直しをした．

4.　データ分析

自己推進時抵抗は Narita et al.（2017）による MRT 法を用いて評価された．速度に関しては，回帰曲線により導出された速度（U_{Tre0}）を分析に用いた．なお，U_{Tre0} は評価対象となる速度（V_{Si}）と必ずしも一致する訳ではなく，これは MRT 法を用いる際の前提条件に関係する．MRT 法では，余剰推進力を測定するための流速間で泳動作や身体姿勢を一定にすることが設けられているが，それらの課題を達成するための内的意識に加え，その課題を補助するための水中メトロノームの音に同調するという外的意識が泳者には発生する．これらの複数の注意が V_{Si} 時に自由に泳いでいる時とそれを維持しながら異なる流速で泳いだ時に僅かな差異を生じさせるため，各流速で計測された余剰推進力の関係性から導出された回帰曲線に影響を与えたと考えられる．そのため，本研究で

は U_{Tre0} が V_{Si} から±0.05 m/s 以上異なる場合は再実験を実施した．さらに，2 名の対象者において 1.5 m/s での測定時に泳動作の維持が困難であったため分析から除外した．よって，1.5 m/s での自己推進時抵抗を評価できたのは 5 名であった．

複数の速度において抵抗力を評価する際，抵抗力が速度の累乗に比例する性質を考慮し，先行研究（Berger, 1999; Hollander et al., 1986; Ribeiro et al., 2013; Vennell et al., 2006）と同様に抵抗力を以下の式 (1) より回帰分析をおこなった．

$$D = a \cdot v^{b} \quad (1)$$

D は抵抗力，v は速度をそれぞれ表している．各対象者で計測された全ての速度と抵抗力に最も近似するよう a と b を最小二乗法にてそれぞれ導出した．

また泳者の泳ぎの変化を示す指標として，本研究ではストローク頻度とストローク長の 2 つのストローク変数を用いた．ストローク頻度（Hz）は，流速を V_{Si} に設定した際に回流水槽内の一定の位置を維持して泳ぐ泳者の 10 ストローク分の時間（右手が入水してから，10 回後に再び右手が入水するまでに要した時間）を計測し，その逆数から算出した．一方でストローク長（m/stroke）は泳速度（m/s）をストローク頻度で除することで算出した．

5. 統計解析

本研究で得られた自己推進時抵抗と受動抵抗の比較を，係数 a と次数 b を対象に対応のある t 検定を実施した．さらに自己推進時抵抗とストローク変数の関係性を，対象者毎での自己推進時抵抗とストローク頻度及びストローク長との間でピアソンの相関係数を算出し評価した．なお，以上の解析は全て IBM SPSS Statistics 22.0 を用いて実施し，有意水準は全て危険率 5% 未満とした．

Ⅲ 結 果

各速度における自己推進時抵抗（Active drag）と受動抵抗（Passive drag）について，7 名それぞれの結果を Fig. 3 に示した．全ての対象者において，本研究で MRT 法を用いて評価されたクロール泳中の自己推進時抵抗は受動抵抗よりも高い値を示した．さらに，速度と抵抗力の関係性を示す回帰曲線の係数 a と次数 b の 7 名の平均値±標準偏差を求めた結果，係数 a に関しては自己推進時抵抗で 35.7±5.3, 受動抵抗で 23.6±3.1 であり，有意な差が認められた（$t(6) = 4.35, p = 0.05$）．一方で次数 b に関して，自己推進時抵抗で 2.80±0.22，受動抵抗で 2.08 ± 0.23 であり，有意な差が認められた（$t(6) = 5.93, p = 0.01$）．

MRT 法で評価されたクロール泳中の自己推進時抵抗に対するストローク頻度，ストローク長の関係性を，各泳者の相関係数及び p 値と併せて Fig. 4 に示した．自己推進時抵抗とストローク頻度では，全ての泳者において非常に高く有意な正の相関関係が認められた．一方でストローク長では対象者によってばらつきがあり，有意な負の相関関係が認められた泳者は 4 名，認められなかった泳者が 3 名であった．

Ⅳ 考 察

1. 自己推進時抵抗と受動抵抗の比較

本研究で MRT 法を用いて推定された自己推進時抵抗は受動抵抗よりも高い値を示した．この結果は Zamparo et al.（2009）や Gatta et al.（2015）の結果を支持する一方で，Toussaint et al.（1988）や Van der Vaart et al.（1987）とは異なる結果を示した．本研究で評価された受動抵抗は先行研究（Chatard et al., 1990; Zamparo et al., 2009）と同様の値が示され，これはプールや測定装置が異なるとしても，受動抵抗は同様であると報告した Havriluk（2005）の研究と一致するものとなった．

双方の抵抗力の比較において，本研究とは異なる結果を報告した Toussaint et al.（1988）や Van der Vaart et al.（1987）の研究では MAD-system を用いて自己推進時抵抗を評価していた．通常のクロール泳では，上肢を回転させることにより下肢を沈ませるモーメントが働くが，キック動作を行うことによって下半身を浮かせ，身体の

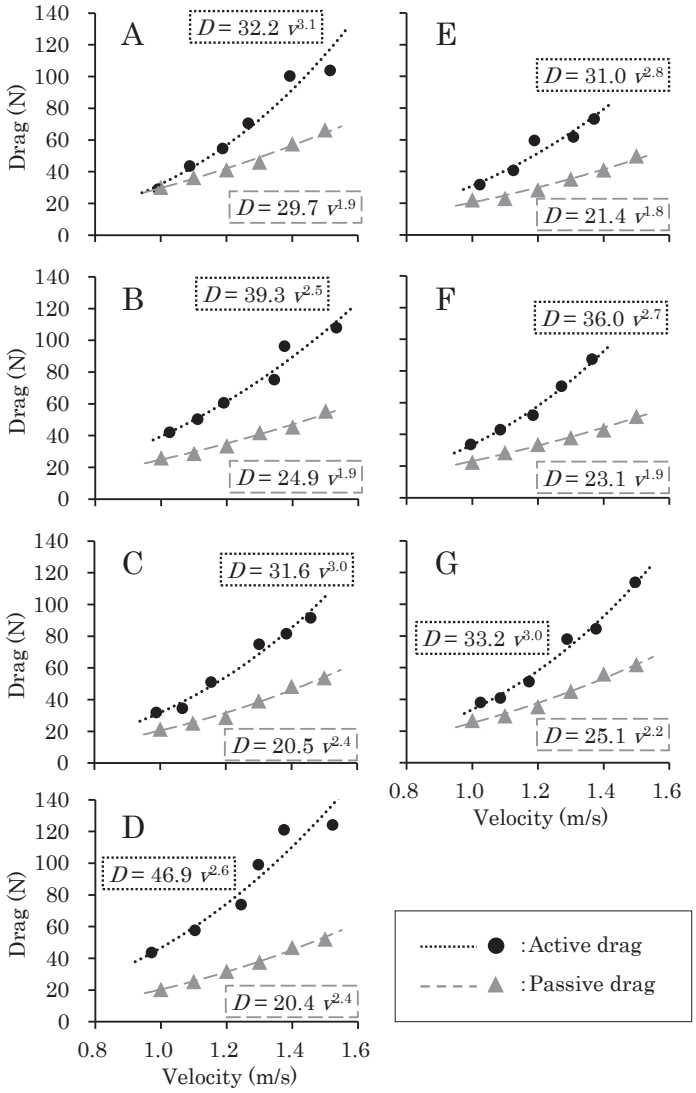


Fig. 3. Results of active and passive drags for each swimmer.

水平姿勢を維持し抵抗を低減する働きを有すると Yanai（2001）は報告している．さらに，この傾向はシミュレーション研究でも裏付けられている（Nakashima, 2007）．一方でキック動作は主流方向とは異なる方向に下肢を動かすため抵抗を増大させる働きがあり，抵抗を低減させる観点からすれば，できる限りキック動作は用いたくない．MAD-system を用いた研究では，浮力体であるプルブイを大腿部に装着しており，キック動作を用いずとも下半身の水平姿勢の維持が可能となる．クロール泳における下肢動作の有無による抵抗力を比較した研究はいまだ存在しないものの，MAD-system ではプルブイによる水平姿勢のサポートが抵抗力の低減に貢献したと考えられる．

本研究と同様に，Gatta et al.（2015）は受動抵抗よりも自己推進時抵抗の方が大きくなることを報告している．この研究では泳者の水泳中の前面投影面積を計測し，その値を用いて自己推進時抵抗を算出するという方法論を用いている．その結果，クロール泳ではストリームライン姿勢時よりも前面投影面積が大きくなるため，クロール泳の自己推進時抵抗の方が大きくなると報告して

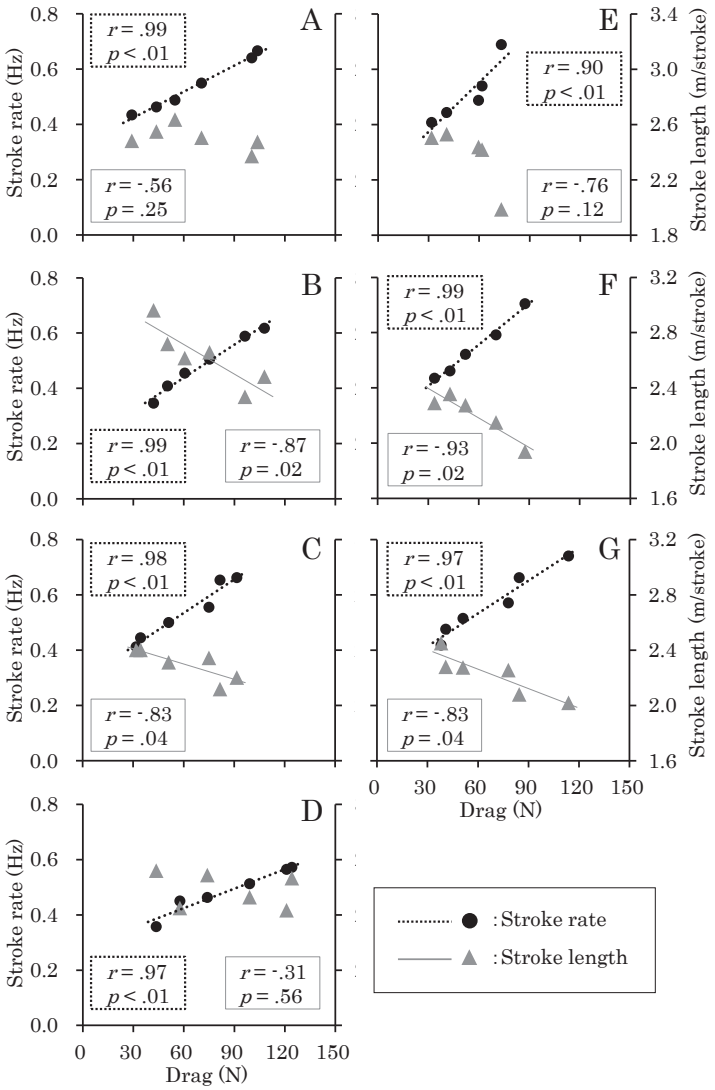


Fig. 4. Relationships between stroke rate, stroke length and active drag for each swimmer.

いる．同様に Zamparo et al.（2009）においても，クロール泳中の体幹の傾きがストリームライン姿勢を保持した時よりも大きくなり，前面投影面積が大きくなることから，受動抵抗よりも自己推進時抵抗の方が大きくなると報告している．ストリームライン姿勢は言葉の通り流線形の姿勢を保持し，最も低抵抗な姿勢と言われている．そのため，スタート後やターン後の高速度時に泳者はストリームライン姿勢を採用し，減速を最小限にするための手段として用いている．このようにストリームライン姿勢時の受動抵抗は泳動作中の抵抗力よりも小さくなることは当然として思われていたが，本研究ではクロール泳との比較からそれを実証的に裏付ける結果を示した．

2. 速度と抵抗力，ストローク変数の関係性

本研究において評価された自己推進時抵抗は速度の約 3 乗に比例して大きくなるとの結果を示した．これは MRT 法の開発を主眼とした Narita et al.（2017）の報告において提示された結果と同様であったが，本研究ではさらに自己推進時抵抗とストローク変数との関係性を初めて明らかにし

た．これまでは，受動抵抗あるいは自己推進時抵抗の区別なく，泳者に働く抵抗力は速度の 2 乗に比例して大きくなることが定説とされてきた．これは抵抗力の主要因とされる圧力抵抗が速度の 2 乗に比例することや，受動抵抗が泳速度の 2 乗に比例して大きくなることに由来していると思われる．よって Gatta et al.（2015）が用いた自己推進時抵抗の評価方法でも，速度の 2 乗に比例することを前提条件に自己推進時抵抗を算出している．同様に Ogita et al.（1999）においても，抵抗に抗して推進するためのパワーを定義する際，抵抗力が速度の 2 乗に比例することを前提としている．しかしながら本研究において，自己推進時抵抗は速度の 2 乗ではなく約 3 乗に比例して大きくなることが示された．そのため，速度が高くなる程，受動抵抗と自己推進時抵抗の差は増大した．この理由として，受動抵抗は形状が一定であるのに対し，自己推進時抵抗は時々刻々と形状が変化することが考えられる．圧力抵抗が速度の 2 乗に比例することは定常状態を前提としており，水泳では常に身体が動き続けているため身体周りの水は非定常状態となる．また，速度が高くなる程，造波抵抗による影響が増大する（Mollendorf et al., 2004; Vennell et al., 2006）．ヒトの水泳時は約 1.7 m/s 以上で造波抵抗による影響が大きくなり，それは速度の 3 乗に比例することが報告されている（Toussaint et al., 2002）．本研究は 1.5 m/s 以下の試技ではあるものの，手部の入水時や連続した下肢動作の利用が造波抵抗による影響を増大させていると推察される．本研究において，7 名すべての対象者において自己推進時抵抗とストローク頻度に非常に高い正の相関関係が示された．泳速度の増加に伴う泳動作について検証した研究において，泳速度が高くなる程，低抵抗姿勢であるグライド局面の割合が小さくなること（Seifert et al., 2010）や，下肢動作の利用が増大すること（Morris et al., 2016）が報告されている．これを踏まえると，本研究においても泳速度の増加に伴い，抵抗の少ないグライド局面が減少するだけでなく，上肢動作や下肢動作の増加により造波抵抗が増大し，自己推進時抵抗が大きくなったと推察される．以上のことから，受動抵抗に関してはこれまでと同様に速度の 2 乗に比例して大きくなると言えるが，自己推進時抵抗は受動抵抗とは異なる動態を示し，それにはストローク頻度が関係していることが明らかとなった．

3. 現場への提言

本研究結果から，自己推進時抵抗は受動抵抗よりも大きく，泳速度の約 3 乗に比例して増加し，さらにストローク頻度の増加が深く関連していることが明らかとなった．このことは，実際のレースにおける高い泳速度においては，これまで想定されてきた値よりもかなり大きな抵抗力が働くことを意味する．以上のことを踏まえ，以下の 2 点を提案する．1 点目はスタートやターン後の水中ドルフィンキックを用いることの有用性である．ドルフィンキックはスタート後やターン後の 15 m まで用いることが認められており，近代 4 泳法に続き第 5 の泳法として広く知られ，これまでにも多くの研究が行われてきた（小林ほか , 2016; Shimojo et al., 2014）．ドルフィンキックは水面下で行われるため，造波抵抗による影響も受けにくい．水面からの深さの違いによる抵抗力について検証した研究では，水深が約 0.8 m（Vennell et al. 2006）や 0.4—0.6 m（Lyttle et al., 1999）よりも深いと造波抵抗による影響を受けず，特に高い速度においては抵抗力の低減に貢献し得ることが報告されている．さらに本研究において，泳速度が高くなる程，四肢の動作を伴う自己推進時抵抗と受動抵抗の差は広がる傾向を示した．レースで水中ドルフィンキックが用いられるスタートやターン後の泳速度はレース中に最も高いため，いかにその速度の低下を抑制するかが重要となる．泳速度は推進力と抵抗力の関係性により決定されるため，泳速度を増加もしくは維持する上で，推進力の増加のみならず，抵抗力の削減が重要となるだろう．その際，Chatard et al.（1990）や Havriluk（2005）が報告しているように，いかに低抵抗姿勢を維持できるかが重要となる．以上のことから，水中ドルフィンキックによる推進は造波抵抗による影響の削減に加え，四肢を動作させ

て水面を泳ぐよりも抵抗力を抑制でき，高い泳速度の達成やエネルギー消費量の節約に貢献し得ると考えられる（Arellano et al., 2002; Lyttle et al., 1999, 2000; Takeda et al., 2009）．2 点目としては，高い泳速度でのトレーニングの重要性である．近年，競泳競技においても高強度トレーニングが注目を集めているが（Faude et al., 2008; 仙石ほか, 2017），その効果として Ogita et al.（2014）はエネルギー供給能力の向上を挙げている．しかしながら，その生理的な応答のみならず，水泳での高強度トレーニングは流体力学的な面においても有用であろう．その理由として，泳動作を伴う泳者に働く抵抗力は速度に大きな影響を受けることが挙げられる．よって低い速度や低いストローク頻度での技術トレーニングも当然必要であろうが，競技会でのレースに対応した高速度及び高ストローク頻度での泳動作を洗練し，大きな抵抗力を受けながら推進するためのパワー獲得や，高速度での抵抗力削減技術が重要になるであろう．

4. 今後の課題

本研究では V_{si} が 1.5 m/s の試技で対象者 7 名のうち 2 名で計測することができなかった．MRT 法の前提条件を達成するために，泳者は泳動作の維持が求められるが，速度が高くなる程その維持が困難となる．そのため，短距離種目に対応した速度での評価を試みる上では十分に休息を挟むことや，余剰推進力の計測点の削減などの実験設定の改良が必要になるだろう．

本研究では全身を用いたクロール泳での自己推進時抵抗の評価を試みた．MRT 法は他の泳法にも応用可能である汎用性を有しており，その評価が可能となれば，これまで評価できなかった現象の機序解明に貢献できると考えられる．例えば，下肢動作を制限したクロール泳を MRT 法で評価することで，下肢動作の有無による自己推進時抵抗への影響について検証できる．さらに，クロール泳に加え他の 3 泳法（バタフライ，背泳ぎ，平泳ぎ）にも応用し，さらに三次元的泳動作やエネルギー消費量の分析と併用することで，自己推進時抵抗に関する理解が深まることが期待される．

V まとめ

本研究では，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を多段階の泳速度において比較することを目的とした．その結果，自己推進時抵抗は受動抵抗よりも高い値を示し，泳速度が高くなる程その差が大きくなることが示された．そして，MRT 法で評価された自己推進時抵抗は速度の約 3 乗に比例し，それにはストローク頻度が関係することを本研究は初めて示した．以上のことから，水泳中の泳者に働く抵抗力を評価する際に，受動抵抗と自己推進時抵抗を区別する必要性があるだろう．

文 献

Arellano, R., Pardillo, S., and Gavilán, A. (2002). Underwater undulatory swimming: Kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. Paper presented at the Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports, Universidad de Granada.

Berger, M. A. (1999) Determining propulsive force in front crawl swimming: a comparison of two methods. J. Sports Sci., 17: 97-105.

Chatard, J., Lavoie, J., Bourgoin, B., and Lacour, J. (1990) The contribution of passive drag as a determinant of swimming performance. Int. J. Sports Med., 11: 367-372.

Di Prampero, P., Pendergast, D., Wilson, D., and Rennie, D. (1974) Energetics of swimming in man. J. Appl. Physiol., 37: 1-5.

Faude, O., Meyer, T., Scharhag, J., Weins, F., Urhausen, A., and Kindermann, W. (2008) Volume vs. intensity in the training of competitive swimmers. Int. J. Sports Med., 29: 906-912.

Formosa, D. P., Mason, B., and Burkett, B. (2011) The force–time profile of elite front crawl swimmers. J. Sports Sci., 29: 811-819.

Gatta, G., Cortesi, M., Fantozzi, S., and Zamparo, P. (2015) Planimetric frontal area in the four swimming strokes: Implications for drag, energetics and speed. Human movement science, 39: 41-54.

Havriluk, R. (2005) Performance level differences in swimming: a meta-analysis of passive drag force. Res. Q. Exerc. Sport, 76: 112-118.

Hollander, A., De Groot, G., van Ingen Schenau, G., Toussaint, H., De Best, H., Peeters, W., Meulemans, A., and Schreurs, A. (1986) Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. J. Sports Sci., 4: 21-30.

小林啓介・下門洋文・高木英樹・椿本昇三・仙石泰雄（2016）エリート女性競泳選手の水中ドルフィンキックにおける体幹，大腿，下腿の筋活動様式．体育学研究，61：185-195.

Kolmogorov, S. and Duplishcheva, O. (1992) Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. J. Biomech., 25: 311-318.

Lyttle, A. D., Blanksby, B. A., Elliott, B. C., and Lloyd, D. G. (1999) Optimal depth for streamlined gliding. Biomechanics and medicine in swimming VIII: 165-170.

Lyttle, A. D., Blanksby, B. A., Elliott, B. C., and Lloyd, D. G. (2000) Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. J. Sports Sci., 18: 801-807.

Mollendorf, J. C., ALBERT C TERMIN, I., Oppenheim, E., and Pendergast, D. R. (2004) Effect of swim suit design on passive drag. Med. Sci. Sports Exerc., 36: 1029-1035.

Morris, K. S., Osborne, M. A., Shephard, M. E., Skinner, T. L., and Jenkins, D. G. (2016) Velocity, aerobic power and metabolic cost of whole body and arms only front crawl swimming at various stroke rates. Eur. J. Appl. Physiol., 116: 1075-1085.

Nakashima, M. (2007) Mechanical study of standard six beat front crawl swimming by using swimming human simulation model. J. Fluid Sci. Tech., 2: 290-301.

Narita, K., Nakashima, M., and Takagi, H. (2017) Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. J. Biomech., 54: 123-128.

Ogita, F., Onodera, T., and Tabata, I. (1999) Effect of hand paddles on anaerobic energy release during supramaximal swimming. Med. Sci. Sports Exerc., 31: 729-735.

Ogita, F., Huang, Z., Kurobe, K., Ozawa, G., Nagira, A., Yotani, K., Taguchi, N., and Tamaki, H. (2014) Effects of sprint interval training on metabolic, mechanical characteristics and swimming performacne. XIIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming, pp.453-457.

Ribeiro, J., De Jesus, K., Figueiredo, P., Toussaint, H., Guidetti, L., Alves, F., and Fernandes, R. (2013) Biomechanical determinants of force production in front crawl swimming. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 53(3 suppl 1): 30-37.

Seifert, L., Toussaint, H., Alberty, M., Schnitzler, C., and Chollet, D. (2010) Arm coordination, power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers. Human Movement Science, 29: 426-439.

仙石泰雄・角川隆明・小林啓介・成田健造（2017）高強度トレーニングを柱とした競泳競技トレーニングシステム．コーチング学研究，30：61-65.

Shimojo, 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.

高木英樹（2001）抵抗を制する者，勝負を制す．水泳水中運動科学，4：5-10.

Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H., and Tsubakimoto, S. (2009) Do differences in initial speed persist to the stroke phase in front-crawl swimming? J. Sports Sci., 27: 1449-1454.

Toussaint, H., De Groot, G., Savelberg, H., Vervoorn, K., Hollander, A., and van Ingen Schenau, G. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. J. Biomech., 21: 435-438.

Toussaint, H., Roos, P. E., and Kolmogorov, S. (2004) The determination of drag in front crawl swimming. J. Biomech., 37: 1655-1663.

Toussaint, H., van Stralen, M., and Stevens, E. (2002) Wave drag in front crawl swimming. ISBS-Conference Proceedings Archive, 279-282.

Van der Vaart, A., Savelberg, H., De Groot, G., Hollander, A., Toussaint, H., and van Ingen Schenau, G. (1987) An estimation of drag in front crawl swimming. J. Biomech., 20: 543-546.

Vennell, R., Pease, D., and Wilson, B. (2006) Wave drag on human swimmers. J. Biomech., 39: 664-671.

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

Zamparo, P., Gatta, G., Pendergast, D., and Capelli, C. (2009) Active and passive drag: the role of trunk incline. Eur. J. Appl. Physiol., 106: 195-205.

（2017 年 6 月 9 日受付
2018 年 4 月 3 日受理）

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2018/6/15