

# 平泳ぎのストローク技術に関する流体力学的考察 —手部に生じる流体力と推進力の関係から—

高木 英樹 (Hideki Takagi)	三重大学教育学部
清水 幸丸 (Yukimaru Shimizu)	三重大学工学部
松井 敦典 (Atsunori Matsui)	鳴門教育大学
南 隆尚 (Takahisa Minami)	鳴門教育大学
野村 照夫 (Teruo Nomura)	京都工芸繊維大学
合屋十四秋 (Toshiaki Goya)	愛知教育大学

## 〔要旨〕

本研究では、平泳ぎのストローク動作に関して、未熟練者と熟練者間での推進技術の差を流体力学的な視点から比較検討することを目的とした。比較する指標として、手部の画像分析から求めた推定合力およびロードセルによって実測した推進力を用いた。推進力の測定にあたっては、被験者に腕のみの平泳ぎを行わせ、その際、被験者の腰部に装着したケーブルに発生する張力を測定した。また右上肢のプル動作を二台の水中カメラで撮影し、DLT法によって三次元動作解析を行った。得られた手部の三次元位置座標より迎角、流入角および移動速度を算出し、Schleihauf<sup>9)</sup>の揚抗力係数をもとに手部が発揮している推定合力を計算した。推進力に関して最大値を比較すると、熟練者は150.3Nで、未熟練者(42.5N)の3倍以上の推進力を発揮していた。また手部推定合力の最大値は、熟練者が72.0Nで未熟練者が35.0Nであった。熟練者は、未熟練者と比較して、手部の迎角を適切に制御し手部で発揮した力を有効に推進力へと変換していた。

◆キーワード：水泳、平泳ぎ、推進技術、流体力、三次元動作解析

## 1. 緒言

これまで多くの水泳の指導書において平泳ぎのストローク動作（上肢の使い方）に関する記述がなされてきた。しかしながら、それらの指導書の中で、記述されたストローク動作がなぜ有効であるのかの力学的根拠を示したものは数少ない(Counsilman<sup>3)</sup>、Maglischo<sup>5)</sup>)。さらに「優れたスイマーは、より大きな揚力を発揮して推進力を増大している」等の解釈がされていたとしても、その解釈はあくまでも流体力学的な仮説にとどまり、具体的なデータを示してその裏付けを行っている著書は見あたらない。

研究報告書においても、平泳ぎを対象とした報告は、クロールと比較すると少なく、吉澤ら<sup>10),11)</sup>が筋電図学的に平泳ぎ中の上肢の動作について考察を試みた報告等が散見される程度で、実際に平泳ぎのストローク動作による推進力の定量を試みた例は数少ない(Schleihauf et al.<sup>10)</sup>、高木ら<sup>12)</sup>)。

その理由として、平泳ぎのストローク動作は、他の三泳法と比較して上肢の動作範囲が狭く、一部のトップスイマーの泳動作を除いて、一般的にはかき始めからリカバリー動作まですべて水中において行われるため抵抗を生む局面が多く、全推進力への貢献度は低いと見られ、研究対象とされにくかった。

そこで本研究では、平泳ぎのストローク動作に注目し、レベルの異なる被験者を用いて技術の習熟度に応じて推進力にどのような差が見られるのかを流体力学的に比較検討することを目的とした。流体力学的指標として、画像分析結果より手部が発揮していると思われる流体力の推定値およびロードセルによる推進力の実測値を用い、技能レベルの差がこれらの指標にどのように影響するかを中心に考察した。本研究結果より、これまで困難であったストローク技術の質的評価が可能となり、実際の指導上、有効な基礎資料を得ることができた。

## 2. 実験方法および装置

### 2.1 被験者

被験者として、大学水泳部に所属し、競技歴7年以上の競泳経験を持つ4名と体育系大学に所属し、競泳競技未経験者3名の計7名を対象とした。各被験者の性別、年齢、身体特性、水泳競技歴を表1に示す。

表1 被験者の身体特性及び競技歴

技能レベル	被験者	性別	身長 (m)	体重 (kg)	手部平面積 (m <sup>2</sup> )	競技歴 (年)
水泳競技経験者	A.M	男	1.84	90	0.0185	15
	H.T	男	1.75	77	0.0168	7
	T.F	女	1.62	57	0.0149	9
	T.N	男	1.75	85	0.0160	18
水泳競技未経験者	N.W	女	1.58	51	0.0139	0
	S.A	女	1.59	49	0.0142	0
	Y.K	男	1.65	62	0.0153	0

### 2.2 試技内容

被験者の股間にブルブイ（浮き）をはさませ、キックを用いずに上肢のかきのみによる平泳ぎを最大努力で約10秒間行うよう指示した。試技に際しては、通常行っている平泳ぎの腕によるストローク動作をできる限り再現するように指示し、呼吸動作等も通常通りに行わせた。試技後十分な休息をおいた後、同一の試技を3回行わせた。

### 2.3 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。画像分析用のCCDカメラ（※1、VICTOR製）2台を防水用ハウジングに入れ、双方のカメラの光軸がほぼ直交するように被験者の斜め前方の水中に設置した。撮影にあつ

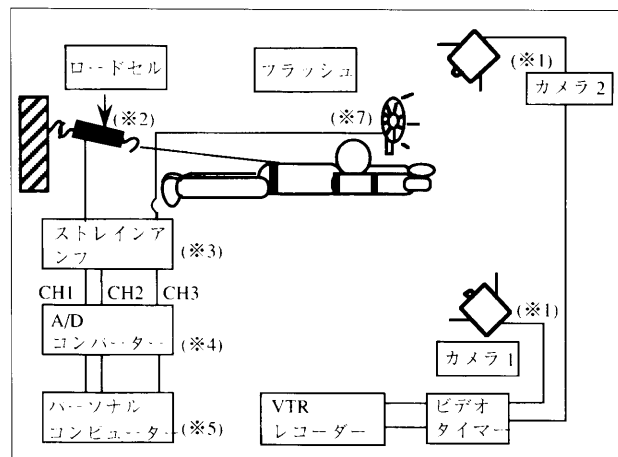


図1 実験機具の構成図および分析手順

ては、カメラレンズの歪みによる誤差を最小とするために、カメラ位置を被写体からできる限り遠方にし、かつデジタイズ作業がしやすいようにレンズのズームアップを最大にして、主に右上肢の動作のみを撮影した。また被験者に対しては肩峰、肘関節周経部、手関節周経部、中指先端、親指先端、小指先端に画像分析用のランドマークとしてそれぞれ白と黒のテープを貼りつけた。

次に前方への推進力を測定するために、被験者の脛にケーブル（ケブラー線維製）を結び付けたベルトを装着させ、他端を固定されたロードセル（※2、SHIMPO製）に接続し、推進力を測定した。張力信号はストレインアンプ（※3）で増幅し、A/D変換装置（※4）に取り込んでデジタル化した後、サンプリング周波数100HZでパーソナルコンピュータ（※5、NEC製 PC9801RA）に入力した。各データの同期については、写真撮影用のストロボ（※6）を発光させて2台のカメラの画像に映し込むとともに、発光時にその回路から導出される電気信号を圧力信号および張力信号と同時にパーソナルコンピュータに入力することによって各データの時間的同期を行った。

## 3. 実験データの整理方法

### 3.1 推進力データの処理

実験に先立ち、ロードセルの出力データに関しては、バネばかりを用いて0~20kgfの範囲で1kgfずつ力を増加させた場合の電圧出力との加えた力との関係からあらかじめ較正式を求めた。この較正式をもとに算出された推進力のデータは、ストロボの閃光と同時に起こる電圧変化をトリガーとして画像データとの時間的同期を行い、平泳ぎのかき始めからリカバリーまでの1サイクル分に対応する推進力データだけ抽出し、分析を行った。

### 3.2 画像分析の方法

2台のカメラによる映像は、画像中に録画されたストロボの閃光を同期信号としてビデオ画像の同期をはかった上で、動作画像をスーパーインポーズ機能を備えたパーソナルコンピュータ（シャープ製 X68000）に取り込み、被験者の肩峰、肘関節、手関節中央、中指先端、親指先端、小指先端の6点を1フィールド(1/60sec)ごとにデジタイズして2次元座標

値に変換した。身体各部位の計測点の三次元座標の算出には、DLT法(池上ら<sup>4)</sup>)を用い、得られた三次元座標値に対してButterworth型デジタルフィルタを適用してデータを平滑化した。

### 3.3 座標系および手部の速度、角度の定義

本研究で用いた座標系および手部の速度、角度の定義を図2に示す。被験者が水中で水平姿勢をとつ

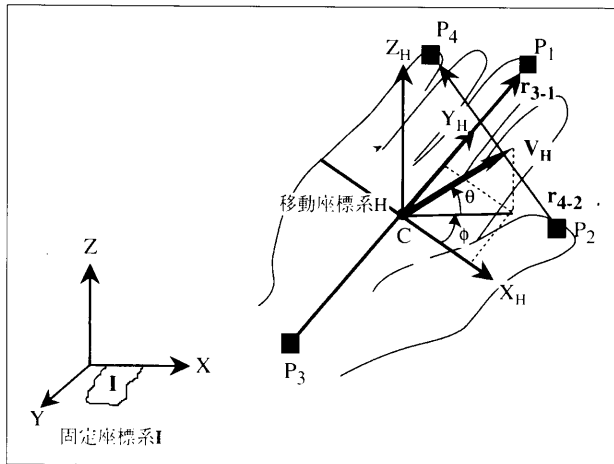


図2 座標系および迎角  $\theta$  と流入角  $\phi$  の定義

た際の長手方向に対して鉛直方向をZ軸、左右方向をX軸、前後方向をY軸とする静止座標系I(X、Y、Z)を定義した。そして手部のランドマークをそれぞれ点P1(中指先端)、点P2(親指先端)、点P3(手関節中央部)、点P4(小指先端)とし、静止座標系Iに対する各点の位置ベクトルをそれぞれ $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ と表す。次に点P1とP3を結ぶ線分の中点を点Cとすると、点Cの位置ベクトル $r_c$ は、式(1)によって求められる。

$$r_c = 1/2 (r_1 + r_3) \dots\dots\dots (1)$$

手部の移動速度 $V$ は、この点Cの変位を微分することによって求められるので、式(2)で表される。

$$V = \dot{r}_c \dots\dots\dots (2)$$

次に手部の迎え角 $\theta$ および流入角 $\phi$ の定義を示す(図2参照)。一般的に迎え角とは、主流方向に対する翼などの基準面の傾きを表し、流入角とは、主流が翼などに対してどちらの方向から流入するかを示すものである。本研究では、画像分析データから迎え角および流入角を算出するために、新たに点Cを原点とする直交移動座標系H( $X_H$ 、 $Y_H$ 、 $Z_H$ )を設定した。直交移動座標系Hの設定にあたっては、 $Y_H$ 軸を点P3と点P1を結ぶ直線方向に設定し、 $Z_H$ 軸は点P3、

P1を結ぶベクトル $r_{3-1}$ と点P2、P4を結ぶベクトル $r_{4-2}$ の双方に直交するように設定した。さらにその $Z_H$ 軸と $Y_H$ 軸に直交するよう $X_H$ 軸を設定した。

ここで式(2)に示した速度ベクトルを移動座標系Hに座標変換したベクトルを $V_H$ と表す。本研究では、迎角 $\theta$ を流速ベクトル $V_H$ と $X_H$   $Y_H$ 平面とがなす角と定義した。さらに流入角 $\phi$ は、流速ベクトル $V_H$ を $X_H$   $Y_H$ 平面へ投影したベクトルと $X_H$ 軸とのなす角と定義した。

### 3.4 手部が発揮する流体力の算出方法

図3に手部が発揮する流体力の定義を示す。本研究では、画像分析の結果から得られた手部の迎角 $\theta$ と流入角 $\phi$ および速度 $V$ のデータをもとに手部が発揮していると思われる流体力の推定を行った。推定

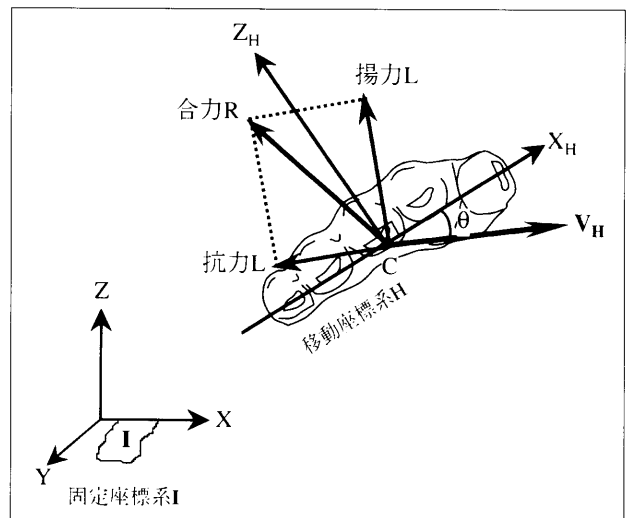


図3 手部に生じる迎角  $\theta$  と流体力の定義

に当たっては、式(3)および(4)に示す揚力 $L$ および抗力 $D$ を求める流体力の一般式に手部の平面積 $S$ 、速度 $V$ およびSchleithauf<sup>5)</sup>による手部の揚力係数 $C_L$ 、抗力係数 $C_D$ を代入して算出した。なお $\rho$ は、水の密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )を示す。

$$L = \frac{1}{2} \rho S C_L V^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho S C_D V^2 \dots\dots\dots (4)$$

上述の推定式によって求められた流体力は、図3に示すように揚力 $L$ が流速ベクトル $V_H$ に対して垂直方向に作用し、抗力 $D$ が流速ベクトル $V_H$ と逆方向に作用すると考えられる。最終的に手部が発揮している

と思われる合力 $R$ （以後、手部推定合力という）は、揚力 $L$ と抗力 $D$ の計算結果から次式によって算出した。

$$R = \sqrt{L^2 + D^2} \dots\dots\dots(5)$$

また手部推定合力 $R$ に対して揚力の占める割合 $L/R$ と抗力占めるの割合 $D/R$ を次式から算出した。

$$L/R = \frac{L^2}{R^2} \dots\dots\dots(6)$$

$$D/R = \frac{D^2}{R^2} \dots\dots\dots(7)$$

## 4. 結 果

### 4.1 動作動作パターンの特徴

本研究では、被験者の中で特に平泳ぎに熟練していると思われる競泳選手T.N（以後、熟練者とする）の分析結果を中心に水泳競技未経験者Y.K（以後、未熟練者とする）の分析結果と対比させながら報告する。

平泳ぎの水中動作、特に手部の動作パターンに注目して、熟練者と未熟練者の1ストローク中（押し出しからリカバリー）の右手の動作パターンを図4（熟練者T.N）および図5（未熟練者Y.K）に示す。各図中に描かれた四角形は親指、中指、小指および手首中央を結んだスティックダイアグラムであり、かき動作開始から1ストローク終了まで、1/10sec

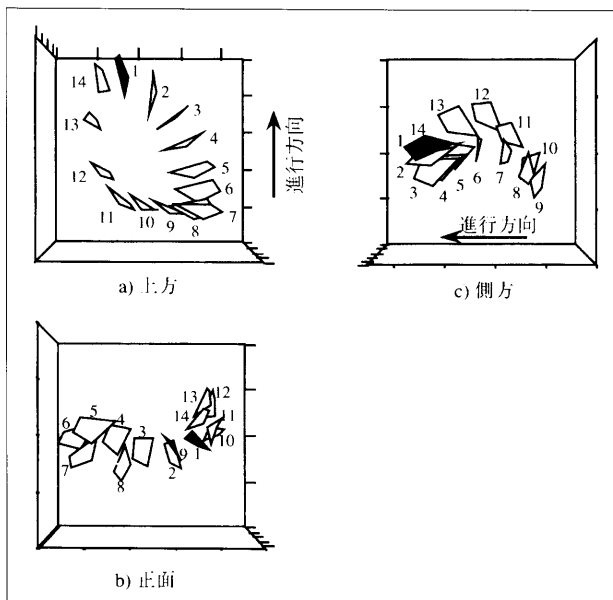


図4 熟練者T.Nにおける右手の動作パターン

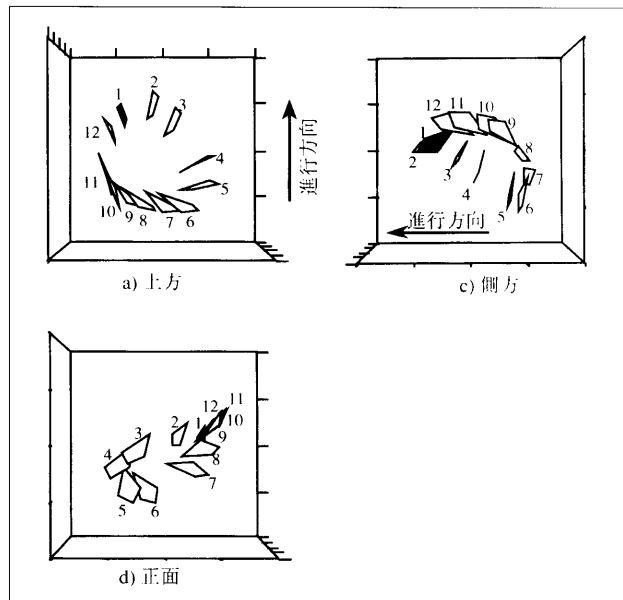


図5 未熟練者Y.Kにおける右手の動作パターン

ごとに順次に番号を振ってある。また左上(a)が手部の動作パターンを真上から見た図、左下(b)が進行方向正面から見た図、右上(c)が真横から見た図であり、ストローク動作開始（番号1）からリカバリー終了までの一連の動作を示している

熟練者と未熟練者の動作の特徴を比較すると、未熟練者は図5中の番号2～5にかけて水を斜め下後方に押し進めようとしているのが分かる。これはいわゆるストレートプルと呼ばれ、水泳初級者に多く見られる動作様式である。一方図4より、熟練者の動作は、未熟練者と比較してかなり複雑な動きをしている。特に正面および側方からみた図4b)、4c)において、熟練者はかき始めから和船の櫓のように手の迎え角を様々に変化させながら水をとりえようとしている。

### 4.2 手部の迎角および移動速度

熟練者および未熟練者の動作の違いをさらに詳細に分析するために、両者の手部の迎角 $\theta$ と移動速度 $V$ の経時的变化を図6、7に示す。

図6より迎角 $\theta$ に関して、未熟練者はストローク開始時の迎角 $\theta$ がほぼ $90^\circ$ で最大値を示した後、徐々に減少し続け、かき込み動作終了時に当たる0.7秒後に迎角 $\theta$ は約 $5^\circ$ まで減少した。一方、熟練者は図4のスティックダイアグラム中での複雑な動きを裏付けるように、迎角 $\theta$ が1ストローク中かな

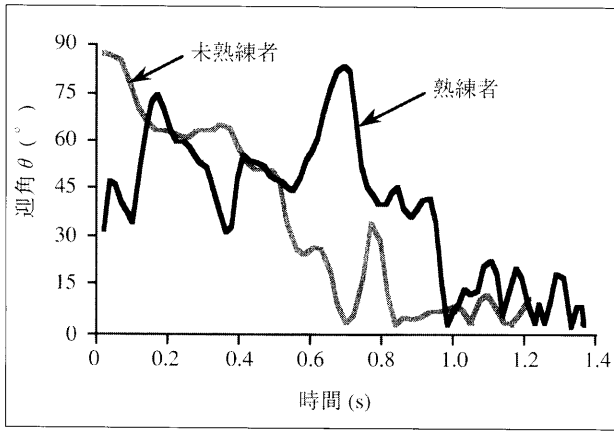


図6 熟練者T.Nおよび未熟練者Y.Kにおける迎角 $\theta$ の比較

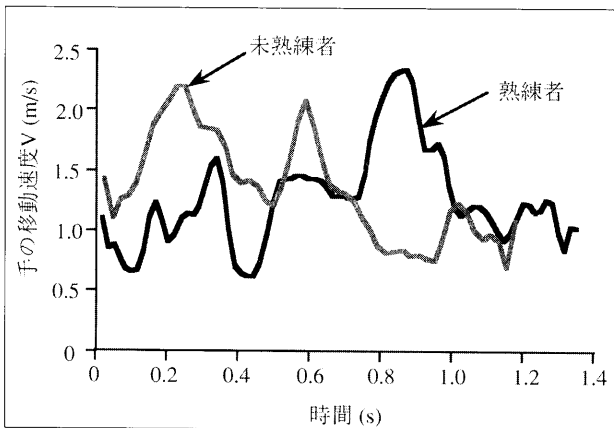


図7 熟練者T.Nおよび未熟練者Y.Kにおける手部移動速度Vの比較

り変化している。このように両者の違いは、未熟練者がかき始めからかき込み動作終了時にかけて迎角がほぼ単調に減少しているのに対して、熟練者はほぼ $30^\circ$ 以上の迎角を保ちながら $30\sim 80^\circ$ の範囲で複雑に変化している点にある。

次に図7より手部の速度Vに関して、未熟練者は、かき始めから約0.3秒後に約2.2m/sの最大値を示し、全体的な傾向としてストロークの前半部の方が速度が大きい。一方、熟練者は未熟練者と異なりストローク前半は、低速度で未熟練者よりも遅いが、ストロークの終了にかけて増大し、リカバリー開始直前の約0.9秒後に約2.3m/sの最大値を示した。両者を比較すると、移動速度の最大値にはあまり差が認められないが、迎角と同様に未熟練者は、ストローク前半部分の速度が大きいものに対して、熟練者は、初め未熟練者より低い速度であるが、後半のかき込み動作終了時にかけて徐々に速度を増加させていた。

### 4.3 手部推定合力と推進力

画像分析データをもとにSchleihauf<sup>6)</sup>の係数を用いて算出した手部推定合力Rとロードセルによって計測した推進力との関連を図8(熟練者)および図9(未熟練者)に示す。なお図中上段が、推進力を示し、下段が手部推定合力Rを示している。

図8より熟練者の推進力は、0.6秒後までほとんど発揮されていないが、0.7~0.9秒後にかけて急激に増加し、最大値は約150Nを示した。手部推定合力Rは、ストローク動作の初期に小さなピークが見られるが、実測推進力と同様にかき込み時において急激に増加しているが、最大値は約72Nで、推進力の半分程度であった。

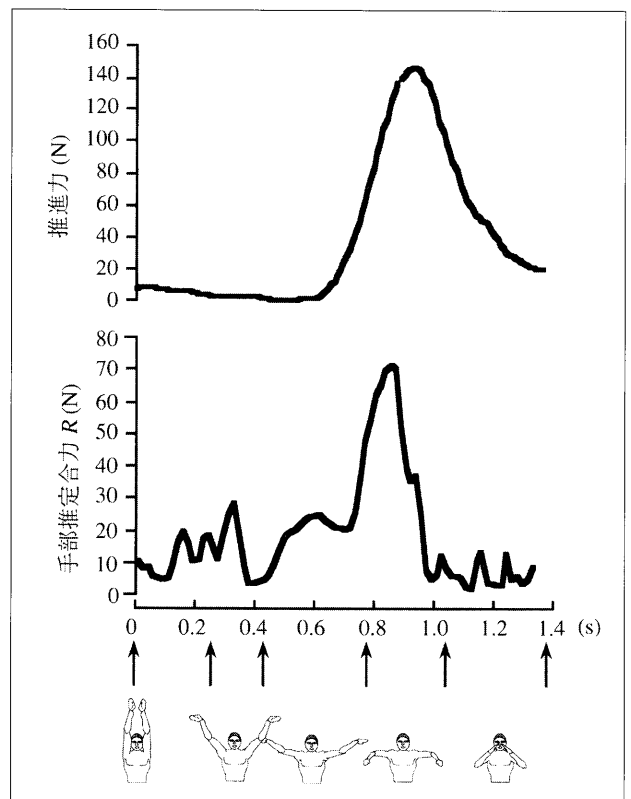


図8 熟練者T.Nにおける手部推定合力Rと推進力の変化

一方図9より、未熟練者の場合、推進力に関しては、ストローク前半部分で推進力が発揮されないのは熟練者と同じ傾向にあるが、ピークを迎えたのは、熟練者と異なり、リカバリー局面に入った約0.8秒後で、最大値は約42Nであった。さらに手部推定合力は、0.2秒後と0.6秒後付近でピークが見られ、最大値は推進力の9割程度にあたる約35Nであった。

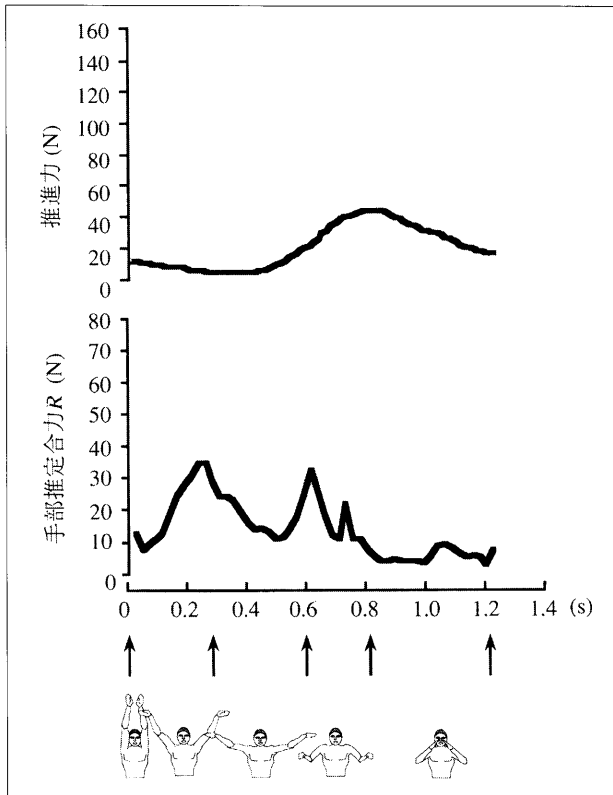


図9 未熟練者Y.K.における手部推定合力 $R$ と推進力の変化

他の被験者に関しても、水泳競技経験者と未経験者との差は大きく、推進力については、経験者の最大値の平均が $135.0\text{N} \pm 12.9$ あるのに対して、未経験者の最大値の平均は、 $39.0\text{N} \pm 2.6$ であった。また手部推定合力 $R$ に関しては、経験者の最大値の平均が $67.6\text{N} \pm 5.3$ あるのに対して、未経験者の最大値の平均は、 $30.1\text{N} \pm 4.8$ であった。

次に推進力と手部推定合力の相互の関連について比較すると、熟練者の場合、ストローク後半のかき込み時において2つの指標がほぼ同時に最大値を示した。しかし未熟練者の場合、手部推定合力はストローク前半に最大値を示し、推進力はストローク後半にピークを迎えていた。

#### 4.4 手部推定合力に占める揚力と抗力の割合

熟練者と未熟練者のストロークテクニックの違いをさらに詳細に分析するために、手部推定合力 $R$ に占める揚力 $L$ と抗力 $D$ の内訳を図10に示す。なお図中の上段が熟練者、下段が未熟練者の推定結果を示している。

熟練者の場合（図10上図）、1ストローク中に発

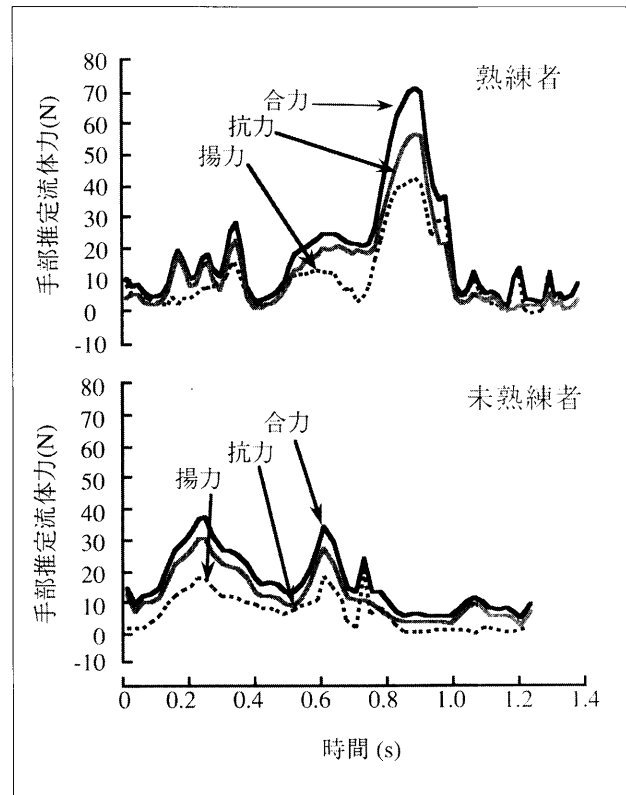


図10 熟練者および未熟練者の発揮する推定流体力の比較

揮される、平均の手部推定合力は $19.1\text{N}$ で、最大値は $72.0\text{N}$ であった。またその内訳を揚力と抗力に分けてみると、揚力が平均 $11.2\text{N}$ で、合力に対する割合 $L/R$ は $35.0\%$ であった。また、抗力に関しては平均 $15.3\text{N}$ で合力に対する割合 $D/R$ は $65.0\%$ であった。

一方未熟練者の場合（図10下図）、1ストローク中に発揮される平均の手部推定合力は $14.1\text{N}$ で、最大値は $35.0\text{N}$ であった。次に合力の内訳については揚力が平均 $5.8\text{N}$ で、合力に対する割合 $L/R$ は $16.7\%$ であった。抗力に関しては平均 $13.0\text{N}$ で合力に対する割合 $D/R$ は $83.3\%$ に達し、抗力の割合が熟練者に比べて大きな値を示した。

## 5. 考察

### 5.1 ストローク技術に関する熟練者と未熟練者の比較

熟練者と未熟練者のストローク動作を比較した場合、手部の迎角 $\theta$ および速度 $V$ の双方に差異が認められた。つまり未熟練者は、ストローク前半にお

る手部の速度が大きいものに対して、熟練者の場合、ストローク後半のかき込み時に速度の最大値を示している。さらに迎角 $\theta$ に関しても、未熟練者の場合、かき始めの迎角が $90^\circ$ で最大を示した後、 $5^\circ$ 程度まで徐々に迎角が減少する傾向にあるが、熟練者の場合、ストローク開始からリカバリーに至る直前まで、 $30^\circ \sim 85^\circ$ の範囲で局面ごとに変化している。

一般的に水泳初級者は、水を後ろに押して推進するという感覚が強いため、本実験結果に示されるように最初に大きな迎角を保って勢いよく水を後方に押すストロークパターン（ストレートプル）になるものと思われる。またストローク中も手関節角度をほぼ固定したままストローク動作を行っているので、腕のかき動作に伴って、迎角が単調に変化しているものと思われる。一方熟練者は、ストローク動作開始後、スカーリング動作(高木ら<sup>11)</sup>)と呼ばれる和船の櫓のような動作を適用しながら常に迎え角を $30^\circ$ 以上に保ちつつ、ストローク後半のかき込み時に最も手部速度が速くなるような動作を行っている。つまり熟練者の場合、抗力を主体として推進するのではなく、内側にかき込むときに迎え角を迎え角を約 $40^\circ$ に保って、揚力をより多く発揮させ、抗力との合力を増大させて推進しようとしているのかがうかがえる。

次に推進力、手部推定合力 $R$ についても、未熟練者と熟練者との間に顕著な差が認められた。特に推進力に関しては、未熟練者は熟練者の $1/3$ 以下で、未熟練者が形態的に熟練者より劣っているとはいえ、単に筋出力の差異から生じる差とは考えにくく、この差異は主に両者のストロークテクニックの優劣によるものと推察される。しかしながら、本研究では推進力を測定する際、泳者をケーブルで固定して平泳ぎのプル動作を行わせているため、データを解釈する上で以下の制限が考えられる。つまり、平泳ぎのリカバリー局面では進行方向とは逆方向に力が加わるため、身体が後退しケーブルがたるむ可能性がある。そうすると再びプル動作で推進力が発生するが、身体が前進しケーブルのたるみがなくなるまではロードセルには張力は発生しないことが考えられる。よって本研究結果は、ストローク中、身体重心部に加わった力とは時間的にずれが生じていることが懸念される。また未熟練者の場合、推進力の絶

対値も小さく、プルの後半で推進力が減退してしまうことから、本測定システムで計測した場合、ケーブルのたるみがなくなる時点では推進力のピークを過ぎており、推進力を過小評価してしまう恐れがある。その他、実際の水泳では身体が前進するため、水は身体に対し常に後ろ向きに流れているが、本研究では静止した水をかくことになる。後ろ向きに流れる水の中で有効な推進力を産み出すのが熟練者のプルのテクニックと考えられるため、本実験条件下で計測された推進力と実際の水泳中の推進力と比較する際には、注意が必要となる。

手部推定合力 $R$ は、手の面積 $S$ 、揚抗力係数 $C_L$ 、 $C_D$ 、手部速度 $V$ の3つの変数によって算出されるが、手部速度 $V$ の二乗に比例するため、その変化による影響を大きく受けるので、その発揮パターンは手部速度の推移パターンと類似している。しかし手部速度 $V$ は、推移パターンに関しては違いが見られたが、絶対値については大きな差が認められなかった(熟練者 $2.3\text{m/s}$ 、未熟練者 $2.2\text{m/s}$ )。よって手部推定合力 $R$ に関する両者の差は、迎角および流入角の影響が大きいと考えられる。迎角 $\theta$ は、未熟練者の場合、かき始めに $90^\circ$ 程度で最も大きく、その後単調に減少し、ストローク後半には $5^\circ$ 程度まで減少している。Schleihauf<sup>10)</sup>による抵抗係数の測定結果によると、迎え角が $5^\circ$ 程度では揚力および抗力係数のどちらも小さな値しか示さない。合力は、揚力と抗力の平方の和であるので、Schleihauf<sup>10)</sup>の結果によれば合力を大きくするためには迎角を $40^\circ$ 前後に保つのが望ましいと考えられる。よって未熟練者の迎角はより大きな合力を生むには適していないと考えられる。

一方熟練者の手部推定合力 $R$ を見ると、最大値は $72.0\text{N}$ で、未熟練者( $42.0\text{N}$ )の約 $1.9$ 倍に達し、平均値( $19.1\text{N}$ )でも未熟練者( $13.0\text{N}$ )をかなり上回った。この値を世界のトップスイマーを対象としたSchleihauf et al<sup>10)</sup>の結果と比較すると、トップスイマーの手部推定合力の最大値が約 $85\text{N}$ であったことから、競技レベルの差を考慮すれば、本研究結果はほぼ妥当な結果であったと考えられる。また手部推定合力の発揮パターンに関してもSchleihauf et al<sup>10)</sup>の結果と本研究結果はほぼ一致し、入水からキャッチ局面において小さなピークがあった後、かき込み局面で合力が急激に増大しており、これらの特徴は熟

練者に共通するものと考えられる。Schleihau et al<sup>10)</sup>の報告では手部速度、迎角、手部面積等が明らかにされていないので本研究結果と比較してどの要因が推進力向上に貢献しているの明らかにすることはできないが、揚抗力係数の関係から推察すると、迎角を30~60°に保ちながら手部速度を上げることは重要であると考えられる。

以上のような熟練者と未熟練者との比較から、実際の平泳ぎの指導場面においては、より大きな合力を発揮させるために迎え角を30~60°の範囲に保ちながら手部速度を徐々に加速することが重要であると示唆される。

## 5.2 手部推定合力 $R$ と推進力との関係

熟練者の場合、手部推定合力 $R$ と推進力がほぼ同時期にピークを迎えており、未熟練者と比較すると手部で発揮した合力が効率よく身体全体に作用していると考えられる。実際の試技では、両上肢によってプル動作を行っているため、右手のみによる手部推定合力の最大値が72.0Nであるから、左手もほぼ同じ力を発揮しているとする、その最大値の合計は144.0Nで、推進力の最大値(150.3N)とほぼ等しい値となる。しかしながら、本研究で算出した手部推定合力 $R$ は、必ずしも常に身体を進行方向に推進させるのに貢献しているのではなく、その進行方向成分のみが推進力として作用する。よって本研究結果のみから、手部で発揮された流体力と推進力との関係を説明することはできないが、理想的には手部で発揮された流体力が全て推進力へと変換されることが望ましい。熟練者の場合、手部推定合力 $R$ がピークを迎えたのは、ストローク後半(ストローク開始後、約0.9秒後)のかき込み期にあたり、その時の迎角 $\theta$ は約40°であった。その時の手部の動きをスティックダイアグラム(図4中番号9)から見ると、進行方向に対して左右方向で体幹中心部に向かって移動している。揚力は移動方向とは垂直方向に、また抗力は移動方向と反対方向に作用することから、左右のストロークがほぼ対称であると考え、その時、両手で発揮された流体力のうち、抗力成分はほぼ相殺され、揚力成分のみが進行方向と一致することになる。よってこの時点において揚力が発揮されやすい迎角を保持することは、手部で発揮した力を効率よく推進力に変換するための重要なポイントと

言える。

一方、未熟練者の場合、推定手部合力 $R$ と推進力の発揮パターンには大きなずれが生じていた。このずれが生じる原因としては、前述した研究上の制限からくるケーブルのたるみなどが考えられる。加えて未熟練者の場合、ストローク前半(ストローク開始後、約0.3秒後)に推定手部合力 $R$ のピークが見られるが、その時の迎え角 $\theta$ (図6参照)は約60°で、スティックダイアグラム(図4中、番号3)から見ると進行方向に対して斜め下方に移動している。この時、手部で発揮されている合力は、主に身体を進行方向に対して斜め上方へ押し上げるように作用すると考えられ、結果として身体を推進させるために有効に作用せず、ケーブルのたるみの解消が遅れ、推進力の測定結果との間のずれを助長していると考えられる。

初・中級段階にある泳者がより効率よく推進力を得るためには、本研究結果に示されたように手部で発揮した合力と身体全体の推進力が一致するようにストローク動作を行うことが望ましいと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、平泳ぎストローク動作中の手部に生じる推定合力および推進力の実測値を指標として、熟練者と未熟練者のストローク技術を流体力学的に比較検討し、指導上のポイントとして以下の結論を得た。

1. 手部に生じる抗力と揚力を効率よく発揮させるためには、手部の迎え角を30~60°の範囲で適切に保ちながらストローク動作を行う必要がある
2. 手部の圧力差を増大させ合力を増すためには、かき始めからストローク後半にかけて徐々に手部速度を加速させる必要がある。

## 【文 献】

- 1) Berger, M. A. M. (1994) Comparison of different measurements of the propulsive force in front crawl swimming. VII International symposium on biomechanics and medicine in swimming program and abstract book: 17
- 2) Berger, M. A. M., Groot, G. d. and Hollander, A. P. (1995) Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models. J Biomech 28(2) : 125-133



- 3) Counsilman, J. E. (1968) *The Science of Swimming.* : 111-132, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 4) 池上康男、桜井伸二、矢部京之助 (1991) D L T法. *Jpn J Sports Sci* 10(3) : 191-195
- 5) Maglischo, E. W. (1982) *Swimming Faster.* : 129-168, Mayfield Publishing Company, Clifornia
- 6) Nomura, T., Costill, D. L., Lee, G. A., Goodpaster, B. H., Obara, S. and Matsui, A. (1995) Effects of sprint-assisted swimming on hand pressure during breaststroke. *Proceedings of FISU/CESU Conference the 18th Universiade 1995 Fukuoka* : 146-147
- 7) Payton, C. J. and Bartlett, R. M. (1995) Estimating propulsive forces in swimming from three-dimensional kinetic data. *J Sports Sci* 13(6) : 447-454
- 8) Schleihauf, R. E. (1979) A Hydrodynamic Analysis of Swimming Propulsion. *SWIMMING III*, Terauds, J. and Bedingfield, E. W. (Eds) : 70-109, University Park Press, Baltimore, MD.
- 9) Schleihauf, R. E. (1983) Three-Dimensional Analysis of Hand Propulsion in the Sprint Front crawl Stroke. *Biomechanics and Medicine in Swimming*, Hollander, A. P. et al. (Eds) : 173-183, Human Kinetics, Champaign, IL
- 10) Schleihauf, R. E., Higgins, J. R., Hinrichs, R., Luedtke, D., Maglischo, C., Maglischo, E. W. and Thayer, A. (1988) Propulsive techniques: front crawl stroke, butterfly, backstroke, and breaststroke. *Swimming Science V*, Ungerechts, B. E. et al. (Eds) : 53-59, Human Kinetics, Champaign, IL
- 11) 高木英樹, 清水幸丸, 前田太佳夫 (1992) スカールリング動作における推力発揮の効率. *スポーツ工学シンポジウム 1992講演論文集* : 87-90
- 12) 高木英樹, 清水幸丸 (1993) 平泳ぎによる推進力発揮に関する流体力学的考察 (腕のかきによる揚力および抗力発生のメカニズム). *日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集* : 398-400
- 13) 高木英樹, 清水幸丸 (1994) 水泳における手部の役割に関する流体力学的考察. *日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集* : 95-96
- 14) Yoshizawa, M., Okamoto, T., Tokuyama, H. and Kumamoto, M. (1978a) Electromyography study of the breaststroke. *Biomechanics V-B*, Komi P. V. (Ed) : 222-229, University Park Press, Baltimore
- 12) 古澤正尹 (1978b) 筋電図による平泳ぎの泳法分析. *体育の科学*, 28 (6) : 381-384