



# PIVによる水泳スカーリング動作時の 手部周り流れ場の可視化

— 推進メカニズムの解明に向けて —

三輪 飛寛<sup>1)</sup>, 鎌田 依里<sup>2)</sup>, 松内 一雄<sup>3)</sup>, 榊原 潤<sup>4)</sup>, 野村 武男<sup>5)</sup>

## Flow visualization of sculling motion in human swimming using PIV

Takahiro MIWA, Eri KAMATA, Kazuo MATSUUCHI, Jun SAKAKIBARA  
and Takeo NOMURA

### ABSTRACT

Our goal was to examine the propulsion mechanism of sculling motion by visualising the unsteady flow field around a swimmer's hand using PIV.

One formerly competitive swimmer participated in this study and was instructed to swim using a sculling motion in a swimming flume. Two-hundred series of sequential flow fields around the swimmer's left hand were simultaneously obtained by PIV. The flow fields were calculated from two sequential particle images to determine the particle velocity-vectors and the intensity of the vortices.

A leading edge vortex was found beside the little finger of the hand during the out-scull phase, and the vortex seemed to be shed during the transition phase from out-scull to in-scull. The circulation change around the hand was seen after the transition phase. The results of the present study suggested that the sculling swimmer created a propulsive force induced by the momentum change of the flow field relating to the circulation and the shed vortex.

**Keywords:** Sculling motion, Human swimming, Unsteady flow, Vortex, Propulsion mechanism

### 1. はじめに

スカーリング動作は、水泳時やシンクロナイズドスイミング(以下「シンクロ」と略す)で使用される手で8の字を書くような動きによる推進技術の一つであり(Fig.1), 競泳では、一般的な教本で採用されているクロール泳におけるS字プル動作を行う時のIn-sweep動作からOut-sweep動作の遷移過程がスカーリング動作と関係があるとされ、ストロークのプル動作のドリル練習として用いられている<sup>1)</sup>。シンクロにおけるスカーリング動作は、身体姿勢をコントロールし、浮力をつくり、さらには推進させることの

できる動作であり<sup>2)</sup>、技や演技などを行う上で必要不可欠な推進技術となり、その重要性はシンクロの指導書などでも述べられている<sup>3)</sup>。

スカーリングによる推進力発生機構について Rackham<sup>4)</sup>および Hall<sup>5)</sup>は、スカーリング動作時の手を翼と仮定した場合、翼に適度な角度を持たせて水平にかくことにより、翼の上部と下部の圧力差を増大させ、揚力を発生させていると説明している。この解釈は定常な翼の運動からの類推であり、これらの研究では8の字動作の物理的意味の説明はなされていない。

これまでに行われてきた水泳時の推進メカニズムの研究は、主に手部によって発揮される推進力に着目したものが多く、Schleihauf<sup>6)</sup>や Berger<sup>7)</sup>は手のモデルを用いた準定常解析を行い、泳者にかかる力の評価を行った。Schleihauf<sup>6)</sup>の報告は、手にかかる力を最初に定量的に評価したものであり、水泳の流体力学研究におけるパイオニア的研究として重要である。また伊藤<sup>8)</sup>は、Schleihauf<sup>6)</sup>の手法を応用し、シンクロのサポート・スカーリング動作

\* 原稿受付 2010年10月22日

1) 正会員 国立スポーツ科学センター スポーツ科学研究部 (〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1, E-mail: miwa.takahiro@jiss.naash.go.jp)  
2) 筑波大学大学院 体育研究科  
3) 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
4) 正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
5) 筑波大学大学院 人間総合科学研究科

時の手のひら形状に関する流体力学的特性を明らかにした。シンクロにおける詳細な流体力学的研究は皆無であった事からもその意義は大きい。しかしながら、これらの研究は手部周りの流れ場の速度を一定として捉えた準定常解析を行った研究である。実際の泳者の手の動作は加減速を繰り返す複雑な動作であり、力の発生の本質的な部分を欠いている可能性を否定できない<sup>9)</sup>。Pai and Hay<sup>10)</sup>は振動するシリンダーモデルを用いた力の測定を行い、準定常解析における測定値の誤差に関して報告した。さらに Sanders<sup>11)</sup>や工藤ら<sup>12)</sup>は、手部モデルを用いた力測定の研究を進展させ、準定常解析から得られた手に働く力の大きさは、実際の泳者から推定される推力の値に比べ小さいことを報告している。

このような背景から、最近では非定常な動きを伴う水泳時の推進メカニズムを研究する上で、Ungerechtsら<sup>13)</sup>や Toussaintら<sup>14)</sup>のように、水泳時の流体の非定常性を重要視する報告がされてきている。そのため、実際の泳ぎの推進メカニズムを解明するためには、身体周りの流れの非定常性を考慮に入れることが必要不可欠であると考えられる。しかしながら、これまで泳者周りの非定常な流れ場を定量的に測定する手段がなく、気泡を用いた流れ場の簡易な可視化による定性的な評価に留まっていた<sup>15), 16)</sup>。

一方、近年の生物学や工学分野では、非定常な流れ場の速度分布を調べる手法として最も有効な計測法の一つである粒子画像流速測定法（以下「PIV計測法」と略す）を用いて、非定常流体中の昆虫の飛翔や魚の推進メカニズムに関する研究が盛んに行われており、昆虫や魚は流体中に渦を作りだし、これにより運動量を生成して力を得ていることが明らかとなっている<sup>17)-19)</sup>。これらの研究では、測定範囲の狭い非常に小さな流れ場のものがほとんどであり、ヒト水泳時のように大きな流れ場の解析に PIV 計測法をそのまま適用するには、高出力レーザーやヒトが泳げるサイズの回流水槽が必要など測定環境面で問題があった<sup>9)</sup>。最近になり松内ら<sup>20)</sup>が上記問題点を解決し、クロール泳手部動作と非定常な流れ場の関係から、トップスイマーは手の平の傾き角度を変化させて生成した渦による運動量を利用し推進していると報告している。しかしながら、三次元的に複雑な動きをするクロール泳手部周りの流れ場を二次元平面上で計測しているため、詳細な手部近傍の流れ場までは明らかになっておらず、水泳時の推進メカニズムを解明する上でさらなる知見が必要である。

本研究は、水泳やシンクロの基礎的推進技術の一つであり比較的単純な二次元平面上を反復移動する、スカーリング動作の推進メカニズムに関する知見を得ることを目的とする。松内ら<sup>20)</sup>がクロール泳に使用した 2 次元速度 2 成分 PIV 計測法（two-component PIV, 以下「2C-PIV」と略す）を用い、泳者スカーリング動作時の手部周りの非定常流れ場の様子から推進力発揮のメカニズムを探っていく。

実際の泳動作時と同様の非定常な流れ場からスカーリング動作の推進メカニズムを探るという試みは、体育科学の分野において新しい視点であり、本研究から得られる知見は、水泳やシンクロのコーチング現場や、今後の水泳の流体力学的研究において有益な基礎的資料となることが期待される。

## 2. 方法

### 2.1 被験者

1 名の元大学競泳選手（身長：172cm, 体重：65kg, 競泳歴 12 年）が被験者として本実験に参加した。実験前に被験者には実験の趣旨及び危険性についての説明をし、実験参加の同意を得た。

### 2.2 回流水槽

実験には回流水槽（測定領域：長さ 4.6m, 幅 2.0m, 深さ 1.5m, 五十嵐工業社製）を使用した。本回流水槽は 0.2-2.5m/s まで 2% の誤差で流速を変えられるものであり、水深は 1.2m, 流速を 0.5m/s に固定した。なお、回流水槽の流れの均一性を検証するため、事前に流れ場の測定領域に何も置かない状態で、プロペラ流速計および PIV 計測法による流速測定を行い、測定面内における流速が均一流であることを確認した。

### 2.3 スカーリング動作および測定領域

本研究の分析対象であるスカーリング動作は、肘を支点にして 8 の字を描くように手を左右方向にインスカル及びアウトスカルを繰り返す動作とした。被験者は普段から練習時にスカーリング動作を行っており実験試技には慣れていた。Fig. 1 にスカーリング動作の模式図を示す。左図は、泳者が伏臥姿勢で左手スカーリング動作を行っている様子を泳者の頭上から見たものであり、右図は回流水槽下方から見た様子を測定結果と照らし合わせやすいように鏡像で示した。右図の四角で囲まれた部分は本研究での

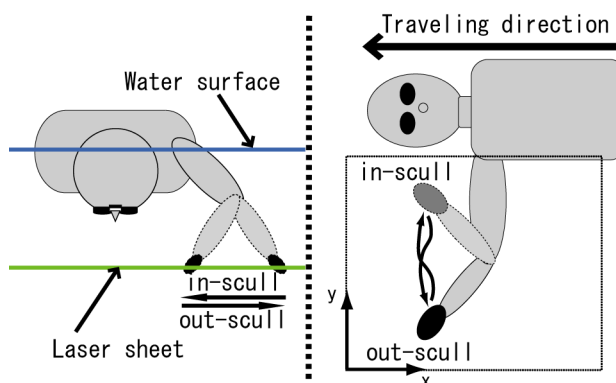


Fig. 1 Schematic diagram of the sculling motion in the prone position. The illustration on the left is the vertex view of the sculling motion. The illustration on the right expresses the mirrored image of the sculling motion from the bottom.

測定領域を示し、得られる結果はこの四角部分の流れ場を分析したものとなる。回流水槽の流れ方向(身体長軸方向)を  $x$  軸, 主な手の移動方向となる身体長軸に直交する軸(図中では上下方向)を  $y$  軸とした。被験者には伏臥姿勢でのスカーリング動作を肩の真下で行い、回流水槽の測定位置に留まるように指示をした。試技は 10 試技行い、スカーリング動作は手をほぼ左右対称に動かしていることから、動作方向が大きく変化するアウトスカルからインスカルにかけての遷移局面に着目し分析をした。また、レーザー光によるハレーションの影響を最小限にするために、被験者の左手にはスカーリング動作に支障をきたさない厚さの黒ゴム手袋 (Black Dragon, Beauty Black Gloves, 株式会社アレックスケア社製) を装着させた。

### 2.4 2C-PIV 計測法

2C-PIV 計測法は、流れ場にトレーサー粒子を懸濁し、レーザーシートを微小時間間隔で連続的に照射することでシート面内の照射されたトレーサー粒子の動き(速度ベクトル)を算出し、流れ場を可視化する方法である。本研究では、松内ら<sup>20)</sup>がクロール泳の手部周り流れ場解析に用いた PIV 計測法を参考にスカーリング動作に応用した。Fig. 2 は PIV 計測法の実験概略図である。回流水槽中に流れを阻害しない比重が約 1.0 で粒径  $50\mu\text{m}$  のトレーサー粒子(ダイアミド 2157, ダイセル・エボニック株式会社)を混入し、回流水槽側面窓から Nd-YAG レーザー(Solo PIV 120 : New Wave Research, Inc., USA)をシート状に水平照射した。トレーサー粒子の混入量は回流水槽の水量  $100\text{ m}^3$  に対して  $180\text{ cm}^3$  とした。スカーリング動作時の被験者の左手がレーザーシート面を通過するようにレーザーシートの高さを調節し、レーザーシートによって照射された粒子の画像を回流水槽下方窓より鏡で 90 度屈折させた後、高解像度 CCD カメラ(Kodak Megaplus ES1.0 : Eastman Kodak Co., USA)により取得した。撮影画像はデスクトップコンピュータ(Dell Dimension 4200 : Dell Computer Corp., USA)に記録した。CCD カメラで撮影したレーザー測定面の計測領域は  $0.5 \times 0.5\text{m}$  に固定した。レーザーの照射と CCD カメラによる撮影はパルスジェネレーター(Quantum Composers Inc., USA)で同期させた。レーザーの照射間隔は一周周期を  $67\text{ms}$  (サンプリング周波数  $15\text{Hz}$ ) とした。一周期間にレーザーシートを微小時間間隔( $1\text{ms}$ )で二回照射し、各周期中の二枚のレーザーシート面上の粒子の移動距離から速度ベクトルを算出した。本研究では一回の試技で 200 枚の時系列連続画像データを取得し、粒子画像二枚一組で 100 枚の速度場情報を得ることができるように設定した。この実験設定で、一回の PIV 計測でスカーリング動作 8~9 往復分のデータが取得できる。

### 2.5 キャリブレーション及びデータ解析

撮影した粒子画像から粒子の位置座標を特定するため

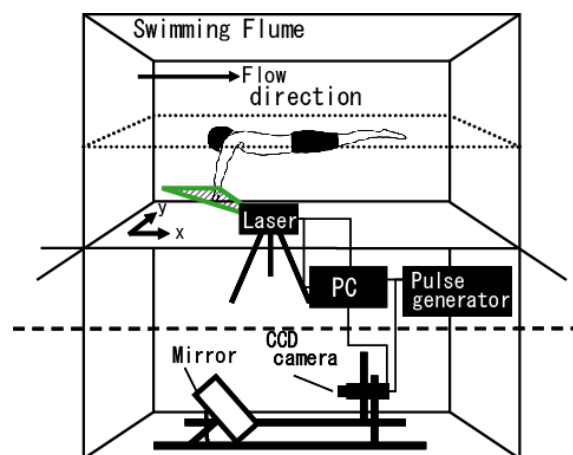


Fig. 2 The Schematic view of the 2C-PIV experimental setup.

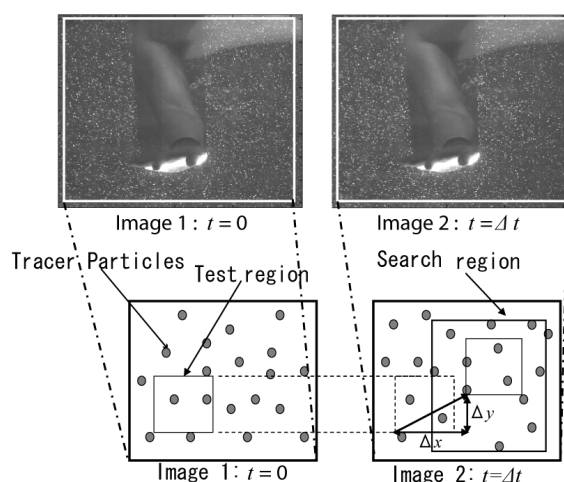


Fig. 3 CCD particle images (single-exposure double-frame images) and the image illustrations for identification of the particles using the cross-correlation method.

に、実験前にレーザーシート測定面において  $10\text{mm}$  間隔の 2 次元格子校正板を CCD カメラで撮影し、実験座標系を作成した。Fig. 3 は、微小時間間隔 ( $\Delta t$ ) で撮影された 2 枚の粒子画像の例である(測定範囲は Fig. 1 を参照)。ある時刻  $t=0$  における粒子画像中の検査領域内の粒子(Fig. 3, Image 1)と、 $\Delta t$  秒後の探査領域内の粒子(Fig. 3, Image 2)を比較し、相互相関分析法<sup>21)</sup>を用いて相関係数が最大となる位置を  $\Delta t$  秒後の粒子位置として同定することで粒子の変移( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ )を求め、

$$u = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (2)$$

により粒子の移動速度ベクトル( $u$ ,  $v$ )を算出した<sup>18), 20)</sup>。

また, MATLAB (MATLAB ver.6.5.1, Release 13, The MathWorks Inc., USA)を用いて流れ場の速度ベクトル分布図を作成し,

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

により渦度( $\omega$ )を算出し渦度分布図を得た. 渦度とは流体中に存在する回転運動成分の度合いを示す量であり, 角速度と同じ次元を持ち, 渦の回転の方向及び回転の強さを表す指標として用いられている<sup>22)</sup>.

### 3. 結果

PIV 計測の元となる CCD カメラの時系列粒子画像を Fig. 4 に示す. 被験者の身体は画像の上部に頭が左側に向いた状態で存在する(身体と測定面の関係に関しては Fig. 1 右図を参照). 左列上段から下段(Fig. 4: a-c)がアウトスカル局面, 最下段(Fig. 4: d)がアウトスカルからインスカルへの遷移局面(以下「遷移局面」と略す), そして右列下段から上段(Fig. 4: e-g)がインスカル局面の様子を表したものである. アウトスカル局面では小指が先行するように手が移動し, インスカル局面では親指側が先行するように移動している.

Fig. 5 は Fig. 4 の粒子画像から算出した同時刻における流れ場の速度ベクトル分布, 同様に Fig. 6 は得られたベクトルデータから算出した渦度分布をそれぞれ示したものである. 各図中の黒色楕円はその時刻における被験者の手の位置を表し, 小指の位置を白丸印で示した. また, その時刻以前の手の位置を, 破線白抜き楕円(アウトスカル時)と, 実線白抜き楕円(インスカル時)でそれぞれ表している. 黒色楕円から上方へ伸びているメッシュ状に色付けされた台形部分は, 手がレーザーを通過したことによってできた影により発生したエラーベクトルを除去するため描いた.

速度ベクトル分布図では測定面の平均流速を差し引いて表示した. そのため, 流れ場に流速の変化がないような主流速とはほぼ同じ流速の場合はドット状で示され, 主流速から流速変化のある箇所にはベクトルが現れていることになる. アウトスカル局面の手が身体の外側(y軸負方向)に移動していく過程において, 手の小指近傍で手に沿った時計回り方向のベクトルが見られ(Fig. 5: a-b), 手と身体の間には右下方向のベクトルが多く発生している(Fig. 5: b-c). 遷移局面(Fig. 5: d)においては, 点線の円で示す時計回りの渦が発生しているのが見られた. その後のインスカル局面で手は時計回りの渦を通過し(Fig. 5: e), 手が身体に近づく方向(y軸正方向)に移動していく過程で, 手背側で手に沿った反時計回りのベクトルが見られるとともに, 手と渦の間に右上方向のベクトル, つまり主流方向へ加速するベクトルが見られた(Fig. 5: f-g). これらの主流方

向へ加速するベクトルは, 他の試技やこの結果で表している他のストローク動作においても確認された.

Fig. 6 中の右側に白黒濃淡で示された凡例バーの数値が渦度を表しており, 上下両端において渦度が最も強くなる. 白色が反時計回り, 黒色が時計回りの渦度を表す. アウトスカル局面(Fig. 6: a-b)で先行する手の小指側に黒色の渦が見られることから, この位置に時計回りの渦が存在し, その後に渦が手背側を通り親指側へと移動している様子が見られた(Fig. 6: c). 遷移局面(Fig. 6: d)では, 先の時刻に見られた渦が手から離れ, その後のインスカル局面において手はその渦を通過し(Fig. 6: e), 手の上方への移動とともに離れていく様子が見られ, 手の周りには白色の渦度(反時計回りの渦)が見られた(Fig. 6: f-g).

### 4. 考察

松内ら<sup>20)</sup>は, クロール泳 S 字プル動作時の In-sweep 動作から Out-sweep 動作の遷移過程における手の平と渦の関係について調べ, 手の運動方向の変化によって手部周りの循環(束縛渦)の方向が逆転し, 循環保存の原理から循環の回転方向の変化後には逆方向に回転する渦(自由渦)が放出され, 手と放出された自由渦との間に運動量が生じることで推進力を得ると説明している. しかしながら, 手部周りの循環の方向変化に関して手の移動方向の変化のみに起因した説明しかされておらず, 実際に手部周りの循環に変化が起こっているのか手部近傍の流れの詳細は分かっていない.

本研究で確認されたアウトスカル局面(Fig. 5: a-c および Fig. 6: a-c)の小指(白丸印)側における時計回りの手に沿ったベクトルと黒色の渦度, 遷移局面を経て手部の運動方向が変化したインスカル局面(Fig. 5: e-g および Fig. 6: e-g)での反時計回りの手に沿ったベクトルと白色の渦度は, 移動中の手部周りにおいてそれぞれ時計回りと反時計回りの循環の存在を示しているものと考えられる. これは, 松内ら<sup>20)</sup>の報告した手の移動方向の変化による循環の回転方向の逆転を示すものであり, ヒト水泳動作時の手部周りの循環の様子が確認できたその意義は大きいと考えられる. また, 本研究のスクーリング動作では, 手が小指を先頭として y 軸負方向へある角度を持って移動していることから, アウトスカル局面において手の小指側に前縁渦が発生し, 手の移動と共に前縁渦が小指側から手背側を通過して親指側へ移動し, 遷移局面(Fig. 6d)には手から離れた自由渦として存在していると考えられる. このような前縁渦の存在は, 揚力を強める働きを持つと考えられており<sup>23)</sup>, 推進力発生メカニズムを考える上で興味深い.

Lamb<sup>24)</sup>によれば, 翼が急発進したときに放出される出発渦(自由渦)と翼周りの循環(束縛渦)によって, 互いに逆方向に回転する渦対が形成され, 翼の移動に伴って渦対間の距離が増大することにより, 流れ場における運動量



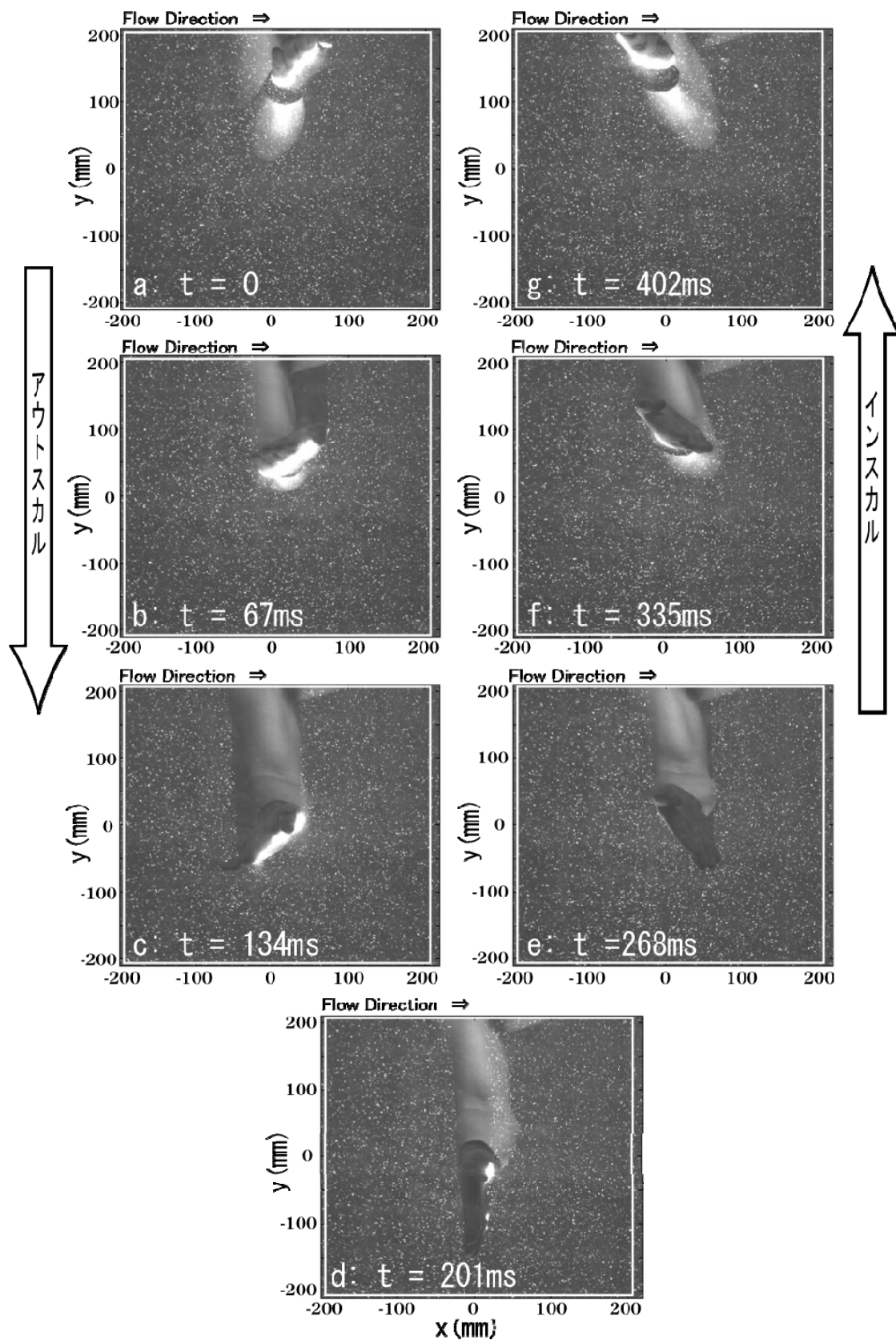


Fig. 4 Time sequential CCD camera images of sculling motion. The water flows along the  $x$ -axis (from left to right). Out-scall phase (left-side panels: a-c), transition phase (bottom panel: d) and in-scall phase (right-side panels: e-f).

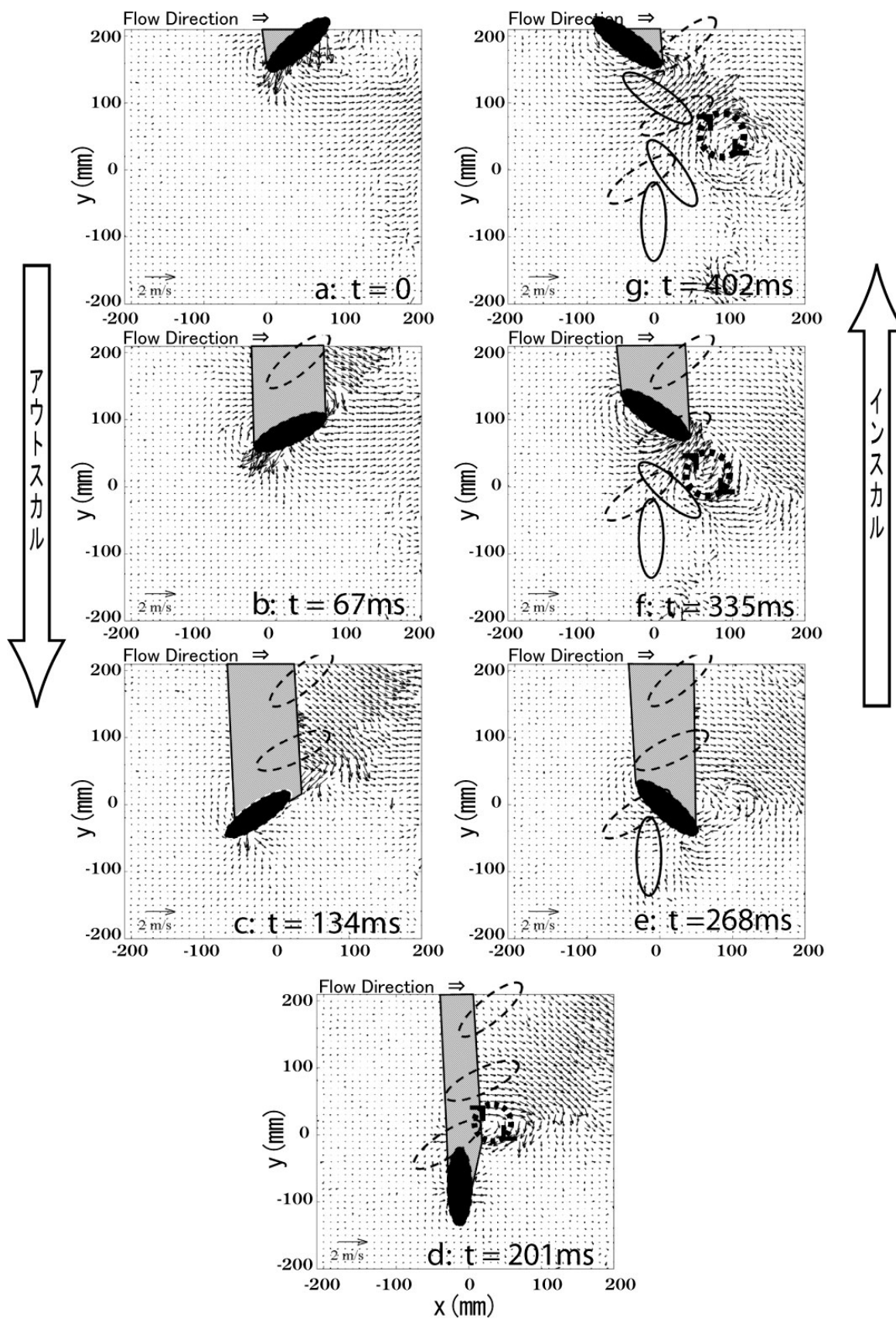


Fig.5 Time sequential velocity-vector maps of sculling motion. The water flows along the x-axis. Out-scall phase (left-side panels: a-c), transition phase (bottom panel: d) and in-scall phase (right-side panels: e-f). The black ellipsoid and white circle indicate the hand position and fifth finger, respectively.

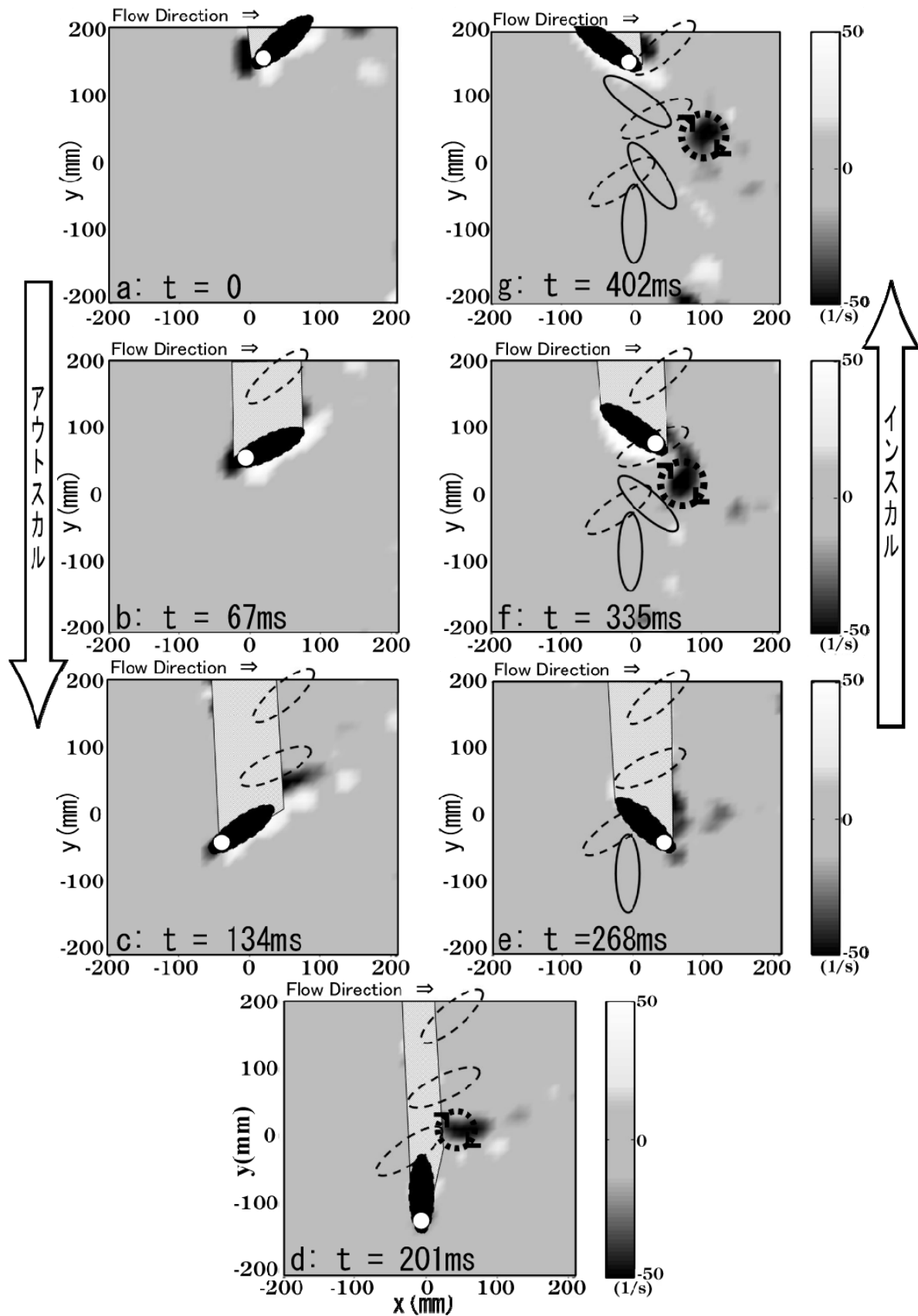


Fig. 6 Time sequential vorticity maps of sculling motion. The water flows along the x-axis. Out-scall phase (left-side panels: a-c), transition phase (bottom panel: d) and in-scall phase (right-side panels: e-f). The black ellipsoid and white circle indicate the hand position and fifth finger, respectively.



が増加し, その増加分が結果として翼に働く揚力になる. このとき, ニュートンの第二法則より, 運動量の時間変化量に応じて, 物体に力が作用する. Fig. 7 に揚力発生のメカニズムを模式的に表した. 時刻  $t$  の流れ場は, 放出された自由渦 (Shed vortex: 時計回り) と一定速度で移動する翼周りの束縛渦 (Bound vortex: 反時計回り) で形成される互いに逆回転の渦対であり, 流れ場には渦対間に向きの運動量  $P(t)$  が発生する. 時刻  $t + \Delta t$  における流れ場の運動量は, 翼周りの束縛渦 (反時計回り) が移動することによって新たに下向きの運動量  $\Delta P$  を発生させることになり,  $P(t + \Delta t) = P(t) + \Delta P$  で表される. ここで, 翼に働く揚力を  $L$  とすると, ニュートンの第二法則より,

$$L = -\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -\frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (4)$$

が得られ, 揚力  $L$  は運動量の時間変化量 ( $-\Delta P / \Delta t$ ) と等しく, 翼の移動方向に対して鉛直上向きに働き, これが揚力発生のメカニズムと考えられている<sup>25)</sup>.

本研究のスカーリング動作は, 手の移動方向が主に結果図における  $y$  軸正負方向であるため, 手に働く揚力は泳者推進方向の  $x$  軸負方向に働くものが結果として推進に寄与する. 今回のような二次元平面で流れ場を見た場合, 泳者推進方向とは逆方向の運動量を作り出す必要があり, 速度ベクトルとしては  $x$  軸正方向成分を持ったベクトルを多く作り出すことが重要となる.

本研究で手を翼と仮定した場合, 手周りの循環 (反時計回り) と遷移局面に放出された自由渦 (時計回り) で渦対が形成され, その後のインスカル局面で渦対間の距離が増大することで運動量が増加し, 手に揚力が働き推進力の一部となっていると考えられる. 結果としてこの運動量の変化分がインスカル局面の手と自由渦間のベクトル群 (Fig. 5:  $f, g$ , 図右上向き) となって現れていると考えられる. また, スカーリング動作がほぼ左右対称に 8 の字の軌道を描くことから, Fig. 5:  $a$  よりも前の時刻でのインスカルからアウトスカルへの遷移時においても, アウトスカルからインスカルへの遷移局面と同様に自由渦 (この場合は反時計回り) が発生していることが想定され, その自由渦と手の循環 (束縛渦: 時計回り) との間に主流方向 (Fig. 5:  $b, c$ , 図右下方向) のベクトル群が結果として現れていることが示唆される.

このように, 競泳やシンクロで使われる基礎的推進技術の一つであるスカーリング動作では, 手でアウト・インスカルを繰り返し, 特にその動作の遷移局面において自由渦を作り出し, 手の周りの循環と自由渦間の運動量を変化させることによって非定常的に力を生み出し, 推進していることが示唆された.

推力発揮部位である手の周りの流れ場を可視化することで, スカーリング動作時の手と渦の関係についての情報

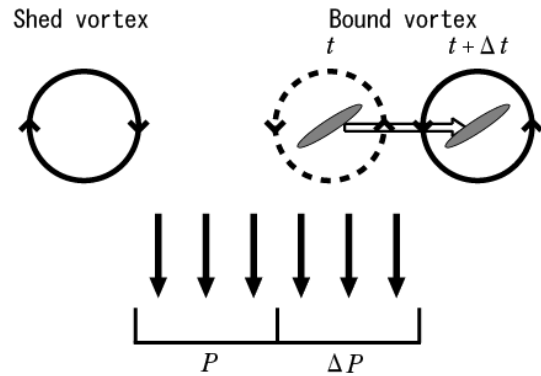


Fig. 7 The schematic diagram of momentum generation by a pair of counter-rotating vortices.  $P$  is the downward momentum at time  $t$  generated by the wing.  $\Delta P$  is the new downward momentum at time  $t + \Delta t$  generated by the moving wing. (Adapted from Matsuuchi et al., 2009)

を得ることができた. しかし, 手の詳細な角度変化, レーザ光を遮ることによってできる影の影響, 手の近傍の流れ場の同定等には改良の余地がある. 今後, PIV 計測の改良と手の動作分析を組み合わせ, さらに手に働く力を計測するなど流れ場との関係を見ていくことで, より詳細に推力発揮のタイミングやメカニズムの知見を得ることができ, 泳指指導などコーチングの現場にも貢献できると考えられる.

## 5. まとめ

本研究は, 2C-PIV 計測法を用いてスカーリング動作時の手部周りの流れ場を可視化し, その流れ場の特性からスカーリング動作による推進力発揮メカニズムについての知見を得ることを目的とした. 本研究から得られた結果をまとめると以下ようになる.

- 1) スカーリングによる流れ場は極度の非定常性を示し, これまでの定常流れを基本とする解析が適用できないことが分かった.
- 2) アウトスカルからインスカル局面への手の移動変化後に, 手周りの循環の方向が逆転している様子が確認された.
- 3) 自然界で生物が渦の形成と放出により力を発生しているのと同様に, インスカルおよびアウトスカル動作の遷移過程において非定常的に力を生み出して推進していることが推察された.

## 6. 謝辞

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 16300202)による助成, および基盤研究(B)(課題番号 15300216)の助成の一部を受けて行われた.



## 参 考 文 献

- 1) Maglischo, E. W.: *Swimming Even Faster*, California, Mayfield Publishing Company (1993).
- 2) 本間三和子: シンクロナイズドスイミングにおけるスカーリングとエッグビーターキックの技術に関する文献研究, 筑波大学体育科学系紀要, Vol. 29 (2006) pp.1-14.
- 3) Nesbitt, S.: Basic sculling, Transitions and Drills, SYNCHRO April/May (1991) pp.23-25.
- 4) Rackham, G.: Sculling, Synchronized Swimming, Feber and Faber, London (1968) pp.194-201.
- 5) Hall, B.: The mechanics of sculling, Synchro October (1985) pp.14-17.
- 6) Schleihau, R. E.: A hydrodynamic analysis of swimming propulsion, In Terauds, J. and Bedingfield, E. W. (eds.), *Swimming III*, Baltimore, Maryland, University Park Press (1979) pp.79-109.
- 7) Berger, M. A. M., de Groot, G. and Hollander, A. P.: Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models, *Journal of Biomechanics*, Vol. 28 (1995) pp.125-133.
- 8) 伊藤慎一郎: シンクロナイズドスイミングの手のひら形状に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集(B編), 73(734) (2007) pp.2033-2037.
- 9) Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakakibara, J., Shintani, H. and Ungerechts, B. E.: Unsteady flow measurement around a human hand in swimming using PIV, Abstract of 9th Annual Congress of the European College of Sport Science, Clermont-Ferrand, France (2004) pp.274.
- 10) Pai, Y. and Hay, J. G.: A hydrodynamic study of the oscillation motion in swimming, *International Journal of Sport Biomechanics*, Vol. 4 (1988) pp.21-37.
- 11) Sanders, R. H.: Hydrodynamic characteristics of swimmer's hand, *Journal of Applied Biomechanics*, Vol.15 (1999) pp.3-26.
- 12) 工藤重忠, Barry Wilson, 高木英樹: 揚・抗力係数を用いた非定常流状態での手部流体力推定時の誤差, 水泳水中運動科学, Vol.10, (2007) pp.1-11.
- 13) Ungerechts, B. E., Persyn, U., and Colman, V.: Application of vortex flow formation to self-propulsion in water, In Keskinen, K. Komi, P. and A. P. Hollander (eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*, K. L., Jyvaskla, Gummerus Printing House (1999) pp.95-100.
- 14) Toussaint, H. M., Van den Berg, C. and Beek, W. J.: "Pumped-up propulsion" during front crawl swimming, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol.34 (2002) pp.314-319.
- 15) Arellano, R.: Vortices and propulsion, Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports, (edited by Ross Sanders & Joram Linsten), Perth, Western Australia, School of Biomedical and Sports Science (1999)pp.53-65.
- 16) Colwin, C. M.: Breakthrough Swimming, *Human Kinetics*. (2002).
- 17) Lauder, G. V. and Drucker, E. G.: Forces, fishes, and fluids: hydrodynamic mechanisms of aquatic locomotion, *News in Physiological Sciences*, Vol.17 (2002) pp.235-240.
- 18) Sakakibara, J., Nakagawa, M. and Yoshida, M.: Stereo-PIV study of flow around a maneuvering fish, *Experiments in Fluids*, Vol. 36 (2004) pp.282-293.
- 19) Tytell, E. D. and Lauder, G. V.: The hydrodynamics of eel swimming : I. Wake structure, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 207 (2004) pp.1825-1841.
- 20) 松内一雄, 山田圭一, 野村武男, 榊原潤, 新谷治樹, 三輪飛寛: クロール泳者の手の動作分析とPIV計測法による流れ場の可視化, 日本機械学会論文集(B編), 73(734) (2007) pp.2027-2032.
- 21) 可視化情報学会編: PIVハンドブック(第1刷), 森北出版株式会社, 東京, (2002) pp.69-70.
- 22) 基礎流体力学編集委員会編: 基礎流体力学(第10刷), 産業図書株式会社, 東京, (2001) pp.84-85.
- 23) Izumi, K. and Kuwahara, K.: Unsteady flow field, lift and drag measurements of impulsively started elliptic cylinder and circular-arc airfoil, AIAA-83-1711 (1983) pp.1-15.
- 24) Lamb. H.: *Hydrodynamics*, 6th ed., Art. 157, Cambridge University Press (1932)
- 25) Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakakibara, J., Shintani, H. and Ungerechts, B. E.: Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming, *Journal of Biomechanics*, Vol.42 (2009) pp.42-47.

