

ロボットアームを用いた水泳動作時の力と流れ場に関する分析

高木英樹^{*1}・尾崎 尚^{*2}・中島 求^{*3}・松内一雄^{*2}

Analysis of the hydrodynamic force and flow field during human swimming motion by using a robot arm.

TAKAGI Hideki^{*1}, OZAKI Takashi^{*2}, NAKASHIMA Motomu^{*3}
and MATSUUCHI Kazuo^{*2}

Abstract

The purpose of this study was to clarify the mechanism of the generation of unsteady force in human swimming motion. Experiments were conducted by using a robot arm in a flume (test section: 4.6×2.0×1.5m) and the unsteady forces acting on the robot were measured by a balance. The velocity distributions around the robot arm were obtained by the PIV method and relations between the velocity distributions and the forces were discussed. The robot arm was made from the polyester in imitation of a right human hand. We corrected data in three types of the stroke pattern, i.e. Stroke-S, Stroke-I, and Stroke-SI. The Stroke-S is that the hand trajectory is the figure "S", the Stroke-I is a straight pull type and the Stroke SI is the middle of the strokes-S and strokes-I.

As results, the maximum thrust was measured when the stroke direction was changed in each stroke. In the Stroke-S, the maximum thrust was obtained among the three conditions. When a vortex was just emitted from the palm and a new vortex rotating with the opposite direction was moved behind the palm, the maximum thrust was observed.

Key Words: Unsteady flow force, Quasi-steady flow force, PIV method, Swimming

1. はじめに

競泳のクロール泳法においては、上肢と下肢によって発揮される推進力の比は10:1~6:1との報告¹⁾があり、上肢のストローク動作による推進力の貢献が大きいとされている。そこで本研究ではクロール時の推進力発生に大きく関わっているとされる上肢の動作に着目し、泳動作時に発生する流体力と手周りの流れ場の計測を同時に行うことで推進力発生メカニズムの解

明を目指す。

過去、水泳時の推進力に関する研究は数多く報告されている。その中でSchleihauf²⁾やBergerら³⁾は、各時刻の流れ場を定常とみなすことで、泳者の手部にかかる力の評価を行った。この方法は準定常解析と呼ばれるもので、手部にかかる力を初めて定量的に評価した意義は大きい。しかし実際の泳者の動作は非常に複雑であり、手周りの流れも非定常となっ

^{*1} 筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

^{*2} 筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻

^{*3} 東京工業大学 大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻

ている⁴⁾。それに加え準定常解析では泳動作における手部の加速度や迎え角の変化、泳動作に伴う流れの時間的变化は考慮されておらず、実際に発生する力を過小評価する恐れがあることが指摘されている⁵⁾。また流れの非定常性を考慮した場合、揚力が定常値に比べ最大2倍になるとの報告⁶⁾や、準定常解析から得られた泳者の手部に働く力の推定値が、実際の推進力から推定される値に比べ小さいとの報告^{7,8)}があり、水泳時の推進力を議論する際、非定常性を考慮する必要性が高まっている。

一方で、泳者身体周りの流れの研究に関しては、タフトやトレーサー粒子、染料を用いることで流れの挙動を観察しようとする試みがされてきた。しかし近年の急速なコンピュータの発展に伴い、PIV (Particle Image Velocimetry) と呼ばれる粒子画像流速計測法が普及し、これまで以上に精緻な分析が可能になりつつある。PIV は流れに非接触で瞬時の速度分布が得られるため、水泳における流れ場の計測に適していると考えられる。松内ら⁹⁾はクロール泳者の手周りの PIV と動作分析を個別に行い、得られた結果を組み合わせることで、泳者の手部動作と渦生成に密接な関わりがあることを示した。さらに村松¹⁰⁾は、SMAP (Synchronized System of Motion Analysis and PIV) システムを構築することで、手部動作とそれに伴う渦の関係を詳細に評価した。また非定常運動を行う魚や昆虫の推進・飛翔に関する研究でも流体中に渦を作り出すことで、力を得ていることが明らかとされている。これらのことからトップスイマーも渦を効果的に発生させることで推進している可能性が指摘されている。

そこで本研究では、非定常運動を行ったときに生じる流体力発生メカニズムを解明するため、再現性の高い動作が可能でロボットアームを用いて、泳動作時に発生する推進力と流れ場の同時計測実験を行った。なお本研究では流体力の名称として、ロードセルにより計測する力を非定常流体力、準定常解析により推定される力を準定常流体力と呼ぶこととする。

2. 実験装置

2.1 PIV 計測システム

図1に PIV 計測システムの概略図を示す。

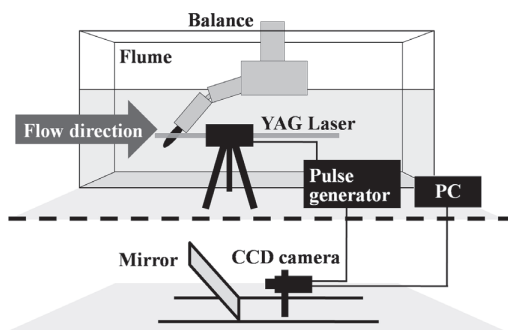


Fig.1 Experimental apparatus

実験は筑波大学に設置されている流水プール (測定部:長さ 4.6 × 幅 2.0 × 水深 1.5[m]、五十嵐工業)で行った。座標系として主流方向を x 、奥行き方向を y 、鉛直上向き方向を z とした。PIV 解析を行うために、流水プール中には粒径 $50\mu\text{m}$ のトレーサー粒子 (西華産業、ダイアミド) を混入し、側方からシート状にした YAG レーザー (NEW WAVE RESEARCH, Solo, PIV 120) を照射した。トレーサー粒子によるレーザーの散乱光は流水プール下部から鏡を介して CCD カメラ (REDLAKE MASD, Mega Plus ES1.0) で撮影し、コンピュータに記録した。またパルスジェネレーター (Quantum, Model 9314) を用いてレーザーの照射と CCD カメラの撮影を同期し、ロボットアームの動作開始と同時に計測が開始するように設定した。

2.2 ロボットアーム

ロボットアームは人間の右腕を模擬して作られ、胴体・肩・上腕・前腕・手部から構成される。手部の指部は閉じており、長さ 0.23m、幅 0.10m、投影面積は 0.0171m^2 であり、PIV 計測におけるレーザー光のハレーションを軽減するため手部には黒手袋を装着した。図2に本実験で用いた手部モデルを示す。また、ロボットアームは流水プール上部に梁とシャフトと天秤を介すことで固定した。ロボットアームの各関節にはポテンシオメーターが取り付けられ、関節角度の計測が可能となっている。動作の制御は指令関節角度データに基づいた電圧が D/A 変換され、サーボモーターに入力されることで行なわれる。そして動作中に計測された関節角度を用いて、手部の位置情報を算出した。



Fig.2 Hand model of the robot arm

3. 推進力測定実験

PIV 解析と推進力との関連を検討するために、動作の再現性が高いロボットアームを用いて、泳動作により発生する推進力を計測した。動作中に発生する力はロボットアーム上部に取り付けたロードセルでサンプリング周波数 200Hz で計測した。泳動作として S 字を描くプル動作（ストローク S）、比較的直線的なプル動作（ストローク I）、ストローク S とストローク I の中間的な動作（ストローク SI）の 3 種類のストローク動作を行わせた。本実験で行った泳動作の手部を 125ms 間隔で図 3 中に示す。さらに図 4 に泳動作中の手部の中心点（中手骨頭）を x - y 平面に投影した軌跡を示し、図 5 に手部中心点の速度から、主流速である 0.3m/s を差し引いた主流速に対する手部の相対速度を示す。

4. 実験結果と考察

図 6 に x - y 平面での手部の中心点の位置と推進力（推進方向を正）を示す。3 種類のストローク全てにおいて、推進力の最大値を計測したのは、ストローク方向が変化する時であった。ストローク S と SI では In-sweep から Out-sweep への遷移時に、ストローク I では入水後の Out-sweep から直線的な動きをした後の In-sweep に遷移する時であった。このように泳動作の方向が変化しているときに大きな力が発生していることから、泳動作中に進行方向を変化させることは重要であると言える。しかし、いずれのストロークにおいても入水後に Out-sweep から In-sweep を行っているにも関わらず推進力は大きくない。その理由として泳動作開始時では、 y 方向への動きが大きく、さらにストロー

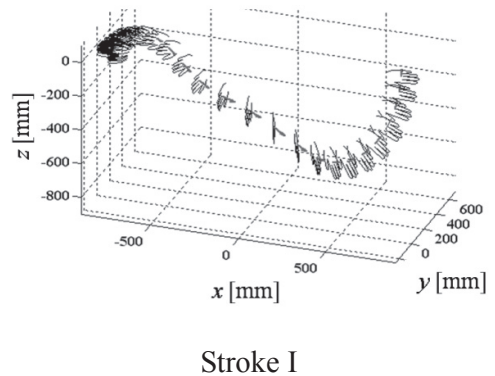
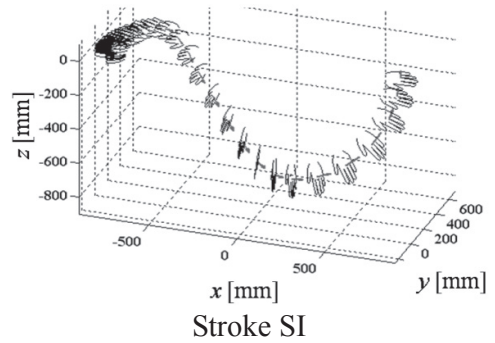
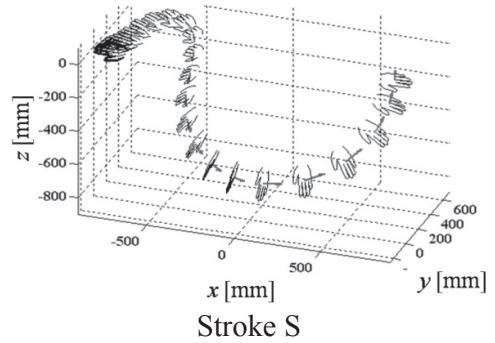


Fig.3 Palm positions and attitudes at every 125ms

ク速度が遅いことがその理由として考えられる。

次に流れ場の結果を示す。流れ場は本実験で行った 3 種類の泳動作中で最も大きな推進力を計測した Stroke S に関して示す。そして最も大きな推進力を計測した時を B、その 67ms 前を A、67ms 後を C として図 6 の Stroke S の図中に示し、図 7 に A、B、C における流れ場を示す。流れ場の速度分布からは主流速 0.3m/s を差し引いて示してあり、渦の強さと回転の向き（渦

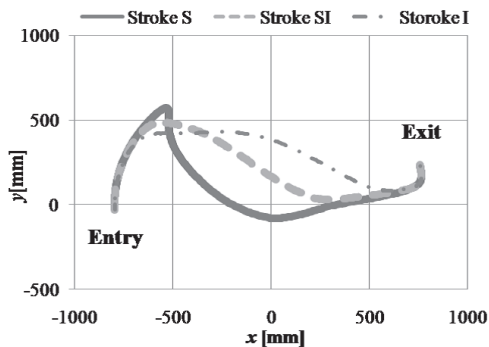


Fig.4 Trajectories of the head of metacarpal of the middle finger viewed from the top

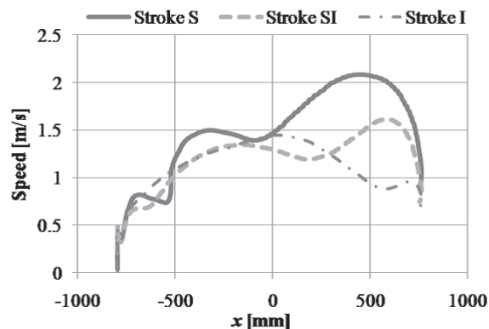


Fig.5 Variations of hand speeds relative to the flow in x direction.

た。最も大きな推進力を計測した Stroke Sにおいて、最大推進力発生時には手部からの渦の放出と、手部背面への渦の回り込みが確認された。これらのことから泳者は泳動作の方向を変えることで、放出渦と手部との間に流れを誘起させ、その運動量の時間的な変化の反作用を利用し大きな推進力を得ていると考えられる。また、渦中心は負圧になることから、ストローク方向を変化させることで、手部背面に渦を付着させ、手部背面と手部前方との圧力差による力を利用して大きな推進力を発生させていると考えられる。

参考文献

- 1) Hollander, A.P., de Groot, G., van Ingen Schenau, J.G., Kahman R., Toussaint H.M (1988): Contribution of the Legs to Propulsion in Front Crawl Swimming. *Swimming Science V*, Human Kinetics, Champaign, pp.39-43.

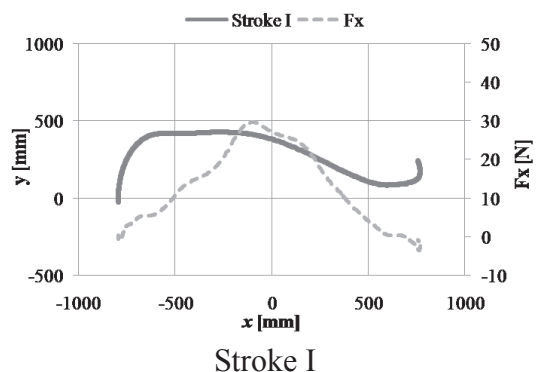
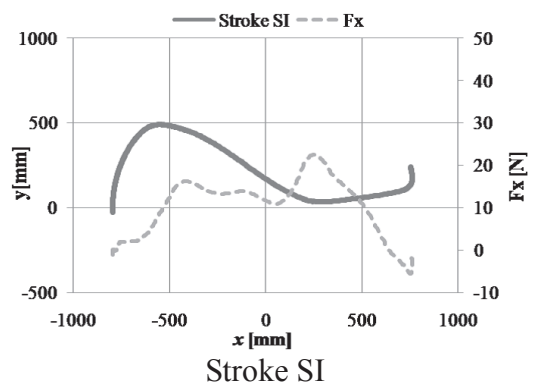
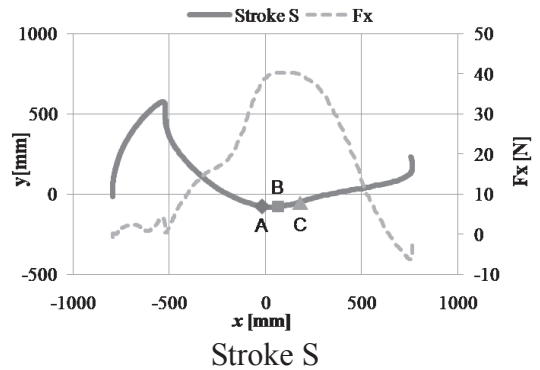


Fig.6 Variations of hand positions y and thrust F_x in x direction.

- 2) Schleihauf, R.E. (1979): A Hydrodynamic Analysis of Swimming Propulsion. *Swimming III*, Human Kinetics, Champaign, pp. 70-109.
- 3) Berger, M.A.M., Gert de Groot, Hollander A.P. (1995): Hydrodynamic Drag and Lift Forces on Human Hand/Arm Models. *Journal of Biomechanics*, 28(2), pp.125-133.
- 4) Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakak-

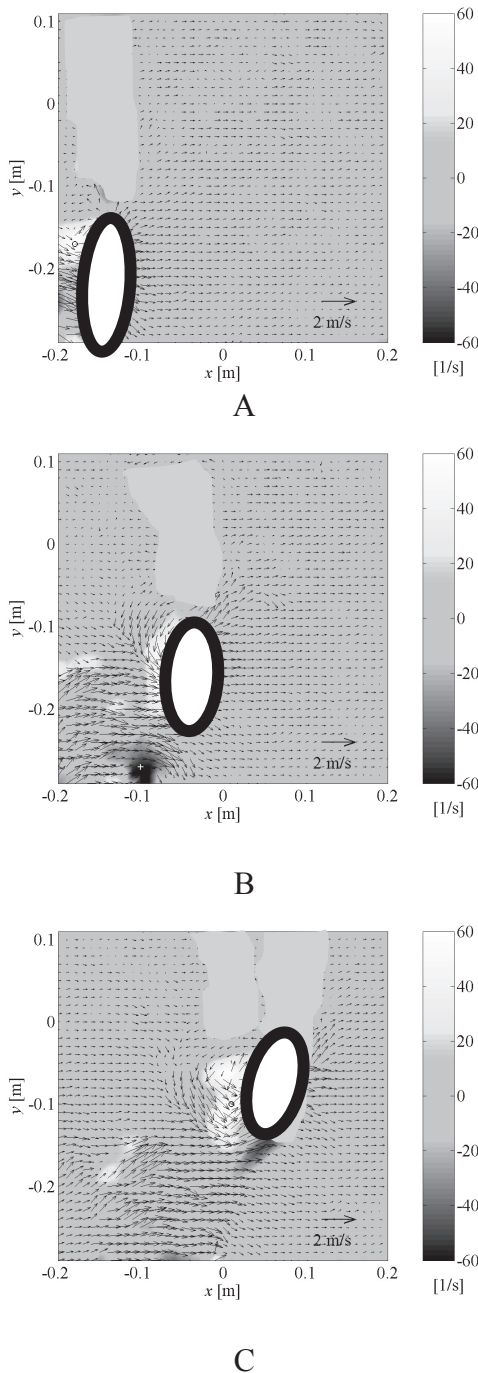


Fig.7 Sequential variations of flow vectors and vorticity distributions for Stroke S.

mechanics, 42(1), pp.42-47.

- 5) 工藤重忠, Wilson, B., 高木英樹 (2007): 揚・抗力係数を用いた非定常流状態での手部流体力測定時の誤差. *Japanese Journal of Sciences in Swimming and Water Exercise*, 10(1), pp.1-10.
- 6) Izumi, K., Kuwahara, K. (1983): Unsteady Flow Field, Lift and Drag Measurements of Impulsively Started Elliptic Cylinder and Circular-Arc Airfoil. *AIAA-83-1711*, pp.1-15.
- 7) Toussaint, H.M., Coen Van den Berg, Beek, W.J. (2002): "Pumped-Up Propulsion" during Front Crawl Swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(2), pp.314-319.
- 8) Sanders, R.H. (1999): Hydrodynamic Characteristics of a Swimmer's Hand. *Journal of Applied Biomechanics*, 15, pp.3-26.
- 9) 松内一雄, 山田圭一, 野村武男, 榊原潤, 新谷治樹, 三輪飛寛 (2007): クロール泳者の手の動作分析法と 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), pp.2027-2032.
- 10) 村松由基 (2009): PIV と DLT 法の同期システムによるクロール泳動作中の手部流体力に関する研究. 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文.
- 11) Counsilman, J.E. (1971): The Application of Bernoulli's Principle to Human Propulsion in Water. (Ed) L. Lewillie and J. Clarys, (In) *First International Symposium on Biomechanics of Swimming*. Universite Libre de Bruxelles, Brussels, pp.59-71.
- 12) Schleihauf, R., Gray, L., DeRose, J. (1983) : Three-Dimensional Analysis of Hand Propulsion in the Sprint Front Crawl Stroke. (Ed) Hollander A.P., et al. (In) *Biomechanics and Medicine in swimming*. Human Kinetics, Champaign, pp.173-183.

ibara, J., Shintani, H., Ungerechts, B.E. (2009): Unsteady Flow Measurement around a Human Hand in Swimming. *Journal of Bio-*