

令和元年6月21日現在

機関番号：33111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16540

研究課題名(和文)水中ドルフィンキックの力-流れ場関係の解明

研究課題名(英文)Clarifying the relation between force and flow during undulatory underwater swimming

研究代表者

下門 洋文(Shimojo, Hirofumi)

新潟医療福祉大学・健康科学部・講師

研究者番号：50757911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体力学分野で用いられる粒子画像流速計測法(Particle Image Velocimetry, PIV)を用いて、スイマーの手足周りの流れを三次元的に可視化する新たな方法を考案した。この方法を用いて、泳者の推進メカニズムについて調査したところ、スイマーは水中で手足の方向を変えたり捻りを加えるなど複雑な動きをしており、この動きによって手足の周りに渦を発生させて、この渦が推進力の源となっている可能性が示唆された。また、この渦は推進力の大きさを反映するため、本研究の方法を発展させれば泳者が水から得た力の程度を推定できるようになる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、水泳の腕のかきのことを「水を押し」と表現されていたが、実際には押しておらず渦を作り出して手足の周りに圧力差を生み出し、スイマーはこれを推進に利用して遊泳している。ヒトが速く泳ぐためには、作用反作用のように力任せに水を押せば進めるのではなく、渦をどうやって作るかがカギとなり、水泳指導法のパラダイムシフトにつながる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new method for three-dimensionally visualizing the flow around the swimmer's hand and foot using Particle Image Velocimetry (PIV) used in the field of fluid dynamics. Using this method, the swimmer's propulsion mechanism was investigated, and the swimmer performed complex limb-movements such as changing the stroke direction or rotation of the limb in the water, and this movement generates a vortex around the limb. It is suggested that this vortex may be the source of propulsion. Also, this vortex reflects the magnitude of the propulsive force, so if the method of this study is developed, it will be possible for the swimmer to estimate the degree of force obtained from the water.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：水泳 PIV モーションキャプチャ 筋電図

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

スポーツでの記録更新を目指すためには、スポーツ科学のみに頼るのではなく、今後は医学や工学分野との融合、いわゆる分野間のクロストークが求められている。特に水泳は水中でのヒトの運動であり、泳ぐためにどうすればよいのか、そもそもの現象の説明が十分できていなかった。流体力学の流れの可視化手法である、粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry method, PIV 法）は実際の泳者の周りの流れを計測できる強力なツールであり、これまで説明できなかったヒトが水中を泳ぐ現象を流体力学的に説明できる可能性があった。

2. 研究の目的

- 1) 筋活動計測、圧力による流体力の推定と流れの可視化を同時計測する環境を構築する。
- 2) 水泳運動中のヒトの手部および足部周りの流れを可視化し、力-流れ場関係を解明する。

3. 研究の方法

筑波大学回流水槽を使用し、熟練したスイマーのクロール泳とキック泳（水中ドルフィンキック）について以下の計測を行った。三次元動作解析（モーションキャプチャシステム）、筋活動（防水型筋活動計）、足部に働く圧力（防水型圧力センサシステム）、スイマー後流の流れ場の可視化（PIV システム）を同時計測できる環境を構築した。PIV 法は、レーザーシートが照射された領域をカメラで撮影し、矢印で表現された横断面の速度ベクトル画像を得ることができる。複数スライス断面を結合する方法を進展させ、泳者後流の流れ場が立体的になるよう三次元化を試みた。

4. 研究成果

- (1) 当初、複数の機器を同じタイミングで計測する同期が懸念事項であった。Portable Timing Unit (PTU) を用いることで、上述した 3 次元動作解析、筋活動計測、圧力計測、流れ場計測を同時に行える環境を構築することができた。また、従来 PIV 法は数 mm～数 cm 四方の計測範囲の流れを可視化することに用いられることが多いことから、昆虫や魚類のようなサイズとは大きく異なるヒトを対象とした計測には課題が多かった。例えば、PIV 法で用いるキャリブレーションプレートは 309mm 四方であり (LaVision 社製)、スイマーのキック動作の振幅は 1000mm 以上、ストローク動作であればゆうに 1500mm 以上の計測範囲が必要である。我々は、カメラ回転、ミラーを用いるなど計測方法の工夫を施すことで流れ場の計測範囲を約 2 倍に拡大させることに成功した。加えて、スイマーの動きを位相分けし、条件付き加算平均法と座標変換法を用いることで、スイマーの手足周りの流れ場を三次元的に可視化することに成功した（学会発表 4）。これまで、レーザーシートで照射されたある特定の断面のみであったスイマーの流れ場の可視化に対して、計測範囲拡大と精度向上を世界で初めて達成した。

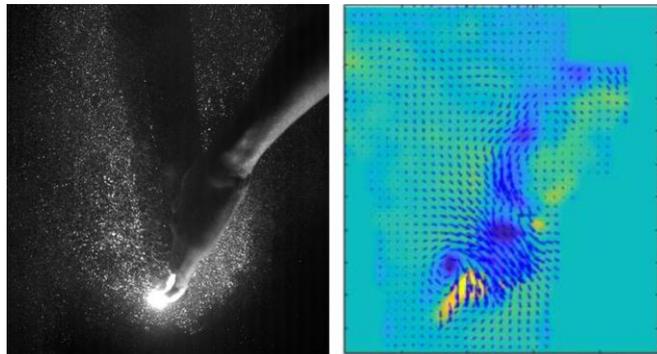


図 1. クロール泳中の手部周りの流れ場

- (2) クロール泳中のスイマーの手部周りの流れ場を可視化したところ、水は押されておらず、手背側に渦が形成されていた（図 1）。特にスイマーのストローク動作を三次元動作解析で観察すると、手が入水した後に体の外側で水をかき、外側から内側へと手の移動方向・速度が急に変わり、この局面でスイマーは加速していた。いわゆる、水を強くプッシュする局面と言われていたこの局面では、手背側の圧力値は大きなマイナス、掌側がプラスとなっており、この圧力差が力として手に働き、泳者はこれを推進に利用していることが示唆された（学会発表 1）。この結果から、スイマーの推進メカニズムは水を押ししているのではなく、水中で手をかく方向が変化することで手の周りに渦を生成され、それが圧力差となって手に力として働き、これを使って泳いでいたのである。
- (3) キック泳中（水中ドルフィンキック泳中）のスイマーについて調査したところ、単に下肢を上下に振って泳いでいるのではなく、3 次元動作解析と筋活動計測によって下肢の捻り動作を行っていることが初めて明らかとなった。流れ場を見てみると（図 2）、けり下ろし中にスイマーは両足の裏に渦を形成し、この渦の塊は次第に大きくなり、けり下ろしの最後の局面に下肢の捻り動作が行われ、この渦の塊を中央に集めるようにして放出していた。その後、この剥がれた渦の塊はジェットとして放出され、この反力でスイマーが推進していることが示唆された（学会発表 2, 3 雑誌論文 1, 3）。

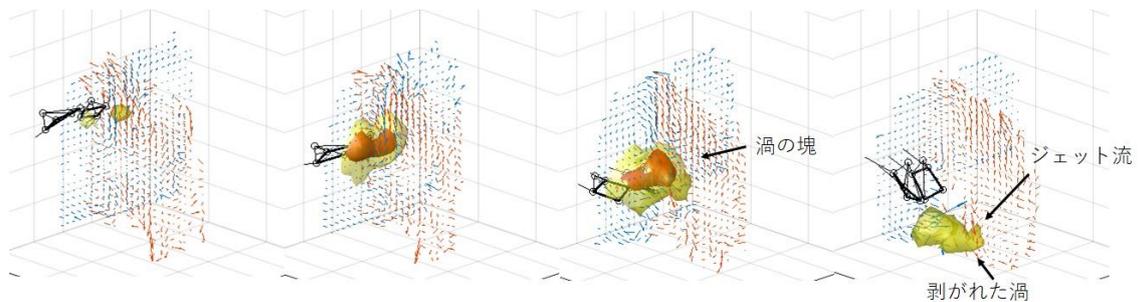


図 2 水中ドルフィンキック中のスイマー後流の流れ場と渦の生成過程

(4) これまで、足関節の柔軟性がキック泳のスピードに影響すると言われていたが、その理由として足裏側で渦を生成するためにある程度の足関節の底屈角度が必要であったためだと推察される。これを確認するために、同じスイマーで通常の状態と足関節に制限を設けた状態で比較すると、後流の流れ自体が変わっていた。興味深いことに、足関節の底屈角度よりもむしろ推力の大きさは前足部の柔軟性が影響しているようである(雑誌論文 2)。このことから、渦の塊を最終的に放出するジェットを生み出す動作が推力に影響することが示唆された。

(5) 3 次元的な流れ場の可視化が実現したことで、渦輪理論に基づいて循環 Γ (Milne-Thomson, 1966) を計算することが可能となった。いわゆるドーナツ型の渦輪のことで、輪の面積と周りの速度ベクトルからスイマーが得た推力を見積もることができる。この渦輪は水中を推進した生物が運動量を水に与えた結果であり、つまり推力そのものがこれに反映されている。イルカの場合は 1400N ほどになるといわれており、スイマーでも同様の手法で計算できればパワーも推定できる。しかしながら、我々の行った方法では計測範囲がいまだに狭いため、渦輪形成が視認できるための広大な領域を計測しなければならず、今後の課題である。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 3 件)

- 1) Shimojo, H., Gonjo, T., Sakakibara, J., Sengoku Y., Sanders R., Takagi, H. (2019) A quasi three-dimensional visualization of unsteady wake flow in human undulatory swimming. *Journal of Biomechanics* (In press)
- 2) Hirofumi Shimojo, Rio Nara, Yasuhiro Baba, Hiroshi Ichikawa, Yusuke Ikeda, Yoshimitsu Shimoyama. (2019) Does ankle joint flexibility affect underwater kicking efficiency and three-dimensional kinematics? *Journal of Sports Sciences* (In press).
- 3) 下門洋文, 高木英樹 (2018) 泳者周りの流れ場の可視化. *バイオメカニクス研究*, 21(4), 180-188.

〔学会発表〕(計 4 件)

- 1) Rina Ebihara, Hirofumi Shimojo, Tomohiro Gonjo, Yasuo Sengoku, Hideki Takagi. Relationships between upper limb motion and flow fields around the limb in front crawl. The XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (Tsukuba, Japan), 17-21 Sep 2018.
- 2) Hirofumi Shimojo, Rina Ebihara, Kenzo Narita, Tomohiro Gonjo, Yasuo Sengoku, Shozo Tsubakimoto, Hideki Takagi. Shedding vortex and pressure pattern around the foot in undulatory underwater swimming. The XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming (Tsukuba, Japan), 17-21 Sep 2018.
- 3) Hirofumi Shimojo, Ryo Murakawa, Rio Nara, Yasuhiro Baba, Yasuo Sengoku, Jun

Sakakibara, Yoshimitsu Shimoyama, Shozo Tsubakimoto, Hideki Takagi.
THREE-DIMENSIONAL FLOW FIELD AND LEG MOTION DURING
UNDULATORY UNDERWATER SWIMMING. 35th International Conference on
Biomechanics in Sports (ISBS 2017). (Köln, Germany), 14-18 June 2017.

- 4) Hirofumi Shimojo, Ryo Murakawa, Yasuo Sengoku, Jun Sakakibara, Shozo Tsubakimoto, Hideki Takagi. A FLOW VISUALIZATION OF UNDULATORY UNDERWATER SWIMMING -A PILOT STUDY OF THREE DEIMENTIONAL ANALYSIS-. 34th International Conference on Biomechanics in Sports (ISBS 2016). (Tsukuba, Japan), 18-22 July 2016.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。