

2019年7月9日

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学
学校法人 新潟総合学園 新潟医療福祉大学

キック泳で推進するカギは足裏の渦にあった
～スイマーの周りの水の流れの立体的可視化に初めて成功～

研究成果のポイント

1. 回流水槽を用いて、スイマーの周りの水の流れを立体的に可視化することに成功し、キック泳（水中ドルフィンキック；イルカのように水中を進む潜水泳技術）で速く泳ぐためには、足裏の渦の作り方とその扱い方が一つのカギであることを見出しました。
2. 水中をキック泳で推進しているスイマーは、足を上下に振っているだけのように見えますが、モーションキャプチャを使って詳細に調べると、推進するための重要な局面で下肢の捻り動作（内・外旋）を行っていたことが分かりました。
3. 本研究で開発した、流れの三次元的な可視化手法を用いれば、カメラ撮影のみで、流れの情報からスイマーが得た推力の大きさを計算できるようになります。

国立大学法人 筑波大学体育系 高木英樹教授、学校法人 新潟総合学園 新潟医療福祉大学健康科学部 下門洋文講師らの研究グループは、筑波大学が保有する実験用回流水槽を用いて、キック泳中のスイマーの三次元動作解析とスイマーの周りの流れの三次元的可視化を同時に行い、その推進メカニズム解明に取り組みました。

スイマーは、非定常状態、いわゆる乱流のような水の流れを推進に利用して水中を移動できているため、この非定常状態の流れにこそスイマーの推進メカニズム解明のカギが隠されていると考えられてきました。しかしながら、スイマーの手足に働く力については、これまで、直接測定する手段が無く、防水型圧力センサを手足に貼り付ける方法などが用いられてきましたが、力の大きさが分かっても、力の方向やその原因にまで言及することができず限界がありました。本研究は、流れを可視化する流体力学的手法をヒトの水泳運動に適應するよう独自に改良し、キック泳中のスイマーの下肢の動きとその周りの流れを、初めて三次元的に計測し、可視化することに成功しました。

その結果、キック泳の推進メカニズムは、スイマーの足裏にできる渦の形成過程から説明できることがわかりました。この、流れの三次元可視化法を用いると、センサ類を身体に貼り付けることなく、カメラで撮影するだけで泳者が得た推力を周りの流れの情報から計算することができます。これらの成果は、より効果的な水泳の指導方法に応用できると期待されます。

本研究成果は、明治大学、シドニー大学、ノルウェー体育大学との国際共同研究として進められてきたものであり、バイオメカニクス分野のトップジャーナルである Journal of Biomechanics において、2019年7月4日付で先行公開されました。

研究の背景

水中を優雅に泳いでいるスイマーは、泳ぐ動作によって明らかに水から力を得て水中を推進しており、これがどのような現象に基づくのか、この問題を解き明かすべく古くから研究が進められてきました。1936年、イギリスの動物学者であるサー・ジェームズ・グレイ (Sir James Gray) は、イルカが泳ぐ様子を見てなぜこれほど速く泳げるのか調べたところ、当時の理論では、イルカほどの大きな物体が持つ筋肉でも、水中を高速で泳ぐ推力をどのように生み出しているのか説明できないとして、のちに「グレイのパラドックス」と呼ばれる問題が生まれました。イルカやヒトも含めて、スイマーの周りの水の流れはいわゆる乱流状態で、車や飛行機のように一定速度の定常状態ではない、非定常状態といわれています。近年の研究では、スイマーはこの非定常流体の力を使って推進しており、物体の大きさや筋肉量からは計算できないような力を得ているといわれています。この非定常流体にこそ、推進メカニズム解明のカギがあると考えられてきました。松内一雄筑波大学名誉教授 (流体力学) はフィンロボットを対象に、非定常流体力の推進メカニズムを解明するために、流体の可視化手法 (Particle Image Velocimetry, PIV法, 図1参照) から流れを三次元化する方法を独自に考案し、フィンが水から得た推力を周りの流れの情報 (渦輪) から得ることに成功しました (Imamura and Matsuuchi, *Experiments in Fluids* 2013)。本研究グループは、この手法を応用し、ヒトの周りの流れの三次元的可視化を試みました。

研究内容と成果

本研究では競泳レースのスタートとターン後に行われる潜水泳技術である水中ドルフィンキックに着目し、このキック泳中のスイマーの下肢の三次元動作解析と、その周りの水の流れを三次元的に可視化することを試みました。筑波大学が保有する回流水槽を用いて、モーションキャプチャシステムとステレオPIVシステムで、スイマーの動作と周りの水の流れを同時に計測することにより (図2)、流れの三次元可視化が達成できました。具体的には、解析の段階で座標変換と条件付き加算平均という方法を組み合わせることで、複数の流れ場をスイマーの後流側に配置し、流れを三次元化しました (図3)。その結果、イルカのように単に両足を上下に振って泳いでいると思われていた水中ドルフィンキックは、実は下肢の捻り動作 (内・外旋) が含まれていることが三次元動作解析から分かりました。流れを三次元的に可視化したところ、けり下ろし動作中に強い渦が足の裏側に形成されていき (図4右、図5の1~4)、けり下ろしのフィニッシュ局面で下肢の捻り動作が入ることで足先が互いに近づき、渦を中央に集めて塊にしている様子がみられました。この時、この渦の塊が周りの水を引き寄せるように下向きの強い流れを形成しており、最終的にこの渦の塊とともに強いジェット流 (泳者が得た推力を反映) が足先から放出されていました (図4左)。これらの現象から、この渦の塊こそが足部にかかる力の作用を最大化していることが示唆されました (図6)。

以上の結果から、キック泳では、けり下ろし動作で渦を作りだす過程と、その渦をどのように扱うのかでこのジェット流が影響を受け、推進力の大きさも変わるものとみられます。速く泳ぐためには、けり下ろし動作で強い渦を作り出し、それをできるだけ中央に集める捻り動作がキーポイントになりそうです。

今後の展開

クロール泳のストローク動作でも、いわゆるS字プルの動きで強い渦が形成される様子が既に観察されているので、非定常流体力の正体が渦に起因していると考えられます。単に力任せに水を押せば作用反作用で流体から力を得られるというステレオタイプの考えから、流体から効果的に力を得るためには渦の形成過程やその扱い方に焦点を当てるべきで、これまでの水泳指導も変わることに繋がります。また本研究で開発した、流れの三次元可視化法を用いると、センサ類を身体に貼り付けることなく、カメラで

撮影するだけで、泳者が得た推力を周りの流れの情報から計算することができます。今回の研究は、単純な下肢の振幅運動であるキック泳で行っていますが、この方法を改良・応用することで、腕による推進メカニズム解明が飛躍的に進むものとみられます。手で水をかいてもうまく泳げない理由は、渦を効果的に作っていなかったということの説明できるかもしれません。

今後は本測定法を応用し、キック泳に限らず、他の泳法においてトップスイマーが水の流れを操っている様子を可視化し、水泳の推進メカニズム解明を進めていきパフォーマンスの向上に対する方策を提案できる研究を目指します。また、ヒトが水中を泳げる現象を明らかにしていくことで、水泳指導法の改良にむけた科学的根拠を提供していきます。

参考図

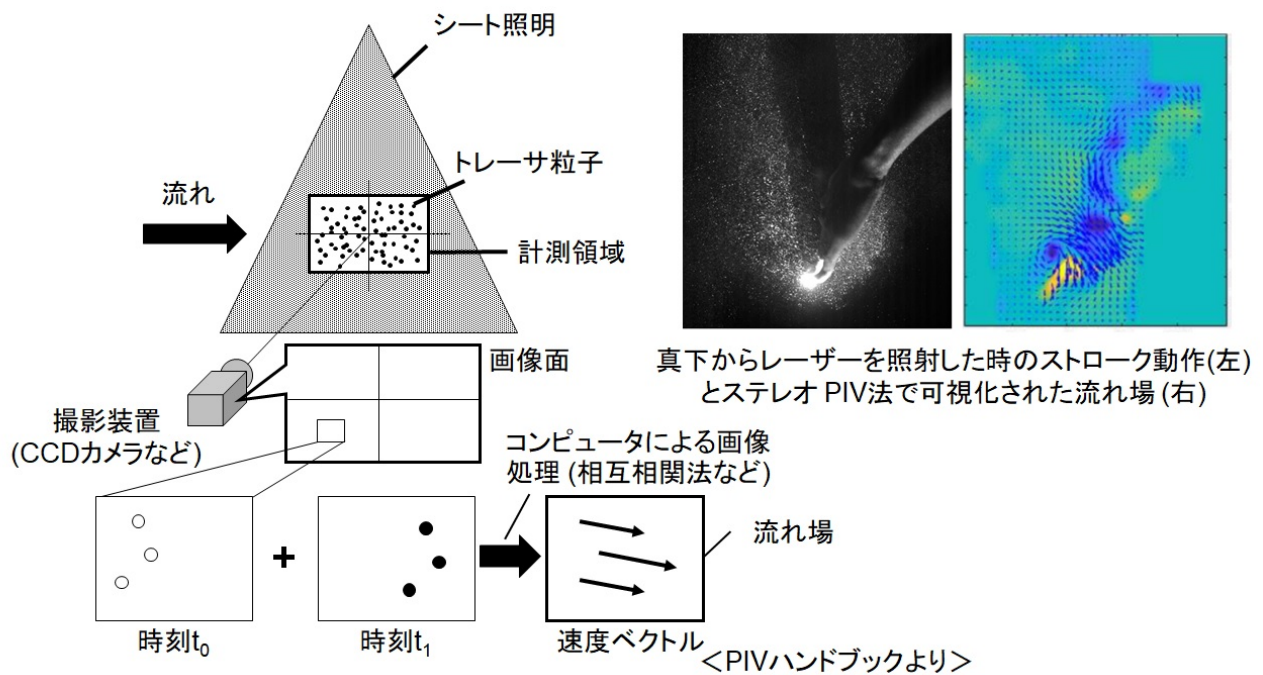


図 1 PIV 法の原理。水流にトレーサ粒子を混入させ、計測領域をレーザーシートで照射し、これを撮影装置で記録します。異なる 2 時刻の記録画像から、コンピュータ画像処理で速度ベクトルを計算し、各点の流れの方向や大きさが分かる流れ場 (Flow field) を得ることができます。ステレオ PIV 法では 2 台のカメラで記録するため、3 成分(u,v,w)の速度ベクトルを計算することが可能です。

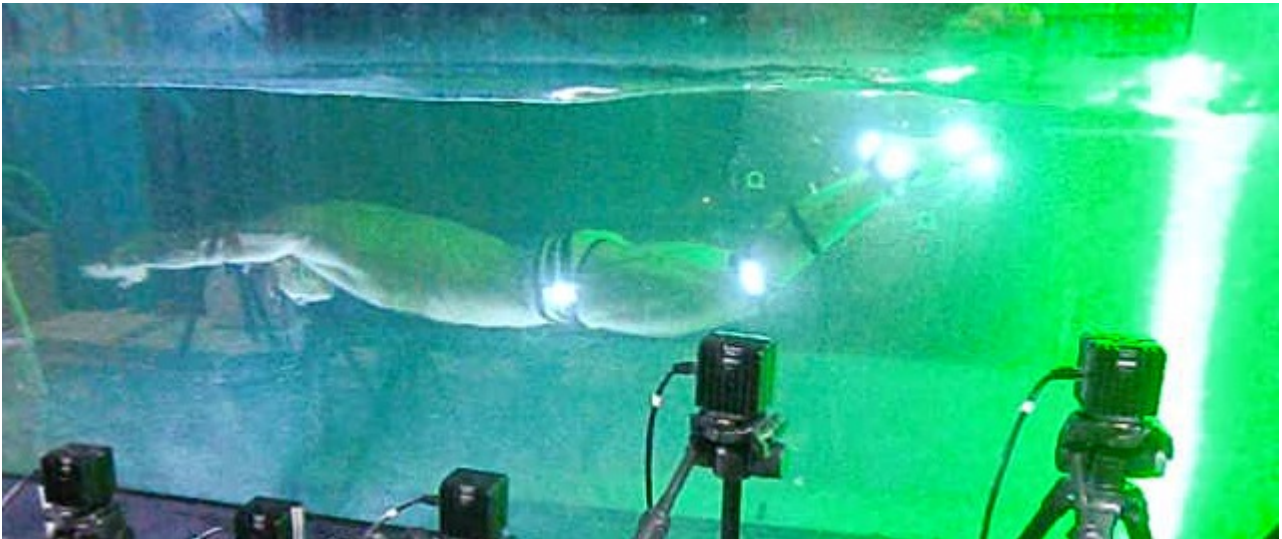


図2 実際の測定風景。水中キック泳動作とスイマー後流の流れを計測している最中の写真。レーザーシートを回流水槽の下から照射し、スイマーの横断面の流れ場を得ることができます。スイマーの各関節にはLED マーカーを張り付けており、モーショキャプチャで三次元動作解析を行います。

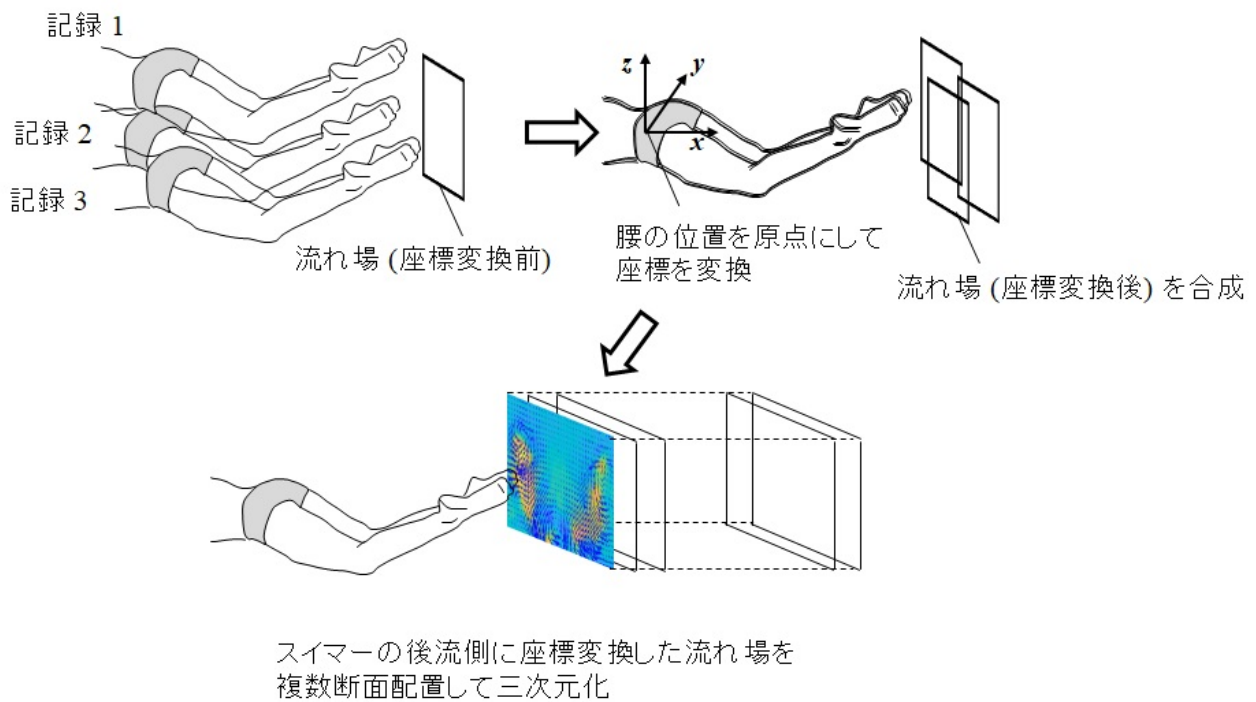


図3 流れ場の三次元化手続きの概要。スイマーは回流水槽内で場所を変えながら複数回泳んでもらいました(全て同じ流速環境 [0.8m/s]、十分な休憩をはさみながら)。解析の段階でキック泳動作を位相分けし (図内では例としてけり下ろしの瞬間を示しています)、同位相の複数の流れ場を座標変換します。スイマーの左腰のマーカーを原点にして流れ場の座標を変換すると、スイマーを中心とした相対的な位置に移動します。座標変換された流れ場がスイマー後流に複数配置され加算平均していくことで、最終的に流れ場の三次元化が達成されます。

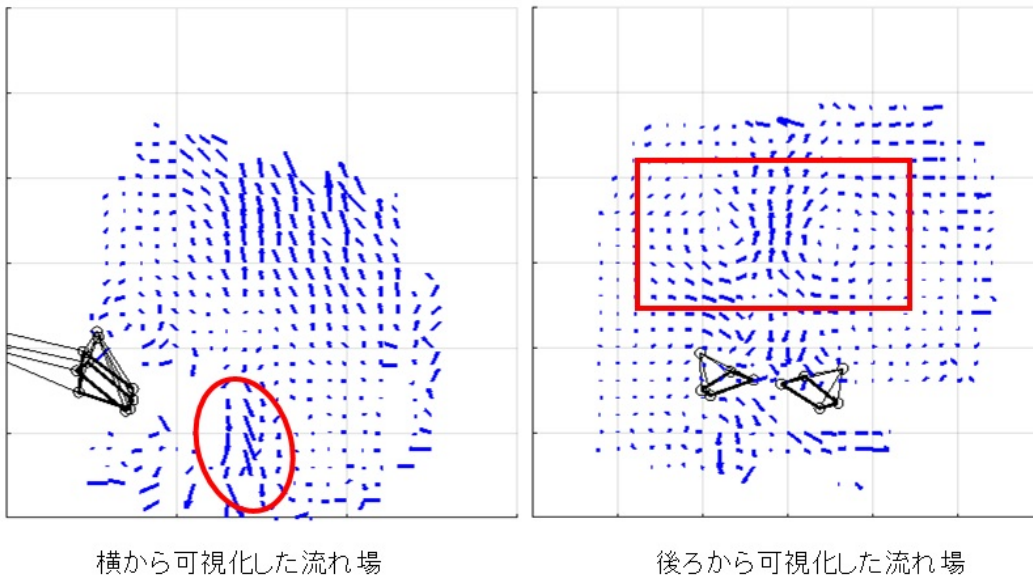


図 4 横と後ろから可視化した流れ場。けり下ろした直後に下向きの強い流れであるジェット流が発生している様子が見られました (図左、楕円内)。けり下ろし中には、下に向かって足部が移動し、その跡には二つの対照的な渦が発生していました (図右、枠内)。

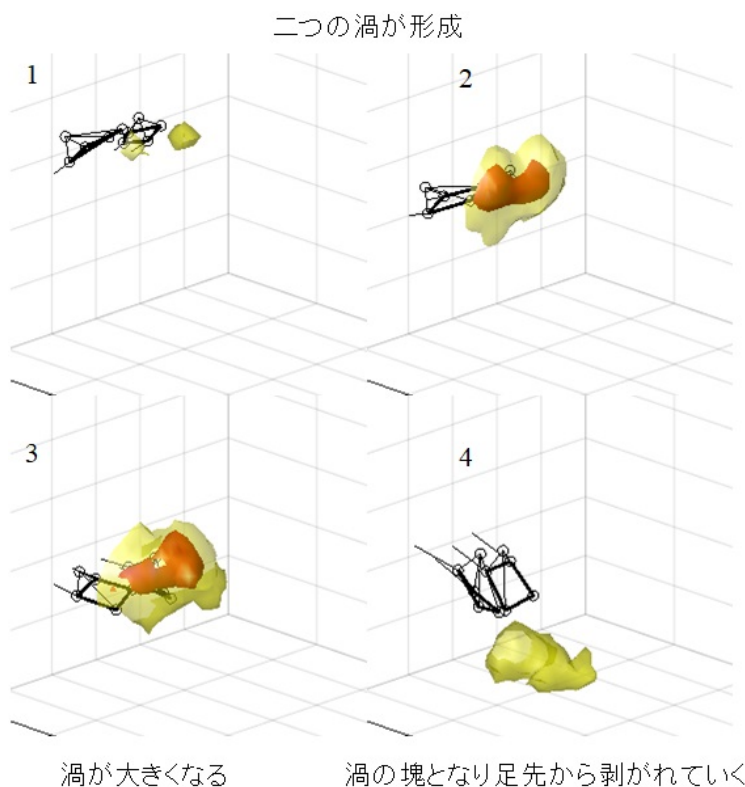


図 5 三次元化された流れ場と渦の形成過程の様子。スイマー左後方からの視点で、けり下ろし中の三次元化された渦を 1～4 の順に示しています。渦が形成された場所を着色して黄色で示し、より強い渦を赤色で表示しています。1～2 のけり下ろし動作初期では二つの渦が形成され、3～4 のけり下ろし終盤では渦がより大きくなり、渦の塊となって剥がれていく様子が観察されました。けり下ろしの最中、スイマーは下肢を内旋位 (足先が体の中心側を向いた状態) から、外旋位 (足先が体の外側を向いた状態) へと回旋運動を行っており (3,4)、その動きで渦を塊にして放出しながら水中を推進しています。

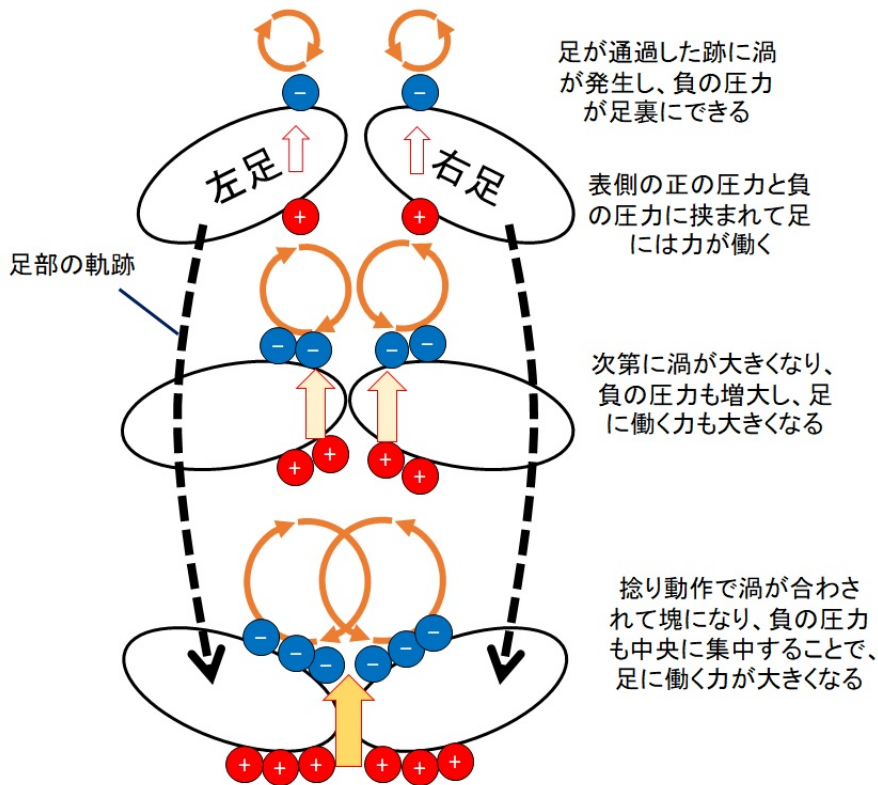


図 6 水中キック泳（ドルフィンキック）の推進メカニズムの模式図。スイマーの後ろ側から見た図で、けり下ろし動作中（スイマーが最も加速する局面）の足の動きと周りの流れとの関係を説明しています。渦の発生と足部に働く圧力から推察される推進メカニズム。

掲載論文

【題 名】 A quasi three-dimensional visualization of unsteady wake flow in human undulatory swimming.

（ヒトのうねり泳中の非定常な後流の準三次元的な可視化）

【著者名】 Hirofumi Shimojo, Tomohiro Gonjo, Jun Sakakibara, Yasuo Sengoku, Ross Sanders, Hideki Takagi

【掲載誌】 Journal of Biomechanics (DOI: 10.1016/j.jbiomech.2019.06.013)

問合わせ先

高木 英樹（たかぎ ひでき）

筑波大学 体育系 教授

下門 洋文（しもじょう ひろふみ）

新潟医療福祉大学 健康科学部 健康スポーツ学科 講師