

研 究 報 告 書

「水泳プール中の水の流れを 3 次元計測する技術の開発」

研究期間： 2019 年 4 月～2021 年 3 月

研究者番号： 50229

研 究 者： 山下 聖悟

1. 研究のねらい

水中での推進効率や速度を向上させるためには、水流を理解することが大事であることが知られている。例えば、水中で生活する魚や昆虫は泳ぐ際に後方に複数の渦状の水流を作り、その力により水中を素早く移動している。人の泳動作による水流を広範囲で計測することができるになれば、水中での人の推進を妨げる抵抗の発生原因や位置を新たに明らかにできる。また、3 次元的水流が計測できれば、人の推進メカニズムの解明やより効率のよい泳動作の発見ができる可能性がある。しかし、既存の流体計測手法には、人が存在する環境での流体計測においていくつかの問題があった。流体計測には、流体に微小な粒子(トレーサー粒子)を散布し、レーザー照射による粒子の散乱光によって粒子を周囲より明るくし、カメラによる水の流れを計測可能にする粒子イメージ計測法(PIV)が用いられることが多い。しかし、広範囲の粒子に十分な光を照射するためには強力なレーザー光源が必要になる。もし人全体をカバーするような範囲での流体計測が必要である場合、人の肌や目に重大な悪影響を与える可能性がある強力なレーザー光源が必要とされる。本研究では、人体に悪影響を与えないトレーサー粒子と光源を用いた流体計測手法を開発する。提案流体計測手法には、計測範囲の拡大が従来の手法に比べて容易であり、トレーサー粒子が均一に分散する・沈殿しないという特徴も持つ。本研究では、トレーサー粒子として偏光面を回転させる能力(複屈折あるいは旋光性)のある粒子(セルロースなど)を用いる。トレーサー粒子を可視化するためには、偏光した光を照射する室内灯程度の光量のバックライトと、カメラのレンズに設置された偏光板を用いる。2 枚の偏光板(右・左円偏光板)を重ねた場合、後部からの光が透過しなくなる遮光が起こる。2 つの偏光板に挟まれた位置に偏光面を回転する能力を持つ粒子がある場合、偏光板の外から見ると粒子のみが明るくなる。粒子のみが周囲に比べて大幅に明るく見える場合、カメラを用いた位置計測が可能となる。

2. 研究成果

(1) 概要

ACT-I 加速フェーズでは、ACT-I の研究課題である“水泳プール中の水の流れ 3 次元計測する技術の開発”をより深める研究を行った。具体的には、水泳、流体計測を専門とする研究者との共同研究の推進、実用性の向上、他研究領域への応用を目指した。

申請者は、水泳動作と水中での抵抗・抗力や水泳動作による水流について高い専門性を持つ鹿屋体育大学(現筑波大学)の研究者らとの共同研究を開始した。このコラボレーションは本研究課題を飛躍的に加速させる。本研究では、水流計測を水泳のために用いている専門家からの意見を継続的に得ながら、より学術的な貢献が大きくなる方向へ研究を的確に進めた。

プール中の水の動きを計測するためには、トレーサー粒子が万遍なく長期間水中に漂っている状態が好ましい。しかし、ACT-I 研究期間で開発したトレーサー粒子(人工いくら)はゆっくりと底に向かって沈むため、計測の際には水をかき混ぜる等の方法により水中に漂わせる必要があった。また、粒子径が大きいと、大まかな水の流れしか計測できないという制限もあった。加速フェーズでは、実用性に関わるこれらの問題を解決した。申請者はこれまでの基礎実験から、セルロースが既存のトレーサーの問題(沈殿速度の早さ、粒子径の大きさ)を解決する糸口になることを明らかにした。提案した光学系は複屈折を持つ部分だけを周囲に比べて明るく可視化することができる。また、ナノセルロースのトレーサー粒子は、流れによって複屈折が生じる流動性複屈折という光学特性を持つ。つまり、水泳動作などにより水が流れた場合、その部分のみが周囲に比べて明るくなる。計測が必要な部分のみが可視化されるため、既存の流体計測手法の問題点とされていた粒子同士による遮蔽が少なくなり、より広範囲で流体計測が可能になると考えられる。

(2) 詳細

研究テーマ A「水泳、流体計測を専門とする研究者との共同研究の推進」

申請者は、大型のガラス水槽(幅 2m、奥行き 3m、高さ 1.5m)を用いて人が泳ぐ際に起こす水の流れを観測する実験を共同研究者と共にを行った。実験の際には、0.02wt%のセルロースナノクリスタル懸濁液 5 トンを水槽中に準備した。また、水泳経験者に水槽中で様々な泳法を用いて泳ぐように依頼し、その水流を観測した(図 1)。例を挙げると、スカーリングと呼ばれる水中でその場で留まる際に用いられる手の動き、クロールの手の動作などによって発生する手の周りの水流を観測した。また、平泳ぎに伴う足の動きやバタ足、ドルフィンキックの際の足周辺の水流についても観測した(図 2)。結果として、過去の研究により予測されたような水の流れが観測された。例えば、スカーリングは手を左右に振るような動作を行いその場に留まるための浮力を作り出すためのものである。過去の研究から、手で作り出した水の流れ(渦)を横方向に投げ、手のひらでそれを受けることで下方向に安定した水流を作り出していることがわかっている。本実験においても、手のひらが渦を作り出していること、その渦が横方向に移動すること、渦を手のひらで受けることによって結果的に下方向に流れが発生していることが観測できた[5]。ドルフィンキックにおいても、揃えた足が上から下に移動する際に足の裏の上部に強い渦が発生していることと、その渦が足の動きについていくよ

うに下方向に移動して、結果として体に対して後方下方向に大きな水の流れを発生していることが観測された。しかし、大型水槽を用いた本実験では、スペースの制限のため、連続した泳動作を行うことができない。水泳に関する学術的な貢献を提供するためには、実際のプールや回流水槽のような連続的な泳動作が可能な環境において計測を実現する必要がある。本研究では、計測範囲を更に拡大できる光学系の開発や、遠隔地への計測環境の実装を考慮した携帯性の実現、更に水の容量の多い環境にて十分な濃度のトレーサー粒子を散布する方法の確立などを目指した。



図 1 人が泳ぐ際に起こす水の流れを可視化し観測する実験

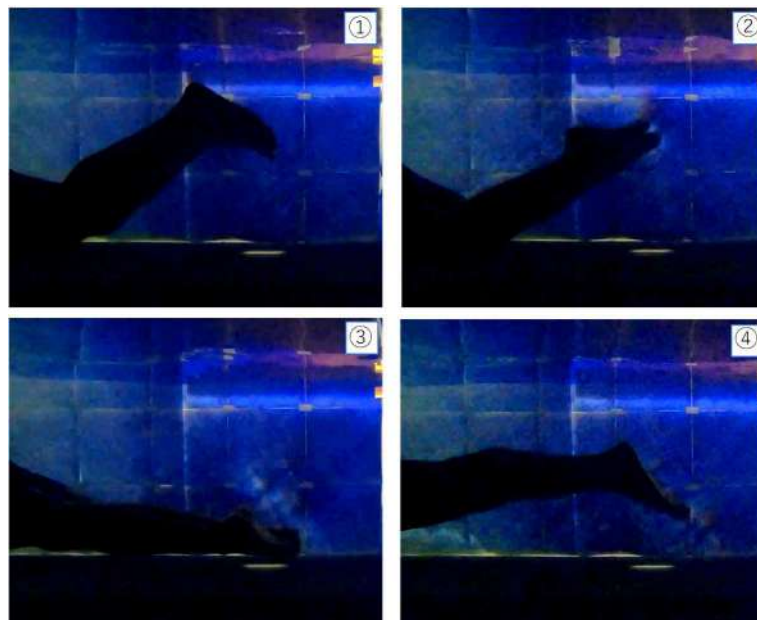


図 2 ドルフィンキックによる水の流れを可視化した例

研究テーマ B「トレーサー粒子の均一分散・長時間浮遊の実現と計測可能範囲の向上」

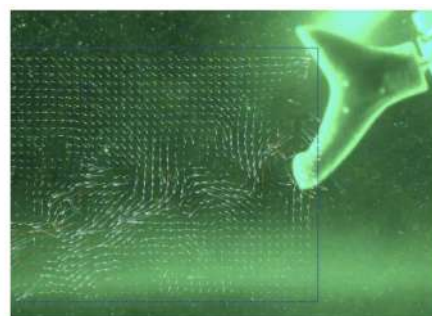
ACT-I の期間中に、セルロース微粒子や人工いくらなどによるトレーサー粒子を提案した。しかし、これらの粒子には沈殿速度が速く粒子径が大きいため、微少な水の動きに追従することが難しいという問題があった。本研究では、ナノサイズのセルロース粒子が、既存のトレーサー粒子の問題を解決する糸口になることを基礎実験から明らかにした。セルロースは植物繊維の主成分であり健康食品としても販売されている。セルロースナノファイバー(SNF)は、ナノサイズのセルロース繊維である。SNFは最大で数ヶ月の間、沈殿または浮上せず水中を浮遊し続ける特性を持つ。また、水全体に万遍なく分散した状態を保つことも知られている。加えて、SNFは粒子サイズが微細であり光を散乱させないため水に散布した場合も水をほとんど白濁させない SNF を含む水は、流れなどにより力(せん断力)を受けた部分だけが強い複屈折を持つ特徴を持つ。また、提案する光学系は複屈折を持つ部分だけを周囲に比べて明るく可視化することができる[3]。これらを組み合わせることで、水泳動作などにより水が流れた場合、その部分のみが周囲に比べて明るく観測される。計測が必要な部分のみが可視化されるため、既存の流体計測手法の問題点とされていた粒子同士による遮蔽が少なくなり、より広範囲で流体計測が可能になると考えられる。セルロースの加工や製造は、これらに高い専門性を持つ大阪大学能木研究室の春日氏らと共同で行った。セルロース及び材料合成に精通している研究協力者の存在は、本研究をさらに加速した。

研究テーマ C「精度や制限の明確化」

セルロースナノファイバーをトレーサー粒子に用いる場合、粘度が剪断力(渦や乱流の際に発生)に応じて変化するという特性を考慮に入れて流体計測を実現する必要がある。本研究では、従来のトレーサー粒子を用いて流体計測を行なった場合との比較実験を行い精度や制限の明確化を試みた(図 3)。具体的には、レーザーを用いてトレーサー粒子を可視化しカメラで流れを観測する既存手法を用いて水の流れを計測した。また、回流水槽中に一定の形のオブジェクトを置いた際の水の流れをシミュレーションにより求め、提案手法との比較検証のための足掛かりとした。



(A) 提案手法



(B) 既存手法

図 3 既存の光学系との比較実験の例

3. 今後の展開

2020 年度には、実際のプールを用いた検証実験を実施予定であった。新型コロナウイルスによる緊急事態宣言などの影響により 2020 年度の実験が延期されたため、2021 年度は引き続き、上記した検証実験の実施を目標に研究活動を行う。また、2019 年度、2020 年度に引き続き、計測範囲を更に拡大できる光学系の開発や、遠隔地への計測環境の実装を考慮した携帯性の実現、更に水の容量の多い環境にて十分な濃度のトレーサー粒子を散布する方法の確立などを目指す。2020 年度に引き続き、セルロースナノファイバーをトレーサー粒子に用いる場合と、従来のトレーサー粒子を用いて流体計測を行なった場合との比較実験を行う。比較実験により、精度や制限を明確化する。例えば、セルロースナノファイバーをトレーサー粒子に用いる場合、粘度が剪断力(渦や乱流の際に発生)に応じて変化するという特性を考慮に入れて流体計測を実現する必要がある。本研究の目標は、水の流れを 3 次元的に計測することである。そのため、ステレオカメラを用いて粒子を追跡する従来手法と、提案する粒子と可視化手法に特化した、3 次元的に流れを計測するため新たな光学系と計測手法の研究開発を行う。例えば、機械学習を用いて粒子の形状やブレを学習して、既存手法よりも正確に粒子を追跡する手法や、粒子のボケ方などの見た目の情報から、その 3 次元位置を推測する手法など考えられる。加えて、提案技術を学校やスイミングスクール等の一般社会においても使用可能な製品にすることを目指す。また、提案技術の他研究領域への応用も促進する。例えば、本技術の光学系は透明な身体を持つゾウリムシやミジンコなどを可視化することもできるため、水中微生物の行動観察に役に立つことが明らかになっている。流体だけではなく気体への応用も可能であることが予測される。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

トレーサー粒子を可視化して水の流れを計測可能にする光学系の開発や、トレーサー粒子の検証についてはおおそ計画通りに進行している。しかし、粒子を 3 次元的に計測するための機構についてはまだ多くの課題が残されている。例えば、現段階では、トレーサー粒子の数を従来手法に比べて大幅に制限した場合にのみ 3 次元計測が可能である。水の流れの 3 次元的な計測や、様々な角度からの水の流れの可視化はバイオメカニクス領域に大きな学術的な貢献をもたらすため、引き続き誠意的に研究開発を進める。また、人が連続的に泳動作を行うことができる大型の水槽またはプールにおける計測実験は、水泳のメカニズムに関する理論の証明などに必須である。新型コロナウイルスの感染拡大の影響により年度内の大規模な実験はほとんど断念されてしまったが、来年度は、実際の水泳環境を用いた人の起こす水の流れの可視化に関する実験を遂行できるように準備を進めている。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

2019 年度は、当初予定された通りに研究が実施された。検証実験のための費用が予定よりも多くかかることが予測されたため、増額措置に申請した。2020 年度は、新型コロナウイルスの感染拡大の影響で、ほとんどの実験が来年度以降に延期された。実際の水泳環境を用いた大規模な実験を来年度に行うために予算の執行は制限された。既存の流体計測手法との比較実験のために想定よりも多くの費用が必要になることがわかったため、増額措置に申請した。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果(今後の見込みも重視してください。)

流体計測における提案手法の有効性がある程度証明されたが、既存の手法との定量的な比較や制限の明確化が不足している。そのため、本研究成果に関心がある企業や研究者らとともに、提案手法をより実用的にするための研究開発を続ける。例を挙げると、セルロースナノファイバーをトレーサー粒子に用いる場合、粘度が剪断力(渦や乱流の際に発生)に応じて変化するという特性を考慮に入れて流体計測を実現する必要がある。また、従来のトレーサー粒子を用いて流体計測を行なった場合との比較実験を行い精度や制限を明確化する必要がある。3次元的に流れを計測するための新たな仕組みも必要とされる。

・研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題の進行には光学、情報処理、バイオメカニクスなどの総合的な知識と技術が必要である。申請者は、水泳動作と水中での抵抗・抗力や水泳動作による水流について高い専門性を持つ研究者との共同研究を推進している。加えて、材料の開発や検証に専門的な知識を持つ研究者らも協力しながら研究開発を進めている。これらのコラボレーションは、情報工学や光学の知見を他の領域に応用し、様々な領域で学術的な貢献を生み出すことに寄与している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, “Feasibility Study on Water Flow Visualization Using Cellulose Particles and Pervasive Display”, The 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays(PerDis 2019), June 12-14, 2019.
2. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, “Water Flow Measurement for Swimmers using Artificial Food-grade Roe as Tracer Particles”, The 5th International ACM In Cooperation HCI and UX Conference(CHIUxID 2019), April 8-9, 2019
3. Shogo Yamashita, Takaaki Kasuga, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Masaya Nogi and Jun Rekimoto, “Fluid-Measurement Technology using Flow Birefringence of Nanocellulose”, SIGGRAPH '19: ACM SIGGRAPH 2019 Posters, July 13, 2019
4. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, “A Human-Friendly Fluid Measurement Technology using Artificial Fish Eggs as a Tracer”, ACM CHI 2019 ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION, May 2, 2019
5. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, “Water Flow Visualization for Swimming using Nanocellulose”, ACM CHI 2020 ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION, April 25, 2019

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

1.

発 明 者: 山下 聖悟

発 明 の 名 称 : 3 次元流体計測法

出 願 人: 東京大学

出 願 日: 2019/07/12

出 願 番 号: 2019-13324 (2018-12298)

(2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

Best Poster Award at CHI 2019 Asia CHI symposium (The 5th Asian CHI Symposium Emerging HCI Research Collection)