

## 流れの可視化用紫外線励起蛍光トレーサの開発<sup>1</sup>

### Development of Ultraviolet Rays Excitation Fluorescence Tracer for Flow Visualization

堀江 昌朗 <sup>2</sup>	摂南大学工学部
宮原 彰 <sup>3</sup>	セントラルテクノ株式会社
HORIE, Masaaki	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
MIYAHARA, Akira	Central Techno Corporation

#### ABSTRACT

The particle tracer methods is one of the flow visualization techniques generally used. In this method, microspheres, such as plastic or glass particle, are added to fluid to trace the fluid motion. The velocity of the fluid is measured by PIV (Particle Image Velocimetry) analysis from usage of the recorded images with a high-speed video camera. However, when the halation is generated with the reflections of light on the conditions of the experiments, such as a moving wall, wall neighborhood of acrylic or metal, and extremely narrow recording area, it is difficult to clarify the behavior of the flow from recorded images by the particle tracer methods. To overcome these problems, the authors developed fluorescent luminous microsphere plastic particles that are excited by ultraviolet rays. The particles emit in a different color by the difference of the ingredient, moreover, these are able to excite by not only ultraviolet wavelength but also 405nm wavelength. This report explains the case with some experiments of flow visualization and the effectiveness of this flow visualization methods with fluorescent tracer and laser source of ultraviolet or 405nm wavelength.

キーワード：流れの可視化, 粒子追跡法, トレーサ, 蛍光粒子, 紫外線

**Keywords** : Flow visualization, Particle tracer methods, Tracer, Fluorescent Particles, Ultraviolet ray

---

<sup>1</sup>【原稿受付】2019年9月17日, 【掲載決定】2019年12月25日

<sup>2</sup>【主著者連絡先】堀江 昌朗 摂南大学, 教授 e-mail: m-horie@mec.setsunan.ac.jp  
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, 摂南大学工学部

## 1. はじめに

空気や水などの流体を取り扱う機械産業や医療、食品など様々な分野において、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を用いた流れ場の数値シミュレーションが盛んに行われている。しかし、数値解析では二次元あるいは三次元による流れ場の適切な計算格子を作成し、 $\kappa$ - $\varepsilon$  モデルをはじめとする乱流モデルの設定など流体力学の知識が必須となる。また、様々な流体を取り扱う製品の研究開発の現場では、数値解析結果の信頼性を評価するために実験との比較が欠かせない。この様な流れの状態を測定する実験の1つが流れの可視化であり、空気や水などの流れを様々な手法を用いて視覚化する。近年、広く利用されている流れの可視化手法として粒子追跡法が挙げられる。この手法は、樹脂などのトレーサ粒子を流体に混入し、レーザーなどの光源と高速度ビデオカメラを用いて流体と共に移動する粒子の挙動を連続的に撮影する。この撮影された映像から粒子の物理座標を算出し、PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析や PIV (Particle Image Velocimetry) 解析と呼ばれる手法を用いて流体の動きや速度を算出する<sup>①</sup>。この様な流体中の粒子の映像を用いた流れ場の解析において、計算の基となる可視化画像の品質、特にトレーサ粒子の動きを正確に追跡することが重要である。一般的に可視化実験に使用する光源は 532 nm の波長などの可視光が使用されるが、可視光の単波長光源を使用する場合、トレーサ粒子だけでなく流路壁面や光の反射によるハレーションは全て光源と同じ波長の光として撮影される。そこで、不要な反射光を除去するためにマスキングや輝度補正などの画像処理を行い、流体中の粒子の輝度情報のみを抽出した画像を取得する。しかし、実験条件や実験環境によってはハレーションの影響により、トレーサ粒子が見えなくなってしまうなど、PIV 解析などに適切な映像の撮影が困難な場合も少なくない。既往の技術として、ローダミン $\beta$  と呼ばれる蛍光物質をトレーサに塗布した粒子を使用する場合がある。この蛍光粒子は 532 nm などの単波長のレーザーを使用して橙に発光し、532 nm の波長を光学フィルタで除去することによりトレーサのみの追跡が可能となる。しかし、ローダミン $\beta$  を塗布した蛍光粒子を使用する際には高出力のレーザー光源を必要とする場合が多く、また、水溶性であることから流体中に溶け出ないように粒子にコーティングなどの特殊処理が必要であり、さらに毒性があるため廃棄処理に注意が必要である。この様な理由からローダミン $\beta$  蛍光粒子を用いた粒子追跡法は、研究開発の現場において簡単に実験で使用できるほど広く普及していないのが現状である。そこで、本稿ではローダミン $\beta$  に代わる蛍光体として、また、ハレーションなどの問題を克服するトレーサとして、主に紫外線波長で強く蛍光するセントラルテクノ社の紫外線励起蛍光体「Lumisis<sup>®</sup>」<sup>②</sup>をトレーサに採用した実験事例について紹介する。さらに、この蛍光体の技術を応用し、流れの可視化に適したトレーサである紫外線励起蛍光樹脂粒子「Lumisis Marker<sup>®</sup>」を共同開発し、この蛍光樹脂粒子を用いた流れの可視化実験を行った。その結果、紫外線励起蛍光樹脂粒子と紫外線または 405 nm の波長の光源を利用することによって、ハレーションが生ずることなく、PIV 解析に適したトレーサ粒子の映像の取得が可能であることを明らかにした。

## 2. 紫外線励起蛍光体を用いた粒子追跡法

### 2-1 紫外線励起蛍光体

セントラルテクノ社の紫外線励起蛍光体「Lumisis®」<sup>②</sup>は希土類有機錯体の結晶体で、太陽光下では蛍光色に関わらずほぼ白色である。しかし、ブラックライトやUV-LEDなどの紫外線波長に励起され、有機錯体の成分の違いにより赤、青、緑など様々な色に蛍光する物質である。本実験では緑色に蛍光する「Lumisis® G-3300」を使用した。図1は本蛍光体の走査電子顕微鏡（日本電子社製JSM-6510LAS）による映像である。本蛍光体の直径は約10  $\mu\text{m}$  で、長さは大いもので数100  $\mu\text{m}$  程度の柱状の結晶体である。図2は本蛍光体の励起波長と蛍光波長を示している。本蛍光体の励起波長は主に紫外線波長の290~405 nmで、蛍光波長のピークは約510 nmであり、比重は約1.3である。なお、図中の約290 nm以下の波長は測定装置の限界を超えているためノイズである。ここでは割愛するが、青や赤に蛍光する蛍光体の結晶体の形状はそれぞれ異なるが、全ての蛍光体は紫外線波長で励起され、それぞれの色に蛍光する特徴を有している。

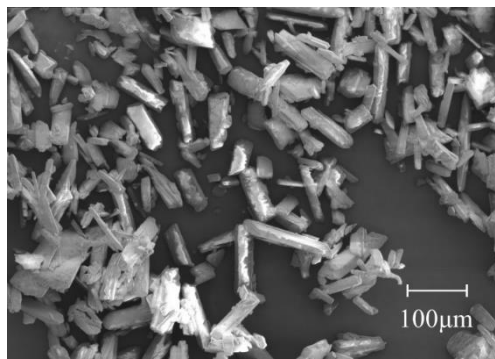


図1 紫外線励起蛍光体（Lumisis® G-3300）のSEM画像

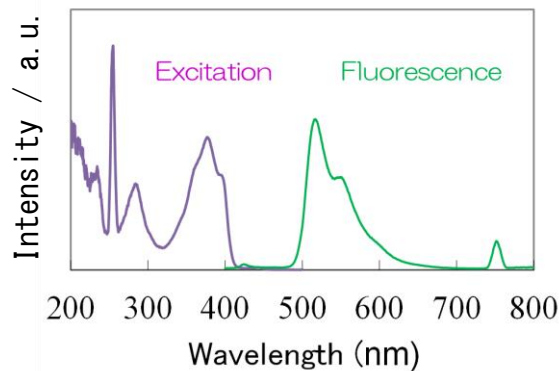


図2 紫外線励起蛍光体（Lumisis® G-3300）の励起波長および蛍光波長

## 2-2 水槽内の流れの可視化

粒子追跡法のトレーサとして紫外線励起蛍光体の有効性を検証するために、小型ポンプにより流体を循環することができる透明アクリル製の水槽（W100×D100×H150 mm）を利用して流れの可視化実験を行った。作動流体には本蛍光体と粒径が約 100  $\mu\text{m}$  の球形状のポリスチレン粒子を混入した水を使用し、デジタルカメラを用いて粒子挙動のカラー撮影を行った（図 3）。光源は可視光のバイオレットレーザー（波長：405 nm，出力：100 mW）と、不可視光の紫外線レーザー（波長：375 nm，出力：20 mW）の 2 種類を使用した。それぞれのレーザー光はドットの形状で照射されるため、シンドリカルレンズを介して厚さが約 3 mm のシート光に変換して水槽内に照射した。また、水槽底部には光源によるハレーションの有無を確認するために、表面が鏡面状の金属の丸棒を設置した。

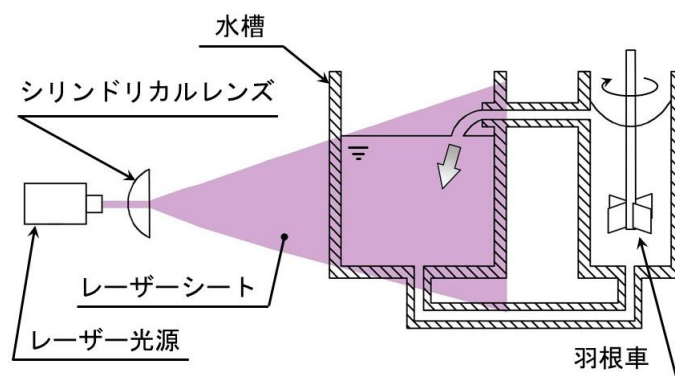
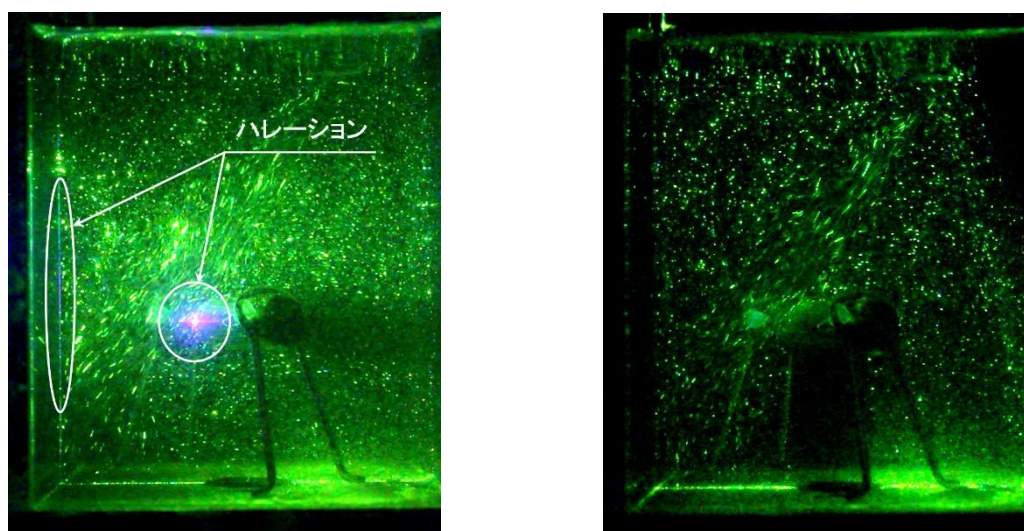


図 3 水槽内の流れの可視化実験装置概略

図 4 にそれぞれのレーザー光源を用いた場合の水槽内部に浮遊する粒子とハレーションの状態を示す。(a)のバイオレットレーザーを用いた場合、紫外線励起蛍光体は非常に明るく緑色に蛍光することが確認された。これに対して、流体中に混入されたポリスチレン粒子や水槽底部に設置された金属の丸棒に生じたハレーションは光源と同じ波長の光を反射した。また、ポリスチレン粒子は透明な球形状の粒子であることから、一般的な可視化で使用される樹脂粒子と同様にミー散乱によって 405 nm の波長の散乱光を返す。しかし、シート面に対して垂直な方向からの撮影では散乱光の光量は非常に小さいため、ほとんど確認することができなかった。なお、ここでは割愛するが、光源の 405 nm の波長を除去、または蛍光波長を通す光学フィルタを使用することにより、蛍光体のみの挙動を撮影することが可能である。

(b)の不可視光である紫外線レーザーを用いた場合、水槽内部を流体と共に流れている蛍光体、または、水槽底部に堆積している蛍光体は、レーザー光源の出力が僅か 20 mW であっても非常に明るく蛍光することが確認された。これは本蛍光体の蛍光効率が非常に高いことを示唆しており、また、散乱光ではなく、375 nm の波長によって励起されて自己発光している光を観測しているためであると考えられる。さらに、アクリルの壁面や水槽底部に設置された金属の丸棒におけるハレーションや流体中に浮遊しているポリスチレン粒子は

視認することができなかった。以上のことから、紫外線励起蛍光体と紫外線光源の組合せによる流れの可視化は、流路壁面や不要なハレーション、水中を浮遊するゴミや気泡などの蛍光体以外の物体は不可視であり、光学フィルタを使用することなくトレーサである蛍光体のみの挙動を撮影することが明らかとなった。



(a) レーザー波長：405 nm，出力：100 mW (b) レーザー波長：375 nm，出力：20 mW  
 図4 水槽内を流れる流体中の紫外線励起蛍光体とハレーション

### 2-3 狭い流路内部の流れの可視化

紫外線励起蛍光体をトレーサとした可視化実験の応用として、スクリーポンプ内部に形成される二重螺旋状の狭い流路内部の流れの可視化実験を行った。実験装置の概略を図5に、またスクリーポンプのロータとステータの概略を図6に示す。スクリーポンプのロータの直径は約5 mmで螺旋形状であり、ステータは長円がねじれた孔の形状をしている。ロータとステータの間には腹と節を持つ二重螺旋状の流路が形成され、ロータがステータ内部で自転と公転を行うことにより二重螺旋状の流路を軸方向に押し出してポンプとして機能する。本実験で使用したスクリーポンプのロータは金属製で表面は鏡面状であり、また、ステータは透明アクリル製である。撮影範囲はW10×H8 mm程度のポンプ内部に形成される流路であり、ロータの回転に伴いロータ壁面が回転移動する。

本実験では、一般的なトレーサであるポリスチレン粒子と紫外線励起蛍光体の撮影状態の比較を行うために、可視光であるグリーンレーザー（波長：532 nm，出力：1 W）と、同じく可視光であるバイオレットレーザー（波長：405 nm，出力：100 mW）を光源として使用した。ここで、トレーサ粒子はグリーンレーザーを使用する場合は粒子直径が10 μmのポリスチレン粒子、バイオレットレーザーを使用する場合は紫外線励起蛍光体を使用した。なお、バイオレットレーザーを使用する場合、ハレーションを除去するために蛍光体の緑の光を透過する光学フィルタ（ケンコー・トキナー社製 MC P01）を使用した。なお、レ

レーザー光はシリンドリカルレンズを介してシート光に変換して透明アクリル製ステータの上面から垂直に照射し，シート面に垂直な方向からモノクロ高速ビデオカメラ Phantom M310 を用いて撮影を行った<sup>(3)</sup>。

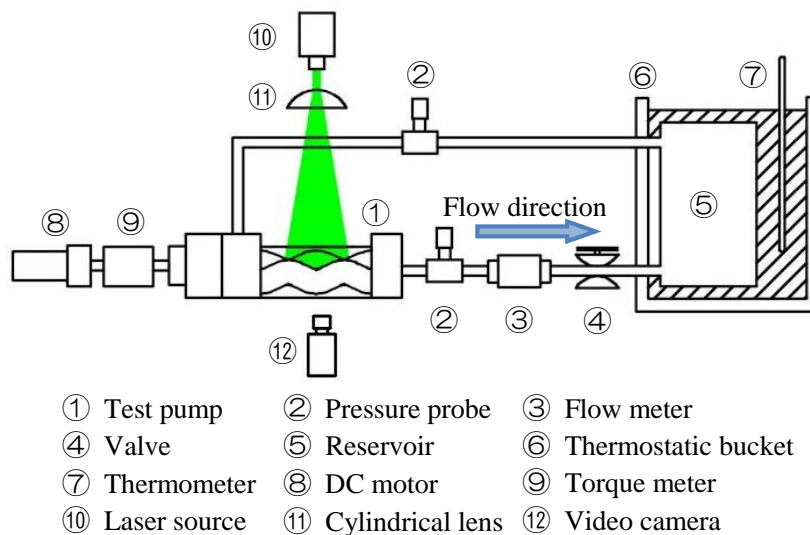
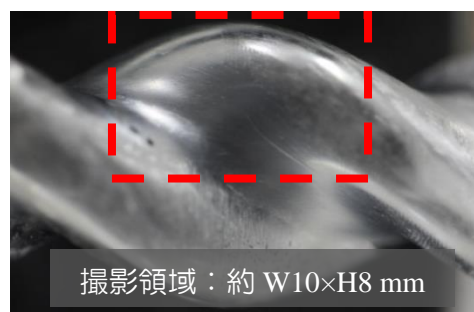


図5 可視化用スクリーump実験装置概略



(a)ロータ (ステンレス製)



(b)ステータ流路部 (アクリル製)

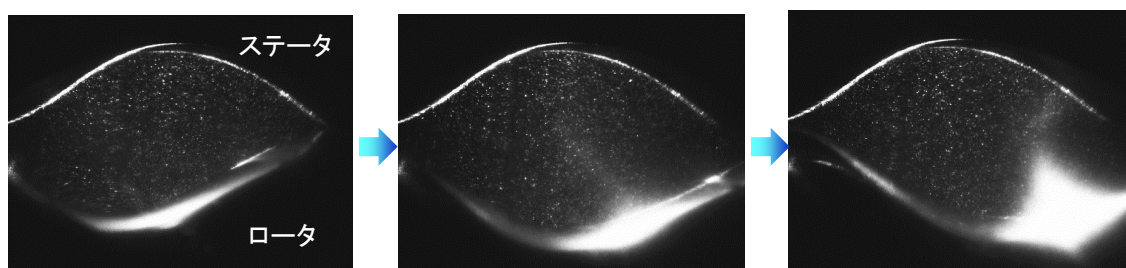
図6 スクリューポンプのロータとステータ

図7はスクリーump内部の映像を示しており，(a)はポリスチレン粒子を用いた場合，(b)は紫外線励起蛍光体を用いた場合の流動状態を撮影した結果である．なお，それぞれの映像の上部は静止しているステータ，下部は回転移動するロータを示しており，右側が流路の下流側であり，ロータの回転に伴い流路は左から右へ移動する．この実験ではロータの回転速度を 1,000 rpm に設定し，撮影領域内で流路断面が最大になる状態の前後の時刻 ( $\Delta t = 7.5 \text{ ms}$ ) における映像の一部を例示した<sup>(4)</sup>。

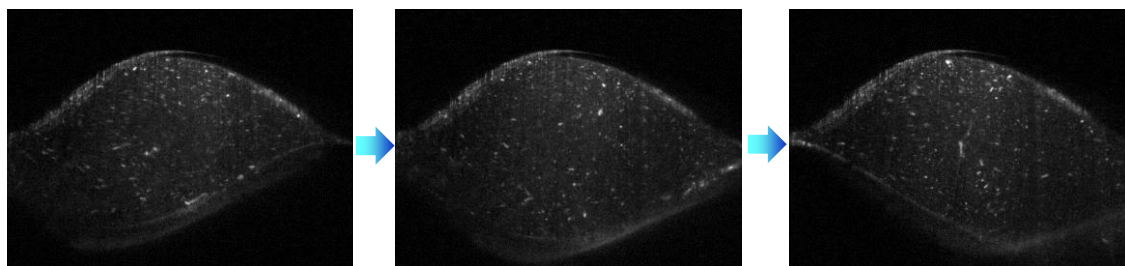
(a)のポリスチレン粒子とグリーンレーザーを用いた場合，金属製のロータの表面においてシート光の一部が反射して強いハレーションが生じる場合がある．この様に単波長の可

視光光源とトレーサ粒子を用いた一般的な流れの可視化実験では、粒子やハレーションなど目に見える全ての輝度情報は光源と同じ波長の光として撮影される。そのため、ハレーションが生じた領域内における粒子の撮影は困難な場合が多い。

(b)の紫外線励起蛍光体とバイオレットレーザーを使用した場合、蛍光波長を透過する光学フィルタを利用することにより、不要なハレーションがほとんど除去され、蛍光体のみの挙動を撮影することが可能である。また、出力が 100 mW の低い出力であっても紫外線励起蛍光体の蛍光強度が非常に高いために、7,000 fps での撮影が可能であった。



(a) トレーサ：ポリスチレン粒子(10  $\mu\text{m}$ )，レーザー波長：532 nm，出力：1 W，  
フレームレート：10,000 fps，シャッタースピード：1/20,000 s



(b) トレーサ：紫外線励起蛍光体，レーザー波長：405 nm，出力：100 mW，  
フレームレート：7,000 fps，シャッタースピード：1/7,000 s，光学フィルタ

図7 スクリューポンプ内部流れの粒子挙動とハレーション

この様に、紫外線励起蛍光体は紫外線だけでなくバイオレットレーザーであっても明るく蛍光するために粒子追跡法のトレーサとして利用できることが確認された。しかし、形状が不均一であるために流体中の粒子挙動が不安定になること、結晶体が崩れやすく壁面に付着してしまうことなど改善すべき課題も明らかになった。

### 3. 紫外線励起蛍光樹脂粒子を用いた粒子追跡法

#### 3-1 紫外線励起蛍光樹脂粒子

著者らは紫外線励起蛍光体の種々の問題を克服するために、本蛍光体を球形状の樹脂に混入させた紫外線励起蛍光樹脂粒子を開発した。これまでに数種類の樹脂を母材とした蛍

光粒子の試作を行ってきたが、本報告では母材にアクリル樹脂を用いた紫外線励起蛍光樹脂粒子について紹介する。なお、蛍光樹脂粒子は母材に混入させる蛍光体の成分を変更することにより赤、青、緑に蛍光させることが可能であり、励起波長や蛍光波長の特性は基となる紫外線励起蛍光体と同様である。図 8 は紫外線励起蛍光樹脂粒子が入った小瓶に高輝度 LED（波長：375 nm）を照射したときの蛍光状態を示している。開発した RGB の 3 色に蛍光する粒子は、290～405 nm の主に紫外線波長の光源を 1 つ使用するだけで異なる色に蛍光する。これらの蛍光樹脂粒子を用いることにより、カラー撮影を行う際にはそれぞれの色に対して輝度補正を簡単に行うことができ、また、撮影環境や条件によって適切な蛍光色を選択することができる。図 9 は紫外線励起蛍光樹脂粒子の SEM 画像を示している。蛍光樹脂粒子は平均粒径が 10  $\mu\text{m}$  の球形状であり、先に述べた結晶体の様に形が崩れて壁面に付着することがなく、また、蛍光体が流体中に滲み出ることもない。そのため、一般的に流れの可視化で使用するナイロンやポリスチレン粒子と同じように使用することが可能である。なお、本紫外線励起蛍光樹脂粒子に関する特許をセントラルテクノ(株)と共同出願中<sup>5)</sup>である。



図 8 紫外線励起蛍光樹脂粒子（励起波長：375 nm）

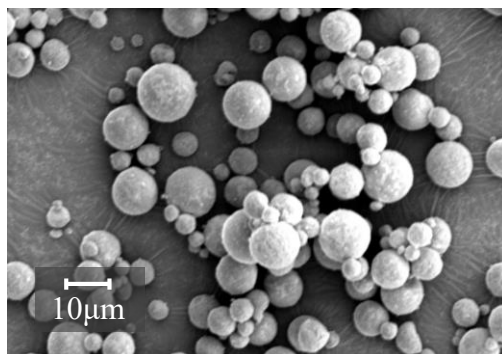


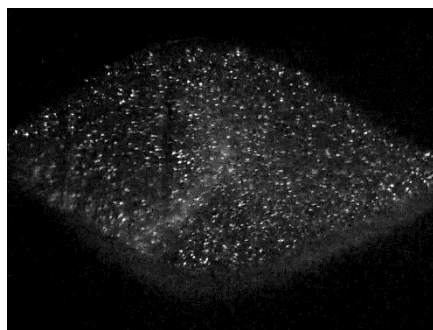
図 9 紫外線励起蛍光樹脂粒子の SEM 画像

### 3-2 狭い流路内部の流れの可視化

紫外線励起蛍光樹脂粒子を用いて、前節で述べたスクリュウポンプの内部の流れの可視

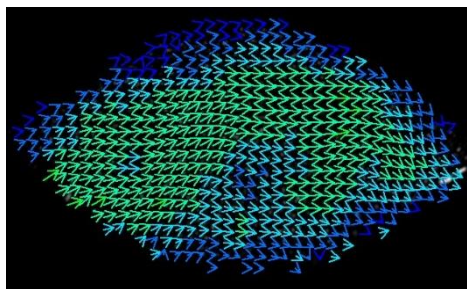


化実験を行った。ここで、蛍光樹脂粒子は緑色に発光するものを使用し、光源にはバイオレットレーザー（波長：405 nm，出力：500 mW）と光学フィルタを使用した。ロータの回転速度は 1000 rpm であり、モノクロ高速ビデオカメラ（Phantom M310）の撮影条件はフレームレートが 10,000 fps，シャッタースピードは 1/20,000 s である。図 10 の(a)は高速ビデオカメラで撮影された画像，(b)は PIV 解析によって算出された速度分布，(c)は渦度分布である。なお，(a)の画像は高速ビデオカメラによって連続撮影された映像の 1 つであり，輝度補正のみを施しておりマスキング処理などは行っていない。また，図 7 と同様にそれぞれの画像の上部は透明アクリル製のステータ，下部は回転移動している金属製のロータ部である。(a)の画像では，光学フィルタを利用しているためにアクリルの壁面近傍や金属表面のハレーションはほとんど映ることがなく，流体中に浮遊している蛍光粒子のみ撮影されていることが確認できる。この様に輝度を補正するだけで粒子の映像だけを簡単に取得することができることから，撮影条件によっては数千枚もの映像に対して行われていたハレーションの除去やマスキングなどの極めて煩雑であった画像処理が簡略化される。また，元画像の品質が向上することから PIV 解析による流体の速度や渦度の算出も簡単に行うことが確認された。なお，ここでは割愛するが，本解析結果はポリスチレン粒子とグリーンレーザー光源を用いた一般的な可視化実験による PIV 解析結果とほぼ同じであった。

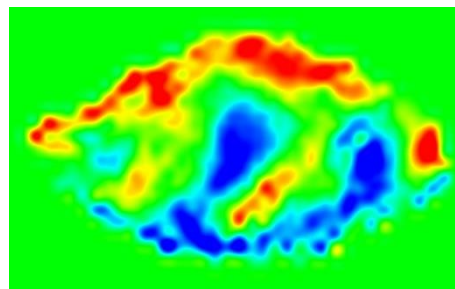


(a) 元画像

トレーサ：紫外線励起蛍光樹脂粒子(10  $\mu\text{m}$ )，レーザー波長：405 nm，出力：500mW，  
フレームレート：10,000 fps，シャッタースピード：1/20,000 s，光学フィルタ



(b) 速度ベクトル



(c) 渦度分布

図 10 紫外線励起蛍光樹脂を用いたスクリーンプンプ内部の流れの PIV 解析結果

ここで、光学フィルタを使用せずにバイオレットレーザーとカラーの高速度ビデオカメラを用いた場合、1つの光源で蛍光樹脂粒子と回転移動する壁面を異なる色で同時刻に撮影することが可能である。さらに、出力の高い不可視光の紫外線レーザーを光源として使用した場合、光学フィルタを使用することなく蛍光樹脂粒子のみを鮮明に撮影することが可能になることから、PIV解析に適した映像の取得が容易に行えるようになる。

#### 4. 結論

紫外線励起蛍光体および新しく開発した紫外線励起蛍光樹脂粒子をトレーサとした流れの可視化実験を行い以下の知見を得た。

紫外線励起蛍光体を用いた流れの可視化において不可視光である紫外線光源を用いることにより、ハレーションは生ずることなく、紫外線励起蛍光体のみを撮影することが可能である。バイオレットレーザー光源（波長：405 nm）を用いた場合、蛍光体は蛍光色の波長で、また、ハレーションやその他の物体は405 nmの波長の光として撮影される。バイオレットレーザー光源と光学フィルタの組合せによる撮影は、紫外線光源を使用したときと同様にハレーションなどがない映像を取得することが可能である。

紫外線励起蛍光樹脂粒子は紫外線励起蛍光体と同じ光学特性を有しており、また、球形状であるため一般的な流れの可視化実験で使用される粒子と同様の取扱いができる。本手法を用いて撮影された画像はハレーションを除去するための煩雑なマスキングなどの画像処理を行う必要がなく、また、輝度補正を行うだけで容易にPIV解析を実施することができる。

#### 5. おわりに

紫外線励起蛍光樹脂粒子と紫外線光源の組みあわせによる粒子追跡法により、複数流体の混合過程、キャビテーション気泡周りや壁面近傍の流れ、極微小空間やハレーションが生じやすい撮影領域の流れ、気泡や異物を含む流れなど、これまで困難あるいは不可能であった様々な流れの測定が可能になると考えている。今後は、本可視化技術を様々な流れ場へ適用し、実証実験を行う予定である。

#### <参考文献>

- (1)PIVハンドブック, (社)可視化情報学会編, 森北出版, (2002)
- (2)セントラルテクノ(株)HP, <http://www.central-techno.co.jp/>, (2019年9月17日閲覧)。
- (3)長濱 正太, 堀江 昌朗, 紫外線励起蛍光体を用いた狭い隙間を有する一軸スクリューポンプの内部流れの可視化, 第46回可視化情報シンポジウム講演論文集 USB, (2018)
- (4)堀江 昌朗, 紫外線励起蛍光体を用いた流れの可視化, 建築設備と配管工事 流れの可視化, 日本工業出版, (2019), pp. 71-74.
- (5)セントラルテクノ株式会社, 学校法人常翔学園, 特願 2019-082356, 蛍光粒子, 蛍光粒

子を用いて流体が存在する場において、流体の動き/運動を可視化し検査するための検査装置および、蛍光粒子を用いて流体が存在する場において、流体の動き/運動を可視化し検査する検査方法, (2019)