

## プラズマ内に浮遊する多数の微粒子をリアルタイムで 観察・分類できる技術を世界で初めて開発

本学電気電子工学系 三瓶明希夫准教授, 栗辻安浩教授, 大学院生 工芸科学研究科博士後期課程電子システム工学専攻 井上智好, 大学院生, 工芸科学研究科博士前期課程電子システム工学専攻 川出恭隆, 鈴木理史, 落合遼太朗大学院生(研究当時)の共同研究グループは, 光波の振動方向である偏光<sup>※1</sup> 情報をもとに, プラズマ<sup>※2</sup> 中で浮遊する多数の微粒子をリアルタイムで観察・分類できるイメージング技術の開発に世界で初めて成功しました。従来技術では不可能であったプラズマ中の微粒子の分類を, 光の偏光の情報を利用することで可能になりました。プラズマ内の微粒子をリアルタイムで捉えて分類することは宇宙空間における微生物の挙動の模擬実験, プラズマメタマテリアルの開発への貢献などプラズマ利用技術の進展が期待できます。

この研究成果は, 2021年8月27日に, 電気・情報工学分野の学術研究団体IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)発行の学術雑誌「IEEE Transactions on Plasma Science」に掲載されました。

### ポイント

---

- ✓ 光の振動方向である偏光情報をもとに, プラズマ中で浮遊する多数の微粒子をリアルタイムで観察し, 分類ができる技術とそのシステムの構築に成功
- ✓ 宇宙空間における微生物の挙動の模擬実験, プラズマメタマテリアルの開発への貢献などプラズマ利用技術への応用へ期待

## 研究の背景

---

固体、液体、気体に続く第4の物質状態と言われる、プラズマ<sup>※2</sup>を利用した科学技術は様々な分野で利用されています。プラズマはその状態に応じた性質を生かし、アーク放電(溶接、切断、溶射)や半導体製造のための微細加工、薄膜の合成、殺菌などに積極的に利用されています。さらに近年では、プラズマ中にミクロン程度の大きさの微粒子を含んだ、微粒子プラズマ<sup>※3</sup>へ注目が集まっています。微粒子プラズマの振舞いを明らかにすることで、プラズマプロセス技術の高精度・微細化や核融合炉の発展につながると期待されています。

プラズマ中にミクロンオーダーの微粒子が存在すると負に帯電して、クーロン力や重力・イオンドラグ力等の力を受けて浮遊・運動する事実は良く知られています。特に微粒子が非球形である場合は、場から受ける力のわずかな不均衡から、ブラウン運動と異なる複雑な運動をします。帯電した微粒子同士は、お互いにクーロン力で相互作用しながら複雑な集団運動を行うため、プラズマ中を自発的に泳ぐマイクロロボットや、アクティブマター実現への応用が期待されています。本学三瓶准教授らの研究グループは、微粒子プラズマの特性に着目し、プラズマ中に花粉・細菌といった非球形微粒子の浮遊や操作に関する研究を行ってきました。これまでに研究グループは、生成したプラズマ中に、花粉やオートクレーブ処理後に粉末にした大腸菌や肺炎桿菌等の細菌を入れて、それらの挙動の観測に成功しています。しかしながら、これまでの技術では記録方法の問題から、プラズマ内に浮遊する複数種類の微粒子種の同定や分級は不可能でした。花粉のような自己駆動力の大きい非球形微粒子を含めて、複数種類の微粒子種が区別できるようになれば、従来は観測されていない臨界現象や二相共存・分離過程の計測が実現できる可能性があり、非線形・複雑系の特徴を示す物理現象の理解へと繋がります。

## 研究の内容

---

本研究では、光の振動方向である偏光情報をもとに、プラズマ中で浮遊する多数の微粒子の振る舞いと種類をリアルタイムで分類・観察できるイメージング技術の開発に成功しました。

これまで、細菌の形状や大きさなどによって浮遊位置や挙動が変化することが示唆されてきましたが、複数種類の微粒子が混在することが考えられる環境下において、微粒子の同定および分類は困難でした。

本研究で提案した技術は、多数の微粒子の振る舞いの観察と微粒子の分類を同時に行えます。その特徴は、光の性質である偏光を利用した点です。光の偏光とは、特定の方向に振動する光の電場を示したものです。樹脂やガラス製品の欠陥検出や膜厚測定技術として利用されています。これらの技術では、物体から反射した光または透過した光の偏光状態を明らかにすることで、物体の組成や状態を評価しています。本研究では、微粒子からの反射光の偏光状態を取得し、プラズマ内に浮遊する微粒子の分類を行いました。

本研究では、本学栗辻教授らのグループが進めている、高速に動く物体の3次元動画像観察・

計測する研究においてキーとなる偏光イメージングカメラと呼ばれる最先端の記録デバイスを使用しました。偏光イメージングカメラは通常のカメラとは異なり、撮像素子の画素ごとに異なる偏光状態を検出する微小素子(微小偏光子アレイ)を備え付けた記録デバイスです。記録した画像に対して適切な画像処理を施すことで、高速に動く物体からの反射光の偏光情報をリアルタイムで可視化することが可能です(図1)。

実証実験では、高周波放電で生成したプラズマ中に花粉粒子とジビニルベンゼン粒子をそれぞれ多数入れて、レーザー光を浮遊する微粒子に照射し、反射光を発生させました。微粒子からの反射光を偏光イメージングカメラで記録することで、挙動の観察と粒子種類の分類を同時に行うことに成功しました(図2)。また、微粒子種によって表面構造や反射特性が異なることから、反射光の偏光状態が変化していることが示唆されました。

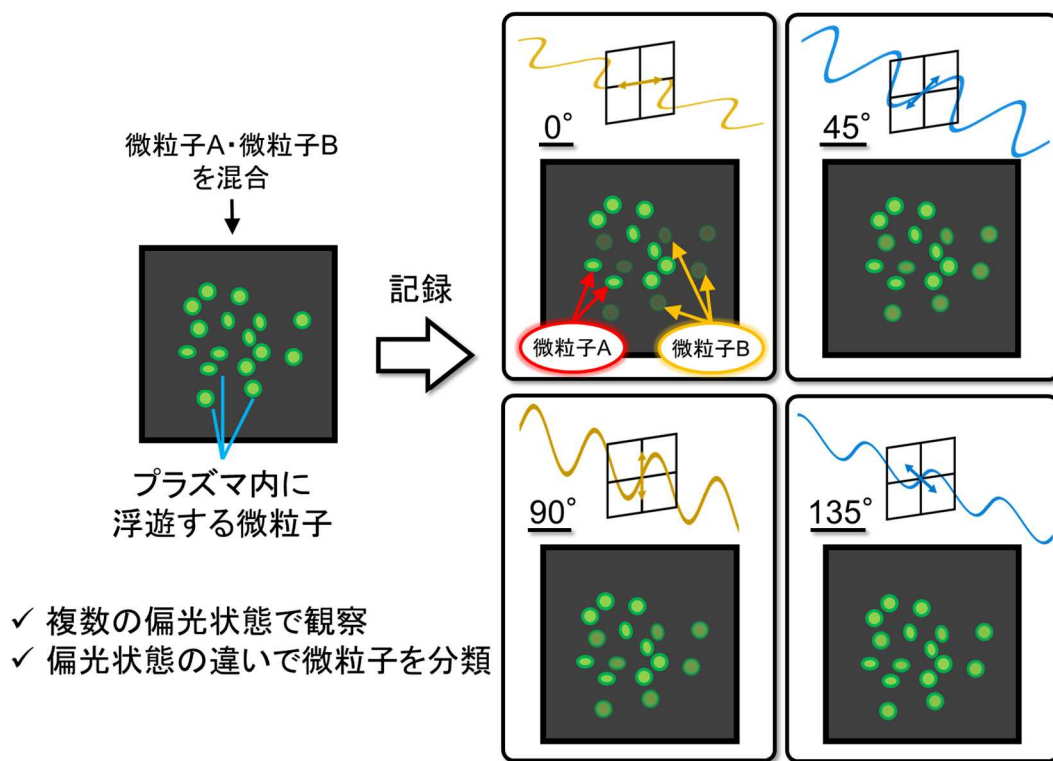


図1. プラズマ内に浮遊する多数の微粒子を画像により分類する手法の概念図

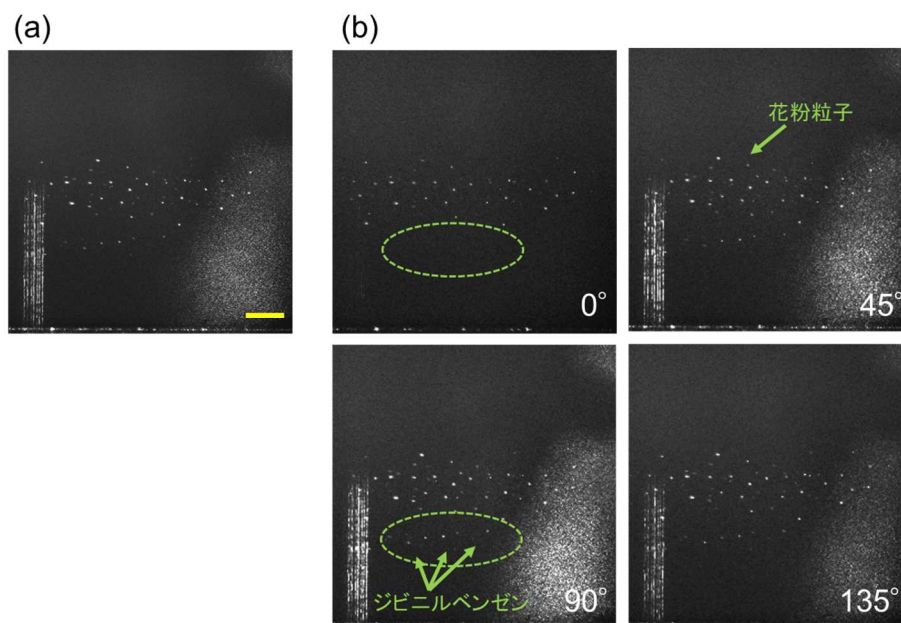


図 2. プラズマ内に浮遊する多数の微粒子の振る舞いの記録と分類に同時に成功した結果; (a)画像処理前の画像 (b) 画像処理後の画像。

## 今後の展開

本研究で提案・実証した技術は、これまで不可能であったプラズマ中で浮遊する多数の微粒子の分類を、光の偏光の情報を利用することで可能になりました。プラズマ内の多数の微粒子をリアルタイムで捉えて分類し、解析することは宇宙空間における微生物の挙動の模擬実験、プラズマプロセス技術の高精度微細化、プラズマメタマテリアルの開発への貢献など様々なプラズマ利用技術への応用・展開が期待できます。加えて、空気中の PM2.5 やハウスダスト、スギ花粉などの有機系微粒子試料の同定や環境計測への利用も期待されます。

今後の課題としては、提案手法を微生物や細菌といった異なる微粒子へ適用させることや微粒子による偏光状態の違いが生じる原因の究明、動的な微粒子プラズマの3次元動画像計測への展開が挙げられます。

## 用語解説

### 1. 偏光

光は電場と磁場が波となって進む電磁波の一種。電場の方向は、光の振動方向と直交していますが、一般にはその向きは決まっていません。この電場の向きが1方向にそろったものを直線偏光と呼びます。

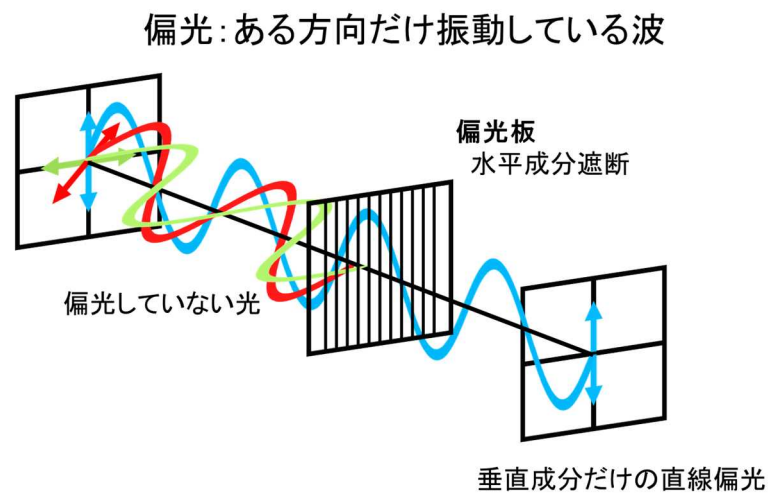


図 3. 偏光の説明図

## 2. プラズマ

プラズマは固体、液体、気体に続く第 4 の物質状態と言われ、高温のため気体中の原子から電子が分離して電子とイオンが自由に運動できるようになった状態のこと。

## 3. 微粒子プラズマ

ミクロン程度の大きさの微粒子を含んだプラズマ。宇宙に存在するちりやプラズマプロセス技術における不純物など、多岐にわたって存在する。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会(JSPS) 科学研究費助成事業 挑戦的研究(萌芽) 18K18750 ならびに 20K21001 の支援を受けて行なったものです。

また、本研究は、大学院工芸科学研究科(博士後期課程)電子システム工学専攻の授業科目「イノベーションプロジェクト」の一環で行われました。

## 論文情報

---

- **タイトル**

“Identification of pollens from polymer particles levitating in an RF plasma by the polarization imaging method”

- **著者**

Tomoyoshi Inoue, Akio Sanpei, Yasutaka Kawade, Masashi Suzuki, Ryotaro Ochiai, Yasuhiro Awatsuji

- **掲載誌**

IEEE Transactions on Plasma Science

- **DOI**

[10.1109/TPS.2021.3105559](https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3105559)

- **アブストラクト URL**

<https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3105559>

## 問い合わせ先

---

< 研究に関すること >

京都工芸繊維大学電気電子工学系

准教授 三瓶 明希夫 (さんぺい あきお)

TEL:075-724-7411 E-mail:sanpei@kit.ac.jp