



自主創造  
日本大学



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
核融合科学研究所  
National Institute for Fusion Science



崇城大学

学校法人 日本大学  
自然科学研究機構 核融合科学研究所  
学校法人 君が淵学園 崇城大学

## ねじれた光で流れを測る ～レーザー計測の新たな可能性を拓く～

### 概要

プラズマから物質への粒子流の測定は、プラズマと物質の相互作用の観点から重要な課題となっています。一般的なレーザーでは、光が進行する方向に沿った粒子の速度しか測定できないため、例えば、核融合装置の炉壁に向かう粒子束に対しては、壁が光路を妨げて測定できません。日本大学の博士後期課程3年生 皆川裕貴氏、荒巻光利教授、核融合科学研究所の吉村信次准教授、および崇城大学の寺坂健一郎准教授らによる研究グループは、光渦<sup>\*1</sup>と呼ばれる波面<sup>\*2</sup>がらせん状にねじれたレーザーを使用することで、測定可能な速度の方向に対する制約を克服しました。この測定法は光渦レーザー吸収分光法と名付けられ、光渦を用いることで光の進行方向に対して垂直な粒子流も測定可能となりました。これにより、物質とプラズマの境界領域における現象の解明に大きく貢献することが期待されます。

この研究成果をまとめた論文が英国ネイチャー・パブリッシング・グループの科学雑誌「Scientific Reports」オンライン版に2023年9月16日に掲載されました。

### 研究背景

プラズマは原子がイオンと電子に電離した状態であり、半導体製造をはじめとする多くの産業で利用されています。また、次世代エネルギー源としてのプラズマ核融合炉の開発も精力的に進行中です。このようなプラズマの高度な利用において、プラズマで生成される活性種が基板に流れ込むエネルギーや、炉心から拡散する高温粒子による炉壁への熱負荷は重要な情報となります。しかし、一般的なレーザーでは光が進行する方向に沿った粒子の速度しか測定できません。そのため、基板や炉壁に入射する粒子束に対しては、斜めから光を照射して基板や炉壁に垂直な成分を測定してきました。しかし、この方法でも確保できる光路には制限があり、測定が不可能なケースも

あります。このような状況から、流れ測定における光計測の自由度を拡大することが強く求められています。

## 研究成果

日本大学の博士後期課程 3 年生 皆川裕貴氏，荒巻光利教授，核融合科学研究所の吉村信次准教授，および崇城大学の寺坂健一郎准教授らによる研究グループは，ガラス管内を流れるプラズマに対して垂直方向から光渦を照射し，光渦の吸収に現れるドップラー効果<sup>\*3</sup>の不均一性を用いてプラズマの流速を計測することに成功しました(図 1)。

光と原子との相互作用におけるドップラー効果は，光の波面と原子の運動方向との関係によって決まります。従来のプラズマ計測では，このドップラー効果を用いて原子の速度を測定していましたが，平面波を用いた光源では光が進む方向の速度しか検出できませんでした。本研究では，光渦を用いた「光渦吸収分光法」を開発し，この課題の解決に取り組みました。光渦はらせん状の等位相面を持ち，そのため一様な横方向のプラズマ流と等位相面との関係が場所によって異なります。この特性を利用して，光渦と原子との相互作用におけるドップラー効果の空間変化から，横方向の流れ速度を得ることに成功しました。本研究でこの技術を用いて，約 50 から 150 m/s の範囲のガス流速に対して高精度な測定が可能であることを実証しました。

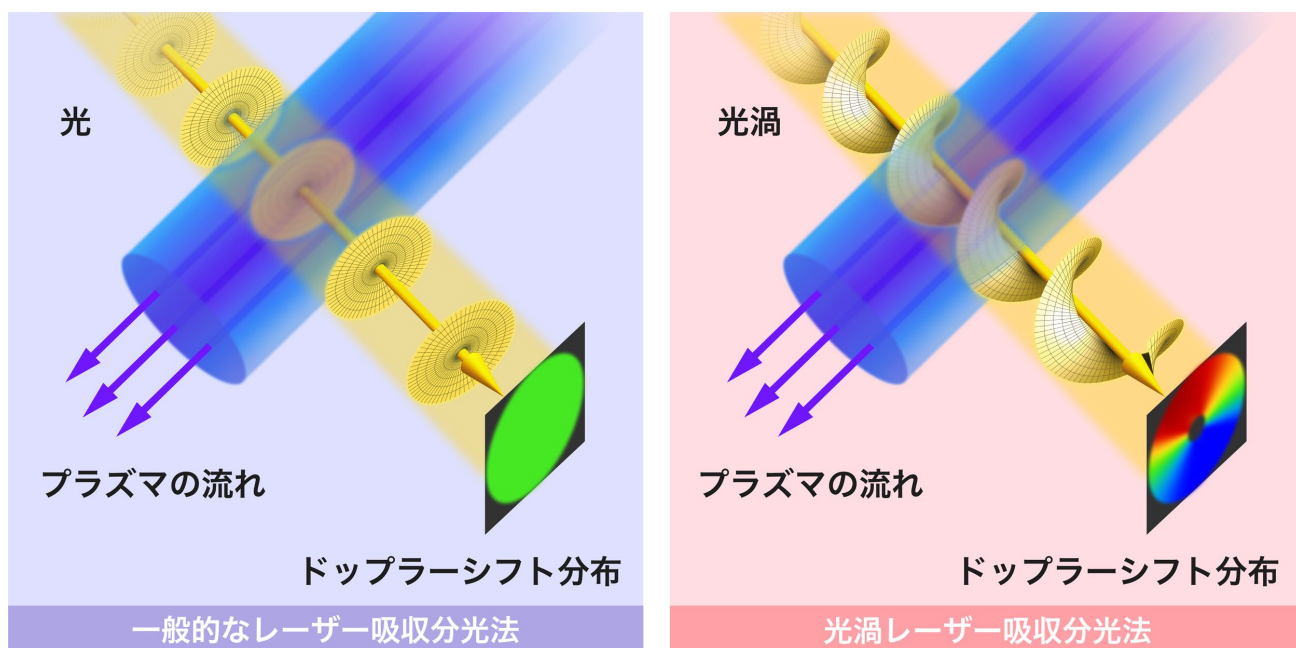


図 1 波面が平面である一般的なレーザー吸収分光法では，光に垂直な流れを測定することはできません。本研究では，らせん状の波面を持つ光渦をプラズマの流れに対して垂直に入射させることで測定を可能にしています。ドップラー効果は流れの方向と波面の角度に依存するため，光渦のねじれた波面によってビーム断面内でドップラーシフトの分布が生じます。波面の構造は既知であるため，観測されたドップラーシフトの分布からビームを横断するプラズマの流れが得られます。

(©核融合科学研究所)

## 研究成果の意義と今後の展開

従来、光が進行する方向に沿った粒子の速度しか測定できないというのは一般的な認識であり、装置等の制約により光が通過できない方向の速度は測定不可能とされていました。この研究では、光渦を用いて横方向の速度も測定できることを実証し、光の空間構造を活用することで新たな測定の可能性を開拓しています。今後、この手法をプラズマと物質の境界領域での粒子輸送観察に適用する予定です。

## 用語解説

### \*1 光渦

らせん状の波面を持つ光のことで、ビーム中心に位相特異点を持つ。軌道角運動量を伴う光として注目されている他、2014年のノーベル化学賞を受賞した S. Hell の超解像蛍光顕微鏡や光渦ピンセット、光渦多重通信等、様々な応用研究が進められている。

### \*2 波面

振動しながら伝搬する波において、振動のタイミングが同じ場所をつないだ面を波面と言う。

### \*3 ドップラー効果

波の発生源と観測者が波面を越える方向に相対運動しているときに、波の周波数が実際とは異なる値として観測される現象。

## 掲載誌情報

雑誌名:Scientific Reports

題名:Enhancement of Doppler spectroscopy to transverse direction by using optical vortex  
(光渦を用いたドップラー分光の横方向への拡張)

著者名:皆川裕貴<sup>1</sup>, 吉村信次<sup>2,3</sup>, 寺坂健一郎<sup>4</sup>, 荒巻光利<sup>1</sup>

1 日本大学生産工学部, 2 自然科学研究機構 核融合科学研究所, 3 名古屋大学低温プラズマ科学センター, 4 九州大学(現 崇城大学)

DOI: 10.1038/s41598-023-42517-z

## 研究支援

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(B) (課題番号 JP25287152, JP17H03000, JP21H01058), JSPS 科研費国際共同研究強化(B) (課題番号 JP 18KK0079), JSPS 科研費 基盤研究 (C) (課題番号 21K03501), 核融合科学研究所 LHD 計画共同研究 (NIFS13KOAP026) の支援のもとに行

われました。

## 本件に関するお問い合わせ先

### ・研究内容について

日本大学生産工学部電気電子工学科

教授 荒巻光利(あらまき みつとし)

E-mail: aramaki.mitsutoshi@nihon-u.ac.jp

博士課程3年 皆川裕貴(みながわ ひろき)

E-mail: cih19020@g.nihon-u.ac.jp

大学共同利用機関法人

自然科学研究機構 核融合科学研究所 研究部

プラズマ・複相間輸送ユニット

准教授 吉村信次(よしむら しんじ)

E-mail: yoshimura.shinji@nifs.ac.jp

崇城大学情報学部情報学科

准教授 寺坂健一郎(てらさか けんいちろう)

E-mail: terasaka@cis.sojo-u.ac.jp

### ・本件の広報について

日本大学生産工学部庶務課

TEL: 047-474-2201 FAX: 047-479-2432

E-mail: cit.shomu@nihon-u.ac.jp

大学共同利用機関法人

自然科学研究機構 核融合科学研究所 管理部

総務企画課 対外協力係

TEL: 0572-58-2019 FAX: 0572-58-2601

E-mail: taigai-kakari@nifs.ac.jp