



## ミクロな揺らぎのさらに小さい構造に迫る - プラズマ基礎実験の新展開 -

### 概要

プラズマ中でイオンと電子が作る様々な大きさの“揺らぎ”の特徴を明らかにすることは、核融合発電の実現などにおいて重要な課題です。プラズマ中の揺らぎの研究は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）のような大規模実験装置に加え、小規模な基礎実験装置でも精力的に行われています。核融合科学研究所の河内裕一特任助教、日本大学の佐々木真専任講師、九州大学の小菅佑輔准教授、京都大学の稲垣滋教授らの共同研究グループは、九州大学の直線型の基礎プラズマ装置PANTA\*において、従来研究されてきたイオンの運動サイズのミクロな揺らぎよりも、さらに100分の1小さい、電子の運動サイズの揺らぎの時空間構造を、世界で初めて詳細に観測することに成功しました。本研究は、大規模装置では観測が困難である電子の運動サイズの揺らぎを、小規模な基礎実験装置で観測可能な大きさに拡大することにより実現しました。本研究成果は、核融合研究のみならず、揺らぎに伴う宇宙プラズマの諸現象の解明にも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Scientific Reportsに12月12日に掲載されました。

### 研究背景

次世代エネルギー源として期待されている核融合発電は、高温のプラズマを利用します。プラズマは、気体の原子がイオンと電子に分かれて運動している状態です。イオンと電子は正負逆の電荷を持ち、イオンの質量は、例えば水素プラズマの場合、電子の質量の約1800倍です。このため、イオンと電子の運動は時間的にも空間的にも大きく異なります。具体的には、磁場中にプラズマが存在する場合、イオンは電子に対して、時間的には約1800倍ゆっくりと、空間的には約40倍大きく運動します。このようなイオンと電子が集団的に運動することでプラズマ中の電場などが揺らぎます。“揺らぎ”は、大小様々な時間・空間の構造を持っていて、プラズマを冷やしたり流れを作ったりします。揺らぎの特徴を理解することは、核融合研究などにおけるプラズマ物理の重要な課題となっています。

核融合発電の実現には、高温高密度のプラズマを磁場で閉じ込めて維持する必要がありますが、空間的に様々な大きさをもつ揺らぎによって、プラズマから熱が逃げるのが問題となっています。多様な揺らぎの中でも、プラズマが突然壊れてしまうような数メートル級の大きな揺らぎをマクロスケール揺らぎ、粒子や熱をプラズマの外に吐き出して閉じ込めを悪くしてしまうようなイオンの運動サイズ程度(数センチメートル)の小さな揺らぎをイオンスケール揺らぎ（又はミクロスケール揺らぎ）と呼んでいます。それぞれについ

て世界中で研究が進められてきましたが、近年のシミュレーション研究などを通じて、イオンの運動サイズよりもさらに小さい、電子の運動サイズ程度(数百マイクロメートル)の揺らぎが電子の熱の閉じ込めなどに重要であることが分かってきました。このような揺らぎは電子スケール揺らぎと呼ばれ、それに伴う諸現象を理解するためにも、電子スケール揺らぎの実験的な観測が求められています。しかし、一般にイオンスケール揺らぎの計測でさえ高い空間分解能を要するために困難とされており、それよりもさらに小さい電子スケール揺らぎの計測は、さらに難しい問題となっています。また、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のような高温(1億度)のプラズマでは、計測器が大規模になり、かつ高温による計測の制限が大きいなど、電子スケール揺らぎ観測は多くの課題を抱えていました。

## 研究成果

九州大学応用力学研究所にある基礎プラズマ装置 PANTA は直線型の小型装置です。核融合科学研究所のLHDと比べ、プラズマ体積は千分の1、プラズマの温度は1万分の1(1万度)など、プラズマパラメータはかけ離れています。ところが、プラズマの密度や磁場の値などの実験条件を調整することで、大型実験装置で観測される現象を再現することができます。このような小型の基礎実験装置は、少人数で実験できる、高温では利用が困難である高感度なセンサーによる計測が可能など、多くのメリットがあり、これまでにイオンスケール揺らぎの研究が多く行われてきました。(図1左)

核融合科学研究所の河内裕一特任助教、日本大学の佐々木真専任講師、九州大学の小菅佑輔准教授、京都大学の稲垣滋教授らの共同研究グループは、今回、PANTA を利用した電子スケール揺らぎの観測に挑戦しました。イオンや電子の運動の大きさ及びその集団運動により現れる揺らぎの大きさは、温度が高いほど、また、磁場が弱いほど大きくなります。そこで、本研究では、磁場を通常の実験より4分の1に弱くすることで、イオンや電子の運動の大きさ及び揺らぎ自体の大きさを4倍に拡大しました。さらに実験条件を調整し、イオンスケール揺らぎを抑制し、電子スケール揺らぎのみが発生可能な実験条件を作

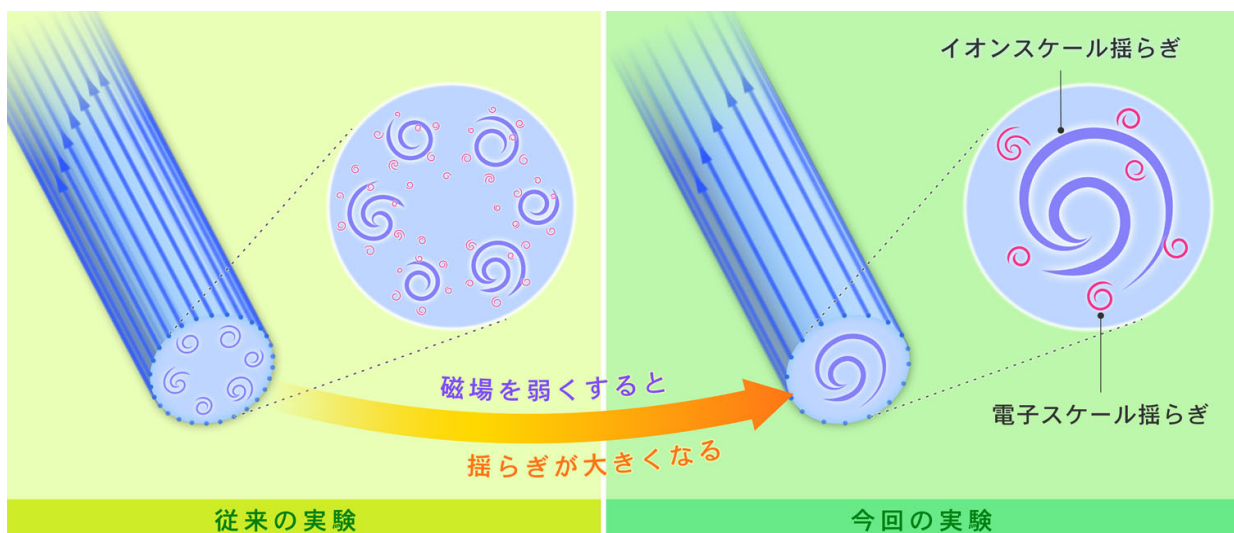


図1：本研究の模式図。基礎プラズマ装置 PANTA におけるプラズマとそこに存在する揺らぎを示している。従来の研究ではイオンスケール揺らぎの観測を行ってきた(左)。本研究では、従来の研究に比べて磁場を弱くしており、それに伴って揺らぎの大きさが拡大されている(右)。これにより、電子スケール揺らぎの観測が可能となった。

り出しました(図1右)。一般的に細かい構造を見るためには、高い空間分解能で計測するというアプローチを取りますが、(例えば、顕微鏡では細かい構造を見るためにレンズを使って空間分解能を上げて像を拡大表示します)、本研究の場合は、実験条件の制御により、細かい構造自体を観測できる大きさに拡大するというアプローチを取りました。PANTAには、たくさんのセンサーが密に並べられており、これらを用いることで高い空間分解能と高い感度で電子スケール揺らぎの観測に成功しました。

このように、小型の基礎実験装置を利用した新しい実験アイデアと高性能な計測器を組み合わせることで、電子スケール揺らぎの時空間構造を詳細に計測しました。その結果、電子スケール揺らぎが発生し、時速7000キロメートル(超音速ロケット飛行機と同程度)でプラズマ中を伝播し、やがて寿命を迎えて消滅していく様子までを観測することに成功しました。観測された電子スケール揺らぎは、これまで同装置で観測されてきたイオンスケール揺らぎよりも100倍程度空間的に小さく時間的に速い現象です。研究グループは、従来と比べて実質的に100倍程度の解像度での揺らぎの観測を実現したのです。

## 研究成果の意義と今後の展開

プラズマ中のイオンスケール揺らぎに関する研究は、これまでも多く行われてきましたが、より小さい電子スケール揺らぎの観測は、ほとんど行われてきませんでした。本研究では、新しい実験アイデアと高性能な計測器を組み合わせることで電子スケール揺らぎを観測し、その詳細を明らかにすることに成功しました。この成果は、将来の核融合炉でプラズマの熱や粒子が逃げるメカニズムの解明や、宇宙空間における多様なプラズマ現象の謎の解明などにつながることで期待されます。今後は、この研究を発展させ、観測された電子スケール揺らぎと熱や粒子の逃げ方との関連についての実験観測を行い、電子スケール揺らぎの物理解明に向けて先陣を切って研究を推進していきたいと考えています。

### 【用語解説】

※ 基礎プラズマ装置PANTA

九州大学応用力学研究所にある共同利用実験装置で、ヘルムホルツコイルによって均一な直線磁場を形成し、高周波によって円柱状の高密度( $10^{19}\text{m}^{-3}$ )・低温(1万度)プラズマを生成している。国内唯一、世界でも有数の、プラズマ中の揺らぎの基礎研究に特化した実験装置で、超多チャンネルのセンサーアレイや反射計、可視光トモグラフィなどの多様な揺らぎ計測器を数多く有している。PANTAはPlasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysisに由来する。

### 【論文情報】

雑誌名: Scientific Reports

題名: Spatiotemporal dynamics of high-wavenumber turbulence in a basic laboratory plasma

(基礎実験室プラズマにおける高波数乱流の時空間ダイナミクス)

著者名: 河内裕一<sup>1</sup>、佐々木真<sup>2</sup>、小菅佑輔<sup>3,4</sup>、寺坂健一郎<sup>5</sup>、西澤敬之<sup>3,4</sup>、山田琢磨<sup>6</sup>、  
糟谷直宏<sup>3,4</sup>、文賛鎬<sup>3,4</sup>、稲垣滋<sup>7</sup>

- 1 自然科学研究機構 核融合科学研究所、2 日本大学生産工学部、3 九州大学応用力学研究所
- 4 極限プラズマ研究連携センター、5 九州大学大学院総合理工学府、6 九州大学基幹教育院
- 7 京都大学エネルギー理工学研究所

DOI: [10.1038/s41598-022-23559-1](https://doi.org/10.1038/s41598-022-23559-1)

## 【研究サポート】

- (1) 本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。
- (2) 本研究は、文部科学省の科学研究費助成事業(21H01066、20J12625、17H06089、17K06994)、独立行政法人日本学術振興会の「研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)」“PLADyS”による支援を受けました。

## 【ご参考】

文部科学省「核融合研究」[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/fusion/](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/)  
核融合科学研究所ホームページ <https://www.nifs.ac.jp/>  
九州大学応用力学研究所ホームページ <https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/>  
PLADyS ホームページ <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/index.html>

## 【本件のお問い合わせ先】

### ● 研究内容について

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 ヘリカル研究部  
高温プラズマ物理研究系  
特任助教 河内裕一（かわち ゆういち）  
電話：0572-58-2234 E-mail: kawachi.yuichi@nifs.ac.jp

日本大学生産工学部電気電子工学科  
専任講師 佐々木 真（ささき まこと）  
電話：047-474-2374 E-mail: sasaki.makoto@nihon-u.ac.jp

九州大学応用力学研究所  
准教授 文賛鎬（むん ちゃんぽ）  
E-mail: moon@riam.kyushu-u.ac.jp  
准教授 小菅佑輔（こすが ゆうすけ）  
E-mail: kosuga@riam.kyushu-u.ac.jp

京都大学エネルギー理工学研究所  
教授 稲垣 滋（いながき しげる）  
電話：0774-38-3484 E-mail: s-inagaki@iae.kyoto-u.ac.jp

### ● 本件の広報について

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 ヘリカル研究部  
基礎物理シミュレーション研究系  
准教授 兼 対外協力部副部長 樋田美栄子（といだ みえこ）  
電話：0572-58-2377 E-mail: toida.mieko@nifs.ac.jp

日本大学生産工学部庶務課  
電話：047-474-2201 E-mail: cit.shomu@nihon-u.ac.jp

九州大学広報室  
TEL: 092-802-2130 FAX: 092-802-2139  
Mail: koho@jimukyushu-u.ac.jp

国立大学法人  
京都大学 総務部広報課 国際広報室  
電話: 075-753-5729 E-mail: comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

● 取材の申し込みについて

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  
電話: 0572-58-2019 E-mail: taigai-kakari@nifs.ac.jp

日本大学生産工学部庶務課  
電話: 047-474-2201 E-mail: cit.shomu@nihon-u.ac.jp

九州大学応用力学研究所  
准教授 文賛鎬(むん ちゃんほ)  
E-mail: moon@riam.kyushu-u.ac.jp  
准教授 小菅佑輔(こすが ゆうすけ)  
E-mail: kosuga@riam.kyushu-u.ac.jp

国立大学法人  
京都大学エネルギー理工学研究所 広報室  
電話: 0774-38-3402 E-mail: iae-koho@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp