

2022 年 9 月 30 日

核融合プラズマへの燃料供給ペレット周辺の極限状況下に現れる“揺らぎ”構造の発見 —核融合炉の持続的燃焼の制御向上への貢献に期待—

概要

夜空にきらめく星々、それらは核融合^{*1} エネルギーによって輝いています。エネルギー問題を恒久的に解決するため、太陽や星々が何十億年も輝き続けるエネルギー源を地上に実現する、核融合発電の研究が進展しています。そのためには、超高温の核融合プラズマ^{*2} を閉じ込め、核融合反応を維持する技術の確立が必須です。

京都大学エネルギー理工学研究所の大島慎介助教、門信一郎准教授、長崎百伸教授、同大学エネルギー科学研究科の鈴木琢土修士課程学生(研究当時)、的池遼太同博士課程学生(研究当時、現：量子科学技術研究開発機構)、核融合科学研究所の本島厳准教授らの共同研究グループは、磁場閉じ込め^{*3} 核融合プラズマへの燃料供給ペレット周辺に形成される“揺らぎ”^{*4} を発見しました。

核融合炉では、太陽の中心温度を超える1億度超の超高温プラズマ中心部に、燃料供給のための水素の氷(ペレット)を弾丸のように打ち込むことが必要とされます。今回の研究では、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置^{*5} で生成した1千万度を超える高温プラズマに、核融合科学研究所が開発した水素ペレット入射装置を用いて時速~900 km でペレットを打ち込み、プラズマ中でペレットが溶ける様子を10万分の1秒で撮影可能な高速カメラで観測しました。得られた画像の解析によって、ペレットが溶ける過程において“揺らぎ”が生まれ、三次元的に伝搬していることを解明しました。“揺らぎ”は、身近なところでは蛇口から流れ出る水の揺らぎ・立ち上る煙の揺らぎ・川や海の流れから、天体規模の現象であるオーロラ・太陽や木星表面に観測される揺らぎまで、自然界において普遍的に存在し、様々な機能を果たしています。超高温プラズマと水素の氷が共存する極限状況における“揺らぎ”の発見は、将来の核融合炉でのペレットによる燃料供給・持続的燃焼の実現においても、“揺らぎ”の発生機構・機能を解明・理解し、精緻(せいち)に制御することの重要性を初めて示しました。

本成果は、2022年8月20日に英国の国際学術誌「Scientific Reports」にオンライン掲載されました。

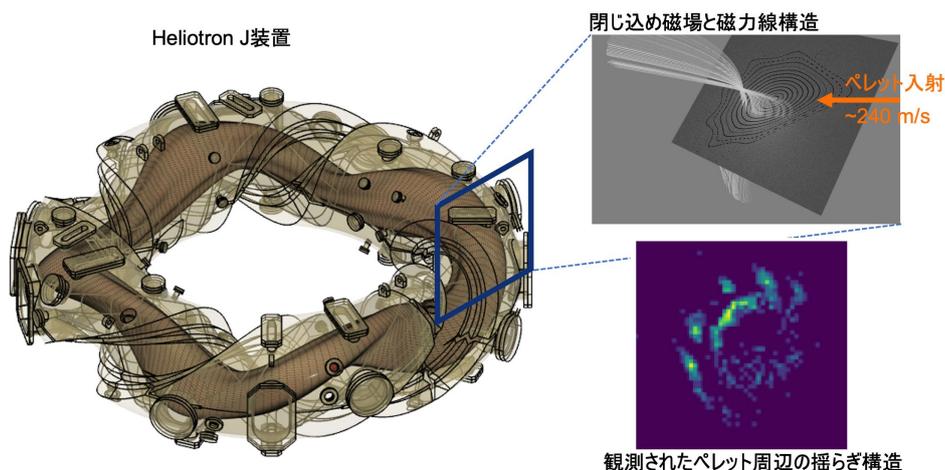


図 ヘリオトロンJ装置とその磁場構造、そして観測されたペレット周辺の“揺らぎ”構造

1. 背景

人類のエネルギー問題を永続的・最終的に解決しうる核融合発電を実現するため、磁場で閉じ込められた超高温プラズマによる制御熱核融合の研究が進展しています。様々な苦難を乗り越え、核融合反応に必要な1億度超の超高温プラズマは各国の大型実験装置で既に達成されています。現在、フランスにおいて、日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極の協力下で超大型国際プロジェクト「ITER（イーター）」の建設が進められており、数年後には核融合エネルギーの科学技術的成立性を実証する実験の開始が予定されています。また近年、各国で核融合ベンチャーが相次ぎ立ち上がっています。核融合エネルギーは、持続可能な開発目標「SDGs (Sustainable Development Goals)」の7番目の課題「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに (Goal 7: Affordable and Clean Energy)」の実現にも貢献する先進的な科学技術の一つです。

核融合プラズマの燃焼、つまり核融合反応を持続的に維持するためには、太陽の中心温度を遥かに超える1億度超で燃焼する超高温プラズマの中心部に、燃料である同位体水素^{*6}を継続的に供給することが必要です。しかしながら、そのような超高温でガスを燃料として用いると、プラズマ周辺部でプラズマ化して閉じ込め磁場に捉われ、結果としてプラズマの中心に燃料が到達することはできません。例えるなら、たき火の中心部に燃料を供給しようとしても、到達する前にたき火周辺で燃え尽きてしまう、というような状況です。

この問題を解決できるのがペレット入射という方法です。低温で冷却して固体となった水素の氷（ペレット）を、秒速数百メートルから数キロメートルという高速で、弾丸のようにプラズマに打ち込みます。高速で打ち込まれたペレットはプラズマ中で溶けきる前にプラズマ中心部に到達し、効率的な燃料供給を実現できます。

ペレットがプラズマへ溶けることを「溶発」と呼びます。プラズマ中心にペレットが到達できるよう、ペレットの速度とサイズを制御することで、溶発過程は精緻に制御されます。このペレット溶発過程では、1千万度から1億度にも達する超高温のプラズマと、ペレットが溶発して形成される弱電離^{*7}した水素の雲（プラズモイドと言います）、そして水素の氷そのものが共存しています。ペレットの周囲は1千万から1億度の温度差、そして500億倍もの密度差がある極限的な状況下であり、その溶発過程は未だ完全に理解されていません。将来の核融合炉の燃焼の維持には、このペレット溶発過程の詳細な理解が不可欠であり、実験・理論を両輪としてペレット溶発の物理研究が現在も進められています。

しかしながら、プラズマはm（メートル）程度の大きさであるのに対し、ペレットはmm（ミリメートル）程度の小さなサイズです。超高温のプラズマ中を弾丸のように駆け抜ける微小サイズのペレットがプラズマに溶ける過程を詳細に観測することは、現在の科学技術においても容易ではありません。様々な計測機器や計算シミュレーションを駆使しつつ、研究を進める必要があります。

2. 研究手法・成果

本研究は、高速な時間スケールの現象を撮像可能な特殊なカメラを用いて、ペレットが溶けてプラズマ化する溶発過程に生じる“揺らぎ”を発見しました。更に詳細なデータの解析、具体的には閉じ込め磁場の磁力線構造と、得られた揺らぎの画像との比較を行うことで、ペレット周辺に観測される揺らぎの構造、そしてその三次元的挙動を可視化することに成功しました。

実験は、京都大学エネルギー理工学研究所における核融合プラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において行われました。ペレット入射装置は、自然科学研究機構 核融合科学研究所によって開発された、ヘリオトロンJ専用の小型ペレット入射装置が用いられました。電子温度1千万度超のプラズマ中にペレットを入射し、その溶発過程を高速カメラによって観測しました。用いられた高速カメラは1秒間に10万フレームの画像を撮像することが可能です。1秒間あたりの撮影画面数は通常のビデオカメラで30フレーム、最近のスマートフォン

のスロー撮影でも 240 フレーム（8 倍速撮影）程度ですが、今回用いられた高速カメラは 3000 倍速以上の高速撮影が可能です。

プラズモイド周辺に揺らぎ（揺動）構造が存在していることが、高速カメラ画像のデータ解析によって可視化されました。揺らぎの大きさは背景密度の最大 15%と見積もられ、これはプラズマ中に存在するプラズマの勾配によって引き起こされる揺らぎ（乱流）の強度より大幅に大きいものです。つまり、ペレットにより誘発された、これまで認識されていなかった新しいタイプの揺らぎであると考えられます。

続いて、揺らぎの構造が背景の磁場（磁力線）に沿って広がるという性質を利用し、背景の磁場構造と比較することによって揺らぎの三次元的振る舞いの解明を試みました。通常、高速カメラの画像からは揺らぎの二次元的な挙動の情報しか得られませんが、ヘリオトロン J 装置の特徴である静的、かつ制御性の高い閉じ込め磁場の生成によってこのような解析が可能となりました。磁力線構造、高速カメラ視野の三次元モデル、カメラ画像上のペレットの揺らぎ形状・動きを比較・分析することで、揺らぎの三次元的な挙動を再構成することに成功しました。ペレットによって誘発された揺らぎは、磁力線に沿った方向にペレットからずれた空間位置に局在し、揺らぎは磁力線を横切って回転していることが分かりました。揺らぎはペレット周辺を回転しながら、ペレットとともに進行するという、複雑な三次元的振る舞いをしていることを意味しています。

揺らぎの発生機構についての検証はこれからの課題ですが、本論文ではペレット周辺に形成されたプラズマパラメータの強い勾配（非均一性。ここでは密度の濃淡のこと）によって不安定化された揺らぎである可能性を議論しています。ここで、重要なことは、一般に揺らぎは、勾配を緩和、つまり勾配をなだらかにするように振舞います。これは、ペレットをプラズマに入射すると、ペレット周辺に形成された揺らぎが、ペレット溶発の物理過程や最終的にペレットがプラズマに吸収される過程に影響を与える可能性を強く示唆しています。つまり、核融合炉へのペレットによる燃料供給過程そのものに影響する可能性がある、核融合炉の持続的燃焼、継続的な運転に直結する重要な知見です。

3. 波及効果、今後の予定

プラズマ中にも様々な揺らぎが存在し、それらがプラズマの粒子の振る舞いに影響を与えていることはこれまでもよく知られていました。しかしながら、超高温プラズマと水素の氷（ペレット）が相互作用し合う、極限的な状況下においても、揺らぎが存在しうることが本研究によって初めて明らかになりました。この揺らぎは、核融合プラズマにおけるペレット溶発過程において普遍的に存在し、溶発および燃料供給の過程に何らかの役割を果たしていることが示唆されます。この成果は、これまでのペレット溶発過程とペレットのプラズマへの吸収過程の理解において見逃されていた重要なピースである可能性があり、将来の核融合炉における燃焼プラズマの維持においても重要な知見です。

今後、異なる実験装置でのペレット実験の実施や、プラズマの加熱条件を変えたペレット実験を幅広く実施し、ペレット溶発物理の詳細を明らかにしていきたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は自然科学研究機構・核融合科学研究所と京都大学との双方向型共同研究（NIFS10KUHL030, NIFS18KUHL084, NIFS18KUHL086, NIFS17KLPR039）、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”、JSPS 科研費（課題番号 20K03901, 19H01875, 19K03802）の支援を受けました。また、実験をサポートいただいた全てのスタッフ・学生の皆様に感謝いたします。

<用語解説>

※1 **核融合・核融合炉**：何十億年にもわたって太陽や星々が輝くエネルギーは、核融合反応によるものです。水素のように軽い原子核同士の融合時に発生するエネルギーによって、太陽や星々は燃えています。

また、恒星の内部や超新星爆発の過程で核融合反応が起こり、地球上に存在する様々な元素が生成されました。我々の身体を構成する元素も、かつて恒星の中で核融合によって燃え、生まれてきたのです。

核融合炉は、「星のエネルギー」である核融合反応を地上に実現し、エネルギーを取り出す科学技術です。その利点としては、・温暖化ガスである二酸化炭素の排出がない。・核融合反応の維持自体が困難であるため原理的に核分裂炉のような暴走が生じない。・海水中に豊富に存在する重水素を利用できる。・石油のような地域的偏在性がない。・高レベル放射性廃棄物が生じない、等が挙げられ、理想的な未来のクリーンエネルギーと考えられています。

古くは「バック・トゥ・ザ・フューチャー」や「ガンダム」、最近では「インターステラー」など、数々のSF作品に核融合炉は登場していましたが、もはやフィクションではない時代となってきています。

※2 **核融合プラズマ**：核融合反応を実現するためには、太陽の中心温度を超える1億度超の超高温プラズマを生成し、持続的に閉じ込める必要があります。これら核融合を実現するために必要な超高温プラズマを、核融合プラズマと呼んでいます。日本においては、日本原子力研究開発機構(現:量子科学技術研究開発機構)のJT-60U、核融合科学研究所のLHDなどの大型装置において、既に1億度超の核融合プラズマは実現されています。ヘリオトロンJ装置は中型の装置なので、プラズマの温度は1千万度から3千万度程です。核融合プラズマの基礎物理の理解を目指して研究が進展しています。

※3 **磁場閉じ込め**：核融合の方式としては、磁場閉じ込め方式、レーザー方式などがあります。磁場閉じ込め方式では、ドーナツ形状の強い磁場のかごによって高温のプラズマを構成する荷電粒子（イオンと電子）を閉じ込めます。荷電粒子（イオン・電子）は中学校の理科で習ったローレンツ力に従い、磁場に巻き付くように動きます。磁場閉じ込め核融合の、最も基本となる原理は中学校理科で十分理解できます。

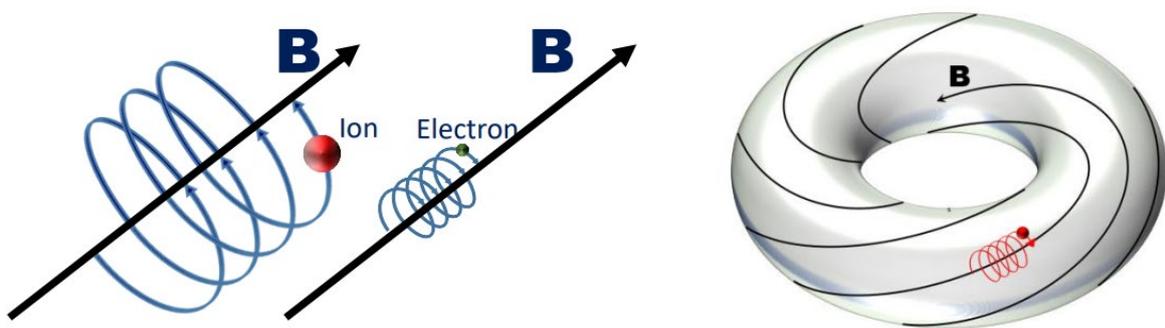


図1. 磁場閉じ込め核融合の原理。ローレンツ力によって磁場に巻き付くように動く荷電粒子（イオン・電子）の性質を利用し、ドーナツ状の磁場を形成することによってプラズマを閉じ込める。

磁場閉じ込め方式としては、トカマク型、ヘリカル型などがあります。磁場で閉じ込める基本原理は同一ですが、磁場を生成するコイルの形状や磁場の構造が異なります。京都大学のヘリオトロンJ装置はヘリカル型です。各国にある装置は、以下リンクから調べることができます。

<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>

※4 揺らぎ：学術分野では、「揺動（ようどう）」と呼ばれます。

自然界には、様々な揺らぎが存在しています。身近なところでは、勢いよく蛇口から流れ出る水の揺らぎ・立ち上る煙の揺らぎ・川や海の流れ・雲や嵐などの気象現象から、自動車や飛行機の周囲の空気の流れ、そして天体規模の現象である地球のジェット気流やオーロラ・太陽や木星表面に観測されるパターンに至るまで、我々の世界は揺らぎに満ちており、現在も研究の対象となっています。

プラズマ中においても多様な揺動が存在します。例えば、“電磁流体力学的不安定性”と呼ばれる揺動は、空間スケールが大きく激しい揺動を伴います。プラズマの崩壊を招く危険性もあり、発生を避けるべくプラズマは慎重に制御されています。また、プラズマ中に不可避に存在する揺動として、小さく不規則な揺動である“乱流”も重要です。プラズマの崩壊を招くことはありませんが、本文中で触れたようにプラズマ温度・密度などの勾配（高低差や濃淡）を緩和させる（なだらかにする）ように働きます。つまり、高温のプラズマがあればより低温にするように働くため、核融合の実現にとっては厄介な問題です。

揺動は、温度差・密度差・流速差などがあればどこにでも発生し、また様々な大きさの揺動がお互いに相互作用しながら、複雑な振る舞いをしています。蝶の羽ばたきが竜巻を引き起こすかもしれない、という「バタフライ効果」のたとえ話が良く知られているように、現在の科学では小さな揺動が最終的にどのような影響を及ぼすか、予測することは困難なのです。このため、気象や宇宙、そして核融合などの多くの分野において、実験による観測や、スーパーコンピュータによるシミュレーションなどを駆使して揺動研究は進められています。核融合プラズマの揺動（揺らぎ）の研究は、自然界の理解ともつながっているのです。

※5 ヘリオトロンJ装置：ヘリオトロン磁場は1958年京都大学の宇尾光治博士によって創案され、その歴史が始まりました。ヘリオトロンA、ヘリオトロンB、ヘリオトロンC、ヘリオトロンD、ヘリオトロンDM、ヘリオトロンDR、ヘリオトロンEと、次々と装置が開発されました。ヘリオトロンE装置が優れた性能を示したことから、核融合科学研究所において、更に大型の超伝導ヘリカル装置であるLHDが開発されました。LHDでは1億度超のプラズマが最近達成されています。その一方、京都大学では従来のヘリオトロン磁場を発展させ、新たに「配位最適化」といわれる概念を取り入れた先進ヘリカル装置ヘリオトロンJが開発されました。閉じ込め磁場の最適化に関する、大学ならではの独自の物理研究が進展しています。

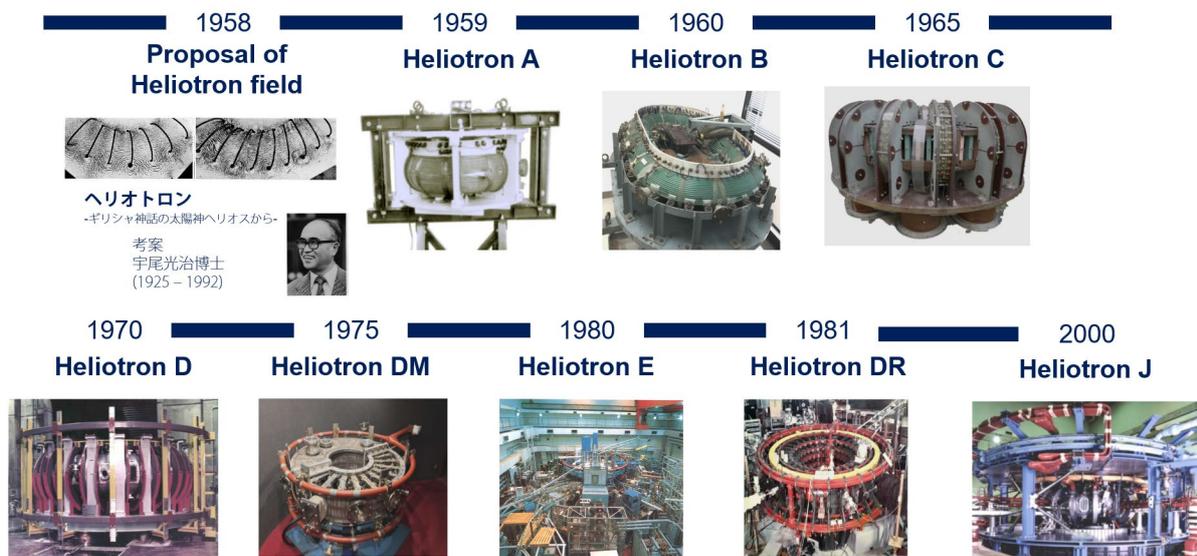


図2. 京都大学におけるヘリオトロン研究の歴史。核融合プラズマの物理の理解・周辺技術の発展とともに、現在ではヘリオトロンJ装置程度の中型装置でも数千万度のプラズマを生成・閉じ込めることは容易となった。

※6 **同位体水素**：水素の同位体である重水素や三重水素のこと。核融合反応そのものは様々な元素で起こり得ますが、 現段階の核融合炉では水素の同位体である重水素や三重水素による核融合反応が利用されます。重水素は海水中に豊富に含まれ、三重水素は核融合炉で生成されます。

※7 **電離**：電離とは、原子や分子から電子が分かれて、イオン化することです。一般に気体が電離すると、プラズマとなります。電離したイオンや電子は、ローレンツ力によって磁場に閉じ込めることができます。ほぼすべての粒子が電離した状態を完全電離プラズマ、電離度が低いものを弱電離プラズマと呼びます。

<研究者のコメント>

京都大学エネルギー理工学研究所 大島慎介 助教：

核融合研究は装置・実験の規模が大きく、必然的に大きな予算、多くの人員、長い研究期間が必要です。このため、短期間で成果が求められ、予算や研究人員も先細りしつつある日本の大学等の学術機関では、端的に言って“コスパが悪い”と判断され、老朽化しつつある装置の維持すら厳しい状況に追い込まれつつあります。しかしながら、数年後に稼働を開始する ITER などの超大型プロジェクトと、本研究のような先進的、かつ柔軟な物理研究の実施が可能な小・中規模装置での基礎研究は、研究の両輪としてどちらも不可欠です。資源のない日本にこそ核融合研究は重要です。持続的な研究環境を実現するため、核融合研究をご理解・ご支援いただけたら幸いです。

京都大学大学院エネルギー科学研究科 鈴木琢土 修士課程学生（研究当時）：

本研究は「高速カメラで面白い現象が見えないか」という興味・関心から始まりました。解析手法を工夫し、実験装置のヘリオトロンJの特性を利用することで、十分な成果を得られることを示せたと思います。このような挑戦的な研究ができたのは、大島助教をはじめとしたヘリオトロングループの皆様と家族のサポートのおかげです。改めて感謝いたします。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Three-dimensional dynamics of fluctuations appearing during pellet ablation process around a pellet in a fusion plasma experiment（核融合プラズマ実験における、ペレット溶発過程に現れる揺動の三次元的ダイナミクス）

著者：大島慎介・鈴木琢土（共同第一著者）、的池遼太、本島巖、門信一郎、森敦樹、宮下颯、小林進二、南貴司、岩田晃拓、D. Qiu, C. Wang, M. Luo, P. Zhang、近藤恭斗、西野信博、水内亨、岡田浩之、木島滋、稲垣滋、長崎百伸

掲載誌：Scientific Reports DOI：10.1038/s41598-022-18239-z