

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究課題	期間：2021～2025 番号：21H04973
研究課題名	核融合プラズマの位相空間揺らぎをもたらす新しい輸送パラダイムの探求
研究代表者氏名（ローマ字）	居田 克巳（IDA Katsumi）
所属研究機関・部局・職	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号	00184599

研究の概要：

本研究課題では、速度空間歪みの揺らぎを計測する装置を開発して、超高温プラズマ発生装置に設置し、実空間の揺らぎ（乱流）と速度空間の揺らぎの両者を観測する。そして、揺らぎの研究を従来の「実空間」から「位相空間」へと拡張することで、非局所輸送やヒステリシスなどの謎を解きえる新しい輸送パラダイムを探求する。

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：位相空間揺らぎ、乱流輸送

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの研究は、核融合エネルギーの実現という目的をインセンティブに、1億度に至る高い中心温度と必要な密度を維持する手法と、輸送（勾配と流束との関係）の理解を重要課題として進められてきた。温度勾配と熱流束との関係は、熱流束の量が温度勾配に比例するという単純なものではなく、強い「非線形性」を持つことや、熱流束の量が局所的な温度勾配のみでは決まらない「非局所性」、あるいは「ヒステリシス」、「非周期振動」の存在などが指摘されている。波動のエネルギーが、波動と粒子のエネルギー交換により減衰する現象は、ランダウ減衰として古くからよく知られているが、乱流のエネルギーが異方性をもつ速度空間の歪みを通じてプラズマ流の駆動エネルギーへと変換される現象（帯状流や自発回転の発生）の発見は比較的近年である。この帯状流や自発回転がプラズマの輸送を左右していることも明らかになった。これらの発見はプラズマの「実空間の揺らぎ」と「速度空間の歪み」と「輸送」との複雑な相互作用の存在を示し、「速度空間の歪みの揺らぎ」が「輸送」を理解する上で重要であることを示唆している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プラズマの速度空間歪みの揺らぎを観測し、揺らぎの研究を「実空間」から「位相空間」へと拡張することで、輸送物理を問い直そうとするものである。現在の研究はもっぱら「実空間」の揺らぎで、その計測の困難さ故に「位相空間」にまで拡張した研究は世界的に見てもこれまでない。この点において高い独自性が認められる。「位相空間」への拡張は、衝突によるマクスウェル分布への緩和が減り、非マクスウェル成分の割合が多くなる核燃焼プラズマにおいて極めて重要となる。「位相空間揺らぎ」の理解が、輸送のパラダイムシフトをもたらすことが期待され、その理解は非線形性に満ちた核融合プラズマの予測精度向上につながる創造性を有する。また、マクスウェル分布から外れる地球磁気圏や太陽フレアのプラズマでも位相空間における揺らぎの重要性が指摘されており、本研究の波及効果も見込まれる。ひいては非平衡開放系における対称性／非対称性（キュリーの原理）や集団現象の統計力学などのマクロな体系に新しい視座を提示することが期待される。

3. 研究の方法

1) イオンと電子の速度空間歪みの揺らぎを検出する計測システムを開発する。2) 低衝突周波数の高温プラズマを生成できる装置で実験・観測を行う。3) 理論・シミュレーションからのアプローチをこれらの実験と相補させる。1-A) 高速荷電交換分光システムによる速度空間のマクスウェル分布からの歪みの計測には、イオン衝突時間周波数を十分超えた高速計測が必須である。分光器のF値、口径、検出器の高速化の改良を行い、時間分解を従来の数百Hzから数十kHz（20kHz～64kHz）に向上させる。1-B) 広周波数バンド電子サイクロトロン放射強度測定システムを使って電子の速度分布関数を計測するには、磁場強度の変化が小さい視線を選んで、磁場強度変化による放射の周波数の広がりをも最小にし、非マクスウェル成分による周波数の広がりも広周波数バンドの電子サイクロトロン放射強度測定システムで計測する。

4. これまでの成果

・イオンの速度空間歪みの計測

本研究では、イオンの速度空間分布は荷電交換分光法にて計測する計画である。マクスウェル分布からの歪みを検出するためには、イオン・イオン衝突周波数をはるかに超える計測周波数を持つ必要がある。採択前に開発していた炭素不純物イオンに加えて、採択後にバルクプラズマイオンに対しても荷電交換分光システムの高速度化を行った。これにより炭素不純物イオンとバルクプラズマイオンの速度分布関数の両方が高速かつ高精度で観測できるようになった。大型ヘリカル装置（LHD）の高温プラズマにて磁気流体力学(MHD)バーストに伴うマクスウェル分布

からの歪みの検出可能性を検証した。プラズマに入射した高エネルギー粒子（重水素）の歳差運動によって励起されたMHDバーストの電磁波はランダウ減衰・通過時間減衰で、炭素不純物イオンとバルクプラズマ（重水素）イオンを加速し、マックスウェル分布からの歪みを引き起こしている事実が観測された。図1は、電磁波が発生する直前、直後の不純物炭素イオンとバルクプラズマ（重水素）イオンの速度分布関数の変化であるが、共鳴位相速度( $V_{res}$ )より速い粒子の個数が増え、遅い粒子の個数が増える現象が、炭素不純物イオンとバルクプラズマ（重水素）イオンで観測された。このマックスウェル分布からの歪みに伴い、炭素不純物イオンは20%のエネルギー増加を、バルクプラズマイオンは6%のエネルギー増加が観測された。電磁波からイオンに移送されたエネルギーに質量依存性が観測された。この無衝突エネルギー移送の質量依存性は、当初の研究計画において予見していなかった実験結果で、高い学術的価値があり、磁気圏プラズマの無衝突エネルギー移送に新たな知見を与えるものである。

## 5. 今後の計画

### ・イオンの速度分布関数の歪み計測

令和5年度：JT-60SAの高速荷電交換分光システムの光学系および光ファイバーバンドルを製作する。観測ポート本体室のジャンクションボックスを製作する。不純物である炭素の速度分布関数とバルクプラズマである水素・重水素の速度分布関数を同時に計測するために、炭素用の分光器に加えて水素用の分光器を製作する。

令和6、7年度：製作した光ファイバーバンドルと分光器をJT-60SAに設置する。荷電交換分光計測を行うには、プローブビームとしてプラズマに中性粒子ビームを入射する必要がある。JT-60SAの中性粒子ビーム入射実験開始の時期は確定していないが、中性粒子ビームが入射できれば計測が開始できるように準備を整える。

令和6年4-6月と令和7年10-12月に行われるLHD実験にて、分光器に新しく製作した2種類の検出器（イメージインテンシファイヤー付きの高速カメラとの電子増幅付きのCCD検出器）を取り付けて、各々をテスト、各々の検出器の優劣を判断する。

## 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. T. Tokuzawa, Y. Goto, D. Kuwahara, M. Nishiura, and T. Shimizu, “New Q and V-band ECE radiometer for low magnetic field operation on LHD”, EPJ Web of Conferences 277, 03008 (2023) 査読有り.
2. K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, K. Nagaoka, K. Ogawa, T. Tokuzawa, H. Nuga & Y. Katoh, “Direct observation of mass-dependent collisionless energy transfer via Landau and transit-time damping”, Communication Physics vol.5 228 (2022) 査読有り.
3. T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida, “3D Metal Powder Additive Manufacturing Phased Array Antenna for Multichannel Doppler Reflectometer”, Review of Scientific Instruments, vol.93, 113535 (2022) 査読有り.
4. T. Nasu, T. Tokuzawa, T. I. Tsujimura, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, K. Tanaka, M. Emoto, S. Inagaki, A. Ejiri, and J. Kohagura, “Receiver circuit improvement of dual frequency-comb ka-band Doppler backscattering system in the large helical device (LHD)”, Review of Scientific Instruments vol.93, 113518 (2022) 査読有り.
5. T. Tokuzawa, S. Inagaki, M. Inomoto, A. Ejiri, T. Nasu, T. I. Tsujimura, and K. Ida “Application of Dual Frequency Comb Method as an Approach to Improve the Performance of Multi-Frequency Simultaneous Radiation Doppler Radar for High Temperature Plasma Diagnostics” Applied Sciences, vol.12 4744 (2022) 査読有り.
6. F.J. Arellanno, M. Yoshinuma, K. Ida\*, “Charge exchange spectroscopy using spatial heterodyne spectrometer in the large helical device”, Review of Scientific Instruments vol.93, 033503 (2022) 査読有り.
7. Y. Goto, T. Tokuzawa, D. Kuwahara, K. Ichinose, H. Tsuchiya, M. Nishiura, T. Shimizu, S. Kubo, I. Yamada, “Development of the Q-band ECE Imaging system in the large helical device”, Journal of Instrumentation vol.17 C01016 (2022) 査読有り.
8. K. Ida, “Non-local transport nature revealed by the research in transient phenomena of toroidal plasma”, Review of Modern Plasma Physics vol.6 2 (2022) 査読有り.

## 7. ホームページ等

科研費 特別推進研究 2021-2026 (21H04973)

<https://tokusui.nifs.ac.jp>