

統合観測システムで解き明かす乱流プラズマの構造形成原理と機能発現機構

Plasma Turbulence Observation System (PLATOS) for puzzling out the principles
of structural formation and functional expression in turbulent plasmas

課題番号：17H06089

藤澤 彰英 (FUJISAWA AKIHIDE)

九州大学・応用力学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

至る所に見られる乱流プラズマの構造形成や機能発現原理を探求するため統合観測装置 PLATO を製作し、プラズマ乱流場の大域性および対称性の破れを捉えることで、長年の磁場閉じ込め核融合研究で得られた宇宙天体プラズマにも共通する普遍的な謎に挑む。今 PLATO 製作は完了し将に実験開始目前である。プラズマ乱流場の実像を世界で初めて明らかにする。

研究分野：物理学

キーワード：プラズマ、乱流、トモグラフィー、大域性、乱流偏在

1. 研究開始当初の背景

プラズマは自然界や実験室至る所に存在する。そのプラズマの構造やダイナミクスを決定しているのが乱流である。特に、核融合研究分野では乱流は磁場閉じ込めプラズマの性能を決めるものとして半世紀以上にわたって国際的に研究されてきた。その努力の末、プラズマ乱流の新しい見方が生まれている。乱流プラズマ中では「生成消滅する様々なスケールの揺らぎが結合しプラズマの特性を決める」という見方である。局所的な描像から大域的な描像へと転換された新パラダイムに基づく研究が期待されている[1]。

2. 研究の目的

本課題の目的は、新パラダイムに沿って研究するために、プラズマ乱流場に生起する揺らぎや構造を捉えることのできる、高時空間分解能をもつ大域精密計測を世界に先駆けて実現することである。乱流場の「大域性」と「対称性の破れ」を観測し、乱流プラズマの構造形成と機能発現の原理に迫ることを目的とする。理論・シミュレーションとも協働し、核融合分野で得られた経験則（アイソトープ効果、磁場形状依存性、パワーデグラデーションなど）や非局所輸送などの未解決問題をを探索する

3. 研究の方法

これまでのトーラス型磁場閉じ込め装置では高温高压のプラズマの生成に主眼が置かれ、乱流場の観測は数点に留まっていた。そ

れに対し、本研究では、プラズマ乱流の物理研究に特化した新装置 PLATO (PLASMA Turbulence Observatory: プラズマ乱流統合観測システム) を製作する。PLATO ではプラズマの発光を利用したトモグラフィーを用いて大域計測を実現する。PLATO では、乱流トモグラフィーに加え、局所的な精密計測に優れた重イオンビームプローブ (HIBP) などの無摂動計測装置を相補的に使い、統合的に先進観測法を用いて乱流研究を進める。

4. これまでの成果

PLATO の装置本体 (プラズマ生成部) は令和元年12月組立が終了し、令和2年1月にはコイルと電源の結線が完了した(図参照)。近々実験開始予定である。プラズマ生成部の特徴の一つとして一次電源として「誘導機型フライホイール自励式発電機」[2]を開発し低コスト化とメンテナンスの簡素化に努めている。他分野にも役立つ方式である。

PLATO 観測の主役であるトモグラフィーのため様々な光学部品を開発した。FPGA を活用し光アンプとディジタイザーが一体となった光信号の記録装置オプティカルロガーは1チャンネルのコストが極めて安価である。また、HIBP では通常局所数点の観測が可能であるが2つの局所領域(3点)を大域的に観測できる。HIBP の新しい可能性として提案されていた密度分布計測法が実証され PLATO で

の有力な密度分布計測法である[3]。

また、直線プラズマ装置 PANTA (現有) を支援研究として活用している。PANTA では準3次元トモグラフィーが完成し[4]、このデータを用いPLATO実験に備えて新しい画像解析法を開発している。Fourier-Bessel 展開法における基底の最適化法[5]、Stokes parameters を用いたプラズマダイナミクスの解析法[6]、また、Fourier-Rectangular 級数展開法[7]などである。また、PANTA で発見された Streamer の物理が深化している[8,9]。理論シミュレーションをはじめとする連携研究では、広く乱流プラズマに関連した成果が多数上がっている[10]。また、PLATO での物理課題が理論的見地から纏められている[11]。PLATO 実験を見据えたプラズマのシミュレーションも開始されている。



図 PLATO 組立直後の写真

5. 今後の計画

プラズマ乱流統合観測装置 PLATO の製作が完了した。プラズマ乱流場の大域精密観測実現は目前である。半年程度は観測対象に足る乱流プラズマの生成に集中し、観測の主役であるトモグラフィーを Ha, UV 最後に X 線の順に立上げる。そして、世界初の乱流場の観測を元に、まずは物理課題としてアイソトープ効果と乱流場のプラズマ形状依存性について探求する。本課題の実施に関連した成果について、レビュー論文および単行本 (物理学最前線 プラズマ乱流場の構造形成とダイナミクス (仮題)) を出版する計画である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Past and present experiments toward PLA

TO project, A. Fujisawa, AIP Conference Proceedings **1993**, 20011 (2018)

2. Design and Implementation of DC Pulsed Power Supply Employing Self-excited Induction Generators and Flywheels for Toroidal Field Coils of a tokamak device, PLATO, M. Murayama, S. Kato, A. Fujisawa et al., IEE E Trans. Appl. Supercond. in press.
3. Density profile measurement with a heavy ion beam probe in a toroidal plasma of the compact helical system, A. Shimizu, A. Fujisawa, S. Ohshima et al., Review of Scientific Instruments **89**, 113507 (2018).
4. Tomography system for two-dimensional observation of fluctuation in magnetized plasma, K. Yamasaki, A. Fujisawa, Y. Nagashima et al., Rev. Sci. Instrum. in press.
5. A proposal of Fourier-Bessel expansion with optimized ensembles of bases to analyze two dimensional image, K. Yamasaki, K., A. Fujisawa et al., Rev. Sci. Instrum., **88** 93507 (2017).
6. Combined methods of moment vectors and Stokes parameters to analyze tomographic image of plasma turbulence', A. Fujisawa, Y. Nagashima, K. Yamasaki et al., Physics of Plasmas **26**, 012305 (2019).
7. Fourier-rectangular function analysis for cylindrical plasma images, K. Yamasaki, A. Fujisawa et al., Journal of Applied Physics, **126**, 043304 (2019).
8. Observations of radially elongated particle flux induced by streamer in a linear magnetized plasma, F. Kin, A. Fujisawa, K. Itoh et al., Physics of Plasmas **26**, 042306 (2019).
9. Extraction of nonlinear waveform in turbulent plasma, F. Kin, K. Itoh, A. Fujisawa et al., Phys. Plasmas **25**, 62304 (2018). (Editor's pick-up)
10. Quantification of Turbulent Driving Forces for the Geodesic Acoustic Mode in the JFT-2M Tokamak, T. Kobayashi, M. Sasaki, T. Ido, A. Fujisawa et al., Phy. Rev. Lett. **120**, 45002 (2018).
11. Symmetry-Breaking of Turbulence Structure and Position Identification in Toroidal Plasmas, K. Itoh, S-I. Itoh, A. Fujisawa, Plasma and Fus. Res. **13**, 1102113 (2018).

7. ホームページ等

http://tokusui.riam.kyushu-u.ac.jp/PLATO_project/index.html