

## 乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究

### Integrated Research on Dynamic Response and Transport in Turbulent Plasmas

伊藤 早苗 (ITO SANAE)

九州大学・応用力学研究所・教授



#### 研究の概要

プラズマ乱流の新しいパラダイム（物理的描像）が確立しつつある。e-Scienceを導入し、理論・シミュレーション・実験を統合し、プラズマの乱流構造における「動的応答」へ研究を展開する。乱流プラズマの大域的・動的乱流輸送にかかわる法則の定式化を目指す。核融合炉心燃焼制御や自然界プラズマの大域的変動現象を理解させる最先端研究である。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ乱流

#### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ乱流は核融合炉心の高性能化や天体现象の理解に関わる重要課題である。近年、代表者や分担者が世界の研究を主導し、微視的揺動とメソスケール揺動が共存するという、プラズマ乱流の新しいパラダイムが確立した。プラズマの乱流構造の「動的応答」へと研究を展開し、物理的描像を普遍化し大域的乱流輸送の法則を探求する時代が到来している。特に、プラズマ乱流による動的輸送現象は、核燃焼炉心制御にも関わるチャレンジングな課題であり、自然界におけるプラズマの突発的かつ大域的変動に満ちた現象を理解する上でも不可欠な現代物理学の重要課題となっている。

#### 2. 研究の目的

微視的揺動とメソスケール揺動更には巨視的パラメタの界面等が生成消滅する、多スケールな「乱流プラズマ構造」の時空構造や動的応答・遷移の物理過程に取り組み、遠熱平衡乱流媒質に特有な、大域的・動的乱流輸送にかかわる法則の定式化を目指す。テーマに沿った目標を次のように構想する。

（理論）プラズマ乱流の統計理論を発展させ「揺動場から構造までの時空構造」という概念を定式化、大域的乱流理論を構成し動的応答理論へと発展させる。

（シミュレーション）輸送障壁の形成と突発

的消失などに生起する速い応答、大域的動的構造ダイナミクスに明確な描像を与える。

（実験）直線およびトーラスプラズマにおいて乱流の動的応答を観測する。直線装置では外部摂動力に対する動的応答を観測し揺動間の非線形過程を定量化し因果関係を明らかにする。トーラスでは長距離相関を持つ揺動を探索し動的輸送現象との関係を明らかにし、大域応答をもたらす機構を解明する。

#### 3. 研究の方法

e-Scienceにより理論・シミュレーション・実験の知の循環を促進、その統合によりプラズマ乱流の理解を進める。「数値直線プラズマ」「数値計測プラズマ」シミュレーションを駆使し実験の立案・解析を先導する。実験では直線装置をより物理実験に適した形に改良し外部摂動を加え動的応答を観測する。

#### 4. これまでの成果

理論、シミュレーション、実験の各分野において質の高い成果が得られている。理論では非拡散的輸送や非局所的輸送の物理やその確率的描像が提示されたこと、シミュレーションでは乱流シミュレーターが稼働しプラズマ乱流実験を先導したことが挙げられる。実験では超長距離相関を持つ揺動やその遷移現象が発見されたこと（いずれも世界初）、ドリフト波乱流での基本的非線形過程

が網羅的かつ定量的に観測されたこと、プラズマ乱流や乱流輸送の為に先進データ解析法の開発が進んだこと、などが挙げられる。

プラズマ物理の体系化、という視点からは granulation 等の乱雑項まで包含する位相空間統計的乱流の新描像の系統的提示、プラズマ乱流の非線形過程の定量的実験という新研究領域の明示化、等が挙げられる。

全体は3つの革新的成果として纏められる。e-Science の導入により理論、シミュレーション、実験の統合、知の循環の促進(研究方法の革新)、プラズマ乱流の新パラダイムの普遍化(研究描像の革新)、がある。以上の目標に沿った成果に加え当初計画にない新展開として、更に広い対象のプラズマを俯瞰する非平衡極限プラズマ研究の展開(研究領域の革新)がある。また、本計画完了後に計画していた世界の実験研究の指導が既実現し成果をあげたことを加筆する。

#### 5. 今後の計画

この研究プロジェクトの中心課題は、理論・シミュレーション・実験の研究を統合し、乱流プラズマの時空構造と動的輸送を総合的に解明することにある。この3年間で、e-Science 法を導入し理論及び実験学の体系化を加速し系統的に成果を発信した。平成24年度には、乱流輸送現象の描像をまとめ実験検証の組織的なアセスメントを進める。そしてプラズマ乱流構造形成の図書[S.-I. Itoh, K. Itoh, P. H. Diamond: *Multi-Scale Dynamics of Structure Formation in Confined Plasmas* (Cambridge Univ. Press)] 原稿を完成する。また2012年EPS/ICPPにて「プラズマ物理学の将来展望」というテーマで講演を行うなど、研究の普遍化を推進し「非平衡極限プラズマ研究領域」の世界的提示につとめる。国際会議 International Workshop on H-mode Physics を25年度に主催する等、最終年度までに統合成果を世界的に発信する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)(主要論文)

1. S. Inagaki et al., Observation of Long-Distance Radial Correlation in Toroidal Plasma Turbulence, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 115001
2. S.-I. Itoh, K. Itoh A mini-max principle for drift waves and mesoscale fluctuations Plasma Phys. Control. Fusion **53** 015008-1-8 (2011)
3. A. Fujisawa, A Review – Observation of Turbulence and Structure in

Magnetized Plasmas, Plasma and Fusion Res. Vol. **5**, (2010), 046-1-24

4. T. Yamada, et al., Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interaction in a Drift-Wave Streamer, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 225002-1-4.
5. N. Kasuya, et al., Selective Formation of Streamer in Magnetized Cylindrical Plasmas, Nucl. Fusion **50** (2010) 054003-1-8

#### (図書)

P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: Modern Plasma Physics (Cambridge University Press, England, 2010)

#### (受賞)

- プラズマ核融合学会奨励賞 (山田 Experimental Study of Drift Wave Turbulence on Linear Plasmas,平成21年度)
- 物理学会若手奨励賞 (糟谷 Two-Dimensional Structure and Particle Pinch in Tokamak H Mode 他2編 平成21年度)
- 井上學術賞(藤澤「磁場閉じ込めプラズマの乱流輸送の実験的研究と帯状流の発見」平成22年2月4日)
- 物理学会若手奨励賞(山田 Anatomy of plasma turbulence 他2編 平成22年度)
- 文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門) (居田、藤澤 平成22年4月13日)
- 第57回 仁科記念賞受賞(藤澤、居田、「高温プラズマにおける自発電磁場の実験的検証」平成23年12月6日)
- 第17回日本物理学会論文賞 (藤澤、伊藤(早)、伊藤(公)、永島、Causal Relationship between Zonal Flow and Turbulence in a Toroidal Plasma, 平成24年3月26日)
- 平成23年度吉川允二賞 (永島 「乱流による大域的な輸送現象とプラズマ流の形成過程との因果関係に関する研究」平成23年)
- 文部科学大臣若手科学者賞(永島 「プラズマ乱流非線形解析による帯状流駆動機構実測の研究」平成24年度4月予定)
- Plasma Conference 若手優秀発表賞(佐々木 「プラズマ境界近傍における測地線音波の非線形過程」平成23年11月25日)
- その他、研究に参加している大学院生が6件の奨励賞等を受けている。

ホームページ等

<http://tokusui.riam.kyushu-u.ac.jp/S/home.html>