

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料  
〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文）乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究

研究課題名（英文）Research on Structural Formation and Selection Rules  
in Turbulent Plasma

研究代表者

伊藤 早苗 (ITO SANAE-I.)

九州大学・応用力学研究所・教授



研究の概要：高温磁化不均一プラズマの乱流と構造形成の機構を、理論・シミュレーション・実験を統合して研究した。乱流と構造形成の非線形統計理論、大域的非線形シミュレーション、帯状流やストリーマー・帯状磁場などメゾスケール非線形構造の観測、揺動間の非線形相互作用の定量的に観測などにも成功し、プラズマ乱流物理学の新展開をもたらした。核融合研究や自然界のプラズマも含み、乱流プラズマの総合的理解に大きく寄与した。

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学(4501)

キーワード：プラズマ、乱流、構造形成、統計理論、構造相転移、非線形結合

#### 1. 研究開始当初の背景

高温磁化不均一プラズマは、核融合プラズマの燃焼実験を行う国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画が実施の運びとなり、プラズマ乱流輸送と構造の原理的理解が重要視されている。また、プラズマを用いた物質創成では揺動や構造を制御する重要性が着目されている。さらに、宇宙天体での観測の急速な発展から、プラズマの構造形成の理解が、宇宙や天体での物理過程の理解に不可避であることが分かってきた。高温磁化不均一プラズマの乱流と構造形成の機構解明が必須の課題と考えられるようになった。

#### 2. 研究の目的

高温磁化不均一プラズマについて、乱流と構造形成の機構を解明し自律的構造の遷移と選択則を得ることを目的とする。熱平衡状態からかけ離れた乱流媒質のなかで普遍的な問題に検証可能な形の定式化を提供することをめざす。

#### 3. 研究の方法

研究計画は、3つの柱からなる：(i) 遠非平衡プラズマの非線形・統計理論の体系化、(ii) 非線形シミュレーションによる素過程検証と輸送シミュレーションによる検証や普遍化、(iii) 直線磁化プラズマを用いた乱流実験及びCHS実験による構造形成や確率遷移の詳細研究。理論・実験・シミュレーション

を統合して法則化を目指した。国際諮問委員会を設け、国際諮問委員による評価を受けるなど自主的な評価にも力を注いだ。

#### 4. 研究の主な成果

この研究では、高温磁化不均一プラズマの乱流と構造形成の機構、自律的構造の遷移と選択則に関し、理論解析・シミュレーションおよび実験を統合することによって予想を大きく上回る成果を上げる事が出来た。

理論研究では、乱流と構造形成の非線形機構の解明（特に異なるスケールの帯状流を繰り込んだ乱流輸送理論）とともに乱流統計理論を大系化した。シミュレーションでは、乱流に関する大域的非線形シミュレーションを行い、大域的な構造形成過程やダイナミクスを解明した。実験では乱流場の直接観測、メゾスケール非線形構造（帯状流やストリーマー、帯状磁場）の観測に成功し、更に揺動間の非線形相互作用を定量的に観測する事にも成功した。これらの成果は世界の研究水準を大きく引き上げる結果であり、プラズマ乱流物理学の新展開をもたらした。理論解析・シミュレーションおよび実験を統合する研究手法を実現し成果を上げた事も、今後の研究可能性を開拓したという意味が大きい。

代表的な成果を具体的に説明する。

理論研究の主要テーマとして①プラズマ乱流構造形成の確率理論②多スケール乱流の非線形理論に大きな展開をもたらした。まず、プラズマ乱流統計理論として”dressed

#### 〔4. 研究の主な成果 (続き)〕

test mode”法と呼ぶ伊藤の方法を、非平衡統計力学における森の射影演算子法によって再構成した。構造相転移の選択則の基盤である。乱流構造の寿命という概念を提示し、ダイナミズム研究の基礎概念を提示した。

多スケール乱流について、乱流と乱流輸送の描像を一新する理論体系を作り上げた。典型的なものは帯状流やストリーマーである。(帯状流は、トーラス面の上では一定の値を持ち変動する径電場によるメゾスケールのプラズマ流であり、ストリーマーは波動がポロイダル方向に収束し半径方向に伸びる。)「帯状流(やストリーマー)を着た乱流」を重点課題として推進した。理論研究を進め帯状流に関する総合的研究論文がまとめられた。微視的乱流・メゾスケール揺動・巨視的分布が一体として形作る乱流構造を解明し、起こりうる乱流構造の選択則を総合的に提示した。乱流輸送の理論式も帯状流効果を繰り込んだものに改訂した。世界の研究を指導する成果が上がった。本分野の世界的研究の一頂点と言える。

シミュレーションでは、大域的乱流コードを開発し、微視的な乱流揺動が急速に成長することによって巨視的な MHD (磁気流体力学) 不安定性を早く成長させることを発見し、突発的 MHD 崩壊が起きる道筋の一つを提示した。また大域的な機構によって輸送障壁が作られることが示された。異なったスケールのダイナミクスが直接結合する非線形過程のレビューを刊行した。輸送コードシステム TASK は日本を代表して国際的にも高い評価を受け ITER の計画を先導しているが、その公開作業を進めた。更に、直線プラズマ実験の設計解析のための「数値直線プラズマ (numerical linear device: NLD)」を開発し、ストリーマーの発見を先導した。これらも世界最先端の成果である。

実験においても、トーラスプラズマにおいて、世界で初めて帯状流の実験的検証を得た。帯状流の存在の確認と構造の観測、帯状流による乱流輸送の抑制を CHS トーラス実験により世界で初めて実証することが出来、新しい乱流輸送の描像を確固としたものへ展開させた。高次相関解析 (bicoherence 解析) を乱流と帯状流の共存する系に適用し、初めて biphasic 解析を実施したことを含め、帯状流と乱流揺動の非線形結合の強度を定量的に実測することに世界で初めて成功した。理論的予測の検証のための比較研究にも成功した。乱流の中の揺動同士の結合度を定量的に研究しうることを実証した。

直線プラズマ実験装置では、プラズマ中の乱流構造のための多点高精度計測・解析実験システムを駆使し、乱流の非線形過程を研究した。揺動による帯状流生成の詳細研究を進

め、更にストリーマーを発見し、ドリフト波揺動との非線形結合の測定にも成功した。

また、メゾスケール・ダイナモ (帯状磁場) の発見に成功した。ダイナモ磁場の発生の物理のなかで、「熱対流乱流が平均磁場を作る」という基本的な過程を世界で初めて実験で観測した。

これらの数々の世界初の研究成果を通じ、微視的乱流・メゾスケール揺動・巨視的分布が一体として形作る乱流構造と選択則を実験的に検証した。プラズマ実験研究に新機軸をもたらし、「乱流プラズマ実験学」を創始したものである。

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

「理論・シミュレーション・実験の統合」と言う本プロジェクトの手法は本プロジェクト内部に留まらず世界の研究者を巻き込んで発展しており、世界のプラズマ乱流物理学の研究動向を指導した。

乱流輸送抑制を理論・シミュレーション・実験により統合的に実証した本研究は、ITER 計画等核融合研究に対して大きなインパクトを持っている。プラズマ物理の体系化から発して、天体プラズマも含む乱流プラズマの総合的理解に大きく寄与した。

「線形不安定性、局所的輸送理論、決定論的予測」という従来のプラズマ物理の描像に対し、本研究によって「非線形機構による励起、非局所的な大域的理論、確率統計的描像」という新たな体系が確立され、乱流プラズマの描像が一新され、研究潮流が変わるほど世界的に大きなインパクトを持った成果を上げる事が出来た。

#### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

- [1] A. Fujisawa, A review of zonal flow experiments, Nucl. Fusion Vol. **49** (2009) 013001
- [2] T. Yamada, **S.-I. Itoh**, 10 名, Anatomy of plasma turbulence, Nature Phys. Vol. **4** (2008) 721-725
- [3] A. Fujisawa, K. Itoh, 17 名, Y. Nagashima, **S.-I. Itoh** and P. H. Diamond, Experimental Evidence of a Zonal Magnetic Field in a Toroidal Plasma, Phys. Rev. Lett. Vol. **98** (2007) 165001
- [4] **S.-I. Itoh**, K. Itoh and M. Yagi, Life time of plasma states near transition boundary, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. **74** No.3 (2005) 947-950
- [5] P. H. Diamond, **S.-I. Itoh**, 2 名, Zonal Flows in Plasma - A Review, Plasma Phys. Control. Fusion Vol. **47** No.3 (2005) R35-R161

ホームページ等

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