

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224014

研究課題名(和文)乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究

研究課題名(英文)Integrated Research on Dynamic Response and Transport in Turbulent Plasmas

研究代表者

伊藤 早苗 (Itoh, Sanae-I.)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：70127611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,100,000円、(間接経費) 50,130,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込めプラズマの乱流と構造の時空応答を研究し、大域的・動的輸送関係を探求した。熱流と温度勾配の関係が単純な拡散的关系ではなく、加熱入力履歴を反映したヒステリシスを伴うことを発見した。数十年来の描像を覆す画期的な成果である。物理機構解明のため、新たに速度空間の熱力学的な力を考案・導入し、乱流輸送理論の枠組みを拡張した。揺動塊の大域的移動の理論と実験を進展させた。プラズマサイズ程度の長波長揺動も発見した。基礎プラズマ実験装置PANTAを活用し、時空不均一で局在した非線形過程の観測や電場を通じた揺動制御に成功した。今後のプラズマ物理研究の中心テーマを提示した。

研究成果の概要(英文)：Turbulence and transport of magnetically-confined plasmas were investigated, by focusing upon the global and dynamical relation between gradient and flux. The hysteresis response in gradient-flux relation, which depends on the external heating power, was discovered. This is the outstanding achievement that renews the conventional picture of plasma transport. Physics basis for this new discovery was studied. The new thermodynamical force in phase space was studied, expanding the framework of conventional transport theory. Global motion of turbulence clump was investigated theoretically and experimentally. A large-scale fluctuation, the correlation length of which extends over the plasma column, was discovered. By use of basic experiment device PANTA, the nonlinear interaction, localized in space and time, was observed and the control of turbulence by external global electric field was demonstrated. These achievements show the central theme for future research.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ乱流 乱流輸送 多スケール乱流 動的時空応答 勾配と流束の関係 ドリフト波乱流 位相空間乱流

1. 研究開始当初の背景

高温磁化不均一プラズマについては、制御核融合を目指し世界的に集中的研究が行われている。近年の研究では、乱流輸送が微視的・局所的なドリフト波乱流のみによって定まるのではなく、帯状流などメソスケール・非局所的な揺動にも規定されるという理解の転換があった。また、プラズマ状態の変化が拡散的輸送機構による伝達よりずっと速く伝播する現象が理解されていない。これらから、輸送現象を拡散的過程として定式化している従来の静的なモデルを根本的に再検討する必要がある。プラズマ燃焼制御のためにはダイナミックな変動を制御する必要があり、そのために「動的」輸送現象の理解が希求されている。

2. 研究の目的

本研究では、高温磁化不均一プラズマを対象とし、乱流と時空構造の動的応答を解明する事を通じて、磁場閉じ込めプラズマの動的輸送現象を解明することを目的とする。理論・シミュレーション・実験研究を統合し検証を行う。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む。熱平衡状態からかけ離れた乱流媒質に特有な、大域的・動的乱流輸送にかかわる法則の定式化を目指す。

3. 研究の方法

二つの総合的推進を行う。一つは、乱流プラズマの多スケール構造（ドリフト波のような微視的揺動、帯状流などメソスケール揺動、等々）を統合研究する為、(1)多スケール乱流の統計理論、(2)大域的シミュレーション、(3)非線形結合実測と動的・外部駆動応答実験、の各々を展開し、統計型統合した研究を構成する。もう一つは、輸送現象を動的・大域的に捉えるために、(a)乱流の時空構造の動的応答の研究、および(b)磁場閉じ込めプラズマの動的・大域的輸送問題に取り組む。以上をまとめ、乱流プラズマの時空構造と輸送の問題を動的及び統計科学的に総合的解明をする事を目指す。

4. 研究成果

当初の目的を凌駕する成果を得た。今後のプラズマ物理研究の中心テーマを提示した。こうした成果を総合論文として取りまとめ発信した（一例を発表論文[9]に示す）。典型的なものを説明する。

(1) 動的・大域的輸送現象の研究

①動的輸送関係の実験的研究 高精度時間空間分解プラズマ温度計測実験に、本研究で開拓された畳込み積分法を適用し、動的・大域的輸送を実験的に観測し定式化した。熱流と温度勾配の関係が（従来の）単純な拡散的

関係ではなく、加熱入力履歴を反映したヒステリシスを伴うことを発見した[発表論文2]。(図1)数十年の描像は、「熱流はその位置の温度勾配等プラズマパラメタで一意に決定される」とする仮説である。この発見は、拡散仮説を覆す画期的な成果である。この発見により、従来謎とされていた、輸送係数にまつわる「静的な評価と変動伝播からの評価の乖離」(図1の点線と鎖線の乖離)の問題を解決している。

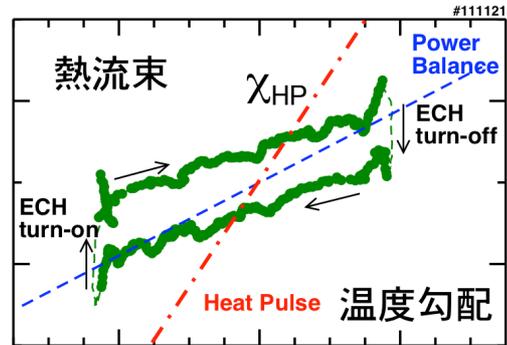


図1:LHDプラズマにおける温度勾配と半径方向熱流の関係(緑色の実線)。ヒステリシスが発見された。(発表論文2より引用。)従来の単純化された評価(点線や一点鎖線)と比較する。

②新たな速度空間の熱力学的な力 熱流と温度勾配の関係に現れたヒステリシスは、従来に理論の枠組みでは理解出来ない。その物理機構解明のため、速度空間の熱力学的な力(分布関数を変化させる割合)を新たに導入し、乱流輸送理論の枠組みを拡張した[発表論文6]。これにより、加熱入力(分布関数の変化を伴わずに)直接揺動強度や乱流輸送に影響しうる事を示した。

③揺動塊の大域的移動 熱流と温度勾配が拡散的関係から離れる理由として、いくつかの具体的物理機構が提案されている。その一つが、乱流塊がプラズマ内部を大域的に動く可能性である。乱流揺動塊のラグランジュ相関を調べ、大域的に伝播する結合長を求めた。JFT-2MとHL-2Aのトカマク実験においても、プラズマの自律振動を観測し[発表論文4,5]、揺動塊が大域的に伝播している事を発見した[発表論文4]。

④長距離相関揺動の発見 プラズマ半径全体に及ぶ相関長を持つ揺動が、乱流輸送の動的応答に影響する事はかねてから指摘されていた。Correlation-huntingと呼ぶ多数の大域的なシグナルの相関を探索する方法を考案しLHDプラズマに適用する事によって、プラズマサイズ程度の長い波長を持つ揺動も発見した[発表論文8]。この揺動は、非線形励起され、半径方向の流束に寄与する割合は、微視的な揺動全体に比べ小さいが、空間的に遠く離れた微視的揺動に非線形結合を通じて影響する事が実証された。局所的な拡散モデルが破れている事に寄与している。磁気アイランド等トポロジー変化の効果も観測し

た。[発表論文 7]

⑤局所的輸送モデルの破綻 電子エネルギーの輸送にとどまらず、運動量輸送の研究も進めた[発表論文 3]。そして、輸送現象全体を俯瞰し、従来からの局所的輸送モデルの破綻があることについて総合報告をまとめた。

(2) 基礎プラズマ実験装置 PANTA を活用した乱流素過程の解明

①動的輸送観測法 従来の長時間平均による輸送の評価法では、輸送現象が動的に変化する様子を観測する事が出来ない。そこで、フーリエ変換法にあわせウェーブレット変換法を適用し、輸送現象の動的変化を追跡する方法を開発した。この方法を LHD 装置に適用する事で、磁気面破壊の発生を伴うダイナミックな変化を観測する事に成功した。

②乱流揺動の統計 乱流輸送の値の分布はガウスの統計から外れる。それが、stretched Gaussian 分布に従う事を示す等、統計的性質の解明も進んでいる。

③時空不均一な局在した非線形結合の観測 ストリーマーを PANTA にて発見したが、揺動間の非線形結合も、時間空間的に局在し不均一である事を実験的に観測する事に成功した[発表論文 10]。ストリーマーやドリフト波鋸歯状波等の揺動は非線形結合の時空局在があることで実現している。非線形結合の時空局在がプラズマ乱流のダイナミクスを決定する重要な要素である例を示した。

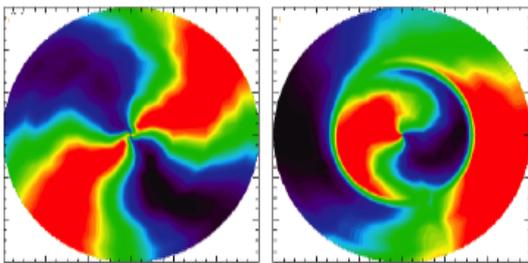


図 2 : PANTA 装置で発見されたストリーマー状態の非線形過程の研究。不安定ドリフト波(左)による非線形励起(右)が波の局在をもたらす。(発表論文 10 より引用。)

④電場を通じた揺動制御 本研究グループは、巨視的・メゾスケール電場によりマイクロ揺動が抑制されるという描像をかねてから先導して来た。本研究では、プラズマ終端部の電位を人為的にバイアスし、ドリフト波乱流揺動の変化を観測した。その結果、バイアス電位印可により揺動の時空相関長が変化する事を観測した。更に、電極への印可電位が閾値を超えると、プラズマ内部の空間電位構造や揺動場が遷移する事を発見した[発表論文 1]。

(3) 理論・シミュレーション・実験の統合研究法

本研究の成果は、理論・シミュレーション・実験を統合して研究する方法の成功によ

ってもたらされている。この方法を有効にするため、二つの研究インフラを構成した。一つは、「プラズマ乱流ドック」の概念と実現である。基礎プラズマ実験装置に極多数のプロブを取り付け、多数の空間位置でのデータを高時間分解で取得し、高速で大域的な相関(二次および高次)を解析する。プラズマの平均量の構造や流束、揺動間の非線形結合やエネルギー移送を大域的に求め、それらの間の関連・因果関係や法則を求める事を可能にする。これと並行し、大域的な非線形シミュレーション「数値直線プラズマ」、「乱流計測シミュレータ」を活用している。時空 4 次元データを総て取得し、時間発展や空間不均一な揺動の非線形結合を観測し、特徴的ダイナミクスや法則を発見する方法である。この方法は、実際に実験で検証する上での道標を与える。

(4) プラズマの非平衡性の定式化

以上の研究を通じ、プラズマの非平衡性の定式化を進めた。一つは、非平衡性の強さの定量化である。揺動強度や、巨視的不均一性と揺動の時間空間スケールの均整・混合の度合いによって、非平衡性の強さを示す。もう一つの視点は、統計性の定式化である。不均一なプラズマは、のっぺりした滑らかな不均一性のみならず、「平均量」(マイクロ揺動の時間空間スケールより長いスケールで平均)が時間空間で統計的に変動する実態を明らかにした。その状態を計測するため、マイクロ波コムを活用する新計測法も考案し、実験に適用する状態である。

以上の結果は、非平衡状態にあるプラズマの乱流の本質的な過程を描き出している。今後のプラズマ物理研究の中心テーマを提示した。

(5) 世界的な人材の育成

分担者達が仁科記念賞(平成 23 年度)、井上學術賞(平成 21 年度)、文部科学大臣表彰科学技術賞(平成 22 年度)、日本物理学会論文賞(平成 23 年度)、プラズマ核融合学会論文賞(平成 25 年度)等、多くの重要な賞を受け、連携研究者や研究協力者も多数の賞を受けている。また、本研究テーマに取り組む世界的な若手の育成を目的にして、ヨーロッパ物理学会におけるプラズマ乱流を主題とした優れた研究発表を対象に Itoh project prize in plasma turbulence を毎年授与している。国際キャリアパスとして機能している。

以上のように、本研究は人材育成にも大きな成果をあげている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 138 件)

1. T. Yamada, S. Inagaki, 11名, S.-I. Itoh, 1名 :

End plate biasing experiments in linear magnetized plasmas, Nucl. Fusion **54** (2014) in press (査読あり)

2. S. Inagaki, 2名, S.-I. Itoh, 他15名.: How is turbulence intensity determined by macroscopic variables in a toroidal plasma?, Nucl. Fusion **53** (2013) 113006 (査読あり)

3. K. Ida, 8名: "Reversal of Intrinsic Torque Associated with the Formation of an Internal Transport Barrier" Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 055001 (査読あり)

4. T. Kobayashi, K. Itoh, 2名, S.-I. Itoh, 6名: Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak, Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 035002 (査読あり)

5. J. Cheng, 1名, K. Itoh, 8名, S.-I. Itoh, 9名: Dynamics of Low-Intermediate-High Confinement Transitions in Toroidal Plasmas, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 265002 (査読あり)

6. S.-I. Itoh and K. Itoh: New Thermodynamical Force in Plasma Phase Space that Controls Turbulence and Turbulent Transport, Sci. Rep. **2** (2012) 860 (査読あり)

7. K. Ida, 3名: Reduction of Ion Thermal Diffusivity Inside a Magnetic Island in JT-60U Tokamak Plasma, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 065001 (査読あり)

8. S. Inagaki, 3名, S.-I. Itoh, 16名: Observation of Long-Distance Radial Correlation in Toroidal Plasma Turbulence, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 115001 (査読あり)

9. 伊藤早苗: 「乱流プラズマ —構造形成、選択則、動的応答と動的輸送—」, J. Plasma Fusion Res. **86** (2010) 334-370 (査読なし)

10. T. Yamada, S.-I. Itoh, 9名: Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interaction in a Drift-Wave Streamer, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 225002 (査読あり)

[学会発表] (計 350 件)

1. Y. Nagashima, "Investigation of Essential Nonlinear Processes in Plasma Turbulence" (招待講演), 第40回プラズマ物理に関するヨーロッパ物理学会(2013年7月4日、エスポー、フィンランド)

2. K. Ida: "Towards an Emerging Understanding of Nonlocal Transport", (オーバービュー講演) 第24回IAEA核融合エネルギー会議(2012年10月9日、サンディエゴ、米国)

3. S. Inagaki, "Fluctuation with Long Range Correlation and Coupling with Plasma Turbulence in Toroidal Plasma" (招待講演), 第39回プラズマ物理に関するヨーロッパ物理学会及び第16回国際プラズマ物理学会議(2012年7月5日、ストックホルム、スウェーデン)

4. K. Itoh: Frontier Physics of Extremely non-Equilibrium Plasmas, (プレナリ講演), プラズマコンフェレンス 2011 (2011年11月22日、金沢)

5. A. Fujisawa: "Experimental studies of mesoscale structure and its interactions with microscale waves in plasma turbulence", (プレナリ講演), 第38回プラズマ物理に関するヨーロッパ物理学会(2011年6月29日、ストラスブルグ、仏)

[図書] (計 1 件)

P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: Modern Plasma Physics, Vol.1 Physical Kinetics of Turbulent Plasmas, Cambridge University Press (Cambridge, UK, 2010) 417 pages

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 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
研究者番号: 70127611

(2) 研究分担者

居田 克巳 (IDA, Katsumi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 00184599

伊藤 公孝 (ITO, Kimitaka)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 50176327

稲垣 滋 (INAGAKI, Shigeru)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 60300729

糟谷 直宏 (KASUYA, Naohiro)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 20390635

小菅 佑輔 (KOSUGA, Yusuke)
九州大学・高等研究院・助教
研究者番号: 00700296

佐々木 真 (SASAKI, Makoto)
九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：70575919

永島 芳彦 (NAGASHIMA, Yoshihiko)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号：90390632

藤澤 彰英 (FUJISAWA, Akihide)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：60222262

矢木 雅敏 (YAGI, Masatoshi)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
那珂研究所・グループリーダー
研究者番号：70274537

レシユール マキシム (LESUR, Maxime)
九州大学・伊藤極限プラズマ研究連携セン
ター・助教
研究者番号：90644534

(3)連携研究者

福山 淳 (FUKUYAMA, Atsushi)
京都大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：60116499

山田 琢磨 (YAMADA, Takuma)
九州大学・基幹教育院・准教授
研究者番号：90437773