

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244113

研究課題名(和文)非平衡プラズマ物理学のための乱流計測シミュレータ研究

研究課題名(英文)Turbulence diagnostic simulator for physics of nonequilibrium plasmas

研究代表者

伊藤 公孝 (Itoh, Kimitaka)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50176327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、磁化不均一高温プラズマを対象に、乱流計測シミュレータ(大域的乱流シミュレーションの時間・空間4次元データ全体を蓄え、多元の乱流場を高次相関解析し、諸現象の因果関係を検定するシステム)を活用し研究を推進した。広域高次相関解析等の先進データ解析法を考案した。輸送障壁の形成機構の検証、勾配・流束関係に現れるヒステリシスの発見、位相空間に働く新しい乱流駆動力の提唱、スケール混合にもとづく空間構造や時間的突発性の発生の研究など、多くの成果をもたらした。非平衡プラズマの大域的非線形機構の理解に大きな進歩をもたらした。

研究成果の概要(英文)：In this work, the turbulence diagnostic simulator (in which simulation data in the 4 space-time dimensions are stored and higher order and global correlations among them are studied) was developed for high-temperature magnetized plasmas. New data analysis method (to investigate the global and higher-order correlation) was investigated.

Based on these bases, researches have been advanced on the subjects of, e.g., the identification of the mechanism that induces the transport barrier, the discovery of transport hysteresis, the proposal of a new thermodynamical force in the phase space to enhance the turbulence and turbulent transport, the new spatio-temporal dynamics which are caused by the scale-mixing in the nonequilibrium plasmas, etc. Thus, this research has brought about a substantial progress in the understanding of the nonlinear structure formation mechanism of nonequilibrium plasmas.

研究分野：プラズマ物理学、核融合科学

キーワード：プラズマ乱流 輸送現象 計測シミュレーター 長距離相関揺動 実験的検証法

1. 研究開始当初の背景

実験室や自然界のプラズマに関する知識が急増するにつれ、従来の「局所的・線形的」描像に基づいた研究の限界が明瞭になっている。例えばプラズマ物理の実験的・理論的進展と展望を論じる場でも、輸送の非線形関係や非局所関係が焦点としてレビューされた[K. Itoh: Nucl. Fusion **50** (2010) 154001]。旧来のモデルの限界が知られるとともに、物理的理解が急進展した。すなわち、(1)乱流揺動と構造が互いに支え合う「乱流構造」という描像が展開した[S.-I. Itoh: Plasma and Fusion Res. **4** (2009) 038]。異スケールの場合や離れた空間位置での揺動の結合が重視されている[P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (CUP, Cambridge, 2010)]。(2)特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(平成 16-20 年度)等、実験と理論・シミュレーションの統合研究が進んだ。その結果、乱流の非線形結合を実測し理論と定量的に比較する研究が実現した。乱流シミュレーションと直線プラズマ実験法を結びつける数値直線装置(Numerical Linear Device)が実現し、それがストリーマー発見を先導した[T. Yamada, et al.: Nature Phys. **4**, 721 (2008)]。同時に、e-Science (複雑なデータから法則を見いだす研究方法)が世界的に展開している。

こうした背景を踏まえ、乱流場の先進的な観測方法とデータ解析方法を考案することによって、熱平衡状態からかけ離れた「非平衡プラズマ」の新しい法則が見いだされるとの着想を得た。

2. 研究の目的

この研究においては、磁化不均一高温プラズマを対象に、理論モデル・乱流シミュレーションと実験研究を統合し、非平衡プラズマの大域的な非線形構造形成機構を研究する事を目的とする。トロイダル磁場閉じ込め装置を対象にした「乱流計測シミュレータ」を駆使し、メゾ・マクロプラズマ流を介在とした乱流の相互作用や揺動の非線形ノイズ効果等、最先端理論研究成果を数値観測し検定する。実験とのインタラクティブな研究を通じ、複雑な非線形現象を実際に観測する方法を提言するとともに、観測データが、実際に生起している現象を如何に反映するかを検定する。広域高次相関解析等の先進データ解析法を考案し、実験データ解析の方法を提示・提案する。理論的モデル形成、大域的ダイナミクスの帰納的発見、検証法提示と実験による実証、という総合的な乱流計測シミュレータ研究を実現する。これらを通じて、非平衡プラズマの大域的な非線形機構解明をめざす。

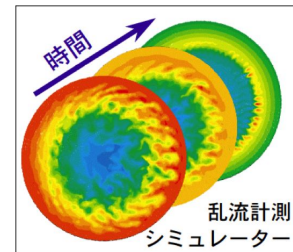
3. 研究の方法

研究方法は、次の3つの柱によって構成する。

(i)乱流計測シミュレータを増強・発展させ、

理論モデルを検証し、空間的に異なる位置の揺動に内在する因果関係を見出す。(ii)因果関係探索法を実験に提供し、先進解析法を活用し、基礎実験装置(PANTA)、大型ヘリカル装置 LHD や国内外のトカマクの乱流データを解析する。(iii)それらの統合を通じて法則の確立を目指す。

乱流計測シミュレータでは、大域的な非線形シミュレーションを行い、乱流場の時間空間4次元データをすべて蓄える。データの数値的観測



を行い、高次相関等の先進統計解析を行う。広域的なマスメータの大域的解析により因果関係を発見検証する方法論である。

この全体計画のもと、(a)理論的には、大域的な非平衡ダイナミクスの研究、(b)乱流計測シミュレータによる大域的因果関係の観測、(c)実空間の輸送界面や速度空間構造と乱流の相互作用の理論・シミュレーションによる研究、(d)実験検証の道筋は、実験検証の考案・先進データ解析法の開拓、乱流実験データを対象にした実験検証、から問題に取り組む。(e)揺動解析国際共同ワークショップを開催する。

このような多元的研究展開を実現し、研究方法論として乱流計測シミュレータを活用し、大域的な非平衡プラズマの物理に新しい進展をもたらす。以上によって非平衡プラズマの物理学の新展開の典型例を形作る。

4. 研究成果

(1) 研究基盤の構築

乱流計測シミュレータは、複雑かつ同時に生起する諸現象の間の因果関係を検定する、e-science の研究方法である。本研究で乱流計測シミュレータをトロイダルプラズマ・直線プラズマ双方に整備・増強した [N. Kasuya, et al.: Phys. Plasmas **21** (2014) 110701, M. Sasaki, et al.: Nucl. Fusion **54** (2014) 114009]。その結果、トロイダルプラズマの大域的応答や直線プラズマでの非線形過程の定量的同定等が可能になり、本研究計画の成果を生み出した。

(2) 先進データ解析法と実験検証

置込み積分手法と揺動のエンベロープ解析を組み合わせ、プラズマ乱流研究に体系的に適用した。それにより、動的輸送解析法や、乱流ダイナミクスの探査法、広域相関探査法等を実験解析に提供した[主な発表論文, S. Inagaki, et al., PFR **8** (2013) 1202172]。以下に示す多くの発見をもたらした。

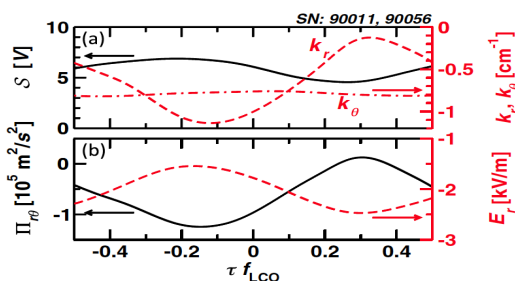
(3) 輸送界面

改善閉じ込めの研究は、研究代表者らが提

唱した径電場分岐モデルによって研究が行われている[主な発表論文]。定量的な検証を目指し、L-H mode 遷移の状況の近傍で発生する自律的な振動 Limit Cycle Oscillation (LCO)について、世界中で研究されている。この結果を総観してレビュー論文をまとめた[主な発表論文]。

径電場の駆動源

LCOでの振動電場の動力学を検討した。図に示すものは、 $D\alpha$ の周期変動を時間の参照基準としてそろえた時系列データ (2π の位相で表示)。マイクロ揺動振幅 S 、 θ 方向波数(波面モジュレーションに起因)、ポロイダル波数、Reynolds Stress Π 、径電場を示す。LCOに伴う変動 $\delta\Pi$ に起因する速度変化 δV を評価し $\delta V \sim 25$ [m/s]を得る。一方、実験で観測されたE/B速度の変動は ~ 400 m/sである。LCOに伴う変動 Π は、電場変動の1/10程度以下の寄与しか持たぬ事が結論された。帯状流を介在とする通説の機構は重要ではない事を世界で初めて実証した [J. Cheng, et al.: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 265002; T. Kobayashi, et al.: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 035002, 主な発表論文]。



電場曲率の重要性

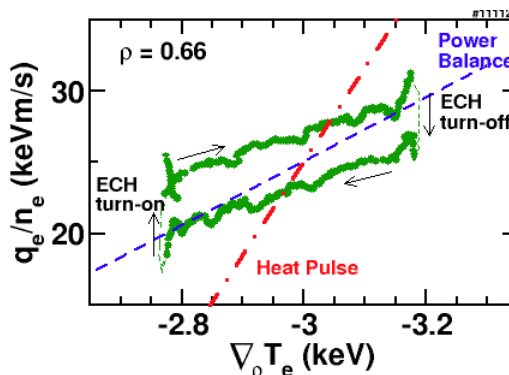
本研究では、輸送障壁形成の理論の定量化を進め、従来考えられている径電場のシアではなく曲率がより重要な働きをしていることを見出した[主な発表論文]。それに基づき、輸送障壁の厚みのスケーリング則を検討した。さらにJT-60Uプラズマの詳細な観測結果を対象に、先進データ解析を適用し、電場曲率の重要性や、上記のトロイダルリターン流についての検証を進めた[K. Kamiya, et al.: Phys. Plasmas **21**, 122517 (2014)]。

(4) 大域的輸送関係の研究

加熱入力を振動させ、プラズマ温度の時空動的応答を観測することで輸送係数を探査する研究は、数十年來の標準的な研究方法である。しかしながら、その方法で評価された拡散係数は定常状態のバランスから評価されたものと一致せず、謎とされていた。また、L-H遷移直後、プラズマ中央部の輸送改善が起き、その伝播速度が拡散伝播の数十倍の速さになりうる事が知られているが、謎に止まっている。

こうした根本的な謎を解明するため、本研究では畳み込み積分法を開発した。この畳み込み積分法は、時系列データから中心周波数成分のみを取り出す従来の方法とは異なり、高次高調波までとらえ応答を非線形伝播ダイ

ナミクスとして構成する。それは輸送関係式(勾配と熱流の関係)が一価関数ではない場合にも適用できる。この方法をLHDプラズマの周期的加熱実験に適用したところ、図に示すように、勾配と熱流 q_e の関係にヒステリシスがあることを発見した。従来から信じられてきた輸送関係モデルを革新する画期的な発見を導いた [S. Inagaki, et al.: Nucl. Fus. **53** (2013) 113006; K. Ida, et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 013022]。なお、この発見では、揺動強度の応答も同時解析したことが本質的である。今までも、ヒステリシスの可能性は指摘されていたが、「ヒステリシスではなく加熱入力分布の誤差かもしれない」という可能性を除外できなかった。揺動強度が同時にヒステリシスを持って変化していることが観測されたため、輸送ヒステリシスが確実なものと結論された。乱流計測シミュレータの有効性を実証した。



(5) 大域的な非線形過程:長距離非線形結合と乱流塊輸送

前項に示すような局所的な輸送モデルの破綻には様々な可能性がある。それらを今後解明していく上で、大域的な非線形過程の観測法を検討した。

プラズマ表面での分布の変化に伴い揺動塊が伝播する現象が予想され、畳み込み積分法に基づきそれを解析する方法を提示した。LHDプラズマでの観測に成功している[T. Tokuzawa, et al.: Phys. Plasmas **21** (2014) 055904]。JFT-2M トカマクプラズマでも、上記 Limit Cycle Oscillation に伴い、乱流揺動強度変動が内部へ 0.7 km/sec 程度の伝播速度で伝わる事が分かった。乱流シミュレーションの結果、強い勾配のパルスの後ろに揺動強度が強くなるペアの非線形構造が伝播する。そのような「熱波」伝播の従来の理論的予測と、今回の観測は合致している。

(6) 位相空間ダイナミクス

乱流計測シミュレータを活用して研究を進めた結果、従来の仮定を覆す多くの画期的進展を得た。そこで、モデルの枠を変え、実空間だけではなく、位相空間での応答を研究する必要が強まり、研究の展開を得た。一つの例は、マイクロ揺動が乱流応力を通じて帯状流のような巨視的な流れを作る場合、同時に

生まれている位相空間の渦を考えることにより、トロイダル流へと転換し得ることが理論的に示された[Y. Kosuga, et al.: Plasma Phys. Contr. Fusion **55** (2013) 125001]。

さらに重要な進展は、加熱による乱流の直接的な励起という仮説を提示したことである。勾配と熱流の関係にヒステリシスがあることが発見され、温度勾配などのプラズマパラメタがほとんど変化しないのに熱流が大きく変化するという発見は、従来の「勾配が駆動する乱流と乱流輸送」というパラダイムを根本から揺るがせる事実である。これを考察するため、位相空間に働く新しい熱力学的な力の重要性を指摘し[S.-I. Itoh, et al.: Sci. Rep. **2** 860 (2012)], 輸送ヒステリシスが導かれることを示した[Sanae-I. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **53** (2013) 073035]。今後の検証をまつ。

(7) 非平衡性とスケール混合

熱平衡状態からかけ離れた「非平衡プラズマ」の特徴はスケール混合にある。ミクロスケールの運動と、マクロスケールの構造が独立してそれぞれ決まるのではなく、スケール混合を起こし生成発展することが重要である。空間スケールの異なる現象が干渉するという観点からは、輸送障壁の形成、デコボコした分布の自律的生成など、新たな過程が示された。時間スケールの混合という観点からは、成長率の急変の問題を考察した。LHDで観測されたGAM振動の突然の励起を対象に、共存する2倍高調波との非線形結合による励起とする物理モデルを構成し説明した[T. Ido, et al.: Phys. Rev. Lett. **116**, 015002 (2016); M. Lesur, et al.: Phys. Rev. Lett. **116**, 015003 (2016)]。

以上のように、本研究を進めることで、複雑な非線形現象を実際に観測する方法を提言し、実験データ解析の方法を提案した、それを活用し多くの発見を先導した。熱平衡状態からかけ離れた「非平衡プラズマ」の新しい法則を探索し、位相空間への拡張・異なるスケールの混合、という観点から研究を進め、輸送障壁構成の動力学、新たな熱力学的な力の導出などの多くの成果を得た。

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 61 件)

K. Itoh, et al. [5名の筆頭]: On the study of higher harmonics of heat pulse propagation in the modulated-heating experiments, Journal of the Physical Society of Japan **85** (2016) 014501 (査読有り)
<http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.014501>

K. Itoh et al. [5名の筆頭]: Contribution of Geodesic Acoustic Modes in the Limit Cycle Oscillation near H-mode Transition in JFT-2M Plasmas, Plasma Phys. Contr. Fusion **57** (2015)

092001 (査読有り)

[doi:10.1088/0741-3335/57/9/092001](https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/9/092001)

K. Itoh, et al. [4名の筆頭]: On the spatial structure of solitary radial electric field at the plasma edge in toroidal confinement devices, Plasma Phys. Contr. Fusion **57** (2015) 075008 (査読有り)

[doi:10.1088/0741-3335/57/7/075008](https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/7/075008)

K. Itoh, et al. [3名の筆頭]: An assessment of limit cycle oscillation dynamics prior to L-H transition (review), Plasma Fusion Research (2013) Volume **8**, 1102168 (査読有り)
DOI: 10.1585/pfr.8.1102168

K. Itoh: et al. [3名の筆頭]: Dual Maxwell Construction and Transport Barrier of Helical Plasmas, J. Phys. Soc. **81** (2012) 124501(査読有り)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.124501>

K. Itoh, et al.: [12名の筆頭] On influences of long-range fluctuations on transport in Large Helical Device plasmas, Plasma Phys. Contr. Fusion **54** (2012), 095016 (査読有り)

[doi:10.1088/0741-3335/54/9/095016](https://doi.org/10.1088/0741-3335/54/9/095016)

[学会発表](代表者によるもの計 34 件)

K. Itoh: “Non-Equilibrium and Extreme State of Plasmas”, 25th International Toki Conference: ‘Creating Future’ (November 3, 2015, Japan) (invited)

K. Itoh: “Future Prospect of Plasma Physics” 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics and 16th International Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2-6 July 2012) (invited lecture)

K. Itoh: “Energy Science and Civilization”, at Germany-Japan Round Table – From the Early Universe to the Evolution of Life (December 2011, Heidelberg) (Invited lecture)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nifs.ac.jp/fts/itoh/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 公孝 (ITO KIMITAKA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授、フェロー

研究者番号: 50176327

(2) 研究分担者

登田 慎一郎 (TODA SHINICHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 60332186

村上 定義 (MURAKAMI SADAYOSHI)

京都大学・大学院工学研究科原子核工学専攻・准教授

研究者番号：40249967

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

(3)連携研究者

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

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