

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14282

研究課題名(和文) プラズマ乱流の位相空間における新しい駆動力

研究課題名(英文) A new driving force in phase space of plasma turbulence

研究代表者

伊藤 早苗 (Itoh, Sanae)

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プラズマ乱流の位相空間における新しい駆動力を考察し、それが勾配-輸送関係の輸送ヒステリシスに直結する事を示し、レビューをまとめた。この理論の応用として、従来謎とされて来たプラズマ閉じこめの水素同位体効果に関する新たなモデルを考案した。輸送ヒステリシスの高精度観測法を考案し世界の実験装置へ適用した。輸送ヒステリシス観測を博捜し国際協働成果を得た。コアプラズマの輸送関係と周辺輸送障壁と双方を考察し、この機構が核融合炉の制御系にも重要な意味を持つ事を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research programme, the new driving force of turbulence in phase space is studied, and the relation of this mechanism with the hysteresis in gradient-flux relation is analyzed. A review is published. This theory is extended to study the dependence on the mass number of hydrogen isotope. It is shown that the jump of transport hysteresis (at the on-off of heating power) can be smaller for heavier isotope. Experimental method to identify the transport hysteresis is also advanced. The results are applied to experimental devices in the world. Experimental evidences are established by international collaborations. The physics of transport hysteresis in the core plasma is combined with those at transport barriers. It is also shown that this mechanism can be important in the design of control system of fusion devices.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：動的応答 乱流 位相空間 加熱と乱流の直接結合

1. 研究開始当初の背景

(1)内外の動向と動機付け

磁化高温プラズマでは、従来、温度勾配と熱流の関係として $q = -\chi \text{grad } T$ (または輸送行列) のような単純な輸送関係が信じられてきた。極最近、L-mode 状態のプラズマについて、加熱入力の時空間履歴を反映したヒステリシスを持つことが発見され、単純な拡散的輸送関係が破れていることが分かった[1](図1実線)。加熱の on・off 直後に熱流がジャンプする。輸送関係式は核融合プラズマの応答を決めるので、この発見は核融合の制御システム設計に強い影響を与える。その重要性にもかかわらず十分な理解が得られていない。

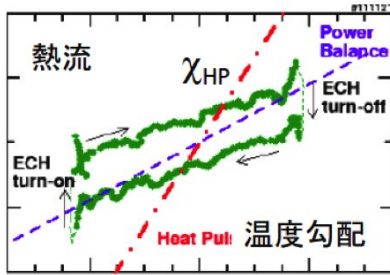


図1：温度勾配と熱流の関係に現れるヒステリシス[1]

(2)本計画の着想への経緯

研究代表者は、乱流の位相空間の時空構造を考察し、プラズマ加熱が乱流を直接駆動するという理論仮説を提案した[2]。この新しい理論を高温閉じ込めプラズマに適用し図1の性質を説明しようと考えられる。実際のプラズマで、乱流輸送への加熱の直接的効果を定量的に求め、現実のプラズマダイナミクスとの比較を行う事を目的として、本計画を提案する事とした。

(3)成果の意義

プラズマの輸送研究では、勾配-流束関係は基本的で重要な性質である。この研究により、従来のモデルに代わるより正確な輸送関係式が提示される。この成果が得られれば、二つの大きな意義がある。第一は、輸送関係式に信頼性の高い学理基盤を与える事で、核融合燃焼プラズマの制御システムの設計等(例えば応答時定数の適切な選択)に寄与出来る。第二は、空間不均一と時間変化でプラズマ乱流輸送を記述する、物理的枠組みの拡張という意義がある。

[1] S. Inagaki et al.: Nucl. Fusion **53** (2013) 113006

[2] S.-I. Itoh, et al.: Sci. Rep. **2** (2012) 860

2. 研究の目的

本計画の目的は、磁化高温閉じ込めプラズマを対象に、「乱流に駆動される熱流束など

が加熱入力に直接依存する」事を理論的に説明する事である。最新の非平衡プラズマ乱流理論に基づき輸送の理論解析を行い、勾配に加え、加熱入力への依存性という新しい効果を繰り込み、乱流輸送のモデル方程式を構築する。動的に変動する加熱入力のもとで、勾配と輸送・揺動強度との関係にヒステリシスが現れる事を定式化する。実際のプラズマで、加熱として高周波や中性粒子ビーム等を例に、その乱流輸送への直接的効果や、ヒステリシス関係やダイナミクスを定量的に求める事を目標とする。

3. 研究の方法

位相空間分布関数 f と、加熱・粒子補給・運動量駆動等に応じた運動論的發展方程式のソース項 S を考察する。 f が揺動成分を含む結果、ソース項 S にも揺動成分が現れる。 S の揺動成分の理論式を求める。次に、 S の揺動成分による、 f の揺動成分への影響を解析する。双方を自己無撞着に取り入れる事により、加熱等の存在による乱流と乱流輸送への影響についての理論式を定式化する。揺動成分として、マイクロなドリフト波を考えるとところからスタートし、メゾ・マクロスケールの揺動を含む場合に拡張し、更に確率統計的な変動を含む場合へと拡張を試みる。この理論的着想を進展させ、輸送関係のヒステリシスと言う難問に限らず、他の難問(例えば、プラズマ閉じこめ時間の水素同位体効果など)への解決の糸口を探る試行も行う。

理論的な結果を実験と比較して妥当性を検討する。そのために、実験観測から「温度勾配と熱流の関係に現れるヒステリシス」を精密に抽出する方法についても検討を重ねる。

4. 研究成果

(1)プラズマ乱流の位相空間における新しい駆動力と輸送ヒステリシス

この研究でテーマとする過程は、位相空間における外部入力と揺動が結びついた結果、外部入力に直接揺動を励起する可能性について研究する事である。位相空間でのプラズマ発展方程式

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla + \frac{e_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_v \right) f(\mathbf{x}, \mathbf{v}; t) = S + C$$

に現れる外部入力 $S[f; \mathbf{v}, \mathbf{x}, t]$ の項に着目する。 $f = f_0 + \tilde{f}$ のようにプラズマの揺らぎが存在すれば、外部入力にもコヒーレントな揺らぎ

$$S[f; \mathbf{x}, \mathbf{v}, t] = \tilde{S}[f_0; \mathbf{x}, \mathbf{v}, t] + \frac{\delta S[f_0; \mathbf{x}, \mathbf{v}, t]}{\delta f_0} \tilde{f} + \dots$$

が伴う。その結果、揺動の平均振幅は $I \sim I_0 / (1 - \Gamma_h)$ の様に増大する。ここで $\Gamma_h = \gamma_h \chi_0^{-1} k_{\perp}^{-2}$ は、加熱による励起と非線形緩和の競合を示すパラメタである[2]。この結果は、 $\Gamma_h \ll 1$ の場合に成り立つ表式であり、

加熱密度が上がり Γ_h が1に近づくと破綻する。その場合へと非線形解析を拡張した結果が得られる。揺動強度は

$$I = \frac{\Gamma_h - 1 + \sqrt{(\Gamma_h - 1)^2 + 4I_0\omega_2\chi_N^{-1}k_{\perp}^{-2}}}{2\omega_2\chi_N^{-1}k_{\perp}^{-2}}$$

と与えられる。ここで ω_2 は非線形緩和率を $\omega_2 I$ と書く場合に現れる係数である。

プラズマの加熱率が直接揺動レベルを高める理論成果を拡張する事によって、更に多様な問題を解決する可能性を探究した。この研究で得られた理論関係式 $I \sim I_0/(1-\Gamma_h)$ のプラズマパラメタへの依存性を研究した。鍵となるパラメタ Γ_h は、競合する背景乱流の性質に依存する。もし、その背景乱流による輸送係数が gyro-Bohm 依存性を持つとすると、水素原子質量数 A に対して $A^{0.5}$ に比例するだろう。加熱効果を反映するメゾおよび巨視的揺動のスケールが変わらなければ、パラメタは $\Gamma_h \sim A^{-0.5}$ という依存性を与える。言い換えれば、水素原子の質量数が重いほど、ヒステリシスの幅が小さくなる。図2に説明を載せる。

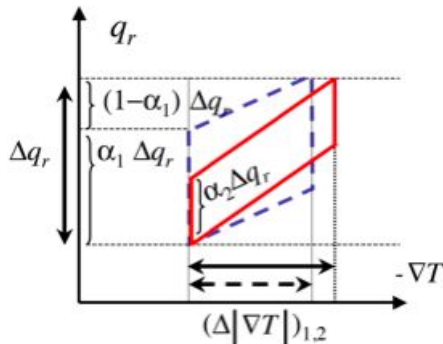


図2：勾配-流束関係のヒステリシス（加熱の on-off を繰り返す実験で現れるもの）について、軽水素（点線）と重水素（実線）を比較したもの。

その結果、水素同位体効果を解決する糸口である事を示した。磁化プラズマ閉じこめの水素同位体効果と呼ばれる謎は、水素イオンの同位体の違いによって、エネルギー閉じ込め時間が変わる事を指している。この実験事実も長く知られているが、説明がつかない。「乱流に駆動される熱流束などが加熱入力に直接依存する」機構が、従来謎とされていた「閉じこめ時間に対する水素同位体効果」の一因であるとの着想に発展した[S.-I. Itoh and K. Itoh: Nucl. Fusion **56** (2016) 106028]。論文を取りまとめて国際会議で発表し投稿した。

従来からの研究との差異も明らかにするための研究も進めた。今迄も速度分布関数のずれに伴う位相空間ダイナミクスは研究されている。その過程は、この計画で研究する「新しい位相空間の駆動力」と相補的な役割りを果たしている。新しい駆動力の役割りを明瞭

にするために、従来の過程（位相空間の変形）にかかわる乱流輸送についても解析を進めた[M. Sasaki, et al.: Phys. Plasma **23** (2016) 102501, M. Sasaki, et al.: Nucl. Fusion **57** (2017) 036025]。多様な過程を描き出し、位相空間ダイナミクスの重要性を指摘した。

(2)核融合炉の制御にも重要な意味

この研究では、コアプラズマの輸送関係式としてのヒステリシスに着目した研究から着手した。そして、それを周辺輸送障壁との結合系として構成した[S.-I. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **57** (2017) 022003]。

その結果、プラズマ乱流の位相空間における新しい駆動力と輸送ヒステリシスの問題が、乱流輸送物理としての重要性だけではなく、核融合炉の制御にも重要な意味を持つ事を示した。プラズマ中心部で鋸歯状振動の様な崩壊現象が起きる可能性が知られている。通常は、中心部で急変があっても、変動がプラズマ内部を伝播する内に拡散により変動がなだらかになると考えられて来た。しかし、輸送ヒステリシスが働く場合、拡散によってなだらかにならずに極めて短い遅れを持って表面に伝達し、その結果、表面での遷移をもたらす等という大規模な変動をもたらす。この結果は、輸送ヒステリシスが核融合炉の制御にも重要な意味を持つ事を指摘し、IAEA 核融合エネルギー会議においてオーバービュー論文として発表した[K. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **57** (2017) in press]。

(3)総合論文のとりまとめ

加熱変動に対する熱流の急変、即ち勾配-輸送関係にあらわれるヒステリシス現象について、国際共同研究を通じて、実験結果を世界的に博搜した。この研究計画を提案した時点での状況は、「背景」に説明したように LHD の実験を中心にしたものであった。それに DIII-S, KSTAR, TJ-II 等の実験結果からも同様な性質を確実なものとして抽出した。レビュー論文をまとめ成果を発信した[S.-I. Itoh, et al.: Plasma Fus. Research **11** (2016) 2503086]。

乱流におよぼす加熱による直接効果を検証するためには、複雑な多数の過程を解きほぐして因果関係を確認する必要がある。そのための基礎的な解析方法を考察した。cross bispectrum を観測し解析する事により、錯綜する過程を分類し、分析する事が出来る事を示した。こうした俯瞰的考察をレビュー論文にまとめ成果を発信した[S.-I. Itoh, et al.: Plasma Fus. Research **12** (2017) 1101003]。

(4)輸送ヒステリシス観測法の改善

本研究の研究動機の一つが、輸送ヒステリシスに関する実験観測である。輸送ヒステリシスが普遍的に存在する事を実証する研究も進める必要がある。その意図から、輸送ヒステリシス観測法をより確実にするための

研究を波及研究として進めた。ヒステリシス現象を探索する方法も示した[K. Itoh, et al.: J. Phys. Soc. Japan **85** (2016) 014501, K. Itoh, et al.: Plasma Fus. Research **11** (2016) 1402002 など]。これによって、本研究の基盤を更に確かなものとした

(5)研究の波及効果

位相空間における新しい駆動力を考える道筋で、プラズマの突発現象に理解を与える理論モデルと実験検証を得た。揺動の突発的な成長に関する成果を得た成果(M. Lesur, et al.: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 015003 など)では、位相空間における運動論的非線形性を新たに取り入れたモデルを導出した。初期に生じた揺動が初期周波数の2倍程度になった場合に、元来の周波数をもつ揺動が突発的に生じる機構を見出した。得られた理論予測は大型ヘリカル装置を用いた実験で観測されている現象をよく再現することが明らかとなった[T. Ido, et al.: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 015002]。

この研究計画は、プラズマ乱流の新しい駆動力の物理の創案にある。Heating heats turbulence をいう概念を提示した。それを拡張し、粒子補給もまた乱流源となりうる (fuelling fuels turbulence) という考え方に達し、波及研究として推進した[K. Itoh, S.-I. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **57** (2017) 056031]。粒子補給は、通常外部から中性粒子を加え、その電離過程によってプラズマ化するものが主である。通常、プラズマ閉じこめ領域外部では、強い揺動が励起されている。そこで、外部での強い揺らぎが中性粒子の密度変動に転写され、中性粒子によるプラズマ粒子の補給と共に揺動も主プラズマに注入される過程である。表面近傍の強い揺らぎの起源は現在迄明確になっておらず、謎に光を充てる展開を得た。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

K. Itoh, S.-I. Itoh, 他 2 4 人, Hysteresis and Fast Timescale in Transport Relation of Toroidal Plasmas, Nucl. Fusion, 査読有, Vol. 57, 2017, in press.

S.-I. Itoh, K. Itoh, Y. Nagashima, Y. Kosuga, On the Application of Cross Bispectrum and Cross Bicoherence, Plasma Fus. Research, 査読有, Vol. 12, 2017, 1101003-1-9
DOI: 10.1585/pfr.12.1101003

S.-I. Itoh, S. Inagaki, J. Q. Dong, K. Itoh, Approaches to Hysteresis of Transport Relation in Toroidal Plasmas, Plasma Fus. Research, 査読有, Vol. 11, 2016, 2503086-1-7
DOI: 10.1585/pfr.11.2503086

S.-I. Itoh, K. Itoh, S. Inagaki, Transport hysteresis of core plasma, isotope effect, and H-mode physics, Nucl. Fusion, 査読有, Vol. 57, 2017, 022003-1-8
DOI:10.1088/0029-5515/57/2/022003

S.-I. Itoh, K. Itoh, Hydrogen Isotope Effect on Dimits Shift, Nucl. Fusion, 査読有, Vol. 56, 2016, 106028-1-6
DOI:10.1088/0029-5515/56/10/106028

K. Itoh, K. J. Zhao, J. Q. Dong, S.-I. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Nagashima, Y. Kosuga, J. Cheng, T. Kobayashi, A Calibration of Setting of Mach Probes by Observing GAM Oscillations, Plasma Fus. Research, 査読有, Vol. 11, 2016, 1402002-1-4
DOI: 10.1585/pfr.11.1402002

T. Ido, K. Itoh, M. Osakabe, M. Lesur, A. Shimizu, K. Ogawa, K. Toi, M. Nishiura, S. Kato, M. Sasaki, K. Ida, S. Inagaki, S.-I. Itoh, Strong Destabilization of Stable Modes with a Half-Frequency Associated with Chirping Geodesic Acoustic Modes in the Large Helical Device, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol.116, 2016, 015002-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.015002

M. Lesur, K. Itoh, T. Ido, M. Osakabe, K. Ogawa, A. Shimizu, M. Sasaki, K. Ida, S. Inagaki, S.-I. Itoh, Nonlinear Excitation of Subcritical Instabilities in a Toroidal Plasma, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol. 116, 2016, 015003-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.015003

K. Itoh, S.-I. Itoh, S. Inagaki, N. Kasuya, A. Fujisawa, On the Study of Higher Harmonics of Heat Pulse Propagation in the Modulated-Heating Experiments, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 85, 2016, 014501-1-6
DOI: 10.7566/JPSJ.85.014501

〔学会発表〕(計 11 件)

伊藤公孝、伊藤早苗
水素同位体効果と学術研究の進展
第 33 回プラズマ・核融合学会年会、2016.11.29 ~ 2016.12.2、東北大学青葉山キャンパス (宮城県、仙台市)

S.-I. Itoh
Hysteresis in transport relation
Japan-China Joint Data Analysis Workshop, 2016.10.24 ~ 2016.10.28, Kyushu University (Kasuga-city, Fukuoka)

K. Itoh, S.-I. Itoh, K. Ida, S. Inagaki, Y. Kamada, K. Kamiya, J. Q. Dong, C. Hidalgo, T. Evans, W. H. Ko, H. Park, T. Tokuzawa, S. Kubo,

T. Kobayashi, Y. Kosuga, M. Sasaki, G. S. Yun, S. D. Song, N. Kasuya, Y. Nagashima, C. Moon, M. Yoshinuma, R. Makino T. Tsujimura, H. Tsuchiya, U. Stroth
Hysteresis and Fast Timescale in Transport Relation of Toroidal Plasmas
26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016.10.17 ~ 2016.10.22, Kyoto International Conference Center (Kyoto)

伊藤早苗、伊藤公孝

Hydrogen Isotope Effect on Dimits Shift
日本物理学会 2016 年秋季大会、2016.9.13~2016.9.16、金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市)

伊藤早苗、稲垣滋、小菅佑輔、小林達哉、伊藤公孝

プラズマの輸送に現れるヒステリシスと強相関性
日本物理学会第 71 回年次大会、2016.3.19~2016.3.22、東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)

伊藤公孝、伊藤早苗、小菅佑輔、井戸毅、稲垣滋、M. Lesur

プラズマの突発現象と遠非平衡性
日本物理学会第 71 回年次大会、2016.3.19~2016.3.22、東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)

小菅佑輔

実空間・速度空間の統計的揺動を取り込んだプラズマ乱流・輸送に関する研究
日本物理学会第 71 回年次大会、2016.3.19~2016.3.22、東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)

伊藤早苗、稲垣滋、伊藤公孝、糟谷直宏、小菅佑輔、佐々木真、小林達哉、居田克己
強相関乱流

日本物理学会 2015 年秋季大会、2015.9.16~2015.9.19、関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

小菅佑輔、伊藤早苗、P.H. Diamond、伊藤公孝、M. Lesur

共鳴駆動型補足イオン乱流における亜臨界不安定性
日本物理学会 2015 年秋季大会、2015.9.16~2015.9.19、関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

K. Itoh

Non-equilibrium and Extreme State of Plasmas
25th International Toki Conference, 2015.11.3~2015.11.6, Ceratopia Toki (Toki-city, Gifu)

M. Lesur, K. Itoh, T. Ido, M. Osakabe, K. Ogawa, A. Shimizu, M. Sasaki, K. Ida, S. Inagaki, S.-I. Itoh

Nonlinear destabilization of energetic particle-driven modes
8th Festival de Theorie, 2015.7.17, Aix-en-Provence (France)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 早苗 (ITOH, Sanae)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号 : 7 0 1 2 7 6 1 1

(2)研究分担者

小菅 佑輔 (KOSUGA, Yusuke)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号 : 0 0 7 0 0 2 9 6

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 : 5 0 1 7 6 3 2 7