

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19360418

研究課題名（和文） 核融合燃焼プラズマにおける輸送の基礎理論の研究

研究課題名（英文） Theoretical study of transport process in fusion ignition plasmas

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

研究者番号：50176327

研究成果の概要（和文）：

核融合燃焼プラズマでは、圧力勾配駆動乱流において、低周波長波長の揺動も核融合燃焼の存在によって励起される。拡散的な輸送に併せ長距離相関揺動による非拡散的輸送が重要になり、その基礎理論をまとめた。具体的な例として、帯状流の非線形効果を繰り込む事によって非線形異常粘性を定式化した。遠距離相互作用の一例として乱流輸送のシーソー機構を理論的に見いだした。これらの成果は、核融合燃焼プラズマの理解や燃焼制御の基礎を構成する。

研究成果の概要（英文）：

In burning plasmas in magnetic confinement fusion device, the pressure-gradient-driven turbulence is affected by the ignition, so that long wavelength fluctuations are established. In this research project, a theoretical basis for turbulent transport was established, in which nonlinear interactions between microscopic and mesoscopic/macroscopic fluctuations are correctly introduced. For instance, turbulent viscosity was formulated, by renormalizing higher order nonlinear effects of zonal flows. In addition, the seesaw mechanism of turbulent transport was proposed. Theoretical results form the basis for understanding and controlling fusion burning plasmas.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：プラズマ物理学、核融合科学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ乱流、輸送現象、帯状流、長距離相関、過渡応答、核融合燃焼

1. 研究開始当初の背景

制御された核融合反応プラズマの研究において、根本的課題の一つがトロイダルプラズマの強い乱流による輸送現象である。従来の研究では線型不安定性が重視され、その結果に基づいた輸送係数の評価が通用している。こ

の旧来の方法では、乱流熱拡散係数については、(温度の $3/2$ 乗に比例し勾配長に反比例する) gyro-reduced Bohm diffusion と呼ばれるものに次元的には一致するものが導かれ理解に寄与した。しかし、例えば実験で観測されているイオン質量数依存性(重い水素の同位

体プラズマの乱流熱拡散係数が小さい)等、核融合燃焼実験実現に必須と考えられている種々のことが説明できず、乱流輸送理論の根本的革新が求められて来た。

それに応えるために、代表者らは、(1)非線型不安定性による揺動の励起(上記イオン質量数依存性の理解も得られる)を提案し[K. Itoh, et al.: *Transport and structural formation in plasmas* (IOP, England, 1999)], (2)帯状流のようなメソスケール構造を繰り込んだ理論を構成し、(3)確率的励起機構を考慮するなど、新しい乱流輸送理論体系を構築している[A. Yoshizawa, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Plasma and Fluid Turbulence* (IOP, England, 2002)]. 代表者は核融合反応に伴い径電場を駆動する機構が存在することを理論的に指摘しており[K. Itoh, et al.: *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** (1996) 760]、この機構が帯状流の減衰・駆動を通じて乱流輸送そのものに新たな影響を与える。また、ヘリカル系トロイダルプラズマのリップル補足粒子や、イオン・サイクロトロン共鳴加熱に伴う高エネルギー粒子が、帯状流に影響することも着想し、その具体的解析を行うことで検証も行うことが出来ると考えられる。

2. 研究の目的

この研究においては、核融合燃焼プラズマの輸送理論の基盤を展開することを目的とするが、特に次の点を焦点とする。即ち、トロイダルプラズマの乱流や構造形成の理論およびそれらの実験による検証など、基礎的な方法論に関する近年の急速な進展を、核融合反応が起きているプラズマへと適用し、将来の核融合実験炉を用いた研究に必要な輸送理論の基盤を提示することである。トロイダルプラズマの乱流輸送現象が、微視的な揺動の非線型発展だけではなく帯状流などメソスケール・ダイナミクスや、巨視的径電場など、異なるスケールの非線型過程の結合に強く影響されていることを重視する。理論やシミュレーションによる理論的法則を求め、それによる予測を提示すると共に、新たな機構の検証法を統合的に進めることにより、人類が初めて遭遇する制御核融合プラズマの輸送現象に対し、先進的な学術基盤を提供することを目的とする。

3. 研究の方法

計画初年度には研究の具体的構想をたて、核融合燃焼過程と多スケール結合効果を繰り込んだ乱流輸送の理論を開拓し、平行して、その原理の検証法を提案するための手順を考える。トロイダルプラズマを例として取り、(非線型不安定性駆動の場合まで含めた)ミクロ乱流ダイナミクスと、帯状流などのメソスケール構造との結合を繰り込み研究する。

更にはプラズマ全体に及ぶ長波長揺動の効果も検討する。具体的には、帯状流の減衰率や、径方向のスケール長選択則にたいする影響を検討する。帯状流の非線形過程を繰り込んだ輸送理論を展開し、従来の準線形理論では取り扱う事の出来なかった多スケールを内在する構造理論を展開する。さらに、ヘリカル系トロイダルプラズマのリップル補足粒子や、イオン・サイクロトロン共鳴加熱に伴う高エネルギー粒子の効果などを並行して解析し、ここで提案する物理過程を実験により検証する方法も研究する。これらの研究成果に立脚し、長距離相関揺動がもたらす輸送現象の観測法を新規開拓する。核融合燃焼状態では、プラズマ内部の計測手段が制限される事を重要視し、乱流揺動の観測を用いる、新しいプラズマ計測法を考案する。

4. 研究成果

(1) 研究基盤の進展

プラズマ乱流輸送研究の基盤をなすプラズマ乱流理論の方法論を論理立てて構成した[図書①]。非線型効果を、着目するモード(運動)にたいしてコヒーレントな効果と乱雑なノイズ効果とに区分する。コヒーレントな効果に着目し、非線型な自己無撞着状態を求める。この解は多重解を持ちうる。そしてノイズによる着目するモードへの効果を解析する。特に、非線型な自己無撞着状態の間の遷移を研究する。遷移確率によって、可能な多数の非線型な自己無撞着状態のなかで、どの状態が選択的に実現するかを预言する。本体系によって研究成果をあげている。かつての「線形不安定性・局所的理論・決定論的理論」の枠に閉じこもって定式化されてきた方法論と比較し、現在は「非線形不安定性、非局所理論、確率統計的理論」に拡張した乱流輸送理論体系を構成している。遠非平衡系プラズマの乱流輸送について体系的な理論研究を進めることが可能になった[論文①、②、⑤、図書③]。

(2) 帯状流を着た乱流による輸送係数

メソスケール揺動と微視的揺動の共存する系の乱流輸送理論に大きな成果を得ている。プラズマ密度のようなスカラー量の異常輸送についての研究例は[図書③]にあるが、ベクトル場の輸送問題に拡張した成果[論文⑥]を紹介する。

ドリフト波が帯状流と共存し、エネルギーが帯状流との間で分配される。すなわち、ドリフト波(波数 \mathbf{k} 、振幅 ϕ_d)があると、その波のモジュレーションと帯状流(波数 q, \hat{x})が増幅される。 $(\hat{x}$ は密度勾配方向の単位ベク

トル。) 成長率は $\gamma_Z = q_r^2 D_{rr}$,

$$D_{rr} = -\frac{c^2}{B^2} \int d^2k \frac{k_{\parallel}^2 k_r}{\Delta\omega_k} (1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2)^{-2} \frac{\partial N_k}{\partial k_r} \quad (1)$$

となる (N_k と $\Delta\omega_k$ はドリフト波のアクションスペクトル及び非相関率、 ρ_s はイオン・ラーマー半径)。

この結果からは、巨視的な速度不均一も乱流により拡散型の波数依存性 (q_r^2) を持って増幅される様に見え、実験で乱流粘性が観測されている事実と反する。乱流による巨視的スケールの運動量の輸送 (乱流粘性の問題) を考えるには、このレベルの理論では不十分である。そのために、帯状流の高次の非線形効果を繰り込んだ乱流粘性の理論を構成する。速度場を $V = V_L + V_Z$ (V_L : 巨視的な流れ V_Z : 帯状流)、 $U = dV/dx$ を渦度とする。帯状流が V_L より速い時定数で非線形定常状態 $U_Z = U_m$ ($U_m^2 = (3/4)(1-\mu)D_{rr}/D_3$ 、 μ は 1 より小さな数係数) に達するので、巨視的な流れは

$$\frac{\partial}{\partial t} U_L + D_{rr}(1-\mu) \frac{\partial^2}{\partial r^2} U_L - 3D_3 U_m^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} U_L = 0 \quad (2)$$

にしたがって発展する。 $(\mu$ は 1 より小さな数係数。) 帯状流の非線形定常振幅 $U_Z = U_m$ を (2) 式に代入すれば、巨視的な流れは $5(1-\mu)D_{rr}/4$ という正の粘性係数によって減衰することが分かる。

(3) 帯状流による輸送のシーソー機構

トロイダルプラズマの異常輸送は、微視的なドリフト周波数領域の乱流とメゾスケールの帯状流の相互作用によって規定され実験的確認も進んでいる。巨視的な電場によって大域的輸送現象が生まれるように、帯状流を介在としてメゾスケールの相関を持つ準大域的輸送現象が生まれる。こうした過程を理論的に説明する帯状流による輸送のシーソー機構を提案した[論文③]。

帯状流が半径方向に相関長 L を持つとする。帯状流はその相関長の中のマイクロ揺動で駆動されるから、マイクロ揺動強度分布 $I(x)$ と帯状流の強度分布 $E(x)$ の結合方程式は積分方程式になる：

$$\frac{\partial}{\partial t} I(x) = \gamma(x)I - \omega_2 I^2 - \alpha E I \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} E = \alpha E \frac{1}{2L} \int_{-L}^L dx I - \nu E \quad (4)$$

結合係数 α は非線形理論によってその表式が得られる。

この非局所的結合の結果、半径方向にはなれた位置でのマイクロ揺動が競合する新たな機構が生まれる。帯状流の相関長の範囲内でマイクロ揺動の成長率に違いがある場合、より不安定性の強い領域で揺動が発達し、それが空間の広い領域に亘る帯状流を励起する。励起された帯状流は不安定性が弱い領域の揺動を抑制する。帯状流を介在として、不安定性の強い領域の微視的揺動が、離れた (不安定性の弱い) 領域の微視的揺動を抑制する。シーソーの片側が下がると反対側があがるような効果を持つ。図 1 は、裸のマイクロ揺動がプラズマ半径方向に点線のような分布を持つ場合、帯状流 (破線) を励起する事によって、揺動振幅は実線に示すような半径分布となる例を示している。図の $x=0$ の位置近傍で揺動が抑制され、その結果、自律的に輸送障壁が構成されることが理論的に示された。

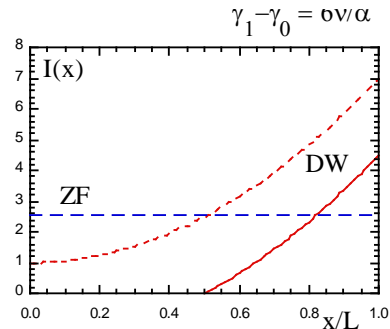


図 1 : 揺動 (DW: 実線) と帯状流 (ZF: 破線) 強度の空間分布。乱流駆動源 $\gamma(x)$ を点線で示す。離れた位置の乱流によって励起される帯状流を通じ、乱流抑制が起きる。

(4) 実験観測法

以上に紹介した研究結果は、微視的乱流と帯状流の非線形結合の研究が重要であることを示している。核融合燃焼制御への効果の重要性から鑑み、理論研究に留まらず、実験的検証が必須である。そうした非線形結合の実験的観測法についても[論文②、図書②]に最先端の研究展開と今後の展望を報告した。

理論研究と実験研究の融合による新機構として、乱流理論の進歩を新計測の開発に応用する研究も進めた。geodesic acoustic

mode (GAM) spectroscopy という方法を研究した。GAM の分散関係は、イオンの質量数に依存するから、GAM を観測する事でプラズマ中のイオン密度や純度を計測する新しい方法となる[論文④]。

この方法は、乱流研究とプラズマ計測研究を融合する事で新しい研究の可能性を示しており、今後の核融合燃焼プラズマ研究の一つの方向を示している。

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 42 件)

- ① K. Itoh, Summary of IAEA Technical Meeting on Plasma Instabilities Nucl. Fusion **50** (2010) 054001 (査読有り)
- ② K. Itoh: “Summary of the 19th International Toki Conference - Advanced Physics in Plasma and Fusion Research “ Plasma and Fusion Research **5** (2010) S2118 (査読有り)
- ③ K. Itoh, S.-I. Itoh, M. Yagi, A. Fukuyama, “ Seesaw Mechanism in Turbulence-Suppression by Zonal Flows”, J. Plasma and Fusion Res. Series **8** (2009) 119. (査読有り)
- ④ S.-I. Itoh, S. Nishimura, K. Itoh, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Inagaki Geodesic Acoustic Mode Spectroscopy II, J. Plasma Fusion Res. **4** (2009) 014 (査読有り)
- ⑤ K. Itoh and S.-I. Itoh, 「プラズマの乱流構造」日本物理学会誌, Vol. **63** No. 10 (2008) 785 (閲読有り)
- ⑥ K. Itoh, S. Toda, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, M. Yagi and A. Fukuyama ” Turbulent Transport of Poloidal Momentum in Toroidal Plasmas” J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 084502 (査読有り)

[学会発表] (計 13 件)

- ① K. Itoh: “Summary”, at 19th International Toki Conference on “Advanced Physics in Plasma and Fusion Research” (2009/12/08-11, Toki, Japan)
- ② K. Itoh: “A Quarter Century of H-mode Physics - A View of Theorists” Lecture at Festkolloquium for Prof. Wagner (2008/11/27, Max-Planck-Institut fuer Plasmaphysik, Greifswald, Germany)

- ③ K. Itoh: “Brief Summary of School (Summary lecture)”, 2nd ITER International Summer School in conjunction with the 47th Summer School of JSPF for Young Plasma Scientists (2008/07/22-07/25, Kyushu Univ., Fukoka, Japan)

[図書] (計 4 件)

- ① P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (Cambridge University Press, 2010) 570 pages
- ② K. Itoh, Summary, in *Second ITER International Summer School - Confinement* (AIP, 2009) AIP Conference Proceedings 1095, pp 215-233
- ③ K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Yagi, A. Fukuyama, T. S. Hahn, K. Hallatschek, G. R. Tynan, Physics of Zonal Flows, in *Turbulent transport in fusion plasmas* (AIP, 2008) AIP Conference Proceedings 1013, pp. 106-126

[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 H 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
佐貫 平二 (SANUKI HEIJI)
元核融合科学研究所・教授
研究者番号：80109355 (平成 19 年度)