

平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成26年 4月23日現在

研究代表者 氏名	伊藤 早苗	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	九州大学・応用力学研究所・教授
研究課題名	乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究		
課題番号	16002005		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 伊藤 早苗（九州大学・応用力学研究所・教授） 研究分担者 矢木 雅敏（九州大学・応用力学研究所・教授） 研究分担者 稲垣 滋（九州大学・応用力学研究所・准教授） 研究分担者 伊藤 公孝（核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授） 研究分担者 藤澤 彰英（核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成16年度	114,300千円
平成17年度	170,500千円
平成18年度	71,500千円
平成19年度	38,400千円
平成20年度	30,000千円
総計	424,700千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

平成 16-20 年度の特別推進研究は、高温磁化不均一プラズマを対象に、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した。従来のプラズマの輸送（特に異常輸送と閉じ込め則）研究は線形不安定性であるマイクロなドリフト波を対象としていた。古い描像を超え、マイクロなドリフト波とともにメソスケール・マクロスケールの揺動が非線形励起されて共存する「乱流構造」という描像を提示した。研究のパラダイムシフトをもたらした。理論で提示した非線形構造（帯状流・ストリーマー・帯状磁場）を発見し、乱流揺動の非線形結合強度の実測等に成功し、プラズマ乱流物理学に新機軸をもたらした。新たな世界の研究潮流の源になっている。

特別推進研究終了後の発展の基盤 この成果をもとに3種の基盤を作り、研究を発展させた。

(1) 物理の基盤として、P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas* (Cambridge University Press, England, 2010) 570頁を刊行した。

(2) 理論解析・シミュレーション研究および実験研究を統合する方法を明晰化した。シミュレーションでは、「プラズマ乱流計測シミュレーション」を活用し、実験装置としては「プラズマ乱流ドック」を作り上げ、統合研究を進めた。

(3) 組織的基盤も得た。理論・シミュレーション・実験の統合研究を可能とする、「伊藤プラズマ乱流研究センター」が九州大学に先導的学術研究拠点として設置された(平成 21 年)。その後「伊藤極限プラズマ研究連携センター」と拡充改組された(平成 23 年)。平成 26 年度から、九州大学の学内共同教育研究施設「極限プラズマ研究連携センター」として設置され、伊藤早苗がセンター長を務めている。国際的にも、「磁場核融合に関する国際連携研究所」(LIA 336)が九州大学・CNRS・プロヴァンス大学・大阪大学及び核融合科学研究所によって平成 19 年度に設立され、伊藤早苗は、国際共同所長に就任している。

これらの基盤を活用して、理論・シミュレーション・実験を統合した研究を共同研究者とともに推進した。二つの流れを説明する。

基盤研究(S)「研究課題名：乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究」

(研究期間：平成21年度~平成25年度)

特別推進研究の成果に立てば、マイクロな乱流が拡散的輸送現象をもたらすという従来のモデルは成立しない。乱流と時空構造の応答を通じて、磁場閉じ込めプラズマの動的輸送現象を解明する研究を行った。そこで、熱平衡状態から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輸送関係を探求した。プラズマサイズ程度の長波長揺動も発見された[次ページ論文 12]

(図 1 は断面上のパターン)。温度勾配と熱流の関係が $q = -\chi \text{ grad } T$ (または輸送行列) のような従来信じられてきた単純な輸送関係ではなく、加熱入力の時間履歴を反映したヒステリシスを持つことが発見された[論文 17]。(図 2 実線。) 数十年来のプラズマ輸送の描像を覆す画期的な発見である。この理解のため、速度空間の熱力学的な力を新たに理論的に導入し、乱流輸送理論の枠を拡大した[論文 7,8]。今後のプラズマ物理研究の明確な中心問題を提示した。

プラズマの遠非平衡性の描像を更に普遍化する研究を展開した。プラズマ乱流、高エネルギー密度プラズマ、ナノ・バイオプラズマ等、プラズマ諸分野はこれまで独立して発展してきた。しかし、非平衡的性質に着目する事でこれらの分野の先進研究を糾合して、非平衡極限プラズマの学理を確立することが可能になる。その観点から、「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク研究計画」を提案し共同研究を推進している。個々の分野で培ってきた知見・技術の融合により体系的学理を確立し、それを通じて幅広い科学技術に普遍的学術基盤を提供することを目指している。本ネットワーク計画は、日本学術会議「学術の大型研究に関するマスタープラン」(平成 22、23 年)に取り入れられ、文部科学省の「ロードマップ」策定(平成 22 年)では優先度が認められる 18 計画に盛り込まれる等高く評価された。

なお、特別推進研究終了後、伊藤早苗は九州大学主幹教授(平成 21 年度)に任ぜられた。研究分担者の藤澤が井上学術賞(平成 21 年度)、文部科学大臣表彰科学技術賞(平成 22 年度)、仁科記念賞(平成 23 年度)を授賞した他、研究分担者、研究協力者が多数の授賞を受けた。(後述)。

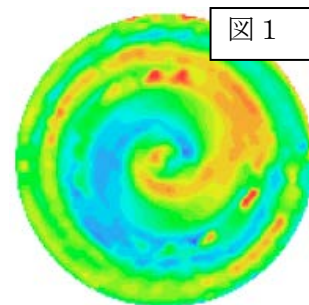


図 1

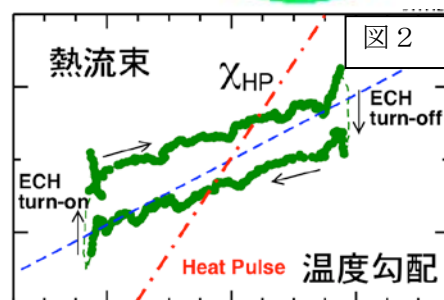


図 2

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

[1] S.-I. Itoh: Structure Formation in Turbulent Plasmas, Plasma and Fusion Res. **4** (2009) 038.

[2] S. -I. Itoh and K. Itoh: Kinetic Description of Nonlinear Plasma Turbulence, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 124502.

[3] S.-I. Itoh, K. Itoh: On Distance of Turbulent Plasma from Thermal Equilibrium, J. Phys. Soc. Jpn. Vol 79, No **12**, 124501-1-5 (2010)

[4] 伊藤早苗: プロジェクトレビュー「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

[5] S.-I. Itoh, K. Itoh: A mini-max principle for drift waves and mesoscale fluctuations, Plasma Phys. Control. Fusion **53** 015008-1-8 (2011)

[6] S.-I. Itoh and K. Itoh, : Response of plasma turbulence against externally-controlled perturbations, Chin. Phys. B Vol. **21**, No. 9 (2012) 095201

[7] S.-I. Itoh and K. Itoh: New Thermodynamical Force in Plasma Phase Space that Controls Turbulence and Turbulent Transport, Sci. Rep. **2** 860 -1-5 (2012)

[8] S.-I. Itoh, K. Itoh: Immediate Influence of Heating Power on Turbulent Plasma Transport, Nucl. Fusion **53** (2013) 073035

[9] 図書 P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas* (Cambridge University Press, England, 2010) 570 pages を刊行した。

共同研究成果を例示する。

[10] T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, N. Kasuya, K. Kamataki, H. Arakawa, T. Kobayashi, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh: Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interaction in a Drift-Wave Streamer, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 225002-1-4.

[11] T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh: Two-dimensional bi-spectral analysis of drift wave turbulence in a cylindrical plasma, Phys. Plasmas **17** (2010) 052313-1-10

[12] S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Ida, S.-I. Itoh, N. Tamura, S. Sakakibara, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Ido, S. Nishimura, H. Arakawa, T. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Nagayama, et al.: Observation of Long-Distance Radial Correlation in Toroidal Plasma Turbulence, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 115001

[13] M. Sasaki, K. Itoh, S.-I. Itoh: Energy channeling from energetic particles to bulk ions via beam driven geodesic acoustic mode - GAM channeling, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. **53**, (2011), 085017

[14] K. Itoh, S.-I. Itoh, S. Inagaki, T. Kobayashi, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Oldenbuerger, K. Ida, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada and the LHD Experiment Group: On influences of long-range fluctuations on transport in Large Helical Device plasmas, Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012), 095016

[15] J. Cheng, J. Q. Dong, K. Itoh, L. W. Yan, M. Xu, K. J. Zhao, W. Y. Hong, Z. H. Huang, X. Q. Ji, W. L. Zhong, D. L. Yu, S.-I. Itoh, L. Nie, D. F. Kong, T. Lan, A. D. Liu, X. L. Zou, Q. W. Yang, X. T. Ding, X. R. Duan, et al.: Dynamics of Low-Intermediate-High Confinement Transitions in Toroidal Plasmas, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 265002

[16] T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino: Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak, Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 035002

[17] S. Inagaki, T. Tokuzawa, N. Tamura, S.-I. Itoh, T. Kobayashi, K. Ida, et al.: How is turbulence intensity determined by macroscopic variables in a toroidal plasma?, Nucl. Fus. **53** (2013) 113006

国際会議の招待講演は、ヨーロッパ物理学会、アメリカ物理学会、国際プラズマ物理学会議、Plasma Conference 2011、等の国際会議、H-mode workshop, アジア太平洋輸送研究ワークショップなどの専門家会議、日本物理学会はじめ多数行われた。（共同研究内容について共同研究者全体で120件以上の招待講演を行っている。）

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

科学研究費基盤研究(S)

乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究

（平成 21-25 年度、代表者伊藤早苗 167,100 千円）

「日本経済再生に向けた緊急経済対策」に基づく平成 24 年度補正予算（第 1 号）により国立大学法人施設整備費補助金（文部科学省）166,000 千円が九州大学伊藤極限プラズマ研究連携センター（センター長伊藤早苗）に措置され、直線プラズマ乱流ドックが整備され、プラズマ乱流に関する統合的研究を実施している。

九州大学において、全学共通経費として 22,000 千円がプラズマ乱流研究センターおよび伊藤極限プラズマ研究連携センター（センター長伊藤早苗）に措置されプラズマ乱流に関する国際的研究を実施した。（平成 21-25 年度）

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

特別推進研究の成果を踏まえ、磁場閉じ込めプラズマの動的輸送を解明する研究を行った。その結果、従来の描像（仮説）を覆す決定的な実験観測を得た。そのため、熱平衡状態からかけ離れた非平衡極限の乱流媒質に特有な、大域的・動的乱流輸送にかかわる輸送関係の定式化が必要となりそれらを追求した。成果を 3 項目にまとめる。

1 描像の改革 高温磁化プラズマの乱流輸送について、従来は「線形、局所、決定論」的描像が追求された。即ち、線形不安定成長率や局所的なプラズマパラメタから乱流輸送が決定論的に導かれる、という仮説（思い込み）が受け入れられていた。本研究により、「非線形、非局所、確率論的」描像への転換が強く促された。その基盤となる発見は：

(1a) 線形安定なメゾ・マクロの揺動も強く励起されること、その成分が持つエネルギー密度が、ミクロな不安定モードが持つ強度と同程度になる。線形安定性とその準線形応答のみでの議論は不十分であり、線形安定なモードも乱流輸送に重要な働きをする。

(1b) 2-1 ページ図 2 に示すように、局所的な輸送関係（ある位置の熱流をその場の勾配値等のパラメタで表現しようとする仮説）が破れている事が疑いない。このようなヒステリシスが、ある特殊な半径位置のみで見られるのではなく、プラズマ中の広い領域で観測された。

(1c) 熱と粒子と運動量の輸送を比較した結果、単純な比例関係（Fick の法則）が必ずしも成り立たないという結果を得た。

(1d) 「不均一性」が時空一定の固定したものではなく、動的に変動する事が分かった。平均の定義やその廻りの統計的変動の重要性が示された。

(1e) こうした従来無視されて来た事柄を定量的に観測する為の、動的輸送現象解析法を提案し確立している。

2 物理学として新しい熱力学的力の理論

これらの、従来の常識を覆す観測結果を理解するため、乱流輸送を特徴づける熱力学変数を拡張した。今迄は、温度勾配、密度勾配・・・等、実空間のパラメタに着目していた。その枠を取り払い、乱流輸送を司る、速度空間の熱力学的力を新たに定式化した。プラズマの「速度分布関数の変形」（それは従来認識されていた）ではなく、プラズマの「速度分布関数を変形させようとする力」が重要である事を世界で初めて示した。

速度空間に拡張すると、実空間と速度空間の干渉という新しい物理課題に取り組む事が出来た。例えば、位相空間の渦と実空間の渦が干渉し、トロイダルプラズマ（二重連結プラズマ）の中で、ポロイダル方向の回転駆動力がトロイダル方向への駆動と干渉する事を世界で初めて示した。

3 乱流ドックによる研究法

以上のように得られた世界的学術の進展は、プラズマのパラメタが広がったから実現したのではなく、理論・シミュレーションと実験の統合や、乱流プラズマのデータ解析法の統合的改革によって可能となっている。乱流ドックの研究法（即ち、基礎実験で理論の予測を検証する方法を作り上げ、大型装置に適用する方法）を確立し、大型実験装置に対する様々な方法を提示した。その中には、Correlation hunting 法や GAM スペクトロスコーピー等、従来測れなかったものを見いだす研究法を提示し、世界の研究界に提供している。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

平成 16-20 年度の特別推進研究がもたらした最大の貢献は、高温磁化不均一プラズマの乱流並びに乱流駆動輸送の描像（中心仮説）を作り替えた事である。

従来の研究は、線形不安定性であるマイクロなドリフト波を対象としてその成長や飽和を議論していた。乱流輸送を局所的な関係（ある場所の乱流輸送がその場のプラズマパラメタで決まる）として定式化しようと試みていた。しかし、実験で観測される高温磁化プラズマは、局所的な関係に収まらぬ乱流輸送現象に満ちている。

その古い描像を超え、本研究では、マイクロなドリフト波とともにメゾスケール・マクロスケールの揺動が非線形励起されて共存する「乱流構造」という描像を提示した。理論で提示した非線形構造（帯状流・ストリーマー・帯状磁場）を実験的に発見し、乱流揺動の非線形結合強度の実測等に成功し、プラズマ乱流物理学に新機軸をもたらした。乱流状態は、その場その時刻の巨視的プラズマパラメタのみでは定まらぬ。研究のパラダイムシフトをもたらした。新たな世界の研究潮流の源になっている。このことは、3-2 にリストした多数の論文が多く引用を受けている事から明らかであろう。（論文 Zonal Flows in Plasma - A Review [Plasma Phys. Control. Fusion Vol.47 No.3 (2005) R35-R161]は磁化高温プラズマを主題とする全論文の中でも特筆すべき引用数(939)を示した。）

二つの学会で当該研究にかかわる新セッションが設立された。平成 25 年以来、プラズマ核融合学会では分科細目「非平衡極限プラズマ」が実現し、日本物理学会では企画セッション「非平衡極限プラズマ」が実現した。学会としても本研究領域を新たに認めた事を意味する。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Zonal Flows in Plasma - A Review [Plasma Phys. Control. Fusion Vol.47 No.3 (2005) R35-R161]	ドリフト波乱流が帯状流と一体の非線形状態である事を説明した。理論、シミュレーション、実験の総ての側面から総合的に論じたもの。（ドリフト波の非線形構造には、ストリーマーもある事を示す。）世界的研究方向を決めた研究成果。	939
2	Identification of Zonal Flows in Toroidal Plasma [Phys. Rev. Lett. Vol.93 (16) (2004) 165002]	ドリフト波乱流が帯状流と一体の非線形状態である事、特に低周波帯状流の存在と非線形結合について、世界で初めて実験的検証を与えた。	252
3	A review of zonal flow experiments [Nucl. Fusion 49 (2009) 013001 (42pp)]	ドリフト波乱流が帯状流と一体の非線形状態である事は、世界的な追試実験によって確定した。その全貌を取りまとめた。	179
4	Physics of Zonal Flows [Phys. Plasmas Vol.13 No. 5 (2006) 055502]	帯状流と共存するドリフト波乱流に起きる非線形過程を総合的かつ明晰に説明したもの。	113
5	Observation of nonlinear couplings between small-poloidal wave-number potential fluctuation and turbulent potential fluctuations in ohmically heated plasmas in the JFT-2M tokamak [Phys. Rev. Lett. Vol.95 (2005) 095002(1-4)]	帯状流には、2種類在る事が理論的に予言されていた。その一つである、周波数の高い振動型帯状流(測地線音波 GAM)を研究し、GAMの存在と非線形結合について、世界で初めて実験的検証を与えた。	104
6	Anatomy of plasma turbulence [Nature Phys. 4, 721-725 (2008)]	ドリフト波のつくる非線形構造には、ストリーマーがある。その時空構造と、それを構成する非線形機構を、世界で初めて実験で明らかにした。プラズマ乱流の実験研究の方法論も明示した。	82
7	Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas [Nuclear Fusion 47 (2007) S718]	ドリフト波乱流が帯状流と一体の非線形状態である事について、世界的な実験研究の進展を取りまとめ、世界の研究を刺激した。	71
8	Geodesic-Acoustic-Mode in JFT-2M tokamak plasmas [Plasma Phys. Control. Fusion Vol.48 (2006) S41]	周波数の高い振動型帯状流(測地線音波 GAM)を研究し、GAMの時間空間構造を詳細に観測し、理論的予言と比較した。	61
9	On the bicoherence analysis of plasma turbulence [Phys. Plasmas Vol.12 No.10 (2005) 102301]	ドリフト波乱流を対象に、バイコヒーレンスの計測が行われている。バイコヒーレンスの値を非線形過程の定量的評価につなげる方法を示した。乱流実験学を構築する重要な成果を得た。	48
10	Comparison of transient electron heat transport in LHD helical and JT-60U tokamak plasmas [Nucl. Fusion Vol.46 No.1 (2006) 133-141]	LHDのヘリカルプラズマとJT-60Uトカマクプラズマの双方を対象に、電子熱輸送を実験的に研究した。動的応答による研究法の有効性を示した。	43

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Review of Experimental Drift Turbulence Studies [Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 113001]	帯状流を含むドリフト波の実験研究が世界的に展開している。その成果を取りまとめたレビュー論文であり、実験研究を指導した。	96
2	Characterization of bifurcation induced by long distance correlation between heat flux and temperature gradient in toroidal plasmas, [Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 075002]	LHD プラズマでは周辺の摂動により中心部の閉じ込め改善が起きる事が知られている。この現象を詳細分析し、温度勾配と熱流の輸送関係が局所的なものではなく、非局所関係である事を示し、乱流輸送の新しい描像を提示した。	47
3	Observation of Long-Distance Radial Correlation in Toroidal Plasma Turbulence, [Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 115001]	LHD プラズマを対象に、相関長がプラズマ全体に及ぶ低周波揺動を世界で初めて発見し、乱流により非線形励起される事を示した。乱流輸送の描像を大きく書き換える成果である。	19
4	Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas [Nuclear Fusion 49 (2009) 095024]	LHD のヘリカルプラズマと JT-60U トカマクプラズマの双方を対象に、イオンの輸送障壁のダイナミクスを定量的に観測した。発生一が自律的に決まる事を示した。	17
5	Effect of the curvature and the beta parameter on the nonlinear dynamics of a drift tearing magnetic island [Nucl. Fusion 49 (2009) 055016]	ドリフト・テアリング不安定性のシミュレーション研究により、マクロな MHD 揺動（テアリング不安定性）とマイクロ揺動（ドリフト波）の非線形結合を明確化した。	15
6	Turbulence and zonal flows in edge plasmas of the HL-2A tokamak [Plasma Phys. Control. Fusion 52 124008 (2010)]	HL-2A トカマク（中国）プラズマの周辺プラズマを詳細に観測し、乱流による帯状流の発生過程を定量的に示した。	15
7	Observations of abrupt changes in the fluctuation spectrum on LMD-U [Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 085001]	直線磁化プラズマのドリフト波揺動の時間発展を研究し、スペクトルの急変を観測し非線形過程を定量的に調べた。	13
8	Observation of Quasi-Two-Dimensional Nonlinear Interaction in a Drift-Wave Streamer [Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 225002]	ドリフト波のつくる非線形構造であるストリーマーを対象に、それを構成する非線形機構を実験で明らかにした。	8
9	Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak [Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 035002]	トカマクプラズマのL-H遷移条件近傍で起きるリミットサイクル振動を解析した。平均流の発生機構を明確化した。揺動塊の空間伝達の観測に成功した。	5
10	New Thermodynamical Force in Plasma Phase Space that Controls Turbulence and Turbulent Transport, [Sci. Rep. 2 860 (2012)]	位相空間に働く新しい熱力学的力が、乱流揺動に直接影響する事を示した。乱流と乱流輸送を制御する新しい物理量になる。	4

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

核融合開発研究への寄与

核融合発電を目指した開発研究が世界的に推進されている。現在国際熱核融合実験炉(ITER)が世界7極の共同事業として建設されている。ITERによって核融合燃焼状態のプラズマが長時間実現され、核融合原型炉への基盤が得られると考えられている。プラズマ乱流輸送によりITERプラズマが燃えないかもしれないという危惧は、帯状流で解消するとされていた。本研究において、帯状流の存在が実証され、そうした危惧や混乱が解決された。

本研究の成果によって、乱流輸送の描像が改革された。古い物理的描像に基づくITERプラズマの曖昧な応答の予測が、より正確な予測と置き換えられる。これによって、ITERを用いた研究において試行錯誤を減らす等合理化され、核融合原型炉への基盤がより速く得られる。

プラズマを活用する科学技術への寄与

プラズマは、現代と未来の文明を支える科学技術の基幹である。例えば、半導体集積回路の高度化はプラズマの活用によって実現している。新機能をもった物質の創成から生体とプラズマの相互作用研究にいたる、極めて広い範囲でプラズマ研究のフロンティアが開拓されている。そのフロンティアで着目されている揺らぎの制御を通じたプロセスの制御法の研究である。特別推進研究の成果を広汎なプラズマ科学研究と結びつける、「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク研究計画」が提案され共同研究が進展している。遺伝子内包カーボンナノチューブやスーパーダイヤモンドなど新機能性物質創成、プラズマ医療応用等、幅広い科学技術に普遍的学術基盤を提供することを目指している。本ネットワーク計画は、日本学術会議「学術の大型研究に関するマスタープラン」（平成22年、23年）に取り入れられ、文部科学省学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会の「ロードマップ」の策定（平成22年）では優先度が認められる18計画（平成24年の改訂では17計画）に盛り込まれる等、一段の研究推進と成果の期待が高まっている。

自然の理解への寄与

宇宙や自然の成り立ちやダイナミクスの理解が深まる事も、我が国の文化を涵養し社会を豊かとする。

自然界ではダイナモ磁場のような巨大な磁場が自然発生する。宇宙全体に影響するとともに、太陽風や宇宙線の影響を変え地上の生命の発展に強く影響すると考えられている。理論やシミュレーションによればダイナモ磁場は熱対流乱流によって発生するとされているが、実験で検証する事は極めて困難だった。本研究において、高温プラズマ中の熱対流乱流によって帯状磁場が形成される事が世界で初めて発見された。メゾスケールダイナモの実験観測として世界に先駆けた成果である。乱流ダイナモ仮説を検証する顕著な里程碑である。この発見に限らず、マイクロな乱流が発達するときに、メゾスケール・マクロスケールの規則的な構造が非線形励起されて共存する「乱流構造」を作り出す、ということが本研究の中心成果である。この成果に立つ事によって、乱流が発展する事によって、あるいは目に見える構造が消え、あるいは顕著な構造が生まれて来る、というダイナミクスの物理的理解が進む。「万物流転」の法則へ、明確な進歩をもたらしたと考えている。

国際人材交流と日本ファンの育成への寄与

科学を通じた日本のファンを増やすことは、我が国の社会を豊かにする。次ページに示すように、ヨーロッパ物理学会での伊藤賞（プラズマ乱流を主題とした大学院生の優れた研究発表を対象）を設定し、九州大学にて授賞者に賞を授与し研究発表と議論の機会を与えてきた。日本を核にしたキャリアパスが始動し、受賞者の活躍は世界的に評価されている。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

若手研究者のその後の活躍を述べる。(いずれもプラズマ乱流研究を世界的に先導し学生の指導に活躍している。)

○九州大学特任助手（ポスドク）として研究参加した一人は、平成20年に東京大学助教に着任し、平成23年に九州大学准教授に昇進した。プラズマ核融合学会奨励賞（平成18年度）、日本物理学会若手奨励賞（平成21年度）、吉川允二核融合エネルギー奨励賞（核融合エネルギーフォーラム：平成23年度）、文部科学大臣表彰 若手科学者賞（平成24年度）を授賞した。

○九州大学学術研究員（ポスドク）として研究参加した一人は、平成20年に東京大学助教に着任し、平成25年に九州大学准教授に昇進した。プラズマ核融合学会奨励賞（平成21年度）、日本物理学会若手奨励賞（平成23年度）を受賞。

○日本学術振興会特別研究員（核融合科学研究所）として研究参加した一人は、平成19年に、核融合科学研究所助教に着任し、平成24年に九州大学准教授に昇進した。プラズマ核融合学会奨励賞（平成17年度）、核融合エネルギー奨励賞（平成19年度）日本物理学会若手奨励賞（平成22年度）を授賞した。

○核融合科学研究所助手として研究参加した一人は、平成19年に核融合科学研究所助手から九州大学准教授に着任した。核融合エネルギー奨励賞（平成20年度）、プラズマ核融合学会論文賞（平成25年度）を受賞した。

大学院生のその後の活躍を述べる。

○平成18~20年度に博士課程に在籍し研究に参加した大学院生は、平成20年に日本学術振興会特別研究員に採用され、平成22年4月に九州大学助教に着任した。現在はプラズマの実験研究や学生の指導に活躍している。

○平成18~20年度に博士課程に在籍し研究に参加した大学院生は、九州大学の学位にあわせフランスプロヴァンス大学から twin doctor degree を受けた。日本学術振興会特別研究員を経て、現在神戸高専の講師として、シミュレーション研究や学生の指導に活躍している。

○平成19~20年度に博士課程に在籍し研究に参加した大学院生は、平成21年度に九州大学助教に着任した。現在はプラズマの乱流理論研究や学生の指導に活躍している。プラズマ核融合学会奨励賞（平成25年度）を受賞。

○平成20年度に博士課程に在籍し研究に参加した大学院生は、平成22年度に九州大学の学位にあわせフランスプロヴァンス大学から twin doctor degree を受けた。日本学術振興会特別研究員を経て、現在中部大学研究員として研究や学生の指導に活躍している。

○平成20年度に博士課程に在籍し研究に参加した大学院生は、現在帝京大学の助教（専任）として研究や学生の指導に活躍している。

ヨーロッパ物理学会における「伊藤賞」の実現と世界的人材育成を述べる。

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 を制定した。九州大学にて授賞者に賞を授与し研究発表と議論の機会を与える。イギリス物理学会出版(IOPP)やヨーロッパ物理学会プラズマ分科(DPP EPS)の協力のもと、現在迄9年間実施し、9名を受賞者、20名弱を佳作として表彰した。九州大学助教を務めた後ドイツの公職についたドイツ人受賞者をはじめ、受賞者が活躍し、国際キャリアパスとして機能し、人材育成が世界的に評価されている。

中堅研究者の一層の活躍とリーダーの育成を述べる。

九州大学助教として研究参加した一人は、平成22年に東京農工大学教授に昇進した。また、平成21年から科学研究費基盤研究(S)を代表者として主宰した。

また、核融合科学研究所助教として研究参加した一人は、平成21年九州大学教授に昇進した。現在はプラズマ乱流物理学の世界的指導者として研究を先導し、教育にも活躍している。平成21年度に井上学術賞、平成22年度に文部科学大臣表彰科学技術賞、平成23年度仁科記念賞、平成23年度日本物理学会論文賞等、多くの重要な賞を受けている。

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。