

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246162

研究課題名(和文) 2次元乱流ダイナミクス観測のための多波長超多点観測法の開発

研究課題名(英文) Development of multi-channel and multi-wavelength detection for observing 2D turbulence dynamics

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,400,000円、(間接経費) 11,220,000円

研究成果の概要(和文)：揺らぎと構造のマルチスケール結合の描像に基づくプラズマ乱流と輸送の理解を目指して、プラズマの自発光による乱流と構造のトムグラフィー法、多波長超多点観測法の原理実証を行った。九大の直線プラズマ装置PANTAにてプラズマ発光(可視光)を4視点から観測する132チャンネルトムグラフィシステムを完成しプラズマの断面全域に渡るダイナミクスを含めた観測が実現できた。プラズマ発光の二次元像が得られ、また十分な精度で検出光の揺らぎ成分が測定された。X線および紫外光については、シンチレータおよび蛍光ガラスによる間接検出法の基礎的な段階が終了した。トムグラフィーのアルゴリズム開発も進み原理実証が完了した。

研究成果の概要(英文)：Aiming at advanced understanding of plasma turbulence and transport, based on multi-scale nonlinear couplings between fluctuations and structures, super multi-channel and multi-wavelength detection has been developed for tomographic system. A 132 ch. prototype system is constructed in a linear cylindrical device, termed PANTA, to be able to detect visible lights with covering the whole plasma cross-section in four azimuthal angles separated by 45 degree apart. The whole region of plasma has been able to be successfully measured, including its dynamics, with visible lights. Two-dimensional image of plasma light emission was reconstructed, and the fluctuation component was detected with sufficient signal-to-noise ratio. As for X-ray and ultra-violet light, the initial development of the methods using scintillator and fluorescence glass has been successfully accomplished. Tomography algorithms have been explored and the major principle of the proposed method have been proved.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：プラズマ 乱流 トムグラフィー 多スケール結合 X線 紫外線 オプティカルフィードスルー 蛍光ガラス

## 1. 研究開始当初の背景

現在、核燃焼プラズマを地上に実現すべく、ITER プロジェクトが人類の叡智を結集して進められている。ITER の設計では、既存の実験結果を外挿する「経験的スケーリング則」の方法が用いられてきた。閉じ込めスケーリング則は広く受け入れられているが、外挿に伴う予測の幅が避けられない。予測の幅が元になって“ITER は燃えないのでは？”(J. Glanz, Science 1996) という混乱が巻き起こった事は記憶に新しい。

現在でも、H-mode ペDESTAL 高さの予測の幅がもたらす核融合 Q 値の大きな開き等多くの課題がある(ITER Physics Basis, Nucl. Fusion 39 1999)。核融合の実現をめざす ITER でのこうした曖昧さを払拭し研究コストを高効率にするため、閉じ込めプラズマ特性を経験則だけでなく第一原理から精密に予測することがますます重要になっている。そのためには乱流の物理理解が望まれていた。

プラズマ閉じ込めの研究では、プラズマ乱流および構造形成の描像について変革の時を迎えている (P. H. Diamond et al., PPCF 2005, A. Fujisawa, Nucl. Fusion 2009)。代表者らによる我が国に於ける実験的発見 (A. Fujisawa et al., PRL 2004) により、プラズマの構造は、局所的な乱流によってのみ決まるのではなく、マイクロ・メソ・マクロの波長スケールの異なる揺らぎの結合により形成・維持されるという描像が確立した。従来からプラズマ乱流は局所磁場構造(曲率、測地線曲率、他)などと関連して 2 次元的な構造を持つことが知られており、現代的描像においても、帯状流や GAM などによる Dynamic Shearing (K. Itoh et al., PPCF 2005) や Turbulence Spreading (Z. Lin et al., Phys. Plasmas 2004) などの効果により乱流パターンは(径およびポロイダル方向に) 2 次元的かつダイナミックに変動し、遠く離れた 2 点での乱流特性が互いに関係をもつことが予言され、輸送の大域性の説明が第一原理から可能になりつつある。

また、帯状流の谷に背景乱流が捕捉され変動していることを示唆する観測 (A. Fujisawa et al., JPSJ 2007) もあり、帯状流の構造とともに「乱流パターン」とプラズマ輸送特性も時空間的に変動していると推測されている。しかしながら、現在のトロイダルプラズマの乱流実験、特に高温プラズマ領域では基本的に局所一点観測に留まっている。希求されている核融合プラズマの「第一原理実験法則」を得るためには、この 2 次元かつ動的描像を確かめ、プラズマ全域におよぶマイクロからマクロまで全てのスケールの揺らぎの同時計測が必要である。プラズマ全域に渡る乱流の 2 次元ダイナミクスの観測こそが今後のプラズマ乱流の物理、更には核融合学の発展には不可欠であり、2 次元乱流ダイナミクスの観測法を開発することが必須であった。

## 2. 研究の目的

揺らぎと構造のマルチスケール結合の描像に基づいてプラズマ乱流と閉じ込めの更なる理解のためには、これまで一点計測(あるいは周波数領域)に留まっていた観測を、(波数領域も含めるため)広域に渡る 2 次元観測へと発展させるのが不可欠な時代となっている。

本研究は、X 線、紫外光、可視光についてトモグラフィ法に基づき局所情報に変換する多波長超多点観測法の原理実証を目的とする。X 線や紫外線に関しては九大の球状トカマク QUEST など、X 線や紫外線を十分に発光する高温プラズマにおいて原理実証し、九大の直線プラズマ装置 PANTA にてポロイダル断面全域に渡る乱流の 2 次元ダイナミクスの観測を実現する。将来、高性能プラズマ実現のためプラズマの構造形成機構を第一原理から明らかにするため、乱流の 2 次元ダイナミクスを実測するための多波長長多点観測器とそのデータを用いたトモグラフィアルゴリズムの開発を行う。

## 3. 研究の方法

はじめに、多波長超多点空間観測法および試作品の概略について説明する。従来の X 線や紫外光の検出では、通常、ノイズ低減のためアンプを実装した検出器(1cm 程度の大きさとなる)をプラズマに対向して並べる必要があり、数十の検出器を並べることが限界である。しかしながら、ファイバー(1mm 以下)を対向面に直接配列し、ファイバーによる光の伝送の後、十分なスペースを有する離れた場所で電気信号変換が行える。この方法では、並べられる検出器の数はファイバー径により決まり数 mm 間隔での配置が可能であろう。また、検出器を遠隔に配置可能であるためノイズ耐性についても優れている。

実際の方法としては、多波長超多点検出システムのハードウェアを作成し、九大直線プラズマ生成装置 PANTA やトロイダル装置に設置し開発する。可視、紫外、X 線等、プラズマからの発光領域に対応した波長の異なる光を検出し、対応するプラズマ領域の揺らぎや構造変化を検出しようとする。図 1 にその光入射部の概念図を示す。プラズマ光はコリメータにより観測領域が線状に制限され、入射した光は光学フィルターにもちいて特定の可視光領域および紫外線領域に分離される。X 線の場合はフィルターの代わりにシンチレータ(CsI など)を置き可視光に変換して、オプティカルフィードスルーに入射する。ここでオプティカル・フィードスルーとはフィルターを透過した光を真空側から大気側へ伝送するために、蛍光ガラスを埋め込んだ真空フランジをいう。これにより紫外光は可視光に変換され、ファイバーによって光検出器まで伝送される。

一方、トモグラフィーのアルゴリズムの開発については、現在、これまでプラズマのトモグラフィーに用いられてきた関数展開法に加えて、医学領域で用いられている ML-EM ほか、ART 法など種々のアルゴリズムを適用する。また、大量の画像データを扱うために、既存のパーソナルコンピュータのクラスターシステムでの適用を目指して行う。

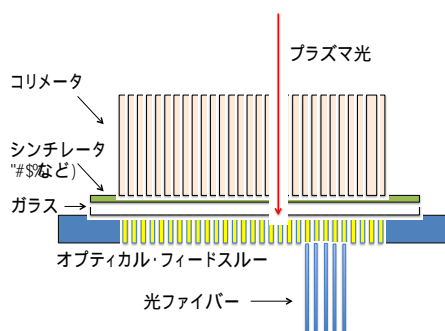


図1 スーパートモグラフィーのために開発されたオプティカル・フィードスルーを用いた多チャンネル X 線検出システム概念図。オプティカル・フィードスルーの光伝送部は蛍光ガラスであり(シンチレータ+石英ガラス)部分を紫外線あるいは可視光のフィルターに代えることで紫外線の多チャンネル検出システムとして使用できる。

#### 4. 研究成果

本研究課題において、多波長超多点計測器とそれを用いたトモグラフィーアルゴリズムの開発が進み、その原理検証が完了した。以下、ハードウェア、アルゴリズムおよび得られた実験結果について詳述する。

ハードウェアシステム開発：図2には、実際に製作した PANTA 用多波長超多点検出システムの光入射部を示してある。一列 33 本、4 列計 132 の蛍光ガラスが取り付けられている。フランジとコリメータとの間に光学フィルターを設置可能なスペースがもうけられ可視光や紫外光を適切なバンドに分光する事ができる。このシステムを PANTA の磁気軸の周回方向に 4 カ所 45 度ずつ離れた位置に設置し、トモグラフィーの試行を行った。X 線に関しては同様なシステムを高温プラズマ様に ICF152 フランジを用いたオプティカルフィードスルーを作成し、そこに取り付けられるようなシステムを開発した。また X 線様として石英ガラスに CsI を蒸着したシンチレータを東芝電子管デバイスに依頼し作成した。

揺らぎ構造のトモグラフィーを行うために、十分高いゲインをもち S/N に優れたアンプを開発した。ナノアンペアの電流を低ノイズで電圧変換できる重イオンビームプローブ用の回路に基づいて、 $10^8$  V/A のゲインおよび周波数帯域 50kHz を持つ光-電圧変換アンプを製作した。



図2 PANTA 用に製作されたトモグラフィー用光検出器。ArI および ArII ラインを検出可能

アルゴリズムの開発：トモグラフィーのアルゴリズムを確立するために、仮想プラズマ発光データと仮想計測システムによるアルゴリズムの試作および開発を行っている。図3(上)に仮定された発光強度のデータを示す。図3(下左)は、仮想データから得られる線積分データから ART 法を用いてトモグラフィーを行った結果、図3(右)は ML-EM 法によって得られた結果を示している。このシミュレーションでは、2.5 度ずつ 8 方向の視点から 101 チャンネルの視線(総数 808 チャンネル)で観測したと仮定し、25x25 画素に分割してその発光強度を求めている。

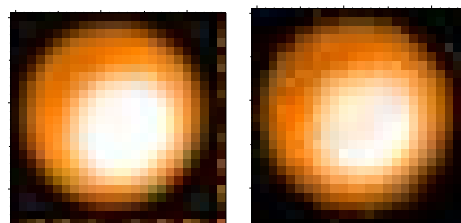
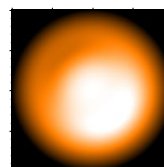


図3. (上) 仮想データ(下左) ML-EM 法によるトモグラフィ画像(下右) ART 法によるトモグラフィ画像。

実験結果：多波長超多点検出システムによるトモグラフィーの試行のために、前述した直線プラズマ PANTA にて、各断面 16 チャンネル、総数 64 チャンネルの視線の観測を行った。観測には、アルゴン一価のライン 476.5nm を中心に  $\pm 30$ nm の幅を持つ領域の可視光である(対象とするプラズマはアルゴンプラズマ)。

4 方向から観測された発光強度分布を図4(左)に示してある。トモグラフィーのアルゴリズムの試行結果の一例を図4

(下)に示す。プラズマの発光が中央で極めて急峻であることが分かる。また、非対称性であることが示唆されているが、トモグラフィシステムがプラズマ生成アンテナの近傍に設置されているため電圧導入部による対称性の破れの反映だと考えられる。

また、プラズマの中心を見込む発光強度信号のフーリエ解析を行った。広い周波数帯に分布する‘乱流的’な揺らぎ部分に急峻なピークとして現れるコヒーレントなモードも観測され、SN比最大  $1 \times 10^6$  が達成されており、十分な精度で揺らぎ部分のトモグラフィが可能である事が示唆されて

ML-EM法によるトモグラフィの初期結果(例)

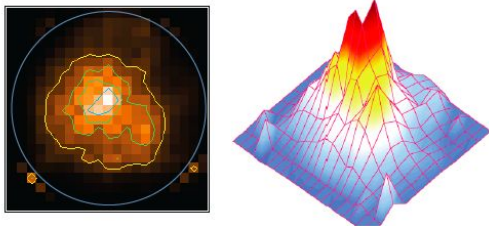


図4.(上)4方向から観測された発光プロファイル(一方向16チャンネルの視線を観測)(左)ML-EM法によって得られたトモグラフィ画像。(右)対応するサーフィスプロット。

いる。実際に Bessel 関数展開法でトモグラフィを行った例を示す。

一方、紫外線に関しては京都工繊大の協力を得て RELAX 逆転磁場ピンチ装置にて実際に紫外光を可視に変換し伝送する事で有為なデータが得られている。一方、QUEST では CsI を使ったシンチレータを図1のシステムのフィルターの代わりに挿入する事で、フォトマルチプライアーを用いて X 線を検知する事に成功している。

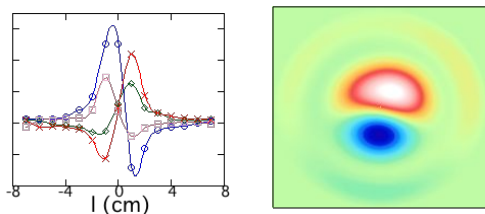


図5.(左)4方向から観測されたコヒーレントな揺らぎ部分な発光プロファイル(一方向16チャンネルの視線を観測)(右)ML-EM法によって得られたトモグラフィ画像。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

- 1) Non-Gaussian properties of global momentum and particle fluxes in a

cylindrical laboratory plasma, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, S. Inagaki, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, K. Kamataki, T. Yamada, S. Shinohara, S. Oldenbürger, M. Yagi, Y. Takase, P. H. Diamond, and K. Itoh, *Physics of Plasmas* **18**, 070701 (2011). 査読有.

- 2) Dynamic interaction between a solitary drift wave structure and zonal flows in a linear cylindrical device, H Arakawa, T Kobayashi, S. Inagaki, N Kasuya, S Oldenbürger, Y. Nagashima, T. Yamada, M Yagi, A. Fujisawa, K Itoh, S.-I Itoh, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 115009 (2011). 査読有.
- 3) Experimental studies of mesoscale structure and its interactions with microscale waves in plasma turbulence, A. Fujisawa, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 124015 (2011). 査読有.
- 4) Observations of intermittent structures in the periphery of cylindrical linear plasma in PANTA, Noriko Ohyama, Akihide Fujisawa, Shigeru Inagaki, Yoshihiko Nagashima, Stella Oldenbürger, Tatsuya Kobayashi, Katsuyuki Kawashima, Yuuki Tobimatsu, Tetsuo Yamashita, Soutaro Yamada, Hiroyuki Arakawa, Takuma Yamada, Masatoshi Yagi, Naohiro Kasuya, Makoto Sasaki, Sanae-I. Itoh and Kimitaka Itoh, *Plasma and Fusion Research* **7**, 1201025 (2012). 査読有.
- 5) Observation of Long-Distance Radial Correlation in Toroidal Plasma Turbulence, S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Ida, S.-I. Itoh, N. Tamura, S. Sakakibara, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. Kubo, T. Shimosuma, T. Ido, S. Nishimura, H. Arakawa, T. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Sudo, H. Yamada, and A. Komori, *Phys. Rev. Lett.* **107** 115001 (2011). 査読有.
- 6) Dynamics of particle flux in a cylindrical magnetized plasma, S Oldenburger, S. Inagaki, T Kobayashi, H Arakawa, N Ohyama, K Kawashima, Y Tobimatsu, A. Fujisawa, K Itoh and S.-I Itoh, *Plasma Phys. Control. Fusion* **54** 055002 (2012). 査読有.
- 7) On influences of long-range fluctuations on transport in Large Helical Device plasmas, K Itoh, S.-I Itoh, S. Inagaki, T Kobayashi, A

- Fujisawa, Y. Nagashima, S. Oldenburger, K. Ida, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, H. Yamada and the LHD Experiment Group, Plasma Phys. Control. Fusion **54** 095016 (2012). 査読有.
- 8) On turbulence-correlation analysis based on correlation reflectometry, N.V. Teplova Kosolapova, K. Itoh, S.-I. Itoh, E.Z. Gusakov, S. Heuraux, S. Inagaki, M. Sasaki, T. Kobayashi, Y. Nagashima, S. Oldenburger, A. Fujisawa, Phys. Scr. **87** 045502 (2013). 査読有.
- 9) Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak, T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Phys. Rev. Lett. **111** 035002 (2013). 査読有.
- 10) How is turbulence intensity determined by macroscopic variables in a toroidal plasma? S. Inagaki, S.-I. Itoh, K. Ida, A. Fujisawa, K. Itoh, Nucl. Fusion **53** 113006 (2013). 査読有.
- 11) Spatial structures and interaction of multiple sheared flow populations in tokamak edge turbulence, K.J. Zhao, J.Q. Dong, L.W. Yan, P.H. Diamond, J. Cheng, W.Y. Hong, Z.H. Huang, M. Xu, G.R. Tynan, K. Itoh, S.-I. Itoh, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Inagaki, Z.X. Wang, L. Wei, Q. Li, X.Q. Ji, Y. Huang, Yi. Liu, J. Zhou, X.M. Song, Q.W. Yang, X.T. Ding, X.R. Duan and the HL-2A Team Nucl. Fusion **53** 083011 (2013). 査読有.
- 12) Sawtooth-triggered limit-cycle oscillations and I-phase in the HL-2A tokamak, K.J. Zhao, J. Cheng, P.H. Diamond, J.Q. Dong, L.W. Yan, W.Y. Hong, M. Xu, G. Tynan, K. Miki, Z.H. Huang, K. Itoh, S.-I. Itoh, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Inagaki, Z.X. Wang, L. Wei, X.M. Song, G.J. Lei, Q. Li, X.Q. Ji, Yi Liu, Q.W. Yang, Nucl. Fusion **53** 123015 (2013). 査読有.
- 13) An Assessment of Limit Cycle Oscillation Dynamics Prior to L-H Transition, K. Itoh, S.-I. Itoh, A. Fujisawa, Plasma Fusion Res. **8**, 1102168 (2013). 査読有.
- 14) Turbulence in Toroidal Plasma, Akihide Fujisawa, J. Phys. Soc. Proc.1 015005 (2014). 査読有.
- [学会発表](計11件)
- 1) 'Experimental Studies of Mesoscale Structure and Its Interactions with Microscale Waves in Plasma Turbulence', Plenary talk, A. Fujisawa, European Physics Society, 38<sup>th</sup> Conference on Plasma Physics, Plenary talk, June 27-July 1, 2011, Strassburg France. (招待)
- 2) 'Turbulence in Toroidal Plasma' A. Fujisawa, Asian Pacific Physics Conference 2013, Makuhari Messe Chiba, Japan July 15-18 (招待).
- 3) Extended Paradigm of and Diagnostics for Plasma Turbulence A. Fujisawa, Y. Nagashima, S. Inagaki, K. Matsuoka, S.-I. Itoh, K. Itoh, H-mode workshop, Kyushu University Chikushi Campus, Fukuoka Japan Oct 2-4 2013
- 4) 「磁化プラズマの乱流と輸送の現代的描像について」シンポジウム「様々なプラズマの非平衡性」藤澤彰英 プラズマカンファレンス 2011 金沢 平成 23 年 11 月 22 日-25 日
- 5) 「乱流プラズマにおける構造形成の実験観測」藤澤彰英 国立天文台研究集会「天文学を中心とした理工学での乱流研究 (NAOJ Turb. 2011)」東京大学 生産技術研究所 平成 24 年 2 月 23 日
- 6) 「乱流プラズマにおける構造形成の実験観測」藤澤彰英 平成 24 年度 3 月 19 日-22 日 天文学会(招待講演) 龍谷大学 京都(招待)
- 7) 「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流とメソスケール構造の生成について」(仁科記念賞受賞講演) 藤澤彰英 日本物理学会 平成 24 年 3 月 24 日-27 日 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス 西宮(招待)
- 8) 「磁化プラズマ乱流研究の進展」藤澤彰英 プラズマ核融合学会九州支部会 平成 24 年 12 月 22 日 九州大学筑紫キャンパス 春日(招待)
- 9) 「乱流プラズマの輸送と界面のダイナミクス」藤澤彰英 日本物理学会 広島大学 平成 25 年 3 月 26 日-3 月 29 日
- 10) 「プラズマ乱流の描像と全域マルチスケール観測の必要について」日本物理学会 藤澤彰英、永島芳彦、稲垣滋、松岡啓介、伊藤公孝、伊藤早苗 徳島大学 平成 25 年 9 月 25 日-28 日
- 11) プラズマ乱流全域マルチスケール観測と

装置設計 藤澤彰英、松岡啓介、永島芳彦、稲垣滋、伊藤公孝、伊藤早苗  
プラズマ核融合学会 平成25年12月3日-6日  
東京工業大学

〔図書〕(計3件)

- 1) 「プラズマ乱流研究の新展開：巨視的揺らぎ構造の発見と新パラダイム」藤澤彰英 パリティ 2014年1月号 20-22p
- 2) 「初学者のための原子力・量子・核融合の事典」(丸善) 3.7.8項 藤澤彰英 2013年
- 3) 電気学会技術報告 「球状トカマクをベースとする核融合発電炉」 2.3 輸送(Lモード、Hモード、ITB) 26-32ページ、藤澤彰英 核融合炉の経済性向上調査専門委員会編 電気学会 第1298号 平成24年12月

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/fujisawaken/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

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

井戸毅 (Ido Takeshi)  
核融合科学研究所 准教授  
研究者番号：50332185

清水昭博 (Shimizu Akihiro)  
核融合科学研究所 助教  
研究者番号：00390633

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

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

中野治久 (Nakano Haruhisa)  
核融合科学研究所 助教  
研究者番号：90442524

大島慎介 (Ohshima Shinsuke)  
京都大学エネルギー理工学研究所 助教  
研究者番号：00469610

図子秀樹 (Zushi Hideki)  
九州大学 応用力学研究所・教授  
研究者番号：20127096