

## 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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656576

研究課題名(和文)乱流場における偶然力の可視化と定量化

研究課題名(英文)Visualization and quantification of the stochastic force in plasma turbulence

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：乱流場における偶然力の可視化と定量化という課題に対して高速カメラ、マッハプローブ、HX線分布計測等の計測を用いて以下の成果を得た。1)単純トーラス磁場配位におけるblob発生の統計性、2)非誘導電流駆動による自発ダイバーター配位形成とSOL揺らぎ、3)0Hplasmaへの高周波印加によるSOLのコヒーレント揺らぎと磁力線ピッチの統計性を明らかにした。特筆すべき点として、平均プラズマ流れ、流れの乱れ計測など速度場計測手法の開発に取り組み、非誘導電流駆動プラズマの自発回転を発見し、自発回転( $\sim 10\text{km/s}$ )には正曲率垂直磁場が有効であり、電流方向回転であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Visualization and quantification of the stochastic force in plasma turbulence have been investigated using fast camera imaging of plasma, Mach probes in the SOL and four HX arrays. The followings are achieved; 1) stochastic scaling law and gamma pdf of the SOL turbulence, 2) statistic law of magnetic pitch dependence of the coherent SOL turbulence, 3) development of the velocitometry for the SOL turbulence. Especially, the plasma flow measurements based on the Doppler shift spectroscopy for impurity ions, Mach probes for the SOL plasma, and velocitometry for fluctuations have been performed and it has been found that intrinsic rotation is triggered under the particular magnetic field configuration with strong positive curvature, and the rotation is the same as the plasma current. slab

研究分野：工学

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・核融合 自己組織化 偶然力 揺動確率密度分布 揺動高次モーメント法 プラズマ回転

1. 研究開始当初の背景

揺動の研究は核融合研究の重要な柱の一つとして長年研究されてきた。揺動の解析には周波数・波数空間での解析も含めて、高度な解析手法が用いられている。確率密度分布(pdf)に着目して、Carreras(POP 1996) は粒子束の pdf moment 解析、また Labit(PRL2007) は密度揺動の moment 統計解析を行った。前者は  $n, v$  をそれぞれ Gauss 型揺らぎとした点で今日の Blob 等を考慮した状況を反映していない事、また後者は pdf が beta 分布であることを主張したが、手法に内在する利点を生かした研究へと展開していない。本研究では高速カメラを用いた広範囲な揺動計測から pdf が空間的に見かけ上異なって観測されても、Gamma 分布を主体とした分布に従うことを見だし(掲載受理 JNM 2010 Sep., NF 投稿中)、これをさらに発展させる形で、

**確率微分方程式の実験的決定、ランジュバン方程式の実験的決定、そしてランジュバン方程式における決定論的/確率論的影響を定量的に定められないか**

というアプローチでの研究を進めている。

個々の物理量の揺らぎの因果律とは別に、粒子束  $\Gamma \propto n v$ 、熱粒子束  $q \propto T v$  などの解析には複数の確立変数の積の結合確率密度分布を決定する必要があり、上述の手法を発展させて、揺らぎによる輸送における偶然力の役割解明に進める。

加えて、揺らぎのなかでも観測の遅れている平均流速の core から SOL までの同時計測、揺動速度場計測法の確立という課題にも取り組む。これにより揺動の駆動力と速度場の相互関係を明らかにする端緒となる。これらの課題に対しては分光手手法による Core flow、Mach probe による SOL flow、高速カメラによる速度場構築の3通りを用いて取り組むことで、階層性を明らかにする。

2. 研究の目的

高速カメラで観測した2次元映像から多数の空間に依存した光量の揺動時系列デー

タ  $n(t)$  を取得し、それらを独立した確率変数列と見なすことにより、平均  $\mu$ 、分散  $\sigma^2 = \mu_2$ 、Skewness  $S = \mu_3 / \mu_2^{1.5}$ 、Kurtosis  $K = \mu_4 / \mu_2^2$  の2次元構造を決定する。広範囲な領域で  $K = 1.5S^2 + 3$  の関数関係が実験的に得られ、pdf  $p(n)$  が Pearson type に従い、特に Gamma 分布で近似できることを見いだした。この成果の上に以下の点を明らかにする。

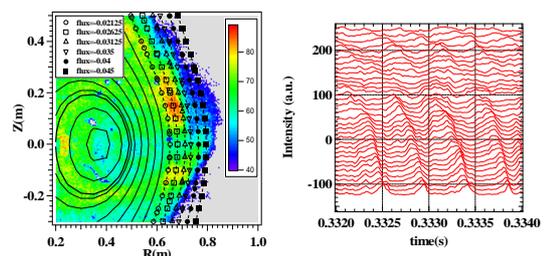
- (1) Pearson type の確率微分方程式 Stochastic Differential Eq を、 $S, K, \sigma$  値から決定し、実験的に SED を定め、その空間構造を明らかにすること。
- (2) 密度揺動に関する Langevin model 方程式 LME と実験的に得られる SED との比較から、pdf の変化を通じて観測される“偶然力項”の役割を明らかにする。
- (3) 偶然力に対する場の無次元量  $(q, \rho, v, \beta, \epsilon)$  依存性を調べる。
- (4) filter を用いた Doppler 計測あるいは多点位置の密度揺動の相関解析から速度揺動を決定し、密度揺動と併せて、粒子束揺動を計算し、 $n, v$  の結合確率密度分布、それに付随した統計量(相互相関係数)の空間構造を得る。

こうした揺動場と密接に速度場の計測を追加し、外部からの運動量入力のない非誘導プラズマにおける自発プラズマ回転の生起条件、回転の方向、自発回転の維持機構、回転とプラズマ密度などの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

申請者の提案する揺動解析から実験的に SDE を決定する手法を以下にしめす。

図 1



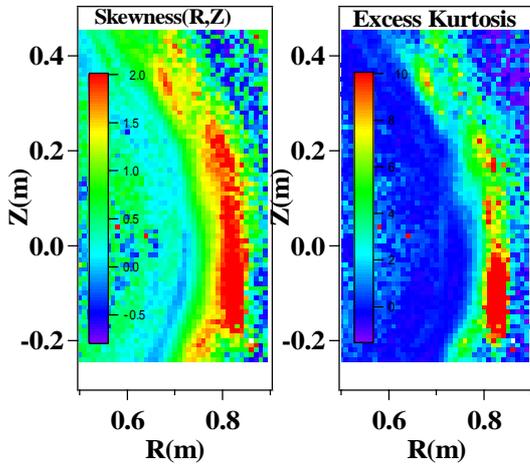


図 2

図 1 は高速カメラ映像の snapshot とその時刻における磁気面に沿った揺動の時系列を示す。Blob が上部から下部にかけ伝播する様子が示されている。空間点を固定し、確率変数  $n(t)$  を光量揺動として定め、moment を算出する ( $K_e = K - 3$ )。その様子を図 2 に示す。S,  $K_e$  が 0 の構造を示す領域は  $S = K_e = 0$  で特徴づけられる Gauss 揺動の領域から明らかに区別され、平均光量の勾配が形成されている領域に一致している。こうして、Pdf の形を特徴づける S,  $K_e$  を“輸送”に関して物理的に意味づけた表現である、three-points correlation, および a measure of intermittency が可視化されている。

$$\frac{d(\log p(n))}{dn} = -\frac{a+n}{c_0 + c_1 n + c_2 n^2} \quad (1)$$

S,  $K_e$  の間には簡単な関係 ( $K_e = 1.5S^2$ ) が見いだされ、この関係を満足する SDE は式 1 の Pearson type に属することがわかった。簡単な計算により、これらの係数は moment と関連づけることができ、 $c_0 \sim c_2$  係数の空間構造を決めることができる。 $c_1 = c_2 = 0$  の  $p(n) = \text{Gauss}$  型分布から、 $p(n) = \text{Gamma}$  型 ( $c_1 > 0, c_2 = 0$ )、 $p(n) = \text{Beta}$  型 ( $c_2 > 0$ ) と空間構造の変化を可視化して知ることができる。これが**実験から SDE を定める**というアイデアの元になっている。

速度場は平均速度場並びに揺動速度場から構成されている。本研究では、平均速度場を Doppler 分光、Mach probe の双方で計測し、高速カメラの密度揺動場から揺動速度場を解析する手法の確立に取り組む。こうした計測法を組み合わせることにより、揺動場を支配する乱流場の総合的な知見が得られる。

#### 4 . 研究成果

以下の成果を得た。

(1) “ Blob 発生・伝播の速度場構造とメソスケール揺らぎのユニバーサルな統計確率分布の解明 ”

本研究では単純トロイダル配位で観測される blob を対象に次の 2 つのアプローチでトカマクの開放系磁場領域の速度場揺らぎの性質を明らかにすることをめざす。第一の手法と目的は高速カメラを用いて blob の発生・駆動・伝播のすべての過程における速度場の動的時空間構造を計測し、密度場との関係を明らかにすること、第 2 の手法と目的は間歇揺らぎとしての特徴を有する blob 系の揺らぎを静的確率事象としてとらえ、その確率密度関数が従う確率分布則を明らかにすることである。23 年度はイメージインテンシファイヤーを購入し、微弱光を高速で観測できるようにシステムの向上を図った。それを用いて、プロップの発生、伝播に関して、新たに、印加磁場強度とミラー比の違いを考慮した観測結果を得ることができ、日本物理学会にて口頭発表を行い、電気学会に論文投稿中である。同時に速度場の計測として、HeII の光学フィルターを用いて、強度比から速度を算定することにより、背景流れ場の観測に成功した。初期結果は国際会議で発表し、論文に投稿中である。乱流場における偶然力の可視化と定量化という課題に対して行った研究は以下の通りである。まず、1) 非誘導方式による電流駆動と

閉磁気面形成過程、を磁気解析により調べ、2) 高ポロイダルベータプラズマと自発ダイバータ配位形成が可能な外部条件を解明し、高速電子の寄与を評価すること、さらに本研究課題の主要なテーマである3) 高周波印加による SOL のコヒーレント揺らぎと磁力線ピッチの統計性を明らかにした。

#### (2) 非誘導電流駆動における自発ダイバータ配位形成と揺らぎの磁力線ピッチ相関

本研究では、開磁気面下で、シード電流と高速電子が放出する X 線の磁気ミラー比  $M(0.85-2)$  依存性を調べ、ミラー比を強めることにより X 線強度の増大を観測した。これが高速電子の閉じ込めによることは高周波遮断後の減衰時間によって確認した。こうして、磁気ミラー比を強め ( $M=2$ )、磁場強度を大きくすること ( $B_z/B_t \sim 10\%$ ) によりサイクロトロン共鳴で初期生成された高速電子を良好に閉じ込め、高効率な電流立ち上げ ( $0.3-0.5\text{MA/s}$ ) を実現し、到達値  $\sim 35\text{kA}$  の非誘導電流駆動が可能であることを見出す成果を挙げた。X 線計測をもとに高速電子の圧力を推定し、圧力増大により自発ダイバータ配位が形成されることを確認した。こうした非誘導電流駆動プラズマにおいて、高温プラズマの境界域における間歇的大振幅揺らぎの発生機構とそれによる熱・粒子輸送の解明に向けて、磁力線のピッチの依存性を調べた。プローブにより密度、電位、流れ場の同時計測と詳細な広領域計測を行い、揺らぎの統計解析を行った。非接触イメージング手法を用いて、極めて広い領域をプラズマを乱すことなく高速度で観測することに成功し、密度の対流輸送をもとに密度揺らぎから速度場を再構築する手法を開発した。

#### (3) 非誘導プラズマにおける自発プラズマ回転

本研究では、平均プラズマ流れ、流れの乱れ計測に取り組み、自発ダイバータ配位形成過程では、高周波による電流形成に先立ち、高周波印加直後にプラズマ回転 ( $\sim 10\text{km/s}$ ) が起きること、その自発回転誘起は正曲率垂直磁場が有効であり、高周波パワーとともに回転が増すこと、回転方向は垂直磁場方向にのみ依存することを明らかにした。さらに、定常状態においても大量のガス入射により回転速度分布が影響され回転分布の反転が起きること、適切なガス入射の場合には長時間自発回転を維持できることなどの知見を得た。こうした平均流の計測に加えて流れの乱れについて今後の研究を発展させる。

本研究を通じて3名の博士課程の院生が研究を進めることができた。2名は1) 非誘導電流駆動による高 poloidal ベータと高速電子寄与、2) 高速カメラを用いた揺動と磁力線ピッチの関係に関する研究により学位を得ている。一名は「磁化プラズマにおけるプラズモイド生成と磁力線を横切る輸送におよぼす磁力線曲率と乱流速度場の影響について」という課題で研究助成 (笹川奨学金) を得た。また2014年3月の物理学会において、一名が優秀発表賞を得た。

#### 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16件)

1. S. Tashima, H. Zushi, et. al., 他12人, Role of energetic electrons during current ramp-up and production of high poloidal beta plasma in non-inductive current drive on QUEST, Nuclear Fusion, 54, 023010, 2014. 査読有
2. S. Banerjee, H. Zushi, et. al., 他10人, Turbulence velocimetry of tangential fast imaging data on QUEST, Plasma Fusion Res., 8, 2402098, 2013. 査読有
3. T. Nishioka, T. Shikama, S. Nagamizo, K. Fujii, H. Zushi, et. al., 他5人,

- Development of a compact thermal lithium atom beam source for measurements of electron velocity distribution function anisotropy in electron cyclotron resonance plasmas, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 84, 073509, 2013. 査読有
4. S. Banerjee, H. Zushi, et. al., 他 10 人, Edge turbulence characteristics of the Ohmic-ECRH driven plasma current phase investigated with fast visible imaging in QUEST, Proc. ITC-22, 2013. 査読無
  5. S. Tashima, H. Zushi, et. al., 他 12 人, Non-inductive current drive by EC waves in an inboard poloidal magnetic field null configuration on the Spherical Tokamak QUEST, Proc. ITC-22, 2013. 査読無
  6. S. Banerjee, H. Zushi, et. al., 他 10 人, Statistical features of coherent structures at increasing magnetic field pitch investigated using fast imaging in QUEST, Nuclear Fusion, 52,123016, 2012. 査読有
  7. S. Banerjee, H. Zushi, et. al., 他 12 人, Fast visible imaging and edge turbulence analysis in QUEST, Rev. Sci. Instrum, 83,10E524, 2012. 査読有
  8. Tashima S., Zushi H., The role of energetic electrons on non-inductive current start-up and formation of an inboard poloidal field null configuration in the spherical tokamak QUEST, Proc. 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics, 2 - 6 July 2012, Stockholm Waterfront Congress Centre, Stockholm, Sweden, P1.051-P1.051, 2012. 査読有
  9. H. Idei, M. Sakaguchi, K. Nagata, K. Hanada, H. Zushi et. al., 他 7 人, Conceptual Design and Prototype Performance of Phased-array Antenna for EBWH/CD Experiments in QUEST, 電気学会論文誌 A, 132, 7, 511-516, 2012. 査読有
  10. E. Kalinnikova, H. Idei, H. Igami, S. Kubo, A. Fukuyama, H. Nuga, H. Zushi, K. Hanada, Modeling of OXB Mode Conversion Scenario for EBWH/CD Experiments in QUEST, 電気学会論文誌 A, 132, 7, 505-510, 2012. 査読有
  11. S. Banerjee, H. Zushi, et. al., 他 13 人, Statistical Analysis of the Convective Intermittent Transport at the Edge Region of QUEST, 電気学会論文誌 A, 132, 7, 545-554, 2012. 査読有
  12. S.K. Sharma, H. Zushi, et. al., 他 14 人, Analysis of PWI footprint traces and material damage on the first walls of the spherical tokamak QUEST, fusion enginerring and design, 87, 77-86, 2012. 査読有
  13. S. K. Sharma, H. Zushi, et. al., 他 24 人, Permeation measurements for investigating atomic hydrogen flux and wall pumping/fuelling dynamics in QUEST, Journal of Nuclear Materials, 420, 83-93, 2012. 査読有
  14. S. Banerjee, H. Zushi, et.al, 他 11 人, Statistical Interpretation of the Density Fluctuations From the High-Speed Visible Images of Edge Turbulence on QUEST, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 39, 3006-3007, 2011. 査読有
  15. H. Zushi, et.al, 他 10 人, Acceleration of Blob driven by Helical Instability In a Simple Magnetic Configuration in QUEST, Journal of Nuclear Materials, 415 S624-627(2011) 査読有
  16. T. Shikama, K. Fujii, S. Kado, H. Zushi, et.al, 他 5 人, " Plasma polarization spectroscopy of atomic and molecular emissions from magnetically confined plasmas", Can. J. Phys., 89, 5, 495-501, 2011. 査読有
- [学会発表](計 29 件)
1. 高周波非誘導電流駆動における自発高ポロイダルベータ配位の形成 関子秀樹, 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 03 月 28 日 東海大学 湘南キャンパス
  2. QUEST 装置における 28GHz ECH システムを用いた電流立ち上げ実験 出射 浩, 関子秀樹, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 28 日, 東海大学 湘南キャンパス
  3. 非誘導電流駆動球状トカマク(QUEST)の周辺熱流束とプラズマ流, 恩地 拓己, 関子秀樹, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 27 日, 東海大学 湘南キャンパス
  4. An analytical description of high  $p$  equilibrium with negative triangularity in QUEST MISHRA KISHORE, 関子秀樹 ALEKSANDROVI, QUEST Team 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 27 日 東海大学 湘南キャンパス
  5. QUEST における電子バーンシュタイン波輻射計測 秋本隆太, 出射 浩, 関子秀樹, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部 第 17 回支部大会, 2013 年 12 月 21 日, 佐世保工業高等専門学校
  6. QUEST 定常プラズマにおける H, He 粒子リサイクリング, 関子秀樹, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 2013 年 12 月 04 日, 東京工業大学大岡山キャンパス
  7. QUEST における水素ヘリウム・粒子挙動, 関子秀樹, 第 8 回 QUEST 研究会, 2013 年 07

- 月 30 日, 九州大学筑紫キャンパス
8. Scrape Off Layer Flow Characteristics in the Spherical Tokamak QUEST, S. Banerjee, H. Zushi, APPC12 The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年 07 月 17 日, International Conference Halls, Makuhari Messe Chiba, Japan
  9. Characteristics of High Poloidal Beta ( $\beta$ ) Plasma Formed by Electron Cyclotron Waves in Spherical Tokamak QUEST, K. MISHRA, H. Idei, H. Zushi, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年 07 月 17 日, International Conference Halls, Makuhari Messe Chiba, Japan
  10. 非誘導電流駆動を用いた高ポロイダルベータ平衡とその解析, H. Zushi, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 29 日, 広島大学 東広島キャンパス
  11. H<sub>2</sub>/He retention in QUEST, 関子秀樹, Workshop on QUEST and Related ST RF Startup and Sustainment Plasma Research, 2013 年 02 月 27 日
  12. Present status of QUEST experiments, 関子秀樹, Workshop on QUEST and Related ST RF Startup and Sustainment Plasma Research, 2013 年 02 月 26 日
  13. Study of plasma poloidal rotation induced by electron cyclotron waves (ECW) in QUEST, S. Banerjee, K. Mishra, S. Tashima, T. Inoue, H. Zushi, CSS-14, 2013 年 02 月 18 日, Chikushi Campus of Kyushu University
  14. 球状トカマクに於ける粒子制御と定常プラズマ放電, 関子秀樹, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 29 日, クローバープラザ
  15. Non-inductive current drive by EC waves in an inboard poloidal magnetic field null configuration on the spherical tokamak QUEST, S. TASHIMA, H. ZUSHI, ITC-22, 2012 年 11 月 22 日, Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu
  16. Edge turbulence characteristics of the Ohmic-ECRH driven plasma current phase investigated with fast visible imaging in QUEST, S. Banerjee, H. Zushi, ITC-22, 2012 年 11 月 21 日, Toki, Toki-city, Gifu
  17. Non-inductive Current Start-up and Plasma Equilibrium with an Inboard Poloidal Field Null by Means of Electron Cyclotron Waves in QUEST, H. Zushi, 24TH IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE, 2012 年 10 月 08 日, San Diego, USA
  18. QUEST 電流駆動における自発的 high beta poloidal 配位の解析, H. Zushi, 日本物理学会 2012 年 秋季大会, 2012 年 09 月 18 日, 横浜国立大学
  19. Fluctuation characteristics and flow at the SOL of ECRH driven plasma in QUEST, S. Banerjee, H. Zushi, 日本物理学会 2012 年 秋季大会, 2012 年 09 月 18 日, 横浜国立大学
  20. The role of energetic electrons on non-inductive current start-up and formation of an inboard poloidal field null configuration in the spherical tokamak QUEST, S. TASHIMA, H. ZUSHI, 39th EPS, 2012 年 07 月 02 日, Stockholm Waterfront Congress Centre, Sweden
  21. Edge turbulence study with fast visible imaging in QUEST, S. Banerjee, H. Zushi, 2nd East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, 2012 年 6 月 26 日, Jeju Island, Korea
  22. 高温プラズマ物理学研究センターに関連した今までの成果と将来構想, 関子秀樹, RIAM フォーラム 2012, 2012 年 06 月 05 日, 九州大学筑紫地区
  23. Variations in Edge Turbulence Induced by Poloidal Magnetic Field Curvatures for 8.2 GHz Slab Plasma in QUEST, S. Banerjee, H. Zushi, 19<sup>th</sup> Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, 2012 年 5 月 6 日, Monterey, CA
  24. QUEST 電流駆動における自発的 inner poloidal field null 配位の形成について, H. Zushi, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 26 日, 関西学院大学
  25. QUEST 装置における硬 X 線計測による ECH 電流立ち上げ時と定常維持時の高速電子解析, 田島西夜, 関子秀樹, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 26 日, 関西学院大学
  26. QUEST における電子サイクロトロン波を用いた電流駆動時の硬 X 線計測と高速電子挙動解析, 田島西夜, 関子秀樹, PLASMACONFERENCE2011, 2011 年 11 月 22 日, 石川県立音楽堂
  27. QUEST プラズマ SOL 揺動の高次モーメントを用いた "偶然力" の評価, 関子秀樹, PLASMACONFERENCE2011, 2011 年 11 月 22 日
  28. QUEST の最近の実験, 関子秀樹, 第 6 回 QUEST 研究会, 2011 年 08 月 02 日, 九州大学筑紫地区
  29. QUEST 非誘導電流駆動実験の現状と将来計画, 関子秀樹, RIAM フォーラム 2011, 2011 年 06 月 09 日, 九州大学筑紫地区
- 〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/>
- 6 . 研究組織  
(1) 研究代表者  
関子 秀樹 (ZUSHI Hideki)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号 : 2 0 1 2 7 0 9 6