

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月27日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20760581

研究課題名（和文） トーラス磁場閉じ込めプラズマにおける乱流構造と輸送障壁の研究

研究課題名（英文） Research on turbulent structures and transport barriers in magnetized torus plasmas

研究代表者

糟谷 直宏（KASUYA NAOHIRO）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：20390635

研究成果の概要（和文）：乱流が形成するメソスケール構造はトーラス磁場閉じ込めプラズマの輸送現象で重要な役割を果たす。本研究はその構造形成機構の理解を目的とする。円筒形プラズマの抵抗性ドリフト波乱流シミュレーションから乱流構造形成の素過程について研究を行い、飽和機構や選択則に関する知見を得た。さらにヘリカルプラズマにおけるドリフト交換型不安定性シミュレーションコードを開発し、得られた乱流場に対して実験計測の模擬を行うことで、乱流構造の様相とその形成の時空間構造を示し、シミュレーションと実験の共同研究を有機的に進める枠組みの基盤構築をした。

研究成果の概要（英文）：The object of this study is to understand formation mechanisms of turbulence meso-scale structures, which play important roles on transport phenomena in torus magnetized plasmas. Simulations of resistive drift wave turbulence in cylindrical plasmas clarified the elementary processes of saturation and selection of the turbulent structures. By developing a simulation code for drift-interchange instability in helical plasmas and carrying out numerical diagnostics with finite resolutions on the simulation data, the feature and formation mechanism of turbulent structures were shown, and the basic framework for efficient collaboration between simulations and experiments has been constructed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

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：理論シミュレーション、トーラスプラズマ、乱流構造、帯状流、3次元性

## 1. 研究開始当初の背景

多くの磁場閉じ込めプラズマ実験装置において改善閉じ込め現象が観測されている。改善閉じ込めプラズマ中の輸送を理解するに

は乱流が形成するメソスケール構造の形成機構の理解が必要である。近年、帯状流やストリーマといったそれぞれ径方向、ポロイダル方向に局在化した乱流構造に注目が集ま

っており、乱流同士の相互作用に加えて、それら乱流が形成するメソスケール構造が自己無撞着に乱流状態を規定する機構から異常輸送を定量的に説明する研究が進められている。また、ヘリカル系における輸送障壁形成機構も重要で、その理解は途上である。乱流構造の形成機構と磁場構造の関係を検討すること、そして乱流構造と乱流輸送抑制の関係を探ることが輸送障壁の形成機構の解明に重要な役割を果たす。

## 2. 研究の目的

本研究はトーラス磁場閉じ込めプラズマにおける改善閉じ込め現象の物理的理解を目的とする。改善閉じ込めプラズマ中の輸送を理解するには乱流が形成するメソスケール構造の形成機構の理解が必要である。円筒形直線型プラズマという比較的単純な系におけるドリフト波乱流の数値シミュレーションから乱流構造形成の素過程の研究を進めるとともに、その数値計算コードを拡張してヘリカル磁場形状に適合する。そして数値計算から得られた3次元乱流場に対して、プラズマ実験で行われている乱流計測を模擬することで、プラズマの微視的乱流が形成する乱流構造の形成機構を解明する。

## 3. 研究の方法

プラズマ乱流の数値シミュレーションを行い、磁場閉じ込めプラズマで形成される乱流構造の形成機構を探る。本研究では比較的計算時間が少なくすむ流体モデルを用いて解析を行う。まず、既存の円筒形直線型プラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流コード Numerical Linear Device (N. Kasuya, et al., J. Plasma Phys. (2006))を用いて、乱流構造の素過程と構造形成の選択則の詳細を明らかにする。そして、直線型プラズマにおける乱流コードを拡張してトーラス磁場形状のヘリカル系に適合する。トーラスでは対象とする不安定性が異なるのでモデルを検討する必要がある。さらに磁場もトロイダル、ポロイダルの両成分を持ち、またヘリカルリップルも存在するのでそれら磁場形状の効果を取り入れる。開発した乱流コードを用いて3次元乱流の時系列データを生成する。その乱流場データに対してプラズマ実験で行われている乱流計測を模擬する。そして、メソスケール乱流構造の形成機構とそのダイナミクスの解析を行う。

## 4. 研究成果

(1) 磁化プラズマにおける乱流構造形成の素過程の理解を進めるために、円筒形直線型プ

ラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流のシミュレーションを行った。非線形結合過程の詳細な解析を行うことで、非線形飽和状態における帯状流やストリーマの形成とその3次元な構造維持機構、帯状流の減衰力をパラメータとした両構造の選択的生成機構を明らかにした。九州大学の直線型装置 PANTA 実験グループとの共同研究により、乱流構造の実験的同定という成果につながった。

(2) ヘリカルプラズマでの乱流へと研究を発展させるためにモデル方程式の検討を行った。抵抗性交換型モードを記述する流れ関数、ベクトルポテンシャル、圧力の3場簡約MHD方程式系に、ドリフト波不安定性を考慮するため磁力線方向の電子のダイナミクスを加えたモデルを導入した。ここで簡単化のためトロイダル・ヘリカル磁場曲率はヘリカルピッチに関して平均化された表式で取り入れた。そして本モデルを用いて数値計算コードを開発した。既存のコードでは非線形項の計算にモード結合テーブルを用いて3波結合の総和を求めていたが、フーリエ変換を用いて非線形項を実空間で計算することで計算の高速化を図った。さらに並列計算におけるデータ通信量の軽減、ループ構成の最適化、並列指示行の追加、冗長部の整理などにより計算を高速化し、3次元長時間時系列乱流データの生成を可能とした。

(3) 開発したドリフト交換型不安定性コードを用いてヘリカルプラズマにおける不安定性によって駆動される乱流を模擬した。まず、線形解析により固有モードの性質を調べた。抵抗性交換型モードが有理面に局在しており、抵抗率や圧力に対する線形成長率の依存性が理論式に一致することや、ドリフト波の固有関数が小半径方向に広がっており、両者の成長率が同程度となるパラメータが存在することを確かめた。そして、系が不安定化するパラメータを用いて、圧力ソース項を与えて維持した非線形飽和状態を得た。図1に電位エネルギーの各フーリエモード成分の時間発展を示す。プラズマ中に有理面が存在する低モード数モードがまず不安定化し、

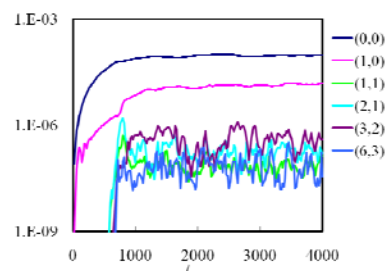


図1：電位エネルギーの各フーリエモード成分の時間発展

非線形項を通じたモード間のエネルギー交換により飽和状態がもたらされている。

(4) 得られた乱流データに対して乱流の実験計測を模擬した解析を行い、有限ビーム幅によって限定される分解能について議論した。計測を模擬するモジュールの開発を重イオンビームプローブ(HIBP)、位相コントラスト干渉計(PCI)、ビーム発光分光法(BES)について行った。HIBP 数値診断では揺動場中での重イオン粒子の運動、およびその軌道に沿ってのビーム減衰を計算し、有限ビーム幅内の平均として得られるポテンシャル、密度信号を算出する。PCI 数値診断では入射レーザーラインに沿った密度場から、密度揺動の2次元波数スペクトル分布を算出する。BES 数値診断では検出器視線方向の積分効果が密度揺動観測にいかに関与するか、そして観測から磁気面量の径方向分布再構成が可能か評価する。これらモジュールを前述のドリフト交換型モードコードから得られた3次元乱流場時系列データに適用した。図2(a)に揺動場中での HIBP ビーム軌道およびイオン化領域の例を示す。この時の電位時間変化の数値計測値と対応する固定点における局所値の比較が図2(b)である。特徴的な空間スケールを持つ乱流構造に対する有限空間分解能での計測の可能性を検討することができた。また、線積分量として得られる信号から局所的な値を抽出する手法についての知見も得られた。

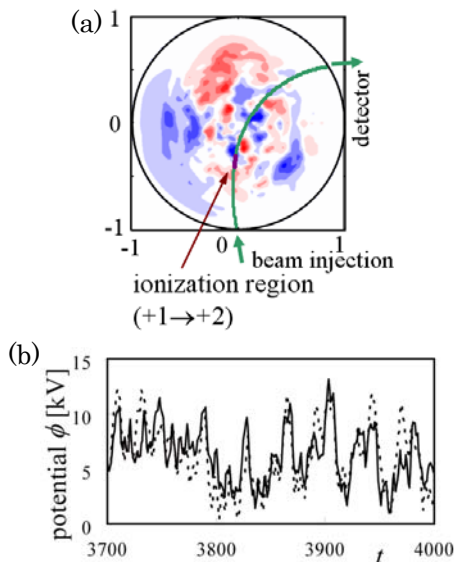


図 2: (a) ポロイダル断面における電位揺動の等高線表示。HIBP のビーム軌道とイオン化領域の例が示されている。(b) 密度揺動の時間発展。HIBP 計測模擬による数値計測値(実線)と対応する固定点における局所値(点線)が示されている。

(5) 得られた乱流データを用いて数値診断を行い、トーラスプラズマにおけるメゾスケール構造の形成機構とその時空間構造の検出方法を研究した。前述のドリフト交換型モデルを用いたシミュレーションの非線形飽和状態では、特徴的な振動数を持つ帯状流成分が形成される。飽和状態における非線形結合の評価から、動的な流れの形成機構を説明した。図3(a)に圧力揺動径方向分布の時間変化として  $(m, n) = (0, 0)$  モード以外の揺動の和  $\tilde{p}_{m \neq 0}$  と  $(0, 0)$  モード揺動  $\tilde{p}_{00}$  とに分けて示す。ここで  $m, n$  はそれぞれポロイダル、トロイダルモード数である。揺動中には規格化小半径  $r/a > 0.8$  の領域に局在化したモードが存在し、 $r/a \sim 0.83$  に共鳴面を持つ  $(3, 2)$  モードの強度が最大となっている。一方  $(0, 0)$  モード揺動は主に  $r/a = 0.4 - 0.7$  の領域に存在し、時間変化も比較的ゆっくりである。両者の関係を調べるため乱流 ( $\tilde{p}_{m \neq 0}$ ) と  $(0, 0)$  モード ( $\tilde{p}_{00}$ ) の相関を計算した。 $\tilde{p}_{m \neq 0}$  と  $r/a = 0.5$  (図中点線の位置) における  $\tilde{p}_{00}$  の相関の2次元分布を示したのが図3(b)である。 $r/a = 0.4 - 0.6$ ,  $\theta = -\pi/6 - \pi/4$  (弱磁場側) の領域において乱流と  $(0, 0)$  モードが強く結合しているが、揺動モードが局在している領域では結合は弱い。さらに2点2時刻相関の評価により圧力変化の急速な伝播の様子が明らかになった。このような乱流とメゾスケール構造間の非線形結合の空間分布を特定する解析により、乱流構造形成が持つ時間、空間構造が明らかになった。さらに高モード数モードが結合に寄与する局在した領域が存在するので、詳細な計測と広域な計測の組み合わせが大域的構造の形成機構解明には必要であることを示した。

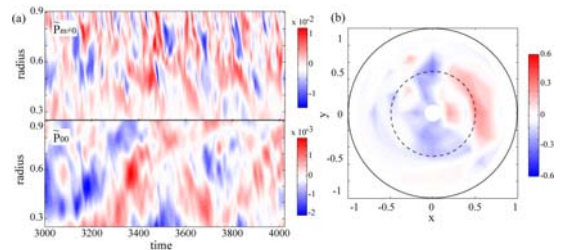


図 3: (a) 圧力揺動径方向分布の時間変化。 $(m, n) = (0, 0)$  モード以外の揺動の和  $\tilde{p}_{m \neq 0}$  と  $(0, 0)$  モード揺動  $\tilde{p}_{00}$  が示されている。(b)  $\tilde{p}_{m \neq 0}$  と規格化小半径 0.5 (点線の位置) における  $\tilde{p}_{00}$  の相関の2次元分布。

このように実験においても徐々にその姿をあらわしてきているメゾスケール構造の形成機構を、トーラスプラズマへと対象を発展させた乱流シミュレーションを通じて解明した。そして磁化プラズマにおいて共通となる非線形的なモード結合と不安定モード飽

和過程の理解を進めた。トーラス磁場閉じ込めプラズマにおける乱流構造形成による輸送への寄与を定量的に評価する基盤となる成果である。

#### 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 9 件)

1) N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Heavy Ion Beam Probe Measurement in Turbulence Diagnostic Simulator, Plasma Science and Technology, Vol.13 (2011) 326-331, 査読有, DOI: 10.1088/1009-0630/13/3/11

2) N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, On Detection of a Global Mode Structure in Experiments by Use of Turbulence Diagnostic Simulator, Plasma and Fusion Research, Vol.6 (2011) 1403002-1-5, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.6.1403002

3) N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Selective formation of streamers in magnetized cylindrical plasmas, Nuclear Fusion, Vol. 50 (2010) 054003-1-8, 査読有, DOI: 10.1088/0029-5515/50/5/054003

4) N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Analyses of Nonlinear Coupling for Turbulent Structural Formation in Magnetized Cylindrical Plasmas, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol.8 (2009) 77-81, 査読有, URL: [http://www.jspf.or.jp/JPFERS/PDF/Vol8/jpfrs2009\\_08-0077.pdf](http://www.jspf.or.jp/JPFERS/PDF/Vol8/jpfrs2009_08-0077.pdf)

5) N. Kasuya and K. Itoh, Two-dimensional Model Including the Mechanism of the Poloidal Shock Structure and Geodesic Acoustic Mode in Toroidal Plasmas, Plasma Fusion Research, Vol. 3 (2008) S1016-1-4, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.3.S1016

6) N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Selective Formation of Turbulent Structures in Magnetized Cylindrical Plasmas, Physics of Plasmas, Vol. 15 (2008) 052302-1-10, 査読有, DOI: 10.1063/1.2912461

[学会発表] (計 25 件)

1) N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Three-Dimensional Turbulence Analyses Using Turbulence Diagnostic Simulator, 38th EPS Conference on Plasma Physics, 2010年6月30日, フランス、ストラスブール

2) N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh, S.-I. Itoh and N. Ohya, Development of Turbulence Diagnostics on Three-Dimensional Fields Obtained by Numerical Simulations in Magnetically Confined Plasmas, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010年10月13日, 大韓民国大田

3) N. Kasuya, S. Nishimura, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Numerical Simulations in Magnetically Confined Plasmas, CUP seminar: Modeling of Theory and Simulation of Fusion Plasmas, 2010年8月30日, 中華人民共和国北京

4) 糟谷直宏, 西村征也, 矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗, 大藪修義, 磁化プラズマにおける乱流輸送の二次元構造の研究, 日本物理学会 2010年年次大会, 2010年3月20日, 岡山県岡山市

5) N. Kasuya, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Numerical Simulation of Streamer Formation in Magnetized Cylindrical Plasmas, Joint U.S.-EU Transport Task Force Workshop, 2009年4月28,30日, 米国カリフォルニア州サンディエゴ

6) 糟谷直宏, トロイダルプラズマにおける構造形成とポロイダルショック, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手県盛岡市

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ:

<http://www.nifs.ac.jp/fts/kasuya/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

糟谷 直宏 (KASUYA NAOHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 20390635