

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2016

課題番号：24760703

研究課題名(和文) 3次元磁場配位を考慮した乱流構造形成機構の研究

研究課題名(英文) Research on formation mechanism of turbulent structures concerning 3-D magnetic configuration

研究代表者

糟谷 直宏 (Kasuya, Naohiro)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：20390635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの乱流輸送現象解明には、揺動のダイナミクスを多スケール間にわたって同時に同定することが重要である。そのために本研究ではヘリカルプラズマにおける大規模大域的乱流シミュレーションを行った。得られた乱流場に対する数値診断により、動的な輸送現象で現れる多スケール揺動間の非線形相互作用の物理機構を解明した。さらに運動論的效果を取り込んだモデルの拡張、非軸対称な3次元平衡磁場配位の導入、実験計測を模擬した数値診断手法の開発といった定量性向上のためのシミュレーション要素研究を合わせて行うことで、研究基盤の確立につなげた。

研究成果の概要(英文)：It is important to identify fluctuation dynamics with multiple spatio-temporal scales entirely for clarifying turbulent transport phenomena in fusion plasmas. For that purpose, large global simulations of magnetized plasmas, especially for helical plasmas, have been carried out in this research. Numerical diagnostics on simulation data of 3-D turbulent fields reveal nonlinear interaction between multi-scale fluctuations in their dynamics. Extension of the model to include kinetic effects, introduction of 3-D equilibrium magnetic configuration, development of numerical diagnostics simulating experiments have been also carried out to contribute establishment of the basis for simulation researches.

研究分野：核融合学

キーワード：プラズマ・核融合 磁場閉じ込め 乱流 ト-ラス 数値診断

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマでは、微視的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。加えて、装置サイズ(マクロ)の空間スケールを持つ巨視的モード構造がトロイダルプラズマの輸送現象へ果たす役割にも注目が集まっているので、巨視的モード、メソスケール構造、微視的乱流のダイナミクスを同時に同定することが重要である。近年進展が目覚ましい大規模シミュレーションにより多スケール構造間の相互作用を含めて自己無撞着な描像を提示できる。計測技術の進展の一方で、一般に実験計測では計測視線、領域、分解能に制約があることから、シミュレーションを用いて計測データの理解を図ることが有効である。実験計測のシミュレーションによりシミュレーションと実験結果との定量的比較が可能となる。

2. 研究の目的

本研究はトロイダル磁場閉じ込めプラズマにおける乱流構造形成機構とその輸送への寄与の定量的理解を目的とする。プラズマ中に存在する巨視的モード、メソスケール構造、微視的乱流のダイナミクスを同時に含んだプラズマ乱流の大域的シミュレーションを通じて、乱流輸送の物理機構を解明する。特にヘリカルプラズマという3次元的に磁場が分布する系で、微視的乱流が自己無撞着に形成する乱流構造の様相を対象とする。また、各種シミュレーション要素開発により、評価の定量性を向上する。特にデータ解析について、実験計測と対照させた形での比較を行う。そして、乱流輸送現象を理解するための実験とシミュレーションの共同研究基盤形成を推進する。

3. 研究の方法

本研究では核融合科学研究所の Large Helical Device (LHD)などのヘリカルプラズマにおける乱流シミュレーションを行う。流体モデルを用いたグローバルシミュレーションと得られた乱流場に対する数値診断により、動的な輸送現象において効果を持つ多スケール揺動間の非線形的相互作用の物理機構を解析する。さらに高温磁場閉じ込めプラズマを適切に表現するための運動論的效果を取り込んだモデルの拡張、定量的評価を行うための非軸対称な3次元平衡磁場配位の導入、直接比較を可能とするための実験計測を模擬した数値診断ツールの開発といったシミュレーション要素研究を合わせて行うことで、研究基盤の確立を図る。

4. 研究成果

(1)ヘリカルプラズマの圧力分布の動的応答シミュレーションから圧力変動の非線形伝搬機構を研究した。ヘリカルプラズマにおけるドリフト交換型モード乱流コードを用いて、プラズマ中心部の圧力ソースに周期的変化を加えて圧力分布の応答をみるシミュレーションを行った。圧力ソース項を与えて維持した飽和状態において、ポロイダルモード数の小さいモードが不安定化し、モード間の非線形結合が飽和状態をもたらしている。また、半径方向に広がったモード構造を持つモード(巨視的モード)も励起されている。図1(a)に揺動パターンのスナップショットを示す。そのような飽和状態に対してソース変調を加えた。ソース変調に対する特徴的な変化は揺動の中に埋もれているが、応答の繰り返しを平均することで明らかになる。中心部で加熱ソースを増減し、その繰り返しを重ね合わせることで乱雑成分を除去し、特徴的な変化を抽出した。圧力揺動の変化は異なる半径位置で瞬時に起こる。乱流構造の役割の物理的理解を図るために、熱流束の径方向分布の応答を見ると、中心部での変化が拡散よりも早いタイムスケールで伝わっており(図1(b))、熱流束と圧力勾配の関係にヒステリシスが現れることがわかった。その輸送の伝

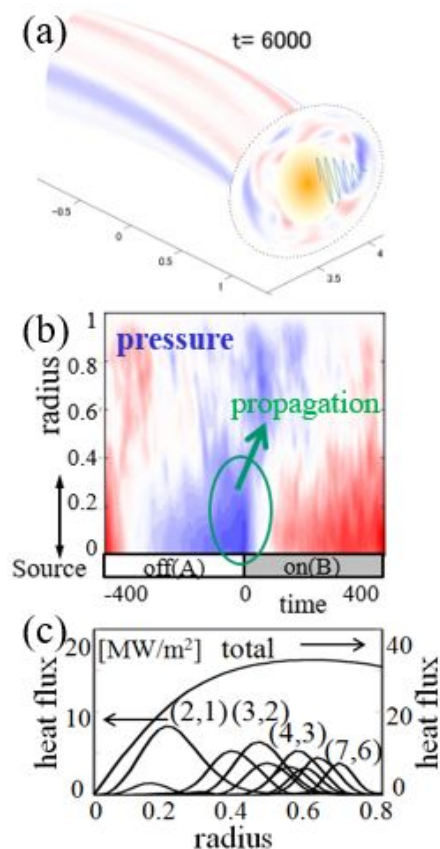


図1: (a)揺動のスナップショット。(b)周期的なソース変調に対する圧力径分布の応答。(c)各モードが駆動する熱流束の径方向分布。

播にはモード間の非線形結合によるエネルギー再分配と半径方向に分布したモード(図1(c))の逐次的応答が重要な役割を果たしていることがわかった。そして圧力勾配の応答が熱流束の応答より先行するので、熱流束と圧力勾配の関係にヒステリシスが現れる。モード間の非線形結合の大きさを評価することで、その半径方向の分布との対応から、動的な構造形成機構が鮮明になった。さらに、揺動が駆動・減衰される過程における以下のような特徴が明らかになった。平均成分は軸シフトを伴う振動を有する。巨視的モードは非線形エネルギー移送効果の強さの違いから半径位置により励起機構や熱流束の大きさが異なる。微視的モードは準線形的駆動の様相が強く、圧力勾配の変化がモード強度の変化より先行する。このように輸送現象の物理的理解に関して、モード間の非線形結合の定量性解析を、実験でみられている動的応答計測と対照させた形で行い、プラズマ中に存在する乱流輸送現象の素過程を浮かび上がらせることができた。

(2) 流体モデルの拡張として有限軌道幅効果を取り込んだジャイロ流体モデルのグローバルシミュレーションコード開発を進めた。モデルの理解を深めるために円筒形プラズマにおけるイオン温度勾配(ITG)不安定性モードの解析を行った。プラズマ基礎実験における実験パラメータを用いた線形成長率の評価を行った。局所解析から有限軌道幅効果はITGモードの安定化効果を持つことを確認した。放電ガス種がヘリウム、ネオン、アルゴンの場合を比較すると最も不安定なモードの方位角方向モード数はガス種によって異なるが、不安定閾値はガス種に依らない。イオン-電子温度比と温度勾配に対する依存性(図2)からITG不安定性励起にはより大きい温度勾配が必要なことがわかった。そして複数のモデル間の比較を行った。さらにフーリエ・ベッセル展開を径方向に課すことで数値安定性向上を図り、大域的モード構造解析のためのコード開発を進めている。

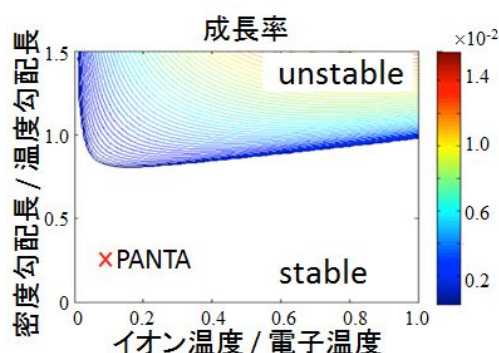


図2: 温度比と勾配長比に対する線形成長率の依存性。X点は参考実験パラメータを表す。

(3) ヘリカルプラズマで重要となる3次元

磁場配位の効果を評価するためのシミュレーション環境を構築した。ヘリカル系の平衡磁場配位を取り入れることができるグローバルモデルのMHDコードMIPS (Y. Todo, et al., Plasma Fusion Res. 5 (2010) S2062)を導入した。そしてシミュレーション結果の非線形ダイナミクスを視覚化するための解析環境整備を行った。非線形飽和過程におけるモード構造発展の数値診断が可能となった。初期条件に平衡コードにより得られた3次元平衡実磁場配位(中心ベータ値7%)を用いて、圧力駆動型バルーニング不安定性のシミュレーションを行い、非線形飽和を得た。図3に線形発展期および非線形飽和期における各モード強度の時間発展を示す。非線形結合により小波数モード成分が励起されている。熱拡散係数への依存性を調べ、線形成長段階における不安定モードと、非線形段階における圧力緩和に至る過程での非線形励起の違いを明らかにした。

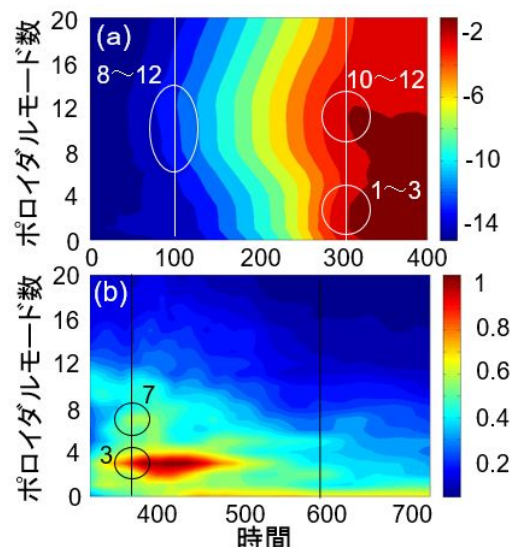


図3: 圧力駆動型バルーニング不安定性シミュレーションにおける(a)線形成長期および(b)非線形飽和期における各モード強度の時間発展。

(4) 3次元実磁場配位下での乱流描像の抽出という点で、数値診断の適用範囲をジャイロ運動論シミュレーションデータへと拡大した。3次元平衡磁場配位を取り込んだイオン温度勾配乱流のジャイロ運動論シミュレーションコードGKV-X (M. Nunami, et al., Phys. Plasmas 19 (2012) 042504)を導入した。これはフラックスチューブモデルを用いている。開発を進めてきた乱流計測シミュレータを、この3次元シミュレーションデータの数値診断に適用した(図4)。ヘリカルプラズマで揺動は3次元的分布を持ち、それに対する位相コントラスト法での観測は測定視線方向に線積分された信号を与えるので、実験観測と揺動の対応が問題となる。シミュレーションで得られた揺動3次元時系列デー

タに対して、測定視線方向線積分の効果を計算した。そして空間分解能を考慮して、密度揺動スペクトルの空間的变化を評価した。ヘリカルプラズマでは垂直位置によって磁力線方向が異なることから、その方向性を利用して、局所値を抽出する試みがなされている(磁気シア法)ので、その方法をシミュレーションデータに適用した。磁気シア法による抽出と局所揺動の比較を行い、スペクトルの傾向を確かめた。スペクトルの違いをどの程度識別できるかの指標となる。この解析により微視的乱流の実験観測での見え方を定量的に示すことができた。

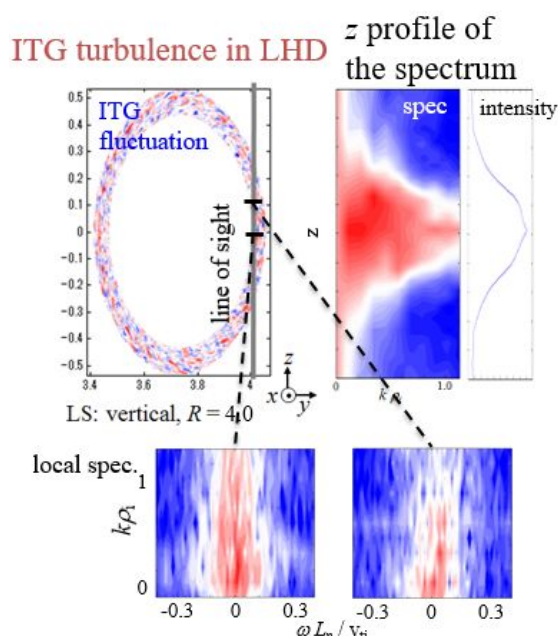


図 4: ジャイロ運動論コードから得られた密度揺動パターンとスペクトル、磁気シア法により算出した波数スペクトルの垂直方向依存性。

このように本研究では磁場閉じ込めトラスプラズマ中で生じる乱流輸送現象について多様な面から研究を推進し、輸送現象の物理的理解、モデルの発展、3次元平衡磁場配位の効果、実験計測を模擬した数値診断法の開発というそれぞれの項目について成果を上げることができた。

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 1 1 件)

- 1) N. Kasuya and M. Yagi, Radially distributed instabilities and nonlinear process to generate pressure variation in a torus plasma, Plasma and Fusion Research, Vol.12 (2017) 1303005, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.12.1303005.
- 2) G. Hattori, N. Kasuya and M. Yagi,

Analysis of ion-temperature-gradient instabilities using a gyro-fluid model in cylindrical plasmas, Plasma and Fusion Research, Vol.10 (2015) 3401060, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.10.3401060.

3) N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi and S.-I. Itoh, Simulation study of hysteresis in the gradient-flux relation in toroidal plasma turbulence, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.57 (2015) 044010, 査読有, DOI: 10.1088/0741-3335/57/4/044010.

4) N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi and S.-I. Itoh, On violation of local closure of transport relation in high-temperature magnetized plasmas, Physics of Plasmas, Vol.21 (2014) 110701, 査読有, DOI: 10.1063/1.4902102.

5) N. Kasuya, S. Sugita, M. Sasaki, S. Inagaki, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Evaluation of spatial variation of nonlinear energy transfer by use of turbulence diagnostic simulator, Plasma and Fusion Research, Vol.8 (2013) 2403070, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.8.2403070.

[学会発表](計 4 2 件)

1) N. Kasuya, M. Nunami and M. Yagi, Numerical diagnostics of turbulent transport in three-dimensional magnetic configurations, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月19日, 京都国際会議場(京都府京都市).

2) N. Kasuya, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi and S.-I. Itoh, Analysis of 2-dimensional transport mechanism in a toroidal plasma turbulence simulation, 15th Int. Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2015年10月20日, Garching (Germany).

3) N. Kasuya, M. Sasaki, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi, S.-I. Itoh, Numerical diagnostics of non-diffusive transport process by use of turbulence diagnostic simulator, 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014年10月16日, St. Petersburg (Russia).

4) N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yagi and S.-I. Itoh, Simulation study of hysteresis in the flux-gradient relation in turbulent transport, 17th International Congress on Plasma Physics, 2014年9月15日, Lisbon (Portugal).

5) N. Kasuya, S. Sugita, S. Inagaki, M. Sasaki, K. Itoh, M. Yagi and S.-I. Itoh, Identification of dynamical response mechanism in a turbulent simulation with source modulation, 14th Int. Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2013年10月3日, 九州大学(福岡県春日市).

6) N. Kasuya, S. Sugita, M. Sasaki, Y. Miwa, S. Inagaki, M. Yagi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Numerical diagnostics and identification of fluctuation structure by use of turbulence diagnostic simulator, 22nd International Toki Conference, 2012年11月20日, セラトピア土岐 (岐阜県土岐市).

〔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.riam.kyushu-u.ac.jp/sosei/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

糟谷 直宏 (KASUYA NAOHIRO)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：20390635