

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06938

研究課題名(和文) 過渡状態における多次元構造の発現と乱流輸送に関する数値診断研究

研究課題名(英文) Numerical diagnostic of turbulent transport on appearance of multi-dimensional structures in transient response

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はトロイダル磁場閉じ込めプラズマにおいて発現する空間3次元構造(多次元構造)が輸送にもたらす効果の定量化を目的とする。トーラスプラズマでは様々な局在構造がダイナミクスを伴って存在し、空間多次元構造を持ち得るので、乱流構造から自律的に形成されるものと磁場配位に起因するものについて大域的シミュレーションを行った。過渡状態において現れる特徴的な非線形機構、分布形成機構、およびそれらの数値診断手法について多面的に成果を上げ、輸送機構評価の基盤を構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トーラスプラズマの輸送現象を理解するためにはプラズマ中の空間的に偏在した構造の解明が重要である。本研究では2種類の大域的シミュレーションを通じて、モデル化された形での物理機構の理解とともに、現実的な磁場分布中での構造解析手法を進展させた。解析対象も複数種類の微視的揺動と大域的モードを含んでおり、広い適用範囲を示すことができている。実験観測描像も提示することができている。熱輸送の空間構造の計測という未解明の学術的問題に取り掛かる基盤となる成果である。

研究成果の概要(英文)：There exist several kinds of multi-dimensional spatial structures, which show dynamical changes to affect transport in magnetized toroidal plasmas. The object of this research is to develop the methodology for quantification of the effect in toroidal plasmas. Two kinds of global simulations were carried out to investigate dynamics of structures formed spontaneously by turbulence and those depending on magnetic configuration for plasma confinement. Characteristic nonlinear mechanisms and profile formation mechanisms were clarified in transient responses of plasmas. Tools for numerical diagnostic of the structures were also developed, which contribute to construct the framework to evaluate the multi-dimensional transport mechanism.

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 多次元構造 過渡応答 トーラス MHD 数値診断

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流状態にある磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、プラズマ性能(密度、温度、閉じ込め時間)の改善のためには乱流輸送の機構理解と定量的評価が不可欠である。プラズマ乱流は、自発的に構造を形成することが知られている。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がその例である。それら構造形成に伴い、乱流による粒子・熱輸送も空間構造を持つ。定常的な状況では、その効果は時間、空間平均されるが、変化の時間スケールが乱流応答の時間スケールに近づく過渡的な状況で、その効果が顕著に表れる。プラズマに摂動を加えることで現れる過渡的な状況で、空間的に離れた点での早い応答が現れるなど未解明な現象が存在し、解明が待たれている。このような問題に対しては大型計算機を用いたグローバルシミュレーションが有効である。ここでいうグローバルとは最外殻磁気面内側のコアプラズマを中心から端まで扱うという意味である。近年グローバルコードが世界各国で開発され、乱流輸送計算で成果を上げ始めている。

我々は簡約 MHD モデルを用いたヘリカルプラズマのドリフト交換型乱流に、加熱を時間的に変化させる摂動を加えたシミュレーションを行い、乱流輸送の応答を調べた。そして圧力勾配と熱流束の関係が一对一ではないヒステリシスを得た。その時のダイナミクスの可視化を行うと、モード分布と波数空間スペクトルに応じた 2 次元構造が現れた。局在化した流束が存在し、これは局所的な解析では知りえない輸送構造である。このような磁場閉じ込めトラスプラズマにおける構造形成の要因としては、プラズマに内在する乱流構造形成に起因するもの(自律構造)、3 次元構造な磁場配位に起因するもの(磁場構造)、プラズマコア 端部の境界条件に起因するもの(プラズマ端効果)、異種粒子間の相互作用に起因するもの(多種粒子効果)等があげられる。それぞれの要素研究は数多くなされているが、乱流輸送の多次元構造という観点からの系統的理解はいまだ途上であり、研究の進展が必要とされる。

乱流の空間構造研究には、高時間・高空間分解能を持つ計測器による実験計測が不可欠である。近年の計測技術の進展(例えばマイクロ波コム反射計)から大型装置においても計測データが得られ始めている。研究の進展のためには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り、乱流計測シミュレータというシミュレーションによる数値診断システムの開発が進められている。

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いて発現する空間 3 次元構造が輸送にもたらす効果の定量化を目的とする。トラスプラズマの輸送現象を理解するためには、プラズマ中の空間的に局在した構造の解明が重要である。様々な局在構造がダイナミクスを伴って存在し、空間多次元構造を持ち得る。多次元構造が現れる状況をシミュレーションし、定量化する解析手法を確立する。過渡的な状況で強く表れると考えられるので、外部摂動に対する応答や MHD イベントに伴うプラズマの小崩壊といった状況をシミュレーションの対象とする。いくつか存在する多次元効果のうちから、乱流の自発構造と磁場構造に起因するものの 2 要因を対象とする。乱流が自発的に形成する構造の重要性は数多くの研究が指摘するところであり、本研究では簡約 MHD コードと平均化した磁場配位を用いて、物理機構の素過程理解を目指す。簡約されているとはいえ、不安定性(ミクロ、メゾ、マクロ)、モード間非線形相互作用、拡散輸送といった必須要素はすべて含んだモデルである。一方、対象が磁場という入れ物の中に閉じ込められたプラズマである以上、磁場分布の影響は顕著で、かつヘリカルプラズマのような 3 次元形状を持つ場合はより重要である。磁場配位の効果については簡約化されていない MHD(フル MHD)コードと実磁場配位を用いて、実際の効果の大きさ評価を目指す。さらに乱流計測シミュレータを用いた数値診断の手法を取り入れ、診断とグローバルシミュレーションを組み合わせる。特徴的性質、観測可能性を提示し、実験観測につなげるのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では多次元構造のうち、乱流構造から自律的に形成されるものと磁場配位に起因するものの両者を対象とする。効果が顕在化する過渡的な状況の非線形シミュレーションを通じて、輸送への寄与とダイナミクスを明らかにする。以下の 2 種類のグローバルシミュレーションを行う。

(1) 簡約化モデルコードとして DISA コードを用いる。DISA コードは平均化法で磁場の影響を準 2 次元的にしたうえで、簡約 MHD 方程式を解くコードである。ヘリカルプラズマにおける交換型不安定性の計算を行う。ソース項により外部から加熱摂動を印加した時の過渡的な状況ダイナミクスを模擬し、そこで働く非線形機構を定量化する。本研究目的のうち乱流構造に起因する要素の解析に当たる。

(2) 詳細な磁場配位を取り込める数値計算コードとして MIPS コードを用いる。MIPS コードは平衡計算コードで計算された平衡磁場データを取り込んで磁場配位の 3 次元形状を扱える。モ

デルには簡約されていないMHD(フルMHD)方程式を用いている。比較的計算負荷の小さい平衡コードから得られるトーラス平衡データの取り込みを可能とし、プラズマダイナミクスの条件探索を行う。またMIPSコード計算結果の解析のためのルーチンを整備する。本研究目的のうち磁場構造に起因する要素の解析に当たる。

これらシミュレーションに加え、乱流計測シミュレータを活用した実験検証法の検討も行う。実磁場配位での幾何構造を考慮して、実験計測データ中にプラズマゆらぎがいかに関与しているか提示し、実験観測につなげる方法を検討する。また、簡略化した幾何構造のもと乱流構造形成機構の素過程を探る基礎研究もあわせて行う。

4. 研究成果

本研究では多次元構造のうち、乱流構造から自律的に形成されるものと磁場配位に起因するものの両者を対象として、以下のような成果を上げた。

(1) 乱流から自律的に形成されるトーラスプラズマ中の多次元構造

乱流から自律的に形成される構造のダイナミクスについて、3場簡約MHD方程式系を用いてドリフト交換型モード乱流を解析し、モード間非線形結合の空間的分布と圧力分布の発展の関係を調べた。ここではヘリカルプラズマにおける各有理面を中心に径方向に幅を持って分布する不安定共鳴モードと非線形励起モード群が存在する系を考える。これら多くのモードからの寄与の総和で非線形飽和レベルが保たれる。周期的に変化する空間的に局在した圧力ソース項の変調を加え、特徴的な応答の抽出を行った。変調周期について条件付き平均をとってもなお時間変化の中にアバランチ的な緩和が現れる。その揺動スケールの時間変動に関しては、それぞれの場所で異なる、共鳴モードとの関係が強いことがエネルギー時系列の相関解析からわかった(図1)。非線形性による自己維持機構が働く中で、磁場分布に依存する不安定な単一モードがプラズマ応答を主導している様相を明確にすることができた。

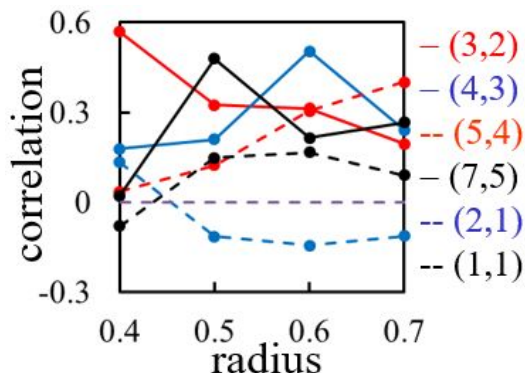


図1：圧力平均成分と各モードからの非線形寄与の時間変動の相関。

(2) 乱流から形成される構造ダイナミクスの素過程

自律的に形成される構造のダイナミクスの素過程に関して、中性粒子による減衰力に空間分布が存在するときに流れが形成されるという新たな発見があった。基礎実験装置を想定し、粒子コードを用いて計算した中性粒子分布を3場簡約流体方程式系の抵抗性ドリフト波乱流シミュレーションに導入した。非線形飽和状態で周方向プラズマ流れが励起される(図2)。中性粒子の持つ不安定性の減衰力の大きさが空間的に異なると不安定モードの位相構造を变形し非線形応答を生む機構が明らかになった。ここで中性粒子の非一様性が本質的な役割を果たしているが、種々の不安定性減衰力から同様な効果が予想されるので一般的なプラズマ乱流に応用できる成果である。また、イオン温度勾配不安定性の基本的な性質を理解するために、ジャイロ流体モデルを用いて線形解析を行った。有限ラーマ半径効果を含む解析式を導出し、それにより数値解を説明した。

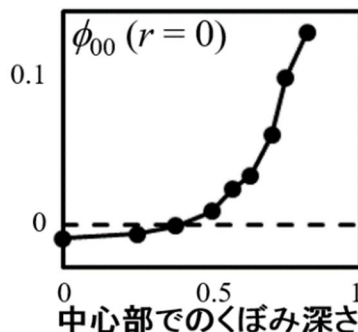


図2：プラズマ中心における平均電位成分非線形駆動電位の中性粒子分布非一様性に対する依存性。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

(3) トーラス磁場配位に起因する多次元構造

磁場配位に起因する多次元性の研究として、トカマクプラズマで発現する 3 次元構造の磁場配位依存性の解析を行った。トカマク平衡データを MHD コードに導入するルーチンを作成し、非線形シミュレーションにより、磁場配位からもたらされる不安定モード構造の違いとその分布変化への効果を評価した。九州大学のプラズマ乱流統合観測装置 PLATO トカマクを対象として、その代表的な磁場配位を用いて MHD 不安定性の非線形シミュレーションを行った。バルーニング不安定性とキンク不安定性が競合するシミュレーション結果を得た(図 3)。安全係数分布を変化させることによって不安定性を制御し、それぞれが非線形飽和状態に与える効果を示した。今回のパラメータではバルーニング不安定性は局所的な圧力分布の平坦化に寄与するのに対して、キンク不安定性はプラズマ中心近傍のダイナミックな圧力緩和に寄与する。そして、圧力緩和現象における不安定モード間の非線形相互作用の様相を明らかにした。

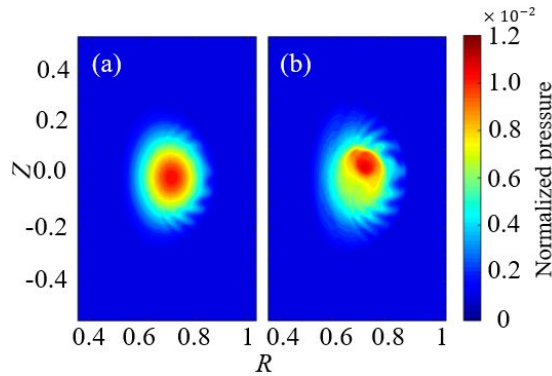


図 3 : トーラス MHD 不安定性シミュレーションで現れた(a)バルーニングおよび(b)キンク不安定性。

(4) 乱流構造探索のための数値診断

磁場配位に関する構造を探るために、ヘリカル実磁場配位を取り込んだ微視的乱流シミュレーションデータ数値診断ルーチンの整備を行った。そして 3 次元揺動分布に対して実験計測を模擬したデータ解析を行った。LHD 実磁場配位のもとでの微視的乱流について、複数のフラックスチューブシミュレーションを組み合わせることで、3 次元的に磁場が分布する中での揺動の構造を調べた。密度揺動に対して位相コントラスト法で観測されるような測定視線方向に線積分をした密度信号を計算し、ヘリカルプラズマでの磁力線方向を利用して局所値を抽出する磁気シア法を適用した(図 4)。空間分解能を考慮して、磁気シア法による抽出と局所揺動の比較を行い、スペクトルの傾向の一致を確かめた。さらにイオン温度勾配不安定性の線形成長率及び非線形飽和状態における揺動強度の分布を計算し、LHD においてはトロイダル方向の依存性が弱いことを確かめた。そしてシミュレーション空間から実空間への変換ルーチンを整備することにより、それぞれの揺動が実験的に得られる線積分信号にどれだけの寄与をするか評価を可能とした。また、線積分信号から局所情報を抽出する操作に統計的信号処理技法を適用し、空間非対称性が弱い観測対象に対して、データ再構成を行うことで非対称性が拡大する傾向を見た。

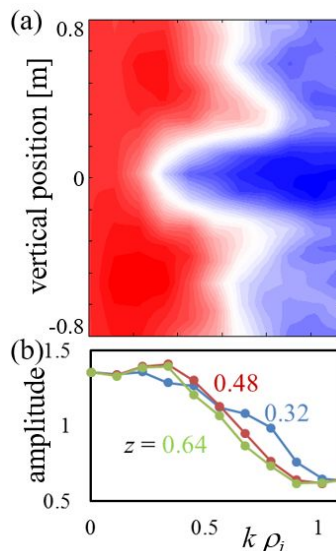


図 4: 揺動波数スペクトルの(a)垂直方向分布および(b)その垂直方向位置 $z=0.32, 0.48, 0.64$ における抽出。線積分データより磁気シア法によって再構成されたものである。

以上のように、本研究で対象とする自律的および磁場配位由来の 2 種類のプラズマ構造形成について確実に研究を進展させることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kasuya N., Ohno T., Sasaki M., Yagi M.	4. 巻 14
2. 論文標題 Finite Larmor radius effect on ion-temperature-gradient instability in cylindrical plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401158 ~ 1401158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1401158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kasuya N., Nunami M., Tanaka K., Yagi M.	4. 巻 58
2. 論文標題 Numerical diagnostics of fluctuation spectrum in 3D magnetic configurations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106033 ~ 106033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kasuya N., Sasaki M.	4. 巻 1993
2. 論文標題 Simulation research on competitive nature of plasma turbulence in linear devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020008-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5048718	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kasuya N., Sasaki M., Abe S., Yagi M.	4. 巻 87
2. 論文標題 On the radial eigenmode structure of drift wave instability with inhomogeneous damping in cylindrical plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024501-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.024501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kasuya N., Abe S., Sasaki M., Inagaki S., Kobayashi T., Yagi M.	4. 巻 25
2. 論文標題 Turbulence simulation taking account of inhomogeneity of neutral density in linear devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012314-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5009803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Kasuya and M. Yagi	4. 巻 12
2. 論文標題 Radially distributed instabilities and nonlinear process to generate pressure variation in a torus plasma	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1303005-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1303005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 N. Kasuya, M. Nunami, K. Tanaka, C. A. Michael, S. Toda and M. Yagi
2. 発表標題 Turbulence diagnostic using turbulence simulation data in magnetized plasmas
3. 学会等名 14th Japan-Korea workshop on modeling and simulation of magnetic fusion plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 糟谷直宏, 富松修平, 佐々木真, 永島芳彦, 井戸毅, 稲垣滋, 藤澤彰英
2. 発表標題 PLATO装置を対象とした平衡・揺動シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kasuya, T. Onomichi, S. Tomimatsu, T. Ido, M. Nunami, S. Toda, M. Yagi, Y. Nagashima, and A. Fujisawa
2. 発表標題 Application of numerical diagnostics to fluctuation simulations of torus plasmas
3. 学会等名 第28回国際土岐コンファレンス(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Tomimatsu, N. Kasuya, M. Sato, A. Fukuyama, M. Yagi, Y. Nagashima, and A. Fujisawa
2. 発表標題 Dynamics of resistive ballooning instability in PLATO tokamak plasma
3. 学会等名 第28回国際土岐コンファレンス(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富松修平, 糟谷直宏, 佐藤雅彦, 福山淳, 矢木雅敏, 永島芳彦, 藤澤彰英
2. 発表標題 PLATOプラズマにおけるバルーニングおよびキンク不安定性シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Kasuya, M. Sasaki, M. Yagi, S. Abe, S. Tomimatsu, S. Inagaki, A. Fujisawa
2. 発表標題 Recent progress on numerical simulations of basic experiments of magnetic confined plasmas
3. 学会等名 13th Japan-Korea workshop on modeling and simulation of magnetic fusion plasmas(国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Kasuya, M. Nunami, K. Tanaka, C.A. Michael, S. Toda, M. Yagi
2 . 発表標題 Numerical Diagnostic to Investigate Poloidal Asymmetry in Three-Dimensional Magnetic Configurations
3 . 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Kasuya, T. Ohno, M. Sasaki, M. Yagi
2 . 発表標題 Comparison of reduced sets of a gyro-fluid model for ion-temperature-gradient instabilities in cylindrical plasmas
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Kasuya, S. Abe, M. Sasaki, S. Inagaki, M. Yagi
2 . 発表標題 Turbulence Simulation Taking Account of Inhomogeneity of Neutral Density in Linear Devices
3 . 学会等名 7th Asia Pacific Transport Working Group (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 N. Kasuya, M. Nunami, M. Yagi
2 . 発表標題 Numerical Diagnostics of Turbulence Simulation Data in Magnetized Plasmas
3 . 学会等名 12th Japan-Korea Workshop on Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Kasuya, M. Nunami, K. Tanaka, M. Yagi
2. 発表標題 Fluctuation Spectrum Analysis Using Turbulence Simulation Data in 3-D Magnetic Configuration
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Kasuya, S. Abe, M. Sasaki, S. Inagaki, T. Kobayashi, M. Yagi
2. 発表標題 On a Radial Eigenmode Structure of Drift-Wave Instability with a Inhomogeneous Neutral Density Profile in Cylindrical Plasmas
3. 学会等名 26nd International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 糟谷直宏, 阿部哲, 佐々木真, 稲垣滋, 小林達哉, 矢木雅敏
2. 発表標題 円筒プラズマにおける中性粒子密度の不均一とドリフト波不安定性の径方向モード構造について
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kasuya and M. Yagi
2. 発表標題 Response of drift-interchange instability and radial propagation of pressure modulation in a helical plasma
3. 学会等名 Joint JIFT workshop on Extended MHD and MHD simulations for magnetized plasmas and Theory and simulation of 3D physics in toroidal plasmas (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 糟谷直宏, 矢木雅敏
2. 発表標題 ヘリカルプラズマにおける不安定性の径方向分布と圧力変動伝播の非線形過程
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	佐藤 雅彦 (Sato Masahiko)		
研究協力者	富松 修平 (Tomimatsu Shuhei)		