

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2022

課題番号：15K06651

研究課題名(和文) 圧力駆動型モードによるプラズマ構造変化に対する共鳴摂動磁場とシアフローの影響

研究課題名(英文) Effects of resonant magnetic perturbation and shear flow on plasma structure deformation due to pressure driven modes

研究代表者

市口 勝治 (ICHIGUCHI, Katsuji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：90211739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：三次元磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて、摂動磁場及び巨視的背景フローの圧力駆動型不安定性に対する影響を電磁流体力学的手法を用いて数値的に解析した。

摂動磁場に対する解析結果として、局所的に磁気島が形成される場合には不安定性の幾何学的性質が変化すること、及び、プラズマ形状全体が変形する場合には閉じ込め磁場の性質が大きく変化することが得られた。フローの影響は、三次元フロー分布を計算する手法を新たに開発することによって可能になった。このフロー分布を圧力駆動型モードに対する影響の解析に適用した。その結果、フローの絶対値を上昇させるとある値の前で線形成長率が減少から増加へと転じることが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合発電を実現するためには、高温のプラズマを定常的に閉じ込めておく磁場閉じ込め方式が世界各地で研究されている。このとき、プラズマが電磁流体力学的に不安定になると急激に閉じ込めが劣化するため、プラズマの安定性に関する性質を解明しておくことが必須とある。一方、ヘリオトロン配位では幾何学的対称性がないので三次元的取り扱いが必須であり、解析が困難であることが多い。本研究では、この状況に取り組み、特に摂動磁場及びプラズマ中のフローが安定性に及ぼす影響について三次元的な解析を進めた。その結果、圧力駆動型モードによる崩壊現象に対する誤差磁場やフローの影響について知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The effects of the perturbed magnetic field and the global background flow on the pressure driven modes in magnetically confined fusion plasmas have been analyzed numerically by means of three-dimensional (3D) magnetohydrodynamic (MHD) procedure.

The results for the perturbed magnetic field is that the geometrical property of the instability is changed when the magnetic islands are locally generated and that the confinement property of the magnetic configuration is widely changed when the global plasma shape is deformed. As for the flow effects, the development of an excellent numerical scheme to calculate the 3D flow profile has enabled us the analysis. The obtained flow profile is applied to the analysis of the effects on the pressure driven mode. The results show that the tendency of the linear growth rate in the increase of the absolute value of the flow is changed from decreasing tendency to increasing tendency at a certain value,

研究分野：プラズマ物理学・核融合学

キーワード：磁場閉じ込め核融合プラズマ 電磁流体力学 数値シミュレーション 巨視的フロー 圧力駆動型モード 非線形ダイナミクス 構造変化 摂動磁場

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合装置においては、良好なプラズマの閉じ込めが必要である。しかし、良好な閉じ込めが達成されればされるほど、プラズマ圧力が上昇し、圧力駆動型モードが不安定となる危険性が増大する。圧力駆動型モードの非線形発展においては、崩壊現象等の巨視的構造変化が引き起こされるため、それに基づいた安定限界の定量的評価は核融合炉を設計する上で極めて重要である。

一方、近年、多くの実験において、圧力駆動型モードの制御との関連において共鳴摂動磁場 (RMP) が注目されている。これは、共鳴摂動磁場によって圧力分布が変化し、モードの駆動力が変化すると考えられているからである。トカマクでは、H モードのペDESTAL領域での圧力勾配を緩和させ、Edge Localized Mode の制御に利用することが期待されている。また、ヘリオトロンにおいても、圧力駆動型モードが最も危険な不安定性であるために、RMP の影響を解明するために精力的に実験が行われている。

しかし、RMP に対するプラズマ応答は系統的に解明されてはいない。圧力駆動型モードに対して安定化効果が期待されるが、必ずしも完全に理解されているわけではない。これまで、圧力駆動型モードと RMP との相互作用に対して我々はまず直線ヘリオトロン配位においてこの相互作用を解析し、磁気島の形成が交換型モードの成長を抑制することを示した。しかし、RMP が印加されると、ヘリオトロンのみならずトカマクにおいても、その磁場構造に幾何学的対称性がなくなる。従って、厳密な解析を行うには、特にヘリオトロンプラズマに対しては、三次元計算が必須となるため、系統的な取り扱いがなされていなかった。

一方、プラズマ閉じ込めに関して好ましい状況である輸送障壁が形成される場合には、大きな巨視的シアフローが観測されている。逆に、フローの停止とともにモードロッキングが生じ、不安定性が成長することも観測されている。したがって、巨視的シアフローはプラズマ安定性に対して好ましい寄与を持つと考えられるが、その状況に対応するグローバルな非線形ダイナミクスシミュレーションの結果は示されていない。特に、幾何学的対称性のないヘリオトロンプラズマにおいては、三次元性を取り入れた解析は行われてこなかった。

ヘリオトロンプラズマでのシアフローと交換型モードとの相互作用に関しては、2 種類の先行研究がある。一つは、三次元配位での理想交換型モードに対する電磁流体力学的 (MHD) 解析であり、この場合にはシアフローによって駆動されるケルビン・ヘルムホルツ不安定性によって、必ず不安定化が助長されるという結論になっている。もう一つは、直線ヘリカル配位における静電的抵抗性 g モードに対する解析である。この場合、フローの絶対値を大きくするにつれて交換型モードの線形成長率が減少し、ある値を超えると完全に安定化される領域が存在する。さらにフローを大きくすると、今度は度ケルビン・ヘルムホルツ不安定性によって不安定化される。実際のプラズマは三次元的であり、さらに抵抗性 MHD 的振る舞いをするため、どちらの傾向が現れるのかは、不明となっていた。

2. 研究の目的

圧力駆動型不安定性による構造変化、特に崩壊現象に対して、摂動磁場及び巨視的シアフローが及ぼす影響を解明する。そのため、交換型モードが不安定になりやすいヘリオトロンプラズマを対象とする。摂動磁場を加えた場合には、磁気島の生成による平衡圧力分布の変化が交換型モードの成長に及ぼす影響について着目する。また、プラズマ全体を変形させるような摂動磁場を加えた場合での、磁場特性についても解析を進める。巨視的シアフローが存在する場合においては、まず、三次元平衡におけるプラズマフローの三次元分布を求め、その特徴を調べる。そして、そのフロー分布が交換型モードの成長に対して及ぼす影響を解析する。

3. 研究の方法

本研究では、圧力駆動型モードによるプラズマ構造変化を、電磁流体力学的 (MHD) 数値シミュレーションを用いて解析する。ヘリオトロンプラズマを対象として、圧力駆動型モードによる不安定性及びその非線形ダイナミクスを取り扱う。

基本的な手順は以下のとおりである。まず、プラズマを閉じ込める真空磁場配位をコイルに流れる電流からピオ・サバル則に基づいて計算する。この真空磁場を用いて、三次元 MHD 静止平衡を HINT コード (Y.Suzuki, et al., Nuclear Fusion 46, (2006) L19) を用いて計算する。摂動磁場は、真空磁場計算もしくは三次元平衡計算の際に追加して挿入することができる。HINT コードは、三次元平衡計算において広く使用されている VMEC コードとは異なり、入れ子状の磁気面の存在を仮定せずに平衡を計算できるので、摂動磁場を含む平衡計算には最適である。この三次元平衡の線形安定性及び非線形ダイナミクスを MIPS コード (Y.Todo et al., Plasma and Fusion Research. 5 (2010) S2062) を用いて解析する。MIPS コードでは、プラズマ摂動の時間発展を追跡し、その線形領域での振る舞いから線形成長率や固有関数の形状を求めることができる。また、さらに時間発展を追跡することによって、プラズマの非線形構造変化の様子も調べることができる。

シアフローによる構造変化の効果を調べるためには、本来、シアフローを矛盾なく含んだ三次元平衡を計算し、その平衡での摂動の振る舞いを解析することが必要である。しかし、任意のプロファイルを持つシアフローを矛盾なく含む三次元平衡を計算する手法は、現時点ではまだ開発されていない。そこで、本研究では、シアフローを三次元静止平衡から計算し、プラズマの時間発展を追跡する際に、その初期条件に加えることによって模擬することとした。ただし、後述するように、三次元静止平衡からシアフローを計算するためにも大きなブレイクスルーが必要であり、そのために本研究では新たな計算手法を開発した。

なお、本研究課題においては、摂動磁場とシアフローがプラズマ構造変化に与える影響を個別に取り扱った。両者を同時に取り扱うためには、摂動磁場が存在する平衡においてシアフローを計算する手法を新たに開発する必要がある、今後の課題となっている。また、プラズマの反磁性回転によるフローを含む交換型モードの解析も行っており、この場合には、簡約化 MHD 方程式を利用した半解析的なアプローチを採用した。

4. 研究成果

(1) 圧力駆動型モードによるプラズマ構造変化に対する摂動磁場の影響

共鳴摂動磁場 (RMP) を含むヘリオトロンプラズマの MHD 解析

典型的なヘリオトロンプラズマである大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマにおいて、MHD 安定性に対する共鳴摂動磁場の影響を調べた結果について論文にまとめた。LHD では、誤差磁場の存在が実験的に確認されており、 $(m, n) = (1, 1)$ の成分が支配的となっている。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。そこで、この誤差磁場に対応する水平方向に一樣な摂動磁場を引火した場合のプラズマの解析を行った。

まず、HINT コードを用いてこの摂動磁場を印加した平衡を計算した。その結果、摂動磁場に対応する磁気島がプラズマ内部に存在する平衡が得られた。圧力分布は、この磁気島構造に対応して磁気島内部で平坦化されている。このため、圧力勾配は、0 点近傍では弱く X 点近傍では強くなり、摂動磁場が無い場合に比べると、ポロイダル方向に異方性を持つことになる。

この平衡での線型安定性を、MIPS コードを用いて解析した。ここでは、摂動磁場が無い場合に典型的な交換型モードが不安定になるような磁場配位を採用した。このとき、摂動磁場を印加すると、交換型モードではなく、磁気島の X 点近傍に局在するバルーニング的な構造を持つモードが不安定となった。これは、圧力勾配の大きい X 点近傍に局在することによって、駆動ポテンシャルを最も効率よく利用できるためであると考えられる。

さらに非線形領域での圧力分布の構造変化を吟味した。摂動磁場が無い場合には、圧力分布は交換型モードによってマッシュルーム的な変形を伴って崩壊する。これに対して、摂動磁場が印加された場合には、摂動磁場によって形成される磁気島の X 点近傍から崩壊が生じて全体に広がっていく。従って、モード構造の空間的位相は磁気島の幾何学的形状によって固定されることになる。一方、交換型モードにはそのような特別な位相は存在せず、摂動磁場の有無による構造変化の大きな違いが見られた。

ヘリオトロン配位における D 型変形の効果

LHD 配位に対して、大きな摂動磁場を加えて、断面形状を D 型に変形した場合について真空磁場に対して解析を行った。LHD をはじめとするヘリオトロン配位には、正味トロイダル電流を流さなくても閉じ込め磁場を生成することができるという大きな利点がある。さらに、連続巻コイルを採用していることにより、ダイバータ磁力線が自動的に備わっているという、優れた性質も持ち合わせている。しかし、このダイバータ磁力線を効率よく利用するためには、その磁力線が通過するための十分な空間が必要である。特に、トーラス内側において、最外殻磁気面とヘリカルコイルとの間の間隙 (ダイバータクリアランス) を確保することが重要となる。

そこで、本研究では、このダイバータクリアランスを広げるために、最外殻磁気面を変形し、楕円形状から D 型にすることを検討した。そのために、LHD のコイル配位に加えて、ヘリカルコイルの内側の水平面上に 1 本のポロイダルコイルを設置する。そうすると、このコイルに流れる電流によって、内側の磁気面は内部へ押し込まれ、最外殻磁気面の形状が D 型となる。これによって、ダイバータクリアランスを有効に広げることができることを示すことができた。一方、この変形によってプラズマ体積は小さくなり、縦長変形となるために、上下方向の粒子損失が生じやすくなるという欠点が生じた。これらを回避するためには、全体的に横長となるような四重極磁場を重畳することを検討した。装置サイズを縮小した場合も検討した。この場合、相対的にヘリカルコイルが大きくなることにより、ダイバータクリアランスを確保することが困難となってくる。実際、半分のサイズではクリアランスを確保しようとしても、その前に、磁気軸が上下に分離してしまい、入れ子状の磁気面を保てないことがわかった。

(2) 交換型モードとフローとの相互作用

交換型モードに対する反磁性フローの影響と熱伝導の効果

LHD プラズマの交換型モードに対する反磁性効果による回転の効果と、熱伝導度及び粘性の影響に着目した。これまで、交換型モードに対しては、これらの散逸項は安定化に寄与し、線型成長率を低減する効果のみを持つと考えられてきた。そこで、本研究では、3-field の簡約化 MHD

方程式を用い、反磁性効果によるフローを含んだ場合について線型固有値解析を行った。

まず、熱伝導効果のみを含む場合について、考察した。熱伝導度を増加させるに従って、線形固有モードの第1固有値の成長率は減少していくと同時に、第2固有値の成長率は増加していく。そして、熱伝導度がある値より大きくなると両者は縮退して一つの固有値となり、同じ成長率をもって減少していくことが得られた。成長率が縮退するまでは、いずれの固有値の実周波数もゼロであるが、成長率の縮退と同時に実周波数に分岐が生じ、第1固有値はイオン反磁性方向の値を持ち、第2固有値は電子反磁性方向の値を持つことがわかった。次に、この状況において、反磁性効果を含めた解析を行った。この場合、熱伝導度のどの値に対しても、成長率及び実周波数において両者は分離している。

さらに粘性を加えた解析を行った。この場合には、熱伝導度を上昇させると、第1固有値の成長率が減少し第2固有値の成長率が増加して、ある値を超えると両者が逆転する。一方、実周波数の符号は第1固有値では正、第2固有値では負であり、両者の符号は熱伝導度が増加しても変化しない。実際に観測されるモードは、成長率が最大のモードであることを考えると、熱伝導度が小さいときには、イオン反磁性方向に回転するモードが観測されるが、ある程度大きい場合には、電子反磁性方向に回転するモードが観測されることになる。すなわち、熱伝導度を増加させても、必ずしも成長率の観測値が減少するとは限らないということになる。

モデルフロープロファイルを用いた巨視的背景フローと交換型モードとの相互作用の解析

三次元平衡における巨視的背景フローと交換型モードとの相互作用の研究の第1ステップとして、シアフローとしてモデル的なプロファイルを仮定して解析を行った。

対象はLHDプラズマとし、フローとしては磁気面関数であることを仮定してポロイダルフローのみを取り入れた。このとき、フローのプロファイルは、実験で観測されているものに近い形状を採用し、回転変換が1の有理面上で有意なシアが存在するようにした。このプロファイルを固定して、その絶対値を変化させた場合について解析を行った。

フローの無い場合に交換型モードが強く不安定な平衡を選んで計算を行った。この場合、 $(m,n)=(4,4)$ のモードが支配的なモードとして成長し、非線型飽和後に圧力分布に対して大きな崩壊現象をもたらす。同時に、磁気面も破壊されストキャスティックになっていく。これに対して、このフローなしの場合の飽和レベルと同程度の運動エネルギーを持つフローを加えた場合には、崩壊現象が弱められることが得られた。このとき、支配的なモードは $(m,n)=(2,2)$ に減少し、同時刻での圧力崩壊も磁気面破壊もかなり抑えられている。さらに、フローなしの飽和レベルよりも2桁程度大きな運動エネルギーを持つフローを加えた場合には、モードの成長は見られず、圧力分布にも磁気面形状にも、変化は見られなかった。

実験データを用いた三次元フロー計算スキームの開発および改良

で行った解析では、プラズマフローとして、ポロイダル成分のみを考慮しそのプロファイルにもモデル的な形状を採用した。従って、そのフローの表現には物理的根拠が薄弱であった。そこで、LHD計測結果と矛盾のないフロープロファイルを求める手法を開発した。

まず、定常状態においてフローは磁気面上を流れると仮定し、その磁力線に垂直方向成分がポテンシャルによって与えられるとする。そうすると、このフローはHamada座標において、比較的簡単な式で表現できる。ところが、ダイナミクスを解析するにはMIPSコードでは円柱座標系を採用しているため、Hamada座標と円柱座標との座標変換が必要となる。ここでは、VMC座標を仲介させてこの変換を数値的に求める表式を導出した。また、この表式には、2つの未定の磁気面量が含まれており、この量を決定するために実験データを利用することとした。このようにして、三次元平衡におけるフローを計算する数値計算スキームを新たに開発した。LHD実験では、フローのポロイダル及びトロイダル成分が、横長断面での水平面上で一次的に計測されている。ここで開発した計算スキームを用いることにより、一次元の実験データを用いて、三次元のプラズマ全領域でのプラズマフロー分布を計算することができるようになった。

その後、この計算スキームに対してさまざまな改良を進めた。まず、定式化の再検討を行った。プラズマ全域にわたってのフローの分布を求めるために三次元平衡磁場のデータを利用する。当初の計算スキームでは、ダイナミクス計算に用いるHINTコードの磁場を用いてフロー計算を行っていた。しかし、HINTコードでは、入れ子状の磁気面を仮定せずに三次元平衡を計算している。このことは、平衡の三次元性を正確に取り扱うことができるという大きな利点がある一方で、フロー計算スキームが磁気座標を用いて定式化しているため、定式化の際の仮定を精度よく担保するにはあまり適切ではない。そこで、フロー計算においてはHINTコードの計算結果を採用せず、対応するVMCコードの平衡のみを用いることとした。これにより、定式化及び計算手順が簡素化され、定式化において設定した仮定条件を精度よく満たすことに成功した。

さらに、磁気軸近傍では、フローの計算が数値的に発散する可能性があることが判明した。そこで、2点の改良を行った。まず、磁気軸上でのポロイダルフロー成分について改良を行った。物

理的には、磁気軸上ではポロイダル成分は存在しないが、他の領域と同様の計算手法を用いていたために有限の値が存在していた。そこで、この磁気軸上でのポロイダル成分を強制的にゼロとする措置を行った。次に、座標変換の精度向上を行った。フローの定式化は VMEC 座標 (s, u, v) の関数として表現されるが、ダイナミクス計算のためには、円柱座標の関数として求めることが必要となる。そのためには、VMEC 座標を円柱座標の関数として表現しなければならない。VMEC コードでは円柱座標を VMEC 座標の関数として表現しているため、両座標系間の逆変換を行わなければならない。このスキームでは、初期値を粗く推定し 2 次元ニュートン法を用いて精度を向上させている。ところが、当初のスキームでは磁気軸近傍でこの初期値推定が適切でない場合があることが判明した。そこで以下のようにこの初期値推定の精度向上を行った。まず、最外郭磁気面内での存在可否を cross numbering 法を用いて決定する。次に、 s 方向と u 方向の両方の精度の向上のためにプラズマ領域を (s, u) の微小セグメントに分割し、そのセグメント内での存在可否をベクトル積判定法を用いて決定することとした。これにより、精度は飛躍的に向上し、発散は生じなくなった。

開発した計算スキームによって求められたフローと交換型モードとの相互作用

交換型不安定性の発現を効率よく得るために、対象とする平衡として、フローが無い場合において非常に不安定なモデル平衡を選択した。したがってフローがない場合には、交換型モードが成長し非線形段階において、圧力分布は大きく崩壊する。この平衡に、実験と同程度の大きさのフローを印加した。ところが、不安定性に対するフローの効果が不十分で、結果として、フローが無い場合と同様の崩壊現象が得られた。そこで、フローの大きさを人為的に 200 倍にすると、崩壊が若干抑制されるという状況となった。これにより巨視的背景フローには交換型不安定性に対して潜在的な安定化効果があることが分かった。

この結果を詳細に調べるために、シミュレーション手法の再確認を行った。その結果、非線形ダイナミクスにおいて仮定している粘性によって、フローが急速に減衰していることが判明した。そこで、この巨視的背景フローが常に初期値を保つように運動方程式を補正した。これは、中性粒子入射等によって運動量が継続的に注入されること及び新古典拡散によって継電場が定期的に形成されること等によってフローが維持されていることに対応する。その結果、実験で観測される値の 10 倍程度でも安定化の傾向は見られた。

このシミュレーションでは、さらにフローを大きくすると逆に圧力分布の崩壊が促進され不安定化の寄与を持つような結果が得られている。そのため、フローによって安定化の傾向はみられても、完全に成長を抑制する状況は見出されていない。また、安定化の傾向を圧力分布の非線形崩壊の度合いのみで検討しており線形領域での議論が不足していた。この状況を精査するために、まず、線形領域での運動エネルギーの時間発展においてトロイダルモード分解を行い、それぞれのモードの線形成長率を評価できるように計算手法を改良した。また、フローなしの場合の交換がモードの駆動力を減少させることを考え、平衡のベータ値を減少させることとした。そして、それぞれのベータ値において、支配的なモードの線形成長率のフローの絶対値に対する依存性を解析することとした。その結果、フローの絶対値を増加させていくと、ある臨界点までは線形成長率は減少し、安定化の寄与が見られる。ところが、その値を超えると逆に線形成長率はフローの値とともに増加することが得られた。この傾向は、ベータ値を減少させても同様にみられる。しかし、この臨界点はベータ値が小さいほど小さく、フローを上昇させるとすぐに成長率が増加に転じる。このために、現段階においては、フローのみの効果によって完全に安定化する状況は見出されていない。また、成長率が増加に転じた後の摂動圧力分布を調べた結果、奇関数となっていることが判明した。これは、偶関数の分布を持つ交換型モードの分布とは異なっている。先行研究では、この分布はケルビン・ヘルムホルツ不安定性において得られている。したがって、上記の結果は、交換型モードとケルビン・ヘルムホルツ不安定性が競合したことによる結果だと理解している。すなわち、フローが小さい場合は、交換型モードが支配的であるが、フローが大きくなるにつれてケルビン・ヘルムホルツ不安定性が不安定となる。その結果、両者がお互いの成長を阻害する方向に働き、全体の成長率は減少する。さらにフローが大きくなると、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の方が卓越し、この成長率が増加していくと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 ICHIGUCHI Katsuji, SUZUKI Yasuhiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Vacuum Configurations of D Shape Heliotron	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3403100 ~ 3403100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3403100	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 Katsuji ICHIGUCHI, Yasuhiro SUZUKI, Yasushi TODO, Masahiko SATO, Timothee NICOLAS, Benjamin A. CARRERAS, Satoru SAKAKIBARA, Yuki TAKEMURA, Satoshi OHDACHI and Yoshiro NARUSHIMA	4. 巻 11
2. 論文標題 Three-Dimensional Numerical Analysis of Shear Flow Effects on MHD Stability in LHD Plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2403035-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.11.2403035	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 該当する
1. 著者名 T. Nicolas and K. Ichiguchi	4. 巻 56
2. 論文標題 Dissipation and diamagnetic effects on the interchange mode growth rate and rotation in reduced magnetohydrodynamics applied to stellarators	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026008, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0029-5515/56/2/026008	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 該当する
1. 著者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, and B. A. Carreras	4. 巻 55
2. 論文標題 Three-dimensional MHD analysis of heliotron plasma with RMP	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 073023, 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0029-5515/55/7/073023	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 該当する

〔学会発表〕 計37件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 市口勝治、鈴木康浩、藤堂泰、榊原悟、居田克巳、武村勇輝、B.A.Carreras
2. 発表標題 MHD 安定性に対する巨視的背景フロー効果の三次元数値解析
3. 学会等名 2021年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市口勝治、鈴木康浩、藤堂泰、榊原悟、居田克巳、武村勇輝、Benjamin A. Carreras
2. 発表標題 交換型モードと巨視的フローとの相互作用に対する三次元 MHD 数値解析
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, K. Ida, Y. Takemura, S. Sakakibara, M. Yoshinuma, B.A.Carreras
2. 発表標題 Numerical study of interaction between interchange mode and global flow
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市口勝治、鈴木康浩、藤堂泰、榊原悟、武村勇輝、B. A. Carreras、L. Sugiyama
2. 発表標題 LHDプラズマの崩壊現象における非共鳴モードの非線形MHD解析
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuji ICHIGUCHI, Yasuhiro SUZUKI, Yasushi TODO, Satoru SAKAKIBARA, Yuki TAKEMURA, Benjamin A. CARRERAS, Linda SUGIYAMA
2. 発表標題 Numerical Analysis of Non-Resonant Mode in LHD Partial Collapse with Net Toroidal Current
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, B. A. Carreras, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima
2. 発表標題 NUMERICAL STUDY OF NET TOROIDAL CURRENT EFFECTS ON MHD STABILITY OF LHD PLASMAS
3. 学会等名 22nd International Stellarator Heliotron Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, B. A. Carreras
2. 発表標題 Numerical Study of Net Toroidal Current Effects on MHD Stability of LHD Plasmas
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市口勝治、後藤拓也、佐竹真介、山口裕之、柳長門、鈴木康浩
2. 発表標題 ヘリオトロンプラズマに対する磁場コイル配位最適化検討
3. 学会等名 第36回プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Nonlinear simulation of interaction between global flow and interchange modes in heliotron plasmas
3 . 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, S. Sakakibara, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Causality Study of MHD Events in LHD Plasmas
3 . 学会等名 45th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Nonlinear simulation of interaction between global flow and interchange modes in heliotron 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 K. Ichiguchi, Y. Suzuki
2 . 発表標題 Fundamental numerical study of D shape heliotron
3 . 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名	K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, B. A. Carreras
2. 発表標題	Nonlinear simulation of interaction between global flow and interchange modes in heliotron plasmas
3. 学会等名	MPPC Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	市口勝治、鈴木康浩、佐藤雅彦、藤堂泰、B.A.Carreras、榊原悟、大館暁、成嶋吉朗
2. 発表標題	ヘリオトロンプラズマでの交換型モードと巨視的フローの相互作用に対する3次元数値解析
3. 学会等名	2018年日本物理学会秋季大会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Ichiguchi, S. Sakakibara, B. A. Carreras
2. 発表標題	LHDのMHD崩壊現象における因果律の検討
3. 学会等名	第35回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Ichiguchi, Y. Suzuki
2. 発表標題	D型断面変形によるヘリオトロンプラズマの最適化の検討
3. 学会等名	日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年	2019年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, and B. A. Carreras
2 . 発表標題 Three-dimensional numerical study of global flow effects on interchange instabilities
3 . 学会等名 44th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, and B. A. Carreras
2 . 発表標題 Numerical study of global flow effects on interchange instabilities in LHD configuration
3 . 学会等名 21th International Stellarator/Heliotron Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, K. Ida, B. A. Carreras, S. Sakakibara, S. Ohdachi, and Y. Narushima
2 . 発表標題 Numerical analysis of interaction between shear flow and interchange mode in heliotron
3 . 学会等名 The 26th International Toki Conference (ITC-26) & The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference(APFA-11) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 市口勝治, 鈴木康浩, 藤堂泰, 佐藤雅彦, 居田克巳, 榊原悟, 大館暁, 成嶋吉朗, Benjamin. A. Carreras
2 . 発表標題 ヘリオトロンプラズマの安定性に対する大局的フロー効果の数値的研究
3 . 学会等名 Plasma 2017
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 市口勝治
2. 発表標題 理想MHDに基づく交換型不安定性の直観的説明
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 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, T. Nicolas, B. A. Carreras, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, Y. Narushima
2. 発表標題 Numerical analysis of global flow effects on interchange modes in heliotron plasmas
3. 学会等名 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, Y. Takemura, S. Sakakibara, M. Sato, B. A. Carreras, T. Nicolas, S. Ohdachi, Y. Narushim
2. 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of global flow effects on MHD stability in heliotron plasmas
3. 学会等名 THEORY OF FUSION PLASMAS, 16th JOINT VARENNA - LAUSANNE INTERNATIONAL WORKSHOP (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Takemura, S. Sakakibara, Y. Todo, M. Sato, S. Ohdachi, Y. Narushima, T. Nicolas, and B. A. Carreras
2. 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of interaction between plasma rotation and interchange modes
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市口勝治、鈴木康浩、藤堂泰、武村勇輝、佐藤雅彦、榊原悟、大館暁、成嶋吉朗、B.A.Carreras
2. 発表標題 LHDプラズマ安定性に対する径電場フロー効果の3次元数値解析II
3. 学会等名 2016年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Todo, M. Sato, T. Nicolas, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, Y. Narushima
2. 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of global flow effects on MHD stability in heliotron plasmas
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, Y. Takemura, S. Sakakibara, Y. Todo, M. Sato, S. Ohdachi, Y. Narushima, T. Nicolas, and B.A. Carreras
2. 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of interaction between plasma rotation and interchange modes
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 - comparison to experiments (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市口勝治
2. 発表標題 巨視的フローを含む交換型モードの三次元数値解析
3. 学会等名 第6回 IFERC-CSC研究会
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Katsuji ICHIGUCHI
2 . 発表標題 Three-Dimensional Numerical Analysis of Interaction between Plasma Rotation and Interchange modes
3 . 学会等名 22th NEXT (Numerical EXperiment of Tokamak) Workshop
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of shear flow effects on MHD stability in LHD plasmas
3 . 学会等名 20th International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2015年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of shear flow effects on MHD stability in LHD plasmas
3 . 学会等名 25th International Toki Conference (国際学会)
4 . 発表年 2015年

1 . 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, B. A. Carreras
2 . 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of shear flow effects on MHD stability in LHD plasmas
3 . 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2015
4 . 発表年 2015年

1. 発表者名 市口勝治, 鈴木康浩, 佐藤雅彦, 藤堂泰, T. Nicolas, B.A.Carreras, 榊原悟, 武村勇樹, 大館暁, 成嶋吉朗
2. 発表標題 LHDプラズマのMHD安定性に対するシアフローの影響
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 K. Ichiguchi, Y. Suzuki, M. Sato, Y. Todo, T. Nicolas, S. Sakakibara, Y. Takemura, S. Ohdachi, B. A. Carreras
2. 発表標題 Three-dimensional numerical analysis of LHD plasmas including shear flow
3. 学会等名 第33回プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 市口勝治, 鈴木康浩, 佐藤雅彦, 藤堂泰, T. Nicolas, B.A.Carreras, 榊原悟, 武村勇樹, 大館暁, 成嶋吉朗
2. 発表標題 LHDプラズマにおける交換型モードに対するシアフローの影響
3. 学会等名 第5回IFERC-CSC研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市口勝治, 鈴木康浩, 佐藤雅彦, 藤堂泰, T. Nicolas, B.A.Carreras, 榊原悟, 武村勇樹, 大館暁, 成嶋吉朗
2. 発表標題 Effects of Plasma Rotation on Interchange Modes in LHD
3. 学会等名 第21回NEXT研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市口勝治, 鈴木康浩, 佐藤雅彦, 藤堂泰, T. Nicolas, B.A.Carreras, 榊原悟, 武村勇樹, 大館暁, 成嶋吉朗
2. 発表標題 LHDプラズマ安定性に対する径電場フロー効果の三次元数値解析
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------