

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6月8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：20760583
 研究課題名（和文） 線形磁気流体シミュレーションによる環状プラズマの崩壊現象の研究
 研究課題名（英文） Collapse phenomena of toroidal plasma by nonlinear MHD simulation
 研究代表者
 水口 直紀（MIZUGUCHI NAOKI）
 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号：70332187

研究成果の概要（和文）：環状プラズマにおいて普遍的に観測されている崩壊現象を対象とし、磁気流体力学(MHD)モデルに基づいた数値シミュレーションを行い、その非線形ダイナミクスについての包括的な理解を深めた。球状トカマクの周辺局在モード(ELM)、ヘリオトロンのコア密度崩壊(CDC)、および逆磁場ピンチ(RFP)のヘリカル構造形成を具体的対象とし、実験とも比較しながら各々のモデリングを行い、圧力勾配下での磁気再結合が3次元緩和構造を形成する等、共通の物理機構を抽出した。

研究成果の概要（英文）：Nonlinear Magnetohydrodynamic(MHD) simulations have been executed for a comprehensive modeling of collapse phenomena in toroidal plasmas. The edge-localized mode(ELM) in spherical tokamak, the core density collapse(CDC) in heliotron, and the helical structure formation in reversed-field pinch(RFP) have been examined, comparing with experimental observations. Several common natures such as the magnetic reconnections under the pressure gradient which cause three-dimensional relaxed structures have been found out.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：プラズマ理工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：MHD、シミュレーション、崩壊現象、ヘリオトロンの RFP

1. 研究開始当初の背景

周辺局在モード（Edge-Localized Mode; ELM）は、近年の大型トカマク装置における高閉じ込め状態（Hモード）において、しばしば周辺の圧力勾配の大きな領域（ペダスタル部）で間欠的に観測される崩壊現象の一種である。ELM は将来の核融合炉を展望する上で、炉壁の損傷や閉じ込め劣化を引き起

す要因として回避されるべき対象である一方で、不純物粒子の効率的な排出に重要な役割を果たしているという側面もあり、その発生物理機構の理解と制御が近年の重要な検討課題となっている。ELM には、特性の異なるいくつかの種類があることが実験的に知られており、また、同様の ELM 的な揺動は、球状トーラス(Spherical Torus; ST)やヘリカル系装置においても観測され、高閉じ込

め状態のプラズマに普遍的な現象と考えられる。また、最近のヘリカル系における高密度コア (Super Dense Core; SDC)配位においては、過渡的なプラズマ温度の上昇時において、中心密度構造の急激な減少と周辺部へのエネルギーの掃き出しを伴う崩壊現象 (Core Density Collapse; CDC) が観測されている。このような現象も、さらなる閉じ込めの高ベータ化のための重要な克服課題となっている。

ELM は、(1)原因となる磁気流体力学 (MHD)不安定性の励起、(2)圧力構造の崩壊と余剰エネルギーおよび粒子の排出、(3)構造の再形成といった段階を繰り返しながら間欠的に発生すると考えられており、それらの物理機構に対する理解が、実験、理論の両面から近年急速に進展してきている。中でも(1)の線形不安定性については、所謂ピーリング・バルーニングモデルを元にした理解が進んでいる。また、線形安定性と長時間にわたる輸送特性とを関連づけて、(3)から(1)へと回帰する ELM の間欠的挙動を説明するモデルについても進展してきている。その一方で、(2)に相当する短時間かつ大振幅の非線形ダイナミクスについては、未だ不明な点が多く残されている。実験的には、トカマクおよび ST 装置において、特徴的な紐状構造 (フィラメント) の形成やその運動の様子等、断片的にはあるが徐々に情報が蓄積されてきており、またヘリカル型装置においても、CDC に関する現象論が整理されてきている。

2. 研究の目的

本研究は、トカマクやヘリカル系など様々な磁場配位をもつトラスプラズマにおいて普遍的に観測されている崩壊現象について、その非線形ダイナミクスを、MHD モデルに基づいた非線形数値シミュレーションにより配位間で比較しながら包括的に理解しようとするものである。

上に述べたような崩壊現象について、その物理機構を明らかにし、実験予測精度を高めるためには、現時点では理解の遅れている非線形ダイナミクスに対する理解を深め、線形安定性や実験事実といった既知の情報の断片を矛盾なくつなぐ非線形モデルを構築することが重要である。とくに配位の違いがもたらすダイナミクスの質的な差異と、一方で配位間に共通に現れる特性とを知ることは、普遍性と多様性をあわせもつ崩壊現象を支配する物理機構の本質を明らかにする上で必要不可欠である。現状では情報が広汎におよび、急速に増えてきている段階にあるため、研究は広くパラメータを走査しつつ非線形特性を配位間で比較し、かつ実験と理論との

対応を確認しながら進めてゆく。核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)による実験が行なわれ、さらに高性能の大型計算機システムを中心とした世界的にも稀な計算機環境を活用できる。このような研究環境を前提として、本研究では、ST、トカマク、ヘリカル系等のそれぞれについて、実験条件に即した数値シミュレーションを実行し、計算機上で個々の崩壊現象について、その非線形過程を再現した上で、配位間で比較しながら相違点を整理することにより、そのダイナミクスを包括的に理解することを目的とする。

3. 研究の方法

上記、具体的な崩壊現象を対象とし、個々の現象の発生実験条件に即した現実的な計算モデルを設定し、シミュレーションを実行した。また研究期間中に逆磁場ピンチ

(Reversed-Field Pinch; RFP) 実験において、崩壊を伴った3次元構造の形成過程に関する研究が進展し、本研究課題の遂行に有用であると認められたため、これについても、本研究課題の具体的な対象として追加し、これに関するシミュレーションも行った。

手法としては、既存の3次元非線形 MHD シミュレーションコードを基本として、修正を加えながら用いた。個々の対象に合わせ、境界条件や散逸項の取り扱い等に、適宜モデルを拡張してシミュレーションを行った。

シミュレーション結果は、直ちに可視化を施し、実験結果と直接的な比較を行った。非線形挙動を両者で比較し、実験結果を再現するような計算条件を再帰的に求め、モデリングを順次進めていった。

いずれの配位においても、崩壊現象は複雑な3次元構造をもった磁場、速度場、圧力場が互いに作用し合いながら時間発展すると予想されたため、計算結果の可視化には、3次元構造の表示に有用な仮想現実技術や、詳細構造の解析に必要な各種の2次元面への投影スキーム、また時間変化についての動画表示技術等を駆使した可視化技術を用いた。

計算は核融合科学研究所のスーパーコンピュータシステムを用いて行った。研究機関の初期においては NEC 製のベクトル並列型計算機 (SX-8) を、終期には日立製のスカラ並列型計算機 (SR-16000) を用いたため、基幹となる非線形 MHD コードを、それぞれに最適化された MEGA-D コード (初期) および MIPS コード (終期) と使い分けた。

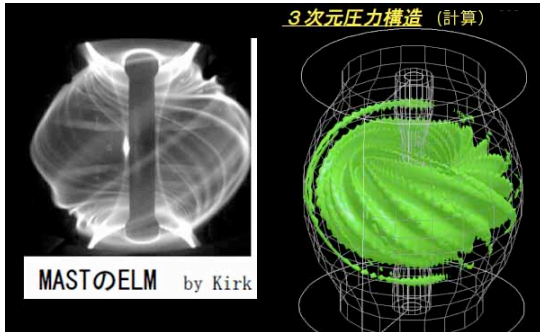
4. 研究成果

個別の配位に対してそれぞれシミュレー

ションを実行し、結果を得た。実験観測結果との比較も並行して進め、個々の現象についての理解を進めた。そしてそれらを統合し、各々の相違点について考察を行った。以下に列記する。

(1) ST における ELM

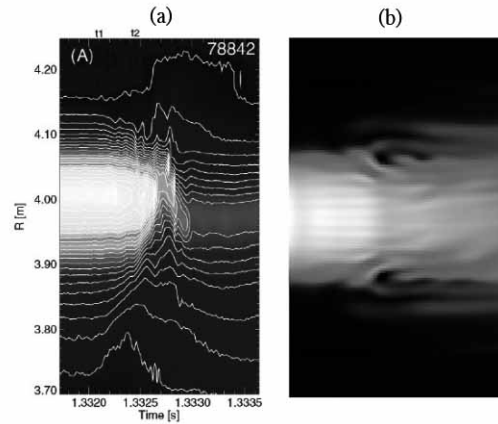
周辺部に生起する高波数モードの成長により、特徴的なフィラメント構造が自発的に形成され、さらに本体プラズマから分離する様子を再現した。これは球状トカマク装置において観測された画像計測結果ともよく一致している。ELM の制御は現在の大型トカマクにおいても主要課題の一つであり、バルーニングモードとピーリングモードの発生機序のちがいや、衝突性パラメータ依存性への影響についての知見を与えるる計算結果である。



ST における ELM 崩壊時に現れるフィラメント構造(左)MAST 装置における観測結果(右)シミュレーション結果(圧力の等値面)

(2) ヘリオトロンにおける CDC

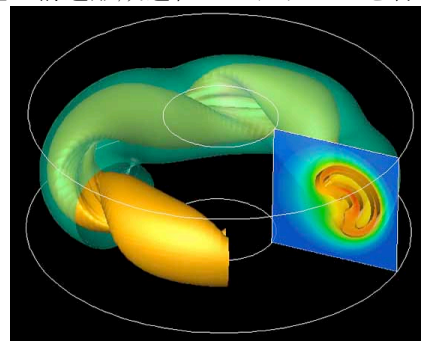
CDC は高ベータ且つ大きな圧力勾配をもつヘリオトロン配位において観測される、中心密度の崩壊現象である。バルーニング様の周辺モードを前兆として中心部から外部への密度の短時間の掃出しを伴う。それらの一連のシナリオを計算機シミュレーションにより明らかにした。抵抗性バルーニングモードの発展から磁気面構造の崩壊と磁気再結合を通じて中心構造が MHD 的時間スケールで崩壊する様子を再現し、実験とある程度一致を見た。特徴的な長波長モードの出現等に一部不一致が見られさらなる検討を要する。



圧力構造の時間発展(a)実験(SXR 信号)。(b)シミュレーション(圧力の径方向分布)

(3) RFP の単ヘリシティ構造の形成

RFP 配位で観測されている単ヘリシティ状態等の 3 次元構造の形成および崩壊過程を具体的対象とし、汎用非線形 MHD ソルバーである MIPS コードを用いて、現象の再現を試みた。共鳴有理磁気面が存在する場合と非存在の場合とで結果を比較すると、いずれの場合も特徴的なそら豆型ポロイダル断面をもち、且つホローな圧力分布を形成する、トロイダルモード数が 4 のヘリカル型配位に自発的に緩和する様子が再現された。京都工繊大の RELAX 装置における実験結果と比較し、モード構造がよく一致することが確認された。また共鳴/非共鳴いずれの場合においてもヘリカル状態が形成される事実は米国における実験結果とも符合する。このように、実験との比較を行いながら、RFP における崩壊型の構造形成過程のモデリングを行った。



RFP に発現する 3 次元構造

(4) 総括

研究初年度からの他の配位に対するシミュレーション結果と配位間で比較すれば、プラズマベータ値や、原因モードの駆動エネルギー源等に違いをもつにもかかわらず、不安定

性成長の飽和に際し、磁気再結合を伴った3次元構造へと変換する等、共通点が見出された。本研究課題は、崩壊過程の動的な解析を行ったものであるが、その帰結として生じる緩和状態には、一定の共通の特徴をもった3次元構造が見出されたため、今後の研究の発展の方向性として、これらの3次元緩和状態の特性を明らかにしてゆくことが提案できる。

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3件)

① N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune, and K. Ichiguchi, "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", Plasma and Fusion Research, Vol. 7, (2012) (掲載予定)

② Naoki Mizuguchi, Yasuhiro SUZUKI, and Nobuyoshi OHYABU, "Nonlinear dynamics of a collapse phenomenon in heliotron plasma with large pressure gradient", Nuclear Fusion, Vol. 49, (2009), 095023.
doi:10.1088/0029-5515/49/9/095023

③ Naoki MIZUGUCHI, Yasuhiro SUZUKI, and Nobuyoshi OHYABU, "Nonlinear simulation of collapse phenomenon in helical plasma with large pressure gradient", Plasma and Fusion Research, Vol. 3, (2008), S1034.
<http://nifs-repository.nifs.ac.jp/handle/10655/6371>

[学会発表] (計6件)

① 水口直紀, 三瓶明希夫, 藤田慎一, 大木健輔, 比村治彦, 政宗貞男, 市口勝治, "逆磁場ピンチにおける3次元構造の形成に関する非線形MHDシミュレーション", Plasma Conference 2011, 2011年11月22日~27日, 石川県立音楽堂(金沢市), 23P118-P.

② N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune, K. Ichiguchi, "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", 21st International Toki Conference on Integration of Fusion Science and Technology for Steady State Operation, Nov.28 - Dec.1, 2011, Toki, P1-83.

③ 水口直紀, 市口勝治, "ヘリカル系のコ

アプラズマのMHD現象の非線形解析", プラズマ・核融合学会第27回年会, 2010年11月30日~12月3日, 北海道大学学術交流会館(札幌市), 02P03

④ Naoki MIZUGUCHI, and Katsuji ICHIGUCHI, "Nonlinear analysis of MHD collapse phenomena in the core region of helical system", 20th International Toki Conference on The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science, Dec. 7-10, 2010, Toki, P2-16.

⑤ 水口直紀, 市口勝治, "ヘリカル系における圧力崩壊過程の非線形シミュレーション", プラズマ・核融合学会第27回年会, 2008年12月2日~5日, 栃木県総合文化センター(宇都宮市), 2aB21P

⑥ N. Mizuguchi, Yasuhiro SUZUKI, and Nobuyoshi OHYABU, "Nonlinear Dynamics of Collapse Phenomena in Heliotron Plasma with Large Pressure Gradient", 22nd IAEA Fusion Energy Conference (Oct. 13-18, 2008, Geneva), TH/P9-17.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ(成果発表資料、論文へのリンク等を掲載)

<http://www.nifs.ac.jp/fts/mizu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水口 直紀 (MIZUGUCHI NAOKI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：70332187

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし