

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820443

研究課題名(和文) Integrated multi-time-scale simulation of energetic ion dynamics in tokamak plasmas

研究課題名(英文) Integrated multi-time-scale simulation of energetic ion dynamics in tokamak plasmas

研究代表者

Bierwage Andreas (Bierwage, Andreas)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：10584691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：ビーム駆動されたJT-60トカマクプラズマに対するマルチ時間スケール統合シミュレーションおよび自己無撞着シミュレーションを高性能スーパーコンピュータHeliosにより遂行した。シミュレーションにより初めて実験で観測されている突発的の大事象(ALE)と呼ばれる緩和現象を再現することができた。この現象が発生すると核融合出力とプラズマ閉じ込めに影響を与えられとされる。シミュレーション解析によりALEの発生間隔とその発生を決める重要な物理機構を明らかにした。数値シミュレーション結果は実験データによりその妥当性を検証した。これによりコードの予測精度の向上と信頼性が確立された。

研究成果の概要(英文)：A combination of integrated and self-consistent multi-time-scale simulations of beam-driven JT-60 tokamak plasmas were performed on the high-performance supercomputer Helios. These simulations reproduced, for the first time, experimentally observed relaxations known as Abrupt Large Events (ALE), which play an important role in the regulation of nuclear fusion performance and plasma confinement. An analysis of the results revealed key physics mechanisms that determine the intervals between ALEs and their sudden onset. In particular, the duration of the intervals is determined by collisional slow-down of energetic ions and wave-particle resonance conditions. The overlap of resonances associated with three distinct magnetohydrodynamic (MHD) modes is proposed as a key component of the ALE trigger mechanism. The numerical results were successfully validated against experimental data, which helps to build confidence in their relevance and reliability as needed for making predictions.

研究分野：工学

キーワード：核融合学 トカマク 高エネルギーイオン アルフベン波 波・粒子共鳴 マルチ時間スケール動力学
非線形シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

現在フランスに建設されている ITER は初めて制御された自己点火熱核融合プラズマを実現する計画である。核燃焼プラズマにおいては重水—三重水素熱核融合反応により生成される高エネルギーアルファ粒子により燃料プラズマが加熱される。現在の実験、例えば日本における JT-60 では外部入射された中性粒子ビームを利用して高エネルギーイオンを供給し、同様の条件を作り出している。JT-60 で行われたビーム駆動実験においては突発的の大事象(ALE)と呼ばれる間欠的な強い揺動が観測されている。ALE が起こると中性子放射率が著しく減少し高エネルギーイオンの損失が増加することが報告されており、ITER で同様の現象が起こると核融合反応率の減少が懸念される。そのため、ALE のような緩和事象の物理を明らかにし、いつそれが起きるかを予測することは重要な研究課題と位置づけられる。

2. 研究の目的

この研究の到達点は ALE を数値的にシミュレーションし、ALE の発生機構を明らかにすることである。そのため、以下の里程碑を設定した。

(1) 現在利用可能なスパコンの計算資源を有効活用し、数値シミュレーションにより ALE を再現するため、モデルの改良を行うとともにその結果を解析する手法を開発する。

(2) (1) で開発したコードを用いて JT-60U トカマクプラズマに基づく実験シナリオに沿って ALE のような緩和現象をシミュレーションする。

(3) (2) で得られたシミュレーション結果を解析し、実験データに対してその結果の妥当性を検証する。ALE の物理を同定するのに必要な情報を抽出する。

3. 研究の方法

以下のようにしてこの研究の到達点を目指した。

(1) すでに確立されている MEGA コードを拡張し、衝突モデルおよび JT-60 の実際の実験条件に基づいた現実的な高エネルギーイオンビーム源を実装した。これらを考慮しない場合は電磁流体モード(MHD)と高エネルギービームイオンとの共鳴相互作用が起こる短い時間(1ミリ秒程度)のシミュレーションが可能であったが、これらを考慮することにより ALE 発生の数サイクル(1回あた

り40~60ミリ秒)を含む長時間シミュレーション(200ミリ秒程度)が可能となった。

(2) 概要を得るため、拡張された MEGA コードを用いて統合シミュレーションを行った。ここでは5ミリ秒間隔で1ミリ秒だけ波—粒子の相互作用を考慮した。六ヶ所の国際核融合エネルギー研究センター附属計算機シミュレーションセンターの高性能スパコン HELIOS を用い、このマルチフェイズ法と呼ばれる有効的計算手法により物理時間として数100ミリ秒をシミュレーションすることができた。興味のある時間間隔、数ミリ秒の持続時間を選んで自己無撞着なシミュレーションを再度行った。すなわち、波—粒子相互作用、ビーム入射、衝突を連続して考慮した。

(3) 新しい解析手法「粒子軌道に基づく共鳴解析(ORA)」を開発し適用した。これにより ALE に対し重要だと考えられるキーとなる物理過程すなわち波—粒子共鳴、共鳴重畳、周波数挿引、不安定性の対流増幅、高エネルギーイオンの弾道的輸送等を詳細に現実的な条件で研究することが可能となった。

4. 研究成果

得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) モデリング、コード開発、ベンチマークテストは成功裏に完了した。現時点において、拡張された MEGA コードは MHD 波と高エネルギーイオンの波—粒子相互作用の自己無撞着な長時間シミュレーションを行うことができる世界唯一のコードであり、実験データによりその妥当性を検証済みである。この研究および関連研究に対し、MEGA 開発チーム(研究代表者を含む4人のメンバーから構成)は平成27年度フラスマ・核融合学会の第20回技術進歩賞:「高エネルギー粒子・MHD 連結シミュレーションコート MEGA の開発」を受賞した。

(2) 統合シミュレーションにより ALE の完全な2サイクル(3つの緩和現象)がシミュレーションにより得られた(図1(a))。次に中間の ALE が発生する数ミリ秒前からスタートし、自己無撞着にシミュレーションし、緩和現象を再現することに成功した(図1(b))。特に強調したい点はこのシミュレーションは安定な初期条件からスタートし数ミリ秒の長い周期の間中立安定にとどまっておき、その後、突発的に新しい平衡へと緩和する点である。このシミュレーション結果は計算プラズマ物理における新しい大きな里程碑と言える。

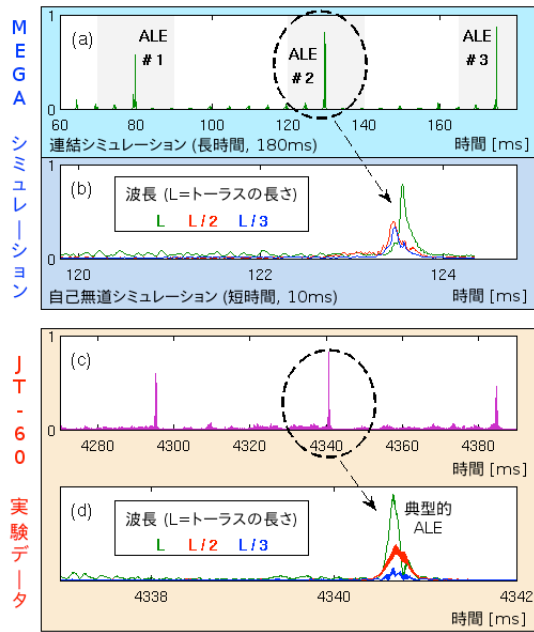


図 1 高エネルギーイオンに駆動された MHD 不安定性の磁場揺動の時間発展。シミュレーション(a,b)と実験データ(c,d)の比較。

(3) シミュレーション結果の解析と妥当性の評価を行い、新しい洞察が初めて得られた。

① それぞれの緩和事象の間に高エネルギーイオンのアバランチが起こり圧力分布は平坦化する。シミュレーション結果に因れば高エネルギーイオン圧力は波-粒子相互作用を無視した古典的なモンテカルロシミュレーションで得られた値に対し、プラズマの中心で 20 ~ 45 % 低い値を与える (図 2)。新しいシミュレーション結果は実験観測をよく説明する。

② ALE 期間中の MHD 波の動力学を解析し、緩和現象は 3 つの異なる振動 MHD モードが同時に高い振幅に達した時に起こることを発見した (図 1 (b))。この予測はその後実験計測により確認された (図 1 (d))。

③ JT-60 実験において ALE 間で発生する低振幅の MHD モードは高・低周波数側に周波数変調を起こすがシミュレーションにより再現できた。これまでの周波数変調の理論モデルは一次元 (動径方向の位置) の動力学のみを考慮していたが、シミュレーション結果は、高エネルギーイオンの多次元位相空間 (動径方向の位置、ピッチ角、及び・あるいは運動エネルギー) の動力学を考慮した新しい機構を用いて説明可能である。

以上まとめるとマルチ時間スケール MEGA シミュレーションにより JT-60 実験で観測された低振幅周波数変調モードのみならず ALE のような大振幅緩和事象を再現することができた。シミュレーション結果と実験計測デー

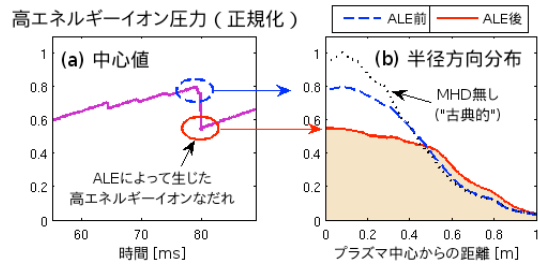


図 2 高エネルギーイオン圧力の時間発展。(a)中心値、(b)半径方向分布。

タとの比較によりその妥当性を検証した。これによりシミュレーション結果の精度を確信するに至った。シミュレーション結果には ALE の発生機構といつそれが発生するかを明らかにするための情報が含まれていると言える。

シミュレーション結果の詳細な解析は現在も継続しているが重要な洞察はすでに得られた。例えば引き続き起きる ALE までの時間間隔は衝突による高エネルギーイオンのスローイングダウンと波-粒子共鳴条件により決まることが判明した。さらに ALE 間の磁場揺動のスペクトル解析に基づき、非線形共鳴重畳が ALE のような緩和事象をトリガーする重要な機構であると考えられる。しかしながらこれまで考えられてきた共鳴重畳の描像だけで ALE を完全に説明できるわけではない。これまでの描像は単純化された一次元モデルに基づいており、主に相互作用する揺動振幅に対する判定基準により決定される。我々の結果によればこれだけでは不十分で多次元の過程を考慮する必要がある。実際、これは ALE のような大振幅緩和事象のみならず低振幅の周波数変調モードに対して成立している。後者に対してはこれまでの一次元の理論モデルでは説明できない多次元の周波数変調機構を発見している。

結論としてこの研究で得られたシミュレーション結果の解析をさらに進めることでトカマクのような複雑な形状をもつプラズマ中の MHD モードと高エネルギーイオンの非線形動力学に対し驚愕すべき新しい洞察が得られることを期待する。

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 10 件)

- ① ビアワーゲ アンドレアス、篠原 孝司、
「Orbit-based analysis of nonlinear energetic ion dynamics in tokamaks: II. Mechanisms for rapid chirping and convective amplification」、査読有、Physics of Plasmas、Vol. 23、2016、印刷中

- ② ビアワーゲ アンドレアス、篠原 孝司、
「Orbit-based analysis of nonlinear energetic ion dynamics in tokamaks: I. Effective mode number profile and resonant frequency tracking」、査読有、Physics of Plasmas、Vol. 23、2016、印刷中
- ③ ビアワーゲ アンドレアス、相羽 信行、篠原 孝司、「Alfvén acoustic channel for ion energy in high-beta tokamak plasmas」、査読有、Physical Review Letters、Vol. 114、2015、015002、5 頁
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.015002
- ④ ビアワーゲ アンドレアス、篠原 孝司、
「Orbit-based analysis of resonant excitations of Alfvén waves in tokamaks」、査読有、Physics of Plasmas、Vol. 21、2014、112116、21 頁
DOI: 10.1063/1.4902519
- ⑤ ビアワーゲ アンドレアス、藤堂 泰、相羽 信行、篠原 孝司、「Dynamics of low-n shear Alfvén modes driven by energetic N-NB ions in JT-60U」、査読有、Nuclear Fusion、Vol. 54、2014、104001、14 頁
DOI: 10.1088/0029-5515/54/10/104001
- ⑥ ビアワーゲ アンドレアス、篠原 孝司、相羽 信行、藤堂 泰、「Role of convective amplification of n=1 energetic particle modes for N-NB ion dynamics in JT-60U」、査読有、Nuclear Fusion、Vol. 53、2013、073007、12 頁
DOI: 10.1088/0029-5515/53/7/073007

〔学会発表〕（計 16 件）

- ① ビアワーゲ アンドレアス 他、（招待講演 I-10）「Alfvén Acoustic Channel for Ion Energy in High-Beta Tokamak Plasmas」、14th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems、2015 年 9 月 1-4 日、ウイーン（オーストリア）
- ② ビアワーゲ アンドレアス 他、（招待講演 21aC-2-1）「Multi-Time-Scale Energetic Particle Dynamics in JT-60U Simulated with MHD Activity, Sources and Collisions」、プラズマ・核融合学会第 31 回年会、2014 年 11 月 18-21 日、朱鷺メッセ（新潟県・新潟市）
- ③ ビアワーゲ アンドレアス 他、（ポスター発表 TH/P7-39）「Multi-Time-Scale Energetic Particle Dynamics in JT-60U Simulated with MHD Activity, Sources and Collisions」、25th IAEA Fusion Energy Conference、2014 年 10 月 13-18 日、サンクト・ペテルブルク（ロシア）
- ④ ビアワーゲ アンドレアス 他、（ポスター発表 JP8.00111）「Hybrid simulation of fast ion dynamics in the presence

of off-axis fishbone-like modes in high-beta JT-60U plasmas」、55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics、2013 年 11 月 11-15 日、デンバー（米国）

- ⑤ ビアワーゲ アンドレアス 他、（招待講演 I-4）「Properties of Energetic Particle Modes in N-NB Driven JT-60U Plasmas」、13th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems、2013 年 9 月 17-20 日、北京（中国）

〔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〕

ホームページ等

www.fusionofminds.org/FusionScience

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ビアワーゲ アンドレアス
(BIERWAGE, Andreas)

国立研究開発法人日本原子力研究開発
機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合
研究所・研究副主幹
研究者番号：10584691