

## 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3日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860081

研究課題名（和文） 高ベータプラズマにおける高エネルギー粒子駆動不安定性のシミュレーションに関する研究

研究課題名（英文） Numerical Simulation research on energetic particle driven instabilities in high-beta plasmas

研究代表者

ビアワゲ アンドレアス (BIERWAGE ANDREAS)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職

研究者番号：10584691

研究成果の概要（和文）：

数値シミュレーションにより、高エネルギー粒子駆動 MHD モードの線形成長率、非線形飽和レベルと非線形発展に対し、プラズマ形状、圧力、圧縮性が重要な影響を与えることを見いだした。一方、粒子輸送はこれらの影響をさほど受けない。粒子輸送に対しては、初期の粒子分布関数形がより重要であると考えられる。分布関数の役割を同定するための新しい数値手法を開発したので、今後、輸送機構の解明を行っていく。

研究成果の概要（英文）：Plasma geometry, pressure and compressibility effects are found to have significant influence on the growth rates, saturation levels and evolution of energetic particle driven modes. However, the overall particle transport caused by these modes is found to be less sensitive to these effects. It is concluded that the form of the particle distribution function plays a more important role. New numerical methods are developed, which will be used to clarify the role of the distribution function in the future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	550,000	165,000	715,000
2011年度	550,000	165,000	715,000
総計	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ、アルヴェン波、高エネルギー粒子、粒子輸送

## 1. 研究開始当初の背景

JT-60U トカマク実験が MHD 安定性境界近傍の高ベータ領域で行われ、低周波のアルフベンモードが観測されている。これらのモードは高エネルギーイオンとの共鳴効果により駆動されていると考えられる。このモードは高エネルギーイオンの輸送を増大させ、プラズマ周辺において別の不安定性をトリガーする可能性がある。これは、よい影響と悪い影響を合わせもつ。例えば、高エネルギー粒子の閉じ込めは劣化するがプラズマと壁の接

触によるダメージを緩和できる可能性がある。これは自己点火核融合実験やデモ炉の運転においてきわめて重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は高圧力条件下における高エネルギー粒子駆動 MHD モードの線形励起、非線形発展を研究することである。解決すべき多くの問題がある。興味のあるモードはミリ秒の時間スケールで周波数の掃引を起し

ている。モードと高エネルギー粒子との相互作用によりこれらの粒子の再分配が起きる。加えて、熱イオンの運動論効果が低周波数領域で重要となる。これらの現象を定性的、定量的に理解する必要がある。問題が複雑なため段階的なアプローチを用いる。ここでは周波数掃引と高エネルギーイオンの輸送解析に焦点をあてる。任意の高エネルギーイオンの平衡分布関数を取り扱うため、空間分布と速度分布関数の非等方性を独立に変化させることが可能な新しい平衡分布関数の構成法を開発した。

### 3. 研究の方法

(1) JT-60U においては高周波数モードと関連した周波数掃引と高エネルギーイオンの分布関数の再分配も観測されている。これらのモードに注目することで熱イオンの運動論効果と関連した複雑性を排除することが可能となる。高周波数モードに関するこれまでのシミュレーションでは簡略化された形状でゼロベータを仮定していた。今回、現実的形状やプラズマ圧力を用いてシミュレーションを行った。不安定性の線形成長率、飽和レベル、非線形発展のパラメータ依存性を調べた。非線形領域ではモード周波数と高エネルギー粒子輸送に注目した。

(2) シャーアルフベン波の連続スペクトルの構造をプラズマ実形状や圧力に対して計算可能な新しいコードを開発した。これはシミュレーション結果を解釈するために必要で有り、モードの同定に役立つ。

(3) 高エネルギー粒子駆動 MHD モードの成長率、周波数、非線形発展は一般的には位相空間の分布関数に依存する。粒子シミュレーションにおいて初期分布関数を設定するこれまでの手法は、物理的に単純化したものや数値的に不正確なものであった。そのため実験条件に適合しておらず、擬似的な緩和現象を引き起こし、シミュレーション結果に影響を及ぼしていた。新しい手法を開発し、実験条件に近い状況を再構築することが可能となった。また擬似的な緩和現象を避けることができた。

### 4. 研究成果

(1) 高エネルギー粒子モードのグローバルシミュレーションを非線形ハイブリッドコード MEGA を用いて行った。シミュレーションパラメータは JT-60U に実験に基づく。ここで周波数掃引モードと高エネルギーイオンの蓄積の突発的な緩和が観測されている。得られた結果は以下の通りである。

- ① ゼロベータ近似のもとで円形断面と現実的なプラズマ形状断面(非円形断面)の場合を比較した。その結果、非円形断面の場合、線形成長率と飽和振幅が半減した。周波数と径方向の存在位置はいずれも類似しており実験結果と一致する。非線形モードの発展は変化するが高エネルギー粒子輸送は図 1 に示すように類似している。

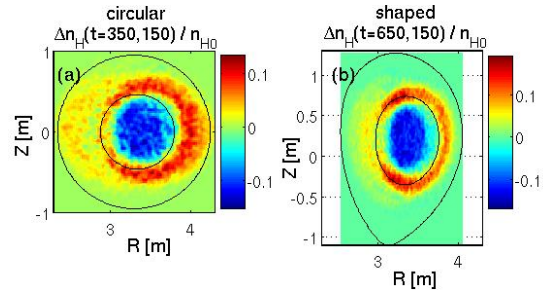


図 1 シミュレーションの最終段階における高エネルギーイオン密度の損失(青)と利得(赤)  
(a) 円形断面、(b) 非円形断面

- ② 非円形断面の場合において、現実的な圧力や比熱比を変化させてシミュレーションを行った。プラズマ圧力は不安定化の効果があり、圧縮性は安定化の効果があることを見いだした。この傾向は線形成長率と飽和振幅のいずれにおいても見られ理論的予測と一致する。周波数掃引の範囲とモードの径伝搬は図 2 に示すように連続シャーアルフベンスペクトルの圧力により誘起した周波数ギャップに影響を受ける。①で述べたように高エネルギーイオン輸送の変化は線形成長率の差異、飽和振幅やモードの発展と相関はない。

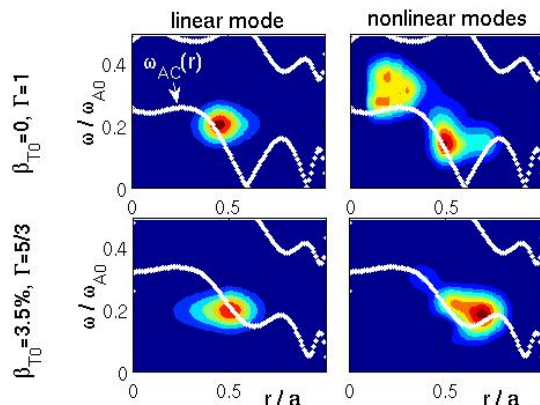


図 2 揺動のパワースペクトルのスナップショット(カラーの等高線)。縦軸は周波数、横軸はプラズマ小半径。上はゼロベータの場合、下は有限ベータの場合を示す。左図は線形モード、右図は非線形モードを示す。白い点線は連続シャーアルフベンスペクトラムで低周波数側に圧力が誘起したギャップが出現している。

(2) 線形の固有モード周波数と同様に非線形発展するモード周波数は連続シャーアルフベンスpektrumに近接して存在することを見いだした。図2からも明らかである。このことは揺動がバルクプラズマの離散固有値によってではなく高エネルギーイオンパラメータに支配されていることを意味する。さらにこの結果は、シミュレーションコードの検証に役立つ。なぜならば連続スペクトルは異なる数値手法により得られるからである。

(3) 磁気プラズマにおける荷電粒子の平衡分布関数をモデル化するための新しい数値手法を開発した。要点は以下の通りである。

- ① シミュレーション粒子は図3に示すように無摂動ドリフト軌道に沿って初期化される。粒子間距離は磁気ミラー力に伴う圧縮性運動を反映している。この手法により正確な平衡分布関数を得ることができるので、これにより初期化された粒子シミュレーションは擬似的な緩和現象を抑制することが可能となる。それに加えて、特に線形成長フェイズにおいてノイズレベルもかなり低減化する。

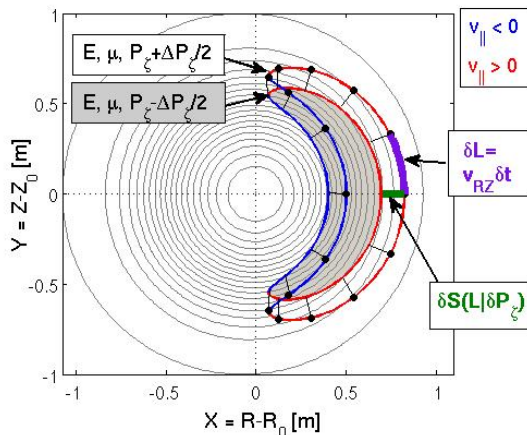


図3 同じ運動エネルギーと磁気モーメント、異なる正準トロイダル運動量を持つ粒子が占める体積要素。体積要素は無摂動粒子軌道に基づいて定義した(バナナ型の曲線)。

- ② シミュレーション粒子のウエイティングはインタラクティブな繰り返しスキームを用いて行う。これによりモーメントが実験計測により得られた分布に一致するような平衡分布関数を構成することが可能となる。この手法により、以前採用していた初期化法よりシミュレーションの初期条件を扱いやすくなった。

(4) この研究の結論と将来の方向性以下に示す。

- ① 項目(1)と(2)でまとめられた結果はプラズマ実形状と高圧力の役割に対し、有益な視点を与える。不安定性成長や飽和レベルと高エネルギーイオン輸送との相関がないことを理解するためには輸送ダイナミクスの詳細な解析が必要である。
- ② 項目(3)で記述した新しいシミュレーション初期化法に対し、ベンチマークテストを行いその妥当性を検証した。この初期化法の応用として、項目(1)と(2)で記載したモードを含む高エネルギー粒子モードのダイナミクスにおける分布関数の役割を調べることがあげられる。

## 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 ビアワーゲ・アンドレアス、相羽信行、藤堂泰、 Deng・ヴェンジュン、石川正男、松永剛、篠原孝司、矢木雅敏、査読有、Plasma and Fusion Research、Vol. 7、2012、2403081、4頁  
DOI:10.1585/pfr.7.2403081
- ② ビアワーゲ・アンドレアス、ディトロヤ・クラウディオ、ブリグリオ・セルジオ、ヴラド・グレゴリオ、査読有、Computer Physics Communications、Vol. 183、2011、1107-1123  
DOI:10.1016/j.cpc.2012.01.013
- ③ ビアワーゲ・アンドレアス、藤堂泰、相羽信行、篠原孝司、石川正男、矢木雅敏、査読有、Plasma and Fusion Research、Vol. 6、2011、2403109、5頁  
DOI:10.1585/pfr.6.2403109

[学会発表] (計5件)

- ① ビアワーゲ・アンドレアス、「VisualStart: GUI-Aided Unified Initialization Tool for Hybrid (MHD + Particle) Simulations」、17<sup>th</sup> Numerical Experimental Tokamak (NEXT) Meeting、2012年3月15日、柏市、千葉県、日本
- ② ビアワーゲ・アンドレアス、相羽信行、藤堂泰、Deng・ヴェンジュン、石川正男、松永剛、篠原孝司、矢木雅敏、「Nonlinear Simulation of Energetic Particle Modes in JT-60U」、12<sup>th</sup> Joint Meeting of US-Japan MHD Workshop and

ITPA MHD Stability / Energetic Particle Topical Group、2012年3月8日、土岐市、岐阜県、日本

- ③ ビアワーゲ・アンドレアス、相羽信行、藤堂泰、デング・ヴェンジュン、石川正男、松永剛、篠原孝司、矢木雅敏、「Nonlinear Simulation of Energetic Particle Modes in High-Beta Tokamak Plasma」、21<sup>st</sup> International Toki Conference、2011年11月29日、土岐市、岐阜県、日本
- ④ ビアワーゲ・アンドレアス、藤堂泰、相羽信行、篠原孝司、石川正男、矢木雅敏、「Nonlinear Hybrid Simulations of Energetic Particle Modes in Realistic Tokamak Flux-Surface Geometry」、20<sup>th</sup> International Toki Conference、2010年12月8日、土岐市、岐阜県、日本
- ⑤ ビアワーゲ・アンドレアス、デイトロヤ・クラウディオ、フラスカティプラズマ理論グループ、「Method for loading marker particles for arbitrary distribution functions and application for simulation of high-energy ion dynamics in tokamak plasma」、7<sup>th</sup> Supercomputing in Nuclear Application and 3<sup>rd</sup> Monte Carlo Joint International Conference、2010年10月17日、東京、日本

〔その他〕

ホームページ等

[www.fusionofminds.org/FusionScience](http://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)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

核融合研究開発部門・研究職

研究者番号：10584691