

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289356

研究課題名(和文) トカマクプラズマにおける高速イオン駆動低周波不安定性の運動論的解析

研究課題名(英文) Kinetic analysis of fast-ion-driven low-frequency instabilities in tokamak plasmas

研究代表者

福山 淳 (Fukuyama, Atsushi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60116499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：トカマクにおける低周波モードの運動論的解析を行うために、任意の速度分布関数をもつトロイダルプラズマ中の波動に対する誘電率テンソルを計算するモジュールを開発し、2次元波動伝播解析モジュールと組み合わせてアルヴェン固有モードの線形安定性解析を行った。さらに高速粒子の速度分布関数解析モジュールを拡張し、広いエネルギー範囲の解析を可能にすると共に、現実的な乱流拡散モデルやペレット入射を模擬する粒子源モデルを導入し、燃焼立ち上げ時の運動論的時間発展解析が実現した。その結果、トカマク燃焼立ち上げ時の高速イオン速度分布関数を用いて、アルヴェン固有モードの励起・抑制の自己無撞着な解析が可能になった。

研究成果の概要(英文)：In order to realize kinetic analysis of low-frequency modes in tokamak plasmas, a module to calculate dielectric tensors in response to waves in toroidal plasmas with arbitrary velocity distribution functions was developed, and it was combined with a two-dimensional full wave module, and applied to the linear stability analysis of Alfvén eigenmodes. In addition, a module for the analysis of velocity distribution functions for energetic particles was extended to analyze with wide energy range and to introduce realistic turbulent diffusion model and particle sources simulating pellet injection; so that the kinetic analysis of time evolution during the burning start up phase becomes available. As a result, self-consistent analysis of excitation and suppression of Alfvén eigenmodes with velocity distribution functions of fast ions during burning start up phase in tokamaks.

研究分野：核融合理論・シミュレーション

キーワード：プラズマ・核融合 計算物理

### 1. 研究開始当初の背景

トカマクプラズマにおいては、さまざまな低周波モードが観測されている。ベータ限界に大きな影響を及ぼす抵抗性壁モード、ダイバータ熱負荷を増大させる ELM (エッジ局在モード)、核融合反応率を大きく変化させる内部キックモード、磁気島を形成しベータ値を低下させるティアリングモード、高速イオンが励起しその閉じ込めを劣化させるアルヴェン固有モード、またそれらがイオン音波やドリフト波と結合することによって生じる低周波モードも数多く観測されている。これらの低周波モードは比較的波長が長いので、これまで電磁流体モデルによって安定性が解析されてきたが、高速イオンの存在が安定性に大きな影響を与えることから、電磁流体解析に高速イオンの効果を取り入れた解析が進められている。しかしながら電磁流体モデルに基づいているため、電子やバルクイオンのランダウ減衰が含まれない、真空領域が取り扱えない等の問題がある。

一方、ジャイロ運動論モデルを用いて発展方程式を解き、大規模な非線形電磁シミュレーションによって、低周波モードの時間発展を解析する試みも進展しつつある。しかしながら、非常に大きな計算資源を必要とするため、炉心プラズマ全体の全運転時間にわたる時間発展を記述しようとする統合シミュレーションに組み入れることは困難であり、より高速に安定性を解析する手法が求められている。

また、低周波モードの励起によって、高速イオンの閉じ込めや輸送が変化し、その密度分布や速度分布関数に変形する。これらの変形は低周波モードの励起に影響をあたえるため、自己無撞着な解析が必要となる。しかしながら、従来の安定性解析においては、速度分布関数の変形を含めた自己無撞着な解析は行われていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究においては、これまで開発してきたトカマク統合コード TASK を拡張することにより、高速イオンの速度分布関数と低周波モードの線形安定性を自己無撞着に解析し、不安定性の発生条件を実験結果との比較によって検証するとともに、高速イオンの生成制御による不安定回避手法を開発する。

(1) 任意の速度分布関数をもつトロイダルプラズマにおいて、運動論的效果を含めて電磁的固有モードを解析する数値計算モジュールを開発し、高速イオンによって駆動される低周波モードの線形安定性を解析する。

(2) 速度分布関数の時間発展を解析する運動論的輸送解析モジュールと組み合わせ、速度分布関数の変形を含めた自己無撞着な安定性解析を行い、実験データとの比較によって不安定性の発生条件を検証する。

(3) 中性粒子ビームやイオンサイクロトロン波を用いた高速イオンの生成制御を取り入れ、低周波モードの安定化手法の開発を行う。

### 3. 研究の方法

本研究を進めるにあたっては、線形不安定性解析モデルと速度分布関数解析モデルの定式化を行い、トカマク統合モデリングコード TASK に取り入れて、数値シミュレーションを行う。

トカマク統合コード TASK には、図 1 に示すように、平衡、輸送、波動、中性粒子ビーム入射 (NBI)、速度分布関数等の解析モジュールが組み込まれている。本研究においては、比較的長波長の波動伝播吸収解析に用いられている TASK/WM を使用する。このモジュールはトロイダル方向とポロイダル方向にはフーリエ分解を使用し、径方向には有限差分法を用いてマクスウェル方程式の境界値問題を解く。このモジュールはイオンサイクロトロン波加熱のために開発されたが、複素周波数を取り扱うことができるように拡張され、電子密度に比例する一定振幅の電流源に対して波動電界振幅を極大にする複素周波数を求めることにより、固有モードの周波数、成長/減衰率、波動電磁界の空間構造を求めることができる。

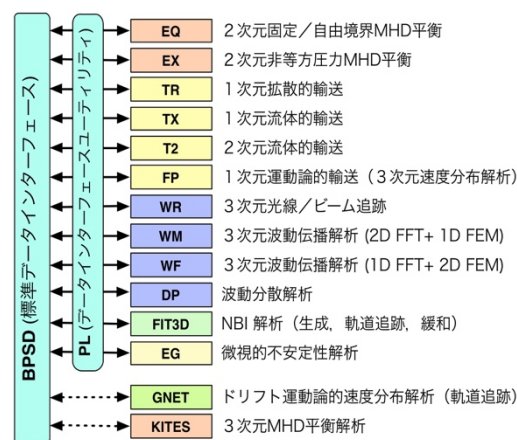


図 1 トカマク統合コード TASK の構成

一方、中性粒子ビーム加熱や核融合反応によって生成される高速イオンの振る舞いを解析するために、速度分布関数の時間発展を記述する TASK/FP モジュールを使用する。このモジュールは、各粒子種の軌道平均された速度分布関数を速度空間 2次元・実空間 1次元 (磁力線に平行な運動量、垂直方向の運動量、トカマクのプラズマ小半径) の 3次元分布関数として、その時間発展を記述する。ビームの入射、波動加熱、核融合反応による高速粒子の生成に加えて、クーロン衝突による緩和、乱流輸送による径方向拡散等を記述することができる。なお、現在のモジュールでは、有限軌道幅の効果は取り入れられていない。

#### 4. 研究成果

##### (1) 任意速度分布関数をもつトロイダルプラズマにおける線形安定性解析

波動伝播解析モジュール **TASK/WM** を用いると、波動電磁界に対するプラズマの応答を記述する誘電率テンソルを与えることにより、低周波固有モードの線形安定性を解析することができる。

マクスウェル速度分布のトカマクプラズマに対しては、プラズマ分散関数を用いてドリフト運動論的誘電率テンソルを近似することができ、トロイダルモード番号  $n=1$  と 2 のアルヴェンモードの結合によって現れるトロイダルアルヴェン固有モード(TAE)の周波数と減衰率を求めることができる。

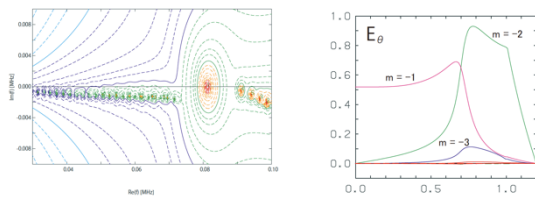


図2 マクスウェル速度分布のトカマクプラズマにおける TAE の周波数構造と径方向電界分布

図2(左)は複素周波数空間における波動電界積分値の等高線を示し、その極大の位置が固有モードの実周波数と成長/減衰率を表す。実周波数 81.2 kHz 付近に減衰率が小さく、容易に励起される固有モードが存在する。図2(右)はその固有モードの波動電界の小半径方向分布を示し、 $q(0)=1$ ,  $q(a)=2$  のトカマクプラズマでは  $q=3/2$  となる小半径  $\rho=0.7$  付近に磁場揺動が局在する TAE である。このモードの減衰率は 44.6 Hz と小さいので、磁力線方向位相速度と共鳴する高速イオンが空間的に局在すれば、その密度勾配によって TAE が不安定となって励起される。

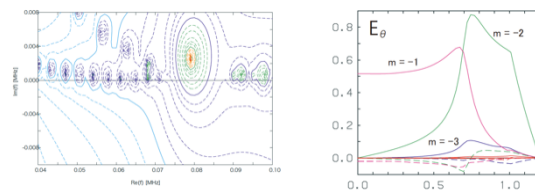


図3 高速イオンビーム成分がある場合の TAE の周波数構造と径方向電界分布

図3はプラズマ中心付近に高速イオン成分が局在した  $\beta \sim 7.5\%$  の場合の固有モードの周波数構造と TAE の空間分布を示す。TAE は不安定となり、成長率は 2.53kHz となった。その成長率はビーム成分の圧力(温度)とともに増大し、図4に示すように、解析的に評価された成長率とほぼ一致する。TASK/WM による数値計算では、解析的评价に含まれていないイオンランダウ減衰等が含まれるため、やや低い成長率となっている。

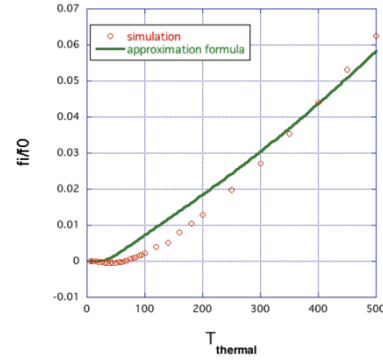


図4 TAEの線形成長率の高速イオンビーム成分の温度に対する依存性

マクスウェル速度分布をもつ高速イオン成分に対しては、誘電率テンソルを解析的に求めることができるが、任意の速度分布関数に対しては誘電率テンソルを数値積分により求めることが必要となる。特に固有周波数が複素数となるため、複素速度空間におけるランダウ積分路に沿って、精度よく数値積分を行う必要がある。

図5に数値積分により誘電率テンソルを計算した場合の固有モードの周波数構造と TAE の径方向電界分布を示す。図3と同じパラメータに対して、成長率は 2.33 kHz となり、実周波数と成長率は共に 0.2 kHz 以下の誤差が生じた。これは速度空間と実空間の離散化(80, 80, 16)に起因し、格子点数を増やすと、精度は向上するが、計算時間が増大する。

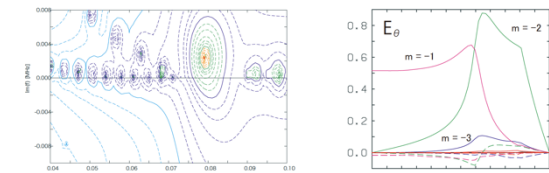


図5 数値積分により誘電率テンソルを求めた場合の TAE の周波数構造と径方向電界分布

以上のように、数値積分による誘電率テンソル評価の妥当性を検証した後、任意の速度分布関数に対する TAE の線形安定性を解析した。まず、速度空間非等方性の効果を解析した。図6に計算結果を示す。横軸の  $T_{pp}$  は高速イオン成分の垂直方向温度であり、パラメータの  $T_{pr}$  は平行方向温度を表す。縦軸は成長率と実周波数の比を示し、温度の増大と共に増加するが、ほぼ  $T_{pp}$  と  $T_{pr}$  の和に比例し、非等方性の効果は小さい。

次に、速度分布関数の時間発展解析によって求められた分布関数に対する解析を行った。現在の所、分布関数の数値誤差の影響が大きいため、予備的な解析結果は得られているが、系統的な解析は今後の課題である。

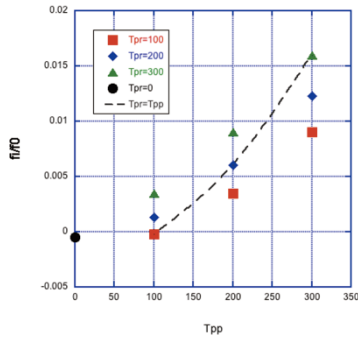


図6 TAE 成長率の垂直方向温度  $T_{pp}$  と平行方向温度  $T_{pr}$  に対する依存性

アルヴェン固有モード以外の低周波モードに対しては、まず抵抗性流体モデルの誘電率テンソルを用いて、内部キンクモードおよび抵抗性壁モード（外部キンクモード）の線形成長率の解析を行い、解析的評価および従来の MHD 解析の結果を再現することを確かめた。さらに運動論的効果を含めて解析するため、より一般的なドリフト運動論モデルに基づく誘電率テンソルの定式化を行い、TASK/WM に実装したが、動作確認には至らなかった。今後早急に従来の解析との検証を行い、音波やドリフト波を含めた解析に拡張する必要がある。

運動論的アルヴェン波等の解析に必要な有限ラーモア半径効果を取り入れるために、ジャイロ運動論的誘電率テンソルの定式化を行った。実装もほぼ完了しており、ドリフト運動論的誘電率テンソルの動作確認完了後、本格的な解析を行う予定である。

## (2) 燃焼プラズマにおける速度分布関数の時間発展解析

核融合炉心プラズマにおいては、燃焼立ち上げ時には外部加熱によって高速燃料イオンが生成され、定常燃焼時には高速  $\alpha$  粒子が生成される。このような状況下でのアルヴェン固有モードの励起や低周波モードに対する影響を調べるために、速度分布関数の時間発展解析を行った。

炉心プラズマにおいては、高速燃料イオンが中性粒子ビーム加熱やイオンサイクロトロン波加熱によって生成され、高速ヘリウムイオン ( $\alpha$  粒子) が核融合反応によって生成されるのに加えて、高速電子も電子サイクロトロン波加熱やディスラプション時に発生するトロイダル電界によって生成される。また、核融合反応以外では、高速粒子はバルク粒子の加速によって生成されるため、バルク粒子と高速テイル粒子を分離することは一般には困難である。このため、各粒子種の速度分布関数を径方向輸送も含めて取り扱う運動論的輸送シミュレーションが必要となる。

本研究では、燃焼立ち上げ時に着目し、外部加熱によって生成される燃料高速イオンが励起するアルヴェン固有モードを解析した。

これまでに開発されてきた TASK/FP モジュールは、多粒子種 3 次元速度分布関数の時間発展解析が可能であったが、計算量が多くシミュレーションに時間を要した。以前から小半径方向と粒子種に関しては並列化されていたが、新たに運動量についても MPI による並列化を実装し、計算の大幅な高速化を実現した。これにより、燃焼立ち上げの時間発展やディスラプション時の高速電子生成が解析できるようになった。

ITER プラズマにおける加熱開始 1 秒後の速度分布関数の径方向依存性を図 7 に示す。重水素 (D) は中性粒子ビームにより、三重水素 (T) はイオンサイクロトロン波によりいずれも  $\rho=0.1$  付近で加熱され、 $\alpha$  粒子 (He) が核融合反応によって生成されている。時間的に一定で径方向に放物型の乱流拡散を仮定した。

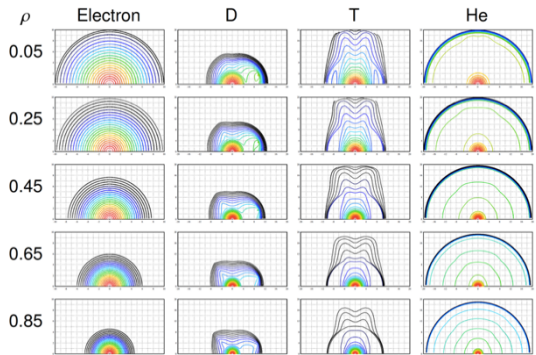


図7 電子、重水素、三重水素、ヘリウムの速度分布関数の径方向依存性。横軸は磁力線方向運動量、縦軸は垂直方向運動量で、分布関数の等高線はマクスウェル分布の場合に等間隔。

燃焼立ち上げのシミュレーションを行うため、新たに導入された並列化を利用するとともに、径方向拡散による粒子損失を補うため、ペレット入射を模擬する粒子源を導入した。さらにより現実的な乱流輸送モデルとして、通常の 1 次元拡散型輸送シミュレーションに用いられ、大型トカマクの実験結果を再現している電流拡散型バルーニングモード (CDBM) 乱流輸送モデルを導入した。密度がほぼ一定となるように粒子源を設定したときの、重水素イオンの体積平均された密度と温度の時間発展を図 8 に示す。

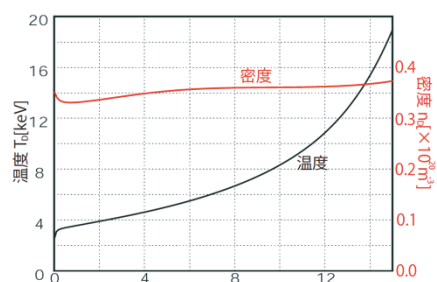


図8 重水素イオンの密度と温度の時間発展

50 MW の中性粒子ビーム加熱により重水素イオン温度は線形に増大するが、6 keV を越えたあたりから  $\alpha$  粒子加熱により指数関数的に増加するようになる。  $\alpha$  粒子との衝突による加熱は電子加熱が支配であるとはいえ、高速燃料イオンに対する加熱も大きい。  $\alpha$  粒子加熱が支配的になる直前の  $t=6$  s と支配的になった後の  $t=15$  s における重水素イオンの速度分布関数を図 9 に示す。

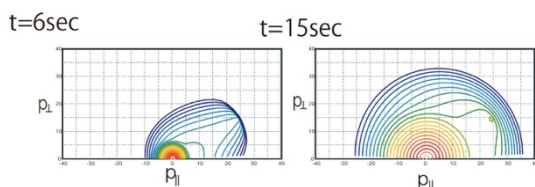


図 9  $\alpha$  粒子加熱が支配的になる直前となった後の重水素イオンの速度分布関数。

$\alpha$  粒子加熱が支配的になると、燃料イオンの速度分布は等方に近づくが、バルク成分の温度の上昇に伴い、イオンのランダウ減衰により成長率が低下する可能性も生じる。

一方、励起された低周波モードは高速イオンとの相互作用により、速度分布関数を変形させる。波の周波数に比べて速度分布関数の時間変化がゆるやかであれば、準線形近似を用いて速度拡散係数を求めることができる。アルヴェン固有モードについて、運動論的誘電率テンソルに対応する準線形拡散係数を TASK/FP に取り入れた。準線形拡散による速度空間および実空間における平坦化が、モードの成長率を減少させることが示された。

モード成長と速度分布関数の変形の自己無撞着な解析については、コードは整備されたが予備的な検討に留まり、系統的な解析には至らなかった。今後、自己無撞着な時間発展解析を進め、実験結果との比較を進める必要がある。

### (3) 高速イオンの生成制御による低周波モードの安定化

高速の燃料イオンや  $\alpha$  粒子は、アルヴェン固有モード等の低周波モードの線形安定性に大きな影響を与える。高速燃料イオンの場合、中性粒子ビーム加熱では入射角や入射エネルギーを、イオンサイクロトロン波加熱では周波数や励起モードを変化させることによって、生成位置や空間分布を変化させることができる。これらの制御による低周波モードの回避や抑制を調べるために、線形成長率の加熱パラメータ依存性解析に着手した。予備的な検討結果は得られているが、系統的な解析は今後の課題である。

## 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 1 件)

① H. Nuga, M. Yagi, A. Fukuyama, Simulations of Runaway Electron Generation including Hot-Tail Effect, Nuclear Fusion, 査読有, 57 (2017) in press.

[学会発表] (計 25 件)

① A. Fukuyama, Integrated Modelling and Simulation of Toroidal Plasmas, 7th ITER International School, Aix-en-Provence, France, 2014/8/25-29, 招待講演

② A. Fukuyama, H Nuga, T. Futakuchi, K. Nagai, Kinetic Integrated Modeling of Tokamak Core Plasmas by the TASK code, 24th International Conference on the Numerical Simulation of Plasmas, Golden, CO, USA, 2015/8/12-14, 国際学会

③ A. Fukuyama, Progress of Integrated Modeling of Magnetic Fusion Plasmas, 7th Int. Symp. on Advanced Energy Science, Kyoto, 2016/9/5-6, 招待講演

④ 福山 淳, 統合モデリングに基づくトカマク炉心プラズマシミュレーションの現状と展望, プラズマシミュレータシンポジウム 2016, 核融合研, 2016/9/7-8, 招待講演

⑤ 福山 淳, 統合トカマクモデリングコード TASK の開発と統合シミュレーションの展望, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学, 2016/11/29-12/02, 招待講演

[その他]

ホームページ: 統合コード TASK の公開:  
<http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/TASK/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福山 淳 (FUKUYAMA Atsushi)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60116499

### (2) 研究協力者

奴賀秀男 (NUGA Hideo)  
京都大学・大学院工学研究科・特定研究員  
永井一樹 (NAGAI Kazuki)  
京都大学・大学院工学研究科・修士 2 年  
二口泰成 (FUTAKUCHI Taisei)  
京都大学・大学院工学研究科・修士 2 年