

平成25年度NIFS共同研究 研究会
「MHDおよび流体力学における流れの安定性に関する 理論・シミュレーション研究」
概要集

▶ **MHD回転流のスペクトルと不安定性 (招待講演)**

福本康秀(九州大)

降着円盤の中心で天体を形成するためには乱流によって角運動量の外部への輸送を促進する必要があり、Balbus and Hawley(1991)による指摘以来、磁気回転不安定性(Magnetorotational instability: MRI)が乱流の起源であるという考えが定着してきた。一方、70年代半ば以降、中性流体における細長い渦の安定性の研究が進み、Moore-Saffman-Tsai-Widnall不安定性(MSTW-I)に代表される渦の不

安定機構の普遍性が明らかになってきた。MRIとMSTW-Iの間には回転流の不安定性という共通項があり、この両者の関係(=類似性、相違点)を理解したいと思っている。

まず、Velikov(1959)とChandrasekhar(1960)による'標準MRI'やHollerbach & Rudiger(2005)が見つけた'らせん型MRI'のWKB法による短波長安定性解析を紹介する。続いて、長波長領域へ接続するために、解けるモデルに対して大域的モード解析を行う。短波長極限との関係やハミルトン力学系的構造について検討する。

▶ **トカマクプラズマにおける理想MHD安定性に対するプラズマ回転の影響**

相羽信行(原子力機構)

トーラス型軸対称磁場閉じ込めプラズマであるトカマクプラズマは、しばしばトロイダル方向に速く回転し、この回転がMHD安定性に影響を与えることが理論的・実験的に知られている。本発表では、この影響に関する具体的な数値解析の結果を実験結果の紹介を交えながら示す。特に、講演者が近年進めてきたエッジローカライズモードと呼ばれる比較的短波長なMHDモードに対して差動回転が影響を与えるメカニズムについて詳細に報告する。

▶ **シア流にまつわるスペクトル汚染のモデル解析と解法に関する考察**

佐々木悠大(東京大)

抵抗性MHDモデルの固有モード解析を行った結果、「スペクトル汚染」と呼ばれる偽の不安定性が起り得ることが見出されている。簡略化したモデルを用いて偽の不安定性を再現し、偽の不安定性が生じる原因について考察する。

▶ **DIII-Dにおけるアルフベン固有モードと高速イオン輸送のシミュレーション**

藤堂泰(核融合研)

高エネルギー粒子分布の時間発展について、粒子入射と衝突のみを計算する古典計算とMHD方程式も同時に計算するハイブリッド計算を組み合わせたマルチフェーズシミュレーションを開発した。この方法を用いてDIII-Dにおけるアルフベン固有モードと高速イオン分布に関するシミュレーションを実行し、結果を実験と詳細に比較する。

▶ **ヘリカル系における高エネルギーイオンの動力学と理想MHD不安定性**

西村征也(核融合研)

ヘリカル系プラズマにおけるリップル磁場による高速イオンの捕捉過程とそれに伴う理想MHD不安定性への影響について議論を行う。高速イオンの運動方程式、捕捉粒子の分布関数のジャイロ運動論的方程式および簡約化MHD方程式に基づく、線形固有モードのエネルギー原理および固有値方程式を導出する。導出されたモデルに関する初期的な解析結果について報告する。

▶ **歪んだ渦における局所擾乱の成長:線形不安定性・非線形発展・乱流 (招待講演)**

服部裕司(東北大)

歪んだ渦における局所擾乱の成長過程を直接数値シミュレーションにより調べた。歪んだ渦には楕円型不安定性が存在する。局所安定性解析によって予測される線形段階での不安定成長に加えて、その後の非線形成長を捉えることに成功した。成長過程は、線形段階、弱非線形段階、非線形段階、乱流の4段階に分けることができる。それぞれの過程および乱流への遷移の特徴づけを行った。

▶ **From canonical to non-canonical variables in describing laser-plasma interaction**

岸本泰明(京都大)

We have developed a theory of relativistic ponderomotive force of transversely localized laser elds which is applicable to a regime where the conventional formula described in terms of the local eld gradient is hardly applied such that nonlocal and/or global extent of the pro le becomes important. By nding proper noncanonical coordinates and gauges in the variational principle and Lie perturbation, we obtained a new formula for the ponderomotive force involves new terms represented by second and third spatial derivatives. The force then depends not only on the local eld gradient, but also on the curvature and its variation. The result can provide a theoretical basis for describing nonlinear laser-plasma interaction including such nonlocal effects, which is examined via PIC simulation of laser propagation in a plasma with a super Gaussian transverse eld prole.

▶ **Response of micro-scale fluctuations to the evolution of MHD magnetic island**

李継全(京都大)

Nonlinear evolution of microscale turbulence interacting with a naturally growing MHD magnetic island is simulated based on a Landau-fluid model. Here we report on a new short wavelength magnetic-island-induced ion temperature gradient (ITG) instability, which is referred to as sw-MITG mode. It is triggered by a critical threshold of magnetic island width in multiscale turbulence involving the dynamics of all zonal modes (namely, zonal flow, field/current, temperature and density). The sw-MITG mode is characterized by a substantially low stability threshold and a global structure propagating along the ion diamagnetic drift direction. Its generation results from the response of microscale fluctuations to turbulent cross-field heat transport associated with increasing boundary layer width about the island separatrix. Specifically, the flattening of ion temperature profile inside the magnetic island sharply vanishes while the density profile flattening persists, suggesting a breakdown of frozen-in law. An intermittency of heat transport is caused by the sw-MITG mode interacting with dynamical magnetic island and microturbulence.

▶ **トロイダルプラズマにおける外部磁場揺動による強制磁気再結合**

石井康友(原子力機構)

磁場に閉じ込められたプラズマに外部から磁場摂動が加わると摂動磁場に対応する共鳴面で強制磁場再結合が生じ、磁気島が形成による閉じ込め磁場構造の変化を通じて、プラズマ閉じ込めに

大きな影響を与える。この磁場再結合過程についてはMHD理論研究の対象としてこれまで多くの研究者によって調べられてきた。その多くは、再結合過程の基礎過程に関するもので、多くはスラブ形状、ないしは、円柱形状での現象を対象としている。核融合で対象とするプラズマはトロイダル形状であり、外部摂動が単一ヘリカルモードであったとしても、プラズマ中ではトロイダルモード間結合によって多くのサイドバンド・モードが生成され、磁場構造の乱れに影響を与える。本研究では、軸対称トカマク・プラズマに対する外部摂動磁場の影響を数値シミュレーションによって調べた結果について報告する。

▶ トカマクプラズマのシア回転によるモード間結合とバルーニングモード安定化

古川勝(鳥取大)

トロイダル方向にシア回転するトカマクプラズマにおける高トロイダルモード数バルーニングモードは、平衡流を残して線形化したMHD方程式中のプラズマ変位を、時間依存するアイコナールを用いて表すと、1次元連立波動方程式で記述できる。その解を、支配方程式の性質を反映しつつ連続スペクトルを離散化したモードに分解することにより、平衡の圧力勾配からエネルギーをもらって増幅する不安定モードから、その他の安定モードへとエネルギーが移送される様子を観察することに成功した。このエネルギー移送の結果、全体としてバルーニングモードが時間平均の意味で安定化されることが明らかになった。

▶ 交換型モードにおける自発的流れと磁気島形成

市口勝治(核融合研)

円柱プラズマ中での抵抗性交換型モードの非線型フェーズにおける磁気島の時間発展を、数値シミュレーションを用いて調べた。抵抗が大きい場合、交換型モードの渦による駆動型磁気リコネクションによって、ポロイダルモード数の2倍の数の磁気島が形成されることを見出した。また、その後の時間発展において、一様ポロイダルフローが成長し、このフローが飽和する段階において、磁気島の数がポロイダルモード数と同じになることも得られている。

▶ 可逆性をもつ無衝突磁気リコネクション

石澤明宏(核融合研)

Reversible magnetic reconnection is demonstrated for the first time by means of gyrokinetic numerical simulations of a collisionless magnetized plasma. Growth of a current-driven instability in a sheared magnetic field is accompanied by magnetic reconnection due to electron inertia effects. Following the instability growth, the collisionless reconnection is accelerated with development of a cross-shaped structure of current density, and then all field lines are reconnected. The fully reconnected state is followed by the secondary reconnection resulting in a weakly turbulent state. A time-reversed simulation starting from the turbulent state manifests that the collisionless reconnection process proceeds inversely leading to the initial state. During the reversed reconnection, the kinetic energy is reconverted into the original magnetic field energy.

[1] A. Ishizawa and T.-H. Watanabe: Physics of Plasmas (2013) 102116.

▶ 爆発的磁気リコネクションにおける階層間相互作用

廣田真(東北大)

無衝突プラズマ中では電子慣性効果によって磁気リコネクションが起こり、これは非線形段階で爆発的に成長する場合がある。一方、電子温度効果(ホール効果+電子圧縮性)は電流シートをX点型に変形し、リコネクション速度を劇的に増大させる傾向が一般に指摘されている。本研究では

数値シミュレーションによって非線形加速過程を調べ、電子温度効果が爆発的磁気リコネクションに与える影響を議論する。

▶ Viscosity Effects on the Explosive Growth Dynamics of Nonlinear Resistive Tearing Mode

Ahmad Ali(京都大)

For large values of Δ' , the X-point configurations collapse to current sheet leading to the explosive growth of the reconnected flux. In this work, we study this problem including the viscosity effects on the onset of the X-point collapse and the explosive growth dynamics of the reconnected flux. Our simulation is based on the reduced resistive MHD model in slab geometry, involving the viscosity effect. The onset of the explosive growth phase exhibits a critical magnetic island width $\Delta'w_c$. The value of $\Delta'w_c$ in limit of zero resistivity and the slope of its scaling vs the resistivity, are significantly modified due to the inclusion of finite viscosity. The viscosity dependence of the critical island width $\Delta'w_c$ is investigated in a broad parameter regime. It is found that the transition criterion for the onset of explosively nonlinear growth shows a remarkable scaling change with a turning point $P_r = 1$. The critical island width $\Delta'w_c$ quickly decreases with increasing the viscosity for $P_r < 1$. Contrarily, gradually increases as the viscosity increases in the region of $P_r > 1$. It is observed that the scaling of linear growth rates of the tearing mode also depends on P_r , showing the same turning point of $P_r = 1$. A secondary instability analysis with quasilinear modifications of the equilibrium current profile due to zonal current shows that the current peaking is possibly responsible for the onset of the X-point collapse and the current sheet formation, leading to the explosive growth of the reconnected flux.

▶ Euler-Maxwell方程式系の消散構造の解析と安定性について

上田好寛(神戸大)

Euler-Maxwell方程式系は緩和項を持つ双曲型方程式系で記述されるが、線形化方程式系に現れる緩和行列が対称行列ではないため、静田・川島(Hokkaido Math. J., 14 (1985))によって導かれた安定性理論を適用することができず、一般論による解の減衰評価を得ることはできない。そこで本発表では、Euler-Maxwell方程式系に対してエネルギー法を適用することで、平衡点周りの漸近安定性と解の減衰評価を導き、それを機に、一般の緩和項を持つ双曲型方程式系に関する静田・川島理論の拡張を行ったので報告する。また時間があれば、最近の研究としてEuler-Maxwell方程式系の定常問題についても言及したい。本研究は、九州大学の川島秀一氏、Beijing University of TechnologyのShu Wang氏、Chinese University of Hong KongのDenjun Duan氏との共同研究である。

▶ 2次元低 β 簡約化 MHD の定常状態のアニーリングシミュレーション

近末吉人(東京大)

理想流体の運動はハミルトニアンとポアソン括弧で書かれる。ポアソン括弧の反対称性からハミルトニアンが、位相欠陥からカシミール不変量が保存する。アニーリングシミュレーションは、ポアソン括弧を2回作用させた発展方程式を解くことで、元の運動のカシミール不変量を保ったまま、エネルギーを極値化する方法である。この方法を2次元低 β 簡約化 MHD に適用し、その定常状態を得ることに成功した。

▶ 高ベータ簡約化MHDモデルにおける流れをもつ平衡とその安定性**伊藤淳(核融合研)**

強いポロイダル流によって磁場構造の変形が生じる高ベータトカマク平衡を表す簡約化平衡方程式とその解析解の導出、その解析解を用いた安定性解析のための磁気座標と時間発展を含んだ簡約化MHD方程式について議論する。これらにはすべて漸近展開が用いられ、展開の高次の項までとることで高ベータ平衡とその安定性に対するポロイダル流の効果が表せることを示す。

▶ レイリー・テイラー不安定性の線形/非線形成長に対する微視的効果の影響**後藤涼輔(総研大)**

一流体MHDモデルにHall効果及びジャイロ粘性項といった微視的効果を取り入れた拡張MHDモデルによる短波長Rayleigh-Taylor(RT)不安定性の非線形数値シミュレーションを行った。当日はRT不安定性の線形成長率・非線形混合幅・密度/圧力プロファイル等に対する微視的効果の影響について報告する。

▶ 2.5次元Kelvin-Helmholtz不安定性の拡張MHDシミュレーション**羽鳥智栄(総研大)**

シアフローによって駆動されるKelvin-Helmholtz不安定性に対する二流体効果と有限ラーモア半径効果の影響を調べた。2次元拡張MHDシミュレーションによって、これらの効果の線形成長率への影響や非線形段階での渦の成長への影響について得られた結果について述べる。