

## MHD・高エネルギー粒子シミュレーション Simulations of MHD and energetic particles

藤堂 泰  
TODO Yasushi

核融合研  
NIFS

### 1. はじめに

磁場閉じ込め核融合プラズマは、粒子間衝突による分布関数緩和時間がプラズマ粒子の周回時間よりも長い無衝突プラズマである。磁気流体力学 (MHD) はプラズマの巨視的挙動を説明する物理モデルであるが、粒子間衝突によって分布関数がMaxwell分布に緩和することを仮定しており、プラズマ圧力の時間発展を断熱の式に基づいて与えている。これは明らかに無衝突条件と整合していない。MHDを高温プラズマに適用する際には、無衝突プラズマに適用できるような拡張が必要である。

代表的な例は高エネルギー粒子のみに粒子法を適用し、プラズマの他の部分を流体として取り扱う高エネルギー粒子・MHDハイブリッドシミュレーションである[1,2]。本講演では高エネルギー粒子・MHDハイブリッドシミュレーションと、熱イオンにも粒子法を適用して拡張した新しい運動論的MHDハイブリッドシミュレーション[3]について紹介する。

### 2. アルフベン固有モードバーストを引き起こす高エネルギー粒子位相空間臨界分布

アルフベン固有モードが繰り返し突発的に発生する現象であるアルフベン固有モード (AE) バーストの物理機構を解明するために、大規模シミュレーションを実施し、複数AEの共鳴の重なりによる高エネルギーイオン輸送束と高エネルギーイオン分布関数の時間発展を詳細に解析した[4]。

AEバーストの発生直前には、複数のAEが不安定化して小振幅に成長している。これらの小振幅AEは高エネルギーイオン分布関数を局所的に平坦化し、位相空間において階段状の分布を形成する。さらにビーム入射を行うとAEの振幅増大によって共鳴の重なりが局所的に発生し、それによるさらなるAEの振幅増大が連鎖的かつ大域的な共鳴の重なりを引き起こす。階段状の分布はAEバーストをもたらす臨界分布で

ある。AEバーストの発生前後の高エネルギーイオン分布関数の時間発展を図1に示す。AEバーストは大域的な高エネルギーイオン輸送と高エネルギーイオン分布の飽和をもたらす。

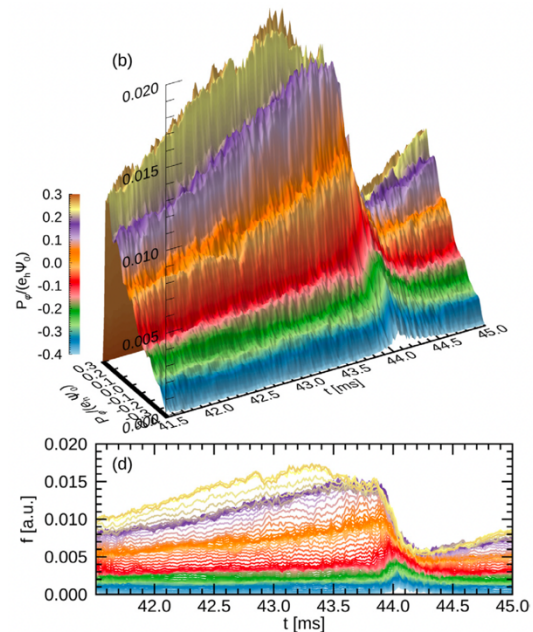


図1. トロイダル正準運動量 ( $P_{\parallel}$ ) の関数として表示した高エネルギー粒子位相空間分布の時間発展。色は  $P_{\parallel}$  を示している。上図奥がプラズマ中心、手前が周辺に対応している[4]。

### 3. LHDにおける高速イオン励起MHD不安定性による高速イオン輸送

大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマにおいて捕捉高速イオンが励起するMHD不安定性のシミュレーションを実施した[5]。実験では捕捉高速イオンは磁場に対して垂直方向に入射される中性粒子ビームによって生成される。シミュレーションにおいてポロイダルモード数  $m=2$ 、トロイダルモード数  $n=1$  のMHD不安定性が急速に成長し、プラズマ中心部において高速イオン垂直圧力が大幅に減少することを観測した。不安定性の周波数の符号反転と同時に、MHDモードと強く相互作用しているヘリカル捕捉高速イオンの歳差ドリフト方向が反転することを

見出した。これらのヘリカル捕捉粒子の歳差ドリフト方向は、MHDモードとの相互作用が終了すると本来の方向を回復するが、歳差ドリフト方向が反転している期間中に半径方向外側へ向かって急速に輸送される。図2は不安定性によって輸送される捕捉高速イオンの軌道と磁気面を示している。

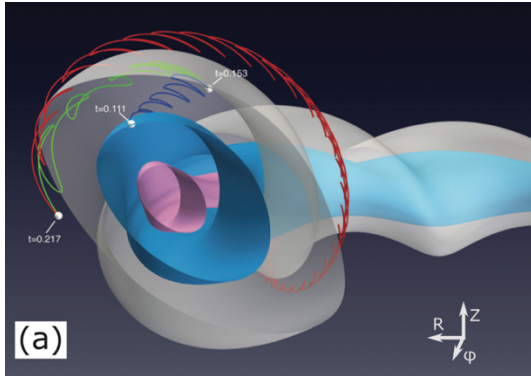


図2. LHDにおいて高速イオン励起MHD不安定性によって輸送される捕捉高速イオンの軌道。比較のため $r/a=0.2$  (ピンク),  $0.5$  (青),  $0.85$  (灰色)の磁気面が示されている[5]。

#### 4. 熱イオンの運動論的効果によるLHDにおけるMHD不安定性の安定化

LHDの実験では、MHD理論で予想されるよりもMHD不安定性は穏やかであり、MHD理論では不安定であると判定されるにもかかわらずプラズマ圧力分布が保持されていることがわかっている。平衡流の効果や拡張MHD効果を考慮したMHDシミュレーションも実施されたが、LHD実験で観測されている安定な高圧力プラズマの保持機構を十分に説明することはできなかった。熱イオンの運動論的効果を考慮した運動論的MHDハイブリッドシミュレーションにより、熱イオンの運動論的効果によってバルーニング不安定性の線形成長率が大きく低下することが発見された[6,7]。詳細な解析の結果、熱イオンの運動論的効果による抑制効果は、ヘリカルリップルに捕捉されたイオンの歳差ドリフト運動に起因することが明らかになった。図3は非線形段階における圧力分布について、MHDシミュレーションと運動論的MHDシミュレーションの結果を比較している。MHDモデルを用いた非線形シミュレーションでは高い圧力を維持することができないが、熱イオンの運動論的効果を考慮すると、不安定性の飽和後もコア領域における高い圧力が維持されることが実証された[8]。

#### 5. まとめと今後の展望

以上の成果の他に、(1) 高エネルギー粒子駆動測地的音響モードによるエネルギーチャネリング[9]、(2) 高エネルギー電子によるアルフベン固有モードバーストの安定化と不安定化[10]、(3) Heliotron JとCFQSにおけるアルフベン固有モード[11,12]、(4) トカマクにおける軸外れフィッシュボーン不安定性[13]などの成果について報告し、今後の課題と展望について議論する。

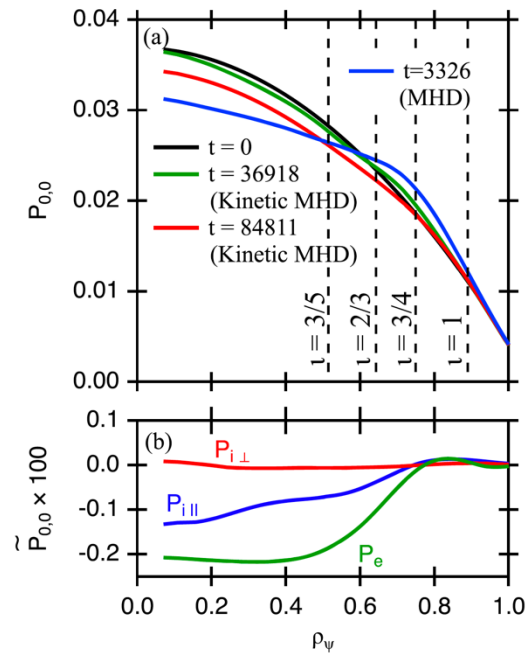


図3. (a) LHDにおけるMHD不安定性の非線形発展に関するMHDシミュレーションと運動論的MHDシミュレーションの比較。(b) 運動論的MHDシミュレーションにおける、電子圧力および磁場に対して平行成分と垂直成分の熱イオン圧力の揺動分布[8]。

#### 参考文献

- [1] W. Park *et al.*, Phys. Fluids B **4** (1992) 2033.
- [2] Y. Todo and T. Sato, Phys. Plasmas **5** (1998) 1321.
- [3] Y. Todo *et al.*, Plasma Phys. Control Fusion **63** (2021) 075018.
- [4] Y. Todo, Nucl. Fusion **59** (2019) 096048.
- [5] M. Idouakass *et al.*, Phys. Plasmas **28** (2021) 080701.
- [6] M. Sato and Y. Todo, Nucl. Fusion **59** (2019) 094003.
- [7] M. Sato and Y. Todo, J. Plasma Phys. **86** (2020) 815860305.
- [8] M. Sato and Y. Todo, Nucl. Fusion **61** (2021) 116012.
- [9] Hao Wang *et al.*, Nucl. Fusion **59** (2019) 096041.
- [10] Jialei Wang *et al.*, Nucl. Fusion **60** (2020) 112012.
- [11] P. Adulsiriswad *et al.*, Nucl. Fusion **61** (2021) 116056.
- [12] Hao Wang *et al.*, Nucl. Fusion **62** (2022) 106010.
- [13] Hanzheng Li *et al.*, Nucl. Fusion **62** (2022) 026013.