

LH 電流駆動シミュレーション

LH current drive simulation

辻井直人¹TSUJII Naoto¹東京大学 新領域創成科学研究科¹The University of Tokyo, School of Frontier Sciences¹

1 概要

核融合装置の加熱・電流駆動によるアクチュエータとして高周波の役割は確立しており、炉心プラズマにおける波動物理は比較的理解が進んでいる分野であると思われる。低域混成 (LH: Lower-Hybrid) 波とイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF: Ion Cyclotron Range of Frequencies) の波の記述には、一般に全波計算が必要であるが、波動・高速粒子の自己無撞着な大域的シミュレーション [1] を用いることで、これらの波による加熱・電流駆動特性を定量的に予測することが可能である。シミュレーションによる予測の妥当性は実験計測との比較により検証されている [2, 3, 4]。吸収の弱いシナリオの定量的モデリングは従来困難であったが、炉心プラズマ用のスペクトルコードを有限要素法によるアンテナ・SOL (Scrape Off Layer) モデルと統合することで、アンテナ・SOL まで含めた大域的な定量解析が可能となっている [5]。今後、波動と SOL プラズマの相互作用の理解の進展により、アンテナ・プラズマ相互作用の問題解決に近づくことが期待される。また、流れの駆動 [6, 7] の機構解明や有限軌道幅効果 [8, 9] の検証は、高周波による加熱・電流駆動以外のアクチュエータとしての可能性を開くものであり、今後の研究が必要である。

2 基礎物理

高周波加熱・電流駆動において、波動はプラズマを構成する電子・イオンと共鳴的に相互作用する。そのため、ほとんどの高周波加熱・電流駆動シナリオでは、条件を満たす方向に分布関数の裾から高速粒子のテールを生じる。バルクプラズマの加熱は、高速粒子のバルク電子・イオンとの衝突によるエネルギー散逸の結果として起こる。電流駆動については、高速粒子 (電子) 電流がそのまま磁気平衡電流を担う。波動により生成される高速粒子の密度はバルクの数パーセント以下と小さいが、高速粒子は一般にバルクよりも高い効率で波動を吸収するため、シナリオによって波動の電場分布に強い影響を与える。そのため、一般に波動伝

搬・吸収と高速粒子輸送は自己無撞着に解くことが必要である。

炉心プラズマにおける波動の吸収を正しく評価するためには、非局所的な熱いプラズマの誘電率を用いることが必要である。このため、波動計算においては波動のスペクトル展開を用いる方法がよく用いられる。波動・高速粒子の相互作用には準線形理論を用いるが、これは線形な波動計算における相互作用の誘電率テンソルによる表現とコンシステントなものである。高速粒子輸送の記述には軌道平均フォッカー・プランク方程式を用いる。一般には全波計算にはスーパーコンピュータが必要であり、自己無撞着計算における高速粒子輸送計算のコストは小さい。

3 炉心プラズマにおける波動・高速粒子シミュレーションの妥当性検証

炉心プラズマの波動・高速粒子シミュレーションについては妥当性検証が進んでいる。低域混成波電流駆動 (LHCD: Lower-Hybrid Current Drive) に関しては、MSE で拘束した平衡計算により実験的に得られた電流分布と、シミュレーションによる駆動電流予測が誤差の範囲でよく一致することが示されている [2]。高速電子のエネルギー・空間分布は制動 X 線放射計測により調べることができるが、これについても炉心からの放射に関してはシミュレーションと実験計測がよく一致することが確かめられている [4]。

ICRF シミュレーションについては、少数イオン加熱シナリオにおける NPA (Neutral Particle Analyzer) を用いた高速イオン計測とシミュレーション予測が定量的に合うことが示されている [4]。ICRF の速波はバルクイオンと基本サイクロトロン共鳴で相互作用しないため、少数イオン加熱に代表されるような複数のイオン種を用いるシナリオが一般的である。その場合、異なるイオン種のサイクロトロン共鳴の間にイオン・イオン混成共鳴が存在し、イオンバーンシュタイン波やイオンサイクロトロン波へのモード変換が起こる。モード変換の強いシナリオは効果的な電流駆動や流れ

の駆動ができるため、その定量的予測が求められる。モード変換によって生成される遅波の分布は位相差イメージング (PCI: Phase Contrast Imaging) を用いて直接計測されており、シミュレーションと実験計測がよく合うことが示されている [3].

4 現実的アンテナ・SOL モデル拡張

波動の炉心プラズマにおける吸収が弱いシナリオは正確なモデリングが難しい。これは、最先端の波動・高速粒子シミュレーションにおいても、アンテナを含む SOL はごく簡易的なモデルで済まされていることが一因である。吸収の強いシナリオにおいては、炉心プラズマに結合する波のパラメータが良く分かっており、また波動の伝搬・吸収に SOL は大きな役割を果たさないため、これで問題はない。一方、吸収の弱いシナリオでは炉心プラズマと SOL の波動が強く相互作用するため、正確な予測には現実的 SOL モデルが必要となる。

炉心プラズマの波動シミュレーションにおいて一般に用いられるスペクトル展開は、波動の吸収を定量的に評価するために必須の熱いプラズマの誘電率を実装するのに都合が良いが、SOL・アンテナの複雑な形状を記述するには不向きである。一方アンテナの設計に用いられる 3 次元有限要素法 (FEM: Finite Element Method) によるモデルは複雑な形状を記述することができるが、熱いプラズマの非局所的誘電率の実装が困難であり、簡単に炉心プラズマに拡張することができない。そこで、系を LCFS (Last Closed Flux Surface) 近傍で炉心プラズマと SOL (アンテナを含む) の 2 つの領域に分けて、それぞれを記述に適した従来のコードで解き、その解を結合するという方法が提案されている [5]。この方法では、境界面で想定される一般の電場分布を表現するのに十分な数の「モード解」を求め、その重ね合わせの係数を境界面で電場と磁場が連続になるように決定する。異なる境界条件を持つ解は同時に解けるため、全「モード解」を求める計算は従来の計算に対して 2-3 倍多い程度である。また、重ね合わせの係数を決定するために解く必要があるアドミッタンス行列は、モード数のサイズなので、波動計算と比べると無視できる時間で解くことができる。

この方法を用いることで、比較的小さなコストで最先端の炉心プラズマの波動シミュレーションを現実的な 3 次元アンテナ・SOL モデルを含むように拡張できる。従来波動シミュレーションを行う際には実験的に推定された吸収効率を用いていたが、現実的な SOL を計算に含めることで、炉心での吸収効率をある程度予測できるようになった。例えば、Alcator C-Mod の

D-H と D-He3 シナリオについて、スピッツァー抵抗を元にした電子衝突を、SOL プラズマにおける波動の散逸過程として含めることで、それぞれ 90% と 50% という実験において確認されている吸収効率を再現することができている [5].

5 今後の課題

LH 波、ICRF 波の核融合炉への適用においては、アンテナ・プラズマ相互作用による不純物生成やアンテナ損傷が問題となる。この課題の解決には、単純なバルクプラズマとコールド状態のアンテナの相互作用だけではなく、アンテナが作るシースや SOL で生成される高速粒子の振る舞いを理解する必要がある。4 節のような手法は、現実の SOL における様々な損失機構の定量的評価と解明に有効である。

高周波のアクチュエーターとしての機能は加熱・電流駆動に限定されるものではない。高周波による流れの駆動 [6, 7] は高周波による非自明な乱流制御の一例と考えられており、解明が必要である。波動による高速粒子拡散における有限軌道幅効果を効果的に用いることで、高速粒子の位相空間制御が可能かもしれない。有限軌道幅効果の研究は限定的であり [9]、現実的な有限軌道幅効果を含むフォッカープランク計算 [8] の高周波実験による妥当性検証が望まれる。

References

- [1] E.F. Jaeger et al. Global-wave solutions with self-consistent velocity distributions in ion cyclotron heated plasmas. *Nuclear Fusion*, 46(7):S397, 2006.
- [2] S. Shiraiwa et al. Full wave effects on the lower hybrid wave spectrum and driven current profile in tokamak plasmas. *Physics of Plasmas*, 18(8):080705, 2011.
- [3] N. Tsujii et al. Validation of full-wave simulations for mode conversion of waves in the ion cyclotron range of frequencies with phase contrast imaging in Alcator C-Mod. *Physics of Plasmas*, 22(8):082502, 2015.
- [4] J.C. Wright et al. Time dependent evolution of RF-generated non-thermal particle distributions in fusion plasmas. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56(4):045007, mar 2014.
- [5] J.C. Wright et al. Antenna to core: A new approach to rf modelling. *EPJ Web Conf.*, 157:02011, 2017.
- [6] Y. Lin et al. Observation of ion cyclotron range of frequencies mode conversion plasma flow drive on Alcator C-Mod. *Physics of Plasmas*, 16(5):056102, 2009.
- [7] Y. Lin et al. Ion cyclotron range of frequency mode conversion flow drive in D(³He) plasmas on JET. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 54(7):074001, 2012.
- [8] Yu.V. Petrov and R.W. Harvey. A fully-neoclassical finite-orbit-width version of the CQL3D Fokker - Planck code. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 58(11):115001, 2016.
- [9] M. Choi et al. Monte Carlo orbit/full wave simulation of ion cyclotron resonance frequency wave damping on resonant ions in tokamaks. *Physics of Plasmas*, 12(7):072505, 2005.