

高速イオンによる低域混成波不安定性の非線形発展に関する  
粒子シミュレーション

Particle simulation study on nonlinear development of lower hybrid  
wave instabilities driven by energetic ions

樋田美栄子

Mieko Toida

核融合科学研究所, 総研大

National Institute for Fusion Science, SOKENDAI

高速粒子による不安定性は、核融合プラズマと宇宙プラズマに共通する重要な物理過程の一つである。高速粒子には様々なものがあるが、本研究では、磁場に垂直方向の速度空間における分布がリング状となっている高速イオンに注目している。例えば、磁場閉じ込めプラズマ実験装置では、プラズマ加熱用の中性粒子入射(NBI)によって生成される高速イオンはリング状の速度分布を形成する。核融合反応で生成される $\alpha$ 粒子の速度分布は等方的であるが、粒子軌道がピッチ角によって異なるため、 $\alpha$ 粒子は環状プラズマのエッジ付近でリング状の速度分布を取り得る。このような高速イオンが引き起こす不安定性の代表例がイオンサイクロトロン放射であり、多くの理論・シミュレーション研究が行われてきた。その一方で、近年、NBIに伴う電磁波放射の時間発展が様々な様相を示すことが、大型ヘリカル装置(LHD)等で観測されている。その機構は完全には理解されておらず、その解明には不安定性の非線形発展を理解することが必要である。また、宇宙では、無衝突衝撃波や磁気再結合による粒子加速によって、リング状の速度分布を持つ高速イオンが形成され、そのようなイオンが引き起こす不安定性の非線形発展は、無衝突衝撃波のエネルギー散逸、宇宙プラズマにおけるイオン加速などにも重要な影響を及ぼしていると考えられている。

本研究は、このような高速粒子による不安定性の非線形発展という、核融合と宇宙のプラズマで共通する物理を切り出し、電磁粒子シミュレーションを用いて解析を行っている。電磁粒子シミュレーションは、大域的な解析は不可能であるが、イオンサイクロトロン周波数から電子サイクロトロン周波数を超えるような幅広い周波数帯の波と個々の粒子の相互作用、波動間非線形結合を扱えるものであり、高速粒子による不安定性の非線形発展の理解を深化させるために欠かせない手法である。これまで、この電磁粒子シミュレーションを用いて、リング状の速度分布を持つ高速イオンが引き起こす不安定性について研究を行ってきた。特に、イオンのリング速度がアルヴェ

ン速度より小さい場合に起こる、低域混成波不安定性に注目している。

図1は、垂直NBIで生成される高速イオンによる不安定性に関するシミュレーション結果である。 $\omega \approx n \Omega_D$  ( $n$ は整数,  $\Omega_D$ は重水素のサイクロトロン周波数)のイオンサイクロトロン波に加えて低域混成共鳴周波数付近の波が励起されていることが確認できる。このような広い周波数帯の波の同時励起は、実験と同様である。さらに、プラズマ密度を様々に変えたシミュレーションによって、プラズマ密度が大きくなると、最大振幅となる低域混成波の周波数が増加することを示した。この密度依存性も、LHD実験の結果と良く一致している[1]。

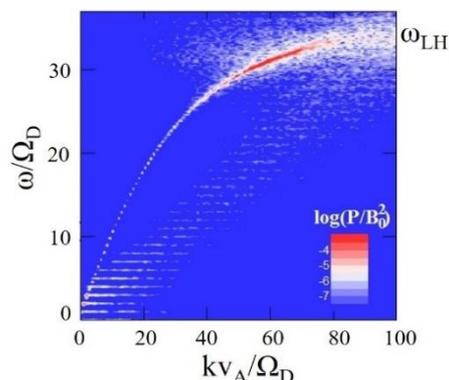


図1:低域混成波とイオンサイクロトロン波の同時励起[1]

上記は、初期に高速イオンを与え、その緩和過程を調べたものであるが、それを拡張して高速イオンを注入し続けるという開放系シミュレーションも行った。LHDでは、接線NBIと電子サイクロトロン加熱装置による電力入射を同時に行ってプラズマを立ち上げている時に、放射電磁波の周波数が階段状に増加することが観測されている。この放射は、密度が徐々に増加するプラズマ中で、接線NBIによって持続的に作られる高速イオンが引き起こしていると考えられる。そこで、プラズマ密度を増やし続け、そこに接線NBIによって作られるような、ピッチ角が小さい高速イオンを長時間に渡って注入し続けるというシミュレーションを行った[2]。図2は、高速イオンによって励

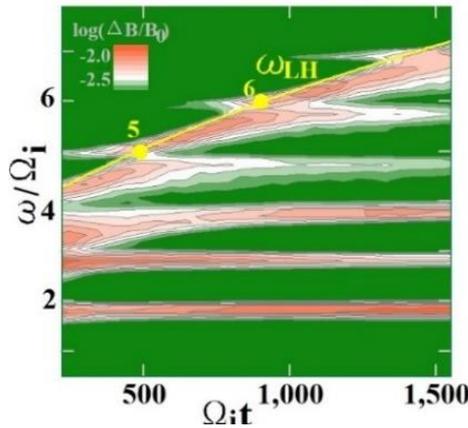


図2: 密度が増加するプラズマ中での低域混成波の周波数変化[2]

起された磁場揺動の周波数の時間変化を示すが、振幅が大きいことを示す赤色の部分に注目すると、 $\omega > 4\Omega_i$  の領域では周波数が階段状に増加している。また、段差が  $\Omega_i$  であること、黄色の線で示す低域混成共鳴周数  $\omega_{LH}$  が  $n\Omega_i$  に等しくなる頃に、その周波数の波が成長を始めていることが分かる。これらは LHD 実験の結果と一致している。

高速イオンによる低域混成波不安定性は、地球磁気圏でも重要な研究課題となっている。例えば、地球磁気圏の極域からは大量の酸素イオンが宇宙空間へと流出しているが、その理由は長年の未解決問題である。この問題解決の鍵は酸素イオンの加速だと考えられており、その加速機構の候補の一つが、極域に降り込む高速イオンが励起した低域混成波によるものである。そこで、開放系粒子シミュレーションを用いて、低域混成波の長時間非線形発展を調べた。高速イオンを注入し続けることによって低域混成波が大振幅を維持すること、幅広い波数の低域混成波が励起されること、それに伴って背景イオンの加速が促進されることが明らかとなった[3]。

また、近年、高速粒子が励起したと考えられる低域混成波とその高調波が、核融合プラズマと地球磁気圏の両方で報告されている。そこで、高調波の効果とその生成機構を調べるために、粒子シミュレーションによる解析を行った[4]。図3は、地球極域上空でのパラメータに相当するシミュレーション結果であり、低域混成波とその整数倍の高調波が励起されている。また、多くの高調波が生成されるとイオンがより強く加速されることも明らかになった(図4)。これは、高調波がイオンの加速を促進するという新たな可能性を示すものである。高調波の励起機構については、波動間非線形相互作用によるものであることを明らかにした[5]。

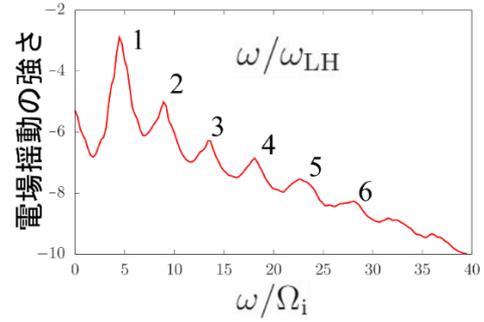


図3: 低域混成波の高調波の生成[4]

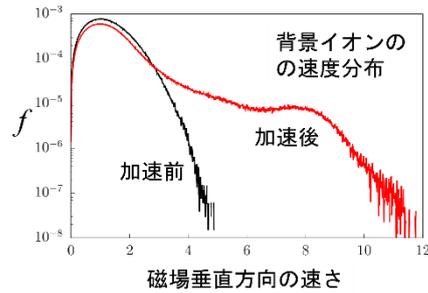


図4: 低域混成波と高調波によって加速された背景イオンの速度分布[4]

今後は、高調波の生成条件を明らかにするためのパラメータ解析や、核融合プラズマと宇宙プラズマの共通課題でもある、多種類イオンの効果などについての研究を進める予定である。

## References

- 1) M. Toida, K. Saito, H. Igami, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki, Plasma Fusion Res., Vol. 13, 3403015 (2018).
- 2) M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, and R. Seki, Plasma Fusion Res., Vol. 14, 3401112 (2019).
- 3) T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 90, 124501 (2021).
- 4) T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, Geophys. Res. Lett., Vol. 50, e20222GL102356, (2023).
- 5) T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, and S. Taguchi, Phys. Rev. E, Vol. 108, 035208 (2023).