

## 電子サイクロトロンドリフト不安定性の理論および数値シミュレーション

## Theory and Simulation of the Electron Cyclotron Drift Instability

# 藤本 桂三[1], 町田 忍[2]

# Keizo Fujimoto[1], Shinobu Machida[2]

[1] 京大・理・地球物理, [2] 京大・理・地球惑星

[1] Dept of Geophys Sci., Kyoto Univ, [2] Dept. of Geophys., Kyoto Univ.

磁気再結合領域において、磁気中性点からの距離がイオンの慣性長より小さく電子の慣性長より大きな領域では、イオンは磁化されず電子のみが磁化されていると考えられる。このような領域では、電子は  $E \times B$  ドリフトにより通常の Alfvén 速度を超えて電子の Alfvén 速度まで加速が可能となり (e.g. Hoshino et al., 2001)、Super Alfvénic な電子ビームが磁力線を横切って流れる可能性がある。そこで、本研究ではこのような Super Alfvénic な高速電子ビームが磁力線を横切の場合に励起される不安定性について調べることにした。この問題は、電子ビームに乗った系で考えると、一様電場の無い空間で Super Alfvénic なイオンビームが磁場を横切の場合に励起される不安定性を調べることと等価である。

上記の背景をもとに、我々は 2-1/2 次元電磁粒子コードを用いて磁力線に垂直なイオンビームが存在する場合に励起される不安定波動について数値シミュレーションを行った。また、並行して行った線型理論計算から、低域混成周波数帯では変形 2 流体不安定性、高域混成周波数帯では電子サイクロトロンドリフト不安定性がそれぞれ励起されることがわかった。数値シミュレーションでは、前者はイオンビームの速度が電子の熱速度よりも小さいとき、後者はイオンビームの速度が電子の熱速度よりも大きいときにそれぞれ顕著な不安定性を示した。各モードの成長率を調べた結果、それらが線型理論と一致することがわかった。変形 2 流体不安定性は、磁力線に対して斜め方向に伝播する静電的な波動により、磁化された電子が磁力線方向に加熱されるという特徴をもっている。一方、電子サイクロトロンドリフト不安定性は磁力線にほぼ垂直に伝播する静電波を励起するため、電子がこの波に捕捉されて磁力線に垂直方向に加熱される特徴がある。さらに、シミュレーションと線型理論から電子サイクロトロンドリフト不安定性による波動の伝播範囲が、ビーム速度の増加とともに磁力線方向に広がることをわかった。これは、この不安定性が電子バースタイン波とビームイオンの共鳴によって生じることに起因する。すなわち、電子バースタイン波の伝播方向は短波長領域ではほぼ磁力線に垂直方向に束縛されるが、長波長領域ではより広範囲になる。そのため、ビーム速度が増し共鳴する波の波長が長くなるにつれて、より広範囲の電子バースタイン波がビームイオンと共鳴できるようになり、不安定波の伝播方向が広がることが考えられる。線型理論から得られたもう 1 つ重要な結果とし、変形 2 流体不安定性は電磁的效果によって安定化されるのに対して、電子サイクロトロンドリフト不安定性は電磁的效果によって不安定性を増すことが挙げられる。

さらに、我々は数値シミュレーションにより異常抵抗の時間発展を調べ、電子サイクロトロンドリフト不安定性による異常抵抗が変形 2 流体不安定性と同程度であることを見出した。得られた値は準線型理論によって求められるものと良く一致している。このことから、高速ビームの存在する場合には電子イオンサイクロトロンドリフト不安定性がエネルギー散逸効果に重要な役割を果たすことがわかる。

以上をまとめると、

(1) イオンビームが電子の熱速度よりも小さいときは変形 2 流体不安定性により電子は磁力線方向に加熱されるが、熱速度を超えると電子サイクロトロンドリフト不安定性により電子は磁力線に垂直方向に加熱される。

(2) 電子イオンサイクロトロンドリフト不安定性による波動の伝播範囲は、ビーム速度が増すにつれて磁力線方向に広がる。

(3) 変形 2 流体不安定性は電磁的效果によりやや安定化するが、電子イオンサイクロトロンドリフト不安定性は電磁的效果により不安定になる。

(4) 電子イオンサイクロトロンドリフト不安定性による異常抵抗は、変形 2 流体不安定性による異常抵抗と同程度である。このことは、高速ビームの存在する場合に電子イオンサイクロトロンドリフト不安定性がエネルギー散逸に重要な役割を果たすことを意味する。