

論文の内容の要旨

論文題目 Turbulent Mixing and Transport of Collision-less Plasmas
across a Stratified Velocity Shear Layer

(密度成層中の速度シアー境界層を介した無衝突プラズマの
乱流輸送についての研究)

氏名 松本洋介

速度勾配層において成長することが知られている Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定は、大気現象から天文学的現象と幅広いスケールにおいて観測され、それ故に数多くの研究がなされてきた。太陽風—地球磁気圏相互作用の観点においても例外ではなく、人工衛星によるプラズマの直接観測によってその存在が明らかになっている。特に、K-H 不安定が最も成長しやすい領域である低緯度境界面(LLBL)においては、太陽風のプラズマが地球磁気圏内に直接浸入している痕跡が報告されており、Dungey[1961]のリコネクションモデルに次ぐ新たな太陽風プラズマの輸送モデルにおいて、K-H 不安定は重要な役割を果たしているのではないかと考えられてきた。しかしながら、これまで数多くの観測的な「状況証拠」は挙げられているものの、それを裏付ける理論的な支えがなかった。そこで本研究では、K-H 不安定によって太陽風プラズマを広範囲に渡って輸送することが可能であることを示し、新たな太陽風—地球磁気圏相互作用のモデルを理論的側面から提唱することを目的としている。

まず、基本的な設定の下での K-H 不安定によるプラズマの混合について研究を行うため、一様垂直磁場配位の下、full particle simulation による計算を行った。その結果、プラズマの混合領域は境界面においてもっとも混合しており (図 1)、K-H 不安定の時間発展によってその境界面の長さが伸び、変形することによってプラズマの混合領域が時間とともに増大することがわかった (図 2)。また、境界面に対して垂直方向への拡散は、電子の境界面が小さいスケールで変形することによってイオンの混合領域を埋め尽くし、その結果、イオンと電子の混合領域の面積が同程度になることがわかった。この電子の境界面を変形させるのはイオンと電子の熱揺らぎによって生じる、静電波によるものであると考えられる。

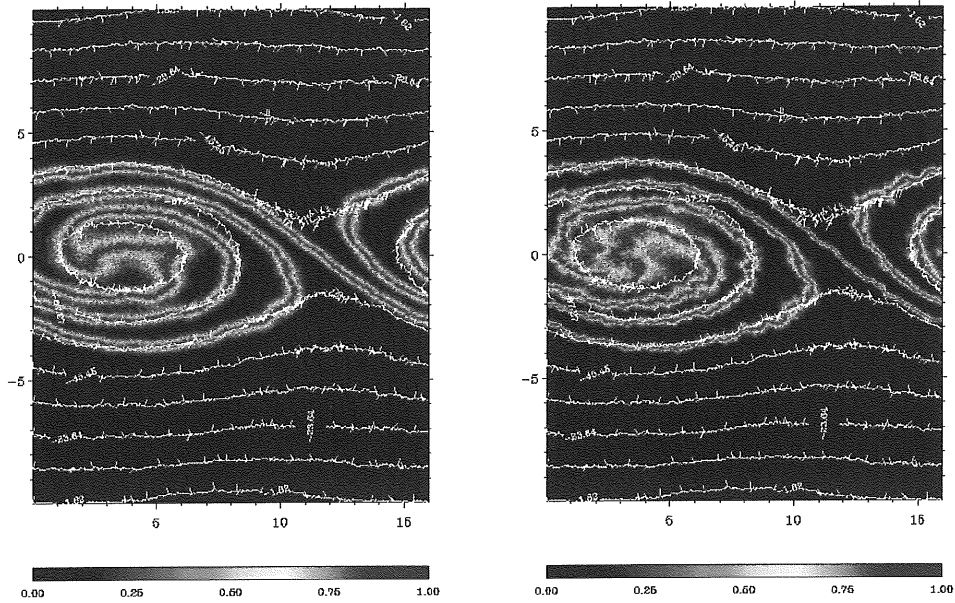


図1、混合領域を表した図。左図が、イオン、右図が電子の混合領域。

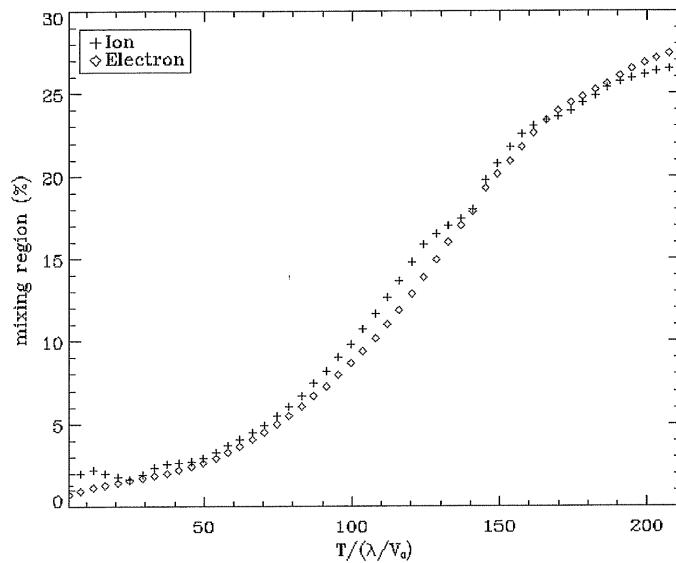


図2、イオン、電子の混合領域の全領域に対する割合の時間変化

太陽風と地球磁気圏の特徴的な差異は、そのプラズマの非一様性にある（図3）。我々はこの点に注目し、プラズマの密度（温度）差がある場合の K-H 不安定について研究をおこなった。

理想 MHD シミュレーション：

密度成層中の K-H 不安定について、その密度比に対する非線形発展の特徴の違いに注目し、解析を行った。その結果、密度比が 1 対 0.2 の場合、K-H 不安定の非線形段階において渦の周辺及び内部で 2 次的不安定が成長することがわかった。渦の周辺においては 2 次的 K-H 不安定が成長し、また、

その内部においては2次的 Rayleigh-Taylor(R-T)不安定が成長することがわかった (図4)。その結果、強い乱流へと発展する。この乱流の強さは密度比によることがわかり、また、2次的 R-T 不安定は乱流を発生させるのみならず、プラズマを低密度領域に輸送する働きがあることがわかった。これまでの K-H 不安定の流体計算においては、3次元性による2次的不安定が発生し、乱流に移行することが知られていたが、2次元平面内の R-T 不安定による乱流への移行を示したのは本研究が初めてである。

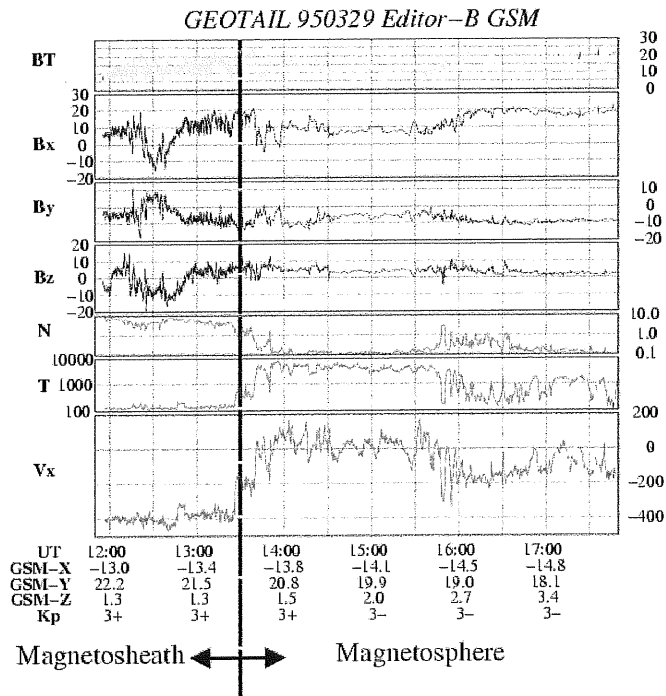


図3、人工衛星 Geotail による、低緯度境界面の観測

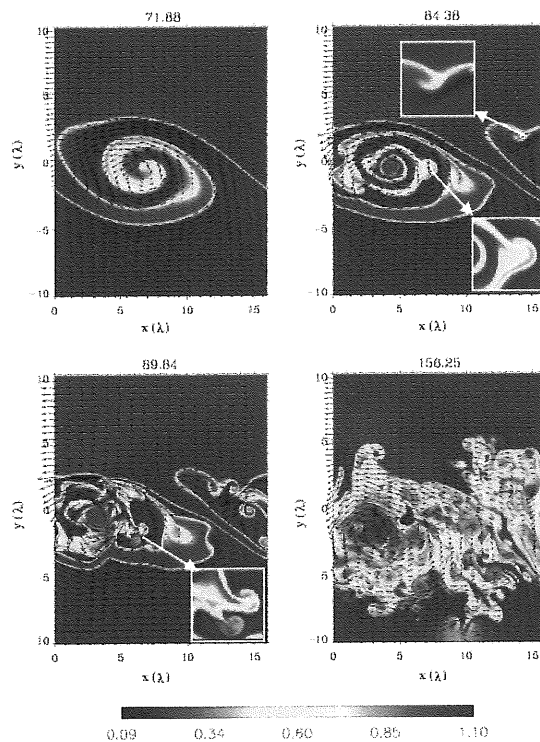


図4、MHD シミュレーションの結果。密度比 1 対 0.2

Full particle シミュレーション :

MHD 計算の結果を踏まえて、Full particle シミュレーションを行った。その結果、MHD の計算よりも早い段階で渦の外側で 2 次的 R-T 不安定が成長することがわかった (図 5)。密度が一様な場合と比べると、密度比が 1 対 0.1、1 対 0.2 のケースにおいて、これまでにない時間、空間スケールでプラズマの混合が促進されることがわかった (図 6)。また、乱流の発生によって、流体の運動エネルギーは小さいスケールへと輸送されるが、最終的にはイオンの慣性長程度で押えられ、イオンスケールで決まることがわかった。

太陽風—地球磁気圏相互作用の観点から、密度成層中の K-H 不安定の非線形発展について研究をおこなった。その結果、密度比が大きい場合には、2 次的 K-H、R-T 不安定が成長し、乱流へと移行することがわかった。また、2 次的 R-T 不安定は、プラズマを密度が大きい領域から小さい領域に輸送する重要な役割を果たしている。以上の結果から、以下のような太陽風—地球磁気圏相互作用のモデルを提唱したい。

1. 長時間の南向き惑星間空間磁場 (IMF) が続き、従来のリコネクションモデルにより、磁気圏内のプラズマが希薄になり、温度が高くなる。
2. IMF が南向きから北向きになる。
3. 低緯度境界面において密度差が非常に大きくなっているため、K-H 不安定による効果的な太陽風プラズマの磁気圏内への輸送が起こる。
4. 磁気圏内の温度が冷やされ、密度が一様になり、K-H による輸送が止まる。

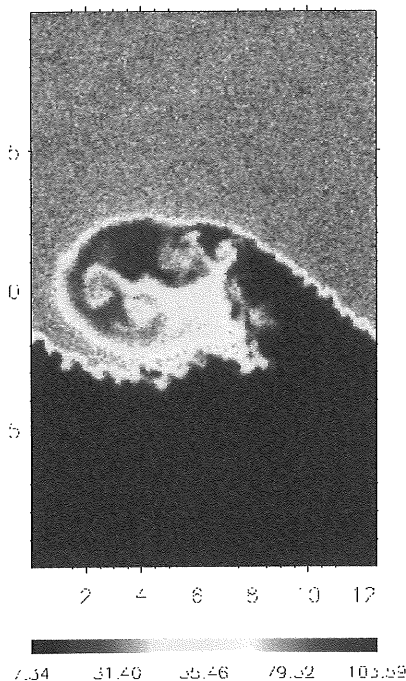


図 5、full particle シミュレーションの結果。密度比 1 対 0.2。

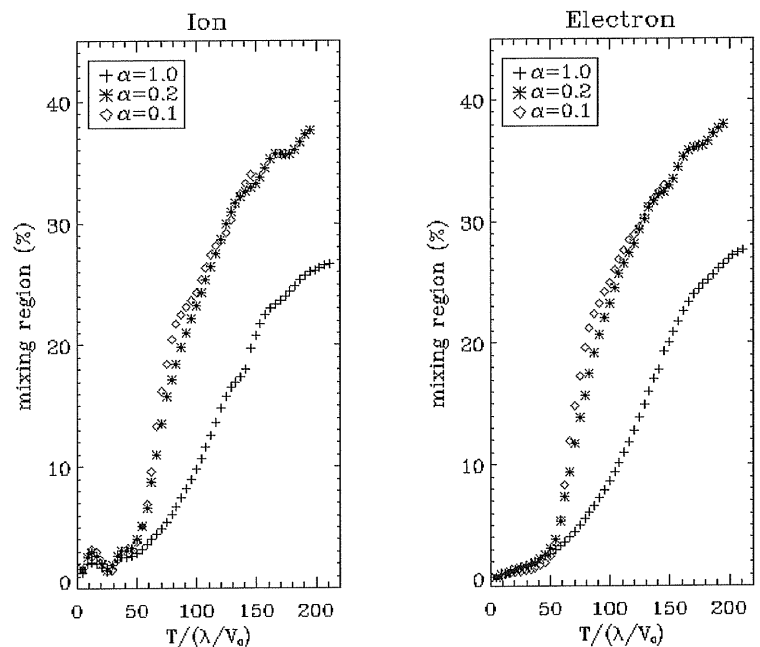


図 6、混合領域のシミュレーション領域に占める割合の時間変化。α: 太陽風側に対する密度比