

ケルビン・ヘルムホルツ不安定の順・逆エネルギーカスケード過程による幅広いプラズマ混合層の形成

Formation of a broad plasma mixing layer via forward and inverse energy cascades of the Kelvin-Helmholtz instability

松本 洋介 [1]; 関 華奈子 [1]

Yosuke Matsumoto[1]; Kanako Seki[1]

[1] 名大 STE 研

[1] STEL, Nagoya Univ.

地球磁気圏の脇に存在する温度が低く密度の高いプラズマによって構成される LLBL の存在は古くより人工衛星により確認されてきたが、その輸送ルートについては磁気圏物理学の謎の一つとして長年残されている。特に LLBL は北向き IMF 時に形成されることから、これまで以下の物理メカニズムによる輸送が提唱されてきた。まず、北向き IMF 時では高緯度磁気リコネクションが南北両極で起き、太陽風プラズマを閉じた磁力管に閉じ込めるダブルローブリコネクション (DLR) モデルが挙げられる。数値シミュレーションの発展により、近年 DLR モデルによる太陽風プラズマの輸送がグローバル MHD シミュレーションによって再現され [Li et al., 2008]、観測でもこれをサポートする結果が得られている [Oieroset et al., 2008]。一方、DLR は磁気圏境界近傍の LLBL の形成に寄与し、磁気圏深部のプラズマ混合層の形成には他の拡散的な物理メカニズムが必要であることが報告されている [Seki et al.]。その拡散的メカニズムはいくつか挙げられるが、本研究では有力な候補のひとつとしてケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定に着目している。

近年の数値シミュレーションによる研究から、KH 不安定の非線形発展により太陽風プラズマを磁気圏内へと輸送することが可能であることがわかってきた。KH 渦の面内に磁場成分がある場合は、磁場が渦に巻き込まれることによって渦内部で磁気リコネクションが励起され、太陽風プラズマが剥ぎ取られることが示された [Nykyri and Otto, 2001; Nakamura et al., 2008]。一方、密度の非対称性が大きい場合は、密度成層構造に働く遠心力によって励起されるレイリー・テイラー (RT) 不安定が 2 次的に励起され、KH 不安定が乱流発展することによる乱流輸送モデルが著者らの研究によって示された [Matsumoto and Hoshino, 2004, 2006]。いずれにしても、KH 不安定によるプラズマ混合層の形成は初期のシア層の厚みの数倍程度であり、観測から要求される幅広い混合層形成を示すには至っていない。

本講演では、大きなシミュレーション領域の下で高解像度 MHD シミュレーションを行い、2 次的 RT 不安定による KH 不安定の乱流発展とエネルギー逆カスケード過程を組み合わせることにより、幅広い混合層形成が短時間で可能であることを示す。大きなシミュレーション領域の下では複数の KH 不安定モードが同時に成長する。成長率の大きな複数の不安定モードが非線形段階に入ると、モード間結合が起き、エネルギー逆カスケード過程によって系で許される最大サイズの渦が急激に成長する。それは線形理論から予想される速さの約 4 倍に達することが明らかになった。また同時に、密度成層領域では 2 次的 RT 不安定が励起され、エネルギー順カスケードが起きることにより、プラズマの混合が促進される。最大サイズの渦が速い時間スケールで成長するため、急激に乱流領域が空間的に広がり、その結果初期のシアの厚みの 40 倍の混合層形成が得られた。典型的な太陽風パラメタを適用した結果、 $7R_E$ (地球半径) の混合層が 10 分程度の時間スケールで形成され、その間に KH 不安定モードは $25R_E$ 伝搬する結果が得られ、観測から要求される時空間スケールを説明できることが明らかになった。また、拡散係数は $10^{17} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ とこれまで求められていた $10^9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ [Nykyri and Otto, 2001] を大幅に上回る値が得られた。