

オーロラ加速領域形成過程解明に向けた

衝突性 Hall MHD シミュレーションを用いた 3 次元電磁場構造解析

川上航典

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

1 はじめに

オーロラ加速領域は、磁気圏電離圏結合系 (M-I 結合系) に存在する上向き静電場構造である。この領域はオーロラが発生するために必要な降り込み粒子を生成する役割を持ち、その形成・発展過程の解明はオーロラ発展形態の全容解明の面からも重要である。本研究ではオーロラ加速領域形成・発展過程の中でも、特に初期形成過程解明を目的とし、プラズマ流体中において情報を伝える役割を持つ Alfvén 波の M-I 結合系における伝搬特性について調査を行った。

今回は先行研究[1]で報告されている様に、電離圏が単なる境界領域として波を反射させるだけでなく、プラズマと中性大気が衝突によって運動量交換を行うことで新たに波を生成し系全体の発展に大きく寄与することでオーロラの発生にも強い影響を持つことから、M-I 結合系のなかでも特に電離圏側の役割について注目するため、衝突性 Hall MHD 方程式系[2]を用いた数値実験を行った。この衝突性 Hall MHD 方程式系では、プラズマ流体と中性大気間における衝突効果と、その結果生じる電流を考慮することで、プラズマ流体のダイナミクスと電磁場の発展を同時に記述することが可能である。また今回の計算では、この方程式系を 3 次元 M-I 結合系において計算することで、通常は薄層として近似される電離圏を高度方向まで情報を持たせた。

この 3 次元衝突性 Hall MHD 方程式をもとに数値シミュレーションの開発、並びに M-I 結合系における電磁場構造解析、すなわち Alfvén 波の伝搬特性解析を行った。

2 研究手法

数値シミュレーションに関しては、計算スキームとして Two Step Lax-Wendroff 法[3]を採用し、地球 dipole 磁場の磁束管の一部に対応する 3 次元 M-I 結合系空間に対応する $200 \times 50 \times 50$ のグリッドを持つ計算空間を用意した。

その上でエネルギー入力として Alfvén 波を計算空間の磁気圏から電離圏に伝播するよう入射した。この設定のもとプラズマと中性大気との衝突効果の影響を明らかにするため、衝突効果を考慮して高度 80km を計算領域の下端とした場合と、衝突を無視して高度 200km を下端とした場合の 2 つの場合について計算を行い、その結果について解析・比較を行った。

3 結果

現在の手法では Alfvén 波が M-I 結合間を往復し始め合成波を作るところ(実時間 2.8 秒)まで安定した計算が可能であった。今回は特に Alfvén 波に伴う磁気張力方向電流成分 j_x の構造に注目した(図 1)。

その結果、高度が上昇するにつれ衝突効果を考慮して計算した場合の方が電流の大きさが小さくなり、その影響が高度 3,000km 付近まで届くことがわかった。これは電離圏における衝突によるプラズマの運動量損失が Alfvén 波を介して磁気圏まで伝搬したことによるものである。

また両方に共通する性質として wave packet のような構造が発生している。これは先行研究[4]でも報告されている、背景プラズマと地球磁場の空間勾配

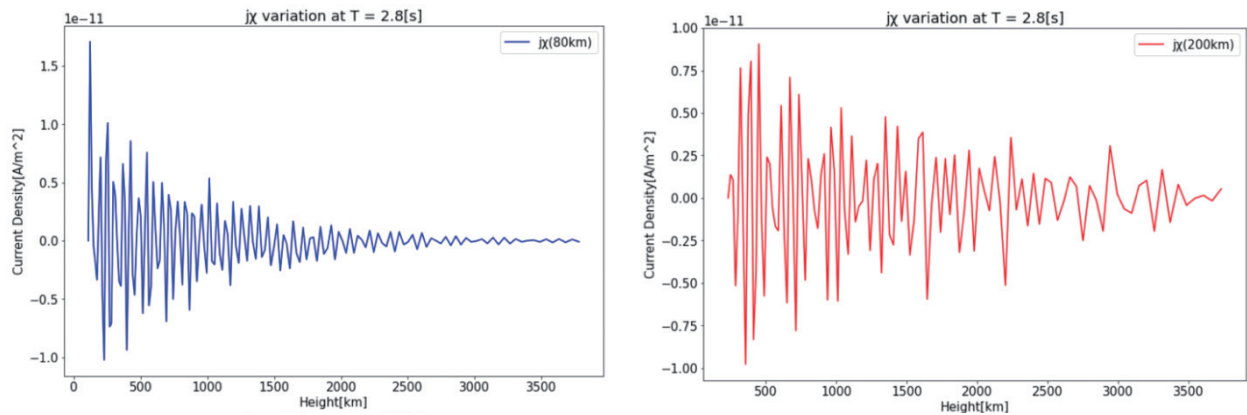


図 1 : M-I 結合系における Alfvén 波の伝搬に伴う電流の大きさ

(左) 高度 80km から衝突効果を考慮し計算した結果、(右) 高度 200km から衝突効果を無視し計算した結果

によって Alfvén 波の位相速度が急激に変動することで、Alfvén 波自身が閉じ込められることで生じた定在波構造である可能性がある。今回は確認できなかったが、この wave packet 構造下では非線形アンペール力により背景プラズマが動かされ、低プラズマ密度領域を形成し Alfvén 波の伝搬特性をさらに変化させることが報告されており、オーロラ加速領域形成過程において一つの鍵になると考えられる。

4 おわりに

本研究では 3 次元衝突性 Hall MHD シミュレーションを用いることで、磁気圏電離圏結合系(M-I 結合系)において電離圏での中性大気とプラズマ間の衝突効果を含んだダイナミクスが Alfvén 波を介して磁気圏側にまで影響を与えることを確認した。今後はより長時間発展の計算を行うことで[1]で報告されている M-I 結合系におけるオーロラ加速領域形成過程における電離圏の役割についてより詳細を調査する。また、そのために Hall MHD 特有の振動を抑えるための hyper resistivity[4]や、その他の数値スキームの導入を予定している。

同時に、今回確認された Alfvén 波の wave packet 構造についても、その構造内でのダイナミクス、並びに背景物理量への影響についても調査を行っていく。

5 謝辞

本研究の計算は京都大学のスーパーコンピュータ共同研究制度(若手・女性奨励枠)を活用させていただきましたので、御礼申し上げます。

6 参考文献

- [1] A. Yoshikawa, R. Fujii, vol. 235 (Wiley Online Library, New York, 2018), pp. 427–443
- [2] Otto, A., & Zhu, H. (2003). In J. Büchner, M. Scholer, & C. T. Dum (Eds.), Space plasma simulation. Lecture notes in physics (Vol. 615, pp. 193–211).
- [3] Ogino, T., R. J. Walker, and M. Ashour-Abdalla (1992), IEEE Trans. Plasma Sci., 20, 817–828, doi:10.1109/27.199534.
- [4] Sydorenko, D., R. Rankin, and K. Kabin (2008), J. Geophys. Res., 113, A10206,
- [5] B. Srinivasan and U. Shumlak. PHYSICS OF PLASMAS 18, 092113 (2011)