

多流体プラズマシミュレーションを用いた

磁気圏電離圏結合オーロラ電流系発展プロセスの解明

川上航典

九州大学理学府地球惑星科学専攻

1 はじめに

近年、人工衛星などの安定運用のために、宇宙環境変動を理解・予測する宇宙天気研究の重要性が高まっている。その中でも、極域で観測されるオーロラは、宇宙環境中を輸送されたエネルギーが可視化された代表的な現象であり、その物理過程を理解することは、宇宙天気現象の予測への第一歩である。これまで、オーロラ発生時における粒子加速などは数多くの研究が行われてきた一方で、その形成に至る背景プラズマや電磁場の発展過程については、現在でも十分に理解されていない。特に、エネルギー輸送の観点から重要な役割を担う Alfvén 波の非線形発展は未だ研究途上である。Alfvén 波は、磁場およびプラズマの擾乱が磁力線に沿って伝搬する MHD (Magnetohydro Dynamics) 波動であり、電磁エネルギーの輸送を担う。また、Alfvén 波の伝搬に伴う電磁場変動はプラズマ密度などの背景場にも影響を与え、それによって波自身の伝搬特性が変化する可能性がある。本研究では、MHD 方程式を用いた数値モデルを開発し、Alfvén 波の伝搬に伴う非線形発展の調査を行った。特に数値モデルでは、これまでの数値不安定性を克服するため HLL 型数値解法を採用しつつ WENO 法を組み合わせ、HPC を用いて並列化することで円滑な研究活動を達成した。これにより、Alfvén 波の伝搬によって背景プラズマが変動し、その変動がさらに Alfvén 波の伝搬へ影響を及ぼす一連の非線形過程を自己無頓着な形で明らかにした。

2 研究手法

数値シミュレーションは、MHD 方程式などの双極型偏微分方程式を安定的に解くことができる HLL (Harten Lax-van Leer) 型数値解法[1]を用い、WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 法[2]を用いることで高精度化を図った。また、計算領域には地球磁場構造に沿った dipole 座標系を採用し、初期条件として地球磁場並びに、プラズマを2種類(水素イオン、酸素イオン)考慮したプラズマ密度分布を与えた。その際得られた初期の Alfvén 速度分布を図1に示す。その後、この計算領域に対して波のインプットを継続的に行い、波の伝搬に伴う非線形発展について調査を行った。

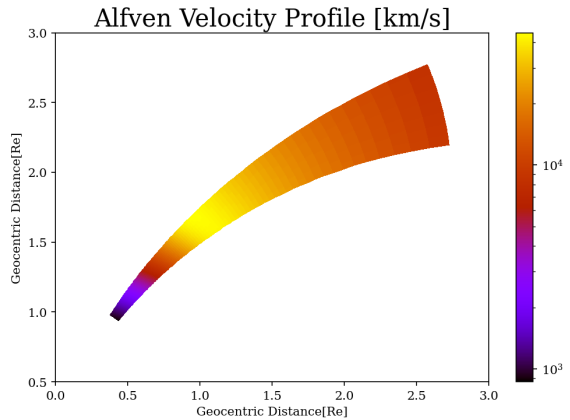


図1 初期 Alfvén 速度分布。

縦軸、横軸は地球半径。カラーは速度。

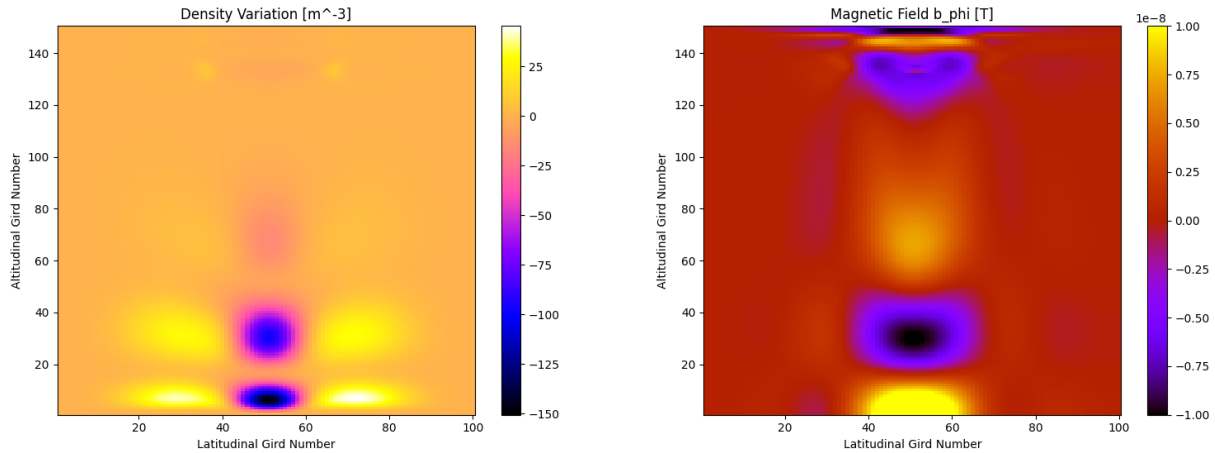


図 2 12 秒後における相対密度変動(左)と波の振幅(右)

縦軸、横軸は数値計算におけるグリッド番号。

3 結果

図 2 に今回開発したモデルで 12 秒ほど計算した結果として、初期状態からの密度変動をパーセンテージで表したものの(左)とその時の波の位相を示している。まず全体の構造に注目すると、先行研究で報告されてきたものと同様の定在波構造が形成されているのがわかる。これは非一様な位相速度と計算領域下端で波が反射されることによって形成されるものである。

次に左図に注目すると、波の伝搬経路上では常に密度が減少している一方で、その両端では密度が増加していることがわかる。これは先行研究のモデル[3]では考慮されていなかった非線形効果を入れたことで初めて確認できた構造である。

また右図に注目すると、特に上部において伝搬経路中央と両端で波の位相が入れ替わっているところが確認できる。これは左図で確認した密度の変動によって Alfvén 波の位相速度も同時に変動され、中央では増加、両端では減少したことに由来するものである。この物理過程は位相混合と呼ばれ、先行研究でも報告されていた[4]ものであるが、本研究で初めて密度変動も含めた自己無頓着な形で再現することができた。

これらの結果から、Alfvén 波の伝搬に伴う非線形発展が背景場を変動させ、その結果、元の Alfvén 波の位相を変えることが確認できた。

4 まとめ

今回はスーパーコンピュータを用いることで、安定性は高いが計算量が高い計算手法を用いた数値モデルを開発し、研究に活用することができた。その結果、Alfvén 波の伝搬に伴って密度減少や、位相混合が起こる物理過程を統一的に再現することができた。今後は、より長い時間発展や小さな空間スケールまで計算への拡張や、境界条件の改良、より高精度な数値計算スキームの採用を行うことで、実際の観測との比較が可能な数値モデルを目指し、オーロラ発展における基礎物理過程の解明を目指す。

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] Harten, Lax, Leer 1983
- [2] Liu, Osher, Chan 1994
- [3] Streltsov and Lotko, 2008
- [4] Lysak and Song, 2008