

磁気圏-電離層結合系における電子加速とオーロラ構造発達に関するシミュレーション研究

課題責任者

藤田 慶二

核融合科学研究所

著者

藤田 慶二^{*1}, 渡邊 智彦^{*2}, 榊 剛志^{*2}, 武藤 紘生^{*2},

^{*1} 核融合科学研究所, ^{*2} 名古屋大学大学院理学研究科

キーワード: オーロラ, 磁気圏, 電離層, Alven 波, フィードバック不安定性

1. 磁気圏-電離層結合系の非線形シミュレーション

磁気圏中で磁力線に沿って加速される荷電粒子と電離層における中性大気との衝突の結果生じるオーロラ発光, およびその多様な密度構造の発達, 磁気圏と電離層の複雑な電磁的相互作用の産物である。我々は, この磁気圏-電離層 (M-I) 結合系において, 磁気圏と電離層を往來する Alfvén 波と電離層内の密度波が共鳴成長するフィードバック不安定性と呼ばれる機構に着目し, Alfvén 波が形成する平行電場による粒子加速から, オーロラ構造に対応する電離層密度構造の発達という一連の現象を統一的に解析するため, 種々のシミュレーションモデルの開発を進めている。

これまで, 非線形な簡約化磁気流体 (MHD) モデルによる, 一様な背景分布を持つ特定の磁力線周辺領域を想定した局所的なシミュレーションにより, フィードバック不安定性によるオーロラアーク構造の線形成長と, 二次的に誘発される Kelvin-Helmholtz 不安定性による渦構造の生成および乱流状態への移行が実演されている [1, 2]。さらに, ジャイロ運動論に基づき, この局所モデルを運動論的に拡張することで, 平行電場を介した波動粒子相互作用を取り入れることにも成功している [3]。本研究では, これらのモデルをさらに拡張することで, より精巧なシミュレーションを実行する。

2. 非線形加速シミュレーションのためのジャイロ運動論的モデルの拡張

通常のジャイロ運動論的オーダーリングに基づく, 平行電場による非線形加速に関わる非線形項は高次の微小項となり無視されることが多い。しかし, オーロラ電子加速とその結果生じる特徴的な測度分布構造を解析するためには, この項の影響は不可欠である。そこで, ジャイロ運動論的モデルを拡張に, 非線形加速項を導入することで, M-I 結合系におけるオーロラ電子の非線形加速シミュレーションを実行した。

図 1 は, 非線形加速項を考慮していない場合 (上) と考慮した場合 (下) で, 磁気圏から電離層に向かって降込み電子の微分エネルギーフラックススペクトルを示しており, 横軸は時間, 縦軸はエネルギーレベル, カラーマップの色がフラックスの強さを表している。上下の図を比較することで, 非線形加速項により, フラックスの強さとエ

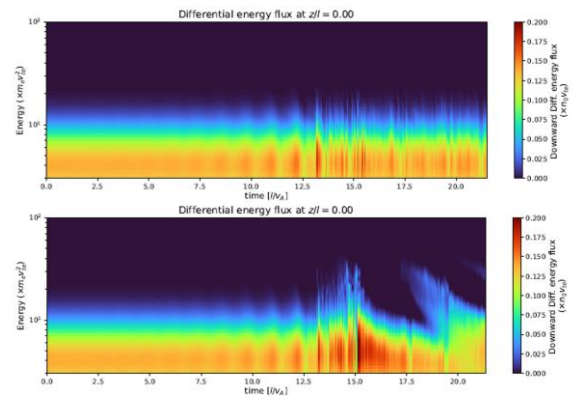


図 1 非線形加速項を考慮していない場合 (上) と考慮した場合 (下) の降込み電子の微分エネルギーフラックススペクトル。

ネルギーレベルともに増幅が起きていることが確認できる。

3. 非局所双極子磁場配位でのオーロラ構造の非線形発達

双極子磁場形状に沿った数値格子上で磁気圏プラズマをモデル化し, 簡約化磁気流体方程式を解くことでオーロラ構造の非線形発達に関するシミュレーションを実現した。従来の二重周期境界条件を課した局所シミュレーションでは, オーロラ構造の乱流遷移過程が詳細に調べられてきたが [1, 2], 新たに開発したモデルでは, 緯度方向への伝播に伴うオーロラ構造の非局所的な成長過程を調べることが可能となった [4]。

初期に波束構造として与えられた電離層密度擾乱が垂直電場によって低緯度方向に伝播しながらフィードバック不安定性により成長する過程を図 2 に示す。経度方向 (図の上下方向) に長く伸びた縞状構造をもつ密度擾乱は不安定性により増幅される。やがて密度が増大した領域の後方に Kelvin-Helmholtz 不安定性によって渦構造が発達し, 乱流状態に遷移する様子が見て取れる。乱流への遷移後, 擾乱が緯度方向に急速に広がる現象が新たに見出された。また, オーロラの渦構造については, 反時計回り成分が選択的に強められることがシミュレーションから明らかとなり, 理論的な検証とも整合的な結果が得られた。

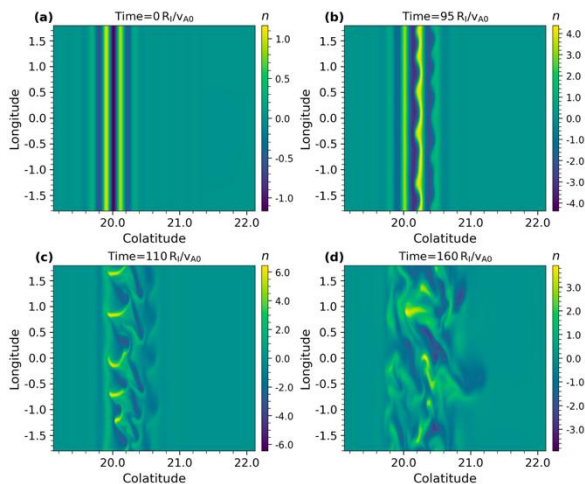


図 2 非局所双極子磁場配位を用いた磁気圏-電離圏結合のシミュレーションで得られた電離層上でのオーロラ密度擾乱の各時刻での分布。

4. 磁気圏-電離圏結合におけるバルーニング不安定性の非線形シミュレーション

これまでの M-I 結合系のシミュレーションでは、上記の例を含め、大域的な圧力分布は十分小さいと仮定し、(分散性) Alfvén 波を介したフィードバック不安定性を主な対象としてきた。一方、磁気圏プラズマの背景圧力勾配が大きくなると、バルーニング不安定性という別種の不安定性が現れ、両者の競合過程が存在することが理論的に指摘されてきた[5]。そこで本研究では、局所双極子磁場の下で背景圧力分布と圧力揺動を取り入れた M-I 結合系のシミュレーションモデルを新たに開発した。これを用いた線形解析から、従来の理論解析では予測されていなかった磁力線方向に最低次のモード構造を持つバルーニング不安定性が成長し得ることを見出した。さらにこの不安定性を含む非線形シミュレーションを実現し、非線形状態での渦構造の発達を介して、最終的に圧力揺動をともなった乱流状態へ遷移することが明らかとなった。

謝辞

本研究は、科研費(22H00116)の助成を受けて実施された。

文献

- [1] Watanabe, T.-H., Kurata, H., & Maeyama, S. “Generation of auroral turbulence through the magnetosphere-ionosphere coupling”, *New Journal of Physics*, 18 (12), 125010, 2016.
- [2] Watanabe, T.-H., Fujita, K., & Maeyama, S. “Growth of auroral structures, vortex formation, turbulence transition, and energy cascade in Alfvénic magnetosphere-ionosphere coupling”, *Geophysical Research Letters*, 52 (20), 2016

[3] Watanabe, T.-H., Fujita, K., & Maeyama, S. “Nonlinear gyrokinetic simulation of the feedback magnetosphere-ionosphere coupling”. Submitted to *Geophysical Research Letters*.

[4] Sakaki, T., Watanabe, T.-H., & Maeyama, S., “Convective growth of auroral arcs through the feedback instability in a dipole geometry”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(12), 2024.

[5] Watanabe, T. -H. “Feedback and ballooning instabilities in the magnetosphere - ionosphere coupling”, *Geophysical Research Letters*, 47(12), 2020.