

学位申請論文公開講演会

日時：2026年1月26日(月) 9:00~

申請者： 柿 剛志 (P研)

場所：理学南館 1F セミナー室

題目：論文題名

Global Simulation of Auroral Structure Evolution in the Magnetosphere-Ionosphere Coupling System
(磁気圏-電離圏結合系におけるオーロラ構造発達の大域的シミュレーション)

主論文の要旨

オーロラの形成には磁気圏と電離圏のプラズマ相互作用が重要と考えられている。オーロラを輝かせる荷電粒子の加速機構やカーテン状構造の形成、渦巻く運動のメカニズムは未解明な点が多い。

磁気圏と電離圏の結合系における自発的なオーロラ構造形成を説明する理論として、磁力線に沿って伝播する磁気流体波（シアアルヴェン波）と電離圏のプラズマ密度揺動の共鳴によって生じる不安定性（フィードバック不安定性）があり、オーロラ形成に関する理論・数値シミュレーション研究が行われてきた。この不安定性の成長率は磁力線長や電離圏のプラズマ密度、電場強度などに依存するため、それらのパラメータの空間的不均一性は不安定性を介した非局所的なオーロラの成長過程に影響を及ぼすと考えられる。

双極子磁場配位におけるフィードバック不安定性の解析を行うため、三次元のシミュレーションコードを開発し、背景場の空間的不均一性がオーロラ発達過程に及ぼす影響について調査した。二次元線形シミュレーションから、初期揺動が背景電場により緯度方向へ伝播しながら不安定性によって振幅が増幅されることが示された。さらに、磁力線長の変化によって揺動が不安定条件から外れることで成長が飽和し、減衰に転じることが示された。東西に長く伸びたオーロラ構造（オーロラアーク）を特徴づける揺動は局所分散関係を満たしながら伝播する。また、背景電場が非一様性は、揺動の位置における不安定性の成長率を変化させることで、成長の飽和時間や振幅に影響を及ぼすことが明らかになった。

三次元の非線形シミュレーションから、フィードバック不安定性による振幅の増大によって二次不安定性が誘起され、アーク構造が変形することが明らかになった。非線形効果によって形成される電離圏密度の渦構造は、その高密度領域が選択的に反時計回りの運動を示す。その後、渦状の構造は乱流状の微細構造へと変化し、緯度方向へ拡大することが示された。乱流状態での揺動のエネルギースペクトルは従来の研究や衛星観測と大きく矛盾しない。背景電場強度の不均一性を考慮した場合、渦構造が形成される一方で非線形段階では高波数の揺動が減衰し、空間スケールが大きい構造が支配的となることが示された。

これらの結果はフィードバック不安定性によるオーロラ形成理論の有効性と、大域的な成長に背景場の空間的不均一性が影響を及ぼすことを示している。また、現実に観測されるオーロラの自発的発達を説明する手がかりを与え、オーロラ形成におけるアルヴェン波を介した磁気圏-電離圏結合系ダイナミクスの重要性を示唆している。