

(別紙様式-2)

核融合理論と磁気圏プラズマの高性能計算モデリングの融合研究
Interdisciplinary Research on Nuclear Fusion Theory and HPC Modeling of Magnetospheric Plasma

渡邊智彦 名古屋大学・大学院理学研究科

【研究目的】

地球や木星などの固有磁場を持つ惑星は磁気圏を形成し、高温プラズマをその内部に閉じ込めるとともに、プラズマ波動や荷電粒子の振り込みを介して惑星電離層との結合系を形成している。一方、磁場閉じ込め核融合装置は、磁場により高温プラズマをその内部に保持する点で、磁場強度やプラズマ温度に数桁の違いはあるが、磁気圏プラズマと多くの共通した物理現象を内包している。磁気核融合研究では、強い非平衡状態にあるプラズマが引き起こす多様な不安定性を回避し安定な閉じ込め状態を実現するために、精緻なプラズマ理論が構築されてきた。中でも、簡約化磁気流体理論とジャイロ運動論は、プラズマの安定性と緩和現象、微視的乱流輸送などの問題に定量的にアプローチするための有用な手法として幅広く研究が進められてきた。本課題では、高性能計算科学の手法を援用し、核融合プラズマ理論を磁気圏・電離圏プラズマ研究に応用することで、これらの融合研究の推進を目的とする。

【研究方法】

課題2年目である令和6年度には、当初計画に沿ったテーマとして、(1) 非局所簡約化磁気流体モデルを用いた磁気圏-電離圏結合系におけるオーロラ発達の非線形シミュレーション、(2) バルーニングモードを含めた磁気圏-電離圏結合のための局所簡約化磁気流体シミュレーションコードの開発、(3) ジャイロ運動論を用いたオーロラ発達と電子加速の非線形シミュレーション研究、(4) ジャイロ運動論的シミュレーションコードの双極子磁場配位への拡張、の課題に取り組んだ。

上記(1)に挙げたオーロラ発達の非線形シミュレーションについては、本課題で進めてきた研究をもとに、2024年度名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクトにおいてHPC人材育成枠で課題が採択されており(代表者・榑剛志)、情報基盤センター、ISEE、ならびに物理学教室の協力のもとで実施された。当該プロジェクトについては、2025年度も引き続き採択されており、若手研究者育成の視点からも有意義な成果が得られている。

上記(3)に挙げた課題については、スーパーコンピュータ「富岳」の利用申請が再度採択され、大規模なジャイロ運動論的シミュレーションを用いた解析を継続的に進めている。

項目(4)では、ジャイロ運動論的シミュレーションコードGKVを双極子磁場配位へと拡張し、同時に生じた数値的困難を克服するための新たな数値手法を考案するとともに、コードへの実装とベンチマークテストを実施した。より詳しい内容について次の【研究成果】の項にまとめる。

また、今年度の新たな取り組みとして、(5)磁気圏プラズマやオーロラの衛星観測を専門とする研究者(ISEE・平原、東北大・坂野井)との共同研究として、「れいめい」衛星が観測したオーロラ動画の解析を開始した。シミュレーションとの比較の上で、興味深い成果が得られつつある。さらに、(6)磁気圏-電離圏結合におけるオーロラ発達の理論モデルから得られる予測と磁気圏観測との比較についても課題メンバーで議論を開始している。

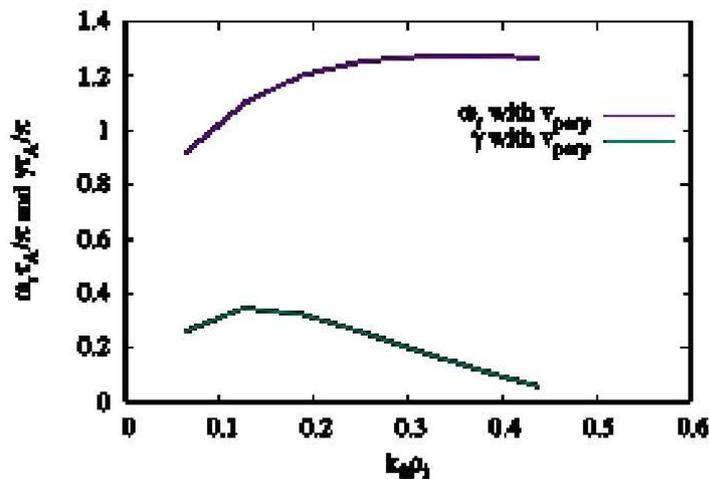
以上の研究テーマについては、本課題終了後も共同研究として継続的に進めていく予定である。

【研究成果】

(4) ジャイロ運動論的シミュレーションコードの双極子磁場配位への拡張

これまでに、開発した電離圏モジュールをジャイロ運動論的シミュレーションコードGKVに組み込むことで、磁気圏-電離圏結合系の運動論的解析を実現してきた。これはオーロラ構造の発達と乱流遷移、

粒子加速を同時に扱うことのできる独自性の高いアプローチであるが、これまでの解析は直線磁場形状の場合に限られていた。磁場ドリフトや磁気ミラー力などを含めて、実際の磁気圏プラズマをより正確に取り扱うには、双極子磁場配位への拡張が必要となる。しかし、従来のコードでは、平行方向速度と磁気モーメントを速度空間座標として採用しているため、双極子磁場のように強い磁場強度不均一性を持つ系においては磁気ミラー力が非常に大きくなり、時間積分を数值的に実行する際に厳しい制約が課されるため、オーロラ領域への適用に大きな困難があった。この問題点を克服するために、速度空間座標として磁気モーメントの代わりに磁場垂直方向速度成分を座標として用いることができるようにGK Vコード拡張した。従来の手法とは、入力パラメータひとつで切り替えが可能であり、ベンチマークと保守が容易に実施できるように実装されている。



上図は、新しいコードを用いて行った磁気圏-電離圏結合系におけるフィードバック不安定性の線形解析の結果から、周波数と成長率の波数依存性をプロットしたものである。新しいコードを用いることで、従来は解析不可能であった電離層高度で磁気緯度60度のサブオーロラ領域においても、安定な解析を実行することができた。その結果、直線磁場の場合に比べて成長率の低下が認められるが、強い磁場不均一性とミラー力を伴う双極子磁場配位においても、オーロラ領域に近い磁気緯度でフィードバック不安定性が存在することを確認できた。

本研究の成果については、日本物理学会およびプラズマ・核融合学会で発表した。

【成果発表】

本課題で令和5年度より進めてきた非局所簡約化磁気流体モデルを用いた磁気圏-電離圏結合系におけるオーロラ発達については、その成果の一部をJournal of Geophysical Research誌に発表した。

Sakaki, T., T-H. Watanabe, and S. Maeyama, “Convective growth of auroral arcs through the feedback instability in a dipole geometry”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **129**, 12 (2024): 32 023JA032407.

さらに、従来から進めてきた局所簡約化磁気流体モデルを用いたフィードバック不安定性の非線形発展と乱流遷移についても論文として取りまとめ学術雑誌に投稿中である。