

(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】

磁場閉じ込め核融合では、数テスラを超える強力な磁場で1億度におよぶ高温プラズマ（電離したガス）を閉じ込めることで、核融合反応を連鎖的に発生させることを目指している。この系は、磁場強度やプラズマ温度に数桁の違いはあるが、地球や木星などの磁化惑星周辺におけるプラズマ環境と類似しており、また太陽や他の天体にも同様に強く磁化したプラズマが存在する。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。特に低周波数領域においては、磁場による非等方性を適切に取り入れた簡約化磁気流体方程式とそれを用いた安定性解析理論や非線形シミュレーションが発達してきた。また、超高温プラズマにおいては、粒子運動論効果や二流体効果が顕著となることから、ジャイロ運動論と呼ばれる理論が、近年、長足の進歩を遂げてきた。本研究では、磁気核融合研究で培われた理論に基づき、かつ、高性能計算科学の手法を援用して、地球磁気圏プラズマの数値シミュレーション研究を進展させ、核融合、宇宙プラズマ、計算科学の融合的研究の推進を目指している。

【研究方法】

課題実施初年度である令和5年度においては、(1) 簡約化磁気流体方程式を用いた磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーション、および、(2) ジャイロ運動論的方程式にもとづくオーロラ発達と電子加速の統合シミュレーション、という二つの課題を設定した。いずれも、磁気核融合研究で培われた理論解析手法を用いており、磁場垂直方向には波長が短く磁場平行方向には長い波長を持つ磁気流体的揺動を扱う。そのうち、(1)は緯度・経度方向の非局所性を取り入れることのできる流体シミュレーションによって、磁気圏・電離圏のグローバルな構造がオーロラの成長・発達へ及ぼす影響を調べることができる。(2)では、プラズマの運動論と呼ばれる理論を用いて、オーロラ成長にともなう電子加速を自己無撞着に再現することを目指した課題である。本課題の支援を受けて、名古屋大学情報基盤センターにあるスーパーコンピュータ「不老」を用いて、(1)の非線形シミュレーションと(2)のテスト計算を行った。より大規模な計算資源を必要とする(2)の非線形シミュレーションには、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した。

本融合研究課題に関連して、地球磁気圏研究を専門とする宇宙地球環境研究所の三好教授と家田助教、ならびに課題参加メンバー間で2023年12月に研究打ち合わせを行った。そこでは、数値シミュレーション結果と衛星・地上観測との比較に向けたアプローチについて議論し、また、今後の理論・数値モデル拡張の方向性について検討を行った。

また、本課題からの支援をもとに、磁気圏-電離圏結合研究において国際的に著名な研究者であるR. Lysak教授（ミネソタ大学）とC. C. Chaston博士（カリフォルニア大学）を2024年3月に訪問し、本課題で得られた結果を含む最新の研究成果について議論を行った。Lysak教授からは、木星磁気圏への応用に関して提案をいただき、また、Chaston博士からは、MMS衛星をはじめとした観測結果との比較などにおいて協力いただけることとなった。

【研究成果】

(1) 簡約化磁気流体方程式を用いた磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーションについて、従来より開発を進めてきたシミュレーションコードを用いて、線形近似の下でオーロラ構造発達の解析を行った。初期に与えた波束状の密度擾乱が、背景対流電場の方向へと電離層上を伝播しつつ、増幅され

る過程を解析した。個々の擾乱は低緯度側へと伝播しながら成長と飽和・減衰を行うが、波束全体としてはフィードバック不安定性と呼ばれる物理機構を介して増幅され、緯度によって異なる磁力線長をもつ磁気圏プラズマ中であっても、局所的な分散関係を満たしつつ低緯度側へと伝播しながらオーロラ構造が発達していく様子が明らかになった。ここまでの成果を論文としてまとめ、国際学術雑誌に投稿した。

引き続き、非線形性を考慮した磁気圏-電離圏結合の非局所流体シミュレーションを行った。非局所モデルにおいても、不安定性を介して発達した擾乱が十分大きな振幅まで成長すると、それに伴う磁場垂直方向の速度変動から2次的な不安定性が成長することが確かめられた。図1に異なる時刻での電離層密度擾乱分布を示す。時刻 $390 R_l/V_A$ では、縞状のオーロラ構造中に渦が発生し、密度の増大領域が反時計回りに回転する様子がわかる。ここで、 R_l は地球中心から電離層までの距離を、 V_A は磁気流体波の伝播速度をそれぞれ表す。時間の経過とともにさらに擾乱が発達すると、その渦はより細かな渦を生成し、乱流状態へと遷移することが明らかになった (図1右)。この乱流状態において、経度方向の波数スペクトルを見ると磁気流体乱流に特徴的な冪乗則を満たしていることが確かめられた。

この成果を踏まえ、本課題について2024年度名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクトにHPC人材育成枠で応募し採択いただくことができた (代表者・榊剛志)。

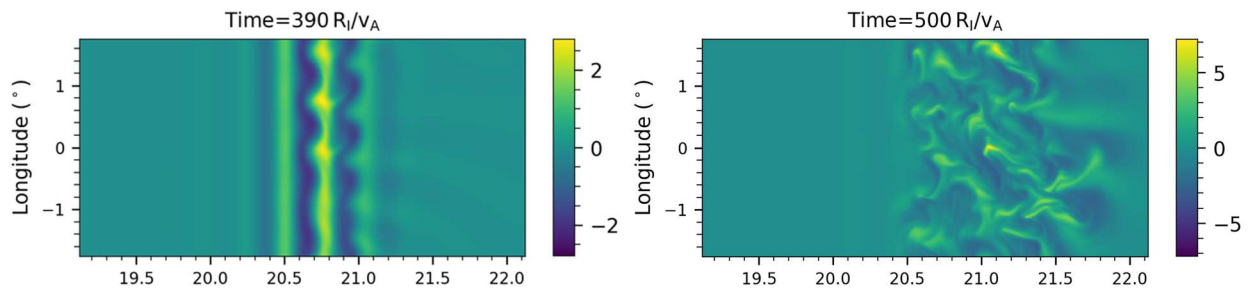


図1：磁気圏-電離圏結合の非局所シミュレーションで得られた電離層密度擾乱分布

- (2) ジャイロ運動論の方程式にもとづくオーロラ発達と電子加速の統合シミュレーションモデルを開発し、2023年度下期よりスーパーコンピュータ「富岳」を用いた解析を開始し、その初期結果を得た。ここでは直線磁場形状を仮定し、局所的な磁気圏-電離圏結合系を考えている。流体モデルの場合と同様に、磁気流体波を介して磁場に沿った電流が運ばれ、電離層上のプラズマ密度が変化する。背景電場が十分大きな値となると、上述のフィードバック不安定性が発達し、オーロラ構造に対応する擾乱が成長する。ここでは、磁気圏プラズマの記述にジャイロ運動論を用いることで、オーロラ発達とともに、磁気流体波による電子加速を自己無撞着に取り扱うことが可能となった。このシミュレーションにより、オーロラ発達をもたらす不安定性の非線形飽和過程において、正味の電子加速が生じることが確かめられた。この成果により、オーロラ発達と電子加速を同時に説明することが可能となり、人工衛星で観測されているアルヴェン・オーロラの成因に首尾一貫した理解を初めて与えることができた。

【成果発表】

上述の研究成果について以下の国際学会にて発表を行なった。他に国内学会・研究会にて、12件の発表を行った。あわせて学術論文1編を投稿中である。

1. T.-H. Watanabe, T. Sakaki, K. Fujita, and S. Maeyama, “Simulation of auroral turbulence driven in feedback M-I coupling system”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Port Messe Nagoya, Nagoya, Nov. 12-17, 2023) (Invited talk).
2. K. Fujita and T.-H. Watanabe, “A nonlinear gyrokinetic model of the magnetosphere-ionosphere coupling system”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Port Messe Nagoya, Nagoya, Nov. 12-17, 2023) (Contributed poster presentation).