

多流体磁気流体シミュレーションを用いた衛星エウロパにおける電離圏空間分布時間変化の解明

Multi-fluid MHD Simulation for spatiotemporal variation of Europa's ionosphere

研究代表者：佐藤晋之祐

(東北大学理学研究科地球物理学専攻)

研究目的 (Research Objective):

衛星エウロパは木星から約 9.4 木星半径離れた位置を公転する衛星で、表面を水氷で覆われている。内部にエネルギー源を持たないが、衛星の公転速度よりも速い速度で共回転する木星磁気圏(～100 km/s)から高エネルギープラズマの照射を受けることで外的にエネルギーを獲得し、希薄大気の生成と損失を常に経験し続けている。生命存在可能性が広く議論される中、エウロパ大気と木星磁気圏の結合について時空間的に理解することはエネルギー供給の観点で重要である。

エウロパの中性大気に木星磁気圏プラズマが衝突することによって電離圏が形成される。これは大気の視点では損失過程の一つである。磁気圏の共回転による遠心力を駆動源とする交換型不安定性やプラズマインジェクションなどによって、磁気圏プラズマには疎密が存在する(Fig.1)が、電離形成において磁気圏プラズマの密度は電離度に直接影響する。そこで本研究では、先行研究では一様として仮定されていた磁気圏プラズマの密度や温度に分布を与えて数値計算を行った。



Fig.1: 木星磁気圏プラズマとエウロパ中性大気の衝突に伴う電離圏形成の模式図。磁気圏の経度方向にプラズマ密度の疎密が存在し、それらがエウロパ中性大気に衝突する。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、木星磁気圏の衝突プラズマについて経度方向の疎密構造を取り入れた多流体モデル計算を行った。多流体磁気流体力学シミュレーションコード「MAESTRO (Sakata et al., 2024)」をエウロパ周辺のプラズマ環境に適用し、3次元的にエウロパにおける電離や化学反応の過程を計算することで、エウロパ電離圏の時空間構造を模擬する。「MAESTRO」は惑星や衛星など天体とその周辺の磁気流体

の運動ならびに化学反応を三次元で計算するもので、天体周辺に三次元の計算領域である空間グリッドを設定し、それらを分割し、MPI 通信による並列計算を行う。

研究成果 (Accomplishments) :

「MAESTRO」を木星磁気圏と氷衛星(エウロパ・ガニメデ)に適用するためのチューニング作業を行なった。チューニング作業では、木星磁気圏と、衛星中性大気のパラメータは時間方向に一定とした。初期条件として、衛星固体内部に背景磁場が貫通するという仮定を置いた。これは物理に基づかない仮定ではあるが、衛星表面におけるプラズマの湧き出しを防ぐために必要な施策である。木星磁気圏は、氷衛星近傍では sub-Alfvénic であり、太陽風と惑星の相互作用とは異なり前面にショックは生じない($\beta \sim 0.06$)。「MAESTRO」における計算でもショックが生じないことを確認した(Fig.2)。また、探査機フライバイで確認されていた Alfvén wing の構造も再現できており(Fig.3)、チューニング作業は順調に進んでいると考えている。しかし、チューニング作業に時間を要したため、今年度中に磁気圏プラズマ密度の時間変動を取り入れた計算まで達成できなかったことから、次年度以降に改めて磁気圏時間変動とエウロパ電離大気形成の時空間構造の解明を進める予定である。

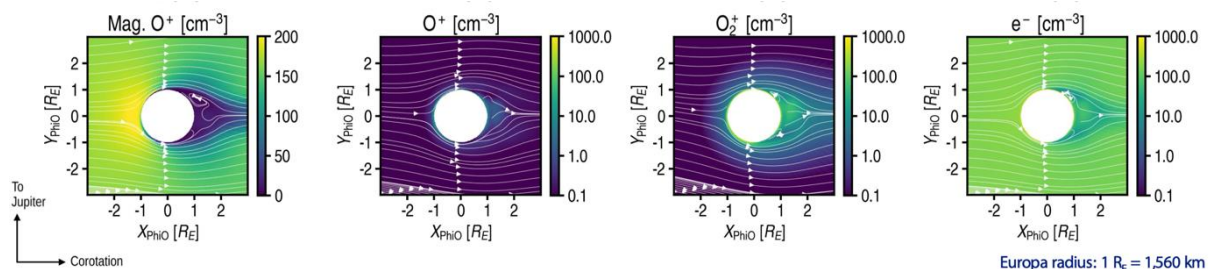


Fig.2: 磁気圏パラメータを時間方向に一定と仮定した計算によるエウロパ周辺における荷電粒子の赤道面密度分布。左から順に、磁気圏由来 O⁺、エウロパ由来 O⁺、O₂⁺、電子。

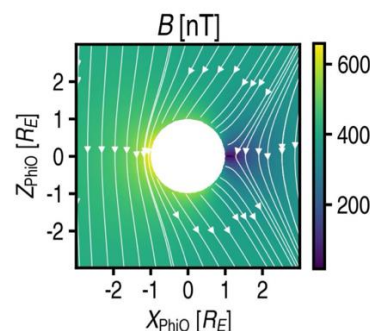


Fig.2: エウロパにおける磁場構造(子午面分布)。下流(+X 方向)に向かって Alfvén wing が形成されている。

公表状況 (Publications) :