

高精細プラズマバブルモデルと全球大気圏電離圏モデルの融合

Integration of high-resolution plasma bubble model and whole atmosphere-ionosphere model

研究代表者：横山 竜宏 (京都大学生存圏研究所)
yokoyama@rish.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：陣 英克 (情報通信研究機構)
jin@nict.go.jp.jp
担当：全球大気圏電離圏モデル (GAIA) の開発・実行

品川 裕之 (情報通信研究機構)
sinagawa@nict.go.jp.jp
担当：全球大気圏電離圏モデル (GAIA) の開発・実行

市野 達也 (京都大学情報学研究科)
ichino.tatsuya.28a@st.kyoto-u.ac.jp
担当：電場計算ルーチンの高速化

研究目的 (Research Objective):

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。特に、下層大気で励起された大気重力波は、電離圏高度で大きな振幅を持つため、電離圏の変動に重要な役割を果たすと考えられている。また、局所的なプラズマ密度の不規則構造を伴う電離圏擾乱が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動(シンチレーション)が生じるため、GPS 等による電子航法に障害を及ぼすことが知られている。このような電離圏擾乱の発生機構を解明し、発生を事前に予測することが、科学・実用の両面から求められている。本研究では、特に深刻な障害の原因となる赤道スプレッド F (プラズマバブル) の生成機構解明と発生予測を目指し、低緯度電離圏数値モデルを用いたプラズマバブル生成に関する研究を実施する。全球の大気圏電離圏結合モデルである GAIA モデルに高分解能のプラズマバブルモデルを階層的に結合させ、現実的な背景の条件においてプラズマバブルの発生条件について検討を行う。また、分解能をさらに向上させることで、シンチレーションを起こすスケール(300-400m)の密度構造を直接再現し、短波帯の電波伝搬、測位衛星信号に発生するシンチレーションの定量的な評価へとつなげることを目指す。

計算手法 (Computational Aspects):

地球電離圏は弱電離プラズマ気体であり、地球磁場と中性大気との衝突の影響によりイオンと電子は異なった運動を示し、導電率に異方性を持つ。従って、イオンと電子の2流体を考慮する必要がある、イオンと電子の速度差から得られる電流密度の発

散が 0 となる条件から電離圏内で発生する電場を求めることができる。その電場を用いてイオン速度を求め、プラズマ密度の連続の式から 1 時間ステップ後のプラズマ密度分布を更新する。現在までに開発されてきた High-Resolution Bubble (HIRB) モデルに改良を加えることで、全経度範囲をカバーする数値モデルの作成を目標とする。正イオンとして NO^+ (E 領域) と O^+ (F 領域) の 2 種類を与える。磁気赤道を中心とするダイポール座標系を用い、磁気赤道上で高度 88-1270km、緯度方向に約 20 度の計算領域を確保する。昨年度には、計算領域を全経度域に拡張し、周期境界条件を仮定しないモデルの開発を行った。計算領域の増加により計算量・時間ともに大幅な増大が見込まれるため、計算の高速化も重要な開発課題であることが明らかとなった。今年度は、主に計算アルゴリズム、特にポアソン方程式を解いて分極電場を求める部分の高速化に着手した。

研究成果 (Accomplishments) :

電流保存の式から導出されるポアソン方程式は、空間方向に差分を取ることで大規模な連立一次方程式帰着される。この連立方程式は非常に疎な行列を係数に持つため、反復解法で計算を行う。MPI による領域分割を行っているため、反復アルゴリズムのベクトル内積計算部分で反復毎に通信が生じる。この効率化のために、まずノード数、スレッド数を変化させた場合の実行時間の变化について検討した。ノード数は、磁力線直交方向に領域分割し、各領域を 1 ノードに割り当てており、 2×2 と 4×4 ノードの場合について検討した。Fig.1 にスレッド数を 1 から 16 まで変化させた場合の速度向上率を示す。総コア数は同じで空間解像度を 2 倍、すなわちメモリ量が 2 倍となった場合について示している。いずれのケースにおいても、スレッド数 8 程度までは理想的な速度向上を見せているが、スレッド数 10 を超えたあたりから向上率の鈍化がみられる。本モデルにおいては、スレッド並列数を 8 として計算を実施することが適切であることが確かめられた。

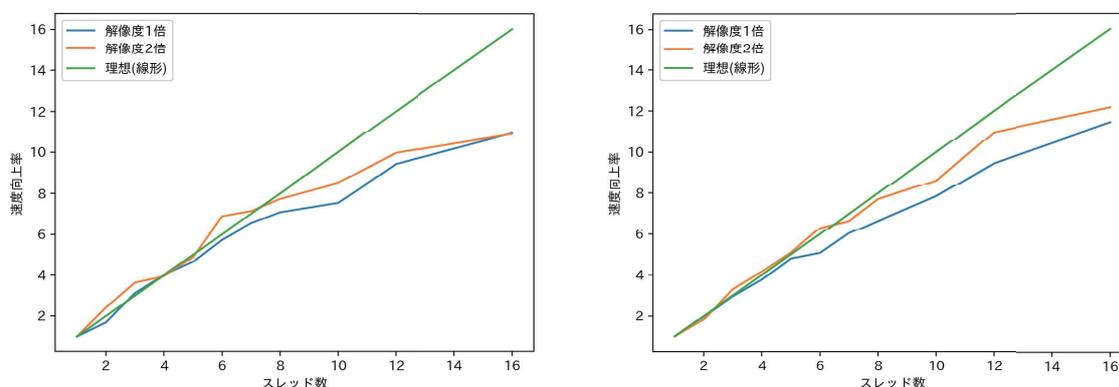


Fig.1: ノード数を固定し、スレッド数を変化させた場合の速度向上率。
左図は 2×2 ノード、右図は 4×4 ノードの場合を示す。

また、総コア数を一定とした場合に、ノード数、スレッド数の割り当てによって実行速度に変化が見られるかどうか検討した。小規模な計算の場合、ノード数の増加は通信オーバーヘッドの増大の原因となって実行時間が増加したが、計算領域が大規模になるにつれてその傾向は逆転し、ノード内のスレッド並列の効率悪化による実行時間の増大が顕著となった。

次に、連立方程式の解法アルゴリズムについて検討を行った。メインの計算アルゴリズムは、これまでに様々な検討を行った結果、BiCG(双共役勾配法)と呼ばれるアルゴリズムから派生した BiCGstar と名付けられたアルゴリズムを使用している[Fujino and Murakami, 2013]。一方、行列の条件数を改善するための前処理については、近似逆行列をノイマン級数で構成する手法を用いている。ここで、ノイマン級数による逆行列の近似は

$$(I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \dots$$

と表される。この多項式の項数を多く取るほど逆行列の精度が高くなるため反復回数の減少が期待される一方、1反復当たりの計算量が増加するため、ある最適な項数が存在すると考えられる。Fig.2 にノイマン級数の項数に対する反復回数と実行時間の推移を示す。項数が少ない間は反復回数と実行時間もともに急激に減少するが、反復回数の減少効果は徐々に鈍化し、実行時間は項数 50 付近から増加に転じる。前処理を行わない場合に比べて実行時間は約 1/2 に減少しており、この前処理を導入することで大幅な実行速度の向上が見込まれる。

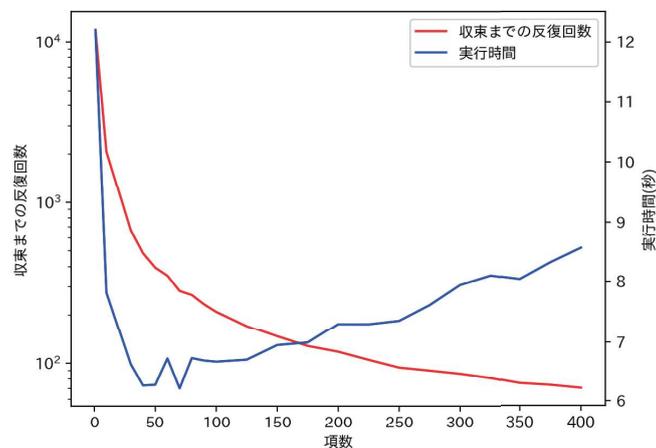


Fig.2: 前処理のための近似逆行列を構成するノイマン級数の項数と、反復解法の反復回数と実行時間の関係

今後は、昨年度に開発した全経度域をカバーするモデルに本前処理手法を導入し、全球モデル GAIA との結合に向けた開発を継続して実施する予定である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Shinagawa, H., C. Tao, H. Jin, Y. Miyoshi, and H. Fujiwara, Numerical prediction of sporadic E layer occurrence using GAIA, *Earth, Planets and Space*, 73:28, doi:10.1186/s40623-020-01330-y, 2021.

(口頭)

1. Yokoyama, T., and T. Komoto, Development of Multi-scale Numerical Simulation Model for the Study on Ionospheric Disturbances, Asia Oceania Geosciences Society 18th Annual Meeting [Virtual: August 2021].
2. 横山 竜宏, 杉野 創, 高木 理絵子, 劉 鵬, 山本 衛, 赤道大気レーダーで観測されたプラズマバブルと150km エコーの長期統計解析, 第15回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム [Virtual: 2021年9月].
3. 横山 竜宏, 高木 理絵子, 山本 衛, 穂積 コンニャナツ, 埜 千尋, 品川 裕之, 赤道大気レーダーを用いた金環日食時の電離圏 E 領域不規則構造の研究, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会 [Virtual: 2021 年 6 月].
4. 横山 竜宏, 古元 泰地, 電離圏擾乱の研究に資するマルチスケール数値シミュレーションの開発, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会 [Virtual: 2021 年 6 月].
5. 横山 竜宏, 古元 泰地, 電離圏擾乱の研究に資するマルチスケール数値シミュレーションの開発, STE シミュレーション研究会・KDK シンポジウム合同研究会 [Virtual: 2021 年 3 月].
6. 横山 竜宏, 高精細プラズマバブルモデルの現在と今後の展望, 2020 年度 ISEE 研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」 [Virtual: 2021 年 3 月] (Invited).
7. 横山 竜宏, 古元 泰地, 高精細プラズマバブルモデルと GAIA モデルの結合に向けたマルチスケール数値モデルの開発, GAIA 研究会 [Virtual: 2021 年 3 月] (Invited).