

データ同化を用いた地球磁気圏 MHD シミュレーションのモデルパラメータ最適値推定

才田 聡子 データ同化センター 情報・システム研究機構特任研究員

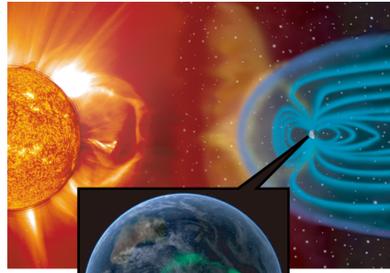
オーロラについて

グローバルMHDシミュレーションモデルの磁気圏・電離圏 結合領域におけるパラメータ感受性

太陽風に対する地球磁気圏・電離圏の応答

太陽風中のプラズマが地球大気中の酸素原子、窒素分子などに衝突すると、酸素原子、窒素分子は特有の光を発する。これがオーロラである。

宇宙空間のプラズマは磁力線に沿って移動するためオーロラの動きや形に太陽風に対する磁気圏や電離圏の様子が反映されている。



地球磁気圏MHDシミュレーション

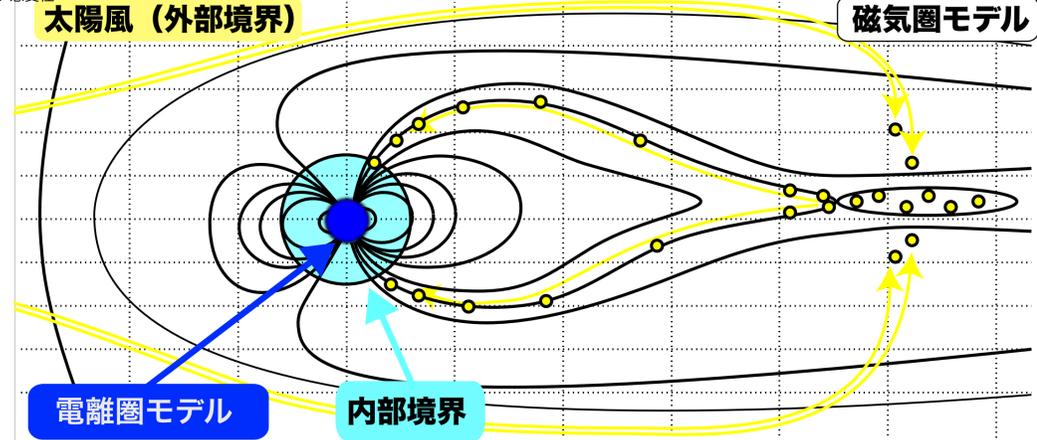
太陽風の変化に対する磁気圏・電離圏の応答を調べるために電磁流体(Magnetohydrodynamic; MHD)方程式を使い、地球磁気圏の電磁流体としての振る舞いは数値シミュレーションで再現できる。

本研究の目標

本研究ではデータ同化手法を用いてシミュレーションモデルのパラメータの最適値を推定し、オーロラの動きや形を支配する物理過程の再現を試みる。



シミュレーションと可視化システム



磁気圏MHDシミュレーションと3D可視化システム

地球磁気圏MHDシミュレーションはMHD方程式を基礎方程式とする磁気圏モデルとHall-Pedersen電流系を基礎方程式とする電離圏モデルで構成される。(Tanaka et al., 2010)

また、AVS Express/Developerでオーロラの発達過程を可視化ツール上再現し解析している。

シミュレーションモデルの課題

太陽風 (外部境界)

磁気圏モデル

内部境界

電離圏モデル

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma \nabla \Phi_I &= G_m (\text{rot} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_b) = J_{\parallel} \\ \sigma &= \sigma_{EUV} + k_2 \sigma_{Diff}(P, \rho) + k_3 \sigma_J(J_{\parallel}) \\ \Phi_m &= \Phi_I - k_4 f_2(J_{\parallel}) |J_{\parallel}| \\ \mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b) \mathbf{n}_b &= -\rho \nabla \Phi_m \times \mathbf{B}_0 / B_0^2 \\ \frac{\partial (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b)}{\partial l_b} &= 0 \\ \rho &= \rho_b, P = P_b \quad (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b > 0) \\ \frac{\partial \rho}{\partial l_b} = \frac{\partial P}{\partial l_b} &= 0 \quad (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_b < 0) \end{aligned}$$

σ : the ionospheric conductivity tensor
 Φ_I : the ionospheric potential
 Φ_m : the magnetospheric potential
 G_m : a geometrical factor ($r=3RE$ to $r=1RE$)
 σ_{EUV} : due to the solar EUV
 σ_{Diff} : due to the diffuse auroral precipitation
 σ_J : due to the FAC
 $f_2 = 1$: at the upward FAC
 $f_2 = 0$: at the downward FAC
 k_2, k_3, k_4 : scaling constants

○で囲んだ係数：
恣意的に決定できてしまう

磁気圏-電離圏結合領域のモデルパラメータ

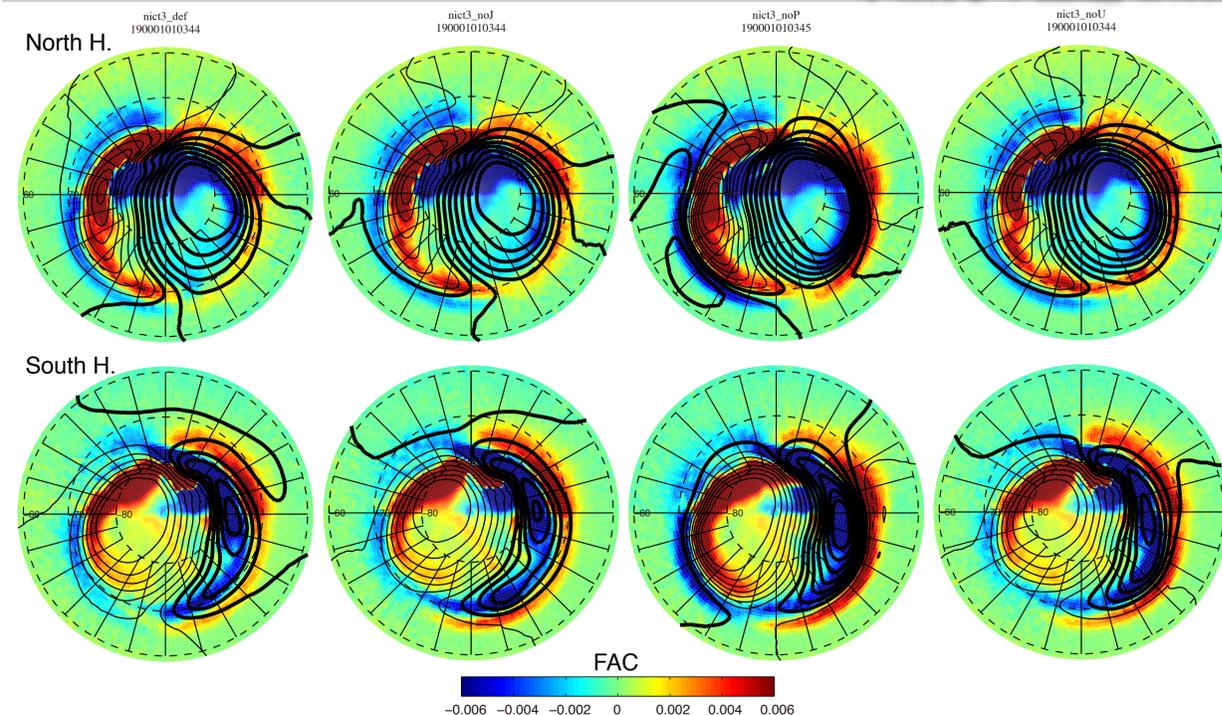
磁気圏の内部境界では左に示す関係式を解き、沿磁力線電流やポテンシャルを介して電離圏に結合している。この関係式の○で囲んだ係数は任意に決定できるスケール定数である。

- k_2 : 磁気圏のディフューズ(不明瞭な)オーロラ粒子の降下による電離層電気伝導度の増加の割合
- k_3 : 磁気圏のディスクリット(明瞭な)オーロラ粒子の降下による電離層電気伝導度の増加の割合
- k_4 : 上向き沿磁力線電流の流入による磁気圏ポテンシャルへの寄与の割合

これらの係数の値を変えることで、定常磁気圏からオーロラが発生するまでの時間や、オーロラ発生時の磁気圏の磁場変動も変わる。

本研究の最終的な目的はこの任意に決定できる係数についての最適値を推定することである。そして、磁気圏変動に対する電離圏の応答と電離圏変動の磁気圏へのフィードバック過程、すなわち磁気圏-電離圏相互作用過程における新しい物理を発見したい。

本研究の経過と成果



磁気圏-電離圏 結合領域におけるパラメータ感受性

磁気圏-電離圏結合領域におけるディフューズオーロラや、ディスクリットオーロラ粒子の降下による電離層電気伝導度の増加をコントロールする係数を変化させ、電離圏電位分布に及ぼす影響を調査した。

左図は太陽風中の磁場を南向きにして地球磁気圏にオーロラを発生させる直前の、電離層電位分布を等高線で、沿磁力線電流をカラーで示したものである。上側のパネルが北半球、下側が南半球の電離層を示している。左からデフォルトの条件($k_2, k_3, k_4 = \text{const.}$), $k_3=0$, $k_2=0$, $k_4=0$ 。

前述した磁気圏-電離圏結合領域の関係式から、沿磁力線電流による電気伝導度増大が電離層電位を減少させ、さらに対流電場がより低緯度に広がるのを妨げている様子が見て取れる。しかしながら、電離層電位の増大減少傾向はまちまちである。モデルパラメータの変動による効果は非線形と考えられる。

今後はモデルパラメータの最適値を推定するためにマルコフ連鎖モンテカルロ法などの手法を用いてモデルパラメータの組み合わせ数を最小限に抑えて計算量の圧縮を試みる。