

確率差分モデルを利用した波動観測データからのプラズマ圏内電子密度分布推定法

Determination of electron density profile in the plasmasphere deduced from wave data using a stochastic differential model

後藤 由貴[1], 笠原 禎也[1], 佐藤 亨[2]

Yoshitaka Goto[1], Yoshiya Kasahara[1], Toru Sato[2]

[1] 京大・情報学・通信情報システム, [2] 京大・情報学

[1] Dept. of Communications and Computer Eng., Kyoto Univ., [2] Informatics, Kyoto Univ.

プラズマ圏内の電子密度分布の確率的な揺らぎを考慮した確率差分モデルを利用して、科学衛星軌道上で得られた電子密度および VLF 波動の観測データからグローバルな電子密度プロファイルを推定する手法を提案する。磁力線方向には一定の温度勾配にしたがった拡散平衡モデル、緯度方向には確率差分方程式で表される平滑化モデルを適用し、モデル中のパラメータを、波動の伝搬ベクトルおよび伝搬遅延に関する観測データと理論値との差が最小となるように最小二乗法で決定する。これにより、グローバルな電子密度の変動と衛星軌道上のローカルな揺らぎとを区別し、電子密度プロファイルのより詳細な構造の推定を可能とした。

地球プラズマ圏内のグローバルな電子密度プロファイルは、ローカルタイム、季節、太陽活動度により複雑に変化するため、その短時間の密度プロファイルを決定することが非常に重要である。一方、通常の科学衛星の観測により求められる電子密度は、その衛星の軌道上もしくはそれより下部の領域のものであった。これに対し、衛星軌道上の電子密度分布および地上から伝搬してきた VLF 波動の観測データを利用することによりグローバルな電子密度の分布を推定するという新しい手法が Kimura et al. (1997) により提案されている。この手法は、グローバルな密度プロファイルを拡散平衡モデルに基づく解析的な関数で表現し、関数中の未知パラメータをモデルフィッティングにより決定するというものであった。本研究では、この手法を改良し確率差分方程式を利用することで、電子密度分布の確率的な揺らぎを考慮にいたった柔軟性の高いモデルを提案する。

本手法では、1997 年秋まで船舶の遠距離航行支援システムとして利用されてきたオメガ信号を利用する。地上局から発信されプラズマ圏内に伝搬したオメガ信号は、科学衛星あけぼのに搭載された VLF 波動受信器によりしばしば連続的に観測されており、伝搬ベクトルおよび遅延時間を決定できる。一方、プラズマ圏内の電子密度分布を決定すれば、レイトレイシングによりあけぼの衛星上で観測されるべきオメガ信号の伝搬ベクトルおよび遅延時間を理論的に算出できる。すなわち、軌道上の電子密度の観測値およびオメガ信号に関する観測結果が理論値と一致するように電子密度のプロファイルを非線形最小二乗法により決定することが可能である。

あけぼの衛星は近地点 300km、遠地点 10000km の楕円極軌道を描きながら地球周辺を周回しており緯度方向に対し連続した観測データが得られるが、観測される電子密度は衛星軌道上のローカルな揺らぎおよび観測ノイズを含んでいる。提案モデルでは、プラズマ圏内の電子密度分布が沿磁力線方向は一定の温度勾配に従った拡散平衡状態であると仮定する。一方、緯度方向については密度の確率的な揺らぎを確率差分方程式で表現する平滑化モデルを適用する。本研究では基準高度(1000km)における緯度方向の電子密度の変化に対して平滑化を行い、衛星軌道上の電子密度から基準高度の電子密度分布をノンパラメトリックに決定する。この方法の利点は、観測データに含まれる不要な変動を取り除き、有意な変動を拡散平衡モデルに基づくグローバルな分布に反映できる点にある。以下に具体的な方法を示す。

まず、衛星軌道上の連続する観測点と同一 L-value をもつ基準高度上の各点における電子密度の 2 次差分が平均 0、分散 $T \cdot S$ の Gauss 分布に従うものとする。但し、 T は電子密度の観測誤差の分散値を表し、 S は観測値を平滑化する度合いを調整するスムージングパラメータである。この 2 次の確率差分表現により、入力を基準高度の電子密度、出力を衛星軌道上の電子密度とした線形の観測モデルが導出できる。すなわち、適当なスムージングパラメータおよび拡散平衡モデルに関係する電子温度勾配、基準高度のイオン組成比などの各パラメータを決定することにより、カルマンフィルタを用いてグローバルな電子密度分布を再現することができる。各パラメータは前述のように、オメガ信号の観測値およびパラメータにより決定される電子密度プロファイルを用いて行ったレイトレイシングの結果とが一致するように非線形最小二乗法により決定する。

提案手法の評価を疑似観測データを用いたシミュレーションにより行った結果、衛星軌道上で同じ電子密度の

観測結果が得られた場合でも、地上から伝搬する波動のもつ情報を取り入れることにより、グローバルな電子密度の変動と衛星軌道上のローカルな揺らぎとを区別することが可能であることを確認した。また、この手法の利点として衛星の 1 パスの観測データに基づいて、その短時間における尤もらしいグローバルな電子密度プロファイルを再現できるという点が挙げられる。今後、本手法を実観測データへ適用し実用性について検討していく予定である。

[1]Kimura et al., J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys. 59, 1569--1586. 1997