

2次元FDTD法を用いた電離圏空間構造に関する研究

0755018 吉野 修二郎

1. はじめに

地球の上層には、窒素や酸素などの分子や原子が電離することにより生じた、イオンと自由電子からなる電離気体（プラズマ）粒子が存在している。電波伝搬に影響を及ぼす電離気体粒子が存在する領域を電離圏と呼ぶ。したがって、電離圏は高度 50~2000km の範囲と考えられ、高度によっていくつかの領域に分けられる。電離圏の電子密度は太陽からの X 線や紫外線、あるいは宇宙線等のエネルギーによって生成される F 領域（140km 以上）で最大になる。F 領域の下には太陽の軟 X 線によって生成される E 領域（90~140km）がある。E 領域には通常の E 領域の他に厚さ数 km 以下のスポラディック E 層と呼ばれる局地的、突発的に発生する電子密度の大きい電離圏がある（以下 Es 層と表記する）。Es 層は強い電子密度勾配があることから、様々なプラズマ不安定が起きていると考えられる。そのため、Es 層は一様均一なものではなく、パッチ状やスケールの小さい不規則構造を伴うことが多いと考えられている。また、Es 層発生後に沿磁力線イレギュラリティ（Field-Aligned Irregularities；以下 FAI と表記する）が確認されている。中緯度 E 領域 FAI を生成すると考えられている Gradient-drift 不安定は、電子密度勾配と外部電場 E 、地球磁場 B との $E \times B$ ドリフトによって発生する。FAI の出現は Es 層の発生との相関が高く、電子密度勾配は Es 層出現後、Es 層の不規則な疎密構造が磁力線に沿って引き伸ばされ形成すると考えられている。E 領域の下に D 領域がある。D 領域は高度 50~90km の範囲で、この領域のプラズマはライマン α 線や硬 X 線によって生成される。F 領域の最大電子密度となる上側の領域をトップサイド、さらにその上側をプラズマ圏と呼び、これらは磁気圏へとつながっていく。

2. FDTD 法による電離圏空間構造の推測

電離圏中の電波伝搬特性を解明することは、安定した通信を確保するために必要不可欠である。電離圏 E、F 領域のように電子密度が高度とともに変化する不均質媒質中の電波伝搬特性を解析するために、本研究では自由な空間構造を持つ領域の解析が可能な FDTD シミュレーションを用いた。広大な領域のシミュレ-

ーションを行うため空間変化を 2 次元に限定し、プラズマを扱うことのできる 2 次元 FDTD コードを開発し、そのシミュレーションコードを用いて電離圏プラズマ中（E 領域）の電波伝搬を再現して伝搬特性の解析を行う。また、Es 層や FAI などの電離圏空間構造は通信を始めとする電波伝搬に大きな影響を与えるか、その構造は詳しくわかっておらず、その観測手法も確定されていない。Es 層や FAI などの電離圏空間構造が電波伝搬に与える影響を調べることで逆にそれらの空間構造を推定できるのではないかと考えた。そこで、Es 層や FAI を模した層状モデル・電子雲モデルを置いて 2 次元シミュレーションを行い、電波伝搬に与える影響を詳細に調べた。その際、電波源の位置、周波数などを様々に変化させてシミュレーションを行うことで電波伝搬に異なる影響を与える。これらのシミュレーションで得られた受信データを比較し、解析することで空間構造が推測できると考えられる。

3. 電離圏中の電波伝搬シミュレーション

まず始めにシミュレーション領域を比較的狭い範囲に設定し、電波伝搬特性の基本的な物理過程を確認した。電離圏モデルとして層状モデル・電子雲モデルを仮定し、それぞれのモデルが電波伝搬にどのような影響を及ぼすのかを比較・検証した。それぞれのモデルは、背景プラズマとして高度が上昇するにしたがって指数関数的に増加し、最高高度 40km で最大値 $1.00 \times 10^{10}[\text{m}^{-3}]$ となる電子密度を設定している。また、電離圏モデルとして仮定した層状モデルは、高度 25km から 5km の厚さで電子密度 $0.75 \times 10^{10}[\text{m}^{-3}]$ のプラズマを一様に分布させている。このプラズマ層を以後 Es 層と呼ぶ。一方、電子雲モデルは、モデルの中心を高度 25km の左端から右端までの位置に 7.5km 間隔で設定する。電子雲の電子密度分布は最大電子密度 $1.00 \times 10^{10}[\text{m}^{-3}]$ のガウス分布を用いて、電子雲中心にいくほど電子密度の高いプラズマを設定してある。電子雲の大きさは短辺 2km、長辺 3km の楕円形である。それぞれの図において (a) は層状モデル、(b) は電子雲モデルの場合を示す。図 1 は電子密度分布と電界強度の高度分布を求めるラインを表示、図 2 は $t = 250[\mu\text{sec}]$ の時点の電界を波源の電界を 0dB とした相対値で表示し、図 3 は

電界強度の高度分布を表示している。シミュレーションを行った結果、層状モデルでは Es 層以下の高度で干渉波が見られ、Es 層上空で一旦電界強度が減少し、屈折波の影響で再び電界強度が増加する。この屈折波の影響が現れる高度・強さなどは、発信源と観測点の位置関係に依存していると考えられる。一方、電子雲モデルでは電子雲中で電界強度が減少し、電子雲上空で干渉波が見られると同時に電界強度が増加し、その後電界強度が減少する。この干渉波の影響は発信源と観測点の位置関係に加えて、発信周波数に依存していると考えられる。

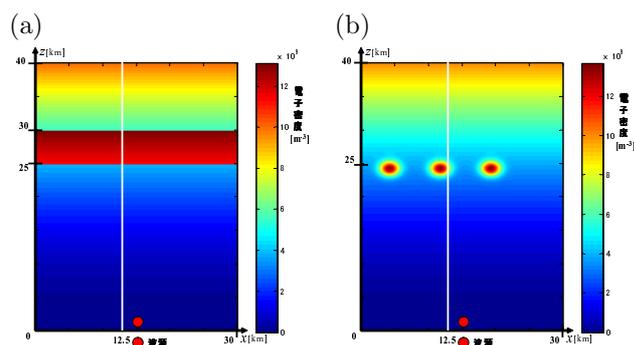


図 1: 電離圏モデル

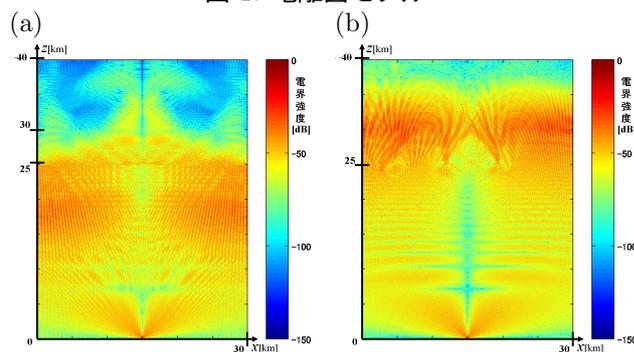


図 2: 電波伝搬の様子

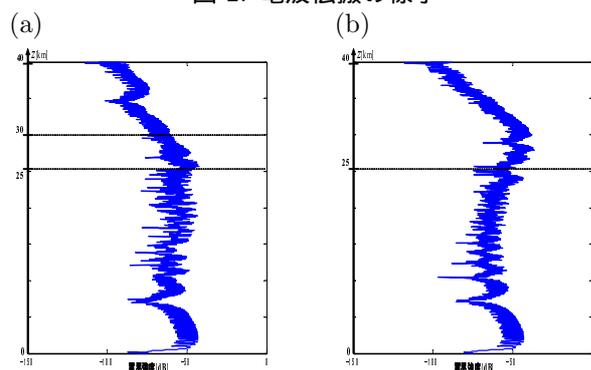


図 3: 電界強度-高度分布

この結果から、位置や周波数の異なる発信源からの電波を受信し、Es 層・電子雲上空の電界強度変化を詳しく解析すれば、電界強度の高度分布から電離圏空間構造を推測できると考えた。発信源の位置を変えてシ

ミュレーションを行った場合、層状モデルでは発信源の位置の違いから、高度 25km 以上の電界強度変化の違いが見られ、Es 層直上の電界強度は透過する電波に、そのさらに上空では屈折して回り込む電波に依存する。一方、電子雲モデルでは、層状モデルの場合と同様、電子雲上空の電界強度変化を詳しく調べることによって、直接波・屈折波両方の特徴を得ることができる。発信源と観測点間で直接波に近い位置の電子雲、屈折波は遠い位置の電子雲の影響を反映しているが、層状モデルの場合と異なり電子雲で屈折した電波の伝搬方向の変化が複雑なため、電界強度の高度分布に現れる干渉波も複雑なものとなっている。

電離圏のような磁化プラズマ中を伝搬する電波は、電磁界成分が磁場に対して左方向に回転する特性波 (L 波) と右方向に回転する特性波 (R 波) に分けられ、それぞれ異なる伝搬特性を持つ。特に R 波の伝搬特性は電子密度が希薄な場合でも影響を受ける。本研究で使用している電波は、主に外部磁場に対して平行に伝搬する波であり、L 波と R 波を合成した波であると考えられる。電離圏空間構造の推測の際重要な情報である干渉波は、発信源と電離圏モデルとの位置関係以外に発信周波数によっても変化する。発信源の周波数を変えてシミュレーションを行った場合、層状・電子雲モデルともに、プラズマ中を伝搬する電波の電界強度変化は、サイクロトロン周波数、プラズマ周波数及び発信周波数の関係に依存している。特に Es 層・電子雲を透過する際の電界強度変化は R 波の伝搬特性に大きく影響される。R 波の伝搬特性は電子密度の影響を強く受けるため、電波の伝搬特性を L 波・R 波に分けて解析することで電離圏空間構造の推測に応用できる可能性を示した。

4. まとめと今後の課題

本研究で行ったシミュレーションの結果から、発信源の位置や周波数を様々に変化させることで層状・電子雲モデルが電波伝搬に与える影響に大きな違いが見られ、層状・電子雲の構造を推測できる可能性を示すことができた。

今後は更に多様な電離圏モデルの構造、発信源の位置、周波数の場合についてシミュレーションを行い、試行回数を増やし比較・検証を行う必要がある。特に電離圏磁化プラズマ中の電波伝搬特性は周波数によって大きく異なるため、周波数を変化させたシミュレーションが効果的であると考えられる。