

2次元FDTDシミュレーションを用いた Es層の空間構造推定

1155008 黒川 貴寛

1.はじめに

電離圏高度 90~140km 付近には、突発的に電子密度の高いスポンディック E 層 (Es 層) が現れることがある。Es 層は電波伝搬に様々な影響を与えることで知られているが、未だにその発生メカニズムや空間構造などは明らかになっていない。これまで Es 層は水平方向に一様な層状であると考えられてきたが、近年では Es 層は雲状の場合があることが分かっている。Es 層の空間構造は電波伝搬に影響を与えると考えられるため、これを解明することは安定した通信を確保するために必要である。そこで本研究では、電波受信機を搭載したロケットの電波観測実験の結果とロケット実験状況を想定した電波伝搬シミュレーションの結果を比較することで、ロケットで観測可能な電波強度高度分布から Es 層の空間構造推定を行った。

2.電波伝搬シミュレーション

Es 層が 2 次元, 3 次元的な空間構造を持つ場合は 1 次元的な密度変化を仮定した Full-wave 法では電離圏中の電波伝搬を再現出来ないため、本研究では自由な空間構造が設定可能な FDTD 法を用いてシミュレーションを行い、Es 層の構造が電波伝搬に与える影響について調べた。シミュレーション領域は縦軸を高度、横軸を地上の距離とした 2 次元空間を仮定し、層状、波状、電子雲状の構造を持つ Es 層を高度 90km 地点に配置した。それぞれの Es 層モデルを配置したシミュレーション領域を図 1 に示す。電波伝搬は周波数によって異なる事が分かっているため、発信周波数として 0.5MHz, 1.0MHz 2.0MHz を設定し、シミュレーション領域左下の発信源より電波を発信した。

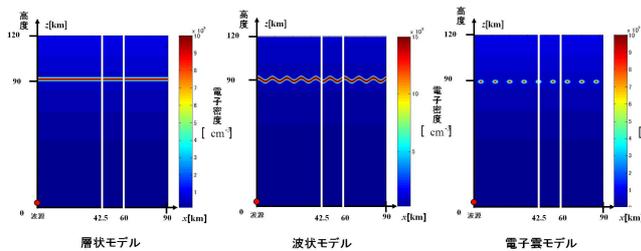


図 1: シミュレーションモデル

シミュレーション結果として電波が領域全体に行きわたった時の磁界強度空間分布を示す。また、ロケット実験から得られるデータは磁界強度高度分布であるため、磁界強度空間分布中のロケットの軌道を想定したライン上の磁界強度高度分布を抽出した。発信周波数 0.5MHz の層状モデル、電子雲モデルのシミュレーション結果を図 2, 図 3 に示す。それぞれの図において、(a) は磁界強度空間分布、(b), (c) は発信源からの距離 42.5km, 60km 地点の磁界強度高度分布を表している。

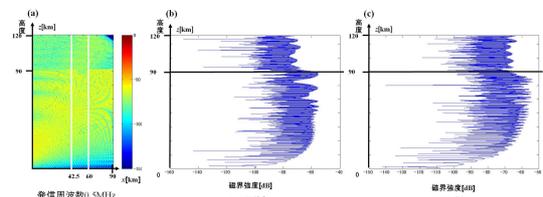


図 2: 層状モデルにおける発振周波数 0.5MHz の電波伝搬の様子

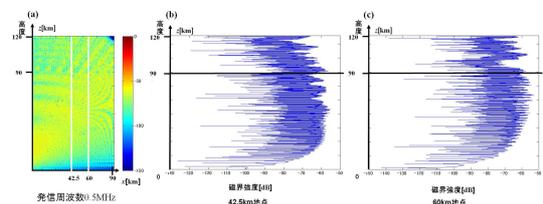


図 3: 電子雲モデルにおける発振周波数 0.5MHz の電波伝搬の様子

図 2(a) の層状モデルの磁界強度空間分布において、高度 90km で磁界強度が減少している。図 2(b), (c) の発信源からの距離 42.5km, 60km 地点の磁界強度高度分布では、どちらにも高度 90km で磁界強度が大きく減少するという特徴が現れ、これは磁界強度空間分布の磁界強度が減少した高度と一致している。図 3(a) の電子雲モデルの磁界強度空間分布において、高度 90km より上の高度で磁界強度が強い領域、弱い領域交互に現れている。図 3(c) の発信源からの距離 60km 地点の磁界強度高度分布には磁界強度の一時的な減少が現れ、この特徴は磁界強度空間分布におけるロケットの軌道

を想定したラインが磁界強度の弱い領域を通過した位置と一致している．その他の Es 層モデル，周波数における磁界強度空間分布に現れた特徴は磁界強度高度分布に同じ高度で現れている．よって磁界強度高度分布から電波伝搬の様子を推定することが可能であると考えられる．

3. ロケット実験結果による Es 層空間構造推定

2011 年 12 月 19 日 23:48JST に内之浦宇宙空間観測所で行われた電波観測ロケット実験の実験状況を想定したシミュレーションを行った．発信周波数にはロケット実験で実際に用いられた 873kHz を設定し，実際のロケット実験の発信源とロケット発射地点間の距離が 120km のため，ロケットの軌道を想定したラインは発信源からの距離を 120km 地点に設定した．層状モデルにおけるシミュレーション結果を図 4 示す．図 4 において，(a) はシミュレーション領域，(b) は磁界強度空間分布，(c) はロケットの軌道を想定したライン上の磁界強度高度分布を表している．図 4(b) の磁界強度空間分布において，高度 90km より上の高度で磁界強度が大きく減少している．これは電波が Es 層に入射する際の入射角が大きくなり電波が反射したためと考えられる．また図 4(c) 磁界強度高度分布では，高度 90km で磁界強度が大きく減少し，その後しばらく変化せず，高度 100km 地点で増加するという特徴が現れている．

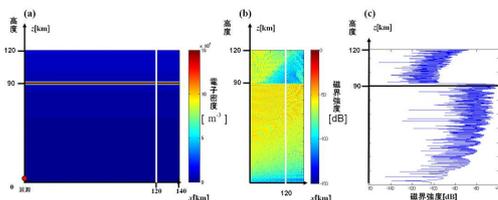


図 4: ロケット実験を想定した層状モデルにおけるシミュレーション結果

内之浦ロケット実験から得られた，発信周波数 873kHz の電波を受信した際の磁界強度高度分布を図 5 に示す．観測データにおいて，高度 90km で磁界強度が急増加しているが，これは電波受信機を包んでいるノーズコーンが開頭されて，受信する電波が強くなったためである．その後，磁界強度にしばらく変化がないが，高度 100km 地点で磁界強度が大きく減少している．この特徴は図 4 の層状モデルに現れた特徴に類似している．したがって，ロケットが通過した高度 100km 付近には層状の Es 層が存在したと考えられる．

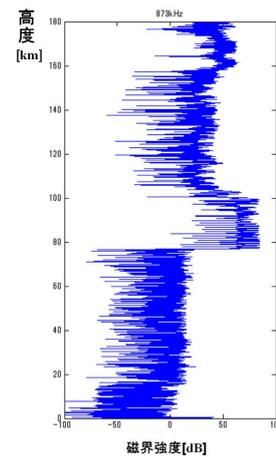


図 5: ロケット実験における 873kHz の電波を受信した際の磁界強度高度分布

4. まとめと今後の課題

ロケット実験を想定したシミュレーションを行い，実際に実験から得られた観測データと比較することで Es 層の空間構造推定を行った．実験から得られた磁界強度高度分布には層状モデルのシミュレーション結果と似た特徴が現れたため，ロケットは層状の Es 層を通過したと推定出来る．しかし，観測データにおいて高高度で再び磁界強度が大きくなり，空間構造を持つ電子雲モデルにおける電波伝搬の特徴も現れている．このことから，本研究で想定した Es 層のスケールより大きい Es 層が存在した可能性が考えられる．この磁界強度変化を説明するためには Es 層の空間構造のスケールの違いが電波伝搬に与える影響を調べる必要がある．また，層状，波状，電子雲状以外の空間構造をもつ Es 層による影響の可能性も考えられる．したがって，更に様々な空間構造，より大きいスケールの Es 層モデルを設定したシミュレーションを行って電波伝搬への影響を検証する必要がある．