2-5 スポラディック E 層の再現

2-5 Reproducing the Sporadic E Layer

品川裕之

SHINAGAWA Hiroyuki

スポラディック E(以下 Es) 層は、高度 90 km ~ 120 km に突発的に現れる高電子密度の薄い層である。Es 層は HF ~ VHF 帯の電波を利用した通信・放送や航空機の管制などに混信を引き起こす場合があり、その発生予測は宇宙天気予報における重要課題の一つとなっている。Es 層についてはこれまでに様々な研究が行われてきたが、実際の Es 層の振る舞いは極めて複雑であり、数値モデルによる再現や予測はほとんど不可能と考えられてきた。しかし最近になって、全球大気圏ー電離圏モデル GAIA を用いた Es 層の数値シミュレーションモデルが開発され、これによって現実的な Es 層の構造の再現が可能となってきた。本稿では、Es 層の数値シミュレーションについて解説するとともに、Es 層の発生予測の可能性についても述べる。

Sporadic E (Es) layers are narrow layers with high electron densities consisting mainly of metal-lic ions. These layers appear sporadically in the region predominantly at altitudes between 90 km and 120 km. Among the many kinds of space weather disturbances, Es layers are one of the most important phenomena because they significantly affect radio communication and broadcast systems as well as air-navigation systems, which use high-frequency (HF) and very high-frequency (VHF) radio waves. Despite various studies, it seemed impossible to reproduce and predict the Es layer because actual behavior of the Es layer is extremely complicated. Recently, however, a new model has been developed to numerically reproduce the Es layer using the whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA and a local high-resolution ionospheric model. This paper describes the numerical simulation of the Es layer and a prediction of Es occurrence.

1 まえがき

スポラディック E(Es) 層は高度 90 km から 120 km に突発的に現れる高電子密度の薄い層で、その存在は 地上からの電波観測やロケット観測により 1940 年代 頃から知られていた。Es層を構成するのは主に金属イ オンであり、それらは宇宙空間から地球大気に入射す る微粒子(流星塵)によって供給された鉄(Fe)、マグ ネシウム (Mg)、カルシウム (Ca)、ナトリウム (Na)、 ケイ素 (Si) などの金属原子が、太陽極端紫外線 (EUV) による電離や、NO⁺やO₂⁺などの電離圏イオンとの電 荷交換によってイオン化されて生成されたものである と考えられている。これまでのロケット観測によると、 Es 層は鉄イオン (Fe⁺) が主成分であることが多いが、 その他の金属イオンもしばしば検出されている。超高 層大気中では金属原子は微量であるため金属イオンの 生成率は非常に小さいが、NO⁺ や O_o⁺ などの分子イオ ンに比べ消滅の時定数がはるかに長いため、一旦生成

されると電離圏内に長期間留まる性質がある。

Es層の発生は顕著な季節依存性を持ち、春から夏にかけて頻繁に現れる傾向があるが、秋から冬にかけても時折強く現れることがある。太陽活動や地磁気活動の依存性は弱いことから、その発生には下層大気から伝搬してくる潮汐波、プラネタリー波、重力波などの大気波動が重要な役割を担っていると考えられている。また、Es層の発生率には顕著な地域依存性も見られ、日本を含む東アジア域では他の地域に比べ発生率が高いことが知られている[1][2]。このことは Es層が下層大気での大気波動の地域依存性と関連していることを示唆している。

Es 層は HF 帯や VHF 帯の電波を反射するため、この周波数帯を使った通信や放送などの混信を引き起こすことがある。また、最近では Es 層による異常反射が航空管制システムにも影響を及ぼすことが報告されており、Es 層の発生を事前に予測することが求められている。情報通信研究機構 (NICT) では、電離圏じょ

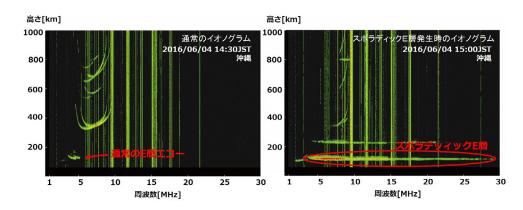


図 1 2016 年 6 月 4 日沖縄における NICT のイオノゾンデの観測 左はスポラディック E 層の発生前、右は発生中の様子を示す。

う乱をモニターするために国内 4 地点 (稚内、国分寺、山川、沖縄) にイオノゾンデを設置して常時データを取得している。図 1 は国分寺で Es 層が発生した時のデータである。

Es 層の強さはイオノゾンデが発出する電波が反射される最大の周波数 (foEs) を用いて表され、NICT の基準ではfoEs が8 MHz を越えた場合を「Es 層の発生」と定義し、宇宙天気予報で報告を行っている。イオノゾンデで得られた電離圏のデータはデータベースに保存され、一般に公開されている。

NICT では観測のほかに電離圏の数値モデルを用いた研究も行っており、NICT と九州大学、成蹊大学の共同研究で開発された全球大気圏-電離圏モデルGAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)は、これまでに様々な電離圏現象の再現とその物理過程の解明に用いられてきた[3][4]。現在、気象の再解析データを入力としたGAIAのリアルタイムシミュレーションの試験運用を行っており、 $2 \sim 3$ 日先までの大気圏-電離圏の状態を予測することが可能となっている[5]。GAIA は電離圏だけでなく中性大気についても高精度で再現できることから、GAIA による Es 層の再現・予測の可能性に

ついても検討を進めてきた。

2 Es 層形成の基本過程

Es層が形成される高度では、イオンと中性大気の衝突周波数が大きいため、中性大気が動くとイオンも一緒に引きずられて動こうとするが、この高度ではイオンは地球磁場の影響も受けるため中性大気の運動から外れ、鉛直方向の運動が生じる。その結果、この領域で中性大気の風に鉛直方向のシアができると金属イオンが高度方向に集められて局所的にイオンの密度が高くなり、高電子密度の薄い層が形成される。このメカニズムは、ウインドシア理論(Wind shear theory)と呼ばれ広く一般に受け入れられてきた[6][7]。

図2は中性風シアによるEs層の形成過程を模式的に描いたものである。北半球の場合、高高度の北向き水平風が発生すると、イオンは磁力線方向に動きやすいため、鉛直下向きのイオン速度が生じる。この時同時に低高度の南向き水平風が発生すると上向きイオン速度が生じ、それらの間の高度領域にイオンが集積することでEs層が形成される。同様に、高高度で西向き風、低高度で東向き風の条件においてもローレンツ

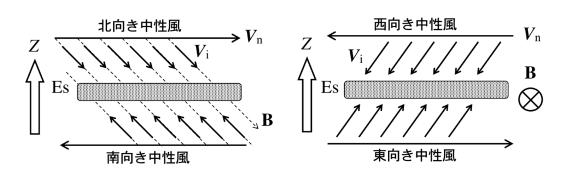


図 2 ウインドシア理論による Es 層形成の模式図 B は磁場、Z は鉛直上向き方向、Vn は中性風速度、Vi はイオン速度。 (左) 北半球における南北風シアの場合。(右) 北半球における東西風シアの場合。南北風シアの場合 (左) では、中性風がイオンを南北方向に動かそうとするが、イオンは磁力線方向に沿って動きやすいので中央に集まってくる。東西風シアの場合 (右) はイオンが中性大気とともに動こうとすると、イオンにローレンツ力が働いてイオンを中央に集める運動が生じる。

力が働くことにより Es 層が形成される。南半球では、東西風が Es 層を形成する条件は同じであるが、南北風は、高高度で南向き風、低高度で北向き風の条件の場合に Es 層が形成される。なお、この中性風の方向は磁力線座標における方向であり、一般に磁力線の方向は地理座標の南北方向とずれているため、実際の計算では地理座標での風向を磁力線座標での風向に変換する必要がある。

このイオンの鉛直運動は、電離圏の全てのイオンに起きるが、背景の NO^+ や O_2^+ などの分子イオンは化学反応が速く常にほぼ光化学平衡となるので、運動がイオン密度に与える影響は小さい。一方、金属イオンは化学反応が遅いため、運動の影響を強く受け、シアに伴って密度の急上昇が起きる。東西風シアと南北風シアの影響を比較すると、 $120~{\rm km}$ 以上の高度では南北風シアのほうがより効率良くイオンの鉛直運動を引き起こすのに対し、 $120~{\rm km}$ 以下の高度では東西風シアの影響のほうが強くなる傾向がある。したがって、Es層が最も良く現れる $90~{\rm km}\sim 120~{\rm km}$ の高度では、Es層は主に東西風シアで形成されると考えられる。

3 数値モデルによる Es 層の再現

3.1 Es層のモデル研究の歴史

Es 層を数値的に再現しようとする試みはすでに 1960 年代から行われ、これまでに数多くのモデル研究 が行われてきた。基本的には中性風のシアを仮定して、ウインドシア理論に基づいて金属イオンをある高度に 集積させるモデルであり、実際に適当な中性風のシアを仮定すると Es 層的な構造ができることは古くから 知られていた [8]。また、ロケット観測によって得られた中性風のシアと、それと同時に観測された Es 層が 実際にある程度対応していることが簡単なモデルで確認されていた [9]。しかし、ロケット観測は限られた領域の瞬間的なデータであり、空間的な広がりや時間変動についての情報を得ることができないため、Es 層の 精密なモデルの開発は困難であった。

近年、大気圏-電離圏モデルが世界のいくつかの研究機関で開発され、数値精度が向上するにつれて、モデルで得られた中性風を入力として Es 層の形成を再現するシミュレーションが行われるようになってきた [10]。国内では、NICT が中心となって開発した GAIA と局所的に高精度の電離圏モデルを用いて、Es 層を再現し、実際に観測された Es 層との比較が行われ、観測を良く再現できることがわかった [11]。

3.2 Es 層のモデリング方法

Es層をモデルで再現するためには、金属イオンを含

む電離圏イオンについて連続の式と運動量の式(イオン速度の式)を解く必要がある。通常、Es層の領域ではイオンや電子の温度は中性大気の温度とほぼ同じと仮定してよいのでエネルギーの式は解かなくてもよい。また、Es層の高度領域では運動方程式の速度の時間変化と慣性項は無視できる。したがって、下部電離圏でのイオンの方程式系は以下となる。

連続の式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) + P_i - L_i \tag{1}$$

イオン速度の式

$$\mathbf{v}_{i} = \frac{\zeta}{1+\zeta^{2}} \frac{\mathbf{u} \times \mathbf{B}}{B} + \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}}{1+\zeta^{2}} \frac{\mathbf{B}}{B^{2}} + \frac{\zeta^{2}}{1+\zeta^{2}} \mathbf{u} - \frac{\nabla p_{e} \cdot \mathbf{B}}{m_{i} n_{e} \nu_{in} (1+\zeta^{2})} \frac{\mathbf{B}}{B^{2}} + \frac{1}{1+\zeta^{2}} \frac{\mathbf{F} \times \mathbf{B}}{qB^{2}} + \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{B}}{m_{i} \nu_{in} (1+\zeta^{2})} \frac{\mathbf{B}}{B^{2}} + \frac{\zeta}{1+\zeta^{2}} \frac{\mathbf{F}}{qB}$$

$$+\frac{1}{1+\zeta^2}\frac{\mathbf{E}_{\perp} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{\zeta}{1+\zeta^2}\frac{\mathbf{E}_{\perp}}{B} \tag{2}$$

$$\zeta = \frac{\nu_{in}}{a_i} \tag{3}$$

$$\mathbf{F} = -\frac{\nabla p_i}{n_i} + m_i \mathbf{g} \tag{4}$$

$$p_i = n_i k_B T_i \quad , \quad p_e = n_e k_B T_e \tag{5}$$

ここに、n: 密度、v: イオン速度、u: 中性風速度、T: 温度、B: 磁場、E: 電場、P: イオン生成率、L: イオン消滅率、m: 質量、p: 圧力、g: 重力加速度、q: 素電荷、 v_{in} : イオンの中性大気に対する衝突周波数、 Ω_i : イオンのジャイロ周波数、 k_B : ボルツマン定数である。添字 i、e、n はそれぞれイオン、電子、中性粒子を表す。一般に、電離圏領域では磁力線に並行な方向には等電位として良いので、電場は磁場に垂直な成分(\mathbf{E}_{\perp})のみとしている。また、 \mathbf{E} s 層高度ではイオンと電子の温度はほぼ中性大気の温度であるので、 $T_i = T_e = T_n$ としてよい。

上記のイオン速度の式(2)は一般的な形であるが、 小さい項と電場の項を無視すると、鉛直方向のイオン の速度の式は近似的に以下のような比較的簡単な形で 表すことができる。

$$w_i = \frac{V\cos I\sin I}{1+\zeta^2} + \frac{\zeta U\cos I}{1+\zeta^2}$$
 (6)

ここに、 w_i : イオンの鉛直速度、I: 磁場の伏角、V: 南向き中性風速度、U: 東向き中性風速度である。

図2で模式的に示したように、南向き風中性 Vと東向き中性風 Uの正負の符号、すなわち水平風の風向によって、鉛直イオン速度の向きが変化することがわか

る。前節で述べたように、もしある高度より上方で下向きイオン速度、下方で上向きイオン速度を生じさせるような高度方向の水平風の変化(水平風シア)があると、その高度領域にイオンが集積して高密度の金属イオン層(Es 層)が形成される。

3.3 Es 層を支配する物理過程

基本的には、上記の方程式系に物理過程のパラメータを与えて、数値的に解くことによって、金属イオンの分布が求まり、中性風のシアによって Es 層が形成される過程を再現することができる。Es 層の形成に関連する主な過程としては以下のものがある。

(1) 中性風

Es 層の形成の主要メカニズムは中性風のシアであるが、この領域は衛星による直接観測が難しいため、中性風の観測は主にロケットや地上からの光学観測やレーダー観測などで行われてきた。そのため広範囲の定常的な観測が難しく、実際の中性風と Es 層の定量的な関係が明らかになっていなかった。しかし、最近になって大気圏-電離圏の数値モデルの精度が向上し、観測データを補うものとして数値モデルのデータが利用されるようになってきた。

(2) 金属原子、金属イオンの流入量

Es層を構成する金属イオンの起源は、宇宙から降り込んでくる金属を含む微粒子である。粒子の大きいものは流星となって観測されるが、ほとんどは観測されないほど小さい微粒子である。これらは常時地球大気に降り注いでいるが、その入射量は一定ではなく、季節変化などのほか、流星群などに伴う突発的な増加もあると考えられている[12][13]。実際にどのくらいの量がどの場所に降り込んでいるかは明確にはわかっておらず、流星の観測データやロケット観測などによる金属原子やイオンの分布に基づく理論・経験モデルが構築されてはいるが、まだ不確定性がある[14][15]。また、一旦流入してきた金属原子は熱圏大気の風によって水平方向に運ばれるため、金属原子がどの場所にどのくらい分布しているかについてもはっきりとはわかっていない。

(3) イオン化学反応

金属イオンは、金属原子が太陽極端紫外線の光電離によってイオン化されて生成される過程と、背景の NO^+ や O_2^+ などの分子イオンと電荷交換する過程によって生成される。その後、一部は更に背景の分子と化学反応して別のイオンになり、最終的には電子との解離性再結合によって金属原子にもどる。

 Ca^+ の場合、主な化学反応過程は以下のものである。 $Ca + hv \rightarrow Ca^+ + e :$ 光電離による生成 $Ca + O_2^+ \rightarrow Ca^+ + O_2$: 背景イオンとの電荷交換による生成

 $Ca + NO^+ \rightarrow Ca^+ + N_2$

: 背景イオンとの電荷交換による生成

 $Ca^+ + e \rightarrow Ca + hv$

:電子との再結合による消滅 実際にはこの他にも多くの化学反応過程があり、中 性の Ca 原子は化学反応によって他の様々な分子と結 びついて大きな分子となり、徐々に下層大気に輸送さ れて Es 層の領域からは消滅していくと考えられてい る。鉄やマグネシウムなどの他の金属イオンについて も基本的には同様の化学反応である [16]。

(4) 電離圏電場

電離圏中には熱圏の中性風によって励起される電場(ダイナモ電場)と、磁気圏起源の電場があり、これらの電場が電離圏 F層のイオンドリフトを引き起こし、電離圏密度分布に大きな影響を及ぼすことが知られている。これらの電場は、Es層の高度領域でも存在しており、Es層の生成や変動に影響を与える可能性が示唆されている[17]。しかし、Es層領域での電場とその電場が Es層に及ぼす影響についてはまだ未解明の点が多く、現在様々な研究が進められている[10][18]。以下に紹介する3次元モデルでは電場の影響は無視している。

3.4 GAIA を用いた Es 層の 3 次元シミュレーション

前述のように、これまでに多くのEs層のモデリング研究が行われてきたが、基本構造の再現に留まっており、実際に観測されるEs層の振る舞いを十分な精度で再現できてはいなかった。最近になって、GAIAで得られるデータを用いたEs層形成の3次元シミュレーションモデルが開発され、ある日時・場所で観測されたEs層の実際の変動の様子がほぼ再現された[11]。この研究は、将来的にEs層の数値予測につながるものとして重要な成果である。以下にその概要を述べる。

GAIA は、大気圏と電離圏を同時に解くモデルであるが、電離圏モデルの格子間隔は標準版の場合、電離圏 E 層付近で高度方向が10 km、緯度方向が2.5 度、経度方向が1度である。Es 層は厚さが数百 m~数 km程度であるため、その構造を GAIA で直接再現することはできない。したがって、Es 層のシミュレーションでは、GAIA とは別に局所的な高精度の電離圏モデルを用いて、GAIA の中性大気のデータを入力とすることにより電離圏を高精度で再現した。この局所電離圏モデルは、計算領域は高度方向に85 kmから220 kmまでで、緯度・経度方向には、それぞれ20度の幅としている。この計算領域の中心は、北緯35.7度、東経139.8 度として、日本全体を含むモデルとなっている。格子間隔は、高度方向は高度85 kmから140 kmまで

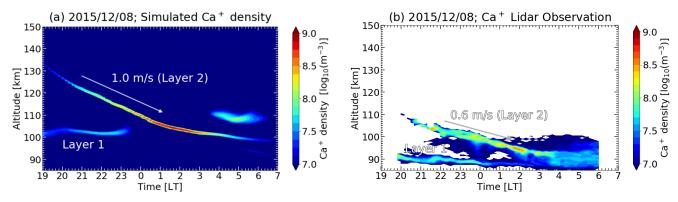
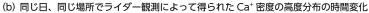


図 3 (a) 2015 年 12 月 8 日北緯 35.7 度、東経 139.8 度で、3 次元シミュレーションで得られた Ca⁺ 密度の高度分布の時間変化



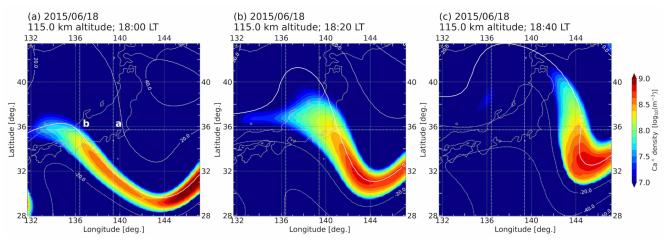


図 4 3 次元シミュレーションで得られた 2015 年 6 月 18 日の日本付近の高度 115 km での Es 層の水平分布の時間変化 カラーコンターは密度を表し、白の点線は東向きの中性風速度を表す。

は 0.5 km、140 km から上は徐々に間隔を広げて上端 付近で 2.0 km とする。水平方向の格子間隔は 0.25 度 としている。金属原子と金属イオンの初期分布はロ ケット観測や理論研究から得られた経験モデルに基づ いて与えている。

図3にシミュレーションの結果と観測で得られた Ca⁺の密度を示す。右図は2015年12月8日に北緯35.7度、東経139.8度でライダーで観測されたCa⁺の密度の高度分布を示している。日本時間20時頃から高度120km付近にEs層が現れ始め、次第に密度を上げつつ下降していく様子が見える。また、高度90km付近から非常にゆっくりと下降していくもう一つの層も観測されている。このようなEs層の二重構造はこれまでにも様々な観測で報告されており、大気潮汐波によるシアの特徴的な構造に対応していると考えられている。

同じ時間・場所に対応した3次元数値シミュレーションの結果が図3の左図である。観測に比べEs層の高度が10km程度高いが、ほぼ同様の層が形成され、下降していく様子が再現されている。他の日についても観測結果と比べた結果、観測されたEs層の大

まかな構造は再現されていることが確認された。

現在、このモデルを用いて日本付近における Es 層の水平方向の広がりや運動を調べる研究も進めている [19]。図 4 は、高度 115 km における日本付近の Ca⁺の密度分布である。シミュレーションで再現された Es 層は特徴的な帯状の形を持ち、速い速度で運動をしていることがわかる。図 4 (a) の中の a と b の場所での鉛直方向の Es 層の構造の時間変化を図5に示す。図5の(a)と(b)はそれぞれ図4のa,b の場所に対応している。Es 層が水平に移動しつつ下降しているため、一地点で見ると複雑な変動を示す様子が再現されている。

この研究によって Es 層が必ずしも中性風のシアだけで形成されているのではないことも明らかになった。高度 110 km 以上の領域では主に中性風のシアによって金属イオン層が形成されるが、その層が下降するに従って、中性風のシアの位置からは外れ始め、むしろ中性風に流されつつ変化していくことがわかった [19]。このことは従来考えられてきた「ウインドシア理論」が必ずしも当てはまらない場合があることを強く示唆しており、Es 層の研究において極めて重要な発見である。

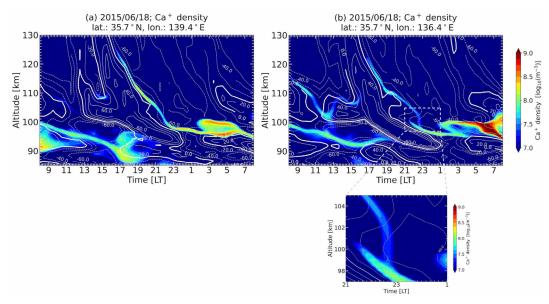


図 5 2015 年 6 月 18 日の (a) 35.7° N, 139.4° E、(b) 35.7° N, 136.4° E の場所での Ca⁺ 密度の時間変化 コンターは東向きの中性風速度、濃い白線は東西風のシアがゼロのところを示す。(b) の下の図は、Es 層の高さが急激に下がった部分を拡大したもの。

GAIA と局所モデルを組み合わせた3次元シミュレーションモデルを用いることによって、同じ日時に実際に観測されたEs層の基本構造の再現に成功した。しかし、細かい構造や変動に関してはまだ十分に再現されているとは言えない。特に、実際にイオノゾンデなどで観測されたEs層の電子密度は時間的に大きく変動しているのに対し、シミュレーションのEs層の電子密度は変化がゆるやかである点が大きく異なっている。この違いについては、以下のようないくつかの原因が考えられる。

- (1) GAIA で計算された大規模な中性風の誤差
- (2) GAIA の分解能では取り扱えないスケールの小さい大気波動の影響
- (3) 背景の金属原子の量と分布の不確定性
- (4) 局所電離圏モデルの境界条件の不確定性
- (5) 電離圏電場の影響

Es層の再現精度の向上のためには、モデルの高精度 化と検証を行うとともに、物理パラメータの与え方の 検討も行っていく必要がある。また今後、イオノゾン デ観測や衛星観測などの発展によってさらに多くの情 報が得られる可能性があり、モデルと観測との比較及 びデータ同化モデルの開発が重要となると思われる。

4 Es 層の数値予測

全球大気圏-電離圏モデル GAIA は、リアルタイムで計算を実行しつつ、数日先までの予測計算を行うことができる。まだ誤差は大きいと考えられるが、電離圏 E 領域の中性風の予測も可能となっている。GAIA

によって予測された中性風を入力として Es 層の 3次元シミュレーションモデルを実行すれば、Es 層を予測することも原理的には可能である。しかし、前述のように現実にはまだ様々な不確定要素があるため、シミュレーションによって直接 Es 層の予測を行うにはさらに多くの検討と改良、検証が必要である。

一方、厳密なシミュレーションを行わずに比較的簡便な方法で Es 層の強度や発生を予測する方法が提案されている [20]。これは式(6)で表される近似的な鉛直イオン速度を用いて鉛直方向のイオン収束率(Vertical Ion Convergence、以下 VIC)を求め、これを Es 層の強度 (foEs) の指数とするものである。すなわち、

$$VIC = -\frac{\partial w_i}{\partial z} \tag{7}$$

を指標とするものである。

実際にGAIAのデータを用いてこの方法で計算した VICとEs層の強度を表す foEsの比較を行った結果が 図 6 である。ここでは、2009年の国分寺で観測された foEsの日平均とGAIAで計算された高度 120 km における VICの日平均を比較した。この結果から、鉛直イオン収束率 VICは foEsと良い相関があることがわかる。季節変化が良く一致しているほか、日変化に関してもおおむね合っている。この一致の理由は、高度 120 km 付近の金属イオンの収束が大まかにはその後の Es層の大きさを決めているためであると推測される。この手法は日変化に関してはある程度良い予測値を与えるが、より短い数時間程度の時間スケールでみると foEsとあまり合っていない。これは GAIAでは 取り扱えない小さいスケールの大気波動が foEsの時

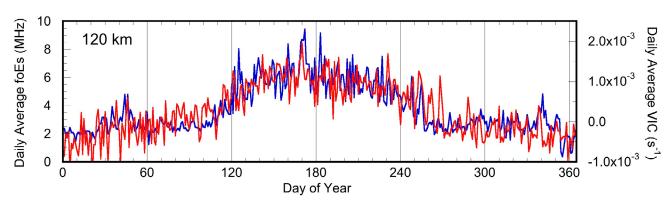


図 6 2009 年の国分寺における日平均した foEs と鉛直イオン収束率 VIC の比較 青線がイオノゾンデで観測された foEs、赤線が GAIA で求められた高度 120 km における VIC を表す。

表 1 2009 年の Es 層発生 (foEs ≥ 8 MHz) の予測結果 予測の Yes は、Es 層が発生すると予測した日、No は発生しないと予測した日を表し、Es 層発生の Yes は実際に Es 層が発生した日、No は発生しなかった日を表す。(a) は持続予測 (明日は今日と同じとする予測)、(b) は VICを用いた予測。下段の値は的中率とスキルスコアを表す。

(a)		Es 層発生	
		Yes	No
予測	Yes	112	32
	No	32	189

的中率= 0.825 スキルスコア= 0.633

(b)		Es 層発生		
		Yes	No	
予測	Yes	124	31	
	No	20	190	
的中率= 0.860 スキルスコア= 0.711				

間変動を引き起こしているためであると考えられる。

表 1 に図 6 の VIC の値を用いて Es 層の発生 (foEs \geq 8 MHz) の予測を行った結果の一例と、それから求めた的中率及びスキルスコアを示す。スキルスコアはいくつかの種類があるが、ここでは Heidke のスキルスコアを用いた [21]。予測精度の比較のため、単純に「今日 Es 層が発生すれば明日も発生する」とした場合の予測方法 (持続予測) との比較を行った。

VIC による予測方法では、以下の判定基準を用いている。

- (1) VIC ≥ 6.1 × 10⁴ の場合は、明日 Es が発生する (Yes)
- (2) VIC ≤ -2.0 × 10⁴ の場合は、明日 Es は発生しない (No)
- $(3)6.1 \times 10^4 > \text{VIC} > -2.0 \times 10^4$ の場合は、明日は今日と同じ(持続予測)

Es層の発生は季節変化が大きく、夏季にはほぼ毎日発生し、冬季はほとんど発生しないため、単純な持続予測の方法でもある程度良い精度で予測できるが、GAIAで得られるVICによる数値予測情報を加えることで、更に予測精度が向上することが確認された[20]。しかし、まだ精度の向上幅は十分とは言えず、更に予

測手法の改良が必要である。

NICTの宇宙天気予報センターで現在試験運用しているリアルタイム GAIA は、数日先までの大気圏と電離圏の予測値を与えることが可能である[5]。このシステムを用いて Es 層の発生予測試験を行ったところ、1~2日先までの Es 層発生に関しては、GAIA による数値予測は有意な情報を与えることがわかった[20]。現在、我々のグループではリアルタイム GAIA を用いた Es 層発生の予測システムの開発を進めている。

5 むすび

Es層は通信や放送、航空管制などに悪影響を及ぼす ことから、その発生予測は宇宙天気予報の大きな課題 となっている。Es層の発生や変動に関しては古くから 様々な観測や数値モデルによる研究が行われてきたが、 基本的にはウインドシア理論に基づく理解に留まって いた。最近になって、GAIA を用いた数値シミュレー ションと高精度の局所電離圏モデルを組み合わせるこ とによって、実際に観測された Es 層の再現が可能と なってきた。その結果、ウインドシア理論だけでは Es 層の変動を説明するには十分でなく、様々な物理過程 が関与していることが明らかになった。また、GAIA を用いた予測方法の開発によって Es 層の発生予測に 関しても重要な手がかりが得られた。しかしながら、 ある場所における Es 層の発生時刻や規模(foEs の大 きさ) などの予測は依然難しいのが現状である。今後、 GAIA や局所電離圏モデルの改良を進めるとともに、 データ同化を用いた予測手法の開発を行うことによっ て実用的な予測を目指していく。

謝辞

本稿の作成は、総務省委託業務「電波伝搬の観測・ 分析等の推進」によって行われたものである。

【参考文献】

- D. L. Wu, C. O. Ao, G. A. Hajj, M. T. Juarez, and A. J. Mannucci, "Sporadic E morphology from GPS-CHAMP radio occultation," J. Geophys. Res., vol.110, A01306, 2005. DOI: 10.1029/2004JA010701
- 2 H. Shinagawa, Y. Miyoshi, H. Jin, and H. Fujiwara, "Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA," J. Geophys. Res. Space Physics, vol.122, Issue4, pp.4450– 4465, 2017. DOI: 10.1002/2016JA023778
- 3 H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, "Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure," J. Geophys. Res., vol.113, A09307, 2008. DOI:10.1029/2008JA013301
- 4 H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, "Vertical connection from the tropospheric activities to the ionospheric longitudinal structure simulated by a new Earth's whole atmosphere-ionosphere coupled model,"
 J. Geophys. Res., vol.116, A01316, 2011. DOI: 10.1029/2010JA015925
- 5 C. Tao, H. Jin, Y. Miyoshi, H. Shinagaw, H. Fujiwara, M. Nishioka, and M. Ishii, "Numerical Forecast of the Upper Atmosphere and Ionosphere using GAIA," Earth Planets and Space, vol.72, article number 178, 2020. DOI:10.1186/s4062 3-020-01307-x
- 6 J. D. Whitehead, "Production and prediction of sporadic E," Rev. Geophys., vol.8, Issue 1, pp.65–144, 1970. DOI: 10.1029/RG008i001p00065
- 7 W.-H. Yeh, J.-Y. Liu, C.-Y. Huang, and S.-P. Chen, "Explanation of the sporadic-E layer formation by comparing FORMOSAT-3/COSMIC data with meteor and wind shear information," J. Geophys. Res. Atmos., vol.119, Issue 8, pp. 4568–4579, 2014. DOI: 10.1002/2013JD020798
- 8 S. Kato, T. Aso, T. Horiuchi, J. Nakamura, and T. Matsuoka, "Sporadic-E formation by wind shear, comparison between observation and theory," Radio Sci., vol.7, pp359–362, 1972.
- 9 B. P. Williams, C. L. Croskey, C. Y. She, J. D. Mitchell, and R. A. Goldberg, "Sporadic sodium and E layers observed during the summer 2002 MaCWAVE/MIDAS rocket campaign," Ann. Geophys., vol.24, pp.1257– 1266, 2006, DOI: 10.5194/angeo-24-1257-2006
- 10 J. Krall, J. D. Huba, E. Nossa, N. Aponte, and D. P. Drob, "SAMI3 simulations of ionospheric metallic layers at Arecibo," J. Geophys. Res. Space Physics, vol.125, Issue3, 2020. DOI: 10.1029/2019JA027297
- 11 S. Andoh, A. Saito, H. Shinagawa, and K. M. Ejiri, "First simulations of day-to-day variability of mid-latitude sporadic E layer structures," Earth Planets and Space, vol.72, article number165, 2020. DOI: 10.1186/ s40623-020-01299-8
- C. Haldoupis, D. Pancheva, W. Singer, C. Meek, and J. MacDougall, "An explanation for the seasonal dependence of midlatitude sporadic E layers," J. Geophys. Res., vol.112, A06315, 2007. DOI: 10.1029/2007J A012322
- 13 T. Maruyama, H. Kato, and M. Nakamura, "Meteor-induced transient sporadic E as inferred from rapid-run ionosonde observations at midlatitudes," J. Geophys. Res., vol.113, A09308, 2008. DOI: 10.1029/2008JA013362
- 14 W. Singer, U. von Zahn, and J. Weiß, "Diurnal and annual variations of meteor rates at the arctic circle," Atmos. Chem. Phys., vol.4, Issue 5, pp.1355–1363, 2004. DOI: 10.5194/acp-4-1355-2004.
- W. Feng, D. R. Marsh, M. P. Chipperfield, D. Janches, J. Höffner, F. Yi, and J. M. C. Plane, "A global atmospheric model of meteoric iron," J. Geophys. Res. Atmos., vol.118, pp.9456–9474, 2013. DOI: 10.1002/jgrd.50708
- 16 J. M. C. Plane, W. Feng, and E. C. M. Dawkins, "The mesosphere and metals: Chemistry and changes," Chemical Reviews, vol.115, no.10, pp.4497–4541, 2015. DOI: 10.1021/cr500501m
- 17 L. C. A. Resende, I. S. Batista, C. M. Denardini, A. J. Carrasco, V. F. Andrioli, J. Moro, P. P. Batista, and S. S. Chen, "Competition between winds and electric fields in the formation of blanketing sporadic E layers at equatorial regions," Earth Planets and Space, vol.68, article number201, 2016. DOI: 10.1186/s40623-016-0577-z
- 18 J. Moro, L. C. A. Resende, C. M. Denardini, J. Xu, I. S. Batista, V. F. Andrioli, and N. J. Schuch, "Equator,ial E region electric fields and sporadic E layer responses to the recovery phase of the November 2004 geomagnetic storm," J. Geophys. Res. Space Physics, vol.122, pp.12,517–12,533, 2017. DOI: 10.1002/2017JA024734
- 19 S. Andoh, A. Saito, and H. Shinagawa, "Temporal evolution of three-dimensional structures of metal ion layer around Japan simulated by a mid-latitude ionospheric model," J. Geophys. Res. Space Physics., vo.116, Issue 6, 2021. DOI: 10.1029/2021JA029267

- 20 H. Shinagawa, C. Tao, H. Jin, Y. Miyoshi, and H. Fujiwara, "Numerical prediction of sporadic E layer occurrence using GAIA," Earth Planets and Space, vol.73, article number 28, 2021. DOI: 10.1186/s40623-020-01330-y
- 21 https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/53/4_6.pdf, May 24, 2021.



品川裕之 (しながわ ひろゆき) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 研究員 Ph.D. 超高層大気物理学