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 -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 metallic 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 atmosphereionosphere 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O₂⁺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、2~3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O₂⁺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 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 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 km ~ 120 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

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

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

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

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

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(E_1)のみとしている。ま た、Es 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。

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

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 O₂⁺ 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。

 $Ca^+ の場合、主な化学反応過程は以下のものである。$ $Ca + hv → Ca^+ + e : 光電離による生成$ $Ca + <math>O_2^+ \rightarrow Ca^+ + O_2$:背景イオンとの電荷交換による生成 Ca + NO⁺ → Ca⁺ + N₂

: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) 電離圈電場

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 (b) 同じ日、同じ場所でライダー観測によって得られた 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120 km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90 km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、

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

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120km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 120km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		(ł		n)	Es 層発生	
		Yes	No		(t	,,	Yes	No
予測	Yes	112	32		予測	Yes	124	31
	No	32	189			No	20	190
的中率= 0.825 スキルスコア= 0.633					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 ≥ 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)6.1×10⁴ > VIC > -2.0×10⁴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
- 12 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
- 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.
- 15 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 threedimensional 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