



## 解説

# 観測ロケットによる電離圏スポラディックE層の空間構造の解明

## Sounding Rocket Observations of Spatial Structure of Sporadic E Layers in the Ionosphere

栗原純一<sup>1</sup>, 岩上直幹<sup>1</sup>, 高橋隆男<sup>2</sup>, 石坂圭吾<sup>3</sup>, 熊本篤志<sup>4</sup>,  
阿部琢美<sup>5</sup>, 松岡彩子<sup>5</sup>, 石井 守<sup>6</sup>, 栗原宜子<sup>5</sup>, 野村麗子<sup>5</sup>

KURIHARA Junichi, IWAGAMI Naomoto<sup>1</sup>, TAKAHASHI Takao<sup>2</sup>, ISHISAKA Keigo<sup>3</sup>,

KUMAMOTO Atsushi<sup>4</sup>, ABE Takumi<sup>5</sup>, MATSUOKA Ayako<sup>5</sup>, ISHII Mamoru<sup>6</sup>,

KOIZUMI-KURIHARA Yoshiko<sup>5</sup> and NOMURA Reiko<sup>5</sup>

北海道大学大学院理学研究院, <sup>1</sup>東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup>東海大学工学部, <sup>3</sup>富山県立大学工学部,

<sup>4</sup>東北大学大学院理学研究科, <sup>5</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>6</sup>情報通信研究機構

(原稿受付: 2015年11月12日)

地球電離圏の高度 90~150 km の E 領域に散発的に発生する, 電子密度の高いスポラディック E 層 ( $E_S$  層) は, 特に VHF 帯の電波を良く反射し, 通信障害を引き起こすことが知られている.  $E_S$  層の研究は長い間行われてきたが, その空間的な構造については未解明な点が多い.  $E_S$  層は中性大気の流れと地球磁場の効果によって,  $Mg^+$  等の金属イオンが集束して生成される. 2008年の観測ロケット S-310-38 号機実験により, 世界で初めて  $E_S$  層内の  $Mg^+$  の 2 次元水平構造の紫外撮像観測に成功したが, ロケットの歳差運動のために観測装置の視野が予定から逸れてしまい, 観測結果は大きな制約を受けた. 2014年8月の観測ロケット S-520-29 号機実験では, 姿勢制御装置を用いてロケットの姿勢を安定させて観測することをめざした. 姿勢制御は期待通りではなかったものの, 前回よりも広範囲で  $E_S$  層内の  $Mg^+$  密度構造を観測することに成功した. 本稿では  $E_S$  層の不均一構造に関する最新の観測的研究について紹介する.

### Keywords:

ionosphere, ionosonde, sporadic E layer, magnesium ion, sounding rocket, ultraviolet imaging

## 1. はじめに

### 1.1 電離圏とは

地球を取り巻く大気が, 主に太陽からの紫外線によって部分的に電離されてプラズマ状態になった「電離圏」と呼ばれる領域が, 約 60 km~1000 km の高度に存在している. 中性の地球大気の電離によって生成されたプラズマは, イオンと電子との再結合によって中性の大気に戻り消滅する. この生成消滅過程において, 中性大気の密度や組成が高度によって異なるだけでなく, 太陽紫外放射のスペクトル自体も中性大気の電離や解離に伴う吸収によって高度とともに変化する. その結果, 電離圏のプラズマの密度, すなわち電子密度は高度方向に特徴的な層構造を持ち, 図 1 のように電子密度が相対的に高い「電離層」が複数生成され, 下から D, E, F 層と呼ばれている. また, 各層の出現する高度領域をそれぞれ D, E, F 領域と呼ぶ. 電離層の電子密度は太陽紫外放射に依存するため, 時刻や季節, さらには太陽の活動度によって異なる.

D 層は高度 60~90 km の D 領域に発生し, 主に太陽紫外放射の中でも特に強いライマン  $\alpha$  線 (121.6 nm) による NO 分子の電離によって生成される. この高度では電子との再

結合反応が速い分子イオンが支配的なため, 太陽紫外放射のない夜間に D 層はほぼ消滅する.

E 層は高度 90~150 km の E 領域に発生し, 極端紫外放射によって電離された  $N_2$ ,  $O_2$  分子が複雑な化学反応過程を経て  $NO^+$  や  $O_2^+$  を主成分として生成される. 夜間には電子密度が昼間よりも 2 桁程度減少する.

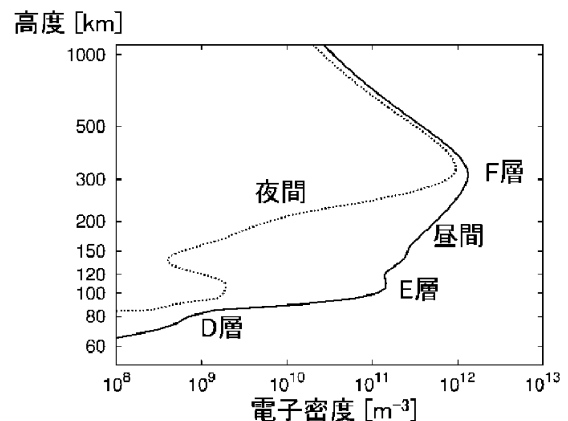


図 1 電離圏の電子密度の高度分布.

corresponding author's address: Hokkaido University, Sapporo, HOKKAIDO 060-0810, Japan

corresponding author's e-mail: kurihara@mail.sci.hokudai.ac.jp

$F$ 層は高度150~500 kmの $F$ 領域に発生する。電子密度のピークとなる高度300 km付近では $O^+$ イオンが支配的だが、高度と共に $He^+$ イオン、さらに高高度では $H^+$ イオンなどの軽原子イオンが支配的になる。 $F$ 領域には高度150~200 kmに $F_1$ 層と高度200 km以上に $F_2$ 層という2つの層が発生する。 $F_1$ 層以下の高度では、プラズマの生成と消滅による光化学平衡が支配的なため、昼間と夜間とでは密度が大きく異なる。一方、 $F_2$ 層以上の高度では中性大気の密度が低いために生成・消滅がともに減少し、重力とプラズマの圧力勾配力が釣り合った拡散平衡の状態にあるため、昼夜を問わず $F_2$ 層は形成されている。

## 1.2 電離層の観測

電離層に対しては様々な観測手法が存在するが、古くから最もよく用いられてきた方法は電波を利用した観測である。電離層では、入射する電波の反射、屈折、回折、および散乱が起こる。20世紀初頭における電離層の実質的な発見は、当時発明されたばかりの無線通信が大西洋を越えて成立したという観測的事実から、上空に電波を反射する層の存在が示唆されたことに端を発している。

電離層は特に短波帯(3~30 MHz)の電波を反射する性質がある。地上から送信された電波が電離圏に垂直に入射したとき、送信電波の周波数が電子プラズマ周波数と一致した高度で電波が反射される。電子プラズマ周波数は電子密度の平方根に比例するので、周波数を掃引しながらパルス状の電波を送信すると、その周波数に対応した電子密度をもつ高度から、その高度に対応した遅れ時間をもって反射電波(エコー)が返ってくる。

これを利用して、電離圏の電子密度の高度分布を得る装置が1930年代に発明されたイオノゾンデ(ionosonde)である。ただし、この観測方法では電離圏の電子密度が最大となる高度よりも下の高度からのみ反射電波が得られる。その最高周波数を臨界周波数と呼び、それより高い周波数では電波は電離圏を突き抜ける。

日本国内では現在、国立研究開発法人情報通信研究機構がサロベツ(北海道)、国分寺(東京都)、山川(鹿児島県)、および大宜味(沖縄県)の4か所にイオノゾンデ観測施設を設置して電離圏の定常観測を15分間隔で行っている。

イオノゾンデによる観測から得られた、周波数に対するエコー強度の高度分布を表したものをイオノグラムと呼ぶ。図2は山川におけるイオノグラムの例であるが、横軸が送信電波の周波数、縦軸がエコーの遅延時間から算出した見かけの高度、色がエコーの相対的な強度を表している。このイオノグラムから各電離層の見かけの高度や臨界周波数などのパラメータを読み取り、定常的に記録し続けることで、電離圏の状態およびその変動に対する貴重なデータが世界各地で日々蓄積されている。

## 2. スポラディックE層

### 2.1 スポラディックE層とは

電離圏E領域にしばしば電子密度の高い層が発生することがあり、「散発的な」という意味の英語の"sporadic"から

「スポラディックE層( $E_S$ 層)」と呼ばれている。 $E_S$ 層が背景のE層よりも数桁以上高い電子密度を持つまでに発達した場合には、通常は電離層を突き抜けるはずのVHF帯(30~300 MHz)の電波をも反射する。そのため、以前はテレビ放送の受信障害を引き起こす原因としてよく知られていた。現在、テレビ放送はさらに周波数の高いUHF帯(300 MHz~3 GHz)を使った地上デジタル放送に移行したために影響を受けなくなったが、VHF帯のFMラジオ放送などはいまだに影響を受けることがある。例えば、FMラジオを聴いていると、中国・韓国などの周辺国のテレビ・ラジオ放送が突然聴こえ始めるといった混信現象が $E_S$ 層による電波反射によって発生する。

$E_S$ 層が発生すると、イオノグラムの様相は一変する。図3は $E_S$ 層発生時のイオノグラムの例であるが、高度100 km付近に発生した $E_S$ 層によるエコーが25 MHzを超える周波数まで達している。このように $E_S$ 層の臨界周波数が $F$ 層の臨界周波数を超えるほど発達した場合には、 $F$ 層は $E_S$ 層に遮蔽されてエコーが得られなくなる。なお、高度200 km・300 km付近にみられるエコーは、 $E_S$ 層で反射された電波の地表面反射が $E_S$ 層によって再反射された二次的・三次的なエコーであり、見かけ上、 $E_S$ 層の2倍・3倍の高度にあらわれる。

### 2.2 Wind Shear 理論

$E_S$ 層が発生するメカニズムは、1960年代に初めて提唱された「Wind Shear 理論」によって多くの場合で説明できる[1, 2]。この理論は、ある高度を境に上下で中性大気の水平

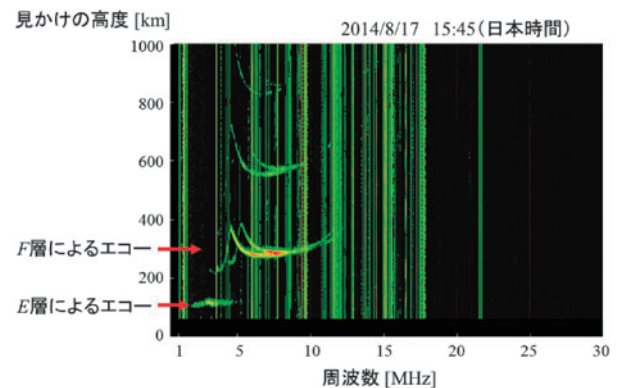


図2 山川におけるイオノグラムの例。

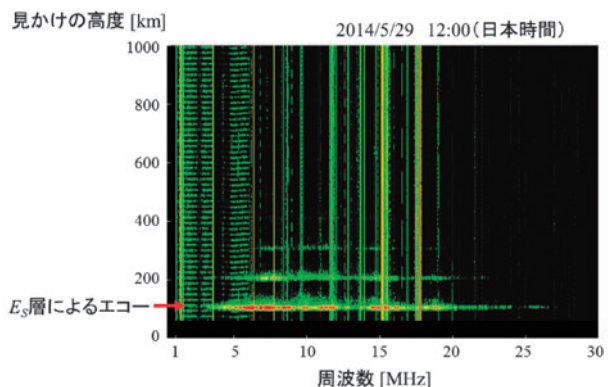


図3  $E_S$ 層発生時のイオノグラムの例。

風が逆向きの状態，すなわちシアア (Shear) があると，上下にあるイオンが地球磁場の効果を受けてその中間の高度に収束して  $E_S$  層が形成される，というものである。

図4にその仕組みを模式的に示した。仮に  $E$  領域のある高度より上で西向きの風，下で東向きの風が吹いているとすると，イオンも中性大気分子との衝突によって，風と同じ方向に摩擦力を受けて引っ張られる。しかし，北向きの水平成分を持った地球磁場があるために，イオンはローレンツ力と摩擦による力を受けてドリフト運動をする。これは実験室プラズマでは再現の困難な，地球電離圏特有の現象で，磁場中でイオンと中性粒子との衝突があり，なおかつ中性粒子に平均運動 (風) がある場合に起こるドリフト運動である。その結果，西向きの風に対しては斜め下向き，東向きの風に対しては斜め上向きにイオンが移動し，その中間に集まる。電子の場合は，中性大気分子との衝突周波数がジャイロ周波数よりもずっと低いためにその運動は磁力線に束縛されているが，プラズマの電気的中性を保つためにイオンとともに磁力線に沿って鉛直方向に移動する。このようなイオンと電子の運動もまた，拡散よりも中性粒子との衝突が卓越する電離圏  $E$  領域ならではの現象である。このように Wind Shear 理論では  $E$  領域においてある条件を満たす中性風シアアが存在することが必要とされるが，実際に  $E_S$  層発生高度に中性風シアアが存在することが観測されている [3]。また，発達した  $E_S$  層は数 km 以下の厚さであることが多い。

中性風シアアの成因は，大気中を伝播する波動と強い関係がある。地球大気には様々な時間的・空間的スケールを持った波動が伝播しており，その中でも大気潮汐波と呼ばれる大気波動が  $E_S$  層の形成と高度変化に大きく寄与していると考えられている。大気潮汐波は太陽放射による地球大気の加熱を励起源としており，1日 (24時間) 周期，半日 (12時間) 周期，8時間周期などの周期的な変動を持つ。このような大気波動が引き起こす風速変動の鉛直方向における「節」にあたる高度が中性風シアアの中間点に対応していると推測される。この節の高度が時間とともに下方に伝搬することに対応して， $E_S$  層の高度が下がる現象がしばしば観測されている [4]。

$E_S$  層の発生頻度は，その名の通り散発的であり，日々の  $E_S$  層の発生を地上の天気予報のように的確に予測するこ

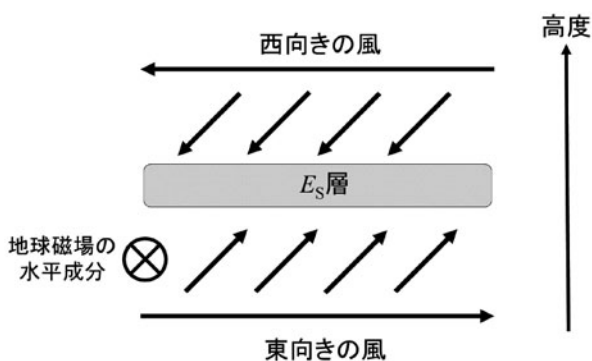


図4 Wind Shear 理論の模式図。

とは極めて困難である。しかし，統計的には地理的・季節的な特徴を有している。一般的に  $E_S$  層の発生頻度は (厳密には地理的ではなく，磁氣的な) 中緯度域で高く，極域と赤道域では低い。これは Wind Shear 理論から明らかな通り，地球磁場の向きが中緯度では北半球で斜め下向き，南半球で斜め上向きとなっており，イオンと電子の集束に好都合なためである。極域では磁場の向きが鉛直に近く，磁場の水平成分が弱いためにイオンが鉛直方向にドリフトしにくい。反対に赤道域では磁場の向きが水平に近く，電子が鉛直方向に移動できないため，ドリフトしようとするイオンは引き戻されてしまう。季節的には， $E_S$  層の発生頻度は南北半球それぞれの夏季に高くなる傾向がある。この季節依存性については最近まで謎とされてきたが，前述の大気潮汐波による中性風シアアが夏季に強まることと関係すると示唆されている [5]。

### 2.3 金属原子イオン

$E_S$  層の形成にとって，もう一つ重要な条件がある。それは金属原子イオンの存在である。プラズマの密度が高くなると，イオンと電子の再結合も加速する。再結合反応の速さは電子密度の二乗に比例し，イオンの種類に依存する。 $E_S$  層の寿命は数時間以上であるが， $E$  領域の主成分である  $NO^+$  や  $O_2^+$  などの分子イオンの場合，集束する速さに対して解離再結合の反応速度が速いため，数時間も高い密度を維持することができない。ところが， $E_S$  層は比較的再結合反応の遅い  $Fe^+$  や  $Mg^+$  などの金属原子イオンによって支配的に形成されていることが，これまでの観測からわかっている [6]。

この高度領域に豊富に存在する金属原子イオンは，流星によって供給されている。流星とは惑星間空間を漂う流星物質が地球大気に高速で突入する際の加熱により気化・プラズマ化して発光する現象であるが，その元となる流星物質は主に彗星から放出された塵と考えられ，鉄やマグネシウムなどの金属を多く含んでいる。流星物質が大気圏突入によってプラズマ化して金属イオンを発生させる高度が，主に  $E$  領域の高度に相当する。気化・プラズマ化した流星物質は様々な化学過程を経ながら下方へと輸送され，いずれは地表または海底に降り積もるが，地球大気には流星物質が1日あたり数10tから100t近くも降り注いでいると推測されている。このため， $E$  領域には金属原子イオンが電離圏の外部から恒常的に供給されており， $E_S$  層の形成に重要な役割を果たしている。

## 3. スポラディック $E$ 層と電離圏プラズマの現象

### 3.1 $E_S$ 層が関係する現象

電離圏プラズマ物理学の研究対象として， $E_S$  層はそれ自体が興味深い現象であるだけでなく，さらにほかの現象とも密接な関係がある点が大変重要である。

例えば，中緯度電離圏における沿磁力線不規則構造 (Field-Aligned Irregularity; FAI) と呼ばれる現象 [7] は， $E$  領域や  $F$  領域のプラズマ密度に磁力線に沿った粗密構造が存在する場合に，レーダー電波の進行方向を磁力線に直交させると，エコーが観測される現象である。レーダーの

送信電波の波長に対して、不規則構造が半波長の空間スケールを持つと電波の強い散乱を起こし、エコーが得られる。この現象は、 $E_S$  層内の空間的な密度の不均一が原因で発生することが示唆されている[8]。前述のように、電離圏では電子のジャイロ周波数が相対的に高く、磁力線に垂直な面内では電子の運動は磁力線に束縛されるものの、磁力線に沿う方向には電子が比較的自由に動ける。言い換えると、磁力線に沿う方向には導電率が非常に高いため、その方向には等電位とみなせる。仮に  $E_S$  層内の電子密度に不均一な構造があると局所的に磁力線に垂直な面内で分極電場が生じ、その電場が磁力線に沿って投影 (マッピング) されることで、プラズマの不規則構造が磁力線に沿って延伸すると考えられている。

さらに、最近の計算機シミュレーションによって、 $E_S$  層の不均一構造に起因する分極電場が磁力線に沿って  $F$  領域にマッピングされ、 $F$  領域に発生する中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) と呼ばれる現象の成長率を急激に加速することがわかってきた[9]。MSTID は水平方向に数 100 km スケールの波状構造を持った電子密度の擾乱が伝搬する現象だが、地上にある GPS 受信機網を利用した全電子数の観測や大気光イメージャーによる光学観測によって、その特徴が捉えられている。このように電離圏プラズマ物理学では高度の異なる  $E$  領域と  $F$  領域のプラズマが電磁氣的に結合している現象が徐々に明らかになってきており、 $E$ - $F$  領域結合過程として注目されている。

### 3.2 $E_S$ 層の不均一構造

水平に均一な層状の  $E_S$  層が発生するメカニズムは Wind Shear 理論で説明できるが、上記の現象において前提となっている  $E_S$  層の不均一構造の成因については、実はまだ解明されていないのが現状である。 $E_S$  層内に不均一構造を形成する機構については、大きく分けて以下の 3 つの仮説があり、それぞれある程度の観測的証拠を有している。

一つ目は、古くから提唱されてきた説で、大気重力波が  $E_S$  層を空間的に変調させるという説である[10, 11]。大気重力波とは重力を復元力として大気中を伝播する大気波動の一種で、同じ大気波動でも前述の大気潮汐波と比べると格段に時間的・空間的スケールは小さい。この大気重力波によって、本来は水平で一様な  $E_S$  層が周期的な波状構造に歪められるという説である。

二つ目は、中性風シアによる Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定が  $E_S$  層内に不均一構造をつくるという説である[12, 13]。KH 不安定とは速度の異なる流体の境界面において発生する現象であるが、 $E_S$  層には中性風シアが存在するために KH 不安定が発生しやすい状態にある。KH 不安定による中性大気の渦はシアの断面に周期的に発生する性質があり、 $E_S$  層を鉛直方向から見ると縞模様のようなプラズマの不均一構造になると推測される。

三つ目は、 $E_S$  層が潜在的にもつプラズマ不安定性が不均一構造をつくるという説である[14]。 $E_S$  層は中性風シアによる東西風速の節の位置にあるため、鉛直方向に擾乱が発生すると、節の上側に持ち上げられたプラズマは中

性風と地球磁場の効果で斜め上向き、節の下側で斜め下向きの分極電場を作る。その結果、初期の擾乱が成長するとともに、北西 - 南東方向に伸びた不均一構造ができるとするという説である。この不安定性は  $E_S$  層が形成される条件そのものに由来し、外部から初期擾乱を与えられるだけで成長するため、 $E_S$  層が本質的に持つ不安定性である、という意味で「 $E_S$  層不安定」とも呼ばれる。

これら三つの説には  $E_S$  層内に形成される不均一構造の空間的スケールや方向、その成長の時間的スケールなどの特徴に違いがある。特に、 $E_S$  層不安定による説では、北西 - 南東方向の構造が卓越するという特徴があるが、これが前述の  $F$  領域において観測される MSTID が持つ北西 - 南東方向の波面構造と相関があると示唆されている[15]。

したがって、 $E_S$  層の不均一構造を何らかの観測方法で可視化することができれば、上記の仮説のうちのどれが整合するか検証できるはずである。しかしながら、従来の観測手法では様々な制約のために広範囲にわたる  $E_S$  層の空間構造の把握が困難であった。

## 4. 観測ロケットによる実験

### 4.1 観測ロケットによる $E_S$ 層の研究

観測ロケット (Sounding rocket) とは、人工衛星を軌道以上に輸送するロケットとは異なり、観測機器を搭載して打ち上げられ、弾道飛行をしながら観測や実験を行うためのロケットである。気球や衛星などのほかの手段では到達できない高度 60~200 km の領域において、その場 (In situ) 観測が可能な唯一の観測手段である。日本では国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所が観測ロケットを国内外の発射場から年間数機程度打ち上げており、超高層大気・電離圏の観測のみならず、天文や微小重力環境などの研究にも用いられている。現在、宇宙科学研究所が使用する観測ロケットは S-310 型、S-520 型、SS-520 型の 3 機種があり、搭載する観測機器の重量や最高到達高度などによって使い分けられる。S は 1 段、SS は 2 段式ロケットを表し、310 と 520 の数字はロケットの直径 (mm) を表している。国内では鹿児島県の大隅半島にある内之浦宇宙空間観測所 (USC) から打ち上げられている。

観測ロケットを利用した  $E_S$  層の観測的研究は国内外で行われてきたが、特に大きな成果を残した研究として 1996 年 8 月に行われた SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyusyu) [16] および 2002 年 8 月に行われた SEEK-2 [17] の二つの実験がある。SEEK の目的は、それ以前にすでに提唱されていた大気重力波によって  $E_S$  層が変調され、FAI を発生するという仮説を検証することであり、観測ロケットによるその場観測と地上のレーダーによる遠隔観測を組み合わせた大規模なキャンペーン観測が行われた。その成果が基になって、大気重力波以外の、KH 不安定や  $E_S$  層不安定を要因とする  $E_S$  層の不均一構造形成を説明する新たな仮説が生まれ、 $E_S$  層関連現象の研究は飛躍的に発展した。

### 4.2 S-310-38 号機実験

筆者らの提案により、日本で 2008 年 2 月に行われた S-310-38 号機観測ロケット実験では、 $E_S$  層の空間構造を明

らかにすることを目的として、新たに開発されたマグネシウムイオンイメージャー (Magnesium Ion Imager; MII) による撮像観測が行われた[18]。

前述したとおり、 $E_S$  層は主に金属原子イオンで構成され、 $Mg^+$  は  $Fe^+$  に次いで多く含まれることが知られている。 $Mg^+$  は紫外域に 279.6 nm と 280.3 nm の二つの共鳴散乱輝線を持つことから、 $Mg^+$  によって共鳴散乱された太陽紫外放射を観測することができれば、 $E_S$  層内のプラズマの分布を推定できる可能性がある。しかし、紫外共鳴散乱光は成層圏のオゾン層による吸収を受けるため、地上から観測することは不可能である。そこで、観測ロケットを用いて  $E_S$  層を上から撮像するという世界初の試みが提案された。この実験では、下層大気的气体分子によるレイリー散乱光の混入を避けるため、観測ロケットの打上げを日没直後の  $E$  領域以上の高度が日照、それ以下では日陰となる時間帯に設定した。

通常、観測ロケットは姿勢を安定させる目的で 1~2 Hz 程度のスピン運動をしながら飛翔するため、検出素子が面的に配置された光検出器 (エリアセンサー) では画像がぶれてしまい、撮像が難しい。本実験では観測ロケットのスピン運動を逆手に取り、検出素子が一列に並んだ光検出器 (ラインセンサー) で  $Mg^+$  共鳴散乱光を検出し、スピン運動を利用してスキャンをすることを発案した (図 5)。MII は  $Mg^+$  共鳴散乱光を 280 nm 付近のみを透過するバンドパスフィルタを通し、1 度×10度の視野を持つ光学系で集光し、8チャンネルの1次元マルチアノード光電子増倍管で検出する。このMIIの視線方向をスピン軸から150度(下方斜め30度方向)に設置することで、約1Hzのスピン運動により、半径30度×幅10度のドーナツ状の視野をスキャンする。さらに、観測ロケットが  $E_S$  層の上を弾道飛行することで、ドーナツ状の視野も飛翔経路上を移動し、より広範囲を撮像できる。

MII を搭載した観測ロケット S-310-38 号機は、2008年2月6日18時14分40秒(日本標準時)に USC から南東方向に向かって打ち上げられた。この時、山川におけるイオノグラムから、高度100 km 付近に  $E_S$  層の発生が確認されている。図 6 は観測ロケットに搭載されたインピーダンスプローブ

と呼ばれる装置によってその場で観測された電子密度の高度分布である。点線が観測ロケットの上昇時、実線が下降時の観測結果であり、両者は観測ロケットの軌道上で場所が異なるために電子密度に多少の差はあるが、いずれの場合も高度100 km 付近に  $E_S$  層が発生していることがわかる。山川のイオノグラムと合わせて、観測された  $E_S$  層は少なくとも約 200 km 以上の範囲に広がっていると言える。

この実験における MII の観測により、世界で初めて  $E_S$

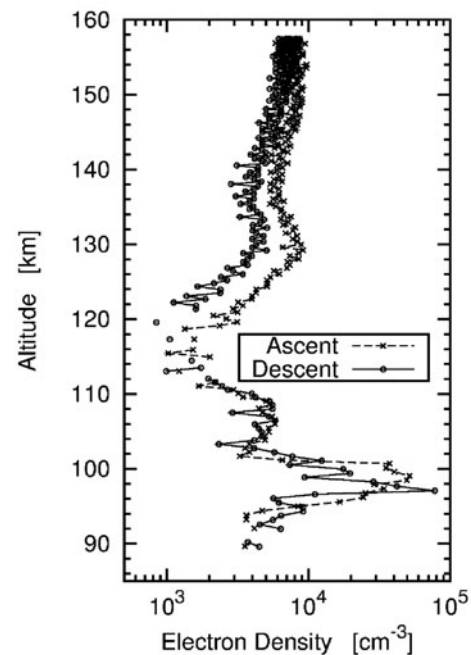


図 6 インピーダンスプローブによってその場で観測された電子密度の高度分布 (参考文献[18]の図 5 を引用)。

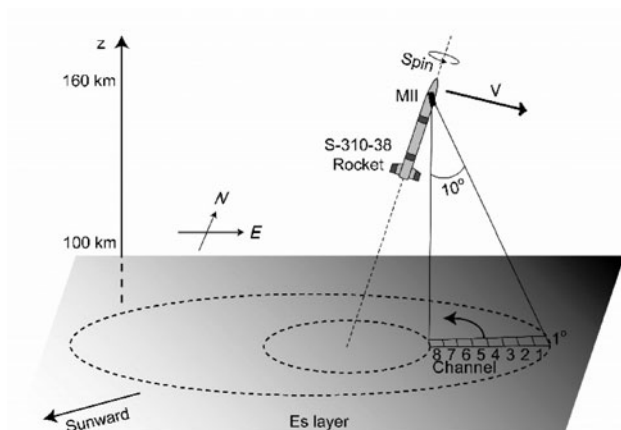


図 5 MII による観測の模式図 (参考文献[18]の図 1 を引用)。

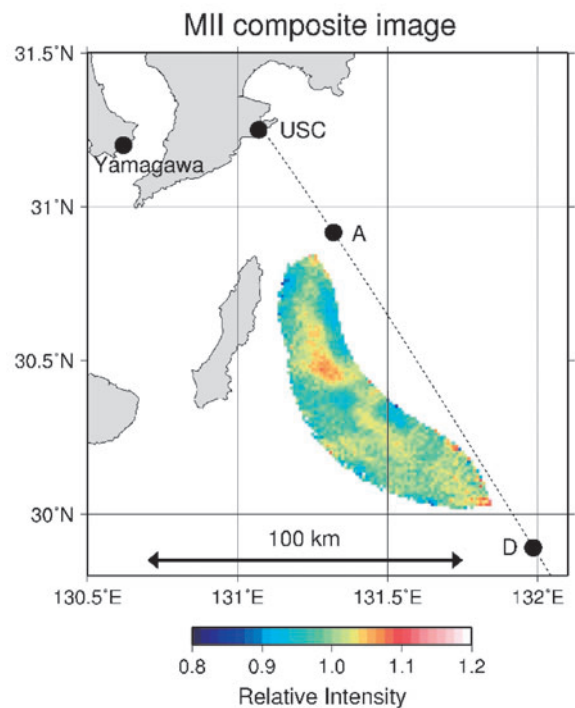


図 7 MII で観測された散乱光の相対的な強度分布 (参考文献[18]の図 4 を引用)。

層内の  $Mg^+$  の 2 次元水平構造の観測に成功した。図 7 は MII で観測された散乱光の相対的な強度分布であり、値が大きくなるほど  $Mg^+$  共鳴散乱光が相対的に強い、すなわち  $E_S$  層内の  $Mg^+$  密度が高いことを表している。この観測領域において、 $E_S$  層内の  $Mg^+$  密度擾乱は、20%程度の振幅を持った細長いパッチ状の構造を形成し、その構造は北西-南東方向に連なっていた。この構造はこれまで提唱されてきた  $E_S$  層不安定によって形成される波面構造と特徴が一致することから、 $E_S$  層不安定の存在を観測的に示唆する結果となった。

#### 4.3 S-520-29 号機実験

S-310-38 号機実験の結果は、 $Mg^+$  共鳴散乱光観測が  $E_S$  層の不均一構造の解明に有効であることを示したが、有意な観測領域が約  $100 \text{ km} \times 30 \text{ km}$  の範囲に限定されたために、プラズマ不安定機構の存在を裏付ける北西-南東構造の空間的な周期性については明らかになっていない。また、観測ロケットによるその場観測とも対象領域が一致しておらず、他の搭載機器による電子密度観測結果などとの直接比較は不可能であった。

この原因は観測ロケットの飛翔時の姿勢にある。これまでの S-310 型ロケットの飛翔中における機軸の歳差運動は半径  $10 \sim 20$  度程度だが、S-310-38 号機の場合は歳差運動が半径約 25 度と大きく、また歳差中心自体も天頂から東に約 30 度傾いていたため、MII の視野が当初予定していた領域よりも大きく西にずれてしまった。視野が西になるほど下層大気からのレイリー散乱が相対的に明るくなり、ある位置よりも視野が西側にある場合には MII の出力が飽和してしまったため、有意な観測データは全体の 1/4 程度であった。

そこで、S-310-38 号機実験の成果を再検証するために 2014 年 8 月に行われた S-520-29 号機実験では、観測ロケットの姿勢制御装置が新たに搭載された。これはサイドジェットと呼ばれる装置で、観測ロケットの機軸に垂直な方向に  $N_2$  ガスを噴出するスラスタを 4 基搭載し、それぞれの噴出を電子制御することで目的の方向に観測ロケットの姿勢を保持することができる。今回は MII による観測領域を最適化するために機軸が天頂方向を維持する制御が計画された。

さらに、S-520-29 号機実験では、280 nm バンドパスフィルタの透過幅が異なる MII を 2 台搭載した。透過幅の狭いフィルタと広いフィルタの出力を比較することで、 $E_S$  層からの  $Mg^+$  共鳴散乱輝線と背景の連続的なレイリー散乱の成分を効果的に分離することができる。姿勢制御装置と MII の改良を検討した結果、大型の S-520 型観測ロケットでの実験が必要となったのである。

観測ロケット S-520-29 号機は、2014 年 8 月 17 日 19 時 10 分 (日本標準時) に USC から打ち上げられた。今回も山川におけるイオノグラムで高度 100 km 付近に  $E_S$  層の発生を確認して打ち上げを実施した。ところが、その後の解析の結果、姿勢制御装置が期待通りに動作せず、観測ロケットが半径約 33 度という非常に大きな歳差運動を起こしていたことが判明した。やはり今回も有意な観測データは全体の

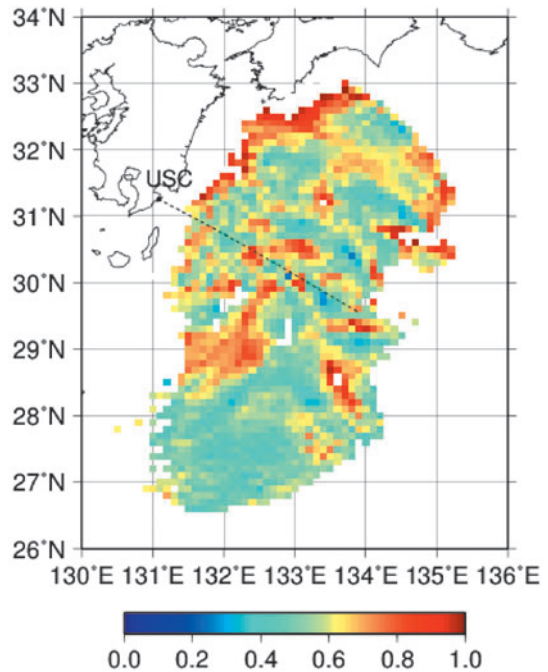


図 8 2 台の MII で観測された散乱光の強度比分布。

1/4 程度に抑えられてしまったが、歳差中心の傾きが東へ約 15 度と S-310-38 号機実験より比較的小さかったことが幸いし、前回よりも広範囲の観測を行うことができた。

図 8 は前述の 2 台の MII によって観測された散乱光の強度比の分布である。 $E_S$  層からの  $Mg^+$  共鳴散乱光が背景のレイリー散乱光よりも強ければ強度比は 1 に近づき、反対であれば 0 に近づく。この結果はまだ精査の余地が残っているが、強度比分布からは北西-南東方向の構造が周期的に並んでいることや、その構造は様々な水平スケールを持つなどの特徴がわかった。今後の詳細な解析により、 $E_S$  層の不均一構造の成因に関わる議論が進むと期待される。

## 5. まとめと今後の展望

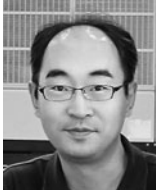
$E_S$  層は地球電離圏プラズマの研究対象としては比較的長い歴史を持つが、観測技術の進展とともに新しい課題が見つかり、今でも未解明な点がいくつも残された現象である。特に 1990 年代以降に観測ロケットやレーダーを用いた観測や計算機シミュレーションにより次々と明らかになった  $E_S$  層の不均一構造は、 $E-F$  領域結合過程という観点から、電離圏プラズマにおいて現在最も注目される研究課題の一つである。今後は本稿で紹介したような  $E_S$  層の微細な空間構造が人工衛星などによって高頻度で観測できるようになれば、空間構造そのものの生成メカニズムだけでなく、MSTID などの  $F$  領域の現象との結合過程の物理についても理解が進むと期待される。

$E_S$  層はその発見以来、科学的な側面だけでなく、社会的にも電波との関連の深い現象である。 $E_S$  層が一般市民の生活に及ぼす影響はテレビ放送の「地デジ化」に伴ってやや薄れたが、同じく VHF 帯を使用している防災行政無線や航空無線などの市民の安全・安心に関わる無線通信の障害という観点からは、 $E_S$  層の影響は引き続き重要である。

$E_S$  層の研究は地球電離圏プラズマ物理学における最先端の科学的意義だけでなく、社会的重要性も伴いながら、今後も発展するであろう。

#### 参考文献

- [ 1 ] J.D. Whitehead, *Nature* **188**, 567 (1960).
- [ 2 ] J.D. Mathews, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **60**, 413 (1998).
- [ 3 ] J.D. Whitehead, *J. Atmos. Terr. Phys.* **51**, 401 (1989).
- [ 4 ] C. Haldoupis, *Space Sci. Rev.* **168**, 441 (2012).
- [ 5 ] Y. H. Chu *et al.*, *J. Geophys. Res.* **119**, 2117 (2013).
- [ 6 ] P.A. Roddy *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L19807 (2004).
- [ 7 ] M. Yamamoto *et al.*, *J. Geophys. Res.* **96**, 15943 (1991).
- [ 8 ] T. Yokoyama *et al.*, *J. Geophys. Res.* **108**, 1054 (2003).
- [ 9 ] T. Yokoyama and D. L. Hysell, *Geophys. Res. Lett.* **37**, L08105 (2010).
- [10] R.F. Woodman *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **18**, 1197 (1991).
- [11] Y.H. Chu *et al.*, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **73**, 883 (2011).
- [12] M.F. Larsen, *J. Geophys. Res.* **105**, 24931 (2000).
- [13] P.A. Bernhardt, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **64**, 1487 (2002).
- [14] R.B. Cosgrove and R. T. Tsunoda, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1864 (2002).
- [15] Y. Otsuka *et al.*, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **70**, 2196 (2008).
- [16] S. Fukao *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1761 (1998).
- [17] M. Yamamoto *et al.*, *Ann. Geophys.* **23**, 2295 (2005).
- [18] J. Kurihara *et al.*, *J. Geophys. Res.* **115**, A12318 (2010).



くり はら じゅん いち  
栗原 純一

2004年東京大学大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻・博士課程修了。JAXA 宇宙科学研究本部、名古屋大学太陽地球環境研究所を経て、現在、北海道大学大学院理学研究院・特任准教授。これまで観測ロケット5機・衛星6機の搭載観測機器の開発に携わる。



い わ み な お もと  
岩上 直幹

地上・ロケット・大気球からの地球惑星大気の光学遠隔測定を行ってきた。昭和基地でオーロラ、ロケットで熱圏一酸化窒素・酸素原子、大気球で成層圏二酸化窒素・オゾン。ここ16年間は金星探査機あかつきに関わり1 $\mu$ mカメラの責任者をやっている。



た か は し た か お  
高橋 隆男

東海大学・工学研究科航空宇宙学専攻教授／情報教育センター教授（工学博士）、研究テーマは、地磁気姿勢計(GA)と太陽センサ(SAS)によるロケット飛翔姿勢の解析、及びロケット搭載用高感度磁力計(MGF)による電離層などの微小磁場変動の観測による3次元電流系システムの解明です。1972年から現在に至るまで、宇宙科学研究所が打ち上げた殆どのロケットに搭載したGA,SAS,MGFの担当者として打ち上げ実験に従事しています。



い し さ か けい ご  
石坂 圭吾

富山県立大学工学部准教授。2000年富山県立大学大学院・博士（工学）。主な研究分野は、電波工学。特に、観測ロケットを用いて電離層中の電波伝搬特性やDC電場観測を行っている。富山県内の中高生に富山の小さい大学でも宇宙探査に直接にかかわることができるロケット実験に参加することに宣伝活動を推進している。



く ま も と あつ し  
熊本 篤志

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻准教授。主な研究分野は電波・プラズマ波動観測にもとづく惑星プラズマ物理学、レーダによる月地下探査。電離圏イオン組成計測への応用を目指して、電子密度計測用インピーダンスプローブの広帯域化に取り組んでいます。



あ べ た く み  
阿部 琢美

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系・准教授。1991年電気通信大学大学院電気通信学系研究科電子工学専攻修了。工学博士。カナダ国立研究開発機構ヘルツベルグ天体物理学研究所研究員、青山学院大学理工学部助手を経て現職。観測ロケットを用いて超高層大気物理学の研究に取り組んでいる。自称観測ロケット実験コーディネータ。



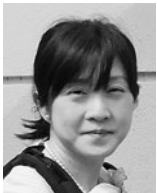
まつ おか あや こ  
松岡 彩子

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系准教授。1994年東京大学理学系研究科地球惑星物理学専攻で博士（理学）の学位を取得。火星探査機「のぞみ」、水星探査機BepiColombo MMO、ジオスペース探査衛星ERG等の磁場計測装置を担当。



い し い まもる  
石井 守

国立研究開発法人情報通信研究機構宇宙環境研究室長。1993年京都大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修了、理学博士。1994年より現職。専門は超高層大気物理学。最近是国内外の会議の際に各地で朝ジョギングを楽しむほか、東京マラソン、京都マラソンなどの大会に参加。



くり はら よし こ  
栗原 宜子

2006年東京大学大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻・博士課程修了。現在、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・大学共同利用システム研究員。専門分野は超高層大気物理学で、これまで観測ロケット4機で中間圏界面付近の中性風観測を行った。



の むら れい こ  
野村 麗子

宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員。主な研究分野は超高層大気物理学。衛星搭載用の超小型軽量磁場観測器の研究開発に取り組む。