

## 地上デジタル放送波を用いた水蒸気推定手法の開発 Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting wave

川村 誠治<sup>1\*</sup>; 太田 弘毅<sup>1</sup>; 花土 弘<sup>1</sup>; 山本 真之<sup>1</sup>; 志賀 信泰<sup>1</sup>; 木戸 耕太<sup>1</sup>; 安田 哲<sup>1</sup>; 後藤 忠広<sup>1</sup>;  
市川 隆一<sup>1</sup>; 雨谷 純<sup>1</sup>; 今村 國康<sup>1</sup>; 藤枝 美穂<sup>1</sup>; 石津 健太郎<sup>1</sup>; 岩井 宏徳<sup>1</sup>; 杉谷 茂夫<sup>1</sup>  
KAWAMURA, Seiji<sup>1\*</sup>; OHTA, Hiroki<sup>1</sup>; HANADO, Hiroshi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Masayuki<sup>1</sup>; SHIGA, Nobuyasu<sup>1</sup>;  
KIDO, Kouta<sup>1</sup>; YASUDA, Satoshi<sup>1</sup>; GOTOH, Tadahiro<sup>1</sup>; ICHIKAWA, Ryyuichi<sup>1</sup>; AMAGAI, Jun<sup>1</sup>;  
IMAMURA, Kuniyasu<sup>1</sup>; FUJIEDA, Miho<sup>1</sup>; ISHIZU, Kentaro<sup>1</sup>; IWAI, Hironori<sup>1</sup>; SUGITANI, Shigeo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構

<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology

情報通信研究機構では、地デジ放送波を用いて水蒸気を推定する手法の研究開発を行っている。電波は伝搬の過程で水蒸気による遅延を受ける。この遅延量を計測すれば、伝搬路上の水蒸気積算値を推定することができる。例えば伝搬距離が5 kmの場合、相対湿度が1%変化すると伝搬遅延は約17 ps変化する。有効な観測のためには少なくとも数十psの精度で遅延時間を精密測定する必要がある。地デジ波はOFDM方式で符号化されており、その中には既知信号(SP信号)が埋め込まれている。既知信号から複素遅延プロファイルを算出しその位相を用いることで、原理的には約4.5 ms毎に伝搬遅延を高精度(ピコ秒オーダー)に求めることが可能である。このような精度を議論する場合、電波塔側、受信局側のそれぞれの局発の位相変動が大きな誤差要因となる。そこで、電波塔を含む直線上に2つの受信点を設け、それぞれで遅延時間を測定する。この測定値には電波塔と受信局それぞれの局発の位相変動が含まれているが、両者の差を取ることによって電波塔側の位相変動を相殺することができる。残った2地点間の局発の位相変動差を同期により相殺することで、水蒸気量を推定する。

これまでに地デジ放送波の遅延を位相変動として測定する装置をソフトウェア無線の技術で開発してきた。この装置をさらに改良し、リアルタイム処理可能なチャンネル数を最大5chにまで拡張することに成功した。同装置のハードウェアとしての測定精度を評価し、遅延測定の時間分解能が50 ps程度(距離分解能15 mm)であることを確認した。異なる地点の局発の同期(位相変動差を取り除く)手法としてはCATVを用いる方法を検討している。CATV網には地デジ中継信号(電波塔から送信されているRFと同じ信号)が通っており、上記の装置で地デジ放送波と同じように処理することが可能である。CATV網で配信される信号をリファレンスとして局発の位相変動を取り除く。CATV信号は異なる経路を通過するためそれぞれ独自の遅延変動を持っているが、それを補正する手法を開発しており、現時点での同期精度は100 ps以下となっている。さらに精度向上を目指して室内実験を行っている。今夏をターゲットに水蒸気推定の実証実験を計画している。この実験ではCATV同期に加え、既に確立している光ファイバーを用いた同期も併用して同期の検証と遅延測定を行う予定である。将来の多点展開に向けて測定装置の小型化(ボード化)の検討も進めている。

キーワード: 水蒸気, 電波, 伝搬遅延, 地デジ

Keywords: water vapor, radio wave, propagation delay, digital terrestrial broadcasting

## 北陸冬季雷と関連する下部電離圏擾乱の二周波観測 Dual frequency observation of subionospheric perturbations associated with Hokuriku winter lightning

森永 洋介<sup>1\*</sup>; 土屋 史紀<sup>1</sup>; 小原 隆博<sup>1</sup>; 三澤 浩昭<sup>1</sup>; 本間 規泰<sup>2</sup>

MORINAGA, Yosuke<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Fuminori<sup>1</sup>; OBARA, Takahiro<sup>1</sup>; MISAWA, Hiroaki<sup>1</sup>; HONMA, Yasunori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, <sup>2</sup> 東北電力株式会社

<sup>1</sup>Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Tohoku Electric Power Company

Intense electromagnetic pulses (EMP) radiated from lightning discharge could cause heating and ionization and alter the conductivity in the ionospheric D-region. The purpose of this study is to reveal influence of the lightning on the lower ionosphere and its dependence on properties of lightning discharges. For this purpose, two LF radio observation systems were installed in Takine (Fukushima) and Sasaguri (Fukuoka). Radio signals from two JJY transmitters at Haganeyama (Fukuoka, 60kHz) and Otakadoyayama (Fukushima, 40kHz) are simultaneously measured at Takine and Sasaguri, respectively. Radio propagation paths of both transmitter-receiver pairs are almost overlapped and the midpoints of both paths are located over the coast of Hokuriku area. These enable us to investigate the lightning effect on the lower ionosphere at different height because it is expected that reflection height of radio wave depends on radio frequency.

The LF signature of subionospheric perturbations associated with winter lightning in the Sea of Japan (around Hokuriku) has been observed from December 13, 2014. Signatures of subionospheric perturbation (early event) which occur immediately after the causative lightning were detected. While modeling studies (E. D. Schmitter, 2014) show that change of ionization state in the lower ionosphere depends on intensity of EMP, there is no clear observation evidence that shows quantitative relationship between them. We analyze the data derived from these observations using peak current of causative lightning and difference in frequency of two JJY.

Acknowledgement: We would like to thank A. Yoshikawa, T. Uozumi and S. Abe, Kyushu University, Fukuoka and T. Ohno, Hoshinomura astronomical observatory, Fukushima, for cooperating LF radio observation.

Keywords: lightning discharge, subionospheric perturbation, dual frequency observation

## HFDと微気圧計による台風通過時の大気波動のスペクトル解析 Spectral analysis of ionospheric and atmospheric perturbations associated with typhoons using HFD and microbarometer

平林 慎一郎<sup>1\*</sup>; 中田 裕之<sup>1</sup>; 鷹野 敏明<sup>1</sup>; 富澤 一郎<sup>2</sup>

HIRABAYASHI, Shinichiro<sup>1\*</sup>; NAKATA, Hiroyuki<sup>1</sup>; TAKANO, Toshiaki<sup>1</sup>; TOMIZAWA, Ichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Chiba University, <sup>2</sup>Center for Space Science and Radio Engineering

竜巻や台風などの激しい気象条件に伴い大気波動が発生し、これが電離圏擾乱を引き起こすことが知られているが、その特徴や大気波動の伝搬特性は解明されていない。本研究では、台風に伴い発生する大気波動の解析を行った。電気通信大学が運用するHFドップラー(HFD)、微気圧計のデータを用いて、時系列データとダイナミックスペクトルの解析、スペクトル強度の時間変化の解析を行った。今回用いたHFDデータは、菅平の観測点で取得された5006 kHzの受信データである。微気圧計データは、京都府峰山町に設置されているものを用いた。なおHFDデータの解析を行う時間帯は7:00から18:00までとした。これは日没から日の出までの時間帯にかけては電離圏の変動が非常に大きく、解析には適切でないためである。台風のデータについては、国立情報学研究所が運営するデジタル台風より取得した。典型例として、台風2013年26号の結果を述べる。この台風は2013/10/15から10/17にかけて日本に上陸し、10/16に菅平観測点に最接近した。取得されたHFDデータのダイナミックスペクトルでは、5 mHz以下の帯域では、台風が接近していない時でもスペクトル強度に変動が現れているが、台風通過時に5.240 mHzの帯域においてスペクトル強度の上昇が見られた。時系列においては台風通過時にドップラーシフトの振幅約0.2 Hzの変動が見られた。微気圧計データについても、ダイナミックスペクトルでは5.250 mHzでスペクトル強度の上昇が見られ、HFDの場合と同様の傾向を示していることがわかった。このように5.240 mHzの帯域においてスペクトル強度の上昇が見られたこと、台風最接近の前日でもスペクトル強度の上昇が見られたことから、30 mHz、4 mHzについてスペクトル強度の時間変化の解析を行った。同時に、菅平観測点と台風中心との距離、菅平観測点での風速それぞれの時間変化をとり、関連を解析した。風速については、気象庁の保有する気象観測データ(アメダス)を使用し、観測地点は、菅平観測点に最も近い埼玉県秩父市のものを用いた。その結果、スペクトル強度の時間変化において、30 mHzでは台風通過時におけるスペクトル強度の上昇が見られるのに対し、4 mHzではそれほど顕著でないことがわかった。このことと、前述のダイナミックスペクトルの様子を踏まえると、高周波数域でのスペクトル強度は、台風による影響がより強くなると考えられる。スペクトル強度のピークは、菅平観測点と台風中心間の距離が最短となる時間帯と、風速が最大となる時間帯において最大となっていることがわかった。

キーワード: 台風, 電離圏, 大気波動, 微気圧計, HFD

Keywords: Typhoons, ionosphere, atmosphere, microbarometer, HFD

## SWARM 衛星が中低緯度電離圏上空で観測した微細沿磁力線電流の起源の推定 Origin of small-scale field-aligned currents as observed by SWARM above the ionosphere in middle and low latitudes

青山 忠司<sup>1\*</sup>; 家森 俊彦<sup>2</sup>; 中西 邦仁<sup>1</sup>  
AOYAMA, Tadashi<sup>1\*</sup>; IYEMORI, Toshihiko<sup>2</sup>; NAKANISHI, Kunihito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 京都大学大学院 理学研究科 附属地磁気世界資料解析センター  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University

我々は、2013年11月22日に打ち上げられた Swarm 衛星の一年分の磁場データを解析し、中低緯度において衛星の軌道に沿った数十秒周期 (10~40 s) の微小な (0.1~5nT) 磁場変動が、微細な沿磁力線電流の空間構造であることを確認した (Iyemori et al., GRL, 2015)。また、CHAMP 衛星の磁場データの統計的解析により、地形・季節依存性などから、その磁場変動は下層大気の大擾乱により生じた重力音波共鳴によって E 層ダイナモが駆動され沿磁力線電流が流れてもたらされていると考えられる (Nakanishi et al., EPS, 2014)。本発表では、前半において気象データと磁場データを比較することにより、磁場変動が下層大気起源であることを明らかにする。後半では、2014年に日本付近を通過した台風上空の磁場変動のスペクトル指数を調べることで、電離層ダイナモの起源が南北半球どちら側にあるのかを推定する。

キーワード: 沿磁力線電流, 電離層ダイナモ, 大気重力波, 重力音波, SWARM 衛星, 台風  
Keywords: field-aligned current, ionospheric dynamo, atmospheric gravity wave, acoustic gravity wave, swarm satellite, typhoon

## ブラジル磁気異常帯における沿磁力線の微細構造の検証 The verification of the small spatial structure of field aligned currents over the Brazilian Anomaly

中西 邦仁<sup>1\*</sup>; 家森 俊彦<sup>1</sup>; 青山 忠司<sup>1</sup>  
NAKANISHI, Kunihito<sup>1\*</sup>; IYEMORI, Toshihiko<sup>1</sup>; AOYAMA, Tadashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

Nakanishi 等 (2014) は、CHAMP 衛星が観測した磁場データにカットオフ周期を 40 秒にしたハイパスフィルターを通した結果、軌道に沿って数十秒の磁場変動が中低緯度にほぼ常時存在することを発見した。解析結果から、その磁場変動の周期と振幅の緯度依存性について、ブラジリアン磁気異常帯とその他の領域では特性が異なることを示した。つまり、その他の領域では、衛星が磁気赤道に近づくにつれ、周期が長くなり振幅が小さくなる。ブラジリアン磁気異常帯では、周期は比較的長くなり、振幅は小さくならない、むしろ大きくなる傾向がある。他の特性については、どちらの領域においても同様な特性が見られる。つまり、1) 主磁場に垂直な変動である。2) 昼側の振幅は夜側に比べ振幅ははるかに大きく、ローカルタイムにおける振幅と E 層伝導度の相関は非常に高い。3) 統計的に振幅は南北共役性を持っている。4) 振幅には磁気擾乱度依存性と太陽風パラメータ依存性はほとんど見られない。5) 振幅の全球図には地理的な特性を持つ明瞭な季節依存性が見られる。

ブラジリアン磁気異常帯以外の領域に見られる周期と振幅の緯度依存性をはじめ上記の特性から、下層大気起源の大気重力波（重力音波モード、または、内部重力波モード）によって駆動された電離層ダイナモによって生成された沿磁力線電流の微細構造（200 ? 300 km）であることが強く示唆された。このモデルから周期と振幅の緯度依存性について次のように説明できる。ダイポール型の主磁場を用いて、電離層における沿磁力線電流の空間スケールがその主磁場の磁力線に沿って衛星高度までトレースされる。衛星高度における空間スケールは磁気赤道に近づくにつれ長くなる。磁気赤道上空では空間スケールがカットオフ周期に相当する空間スケールより長くなり、振幅が減衰する。

本発表では、ブラジリアン磁気異常帯に見られる磁場変動がその他の領域の磁場変動と同じメカニズムで生成されているかどうかを検証し、特に、上記のモデルで異なる特性を説明できる可能性を示す。つまり、ブラジリアン磁気異常帯では主磁場の磁力線が東西方向に傾いているため、緯度方向のスケールが磁力線に沿って衛星高度までトレースされると経度方向に傾きその分緯度方向のスケールが短くなり、磁気赤道上空においてさえもカットオフ周期に比べ比較的短く、それゆえに振幅は比較的減衰されない。

この可能性を示すことは、ブラジリアン磁気異常帯をふくめ中低緯度の全ての領域について対象の磁場変動を研究することができることを意味する。

キーワード: 沿磁力線電流の微細構造, 中低緯度, CHAMP 衛星, SWARM 衛星, 大気重力波, ブラジリアン磁気異常帯  
Keywords: spatial structure of field aligned currents, middle and low latitudes, the CHAMP satellite, the SWARM satellite, atmospheric gravity wave, the Brazilian Anomaly

## HFDにより観測された地震に伴う電離圏擾乱と地震動の関係 The relationship between ionospheric disturbances detected by HFD and ground perturbations associated with earthquakes

高星 和人<sup>1\*</sup>; 中田 裕之<sup>1</sup>; 鷹野 敏明<sup>1</sup>; 富澤 一郎<sup>2</sup>; 長尾 大道<sup>3</sup>  
TAKABOSHI, Kazuto<sup>1\*</sup>; NAKATA, Hiroyuki<sup>1</sup>; TAKANO, Toshiaki<sup>1</sup>; TOMIZAWA, Ichiro<sup>2</sup>; NAGAO, Hiromichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Graduate school of Engineering, Chiba University, <sup>2</sup>Center for Space Science and Radio Engineering, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

過去の研究より、巨大地震発生に伴い電離圏に擾乱が発生することが知られている。その発生メカニズムの1つとして考えられているのが、地震により発生したレイリー波などの表面波が遠方に伝搬し、その地震動が大気中に励起した音波が電離圏まで到達することで擾乱を起こすというものである。本研究では、HFD観測データより算出した電離圏上下方向擾乱速度と、その電波反射点直下の地震計データによる地震動の様子を比較することで、これらの間の関係性を解明することを目的とする。電気通信大学が行っている短波ドップラー (HFD) 観測では、電通大調布キャンパスより送信され、電離圏で反射されたHF帯電波を各受信点で受信する。電離圏で擾乱が発生し、反射高度が変化すると、受信周波数がドップラーシフトを受けるため、その周波数変化から反射高度での電離圏の上下動を観測することが出来る。本研究では5006 kHzの受信データを用いた。また、電離圏速度算出においてより正確な値を求めるため、電離圏電子密度算出プログラムPOLANを用いてNICTのイオノグラムデータ(国分寺)より電子密度高度分布を求め、電波反射高度を決定した。地震計データには、防災科学研究所の強震観測網(K-NET, KiK-net)の地震波形データ(加速度)をフリーソフトWAVEANAを用いて速度表示したものと、広帯域地震観測網(F-net)の地震波形データ(速度)の2種類を用いた。

比較方法としては、HFD受信周波数データより算出した電離圏上下速度の最大値と、HFD反射点直下の2種類の地震計データによる地面の上下方向の速度の最大値それぞれとの相関をとることで比較を行った。比較に用いた事例は、2003~2013年に発生したM6.0以上の地震のうち、HFD受信周波数において変動が観測され、かつその直下の地震計において地震波形データが存在する地震すべてとした。HFD反射点は菅平、大洗、飯館の3点でのデータを使用し、地震計はそれぞれその反射点直下に最も近い観測点のものを選んで用いた。

結果として、どちらの地震計との比較においても、最も対象イベント数の多い菅平での比較において、電離圏速度が地面速度の平方根に比例するという傾向が見られた。また、他2つの観測点においては、対象イベント数が少ないほど乗数、係数共に小さく、菅平の結果より離れていくという傾向が見られた。これは、イベント数不足により十分な統計が取れていないことによるものであると考えられ、イベント数増加に伴い菅平の結果に近づくものと考えられる。

キーワード: 電離圏, HFD, 地震, 音波, 地震計, 地震動

Keywords: ionosphere, HFD, earthquake, acoustic wave, seismometer, ground perturbations

## 地震レーリー波による電離層電子密度擾乱のシミュレーション Simulation Results for the Ionospheric Density Disturbances Triggered by Earthquake Rayleigh Waves

陳佳宏<sup>1\*</sup>; 松村 充<sup>2</sup>; Lin Charles<sup>1</sup>; 齊藤 昭則<sup>3</sup>; 劉 正彦<sup>4</sup>

CHEN, Chia-hung<sup>1\*</sup>; MATSUMURA, Mitsuru<sup>2</sup>; LIN, Charles<sup>1</sup>; SAITO, Akinori<sup>3</sup>; LIU, Jann-yenq<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 台湾国立成功大学地球科学学科, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室, <sup>4</sup> 台湾国立中央大学太空科学研究所

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Taiwan, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>4</sup>Institute of Space Science, National Central University, Taiwan

During the great earthquake event of M9.0 Tohoku earthquake on 11 March 2011 in Japan, previous studies detected the horizontal wave structure of ionospheric total electron content (TEC) disturbances by a dense ground-based GPS receiver network. These results suggested that the ionospheric TEC disturbances could be caused by the earthquake-triggered seismic surface, acoustic-gravity, and tsunami waves, which are distinguished by the different propagation velocities, durations, and periods. In order to further investigate the vertical coupling effect for the ionospheric plasma density disturbances, this study employed a three-dimensional, non-linear, compressible numerical model. This model simulated the disturbances of neutral mass densities from the surface to lower, upper atmosphere and the ionosphere, by specifying the surface displacement triggered by the earthquake, such as the rayleigh waves, at the model lower boundary. The results show that the TEC disturbances have two types of the propagation waves, first horizontal waves and slow co-centric waves. These might be caused by the neutral wind dynamo effect and the ion-neutral collision along the magnetic field.

キーワード: 地震, レーリー波, 電離層, 電子密度擾乱

Keywords: Earthquake, Rayleigh wave, Ionosphere, Plasma density disturbance

## 津波を伴う地震と内陸地震後に発生する電離圏ホールの比較 Comparison between the ionospheric holes between inland earthquakes and subduction earthquakes with tsunami.

金谷 辰耶<sup>1\*</sup>; 鴨川 仁<sup>1</sup>  
KANAYA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; KAMOGAWA, Masashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学教育学部物理学科  
<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

2011年東北沖地震での津波発生時、津波の発生場所を中心として波状に広がる電離圏擾乱が発生した。その後津波の震央付近では電離圏電子密度が数十分にわたって減少した(電離圏ホール)のが観測された。本研究では大規模内陸地震における電離圏の変動を調べ、津波を伴う海洋型地震と比較することによって電離圏ホールが津波を伴う海洋型地震特有のものであるのかをGPS全電子数観測で調べた。その結果、マグニチュードが同規模であるにもかかわらず、津波を伴う地震は明瞭に電離圏ホールが見えた。この原因は、大気音波励起を行う変動が津波の場合、1周期あるのに対して、内陸地震は半周期しかないことが関係していると思われる。本研究は中部電力原子力安全技術研究所公募研究で行われており、全電子数解析に関して東京学芸大学中村真帆博士の指導を受けた。

キーワード: 電離圏ホール, 内陸地震, 津波  
Keywords: Ionospheric hole, Inland earthquake, Tsunami



## 高知工科大学 5ch HRO-IF による 2014~2015 年の流星群観測結果と多地点観測システムの評価 OBSERVATION OF METEOR SHOWERS IN 2014 - 2015 BY 5CH HRO-IF AND EVALUATION OF SYSTEMS AT KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

水本 聡<sup>1\*</sup>  
MIZUMOTO, Satoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 高知工科大学  
<sup>1</sup>Kochi Tech of Univ.

### 1. はじめに

流星電波観測 (HRO) は、天候や昼夜を問わず 24 時間流星の観測が可能である。高知工科大学では、2009 年に 5ch 流星電波干渉計を開発し、流星電波の到来角から流星出現位置を観測してきた。また、準リアルタイムで観測結果を Web に公開する流星自動観測システム (埜口, 2009) の運用を 2011 年度まで約 2 年間にわたり行った。2011 年には、5ch 電波干渉計及び GPS 時刻較正付受信機を用いた多地点観測により流星軌跡情報の算出を行うシステムを開発した (山崎, 2012)。2012 年には、流星エコーの絶対強度を定期的に観測可能なシステムによる HRO 観測点が当時国内に存在しなかったため、流星エコーの絶対強度とプラズマ密度を精密測定できるシステムを開発した (大和, 2013)。今回、それらの観測設備・機材を用いて 2014 年度より再開させた高知工科大学 5ch 電波干渉計システムによる最新の観測結果、並びに今後の展望について報告する。

### 2. 5ch HRO-IF による流星電波観測

高知工科大学では、2003 年より 6 方位 HRO を開始した。2005 年より 3ch 流星電波干渉計 (HRO-IF) システムの基礎開発を行い (堀内, 2005; 岡本, 2005)、3 基のアンテナの位相差から流星電波の到来角を求め、およその流星出現位置の算出を行いつつ約 3 年分のデータを収集した (濱口, 2006; 埜口, 2007)。3ch HRO-IF では、位相差から求まる到来角の測定誤差が大きく、仰角が低くなるほど測定結果にズレが生じるため位置精度に限界がある。これを解決するため、2009 年には改良版の 5ch HRO-IF を開発し、到来角の測定精度を向上しつつ以降約 2 年間の安定した自動観測を実現した (埜口, 2009)。5ch 干渉計では 5 台のスーパーヘテロダイン受信機を用い、周波数変換時に位相差を保持するため各受信機に対する局部発振を共通とする構成となっている。干渉計では高精度な時刻同期が求められるため、GPS から受信機へ正秒タイミングで出力される 1PPS (Pulse Per Second) パルスを AD ボード入力した信号を用いて時刻決定し 0.1 s 毎に FFT 解析を行っている。これらを用いて 2014 年度に観測した流星群についての観測結果を報告する。

### 3. 2014~2015 年度観測結果

2014 年 5 月より 5ch HRO-IF の装置再立ち上げを行い、1 地点における観測から、きりん座流星群 (5 月)・おひつじ座流星群 (6 月)・しし座流星群 (11 月) の観測を行った。ふたご座流星群 (12 月) としぶんぎ流星群 (1 月) の観測は 5ch HRO-IF に加えて別の 2 地点に HRO 観測地点を設け、3 地点における多地点同時観測から流星軌跡ベクトル算出を試みた。開始当初の多地点観測による観測結果では観測 PC の不具合が見つかり条件が揃わずベクトル算出までには至らなかったが 2012 年の一時期に収集した 3 地点同時観測と同等の状況まで装置復旧が完了した。

### 4. まとめ

高知工科大学では 2003 年以降ほぼ連続的に HRO による前方散乱方式の流星電波観測を行い、その中でも定常流星群であるふたご座流星群の観測に重きを置いた解析と精度検証を行ってきた。しかし、2014 年に観測されたきりん座流星群の様な突発流星群の高精度なパラメータを得るためには、多地点観測による流星軌跡情報の算出を定常運用に格導入する必要がある。そのため半恒久的に電波観測に利用できる場所を学外 2 地点に確保し、データ転送を自動化して観測データを取得するシステムが必要である。2015 年初頭の多地点観測の検証の際に見つかったファイル生成エラー等のシステム上のトラブルに早期に気づく仕組みを含む、流星電波観測ネットワークの構築を現在進めている。本発表では高知工科大学の流星電波観測システムの現状と 2014~2015 年度の観測結果並びに今後の展望について発表する。

### 参考文献:

埜口和弥, 5ch 電波干渉計による流星出現位置の精密測定と自動観測システムの開発, 平成 20 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2009.

PEM27-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 18:15-19:30

山崎倫誉, 5ch 干渉計及び多地点観測に基づく流星軌道計測法の開発と KUT 流星電波観測システムの改良, 平成 23 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2012

大和忠良, HRO 流星電波エコー絶対強度較正装置の開発および流星飛跡線電子密度の算出と評価, 平成 24 年度 高知工科大学 特別研究報告, 2013

キーワード: 流星電波観測, 電波干渉計, 多地点観測

Keywords: Meteor radio observations, Radio interferometer, Multisite observations

## VHF 帯遠距離伝搬波を用いた九州-沖縄付近での強い Es の広域構造とその持続性 Large-scale structure and continuation of intense Es around the Kyusyu-Okinawa by VHF long-distance propagation

柳澤 伸矢<sup>1\*</sup>; 富澤 一郎<sup>1</sup>; 山本 淳<sup>2</sup>

YANAGISAWA, Shinya<sup>1\*</sup>; TOMIZAWA, Ichiro<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター, <sup>2</sup> 海上保安大学校海事工学講座

<sup>1</sup>Center for Space Science and Radio Engineering, <sup>2</sup>Maritime Science and Technology, Japan Coast Guard Academy

我々は強いスプラディック E(Es) で反射された VHF 帯電波を調布と呉にて同時受信している [1]。我々の過去の観測から強い Es は非常に細長い数百 km の水平構造を持っていることが分かってきた [2]。本論文では主として 2013 年 9 月 14 日と 2014 年 5 月 11 日と 2014 年 7 月 1 日に九州-沖縄付近で観測された強い Es の広域構造と移動特性、持続時間について議論する。3 つの Es についての比較からほぼ同じ観測範囲を通過しているという点で共通していて、構造などの特性の比較を行う上で適している。

(1)2013 年 9 月 14 日 17 時 JST 頃に観測された Es は、波面長が約 300 km であった。移動方向は南東方向、速度は約 40 m/s、波面幅は東側では 7~20 km と波面長に比べて狭く、西端では 120 km と広がりかつその部分の移動速度および方向がわずかに異なっていた。そのため全体構造は細長い三角形の波面が中央付近で折れ曲がった形と推定できる。西端部分は時間経過と共に太くなり、一方東側の部分は変化せず構造変化の様相が異なった。また Es 持続時間は 2 時間と長時間であった。

(2)2014 年 5 月 11 日 19~21 時 JST 頃に観測された Es は、2 つの波面構造を持って北西方向へ移動した。2 つの波面は約 50 m/s と約 60 m/s の速度で移動し、波面長は約 300 km と約 400 km とほぼ同じであったが、波面幅は 5~20km、5~8 km と大きく異なっていた。また持続時間は共に約 1 時間であった。

(3)2014 年 7 月 1 日 10~11 時 JST 頃に Es は、2 つの波面を持って北西方向へ移動した。(2) と異なる点として 2 つの波面は約 50 m/s と約 150 m/s の大きく異なる速度で移動し、途中で交差した。波面長は約 380 km と約 300 km とほぼ同じであったが、(2) と同様に波面幅は 7~35km と 55~180 km と大きく異なっていた。また持続時間は 2 つとも約 1 時間であった。

これら同じ緯度・経度の範囲で観測された 3 つの強い Es は、長さは 300~400km とほぼ同じであるが、Es 構造および移動速度が大きく異なっていた。移動方向は (1) は南東だが (2) と (3) は北西で逆だった。さらに継続時間は (1) が約 2 時間であるのに対し (2)、(3) は約 1 時間と半分程度の時間しか高電子密度構造を持続できなかった。以上の結果から、強い Es が細長い構造を持続して移動可能な時間は約 1~2 時間と推定できる。

講演では解析方法、解析例を増やし Es の移動特性や特徴・構造などの比較結果について詳しく報告する。

[1] 山幡 琢也, 富澤 一郎, 山本 淳: VHF 帯遠距離伝搬受信による広域 Es 構造観測システム開発, SGEPPS, B005-P038, 2012.

[2] 富澤 一郎, 山幡 琢也, 山本 淳: VHF 遠距離伝搬による Es 広域構造と移動特性, SGEPPS, B005-33, 2012.

キーワード: 電離圏, スプラディック E 層, 広域構造

Keywords: Ionosphere, Sporadic E layer, Large-scale structure

## HF ドップラスペクトル詳細解析による波面状スプラディック E の断面構造の導出 Derivation of shape of cross-section of frontal sporadic E by the HF Doppler spectral analysis

大田 裕揮<sup>1\*</sup>; 富澤 一郎<sup>1</sup>

OHTA, Hiroki<sup>1\*</sup>; TOMIZAWA, Ichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境センター

<sup>1</sup> Center for Space Science and Radio Engineering, UEC

波面状スプラディック E(Es) は、過去の研究で細長い円筒状の形をしていることは分かってきた [1]。しかし、波面に沿った断面構造が一様なのか、それとも変化しているのかという問題について、まだ観測データがない。本論文では、関東 HFD 観測網の多数の観測点による HF ドップラスペクトルを詳細に解析することにより波面状 Es の断面構造を調べた結果を述べる。

まず、関東の HFD 中間反射点を通過する波面状 Es を観測し、中間点通過時刻付近のドップラシフト周波数毎の電界強度の三次元詳細データを求める。このデータを一定の周波数間隔に切り出した電界強度の時間変動は下部から細長い Es 波面に電波が入射した場合の等価散乱断面積の入射角依存性と見なすことができる。各送受信点間の基線中間点が異なることから、波面状 Es 反射波面の断面を細かく推定することができる。この解析を複数の観測点で行うことにより波面の移動方向と速度を求め、波面状 Es 全体の反射波面の断面構造を詳細に導出する。

実際に観測データを周波数方向に切り出した電界強度グラフは変動が大きく、直接解析することが困難であるので、最小二乗法による二次式フィッティングにより平均的变化を求める。この平均的变化を基にドップラシフト周波数毎の最大強度およびその時刻、3 dB 時間幅を求める。最大強度とその時刻から波面の凹凸を、3 dB 時間幅と水平移動速度の積から波面の幅を求める。

以上の解析方法を適用し、2009年7月23日23時JST頃に発生した波面状 Es を詳しく調べた。波面の移動速度は 102 m/s、南西方向に進む波面状 Es であり、波面幅は約 12 km と求めた。フレネルゾーン約 4 km の分解能で波面構造を見ると、この波面状 Es は単純な一つの山状の断面構造だけでなく、山が二つある構造や非対称構造も存在することが分かった。

以上より、HF ドップラスペクトルを各観測点で詳細に調べることによってフレネルゾーンのスケールで波面状 Es の断面構造を導出できることが分かった。この解析をより多くの波面状 Es に対して行うことによって、波面状 Es の断面構造の規則性を詳しく調べることができる。

[1] 富澤一郎・藤井厚太郎: 波面状 Es による HF 波伝搬モデル, JPGU 2013, PEM29-01, 2013.5.

キーワード: 電離圏, HF ドップラ, スプラディック E

Keywords: ionosphere, HF Doppler, Sporadic E

## VOR 遠距離伝搬およびイオノゾンの観測に基づく ITU-R の Es 伝搬モデルの検討 Examination of the Es propagation model of ITU-R based on VOR long distance propagation and the observation of ionosonde

新田 琢也<sup>1\*</sup>; 富澤 一郎<sup>1</sup>; 山本 淳<sup>2</sup>; 齊藤 真二<sup>3</sup>

NITTA, Takuya<sup>1\*</sup>; TOMIZAWA, Ichiro<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Atsushi<sup>2</sup>; SHINJI, Saitoh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究センター, <sup>2</sup> 海上保安大学校, <sup>3</sup> 電子航法研究所

<sup>1</sup>Center for Space Science and Radio Engineering, UEC, <sup>2</sup>Japan Coast Guard Academy, <sup>3</sup>Electronic Navigation Research Institute

電気通信大学では強いスポラディック E (Es) で反射された VHF 帯電波を調布と呉で観測している [1]。GBAS の VHF データ伝送系 (GBAS-VDB) において、強い Es 反射による遠距離伝搬波が干渉許容レベルを超えないかを検討するため、電子密度構造を広域にわたって調べることが必要となっている [2]。1970 年代までの観測に基づく ITU-R の Es 伝搬モデルの反射減衰量関係式については 80 MHz 以下でしか保証していない [3],[4]。本論文では、周波数 110 MHz 付近の VOR 観測から求めた電離層反射減衰量および中間反射点付近の NICT 山川イオノゾンデ臨界周波数  $f_oE_s$  の観測結果に対し、ITU-R の Es 伝搬モデル式適用可能性の初期検討を行った結果を述べる。

山川 (31.20N, 130.62E) と VOR 中間反射点との距離に近い与論島 (27.044N, 128.398E) および与那国島 (24.457N, 122.998E) の VOR 送信局の電波を、2014 年 5 月 1 日~9 月 30 日において、呉 (34.246N, 132.528E) で観測した。得られた VOR 受信電力および山川  $f_oE_s$  と使用周波数  $f$  の比 ( $f/f_oE_s$ ) に対する電離層反射減衰量  $\Gamma$  を求め、ITU-R の Es 伝搬モデル式算出値と比較を行った。その結果、呉 VOR 受信電力より求めた  $\Gamma$  は ITU-R の Es 伝搬モデル式と比べて小さく、実際の受信電力に比べて弱い値を予測値として与えてしまうことが分かった。これは、ITU-R の Es 伝搬モデルでは、フレネルゾーンより大きい Es 反射モデルを前提としており、VOR 遠距離伝搬観測ではフレネルゾーン領域内での Es を観測しているためだと考えられる。地表伝搬距離 893 km の呉—与論島間と 1427 km の呉—与那国島間の電離層反射減衰量では、伝搬距離が短い呉—与論島間の方が予測値との差が大きい。また、 $(f/f_oE_s)$  に対する電離層反射減衰量  $\Gamma$  の傾きに注目すると、VOR では緩やかな傾きとなり、ITU-R の Es 伝搬モデルの周波数依存性を表す指数が大きすぎることを示している。ここで得られた結果から、周波数 110 MHz 付近における ITU-R の伝搬モデル式は、見直しを行う必要があると判断できる。今後は検討回線数を増やし、110MHz 付近での ITU-R の Es 伝搬モデル式について詳細に検討してゆく予定である。

### 参考文献

[1] 山幡 琢也, 富澤 一郎, 山本 淳: VHF 帯遠距離伝搬受信による広域 Es 構造観測システム開発, SGEPSS, B005-P038, 2012.

[2] 齊藤真二, 富澤一郎, 山本淳: GBAS-VDB に対するスポラディック E による VOR 遠距離伝搬の影響の検討, 信学技報, vol. 114, SANE2014-125, pp113-118, 2015.

[3] K. Miya and T. Sasaki: Characteristics of ionospheric Es propagation and calculation of Es signal strength, Radio Sci., vol.1, pp.99-108, 1966.

[4] ITU-R: Recommendation of ITU-R, Method for calculating sporadic-E field strength, Rec.ITU-R P.534-4, 1999.

キーワード: 電離層

Keywords: ionosphere

## 2次元FDTD法を用いたS-310-40号ロケットによって観測されたEs層の空間構造推定 Estimation of spatial structure of sporadic E layer observed by S-310-40 rocket with 2-dimensional FDTD simulations

三宅 壮聡<sup>1\*</sup>; 井上 泰徳<sup>1</sup>; 石坂 圭吾<sup>1</sup>  
MIYAKE, Taketoshi<sup>1\*</sup>; INOUE, Hironori<sup>1</sup>; ISHISAKA, Keigo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山県立大学

<sup>1</sup> Toyama Prefectural University

電離圏電子密度の解析手法として、ロケットによる直接観測やレーダによる観測、シミュレーション（Full-wave 法や FDTD 法）が行われている。本研究では磁化プラズマ中の波動伝搬を扱うことができる 2次元 FDTD シミュレーションコードを開発し、層状と楕円電子雲の Es 層モデルを仮定して、電離圏の空間構造が電波伝搬特性に与える影響を調査した。また実際の電離圏ロケット観測を想定して、シミュレーション結果から電波の磁界強度高度分布を求め、電離圏モデルが異なる場合の磁界強度高度分布を比較し、その特徴から逆に電離圏空間構造の推測を行えるか検証を行った。その結果、層状モデルでは高度の上昇に伴い磁界強度が単調減少するが、電子雲モデルでは磁界強度が減少した後上空で磁界強度が増加するという違いが見られた。この違いを利用してロケット実験を想定したシミュレーションを行ったところ、層状モデルのシミュレーション結果と類似した特徴が現れており、Es 層の空間構造の推定が可能であると考えられる。さらにシミュレーション結果を S-310-40 号ロケット観測で得られたデータと比較したが、シミュレーションで想定した Es 層モデルが適切ではなかったため、空間構造を特定することができなかった。そのため本研究では、モデルの位置や厚さ、電子密度を変更して 2次元 FDTD シミュレーションを行うことで、空間構造のスケールが電波伝搬に与える影響を調査する。そして磁界強度高度分布から S-310-40 号ロケット観測で観測された Es 層の空間構造を推定する。

キーワード: スポラディック E 層, 空間構造, 2次元 FDTD シミュレーション

Keywords: Sporadic E layer, spatial structure, 2D FDTD simulation

## 時間領域 Full wave 法を用いた電離圏下部領域電子密度推定法の改良 Improvement of an estimation method of the electron density profile in the lower ionosphere with time domain Full wave

三宅 壮聡<sup>1\*</sup>; 森山 寛章<sup>1</sup>; 芦原 佑樹<sup>2</sup>; 村山 泰啓<sup>3</sup>; 川村 誠治<sup>3</sup>

MIYAKE, Taketoshi<sup>1\*</sup>; MORIYAMA, Hiroaki<sup>1</sup>; ASHIHARA, Yuki<sup>2</sup>; MURAYAMA, Yasuhiro<sup>3</sup>; KAWAMURA, Seiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 富山県立大学, <sup>2</sup> 奈良工業高等専門学校, <sup>3</sup> 情報通信研究機構

<sup>1</sup>Toyama Prefectural University, <sup>2</sup>Nara National College of Technology, <sup>3</sup>National Institute of Information and Communications Technology

MF レーダは電離圏 D 領域から分反射波を観測できるため、  
大気中の非常に希薄な電子密度の測定にも利用できる。  
本研究では MF レーダの観測手法を時間領域 Full wave 法を用いてシミュレーションし、  
電離圏下部領域の電子密度を連続的に観測する方法を検討する。  
現在 MF レーダを用いた電離圏下部電子密度推定に用いられているアルゴリズムとして DAE 法がある。  
しかし、DAE 法にはいくつかの問題点がある。  
そこで、時間領域 Full wave 法を用いて MF レーダの観測手法を再現し、  
DAE 法の問題点・改良点を検討して、  
電離圏下部領域電子密度の改良を行った。  
電離圏 D 領域では高度が上昇するにつれて電子密度が大きくなる傾向があることがわかっている。  
この電子密度変化の傾向を利用して、DAE 法を改良する。  
具体的には、従来の DAE 法で求めた電子密度高度分布を低高度から順に検討し、  
高度が上昇して電子密度が減少する場合は吸収係数の値を変更して  
電子密度を修正するという操作を自動的に繰り返して電子密度を推定した。  
さらに初期値や修正値の検討を行い、改良した DAE 法を適用することで広範囲で電子密度推定精度が向上した。

キーワード: 電離圏 D 領域, MF レーダ, Full-wave 法, DAE 法

Keywords: Ionospheric D region, MF Radar, Full-wave method, DAE method

## S-520-29号機観測ロケットによる電波伝搬特性解析 Analysis of Propagation Characteristics of Radio Wave by S-520-29 Sounding Rocket

板屋 佳汰<sup>1\*</sup>; 石坂 圭吾<sup>1</sup>; 芦原 佑樹<sup>2</sup>; 熊本 篤志<sup>3</sup>; 阿部 琢美<sup>4</sup>; 栗原 純一<sup>5</sup>  
ITAYA, Keita<sup>1\*</sup>; ISHISAKA, Keigo<sup>1</sup>; ASHIHARA, Yuki<sup>2</sup>; KUMAMOTO, Atsushi<sup>3</sup>; ABE, Takumi<sup>4</sup>; KURIHARA, Junichi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 富山県立大学情報システム工学専攻, <sup>2</sup> 奈良工業高等専門学校電気工学科, <sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>4</sup> 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, <sup>5</sup> 北海道大学 大学院理学研究院

<sup>1</sup> Toyama Prefectural University, <sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Nara National College of Technology, <sup>3</sup> Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4</sup> Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science Department of Solar, <sup>5</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University

2014年8月17日19時10分(JST)に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所でS-520-29号機観測ロケット実験が行われた。本観測ロケット実験は、電離圏下部高度100km付近に出現するスポラディックE層を立体的に観測することが目的である。そのために、3つの手法を用いて観測が行われた。1つ目は、光学的な観測による手法でスポラディックE層中の鉄イオンやマグネシウムイオンなどの金属イオンが太陽光を受け、共鳴散乱により発する紫外光をイメージャにより観測する。2つ目は、電波を用いる手法で地上から送信される様々な電波のうち中波帯および長波帯の電波をロケットで受信する。そこで得られた強度変化から電波伝搬特性や垂直方向の電子密度分布を推定する。3つ目は、ラングミュアプローブとインピーダンスプローブを用いた手法でロケット近傍の電子密度測定を行う。本研究では、2つ目の電波観測を担当した。本観測ロケットには、2つ目の手法である長・中波帯電波の観測を目的として、長・中波帯電波受信機(LMR)を搭載し、ロケット飛行中の長・中波帯電波の受信強度を観測した。LMRのアンテナには3軸のループアンテナを使用している。LMRは、地上から873kHz(NHK熊本第2放送)、666kHz(NHK大阪第1放送)、60kHz(標準電波)の3周波数電波の受信を行った。873kHz電波、60kHz電波はロケットの飛行経路に対して北側から、666kHz電波はロケットの飛行経路に対して東側から到来している。このように伝搬経路の異なる電波を同時観測することにより、スポラディックE層の位置と大きさについても調査を行うことが出来る。観測ロケット実験においてLMRは正常に動作し、受信強度観測を無事完了した。電波伝搬特性の解析は、周波数解析により受信電波を特性波に分離し、分離したデータからドップラーシフトを計算することにより行う。観測ロケットが受信する電波は、地球磁場の向きと偏波の旋性およびロケットスピンによってドップラーシフトを受ける。このため周波数解析により受信した電波を特性波に分離することで、ドップラーシフトを計算することが可能である。ここで得られたドップラーシフトからbookerの方程式を用いて電子密度の高度分布を推定する。周波数解析による特性波の分離観測の結果、873kHz、666kHz電波は電離層で完全反射され、60kHz電波はモード変換により、ホイッスラーモードとなって観測ロケット最高高度まで伝搬していることが判明した。その後、それぞれの電波強度から計算したドップラーシフトを用いて電子密度推定を行った。本発表では、観測ロケット実験の観測結果と解析結果について速報を報告する。

キーワード: 観測ロケット, 電波伝搬, ドップラーシフト, スポラディックE層  
Keywords: sounding rocket, radio wave propagations, Doppler shift, sporadic E layer



## 電離圏観測ロケットのウェイク周辺においてプラズマ波動を励起する電子の速度分布の検討 Velocity distribution of electrons generating plasma waves around the wake of an ionospheric sounding rocket

遠藤 研<sup>1\*</sup>; 熊本 篤志<sup>1</sup>; 加藤 雄人<sup>1</sup>  
ENDO, Ken<sup>1\*</sup>; KUMAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; KATO, Yuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

プラズマ中を超音速で運動する物体の後方にはウェイクと呼ばれるプラズマの希薄な領域が形成される。ウェイクは観測ロケットや人工衛星など飛行体の後方に生じる他、太陽風プラズマと天体の相互作用によっても作られることが知られている。

人工衛星や月のウェイク近傍ではプラズマ波動の観測例があるが、ロケットのウェイク近傍でもプラズマ波動の励起を示唆する結果が近年のロケット観測により得られている。2012年1月12日の明け方に鹿児島で行われたS-520-26ロケット実験(最高到達高度:298 km)では、3種類のプラズマ波動が確認されている(それぞれGroup A, B, Cと呼ぶ)。観測された波動は、その周波数から、静電的電子サイクロトロン高調波(ESCH)及びUHRモード波動(Group-A)、ホイッスラーモード波動(Group-B, C)であると結論され、それぞれある特徴的なスピン位相角依存性をもっていた。2007年9月2日の夕刻に鹿児島で行われたS-520-23ロケット実験(最高到達高度:279 km)でも、Group-Aの波動は観測されており、そのスピン位相角依存性はS-520-26ロケット実験の結果と矛盾しないものであることが分かっている。

電離圏の電子の速度分布にビーム成分や温度異方性を与えた分布を仮定し波動の分散関係を数値的に求めたところ、UHRモード波動、ESCH波動の他、静電的ホイッスラーモード波動の波数、周波数領域で波が成長する解が得られている。この計算結果とロケット観測の結果から、仮定した速度分布と等価的な速度分布がウェイク近傍に存在していたと考えられるが、実際にどのような速度分布関数がどのような空間分布で存在しうかは今後検証するべき課題である。

Singh et al. (1987)は、プラソフ-ポアソンコードを用いて一次元の真空中に両側からプラズマが流れ込む現象を模擬することで、物体のごく近傍のウェイクでは二流体不安定型の速度分布関数が得られることを示した。しかし、同論文で議論に取り上げられているのはウェイク軸上の速度分布関数のみであり、それ以外の領域での分布関数については特に言及されていない。また、速度空間の次元については拡散方向一次元のみ議論にとどめられており、電子の異方性に関しては指摘されていない。

そこで我々は、ウェイク近傍における速度分布関数の空間分布について考察するため、Singh et al. (1987)の方法を僅かに改変した、空間一次元(磁場方向)、速度空間二次元(磁場方向とそれに垂直な方向)の静電プラソフシミュレーションを検討している。具体的には、一次元空間に設けた真空領域に電子、イオンが拡散していく状況を考え、シミュレーションの時間発展はウェイクの軸方向の空間変化として解釈する。電子・イオンが拡散する磁力線の方向に長さ10 mの1次元空間をとり1024 gridに分割して計算を行う

本発表では、S-520-26及びS-520-23ロケット実験の観測結果をもとに、ウェイク近傍のプラズマ波動の周波数帯域および空間分布を明らかにし、励起に寄与しうる電子の速度分布に関して議論を行う。併せて、プラズマ波動を励起しうる速度分布をもつ電子がウェイク近傍にどのように空間分布するかを明らかにするために開発を進めているシミュレーションコードについて紹介し、その計算結果について報告する。

キーワード: ウェイク, プラズマ波動, 観測ロケット, 電離圏

Keywords: wake, plasma wave, sounding rocket, ionosphere

## ICI ロケットキャンペーンで観測されたプラズマイレギュラリティの構造 Characteristic feature of plasma irregularity obtained in ICI sounding rocket campaign

阿部 琢美<sup>1\*</sup>; Moen Joran<sup>2</sup>  
ABE, Takumi<sup>1\*</sup>; MOEN, Joran<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>2</sup> オスロ大学  
<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>University of Oslo

ICI-3 (Investigation of Cusp Irregularities) campaign was conducted in December 2011, to study a better description of plasma instabilities and wave phenomena related to Reversed Flow Events (RFEs) in the cusp ionosphere. In this campaign, sounding rocket was launched at Ny-Alesund in Svalbard, and intercepted the dayside cusp aurora region as expected. Among science instruments onboard, a purpose of Fixed Bias Probe (FBP) is to measure electron current incident to its spherical probe with high time resolution for investigating plasma irregularity with a spatial scale from 1 m to 100 m. The FBP successively identified existence of the small-scale electron density irregularity during the flight.

Power spectrum analysis was applied to the incident electron current, which is basically proportional to the electron density, with an interest in understanding characteristic feature of the spatial scale in the irregularity. In fact, the data obtained in this campaign are appropriate to investigate altitudinal variation of the frequency characteristics because the rocket was staying almost in the irregularity region through its flight.

As a result of spectrum analysis of the electron density variation, it is clearly found that spectral power with 10 meter scale increases with altitude. However, it should be noted that spectral power tends to increase with the background density if the irregularity is contained at a constant rate in the background density. Therefore, spectral amplitude normalized by the background density was used to investigate the altitudinal dependence. Our analysis indicates that normalized amplitude of the density irregularity with 1-10 m scale is most significant at altitudes between 100 and 150 km, while the one with 100 m scale is almost constant independently of altitude. In particular, it is noticeable that the amplitude of electron density irregularity has a small local maximum in the frequency of 100-200 Hz (corresponds to decameter spatial scale) at 100 km altitude. Such feature is not found at other altitudes. The electron density irregularity with such a scale can be a target of HF backscatter radar echoes.

We will discuss altitudinal variation of the density irregularity in more detail.

キーワード: 観測ロケット, プラズマイレギュラリティ, 電離圏, カスプ, 電子密度  
Keywords: Sounding rocket, plasma irregularity, ionosphere, Cusp, electron density

## 観測ロケット搭載ラングミュアプローブにより観測されたスポラディック E 層の空間構造と新たな解析方法の導入 Space structure of Es layer observed by Langmuir probe and a new analysis method

坂本 優美花<sup>1\*</sup>; 阿部 琢美<sup>2</sup>; 三宅 互<sup>1</sup>  
SAKAMOTO, Yumika<sup>1\*</sup>; ABE, Takumi<sup>2</sup>; MIYAKE, Wataru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東海大学大学院工学研究科航空宇宙専攻, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

<sup>1</sup>Department of Aeronautics and Astronautics Graduate School of engineering, Tokai University, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

スポラディック E 層の観測・研究は古くから行なわれてきたが、その生成機構については wind-shear 理論が一般に受け入れられている。この理論は電子密度の集積過程を説明するが、内部の熱エネルギー収支についてはほとんど情報を与えない。電離圏の熱エネルギー収支を議論する上で、電子温度は重要なパラメータであるが、スポラディック E 層内の正確な電子温度観測の例は少ない上に信頼性に乏しい。このように、スポラディック E 層内の電子密度に関しては夥しい数の観測例が報告されているものの、熱エネルギー収支を議論するために必要な電子温度情報は限られた報告例しか存在せず、信頼性のある観測が待ち望まれている。

一般にスポラディック E 層の高度方向の幅は非常に狭いため、高速で飛行する観測ロケットによる詳細観測は難しい。観測報告が多数あるものの、詳細空間構造を議論する上で十分なデータは得られていないのが現状である。このため、スポラディック E 層空間構造の更なる理解のためには、高速サンプリングが可能な測定器による観測を基にした、精度に優れた電子温度・電子密度データを得ることが求められる。

下部電離圏に発生するスポラディック E 層の空間構造解明を主目的として平成 26 年 8 月 17 日 19 時 10 分 00 秒 (JST) に宇宙航空開発機構内之浦宇宙空間観測所より観測ロケット S-520-29 号機が打ち上げられた。この実験は光、電波、直接測定という 3 つの手段を用いて電子/イオン密度分布を測定し、スポラディック E 層の空間構造を捉えることを目的としている。本実験では所期の目的通りロケットが飛行中に厚さ約 1 km のスポラディック E 層を通過し、観測が行なわれた。

直接測定用プローブのひとつとしてロケットにラングミュアプローブが搭載されたが、この測定器における印加電圧の掃引周期は 62.5 ミリ秒であり、これを周期として電子温度と電子密度を推定することが可能である。この時間は空間分解能では約 100 m に相当するが、鋭いスポラディック E 層のような鉛直方向の厚さ 1 km 程度の空間の詳細構造を議論するには不十分である。実際に今回の実験においてスポラディック E 層内で取得されたプローブの電圧-電流特性を見ると、電圧掃引時間内に電子密度が変化したためと思われる電流の変化が見られ、従来の方法では電子温度と電子密度が推定できないことがわかった。

本研究では、このように急激に電子密度が変化する場合でも正確な推定を可能にする新たな解析方法を考案し、スポラディック E 層付近で取得された実際のデータに適用した。新たな方法ではデータ補間を用いることで、掃引時間よりも短い時間間隔で電子温度と密度を推定することが可能になる。本講演では新たな手法に基づいて推定したスポラディック E 層の厚さや背景との電子密度の比較、補間法の妥当性や、含まれる誤差について検討した結果を報告する。

キーワード: E 層, ラングミュアプローブ, 観測ロケット

Keywords: E layer, Langmuir probe, sounding rocket

## S-520-26号機による電離圏中のDC電場解析 Analysis of DC electric field in ionosphere by S-520-26 sounding rocket

石坂 圭吾<sup>1\*</sup>; 山本 衛<sup>2</sup>; 横山 竜宏<sup>3</sup>; 阿部 琢美<sup>4</sup>; 渡部 重十<sup>5</sup>

ISHISAKA, Keigo<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Mamoru<sup>2</sup>; YOKOYAMA, Tatsuhiko<sup>3</sup>; ABE, Takumi<sup>4</sup>; WATANABE, Shigeto<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 富山県立大学, <sup>2</sup> 京都大学生存圏研究所, <sup>3</sup> 情報通信研究機構, <sup>4</sup> 宇宙科学研究所, <sup>5</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>Toyama Prefectural University, <sup>2</sup>RISH, Kyoto University, <sup>3</sup>NICT, <sup>4</sup>ISAS, <sup>5</sup>Hokkaido University

S-520-26 sounding rocket experiment was carried out at Uchinoura Space Center (USC) in Japan at 5:51 JST on 12 January, 2012. The purpose of this experiment is the investigation of the bonding process between the atmospheres and the plasma in the thermosphere. S-520-26 sounding rocket reached to an altitude of 298 km 278 seconds after a launch. The S-520-26 payload was equipped with Electric Field Detector (EFD) with a two set of orthogonal double probes to measure both DC and AC less than 200 Hz electric fields in the spin plane of the payload by using the double probe method. One of the probes is the inflatable tube structure antenna, called the ITA, with a length of 5 m (tip-to-tip). And ITA is very lightweight (12.5g per one boom). The ITA extended and worked without any problems. It was the first successful use of an inflatable structure as a flight antenna. Another one is the ribbon antenna with a length of 2 m (tip-to-tip). The electrodes of two double probe antennas were used to gather the potentials which were detected with high impedance pre-amplifier using the floating (unbiased) double probe technique. The potential differences on the two main orthogonal axes were digitized using 16-bit analog-digital converter, sampled at 800 samples/sec with low pass filter at cut-off frequency of 200 Hz.

Results of measurements of DC electric fields by the EFD have the large sine waves that result from the payload rotation at the spin period. The largest contribution to the electric field measurements by double probes moving through the ionosphere at mid-latitudes is that due to the  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  fields created by their motion across the ambient magnetic field, where  $\mathbf{v}$  is the rocket velocity in the Earth-fixed reference frame and  $\mathbf{B}$  is the ambient magnetic field. The sum of the squares of the two components represents the magnitude of the DC electric field in the spin plane of the payload. These data reveal abrupt, large-scale variations which can immediately be attributed to changes in the geophysical electric field since the  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  fields are slowly varying. The sum of the squares data also reveals contributions at the spin frequency and its harmonics. These contributions result primarily from distortions of the waveforms in the raw data. Then we obtained three components of natural DC electric fields by subtracting the  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  fields from raw data. As a result, the magnitude of DC electric field on a rocket orbit during the ascent was about 1mV/m, and the direction was for north-east.

キーワード: DC電場, 電離圏, ロケット観測

Keywords: DC electric field, ionosphere, rocket experiment

## 地上ミリ波観測装置による極域中間圏一酸化窒素 (NO) の年々変動 Inter-annual variations of Nitric Oxide in the polar mesosphere observed by a millimeter-wave radiometer at Syowa

上村 美久<sup>1</sup>; 磯野 靖子<sup>2</sup>; 長浜 智生<sup>1\*</sup>; 水野 亮<sup>1</sup>; 江尻 省<sup>2</sup>; 堤 雅基<sup>2</sup>; 中村 卓司<sup>2</sup>; 三好 由純<sup>1</sup>  
UEMURA, Miku<sup>1</sup>; ISONO, Yasuko<sup>2</sup>; NAGAHAMA, Tomoo<sup>1\*</sup>; MIZUNO, Akira<sup>1</sup>; EJIRI, Mitsumu K.<sup>2</sup>;  
TSUTSUMI, Masaki<sup>2</sup>; NAKAMURA, Takuji<sup>2</sup>; MIYOSHI, Yoshizumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

太陽陽子イベント時に、高エネルギー粒子が地球大気に降りこんだ場合、極域の下部熱圏・中間圏・上部成層圏の窒素酸化物 (NO、NO<sub>2</sub>) の増加やオゾン減少などの大気微量成分の組成変動が起こることが知られている (e.g., Lopez-Puertas et al. 2005)。我々は国立極地研究所と共同して大気分子の放射スペクトルを観測するミリ波分光観測装置を、南極昭和基地に設置し、2012年1月からNOスペクトルの観測を行っている。

これまでの観測データからNOカラム量は、冬期に増加し、夏期に減少することが分かった。また、2014年については2012年、2013年と比べると冬期の増加量が約半分しかないことが分かった。

そこで、ミリ波分光観測装置の信頼性を確かめるため、AIM衛星搭載SOFIEセンサーとの相互比較を行った。昭和基地と同じ磁気緯度帯で観測されたデータからNOカラム量を算出したところ、ミリ波とSOFIEの結果は同じ傾向を示した。さらに、カラム量同士の月平均を比較したところ相関係数0.86と良い相関がみられた。このことから、ミリ波分光観測装置は均一な観測を行っていて、2014年冬季のNOカラム量減少は確実な現象と考えられる。

次に冬期NOカラム量の年々変動について相対論的電子のフラックス変動の影響を検討した。POES衛星により観測された電子フラックスのデータを用い、月ごとの電子フラックス積算量を求めたところ、2014年に、2012年、2013年の値よりおおむね低くなっており、特に4月から8月の冬期に顕著に低くなっていることが分かった。このことから、2014年冬季にNOカラム量が顕著に小さかった原因は日照による光解離の影響を受けにくい4月から8月の相対論的電子の降り込み量が少なかったことによると考えられる。

キーワード: ミリ波分光, 一酸化窒素 (NO), MLT 領域, 高エネルギー粒子の降り込み

Keywords: microwave spectroscopy, Nitric Oxide, MLT region, Energetic Particle Precipitation

## ファブリーペローイメジャーによるナトリウム薄明大気光の観測 An observation of sodium twilight airglow using a Fabry-Perot imager

鈴木 秀彦<sup>1\*</sup>; 高橋 秀幸<sup>2</sup>; 田口 真<sup>2</sup>  
SUZUKI, Hidehiko<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Hideyuki<sup>2</sup>; TAGUCHI, Makoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 明治大学, <sup>2</sup> 立教大学

<sup>1</sup>Meiji university, <sup>2</sup>Rikkyo university

大気圏上部に相当する中間圏から熱圏下部までの領域 (MLT 領域) は、近年大きな問題となっているグローバルな大気変動の影響が顕著にあらわれる領域として注目されており、その物理的および化学的構造の解明が進められている。この MLT 領域の温度構造や化学過程を探る鍵として注目されているのが、地球外から大気圏に飛び込んでくる流星物質によって供給・維持されている金属原子の層である [Williams, 2002]。この金属原子層を利用した MLT 領域の探査手法の例として、共鳴散乱ライダーがあるが、これは同領域における風速や温度情報を提供する貴重な観測手段として広く定着している [Plane, 2003]。このように、金属原子層は MLT 領域を探索する鍵として広く利用されているものの、その水平空間分布やカラム量の季節変動については未解明な点が多い。本研究では、この金属原子の水平分布を地上から直接観測する方法として薄明大気光現象に着目した。薄明大気光とは、下層大気 (20 km 以下) には太陽光があたり、下部熱圏の金属原子層 (~高度 100 km) だけが日照下にあるような幾何学的条件下 (=薄明時間帯) で、金属原子由来の共鳴散乱光が顕著に発光する現象である。この現象は古くから知られており、分光観測や理論的研究などが精力的に行われてきた [e.g. Chamberlein, 1961]。この発光現象の特徴は、ライダーのように狭い領域をレーザー光で照射し、共鳴散乱を誘起する手法と異なり、太陽光が光源となるため、面的に発光が起こることである。したがって、薄明大気光の強度を面的にとらえることができれば、金属原子カラム量の水平分布を得る事ができる。薄明大気光はその名の通り、薄明時間帯に起こる現象であるから、地上からの観測では、背景光として連続光成分が混入する。したがって、微弱な薄明大気光を面的に精度よく捉えるためには、広視野、高感度、かつ狭帯域なイメージング手法を必要とする。そこで、本研究では、そのような要件を満たす装置として国立極地研究所が有するファブリーペローイメジャーを用い、最も強度が強いことで知られるナトリウムによる薄明大気光観測を試験的に実施した。本発表では、この試験観測の結果に基づき、薄明大気光を利用した金属原子の空間分布観測の可能性について議論する。

キーワード: 薄明大気光, 中間圏, 熱圏, 金属原子層, ファブリーペロー

Keywords: twilight airglow, mesosphere, thermosphere, metallic layer, Fabry-Perot

国際宇宙ステーションからの撮像観測を用いた大気光輝度の不連続の三次元構造の推定  
An estimation of three-dimensional structures of airglow emission discontinuities using images taken from ISS

佐藤 大仁<sup>1\*</sup>; 齊藤 昭則<sup>1</sup>; 秋谷 祐亮<sup>1</sup>; 穂積 裕太<sup>1</sup>  
SATO, Masato<sup>1\*</sup>; SAITO, Akinori<sup>1</sup>; AKIYA, Yusuke<sup>1</sup>; HOZUMI, Yuta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

国際宇宙ステーション (ISS) からの宇宙飛行士による撮像画像を用いて大気光輝度の不連続の三次元空間構造を明らかにした。宇宙飛行士によるデジタルカメラを用いた夜間撮像には地球リム上に大気光層が写っている。可視光による撮像である為、これらは、高度 90km 付近に存在する Na 589nm と OI 557.7nm の大気光が支配的であると考えられる。2011 年 10 月 16 日及び 2014 年 8 月 26 日の撮像では大気光層に輝度の不連続構造が観測された。それぞれ 4 分 24 秒間、8 分 15 秒間の観測によって不連続構造を様々な角度から撮影されていたため、三次元空間構造の推定を行うことが出来た。その結果、不連続構造は Na と OI の二つの大気光発光層が上下に分かれることによるものであることがわかった。また、不連続構造はほぼ東西方向に幅 700km 以上にわたり広がっていることがわかった。また、アーベル関数を用いることで発光層の高度分布及び発光の RGB 比を求めた。地上からの大気光観測では中間圏ボアとして大気光輝度の不連続構造が観測されているが、今回の不連続構造は中間圏ボアと共通する性質と、一致しない性質を持つ事が明らかとなった。講演では、観測された中間圏大気光不連続構造の空間的構造を報告し、そのボアとの相違点から、生成機構についての議論を行なう。

キーワード: 大気光, 中間圏ボア

Keywords: airglow, mesospheric bore

## 南極昭和基地レイリー/ラマンライダーにより観測された中層大気の大気重力波の新しい解析方法 New analysis of gravity wave in middle atmosphere by Rayleigh/Raman lidar at Syowa station in Antarctica

木暮 優<sup>1\*</sup>; 中村 卓司<sup>2</sup>; 江尻 省<sup>2</sup>; 西山 尚典<sup>2</sup>; 堤 雅基<sup>2</sup>; 津田 卓雄<sup>3</sup>

KOGURE, Masaru<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Takuji<sup>2</sup>; EJIRI, Mitsumu K.<sup>2</sup>; NISHIYAMA, Takanori<sup>2</sup>; TSUTSUMI, Masaki<sup>2</sup>; TSUDA, Takuo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 電気通信大学

<sup>1</sup>Department of Polar Science, The Graduate University for Advanced Studies, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, Japan, <sup>3</sup>The University of Electro- Communications

下層大気で発生した重力波は上方伝播し、中層大気へ運動量をもたらす。その効果は、中層大気の水平平均風を変化させ、大規模子午線循環を引き起こし、中層大気の鉛直気温プロファイルを大きく変化させることが理論的に理解されている [Lindzen, 1981; Holton, 1982; Matsuno, 1982]。しかし、重力波の水平平均風への寄与の定量的理解は現在でも不十分である。中でも極夜ジェットなどの対流によって発生する重力波は、どの程度寄与しているか未知な部分が多い。そこで、我々は南極昭和基地にレイリー/ラマンライダーを設置し、2011年2月から高度約8~70 kmの気温データを取得し、重力波による気温擾乱を観測している。2014年10月終わりまでに850晩以上観測を行った。

我々は、Duck et al. (2001) 及び Alexander et al. (2011) の解析方法を参考に解析を行っている。しかし、彼らの解析方法は大気気温から背景場の気温を引いた値 ( $T'$ ) を重力波による気温擾乱の振幅としているため、位相の時間変化を考慮しておらず、波のエネルギー ( $E_p$ ) を過小評価してしまう可能性があった。そこで、我々は  $T'$  を大気密度の平方根で重みづけしヒルベルト変換することによって  $T'$  の位相を  $90^\circ$  遅らせた値 ( $T_h'$ ) を求め、 $((T')^2 + (T_h')^2)^{1/2}$  を計算することで純粋な振幅を取り出す方法を独自に考案した。本講演では我々の解析方法を詳しく述べる。

キーワード: 成層圏, 中間圏, 中層大気, 大気重力波, 南極域, ライダー

Keywords: Stratosphere, Mesosphere, Middle atmosphere, gravity wave, Antarctica, Lidar



## 波長可変ライダーによる Fe 温度と Ca<sup>+</sup>温度の観測 Measurements of Fe and Ca<sup>+</sup> temperatures using by a frequency-tunable lidar

津田 卓雄<sup>1\*</sup>; 江尻 省<sup>2</sup>; 西山 尚典<sup>2</sup>; 阿保 真<sup>3</sup>; 川原 琢也<sup>4</sup>; 中村 卓司<sup>2</sup>  
TSUDA, Takuo<sup>1\*</sup>; EJIRI, Mitsumu K.<sup>2</sup>; NISHIYAMA, Takanori<sup>2</sup>; ABO, Makoto<sup>3</sup>; KAWAHARA, Takuya<sup>4</sup>;  
NAKAMURA, Takuji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 首都大学東京, <sup>4</sup> 信州大学

<sup>1</sup>The University of Electro-Communications, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Tokyo Metropolitan University, <sup>4</sup>Shinshu University

We are developing a new resonance scattering lidar system to be installed at Syowa Station (69S, 39E) in Antarctica. For the new lidar system, we have employed a tunable alexandrite laser covering the resonance scattering lines of two neutral species, which are atomic potassium (K, 770 nm) and atomic iron (Fe, 386 nm), and two ion species, which are calcium ion (Ca<sup>+</sup>, 393 nm) and aurorally excited nitrogen ion (N<sub>2</sub><sup>+</sup>, 390 nm, 391 nm). Thus the new lidar system will provide information on the mesosphere and lower thermosphere as well as the ionosphere. Using the new resonance scattering lidar together with colocated other instruments, we will conduct a comprehensive ground-based observation of the low, middle, and upper atmosphere above Syowa Station. This unique observation is expected to make important contribution to studies on the atmospheric vertical coupling process and the neutral and charged particle interaction.

In this presentation, we will report current status on test observations of the iron atom layer at National Institute of Polar Research (NIPR) at Tachikawa, Japan (36N, 139E). In order to obtain the iron resonance line at 386 nm, we operate the fundamental laser (i.e. the tuneable alexandrite laser) at 772 nm, which is shifted by 2 nm from the potassium resonance line at 770 nm, and then obtain the pulsed 386 nm laser using nonlinear crystal based on the second harmonic generation (SHG) technique. On 14 August 2013, we successfully detected first signals from the iron atom layer, with one-frequency mode for Fe number density measurement. The observed iron number density would be fairly comparable to that from the previous observations at Illinois (40N, 88W). After that, we have prepared three-frequency mode for Doppler temperature measurements. Based on a theoretical calculation, we have determined good combination of the three laser frequencies to minimize the temperature error, and then performed operations of the three-frequency mode on 5 and 18 August 2014. The obtained temperature data will be compared with those from NRLMSISE-00 model and satellite observations. Furthermore, we will show a challenge of observing Ca<sup>+</sup> temperature.

キーワード: 共鳴散乱ライダー, 中間圏・下部熱圏, 電離圏 D・E 領域, 中性大気温度, イオン温度

Keywords: Resonance scattering lidar, Mesosphere/Lower thermosphere, Ionospheric D/E region, Neutral temperature, Ion temperature

## EISCAT レーダートロムソ観測所における 2015 年 3 月までの STEL 光学観測結果 Report of the STEL optical observation at the Tromsø EISCAT radar site by March 2015

大山 伸一郎<sup>1\*</sup>; 野澤 悟徳<sup>1</sup>; 塩川 和夫<sup>1</sup>; 大塚 雄一<sup>1</sup>; 津田 卓雄<sup>2</sup>; 高橋 透<sup>1</sup>; 藤井 良一<sup>1</sup>  
OYAMA, Shin-ichiro<sup>1\*</sup>; NOZAWA, Satonori<sup>1</sup>; SHIOKAWA, Kazuo<sup>1</sup>; OTSUKA, Yuichi<sup>1</sup>; TSUDA, Takuo<sup>2</sup>;  
TAKAHASHI, Toru<sup>1</sup>; FUJII, Ryoichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 電気通信大学情報理工学部

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, <sup>2</sup>Department of Information and Communication Engineering, University of Electro-Communications

太陽地球環境研究所 (Solar-Terrestrial Environment Laboratory; STEL) は欧州非干渉散乱 (European Incoherent Scatter; EISCAT) レーダーがあるノルウェーのトロムソ (北緯 69.6°, 東経 19.2°) で 10 年以上に渡り光学観測を実施してきた。トロムソは欧米・アジア諸国が様々な光学・電波観測装置を設置し、EISCAT レーダーを軸とした国際共同観測研究を展開する世界最大級の観測拠点である。2015 年 1 月現在、我々はトロムソ観測所に以下に述べる 5 台の光学観測装置を設置し、10 月から翌 3 月の約半年間、自動観測とともに共同研究者からの要請に応じた観測モードで運用を行っている。尚、これら光学観測装置以外にナトリウムライダーが 2010 年 10 月から稼働している。

### 1. 3 波長フォトメータ

1997 年 1 月に最初のキャンペーン観測を実施後、2001 年 10 月に自動運用を開始した本装置は現在 3 つの光学フィルター (427.8 nm, 630.0 nm, 557.7 nm) を持ち、20Hz サンプリングでデータを取得する。2010 年 10 月に運用・データの自動処理システムを更新した。常に磁力線方向に固定した観測を行い、EISCAT UHF レーダーの主要観測モードの一つである CP-1 モード (同じく磁力線方向にアンテナ方向を固定した観測) とほぼ同じ空間を同時に観測することができる。

### 2. 天候・オーロラ観測用デジタルカメラ

対流圏高度の雲の発生状況を把握することは、光学観測データの解析にとって必須事項である。光学フィルターを通した単色画像では天候を判別しにくく、デジタルカメラで撮影されるカラー画像がより適している。そこで 2001 年 10 月からデジタルカメラによる自動観測を開始した。撮影画像は天候確認だけでなく、磁力線付近のオーロラ微細構造などオーロラ形態情報の提供も兼ねている。

### 3. プロトン全天カメラ

2006 年 10 月から自動運用を開始した本装置は、下向き沿磁力線電流の発生領域における電離圏応答を捉えることを目的に設置された。上向き沿磁力線電流の発生領域 (オーロラアーク発生領域に相当) に近接するオーロラ発光が弱く、電離圏電子密度が周辺より極端に低い領域には、下向き沿磁力線電流と磁場に垂直な電場が発生すると考えられている。これら電流回路の連続性を維持するために下向き沿磁力線電場が形成され、磁気圏からのプロトン降込みが誘導される結果、プロトン発光 (486.1 nm) が期待される。これまでの観測で数例だがこの仮説を裏付ける観測結果が取得されている。

### 4. 多波長全天カメラ

オーロラや大気光を観測する目的で 2009 年 1 月に設置された本装置は、6 種類の光学フィルターが装着されたホイールを備え、積分時間や観測波長の順番などを任意に設定できる自動観測プログラムによって制御されている。現在保有する光学フィルターの波長は、557.7 nm、630.0 nm、OH バンド、589.3 nm、572.5 nm、732.0 nm である。

### 5. ファブリペロー干渉計 (Fabry-Perot interferometer: FPI)

多波長全天カメラ (上記 4) と同時にトロムソ観測所に設置された本装置は、視野角約 4° の狭視野タイプの装置であり、3 種類の光学フィルターを装着したホイールを持つ。装置上部にはスカイスキャナーと呼ばれる回転モーター付ミラーがあり、観測プログラムでホイールとスカイスキャナーを制御することで、観測波長やその選択順序と積分時間、視線方向を科学的に合わせて任意に設定することができる。観測される物理量は中性大気風の風速と温度である。

これらの光学観測装置は、EISCAT レーダーをはじめ様々な観測装置との共同観測実験に利用されてきた。最初の装置が自動観測を始めて以来、稼働期間は太陽活動周期の 1 サイクルに近く、超高層大気の長期変動研究やイベント解析を行う上で貴重なデータセットが整備された。これまでに蓄積された観測データのクイックルックはウェブページで公開されている ([www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~eiscat/data/EISCAT.html](http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~eiscat/data/EISCAT.html))。今後も全装置の自動観測を継続しながら様々な観測実験に参画し、国内外の共同研究者の研究活動に寄与していく。

# Japan Geoscience Union Meeting 2015

(May 24th - 28th at Makuhari, Chiba, Japan)

©2015. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PEM27-P25

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 18:15-19:30

キーワード: オーロラ, 大気光, 光学装置, 電離圏, 熱圏, 極域

Keywords: aurora, air glow, optical instrument, ionosphere, thermosphere, polar region

## トロムソにおける GNSS 受信機を用いた電離圏シンチレーション観測 Observation of GNSS scintillation in Tromso

上部 広大<sup>1\*</sup>; 大塚 雄一<sup>1</sup>; 小川 泰信<sup>2</sup>; 細川 敬祐<sup>3</sup>

UWASHITOMI, Kodai<sup>1\*</sup>; OTSUKA, Yuichi<sup>1</sup>; OGAWA, Yasunobu<sup>2</sup>; HOSOKAWA, Keisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 電気通信大学大学院情報理工学研究所

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Department of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-Communications

電離圏シンチレーションは、人工衛星などから送信された電波が電離圏の局所的な電子密度の不規則性により位相及び振幅の変動が引き起こされる現象である。受信振幅が変動する振幅シンチレーションは、電子密度の不規則構造によって信号の回折が生じ、信号が互いに干渉しあうことによって発生する。振幅シンチレーション指数である S4 は平均信号強度で正規化した信号強度変化の分散で示される。S4 は、主に赤道域において大きく、極域では小さいことが知られている。一方、電離圏電子密度の空間的もしくは時間的変動によって引き起こされると考えられている位相シンチレーションは、極域で発生し、位相シンチレーション指数である  $\sigma\phi$  は位相の標準偏差で定義されている。

本研究では、ノルウェーのトロムソに設置した Global Navigation Satellite System(GNSS) 受信機を用い、L1, L2 の 2 周波の受信信号強度と位相をサンプリング周波数 50Hz で観測し、位相シンチレーションと振幅シンチレーションを調べる。従来の研究では、極域において振幅シンチレーションはほとんど発生しないとされていたが、本観測では 2013 年 11-12 月において、S4 の値が 0.3 を越える振幅シンチレーションは、12 日観測された。そのうち 7 日は、地磁気活動が活発であったが、5 日は静穏であった。

本講演では、振幅シンチレーションの発生と位相シンチレーション及び背景の全電子数変動と比較を行う。

キーワード: シンチレーション, 電離圏, GPS, GNSS, 地磁気活動, TEC

Keywords: scintillation, ionosphere, GPS, GNSS, geomagnetic disturbance, TEC

## 高緯度帯の GPS 観測網を用いた中規模伝搬性電離圏擾乱の統計解析 Statistical analysis of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances using a GPS network at high-latitudes

溝口 拓弥<sup>1\*</sup>; 大塚 雄一<sup>1</sup>; 塩川 和夫<sup>1</sup>; 津川 卓也<sup>2</sup>; 西岡 未知<sup>2</sup>

MIZOGUCHI, Takuya<sup>1\*</sup>; OTSUKA, Yuichi<sup>1</sup>; SHIOKAWA, Kazuo<sup>1</sup>; TSUGAWA, Takuya<sup>2</sup>; NISHIOKA, Michi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 情報通信研究機構

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications

我々の先行研究では、アラスカに存在する 100 機以上の GPS 受信機網から得られたデータを用いて作成した全電子数 (Total Electron content ; TEC) 変動の水平二次元分布図 (時間分解能は 30 秒、空間分解能は緯度経度  $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ ) を調べることで、2012 年 1 年間のアラスカ上空における中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances; MSTID) の発生頻度、伝搬方向に関する統計的性質を初めて明らかにした。アラスカ上空における MSTID は冬季 (11 月~2 月) の昼間 (8~20 時 LT) に発生頻度が高く、最大で 50% 程度の発生頻度であった。また、その伝搬方向は、8 時から 14 時程度まで南か南東方向が支配的であり、14 時から 20 時頃まで南西方向が支配的であることが分かった。

本研究では、とりわけこの伝搬方向の統計解析結果の理解に焦点を当てた。昼間における南、南東方向への伝搬は、中緯度地域における昼間の MSTID の特徴と一致するものであり、大気重力波が MSTID の成因であると考えられる。一方、南西方向へ伝搬する MSTID は、アラスカにおいて全天大気光イメージャーによる MSTID の観測を行った先行研究でも大気光観測が可能になる日没時以降に観測されており、オーロラ活動によって励起された大気重力波が原因と考えられている。本研究では、大気光観測が可能になる日没後よりも早い地方時においても南西方向に伝搬する MSTID が発生することを示した。

本講演では、MSTID の周期、水平波長、伝搬速度等のパラメータを統計解析した結果を示すとともに、オーロラ活動によって励起された大気重力波が伝搬することによって TEC 変動を引き起こしたという可能性について議論する。また、アラスカと同緯度帯に位置する北欧の GPS データも使って MSTID の伝搬方向を詳細に調べ、このような特徴の MSTID が高緯度帯特有のものかどうかについて議論する。

キーワード: 中規模伝搬性電離圏擾乱, GPS, オーロラ活動

Keywords: Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, GPS, auroral activity

## 北米の GPS 受信機網観測に基づく中規模伝搬性電離圏擾乱の経度依存性に関する統計的研究 Statistical study of longitude dependencies of MSTIDs observed with GPS networks

山脇 景太<sup>1\*</sup>; 大塚 雄一<sup>1</sup>; 塩川 和夫<sup>1</sup>; 津川 卓也<sup>2</sup>; 西岡 未知<sup>2</sup>

YAMAWAKI, Keita<sup>1\*</sup>; OTSUKA, Yuichi<sup>1</sup>; SHIOKAWA, Kazuo<sup>1</sup>; TSUGAWA, Takuya<sup>2</sup>; NISHIOKA, Michi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>2</sup> 情報通信研究機構

<sup>1</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology

本研究では、北米の GPS 受信機網を用いて中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) の性質を統計的に明らかにし、先行研究の結果と比較した。

地上受信機と GPS 衛星間における電波の遅延量から、電離圏の全電子数 (Total Electron Content; TEC) が得られる。得られた TEC から作成された水平二次元分布図を用いて、2013 年の北米上空における MSTID の統計解析を行った。北米全土における TEC の水平二次元分布図を用いた MSTID の統計解析は、本研究が初である。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 北米上空の MSTID の発生頻度は、日中 (8 時~20 時) において冬季 (11 月~3 月) に高く、伝搬方向は南東方向が支配的であった。この冬季の日中に MSTID の発生頻度が高いという特徴は、中緯度地域における先行研究の結果に一致するものであり、大気重力波が MSTID 成因の原因であると考えられる。

2. 夜間 (22 時~6 時) における MSTID は、夏季 (5 月~8 月) に発生頻度が高く、その伝搬方向は南西方向が支配的であった。この特徴は先行研究の結果に見られ、その成因はパーキンス不安定によるものであると考えられる。

3. 1 年を通して朝方に MSTID の発生頻度が高かった。伝搬方向は東方向が支配的であり、その発生原因は日出線で生成される重力波の可能性が考えられる。

4. 夏季 (5 月~6 月) において、北米西部のほうが東部よりも夜間の MSTID の発生頻度が高く、約 20% もの差が見られた。先行研究により夜間 MSTID と ES 層との関係が示されている。低軌道衛星による掩蔽観測により、北米上空において ES 層の発生頻度は西部のほうが東部より高いことが示されており、本研究の結果は MSTID の生成に ES 層との結合が重要な役割を果たしていることを示唆するものであった。

キーワード: 中規模伝搬性電離圏擾乱, 全地球測位網, スポラディック E 層, 経度依存性

Keywords: MSTID, GPS, sporadic E layer, longitude dependencies