

## Observations and Modeling of Ionospheric Disturbances Triggered by Rockets

\*Charles Lin<sup>1</sup>, Chia-Hung Chen<sup>1</sup>, Mitsuru Matsumura<sup>2</sup>, Jia-Ting Lin<sup>1</sup>

1.Department of Earth Science, National Cheng Kung University, 2.National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems

This study presents two-dimensional structure of disturbances wave signatures in ionospheric electron density resulting from the rocket transit using the rate of change of the total electron content (TEC) derived from ground-based GPS receivers around Japan and Taiwan. From the TEC maps constructed for the recent five rocket launches around East Asia region, features of the V-shape shock wave fronts in TEC perturbations are prominently seen. These fronts, with period of 100-600 sec, produced by the propulsive blasts of the rockets appear immediately and then propagate perpendicular outward from the rocket trajectory with supersonic velocities between 800-1200 m/s for both events. Following the initial shock wave feature, various disturbances waves in TEC are seen. Twenty minutes after the rocket transits, delayed electron density perturbation waves propagating along the bow wave direction appear with phase velocities of 800-1200 m/s. According to the propagation character, these delayed waves may be generated by rocket exhaust plumes at earlier rocket locations at lower altitudes. The upward propagating disturbance waves due to exhaust plumes from lower altitude are also reconstructed by comprehensive model calculations.

Keywords: Ionospheric Disturbance Waves, Rocket Exhaust

## 地磁気変動から推定する津波電離圏ホールのダイナミクス

Study of dynamics of tsunami ionospheric hole from geomagnetic observation

\*富田 悠登<sup>1</sup>、金谷 辰耶<sup>1</sup>、鴨川 仁<sup>1</sup>、上嶋 誠<sup>2</sup>\*Yuto Tomida<sup>1</sup>, Tatsuya Kanaya<sup>1</sup>, Masashi Kamogawa<sup>1</sup>, Makoto Uyeshima<sup>2</sup>

1.東京学芸大学教育学部物理学科、2.東京大学地震研究所

1.Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Approximately several minutes after the occurrence of the mainshock of the M9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on 11 March 2011, various geo-electromagnetic phenomena was in Japan and even in the magnetic conjugate point of Japan (i.e. Australia) through magnetic field lines as a field align current. In this paper, we show electromagnetic phenomena after the 2011Tohoku earthquake in the ionosphere such as tsunami ionospheric hole, seismo-field align current, Rayleigh-wave-induced ionospheric arc current, and seismic- ionospheric ring current (SRIC). SRIC was highly related to tsunami ionospheric hole observed by GPS-TEC.

キーワード：磁気、地震、津波、津波電離圏ホール

Keywords: Magnetic field, Earthquake, Tsunami, Tsunami ionospheric hole

## 超稠密GNSS受信ネットワークによる電離層TECの微細変動の特性

Small-scale variations of ionospheric TEC observed with a hyper-dense GNSS receiver network

竹田 悠二<sup>1</sup>、伊藤 直<sup>1</sup>、\*津田 敏隆<sup>1</sup>、新堀 淳樹<sup>1</sup>Yuji Takeda<sup>1</sup>, Naoki Ito<sup>1</sup>, \*Toshitaka Tsuda<sup>1</sup>, Atsuki Shinbori<sup>1</sup>

1.京都大学生存圏研究所

1. Research Institute for Sustainable Humanosphere

GNSS衛星の電波が電離層と対流圏で起こる伝搬遅延からTEC(Total Electron Content)と可降水量(PWV: Precipitable Water Vapor)が求まる。2011年に宇治市西方の約10km四方に1-2km間隔で7-15台の受信機を設置し稠密GNSS受信ネットワークを構築した。降水雲の接近に先立つ約15分前にPWVが約5 mm増加し、その水平変化は3-10mmであった。このため精度2mmでのPWV測定が目標となる。今後数百台のGNSS受信機を想定した場合、廉価な1周波GNSS受信機を用いる必要がある。2周波GNSS受信機では電離層遅延を除去できる。1周波受信機に対して、その周辺の2周波受信機で得られる電離層遅延を内挿する電離層補正モデルを用いる。

天頂付近に長時間滞在する準天頂衛星(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)により1-2kmの空間分解能で電離層のTECの1分値の時間変動を観測した。日出・日没時及び地磁気擾乱時のTECの時間変化に有意な空間分布は認められなかった。一方、伝搬性電離層擾乱が起こると、水平スケール数十kmの波状にTECが滑らかに空間変動した。これらは電離層遅延を厚みのない1層で空間内挿して補正する際に、2次曲面までを仮定すれば十分である。電離層情報を空間内挿するモデルとして、RTNetに付加されたHIRIM、およびドイツGFZが開発したSEIDを用いた。狭い空間スケールでの30秒間隔の内挿ではSEIDがより良好で、PWVの誤差をRMSで1.5mmに抑えられることが分かった。また1秒間隔の内挿を行うことで誤差を70%に抑える事ができた。

キーワード：GNSS気象学、超稠密GNSS受信ネットワーク、可降水量、電離層全電子数、電離層伝搬遅延

Keywords: GNSS meteorology, hyper-dense GNSS receiver network, PWV (precipitable water vapor), TEC (total electron content), ionospheric propagation delay

## GNSS-TECによる北米大陸上空の中緯度スποラディックEの観測

## Observation of mid-latitude sporadic E over North America by GNSS-TEC

\*鈴木 貴斗<sup>1</sup>、古屋 正人<sup>2</sup>、日置 幸介<sup>2</sup>、前田 隼<sup>3</sup>

\*Takato Suzuki<sup>1</sup>, Masato Furuya<sup>2</sup>, Kosuke Heki<sup>2</sup>, Jun MAEDA<sup>3</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻、2.北海道大学理学研究院地球惑星科学部門、3.北海道大学附属図書館

1.Hokkaido University, 2.Faculty of Science, Hokkaido University, 3.Hokkaido University Library

Maeda and Heki. (2014)はGlobal Navigation Satellite System - Total Electron Content (GNSS-TEC)を用いることで日本上空の中緯度スποラディックE(以下Es)を面的に捉えることに成功した。今回我々はGNSS局が密であり、日本と同じ中緯度に位置する北米大陸西海岸でも同様にEsを捉えることができると考え、研究を行った。

Maeda and Heki. (2014)を参考にし、北米大陸上空で発生するEsの発生しやすい時期や時間帯は日本と同じであると考えた。まず、北米大陸西海岸にあるDigisondeのPt. Arguello (lat: 34.8, lon: 239.5)で2006~2015年、5~8月の15~21UTにEsの臨界周波数foEsが12MHz以上となる日時を選んだ。次に、選んだ日時にPt. Arguello付近でEsが見られるかどうかをGNSS-TECを用いて調べた。

その結果、北米大陸上空のEsを捉えることに成功し、経度が異なる場所でも強いEsはGNSS-TECで捉えることが可能であることが示された。更に、観測されたEsは日本と同様に全て東西方向であり、これは東西風シアを反映していると考えられる。

キーワード：スποラディックE、GNSS-TEC

Keywords: Sporadic E, GNSS-TEC

## アラスカのGPS受信機網で観測された中規模伝搬性電離圏擾乱の生成機構

## Generating mechanism of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance using a GPS network in Alaska

溝口 拓弥<sup>1</sup>、\*大塚 雄一<sup>1</sup>、塩川 和夫<sup>1</sup>、西岡 未知<sup>2</sup>、津川 卓也<sup>2</sup>Takuya Mizoguchi<sup>1</sup>, \*Yuichi Otsuka<sup>1</sup>, Kazuo Shiokawa<sup>1</sup>, Michi Nishioka<sup>2</sup>, Takuya Tsugawa<sup>2</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.情報通信研究機構

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.National Institute of Information and Communications Technology

我々の先行研究では、アラスカと北欧に存在する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図 (時間分解能は30秒、空間分解能は約80 km四方) を調べることで、2012年のアラスカ上空及び2008年の北欧上空における中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) の発生頻度、伝搬方向、周期、水平波長及び水平位相速度に関する統計的な性質を明らかにした。観測されたこれらの高緯度におけるMSTIDは、発生頻度の極大に着目すると3つのパターンに分類することができ、それぞれ、アラスカと北欧における冬季の昼間、北欧における夏季の夜間、アラスカにおける冬季の昼間から日没付近となる。アラスカと北欧で冬季の昼間に発生したMSTID及び北欧で夏季の夜間に発生したMSTIDは、発生頻度の季節・地方時変化や伝搬方向の統計的な性質が、日本や南カリフォルニアなどの中緯度帯におけるMSTIDと一致していた。一方で、アラスカにおいて冬季の昼間から日没付近に発生していたMSTIDは、これまで中緯度では観測されていない特徴をもつ。本講演では、このMSTIDについて、中緯度で従来から言われているメカニズムによって発生するかどうか、電気力学及び中性大気力学の2つの観点から考察を行った結果を発表する。

まず、電気力学的観点において、高緯度では磁力線が鉛直に近いこと、高度方向のプラズマ変動が起こりにくく、分極電場によるExBドリフトでは電子密度変動の振幅が小さくなることが分かった。そこで、この電子密度変動の振幅を、Es層の電場が磁力線を介してF層に伝わることで増大させ、MSTIDとして観測されるまでに至るといふ発生メカニズムを考察した。この理論では、磁気共役点においてMSTIDの発生地方時が一致する必要があるが、アラスカと磁気共役の関係にあるニュージーランドにおける先行研究の結果と比較したところ、MSTIDの発生地方時は一致していなかった。すなわち、アラスカにおけるMSTIDが電気力学的なメカニズムで発生しているとは考えづらいという結論に至った。

次に、中性大気力学的観点において、オーロラ活動によって大気重力波が励起され、MSTIDとして観測されるという考えに基づき、電離圏電子密度の擾乱の指標であるROTI (Rate Of TEC change Index)、地磁気活動度の指標であるAE指数及びKp指数とMSTIDの発生頻度を比較したが、明確な対応は見られず、MSTIDとオーロラ活動との関係は殆どないと言える。

これらのMSTIDの波源を同定すべく、大気重力波のレイトレーシングを行った結果、34イベント中24イベントが対流圏の高度10 kmまで到達した。すなわち、対流圏の高度10 kmで励起された大気重力波が、電離圏の高度300 kmまで到達し、MSTIDとして観測されている可能性が高いことが明らかになった。また、いくつかのケースでは成層圏等でレイトレーシングができなくなった。それより下層からは大気重力波が伝搬してこれられないため、成層圏における現象 (極渦の活動等) がMSTIDの成因に効いている可能性も考えられる。今後、大気重力波の励起源をより詳しく調べることで、高緯度におけるMSTIDの発生メカニズムの描像をより明らかにする必要があるだろう。

キーワード：電離圏、伝搬性電離圏擾乱、GPS

Keywords: ionosphere, traveling ionospheric disturbance, GPS

## 熱圏中性風計測に向けたSrおよびBa共鳴散乱光の高精度スペクトル解析

Spectral analyses of resonance scattering of Sr and Ba for determination of thermospheric neutral wind

\*齋藤 耕<sup>1</sup>、柿並 義宏<sup>1</sup>、山本 真行<sup>1</sup>

\*ko saito<sup>1</sup>, Yoshihiro Kakinami<sup>1</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1</sup>

1.高知工科大学

1.Kochi University of Technology

## 1. はじめに

我々はJAXA他と共同し、観測ロケットからのリチウム放出によって熱圏希薄大気中における風速プロファイルの計測技術を開発してきた。2014年11月にノルウェーにて観測ロケット放出バリウム(Br)およびバリウムイオン(Br<sup>+</sup>)の共鳴散乱光を観測し、高度 150~400 kmの熱圏中性風およびイオンドリフトの観測が行われた。また、日本は将来的にストロンチウム(Sr)を用いて同様の計測を実施予定であり、その予備実験として2014年9月に群馬県内にてSr放出装置を用いた地上実験が行われた。この両方の実験から得たSrおよびBa共鳴散乱光の画像から行ったスペクトル解析の結果と、SrおよびBaの放出検証について報告する。

## 2. スペクトル解析

本実験のスペクトル観測方法として、ノルウェーで行われたロケット実験の地上観測では回折格子(500 line/mm)をレンズ前面に装着したカメラ(Nikon D700)によりスペクトルを観測した。Sr放出地上模擬実験では同回折格子を装着したビデオカメラ(SONY DCR-PC101)とファイバ入力型分光光度計を用いて観測した。それぞれの観測で得られた分光画像の1次回折光が写る画像をIDL (Interactive Data Language)言語を用いて作製した画像処理ソフトウェアを用いてスペクトル断面の輝度分布を読み取り画像上の各ピクセルにおける輝度値をグラフ化した。次に、較正用光源として理科教材用の小型放電装置を使用しアルゴン(Ar)放電管によるArガスの輝線スペクトルを分光カメラおよび分光ビデオカメラで撮影した。撮影より得られたArスペクトル画像から基準となる輝線波長を複数取得し、グラフ化したSrおよびBa共鳴散乱光の輝度分布の波長を較正した。また、ファイバ入力型分光光度計では単位時間の空間積分スペクトル強度を得ることができ、Sr発光時のデータを解析した。

## 3. スペクトル解析結果および考察

ノルウェーでのロケット実験で得られた分光画像のスペクトル解析から、波長455 nm, 557 nm, 610 nm~661nmの発光スペクトルを確認した。Br<sup>+</sup>およびBa発光の文献値の波長である455 nmおよび553 nmと非常に接近した値を本解析により得た。Sr地上実験の分光画像および分光光度計のスペクトル解析から波長460 nmの発光スペクトルを確認でき、Sr発光の文献値である460.7 nmに同定できると考えられる。複数のスペクトル断面を積分することで非常に微弱なSr 460.7 nmの立ち上がりを明瞭に検出できた。分光光度計の解析からは、Sr放出の際のテルミット反応によるものと考えられる635 nm, 644 nm, 656 ~659 nmの鉄(Fe)、アルミニウム(Al)、および668 nm~671 nmの酸素分子(O<sub>2</sub>)のスペクトルを確認した。

## 4. まとめ

ノルウェー観測ロケット実験で得られた分光画像より波長455 nm, 557 nmの発光を確認でき、Br<sup>+</sup>およびBaのスペクトルに同定され、Ba放出ならびにイオン化とそれぞれの発光を確認できた。またSr地上模擬実験で得られた分光画像および分光光度計の時空間積分スペクトルデータでは460.7 nm付近で輝度ピークを確認しておりSr放出および発光が確認できたと結論される。

キーワード：ストロンチウム、共鳴散乱、熱圏

Keywords: strontium, resonance scattering, thermosphere

## 赤道プラズマバブルに伴う磁場変動の数値シミュレーション

Numerical simulation of magnetic field variation associated with equatorial plasma bubble

\*横山 竜宏<sup>1</sup>、Stolle Claudia<sup>2</sup>\*Tatsuhiko Yokoyama<sup>1</sup>, Claudia Stolle<sup>2</sup>

1.情報通信研究機構、2.GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany

1.National Institute of Information and Communications Technology, 2.GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。赤道域電離圏においては、赤道スプレッドF/プラズマバブルと呼ばれる現象の研究が古くから行われている。プラズマバブルに伴う局所的なプラズマ密度の不規則構造が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動（シンチレーション）が生じるため、GPS等による電子航法に深刻な障害を及ぼすことが知られている。現在までに、プラズマバブルの複雑な内部構造を再現可能な3次元数値モデルを開発し、非線形成長過程について明らかにすることに成功してきた。近年、高精度の磁力計を搭載した衛星観測(CHAMP, Swarm)により、プラズマバブル中を衛星が通過する際に、数nT程度の磁場変動が観測されることが報告されている。この磁場変動は、プラズマ圧力勾配が作る電流によって主磁場成分が強められる反磁性効果と、プラズマバブルの壁面に沿って流れる沿磁力線電流による主磁場直交方向の変動によるものと解釈されている。そこで、数値モデル内で磁力線等ポテンシャルの仮定を外すことで3次元の電流場を計算し、その電流場が作る磁場変動の計算を行った。その結果、観測と同程度の磁場変動が再現され、沿磁力線電流の分布は、想定されていたモデルとよく合致することが明らかとなった。プラズマバブルに伴う磁場変動は、岩石圏起源の磁場変動と振幅、空間スケールが近いため、固有磁場のモデル化にとっても重要な情報となり得る。

キーワード：プラズマバブル、磁場、シミュレーション、CHAMP衛星

Keywords: plasma bubble, magnetic field, simulation, CHAMP satellite

## Sq電流系中心の電子加熱現象解明のための観測ロケット実験速報

## — DC電場&amp;超低周波波動観測 —

Preliminary report of a sounding rocket experiment to elucidate electron heating in the Sq current focus

- Observations of DC Electric field and VLF band plasma wave -

\*安宅 祐香<sup>1</sup>、石坂 圭吾<sup>1</sup>、阿部 琢美<sup>2</sup>、田中 真<sup>3</sup>、熊本 篤志<sup>4</sup>、吉川 顕正<sup>5</sup>、松下 拓輝<sup>5</sup>

\*Yuka Ataka<sup>1</sup>, Keigo Ishisaka<sup>1</sup>, Takumi Abe<sup>2</sup>, Makoto Tanaka<sup>3</sup>, Atsushi Kumamoto<sup>4</sup>, Akimasa Yoshikawa<sup>5</sup>, Hiroki Matsushita<sup>5</sup>

1.富山県立大、2.JAXA宇宙科学研究所、3.東海大、4.東北大、5.九州大

1.Toyama Pref. Univ., 2.ISAS/JAXA, 3.Tokai Univ., 4.Tohoku Univ., 5.Kyushu Univ.

冬期昼間において電離圏下部ではSq電流系と呼ばれる領域が発生し、その中心付近には電子加熱、強い電子密度擾乱等の特異なプラズマ現象が生じている。S-310-44号機観測ロケット実験は、各観測器を搭載したロケットをSq電流系中心に向けて打上げ、特異現象の解明のための鍵となる物理量を観測することが目的である。過去にもS-310-37号機観測ロケットで同じような実験が行われたが、沿磁力線方向の電場成分を観測することができなかった。これは、ロケット本体に太陽光が照射されることによって生じる光電子が電場観測に影響を与えたことが原因の一つである。観測データから完全に光電子パルスの影響を除去することは非常に困難である。そこでロケット本体から放出される光電子が分布している領域から外へ電場センサとなる電極を出すことが可能であれば、光電子パルスの影響を少なくできる。したがって、アンテナの長さを可能な限り長くして、観測を行う必要がある。そこでS-310-44号機観測ロケットでは、アンテナの長さをS-310-37号機観測ロケットの2倍の4m Tip-to-Tipにし、光電子パルスの影響を少なくするとともに電場の測定精度を向上させる。2016年1月15日、内之浦宇宙空間観測所でS-310-44号機観測ロケット実験が行われた。ロケットは計画通りにSq電流系の中心付近を通過した。また、搭載された科学観測機器も正常に動作した。電場観測装置EFDにおいては、打ち上げから67秒後（高度81km）にアンテナが伸展開始し、81秒後（高度97km）に全伸展し、観測が開始された。観測されたデータを見ると、S-310-37号機で見られた光電子の影響は見られなかった。本発表ではS-310-44号機で得られた電場データを解析し、Sq電流系の生成メカニズムの解明に重要な電場ベクトルの導出結果について述べる。

キーワード：電場、ロケット観測、Sq電流系

Keywords: electric field , sounding rocket experiment, Sq current system

Sq電流系中心の電子加熱現象解明のための観測ロケット実験速報－プラズマ波動観測－  
Sounding rocket experiment to clarify electron heating phenomena in the Sq current focus -  
Plasma wave observation -

\*熊本 篤志<sup>1</sup>、石坂 圭吾<sup>2</sup>、安宅 祐香<sup>2</sup>、高橋 隆男<sup>3</sup>、田中 真<sup>3</sup>、阿部 琢美<sup>4</sup>

\*Atsushi Kumamoto<sup>1</sup>, Keigo Ishisaka<sup>2</sup>, Yuka Ataka<sup>2</sup>, Takao Takahashi<sup>3</sup>, Makoto Tanaka<sup>3</sup>, Takumi Abe<sup>4</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.富山県立大学工学部情報システム工学科、3.東海大学、4.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Toyama Prefectural University, 3.Tokai University, 4.JAXA

In order to clarify electron heating phenomena in the center of Sq current focus in the winter ionosphere, the sounding rocket experiment S-310-44 was launched at 21:00 UT (12:00 JST) on January 15, 2016 at Uchinoura Space Center (USC). Plasma Wave Monitor (PWM) onboard the S-210-44 was successfully measured plasma waves in a frequency range from 300 Hz to 22 MHz along the rocket trajectory with apex altitude of 160 km, which is also confirmed to be near the Sq current focus by using data from magnetometer chain on the ground. The AC electric field was picked up with two antenna elements (EFD-ANT-1 and 2), and respectively amplified by two preamplifiers (EFD-Pre-1 and 2) of the Electric Field Detector (EFD). Then, two signals were fed to two PWM inputs (PWM-HF and PWM-VLF), respectively. The signal fed to PWM-HF was sampled at 81.92 MSPS and converted to spectrum in a frequency range from 20 kHz to 22 MHz with 400 frequency steps. The signal to PWM-VLF was sampled at 81.92 kSPS and converted to spectrum in a frequency range from 300 Hz to 20kHz with 400 frequency steps. These spectra were obtained every 125 msec. EFD antenna elements were stored on the ground and deployed at altitude of 85 km. So the altitude range from 85 km to 160 km are covered in ascent, and all altitude range below 160 km are covered in descent.

During the flight, the following phenomena were identified: (1) Harmonic emissions of lower hybrid resonance (LHR) were found in a frequency range from several hundred Hz to several kHz. Their frequencies changes depending on the ambient plasma density and likely on the ion compositions. They are enhanced at altitude around 100 km in ascent but not enhanced at the same altitude in descent. (2) Upper hybrid resonance (UHR) waves were not found in a frequency range around several MHz. In most previous sounding rocket experiment, UHR waves were found in altitude range higher than 200 km, and masked at altitude below 200 km by the artificial radio waves from the ground. In this experiment, the artificial radio waves were not so intense to mask the other emissions. The LHR waves can be generated by various energy inputs. Baker et al. [2000] reported that LHR emissions were found in the sounding rocket experiment, and suggested that they are caused by the whistler waves from the thunderstorms on the ground. The enhancement of LHR only in ascent suggests that the energy source of LHR wave is localized in narrow area in E region of the ionosphere. Through the comparisons with data from the other instruments onboard the S-310-44 such as electron density and temperature (FLP), DC and AC electric fields (EFD), and currents (MGF), we will be able to discuss the energy source of the observed LHR waves in more detail.

キーワード：観測ロケットS-310-44号機、Sq電流系中心、プラズマ波動観測、低域混成共鳴波

Keywords: The sounding rocket experiment S-310-44, Sq current focus, Plasma wave observation, Lower hybrid resonance wave

## Sq電流系中心の電子加熱現象解明のための観測ロケット実験速報

- 電子エネルギー分布観測 -

Preliminary report of a sounding rocket experiment to elucidate electron heating in the Sq current focus

- Observations of thermal electron energy distribution -

\*阿部 琢美<sup>1</sup>、石坂 圭吾<sup>2</sup>、熊本 篤志<sup>3</sup>、田中 真<sup>4</sup>、高橋 隆男<sup>4</sup>、松下 拓輝<sup>5</sup>、吉川 顕正<sup>5</sup>\*Takumi Abe<sup>1</sup>, Keigo Ishisaka<sup>2</sup>, Atsushi Kumamoto<sup>3</sup>, Makoto Tanaka<sup>4</sup>, Takao Takahashi<sup>4</sup>, Hiroki Matsushita<sup>5</sup>, Akimasa Yoshikawa<sup>5</sup>

1.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、2.富山県立大学工学部、3.東北大学大学院理学研究科、4.東海大学、5.九州大学理学研究院

1.Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science Department of Solar System Sciences, 2.Toyama Prefectural University, 3.Tohoku University, 4.Tokai University, 5.Kyushu University, Faculty of Sciences

電離圏下部のSq電流系中心には電子加熱、電子密度擾乱を初めとするプラズマの特異現象が発生している。このような現象の特徴を明らかにし、その発生メカニズムを解明することを主目的として、観測ロケット実験が2016年1月15日に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所周辺で行なわれた。この観測ロケット(S-310-44号機)には電子エネルギー分布・電子密度擾乱測定器(F L P)、電場計測器(E F D)、プラズマ波動測定器(P W M)、磁場計測器(M G F)等計5個の観測機器が搭載された。本発表では、ロケットの搭載観測機器のひとつであるF L Pの観測結果を中心に発表を行なう。

F L Pでは、直径3mmの円筒プローブに印加する周期10Hz・振幅3Vの三角波電圧に周期2kHzの微小振幅の正弦波を重畳し、その2倍の高調波成分を取り出すことで、所謂プローブのV-I特性の2次微分成分の推定が可能である。プローブから見た空間電位が決定されれば、2次微分成分から容易にエネルギー分布関数を導き出すことが出来る。F L Pのもうひとつの機能は電子密度擾乱の測定にあり、この目的のために直径30mmの球プローブをロケットの機軸中心に設置した。プローブには+4Vの電圧を印加し、その場の電子密度に比例する電子電流を6.4kHzの周波数でサンプリングを行い、1m以下の空間スケールまでの電子密度擾乱をモニターした。本ロケットの実験期間中、九州大学のグループが地上に設置した磁力計のデータからSq電流系の位置を推定し、打ち上げ条件の判断に用いられた。1月15日正午に行ったロケットの打上げ時には軌道とSq電流系中心の距離は約200~300 kmであった。

F L Pはロケットの上昇時・下降時に成功裏に観測を実施しデータの取得を行なった。電子エネルギー分布から電子温度を推定したところ、ロケット上昇時の高度100~110 kmにおいて背景温度に対して約200 Kの上昇を示していたことがわかった。電子エネルギー分布に関しても、完全なマクスウェル分布ではなく非熱的な成分の存在を示すデータが得られている。電子密度擾乱に関しては、電離圏E領域で数百Hzの周波数の擾乱が激しく、特に高度95~110 kmでは広い周波数帯において強度が顕著に増大していたことが観測データから確認された。発表ではこれらの特徴に関する解析結果を紹介し、議論を行う。

キーワード：Sq電流系、観測ロケット、電子加熱

Keywords: Sq current system, sounding rocket, electron heating

## 1980年から2010年までの地磁気Sq等価電流系の変化

Variation of equivalent current system representing geomagnetic Sq variation in the period of 1980-2010

\*竹田 雅彦<sup>1</sup>

\*Masahiko Takeda<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科付属地磁気世界資料解析センター

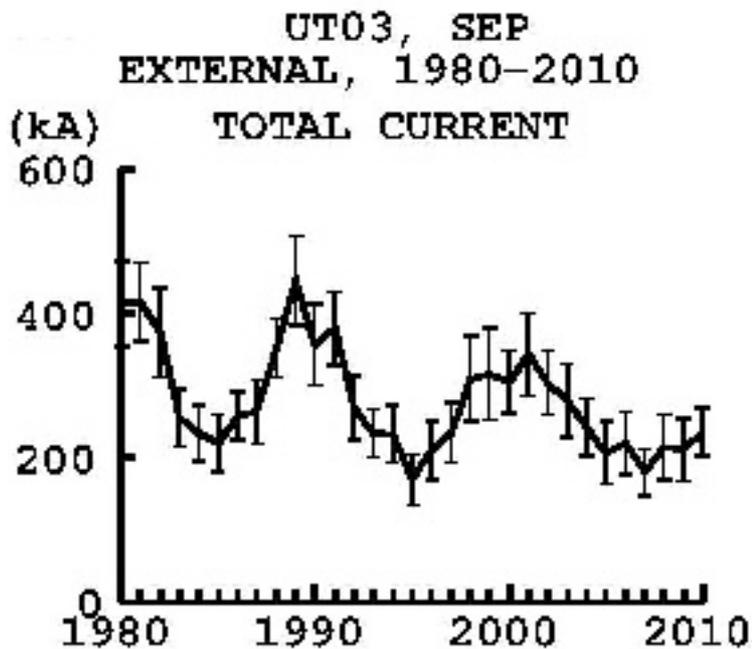
1. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University

1980年から2010年までの31年間について球関数解析により地磁気Sq等価電流系をUT1時間毎に求め、その季節、経年変化などを調べた。例えば、図にあるように全外部電流量の経年変化としては太陽活動度の11年周期に対応する変化に加えて各周期各々の特性も反映されていて、特に2000年以降はそれ以前に比べ全体として小さくなっていることが示された。

その他の特徴などについては発表時に述べる予定である。

キーワード：地磁気日変化、等価電流系、経年変化、太陽活動度

Keywords: geomagnetic daily variation,, equivalent current system, secular variation, solar activity



JEM-GLIMS直下視観測から同定したスプライトの水平空間分布と親雷放電との関係  
Horizontal Distributions of Sprites and the Relation to Parent Lightning Discharges  
Derived from JEM-GLIMS Nadir Observations

\*佐藤 光輝<sup>1</sup>、足立 透<sup>2</sup>、佐藤 剛志<sup>3</sup>、牛尾 知雄<sup>4</sup>、森本 健志<sup>5</sup>、鈴木 睦<sup>6</sup>、山崎 敦<sup>6</sup>、高橋 幸弘<sup>1</sup>

\*Mitsuteru Sato<sup>1</sup>, Toru Adachi<sup>2</sup>, Tsuyoshi Sato<sup>3</sup>, Tomoo Ushio<sup>4</sup>, Takeshi Morimoto<sup>5</sup>, Makoto Suzuki<sup>6</sup>,  
Atsushi Yamazaki<sup>6</sup>, Yukihiro Takahashi<sup>1</sup>

1.北海道大学 大学院理学研究院、2.気象研究所、3.北海道大学 大学院理学院、4.大阪大学 工学研究科、5.近畿大学 理工学研究科、6.宇宙科学研究所

1.Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Meteorological Research Institute, 3.Department of CosmoSciences, Hokkaido University, 4.Graduate School of Engineering, Osaka University, 5.Faculty of Science and Engineering, Kinki University, 6.ISAS/JAXA

JEM-GLIMSは、国際宇宙ステーション(ISS)から雷放電・高高度放電発光現象(TLEs)の直下視観測を2012年11月に開始し、2015年8月に完了した。約3年間の軌道上観測期間において、合計8357例の雷放電、699例のTLEsの検出に成功した。JEM-GLIMSの光学観測データおよび地上雷放電観測データの解析から、699例のTLEsのうち42例がスプライト、508例がエルプスであると同定した。スプライト観測データの詳細解析によって、(1) 42例全てにおいて、スプライトは親雷放電発生から約1 msの遅延時間をもって発生すること(短遅延型スプライト)、(2) スプライトの発光は親雷放電発光の上空付近で発生していること、などが明らかとなった。しかしながら、スプライトの発光位置は、親雷放電のピーク発光位置からは厳密にはずれており、その空間偏差の中央値と平均値はそれぞれ13.6 km、13.3 kmとなることが判明した。親雷放電の発光ピーク位置が帰還雷撃点に一致すると仮定すると、この結果は、Lu et al. [JGR, 2013]の先行研究で示されている「短遅延型スプライトは親雷放電の帰還雷撃点から30 km以内で発生する」という結果に整合する。このことは、(1) 雷放電によって雷雲内で中和される電荷の中心領域が帰還雷撃点から10 km程度変位している、もしくは、(2) 電荷中和領域は帰還雷撃点に一致するが、スプライト発生高度にあらかじめスプライトを容易に発生させる"種"が形成されていた、という2つの可能性を示唆する。講演では、JEM-GLIMSによって観測されたスプライトの空間分布と親雷放電との空間偏差を詳細に示すと共に、空間偏差が生じる原因について議論する。

キーワード：雷、高高度放電発光現象、国際宇宙ステーション

Keywords: Lightning, TLEs, ISS

## サブストーム回復相におけるオーロラパッチと下部熱圏風速変動

Lower-thermospheric wind variations in auroral patches during the substorm recovery phase

\*大山 伸一郎<sup>1</sup>、塩川 和夫<sup>1</sup>、三好 由純<sup>1</sup>、細川 敬祐<sup>2</sup>、ブレントン ワトキンス<sup>3</sup>、栗原 純一<sup>4</sup>、津田 卓雄<sup>2</sup>、クリストファー ファーレン<sup>3</sup>\*Shin-ichiro Oyama<sup>1</sup>, Kazuo Shiokawa<sup>1</sup>, Yoshizumi Miyoshi<sup>1</sup>, Keisuke Hosokawa<sup>2</sup>, Brenton J Watkins<sup>3</sup>, Junichi Kurihara<sup>4</sup>, Takuo T. Tsuda<sup>2</sup>, Christopher T Fallen<sup>3</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.電気通信大学、3.アラスカ大学フェアバンクス校地球物理学研究所、4.北海道大学

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.University of Electro-Communications, 3.Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, 4.Hokkaido University

地磁気活動に対する極域熱圏・電離圏の応答は長年研究されており、変動を発生させる代表的な物理機構としてジュール加熱や粒子加熱による熱エネルギー散逸、ローレンツ力による運動量輸送が提唱されている。これらの物理機構に関する研究はサブストームの主相ないしオンセット前後の現象の解析が主であり、回復相に着目した研究は少ない。しかし回復相はオーロラ電子の中で最高エネルギーを持つ粒子が降込む時間帯に相当し、電離圏密度は高度・緯度・経度の広範囲にわたり顕著に変動することが知られている。そこで我々は回復相に着目し、熱圏・電離圏の基本物理量（密度・温度・風速）の代表的変動を把握し、その発生機構の物理的解明を目的としている。

ノルウェーのトロムソにあるファブリペロー干渉計（FPI; 波長557.7nm）を用いた我々の観測研究によってサブストーム回復相のオーロラパッチ（AP）の出現に伴い一晩の中で最大の振幅を持つ風速変動が下部熱圏で測定された。一連のサブストーム活動中に蓄積・散逸されるプラズマエネルギーの収支過程では、回復相でのエネルギー散逸量は少ないと一般的には考えられているので、この観測事象は興味深い結果と言える。そこで本研究では、激しい風速変動が観測された3つのイベントについて、その時の太陽風・磁気圏・電離圏の観測値を用いた総合的な議論を行った。その結果、（1）APの縁あるいはAPに囲まれたオーロラ輝度が低い部分に風速変動が局在し、振幅と周期は最大で約20 m/s（鉛直成分の値）と約10分である、（2）電離圏対流電場は概ね小さい（ $< 15$  mV/m）、（3）脈動オーロラを伴う、ということが分かった。これらのことから風速変動を発生させるエネルギー散逸はAP周辺に局在していると推定される。FPIで測定したオーロラ波長（557.7 nm）は電子の降り込みエネルギーに依存して発光高度が変動する。さらに主な発光高度領域である100km付近には風速の高度勾配がある。FPI風速値へのこれら高度分布の影響を推測するために、欧州非干渉（EISCAT）レーダー測定電子密度と、Geophysical Institute, Univ. of Alaska Fairbanks が開発した電離圏モデル（SCIM）を用いた定量解析を行った。その結果、発行高度の変化は1.5kmかそれ以下であり、約20m/sに達する風速変動を発光高度の変化だけで説明するのは難しいと考えられる。電離圏対流電場は小さいことから、通常のジュール加熱やローレンツ力による大気加速も考えにくい。現状、主要な物理機構は未解明であるが、サブストームに伴う磁気圏からのエネルギー輸送過程と、中性大気へのエネルギー輸送過程をより理解するために、回復相における電離圏・熱圏応答の研究は鍵となるかもしれない。

キーワード：オーロラ、熱圏、ファブリペロー干渉計、サブストーム回復相

Keywords: aurora, thermosphere, Fabry-Perot interferometer, substorm recovery phase

波長可変共鳴散乱ライダーによる国内観測試験～第58次南極地域観測隊での昭和基地導入に向けて～  
Test observations by a frequency-tunable resonance scattering lidar

\*江尻 省<sup>1</sup>、西山 尚典<sup>1</sup>、津田 卓雄<sup>2</sup>、阿保 真<sup>4</sup>、津野 克彦<sup>3</sup>、和田 智之<sup>3</sup>、小川 貴代<sup>3</sup>、川原 琢也<sup>5</sup>、中村 卓司<sup>1</sup>

\*Mitsumu K. Ejiri<sup>1</sup>, Takanori Nishiyama<sup>1</sup>, Takuo T. Tsuda<sup>2</sup>, Makoto Abo<sup>4</sup>, Katsuhiko Tsuno<sup>3</sup>, Satoshi Wada<sup>3</sup>, Takayo Ogawa<sup>3</sup>, Takuya Kawahara<sup>5</sup>, Takuji Nakamura<sup>1</sup>

1.国立極地研究所、2.電気通信大学、3.理化学研究所、4.首都大学東京大学院システムデザイン研究科、5.信州大学工学部

1.National Institute of Polar Research, 2.The University of Electro-Communications, 3.RIKEN, 4.Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, 5.Faculty of Engineering, Shinshu University

国立極地研究所は、2010年より6年間のプロジェクトとして第Ⅷ期重点研究観測「南極域から探る地球温暖化」を推進している。中層・超高層大気観測研究は、その中のサブテーマIに位置付けられており、地表から超高層大気にいたる大気の変動をとらえる計画で、これまでに継続観測してきた各種レーザー・光学観測機器に加えて、第Ⅷ期で新たに大型のレーザーやライダーなどの測器の開発・導入・観測を進めている。ライダープロジェクトとして、2011年から昭和基地で上部対流圏から中間圏まで(<70-80km)の温度プロファイル観測を開始しているレイリー/ラマンライダーに加えて、観測高度をさらに上空、超高層大気にまで広げ、より高高度での大気重力波の活動や、オーロラ活動に伴うイオン化学反応を介した大気微量成分の組成変動など、超高層大気中の様々な力学・化学過程を通じた大気の変動をとらえるべく、国内で波長可変共鳴散乱ライダーの開発を進めている。送信系には波長可変のアレキサンドライト・レーザーと第2高調波発生器を用いており、インジェクションシーダーの波長を波長計で制御することで、基本波として768-788 nm、第2高調波として384-394 nmのうち任意の波長のレーザーパルスを得ることが出来る。これにより南極昭和基地において、カリウム原子(770 nm)、鉄原子(386 nm)、カルシウムイオン(393 nm)、窒素イオン(390-391 nm)の原子とイオンを狙って、高度80 km以上の大気温度、原子やイオンの高度分布などを測定する計画である。2013年以降は、国内での金属原子・イオン層観測試験も行いながら、第58次南極地域観測隊(2016年11月出発予定)での昭和基地への導入を目指して、ライダーシステムの開発・改良を行っている。本講演では、開発・改良の現状と、金属原子・イオン密度、および中間圏温度の試験観測の結果を議論する。

キーワード：共鳴散乱ライダー、中間圏・下部熱圏領域、温度観測、金属原子、金属イオン

Keywords: resonance scattering lidar, Mesosphere Lower-Thermosphere Region, Temperature measurement, Metal atom, Metal ion

## 昭和基地で観測された中間圏大気重力波の一晩における時間変動

One night variation of horizontal phase velocity distribution of mesospheric gravity waves at Syowa

\*松田 貴嗣<sup>2,1</sup>、中村 卓司<sup>1,2</sup>、堤 雅基<sup>1,2</sup>、江尻 省<sup>1,2</sup>、富川 喜弘<sup>1,2</sup>

\*Takashi S. Matsuda<sup>2,1</sup>, Takuji Nakamura<sup>1,2</sup>, Masaki Tsutsumi<sup>1,2</sup>, Mitsumu K. Ejiri<sup>1,2</sup>, Yoshihiro Tomikawa<sup>1,2</sup>

1.国立極地研究所、2.総合研究大学院大学

1.National Institute of Polar Research, 2.Graduate University for Advanced Studies

Gravity waves, generated in the lower atmosphere, can propagate to the mesosphere and the lower thermosphere, and transport great amount of energy and momentum, and release them at various altitude regions. Among many parameters to characterize gravity waves, horizontal phase velocity is very important to discuss vertical propagation and where the momentum is released. Near the mesopause region, OH and other airglow imaging has been used for investigating the horizontal structures of gravity waves for more than two decades. Although the huge amount of the image data has been observed at various observation sites all over the world, a time consuming manual procedure has been used for extracting horizontal propagation characteristics from airglow data. This causes difficulty in obtaining a global map of gravity wave characteristics in the mesopause region. Another important fact on the mesospheric gravity wave studies is that observations over the Antarctic region were quite rare despite a significant amount of gravity waves generated in this region.

Matsuda et al., 2014 developed new statistical analysis method for deriving horizontal phase velocity spectrum of gravity waves derived from airglow imaging data. It is suitable to not only deal with a large amount of data, but also reveal temporal variation of phase velocity spectrum. In this study, we obtained 9 horizontal phase velocity spectra every an hour at 1501-0000 on May 11 2013 at Syowa (69S, 40E). We compared these spectra with background wind using re-analysis data (MERRA) and MF radar data, and found that effect of wind filtering by critical level could not explain the temporal variation.

キーワード：大気重力波、大気光イメージング、中間圏

Keywords: Atmospheric gravity waves, Airglow imaging, Mesosphere

## 信楽の長期大気光撮像データを用いた中間圏大気重力波の水平位相速度スペクトルの解析：対流圏再解析データとの比較

Long-term variation of horizontal phase velocity spectrum of mesospheric gravity waves observed by an airglow imager at Shigaraki : Comparison with tropospheric re-analysis data

\*竹生 大輝<sup>1</sup>、塩川 和夫<sup>1</sup>、藤波 初木<sup>1</sup>、大塚 雄一<sup>1</sup>、松田 貴嗣<sup>2</sup>、江尻 省<sup>2</sup>、中村 卓司<sup>2</sup>、山本 衛<sup>3</sup>  
 \*Daiki Takeo<sup>1</sup>, Kazuo Shiokawa<sup>1</sup>, Hatsuki Fujinami<sup>1</sup>, Yuichi Otsuka<sup>1</sup>, Takashi S. Matsuda<sup>2</sup>, Mitsumu K. Ejiri<sup>2</sup>, Takuji Nakamura<sup>2</sup>, Mamoru Yamamoto<sup>3</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.国立極地研究所、3.京都大学生存圏研究所

1.Institute for Space-Earth Environmental Research Nagoya University, 2.National Institute of Polar Research, 3.Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

下層大気で生成された大気重力波は運動量を成層圏・中間圏へ運搬し、中間圏界面で砕破した際に運動量を放出する。放出された運動量が大規模な子午面循環を引き起こし、中層大気における物質の輸送に大きな影響を与える。この運動量の運搬を伴う大気重力波の中層大気への伝播は、大気重力波の水平位相速度に大きく依存している。大気重力波に関する研究は過去にも多くあり、レーダーや大気光画像を用いて波長や位相速度などのパラメータの解析が行われてきたが、大気光画像で観測できる中間圏の小規模大気重力波の10年以上の長期にわたる水平位相速度スペクトルの解析はまだ行われていない。

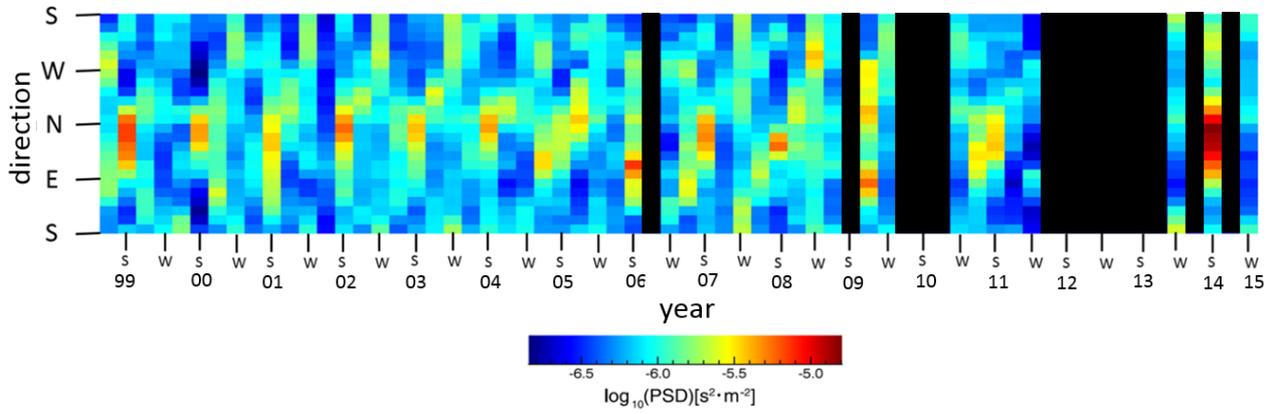
そこで我々は、京都大学の信楽MU観測所(北緯34.8度、東経136.1度)に設置された超高層大気イメージングシステム(OMTI)の全天大気光イメージャーの長期観測データ(1998年10月1日~2015年7月26日)を用いて、大気重力波の水平位相速度スペクトルの長期解析を行った。解析法として、Matsuda et al. (JGR, 2014)により提案された手法を用いた。この手法は、3次元フーリエ変換を用いて大量の画像データに対して自動的に水平位相速度スペクトルの計算を行うことができるため、長期データの解析に適している。

この約17年の解析の結果、信楽上空の大気重力波の伝播方向は、春は北東と南西、夏は北東、秋は北西、そして冬は南西方向に伝播する波が卓越し、毎年同じような季節変動をすることがわかった。とりわけ夏の北東方向と冬の南西方向が顕著な違いとして現れた。また、冬と春はそれぞれ7-8年、2-3年の時間スケールでパワースペクトル密度が変化していることもわかった。

そこで我々は、夏と冬の伝播方向の違いに着目した。夏は北東、冬は南西と、東西方向にも南北方向にも伝播方向が入れ替わっている。東西方向については、高度70km付近で夏は西向き、冬は東向きに吹く中間圏ジェット気流によるウィンドフィルタリングで中間圏の大気重力波の伝播方向が変わるという先行研究の考察と一致する(e.g., Nakamura et al., EPS, 1999; Ejiri et al., JGR, 2003)。しかし、南北の伝播方向の季節変化はウィンドフィルタリングでは説明できない。そこで、夏は北向き、冬は南向きの伝播方向の変化は大気重力波の波源の位置の変化によるものであると予想し、対流圏の上昇流速の再解析データを用いて、季節ごとの対流圏の上昇流速の速度分布を調べた。すると、日本付近では、夏は日本の南の梅雨前線、冬は日本の北東のカムチャッカ半島沖で冬型の気圧配置による低気圧により、夏は日本の南、冬は日本の北で強い上昇流が発生していることがわかった。このことより、夏と冬の南北の伝播方向の入れ替わりは、大気重力波の波源の位置の変化によるものであると考えられる。

次に我々は、大気重力波の水平位相速度のパワースペクトル密度が、冬は7-8年、春は2-3年といったように季節ごとに特徴的な年変動していることに着目した。そこで、パワースペクトル密度の夏と冬の年変動と、対流圏の上昇流速の再解析データ、エルニーニョ・南方振動(NINOインデックス)、北極振動(AOインデックス)、太陽黒点数の年変動との相関係数を計算した。その結果、大気重力波の水平位相速度のパワースペクトル密度の年変動と、対流圏の上昇流速の再解析データの間、夏は日本の南側、冬は日本の北東の領域において強い相関が見られた。この領域は、夏は日本の南の梅雨前線、冬は日本の北東のカムチャッカ半島沖で冬型の気圧配置による低気圧の位置とほぼ一致する。この結果は、先ほどの夏と冬の南北の伝播方向の入れ替わりは、大気重力波の波源の位置の変化によるものであるという考察をより確かなものとする。また、エルニーニョ・南方振動(NINOインデックス)、北極振動(AOインデックス)、太陽黒点数の年変動との相関はほとんど見られなかった。

キーワード：中間圏大気重力波、水平位相速度スペクトル、長期解析、大気光画像、対流圏再解析データ  
Keywords: mesospheric gravity waves, horizontal phase velocity spectrum, long-term analysis, airglow imager, tropospheric re-analysis data



## LF帯標準電波を用いた台風に関連する下部電離圏反射高度変動

Variations in the reflection height in the lower ionosphere associated with typhoons using LF transmitter signals

\*大矢 浩代<sup>1</sup>、浅田 圭佑<sup>2</sup>、土屋 史紀<sup>3</sup>、塩川 和夫<sup>4</sup>、中田 裕之<sup>1</sup>、山下 幸三<sup>5</sup>、高橋 幸弘<sup>6</sup>

\*Hiroyo Ohya<sup>1</sup>, Keisuke Asada<sup>2</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>3</sup>, Kazuo Shiokawa<sup>4</sup>, Hiroyuki Nakata<sup>1</sup>, Kozo Yamashita<sup>5</sup>, Yukihiro Takahashi<sup>6</sup>

1.千葉大学大学院工学研究科、2.千葉大学工学部、3.東北大学大学院理学研究科、4.名古屋大学宇宙地球環境研究所、5.サレジオ工業高等専門学校電気工学科、6.北海道大学大学院理学研究院

1.Graduate School of Engineering, Chiba University, 2.Faculty of Engineering, Chiba University, 3.PPARC, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 5.Department of Electrical Engineering, Salesian Polytechnic, 6.Graduate School of Science, Hokkaido University

So far, several studies for gravity waves caused by typhoons have been reported, although there are few studies for the lower ionosphere variations associated with typhoons using LF transmitter signals. In this study, we investigate variations of the D-region height associated with a typhoon of 11-20 June, 2012 using phase data of LF transmitter signals. There were two magnetic storms (minimum Dst values: -51 nT on 12 June and -71 nT on 17 June) in these dates. The propagation paths were Fukushima-Pontianak (PTK, Indonesia, 40 kHz) and Saga-PTK (60 kHz). We converted the phase data to reflection heights based on Earth-ionosphere waveguide mode theory. The period of the reflection height variations was analyzed by wavelet transform. The reference days were 23, 24, and 29 June, 2012, which were also geomagnetically quiet days. We excluded the periods of the reflection height variations seen in these reference days from the periods during the typhoon. In daytime during the typhoon, several solar flares were identified by the GOES X-ray flux. When the solar flares occurred, the reflection heights were largely decreased. Only nighttime data of the reflection height were analyzed because the duration of the gravity waves is expected to be several hours. As a result, the common periods of the reflection height over both propagation paths were 45.3 minutes on 15 June, 2012, and 76.1 minutes on 16 June. The duration of the periods was about 50 minutes in nighttime. In the two nights, medium-scale traveling ionospheric disturbances were not observed in the GPS-TEC data over Japan. The horizontal wavelengths were calculated from the onset time difference of the oscillations between the two propagation paths, and difference of the distance between the source location (the typhoon) and the two propagation paths. The horizontal wavelengths were estimated to be 483 -662 km for the 45.3 minutes and 1222 -1346 km for the 76.1 minutes. The horizontal wavelengths were comparable or longer than previous studies.

## 波線法によるVLF/LF電界強度計算法の開発

Development of VLF/LF field strength prediction program using wave-hop theory

\*野崎 憲朗<sup>1</sup>、今村 國康<sup>1</sup>、土屋 茂<sup>1</sup>、北内 英章<sup>2</sup>\*Kenro Nozaki<sup>1</sup>, Kuniyasu Imamura<sup>1</sup>, Shigeru Tsuchiya<sup>1</sup>, Kitauchi Hideaki<sup>2</sup>

1.情報通信研究機構、2.Kitauchi Lab.

1.National Institute of Information and Communications Technology, 2.Kitauchi Lab.

国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）の勧告を取り込んだ波線法によるVLF/LF電界強度計算プログラムが開発された。受信点での電界強度は地表波と、電離圏の底と地表の間を反射する1-hopから10hopまでの空間波のベクトル合成からなる。プログラムでは与えられた日時、地表距離16000kmまでの送受信点間の全大地/電離層反射点のパラメータが計算される。本発表では詳細なアルゴリズムといくつかの特徴的な結果が示される。

キーワード：超長波/長波、電界強度、波線法

Keywords: VLF/LF, field strength, wave-hop theory

## 小型気球搭載型雷放電方向探知システムの基礎開発

Basic development of direction finding system for lightning discharge at small balloon

\*吉永 真章<sup>1</sup>、山本 真行<sup>1</sup>\*Masaaki Yoshinaga<sup>1</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1</sup>

1.高知工科大学

1.Kochi University of Technology

## 1. はじめに

高層大気観測では、科学技術の進歩と共に新たな観測手法が次々と誕生しており、中でも気球観測は他の高層大気観測手法に比べ低コストで、搭載機器の制限も少ないということから、近年JAXA（宇宙航空研究開発機構）などが運用する大気球において様々な萌芽的実験が行われている。マイコンやセンサーの小型化が急速に進んでいる近年では、特に小型気象観測用気球を用いた実験が大学研究室単位でも実現可能となりつつある [1,2]。

本研究では、高高度小型気球用観測機器の 1 案として小型気球搭載型雷方向探知システムの提案・基礎開発を行った。現在日本での雷観測は、気象庁や落雷情報提供を専門とするフランクリン・ジャパン株式会社などが行っている。雷観測の一般的手法として地上局と気象観測用衛星がある。しかし、雷雲が発達する高度域（約 5 km~10 km）を通過する観測はほとんど行われてこなかった。そのため、高高度気球に気象観測用として雷観測システムを搭載し、高頻度にその場観測することで科学的に有用なデータが得られると考えられる。本発表では今回は小型雷方向探知システムの設計・検討および今後の展望について報告する [3]。

## 2. システム開発

雷方向探知手法としては気球搭載時のことを考慮し、単純な構造である程度の強度が見込めるループアンテナ（磁界アンテナ）による電磁波検出型を採用した。開発したシステムは 1 対の直交ループアンテナ、信号増幅用プリアンプおよびバイアス回路、2 チャンネル A/D 変換器、観測時刻取得用のGPS 受信機、データ保存用SD カードによる構成となっている。

## 3. システム評価実験

開発した  $\phi 100$  mm $\times$ 90巻の小型ループアンテナシステムが磁界の変化を検知できるか確認するため、放電管による放電を微小人工雷と見立てた実験を行った。実験目的は放電管とループアンテナ間の距離による電磁波減衰ならびにループアンテナ面に対する放電管の方向を可変した信号波形の方位角依存性の確認にある。電磁波強度の距離減衰実験では、距離を0.5 m、0.7 m、1.0 m、1.2 mの順で可変させた。また、方位角依存性実験は直交ループアンテナを左右 0~90°まで45°刻みで回転させ、放電管とループ面の方向関係を疑似的に変えた。

## 4. 実験結果・考察

電磁波検知強度実験で検知された信号強度  $A$  は距離  $d$  による 2 次多項式で近似できた。放電管からの受信は微弱であるが、定量的に検知できていると言える。一方、ループアンテナの方向可変による検知信号の波形には法則性が認められず方向探知は出来なかった。これは今回用いた mbed マイコンによる A/D 変換サンプリングレート不足のために発生した両チャンネル間での信号遅延が主な原因と考えられる。

## 5. まとめ

製作したシステムは落雷を模擬した微小放電実験で問題なくデータ収集できた。しかし、本システムの屋外設置は試みておらず自然の雷電磁波検出は未確認である。気球搭載を考慮するとシステムの小型化や高層大気を模擬した環境下での性能実験も必要であり、また、雷には負極性雷と正極性雷といった極性が異なる 2 種類の放電現象があるため、実際の方向探知には極性判別用の電界アンテナであるダイポールアンテナを増設する必要がある。

## 参考文献

[1] 河野博基, 小型気球搭載型テレメータおよび簡易運用システムの開発, 平成 25 年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2014.

[2] 枝本雅史, パラfoilを用いた小型飛翔体自律誘導システムの基礎開発, 平成 26年度 高知工科大学 卒

業研究報告, 2015.

[3] 吉永真章, 小型気球搭載型雷放電方向探知システムの基礎開発, 平成 27 年度 高知工科大学 卒業研究報告, 2016.

キーワード: 雷、電磁波、気球

Keywords: Thunder, Electromagnetic wave, Balloon

## 国内運用に最適化された小型高高度気球システムの開発と飛翔評価試験の結果

## Development and evaluative flight experiment result of small high-altitude balloon system optimized for domestic operation

\*平塚 丘将<sup>1</sup>、河野 紘基<sup>1</sup>、山本 真行<sup>1</sup>\*Takamasa Hiratsuka<sup>1</sup>, Hiroki Kono<sup>1</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>1</sup>

## 1. 高知工科大学

1. Kochi University of Technology

## 1. はじめに

地上から成層圏界面までの高高度域における観測手法として、特殊高高度航空機や観測ロケット、高高度気球が一般的に用いられている。このうち高高度気球は他の手段に比べて、簡素な構造で実現可能なため、実験にかかるコスト及び搭載機器への物理的な負荷が少ない利点を持つ。更に、推進に化学反応を用いず、上昇速度が数m/sであることから、観測対象となる大気の攪拌を起さず、科学観測において有利な観測手法である。これらの利点を活かして、海外では気象観測業務用の小型観測気球を、高高度気球実験に応用する事例が頻繁に見受けられるようになった。気象観測気球は直径が約3 m以内のゴム製気球であり、ペイロード質量は単独の気球で約5 kg以内と他の手段と比較して非常に小型である。これらの小規模、低価格な高高度気球実験は、大質量の装置運搬を必要としない局面において、今後有効性を発揮する可能性が十分に考えられるようになった。このような背景から、高高度気球の重要性は大きく、活用方法次第で、その役割は飛躍的に拡大していくと思われる。しかし小型高高度気球を用いた観測手法は国内での普及と活用が進んでいない。これは主に日本の地理的な制約によって搭載装置の回収と運用の安全確保が困難であることに起因している。広大な国土をもつ海外の国々では、砂漠や人口密度の小さい平野を着地点として設定することで、実験装置を搭載した小型高高度気球を安全に運用かつ効率的に回収することが可能である。一方、国内では着地点は限定され、海洋に設定せざるを得ないため気球を用いる優位性が十分に発揮できない。小型高高度気球は事前の気流予測を元に回収を行うが、予測誤差を能動的に吸収する機構や機能を持った気球運用システムは存在していない。本研究では、大学研究室レベルでの開発と検証が可能な小型高高度気球の運用システムにフォーカスし、上述した課題を克服するためサーボ制御のパラフォイルを用いた制御降下式ペイロード技術の開発と性能評価実験を通して開発システムの妥当性および実用性を検討した。

## 2. 開発した機体及び低高度飛行実験

各種飛行試験(直進滑空、旋回)に供する図の様な試験機体を設計し、高度約20 mの高所作業車からの投下する低高度飛行実験を行った。機体は地上からの遠隔操作で制御を行った。

## 3. 実験結果

6回投下中1回分の搭載SDカードに記録されたGPS位置及び気圧計データから算出した滑空比は約2となった。評価はパラフォイルが安定滑空に入った期間について行う必要があったが、期間が短く長期的な評価が困難なため、短期間の評価を行った。同データからは、投下直後は垂直降下速度が支配的だが、その後垂直降下で得たエネルギーが水平滑空に変わるフェーズになり、着地前に水平速度を低下させながら安定滑空に入っていく様子が確認できた。機首方位角と左右サーボ制御角の関係の考察から、サーボ制御による旋回について南から東方向に進行しつつあった機体が右側サーボの引き下げと同期して南方向に舵を切る様子が機首方位角データおよび機体オンボードカメラ映像から見て取れた。

## 4. まとめ

機構設計に関しては多くの新規開発要素に設計妥当性が確認された。円筒筐体および内部モジュールは比較的高加速度の着地衝撃に耐え、通常運用では問題にならないことが確認された。また、強風下の激しい運動を伴った高所作業車からの低高度飛行試験においてパラフォイルが機体に絡まる等の問題は発生せず、パラフォイルの開傘不良および失速による翼形状の崩壊に伴う墜落は起きなかった。不安定な上昇挙動および懸吊、投下姿勢を免れない小型高高度気球搭載装置において補助・接続ロッドの果たす重要性を確認することができた。しかし、軽量と強度を両立した複雑な設計を行う必要があったことから、結果的に1レイヤーに電装基板を収めることが不可能になった。このため、一部のモジュールが僅かなスペースに懸架される形で実装さ

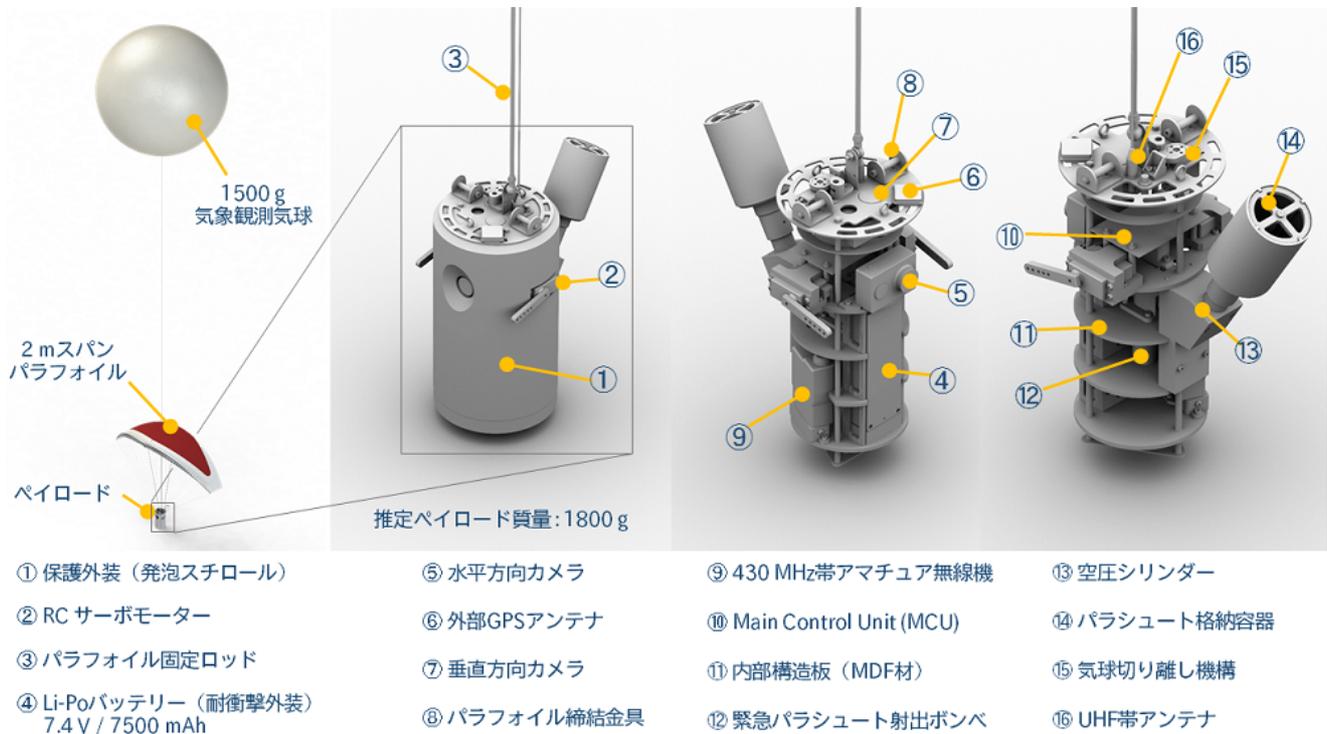
れ、飛行試験における着地時に、懸架されたモジュールが相次いで基板から脱落、破損し、動作不良を招く結果となった。今後の課題は、長距離飛行時の滑空比、旋回性能を確認するために、より高い高度からの飛行評価実験を行う必要がある。そのような実験は規模が大きくなり実際の放球に近い環境で行うことが想定されることから、信頼性の高いバス機器、地上局システムの開発を行っていく。また、将来的なミッション機器の搭載を見越して、ペイロードのバス機器とミッション機器の構成の設計も平行して行う予定である。

### 参考文献

河野 紘基, 国内運用に最適化された小型高高度気球システムの開発と飛翔評価試験, 平成27年度 高知工科大学 大学院特別研究報告, 2016.

キーワード：小型高高度気球、パラフォイル、誘導制御

Keywords: small high-altitude balloon, parafoil, guidance control



## 地上デジタル放送波を用いた水蒸気推定手法の開発－反射波を用いた実験結果－

## Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves - Results using reflected waves -

\*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>

\*Seiji Kawamura<sup>1</sup>, Hiroki Ohta<sup>1</sup>, Hiroshi Hanado<sup>1</sup>, Masayuki Yamamoto<sup>1</sup>, Nobuyasu Shiga<sup>1</sup>, Kouta Kido<sup>1</sup>, Satoshi Yasuda<sup>1</sup>, Tadahiro Goto<sup>1</sup>, Ryuichi Ichikawa<sup>1</sup>, Jun Amagai<sup>1</sup>, Kuniyasu Imamura<sup>1</sup>, Miho Fujieda<sup>1</sup>, Kentaro Ishizu<sup>1</sup>, Hironori Iwai<sup>1</sup>, Shigeo Sugitani<sup>1</sup>

1.国立研究開発法人 情報通信研究機構

1.National Institute of Information and Communications Technology

情報通信研究機構（NICT）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。装置を多点展開して水平面内の水蒸気変動に起因する伝搬遅延を常時モニターし、データ同化による気象予報精度の向上に貢献することを目的としている。有効な観測のためには数十ps以上の精度で伝搬遅延を精密測定する必要があり、放送局や受信地点の局部発振器の位相変動は大きな誤差要因となる。そのため、考えている基本的なアイデアは次の通りである。電波塔を含む直線上に2つの受信点を設け、それぞれにおいて伝搬遅延（位相変動）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部発振器の位相変動が含まれているが、両者の差を取ることで電波塔側局部発振器の位相変動を相殺することができる。残った2地点間の局部発振器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。

伝搬遅延（位相変動）を精密に測定する技術と、異なる地点の局部発振器を高精度に同期させる技術が重要となる。伝搬遅延の精密測定については、これまでソフトウェア無線の技術で開発を進めてきた地デジ放送波の位相変動のリアルタイム測定装置について改良を進めた。各放送局はそれぞれ独自に局部発振器を運用しており、その種類やGPS同期の有無などには違いがある。どのような局部発振器を用いた局であっても安定して位相変動が長期観測可能のように装置の改良を行った。異なる地点の局部発振器の同期については、現在実証実験の準備を進めているところである。

本発表では、同期不要の観測手法とその結果を報告する。電波塔と受信地点を含む直線上で、受信地点から電波塔と反対方向に反射体がある場合、受信地点において直達波と反射波を同時に受信することができる。測定は受信地点の一つの局部発振器を用いて行われるため同期は不要で、直達波と反射波の差を取るだけで受信地点と反射体の間の往復分の伝搬遅延が測定できる。NICT本部は東京スカイツリーから西方約29 kmに位置している。このNICT本部において、スカイツリーと反対側約1 kmの地点のビルからの反射波が受信できる。直達波と反射波を同時に受信してその差を取ることで、NICT本部とビル間の伝搬遅延の測定を行った。NICT本部にある60 m鉄塔には気温・気圧・湿度等を測定する地上気象装置を設置している。NICT本部とビルの間約1 kmの気象条件がこの地上気象装置の観測データで代表されると仮定して計算した伝搬遅延の変動と、本実験の測定結果は非常に良く一致した。この結果は地デジ放送波が水蒸気に起因する伝搬遅延を測定するために有用であることを示している。ただし、雨が降った後数時間は地デジ放送波を用いて測定した伝搬遅延が計算値よりも大きくなることが分かっている。雨により反射面が濡れる、もしくは雨により大地反射の条件が変わって大地反射成分が受信される等の影響が考えられ、この検証は必要である。

キーワード：地デジ放送波、水蒸気

Keywords: digital terrestrial broadcasting wave, water vapor

## 雷放電・TLEsの全球発生分布および発生頻度と地方時間依存性

## Global occurrence distributions and rates of lightning and TLEs and their LT dependences

\*佐藤 剛志<sup>1</sup>、佐藤 光輝<sup>2</sup>、牛尾 知雄<sup>3</sup>、森本 健志<sup>4</sup>、足立 透<sup>5</sup>、鈴木 睦<sup>6</sup>、山崎 敦<sup>6</sup>、高橋 幸弘<sup>1</sup>

\*Tsuyoshi Sato<sup>1</sup>, Mitsuteru Sato<sup>2</sup>, Tomoo Ushio<sup>3</sup>, Takeshi Morimoto<sup>4</sup>, Toru Adachi<sup>5</sup>, Makoto Suzuki<sup>6</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>6</sup>, Yukihiro Takahashi<sup>1</sup>

1.北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻、2.北海道大学 大学院理学研究院、3.大阪大学大学院工学研究科情報通信工学部門、4.近畿大学理工学部、5.気象研究所気象衛星・観測システム研究部、6.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

1.Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Department of CosmoScience, Hokkaido University, 3.Information and communication engineering department, Osaka University, 4.Faculty of Science and Engineering, Kindai University, 5.The Meteorological Satellite and Observation System Department, Meteorological Research Institute, 6.Institute for Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency

高高度放電発光現象(TLEs: Transient Luminous Events)は雷雲地上間放電に伴って、成層圏や中間圏で発生する過渡的な放電発光現象である。約25年前の現象の発見以来、TLEsの全球発生頻度分布は明らかにされてこなかったが、2004年から軌道上観測を開始したFORMOSAT-2衛星搭載ISUAL観測器のデータ解析から、それらが初めて推定された。しかし、FORMOSAT-2衛星は太陽同期極軌道衛星であるため、推定された全球発生頻度は誤差が大きく、かつ地方時(LT)依存性などは不明である。本研究では、軌道傾斜角が51°である国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)に搭載され、軌道上からの直下視観測を開始したJEM-GLIMS(Global Lightning and Sprite Measurements on JEM-EF)の光学観測データを用いた。2012年12月から2014年11月の期間のデータを解析し、この期間の全観測時間と雷放電・TLEsの検出数から、全球発生頻度を推定した。さらにこの結果から、雷放電とTLEsの全球発生分布と頻度を地方時間毎に推定した。その結果、雷放電とTLEsの発生はアフリカ大陸、東南アジア、中央アメリカに集中していることがわかった。この結果は、過去のMicroLab-1/OTDやTRMM/LISなどの衛星による雷放電観測結果と整合する。さらに、雷放電とTLEsは20LTにピークをもち、かつ00LTから03LTの夜明け前にかけて頻度が上昇することが明らかになった。講演では、解析で得られた全球頻度分布とそのLT依存性に関する結果を詳細に報告するとともに、夜明け前にかけて雷放電・TLEsの発生頻度が上昇する理由について議論する。

キーワード：高高度放電発光現象

Keywords: TLEs

## 大気光イメージング観測による山岳励起大気重力波の研究

## Study of atmospheric gravity waves of orographic origin by airglow imaging

\*奥田 雅大<sup>1</sup>、鈴木 秀彦<sup>1</sup>\*Masahiro Okuda<sup>1</sup>, Hidehiko Suzuki<sup>1</sup>

1. 明治大学

1. Meiji Univ.

中層大気におけるエネルギー・運動量収支を理解するうえで重要な大気重力波の励起伝播過程については、これまで観測・シミュレーションの両面から研究が行われてきた。大気重力波の主な励起源としては、山岳地形および海陸分布、下層大気における活発な対流活動、そして風速場中の空間変動などが知られている。特に励起源が地上に固定されている地形性の大気重力波は、季節変動する下層大気の流れと相まって、中層大気循環に一定の規則性を与える重要な因子の一つであると考えられている。そこで、本研究では山岳地形によって励起された大気重力波を観測するために、神奈川県川崎市にある明治大学生田キャンパス(35.6°N, 139.5°E)に、大気光イメージャーを設置し、2015年12月より連続観測を開始した。関東平野のほぼ中央にあたるこの観測拠点は、西部に富士山をはじめとする山岳地形、東南部には太平洋を望むという位置関係から、地形性の重力波の同定に有利であると期待される。例えば、下層大気において西風が継続する状況においては、富士山によって励起される山岳波が、風下側である関東上空の大気光層において対地位相速度がゼロとなる波状構造を形成することが予想される。富士山は高度が突出しており、モデル計算で仮定されるような独立峰型の地形であることから、上述のような観測例はモデルによる比較・再現がしやすく、山岳波の励起伝播過程について多くの知見をもたらすことが期待される。本発表では、大気光イメージングシステムの詳細と初期観測結果について報告する。

キーワード：大気重力波、中層大気、山岳波

Keywords: Atmospheric gravity wave, Middle atmosphere, Mountain wave

## Odin/OSIRIS共鳴散乱観測データを用いた地磁気活動に伴うNa層変動の調査

Investigation on Na layer response to geomagnetic activities using resonance scatter measurement by Odin/OSIRIS

\*津田 卓雄<sup>1</sup>、中村 卓司<sup>2</sup>、江尻 省<sup>2</sup>、西山 尚典<sup>2</sup>、細川 敬祐<sup>1</sup>、高橋 透<sup>1</sup>、Gumbel Jörg<sup>3</sup>、Hedin Jonas<sup>3</sup>

\*Takuo T. Tsuda<sup>1</sup>, Takuji Nakamura<sup>2</sup>, Mitsumu K. Ejiri<sup>2</sup>, Takanori Nishiyama<sup>2</sup>, Keisuke Hosokawa<sup>1</sup>, Toru Takahashi<sup>1</sup>, Jörg Gumbel<sup>3</sup>, Jonas Hedin<sup>3</sup>

1.電気通信大学、2.国立極地研究所、3.ストックホルム大学

1.The University of Electro-Communications, 2.National Institute of Polar Research, 3.Stockholm University

The Na layer is normally distributed from 80 to 110 km, and the height range is corresponding to the ionospheric D and E region. In the polar region, the energetic particles precipitating from the magnetosphere can often penetrate into the E region and even into the D region. Thus, the influence of the energetic particles to the Na layer is one of interests in the aspect of the atmospheric composition change accompanied with the auroral activity.

There are several previous studies in this issue. For example, recently, we have reported an initial result on a clear relationship between the electron density increase (due to the energetic particles) and the Na density decrease from observational data sets obtained by Na lidar, EISCAT VHF radar, and optical instruments at Tromsø, Norway on 24-25 January 2012. However, all of the previous studies had been carried out based on case studies by ground-based lidar observations. In this study, we have performed, for the first time, statistical analysis using Na density data from 2004 to 2009 obtained with the Optical Spectrograph and InfraRed Imager System (OSIRIS) onboard Odin satellite. In the presentation, we will show relationship between the Na density and geomagnetic activities, and its latitudinal variation. Based on these results, the Na layer response to the energetic particles will be discussed.

キーワード：Na層、高エネルギー粒子、Odin/OSIRIS

Keywords: Na layer, energetic particle, Odin/OSIRIS

## 中間圏重力波観測用低廉大気光カメラの性能評価 3 : 画像処理

## Performance evaluation of low-cost airglow camera for mesospheric gravity wave measurements -Part 3: Image processing

\*鈴木 臣<sup>1</sup>\*Shin Suzuki<sup>1</sup>

## 1. 愛知大学地域政策学部

1. Faculty of Regional Policy, Aichi University

Atmospheric gravity waves significantly contribute to the wind/thermal balances in the mesosphere and lower thermosphere (MLT) through their vertical transport of horizontal momentum. It has been reported that the gravity wave momentum flux preferentially associated with the scale of the waves; the momentum fluxes of the waves with a horizontal scale of 10-100 km are particularly significant. Airglow imaging is a useful technique to observe two-dimensional structure of small-scale (<100 km) gravity waves in the MLT region and has been used to investigate global behavior of the waves. Recent studies with simultaneous/multiple airglow cameras have derived spatial extent of the MLT waves. Such network imaging observations are advantageous to ever better understanding of coupling between the lower and upper atmosphere via gravity waves. In this study, we newly developed low-cost airglow cameras to enlarge the airglow imaging network. Each of the cameras has a fish-eye lens with a 185-deg field-of-view and equipped with a CCD video camera (WATEC WAT-910HX) ; the camera is small (W35.5 x H36.0 x D63.5 mm) and inexpensive, much more than the airglow camera used for the existing ground-based network (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI) operated by Solar-Terrestrial Environmental Laboratory, Nagoya University), and has a CCD sensor with 768 x 494 pixels that is highly sensitive enough to detect the mesospheric OH airglow emission perturbations. In this presentation, we will report some results of performance evaluation using the data obtained during test observations made at Shigaraki, Japan, in 2014.

## スボラディックE層内の電子温度減少に関する数値的検討

## A numerical study on decrease of electron temperature inside the sporadic E layer

\*坂本 優美花<sup>1</sup>、阿部 琢美<sup>2</sup>、三宅 互<sup>1</sup>\*Yumika Sakamoto<sup>1</sup>, Takumi Abe<sup>2</sup>, Wataru Miyake<sup>1</sup>

1.東海大学大学院工学研究科航空宇宙学専攻、2.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1.Department of Aeronautics and Astronautics Graduate School of Engineering, Tokai University,

2.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

スボラディックE層は古くから研究・観測されてきた。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が、この理論は電子密度の集積過程を説明するに留まり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。更に、電子温度は電離圏の熱エネルギー収支を議論する上で重要なパラメータであるが、過去にはスボラディックE層内で十分に信頼性のある電子温度観測データは数えるほどしか得られてこなかった。このように、スボラディックE層内の電子温度情報は限られた報告例しか存在せず、内部での熱エネルギー収支に関する議論は非常に少ない。

下部電離圏に発生するスボラディック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(日本標準時)に観測ロケットS-520-29号機が宇宙航空開発機構内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた。このロケットには高速サンプリングが可能なLangmuirプローブが搭載されており、且つ新たな解析方法を導入したことによってこれまでの観測よりも細かな時間(空間)間隔で、スボラディックE層内の電子密度・温度の空間構造の推定が可能になった。その結果として、電子密度が増加するスボラディックE層内における電子温度の変化がはっきり示され、外部との境界付近から中心に向かって温度が次第に減少していく傾向が明らかになった。

本研究では、観測結果として得られたスボラディックE層内での電子温度低下がどのようなメカニズムによるものか議論するために、数値的に検討を行っている。90~120 kmにおける高度で、スボラディックE層を含む鉛直方向の一次元空間で電子、イオン、中性粒子を与え、電子に関するエネルギー方程式を使用して電子温度分布についての数値計算を行った。今回の計算では、高度100kmにスボラディックE層が存在すると想定し、この層内で最大電子密度が背景に対して10倍、20倍、30倍に増加した場合の電子温度分布を求めた。加熱過程としては光電子による加熱とジュール加熱、冷却過程としては中性大気およびイオンとの相互作用による過程を考慮している。その結果、電子密度が高くなるにつれて、背景に対する電子温度の減少幅が徐々に大きくなっていく傾向が見られた。更に、イオン密度や電場等のパラメータを変化させ、どのような条件で電子温度の変化量が大きくなるかを検討した。本発表では、これらの検討結果についての報告を行う。

キーワード：観測ロケット、スボラディックE層

Keywords: Sounding rocket, sporadic E layer

## HFドップラスペクトル詳細解析による波面状スポラディックEの断面構造の導出

## Derivation of cross-section shape of sporadic E by HF-Doppler spectral analysis

\*大田 裕揮<sup>1</sup>、富澤 一郎<sup>1</sup>

\*Hiroki Ohta<sup>1</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>1</sup>

1.電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

1.Center for Space Science and Radio Engineering ,UEC

波面状スポラディックE(Es)は、我々の研究から断面構造は一様な円筒形ではなく、また波面上の場所により異なる構造を持つことが分かってきた[1][2]。

本研究では、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。ドップラ周波数0付近での電界強度の時間変動から細長いEs波面に下部から電波が入射した場合の等価散乱断面積の入射角依存性を求める。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。

この方法により、関東HFD観測網の4つの送信周波数毎の多数の反射点通過時の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下部の断面構造を調べた結果を述べる。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た。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状Es下面の波面幅を求める。

以上の解析方法を適用し、2013年1月16日および19日の21 JST(UT+9)に観測された波面状Esの断面構造について詳細に求めた。1月16日の波面状Esは279°方向に205 m/s、1月19日は205°方向に151 m/sと高速で移動する幅の狭いEsであった。移動速度の速い波面状Esはピーク電界強度の時間変化が少なく、円筒状に近い構造を持つことが分かった。また、1月16日の波面状Esは、高い周波数の断面幅がフレネルゾーン径(4.1 km)とほぼ同じになり、このことに中心の電子密度が高くなる円心構造を持っていることが分かった。また各周波数でのEsの中間点通過時刻の違いがあることから、中心断面構造に傾きがあることが分かった。

講演では、この解析法をドップラシフト変化曲線の異なる波面状Esに対して適用することにより、Es断面構造について議論する予定である。

[1]大田裕揮・富澤一郎：HFドップラスペクトル詳細解析による波面状スポラディックEの断面構造の導出，JPGU2015, P-EM27-P11, 2015.5.

[2] 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：電離層、スポラディックE、HFドップラ観測

Keywords: ionosphere, sporadic E, HF Doppler shift observation

中緯度昼間スポラディックEにおけるシアア不安定性について-InSARとGPS-TEC観測の結果から-  
Possible shear instability in the daytime midlatitude sporadic-E observed with InSAR and  
GPS-TEC

\*前田 隼<sup>1</sup>、鈴木 貴斗<sup>1</sup>、古屋 正人<sup>1</sup>、日置 幸介<sup>1</sup>

\*Jun MAEDA<sup>1</sup>, Takato Suzuki<sup>1</sup>, Masato Furuya<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

1.北海道大学

1.Hokkaido University

Small-scale horizontal structures of daytime midlatitude sporadic E are studied by interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and GPS total electron content (TEC) observations over Japan. With GPS-TEC observations, sporadic E with foEs higher than 16 MHz can be detected [Maeda and Heki, 2014]. A dense array of GPS receiving stations in Japan (GEONET) enables us to image horizontal shapes of sporadic E by plotting vertical TEC anomalies on a map. Such TEC maps revealed that sporadic E over Japan has a common shape which is elongated in the east-west (E-W) direction with typical length and width of ~200 km and ~20 km, respectively, regardless of occurrence latitudes [Maeda and Heki, 2014; 2015]. In this study, we observed smaller-scale structures by InSAR as well as GPS-TEC observations. The spatial resolution is ~300 m for InSAR and ~2 km for GPS-TEC (by analyzing raw slant TEC time series).

The results show that small-scale plasma patches are embedded in large scale frontal structures and such small patches are quasi-periodically located both in zonal and meridional directions.

There are two major candidates for the generation mechanism of daytime sporadic E structure, i.e., namely, atmospheric gravity waves, and the Kelvin-Helmholtz (K-H) instability. We speculate that the K-H instability in the neutral atmosphere under the presence of vertical shear of zonal winds would create billow structures elongated in the zonal direction. On the other hand, secondary instability, such as secondary turbulence in the neutral atmosphere or gradient-drift instability are the two major possible drivers for the patch structuring in the meridional direction.

キーワード：スポラディックE、InSAR、GPS-TEC

Keywords: sporadic-E, InSAR, GPS-TEC

VOR、AIS、イオノゾンデを用いた強いEsの電子密度分布推定と遠距離伝搬波の干渉モデルへの適用  
 Estimation of electron density distribution of strong Es using VOR, AIS and Ionosonde and  
 its application to the VHF interference model of long-distance propagation wave

\*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>

\*Takuya Nitta<sup>1</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>1</sup>, Atsushi Yamamoto<sup>2</sup>, Shinji Saitoh<sup>3</sup>

1.電気通信大学 宇宙・電磁環境研究センター、2.海上保安大学校、3.独立行政法人 電子航法研究所

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

電気通信大学では強いスプラディックE (Es) で反射されたVHF帯電波を調布と呉で観測している[1]。強いEs反射によるGBASのVHFデータ伝送系 (GBAS-VDB) 遠距離伝搬波の干渉を予想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]。

柳沢の研究ではスプラディックE (Es) の広域構造と移動特性が明らかになってきた[3]が、Esの電子密度分布構造についてはまだ明らかにされていない。ITU-RのEs伝搬モデルは1960年代のEs伝搬観測に基づいた電離層反射減衰量 $\Gamma$ と中間反射点付近のイオノゾンデ垂直臨界周波数 $foEs$ との対応式は、周波数80 MHzまでしか適用保証されていなかった[4],[5]。本研究により、2013~2015年の110 MHz付近のVOR遠距離伝搬観測において、中間反射点とイオノゾンデとの距離が約400 km以内の場合、ITU-RのEs伝搬モデルとの対応を初めて確認することができた。

この関係を用いて多数のVOR遠距離伝搬波強度から電子密度分布を推定した結果とAIS遠距離伝搬観測、山川・沖縄イオノゾンデ観測による特定点の電子密度を比較した。2014年6月15日10~15時JST頃に山川 (31.20N, 130.62E) および沖縄 (26.68N, 128.15E) イオノゾンデとの距離が約400 km以内となる東シナ海、沖縄、九州南部付近においてEsを観測した。このEsが高度108 km、速度約70 m/sで約330°方向に移動していることが確認できた。また、このEsはAISで10時10分~11時30分に沖縄南部・東部海上において、電子密度が $1.0 \times 10^{13}$  e $l/m^3$ を超える強いEs領域が出現したことが分かった。この時の沖縄イオノゾンデにおける電子密度が $9.2 \times 10^{12}$  e $l/m^3$ であり、AIS観測によるEsとほぼ一致することを示した。このEsでは、ITU-RのEs伝搬モデルを適用するとVORとGBAS-VDBとの干渉が懸念されるVOR受信電力-98dBmを超える可能性があることがわかった。講演ではこの方法による解析例を示し、強いEsの電子密度の分布や移動特性の特徴と干渉発生との関係について詳しく報告する。

#### 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に対するスプラディック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] 柳沢 伸矢: VHF帯遠距離伝搬波観測による強いスプラディックEの広域構造と移動特性の研究, 電気通信大学修士論文, 2016.

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

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

低高度衛星によって観測された下層大気起源の電離圏上空微小磁場変動 ～ 下層大気現象の同定 ～  
Small-scale magnetic fluctuations of lower atmospheric origin as observed by low Earth  
orbit satellites ~ Identification of lower atmospheric phenomena ~

\*青山 忠司<sup>1</sup>、家森 俊彦<sup>1</sup>、中西 邦仁<sup>1</sup>

\*Tadashi Aoyama<sup>1</sup>, Toshihiko Iyemori<sup>1</sup>, Kunihito Nakanishi<sup>1</sup>

1.京都大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kyoto University

近年、CHAMP（2000～2009年）やSWARM（2013年～）衛星のような低高度精密磁場観測衛星のデータ解析により、中低緯度電離圏上空において、衛星からのみかけ周期が30秒程度、振幅が0.1～5nTの微小な磁場変動（以下、磁気リップル（magnetic ripples）という）が常時存在することが明らかになった。この磁気リップルには地形・季節依存性が見られるため、下層大気を起源とする大気重力波に起因するE層ダイナモによって局地的な沿磁力線電流が流れていると考えられ、低緯度ほど周期が長くなり、振幅が小さくなることも沿磁力線電流による磁場効果であることを示唆している。CHAMPとSWARMに搭載されている磁力計の精度は0.065 nTであり、磁気リップルには、磁気赤道に対して南北共役性が見られること、編隊飛行をする二つのSWARM衛星において類似した磁場変動が観測されること、などの特徴もある。このことから、磁気リップルが観測ノイズではないことは明白である。また、台風や火山噴火時に大気重力波が生じることが知られており、本発表では、これらのイベントと磁気リップルとの関連性について述べ、磁気リップルを生じさせる大気波動の特性と、その発生源となる下層大気現象について考察する。

キーワード：電離層ダイナモ、沿磁力線電流、重力音波共鳴、SWARM衛星、CHAMP衛星、磁気リップル

Keywords: ionospheric dynamo, field-aligned current, acoustic resonance, SWARM, CHAMP, magnetic ripple

2016年2月7日に北朝鮮から発射されたロケット：電離圏の穴から見える二段目の推力の増加

*Ionospheric Hole made by the Kwangmyongsong-4 Rocket Launched from North Korea on Feb. 7, 2016, and Increase of Thrust of its Second Stage Engine*

\*日置 幸介<sup>1</sup>、中島 悠貴<sup>2</sup>、賀 黎明<sup>1</sup>

\*Kosuke Heki<sup>1</sup>, Yuki Nakashima<sup>2</sup>, Liming He<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2.北海道大学大学院理学院自然科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

昇るロケットや弾道ミサイルによって、それらの排気に含まれる大量の水分子が電離圏に持ち込まれると、正イオンから電荷を奪った水分子が電子と結合することによって、電離圏に電子の「穴」（電子密度の減少域）が生じる。電離圏全電子数(Total Electron Content, TEC)は、全球衛星航法システム(GNSS)のLバンドの複数搬送波の位相差から比較的容易に求めることができ、このような穴の観測に便利である(Furuya & Heki, 2008)。Ozeki & Heki (2010)は、日本全国に展開された国土地理院のGNSS網のデータから、2009年四月に北朝鮮東部舞水端里から東北日本に向けて発射されたロケット（大陸間弾道ミサイル・テポドン2）が日本海上空につくった電離圏の穴を解析し、1998年の同様のロケット（テポドン1）との推力を比較した。また2012年十二月には北朝鮮西北部東倉里から南に向けて銀河3号と呼ばれるロケットが打ち上げられたが、Nakashima & Heki (2014)は、GLONASS衛星のデータを解析することによって二段目が作った黄海上空の電子の穴と三段目が作った琉球南西部上空の電子の穴を見出した。

2016年2月7日の日本時間午前9:31 (00:31 UT) に、2012年と同様に北朝鮮の東倉里から南に向けてロケットが発射され、地球観測衛星（光明星4号）を軌道に投入した。本研究では、GEONETのデータを用いて、このロケットが黄海や東シナ海上空に作った電離圏の穴を解析した。前回と異なりGPSとGLONASSのそれぞれ複数の衛星で穴を明瞭に捉えることができた。穴は打ち上げ6-7分後に生じたが、そのタイミングと場所は銀河3号のケースとほぼ同じであった。しかし、穴の規模（TECの減少量とそれが生じた範囲）は、2016年のケースが有意に大きい。九州西部のGNSS局でGPS29番衛星を用いて観測されたTECの時系列を、過去の三例の時系列と比較したものを添付の図に示す。今回生じた電離圏の穴において、TECの減少量と穴の継続時間が突出していることがわかる。

これまでの北朝鮮からのロケット打ち上げでは、一段目は電離圏高度到達前に切り離されており、二段目のロケットの排気が電離圏に影響を及ぼしていることがわかっている(Ozeki and Heki, 2010)。今回（2016年）のロケットの全体像は前回（2012年）とほぼ同じであることが知られているが、最終的に軌道に投入するペイロードが前回より大きいことがわかっており、それに伴って二段目の推力のパワーアップが図られた可能性がある。しかし、今回の打上当時の黄海上空の鉛直TECは約30 TECUと2012年の時の二倍程度であるため、実際の推力の比較はより定量的な議論が必要であろう。

文献

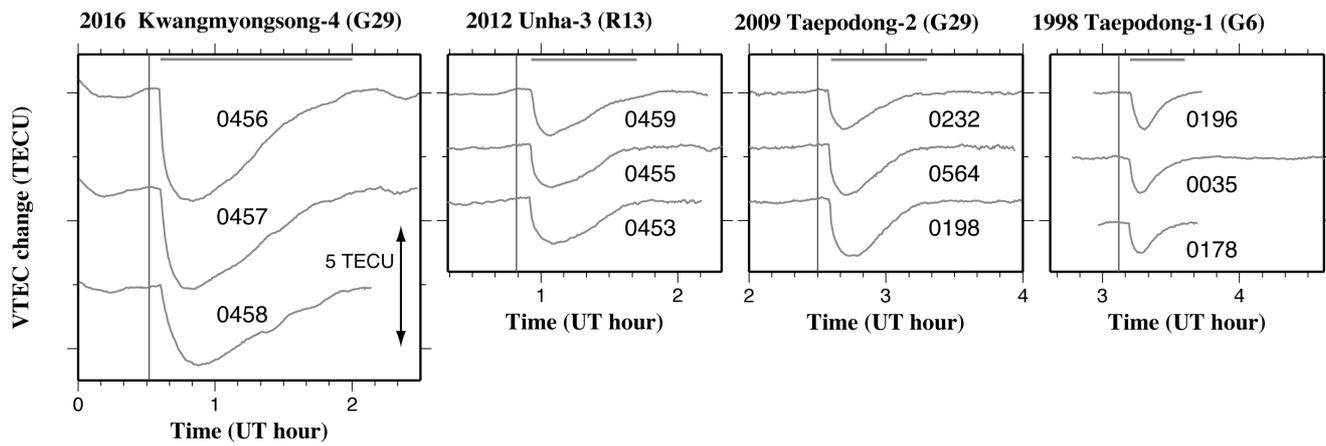
Furuya, T. and K. Heki, Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, *Earth Planets Space*, 60, 235-239, 2008.

Nakashima, Y. and K. Heki, Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan, *Radio Sci.*, 49, doi:10.1002/2014RS005413, 2014.

Ozeki, M. and K. Heki, Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.*, 115, A09314, doi:10.1029/2010JA015531, 2010.

キーワード：GNSS-TEC、北朝鮮ロケット、電子数減少

Keywords: GNSS-TEC, North Korean rocket, ionospheric hole



## 地震による電離圏全電子数変動の空間分布の解析

## Analysis of Spatial Distributions of Total Electron Content Variations Associated with Earthquakes

\*正村 駿<sup>1</sup>、中田 裕之<sup>1</sup>、大矢 浩代<sup>1</sup>、鷹野 敏明<sup>1</sup>、津川 卓也<sup>2</sup>、西岡 未知<sup>2</sup>

\*Shun Shomura<sup>1</sup>, Hiroyuki Nakata<sup>1</sup>, Hiroyo Ohya<sup>1</sup>, Toshiaki Takano<sup>1</sup>, Takuya Tsugawa<sup>2</sup>, Michi Nishioka<sup>2</sup>

1. 千葉大学大学院工学研究科、2. 情報通信研究機構

1. Graduate School of Engineering, Chiba University, 2. National Institute of Information and Communications Technology

巨大地震発生により電離圏擾乱が発生することが報告されている。これは地震による地面の変動や津波により発生した音波や大気重力波が電離圏に伝搬したためと考えられている。2011年に東北地方太平洋沖地震が発生し、近い将来、東海地震などの大規模な地震が発生すると予測されている中、地震に伴う電離圏擾乱について研究することは地震のメカニズムを解明する上で重要となる。

先行研究では、国土地理院のGPS受信機網であるGPS連続観測システム(GEONET)により観測された電離圏全電子数(Total Electron Content: TEC)の時系列データを周波数解析することで、周波数帯域毎の地震によるTEC変動が確認されている。そこで本研究では、GEONETにより得られたTECの時系列データを周波数分解し、各帯域で算出したTEC変動の空間分布について解析を行った。ガウシアンフィッティングを用いて解析を行い、TEC変動の緯度方向および経度方向の広がりを求め、マグニチュードの相関を調べた。電離圏は高度350 kmにある薄層と仮定し、貫通点を求めた。また、TECの時系列データに高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)を施すことにより周波数帯域毎のTECのスペクトル強度を算出した。

2000年以降に発生した地震のうち、5事例について解析を行ったところ、緯度方向ではTEC変動の空間分布とマグニチュードの相関は高いが、経度方向の広がりは相関が小さいことが明らかになった。

キーワード：電離圏全電子数

Keywords: Total electron content

## GPS-TECとHFドップラーを用いた火山噴火に伴う電離圏変動の解析

The ionospheric variations associated with volcanic eruptions observed by GPS-TEC and HF Doppler

\*長南 光倫<sup>1</sup>、中田 裕之<sup>1</sup>、大矢 浩代<sup>1</sup>、鷹野 敏明<sup>1</sup>、冨澤 一郎<sup>2</sup>、津川 卓也<sup>3</sup>、西岡 未知<sup>3</sup>

\*Aritsugu Chonan<sup>1</sup>, Hiroyuki Nakata<sup>1</sup>, Hiroyo Ohya<sup>1</sup>, Toshiaki Takano<sup>1</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>2</sup>, Takuya Tsugawa<sup>3</sup>, Michi Nishioka<sup>3</sup>

1.千葉大学大学院工学研究科、2.電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター、3.情報通信研究機構  
1.Graduate School of Engineering, Chiba University, 2.Center for Space Science and Radio Engineering, 3.National Institute of Information and Communications Technology

地震や台風など下層大気での現象に伴い大気波動が生じ、これにより電離圏擾乱が引き起こされることが知られている。火山噴火に伴い大気波動が生じることは知られているが、火山噴火に伴う電離圏擾乱の観測事例はそれほど多くない。そこで本研究では、火山噴火に伴う電離圏の変動について、GPS-TEC(Total Electron Content)データと短波ドップラー(HF Doppler : HFD)を用いて解析を行った。

GPS-TECデータは、国土地理院のGPS連続観測システム(GPS Earth Observation Network : GEONET)により導出されるものを用いた。TECデータは各衛星-受信機のペアにおいて導出される。解析には、GEONETの受信点約1200点、衛星仰角30度以上の30秒値データを用いた。このデータに高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform : FFT)を施し、周波数帯域毎のスペクトル強度を算出し、TECの変動を検証した。解析対象は、2000年以降に浅間山、御嶽山、および新燃岳で発生した噴火19事例とした。結果、19事例中2事例で火山噴火に伴うTEC変動が検出された。いずれも中爆発規模の浅間山における噴火である。TEC変動はいずれも火山の南側で顕著であり、地震の場合と同様である。しかし変動は7 ~ 12 mHzの周波数帯域で確認された。これは地震時に観測されるものより高い周波数である。

さらに、GPS-TECより変動が検出された2事例を含め、浅間山で発生した中爆発規模噴火4事例を対象に、電気通信大学の短波ドップラー(HFD)観測データを用いて解析を行った。解析には浅間山火口に最も近い観測点である、菅平の5.12秒値の観測データを用いた。結果、4事例中3事例で変動が確認された。FFTを施した結果、3 ~ 5 mHz帯に1つのピーク、8 ~ 18 mHzの帯域に複数のピークが見られる傾向にあった。3 ~ 5 mHzは地震に伴うTEC変動で卓越する帯域で、地面の変動により発生した波動が地表と下部熱圏との間に閉じ込められて定在波となり、電離圏まで漏れて到達してくることに起因する。これより、火山噴火に伴うTEC変動も同様のメカニズムをもつことが示唆される。しかし、GPS-TECでは変動が見られず、その原因については今後調べていく必要がある。8 ~ 18 mHzの帯域見られる複数のピークは、噴火の爆発規模に由来し、噴火の爆発により生じた圧力変動が電離圏に伝わったものではないかと考えられる。また、GPS-TECによる解析で見られた7 ~ 12 mHzの変動と同様のものをとらえたと考えられる。

キーワード：電離圏、火山噴火

Keywords: ionosphere, volcanic eruptions

## 日没時電離圏擾乱季節変動の HF ドップラーによる観測

Seasonal variation in sunset ionospheric disturbances found in a long-term HF Doppler observation dataset

\*坂井 純<sup>1</sup>、冨澤 一郎<sup>1,2</sup>、細川 敬祐<sup>2,1</sup>

\*Jun Sakai<sup>1</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>1,2</sup>, Keisuke Hosokawa<sup>2,1</sup>

1.電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター、2.電気通信大学大学院情報理工学研究科情報・通信工学専攻  
1.Center for Space Science and Radio Engineering, University of Electro-communications,  
2.Department of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-communications

日没に伴う電離圏擾乱は中性大気 - 電離圏結合の顕著な例として知られている。この現象は、日没により冷却された大気が下降し再度上昇することによって発生する大気重力波が電離圏を擾乱するものと考えられている。この擾乱はイオノゾンデをはじめ、IS レーダー、TEC などの手段で観測されている。日没時には日照による電離が止まって電離圏自体が変動し、観測結果には起源の異なる擾乱が同時に記録されるため、これらの観測では擾乱源の特定は簡単には行えない。過去に HF ドップラーを使用した観測において大気重力波の波源高度が推定されており、日没時電離圏擾乱の発生源はオゾン層に相当する高度にあることが示されている。日没は季節変化の規則性が明瞭なため日没に伴う擾乱は他の大気擾乱との分離が容易である。したがって、日没時電離圏擾乱の季節変動を知ることは中性大気 - 電離圏結合を理解する有効な手段となりうる。本研究では、HF ドップラーの長期観測により得られた日没時電離圏擾乱の季節変動の様相、特に擾乱の反復周期の季節依存性を明らかにする。

キーワード：電離圏擾乱、日没、HF ドップラー

Keywords: ionospheric disturbance, sunset, HF Doppler

## 電離圏下部領域における電子密度自動推定アルゴリズムの改良

## Improvement of the electron density automatic estimation algorithm in the ionosphere lower region

\*中澤 涼太<sup>1</sup>、三宅 壮聡<sup>1</sup>、石坂 圭吾<sup>1</sup>\*Ryota Nakazawa<sup>1</sup>, Taketoshi Miyake<sup>1</sup>, Keigo Ishisaka<sup>1</sup>

1.富山県立大学

1.Toyama Prefectural University

電離圏下部領域の電子密度高度分布を推定する手法として、ロケット観測による直接観測が有効であると考えられているが、高度 40km~80km のノーズコーンを開くことのできない高度ではプローブなどによる直接観測が不可能である。この高度域では、地上からの電波強度高度分布を観測してその減衰特性から電子密度高度分布を推定する、という電波吸収法が現在最も有効な電子密度観測方法であると考えている。電波吸収法は次のような手順で電子密度推定を行う。まず仮定した電子密度高度分布から Full wave 法を用いて電波強度の理論値を計算する。次にロケット実験で得られた観測値と比較して電波強度の理論値と観測値が一致すれば、仮定した電子密度が妥当であると判断できる。一致しなかった場合、比較して得られた結果にもとづいて電子密度高度分布を修正し、電波強度の観測値と理論値を徐々に一致させて電子密度を推定する。この手順のうち、電波強度の観測値と理論値の比較および電子密度高度分布の修正を手作業で行っており、電子密度の修正に時間がかかるという欠点がある。また、観測値と理論値を比較する際に定量的な基準がないという問題点もある。

過去の研究において電波吸収法の自動化アルゴリズムを用いて推定を行った。その結果、推定領域全体の誤差が1.2dB以内の精度かつ短時間での推定を実現した。しかし、低高度部において電子密度の大幅な変動が発生していた。これは実観測では見られない現象であり、この推定は現実的な結果を出すことは出来なかったと言える。本研究では現実的な推定結果を出すようにアルゴリズムの検討、改良を行った。

キーワード：電離圏、プラズマ波動、電子密度高度分布、Full wave法

Keywords: ionosphere, plasma waves, electron density profile, Full wave method

## 高い高度分解能を持つロケットGPS-TECトモグラフィ法の検証

Rocket GPS-TEC Tomography method to obtain high altitude resolution

\*池端 祐太郎<sup>1</sup>、芦原 佑樹<sup>1</sup>\*Yutaro Ikehata<sup>1</sup>, Yuki Ashihara<sup>1</sup>

1.奈良工業高等専門学校 電子情報工学専攻

1.Department of Electric and Information Engineering National Institute of Technology, Nara College

In the high altitude atmosphere of the earth, there is a layer of atmosphere called ionosphere, filled with extricated electrons, and the observation of the electron density profile in the ionosphere is recently taken notice of.

As an approach to the observation of electron density profile in the ionosphere, there is the remote sensing method called GPS-TEC method, which calculates the total electron counts (TEC) on the transmission path of GPS wave, from its propagation delay. By applying tomography analysis on TEC values in multiple paths, which are one dimensional information, the electron distribution profile can be earned as two dimensional data, and this method is called GPS-TEC tomography method. However, this method has a defect, that it has low resolution in altitude direction.

In order to enhance the altitude resolution, we have proposed "Rocket GPS-TEC Tomography method," which applies tomography analysis on the TEC values earned by rocket observation. Compared to the conventional GPS-TEC tomography, this method can observe TEC values in horizontal paths, as the observation rocket navigates in both range and altitude direction. By this approach, we assumed that altitude resolution of the tomography result will improve. In this study, we verified the efficacy of proposed method through simulation experiment.

キーワード：電離圏、GPS-TEC、観測ロケット

Keywords: ionosphere, GPS-TEC, sounding rocket

全球大気モデルGAIAによる中低緯度熱圏・電離圏ダイナミクスの主磁場依存性  
Effect of intrinsic magnetic field decrease on the low-to-middle latitude  
ionosphere-thermosphere dynamics simulated by GAIA

\*埜 千尋<sup>1</sup>、陣 英克<sup>1</sup>、品川 裕之<sup>1</sup>、藤原 均<sup>2</sup>、三好 勉信<sup>3</sup>

\*Chihiro Tao<sup>1</sup>, Hidekatsu Jin<sup>1</sup>, Hiroyuki Shinagawa<sup>1</sup>, Hitoshi Fujiwara<sup>2</sup>, Yasunobu Miyoshi<sup>3</sup>

1.情報通信研究機構、2.成蹊大学、3.九州大学

1.National Institute of Information and Communications Technology, 2.Seikei University, 3.Kyushu University

地球の主磁場は、過去80万年の間に $10^{22}$ - $10^{23}$  Am<sup>2</sup> の範囲で変動し、1840年頃から約6%/100年で減少している。主磁場の大きさが変わると、それに依存する電離圏電気伝導度等の電磁場を通して、電離層および電離圏と相互作用下にある大気圏は影響を受ける。Sq場が長期変化していることが観測で検出され、地球固有磁場の長期変化のSq場への影響は数値実験を通して検証されてきた。また、二酸化炭素量の長期変化が超高層領域環境に影響していることに加えて、地球磁場による変動も同程度寄与していることが数値実験で指摘されている。大気下層から超高層にかけて、波動伝搬を通して大気ダイナミクスは鉛直方向に結合している。本研究は、その結合過程が磁場によってどのように影響するかに着目し、GAIAモデルを用いて評価を行った。GAIAは、大気下層に気象再解析データを入力し、対流圏から熱圏までの大気圏と電離圏の大気物理・化学過程を解くモデルである。本研究では、4波構造が電離圏・熱圏パラメータに見られる2008年2月の一ヶ月間について、磁場強度を50%および75%に変えた計算を行った。中低緯度に着目するため、極冠電場ポテンシャルおよびオーロラ電子降り込みの影響がない設定で計算を行った。

計算された250 km高度面の全球平均値を比較すると、中性大気速度や電子密度の主磁場依存性は小さいのに対し、主磁場が減少すると、ダイナモ電場は磁場減少率程度に小さく、電離圏水平電流は大きくなった。ダイナモ電場の磁場依存性のほか、電気伝導度ピーク高度増大を伴い電気伝導度が $\sim B^{-2}$ に依存し、水平電流にも磁場依存性が反映したためである。空間分布としては、磁場減少時に、赤道域の東西風速度および電子密度ピーク高度の増大が見られた。これらの生成要因や潮汐波の伝搬への影響について報告する。

キーワード：熱圏・電離圏、中低緯度、惑星固有磁場依存

Keywords: thermosphere-ionosphere, low-to-middle latitude, intrinsic magnetic field dependence

## ISS-IMAP/EUVIで観測された夕方側電離圏上部Heイオンの水平構造

Horizontal structures of Helium ion in the upper ionosphere observed by ISS-IMAP/EUVI

\*穂積 裕太<sup>1</sup>、齊藤 昭則<sup>1</sup>、吉川 一郎<sup>2</sup>、山崎 敦<sup>3</sup>、村上 豪<sup>3</sup>\*Yuta Hozumi<sup>1</sup>, Akinori Saito<sup>1</sup>, Ichiro Yoshikawa<sup>2</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>3</sup>, Go Murakami<sup>3</sup>

1.京都大学大学院理学研究科、2.東京大学、3.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.The University of Tokyo, 3.Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency

Horizontal structures of ionized Helium in the upper ionosphere of dusk side were obtained from observation of resonant scattering light. The Extreme Ultra Violet Imager (EUVI) of the ISS-IMAP (Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere and Plasmasphere mapping) mission has taken image of He II radiation (30.4 nm) from the International Space Station (ISS) since October 2012. North-south asymmetry and longitudinal structure of ionized Helium were found. North-south asymmetry in solstice seasons are well consistent with previous in-situ measurement and numerical simulation. However, the longitudinal structure is not reported before and cannot be explained by numerical simulation with SAMI2-model. The longitudinal difference of meridional wind is a candidate of the Helium ion structure.

ノルウェー・トロムソにおける GNSS 受信機による電離圏シンチレーション観測  
Ionospheric Scintillation Observations with GNSS receivers in Tromsø, Norway

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

\*Yuichi Otsuka<sup>1</sup>, Kodai Uwashitomi<sup>1</sup>, Yasunobu Ogawa<sup>2</sup>, Keisuke Hosokawa<sup>3</sup>

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.国立極地研究所、3.電気通信大学

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.National Institute of Polar Research, 3.University of Electro-Communications

電離圏に、電子密度の不規則構造が存在すると、人工衛星から送信された電波の信号強度や位相が変動することがある。この現象は、電離圏シンチレーションと呼ばれている。電離圏プラズマは、電波伝搬にとって、分散媒質であり、電波の位相速度はプラズマ密度が高いところにおいて速くなる。このため、電離圏プラズマの粗密構造が存在する場合、電波の位相変動が起こり、この現象は位相シンチレーションとよばれている。また、電離圏プラズマ密度の粗密構造により電波が回折し、信号が互いに干渉しあうことによって受信信号の振幅が変動する。この現象は、振幅シンチレーションと呼ばれている。

我々は、ノルウェーのトロムソにGlobal Navigation Satellite System(GNSS)受信機を設置し、1575.42MHzと1227.60MHz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で観測している。位相シンチレーションの指標として、全電子数の1秒間隔の差分について1分間の標準偏差である

(ROTI : Rate of TEC change Index)を調べ、振幅シンチレーション指数S4と比較した。2014年2月8日

00:10-00:20UTに0.7TECU/minを越える大きなROTIの増大が観測されたが、このとき、S4指数には顕著な増大が見られなかった。同時刻に、南北に242m離れた2点で観測されたTEC変動を比較すると、両地点においてTECの時間変動を非常に類似しており、相互相関係数は0.98以上であった。これは、2点間においてTEC変動がほぼ等しく、TECの空間構造は全く一様に近いことを示している。プラズマ密度の空間構造が無い場合、電波は回折されないため、振幅シンチレーションは起こらない。よって、この事例では、TECは時間的に激しく変動しているが、100mオーダーの空間スケールを持つ空間構造は小さかったと考えられる。一方、2014年10月27日11:30-12:00UTでは、振幅シンチレーション指数S4が0.4程度になる増大が見られたが、ROTIの増大は起こらなかった。242m離れた2点間のTEC変動の相互相関係数は、0.6程度と比較的低い値になっている。これは、プラズマ密度の空間構造があり、電波の回折により振幅シンチレーションが起こっていると考えられる。

キーワード：電離圏、GNSS、シンチレーション

Keywords: ionosphere, GNSS, scintillation