

Observations and Modeling of Ionospheric Disturbances Triggered by Rockets

*Charles Lin¹, Chia-Hung Chen¹, Mitsuru Matsumura², Jia-Ting Lin¹

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¹、金谷 辰耶¹、鴨川 仁¹、上嶋 誠²*Yuto Tomida¹, Tatsuya Kanaya¹, Masashi Kamogawa¹, Makoto Uyeshima²

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 悠二¹、伊藤 直¹、*津田 敏隆¹、新堀 淳樹¹Yuji Takeda¹, Naoki Ito¹, *Toshitaka Tsuda¹, Atsuki Shinbori¹

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プラディックEの観測

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

*鈴木 貴斗¹、古屋 正人²、日置 幸介²、前田 隼³

*Takato Suzuki¹, Masato Furuya², Kosuke Heki², Jun MAEDA³

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プラディック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：スプラディック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¹、*大塚 雄一¹、塩川 和夫¹、西岡 未知²、津川 卓也²Takuya Mizoguchi¹, *Yuichi Otsuka¹, Kazuo Shiokawa¹, Michi Nishioka², Takuya Tsugawa²

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¹、柿並 義宏¹、山本 真行¹

*ko saito¹, Yoshihiro Kakinami¹, Masa-yuki Yamamoto¹

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⁺)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⁺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(O₂)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⁺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¹、Stolle Claudia²*Tatsuhiko Yokoyama¹, Claudia Stolle²

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&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¹、石坂 圭吾¹、阿部 琢美²、田中 真³、熊本 篤志⁴、吉川 顕正⁵、松下 拓輝⁵

*Yuka Ataka¹, Keigo Ishisaka¹, Takumi Abe², Makoto Tanaka³, Atsushi Kumamoto⁴, Akimasa Yoshikawa⁵, Hiroki Matsushita⁵

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¹、石坂 圭吾²、安宅 祐香²、高橋 隆男³、田中 真³、阿部 琢美⁴

*Atsushi Kumamoto¹, Keigo Ishisaka², Yuka Ataka², Takao Takahashi³, Makoto Tanaka³, Takumi Abe⁴

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¹、石坂 圭吾²、熊本 篤志³、田中 真⁴、高橋 隆男⁴、松下 拓輝⁵、吉川 顕正⁵*Takumi Abe¹, Keigo Ishisaka², Atsushi Kumamoto³, Makoto Tanaka⁴, Takao Takahashi⁴, Hiroki Matsushita⁵, Akimasa Yoshikawa⁵

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¹

*Masahiko Takeda¹

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

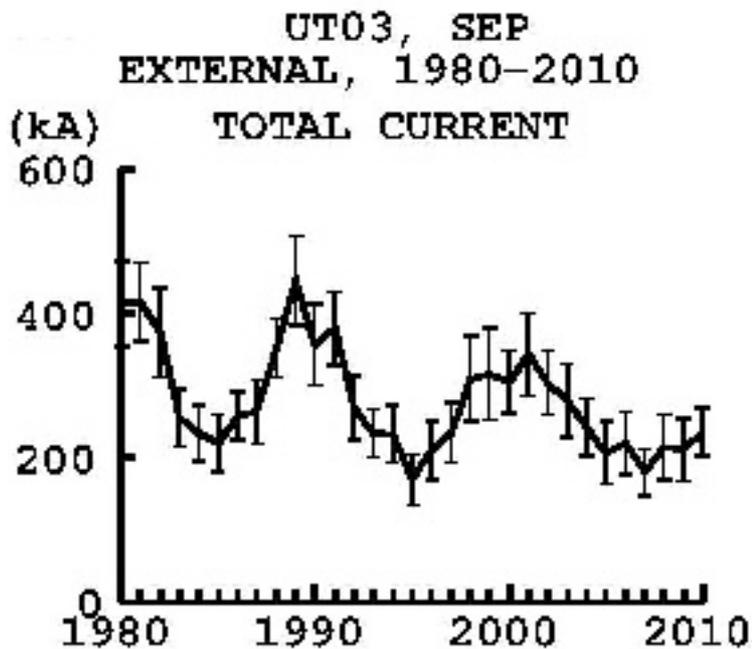
1. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University

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¹、足立 透²、佐藤 剛志³、牛尾 知雄⁴、森本 健志⁵、鈴木 睦⁶、山崎 敦⁶、高橋 幸弘¹

*Mitsuteru Sato¹, Toru Adachi², Tsuyoshi Sato³, Tomoo Ushio⁴, Takeshi Morimoto⁵, Makoto Suzuki⁶,
Atsushi Yamazaki⁶, Yukihiro Takahashi¹

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¹、塩川 和夫¹、三好 由純¹、細川 敬祐²、ブレントン ワトキンス³、栗原 純一⁴、津田 卓雄²、クリストファー ファーレン³*Shin-ichiro Oyama¹, Kazuo Shiokawa¹, Yoshizumi Miyoshi¹, Keisuke Hosokawa², Brenton J Watkins³, Junichi Kurihara⁴, Takuo T. Tsuda², Christopher T Fallen³

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¹、西山 尚典¹、津田 卓雄²、阿保 真⁴、津野 克彦³、和田 智之³、小川 貴代³、川原 琢也⁵、中村 卓司¹

*Mitsumu K. Ejiri¹, Takanori Nishiyama¹, Takuo T. Tsuda², Makoto Abo⁴, Katsuhiko Tsuno³, Satoshi Wada³, Takayo Ogawa³, Takuya Kawahara⁵, Takuji Nakamura¹

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^{2,1}、中村 卓司^{1,2}、堤 雅基^{1,2}、江尻 省^{1,2}、富川 喜弘^{1,2}

*Takashi S. Matsuda^{2,1}, Takuji Nakamura^{1,2}, Masaki Tsutsumi^{1,2}, Mitsumu K. Ejiri^{1,2}, Yoshihiro Tomikawa^{1,2}

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¹、塩川 和夫¹、藤波 初木¹、大塚 雄一¹、松田 貴嗣²、江尻 省²、中村 卓司²、山本 衛³
 *Daiki Takeo¹, Kazuo Shiokawa¹, Hatsuki Fujinami¹, Yuichi Otsuka¹, Takashi S. Matsuda², Mitsumu K. Ejiri², Takuji Nakamura², Mamoru Yamamoto³

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。

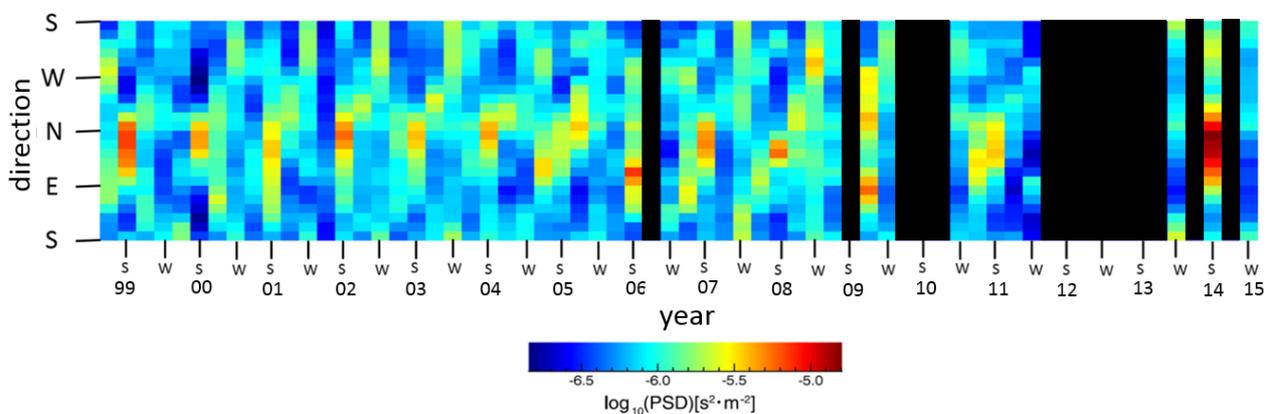
そこで我々は、京都大学の信楽MU観測所(北緯34.8度、東経136.1度)に設置された超高層大気イメージングシステム(OMTI)の全天大気光イメージャーの長期観測データ(1998年10月1日~2015年7月26日)を用いて、大気重力波の水平位相速度スペクトルの長期解析を行った。解析法として、Matsuda et al. (JGR, 2014)により提案された手法を用いた。この手法は、3次元フーリエ変換を用いて大量の画像データに対して自動的に水平位相速度スペクトルの計算を行うことができるため、長期データの解析に適している。

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¹、浅田 圭佑²、土屋 史紀³、塩川 和夫⁴、中田 裕之¹、山下 幸三⁵、高橋 幸弘⁶

*Hiroyo Ohya¹, Keisuke Asada², Fuminori Tsuchiya³, Kazuo Shiokawa⁴, Hiroyuki Nakata¹, Kozo Yamashita⁵, Yukihiro Takahashi⁶

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¹、今村 國康¹、土屋 茂¹、北内 英章²*Kenro Nozaki¹, Kuniyasu Imamura¹, Shigeru Tsuchiya¹, Kitauchi Hideaki²

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