

R005-01

A 会場 : 11/26 PM2 (14:50-16:20)

14:50~15:05:00

STRLINK 衛星の軌道情報を用いた熱圏大気密度の推定

#山本 衛¹⁾, 惣宇利 卓弥¹⁾, 古川 颯太¹⁾

(¹ 京大生存圏研

Estimation of thermospheric density from STARLINK TLE

#Yamamoto Mamoru¹⁾, Takuya SORI¹⁾, Sota Furukawa¹⁾

(¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

This study explores the potential of using the open orbital information of satellites to estimate the neutral atmospheric density in the thermosphere. We used the public Two-Line Element (TLE) data from the Starlink constellations. The analysis period was from September 19 to November 6, 2024. Based on the method of Picone et al. (2005), thermospheric density was derived from the time derivative of the satellites' mean motion. As the first attempt, we limit ourselves to not assessing the absolute value, but a relative variation to the NRLMSIS 2.1 model. The estimated results followed well in altitudes and in time with the model values below 400 km, although occasional deviations of a factor of 2 – 3 were found at higher altitudes. Three notable density increases were observed on October 8, 11, and 18 – 20, 2024. The first two events correlated with geomagnetic storms, lasting approximately one day over a broad altitude range. The third event, however, had a weak correlation with geomagnetic storm activity, persisted for several days, and appeared mainly at altitudes above 400 km. Our findings confirm that contemporary TLE data are a valuable resource for monitoring the thermospheric density dynamics. In the presentation, we try to include the advances in our analysis up to the symposium.

米国の Space X 社がインターネット通信のために多数の STARLINK 衛星を打上げている。我々は、STARLINK 衛星を取り上げて、衛星が受ける大気抵抗を使った熱圏大気密度推定の可能性について研究を行っている。今回のデータ解析の期間は 2024 年 9 月 19 日から 11 月 6 日である。Picone et al. (2005) が示した手法に基づいて、衛星の平均運動（1 日間の地球周回数）の時間微分から熱圏密度を導出した。現在のところ、密度の絶対値ではなく、大気密度の経験モデルである NRLMSIS 2.1 に対する相対的な変動の評価を行っている。密度の推定値は、400 km 未満の高度においては、時間・高度変動が経験モデル値とよく一致したが、それより高い高度域では 2~3 倍に達する変動が検出された。2024 年 10 月 8 日、11 日、18~20 日に 3 回にわたる顕著な密度増加が見られた。最初の 2 回のイベントは、広い高度範囲で発生し、継続時間は約 1 日間であり、磁気嵐の発生とほぼ同時期に発生した。しかしながら、3 回目のイベントは地磁気活動との相関が弱く、継続時間は数日間であり、変動が現れた高度域は主として高度 400km 以上であった。これらの結果は、現在公開されている衛星軌道情報が熱圏大気密度の時間高度変動を監視するための貴重な情報源であることを示している。発表においては、最新の解析結果について紹介する。

R005-02

A 会場 : 11/26 PM2 (14:50-16:20)

15:05~15:20:00

南極昭和基地で実施されたスーパープレッシャー気球観測における気温データの補正

#川上 莉奈¹⁾, 富川 喜弘^{1,2)}

(¹ 総研大, (² 極地研

Correction of temperature data from Super-Pressure Balloon observations at Syowa Station, Antarctica

#Rina KAWAKAMI¹⁾, Yoshihiro TOMIKAWA^{1,2)}

(¹The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, (²National Institute of Polar Research

Scientific research balloons are used in a wide range of scientific experiments, including astronomical observations, cosmic ray measurements, upper-atmosphere observations, and engineering demonstration tests. Zero-pressure (ZP) balloons, which have been used until now, have the disadvantage of not being able to fly for long periods, whereas super-pressure (SP) balloons overcome this limitation. SP balloons maintain an internal pressure consistently higher than atmospheric pressure, thereby preventing buoyancy fluctuations caused by diurnal cycles and enabling prolonged flight durations (>1 month). Taking advantage of these characteristics, the LODEWAVE (LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) project was proposed to conduct observations in Antarctica in order to obtain the horizontal distribution of vertical flux of horizontal momentum associated with atmospheric gravity waves [Tomikawa et al., 2023]. In the LODEWAVE project, SP balloons measure temperature, pressure, and horizontal wind every 30 s at the balloon location.

During flight, when the ventilation is nearly zero, the thermistor is heated by solar radiation, leading to significant overestimation of the actual atmospheric temperature [Hertzog et al., 2004]. This effect was also observed during the first LODEWAVE campaign, where the temperature sensor was significantly affected by solar radiation, which included heat conduction through the lead wires. As a result, the temperature data exhibited pronounced diurnal variations. In addition, the thermistor was affected by heat flow from the housing, resulting in short-period fluctuations and making it impossible to obtain accurate temperature data. To address this issue, improvements were made by modifying the sensor design and the data acquisition method. In the second campaign, following these improvements, the quality of the temperature data was greatly enhanced; however, it was not possible to completely eliminate diurnal variations associated with solar radiation or numerous heat spikes caused by heat flow from the housing. Such data errors reduce the accuracy required for atmospheric gravity wave analysis and for assimilation into numerical models. Therefore, in this study, we applied corrections to SP balloon temperature data to account for the effects of solar radiation and heat flow from the housing.

The correction was performed using data from the radiosonde (1 s values) and temperature sensor (30 s values) installed on LODEWAVE 04 and 05, which were launched during the 65th Japanese Antarctic Research Expedition, as well as atmospheric reanalysis data from ERA5 (interpolated to 30 s values) for the corresponding flight periods. To remove the effects of heat spikes, the minimum value was selected from each 15 min interval, and subsequent corrections were applied for the effects of solar radiation. The solar radiation effect was corrected using the theoretical heating formula presented by Dirksen et al [2014]. This formula accounts for both direct solar radiation reaching the sensor and diffuse radiation, but in this study only the direct component was considered. As a result of the correction, deviations from ERA5 were reduced, and the effects of solar radiation were successfully removed. In addition, high-frequency components not present in ERA5 were detected, suggesting the presence of atmospheric gravity wave signals. To further improve accuracy, it will be necessary to account for the effects of atmospheric scattering and surface reflection, as well as the cooling effect of infrared radiation during nighttime when solar heating is absent.

科学実験用大気球は、天体観測・宇宙線観測・高層大気の観測・工学実証試験といった幅広い分野にわたる科学実験に利用されている。これまで利用されてきたゼロプレッシャー (ZP) 気球は長時間の飛翔ができないという弱点を抱えているがスーパープレッシャー (SP) 気球はこの弱点を克服した気球である。SP 気球は、気球内部の圧力を常に大気圧よりも高く保つことによって、昼夜の浮力変動を防ぎ長時間の飛翔 (>1 か月) を可能にする気球である。このような SP 気球の特徴を用いて、大気重力波に伴う水平運動量の鉛直フラックスの水平分布を取得するための観測を南極で実施する LODEWAVE (LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) 計画が立案された [Tomikawa et al., 2023]。LODEWAVE 計画における SP 気球観測では気球の位置における気温・気圧・水平風速のデータを 30 秒ごとに計測している。

飛翔中の通風量がほぼ 0 となる SP 気球観測ではサーミスタが日射によって加熱され、実際の大気ガス温度を大きく過大評価する傾向がある [Hertzog et al., 2004]。LODEWAVE 計画の第 1 回キャンペーン観測でもその影響は見られ、気温センサを搭載する際に用いたリード線からの熱伝導を含め、日射の影響を大きく受けた。その結果、気温データに日周期の変動が含まれてしまった。上記に加え、サーミスタが筐体からの熱流を受け短周期の変動成分を持つことにより、正確な気温データを得ることができなかった。そこでセンサの形状や気温データの取得方法を変更し改良が行われた。改良後の第 2 回キャンペーン観測では、取得した気温データは大幅に改善されたものの、日射に伴う日周期変動や筐体からの

熱流の影響に伴う多数のヒートスパイクを完全に取り除くことはできなかった。このような様々な外的要因による誤差が含まれているデータは大気重力波の解析や、モデルに対するデータ同化に用いるには正確性が不十分である。そこで本研究では、SP 気球観測で得られた気温データの正確性を向上させるため日射・筐体からの熱流による影響の補正を行った。

補正は第 65 次南極地域観測隊にて放球された LODEWAVE 04, 05 に搭載したラジオゾンデ (1 秒値)、気温センサ (30 秒値)、それぞれの飛翔期間に対応する大気再解析 ERA5 (30 秒値に補間したもの) のデータを用いて行う。SP 気球の気温データはヒートスパイクの影響を除去するため 15 分間のデータの中から最小値を採用し、その後日射による影響に対する補正を行った。日射の影響は Dirksen et al[2014] で示された日射加熱量の理論式を用いて行う。この式ではセンサに到達する直達日射量や拡散放射の影響が考慮されているが、本研究では直達日射量のみの影響を考えた。補正を行った結果、ERA5 からのずれが小さくなり、日射の影響を取り除くことができた。また、ERA5 では見られなかった高周波成分が見られ大気重力波の成分が表れていると考えられる。さらに正確性を向上させるには、大気中の散乱や地表での反射の影響に加え、日射加熱のない夜間の赤外放射による冷却の効果を考慮する必要がある。

R005-03

A 会場 : 11/26 PM2 (14:50-16:20)

15:20~15:35:00

南極昭和基地で観測されたサブストームに伴う地上大気電場変動

#源 泰拓¹⁾, 門倉 昭^{2,4)}, 鴨川 仁³⁾, 田中 良昌^{2,4,6)}, 佐藤 光輝⁵⁾

(¹⁾ アスタミューゼ, (²⁾ 情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設, (³⁾ 静岡県立大学, (⁴⁾ 国立極地研究所, (⁵⁾ 北海道大学, (⁶⁾ 総合研究大学院大学

Atmospheric electric field variation at Syowa Station, Antarctica associated with substorm evolution

#Yasuhiro Minamoto¹⁾, Akira KADOKURA^{2,4)}, Masashi KAMOGAWA³⁾, Yoshimasa TANAKA^{2,4,6)}, Mitsuteru SATO⁵⁾

(¹astamuse company,Ltd., (²ROIS-DS, (³University of Shizuoka, (⁴National Institute of Polar Research, (⁵Hokkaido University, (⁶The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

Variation of atmospheric electric field (AEF) associated with substorm evolution was examined using the data obtained at Syowa Station, Antarctica from 2015 to 2017. First, we derived the AEF reference values from the fair-weather AEF data at Syowa under geomagnetic quiet conditions, and then, analyzed the AEF deviation from the reference values in different substorm activity levels classified with the AE-index. It was found that in the higher AE-index condition, the AEF deviation showed the more positive (downward) variation in dawn MLT sector, and the more negative (upward) variation in dusk-to-midnight sector. As a result, AEF diurnal variation showed the further difference from the typical Carnegie Curve at the time of the higher substorm activity, having a maximum in the morning hours and a minimum in the afternoon hours. Such a local time dependence of the AEF variation during substorm is consistent with the ionospheric electric potential variations associated with the evolution of the substorm current system.

2015 年から 2017 年の間の南極昭和基地における観測データを用いて、サブストームの発達に伴う地上大気電場変動の解析を行った。まず、晴天時かつ地磁気活動静穏時の地上大気電場観測データを参照データとして抽出し、AE インデックスで表される地磁気活動度によって、その参照データからの偏差がどのように変化するかを解析した。その結果、AE インデックスが大きくなり地磁気活動度が高くなるにつれて、朝側の磁気地方時では正の偏差が（下向きの電場変動が）、夕方側から真夜中にかけての時間帯では負の偏差が（上向きの電場変動が）より顕著になる、ということが明らかになった。こうした変動により、昭和基地で観測される地上大気電場の日変化は、サブストームに伴う地磁気活動度が高くなるにつれて、晴天日に典型的ないわゆる“カーネギーカーブ”（朝側で最小、午後側で最大）とは全く逆に、朝側で最大で午後側で最小、という特徴を示すようになることが分かった。このようなサブストームに伴う地上大気電場変動の磁気地方時依存性は、サブストーム電流系の発達に伴って、電離圏に、朝側に正、夕方から真夜中側に負の電位分布が生成され発達することと矛盾せず、そうした電離圏の電位分布の変動を、地上大気電場の変動として観測出来ていることを示していると解釈出来る。

R005-04

A 会場 : 11/26 PM2 (14:50-16:20)

15:35~15:50:00

時間差マルチビーム観測方式の開発と Tromsø Na ライダーへの実装

#佐藤 洸太¹⁾, 津田 卓雄¹⁾, HU JINYI¹⁾, 森山 陽介¹⁾, 園山 雄基¹⁾, 和田 奈津希¹⁾, 青木 猛¹⁾, 斎藤 徳人²⁾, 野澤 悟徳³⁾, 川端 哲也³⁾, 川原 琢也⁴⁾, 高橋 透⁵⁾

(¹⁾ 電通大, (²⁾ 理化学研究所, (³⁾ 名大・宇地研, (⁴⁾ 信州大・工, (⁵⁾ 電子航法研

Development of a time-delayed multi-beam observation method and its implementation to the Tromsø Na lidar

#Kota Sato¹⁾, Takuo Tsuda¹⁾, Jinyi Hu¹⁾, Yosuke Moriyama¹⁾, Yuki Sonoyama¹⁾, Natsuki Wada¹⁾, Takeshi Aoki¹⁾, Norihito Saito²⁾, Satonori Nozawa³⁾, Tetsuya Kawabata³⁾, Takuya Kawahara⁴⁾, Toru Takahashi⁵⁾

(¹⁾University of Electro-Communications, (²)RIKEN, (³)Institute for Space-Earth Environment Research, Nagoya University,

(⁴)Faculty of Engineering, Shinshu University, (⁵)Electronic Navigation Research Institute

In the polar mesosphere and lower thermosphere region, where part of the atmosphere is ionized, it is essential to measure the neutral atmosphere and the ionosphere simultaneously to understand the neutral-ion interactions. The Tromsø sodium (Na) lidar was developed in 2009 – 2010 by Nagoya University, Shinshu University, and RIKEN. In addition, University of Electro-Communications has been involved in its operation and development since 2015. This lidar system is equipped with a laser diode-pumped laser system, which has advantages in stability and lifetime. Another feature is that observations can be made simultaneously in five directions (vertical, east, west, north, and south) using split beams. This lidar is located at the European incoherent scatter (EISCAT) radar site in Tromsø (69.6° N, 19.2° E), so we are able to perform simultaneous observations of the neutral atmosphere and ionosphere by using the EISCAT radars and the Na lidar. The observation height range of the Na lidar depends on the distribution height range of the Na layer, which is normally from 80 to 110 km. On the other hand, recent observations have revealed low-density Na events at higher altitudes (above 110 km, up to 196 km). It is called thermospheric Na, and the extension of the observation range of Na lidars is expected by observing such thermospheric Na. However, the Inter-Pulse-Period (IPP) of Tromsø Na lidar is 1 ms, and thus the corresponding observation range is 0-150 km. Therefore, to observe the thermospheric Na layers, we have been working on an extension of the altitude range of the Tromsø Na lidar.

In this study, we have developed a time-delayed multi-beam method to improve the performance of Tromsø Na lidar. This method forms multiple beams by physically switching the transmission direction of each pulse without splitting the beam. Specifically, the beam is switched alternately between one vertical direction and the other four directions (east-west-south-north) every 1 ms. In this case, the IPP becomes 2 ms for each direction and the measurement range is extended to 0 – 300 km. In addition, the pulse energy of the vertical beam is 5 times higher than the current system. The power per unit time is 2.5 (= 5/2) times higher, and noise is reduced by decreasing the number of accumulations. Therefore, the signal-to-noise ratio can be improved. For the implementation of this method, two key techniques are needed. Those are (1) switching of the transmission direction of laser pulses at high speed and with high pointing accuracy, and (2) control of transmission of time-delayed pulses and multi-channel measurement.

For (1), we developed a 2-direction beam line switching system using a commercially available galvanometer scanner. When applying a galvanometer scanner, performance evaluation experiments were conducted because it was unclear whether it had enough beam switching accuracy. The experimental results showed that the switching beam position drifted approximately 130 μ rad (max.) due to motor heating and room temperature fluctuations. This drift is less than the required beam position accuracy (<200 μ rad), so in other words, the results showed a good performance. For (2), we developed an 8-channel (4+4) photon counting system that performs time-delayed measurements using an FPGA (Field-Programmable Gate Array). The time-delayed photon counting is synchronized with the operation of the 2-direction beam line switching system. We have confirmed that the system is operated as designed, based on the experiments.

In the presentation, we will introduce the developed system and experimental results on the system performance. Furthermore, we plan to implement the system at the Tromsø Na lidar in October 2025, so initial reports on the implementation will also be presented.

R005-05

A 会場 : 11/26 PM2 (14:50-16:20)

15:50~16:05:00

ハワイ・ハレアカラ T60 望遠鏡を用いた金星のオーロラ観測研究

#栗生 大竣¹⁾, 鎌谷 将人²⁾, 中川 広務¹⁾, 青木 翔平³⁾, 寺田 直樹¹⁾

(¹ 東北大学地球物理学専攻惑星大気物理学分野, (² 東北大学地球物理学専攻惑星プラズマ・大気研究センター, (³ 東京大学大学院複雑理工学専攻

Ground-based observation of Venusian aurora using the T60 telescope at Haleakalā

#Taishun AO¹⁾, Masato KAGITANI²⁾, Hiromu NAKAGAWA¹⁾, Shohei AOKI³⁾, Naoki TERADA¹⁾

(¹Tohoku University, Department of Geophysics, Planetary Atmospheric Physics, (²Tohoku University, Department of Geophysics, Planetary Plasma and Atmosphere Research Center, (³University of Tokyo, Department of Complexity Science and Engineering

Aurora is key phenomena for understanding the interaction between the solar wind and planetary magnetosphere/ionosphere. Their characteristics have been extensively studied on Earth, Jupiter, and Saturn, which possess intrinsic magnetic fields and atmospheres. Recently, thanks to the aggressive explorations by MAVEN and EMM, various types of aurora have been discovered on Mars, a weakly magnetized planet without the intrinsic magnetic field. With its complex induced magnetosphere, Mars exhibits unique auroral features, unseen on Earth, including global-scale diffuse aurora and localized crustal-field-associated discrete aurora. In contrast, detections of aurora at Venus, which also has no intrinsic magnetic field, have so far been limited to be found associated with coronal mass ejections (CMEs), with limited observational coverage. Thus, the spatio-temporal variations of Venusian aurora remains poorly understood.

In this study, we aim to reveal the spatio-temporal variations and generation mechanisms of Venusian aurora through continuous, wide-field observations. We conducted observations of Venus from February 10-19, 2025, using the 60 cm telescope (T60) at Tohoku University Haleakalā Observatory in Hawaii. This observation is unique in that it uses a fiber array spectrograph to capture a wide-area image of the night side of Venus. A 20-minute observation was considered one data set, and an average of four data sets were observed per day. During this period, 37 data sets were observed. At that time, the apparent Venus's disk was $\sim 30'' \times 30''$, and the field of view was $\sim 20'' \times 20''$, covering about half of the night side of the disk. Focusing on the oxygen green line at 5577 Å, we obtained spectra with a wavelength range of 5540-5590 Å and a resolution of 0.02 Å. The relative velocity between Venus and Earth was ~ 12 km/s during this period, corresponding to a Doppler shift of ~ 0.2 Å, which was sufficient to separate Venusian emissions from terrestrial airglow. The observation of the aurora was limited to the night side of the field of view. A field aperture was used to minimize contamination from reflected light because the reflection of sunlight from the daytime side of Venus was the greatest source of noise. The observation was conducted for approximately one hour between sunset and Venus's setting.

As a result, emissions were detected in 74 out of 4,440 spatial grids, with maximum intensities ~ 50 Rayleighs. Venus aurora emissions were observed on every day of the campaign, suggesting that auroral activity occurs persistently and not only during solar events such as the Coronal Mass Ejections (CMEs). The spatial distribution of emissions tended to concentrate near the limb of Venus. To confirm these findings, we refine data selection criteria and noise evaluation.

This study demonstrates the feasibility of continuous monitoring of the 5577 Å emission on the nightside of Venus. Remote and automated control of the telescope has already been established, and since May 1, ~ 60 -day continuous dataset has been accumulating. Statistical analysis of these data will allow us to determine the occurrence frequency, spatiotemporal variability, and solar wind dependence of Venusian aurora, contributing to a better understanding of its mechanisms.

オーロラは太陽風や高エネルギー粒子と惑星の磁気圏・電離圏との相互作用を理解するうえで重要な現象である。これまでには固有磁場と大気をもつ地球、木星、土星においてオーロラの特徴が詳細に研究されてきた。近年はNASA火星探査機 MAVEN や UAE 火星探査機 EMM によって、固有磁場を持たない弱磁場惑星の火星においても、様々な種類のオーロラが発見された。火星は複雑な誘導磁気圏をもち、全球を覆うものや地殻磁場に関連した、地球では見られない特徴的なオーロラが観測されている。一方、火星と同様に固有磁場を持たない金星のオーロラ観測の報告事例は非常に限定的であるものの、Gray et al. (2014) はオーロラ発光がコロナ質量放出 (CME) 時に限定されることを示唆し、観測範囲も狭いことから、その時空間変動は未解明である。

本研究では、独自の観測網を用いて金星オーロラの広範囲かつ継続的な観測を初めて実現することで、金星オーロラの時空間変動や発生メカニズムを解明することを目的とする。

本研究では、ハワイ・ハレアカラ山頂東北大学観測所の 60 cm 望遠鏡 (T60) を用いて 2025 年 2 月 10 日から 19 日にかけて連続的に金星を観測した。この観測では、ファイバレイ分光器を用いて、金星ディスク夜面を広範囲撮像できる点が新しい。20 分の観測を 1 データセットとして 1 日平均 4 データセットの観測を実施し、9 日間に 37 データセットの観測に成功した。また、観測時の金星ディスクは約 $30'' \times 30''$ に対して、観測視野は $20'' \times 20''$ を占め、金星夜面の半分程度の観測を達成した。オーロラは酸素原子 5577 Å を対象として、波長範囲 5540-5590 Å、波長分解能 0.02 Å である。金星との相対速度は約 12 km/s であり、約 0.2 Å のドップラーシフトが見込まれ、十分に金星と地球の発光を分

離できた。オーロラを観測する際に、金星昼面の太陽光反射が最大のノイズであるため、反射光の漏れ込みを最小限に抑えるために視野絞りをを用いて観測範囲を夜面に制限した。また、観測時間は太陽が沈んでから金星が沈むまでの約1時間の間に行った。

観測の結果、4440 ピクセルの観測のうち、74 ピクセルにおいて発光がみられた。典型的な発光強度は $\sim 50R$ 程度であった。また、この観測期間9日間のうち毎日金星由来の発光がみられCME等の太陽現象にかかわらず、定常的にオーロラ発光が観測されることが示唆された。さらに、その発光分布は金星の縁に集中している傾向があった。この結果をより確からしいものにするため、データの選定方法やノイズの評価をさらに進めている。

独自の小口径望遠鏡という利点を活かし、金星の夜面での $5577 \text{ \AA}$ 発光の時空間変動を長期的に監視することが可能になった。すでに本観測の遠隔かつ自動制御に成功し、5月1日からの連続観測では約60日間のデータが蓄積されつつある。これらの世界的にも稀有なデータセットを統計解析することで、金星オーロラの発生頻度、時空間変動、太陽風条件との相関を解析し、その形成メカニズムの解明に貢献することが期待される。

R005-06

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

16:40~16:55:00

火山噴火に伴う超高層大気波動のシミュレーション

#品川 裕之¹⁾, 三好 勉信¹⁾, 陣 英克²⁾, 大矢 浩代³⁾

⁽¹⁾九州大学, ⁽²⁾国立研究開発法人 情報通信研究機構, ⁽³⁾千葉大学

Simulation of atmospheric waves in the upper atmosphere associated with volcanic eruptions

#Hiroyuki SHINAGAWA¹⁾, Yasunobu MIYOSHI¹⁾, Hidekatsu JIN²⁾, Hiroyo OHYA³⁾

⁽¹⁾Kyushu University, ⁽²⁾National Institute of Information and Communications Technology, ⁽³⁾Chiba University

In intense volcanic eruptions, acoustic waves, Lamb waves, and gravity waves with large amplitudes are generated in association with rapid expansion of the atmosphere driven by eruptions, affecting the thermosphere and the ionosphere significantly. While previous studies have revealed the basic nature of the atmospheric waves in the lower atmosphere, in the upper atmosphere physical processes of atmospheric waves originated from volcanic eruptions have not been fully understood. In particular, physical processes of the structure and propagation of Lamb waves, vertical oscillations with a period of several minutes, and fast waves with a phase velocity of about 1 km/s in the thermosphere have not been revealed.

Although numerical simulations of Shinagawa and Miyoshi (2024) roughly reproduced acoustic waves, Lamb waves, and gravity waves as well as traveling ionospheric disturbances (TIDs) associated with the Tonga volcanic eruption, the model could not reproduce high-frequency oscillations and detailed structures of waves because grid intervals of the model are rather large: 2 km vertically, and 20 km horizontally.

To study the atmospheric waves in the upper atmosphere in more detail, we have carried out the atmospheric simulations using a high-resolution 2-dimensional model with grids of 1 km vertically, and 2 km horizontally.

The simulation results indicate:

1. Lamb waves can propagate up the thermosphere, but they are significantly deformed by the interaction with gravity waves with phase speeds similar to Lamb waves.
2. Atmospheric oscillations generated after the passage of Lamb waves are generated by the effect of non-isothermal atmosphere, but they are also driven by the interaction of Lamb waves and gravity waves.
3. Propagation of Lamb waves is significantly affected by background winds in the atmosphere.
4. Fast waves with a speed of about 1 km/s in the thermosphere are basically acoustic waves, which are significantly affected by the molecular viscosity.

We will present and discuss the simulation results by comparing with observations.

Reference

Shinagawa, H., and Miyoshi, Y. (2024) Simulation study of atmosphere-ionosphere variations driven by the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth Planets Space*, 76:15.

<https://doi.org/10.1186/s40623-024-01960-6>

大規模な火山噴火では、噴火に伴う急激な大気膨張によって大振幅の音波、Lamb 波、重力波などが生成される。これらの大気波動は超高層大気に伝搬し、熱圏・電離圏に大きな影響を与える。これまでの研究によって下層大気中の大気波動の性質は概ね明らかになっているが、超高層大気中の大気波動の性質に関しては未解明の問題が多い。特に、熱圏中の Lamb 波の構造と伝搬、数分周期の鉛直振動、約 1km/s の位相速度で高速伝搬する波動などについては理解が十分でない。

Shinagawa and Miyoshi (2024) によるトンガの噴火に伴う大気圏・電離圏変動の数値シミュレーションでは、火山噴火に伴う音波、重力波、Lamb 波などの大気波動や電離圏波動 (TIDs) が概ね再現された。しかし、このモデルは格子間隔が鉛直方向 2km、水平方向 20km とかなり荒かったために、細かい振動や波動の詳しい構造は十分に再現されていなかった。

今回我々は、火山噴火に伴う超高層大気波動をより詳しく調べるために、格子間隔を鉛直方向 1km、水平方向 2km とした高精度 2 次元モデルを用いて、中性大気変動のシミュレーションを行った。その結果、これまでに以下のことがわかった。

- (1) Lamb 波は熱圏にまで伝搬するが、ほぼ同じ位相速度を持つ重力波との相互作用によって大きく変形する。
- (2) Lamb 波通過後の熱圏大気の鉛直振動は、主に非等温大気の効果で引き起こされるが、重力波との相互作用によっても振動が起こる。
- (3) Lamb 波の伝搬は背景風の影響を強く受ける。

(4) 約 1km/s で伝搬する熱圏大気波動は、基本的には音波モードの波であるが分子粘性の影響を強く受ける。

本発表では、本シミュレーションの結果を報告し、これまでの観測との比較を行うことにより超高層大気波動について議論を行う予定である。

文献

Shinagawa, H., and Miyoshi, Y. (2024) Simulation study of atmosphere-ionosphere variations driven by the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth Planets Space*, 76:15.

<https://doi.org/10.1186/s40623-024-01960-6>

R005-07

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

16:55~17:10:00

2022 年トンガ噴火の水蒸気異常が極中間圏雲活動に与える影響に関するひまわり 8 号/9 号の観測に基づく研究

#森山 陽介¹⁾, 津田 卓雄¹⁾, 安藤 芳晃¹⁾, 鈴木 秀彦²⁾, 中川 広務³⁾, 西山 尚典^{4,5)}, 田中 良昌^{4,5,6)}, 村田 健史^{7,8)}, Yue Jia^{9,10)}

(¹ 電気通信大学, (² 明治大学, (³ 東北大学, (⁴ 国立極地研究所, (⁵ 総合研究大学院大学, (⁶ ROIS-DS, (⁷ 信州大学, (⁸ 総合地球環境学研究所, (⁹ NASA/GSFC, (¹⁰ Catholic University of America

Research on the impact of the 2022 HTHH Eruption's water vapor anomaly on PMC activities based on Himawari-8/9 observations

#Yosuke MORIYAMA¹⁾, Takuo TSUDA¹⁾, Yoshiaki ANDO¹⁾, Hidehiko SUZUKI²⁾, Hiromu NAKAGAWA³⁾, Takanori NISHIYAMA^{4,5)}, Yoshimasa TANAKA^{4,5,6)}, Takeshi MURATA^{7,8)}, Jia YUE^{9,10)}

(¹University of Electro-Communications, (²Meiji University, (³Tohoku University, (⁴National Institute of Polar Research, (⁵The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, (⁶ROIS-DS, (⁷Shinshu University, (⁸Research Institute for Humanity and Nature, (⁹NASA/GSFC, (¹⁰Catholic University of America

Polar mesospheric clouds (PMCs), also known as noctilucent clouds (NLCs), are the highest clouds in the terrestrial atmosphere. They consist of water ice particles, which can be formed in the mesopause region (80-85 km) during the polar summer with extremely low temperature conditions. The water ice particle formation is considered to be highly sensitive to temperature and water vapor. For over a century, the potential relationship between large volcanic eruptions, such as the 1883 Krakatoa, and PMC activity has been discussed. However, this relationship remains poorly understood due to a lack of observational data and the rarity of such large-scale events. The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) submarine volcanic eruption on January 15, 2022 (20.5°S, 175.4°W) was a large-scale event that injected an unprecedented amount of water vapor, approximately 146 ± 5 Tg (or approximately 10% of the stratospheric H₂O burden), into the stratosphere (at an altitude of 50-55 km). This injected water vapor subsequently spread globally, reaching the polar mesopause regions approximately two years after the eruption. This study examines the impact of the HTHH eruption-originated water vapor anomaly on PMC activities using satellite observations. We analyzed the occurrence rate (OR) of PMCs using data from the Japanese geostationary satellites Himawari-8/AHI and Himawari-9/AHI, as well as temperature and water vapor volume mixing ratio (H₂O VMR) data from the Aura/Microwave Limb Sounder (MLS), from 2015 to 2025.

Monthly averages were calculated for January (Southern Hemisphere, SH) and July (Northern Hemisphere, NH) within the latitude range of 65-81°S/N and altitude range of 77.8-87.9 km. To extract the effects of water vapor anomalies on the PMC variations, at first, we reproduced the temperature-dependent components in the PMC OR variability using a linear regression based on the 2015-2021 relationship. Then, we remove the reproduced components and derive residuals as temperature-independent components in the PMC OR variability. These residuals are defined as Δ PMC. As a result, we found a significant Δ PMC increase ($+15 \pm 5\%$) in January 2024 in the SH. This Δ PMC increase was associated with the significant increase in H₂O VMR ($+0.88 \pm 0.04$ ppmv, or 15.8%) compared to 2015-2021 averages. These associations would strongly suggest that the water ice formation was enhanced by the water vapor anomalies mainly induced by the 2022 HTHH eruption.

These findings would represent the first observational evidence of a relationship between eruption-originated water vapor injection and PMC activity, a topic that has been discussed since the 1883 Krakatoa eruption. This research advances our understanding of the horizontal and vertical coupling processes within the middle and upper atmosphere influenced by large volcanic eruptions.

R005-08

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

17:10~17:25:00

能登半島地震に伴う電離圏全電子数擾乱の伝搬異方性

#石本 夢実¹⁾, 柿並 義宏¹⁾, 齊藤 大晶²⁾

(¹⁾ 情報大, (²⁾ 公立千歳科学技術大学

Anisotropy of traveling Ionospheric disturbances measured by TEC after the 2024 Noto-Peninsula earthquake

#Mumi Ishimoto¹⁾, Yoshihiro Kakinami¹⁾, Hiroaki Saito²⁾

(¹⁾Hokkaido Information University, (²Chitose Institute of Science and Technology

Anisotropy of traveling Ionospheric disturbances measured by TEC after the 2024 Noto-Peninsula earthquake large earthquakes generate acoustic waves that propagate upward and disturb ionospheric plasma, detected as TEC variations from GNSS. The Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake occurred at 37.5° N, 137.2° E on 1 January 2024 at 07:10 UT, and TEC disturbances were observed approximately 9 minutes later over the epicenter. At that time, two QZSS satellites (J02, J07) and two GPS satellites (G08, G16) were located. In this study, we computed ionospheric TEC from GEONET data provided by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) and analyzed coseismic TEC disturbances with a sampling rate of 30 s. Acoustic waves are expected to expand concentrically from the epicenter, producing concentric TEC perturbations. However, clear disturbances were observed southward for J02 and G16 and northeastward for J07, deviating from the expected concentric pattern.

To investigate the origin of the observed anisotropy, we computed the propagation of acoustic waves generated by the earthquake using a Hamiltonian ray-tracing method in spherical coordinates. Assuming the epicenter as the source, rays were launched isotopically, and their trajectories were analyzed. The atmospheric sound speed structure was modeled with altitude profiles of density and temperature derived from NRLMSISE-00. For each ray, the arrival time and propagation direction (wave vector) were extracted at altitudes below 500 km. Electrons readily move along geomagnetic field lines but have little mobility across them.

Thus, atmospheric perturbations induced by acoustic waves are more effective when the wave vector is aligned with the geomagnetic field vector and less effective when perpendicular. To quantify this effect, we calculated $|\cos \theta|$, where θ is the angle between the geomagnetic field vector and the wave vector, and defined it as the geomagnetic propagation coefficient. The large values indicate high amplitude of the ionospheric disturbances, while the smaller values correspond to low amplitude of those. The coefficient was higher south of the epicenter, suggesting that the disturbances mainly propagate southward. However, the disturbances for J07 mainly propagated eastward, which cannot be explained by geomagnetic effects alone, suggesting that apparent line-of-sight effects must also be considered.

Because TEC is an integrated density along the line of sight (hereafter observation vector), positive and negative perturbations along the same path cancel each other. When the wave vector is nearly parallel to the observation vector, cancellation reduces the apparent TEC disturbance. In contrast, when the two are perpendicular, the apparent disturbance is enhanced. We quantified this effect by calculating $\sin \Phi$, where Φ is the angle between the wave vector and the observation vector, and defined it as the observation coefficient. The observation coefficients were small in the direction of each satellite's observation vector from the epicenter. For instance, since J02 had a high elevation angle (~90°), the coefficient shows a low value over the epicenter. J07 had an azimuth toward south-southwest, G08 toward southwest, and G16 toward north-northeast, resulting in low coefficients in those directions.

To incorporate both effects, we multiplied the geomagnetic propagation coefficient by the observation coefficient, defining the product as the disturbance observation coefficient. This coefficient was highest southward for J02 and G16, eastward for J07, and southeastward for G08. Observed TEC disturbances were consistent with these coefficients: southward for J02 and G16, eastward for J07, and southward for G08. Disturbances were stronger in directions with higher disturbance observation coefficients. These findings indicate that the observed anisotropy of TEC disturbances results from the combined effects of geomagnetic field alignment and observation geometry.

大規模な地震が発生すると音波が発生する。この音波は大気中を上向きに伝搬し、伝搬の過程で周囲の大気を揺らす。こうした大気の揺らぎは熱圏に到達し、同高度に存在する電離圏中の電子を擾乱させる。その結果、GNSS 観測により見積もられる全電子数 (TEC) の擾乱として検出される。

2024 年 1 月 1 日 7:10 UT 能登半島で Mw7.5 の地震が発生 (震央 37.5° N, 137.2° E) し、発生約 9 分後に TEC 擾乱が観測された。地震発生時には QZSS 2 基 (J02, J07) と GPS 2 基 (G08, G16) が上空に位置していた。本研究では国

土地理院が運用する GEONET のデータから電離圏全電子数 TEC を計算し、地震後の TEC 擾乱について調べた。サンプリング周期は 30 秒である。音波が同心円状に広がるため TEC も同心円状に変化すると予想されるが、J02 と G16 は震源の南方向に、J07 では北東方向のみ明瞭な TEC 擾乱が観測され、音波の伝搬とは一致しなかった。

観測された各衛星における TEC 擾乱の伝搬異方性の原因を明らかにするため、地震に伴って上空に伝播する音波の到達方向を球面座標系に基づくハミルトニアン形式の ray tracing 法により計算した。波源を能登半島地震の震央と仮定し、各方向に等間隔で射出された音波の経路を解析した。音速構造は NRLMSISE-00 モデルにより構築し、密度と温度から音速分布を計算した。風の影響は考慮していない。各音線に対して、指定した高度（500km 以下）における到達時刻と音波伝播方向（波数ベクトル）を抽出した。

電子は磁力線に沿って移動できるが、垂直方向にはほとんど移動できない。震源からの音波による大気変動は、磁力線方向（以下、地磁気ベクトル）に平行であれば電子が動きやすく、垂直であれば動きにくい。地磁気ベクトルと波数ベクトルのなす角 θ から $|\cos \theta|$ を算出し、電子の移動し易さをモデル化（以下、地磁気伝搬係数）した。波数ベクトルが磁力線方向に平行の場合、地磁気伝搬係数の値は大きくなり、垂直の場合は値が低くなる。地磁気伝搬係数は、震源から南方向の値が高く、震源南側に伝播しやすい傾向が見られた。TEC 擾乱が震源南側で観測された衛星は J02, G08, G16 である。一方、J07 は震源から南には TEC 擾乱は観測されず、東方向に TEC 擾乱が観測されたため、この結果は地磁気ベクトルだけでは説明がつかない。そのため、TEC の見かけの変化を考慮する必要がある。

TEC は積分値であるため、電波の経路上（以下、観測ベクトル）に擾乱の正と負が存在すると、相殺され、見かけ上、擾乱がないように見える。そのため、波数ベクトルと観測ベクトルが平行に近い場合は相殺され、見かけの擾乱は小さくなる。一方、波数ベクトルと観測ベクトルが垂直に近い場合は見かけの擾乱が大きくなる。この効果を波数ベクトルと観測ベクトルのなす角 Φ から $\sin \Phi$ を計算（以下、観測係数）し、評価した。震源から見た観測ベクトル方向の観測係数の値は低くなる。J02 の仰角は 90 度近いので、震源周辺の観測係数の値が低かった。一方、J07 の方位角は南南西方向、G08 は南西方向、G16 は北北東方向を向いているため、観測係数はそれらの方向の値が低かった。

2 つの効果を考慮するため、計算した地磁気伝搬係数と観測係数をかけ合わせた（擾乱観測係数）。J02 と G16 は南方向に、J07 は東方向、G08 は南東方向で高い値を示した。J07 は全体的に値が低かった。TEC 擾乱は J02 と G16 は南方向に観測でき、J07 は東方向、G08 は南方向に観測できた。擾乱観測係数の値が高い方向では TEC 擾乱が強く、低い方向では弱いか観測されず、観測結果は擾乱観測係数と一致する。以上から、観測された異方性は地磁気ベクトルと観測ベクトルの相互作用によって形成されていることが分かった。

R005-09

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

17:25~17:40:00

#Fu Junxian¹⁾, 大塚 雄一¹⁾

⁽¹⁾ISEE

Multi-Source Ionospheric Disturbances and Conjugate effects During The 2024 Typhoon Shanshan

#Junxian Fu¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾

⁽¹⁾The Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Typhoons have been widely reported to induce ionospheric disturbances through various atmospheric and electrodynamic coupling mechanisms. The passage of Typhoon Shanshan in 2024 provided a unique opportunity to investigate such disturbances over Japan using GNSS-derived total electron content (TEC) data. A fourth-order Butterworth bandpass filter was applied to extract the perturbation component of vertical TEC. During 15:00 – 16:30 UT on 12 September 2024, two distinct types of TEC anomalies were identified: (1) nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs), and (2) concentric ionospheric disturbances (CIDs) associated with typhoon-induced gravity waves. By incorporating conjugate observations from GNSS stations in Australia, this study further examines conjugate effects driven by electric field and the contrasting spatial characteristics of these two disturbance types. Results show that conjugate effects associated with nighttime MSTIDs are clearly observable in the southern hemisphere, consistent with electric field transmission along geomagnetic field lines. In contrast, conjugate signatures related to typhoon-induced gravity waves are absent or weak, suggesting a more localized or hemispherically asymmetric generation mechanism.

R005-10

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

17:40~17:55:00

地上磁場データを用いた台風がもたらす大気圏・電離圏結合擾乱の定量的解析

#西村 美紀¹⁾, 吉川 顕正²⁾, 魚住 禎司³⁾

(¹ 九大理学府, (² 九大/理学研究院, (³ 九州大学国際宇宙惑星環境研究センター

Quantitative Analysis of Typhoon-Induced Atmosphere – Ionosphere Coupling from Ground Magnetic Data

#Miki Nishimura¹⁾, Akimasa YOSHIKAWA²⁾, Teiji UOZUMI³⁾

(¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, (²Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, (³International Research Center for Space and Planetary Environmental Science, Kyushu University

In recent years, it has become increasingly evident that intense convective activities, including typhoons, have significant effects on the ionosphere. For example, neutral winds associated with gravity waves generated in the troposphere have been pointed out to drive dynamo currents in limited regions of the ionospheric E layer at altitudes of 90 – 150 km (Nakanishi et al., 2014). Previous studies have reported that magnetic field variations caused by small-scale field-aligned currents generated through this ionospheric dynamo process have been observed (V. A. Martines-Vedenko et al., 2019; Aoyama et al., 2017). These studies have provided important insights into the coupling processes between the atmosphere and the ionosphere.

As for ground-based observations, Chen et al.,(2014) analyzed geomagnetic disturbances in Taiwan associated with typhoons. Their analysis targeted nighttime data from September 1 to 30, 2008, during which three typhoons approached or made landfall in Taiwan. They reported that, for all three typhoons, clear amplitude inconsistencies were repeatedly observed in the 2.5 – 7 mHz frequency band on the days of their closest approach. This result suggests that convective activities associated with typhoons may contribute to geomagnetic variations via the ionosphere.

However, several issues remain in previous studies. First, the analysis of Chen et al.,(2014) was limited to nighttime, and results for the daytime, when the ionospheric E layer is present, have not been sufficiently demonstrated. Since the daytime ionosphere has higher conductivity and the characteristics of disturbances may differ greatly from those at night, and clarifying this aspect is essential. Second, satellite observations are only possible when the timing of a typhoon coincides with the satellite's overpass, making it difficult to secure a sufficient number of events for statistical analysis. Third, compared to space weather phenomena such as geomagnetic storms, geomagnetic variations caused by typhoons are considered to be small, and their detection and quantification are difficult.

Based on this background, the present study aims to verify whether variations in ionospheric currents caused by electron density fluctuations associated with typhoon passages can be detected as geomagnetic variations on the ground, using multi-point geomagnetic observation data in Japan. By utilizing data from both the MAGDAS (Magnetic Data Acquisition System) ground magnetometer network, globally deployed by International Research Center for Space and Planetary

Environmental Science, Kyushu University, and the geomagnetic observatories operated by the Japan Meteorological Agency, continuous and wide-area analyses can be performed. This enables statistical analyses of a larger number of events compared to satellite observations, with the goal of clarifying, from an electromagnetic perspective, the mechanisms of atmosphere – ionosphere coupling disturbances induced by typhoons through the detection of small ground geomagnetic variations.

The data used in this study cover the period from 2009 to 2021, focusing mainly on August to October of each year. Frequency analyses are being conducted for approximately 75 typhoons that approached or made landfall on the Japanese archipelago during this period (currently ongoing). For these 75 events, multi-point observation data from about six to seven sites, including both MAGDAS and Japan Meteorological Agency geomagnetic observatories distributed from Hokkaido to Kyushu, are available. Specifically, the analysis investigates in which frequency bands geomagnetic disturbances occur, dividing the data into daytime and nighttime intervals. To examine local geomagnetic variations with the influence of space weather removed, correlation coefficients between two observatories—for example, Kuju (Oita Prefecture) and Kakioka (Ibaraki Prefecture)—are calculated separately for day and night. For data where correlation coefficients decrease, it is examined whether the timing corresponds to periods before or after typhoon passages. If so, detailed investigations are conducted into electron density variations in the ionospheric F layer using total electron content (TEC) data. In addition, water vapor data observed by the Himawari meteorological satellite are also incorporated to analyze atmospheric conditions.

In this presentation, the results of the above analyses will be shown, and the generation mechanisms of ground geomagnetic variations induced by typhoons will be discussed.

近年、台風を含む激しい対流活動が電離圏に影響を及ぼすことが明らかになりつつある。例えば、対流圏から発生する重力波に伴う中性風は高度 90~150km の電離圏 E 層内の限られた領域でダイナモ電流を駆動することが指摘されている (Nakanishi et al., 2014)。過去の研究から、この電離圏ダイナモ過程を通じて生成された小規模な沿磁力線電流による磁場変動が観測されている (V. A. Martines-Vedenko et al., 2019; Aoyama et al., 2017)。これらの研究は、大気圏と電離圏

の結合過程を理解する上で重要な知見を提供してきた。

地上観測に基づく研究としては、Chen et al.,(2014) が台風に伴う台湾の地磁気擾乱を解析している。解析対象は2008年9月1日から30日までの夜間データであり、この期間には3つの台風が台湾に接近もしくは上陸した。彼らは3つの台風すべてにおいて、最接近日に2.5 – 7mHzの周波数帯域で振幅に顕著な不一致が繰り返し観測されたと報告している。このことは、台風に伴う対流活動が電離圏を介して地磁気変動に寄与する可能性を示唆している。

しかしながら、先行研究にはいくつかの課題が残されている。第一に、Chen et al.,(2014) の解析は夜間に限定されており、電離圏E層が存在する昼間における結果は十分に示されていない。昼間の電離圏は電気伝導度が高く、擾乱の特徴が夜間とは大きく異なる可能性があるため、その解明は不可欠である。第二に、人工衛星観測は台風と衛星の通過タイミングが一致した場合に限られるため、統計的に十分なイベント数を確保することが困難である。第三に、磁気嵐などの宇宙天気現象と比較すると、台風に起因する地上磁場変動は微小であると考えられ、その検出および定量化は容易ではない。

以上の背景を踏まえ、本研究は日本における地上磁場の多点観測データを用いて、台風通過前後に伴う電子密度変動に起因する電離圏電流の変化が地上磁場変動として検出可能であるかを検証する。九州大学国際宇宙惑星環境研究センターがグローバルに展開している地上磁場観測網 MAGDAS (Magnetic Data Acquisition System) および気象庁地磁気観測所のデータを利用することで、連続的かつ広域的な解析が可能となる。これにより、人工衛星観測に比べ多数のイベントを対象とした統計解析が実現でき、微小な地上磁場変動を通じて台風起因の大気圏・電離圏結合擾乱の機構を電磁気学的側面から明らかにすることを目指す。

使用データは、2009年から2021年の各年において概ね8月から10月までのものを用いる。この期間に日本列島に接近もしくは上陸した約75個の台風に対して周波数解析を行う(現在進行中)。この75イベントに対しては、MAGDASと気象庁地磁気観測所併せて北海道から九州地方までの6から7箇所ほどの多点観測データを利用することができる。具体的には、どの周波数帯で地磁気擾乱が発生するのかを昼と夜の時間帯に分けて調査する。宇宙天気の影響を取り除いたローカルな地磁気変動を調べるために、例えば久住(大分県)と柿岡(茨城県)といった2観測点において、昼と夜それぞれの相関係数を算出する。相関係数の低下が見られたデータについて、それが台風通過前後の時期に対応するかどうかを検証し、該当する場合は電離圏F層における電子密度変動を、全電子量データを用いて詳しく調査する。さらに、気象衛星ひまわりによる水蒸気量データを併用し、大気側の条件も解析する。

本講演では、以上の解析結果を示し、台風起因の地上磁場変動の発生機構について議論を行う。

R005-11

A 会場 : 11/26 PM3 (16:40-18:25)

17:55~18:10:00

地震によって励起された Pc3 型地磁気脈動

#家森 俊彦¹⁾, 青山 忠司²⁾, 横山 佳弘³⁾

(¹⁾ 京大, (²⁾ エフ・ファクトリー (株), (³⁾ ノルウェー北極大学

Pc3 geomagnetic pulsations excited by earthquakes

#Toshihiko Iyemori¹⁾, Tadashi Aoyama²⁾, Yoshihiro Yokoyama³⁾

(¹⁾ Kyoto University, (²⁾ F-Factory Co. Ltd., (³⁾ UiT The arctic university of Norway

Lamb waves generated by the January 2022 Tongan undersea volcanic eruption are believed to have excited large amplitude and short period Pc3 geomagnetic pulsations in the dayside plasmasphere (Iyemori et al., 2025). Similar increases in power spectral density in the Pc3 frequency band were observed 10-20 minutes after large earthquakes ($M > 6.5$) occurring on land during the daytime (10-14 LT) at least in five of the ten earthquakes that met the above criteria that occurred between 2014 and 2025. During large earthquakes, seismic motions thought to be surface waves with a period of 10-30 seconds propagate far away, causing slight fluctuations in the orientation of magnetometer sensors, resulting in apparent Pc3-like fluctuations. Therefore, it is necessary to distinguish these from natural Pc3 phenomena. In this study, we not only examined magnetic field fluctuations before the arrival of seismic waves using seismometer data, but also calculated one second resolution total magnetic field, which is independent of sensor orientation, by taking the square root of the square of the three components of one second resolution magnetic field observation data. This analysis can avoid the influence of magnetometer sensor vibrations due to seismic waves. In some cases, we also compared the data with magnetic field observation data from the Swarm satellites. Because Pc3s frequently occur in the daytime, the possibility that the timing of the earthquake coincided with a solar wind origin Pc3 event cannot be ruled out. However, the average results of the 10 cases examined show that the spectral density increases approximately 20 minutes after the earthquake, suggesting that acoustic waves generated by the earthquake may have induced currents in the ionosphere and injected magnetosonic waves into the plasmasphere, exciting Pc3 waves by a cavity resonance. The spectral density increase is not as broad as in the 2022 Lamb wave passage and tends to lean to longer-period side than 15-20 seconds. However, the presence of many spectral density peaks and their relative positions are similar with the Lamb wave case.

2022 年 1 月のトンガ海底火山噴火によって生成された Lamb 波は昼間側プラズマ圏に大振幅でかつ短周期 (10-20 sec) 帯にスペクトル密度分布の中心がある Pc3 型地磁気脈動を励起したと推測された (Iyemori et al., 2025)。これと同様に、昼間側 (10-14LT) の陸域で発生した大きな地震 ($M > 6.5$) の際にもその 10-20 分後から Pc3 の周波数帯でパワースペクトル密度増大が、2014-2025 年に発生した上記条件を満たす地震 10 例中 5 例以上で見られた。大きな地震の際には 10-30 秒周期の表面波と考えられる地震動が遠方まで伝播し、磁力計センサーの向きがごくわずかに変動して見かけ上 Pc3 のような変動が生じるため、自然現象としての Pc3 との区別が必要となる。当報告では、地震計のデータを参照して、地震波が到達する前の磁場変動を調べるだけでなく、毎秒値磁場観測データ 3 成分の 2 乗和の平方根をとることによってセンサーの向きとは無関係な全磁力の毎秒値を求め、それを解析することで、地震波による磁力計センサー振動の影響を避けて解析を行った。また、いくつかの例では、Swarm 衛星による磁場観測データとも比較した。Pc3 は昼間側では頻繁に発生しているため、太陽風起源の Pc3 と地震発生のタイミングがたまたま一致したという可能性も否定できないが、調べた 10 例を重ね合わせて平均した結果は、地震発生約 20 分後からスペクトル密度が増加することから、地震で発生した音波が電離圏に電流を流し、プラズマ圏に磁気音波を注入して共鳴し Pc3 を励起した可能性を示唆する。また、スペクトル密度増加の帯域は、2022 年の Lamb 波通過の場合のように広くはなく、10-20 秒よりも長周期側にかた寄る傾向があるが、多数のスペクトル密度のピークが現れる点、およびそれらピークの位置関係では類似している。

R005-12

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

9:15~9:30:00

2024 年 5 月の X5.89 クラス太陽フレア中の EUV 振動によって引き起こされた D 領域電離圏変動

#久保田 朱音¹⁾, 大矢 浩代¹⁾, 土屋 史紀²⁾, 中田 裕之¹⁾

(¹⁾ 千葉大, (²⁾ 東北大・理・惑星プラズマ大気

D-region ionospheric variations driven by EUV oscillations during the X5.89 solar flare in May 2024

#Akane Kubota¹⁾, Hiroyo Ohya¹⁾, Fuminori Tsuchiya²⁾, Hiroyuki Nakata¹⁾

(¹Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, (²Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

Solar flares produce strong enhancements in solar irradiance within the extreme ultraviolet (EUV) and X-ray bands, significantly impacting the D-region ionosphere (60 – 90 km). Enhanced EUV and soft X-ray fluxes are efficiently absorbed by molecular oxygen and nitrogen, leading to rapid increases in electron density which has been confirmed by very low frequency (VLF) observations (Kumar and Kumar, 2018). Moreover, Hayes et al. (2017) reported that D-region electron density pulsations were synchronized with flare-driven X-ray and EUV pulsations. In the EUV range, Lyman- α radiation (121.6 nm) is the dominant component and is known to influence the D-region, although its contribution is slower and less variable than that of X-rays (Kitajima et al., 2024). The D-region response to Lyman- α during flares, however, remains unclear. In this study, we investigated D-region ionospheric variations for the X5.89-class solar flare that occurred at 01:10 UT on May 11, 2024, the largest flare among large geomagnetic storms in May 2024. We used LF transmitter signals observed by a worldwide VLF/LF radio propagation network OCTAVE/AVON. The LF waves were transmitted from JJY60 (60.0 kHz) in Japan and BPC (68.5 kHz) in China, and received at Pontianak (PTK), Indonesia and Rikubetsu (RKB), Japan. Normally, when a solar flare occurs the phase of the LF signal exhibits time variations similar to those of X-ray flux. However, during the X5.89-class solar flare, unusual oscillations in phase and amplitude were observed. Based on wavelet analysis of these oscillations, the periods were 549 s for the phase of the JJY60-PTK path and 388 s for the phase of the BPC-PTK path. To investigate the cause of the LF oscillations, the LF waves were compared with EUV data observed by the GOES-16 and SDO satellites. The summation of EUV in the 20 – 140 nm range, including the Lyman- α , was similar to a part of the LF oscillations, and a few peaks of the LF oscillation coincided with peaks in the composite EUV radiation. A detailed analysis confirmed that similar oscillations occurred in the LF waves 3 minutes after the EUV oscillations. Furthermore, a calculation of the ionization production rate revealed that Lyman- α radiation has the largest effect on the D-region in EUV wavelength band. These results suggest that the periodic variations in EUV radiation associated with the solar flare affected the electron density in the D-region ionosphere.

太陽フレアは、極端紫外線 (EUV) および X 線帯域における太陽放射強度を著しく増強し、D 領域電離圏 (60~90 km) に大きな影響を与える。増加した EUV および軟 X 線フラックスは分子状酸素および窒素によって効率的に吸収され、電子密度の急激な増加をもたらす。これは、超低周波 (VLF) の電波観測によって確認されている (Kumar and Kumar, 2018)。さらに、Hayes et al. (2017) は、D 領域の電子密度の脈動がフレア駆動による X 線および EUV の脈動と同期していることを報告している。EUV の範囲では、ライマン α 放射線 (121.6 nm) が主要な成分であり、その寄与は X 線よりも遅く、変動も少ない (Kitajima et al., 2024)。しかし、フレア発生時のライマン α に対する D 領域の反応は不明のままである。本研究では、2024 年 5 月 11 日 01:10 (世界時) に発生した X5.89 クラスの太陽フレアに対する D 領域電離圏の変動を、LF 帯標準電波を用いて調査した。これは 2024 年 5 月に連続して発生した太陽フレアの中で最大のものであった。本研究で使用した LF 帯標準電波は、我々の研究グループが世界中で運用している OCTAVE/AVON のデータである。LF 波は日本の JJY60 (60.0 kHz) と中国の BPC (68.5 kHz) から送信され、インドネシアのポンティアナック (PTK) と日本の陸別 (RKB) で受信された。通常、太陽フレアが発生すると、LF の位相は X 線フラックスと同様の時間変動を示す。しかし、この X5.89 クラスの太陽フレアでは、位相と振幅に異常な振動が観測された。これらの振動をウェーブレット解析した結果、周期は JJY60-PTK パスの位相で 549 秒、BPC-PTK パスの位相で 388 秒であった。LF の振動の原因を調査するため、LF 波と GOES-16 および SDO 衛星で観測された EUV データを比較した。ライマン α 線を含む 20~140nm の範囲の EUV の合計値は、LF 振動の一部と類似していた。20~140nm の範囲の EUV の合計値は、LF 振動の一部と類似しており、LF 振動のいくつかのピークは合成された EUV 放射のピークと一致した。詳細な解析から、EUV の振動の 3 分後に LF 波で同様の振動が発生したことが確認された。さらに、電離生成率を計算したところ、ライマン α 線が EUV の中で D 領域に与える影響が最も大きいことが分かった。これらの結果は、太陽フレアに伴う EUV 放射の周期的変動が、D 領域電離圏の電子密度に影響を与えることを示唆するものである。

R005-13

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

9:30~9:45:00

#大矢 浩代¹⁾, 古谷 凌汰¹⁾, 土屋 史紀²⁾, 山本 真行³⁾, 鷲見 貴生⁴⁾, 中田 裕之¹⁾, 渡邊 堯⁵⁾, 小林 美樹⁶⁾

(¹⁾ 千葉大学, (²⁾ 東北大学, (³⁾ 高知工科大学, (⁴⁾ 国立天文台, (⁵⁾ 情報通信研究機構, (⁶⁾ 日本流星研究会)

D-Region ionospheric disturbances induced by fireballs and satellite reentries observed with OCTAVE VLF/LF transmitter signals

#Hiroyo Ohya¹⁾, Ryota Furuya¹⁾, Fuminori TSUCHIYA²⁾, Masa-yuki YAMAMOTO³⁾, Tatsuki Washimi⁴⁾, Hiroyuki NAKATA¹⁾, Takashi WATANABE⁵⁾, Miki Kobayashi⁶⁾

(¹⁾Chiba University, (²)Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University,

(³)Kochi University of Technology, (⁴)National Astronomical Observatory of Japan, (⁵)National Institute of Communications and Technology, (⁶)The Nippon Meteor Society

Fireballs are exceptionally bright meteors (magnitude > -4) that enter Earth's atmosphere and burn up due to aerodynamic heating, typically originating from larger meteoroids or small asteroids. Similarly, artificial satellites or other human-made objects can reenter the atmosphere in a controlled or uncontrolled manner, experiencing heating that may cause partial or complete ablation. These atmospheric entry events can ionize the surrounding neutral atmosphere, affecting the D-region ionosphere (60 – 90 km altitude), which can be detected using very low frequency (VLF, 3 – 30 kHz) and low frequency (LF, 30 – 300 kHz) transmitter signals. Previous studies have shown that fireballs generate acoustic and atmospheric gravity waves (AGWs), causing D-region ionospheric fluctuations (Chernogor, 2015; Ohya et al., 2024). However, detailed mechanisms of D-region variations induced by fireballs and satellite reentries remain unclear. This study quantitatively investigates lower ionospheric variations associated with atmospheric entry events using OCTAVE VLF/LF transmitter signals, the F-net seismic observation network, and infrasound data from Kochi University of Technology and the National Astronomical Observatory of Japan. Two events are analyzed: a fireball observed at 14:33 UT on April 23, 2023, and the reentry of a Starlink satellite (Group 6-32 debris 31119) at 12:38 UT on December 26, 2023. Transmitters include JJI (22.2 kHz, Miyazaki, Japan), JJY40 (40.0 kHz, Fukushima, Japan), JJY60 (60.0 kHz, Saga, Japan), and BPC (68.5 kHz, China), with receivers at RKB (Rikubetsu, Japan) and KAG (Kagoshima, Japan). For the fireball, amplitude and phase variations with periods of 200 – 500 s were observed on the JJY60-RKB path, while the JJY40-RKB path exhibited larger distinct variations (18 dB and 200°), likely caused by strong ionization along the fireball trail. Seismic (vertical velocity at Kashiwazaki; KZK) and infrasound (Mozumi; MZM) data also showed variations with periods of 300 – 400 s and 200 – 400 s, respectively. Coherence analysis revealed significant peaks at 200 – 400 s between LF, seismic, and infrasound signals. For the satellite reentry, amplitude and phase variations with periods of 200 – 300 s were observed in the JJY40-KAG signals, and corresponding infrasound variations at Tateyama (TTM) coincided with acoustic wave arrival at the ground. Coherence analysis showed a peak at 256 s. These results indicate that acoustic waves generated by fireballs and satellite reentries propagate upward, inducing disturbances in both the D-region ionosphere and at the Earth's surface. Detailed results will be presented in the session.

R005-14

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

9:45~10:00:00

RIDE ロケット・キャンペーンによる中緯度スποラディック E 層の生成過程の解明

#齊藤 昭則¹⁾, 阿部 琢美²⁾, 松岡 彩子¹⁾, 石坂 圭吾³⁾, 齋藤 義文²⁾, 田川 雅人⁴⁾, 熊本 篤志⁵⁾, 白澤 秀剛⁶⁾, 小嶋 浩嗣⁷⁾, 栗田 怜⁷⁾, 村田 直史²⁾, 松山 実由規³⁾, 横田 久美子⁴⁾, 西岡 未知⁸⁾, 安藤 慧⁸⁾, 斎藤 享⁹⁾, 高橋 透⁹⁾, 細川 敬祐¹⁰⁾, 中田 裕之¹¹⁾, 横山 竜宏⁷⁾, Liu Huixin¹²⁾, 木暮 優¹³⁾, 西山 尚典¹⁴⁾, 江尻 省¹⁴⁾, 坂崎 貴俊¹⁾

(¹⁾ 京都大・理, (²⁾ 宇宙航空研究開発機構, (³⁾ 富山県立大学, (⁴⁾ 神戸大学, (⁵⁾ 東北大学, (⁶⁾ 東海大学, (⁷⁾ 京都大学生存圏研究所, (⁸⁾ 国立研究開発法人情報通信研究機構, (⁹⁾ 海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所, (¹⁰⁾ 電気通信大学, (¹¹⁾ 千葉大学, (¹²⁾ 九州大学, (¹³⁾ 延世大学, (¹⁴⁾ 国立極地研究所

The RIDE Rocket Campaign: Elucidating the Generation Processes of Mid-Latitude Sporadic E Layers

#Akinori Saito¹⁾, Takumi ABE²⁾, Ayako MATSUOKA¹⁾, Keigo ISHISAKA³⁾, Yoshifumi SAITO²⁾, Masahito Tagawa⁴⁾, Atsushi KUMAMOTO⁵⁾, Hidetaka Shirasawa⁶⁾, Hirotsugu KOJIMA⁷⁾, Satoshi KURITA⁷⁾, Naofumi Murata²⁾, Miyuki MATSUYAMA³⁾, Kumiko Yokota⁴⁾, Michi NISHIOKA⁸⁾, Satoshi ANDOH⁸⁾, Susumu SAITO⁹⁾, Toru Takahashi⁹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁰⁾, Hiroyuki NAKATA¹¹⁾, Tatsuhiro YOKOYAMA⁷⁾, Huixin LIU¹²⁾, Masaru Kogure¹³⁾, Takanori NISHIYAMA¹⁴⁾, Mitsumu K. EJIRI¹⁴⁾, Takatoshi Sakazaki¹⁾

(¹⁾ Graduate School of Science, Kyoto University, (²⁾ JAXA, (³⁾ Toyama Prefectural University, (⁴⁾ Kobe University, (⁵⁾ Tohoku University, (⁶⁾ Tokai University, (⁷⁾ RISH, Kyoto University, (⁸⁾ NICT, (⁹⁾ ENRI, (¹⁰⁾ University of Electro-Communications, (¹¹⁾ Chiba University, (¹²⁾ Kyushu University, (¹³⁾ Yonsei University, (¹⁴⁾ NIPR

On July 15, 2025, at 12:00 JST, the sounding rocket S-310-46 was launched from the Uchinoura Space Center of the Japan Aerospace Exploration Agency to conduct in-situ observations of the daytime sporadic E layer. This rocket experiment was part of the RIDE (Rocket Investigation of the Daytime E-region) campaign, which integrates sounding rocket measurements with ground-based observations such as ionosondes and a three-dimensional numerical model of metallic ions, with the aim of elucidating the generation processes of the sporadic E layer. Although the occurrence of sporadic E layers can be detected from ground-based observations using radio waves, understanding their generation mechanisms requires measurements of the winds and electric fields that drive the metallic ions, as well as the surrounding neutral atmosphere, plasma environment, and associated electric currents. To address this, the sounding rocket carried out direct in-situ measurements of both the neutral atmosphere and plasma. The RIDE rocket carried seven scientific payloads. These include the Neutral Mass Spectrometer (NMS), Neutral Density and Wind Instrument (IOG), Ion Velocity Analyzer (IVA), Impedance Probe (NEI), Fast Langmuir Probe (FLP), Electric Field Detector (EFD), and Magnetometer (MAG). Ground-based observations included an ionosonde network consisting of four stations of the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) and additional ionosonde receivers installed in Miyazaki, Beppu, Aso, and Kuroshio Town, a VHF receiver network operated by the University of Electro-Communications and collaborators, the GEONET GNSS receiver network operated by the Geospatial Information Authority of Japan, and a metallic ion lidar operated by the National Institute of Polar Research. By comparing these comprehensive observational data of the sporadic E layer with numerical simulations, including the whole atmosphere model GAIA and a three-dimensional metallic ion model, we aim to clarify the generation processes of the sporadic E layer and contribute to the development of forecasting methods for Es layer occurrence.

2025 年 7 月 15 日 12:00JST に宇宙航空研究開発機構内之浦宇宙空間観測所から S-310-46 号機が打ち上げられ、昼間スποラディック E 層の直接観測を行った。この観測ロケットは RIDE(Rocket Investigation of the Daytime E-region) キャンペーンの一部であり、イオノゾンデなどの地上観測と、3 次元金属イオン数値モデルと合わせて、スποラディック E 層の生成過程の解明を目的としたものである。スποラディック E 層の発生は地上から電波により測定できるが、その生成の物理過程を知るためにはスποラディック E 層を構成する金属イオンを動かしている風・電場と、それらを作る周辺の中性大気・プラズマ大気・電流を測る必要があり、観測ロケットによって中性大気とプラズマの両方の直接観測が実施された。RIDE ロケットの搭載機器は中性大気質量分析 (NMS)、中性大気密度・風計測装置 (IOG)、イオン速度測定器 (IVA)、インピーダンスプローブ (NEI)、高速ラングミュアプローブ (FLP)、電場観測装置 (EFD)、磁場計測器 (MAG) の 7 つである。地上観測は情報通信研究機構の 4 地点のイオノゾンデと宮崎、別府、阿蘇、黒潮町に設置されたイオノゾンデ受信機からなるイオノゾンデ網、電気通信大学らによる VHF 受信機網、国土地理院による GNSS 受信機網 GEONET、国立極地研究所金属イオンライダーである。これらの総合的なスποラディック E 層の観測データと全大気モデル GAIA や 3 次元金属イオンモデルなどの数値シミュレーションと比較することによって、スποラディック E 層の生成過程を解明し、実現困難とされている Es 層の発生予測に発展していくことを期待している。

R005-15

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

10:00~10:15:00

観測ロケット搭載Langmuirプローブにおけるウェーク影響の推定と補正

#上田 遥介¹⁾, 齊藤 昭則²⁾, 阿部 琢美³⁾

(¹⁾ 京都大, (²⁾ 京都大, (³⁾ 宇宙航空研究開発機構)

Estimation and Correction of Wake Effects on a Sounding Rocket Langmuir Probe

#Yosuke Ueda¹⁾, Akinori SAITO²⁾, Takumi ABE³⁾

(¹⁾Kyoto University, (²⁾Kyoto University, (³⁾Japan Aerospace Exploration Agency)

To directly observe the plasma environment in the Earth's ionosphere, sounding rockets have frequently been equipped with Langmuir probes to measure electron temperature and density. However, as the rocket travels at high velocity while spinning, the plasma becomes rarefied when the probe enters the region behind the rocket (the wake), leading to systematic errors in the estimated values of electron temperature and density. Conventionally, the common method to mitigate this wake effect has been to discard the data from the affected sections (Watanabe et al., 1989).

To improve both data utilization and analysis accuracy, it is essential to establish a method for correcting the wake effect based on a physical model. This study aims to develop a technique to quantitatively model and correct the influence of the wake on electron temperature and density estimates. The analysis uses observation and attitude data from the sounding rocket S-520-29 (apogee: 243 km), launched from the Uchinoura Space Center in 2014. A key feature of this rocket was that, in addition to its spin, it exhibited precession with a short period and large amplitude. While previous research has proposed correction methods for spin motion (Ueda et al., 2025), this study builds upon that work by constructing a new correction model that also accounts for the complex probe movements caused by the rocket's precession.

The method developed in this study demonstrates the potential for high-precision correction of data affected by a rocket's complex motion, a task that has proven difficult until now. In the future, we plan to generalize this method for application to data from other rockets, such as the S-310-46, which was launched in July 2025. Through this work, we expect to deepen the understanding of fine-scale plasma structures within the ionosphere.

R005-16

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

10:15~10:30:00

観測ロケット搭載用イオンドリフト速度測定器によるスποラディック E 層の観測

#加藤 千晶¹⁾, 阿部 琢美²⁾, 齊藤 昭則³⁾, 小嶋 浩嗣³⁾, 栗田 怜³⁾

(¹⁾ 京大院工, (²⁾ 宇宙航空研究開発機構, (³⁾ 京都大学

Observation of Sporadic E Layers Using a Rocket-Borne Ion Drift Velocity Analyzer

#Chiaki Kato¹⁾, Takumi Abe²⁾, Akinori Saito³⁾, Hirotsugu Kojima³⁾, Satoshi Kurita³⁾

(¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, (²Japan Aerospace Exploration Agency, (³Kyoto university

The upper atmosphere of the Earth contains ions and electrons, along with neutral particles, which are produced by photoionization of atmospheric nitrogen and oxygen molecules by solar ultraviolet radiation. This region, known as the ionosphere, is stratified into multiple layers depending on plasma density. These layers have the property of reflecting radio waves, and communications, broadcasting, navigation, and air traffic control using shortwave and very high frequency (VHF) bands rely on this ionospheric reflection. In the ionosphere, where collisions between ions and neutral particles dominate, electric currents and polarization electric fields arise, leading to characteristic phenomena that differ from those observed in a neutral atmosphere.

One representative phenomenon is the sporadic E (Es) layer, which appears intermittently at altitudes of approximately 90 – 130 km with high probability from spring to summer and consists mainly of metallic ions such as Fe^+ and Mg^+ . The Es layer is known to strongly reflect VHF radio waves, causing anomalous propagation that can affect communication, broadcasting, and air traffic control.

In the Es layer formation region, ions are strongly affected by frictional forces due to collisions with neutral particles. As a result, ions tend to move at velocities close to the neutral wind and act as a mediator for transferring neutral atmospheric motion into the ionosphere. Furthermore, ions serve as the main medium for momentum and energy exchange between neutral particles and plasma, and accurate knowledge of their behavior is essential for understanding the interactions between plasma and neutral atmosphere during Es layer formation. Therefore, direct measurements of detailed physical quantities such as ion velocity, temperature, and density are critically important for elucidating the formation processes of the Es layer.

In this study, we have been developing an ion drift velocity analyzer capable of estimating ion drift velocity and density in the lower ionosphere. Since ground-based performance evaluation tests produced the expected results, the analyzer was installed on a sounding rocket during the summer of 2025, and an experiment was conducted to investigate the Es layer formation process. In this experiment, direct measurements of neutral and plasma particles, as well as electric and magnetic fields, were performed in the Es layer region.

The ion drift velocity analyzer consists of a Retarding Potential Analyzer (RPA) and a collector electrode. The RPA selects particles according to their energy by applying a retarding voltage as they pass through. Ions that pass through the RPA reach the collector electrode and are detected as ion currents. The collector electrode is circular, composed of 36 segmented fan-shaped electrodes. The distribution of currents from these segments is used to determine the arrival direction of ions, which, when combined with the velocity component normal to the RPA plane, yields the three-dimensional ion drift velocity.

The rocket reached an altitude of approximately 104 km, which was lower than predicted, and did not reach the altitude of maximum electron density in the Es layer. Moreover, the rocket maintained a significantly inclined attitude during flight. Consequently, the measured ion currents obtained by the analyzer were lower than expected. The instrument had been mounted so that ions would enter nearly perpendicularly when the rocket flew along its principal axis; however, due to the inclined flight attitude, ions likely had difficulty reaching the collector electrodes effectively.

In this presentation, we report on the bulk energy, temperature, and density of ions estimated from the data acquired by the analyzer.

地球の大気上層部は、太陽紫外線による大気中の窒素分子や酸素分子の光電離により、中性粒子とともにイオンや電子が重要な構成粒子となる。この領域は電離圏と呼ばれ、プラズマ密度に応じて高度ごとに複数の層として区別される。これらの層は電波を反射する性質をもち、短波帯や超短波帯の電波を用いた通信放送・測位・航空機管制などは、電離層での電波の反射を利用して行われる。イオンと中性粒子の衝突が卓越するこの領域では、電流や分極電場が発生し、中性大気のみの場合とは異なる特徴的な現象が多く存在する。

その代表的な現象の一つは、スポラディック E 層 (Es 層) である。春から夏にかけては高い確率で高度 90~130 km に散発的に発生する高電子密度の薄い層で、主に Fe^+ 、 Mg^+ などの金属イオンからなる。特に超短波帯の電波をよく反射し、通信や放送、航空機管制に使われる電波の異常伝搬を引き起こすことで知られている。

Es 層形成領域では、イオンは中性粒子との衝突による摩擦力の影響を強く受ける。このため、イオンは中性風とほぼ同じ速度で運動する傾向が強く、中性大気の運動を電離圏に伝える媒介として機能する。さらに、イオンは中性粒子とプラズマ間における運動量・エネルギー交換の主要な媒体であり、その挙動を正確に把握することは、Es 層形成過程におけるプラズマと中性大気の相互作用を理解する上で不可欠である。したがって、Es 層の形成過程解明には、イオン速度、

温度、密度といった詳細な物理量を直接計測することが極めて重要である。

これまで本研究では、電離圏下部においてイオンドリフト速度および密度を推定可能なイオンドリフト速度測定器の開発を進めてきた。地上での性能評価試験において期待される結果が得られたことから、2025 年夏期に本測定器を観測ロケットに搭載し、Es 層形成過程の解明を目的とした実験を実施した。本実験では、Es 層を形成する中性粒子およびプラズマ粒子に加え、磁場および電場の直接測定が行われた。

イオンドリフト速度測定器は、Retarding Potential Analyzer(RPA) とコレクタ電極から構成される。RPA では、粒子が通過する際にリターディング電圧を設定することにより、粒子のエネルギーを選別する。RPA を通過したイオンはコレクタ電極に到達し、イオン電流として検出される。コレクタ電極は 36 枚の扇形単電極が円型をなすように貼り付けられている。これらのコレクタ電流から生成される分布からイオンの到来方向を検出し、RPA より推定される法線方向の速度と組み合わせて 3 次元的なイオンドリフト速度を得る。

ロケットは予測よりも低い約 104 km の高度に到達したが、Es 層における最大電子密度の高度には達しなかったと考えられる。さらに、ロケットは大きく傾斜した姿勢を保ちながら飛行した。このため、本測定器で得られた電流値は予想よりも低い値となった。ロケット速度が機軸方向に近い角度で飛翔する場合にイオンが測定器に対してほぼ垂直に入射するよう測定器は取り付けられたが、今回は飛翔姿勢が斜めであったため、イオンがコレクタ電極に到達しにくかったと考えられる。

本発表では、本測定器による観測データから推定したイオンのバルクエネルギー、イオン温度、イオン密度について報告する。

R005-17

A 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

11:05~11:20:00

極域における金属イオン流の3次元シミュレーション

#安藤 慧¹⁾, 品川 裕之²⁾, 陣 英克¹⁾, 埜 千尋¹⁾, 細川 敬祐³⁾

(¹⁾ 国立研究開発法人 情報通信研究機構, (²⁾ 九州大学, (³⁾ 電気通信大学

Three-dimensional metal ion flow in the polar ionosphere simulated by a new ionospheric model

#Satoshi Andoh¹⁾, Hiroyuki SHINAGAWA²⁾, Hidekatsu JIN¹⁾, Chihiro TAO¹⁾, Keisuke HOSOKAWA³⁾

(¹⁾National Institute of Information and Communications Technology, (²⁾Kyushu University, (³⁾The University of Electro-Communications

The temporal evolution of the three-dimensional metal ion flow (MIF) in the polar ionosphere is presented for the first time. Until now, no groups have thoroughly examined the temporal evolution of three-dimensional MIFs in the polar ionosphere, which is crucial for polar sporadic E layer (EsL) dynamics. Here, we developed a new ionospheric model for metal ion dynamics, which incorporates electric fields and winds from a whole atmospheric model. We revealed the time-dependent three-dimensional MIFs in the polar ionosphere, driven by two-cell convective electric fields. The simulated MIFs closely matched observations reported in previous studies and were primarily caused by electric fields. For example, metal ions gather in the evening cell rather than the morning cell in the ionospheric F region owing to the morning divergence and evening convergence electric fields; the narrow latitudinal metal ion concentrations appear in the pre-midnight ionospheric E region owing to downward motions and vertical convergence of ions by electric fields. Our findings emphasize the critical role of electric fields in polar metal ion dynamics and provide valuable insights for interpreting past and future MIF observations in the polar ionosphere.

R005-18

A 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

11:20~11:35:00

極渦による中緯度電離層スプラディック E 層の変調について

#前田 朋毅¹⁾, Liu Huixin^{1,2)}, 山崎 洋介³⁾, Qiu Lihui⁴⁾

(¹⁾九州大学, (²九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, (³ロストック大学ライプニッツ大気物理学研究所, (⁴九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター

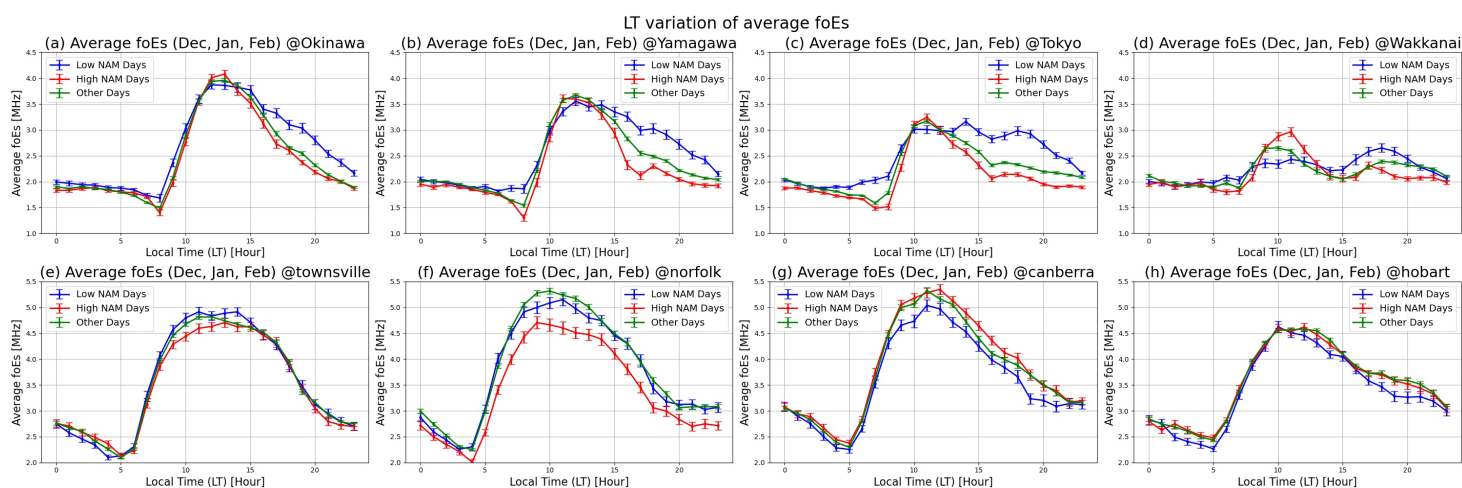
Modulation of the mid-latitude ionospheric Sporadic E layer by the polar vortex

#Tomoki Maeda¹⁾, Huixin Liu^{1,2)}, Yosuke Yamazaki³⁾, Lihui Qiu⁴⁾

(¹Kyushu University, (²Department of the Earth and Planetary Science, Faculty of Science, Kyushu University, Fukuoka, Japan, (³Leibniz Institute of Atmospheric Physics at the University of Rostock, Kuehlungsborn, Germany, (⁴International Research Center for Space and Planetary Environmental Science, Kyushu University

The sporadic E (Es) layer, a dense thin layer composed of metallic ions, is a prominent phenomenon in the atmosphere-ionosphere coupling system because its formation is mainly driven by vertical shear of neutral winds. Recent studies have reported possible links between Es layer and sudden stratospheric warming events. This study statistically investigated how polar vortex variations, represented by the Northern Annular Mode (NAM) index, influence Es layer activity over Japan and Australia using 19 years of ionosonde and JAGUAR-DAS Whole neutral Atmosphere Reanalysis(JAWARA) data. The results show that the intensity of the Es layer increase in the morning and afternoon over Japan under weak polar vortex conditions, which is consistent with the enhanced vertical ion convergence pattern. In contrast, no clear relationship between NAM and Es intensity is seen in Australia. The findings support a coupling between stratospheric dynamics and ionospheric irregularities via semidiurnal tides and suggest that polar vortex strength, especially NAM index, may serve as a useful parameter for forecasting Es layer variability.

スプラディック E(Es) 層は、金属イオンから成る高密度で薄い層であり、その形成が主に中性大気の鉛直風シアによって駆動されることから、大気圏電離圏結合において重要な現象です。近年、Es 層と突然成層圏昇温 (SSW) との関連が報告されています。本研究では、日本およびオーストラリアにおける Es 層活動への極渦変動の影響を、北半球環状モード (NAM) 指数を指標とし、19 年間のイオノゾンデ観測および JAGUAR-DAS による大気再解析データ (JAWARA) を用いて統計的に解析しました。その結果、日本においては弱い極渦条件下で Es 層強度が朝方および午後に増加し、これは鉛直イオン収束の強化パターンと整合的であることが示されました。一方、オーストラリアでは NAM と Es 強度との明確な関係は認められませんでした。これらの結果は、半日周期潮汐を介した成層圏力学と電離圏との結合を支持するとともに、極渦の強さ、特に NAM 指数が Es 層変動の予測に有用な指標となり得ることを示唆しています。



R005-19

A 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

11:35~11:50:00

船舶自動識別装置の電波を用いたスプラディック E 動的特性の複数事例解析

#住本 有¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 珠玖 直樹²⁾, 坂野 太陽²⁾

(¹ 電気通信大学, (² 東洋信号通信社

Multiple Case Studies of dynamical characteristics of sporadic E using maritime radio waves from automatic identification system

#Yu Sumimoto¹⁾, Keisuke Hosokawa¹⁾, Naoki Shuku²⁾, Taiyo Sakano²⁾

(¹University of Electro-Communications, (²TST Corporation

The sporadic-E (Es) layer, which appears at altitudes of 95–120 km in the ionospheric E region, is a thin layer with increased electron density. It is known that Es generally occurs at mid-latitudes during the daytime in summer, and that Es causes anomalous long-distance propagation of very high-frequency (VHF) radio waves through reflection. Recent researches showed that anomalous long-distance propagation of aeronautical VHF radio waves occurs during Es. Furthermore, Chartier et al. (2022) demonstrated a correlation between Es and 1000–2500 km long-distance propagation of 162 MHz maritime radio waves used for the automatic identification system (AIS). However, the feasibility of observing Es from a commercial dense AIS receiver network has not yet been evaluated. In this study, we validate the feasibility of visualizing the structure and motion of Es using commercial AIS data from a network operated by TST Corporation.

We investigated anomalous long-distance propagation in the commercial AIS data during an Es event on July 7, 2024. It was found that the mid-points between the receiving (Rx) stations and transmitting (Tx) stations (i.e., ships) were distributed in a relatively narrow area on the Japan Sea, which confirms the feasibility of detecting Es with the AIS data. This mapping of the mid-points also allowed us to visualize the shape and motion of Es in 2D, where the cluster of reflection points elongated northeast, and sometimes showed a curved structure. Furthermore, by analyzing the temporal variations in the distribution of the reflection points, it was shown that Es was moving westward at approximately 84.2 ± 24.9 m/s, and northward at approximately 27.3 ± 8.2 m/s. During four months from May to August 2024, we identified 8 events excluding July 7, 2024. Analyses of these event demonstrated that monitoring of Es with AIS signal is possible in a wide area, covering the Korean Peninsula, the East China Sea near Kyushu and the Pacific Ocean near Hokkaido. We often detected Es around noon and in the evening. In addition, there were curved clusters of reflection points like those seen on July 7, 2024, but thin front-like ones were also observed. Furthermore, on June 5, 2024, Es that formed at different locations were observed simultaneously.

We also performed a statistical analysis using the commercial AIS data during four months from May to August 2024. The result showed a reasonable correlation between the occurrences of Es in the ionosonde data and long-distance propagation. In the presentation, we will discuss the relationship between the occurrence characteristics and the direction of motion of Es based on multiple cases.

スプラディック E (Sporadic E: Es) は、電離圏 E 領域高度 95-120 km に発生する電子密度が増大した薄い層である。Es は夏の昼間に主として中緯度帯において発生し、強い Es は VHF (Very High-frequency) 帯の電波を反射し異常長距離伝搬が発生させることが知られている。これまでの研究によって、航空航法用電波の長距離伝搬が報告されてきたが、最近 Chartier et al. (2022) によって、船舶識別装置 (Automatic Identification System: AIS) で用いられている 162 MHz 帯船舶無線においても、Es 反射による長距離伝搬が発生していることが示されている。しかし、この Chartier らによる研究は、政府機関による限られた受信点のデータを用いているため、商用 AIS 受信機網による多点データの有効性については検証されていない。よって、本研究では、東洋信号通信社が日本国内に 100 点以上配備している AIS 受信機網によって得られた商用多点 AIS データを用いて Es の動的特性の可視化が可能かについて検証を行う。特に、Es 空間分布や動きの 2 次元的なモニタリングに対するフィジビリティを確認する。

商用データによって長距離伝搬が観測され、イオノゾンデによって Es の発生が確認できた 2024 年 7 月 7 日の事例について解析を行ったところ、受信点と送信点の中間点が日本海上に集中して分布していることが確認されたため、AIS 信号を利用した Es 観測の有効性が明らかになった。また、中間反射点をプロットした動画から、Es の形状や移動の可視化が可能であることも確認することができた。この Es の事例では、中間反射点の集合が北東方向に伸び、湾曲した形状を示していた。さらに、北緯 37.0 度と東経 134.0 度の断面に沿った中間反射点の位置の時間変化を解析することによって、西方向に約 80.9 ± 19.1 m/s、北方向に約 26.7 ± 8.2 m/s の速度で Es が移動していたことも明らかになった。2024 年 5–8 月の解析期間において、2024 年 7 月 7 日のイベント以外にも 8 件の Es の事例が確認されたため、それぞれのイベントについて発生位置や形状、移動方向、発生継続時間について解析を行った。その結果、AIS 信号による Es 観測の観測範囲が朝鮮半島付近の日本海だけではなく、九州付近の東シナ海や、北海道付近の太平洋までの広範囲であることが分かった。また、Es は正午前と夕方に多く観測され、形状は 2024 年 7 月 7 日の事例で見られた湾曲した反射点の集合だけではなく、線状の分布も観測された。2024 年 6 月 5 日の事例では、東シナ海と日本海でそれぞれ発生していた Es を同時刻に観測した。

2024 年 5–8 月の期間に得られた商用データの統計解析も実施した。Es が発生していることを意味する foEs が 8 MHz 以上である回数と、1 日ごとの伝搬距離における受信回数の比較から、Es の発生と長距離伝搬に相関があることが確認された。発表では、観測された複数事例の発生時刻による移動方向について考察を行う予定である。

R005-20

A 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

11:50~12:05:00

超稠密 GNSS 受信機網を用いたスποラディック E 層の高時空間分解能解析 -空間スケールと移動特性の把握-

#田納 俊太¹⁾, 細川 敬祐²⁾, 大塚 雄一³⁾, 斎藤 享⁴⁾

(¹ 電気通信大学, (² 電気通信大学, (³ 名古屋大学, (⁴ 電子航法研究所

High spatio-temporal resolution analysis of Sporadic E layer using ultra dense GNSS receiver network

#Shunta TANO¹⁾, Keisuke HOSOKAWA²⁾, Yuichi OTSUKA³⁾, Susumu SAITO⁴⁾

(¹Univ. of Electro-Communications, (²Univ. of Electro-Communications, (³Nagoya Univ., Institute for Space-Earth Environmental Research, (⁴Electronic Navigation Research Institute

Sporadic E layer (EsL) is a phenomenon in which the electron density in the E region of the ionosphere at around an altitude of 100 km, increases suddenly and locally. When EsL occurs, VHF radio waves, which normally pass through the ionosphere, are reflected instead, leading to anomalous long-distance propagation. This can cause unintended interference between distant signals and desired signals from nearby sources. EsL has been observed using ionosondes and by monitoring anomalous long-distance propagation of VHF signals used for maritime and aeronautical navigation. In this study, we aim to visualize the morphology and dynamics of EsL by utilizing a GNSS receiver network to achieve a two-dimensional visualization. Although previous studies have also employed GNSS-based observations, the limited number of data points resulted in relatively low spatial resolution, making it difficult to accurately capture the structure and motion of EsL.

Considering this situation, this study visualized EsL using data from the ichimill GNSS receiver network, which is operated by SoftBank Corp. at more than 3,300 locations across Japan and GEONET, which is operated by Geospatial Information Authority of Japan. The receiver network combining these two is considered as the most dense GNSS receiver network in the world. Specifically, we analyzed an EsL event that occurred on July 4, 2022, by mapping the electron density disturbance index, known as the Rate of TEC Index (ROTI), derived from the total electron content (TEC) observed by the GNSS receiver network. The altitude of electron density disturbances was assumed to be 100 km in this analysis, enabling us to visualize the spatial structure of EsL. As a result, we not only revealed the spatial scale and velocity of EsL but also demonstrated that its movement can be tracked. In particular, the velocity of EsL, determined through both longitude cross-sectional analysis and direct 2D tracking, was found to be approximately 105 m/s in both cases, confirming consistency between the two approaches. Additionally, the area of the observed EsL patches peaked at 250 km² and had a spatial scale of about 15 km. As for the temporal change of the patches, it was found that the area of the patches was small immediately after their occurrence, but gradually increased, reached a peak and then decreased, which made it possible to trace the growth and disappearance of the EsL patches and measure their lifetime. The movement direction of EsL was found to change over time: initially, EsL drifted northward or northwestward, but just before its dissipation, its direction shifted toward the northeast. Furthermore, the movement characteristics of EsL, as visualized in this study, were found to be generally consistent with numerical simulations of metal ion accumulation based on neutral wind data from the GAIA model. These results demonstrate that an ultra-dense GNSS receiver network enables detailed visualization of both the morphology and movement characteristics of EsL.

In the presentation, we plan to present the temporal variations in spatial scale and velocity. Additionally, we will compare these findings with the results of simulations using the GAIA model.

The SoftBank's GNSS observation data used in this study was provided by SoftBank Corp. and ALES Corp. through the framework of the "Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science".

スποラディック E (Sporadic E: Es) 層は、電離圏 E 領域の高度 100 km 付近で突発的に電子密度が増大する現象である。EsL が発生すると、通常は電離圏を突き抜けていく VHF 帯の電波が電離圏で反射してしまうことにより異常長距離伝搬が発生し、意図しない遠方からの電波が近隣からの所望波と混信する可能性が指摘されている。EsL は、イオノゾンデや船舶や航空航法用 VHF 帯電波の長距離異常伝搬を用いて観測されてきたが、本研究では EsL の形状と運動を明らかにすることを目的として、GNSS 受信機網を用いた EsL の 2 次元的可視化を行う。これまでの研究でも GNSS を用いた観測は行われてきたが、データポイントの数が少なく空間解像度が相対的に低かったため、EsL の形状や運動を正確に把握することが困難であった。

このような状況を踏まえ、本研究では国土地理院が国内 1,300 以上の地点において運用している GEONET のデータに加えて、ソフトバンク株式会社が国内 3,300 以上の地点において運用している ichimill GNSS 受信機網のデータを用いて緯度経度 0.05° の分解能で EsL の水平二次元構造を可視化した。これらを組み合わせた GNSS 受信機網は世界でも最も稠密な受信機網と考えられる。解析では、2022 年 7 月 4 日に約 2 時間にわたり東北地方全域で発生した EsL 事例について、GNSS 受信機網による全電子数 (Total Electron Content: TEC) から導き出された電子密度擾乱指数 (Rate Of TEC Index: ROTI) を電子密度擾乱の発生高度を 100 km と仮定することによって地図上に投影し、EsL の空間構造の可視化を

試みた。その結果、EsL の空間スケールや速度を明らかにするだけでなく、EsL の動きのトラッキングが可能であることが明らかになった。具体的には、EsL の速度は経度断面解析の画像から求めた結果と、EsL の動きのトラッキングから求めた速度がどちらも約 105 m/s となり両者に整合性が見られた。また、観測されたパッチ状の EsL の塊の面積は 250 km^2 にピークがあり空間スケールとしては 15 km 程度であった。塊の時間変化については、発生した直後は面積が小さいが段々と大きくなりピークを迎えてその後小さくなっていることがわかり、これにより EsL の塊の成長・消滅を追跡できライフタイムも計測することができた。さらに、EsL パッチの移動方向は、EsL が発生した直後は真北や北西の方角であるのに対して、消滅する直前では移動方向が北東の方角に変化していることが明らかになった。本研究によって可視化された EsL の移動特性は、GAIA モデルの中性風を用いた金属イオンの集積に関する数値シミュレーション (Andoh et al, 2022) によって導き出された予測とおおよそ一致することもわかった。これらの結果から、超稠密 GNSS 受信機網を用いることで、EsL の空間スケールと移動特性の高時空間分解能解析を行えることが実証された。

発表では、空間スケールや速度の時間変化の結果を示し GAIA モデルを用いたシミュレーションの結果と比較する予定である。

本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点のデータの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社および ALES 株式会社より提供を受けたものを使用しました。

R005-21

A 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

12:05~12:20:00

#斎藤 享¹⁾, 細川 敬祐²⁾, 吉原 貴之¹⁾

(¹⁾ 電子航法研, (²⁾ 電気通信大学

Fine scale structures of the Es layer revealed by an ultra-dense GNSS network

#Susumu SAITO¹⁾, Keisuke HOSOKAWA²⁾, Takayuki YOSHIHARA¹⁾

(¹⁾Electronic Navigation Research Institute, MPAT, (²⁾University of Electro-Communications

The Sporadic E (Es) layer is an ionospheric layer which has very high density but is thin in altitude occurring in the E region. It has been well known that the Es layer is formed by the vertical shear of the neutral wind. However, the occurrence of the Es layer is still difficult to predict due to its "sporadic" nature.

Recent advancement in the numerical simulation of the Es layer with realistic background neutral wind fields helped understanding the characteristics of the Es layer occurrences. However, it is still insufficient for prediction of the Es layer occurrence, which is partly because the spatial resolution is limited. Therefore, observations of the Es layers are still important for monitoring the Es layer occurrences. It is also important to investigate the development of the Es layer with fine resolutions in space and time.

The global navigation satellite system (GNSS) receiver network is now widely used to monitor the Es layer. The rate of total electron content index (ROTI) is one of the effective quantities to detect the Es layer. We used the data obtained from the ultra-dense GNSS network operated by SoftBank. ROTI values derived from the GNSS data are mapped at an altitude of 100 km with 0.05x0.05 degrees in the latitude and longitude.

Around 04:00 GPST (approximately 13:00 in the local standard time), ROTI enhancements which are considered to represent the Es layer with fine and complex structures were observed around 38-45N and 138-142E. The Es layer changed its shape as it drifted northward at about 90 m/s. At 04:00 GPST, the Es layer had vortex-like structures with scale size of about 50 km. The Es layer also showed periodic structures with scale size of about 20 km. The Es layer changed its form into ripple-like structures, and then decayed away. The total duration of the event was about two hours. The spatial structures are similar to those obtained by numerical simulations of the Kelvin-Helmholtz instability, breaking of atmospheric gravity waves, and the Es layer formed as a result of these processes.

Thus, studying fine scale structures of the Es layer by dense GNSS networks is very useful to enhance our understandings of the mechanisms of the Es layer. Our future studies include the statistics of occurrences of different complex shapes, scale sizes of them, area of the Es layer, and its lifetime.

R005-22

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

13:45~14:00:00

令和3年8月の大雨により励起した大気重力波と中規模伝搬性電離圏擾乱

#木暮 優¹⁾, Song In-Sun¹⁾, Song Byeong-Gwon¹⁾, Liu Huixin²⁾, 西岡 未知³⁾, PERWITASARI Septi³⁾, Kam Hosik⁴⁾, Hong Hong⁴⁾

(¹ 延世大, (² 九州大学, (³ 情報通信研究機構, (⁴ 韓国天文研究院

MSTIDs Driven by Secondary Gravity Waves Associated with the Heavy Rainfall in August 2021 over Kyushu, Japan

#Masaru Kogure¹⁾, In-Sun Song¹⁾, Byeong-Gwon Song¹⁾, Huixin LIU²⁾, Michi NISHIOKA³⁾, Septi PERWITASARI³⁾, Hosik Kam⁴⁾, Hong Hong⁴⁾

(¹Yonsei University, (²Kyushu University, (³NICT, (⁴Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea

From August 11, 2021, humid air flowed into Kyushu, the western part of Japan's main islands, intensifying a stationary front and leading to record-breaking precipitation (JMA, 2021; https://www.data.jma.go.jp/tcc/data/news/press_20210924.pdf).

Around 17 UT on August 12, 2021, a satellite observation (AIRS) captured concentric stratospheric gravity waves (GWs) over the heavy rainfall. ~6 hours later, Japan and Korea's GNSS networks detected semi-concentric medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) propagating from Kyushu (~131° E, ~33° N) toward the northward to southeastward. According to the reanalysis (JAWARA), the mesosphere was the reflection layer for the GWs driving the MSTIDs.

Our simple backward raytracing analysis suggests that these GWs driving the MSTIDs possibly passed through the mesosphere in ~17 – 20 UT. During this period, our forward raytracing analysis suggests the stratospheric GWs observed by AIRS broke in the mesosphere over Kyushu, producing an eastward local body force.

To investigate the source of the stratospheric GWs, we conducted a convection – resolving high-resolution meteorological simulation below ~48 km altitude using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The simulation successfully reproduced GWs in the stratosphere similar to those observed by AIRS, which were emitted by deep convection within the heavy rainfall.

Therefore, we conclude that the MSTIDs were driven by the secondary GWs generated in the mesosphere. Their primary GWs were induced by the deep convection. AIRS likely captured those primary GWs.

On the other hand, the simulation did not show stratospheric GWs with a spectral signature matching the MSTIDs, suggesting that the convectively – generated primary GWs may not propagate or penetrate into the ionosphere in this event.

We will show those results and discuss the physical relationship between the heavy rainfall and MSTIDs.

2021 年 8 月 11 日から九州に湿った空気塊が南から流れ込み、停滞前線を刺激し、観測史上最大量の大雨となった (JMA, 2021: https://www.data.jma.go.jp/tcc/data/news/press_20210924.pdf).

12 日 17UT 頃、この大雨上空に円形のような波面を持つ成層圏大気重力波を衛星観測 (AIRS) が捉えていた。円の東部のみが明確に表れていたため、この成層圏重力波は主に東方向に伝播していたと考えられる。その約6時間後、日韓の GNSS ネットワークがほぼ円形の波面を持つ中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTIDs) を観測していた。この電離圏擾乱も、九州から四国・中部・関西地方へと東方向に伝播していた。

高度 110 km までカバーしている再解析データ JAWARA から、この電離圏擾乱を駆動した大気重力波にとって中間圏は反射層であり、波が対流圏・成層圏から伝播してきたわけではないことが示唆された。

後方レイトレーシングの結果から、電離圏擾乱を駆動した大気重力波は中間圏を 17 – 20 UT で通過すること、前方レイトレーシングから~17 UT に AIRS が捉えた成層圏重力波が中間圏で碎波もしくは飽和し、ほぼ真東向きの local body force を作り出すことがわかった。

成層圏重力波の波源を特定するために、積雲対流を陽に再現できる気象モデル (Weather Research and Forecasting: WRF) を用いて大雨期間中の対流圏・成層圏をシミュレーションした。結果、シミュレーションでも AIRS と良く似た成層圏重力波が 17 UT 頃に現れており、九州西部 (佐賀県や長崎県) 上空の大雨をもたらし強い対流が波源であることがわかった。この対流は東向きに進む位相を持つ成分が強いため、東向きに伝播する大気重力波が効率的励起したと考えられる。

以上の結果をまとめると、以下の4つのプロセスを経て電離圏擾乱は駆動されたと考えられる。

(1) 大雨に伴う強い対流が大気重力波 (1 次波) を励起

(2) 1 次波は中間圏で碎破し東向きの local body force を生成

(3) この local body force が準円形の波面を持つ 2 次波を励起

(4) 2 次波が電離圏まで到達したことで九州を中心とした東向きに進む伝搬性電離圏擾乱が駆動

本発表では、上記の結果を見せつつ、記録的な大雨と中規模伝搬性電離圏擾乱との物理的な関係を議論する。

R005-23

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

14:00~14:15:00

#FU WEIZHENG¹⁾, 大塚 雄一²⁾

(¹ 名大 宇宙地研, (² 名古屋大学

Midnight Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances in Japan: Preliminary Case Study Results

#WEIZHENG FU¹⁾, Yuichi OTSUKA²⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, (²Nagoya University

This study investigates the development of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs), with a particular focus on post-midnight events over Japan. Dense Global Navigation Satellite System (GNSS) total electron content (TEC) observations, complemented by ionosonde data and simulations from the Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy (GAIA), are used to analyze their temporal evolution and driving mechanisms. Detailed case studies reveals that while pre- and post-midnight MSTIDs share common features—such as a positive correlation with sporadic E (Es) layers, northwest – southeast (NW – SE) alignment, and southwestward propagation—they differ in amplitude and spatial scale. Numerical calculations based on GAIA outputs demonstrate that E – F coupling remains important for MSTID generation both before and after midnight. The relative contributions of the E and F regions vary across the midnight-to-post-midnight period due to the midnight variations in thermospheric winds. In addition, mutual interactions between the E and F regions are essential for MSTID development.

R005-24

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

14:15~14:30:00

中規模伝搬性電離圏擾乱の太陽活動度依存性の統計的研究: アメリカにおける GPS 観測

#内藤 翼¹⁾, 大塚 雄一¹⁾, 新堀 淳樹¹⁾, 西岡 未知²⁾, PERWITASARI Septi²⁾

⁽¹⁾ 名古屋大学, ⁽²⁾ (独) 情報通信研究機構

Statistical study of solar activity dependence of medium-scale traveling ionospheric disturbance : GPS observation in America

#Tsubasa Naito¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾, Atsuki SHINBORI¹⁾, Michi NISHIOKA²⁾, Septi PERWITASARI²⁾

⁽¹⁾Institute of for Space-Earth Environmental Research, ⁽²⁾National Institute of Information and Communications Technology

In order to elucidate Solar activity dependence of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance (MSTIDs) in America, we analyzed Total Electron Content (TEC) data obtained from GPS receiver network in America during 19 years from 2000 to 2019. We have calculated the detrended TEC by subtracting the 1-h running average from the original TEC data for each satellite and receiver pair and made two-dimensional maps of the detrended TEC with a spatial resolution within a range of 0.25 latitude and 0.25 longitude. We have investigated MSTID activity, defined as dI/I , where dI is a standard deviation of the detrended TEC within an area of 7.00 latitude and 7.00 longitude, and I is the average vertical TEC in the same area. We have calculated auto-correlation function of the detrended TEC from each 2-h time series of the detrended TEC to estimate the horizontal propagation velocity and direction of MSTIDs.

We investigated seasonal variation of MSTID activity, occurrence rate, and propagation direction and velocity of MSTID from 2000 to 2019 in two locations, Southwestern America, and Southeastern America. In Southwestern America, MSTID activity during nighttime shows high between winter and spring in nighttime. On the other hand, in Southeastern America, MSTID activity during nighttime has two peaks: during summer and during winter. This result is similar to the results shown by Kotake et al.(2006). In both regions, MSTID occurrence rate has a peak in summer during daytime, and has two peaks: during summer and during winter. This is similar to MSTID occurrence in Japan shown by Otsuka et al. (2021). MSTID at both locations propagate southward during daytime in winter and southwestward during nighttime in summer. The propagation velocity of MSTID is found to be 125 m/s to 150 m/s during the daytime in winter and around 75 m/s to 100 m/s during the nighttime in summer at both locations.

We investigated solar activity dependence of MSTID propagation direction during daytime from 2000 to 2019 at both locations. In both regions, MSTID propagates southward, and solar activity dependence of propagation direction is not discernible. In addition, we investigated the propagation velocity distribution of MSTID from 2000 to 2019. In both regions, the proportion of MSTID with velocities of 0 – 100 m/s is higher during periods of high solar activity than during periods of low solar activity, while the proportion of MSTID with velocities of 100 – 200 m/s is lower. This result is similar to Japan shown by Otsuka et al. (2021), and can be explained by the following. When solar activity is lower, the atmosphere density is lower, and the viscosity of the neutral atmosphere is higher. Consequently, gravity waves with shorter vertical wavelengths are more likely to dissipate, leading to a lack of MSTIDs with low propagation velocities during low solar activity period.

本研究では中規模伝搬性電離圏擾乱の太陽活動度依存性を調べるため、2000 年から 2019 年における、アメリカ南西部 (28° N~35° N, 110° W~117° W) とアメリカの南東部 (28° N~35° N, 83° W~90° W) の 2 地点の全地球測位システム (GPS) から算出した全電子数 (TEC) データを解析した。各衛星-受信機間で得られた TEC の時系列から、1 時間の移動平均からの偏差を算出し、MSTID による TEC 変動とした。本研究では、TEC データから MSTID 活動度という指標を上記の緯度 7 度経度 7 度の範囲で 1 時間に観測された TEC 変動の標準偏差 (δI) を、 I は δI と同じ範囲、同じ時間帯に観測された背景 TEC(I) を用いて $\delta I/I$ と定義し算出している。また、TEC データの 2 時間の時系列から、Otsuka et al.(EPS,2021) の方法を用い、TEC の自己相関関数 (ACF) を計算することで、MSTID の伝搬速度及び伝搬方向を算出している。

2000 年から 2019 年までの MSTID 活動度、MSTID の発生率、MSTID の伝搬方向、伝搬速度の 4 つの季節変化を調べた。MSTID 活動度について、夜間は、西側は冬から春にかけて極大を迎える一方、東側は夏と冬に極大を迎えていた。これは Kotake et al.(2006) の結果と類似している。MSTID の発生率について、各観測地点で昼間は冬に極大を迎え、夜間は夏と冬に極大が見られた。このことは Otsuka et al.(2021) で示された日本における MSTID 発生率の傾向と同様であった。MSTID の伝搬方向について、2 地点とも冬の昼間はほぼ南方向であり、夏の夜間は南西方向であることが分かった。MSTID の伝搬速度については、2 地点ともに冬の昼間は 125 m/s ~ 150 m/s、夏の夜間は 75 m/s ~ 100 m/s であることが分かった。

冬の昼間の MSTID について、2000 年から 2019 年までの MSTID の伝搬方向の年々変化を調べた。2 つの地点でやや西よりの南方向に伝搬しており太陽活動度に対する顕著な違いは見られなかった。また、2000 年から 2019 年までの MSTID の伝搬速度分布を調べた。2 地点ともに低太陽活動期に比べて高太陽活動期のほうが全体に占める 0 m/s ~ 100 m/s の速度の MSTID 割合が高く、100 m/s ~ 200 m/s の速度の MSTID の割合が低かった。この結果は Otsuka et al.(2021) で見られた日本での傾向と類似しており、太陽活動度が低いと中性大気の密度が小さくなることで粘性が高くなるため、鉛直波長の短い大気重力波が消散しやすくなり、低太陽活動期では、伝搬速度が小さい MSTID が観測されないためと考えられる。

R005-25

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

14:30~14:45:00

S-520-32 号機観測ロケットで観測された電場が MSTID に与える影響

#松山 実由規¹⁾, 石坂 圭吾²⁾, 芦原 佑樹³⁾, 斎藤 享⁴⁾, 山本 衛⁵⁾, 白澤 秀剛⁶⁾, 阿部 琢美⁷⁾

(¹⁾ 富山県立大学, (²⁾ 富山県立大学, (³⁾ 奈良工業高等専門学校, (⁴⁾ 海上・港湾・航空技術研究所, (⁵⁾ 京都大学, (⁶⁾ 東海大学, (⁷⁾ 宇宙航空研究開発機構

Effect of electric field observed by S-520-32 sounding rocket on MSTID

#Miyuki Matsuyama¹⁾, Keigo ISHISAKA²⁾, Yuki ASHIHARA³⁾, Susumu SAITO⁴⁾, Mamoru YAMAMOTO⁵⁾, Hidetaka SHIRASAWA⁶⁾, Takumi ABE⁷⁾

(¹⁾ Toyama Prefectural University, (²⁾ Toyama Prefectural University, (³⁾ National Institute of Technology, Nara College, (⁴⁾ MPAT, (⁵⁾ Kyoto University, (⁶⁾ Tokai University, (⁷⁾ JAXA

The nighttime MSTID is a plasma instability occurring in the mid-latitude F region of the ionosphere in summer. The MSTID exhibits wavefronts aligned northwest-southeast and propagate southwestward. Numerical simulations suggest that a key factor in the MSTID generation is the coupling between the E and F regions of the ionosphere. Electric fields generated in the Es layer can map along magnetic field lines to the F region, modulating plasma density and further enhancing the MSTID structures. However, there are few examples of in-situ observations of the MSTID, thus the generation mechanism remains unclear. The S-520-32 sounding rocket was launched from the JAXA Uchinoura Space Center at 23:20 JST on August 11, 2022 to elucidate the MSTID generation mechanism. The influence of electric fields on MSTID generation is investigated through in-situ rocket observation.

The S-520-32 sounding rocket was equipped with the rocket GNSS-TEC and the Electric Field Detector (EFD). The rocket GNSS-TEC observed TEC from the rocket to the satellites using GNSS receivers mounted on the rocket. The results of ground-based GNSS-TEC and rocket GNSS-TEC observations showed the same trend in positive and negative TEC areas. Furthermore, the rocket GNSS-TEC observations revealed three peaks in the results received from a single satellite, and the detailed electron density structure was observed. In addition, the EFD observed two orthogonal electric field components perpendicular to the rocket axis using electrodes at the tips of two pairs of booms. The electric fields occurred alternately in the northeast and southwest directions. The rocket GNSS-TEC and electric field were projected at an altitude of 350 km to compare the TEC and the electric field. The results showed that the electric field occurs in the northeast/southwest direction in the positive/negative areas of the TEC. This revealed a correlation between the TEC and the electric field.

This presentation shows a comparison of the rocket GNSS-TEC and the electric field and demonstrates the influence of this electric field on the electron density structure.

夜間 MSTID は中緯度電離圏 F 領域で発生するプラズマ不安定現象であり、北西-南東方向の電子密度の波状構造が南西方向に伝搬する。シミュレーションによると、Es 層で発生した電場が磁力線に沿って F 領域にも影響を与える E-F 領域カップリング現象が原因で MSTID が成長するといわれている。しかし、MSTID を直接観測した例は少なく、生成機構は明らかとなっていない。S-520-32 号機観測ロケットは夜間 MSTID の生成機構解明のために 2022 年 8 月 11 日 23:20 (JST) に日本の鹿児島より打ち上げられた。観測ロケットによる直接観測を通じて、電場が MSTID の生成に及ぼす影響を明らかにする。

S-520-32 号機観測ロケットには、ロケット GNSS-TEC 観測装置と電場観測装置 (EFD) が搭載された。ロケット GNSS-TEC はロケットに GNSS 受信機を搭載することでロケットから衛星までの TEC 観測を行った。地上観測による GNSS-TEC とロケット GNSS-TEC の観測結果は正/負の TEC の領域が同じ傾向を示していた。また、ロケット GNSS-TEC の観測結果によると、一つの衛星で受信した結果の中に 3 つのピークがあり、細かい電子密度構造が観測された。また、EFD は 2 対のブームの先端にある電極により、ロケット機軸に垂直な直交 2 成分の電場を観測した。EFD で観測された自然電場は北東、南西方向に周期的に発生していた。ロケット GNSS-TEC および電場をともに高度 350 km に投影し、TEC と電場を比較した。その結果、TEC が正 (負) の領域では電場は北東 (南西) 方向であり、F 領域の TEC と電場に相関があることが明らかとなった。

本発表では、ロケット GNSS-TEC と電場を比較し、この電場の電子密度構造への影響を示す。

R005-26

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

14:45~15:00:00

#Topacio XzannGarryVincentMiranda¹⁾, 吉川 顕正¹⁾

(¹ 九大)

The Meridional Currents of the EEJ and Their Relation to the Main Eastward Current Analyzed Using Principal Component Analysis

#Xzann Garry Vincent Miranda Topacio¹⁾, Akimasa Yoshikawa¹⁾

(¹Kyushu University)

The equatorial electrojet (EEJ) is a prominent eastward geomagnetic current flowing at the magnetic dip equator, primarily recognized through its significant influence on the H (northward) magnetic component as observed from the ground. Besides its main eastward flow, the EEJ encompasses meridional currents flowing perpendicular to the main current, whose effect on the main eastward current remain less understood. This study aims to investigate the effects of the meridional currents of the EEJ on the main EEJ itself by employing principal component analysis (PCA) on ground magnetic data taken from several ground magnetic stations near the dip equator, focusing on isolating these effects from other concurrent geomagnetic influences. Simulation data from GAIA was also analyzed to support the ground data analysis.

The analysis revealed that the second principal component was preliminarily associated with the meridional currents and the intensification of the EEJ, as well as the global Sq currents. This implies that the meridional currents might be related to the intensification and decay of the EEJ. The longitudinal variation of the second principal component further supports this identification. PCA analysis of the model data also revealed the presence of a current system similar to the proposed meridional current structure.

These findings demonstrate the potential of PCA in distinguishing EEJ-related magnetic signatures from other geomagnetic phenomena in ground-based observation data, offering insights into the three-dimensional structure of the EEJ. Future efforts will aim at validating these results through methodological refinement and comparative analyses with satellite data and other resources.

R005-27

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

15:00~15:15:00

#滝 朋恵¹⁾, Sergienko Tima¹⁾, Brändström Urban¹⁾

(¹IRF)

Electric fields in and around auroral arcs at higher F region using BROR experiment data

#Tomoe Taki¹⁾, Tima Sergienko¹⁾, Urban Brändström¹⁾

(¹Swedish Institute of Space Physics (IRF))

In March 2023, the Barium Radio and Optical Rocket (BROR) experiment was conducted at the Esrange rocket range near Kiruna, Sweden. The payload included eight canisters containing Ba-Sr-thermite mixtures, released at altitudes between 130 and 250 km. This BROR experiment carried out simultaneous ground-based optical and radar observations.

ALIS_4D multistation auroral imager system operated by the Swedish Institute of Space Physics (IRF) was a crucial optical facility that supported the BROR experiment. During the experiment, the five ALIS_4D stations operated at Kiruna, Abisko, Silkkimuotka, Tjautjas, and Esrange. The multi-point optical observations allow the 3D tomography reconstruction of the artificial ion clouds. Additional observations included NIPR cameras, IRF all-sky cameras, and photos and movies provided by many semi-professional photographers. Simultaneous EISCAT UHF radar observations were also performed.

In the auroral ionosphere, the ion motion is determined primarily by the electric field. Therefore, the barium ion dynamics obtained from the tomography reconstruction allowed us to determine the ionospheric electric field.

During the BROR experiment, natural aurora was also present, and the motion of the barium ion clouds crossing the aurora was observed. The analysis of these data allows us to derive the electric field dynamics in the vicinity of the active auroral arc.

In this presentation, we report electric fields inside and outside of the auroral arc calculated at the F-region altitudes of approximately 230 km using data from the BROR experiment.

R005-28

A 会場 : 11/27 PM1 (13:45-15:45)

15:15~15:30:00

#木之下 隆弘¹⁾, 田口 聡¹⁾, 小池 春人¹⁾

(¹ 京大理)

Mesoscale plasma flow in the near-noon high-latitude ionosphere: Scale-dependent features

#Takahiro Kinoshita¹⁾, Satoshi Taguchi¹⁾, Haruto Koike¹⁾

(¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University)

High-latitude plasma convection is known to reflect different controlling processes depending on the spatial scale. On large scales, typically several hundred kilometers or more, the convection pattern is mainly determined by solar wind and magnetospheric conditions. At the other extreme, small-scale variations below about 10 km are attributed to Alfvén waves propagating along magnetic field lines. The focus of this study is on the intermediate, mesoscale range of 20 – 200 km, where the controlling mechanisms are less well understood. In particular, we aim to identify whether near-noon mesoscale convection exhibits unique properties that are not simply a consequence of large-scale drivers or small-scale Alfvénic fluctuations. To investigate this, we used ion drift data from the Swarm A and Swarm B satellites spanning more than 10 years (December 2013 – March 2025). We selected intervals when the two satellites passed through nearly the same MLT-MLAT region near noon with time differences of 40 – 180 s. By systematically comparing the paired observations, we examined how plasma flow characteristics depend on spatial scale and assess their temporal persistence. These results are expected to contribute to a better understanding of mesoscale plasma convection and its role in the high-latitude ionospheric dynamics.

ハレアカラ T60 望遠鏡のファイバー面分光器を用いた水星 Na 外圏大気の時空間変動の観測

#高鳥 尚子¹⁾, 鍵谷 将人¹⁾, 笠羽 康正¹⁾

(¹ 東北大学)

Observation of spatio-temporal variations in Mercury's sodium exosphere using the Haleakala T60 telescope

#Naoko TAKATORI¹⁾, Masato KAGITANI¹⁾, Yasumasa KASABA¹⁾

(¹Tohoku University)

Mercury possesses an extremely tenuous exosphere that contains alkali metals. In particular, the resonance scattering emissions of neutral sodium (Na) D-lines (589.0 nm, 589.6 nm) are bright enough to be observed even with ground-based small- and medium-sized telescopes. Compared with Earth, Mercury's smaller magnetosphere is estimated to vary on the order of several minutes under the influence of the solar wind, and its neutral exosphere is also expected to vary on similar timescales. Previous ground-based observations have occasionally revealed a double-peak (DP) emission structure in the Na exosphere, with intensity maxima near both poles. The north – south intensity ratio of these peaks has been observed to vary on timescales of about one hour and about ten minutes. These timescales are consistent with the scenario in which one of the Na sources is ion sputtering induced by the magnetosphere.

Ground-based observations have conventionally been performed using slit spectroscopy to capture temporal and spatial variations. However, obtaining two-dimensional spatial distributions with this technique requires slit scanning, which takes about one hour to map the entire Mercury disk. Minute-scale variations previously detected were obtained from fixed-slit narrow field-of-view observations. Thus, a new method is required to investigate global-scale variations.

We have been developing a fiber-fed integral-field spectrograph combined with an adaptive optics (AO) system on the 60 cm telescope (T60) at Tohoku University to capture global spatial distributions of Mercury's Na exosphere with a temporal resolution of several minutes. After the BepiColombo spacecraft enters Mercury orbit in late 2026, our ground-based observations will support exospheric remote sensing by the sodium emission camera MSASI onboard the Mio spacecraft, in coordination with in-situ measurements of the solar wind and magnetosphere.

T60 is located at the summit of Haleakalā, Maui, Hawai'i (3,040 m a.s.l.), and is capable of continuous remote operation. The fiber-fed spectrograph consists of a fiber image slicer and a high-dispersion visible spectrograph (spectral resolving power: 67,000). The fiber image slicer provides a field of view (FOV) of 1.5" × 1.5" per fiber, with 120 fibers arranged in a 10 × 12 grid, covering a total FOV of 15" × 18". With an integration time of one minute, Mercury's Na exosphere can be observed with a signal-to-noise ratio (SNR) of ~15. By coupling this system with AO, we compensate for strong daytime seeing. In spring 2025, we achieved a spatial resolution of ~1" (FWHM) in morning observations.

In our ongoing remote observations, one frame corresponds to one minute, consisting of disk observations (Disk, centered on Mercury) and background sky observations (Sky). A single observation cycle comprises 24 Disk frames (1 min × 24), 1 Sky frame (1 min), and 4 white-light frames (30 s × 4), completed in about 30 minutes. This enables monitoring of Na variations with one-minute temporal resolution. Under favorable weather conditions, observations can be performed for about six hours per day (excluding the meridian), allowing up to 12 cycles (~288 Disk frames) per day.

In spectral data, we subtract the Sky from the Disk and separate the Mercury surface reflection spectrum (continuum) and Na exospheric emissions (Na D1, D2 lines) to derive their spatial distributions. For the continuum, we compare the data with a Mercury reflectance model (Hapke model) using least-squares fitting to estimate the Mercury disk position and evaluate AO-corrected seeing.

When integrating Na D1 and D2 emission lines, a reliable evaluation of the Mercury surface reflected spectrum, including solar Fraunhofer absorption (Na D1, D2 absorption lines), is essential. The most reproducible method is to estimate this spectrum from the scattered sunlight spectrum (Sky), and we are refining this approach. Applying this method to the observation on May 7, 2025, we successfully constructed a "data pipeline for Na emission retrieval" that separates and integrates Mercury's Na emission lines properly. We will apply this analysis to accumulated datasets to test its feasibility.

In future work, we will evaluate the temporal variations of Na emission spatial distributions and compare them with previous studies (Massetti et al., 2017). We aim to verify whether ~10-minute scale spatiotemporal variations in the north – south intensity ratio can also be observed, and to establish a practical scheme for Mercury Na exosphere observations and analysis.

水星はアルカリ金属を含む非常に希薄な外圏大気を有している。特に中性 Na の D 線 (589.0nm, 589.6nm) による共鳴散乱発光は明るく、地上の中小口径望遠鏡でも観測可能である。地球と比較して小さい水星磁気圏は、太陽風の影響により数分のオーダーで変動していると推定され、中性の外圏大気も同様の時間スケールで変動すると予想される。これまでの地上観測では、水星 Na 外圏大気に南北の両極にピークを示すダブルピーク (DP) 発光が見られることがあり、その南北輝度比は 1 時間程度のスケールと 10 分程度のスケールで変化する。この時間スケールは、Na 生成要因の 1 つが

磁気圏由来のイオンスパッタリングによるとする場合のそれと一致しうる。

従来の地上望遠鏡観測では、スリット分光によって空間・時間変動が捉えられてきた。この手法で2次元空間分布を捉えるにはスリットスキャンが必要で、水星全球の分光撮像観測には約1時間を要する。従来観測で検出されてきた数分オーダーの変動はスリット位置を固定した狭視野観測で得られたもので、全球分布の変動観測には新たな手段が必要となる。

私たちは、東北大学 60cm 望遠鏡 (T60) にファイバー面分光器と補償光学 (Adaptive Optics) システムを結合させ、水星 Na 外圏大気の全球空間分布の変動を数分スケールで捉えることを目指した開発を進めてきた。2026 年末の BepiColombo 探査機の水星周回軌道投入後には、Mio 探査機に搭載された Na 発光観測カメラ MSASI による外圏大気リモート観測を支援、同探査機による太陽風・磁気圏 in-situ 観測と協調した観測を行う予定である。

T60 はハワイ・マウイ島ハレアカラ山頂 (海拔 3,040m) に位置し、遠隔操作で継続的観測が可能である。この望遠鏡に装着したファイバー面分光器は、ファイバー視野集積器と結合した可視高分散分光器 (波長分解能: 67,000) からなる。ファイバー視野集積器は 1 ファイバーあたり $1.5'' \times 1.5''$ の視野を持ち、120 本のファイバーを 2 次元 (10×12) に配列して $15'' \times 18''$ の視野を面分光する。1 分の積分で水星の Na 外圏大気を信号雑音比 (SNR) 15 程度で観測することが可能である。本装置に AO システムを結合させ、昼間の荒れたシーイングを補正している。2025 年春には朝方の観測で FWHM $1''$ 程度の空間分解能を達成した。

現在遂行中の一連の遠隔観測では、視野中心に水星を捉える観測 (Disk) と周辺背景光を捉える観測 (Sky)、それぞれ 1 分を 1 フレームとしている。観測の 1 サイクルは、Disk: 24 フレーム (1 分 $\times$ 24) $\rightarrow$ Sky: 1 フレーム (1 分) $\rightarrow$ 白色光: 4 フレーム (30 秒 $\times$ 4) で構成されており、約 30 分で完成する。これにより 1 分の時間分解能で水星 Na の変動が観測可能である。天候が適せば南中を除き昼間で累計 6 時間程度の観測が可能で、1 日に最大 12 サイクル (24 $\times$ 12 フレーム) 程度の水星観測が可能となる。

これらの分光データでは、Disk から Sky を除去した上で、水星表面の反射スペクトル (連続光) と水星外圏大気の Na 発光 (NaD1, D2 輝線) を分離し、それぞれの面分布を導出する。連続光データに対しては、水星反射光モデル (Hapke モデル) と最小二乗法を用いて比較することで、観測時の水星ディスク位置と AO 補正後のシーイング評価を行う。

NaD1, D2 輝線の発光の積分の際には、太陽フラウンホーファー吸収 (Na D1, D2 吸収線) を含む水星表面反射光のスペクトルの確実な評価が必要となる。これには、地球大気の散乱光スペクトル (Sky) から見積もる方法が最も再現性があり、手段の模索を進めている。今回、2025 年 5 月 7 日の観測データに対してこの方法を適用し、水星 Na 輝線を分離し適切に積分を行える「Na 発光導出のデータパイプライン」構築に成功した。これまで蓄積されてきた観測データにこの解析処理を適用し、実用可能か検討を進めていく。

今後は、Na 発光面分布の時系列変動を評価し、先行研究 (Masseti et al., 2017) との比較を行う予定である。先行研究と同様に南北輝度比に 10 分スケール程度の時空間変動が見られるかを検証し、水星観測・解析スキームの実用化を進めていく。

#津田 卓雄¹⁾, 青木 猛¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 芳原 容英¹⁾, 西山 尚典²⁾, 小川 泰信²⁾, 田中 良昌²⁾, 川端 哲也³⁾, 野澤 悟徳³⁾, 大山 伸一郎³⁾, 村瀬 清華⁴⁾

(¹⁾ 電気通信大学, (²⁾ 国立極地研究所, (³⁾ 名古屋大学, (⁴⁾ 北見工業大学

Operations of single-board computer-based all-sky digital camera systems at multiple sites

#Takuo TSUDA¹⁾, Takeshi AOKI¹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁾, Yasuhide HOBARA¹⁾, Takanori NISHIYAMA²⁾, Yasunobu OGAWA²⁾, Yoshimasa TANAKA²⁾, Tetsuya KAWABATA³⁾, Satonori NOZAWA³⁾, Shin-ichiro OYAMA³⁾, Kiyoka MURASE⁴⁾

(¹⁾University of Electro-Communications, (²National Institute of Polar Research, (³Nagoya University, (⁴Kitami Institute of Technology

We have developed a single-board computer-based all-sky digital camera system, which is a simple, compact, lightweight, and low-cost camera system. The developed camera system is not high-end, but it is still convenient for quick monitoring of weather and aurora conditions. Thus, all-sky observations by the developed camera system would be useful for supporting other observations, which need information on weather and/or aurora conditions. To date, we have produced seven camera systems in total. Among them, four camera systems have been installed to support the atmospheric electric field observations in Chofu (35.7N, 139.5E), Sugadaira (36.5N, 138.3E), Iwaki (37.1N, 140.9E), and Kakioka (36.2N, 140.2E). The other three camera systems have been installed for aurora observations in Longyearbyen (78.1N, 16.0E), Tromsø (69.6N, 19.2E), and Abisko (68.4N, 18.8E). In the presentation, we will introduce the developed camera systems. Then, their current status and next plans will be discussed.

キルナにおける夜光雲スペクトルの地上観測

#増田 歩音¹⁾, 遠藤 哲歩¹⁾, Dalin Peter²⁾, 津田 卓雄³⁾, 鈴木 秀彦¹⁾

(¹⁾ 明治大学, (²) Swedish Institute of Space physics, (³) 電気通信大学

A ground-based observation of spectra of noctilucent clouds in Kiruna

#Ayune Masuda¹⁾, Akiho ENDO¹⁾, Peter Dalin²⁾, Takuo TSUDA³⁾, Hidehiko SUZUKI¹⁾

(¹) Meiji University, (²) Swedish Institute of Space physics, (³) University of Electro-Communications

Noctilucent clouds (NLCs) are ice clouds that appear mainly in subpolar regions (between 50 and 60 degrees latitude) during the summer in both hemispheres. NLCs typically appear at altitudes between 80 and 90 km. These clouds provide valuable information on the mesopause region and are considered to be important indicators of this region. Imaging is a most common method for observing NLCs, as even ordinary digital cameras can easily capture their wave detailed features. Spectroscopic observation is also an effective method for studying NLCs because it provides information about the ice cloud's physical properties (e.g., particle size distribution and shape). Recent progress in developing sensitive, low-cost sensors allows us to easily implement spectroscopic observations of NLCs, as well as imaging methods. We have developed a compact spectrometer consisting of imaging lenses, a diffraction grating, a slit, and a CMOS sensor. Additionally, a color camera is installed outside the spectrometer to control its field of view (f.o.v.). The spectrometer registered its first light between August 15 and 22, 2024, in Kiruna, Sweden (67.86° N, 20.42° E). Fortunately, we successfully observed NLCs with the spectrometer during the test observation on the night of August 19-20. However, it was difficult to separate a pure NLC signal from the background sky signal (Masuda et al., 2024). The radiance of the background sky signal varies dynamically in both time and space during twilight. Thus, in general it was difficult to estimate the background signals from "NLC + sky" spectra. To overcome this problem, we narrowed the spectrometer's field of view from 67 degrees to 20 degrees. This improved the spectrometer's spatial resolution and made it possible to resolve fine NLC structures, such as ripples. The ripple structure is a wavy pattern in the clouds, which makes it possible to estimate the background signal in neighboring gap areas within the same image. The improved spectrometer has been operational since August 6, 2025, and has already succeeded in detecting ripple structures on the night of August 20-21, 2025. This presentation will report early results of the initial analysis of the NLC spectrum data. In particular, we will discuss the history of particle size during the event using the color ratio of the NLC spectrum taken under various scattering angles.

夜光雲 (NLC) は、両半球の夏季の極域 (緯度 50-60 度) に発生する氷の雲である。NLC の典型的な発生高度は 80-90 km であり、中間圏界面領域のダイナミクスを可視化する貴重な現象として知られている。夜光雲は短時間の露光時間でも微細構造を容易にとらえることができるため、そのイメージング観測は同領域の乱流の研究にとって強力な武器となる。分光観測もまた、氷の雲の物理的特性 (平均粒子サイズや粒径分布など) を推定できる有効な観測手段である。近年、低コストかつ高感度なイメージングセンサーの登場によって、NLC の分光観測を容易に導入することが可能になった。そこで我々は、夜光雲を観測するためにレンズ、透過型回折格子、スリット、CMOS センサーから構成される小型イメージング分光計を開発した。観測時には視野確認用のカラーカメラ (F.O.V カメラ) も併置し、事前校正により分光器のスリットに対応する視野領域が、視野確認用カメラの画角のどの領域を見ているかを対応付けしてある。2024 年には 8 月 15 日から 22 日までの期間、スウェーデンのキルナにおいて本分光器を用いた夜光雲の分光観測を行う機会を得た。この期間中の 8 月 20 日の晩には夜光雲の分光観測に成功したものの、解析によって背景光と夜光雲の信号が含まれるデータから、夜光雲の信号のみを抽出することが困難であることが判明した (Masuda et al., 2024)。これは夜光雲が観測される薄明時間においては、背景光の強度が空間的にも時間的にも大きく変動するため、空間的に広がりを持つ夜光雲の分光データを得たとしても、そこから背景光の信号を推定することが難しいためである。そこで、分光器の前面レンズを交換し、スリットに沿った視野角を 67 度から 20 度に狭め、空間分解能を高める修正を行った。夜光雲にはリップル構造と呼ばれる微細構造がしばしば観測されるが、空間分解能を高めることでこの構造を空間的に分解して観測することが可能となる。リップル構造は、雲の部分と隙間の部分が近接して観測されるため、雲の部分の背景光信号を近傍の隙間部分の信号から推定することが可能になる。この改良型分光計を 2025 年 8 月 6 日から再びキルナにて設置運用し分光観測を行っている。同年の 8 月 25 日の晩には、複数のリップル構造の分光観測に成功している。本発表では、2025 年に改良型の分光器で得られた NLC の分光データの初期解析結果を報告する。特に、様々な散乱角で得られた NLC スペクトルの Color Ratio を用いて、イベント中の粒子サイズの変化について考察する。

北海道における夜光雲出現頻度の朝夕非対称性のメカニズム

#遠藤 哲歩¹⁾, 富川 喜弘²⁾, Dalin Peter³⁾, 坂野井 和代⁴⁾, 岩本 勉之⁵⁾, 西谷 望⁶⁾, 津田 卓雄⁷⁾, 中村 優里子¹⁾, 面 征宏¹⁾, 鈴木 秀彦¹⁾

(¹ 明治大学, (² 国立極地研究所, (³ Swedish Institute of Space physics, (⁴ 駒澤大学, (⁵ 紋別市役所, (⁶ 名古屋大学, (⁷ 電気通信大学

A strong local-time dependency on the occurrence of noctilucent clouds over Hokkaido, Japan.

#Akiho ENDO¹⁾, Yoshihiro TOMIKAWA²⁾, Peter DALIN³⁾, Kazuyo SAKANOI⁴⁾, Katsushi IWAMOTO⁵⁾, Nozomu NISHITANI⁶⁾, Takuo TSUDA⁷⁾, Yuriko NAKAMURA¹⁾, Masahiro OMOTE¹⁾, Hidehiko SUZUKI¹⁾

(¹ Meiji University, (² National Institute of Polar Research, (³ Swedish Institute of Space physics, (⁴ Komazawa University, (⁵ Monbetsu city, (⁶ Nagoya University, (⁷ University of Electro-Communications

Noctilucent clouds (NLCs) are the highest clouds in the Earth's atmosphere, occurring at altitudes of about 82 – 85 km, and are typically observed in high-latitude regions (50 – 60° in latitude) during summer. Observations of NLCs is the effective method to monitor the atmospheric dynamics in the mesopause region with high spatial and temporal resolution. In recent years, a latitudinal expansion of NLC occurrences toward lower latitudes has been reported. In particular, a number of NLC cases at midlatitudes (below 50°) is increasing. For example, 36 events were reported in North America between 2003 and 2011 (Russell III et al., 2014). In Europe, more than five events per year were recorded from 2005 to 2021, with as many as 22 cases in 2009 (Dalin et al., 2023). In Asia, NLCs were first observed in Hokkaido, Japan (42° N), in 2015 (Suzuki et al., 2016), and later in Beijing, China (40° N) in 2020 (Jiaxuan et al., 2022). In Japan, the NLC imaging network has been updated since the first NLC detection in Hokkaido in 2015. Four more events were observed in 2020, one in 2021, and four in 2025, giving a total of ten NLC cases at present. Except for one case, all events occurred in the early morning hours (2:00 – 3:00 LT). Although the occurrence of NLCs is theoretically possible after sunset as well as before sunrise, the actual observations show a strong local time dependence on the occurrence. A similar local time dependence of NLC occurrence has also been reported by lidar observations in the European polar mesopause region (69° N, 16° E) (Fiedler et al., 2011).

To investigate the causes of this local time dependence of NLC over Hokkaido, we compared multiple ground-based NLC events with temperature and water vapor fields obtained from AURA/MLS satellite data. The analysis revealed a persistent local-time-fixed variation pattern in the temperature field, with relatively high temperatures after sunset and low temperatures at dawn. This pattern is consistent with the fact that most NLCs in Japan occur in the early morning. A likely explanation is the influence of solar atmospheric tides. To examine this assumption, we investigated meteorological fields in the upper mesosphere around North Japan using the JAGUAR-DAS Whole neutral Atmosphere Reanalysis (JAWARA) data, which includes assimilation up to lower thermosphere ($z = 150$ km). The results suggest that modulations caused by tidal waves are responsible for the strong local-time dependence of NLC occurrence in Japan.

夜光雲 (Noctilucent Clouds: NLCs) は、地球上の雲の中で最も高高度 (約 82 – 85 km) に形成される雲であり、高緯度地域 (緯度 50 – 60 度) の夏季に観測される。夜光雲のイメージ観測は、中間圏界面領域の大気状態を高い時空間分解能で把握する手段として有効である。近年、夜光雲の出現範囲が低緯度側へ拡大している傾向が報告されており、中緯度 (緯度 50 度以下) における観測例も増加している。たとえば北米では 2003 年から 2011 年の間に 36 例の観測が報告されている (Russell III et al., 2014)。ヨーロッパでは 2005 年から 2021 年まで毎年 5 例以上が観測され、2009 年には最大で 22 例が記録された (Peter et al., 2023)。アジア域でも観測例があり、2015 年には日本・北海道 (42° N) で夜光雲が初めて観測された (Suzuki et al., 2016)。また 2020 年には中国・北京 (40° N) において観測例が報告されている (Jiaxuan et al., 2022)。

日本での夜光雲観測は 2015 年の北海道での初観測を契機に観測体制が強化され 2020 年には 4 例、2021 年には 1 例、さらに 2025 年には 4 例の追加検出に成功している。これらの観測例計 10 例のうち 1 例を除きすべてが明け方 (LT 2-3 時) に集中して発生している。夜光雲の出現条件は太陽高度角によって制約されるため、日没後にも観測の機会はあるが、観測事実は強い朝夕非対称性を示している。同様に地方時依存性を示した一例として欧州 (69° N, 16° E) で行われた極域中間圏界面のライダー観測の結果が報告されている (Fiedler et al., 2011)。

本研究では、北海道上空における夜光雲出現時間の地方時依存性の原因を解明するため、複数の観測事例に対して衛星観測 (AURA/MLS) による温度・湿度場との比較を行った。その結果、日没後の薄明時間帯と明け方の薄明時間の温度場にはローカルタイムに固定された変動パターンが存在することが分かった。この固定パターンは、日没後は高温、明け方が低温というパターンを示しており、北海道で観測された夜光雲が明け方の時間帯に集中していることと整合している。ローカルタイム依存する温度変動パターンとしては潮汐波動によるものが有力である。そこで、本研究では上部中間圏領域までのデータ同化が実装された気象再解析データ JAWARA を用いて同時期における日本周辺の上部中間圏領域の気象場の典型的な特徴を調査した。その結果、日本における夜光雲出現時間の偏りをもたらすものは同領域に伝搬する潮汐波動によるものであることが強く示唆された。

R005-P05

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

大気光イメージング観測を用いた中間圏風速の測定

#鈴木 臣¹⁾, 塩川 和夫²⁾, 江尻 省³⁾, 中村 卓二³⁾, 堤 雅基³⁾

(¹⁾ 愛知大, (²⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (³⁾ 国立極地研究所

Measuring Mesospheric Winds Using Airglow Imaging of Atmospheric Gravity Waves

#Shin SUZUKI¹⁾, Kazuo SHIOKAWA²⁾, Mitsumu E EJIRI³⁾, Takuji NAKAMURA³⁾, Masaki TSUTSUMI³⁾

(¹⁾ Aichi University, (²⁾ ISEE, Nagoya University, (³⁾ NIPR

In this study, we estimated wind speeds near the mesopause by analyzing atmospheric gravity waves observed with airglow imaging. Based on the linear dispersion relation for gravity waves, the vertical wavelength can be derived from the intrinsic horizontal phase velocity (the horizontal phase speed minus the orthogonal projection of the background wind velocity to the phase velocity vector) together with the horizontal wavelength. Airglow imaging enables the direct determination of both the horizontal phase velocity and horizontal wavelength from the images. Assuming that the same wave structure is present in airglow emissions at different altitudes, the ratio of horizontal to vertical wavelength can be obtained from the phase difference between wavefronts observed in two airglow images and the altitude separation of the airglow layers. This approach makes it possible to determine the background wind solely from airglow observations.

On October 1, 2008, clear gravity wave structures were detected with the Optical Mesosphere Thermosphere Imager (OMTI) in OI and OH airglow at Shigaraki. This night coincided with the ANDON campaign, an intensive observation of the mesosphere using airglow imaging, radar, and lidar. The ANDON camera located at Taka had an overlapping field of view with OMTI, which enabled us to calculate airglow layer heights, essential for wind estimation, using triangulation. The airglow heights were somewhat lower than typical values, estimated at 83 km for OI and 74 km for OH. The gravity waves had a horizontal wavelength of 24.5 km and a horizontal phase velocity of 17.4 m/s, propagating toward the north-northwest (121.3° counterclockwise from east). These estimates yielded a background wind of 11.1 m/s in the direction of wave propagation. Simultaneous wind measurements at the OI airglow height with a Fabry-Perot interferometer (FPI) at Shigaraki indicated a wind speed of 13.1 m/s, consistent with our estimation, thereby validating both the results and the estimation algorithm.

R005-P06

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

31 年間の長期地上観測に基づく日本における中間圏・熱圏夜間大気光の長期変動および短周期変動の解析

#堀田 雄斗¹⁾, 塩川 和夫¹⁾, 大塚 雄一¹⁾, 山本 衛²⁾

(¹ 名古屋大学, (² 京都大学

Analysis of long-term and short-period variations in nighttime airglow based on 31-year ground-based airglow observation in Japan

#Yuto Hotta¹⁾, Kazuo SHIOKAWA¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾, Mamoru YAMAMOTO²⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, (²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

We analyzed the intensity of three types of mesospheric and thermospheric nighttime airglow (O(557.7 nm), O(630.0 nm), and Na(589.3 nm)) using long-term data spanning approximately 31 years obtained in Japan. The airglow intensity data were collected by photometers at Kiso (35.5° N, 137.4° E, from Jan 1, 1979, to Dec 10, 1994, provided by NAOJ) and Shigaraki (34.8° N, 136.1° E, from Jul 5, 2010, to Dec 31, 2024, Shiokawa et al., EPS, 2007). For the 11-year solar cycle variation, a tendency for intensity to increase during solar maximum was observed for O(557.7 nm) and O(630.0 nm), while this trend was not prominent for Na(589.3 nm). For seasonal variations in the mesopause region, O(557.7 nm) showed a tendency for intensity to peak around June and October, and Na(589.3 nm) showed a peak tendency around April and October. For the thermospheric O(630.0 nm) airglow, a peak intensity was observed around May and August. We also examined airglow intensity variations during Sudden Stratospheric Warming (SSW) events. We compiled a list of SSWs that occurred between 1979 and 2024 and used a superposed epoch analysis to investigate whether there were any changes in nighttime airglow intensity 120 days before and after each event. As a result, a slight decrease in intensity was observed for Na(589.3 nm) airglow after an SSW, while other airglow types showed less significant responses. In the presentation we will report further analysis of long-term and short-period variations in nighttime airglow at low-mid latitudes and discuss the possible causes of these variations.

私たちは3種類 (O(557.7 nm), O(630.0 nm), Na (589.3 nm)) の中間圏、熱圏夜間大気光の強度を、日本で得られた約31年間の長期データを使用して解析した。大気光強度データとしては、木曽 (35.5° N, 137.4° E, 期間: 1979年1月1日-1994年12月10日、国立天文台提供) および信楽 (34.8° N, 136.1° E, 期間: 2010年7月5日-2024年12月31日、Shiokawa et al., EPS, 2007) に設置されたフォトメータのデータを用いた。11年周期の太陽活動変動と大気光強度変動を比較した結果、O(557.7 nm) および O(630.0 nm) では太陽活動極大期に強度が増加する傾向が見られた一方、Na (589.3 nm) ではその傾向は目立たなかった。季節変動の解析では、中間圏界面領域の O(557.7 nm) では6, 10月付近で強度が極大になる傾向が、Na (589.3 nm) では4, 10月付近で極大になる傾向が見られた。熱圏の O(630.0 nm) 大気光では5, 8月付近で極大になる傾向が見られた。また、短期変動の解析として、成層圏突然昇温 (SSW) 時の大気光強度変動について解析を行った。1979年から2024年までに発生したSSWをリスト化し、その発生前後の120日間について夜間大気光強度に変動が見られるかどうかを、重ね合わせエポック解析を用いて調査した。その結果、Na (589.3 nm) 大気光ではSSW後にわずかに強度が減少する傾向が見られたが、他の大気光では顕著な応答は少なかった。講演ではさらに、中低緯度における夜間大気光の長期変動、短期変動についての解析の結果と、その変動の原因についての考察を議論する。

R005-P07

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

#Anggarani Sefria^{1,3}), Hadi Tri Wahyu²), Perwitasari Septi⁴), 塩川 和夫³)

(¹BRIN, Indonesia, (²Institut Teknologi Bandung, Indonesia, (³Nagoya University, (⁴NICT

Statistical study of atmospheric gravity waves using OI 557.7 nm airglow images over Tomohon, Indonesia

#Sefria ANGGARANI^{1,3}), Tri Wahyu HADI²), Septi PERWITASARI⁴), Kazuo SHIOKAWA³)

(¹BRIN, Indonesia, (²Institut Teknologi Bandung, Indonesia, (³Nagoya University, (⁴NICT

Atmospheric gravity waves (AGWs) are intriguing due to their widespread occurrence throughout the atmosphere and their capability in transporting energy and momentum across different altitudes. In Indonesia, despite their importance, optical observations of AGWs remain limited in both number and spatial coverage, with most studies conducted only in the western region. To address this gap, we carried out optical observations in eastern Indonesia to characterize equatorial AGWs and evaluate the influence of local atmospheric conditions on their propagation. This study presents an analysis of AGWs in the mesopause region over Tomohon (1.34° N; 124.82° E; dip lat. 7.75°) using OI 557.7 nm airglow images (altitude ~96 km) collected from January 2017 to July 2019. A total of 143 AGW events were identified. The observed horizontal wavelengths ranged from 5 km to 80 km with typical periods of 6 to 20 minutes. The prevailing propagation direction of AGWs was eastward (45° to 135°), with phase speeds ranging from 20 m/s to over 70 m/s. A comparison with the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) background wind data indicates that 82.5% of the observed AGWs were able to avoid filtering by background winds. To investigate the possible source, precipitation data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) were examined. These results suggest that strong convective activity associated with intense tropospheric precipitation over eastern Indonesia is a likely source mechanism for the observed AGWs, influencing their generation and upward propagation into the mesopause region.

#楊 天量^{1,2)}, 長浜 智生²⁾, 水野 亮²⁾, DANG Tong³⁾, LEI Jiuhou³⁾

(¹ 名古屋大学理学研究所, (² 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (³ Deep Space Exploration Laboratory, University of Science and Technology of China

Analyses of solar eclipse effects on mesospheric chemistry and dynamics—a long-term study

#Tianliang Yang^{1,2)}, Tomoo NAGAHAMA²⁾, Akira MIZUNO²⁾, Tong DANG³⁾, Jiuhou Lei³⁾

(¹ Graduate School of Science, Nagoya University, (² Institute for Space-Earth Environmental Research, Graduate School of Science, Nagoya University, (³ Deep Space Exploration Laboratory, University of Science and Technology of China

Solar eclipses are short-term, small-scale natural experiments that test photochemical and dynamical responses in near space (from upper stratosphere to lower thermosphere). Using long-term observations by Aura satellite, we analyze the statistics for 33 eclipses events on mesospheric tracer gas and quantify the reduction in solar irradiance by the obscuration (η). The results show that when $\eta > 70\%$, mesospheric ozone around ~ 65 km increases by about 105%. The results of Aura MLS display that, in small solar zenith angles range ($SZA < 45^\circ$), the increases in ozone are accompanied by decreases in HOx, which can be explained by Chapman Cycle and a weakening of HOx-catalyzed loss; in larger SZA range ($SZA \geq 45^\circ$), ozone rises as radiance diminishes as in $SZA < 45^\circ$, but the HOx variability is no longer significant. Given that the satellite operates in a Sun-synchronous orbit—linking SZA to latitude and season, the contrast suggests that at high latitudes or during mid-latitude winter, energetic particle precipitation should become a more important source of HOx, rather than irradiation-dominated photochemistry (Solomon et al., Geophys. Res. Lett., 1983). In the upper-mesosphere region ($\approx 70 - 80$ km), ozone changes under $\eta > 70\%$ exhibit substantial uncertainty, which could be related to event-to-event atomic hydrogen (H) difference in ambient atmosphere (Zhan et al., JGR:SP, 2025). Numerical simulations based on WACCM-X are used to explore the possible mechanisms that are responsible for the features seen in the observations and to identify the common or distinct characteristics of these mechanisms across different eclipse events.

#石井 智士¹⁾, 鈴木 秀彦²⁾, 江尻 省^{3,4)}, 田中 良昌^{3,4,5)}, 田口 真¹⁾, 堤 雅基^{3,4)}, 西山 尚典^{3,4)}

(¹⁾ 立教大学, (²⁾ 明治大学, (³⁾ 国立極地研究所, (⁴⁾ 総合研究大学院大学, (⁵⁾ 情報システム研究機構データサイエンス共同利用基盤施設

Investigation of energetic particle precipitation events on the polar mesopause region

#Satoshi Ishii¹⁾, Hidehiko SUZUKI²⁾, Mitsumu K. EJIRI^{3,4)}, Yoshimasa TANAKA^{3,4,5)}, Makoto TAGUCHI¹⁾, Masaki TSUTSUMI^{3,4)}, Takanori NISHIYAMA^{3,4)}

(¹Rikkyo University, (²Meiji University, (³NIPR, (⁴SOKENDAI, (⁵ROIS-DS

We have been conducting spectral observations of OH (8-4) airglow at Syowa Station during the winter seasons. The OH airglow, emitted at an altitude of approximately 86 km, is a key tracer of atmospheric processes in the mesopause region. From these observations, we derived the rotational line intensity of the OH (8-4) airglow (OH airglow intensity) and its rotational temperature.

This study aims to investigate the effects of energetic particle precipitation (EPP) on the polar mesosphere during auroral activity. OH is produced by the reaction of ozone with atomic hydrogen. EPP is believed to produce NO_x and HO_x in the upper atmosphere, which subsequently destroy ozone molecules. Therefore, we hypothesize that the intensity of OH airglow should vary depending on the chemical changes caused by EPP.

The temporal variation of OH intensity is a superposition of contributions from various atmospheric phenomena. To isolate the effects of EPP from other atmospheric variabilities, we applied the following analyses. First, image data from an infrared all-sky imager at Syowa Station were processed to detect the influence of atmospheric gravity waves. We also derived the local time dependence of OH intensity from averaged spectral data and subtracted this diurnal variation from the observed time series. EPP events were identified from imaging riometer data at Syowa Station from 2016 to 2024, defined by CNA values exceeding 1.0 dB.

In this presentation, we will report on our analysis of OH (8-4) airglow spectral data from 2016 to 2018 and from 2021 to 2024. Our preliminary findings reveal a complex relationship between OH airglow intensity and EPP events. Following strong EPP events, we observe a tendency for OH intensity to decrease over several hours, consistent with prior studies (e.g., Suzuki et al., 2010). However, an instantaneous enhancement is sometimes detected when CNA values are high. This enhancement is inconsistent with the slower, chemical process of ozone destruction. We are investigating the possibility that this enhancement is caused by auroral contamination, likely from the first negative band of N₂⁺.

#Hu Jinyi¹⁾, 津田 卓雄¹⁾, 木暮 優²⁾, 小川 泰信³⁾, 野澤 悟徳⁴⁾, 川端 哲也⁴⁾, 斎藤 徳人⁵⁾, 川原 琢也⁶⁾, 高橋 透⁷⁾

(¹⁾ 電気通信大学, (²⁾ 延世大学, (³⁾ 国立極地研究所, (⁴⁾ 名古屋大学, (⁵⁾ 理化学研究所, (⁶⁾ 信州大学, (⁷⁾ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

Vertical structure of atmospheric waves from the mesosphere to the thermosphere observed by Na lidar and EISCAT radars at Tromsø

#Jinyi Hu¹⁾, Takuo TSUDA¹⁾, Masaru KOGURE²⁾, Yasunobu OGAWA³⁾, Satonori NOZAWA⁴⁾, Tetsuya KAWABATA⁴⁾, Norihito SAITO⁵⁾, Takuya KAWAHARA⁶⁾, Toru TAKAHASHI⁷⁾

(¹⁾University of Electro-Communications, (²Yonsei University, (³National Institute of Polar Research, (⁴Nagoya University, (⁵RIKEN, (⁶Shinshu University, (⁷National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

Atmospheric waves play a crucial role in atmospheric dynamics, and numerous observational studies have been conducted on those in the lower and middle atmosphere. On the other hand, investigations on atmospheric waves above 100 km altitude are still limited. In particular, there are a few observations on the vertical structure of atmospheric waves from the mesosphere to the thermosphere. To understand such a wider vertical structure, this study combined observations by the sodium (Na) lidar and the European Incoherent Scatter (EISCAT) radars at Tromsø, Norway (69°N, 19°E). We analyzed 69 hours of simultaneous observations by the Na lidar and EISCAT radars from 20 to 23 January 2012.

The Na lidar observations provided high-resolution temperature profiles in the altitude range from 75 to 105 km, while the ionospheric parameters, such as electron density, electron temperature, ion temperature, and ion velocity, were obtained in the ionospheric E and F regions from the EISCAT radar observations. In the data analysis, we focused on Na lidar temperature data between 80 and 100 km and EISCAT ion temperature data between 100 and 400 km to investigate the vertical structure of atmospheric waves from the mesosphere to the thermosphere. By combining these datasets, we identified prominent wave-like structures with periods of 6-9 hours, and their phase progressions seemed to be downward. In addition, their vertical wavelengths were 10-20 km in the mesosphere, and those became longer in the thermospheric heights.

We also derived daily mean profiles of potential energy of the observed atmospheric waves. The potential energy showed an increasing trend with increasing altitude from 80 to 175 km. Then, a decreasing trend was observed from 175 to 210 km. After that, an increasing trend was seen above 250 km. This non-monotonic behavior would indicate some energy dissipations in upward propagating waves and/or some additionally generated waves at some altitudes. In the presentation, we will show these results, and the characteristics of the observed wave-like structures will be discussed in more detail.

南極域中間圏下部熱圏における背景風速場の長期変動解析

#堤 雅基^{1,2)}⁽¹⁾ 極地研, ⁽²⁾ 総研大

Long-term variation of the back-ground wind field in the Antarctic mesosphere and lower thermosphere

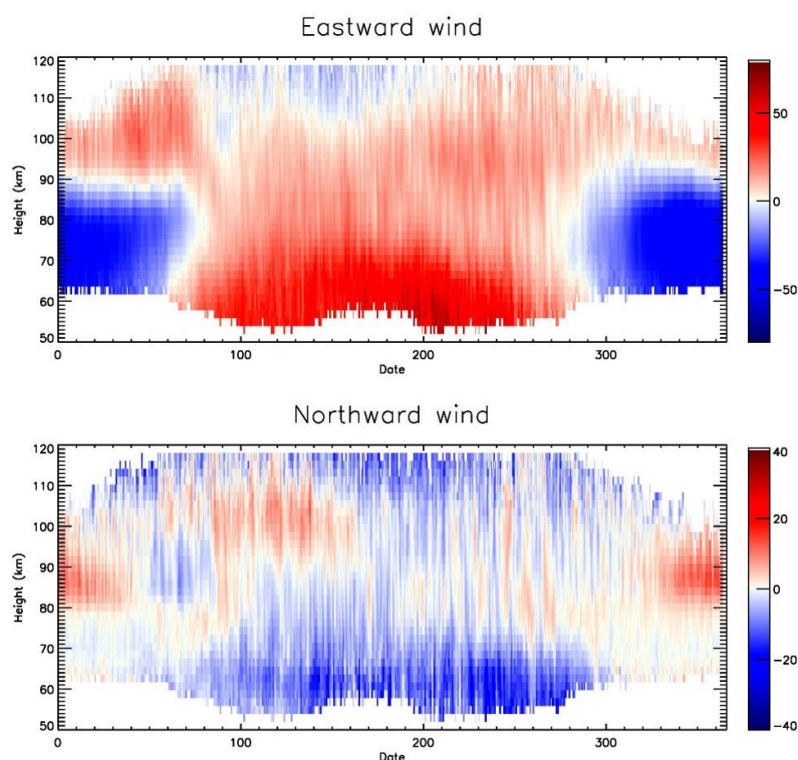
#Masaki Tsutsumi^{1,2)}⁽¹⁾National Institute of Polar Research, ⁽²⁾SOUKENDAI

The middle frequency (MF) radar at Syowa station, Antarctica (69S, 39E), has continuously been observing horizontal winds in the mesosphere and lower thermosphere since 1999. In addition to the conventional correlation analysis wind measuring technique [Briggs, 1984], a meteor wind technique has also been adopted for the Syowa system [Tsutsumi and Aso, 2005]. Because of its low radio frequency (2.4 MHz) the MF meteor winds can be estimated up to 120 km in contrast to the conventional VHF (~30 MHz) meteor radars, where the upper limit is around 105 km. In this study we examine the long-term variation of the Antarctic mesosphere and lower thermosphere winds based on the quarter century of data with an emphasis on the lower thermosphere, where a long-term wind trend has rarely been estimated because of the lack of such long period of wind data.

Briggs, B. H. (1984), Handbook for MAP, vol. 13, pp. 166 – 186, SCOSTEP

Tsutsumi and Aso (2005), JGR, 110, D24111, doi:10.1029/2005JD005849.

南極昭和基地 (69S, 39E) では、1999 年より中波レーダー（以下、MF レーダー）による中間圏から下部熱圏域の水平風速観測を実施している。従来より、昭和基地を含む多くの MF レーダーは、分散配置した 3 台以上の受信機で捉えた弱電離大気エコーの間の相関処理から風速を求めており（相関法）、高度 55-90km ほどの中間圏領域において良好な水平風速観測が行える [e.g., Briggs, 1984]。しかし、このようなタイプのレーダーは、高度 90 km 以上になると風速測定的前提条件が必ずしも満たされず、推定精度に問題が生じる。この問題の解決策として、昭和基地 MF レーダーでは、運用開始当初から流星エコーを利用した風速観測も併用し、相関法データと併せることで高度域 55~120km の風速観測が可能である [Tsutsumi and Aso, 2005]。図に、2003 年から 2023 年のデータを平均した、高度 55~120 km の東西および南北風の季節変化の観測例を示す。使用周波数が MF 帯 (2.4 MHz) と低いため、世界中で広く利用されている VHF 帯 (~30 MHz) の流星レーダーの上限高度 105 km 付近よりも 10 km 以上高い高度まで背景風を観測できるのが特長である。本研究ではその利点を生かし、これまでの四半世紀以上に渡る観測データを元に、南極域の中間圏から特に下部熱圏域の背景風の長期変動傾向を探る。



熱圏ヘリウムの変動解明に向けた近赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発

#會田 陽貴¹⁾, 中川 広務²⁾, 西山 尚典³⁾, 津田 卓雄⁴⁾, 斎藤 徳人⁵⁾, 村田 功⁶⁾, 寺田 直樹⁶⁾, 笠羽 康正⁶⁾

(¹⁾ 東北大学, (²⁾ 東北大学, (³⁾ 国立極地研究所, (⁴⁾ 電気通信大学, (⁵⁾ 理化学研究所, (⁶⁾ 東北大学

Development of a near-infrared laser heterodyne spectrometer for metastable helium emission observation in the thermosphere

#Haruki Aida¹⁾, Hiromu NAKAGAWA²⁾, Takanori NISHIYAMA³⁾, Takuo TSUDA⁴⁾, Norihito SAITO⁵⁾, Isao MURATA⁶⁾, Naoki TERADA⁶⁾, Yasumasa KASABA⁶⁾

(¹Tohoku University, (²Tohoku University, (³National Institute of Polar Research, (⁴The University of Electronic-Communications, (⁵RIKEN, (⁶Tohoku University

The Earth's upper thermosphere (300-500 km altitudes) is located at the boundary between space and the Earth's atmosphere. This region exhibits a complex region of interaction, affected by both space and the lower atmosphere. Since the upper atmosphere is a reservoir of escaping atmosphere to space, thermospheric variations are essential for understanding the atmospheric escape and the evolution of planetary atmospheres. Recently, optical observations of 1083 nm emission lines of metastable He in the upper thermosphere have revealed that the lower atmosphere can significantly affect the thermosphere, as faster than expected even during moderate geomagnetic storm events (Nishiyama et al., 2024). Meanwhile, ground-based observational tools are limited, and in particular, there are no continuous observations of wind speeds and temperature fields. On the other hand, in recent years, there have been remarkable developments in the observation of exoplanets, and metastable He emission lines have been detected in multiple exoplanets (Spake et al., 2018; Krishnamurthy et al., 2024). It is attracting attention as an indicator of atmospheric escape, and there is a desire to gain a universal understanding of its spatiotemporal variations and differences in behavior between planets.

Metastable He is produced by the impact of electrons on ground state He and by recombination of He ions precipitating as solar wind particles. It has a long lifetime of 7,800 seconds and limited photochemical reactions, making it a useful tracer in the thermosphere. However, the 1083 nm emission lines are difficult to separate from the OH emission lines due to their of about 0.1 nm proximity with conventional spectrometers, so observing He density still has difficulties. The purpose of this study is to develop a new near-infrared laser heterodyne spectrometer to improve the wavelength resolution by three orders of magnitude or more (up to 10^7) compared to conventional methods and to isolate the He emission line from the OH emission lines. In addition, we aim to derive wind velocity and temperature fields directly from the Doppler shift and Doppler width, respectively by resolving the He emission line profile for the first time through ultra-high wavelength-resolution observations. The developed device will be installed in our unique polar observation network and the Hawaii Telescope, enabling observations of metastable helium not only on Earth but also on Mars and Venus, thereby contributing to the elucidation of its variations. According to the previous study by Dynamics Explorer 2 and other thermospheric observation satellites, which reported the typical vertical wind speeds in the upper thermosphere of up to 100 m/s, mostly within 30 m/s, the required accuracy of observing vertical wind speed is 30 m/s.

Infrared laser heterodyne spectroscopy is a method of superimposing an infrared light from an observation target with a laser source as the local oscillator (LO) that causes the intermediate frequency component in the radio wavelength. The background radio spectrometer can achieve a wavelength resolution of 10^7 or better for the 1083 nm signal.

In this study, based on the results of evaluation tests of laser characteristics necessary for He emission line observation and heterodyne signal detection tests between laser beams, we will show the status of our consideration of optical systems using halogen lamps.

In the LO characterization test, the wavelength tunable range of the laser, and the wavelength stability, which determines the wavelength resolution, were evaluated. As a result, the wavelength tunable range of the laser was 1082.907-1083.806 nm, which sufficiently covers the target He emission lines (emission line positions: 1082.908 nm, 1083.025 nm, 1083.034 nm) and OH emission lines (emission line positions: 1082.918 nm, 1082.933 nm, 1083.123 nm, 1083.139 nm). The wavelength stability was found to have a standard deviation of 2.6×10^{-5} nm (95.45 % within 0.106 pm) over a 10-minutes integration time. This implies the wavelength resolution of the instrument is approximately 10^7 . This result demonstrates that the spectral resolution is sufficient for isolating the He emission line from OH emission lines. The expected accuracy of the wind speed derivation is about 40 m/s, which is comparable to the expected wind speed from previous satellite observations. Further improvement can be expected by further wavelength stabilization through feedback using a gas cell.

In the laser vs. laser heterodyne signal detection test, we verified the feasibility of detecting heterodyne signals using optical fiber technology as a principle test towards the detection of heterodyne signals between atmospheric light or light of halogen lamps introduced using an optical system and lasers.

The results of this study have raised an outlook for laser heterodyne spectroscopy observations of He alone, separated from OH emission lines. As a next step, continuous observation from the ground will be realized in cooperation with conventional spectroscopy, to elucidate the dynamics of the upper atmosphere of planets.

地球の上部熱圏（高度 300～500 km）は、宇宙空間と地球大気圏との境界に位置し、宇宙と下層大気、双方からの影響が複雑に絡み合う相互作用領域である。この領域は、宇宙へ消失する大気のリザーバであるため、熱圏変動過程の理解は、惑星大気の流出と進化の解明において重要である。近年では、上部熱圏に分布する準安定 He の 1083 nm 輝線の光学観測により、中規模の磁気嵐においても加熱されて膨張した下層大気によって予想以上の速度で熱圏に影響を及ぼし得ることが明らかになった（Nishiyama et al., 2024）。一方で、地上からの観測手段は限られており、特に風速や温度場の継続的な観測は皆無である。また、近年発展が目覚ましい系外惑星の観測において、準安定 He の輝線が複数検出された（Spake et al., 2018; Krishnamurthy et al., 2024）。これは大気流出の指標として注目を集めており、その時空間変動や惑星ごとの振る舞いの違いを普遍的に理解することが望まれている。

準安定 He は、電子衝突や太陽風粒子として降り込む He イオンの再結合によって生成される。寿命が 7800 秒と長く、光化学反応も限られているため、熱圏のトレーサーとして有用である。しかし、1083 nm 輝線は、OH 輝線と波長差およそ 0.1 nm で近接しているため従来の分光器では分離が困難であり、He 密度の定量的な観測が困難であった。本研究の目的は、近赤外レーザーヘテロダイン分光法を新たに開発することで、従来法に比べて波長分解能を 3 桁以上改善し、OH 輝線と分離した He 観測を実現することである。また、波長分解能 10^7 級の超高波長分解能観測により He 輝線プロファイルを分解することで、世界で初めてドップラースhiftとドップラ幅の両方から直接的に風速と温度場を導出することを企図する。開発した装置は、独自の極域観測網ならびにハワイ望遠鏡に実装し、地球のみならず火星や金星の準安定 He 観測を実現することで、その変動解明に資する。衛星観測（Dynamics Explorer 2 など）によると、上部熱圏の鉛直風速は最大で 100 m/s、大部分が 30 m/s 以内と報告されており、鉛直方向の風速の観測には 30 m/s の精度が必要である。

赤外レーザーヘテロダイン分光法は、観測対象からの赤外光と局発赤外光（Local Oscillator）の光を重ね合わせ、その周波数の差となる中間周波数成分を信号として電波分光する手法であり、1083 nm において 10^7 以上の波長分解能を得ることができる。

本研究では、He 輝線観測に必要なレーザーの特性評価試験およびレーザー光同士のヘテロダイン信号検出試験の結果を踏まえ、ハロゲンランプを用いた光学系導入部の検討状況を示す。

レーザー特性評価試験では、観測波長を決定する半導体レーザーの波長可変範囲、波長分解能を決定する波長安定度を測定した。その結果、レーザーの波長可変範囲は 1082.907～1083.806 nm であり、ターゲットとなる He 輝線（輝線位置：1082.908 nm, 1083.025 nm, 1083.034 nm）と OH 輝線（輝線位置：1082.918 nm, 1082.933 nm, 1083.123 nm, 1083.139 nm）を十分カバーできることが分かった。また、レーザーの波長安定度は、10 分間の測定で標準偏差 2.6×10^{-5} nm（95.45% が 0.106 pm 内）であることが分かった。装置の波長分解能は、レーザーの波長安定度で制約を受けるが、およそ 10^7 に相当することがわかり、OH 輝線との分離には十分な性能であることが実証された。期待される風速導出精度は、およそ 40 m/s であり、これは先行衛星観測から期待される風速と同程度である。ガスセルを用いたフィードバックによるさらなる波長安定化などで改善が見込める。

レーザー光同士のヘテロダイン信号検出試験では、光学系を用いて導入する大気光やハロゲンランプ光とレーザーとのヘテロダイン信号の検出を検証する原理試験として、ファイバーやファイバーカプラー、検出器を用いた構成のヘテロダイン信号の検出可能性を検証した。その結果、ヘテロダイン信号を確認することができた。

本研究の成果により、OH 輝線と分離した He 単独のレーザーヘテロダイン分光観測に向けた見通しが立った。今後は、従来分光法と連携して地上からの継続的な観測を実現し、惑星超高層大気の動態解明に貢献する。

#西山 尚典^{1,6)}, 鍵谷 将人²⁾, 津田 卓雄³⁾, Partamies Noora⁴⁾, Whiter Daniel⁵⁾, 小川 泰信^{1,6)}, Sigernes Fred⁴⁾

(¹ 極地研, (² 東北大学, (³ 電気通信大学, (⁴ University centre in Svalbard, (⁵ The University of Southampton, (⁶ 情報・システム研究機構

Statistical variability of orthohelium airglow brightness based on ground-based observations at the KHO, Longyearbyen

#Takanori NISHIYAMA^{1,6)}, Masato KAGITANI²⁾, Takuo TSUDA³⁾, Noora PARTAMIES⁴⁾, Daniel WHITER⁵⁾, Yasunobu OGAWA^{1,6)}, Fred SIGERNES⁴⁾

(¹ National Institute of Polar Research, (² Tohoku University, (³ University of Electro-Communications, (⁴ University centre in Svalbard, (⁵ The University of Southampton, (⁶ ROIS

This study presents the temporal variability of metastable orthohelium, He(2^3S), across multiple scales in the polar region. Orthohelium produces 1083 nm emission through resonance scattering, which was first reported more than 65 years ago during a strong aurora over Moscow. Model studies predict that the orthohelium layer forms at altitudes between ~250 km and 800 km or higher, making it a promising candidate for remote sensing of upper thermospheric and lower exospheric dynamics. However, variations of orthohelium associated with geomagnetic disturbances remain poorly investigated. Continuous He(2^3S) airglow measurements can improve our understanding of orthohelium variability within the magnetosphere – thermosphere – ionosphere coupling system and extend the capability of space weather forecasting up to the exobase.

We obtained a dataset of continuous He(2^3S) airglow brightness from late September 2024 to early April 2025 using the short-wavelength infrared imaging spectrograph NIRAS-2 at the Kjell Henriksen Observatory (KHO), Svalbard (78.1° N, 16.0° E). NIRAS-2 is a newly developed 2-D imaging spectrograph sensitive to radiation from 1.05 to 1.35 μ m (Nishiyama et al., 2024). It provides a 1-D field of view (FOV) aligned with the geomagnetic meridional direction, with an angular coverage of 55° and a resolution of 0.11° per pixel. He(2^3S) spectra with a spectral resolution of 0.44 nm/pixel were obtained by subtracting OH(5,2) Q-lines, as described in Nishiyama et al. (2025).

The observed He(2^3S) airglow brightness time series exhibited clear seasonal variations, including the well-known helium winter bulge, as well as a dependence on solar zenith angle (SZA). Semiannual variations of He(2^3S) airglow brightness were consistent with He density at 500 km altitude calculated by MSIS 2.1. We will further investigate He(2^3S) variability as a function of SZA, magnetic local time, geomagnetic activity, solar activity, and season. In addition, sudden increases in He(2^3S) airglow, likely associated with solar proton events, were observed several times. These enhancements appear to result from particle precipitation (He⁺⁺/He⁺ and electrons), typically when KHO was located within the cusp region. We plan to compare the observed He(2^3S) variability with in situ particle measurements and far-ultraviolet (FUV) spectral imaging from DMSP satellites.

R005-P14

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

#大山 伸一郎^{1,2,3}, バンハマキ ヘイキ³, カイ レイ³

(¹ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (² 国立極地研究所, (³ オウル大学

Dynamics of high-latitude energy conversion in the upper thermosphere studied with FPI and Dynasonde in Tromsø, Norway

#Shin-ichiro Oyama^{1,2,3}, Heikki Vanhamäki³, Lei Cai³

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, (²National Institute of Polar Research, (³University of Oulu

The process of energy transfer from the ionosphere to the thermosphere at high latitudes was examined using equation $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}' + \mathbf{U} \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B})$, where $\mathbf{E}'$ represents the electric field in a reference frame moving with neutral wind, as defined in $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}$. The ratio R of $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}'$ to $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ was derived from a 9-year dataset of ion velocity ($\mathbf{V}$) from the Dynasonde and neutral wind ($\mathbf{U}$) from the Fabry-Perot interferometer (FPI) in Tromsø, Norway, categorized by SuperMAG index (SME) and magnetic local time (MLT). The incoming electromagnetic energy converts to thermospheric thermal energy through Joule heating and kinetic energy via wind acceleration by the Lorentz force, resulting in $0 < R < 1$ in the dusk to premidnight sector under moderately active conditions. $R < 0$ occurred under quiet conditions of SME < 50 nT from dusk to dawn and over a wide geomagnetic level in the post-midnight sector, indicating the Lorentz force performs negative work on the thermosphere, suspecting electromagnetic energy generated in the F region is transported to the magnetosphere. The ratio R can exceed 1 under quiet conditions from dusk to dawn, with all instances of $\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} < 0$ corresponding to $R > 1$. During evening and morning hours when $\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} < 0$ occurs, sunward flow dominates ionospheric plasma convection, causing ion drag to oppose the day-night pressure gradient, yet due to low geomagnetic activity, ion drag cannot overcome the pressure gradient, resulting in opposite directions of the net thermospheric wind field and ionospheric plasma convection.

R005-P15

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

最も単純なイオン-中性衝突周波数モデル

#家田 章正¹⁾

(¹ 名大 ISEE

The simplest ion – neutral collision frequency model

#Akimasa Ieda¹⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Electric currents and Joule heating in the Earth's ionosphere arise from collisions between ions and neutral particles. Such collisions are generally characterized by the ion – neutral collision frequency. In many ionospheric studies, currents in the F region can be neglected. Under this assumption, charge-exchange reactions can be ignored, and the collision frequency can be approximated in a simple form. A commonly cited expression for the simple ion – neutral collision frequency, appearing in several textbooks, is given as $2.6 \times 10^{-15} N \times (M)^{-1/2}$, where N is the neutral density and M is the neutral mass (e.g., Brekke, 2013, p. 248, Physics of the Upper Polar Atmosphere). However, this simplified formula cannot be derived from classical Banks/Schunk formulations of collision frequency (see, for example, Ieda, 2020, Eq. A1, doi:10.1029/2019JA027128), and it is unclear what physical quantity it represents. In this presentation, we discuss the origin of this inconsistency and propose the simplest collision frequency model in which the neutral mass is treated as a constant rather than a variable.

地球電離圏における電流やジュール加熱は、イオンが中性大気に衝突することにより生じる。この衝突は一般に、イオン-中性衝突周波数で表現される。電離圏の研究において多くの場合、F領域の電流を無視することができる。その場合は、電荷交換反応を無視することにより、衝突周波数は単純な形に近似できる。複数の教科書に載っている、単純なイオン-中性衝突周波数は、 $2.6 \times 10^{-15} N \times (M)^{-1/2}$ である（例えば：Brekke(2013, p248)[Physics of the Upper Polar Atmosphere]）。ここで、 N は中性大気密度、 M は中性粒子の質量である。しかし、この単純な式は、Banks/Schunkの古典的な衝突周波数（例えば：Ieda, 2020, 式 A1, doi: 10.1029/2019JA027128）から導くことができず、何を表しているのか不明である。本発表では、この不整合の原因を議論し、さらに、中性分子の質量を変数でなく定数とした、最も単純な衝突周波数モデルを提案する。

ノルウェー・トロムソで、2014 年 1 月 30 日に OH 大気光カメラとナトリウムライダーを用いて観測された中間圏大気重力波の初期解析

#土田 徹拓¹⁾, 塩川 和夫¹⁾, 野澤 悟徳¹⁾, 大山 伸一郎¹⁾, 新堀 淳樹¹⁾, 斎藤 徳人²⁾, 川原 琢也³⁾, 津田 卓雄⁴⁾, 川端 哲也¹⁾

(¹ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (² 理化学研究所, (³ 信州大学, (⁴ 電気通信大学

Analysis of mesospheric gravity waves observed in Tromsø, Norway, on January 30, 2014, using an airglow imager and a sodium lidar

#Eido Tsuchida¹⁾, Kazuo SHIOKAWA¹⁾, Satonori NOZAWA¹⁾, Shin-ichiro OYAMA¹⁾, Atsuki SHINBORI¹⁾, Norihito Saito²⁾, Takuya KAWAHARA³⁾, Takuo TSUDA⁴⁾, Tetsuya Kawabata¹⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, (²RIKEN Center for Advanced Photonics,

(³Shinshu University, (⁴University of Electro-Communications

Studies of small-scale mesospheric gravity waves with horizontal wavelengths less than several hundred kilometers have been conducted using airglow imagers. S. Suzuki et al. (2007) estimated momentum flux of small-scale (20-100 km) gravity waves in the upper mesosphere using an OH-airglow imager at Shigaraki, Japan. They reported that waves identified in the OH images with horizontal wavelengths of 60 – 90 km and apparent phase speeds of 40 – 80 m/s carry upward momentum fluxes of 1-15 m²/s², which is significant and possibly controls the mean winds in the mesopause region. However, estimation of momentum flux, which is proportional to the square of the temperature variation, has been ambiguous, because it requires conversion of airglow intensity variation to spatial and temporal variation of temperature. Here we report an initial analysis result of mesospheric gravity waves observed by an airglow imager and a sodium lidar in Tromsø, Norway, on January, 30, 2014. The sodium lidar directly provides vertical profiles of temperature variation in the upper mesosphere. From 16:00 UT to 24:00 UT, mesospheric gravity waves propagating toward the northeast with horizontal wavelengths of 180-230 km were observed in OH-band airglow images. As part of the initial analysis to estimate the momentum flux of the observed gravity waves, we attempted to correlate these airglow images of gravity waves with mesospheric temperature profiles obtained from a co-located sodium lidar. By analyzing correlation between the airglow intensities and atmospheric temperatures, we will estimate vertical momentum flux carried by the gravity waves.

大気光カメラは、レーダーよりも小規模な大気重力波を観測することができるため、水平波長が数百 km 以下の小規模な中間圏大気重力波の研究は大気光カメラを用いて行われてきた。S. Suzuki et al (2007) は、日本の信楽に設置された大気光カメラを用いて、上部中間圏を伝搬する水平波長が 20-100 km の小規模な大気重力波が運ぶ運動量を推定した。彼らの報告によれば、OH 大気光画像中に同定された水平波長 60-90 km、見かけの位相速度 40-80 m/s の大気重力波は、1-15 m²/s² の運動量を輸送していた。この値は、中間圏界面領域の平均風を制御するのに十分な大きさである。しかしながら、運動量フラックスは温度変動の二乗に比例するため、彼らの研究では、モデル計算を用いて導出した Cancellation Factor というパラメータを用いて、観測された大気光強度変動を温度変動へ変換する必要があり、この過程が最終的な計算結果に不確定さを残す大きな原因であった。そこで本研究では、温度変動を直接計測できるナトリウムライダーと大気重力波の 2 次元パターンを計測できる大気光カメラの観測を組み合わせ、このモデルパラメータに依存せずにより正確に大気重力波が運ぶ運動量フラックスを求めた。本発表では、2014 年 1 月 30 日にノルウェーのトロムソにおいて、大気光カメラとナトリウムライダーによって同時に観測された顕著な中間圏重力波の初期解析結果を報告する。16:00 UT から 24:00 UT にかけて、OH 大気光画像中に、北東方向へ伝播する水平波長 180-230 km、周期が 40-60 分の中間圏重力波が観測された。同じ周期で対応する中間圏重力波は、ライダーから得られた大気温度の鉛直分布において、位相が下方伝搬する波動として観測された。講演では、これらのデータから求められた鉛直運動量フラックス及びその測定誤差やその時間変化を見積もった結果を報告する。

北極域 Na ライダーでの Faraday filter を用いた観測試験

#川原 琢也¹⁾, 斎藤 徳人²⁾, 野澤 悟徳³⁾, 津田 卓雄⁴⁾, 川端 哲也²⁾, 高橋 透⁵⁾, 和田 智之²⁾

(¹⁾ 信州大学工学部, (²⁾ 理化学研究所 光量子工学研究センター, (³⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (⁴⁾ 電気通信大学, (⁵⁾ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

Sodium lidar observations using a Faraday filter in the Arctic: initial results

#Takuya D. KAWAHARA¹⁾, Norihito SAITO²⁾, Satonori NOZAWA³⁾, Takuo T. TSUDA⁴⁾, Tetsuya KAWABATA²⁾, Toru TAKAHASHI⁵⁾, Satoshi WADA²⁾

(¹) Faculty of Engineering, Shinshu University, (²) Center for Advanced Photonics, RIKEN, (³) ISEE, Nagoya University,

(⁴) University of Electro-Communications, (⁵) Electronic Navigation Research Institute

The Sodium (Na) lidar installed at the EISCAT radar site in Tromsø, Norway (69.6° N, 19.2° E) has been monitoring Na density, background temperature, and wind speed in the mesopause region (80-115 km altitude) since 2010. With its highly stable output and almost maintenance-free operation, the lidar has played a key role in clarifying the relationship between auroras and the dynamics of the mesosphere and lower thermosphere during winter nights.

Currently, efforts are underway to:

- (1) extend the observation altitude range of nighttime measurements up to 200 km, and
- (2) expand the observation period to include year-round measurements, including summer, while maintaining the same altitude range for nighttime observations.

To accomplish this, we are developing an ultra-narrowband filter (FWHM ~10 pm) that effectively blocks background light except for the resonance scattering. A magneto-optical filter (Faraday filter; FF) is being developed and integrated into the lidar receiver system.

In the summer of 2024, a newly developed receiver system and observation container were shipped to the site by sea and installed. The receiver system includes a 50 cm telescope, a band-pass filter with a full width at half maximum (FWHM) of 1 nm, a polarization prism, and an FF aligned along the optical path, with light detected by a Multi-Pixel Photon Counter (MPPC). By blocking the observation light and using a continuous-wave 589 nm laser delivered through an optical fiber from the transmission system as the light source, it becomes possible to measure the transmission characteristics of the FF.

In 2025, the receiver system is assembled at the EISCAT site in late September. The Faraday filter (FF) is calibrated using a calibration light, and wavelength scans are performed to measure its transmission. After these preparations, the telescope is pointed vertically, and simultaneous observations with the conventional receiver system are conducted as follows:

- (1) Nighttime observation without activating the FF: The new receiver system operates as a standard system without the FF. Signal light intensity and background light levels are compared to those from the conventional system.
- (2) Nighttime observation with the FF activated: The transmission profile of the FF is measured beforehand. Attenuation ratios of background light and signal light are compared within the same system, as well as with values obtained using the conventional system.
- (3) Verification of consistency in derived temperature and wind speed during nighttime: Consistency between the systems (with the FF activated and the conventional system) is checked for the analyzed temperature and wind speed.
- (4) Daytime observation with only the new system: Following the observation (2), the new system extends measurements from nighttime into daytime to verify that temperature and wind speed can also be obtained during the day.
- (5) High-altitude nighttime observation: With the FF activated, both the new and conventional systems conduct nighttime observations while the pulse laser repetition interval is adjusted to enable high-altitude measurements. Data are collected up to 200 km in the lower thermosphere.

A preliminary report of these observations will be presented at a scientific conference.

南極昭和基地 PANSY レーダーを用いた非干渉性散乱エコー観測手法の開発

#高山 祐輝¹⁾, 橋本 大志²⁾, 佐藤 薫³⁾

(¹ 京大理, (² 情報・システム研究機構 国立極地研究所, (³ 東京大学

Development of PANSY Radar Incoherent Scatter Echo Observation Technique at Syowa Station, Antarctica

#Yuki Takayama¹⁾, Taishi HASHIMOTO²⁾, Kaoru SATO³⁾

(¹Graduate School of Science, Kyoto University, (²National Institute of Polar Research, (³The University of Tokyo

The PANSY radar is a large VHF-band atmospheric radar installed at Syowa Station, Antarctica, which can measure ionospheric electron density through incoherent scatter (IS) observation. Field-aligned irregularities (FAI) are density structures of plasma aligned with magnetic field lines, and they cause coherent scatter for specific radar beams. Since the ionospheric observation data from the PANSY radar is contaminated with coherent echoes from FAI, it is difficult to estimate electron density data, and only test observations have been conducted so far. In this study, we developed a data processing method to remove coherent echoes from FAI from PANSY radar ionospheric observation data. Currently, there are two types of ionospheric observations conducted by the PANSY radar: routine observations and special observations. Routine observations have been conducted continuously for about three days each month since September 2024. The observation beam directions are four directions with a zenith angle of 20 degrees, shifted by 90 degrees in azimuth from the magnetic south direction. Special observations aim to search for coherent echoes that are not from FAI. That echoes are called naturally enhanced ion acoustic lines (NEIALs), which appear along the magnetic field lines. Observations are conducted using multiple beams, mainly in directions parallel to the magnetic field lines. Both types of observations are single-pulse electron density observations. As a data processing method, we applied a process to the radar received intensity data to extract IS observation data with reduced noise. This was done by using the mean and standard deviation to exclude remarkably large values as outliers, and then calculating the average value for each fixed time interval. This method successfully produced valid data as IS observation data for the special observation data from March 2024, test observation data from November 2023, and routine observation data from October 2024 used in the development phase, except for periods where the mixture of coherent echoes was so significant that complete removal was not possible. We will apply the above method to one year of routine observation data and newly obtained special observation data, and compare it with data from an ionosonde and GPS TEC data.

PANSY レーダーは、南極昭和基地に設置された VHF 帯の大型大気レーダーであり、非干渉性散乱 (IS : Incoherent Scatter) 観測によって電離圏の電子密度を測定できる。沿磁力線不規則構造 (FAI:Field Aligned Irregularity) は磁力線に沿ったプラズマの粗密構造であり、特定のレーダービームに対してコヒーレント散乱を引き起こす。PANSY レーダーによる電離圏観測データには FAI 由来のコヒーレントエコーが混在するため、電子密度データの推定が難しく、これまでには試験的な観測しかおこなわれていなかった。本研究では、PANSY レーダー電離圏観測データから FAI 由来のコヒーレントエコーを除去するために、データ処理手法を開発した。現在 PANSY レーダーで行われている電離圏観測は、定常観測と特別観測の 2 種類であり、定常観測は 2024 年 9 月から継続的に毎月 3 日間程度実施している。観測ビーム方向は、天頂角 20 度で磁南方向から方位角を 90 度ずつずらした 4 方向を観測している。特別観測は、NEIALs (Naturally Enhanced Ion Acoustic Lines) という磁力線方向に出現する FAI 由来ではないコヒーレントエコーの探索を目的としており、磁力線に平行な方向を中心に複数方向のビームで観測をおこなっている。両観測ともにシングルパルスによる電子密度観測である。データ処理手法としては、レーダーの受信強度データに対し、平均値と標準偏差を用いて、著しく大きい値を異常値として除外し、その上で一定時間ごとの平均値を算出する処理を適用することでノイズの少ない IS 観測データを抽出した。この手法は、開発段階で用いた 2024 年 3 月の特別観測データ、2023 年 11 月の試験観測データ、および 2024 年 10 月の定常観測データに対しては、コヒーレントエコーの混在が著しく多いため除去しきれない時間帯を除いて IS 観測データとして有効なデータを生み出すことに成功した。上記の手法を 1 年間の定常観測データや、新たに得られた特別観測データにも適用し、また、イオノゾンドのデータや GPS TEC データと比較する。

#小川 泰信^{1,2,3)}, 宮岡 宏¹⁾, 野澤 悟徳⁴⁾, 橋本 大志^{1,2,3)}, 大山 伸一郎⁴⁾, 西村 耕司⁵⁾, 津田 卓雄⁶⁾, 藤原 均⁷⁾, 堤 雅基^{1,2,3)}, 田中 良昌^{1,2,3)}, 西山 尚典^{1,3)}, 吹澤 瑞貴^{1,3)}, 細川 敬祐⁶⁾, 三好 由純⁴⁾, 中村 卓司^{1,3)}, 藤井 良一¹⁾

(¹ 国立極地研究所, (² 極域環境データサイエンスセンター, (³ 総合研究大学院大学, (⁴ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (⁵ 京都大学生存圏研究所, (⁶ 電気通信大学, (⁷ 成蹊大学

Current status and future prospects of the EISCAT_3D project

#Ogawa Yasunobu^{1,2,3)}, Hiroshi MIYAOKA¹⁾, Satonori NOZAWA⁴⁾, Taishi HASHIMOTO^{1,2,3)}, Shin-ichiro OYAMA⁴⁾, Koji Nishimura⁵⁾, Takuo TSUDA⁶⁾, Hitoshi FUJIWARA⁷⁾, Masaki TSUTSUMI^{1,2,3)}, Yoshimasa TANAKA^{1,2,3)}, Takanori NISHIYAMA^{1,3)}, Mizuki FUKIZAWA^{1,3)}, Keisuke HOSOKAWA⁶⁾, Yoshizumi MIYOSHI⁴⁾, Takuji NAKAMURA^{1,3)}, Ryoichi FUJII¹⁾

(¹National Institute of Polar Research, (²Polar Environment Data Science Center, ROIS-DS, (³Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, (⁴Institute for Space and Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, (⁵Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, (⁶University of Electro-Communications, (⁷Seikei University

The European Incoherent Scatter (EISCAT) scientific association started construction of the first stage of the EISCAT_3D radar system in 2017 under international collaboration. EISCAT_3D is a new generation of incoherent scatter radar system based on phased array technology. The first stage involves operating a core site with a transmission power of approximately 3.4 MW and two receive-only remote sites. By summer 2023, all the antennas had been installed at the Skibotn core site in Norway (119 sub-arrays), the Kaiseniemi remote site in Sweden (55 sub-arrays) and the Karesuvanto remote site in Finland (54 sub-arrays). A first light with 7 sub-arrays is planned at the Skibotn core site. This will be followed by various testing and commissioning phases at the three sites, and then operations at the first stage will begin. In connection with the operation of EISCAT_3D, the EISCAT scientific association has made the strategic decision to transfer its assets, operations and commitments to EISCAT AB, a state-owned company that was established in January 2025. The EISCAT_3D radar is expected to be utilized for a variety of scientific studies, including the investigation of the transport of energy and mass from the solar wind and magnetosphere to the ionosphere and atmosphere (McCrea et al., 2016).

In collaboration with the EISCAT scientific association and ISEE Nagoya University, the National Institute of Polar Research (NIPR) has contributed to the construction of the EISCAT_3D by supplying radar transmitter power amplifiers (SSPAs). The high energy- efficient SSPAs had been used for engineering verification tests at the EISCAT sites in Tromsø and Kiruna since 2016. In 2020, NIPR concluded an MoU with EISCAT to supply sub-array transmitter units for the first stage, selected by the EISCAT headquarters through an international tender process. Alongside these contributions to the EISCAT_3D construction, NIPR established the Advanced Radar Research Promotion Center (ARRC) in April 2022. ARRC is preparing for the joint usage and collaborative research of the EISCAT_3D radar system.

This paper reports on the latest status of the EISCAT_3D project and discusses the prospect of future international collaborative studies using the EISCAT_3D radar system.

Reference

[1] McCrea, I. W., A. Aikio, L. Alfonsi, E. Belova, S. Buchert, M. Clilverd, N. Engler, B. Gustavsson, C. Heinselman, J. Kero, M. Kosch, H. Lamy, T. Leyser, Y. Ogawa, K. Oksavik, A. Pellinen-Wannberg, F. Pitout, M. Rapp, I. Stanislawski, J. Vierninen, The science case for the EISCAT_3D radar, *Progress in Earth and Planetary Science*, doi:10.1186/s40645-015-0051-8, 2015.

VLBI と地球大気の同時観測に向けた広帯域アンテナの開発

#氏原 秀樹¹⁾, 野坂 秀之¹⁾, 今井 裕²⁾, 米倉 覚則³⁾, 三澤 浩昭⁴⁾, 市川 隆一⁵⁾

(¹⁾ 立命館大, (²⁾ 鹿児島大学, (³⁾ 茨城大学, (⁴⁾ 東北大学, (⁵⁾ 情報通信研究機構

Development of Wideband Antennas for Simultaneous VLBI and Atmosphere Observation.

#Hideki Ujihara¹⁾, Hideyuki Nosaka¹⁾, Hiroshi Imai²⁾, Yoshinori Yonekura³⁾, Hiroaki Misawa⁴⁾, Ryuichi Ichikawa⁵⁾

(¹Ritsumeikan University, (²Kagoshima University, (³Ibaraki University, (⁴Tohoku University, (⁵National Institute of Information and Communications Technology

Novel 16 - 64 GHz wideband feed and receiver system has been developed. This feed was arranged from the design for 3.2 - 16 GHz feed developed for NICT Kashima 34 m antenna. This wideband observation system enables simultaneous VLBI and water vapor observation in the atmosphere that causes phase fluctuation in VLBI observations. The water vapor emission is measured with oxygen and water drops in cloud simultaneously through the VLBI session in the same direction, thus the system will offer better correction of phase fluctuation than conventional water vapor radiometer. From August 2024, the system was set on Nobeyama 45 m antenna of National Astronomical Observatory and being tested. In March 2025, simultaneous K and Q band VLBI and water vapor observation was carried out. Also, 0.9 m dishes were prepared for portable systems. Because of dish, both systems have quite sharp beam width for measurement of water vapor compared to conventional system. Also correction will be easier for overlapped spectrum of water vapor, drops in cloud and oxygen emission by the wideband system.

Wideband feed and receiver system with on-board signal generator simplifies multiple feeds and receivers for individual feed and receiver with narrow bandwidth. That enables compact measurement system suitable for satellite applications and fit any radio telescopes on the ground because of easy adjustment of feed beam width. This VLBI experiment approved phase stability of the developed system. SNR of the system is worse than ordinal astronomical receivers but enough for test because only bright radio sources are used. Wideband system should suppress incoming spurious signals and RFI with filters or other technique for preventing saturation. Further development will be done better SNR and resolution, also for 80 -190 GHz band. These works are supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 21H04524 and 23H00221. These result and development will be shown in the presentation.

NICT 鹿島 34m アンテナ向けに開発した 3.2-16GHz の広帯域フィードをもとに 16-64GHz の広帯域フィードと受信機を開発し、国立天文台の野辺山 45m アンテナに搭載して試験を行なっている。これは VLBI 観測と同時に地球大気中の 22GHz 帯の水蒸気だけでなくスペクトラムが重なり合う雲中の水滴、50GHz 帯の酸素の放射も同時に測定し、水蒸気に起因する VLBI 観測の位相誤差を精度良く補正することを目指すものである。もちろん水蒸気分布のみの高分解能観測も可能で、そのための 0.9m 可搬型アンテナも製作した。

45m アンテナには 2024 年 8 月に受信機を搭載し、試験と調整ののち、野辺山観測所の水素メーザが復旧した 2025 年 3 月に K/Q バンド同時の VLBI 観測と同時の大気観測を行なった。水メーザを観測する K バンド (22GHz 帯) の相手局は茨城大の高萩 32m アンテナ、SiO メーザを観測する Q バンド (43GHz 帯) の相手局は国立天文台 VERA20m アンテナである。

これらの開発と試験結果を報告する。

現状の受信機は常温のため雑音温度が高く、指向性調整の容易化のため 45m のビーム伝送系の仕様よりフィードのビームを絞ったため開口率が悪く、そのため電波天文用受信機としての感度は悪いが、当面の試験には明るい天体しか使わないので十分である。その反面、どの機関の電波望遠鏡でも試験できるよう小型の SG(Signal Generator) をダウンコンバータに搭載し、フィードのビーム幅は構成の変更で容易に調整できる構造としてある。これらは科研費 (21H04524,23H00221) の支援を受けている。

試験の結果、開発した広帯域受信機は K/Q 両バンドともに VLBI 観測に十分な安定度を有することが確認できた。ただし、広帯域ゆえに SG の高調波の漏れ込みや周辺環境からの RFI(Radio Frequency Interference) を抑圧する必要がある。本システムは従来は観測対象ごとに個別のフィードと受信機を要していた多周波受信機を広帯域フィードで 1 つにまとめたものである。今後は開口率や感度とともに受信機の改良も続け、高精度の水蒸気観測を目指してデータ取得系も整備していきたい。このシステムを高周波化し、地上と宇宙から 80-190GHz での水蒸気や酸素の観測を可能としたい。

小型高感度全天カメラによる欧州・アフリカでのオーロラ・大気光観測の現状

#塩川 和夫¹⁾, 山本 優佳¹⁾, 足立 匠¹⁾, 大塚 雄一¹⁾

(¹ 名大宇地研)

Current status of aurora and airglow observations in Europe and Africa using low-cost high-sensitivity all-sky imagers

#Kazuo Shiokawa¹⁾, Yuka Yamamoto¹⁾, Takumi Adachi¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University)

We are developing low-cost small all-sky imagers for measurements of aurora and airglow at high to low latitudes. The imagers consist of a CMOS camera (ZWO ASI294MM Pro) with a fish-eye lens Fujinon FE1185C057HA-1 and band-pass filters with bandwidths of ~10 nm. These images cost US\$2000, which is 20-40 times cheaper than the previous airglow/auroral cameras used for Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIS, Shiokawa et al., 1999). We have installed these low-cost imagers temporally at Shigaraki, Japan, and Athabasca, Canada, to test their performance. These low-cost imagers were also sent to Egypt, Ethiopia, Kenya, and Nigeria for airglow measurements over Africa, though their operation has not been started except for Nigeria due to several local reasons. The ZWO camera was also used as the detector of the OMTI imagers by replacing the cooled-CCD camera of Hamamatsu Photonics which is no longer manufactured. These hybrid cameras have been in operation at Zugspitze, Germany, and Sata, Japan. In this presentation, we report current status of aurora and airglow observations in Europe and Africa using these low-cost high-sensitivity all-sky imagers.

Shiokawa et al. (EPS, 1999, <https://doi.org/10.1186/BF03353247>)

高緯度から低緯度までのオーロラと夜間大気光の観測のために、私たちは低価格の小型高感度全天カメラを開発してきた。このカメラは、CMOS カメラ (ZWO ASI294MM Pro) に魚眼レンズ (Fujinon FE1185C057HA-1) と帯域幅約 10nm のバンドパスフィルターを組み合わせて構成されている。価格は約 2000 ドルで、超高層大気イメージングシステム (OMTIs, Shiokawa ら, 1999) で使用された従来の大気光・オーロラカメラに比べて 1/20-1/40 の安価である。これらの低価格のカメラは、性能テストのため日本の信楽とカナダの Athabasca で運用された。また、アフリカでの大気光計測のため、エジプト、エチオピア、ケニア、ナイジェリアにも送付されたが、ナイジェリアを除く 3 か所では現地の事情によりまだ運用が開始されていない。この ZWO カメラは、製造が終了した浜松ホトニクス製の冷却 CCD カメラを置き換える形で、OMTI カメラの画像検出部としても使用され、ドイツの Zugspitze と日本の佐多で運用されている。本発表では、ヨーロッパとアフリカにおいて、これらの小型高感度全天カメラを使用したオーロラと大気光の観測の現在の状況を報告する。

Shiokawa et al. (EPS, 1999, <https://doi.org/10.1186/BF03353247>)

オーロラトモグラフィ法を用いた Westward Traveling Surge の解析

#星野 大羽¹⁾, 田中 良昌²⁾, 小川 泰信³⁾, 西山 尚典²⁾, 細川 敬祐⁴⁾, Kirsti Kauristie⁵⁾, Alexander Kozlovsky⁶⁾, Tero Raita⁶⁾
(¹⁾ 総研大, (²⁾ 国立極地研究所, (³⁾ 情報・システム研究機構, (⁴⁾ 電気通信大学, (⁵⁾ フィンランド気象研究所, (⁶⁾ ソダンキラ地球物理観測所

Analysis of Westward Traveling Surge Using the Aurora Tomography Method

#Tau Hoshino¹⁾, Yoshimasa TANAKA²⁾, Yasunobu OGAWA³⁾, Takanori NISHIYAMA²⁾, Keisuke HOSOKAWA⁴⁾, Kauristie Kirsti⁵⁾, Kozlovsky Alexander⁶⁾, Raita Tero⁶⁾

(¹The Graduate University for Advanced Studies, (²National Institute of Polar Research, (³Research Organization of Information and Systems, (⁴The University of Electro-Communications, (⁵Finnish Meteorological Institute, (⁶Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu

Auroras occur when charged particles precipitating from the Earth's magnetosphere collide with the upper atmosphere, exciting atmospheric constituents and producing light emissions. The aurora follows a characteristic development process known as an auroral substorm. During a substorm, the aurora expands explosively both poleward and in the east – west direction. Among these, the expansion particularly toward the west is called the Westward Traveling Surge (WTS). WTS is the most prominent phenomenon of a substorm, and its development has been discussed within various models. However, the expansion and propagation speed of WTS is as fast as ~1 km/s, and no observational studies to date have investigated the spatiotemporal evolution of its three-dimensional structure. The primary reason is that imaging from a single observation site provides only brightness projected onto a plane, while radar observations yield information only along specific lines of sight.

In this study, we aim to quantitatively examine the three-dimensional structure of WTS, as well as the horizontal distribution of precipitating electron energy, using the generalized aurora tomography method [1]. Aurora tomography applies the principles of computer tomography to reconstruct the three-dimensional auroral structure from multiple simultaneous images captured at different observation sites. This enables quantitative discussion of physical quantities such as electron density distribution and conductivity distribution in WTS from an observational perspective. The validity of the reconstructed electron density distribution can be verified by direct comparison with measurements obtained from the EISCAT radar. As a future objective, we aim to extend the discussion to include the three-dimensional current system of WTS and its consistency with theoretical models.

In this presentation, we report the results of tomography analysis applied to auroral image data at 427.8 nm wavelength obtained from Tromsø (69.58° N, 19.23° E), Abisko (68.36° N, 18.82° E), and Kilpisjärvi (69.05° N, 20.36° E) for a WTS event observed at 22:45:34 UT on February 16, 2018. We present the reconstructed three-dimensional structures and precipitating electron energy distributions, and also discuss future perspectives.

[1] Y. Tanaka et al., Ann. Geophys., 29, 551 (2011).

オーロラ現象は、地球周辺の磁気圏から降り込んできた荷電粒子が超高層大気と衝突することで、大気が励起・発光する現象である。オーロラには典型的な発達過程があり、これをオーロラサブストームと呼ぶ。サブストームでは、オーロラは爆発的に極方向および東西へ拡大する。このうち特に西側に拡大する現象を Westward Traveling Surge (WTS) と呼ぶ。WTS はサブストームの最も顕著な現象であり、発達過程について様々なモデルで議論されている。一方で、WTS の拡大・伝播速度は約 1km/s と速く、観測的に 3 次元構造の時空発展を調べた研究はこれまで無い。1 観測点の画像データからだけでは平面に射影された明るさしか分からず、レーダーではある特定の視線方向に関する情報しか得られないことが主な理由である。

そこで本研究は、一般化オーロラトモグラフィ法 [1] を用いて WTS の 3 次元構造、並びに降下電子のエネルギーの水平分布を定量的に議論することを目的とする。オーロラトモグラフィ法とは、コンピュータトモグラフィの手法を利用して、異なる観測点で同時に撮影された複数のオーロラ画像からオーロラの 3 次元構造を復元する手法である。これにより、WTS における電子密度分布や電気伝導度分布といった物理量について、観測的な観点からの定量的な議論が可能になることが期待される。電子密度分布については、EISCAT レーダーによる測定値と直接比較することで、トモグラフィによる再構成結果の妥当性を確かめることができる。将来的な目標としては、WTS の 3 次元電流系についてモデルとの整合性についても議論可能にすることを設定している。

本発表では、2018 年 2 月 16 日 22:45:34UT に撮影された WTS イベントを、Tromsø (69.58° N, 19.23° E), Abisko (68.36° N, 18.82° E), Kilpisjärvi (69.05° N, 20.36° E) から 427.8nm 波長で撮影した画像データに対してトモグラフィ解析を行い、得られた 3 次元構造や降下電子エネルギー分布を報告する。加えて、今後の展望についても議論する。

[1] Y. Tanaka et al., Ann. Geophys., 29, 551 (2011).

R005-P23

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

2024 年 10 月 イベント時の南極昭和基地における電離圏変動

#埜 千尋¹⁾, 西岡 未知¹⁾, 高橋 直子¹⁾, 近藤 巧¹⁾, 永原 政人¹⁾, 安藤 慧¹⁾, 直井 隆浩¹⁾, 津川 卓也¹⁾

⁽¹⁾ 情報通信研究機構

Ionospheric variations observed at Syowa Station, Antarctica during the October 2024 space weather event

#Chihiro TAO¹⁾, Michi NISHIOKA¹⁾, Naoko TAKAHASHI¹⁾, Takumi KONDO¹⁾, Masato NAGAHARA¹⁾, Satoshi ANDOH¹⁾, Takahiro NAOI¹⁾, Takuya TSUGAWA¹⁾

⁽¹⁾National Institute of Information and Communications Technology

The National Institute of Information and Communications Technology (NICT) has been conducting continuous ionospheric observations at Syowa Station in Antarctica for over 60 years. Currently, vertical ionospheric observations using ionosondes and ionospheric scintillation measurements are ongoing. A major space weather event in October 2024 was triggered by solar X-class flares occurring near the center of the solar disk, followed by solar wind disturbances caused by coronal mass ejections, and the arrival of high-energy solar proton particles exceeding those observed during the May-2024 event. This led to significant geomagnetic storms, with horizontal geomagnetic field variations reaching -432 nT, and global ionospheric disturbances. Observations at Syowa Station (39.58° E, 69° S) revealed shortwave radio absorption on October 8 and 9-11, as well as negative phase storms on October 7-9 and 10-12. Phase scintillation also increased intermittently between over October 6-11. In this presentation, we will introduce and discuss the relationship between these ionospheric variations and energy inputs, along with the characteristics of polar cap absorption.

情報通信研究機構では、南極昭和基地において 60 年以上にわたり電離圏定常観測を行っている。現在、イオノゾンデを用いた電離圏垂直観測と衛星電波シンチレーション観測を実施している。2024 年 10 月の大規模宇宙嵐イベントは、太陽面の中央付近の位置から X クラスの太陽フレアが 2 回発生し、コロナガス放出による太陽風擾乱に加えて、2024 年 5 月イベントよりも多くの太陽高エネルギー粒子が地球環境に到来し、地磁気水平成分の最大変化量が約-432 nT となる大きな地磁気嵐および電離圏擾乱が観測された。東経 39.58 度、南緯 69 度に位置する南極昭和基地における電離圏観測では、10/8, 9 - 11 に短波帯電波吸収が見られ、10/7 - 9 および 10 - 12 において負相嵐が見られた。位相シンチレーションも 10/6 - 11 にかけて断続的に増大が見られた。高エネルギー粒子降込みと電離圏変動の対応関係や極冠吸収現象の特徴調査について、本発表で紹介する。

超稠密 GNSS 受信機網を用いた磁気嵐時の中緯度電離圏変動の研究

#古川 周良¹⁾, 細川 敬祐¹⁾

(¹ 電気通信大学)

Study of mid-latitude ionospheric variations during geomagnetic storms using an ultra-dense GNSS receiver network

#Chikara Furukawa¹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁾

(¹The University of Electro-Communications)

At altitudes of 60-500 km above the Earth's surface, there exists a region called the ionosphere, where the atmosphere is ionized by ultraviolet rays from the sun. This region is constantly changing in response to the influx of energy from above and below. In particular, traveling ionospheric disturbance (TID) is one of the ionospheric disturbance phenomena that causes errors in satellite positioning. TIDs are classified into several categories based on their time-spacial scale. Medium-scale TIDs (MSTIDs) have periods of 15 minutes to 1 hour and wavelengths of about 200 km, while large-scale TIDs (LSTIDs) have periods of 30 minutes to 3 hours and wavelengths of 1,000 km or more. Both are primarily driven by atmospheric gravity waves (AGWs), which are restoring forces generated by atmospheric buoyancy. However, large-scale AGWs are generally caused by explosive phenomena on the solar surface, such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs), and therefore solar activity and LSTIDs tend to be discussed together. Large-scale AGWs that drive LSTIDs tend to be generated by high-energy solar wind. Energy enters from the point where the magnetic field of the solar wind (IMF) and the magnetic field of the Earth's cancel each other out, and accumulates in the plasma sheet in the magnetotail. When this energy is released, particle precipitation into the polar regions and increased Joule heating cause an increase in the polar electric field, generating AGWs. The propagation direction of TID has been determined through statistical analysis of observation reports, and there is currently no theory to determine the propagation direction.

On October 10, 2024, during the solar maximum, a large-scale solar flare, the largest in magnitude in X-rays, and an accompanying geomagnetic storm were observed. On the same day, auroras, which are usually observed at high latitudes, were observed in mid-latitude Japan (Hokkaido), and the LSTID was observed moving south over Japan. To date, there have been many observational reports and theoretical studies on LSTIDs, but no observational reports have been made on a massive LSTID comparable to the event focused on in this study. Therefore, we analyze the propagation characteristics of LSTIDs at mid-latitudes by visualizing the variations in electron density over Japan using dense GNSS-TEC for the LSTIDs that occurred from October 10 to October 12, 2024.

地上から高度 60 – 500 km では電離圏と呼ばれる大気が太陽からの紫外線放射によって電離した領域が存在しており、その上方・下方からのエネルギー流入に応答する形で絶えず変動している。特に、電離圏電子密度の変動が高緯度から低緯度にかけて伝搬する現象である伝搬性電離圏擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance: TID) は電離圏変動現象の一つであり、衛星測位に誤差をもたらす原因の一つである。TID はその時空間スケールによっていくつかに分類される。周期 15 分 – 1 時間で、波長が 200 km 程度のものを中規模 TID (Medium-Scale TID: MSTID) と呼び、周期 30 分 – 3 時間、波長が 1,000 km 以上のものを大規模 TID (Large-Scale TID: LSTID) と呼ぶ。いずれも、大気の浮力を復元力とする大気重力波 (Atmospheric Gravity Wave: AGW) が主な駆動源ではあるが、大規模な AGW は一般的に、太陽フレアやコロナ質量放出 (CME) のような太陽表面での爆発現象に起因するため、太陽活動と LSTID は同時に議論される傾向にある。LSTID を駆動するような大規模な AGW の生成プロセスとしては、地球に到来した高エネルギー太陽風が、自身の磁場 (IMF) と地球磁気圏の磁場が打ち消す箇所から侵入し、磁気圏尾部のプラズマシートにエネルギーを蓄積する。それが解放されることによる極域への粒子降下やジュール加熱の増大による極域電場の増大に起因して生成される。また、これら TID の伝搬方向は観測報告からの統計的解析により明らかになったものであり、伝搬方向を定める決定論的メカニズムは現状存在しない。

2024 年 10 月 10 日、太陽活動の極大期に伴い、X 線による太陽フレア等級において最大クラスの大規模な太陽フレアとそれに伴う磁気嵐が観測された。同日、通常高緯度で観測されるオーロラが中緯度の日本 (北海道) で観測され、それに伴い、LSTID が日本上空を南下していく様子が確認された。これまで、LSTID に関して観測報告、理論研究が盛んに行われてきたが、本研究で注目しているイベントに匹敵する巨大な LSTID に関する観測報告は今まで行われていない。そこで、2024 年 10 月 10 日から 10 月 12 日にかけて発生した LSTID について、超稠密 GNSS-TEC を用いて日本上空の電子密度の時間変動を可視化することで、中緯度における LSTID の伝搬特性を解析する。

GNSS 観測に基づく日本-オーストラリア間における夜間中規模伝搬性電離圏擾乱の地磁気共役性の研究

#渡辺 一唯¹⁾, 大塚 雄一¹⁾, 新堀 淳樹¹⁾, 惣宇利 卓弥²⁾, MASUWARAN Veera Kumar³⁾, 西岡 未知⁴⁾, PERWITASARI Septi⁴⁾

⁽¹⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, ⁽²⁾ 京都大学生存圏研究所, ⁽³⁾ サストラミナシ大学, ⁽⁴⁾ 情報通信研究機構

Geomagnetic Conjugation of Nighttime Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances in Japan-Australia Based on GNSS Observation

#Kazui WATANABE¹⁾, Yuichi OTSUKA¹⁾, Atsuki SHINBORI¹⁾, Takuya SORI²⁾, Veera Kumar MASUWARAN³⁾, Michi NISHIOKA⁴⁾, Septi PERWITASARI⁴⁾

⁽¹⁾Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, ⁽²⁾Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁽³⁾SASTRA Deemed University, ⁽⁴⁾National Institute of Information and Communications Technology

Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs) are wave-like propagations of electron density perturbations that occur in the mid-latitude F region. Night MSTIDs are known to intensify through coupling with instabilities in sporadic E (Es) layers, which are more frequently observed in the summer hemisphere. Conjugate MSTIDs exhibiting mirror structures in both hemispheres along common magnetic field lines have also been reported. This suggests that electric fields generated in the Es layer are mapped along magnetic field lines, thereby enabling electromagnetic coupling of MSTIDs between hemispheres.

In this study, we performed a statistical analysis of ionospheric coupling between the northern and southern hemispheres. We utilized ionosonde data from four sites in Japan, together with total electron content (TEC) measurements derived from the Global Navigation Satellite System (GNSS) over Japan and its magnetic conjugate point in Australia, covering the years 2011 – 2020 and 2024.

The disturbance component of TEC (dTEC) associated with MSTIDs was obtained for each satellite – receiver pair by subtracting a 1-hour running mean from the original TEC data. MSTID activity was quantified as $\delta I/\bar{I}$, where δI denotes the average standard deviation of 1-hour TEC variations and $\bar{I}$ the background TEC, computed within a $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ area above each ionosonde. As indicators of Es-layer characteristics, we used foEs, the critical frequency of the Es layer. Correlation coefficients between foEs and the average MSTID activity (19:00-02:00 LT, May-August) were then evaluated.

The correlation between foEs over Japan and MSTID activity above Japan was consistently positive (0.2 to 0.8) across all years except at Okinawa, with higher values observed in the order Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, and Okinawa. This indicates that at higher latitudes, where Es-layer conductivity to the F region is enhanced and Perkins instability in the F region is weaker, MSTIDs rely more strongly on seeding from the Es layer, thereby exhibiting stronger coupling. Conversely, correlations between foEs in Japan and MSTID activity over Australia also tended to increase with latitude but were considerably smaller (-0.2 to 0.4) than the Japan – Japan correlations. These findings suggest that the influence of the Es layer on MSTIDs in the conjugate hemisphere is weaker than in the local hemisphere. This may imply that the polarization electric field generated by kilometer-scale Es layers produces electron density variations in the F region of the same hemisphere, which attenuate as they propagate along magnetic field lines to the opposite hemisphere, resulting in weak correlations with F-region electron density variations in the opposite hemisphere.

Additionally, we analyzed dTEC data from an MSTID event observed over Japan in June 2024 to quantitatively investigate the spatial correlation of TEC variations associated with MSTIDs between the northern and southern hemispheres, which are connected by magnetic field lines. Using the IGRF model, magnetic conjugate points were calculated for each $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ grid within the $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ areas where MSTID activity was evaluated above the four ionosonde sites. Correlation coefficients between dTEC over Japan and that over the corresponding conjugate grids were computed every 5 minutes. The results showed that during the MSTID occurrence interval (19:00 – 02:00 LT) over Japan, the correlation coefficient reached values up to 0.7, confirming that TEC variations associated with MSTIDs exhibit magnetic conjugacy. However, the correlation varied significantly with time, indicating the need for further detailed analysis.

中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) は、主に中緯度の F 領域で発生する電子密度の疎密構造が波状に伝搬する現象である。夜間に発生する MSTID は、夏半球側において発生頻度が高いスプラディック E 層 (Es 層) の不安定性と結合して成長することが知られている。また、同一の磁力線上に位置する南北両半球で鏡像の構造を持つ MSTID が観測されている。このことは、Es 層で発生した電場が磁力線に沿ってマッピングされることで、両半球の MSTID が電磁氣的に結合している可能性を示唆している。

本研究では、この南北半球の電離圏結合の統計解析を行うため、2011 年から 2020 年及び 2024 年における、日本国内 4 地点のイオノゾンドのデータと日本及び日本と磁気共役点であるオーストラリアの全球測位衛星システム (GNSS) から収集された全電子量 (TEC) を調べた。

MSTID による TEC の擾乱成分 (dTEC) を、衛星と受信機のペアごとに、元の TEC データから 1 時間の移動平均を差

し引くことで求めた。MSTID 活動度を、1 時間ごとの TEC 変動の標準偏差 (δI) を背景 TEC ($\bar{I}$) で規格化した $\delta I/\bar{I}$ として定義し、各イオノゾンデがある地点上空の $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ の領域で算出した。また、Es 層の特性を示す指標として、臨界周波数 foEs を使用し、5 月から 8 月の夜間（現地時間 19:00～翌 02:00）における平均 MSTID 活動度との日変動の相関係数を算出した。

日本の foEs と日本の MSTID 活動度の相関係数は、沖縄を除く 3 地点のすべての年で正の値を示し (0.2 から 0.8)、稚内、国分寺、山川、沖縄の順に高い値を示した。このことは、高緯度の方が F 領域に対する Es 層の導電率が高いことや F 領域でのパーキンス不安定が小さいことで、MSTID は Es 層からのシーディングがなければ十分に成長できないため、MSTID と Es 層の結合が強くなることが示唆される。一方で、日本の foEs とオーストラリアの MSTID 活動度の相関係数は、高緯度ほど最大値が大きくなったが、日本の foEs と日本の MSTID 活動度の相関係数と比較すると非常に小さい値であった (-0.2 から 0.4)。これらの結果から、Es 層が反対半球の MSTID に与える影響は、同半球の MSTID に与える影響よりも小さいことが考えられる。これは、数 km スケールの Es 層に起因する分極電場が、Es 層と同半球における F 領域電子密度の変動が生成されるが、磁力線に沿って反対半球に伝わる分極電場は減衰することにより、反対半球の F 領域電子密度変動とは相関が低いと考えられる。

また、磁力線でつながった南北両半球間において、MSTID による TEC 変動の空間構造の相関を定量的に調べるため、2024 年 6 月に日本上空で観測された MSTID 発生期間の dTEC データを解析した。IGRF モデルを用いて、MSTID 活動度を計算した 4 地点の緯度・経度 $4.05^\circ \times 4.05^\circ$ の範囲において $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ の各グリッドに対応する磁気共役点を計算した。日本上空の各グリッドにおける dTEC と、その磁気共役点に対応するグリッド上の dTEC との相関係数を 5 分ごとに算出した。その結果、日本において MSTID が発生していた 19-2 時において、相関係数は、最大 0.7 であり、MSTID による TEC 変動が磁気共役性を持っていることが確認できた。しかし、相関係数の時間変化が大きく、より詳細な解析が必要である。

R005-P26

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

PRE の強度に寄与する日没前電離圏電流の構造解析

#加藤 彰紘¹⁾, 吉川 顕正²⁾, 藤本 晶子³⁾

(¹ 九大/理学府/地球惑星科学専攻, (² 九大/理学研究院, (³ 九工大

Investigating Pre-sunset equatorial electrojet contributing to PRE

#AKIHIRO KATO¹⁾, Akimasa YOSHIKAWA²⁾, Akiko FUJIMOTO³⁾

(¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, (²Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, (³Kyushu Institute of Technology

In the ionospheric E region, there are both the eastward current (EEJ) and the westward current (CEJ). The currents about 2 hours before sunset (Evening EEJ/CEJ) control the intensity of the Pre-Reversal Enhancement (PRE), and it has been suggested that when the evening CEJ is incomplete or reverts to the EEJ component (CEJ + Evening EEJ), it affects the occurrence of plasma bubbles [Uemoto et al., 2010, Akiyama et al., 2019].

In this study, to clarify the daily, regional, and seasonal dependence of evening EEJ/CEJ, we analyzed the EE-index, which consists of the magnetic field variation due to globally varying magnetospheric currents (EDst) and the localized ionospheric magnetic field variations (EUEL) [Uozumi et al., 2008]. Additionally, semidiurnal lunar tidal variations were calculated from EUEL [Fujimoto et al., 2019]. Observation stations in the Asian and South American regions are used for comparison with previous studies

The composite waveforms of semidiurnal lunar tides and Sq currents were analyzed for each lunar time. As a result, characteristic waveforms combining CEJ and evening EEJ were observed when tidal effects are strong (e.g., during SSW). This result suggests that the superposition of semidiurnal lunar tides and Sq currents may promote the formation of eastward currents before sunset, i.e., PRE. This longitudinal dependence was observed in South America, particularly in the Peru sector.

In this presentation, we will discuss whether the evening EEJ/CEJ results from independent current systems or from the superposition of Sq currents and lunar tides, through comparative analysis of Asian and South American regions.

SWARM 衛星を用いた半球間沿磁力線電流の地方時および季節依存性に関する調査#圖子 裕亮¹⁾, 北村 健太郎¹⁾, 寺本 万里子¹⁾, 藤本 晶子¹⁾⁽¹⁾九州工業大学**Analysis of the dependence of Inter Hemispheric Field Aligned Current on solar period and seasonal variation**#Yusuke ZUSHI¹⁾, Kentaro KITAMURA¹⁾, Mariko TERAMOTO¹⁾, Akiko FUJIMOTO¹⁾⁽¹⁾Kyushu Institute of Technology

The formation of current systems in the ionosphere is driven by various factors, including the motion of the neutral atmosphere and current input from the magnetosphere, which interact in a complex manner. However, their overall structure has not yet been fully elucidated. While the two-dimensional characteristics of the Sq current system have long been studied (Takeda, 1980), its three-dimensional configuration that considers the inter-hemispheric field-aligned current (IHFAC) remains unresolved. The IHFAC is considered to arise from the potential difference between the northern and southern hemispheres associated with the Sq current system during geomagnetically quiet conditions. Nevertheless, its polarity and spatial relationship with the Sq current system have so far been investigated mainly through ground-based geomagnetic observations.

Fukushima (1979) reported three key features regarding the polarity of IHFAC: (1) in the dawn sector, the current flows from the summer to the winter hemisphere, whereas in the noon sector it flows in the opposite direction; (2) the polarity of IHFAC in the noon and dusk sectors is in phase; and (3) the current intensity is stronger in the dawn and noon sectors than in the dusk sector. In contrast, Ranasinghe et al. (2019, Earth, Planets and Space) analyzed ground-based magnetic field data at the Davao Observatory (7° N, 124.5° E) and reported different results from the classical model: polarity reversals were observed in the dawn and noon sectors around February and October, and the polarities of the noon and dusk sectors were found to be in anti-phase around June and December. However, these results were derived solely from the east – west component of the ground magnetic field and thus do not provide a comprehensive three-dimensional description that includes magnetic field variations at ionospheric altitudes.

In this study, we used the SWARM satellites, which observe the Earth's magnetic field in low Earth orbit (altitude about 450 – 500 m, orbital inclination about 87.4°), to analyze the variations of the east – west magnetic field due to IHFAC when the satellites passed over the observation point of the Davao Observatory in the Philippines (latitude $\pm 5^\circ$, longitude $\pm 10^\circ$), where previous studies had been conducted. We then compared these variations with ground-based observations in terms of seasonal dependence in three sectors: dawn, noon, and dusk. As a result, the seasonal polarity variations in each sector were generally consistent with those obtained from ground-based observations. On the other hand, in the dusk sector, while the ground-based observations showed symmetric variations in the D-component around 0 nT, the SWARM satellite observations at around 450 km altitude exhibited a baseline offset of about 10 nT eastward. This feature persisted throughout the year and suggests a new seasonal dependence of the southward current.

電離圏において電流システムを形成する要因は様々あり（中性大気の運動、磁気圏からの電流の入力など）、それらが複雑に影響を及ぼし合うが、現在もその全体的な構造は解明されていない。特に Sq 電流系に関しては、その二次元的な描像は古くから研究されてきているが（Takeda, 1980）、半球間沿磁力線電流 (inter-hemispheric field-aligned current ; IHFAC) を加味した三次元的な描像についてはいまだに明らかになっていない。IHFAC は、大気の静穏時に発生する渦状電流の Solar quiet(Sq) に起因する地球南北半球の電位差によって生じるとされているが、その極性や Sq 電流系との空間的な整合性については、これまで主に地上観測による解析が行われてきた。

Fukushima (1979) では、IHFAC の極性として (1) 明け方のセクターでは夏半球から冬半球に流れ、正午のセクターでは逆向きに流れる、(2) 正午と夕方のセクター間の IHFAC の極性は同位相になる、(3) IHFAC の強度は明け方と正午の両セクターで夕方より強い、といった 3 つの特徴を示している。これに対し、Ranasinghe et al. (Earth, Planets and Space, 2019) はダバオ観測所 (7° N, 124.5° E) における地上磁場解析から、明け方および正午のセクターにおいて 2 月、10 月付近で極性の反転が見られ、さらに 6 月、12 月で正午と夕方のセクターにおいて極性が逆位相になる、といった古典的モデルと異なる結果を報告している。しかし、これらの結果は地上磁場の東西成分のみより解析したものであり、電離圏高度における磁場変動を含めた三次元的描像を示すには至っていない。

本研究では極低軌道で地球磁場を観測している SWARM 衛星 (高度約 450~500km、軌道傾斜角約 87.4°) を用いて、観測点を先行研究が行われたフィリピンのダバオ観測所 (緯度 $\pm 5^\circ$ 、経度 $\pm 10^\circ$) を衛星が通過した際の磁場変動によって、IHFAC による東西方向磁場の変動を解析し、夜明け、正午、夕方の 3 つのセクターにおける季節依存性の地上観測との比較を行った。その結果、各セクターにおいて極性の季節変化はおおむね地上観測と同様の結行っても同様の結果が得られた。一方で夕方のセクターについては地上観測では D 成分の変動は 0nT 付近を基準に対称な変動を示していたが、SWARM 衛星による高度 450km 付近の観測では、東向きに 10nT 程度のベースラインのオフセットが見られた。この特徴は年間を通して発生しており、南向き電流の新たな季節依存性を示唆している。

東アジア地域/日本の夏季の降雨域における、キューブサット TEMPEST-D ミリ波水蒸気観測データの解析

#松本 侑大¹⁾, 前澤 裕之¹⁾

⁽¹⁾ 大阪公立大学大学院理学研究科物理学専攻

Analysis of TEMPEST-D CubeSat Millimeter-Wave Water Vapor Data over Summer Rainfall Regions in East Asia and Japan

#Yudai Matsumoto¹⁾, Hiroyuki MAEZAWA¹⁾

⁽¹⁾Dept. of Physics, Grad. Sch. of Science, Osaka Metropolitan Univ.

Recent global climate change has increased the occurrence of extreme weather events such as localized torrential downpours and linear rainbands, highlighting the growing need for observation networks that can improve forecast accuracy. In addition to conventional ground-based and meteorological satellite observations, wide-area and high-frequency measurements by CubeSats are increasingly regarded as a promising tool. In this study, we analyzed millimeter-wave observations at 87, 164, 174, 178, and 181 GHz obtained by the low Earth orbit CubeSat Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Demonstration (TEMPEST-D) (Reising et al., 2018, Proc. IEEE IGARSS), developed under NASA's Earth Venture Technology program and led by Colorado State University. The analysis focused on the summers of 2019 and 2020, during which heavy rainfall events occurred in Japan. Brightness temperatures in the 181 – 164 GHz range respond to scattering by cloud water and ice particles at altitudes of ~5 – 10 km, as well as to water vapor and atmospheric temperature, and showed good large-scale agreement with infrared data from the Himawari satellite (JAXA) and specific humidity fields from ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Furthermore, cold regions detected in the millimeter-wave channels corresponded well with heavy rainfall areas estimated from the hourly precipitation product of the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP; JAXA). In particular, brightness temperatures approaching 140 K are likely capturing cloud water and ice particles in deep convective systems reaching high altitudes. We also discuss cloud structures and their temporal evolution inferred from comparisons between 181/174 GHz data and hourly precipitation. These results suggest that CubeSats equipped with millimeter-wave sensors can provide valuable information on cloud structures and precipitation characteristics, and have strong potential to improve weather forecasting capability in the Asian region. We gratefully acknowledge the data support from Prof. Steven C. Reising (Colorado State University).

近年、地球規模での気候変動に伴い、ゲリラ豪雨や線状降水帯といった極端な気象事象が増加しており、予測精度の向上につながる観測網の必要性が高まっている。こうした中、従来の地上観測や気象衛星に加えて、超小型衛星による広域・高頻度の観測が有望視されている。本研究では、NASA の Earth Venture Technology プログラムの一環としてコロラド州立大学が主導した低軌道キューブサット Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Demonstration (TEMPEST-D) (Reising et al., 2018, Proc. IEEE IGARSS) による 87, 164, 174, 178, 181 GHz のミリ波観測データを解析した。解析対象は、日本で豪雨が発生した 2019 年および 2020 年の夏季である。181-164GHz 帯の放射輝度温度は、高度 5~10km 程度の水滴や氷晶による散乱、水蒸気量や大気温度に応答し、気象衛星「ひまわり」(JAXA) の赤外データや ECMWF Reanalysis v5 (ERA5; ECMWF) に基づく比湿分布とも大局的に一致していた。また、これらミリ波で捉えられた低温領域は Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP; JAXA) の 1 時間降水量から推定される雨量の多い領域とも良い一致を示した。特に 140K に迫る低温の放射輝度温度は、高高度まで発達した対流雲における水滴・氷晶を捉えていると考えられる。本研究では、181/174GHz と 1 時間降水量の比較から推察される雲の構造と時間発展についても議論する。これらの結果はミリ波センサーを搭載したキューブサットが雲構造や降水特性の把握に有用であり、アジア地域における気象予測能力向上に大きく貢献し得ることを示している。尚、本研究はコロラド州立大学 Reising 教授のご厚意によりデータ利用の許可を頂き実施したものであり、ここに謝意を表します。本発表ではこれら一連の解析結果を報告する。

高機能超小型衛星による温暖化ガス観測の戦略#高橋 幸弘¹⁾, 杉山 玄己¹⁾⁽¹⁾ 北大**Strategy for greenhouse gas observation using high-performance micro-satellite**#YUKIHIRO TAKAHASHI¹⁾, HARUKI SUGIYAMA¹⁾⁽¹⁾Hokkaido University

Methane is an important greenhouse gas on par with carbon dioxide, and in recent years, attention has been focused on its impact from industrial equipment in addition to cattle and rice paddies. Satellite-based methane observations have utilized techniques such as GOSAT, which measure high-precision spectra across a wide wavelength range at relatively low ground resolution. There is a growing effort to detect localized phenomena such as gas leaks using methods like the Canadian GHG Sat, which can identify high-density methane emission sources with higher spatial resolution. The latter can be achieved with relatively simple observation devices, making it feasible even for ultra-small satellites weighing less than 10 kg. Our group at Hokkaido University, in collaboration with Tohoku University, has achieved world-leading performance in multi-wavelength spectroscopic imaging with high spatial resolution (up to approximately 4 m) using a liquid crystal filter with a wavelength resolution of 10 nm. To distinguish methane and carbon dioxide absorption lines from other absorption lines, including those of water vapor, a wavelength resolution of 0.4 nm or higher is required. Here, we apply the observation method used for aurora bright lines. Additionally, to ensure sufficient light intensity, it is necessary to precisely control the satellite attitude and achieve pointing accuracy within the spatial resolution of the imaging device. Our research group is exploring strategies for high-sensitivity greenhouse gas observation with spatial resolution of several tens of meters on the ground, and this presentation will introduce the latest progress.

メタンは二酸化炭素に並ぶ温暖化ガスとして重要であり、近年は牛や水田に加え、工業的設備からのガス漏れの影響も注目されている。衛星によるメタンの観測は、GOSAT に代表されるような、比較的低い地上解像度で広い波長域のスペクトルを高精度で測定する手法が利用されてきた。加えて、ガス漏れのような局所的な現象を検知するための、カナダ GHG Sat のような、より高い空間分解能で高密度のメタン放出元を特定する動きがある。後者は比較的簡便な観測装置で可能なため、数 10kg 以下の超小型衛星でも十分観測が可能である。私たち北海道大学のグループは東北大学とともに、液晶フィルターを用いた 10nm オーダーの波長分解能での高空間解像度（最高約 4m）をもつ多波長分光撮像で世界随一の実績がある。メタンや二酸化炭素の吸収線を、水蒸気を含む他の吸収線と区別するためには、0.4nm 以上の波長分解能が必要になるが、ここではオーロラ輝線の観測方法を応用する。また、十分な光量を確保するために、衛星姿勢を高精度で制御し、撮像装置の空間分解能程度の視野の指向性を達成することも必要になる。本研究グループでは、地上で数 10m という高い空間解像度を持つ、高感度温暖化ガス観測の戦略を検討しており、本講演ではその最新の進捗状況を紹介する。

特異的減少傾向を持つ赤道ジェット電流 (EEJ) の発生特性の解明に向けた自動検出プログラムの開発

#菊池 裕夢¹⁾, 吉川 顕正²⁾

⁽¹⁾九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, ⁽²⁾九州大学

Development of an automatic detection method for analyzing EEJ characteristic with decreasing trends

#Hiromu Kikuchi¹⁾, Akimasa YOSHIKAWA²⁾

⁽¹⁾Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, ⁽²⁾Kyushu University

The Equatorial Electrojet (EEJ) is an eastward current observed in the equatorial region. However, cases have been reported in which the EEJ amplitude does not appear even on magnetically quiet days. We define these unusual events as “peculiar-type EEJ,” and have analyzed data from dip latitude stations (ANC, HUA) and an off-dip station (EUS) in the South American region over a five-year period from 2016 to 2020. As a result, peculiar-type EEJ events were identified on 70 days out of 1569 days. Their occurrence showed to have a seasonal dependence and a relationship with the lunar phase. Specifically, peculiar-type EEJ tends to occur more frequently in summer, and their appearance coincides with lunar phases during which westward currents are more likely, suggesting that lunar tidal effects may suppress EEJ. However, since the identification relied on visual inspection, quantitative evaluation was insufficient, and the possibility of human misclassification remained an issue.

In this study, we developed an automatic detection program for peculiar-type EEJ. The analysis showed that 38 events were confirmed by both visual inspection and automatic detection, 40 events were detected only by the automatic method, and 19 events were identified only by visual inspection. Among the latter, 11 cases were found not to be magnetically quiet days, indicating human errors. Furthermore, 40 events overlooked in visual inspection were newly identified by the automatic detection method. These results show that automatic detection improves the accuracy of peculiar-type EEJ identification and is effective for clarifying their occurrence characteristics. In this presentation, we discuss the analysis results on the occurrence characteristics of peculiar-type EEJ using the developed automatic detection method.

赤道ジェット電流 (Equatorial Electrojet: EEJ) は、赤道域で観測される東向きの電流である。しかし、磁氣的に静穏な日であっても通常よりも EEJ の振幅が現れない事例が確認されている。

これらの特異なイベントを「特異型 EEJ」と定義し、これまで我々は 2016 年から 2020 年までの 5 年間にわたり、南米地域の dip 観測点 (ANC, HUA) および off-dip 観測点 (EUS) のデータ解析を行ってきた。その結果、1569 日のうち特異型 EEJ が発生したのは 70 日であり、発生頻度の季節性および月齢との関連性が示唆された。具体的には、季節性においては夏季に多く観測される傾向があり、月齢との対応関係については、西向き電流が発生しやすい月齢において特異型 EEJ が多く出現しており、月潮汐による効果が EEJ を抑制している可能性が示唆されている。しかし、目視による判定に依存していたため、定量的評価が不十分であり、人為的誤判定の可能性が課題となっている。

そこで本研究では、特異型 EEJ を自動的に検出するプログラムを開発した。解析の結果、目視と自動検出の双方で確認された事例は 38 件、自動検出のみで検出された事例は 40 件、目視のみによる検出は 19 件であった。さらに、この 19 件のうち 11 件は実際には地磁気静穏日ではなく、人為的誤りが存在することが確認された。また、目視では見逃されていた 40 件は自動検出により新たに確認された。これらの結果から、自動検出手法は特異型 EEJ の検出精度を向上させ、その発生特性の解明に有効であることが示された。本発表では、開発した自動検出手法を用いて特異型 EEJ の発生特性についての解析結果について述べる。

プラズマバブル発生に対する CEJ の抑制効果とその終了時刻の関連性

#松岡 青空¹⁾, 吉川 顕正^{2,3)}, 加藤 彰紘¹⁾

(¹九州大学大学院 理学府 地球惑星科学専攻, (²九州大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門, (³九州大学大学院 理学府 地球惑星科学専攻 国際宇宙惑星環境研究センター

Influence of CEJ Termination Time on the Suppression of Plasma Bubble Generation

#Sora Matsuoka¹⁾, Akimasa YOSHIKAWA^{2,3)}, Akihiro KATO¹⁾

(¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, (²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, (³International Center for Space Weather Science and Education (ICSWE), Kyushu University

Plasma bubbles, a type of equatorial ionospheric density irregularity, are regions of depleted plasma density generated by the Rayleigh-Taylor (R-T) instability. The eastward electric field known as the Prereversal Enhancement (PRE), which promotes this instability, is thought to be weakened by the westward Counter-Electrojet (CEJ). Consequently, this is expected to suppress the Equatorial Spread F (ESF) that accompanies plasma bubble development [e.g., Uemoto et al., 2010]. However, events have been observed, for instance over Peru in South America, where ESF occurred despite the presence of a CEJ. Thus, the relationship between the equatorial electrojet and the generation of plasma bubbles is not yet fully understood.

Therefore, we investigated the relationship between magnetic field variations on days with CEJs and the occurrence of ESF by analyzing ground-based magnetometer data from days in 2010—a transitional period between solar minimum and maximum—when both phenomena were observed. In this study, we utilized the EUEL index, an indicator of the Equatorial Electrojet (EEJ), along with ionograms and the Rate of TEC Index (ROTI) to detect scintillation. This analysis yielded the following results: (1) Out of 144 days, excluding those with data gaps or magnetic disturbances, CEJ and ESF occurred on the same day in 22 cases. (2) Among these 22 cases, 19 events were identified where the CEJ concluded before 18:00 LT.

These results suggest that if a CEJ event terminates before the typical onset time of the PRE, when the eastward electric field is enhanced, its suppressive effect on ESF development is diminished. The remaining cases, where ESF was not suppressed despite the CEJ ending after 18:00 LT, are currently under analysis.

In this presentation, we will discuss the influence of the CEJ's characteristics on its ability to suppress Equatorial Spread F, based on the results presented above.

赤道域の電離圏不規則密度構造であるプラズマバブルは電離層内でのプラズマ密度が低くなる領域が生じる現象であり、レイリー・テイラー不安定性によって発生する。この不安定性を助長する東向きの電場 (プレリバーサルエンハンスメント: PRE) は、西向き電場のカウンタージェット電流 (CEJ) によって弱められ、その結果プラズマバブルの発生時に生じる赤道スプレッド F が抑制されると考えられている [e.g. Uemoto et al., 2010]。しかし、南米のペルーにおいて CEJ が観測されたにも関わらず赤道スプレッド F が抑制されずに観測されるイベントも存在している。このように、赤道ジェット電流とプラズマバブルの発生の関係性は十分に理解されていない。

そこで我々は、磁気的活動度が極小期と極大期の遷移期にあたる 2010 年の CEJ と赤道スプレッド F がともに発生した日の地上磁場データを解析することで、CEJ 発生日の磁場変動が赤道スプレッド F 発生とどのような関連性を持つかについて調査した。本研究では、EEJ モニタリング指数である EUEL と、シンチレーションを示すイオノグラムと ROTI を用いて解析を行った。これらの解析により以下の結果が得られた。(1) データ欠損および磁気擾乱日を除く 144 日中、22 日で CEJ と赤道スプレッド F の同日に発生していた。(2) 同日に発生した 22 日のうち、CEJ が 18:00LT より前に終了したイベントが 19 日確認された。

これらの結果から、東向き電場を強化する PRE が増大する時刻よりも前に CEJ が終了すれば、赤道スプレッド F の発達を抑制する効果が弱まると考えられる。ただし、22 日のうち 18:00LT 以降で CEJ が終了したが抑制できなかったイベントに関しては現在解析中である。

本発表では、上記の結果に基づき CEJ が持つ赤道スプレッド F の抑制効果への影響に関して議論する。

インドネシア・バンドンのBRIN滞在中に行った磁気嵐時プラズマバブルの研究

#惣宇利 卓弥¹⁾, Abadi Prayitno²⁾, Muafiry Ihsan Naufal²⁾, 西岡 未知³⁾, PERWITASARI Septi⁴⁾, 山本 衛⁵⁾

(¹⁾ 京大 RISH, (²) Indonesian National Research and Innovation (BRIN), (³) (独) 情報通信研究機構, (⁴) N I C T, (⁵) 京都大学

Characteristics of EPB occurrences over Indonesia during a geomagnetic storm in August 2024 ~Visiting Researcher Program in BRIN~

#Takuya Sori¹⁾, Prayitno ABADI²⁾, Ihsan Naufal Muafiry²⁾, Michi NISHIOKA³⁾, Septi PERWITASARI⁴⁾, Mamoru YAMAMOTO⁵⁾

(¹) Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, (²) Indonesian National Research and Innovation (BRIN), (³) National Institute of Information and Communications Technology (NICT), (⁴) National Institute of Information and Communications Technology (NICT), (⁵) Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Equatorial Plasma bubbles (EPBs) are known as the plasma density depletion regions in the equatorial ionosphere. It is also known that plasma density irregularities exist with multiple spatial scales inside EPBs. EPB generations are sometimes activated and suppressed by geomagnetic storms, depending on the phases of geomagnetic storms. A background eastward electric field is one of the most important factors for generating EPBs through the Rayleigh-Taylor instability. In this study, we found that plasma density irregularities related to EPBs were observed over the east side of Indonesia ($>120^{\circ}$ E) while they did not be generated over the west side of Indonesia ($<120^{\circ}$ E) during a geomagnetic storm that occurred on 12 August 2024. The purpose of this study is to clarify the characteristics of EPB generations over Indonesia during the geomagnetic storm by analyzing global navigation satellite system-rate of total electron content (TEC) index (ROTI) and ionosonde data.

ROTI enhancements appeared over the east side of Indonesia following the sunset terminators until ~12:00 UT on 12 August. On the other hand, ROTI enhancements did not be observed over the west side of Indonesia after ~12:00 UT. The north – south component of interplanetary magnetic field (IMF Bz) suddenly weakened at 12:00 UT although the IMF Bz directed still southward. Furthermore, the ionospheric virtual height (h'F) obtained from the ionosonde at Bac Lieu (9.30° N, 105.71° E: west side) was larger during the geomagnetically quiet day (11 August) than that during the geomagnetic storm after 12:00 UT. The h'F at Cebu (10.35° N, 123.91° E: east side) elevated to the high altitude before 12:00 UT during both the geomagnetic storm and geomagnetically quiet day. The h'F at Cebu declined after 12:00 UT during the geomagnetic storm.

During the main phase of geomagnetic storms under the southward IMF condition, penetration electric field over the equator enhanced due to the developments of convection electric field in the polar region through the magnetosphere – ionosphere coupling. The eastward penetration electric field over the equator is intensified after sunset, superposing the pre-reversal enhancement (PRE). On the other hand, a shielding penetration electric field also enhanced following the development of geomagnetic storms. The polarity of the electric field over the equator is opposite to that of penetration electric field; that is westward after sunset. We suggest that the shielding penetration electric field competed with the penetration electric field over the equator when southward IMF was decreased at 12:00 UT. The PRE at Bac Lieu occurred around 11:00 – 12:00 UT (18:00 – 19:00 LT) while the PRE at Cebu occurred around 10:00 – 11:30 UT (18:00 – 19:30 LT). Our results indicate that the PRE at Bac Lieu was suppressed due to the shielding electric field but the PRE at Cebu was not suppressed. Therefore, ROTI enhancements related to EPBs were generated only over the east side of Indonesia ($>120^{\circ}$ E) in this event. We can conclude that EPB generations during geomagnetic storms are controlled by storm-time electric field variations.

This study is supported by the visiting researcher program in BRIN. The TEC and ROTI data over Indonesia in the present analysis are available in the website (<https://gatokaca.brin.go.id/petaionosfer/ionosphericmap/>).

インドネシアのBRINが公募するVisiting Researcher Programに参加した。2か月の間インドネシアのバンドンに滞在し現地の研究者らと磁気嵐時のプラズマバブル発生に関する研究を行った。その解析結果をまとめて発表を行う予定である。

R005-P33

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

#PERWITASARI Septi¹⁾, 西岡 未知¹⁾

(¹NICT

Empirical Study of Vertical ExB Drift Velocity for Post-Sunset Equatorial Plasma Bubble Forecast

#Septi Perwitasari¹⁾, Michi Nishioka¹⁾

(¹National Institute of Information and Communications Technology

Equatorial plasma bubbles (EPBs) are a critical feature of space weather due to their significant impact on communication and navigation systems. Real-time monitoring of EPB occurrence is essential for mitigating radio signal degradation. To address this, we developed an automated EPB alert system based on spread-F detection from SEALION FMCW ionosondes. This study represents the next step toward EPB forecasting by establishing an empirical relationship between ionospheric parameters and the occurrence of Equatorial spread-F (ESF), without delving into the underlying physical mechanisms. For forecasting post-sunset EPBs, we utilize real-time h'F measurements to estimate the vertical ExB drift velocity. Using ionosonde data from Chiang Mai and Chumphon stations (2008 – 2014), we analyzed the probability of post-sunset (10 – 16 UT) ESF occurrence as a function of ExB drift velocity relative to its hourly median. To minimize geomagnetic influence, we selected March 2014, a period of extremely low geomagnetic activity (no magnetic storms; monthly mean K-index daily sum = 9.8). Our results indicate that the probability of ESF occurrence within the following hour increases with ExB drift velocity above the median. When the drift velocity is 0 – 10 m/s higher than the median, the probability is approximately 16.5%. This probability rises to about 52.6% when the velocity difference is 10 – 20 m/s and reaches 81.2% for a difference of 20 – 30 m/s. When the ExB drift velocity exceeds the median by more than 30 m/s, the occurrence probability reaches 100%. These findings provide a practical basis for real-time post-sunset EPB forecasting using ionosonde observations.

機械学習を用いた東・東南アジアの電離圏イオノグラムの自動読取

#劉 鵬¹⁾, 横山 竜宏¹⁾, 山本 衛¹⁾

⁽¹⁾ 京都大学生存圏研究所

Automatic Ionogram Scaling in East and Southeast Asia Based on Machine Learning

#Peng LIU¹⁾, Tatsuhiko YOKOYAMA¹⁾, Mamoru YAMAMOTO¹⁾

⁽¹⁾ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

The Earth's ionosphere is a region where a portion of the Earth's atmosphere is ionized into electrons and ions by sunlight. Various ionospheric anomalies and space weather phenomena in ionosphere can cause radio communication scintillation, satellite signal fluctuations, and larger positioning errors. The most widely used ionospheric observation equipment in the world is the ionosonde. It transmits pulse signals ranging from low to high frequencies vertically then obtains an image called ionogram (Figure b), which records the frequency and virtual height of ionospheric echoes. By scaling various parameters from the ionogram, the electron density distribution in the ionosphere (Figure c) can be derived.

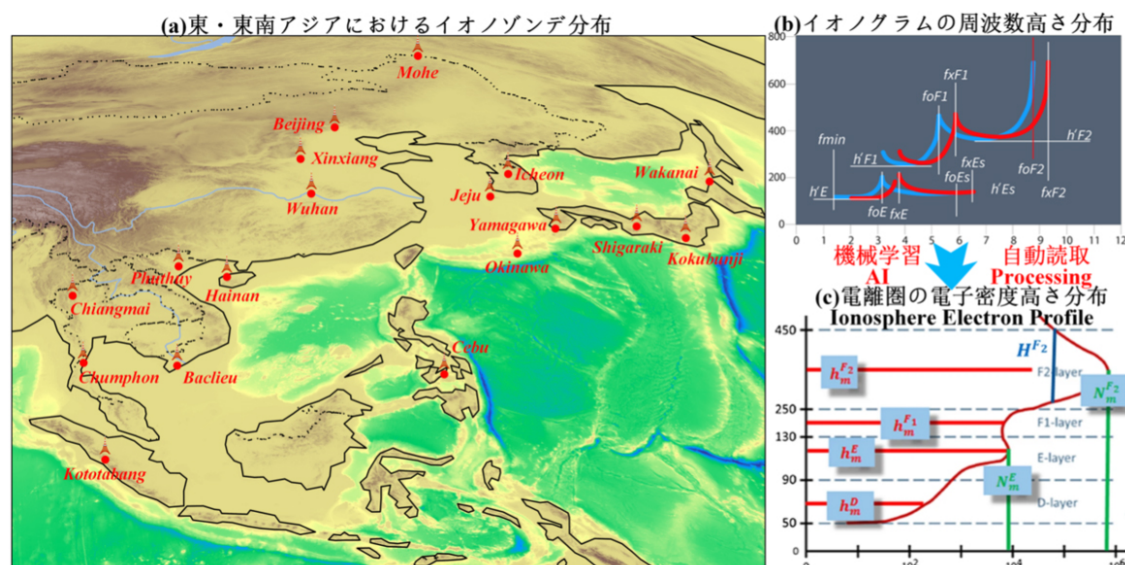
There are approximately 200 ionosondes worldwide, and their distribution in East and Southeast Asia is shown in Figure a. However, considering the ionogram formats of different ionosondes differ, a general intelligent processing system for ionograms is in high demand. Leveraging the recent progresses in artificial intelligence, this research aims to develop a new method for intelligently scaling ionograms based on instance segmentation technology.

The proposed method consists of five steps: 1), denoising the raw data; 2) creating labeled images and training the machine learning model; 3) automatically processing ionograms in east/southeast Asia by referencing the trained model; 4) restoring the coordinate system transformation from images to ionogram; 5) statistically analyzing the ionospheric disturbance phenomena and improving the IRI model accuracy. This research is crucial for industrial applications, such as improving the quality of GPS positioning and radio communications, as well as improving the accuracy of the IRI model.

地球電離圏は太陽光によって地球大気の一部が電子とイオンに電離した領域である。電離圏における様々な電離圏異常の宇宙天気現象が起きると、電波通信の途絶や異常反射、衛星信号の揺らぎや測位誤差の主な原因となる。世界で最も広く用いられている電離圏観測設備はイオノゾンデである。その原理は、低周波から高周波までのパルス信号を鉛直に送信し、反射エコー信号の周波数と見かけ高度を記録したイオノグラム (図 b) と呼ばれる観測データを取得する。イオノグラムから様々なパラメータを読み取ることによって、電離圏の電子密度分布 (図 c) が求められる。

全世界のイオノゾンデはおおよそ 200 機あり、そのうち東・東南アジアにおける分布を図 a に示す。異なるイオノゾンデから出力されたイオノグラムの形式は異なるため、全世界汎用のイオノグラム知能処理システムの構築が必要である。日本での 5 機、中国での 5 機、韓国での 2 機と東南アジアでの 6 機のイオノゾンデのイオノグラムデータは、現在まで有効に利用されていない。最近の目覚ましい人工知能の技術発展を利用し、イオノグラムを研究対象として新しい電離圏擾乱現象の知的な自動解析と電子密度パラメータの読み取り手法を本研究で創出することを目的とする。

本研究の提案手法の流れは五つの手順で構成される: 1) 生データのノイズ除去と可視化、2) 教師データの作成と機械学習モデル訓練、3) 訓練済みモデルを参照して数千万枚の画像の自動処理、4) 検出信号の画像座標系から元のイオノグラム座標系に復元してエコーの特性値を導出、5) 電離圏異常現象の統計解析と国際参照電離圏モデルの高精度化である。本研究は GPS 測位、無線通信など電離圏擾乱の影響を強く受ける電波利用技術の高品質化、及び国際参照電離圏モデルの高精度化などの産業応用にとって不可欠な基礎研究である。



機械学習を用いたイオノグラム画像からのスプレッド F 定量評価手法の提案

#春名 健太郎¹⁾, 劉 鵬¹⁾, 横山 竜宏¹⁾

(¹ 京都大学

Proposal of a method for quantitative evaluation of spread F from ionogram images using machine learning

#Kentaro Haruna¹⁾, Peng LIU¹⁾, Tatsuhiko YOKOYAMA¹⁾

(¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

The Earth's ionosphere extends from an altitude of 50 – 60 km to 1,000 km, where atmospheric molecules and atoms of nitrogen and oxygen contained in the Earth's atmosphere are partially ionized by radiation energy such as ultraviolet rays from the sun and exist as plasma. In ionospheric observations, automated scaling of ionograms have advanced, enabling efficient analysis of electron density and reflection frequencies. However, when ionospheric disturbances such as spread F occur, the shape of the ionogram becomes complex, making accurate analysis difficult with conventional automated scaling. Traditionally, the evaluation of spread F has been dependent on researchers' experience. Attempts to automatically detect spread F in ionograms from Shigaraki MU Observatory and Chiang Mai, Thailand, led us to recognize that establishing quantitative criteria for evaluating its presence and severity is essential to improve the accuracy of automated analysis systems. In this study, we propose a method for quantitatively evaluating the degree of spread from ionogram images when spread F occurs. To detect the echo regions corresponding to spread F in the images, we used Mask R-CNN, which excels at object detection. We calculated features such as area, perimeter, shape ratio, point density, and color distribution for each detected region, and combined them to score the degree of spread. The scoring function was constructed based on ionogram images from Shigaraki MU Observatory and Chiang Mai, with the goal of ensuring it can generalize to other observation sites using only a few sample images. The results of applying the proposed method showed that the detection accuracy of spread F using the scoring function was consistent with human visual evaluation, and that it was possible to continuously quantify the degree of spread from mild to severe. This method can be applied to the automation of ionogram analysis and the quantitative evaluation of ionospheric disturbances, and it is expected that its generalization performance will be verified through application to long-term observation data and interregional comparisons in the future.

地球の電離圏は高度 50 – 60 km から 1000 km にわたって存在し、この領域では地球大気に含まれる窒素や酸素の大気分子・原子が太陽からの紫外線などの放射エネルギーによって一部電離し、プラズマとして存在している。電離圏の観測においては、イオノグラムの自動読み取りが進んでおり、電子密度や反射周波数の解析が効率的に行われつつある。しかし、スプレッド F のような電離圏擾乱が発生すると、イオノグラムの形状は複雑化し、従来の自動読み取りでは正確な解析が困難となる。従来、スプレッド F の判定は研究者の経験に依存してきた。信楽およびタイ・チェンマイで観測されたイオノグラムの自動検出を試みた結果、スプレッド F の有無や度合いを定量的に評価する基準の整備が、自動解析システムの精度向上に不可欠であることが認識された。本研究では、スプレッド F 発生時のイオノグラム画像から、スプレッドの度合いを定量評価する手法を提案する。画像中のスプレッド F に対応するエコー領域の検出には、物体検出に優れた Mask R-CNN を用いた。検出領域ごとに面積、周囲長、形状比、点群密度、色分布などの特徴量を算出し、これらを組み合わせてスプレッド度合いをスコア化した。スコアリング関数は、信楽およびチェンマイで観測されたイオノグラム画像をもとに構築し、新たな観測地点に対しても、少数のサンプル画像を用いるだけで適用可能な汎化性の確立を目指した。提案手法を適用した結果、スコアリング関数によるスプレッド F の検出精度は、人間の目視評価と整合性を示し、弱度から強度までのスプレッド度合いを連続的に定量評価できることが示された。本手法は、イオノグラムの解析自動化および電離圏擾乱の定量評価に応用可能であり、今後は長期観測データへの適用や地域間比較による汎化性能の検証が期待される。

機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析

#寺内 充¹⁾, 劉 鵬¹⁾, 横山 竜宏¹⁾

⁽¹⁾ 京都大学生存圏研究所

Long-term Statistical Analysis of Shigaraki Ionosonde Observations Using Machine Learning Models

#Mitsuru Terauchi¹⁾, Peng LIU¹⁾, Tatsuhiro YOKOYAMA¹⁾

⁽¹⁾Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

The Earth's ionosphere extends from an altitude of about 50 – 60 km up to 1000 km. In this region, molecules and atoms in the neutral atmosphere are partially ionized by ultraviolet radiation and other forms of solar energy, resulting in the generation of plasma. The ionosphere has a layered structure consisting of the F, E, and D regions, among which the F2 layer, located at around 250 – 400 km altitude, exhibits the highest electron density and strongly influences the propagation characteristics of long-distance shortwave communication and satellite navigation systems. Because electron density is affected by plasma, it shows diurnal, seasonal, and multi-year variations, while also undergoing irregular fluctuations caused by geomagnetic disturbances, sporadic E layers, and plasma bubbles. The ionosphere reflects radio waves, and the reflection frequency and altitude are determined by the vertical distribution of electron density. Therefore, long-term observation and analysis of electron density in the ionosphere play an important role in the development of communication technologies.

Observation methods for the ionosphere include ionosondes, incoherent scatter (IS) radars, and artificial satellites, each with its own characteristics. At the MU Observatory, located in Shigaraki, Kōka City, Shiga Prefecture, both an ionosonde and the MU radar—an atmospheric radar designed to observe the middle and upper atmosphere—are installed. The MU radar also functions as an IS radar, enabling continuous ionospheric observations. At the Shigaraki MU Observatory, ionospheric monitoring using the ionosonde is routinely conducted alongside MU radar measurements. The ionosonde works by transmitting upward-directed radio waves with varying frequencies from the ground and recording the signals reflected by the ionosphere. Since the MU radar data alone cannot provide absolute electron density values, calibration using ionospheric parameters obtained from ionograms observed by the ionosonde is required. However, currently, ionospheric parameters are not manually extracted from the ionograms at Shigaraki MU Observatory. Furthermore, manually deriving such parameters from the entire archive of past observations would require enormous time and effort, making it impractical.

To address this issue, this study developed an automatic ionosonde reading system using a machine learning model to automatically extract the critical frequency of the F2 layer (foF2). The proposed method consists of noise reduction for ionograms and machine learning using Mask R-CNN, achieving an accuracy of 95.70% in validation. The automatically extracted foF2 values spanning 22 years were compared with ionosonde observation data from Kokubunji to validate their reliability. The comparison with Kokubunji showed a strong correlation with the Shigaraki results, while also revealing the influence of sporadic E layers on reading accuracy. Furthermore, a comparison with the empirical IRI model was conducted to evaluate the long-term statistical characteristics at Shigaraki. The comparison with the IRI model confirmed that the overall trend of electron density variations was consistent, and long-term changes were found to correlate with solar activity.

地球の電離圏は高度 50-60 から 1000km の範囲に存在し、この領域では地球の中性大気内の分子・原子が太陽からの紫外線などの放射エネルギーによって一部電離し、プラズマが生成されている。電離圏は F、E、D 層といった高度ごとの層構造を持ち、特に高度 250 – 400 km 付近に位置する F2 層は最も電子密度が高く、長距離短波通信や衛星測位システムの伝搬特性に大きな影響を与える。電子密度はプラズマが関わってくるため日変化や季節変化や数年単位での周期的な変動が見られる一方で、地磁気擾乱による電離圏あらしやスボラディック E 層・プラズマバブルといった不規則な変動が起こる。電離圏は電波を反射する性質を持ち、反射周波数や反射高度は電子密度の高度分布によって決まる。よって電離圏における電子密度の長期的な観測と解析は、通信技術の発展において重要な役割を持つ。

電離圏観測の手段には、イオノゾンデ・非干渉散乱 (IS) レーダー・人工衛星などがあり、それぞれの観測手段には特徴がある。滋賀県甲賀市信楽町に位置する MU 観測所には、イオノゾンデと中層大気・超高層大気を観測するための大気観測レーダーである MU レーダーが設置されており、IS レーダーとして電離圏の観測が続けられている。また、信楽 MU 観測所では、MU レーダーでの観測と合わせてイオノゾンデによる電離圏観測が定常的に実施されている。イオノゾンデでは地上から電波の周波数を変化させながら上方に向けて発射し、電離圏で反射される様子を記録している。MU レーダーのデータからは直接電子密度の絶対値を求めることができず、イオノゾンデによる観測結果であるイオノグラムから得られる電離圏パラメータを用いた較正が必要となる。しかし、現在、信楽 MU 観測所のイオノグラムの電離圏パラメータの読み取りは手動で行われていない。また、過去のすべての観測データから手動で電離圏パラメータを読み取ることは膨大な時間と労力を要し、現実的ではない。

この問題を解決するため、本研究では機械学習モデルを用いたイオノゾンデの自動読み取りシステムにより、F2 層

での臨界周波数 (foF2) の自動抽出を行った。提案手法は、イオノグラムのノイズ除去と Mask R-CNN による機械学習からなり、検証では 95.70% の正確性を達成した。提案手法により読み取った 22 年間分の foF2 の値は国分寺のイオノゾンデ観測データと比較し、測定の妥当性を検証した。国分寺との比較では、信楽の読み取り結果との高い相関が確認でき、スプラディック E 層による読み取り精度への影響も見られた。また、電離圏の経験モデルである IRI モデルとの比較を行い、信楽の長期統計の特性を評価した。IRI モデルとの比較では電子密度の変化の傾向が概ね一致することが確認され、長期変化では太陽活動とも相関が見られた。

VIPIR 型イオノゾンデおよび機械学習を用いたパラメータ自動抽出手法の高度化

#西岡 未知¹⁾, 埜 千尋¹⁾, 津川 卓也¹⁾

⁽¹⁾ 情報通信研究機構

Development and Evaluation of AI Models for Automatic Scaling of Ionospheric Parameters and letters from VIPIR Ionosonde Data

#Michi NISHIOKA¹⁾, Chihiro TAO¹⁾, Takuya TSUGAWA¹⁾

⁽¹⁾National Institute of Information and Communications Technology

The National Institute of Information and Communications Technology (NICT) has been conducting ionospheric observations using ionosondes in Japan for over 70 years. Currently, regular observations are carried out every five minutes at four sites: Wakkanai/Sarobetsu (WK546), Kokubunji (TO536), Yamagawa (YG431), and Okinawa/Ōgimi (OK426). The ionograms obtained are automatically scaled and parameters such as foF2 and foEs are published via the NICT website.

In 2016 – 2017, NICT upgraded its ionosonde systems to VIPIR, which allows to separate ordinary and extraordinary modes ionograms. This capability enabled to improve the original automatic scaling methods using AI models. Initially, instance segmentation models were used to detect the echo regions of the E and F layers as rectangular areas. However, this approach could not distinguish between the F1 and F2 layers, resulting in limited accuracy for parameters such as foF1. To address this, a semantic segmentation model was introduced to detect the echoes themselves, leading to improved parameter estimation accuracy. Furthermore, a new model was developed to automatically assign qualifying and descriptive letters, which had previously only been added during manual scaling. This presentation evaluates the performance of these AI-based automatic scaling methods.

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) は 70 年以上にわたって日本でイオノゾンデによる電離層観測を行ってきた。現在は、稚内/サロベツ (WK546)、国分寺 (TO536)、山川 (YG431)、沖縄/大宜味 (OK426) の 4 つの観測点で 5 分おきの定常観測を行っている。取得されたイオノグラムからは、foF2 や foEs 等のパラメータが自動抽出され、Web サイト (<https://wdc.nict.go.jp/Ionosphere/index.html>) を通じて公開されている。

NICT におけるイオノゾンデ装置は、2016-2017 年に正常波と異常波が分離可能な VIPIR 型イオノゾンデに更新された。VIPIR 型イオノゾンデを用いると、正常波のイオノグラムと異常波のイオノグラムが独立して取得可能なため、我々は、AI モデルを活用することによりパラメータの自動抽出手法の向上に成功した。本方法では、イオノグラムより E 領域と F 領域のエコー領域をそれぞれ矩形で検出するインスタンス・セグメンテーションモデルを用いていた。一方で、該当方法では F1 層と F2 層の違いを区別することができず、foF1 等一部のパラメータの精度には改善の余地があった。そこで、エコーそのものを検出するセマンティック・セグメンテーションモデルを用いてパラメータ抽出の精度の向上を図った。さらに、これまでは自動読み取りには付与されていなかった説明記号および限定記号を付与するモデルも開発した。本発表では、これらの自動パラメータ抽出モデルについてその評価を行う。

イオノゾンデ受信機網によるスプラディック E 層の水平構造と水平移動の観測

#古城 侑季¹⁾, 齊藤 昭則¹⁾, 西岡 未知²⁾, 前野 英生²⁾, 近藤 巧²⁾, 安藤 慧²⁾

(¹⁾ 京都大・理・地球物理, (²⁾ 国立研究開発法人情報通信研究機構

Horizontal structures and movements of sporadic E layers observed with ionosonde receiver network

#Yuki Kojo¹⁾, Akinori Saito¹⁾, Michi Nishioka²⁾, Hideo Maeno²⁾, Takumi Kondo²⁾, Satoshi Andoh²⁾

(¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, (²National Institute of Information and Communications Technology

The sporadic E (Es) layer is a dense plasma layer that sporadically appears in the ionospheric E-region, around 90 – 130 km altitude. Its formation and transport are strongly influenced by neutral winds. In particular, vertical shears of zonal winds cause convergence of metallic ions, leading to the formation of Es layers, which are considered to be horizontally transported by background winds. In recent years, studies on the horizontal structures and movements of Es layers using total electron content (TEC) observations have progressed. However, since only high-density Es layers can be detected by TEC, ionosonde observations, which can continuously detect Es layers, are effective for investigating their typical behavior, including lower-density cases. Conventional ionosonde networks, however, are too widely spaced to detect the horizontal structures and movements of Es layers.

To overcome this limitation, we installed new ionosonde receivers in Kyushu, Japan, and established an observation network with horizontal scales that enable monitoring of horizontal movements of Es layers. In June 2023, the receivers were installed at Aso and Miyazaki. By receiving HF signals transmitted from the Yamagawa ionosonde, we conducted oblique observations of Es layers at the midpoints of the Yamagawa – Aso (190 km) and Yamagawa – Miyazaki (100 km) paths. The distance between Aso and Miyazaki is 125 km, and this observation network enables tristatic observation with horizontal scales of about 50 – 100 km. Subsequently, additional receivers were installed at Beppu (245 km from Yamagawa) in July 2024 and at Kochi (307 km from Yamagawa) in March 2025, extending the horizontal scale of the observation network to about 150 km. This expansion improved the ability to detect horizontal movements faster than 100 m/s, and enabled the investigation of larger-scale horizontal structures of Es layers. In this study, we present the results of analyses of horizontal movements and structures of Es layers observed by this five-station network at Yamagawa, Miyazaki, Aso, Beppu, and Kochi, and discuss their formation and transport by neutral winds.

スプラディック E (Es) 層は、高度約 90 – 130 km の電離圏 E 領域に突発的に現れる高密度プラズマ層であり、その形成や輸送には中性風が大きく関与している。特に東西風の鉛直シアによる金属イオンの集積が Es 層の形成の主要因とされ、形成された Es 層は中性風にドラッグされて水平移動することが知られている。近年は TEC 観測による Es 層の水平構造や水平移動の研究が進んでいるが、TEC で観測される Es 層は高密度のものに限られるため、低密度の Es 層を含めた典型的な挙動について調べるためには、定常的に Es 層が検出可能なイオノゾンデ観測が有効である。しかし、従来のイオノゾンデ観測地点の間隔は広く、Es 層の水平構造や移動を検出することは難しかった。

そこで我々は、九州地方に新たにイオノゾンデ受信機を設置し、Es 層の水平観測が可能な水平スケールの観測網を構築した。2023 年 6 月に阿蘇・宮崎に受信機を設置し、山川イオノゾンデからの HF 波を受信することで、山川-阿蘇 (190 km)、山川-宮崎 (100 km) の中点上空の Es 層を斜め観測した。阿蘇-宮崎間は 125 km であり、この観測網により水平スケール約 50 – 100 km の 3 点観測を実現した。さらに、2024 年 7 月に別府 (山川から 245 km)、2025 年 3 月に高知 (山川から 307 km) に受信機を追加し、観測網の水平スケールを最大約 150 km まで拡大した。これにより、100 m/s 以上の移動の検出や、広域的な Es 層の水平構造の把握が可能となった。本研究では、山川・宮崎・阿蘇・別府・高知の 5 地点からなる観測網を用いた Es 層の水平移動および構造解析の結果を示し、Es 層の形成過程や中性風による輸送過程について議論する。

スボラディック Ca^+ 層の時空間構造 ～層高度の短周期変動～

#山川 梓¹⁾, 江尻 省^{1,2)}, 中村 卓司^{1,2)}, 西山 尚典^{1,2)}, 津田 卓雄³⁾, 阿保 真⁴⁾, 津野 克彦⁵⁾, 小川 貴代⁵⁾, 和田 智之⁵⁾

(¹⁾ 総研大, (²) 極地研, (³) 電通大, (⁴) 都立大, (⁵) 理研

Spatiotemporal structure of a sporadic Ca^+ layer ~ short-period height variation ~

#Azusa Yamakawa¹⁾, Mitsumu K. Ejiri^{1,2)}, Takuji Nakamura^{1,2)}, Takanori Nishiyama^{1,2)}, Takuo T. Tsuda³⁾, Makoto Abo⁴⁾, Katsuhiko Tsuno⁵⁾, Takayo Ogawa⁵⁾, Satoshi Wada⁵⁾

(¹) The Graduate University for Advanced Studies, (²) National Institute of Polar Research, (³) University of Electro-Communications, (⁴) Tokyo Metropolitan University, (⁵) RIKEN

Sporadic E layers (EsL) occurring in the ionospheric E region at altitudes of 90-150 km are thin layers with very high electron density (a few kilometers thick), that also contain abundant metallic ions. EsL cause radio communication disturbances in the HF/VHF bands. Therefore, elucidation of the mechanisms of EsL formation and evolution is important. In the mid-latitude region, EsL have been understood to be formed by convergence of metallic ions in the ionospheric E region due to the vertical shear of neutral horizontal winds and the geomagnetic field. However, observation of the spatiotemporal structure of EsL is limited, and their morphological variations and evolutions remain unclear. The primary source of metals in the ionospheric E region is meteors, and there are layers of metallic atoms and ions such as iron, magnesium, sodium, calcium, and so on. Among them, calcium ion (Ca^+) is the only metallic ion that can be observed from the ground by resonance scattering lidar.

The National Institute of Polar Research (NIPR) developed a frequency-tunable resonance scattering lidar and conducted Ca^+ observations in Tachikawa, Japan (2014-2016) and at Syowa Station in the Antarctic (2017-2018). The lidar transmitter was based on an injection-seeded, pulsed alexandrite ring laser for 768-788 nm (the fundamental wavelengths) and a second harmonic generation (SHG) unit for 384-394 nm (the second harmonic wavelengths). The laser wavelengths can be tuned into the Ca^+ resonance wavelength (393 nm) by a wavelength meter that is calibrated using a wavelength-stabilized He-Ne laser. The average laser output at the Ca^+ resonance wavelength was approximately 80 mW, and the repetition rate was ~25 Hz.

In this study, we analyzed a sporadic Ca^+ layer observed on September 1, 2016 at Tachikawa (35.7° N, 139.4° E), and investigated the periodic height variation of Ca^+ layer, that was found at altitudes of 99-101 km between 15:55-16:20 UT. The Ca^+ density profiles had height and time resolutions of 165 m (smoothed from 15 m resolution data) and 5 s, respectively. We derived the centroid altitude of each Ca^+ density profile and fitted its temporal variation with a sinusoidal curve. From this fitting, the vertical displacement amplitude and the observed (ground-based) oscillation period were estimated to be 170 m and 7.5 minutes, respectively. Then, the dispersion relation of internal gravity waves and the relation between ground-based and intrinsic frequencies were subsequently applied, in order to determine gravity wave parameters such as horizontal wavelength and phase velocity that could account for the observed oscillation. Vertical wavelength and the background wind speed was assumed, the latter of which was considered referring to the JAWARA reanalysis data of corresponding time and altitude. Our investigation suggested that the wave propagation direction was in the same direction as the background wind rather than the opposite direction, when the observed oscillation is caused by internal gravity waves.

高度 90-150 km の電離圏 E 領域に散発的に発生するスボラディック E 層 (Es 層) は、電子密度の非常に高い薄層 (層厚数 km) であり、金属イオンを多く含むことで知られている。Es 層は短波・超短波通信において通信障害を引き起こすため、その発生や強度変動の予報が求められている。そのため Es 層の生成と消長の機構を明らかにすることは重要である。中緯度帯における Es 層の成因については、中性水平風の鉛直シアと地球磁場の効果により、この領域に多く存在する金属イオンが収束することであると理解されている。一方で、Es 層の空間構造を観測する手段は限られており、その形状変化と消長については依然として不明な点が多い。電離圏 E 領域に存在する金属の主な供給源は流星であり、鉄、マグネシウム、ナトリウム、カルシウムなどの金属原子およびイオン層が存在する。その中で地上から共鳴散乱ライダーによって観測可能な金属イオンはカルシウムイオン (Ca^+) のみである。

国立極地研究所は、 Ca^+ 密度観測が可能な波長可変共鳴散乱ライダーを開発し、2014-2016 年に立川で、2017-2018 に南極の昭和基地で観測を行った。観測に用いた波長可変共鳴散乱ライダーは、送信系に波長可変のアレキサンドラトリミングレーザーと第 2 高調波発生器を用い、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 (768-788 nm) および第 2 高調波 (384-394 nm) の任意の波長のレーザーパルスを得ている。 Ca^+ 共鳴波長における平均レーザー出力は約 80 mW、繰り返し周波数は約 25 Hz であった。このライダーを使った立川 (35.7° N, 139.4° E) での観測では、微細構造の中に背景の中性風によって引き起こされたと考えられる Ca^+ の波状構造 (高度 91-97 km) や、中性大気の流れに反応して形成されたと考えられる Ca^+ の周期的な鉛直変位 (高度 100-101 km) 等が報告されている [江尻他, 2019]。しかしその構造の成因についての詳細な議論は行われていなかった。

そこで本研究では、2016 年 9 月 1 日の 14:03-19:41 UT に行われた Ca^+ 密度観測の中で、15:55-16:20 UT に高度

99-101km で観測されたスボラディック Ca^+ 層の周期的な高度変化の詳細を調べた。解析に用いたデータの距離分解能は 165m(15 m ごとのデータを平滑化した)、時間分解能は 5 秒であった。 Ca^+ 密度の各時刻におけるプロファイルの重心高度を求め、その時間変化に正弦波をフィッティングすることで、鉛直変位の振幅は 170 m、観測周期 (対地周期) は 7.5 分と求められた。この振動現象が内部重力波によって引き起こされたものであると仮定し、とり得る重力波のパラメーターを求めた。具体的には、鉛直波長を仮定し、さらに大気再解析データ JAWARA を参考にして対象時刻と高度における背景風速の範囲を設定した。その上で、内部重力波の分散関係式および対地周波数と固有周波数の関係式を適用し、観測された振動を説明し得る水平波長や位相速度といった重力波パラメーターを導出した。その結果、観測された振動が内部重力波によるものである場合、その波動は背景風と同じ向きに伝搬していたものと示唆された。

S-310-46 号機観測ロケットにより観測された Es 層発生時の電離圏中の電場の初期解析

#坂野 秀真¹⁾, 松山 実由規²⁾, 石坂 圭吾²⁾, 齊藤 昭則³⁾, 阿部 琢美⁴⁾

(¹⁾ 富山県大, (²⁾ 富山県立大学, (³⁾ 京都大学, (⁴⁾ 宇宙航空研究開発機構

Initial analysis of the electric field in the ionosphere at the onset of the Es layer observed by the S-310-46 sounding rocket

#Hotsuma SAKANO¹⁾, Miyuki MATSUYAMA²⁾, Keigo ISHISAKA²⁾, Akinori SAITO³⁾, Takumi ABE⁴⁾

(¹⁾ Toyama Prefectural University, (²⁾ Toyama Prefectural University, (³⁾ Kyoto University, (⁴⁾ JAXA

The sporadic E layer (Es layer) is like a cloud of metal ions that appears suddenly in the E layer at an altitude of around 100 km. The emission of the Es layer causes radio waves to be reflected at an altitude of around 100 km, reaching further than expected, which contributes to interference. The formation process of the Es layer is not yet understood. To understand the formation process of the Es layer, the S-310-46 sounding rocket was launched from the Uchinoura Space Center at 12:00 (JST) on 15 July 2025.

The electric field is one of the important parameters that affect metal ions. In this rocket experiment, the electric field in the ionosphere during the generation of the Es layer was observed by the Electric Field Detector (EFD). The EFD observed the potential at each of the electrodes at the tips of the two antennas. The electric field is derived by dividing the potential difference by the distance between the electrodes. The measurement frequency is DC-40 Hz, the distance between electrodes is 4 m and a total of four antennas are mounted so that two pairs are orthogonal to each other. In this rocket experiment, three of the EFD's four antennas were deployed and observations were made with those three antennas. For the one pair of antennas that were successfully observed, periodic fluctuations in the electric field were observed with a period of about 10 seconds. This electric field is mainly composed of the induced electric field generated when the rocket crosses in the geomagnetic field. The period of observed electric field coincides with the rocket spin period. Therefore, the rocket spin period is longer than predicted. In this presentation, we present the results of the electric field observed by the EFD on the S-310-46 sounding rocket and an analysis method that considers the effects of unanticipated events.

スプラディック E 層 (Es 層) とは、高度 100km 付近の E 層に突発的に出現する金属イオンの雲である。Es 層が出ていることにより高度 100km 付近で電波が反射され、想定以上の遠方まで届いてしまうことで混信の一因となっている。Es 層の形成過程はまだ解明されていない。そこで、Es 層の形成過程を理解するために S-310-46 号機観測ロケットが内之浦宇宙空間観測所より 2025 年 7 月 15 日 12:00(JST) に打ち上げられた。

電場は金属イオンに影響を及ぼす重要なパラメータの 1 つであり、本ロケット実験では、Es 層発生時の電離圏中の電場を電場観測装置 (EFD) によって観測した。EFD は 2 本のアンテナ先端の電極でそれぞれ電位を観測し、その電位差を電極間距離で割ることで電場を導出することができる。計測周波数は DC~40 Hz、電極間距離は 4 m で、2 組が直交する様に合計 4 本のアンテナが搭載された。本ロケット実験では、EFD の 4 本のアンテナのうち、3 本が展開され、その 3 本のアンテナで観測した。正常に観測できた 1 組のアンテナでは、約 10 秒周期の周期的な電場の変動が観測された。この電場はロケットが磁場中を横切る際に発生する誘導電場が主成分であり、この周期とロケットのスピン周期は一致する。そのため、ロケットのスピン周期が予測より長いことが分かった。そこで本発表では、S-310-46 号機観測ロケットで EFD により観測された電場の観測結果及び予測外の事象の影響を考慮した解析手法を示す。

RIDE キャンペーンにおける中性大気質量分析器 NMS の観測結果

#米田 匡宏¹⁾, 齋藤 昭則¹⁾, 齋藤 義文²⁾, 川島 桜也^{2,3)}, 笠原 慧⁴⁾, 横田 勝一郎⁵⁾

(¹⁾ 京都大学, (²) JAXA 宇宙科学研究所, (³) メリーランド大学, (⁴) 東京大学, (⁵) 大阪大学

Initial Results of a Neutral Mass Spectrometer for Ionospheric Observation under the RIDE Campaign

#Masahiro YONEDA¹⁾, Akinori SAITO¹⁾, Yoshifumi SAITO²⁾, Oya KAWASHIMA^{2,3)}, Satoshi KASAHARA⁴⁾, Shoichiro YOKOTA⁵⁾

(¹) Kyoto University, (²) ISAS/JAXA, (³) University of Maryland, (⁴) The University of Tokyo, (⁵) The University of Osaka

The neutral atmospheric composition is a crucial parameter for calculating plasma motion in the ionosphere, as it governs the collision frequency between neutrals and plasma. While direct in-situ measurements were common until the 1980s, they have become scarce with the rise of empirical atmospheric models. However, simultaneous observations of neutral composition alongside plasma parameters remain vital, offering higher spatio-temporal resolution and fidelity than model-based approaches.

To address this need, we have developed a compact time-of-flight (TOF) Neutral Mass Spectrometer (NMS) for the S-310 sounding rocket. In this instrument, neutral particles are introduced through an antechamber and are ionized by electron impact at the ion source. The ions are then accelerated by a 1000 Hz pulsed voltage, fly a certain distance, and reach a detector. Because the time of flight from acceleration to detection depends on the particle's mass-to-charge ratio, the mass-to-charge ratio can be calculated from the recorded time of flight. A unique feature of this instrument is its triple-reflection design during the ion flight path, which achieves a high mass resolution of approximately 200 within a compact size suitable for the 310 mm diameter structure of the S-310 rocket. This resolution is sufficient to resolve major neutral species in the ionosphere, such as N₂ and O₂. However, atomic oxygen (O) is expected to be difficult to measure directly, as it recombines into O₂ on the wall of the antechamber.

The NMS was launched aboard the S-310-46 sounding rocket from the Uchinoura Space Center at noon on July 15, 2025. This flight was conducted as part of the RIDE campaign, which aims to elucidate the formation process of sporadic E layers that appear at mid-latitudes during summer daytime. The NMS was mounted on the underside of the rocket's payload section and designed to take in neutral particles once per rocket spin during the downleg portion of the flight after the separation of the motor section. Because the ion source filament and high-voltage systems cannot operate under high atmospheric pressure, they were scheduled to be activated after launch by a timer control.

During the flight, the instrument operated successfully for approximately 48 seconds (from 180 to 228 s after launch), after which an electrical discharge terminated the measurements. Although the ion acceleration pulse was approximately 50V higher than the planned value of 560V, other high-voltage systems performed nominally. A mass spectrum of the ambient neutral atmosphere was obtained, though the in-flight mass resolution was approximately 120, lower than that achieved during ground calibrations. The data also revealed periodic variations in the count rates of several species on timescales of ten to twenty seconds. This presentation will report on the detailed mass spectrum obtained during the flight and discuss the observed temporal variations in neutral species.

電離圏における中性大気組成は中性大気とプラズマの衝突周波数に影響するため、プラズマの運動を計算する際に必要な物理量の 1 つである。中性大気組成の直接観測は観測ロケットや衛星に質量分析器を搭載することにより、1980 年代まで盛んに行われていたが、MSIS モデルなどの経験モデルの発達により近年ではほとんど実施されていない。しかし、他の電離圏プラズマに関連するパラメータと中性大気組成を同時観測することは、経験モデルと比較してより高い時空間分解能データを取得でき、現実に応じた詳細な解析が可能になるという点で依然として重要である。

そこで、我々は小型の観測ロケット S-310 への搭載を目指して、電離圏中性大気組成のその場観測を目的とした飛行時間型中性質量分析器 Neutral Mass Spectrometer (以下、NMS) の開発を行ってきた。本機器ではまず、前室部と呼ばれる粒子取り込み口から中性大気を取り込み、イオン源に導入する。イオン源にて電子衝突法によってイオン化された粒子は 1000Hz のパルス高圧により加速され、ある一定の距離を飛行した後に検出器 MCP により検出される。この加速から検出までの飛行時間は粒子の質量電荷比に依存するため、飛行時間を記録することで個々の粒子の質量電荷比を求めることができる。本装置の特色は、飛行経路を 3 回反射させることにより、装置の大きさを抑えたままより高い質量分解能を実現している点にある。実際に装置は S-310 の直径 310mm のステージに収まる大きさで質量分解能は約 200 を達成しており、電離圏において主要な粒子種である O、N₂、O₂ を十分に分解できる。ただし、原子状酸素 O は反応性が高く、前室部の内壁において O₂ へと変化してしまい、直接測定することは困難と考えられる。

NMS は観測ロケット S-310-46 号機に搭載され、2025 年 7 月 15 日 12 時 00 分、鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。当観測ロケットは、中緯度で夏季の昼間に現れるスボラディック E 層の形成過程の解明を目的とした RIDE キャンペーンの下で、電離圏 E 領域を直接観測する役割を担った。NMS は観測ロケット頭胴部の下面に取り付けられ、頭胴部とモーター部が切り離された後、ロケット下降時にロケット 1 スピン毎に 1 回、粒子を取り込んで観測を

行う。イオン源で用いるフィラメントと各部で用いる高圧は高圧力下では起動できないため、動作可能な圧力となる高度に到達する時間にタイマー制御により起動される。

実際の打ち上げでは当初の予定通り、打ち上げ 108 秒後にイオン源が、157 秒後に各種高圧が起動された。その後、高圧の昇圧が完了した 180 秒後から、放電が生じた 228 秒後まで、約 48 秒間測定が実施された。各種高圧のうち、イオンを加速させるパルス高圧のモニター値が設定値 501V に対して約 560V となっていることが確認されたが、他のモニター値は正常な値を示していた。結果、質量分解能は約 120 と地上試験時と比較して低下しているものの、装置周辺の中性大気が成分毎に分離されたと思われる質量スペクトルが得られた。また、一部の成分のカウントレートには十数秒程度の周期的な変動が確認されている。本発表では質量スペクトルと時間変動について詳細な報告を行う。

#熊本 篤志¹⁾, 阿部 琢美²⁾, 齊藤 昭則³⁾, 城 剛希¹⁾, 田中 孝治²⁾, 稲田 仁美⁴⁾, 加藤 雄人¹⁾, 松田 昇也⁵⁾

(¹⁾ 東北大学, (²⁾ 宇宙航空研究開発機構, (³⁾ 京都大学, (⁴⁾ 宇宙システム開発利用推進機構, (⁵⁾ 金沢大学

Number density measurement of electrons by impedance probe (NEI) for S-310-46 sounding rocket, OHISAMA and IMPACT/PCUBE missions

#Atsushi KUMAMOTO¹⁾, Takumi ABE²⁾, Akinori SAITO³⁾, Koki TACHI¹⁾, Koji TANAKA²⁾, Hitomi INADA⁴⁾, Yuto KATOH¹⁾, Shoya MATSUDA⁵⁾

(¹⁾Tohoku University, (²⁾JAXA, (³⁾Kyoto University, (⁴⁾JSS, (⁵⁾Kanazawa University

Number density measurement of electron by impedance probe (NEI) has been performed in the numerous ionospheric rockets and several scientific satellites. In NEI observation, electric capacitance of the 1-m probe immersed in the ionospheric plasma are measured by capacitor bridge with applying RF signal at 400 frequency steps in a range from 0.1 to 20 MHz. By finding frequency at which probe capacitance is minimum, we can determine upper hybrid resonance (UHR) frequency, and derive electron number density from the UHR frequency. While the absolute probe capacitance changes depending on the length, shape, surface conditions of the probe, and plasma sheath formed around the probe, we can derive electron number with 3 % accuracy from frequency dependence of probe capacitance.

In the summer of 2025, Rocket Investigation of Daytime E-region (RIDE) Campaign is performed to clarify the generation and evolution processes of the daytime sporadic-E layers with the S-310-46 sounding rocket, ground-based radio measurements, and numerical simulations. The S-310-46 was launched on July 15, 2025. The NEI was installed on the S-310-46, and operated through its flight for observation of the electron number density. However, since some failure occurred in sensor cable during the ground tests, and we could not find and fix it unfortunately, we have to perform the probe capacitance measurement with unbalanced capacitance bridge. In such conditions, we could not find probe capacitance minimum at UHR frequency in the measured data. So, we made an equivalent circuit model with sensor cable disconnections, and found that the cable disconnection could be modeled well by 5.1 pF at 4.3 cm from the sensor. By using the equivalent model, we could derive electron number density from the unideal NEI data.

We are preparing NEI not only for the sounding rockets but also for small satellite and cubesat. OHISAMA (On-orbit experiment of High-precision beam control using small SATellite for MicrowAve power transmission) mission is a small satellite mission for experiments of microwave power transmission experiments in low Earth orbit. In order to monitor the ionospheric conditions during the microwave power transmission, NEI, langmuir probe, and plasma wave receiver are installed in addition to the microwave power transmitter. In addition to the power transmission experiments from the small satellite to the ground, the power transmission experiments from the small satellite to the 6U-size cubesat released from the small satellite. So, we prepared two NEIs: One is almost the same with that of sounding rockets for the small satellite. Another is 1U-size NEI for cubesat newly developed for OHISAMA. Unit-level test of flight model (FM) were almost finished. Interface tests of FM with spacecraft bus started in August 2025. The launch is planned after the second half of FY2026.

IMPACT/PCUBE is joint cubesat mission of IMPACT (Investigation of ducting Magnetospheric Plasma wave ACTivity) and PCUBE (Probing Controlling, and Understanding of radiation Belt Environment) both for clarification of the contributions of the plasma waves in the magnetospheric duct to the loss process of the radiation belt electrons. IMPACT/PCUBE is 12U-size cubesat. We are planning to install 1U-size NEI which is almost the same with that for OHISAMA cubesat. Since the magnetometer (several hundred gram) is installed at the end of the 1-m boom installed at the opposite side of the cubesat to the NEI probe, we are planning to add dummy mass at the tip of the probe. We have to finish development and unit-level tests of NEI for IMPACT/PCUBE by the start of the interface tests scheduled in the summer of 2026.

Acknowledgement: This study is supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 23H01235, and 23H05429. S-310-46 sounding rocket mission was performed by JAXA/ISAS. OHISAMA mission is performed by Japan Space System (JSS). IMPACT/PCUBE mission is performed by Kanazawa University, Tohoku University, University of Tokyo, Kyoto University, Nagoya University, Kyushu Institute of Technology, and NICT. The NEI instruments for S-310-46, OHISAMA, and IMPACT/PCUBE were manufactured by System Keisoku Co.,Ltd.

RIDE キャンペーン（観測ロケット S-310-46 号機実験）での熱圏下部大気圧力測定結果について

#阿部 琢美¹⁾, 森脇 岳斗²⁾, 小柳 智久²⁾, 横田 久美子²⁾, 田川 雅人²⁾, 齊藤 昭則³⁾

⁽¹⁾ 宇宙研, ⁽²⁾ 神戸大学, ⁽³⁾ 京都大学

On the result of neutral atmospheric pressure measurement by ion gauge in the lower thermosphere during RIDE campaign

#Takumi Abe¹⁾, Gakuto Moriwaki²⁾, Tomohisa Oyanagi²⁾, Kumiko Yokota²⁾, Masahito Tagawa²⁾, Akinori Saito³⁾

⁽¹⁾Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, ⁽²⁾Kobe University, ⁽³⁾Kyoto University

Sounding rocket “S-310-46” was launched from Uchinoura Space Center on July 15, 2025 with an objective of elucidating generation mechanism of the sporadic E layer. A total of seven science instruments were installed to measure the thermospheric neutral atmosphere, the ionospheric ions and electrons, electric and magnetic fields. In this presentation we will describe an initial result from pressure gauge (ion gauge) whose purpose is to estimate the neutral atmospheric density and the atmospheric flow direction on the rocket.

Charged and neutral particles co-exist in the lower ionosphere. The former tends to move in a direction different from the latter, because of a difference in those behaviors against the electromagnetic force. The ionospheric current and ambipolar electric field existing in this region are attributed to a difference in a collision frequency between ion and electron with neutral particles. Characteristic phenomena such as traveling ionospheric disturbance are significantly generated due to the diversity of the particles in this region. It is desirable to develop an instrument which provides information on local quantities about charged and neutral particles to improve our understanding of this region.

Although measurements of the atmospheric density by pressure sensor have been conducted for decades using sounding rocket and satellite since the 1950s in the world, very few were made in Japan. We started developing a pressure gauge to be installed on the sounding rocket. Our pressure gauge has two sensor elements: 1) crystal gauge for the higher-pressure region and 2) B-A (Bayard-Alpert) gauge for the lower-pressure region. The B-A gauge will be turned on under pressure below 4 Pa while the crystal gauge is responsible for the measurement at pressures above this threshold.

In 2022, our pressure gauge was first installed on sounding rocket “S-520-32”. In this measurement, two identical pressure gauges were stored in two different shaped containers. The first container was designed on the basis of Patterson probe, which is known as a closed spherical container with a long tube, from which gases flow in. In the Patterson probe, incoming gas first collides with inner wall of the tube and loses translational kinetic energy, and the pressure gauge inside can measure static pressure due to thermal motion of atmospheric particles. The second one is an open-type cylindrical container. This container was newly developed for the first experiment and has a small inlet for gas inflow. The internal structure was designed so that it can have high sensitivity in the direction of the incoming gas flow. Both sensors successfully measured the atmospheric pressure through the rocket flight. However, it was found that the gauge did not function properly below 10^{-2} Pa because of outgas from an inner surface of the container.

For the second experiment In “S-310-46” experiment, the measures taken to prevent outgassing are as follows: 1) Heat the ion gauge container to get outgas from its inner surface, while decreasing the pressure by pumping, 2) Stop heating and maintain a vacuum inside the container and install the system on the rocket, 3) Lids to keep the vacuum is automatically removed and start measuring during the rocket flight. This system successfully functioned well, and so the gauge started measuring the atmospheric pressure when it became almost the same as the background pressure.

Unfortunately, a flight performance of “S-310-46” was much different from the expected one, i.e., 1) the rocket continued flying while maintaining a large attack angle, 2) the spin rate downed below 0.1 Hz at its initial phase, 3) the apoapsis altitude was about 103-104 km, which was more than 10 km lower than predicted value. As a result of this performance, data from our pressure gauge was very different from the expectation, although the data was continuously collected all through the flight. The preliminary result from the initial analysis will be presented.

スプラディック E 層の形成メカニズムの解明を目的として観測ロケット S-310-46 号機が 2025 年 7 月 15 日に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。この観測ロケットには熱圏中性大気、電離圏イオン・電子、電場、磁場の測定を目的として計 7 つの観測機器が搭載された。本講演では中性大気密度および機上での大気流の測定を目的として搭載された圧力計（イオンゲージ）の初期観測結果について述べる。

圧力計を用いた熱圏中性大気の圧力測定は、ロケット等の飛翔体では 1950 年代から、人工衛星では 1960 年代から行われてきたが、日本ではあまり実績が無い。熱圏下部においては大気の一部が電離しているが、電気的磁氣的な力を受けるプラズマと影響を受けない中性粒子間で衝突が生じるため、この領域の粒子は複雑な運動をすることが知られている。この領域に特有の未解明の現象を理解するためには中性大気の密度や運動を正確に理解することが必要で、そのためにも測定法の確立が望まれている。

ロケットや人工衛星等の高速で飛行するプラットフォーム上での大気圧の測定は飛翔体自身の運動が引き起こす大気擾

乱や機器からのアウトガス等により大きく影響を受けるため、測定された圧力値から真の大気密度を推定するには注意が必要である。

我々は 2022 年に打ち上げた観測ロケット S-520-32 号機に初めて 2 式の圧力計を搭載した。一つはパターソンプローブで球形容器内に測定子を収納したもの、もう一つは新規設計で円筒型容器の内部に測定子を収納したものである。この圧力計はキャノン・アネルバ製で圧力に応じて 2 つのセンサが機能するように設計されており、高圧側では crystal gauge, 低圧側では B-A (Bayard-Alpert) gauge で測定を行うようになっている。圧力が 4Pa 以下になると自動的に B-A gauge に切り替わるものである。圧力計はフライト時に正常に動作し、圧力測定が行われたが、深刻な問題として容器内部に収納された測定子は容器内側表面からのアウトガスの影響により、 10^{-2} Pa 以下において圧力を精確に測定できない問題があった。

S-310-46 号機では圧力計のセンサ測定子を 3 式搭載したが、その中のセンサ B ではアウトガス対策として、1) 排気ポンプを用いて容器内部を真空に保ちながら高温にして表面からアウトガスを出す、2) 昇温を停止し容器内部を真空に保った状態で観測ロケットに搭載し打ち上げる、3) 観測ロケットが上空に達した後に容器内を真空に保つ蓋を開放し測定を開始する、という方法をとった。この対策は功を奏し、ロケット打上げ時には容器内が真空状態、上空に達して容器内外の差圧がほとんど無くなった状況で蓋が外れて周辺大気の圧力測定が行われた。

観測ロケット S-310-46 号機の飛翔は当初の予定と大きく異なり、速度ベクトルとロケット機軸が大きな角度をなす状態で飛行を続け、スピンレートについては初期の段階で 0.1 回/秒を下回るようになり、最高到達高度も 103~104 km に留まった。このため、圧力計の観測データは当初の期待とは異なる結果となってしまったが、圧力値はフライトを通して取得された。本講演ではこの圧力計による取得データに関する報告を行う。

R005-P44

ポスター 2 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

#Rifqi Farhan Naufal¹⁾, Liu Huixin²⁾, Qiu Lihui²⁾, 埜 千尋³⁾, 品川 裕之²⁾

⁽¹⁾九州大学 地球惑星科学専攻, ⁽²⁾九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター, ⁽³⁾情報通信研究機構

Projected Influence of increasing CO₂ levels on Sporadic E Formation Based on GAIA Simulations

#Farhan Naufal RIFQI¹⁾, Huixin LIU²⁾, Lihui QIU²⁾, Chihiro TAO³⁾, Hiroyuki SHINAGAWA²⁾

⁽¹⁾Department of Earth and Planetary Science, Kyushu University, ⁽²⁾International Research Center for Space and Planetary Environmental Science, Kyushu University, ⁽³⁾National Institute of Information and Communications Technology

We utilized the Ground-to-topside Atmosphere – Ionosphere Model for Aeronomy (GAIA) to investigate how increasing CO₂ levels could affect the development of sporadic E (Es) layers. By analyzing the vertical ion convergence (VIC), we found that doubling the CO₂ level results in a strengthening of VIC within the 100 – 120 km altitude range, suggesting the future downward shift of Es formation altitudes. These changes point toward a potential shift in the occurrence patterns of Es in a warming climate. The enhancement of VIC is primarily attributed to the reduction in the ion-neutral collision frequency, alongside changes in zonal wind shear at these altitudes. Overall, our results suggest that climate change could intensify ion convergence processes and, consequently, increase the likelihood of Es events in the future.

FMCW 波を用いた測距と HF ドップラー観測によるスプラディック E 層の解析

#佐古 昇太¹⁾, 中田 裕之²⁾, 並木 紀子³⁾, 野崎 憲朗⁴⁾, 細川 敬祐³⁾, 大矢 浩代²⁾

(¹⁾ 千葉大学大学院, (²⁾ 千葉大学, (³⁾ 電気通信大学, (⁴⁾ なし

Analysis of Sporadic E Layers Using FMCW Ranging and HFD Doppler Observations

#Shota Sako¹⁾, Hiroyuki NAKATA²⁾, Noriko NAMIKI³⁾, Kenro NOZAKI⁴⁾, Keisuke HOSOKAWA³⁾, Hiroyo OHYA²⁾

(¹Chiba University Graduate School, (²Chiba University, (³University of Electro-Communications, (⁴None

Sporadic E (Es) is a thin layer of extremely enhanced electron density that occurs primarily around 100km altitude at mid-latitudes during the summer. The enhanced electron density associated with Es can reflect VHF radio waves, which normally penetrate the ionosphere, causing anomalous long-distance propagation for radio waves incident at low elevation angle. HF Doppler measurement has been employed for the observation of Es; however, this observation method cannot determine the distance to the reflection point and therefore cannot identify the altitude of Es, which has been a limitation.

In this study, we simultaneously conducted the ranging observations of Es using an FMCW radar system, which began operation in 2024, enabling range measurements to analyze the structure and motion characteristics of Es. The HF Doppler observation system exploits the property that HF radio waves are reflected in the ionosphere, detecting temporal variations of the reflection altitude as Doppler frequency shifts. In contrast, FMCW observations continuously observe the propagation path length of the radio wave from the frequency difference between the transmitted and received waves.

We analyzed data obtained on June 2, 2024 (12:00-13:00 UT), June 19, 2024 (13:00-15:00 UT), and July 12, 2024 (13:00-14:00 UT). Using these two observation methods, we extracted five events that were observed simultaneously by both observation methods. In the extraction of events, the start and end times were manually determined for each event. Once the start time was set, a program was created to automatically save the Doppler frequency values every 10 seconds from among those with relatively high signal strength. The results showed that in all cases Es moved at a speed of just over 100 m/s. Sporadic E layers have also been observed in GPS-TEC data that enable us to capture their spatial distributions and movements. Currently, we are preparing ROTI maps for the observation dates using TEC data provided by GEONET of the Geospatial Information Authority of Japan.

In this presentation, we will report further detailed analyses, including the validity of the Es velocities obtained from Doppler and FMCW range measurements by comparison with these ROTI maps.

スプラディック E 層 (Sporadic E: Es) とは、主に夏季の中緯度において高度 100km 付近に発生する、電子密度が極端に増大した薄い層のことである。Es の発生に伴い電子密度が増大することで、通常は電離圏を突き抜ける VHF 帯の電波が反射されてしまうことから、電離圏に低仰角で入射した電波の長距離異常伝搬を引き起こす。HF ドップラーでも Es の観測が行われていたが、この観測手法では電波の反射点までの距離を求められないため、Es の高度を同定できないことが課題であった。

そこで本研究では、2024 年から運用開始した、FMCW 波を用いた測距観測により Es を同時に観測し、Es の構造や移動特性の解析を行った。HF ドップラー観測システムでは、HF 帯の電波が電離圏で反射する性質を利用して反射高度の時間変化をドップラー周波数として捉えることができる。また、FMCW 波による観測では一定の周期で送信周波数に変調を与えており、送信波と受信波の周波数差から、電波の伝搬経路長を高精度に常時測定できる。

本研究では、2024 年 6 月 2 日 12:00~13:00 UT、6 月 19 日 13:00~15:00 UT、7 月 12 日 13:00~14:00 UT の日時におけるデータの解析を行った。HF ドップラー観測と FMCW 波による測距観測の両方で同時に観測されている 5 事例のイベントを抽出した。イベントの抽出においては、開始時刻と終了時刻はイベントごとに手動で決定している。開始時刻が決定したあとは、ある程度受信強度が大きいものの中から 10 秒ごとにドップラー周波数の値を自動で保存するようなプログラムを作成した。これらのイベントについて Es の速度を求めた結果、いずれの事例でも 100m/s 強の速度であった。Es は GPS-TEC データでも検出が可能であり、空間分布やその移動の様子をとらえることが可能である。現在、国土地理院が提供する GEONET の TEC データを活用して、解析日の ROTI マップの作成を進めている。

本発表では、この ROTI マップを用いることで、ドップラー観測・測距観測で求めた Es の速度の妥当性など、さらに詳しい解析について報告を行う予定である。

主成分分析を用いた HF ドップラー観測における日変動成分の抽出とその特徴解析

#小林 弥聖¹⁾, 中田 裕之¹⁾, 大矢 浩代¹⁾, 細川 敬祐²⁾, 中野 慎也³⁾

(¹ 千葉大学, ² 電気通信大学, ³ 情報・システム研究機構)

Extraction and Analysis of Diurnal Variations in HF Doppler Observations Using PCA

#Misato Kobayashi¹⁾, Hiroyuki NAKATA¹⁾, Hiroyo OHYA¹⁾, Keisuke HOSOKAWA²⁾, Shinya NAKANO³⁾

(¹Chiba University, ²The University of Electro-Communications, ³The Institute of Statistical Mathematics)

The ionosphere exhibits complex variations influenced by multiple factors, including diurnal and seasonal variations as well as solar activity, geomagnetic disturbances, gravity waves, and even ground-based phenomena such as earthquakes and volcanic eruptions. To capture the overall picture of such variability, simple time-series averaging or empirical criteria are insufficient, and statistical techniques are required to extract and classify variation patterns from large observational datasets.

In this study, we applied Principal Component Analysis (PCA), a statistical analysis method, to high time-resolution Doppler frequency data obtained from HF Doppler observations to extract representative diurnal variation components and analyze their characteristics. PCA analyzes the correlation structure of multidimensional data and extracts principal components that explain the maximum variance in the data, thereby enabling dimensionality reduction and characterization of variability. The extracted components are ordered as the first, second, and subsequent principal components in descending order of explained variance (contribution rate). Hence, the first principal component best represents the variability in the original data and captures the most dominant variation pattern.

The data used in this study are Doppler frequency shift observations at 5006 kHz, obtained every 10 seconds using an HF Doppler observation network operated by four institutions, primarily the University of Electro-Communications. To investigate the influence of solar activity, PCA was applied to 11 years of data (2005 – 2015).

PCA of the Doppler frequency data obtained at the Sugadaira station revealed that the absolute amplitude of the first principal component was clearly larger than that of the subsequent components. A comparison with the averaged diurnal variation on magnetically quiet days confirmed that the two variations were nearly identical, indicating that the first principal component represents the diurnal variation of the Doppler frequency. In contrast, the amplitudes of the second and higher-order components were considerably smaller, and after applying filtering based on signal intensity, these variations became nearly undetectable. These components are presumed to represent disturbances other than diurnal variation; however, their interpretation as physically meaningful variability remains difficult. Nonetheless, in certain months, the diurnal variation appeared in the second principal component. An examination of correlation coefficients revealed that such cases occurred when the correlation fell below 0.5, suggesting that during periods of frequent disturbances, the diurnal variation may also appear in the second principal component and thus requires consideration.

When comparing the first principal component of Doppler shift at the Sugadaira station over 2005 – 2015, we found that its absolute value varied in accordance with the sunspot numbers. Solar activity follows an 11-year cycle, and within the period from 2005 to 2015, 2009 corresponds to the solar minimum, while 2014 marks the solar maximum. Consistently, the extracted first principal component shows lower absolute values in 2009 and higher values in 2014. Since higher solar activity corresponds to higher maximum electron densities, this variation is likely reflected in the magnitude of the diurnal variation. We anticipate that this amplitude variation can be quantitatively derived from the electron density distribution using the IRI model, and a comparison with these model results is currently in progress.

In this presentation, we report on the validity of diurnal variation extraction by PCA and its relationship to solar activity, based on analyses comparing the extracted principal components to quiet day data and IRI model results.

電離圏の変動は多層的であり、日変動や季節変動に加えて、太陽活動、地磁気擾乱、重力波、さらには地震・火山噴火などの地上起源の影響を受けて複雑に変化する。そのような変動の全体像を把握するためには、単純な時系列平均や経験的基準では不十分であり、膨大な観測データの中から変動パターンを抽出・分類するための統計的手法が必要となる。

そこで本研究では、HF ドップラー観測により得られる高時間分解能のドップラー周波数データに対して、統計的解析手法である主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を適用することで、代表的な日変動成分を抽出し、その変動の特徴についての解析を行った。

主成分分析は、多次元データから相関構造を解析し、データのばらつきを最大限に説明する主成分を抽出することで、元データの次元削減や変動の特徴の把握を可能にする手法である。抽出された主成分の分散の大きさ (寄与率) によって降順に第一主成分、第二主成分と抽出できる。つまり、第一主成分ほど元データの変動をよく表しており、代表的な変動パターンを捉えていると言える。

本研究では、電気通信大学を中心とした 4 機関で運用する HF ドップラー観測網によって 5006kHz の送信波を用いて取得された 10 秒値のドップラー周波数シフトデータである。

太陽活動の影響を調べるため、11 年分 (2005~2015 年) のデータに対して主成分分析を適用した。

菅平観測点におけるドップラー周波数データに対して主成分分析を行い、抽出された各主成分を確認したところ、第1主成分の変動の振幅の絶対値は、他の主成分と比べ明らかに大きいものであった。そこで静穏日のデータを用いて、その平均的な日変動を導出し比較したところ、両者の変化はほぼ一致することが確認された。このことから、第1主成分は、日変化を表していると考えられる。また、第2主成分以降の変動の絶対値は、かなり小さいだけでなく、受信強度でフィルタリングを行うと、第2主成分以降の変動はほとんど確認できないほどの変動となった。第2主成分以降の変動は、日変化以外の擾乱を表していると考えられるが、物理的な意味をもつ変動としての解釈は困難であると考えられる。ただし、ある月の主成分分析を行った際、第2主成分に日変化が現れる場合があることが確認された。その月の第一主成分と静穏日の変動との相関係数を調べたところ、0.5を下回る時に、そのような事例が確認されたことから、擾乱が頻繁に発生した場合には、日変化を抽出する場合には、第2主成分まで確認する必要がある。

次に、2005年から2015年の菅平観測点におけるドップラーシフトの第一主成分の変動を比較したところ、太陽黒点数の増減と共に第一主成分の絶対値も変動していることがわかった。太陽活動は11年周期で変動しており、2005年から2015年の11年においては、2009年が最も静穏であり、2014年が最も活動的な年となる。それに対して抽出した第一主成分も同様に2009年は絶対値が低く、2014年は絶対値が高くなっていた。太陽活動が高い時期においては、電子密度の最大値も大きくなることから、その変化の大きさが日変化の大きさとなって現れたと考えられる。この変化量については、現在IRIモデルを用いた電子密度分布を用いて、導出できると考えられることから、その結果との比較を進めていく予定である。

本発表では、抽出した主成分に対して静穏日やIRIモデルと比較した解析結果をもとに、主成分分析による日変動抽出の妥当性と太陽活動との関連性について報告する予定である。

HF ドップラー観測を用いた 2025 年カムチャッカ半島沖地震に伴う電離圏擾乱の解析

#中田 裕之¹⁾, 大塚 雄一²⁾, 細川 敬祐³⁾, 斎藤 享⁴⁾

⁽¹⁾ 千葉大学大学院工学研究院, ⁽²⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, ⁽³⁾ 電気通信大学大学院情報理工学研究科, ⁽⁴⁾ 海上・港湾・航空技術研究所

Analysis of Ionospheric Disturbances Following the 2025 Offshore Kamchatka Peninsula Earthquake Observed by HF Doppler Sounding

#Hiroyuki Nakata¹⁾, Yuichi OTSUKA²⁾, Keisuke HOSOKAWA³⁾, Susumu SAITO⁴⁾

⁽¹⁾ Graduate School of Engineering, Chiba University, ⁽²⁾ The Institute for Space and Earth Environmental Research, Nagoya University, ⁽³⁾ Graduate School of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-Communications, ⁽⁴⁾ National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

At 08:24 JST on July 30, 2025 (23:24 UT on July 29, 2025), a huge earthquake (Mw 8.8) occurred near the Kamchatka Peninsula. This event ranks as the sixth largest earthquake ever recorded and generated a massive tsunami, which led to prolonged tsunami warnings and advisories being issued across Japan. Previous studies have reported that large earthquakes can introduce ionospheric disturbances through various mechanisms, and it is highly likely that such disturbances also occurred in association with this earthquake. In this study, we analyzed ionospheric disturbances triggered by the Kamchatka earthquake using HF Doppler sounding observations. HF Doppler observations are conducted at 11 stations across Japan under the operation of four institutions led by the University of Electro-Communications. This network conducts simultaneous observations at four frequencies transmitted from the three stations: the Chofu campus of the University of Electro-Communications (5.006 MHz and 8.006 MHz), the Radio NIKKEI Nagara transmitting station (6.055 MHz), and the Nemuro transmitting station (3.925 MHz). However, the 3.925 MHz transmission was suspended at the time of the earthquake. In addition, almost no Doppler frequency variations were observed at 5.006 MHz, most likely because the reflection altitude for receivers near the Kanto region was confined to the E region, while signals did not reach distant stations due to the low reflection height.

Analysis of the Doppler frequency variations just after the earthquake revealed clear disturbances especially at the Sugadaira station. A notable feature was that the oscillation period varied with time. Oscillations with a period of about 2 minutes were observed for roughly 10 minutes after the onset of the disturbance, followed by oscillations with periods of 3 – 4 minutes, and later by oscillations with a period of about 20 minutes. Disturbances were also detected at 6.055 MHz, though they were less pronounced than at 8.006 MHz. The onset of the initial variations appeared later at 8.006 MHz than at 6.055 MHz. Considering that 8.006 MHz is reflected at higher altitudes, this delay suggests that atmospheric waves excited by ground motion—most likely acoustic-mode atmospheric gravity waves—propagated upward and perturbed the ionosphere.

Broadband seismometer (F-net) records from the Onishi station, located near the midpoint between Chofu and Sugadaira within the NIED seismic network, showed clear ground motion preceding the ionospheric disturbance. This further supports the interpretation that upward-propagating acoustic waves generated by the earthquake were responsible for the ionospheric perturbations. The subsequent 3 – 4 minute oscillations may have been caused by acoustic resonance between the ground and the lower ionosphere. However, while the typical resonance period is about 4 minutes, the observed periods were slightly shorter. Therefore, it is also possible that atmospheric waves generated by the earthquake propagated as atmospheric gravity waves. Moreover, seismic records indicated that after the initial strong ground motion, oscillations with a period of approximately 10 seconds became dominant, suggesting that atmospheric gravity waves originating from the source region may also have excited ionospheric disturbances. At the Sugito station, by contrast, persistent short-period oscillations were observed, exhibiting behavior markedly different from that at Sugadaira.

These results indicate that more detailed station-specific analyses are required. Future work will incorporate additional datasets, such as GPS-based observations, to conduct more comprehensive investigations of the ionospheric response to the Kamchatka earthquake.

2025 年 7 月 30 日 08 時 24 分 JST (2025 年 7 月 29 日 23 時 24 分 UT) に、カムチャッカ半島付近 Mw8.8 の巨大地震が発生した。本地震は観測史上 6 番目に大きく、大規模な津波を引き起こし、日本各地で津波警報・注意報が長時間にわたり発表された。これまでの研究から、大規模地震は様々な電離圏擾乱を誘発しうることが報告されており、今回の地震においても電離圏擾乱が生じた。本研究では、HF ドップラー観測を用いて、本地震に伴う電離圏擾乱の解析を行った。解析に用いた HF ドップラー観測は、電気通信大学を中心とする 4 機関により運用され、日本全国 11 観測点を展開している。本ネットワークでは、3 か所の送信局からの 4 周波数の電波を利用して観測を行っている。送信局は、電気通信大学（調布）キャンパス（5.006 MHz および 8.006 MHz）、ラジオ NIKKEI 長柄送信所（6.055 MHz）、根室送信所（3.925 MHz）である。ただし、地震発生時には 3.925 MHz の送信は停止していた。さらに、5.006 MHz ではドップラー周波数変動がほとんど観測されなかった。これは、関東周辺の受信点では反射高度が E 領域に限られていた一方、反射高度が低かったため遠方の観測点には電波が到達しなかった可能性が高いことによると考えられる。

地震直後のドップラー周波数変動の解析では、特に菅平観測点で顕著な擾乱が確認された。特徴的なのは、振動周期が時間とともに変化した点である。擾乱の開始直後から約 10 分間はおおよそ 2 分周期の振動が現れ、その後は 3~4 分周期、さらに後には約 20 分周期の振動が見られた。6.055 MHz でも擾乱は検出されたが、8.006 MHz に比べて振幅は小さかった。初期変動の立ち上がりは、6.055 MHz に比べて 8.006 MHz の方が遅れて現れた。8.006 MHz の方が高高度で反射することを踏まえると、この遅れは地震動により励起された音波が上向きに伝搬して電離圏を擾乱したことを示唆している。また、防災科学技術研究所（NIED）の地震観測網により設置された鬼石観測点（調布ー菅平の反射点付近）における広帯域地震計（F-net）では、電離圏擾乱に先行して明瞭な地震動が確認された。このことも、地震によって生成された音響波が上方へ伝搬して電離圏に達したという解釈を支持している。その後に見られた 3~4 分周期の振動は、地表と下部電離圏の間における音波共鳴により生じた可能性がある。しかし、典型的な共鳴周期は約 4 分であるものの、観測された周期はやや短かった。したがって、地震によって生成された大気波動が伝搬してきた可能性も考えられる。また、地震計の記録によれば、初期の大きな地震動の後には、おおよそ 10 秒周期の振動が卓越するようになったことも、震源域からの大気重力波が電離圏擾乱を励起した可能性を示唆する。一方、杉戸観測点では短周期の振動が継続的に出現し、菅平とは著しく異なる挙動を示した。したがって、観測点ごとにより詳細な解析が必要であり、GPS 観測など他の観測データを組み合わせ、より詳細な解析を進めていく予定である。

2025 年カムチャッカ半島沖地震後の伝搬性電離圏擾乱の GNSS 全電子数観測

#大塚 雄一¹⁾, 石田 志音¹⁾, 傅 維正¹⁾, 新堀 淳樹¹⁾

(¹ 名大 ISEE

GNSS Observations of Traveling Ionospheric Disturbances Following the 2025 Offshore Kamchatka Peninsula Earthquake

#Yuichi Otsuka¹⁾, Shion Ishida¹⁾, Weizheng FU¹⁾, Atsuki SHINBORI¹⁾

(¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Atmospheric waves generated by disturbances on the Earth's surface, such as earthquakes and tsunamis, are known to propagate upward and cause variations in the electron density in the ionosphere. In this study, we investigated traveling ionospheric disturbances (TIDs) that occurred after the great earthquake of Mw 8.8 off the Kamchatka Peninsula that occurred at 23:24 UT on 29 July 2025, using total electron content (TEC) data obtained from the dense GNSS receiver networks across Japan. Deviations of TEC from 15-minute running averages were calculated for each pair of satellite and receiver at more than 4,000 stations, and projected onto an ionospheric altitude of 300 km in the geographical coordinates. Two-dimensional maps of TEC perturbations were then constructed with a spatial resolution of 0.02° in latitude and longitude. The results reveal that southwestward-propagating TIDs with a phase velocity of approximately 1 km/s at the east of Japan between 00:03 and 00:08 UT on 30 July. Based on the observed propagation direction, speed, and the elapsed time from the earthquake, these TIDs are attributed to acoustic waves generated at the epicenter and propagating through the thermosphere to the Japanese region. Furthermore, another southwestward-propagating TID with phase velocity of approximately 300 m/s was observed from 03:05 to about 03:35 UT, approximately 3 hours and 40 minutes after the earthquake. This TID is considered to have been caused by atmospheric waves generated by the tsunami that propagated to the vicinity of Japan.

Acknowledgement

The SoftBank's GNSS observation data used in this study was provided by SoftBank Corp. and ALES Corp. through the framework of the "Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science".

地震や津波など地表の擾乱現象によって発生した大気波動は、上方伝搬し、電離圏電子密度の変動を起こすことが知られている。本研究では、2025 年 7 月 29 日 23 時 24 分 UT にカムチャッカ半島付近で発生した Mw8.8 の巨大地震の後に発生した伝搬性電離圏擾乱について、日本国内に設置された稠密 GNSS 受信機網 (国土地理院 GEONET とソフトバンク独自基準点) から得られた全電子数データを用いて解析した。国内の 4,000 点を超える GNSS 受信機とマルチ GNSS データから得られた全電子数について、15 分移動平均からの偏差を計算し、電離圏高度 300km に投影した。緯度、経度 0.02 度の分解能で全電子数変動の二次元図を作成した。この結果、7 月 30 日 00:03-00:08 UT 頃に、日本の東側において南西方向に約 1km/s で伝搬する伝搬性電離圏擾乱が観測された。観測された伝搬方向と伝搬速度、及び地震発生からの経過時間から、この伝搬性電離圏擾乱は、震央で発生し、熱圏を伝わって日本上空に伝搬した音波が原因と考えられる。さらに、地震発生から約 3 時間 40 分後の 7 月 30 日 3:05 から約 30 分間、位相速度約 300m/s で南西方向に伝搬する伝搬性電離圏擾乱を観測した。この伝搬性電離圏擾乱は、日本付近に伝搬した津波により励起された大気波動に起因すると推定される。

謝辞

本研究で使ったソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社および ALES 株式会社より提供を受けたものを使用しました。