

氏 名 村瀬 清華

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2493 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study on Polar Atmospheric Ionization during Disturbed  
Space Environment

論文審査委員 主 査 片岡 龍峰  
極域科学コース 准教授  
小川 泰信  
極域科学コース 教授  
西山 尚典  
極域科学コース 助教  
佐藤 達彦  
日本原子力研究開発機構 研究フェロー  
三好 由純  
名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授

# 博士論文の要旨

氏 名：村瀬 清華

論文題目：Study on Polar Atmospheric Ionization during Disturbed Space Environment

Space weather exerts significant influence on Earth's environment and human activities through electromagnetic radiation and charged particles. It is now established that energetic particles precipitating into Earth's atmosphere impact atmospheric composition, including ozone depletion, thereby affecting the Earth's climate and weather. A comprehensive understanding of their global atmospheric impact requires whole pictures of spatiotemporal distributions of ionization caused by various particle sources.

This study aims to enhance understandings of atmospheric ionizations resulting from electrons, protons, and photons (X-rays), which are major sources of energetic particles. Specifically, the study addresses two key subjects: (1) Summarizing atmospheric ionizations caused by solar X-rays, solar protons, and radiation belt electrons during the September 2017 space weather event, and (2) Assessing the relative impact of energetic electron precipitation (EEP) events during different phases of the substorm on mesospheric ionization, with a particular focus on the growth phase EEP due to magnetic field line curvature (FLC). The results for each subject are summarized as follows.

(1) We first attempt to assess and summarize altitude profiles of ionization during the September 2017 space weather event using state-of-the-art space-borne and ground-based observations of various particle inputs. In early September 2017, heightened solar activity, marked by X-class flares and solar proton events, was observed. Throughout this period, ground-based radar observations confirmed atmospheric ionization events caused by energetic particle precipitations, namely solar flare X-rays, solar protons, and radiation belt electrons—primary sources of ionization in the Earth's atmosphere. Altitude profiles of the ionization rate are estimated utilizing the Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS), with input particle fluxes acquired from satellites. These estimates are subsequently compared with measurements of ionization altitude, intensity, and electron density from polar region radars, such as the PANSY radar at Syowa Station and the EISCAT in Tromsø, Norway. Our conclusion is that the PHITS simulation results reasonably replicate (within a factor of two error) ionizations measured by

ground-based instruments, incorporating observed ionization sources from satellites.

(2) Numerous studies have delved into the impact of energetic charged particles on the atmosphere during geomagnetically active periods, while the effects during quiet times remain inadequately understood. Identifying two energetic electron precipitation (EEP) events during the growth phase of moderate substorms, we estimated the mesospheric ionization rate for an EEP event with the most extensive dataset from ground-based and space-borne instruments. The mesospheric ionization signature extended below 70 km altitude and persisted for approximately 15 minutes until the substorm onset, as observed by the PANSY radar. Utilizing energetic electron flux data from the Arase and POES 15 satellites as input for the air-shower simulation code PHITS, we quantitatively estimated the mesospheric ionization rate. The calculated ionization level from precipitating electrons aligned with the observed value of cosmic noise absorption (CNA). The potential spatial extent of EEP is estimated to be around  $\sim 8$  hours MLT in longitude and  $\sim 1.5^\circ$  in latitude based on a global magnetohydrodynamic simulation (REPPU) and precipitating electron observations by the POES satellite, respectively. The substantial duration and spatial extent of EEP events suggest a non-negligible contribution of growth phase EEP to mesospheric ionization. Combining cutting-edge observations and simulations, we illuminate the space weather impact of EEP events during geomagnetically quiet times, providing valuable insights into the potential link between the space environment and climate.

We also conducted a statistical investigation of mesospheric ionization during substorms, with a specific focus on the growth phase. Utilizing data on mesospheric echo power from the PANSY radar and cosmic noise absorption (CNA) from the imaging riometer, we performed superposed epoch analyses for five austral winter seasons from 2016. These analyses were based on the timing of substorm onset and the end of the expansion phase as the zero-epoch time. The findings reveal that the event-averaged echo power increases by approximately  $\sim 1$  at and the occurrence rate of the echo by around 10% at an altitude of 75-80 km 10-25 minutes before the onset. This outcome substantiates the non-negligible contribution of growth phase EEP, emphasizing that mesospheric ionization events are not uncommon during the growth phase.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 村瀬 清華

Title  
論文題目 Study on Polar Atmospheric Ionization  
during Disturbed Space Environment  
宇宙環境擾乱時における極域大気の電離に関する研究

地球大気は、種々の高エネルギー粒子（陽子、電子、光子など）によって電離している。その電離が最も顕著に現れるのが、太陽フレアや磁気嵐などの宇宙天気擾乱時の南北極域である。個々の電離源の生成メカニズムや大気電離の影響については半世紀以上にわたって研究が進展してきた。近年の進展目覚ましい宇宙天気予報の分野においては、定量的かつ物理的な予測研究も進んでおり、異なる電離源による大気電離の高度プロファイルの相対的な寄与を分離し、それぞれを定量的に予測可能なかたちで理解することが特に重要な研究課題となっている。

出願者は、審査論文において、種々の高エネルギー粒子による極域大気電離を研究対象として、大気電離率を計算できる先端的なモンテカルロシミュレーション PHITS を導入し、先端的な観測データを組み合わせることで定量的な検証を試みた。より具体的には、PHITS の入力値となる衛星観測データ、PHITS の出力を検証できる大型地上レーダー PANSY や EISCAT の観測データなどに基づいて、宇宙天気現象の擾乱時における大気電離の詳細な変動を実証的に考察している。

審査論文の第 1 章は、宇宙天気現象の概要と、先行研究の一部をまとめたものである。第 2 章は、研究手法の概要や使用した観測データについて述べられている。

第 3 章は、Space Weather 誌に掲載された結果 (Murase et al., 2023) を中心として、2017 年 9 月の宇宙天気イベント中のフレア X 線（光子）、太陽プロトン、放射線帯電子による電離について、それぞれに関する PHITS シミュレーションの再現性について実証的な研究成果がまとめられている。投稿論文の内容以外にも、特に大きな規模のフレア X 線による中間圏の電離については、過去数十年の EISCAT 観測データも用いて評価している。

第 4 章は、Journal of Space Weather and Space Climate 誌に掲載された結果 (Murase et al., 2022) を中心として、あらせ衛星と地上・昭和基地との共役観測における中間圏電離イベントに関して、特にサブストーム成長相での中間圏電離現象の発見にフォーカスした研究成果が説明されている。投稿論文の内容以外にも、サブストーム開始前後での統計解析を行い、Murase et al. (2022) において出願者の発見した成長相の中間圏電離と、既に知られている回復相での脈動オーロラ起源と思われる中間圏電離について、地磁気活動依存性などを明らかにしている。

第 5 章では今後の関連研究の課題や展望、第 6 章は結論が述べられている。

全体を通して、大型地上レーダー観測施設 PANSY、EISCAT のデータ解析に加え、あらせ衛星を代表とする衛星観測データを組合せることで、先端的な PHITS を有効に活用し、

主要な宇宙天気現象に伴う中間圏電離の定量的な理解と予測可能性を示した本研究成果は、今後の宇宙天気分野へ大いに貢献するものと期待される。また、サブストーム回復相での中間圏電離に関する発見的な成果（4章の一部、Murase et al., 2022）と、太陽フレア・太陽プロトン・放射線帯電子という全く異なる高エネルギー粒子の大気電離に関する定量評価（3章の一部、Murase et al., 2023）に関して、査読付国際誌にそれぞれフルペーパーとして既に発表されていることから、博士論文の内容としては十分であると認められる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。