

脈動オーロラの発光強度変化と降下電子エネルギースペクトルの相関: LAMP 観測ロケット, 全天カメラ, れいめい衛星による観測

#平野 晶也¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 三好 由純²⁾, 浅村 和史³⁾, Lessard Marc⁴⁾, Mcharg Matthew⁵⁾, Jaynes Allison⁶⁾, Shumko Mykhaylo⁷⁾, Ledvina Vincent⁸⁾, Hampton Don⁸⁾, 坂野井 健⁹⁾, 三谷 烈史³⁾, 滑川 拓¹⁰⁾, 能勢 正仁¹¹⁾, 小川 泰信¹²⁾, Halford Alexa¹³⁾

(¹⁾ 電通大, (² 名大 ISEE, (³ 宇宙研, (⁴ ニューハンプシャー大学, (⁵ アメリカ合衆国空軍士官学校, (⁶ アイオワ大学, (⁷ ジョンズ・ホプキンズ大学応用物理研究所, (⁸ アラスカ大学フェアバンクス校, (⁹ 東北大学・理・PPARC, (¹⁰ NICT, (¹¹ 名市大・DS 学部, (¹² 極地研, (¹³ NASA ゴダード宇宙飛行センター

The correlation between the luminosity variation of pulsating aurora and energy spectra of precipitating electrons

#Masaya HIRANO¹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁾, Yoshizumi MIYOSHI²⁾, Kazushi ASAMURA³⁾, Marc Lessard⁴⁾, Matthew Mcharg⁵⁾, Allison Jaynes⁶⁾, Mykhaylo Shumko⁷⁾, Vincent Ledvina⁸⁾, Don Hampton⁸⁾, Takeshi SAKANOI⁹⁾, Takefumi MITANI³⁾, Taku NAMEKAWA¹⁰⁾, Masahito NOSE¹¹⁾, Yasunobu OGAWA¹²⁾, Alexa Halford¹³⁾

(¹University of Electro-Communications, Tokyo, Japan, (²Institute for Space – Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan, (³Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa, Japan, (⁴University of New Hampshire, Durham, New Hampshire, USA, (⁵Department of Physics, the United States Air Force Academy, Colorado, USA, (⁶Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, (⁷Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Maryland, USA, (⁸Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Alaska, USA, (⁹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, (¹⁰National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan, (¹¹Nagoya City University, Nagoya, Japan, (¹²National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan, (¹³NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

Aurorae observed in the nightside auroral zone are primarily classified into two broad categories: discrete aurorae, which have clear and distinct spatial structures, and diffuse aurorae characterized by vague and indistinct patchy shapes. It is known that most of diffuse aurorae exhibit quasi-periodic luminosity modulations on timescales of a few to a few tens of seconds, and these are referred to as pulsating aurora (PsA). The energy of the precipitating electrons causing PsA tends to be higher than that of those causing typical discrete aurorae, and we refer to these precipitating electrons here as “PsA electrons”. The tail of the energy spectra of PsA electrons often extends to a few tens/hundreds of keV. Such sub-relativistic electron precipitation can be explained by whistler-mode chorus waves, which are generated near the magnetospheric equatorial plane and propagate along magnetic field lines, scattering electrons through wave-particle interactions at high latitudes. Regarding the relationship between PsA electrons and auroral emissions, simultaneous observations by the Reimei satellite, using an electron detector and a multi-spectral auroral camera, suggest that a flux modulation, whose electrons energy is above a few keV, is the primary cause of the luminosity modulation of PsA (Miyoshi et al., 2015). However, the duration of those earlier observations was as short as a minute and focused on a small area. As a result, the detailed correlation between the luminosity modulation of PsA and the energy spectrum of PsA electrons during relatively longer intervals (e.g., over several minutes) has not yet been clarified. This issue fundamentally stems from the absence of a long-duration spacecraft mission capable of conducting continuous electron measurements in the regions where PsA occurs.

To address these issues, we conducted a correlation analysis between PsA electrons and auroral brightness over a period of several minutes and an area spanning more than 500 km. We used in-situ low-energy electron data obtained from the EPLAS (Electron PLASma Detector) onboard the LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsation) sounding rocket and PsA emission intensity data obtained from an EMCCD (Electron Multiplying Charge Coupled Devices) all-sky camera in Alaska during the launch window. The launch window of the LAMP sounding rocket window was from 11:29 to 11:38 UT on March 5, 2022, and the EPLAS instrument covered an energy range from 5 eV to 15 keV. Meanwhile, the EMCCD all-sky camera in Venetie, Alaska, observed the region containing the magnetic footprint of the rocket during the launch window with a temporal resolution of 100 Hz.

In this study, we focused specifically on the continuous transition of the characteristics of PsA electron precipitation and the corresponding optical morphology of the aurorae as the rocket flew in the latitudinal direction. In the initial phase of the flight, a clear quasi-periodic modulation was observed in the energy flux around 10 keV, and high-contrast PsA was observed by the ground-based all-sky imager. However, as the rocket moved to higher latitudes, this modulation gradually became indistinct, and the optical contrast of the PsA also decreased. Subsequently, the 10 keV modulation disappeared, while steady electron precipitation around 1 keV became prominent. During this period, the faint background emission became stronger than the pulsating component of the PsA. In the final phase of the flight, the steady precipitation of PsA electrons around 1 keV and the modulation of the energy flux around 10 keV occurred simultaneously, exhibiting a complex morphology where the PsA was superimposed on a bright background emission. The presence of such remarkable differences in the characteristics of precipitating electrons and corresponding optical emissions depending on latitude suggests the possibility that the

properties of chorus waves may systematically change with latitude (e.g. Lower Band Chorus and Upper Band Chorus occur simultaneously). In the presentation, we plan to discuss the factors that determine the correlation between PsA electrons and auroral emissions, including a comparison with past observations from the Reimei satellite.

夜側オーロラ帯で観測されるオーロラは、明瞭な空間構造を持つディスクリートオーロラと曖昧な空間構造を持つディフューズオーロラの二つに大別される。ディフューズオーロラの多くは、数秒から数十秒ほどの準周期的な輝度変調を示すことが知られており、脈動オーロラ (Pulsating Aurora: PsA) と呼ばれる。PsA を引き起こす降下電子のエネルギーは典型的なディスクリートオーロラを引き起こすものよりも高いことが知られており、それらの降下電子をここでは「PsA 電子」と呼ぶ。PsA 電子のエネルギースペクトルは、その裾野が数十から数百 keV にまで及ぶこともある。このような準相対論的な電子降下は、磁気赤道面付近で発生する自然電磁波「ホイッスラーモードコーラス波」が磁力線に沿って伝搬し、磁気圏の高緯度領域において波動粒子相互作用によって電子を散乱することによって説明できる。PsA 電子とオーロラ発光の関連については、科学衛星「れいめい」に搭載された電子観測器と多波長オーロラカメラによる同時観測から数 keV 以上の変調が PsA の輝度変調の主要原因であることが示唆されている (Miyoshi et al., 2015)。しかし、先行研究の観測時間は一分未満であり、狭い領域についてのみ着目しているため、長時間かつ広範囲にわたる PsA の輝度変調と PsA 電子のエネルギースペクトルとの間の詳しい相関関係は明らかになっていない。この問題は、PsA が発生している領域において長時間継続的に電子計測を行う飛翔体ミッションが存在しなかったことに本質的に起因する。

この問題を解決するために、本研究では、LAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsation) 観測ロケットに搭載された低エネルギー電子観測器 EPLAS (Electron PLASma Detector) のデータと、アラスカに設置されている EMCCD (Electron Multiplying Charge Coupled Devices) 全天カメラから得られた打ち上げウィンドウ中の PsA の発光強度データに対して、数分間におよぶ時間幅で、かつ 500 km 四方を超える広い領域にわたって相関解析を行った。LAMP 観測ロケットの打ち上げウィンドウは 2022 年 3 月 5 日 11:29-11:38 UT であり、搭載された低エネルギー電子観測器 EPLAS は 5 eV から 15 keV までのエネルギー範囲をカバーしている。また、アラスカのベネタイに設置されている EMCCD 全天カメラは、LAMP ロケットの打ち上げウィンドウ中のロケットのフットプリントを含む領域を 100 Hz の時間分解能で観測していた。

本研究では、特にロケットが緯度方向に飛翔するのに伴い、PsA 電子の降下特性とそれに対応するオーロラの光学的形態が連続的に遷移していく様子に着目した。飛翔初期には 10 keV 付近のエネルギーフラックスに明瞭な準周期的変調が見られ、地上ではコントラストの強い PsA が観測されたが、ロケットが高緯度側へ移動するにつれてこの変調は次第に不明瞭となり、PsA の光学的なコントラストも低下した。その後、10 keV の変調が消失する一方で 1 keV 付近の安定した電子降下が顕著になり、PsA の脈動成分よりも背景のぼんやりとした発光が全体的に増光する期間が観測された。飛翔終盤には、この 1 keV 付近の安定的な PsA 電子の降下と 10 keV 付近のエネルギーフラックスの変調が同時に発生し、明るい背景発光に PsA の明滅が重なるという複合的な様相を呈した。このように緯度によって降下電子および対応する光学発光の特性に顕著な違いが見られることは、コーラス波動の特性（例えば Lower Band Chorus と Upper Band Chorus が同時に発生しているかなど）が緯度によって系統的に変化している可能性を示唆する。発表では、れいめい衛星による過去の観測データとの比較も交え、PsA 電子とオーロラ発光の相関を決める要因について考察を行う予定である。