

リオメータを用いたサブストーム発生前後の高エネルギー電子降下特性の研究

#大山 礼華¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 大山 伸一郎^{2,3,4)}, 田中 良昌³⁾

⁽¹⁾ 電気通信大学, ⁽²⁾ 名古屋大学宇宙地球環境研究所, ⁽³⁾ 国立極地研究所, ⁽⁴⁾ オウル大学

Characteristics of high-energy electron precipitation before and after substorm using riometer

#Ayaka OYAMA¹⁾, Keisuke HOSOKAWA¹⁾, Shin-ichiro OYAMA^{2,3,4)}, Yoshimasa TANAKA³⁾

⁽¹⁾The University of Electro-Communications, ⁽²⁾Institute for Space-Earth Environmental Research, ⁽³⁾National Institute of Polar Research, ⁽⁴⁾University of Oulu

It is well known that, immediately after substorm onsets, highly energetic electrons precipitate from the magnetosphere into the ionospheric D region (60 – 90 km altitude), causing low-altitude ionization. Ionization in the D region, which is the low-altitude part of the ionosphere, is detected as "absorption spikes" in cosmic noise absorption (CNA) using a riometer. In previous studies, riometer operating at a single frequency was used, which limited the ability to estimate the energy range of precipitating electrons based on the observed frequency dependence of CNA and conduct comprehensive statistical analyses. In this study, we examined frequency dependence and statistical properties of CNA variations using a spectral (i.e., multi-frequency) riometer (20 – 55 MHz) in Kilpisjärvi, Finland (KIL; 69.07N, 20.75E). Using a substorm list by Forsyth et al. (2015), we identified 4,506 substorms over two years from 2023 to 2024. To investigate the typical pattern of electron precipitation, Superposed Epoch Analysis (SEA) was applied to characterize variations in CNA around substorm onsets, with the zero epoch-time is set to the substorm onset.

The SEA results reveal a slight decrease (about 0.03 dB) in CNA approximately 20 min before onset, suggesting a temporal reduction in electron precipitation before onset. This behavior during the growth phase may be a precursor of substorm onset (or substorm-related ionization) in the CNA data. Additionally, SEA with MLT sorting showed propagation of CNA enhancements from midnight to eastward at 30 MHz, indicating eastward drift of high-energy electrons in the magnetosphere. The estimated zonal propagation speed at ionospheric altitudes was estimated to be approximately 4.65 km/s during the initial phase. However, all the events we used include cases where other substorms occurred before and after, so we cannot rule out the possibility that the observations were affected by multiple overlapping events. To investigate this trend in more detail, we analyzed 1,693 isolated-substorms (no other substorm within ± 3 hours) at 30 MHz. In the SEA with the isolated-substorms, eastward propagation was more clearly identified, with a slower eastward speed of approximately 2.35 km/s, indicating that isolated substorms produce cleaner CNA features. From the derived propagation speeds, it was found that electrons precipitating into the D region after substorm onset propagate eastward at speeds of a few kilometers per second, rather than westward. The propagation eastward is attributed to the grad-B drift in the magnetospheric equatorial plane. It should be noted that the propagation velocity includes the Earth's rotational velocity. For a given observation site at latitude θ , the rotational velocity is expressed as $v = (2\pi R_e \cos \theta) / (24 \times 3600)$ where R_e is the Earth's radius. At Kilpisjärvi, this value is approximately 0.16 km/s. Since the rotational velocity varies with latitude, it depends on the location of observation.

In the presentation, we will discuss how the substorm-related CNA varies based on substorm size, season, event isolation, and the magnetic latitude of the riometer location.

サブストームオンセットの直後に、磁気圏からの高エネルギー電子が電離圏 D 領域（高度 60 – 90 km）に降下し、電離を引き起こすことが知られている。電離圏の中でも低高度である D 領域での電離は、リオメータによって観測される銀河電波雑音吸収（Cosmic Noise Absorption: CNA）の急増として現れ、「absorption spike」と呼ばれる。従来の研究では、主に単一周波数のリオメータが用いられており、観測された CNA の周波数依存性に基づいて、降下電子のエネルギー帯域を推定することや、その統計的な解析には限界があった。そこで本研究では、20 – 55 MHz の帯域を同時に観測可能な多周波数リオメータと、サブストームオンセットリスト（Forsyth et al., 2015）を組み合わせることで、サブストーム前後における高エネルギー電子降下の周波数依存性および統計的性質を明らかにすることを目的とする。使用データは、フィンランド・キルピスヤルビ（69.07 N, 20.75 E）に設置されているリオメータによって 2022 年 10 月から取得された CNA データで、2023–2024 年の 4506 件のオンセットに対して Superposed Epoch Analysis (SEA) を実施した。これにより、CNA の平均的時間変化から電子降下の特性解明を明らかにすることができる。

Superposed Epoch Analysis (SEA) 解析の結果、サブストームオンセットの約 20 分前からオンセットまでの時間帯に、CNA のわずかな減少（約 0.03 dB）が見られることが明らかとなった。これは、オンセット直前において電子降下量が一時的に減少している可能性を示唆するものであり、低高度電離の「予兆」として観測されている可能性を示唆する。さらに、サブストームオンセット位置とリオメータ観測点との相対的な位置関係を考慮し、オンセットの磁気地方時（MLT）に基づいてデータを分類、観測周波数 30 MHz で SEA を実施した。その結果、CNA の急増が朝方方向に伝搬していく様子が確認され、CNA の増大をつくりだす高エネルギー電子が磁気圏において東向きへ伝搬していることが示唆された。初期応答における伝搬速度を計算したところ、およそ 4.65 km/s の速度で東方向に伝搬していることが明らかになった。ただし、使用した全イベントには、前後に他のサブストームが存在する場合も含まれており、複数イベントの影響が重

なって観測されている可能性も否定できない。そこでこの傾向の純粋性を検証するため、前後3時間に他のサブストームが存在しない孤立型サブストームのみを抽出し、30 MHzで同様にSEAを実施した。その結果、対象イベント数は1,693件に減少したが、電子降下の東方向への伝搬傾向がより明瞭に確認された。この場合の伝搬速度は約2.35 km/sであった。これら伝搬速度の導出から、サブストーム発生後、電離圏D層に降下した電子は西向きではなく東向きに数km/s程度で伝搬することが分かった。東向きに伝搬が起こる理由として、磁気圏赤道面での電子の磁場勾配 (grad B) ドリフトによるものと考えられる。なお、伝搬速度には地球の自転速度が包含されている。観測地点の緯度 θ に対応して自転速度 $v = (2 \pi R_e (\text{地球半径}) \cos \theta) / (24 \times 3600)$ で表され、キルピスヤルビでは約0.16 km/sである。ただし、自転速度は緯度によって変化するため観測地点に依存する。

発表では、サブストームの規模別、季節別、孤立型イベントのような条件別に実施した解析結果やリオメータ観測箇所を変えた場合の解析結果についても詳細に報告する予定である。これらの解析を通じて、サブストームに伴う高エネルギー電子の降下過程とその電離圏応答について議論を行う。