

Geotail 衛星による Auroral Kilometric Radiation の長期統計解析：自動検出技術の適用

#山中 陽斗¹⁾, 笠羽 康正¹⁾, 栗田 怜²⁾, 小嶋 浩嗣²⁾, 土屋 史紀¹⁾, 三澤 浩昭¹⁾

(¹⁾ 東北大学, (²⁾ 京都大学

Long-term Statistical Analysis of Auroral Kilometric Radiation Observed by Geotail: Applied Automated Detection Technique

#Haruto Yamanaka¹⁾, Yasumasa KASABA¹⁾, Satoshi KURITA²⁾, Hirotsugu KOJIMA²⁾, Fuminori TSUCHIYA¹⁾, Hiroaki MISAWA¹⁾

(¹⁾Tohoku University, (²Kyoto University)

Auroral Kilometric Radiation (AKR) is the most intense radio emission from the Earth. It is generated by precipitating energetic electrons along auroral field lines by electron cyclotron resonance. Its intensity correlates with the field-aligned current density, while its frequency is related to the source altitude through the local electron cyclotron frequency. Consequently, AKR provides a valuable diagnostic of both the auroral electron precipitations and their acceleration altitude. The objective of this study is to investigate these statistical characteristics, including their dependence on solar activity.

We performed a long-term statistical analysis of AKR, covering nearly three decades (September 1992 – June 2022) using the Plasma Wave Instrument (PWI) onboard the Geotail satellite. This dataset enables us to investigate AKR occurrence and characteristics over 3 solar cycles.

Since Solar type-III bursts also overlap the AKR frequency range (from several 10s kHz up to 500 – 600 kHz), their automatic removal is essential for robust statistics. In previous studies by the Wind spacecraft, a method using 3-second standard deviations of the spin-axis antenna (Waters et al., 2021) and its extension with the criteria combining frequency and temporal continuity (Fogg et al., 2022).

We modified those methods and applied the long-term dataset of high-quality measurements from the Geotail Plasma Wave Instrument (PWI) Sweep Frequency Analyzer (SFA), covering nearly 30 years from September 1992 to June 2022. Compared with Wind, Geotail needs two major challenges. (1) It lacks a spin-axis antenna, so the angle between the antenna and the radio wave direction varies with the spin (period: ~3 second), producing artificial spin modulations which Wind spin-antenna data does not have. (2) The SFA Band-5 (100 – 800 kHz), the most suitable for AKR, requires 8 seconds for one frequency sweep, so it limits the ability to get short-term fluctuations used in Wind. In order to overcome these issues, we identified AKR with following three criteria: (A) Larger time variability: To mitigate spin-induced fluctuations, we deleted the spin modulation by averaging a longer averaging window (168 s: three 8-s cycles and 8 spin periods), and picked up AKR with a threshold based on the standard deviation of time variations (e.g., $4.65 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$). (B) Larger frequency variability: Since AKR shows stronger frequency fluctuations than solar type-III bursts, we set an additional threshold on the standard deviation across frequency (e.g., $2.65 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$, 32 channels, 175 kHz). © Larger temporal continuity: To exclude short-lived type-III bursts, we require events to satisfy a wide frequency wave (e.g., 30 channels, 160 kHz) with the continuity of 528 seconds (allowing short gaps of up to 168 seconds). By combining these criteria, contamination from solar type-III bursts was substantially reduced.

Next, we applied a distance correction (normalized to 30 Re, assuming an r^2 decay) and start the investigation how the factors controlling AKR appearance and strength are affected with solar activity. The analysis covers the full 30-year Geotail mission period (1992 – 2022). We started the solar maximum (2000 and 2014) and the solar minimum (1996 and 2009), to examine correlations with the solar cycle. Our preliminary analysis yields the following results. (1) AKR occurrence frequency (time fraction of AKRs above a threshold intensity) tends to increase during periods of low solar activity. (2) AKR intensity (frequency-integrated power) does not show a simple or strong correlation with solar activity.

Solar activity can affect AKR through ionospheric conductivity and magnetospheric activity. For examples, it is known that the appearance, strength, and frequency range of AKR show diurnal and seasonal variations associated with the angle of the magnetic axis relative to the Sun (Morioka et al., 2013). These variations are thought to arise from changes in ionospheric conductivity and the configuration of the magnetosphere, and clarifying their relationship with solar activity may provide further insights into these processes. Moreover, frequency variations in AKR could shed light on the dependence of auroral electron acceleration altitudes—linked to magnetosphere – ionosphere coupling—on.

Our analysis will address the dependence of AKR intensity and occurrence frequency in (i) the entire frequency range (78.125 – 625 kHz), (ii) the high-altitude region (low-frequency range, $\leq 200 \text{ kHz}$), and (iii) the low-altitude region (high-frequency band around 500 kHz), with the following three factors: (A) Geomagnetic indices: AKR intensity and occurrence can correlate with AE, Kp, and Dst, and their respective influences will be examined separately. (B) Local time dependence: Since AKR is more observed on the nightside, so the local time effect will be distinguished. © Magnetic latitude dependence: AKR is emitted above both polar region and is more readily observed at high latitudes ($|\text{MLAT}| \geq 20^\circ$). Near the magnetic equator, propagation shadow can also occur near the Earth.

In this presentation, we will report on these initial results.

Auroral Kilometric Radiation (AKR) は、地球が放つ最強の電波放射である。オーロラ磁力線上の高エネルギー電子がサイクロトロン共鳴を起こすことで放射される。強度は沿磁力線電流量、周波数は放射高度（電波源のサイクロトロン周波数）と相関しうするため、オーロラ電子の全体量と加速高度の良い指標となる。本研究の目的は、太陽活動からの影響を含めたこれらの統計的な特徴を明らかにすることである。

AKR の発生周波数帯（～数十 kHz ～ 500 – 600 kHz）には Solar type-III burst も重畳するため、Wind 衛星（1994～）を用いた先行研究では、スピン軸平行アンテナの 3-sec 変動標準偏差を閾値とする AKR の自動検出（Waters et al., 2021）や、周波数・時間連続性を組み合わせた拡張（Fogg et al., 2022）が提案されている。

我々は、この手法を改良し、1992 年 9 月から 2022 年 6 月の約 30 年間に及ぶ Geotail 衛星 Plasma Wave Instrument (PWI) の良質なデータから AKR を自動検出した。PWI Sweep Frequency Analyzer (SFA) データへ自動検出手法を適用する際、Wind 衛星と比べて Geotail 衛星は以下の問題を有する。(1) スピン軸平行アンテナが存在しない。衛星スピン（周期：3-sec）によって電場アンテナと電波到来方向の角度が変動し、スピン位相に起因する変動が重畳する。(2) AKR 観測に最も適する SFA Band-5 (100-800kHz) は、周波数方向のスweepに 8-sec かかる。このため、同一周波数におけるデータ取得周期は 8-sec で、より短時間の変動を捉えられない。このため、我々は以下の 3 つの方法を混合して AKR を識別した。(A) 時間方向の変動が大きい：スピンに伴う強度変動の影響を抑制するため、24-sec 平均（8-sec 周期のデータ 3 つ分、3-sec 周期のスピン 8 回分）をとり、その時間変動の標準偏差を閾値とした（例： $4.65 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ 、+3 回分 = 168-sec）。(B) 周波数方向の変動が大きい：AKR は Solar type-III burst より周波数変動が大きいいため、この標準偏差も閾値（例： $2.65 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ 、32 チャンネル（～175kHz）幅）とした。(C) 継続時間が長い：より短時間の Solar type-III burst を除外するため、一定の周波数ビン充填数を連続して満たしていること（例：30 チャンネル（～160 kHz）幅で 24-sec x 22 ≈ 528-sec 連続。最大 24-sec x 7 ≈ 168-sec のギャップ許容）を閾値とした。これらを組み合わせることで、Solar type-III の混入を低減し、AKR の検出精度を高めた。

この手法に基づいて検出した AKR に距離補正を加えたうえで（地球距離：30 Re 基準、 r^2 減衰を想定）、AKR の頻度や強度に影響を与える要素が太陽活動度に対してどう変化しうるか、評価を進めている。解析対象期間は Geotail の全運用期間である 1992 年～2022 年の 30 年間である。まずは太陽活動が極大であった 2000 年と 2014 年、極小であった 1996 年と 2009 年に注目して解析している。太陽活動度への依存性については、暫定的に以下の解析結果を得ている。(1) AKR の頻度（一定強度以上の AKR の観測時間）：太陽活動度が低い時期ほど高まる傾向が見られる。(2) AKR の強度（周波数積分）：太陽活動度との間の単純な相関は必ずしも強くはない。

太陽活動度は、電離圏伝導度や磁気圏活動度を介して AKR に影響を与える。その例として、AKR の頻度・強度・周波数範囲は、磁軸が地球と太陽を結ぶ線と成す角の変動に伴って日変動・季節変動を示すことが知られている（Morioka et al., 2013）。原因として、電離圏伝導度や磁気圏形状の変動が示唆されており、太陽活動度との関係の解明はこの解明につながる。AKR の周波数変動は M-I 結合に起因するオーロラ電子加速域高度の情報を与えるため、その太陽活動度からの影響も解明しうる。

解析は (i) 全域（全周波数域：78.125-625kHz）、(ii) 高高度域（低周波域：～200kHz）、(iii) 低高度域（高周波域：500kHz 帯）それぞれの強度・頻度について、以下への依存性を考慮しつつ進めている。

(A) 地磁気指数との関係：AKR の強度・頻度は AE、Kp および Dst 指数と相関しうするため、これらの影響を分離する。

(B) ローカルタイム依存性：AKR は夜側でより顕著に観測されるため、この影響を分離する。

(C) 磁気緯度依存性：AKR は両極から放射されるため～± 20° 以上の高緯度でより観測されやすい。磁気赤道域では地球に近いと伝播遮蔽も起きるため、その影響も考慮を要する。

本講演では、これらの初期結果について報告する。