

R010-22

B 会場 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

14:30~14:45:00

イオノゾンデによるブラックアウト予測パラメータの導出

#北島 慎之典¹⁾, 渡邊 恭子¹⁾, 陣 英克²⁾, 埜 千尋²⁾, 増田 智³⁾, 西岡 未知²⁾

(¹⁾ 防衛大学校, (²⁾ 国立研究開発法人 情報通信研究機構, (³⁾ 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

Statistical analysis of blackout prediction parameters using ionosondes

#Shinnosuke Kitajima¹⁾, Kyoko Watanabe¹⁾, Hidekatsu Jin²⁾, Chihiro Tao²⁾, Satoshi Masuda³⁾, Michi Nishioka²⁾

(¹⁾National Defense Academy of Japan, (²National Institute of Information and Communications Technology, (³Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

High-frequency (HF) radio communication is a critical method often used in disaster response and air traffic control because of its capability for long-distance communication using reflections in the ionosphere. However, a rapid increase in solar X-ray emissions during solar flares can cause a sudden increase in electron density in the lower ionosphere, leading to Shortwave Fadeouts (SWFs) that make HF radio unusable. The most severe situation of these events, where a total fadeout of the ionospheric echo occurs, are called blackouts.

The magnitude of SWF can be known from a minimum frequency observed in ionograms (f_{min}) and blackouts. f_{min} subtracted by its 27-day running median at the same LT (df_{min}) correlates well with solar zenith angle and flare class. However, the blackout duration cannot be explained solely by the flare class or the solar zenith angle, suggesting additional influencing factors. In this study, we performed a statistical analysis of SWF from 1981 to 2024 at four Japanese ionosonde stations (Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, and Okinawa). We examined the relationship between observed maximum df_{min} values, blackouts, and solar zenith angle-corrected flare classes. We defined parameter that can contribute to improving the accuracy of SWF forecasting. We use a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and an Area Under the ROC Curve (AUC) to evaluate the parameter.

Our analysis revealed a seasonal variation in SWF frequency, with more events in summer and fewer in winter. This seasonal variation was even more pronounced for blackouts, with the highest number of blackouts occurring in July, more than 10 times the number in December. We also found that C-class flares can also cause blackouts from May to August. For the blackout that occurred in May 2024, the X5.8-class flare on May 11, 2024, lasted longer than the X8.7-class flare that occurred on May 14, 2024, with the blackout durations in Wakkanai lasting 10 and 105 min, respectively. We found the probability of occurrence of blackouts was related to a negative storm on May 11, which caused a decrease in the ionospheric F2 layer critical frequency (f_oF2). Statistical analysis also showed that blackouts are more easily to occur when f_oF2 is low. Predicting blackout occurrences requires consideration of ionospheric information before solar flare, such as f_oF2 .

To address this, we proposed a new prediction parameter, $f_B = f_oF2 / (f_oF2 - f_{min})$, using f_oF2 and f_{min} observed by ionosondes before a solar flare. We defined and evaluated the relationship between f_B , flare class (F), and solar zenith angle (χ) for $df_{min} = 50F^{1/4} \cos^{1/2} \chi f_B$. The ROC analysis yielded an AUC of 0.80 for $df_{min} \geq 3$ MHz, demonstrating improved accuracy in blackout predictions when factoring in pre-flare ionospheric conditions.

HF 通信は、電離圏での反射を利用した、航空機や災害時の長距離無線に使用される非常に重要な通信手段の一つである。一方で、太陽フレアに伴った X 線 (0.1-10 nm) の放射強度の急増によって電離圏下部の電離が進むことにより、デリンジャー現象または短波通信障害 (SWF) が発生し、HF 通信できなくなることがある。デリンジャー現象の中でも、HF の全ての通信が途絶されることをブラックアウトという。

デリンジャー現象の規模は、イオノゾンデで観測される最小反射周波数 (以下、 f_{min}) やブラックアウトから判断できる。そして、 f_{min} の 27 日中央値からの変動量 (df_{min}) は太陽天頂角やフレアクラスと良い相関があることを調べた研究が多くある。しかし、ブラックアウトの継続時間は太陽天頂角とフレアクラスだけでは説明できない。本研究では、1981-2024 年の稚内、国分寺、山川、沖縄にあるイオノゾンデで観測された SWF について、 df_{min} の最大値及びブラックアウトと太陽天頂角補正したフレアクラスの関係について調べた。これより、デリンジャー現象の予測精度向上に寄与できるパラメータを定義し、評価した。評価方法として、ROC 曲線と AUC を用いた。

デリンジャー現象の月別発生頻度を調べた結果、SWF の発生頻度には明確な季節変化があり、夏に多く、冬に少ない傾向であった。ブラックアウトの場合、この季節変化がより顕著であり、7 月のブラックアウト発生数が最も多く、発生数が一番少ない 12 月と比較すると 10 倍以上の発生数であった。また、5 月から 8 月には C クラスフレアでもブラックアウトが発生する可能性があることがわかった。2024 年 5 月に発生したブラックアウトでは、2024 年 5 月 14 日に発生した X8.7 クラスのフレアよりも 2024 年 5 月 11 日の X5.8 クラスのフレアの方が、長時間継続しており、稚内のブラックアウト継続時間はそれぞれ 10 分と 105 分であった。2024 年 5 月 11 日に発生した負相嵐による電離圏 F2 層臨界周波数 (f_oF2) の減少と関連していることが示唆され、統計解析からも f_oF2 が低い時にブラックアウトが発生しやすいという結果が得られた。そのため、ブラックアウトの発生予測には、 f_oF2 などのフレア発生前の電離圏情報を考慮する必要がある。

そこで、フレア発生直前のイオノゾンデで観測された f_oF2 と f_{min} を用いてブラックアウト発生の指標となる予測パラメータ: $f_B = f_oF2 / (f_oF2 - f_{min})$ を定義した。また、 f_B 、フレアクラス (F) と太陽天頂角 (χ) を用いた df_{min} の関係

式： $df_{min} = 50F^{1/4} \cos^{1/2} \chi f_B$ を定義し、評価した。その結果、 $df_{min} \geq 3 \text{ MHz}$ における AUC は 0.80 となった。フレア発生前のブラックアウトになりやすい電離圏の状態を f_B として新たに定義することによりブラックアウトをより正確に予測すること可能となった。