

## HF ドップラー観測を用いた 2025 年カムチャッカ半島沖地震に伴う電離圏擾乱の解析

#中田 裕之<sup>1)</sup>, 大塚 雄一<sup>2)</sup>, 細川 敬祐<sup>3)</sup>, 斎藤 享<sup>4)</sup>

(<sup>1</sup> 千葉大学大学院工学研究院, (<sup>2</sup> 名古屋大学宇宙地球環境研究所, (<sup>3</sup> 電気通信大学大学院情報理工学研究科, (<sup>4</sup> 海上・港湾・航空技術研究所

## Analysis of Ionospheric Disturbances Following the 2025 Offshore Kamchatka Peninsula Earthquake Observed by HF Doppler Sounding

#Hiroyuki Nakata<sup>1)</sup>, Yuichi OTSUKA<sup>2)</sup>, Keisuke HOSOKAWA<sup>3)</sup>, Susumu SAITO<sup>4)</sup>

(<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Chiba University, (<sup>2</sup>The Institute for Space and Earth Environmental Research, Nagoya University, (<sup>3</sup>Graduate School of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-Communications,

(<sup>4</sup>National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

At 08:24 JST on July 30, 2025 (23:24 UT on July 29, 2025), a huge earthquake (Mw 8.8) occurred near the Kamchatka Peninsula. This event ranks as the sixth largest earthquake ever recorded and generated a massive tsunami, which led to prolonged tsunami warnings and advisories being issued across Japan. Previous studies have reported that large earthquakes can introduce ionospheric disturbances through various mechanisms, and it is highly likely that such disturbances also occurred in association with this earthquake. In this study, we analyzed ionospheric disturbances triggered by the Kamchatka earthquake using HF Doppler sounding observations. HF Doppler observations are conducted at 11 stations across Japan under the operation of four institutions led by the University of Electro-Communications. This network conducts simultaneous observations at four frequencies transmitted from the three stations: the Chofu campus of the University of Electro-Communications (5.006 MHz and 8.006 MHz), the Radio NIKKEI Nagara transmitting station (6.055 MHz), and the Nemuro transmitting station (3.925 MHz). However, the 3.925 MHz transmission was suspended at the time of the earthquake. In addition, almost no Doppler frequency variations were observed at 5.006 MHz, most likely because the reflection altitude for receivers near the Kanto region was confined to the E region, while signals did not reach distant stations due to the low reflection height.

Analysis of the Doppler frequency variations just after the earthquake revealed clear disturbances especially at the Sugadaira station. A notable feature was that the oscillation period varied with time. Oscillations with a period of about 2 minutes were observed for roughly 10 minutes after the onset of the disturbance, followed by oscillations with periods of 3 – 4 minutes, and later by oscillations with a period of about 20 minutes. Disturbances were also detected at 6.055 MHz, though they were less pronounced than at 8.006 MHz. The onset of the initial variations appeared later at 8.006 MHz than at 6.055 MHz. Considering that 8.006 MHz is reflected at higher altitudes, this delay suggests that atmospheric waves excited by ground motion—most likely acoustic-mode atmospheric gravity waves—propagated upward and perturbed the ionosphere.

Broadband seismometer (F-net) records from the Onishi station, located near the midpoint between Chofu and Sugadaira within the NIED seismic network, showed clear ground motion preceding the ionospheric disturbance. This further supports the interpretation that upward-propagating acoustic waves generated by the earthquake were responsible for the ionospheric perturbations. The subsequent 3 – 4 minute oscillations may have been caused by acoustic resonance between the ground and the lower ionosphere. However, while the typical resonance period is about 4 minutes, the observed periods were slightly shorter. Therefore, it is also possible that atmospheric waves generated by the earthquake propagated as atmospheric gravity waves. Moreover, seismic records indicated that after the initial strong ground motion, oscillations with a period of approximately 10 seconds became dominant, suggesting that atmospheric gravity waves originating from the source region may also have excited ionospheric disturbances. At the Sugito station, by contrast, persistent short-period oscillations were observed, exhibiting behavior markedly different from that at Sugadaira.

These results indicate that more detailed station-specific analyses are required. Future work will incorporate additional datasets, such as GPS-based observations, to conduct more comprehensive investigations of the ionospheric response to the Kamchatka earthquake.

2025 年 7 月 30 日 08 時 24 分 JST (2025 年 7 月 29 日 23 時 24 分 UT) に、カムチャッカ半島付近 Mw8.8 の巨大地震が発生した。本地震は観測史上 6 番目に大きく、大規模な津波を引き起こし、日本各地で津波警報・注意報が長時間にわたり発表された。これまでの研究から、大規模地震は様々な電離圏擾乱を誘発しうることが報告されており、今回の地震においても電離圏擾乱が生じた。本研究では、HF ドップラー観測を用いて、本地震に伴う電離圏擾乱の解析を行った。解析に用いた HF ドップラー観測は、電気通信大学を中心とする 4 機関により運用され、日本全国 11 観測点を展開している。本ネットワークでは、3 か所の送信局からの 4 周波数の電波を利用して観測を行っている。送信局は、電気通信大学（調布）キャンパス（5.006 MHz および 8.006 MHz）、ラジオ NIKKEI 長柄送信所（6.055 MHz）、根室送信所（3.925 MHz）である。ただし、地震発生時には 3.925 MHz の送信は停止していた。さらに、5.006 MHz ではドップラー周波数変動がほとんど観測されなかった。これは、関東周辺の受信点では反射高度が E 領域に限られていた一方、反射高度が低かったため遠方の観測点には電波が到達しなかった可能性が高いことによると考えられる。

地震直後のドップラー周波数変動の解析では、特に菅平観測点で顕著な擾乱が確認された。特徴的なのは、振動周期が時間とともに変化した点である。擾乱の開始直後から約 10 分間はおよそ 2 分周期の振動が現れ、その後は 3~4 分周期、さらに後には約 20 分周期の振動が見られた。6.055 MHz でも擾乱は検出されたが、8.006 MHz に比べて振幅は小さかった。初期変動の立ち上がりは、6.055 MHz に比べて 8.006 MHz の方が遅れて現れた。8.006 MHz の方が高高度で反射することを踏まえると、この遅れは地震動により励起された音波が上向きに伝搬して電離圏を擾乱したことを示唆している。また、防災科学技術研究所 (NIED) の地震観測網により設置された鬼石観測点（調布-菅平の反射点付近）における広帯域地震計 (F-net) では、電離圏擾乱に先行して明瞭な地震動が確認された。このことも、地震によって生成された音響波が上方へ伝搬して電離圏に達したという解釈を支持している。その後に見られた 3~4 分周期の振動は、地表と下部電離圏の間における音波共鳴により生じた可能性がある。しかし、典型的な共鳴周期は約 4 分であるものの、観測された周期はやや短かった。したがって、地震によって生成された大気波動が伝搬してきた可能性も考えられる。また、地震計の記録によれば、初期の大きな地震動の後には、およそ 10 秒周期の振動が卓越するようになったことも、震源域からの大気重力波が電離圏擾乱を励起した可能性を示唆する。一方、杉戸観測点では短周期の振動が継続的に出現し、菅平とは著しく異なる挙動を示した。したがって、観測点ごとにより詳細な解析が必要であり、GPS 観測など他の観測データを組み合わせ、より詳細な解析を進めていく予定である。