

R005-10

A 会場 : 11/24 PM2 (15:30-18:15)

16:00~16:15

## FMCW 方式短波ドップラー観測を用いた夏季夜間スποラディック E 移動特性の研究

#齋藤 龍之介<sup>1)</sup>, 細川 敬祐<sup>1)</sup>, 並木 紀子<sup>1)</sup>, 野崎 憲朗<sup>1)</sup>, 中田 裕之<sup>2)</sup>, 坂井 純<sup>1)</sup>, 富澤 一郎<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 電気通信大学, <sup>2)</sup> 千葉大学

### Dynamical characteristics of summer nighttime sporadic E: FMCW-based HF Doppler sounding measurements

#Ryunosuke Saito<sup>1)</sup>, Keisuke Hosokawa<sup>1)</sup>, Noriko Namiki<sup>1)</sup>, Kenro Nozaki<sup>1)</sup>, Hiroyuki Nakata<sup>2)</sup>, Jun Sakai<sup>1)</sup>, Ichiro Tomizawa<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>The University of Electro-Communications, <sup>2)</sup>Chiba University

Sporadic E (Es) is a thin layer of extremely high electron density at around 100 km altitudes that occurs mainly in summer at mid-latitudes. Es layer has been known to cause long-range anomalous propagation of radio waves in the VHF band which enter to the ionosphere at a low elevation angle through reflection due to an extreme increase of the E region electron density. Es layer has been studied using various methods because of its influence on aeronautical navigation systems and radio broadcasts in the VHF band. It was revealed that dynamical characteristics of Es layer during daytime can be observed by using Total Electron Content (TEC) obtained by using a ground-based GNSS receiver network. Es layer during night time moves with the Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs), wave-like structures in the F region electron density. MSTID causes large variations in the electron density, therefore it is difficult to observe Es layers only by using GNSS-TEC observations.

In this research, we used the HF Doppler (HFD) observation in order to observe Es layers directly in a wide area. The system can detect the vertical motion of the ionosphere from ground; thus, the dynamical characteristics of various ionospheric phenomena can be visualized using variations of the Doppler frequency and received signal intensity obtained at multiple stations on the ground. The HFD sounding system transmits two radio waves, 5.006 MHz and 8.006 MHz from Chofu, Tokyo and the reflected waves are received at 11 stations in Japan. The transmitted waves consist of continuous waves and Frequency Modulated Continuous Waves (FMCW). The continuous waves are transmitted on fixed frequencies. Thus, when the radio waves are reflected by an Es layer, the observed frequency changes due to the Doppler effect and then characteristic (quasi-periodic) Doppler spectral traces are observed. The frequency of the FMCW signal is modulated in 150 kHz band periodically. Propagation distance is then calculated from frequency difference between replica of transmitted waves and received waves. The replica is synchronized with the transmit station by using GPS. The propagation distance can always be observed with high accuracy with timing of the Doppler traces. Reflection altitude is estimated from the propagation distance and distance from a transmitter to a receiver. Time resolution of the altitude is higher than conventional methods such as ionosonde. The goal of this study is to observe the dynamical characteristics of sporadic E layers from the Doppler traces from the conventional HFD sounding system and the reflection altitude from the FMCW measurement.

We conducted observations of Es layer during nighttime by using the HFD between May and August 2022. The Doppler trace was simulated by calculating the Doppler shift from the time derivative of the propagation path length. By comparing simulation of Doppler traces and the actual observations, we calculated the propagation speed and azimuth of Es layers. However, since the reflection altitude is needed to be assumed in the simulation, there was an uncertainty in the estimated propagation speed and azimuth.

Regularly transmission of the FMCW signal has started since early 2024. We conducted HFD observations of Es layer in Chiba during nighttime between May and July, 2024. We found that, when quasi-periodic Doppler spectral traces were observed, the reflection altitude estimated from FMCW signal ranged from 100 to 125 km. This reflection altitude was slightly higher than that assumed when analyzing the data in 2022 (it was assumed to be 100 km). This implies that the accuracy of simulation will be improved by using the observed reflection altitude as an input parameter for the simulation. We plan to compare these observations of HFD sounding system with those of MSTID using GNSS-TEC.

スποラディック E (Es) 層は、主として夏季の中緯度の高度 100 km 付近に発生する電子密度が極端に増大した層である。Es 層の発生に伴う電子密度の増大によって、通常は電離圏を突き抜ける VHF 帯の電波が反射されてしまうことから、電離圏に低仰角で入射した電波の長距離異常伝搬を引き起こす。航空航法システムやラジオ放送に影響を及ぼすことから、Es 層の特性が様々な観測手法を用いて研究されてきた。地上 GNSS 受信機網の計測によって得られる全電子数 (Total Electron Content: TEC) 観測によって、日中の Es 層に関しては広域的な移動特性を観測できることが明らかになっている。一方、夜間の Es 層は中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: MSTID) と呼ばれる電離圏 F 領域における電子密度の縞状構造と連動して動くことが知られている。そのため、GNSS-TEC では MSTID に伴う電子密度変動が観測されてしまい、Es 層単独の電子密度変動を観測することが難しい。

そこで、本研究では、Es 層の広域的かつ直接的な観測を実現するために短波ドップラー観測 (HF Doppler: HFD) を用いた解析を行った。HFD 観測は、電離圏に向けて短波帯の電波を送信し、その反射波を遠隔地で受信したときに得ら

れるドップラー周波数や受信電界強度の変化から、電離圏の上下動や電離圏現象の移動特性を地上から観測するシステムである。我々が運用している HFD 観測システムでは、東京都調布市から 5.006 MHz、8.006 MHz の 2 周波の電波を送信し、全国 11 箇所を受信している。観測用信号は、単一周波数の連続波と周波数連続変調波 (Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW) から成る。連続波は一定の周波数で送信されているが、Es 層で反射する際に、Es 層の移動に伴うドップラー効果で周波数が変動し、ドップラーシフトがプラスからマイナスに変動する特徴的なドップラートレースが準周期的に見られる。FMCW 波は一定の周期でドップラー観測で用いている単一周波数を中心に 150 kHz の範囲で送信周波数に変調を与えており、GPS による同期を取った上で送信波レプリカと受信波の差周波から電離圏反射した電波の伝搬距離を、ドップラートレースのタイミングと合わせて高精度に常時測定できる。伝搬距離と送受信点間の距離から、電波の反射高度がイオノゾンデなどの従来手法より高い時間分解能で求められる。観測されたドップラートレースと反射高度から、Es 層の空間的な移動を観測することを本研究の目標とする。

2022 年 5 月から 8 月にかけて、HFD 観測を用いて夜間の Es 層の観測を実施し、ドップラートレースの観測結果とシミュレーション結果を比較することで、Es 層の移動速度と移動方向の計算を行った。Es 層の伝搬経路長の時間微分からドップラーシフトを計算し、シミュレーションを作った。シミュレーションには電波の反射高度がパラメータの一つとして必要であるが、この当時は FMCW 波の送信が行われておらず、反射高度を観測する手段がなかったため、Es 層の移動速度や移動方向に不確かさが残る状態であった。

2024 年に FMCW 波の定常的な送信が開始され、同年 5 月から 7 月にかけて千葉で HFD 観測を実施した。Es 発生時に見られる準周期的なドップラートレースが観測された夜間において、FMCW 波を用いて反射高度の観測を行った結果、確かに Es 層が高度 100—125 km の領域に出現していることが明らかになった。2022 年時点では電波の反射高度を 100 km と仮定していたが、実際には高い高度で反射が起っており、従来のシミュレーションでは Es 層の移動速度が小さく出ていた可能性が高い。実測値をシミュレーションのパラメータに用いることでシミュレーション精度の向上が期待できる。また、GNSS-TEC を用いた MSTID の観測結果との比較も行う予定である。