

R005-23

B会場：9/25 AM2 (10:45-12:30)

11:30~11:45

短波ドップラー観測と MU レーダーを用いたスホラディック E 微細構造の研究

#齋藤 龍之介¹⁾, 細川 敬祐¹⁾, 齋藤 享²⁾

(¹⁾ 電通大, (²⁾ 電子航法研

Fine structure of sporadic E: simultaneous observations with HF Doppler sounding system and MU radar in Japan

#Ryunosuke Saito¹⁾, Keisuke Hosokawa¹⁾, Susumu Saito²⁾

(¹⁾The University of Electro-Communications, (²⁾Electronic Navigation Research Institute

Sporadic E (Es) layer is a layer of extremely high electron density that occurs mainly in summer at mid-latitudes around 100 km altitude. Es layer has been known to cause long-range anomalous propagation of radio waves in the VHF band because of the reflection due to an extreme increase of the electron density associated with Es layer. Es layer has been studied for more than half a century using various instruments because of its influence on aeronautical navigation systems and radio broadcasts that use the VHF band. It was revealed that quasi-periodic coherent radar echoes (QP echoes) were observed by using the MU radar when Es layer occurs at night during summer months (Yamamoto et al., 1991). These echoes would manifest fine-scale internal structure of Es layer during nighttime. It was also found that nighttime Es layers are related to Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs), which occurs at the F region altitudes. In order to understand the temporal evolution of these two phenomena, it is needed to understand the fine structure of Es layer. However, the spatial extent of the fine structure has been unclarified because the coverage of the MU radar is limited.

In this research, we used the HF Doppler (HFD) observation in order to observe Es layer in a wide area. The HFD sounding system transmits two continuous waves, 5.006 MHz and 8.006 MHz from Chofu, Tokyo and the reflected waves are received at 11 observation stations in Japan. The system can detect the vertical motion of the ionosphere and dynamical characteristics of various ionospheric phenomena from variations of the Doppler frequency and received signal intensity derived from the received signal at multiple stations. The sampling rate of the raw waveform data is 100 Hz. The temporal resolution of the Doppler frequency and received signal intensity is 10 sec. The HFD observation is known to observe characteristic (quasi-periodic) Doppler spectral traces associated with Es layer, mainly at night during the summer season. This feature would reflect the spatial structure of Es layer, which corresponds to QP echoes. If the identity of the quasi-periodic Doppler trace and QP echoes is confirmed, it would be possible to observe the fine structure of Es layer in a wide area by using the HFD sounders.

For this purpose, we conducted simultaneous observations of Es layer by using HFD and MU radar on eight nights (May 23-26 and June 6-9, 2022). During five nights, the MU radar detected clear signatures of QP echoes. In addition, we confirmed that quasi-periodic Doppler traces were observed in the HFD data obtained in Awaji station. The two observation methods would have detected same Es layer because the difference in the timing of detection was small, about 10 – 20 minutes. The time lag would have been due to the location of the reflection point of the HFD observation in Awaji, which is about 200 km away from the MU radar observation area. When the MU radar clearly detected Es layer, the difference in speed between MSTIDs and Es layer was less than 20 %. This indicates that Es layer and MSTIDs propagated in tandem. Based on this fact, the time needed for propagation of MSTIDs between observation areas of MU radar and HFD was calculated by a cross-correlation analysis of GPS-TEC data. The estimated travel time was almost equal to the time lag in the Es layer observation between the MU radar and HFD. Therefore, we conclude that the time lag of Es layer observation was due to the difference of the observation areas, which further confirms that the quasi-periodic structures in the Doppler spectra of HFD measurements are manifestations of QP echoes seen in data from coherent radars such as the MU radar.

It was confirmed that the two methods observed the internal structures of the same Es layer. Still, however, it is unclarified what kind of spatial structure of Es layer is represented by the quasi-periodic Doppler traces observed by HFD. In order to reveal the spatial structure of Es layer in a wide area, we conduct a cross-correlation analysis of received signal intensity obtained at the HFD stations around the Kanto area, where the distribution of the receiving stations is dense. Also, we plan to reconstruct 2D images of the QP echoes from the imaging observations made by the MU radar and compare them with the quasi-periodic Doppler traces seen in the HFD measurements.

スホラディック 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、電離圏に浅く入射した電波の長距離異常伝搬を引き起こすことが知られている。Es 層は、VHF 帯を使う航空機の制御システムやラジオ放送に影響を及ぼすことから、様々な観測機器を用いて半世紀以上にわたって研究されてきた。MU レーダーを用いた観測によって、夏季の夜間に Es 層が発生した際に、準周期的なコヒーレントレーダーエコー (QP エコー) が観測されることが分かった (Yamamoto et al., 1991)。このエコーは夜間の Es 層の微細構造を示していると考えられる。夜間の Es 層は、電離圏 F 領域で発生する現象である中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: MSTID) と関連することが明らかになっており、この 2 つの現象の時間発展を理解するうえで

Es 層の微細構造について理解することが求められている。しかし、MU レーダーなどの干渉性散乱レーダーの観測範囲は限られているため、微細構造がどの程度の領域にわたって分布しているかは明らかになっていない。

そこで、本研究では、広域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リモートセンシング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 周波の連続波を送信し、全国 11 箇所を受信している。生の波形データは 100 Hz でサンプリングされており、ドップラー周波数と受信電界強度は 10 秒の時間分解能で算出されている。HFD の観測において、夏季夜間の Es 層の発生時にドップラーシフトがプラスからマイナスに変動する筋状の構造が準周期的に見られることが知られており、QP エコーに対応する Es の微細構造を反映しているものと考えられる。このドップラートレースと QP エコーの関連性 (同一性) を確認できれば、HFD を用いて Es 層の微細構造を広域的に観測することが可能になる。

この目的のために、2022 年 5 月 23-26 日、6 月 6-9 日の合計 8 日間にわたり、短波ドップラー観測と、干渉性散乱レーダーの 1 つである MU レーダーを用いて、夜間の Es 層の同時観測を実施した。計 8 晩のうち、5 晩の観測において明瞭な QP エコーを得ることができた。また、同時帯の淡路における HFD 受信データを確認したところ、準周期的なドップラートレースを確認することができた。10 - 20 分の時間差があったものの、二つの準周期的現象が概ね同じ時間帯に観測されたため、同じ Es 層を捉えられた可能性が高いと考えられる。時間差は、HFD 観測の中間反射点が MU レーダーの観測領域から 200 km 程度離れていることによって生まれていると考えられる。MSTID と Es 層の伝搬速度を比較したところ、MU レーダーで Es 層が明瞭に捉えられた日に限れば両者の差は最大 20 % 程度であり、Es 層と MSTID の伝搬特性は一致していたことが分かった。この事実にもとづいて、GPS-TEC のデータを相互相関解析することで MSTID が MU レーダーの観測領域から HFD の観測領域まで伝搬するのに要した時間を求めた。求められた伝搬時間は MU レーダーと HFD の間で生じた Es 層の観測時間の差とおおよそ一致していた。したがって、Es 層の観測時間の差は観測領域の違いに伴うものであると考えられ、HFD で見られる準周期的なドップラートレースが MU レーダーなどの干渉性散乱レーダーで観測される QP エコーに相当することが示された。

2 つの方法で同じ Es 層が観測できることは確認できたものの、HFD で観測できたドップラートレースが具体的に反映している空間構造や移動特性は分かっていない。そこで、観測点が多い関東近郊における HFD 観測点のデータを相互相関解析することで、Es 層の広域的な空間構造や移動特性を明らかにする予定である。また、MU レーダーで実施したイメージング観測から QP エコーの 2 次元像を復元し、HFD の観測結果との比較を行い、HFD でどの程度 Es 層の観測ができるかについても評価を行う予定である。