

## 2.4.7 スポラディック E 層

津田 卓雄（電気通信大学）

（2020年3月31日受付、2021年5月31日公開）

### 2.4.7.1 はじめに

スポラディック E 層 ( $E_s$  層) は、電離圏 E 領域高度に非定常的に出現する高密度の電子・イオンの層として知られている。本節では  $E_s$  層に関する基本的な内容について概説する。より詳細な情報については  $E_s$  層についての複数のレビュー論文 (Whitehead 1970; Whitehead 1989; Mathews 1998) 等も参照すると良い。

### 2.4.7.2 電波伝搬への影響

最も代表的な観測例としてイオノゾンデによる  $E_s$  層の観測例を図 1 に紹介する。イオノゾンデは、短波帯の送信電波の周波数を掃引しながら電離圏を観測する装置であり、送信電波の反射周波数が反射高度の電子密度に依存することを利用して電離圏の電子密度の情報を得ることができる。正常波モード (O-mode) の送信電波の上限反射周波数  $f$  と電子密度  $n_e$  の関係は、2.4.7.1 節で述べたように、アップルトン・ハートレーの式を基に、

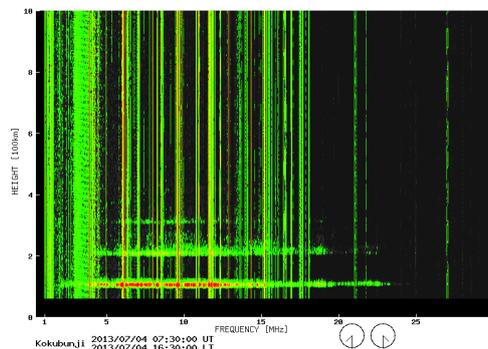


図 1. 2013 年 7 月 4 日 07:30 UT に東京都国分寺市 (35.71°N, 139.49°E) のイオノゾンデで観測された  $E_s$  層 (from WDC for Ionosphere and Space Weather, Tokyo, NICT: <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>)。

$$f = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0}} \approx 8.98 \times \sqrt{n_e} \text{ [Hz]} \quad (2.4.7.1)$$

と簡易的に記述される（恩藤, 丸橋 1999）。高度 100 km 付近の強い反射エコー（図 1 参照）は、周波数 >20 MHz に達しており、従って電子密度 >5×10<sup>12</sup> m<sup>-3</sup> 相当の *Es* 層による反射エコーであると考えられる。以上は送信電波が垂直入射の場合であるが、送信電波が斜め入射の場合、2.4.7.1 節の式 (2.4.7.3) に記したように、電波が反射する周波数  $f$  は、

$$f = \frac{f_p}{\cos i_0} \quad (2.4.7.2)$$

となり（恩藤, 丸橋 1999）、入射角  $i_0$  が大きくなると、反射周波数  $f$  は垂直入射した場合の反射周波数  $f_p$  よりも大きくなる。例えば、電子密度 >5×10<sup>12</sup> m<sup>-3</sup> の *Es* 層に入射角 80° で送信電波が入射する際の反射周波数は >115 MHz となり、VHF 帯の電波をも反射することになる。このように、*Es* 層の社会的重要性として電波伝搬環境への影響、特に短波帯/超短波帯（HF/VHF 帯）の通信・放送等に与える影響（e.g., Sakai et al. 2019）が指摘されており、*Es* 層の動態を監視、予測することが重要である。

### 2.4.7.3 *Es* 層の特徴と観測

続いて、非干渉散乱レーダーによる *Es* 層の観測例（Mathews et al. 1997）を図 2 に紹介する。昼間の日照によって形成された電離圏が日没後に徐々に減衰していく様子が 15–17 LT に見られる。この減衰の時間スケールは、主に電離圏 *E* 領域の主イオンである NO<sup>+</sup>、O<sub>2</sub><sup>+</sup> のライフタイム（再結合の時定数）に依存していると考えられる。一方で、高度幅の狭い高電子密度の *Es* 層が日没以降も長時間維持されている様子が捉えられている。これは *Es* 層の主成分イオンが比較的ライフタイムの長い金属イオンで構成されている為であると考えられている。金属組成の源は大気突入した流星の燃えかすであり、Fe、Mg、Si、Na、Ca、K 等、多種の金属組成が電離圏の下部領域に原子状、イオン状、分子状で分布している（cf. Plane et al. 2015）。例えば、金属イオンの主成分イオンである Fe<sup>+</sup> イオン（cf. Kopp 1997）のライフタイムは、高度 110 km で 10<sup>6</sup> 秒（約 11 日）程度（cf. Matuura et al. 2013）と考えられている。図 3 に示すレーザーセンシング（ライダー）で得られた Ca<sup>+</sup> イオンの観測例（Ejiri et al. 2019）においても *Es* 層に対応する高度幅の狭い (>1 km) Ca<sup>+</sup> イオンの高密度の層が捉えられており、このことから金属イオンが *Es* 層の主成分イオンを構成していることが示唆される。

Ca<sup>+</sup> ライダーの高分解能データ（図 3a 参照）では *Es* 層中に存在する微細な不規則構造が確認できる。*Es* 層中の不規則構造は、全地球航法測位システム（Global Navigation Satellite System: GNSS）等で用いられているマイクロ波帯電波の振幅・位相シンチレーションの要因となる為、

GNSS 測位精度への影響が懸念されている。一方で、 $E_s$  層によるシンチレーションを観測することで  $E_s$  層の全球分布の情報が得られている (図 4 参照)。夏半球の中緯度で  $E_s$  層によるシンチレーションが大きい様子が確認できるが、この特徴はイオノゾンデ等による長年の電離圏観測によって調査が進められてきた  $E_s$  層の一般的な季節特性、緯度特性を良く示している。また、中緯度ほど顕著ではないが、低緯度や高緯度でも  $E_s$  層が発生することが知られている (cf. Whitehead 1970, 1989; Mathews, 1998)。

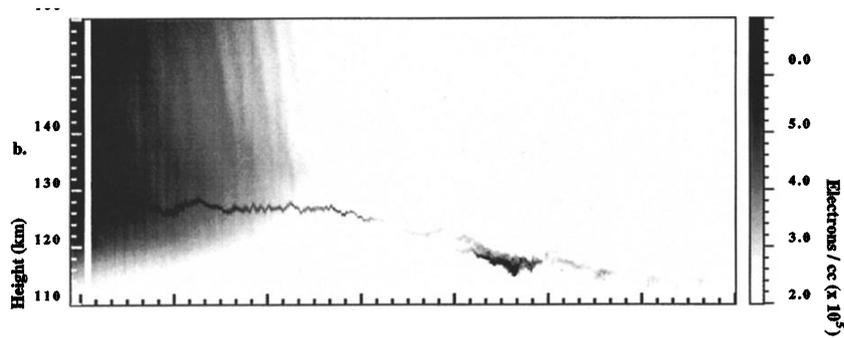


図 2. 1994 年 9 月 2 日にアレシボ (18.34°N, 66.75°W) の非干渉散乱レーダー (送信周波数: 430 MHz) で観測された  $E_s$  層 (Mathews et al. 1997)。

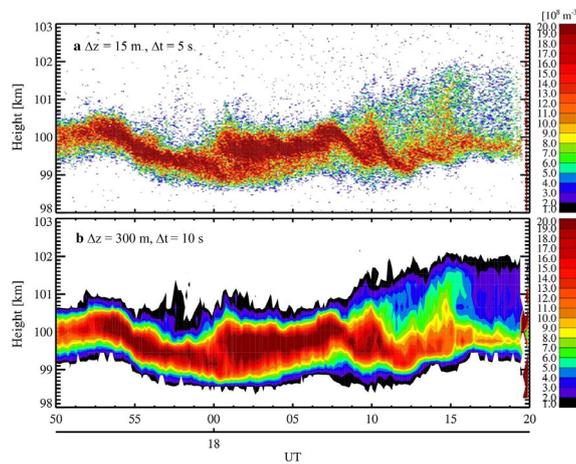


図 3. 2014 年 12 月 24 日に東京都立川市 (35.7°N, 139.4°E) の  $\text{Ca}^+$  ライダー (送信波長: 393 nm) で観測された高密度の  $\text{Ca}^+$  層 (Ejiri et al. 2019)。(a) 時間分解能: 5 s、高度分解能: 15 m の  $\text{Ca}^+$  データ、(b) 時間分解能: 10 s、高度分解能: 300 m の  $\text{Ca}^+$  データ。

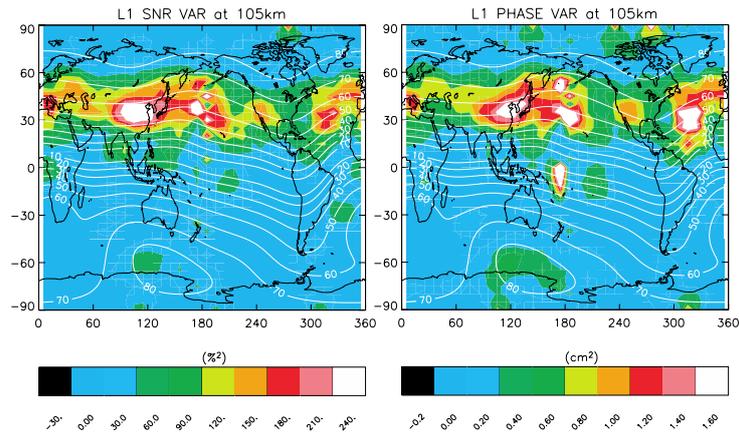


図 4. 2002 年 6–8 月の Global Positioning System (GPS) L1 バンド (約 1.6 GHz) の掩蔽観測で得られた高度 100–110 km の (左) 振幅、(右) 位相の変化率の分散 (シンチレーション) の全球分布 (Wu et al. 2005)。

#### 2.4.7.4 生成機構: ウインドシア理論

最も顕著な中緯度  $E_s$  層の代表的な生成機構であるウインドシア理論について紹介する。イオンの運動は衝突を介して中性風 (中性大気の運動) の影響を受けるが、地球磁場の効果を考慮すると水平方向の中性風が鉛直方向のイオンの運動 (イオン速度) を発生させる。これについてイオンの運動方程式を基に幾つかの仮定を置きながら鉛直イオン速度  $w_i$  を導出すると、

$$w_i = [v \cos I \sin I + (v_{in}/\omega_i)u \cos I]/[1 + (v_{in}/\omega_i)^2] \quad (2.4.7.3)$$

と表現される (Shinagawa et al. 2017)。ここで、 $v_{in}$  はイオンと中性大気の衝突周波数、 $\omega_i$  はイオンのジャイロ周波数である。南向き風  $v$  と東向き風  $u$  の正負の符号によって、即ち水平風の風向によって、鉛直イオン速度の向きが変化することがわかる。もしある特定の高度より上方で下向きイオン速度、下方で上向きイオン速度を生じさせるような高度方向の水平風の変化 (水平風シア) があると、その高度領域にイオンが集積して高密度の電子、イオンの層 ( $E_s$  層) を形成する。図 5 に、水平風シアによって生成される  $E_s$  層の北半球の例を示す。北半球の場合、高高度の西向き水平風が生成する鉛直下向きイオン速度と低高度の東向き水平風が生成する上向きイオン速度によって、それらの間の高度領域にイオンが集積することで  $E_s$  層が形成される。同様に、高高度で北向き風、低高度で南向き風の条件においても  $E_s$  層が形成される。このウインドシア理論を基に、全球大気モデルで計算された風速データを用いて鉛直方向のイオンの集積率を導出する試みが行われている (Shinagawa et al. 2017)。図 6 に示すように、全球大気モデルから得られた鉛直イオン集積率の全球分布は  $E_s$  層の基本特性である夏半球の中緯度で顕著となる特徴を良く再現しており、ウインドシア理論が  $E_s$  層の形成に対して重要な役割を果たしていることを示唆している。

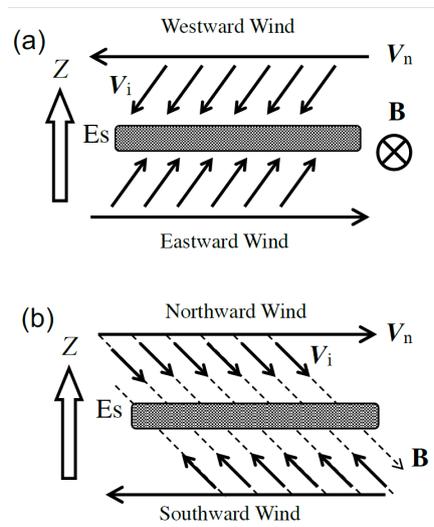


図 5. ウインドシア理論による  $E_s$  層形成の模式図 (Shinagawa et al. 2017)。(a) 東西風シアの場合と (b) 南北風シアの場合。

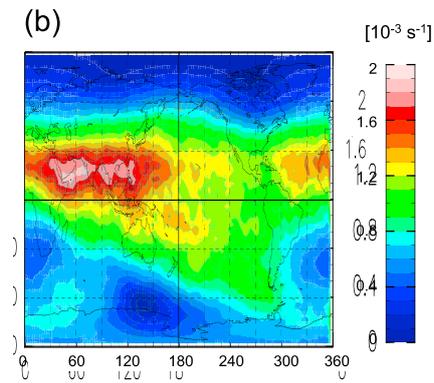


図 6. 全球大気モデル (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy: GAIA) で計算された 2002 年 6-8 月の鉛直イオン集積率の全球分布 (Shinagawa et al. 2017)。

## 参考文献

- Ejiri, M. K., Nakamura, T., Tsuda, T. T., Nishiyama, T., Abo, M., Takahashi, T., Tsuno, K., Kawahara, T. D., Ogawa, T., Wada, S.: Vertical fine structure and time evolution of plasma irregularities in the Es layer observed by a high-resolution Ca<sup>+</sup> lidar. *Earth Planets Space* 71, 3 (2019) <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0984-z>
- Kopp, E.: On the abundance of metal ions in the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.* 102, 9667–9674 (1997) <https://doi.org/10.1029/97JA00384>
- Mathews, J. D.: Sporadic E: Current views and recent progress. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 60, 413–435 (1998) [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6)
- Mathews, J. D., Sulzer, M. P., and Perillat, P.: Aspects of layer electrodynamics inferred from high-resolution ISR observations of the 80–270 km ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 24, 1411–1414 (1997) <https://doi.org/10.1029/97GL01320>
- Matuura, N., Tsuda, T. T., and Nozawa, S.: Field-aligned current loop model on formation of sporadic metal layers. *J. Geophys. Res. Space Physics* 118, 4628–4639 (2013) <https://doi.org/10.1002/jgra.50414>
- Plane, J. M. C., Feng, W., and Dawkins, E. C. M.: The Mesosphere and Metals: Chemistry and Changes. *Chem. Rev.* 115, 4497–4541 (2015) <https://doi.org/10.1021/cr500501m>
- Sakai, J., Hosokawa, K., Tomizawa, I., Saito, S.: A statistical study of anomalous VHF propagation due to the sporadic-E layer. *Radio Sci.* 54, 426–439 (2019) <https://doi.org/10.1029/2018RS006781>
- Shinagawa, H., Miyoshi, Y., Jin, H., and Fujiwara, H.: Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA. *J. Geophys. Res. Space Physics* 122, 4450–4465 (2017) <https://doi.org/10.1002/2016JA023778>
- Whitehead, J. D.: Production and prediction of sporadic E. *Rev. Geophys.* 8, 65–144 (1970) <https://doi.org/10.1029/RG008i001p00065>
- Whitehead, J. D.: Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 51, 401–424 (1989) [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(89\)90122-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90122-0)
- Wu, D. L., Ao, C. O., Hajj, G. A., Juarez, M. T., and Mannucci, A. J.: Sporadic E morphology from GPS-CHAMP radio occultation. *J. Geophys. Res.* 110, A01306 (2005) <https://doi.org/10.1029/2004JA010701>
- 恩藤忠典, 丸橋克英 (eds.): 宇宙環境科学. オーム社, 東京 (2000)