

2.4 電離圏変動

2.4.1 電離圏中の電波の伝搬

大塚 雄一 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

(2020年3月31日受付、2021年5月31日公開)

2.4.1.1 はじめに

短波帯 (周波数3~30MHz) の電波は、電離圏と地上の間を反射しながら遠くまで伝わるため、従来から長距離の放送や通信などに用いられてきた。電離圏の発見も、電波を反射する層の存在を確認したことに始まる。近年では、電離圏を透過する高い周波数の電波を人工衛星から送信する衛星通信や放送、GPS (Global Navigation System) などの全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) による測位が行われている。電波は、現在、我々の生活に欠かせないものになっているが、電離圏によって様々な影響を受ける。本節では、電波伝搬に対する電離圏の影響について述べる。

2.4.1.2 電離圏中での電波の反射・屈折

電離圏にはプラズマが存在しているため、電離圏内を伝搬する電波は、荷電粒子との相互作用による影響を受け、真空中での伝搬とは異なった速度をもつ。その影響は、屈折率 μ によって表され、アップルトン・ハートレーの式として知られている (前田、木村 1984)。電波の周波数 f が、電子のジャイロ周波数よりも十分に高いとき、 μ は

$$\mu = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}, f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2.4.1.1)$$

と表される。ここで、 f_p はプラズマ周波数であり、電子密度 n_e の関数である。また、 e は素電荷、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 m_e は電子の質量である。真空中では、 $n_e = 0$ であるから μ は1となる。電子密度が増加すると、 μ は小さくなり、 $\mu = 0$ となるところ、つまり電波の周波数がプラズマ周波数と一致するところで電波は反射される。

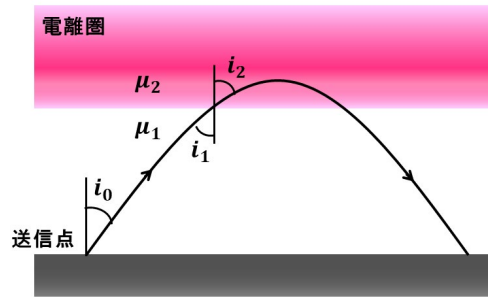


図 1. 電離圏による電波の反射

電離圏に対して、電波が斜めに入射する場合（図1）、電波はスネルの法則に従って屈折する。電波が、屈折率 μ_1 の媒質から入射角 i_1 で屈折率 μ_2 の媒質に入射する時、屈折角を i_2 とすると、

$$\mu_1 \sin i_1 = \mu_2 \sin i_2 \quad (2.4.1.2)$$

の関係がある。電離圏下部では、高度ともに電子密度が増加するため、屈折率は高度とともに小さくなる。よって、電波の屈折角は高度とともに大きくなる。屈折角が 90° になるところで、電波は反射する。式（2.4.1.2）より、地上から天頂角 i_0 で送信した電波が電離圏で反射する条件は、地上における屈折率を1とすることにより、

$$f = \frac{f_p}{\cos i_0} \quad (2.4.1.3)$$

となる。よって、地上から送信する電波の天頂角が大きくなるほど、高い周波数の電波でも反射され、プラズマ周波数よりも高い周波数の電波でも反射される。このため、VHF帯（周波数30～300MHz）の電波もスプラディックE（Es）層によって反射され、遠くまで伝搬することがある（2.4.7節で詳しく述べる）。ある一定の距離において、電波が電離圏で反射されることにより通信ができる最大の周波数は、最高使用可能周波数（Maximum Usable Frequency: MUF）と呼ばれ、電波により遠距離通信の指標になっている。

2.4.1.3 電離圏中での電波の遅延

衛星通信・放送や、GPSなど衛星測位では、電波が電離圏を透過できるよう、プラズマ周波数 f_p よりも十分に大きな周波数 f の電波が用いられている。この時、屈折率 μ は、式（2.4.1.1）から $f_p \ll f$ として近似でき、

$$\mu = 1 - \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e f^2} \quad (2.4.1.4)$$

となる。電波の位相速度は、真空中における光速を c とすると、 c/μ と表される。電離圏において、 μ は1よりも小さいことから、電離圏中では電波の位相速度は光速よりも大きくなる。一方、電波の群速度は、群屈折率 μ'

$$\mu' = 1 + \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e f^2} \quad (2.4.1.5)$$

を用いて、 c/μ' と表される。GPSなどの衛星測位や、人工衛星から海面の高度を計測する手法では、人工衛星から送信された電波が地表の受信機まで届く時間を計測し、電波の進む速さとの積をとることにより距離を測定している (Misra and Enge 2006)。上述したように、電離圏中では、電波の進む速さは、一定ではなく、電子密度に依存するため、これらの方法による距離の測定にとって電離圏は誤差の要因となる。人工衛星から送信された電波が、電離圏を透過して地上で受信される時、電波の位相遅延距離 Δr_p 及び群遅延距離 Δr_g は、

$$\Delta r_g = -\Delta r_p = \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e f^2} T \quad (2.4.1.6)$$

となる。ここで、 T は、電波の伝搬経路に沿って電子密度を積分した値であり、全電子数 (Total Electron Content: TEC) とよばれる。 Δr_g と Δr_p の大きさは等しいが符号は逆転しており、群遅延によって距離は長くなり、位相遅延では短くなる。また、両遅延量とも、周波数の2乗に反比例し、全電子数に比例する。従って、周波数が低いほど、遅延量は大きくなる。電離圏の研究では、全電子の大きさを表す単位としてTECU (TEC Unit) が、 10^{16} 個/m²を1 TECUと定義され、広く用いられている。GPSで用いられているL₁波の周波数 $f = 1.57542$ GHzにおいて、1 TECUの全電子数は、約16cmの遅延距離に相当する。電離圏の全電子数は、場所や時刻、太陽活動度によって大きく変動するが、1~100 TECU (10^{16} ~ 10^{18} 個/m²) 程度である。電離圏の影響により、100m程度の影響がGPSによる測位に現れることがある。

2.4.1.4 電離圏中での電波の吸収

電波は電場の変動を伴うため、電波が電離圏中を伝搬するとき、電離圏中の電子は振動する。電離圏の下部に位置するD領域 (高度60-90km) では、中性の大気も多く存在するため、電子は中性大気と多く衝突し、エネルギーを失う。このため、D領域の電子密度が増加すると、電波が電離圏において吸収されることがある。特に、太陽フレアが発生すると、急増したX線によってD領域において電離が起り、通常は電離圏と地表との間を反射しながら長距離伝搬する短波帯の電波が吸収されてしまい、数分から数時間にわたって長距離の通信が途絶えてしまうこと (ブラックアウト) がある。この現象は、太陽フレアとの関連を指摘した人の名前がつけられ、デリンジャー現象と呼ばれている (恩藤、丸橋 1999)。

また、極冠域では、太陽フレア時に太陽から放出されたエネルギーの高いプロトンによりD領域が電離され、電波の吸収が起こる。この現象は、極冠域吸収 (Polar Cap Absorption: PCA) と呼ばれる。極冠域吸収については、2.4.4.4節で詳しく述べる。

2.4.1.5 シンチレーション

電離圏中に電子密度の疎密構造が存在すると、電離圏を透過する電波の位相や振幅が変動することがある。この現象はシンチレーションと呼ばれている。シンチレーションは、衛星放送・通信やGPSなどの衛星測位などに影響を及ぼすことがある。

2.4.1.2節で述べたように、電離圏中を伝搬する電波の位相速度は、電子密度が高いほど早くなる。電子密度が空間的に不均一な場合、電波の伝搬経路によって電波の位相が異なり、受信される電波の位相が変動する。この現象は位相シンチレーションと呼ばれている。

一方、受信電波の振幅が変動する振幅シンチレーションは、電離圏プラズマの疎密構造、つまり屈折率の疎密構造による電波の回折が原因で発生する。図2に示すように、人工衛星から送信された電波が電離圏を透過して受信点Rで受信される場合を考える。静止衛星やGPS衛星など高高度を飛行する人工衛星の場合、人工衛星の位置から電離圏までの距離は十分に長く、電波は平面波と考えることができる。受信点Rでは、経路PRを通る電波と、電子密度の疎密構造によって回折され、経路QRを通る電波が同時に受信される。経路PRとQRの距離の差が波長の整数倍の場合、2つの電波は同位相であるため電波は強め合い、経路差が波長の半分である場合は逆位相となり弱めあう。このため、点Rでの受信信号の振幅は変動する。経路差が波長と同じになるときの疎密構造の大きさDはフレネル・スケールとよばれ、その大きさは

$$D = \sqrt{2\lambda z} \quad (2.4.1.7)$$

と表され、シンチレーションを起こすプラズマの疎密構造の特徴的な空間スケールを表す。ここで、zは電子密度の疎密構造と受信点との間の距離、λは電波の波長である。GPSのL₁波 (λ ~ 19cm) の場合、Dは300m程度になる。式 (2.4.1.7) から、フレネルゾーンは、電波の波長が大きいほど大きいことが分かる。一般に、シンチレーションを起こす電子密度の疎密構造の波長が大きいほど、疎密の振幅が大きいことが知られている。従って、シンチレーションの強さも、電波の波長に依存し、波長が大きいほどシンチレーションが強くなる傾向がある。

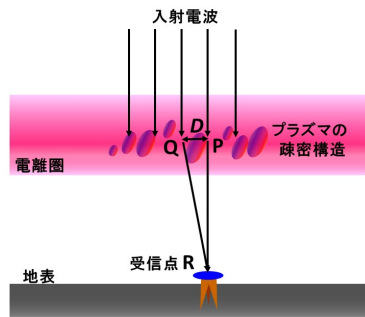


図 2. 振幅シンチレーションの原理を表す模式図

振幅シンチレーション発生 の地理分布と時間分布の特性を 図3に示す。振幅シンチレーションの強さは電子密度の揺らぎの大きさに依存する。そのため、電子密度が高い赤道異常の領域でもっとも頻度が高い。赤道域付近で発生するシンチレーションは、プラズマバブルの内部に発生するプラズマの疎密構造によって発生するため、太陽活動と顕著な正の相関がある。また、プラズマバブルが発生する日没直後に最も発生頻度が高い (Basu et al. 1988)。プラズマの疎密構造は、拡散により消滅するため、シンチレーションの発生頻度は時間とともに小さくなる。その消滅する速度は、空間スケールが小さいものほど早い。VHF帯 (周波数30-300MHz) の電波に起こるシンチレーションは、日没後から日出直前まで夜間を通して発生するが、GPSのL1信号 (周波数約1.6GHz) では、シンチレーションは、真夜中以降はほとんど発生しない (Secan et al. 1995)。プラズマバブルについては、2.4.6節で解説する。

高緯度域では、シンチレーションは、極冠域と夜側のオーロラオーバル、昼側のカスプ領域で発生している。極域におけるシンチレーションについては、2.4.4節で詳しく述べる。

中緯度では極域や赤道域に比べて発生が少ないが、地磁気擾乱時にはシンチレーションが観測されることもある (Ogawa et al. 1980)。

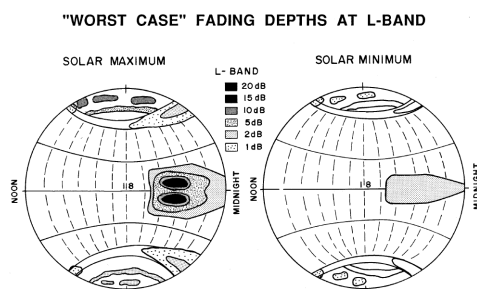


図 3. 太陽活動極大期 (左) と極小期 (右) におけるシンチレーション発生の世界分布 (Basu et al. 1988)

参考文献

- Basu, S., MacKenzie, E., & Basu, Su.: Ionospheric constraints on VHF/UHF communication links during solar maximum and minimum periods, *Radio Sci.*, 23, 363 (1988).
- Misra, P., & Enge, P.: *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (Re-vised Second Edition)*, Ganga-Jamuna Press (2006).
- Ogawa, T., Sinno, K., Fujita, & M., Awaka, J.: Severe disturbances of VHF and GHz waves from geostationary satellites during a magnetic storm, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 42, 7, 637-644 (1980).
- Secan, J. A., Bussey, R. M., Fremouw, & E. J., Basu, S: An improved model of equatorial scintillation, *Radio Sci.*, 30 (3), 607–617, doi:10.1029/94RS03172 (1985).
- 恩藤忠典、丸橋克英 (eds.): *宇宙環境科学*. オーム社, 東京 (2000).
- 前田憲一、木村磐根: *現代 電磁波動論*, オーム社 (1984).