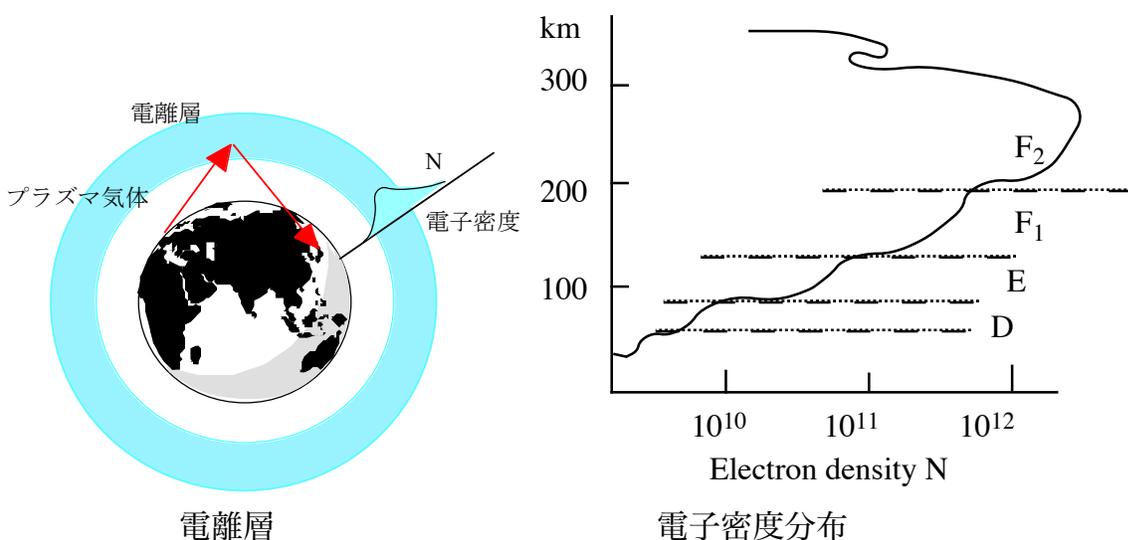


## 質問：電離層にA層やB層はある？

高校生のW君：高校の地学で，地球大気中の電離した部分を電離圏といい，特に強く電離した層状の部分が電離層で，下からD層，E層，F層と習いました．とすると，D層の下にはC層，さらにB層やA層があるのですか？



博士：電離層の名前は確かにアルファベット順になっているが，最初に名前がついたのはE層で，残念ながらA, B, C層というのはないことになっている。

W君：ではなぜ中途半端なところから名前をつけたのですか？

博士：その質問に答える前に，40年以上も前の次の話をしよう．デリンジャー現象として有名なアメリカ国立標準局電波伝搬研究所長のデリンジャー教授が，電離層の研究でノーベル賞を受賞した英国のアップルトン教授に，1943年2月13日に手紙を書いた．その中で，同じように「なぜあなたは電離層の名前をD層，E層，F層のように途中から命名したのですか？」と質問している。

これに対し，アップルトン教授は3月20日の手紙で次のように応えている。

「理由は大変簡単です．私は中波を使ってケネリー・ヘビサイド層（電離層のこと）からの反射を得るのに成功しました．それを論文に発表する際，反射波の電界ベクトルを表すのにEという記号を用いたのです．その後，1925年の冬に少し高いところにある別の層からも反射が返ってくることを発見したので，その電界成分を表すのにFという記号を用いました．ほとんど同じ頃，時々非常に低い高度からも反射があることが分かったので，その電界成分をDと表すことにしました．ここまでは自然の成り行きだったの

ですが、考えてみれば、今後の研究により、これらの層の上下に新しい層が発見される可能性はあるのですから、私としてはA,B,Cと使わなくてよかったと思っています。」

こうして上下の余地を残しながら、電界成分の記号をそのまま層の名前としてD, E, F層が生まれたのだが、なかなかおもしろい話ではないかね。

W君：聞いたこともない珍しいですね。ありがとうございます。大先生も案外単純なのですね。ところでその後の研究で新しい層は見つかったのですか？

博士：最後までつっこんでくる点は君も科学者としての素質十分ということかな。将来の科学者のために、話を続けよう。

海の近くで中波帯のパルス電波を発射すると、D層（50-80 km）よりも低いところから反射が返ってくることがある。また、超短波帯のレーダでも、通称、海蛇（反射波の頭がうねるように時間と共に変化する）と呼ばれる近距離反射がしばしば起こり、これらはC層からの反射だといわれたことがある。しかし、よく調べてみると、その現象は対流圏内での電波の屈折と海面からの散乱の組み合わせによっておこることが分かり、今ではC層はないことになっている。

一方、F層より高いところからも反射が現れることがあり、G層ではないかといわれたりもした。しかし、これも一時的にまた局地的にF層の上部にできる小さな拳のようなもので、層といえるものではない。つまり、G層もないということになっている。

1901年にマルコーニが大西洋横断無線通信実験に成功したことは、当時の電磁波の理論家を大いに刺激した。しかし、どう計算しても丸い地球の4000 km 彼方まで回折効果では電波が届かないことが分かった。この疑問を解決する論文が、1902年ほとんど同時にまた独立に、アメリカのケネリー(A. E. Kennelly) とイギリスのヘビサイド(O. Heaviside) によって発表された。彼らは共に地球大気の上層部には導電層があることを仮定し、それが電波を曲げると主張した。

動機は違うが、その24年前の1878年にスチュワートは、地磁気の日変化を説明するためには地球の上層に電気を伝える層があるはずだという論文を発表していた。

いずれにせよ、この架空の電離層が実在すること実証して見せたのはK-H層（ケネリーとヘビサイドの頭文字をとってこう呼ばれた）の提案から23年後の1925年に発表されたアップルトンとバーネット(E. V. Appleton and M. A. F. Barnett) の論文だ。

アップルトン教授は学生と共に電波を上に向けて発射すると、それが反射して戻ってくることで、また、離れた地点で受信して、地表を伝わってくる波と上空から反射してくる波との位相差から、上空の導電層の高さが分かることも実験的に示して見せた。周波

数を変化させて、電波を送信し、電離層反射波と送信波の干渉パターンを調べることで、電離層の高度、反射波の強度や偏波を調べたのは実に1925年のことである。

## 電離層について

1901年にマルコーニが大西洋横断無線通信実験に成功した。それに刺激されてさらに遠くに電波を飛ばそうと、短波を使っていたアマチュア無線家によって予想をはるかに上回る長距離の異常伝搬現象が発見された。このような長距離の伝搬は地上の伝搬理論だけでは説明がつかない。そのため、上空に電磁波を反射する何か鏡のようなものが存在すると予想された。現在は、それが電離層（D, E, F層）であることが確認されている。この電離層は予測していた Kennelly & Heaviside の名前が付けられている。

空気の密度は地上から高くなるにつれ指数関数的に減少する。太陽光の強さは空気が薄くなるにつれ増大する。空気の分子は太陽光によって電離現象を起こすが、電離されると空気はイオンと電子の混合物となる。この状態をプラズマという。電離によって生まれる電子密度は空気密度と太陽光密度の積に比例するので、図のように電子密度の高い層ができあがる。これを電離層と呼び、電波では遠距離通信に利用できる非常に重要な存在になっている。一般に、この層は地上200 kmから400 kmの辺りにあり、300 km程度の高さで最大となる。かなりの厚さがあるので、地上から見て半無限大の媒質として近似し、その中の電波の振る舞いをみてみよう。

イオンと電子が分離しているプラズマ中に電磁波が存在すれば、イオンや電子は電界によって力を受け、運動するから、これらの荷電粒子によって対流電流が流れる。つまり、プラズマは電流の流れる媒質としてとらえることができる。

## 電子の衝突による媒質定数

電子密度が大きい場合、電子自身やイオンとの衝突が起き、電子の運動が妨げられる。衝突による影響は運動に対して抑止力として働き、その大きさは電子の質量 $m$ 、速度 $\mathbf{v}$ および衝突回数すなわち衝突角周波数 $\omega_c$ の積に比例する。ニュートン力学にしたがって次の運動方程式が立てられる。

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e \mathbf{E} - m \omega_c \mathbf{v} \quad (1)$$

電界が時間的に $e^{j\omega t}$ で変動しているとすれば、この運動方程式は

$$j\omega m\mathbf{v} = -e\mathbf{E} - m\omega_c\mathbf{v}$$

となるから速度 $\mathbf{v}$ はこの式を変形して

$$\mathbf{v} = \frac{-e\mathbf{E}}{m(\omega_c + j\omega)} = \frac{-e(\omega_c - j\omega)}{m(\omega_c^2 + \omega^2)}\mathbf{E} \quad (2)$$

このような電子が単位体積当り $N$ 個あるとすると、それぞれが電荷 $-e$ を運ぶので、

$$\text{電流密度は次の形で表される。} \quad \mathbf{J} = N(-e)\mathbf{v} = \frac{N e^2 (\omega_c - j\omega)}{m(\omega_c^2 + \omega^2)}\mathbf{E} \quad (3)$$

これをMaxwellの方程式に代入すると、形式的に次のようになる。

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega\epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{J} = j\omega\epsilon_0 \left[ 1 - \frac{N e^2}{m\epsilon_0(\omega_c^2 + \omega^2)} \right] \mathbf{E} + \frac{N e^2 \omega_c}{m(\omega_c^2 + \omega^2)} \mathbf{E} \\ &= j\omega\epsilon_0\epsilon_r\mathbf{E} + \boldsymbol{\sigma}\mathbf{E} \end{aligned} \quad (4)$$

したがって、プラズマは等価的に比誘電率と導電率が

$$\epsilon_r = 1 - \frac{N e^2}{m\epsilon_0(\omega_c^2 + \omega^2)}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \frac{N e^2 \omega_c}{m(\omega_c^2 + \omega^2)} \quad (5)$$

の損失誘電体とみなすことができる。この誘電率の中で $\frac{N e^2}{m\epsilon_0}$ は電子密度 $N$ によって決

まる値で、これを $\omega_p^2$ とおき、をプラズマ角周波数と呼んでいる。

$$\omega_p^2 = \frac{N e^2}{m\epsilon_0}, \quad f_p = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{m\epsilon_0}} = 9\sqrt{N} \quad (6)$$

物理定数 $m = 9.035 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ 、 $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ を代入すると、プラズマ周波数は電子密度によっておよそ以下のような値となる。

$$\text{電離層 } N = 10^{11} \quad f_p = 9\sqrt{N} \approx 2.84 \text{ MHz}$$

$$\text{蛍光灯 } N = 10^{17} \quad f_p \approx 284 \text{ MHz}$$

$$\text{核融合 } N = 10^{21} \quad f_p \approx 28.4 \text{ GHz}$$

ここで、プラズマの複素比誘電率を  $\epsilon_r^* = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$  (7)

とし、プラズマ角周波数を使うと等価比誘電率は

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 + \omega^2} - j \frac{\omega_c}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 + \omega^2} \quad (8)$$

と表記できる。この式から分かるようにプラズマの比誘電率の実部は常に1よりも小さい。これは地上の自然物体には存在しない。

電離層によって電波が反射される様子を調べるために  $\omega < \omega_p$  において近似してみる。これは3 MHz以下の周波数帯に該当する。

$$\epsilon_r^* \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad k = k_0 \sqrt{\epsilon_r^*} = k_0 \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \quad (9)$$

となるから 位相速度  $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}$  (10)

これから  $\omega < \omega_p$  の時は、波数も位相速度も純虚数となる。また固有インピーダンスも純虚数となり、

$$\eta = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} = j \frac{\eta_0}{\sqrt{\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - 1}} = j \eta_0 \nu, \quad \nu = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - 1}} \quad (11)$$

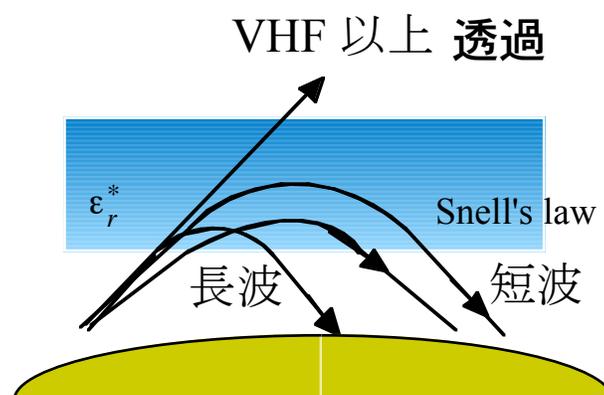
電波がプラズマ境界面に垂直入射したとすれば、その反射係数は次の形になる。

$$R = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} = \frac{j\nu - 1}{j\nu + 1} = 1 \cdot \exp[-j(2 \tan^{-1} \nu - \pi)] \quad (12)$$

つまり反射係数の大きさが1となり、位相が  $(2 \tan^{-1} \nu - \pi)$  だけ遅れた波が完全反射されて戻ってくることになる。

$\omega > \omega_p$  のとき、波数、反射係数とも実数となるので多少の反射はあるものの、電波は電離層を通過して地球の外に出ていくことになる。これから電離層反射を利用できる周波数は以下であることが分かる。の値は大気の状態と太陽の活動状況、昼夜によって大きく変動していることに注意が必要である。

電波伝搬の立場から見た場合、ELF (3 kHz 以下)、VLF (3 - 30 kHz)、LF (30 - 300 kHz)の電波は電離層で完全に反射されるので、大地との間を反射しながら地表に沿って伝搬してゆくことになる。MF (300 kHz - 3 MHz)では、昼間は電離層における吸収が大きいため、地表波のみの伝搬となり、夜間は電離層での吸収が少なくなるので、電離層からの反射が大きくなる。さらに高周波のHF (3 - 30 MHz)では、電離層での吸収が大きく、揺らぎが大きい。また、VHF、UHFと高い周波数に移行するにつれて、電離層の影響は減少してゆき、電波は突き抜けるようになる。したがって、MF-HF帯で電離層の影響が大きく現れる。



## 参考文献

谷口慶治, アンテナと電波伝搬, 共立出版, 2006

関口利男, 電磁波, 朝倉書店, 1976