

無線通信と電離圏

福田 喬

情報通信工学科 教授

菅平宇宙電波観測所長

はじめに

近年における高度情報化社会の進展とともに、電気通信に関する社会的ニーズはますます広域化、多様化しており、中でも「無線通信」は、社会基盤の一つとして欠くことのできない重要な要素となっている。その通信分野に連なる総ての者にとって、昨 2001 年は看過できない慶賀の年であった。すなわち、長距離通信の草分けと位置付けられる大西洋横断無線通信にマルコーニ (G. Marconi) が初めて成功した 1901 年から数えてちょうど 100 年目に当たったからである。これを記念し電通大では、通信実験が成功したその日、12 月 12 日に、歴史資料館、菅平宇宙電波観測所、共同研究センターの三者が協力し、また、(社)日本アマチュア無線連盟の後援も受け、記念講演会を催した。本稿はその折に標記の題目で行った話の抄録である。ただ紙幅の都合からその一部に止まざるを得なかったので、興味のある方は菅平宇宙電波観測所の Web サイトにある講演資料をご覧ください (<http://ssro.ee.uec.ac.jp/information/Marconi100/Presen-OHP.html>)。

講演会では、歴史資料館学術調査員の桑島陽一氏による「無線通信の黎明」と題するマルコーニ本人の活躍にスポットを当てた貴重な講演もあった。その記録も本編に載せられているので、そのあたりの事情についてはその稿をご覧ください。

以下ではマルコーニの実験前後を取り巻く背景事情と電離層発見のこと、そして、最近ではいろいろな探査技法を駆使して電離圏に関する新しいイメージが作られつつあるというような辺りについて、筆足らずを覚悟の上で述べることにする。

背景

電波の歴史のスタートは電磁気学体系の完成に重なることは言うまでもなく、したがってマクスウェル (J. C. Maxwell) の偉業を避けて通ることはできない。それまではどちらかということ個別に扱われがちであった電気と磁気を、電磁気という統合した概念に向かわせたのはファラデー (M. Faraday) であるが、それを拡張して正しい解釈を与えると共に、電磁気学の基本方程式を提示し体系化したのがマクスウェルである。電磁気学が、～または電磁気学が記述する電磁波がと言ってもよいが～、例えば空洞輻射の問題を通じてプランク (M. Planck) による 1900 年の量子仮説を生み、またマクスウェルの方程式の不変性からはアインシュタイン (A. Einstein) によって 1905 年の特殊相対性理論が作られるなど、現代物理学の糸口となっているのは周知のことである。しかしその電磁波も、マクスウェルによって予言された 1860 年頃には人々にそれほど強いインパクトを与えるには至らず、本人も後世これほど重要な資源になるとは思っていなかったようである。その転換をもたらしたのはヘルツ (H. R. Hertz) であり、彼は定量的測定を可能とさせる種々の装置の開発に努め、1887 年に初めて電磁波を発生させ検出に成功した。今で言うヘルツダイポールの原理に基づく電磁波放射とコヒーラによる受信である。ヘルツは更に、電磁波の速度が光速と同一であることも発見しており、光と同様に反射され、屈折され、回折されることも証明している。

いろいろな記録によると、このヘルツの実験の後それほど間が無い 1890 年代に、旧ソ連のポポフ (A. S. Popov) が人為信号の無線による送受信に初めて成功したとなっている。しかしこの頃、旧ソ連と欧米社会とは隔絶した状態にあったためポポフの成果が広く世に知られること

は無く、無線通信に関するクレジットのほとんど総てはマルコーニに帰することになったというのが実情のようである。それでも、マルコーニの行った、母国イタリアにおける若き日の実験・研究、イギリスに渡ってからの無線電信信号会社の設立、および一連の通信実験は、無線通信を実用化に向かわせるための確実な技術開発に深く貢献しており、その功績に対して疑義を挟む寸分の余地も無いのは言うまでもない。

さて、長距離無線通信の歩みと不可分なものとして電離層の存在があることは、今や広く知られている。したがって、その方面に関する動向にも目を向けておく必要がある。しかし当初の電離層研究は、いわゆる電波伝搬とはかけ離れた分野で進められていたというのが本当のところ、地上で観測される地磁気の変動を解釈するため、電流を流すなんらかの領域が上空にあるのではないかと議論がその出発点となっている。電磁気学の体系化がなされるはるか前、したがって電磁波という概念もいまだ確定していない18世紀頃のことである。その後、1839～1878年にかけて、ガウス (C. F. Gauss)、ケルビン卿 (Lord Kelvin (W. Thomson))、スチュワート (B. Stewart) らが高電気伝導層の存在を具体的に予言し議論を展開するようになったが、本格的な物性論的研究は1900年頃のトムソン (J. J. Thomson) による電子の発見やそれに始まる原子物理学の発展を待たなければならなかった。

電波伝搬と直接結びついていたわけでは必ずしもなかったが、おぼろげながら電離層に関する議論が広まりつつあったこれらの状況を、マルコーニがどの程度押さえていたのか、そのことと無線通信との繋がりを彼は意識していたのかどうか、科学技術の発達史の観点からは大いに興味の沸くところである。

電離層の発見

初期の長距離電波伝搬は一般に回折現象として扱われていたため、マルコーニによる1901年の大陸間無線通信の成功はその解釈をはるかに超えるもので、新たな問題提起となって議論を巻き起こしたであろうことは想像に難くない。そのような中で、1902年、アメリカのケネリー (A. E. Kennelly) とイギリスのヘヴィサイド (O. Heaviside) は互いに独立に、「高層大気中には自由電子があってその層が電波を反射し、マルコーニが成功したような長距離無線通信を可能としている」とする説を打ち出した。ケネリー・ヘヴィサイド層 (Kennelly-Heaviside layer) の登場である。そしてすぐに、その自由電子の層は太陽 UV 放射が作り出しているとする生成論まで、1903年のテイラー (J. E. Tayler) や1906年のフレミング (J. A. Fleming) らによって提出されている。ただし、このあたりの議論はまだ定性的な段階に止まっており、大気的光電離効果を定量的に考慮して電離層の基本的構造を説明する本格的な理論は、1928年のハルバート (E. O. Hulbert) や1931年のチャップマン (S. Chapman) まで待たなければならない。

長距離伝搬の機構は、先ほども述べたように当初は回折効果とされていたが、ケネリー・ヘヴィサイド層の登場によって反射の効果も加味されるようになった。この頃の電波伝搬に関する代表的な仕事としては、ワトソン (G. N. Watson) やオースティン (L. W. Austin) らによるものがある。そしてそれらの集大成は、例えば米国標準局が採用した受信電界強度の実験式、オースティン・コーエンの式 (Austin-Cohen formula) ,

$$E = \frac{377hi}{\lambda d} \exp^{-0.0015 \frac{d}{\lambda^{1/2}}} \quad (1)$$

で知られている。 h はアンテナの高さ、 i は供給電流、 d は距離、 λ は波長である。指数部の定数は電離層吸収効果の多寡によって変化し、ここで示したものは昼間の約4,000km程度の電波伝搬に相当するものである。何故わざわざこの式を示したかということ、この式に基づいた当時の公的機関のある種の判断に興味を沸くからである。式(1)を見てわかるように、当時の定式化

では波長 λ が長くなれば長くなるほど指数部引数の絶対値が小さくなり、結果、電界は大きくなる。このことから、当時の政府機関や大手通信会社は長波利用に走ったようである。そしてその裏返しとして、波長の短い短波帯がアマチュア無線家に開放され、そのアマチュアの活動が、今日多くの人々が認めるように、電波科学および電離層物理の発展に多大な貢献をしたという皮肉な結果をもたらしたと思うわけである。このあたりの事情に絡む一文を Radio Amateur's Handbook (40th edition, 1963) から引用しておこう。

... the official viewpoint towards amateurs was something like this: Amateurs? – Oh, yes – Well, stick 'em on 200 meters and below; they'll never get out of their backyards with that. ... Much to their surprise, the amateurs found that they could transmit signals across the North Atlantic on wavelengths near 200 m. Early in 1923, the American Radio Relay League sponsored experiments on wavelengths down to 90 m (approximately 3.3 MHz), which turned out to be successful. ...

このようなアマチュア無線家の活躍もあって 1920 年代には短波帯伝搬の様相も次第に明らかとなり、ケネリー・ヘヴィサイド層に対する見方もより確かなものとなって、具体的にその層の場所を同定しようとする実験が盛んに行われた。そしていよいよ、アップルトン (E. V. Appleton) の実験が成功することになる。1925 年のことである。その実験は図 1 に示すような

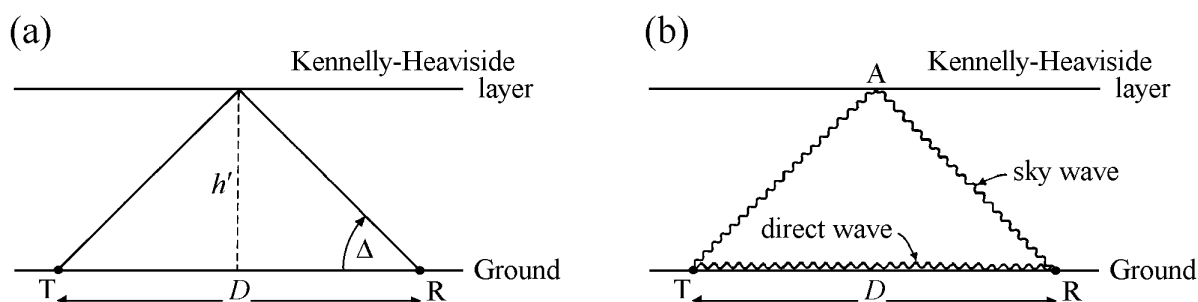


図 1. アップルトンの実験：電波反射高度の決定

2 種類のもので構成されており、共に電波反射高度の決定を行うものである。容易に推測されるように、図 1(a) の実験は、上空波の受信仰角 Δ から既知の送受信点間距離 D を用い、

$$h^0 = \frac{1}{2} D \tan \Delta \quad (2)$$

によって見かけの電波反射高 h^0 を求めようとするもので、(b) の実験は、送信周波数をわずかに変化させると直接波と上空波の重なり合いで起こる干渉パターンが変化することに注目し、

$$\Delta N \approx \frac{P^0 - D}{C} \Delta f \quad (3)$$

によって干渉により生じる信号極大個数の変化 ΔN から上空波の実効伝搬距離 P^0 を求め、次いでそれから電波反射高度を決定しようとするものである。なお、 C は光速、 Δf は周波数変化量である。いずれも今にして思えばしごく当然で平明な原理に基づく実験方法であり、裏返せば、アップルトンがそれまで数多く提出されていたであろう短波伝搬の実験事実を正当に解

釈し評価していたことを示すものであり、感服させられる。アップルトンはその後、磁場のある電離気体中の電波伝搬理論 (Magneto-ionic theory) を完成させており、その中のアップルトン・ハートレーの式 (Appleton-Hartree equation) と呼ばれる磁化プラズマの屈折率を与える式は、今でも地球周辺の電磁波現象を理解する際の最大の拠りどころとなっている。

現在 D 層, E 層, F 層として知られている電離層の基本的構造は、このようにしてアップルトンによって決定されたわけであるが、では何故 D, E, F と名付けられたのであろうか。当然、同種の質問がいろいろと寄せられたらしく、当のアップルトン自身が 1943 年 3 月にデリンジャー (J. H. Dellinger) に宛てた手紙の中でそれを明らかにしている。ちなみにこのデリンジャーは、太陽フレアなどに伴う電離層擾乱の研究で数々の成果をあげた人である。その手紙の内容によると次のような事情らしい。アップルトンの観測手法は図 1 に示したように上空波の電界強度を観測することに基づいていたため、観測結果の図表には電界強度を意味する E の文字がいたるところで使用されていた。したがって電離層反射波を検出したときには自然にその E が残りそのまま層の名前として採用したのだというのである。その後、それより低い高度に別の反射層が見出されたときには D 層と名付け、より高い高度のものは F 層と名付けたというのも自然の成り行きであつたらしい。今にして思えば、もし最初に検出された層が今で言う E 層ではなくもっと低い層であつたなら、高高度に G 層などという名前が生まれていたかもしれないし、またネーミングにアルファベットを採用していたなら、A 層の発見後それより低高度の層の名前はようになっていたのだろうかと心配してしまう。アップルトン自身もそう追想している。とにかく、D, E, F のネーミングは偶然に近い単なる成り行きであつたらしいが、慣れてしまったからとは言え実にしっくり来る良い名前ではないか。

ところで、これまでの話の中では、便宜上、電離層という言葉を使ってきたが、本当のところはこの時代にその言葉は無く、あくまでもケネリー・ヘヴィサイド層という名前が正式なものであつた。そして、アップルトンの発見の後の 1929 年に、ワトソン-ワット (R. A. Watson-Watt) が高電子密度領域を総体として指す言葉として 'Ionosphere' を提案し、現在はそれが定着している。この Ionosphere を邦訳すると '電離圏' である。したがって現在では、高層大気中の電離領域を一まとまりとして呼ぶ場合には電離圏という言葉を用いる。その領域の中の E 層, F 層といったような個別の層状領域を呼ぶ場合には電離層 (ionospheric layer) という言葉を用いる。それぞれ区別して使う慣わしとなっている。本稿の表題に '電離圏' を使用した理由もここにある。

電離圏の電波観測

電離圏は、その研究が始まったころの認識どおり、電気伝導性の高い領域であり、自由電子の多い領域である。したがって、その観測に電波を利用するのは当然の成り行きであることは言うまでもない。しかし、自由電子が多くある媒質中といっても電波の振る舞いはその周波数によって大きく異なる。反射する場合もあり、屈折するだけの場合もある。また、回折や散乱の現象も起こり、地球磁場の影響による偏波面の回転も起こるのであろう。もちろん減衰効果も加味される。このようにいろいろな効果が生じるといえることは、それらの効果を逆に媒質診断のために利用できるということでもある。そのような観点から、今日ではいろいろな手法の電波観測が、それぞれの目的に応じたやり方で様々に行われている。図 2 は、それらのうちの代表的な観測技法を利用周波数によって大まかに分類したものである。図に挙げた総てを説明するほどの紙幅は許されていないので、ここでは電離圏を高度方向に荒く領域分けした場合のそれぞれに対応する特徴的な技法の紹介に限らせていただく。

1) 反射波の利用

さて、先に示したアップルトンの実験は、上空波の反射高度を決定するためのもので、文字どおり反射の機構を利用した手法であつた。これをさらに発展させたのがチューブ (M. A. Tuve)

とブライト (G. Breit) で、彼らは、アップルトンの実験のすぐ後 1925 年 (発表は 1926 年) に、パルス波を用いた電離圏の探査という画期的な手法を開発している。鉛直方向に発射したパルスのエコーの帰着時間からターゲットまでの距離を決定するというものであり、いわばレーダー技術の走りともみなされる。このパルス探査の手法は、いろいろな改良を経て、電離圏探査の支柱となるイオノゾンデ (ionosonde) という観測技法に受け継がれ、現在ではそれによる電離圏観測が全世界 300 ~ 400 局の観測所で続けられており、ネットワーク化とデータベース化を通じて、電離圏構造およびその変動の基礎情報を広く提供している。

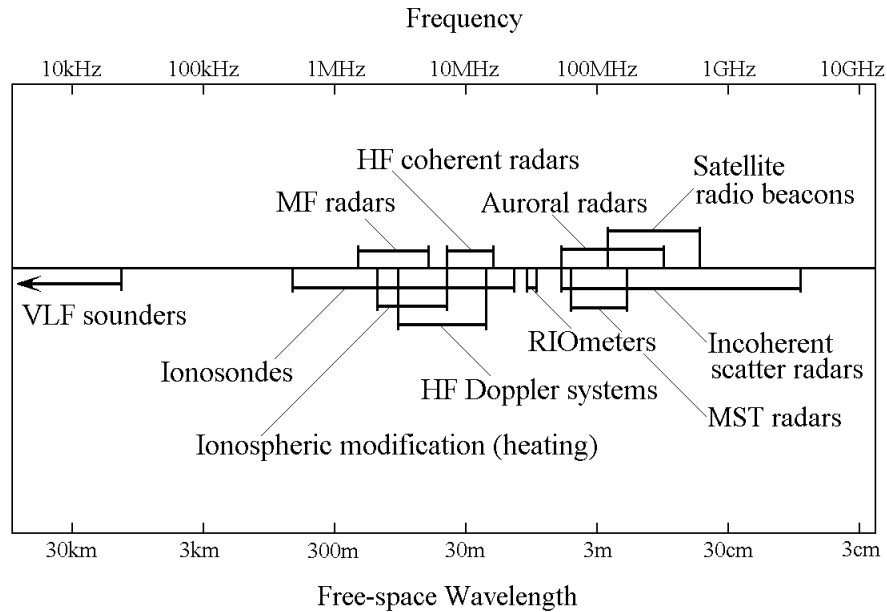


図 2. 電離圏観測のための各種電波技法の使用周波数

イオノゾンデが使用する周波数は、図 2 に示してあるように、数 100kHz から 20MHz 前後である。その範囲で周波数を連続的に変化させ周波数ごとのエコー遅れ時間を測定することで、電離圏電子密度の高さプロファイルを検出している。観測が始められた最初の頃は、電子密度プロファイルの時間的変動についても詳しい情報が欲しいという要求からか、24 時間連続的にパルス送信するという乱暴なことがされていたらしく、甚だしい電波干渉を周りへ引き起こしてしまい非難轟々の厳しい状況であったらしい。その後、幸いにも目的とする電離圏がそれほど短時間には変動しない (本当のところはこれは事実と反しているが、イオノゾンデ観測が通常の目的としている現象についてはという意味) ということが判り、現在では 15 分間隔で観測を行うことが世界的に統一されている。

2) 分反射の利用

上記のようにイオノゾンデは基本的に電波の完全反射を利用しているが、電子密度がそれほど高くない場合には電力の一部だけが戻ってくる分反射という現象が起きる。図 2 中の数 MHz (中波帯) のところに示した MF レーダー (MF radar) はその原理を利用し、電離圏下部に相当する中間圏 (mesosphere; 高度約 65 ~ 95km) と呼ばれる領域を観測している。分反射波の強さはそれが起きる場所の電子密度に依存するので、地上で観測される電波強度の強弱は上空の電子密度擾乱を反映していることになる。したがって、もし観測電波の強弱パターンが地上を移動するような様相を示せば、それは上空の電子密度擾乱の移動を意味することになる。このようにして上空の擾乱の水平移動速度を求めるのが MF レーダーの原理である。観測している中間圏で

は、電子の運動は中性大気の運動のみに、すなわち中性風のみによっているとみなされるので、中性風速がわかるわけである。図3に示したものは、我々がノルウェーのトロムセにある MF レーダーで観測した中性風速変動の一例である。とくに (b) 図の東西風成分に顕著に表れているように、高度 88km 付近で高度と共に風向が逆転する現象が、夏季に継続して観測されている。80~90km という高高度でどうして風向が変化するのか、風向を変化させるエネルギーはどこから来るのか、高層大気力学の中の大きな謎としていま注目を浴びている。

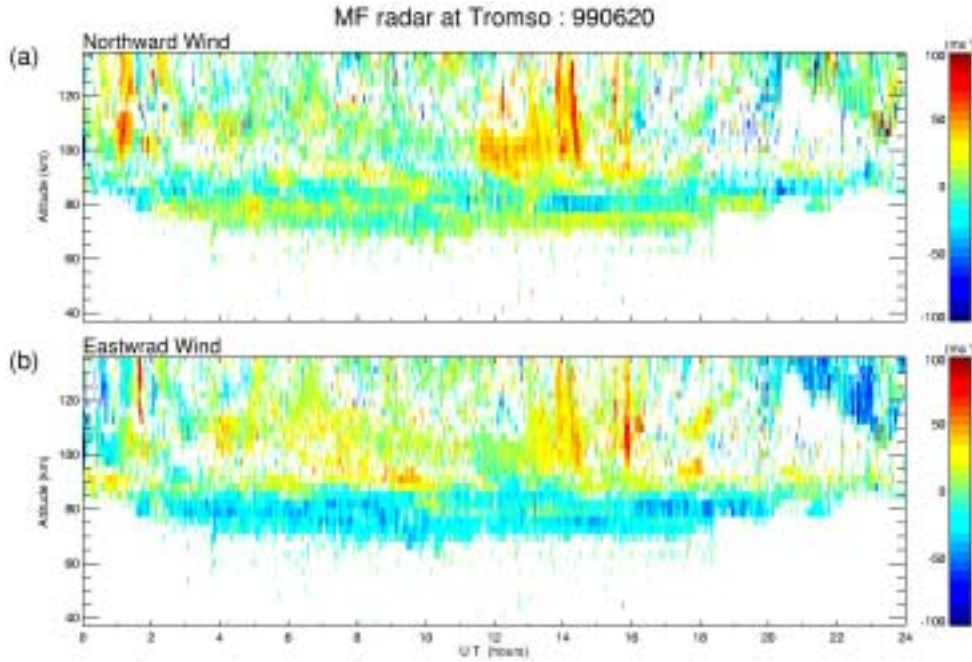


図3. MF レーダーによって観測した中間圏中性風，(a) 南北風，(b) 東西風

3) 散乱波の利用

以上述べた分反射というのは、電子密度が低いために一部の電力しか反射せずほとんどが通過してしまうというものであるが、電子密度が高くて電波の周波数が十分高ければやはり反射は起こらず通過してしまう。しかしそれでもほんの少しの部分は元来た方向に戻るかまたは別の方向に角度を変える。そのような現象を散乱という。したがって、散乱現象を利用するとなると微小な電力を検出するためにシステムを巨大化して高利得にしなければならないという困難さが生じる。しかし、散乱の機構には対象物の揺らぎという本質的なプロセスが強く影響しているということと、それを高い周波数、すなわち短い波長の電波で測定することから小さいスケールの空間構造まで検出できるというメリットもあり、最近では強力な観測手段の一つとして利用が増えてきている。

その散乱を支配する揺らぎの機構であるが、大きく分けて2種類のものがある。一つは、個々の電子の熱的揺らぎに依存し、なおかつ電子同士が相関を持たず独立に振舞っているというケースである。独立であって互いに干渉しないという意味から非干渉性と言われており、そのような散乱機構に基づいて観測するものを非干渉性散乱レーダー (incoherent scatter radar) と呼んでいる。VHF 帯の上の方から UHF 帯にかけての電波が使用され、高度約 90~600km の熱圏 (thermosphere) と呼ばれる領域の観測に用いられている。もう一つの揺らぎの機構は、自由電子はあるもののそれよりずっと多量に中性大気があるために、電子の運動は中性大気の揺らぎ

に支配されていて電子同士互いに独立ではないというケースである。そのような場合は干渉性の散乱であり，干渉性散乱レーダー (coherent radar)，または，それが主として起こる中間圏，成層圏 (stratosphere; 高度約 15 ~ 55km)，対流圏 (troposphere; 高度約 15km 以下) の頭文字を連ねて MST レーダー (MST radar) と呼ばれ，数十から百数十 MHz の周波数で運用されている。

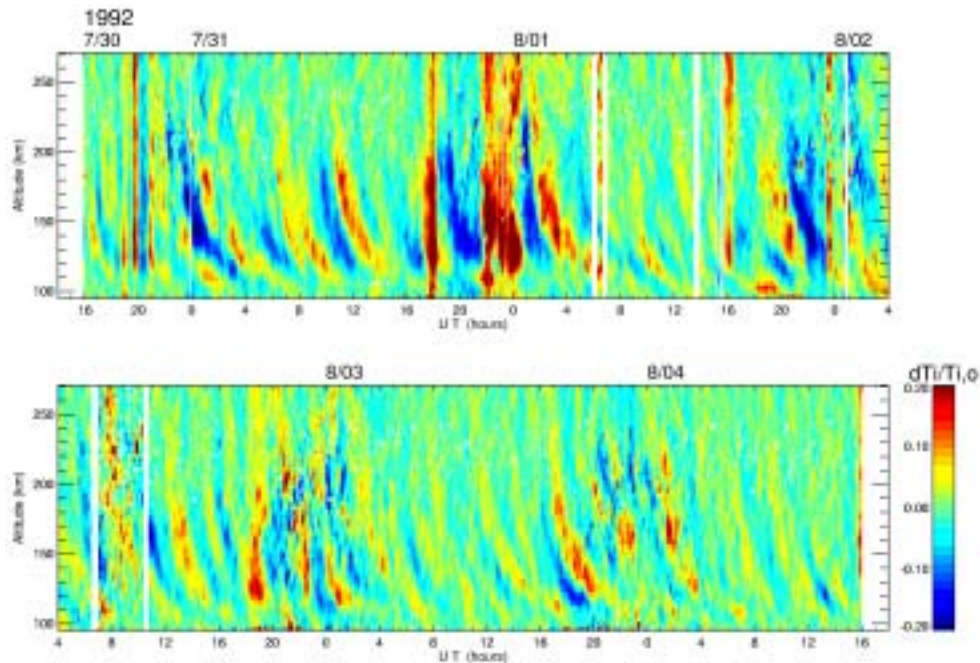


図 4 . EISCAT レーダー観測によるイオン温度変動に現れた大気重力波擾乱

図 4 に示したものは非干渉性散乱 (IS) レーダーによる観測結果の一例である。IS レーダーでは，電子密度，電子温度，イオン温度，イオンのドリフト速度といった，いわば構造とエネルギーと運動に関する情報を，時間と高度の 2 次元量として同時に取得することができるが，ここに示したものは，その中のイオン温度に注目し，その変動成分の時空依存性をほぼ 5 日間に渡って調査したものである。利用したレーダーは， Tromsø にある EISCAT (European Incoherent Scatter radar) と呼ばれるレーダーで，日本とヨーロッパ 6 カ国 (イギリス，フランス，ドイツ，スウェーデン，フィンランド，ノルウェー) とが科学協会を構成して協同運用している装置である。図中，明確に同定できると思うが，正 (または負) の相対変動をする部分が時間経過と共に高高度から低高度に移動して行く構造が見て取れる。この時間 - 高度特性，併せてそれが少し湾曲した軌跡を取っていることから，この擾乱は中性大気中の特性波の一つである大気重力波によって引き起こされていると結論付けられ，このケースの場合には卓越成分の周期が数百分程度となっている。この例に見られるように，電離圏は必ずしも定常的な存在ではなく，中性大気の変動に呼応して大規模で複雑な時空構造を，それもほとんど常時，呈している。

3) 衛星テレメトリ電波の利用 (GPS)

いまや日常生活のいろいろな場面に，意識する必要もないほど当然のごとく人工衛星利用技術が入り込んでいる。その衛星電波は，電離圏の上方からそれを通過して地上までテレメトリ通信をしているわけで，通常はその電波伝搬の途上の効果を見捨てるか補正して各種のサービスに対処している。しかし物理屋にとっては，その無視をしている部分，または補正する前の状態を利用して，伝搬途中の媒質の効果，すなわち電離圏の効果抽出しようと試みる。いろん

な利用のされ方があるが，ここではナビゲーションなどでポピュラーな存在となっている GPS 衛星の電波を利用する話を紹介しよう。

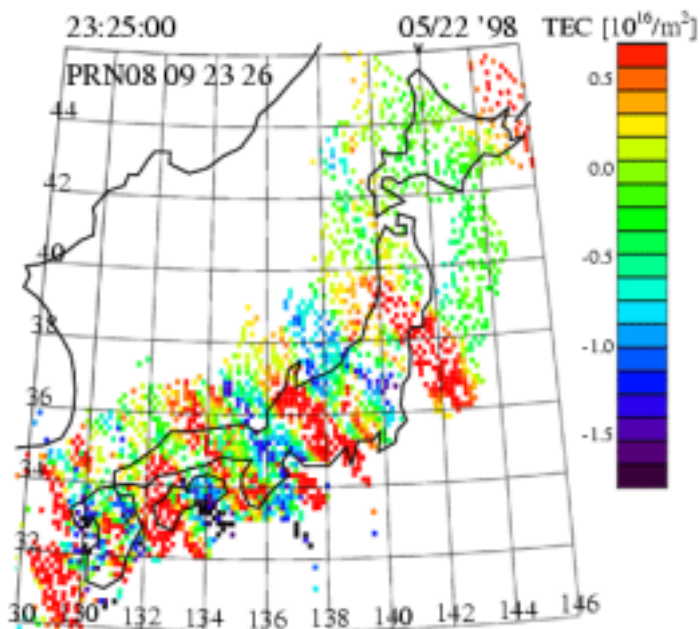


図 5. GPS 衛星電波観測から求めた電離圏全電子数の広域変動
(名大 STE 研，小川忠彦教授より提供)

電離圏はその電波屈折率が周波数に依存する媒質(分散性媒質)なので，周波数が異なると伝搬速度も異なるという状況を作り出す。速度の違いの程度は途中の電子密度に依存するので，ある衛星からの 2 周波を地上で受信し両者の信号の時間差を求めれば，伝搬路上の電子密度の積分値を推定することができる。電離圏全電子数 (Ionospheric Total Electron Content, 略して TEC) の観測である。このような原理を GPS 衛星受信に適用し，それが送信している 2 つの L バンド波 (1.2276GHz, 1.57542GHz) を用いて観測した一例が，図 5 に示されている。日本全国約 3,000 箇所に配置されている国土地理院の GPS 受信機を用いた観測結果であり，受信局ごとに得られた TEC の変動量を対応する参照高度 400km の場所にマッピングしたものである。暖色箇所が平均状態から増えているところ，寒色が減っているところである。図からわかるように，水平スケール約 500 ~ 700km の波状構造が日本列島をすっぽり覆っている。時間変動も同時に調べてみると，このケースの場合は北東から南西に向かって，ちょうどその構造が波面を構成する形で移動している。これらは中規模移動性電離層擾乱と呼ばれており，図 4 で示したような大気重力波によって引き起こされた擾乱が，極域から中低緯度にむかって移動して行く現象と解釈されている。シナリオとして，大気重力波は電離大気を揺れ動かして電離圏に擾乱を与え，それが少なくとも半球規模で移動しながら広範囲の領域の電離圏に変動をもたらしていると言え，気象現象を支配している大気大循環にも匹敵する大規模なエネルギー分配機構を構成していると考えられている。

おわりに

電離圏を含む高高度領域の環境の重要性が社会生活において認識されるようになったのは、電離層反射を利用した無線通信が利用されるようになってからであり、マルコーニによる大陸間無線通信の成功があったからこそという捉え方はそれほどの間違いではなからう。もちろん、電離層に関わる議論は電波伝搬とは異なる分野でマルコーニ以前から進められていたが、それが、マルコーニの実験を契機とし、ケネリーやヘヴィサイドの予言を経て、アップルトンの発見に繋がり電離圏物理学に結実している。そして現在では、太陽 - 地球系物理学の中の重要な一角を占めるに至っており、加えて、電離圏が電離圏単独で取り扱われる時代は過ぎ、中性大気変動や電磁気学的プロセスを写す鏡としての認識から、下層の大気圏や上層の磁気圏、さらにもっと外側の宇宙空間まで含む地球超高層大気全体のカップリングという壮大なシステムの中の重要要素として、電離圏を捉えるべき時代になってきている。

以上、電離圏の話をつなげることができるなどとは端から思ってもいず、出来るはずもないことであるが、宇宙空間の高度利用が現実化しつつあるこの時代だからこそ、地球超高層大気中の電離圏というところはとても重要であるということ、そしてとても面白いということ、それらのほんの一部でもお付き合いいただいた読者に伝えることができたのであれば幸いである。

この機会を与えてくださった目黒会誌編集者諸氏に感謝いたします。