The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.11 (2006) 762-766

小特集 宇宙天気予報

6. 電離圏プラズマ

丸山 隆
独立行政法人 情報通信研究機構

(原稿受付：2006年7月10日)

電離圏プラズマは中性大気の一部が太陽からの極端紫外線の放射を受けて生成される．最も電子密度の高い領域でも僅か0.1%の大気が電離しているに過ぎないが，電波の伝搬には大きな作用がある．短波の反射，衛星電波の伝搬遅延，信号強度の揺らぎなどである．一方，弱電離の電離圏プラズマは中性大気の変化に強く影響される．中性大気組成の変動による生成と消滅のバランス変化，中性大気風によるダイナモ電場と磁場の作用，重力と磁場によるプラズマ不安定などが電離圏プラズマの変動や擾乱の大きな要因となる．したがって，電波の効率的な利用のためには，これらの変動・擾乱過程をよく理解する必要がある．

Keywords:
ionospheric space weather, ionosphere, electron density, ionospheric critical frequency, ionospheric storm, total electron content, equatorial anomaly, plasma bubble, scintillation, GPS

6.1 はじめに

「宇宙天気予報」では，予め変動を報せる（そのためには知る）ことが研究開発の目標であり，また報せを必要とする側の要求を考慮しなければならない．電離圏に関してみると，歴史的には，短波帯の電波を反射する媒体としての存在が重要であり，短波通信の運用者は電離圏の変動を予め知って，用いる周波数を選んでいたのである．現在でも電離圏で反射する短波は特定の通信で重要な役割を持っているが，近年これに加えて，電離圏を通過するVHF帯以上の衛星電波の利用が広まり，電離圏の電波伝搬への影響が問題となっている．GPSに代表される航法測位衛星は1.5 GHz帯の電波を用いるので電離圏プラズマの影響を少なからず受ける．利用目的によってはその影響が致命的になることすらある．電離圏の振舞が標準的なモデルで記述できるならば，影響の評価も難しくはないであろうが，無秩序とも映る変動が重なり合っているのが実態である．その変動の原因あるいは背景と物理機構を知らなければ，先の予測は困難である．原因の多くは太陽・惑星間空間・磁気圏を伝搬してくる「原因と結果の連鎖」であって，そこが「宇宙天気」と呼ばれる所以である．この章では，電離圏の変動と擾乱を理解するのに，まず大気としての電離圏プラズマの特徴を概観する．続いて，変動・擾乱の代表格ともいえる電離圏嵐，プラズマバブル，それにスポラディック E を取り上げる．

6.2 電離圏プラズマの基礎

電離圏の最も濃いところは F 領域と呼ばれ，地上から300 kmほどの高さになる．そこでは電子密度が10^{11}から10^{12}個/m^{3}に達する．これに対して中性大気粒子の密度は10^{15}個/m^{3}である．したがって，電離圏プラズマとは呼んでも高々0.1%しか電離していないのであるから，中性大気の状態を考えずして，電離圏プラズマの変動を議論することはできない．最初に，ある高度に電子密度の極大が現れることを説明する．**図1**は地球超高層大気の組成と密度を示したものである．ここで，重要なのは酸素原子(O)，窒素分子(N_2)，および酸素分子(O_2)である．地上と大きく異なり，酸素原子が主成分になるのは太陽紫外線(UV)による解離の効果である．中性大気粒子は太陽極端紫外線(EUV)により電離されるが，酸素イオンと分子イオンとでは再結合の過程が異なる．分子イオンは解離再結合により元の中性大気粒子に戻るが，酸素イオンは，分子(N_2, O_2)

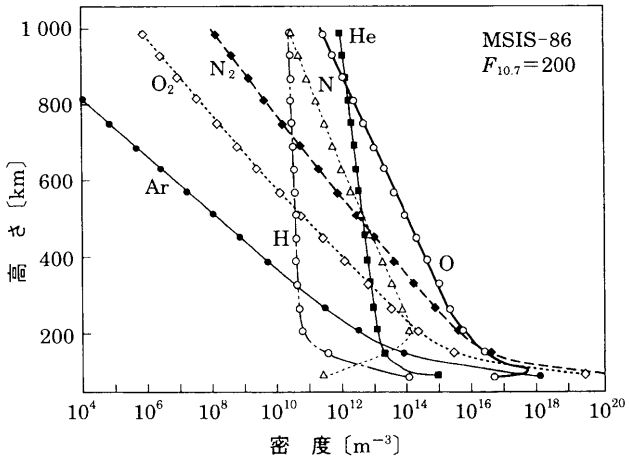

図1 経験モデル[1]による超高層大気の組成．

6. Ionospheric Plasma
MARUYAMA Takashi
author's e-mail: tmaru@nict.go.jp

©2006 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

表1 電離圏中で重要なイオン化学反応.

$O+h\nu$	$\longrightarrow$	$O^+ + e$	フォトンによる電離生成
$N_2+h\nu$	$\longrightarrow$	$N_2^+ + e$	〃
$O_2+h\nu$	$\longrightarrow$	$O_2^+ + e$	〃
$O^+ + N_2$	$\xrightarrow{k_1}$	$NO^+ + N$	組替え衝突
$O^+ + O_2$	$\xrightarrow{k_2}$	$O_2^+ + O$	〃
$N_2^+ + O$	$\xrightarrow{k_3}$	$NO^+ + N$	〃
$NO^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_1}$	$N+O$	解離再結合による電離消滅
$O_2^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_2}$	$O+O$	〃
$N_2^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_3}$	$N+N$	〃

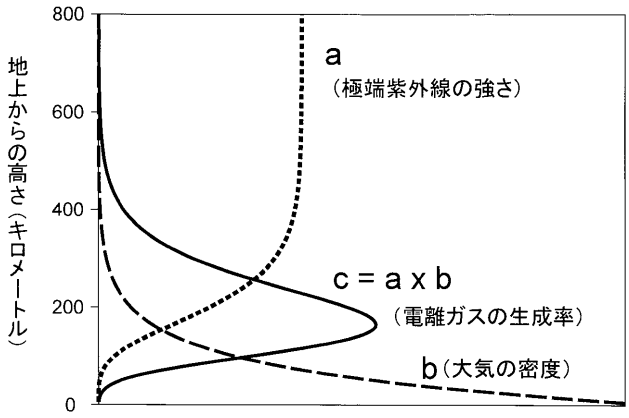

図2 電離生成率の高さ変化.

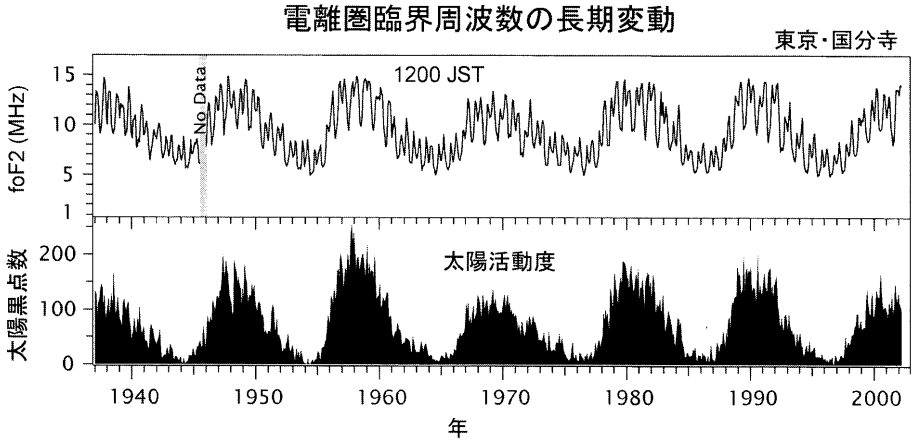

図3 東京における電離圏臨界周波数の長期変動と太陽黒点数.

との組替え衝突を経て中性大気に戻る．**表1**に，重要な反応について挙げる．

分子イオンの再結合反応は組替え衝突の反応に比べて十分早いため，O^+を主体とする電離圏プラズマの消滅係数（β）は，N_2とO_2の密度によって決まる．

$$\beta = k_1[N_2] + k_2[O_2]$$

図1をみると，低高度ほど分子の組成比が高く，プラズマの消滅が早いことがわかる．

電離生成についてみると，大気の薄い上空ではEUV放射は減衰を受けることなく地球超高層大気に浸入する．高度の低下とともに大気密度が上昇し，EUVはOを電離することによって吸収され減衰する．しかし，まだOの密度が低いうちは電離生成はそれほど大きくない．さらに高度が低下するとO密度が増加し，電離生成も増加するが，同時にEUVの減衰も加速される．ついにはEUVがすべて吸収され，電離生成も無くなる．その様子を**図2**に示す．およそ180 kmの高度で電離生成が最大になることがわかる．高度200 km程度より下層領域では生成，消滅ともに反応時間が短く，両方の反応がつりあった光化学平衡状態になる．光化学平衡の電子密度が上層ほど高くなることは，消滅に寄与する分子の比率が急速に小さくなる（**図1**）ことから理解できる．しかし，高度300 km辺りから上では，生成，消滅ともに反応が遅くなり，代わって，拡散や電場ドリフトなどの力学的効果が支配的になる．そこでは，電子密度分布は重力と拡散のつりあった静水圧平衡に近づく．

6.3 電離圏の変動

6.3.1 規則的な変動

生成と消滅を考えると電離圏状態のさまざまな変動（ここでは，規則的に変わるものを変動と呼び，突発的に変わることを擾乱と呼ぶことにする）が理解できる．太陽活動はよく知られた11年の周期で増減を繰り返す．**図3**は太陽EUV放射変動の目安になる太陽黒点数の変化と電離圏最大電子密度に対応する臨界周波数(電子プラズマ周波数)，foF2を示したものである．両者の間にはきわめて良い対応が見られる．しかし，細かく見るとfoF2の変動には1年あるいは半年の周期的な変動が重なっている．1年間の変動を拡大してみると，**図4**（下段）のように春と秋に極大が現れ，夏に極小となっている．夏には太陽高度が高く，大気に入射するEUV束が増加することを考えると，極小値をとることは意外であるが，電離生成の増加以上に，消滅係数が増大するためである．電離圏高度の大気組成は夏にはOが減少し，N_2が増加する変動特性を持っているのである[1]．

6.3.2 電離圏嵐

図4（上段）には，A_p指数と呼ばれる値がプロットしてある．A_p指数は地磁気活動を表す目安のひとつであり，こ

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

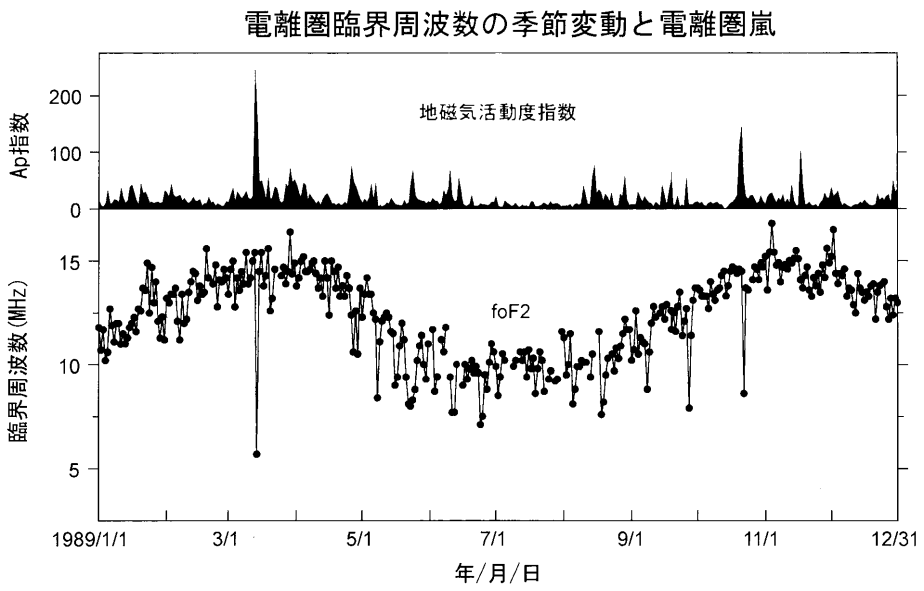

図4　東京における電離圏臨界周波数の季節変動.

の値が高いときには，オーロラ帯でエネルギーが大気に注入されると考えてよい．上下のプロットを比較すると，1年の間に数回 A_p のスパイクと，これに対応した foF2 の低下が見られる．この foF2 の突発的な低下（擾乱）は電離圏嵐と呼ばれてきたもので，かつて短波が遠方との主要な通信手段であった時代には，通信の途絶を引き起こす厄介な現象であった．地磁気活動と電離圏嵐の関係は，やはり，生成と消滅のバランスの変化で説明できる．オーロラ帯でのエネルギー流入によって大気の温度上昇[2]とそれに伴う大循環（地球規模での中性大気流）の変動[3]から，組成変動が起こる．すなわち，分子の比率の高くなった大気が低緯度へ流れ込み，プラズマの消滅を加速するのである[4]．太陽面現象によって引き起こされた太陽風の擾乱が磁気圏との相互作用を経て高緯度地帯にエネルギーを注ぎ込む擾乱連鎖の最終的な形が電離圏嵐である．連鎖の上流側の擾乱を知ることで，電離圏の擾乱を予測する（宇宙天気予報）ことが可能となる．

6.3.3　衛星電波の遅延

地上から地球大気の限界（実際には GPS 衛星の軌道程度の高度，約 2 万 km までで十分）まで電子密度を積分すると全電子数（TEC: total electron content）と呼ばれる量が定義できる．単位断面積を持つ柱の内にある電子の総数で，5×10^{16}から200×10^{16} 個／m^2の範囲で変動する．電離圏を通過する衛星電波は TEC(N_T)の大きさで決まる群遅延(Δt)を生じ，周波数(f)の電波では次のようになる．

$$\Delta t = 1.3446\times10^{-7}\frac{N_T}{f^2}\quad(\text{sec}).$$

GPS 衛星の L_1波（1575.42 MHz）の場合，0.3～100 ns になり，距離に換算すれば，1～30 m の誤差になる（**図 5**）．このような電離圏による GPS 衛星電波遅延は精密な位置決定等の応用面で大きな誤差を生む．そこで，遅延を補正するためのさまざまな技術開発（差分 GPS 技術など）がなされているが，解決すべき課題も多い．TEC は積分値であるが，F 層最大電子密度高度付近からの寄与が大部分を占めるので，永年蓄積されてきた foF2 についての「宇宙天気予報」の知見は，TEC の場合にも当てはまる．

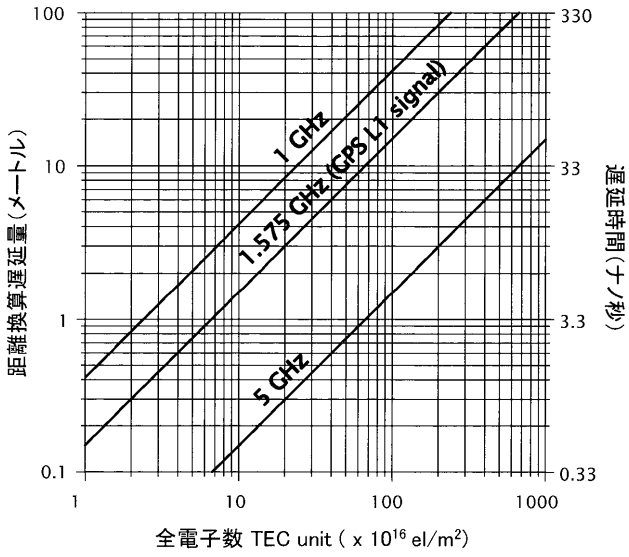

図5　電離圏を透過する電波の遅延.

6.3.4　GPS 衛星を用いた電離圏研究

電離圏伝搬遅延は実利用上では誤差要因であるが，電離圏の研究側からすれば，これを積極的に利用して観測手段にできる．GPS 衛星は先の L_1波のほかに L_2波（1227.60 MHz）を送出している．ひとつの周波数で遅延量の絶対値を求めることは容易でないが，異なった 2 つの周波数の電波を用いれば，相対的な遅延量がわかる．そこから遅延量の周波数依存性を用いて TEC を求めることができる[5]．電離圏研究への GPS 衛星電波の利用にはいくつかの大きな利点がある．電離圏の観測は「電離層垂直打ち上げ」（別名イオノゾンデ）観測が基本であるが，イオノゾンデは大型のレーダー施設であり，観測施設の配置にもさまざまな制約がある．日本の場合，情報通信研究機構の運用する 4 ヶ

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

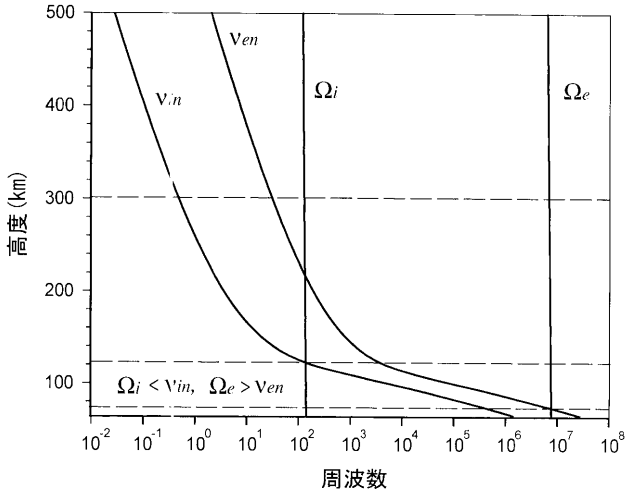

図6　電子およびイオンのジャイロ周波数と中性大気粒子との衝突周波数.

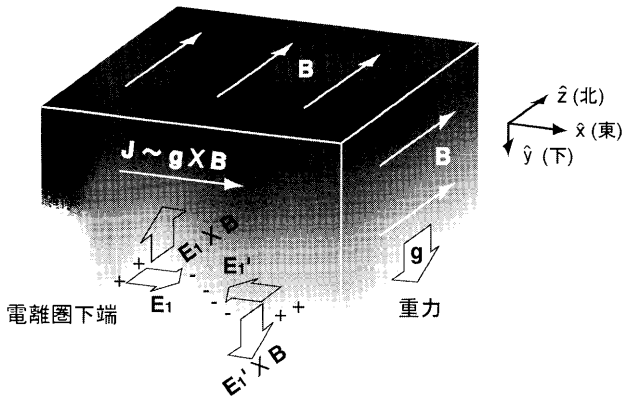

図7　赤道電離圏の不安定性.

所の観測施設など数えるほどしかない．これに比べてGPS衛星受信機は数多く設置されている．国土地理院のGEONET（GPS earth observation network）は約1,300の受信機からなっている．このデータを利用し，それまでの点の観測が面の観測へと拡充され，電離圏変動や擾乱の詳細な空間構造が明らかにされつつある[6,7]．

6.4　電離圏ダイナモ

電離圏プラズマが中性大気に強く影響される他の例としてダイナモ作用がある．**図6**は荷電粒子と中性大気粒子の衝突周波数と地球磁場の下でのジャイロ周波数をあらわしたものである．衝突周波数（ν）が高度とともに非常に広い幅で変化するのに対して，ジャイロ周波数（Ω）は高度による変化が殆どない．そのためこれら特性周波数の大小関係が高さによって入れ替わり，電離圏プラズマ特有の現象が起こる．中性大気風による発電効果がひとつの例である．中性大気は昼間に暖められ，夜には放射によって冷えることから大気大循環（風）が生じる．高度75～120 kmの範囲では，衝突周波数がジャイロ周波数より高いイオンは中性大気に引きずられ，衝突周波数がジャイロ周波数より低い電子は磁場に捉われる．イオンと電子の運動のずれは電流となる．定常状態では，地球全体の電流の連続性が保たれなければならないから，これを充たすような電場が発生する[8]．一種の発電機構であり，電離圏ダイナモと呼ばれている．

ダイナモ電場は磁力線に沿って上方に投影される（電子はジャイロ周波数が他の特性周波数より高く，磁力線方向にのみ自由に移動でき，磁力線は等電位とみなせる）．電離圏F領域では電子，イオンともにジャイロ周波数が衝突周波数より高くなる（**図6**）ので，下層から投影された電場の効果で，プラズマは電場（$\boldsymbol{E}$）と磁場（$\boldsymbol{B}$）に直角な方向（$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$）にドリフトする．電場ドリフトの効果で特に重要なのは，磁気赤道付近のプラズマの再分布である（地球磁場は双極子が歪んだ構造を持ち，赤道付近で磁力線が水平になる場所がある．そこを磁気赤道と呼んでいる）．昼間の磁気赤道付近では電離圏ダイナモによる電場の向きが東向きになる．磁場は水平で北向きであるから，$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ドリフトは鉛直上向きになる．上昇したプラズマは，イオンと中性粒子との衝突周波数がさらに低下し，抗力が小さくなるから，磁力線に沿って落ちてくる．磁力線はアーチ状であるから，磁気赤道から離れた低緯度（磁気緯度10～15度）にプラズマが集中し，南北に2つの極大領域ができる（赤道異常）[9]．この過程は赤道で真上に吹き上げられたプラズマが離れたところへ落ちることから，fountain effectとも呼ばれる．低緯度の電離圏最大電子密度は，このようにダイナモ電場に大きく支配される．しかし，ダイナモ電場の強さは，太陽活動度や季節によって変わり，さらに原因の特定しにくい日々変動を示す．電場変動を精度良く把握・予測することがTECやfoF2の予報に繋がる．

6.5　プラズマ不安定

電離圏の空間構造は時に，きわめてダイナミックに，かつ大振幅で乱れることがある．磁気赤道では重力（$\boldsymbol{g}$）と磁場（$\boldsymbol{B}$）の向きが互いに直角で，イオンはこの2つのベクトルと直角東向き（$\boldsymbol{g}\times\boldsymbol{B}$）にドリフトする．質量の小さい電子は殆ど磁力線に捉われているから，東向き電流が生じる．この電流によって，以下に述べるようなプラズマ不安定（Rayleigh-Taylor不安定）が起こる．電離圏あるいは中性大気の中には常に小さな揺らぎ（地球物理的なノイズ）があると考えられる．いま，**図7**に示したように赤道の電離圏下端が上下に波打っていたとする．電子密度の小さい部分では周囲に比べて導電率（Pederson conductivity）が小さいので電流の連続性から分極電場（$\boldsymbol{E}_1$）が生じる．この電場によるプラズマの$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ドリフトは鉛直上向きであるから，密度の低い部分は周囲との密度差をさらに大きくする．すなわち，プラズマ不安定となる．

赤道電離圏の下端（電子密度勾配が上向き）に生じたRayleigh-Taylor不安定は非線形的に発達し，低密度領域は電離圏の最大電子密度高度（300 km）を突き抜けて1,000 km以上の高度まで上昇する[10]．周囲との電子密度の差は2桁以上にも達し[11,12]，泡が浮かび上がる様子に擬えて，プラズマバブルと呼ばれる．電離圏F領域のプラズマは磁力線方向に容易に再分布し，かつ磁力線は等電位と

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

みなせるから，この不安定性はinterchange instability [13]で，バブルは磁力線方向に数千kmの長さ，東西方向には，数十kmから100kmの規模に発達する．プラズマバブルの発達過程では，二次的なプラズマ不安定が起こり，プラズマバブルの境界あるいは内側にさらに小さなスケールの粗密構造が作られる[14]．粗密構造は衛星電波の伝搬に大きな影響を与える．数百m規模の粗密構造は，そこを通過するGPS衛星電波(～1.5 GHz)の位相を乱し，地上に到達したときに電離圏シンチレーション[15]と呼ばれる振幅揺らぎを引き起こす(Fresnel回折)．シンチレーションの振幅が～20 dBになると受信機は衛星電波の補足に失敗するので，実用化間近なGPSを利用した航空機の運行管制では，この問題が大きく懸念されている．シンチレーションの発生を予測するには，プラズマ不安定の条件を詳しく調べるとともに，種となる微小揺らぎを捕らえることも大事である[16]．ある種の微小揺らぎの起源は下層大気や気象現象にあると考えられている．

6.6 スポラディックE層

電離圏の下部，90～150 kmの高度はE領域と呼ばれ，そこでは光化学平衡にある分子イオン(NO^+, O_2^+)が主成分である．他に，僅かではあるが，流星が燃え尽きて残した金属イオン(Fe^+, Mg^+など)が存在する．電離圏ダイナモの節で述べたように，E領域ではイオンが中性大気風に引きずられるが，両者の運動は全く同じではなく，イオンは磁場と風の向きに直角な運動成分を持つ．ある高度より下では東向きの風，これより上では西向きの風であったとする(風向きのこのような変化をウィンドシアーと呼ぶ)．この風によってイオンは，シアーの下側では上向き，上側では下向きの運動成分を持ち，プラズマはシアーの高度に集中する．このとき，分子イオンは電子密度の二乗に比例して再結合し，急速に消滅するが，消滅の時定数が極めて大きい金属イオンは維持され，薄い層を形成する．これがスポラディックE(E_s)層である．層の最大電子密度に対応する臨界周波数，foEsは散発的(sporadic)に高くなり，ときに20から30 MHzに及ぶこともある．スポラディックE層の発達は，文字どおり「風まかせ」で予測が極めて難しいが，統計的にみると夏の正午前と日没後に活発になる傾向がある．

宇宙天気予報からみたスポラディックE層の重要性はVHF電波の異常伝搬にある．電離圏に入射角iで進入した電波は臨界周波数の$\sec(i)$倍まで反射される．スポラディックE層は高度100 km付近で最も発達するため，遠方からの電波は大きな入射角で斜めに進入することになる．そのため，通常は見通し内の伝搬しか想定していないテレビ放送や航空無線のVHF電波が数千km以上も伝搬し，混信障害を引き起こす．

6.7 おわりに

この章では電離圏の形成機構から始めて，代表的な変動と擾乱現象を取り上げた．周囲の中性大気との関係が深く，磁気圏，太陽風とも結合している．一方，近年では下層大気と電離圏との結合過程も注目されている．宇宙天気予報の研究は宇宙環境の変動・擾乱が引き起こす社会システムへの障害を軽減・回避することが目的であるが，そのためには幅広く基礎研究を推し進めなければならないことを理解していただけたと思う．

参考文献

[1] A.E. Hedin, J. Geophys. Res. **88**, 10170 (1983).
[2] H. Liu and H. Lühr, J. Geophys. Res. **110**, A09S29, doi: 10.1029/2004JA010908 (2005).
[3] T.J. Fuller-Rowell, M.V. Codrescu, R.J. Moffett and S. Quegan, J. Geophys. Res. **99**, 3893 (1994).
[4] G.W. Prölss, Rev. Geophys. Space Phys. **18**, 183 (1980).
[5] G. Ma and T. Maruyama, Ann. Geophys. **21**, 2083 (2003).
[6] A. Saito, M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki and M.C. Kelley, Earth Planets Space **54**, 31 (2002).
[7] T. Maruyama, G. Ma and M. Nakamura, J. Geophys. Res. **109**, A10302, doi:10.1029/2004JA010451 (2004).
[8] H. Rishbeth, J. Atmos. Sol-Terr. Phys. **59**, 1873 (1997).
[9] H. Rishbeth, Ann. Geophys. **18**, 730 (2000).
[10] R.F. Woodman and C. La Hoz, J. Geophys. Res. **81**, 5447 (1976).
[11] J.P. McClure, W.B. Hanson and J.H. Hoffman, J. Geophys. Res. **82**, 2650 (1977).
[12] S.-Y. Su, H.C. Yeh, C.K. Chao and R.A. Heelis, J. Geophys. Res. **107**, 1404, doi:10.1029/2001JA007552 (2002).
[13] A.E. Kherani, M. Mascarenhas, E.R. de Paula, J.H.A. Sobral and F. Bertoni, Space Sci. Rev. **121**, 253 (2005).
[14] M.C. Kelley, R.C. Livingston, C.L. Rino and R.T. Tsunoda, J. Geophys. Res. **87**, 5217 (1982).
[15] K.C. Yeh and C.-H. Liu, Proc. IEEE **70**, 324 (1982).
[16] M.A. Abdu, J. Atmos. Sol-Terr. Phys. **63**, 869 (2001).

NII-Electronic Library Service