

17. 人工衛星による中低緯度の VLF 雑音の観測

恩藤 忠典* 永山 幹敏*

高度400~1000km間を飛ぶ低高度衛星 (POGO, Ariel III など) によって、磁気圏下部の中低緯度において観測された VLF 雑音、および高々度衛星 (EOGO など) によって磁気圏の赤道近傍で観測された VLF 放射について、1969年以後の観測結果を中心に概観した。

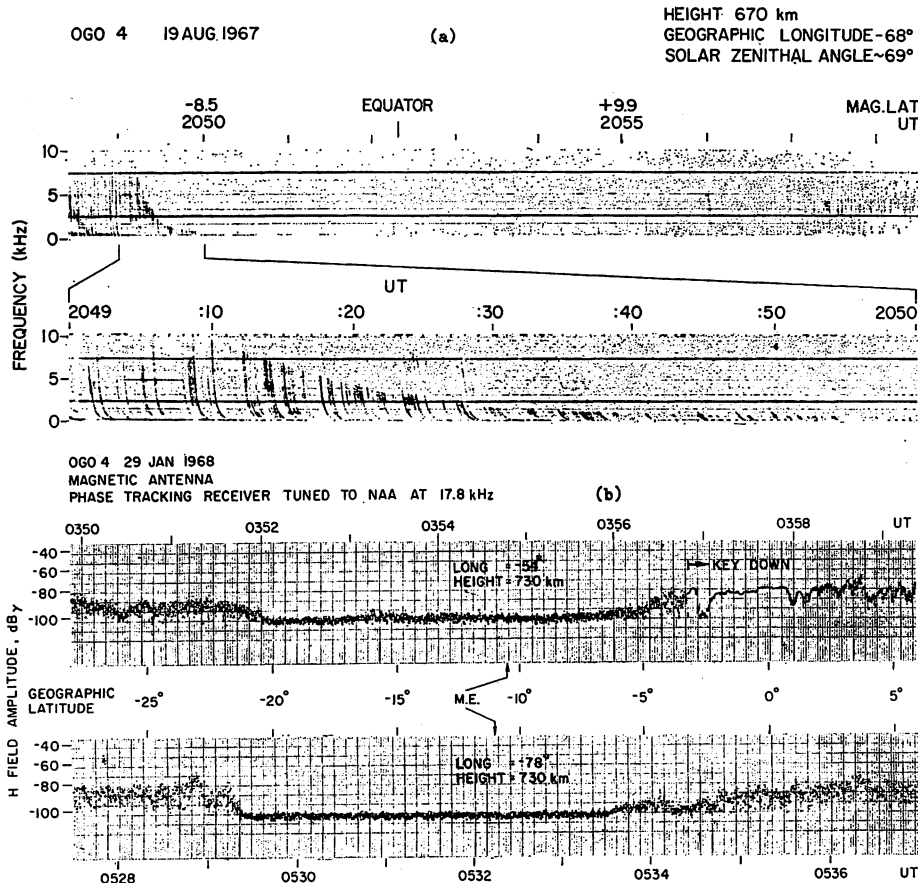
1. 磁気圏下部における VLF 雑音の赤道異常

1.1 VLF 雑音の赤道のまわりの非対称消失

VLF 電波は下部電離層にほとんど垂直に入るが、赤道近くでは地球の磁力線の伏角が小さいため、電波の法

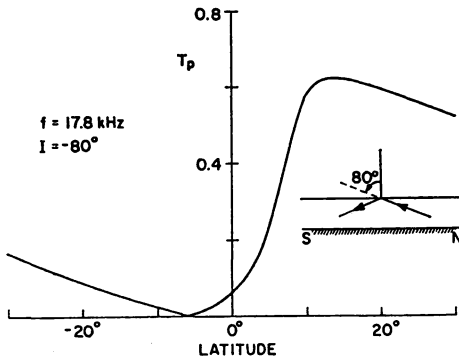
線と磁力線とのなす角は大きい。このため赤道付近で電離層へ下から入った VLF 電波の衝突吸収はかなり大きい。また赤道近くでは F 層と高度1000kmとの間でもおもなイオンが O⁺から H⁺へ変るので、電子密度の鉛直勾配が急に大きくなり、電波の伝搬方向が赤道側へ曲がりやすい。これら二つのことから赤道近傍の上部電離層で観測される VLF 雑音に異常が予想される。第1図(a)は OGO 4号によって地磁気緯度約9°Sの高度670kmで観測された VLF 放射 (0~10kHz) の高い周波数から先に消失する赤道 Erosion⁽¹⁾の例である。また第1図(b)は NAA 17.8kHz電波が高度730kmで約10°Sから5°Sにかけて急に消失している例である。この例からもわかるように、

* 電波部宇宙空間研究室



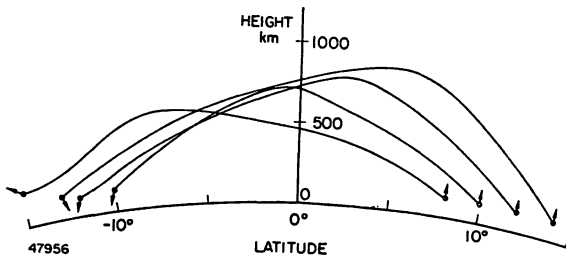
第1図 (a) OGO 4号で受信した広帯域 VLF 雑音の周波数—時間スペクトルで、日中の赤道 Erosion の例を示す
(b) OGO 4号で受信した NAA 17.8kHz 波の磁場成分—夜間の赤道 Defocusing の例 (振幅低下)

VLF雑音は地磁気赤道に関して非対称に消失している。VLF帯電波の電離層吸収は高い周波数ほど大きいから、受信機の最低受信レベルを考慮すれば、電波消失が高い周波数から先に起ることがわかる。電離層—大地間導波管モードからの電波のもれが最もよく起る下部電離層への入射角 80° の場合⁽²⁾について、夜間の電子密度分布⁽³⁾を用いて、17.8kHz電波の透過係数 T_p の緯度変化を計算した(第2図)。 -20° から 0° までの間では、 T_p が小さいから下方から電波は侵入できないが、この領域は T_p が大きい $0^\circ \sim 20^\circ$ の領域と磁力線によって結

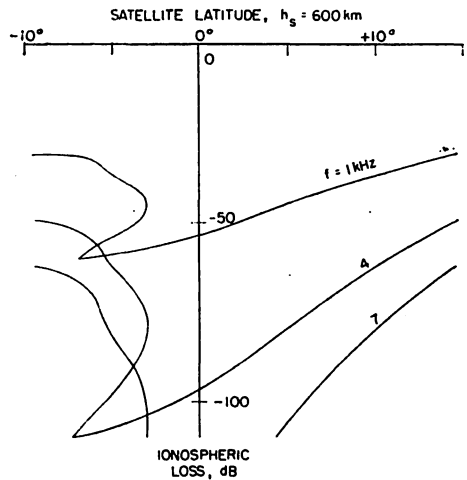
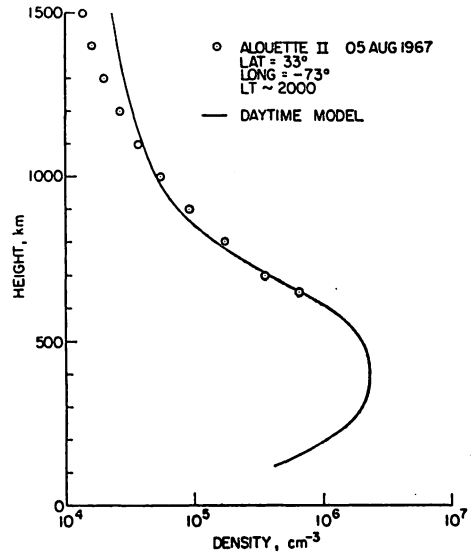


第2図 入射角 -80° の場合、南方へ伝搬する貫通モードの17.8kHz波の下部電離層における透過係数 T_p

ばれている。したがって夜間は $-20^\circ \sim 0^\circ$ の間でも反対半球からホイッスラーが入ってくるので、赤道のまわりの非対称な電波消失は起りえない。事実、赤道 Erosion は日中のみ観測される。第3図は日中の電子密度分布(第4図(a))を用いて計算した高度120kmにおける地磁気緯度 $8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ$ から鉛直上方へ出した1kHz電波の伝搬路を示す。 8° を出発した電波は磁力線の伏角が小さいため、磁場の誘導がよく効いて赤道のほうへ曲り、赤道をこえてから大きい電子密度勾配にあって、伝搬路は下方へ曲る。しかし、 8° より高い緯度を出発した電波は、磁力線の伏角が大きいため初めから赤道のほうへ曲らずに、F層よりずっと高々度まで上昇し、赤道をこえる前に大きな電子密度勾配に出合っ



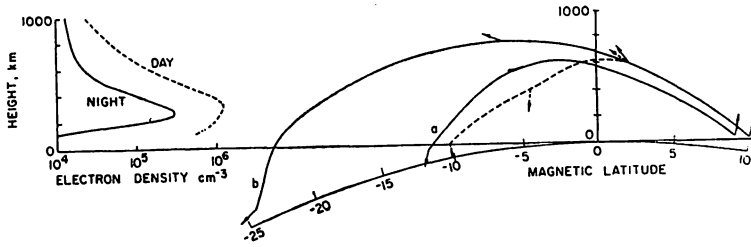
第3図 第4図(a)の電子密度分布を用いて計算した、赤道電離層内の1kHz波の伝搬路



第4図(a) 赤道電離層の日中の電子密度分布。○印は Alouette 2号による測定値を示す
(b) 高度600kmにおける上昇波または下降波の電離層吸収の緯度変化

へ曲る。このように1kHz電波の伝搬路は、赤道に関して非対称になっている。第4図(b)は第3図の伝搬路に沿って求めた高度600kmにおける1kHz電波の吸収値で、やはり赤道に関して非対称になっている。これからもVLF雑音の消失が、第1図(a)のように赤道に関して非対称であることがわかる。10kHz波に関しての同様な計算結果は、1kHz波の場合と同傾向が一致している。

次にNA A17.8kHz波について、日中と夜間の電離層モデルについて Ray Tracing を行なった(第5図)。日中に高度120kmにおいて、 5° から 15° までの間を出発した電波の伝搬路は点線のように赤道に対称になっている



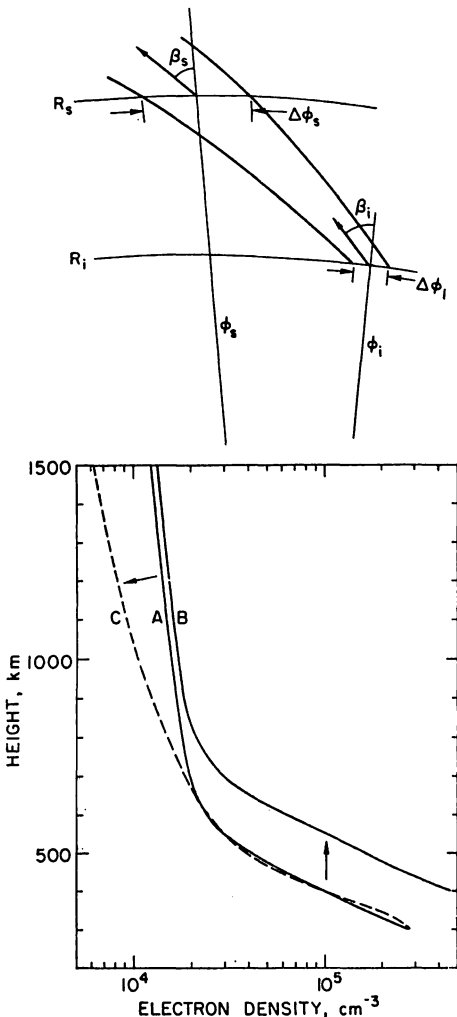
第5図 地磁気赤道近くの17.8kHz波の典型的な日中(点線)および夜間(実線)の伝搬路

が、夜間に緯度9°を出た17.8kHz波は、第5図の実線aのように電子密度の鉛直勾配が大きいO⁺→H⁺遷移高度以下で赤道を横切るため、赤道にほぼ対称に伝搬する。しかし夜間に10°以上の緯度を出た電波は、遷移高

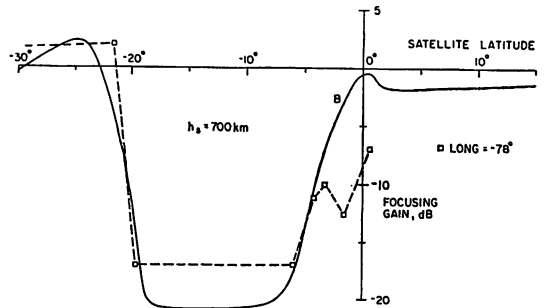
度以高で赤道をこえるため、電波の法線はゆっくりと水平方向に向き実線bのように反対半球のより高い緯度まで到達する。この結果、夜間に5°~10°の間を出た電波は、反対半球では緯度的にかなりひろがって到着する。この電波の Defocusing 効果を第6図(a)のように同じ磁気子午面内にあるΔφの緯度間隔をもつ二つの伝搬路について考えると、二つの伝搬路によってかこまれる出発時と到達時の断面積の比により、電波の収束利得Gを定義できる。

$$G = \left(\frac{R_i}{R_s} \right)^2 \frac{\Delta\phi_i \cos\phi_i \cos\beta_i}{\Delta\phi_s \cos\phi_s \cos\beta_s}$$

ここにφは地磁気緯度を、Rは地球の中心からの距離を示す。またi,sはそれぞれ出発点および人工衛星における値を示す。第6図(b)の電子密度分布を用いて17.8kHz波のRay Tracingを行なった結果、O⁺→H⁺の遷移高度750kmをもつB分布では強いDefocusing(発散)が起り、C分布ではDefocusingは起らない。B分布について衛星高度700kmにおけるNAA17.8kHz波のGの緯度分布を第7図に示した。第1図(b)の経度-78°におけるNAA17.8kHz波の強度変化とよく一致している。こ



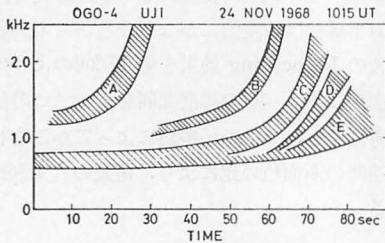
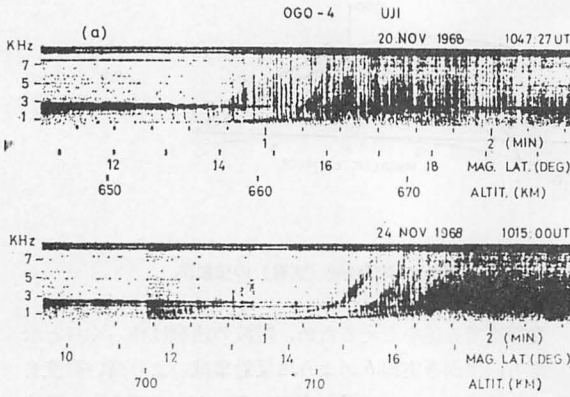
第6図(a) 電波の収束利得を決めるパラメータの説明図
(b) モデルAは第5図の夜間モデル、モデルBはモデルAの遷移高度を上げたもの



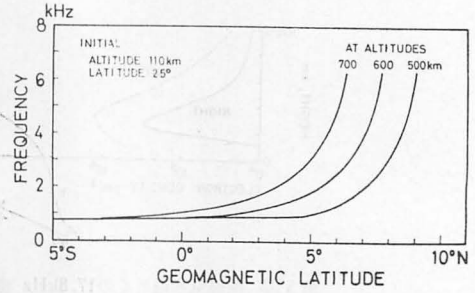
第7図 モデルBを用いて計算した高度700kmにおける電波の収束利得の人工衛星緯度による変化(実線)。点線は第1図(b)の測定結果を示す。また発射信号レベルは+2dBに規格化されている

のようにVLF帯電波の赤道異常は、磁気圏下部の赤道近傍における電波伝搬効果によってうまく説明できる。

1.2 Whistler Striation (すじ状ホイッスラー)⁽⁴⁾

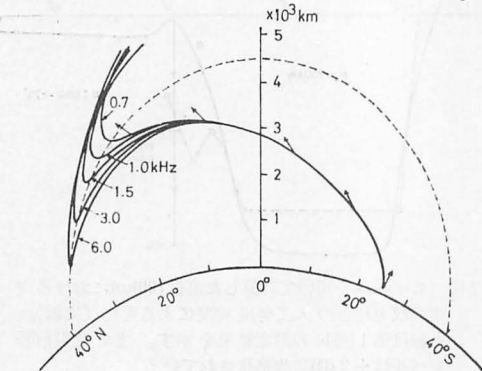
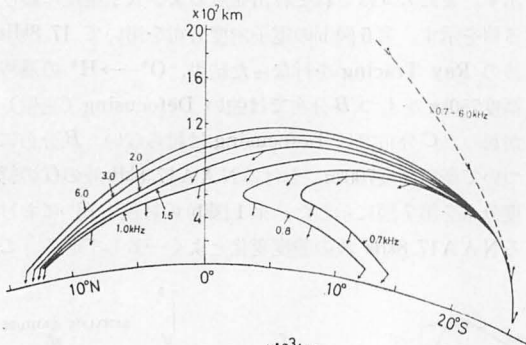


第8図(a) OGO 4号で宇治において観測した Rising striation の例
(b) 第8図(a)のstriationの低周波数域における周波数—時間(緯度)のスケッチ



第10図 レイ・トレーシング法によって計算した上昇striationの周波数—緯度(時間)特性

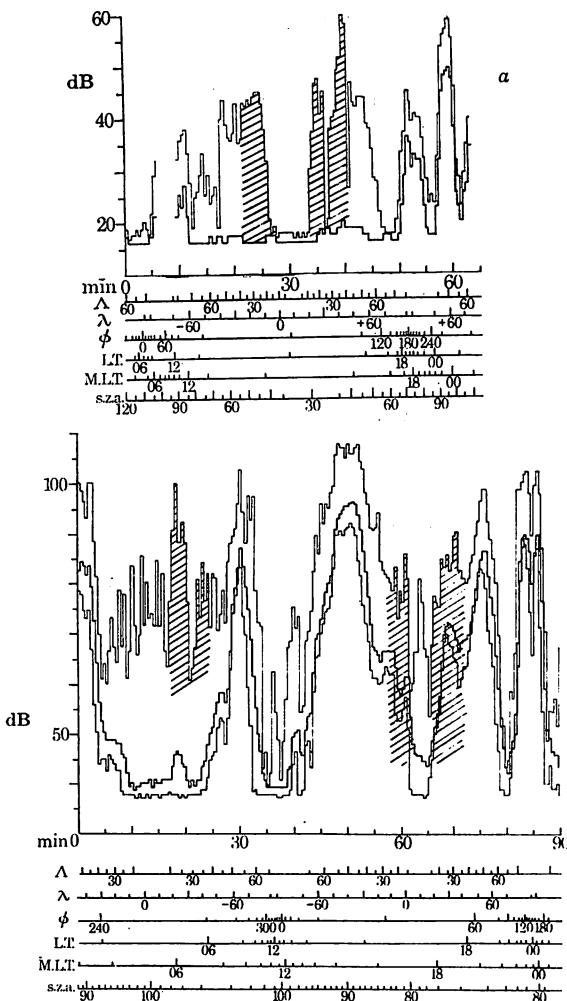
地磁気緯度 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の間で高度 $400 \sim 900$ km において、主として秋の地方時17時から21時にかけて⁽⁵⁾しばしば第8図(a)のようなすじ状の上昇音を観測した。第8図(b)はその低周波数域のスケッチで多重バンド構造を示している。この Whistler Striation の微細構造の継続時間は、1kHz以上で20~30秒であり、1kHz以下では1分以上である。夕方によく起ることから考えて、赤道 Erosion のように吸収によっては説明できない。一方 F_2 層の赤道異常に伴う電子密度の大きな水平方向の勾配をもったモデル電離層について、0.7~6.0kHzの電波が 25° Sを出発した場合の伝搬路を第9図(a)に示した。水平方向の勾配のために、電波は低周波数ほど低高度側へ曲げられる。しかし水平方向の勾配が小さい場合は、電波は第9図(b)の実線のように上方に逃げ、Lower Hybrid Resonance点で反射後、さらに上方へ向うため、高度 $400 \sim 900$ km間では受信できない。第10図は第9図(a)の伝搬路が高度500km, 600km, 700kmと交る緯度と周波数との関係を示したもので、第8図(a)の Whistler Striation の周波数—時間特性によく一致している。



第9図(a) 強い水平方向の勾配をもった電子密度分布について計算した0.7~6.0kHz電波の伝搬路。矢印は波の法線方向を示す
(b) 弱い水平方向の勾配をもった電子密度分布について計算した0.7~6.0kHz電波の伝搬路

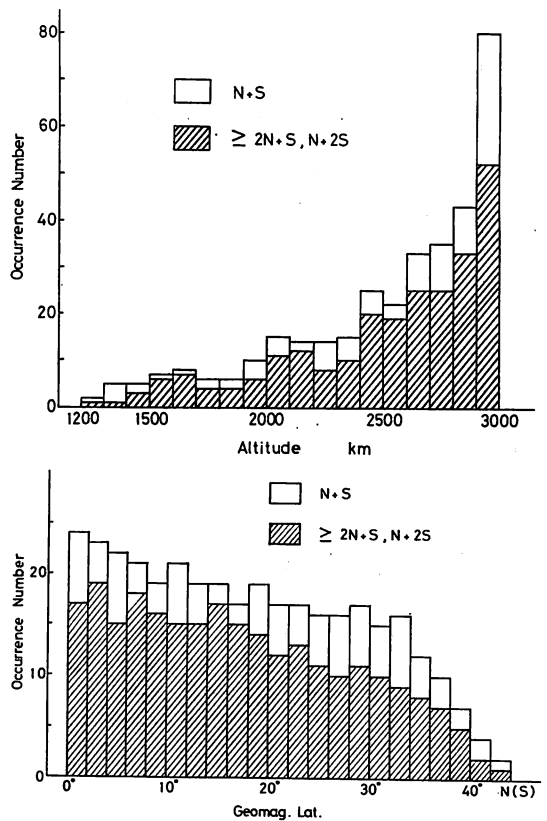
2. 地球の磁力線に沿う磁気圏不規則電離帯に伴うVLF雑音の強度増加⁽⁶⁾

高度 500 km~ 600 kmの間を南北にとんだ Ariel 3号で、いくつかの固定周波数の電波の電界強度を測定した。第11図(a)はオーストラリアの地磁気緯度 29° Sから発射されているNWC 15.5kHz電波の電界強度の緯度分布を示す。発射点の -29° のちようど共役域にあたる $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ にかけて電界強度の山(斜線部)がみられる。特に 35° あたりで強度が極大になっている。また3.2kHzの自然VLF雑音の電界強度も、第11図(b)の斜線部のように $A=20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ (18分と70分頃)にかけて強度増加がみられる。このVLF雑音の増加は、磁力線に沿った大規模な不規則電離帯にVLF電波が捕捉されていることを示唆している。高度 1500 km以上を南北にとぶトップサイドサウンドにより、 $0.9 \sim 2.0$ MHzで中低緯度においてしばしば地



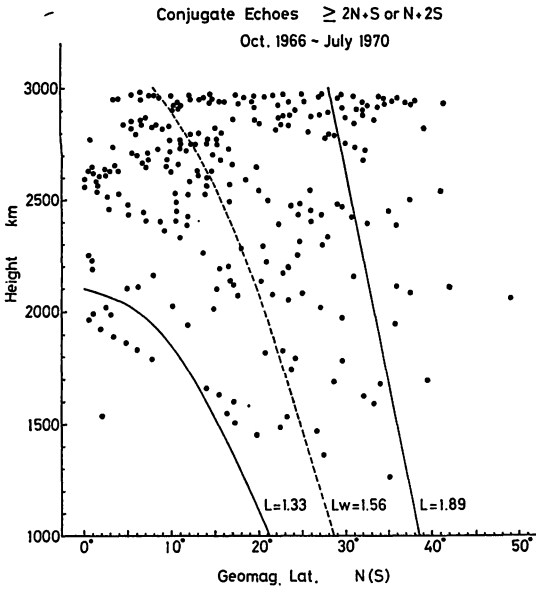
第11図(a) 1967年6月18日0651~0754 UTの間に、Ariel III号(高度500~600km)で受信したNWC 15.5kHz波の電界強度。上側の細線は広帯域受信機の出力を、下側の太線は狭帯域受信機の出力を示す。(Δは不変緯度を、λは地理的緯度を、φは地理的経度を示す)斜線部のΔ=20°~40°にかけて強度増加がみられる
 (b) 1967年5月26日1253~1423 UTの間に、Ariel III号で受信した3.2kHzのVLF放射強度。三つの実線は各々上から最高値、平均値(太線)、最小値を示す。斜線部のΔ=20°~40°にかけて強度増加がみられる

球の磁力線にそったダクト伝搬モードの反射波が観測されている。人工衛星から放射された中短波が磁力線にそって南または北へダクト伝搬し、F層上部で反射されて人工衛星に帰ってきたものをSまたはNで示すと、N+Sはさらに反対半球側へ(北または南へ)伝搬してかえってきた反射波を示す。すなわち人工衛星を通る磁力線に沿って南北両側に不規則電離がある場合にN+Sエコーは受信される。人工衛星はエコーが受信される間に移



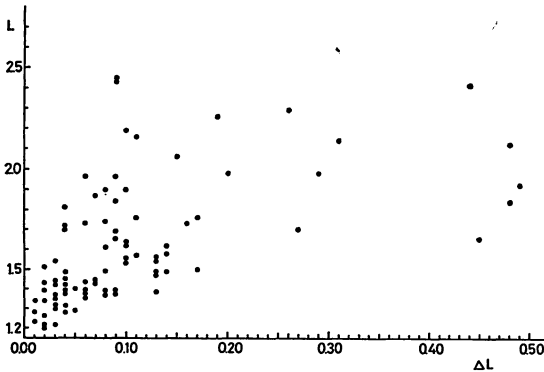
第12図(a) 1966年10月から1970年7月までの間に、電波研究所鹿島支所で受信したAlouette II号イオノグラムに見られた、0.9~2.0MHz帯の磁力線に沿ったダクト型伝搬波のN+Sおよび≥2N+S, N+2Sエコーの受信高度についての頻度分布
 (b) 1966年10月から1970年7月までの間に観測された、ダクト型伝搬波のN+Sおよび≥2N+S, N+2Sエコーの受信緯度についての頻度分布

動するから、≥2N+S, N+2Sエコーの受信はN+Sはまでの受信より幅の広い不規則電離が、磁力線にそってよく発達していることを意味する。1966年10月から1970年7月までの間に、電波研究所鹿島支所で受信したAlouette 2号のイオノグラムから解析したN+Sおよび≥2N+S, N+2Sエコーの受信高度分布を第12図(a)に示す。≥2N+S, N+2Sエコーをもつ全イオノグラムの80%は、2100km以上で起っている。また第12図(b)は同様にダクト伝搬波の受信数と受信点の地磁気緯度との関係を示す。≥2N+S, N+2Sエコーをもつ全イオノグラムの80%が28°以下で起っている。第13図は≥2N+S, N+2Sエコーの観測点の空間分布を示す。便宜上人工衛星の最高々度2000kmで緯度29°を通る磁力線(L=1.89)と、赤道上空2100kmを通る磁力線(L=1.33)を描くと、この2本の磁力線間に全観測点の約80%が入る。またこの2本はほぼ内部放射能帯の内側および外側の境界近

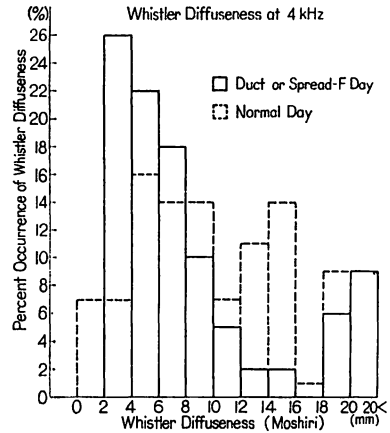


第13図 1966年10月から1970年7月まで6間に、電波研究所鹿島支所で受信した Alouette II号イオノグラムから求めたダクト型伝搬波の $\geq 2N+S$, $N+2S$ エコーの観測点の地磁気緯度—高度座標における分布、 $L_w=1.56$ は地磁気緯度 $35^\circ N$ の稚内を通る磁力線を示す

くを通っている。このことは磁力線に沿う不規則電離が、内部放射能帯の捕捉粒子とホイッスラーモードの電磁波との相互作用によって降下した荷電粒子に起因することを示唆している。不規則電離帯のほぼ中央にある点線の磁力線 ($L_w=1.56$) は、地磁気緯度 35° の稚内を通っている。かように Ariel III号で $20^\circ \sim 40^\circ$ にかけて観測された NWC 15.5kHz 波および自然雑音 3.2kHz 波の強度増加は、磁力線にそった磁気圏不規則電離帯にトラッ



第14図 磁力線にそった個々の不規則電離の出現幅。1966年10月から1970年7月までの間に鹿島で受信した Alouette II号のイオノグラムのうち、ダクト型伝搬波エコーが相次ぐ2個以上のイオノグラムに見られた場合の、継続幅を ΔL で示し、 ΔL の中心を通る磁力線の L と ΔL の関係を求めたもの



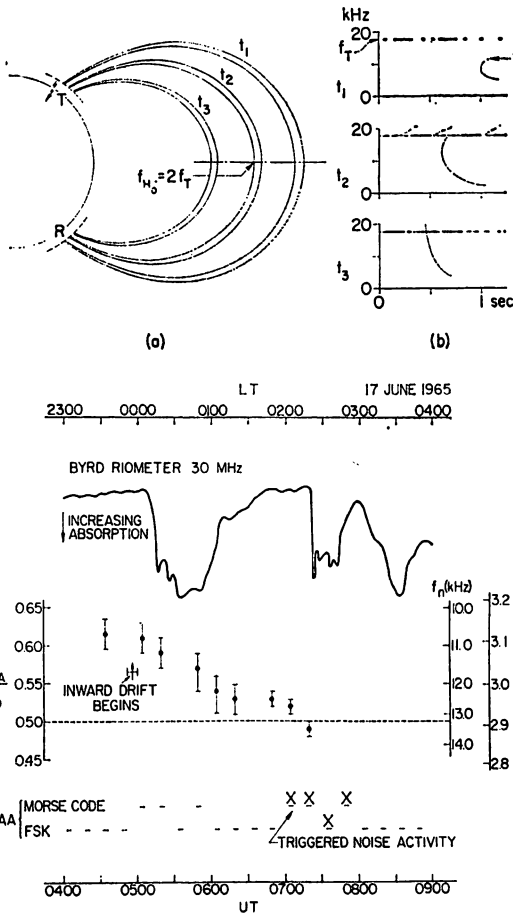
第15図 稚内上空を通る Alouette II号のイオノグラムにダクトが見られた日とそうでない日に、稚内で観測されたホイッスラーモードの時間幅の頻度分布 (1966年10月~1967年12月)。ホイッスラーモードの幅 1mm は 3.2×10^{-3} 秒に相当する。ダクト型エコーが起ったときは、ホイッスラー幅の小さいものがよく起る。しかしダクトのない日はこのような傾向はない

プされた VLF 電波によることがわかった。ダクト型エコーが相次ぐ2個以上のイオノグラムで観測された場合について、その出現幅を ΔL で示すと、第14図のように L の大きい磁力線に沿って (ΔL) 幅の大きい不規則電離が生じている。また Alouette 2号でダクト型エコーが観測された日 (実線) とそうでない日 (点線) に、稚内で観測された 4 kHz におけるホイッスラーモードの幅 (1mm は $\Delta t = 3.2 \times 10^{-3}$ sec) の頻度分布を第15図⁽⁷⁾に示した。磁力線にそった不規則電離が発達している日のほうが伝搬途上でホイッスラーのひろがり方が小さいことがみられる。

3. 外部磁気圏の赤道近傍で観測される VLF 放射

3.1 赤道におけるハーフジャイロ放射

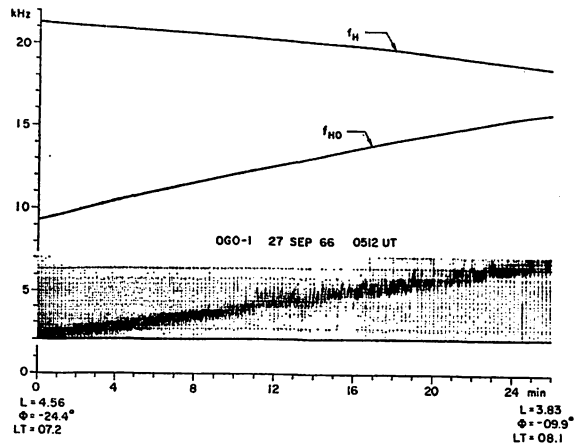
観測点を通る地球の磁力線上の最小の電子ジャイロ周波数、 f_{Ho} の半分の周波数において、ダクト型ホイッスラーの上限遮断⁽⁸⁾およびホイッスラーに誘起された VLF 放射がしばしば外部磁気圏で観測される。一方地磁気活動度、 K_p が高いとき磁気圏尾部に西向き電場 (~ 1 mV/m) がかかり、地球磁場と相互作用して内向きにプラズマドリフトが起る。事実低エネルギープラズマの内向きドリフトは、 K_p が大きいときに直接測定によって確認されている⁽¹⁹⁾。またノーズホイッスラーのノーズ周波数 ($\sim 0.4 f_{Ho}$) の変化からドリフトを推定できる。第16図(a)のようにホイッスラーダクトが内側へ動いた場合を考えると、NAA17.8kHzがちょうど $f_{Ho}/2$ に



第16図(a) 時間 $t_1 \sim t_3$ の間にホイッスラダクトが内側へドリフトして、時間 t_2 で送信周波数 f_T が t_2 のときの磁力線上の赤道の電子のジャイロ周波数の半分、 $f_{H_0}/2$ に等しくなることを示す
 (b) ホイッスラダクトの内側へのドリフトに伴い、ノズホイッスラのノズ周波数が高くなり、群遅延時間が短くなる。そして t_2 で送信周波数 17.8 kHz のところから、上昇する VLF 放射が誘起される模式図
 (c) 1965年6月17日の磁気嵐時に、南極のバード ($L \sim 7$) で観測した 30MHz リオメータのデータ (上図)、および南極のエイト ($L \sim 4$) で観測したホイックスラダクトの L -ドリフト、ならびに NAA17.8 kHz 波に誘起された雑音活動 (×印) を示す。リオメータデータの急減少とともに内側ドリフトが始り、 $f_{NAA}/f_{H_0} = 0.5$ で VLF 雑音誘起されている

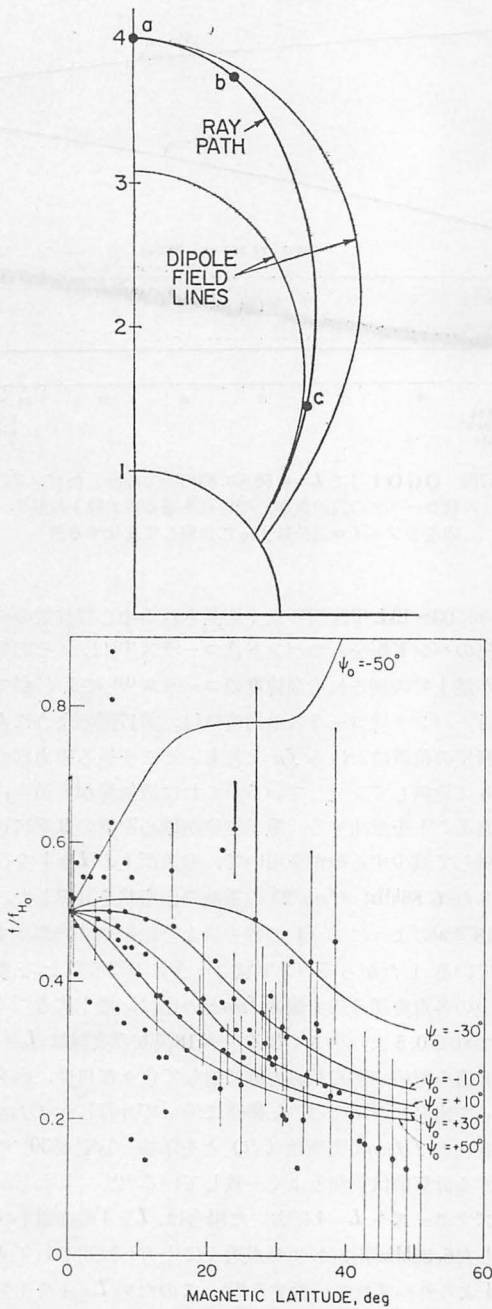
等しくなる時点 t_2 がある。もし $f_{H_0}/2$ での放射機構が働くとすれば、第16図(b)のように t_2 で NAA17.8kHz 波によって、VLF 放射が誘起されるはずである。第16図(c)は $K_p = 7_0$ にまで達した1965年6月17日の磁気嵐のホイッスラダクトのドリフトと、 $2f_{NAA} = f_{H_0}$ の近くで実際に VLF 放射が誘起⁽¹⁰⁾された例である。

おもにプラズマポーズの外 ($L \geq 4$) で、 $K_p = 2 \sim 4$ の



第17図 OGO-1号で $L = 4.56 \sim 3.83$ の間で観測したバンド状コーラスの周波数が、受信点を通る磁力線上の最小の電子ジャイロ周波数 f_{H_0} に比例して変化する例

ときに $03 \sim 15$ LT 区間でよく観測される中心周波数の約 20% のバンド幅をもつバンド状コーラス⁽¹¹⁾は、その分布が地上で観測される高緯度のコーラス⁽¹²⁾によく似ている。バンド状コーラスの周波数は、第17図のように人工衛星の位置における f_H よりも、そこを通る磁力線の f_{H_0} に比例して変化している。これは放射源が赤道面内にあることを意味する。電子密度が地心距離の3乗に逆比例して減少する分布を用いて、赤道面上の $L = 4$ を出発した 6.86kHz ($= f_{H_0}/2$) の電波の伝搬路を計算した。第18図(a)のように $L = 4$ の磁力線より伝搬路は内側へずれている。したがってバンド状コーラスの周波数と、伝搬路上の各点を通る磁力線の f_{H_0} との比は、地上に近づくにつれて 0.5 より小さくなる。第18図(b)の実線は $L = 4$ の赤道を電波の法線が磁力線に対して色々な角度、 ψ_0 をもって出発した場合の、伝搬路に沿って計算した f/f_{H_0} の変化と f/f_{H_0} の実測値 (点) とを示す。 $|\psi_0| \leq 30^\circ$ に対する計算値は実測とよく一致している⁽¹¹⁾。しかしプラズマポーズを $L = 4$ においた場合は、 $L = 4$ の赤道を出発した 6.86kHz 電波は、出発点近くで上方へ反射されて $L = 4$ より外へずれて伝搬する⁽¹³⁾。このため $L = 4$ を出発した伝搬路に沿っての f/f_{H_0} の変化は、プラズマポーズを考慮しない場合と違って実測値にあわない。しかしプラズマポーズより外側の $L = 4.25$ を出発した 5.6kHz ($= f_{H_0}/2$) 波の伝搬路は、プラズマポーズに反射されることなく、 $L = 4.25$ の磁力線より内側へ曲り、これに沿って計算した f/f_{H_0} は観測値とよく一致する⁽¹³⁾。このことはバンド状コーラスがプラズマポーズより外 ($L \geq 4$) でよく観測されることと符合する。

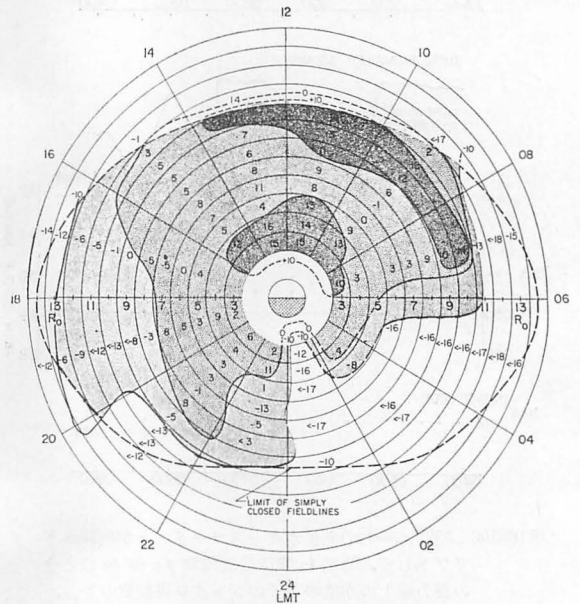


第18図(a) 地球の中心からの距離の3乗に逆比例する電子密度分布で、赤道面上の $L=4$ を磁力線に平行な電波の法線をもって発射された $6.86\text{kHz}(=f_{H_0}/2)$ 電波の伝搬路(内側へ曲っている)
 (b) 磁力線に対して種々の波の法線方向(正の角度は外向き)をもって、赤道面の $L=4$ を出発した 6.86kHz 波の伝搬路にそっての f/f_{H_0} の計算値(実線)と観測値(点)との比較

3.2 外部磁気圏の赤道近傍における VLF 放射の分布⁽¹⁴⁾

地球の中心から地球半径の2倍以遠の磁気圏で観測される VLF 放射の周波数スペクトルは、地上で観測されるコーラスや中緯度のヒスによく似ている。プラズマポーズより内側ではかなり強いヒスがよく観測され、太陽側と夜側とで VLF 放射に差がない。しかしプラズマポーズの外側では、昼側と夜側とで異なる VLF 放射が観測される。プラズマポーズと磁気圏の境界との間では、突発的なヒスで数十秒くらい継続するものと、上昇音の多重コーラスとに大別される。

次に地方時-L 極座標における、 0.3kHz 以上の VLF 放射の最大強度の分布を第19図に示した。10時頃の $4 \sim$



第19図 Williams-Meadモデルの磁力線に沿って、赤道面上に投影した太陽活動極小期のホイッスラーモード VLF 放射の強度分布。各 LMT-R₀ 区分の数字は、 $10^{-2}(\gamma\text{Hz})^{1/2}$ 以上の dB 値で示した放射ピーク強度の区分内の平均値を示す。背景レベル以上の放射がない場合は<印で示されている

$9R_E$ (地球半径) のところに強度が大きいところがある。また $8 \sim 11R_E$ の間の強い VLF 放射領域は、06 時頃から出現する。この領域では、 $0.3 \sim 1.0\text{kHz}$ の電波とジャイロ共鳴を起しうる低ピッチ角の $10 \sim 1\text{keV}$ の電子がかなり観測されており⁽¹⁵⁾、VLF 放射が電子のジャイロ共鳴機構によって起されている可能性はじゅうぶんに考えられる。一方午後の領域では、VLF 放射の活動は徐々に減少している。VLF 放射の強度は朝方では K_p の増大とともに大きくなるが、午後から真夜中にかけては K_p が増大すると強度はかえって減少する。緯度的にはプラズマポーズの外では、 $15^\circ \sim 50^\circ$ の間で VLF 放射強度はとくに緯度依存性をもたないが、プラズマポ

ーズの内側では06時から14時にかけて $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ の間で強度が弱くなる傾向が認められる。

4. まとめと今後の問題点

電離層F層および磁気圏下部の赤道近傍の異常構造により、VLF雑音の伝搬に特異性(電波の発散, 吸収など)が生じて、これが人工衛星で観測されるVLF雑音の赤道異常の原因になっている。

Alouette衛星, Ariel衛星などによって、しばしば不変緯度 20° を通る磁力線に沿って濃密な電子密度領域(Ledge)が観測されている。この磁力線は地磁気緯度 15° 付近では、F層の赤道異常領域を通っている。赤道ジェット電流の東向き電場と、北向きの地球磁場とによる $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ ドリフトで上昇したプラズマが、磁力線方向の拡散に負けて磁力線にそってすべり落ち、LedgeおよびF層の赤道異常をつくりとわれている。したがってこの不変緯度 20° を通る磁力線にそって、ホイッスラーモードのVLF電波が捕捉される可能性はじゅうぶんありうる⁽¹⁹⁾。今後のVLF雑音およびホイッスラーの人工衛星および地上における観測結果をまちたい。また内部放射能帯からの荷電粒子の降下によると思われる $L=1.2\sim 2.0$ にある、地球の磁力線にそった磁気圏不規則電離帯に、VLF雑音およびNWC 15.5kHz電波が捕えられて両者の強度増加が起っている。

プラズマポーズ近傍の磁気圏では、赤道面において電子のジャイロ周波数の半分の周波数でVLF放射が発生している。プラズマポーズの内側と外側とで観測されるVLF放射に違いがあり、特に外側では昼夜の違いがみられる。外部磁気圏におけるVLF放射の強度分布図は、真夜中の $L\geq 2$ でVLF放射の強度が背景レベル以下であることを示している。しかし地上の極光帯($L=4\sim 8$)では、真夜中頃に地磁気活動に伴ってVLF放射の活動が盛んである。この極光帯VLF放射の源を探ること、およびあるとすれば第19図のVLF放射と同じカテゴリーのものであるかどうかなどは今後の問題である。また地上の低緯度でも、5kHzおよび2kHzのVLF放射^{(16), (17)}が観測されているが、これに対応するVLF放射が電離層以高でまだ的確にとらえられていない。最近ISIS-I号で⁽¹⁸⁾地磁気緯度 $\pm 20^{\circ}$ 以下の高度600km以高において、磁場に捕捉されている10eV \sim 10keVの電子および500eV以下の陽子の強い粒子流束($\sim 5\times 10^9$ cm $^{-2}$ ·ster $^{-1}$ ·sec $^{-1}$)が観測された。これらの低エネルギー粒子からのチェレンコフ型放射によって、低緯度VLF

F放射が発生される可能性も考えられる。これらの問題は今後のVLF放射と粒子の同時観測およびプラズマ波を含む電波の発生機構のいっそうの理論的研究によって解明されるであろう。

参考文献

- (1) Scarabucci, R. R., JGR, 75, 69, 1970.
- (2) Wait, J. R., Electromagnetic Waves in Stratified Media, Pergamon Press, New York, 1962.
- (3) Deeks, D. G., Proc. Roy. Soc. A., 291, 413, 1966.
- (4) Kimura, I., Drifting Whistler Cutoff Phenomena—Striations—Observed by POGO Satellites, COSPAR Symposium, Leningrad, May, 1970.
- (5) Lyon, A. J. and Thomas, L., J. Atmos. Terr. Phys., 25, 373, 1963.
- (6) Bullough, K., Hughes, A. R. W., and Kaiser, T. R., Proc. Roy. Soc. A., 311, 563, 1969.
- (7) Ondoh, T., Otsu, J., and Nagayama, M., J. Radio Res. Labs., 105, 15, 1968.
- (8) Carpenter, D. L., JGR., 73, 2919, 1968.
- (9) Vasyliunas, V. M., JGR, 73, 2839, 1968.
- (10) Carpenter, D. L., Stone, K., and Lasch, S., JGR, 74, 1848, 1969.
- (11) Burtis, W. J., and Helliwell, R. A., JGR, 74, 3002, 1969.
- (12) Pope, J. H., JGR, 68, 83, 1963.
- (13) Aikyo K., and Ondoh, T., Propagation of Nonducted VLF Waves in the Vicinity of the Plasmopause, J. Radio Res. Labs., 18, 153, 1971.
- (14) Dunckel, N., and Helliwell, R. A., JGR, 74, 6371, 1969.
- (15) Vasyliunas, V. M., JGR, 73, 7519, 1968.
- (16) Ondoh, T. and Isozaki, S., J. Radio Res. Labs. 15, 133, 1968.
- (17) Ondoh, T., and Isozaki, S., Low Latitude VLF Emissions, Report to the National Research Council, NAS, U. S. A., November, 1968.
- (18) Heikkila W. J., J. Geophys. Res., 76, 1076, 1971.
- (19) 早川正士, 大津仁助, 1971年春日本地球電気磁気学会講演