

EXOS-B 塔載ダクトモニターと電子温度測定*

木村 磐根**・橋本 弘蔵**

Duct monitoring and electron temperature measurement
by the EXOS-B satellite

By

Iwane KIMURA and Kozo HASHIMOTO

Abstract; A detection of ionization ducts in the magnetosphere is planned in the EXOS-B satellite project. The duct detection is based on the VLF Doppler method in which Doppler frequency shift of a ground based standard VLF signal is measured on the satellite. Since the Doppler shift is clearly different for ducted and non-ducted propagations, an existence of the duct can be easily detected. In case of the non-ducted propagation, the wave normal tends to direct within the resonance cone angle, where the electron temperature of the plasma is highly effective to the refractive index and therefore to the Doppler frequency shift. A feasibility of the deduction of the electron temperature from the observed Doppler shift is theoretically confirmed in this report.

概 要

EXOS-B 衛星においては、磁気圏の電離ダクトの検出が1つのプロジェクトになっている。ダクトの検出はVLFドップラー法すなわち地上の標準VLF局の信号のドップラーシフトを衛星で測定することにより行われる。すなわちダクトによる伝搬とダクトによらない伝搬では、ドップラーシフトがはっきり異なるため、ダクトが存在すればそれが容易に判別できる。ダクトによらない伝搬では、波面法線方向は地球磁場と大きな角度をなし、いわゆるレゾナンスコーンの中にはいるからプラズマの電子温度の効果が強く効いて屈折率ひいてはドップラーシフトに大きく影響する。この報告では観測されたドップラーシフトから電子温度を求めることが出来ることを理論的に確認している。

1. 緒 言

EXOS-B は長楕円軌道衛星で、磁気圏プラズマ内の active experiments が主なプロジェクトになっている。すなわち衛星からパルス変調された電波を打出し、プラズマのレ

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

スポンズ、エコー等を観測するものであるが、エコーには通常の電離層反射エコーと磁力線に沿ったダクトによるダクト伝搬エコーが存在する。プラズマレスポンスとしては、プラズマ固有の種々の共鳴や、非線形モード結合による2次的な波動、あるいは triggered emissions のように遠方でサイクロトロン不安定により2次的に励起されるものなどあり様々である。すなわち衛星の近くの local な現象と、広範囲なあるいは遠方の環境に依存するものに大別できる。

本ダクトモニターは、上記中特に後者に関連して、EXOS-Bで ionization duct の位置と大きさをモニターしようとするもので、例えば triggered emissions などの成因にダクトの存否が重要なファクターとなるかどうかのチェックも可能になるであろう。このモニターの原理は地上の VLF 局信号のドップラーシフトを測るといってごく簡単な原理であるが、後述するように、他の装置で測定された電子密度と磁場強度を用いて磁気圏の rough な電子温度や伝搬ベクトル方向が測定できることを説明する。

2. ダクト (duct) 伝搬とノンダクト (nonduct) 伝搬

地表で発生した雷放電の電波や VLF 地上局の信号は磁気圏内をホイスラーモードで伝搬するが、磁力線に沿ったダクトがあるかどうかは伝搬上大きな違いをもたらすことはよく知られている。高緯度地方で観測されるホイスラーの多くはダクト伝搬と考えられ、又何百回もエコーをくり返すホイスラートレインではダクト伝搬が必須である。一方日本付近より低緯度ではダクト伝搬の条件が厳しく、又ダクトの存否もはっきりしない[1]。

ダクト伝搬とノンダクト伝搬の大きな相違は、例えば磁気圏内の赤道面上で観測した場合前者では伝搬ベクトルがほぼ地球磁力線方向に向くのに対して、ノンダクト伝搬では磁力線と大きな角度(後でのべるレゾナンス角 θ_{res} 付近)をもって伝搬し屈折率が非常に大きくなる。このことは、ホイスラーでは walking trace と呼ばれる現象として OGO-2 や 4 により観測され、また VLF 地上局信号では同じ衛星により地上の Omega 信号 ($11\frac{1}{3}$ kHz) の信号が 100 Hz もドップラーシフトして観測されたこと(第1図参照)でも明らかである[2]。

第2図にはいくつかのノンダクト伝搬の電波通路および各点の伝搬ベクトル方向が図示されている。

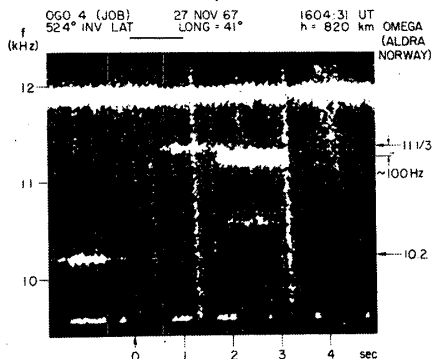
ホイスラーモードにおいて、コールドプラズマ中では lower hybrid resonance (LHR) 周波数以上の周波数では伝搬ベクトルが磁力線とある角度をなすと屈折率が無限大になり、それ以上の角度では伝搬できなくなる限度の角すなわち resonance angle (θ_{res}) があり、ノンダクト伝搬では伝搬ベクトル方向はこの角に近づくことになる。

3. ドップラーシフト

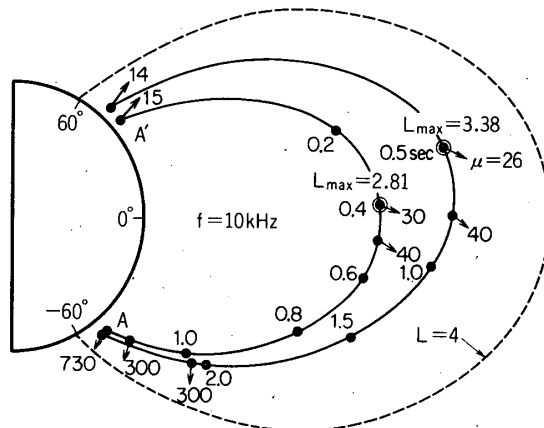
衛星において受信された地上局信号のドップラーシフト Δf は、

$$\Delta f = -f \frac{V}{c} n \cos \sigma \quad (1)$$

で与えられる。ここで f は電波の周波数、 V は衛星の速度、 c は光速、 n は屈折率、 σ は衛星速度 V と電波伝搬ベクトルのなす角であり、 $0 \leq \sigma < 90^\circ$ では Δf は負、 $90^\circ < \sigma \leq 180^\circ$



第1図 ノンダクト伝搬するOmega信号($11\frac{1}{3}$ kHz)“OGO-4におけるドップラーシフト”(Walter and Angerami[2]による)



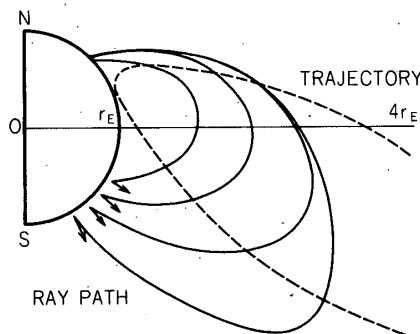
第2図 ノンダクト伝搬の通路と伝搬ベクトル方向通路に沿った数値は伝搬時間であり、矢印の先の数値は屈折率を表わす。(Walter and Angerami [2]による)

では Δf は正となる[3]。

前項で述べたごとく、屈折率 n はダクト伝搬とノンダクト伝搬で大巾に異なり、その比は 1 : 10 ないし 1 : 100 あるいはそれ以上にもなる。従って上記のドップラーシフト Δf も両種の伝搬で同じ程度に値が異なり、容易に弁別できる。

具体的に EXOS-B の軌道におけるドップラーシフトを、ダクト伝搬とノンダクト伝搬の両者について試算した。ダクト伝搬については、波は磁力線に沿って伝わり伝搬ベクトルも磁力線方向であると仮定する。第3図の実線はノンダクト伝搬に関して 22.3 kHz の NWC の信号が種々の緯度から電離層に垂直に入射した時の Ray Tracing の結果を示している。計算に使用したプラズマのモデルは、相京・恩藤[4]の使用したもので特に基準高における緯度変化を無視したものを使用、プログラムは木村[5]に準じたものを使用した。破線は EXOS-B の軌道を近地点 250 km, 遠地点 30,000 km, 軌道面傾射角 30° , 近地点引数 (ω) 45° とした時の子午面への射影である。両者の交点で波が受かると考えられ、その点でのドップラーシフトを計算する。

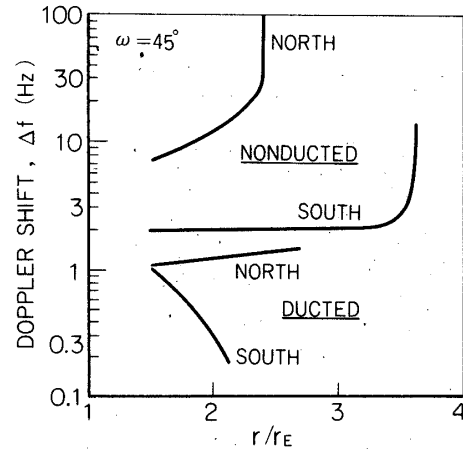
ダクト伝搬とノンダクト伝搬の両者でのドップラーシフトの比較をしたのが第4図である。磁軸は地軸に一致していると仮定した。送信局のある南半球でもノンダクト伝搬のドップラーシフトは数 Hz, ダクト伝搬では 1 Hz 以下となる。北半球では、ノンダクト伝搬のとき 10 ~ 100 Hz に達する。このようにドップラーシフトが大きいのは、北半球側では伝搬ベクトルが屈折率 $n \rightarrow \infty$ となる resonance angle θ_{res}



第3図 22.3 kHz VLF信号の通路(実線)と EXOS-B の軌道(破線)。 r_E は地球の半径。

$$\theta_{\text{res}} = \tan^{-1} \left\{ -\frac{(1-P^2Y^2)(1-Y^2)^{1/2}}{1-P^2Y^2-Y^2} \right\} \quad (2)$$

($Y=f_H/f$, $P=f_P/f_H$; f_P はプラズマ周波数 f_H はジャイロ周波数)に近い角度で伝わるからである。この図から明らかにドップラーシフトの値からダクト伝搬かどうかを決定できることがわかる。ダクト伝搬のドップラー・シフトを示す線が2~3 r_E の途中までしか示されていないのは、それより遠方では受信点を通る磁力線の赤道における f_H が $2f$ ($=44.6 \text{ kHz}$)より小さくなって、ダクト伝搬できないからである。



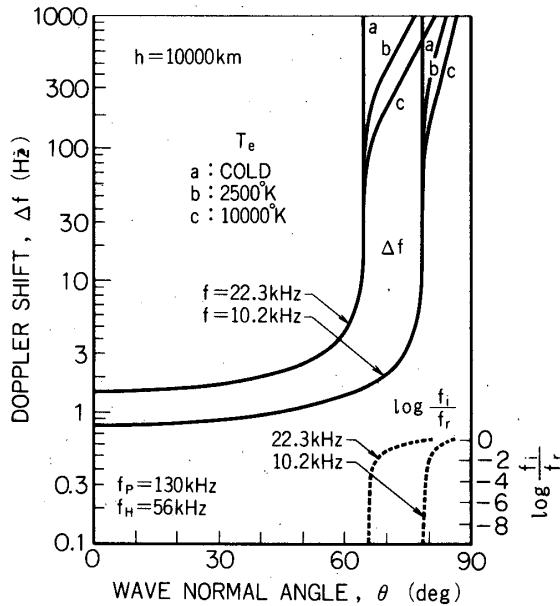
第4図 ダクト伝搬とノンダクト伝搬によるドップラーシフトの比較 (North, Southは、北、南半球であることを示す)

4. 磁気圏プラズマの温度の測定

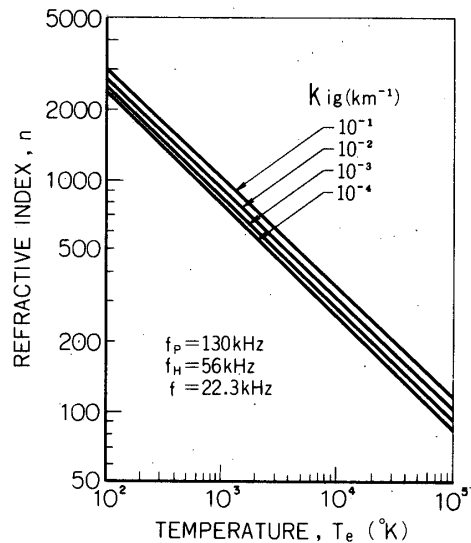
前項においてはプラズマがコールドである場合について述べたが、磁気圏プラズマの電子温度 ($T_e = 1,000 \sim 40,000^\circ \text{K}$) の効果について述べ、この効果を用いてドップラー・シフトから電子温度を推定する方法を説明する。

温度の効果を入れた場合 θ_{res} 以上の角度においても無限大でない屈折率で伝わり、 θ_{res} より大きくなるに従って electrostatic wave となり大きな Landau 減衰をうける[6]。等方的な ($T_\perp = T_\parallel \equiv T_e$) Maxwell 分布をしたプラズマを仮定し、その温度を $T_e = 2,500^\circ \text{K}$, $10,000^\circ \text{K}$ として屈折率を求め、 $V = 4 \text{ km/s}$, $\sigma = 0^\circ$ として(1)式に代入した結果が第5図である。 $T_e = 2,500^\circ \text{K}$, $10,000^\circ \text{K}$ に対応してそれぞれドップラー・シフト Δf は b, c のようになり、a に示されたコールドプラズマのように θ_{res} ($f = 22.3 \text{ kHz}$ で 64.66° , $f = 10.2 \text{ kHz}$ で 78.60°) において無限大とはならない。また $\theta > \theta_{\text{res}}$ では同図右下点線の $\log f_i / fr$ で示されているように Landau 減衰のため f_i といった虚部周波数があらわれてきて、長く伝搬できなくなり、 Δf には温度の関数として上限が存在することがわかる。ノンダクト伝搬をしていてかつ θ が θ_{res} (コールドプラズマとしての)に近いものがあれば、そのドップラー・シフトは温度の影響を受けることになる。そのような信号を見つけるためには、先ず $\theta \approx \theta_{\text{res}}$ と近似して衛星の飛翔方向から σ を定め、観測されたドップラー・シフトから(1)式を用いて n を求める。次に、同時に測定されている f_H , f_P を用い、コールドプラズマとしての分散関係式が上記の n を与えるような θ を求め、それが θ_{res} に非常に近いものであれば、温度効果を受けた信号であり得ると考えられる。このようにして求めた θ が θ_{res} から若干ずれていても、それが $\cos \sigma$ に及ぼす影響は僅かであり、(1)式から n を求めた過程には、ほとんど誤差ははまらない。 θ_{res} より十分小さな θ に対しては温度の効果は無視できるので、(1)式とコールドプラズマの分散関係式から f_P , f_H を用いて θ を正確に決定できる。

次に上に与えられた n から T_e を推定する方法について述べる。 θ_{res} 近くでは T_e の効果により Landau 減衰を受けるから、そのようなノンダクト伝搬で少くとも 1,000km 程度は伝搬して衛星に達したとすると、減衰は例えば 1,000km で $1/e$ 以下でなければならない。こうして、第6図の $k_{ig} = 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ の直線から T_e の上限が求められる。このとき Δf が始めに述べた上限であれば、 T_e を求めたことになる。第6図は次のようにして描かれている



第5図 EXOS-B による VLF 信号 (102, 22.3kHz) のドップラー・シフト



第6図 屈折率 n と電子温度 T_e の関係

る。Maxwell 分布のプラズマの分散関係式を実数 k を与えて複素解 $\omega = \omega_r + i\omega_i$ を求める。群速度を V_g とし、 ω_i が小さいときには $\omega_i = k_i \cdot V_g$ となる。減衰率 k_i の V_g 方向成分を k_{ig} とすると $k_{ig} = \omega_i / V_g$ は波の Ray 方向での単位伝搬長 (第6図では 1 km) あたりの減衰率となる。第5図と同じパラメータで $f = 22.3 \text{ kHz}$ の場合に θ を変化してこのような計算を行い、 k_{ig} が一定となるような n と T_e の関係を描くと第6図が得られる。この図に用いた θ は、 $\theta = 65.7 \pm 0.5^\circ > \theta_{res} (= 64.66^\circ)$ の範囲にある。図から明らかのように、 k_{ig} が 10 倍変化しても (例えば 1,000km あたり $1/e$ の代わりに、10.0km あたり $1/e$ と仮定しても)、 T_e は 2.0% 程度しか変わらないため、 k_{ig} の大きさの仮定が結果に及ぼす影響は少ない。このようにして、今まであまり行われていない波動的な方法によって電子温度をファクターの精度で測定できる。

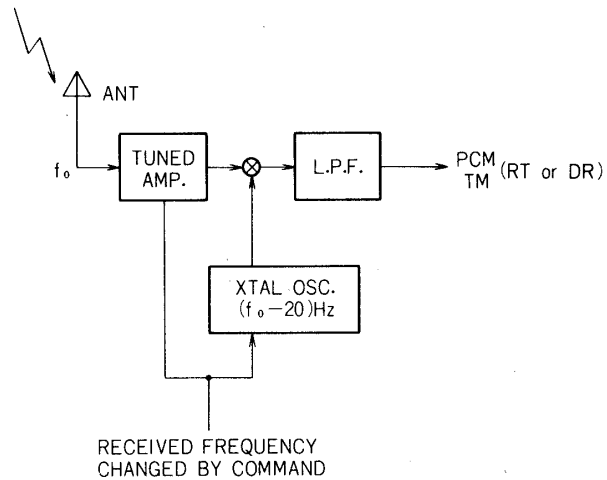
5. 観測装置

ドップラー・シフトの観測はロケットでも度々試みられているように、搭載装置は非常に簡単である。原理図は第7図に示されるように、信号を同調増巾器で増巾し、局部発振と混合して 20 Hz のビートとして地上へ送る。局部発振器としては、 f_0 が 10 ~ 30 kHz である

ことを考えると、10 MHz 近傍の水晶(ATカット 18/U型)発振器からステップダウンすれば0.1 Hz程度の周波数偏差(5×10^{-6})は確保できる。ただし温度変動を10℃以内に押えるか、温度特性を測定しておいて補正をする必要がある。第3項での議論から、この程度の安定度があれば十分である。

上記の20 Hzのオフセットは衛星の飛翔方向と電波の伝搬ベクトルの方向により正にも負にもなりうるので、その弁別のためである。 Δf が20 Hz以上になると正負の弁別はつかなくなるが、衛星の軌道が正確にわかるから弁別可能である。

低域通過フィルター(L.P.F)は観測目的とテレメータ伝送帯域に関係するが、ダクトモニターとしては $\Delta f \sim 2$ Hz程度測れれば十分である。しかし前述のようにノンダクトモードから磁気圏の温度を出そうとする場合には $\Delta f \sim 100$ Hz程度まで測定できる必要があり、帯域はそれだけ広く必要である。



第7図 ダクトモニターのブロック図

6. テレメータ伝送

EXOS-Bのテレメータ計画は、近距離ではリアルタイムでPCM 8 kbits/s, PMバンド巾10 kHzは可能であり、遠距離(19,000 km以上)ではリアルタイムでPCM 1 kbits/s, PM 3 kHzとなる。本プロジェクトでは、PMの伝送帯域のうちの500~700 Hzのバンドを利用してドップラービートを伝送する。

7. 観測周波数の選定

ダクトモニターの観測でダクトの位置、巾などを空間的に連続して調べるためには、できるだけ連続した安定な信号が望ましい。今まで例にあげてきた2.23 kHzはオーストラリアのNWC局であるので、連続信号である。ただし50 HzのFSが行なわれており、その2周波数の弁別をする必要がある。第5図で例にあげた10.2 kHzのOmega信号は、周波数が低いので f_H の低い遠方まで到達できるが、1秒毎に送信局が変わるので前記の理由で問題がある。しかし群伝搬時間を容易に測定できる利点もある。結局2~3周波数を測定対象として、第7図に示したようにコマンドで変更できるようにするのが望ましい。

謝 辞

貴重な議論をしていただいた松本紘助教授に謝意を表します。

1974年7月30日

1974年7月30日

参 考 文 献

- [1] Kimura, I., T. Tomimoto and K. Hiraishi, Measurements of Wave Normal Direction of Whistler Mode Signals in the Ionosphere by means of the Rocket-Doppler Technique, Planet. Space Sci., **21** 671, 1973.
- [2] Walter, F., and J. J. Angerami, Nonducted Mode of VLF Propagation between Conjugate Hemispheres, Observations on OGO's 2 and 4 of the 'Walking-Trace' Whistler and of Doppler Shifts in Fixed Frequency Transmissions, J. Geophys. Res., **74** 6352, 1969.
- [3] Kimura, I. and R. Nishina, Doppler Shift in an Inhomogeneous Anisotropic Medium, Rep. Ionos. Space Res. Japan, **21** 187, 1967.
- [4] Aikyo, K. and T. Ondoh, Propagation of Nonducted VLF Waves in the Vicinity of the Plasmapause, J. Radio Res. Lab., **18** 153, 1971.
- [5] Kimura, I., Effects of Ions on Whistler-Mode Ray Tracing, Radio Sci., **1** 269, 1966.
- [6] Hashimoto, K. and I. Kimura, Oblique Whistler Mode Propagation in a Hot Plasma, Rep. Ionos. Space Res. Japan, **27** 73, 1973.