

JIKIKEN (EXOS-B) による  
NWC局 VLF 信号のドップラーシフトの測定\*

石橋 広通\*\*・橋本 弘蔵\*\*・木村 磐根\*\*

(1982年10月20日受理)

Measurements of Doppler Frequency Shift of NWC VLF  
Signals by means of Jikiken (EXOS-B) Satellite

By

Shiromichi ISHIBASHI, Kouzou HASHIMOTO and  
Iwane KIMURA

**Abstract:** Characteristics of the Doppler frequency shift of NWC (22.3 kHz) signals observed by Jikiken (EXOS-B) satellite are described. Among 46 experimental passes of the spacecraft, the NWC signals were detected on 26 passes. From the characteristics of the detected Doppler shift, it was found that in three passes the signals had reached the spacecraft via nonducted propagation in the geomagnetic meridian planes; in five passes, the signals had propagated in ionization ducts; and in six passes the signals had propagated in the off-meridian nonducted mode. The last case took place when the spacecraft was located in the dusk region, where a longitudinal electron density gradient was present, probably causing this type of propagation. This interpretation was confirmed by three dimensional ray tracing.

概 要

Jikiken (EXOS-B)衛星で観測されたオーストラリアのNWC信号 (22.3 kHz) のドップラーシフトについて検討した結果を述べて

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 京都大学工学部

いる。1978年10月～1980年9月の間に観測された46の軌道のうち、NWC信号が検出されたのが26パスあり、そのドップラーシフトの特性から磁気子午面内ノンダクト伝搬と解釈されるものが3パス、ダクト伝搬と考えられるものが5パス、磁気子午面からはずれたノンダクト伝搬と考えられるものが6パス観測された。最後の例は日没時に起こり、電子密度の経度方向の勾配と赤道異常の効果を考慮した3次元ray tracingにより説明しうることがわかった。

### 1. 序 言

Jikiken(EXOS-B)塔載波動観測機器の1つであるDPL観測装置[1]は、オーストラリア北西岬にあるVLF-NWC局(21.82°S, 114.17°E, 磁気的には32.3°S, 183.8°E)から送信された22.3kHzのVLF電波を受信し、その時生ずるドップラーシフトをアナログテレメータで地上局(内之浦)へ伝送するものである。

ドップラーシフト $\Delta f$ は飛翔体の速度ベクトルを $V$ 、波の伝搬ベクトルを $k$ とすれば

$$\Delta f = -\frac{1}{2\pi} k \cdot V = -\frac{f}{c} n V \cos \sigma \dots\dots\dots(1)$$

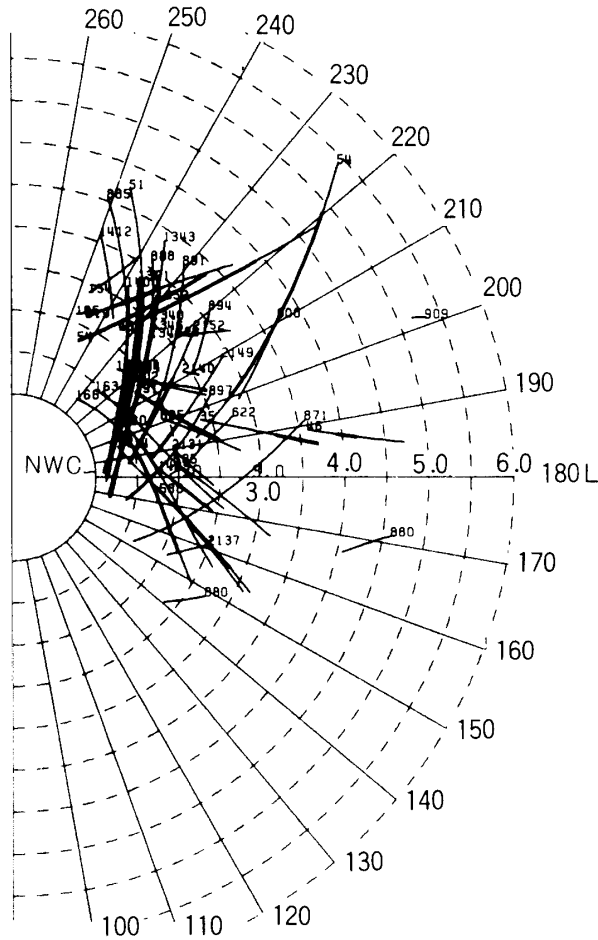
で与えられる。 $n$ は衛星近くのプラズマの屈折率、 $\sigma$ は $k$ と $V$ とのなす角である。 $V$ は軌道計算により正確に求めることができるからドップラーシフトを観測することにより、波の伝搬方向および $n$ を知ることができ、従って伝搬を決定づける要因となる磁気圏中における電子密度分布等を推定することができる。

処理したDPL観測結果は、1978年10月～1980年9月にかけて、7期間に分けて、行なわれたものである(第1表参照)。観測軌道は全部で46パス(Pass)であった。第1図に各パスの衛星軌道の北極から見た磁気赤道投影図を示す。各カーブ上の番号は軌道のrevolution番号である。うち明瞭にNWC信号が受信されているのは26パスであるが、信号が受信されている部分を図中太線で示す。この図から見ると観測軌道はNWCの子午面より東に多いが信号も東においてより受信されていることがわかる。又各期間中は衛星は類似し

DATE	REVOLUTION NUMBER							
1978.10	35*	43*	46*	51*	54a*	54b*		
1978.11	154	163*	166*	174	180*	185	191*	
1979. 4	585	588*	602*	605*	619	622a*		622b
1979. 7	871	874*	880	885	888	891	894	897* 900
1979.12	1340*	1343*	1346*	1349*	1352*			
1980. 1	1391*	1394*	1397*	1400*	1412	1414*	1429*	
1980. 9	2131	2137	2140	2149	2152			

\*NWC signals were found in data

S0430265 82-02-12



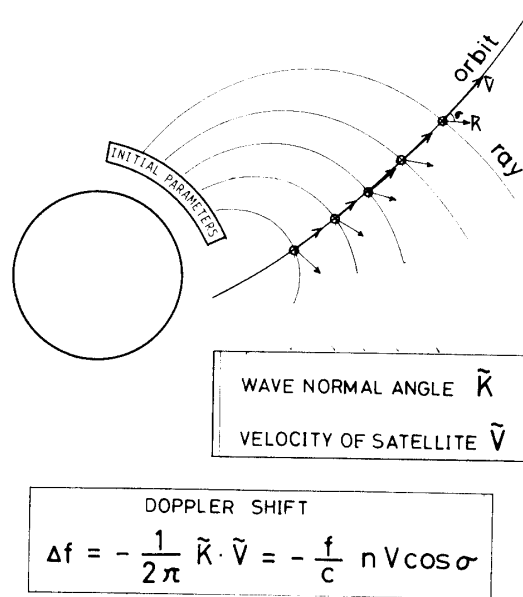
第1図 DPL観測におけるJikiken衛星の軌道の磁気赤道面上への投影図。太い線はNWC信号が受信されている期間を示す。

た軌道上を動くため、観測時における衛星の速度ベクトルもあまり差はないと思われる。即ち衛星は同じ季節に磁気圏のほぼ同じ場所を通過しているため、周囲プラズマの屈折率も、さほど違わないと考えられる。よって各観測期間中は類似したドップラーシフトが得られる。

本稿ではDPL観測によって得られた結果及びその解析結果について述べる。

## 2. 磁気子午面内伝搬としたときの ドップラーシフトの予測値の計算方法

信号の解析は、適当な電子密度及び磁場モデルの下で計算したドップラーシフトの予測値と、実際の観測により得られたドップラーシフトとを直接比較することにより行なう。波の伝搬ベクトル、及び衛星の速度ベクトルがわかればドップラーシフトは(1)式で与えら



第2図 wave normal 方向の計算法

れる。速度ベクトルは軌道計算プログラムを用いて求める。

又、伝搬ベクトル方向を求めるため ray tracing を行なうにあたって用いたモデルは、磁場はダイポールモデル、電子密度は基準高度(1000 km)で緯度、経度方向に変化のない拡散平衡モデルである。モデルパラメータは高さ 1000 km における電子密度  $10^4/\text{c.c.}$ 、イオン組成は  $\eta_{\text{H}^+} : \eta_{\text{He}^+} : \eta_{\text{O}^+} = 0.15 : 0.82 : 0.03$  とした。電子温度は波の伝搬、従ってドップラーシフトの予測値に最も大きく影響することから、いくつか異った温度を用いて計算した。

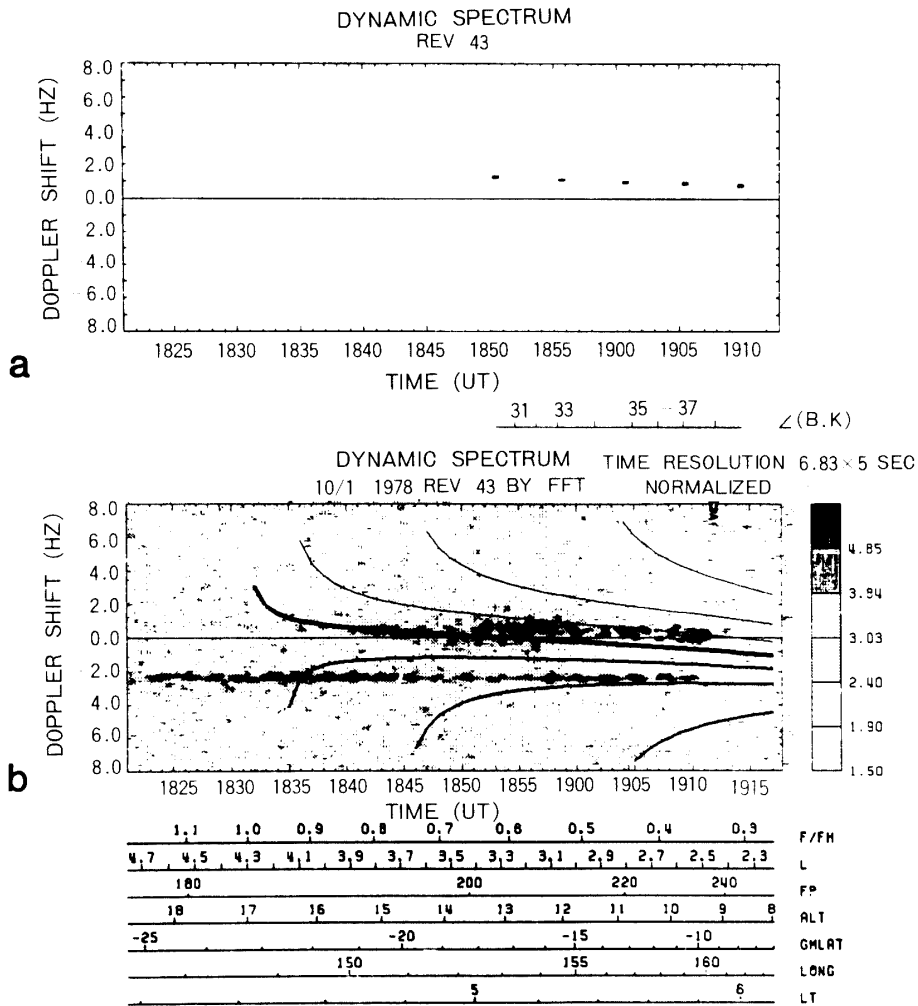
このモデルの下で ray tracing を行なうと、衛星軌道上での伝搬ベクトルを計算することができる。今、電子密度の経度変化は考慮していないので、伝搬は磁気子午面内の2次元とし、同緯度、同高度、同入射角(磁気子午面内に限定する)で入射した波の伝搬路及び伝搬ベクトルは磁気地軸に対し回転対象となる。

第2図に観測点を含む磁気子午面上における伝搬通路と衛星軌道の磁気子午面投影成分との関係を示す。観測点は両者の交点になるから、ある緯度から入射した波を衛星で受けたときのドップラーシフトは両者の交点における伝搬ベクトル並びに衛星の速度ベクトルから(1)式を用いて計算することができる。なお ray tracing の計算結果は一定時間ステップに対する通路の進みがステップ状となるため、軌道との交点といっても実際は軌道に最も近い通路上の進みステップの両側の値を意味する。この2点から各々ドップラーシフトを計算し、その間をたて線で結ぶようにした。

### 3. 観測結果とその考察

本節では予測値と実測値とを比較することにより明らかとなった波動の伝搬について述べ、又伝搬を決定づける要因について考察する。

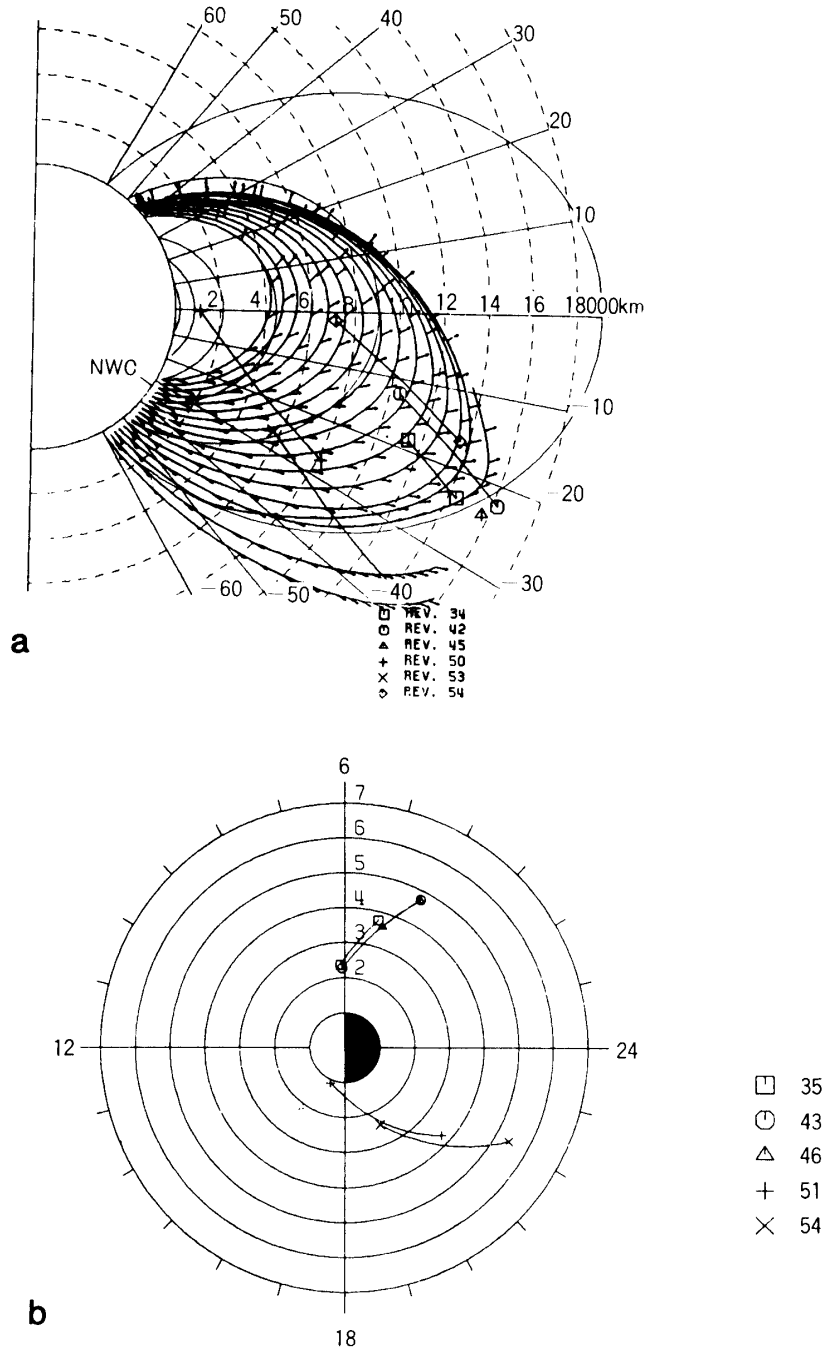
#### 3.1 磁気子午面ノンダクト伝搬の観測例



第3図 磁気子午面内ノンダクト伝搬の観測例 (Rev. 43)

予測値を第3図(a)に、観測例を図(b)に示す。両図とも横軸は観測時間を、縦軸はドップラーシフトを表わす。(a)図下の帯グラフは ray tracing により算出した wave normal angle を、(b)図下の帯グラフは、それぞれ局所的サイクロトロン周波数で正規化された信号周波数、L-value、プラズマ周波数、高度、磁気緯度、経度、ローカルタイムを表わす。(b)図中の実線は磁気子午面内で wavenormal angle を  $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$  まで  $20^{\circ}$  おきに仮定したときのドップラーシフトの値を示したものである。負符号は伝搬ベクトルが磁場の外側を、正符号は磁場の内側を向いていることを表わす。図中では、それぞれ細線、太線で区別してある。

NWC 信号は 1840~1910 UT の間 0~1 Hz 付近に見られる。-2Hz 付近に一定して見られる信号は内部干渉によるもので NWC 信号ではない。このデータは 1978 年 10 月 1 日に観測されたもの (Rev 43) であるが、同期間の Rev 46, Rev 54 にも同様な信号が見受けられる第4図にこの観測期間中の衛星の軌道の磁気子午面投影成分及び ray tracing により計算された波の伝搬路並びに伝搬ベクトルを示す。NWC 局から送信された VLF 波は地



第4図 1978年9月～10月の期間のDPL観測軌道

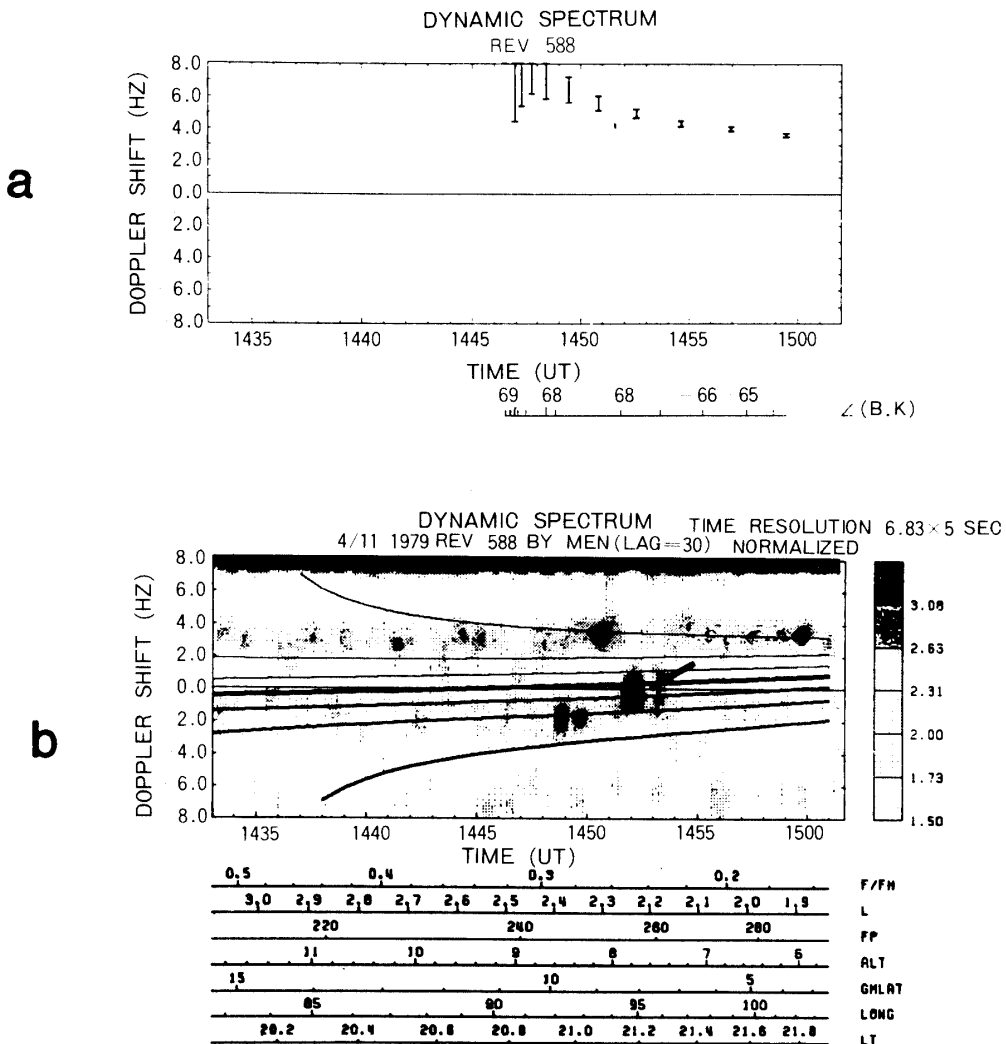
- a. 磁気子午面内投影図および ray tracing により求めた伝搬路と wave normal 方向  
 b. 衛星軌道のローカルタイム-L値ダイアグラム

表と電離層との間を導波管モードで伝搬するため、NWC局を中心にかなり広範囲にわたって電離層入射可能と考えることができる。信号が連続的に受信されているのはこの理由によると思われる。尚、このとき衛星は深夜から日出にかけて観測されているので電子温

度はかなり低いと考えられる。そこで  $T_e=600^{\circ}\text{K}$  とした。第3図(a)と(b)を比較すると、両者は比較的良く一致している。このことから、観測された時間においては電離層電子密度は、緯度方向にも経度方向にもほぼ一定で、NWC局付近の電離層に垂直入射した波が磁気子午面内をノンダクト伝搬していたと解釈することができる。信号は磁気緯度  $-40^{\circ}$   $\sim -50^{\circ}$  において入射した波を受けたことが第4図よりわかる。厳密に観測値と予測値とを比較すると  $0.3\sim 0.5\text{ Hz}$  程度の差違がある事が見受けられるが、ray tracing におけるモデルの自由度を多少考慮することにより補正できる程度のものである。従って先に述べた観測結果の解釈に大きな影響を与えるものではない。

3.2 ダクト伝搬の観測例

ダクト伝搬による可能性の高い観測結果が1979年4月の観測期間にいくつか見受けら



第5図 ダクト伝搬の観測例 (Rev. 588)

- a. ノンダクト伝搬としたときのドップラーシフトの予測値
- b. 観測データをMEM法で処理したもの (矢印の所が信号)

れる。VLF波がダクト (enhanced duct) にトラップされるには[3]

$$f < f_H / 2 \dots\dots\dots(2)$$

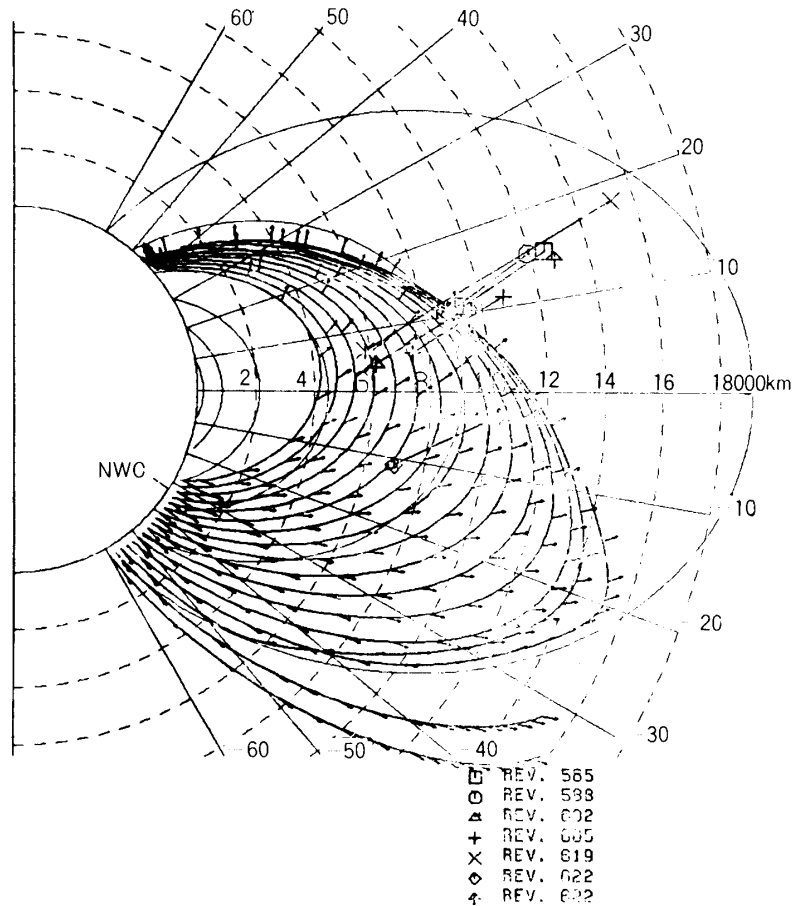
でしかもダクトの中心の電子密度を  $N_m$ , 周囲の電子密度を  $N_b$  とするとき, 入射時の wave normal angle  $\psi_0$  は

$$\cos \psi_0 > N_b / N_m \dots\dots\dots(3)$$

でなければならない。  $N_m$  は  $N_b$  に比べ数%~数10%電子密度が高くなっている程度であるから, ダクト伝搬中VLF波の wave normal angleは十分小さくなければならない。

ダクトの大きさであるが, Angeramiによれば緯度方向には  $L=0.035\sim 0.07$  の厚みを持ち, 経度方向に  $4^\circ$  前後の幅を持つと報告されている[4]。

Rev 588の観測結果を第5図(b)に示す。観測日時は1979年4月11日である。(b)はMEM法で処理したものである。MEM法[5]は有限長データを外挿し, そのスペクトルを予測するもので, S/Nの悪い信号で, FFTの場合時間分解能を犠牲にして平均回数を増さざる



第6図 1979年4月の期間のDPL観測の衛星軌道とノンダクト伝搬する場合の信号の伝搬通路と wave normal 方向



を得ない時でもそのスペクトルを予想する事ができ、ダクト伝搬のような観測時間が短かく時間分解能を下げられない場合に効果を発揮する。

1452 UT 頃に見られる 0 Hz 付近の信号 ((b)中矢印) を見ると、図中の実線より wave normal angle  $\pm 30^\circ$  以内と読取ることができる。しかしノンダクト伝搬の場合の予測値の  $\phi \approx -68^\circ$  と大幅に違っている。第 6 図にこの revolution 及びその前後の衛星の軌道を示すが、波はかなり長距離を伝搬して来なければならず、又衛星軌道付近では resonance に近づくため、この両方による波の減衰は大きい。従って予測値のような信号は受信され難いと考えられる。

帯グラフより  $f/f_H \approx 0.25$ ,  $\Delta L \approx 0.03$  も読取れ、wave normal angle も小さいので、この信号はダクト伝搬中の波を受信したものではないかと考えることができる。

同様の観測結果が同期間の Rev.602, 605 に見られる。又 1980 年 1 月に観測された Rev. 1414, 1424 にもダクト伝搬によると思われる信号が受信されている。よってダクト伝搬は DPL 全観測パスのうち 5 パスに見られたことになる。

### 3.3 低高度、低緯度、日没付近の伝搬波の観測例

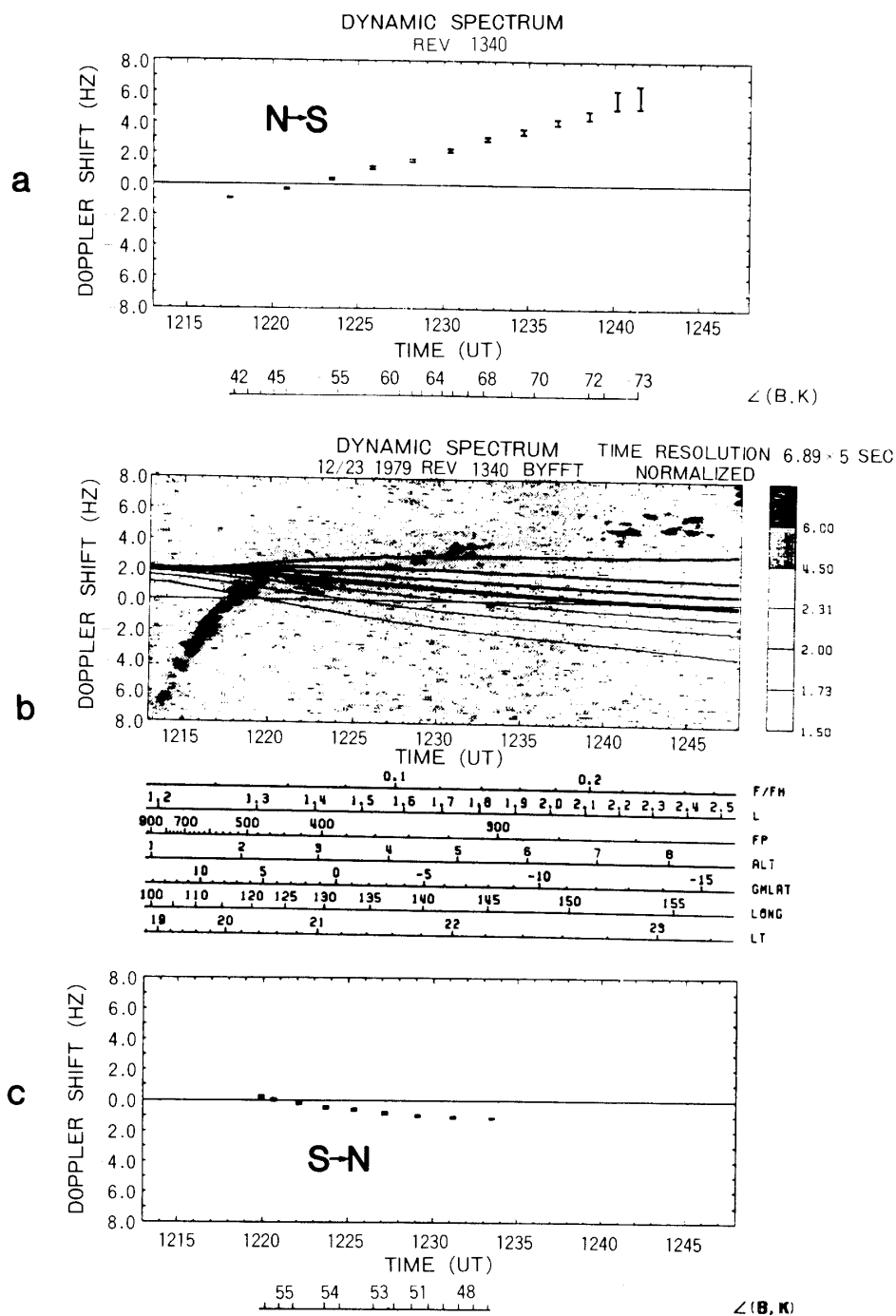
この節では緯度、経度方向に強い電子密度変化勾配のある電離層中を伝搬して来たと思われる観測結果について述べる。こういった観測結果は 1979 年 12 月～1980 年 1 月にかけて見られる。一例 (Rev.1340) を第 7 図(b)に示す。これは 1979 年 12 月 23 日に観測されたものである。この観測結果の特徴は急激に増加するドップラーシフトと緩やかに増加するドップラーシフトが、不連続につながっている事である。こういった特徴はこのパスを含め、この期間中に全部で 6 パス (Rev.1340, 1343, 1352, 1394, 1397, 1400) に見られた。

第 7 図(a)は  $T_e = 1000^\circ\text{K}$  として予測値を計算したものであるが、前節までとは違って北半球で波が下から電離層に垂直入射したものと想定して計算したものである。観測結果と比較すると、1220 UT から 1245 UT にかけてドップラーシフトが 0 Hz から 6 Hz へ変化する様子が良く一致しているため、この信号は南半球にある NWC 局から送信された波が導波管モードで電離層と地表との間を伝搬しながら北半球に至り、そこで電離層に入射して磁気圏内を伝搬したものを受信したと解釈することができる。第 8 図(a)に衛星の軌道、北半球入射した波の伝搬路を計算したものを示すが、これを見ると衛星は比較的低高度において、低緯度入射 ( $20^\circ \sim 30^\circ$ ) した波を受信し得ることがわかる。従って地表伝搬、磁気圏内伝搬を含め、波の伝搬距離が短かかった事が、北半球入射の波が強く受信された原因と考えることができる。第 7 図(c)に示される南半球入射の波による信号が受かっていないのはこの時南半球は夏で電離層下部の電子、イオンの密度が高く、衝突による減衰を強く受けたためと考えられる。

次に第 7 図(b)では 1213～1220 UT の間に観測されている急激にドップラーシフトが増加する信号についてその解釈を述べる。この信号は明らかに予測値とは一致せず従って先程の解釈では説明できない事は明らかである。

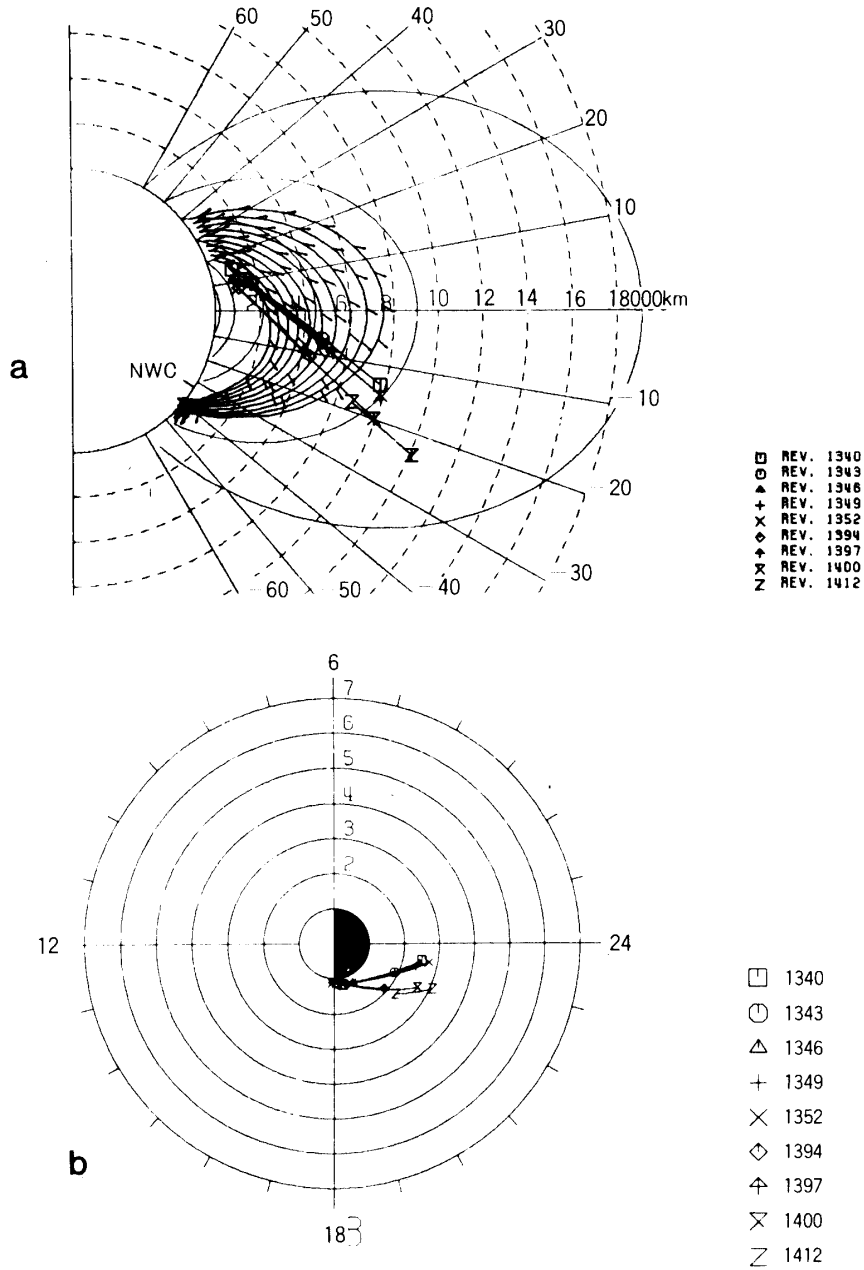
衛星で観測されるドップラーシフトは(1)式で与えられることは既に述べた。ドップラーシフトが大きく変化するのは  $n$ 、既ちプラズマの屈折率が大きい事を意味する。

今、屈折率  $n$  は近似的に



第7図 日没時付近のDPL観測例 (Rev. 1340)

- a. 磁気子午面内を北半球の電離層下端から入射した場合のノンダクト伝搬波のドップラーシフトの予測値
- b. 観測したドップラーシフト
- c. aと逆で南半球で電離層入射する場合のノンダクト伝搬のドップラーシフト予測値



第8図 1979年12月～1980年1月にかけてのDPL観測時における衛星の軌道。a, aは第4図と同様

$$n^2 = 1 + \frac{f_p^2}{f(f_H \cos \psi - f)} \dots\dots\dots(4)$$

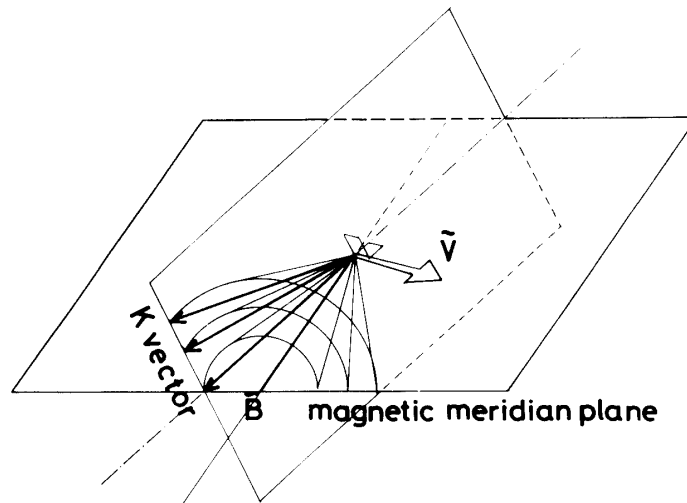
で与えられるから、 $n$ が大きくなるためには $f_p$ が極端に大きくない場合は wave normal angle  $\psi$  が resonance cone angle

$$\psi_{res} = \cos^{-1} \frac{f}{f_H}$$

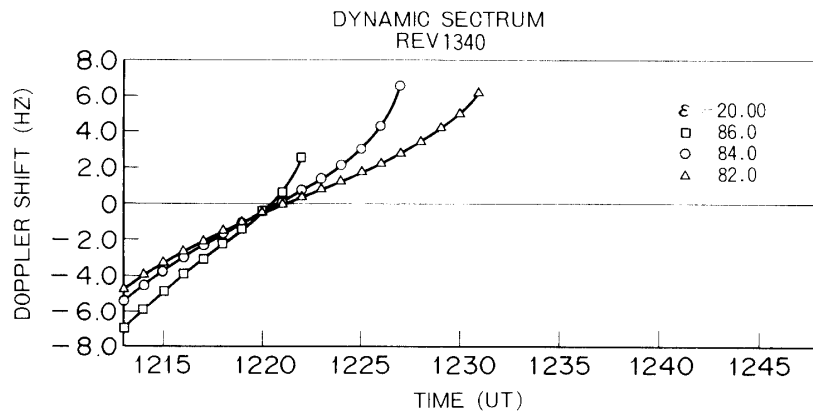
に近くなければならない。図7(b)下帯グラフより  $f/f_H \approx 0.04$  が読取れるから、これより  $\psi_{res}$  は

$$\psi_{res} \approx \pm 88^\circ$$

となる。一方第7図(b)を見れば 1218 UT 頃  $\Delta f = 0$  となっているが図中予測値のカーブからこのとき  $\psi \approx -60^\circ$  であることが読み取れる。 $\Delta f = 0$  となるのは  $V \perp k$  の時で、この条件



第9図 第7図bの1213~1220 UTの時間帯のドップラーシフトを説明する wave normal 方向とロケット速度ベクトルの関係



第10図 wave normal 方向が共鳴角に近いときのドップラーシフトの予測値。□, ⊙, △は wave normal 方向が磁気子午面から西へ  $20^\circ$  傾き、かつ地球磁界となす角がそれぞれ  $86^\circ, 84^\circ, 82^\circ$  で磁力線の外側向きと仮定したときの計算値。

を満たす  $\psi$  は一義的にしか存在しないから先の考察とは明らかに矛盾する。この矛盾はこれまで伝搬ベクトルが磁気子午面内にあると仮定してきたため生じたもので伝搬ベクトルの経度成分 ( $\mathbf{k}$  ベクトルの磁気子午面とのなす角を  $\varepsilon$  とする) を考えることにより観測結果を無理なく説明することができる (第9図参照)。

$\psi = -82^\circ, -84^\circ, -86^\circ, \varepsilon = 20^\circ$  (西向) としたときのドップラーシフト計算値を第10図に示すが観測値の傾向とよく一致している。wavenormal angle が予測値 ( $\psi \approx -40^\circ$ ) に比べ resonance 角近く ( $\approx -85^\circ$ ) になり、しかも伝搬ベクトルが経度方向成分 ( $\varepsilon \approx 20^\circ$ ) を持つような観測結果が得られたのは、観測当時、緯度、経度方向に顕著な電子、イオン密度の変化があったからと考えられる。第8図(a)に衛星の軌道を示したが、衛星は高度 1000 km から 2000 km の間を南に向かって飛んでいて、低緯度から入射された波を受信している。そのため低緯度地方特有の赤道異常による、電子密度の緯度方向勾配が波の伝搬方向に影響を与えることが考えられる。又第8図(b)にローカルタイムから見た衛星の軌道を示すが、ドップラーシフトが急増する信号が得られたのは、日没通過時である。昼側と夜側とは電子密度が異なるため日没時には電子密度の経度方向勾配があり、その結果伝搬方向が経度成分を持つようになったと考えられる。

厳密な波動伝搬の解析を行なうためには、緯度、経度方向の電子密度分布を考慮したモデルの下で3次元 ray tracing を行なう必要がある。しかし、今まで広く用いられ、今回も信号解析に用いて来た ray tracing は伝搬路並びに伝搬ベクトルの経度成分を計算しない磁気子午面中での2次元的な波の伝搬を論じるものであり、こういった場合での解析には用いることができない。そこで新たに3次元 ray tracing [2] を導入し、3次元モデルでの波動解析を行なうことにした。そのことについては次節で述べる。

#### 4. 3次元的な VLF 波伝搬の解析

3次元 ray tracing を用いるに当たって、高度方向には信号解析に用いたと同じ拡散平衡モデルを、緯度方向 ( $\theta$  方向) には、赤道異常を表わすモデルとして

$$\begin{aligned} N_\theta &= 1 + A \exp\left\{-\left(\frac{\theta_0 - \theta_{mN}}{\theta_{WH}}\right)^2\right\} - B \exp\left\{-\left(\frac{\theta_0 - 90^\circ}{\theta_{WL}}\right)^2\right\} \quad 0 < \theta_0 \leq \theta_{mN} \\ &= 1 + A - B \exp\left\{-\left(\frac{\theta_0 - 90^\circ}{\theta_{WL}}\right)^2\right\} \quad \theta_{mN} < \theta_0 < \theta_{ms} \\ &= 1 + A \exp\left\{-\left(\frac{\theta_0 - \theta_{ms}}{\theta_{WH}}\right)^2\right\} - B \exp\left\{-\left(\frac{\theta_0 - 90^\circ}{\theta_{WL}}\right)^2\right\} \quad \theta_{ms} \leq \theta_0 < 180^\circ \\ \theta_0 &= \sin^{-1} \sqrt{\frac{6870}{r}} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

なるモデルを、経度方向 ( $\varphi$  方向) には

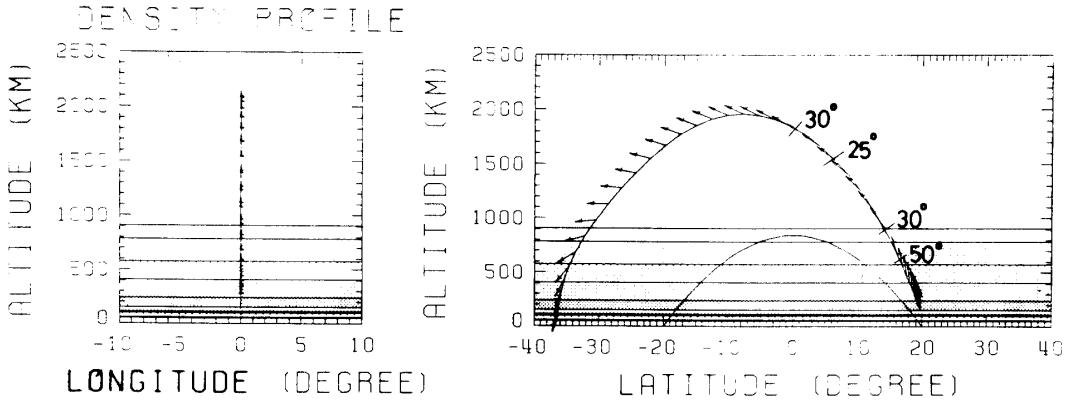
$$N_\varphi = 1 + \frac{D}{\exp(\varphi/C) + 1} \quad (4-2)$$

なるモデルを使用する。

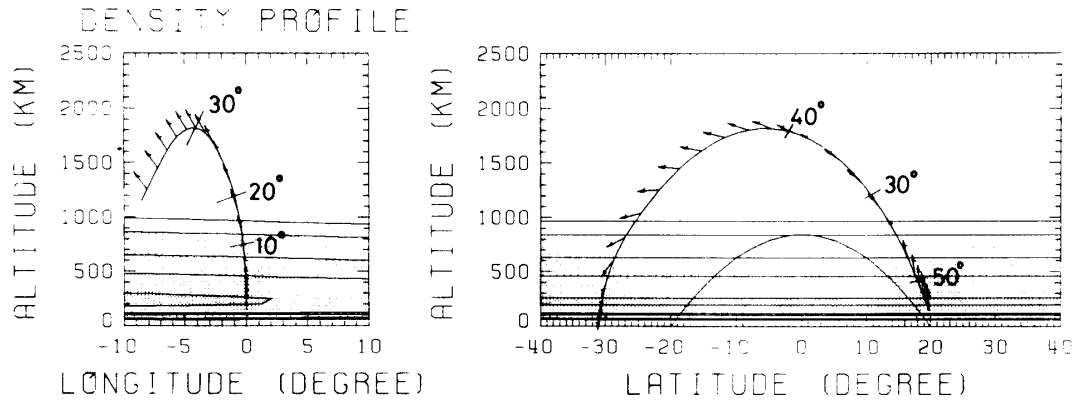
$N_\theta, N_\varphi$  を考慮しないモデルでの ray tracing 計算結果を第11図(a)に、 $N_\varphi$  を考慮した

モデルでの計算結果を同図(b)に示す。入射緯度は  $20^\circ$ 、高度は  $100\text{ km}$  とする。ここで  $C=7.5$ 、 $D=1.0$  としたが、これは磁気経度にして  $30^\circ$  の間に電子密度が半減することを意味する。

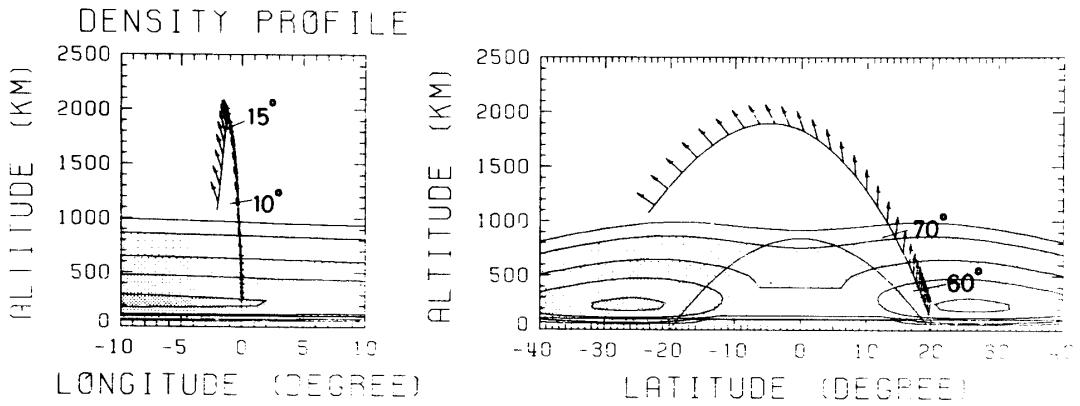
右図は伝搬路および伝搬ベクトルの磁気子午面投影成分を表わす。左図は伝搬路の磁気



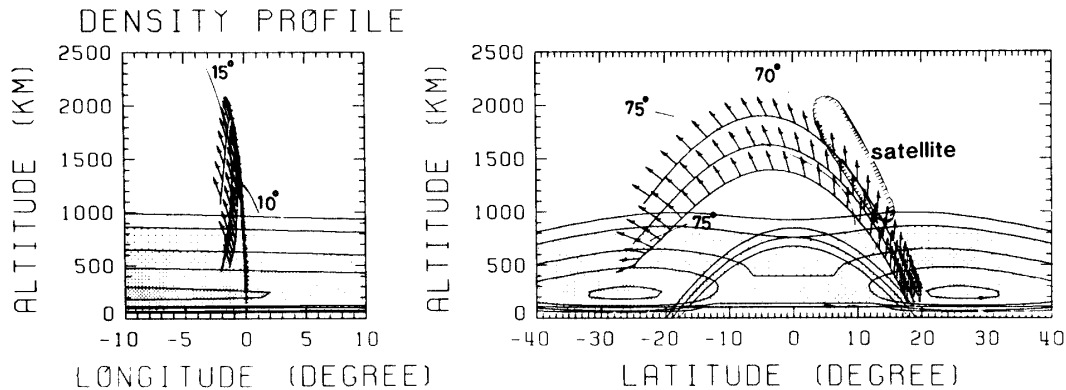
a. 電子密度の基準高さでの緯度、経度方向変化のない場合



b. 経度方向に電子密度の勾配がある場合



c. bに加えて赤道異常を考慮したとき



d. cと同じモデルで入射緯度を $18^\circ$ ,  $19^\circ$ ,  $20^\circ$ とした場合の伝搬路と衛星軌道との関係

第11図 3次元 ray tracing により計算された伝搬通路と wave normal 方向

赤道投影図を表わす。矢印は伝搬ベクトルと磁気子午面とのなす角とを鉛直からの角度で表わしたものであって投影したものではない。wave normal angle  $\psi$  を右図中に、西方傾斜角を左図中に数字で示す。両図中等高線はそれぞれ電子密度の経度、緯度分布を表わしたものである。(b)図左より伝搬路および伝搬ベクトルは西側に向いている様子がわかる。横軸の±符号は東向を正としてある。この傾向は、屈折率が減少する側に波が伝搬する場合、屈折率最大 gradient からはずれるよう伝搬するというスネルの法則により説明することができる。高度最大となる赤道付近では伝搬ベクトルは西向に約 $30^\circ$ 程傾く。

更に  $N_\theta$  をも考慮したときの ray tracing 計算結果について述べる。 $\theta_{mN} = 70^\circ$ ,  $\theta_{mS} = 110^\circ$  とした。 $\theta_{mN}$ ,  $\theta_{mS}$  は基準高度 500 km における電子密度最大となる余緯度を表わす。赤道異常による電子密度ピークは磁場に沿って定義されるから、波の入射高度 100 km において、緯度 $20^\circ$ で入射した波は赤道異常中心の内側(赤道側)より入射することになる。又  $\theta_{wL} = 20$ ,  $\theta_{wH} = 15$ ,  $A = 10$ ,  $B = 10$  とした。これらパラメータは赤道異常中心の電子密度、緯度方向の勾配に関する量である。

結果を第11図(c)に示す。右図より、伝搬ベクトルが磁場の外側へ曲げられ、その結果 wave normal angle が resonance 角に近づく様子がわかる。電子密度の東西傾斜は先の場合と変えてはいないが、伝搬路、伝搬ベクトルの西方傾斜は小さくなっている。屈折率は(4)式で表わされる事から、赤道異常の影響で wave normal angle が resonance cone angle に近づくと同式第2項の分母が小さくなり、屈折率は  $f_H$  即ち磁場によって強く影響されるようになる。従って  $f_p$ 、即ち電子密度の変化は相対的に小さくなり西方傾斜も小さくなったと考えられる。

図(d)に入射緯度 $18^\circ$ ,  $19^\circ$ ,  $20^\circ$ としたときの計算結果を示す。又衛星軌道付近をハッチングで記入した。このモデルの下では衛星は  $\psi = -70^\circ \sim -75^\circ$ ,  $\epsilon = 10^\circ \sim 15^\circ$  の波を受信することになる。1979年12月の観測結果では  $\psi \approx -85^\circ$ ,  $\epsilon \approx 20^\circ$  と観測されている。この値からすれば今の電子密度モデルは観測結果をまだ完全には説明し得るものではないと言えるが、定性的には resonance cone angle に近い伝搬をしようことがわかる。

一方観測結果では、第7図(b)に示したように 1213 UT~1220 UT の上述の off-meridian

伝搬の後、磁気子午面内のノンダクト伝搬のモードが1220～1245 UTまで続いている。この期間はローカル時も夜側にはいり電子密度の経度方向勾配が小さくなったことと、軌道が電離層の赤道異常領域からも離れるためと解釈することが出来る。

## 5. 討論及び結言

EXOS-BのDPL観測装置からのデータを処理した結果、非常に鮮明で、しかもS/Nの良い結果が数多く得られた。このデータを解析した結果以下に示すようなことがわかった。

- i) 採取された観測結果のほとんどは磁気圏中をノンダクト伝搬してきた波動によるものである。又そのうち多くは磁気子午面内伝搬として解釈できる。
- ii) NWC局は南半球にあるが、北半球から入射した波が多く観測されている。この事実は、南半球電離層における波の減衰も重要な要因であるが、それ以上に導波管モードにおける減衰が意外に少ない事を意味している。

iii) 緯度、経度方向に強い電子密度勾配のある媒質中を伝搬してきた波が観測された。

i)に関しては電子温度以外のパラメータはすべて固定した拡散平衡モデルを使つての計算結果と比較した結果であるが、ほとんどすべて予測値と一致することから、ダクトや緯度、経度方向の顕著な電子密度勾配の存在しない媒質中では、その電子密度モデルは、ほぼこのモデルで表わすことができるといえる。

ii)については、本稿では主に波動の伝搬に重点を置いて論じて来たため、夏冬における磁気圏中の減衰の違い、又導波管モードにおける減衰等、波動の強度に関する解析は行なわなかった。佐々木[7]によれば、5 kHzにおける地表伝搬による減衰は2 dB/1000 kmと報告されている。これは北緯20°から入射する波は南緯20°から入射する波に比べ地表伝搬中に9 dBの減衰を受けることを意味する。22.3 kHzの波はさらに減衰が少ないとも報告されている。

DPL観測の本来の目的はダクトモニターであるが、観測されたダクトが少なかったため、あまり十分な結果は得られなかったと言える。しかし上で述べたような観測結果が得られ、今後の研究に新たな材料を提供したことは、本来の役割りを上回る成果を挙げたとと言っても過言ではない。

## 謝 謝

Jikiken DPLの観測運用については、宇宙研河島助教授、村里技官および東北大大家教授、並びにEXOS-B観測班の各位に負う所大であり、ここに厚く謝意を表す。DPLのデータ処理は京大・大型計算センターによって行われた。

## 参 考 文 献

- [1] 木村, 橋本: 宇宙研報告, 15, 711, 1975.
- [2] I. Kimura: Effect of ions on whistler-mode ray tracing, Radio Science, 1, pp. 260—283, 1966.
- [3] 前田, 木村: 電磁波動論, 5章, 8章, オーム社, 1970.



- [ 4 ] J.J. Angerami : Whistler duct properties deduced from VLF observations made with the OGO3 satellite near the magnetic equator, JGR, 75, pp. 6115—6135, 1970.
- [ 5 ] 日野 : スペクトル解析, 朝倉, 1977.
- [ 6 ] I. Kimura : Drifting whistler cut-off phenomena — Straitions — observed by POGO satellites, Space Research XI, Berlin, pp. 1331—1336, 1971.
- [ 7 ] 佐々木 : EXOS/Siple 局波動粒子相互作用実験における Siple VLF 信号の伝搬特性, 昭和57年度修士論文 (京大工).