

極光帯における ELF 放射の到来方向観測

佐藤夏雄*・林 幹治*

Direction Finding of ELF Emissions in Auroral Zone

Natsuo SATO* and Kanji HAYASHI*

Abstract: The observation of arrival direction for elliptically polarized ELF and VLF electromagnetic waves, based on a new method developed by TSURUDA and HAYASHI (1975), was carried out at Syowa Station in Antarctica from March, 1974 to January, 1975. Some preliminary results are described concerning the arrival direction of daytime ELF emissions at the frequency of 0.75 kHz from December 24, 1974 to January 31, 1975. Statistically, the arrival direction depends on local time. The emission is mostly incident from north in the early morning, from south in the late morning, from south-west in the afternoon, and from north-west in the evening. In individual cases, it was often found that the arrival direction remained almost unchanged for several hours, or shifted gradually. The polarization of the emission is generally right-handed and is highly elliptical.

1. は じ め に

昭和基地では各種の ELF, VLF 帯電波放射が観測される。大別すると, (1) 昼間現れるポーラコーラス, (2) 夕方～真夜中, オーロラに伴って現れるオーロラルヒス, (3) 朝方, パッチ状の脈動型オーロラに伴うオーロラコーラスなどがある。(1), (3) は, 夜側から流入した高エネルギー電子が磁気圏の赤道付近で, 電子—サイクロトロン共鳴することにより発生し, (2) は, オーロラ粒子が電離層上部において, チェレンコフ放射により発生していると考えられている。したがって, これらの自然電波は, 磁気圏, 電離圏という巨大なプラズ

* 東京大学理学部附属地球物理研究施設. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

マ実験室で起きている種々の物理現象について有効な情報をもたらす。

昭和基地における自然電波の観測は第7次隊で本格的な観測を開始して以来、多くの成果を上げてきた (HAYASHI *et al.*, 1968; HAYASHI and KOKUBUN, 1971; 林, 1971; KOKUBUN, 1971; KOKUBUN *et al.*, 1969, 1972, 1974; TANAKA, 1972; OGUTI, 1974; SATO and FUKUNISHI, 1973; SATO *et al.*, 1974)。

自然電波の観測で、電波の強度や周波数の情報を得る以外に、電波の到来方向を決定することができれば、磁気圏、電離圏内でのプラズマ運動を探ぐることも可能になり、超高層物理学の研究に重要な情報を提供することになるであろう。

自然電波の到来方向を求める研究は、WATTS (1959) がホイスラーについて、機械的構成によるゴニオメータ法を用い、強度が最小になる方向により、その到来方向を求めたのが最初である。ELLIS and CARTWRIGHT (1959) は、WATTS の方法を用いて、VLF 放射の到来方向を求めた。しかし、ゴニオメータ法は、直線偏波で水平伝播している電磁波に対して有効であるが、垂直入射に近い波や、楕円偏波の波に対して誤差が大きくなる。さらに、ゴニオメータで求めた方位角は ± 180 度の任意性が残るし、天頂角を求めることもできない。BULLOUGH and SAGREDO (1973) はゴニオメータ法により天頂角を求める方法として、ホイスラーのノーズ周波数から、ホイスラーがダクト伝播している磁力線の L 値を求め、それにより、ノーズホイスラーの電離層の出口の天頂角を決定した。しかし、この方法を用いても、垂直入射に近い波や楕円偏波している波に対して誤差が大きくなるというゴニオメータ法の欠点を克服することはできないし、低緯度のように、ノーズホイスラーが観測されにくい地点で、この方法によって天頂角を求めることは非常に困難である。DELLOUE *et al.* (1963) は離れた2点または3点での観測地点で、1つのシグナルを同時に観測し、伝播時間の差により、ホイスラーの到来方向を求めようとした。しかし、この方法では、観測の時間精度が結果に直接反映するわけで、必ずしも現実的な方法でない。TANAKA (1972) は、楕円偏波している波を、2つの直線偏波の波 (TE, TM モードの波) に分離させるために、TM モードだけに関係する垂直電場成分がゼロになる瞬間における磁場2成分値を読み、TE モード成分を除去した。そして、TM モード3成分間の振幅比により、電波の到来を決定した。しかし、この方法も、ELF, VLF 放射のようなランダムノイズに近い電磁波に対して精度が下がり、解析に多くの時間を要するという欠点があった。近年、TSURUDA and HAYASHI (1975) は、垂直電場成分と水平磁場2成分の3成分間で簡単な代数演算をすることにより、TE モード成分の寄与を除去し、到来方向を求めるという新しい測定方法を開発した。この方法によれ

ば、(1) 周波数の広がりのある波であっても同じ点から来ていれば到来方向が定まる。(2) 簡単にアナログ演算化でき、実時間で結果を得ることができる。このように、以前の方探観測に比べるといくつかの点において顕著な改良が行われた。さらに、これらの方法において、電磁波の地面の反射による影響はなく、直接波以外の地面と電離層での多重反射波の影響も、天頂角、方位角の誤差が通常 10 度以内である。

第 15 次南極観測隊では、TSURUDA and HAYASHI (1975) の方法による装置を製作し、昭和基地に設置し、1974 年 3 月～1975 年 1 月の間、受信される自然電波の到来方向観測を行った。この論文では以下、測定原理、観測システム、および現在までに得られた解析結果について述べる。

2. 測定原理

ここではまず、TSURUDA and HAYASHI (1975) にしたがって原理を簡単に紹介し、さらに誤差についての検討を行う。

ELF, VLF 帯の電磁波に関して、われわれが地上で観測できるのは、垂直電場成分と水平

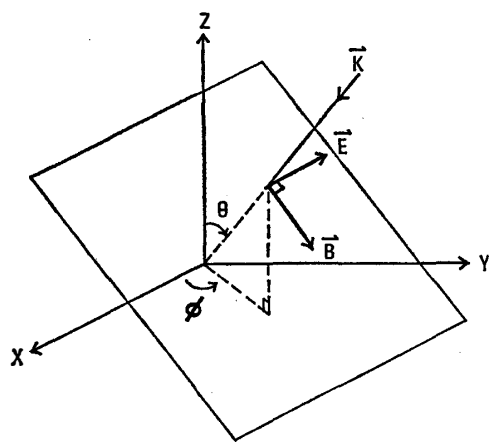


図 1(a) TEモード波の電場 \vec{E} 、磁場 \vec{B} 、伝播ベクトル \vec{k} 、天頂角 θ 、方位角 ϕ との関係。電場成分が XY 平面と平行である。

Fig. 1(a). Relation among electric field (\vec{E}), magnetic field (\vec{B}) propagation vector (\vec{k}), incident angle (θ) and azimuthal angle (ϕ) in TE mode wave. In this mode, electric field is parallel to XY plane.

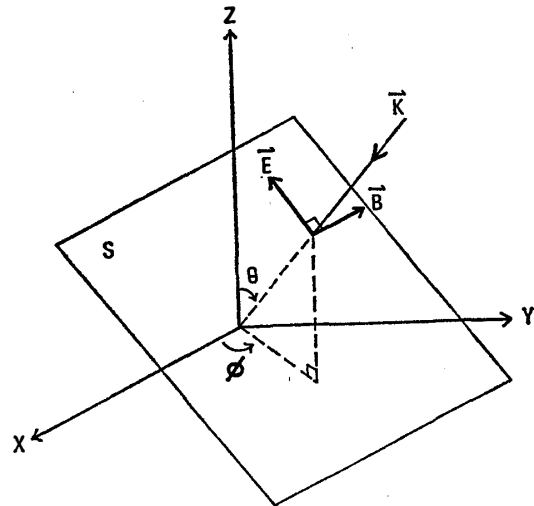


図 1(b) TM モードの関係を示す。磁場成分が XY 平面と平行である。

Fig. 1(b). Relation in TM mode wave. In this mode, magnetic field is parallel to XY plane.

磁場 2 成分であるのでこれらの成分について注目する。一般に、楕円偏波している場合に電場成分が地面と平行な TE モードの直線偏波成分 (図 1a) と磁場成分が地面と平行な TM モードの直線偏波成分 (図 1b) に分解できる。垂直電場には TE モードが含まれないので、水平磁場成分中の TE モード成分の寄与をなくすることができれば、TM モードについて波の伝播ベクトル \vec{k} を求めることが期待できる。TE モード波の寄与は以下に述べるような簡単な代数計算によって除くことができる。反射波が存在する場合でも同じように考えることができるので、ここでは簡単のために反射波は無視する。

2.1. TE モード波

TE モード波の 3 成分

$$\begin{cases} E_z = 0 & (1) \\ B_x = B_{TE} \cos \theta \cos \phi \cos (\omega t + \alpha) & (2) \\ B_y = B_{TM} \cos \theta \sin \phi \cos (\omega t + \alpha) & (3) \end{cases}$$

となる (図 1a)。

ただし、 B_{TE} ; TE モード波の磁場振幅の絶対値

θ ; 天頂角

ϕ ; 方位角

ω ; 角振動数

α ; TM モードとの初期位相差であり、楕円偏波の偏波率を表す。

2.2. TM モード波

TM モード波の 3 成分

$$\begin{cases} E_z = E_{TM} \sin \theta \cos \omega t & (4) \\ B_x = -B_{TM} \sin \phi \cos \omega t & (5) \\ B_y = B_{TM} \cos \phi \cos \omega t & (6) \end{cases}$$

となる (図 1b)。

ただし、 E_{TM} ; TM モード波の電場振幅の絶対値

B_{TM} ; TM モード波の磁場振幅の絶対値。

実測される電磁波は TE モードと TM モードの重ね合わせであるから、次のように表せる。

$$(E_z)_{\text{observed}} \equiv E_z = E_{TM} \sin \theta \cos \omega t \equiv A \cos \omega t \quad (7)$$

$$(B_x)_{\text{observed}} \equiv B_x = B_{TE} \cos \theta \cos \phi \cos (\omega t + \alpha) - B_{TM} \sin \phi \cos \omega t \equiv B \cos (\omega t + \alpha) - C \cos \omega t \quad (8)$$

$$(B_y)_{\text{observed}} \equiv B_y = B_{TE} \cos \theta \sin \phi \cos (\omega t + \alpha) + B_{TM} \cos \phi \cos \omega t \equiv D \cos (\omega t + \alpha) + E \cos \omega t \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし, } A &= E_{TM} \sin \theta \\ B &= B_{TE} \cos \theta \cos \phi \\ C &= B_{TM} \sin \phi \\ D &= B_{TE} \cos \theta \sin \phi \\ E &= B_{TM} \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

これら受信された3成分の信号についてそれぞれ位相を $\pi/2$ 進めたものを $\hat{E}_z, \hat{B}_x, \hat{B}_y$ と表すと,

$$\hat{E}_z = -A \sin \omega t \quad (11)$$

$$\hat{B}_x = -B \sin (\omega t + \alpha) + C \sin \omega t \quad (12)$$

$$\hat{B}_y = -D \sin (\omega t + \alpha) - E \sin \omega t \quad (13)$$

(E_z, B_x, B_y) 3成分と $(\hat{E}_z, \hat{B}_x, \hat{B}_y)$ 3成分との間で次の演算を行う.

$$E_z \cdot \hat{B}_x - \hat{E}_z \cdot B_x = -AB \sin \alpha \quad (14)$$

$$E_z \cdot \hat{B}_y - \hat{E}_z \cdot B_y = -AD \sin \alpha \quad (15)$$

$$B_x \cdot \hat{B}_y - \hat{B}_x \cdot B_y = (BE + CD) \sin \alpha \quad (16)$$

(14)~(16) を用いて以下の演算を行う.

$$\frac{E_z \cdot \hat{B}_x - \hat{E}_z \cdot B_x}{B_x \cdot \hat{B}_y - \hat{B}_x \cdot B_y} = \frac{-E_{TM}}{B_{TM}} \sin \theta \cos \phi \quad (17)$$

$$\frac{E_z \cdot \hat{B}_y - \hat{E}_z \cdot B_y}{B_x \cdot \hat{B}_y - \hat{B}_x \cdot B_y} = \frac{-E_{TM}}{B_{TM}} \sin \theta \sin \phi \quad (18)$$

上の2つの式により, TE モード波の振幅は現れていない.

一方, Maxwell の方程式

$$c \operatorname{rot} E_{TM} = -\frac{\partial B_{TM}}{\partial t} \quad (19)$$

により, (17), (18) 式は,

$$\frac{E_z \cdot \hat{B}_x - \hat{E}_z \cdot B_x}{B_x \cdot \hat{B}_y - \hat{B}_x \cdot B_y} = \sin \theta \cos \phi \equiv k_x \quad (17)'$$

$$\frac{E_z \cdot \widehat{B}_y - \widehat{E}_z \cdot B_y}{B_x \cdot \widehat{B}_y - \widehat{B}_x \cdot B_y} = \sin \theta \sin \phi \equiv k_y \quad (18)'$$

(17)', (18)' はそれぞれ伝播ベクトルの水平成分そのものである。したがって、(17)', (18)' の演算を行うことにより、波の到来方向を求めることができる訳である。ただし、(17)', (18)' の演算を行う際、分母がゼロになる場合には、この観測方法を用いることが不可能になる。分母がゼロになるときの物理的意味は、(16) から明らかなように、 θ が 90 度に近づく、すなわち水平入射に近い場合と、 α がゼロに近づく、すなわち直線偏波に近づく場合とであり、そのとき観測誤差は大きくなるので注意を要する。

今までの演算は、 E_z , B_x , B_y の 3 系統間の相互位相差をゼロとして行った。しかし、3 系統独立の観測器を用いて実際の観測を行うため、演算を行う前の 3 成分間に位相ズレが生じている可能性がある。そこで、観測器械による位相ズレを含む時、上記の演算でどの程度の誤差が生ずるかを求める必要がある。

今、 B_x , B_y が E_z と観測器により位相 β ずれていたとする。ただし、 B_x と B_y は同一な観測器であるため位相ズレはないものとする。この時、(7)~(9), (11)~(13) 式は、

$$\begin{cases} E_z = A \cos(\omega t + \beta) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} B_x = B \cos(\omega t + \alpha) - C \cos \omega t \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} B_y = D \cos(\omega t + \alpha) + E \cos \omega t \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \widehat{E}_z = -A \sin(\omega t + \beta) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \widehat{B}_x = -B \sin(\omega t + \alpha) + C \sin \omega t \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \widehat{B}_y = -D \sin(\omega t + \alpha) - E \sin \omega t \end{cases} \quad (25)$$

(20)~(25) 式を用いて、(14)~(16), (17)~(18) と同様な演算を行う。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{E_z \cdot \widehat{B}_x - \widehat{E}_z \cdot B_x}{B_x \cdot \widehat{B}_y - \widehat{B}_x \cdot B_y} &= \frac{\sin \theta \cos \phi \sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha} + \frac{B_{TM} \tan \theta \sin \phi \sin \beta}{B_{TM} \sin \alpha} \equiv k_x' \end{aligned} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{E_z \cdot \widehat{B}_y - \widehat{E}_z \cdot B_y}{B_x \cdot \widehat{B}_y - \widehat{B}_x \cdot B_y} &= \frac{\sin \theta \sin \phi \sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha} - \frac{B_{TM} \tan \theta \cos \phi \sin \beta}{B_{TM} \sin \alpha} \equiv k_y' \end{aligned} \right. \quad (27)$$

(26), (27) 式により、見かけ上の伝播ベクトル k_x' , k_y' と真の天頂角 (θ) と方位角 (ϕ) との関係は次のように表せる。

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \theta &= \frac{\sqrt{(K+a)^2 + b^2} - \sqrt{(K-a)^2 + b^2}}{2a} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tan \phi &= \tan(\phi' + \gamma) \end{aligned} \right. \quad (29)$$

ただし,

$$\begin{cases} a = \sin(\alpha - \beta) / \sin \alpha \\ b = B_{TM} \sin \beta / B_{TE} \sin \alpha \\ K = \sqrt{k_x'^2 + k_y'^2} = \sin \theta' \\ \tan \phi' = k_y' / k_x' \\ \tan \gamma = b / a \cos \theta \end{cases}$$

今回の観測システムで予想される β の値は 3 章のイコライザーで示すが, 0.75 kHz で約 3 度である. そこで, (28), (29) 式における θ' , ϕ' と θ , ϕ との関係を $\beta=3$ 度, $B_{TM}/B_{TE}=1$ として計算した結果が図 2, 図 3 である. この結果より, θ' に関して, $\alpha=5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ の各楕円偏波に対して, 真の天頂角 θ が 50, 65, 70 度以下の場合には θ' の値が θ に近い. 方位角 ϕ に関しては, θ 依存性は小さく, α が 10 度以上の楕円偏波の時に誤差が小さくなる. 以上のことから, $\alpha \gg \beta$ であれば, 誤差の小さい方探観測が可能であると言える. 次章で示すが, 偏波率 α の大きさも同時観測しているので測定誤差の目安になる. なお, 位相ズレによる誤差以外に, 乗算器のダイナミックレンジが狭いために, 演算部により生じるものがある.

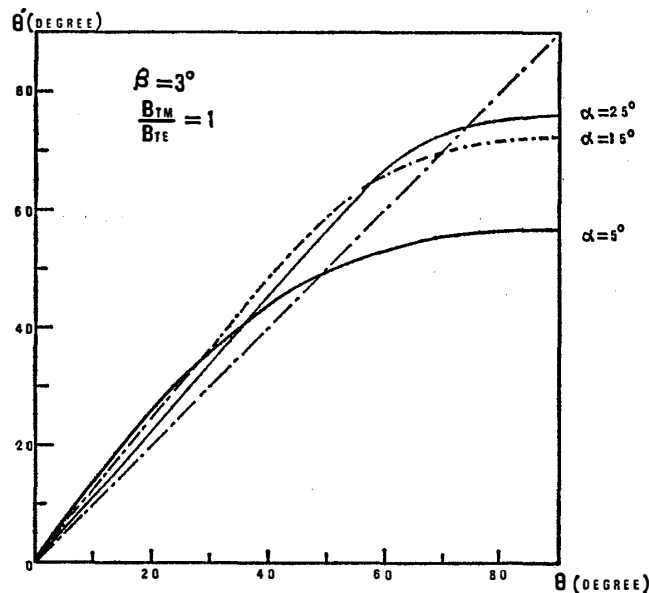


図 2 電場と磁場との位相ズレ $\beta=3$ 度で, $B_{TM}/B_{TE}=1$ のとき, 真の天頂角 θ (横軸) と, 見かけ上の天頂角 θ' (縦軸) との関係を, 偏波率 α が 5, 15, 25 度について表す.

Fig. 2. Corrections for the incident angle (θ') due to errors in phase angle of the receiving system.

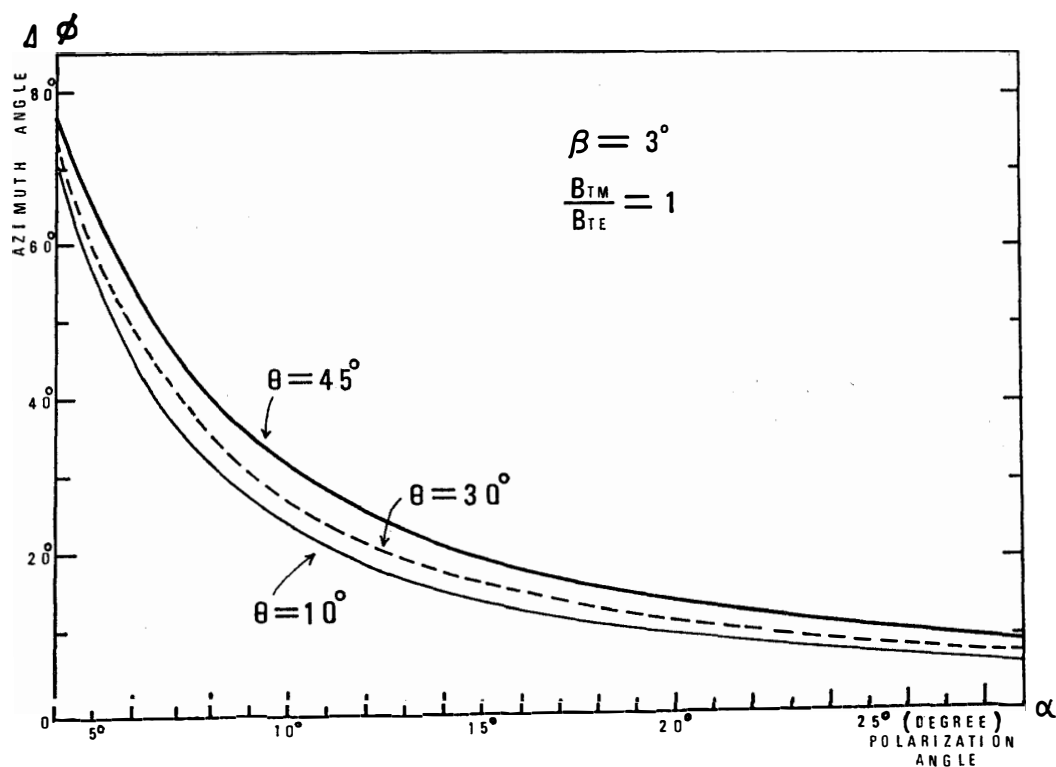


図 3 方位角の誤差 $\Delta\phi$ を、偏波率 α と天頂角 θ の関係で表す。

Fig. 3. Corrections for the azimuthal angle ($\Delta\phi$) due to errors in phase angle of the receiving system.

3. 観測システム

3.1. 観測システムの概要

観測システムのブロック図を図 4 に示す。電磁波の垂直電場成分 (E_z) は垂直アンテナに

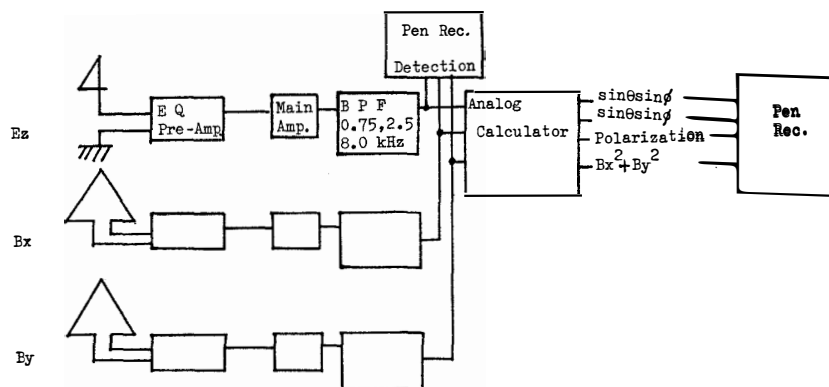


図 4 観測システムの概要を示したブロック図

Fig. 4. Block diagram of the receiving system.

より受信し、水平磁場 2 成分 (B_x, B_y) はループアンテナにより受信する。受信されたシグナルはイコライザー回路により、3 成分間の振幅比、位相差がアンテナで受信する以前と等しくなるように補正する。イコライザーを通ったシグナルは前置増幅器により増幅され、550 m 離れた主増幅器に入る。増幅されたシグナルは狭帯域バンドパスフィルターにより 0.75, 2.5, 8.0 kHz のうちの任意の 1 つの周波数が選ばれる。バンドパスフィルターを通ったシグナルは演算器 (analog calculator) に入る。演算器により、水平伝播ベクトル $k_x (\sin \theta \cos \phi)$, $k_y (\sin \theta \sin \phi)$ や偏波率 ($\sin \alpha$) の値が DC 電圧で現れる。この出力がペンレコーダによりチャート紙に記録される。なお、3 成分の広帯域シグナルを FM データレコーダに同時録音した。

3.2. アンテナ系

観測棟から見晴らし岩方向 550 m 地点に、方探観測用アンテナを新設した。垂直電場成分を受信するアンテナは高さ 3 m のホイップアンテナである。カウンターポイズは正六角形で対角線の長さが 8 m、中心から 36 本の銅線を張りめぐらした。このホイップアンテナの静電容量は計算値で 39.9 pF である。水平磁場 2 成分を受信するアンテナは直交するループアンテナで、底辺の長さが 20 m、高さが 10 m の三角形で 2 ターンしたエレメントである。地磁気の東西方向に張ったエレメントを B_x 成分に、南北方向に張ったエレメントを B_y 成分とした。この 2 つのループアンテナの実効面積 200 m²、インダクタンス 230 μ H、直流抵抗 0.3 Ω である。

3.3. イコライザー系

電磁波の電場成分が E である場合、垂直電場成分 (E_z) を受信する長さ l 、静電容量 C_a の垂直アンテナは、 lE_z の大きさを持つ電源に C_a を直列した回路と等価である。ループアンテナにより受信する水平磁場成分は、インダクタンス L_a 、直流抵抗 r_a 、電源電圧 V_l を直列にした回路と等価である。 V_l の値は、電磁波の電場成分を E 、アンテナの実効面積を S_a 、光速を v_0 とすると、

$$V_l = -j\omega(S_a/v_0) \cdot E$$

となる。

この垂直アンテナとループアンテナの等価回路の違いを、イコライザーにより 3 成分間の振幅比、位相差がアンテナで受信する以前と等しくなるように補正する。

今回の観測に用いたアンテナ系を含んだイコライザー回路の振幅、位相特性の計算値を

図 5, 6 に示す. この図に表れた誤差の大部分は, ループアンテナ系の入力トランスにより生じる. その他, アンテナ系とプリアンプとの結線の関係で入った部分もある.

図 5 イコライザ回路における E_z と B_x, B_y の振幅特性.

Fig. 5. Frequency-amplitude response of the equalization systems (E_z , B_x and B_y) to incident waves.

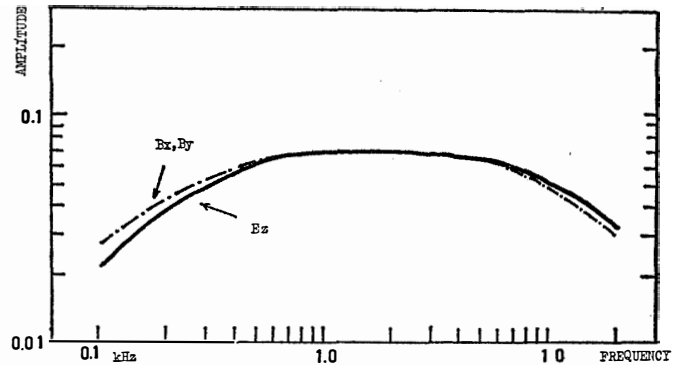
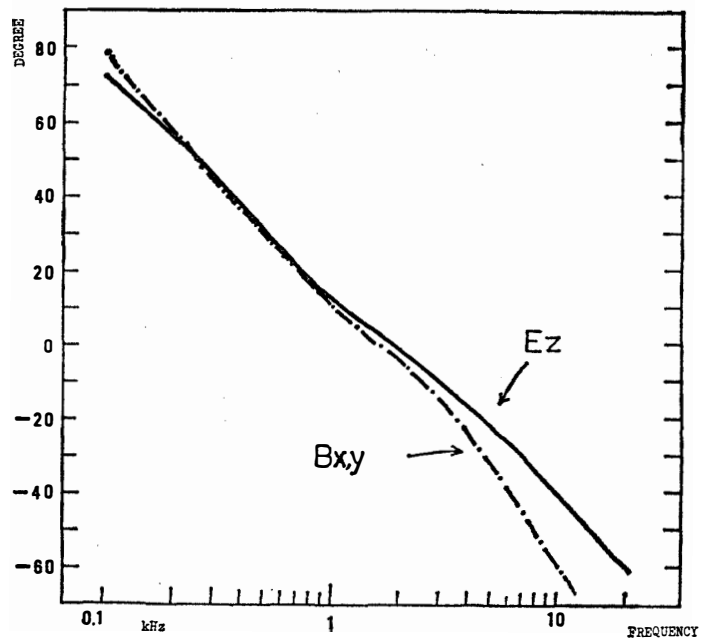


図 6 イコライザ回路における E_z と B_x, B_y の位相特性.

Fig. 6. Frequency-phase response of the equalization systems to incident waves.



3.4. 演算器 (analog calculator)

演算器のブロック図を図 7 に示したが, 3 成分のシグナルは移相器により, E_z 成分は 45 度 (E_z'), B_x 成分は 45 度 (B_x') と 135 度 (B_x''), B_y 成分は 135 度 (B_y'') それぞれ位相が遅れる. このシグナルは $(E_z') \times (B_x'')$, $(E_z') \times (B_y'')$, $(B_x') \times (B_y'')$ 等の掛算が行われた後, ローパスフィルターを通る. この回路の演算を 2 章の記号を用いて書くと, 掛算器により,

$$(E_z') \times (B_x'') = -\frac{AB}{2} \{ \sin(2\omega t + \alpha) - \sin \alpha \} + \frac{AC}{2} \sin 2\omega t$$

この掛算の出力をカットオフ周波数が ω_0 ($\ll \omega$) のローパスフィルターを通すと,

$$(E_z') \times (B_x'') \rightarrow \frac{AB}{2} \sin \alpha$$

となり, (14)~(16) 式と同等な結果になる. さらにこの出力は割算器により, (17)', (18)' 式と同等な k_x , k_y や $\sin \alpha$ が得られる.

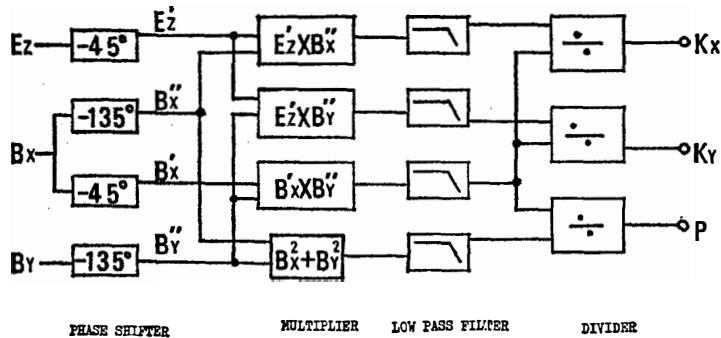


図 7 演算器 (analog calculator) 回路のブロック図.

Fig. 7. Schematic illustration of the analog calculator.

4. 観 測 結 果

0.75 kHz バンドでの ELF 放射の到来方向について 40 日間の解析結果が得られた. 最初に, event 的な特徴を示し, 次に統計的な性質を述べる.

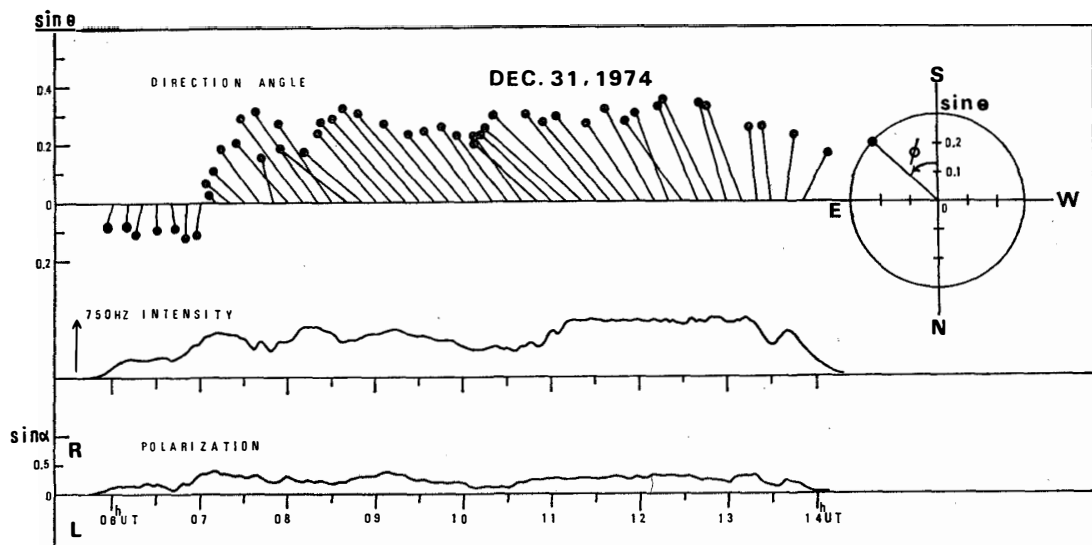


図 8 上段が到来方向の天頂角 $\sin \theta$ と方位角 ϕ を 10 分平均した値. 中段が 0.75 kHz 放射強度. 下段が偏波率 $\sin \alpha$ で, R は右廻り偏波, L は左廻り偏波. この図は, 08h ~ 13h まで, 到来方向がほぼ一定である例である.

Fig. 8. The upper pannel shows 10 minute average values of arrival direction of 0.75 kHz ELF emissions. The middle pannel shows the emission intensity and lower pannel shows polarization angle. R, $\sin \alpha = 1$, and $\sin \alpha = 0$ denote right handed polarization, circular polarization, and linear polarization, respectively. Arrival directions between 08h UT-11h UT on December 31, 1974 are almost unchanged.

—Dec. 31, 1974 event (図 8)—

図 8 は、0.75 kHz バンド ELF 放射の到来方向を上段に、強度を中段に、偏波率を下段に表す。到来方向は方位角 ϕ (地磁気の南から東に向かう角) と天頂角 θ (天頂から地平線方向の角を θ とし、 $\sin \theta$ で表示) を 10 分間平均した値で示した。なお、昭和基地での地磁気の南は地理的南より約 45 度東にある。この日の ELF 放射 (ポーラコーラス) は 05h 50m UT (~MLT) 頃に強くなり始めて以来 14h 20m UT 頃まで約 8 時間半受信された。到来方向は、06h~07h には天頂に近い北方から到来している。07h 10m 頃には、天頂を通り南東方向へ移る。07h 10m~08h 00m まで、方位角は南東方向と変化しないが、天頂角が大きくなる。08h~13h までの 5 時間、方位角、天頂角がほぼ一定である。このように長時間一定方向から到来するのは、放射の源が 5 時間余り、地球と“corotation”していると考えられる。13h~14h の放射強度が弱まる時の到来方向は、南東から南西へと西側へ移動する。図の下段は平均的な偏波率 $\sin \alpha$ を表すが、磁力線の方角に対して右廻りに回転する波を R、左廻りに回転する波を L とした。この図から、ELF 放射は偏波率 α が 30 度以下の右廻りに楕円偏波した波である。

—Jan. 30, 1975 event (図 9)—

05h UT~19h UT まで ELF 放射が続く。05h~06h UT の間、南方から到来していたが、06h 10m 頃に強度が弱まる。再度強度の増した 06h 30m 頃の到来方向は以前とは逆方向の北方で、かなり天頂に近い。09h 40m 頃、放射強度がさらに増加するにしたいが、到来方向は

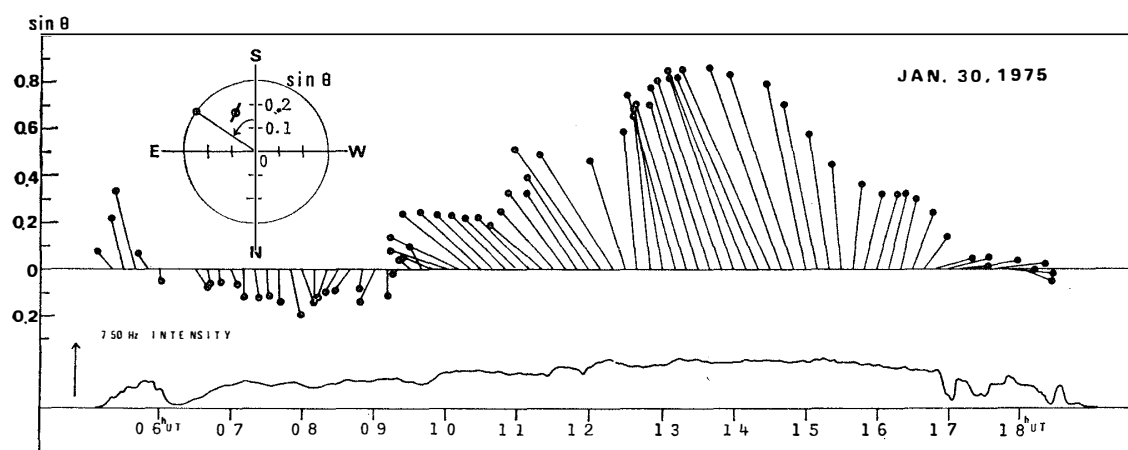


図 9 0.75 kHz 放射の到来方向と放射強度との関係。この図は、10h~11h30m までは到来方向がほぼ一定であり、11h30m~15h30m までは方位角がほぼ一定であるが、天頂角が変化している例である。

Fig. 9. Arrival direction and emission intensity on January 30, 1975.

南東に移動する。10h 20m~11h 30m まで、ほぼ南東方向に固定されているが、11h 30m 以後 14h 30m 頃まで天頂角がしだいに増加を続け、14h 00m には地平線に近づく。方位角はこの間に、しだいに南へ移動する。14h 30m 以後から放射強度の弱まる 19h 頃までの間、天頂角が減少しながら、方位角も南から西へと移動する。

—Dec. 29, 1974 event (図 10)—

この図では到来方向を 4 分間平均値で示してある。特に注目すべきことは、09h UT 前後の現象である。09h 以前の現象に関しては、放射強度が増加を始める 08h 10m 頃の到来方向がほぼ真南であったのが、時間とともに西方へ移動し、09h には、ほぼ真西から到来する。09h 以後は、南東に変わり、再び西へと移動する。この到来方向の移動する現象は次のように解釈できる。ELF の放射源が磁気圏の赤道面付近の離れた 2 点に固定されていて、地球(観測点)が自転により放射源の下を通過するために、到来方向が東から西へ移動する。

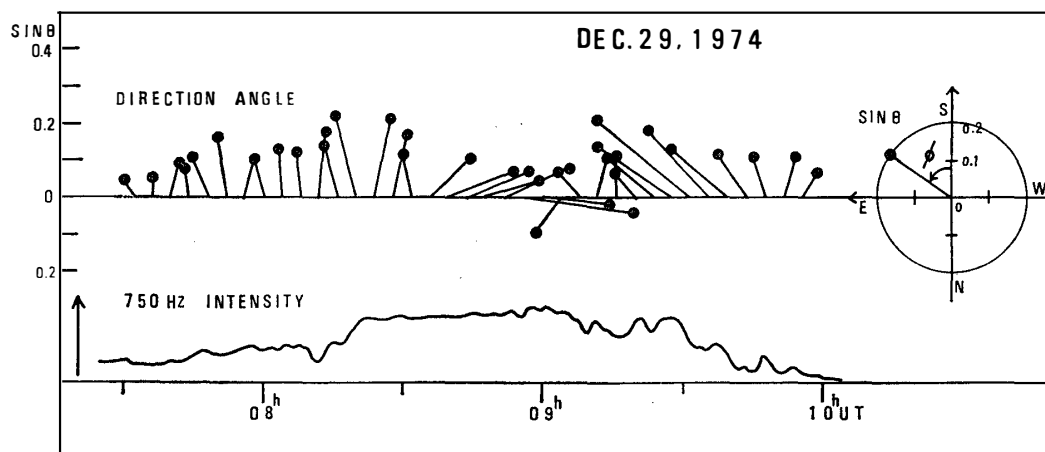


図 10 0.75 kHz 放射の到来方向と放射強度との関係。08h10m~09h および、09h~10h において、到来方向が時間とともに西へ移動する例である。

Fig. 10. Same as for Fig. 9, except for the data on December 29, 1974.

—Jan. 23, 1975 event (図 11)—

10 分間平均した到来方向と、放射強度、偏波率を図 11 に示す。この例で注目すべき現象は、放射強度が増加する 10h 30m から減少する 14h 頃までの間に、到来方向が南東→天頂→北東→南西→西へと移動する。このような到来方向が規則性(ランダムでない)のあるゆっくりと移動する現象を“convective”タイプと呼ぶことにする。一方、05h 30m~07h での到来方向の動きは 10h 30m~14h の動きと比較するとランダムである。07h~10h の到来方向はほぼ一定であり、Dec. 31, '74 の例と同様な“corotative”タイプである。偏波率は 06h~

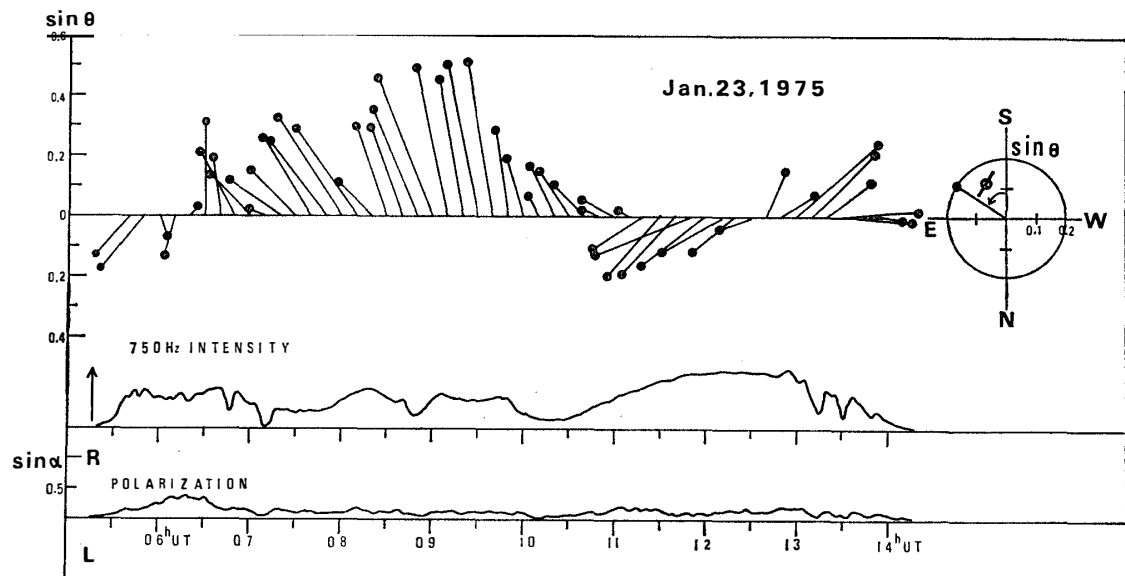


図 11 放射強度と到来方向を示す。到来方向がゆっくり移動しているのが明らかな例。

Fig. 11. Same as for Fig. 8 except for the data on January 23, 1975. In this event, it is clear that the arrival direction displaces slowly during 09h UT–14h UT.

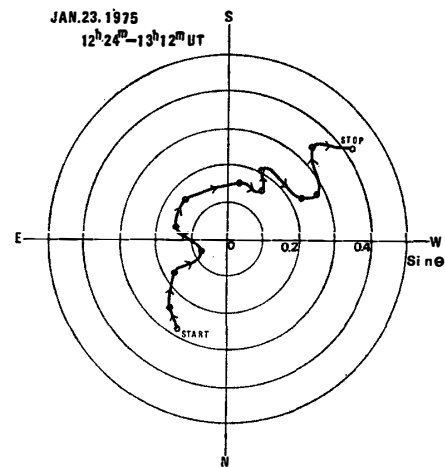


図 12 図 12 の例で、12h24m～13h12m において 4 分間平均した到来方向。

Fig. 12. The locus of 4 minute average values of arrival direction between 12h24m UT～13h12m UT on January 23, 1975.

06h 30m に最も大きくなるが、Dec. 31, '74 の例と同様に、30 度以下の右廻り楕円偏波である。図 12 は、図 11 の中で特に到来方向の移動が明らかなである 12h 24m～13h 12m の間を 4 分間平均した到来方向を示す。

—Jan. 28, 1975 event (図 13)—

特に到来方向の移動が明らかな“convective”タイプの例で、10h～15h での到来方向を 10 分間平均した値を示す。

—統計結果—

Dec. 23, 1974～Jan. 31, 1975 の 40 日間、05h 00m UT～18h 00m UT に 0.75 kHz バンドで

図 13 特に到来方向の移動が明らかな例で、
10h~15h UT において 10 分間平均し
た到来方向。

Fig. 13. The locus of 10 minute average values
of arrival direction between 10h UT-15h
UT on January 28, 1975.

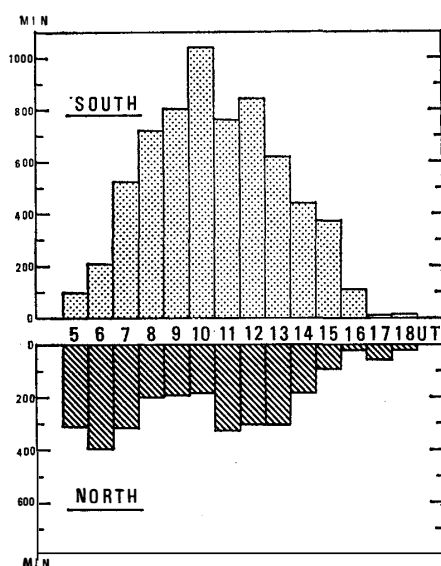
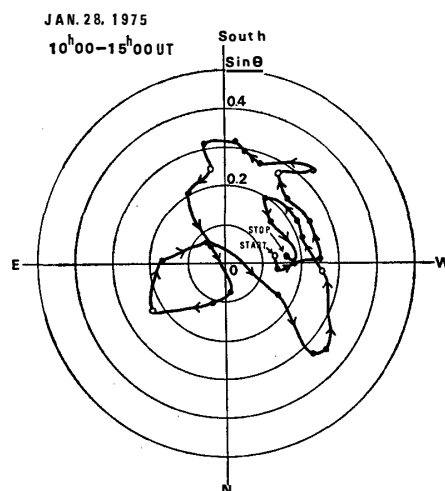


図 14 40 日間の 05h~19h UT 間に受信した
南北方向の統計結果で、各 1 時間内での継続
時間を示す。07h~17h において、南からの
到来が卓越しているのが明らか。

Fig. 14. Local time distribution of arrival
direction of ELF emissions in the north-south
component for 40 days from December 23,
1974.

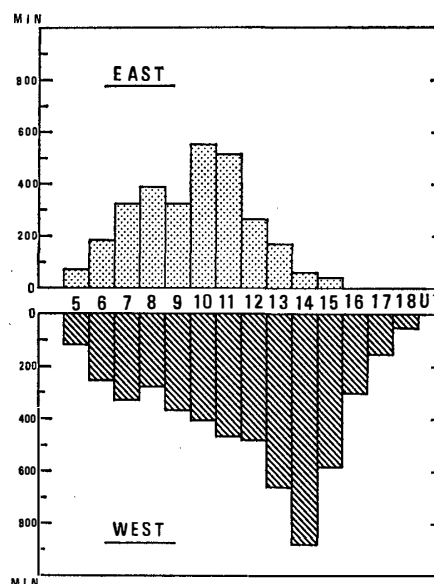


図 15 東西方向に関する到来方向の統計結果。
12h 以後、西からの到来が圧倒的に多くな
る。

Fig. 15. Local time distribution of arrival
direction of ELF emissions in the east-west
component for 40 days from December 23,
1974.

受信した ELF 放射の到来方向の統計を行った。統計は東西南北の各方向別での継続時間を UT (~MLT) 別に行った。地磁気の南北方向からの到来に関する統計結果は図 14 に、東西方向の統計結果は図 15 に示す。図 14 によれば、05h~07h UT の朝方、ポーラコーラスが

受信され始まる時間帯では北方からの到来が卓越する。07h 以後, 17h UT まで, 南方からの到来が北方からの到来よりも圧倒的に多くなる。17h~19h UT の夕方には, 継続時間は短い, 再び北方からの到来が南方より多くなる。図 17 の東西方向の統計結果によれば, 12h UT 以前では東西から同程度の割合で到来するが, 12h UT 以後になると西からの到来が圧倒的に多くなる。以上の統計結果から, ELF 放射の到来方向には地方時依存性が存在することが明らかになった。

5. 考 察

今回の観測は, 新しい観測システムによるものであるから, 解析で得られた 0.75 kHz ELF 放射の到来方向の結果を, 今迄の観測結果と比較してみる必要がある。TAYLOR and GURNETT (1968), OLIVEN and GURNETT (1968), RUSSELL and HOLZER (1970) 等により, 人工衛星で受信した ELF, VLF 放射の発生領域, 地方時間別での受信頻度の統計結果が得られているので, 定性的には昭和基地で受信される放射の到来方向の確率が求まる。ここでは, 図 16 に示した TAYLOR and GURNETT (1968) が Injun 3 衛星で測定した結果と比較してみる。この統計における放射のタイプは, ELF ヒスが 92%, コーラスが 52%, VLF ヒスが 37% である。この図より, ELF ヒスやコーラスは昼間の現象で, 07h~12h LT にピークを持ち, HAYASHI and KOKUBUN (1972) の昭和基地で受信したポーラコーラスの統計結果とは

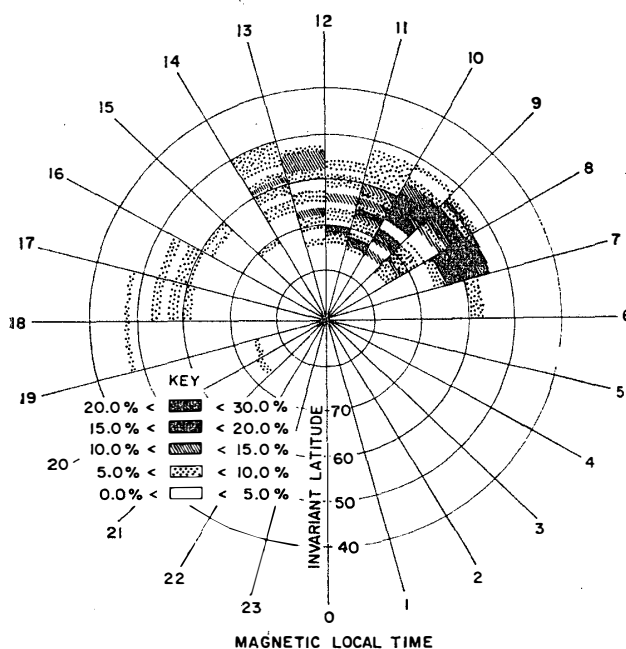


図 16 Injun 3 衛星による ELF, VLF 放射の受信頻度分布 (TAYLOR and GURNETT, 1968)

Fig. 16. The occurrence frequency of ELF emissions with Injun 3 (TAYLOR and GURNETT, 1968).

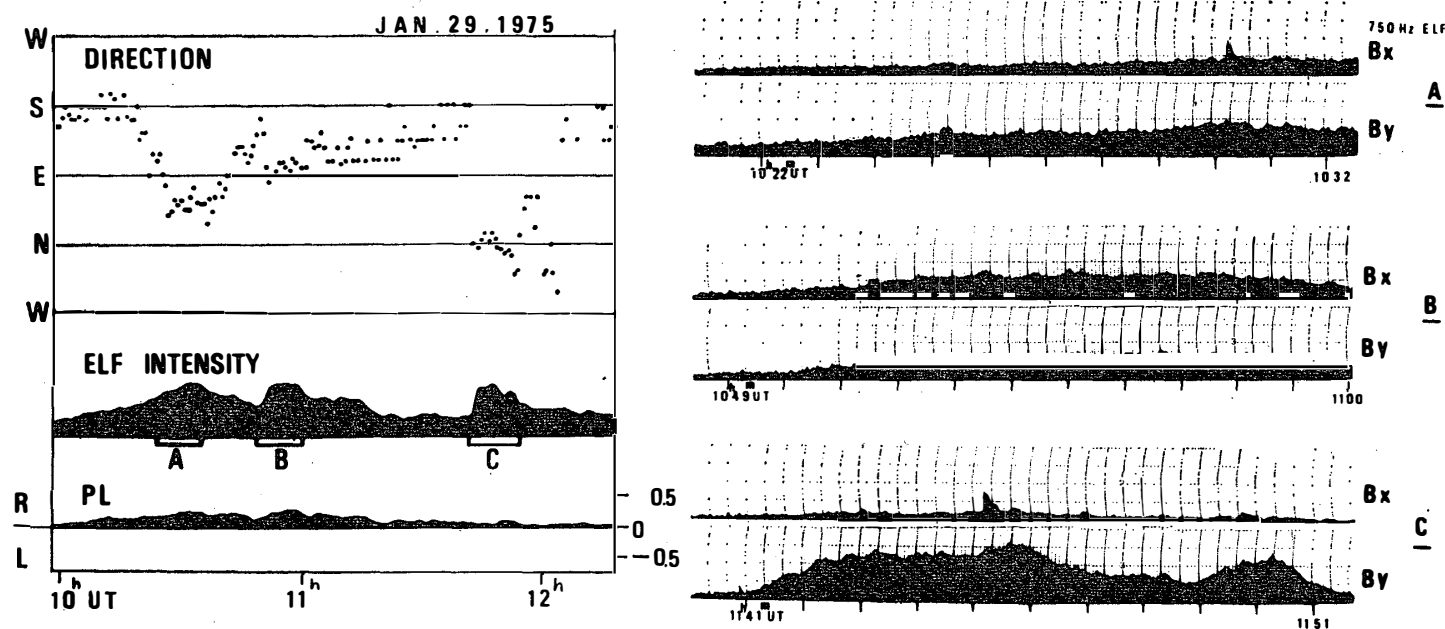


図 17 左図は到来方向の方位角，放射強度，偏波率で，右図は A, B, C の時刻における放射強度の B_x (南北), B_y (東西) 成分

Fig. 17. The left pannel indecates arrival direction, emission intensity and polarization angle at 0.75 kHz. The right pannel shows emission intensity in B_x (N-S) and B_y (E-W) components corresponding to the interval of A, B, and C in the left pannel.

ば一致する。昭和基地の不変緯度 (invariant latitude) は 66.7 度であり、図 16 によれば、定性的に、08h LT 以前は北方から到来し、08h LT~13h LT は天頂や南方で、13h LT 以後再び北方から到来する確率が大きくなる。そこで、図 14 に示した南北方向に関する統計的到來方向を上記の図 16 と比較すると、定性的には一致しているとみなせる。図 15 の東西方向の統計的到來方向の結果で、12h LT 以後、西方からの到来が卓越するのは、ELF 放射の発生源が 07h~12h LT に集中しているためであると解釈できる。

今回の方探装置による結果と、ゴニオメータ法に相当する磁場 2 成分の強度比による方位角と比較してみる。図 17 は、左に 0.75 kHz 放射の方位角、放射強度、偏波率を示し、右図に、A, B, C の時刻での 0.75 kHz 放射強度の B_x (南北方向の磁場)、 B_y (東西方向) 成分を表す。この時、振幅比により期待される方向は、A で北北東、B でほぼ南東、C は北である。今回の方探装置によれば、偏波率は、A, B より C で直線偏波に近く、到来方向の天頂角は、A, B, C の順で大きい。方位角は、A で東北東、B でほぼ西、C は北である。したがって、直線偏波に近くて、天頂角が大きい放射については、方探装置の結果とゴニオメータ法とが定性的に矛盾のない結果を示していることがわかる。

以上のことは、今回の新しい測定方法による電磁波の到来方向観測は、定性的には少なくとも今までの自然電波観測から期待されるものと比べてほぼ矛盾のない結果を示しているものと言えよう。

最後に、今回の観測により、今後改善すべき点として、(1) イコライゼーションを厳密にする、(2) 演算部の精度を上げる、(3) 周波数の選択を自由にできるようにする、(4) 記録方式の改善、(5) 感度の向上、などがある。しかし、17 次観測隊において、(1), (3) は改良がなされ (2), (4), (5) においても、かなり改善がなされている。さらにつけ加えれば、この方探装置に関しても、空電の影響をいかに取り除くかが今後に残された重要な課題である。

なお、今回の解析結果について、期待される磁場の大きさに対する電場の比が小さい傾向にある。この点を考慮すると、天頂角が今回の解析値より大きくなる。したがって、今後電場および磁場のアンテナ系における絶対的な感度校正を行う必要があることを付記しておく。

謝 辞

今回の方探装置の観測実施にあたり、ご指導とご協力をいただきました第 15 次観測隊の皆様、装置製作中にご指導をいただきました東大宇宙航空研究所の鶴田博士、および東大理学部附属地球物理研究施設の皆様に厚く感謝の意を表します。

文 献

- BULLOUGH, K. and J. L. SAGREDO (1973) : VLF goniometer observations at Halley Bay, Antarctica-I. The equipment and the measurement of signal bearing. *Planet. Space Sci.*, **21**, 899-912.
- DELLOUE, J., M. GARNIER, F. GLANGEAUD and P. BILDSTEIN (1963) : La polarisation des sifflements radio-électriques en relation avec leur direction d'arrivée. *Compt. Rend. Acad. Sci., Paris*, **257**, 1131-1134.
- ELLIS, G. R. and C. A. CARTWRIGHT (1959) : Directional observations of noise from the outer atmosphere. *Nature*, **184**, 1307-1308.
- HAYASHI, K., S. KOKUBUN and T. OGUTI (1968) : Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **22**, 149-160.
- HAYASHI, K., and S. KOKUBUN (1971) : VLF emissions during post breakup phase of polar substorm. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **25**, 369-382.
- 林 幹治 (1971) : 第 10 次南極地域観測隊極光・地磁気部門概報—主に VLF エミッションを中心として. 南極資料, **40**, 34-49.
- KOKUBUN, S., K. HAYASHI and T. OGUTI (1969) : VLF emission study at Syowa Station, Antarctica, polar chorus and worldwide geomagnetic variation. *JARE Sci. Rep., Ser. A (Aeronomy)*, **6**, 34 pp.
- KOKUBUN, S. (1971) : Association between quasi-periodic VLF emissions and micropulsation. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **25**, 383-388.
- KOKUBUN, S., K. MAKITA and T. HIRASAWA (1972) : VLF-LF hiss during polar substorm. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **26**, 138-148.
- KOKUBUN, S., T. OGUTI, K. HAYASHI and T. NAGATA (1974) : Auroral VLF emission in Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Special Issue*, **3**, 48-60.
- OGUTI, T. (1975) : Hiss emitting auroral activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 761-768.
- OLIVEN, M. N. and D. A. GURNETT (1968) : Microburst phenomena, 3, an association between microbursts and VLF chorus. *J. Geophys. Res.*, **73**, 2355-2362.
- RUSSEL, C. T., R. E. HOLZER and E. J. SMITH (1970) : OGO 3 observation of ELF noise in the magnetosphere, 2. The nature of the equatorial noise. *J. Geophys. Res.*, **75**, 755-777.
- SATO, N. and H. FUKUNISHI (1973) : Observation of VLF emissions at Syowa Station in 1970-1971, II. Spectral structure of quasi-periodic VLF emissions. *Antarctic Rec.*, **46**, 16-43.
- SATO, N., K. HAYASHI, S. KOKUBUN, T. OGUTI and H. FUKUNISHI (1974) : Relationship between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1515-1526.
- TANAKA, Y. (1972) : VLF hiss observed at Syowa Station, Antarctica-I. Observation of VLF hiss. *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.*, **19**, 33-61.
- TAYLOR, W. L. and D. A. GURNETT (1968) : The morphology of VLF emissions observed with the Injun 3 satellite. *J. Geophys. Res.*, **73**, 5615-5626.
- TSURUDA, K. and K. HAYASHI (1975) : Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves and its application to the low-latitude whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 1193-1202.
- WATTS, J. M. (1959) : Direction finding on whistlers. *J. Geophys. Res.*, **64**, 2029-2030.

(1975 年 12 月 15 日受理)