

極域におけるオーロラヒス放射の到来方向測定

西野正徳*・平沢威男**

Direction Finding of Auroral VLF Hiss in Auroral Zone

Masanori NISHINO* and Takeo HIRASAWA**

Abstract: A newly developed direction finding ('DF') for auroral hiss based on the measurement of time differences of wave arrival among three spaced points was carried out around Syowa Station (geomag. lat. -70.4°), Antarctica in 1978-1979. It has been found that the new DF can determine localized exits of VLF auroral hiss with an accuracy of about 10° . A comparison of the DF results with the ground-based auroral data has shown that impulsive type auroral hiss with a wide-band frequency range has not emerged from the whole region of bright aurora but from some localized regions of bright electron auroras at the ionospheric level, and that the arrival directions of auroral hiss change rapidly in accordance with the auroral movements.

要旨: オーロラの発光と良い相関を持って受信される VLF 帯自然電磁波 (オーロラヒス) の到来方向を測定することは、オーロラヒスの電離層透過点を探知し、その発生、伝搬の研究を行う上で重要である。筆者らは、従来の電磁界解析の 1 点観測法とは異なり、3 点でヒスの到来時間差を計測し到来方向を測定する方式を新たに開発した。この時間差法は、ヒスの波形、偏波特性に影響されず高精度測定が可能であり、また、時間差計測法として、ヒスの相互相関を演算するので VLF 帯空電による妨害を軽減でき、測定の信頼度を向上させることができた。本方位観測システムは南極昭和基地内の 1 点と、そこから約 20 km 離れた 2 点とで構成され、2 系統の 2 GHz 帯テレメータをデータリンクとして用いている。受信された 3 観測点の信号の相互相関関数は、高速データプロセッサにより、リアルタイムに計算され、ヒス到来方向がただちに求められる。ヒスの到来方向観測結果とオーロラ全天写真とを比較することにより、ヒスの到来方向はオーロラ発光領域の活動的な部分とよく一致することが分かり、今後のオーロラヒスの研究に貴重な資料を得た。

1. 緒 言

VLF 帯自然電磁放射は磁気圏および電離層内で発生し、電離層を透過し地上に到来する。

* 名古屋大学空電研究所。Research Institute of Atmospheric, Nagoya University, 13, Honohara 3-chome, Toyokawa 442.

** 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

通常、高緯度地域の極光帯で受信される電磁放射はオーロラヒスと呼ばれる。このヒスの到来方向の測定はヒスの発生領域および伝搬の電離層透過点を探知するために重要であり、TANAKA *et al.* (1976) が1968年南極昭和基地で観測を行った。その方式は12 kHz帯ヒスの電磁界3成分のブラウン管上リサージュ図形から解析する方式である。その後MAKITA (1979) はTSURUDA and HAYASHI (1975) が開発した方式、すなわち電磁界3成分を代数演算して波面の法線方向を求める方式を用いて1976年昭和基地で観測を行った。これらの方式は、1点での電磁界解析のため構成が簡単であるが、測定精度が到来波の偏波、入射角に依存するため測定が不安定である問題がある。また、ヒスを単一周波数の同調受信機で受信するためヒスよりも強度が2桁近くも強いVLF帯空電の振動が残留し、微弱なヒスをマスクする問題もある。したがって解析したデータの信頼性に問題があり、その解釈に不確実性が残る。これらの問題点を解決するため、オーロラヒスの到来方向測定に3点時間差法を採用し、システム設計し、1978-1979年の2年間にわたり、昭和基地周辺において観測を実施した。本論文では時間差法方向測定 (Direction Finding, DF) システムの構成、観測法およびその観測結果について記す。

2. システム構成と測定原理

2.1. オーロラヒスの性質

オーロラヒスのDFシステムを設計する上に必要なヒスの性質を簡単に記す。

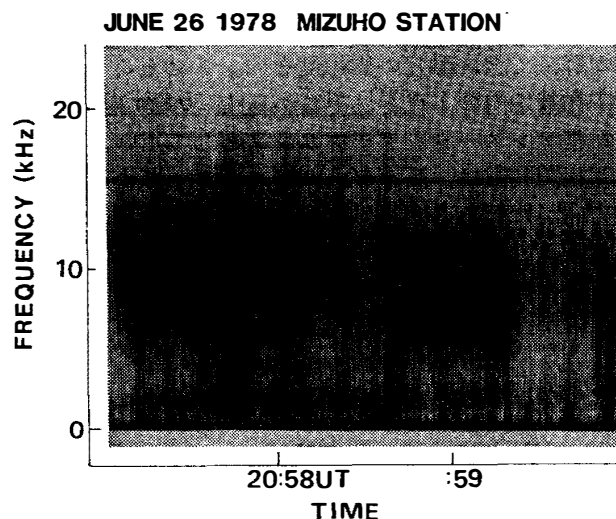


図1 みずほ基地 (Geomag. lat. -72.3° , long. 80.6°) で観測されたオーロラヒスのスペクトル

Fig. 1. Dynamic spectrum of auroral hiss emissions observed at Mizuho Station, Antarctica.

図1に示すごとく、ヒスは VLF-LF 帯に広がる白色雑音の性質を持っており、その帯域は常に変動する。通常 8~10 kHz 付近に最大強度を持つ VLF ヒスが最も発生頻度が高く、南極の3月から10月の冬季において夜間の21時 (Geomagnetic local time, GLT) 前後3時間内にしばしば発生する。継続時間は1~2分間の短時間バーストから数分間のバーストが繰り返し2~3時間も続く場合がある。ヒスの強度はパワーフラックス密度の単位で $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$ の微弱な信号であり、その中で $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$ (電界強度に換算して $0.6 \sim 2 \mu\text{V/m} \sqrt{\text{Hz}}$) の強度のものが最も発生頻度が高い。ヒスは磁気圏、あるいは電離層内で発生し、地球磁力線に沿って電離層内をホイッスラモードで伝搬し地上に到来するので地上でその偏波を測定すると 12 kHz 付近で右旋成分の強い楕円偏波を示す。

2.2. 測定原理

図2の測定座標系において、ヒスが3点 M, S₁ および S₂ 間の距離に比べ遠方から伝搬し、平面波で到来したとすると、2点間 M-S₁ および M-S₂ 間の到来時間差 τ_1, τ_2 を用いて方位角 θ と入射角 i は次式で与えられる。

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{\tau_2}{\tau_1} \frac{d_1}{d_2} \operatorname{cosec} \alpha - \cot \alpha \\ \sin i = c \operatorname{cosec} \alpha \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2}{d_2}\right)^2 - 2\left(\frac{\tau_1}{d_1} \frac{\tau_2}{d_2}\right) \cos \alpha} \end{cases}$$

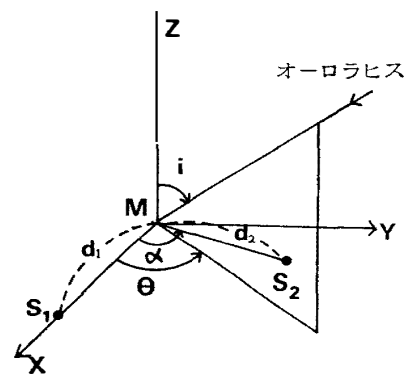
ここで、 c は光速、 α は M-S₁ と M-S₂ のなす角。

前述したごとく、ヒスは VLF 帯の 8~10 kHz 付近で最大の強度を持つ白色雑音の性質を持つので空電のように単一周波数に置き換えた位相差測定はできない。したがって、ヒスに対しては図3に示すごとく、互いに離れた2点で受信されるヒスの相互相関を演算し、相関値 $\phi_1(\tau_1)$ が最大になる遅延時間 τ_1 を到来時間差とした。相関演算から到来時間差を求め

θ : 方位角 i : 入射角 α : M-S₁ と M-S₂ のなす角
 d_1 : M-S₁ 間の距離 d_2 : M-S₂ 間の距離

図2 オーロラヒス到来方向の測定座標系

Fig. 2. Coordinate system of the measurement of direction of wave arrival.



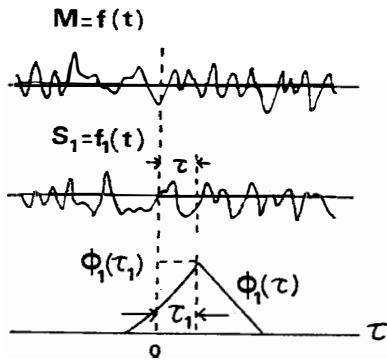


図 3 2 点のオーロラヒス信号の相互相関から到来時間差を求める方法

Fig. 3. Principle of the measurement of differences of arrival time between hiss signals at the two observing points (M and S₁) by cross-correlating the both waveforms.

る本 DF 法の利点は、信号の波形、伝搬における偏波特性に関係なく到来方向が測定されること、また相関処理のため、強度の強い間欠的な空電に対して強度の弱い連続性ヒスの抽出能力が向上することである。

2.3. 観測点の配置

図 4 に本 DF システムに必要な 3 つの観測点の配置と、測定系の構成を示す。南極大陸リュツォ・ホルム湾内の東オングル島昭和基地に M (master point) 点、そこからオングル海峡を渡って南へ約 19 km の大陸ラングホブデ小湊湾奥の露岩地帯 (海拔約 30 m) に S₁ (satellite point) 点、また M 点の東約 18 km の大陸氷上 (海拔約 430 m) に S₂ 点を決め

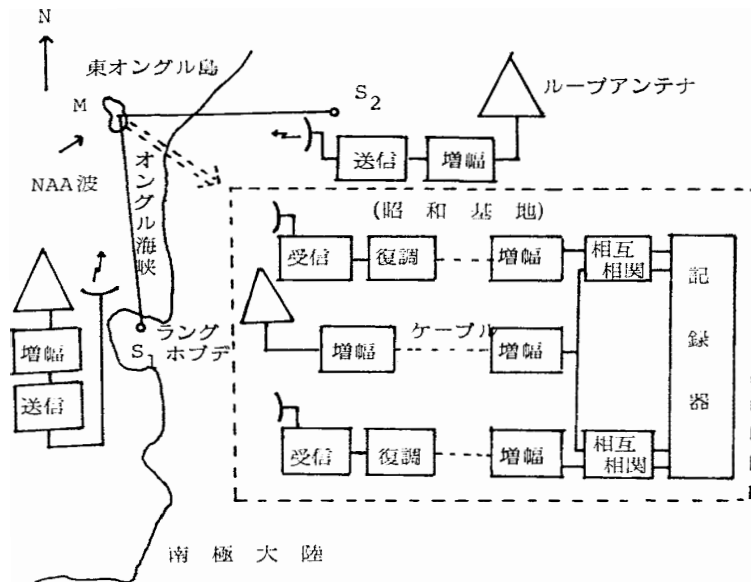


図 4 3 点時間差計測法によるオーロラヒスの DF 観測システム

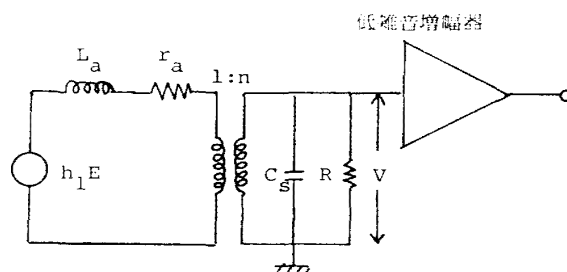
Fig. 4. DF system for auroral hiss based on the measurement of differences of arrival time; configuration of the three spaced observing points (M, S₁ and S₂) and the block diagram of the DF system.

た。S₁ および S₂ 点でのループアンテナによって受信されたヒスの信号は増幅された後、2 GHz 帯テレメータによって東オングル島最高峰の蜂の巣山（海拔 43 m）のテレメータ受信点まで伝送される。テレメータ信号はその場で復調された後、600 m の遮蔽ケーブルで観測室内まで伝送される。一方、M 点（昭和基地）では観測室南南東約 300 m に建てられたループアンテナで受信されたヒスは増幅後直接ケーブルで観測室内に導かれる。このようにして得られた 3 点の信号はヒス受信機によって所要の帯域に制限され、増幅された後、相関器に導かれ処理される。なお、M-S₁ 間の距離は 19.2 km、M-S₂ 間の距離は、18.2 km、それらの基線間の交角は 80 度となった。

2.4. ヒス受信用アンテナと前置増幅部

微弱なオーロラヒスの受信用アンテナには通常大型ループアンテナ（昭和基地では底辺 40 m、高さ 20 m の 3 角形）が用いられてきた。本 DF システムでは 3 点でヒス受信用アンテナが必要である。特に S₁ および S₂ 点へはオングル海峡の海水を経て雪上車で物資、建設要員を輸送するため重量、人手に制限がある。また常時数 m/s の大陸斜面下降風と -20°C 以下にもなる気温、強い吹雪の襲来等を考えるとアンテナの小型化は建設、保守の面から必須条件である。通常、微弱なヒスの信号の受信法はループアンテナで誘起された信号を巻数比の大きい昇圧トランスで昇圧し、その後、高入力インピーダンスの低雑音前置増幅器で増幅する回路方式を採っている。

図 5 のアンテナ結合回路において重要なことは、出力電圧 V と入力電界強度 E との比、すなわち pick-up factor を増加させるため巻数比 n を大きくすることである。しかし、 n を大きくすると昇圧トランス 2 次側のインダクタンスと浮遊容量とで決まる同調周波数が低下し、受信帯域幅を狭くする。本 DF システムでは 10 kHz 前後の VLF ヒスを主として対象



h_1 : ループアンテナ実効高 $((\omega/c)AN)$ (A : アンテナ面の面積, N : アンテナの巻数), E : 入力電界強度, L_a : アンテナ等価インダクタンス, r_a : アンテナ等価抵抗, C_s : 浮遊容量, R : ダンピング抵抗

図 5 アンテナ結合の等価回路

Fig. 5. Equivalent electric circuit of antenna connection.

にするため同調周波数を 10 kHz 付近に決め、広帯域化のためにダンピング抵抗 R を接続した。受信可能最低強度は前置増幅器初段に使用する増幅素子で決まる。用いた FET2SK30 では実測すると入力等価雑音は約 $0.03 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ であったので、この雑音レベルがヒスの最低受信強度 $10^{-16} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz}$ ($0.2 \mu\text{V}/\text{m} \sqrt{\text{Hz}}$) に等しくなる目安で巻数比 n と最小限必要なループアンテナの大きさを決めた。用いたループアンテナの諸元を表 1 に示す。設計した昇圧トランスおよび前置増幅器の回路図を図 6 に示す。アンテナ等価インダクタンスを昇圧トランスの前に置いて測定した V/h_1E の周波数特性を図 7 に、入出力特性を図 8 に示す。なお、本 DF システムにとって重要なことは、3 点のアンテナ—前置増幅器の特性が同一であることであり、そのように調整された。

前置増幅器で約 60 dB 増幅された信号は S_1 および S_2 点においては平衡 2 芯ケーブルでテレメータ筐体内のレベル増幅器に行く。このレベル増幅器はテレメータ送信機の変調入力信号レベル (-25dBm) にまで増幅するトランジスタ広帯域増幅器であり、3 段連続接続で約 50 dB の増幅度を持つ。またレベル増幅器の中には 50 dB の抵抗減衰器を挿入し、広帯域信号の受信レベルを調整する。 S_1 点に設置したループアンテナを図 9 に示すが、その方向は M, S_1 および S_2 の 3 点とも北東—南西方向にアンテナ面を向けた。この理由は、広帯

表 1 VLF オーロラヒス観測用ループアンテナの諸元
Table 1. Characteristics of loop antenna for VLF auroral hiss emissions.

大 き さ	巻 数	等 価 インダクタンス	等 価 抵 抗	実 効 高
底辺 14 m 高さ 8 m	2 回	197 μH	0.17 Ω	2.34 cm (10 kHz)

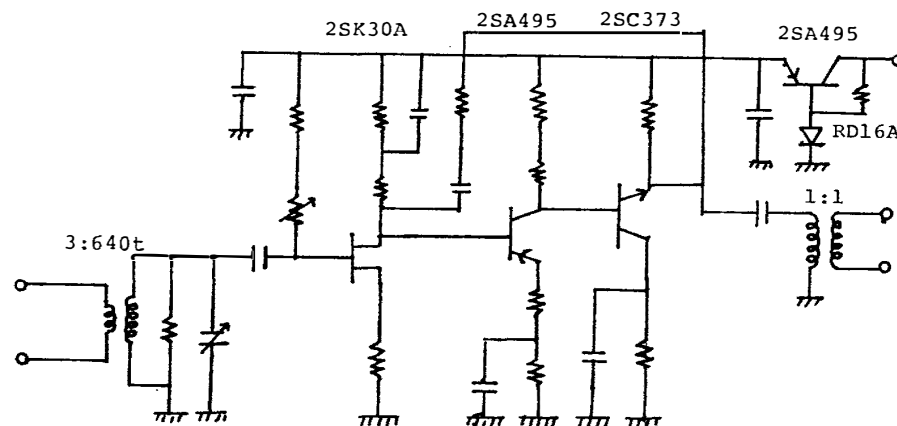


図 6 前置増幅器回路図

Fig. 6. Circuit diagram of pre-amplifier for VLF auroral hiss measurement.

図 7 前置増幅器の周波数—出力電圧の特性
 Fig. 7. Frequency-amplitude characteristics of the pre-amplifier.

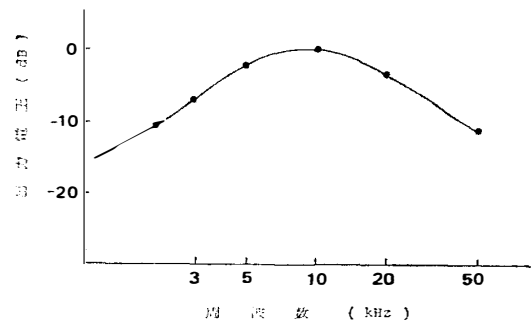


図 8 前置増幅器の入出力特性
 Fig. 8. Relation between input and output voltages of the pre-amplifier.

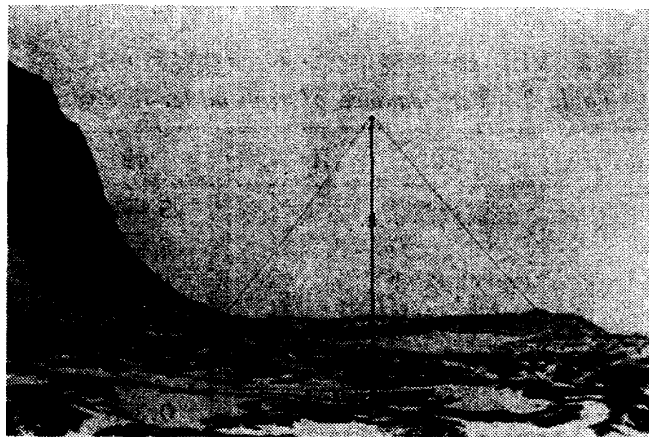
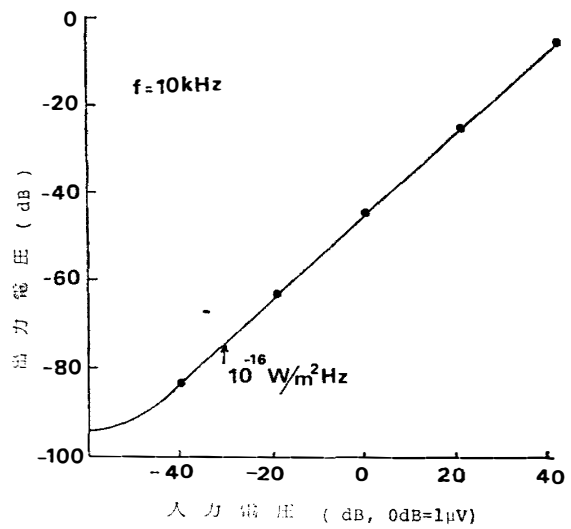


図 9 S₁ 点 (ラングホブデ) の VLF 観測用ループアンテナ
 Fig. 9. Loop antenna set up at the unmanned observing point (S₁), Langhovde.

域信号にはオメガ波 (昭和基地から北方約 6000 km のレ・ユニオン局が強い) と 17.8 kHz の NAA 局波 (北アメリカ東海岸カルターで発信) が強く、前述のごとく、高感度受信の際に、これらの混変調によるビートが 5~10 kHz のヒス受信帯域を妨害するので、レベル増

幅器の抵抗減衰器を調節しながら混変調の生じない方向を実験的に決めたからである。

2.5. テレメータ

VLF-LF 帯の広帯域信号を S_1 および S_2 点から M 点（昭和基地）へ伝送するテレメータとして FM 回線を用いた。テレメータの必要帯域幅 B は電波法令で次式のように決められている。

$$B=2DK+2M.$$

M は最高変調周波数、 K は定数で FM では 1、 D は最大周波数偏移である。 M を 100 kHz とし、また D は変調度 200 kHz rms の変調器を用いた時、ランダム性信号に対して実効値の 4 倍の 800 kHz にとると、結局 $B=1.8$ MHz となる。このような広いビデオ帯域を持てる搬送波としてはマイクロ波を用いるしかない。テレメータ伝送の S/N 比はヒスの到来方向を含めた強度範囲 50 dB にフェージングマージンを考えて 60 dB 以上必要である。このため、送受信アンテナにパラボラアンテナ (1.2 mφ) を用い回線利得を上げ、送信機の低出力化、すなわち低消費電力化に努めた。また、マイクロ波の中でも伝搬損失が少なく、送信機の回路構成が簡単で、フィーダの取扱いが容易である 2 GHz 帯を選択した。用いた日本電気製送信機、T-2GD300 および受信機 R-2GD300 の主要性能を表 2 に示す。

S_1 点では図 10 に示すごとく、岩盤上に 2.75 m の 3 角タワーを建てパラボラアンテナを取り付け、その直下に送信機を置いた。ヒス受信用ループアンテナ (図 9) は送信機より約

表 2 VLF 信号送受信テレメータ装置の主要諸元
Table 2. Performance of transmitter-receiver.

	項 目	特 性
総 合	送信周波数 変調方式 信号伝送帯域 変調度	$S_1 \rightarrow M$ 1987 MHz $S_2 \rightarrow M$ 1859 MHz FM 0.3~100 kHz 200 kHz rms
送 信 部	送信出力 送信周波数安定度	0.3 W $\pm 8 \times 10^{-5}$ 以内
受 信 部	受信局発周波数安定度 受信雑音指数 中間周波数	$\pm 5 \times 10^{-5}$ 以内 7.5 dB 70 MHz
消費電力	送 信 局 受 信 局	4 W 以下 7 W 以下

30 m 離れた。S₂ 点は図 11 に示すごとく、大陸雪面上のため、50 m/s 以上の強風に対してもパラボリアンテナの方向が変化しないよう高さ 5.5 m の三角タワーの 1 m を雪の中に埋め、3 方 2 段ステーをとり、さらにステーアンカーにロープステーを補強した。ループアンテナは送信機より約 15 m 離れた。東オングル島最高峰に建てた昭和基地のテレメータ受信用アンテナは、図 12 に示すごとく、2 台のパラボリアンテナをそれぞれの高さ 5.5 m の三角タワーに取り付け、それらの直下に受信機を置いた。送受信機は、いずれも吹雪・低温から保護するため約 10 cm の厚さの発泡スチロールの断熱材で囲み、鉄の筐体に収納し、さらに毛布で包み、三角タワーに縛った。2 送信点から受信点までの伝搬路はいずれも完全見通しである。表 3 に、S₂→M 回線の回線特性の計算結果を示す。受信点における実測した受

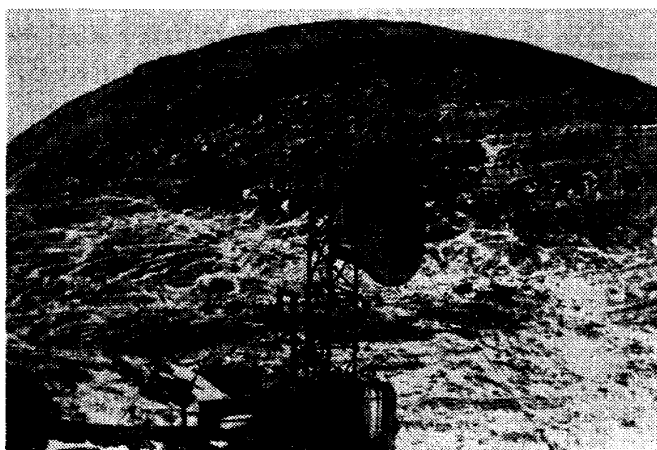


図 10 S₁ 点 (ラングホブデ) における送信機およびパラボリアンテナ

Fig. 10. Paraboloidal antenna set up at the unmanned observing point (S₁), Langhovde.

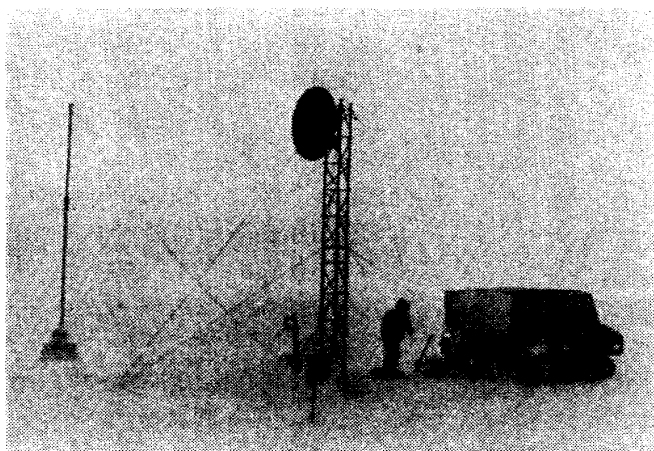


図 11 S₂ 点 (大陸氷上) の VLF 観測器および送信機器

Fig. 11. Loop antenna and paraboloidal transmitting antenna set up at the unmanned observing point (S₂) on the ice slope of the Antarctic Continent.

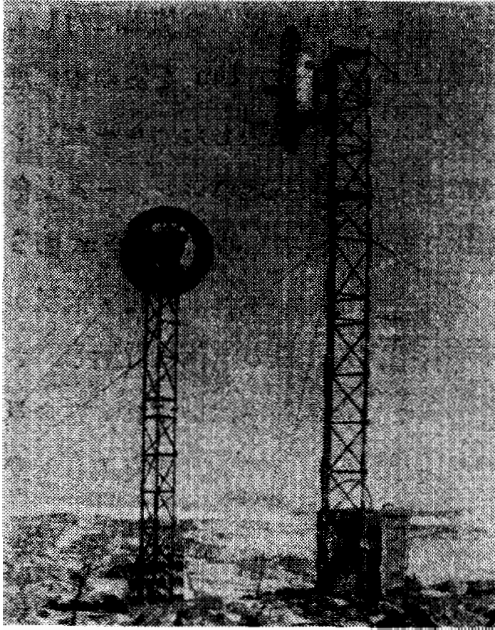


図 12 昭和基地のテレメータ受信機器

Fig. 12. Receiving site of the two telemeters of 2 GHz at Syowa Station.

信電力は、 $S_1 \rightarrow M$ 回線では、 -58 dBm 、 $S_2 \rightarrow M$ では -55 dBm となり、信号伝送の S/N はそれぞれ約 69 dB と約 72 dB を得た。

表 3 昭和基地 (M 点), 大陸氷上 S_2 点間のテレメータ回線特性
Table 3. Characteristics of transmission lines from S_2 observing point to Syowa Station.

区 間		大陸氷上 S_2 —昭和基地	
項 目	値	諸	元
(1) 送 信 電 力	24.8 dB m	0.3 W	
(2) 自由空間損失	-124.4 dB	20 km	
(3) 給電線損失	-2.0 dB	8D2W, 5 m	
	-2.0 dB	8D2W, 5 m	
(4) 空中線利得	24.2 dB	1.2 m ϕ パラボラ, 半値幅約 7°	
	24.2 dB		
(5) 区間損失合計	-80 dB	(2) + (3) + (4)	
(6) 標準受信電力	-55.2 dB m	(1) + (5)	
(7) 受信機雑音電力	-94.7 dB m	B=15 MHz, NF=7.5 dB	
(8) C/N (高周波 S/N)	39.5 dB	(6) - (7)	
(9) S/N 改善係数	32.6 dB		
(10) 標準状態の無評価 S/N	72.1 dB	(8) + (9)	

2.6. 無人観測施設 S_1 および S_2 点 の電源

電力線の設備のない南極の無人観測点の電源としては南極大陸で定常的に吹く風を利用し

た風車発電機が実用化されている（鮎川他，1979）。しかし本 DF システムの電源としては、1) 低温（ -30°C 以下）でも安定して連続動作する、2) 雑音を出さない、3) 設置、取扱いが簡単、安全であり、保守が不要である、等の条件を満す必要から過去に南極で使用実績のある空気積層電池を用いることにした。南極では地吹雪が強く、雪が電池の空気孔につまると電池の機能が停止するので図 13 に示すように収納箱から約 1 m 高の通気管を出し、その先に水平に円盤を取り付けて雪が入らない電池収納箱を用いた。消費電力は、送信機が大部分を消費し、その消費量は表 2 に示したごとく、18 V、約 4 W であるので湯浅電池製の

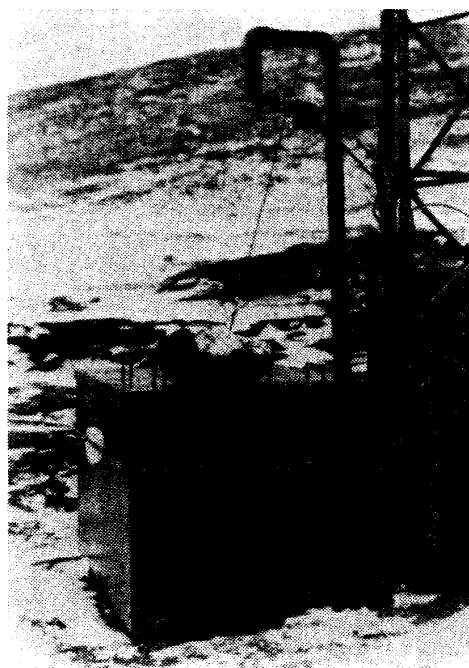


図 13 空気積層電池の収納箱

Fig. 13. Battery box with an air-guided pipe at the unattended observing point (S_1).

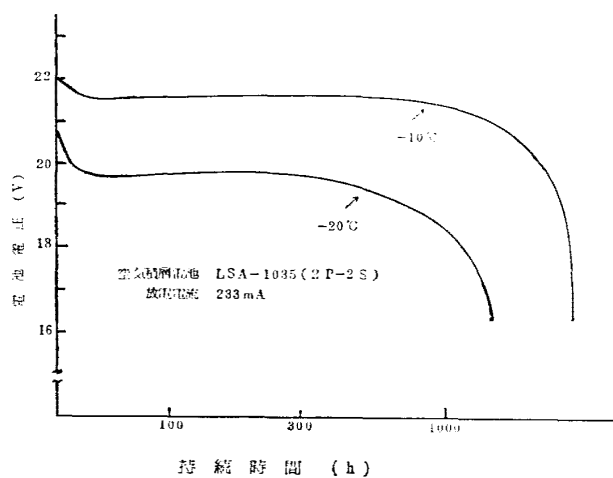


図 14 電池電圧の放電曲線

Fig. 14. Discharge characteristics of battery voltage.

空気積層電池 LSA1035 (公称 350AH) を 2 個直列, 2 個並列に接続して用いた. 電池の寿命は流入する空気温度に依存し, 図 14 の放電曲線から算出すると, 平均気温 -20°C で約 62 日, -10°C では約 110 日になる. したがってできるだけ寿命を長くするために, 収納箱内の電池の空気孔をふさがない程度に断熱材で電池を囲った. S_1 点では大陸沿岸の湾内にあるため比較的 average 気温は高く, 使用した結果, その寿命は約 4 カ月であった. しかし S_2 点は, 沿岸から約 12 km 奥の高度 430 m の大陸氷上であるため比較的 average 気温は低く, 使用した結果, その寿命は約 3 カ月であった.

2.7. VLF ヒス受信機

図 15 に示すブロックダイアグラムにおいて, ヒス受信機の機能は後段の相関器に必要な入力レベルまで信号を増幅することと, VLF-LF 帯内の妨害波を除去することである. 昭和基地で受信される妨害波は空電のほか前述のオメガ波, NAA 波, GBR (16 kHz) と NWC (22.3 kHz) がある. これらはいずれも定常的に発射されているので, これらの波を除去するため広帯域のヒス受信帯域を低域帯 (5~8 kHz) と高域帯 (25~100 kHz) に分離した. 図 16 に 1 例として, M 点 (昭和基地) 用の受信機の周波数特性を示す. また, ヒス受信機には, NAA 波と NWC 波の同調増幅器を付加した. これらは, 次節で記すごとく, 本 DF システムの方向測定の校正に発射位置のわかっている VLF 局波を用いるためである. 空電による妨害電波は, 昭和基地周辺では主としてアフリカ中部と東南アジア南西部からの遠距離空電による. 空電の強い周波数領域はヒスのそれと一致するので帯域濾波器では, 除去できない. しかし, この妨害を軽減させるために, 図 17 に示すごとく, 一定強度以上の空電

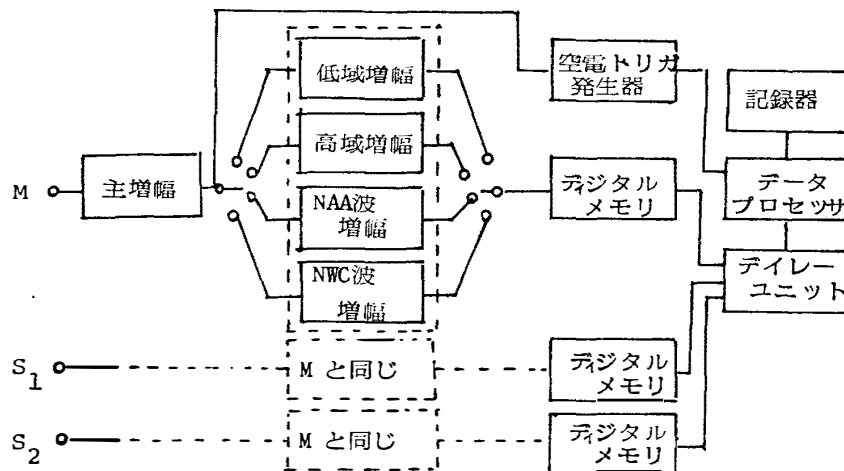


図 15 ヒス受信機と相関器のブロックダイアグラム

Fig. 15. Block diagrams of the hiss receiver and the correlator installed at Syowa Station.

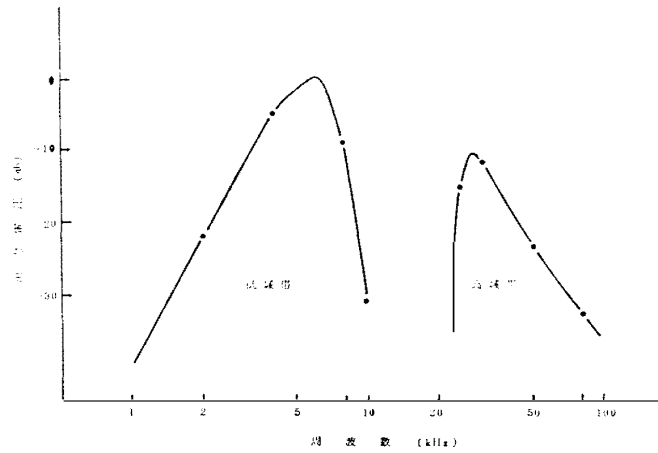


図 16 受信機周波数特性

Fig. 16. Frequency response of receiver for VLF auroral hiss emissions.

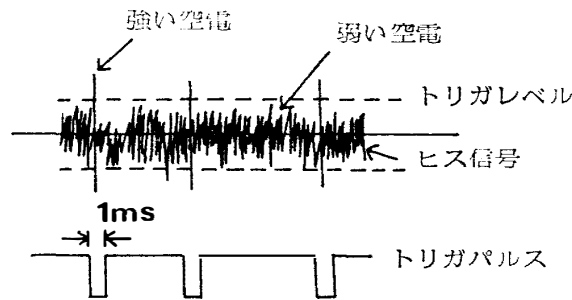


図 17 強い空電による妨害軽減の方法

Fig. 17. Method of rejections of intense atmospherics.

のパルス波を受信すると、トリガパルスが発生させ、次節で記す相関演算を停止させる機能を付加した。通常、トリガレベルは受信されたヒスの最大強度より若干高いレベルに設定するのが望ましいが、実際にはヒスも空電も強度は常に変動するので両者の強度比を比較しながら観測の都度適当に設定した。

2.8. 相 関 器

M-S₁, M-S₂ 間の 2 系統の相互相関の演算には、図 15 のブロックダイアグラムに示したごとく、3 台のデジタルメモリ DM305、遅延ユニット、およびデータプロセッサ SM1330 (いずれも岩崎通信機製) を用いた。その動作を以下に示す。

3 チャンネルの VLF 受信機出力のヒス信号はそれぞれ DM305 によって A/D 変換され記憶される。その後、SM1330 からのデータ転送用のクロックパルスによって 3 チャンネルのデジタル信号がシリアルに SM1330 内の IC メモリに取り込まれる。このデジタルデータは演算プログラム (相互相関関数) にしたがって 2 系統の演算が交互に実行され、演

表 4 デジタルメモリ DM 305 の主要性能
 Table 4. Main performance of digital memory (DM305).

	項 目	性 能
記 憶 部	記 憶 容 量 最高書込み速度 記 憶 素 子	8 bit×1024 ワード (最大) 1 μ s/ワード MOS STATIC RAM
入 力 部	感 度 周 波 数 帯 域 A-D 変 換 器	$\pm 0.1 \sim \pm 50$ V DC 結 合 DC ~ 250 kHz AC 結 合 4 Hz ~ 250 kHz 8 bit 逐次比較式
書 込 み	遅 延 (PCD)	トリガ以前(-), 以後(+) からの書込み開始, ワード数はメモリ容量 に対し, -100, -75, -50, -25, 0, +25, +50, +100, +200% の9種類
読 出 し	読 出 し 開 始 SCOPE	自動繰り返し

表 5 データプロセッサ SM1330 の主要性能
 Table 5. Main performance of data-processor (SM1330).

項 目	性 能
記憶回路	ダイナミック RAM 16 bit×12k ワード
データ取込み(転送)時間 処理機能 処理時間 (入力ワード数に対し) 256 ワード 512 ワード 1024 ワード	5 μ s/ワード 特殊相互相関関数 (2 系統相互相関) 約 0.44 秒 (実測値) 約 0.83 秒 (実測値) 約 1.60 秒 (実測値)
出 力 D-A 2 チャンネル 2 チャンネル 精 度 分解能	SCOPE 20 μ s/アドレス $\tau_1, \tau_2; -4 \sim +4$ V $\phi_1(\tau_1), \phi_2(\tau_2); 0 \sim +5$ V 3% 1/4096 (12 bit)

算結果は D/A 変換されて出力される。アナログ出力は遅延時間 τ_1 と τ_2 , およびそれぞれの相関値 $\phi_1(\tau_1), \phi_2(\tau_2)$ の 4 チャンネルであり, ペン記録される。DM305 と SM1330 の主要性能を表 4 および表 5 に示す。

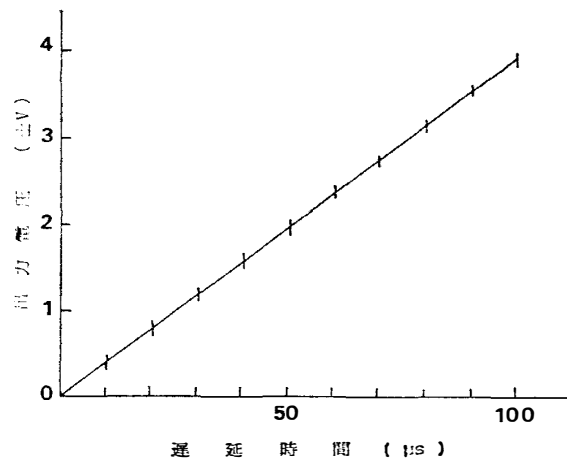


図 18 相関器の遅延時間と出力電圧の関係

Fig. 18. Relation between delay-time and output voltage of data-processor (SM1330).

前述したテレメータ、ケーブル等を通った S_1 と S_2 点信号の M に対する遅延の補正は NAA 波および NWC 波を受信して、DM305 の書き込み時にプリコンピュテーションディレイ (PCD) 機能によって粗く設定し、遅延ユニットで 1 ワード単位で精密に設定した。相関器の遅延時間に対する DC 出力電圧特性の実験結果を図 18 に示す。実験方法は、 M と S_1 の低域帯受信機に白色雑音を入力し、DM305 のサンプリング速度を $1 \mu\text{s}/\text{ワード}$ に設定する。その後、 S_1 点信号の DM305 デジタル出力を遅延ユニットで人為的に遅延させた時の τ_1 のアナログ出力電圧を記録した。出力電圧のばらつきは相関演算における有限積分時間によって生じる統計的演算誤差である。

3. 観 測 法

本 DF システムを用いた観測に先立ち、まず VLF 局波を受信して方位較正を行う。図 15 のヒス受信機を NAA 波および NWC 波用に切り換えて $M-S_1$ および $M-S_2$ 間の相互相関をとる。遅延ユニットの遅延量を NAA 波 ($\theta=295$ 度, $i=90^\circ$) および NWC 波 ($\theta=86^\circ$, $i=90^\circ$) から計算される遅延時間に等しくなるように設定する。ヒスの周波数スペクトルは VLF-LF 帯で変動する。一般的には $8\sim 10$ kHz 付近に最大強度をもつヒスの発生頻度が高いので、観測はほとんど低域帯 ($5\sim 8$ kHz) で行った。 $M-S_1$ 間の距離 19.2 km に相当する信号の最大遅延時間は、 $\pm 64 \mu\text{s}$ であるので、DF 観測は、ヒス信号をサンプリング速度 $1 \mu\text{s}/\text{ワード}$ 、入力データ長 256 ワードの荷重平均化処理で行った。

本 DF システムが有効であるか否かは、3 点のヒス信号間に相互相関があることを実証す

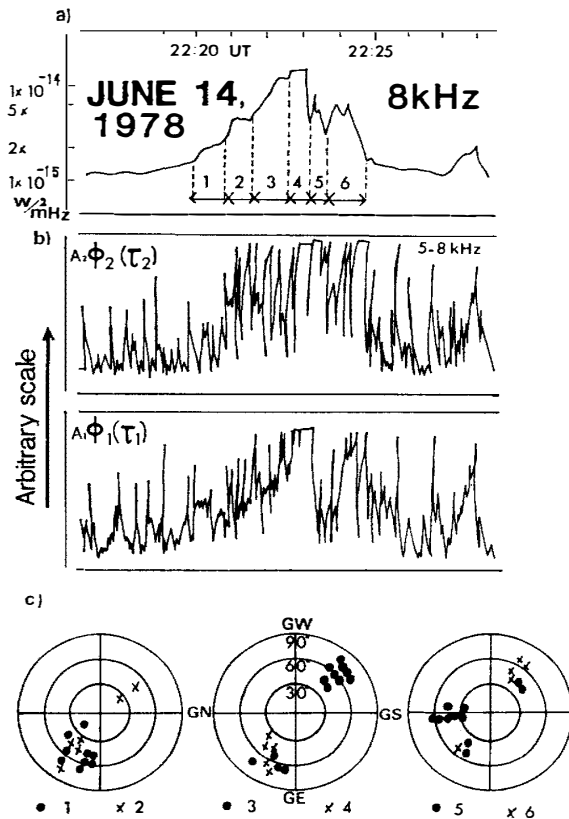


図 19 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 相互
相関記録, (c) 到来方向, 1978 年 6
月 14 日

Fig. 19. Temporal evolution of observed results at 22h UT, June 14, 1978 at Syowa Station. (a) Intensity record of 8 kHz auroral hiss. (b) Cross-correlation values of $A_2\phi_2(\tau_2)$ and $A_1\phi_1(\tau_1)$ for received hiss signals at 5-8 kHz. (c) Estimated azimuthal and incident angles. 1 to 6 represent six sub-events.

る必要がある。図 19 は実際に観測した相関記録の 1 例を示す。上段は充電時定数 2 秒，放電時定数 80 ms の最小値検波法で検出した 8 kHz 帯（帯域幅 230 Hz）ヒスの強度記録である。ヒスがまだ発生していない時は相関値は空電によって衝撃的に上昇し，ただちに零値まで降下する。ここで 2.7. で記したように空電トリガパルス発生器のトリガレベルを適当に調整して強い空電による衝撃的な相関値出力の上昇の頻度を少なくすることが必要である。22 時 20 分頃からヒス強度が上昇するにつれて相関値 $A\phi_1(\tau_1)$, $A\phi_2(\tau_2)$ の最小レベルが上昇する（A は任意の scale factor）。この記録は明らかに 3 点間で相互相関がとれたことを証明している。この上昇時間中の遅延時間データを読みとって算出した到来方向を図 19 の最下図に示す。図 19 の最上部に示されたヒス強度の記録上に示すごとく，この 22 時 20 分～25 分間のヒス活動は，時間的に 6 区間に区切ることができる。1～4 の大きなヒス活動の中で，強度がステップ状に上昇するにつれて地磁気東北東方向と南西方向の 2 つの方向から交互にヒスが到来し，その後，5 のスパイク状ヒスは，地磁気北方向から，最後の 6 では南西方向から到来したことがわかる。

4. 測定精度の考察

本 DF システムの測定精度は相関演算における遅延時間計測の分解能で決まる。DM305 の最高書き込み速度は $1 \mu\text{s}$ であり、この分解能は、入射角 10 度以上の領域、すなわち天頂方向近辺を除けば、 10 度の方位、入射角精度に相当する。しかし実際には、ヒス信号は強い空電の他背景雑音に妙害され、それらの強度は常に変動する。また、相関器個有の演算誤差を含めると測定系全体を通じては $1 \mu\text{s}$ の分解能は困難である。それゆえ、本 DF システムの測定精度は図 20 に示した NAA 波の遅延時間のばらつきの統計処理から推定した。読み取った遅延時間のばらつきの頻度分布は、ほぼ正規分布を示し、標準偏差は $3 \mu\text{s}$ となった。これを基準に到来方向の精度を記すと図 21 になる。入射角 20 度の外側の領域ではすべての入射角に対し 10 度の方位角精度となり、水平線側の斜線部より内側の領域ではすべての方位角に対し 10 度の入射角精度となる。この考察は波が単一方向から平面波で到来したとき、本 DF 観測システムで測定可能な精度を NAA 波を用いて評価したものである。

図 20 NAA 波の M-S₁ 間の遅延時間のばらつきの頻度

Fig. 20. Histogram of variance of delay-time between Syowa Station (M) and S₁ observing points for NAA wave.

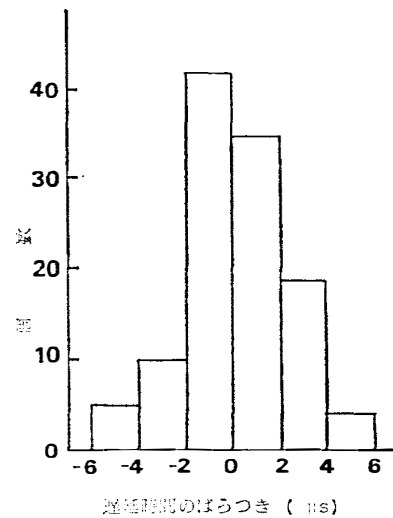
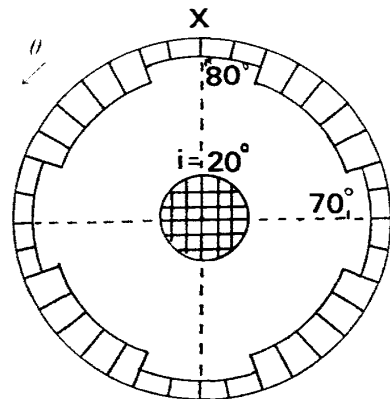


図 21 $3 \mu\text{s}$ の遅延分解能時の測定誤差

Fig. 21. Measuring accuracy of directions of arrival for a time resolution of $3 \mu\text{s}$. The azimuthal angle θ is measured anti-clockwise from the X-axis and the incident angle i is represented as the radial distance.



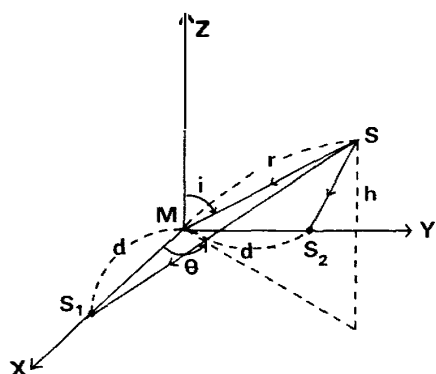


図 22 測定座標系

Fig. 22. Coordinate system of the measurement of arrival direction for the spherical waves.

しかしヒスの電離層透過点の高さは 100~120 km 前後であり、ヒスの入射角が小さい場合は、透過点までの距離は測定系の基線距離に比べそれ程遠くならない。したがって到来波を球面波として取り扱う必要がでてくる。この場合の DF 測定における方位角誤差を求める。図 22 の測定座標系において、簡単なため $d_1=d_2=d$, $\alpha=90^\circ$ とする。波源 S と受信点 M, S_1 , S_2 の位置を (x, y, z) 座標で記すと次のようになる。

$$\begin{aligned} S & (r \sin i \cos \theta, r \sin i \sin \theta, r \cos i), \\ M & (0, 0, 0), \\ S_1 & (d, 0, 0), \\ S_2 & (0, d, 0), \end{aligned}$$

波源 S から各受信点までの距離は次式になる。

$$\begin{aligned} SM &= r, \\ SS_1 &= (r^2 + d^2 - 2rd \sin i \cos \theta)^{1/2}, \\ SS_2 &= (r^2 + d^2 - 2rd \sin i \sin \theta)^{1/2}. \end{aligned}$$

したがって、M- S_1 および M- S_2 間の遅延時間 τ_1 と τ_2 は以下に与えられる。

$$\tau_1 = \frac{1}{c} \{ r - (r^2 + d^2 - 2rd \sin i \cos \theta)^{1/2} \} \quad (1)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{c} \{ r - (r^2 + d^2 - 2rd \sin i \sin \theta)^{1/2} \}. \quad (2)$$

今、波源の高度を h と仮定すると、 $r = h \sec i$ を上式に代入すると、

$$\tau_1 = \frac{1}{c} \{ h \sec i - (h^2 \sec^2 i + d^2 + 2hd \tan i \cos \theta)^{1/2} \} \quad (3)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{c} \{ h \sec i - (h^2 \sec^2 i + d^2 + 2hd \tan i \sin \theta)^{1/2} \} \quad (4)$$

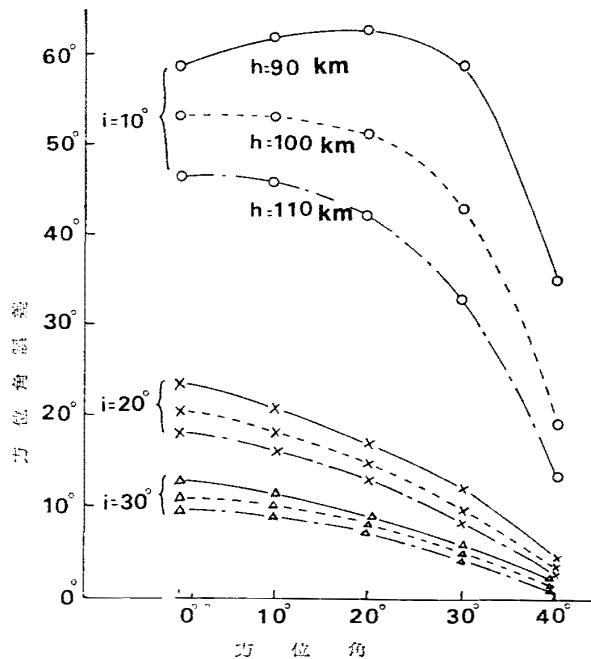


図 23 球面波の場合の方位角誤差

Fig. 23. Errors in azimuthal angle for the spherical waves.

となる。この式を用いて求めた方位角と、平面波すなわち $r^2 \gg d^2$ とした方位角 ($\tan \theta = \tau_2/\tau_1$) との誤差を $d=20$ km として計算すると図 23 となる。この図から、 $i \geq 30^\circ$ であれば方位角誤差はほぼ 10 度以内である。平面波の場合で記した $3 \mu\text{s}$ の分解能で決まる測定精度と合わせて考えると、結局、本 DF システムでは波の到来方向の入射角が 30 度以上であれば平面波としても球面波としても方位角精度はほぼ 10 度であると結論される。

5. オーロラヒスの到来方向の観測結果

一般にオーロラヒス (auroral hiss) は、オーロラの発光と同期して発生し、その継続時間は 10 分以内が多い (HIRASAWA and NAGATA, 1972; TANAKA *et al.*, 1976)。本節ではヒスの到来方向の特性を記述する上に代表的な DF 観測結果 6 例を、うち 4 例はオーロラ全天写真と比較して示す。オーロラ、オーロラヒス等の超高層物理現象は、地磁気方位を用いて説明されるのが一般的である。そこでヒスの方位角の表示を、たとえば地磁気の北を GN (geomagnetic north) で記す。昭和基地では GN は地理的な北 (geographical north) より西側へ約 45 度ずれる。

(A) 20–21 h UT, May 24, 1978 (図 24)

図 24a に最小値検波法で検出した 5 kHz 帯 (帯域幅 230 Hz) のヒスの強度記録を示す。

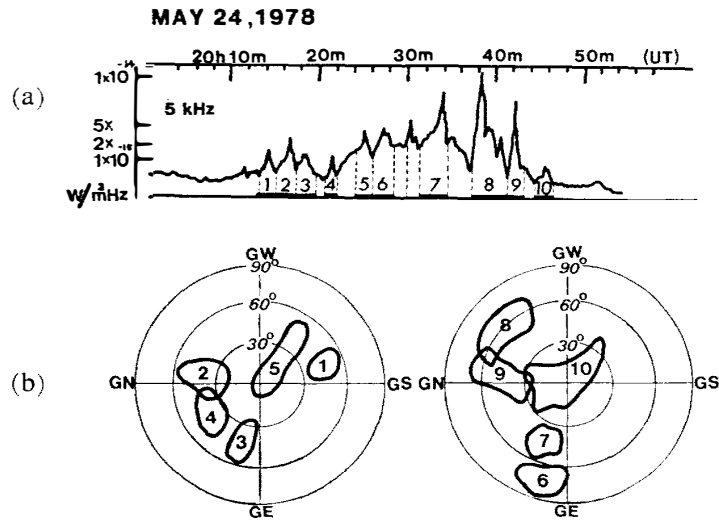


図 24 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 到来方向, 1978 年 5 月 24 日
 Fig. 24. Temporal evolution of observed results around 20-21 h UT, May 24, 1978 at Syowa Station. (a) Intensity of 5 kHz auroral hiss. (b) Estimated azimuthal and incident angles of arrivals of auroral hiss at 5-8 kHz. The numbers from 1 to 10 represent ten sub-events.

20 h 10 m から 48 m にかけて, 各々の持続時間約 1 分程度の spike 状の強度変化が連続的に観測され, それらの重ね合わせとして約 40 分にわたるヒス現象が成り立っている. この spike 状の変化の 1 つ 1 つが基本となるヒス現象の強度変化と考えると, 点線で示されるように 10 個の現象 (sub-event) に区分される. 図 24b には, その各々の sub-event に対して決められたヒスの到来方向が図示されている. この結果から判断されることは, オーロラヒス現象は基本的には持続時間数十秒から数分の spike 的な強度増加から成り立ち, それらの波の到来方向は sub-event ごとに異なった局所領域を示す. Sub-event ごとの到来方向の移動には, この例では特に規則的なものはなく, 不連続に, また不規則にその位置を変えている.

(B) 20-21 h UT, September 9, 1978 (図 25)

図 25 のヒス現象は, 図 24 (May 24, 1978) と同様, 20 h 18 m から 21 h 03 m の約 45 分間にわたり, 強度変化記録 (8 kHz-band) に, spike 状の強度増加が連続的に観測されている. 図 25a に例示した 10 個の sub-event ごとに決定した到来方向が図 25b に示されている. この例ではヒスの到来方向は GSSW および GNE のほぼ 2 カ所に局在し, No. 1, 2, 3, 5, 6 および 9 sub-event は GENE 領域から, また No. 4, 7, 8 および 10 sub-event は GSSW 領域から到来してきている.

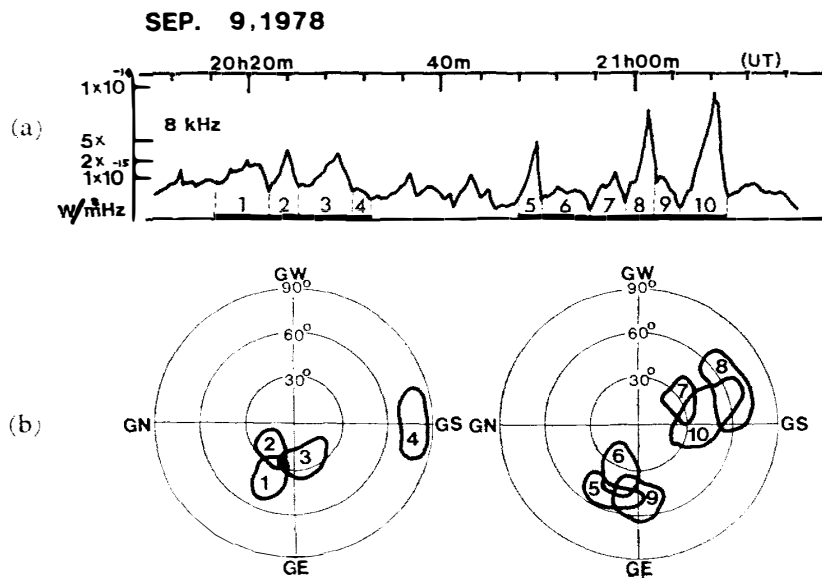


図 25 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 到来方向, 1978 年 9 月 9 日
 Fig. 25. Temporal evolution of observed results around 20-21 h UT, September 9, 1978 at Syowa Station. (a) Intensity of 8 kHz auroral hiss. (b) Estimated azimuthal and incident angles of arrivals of auroral hiss at 5-8 kHz. The numbers from 1 to 10 represent ten sub-events.

(C) 20-21 h UT, July 5, 1978 (図 26)

図 26a では, 5 kHz および 8 kHz の強度変化記録に 20 h 50 m から持続時間約 2 分間のヒスの強度増加がみとめられる. 図 26b に示された 20 h 51 m 30 s におけるオールスカ

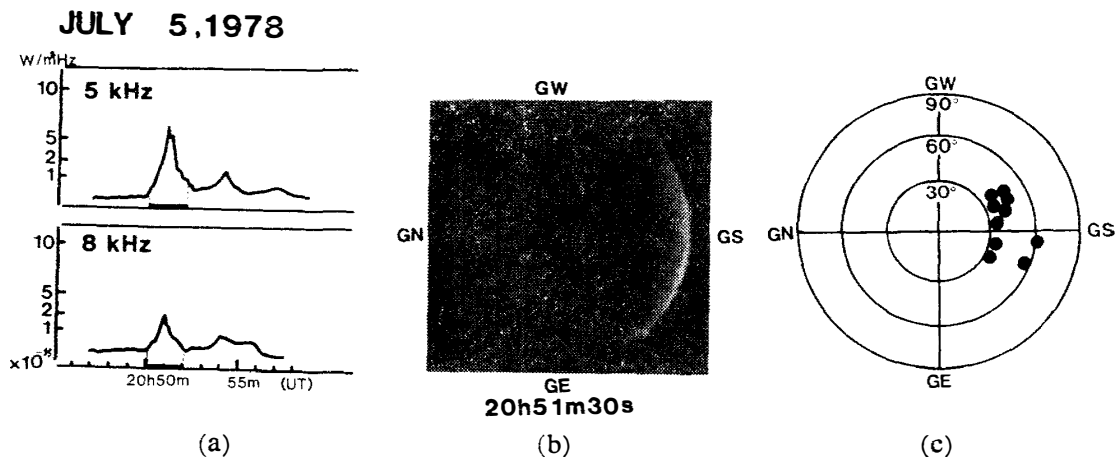


図 26 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 全天カメラ写真, (c) 到来方向, 1978 年 7 月 5 日
 Fig. 26. Temporal evolution of observed results at 20-21 h UT, July 5, 1978 at Syowa Station. (a) Intensities of 5 kHz and 8 kHz auroral hiss. (b) All-sky photograph of aurora. (c) Estimated azimuthal and incident of arrivals of auroral hiss at 5-8 kHz.

イ写真により、この時期に quiet auroral arc が GS 方位の地平線上に存在することがわかる。図 26c には、この sub-event 持続時間内で約 10 秒ごとに決められたヒスの到来方向が示されている。すなわちヒスは入射角 (incident angle) 約 $30^\circ \sim 60^\circ$ 、GS 方向から到来してきている。したがって、このヒスの sub-event は、GS 方向の auroral arc と関連して生起されていると考えられる。

(D) 22–23 h UT, July 4, 1978 (図 27)

図 27 に地磁気 H 成分の減少約 700 nT (図 30 参照) の大きな substorm の開始時の直前に観測されたバースト的なヒス現象の例を示す。この現象においても、図 27a に示すごとく、各々持続時間 30 秒～1 分程度の 4 つの spike 状の強度変化が連続的に観測されている。この 4 つの sub-event に対して決められたヒスの到来方向を図示した図 27b と c のオールスカイ写真を比較することにより、次の観測事実が認められる。

(1) 左側のオールスカイ写真 (22 h 47 m 20 s UT) で、強い auroral arc が、GN 方向の地平線上に存在し、その arc に沿って GE から GW 方向に運動している 2 つの folding shape が GWNW と GENE との 2 方向に観測されている。これとほぼ同時期のヒス現象

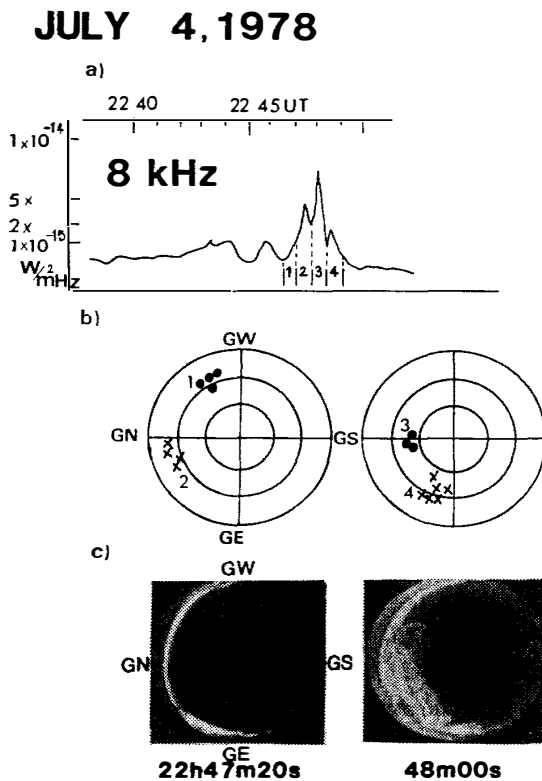


図 27 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 到来方向, (c) 全天カメラ写真, 1978 年 7 月 4 日

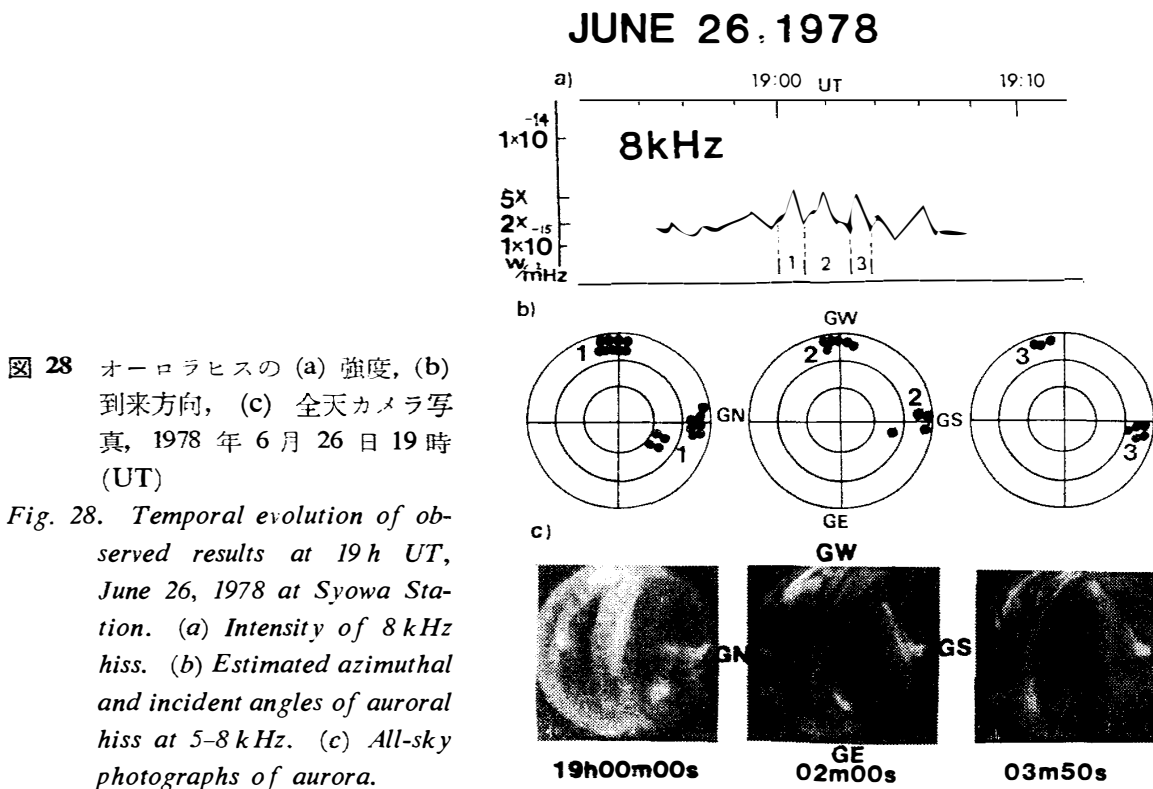
Fig. 27. Temporal evolution of observed results at 22 h UT, July 4, 1978 at Syowa Station. (a) Intensity of 8 kHz auroral hiss. (b) Estimated azimuthal and incident angles of arrivals of auroral hiss at 5–8 kHz. (c) All-sky photographs of aurora.

(sub-event No. 1 および 2) の到来方向が, 図 27b の左側に示され, これによると, この aurora arc の 2 つの folding shape に対応しヒスの No. 1 sub-event では angle 約 70° , GWNW 方向から到来し, また, No. 2 sub-event では, その到来方向が GNNE 方向へと変化している.

(2) 22 h 48 m 00 s (UT) になると GNNE 方向の folding auroral arc が急速に天頂方向へと広がり始める. この時, ヒスの強度はピークになり, (No. 3 sub-event), 到来方向は GN 方向の天頂側 (incident angle 約 40°) に, つづいて GE 方向の incident angle 60° 前後を示している (No. 4 sub-event). この領域はオールスカイ写真 (図 27c 右側) からわかるように folding shape を持った aurora の活動域とよく一致している. 天頂近くまで aurora が広がる 22 h 49 m には電離層異常電離による電波吸収でヒス強度は急激に減少し, 22 h 50 m を過ぎると地上でのヒス現象は終わるが aurora はこの後も天頂から GS 方向へと広がっていく. すなわち auroral breakup のはじまりである.

(E) 19 h UT, June 26, 1978 (図 28)

常に早い動きを示す aurora の出現時には, 20~40 秒の短い継続時間のヒスが間欠的に



受信される。図 28a に示すヒスの強度変化記録がこのような例である。この現象を、図に示すごとく、3 つの sub-event に分け、各々の現象の到来方向とほぼ同時のオールスカイ写真データによる aurora の形状と動きとを比較してみる。まずヒスは互いに多少の相異があるものの、図 27b の 3 つの円形図に示されているようにすべての sub-event において、GW および GN の 2 つの方向から到来してきている。一方、図 28c の 3 つのオールスカイ写真において、不規則な多重構造をした aurora が、ほぼ全天にわたって観測されている。Aurora の光度は全体的には時間とともに弱まってはいるが、GW および GS 方向の地平線近くには、ほぼ定常的な光度の強さを持った folding shape を有する aurora が認められる。以上のヒスの到来方向と aurora の振舞いの比較からこの現象の例では、ヒスは、GW および GS 方向に存在する aurora の活動域 (folding auroras) から交互に到来するものと考えられる。

(F) 20–21 h UT, June 26, 1978 (図 29)

図 29a の強度変化記録 (8 kHz) に、約 10 分間の継続時間を有するヒス現象が生起している。この現象は図 30g に示されるように大きな negative bay disturbance の初相に観測されたもので、その spike 状の強度変化から 9 コの sub-event に分けられる。この sub-event ごとに、そのヒスの到来方向と aurora の出現状況とを比較してみると、

(1) 図 29c に示された 20 h 57 m 00 s 時のオールスカイ写真では、multiple band が GW, diffused ray が GN, また homogeneous band aurora が GS 方向に観測されている。この時期のヒスの到来方向を見ると (図 29b, 上段・左端・No. 1 sub-event), 主として、GW, および GN 方向から到来してきている。すなわち、この到来方向は multiple aurora と rayed aurora の活動域と一致し、GS 方向の homogeneous band aurora 域とは一致がみられない。

(2) No. 2 sub-event は強度 $1 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$ に達する強いヒス現象であるが、この到来は GE 方向である。同時期のオールスカイ写真 (59 m 00 s) をみると、この GE 方向地平線上に 2, 3 の folding shape の aurora が運動しているのが認められる。

(3) 21 h 00 m 30 s, 01 m 40 s, 03 m 00 s および 05 m 00 s の 4 つの連続したオールスカイ写真で、明るい band 状 aurora が 21 h 00 m 30 s 頃 GS 方向の地平線上で活動的になり、folding shape を形成し急速に天頂へと活動域を広げながら GE 方向へ運動しているのが観測されている。この aurora の動きに対応し、ヒスの到来方向も GS (No. 3 と 5 sub-event) から GE (No. 7 sub-event) 方向と方位を変え、aurora がほぼ全天を覆うよ

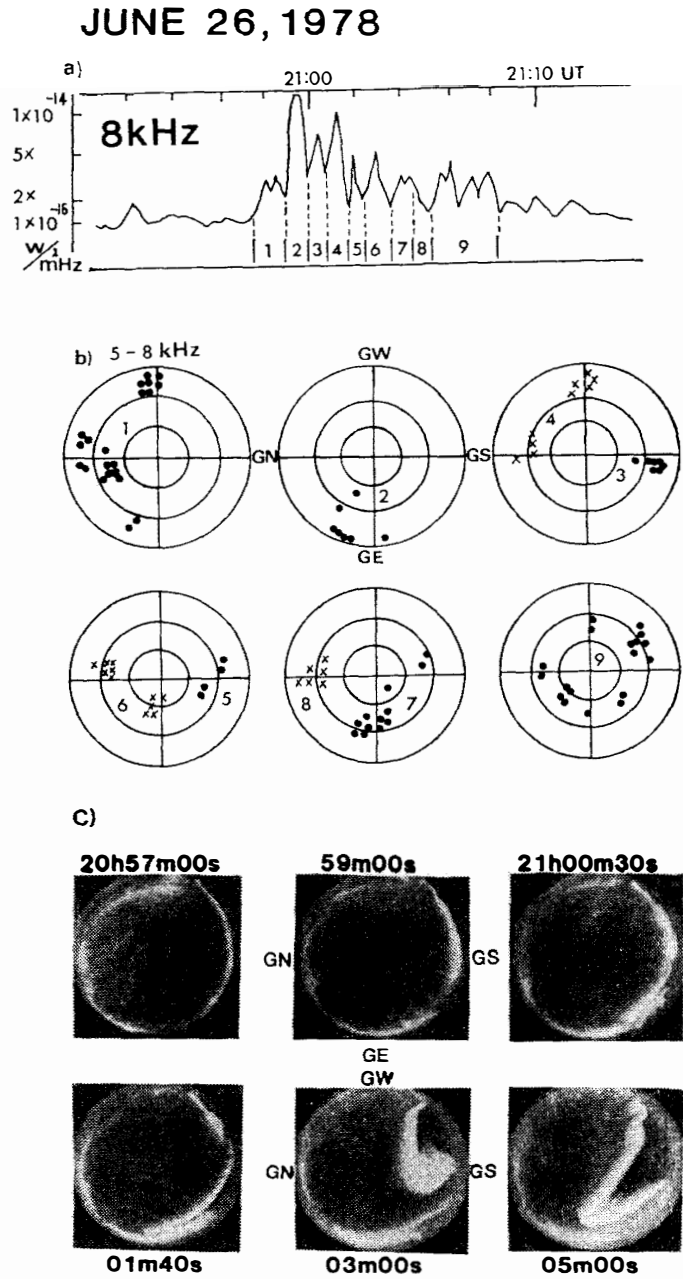


図 29 オーロラヒスの (a) 強度, (b) 到来方向, (c) 全天カメラ写真, 1978年6月26日20-21時 (UT)

Fig. 29. Temporal evolution of observed results at 20-21 h UT, June 26, 1978 at Syowa Station. (a) Intensity of 8 kHz auroral hiss. (b) Estimated azimuthal and incident angles of arrivals of auroral hiss at 5-8 kHz. (c) All-sky photographs of aurora.

うになった 21 h 05 m 00 s 以降 (No. 9 sub-event) には, ヒスの到来方向は, 特に定まった方向を持たずほぼ全方向からランダムに到来してきている。

(4) 21 h 00 m 30 s から 05 m 00 s の間, diffuse rayed aurora が GW~GN~GE 領域で明るさをやや増し, 活動的となっている。この領域の aurora もヒスに対応しており, sub-event Nos. 4, 6 および 8 のヒスは incident angle 約 60~70° を持って, GW~GN~GE 領域から到来してきている。

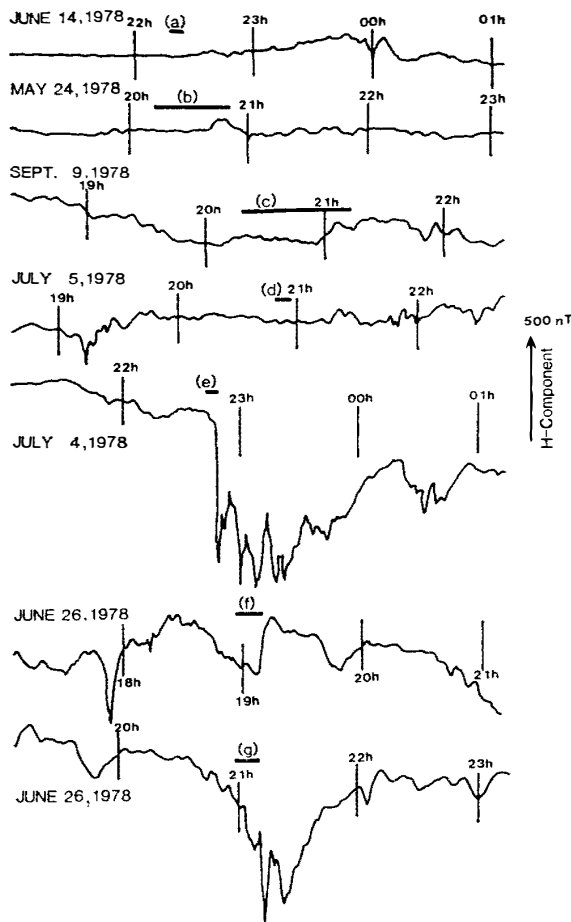


図 30 オーロラヒス DF 観測時の地磁気変化

Fig. 30. Magnetic H-component variations observed at Syowa Station before and after the DF observations of auroral hiss. Observation times of DF are represented by horizontal bars; (a) results of DF are illustrated in Fig. 19, (b) Fig. 24, (c) Fig. 25, (d) Fig. 26, (e) Fig. 27, (f) Fig. 28, and (g) Fig. 29.

以上、(A)～(F)のオーロラ活動時のヒスのDF観測結果の特性は以下のごとく要約される。オーロラヒス現象は基本的には持続時間数十秒から1分程度のspike的な強度増加(sub-event)から成り立ち、そのsub-eventの重ね合わせとして、数分から数十分の連続的なヒス現象を構成している。Sub-eventごとの電波の到来方向はある領域に局所化される。この局所化された電波源は明るいオーロラの発光領域に対応するというよりはむしろ、発光域の一部で、folding shapeを示しながら早い動きを示す領域あるいは不規則な構造を成したrayed arcまたはbandと一致することが多い。またMAKITA(1980)は、オーロラヒスの2つの型とオーロラの空間的位置との関係を統計的に調べ、8kHz付近に最大強度を持つVLFヒスは磁南側弧状オーロラに対応することが多く、数kHz～数十kHzまで広帯域のスペクトルをもつLFヒスは天頂角 $\pm 45^\circ$ の範囲に光るオーロラに対応することが多いと報告している。本DF観測で得た結果は、MAKITAの結果と大筋において良い一致を示すが、より精度の高い測定結果が得られている。特に、オーロラヒスの電離層からの出

口 (localized exit) がどのような形状と運動を示すオーロラと対応するか、また、オーロラの動きにともなうヒスの exit point の移動など、より詳細な情報が得られている。

6. 結 語

電離層あるいはその上層の磁気圏で発生し、電離層を透過し地上に到来するオーロラヒスは一般に広い入射角範囲の楕円偏波である。その DF に 3 点時間差計測法を採用し、南極昭和基地で DF 観測システムを構成した。オーロラヒスは VLF-LF 帯に広がる白色雑音の性質をもった微弱な電波であるため、約 20 km 離れた 3 点間の到来時間差の計測に 2 GHz 帯の広帯域、高 S/N 伝送特性のテレメータを導入し、波形の相互相関の演算から求めた。本 DF システムで計測可能な VLF ヒスの最低強度は、 $10^{-16} \text{ W/m}^2 (\text{Hz})$ ($0.2 \mu\text{V/m} \sqrt{\text{Hz}}$) 程度であり、妨害となる VLF 帯遠距離空電強度より 2 桁近く弱い。相関処理法によってヒスの抽出能力が向上する利点がある。昭和基地を中心に M-S₁ と M-S₂ の 2 系統の相互相関の演算をデジタルメモリーとデータプロセッサを用いて同時処理し、瞬時に到来時間差が最高分解能 1 μs で得られた。発射位置が既知の NAA 波と NWC 波を受信して、DF システムのテレメータ、ケーブル等による信号伝達時間を補正し、VLF 受信機の増幅度、空電除去回路のトリガレベルを適当に設定して観測を行った。

オーロラ VLF ヒス強度の上昇につれて、相関器出力の相互相関値の最小値レベルが上昇し、この事実から本 DF システムの有効性を実証した。ヒスの時間差データから到来方向を

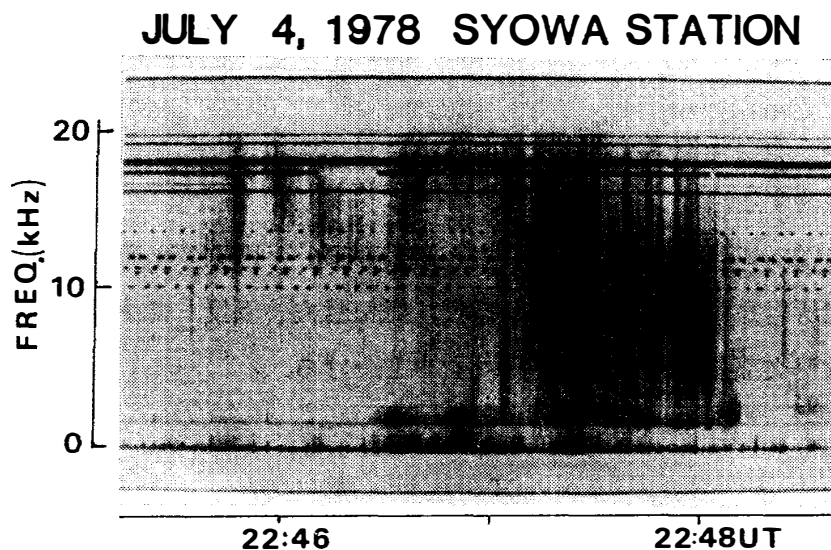


図 31 昭和基地におけるオーロラヒスのスペクトル, 1978 年 7 月 4 日
 Fig. 31. Dynamic spectrum of auroral hiss emissions observed at Syowa Station.

求めると、オーロラヒスは数十秒～1分程度の短時間の内に到来方向が変わり、その到来領域は、動きの早い不規則な構造をした **folding** または **rayed arc** のオーロラ方向にほぼ一致した。

ところで、図 27 に示したオーロラに同期して発生したオーロラヒスは図 31 の周波数スペクトル図に示すように、その強度は 10 秒よりも短い時間で変動する。また前述したごとく、オーロラヒスは衝撃的な遠距離空電からの妨害を受ける。一方、相関処理では、2 系統の相関演算をデータプロセッサによって行ったので、信号を間欠的に処理したことになり、その結果、統計的演算誤差が生じた。このようなヒスの発生の性質の複雑さ、あるいは信号処理法を考慮しても、本 DF システムはオーロラヒスに対してかなりの測定精度を有すると考えられる。

オーロラヒスの DF の最終目標は波の電離層透過点の位置を探知することである。そのためには 4 節の図 22 の測定座標系において、たとえば x 軸の負側の距離 d に S_3 点を設置して地上で 4 点観測を行うと、 $M-S_3$ 間の波の到来時間差は次式のごとく与えられる。

$$\tau_3 = \frac{1}{c} \{ r - (r^2 + d^2 + 2rd \sin i \cos \theta)^{1/2} \}, \quad (5)$$

したがって、3 個の未知数 (θ, i, r) に対して式 (1), (2) および (5) の 3 つの式ができるので、ヒスの透過点の位置が求まることになる。しかし、この 4 点観測の実施には、南極の厳しい自然環境、特に低温に対して、屋外の受信機、テレメータの特性を同一に保持できる低温対策の基礎実験が基本である。

謝 辞

本研究の実施にあたっては、観測器の設置、調整など第 19 次南極地域観測隊隊員の協力を得た。厚く感謝する。

本研究に対し常々ご理解を示されご助力と激励を頂いた国立極地研究所永田武所長、名古屋大学空電研究所岩井章教授、大津仁助教授、鎌田哲夫助教授、田中義人助教授、早川正士助教授、山口敏明文部技官に対し厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 鮎川 勝・寺井 啓・勝田 豊・吉田治郎・外谷 健・坂本純一 (1979): 南極における無人観測 (I) — 無人観測装置の開発と観測結果の速報 —. 南極資料, **66**, 1-24.
HIRASAWA, T. and NAGATA, T. (1972): Constitution of polar substorm and associated phenom-

- ena in the southern polar region. JARE Sci. Rep., Ser. A (Aeronomy), **10**, 76 p.
- MAKITA, K. (1979): VLF-LF hiss emissions associated with aurora. Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. A (Aeronomy), **16**, 126 p.
- TANAKA, Y., HAYAKAWA, M. and NISHINO, M. (1976): Study of auroral VLF hiss observed at Syowa Station, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. A (Aeronomy), **13**, 58 p.
- TSURUDA, K. and HAYASHI, K. (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.

(1980年8月25日受理)