

南極昭和基地・みずほ基地間の VHF/HF 通信

野 崎 憲 朗*

VHF/HF Radio Telecommunications between Syowa Station and Mizuho Station, Antarctica

Kenrou NOZAKI*

Abstract: Radio telecommunication characteristics between Syowa Station and Mizuho Station were studied by using VHF radio wave scattered by ionospheric *E*-layer irregularity accompanied with aurora. VHF radio wave was propagated in a path greatly different from the great circle course according to the irregularity structure. Total reception time rate was about 5% and VHF radio scatter had good correlation with radar aurora and geomagnetic irregularity at Syowa Station.

Geomagnetic irregularity effect on VHF radio scatter was compared with that on HF telecommunication which is easily affected by ionospheric conditions. Complemental relations between HF and VHF telecommunications were discussed.

要旨: オーロラ発生時の電離層 *E* 層不規則構造による VHF 電波散乱通信実験が昭和基地、みずほ基地間で行われた。オーロラ散乱の特性上電波の伝搬通路は大圏コースから大きくはずれる。VHF 電波散乱の時間発生率は 5% 程度で、昭和基地でのオーロラレーダーのエコー発生、地磁気じょう乱と良い相関がある。

電離層じょう乱により障害を受けやすい両基地間の短波通信と地磁気じょう乱に対する特性を比較して、短波通信と VHF 通信の相補性について論じた。

1. はじめに

昭和基地ではみずほ基地、旅行隊との連絡には、見通し内にある時は VHF 電波の地表波伝搬モード、見通し外では HF 電波の電離層反射によって通信している。

昭和基地-日本間の遠距離短波伝搬特性は放送波の観測（貝沼他，1972）や標準電波の観測が行われ、モデル計算による比較がなされている（杉内他，1979）。通信可能時間帯と周波数範囲の月中央値は電波予報として電波研究所から毎月発表され、太陽活動、地磁気活動を観測することにより回線障害の予測もできる。これに対し、昭和基地-みずほ基地回線等、南極内での短波通信は極域特有の電離層の不安定により障害を受けやすい。観測隊では短波通信に 4 MHz 帯を主に、3 MHz 帯を予備的に使っているが、電離層じょう乱が起こると双方とも感度が低下し、通信不能になる。

* 電波研究所電波部。Radio Division, Radio Research Laboratories, 2-1, Nukukita-machi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

昭和基地周辺の雪氷上での VHF 電波の伝搬特性は芳野 (YOSHINO, 1961) が考察している。彼は大陸雪氷の電波特性を測定し、MF-UHF 帯の見通し内での電波伝搬特性を論じた。VHF 電波による見通し外通信の手段はいくつかあり、極域でも実験がなされている。16次隊では対流圏散乱による通信実験が行われ、温度逆転層によると思われる伝搬が観測されたが、実用に供するには大出力と高利得アンテナが必要とされた (近江, 1976)。19次隊では見通し外にいる旅行隊の通信を昭和基地で傍受したことが1回あるが伝搬モードは不明である。昭和基地周辺に現れるオーロラスポラディック E 層は、中緯度スポラディック E 層より臨界周波数が低く、観測隊の使う 55 MHz 帯電波は反射できないと思われる。

オーロラ発生時にできる電離層 E 領域の不規則構造は磁力線に垂直に入射した VHF 電波を散乱する。昭和基地では1966年以来周波数 50 MHz-112 MHz のパルスレーダーを用いて定常観測を行い、みずほ基地上空の電波オーロラを観測している (長谷川他, 1970; 城・坂元, 1973)。オーロラによる VHF 電波散乱を使つての見通し外通信は、カナダのアマチュア無線家が行ったのが最初といわれている。国際地球観測年当時は、カナダとアメリカで多くの回線を設定して積極的に散乱通信実験が行われ、その性質が明らかにされた (BAILEY *et al.*, 1955; COLLINS and FORSYTH, 1959)。昭和基地では今までオーロラによる VHF 電波散乱を使つて通信を行った報告はない。21次隊では昭和基地-みずほ基地間に回線を設定し、VHF 散乱通信の予備的な実験を行った。

以下、2章で VHF 電波散乱通信実験について述べ、3章で2章の結果を短波通信と比較しながら極域の無線通信について述べる。

2. VHF 電波散乱通信実験

実験装置：電離層不規則構造は磁力線に垂直な平面内で入射電波を散乱し、磁力線と入射電波のなす角度が 90° をはずれると急速に散乱は弱くなる (ECKLUND *et al.*, 1975)。昭和基地から見た E 層の磁力線方向が視線方向と $90^\circ \pm 3^\circ$ になる領域と、みずほ基地から見た同様な領域が図1の2つの扇形で現される。昭和基地とみずほ基地間で VHF 電波散乱通信回線が構成されるためには、2つの扇形が重なる部分が必要になる (図1の斜線部分)。両基地間の直線距離は 270 km であるが、VHF 電波散乱通信の場合、電波伝搬距離は 1200-1500 km となる。実験は昭和基地で送信、みずほ基地で受信と記録を行い、2つの散乱領域のうち、昭和基地から真南にある散乱領域にそれぞれ5素子八木-宇田アンテナを向けた。

図2に送信および受信装置のブロック図を示す。600 Hz で FM 変調された中心周波数 55.85 MHz の電波を昭和基地から発射して、みずほ基地で受信した時、変調音が聞きとれるようにした。またペンレコーダー記録上で入感を識別するため、毎時00分から3分間送信、2分間休止をくり返し、さらに48分から00分まで休止するタイムスケジュールで電波を発射した。送信側の休止時間中はトランシーバーを受信状態にして、みずほ基地で入感を認めた

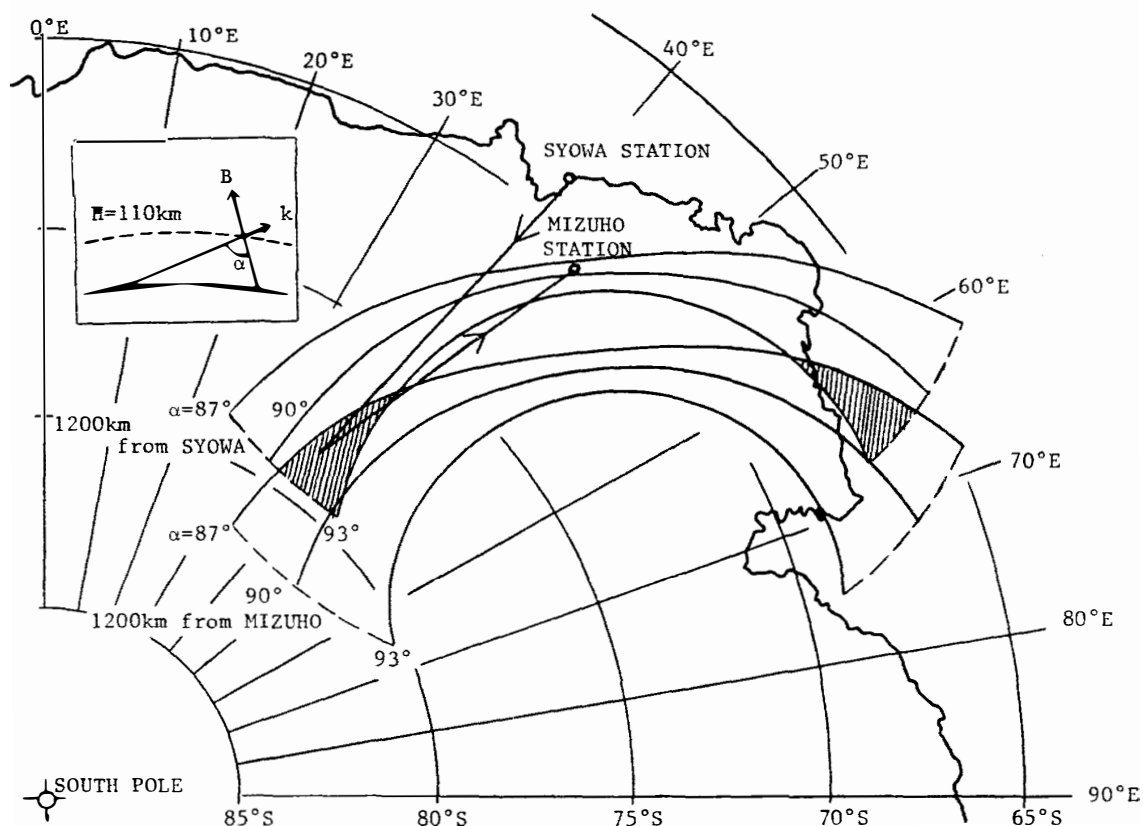


図 1 昭和基地とみずほ基地から見た 110 km 高度での等入射角 (α) 線. VHF 電波は斜線の領域で散乱され、矢印に従って伝搬する.

Fig. 1. Contours of aspect angles α from Syowa Station and Mizuho Station at altitude of 110 km. The hatched areas represent VHF radio wave scattering region. Radio wave is propagated following the arrows.

ら昭和基地を呼び出すようにした. トランシーバーの送信電力は 50 W であるが昭和基地でのアンテナ・トランシーバー間のケーブル損失が大きく, 有効輻射電力は 5 W 程度と見積られる. 受信側ではトランシーバーの第 1 リミッタ電圧をペンレコーダーに連続記録した. オーロラレーダーと比較した回線設計を表 1 に示す. オーロラレーダーで観測される受信機入力信号の最大値は約 -70 dBm であるが, これから送信出力, アンテナ利得等によるレーダーと散乱通信の回線の利得, 損失の差 44 dB を差し引くと, みずほ基地では最大で約 -114 dBm の受信機入力があると推定される.

実験経過: 1980年3月29日から6月27日まで垂直偏波で, 10月9日から12月27日まで水平偏波で実験を行った. 飛雪による静電ノイズ防止用に全アンテナ素子に発泡スチロールのカバーをつけたが, このために受風面積が増し, ブリザードによって昭和基地のアンテナがしばしば破損し, 欠測となった. 21次隊が越冬した1980年は太陽活動極大期にあたり, 昭和基地上空にオーロラが多数現れ, オーロラレーダーにより電波オーロラも数多く観測された (IGARASHI and NOZAKI, 1982).

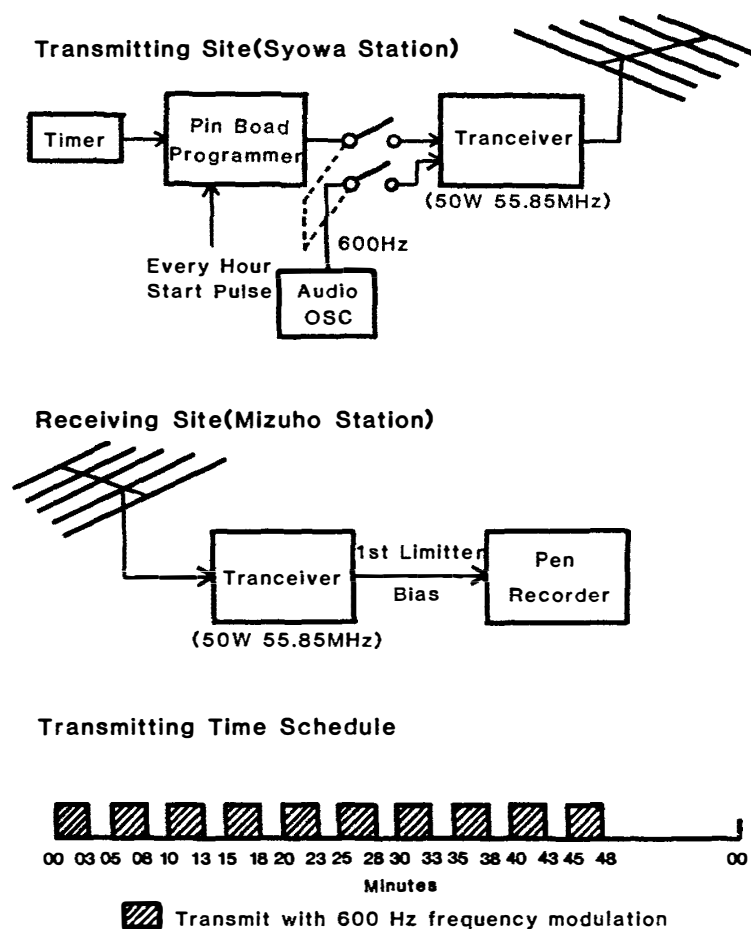


図 2 送信側（上）と受信側（中）の装置のブロック図と送信タイムスケジュール（下）。タイムスケジュールは毎時繰り返す。

Fig. 2. Block diagrams of transmitting (top) and receiving (middle) equipments and transmitting time schedule (bottom). The time schedule was repeated every hour.

表 1 VHF 電波散乱通信とオーロラレーダーの回線設計
Table 1. VHF radio wave scatter and aurora radar budgets.

	TX output power	TX cable loss	TX antenna gain	Propagation distance	RX antenna gain	RX cable loss	Maximum RX input level
VHF scatter	45 W	-8.4 dB	11.35 dB	1500 km	11.35 dB	-4.2 dB	-114 dBm (estimated)
Aurora radar	15 kW	-1.0 dB	12.25 dB	600 km	12.35 dB	-0.8 dB	-70 dBm
Scatter Radar	-25.2 dB	-7.4 dB	-0.9 dB	-8.0 dB	-1.0 dB	-3.4 dB	-44 dB (sum of left)

図 3 に昭和基地でのオーロラレーダー、地磁気 H 成分と同時刻に描いたみずほ基地での VHF 電波散乱の受信記録の例を示す。1 時から 6 時 50 分まで散乱通信の受信電界強度に送信のタイムスケジュールに従った楕形のパターンが記録されている。3 時 40 分と 6 時 10 分

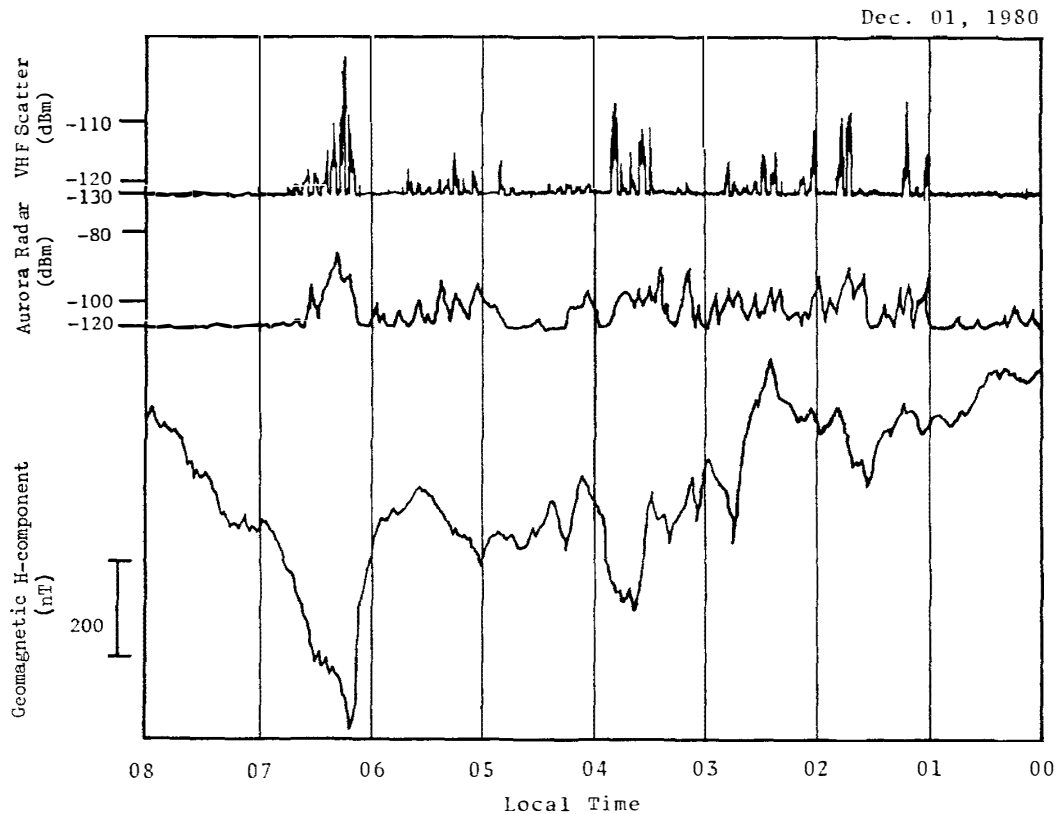


図3 VHF電波散乱通信のみずほ基地での受信記録(上)と昭和基地で観測したオーロラレーダーエコー強度(中)、地磁気 H 成分(下)。レーダーエコーはみずほ基地上空での電波オーロラの出現を意味する。(図1参照)

Fig. 3. Example of VHF radio scatter received at Mizuho Station (upper trace), aurora radar echo intensity observed at Syowa Station (middle trace) and geomagnetic H -component at Syowa Station (lower trace). Enhanced radar echo means that there exists radio aurora above Mizuho Station (cf. Fig. 1).

に地磁気 H 成分が急激に減少するとともに受信電界強度が強くなる。オーロラレーダーは連続して電波を発射しているので、オーロラ散乱の強度がそのまま記録される。受信機への最大入力レベルは -110 dBm であり、回線設計から表1で推定した値にほぼ等しい。昭和基地オーロラレーダーの PPI (Plane Position Indication) 表示では、図1の散乱領域からのエコーが記録されており、今回の実験でみずほ基地で受信された電波は予定した散乱領域を経由していると確認された。

使用したトランシーバーのスケルチ回路が動作して通話可能となるには、 -100 dBm 程度の受信機入力が必要であり、実験期間中にみずほ基地で 600 Hz 変調音を聞きとることはできなかった。また何度か記録紙上で入感を認めて昭和基地を呼んだが、音声による通信はできなかった。全期間で83回の受信記録が得られ、受信時間率は垂直偏波の期間で 3.9% 、水平偏波の期間で 5.7% であった。オーロラレーダーと同程度に送信出力を上げれば、受信時間率もオーロラレーダー並(垂直偏波の期間で 16.0%) になると思われる。

なお、水平偏波の期間中は屋外作業で同じ電波を使用するので、8時から18時（昭和基地時間）までの間送信を止めた。VHF 電波散乱の発生は夜間に多く、受信時間率は見かけ上大きな数値が出ている。

3. 結果と考察

従来行われているオーロラレーダー観測では、散乱の発生は地磁気 H 成分の変化と良い相関を持っている（城・坂元，1973）が、今回みずほ基地で受信した VHF 散乱電波信号もオーロラレーダー、地磁気じょう乱との間にも良い相関が見られた。オーロラレーダーと比較した発生の日変化特性を図4に示す。オーロラレーダーはみずほ基地上空の電離層 E 層を見ているが、図1にあるようにレーダーの散乱領域と VHF 電波散乱通信の散乱領域はほぼ同じ経度上にあり、日変化特性の時間差はない。図4a で18時から24時までの間は散乱通信の発生率が下がっているが、両者ともほとんど同じ日変化の形を示している。全体として散乱通信の割合が低いのは、送信電力がレーダーに比べ低いためである。

実験期間中の昭和基地での地磁気 K 指数の発生数と、 K 指数に対する VHF 電波散乱の発生の分布を図5aに示す。 K 指数ごとの棒グラフの上の数値は、その K 指数の時に VHF 電波散乱が発生する確率を表している。地磁気のじょう乱が大きいほど電波散乱が発生しやすいことは明らかである。図5bにオーロラレーダーエコーの発生と地磁気 K 指数の発生数の分布を示す。レーダーエコーは低い K 指数の時に多く発生しているが、これはレーダーの回線利得が大きく、弱い散乱エコーでも検出できるためである。

昭和基地では毎日みずほ基地と14時30分と20時45分（LT）に短波による定時連絡を行っており、毎回受信機の S メーターの示す値が感度として記録されている。電界強度との間に定量的な関係はつけられていないが、両基地間の電離層の状態を表す指標になる。 S 値が高いほど感度が良く、電離層が静かな時には S 値は4、あるいは5を示すが、じょう乱とともに S 値は下がり、両基地間でまったく連絡のとれない失感状態では S 値は0と記録される。 $S \leq 2$ を通信障害時と考えると、VHF 電波散乱通信実験期間中の短波通信の16%が障害を受けている。

一般に中、低緯度での短波通信の障害は地磁気嵐に伴う電離層じょう乱によるものが大部分で、地磁気嵐発生後数時間で影響が現れ、MUF（最高使用可能周波数）が低下し、通信可能な周波数帯域が狭められる。SID（急始電離層じょう乱）は地磁気嵐以外の原因で起こる通信障害であるが、継続時間は数十分と短い。日本-昭和基地回線のような中低緯度と極域をまたがって通る回線についても、地磁気じょう乱の影響は同様に起こる（貝沼他，1972）。

昭和基地-みずほ基地短波回線の S 値と、その S 値が出た時の昭和基地での K 指数の発生頻度をプロットしたものを図6に示す。図の格子上の円の面積が発生頻度を表す。 $K \geq 5$ となる時の定時連絡はなかった。図で明らかなように K 指数が大きくなっても通信状態が

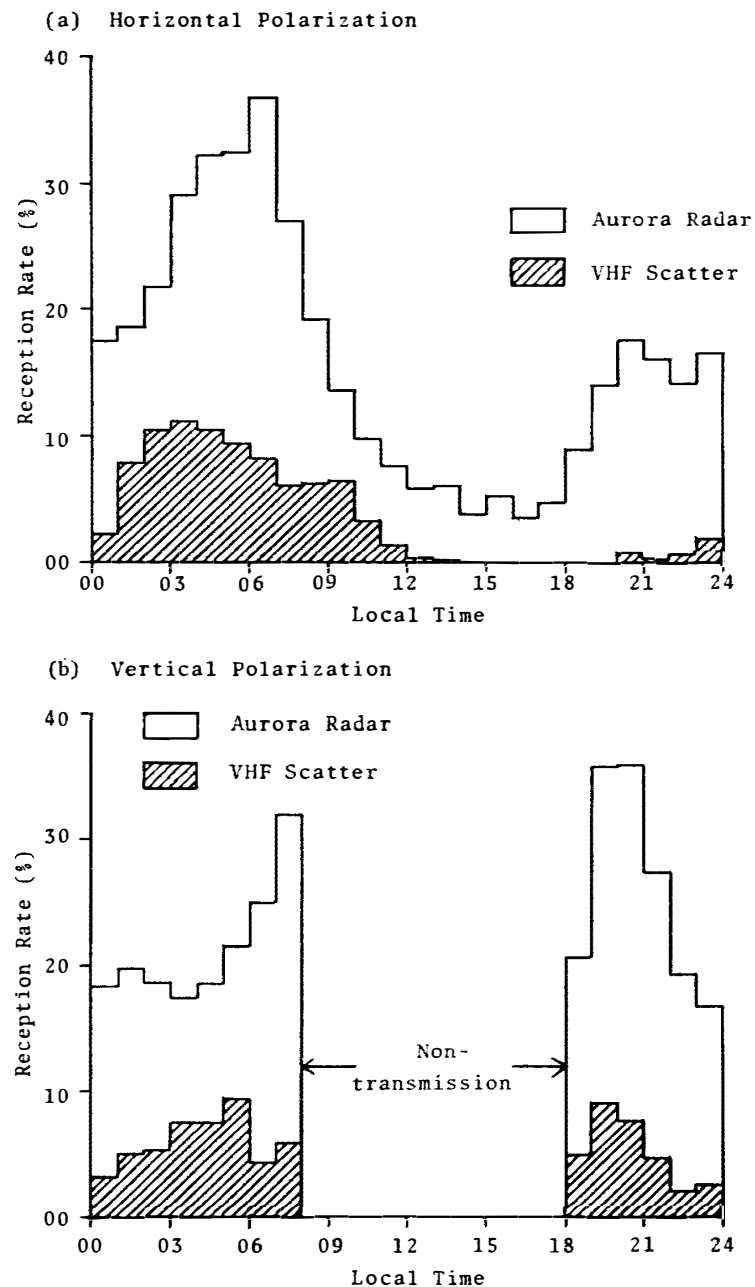


図 4 オーロラレーダーと VHF 電波散乱通信の受信時間率の日変化.
(a) は水平偏波による実験期間 (1980年 3月29日-6月27日), (b) は
垂直偏波による実験期間 (1980年10月9日-12月23日)

Fig. 4. Diurnal variations of aurora radar and VHF radio scatter reception time rate. (a) horizontal polarization period (March 29-June 27, 1980), (b) vertical polarization period (October 9-December 23, 1980).

劣化するということがない。また地磁気が静かでも障害の発生が数多くある。S 値と K 指数との間の相関係数を計算すると 0.096 となり、両者は独立に変化して相互の関連性がない。これは中、低緯度帯での短波通信状態と地磁気活動との関係に反する。昭和基地はオーロラ帯の直下であり、地磁気の変化、電離層のじょう乱はともに近傍の電離層に入射する降下粒

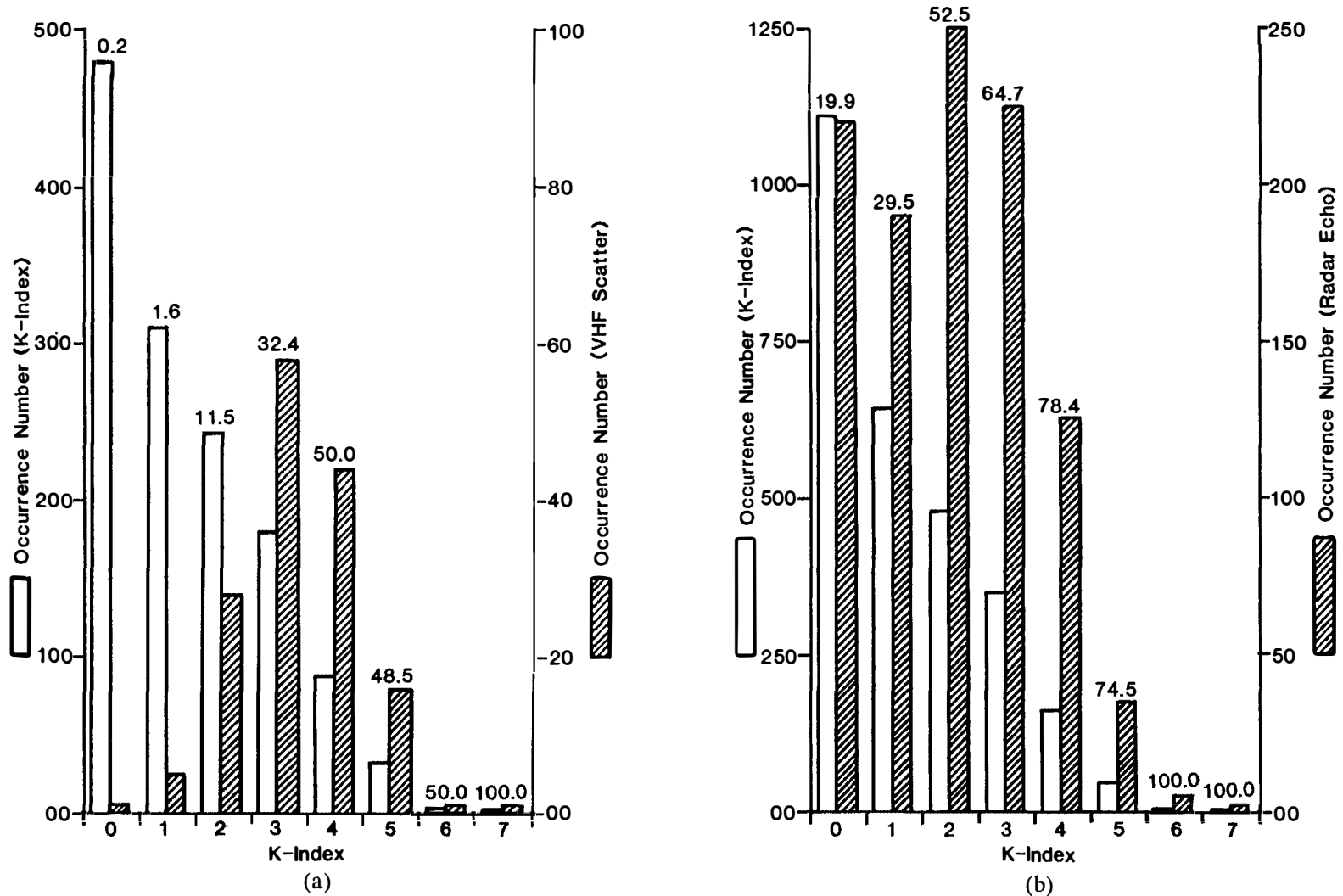


図 5 VHF 電波散乱実験期間中の昭和基地での地磁気 K 指数のそれぞれの値の発生数と、その K 指数の時の、(a) VHF 電波散乱の発生数と、(b) オーロラレーダーエコーの発生数、各棒グラフの上の数値は K 指数の発生と散乱、エコーの発生数の比 (パーセント表示)

Fig. 5. Occurrence number of values of geomagnetic K -index at Syowa Station and (a) VHF radio scatter occurrence number, (b) aurora radar echo occurrence number at the time of the K -index during the periods of VHF radio scatter experiment. Numerals above each bar graph represent ratios of occurrence number vs. K -index value number in percent.

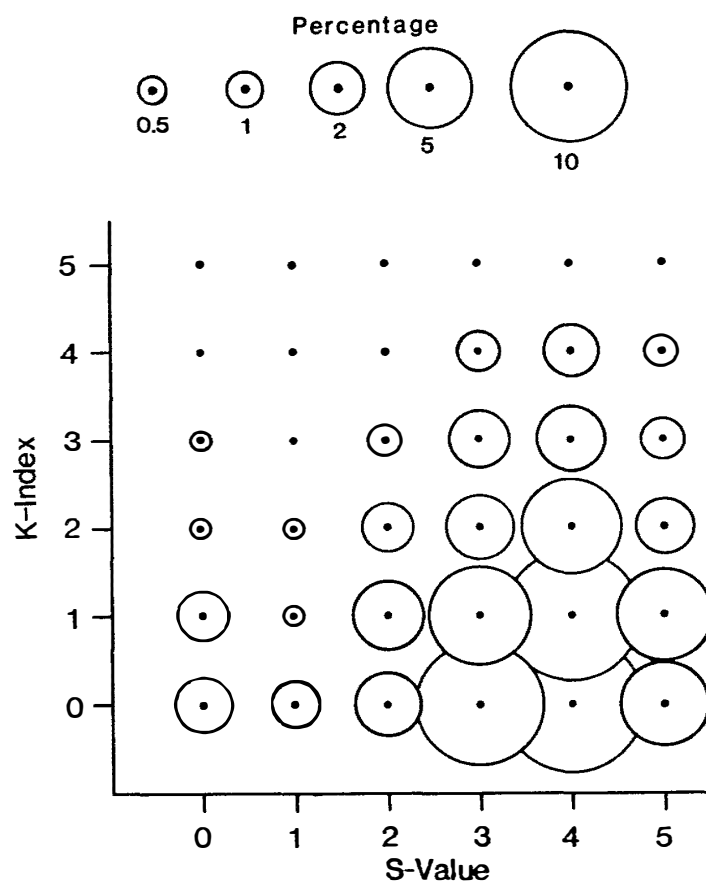


図 6 昭和基地での地磁気 K 指数の値と短波通信の受信機 S 値の発生頻度
 Fig. 6. Occurrence frequency of geomagnetic K -index values at Syowa Station and S -values indicated by HF telecommunication receiver.

子の影響であるが、降下粒子のエネルギーの違いにより、電離が増す高度が異なり、地磁気
 じょう乱には電離層の E 領域が (大林, 1976), 通信障害には D , F 領域が (Davis, 1966)
 寄与しているためと思われる。

昭和基地では15分ごとにイオノゾンデによる電離層観測を行っており、イオノグラム記録
 から直上の電離層状態を知ることができる。 $S \leq 2$ となる障害時について最も近い時刻のイ
 オノグラム記録から昭和-みずほ回線の通信状態を推定すると、障害時の半数が MUF の低
 下によっている。これは電離層の最大電子密度の低下によるもので、送信した電波が電離層
 をつきぬけてしまい、送信電力を増加したり、受信感度を上げてても電波はとどかない。また、
 障害時の4分の1が電離層の電波吸収の増加によって起こっている。一方、イオノグラムか
 らは障害が予想されても現実には通信できた事例が全通信の2割ほどあり、このことは電離
 層が通信障害を起こすような変化をする領域の水平方向の広がり、昭和基地-みずほ基地
 間の距離よりも小さいことを示唆している。

中緯度帯ではこの他、冬季異常吸収による通信障害も発生しているが、極域ではオーロラ
 による吸収と区別がつかない (石嶺, 1979)。

短波通信の状態と VHF 電波散乱通信の発生を比較すると、図 7 のようになる。VHF 電波散乱は地磁気活動とよい相関があり、短波通信は相関がないので、VHF 電波散乱通信と短波通信の間には相関がなく、どの S 値にも一定の割合で散乱通信が受信される。図 7a で、 S 値のすべてについて平均した短波定時通信時に VHF 電波散乱通信が同時に受信される割合は、7%になる。VHF 電波散乱の発生が短波通信を補う条件を緩めて、20時45分の定時連絡の前後12時間の間に散乱通信が受信された場合について、同様な頻度分布をとると図7bのようになり、やはりどの S 値に対しても一定の割合で散乱通信が存在する。平均したVHF電波散乱の割合は40%になる。今回の実験期間中に、短波通信が障害を受けて $S \leq 2$ となる割合は全短波通信の16%であるが、障害時の前後に VHF 電波散乱通信を行って通信を維持するとすれば、障害の割合を10%まで下げることができる。

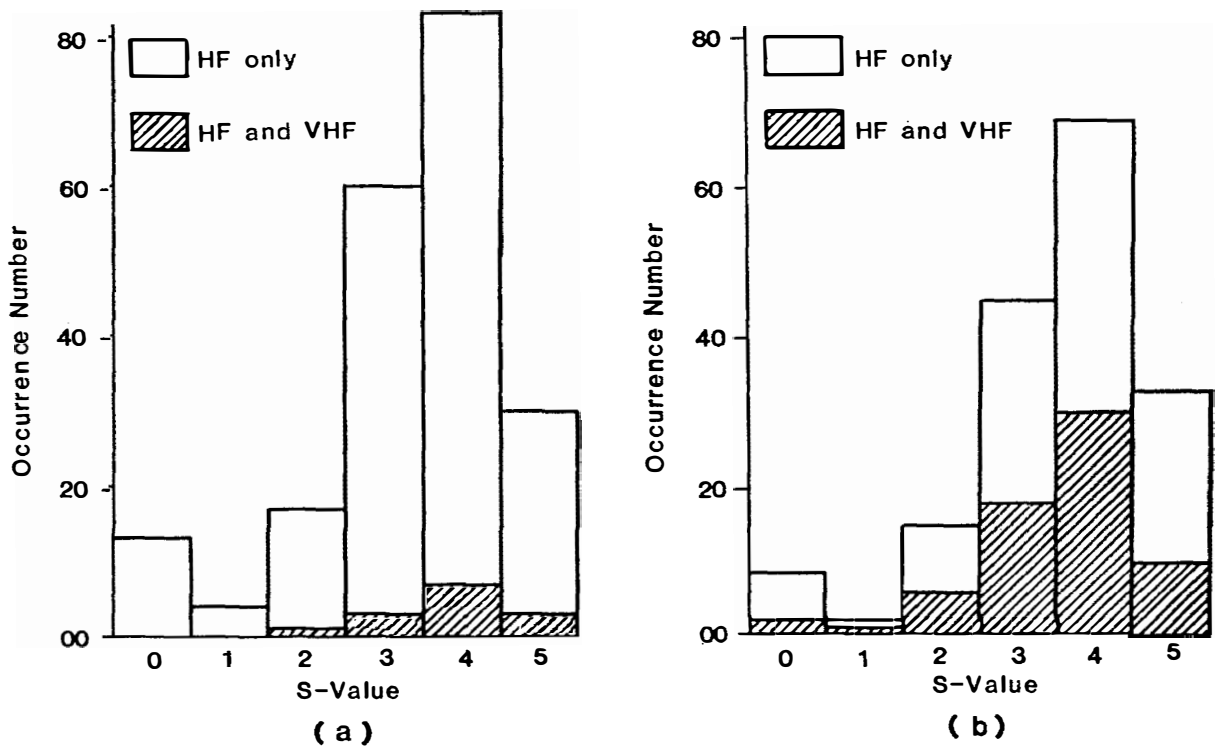


図 7 (a) 短波通信の S 値の発生頻度と通信時に VHF 電波散乱が観測された頻度、
(b) 20時45分 (昭和基地時間) の短波定時連絡時の S 値の発生頻度とその前後12
時間に VHF 電波散乱が観測された頻度

Fig. 7. (a) S -value histogram on HF telecommunication and VHF radio scatter observed at the time of HF telecommunications. (b) S -value histogram on HF telecommunication at every 2045 (LT) and VHF scatter observed within 12 hours before and after the HF telecommunications.

4. 結 び

昭和基地周辺で見通し外通信に使われているのは現在短波無線だけである。昭和基地-み

ずは基地回線の S 値の解析で見たとおり、短波通信の障害は地磁気活動とは関係なく、したがって通信状態の変化の予想がむずかしい。

オーロラに伴う電離層 E 層不規則構造は VHF 電波を偏波面に無関係に散乱し、昭和基地-みずほ基地間の VHF 回線の設定可能なことを示した。今回の実験では音声による交信は不可能であったが、送信出力を10倍にし、ケーブル損失を減らせば十分な受信機入力感度が得られ、通話の品質を測定するとともに、受信時間率の増大が見込まれる。しかしながら、3章で論じたように短波通信の予備として運用しても通信障害の改善にはあまり役立たない。

VHF 電波散乱を通信に実用するには、散乱の発生が地磁気活動に支配されて一定しないこと、午前2時に発生のパークを持つことからデータ集録装置と組み合わせて自動送受信機能を持たせ、独立した通信システムにしておくのが好ましい。

昭和基地のオーロラレーダーでは、オーロラによる散乱エコーとともに流星によるエコーが、1時間あたり数十個観測されている(図8)。流星による VHF 電波散乱機構はオーロラによるものとはほぼ同じで、エコー強度もオーロラエコーとほぼ同じレベルになっている。流星エコーの持続時間は1秒以下であるが、発生頻度は電離層、地磁気の状態によらないので、通信量を限定すれば安定した通信回線が維持できる。

VHF 電波散乱を利用した通信システムは、短波通信に比べアンテナを小さくでき、混信も少ない。電力消費は送信時に数十-数百 W で、待機時は 0.5 W 以下にできる。流星による VHF 電波散乱を利用した通信システムは過去にいくつか発表されており、流星エコーがある時のみ送信するので、平均した消費電力が小さく、移動通信、無人観測のテレメトリに適したシステムができる。

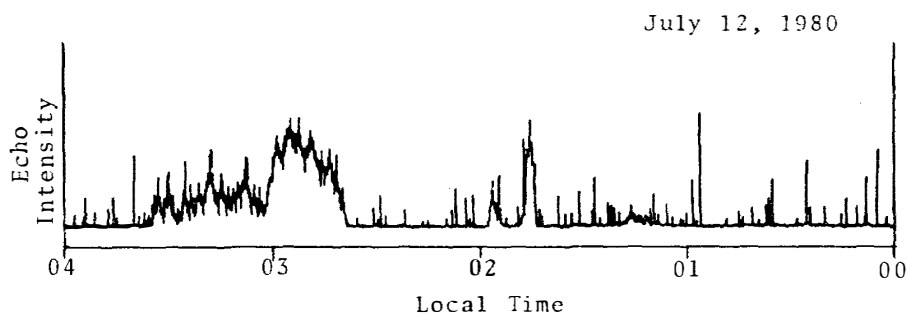


図8 オーロラレーダーの受信記録例。受信レベルが全体に盛り上っているのがオーロラからのエコー、ひげ状に多数あるのが流星エコーを表わす。

Fig. 8. Example of aurora radar echo intensity. Risen level of intensity indicates auroral echo and many spikes indicate meteoric echoes.

謝 辞

オーロラによる VHF 電波散乱通信実験は、計画の段階から電波研究所若井企画部長(現所長)と大瀬主任研究官より適切な助言と励ましを受けた。みずほ基地での装置の設置、保

守を行ってくれた21次隊員諸氏、通信データを心よく提供してくれた長谷川隊員に心から感謝する。

文 献

- BAILEY, D. K., BATEMAN, R. and KIRBY, R. C. (1955): Radio transmission at VHF by scattering and other processes in the lower ionosphere. *Proc. Inst. Radio Eng.*, **43**, 1181-1230.
- COLLINS, C. and FORSYTH, P. A., (1959): Bistatic radio investigation of auroral ionization. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **13**, 315-345.
- DAVIS, K. (1966): 電離層電波伝搬. 糟谷績他訳. 東京, コロナ社, 230-256.
- ECKLUND, W. L., BASLEY, B. B. and GREENWALD, R. A. (1975): Crossed beam measurements of the diffuse radar aurora. *J. Geophys. Res.*, **180**, 1805-1809.
- 長谷川貞雄・城 功・大瀬正美・竹内鉄雄・西牟田一三 (1970): オーロラ観測用レーダー装置および昭和基地におけるレーダーオーロラの出現特性. 南極資料, **37**, 1-16.
- IGARASHI, K. and NOZAKI, K. (1982): Records of radio aurora at Syowa Station, Antarctica in 1980. *JARE Data Rep.*, **68** (Ionosphere 24), 28 p.
- 石嶺 剛 (1979): 下部電離層による電波吸収の冬季異常. 電波研季報, **25**, 331-347.
- 貝沼昭司・城 功・山岡 誠・一之瀬優・坂元敏朗 (1972): 南極昭和基地における短波伝搬実験結果. 南極資料, **45**, 1-11.
- 大林辰蔵 (1976): 宇宙空間物理学, 第4版. 東京, 裳華房, 326-333.
- 近江文好 (1976): オーロラ地域における電波伝搬特性の研究. 日本南極地域観測隊第16次隊報告 (1974~1976). 東京, 国立極地研究所, 79-80.
- 城 功・坂本敏朗 (1973): 昭和基地における電波オーロラの出現特性. 南極資料, **47**, 46-61.
- 杉内英敏・山崎一郎・城 功・小宮紀旦 (1979): 東京-昭和基地回線における JJY 10 MHz 波の伝搬特性. 南極資料, **65**, 119-134.
- YOSHINO, T. (1961): Radio wave propagation on the ice cap. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **11**, 228-233.

(1982年9月21日受理: 1982年11月27日改訂稿受理)