

オーロラ観測用レーダ装置および
昭和基地におけるレーダオーロラの出現特性

長谷川貞雄*・城 功*・大瀬 正美*・
竹内 鉄雄**・西牟田一三*

AURORAL RADAR EQUIPMENT AND CHARACTERISTICS OF
RADAR AURORA AT SYOWA STATION, ANTARCTICA

Sadao HASEGAWA*, Isao SHIRO*, Masami OSE*, Tetsuo TAKEUCHI**
and Ichizo NISHIMUTA*

Abstract

The observation of aurora by the radar method was carried out at Syowa Station in Antarctica during a period from April 1966 to December 1967.

Instrumental outline and characteristics of the radio aurora are discussed in this paper.

Results of this analysis are as follows:

1. The diurnal variation of the auroral echo occurrence takes a pronounced maximum in the morning (0300-0900L.T.) and a small maximum in the evening (1800-2200L.T.).

2. The seasonal variations of the echo

activities were not distinct, but the minimum of the echo occurrence can be found only in the summertime in Antarctica.

3. On the oblique auroral reflections, the azimuthal distribution of the auroral echo occurrences showed that more auroral echoes are received from the region between 120° and 240°.

4. The occurrence time of the auroral echoes in all directions was about 0330L.T. in June, 0630L.T. in September and 0830L.T. in December.

5. The range of a maximum reception of the auroral echoes was about 300km, and the echoes from the outside region of 200 km-1000km were not obtained.

1. 緒 言

1966年、我が国の南極観測の再開に伴い、超高層部門における研究観測の一環として、レーダによるオーロラの観測を行なった。

光のオーロラ (visual aurora) に対して、電波によって観測したオーロラ (オーロラを伴った電離体) は、radio aurora と呼ばれ、多くの研究が行なわれている。

* 郵政省電波研究所電波部. Radio Research Laboratories, Koganei, Tokyo.

** 電波研究所秋田電波観測所. Akita Radio Wave Observatory, Tegata-Sumiyoshi, Akita.

1930年に初めてオーロラが電波に影響を与えることを発見したのは、アマチュア無線家であった。この時は、正常な伝ぱん型式では、電波の伝ぱんが不可能となる高い周波数の電波が、オーロラの現われている領域から反射され、異常な遠距離まで通信が可能であった。

その後、Edward APPLETON らは1933年、Norway の Tromsö において、電離層観測装置によりオーロラの反射波を観測した。そしてradio aurora の研究は HARANG と STOFFREGEN によって1940年に初めて行なわれた。

レーダ装置によって、最初にオーロラの反射波を検出したのは、英国の LOVELL (1947) らであった。彼等は第2次世界大戦のとき、VHF レーダ装置で流星を測定中、偶然オーロラからの反射波 (radar aurora) を受信した。この発見に続いて、戦後 radar aurora の研究が活発となり、Norway, Sweden, Canada, U.S.A. など多数の国によってレーダ観測が行なわれた。

南極大陸におけるオーロラのレーダ観測は I.G.Y. に始まった。U.S.A. は1957年 Little America Station で、30MHz の電波により小規模ながら観測を行なった。New Zealand は1961年に Scott Base で、England は Halley Bay Station にて1961年から比較的長期にわたり、72MHz の電波で観測を行なっている。そのほか、U.S.S.R. も1960年から 72.4 MHz の電波により Mirny Station でレーダ観測を行なっている。

我々は1966年、昭和基地にオーロラ観測用レーダ装置を設置し、4月から観測を開始した。1966年と1967年は空中線を回転して PPI 観測に主眼をおいたが、この間に得られたデータは多量にのぼった。

本報告では1966年のデータを中心に簡単な統計的処理を終えたので、その解析結果として、オーロラの出現特性について述べ、あわせてレーダ装置の概要を説明する。

2. 観測装置および観測方法

電波を用いたオーロラの観測法には、短波帯および 80MHz~100MHz 帯の FM 放送波などの電波伝ぱんの現象を利用するもの、パルス電波による電離層観測装置(通常 1MHz~20MHz) およびレーダ装置を用いるものなどがある。

これらのうち、VHF 帯と UHF 帯のレーダ方式の観測が最も多く行なわれている。この理由として、レーダ装置に通常用いられる八木、またはパラボラ空中線は高利得の指向特性をもち、容易に方位、仰角を変えうること、高出力の送信電力が得られること、および電離層擾乱時に、電波の吸収の影響を比較的受け難い周波数を利用しうること、などによるも

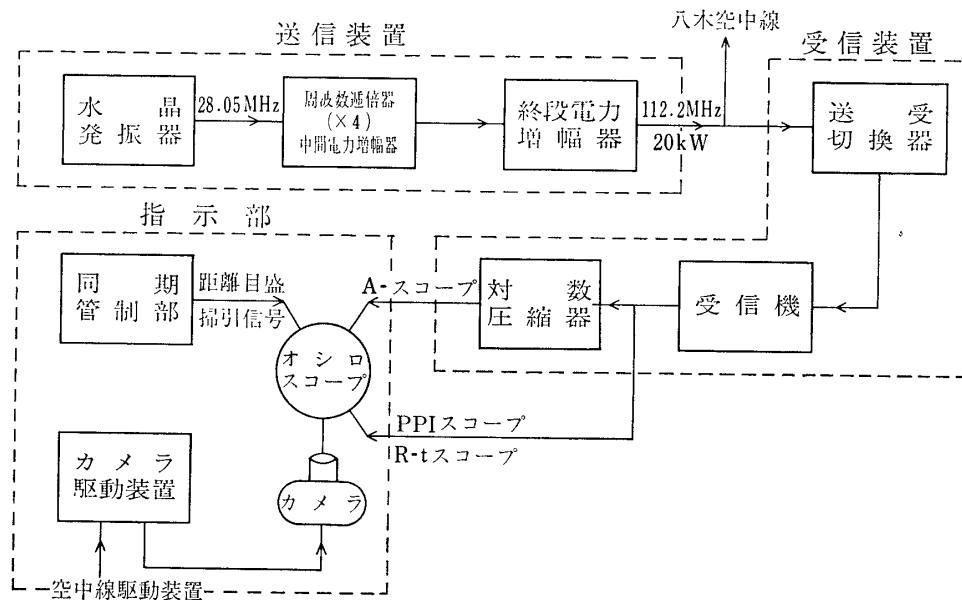


図1 オーロラ観測用レーダ装置のブロックダイアグラム

のと思われる。実験に用いられている周波数範囲は、30MHz から 3000MHz にまで及んでいるが、これらの波で最も多く使用される周波数は、50MHz~100MHz 帯である。

図1に昭和基地に設置したオーロラ観測用レーダ装置のブロックダイアグラムを示す。まず、送信装置から周波数 112.2MHz、出力 20kW、パルス幅 $100\mu\text{s}$ の電波を八木空中線から発射する。オーロラからの反射波は同じ空中線によって受信され、送受切換器を通して受信機に入る。この電波は受信機にて増幅、検波され、この検波出力が PPI と R-t スコープに導かれる。A スコープの場合には、受信機 IF 出力が対数圧縮器を経て導入される。

これらのオシロスコープには、同期制御部より距離目盛、時間軸信号、および方位信号が加えられる。映像は 35mm カメラ、または 16mm 映写用カメラにて、カメラ駆動装置の信号により撮影される。空中線を回転しているときは、カメラ駆動装置に対して空中線駆動装置から駒取り用信号、方位角信号などが加えられる。以下各装置毎にその性能の概要を述べる。

2.1. 送信装置

送信装置は水晶発振器、励振器（周波数逡倍器および中間電力増幅器）と終段電力増幅器、そのほか変調器、電源部とから構成されている。図2に送信装置の外観図を示す。

水晶発振器はバトラー発振回路により、水晶振動子のオーバートーンである周波数 28.05 MHz を発振し、その出力を励振器に供給する。励振器は、28.05MHz の周波数を4倍の



図 2 送信装置外観図

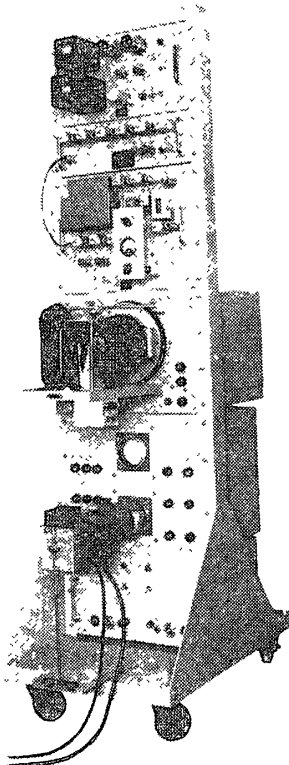


図 3 受信装置および指示装置外観図

112.2MHz に通倍し、同時に電圧増幅を行ない、中間電力増幅器によって終段電力増幅器を励振する。終段電力増幅器はパルス用送信管 7 F 25 を使用し、陽極電圧 12kV を加えて、入力電力を 20kW に増幅し、陽極 π 型同調回路を介して、この出力を空中線に供給している。

変調器は A.C. 50Hz 電源からトリガーパルスを作り、そのパルスでファンタストロン発振器を作動させ、その短形波出力を増幅して各段増幅器のグリッドに加え、パルス電圧の加わったときのみ送信機として動作させるものである。

次に送信機の性能を示す。

- | | |
|--------------|----------------------------|
| 1. 周波数 | 112.2MHz |
| 2. 電波型式 | P _o |
| 3. 通信方式 | 電源同期 |
| 4. 送信方式 | 水晶制御電力増幅方式 |
| 5. 送信出力 | 20kW (尖頭値) |
| 6. パルス幅 | 50 μ s および 100 μ s |
| 7. 繰り返し周波数 | 50Hz |
| 8. 電 源 | 3 相, 220V |
| 9. 出力インピーダンス | 50 Ω |

2.2. 受信装置

受信装置は、送受切換器、インパルス受信機、および対数圧縮器とから構成されている。図 3 に受信装置の外観図を示す。

送受切換器は送信出力を利用し、空中線を送信機（送信時）または受信機（受信時）に電氣的に切換え、接続する装置である。

インパルス受信機は、水晶制御ダブルスーパーヘテロダイン方式の VHF 受信機である。

対数圧縮器は電子管の飽和特性を利用して、入力信号を圧縮変換する装置で、第 2 中間周波数を入力とし、動作範囲 40db, 帯域幅 5kHz で、信号の遅延時間を少なくしている。

受信機の性能を次に示す.

1. 受信周波数 112.2MHz
2. 周波数帯域幅 50kHz \pm 5kHz (3db 以内)
3. 入力インピーダンス 50 Ω
4. 感度 S/N 雑音法, 3db 以下
5. 第1中間周波数 35MHz
6. 第2中間周波数 2MHz
7. ビデオ増幅周波数帯域 50Hz~50kHz
8. 電源 50Hz, 220V

2.3. 指示装置

指示装置はオシロスコープ, 同期管制部, および写真撮影用カメラ装置とから構成されている. 図3下部に指示装置の外観図を示す.

オシロスコープには PPI 指示部, A スコープ指示部と R-t (距離対時間) 指示部がある. PPI 指示部は, 受信機のビデオ出力を, 7" ブラウン管により PPI 表示するもので, 同期管制部から距離目盛, 時間軸掃引信号および空中線駆動装置と連動した方位角目盛信号を受ける. R-t 指示部は空中線のある方向に固定し, オーロラの反射点までの距離, すなわち range を連続して撮影するもので, 入力信号は PPI 指示部と同じく, 受信機のビデオ信号を受け, 輝度変調を行なう. 同期管制部からは, 距離目盛, 時間軸掃引信号を受ける. A スコープ指示部は, オーロラ反射波の強度を撮影するためのもので, 受信機出力は対数圧縮器を経て, 3" ブラウン管に加えられる.

撮影用カメラ装置は, 16mm 用ボレックスカメラと 35mm 用特殊カメラを使用した. 16mm 用カメラは PPI 指示部のみに使用されて, 空中線の1回転毎に発生する接点信号により, 30秒ごとに駆動されて, 駒取り撮影を行なう. 駒送りに要する時間は約2秒である.

35mm 用特殊カメラは, A スコープおよび R-t スコープ用に製作されたもので, 100フィートのフィルムが格納可能であって, 駒取りおよび一定速度での連続撮影ができる機構となっている. A スコープ指示部の駒取り用信号は, カメラ駆動装置に設けられたカム機構により発生し, 15秒毎に1駒の撮影を行なう. このカム機構はさらに A スコープの時計撮影用信号, R-t スコープのタイムマーク信号を発生する. PPI スコープの時計の撮影は, 空中線駆動装置からの信号によって行なわれる.

指示装置の簡単な仕様を示すと次のとおりである.

1. 観測距離 500, 1000 および 1500km (切換)
2. 距離目盛 100km (輝度変調)
3. 方位角目盛信号 30° 毎, 12本 (PPI)
4. 電 源 50Hz, 100V

2.4. 空中線

空中線は送信機の低出力を補うため、高利得指向性空中線とすることとし、8素子2段スタックの八木空中線を用いた。この空中線は、時計方向に30秒で1回転する低速回転式で、仰角は0°~90°まで自由に変えることができる。実際に観測に用いた仰角は、昭和基地の地磁気の dip が約 65° であるから、この磁界に直角に空中線ビームが当たるように約 25° に設定した。

次に空中線の電氣的性能を示す。

1. 周波数 112.2MHz ± 3MHz
2. 空中線利得 13db (ただし比ダイポール利得)
3. 前後方電力比 15db 以上
4. ビーム幅 約 38° (半値幅)
5. 偏波面 水平偏波

図4は昭和基地に設置された八木空中線である。手前の建物は電離棟で、その中に観測装

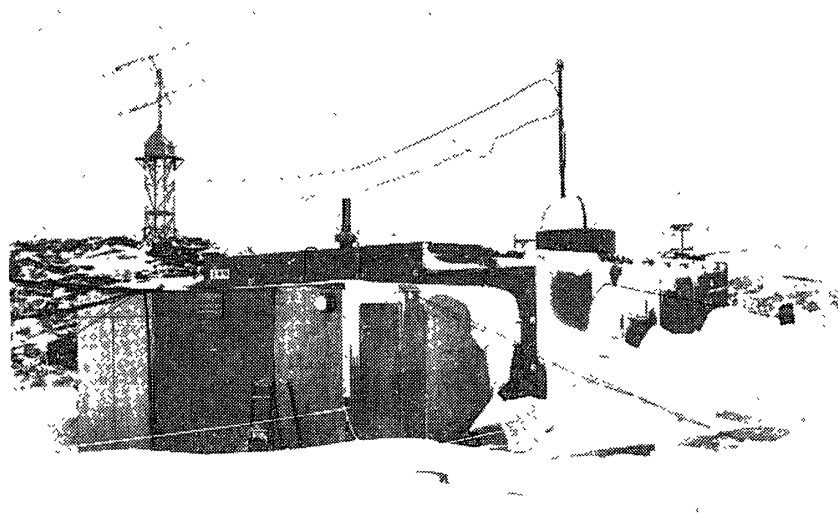


図 4 昭和基地に設置された八木空中線

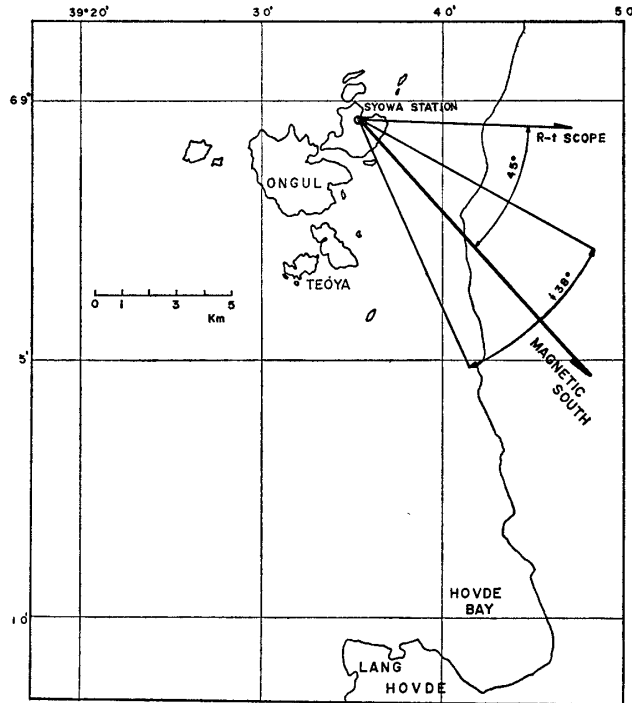


図5 八木空中線の指向特性と方位

置が収められている。

図5は東オングル島の空中線設置位置から空中線を磁気南に向けた場合の空中線ビーム幅(半値幅)を示したものである。PPI観測のときは、このビーム幅で360°回転するが、R-tおよびAスコープ観測のときは、磁気南に対して、ほぼ45°東寄りの方位に固定した。

2.5. 観測諸元

観測場所：昭和基地 69.0°S, 39.4°E

観測期間：1966年4月～1967年12月(21ヵ月間)

観測時刻：1800～0700L.T.(13時間)は上記の期間連続して観測を行なった。ただし、0700～1800L.T.(11時間)は季節変化特性を得るため、1966年6月、9月および12月の3ヵ月間についてそれぞれ観測を行なった。ここでL.T.=U.T.+3^hである。

観測項目：全観測時間にわたって、PPI観測が主に行なわれたが、1966年度には、試験的にR-tおよびAスコープの観測も行なった。

2.6. 観測データのサンプル

図6は1966年9月28日0752L.T.に撮影したPPIスコープの観測データである。この図

では、地磁気北が下に向いているので注意されたい。これはオーロラ反射波が、ほぼ全周に現われている場合で、特に南東および南西の方向に反射波の広がりが見られ、range は 1000 km の距離にまで及んでいる。

図7は1966年8月19日に観測した R-t スコープの1例である。最も range の短い反射波は約 300km に現われ、時間の経過に伴って徐々に移動し、500km 付近に遠ざかって消滅している。

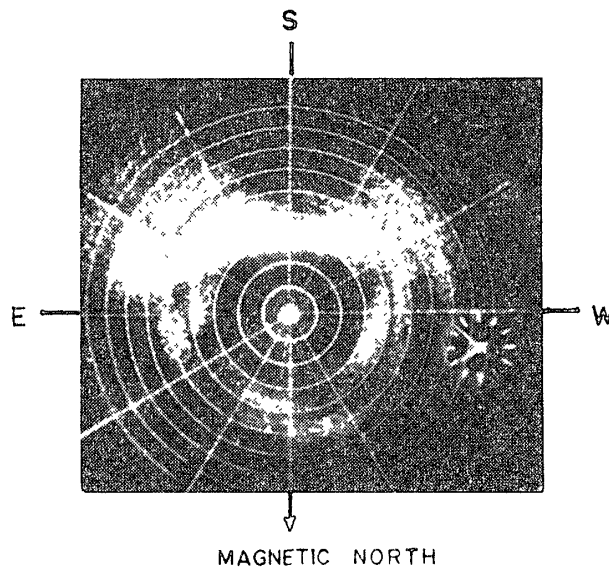


図 6 PPI スコープの撮影例 (1966年9月28日 0752L.T.)

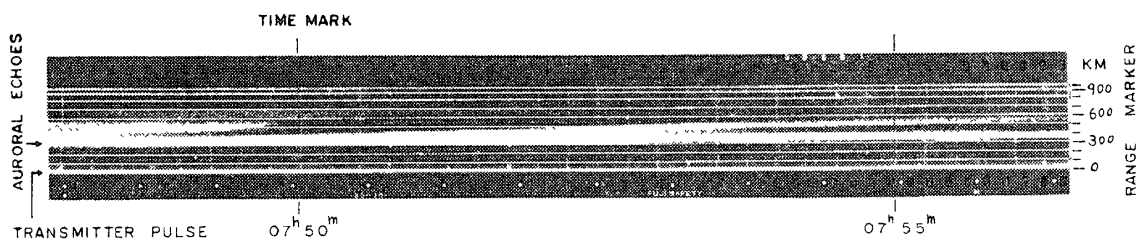


図 7 R-t スコープの撮影例 (1966年8月19日)

図8は1966年8月16日 0635L.T. に行なった A スコープの撮影例である。反射波は約 320km から 400km の range の間にあり、数個に分かれ、これが1群を形成している。

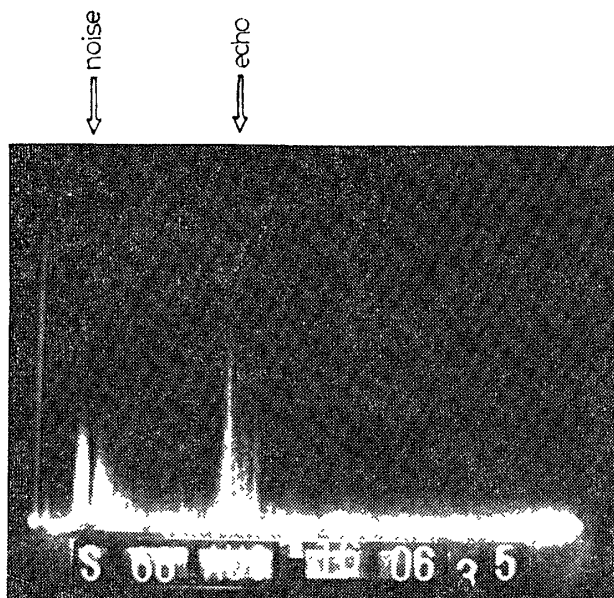


図 8 Aスコープの撮影例

3. 観測結果

約2カ年にわたるレーダ観測の大部分は、PPIスコープの観測であり、我々は今回、このPPIスコープのデータを用いて、オーロラ反射波の統計的な出現特性について解析を行なった。

3.1. 日変化特性

図9は1966年6月、9月と12月の3カ月について、radar auroraの出現率の日変化特性を示したものである。出現率は各月を通じて、昼間に当る時刻より夜間に相当する時刻、すなわち、1800~0900L.T.の時間に多い。さらに、夜間に相当する時刻、1800~0700L.T.の時間に対する各月の出現率を示すと、図10および図11となる。

図10は1966年の各月毎のradar auroraの出現率を示す。この図から、出現率には時間的に二つの山の現われることが認められる。その一つは

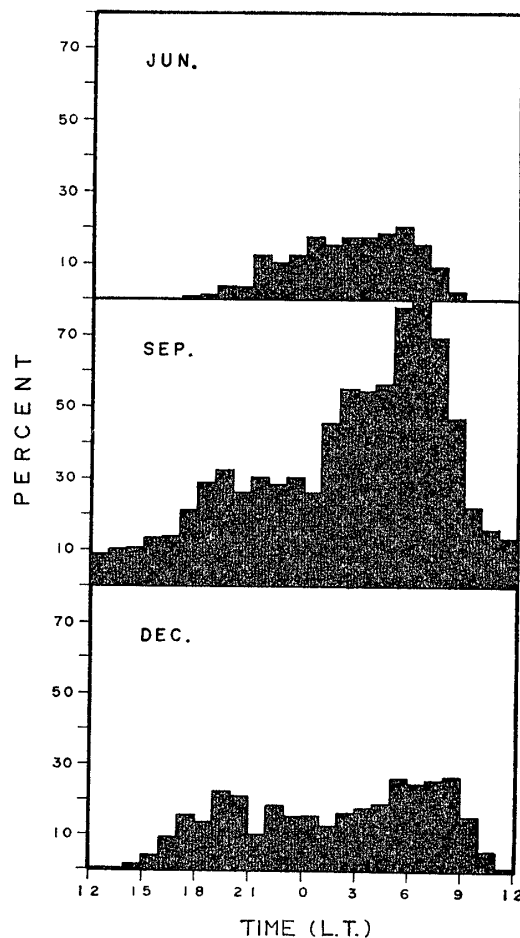


図 9 オーロラ反射波出現率の日変化および季節変化特性 (1966)

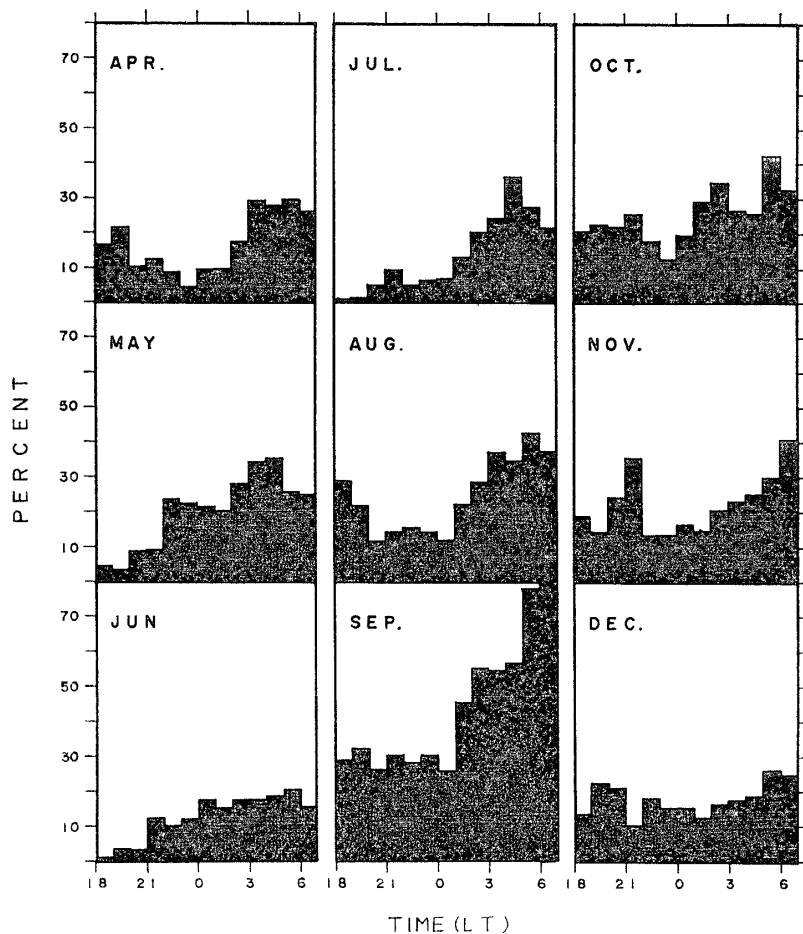


図 10 オーロラ反射波の夜間時 (1800~0700L.T.) の出現率 (1966年)

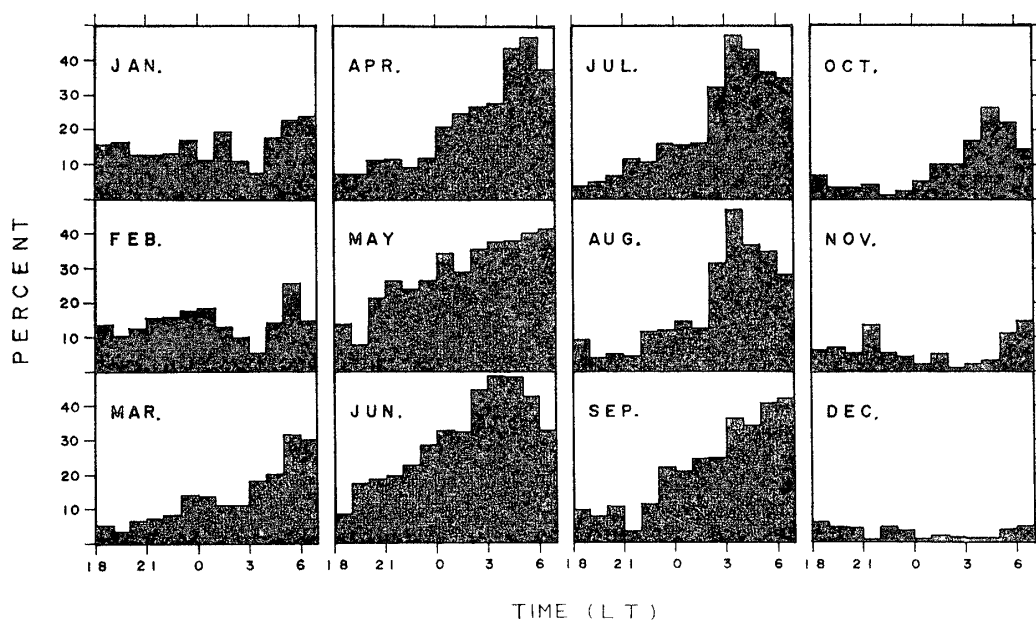


図 11 オーロラ反射波の夜間時 (1800~0700L.T.) の出現率 (1967年)

1800~2200L.T. の時間帯であり，他の山は 0300~0700L.T. (12月頃は 0900L.T.) の時間帯である。

この二つの山を比較すると，朝方の時刻に相当する後者の山は出現率が高く，明確であるが，夕方の時刻に相当する前者の山は，それが少なく，殆んど確認できない月もある。

図11は1967年の radar aurora の出現率を示す。図10に比べて，出現率の高い二つの山は，さほど明瞭ではないが，明らかに高いピークが存在する。このピークは図10と一致しており，朝方の 0300~0700L.T. 付近の時間帯に現われている。

3.2. 季節変化特性

図9は radar aurora の出現率の季節変化特性をも示している。6月は1966年のうち，地磁気活動の最も静穏なときで，昼間に当る時間には反射波は現われていない。9月は6月と全く逆で，地磁気活動の最も激しい場合であり，昼夜にわたって反射波は良好に受信されている。12月は地磁気活動度が，これらの中間に当り，反射波の出現率も，この活動度と同様に，前二者の中間を示している。

図12は，図10および図11の出現率を月毎に合計した値を示したものである。ここで1966年と1967年の各月の出現率の大きさを比較した場合，季節変化特性は明らかでない。

同図の上欄に昭和基地の地磁気活動度を表わす K-指数の和が示されているが，この ΣK

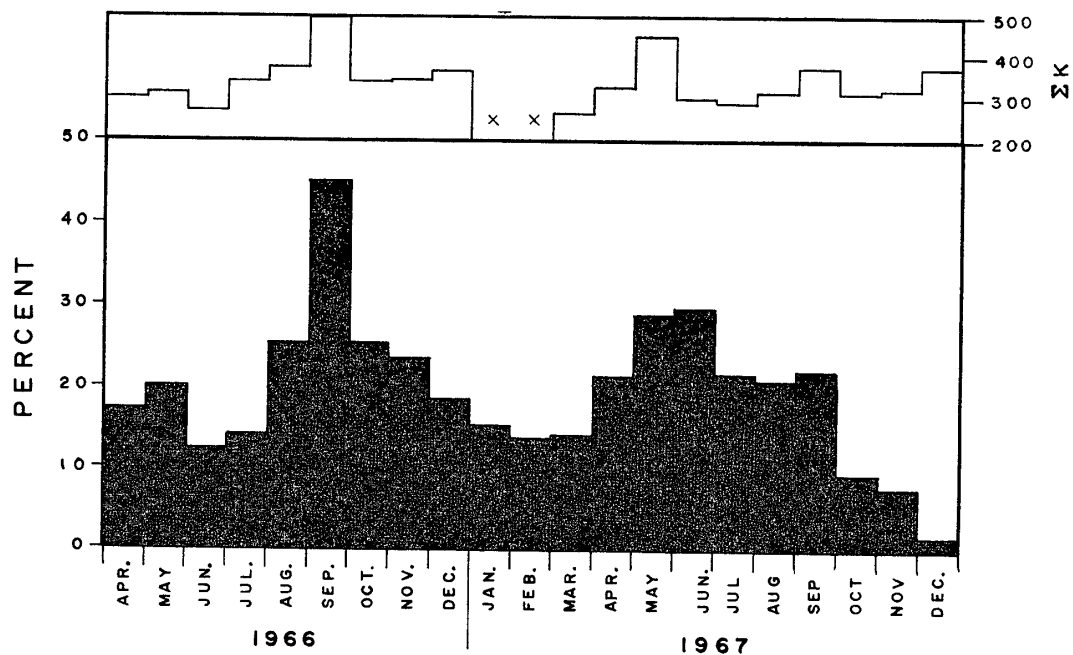


図12 オーロラ反射波の出現率(夜間時)と地磁気活動度

の値と出現率とを比較，対応すると，非常に良好な相関のあることが分かる．しかし12月は逆相関となり，南極の夏期には出現率が低下している．

年変化特性は，図12から分かるように，現在ではデータ量不足のためうんぬんすることはできない．今後の観測データの補充を待って解析したい．

3.3. 方位角分布特性

図13は反射波の出現率の方位角分布特性を1966年6月，9月および12月の3カ月について示したものである．

反射波の出現率は各月に共通して， 90° から 270° までの方位に対して最も多く現われ，更に出現率の高い方位は $120^{\circ}\sim 240^{\circ}$ の範囲となり，その中心は，ほぼ地磁気南を示している．この場合，空中線の半値幅約 $\pm 18^{\circ}$ を考慮すると，真の radar aurora の存在する位

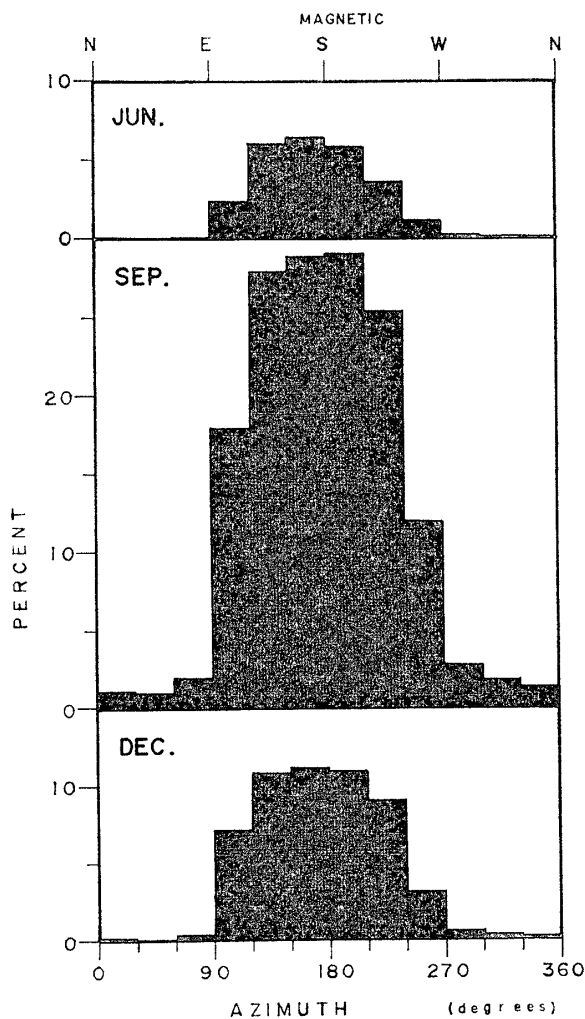


図 13 オーロラ反射波の出現率の方位角分布特性

置は $120^{\circ}\sim 240^{\circ}$ と考えられる。

反対に、反射波の出現率の最も低い方位は、 $N(0^{\circ})$ を中心にして約 $\pm 60^{\circ}$ の範囲であり、出現率の高い9月においても、出現率は約4%と低い値を示している。

方位分布特性としての季節変化特性は全く認められない。すなわち、地磁気活動度の最も静穏な6月と、擾乱の多い9月は、出現率の型が全く相似形であり、前二者の間である12月においても殆んど同じ型を示している。

図14は反射波の出現率に対する方位角分布特性を、前図と同じく1966年6月、9月と12月について時間的に示したものである。

この図から特色ともいべき二つの点が認められる。すなわち、その第1の点は1200~2200L.T.の時間については、各月とも $270^{\circ}\leftarrow N\rightarrow 90^{\circ}$ の方位からの反射波は全く受信されない。特に9月は地磁気擾乱の激しい月であるにもかかわらず、同じような結果を示している。

第2の点は反射波が全方位から受信される時間が季節的に変動することである。すなわち、

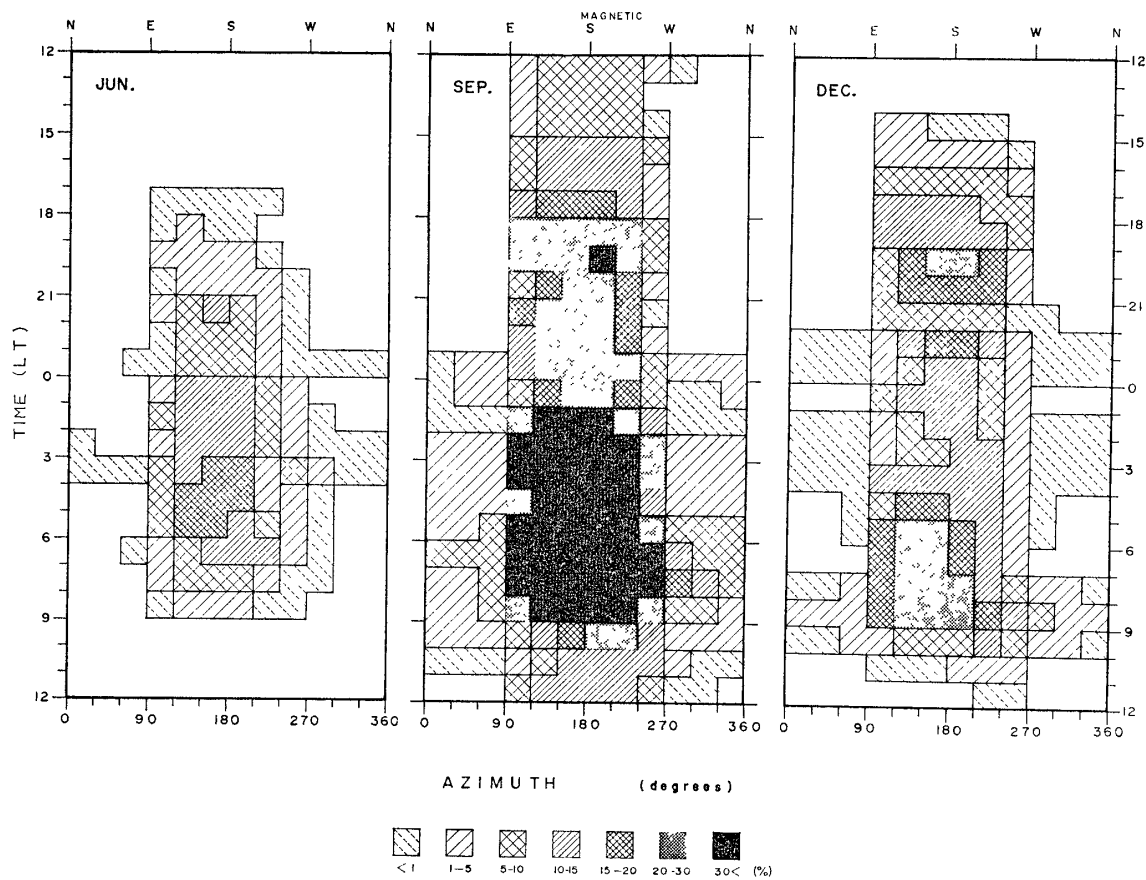


図 14 オーロラ反射波の時間的な出現率の方位角分布特性

6月の場合は 0300~0400L.T. 付近, 9月には 0600~0700L.T. 付近, 12月には 0800~0900 L.T. 付近に現われ, 地磁気擾乱度とは無関係に季節的にこの時間帯が順次移動している.

3.4. 距離特性

図15は電波の反射点までの距離 (range) に対する反射波の出現率を, 1966年9月2日から9日までの8日間のデータについて示している. 求められた range の値は, グループで現われた反射波の最も近い点の値を読取ったものである.

反射波の受信率の最も高い range は 300km (+20km, -30km) で, 73%の高い受信率を示し, 大部分の電波が, この領域から反射されていることがわかる. 次に高い受信率を示す range は 250km で, 8.8%と激減しており, その他の range の受信率はわずか4%以下である. また反射波は 200km 以下の近距離では受信されず, 受信された最も遠い距離は約 1000km であった.

約 200~400km, 600~700km の range に受信率の高くなる二つのグループが認められ, 300km, 600km と 900km にそれぞれ受信率の高いピークが示されている. このピークは高調波関係を示しており, それぞれ2回反射波および3回反射波であろうと推定される.

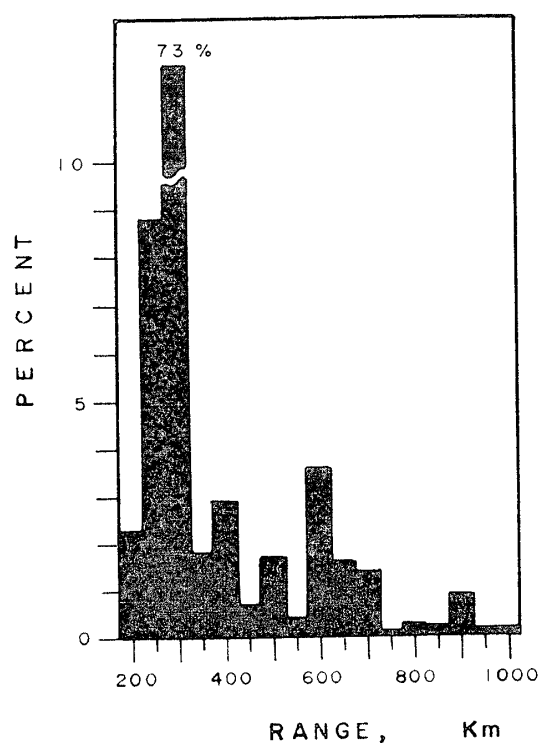


図 15 オーロラ反射波の出現率の距離特性

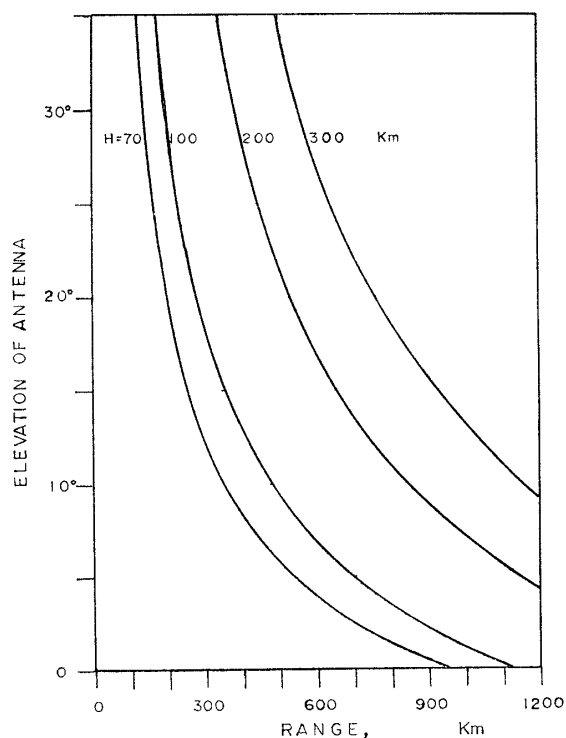


図 16 空中線仰角に対する電離層高の距離特性

図16は range と種々の空中線仰角に対する電波の反射点の高さを示す計算値曲線である。観測には空中線仰角 25° を用いたから、受信率の最も高い 300km の range に対応する電離層の反射点の高さを求めると、約 135km となる。更に、250km の range の場合には、高さは約 110km となり、これらの値は通常の Es 層の高さの概念からすると、少し高目の値である。

使用した八木空中線の垂直面指向特性は実測値がなく、水平面指向特性とほぼ同じであると仮定すると $25^\circ \pm 18^\circ$ (半値幅) となり、この指向特性が含む電離層の高さの範囲は、70 km 以下の低い領域から、200km 以上におよぶ高さとなり、反射波の range から簡単に電離層の反射高を求めることはできない。

4. 結 言

以上、昭和基地に設置されたレーダ装置の概要と、オーロラ反射波の出現特性について解析を行ない、その結果について報告した。最後に、まとめとして結果の要約を示すと、次のとおりである。

1. オーロラ反射波の出現率は、昼間より夜間に相当する時刻に多い。1日の出現率には山が二つ認められ、その山の現われる時刻は、1800~2200L.T. と 0300~0900L.T. の時間帯であり、後者の山が大きく顕著である。

2. オーロラ反射波の出現率の季節変化特性は明らかでなく、この出現率は地磁気活動度 K と非常に良好な相関がある。しかし、12月頃から南極の夏期にかけては、出現率が低下し、K とは逆相関を示す。

3. 経年変化特性はデータ量不足で、明らかな結果が得られなかった。

4. オーロラ反射波の出現率の方位特性については、季節変化は認められず、この出現率は $120^\circ \sim 240^\circ$ の範囲の方位が高く、地磁気南を中心に行っている。逆に、出現率の最も低い方位は $0^\circ \pm 60^\circ$ の範囲である。

時間的な方位特性：年間を通じて、1200~2200L.T. の時間帯は $270^\circ \leftarrow 0^\circ \rightarrow 90^\circ (N \pm 90^\circ)$ の方位からの反射波は全く受信されない。反対に、全方向から反射波が受信される時間は、季節的に移動しており、6月は 0300~0400L.T.、9月は 0600~0700L.T.、12月は 0800~0900L.T. を示している。

5. 反射波が最も多く受信される range は 300km で、全受信率の73%を示している。反射波の受信される最も近い range は 200km、反対に遠い range は 1000km 付近である。

最後に、本報告を結ぶにあたり、種々有益なご助言をいただいた槽谷電波部長、新野電波予報研究室長、また、観測装置の製作に当たって、いろいろとご指導を賜わった当時の錦織第一電波課長、内倉研究官に深くお礼申し上げます。

References

- HULTQVIST, B. and A. EGGLEND (1964): Radio aurora. *Space Sci. Rev.*, **3**, 27-78.
LEONARD, R. S. (1961): Distribution of radar auroras over Alaska. *Univ. Alaska. Sci. Rep.*, **9**, 1-75.
UNWIN, R. S. (1966): The morphology of the V.H.F. radio aurora at Sunspot maximum-I (Diurnal and seasonal variations). *J.A.T.P.*, **28**, 1167-1181.

(1969年11月26日受理)