

昭和基地における電波オーロラの出現特性

城 功*・坂 元 敏 朗**

Characteristics of Radio Aurora Occurrences Observed at Syowa Station in Antarctica

Isao SHIRO* and Toshiro SAKAMOTO**

Abstract: Radio aurora occurrences on 112 MHz observed for nearly one year from April 1970 till February 1971 at Syowa Station the Antarctic were analyzed.

Results obtained are summarized as follows:

- 1) The diurnal variation in the frequency of the radio echo occurrence correlates well with the magnetic Q-index.
- 2) The frequency of their occurrence in the morning sequence correlates comparatively well with absorption of the cosmic radio noise recorded by the riometer, but no definite relation is found in the evening sequence.
- 3) Most echoes in the dark winter have discrete structures, while those in the sunlit summer are characterized by diffuse ones.
- 4) The reflected echoes are generally weaker in the winter than in the summer.
- 5) The echoes in the winter are confined within the range from 300 to 400 km, while the range of those in the summer extends from 300 to 1100 km.
- 6) Radio auroras move northward in the morning and southward in the evening, at a speed of 500~600m/s.

1. 緒 言

南極大陸でのオーロラレーダ観測は、IGYに始まり、アメリカ、ニュージーランド、イギリス、ソ連等それぞれの基地で、30~72MHz帯の電波を使用して観測を行なっている。わが国が初めて昭和基地（地理座標：緯度69°00'S，経度 39°35'E；地磁気座標：緯度 69.6°S，経度 77.1°E）でパルスレーダによるオーロラの観測を開始したのは、1966年第7次越冬観

*電波研究所電波部。 Radio Research Laboratories, Koganei, Tokyo.

**電波研究所山川電波観測所。 Yamagawa Radio Wave Observatory, Radio Research Laboratories, Yamagawa, Ibusuki-gun, Kagoshima.

測からである。その後、1967年第8次越冬観測でも行なわれたが、第7次、第8次越冬観測で実施された観測方法は、PPI方式（アンテナを時計方向に30秒で1回転する低速回転式機構を有し、方位角目盛を 30° 毎に表示する方式で、距離目盛は100km毎の輝度変調）でオーロラ電離雲から反射エコーの到来方位と反射距離等の観測に主眼をおいた。これらの観測データの解析結果はすでに報告されているが（長谷川他、1970）、要約すると、昭和基地における電波オーロラの方位角分布特性は、各月に共通して、南磁極方向 $\pm 60^\circ$ の範囲からの反射が圧倒的に多く、反射波が最も多く受信される距離は300kmで、全受信率の73%にも達している。

また、オーロラ反射波の日変化特性として、 $18^h \sim 22^h$ LT ($15^h \sim 19^h$ UT) と $03^h \sim 09^h$ LT ($00^h \sim 06^h$ UT) の時間帯に受信率の極大値が存在することがわかった。

第11次越冬観測では、以上のような解析結果をもとに、観測方法をPPI方式からAスコープ方式に変え、アンテナの指向特性を南磁極方向に固定し、仰角 25° で、オーロラ反射波の強度変化を調べるためのAスコープ記録（range 対反射強度）、および反射層の時間的変化を見るための流し記録（range 対時間）に限定した観測を実施した。

本報告は、PPI記録で得られなかったオーロラ電離雲の時間的移動と、反射強度の日変化、季節変化特性、および地磁気活動との相互関係など、現在まで解析の進んだ範囲内で報告するものである。

2. 観測装置および観測データ

2.1. 観測装置

図1は昭和基地に設置されているオーロラ観測用レーダ装置のブロックダイアグラムである。送信装置は水晶発振器、励振部（周波数通倍器、および中間電力増幅器）と終段電力増幅器、変調器、電源部から構成されている。送信機の電氣的性能は、

周波数	112.2MHz
電波型式	P_0
通信方式	電源同期
送信方式	水晶制御電力増幅方式
送信出力	20kW（尖頭値）
パルス幅	$50\mu s$ および $100\mu s$
繰返し周波数	50Hz
電源	3相 200V

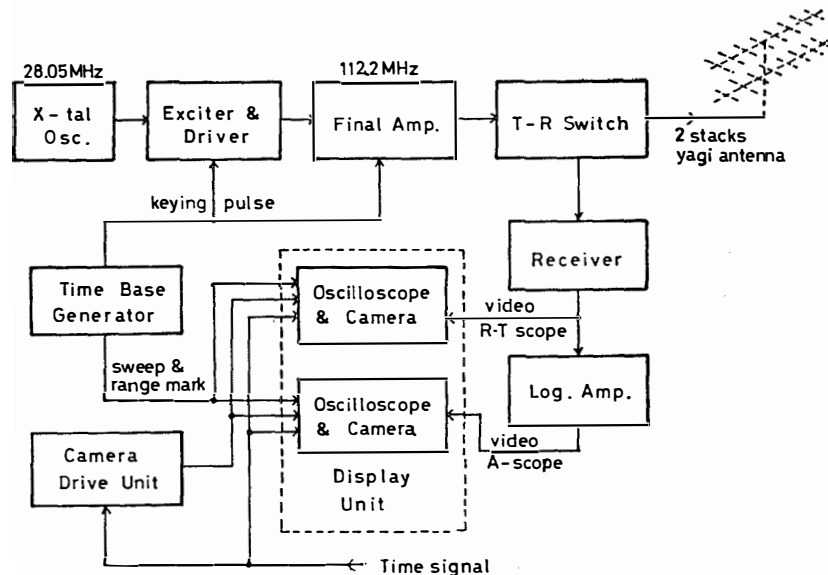


図 1 オーロラレーダ装置のブロックダイアグラム

出力インピーダンス 50Ω

受信装置は、水晶制御ダブルスーパーヘテロダイン方式のインパルス受信機と、受信機入力信号の変化を、対数圧縮素子を用いて対数変化に圧縮する対数圧縮器とで構成され、電気的仕様は次の通りである。

受信周波数	112.2MHz
周波数帯域幅	50kHz \pm 5kHz (3dB以内)
入力インピーダンス	50 Ω
感度	S/N 雑音法 3dB 以下
第 1 中間周波数	35MHz
第 2 中間周波数	2MHz
ビデオ増幅周波数帯域	50Hz \sim 50kHz
電源	100V 50Hz

指示部は 5 寸のオシロスコープ、同期管制装置、および写真撮影用カメラ装置とから構成されている。5 寸のオシロスコープは、A スコープ指示用と流し記録指示用との 2 台からなり、反射エコーの時間的変化を連続的に表示するものである。A スコープ指示部は、オーロラ反射波の強度を記録するためのもので、同期管制装置より距離目盛信号と、時間軸掃引信号を受け、掃引基線を距離目盛信号で輝度変調し、受信機のビデオ出力の振幅変化と距離との表示をする。流し記録指示部は、パルス電波の反射点までの距離の時間的変化を撮影する

もので、同期管制装置から距離目盛信号と時計装置から時刻信号を受け、受信機のビデオ信号で輝度変調を行ない表示する。

撮影用カメラ装置には、35mm用特殊カメラを使用した。このカメラは、Aスコープおよび流し記録用に製作されたもので、100フィートのフィルムが格納され、駒どりおよび一定速度での連続撮影ができる機構に設計されたものである。Aスコープ指示部の駒どりは、毎分0秒の駒どり信号を時計装置から受け、5～10秒の適当な露光で撮影を行なう。また、流し記録は、1cm/minの一定速度でフィルムを流し、時計装置から10分および1時間信号を受け、時定数回路で時間幅を調整し、10分信号と1時間信号を区別する方法をとっている。指示部の電氣的諸元は次の通りである。

同期管制装置

繰返し周波数	50Hz 電源同期
最大観測距離	1000および1500km
距離目盛	100km毎（輝度変調）
電 源	100V 50Hz

Aスコープ駒どりカメラ

フィルムサイズ	35mmハーフサイズ
フィルム巻取り時間	2～5秒
フィルムマガジン	100フィート
電 源	100V 50Hz

流し記録用カメラ

フィルムサイズ	35mm
フィルム送り速度	1cm/min または 2cm/min（切替）
フィルムマガジン	100フィート
電 源	100V 50Hz

空中線は高利得かつ指向特性をシャープにするため8素子2段スタック八木空中線が用いられている。水平角および仰角は機械的に容易に変化できるようになっている。

電氣的性能は次の通りである。

周波数	112.2MHz ± 3MHz
空中線利得	13dB（比ダイポール利得）
前後方電力比	15dB以上

水平面指向特性	約40°
垂直面指向特性	約30°
偏波面	水平偏波

2.2. 観測データ

2.2.1. 観測期間

Aスコープ，流し記録ともに1か年間を通じ，17:00LT から 09:00LT までの夜間観測を行ない，特別観測として，6月，8月，10月の3か月は昼間も含む24時間の連続観測を行なった．観測した期間は1970年4月から1971年2月末までの11か月間で，この間の観測結果についてはすでに報告している (SIRO & SAKAMOTO, 1972)．

2.2.2. Aスコープ記録

図2(a)にAスコープ観測データの一例を示した．反射波は discrete echo で，250km から 350km の range の間にある．また図2(b)は diffuse echo の一例で，300km から 1100 km の range の間に数個の echo が出現している．

インパルス受信機の入力信号は，電波の伝ぱん通路や，反射層の電子密度の不規則な分布による散乱等によって，単純な波形にとどまらず，複雑な波形も多い．したがって，受信信号波形を次のような基準で分類した．

Discrete echo: 受信パルス波形が単純で，1つのピークを有する鏡面反射と思われる信号波形 (図2a)．

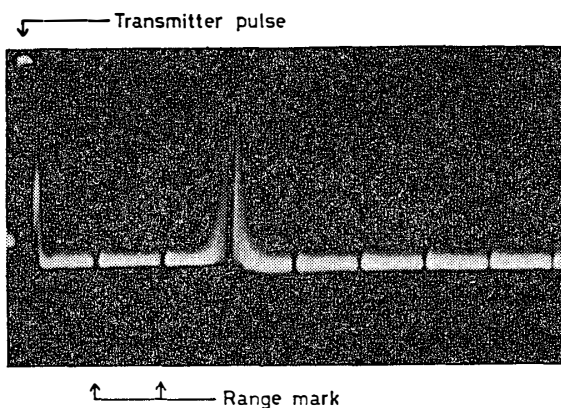


図 2(a) Aスコープ記録例 (Discrete echo)

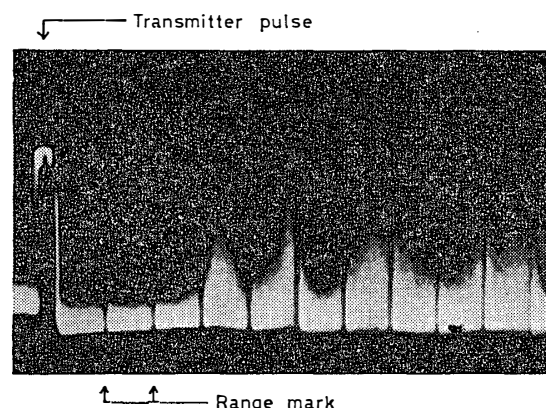


図 2(b) Aスコープ記録例 (Diffuse echo)

Diffuse echo: 受信パルス波形が複雑で，複数以上のピークを有する散乱性と思われる信号波形 (図2b)．

ただし、エコーの判定基準は受信パルスのレベルが、受信機内部雑音レベルまで落ち込んだところで、立ち上りから落ち込みまでの間のピーク数で分類した。インパルス受信機の較正は、標準信号発生器の搬送波を送信パルスで変調し、その出力を受信機入力として、観測期間中はおよそ10~15日毎に較正した。したがって、較正は受信機の入力端で行なったので、アンテナ系の利得は含まれない。

2.2.3. 流し記録

図3は越冬観測中の流し記録の一例である。

最も近い range は 250km 付近で、時間の経過に伴って徐々に移動し、800km 付近に遠ざかり、消滅している。

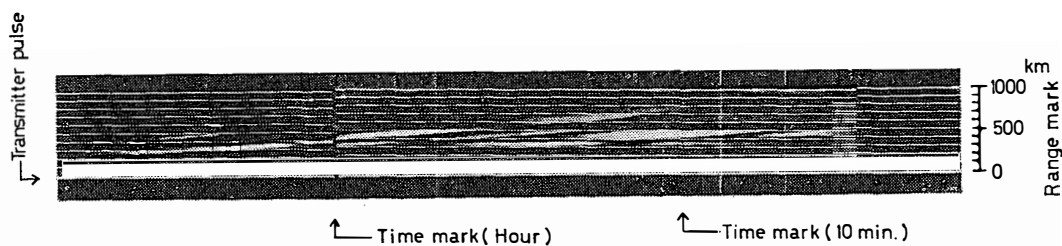


図3 流し記録例

2.2.4. 地磁気およびリオメーター記録

一般に広く用いられている地磁気活動の目安として、K指数があるが、K指数は3時間内の全体的な変化範囲を測るのに対して、更に短い15分に1つの数値を与えるQ指数を採用した。

Q指数は、静穏日日変化によって決まる基準曲線からの偏差の全体を測ることによって決定される。即ち、Q指数は各時間の0分、15分、30分、45分を中心とした15分間内において基準曲線から+方向と-方向に測ったそれぞれの最大偏差の絶対値の和(r)から求められる。Q指数に対応する r 値の上限の値は表1の通りである。

表 1

Q	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r 値の上限	10	20	40	80	140	240	400	660	1000	1500	2200	∞

Q指数の決定は、Z成分を除く2成分(H, D成分)を読み取ることによって得られるのであるが、ここではQ指数を決定するのに、H成分のみを用い、また、最大偏差の方向が+および-に応じてQ指数に符号をつけた値(Q')を用いた。したがって、本文におけるQ'

指数は、電離層内の電流の強さ、即ち、昭和基地上層の東西方向の電流の強さを示すと考えられる。

また、越冬観測期間中のリオメーター記録 (30MHz) については、すでに報告している (SHIRO & SAKAMOTO, 1971).

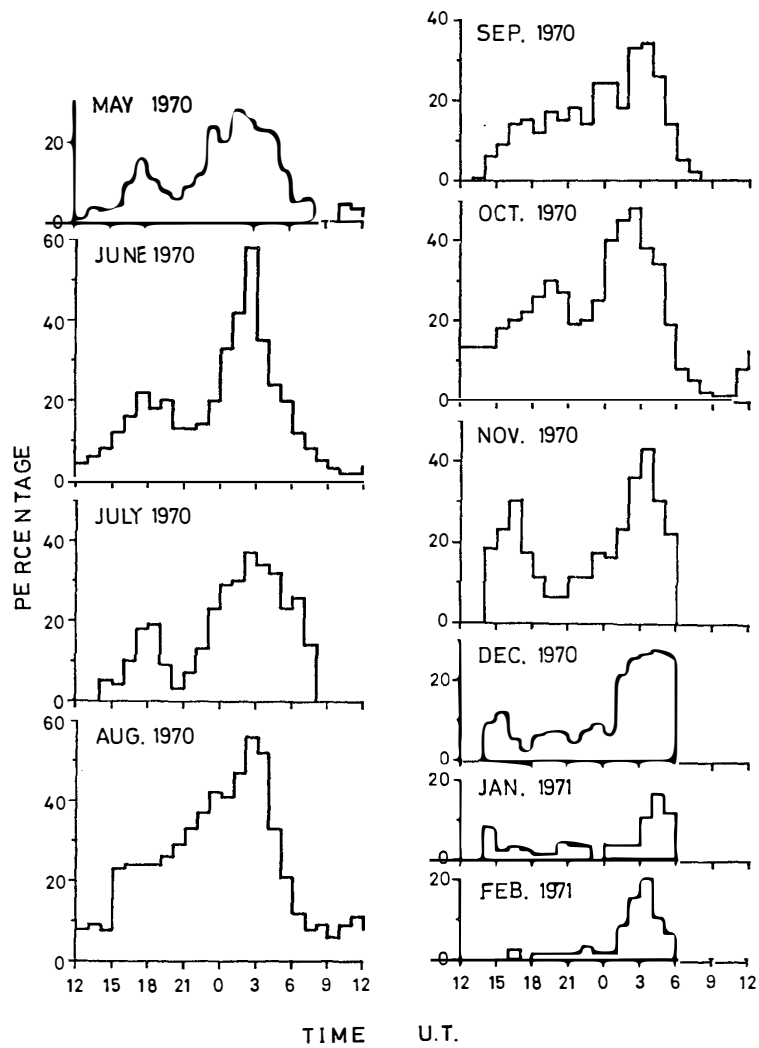


図 4 月別オーロラ反射波の受信率

3. 観測結果

3.1. オーロラエコーの日変化および季節変化

越冬観測中に観測された、オーロラ反射波の受信率（観測時間に対するエコーの受信時間の割合）の解析結果を図4に示した。図4から判るように、約1か年の観測期間を通じ、各月に共通して午後側と午前側にそれぞれ受信率が極大になる時間帯がある。このような現象は、昭和基地で観測された過去3か年間のデータが一様に示す固有の特性であり、北半球の多くの観測所で観測された結果 (HULTQVIST & EGELAND, 1964) から共通に見られる現象である。また、観測地点の地理的位置の相違によって、オーロラ反射波の受信率の日変化が異なることも報告されている。

1961年の越冬観測で、昭和基地におけるE領域内の特質について川尻他(1965)が詳しく解析したが、特にEn (night E層), Esr (retardation type Es層) 層の臨界周波数の日変化特性は、夕刻と朝方にそれぞれ極大が見られ、朝方の極大は夕刻の臨界周波数のそれよりも更に高い値を示している。これらの解析結果は、図4に示したオーロラエコー受信率の日変化特性、および後述する地磁気 Q' 指数の日変化に見られる極大を示す時間帯とほぼ合致している。

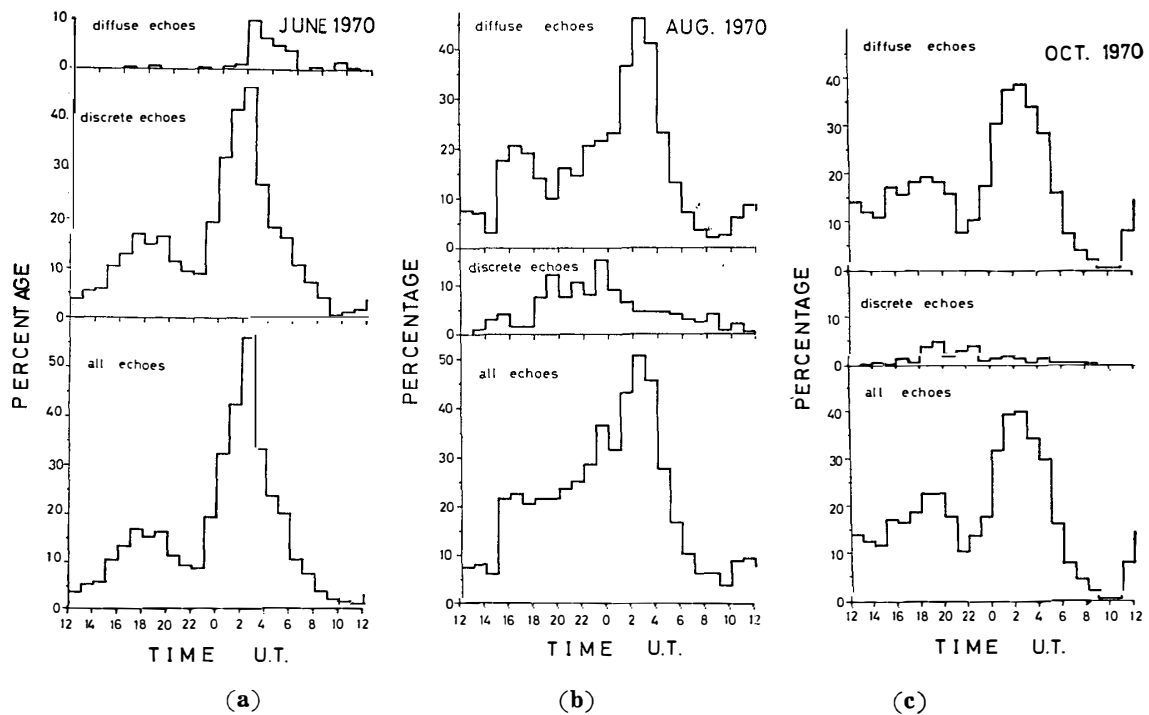


図5 オーロラ反射波の季節変化特性

このことから、受信率を高める要素の一つとして、電離層 E 領域における背景的な電子密度が考えられる。

図5(a)から図5(c)は、特に6月、8月、10月の3か月間実施した24時間連続観測の結果から、2.2.2. 項の基準にもとづいて、Aスコープ受信波形を分類して集計したものである。この図が示すように、全体のエコー受信率に対し、discrete echo の受信率は6月が92%であるのに対して、8月は23%、10月は7%に減少している。また diffuse echo については、discrete echo とは対照的に、6月は8%弱に対し、10月は93%と増加している。

即ち、dark winter の6月頃は、反射エコーは単純な discrete echo の受信率が高く、sunlit summer の12月頃までの中間月である8月および10月頃は、6月の反射エコーとは逆に、discrete echo の受信率が低下し、diffuse echo の受信率が高くなっている。このような変化の様相は、Aスコープの記録を局部的に整理した図8(a)から図8(f)でも示されており、エコーの距離分布と強度変化に、季節的な変化が明瞭に示されている。

エコーの反射距離は図示するまでに至らなかったが、6月頃の discrete echo はその大部分が300km~400kmに限定されており、8月、10月は diffuse echo の受信率が高くなるにつれて、反射距離も300km~1100kmに及ぶ広範囲な領域に広がっている。

このように、反射層の季節的変移の過程は極冠域特有の現象である、dark winter と sunlit summer における太陽輻射の有無と密接に関係しているように思われる。中緯度地方における下部電離層は、日の出と共に生成が始まり、日没と同時に消滅するが、極冠域での下部電離層生成過程では、太陽輻射のみでなく、外気圏から突入する降下粒子の効果も大きく寄与しているがために、消滅することがなく、電離層垂直打ち上げ観測においても、dark winter においては、下部電離層の存在は裏付けられている。

電波オーロラの観測においても、外気圏からの降下粒子にその電離源を依存している dark winter では、反射エコーの受信波形は、その大部分が discrete な波形で占められているが、太陽輻射の効果があられる8月頃からの受信波形は diffuse な波形が多くなり、その受信率も高くなっている。つまり太陽輻射の効果は、レーダ電波の反射機構を大きく乱し、電波の反射領域を広める結果となってあられると考えられる。Diffuse echo の反射は、その大部分が散乱によるものであろうことは間違いないだろう。

3.2. オーロラエコー受信率と地磁気指数

図6は、1966年および1970年の、昭和基地で観測された地磁気データから、K指数およびオーロラレーダの観測時間に対する受信率を、10日間移動平均値を求め、越冬観測期間につ

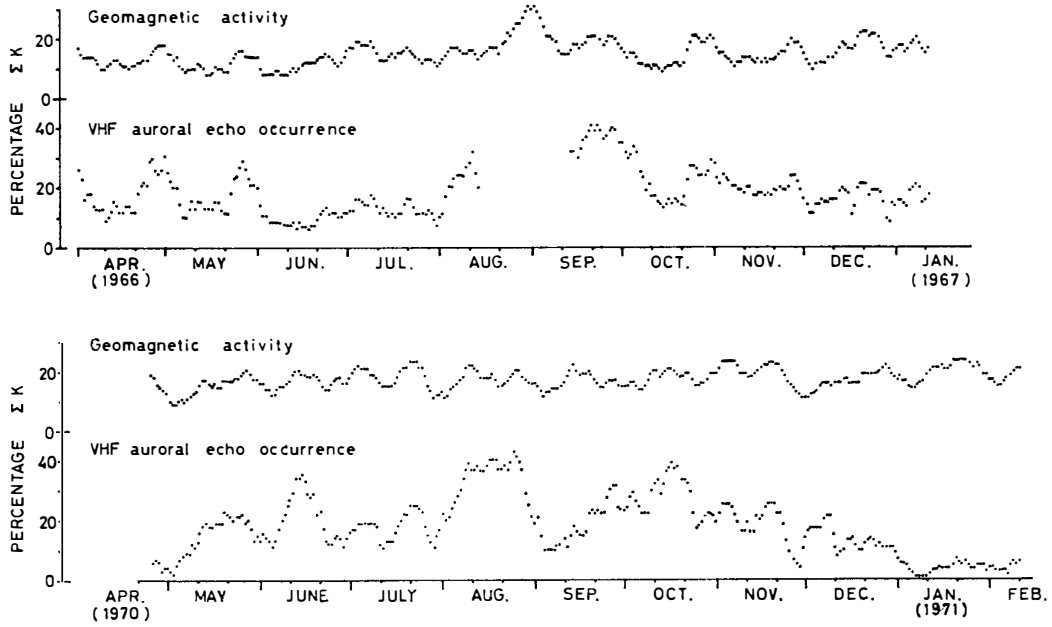


図 6 オーロラ反射波の受信率と地磁気 K 指数との相互関係

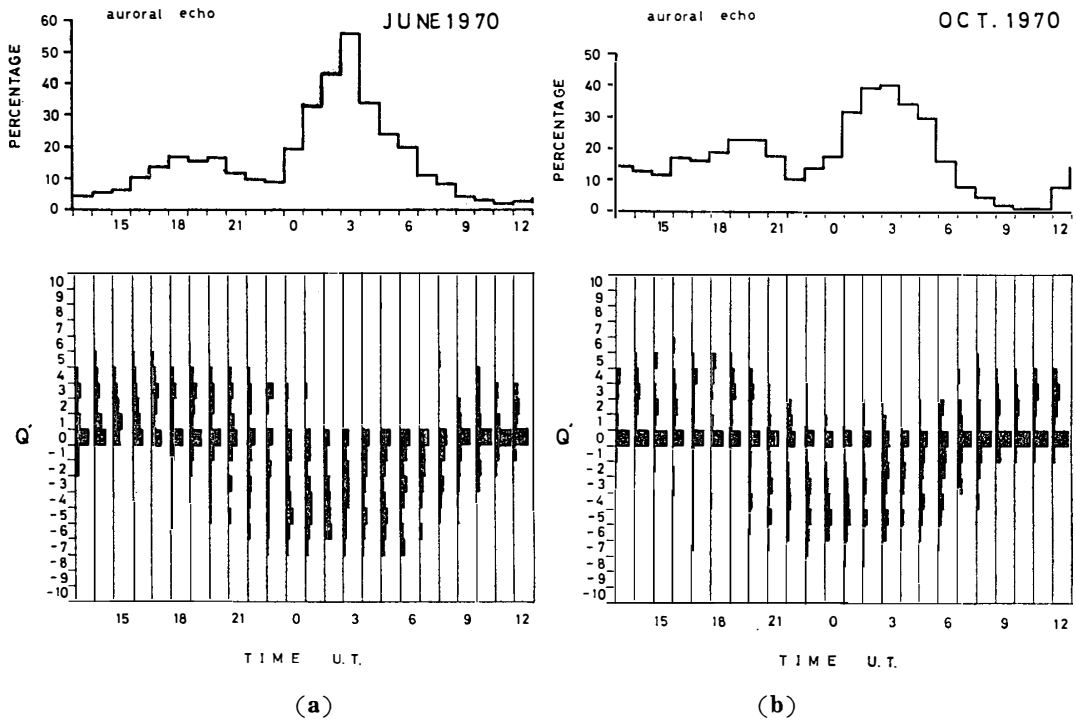


図 7 地磁気 Q' 指数とオーロラ反射波受信率との相互関係

いてプロットしたものである。1966年8～9月に一部欠測があるが、全期間を通じ両者の変化は同じ傾向を示している。

図7(a), (b)は1970年の昭和基地での地磁気データから、6月、10月の2か月分について水平成分Hだけを Q' 指数に直し、 Q' 指数の日変化を示すヒストグラムと、その月のオーロラエコーの受信率とを示した。この図からわかるように、地磁気活動の日変化は一般的傾向として、午後側の21^h～22^h UT頃まで弱い正の湾形変化で占められ、正から負の湾形変化への移行はおおよそ22^h UT頃に起きている。正の湾形変化の極大は、16^h～17^h前後で、負の湾形変化の極小は、02^h～03^h前後にあるように思われる。

一方電波オーロラの受信率の日変化特性を見ると、6月、10月に共通して、受信率が極大値になる時間帯は、地磁気 Q' 指数の日変化の極大・極小の時間帯とほぼ合致することが注目される。また、オーロラエコーの受信率は、 Q' 指数の日変化の正の時間帯では一般に低く、負の時間帯では著しく高くなっている。

3.3. オーロラエコーと地磁気、電離層の吸収との関係

観測データの中から、比較的エコーの受信時間が長いものを選んで、局部的に地磁気変動

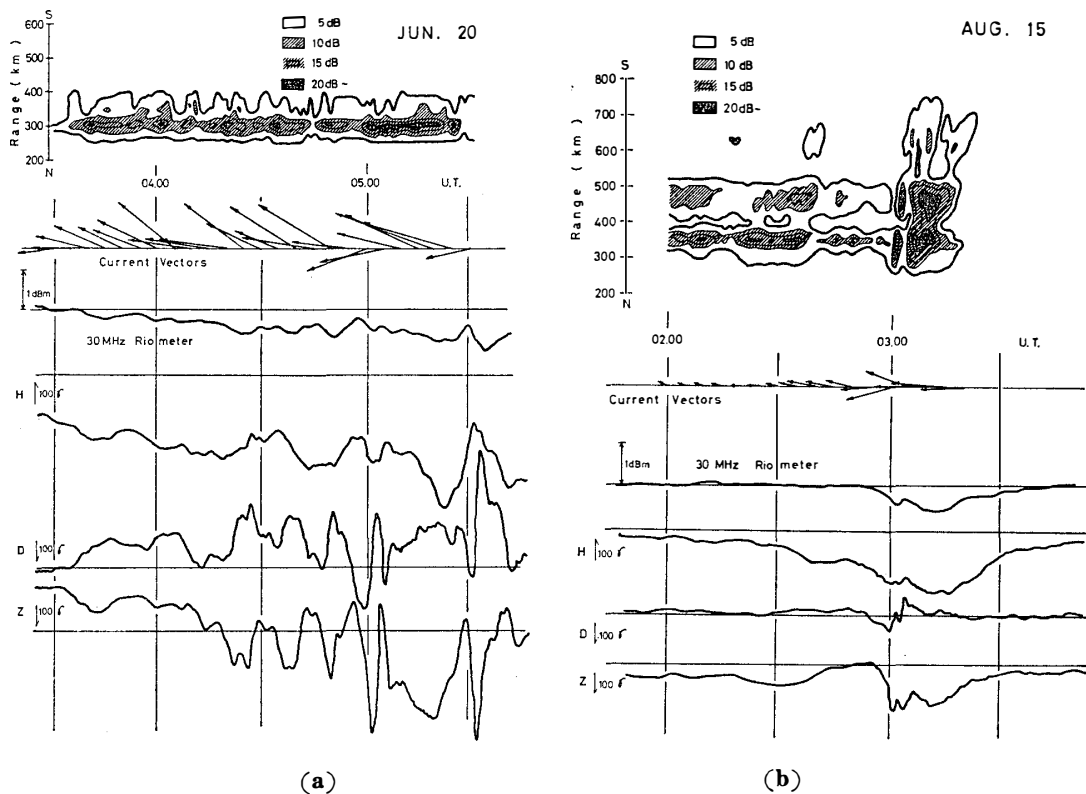


図8 レーダエコーの空間時間変化、および電離層の吸収(30MHz)、地磁気3成分との相互関係

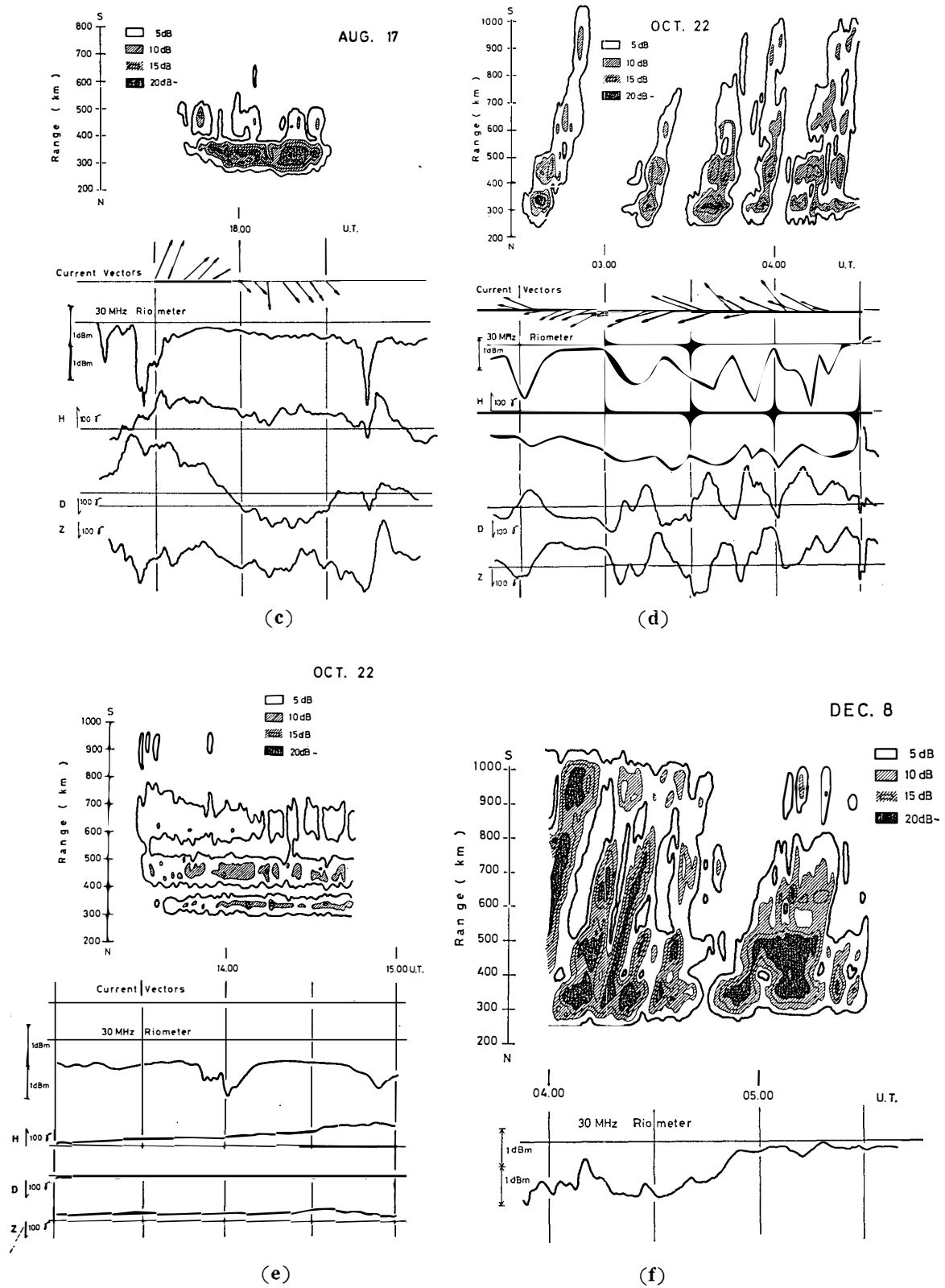


図 8 レーダエコーの空間時間変化, および電離層の吸収(30MHz), 地磁気 3 成分との相互関係

とレーダエコーの空間的、時間的变化および電離層の吸収との相互関係を、図8(a)から図8(f)に示した。図中上段はレーダエコーの空間的、時間的变化を調べるため、1分毎のAスコープ記録から強度変化を読み取り、縦軸にアンテナ指向特性の空間位置 (range), 横軸は時間を取り、レーダエコー強度を等強度線で表わしたものである。また、次の段の電流ベクトルは地磁気変化ベクトル ($H \cdot D$ 成分より求めたもの) を電流ベクトルに置き換えたもので、昭和基地上層の電流の強さを示すものと考えられる。

これらの図から、おおよそ次のようなことが言える。

1) 受信エコーの空間的、時間的变化は、午前側では一様に低緯度側から高緯度側に流れている。また、午後側では高緯度側から低緯度側にパターンが移動している。

2) 午前側の3種類の記録 (レーダエコー, 地磁気, リオメーター) はこれらの間に相互関係を比較的良好に示しているが (特に Oct. 22, 02:30~04:30 UT のレーダエコー, 電離層の吸収, 地磁気D成分), 午後側では一対一の関係はあまり認められない (レーダエコーと電離層の吸収が逆相関にある例が Aug. 17, 17:30~18:30UT)。

3) 冬期 (6月頃) では反射層 (アンテナ指向特性の空間距離) の広がりが少ないのに反し, 春期から夏期 (8月~1月頃) では反射層が広範囲に広がっている。

電波オーロラの反射層, および 30MHzのリオメーターに影響を及ぼす吸収層の生成が, 共に磁気圏から降下する粒子によるものと思われるので, 2)の事実から, 午前側と午後側で降下粒子の性質が異なっていると考えられる (たとえば, エネルギースペクトル, あるいはプロトンと電子の流量等)。

吸収現象が助長される下部層領域は, 大気密度も大きく, 降下粒子の質量やエネルギーの大・小によっても大きく支配されると思われるが, 現在までの解析結果から結論を出すに至っていない。

また, 30MHzのリオメーターは, ビーム幅 50° 前後の鉛直上方向の現象を感知し, 一方レーダにおいては仰角 25° で垂直面ビーム幅約 30° , 水平面ビーム幅約 40° の逆円錐形の底辺面内の現象を感知していることから, それぞれの場所的な相違および周波数の相違等によっても現象を同一視することに問題が残されているものと思われる。これらの問題点については, 稿を改めて検討してみたい。

3.4. オーロラエコーの移動

オーロラ電離雲の移動については, 多くの研究者によって研究されているところである (HARANG & TRÖIM, 1961; BULLOUGH & KAISER, 1955)。図9(a)および(b)は, 1970

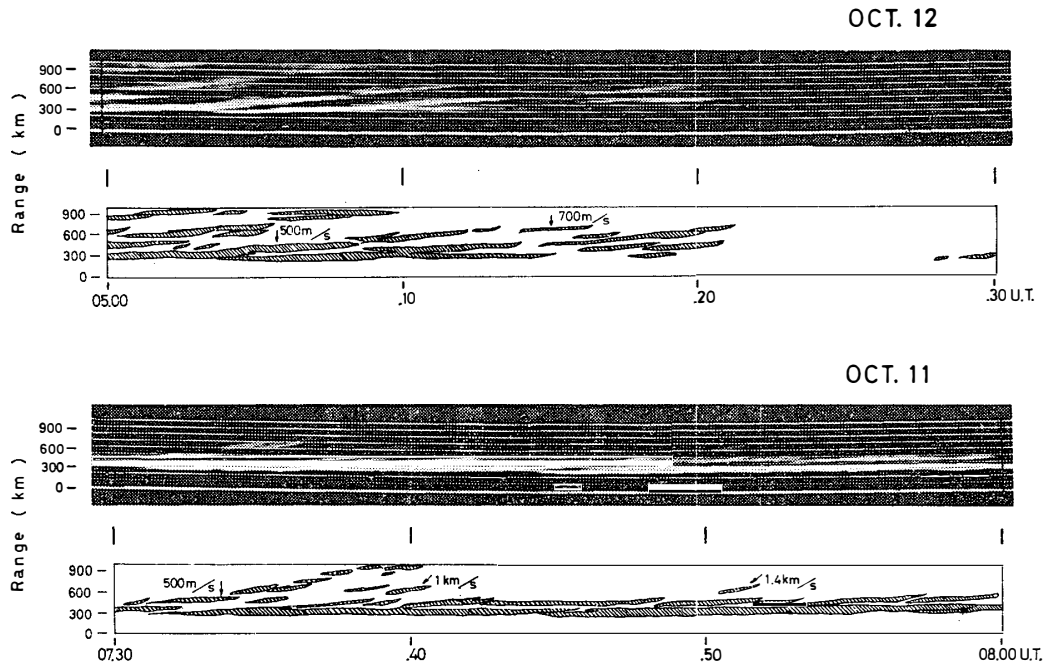


図 9(a) 午前側のレーダエコーの移動例

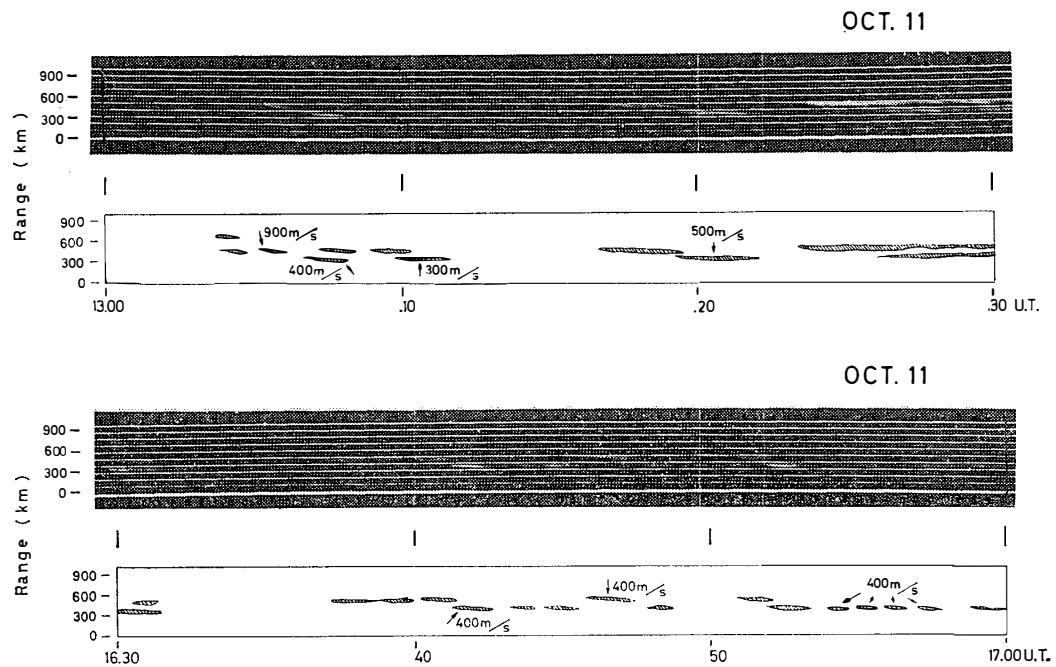


図 9(b) 午後側のレーダエコーの移動例

年越冬観測記録の一例であるが、レーダ反射層の移動方向が、午前側(図 9a)と午後側(図 9b)で違っており、午前側は低緯度側から高緯度側に、午後は高緯度側から低緯度側に移

動している。このような傾向は、図8(a)から図8(f)までのAスコープ記録でも示されているが、流し記録のエコーが時間と共に移動する移動速度は、おおよそ300m/sから1km/sの範囲内で、平均速度は500~600m/s程度と推察される。

アンテナ指向特性を南磁極方向に向けていることから、オーロラ電離雲の移動方向を南北方向と推定したが、運動そのものの方向性や速度などを詳しく調べるためには、現観測装置の電気的性能からして望み得ないところであり、将来空間ダイバシティ方式、またはドップラ等の観測を実施することによって、究明される問題であろう。

4. 結 言

以上、昭和基地で観測された、レーダ反射波の諸特性について、解析した結果をまとめて報告した。これらの解析結果を参考に、将来の観測計画を含めて現在新しいレーダ観測装置を設計、製作中である。

第15次(1974年)越冬観測から実施する予定の新観測装置は、50, 60, 80, 100MHz帯の4周波数で、任意の希望周波数を選択することはもとより、4周波数の連続観測(1分間に周波数を切替えて運用する)も可能な電気的性能を有し、将来のドップラ観測に備え、周波数安定度を高め、付加装置を使用することによって、ドップラの観測もできるように設計されている。

新観測装置によって得られる資料は、これまで明らかでないレーダ反射層の周波数特性等についても多くの情報を提供してくれるものと期待するものである。

解析結果を要約すると次の通りである。

- 1) 電波オーロラの受信率と地磁気活動(K指数)との相互関係は比較的良好である(図6)。
- 2) レーダエコーの受信率特性で見られる、午前側と午後側の極大値は、地磁気Q'指数の日変化特性の極大および極小の時間帯に合致している(図7 a・b)。
- 3) 電離層の吸収現象との相関は、午前側では比較的良好のに対して、午後側ではあまり合致しない。
- 4) Dark winterの冬期では、反射エコーの大部分はdiscrete echoで、反射距離は300~400km付近であるが、sunlit summerの夏期は、diffuse echoの出現が多く、反射距離も300~1100kmの広範囲な領域に広がり、反射層は複雑な散乱機構を表わしている。
- 5) エコー反射強度は図示していないが、一般的に冬期に弱く(平均強度10~15dB)、夏

期には強くなる（平均強度 10~30dB）。

6) オーロラ電離雲の移動は、午前は低緯度側から高緯度側に、午後は高緯度側から低緯度側に移動し、移動速度はおおよそ 500~600m/s である。

最後に、本報告を結ぶにあたり、種々有益なご指導を賜った糟谷電波部長、新野電波予報研究室長、ならびに松浦、石嶺両主任研究官に深くお礼申し上げます。

References

- BULLOUGH, K. and T. R. KAISER (1955) : Radio reflections from aurorae-II. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **6**, 198-214.
- HARANG, L. and J. TRÖIM (1961) : Studies of auroral echoes-I. *Planet. Space Sci.*, **5**, 33-45.
- HULTQVIST, B. and A. EGELAND (1964) : Radio aurora. *Space Sci. Rev.*, **3**, 27-78.
- HASEGAWA, S. and I. SHIRO (1970) : Spatial and temporal distribution of radar auroras over Syowa Station, Antarctica. *J. Radio Res. Labs.*, **17** (90), 137-146.
- 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. *南極資料*, **37**, 1-16.
- 川尻蘆大・若井登・中村純二・中村強・長谷川貞雄 (1965) : 1961年の越冬観測から見た昭和基地における電離層, 極光および地磁気変化の相互関係. *南極資料*, **25**, 55-85.
- SHIRO, I. and T. SAKAMOTO (1971): Riometer records of 30 MHz cosmic noise at Syowa Station, Antarctica in 1970. *JARE Data Reports*, **14**(Ionosphere), 62 pp.
- SHIRO, I. and T. SAKAMOTO (1972): Records of radio aurora at Syowa Station, Antarctica from April 1970 to February 1971. *JARE Data Reports*, **15**(Ionosphere), 34 pp.

(1973年5月1日受理)