



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流氷観測レーダーにおける受信電力の振動特性と氷状の関係
Author(s)	青田, 昌秋; AOTA, Masaaki; 石田, 完 他
Citation	低温科学. 物理篇, 37, 115-123
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18376">https://hdl.handle.net/2115/18376</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	37_p115-123.pdf



## 流水観測レーダーにおける受信電力の 振動特性と氷状の関係<sup>\*,\*\*</sup>

青田昌秋・石田 完

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

### I. ま え が き

低温科学研究所・流水研究施設では、レーダーによって流水の分布、移動の観測を行なっている<sup>1),2)</sup>。同時にレーダー情報と流水の状況との対応についても研究が進められている。石田、小野らはレーダー受信電力の一定距離内の反射パルス数は、氷野の凹凸度と対応していると述べている<sup>3),4)</sup>。筆者はレーダー受信電力の時間変動に着目し、その振動特性の違いは流水の状態とその動揺によるものと考えて、流水域と海面反射域の識別を行なった<sup>5)</sup>。ここではレーダー受信電力の振動特性と氷野の状況、動揺について考察する。

### II. 測定方法

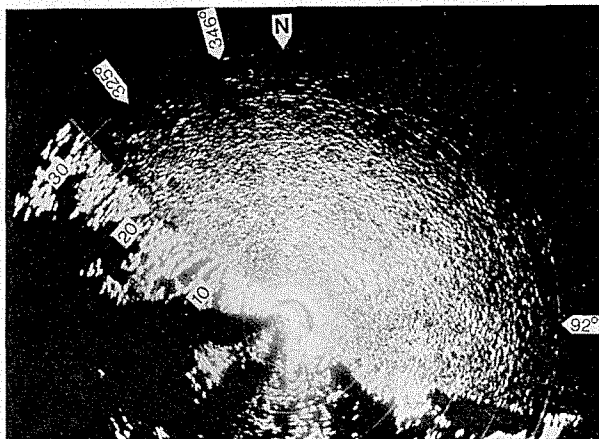
第1~3図は昭和53年3月10日9時0分、10日15時2分および11日7時9分の紋別大山局のレーダー像である。図で左上から右下にはしる海岸線の上側が海面である。映像中の同心円はアンテナから5海里の距離目盛である。

3月10日9時0分：25哩までのほぼ全海域が密氷野である。

10日15時2分：10日未明から吹き続いた8~10 m/sの西風で、レーダー局東方沿岸沿いに細い水路が発生した。

3月11日7時9分：レーダー局東方から西北西方向に水路が拡大した。沖合にもあちこちに水路や氷湖が発生している。

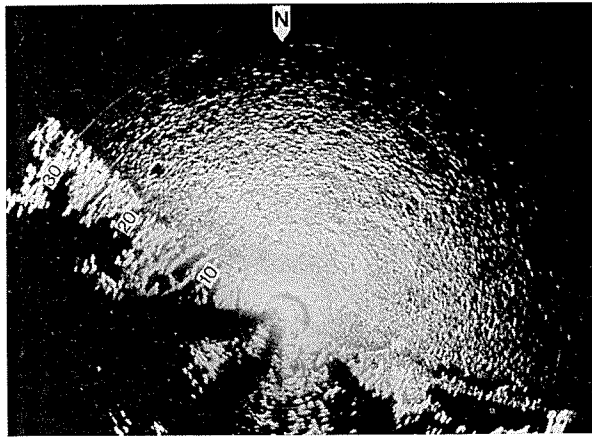
3月10日9時と翌11日7時の2回おのおの数点、氷域からの反射電力の時間変化を測定した。



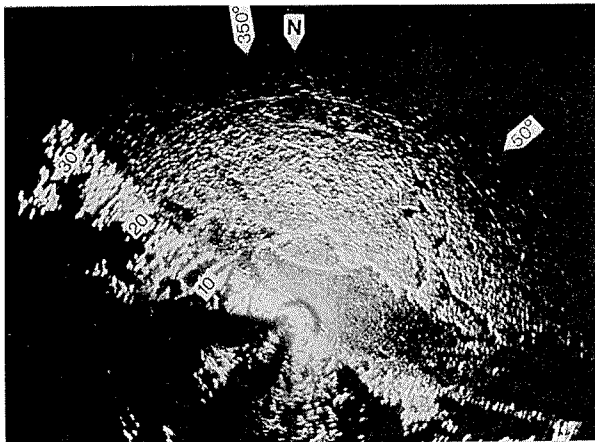
氷野の一定方向に向けてアンテナ  
第1図 紋別沖の流水分布図(昭和53年3月10日9時)

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1970号

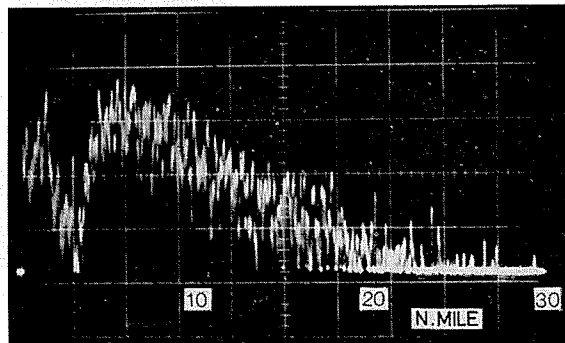
\*\* 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設研究報告 第70号



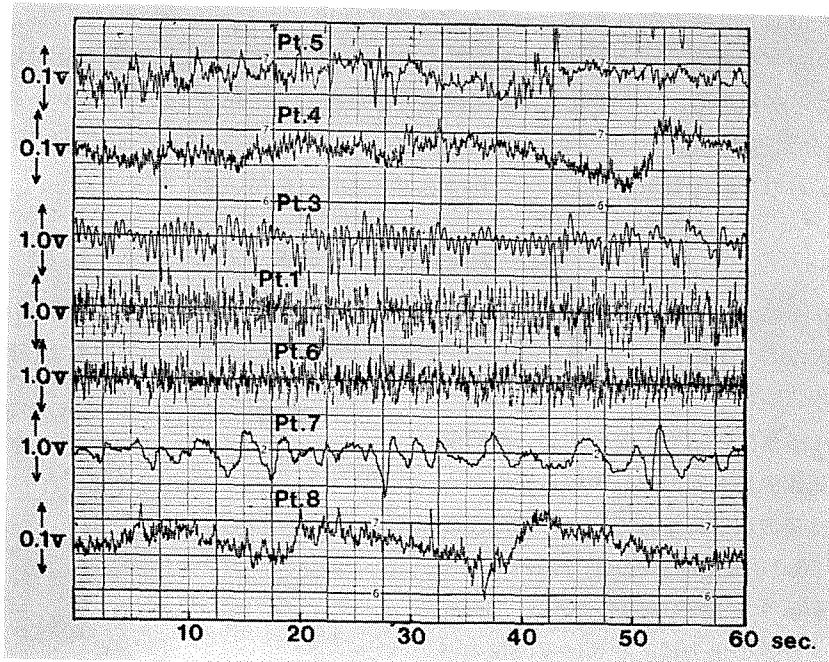
第2図 紋別沖の流水分布図 (昭和53年3月10日15時)



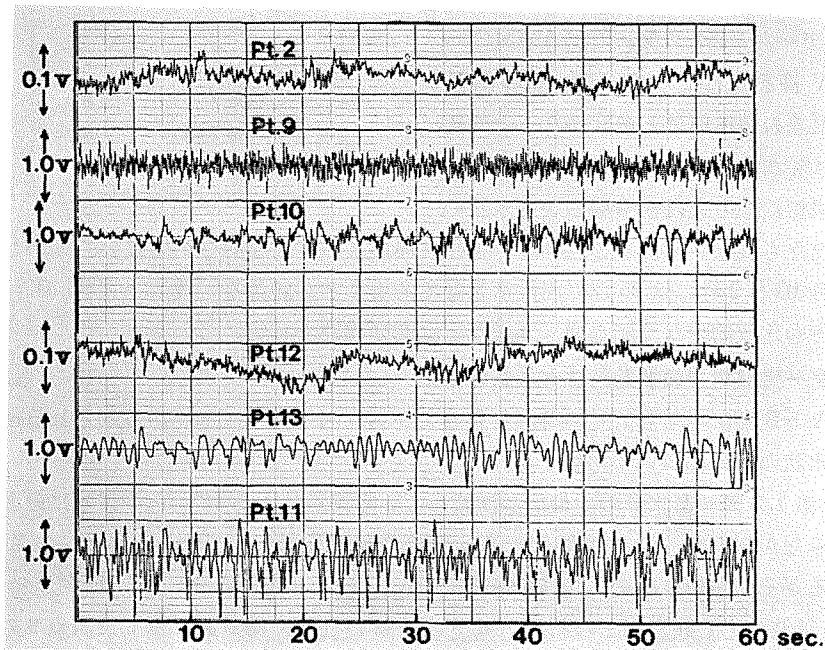
第3図 紋別沖の流水分布図 (昭和53年3月11日7時)



第4図 第1図に示す346度方向のAスコープ



第5A図 レーダー受信電力の時間変動



第5B図 レーダー受信電力の時間変動

ナを固定し、氷野の一方方向からの反射電力をオシロスコープで観測した。こうして得られた10日9時、大山局346度方向のAスコープを第4図に示す。

Aスコープを観察し続けると、一定距離すなわち氷野の特定の場所からの反射電力が変動していることがわかる。この変動を詳細に観察するために、氷野の一点からのレーダー受信電力を2~5分間連続的にデータレコーダに記録した。これにはレーダー電波の発射間隔1msの間、一点からの受信電力を保持する、いわゆるボックスカーを用いた。

### III. 測定結果および考察

氷野からのレーダー受信電力の時間変動を第5A, 5B図に示す。図では1分間だけ示した。

測定数は3月10日は5点、11日8点の合計13点である。測定点の方向および距離を第1表に示す。

第1表 測定時刻および測点位置

測定番号	日 時	方向(度)	距離(漚)
1	10日9時	325	7
2	10日9時	346	15
3	10日9時	92	8
4	10日9時	92	10
5	10日9時	92	15
6	11日7時	350	5
7	11日7時	350	10
8	11日7時	350	15
9	11日7時	50	5
10	11日7時	50	9.5
11	11日7時	50	11
12	11日7時	50	13
13	11日7時	50	16.5

第5A, 5B図に示した受信電力の時間変動のうち比較的長時間の記録の得られた測点に関しては周波数解析を行なった。第6図に測点3, 9, 10, 11および13の信号のパワースペクトルを示す。周波数解析に際しては、データレコーダの出力電圧を0.1~71 Hzのバンドパスフィルタを通し相関計・スペクトル解析器を用いてパワースペクトルを求めた。サンプリング間隔は20ms, 相関計算の積分時間102.4s データー長は154sでHAMMING WINDOW 補正を行なっている。その結果パワーの誤差の標準偏差と最大パワーとの比 $\frac{\sigma_m}{A}$ は19.4%である。

この観測に際しては航空機による氷状の目視観測はなされなかったので、現場の氷状、波浪などの詳細は明らかでない。しかしレーダー像から2月10日9時には25漚以内は密氷野であることがわかる。また3月11日7時には海面反射妨害も比較的少なく開水面、氷縁などは充分識別される。

#### 1) レーダー受信電力の振動特性と氷状の対応

第5A, 5B図に示した信号の時間変動および第6図のスペクトルから知られる振動特性と各測点の氷状の関係について考察する。

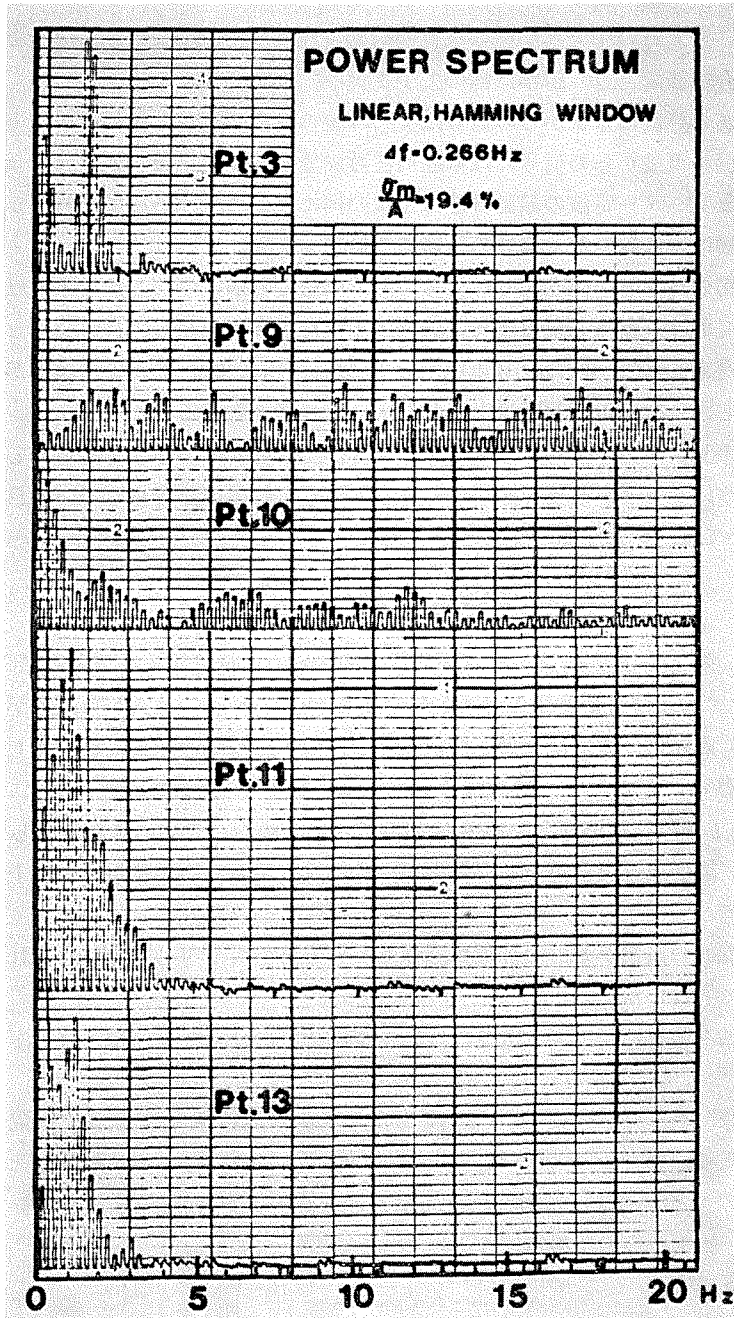
A: 第1, 3図の密氷野の中央部に位置している測点2, 4, 8, 12からの信号は微弱な短周期成分を含みながらも全体的には20秒から1分の長周期変動をしている。もちろん距離によっても異なるがその振幅は極めて小さい。

B: 風波のある開水面上の測点1, 6, 9の振動特性は、第6図に示した測点9のパワースペクトルに代表されるように白色雑音的信号である。

C: 比較的氷縁近くの氷野内に位置している測点3, 11, 13の振動は第6図のパワースペ

クトルからも明らかなように、比較的きれいな1~2Hzの周期的変動をしており、その振幅はかなり大きい。

D: 氷縁付近あるいは砕氷域に位置している測点5, 7, 10の振動は測点10のパワースペ



第6図 第5A, 5B図に示した受信電力の時間変動のパワースペクトル

クトルに代表されるように1 Hz ぐらゐの成分が卓越しており、振幅はかなり大きい。これは(C)に類似しているが短周期成分が重畳している。

以上によって、2, 3の例外を除き受信電力の振動特性と氷状の間にはかなりよい対応が認められることが判る。

すなわち、密氷野の中央部からの電波の振動特性は数十秒の長周期波成分と微小振幅の短周期波成分の合成波であり、振幅は極めて小さい。

氷縁付近あるいは砕氷域からの信号は1~2 Hzの成分が卓越し振幅はかなり大きい。

また開水面の風波からの信号には卓越周波数成分はなく白色雑音的信号を示している。

このようなレーダー電波の振動特性は氷状の何によって生ずるのであろうか。

## 2) 流水の動揺によるレーダー電波の干渉について

氷野は現場の風あるいはうねりによって上下動をくりかえす。しかし氷野は自然の浮防波堤の役をなしており、進入した短波長の風波はまたたくまに消滅し、長波長のうねりのみが氷野の内部まで進入する<sup>6)</sup>。3月10日未明から11日正午頃まで6~8 m/sの西風が吹き続き氷野は沖合へ移動した。この風で氷野は上下動していたと考えられる。

レーダーの受信電力の変動にはこの氷野の動揺が影響していると考えられる。

流水のようにレーダー電波の拡がりにはかに広い分布をしている目標からの反射電力  $P_r$  については、いわゆる、レーダー方程式

$$P_r \propto \frac{P_t}{R^3} \cdot \sin^4 \left( \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda R} \right) \quad (1)$$

が適用されている。ここで  $P_t$  はレーダー送信電力 (Watt),  $R$  はアンテナと目標間の距離 (m),  $h_1, h_2$  はアンテナおよび目標物体の海面からの高さ (m) である。(1)式から距離が遠くなるに従い受信電力は、距離の3乗に反比例して減少する領域から距離の7乗に反比例して減少する領域(干渉域)に移ることになる。(1)式で  $\left( \sin^4 \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda R} \right)$  は干渉の影響を表わしている。

第(1)式の干渉の項は鏡面上に高さ  $h_1$  の物標がある場合の干渉のみを仮定している。すなわちアンテナ、鏡面上の反射点および物標がつくる垂直平面内の光路差による干渉を表わしているにすぎない。

レーダー電波の振動が氷野の動揺に関係しているとしても(1)式で表わされるレーダー方程式では説明できない。

これまでにみてきたレーダー電波の振動を説明するには別に氷塊相互の干渉を考慮に入れねばならない<sup>7), 8)</sup>。

いま簡単のためにパルス・パケット内に等しい反射断面積  $\sigma_0$  を有し、 $l$  だけ隔った2つの物標  $P_1, P_2$  を考える。アンテナから  $P_1, P_2$  および  $P_1, P_2$  の中点  $P_0$  までの距離をそれぞれ  $R_1, R_2, R$  とし、アンテナと  $P_0$  を結ぶ直線  $R$  と  $P_0$  における直線  $\overline{P_1 P_2}$  の法線となす角を  $\theta$  とすると、おのおのの単一物標からの反射電圧  $V_1, V_2$  は

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= K \sqrt{\sigma_0} \cos \frac{4\pi R_1}{\lambda} \\ V_2 &= K \sqrt{\sigma_0} \cos \frac{4\pi R_2}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。(2)式で  $K$  は距離の関数でもあるが、いま距離はほぼ等しいとすれば比例定数と考えてよい。 $\sigma_0$  は反射断面積であるが、受信電力でなく電圧を考えているので  $\sqrt{\sigma_0}$  となっている。合成受信電圧  $V$  は(2)式から

$$\begin{aligned} V &= K\sqrt{\sigma_0} \left[ \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \left(R - \frac{l}{2} \sin \theta\right)\right\} + \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \left(R + \frac{l}{2} \sin \theta\right)\right\} \right] \\ &= K\sqrt{\sigma_0} \left\{ 2 \cos\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \sin \theta\right) \right\} \\ &= K\sqrt{\sigma_r} \cos \frac{4\pi R}{\lambda} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

ここで  $\sigma_r$  は

$$\sigma_r = 4\sigma_0 \cos^2\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \sin \theta\right) \quad (4)$$

である。

(4)式から

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_0} = 2 \left\{ 1 + \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda} \cdot \sin \theta\right) \right\} \quad (5)$$

が得られる<sup>9)</sup>。

(5)式は2つの同じ物標の干渉によって、その反射断面積は単一の物標の場合のその0から4倍まで変化することを表わしている。受信電力は反射断面積に比例するから、受信電力は0から4倍、すなわち雑音レベルから6デシベル変化し得る。また(3)式は距離  $R$  の変化に伴う干渉によって受信電力が平均電力から0に低下し得ることを示している。

動揺している氷海においてもこのような干渉現象が起っていると考えられる。ちなみに(5)式の単純なモデルを氷塊に適用してみる。

いま2つの氷塊への電波の入射角  $\theta$  が垂直で距離  $R$  が一定の場合、2つの氷塊の間隔  $l$  が  $\lambda$  cm/s、( $\lambda$  はレーダー電波の波長で5.4 cm) の速さで変動したとすると、受信電力は振幅6デシベルで2 Hz の振動を示すことになる。また、アンテナとの距離  $R$  が毎秒5.4 cm の速さで動揺したとしても、受信電力は4 Hz の振動を示すことになる。しかしこの場合は振幅は小である。6デシベルの電力変化は流水観測レーダーに充分感知される大きさである。

受信電力の時間変動を考察するには上に述べたような氷の動揺に伴う干渉および反射面の変化を考慮する必要がある、この二つが信号の振動の主な原因でないかと思われる。密氷野、氷縁あるいは砕氷域、海面反射域からののおのおのの信号の振動特性をこのような考えで検討する。

うねりの大きい海域中に氷塊が散在しているようなところや氷縁では、水面と氷板の壁面、浮遊する氷塊の間では上に述べたような干渉現象が充分考えられる。このためこのような海域からの受信電力は比較的振幅の大きい周期的振動を示すと考えられる。

密氷野内部では長波長のうねりの進入によるゆるやかな長周期の動揺はあるが、氷同志の相対運動は小さいであろう。しかしゆるやかな波動によって無数の流水の反射面の角度は周期

的に変動する。このため密氷野からの信号は微小振幅の高周波成分をのせながらも全体的には比較的安定した長周期の変動を示すのであろう。この場合は信号の周期と氷野の振動の周期は一致しているかもしれない。

風波のある開水面からの信号は既に報告したように周期性はほとんど認められず白色雑音的なものである<sup>5)</sup>。

実際の氷野あるいは砕氷域からの受信電力は単純ではなく、無数の反射面からの反射波の集合である。しかしながらさきに述べたレーダー受信電力の振動特性と氷状の対応は流氷の動揺と干渉現象によって定性的には説明される。

### 3) 氷野の亀裂，水路の発生域の探知

受信電力の振動特性と氷状の関係を調べた際、測点1, 3および5に関しては例外とした。

測点3および測点5の振動特性は1~2 Hzの卓越周波数をもつ振動であり、振幅も大きい。この振動は動揺する氷縁付近からの特性を示している。また測点1の信号は海面反射波の特性に近い。しかしこれらの測点の位置は第1図のレーダー像でみるかがり密氷野内と考えられる。

密氷野と見える場所から、このような振動特性が得られることは何を意味するのであろうか。

3月10日12時の観測時まではレーダー像は9時のレーダー像とほとんど変わっていないかった。しかし第2図に示す15時には沿岸沿いに水路が発生している。さきの測点1, 3, 5はこの水路の発生域に近い所に位置している。

これは、3月10日9時の測点1, 3, 5の位置はともにレーダー像では密氷野内に見えるが、この時刻にはすでにこれらの測点の周囲の氷野は破壊されて小水路ないしは砕氷域が発生していたものと思われる。

沿岸定着氷の移動、離岸（海明け）は水路の発生から始まる。海明けの予知のためには水路の発生域を探知することが必要である。

氷域からの反射電力の振動特性を知ることによって、レーダー像では検知できないような細い水路または亀裂の発生域を探知できる可能性がある。

### 4) レーダー電波のパルス数について

石田、小野<sup>3), 4)</sup>はレーダー信号にみられる単位面積内の反射パルス数の分布と氷状が対応すると述べている。しかしこの対応は十分に確かめられたとは言えない。

受信電力は、同じ規模の凹凸度の場合でも干渉によって目標物体の反射断面積が大きく変わることはさきの単純な考察からも明らかである。

第4図のAスコープでのべたように受信電力は平均的には距離方向になだらかに減衰しているが、詳細にみると、鋭いパルスの連続であり、しかもこれらのパルスは時間的にも空間的にもたえず変動している。

これらのことを考え合せるとレーダー電波の単位面積内のパルス数は、氷野の氷丘度の違いと同時に流氷の動揺による有効反射断面積の時間的変化の影響を受けるはずである。

以上のことからパルス情報の実用化には氷野の振動についての考察が必要と思われる。さらにパルス数の時間的変化が氷状についての情報を含んでいる可能性も考えられる。

#### IV. あとがき

氷野からのレーダー受信電力の時間的振動特性と氷状との対応について考察した。その結果以下のようなことがわかった。

1) 海氷域からのレーダー受信電力の振動特性はその海域の氷状についての情報を含んでおり、電波の振動特性から密氷野、砕氷域あるいは開水面を識別できる可能性がある。

2) 氷域からのレーダー信号の振動は、主に流水の動揺のため起こるレーダー電波の干渉と氷野の反射面の周期的変化によると思われる。

3) レーダー電波の振動特性からレーダー映像では識別できない氷野の亀裂・水路の発生域を探知できる可能性がある。

今後は氷野全域のレーダー電波の振動特性分布図を描き氷状の変化との対応を調べていきたい。

おわりに、観測に際し全面的な御協力をいただいた田畑忠司教授をはじめ流水研究施設の皆様に厚く感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 田畑忠司・青田昌秋・大井正行・石川正雄 1969 レーダーによる流水の動きの観測. 低温科学, 物理篇, **27**, 295-315.
- 2) 田畑忠司・大井正行・石川正雄・福土博樹 1970 レーダーによる流水の動きの観測 II. 低温科学, 物理篇, **28**, 301-310.
- 3) 石田 完 1971 流水観測レーダー情報の数値化. 低温科学, 物理篇, **29**, 185-189.
- 4) 石田 完・小野延雄 1969 流水状況とレーダー像との対応. 低温科学, 物理篇, **27**, 317-325.
- 5) 青田昌秋 1972 流水観測レーダーにおける流水と氷面反射の識別. 低温科学, 物理篇, **30**, 163-174.
- 6) Robin, G. DEQ. 1963 Ocean waves and pack ice, *Polar Rec.* **11**, 389-393.
- 7) John Chisholm・Maateu Pranger・Edwin X Berrey・Craig Magwire 1970 DIGITAL COMPUTER OF RADAR REFLECTIVITY DATA. Desert Research Institute, *Tech. Rept.* No 14, 28-31.
- 8) Merrill, I. Skolnik 1970 RADAR HANDBOOK. McGRAWHILL, 11-7—11-4.
- 9) 宇田新太郎 1972 レーダー工学演習. 学献社, 91-93.

#### Summary

Studies of drift ice off the shore of the Sea of Okhotsk, to the northeast of Hokkaido are being carried out by use of a sea-ice radar system at the Sea Ice Research Laboratory of the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

Measurements were made of time variations in the power of radar returns from a sea-ice field, whereby as a result of frequency analysis of time series of the variations it was noticed that each sea-ice condition shows a special frequency characteristic of radar returns.

Using this fact it is possible to distinguish the ice condition from one another. That is to say, signals from the interior of pack-ice field are relatively continuous and steady with fine high-frequency components, like a white noise. The signals from a brash-ice area have clearly prevailing frequency components (1~2 Hz). Meanwhile, a sea clutter shows the characteristic of a white noise, without any clear prevailing frequency components.