



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流水レーダーの分解能の測定
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo; 大井, 正行 他
Citation	低温科学. 物理篇, 28, 291-299
Issue Date	1971-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18159
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_p291-299.pdf



流水レーダーの分解能の測定^{*,**}

藤野和夫・大井正行

(低温科学研究所)

(昭和45年9月受理)

I. ま え が き

我々は北海道オホーツク海沿岸に沿って設置された3つの流水レーダーを用いて、流氷の運動についての研究を行なっている^{1),2)}。この研究の一環として、レーダーの映像と実際の流氷状況とを対応づけるための研究が行なわれている³⁾。この報告は、それに関連して行なわれたレーダーの分解能の測定について述べたもので、既知の反射断面積をもつ標的のレーダースコープ上の映像がどの様になるかを調べたものである。

II. 分解能について

レーダーの性能を表わす1つの指標に分解能がある。これはレーダーのパルス幅及びビーム幅などの基本的要素によって定まる。分解能には距離分解能及び方位分解能の2つがある。距離分解能は同一掃引線上の2つの標的の映像が分離する限界能力を云う。この限界はパルス幅 τ によって定まる。すなわち、 τ 時間で電波が往復する距離、 $c\tau/2$ だけ標的の映像が掃引線方向に奥行きが長く現われる。方位分解能は同一距離にある2つの標的が分離する限界能力を云う。この限界はビーム幅 θ によって定まる。ビーム幅 θ はアンテナ幅を D 、使用波長を λ とすると、 $\theta \approx 70 \frac{\lambda}{D}$ で定義される。ビーム幅 θ はアンテナパターンの半電力点(-3dB)の所の角度を云う。これ等の限界はレーダーの周波数帯域幅、ブラウン管特性、掃引速度などの影響も受ける。更に又、我々はレーダースコープの映像を、肉眼又は写真によって観察するから、それ等の特性による影響も考慮せねばならない。したがって実用上の分解能は、パルス幅及びビーム幅で定義される公称性能に、ブラウン管特性による平均化操作や肉眼、写真などによる同様の操作が加わり、公称性能とは異なったものとなる。特にこの傾向はPPIスコープを使用した場合に著しい。

我々の使用したレーダーはパルス幅は $0.2 \mu s$ 、及び $1 \mu s$ 、波長、 5.42 cm 、アンテナ幅、 360 cm である。したがって公称性能は距離分解能はパルス幅、 $0.2 \mu s$ の時には 30 m 、 $1 \mu s$ で 150 m である。又、方位分解能はビーム幅、 $\theta \approx 1^\circ$ であるから、アンテナからの距離を R とすれば、 $R \sin \theta$ が公称分離限界となる。すなわち、 10 哩の円周上で 324 m 以上離れた2つの標的は分離して識別可能となる。しかし、実用上の分解能は上述の様に、これ等の値よりは劣ると考えられる。

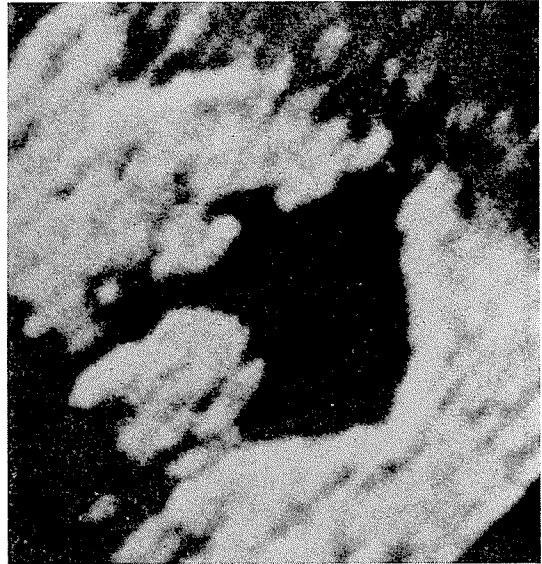
* 北海道大学低温科学研究所業績 第1104号

** 北海道大学低温科学研究所 流水研究施設研究報告第15号

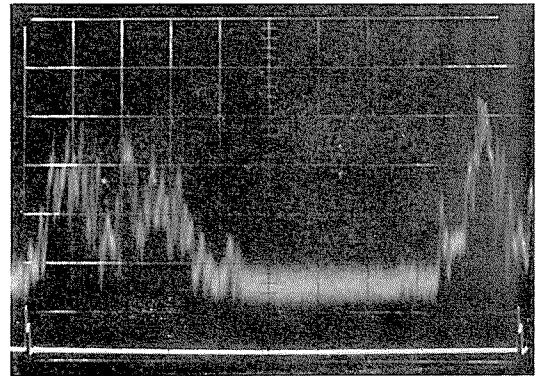
III. 測定の方法及びその結果

測定は昭和45年2月12日から4日間にわたって行なわれた。測定に使用した流水レーダーは、北海道紋別市の大山局である。大山局レーダーは送信出力40kW、アンテナ高は海拔300mである。測定地域には紋別市南東、大山局より約9裡に位置するコムケ湖が選ばれた。コムケ湖は冬の始めより全面結氷し、測定時には氷厚約30cmに達していた。その氷板の上には深さ約40cmの積雪があった。積雪表面は風のためにサスツルギ様の起伏が見られたが、レーダーのPPI及びAスコープの上には第1図A及びBに示した様に、全く無反射の平面として映っていた。そのために湖上に標的を置くと容易に識別可能で、測定には極めて好条件であった。

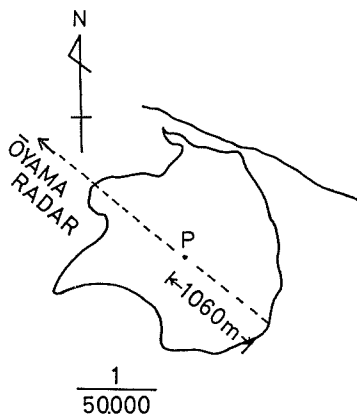
標的は第2図の様に湖上に配置した。第2図のP点には、直角をはさむ2辺がそれぞれ、50cmの直角三角形を12個組み合わせた、八面体型のアルミ製のコーナリフレクターを設置した。C、Q、L、Bの各点には2辺が各60cmの直角三角形3個を組み合わせた四面体型のトタン製のコーナリフレクターを、又A点には2辺が各15cm



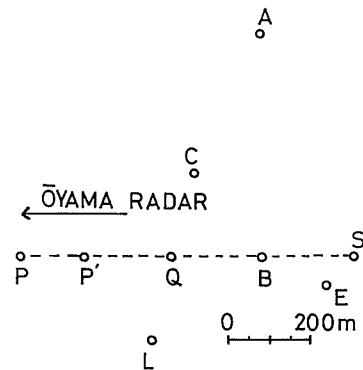
第1図A コムケ湖のPPIスコープ上の映像
中央の黒い部分がコムケ湖



第1図B コムケ湖のAスコープの映像、白くノイズだけが見える部分がコムケ湖



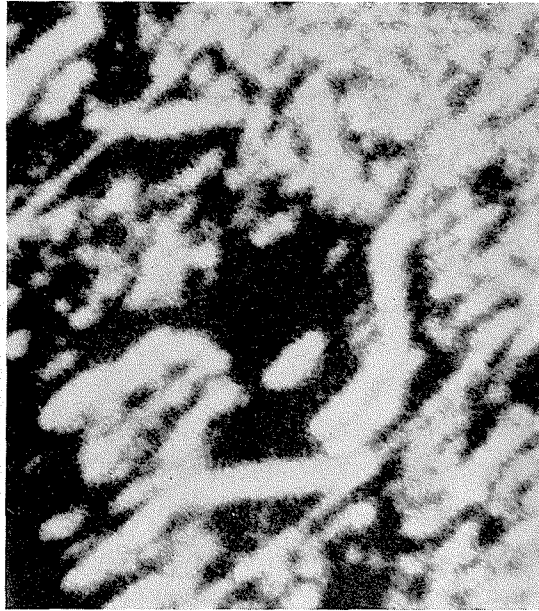
第2図 コムケ湖の上の標的の配置図



の直角三角形を組み合わせた漁網用のトタン製小型八面体型のコーナーリフレクターを設置した。トタン製のコーナーリフレクターの三面の交叉角は、アルミ製のもの程精度は良くはない。P' 点は測量原点で測量用の直径 2.5 cm, 長さ 200 cm のアルミ製のポールが立ててある。E 点には反射強度測定用の直径 60 cm のアルミ製球が地上 1 m の所に吊り下げてある。S 点は距離測定の際の目印点で木製スキーが立ててある。この様に配置された標的の位置は三角測量によって測量された。

これ等の標的について、PPI 及び A スコープでその映像を調べた。

第 3 図はパルス幅 $1 \mu\text{s}$ の時の PPI スコープの映像である。湖の中心付近の輝



第 3 図 パルス幅, $1 \mu\text{s}$ の時の PPI スコープの映像

点は P 点である。湖岸付近の長い輝点は B, A 点分離せずに映っているものである。白く弧状に画面に映っているのは距離マーカーで、その間隔は 2 哩である。このマーカーの間隔から、P 点の映像の大きさを求めると、接線方向に約 700 m, 掃引線方向に約 200 m の大きさを持っていることが分かる。第 4 図はほぼ同時刻のパルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ の PPI の映像である。第 3 図で



第 4 図 パルス幅, $0.2 \mu\text{s}$ の時の PPI スコープの映像

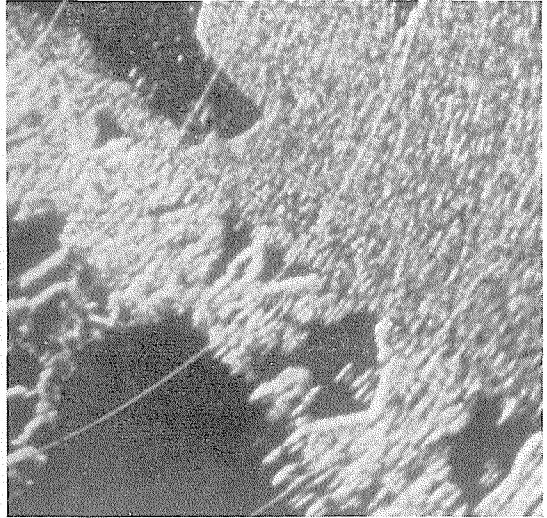
は、1つの輝点であった P 点及び B, A 点、それぞれ 2つの輝点に分離している。P 点より分離したのは P' 点、B, A 点より分離したのは E 点及び S 点である。E 点及び S 点は分離せず 1つの輝点として映っている。各々の点の大きさを求めると、P 点は接線方向に約 700 m と $1 \mu\text{s}$ の場合と変わらないが、掃引線方向では約 100 m と $1 \mu\text{s}$ の場合の $1/2$ 弱となっている。又 P' 点では接線方向に約 400 m, 掃引線方向に約 70 m の大きさをもっている。又 E, S 点の大きさは、P' 点にほぼ等しいことが分かる。第 5 図は P, P', Q, C, B, A, ES の各点が映っているパルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ の PPI の映像である。この映像では Q 点及び C 点、又 B 点及び A 点がほぼ分離しているのが分かる。P 点

及び E, S 点の映像の大きさは、第 4 図の場合とほぼ同じである。しかし P' 点の映像は、接線方向で約 200 m と第 4 図の 1/2 程度に減少している。又 B 点の輝点の大きさは、接線方向で約 500 m, Q 点及び C 点では分離が明確ではないが、それぞれ約 400 m 程度の大きさを持っている。いずれの点も掃引線方向の大きさは、第 4 図の場合とあまり変わってはいない。

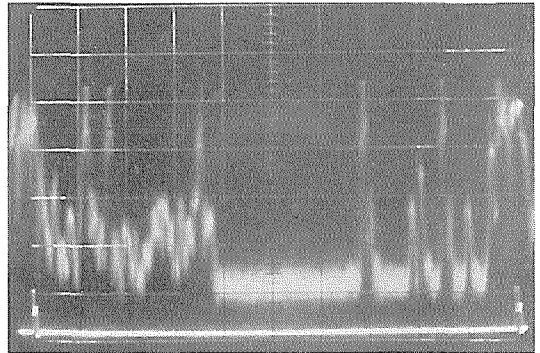
第 6 図はパルス幅 $1 \mu\text{s}$ での A スコープの映像で、横軸は掃引線方向の距離を、又縦軸は受信電力強度の対数比を表わしている。この図は第 5 図の PPI の映像に対応するもので、アンテナ側より P, Q, C, B, ES の 5 点が映っている。パルス幅 $1 \mu\text{s}$ の PPI の映像 (第 3 図) では、P, P' 及び B, ES の各点は分離していなかったが、同じパルス幅の A スコープの映像では、B, ES の 2 点は明らかに分離している。しかし P, P' の 2 点は分離していない。第 7 図は掃引線方向が、第 6 図とほぼ同じ方向のパルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ の A スコープの映像である。アンテナ側より P, P', Q, C, B, E, S の 7 つの標的が、明瞭に分離して写っている。第 5 図の PPI の映像は、同じパルス幅であるが、Q, C, 及び E, S の各点は分離していなかった。しかし A スコープでは、これ等の各点は明らかに分離しているのが分かる。

IV. 測定結果の検討

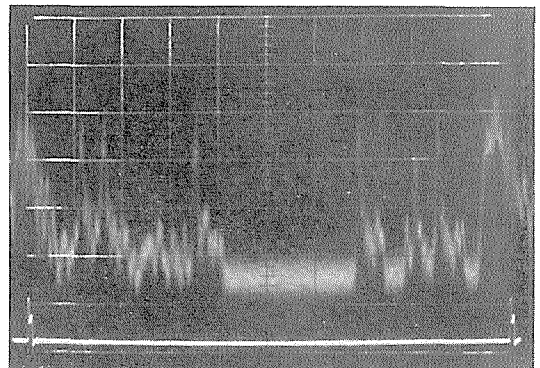
今回の測定で使用した各標的について、その有効反射断面積を求めて見る。八面体型コーナーリフレクターは、三面の交叉角が正確に 90° であれば、電波がその 1 つの三角錐の対称軸に平行に入射した時に 3 重反射を行なって最大の反射を行なう。その時の有効反射断面積 σ_{max} は、直交す



第 5 図 パルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ の時の PPI スコープの映像



第 6 図 P, B 点方向のパルス幅 $1 \mu\text{s}$ の A スコープの映像



第 7 図 P, B 点方向のパルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ の A スコープの映像

る2辺の長さを a とすると

$$\sigma_{\max} = \frac{4}{3} \frac{\pi a^4}{\lambda^2} \quad \lambda; \text{ 使用波長}$$

で定義される。電波が対称軸からずれると有効反射断面積は減少するが、対称軸に対して $\pm 15^\circ \sim 20^\circ$ の範囲では実用上有効である。我々の使用した P, Q, A などの各リフレクターの最大反射断面積は、使用波長 5.42 cm であるから、それぞれ

$$\sigma_P = 90.2 \text{ m}^2, \quad \sigma_Q = 187.1 \text{ m}^2, \quad \sigma_A = 0.7 \text{ m}^2$$

となる。

P' 点の測量ポールの様な円筒の最大反射断面積は、入射電波が円筒軸に垂直な場合で、その値は

$$\sigma_{\max} = 2\pi \frac{r}{\lambda} l^2 \quad r; \text{ 円筒の半径} \quad l; \text{ 円筒の長さ}$$

で定義される。したがって P' 点のポールの最大反射断面積は、 $\sigma_{P'} = 5.8 \text{ m}^2$ となる。

球の反射断面積は電波の入射角には無関係に

$$\sigma = \pi r^2 \quad r; \text{ 球の半径}$$

で与えられる。したがって E 点の球では

$$\sigma_E = 0.3 \text{ m}^2$$

となる。

E 点の球以外の標的の反射断面積は、電波の入射角が変化すると減少するから、レーダーでの標的からの受信電力もそれによって減少することになる。

今入射する電波の角度によって反射断面積の変化しない E 点の球について、その受信電力を求めると、レーダーでの受信電力 P_r は

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

で与えられるから、コムケ湖迄の距離 R を 10 浬、送信電力 P_t を $4 \times 10^4 \text{ W}$ 、アンテナ利得 $G = G_t = G_r$ を 39 dB とすると

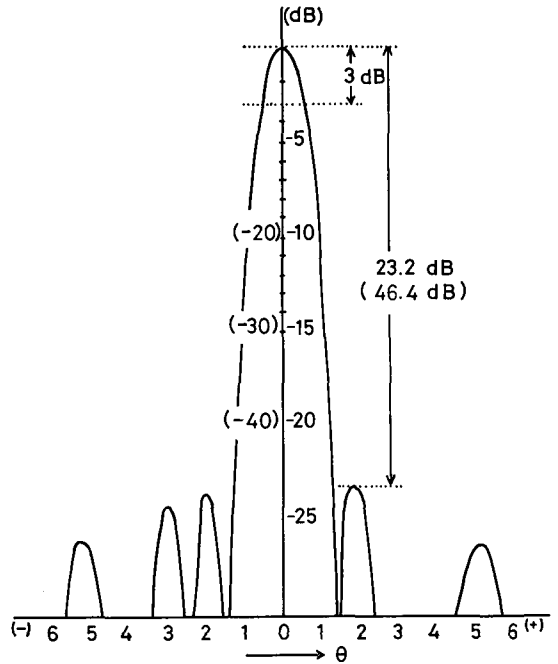
$$P_r = \frac{4 \times 10^4 \times 0.64 \times 10^8 \times (5.42 \times 10^{-2})^2 \times 0.3}{(4\pi)^3 \times (1.85 \times 10^4)^4} = 9.65 \times 10^{-12} \text{ W} \doteq -80 \text{ dB } m$$

となる。この値は大山レーダーの最小識別受信電力の $-95 \text{ dB } m$ を上廻る値であるから、E 点の球は映像として識別可能である。E 点の球よりも反射断面積の大きな各標的は、電波の入射角さえ適当であれば十分な反射断面積をもっているから、当然 E 点より大きな受信電力をもち映像として識別可能であろう。

第 3, 4, 5 図で標的の数が第 2 図と異なるのは各点に設置した標的が設置の方法が適当でなかった為に風によって倒されたり、傾むいたりして電波の入射角が変化して反射断面積が減少したために起った現象である。L, Q, C の各点の標的は設置した後で風で倒されたために映像

が認められなくなったことが確かめられた。又 P' 点のポールも同様に風で傾いたために映像の大きさが変化したこともあった。A 点の標的の映像の大きさが変化し B 点の映像と分離したり、又連なったりしたのも同様の現象と考えられる。

標的の反射断面積が変化しない場合に、その標的が接線方向にどのような大きさをもつ映像となるかについて考える。映像の接線方向の大きさは、アンテナパターンによって定まると考えられる。第 8 図に大山レーダーのアンテナパターンを示した。この図はアンテナからある距離だけ離れた地点での受信電力の測定によって得られたもので、アンテナの送信特性を示すものである。アンテナの送信特性と受信特性は変わらないから、この



第 8 図 大山レーダーのアンテナパターン

図は又アンテナの受信特性を示していると考えても良い。但し、その場合受信電力は復路でも減衰するから、受信電力強度は $1/2$ になり、カッコ内に示した値となる。したがって、サイドローブの影響はほとんど無視して良い位に減衰することが分かる。アンテナと標的の距離が変化すると受信電力の絶対値は変化するが分布曲線の形は変化しないと考える。アンテナの回転につれて第 8 図の様な強度分布の電波が標的に入射し、標的からはそれに応じた反射が行なわれて、再びアンテナで受信されるが、アンテナでの受信電力が、レーダーの最小識別受信レベルの -95 dBm を上廻る値であれば、レーダースコープの上に反射した標的の映像が現われる。したがって、標的の映像の接線方向の大きさは、受信電力曲線の -95 dBm の切線の大きさに等しいことになる。この切線の縦軸上の位置は標的とアンテナの距離、及び標的の有効反射断面積によって定まる。

今 1 つの標的がアンテナから 10 哩の地点にあり、アンテナ主軸と方向が一致している場合に、レーダーの受信電力は最大となり、その値は

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

であるから、標的の反射断面積、 σ を 1 m^2 として前と同様に計算すると、最大受信電力は約 -75 dBm となる。すなわち、第 7 図の分布曲線の頂点の絶対値が -75 dBm となる。したがって最小識別受信レベルの -95 dBm は、カッコで示した -20 dB 付近に位置する。その切線の大きさはアンテナからの角度で表わすと約 1.8° で、映像は接線方向に $R \sin \theta' \approx 580 \text{ m}$ の長さをもつことになる。ここでの角度 θ' は既に述べた公称分解能の θ とは異なるものである。

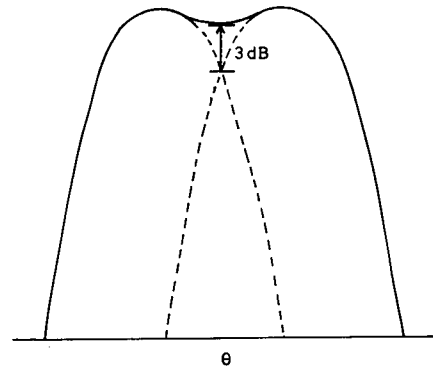
この様に考えると、ある標的のレーダースコープ上での接線方向の大きさは最大受信電力

と最小識別受信レベルの差によって定まる。すなわち、同じ距離にある標的の場合にはその標的の反射断面積によって定まる。例えば、10 哩地点の標的では反射断面積がいかに大きくても映像の大きさは θ' が 3° 以下でそれを超えることはない。反射断面積が 10^2 m^2 程度であれば、最大受信電力は約 -40 dBm で、 θ' は約 2.4° 、したがって接線方向の大きさ $R \sin \theta'$ は約 780 m となる。反射断面積が 10^1 m^2 の程度であれば、 θ' は約 2.2° で $R \sin \theta'$ は 710 m 、又反射断面積が 10^{-1} m^2 の程度であれば、 θ' は約 1.3° で $R \sin \theta'$ は 430 m となる。更に反射断面積が減少すると、最大受信電力と最小識別受信レベルの差はますます小さくなり、ノイズレベルに近づくので、映像の大きさは急速に減少すると共に不安定になるであろう。

測定結果によると、PPI スコープ上の映像の接線方向の大きさは、反射断面積が 10^2 m^2 の程度の P, Q, B の各点の標的では、約 700 m 程度で、これを θ' に換算すると約 2° 弱となる。反射断面積が 10^1 m^2 程度の P', A 点の様な標的では約 400 m 程度の大きさで、 θ' にすると約 1° 強となる。E 点の球は 10^{-1} m^2 程度の反射断面積をもっているが、PPI スコープの上では S 点と分離していないのでその大きさは不明である。しかしこれ等の標的の大きさの測定結果は前に述べた計算値とほぼ一致しているのが分かる。

又、既に述べた様に P' 点のボールの映像の大きさが、第 4 図と第 5 図で変化しているのは、ボールが風で傾いたために入射角が変わり反射断面積が変わったために起こった現象であることが分かる。

次に等距離にある 2 つの標的の映像の接線方向の分離について考える。第 9 図は、同じ反射断面積をもつ 2 つの標的からの受信電力の分布曲線を、模式的に書き表わしたものである。この図から明らかな様に、2 つの標的間の距離が小さい時には点線で表わした各々の標的の受信電力曲線は影響し合って、その値は加算され実線の様な合成曲線となる。2 つの標的間の距離が零の時には、反射断面積が 2 倍になったのと同じ



第 9 図 2 つの標的からの受信電力曲線の模式図

じであるから、合成曲線の横方向の幅は原曲線と同じであるが、その電力は 3 dB 増加する。標的間の距離がわずかでも離れると、合成曲線の横幅は広がり頂点の強度は減少する。しかし各々の原分布曲線の交点の強度と、その点での合成曲線の強度との差はいつも 3 dB である。したがって、2 つの標的間の距離が原分布曲線の半電力点 (-3 dB 点) の $1/2$ より小さい時には、合成曲線は 1 つの頂点をもつ分布曲線となる。標的の半電力点が交点となる距離だけ、お互に離れている場合には、その合成曲線は原曲線の頂点と、ほぼ等しい強度の平坦な頂点をもつ曲線となる。更に標的間の距離が大きいた時は、合成曲線は第 9 図の様に 2 つの頂点をもつ分布曲線となる。この 2 つの頂点又はその間の谷が、レーダースコープで識別可能の時に映像が分離したことになる。この様に考えると、公称分解能がアンテナパターンの半電力点幅、 θ で定義される意味が明らかになる。今迄は 2 つの標的が同じ反射断面積をもつ場合だけについて述べたが、異なる反射断面積をもつ場合についても同様に考えられる。

既に述べた観測結果でB点及びA点の映像が、分離したり、又連なったりしていたが、これは設置方法の不安定だったA点の標的の反射断面積が変動して、合成曲線が変化したために起こった現象であることが、上に述べた考えから理解される。

実用上の各標的の映像の接線方向の分離の問題には、合成曲線の最大受信電力と最小識別電力レベルとの差の大小、すなわち、映像の大きさにも関係する。又使用するレーダースコープにも関係する。すなわち、標的からの受信電力を直接に測定するJスコープの様な場合には、合成曲線の2つの頂点、又は谷が比較的容易に識別可能と考えられる。しかしPPIスコープの様に受信電力の増減を輝度の増減に変換して観察する場合には、ブラウン管特性、肉眼、写真等の平均化操作によって、識別感度が著しく減少することは当然と考えられる。

このことはAスコープを使用して掃引線方向の映像の分離を測定した結果からも明らかであった。例えば、パルス幅、 $1\mu\text{s}$ の時にPPIスコープでは分離しなかったB点とES点、Aスコープでは明瞭に分離している(第6図)。又、パルス幅、 $0.2\mu\text{s}$ の時には、AスコープではE点とS点、S点とE点が明瞭に分離している(第7図)。このことは、パルスの矩形特性の良否にも関係していると思われるが、受信電力の直接測定によって強度の差が容易に識別可能なことを表わしている。今回はアンテナの回転を制御して主軸を正確に標的に一致させることが出来なかったので、受信電力の値については測定を行なわなかった。この点について今後測定方法を検討し改良しなければならない。

今回の測定結果について標的の映像の大きさと反射断面積との関係、又映像の大きさと分離の関係を、反射断面積と受信電力との関係から検討した。その結果映像の大きさは標的からの最大受信電力と、レーダーの最小識別受信電力の差によって定まることが明らかになった。又分解能については、標的からの受信電力を直接測定する場合には、ほぼ公称性能に近いと推定されるが、PPIスコープを使用する場合には、実用分解能は公称性能とは異なった値となることが明らかになった。

V. あとがき

流水の運動をレーダーで観察し、それを実際の氷状と対応させる場合に、色々理解し難い現象がある。

今回の測定では、ある反射断面積をもつ標的が、レーダースコープの上に、どのような映像として映し出されるかについて調べると共に、それがレーダーの公称分解能とどのような関係にあるかについて調べた。測定方法には改良すべき点もあったが、次の様なことが明らかにされた。

1) レーダースコープの上の標的の映像の大きさは、接線方向では標的からの最大受信電力と、レーダーの最小識別受信電力の差によって定まる。

2) 標的からの受信電力を直接測定する方法を用いる場合には、その分解能はレーダーの公称性能にはほぼ近いことが推測される。しかし、PPIスコープを用いる場合には、実用分解能は公称性能とは異なるものである。

これ等の結果は、今後レーダースコープの映像を解析する上で大いに役立つことと考え

る。しかし、未だ未知の点もかなりあるので、今後更に測定の方法も含めて検討し改良して研究を進めなければならない。

この研究は、北海道大学低温科学研究所流氷研究施設の田畑施設長以下全研究員及び全技官によって行なわれたものである。論文の作製に際しては、観測の場合と同様に、全員による検討、討議などの有益な御助力を得た。併せて深く感謝の意を表す。

文 献

- 1) 田畑忠司・青田昌秋・大井正行 1967 流氷観測レーダーによる流氷観測 (序報). 低温科学, 物理篇, **25**, 233-239.
- 2) 田畑忠司・青田昌秋・大井正行・石川正雄 レーダーによる流氷の動きの観測. 低温科学, 物理篇, **27**, 295-315.
- 3) 石田 完・小野延雄 流氷状況とレーダー像との対応. 低温科学, 物理篇, **27**, 317-325.

Summary

Studies of drifting of sea ice along the Okhotsk sea coast of Hokkaido have been carried out using a permanent sea ice radar system.

As part of a series of studies, in the present paper, some investigations were made on the relation between radar echoes and radar cross sections of targets.

Corner reflectors with known cross sections of various orders, pole and sphere were set as targets on the ice field of lake Komuke as shown in Fig. 2.

The sizes of each radar echo from targets were measured by use of PPI and A-scope changing pulse width of radar wave (Figs, 3, 4, 5, 6 and 7).

From these results, it was clarified that when the distance from the radar antenna was kept constant, the sizes of echoes on the radar scope depended upon the radar cross section of targets, that is to say, the length of the tangential direction of the echo depending upon the difference between the maximum strength of the receiving power from targets and minimum detecting power level of the radar. The former corresponds to the radar cross section ' σ ' of each targets and the other is different in each radar. For instance the level of the OYAMA radar which was used for these measurements is about -95 dBm.