



Title	流氷レーダーの分解能の測定 II : 氷及び雪の反射能の測定
Author(s)	藤野, 和夫; FUJINO, Kazuo; 青田, 昌秋 他
Citation	低温科学. 物理篇, 29, 191-198
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18182
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p191-198.pdf



流水レーダーの分解能の測定 II^{*,**}

— 氷及び雪の反射能の測定 —

藤野和夫・青田昌秋・大井正行

(低温科学研究所)

(昭和46年9月受理)

I. ま え が き

レーダーの標的の反射像の強さを表わすのに有効反射断面積 (radar cross section) という概念が一般に用いられている。標的の有効反射断面積を理論的に求めることは、極く少数の単純な形のものに限られ多くの場合には理論計算は不可能である。しかし、実用上標的の有効反射断面積と反射像の関係をj知ることjは極めて重要なことと考えられる。

我々は流水レーダーを用いて既知の有効反射断面積を有する標的がレーダースコープの上jにどの様な反射像として映るかを調べ、有効反射断面積と PPI スコープ上の反射像の関係を明らかにし、前報で報告した¹⁾。今回の実験は標的の有効反射断面積が、その物質によってどの様に变化するかについて調べたものである。標的が導体の場合は反射電力は標的の幾何学的形状によって決まる。しかし、我々の場合の様に標的が氷の様な誘電体の場合には標的に入射した電波の一部はその内部に侵入し透過するがら反射電力は幾何学的形状ばかりではなく、その状態によっても異なるであろう。これ等の点を明らかにするために今回の実験が行なわれた。

II. 実験の方法及びその結果

実験は昭和46年2月20日から25日にわたって北海道、オホーツク海沿岸の紋別市で行なつた。実験に使用した流水レーダーは前回と同様、紋別市の大山局である。標的設置場所は同様に紋別市南東、10 哩のコムケ湖である。コムケ湖は結氷し、氷厚約 30 cm に達しているが、レーダースコープの上には全く無反射の平面として映っている。そのために湖氷上に標的を設置すると容易に識別可能で、実験には極めて好条件である。

測定に使用した標的はアルミ製三角形コーナーリフレクターで測定用は1 辺 50 cm、基準用は1 辺 22 cm である。両方のコーナーリフレクター共、その3面の対称軸がレーダー電波の入射軸とほぼ平行になる様に木のやぐらに固定した。固定する際に、風などによってリフレクターの対称軸と電波の入射軸との間にずれが起って測定中に反射強度が変化しない様充分に注意し厳重に固定した。基準用リフレクターは湖岸から 190 m レーダー局寄りに、また測定用は

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1153 号

** 北海道大学低温科学研究所附属流水研究施設研究報告 第 21 号

リフレクター基準用とレーダー局を結ぶ線上でこれより 260 m レーダー局寄りに設置した。両方のリフレクターを設置した後、大山局のアンテナの回転を止めてアンテナ軸が正確にコムケ湖上の標的に一致する様に調整し完全に固定した。その様な状態でレーダーを作動させ標的からの反射強度を A スコープで測定した。

測定用リフレクターの表面に雪、氷、スチロール、水などを附着させ、その時の反射強度の変化を測定した。又、空気中の水蒸気量の変動などの空中状態の変化が受信電力に影響を与えるのを監視するために基準用リフレクターの反射強度も同時に測定した。

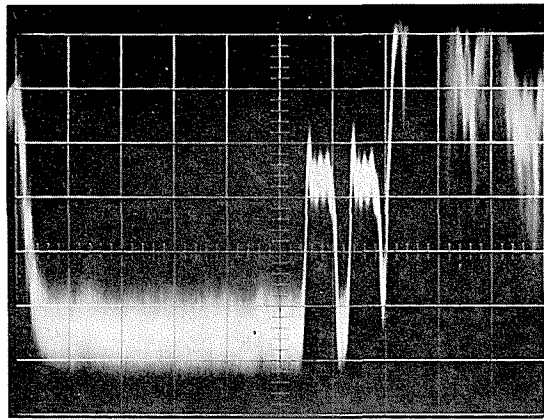
測定は次の様な順序で行なった。

1) 雪の場合。自然積雪をばらばらに砕いて枠に入れ、厚さ 5 cm に圧密し、密度約 0.5 程度の雪板を作る。その雪板を測定用リフレクターの各表面に固着し、その時の反射強度を測定した。次に雪板の表面に霧水を吹きつけて雪板の含水率を変え、その時の反射強度を測定した。又雪板をそのままの状態に放置し、水が凍結して行く過程での反射強度の変化を測定した。

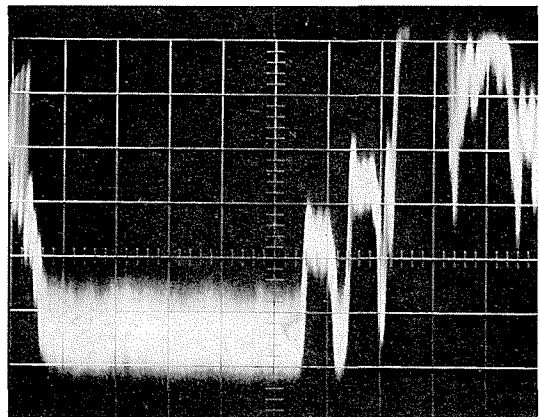
2) 氷の場合。水道水を容器に入れて凍結させ厚さ 5 cm の氷板をつくり、その氷板をリフレクターの各表面に固着し、その時の反射強度を測定した。次に氷板の表面に霧水を吹きつけ、それが凍結して行く時の反射強度の変化を測定した。又、氷板の表面に塩を含ませて氷の表面導電率を変化させて、その時の反射強度を測定した。

3) 発泡スチロールの場合。厚さ 2.5 cm の市販のスチロール板を測定用リフレクターの各表面に固着し、その時の反射強度を測定した。次にその上に同じ厚さのスチロール板を重ねて厚さを 5 cm に変え、その時の反射強度を測定した。

いずれの場合にも、測定の前後には表面に何もついていない状態のリフレクターの反射強度を測定した。又、表面に各種の板を固定する際には平行性に充分留意し、3面の交叉角が正確に 90° になる様に注意した。夜間空中状態の変化による反射強度の変動を調べるため、及び



第1図 2月21日11時30分の測定用及び基準用のコーナーリフレクターの反射強度。図中央附近の2つの反射像の向って左が測定用、右が基準用である。図の横軸は距離、縦軸は電圧である。



第2図 測定用リフレクターに雪板を固着した時の反射強度

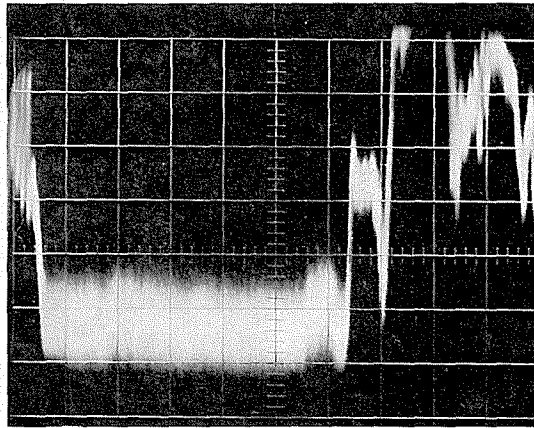
気温の変化によって氷板の反射強度が変動するのを調べるために目動カメラで15分毎にAスコープ撮影してそれから反射強度を読みとった。

測定によって得られた結果を以下に述べる。

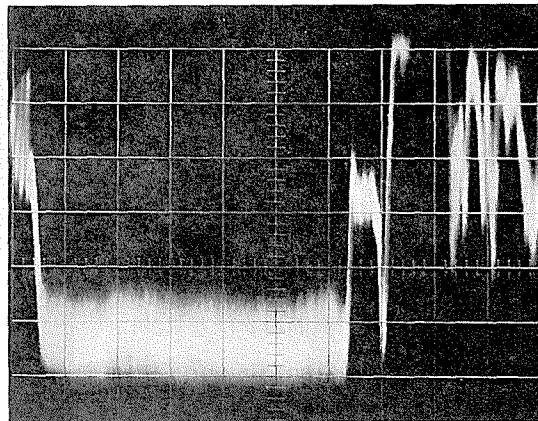
1) 表面に何らの処理もほどこさない時の測定用コーナーリフレクターの反射強度は -72.7 dBm から -73.3 dBm の間を変動した。これからレーダー方程式にしたがって測定用リフレクターの有効反射断面積を求めると約 $1.66 \sim 1.44$ m^2 となる。又、基準用リフレクターの反射強度は -75.0 dBm から -77.5 dBm の間を変動した。これから有効反射断面積を求めると約 $0.97 \sim 0.55$ m^2 となる。第1図は2月21日11時30分の両リフレクターの反射強度を示したものである。

2) 雪板の固着した場合。測定用リフレクターに雪板を固着した時、その反射強度は -81.8 dBm に減少した。雪板による反射強度の減少は 9.1 dB で、これを有効反射断面積様に換算すると 0.20 m^2 となる。第2図は雪板を表面に固着した時のリフレクターの反射強度を示したものである。雪板に水を含ませた時には、その反射強度は 22.3 dB 減少した。時間の経過と共に反射強度は更に減少し、約20分後には反射強度は -100 dBm 以下となり識別不能となった。第3図は雪板に水を含ませた時の反射強度を、又、第4図はそれから約20分後の反射強度を示したものである。

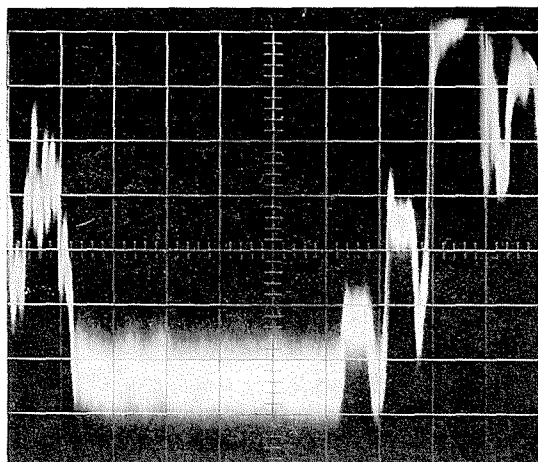
3) 氷板を固着した場合。測定用リフレクターの表面に氷板を固着すると反射強度は -95.0 dBm となり、 21.7 dB 減少した。この時の有効反射断面積は 0.01



第3図 測定用リフレクターの表面に固着した雪板に、水を含ませた時の反射強度



第4図 雪板に水を含ませてから20分後の反射強度



第5図 測定用リフレクターの表面に氷板を固着した時の反射強度

m²となる。次に氷板に霧水をかけた時には反射強度は変動しながら増大し最終的には -83.5 dBm となり、氷板の時よりも 11.5 dB 増大した。この時の有効反射断面積は 0.16 m² となる。氷の表面に塩を含ませた場合には反射強度は変化しなかった。第5図は氷板を固着した時の反射強度を示したものである。又、第6図は氷板表面に霧水をかけた時の反射強度を示したものである。第5図と比較すると反射強度の増加しているのが分かる。

4) スチロール板の場合。測定用リフレクターにスチロール板を固着した場合、厚さ 2.5 cm 及び 5 cm のいずれの場合にも反射強度には変化はなかった。第7図及び第8図はそれぞれ、2.5 cm 及び 5 cm のスチロール板を固着した時の反射強度を示したものである。

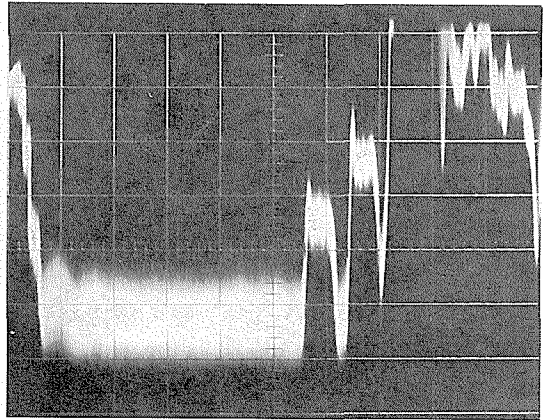
III. 結果に対する考察

標的の有効反射断面積 σ は基本的には自由空間に於けるレーダー方程式から

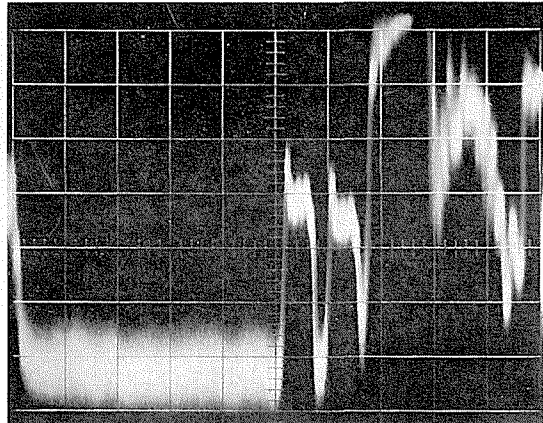
$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 r^4}{G^2 \lambda^2} \cdot \frac{P_r}{P_t}$$

として定義される。ここで r はレーダーと標的間の距離、 P_t はレーダーの送信電力、 P_r は受信電力、 G はアンテナ利得、 λ はレーダー波長である²⁾。この式で P_r は標的の形状と標的の物質の電磁的性質の函数である。通常のレーダーの様に標的が導体と見なされる場合には有効反射断面積は形状のみの函数と考えるが、しかし、流水レーダーや気象レーダーの様に標的が誘電体の場合には有効反射断面積は複雑なものとなる。

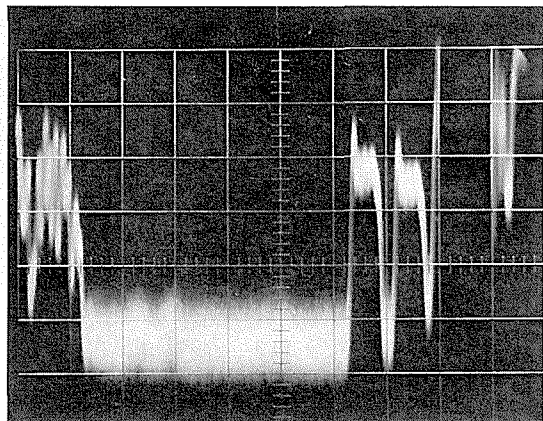
測定結果の 1) の場合、標的はアルミ製のコーナーリフレクターであるから、



第6図 氷板の表面に霧水を吹きつけた時の反射強度



第7図 測定用リフレクターの表面に厚さ 2.5 cm のスチロール板を固着した時の反射強度



第8図 測定用リフレクターの表面に厚さ 5 cm のスチロール板を固着した時の反射強度

この場合にはその有効反射断面積は形状のみの函数と考えられる。コーナーリフレクターの有効反射断面積は理論的に求められる。電波がコーナーリフレクターの3面の対称軸にはほぼ平行に入射した場合には3重反射が起り、その時の最大有効反射断面積は理論的に

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$$

として求めることが出来る。ここで a はコーナーリフレクターの直角をはさむ辺の長さ、 λ は入射電波の波長である²⁾。この式で測定用及び基準用のリフレクターの有効反射断面積の理論値を求めると測定用は $\sigma_M = 89 \text{ m}^2$ 、基準用は $\sigma_S = 3.4 \text{ m}^2$ となる。測定で得られた有効反射断面積はそれぞれ、 $\sigma_M = 1.69 \sim 1.48 \text{ m}^2$ 、 $\sigma_S = 1.00 \sim 0.56 \text{ m}^2$ と理論値よりも、かなり小さな値である。

この原因はリフレクターの設置の際の、電波の入射軸とリフレクターの対称軸との平行性のずれまたはコーナーリフレクターの各面間の交叉角度が 90° に対して誤差があるために生じたものと考えられる。

次にリフレクターの有効反射断面積の値の変動について考える。これには2つの原因が考えられる。1つはレーダーの機械的原因である。他の1つは空中状態の変化によるものである。気温の変動などによって空気中の水蒸気の絶体量が変動すると、空気中を伝播する電波の水分子による散乱が変化し、そのために受信強度の増加又は減少が起る。測定中、相対的な気温変動は 15°C 以上に及んだこと、及び最大の受信電力が日没後から日出前に得られたことなどを考えると、これ等の変動は恐らく後者によって起されたものと考えられる。しかし、この点を明確にするためには更に測定が必要であろう。

測定結果の1)によって我々はリフレクターの形状による有効反射断面積を定めた。したがって、以下の測定結果に見られる受信電力の変動はコーナーリフレクターの表面に固着した物質によるものと考えて良い。

ある媒質内での進行波の電界強度と磁界強度の比を、その媒質の固着インピーダンス (Intrinsic impedance) と定義し、 η で表わすと

$$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = \frac{\tilde{\gamma}}{\sigma + j\omega\epsilon}$$

$$\tilde{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta$$

ここで μ は媒質の透磁率、 ϵ は誘電率、 σ は導電率で $\tilde{\gamma}$ は固有伝播定数である。今、ある媒質中を伝播している電磁波が異なる固有インピーダンスを持つ他の媒質との境界面にぶつかる時、その境界面で一部は反射し、残りは第2の媒質に侵入する。2つの媒質がほぼ同じ程度の固有インピーダンスの場合には、大部分の電磁波エネルギーは第2の媒質中に侵入し、反射はかなり小さい。逆に固有インピーダンスの差が大きい場合には侵入波は小さく反射が大きくなる^{3,4)}。

レーダーの場合には第1の媒質は空気、第2の媒質を標的として、その境界面での反射、屈折、表面に沿っての伝播を考える。標的が無損失誘電体の場合には、導電率 $\sigma_2 = 0$ であるから、固有インピーダンス及び伝播定数は

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}, \quad \gamma_2 = j\omega\sqrt{\mu_2\varepsilon_2}$$

となる。誘電体の透磁率は空気のそれとほぼ等しいと考えて良いから、反射係数（境界面に於ける反射波と入射波との比）は

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \ll 1$$

となる。又、透過係数（反射面に於ける媒質2の電界強度と媒質1の入射波の電界強度との比）は

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \approx 1$$

となる。したがって、反射波は極めて少なく、大部分の電波は標的を透過するから、レーダースコープの上には反射像は得られない。標的が導体の場合には導電率 σ_2 が 10^{15-17} 程度の大きさであるから、固有インピーダンス $\eta_2 \approx 0$ となる。したがって、標的内部には電磁界が存在出来ないから、反射係数、 $R = -1$ 、透過係数、 $T = 0$ となり入射波は全部反射され、レーダースコープの上にはその有効反射断面積に応じた反射像が得られる。

今回の実験では氷や雪の様な誘電体を導体の表面に固着した多層構造である。したがって、現像としては空気と誘電体との界面での現像に更に誘電体と導体との界面現象が加わる。誘電体内部に侵入した電磁波は導体との界面で反射され、再び誘電体内部を透過して空気との界面に達し再び反射透過を起す。それ等の反射波が相互に干渉し合い、又入射波とも干渉し合ってその結果反射強度が減少する。測定に使用したコーナーリフレクターの場合には電波は3面で反射され3重反射を起すから現像は更に複雑なものとなる。したがって入射波と反射波の強度の比を理論的に求めることは可能ではあるが実際には極めて難しい。

測定結果の2)で明らかな様に、雪板を表面に固着した場合の反射強度は元々の反射強度よりも9.1 dB減少した。又測定結果の3)で明らかな様に氷板を表面に固着した場合の反射強度の減少は21.7 dBmであった。これに対してスチロール板を固着した場合には測定結果の4)で明らかな様に反射強度の減少は認められなかった。これ等の反射強度の変化は固着した板の導電率の相異によって起ったと考えられる。導電率が極めて小さく、無損失誘電体と見なし得るスチロール板の場合には、電波はスチロール板と空気との界面でほとんど反射を起さずに板内を透過しスチロールとリフレクターの界面で反射し、再びスチロール板内を透過して空中に出る。この過程で電波の損失はほとんどないから反射強度は測定用リフレクターの反射強度とほとんど同じとなり減少は認められない。一方、雪板や氷板の場合には板自体の導電性が無視出来ず、そのために板と空気の界面で反射が起り、更に板の内部に透過した電波が板とリフレクターの界面で反射して来る。したがってこれ等の電波が相互に干渉し合って反射強度を減少させると考えられる。雪板は空気と純水との混合体であるから、氷板よりは導電率が低く、そのために空気との界面での反射が氷板の場合のそれよりも小さく、したがってそれ等の干渉による反射強度の減少が氷板の場合よりも少なかったと考えるのが妥当である。

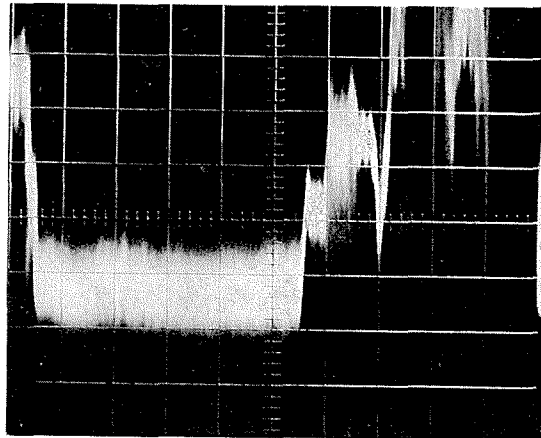
又、測定結果の2)で雪板に水を含ませた場合にその反射強度が次第に減少し最終的には反

射像が得られなくなった。この原因としては雪板が水を含んだために固着した3面の中の1面が自重で次第に変形を起し3面の直交性がそこなわれたために3重反射を起さなくなったためと考えられる。

又測定結果の3)で氷板に霧水を吹きつけた時に反射強度が次第に増加した。この原因は明らかではないが、霧水の撒布によって氷板表面の微少な凸凹が平滑化され、それによる電波の表面散乱が減少したことも原因の1つに挙げられよう。又時間的変動を説明するためには

氷板自体の温度変化による電磁的性質の変化も考慮しなければならないであろう。しかし今回の結果からは詳しくは不明である。

今回の測定中、得られた今一つの興味ある結果は人体がレーダー電波を反射し反射像が得られたことである。人体が水を含んで導電性を有することから妥当とも考えられるが、測定中に作業のために人が標的に近づくと標的の反射像に人の反射像が重量して測定不可能となる例がしばしば起った。第9図は標的の反射像に人の反射像が重畳している例を示したものである。この例で人体がかなり大きな反射能をもっていることが判るであろう。



第9図 標的の反射像に人体の反射像が重畳している例

IV. あとがき

標的の実際の形状及びその電磁的性質がレーダースコープの上の標的映像及びその反射強度とどの様な関係をもつかを明らかにすることは実用的にも興味ある問題である。同時に純学理的にも、その様な物質がレーダー波の様な数 cm 程度の電磁波に対して、どの様な挙動を示すかと言うことは非常に興味ある問題である。

雪や氷は空気と純氷の混合誘電体であり、その誘電的性質は純氷の性質のみではなく、含まれる不純物による微視的構造や気泡などの配列の様な巨視的な構造にも関係し、極めて複雑である。しかしながら、主に実用的な要求から数多くの研究者によって、その性質の研究がなされているが、未だ確定的結果は得られていない様である⁴⁾。

我々の流水レーダーが対象とする標的はその様な複雑な性質をもつ雪や氷であるから、それ等の性質を明確にすることがレーダースコープの上の映像の分析のためには必須のものである。この様な考えにもとづいて前報にひき続き今回の実験が行なわれた。測定の方法等には未だ改良すべき点も多く、今後更に実験をすすめるためには、先に述べた諸量の間の定量的な関係を明確にすることは出来ない。しかし、今回の実験で定性的であるが、次の事実が確かめられた。すなわち、同じ形状の標的の場合に標的が導体の場合と誘電体と導体との2層積層構造をもつ場合とでは標的の反射強度は異なり、導体のみの場合よりも著しく減少する。又、導体に

積層されている誘電体の厚さが等しい場合には、誘電体の導電率が高い程、反射強度の減少は大きく、導電率が低い程、反射強度の減少は大きく、導電率が低い程、反射強度の減少は少ない。

実験に際し終始献身的な御協力をいただいた当研究所、流水研究施設の石川正雄、福上博樹両技官、又種々の御便宜をはかっていただいた流水研究施設長田畑忠司教授、及び融雪科学部門の小島賢治教授、論文を書くに際し数々の有益な御討義及び論文の御校閲をいただいた凍上学部門の鈴木義男博士に併せて深く感謝の意を表します。なおこの研究に要した費用の一部は文部省科学研究費、特定研究・災害科学、流水の総合的研究によったことを記しあわせて謝意を表します。

文 献

- 1) 藤野和夫・大井正行 1970 流水レーダーの分解能の測定 I. 低温科学, 物理篇, **28**, 291-299.
- 2) 無線工学ハンドブック編纂委員会 1964 無線工学ハンドブック. オーム社, 2323 pp.
- 3) 宮島竜典 1952 電磁気学 (1). みすず書房, 345 pp.
- 4) 水島三一郎 1946. 電波と物質. 岩波書店, 178 pp.

Summary

Some preliminary measurements of radar echo intensity from targets were carried out as follows:

As targets, corner reflectors were used which were covered with plates of snow ($\rho=0.5$), ice and styrene foam. The intensity of radar echoes from such targets were measured using an A-scope.

Results obtained showed a remarkable decrease in intensity by such dielectrics with the exception of styrene foam plates. In the case of styrene foam plates, no recognizable change in intensity was observed as shown in Figs. 7 and 8. In the case of snow plates of 5 cm thickness, the decrease of intensity was 9.1 dB compared to that obtained from metal reflectors. When snow plates were soaked by water, a decrease of intensity of 22.3 dB occurred as shown in Fig. 3. For the case of ice plates, which were the same thickness as snow plates, the decrease of intensity was 21.7 dB as shown in Fig. 5.

From these results, we concluded that the intensity of the radar echo from targets, where dielectric materials covered a conductor, was greatly influenced by the dielectric properties of the covering materials. When the conductivity of the covering material was not negligible, it interfered with the reflection and caused a considerable decrease in reflected power compared to that normally obtained from a conventional conductive target.