



Title	海氷域におけるレーダー電波伝搬の観測
Author(s)	大井, 正行; OI, Masayuki; 福士, 博樹 他
Citation	低温科学. 物理篇, 41, 191-198
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18471
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_p191-198.pdf



流水域におけるレーダー電波伝搬の観測^{*,**}

大井正行・福士博樹・石田 完

(低温科学研究所)

(昭和 57 年 10 月受理)

I. ま え が き

筆者等は永年流氷観測レーダーにより流氷の観測を行なってきた。レーダー観測を行なう時の最初の指針は、レーダー像における流氷の分布の把握、すなわち流氷がどのような形でどの範囲にまで映し出されているかを知ることである。しかし流氷が観測される範囲すなわちレーダー電波の到達距離は、毎年流氷の初期から末期にいたるまでの間に、日単位あるいは時間単位で複雑に変化しながら拡大または縮小していることに気付く。

この現象を直感的に表わす方法として、流氷のレーダー像をコマ撮り映画にして眺めてみると、流氷が刻々と姿を変えながら移動する像に重畳して、主に遠距離領域の受信強度が、時には色々な方向で部分的に複雑に変動していることが認められる。このような現象は、一般に気象の影響をうけて、レーダー電波の伝搬径路が変化するために生ずるものと考えられる。

本論文では、レーダー像から電波の最大到達距離の変化が得られたので、その観測結果について述べ、この結果と稚内地方気象台のラジオゾンデによる気象観測資料の解析から、地球の等価半径係数とレーダーの最大観測範囲との関係を求めた。しかし、最大観測範囲の変化は、それ以外に流氷域特有のレーダー電波伝搬現象があることが認められた。

II. レーダー像における観測範囲の変化

北海道オホーツク海沿岸沖合に流氷が到来してから退去する迄の期間は、平年では1月中旬から4月初旬までである。この期間中、気温が最も低下する2月初旬が過ぎて昇温がみられる2月中旬から下旬にかけて、PPIに表示される流氷域の範囲は拡大し始める場合が多い。この観測範囲の拡大は、レーダー装置の受信能力の限界値をあらゆる最小受信電力が一定である場合には、受信電力が増大したことに相当する。

オホーツク海においてこの期間は、一般にN~NWの季節風系の場合、海水域を拡張しながら海水を移動させるとともに、寒気をともなって最も結氷作用を促進させる。すなわち氷況の最盛期で密接度が增大する¹⁾。このように発達した流氷野は、暖気の流入によって融解が始まる3月初旬または中旬まで、形状的にレーダー電波の反射に寄与し易い状態にあることが考えられる。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2492号

** 北海道大学低温科学研究所 附属流氷研究施設 研究報告 第101号

しかし、これまでの観測結果から、観測範囲の変化は、形状的な効果に起因することの他に、大気の状態の変化によって起こる伝搬径路の変化に起因することが上げられる。

第1図に、1982年1月から4月初旬までの期間中に、網走レーダーによって得られた午前9時における最大観測範囲を距離(哩)で示した。網走レーダー局は海拔220 mの高さに設置されているので、標準大気の状態における最大観測範囲は、これまでの観測結果から25哩前後である。第1図の最大観測範囲を示す□印は、観測に使用している指示機PPIが通常32哩までしか表示していないために、観測範囲がこの距離を越えていることを意味している。またこの範囲を示していない日は、流水が存在していなかった日かあるいは存在していても水量が小さく表わせなかったり、停電のため観測できなかった日かの何ずれかである。

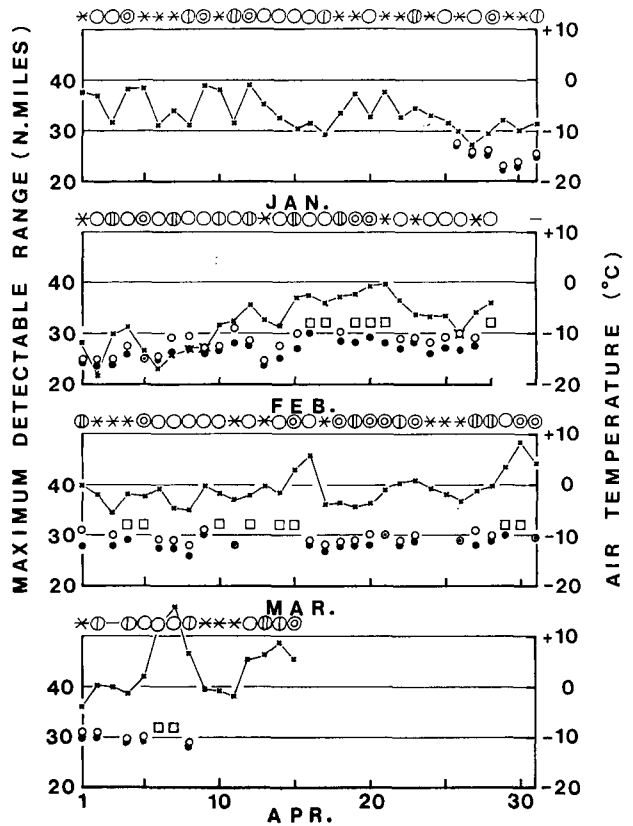
第2図に、流水の最盛期で最大観測範囲が約25哩の例(A)と、流水が幾分ゆるみ始めた約30哩の例(B)を示した。

第1図から、気温の上昇がほぼ安定し氷野の融解を促進させた結果密接度が減少して形状的にレーダー電波の反射に寄与しづらくなる3月初旬または中旬以降においても、依然観測範囲の拡大は衰えていない。むしろ比較的気温が高い日にこの現象が見られる傾向にある。このことは、大気の状態が伝搬径路に影響を及ぼしていることの方が大きいことを示していると思われる。

III. 大気の屈折率と電波径路

1. M 曲線と K

レーダー電波を含むマイクロ波の伝搬は、気象の主要素である気圧、気温および湿度によって決まる屈折率の値そのものよりも、屈折率の高さに対する勾配の方が大きく影響する。一般に電波径路を考えるには、地球の湾曲を考慮した屈折率いわゆる修正屈折率が実験式で与え



第1図 網走レーダーによる、午前9時の流水の最大観測範囲と網走の気温・天気(1982年4月12日08時40分~13日01時20分)。○は最大観距離、●は方位的に平均した観測距離 □は32哩以上観測された時の距離、×は気温を表わす

られている。いま屈折率を n , 修正屈折率を M とし [MU] 単位で表わすと

$$M = \left(n - 1 + \frac{h}{a} \right) \times 10^6 = \frac{79P}{T} + \frac{3.8 \times 10^5 \times e}{T^2} + 0.15h \quad (1)$$

となる²⁾。ここで P は大気圧 (mb), a は地球の実半径 (m), e は水蒸気分圧 (mb), h は地表より的高度 (m), T は大気温度 (°K) である。右辺の $0.15h$ は $h/a \times 10^6$ である。(1) 式から修正屈折率の垂直分布曲線いわゆる M 曲線が与えられると、電波の屈折半径が判かり進路が定まる。大気がほぼ標準に近い状態にあるとき、電波は地球の半径のちょうど4倍に等しいゆるやかな弧を描いて、幾何光学的な見通し限界より遠い地点まで到達することは良く知られている^{3,4)}。この場合、電波が直進すると考えたとき、見かけ上大きくなる地球の半径すなわち等価半径を D とすると、地球が平坦になった率 K は等価地球半径係数と呼ばれ $K = D/a$ で表わされ $4/3$ の値である。 K と M との関係は

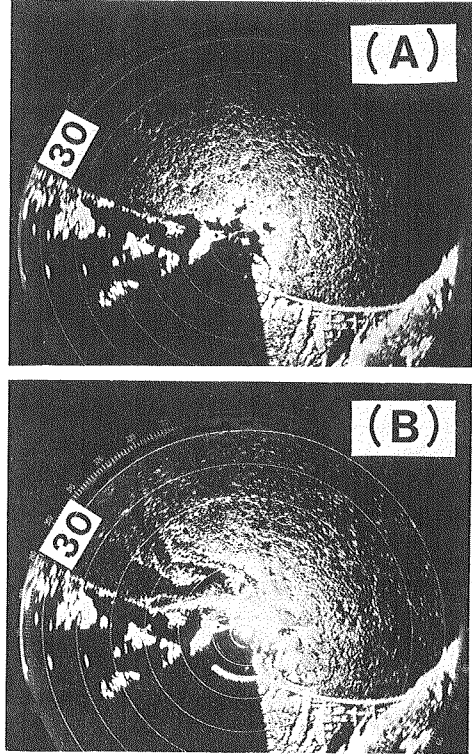
$$K = \frac{10^6}{a \left(\frac{dM}{dh} \right)} = \frac{0.157}{\frac{dM}{dh}} \quad (2)$$

で与えられる⁴⁾。したがって K は電波の屈折状態を間接に表わす値である。

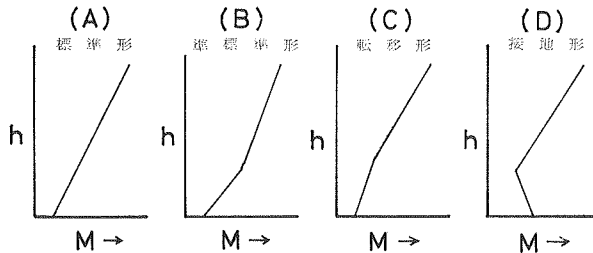
第3図は M 曲線の代表的な例である。各曲線とも部分的な K で構成されており、電波はこの中を通過するときそれぞれの高さにおける K に応じた曲率の弧を描いて伝搬する。

2. ラジオゾンデによる気象要素と K

筆者等は第1図から、大気の屈折率の変化に起因したと思われる観測範囲の変化と、これに対する稚内地方気象台におけるラジオゾンデの観測資料 (印刷天気図: RADIOSONDE AND



第2図 網走レーダーにおける流氷の観測範囲の変化, (A) は約25哩, (B) は約30哩まで観測されている場合の例



第3図 M 曲線の代表的な例

RAWINSONDE DATA) を解析してその関係を調べた。この資料の解析はレーダー観測資料に合わせて、1982年1月から4月中旬までの期間中の午前9時の観測記録についてである。解析の方法として地上から1,000 mまでの高度を対照として、(1)式から M を求めた。この結果、得られた M 曲線として第3図に示した標準形、準標準形および僅かながら転移形が見られたが、 M 値が僅かに異なる標準形が最も多く現われた。結局全観測期間を通じて顕著な違いは見られず、 M 曲線ではレーダー観測結果との対応は見いだせなかった。

そこでこれ等の結果を一層詳しく解析するために、地上から1,000 mまでの高度を50 m毎の20区間に分け、各区間における K を(2)式から求めてみた。第4図は、このようにして求め

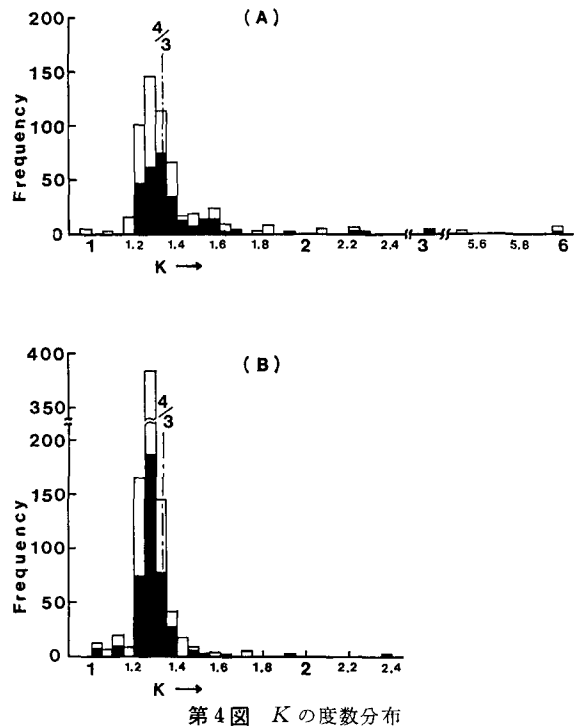
られた K の度数分布である。図(A)は、第1図におけるレーダー観測記録結果から、観測範囲の拡大が30 哩以上に及んでいる日30件の場合であり、また(B)は30 哩に及んでいない日38件の場合である。双方とも K が1.25~1.30が最も卓越している。(A)の場合僅かの度数ながら著しくこの値から隔っている箇所がある。また K が1.35以上の度数は、(A)の日数が(B)よりも少ないにも拘らず、(A)が192と(B)の88より大きい値を示している。このことはレーダー電波の伝搬にある程度反映していると思われる。

しかしこの推察は、実際の伝搬径路から遠い局所的な1地点における K の日分布によるものであり、あくまでも北海道オホーツク海一円を共通な大気の状態と考えた場合にほかならない。

IV. レーダー観測による K の予測

さきに大気屈折状態を間接にあらわす量として K の意義について触れた。実際のレーダー観測において、時間的にゆっくりと変化している受信電力と K との関係について考察してみる。

流水からのレーダー受信電力の観測資料が整っている紋別レーダーにおいては、大気がほぼ標準状態に近い時期の観測範囲は30 哩である。このときレーダー受信装置が受信し得る最少受信電力は -100 dBm である。いまレーダー方程式において、流水野が空中線ビームの拡が



第4図 K の度数分布
(A)は観測距離が30 哩以上、(B)は30 哩未満の場合で、階級の K は0.5 間隔である。黒く塗りつぶしてある部分は、高度500 m 以下の場合を示す

りに比較して広い分布をなして、かつ十分遠方の物標から返ってくる場合、受信電力 P_r は

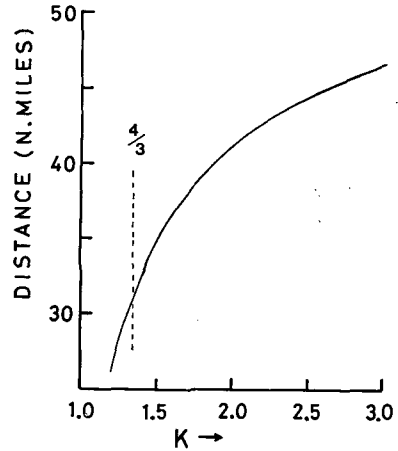
$$P_r = \frac{2\pi \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \sigma_0 \cdot \theta_B \cdot \tau \cdot C (h_{1p} \cdot h_{2p})^4}{\lambda^2 \cdot R^7} \quad (3)$$

であらわされる。ここで P_t は送信電力、 G は空中線利得、 λ は波長、 θ_B は空中線ビーム幅、 τ はパルス幅、 C は電波速度、 h_{1p} および h_{2p} はそれぞれ地球の湾曲を考え入れた場合の空中線および物標の有効高さである。この h_{1p} および h_{2p} は次式であらわされる。

$$h_{1p} \doteq h_1 - \frac{R_1^2}{2Ka}, \quad h_{2p} \doteq h_2 - \frac{R_2^2}{2Ka} \quad (4)$$

ここで h_1 および h_2 はレーダー空中線の高さおよび物標の高さであり、 R_1 および R_2 は空中線位置および物標位置から反射点までの距離であり $R = R_1 + R_2$ である。 h_1 は 300 m であり、 h_2 は実際の流水野においては 0.5 m とする場合が多い⁵⁾。

標準大気における $K=4/3$ は概略値であって、地球上どこでもこの値が期待できるわけではない。いま第4図の結果から、大気が標準状態に近い時期の K を 1.30 とすると、(3)、(4)式から σ_0 が求められる。この σ_0 は距離 R が 30 哩のときに受信電力 P_r が最小受信電力値 -100 dBm となるから、このときの単位面積あたりの散乱断面積で、 $4.85 \times 10^{-4} (\text{m}^2)$ となった。この結果、(3)式における P_r は h_{1p} に含まれる K の値によって変わる。なおこの場合 K の変化によって σ_0 も当然かわるが、(3)式の P_r に与える影響は K に比較して無視できる値である。(3)式は R^{-7} に比例するので、 K の変化に対応して最小受信電力値 (-100 dBm) となる最大観測距離が求められる。



第5図 紋別レーダーにおける最大観測範囲と K の関係

第5図に、この方法によって求めた K の変化に対する最大観測距離の変化を渾で表わした。この結果、伝搬径路全体を十分に含む広域な大気の dM/dh が一定に近い状態にあるときには、レーダー像に示される観測距離に対応した K の値が求められたことになる。なお第5図は、後に述べる沈降性のダクトによる異常伝搬の場合にはあてはまらない。

V. 流水域特有の非標準伝搬の観測例

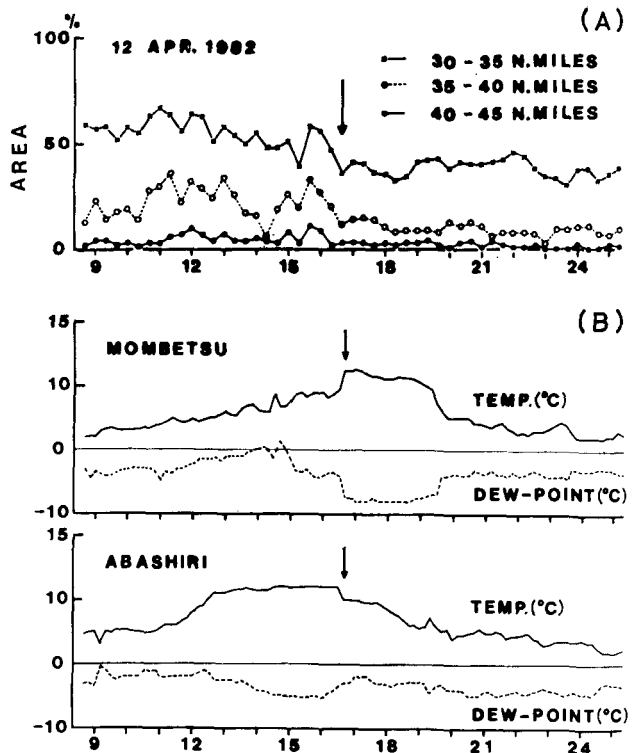
これまでに述べたレーダー映像上の最大観測範囲は、平年で流水が到来してまもなく気温が最も低くなる2月初旬から、暖たかになり始める2月下旬その年によっては3月初旬まで、流水が存在する全方向にわたって一様な状態で示される傾向がある。しかしその後、暖気の流入によって気温が上昇する3月初旬から中旬以降は、全方向に一様ではなく、ある方向では非常に遠くまで延びた状態で時間的にも空間的にもゆっくりと変化している時がある。

このような場合の原因として、次の2つが考えられる。第1はこの時期になると比較的低

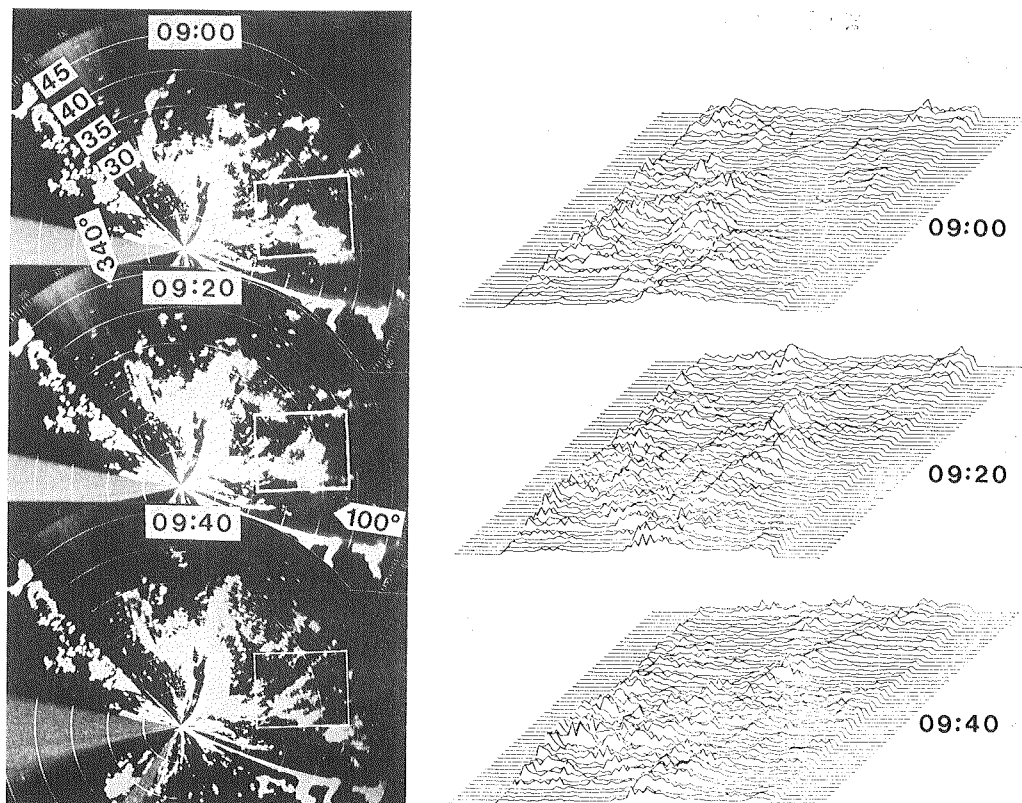
温な流水野上の気層に、南側にある陸地から暖気が流入する機会が多くなる。その結果、低温多湿な気層上に高温低湿の気層が重なり合って、電波工学の分野で第3図(D)に示したような接地形の反転層が形成される領域が生じる。それにより、電波伝搬でいう沈降性ダクトが生成されるためである。この現象は、流水野特有の興味ある現象といえる。第2は、第1の現象に伴って出現するレーダー映像上の偽像である。この場合は比較的近い位置にある流水野の一部が、レーダー電波の進路に対して低角度の反射面をもった鏡の役目をする。この反射面により、その角度によってきまる方向にある遠方の流水からの反射を生じるためである。この場合には、特に通常観測されない距離にあるエコーは、真の流水の存在を示していないことが十分考えられる。

1982年4月12日、紋別レーダーによってこの現象が観測された。この日は晴天でかつ温暖であった。観測した時間は午前8時40分から翌日の午前1時20分までで、20分間隔である。観測方法は、レーダー映像上に標準伝搬に近い状態では流水が観測されない海域をあらかじめ設定した。この海域を距離について30~45 哩までの範囲で5 哩毎に区切り、また方位については340°~100°までを10°毎に区切り、全部で36ブロックに分割した。その上で各ブロックに映しだされた映像の面積を読みとった。この際PPIに映しだされた映像は、その面積を明確に読みとり易くするために特殊なフィルターで-95 dBm以下の受信電力は落した⁶⁾。

各ブロック毎に見れば、30 哩~40 哩においては全方位とも顕著な変化がみられ、90°~100°と60°~70°の2方位だけが、16時40分頃まで40 哩以遠にもエコーが出現しており、さらに30 哩~35 哩の領域よりも遠方の35 哩~40 哩の領域の方が上まっていた。これ等を全方位について平均した第6図(A)を見ると、16時40分以後から面積の減少すなわち受信電力の低下が顕著となったことが判る。この低下した時間は、同図(B)に示すように紋別測候所および網走地方気象台における地上気温、露点温度の自記記録が変化した時間と一致している。



第6図 (A) 紋別レーダーによる異常伝搬の様子を表わすため、定めた海域として方位について340°~100°を各々30~35 哩, 35~40 哩, 40~45 哩に分け、この中に現われたエコーの面積を%で表わしたもの(1982年4月12日08:40~13日01:20)
(B) 紋別、網走における地上気温、露点温度の自記記録

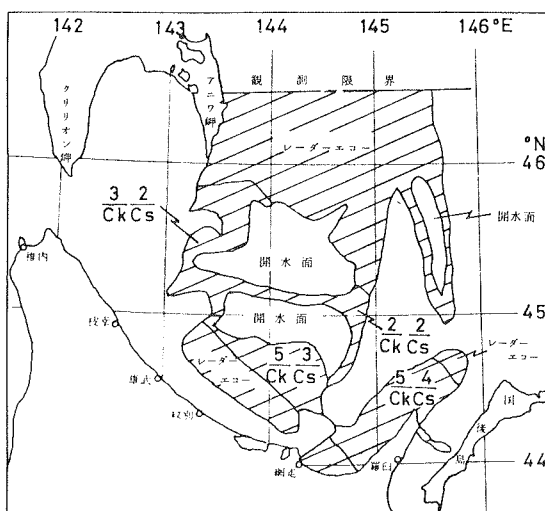


第7図 (A) 紋別レーダーのPPIで、午前9時00分、9時20分、9時40分に観測した時の流水エコーの変化。PPIの中心は15哩
(B), (A)の画面の一部を3次元グラフィックで表わしたもの

第7図に、この観測時間中の一部、40分間の変化を受信電力の相対的な強度を含めて表わした。この結果、30哩以内の流水が移動していなかったにも拘らず、20分間でも位置的、強度的にも大きく変化しているようすがわかる。

以上の結果を総合すると、レーダー電波は明らかに異常な伝搬をしていることが判かる。

なおこの観測をした時間中、30哩以遠における流水分布は不明である。しかし第8図に示すように、翌日13の海上自衛隊機による海水観測結果から、この海域には流水の存在が確認された。紋別レーダーによる30哩以内における流水分



第8図 4月13日の海上自衛隊による海水域

布は、兩日であまり変化がみられなかった。それ故 12 日にも 30 裡以遠には流氷が存在していたに違いない。

VI. あとがき

流氷野が広範囲に分布してから、消滅してゆく永い日数の間に、レーダー電波の受信電力が絶えず変化しているようすを観測し、その結果について述べた。この変化の原因として考えられる大気の変化による伝搬径路への影響を、稚内の高層気象観測資料を解析して検討、推察した。その結果、これ等変動の原因には、流氷が存在する海特有の例えば逆転層の形態等、興味ある現象が含まれていることを示唆した。

これ等を実証するためには、本論文では触れることのできなかつた、伝搬径路にできるだけ近い場所での気象観測を望むしかない。

おわりにのぞみ、快く気象資料の提供をしていただいた紋別測候所の皆様に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 赤川正臣 1969 気象衛星によるオホーツク海の海水分布およびその変化の解析. 自然災害特別研究成果, No. A-54-1, 沿岸海域における流氷の運動予測の研究, 23-49.
- 2) 宇田新太郎 1980 電波工学演習. 学献社, 226-229.
- 3) Merrill I. Skolnik 1970 RADAR HAND BOOK. McGRAWHILL, 24-2-24-12.
- 4) 渋谷茂一 1965 マイクロウェーブ伝搬解説. コロナ社, 67-84.
- 5) 板谷 繁・松代寿治・田畑忠司 1969 流氷のレーダクロスセクションの測定結果について. 宇宙・航行エレクトロニクス研究会資料, 資料番号, SANE 69-1 (1969-04), 1-14.
- 6) 清水紀雄 1975 レーダー信号の統計的処理 (II). 日本無線技報, No. 9, 6-12.

Summary

Intensities of the radar echo change remarkably hour by hour or day by day during the existence of sea ice off the Okhotsk Sea coast of Hokkaido. It was confirmed by the observation of a change in the maximum observable area on the screen of the PPI.

One of the causes for the change in radar echo intensity is a change of a propagative channel for radar waves, as the meteorological conditions change. In order to verify it, frequency distributions of K , the effective earth's radius factor, were obtained corresponding to the change in the maximum observable area, by analyzing the daily weather reports (rawine sonde data) at the Wakkanai Weather Station (Fig. 4). It was understood from Fig. 4 that the maximum observable area depended upon the change in K , as shown in Fig. 5.

Moreover, it was found that this change depended also upon the anomalous propagation, which is a phenomenon characteristic of the sea-ice field.