



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アイスレーダによる南極氷床のリモートセンシング
Author(s)	星山, 満雄
Citation	北海道大学電子科学研究所技術部技術研究報告集, 2, 1-12
Issue Date	1994
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1451
Type	departmental bulletin paper
File Information	KJ00000697028.pdf



アイスレーダによる南極氷床のリモートセンシング

星 山 満 雄

1. まえがき

測定対象物からの物理量を計測する場合、測定器を対象物に接続して直接測る方法を、直接測定 (Direct Measurement) という。これに対して、光、電磁波などを介して直接対象物に触れることなく、間接的に測定する方法はリモートセンシング (Remote Sensing) といわれ、遠隔測定、遠隔探査などと訳され、資源探査衛星「ランドサット」による地表の鮮明な映像や、気象衛星「ひまわり」による雲の映像など身近な存在となっている。

近年の宇宙技術の発展と測定技術の向上により人工衛星によるリモートセンシングが可能となり、電子計算機を用いた画像処理技術の向上による解析能力の増大と相まって、今後の利用・応用範囲の拡大・発展が期待されている。

地球儀で最も目に留まりにくい酷寒の白い大陸、南極大陸でもリモートセンシングは活用されている。南極大陸の水は氷床 (Ice Sheet) と呼ばれ、「相当量の厚さと広がりを持った水体」と定義され、南極大陸とグリーンランドを被う氷をいう。

南極の氷床は、面積約 1.2×10^7 km² (日本領土の約 37 倍)、平均氷厚は約 2400 m (最大氷厚 4776 m) に達し、地球上の雪氷の 90 %、淡水の 70 % を占めるといわれている。

この広大な南極氷床の、精度の高い表面地形図は研究者の要望を満たす現状ではなく、人工衛星搭載レーダ高度計 (表面高度精度 2~3 m) による観測計画があり観測結果が待たれている。

一方、氷床の厚さ計測と氷床下の基盤地形観測は、従来、人工地震探査法 (精度約 3%) で行わ

れていたが、1970年代からは電波を利用した電波探査法 (精度約 1.5%) に移り変わった。日本では1980年以降、航空機搭載型アイスレーダによる観測が実施され、各国との共同観測として、氷厚計測と基盤地形図の作成に威力を発揮している。

また、札幌でも毎月のように最低記録を更新して関心を集めている、大気オゾン量の激減により形成されるオゾンホールは極域上空の人工衛星による長期観測など、多種多様に活用され成果を挙げている。

本稿では、電波氷厚計として開発されたアイスレーダによる観測波形を、氷床内部の物理的性質 (氷床の温度・密度など) の解明、氷床底部状態の把握を目的とした、リモートセンシングの手段として数値解析を実施した。

その結果、解析に用いる数値が観測地での実測値が得られないなど満足できる状況でないため、解析結果への評価・検証は今後の観測結果をまたなければならぬ現状ではあるが、氷床底部の基盤傾斜度などの氷底状態の推定、氷床内部の温度分布推定とその評価について報告する。

2. アイスレーダによる観測波形

観測用の航空機搭載型アイスレーダは、周波数 179 MHz、パルス幅 0.3 μ sec、送信出力 1 Kw、アンテナは航空機の両翼に装着した 3 素子八木アンテナ (利得 8 dB) を使用して、レーダエコーは A スコープ表示方式を用いている。総合受信能力は -164 dB、測定精度は 10 dB で氷床上空 500~1200 m より観測している。

解析に用いた観測波形を図1に示す。

縦軸は観測レーダエコー値、横軸はレーダパルス発射時からの大気中における電波伝搬距離を表示している。なお、氷床中の電波伝搬速度は、氷の誘電率が大気比べて大きいいため大気中の約半分に減速する。このため、図中には氷床表面からの水深用の目盛りを合わせて表示している。

観測波形より多数の情報を得ることができる。

A領域は航空機から氷床表面までの自由空間伝搬部分で航空機高度が分かる。B領域は、氷床内部からのレーダエコーで氷床温度分布や氷床密度分布、この波形には観測されていないが隕石や火山灰などの水中反射物の存在などの情報が得られる。C領域は、測定感度以下の領域で情報は得られない。D領域は、本稿で問題とする氷底からのレーダエコー部分で、前述したように氷床表面と氷底反射間の距離より氷床の厚さの計測と、氷底からのレーダエコーの有無による氷床下の南極大陸の測量が目的であったが、この部分に検討を加えることで氷底状態を推定することができる。

3. 氷底からのレーダエコー

図1に示すように水深 1300～1650 m間に氷底からのレーダエコーが観測されている。

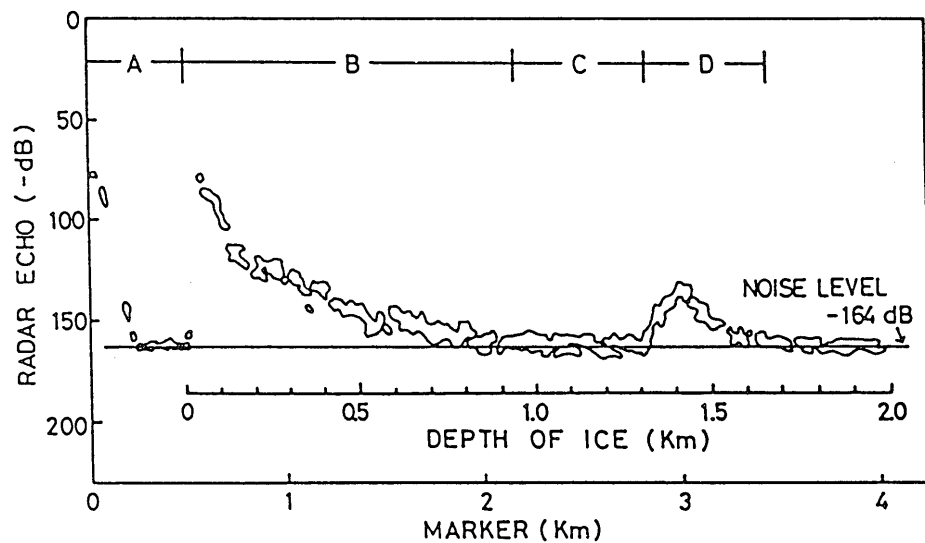


図1 観測波形

この氷底からのレーダエコーが生じる要因としては、多種の事項が考えられる。

- (1) 氷床移動に伴う氷底と大陸岩盤との摩擦により生じた、氷底部のクラックによる反射。
- (2) 氷床中の隕石による反射。
- (3) 氷底部の水中温度異常変化による反射。
- (4) 氷床移動に伴う氷底と大陸岩盤との摩擦により削り採られた、岩の小片による反射。
- (5) 氷底の大陸基岩盤による反射。
- (6) 氷床移動に伴う氷底の大陸岩盤との摩擦熱で生じた水の、氷底部に浸透した含水による反射。
- (7) 同上の水が、氷底と大陸岩盤との間に水膜を形成し、この水膜からの反射。

各要因事項の中で、(1)のクラックによる反射は、1000 mを越える氷底部では、海岸近くの氷床が海に流れ出る付近（氷床の移動量が多い）を除いてクラックの発生は考えにくい。(2)の隕石による反射は、氷床底反射の水深に対するエコー幅より直径 400 m以上の隕石が必要であり現実的に考えにくい。また、小型隕石群の自重による氷床内部へ沈み込む沈降現象による堆積は考えられるが、隕石の沈み込みが 1000 m 以上にも達することは考えにくい点と、氷床途中に沈降中の隕石がなく氷床底部にのみ堆積する不自然さにより、小型隕石群からの反射とする要因も考えにくい。

また、(3)の氷床内部温度の異常変化による反射については、観測波形より水深 50 m毎に 15℃以上の温度変化を必要とし、これも現実的には考えにくい。

以上のことから、(4)～(7)の氷底反射の生じる要因が想定される。しかし、(5)の基岩盤と(7)の水膜からの氷底反射は、レーダ波面に対し水平な反射面では、パルス幅 (50 m) を考慮しても観測波形のように水深 400 mものエコー幅を持つ氷底反射は得られない。従って、図2の氷底反射モデルのように岩盤または岩盤の上に形成されている水膜の反射面がレーダ波面に対して傾斜している必要があり、深さに対し反射面が徐々に変化する考えである。

(4)の氷床内岩片による反射は、氷床移動に伴う氷底と大陸岩盤との摩擦により削り採られた岩の小片が、氷床移動運動により氷底部に取り込まれ(粘性流動の考え)、図3に示すように岩片密度は氷底部が濃く、氷床表面方向に薄くなる密度分布を形成しているものとする。

(6)の氷床含水による反射は、氷底部と大陸岩盤との摩擦による摩擦熱と氷底基盤岩からの地熱で、氷底と岩盤との境界で生じた水が氷床内部に浸透する場合と、氷底部で同一現象により氷床内部に水が生じる場合との両者が混在しているものとして考えられるが、(4)の岩片と同様に氷床中の含水密度は、図3に示す密度分布を形成しているもの

と考えている。

この場合、岩片粒径はレーダ波長 (1.67 m) に対し十分に小さく、岩片・含水ともレーダ波面に対してある密度分布で一様分布しているものとしており、このように連続した密度分布を形成している場合には、解析レーダ波面を任意に設定することができる。図2に示す基岩盤または水膜の傾斜度と、図3に示す岩片または含水の密度分布を解析するのが目的である。

4. レーダ方程式

対象物から反射してくるレーダエコーは、対象物との誘電率の変化率で発生し、数値解析を行うためには次式で表されるレーダ方程式を解かなければならない。

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^n} \delta e^{-2\sum \alpha R_i} \quad (1)$$

ここで、 P_r : 受信電力、 P_t : 送信電力、 G : アンテナ利得、 λ : レーダ波長、 R : 反射体までの距離、 n : 反射面形状の変数、 δ : 反射断面積、 α : 減衰断面積、 R_i : 単位距離を表し、未知数は減衰断面積、反射断面積と反射形状変数であり以下に示す。

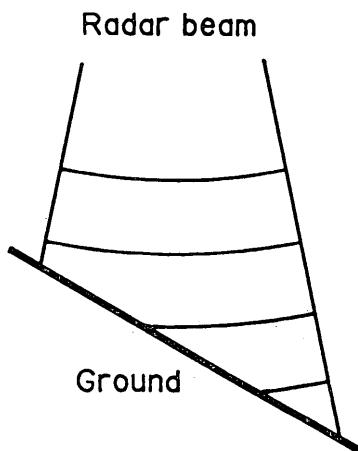


図2 氷底基盤岩・水膜による氷底反射モデル

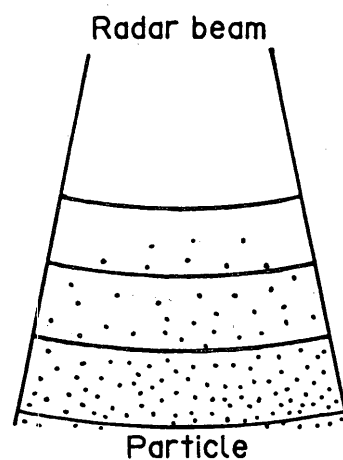


図3 氷床内の岩片・含水による氷底反射モデル

減衰断面積は、電波の減衰定数で次式で表される。

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\omega^2 \mu^2 (g^2 + \omega^2 \epsilon^2)} - \omega^2 \mu \epsilon \right\}} \quad (2)$$

但し、 ω ：電波の角周波数、 μ ：減衰体の透磁率、 ϵ ：減衰体の誘電率、 g ：減衰体のコンダクタンスである。

レーダ標的に対する反射断面積は、定義により次式のように書ける。

$$\delta = 4\pi \left| \frac{P_R}{P_I} \right| = 4\pi \left| \frac{E_R}{E_I} \right| = 4\pi Rv^2 \quad (3)$$

但し、 P_R ：反射電力、 P_I ：入射電力、 E_R ：反射電界強度、 E_I ：入射電界強度、 Rv ：電圧反射係数であり次式で表される。

$$Rv = \left| \frac{n-1}{n+1} \right| \quad (4)$$

$$n = n_r - jn_i = \sqrt{\epsilon_r - j\epsilon_i}$$

但し、 n ：屈折率、 ϵ ：比誘電率を表し、添字の r と i は夫々実数部と虚数部を表す。

反射面形状変数は、反射面の形状がレーダ波面に対して凹面関係の場合 $n=0$ 、平面関係の場合には $n=2$ 、凸面関係の場合 $n=4$ と表され、氷床表面の解析は、氷床表面が風・日射などで荒れているため、凸反射面と考え $n=4$ で行う。

氷床内部のエコーは、氷床内部の誘電率変化による反射と考え、水中での誘電率は連続的に変化するものとする。従って、解析波面を氷床内の任意の位置に設定できるため、 $n=0$ の反射面として解析を行う。

図1で氷底からの最大エコーは、水深 1400 m で -138 dBのエコー値が得られている。水深 1400 m までの電波減衰量は水中温度分布で多少変わるが約 -130 dB程度、アンテナ利得 8 dB、

水膜からの反射を約 8 dB、岩盤からの反射を約 3 dBとした場合、氷底反射を平面反射 ($n=2$) とした場合は最大 -169 dB、凸面反射 ($n=4$) の場合は最大 -240 dB、凹面反射 ($n=0$) の場合には最大 -114 dBのレーダエコー値が得られ、氷底反射面形状が平面反射と凸面反射とした場合には実測エコー値以下となるため、凹面反射である必要がある。

レーダ波面と氷底とが凹面反射の関係になるためには、氷に水・岩片が一様に分布して(図2)反射面が任意に設定できる場合と、岩盤・水膜の反射面が平坦でなく傾斜し(図3)、なおかつ、反射面が十分に凹凸し反射波がアンテナに十分に帰る場合(反射波の 1/100がアンテナに戻った場合でも -134 dBのエコー値が得られる)が考えられる。

以上のことから、レーダ方程式を解くためには氷床の誘電率 (ϵ) を知る必要があり、この数値は Rayの理論式にて温度をパラメータとして求められる。また、南極氷床は降り積もった雪の堆積により形成されているため、氷と空気の混合体と考えられ、この取り扱い Wiener の混合誘電体の理論で氷床密度をパラメータとして求められる(以上の理論式は省略する)。

5. 解析手順

本解析を行うための手順を図4に示す。

まず、解析水深部の氷床の温度と密度を決定する。この氷温度と Rayの理論式より氷の誘電率を求め、氷密度と Wiener の混合誘電体の理論より堆積氷の誘電率を決定する。次に、レーダ方程式を解いてレーダ反射量を求め、実測値と比較検討する。

5.1 氷床中の温度・密度・誘電率

氷床内の温度分布は、最大 4000 m にも達する氷床の深層ボーリングなどによる直接測定は現在不可能であり、参考にすべき実測値は得られない。このため、本解析では氷床表面温度分布を付近の実測値を基に -30℃と定め、各解析水深で温度を

変化させて実測値との対応をその都度求めながら全体としてスムーズ曲線となる温度分布を決定し図5に示す。但し、レーダエコーが図1に示すように1000 mの水深で受信装置のノイズレベル以下となるため、温度分布も同じ水深までしか求めることができない。従って、それより深い場所の温度分布は図5の波線で示すように氷床温度分布が0°Cとなる水深を1500 mから2000 mまで変えた推定温度分布を用いて解析を進めることにする。

一方、降雪の堆積により形成されている氷床の密度分布は、氷床表面から深さ約100 m付近までは氷床密度変化は著しいが、それより深い所での氷床密度変化は少なくなる。観測地点の測定値はないが、他の場所での実測結果が多数ありこれを

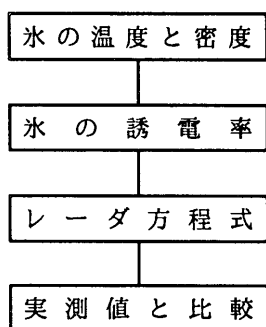


図4 解析手順

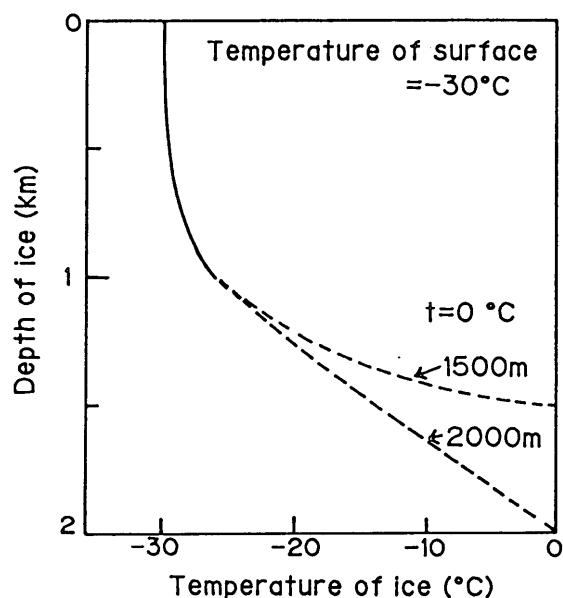


図5 氷床温度分布

参考にして定め、本解析は氷床表面付近を除いて、氷密度を 0.914 g/cm^3 一定値として解析を行う。水中の温度分布および密度分布が決まると、水中の誘電率を求めることができ結果を図6に示す。

5.2 氷底の水・岩の誘電率

氷底からのエコーが生じる要因を水と岩とに想定したが、夫々の誘電率を知る必要がある。氷床底部の水は、氷底と大陸岩盤との摩擦熱と地熱により生じるため、温度を0°Cとする。レーダ周波数179 MHzに於ける誘電率は、Rayの式より $\epsilon = 88 - j2.8$ と求まる。この場合の反射断面積は式(2)より7.7 dBと求まる。一方、岩の誘電率はCCIR (国際無線通信諮問委員会)の資料より、氷底下の岩質をMedium Dry Groundとして、同周波数での誘電率を $\epsilon = 15 - j0.3$ とした。

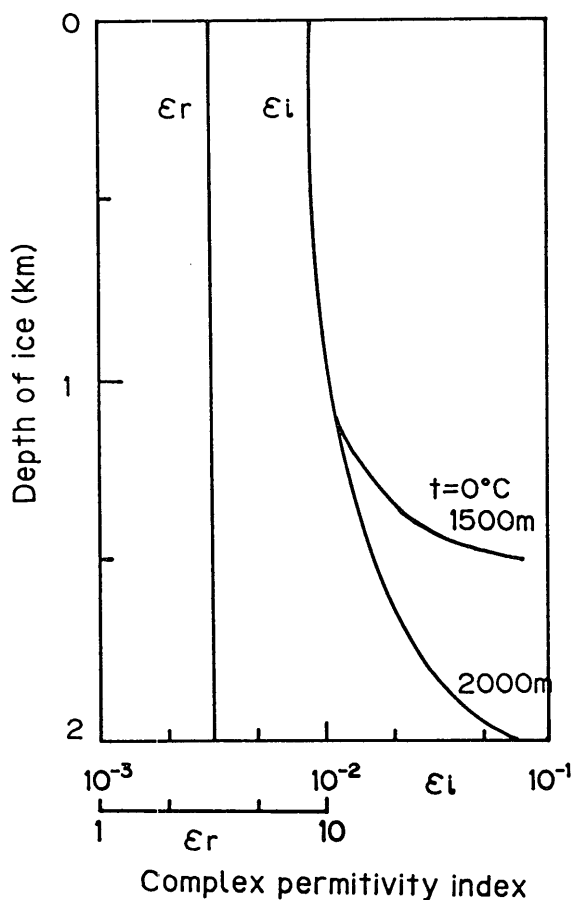


図6 氷床誘電率分布

この場合の反射断面積は 2.4 dBである。

6. 氷底状態の推定

本解析を行うための仮定・条件をまとめると、

(a) 水中温度分布は、氷床表面温度を -30°C とし観測波形にフィットする温度分布を用いる。実測値のない水深は推定温度分布を用いる。密度分布は他の場所での実測値より決定する。

(b) 氷床の誘電率は、南極の氷床は降り積もった雪の堆積により形成されているため、氷と空気の混合物として取り扱う。

(c) レーダ方程式の反射面形状変数は、氷床表面は $n = 4$ 、氷床中と氷底は $n = 0$ とする。

(d) 氷底反射の要因を、岩盤・水膜・岩片・氷中含水とし、岩の誘電率は CCIR の資料より求め、水の誘電率については Rayの式を用いて求める。

(e) 解析は、レーダパルス幅を考慮し、氷床表面より水深 50 m 毎に行う。

(f) 氷床中にはクラック等がなく、多重散乱による影響については考慮しない。

図5に示す水中温度分布を用いて解析を行ったレーダエコーの解析値(・印)と実測値を図7に示す。図より解析値は実測値を十分満足している

と考え、水中温度分布の確かさを確認している。なお、水中の温度分布は、水深 1000m以上での実測値がないため推定温度分布を用いて解析し、水深1500 mで 0°C の場合と 2000 m で 0°C とした推定温度分布での解析結果をも図示し、全体の流れから判断して納得のいく解析結果と考えている。

また、水深 1300 ~ 1650 m間に氷底からのレーダエコーが存在するものとして解析を行い、氷底状態の解析結果を図8~11に示す。

まず、氷底エコーの生じる要因を岩盤とした解析結果を図8に示し、各水深でのレーダ波面積に対する岩盤面積の割合を示している。この結果、水深 1500 m で 0°C とした推定温度分布を用いた解析では氷底岩盤が大略 20° の傾斜岩盤であり、水深 2000 m で 0°C とした推定温度分布を用いた場合には、氷底岩盤が大略 60° の傾斜岩盤である必要がある。

図9は、氷底と岩盤との摩擦により生じた水が、氷底の岩盤上に水膜を形成しているものと想定した場合における解析結果で、推定温度分布を水深 1500 m で 0°C とした場合には大略 28° の傾斜、水深 2000 m で 0°C とした推定温度分布を用いた場合には大略 85° の傾斜岩盤である必要がある。

この場合、水膜は岩盤上に薄く形成されている

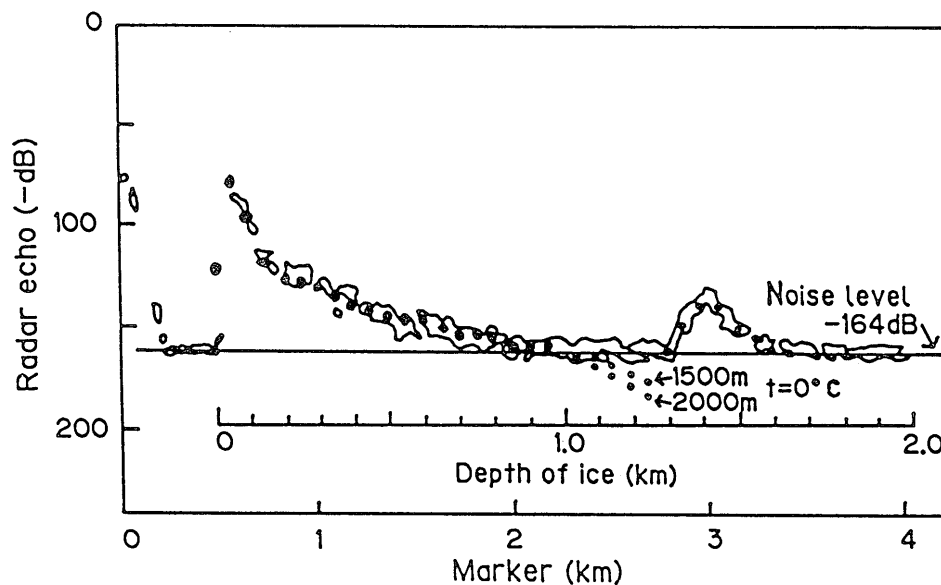


図7 測定値と解析値の比較

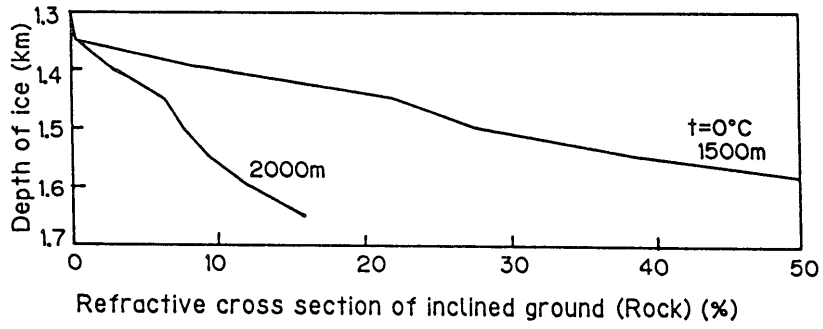


図8 氷底岩盤のレーダ波面に対する割合

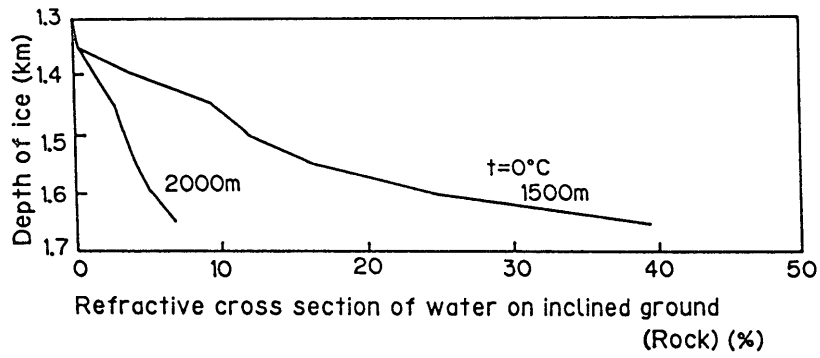


図9 氷底水膜のレーダ波面に対する割合

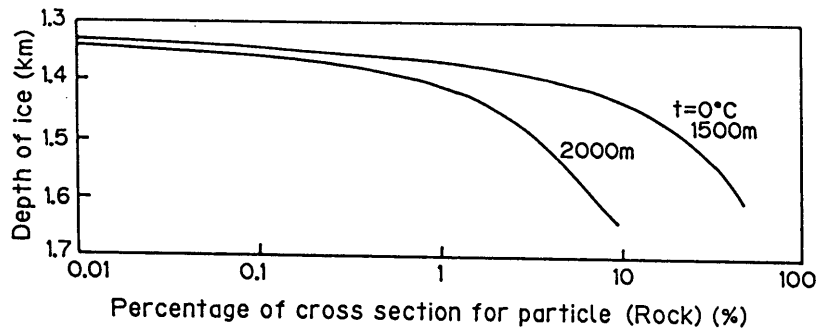


図10 氷底岩片のレーダ波面に対する割合

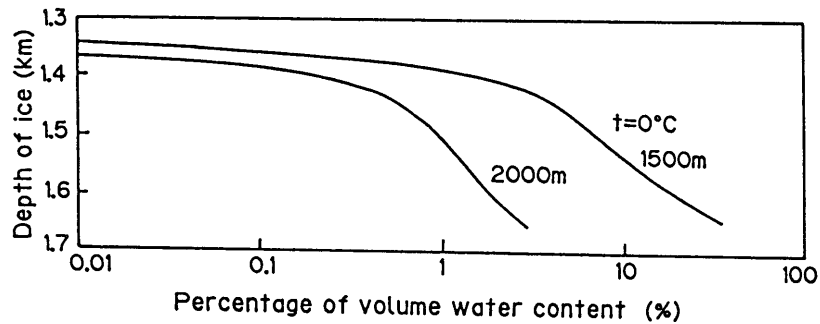


図11 氷底含水のレーダ波面に対する割合

と考え、近似的には岩盤傾斜を表しているものである。しかし、図8の岩盤からの反射より、水膜からの反射係数が大きいこと急峻な傾斜（レーダ波面積に対して反射物の面積が小さい）でも良い結果となっている。また、水膜は岩盤上に形成されているが、岩盤表面の凹凸を反映してアンテナ方向へ十分反射するものとしている。

次に、氷床移動により氷底岩盤から削り取られた岩片が、水中に分散含有されている場合の解析結果を図10に示し、各氷深でのレーダ波面積に対する岩片割合を示している。この場合、岩片粒径はレーダ波長に対し十分に小さく、レーダ波面積に対して一様分布、深さ方向に連続した密度分布を持っているものと仮定している。

最後に、氷床移動による岩盤との摩擦で生じた水が、氷底に含水していると想定した場合の解析結果を図11に示す。解析上の考慮点は岩片の場合と同じである。岩片の反射係数に対し水の反射係数の方が大きいこと、岩片に比較して少ない密度割合となっている。

7. 氷床温度分布の推定

ここでは、アイスレーダによるリモートセンシング活用項目である、観測波形より氷床内部温度分布の推定結果と、実測温度分布との比較・評価について考察する。

南極の「みずほ基地」で測定年代は異なるが、氷床密度分布（1975年）と温度分布（1985年）、60 MHz と179 MHzの2周波数のアイスレーダによる観測（1988年）が実施された。この結果、数値解析を行うのに必要な同一地点での諸量が揃い、推定結果に対する評価を可能とした。

7.1 測定された氷床の密度・温度分布

「みずほ基地」で測定された氷床の密度分布を図12に示す。南極氷床は降雪の堆積によって形成されているため、浅い部分は、氷床源流部や水河など観測地点により氷床状態が異なり氷床密度は大きく変化するが、深い部分（150~200 m 以深）

は、氷床の自重による圧密で観測地点による違いは少なくなり大略一定値となる。ここでは、数値解析の画一的取り扱いを実施するために、図12の波線で示す 0.914 g/cm^3 一定値として解析する。

「みずほ基地」で測定された氷床の温度分布を図13に示す。温度分布は氷床表面に堆積する降雪が沈降して氷温を下げるため（気温の低い冬季間に降雪が多く氷床形成を促進する）氷温度の低い低温部分が生じ、それ以深は基盤岩との摩擦熱や地熱などにより温度は上昇する形が一般的である。本解析は、波線で示すように氷床表面温度分布は $-20^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 間を 1°C 刻みで変化、氷深 500 m における表面との温度差（以降、表面温度差と称す）を各氷床表面温度について $0^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ まで 0.1°C 刻みで変化させ、この間を直線変化させた直線近似温度分布を用いる。

7.2 氷床温度分布の推定

2周波数のアイスレーダによる観測波形を、60 MHzアイスレーダは図14に、179 MHzアイスレーダを図15に示す。氷床の密度と温度変化に伴う誘電率変化により生じるレーダエコーを受信しながら、

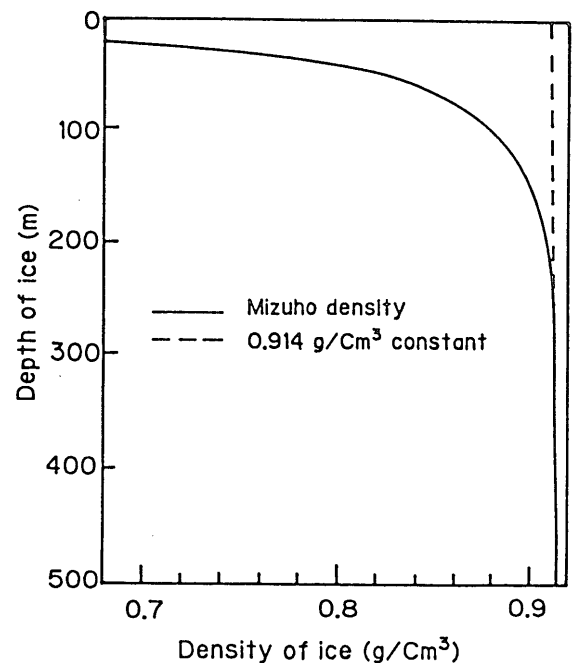


図12 氷床密度分布

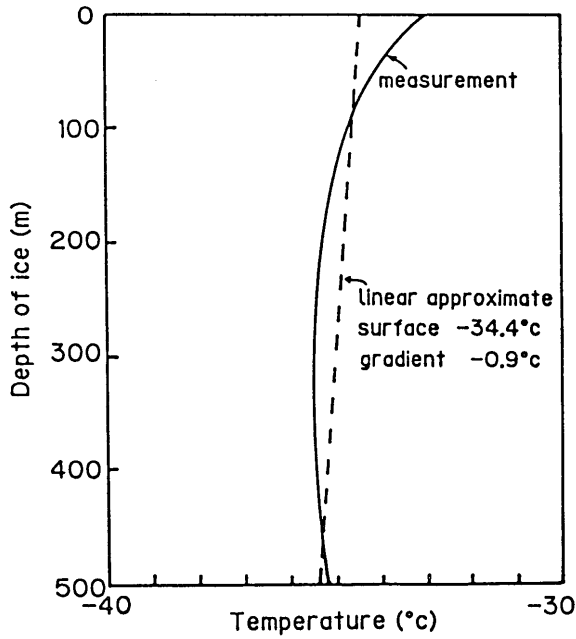


図13 氷床温度分布

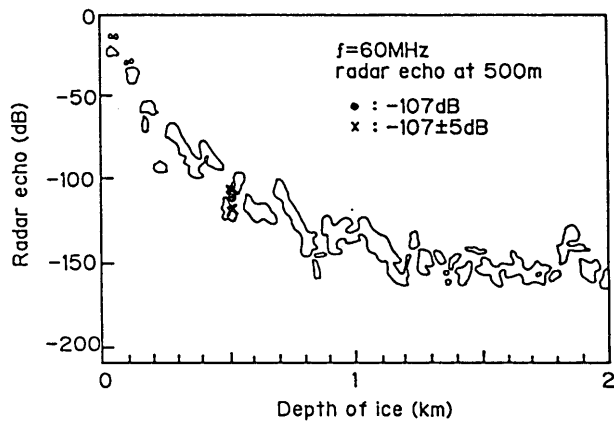


図14 60 MHzアイスレーダによる観測波形

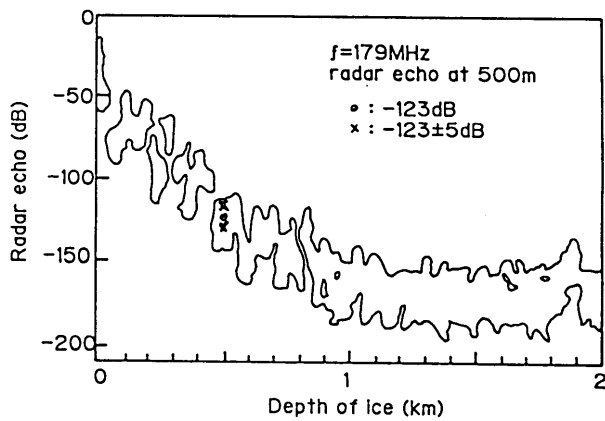


図15 179 MHzアイスレーダによる観測波形

水深が深くなるにつれ氷床中減衰量の増加と共にレーダエコーは小さくなり、やがてノイズレベル (-164 dB) に達した後、氷底からの基岩盤による強い反射を 1900 m 付近で観測している。なお、60 MHzアイスレーダと比較して、179 MHzアイスレーダの方が氷中減衰量が大きいため早くノイズレベルに達する。

水深 500 mにおけるレーダエコー値は、60 MHzアイスレーダで -107 dB, 179 MHzアイスレーダで -123 dBとなる。この値は、「みずほ基地」で測定された氷床密度分布 (図12) と氷床温度分布 (図13) の実測値を用いた、数値解析結果と大略一致する値である。

氷床温度分布推定の仮定・条件をまとめると、
 (a) 氷床密度分布は、 0.914 g/cm^3 一定値とする。
 (b) 氷床温度分布は、氷床表面と水深 500 m間を直線変化させた分布を用いて、氷床表面温度を $-20^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 間を 1°C 刻みで変化、表面温度差は各表面温度について $0^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ まで 0.1°C 刻みで変化させる。

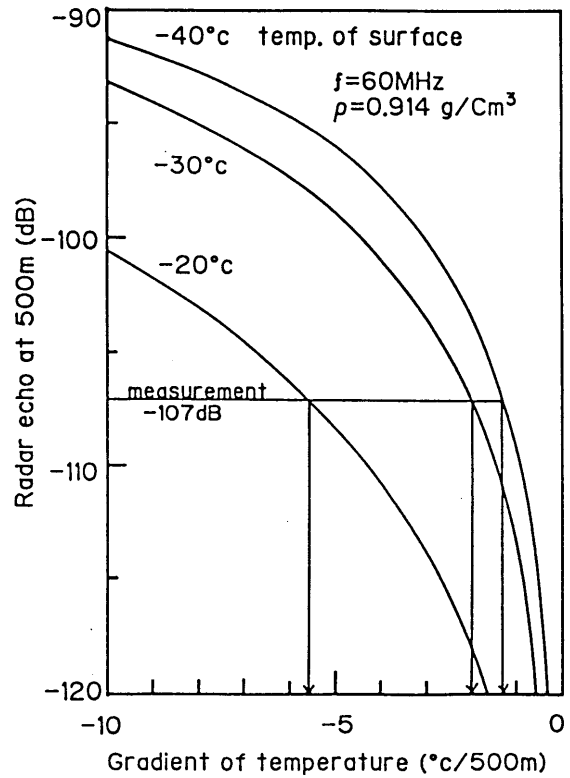


図16 氷床温度分布の推定

(c) 水深が深い程、氷床表面からの履歴を含んだレーダエコー値となるため、水深 500 m に於ける数値解析値と実測値を用いて評価する。

この解析条件に基づく氷床密度・温度分布を用いた、水深 500 m に於ける 60 MHz アイスレーダの解析結果を図16に示す。氷床表面温度を -40°C 、 -30°C 、 -20°C とし、表面温度差を変化させた場合のレーダエコー値の変化を図示している。

氷床表面温度が低い場合、氷床の誘電率は小さく減衰量が減少するためレーダエコーは大きくなる。また、表面温度差が大きい場合、水深に対する温度変化が大きくなるため氷床の誘電率変化が大きくなり、氷床反射量が増大するためレーダエコーは大きくなる。

図14より、60 MHz アイスレーダの水深 500 m レーダエコー値は -107 dB を示しており、同じ値となる温度分布が推定温度分布となる。

その結果、氷床表面温度が -20°C では表面温度差が -5.6°C の温度分布、表面温度が -30°C では表面温度差が -2.0°C 、表面温度が -40°C では表面温度差が -1.3°C となる各氷床温度分布が推定される。氷床表面温度を低くした場合、氷床減衰量の減少に伴い氷床表面との温度差が小さくても同じレーダエコー値となる。

この様にして、60 MHz アイスレーダ観測波形を用いた氷床温度分布の推定は、各氷床表面温度と

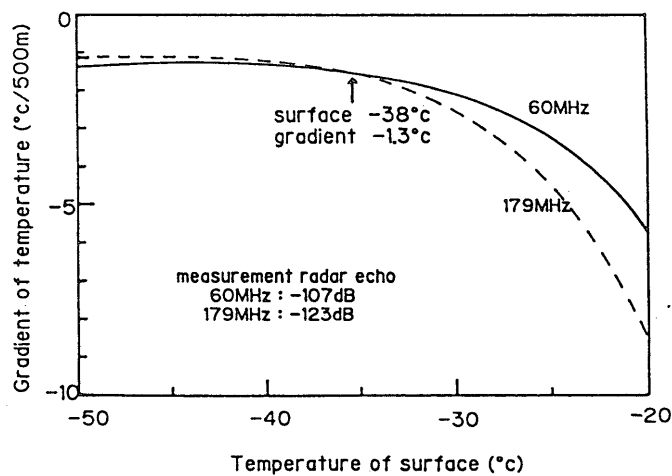


図17 2周波による氷床温度分布推定

表面温度差との組み合わせで多数推定され結果を図17の実線で示す。図に示すように、1周波レーダエコーによる氷床温度分布の推定は可能ではあるが特定は困難である。

そこで、179 MHz アイスレーダについて同様な氷床温度分布推定を行い推定結果を図17の波線で示す。水中の減衰量計算には角周波数 (ω) の項があるため、周波数が高いほど温度変化に対するレーダエコー値変化が顕著となり、60 MHz の推定に比べ角度のついた推定結果となる。この結果、両者の推定結果が一致する氷床温度が -38°C で、表面温度差は氷床表面より -1.3°C 低い氷床温度分布が最終推定結果となる。

8. 推定氷床温度分布と実測値との比較

「みずほ基地」での測定氷床温度分布と、推定氷床温度分布を図18に示す。測定値とは氷床表面温度で約 5°C の違い、水深に対する温度変化については大略一致する推定結果となった。

次に、図14と図15に示す観測波形からのレーダエコー読み取り誤差を考慮し、前記レーダエコーを ± 5 dB 変化させた場合 (図14と15の \times 印で、

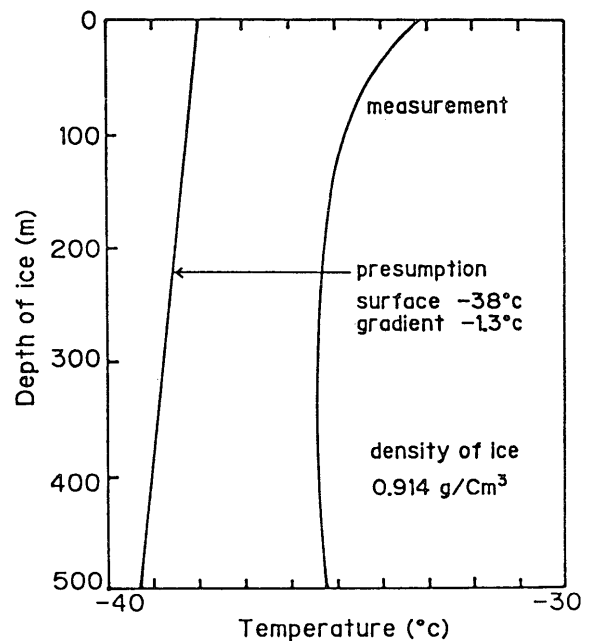


図18 氷床温度分布推定結果

この程度の誤差は十分に考えられる)の水床温度分布推定結果を図19に示す。この結果、レーダエコー値が(読み取り値+5 dB)の場合、水床表面温度は -37°C で表面温度差が -2.5°C 、(読み取り値-5 dB)の場合、水床表面温度が -39°C で表面温度差は -0.7°C の水床温度分布が推定された。

この事は、図16において測定値が大きい場合、表面温度差を大きくして水床反射量の増加を計り、レーダエコーを大きくする必要がある。従って、図17の曲線は表面温度差の大きい方へ下がった形となるが、179 MHz レーダエコーは前述の様に、水床減衰量が大きいため表面温度差をより大きくしてレーダエコーを増加させる必要がある。この傾向は、水床表面温度が高い程顕著であるため、60 MHzの下り方に比べて右下がりの形となる。このため、両周波数の交点は水床表面温度は高く表面温度差が大きい方へ移動し、前記の様な推定結果となる。

最後に、取り扱う水床密度分布を変えた場合の推定結果を図20に示す。水床密度を 0.9 g/cm^3 一定とした場合、水床の表面温度が -37°C で表面

温度差は -1.3°C となり、水床密度を 0.88 g/cm^3 一定値とした場合には、水床表面温度が -35°C で表面温度差は -1.3°C となる水床温度分布が推定された。

水床密度が小さいと、降雪の堆積により形成されている水床内部に空気の気泡が多くなるため、水床の誘電率は小さくなり減衰量が減少するため解析レーダエコーは大きくなる。このため、水床表面温度が同じ場合には、表面温度差は小さくても同じレーダエコー値となる。この傾向は、水床の温度が高いほど顕著で、図17の曲線は右方向へ平行移動した形となり、推定水床温度分布は水床表面温度の高い方へ移動するが、2周波の交差位置が表面温度差の変化が少ない場所であるため、表面温度差は何れの場合にも同じ値となった。

また、水床密度を 0.88 g/cm^3 一定とした場合は推定温度分布により近い推定結果となった。

なお、図17に示す2周波による推定温度分布の交点は、何れの場合にも緩やかに交差するため、推定された温度分布には多少の許容範囲を含む値となり、前述値はその中心値を示す。

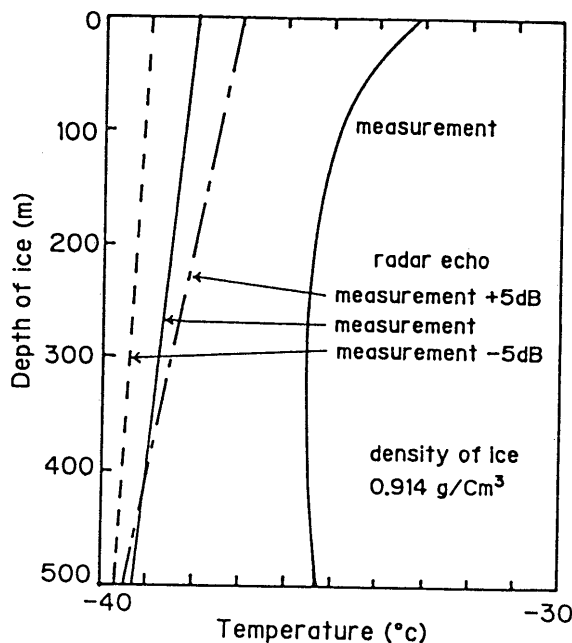


図19 実測値を変えた場合の水床温度分布推定結果

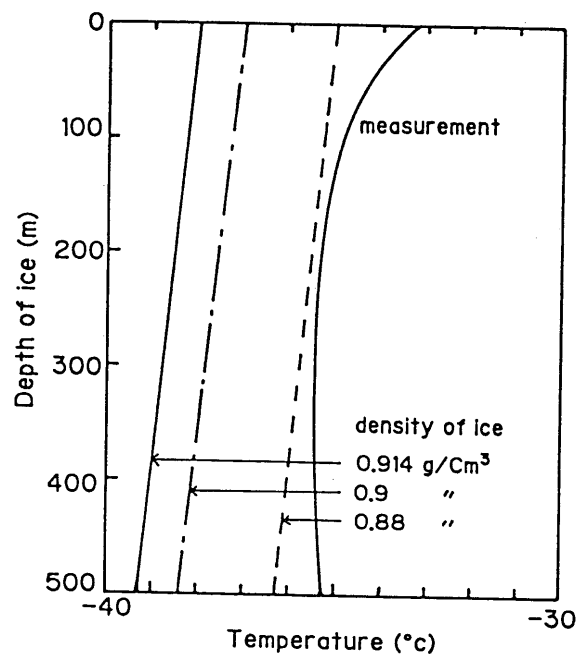


図20 水床密度を変えた場合の水床温度分布推定結果

9. むすび

南極大陸の氷床厚の計測と氷床下地形の把握を目的とした、航空機搭載型アイスレーダによる観測波形をリモートセンシングの手段として活用し、氷底状態の推定と氷床内部温度分布の推定を目的として、多くの仮定と測定値より妥当と思われる数値を用いた解析を余儀なくされている現状ではあるが、以下の結論を得た。

(1) 氷底状態の推定では、氷床表面温度が -30°C で、実測レーダエコーにフィットする水中温度分布（実測値のない場所は推定値を用いる）を用い、氷底エコーの生じる要因を岩盤・水膜・岩片・氷

中含水とし、夫々について実測氷底エコーが得られるべき氷底状態を推定し得た。

(2) 氷床温度分布の推定では、1周波では推定結果の特定が困難であるため、2周波を用い両者の推定結果が一致する値を推定温度分布とし、測定値と表面温度で約 5°C の違い、水深に対する温度勾配は大略一致する推定結果を得た。

(3) 現段階では、解析結果に対する妥当性と精度に対する評価は十分ではないが、数値解析を行うための各パラメータの取り扱いと解析手法の確立がなされた。今後は、リモートセンシングの目的項目毎の測定を、過酷な気象条件下で困難を極めるが多種多様な地点で実施し、観測精度の向上と解析結果に対する有効性の確立が早急に望まれる。