

[特別講演] 南極氷冠上の電波反射特性

電気通信大学名誉教授

芳野 起夫

1. はじめに

1959年、第3次南極観測隊員として初めて大陸上に立ったとき、見渡す限り一面に真っ白な雪氷面を見て、何となく電離層から雪面に降下してくる電波が厚い雪の中に染み込んでいくような感じを憶えた。雪上に置いたアンテナがうまく動作した事もある、それまで世界で誰も計った事を聞いていなかった雪氷の電気的性質を計ってみる衝動に駆られた。この研究は、第3次隊の研究項目には無かった項目だったが、電波物理学担当としてはこの機会を逃す事はできなかった。冬の期間に雪氷の電気的特性を計る項目を検討し、比誘電率と損失角を雪面から数メートルの深さまでハンドオーガでサンプルを取り出し、それ以上の深さは氷河の末端、氷山を利用して可能な限り電気的測定の垂直分布を計測する事を現地提案し隊長の了承を得た。

2. 南極氷冠上での誘電率測定

測定の方法は、現地で思いついた研究のため何の機材も無いので、ハンドオーガの直径と同じ直径10cmの茶筒を見つけて長さ3cmの筒を作り、これに現場で雪を詰めて、測定期間だけ調理から借りたバネ秤で重さを計り、雪の比重を測定する。次にこれを厚さ1cmに切り、両側に直径10cmのアルミ板の電極で挟み、これに送信機の予備部品のバリコン等を使って作った100kHzの発信機を並列に接続して、雪を挟んだ時と、挟まないときのバリコンの角度の差を求めた。また1次隊の持ち込んでそのまま通信倉庫に眠っていたQメーターを用いて、バリコンの容量変化から誘電率と損失角を割り出す事が出来た。冬の間、この真に哀れなガラクタ測定器を一通り作り、長い冬の期間が終わり大陸に出かけたかけた時に雪氷上でこれを試してみると、意外に正確なデータらしき値が得られた。

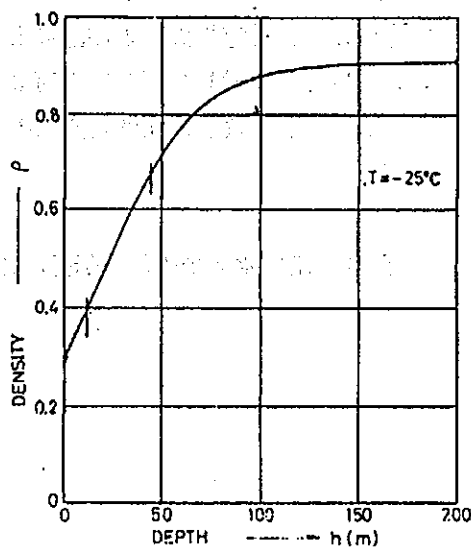


図1 南極氷冠の垂直密度分布

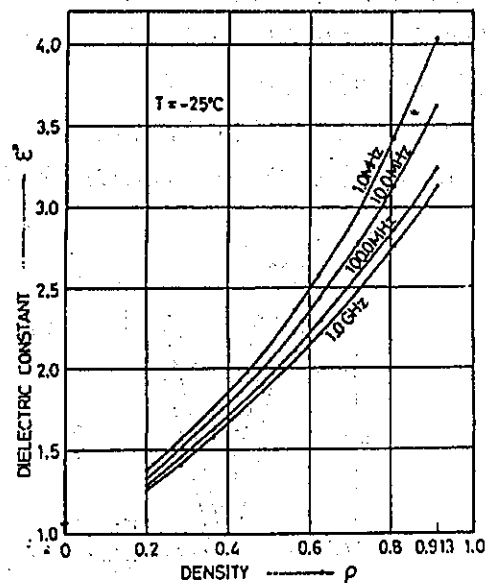


図2 氷冠雪氷内部の比誘電率の垂直分布

基地に戻り早速 Q メーターで測定結果の確認を取ると、信用できる値が得られていた。雪氷の密度測定の結果は、図 1 に示すように当初の予想通り表面雪の密度は  $-25^{\circ}\text{C}$  で 1.05 ~ 1.1 で、深さとともに次第に増加し、深さ 200m を超すと約 0.88 に収斂する。この値をもとに比誘電率と密度との関係は図 2 のようになる。

従ってこの値から計算すると短波帯の雪氷面での反射係数は入射角 15 度として 0.1 となり、入射波エネルギーの 90 パーセントは氷冠内に染み込んでいく事が判った。それぞれ水平偏波入射と垂直偏波入射の場合について、計算で求めた入射角を変化した場合の雪面の、反射係数は図 3 に示すとおりである。

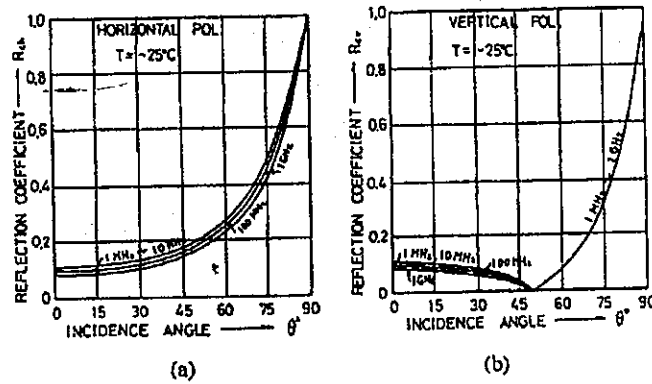


図 3 南極氷冠雪面の入射角に対する反射係数 (a)水平偏波入射 (b)垂直偏波入射

### 3.南極大陸氷冠中の雪氷の誘電特性の垂直分布と伝播特性

水中の比誘電率の垂直分布の測定は、冰山などで得た数値から、密度が図 1 に示すように深さを増すにつれ、ほぼ指数関数的に増加し、深さ 200m 以上になると約 0.88 で飽和し、其れより深さを増しても、高圧気泡の影響でこの値のまま氷底までこの程度の値を保つ様である。これは純水の比誘電率 91 に比較して非常に異なった結果となった。

このことから雪面から侵入した電波の伝播速度  $v$  は深さ 200m 以上の氷床内部では、自由空間の伝播速度の約 1/2 に低下したまま雪氷中をあまり減衰することなく図 4 で示す経路を通り伝播し得る事がわかり、通常は表面での反射は極めて少なく、エネルギーの大部分は雪氷内を伝播し、雪氷の厚さが 2000m の時、誘電体損失、導電損失および泡による散乱損失を考慮すると、短波帯では 135dB 以上の減衰を受けて、反射して再び雪氷面より再放射する場合は、通常は殆ど消滅してしまう事がわかった。また散乱特性は周波数の 4 乗に比例して増加する事も帰国後の解析で明らかになった。

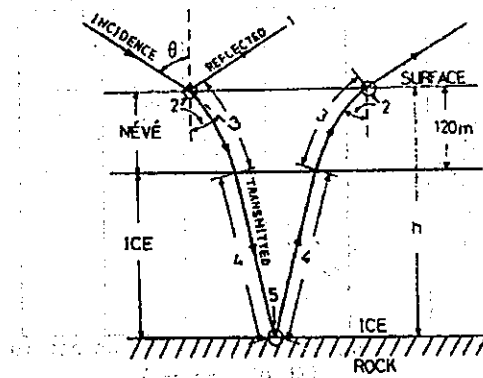


図 4 南極氷冠中の電波伝播経路

#### 4. 本研究成果と南極地域における電波高度計の誤動作

この研究結果は、帰国後の学術会議の報告では、隊の公式観測ではなく、研究費も一切掛かっていなかったため殆ど無視された形であったが、直後に茅誠司、永田武両先生から、興味ある着眼点と以後の発展について励ましの言葉を戴いた。しかし、帰国後早速電気通信学会の研究会で発表したが、そのガリ版刷りのプレティンが当時の米軍の眼に留まり、知らないうちに陸軍通信研究所とペンタゴンの図書室に登録されていた。

1965年突然米国無線学会(IRE) [現在の米国電気電子学会(IEEE)]アンテナ伝播研究会の国際シンポジウムに旅費付きで招待講演を依頼され、1965年8月にワシントンDCで30分にわたる講演を行った。また、この現象をまとめて同学会のアンテナ伝播論文誌に掲載した論文は、1967年度のIEEE APSの最優秀論文賞を受賞する事ができた。これが元になって、私の今日に至る国際活動の起爆剤となったのである。(注1)

1961年の秋、突然米国陸軍通信研究所のWaite氏から、私の論文内容を応用する事によって、初めて1959年南極で起こったダグラスC-124グローブマスター輸送機がホワイトアウトの中で雪面に突っ込んで大事故を起こした理由が解明できたので、今後の共同研究をしたいとの知らせを受けた。1962年のWaiteのIREに提出した論文によると、グローブマスター機はクライストチャーチからマクマードに向かっており、基地に近づいて高度を下げ、着陸に備えて高度計を電波高度計に切り替えて海上から氷上に入った。その時の電波高度計の周波数は430MHz出力7Wであった。飛行機が海面800mで水平に氷冠上空に入ると、電波高度計の電波は氷中に進入し反射して帰ってくる。電波の速度は氷の中では、大気中の速度の半分になり、その結果電波高度計の指示は800mより高くなる。氷の深さが増すほど電波高度計の指示は高くなり、パイロットは高度が高くなったと錯覚して高度を下げた結果、雪面に突っ込んだとしている。この時の墜落に至った経過を図5に示す。

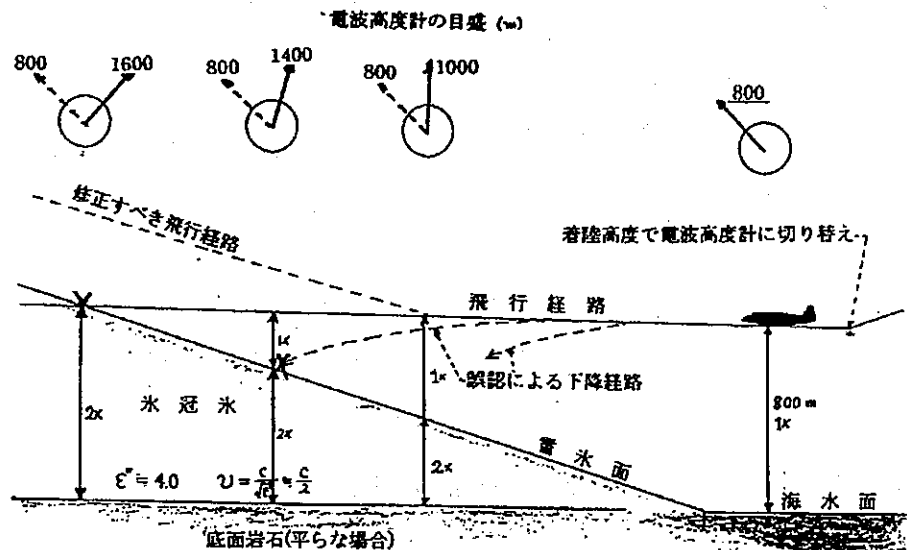


図5 氷冠に差し掛かるときの電波高度計の表示誤差

#### 5. 電波による積雪構造の観測

1961-2年には、英国ケンブリッジのスコット記念極地研究所のエバンス博士から、共同研究の申し入れがあり、私の論文を応用して、電波高度計を用いてグリーンランドと南極大陸の氷冠の氷厚を測定することについて意見を求めてきた。私は、氷冠の氷の電波散乱

損失は周波数の4乗に比例して増すので400MHz帯の電波高度計ではあまり深い所は観測出来ないのもっと低い周波数に下げたほうが良いということを示した。

1968年の第9次隊が極点旅行を計画するに当たり、私の研究結果を用い氷冠の雪氷中は比較的電波が通りやすいことを利用して、レーダーを開発し走行経路に沿う氷冠の厚さの連続観測を提唱した。当時の氷厚観測は雪面上で火薬爆発による音波の反射時間測定法が使われていたが、観測毎にセンサーの設置などに手間と時間が掛かり、雪の密度が極めて低いので音波が散乱し減衰が激しく観測は殆ど不可能であった。アイスレーダーに用いるためには、他の電波の混信を避け、アンテナの大きさも考慮し30MHzを選んだ。論文の解析結果から氷厚3500mまで観測できる送信出力を15Wとした。

このとき私が提唱した周波数30MHzはアイスレーダー周波数として、スコット研究所のエバンスが進めた英国とデンマークの研究を始め、我が国や米国など引き継がれた。レーダー波の氷冠内の反射を用いた観測は、その後改良が加えられ、1980年以降は単に氷厚測定ばかりでなく、積雪構造の詳細解析など非常に重要な研究分野で活躍するようになっており、図6に、現在のアイスレーダーの雪中のエコーと積雪構造の観測例を示す。またNASAでも月面着陸レーダーにこの原理が応用されたと聞いている。図6に南極で観測されたアイスレーダーの観測エコーの一例を示す。

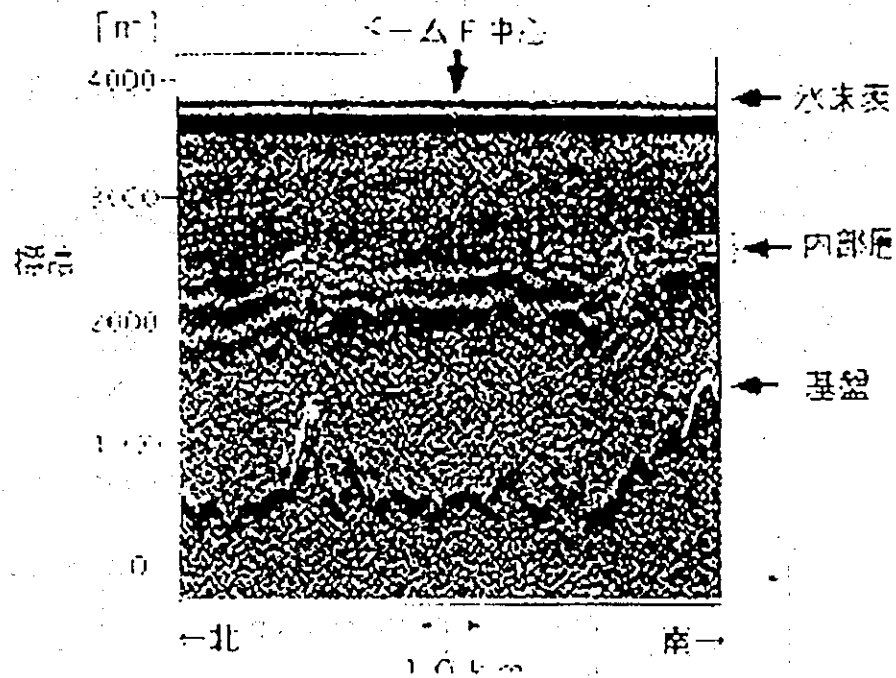


図6 アイスレーダーによる氷冠内の構造の測定

#### 6. 終わりに

本文では、私の氷冠表面の電波反射と雪氷内の電波伝播特性の世界最初の研究論文と、その後の応用と、初期の開発の経過を発表する機会を戴き感謝申し上げる次第です。

#### 参考文献

- T. Yoshino, "The Reflection Properties of Radio Waves on the Ice Cap", IEEE Transactions on Antenna and Propagations, Vol. AP-15, No.4, pp.524-551, 1967.