

学 位 論 文 題 名

Experimental and Theoretical Analyses for Microwave Backscattering from Lake Ice in Northern Alaska

(アラスカ北部湖氷のマイクロ波後方散乱に関する実験的及び理論的解析)

学位論文内容の要旨

アラスカの北西に位置するノーススロープ地区は、陸地の約40%が多数のツンドラ湖と呼ばれる非常に浅い淡水湖に覆われている。1970年代後半に、Xバンド及びLバンドの航空機搭載サイドルッキングレーダ(SLAR)が、この地区のデータを冬期間に取得した際、後方散乱が大きい湖と小さい湖が存在するという非常に興味深い現象を確認した。

一連のSLARデータの解析及び地上における観測の結果、後方散乱の差は氷の下に水が残っている(Floating ice)か否(Grounded ice)かの違いによるものが支配的であると推定された。淡水氷のマイクロ波浸透深さは非常に大きいため、氷に入射したマイクロ波は氷の底面まで到達し、氷の底面にて反射されることになる。水の誘電率は土のそれよりも大きいため、氷/水の反射係数は氷/土の反射係数よりも大きくなる。従って、氷の下に水が存在する湖の方がより強くマイクロ波を上方に反射することになる。さらに、湖氷のコア試料解析から氷中には細い円柱状の泡が多数存在することが判明し、この泡が後方散乱に寄与していることが示唆された。しかし、当時のSLARデータは校正されていない写真のみのデータであったために、これ以上の議論はされていなかった。

本研究は、近年打ち上げられた衛星搭載合成開口レーダ(SAR)データを使用して湖氷のマイクロ波後方散乱特性の解析を行い、地上観測データ及びコア試料データをもとに湖氷のマイクロ波後方散乱モデルを提案し、同期観測された衛星データ及び地上観測データを使用して後方散乱モデルの検証及び考察を行ったものである。

1. 湖氷の地上観測及び解析(第2章)

テストサイトとして、バロー周辺の湖からESA地球観測衛星1号(ERS-1)/SAR画像を参考にして11サイトを選定し、1992年4月に地上観測を実施した。地上観測データから、氷上の積雪深は最大でも80mmで非常に乾いていて、氷厚は24cmから216cmと広範囲にわたり、11サイト中5サイトが湖底まで凍っていて水が存在せず、この5サイトはSARデータの後方散乱係数が低い場所と一致することが判明した。さらに、各サイトから持ち帰ったコア試料の各層の泡の形状及び密度を計測することによって、典型的な湖氷の構造を明らかにし、層の種類として球状気泡層(Granular layer)、無気泡層(Clear layer)及び円柱状気泡層(Tubular bubbles layer)の3種類が存在すること

が判明した。球状気泡層は泡の形状から湖上に積もった雪が凍った、いわゆる雪氷と考えられる。氷の下の水が飽和せずに気体が水に溶けている間は無気泡層ができ、飽和後は気体が水に溶けることができずに円柱状の気泡となって円柱状気泡層が形成されると推定した。

2. SARデータの解析(第3章)

Cバンド(5.3GHz)のSARデータに関しては、1991年9月から1992年4月に取得したERS-1/SAR校正済みデータ12シーンについて解析を行った。湖水が成長すると後方散乱は徐々に上昇し、最終的には-5dB~-8dBで安定する。しかし、ひとたび湖底まで凍結してしまうと後方散乱係数は-15dB~-18dBまで低下することが判明した。この特徴は湖の水深測定に応用できる可能性がある。

Lバンド(1.2GHz)SARについても同様に、1992年7月から1993年4月に取得した資源観測衛星1号(JERS-1)/SAR校正済みデータ7シーンを解析することによって、湖水の成長に伴う後方散乱係数の変化を行った。Cバンドと比較すると湖水の成長に伴う後方散乱の上昇及び湖底の違いによる差は顕著ではない。これは、SARの測定限界が原因である。

以上の解析は、1970年代に行われた湖水の散乱特性の定性的解析に対して、校正済みSARデータを使用することによって解析を行い、初めて定量的に解釈したものである。

3. 湖水のマイクロ波後方散乱モデル(第4章)

湖水の典型的な構造を考慮したマイクロ波後方散乱モデルを提案した。積雪層の後方散乱への寄与は非常に小さいと考え、大気-湖水-水または土の基本的後方散乱モデルを作成した。氷内部は深さに応じて気泡の形状、大きさ及び密度が異なるために、各層の平均誘電率、層間境界における散乱及び気泡の散乱を考慮して各層の散乱を行列表現し、それを多層構造で取り扱えるように拡張した。また、湖水各層内では、気泡の形状及び大きさに応じて、球状気泡、円柱状気泡、楕円体状気泡の散乱特性を考慮した。さらに、湖水底面に関しては、湖水上面に比較して後方散乱に対する寄与が大きいと考えられたので、鏡面散乱と微小ラフネスモデルによる散乱の両方をモデルに取り入れた。

4. 後方散乱モデルによる解析(第5章)

提案した後方散乱モデルを使用して、モデル各部の散乱の解析を行った結果、湖水底面の散乱及び湖水内部の気泡密度が後方散乱に大きく寄与することが判明した。氷の下の水の有無及び氷の成長による後方散乱係数の変化を計算した結果から、両者ともERS-1/SARで観測された後方散乱の変化を説明できた。また、地上観測とSAR観測が同期したデータを使用して、後方散乱モデル出力とSARデータから導出した後方散乱を比較することによって、両者間に高い相関があることが判明した。

以上の議論は、湖水の後方散乱について、衛星搭載SARで観測した観測値と、後方散乱モデルから計算された計算値を結びつけたものである。本論文では、アラスカ北部のツンドラ湖水という特別な対象物を使用しているが、この手法をより一般的な対象物に適用することによって、一般的なマイクロ波後方散乱の理解の進歩が期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 前 晋 爾

副 査 教 授 大 場 良 次

副 査 教 授 佐 伯 浩

学 位 論 文 題 名

Experimental and Theoretical Analyses for Microwave Backscattering from Lake Ice in Northern Alaska

(アラスカ北部湖氷のマイクロ波後方散乱に関する実験的及び理論的解析)

1990年代に入り、ヨーロッパの地球観測衛星1号(ERS-1)や日本の資源観測衛星1号(JERS-1)はそれぞれCバンドとLバンドのマイクロ波合成開口レーダを搭載し、多量の貴重なデータを送信している。マイクロ波は表面のみならず地表下の情報も得ることができ、人工衛星利用マイクロ波リモートセンシングの重要性は年々高まってきている。特に氷は、マイクロ波が表面下はるかに深く浸透するものと予想されており、氷体内部の情報が得られるものと期待されている。

本論文では、マイクロ波と氷の相互作用の解析が容易であり、かつ氷そのものの比較観測が行えるアラスカ北部のツンドラ地帯に分布している浅い湖が凍結してできる湖氷に着目した。実際に湖氷を採取しその内部構造を明らかにするとともに、湖氷地域で得られたERS-1やJERS-1の合成開口レーダデータから後方散乱係数を求め、湖氷の内部構造と後方散乱係数の関係を明らかにする研究を行い、その成果をまとめたものである。本論文の主要な成果は次の通りである。

- ① Cバンド後方散乱係数は湖氷が成長しつつある時 $-5 \sim -8\text{dB}$ であるが、湖底まで凍結すると $-15 \sim -18\text{dB}$ に低下することを見い出した。
- ② 湖氷は球状気泡層、無気泡層及び円柱気泡層から成っていることを明らかにし、それぞれの層及びその境界による後方散乱のモデルを提案し、それにより散乱係数を理論的に解析した。
- ③ 湖氷内部の気泡密度及び湖氷下の水の有無が後方散乱係数に大きな影響を与えることを理論解析及び比較観測によって確かめた。

以上のように著者は、人工衛星搭載マイクロ波合成開口レーダから得られる湖氷の後方散乱係数と湖氷の構造変化の関係を観測と理論解析の両面から明らかにしたものであり、リモートセンシング学と応用物理学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。