

# 衛星搭載SARデータを用いた湿雪域における 積雪水文パラメータの推定手法の開発

Development of an algorithm for estimating snow hydrological parameters  
in wet snow areas using satellite-based SAR images

田殿 武雄<sup>1</sup>・深見 和彦<sup>2</sup>・兒玉 法彰<sup>3</sup>・Jiancheng SHI<sup>4</sup>  
Takeo TADONO, Kazuhiko FUKAMI, Housho KODAMA, and Jiancheng SHI

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 宇宙開発事業団地球観測利用研究センター (〒104-6023 東京都中央区晴海1-8-10)

<sup>2</sup> 正会員 工修 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市大字南原1-6)

<sup>3</sup> 正会員 学(工) 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市大字南原1-6)

<sup>4</sup> Ph.D., Inst. for Computational Earth System Science, Univ. of California, Santa Barbara, USA

The objective of this study is to develop an algorithm for quantitatively estimating snow hydrological parameters using a Synthetic Aperture Radar (SAR) mounted on a satellite and a numerical scattering model. Simultaneous RADARSAT SAR observations were carried out during the winter seasons of 1996 to 1998. The study area is located in the Hokuriku District, Niigata Prefecture, Japan, that is well known for having wet snow with a complicated layer structure from the beginning of the winter season. In previous studies, we sought to estimate the distributions of snow depth and surface roughness using these multi-temporal RADARSAT images. However, snow depths over 20 cm were underestimated because the extinction effects at C-band microwave were too large. In this study, we develop an algorithm to estimate distributions of snow density and roughness using observation datasets with some parameterization techniques and assumptions. Furthermore, we show the possibility of inferring snow depths from combined parameters estimated with a L-band SAR image at test sites.

**Key Words :** microwave remote sensing, snow, surface roughness, RADARSAT, JERS-1, SAR

## 1. はじめに

陸域地表面に存在する積雪は、ローカルには河川流域における水資源予測や流域管理に影響を及ぼすとともに、災害の発生要因となり得る可能性を有し、グローバルにはその存在自体が地球規模での水・熱エネルギー循環に与える影響が大きい。したがって、積雪量の時空間分布を定量的に把握することは水文学的にも気候学的にも極めて重要である。しかし、地上における積雪観測網は全球規模で見ればそれほど整備されておらず、また異なる地点で同程度の精度で計測することも困難である。同時性を持った広域観測には人工衛星によるリモートセンシングが有効であり、とりわけ地表面水文量のモニタリングにはマイクロ波センサの実用化が期待されている。

衛星搭載型の合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、10m程度という高い空間分解能で地表面におけるマイクロ波の散乱強度を表す後方散乱係数と、電磁波の位相情報を計測することができる能動型マイクロ波センサの一つである。これまでもSARを用いた積

雪観測に関する研究は、屋外実験や散乱理論モデルに基づき行われてきた<sup>1), 2), 3)</sup>。また、1994年にスペースシャトルを用いた実験、Shuttle Imaging Radar-C (SIR-C) では多周波、多偏波SARによる観測が実施され、得られたデータを用いた積雪パラメータ推定アルゴリズムの開発も進められているが<sup>4), 5), 6)</sup>、これまでに運用されている衛星搭載型SARはいずれも1偏波送受信、1周波数による単一チャンネルでの計測しかできない。

このような背景から著者らは、1996、1997両年度冬季に新潟県中越地方一帯で実施したカナダの地球観測衛星RADARSAT搭載SARとの同期観測実験に基づき、積雪深の空間分布と積雪表面粗度分布の半経験的な推定手法を提案した<sup>7), 8)</sup>。この手法は、降雪直前のRADARSAT画像と数値散乱モデルを用いて、現地観測に基づく仮定の下で土壌表面粗度を推定し、さらに降雪後のSAR画像と数値計算および別の仮定を加えて、マイクロ波消散効果の評価から積雪深の空間分布を求めるものである。この結果、推定された積雪深は20cm程度では現地観測値と良好な一致を示したが、それ以上の積雪深では過小評価となった。これはC-bandでは消散効果が大きいことが考えられる。

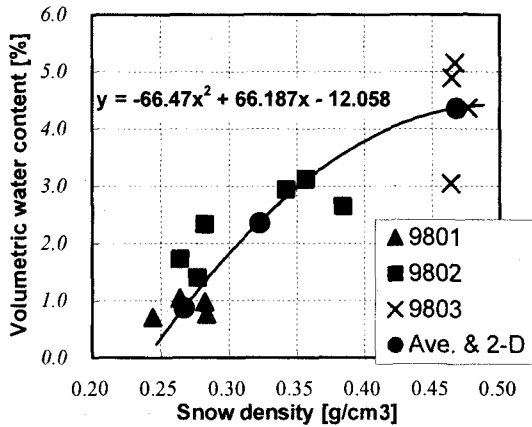


図-1 各サイトでの平均積雪密度と含水率の関係。プロットはそれぞれ1998年1月(▲), 2月(■), 3月(×)の観測値と各月平均値(●), ラインは各月平均値の2次近似曲線を表す。

本研究では、現地観測結果に基づきいくつかの積雪パラメータのモデル化を行い、これを導入した散乱モデル計算と連続する二日間に得られたRADARSAT画像から積雪密度と積雪表面粗度を推定するアルゴリズムを提案し、推定値の検証を行った。さらに、テストサイトを対象に既往の研究で推定された土壌表面粗度<sup>8)</sup>、本研究で推定された積雪パラメータを入力値としたモデル計算と、同時期に得られたJERS-1搭載SAR画像を用いてL-bandデータを組み合わせた積雪深推定の可能性について検討した。

## 2. 同期観測実験の概要

RADARSAT搭載SARとの積雪同期観測実験<sup>7,9)</sup>(代表: 深見和彦)は1996, 1997年度の二冬季間のおよそ月1回、新潟県中越地方一帯を対象に、SARの観測入射角を変更することで対象地域が12時間以内に2回観測できる特徴を利用して、初日18:30頃(Ascending軌道)、2日目5:45頃(Descending軌道)に同期して実施した。本研究では特に、1998年2月に取得された2シーンをを用いて解析を行った。

## 3. 積雪面での散乱プロセスとモデルの概要

積雪面を対象とした場合、SARから得られる後方散乱係数( $\sigma^0$ )は積雪表面散乱、積雪内部での体積散乱、積雪層による消散が小さく照射したマイクロ波が下部の土壌表面にまで到達しているとすれば土壌面での表面散乱、およびこれと積雪層での体積散乱による相互作用による成分などの和として表すことができる。本研究で使用する散乱モデル<sup>10)</sup>は、上下境界面を有する球形粒子が不規則に埋め込まれた媒体からの散乱を放射伝達理論に基づき解いており<sup>4)</sup>、表面散乱項には表面粗度に対するモデルの適用条件が広いIntegral Equation Method(IEM)モデル<sup>11)</sup>、体積散乱項にはdense media理論に基づくQuasi-Crystalline Approximation with Coherent Po-

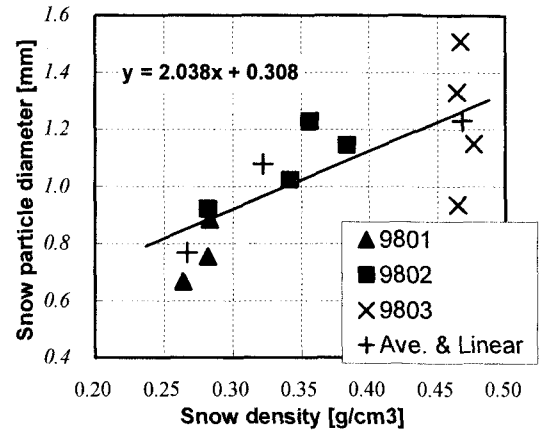


図-2 各サイトでの平均積雪密度と粒径の関係。プロットはそれぞれ1998年1月(▲), 2月(■), 3月(×)の観測値と各月平均値(+), ラインは各月平均値の回帰直線を表す。

tential (QCA-CP)<sup>3)</sup>を導入している。これをある周波数、ある送受信偏波の下で形式的に表すと式(1)になる。

$$\sigma^0 = f(\theta_s, |\sigma, l, \xi, \epsilon_r|_{so}, |\sigma, l, \xi, \epsilon_r|_{sn}, d, h) \quad (1)$$

ここで、 $\theta_s$ は局所入射角で衛星-地表面の幾何関係と地形から求めることができる<sup>12)</sup>。 $\sigma$ ,  $l$ ,  $\xi$ は粗度パラメータで表面高さの標準偏差、相関長さおよび表面相関関数、 $\epsilon_r$ は比誘電率であり媒体の密度( $\rho$ )と含水率( $Mv$ )に強く依存する。これらはそれぞれ土壌(下付き $so$ )と積雪(下付き $sn$ )に関して定義され、 $h$ ,  $d$ は積雪深と粒径を表す。このように後方散乱係数は多くの未知数の関数として表されるが、如何にこの未知数の数を減らすかが実用的な逆推定アルゴリズムを開発する上で重要となる。

積雪層での消散効果が大きく、照射されたマイクロ波が積雪下部の土壌表面に到達していないとすれば、積雪層自体が半無限媒体となり式(2)で表すことができる。

$$\sigma^0 = f(\theta_s, |\sigma, l, \xi, \rho, Mv, d|_{sn}) \quad (2)$$

## 4. 積雪パラメータ推定のアルゴリズム開発

前述の通り、既往の研究から当該対象地域で20cmを越える積雪はC-bandのSARでは消散効果が大きいので、積雪深の推定が困難なことが示唆された<sup>7)</sup>。そこで、20cm以上の積雪を対象としてAscending, Descending両軌道で得られた2シーンのRADARSATデータから、式(2)で表される積雪パラメータの推定について検討する。

### (1) 観測結果に基づく積雪表面粗度に関する検討

積雪表面粗度の分布特性は、これまでに各地における各時期での現地計測に基づき詳細に調べている<sup>7), 10)</sup>。この結果、積雪表面粗度 $\sigma$ と $l$ の分布特性は積雪状態、すなわち含水率や密度に依存しており、新雪や乾雪が含ま

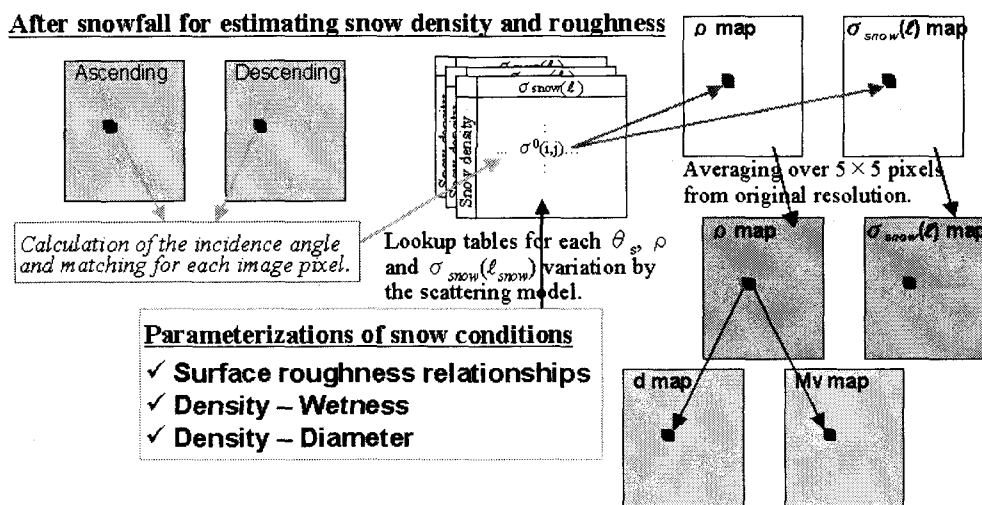


図-3 積雪密度、積雪表面粗度の空間分布推定アルゴリズムの処理フローチャート。

れる“積雪粗面”と、湿雪が含まれる“積雪滑面”のそれぞれについて  $l=f(\sigma)$  の線形関係で表せることが分かった。後方散乱に寄与する未知数を減らす目的で、本研究でもこの関係を導入する。また積雪相関関数( $\xi$ )は $\sigma$ 、 $l$ の絶対値および偏差が小さいことから指数相関を適用する。

## (2) 観測結果に基づく積雪パラメータのモデル化

図-1, 2は1998年1月から3月に実施した現地観測結果から積雪深20cm以上の場合について、それぞれ積雪密度と含水率、積雪密度と粒径の関係を月毎にプロットしたものである。一つのプロットは、サイト毎に各月二日間の観測結果を積雪全層で平均した値を示している。また、各月の平均値(図-1中●、図-2中+)をプロットし、ラインは各月平均値の近似曲線を表している。図-1, 2から各月における積雪パラメータの変化特性を見ることができる。例えば、現地観測は比較的広域に渡り実施したにも関わらず、積雪変態の小さい1月(図-1, 2中▲)には積雪密度、含水率、粒径ともに同程度の値を示しており、既往の研究で行われたように一定値として扱うことが可能であることが分かる<sup>7)</sup>。しかし、積雪深が最大になるとともに変態が進行する2月(図-1, 2中■)には、サイト毎のばらつきが大きく、積雪状態を別途、推定する必要がある。さらに融雪期である3月(図-1, 2中×)には密度、含水率、粒径いずれも最大値を示すとともに、サイト毎のばらつきも大きくなることが分かる。式(2)の未知数を減らすとともに、この積雪パラメータの変化特性を取り込むために、各月平均値の近似曲線から積雪含水率、粒径を密度の関数として式(3)、(4)で表すこととする。

$$Mv(\%) = -66.47 \rho^2 + 66.187 \rho - 12.058 \quad (3)$$

$$d(mm) = 2.038 \rho + 0.308 \quad (4)$$

## (3) 積雪パラメータ推定アルゴリズムの提案

以上の検討から、式(2)は式(5)で表すことができる。

$$\sigma^0 = f(\theta_s, \sigma, \rho) \quad (5)$$

したがって、連続したAscending, Descending両軌道での観測時間差である夜間約11時間で積雪状態に大きな変化がなかったとすれば、両軌道による二つの入射角でのRADARSATデータから未知数である積雪密度、表面粗度( $\sigma$ )を推定することが理論上可能となり、さらに推定値から積雪含水率、粒径、相関長さを求めることができる。

本来ならSARで観測される後方散乱係数から未知数を推定するアルゴリズムを構築すべきであるが、計算機の負荷軽減のため、forwardプロセスの散乱モデル計算から現実的な未知数範囲でのlookup tableを作成し、これとSAR観測値の比較から未知数の推定を行う。

## 5. RADARSATデータへの適用と検証

次に提案された積雪パラメータ推定アルゴリズムを実データであるRADARSAT画像に適用し、未知数空間分布の推定を行う。図-3は空間分布推定の処理フローチャートを模式的に表したものである。ここでは、積雪深20cm以上を対象とするために1998年2月10日、11日に観測されたRADARSAT画像から対象領域を切り出し用いる。

### (1) 局所入射角の計算と2画像のマッチング

両画像の局所入射角( $\theta_s$ )をそれぞれ求めるために、まず2月11日のDescending軌道で得られた画像を2月10日のAscending軌道の画像に1次の幾何補正によってマッピングした。さらにAscending軌道の画像を緯度経度直交座標系に1次幾何補正を行い、国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)と重ね合わせられるようにした。

未知数を推定するDescending軌道の画像中のある1画素について、マッピングしたAscending軌道の画像と数値地図からそれぞれ対応する画素を見付け出し、数値地図からは周囲四点の標高から地形の傾斜の放線ベクトル、両軌道による画像についてはそれぞれ衛星と地表面の幾何(Geometry)で決まる入射角を計算し、両値を内積することでそれぞれの局所入射角を計算した<sup>12)</sup>。

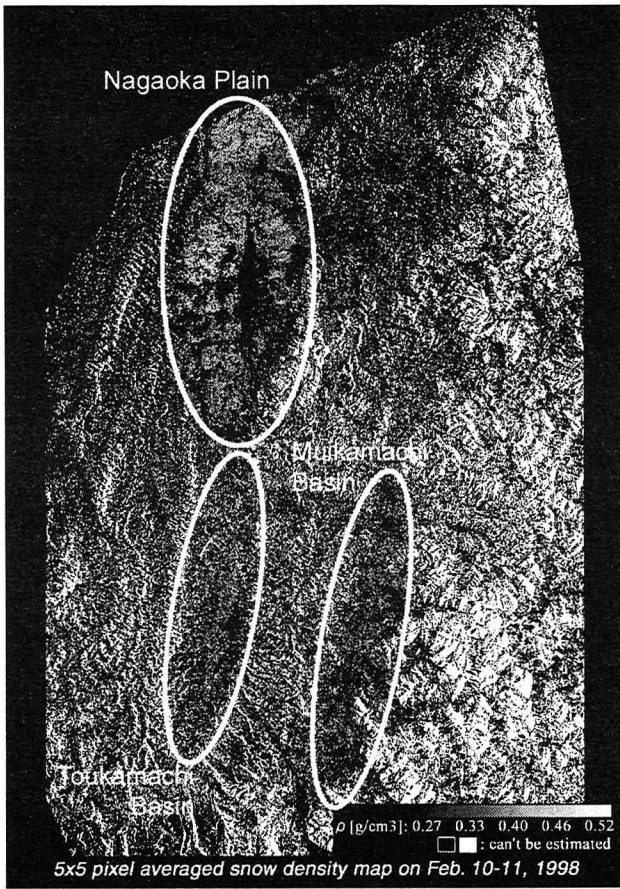


図-4 1998年2月のRADARSAT画像から推定された積雪密度マップ (5×5画素平均)。グレースケールで白くなるほど大きい密度、黒もしくは白は推定できない画素を表す。

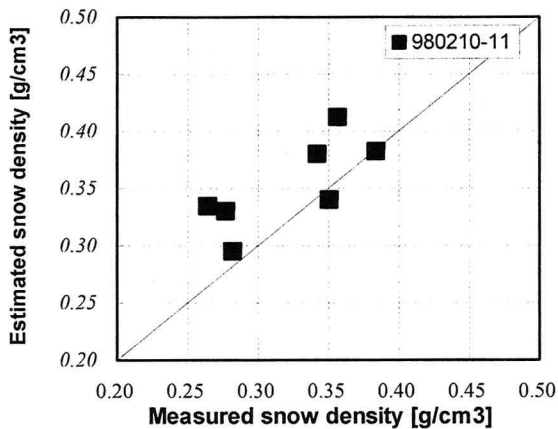


図-6 各サイトでの推定された平均積雪密度の検証。

## (2) 未知数推定用lookup tableの作成

次に、散乱モデルを用いて以下の条件で積雪パラメータ推定のためのlookup tableを作成する。この際、積雪表面相関長さは粗度 $\sigma$ の関数として、また含水率、粒径は密度の関数としてそれぞれ式(3)、(4)を導入する。なお、液体水分と氷の比誘電率の算出にはP. S. Rayのモデル<sup>13)</sup>を使用し、湿雪を対象とするため雪温は0℃とした。

- $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) : 0.27–0.52, 0.05 g/cm<sup>3</sup>刻み,
- $\sigma$  (mm) : 0.5–16.5, 2.0mm刻み,
- $\theta_s$  (度) : 9.5–55.5, 0.5度刻み.

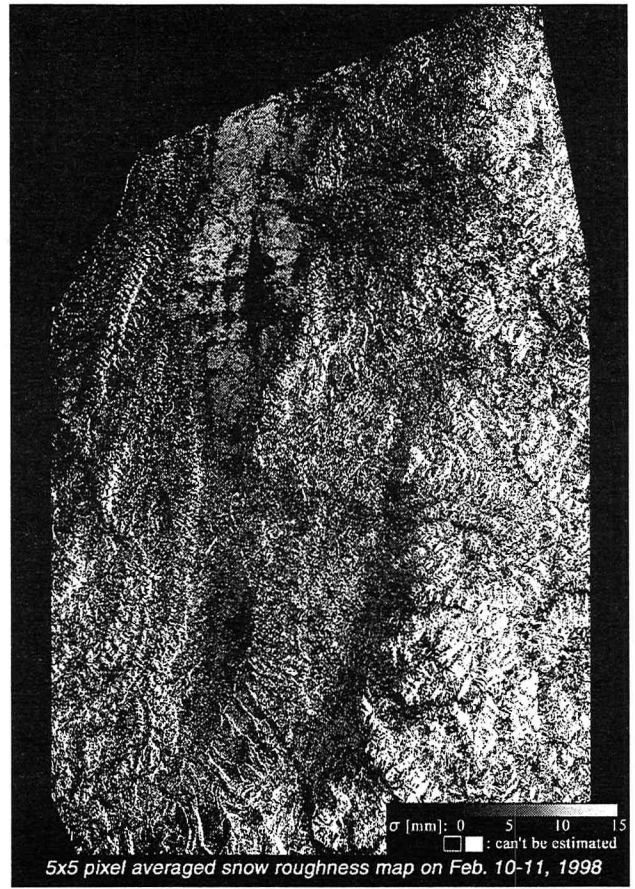


図-5 1998年2月のRADARSAT画像から推定された積雪表面粗度 $\sigma$ マップ (5×5画素平均)。グレースケールで白くなるほど大きい $\sigma$ 、黒もしくは白は推定できない画素を表す。

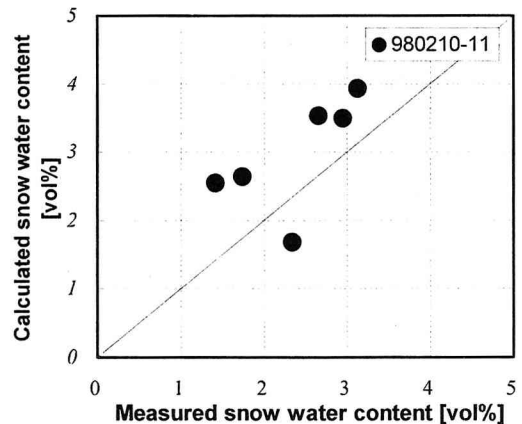


図-7 推定積雪密度から計算された積雪含水率の検証

このように作成されたlookup tableと、5. (1)でマッチングした対応する両画像の各画素の後方散乱係数および $\theta_s$ から、この画素における未知数をそれぞれ求める。

## (3) 積雪パラメータ空間分布図の作成

以上の手順を対象領域のDescending画像全画素について行い、作成されたオリジナル分解能(8m)での積雪密度、粗度 $\sigma$ の空間分布図をミスマッチングなどの影響による推定誤差を減らすために5×5画素の40mメッシュで平均化を行った。図-4は対象領域における推定された積雪密

度マップで、グレースケールで積雪密度の値を示しており白くなるほど大きい密度を表し、テストサイトが含まれる平野部の位置を白で囲んだ。また、図-5は粗度 $\sigma$ マップで白くなるほど大きい $\sigma$ を表している。両図において $\theta_s$ がlookup tableを作成した条件に入らない画素は白、lookup tableに入るが両後方散乱係数から逆推定できなかった画素は黒で表す。若干分かり辛いが、平野部周囲の山岳域では白や黒い画素、平野部中心付近の市街地では黒い画素が多くなっている。これは森林や人工構造物の影響が考えられる。市街地以外の平野部については本手法によって比較的逆推定できていることが分かる。

#### (4) 推定された積雪密度、計算された積雪含水率の検証

推定値の検証として、図-6は横軸が2月10、11両日の現地観測で得られた全層平均の積雪密度、縦軸が推定された積雪密度の関係を7地点のテストサイトについてプロットしたものである。推定値は地点位置合わせの誤差を考慮して3×3画素(120m四方)で、推定できなかった画素以外での平均値として表している。図-7は横軸が現地観測による全層平均の積雪含水率、縦軸が推定積雪密度から式(3)によって計算された含水率の関係をプロットしたものである。なお、テストサイト1地点における観測含水率に計測ミスと思われる値があったため、図-7では除いている。図-6、7から本手法で推定された積雪密度、計算された積雪含水率とともに観測値と比較して若干、過大評価であるが分布の傾向は一致することが分かった。

### 6. JERS-1を組み合わせた積雪深推定の検討

以上の検討から、連続する二日間に観測された2シーンのRADARSAT画像を用いて湿雪域での積雪密度、含水率を推定する本手法は、妥当な結果が得られることが分かった。しかし、水文学的に最も重要な積雪パラメータは積雪密度×積雪深で表される積雪相当水量と言える。前述の通り、既往の研究においてRADARSATデータを用いた積雪深の推定を試みたが、本対象領域のような湿雪域ではC-bandのSARでは難しいことが示唆された<sup>7),8)</sup>。そこで、同時期に得られた日本の地球観測衛星JERS-1搭載のSARデータを組み合わせ、より波長が長く透過性の高いL-bandによる湿雪域での積雪深推定に関して検討する。

本研究で得られた積雪密度、含水率、粒径と積雪表面粗度パラメータを既知とすると、式(1)における残りの未知数は土壤表面に関する3つの粗度パラメータと土壤水分に強く依存する比誘電率、および推定したい積雪深であることが分かる。

#### (1) RADARSATデータによる土壤表面粗度の推定の概略<sup>7)</sup>

無積雪時、すなわち土壤表面からの後方散乱係数は式(1)から積雪に関する未知数を除き、土壤面に関する3つの粗度パラメータと比誘電率で表せることが分かる。既往の検討<sup>4)</sup>から土壤表面の表面相関関数は指数相関関数で表すことができ、また1997年12月の2地点での観測では土壤水分は飽和状態であった。この時期の対象領域の

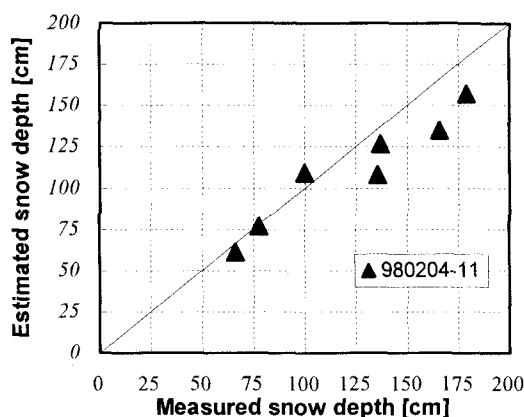


図-8 JERS-1 SAR画像から推定された積雪深の検証。

天候は通常、初冬の降雪と冬型の気圧配置にともなう晴天が数回繰り返される。晴天と言っても冬季の日射エネルギーはそれほど強くなく気温も低いため、土壤水分を著しく低下させるほどのものではなく、初期の降雪を融かす程度である。このような状況から、12月の観測時に土壤水分が飽和状態であったと考えられる。

そこで、対象領域内の土壤水分は飽和体積含水率と仮定すると、残りの未知数である二つの土壤粗度パラメータ( $\sigma$ ,  $l$ )は、連続するRADARSAT画像2シーンをを用いてそれぞれ推定することができる。これを1997年12月24、25両日に得られたRADARSAT画像に適用し、対象領域における50mメッシュでの土壤表面粗度マップが作成された<sup>8)</sup>。

#### (2) L-band SARを組み合わせた積雪深推定に関する検討

本研究で対象としている2月の現地観測時、テストサイト4地点においても積雪下部の土壤水分は12月と同様に飽和状態、他の2地点でも非常に湿った状態であった。これは地温が0℃前後であることから、土壤面と接している積雪層下部の融解が進行したことが一因として考えられる。したがって、土壤状態は12月の時点と大きく変化しておらず、12月のRADARSAT画像から推定された土壤表面粗度、土壤水分は飽和体積含水率、さらに本研究で推定された積雪パラメータを導入すると、積雪面からの後方散乱係数に寄与する未知数は積雪深のみとなる。この積雪深がRADARSATよりも透過性の高いL-band SARによる消散効果の評価から推定できるかについて検討する。

本来ならばRADARSATデータと同日に観測されたL-band SAR画像を用いるべきだが、本研究では1998年2月4日の10:30頃にDescending軌道で観測されたJERS-1 SARデータを使用し、L-band SARによる積雪深推定の可能性について検討した。7地点のテストサイトを対象に、それぞれ2シーンのRADARSAT画像から推定された土壤表面粗度、積雪密度、積雪含水率、粒径、積雪表面粗度を入力値とし、積雪深を変数とした散乱モデル計算による後方散乱係数と、JERS-1 SARにより観測された後方散乱係数の比較から積雪深の推定を行った。なお、位置合わせの誤差、分解能の違い等の影響を小さくするために、JERS-1の後方散乱係数は3×3画素(37.5m四方)の平均値を使用した。

図-8は推定された積雪深の検証として、横軸が2月の

現地観測で得られた積雪深、縦軸が推定された積雪深の関係をプロットしたものである。2月のRADARSATとJERS-1の観測には約1週間の時間差があるが、推定された積雪深はリーズナブルな結果であることが分かった。以上の検討から、多時期のC-band SARによる土壌状態の推定値と、湿雪域もしくは融雪期におけるC-band SARによる積雪パラメータの推定値、およびこれと同時期に得られたL-band SARデータを組み合わせることで積雪相当水量の推定は十分可能であると考えられる。

## 7. 結論

本研究では、湿雪域を対象として連続する二日間に得られたRADARSAT画像から積雪密度と積雪表面粗度の推定アルゴリズムを提案した。後方散乱に寄与する未知数を減らすために、本アルゴリズムには現地観測に基づき積雪の時間変化特性を考慮したいくつかの積雪パラメータのモデル化を導入した。推定された積雪密度、これから計算された含水率は観測値と良好な一致を示した。本研究では湿雪域を対象としたが、提案されたアルゴリズムは高緯度、高々度に位置する乾雪域における融雪期の積雪にも適用できる可能性がある。さらに、RADARSAT画像から推定された積雪パラメータと土壌パラメータに、より透過性の高いJERS-1 SAR画像を組み合わせることで、同時期における積雪深推定の可能性を示した。それぞれから推定された積雪深と密度から、水文学的に最も重要である積雪相当水量の推定も可能である。今後、さらに推定精度の向上、推定領域を拡大するためにSAR画像に含まれるファオショートニング等、通常の幾何補正で取り除くことができない要因、また森林や植生など裸地以外による影響についても検討していく必要がある。

現在、衛星搭載型L-band SARは運用されていないが、近々、日本の陸域観測技術衛星(ALOS)や、C-band SARでは欧州のENVISAT、カナダのRADARSAT-2などの打上げが予定されている。いずれのSARも入射角可変型であり、マルチバンドによる観測頻度も向上できると考えられることから、本アルゴリズムをベースとして実利用につなげていくことも十分考えられる。さらに、多偏波SARデータの検討等により様々な積雪状態での定量的な積雪モニタリング手法の開発を進めていく必要がある。

**謝辞：**本研究で使用了RADARSAT画像はApplication Development and Research Opportunity (ADRO)プログラムの一環としてカナダ宇宙局(CSA)より提供されました。現地観測は土木研究所、長岡技術科学大学、福井工業大学、千葉大学、国際農林水産研究センター、(財)リモート・センシング技術センターの方々との共同研究の成果であり、実験器材の準備に関しては長岡雪氷防災実験研究所、北陸農業試験場(現 北陸研究センター)、名古屋大学の方々に多大なるご協力を賜りました。またNASDA EORCの島田政信、若林裕之両氏には多くの有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Stiles, W.H. and Ulaby, F.T.: The active and passive microwave response to snow parameters, 1. Wetness, *Journal of Geophysical Research*, Vol.85, No.C2, pp.1034-1044, 1980.
- 2) Ulaby, F.T. and Stiles, W.H.: The active and passive microwave response to snow parameters, 2. Water equivalent of dry snow, *Jour. of Geophysical Research*, Vol.85, No.C2, pp.1045-1049, 1980.
- 3) Tsang, L.: Dense media radiative transfer theory for dense discrete random media with particles of multiple sizes and permittivities, *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Vol.6, pp.181-225, 1992.
- 4) Shi, J. and Dozier, J.: Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric Synthetic Aperture Radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.33, pp.905-914, 1995.
- 5) Shi, J. and Dozier, J.: Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, Part I: Inferring snow density and subsurface properties, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.38, pp.2465-2474, 2000.
- 6) Shi, J. and Dozier, J.: Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, Part 2: Inferring snow depth and particle size, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.38, pp.2475-2488, 2000.
- 7) 田殿武雄, 深見和彦, 児玉法彰, Shi, J.: 多時期RADARSAT データを用いた積雪水文パラメータの空間分布推定の試み, 水工学論文集, 第45巻, pp.157-162, 2001.
- 8) Tadono, T., Fukami, K. and Shi, J.: Estimation of snow hydrological parameters using single-parameter, multi-temporal SAR images, *IEEE IGARSS '01 Proceedings*, 2001.
- 9) 深見和彦, 松浦直, 金木誠, 小池俊雄, 田殿武雄, 宇治橋康行, 近藤昭彦, 大野宏之, 上林徳久: 中越地方において観測されたRADARSAT衛星SARデータと積雪水量との関係, 日本写真測量学会平成11年度年次学術講演会発表論文集, pp.407-408, 1999.
- 10) 田殿武雄, 小池俊雄, Shi, J.: 地表面粗度特性を考慮したSARによる土壌・積雪パラメータ推定のための数値シミュレーション, 水工学論文集, 第43巻, pp.217-222, 1999.
- 11) Fung, A.K.: *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Norwood, MA: Artech House, pp.49-73, 1994.
- 12) Tadono, T., Koike, T., Shi, J., Ding, Y., Chen, X., Wang, S., and Yang, M.: Development of an algorithm for soil moisture mapping based on single-parameter SAR images in permafrost regions including the effect of surface roughness, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol.18, No.1, pp.29-38, 2000.
- 13) 鈴木道也: 雪氷電波・光工学, 昭晃堂, pp.83-101, 1987.
- 14) Tadono, T., Qong, M., Wakabayashi, H., Shimada, M., and Shi, J.: Study for estimating soil moisture distribution using polarimetric airborne SAR, *Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II, Proceedings of SPIE*, Vol.4152, pp.319-326, 2000.

(2001. 10. 1受付)