

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

Study for estimating spatial distributions of snow hydrological parameters
using multi-temporal RADARSAT data

田殿 武雄¹・深見 和彦²・児玉 法彰³・Jiancheng SHI⁴
Takeo TADONO, Kazuhiko FUKAMI, Housho KODAMA, and Jiancheng SHI

¹ 正会員 博(工) 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター (〒106-0032 東京都港区六本木1-9-9)

² 正会員 工修 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³ 正会員 学(工) 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

⁴ 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 quantitative estimation of snow parameter distributions using Synthetic Aperture Radar (SAR) data and a numerical scattering model that includes the Integral Equation Method (IEM) model and first-order radiative transfer solution. Simultaneous RADARSAT SAR observations were carried out during the winter seasons of 1996 and 1998. The study area is a part of the Hokuriku District of Japan that is well known for having of wet snow with a complicated layer structure from the beginning of the winter season. We compared the results of simulated backscattering coefficients with the ground-truth data and observed backscattering coefficients. Since the agreement was good, we demonstrated the possibility of estimating roughness distributions of soil surface using images acquired just before the snowfall, assuming that the soil conditions did not change during a winter season. Furthermore, we estimated the distributions of snow depth and roughness using images after a snowfall and estimated soil roughness distributions.

Key Words : microwave remote sensing, snow depth, surface roughness, RADARSAT, SAR

1. はじめに

陸域地表面に存在する積雪は、河川流域における水資源予測や流域管理に直接影響を与えるとともに、融雪流出にともなう洪水や雪崩など災害要因ともなり得る可能性を有している。また、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。

地上における積雪観測は、日本のアメダス、米国のSNOWTELといった自動観測網が整備されている場合や、ロシアのように圃場での観測が継続的に実施されている場合がある。しかし、これらの観測網は全球規模で見れば一部の地域のみで、またいずれも地点観測のため空間的に不均質な積雪分布を広域的に、かつ同程度の精度で計測することは非常に困難である。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の利用が有効であり、とりわけ地表面水文学のモニタリングにはマイクロ波リモートセンシングの実用化が期待されている。

能動型マイクロ波センサの合成開口レーダ(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散乱、反射の強度を表す後方散乱係数(σ_{qp}^0 , ここで下付き p, q は送信偏波, 受信偏波を表す), 位相情報を計測することができる。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^{1), 2), 3)}。著者らも同様に、地上で後方散乱係数を計測できる散乱計を用いて積雪面における散乱特性の実験的検討⁴⁾、積雪層からの散乱を表面散乱項と放射伝達解に基づく体積散乱項で表した数値散乱モデルを用いて複数のSARによる同時観測を想定した応答特性の検討⁵⁾などを行った。

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。1994年にスペースシャトルを用いて実施されたShuttle Imaging Radar-C(SIR-C)実験では多周波、多偏波同時計測できるSARが搭載され、得られたデータを用いて多偏波観測による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⁶⁾。今後各国から多偏波SAR搭載衛星の打上げ計画があるが、この運用が実現しても

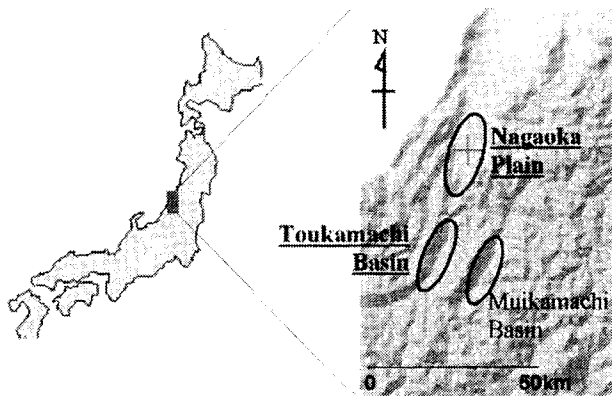


図-1 研究対象地域と地上観測地点を設定した領域

従来通りの単一チャンネルによるデータは利用できる。

本研究では、SARによる積雪水文パラメータの定量的な空間分布推定手法の開発を目的とし、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、まず地表面粗度の分布特性について検討し、特に積雪表面粗度に関しては積雪パラメータと表面粗度の分布特性について議論する。次に、積雪深の変化に対する後方散乱係数の応答特性について、観測結果とマイクロ波散乱理論モデルによるシミュレーションの両面から検討し、これらの結果を踏まえて、散乱モデルによる数値計算と降雪直前のSAR画像データを用いて、一つの仮定の下で土壌表面粗度の空間分布推定手法を提案した。さらに推定された土壌表面粗度分布図と降雪後のSAR画像データ、数値計算結果、および別の仮定を加え、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。

2. 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(σ_{qp}^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はこれまでも紹介しているが⁵⁾、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⁶⁾、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⁷⁾、体積散乱項には一次近似の解法³⁾を導入している。これを使用するSARシステムで定義される、ある周波数(λ)、ある偏波状態(p, q)の下で形式的に表すと式(1)になる。

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

ここで、 θ_s は局所的な入射角、 σ, l, ρ は表面粗度パラメータで、表面高さの標準偏差、相関長さとその分布を表す表面相関関数、 ϵ_r は比誘電率であり含水率

表-1 RADARSAT積雪同期観測実験の概要

概要	内容
観測日	1996年12月～1997年3月、1997年12月～1998年4月の二冬季、およそ月1回の連続した二日間。 1日目：18:30、Ascending軌道、Standard1モード 2日目：5:45、Descending軌道、Standard4モード
地上観測地点	1) 長岡域内：3地点 2) 十日町域内：2地点 3) 六日町域内：2地点での同期観測を基本とする。
地上観測項目	積雪断面観測：積雪深、層位、密度、粒経もしくは粒度、含水率、雪温 その他：積雪表面粗度、土壌含水率

と媒体の密度に大きく依存する。これらのパラメータはそれぞれ土壌(下付き so)と散乱媒体となる積雪(下付き sn)に関して定義される。 d, h は積雪粒径と積雪深を表す。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。

3. 同期観測実験の概要

RADARSAT搭載SARとの積雪同期観測実験⁸⁾(代表：深見和彦)は1996年12月から1997年3月と、1997年12月から1998年4月の二冬季間のおおよそ月1回、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。図-1は研究対象領域の位置、表-1は観測実験概要をそれぞれ表す。本研究では特に、1997年12月と1998年1月に取得されたRADARSATデータ合計4シーンをを用いて解析を行った。

4. 観測結果と散乱モデルシミュレーション

(1) 観測結果に基づく表面粗度に関する検討

地表面粗度の現地計測は、土壌表面が串型粗度計、積雪表面がスプレー式⁹⁾によって実施した。土壌表面粗度の表面高さの標準偏差(σ)と相関長さ(l)の分布特性は、特に今回現地観測を実施した水田について詳細に調べられており⁹⁾、相関関数(ρ)についても議論されている⁹⁾。

図-2は積雪表面粗度の計測結果をまとめたものである。本研究の対象地域でない北海道と富山での計測結果を目視で“積雪粗面”と“積雪滑面”に分類してプロットし、これに長岡での計測結果をその時の積雪状態毎に“湿雪”、“新雪”、“乾雪”に分けてプロットしたものである¹⁰⁾。図-2から降雪直後の新雪は積雪粒子の大きさに依存して粗い表面粗度を形成するが、その後、表面が湿り滑らかになってくるものと推測される。したがって、積雪表面粗度の分布特性はその時の積雪状態、すなわち含水率や密度といった積雪パラメータに依存することが分かった。

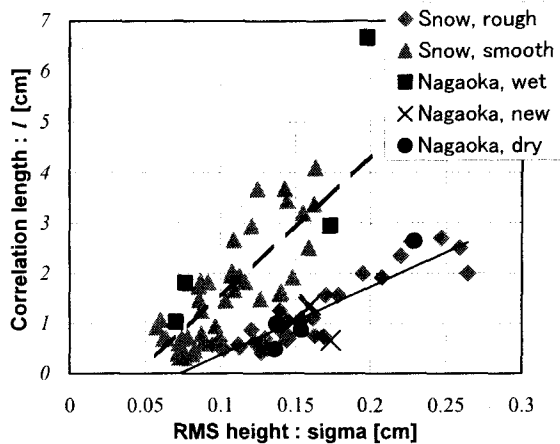


図-2 観測に基づく積雪表面粗度分布の分類¹⁰⁾。プロットは異なる時間、地点での計測から“積雪粗面”(◆)と“滑面”(▲)、別途行った計測から“湿雪”(■)、“新雪”(×)、“乾雪”(●)の分類。ラインは粗面、滑面の回帰直線を表す。

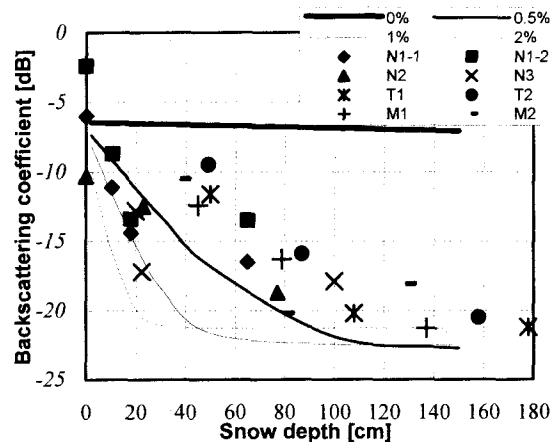


図-3 積雪深と後方散乱係数の関係。プロットは観測値(凡例中、Nは長岡城、Tは十日町城、Mは六日町城内サイト)、ラインは計算値(指数相関関数を仮定、太線は積雪体積含水率0%、中線は0.5%、細線は1%、波線は2%)を表す。

(1) Snow-free & just before snow fall data for estimating soil roughness

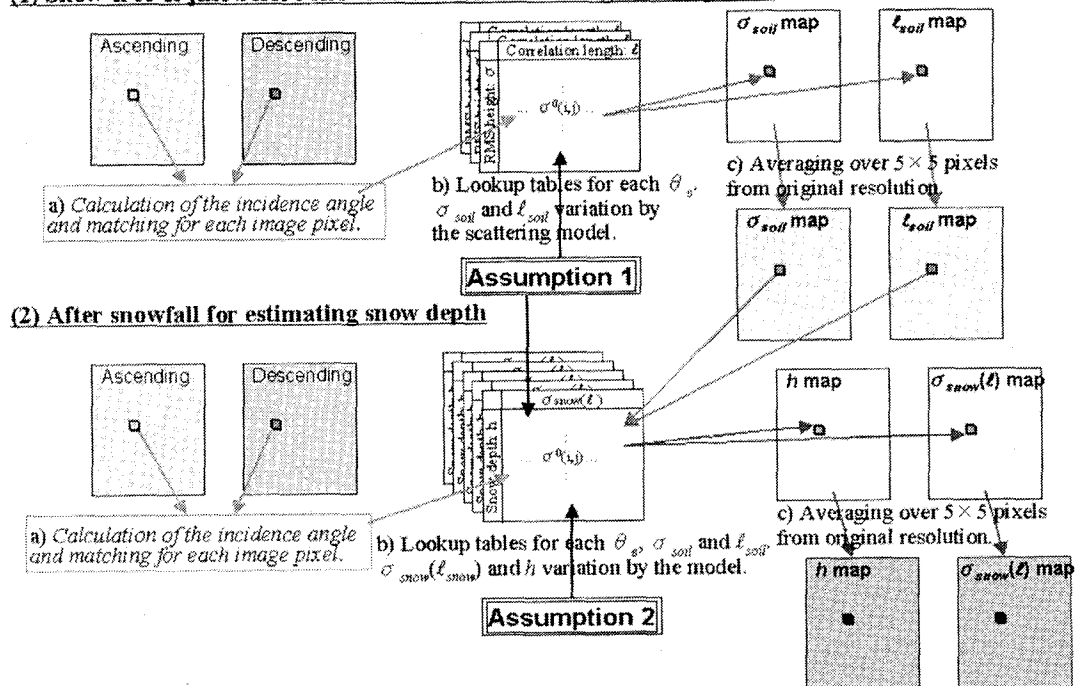


図-4 積雪深、積雪表面粗度推定アルゴリズムの処理フローチャート。

(2) 観測と散乱モデルによる積雪深に関する検討

図-3は積雪深と後方散乱係数の関係について、1997年度のAscending軌道における全観測結果(図中、プロット)と散乱モデル計算結果(同、曲線)を示したものである。モデル計算は積雪密度を $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒径を 1.0mm 、入射角を 22.5° 、土壌の σ を 1.2cm 、 l を 4.3cm と仮定し、積雪体積含水率0%(太線)、0.5%(中線)、1%(細線)および2%(波線)として行った。図-3の観測結果から、地点毎にばらつきはあるもののおよそ積雪深80cmまでは積雪量の増加に伴い後方散乱係数は減少していることが分かる。この要因の一つには、SARから照射されたマイクロ波が積雪層を消散しながら土壌面に到達し、土壌面で散乱した成分が再び積雪による消散を受けながらアンテナへ

戻ってくるものが考えられる。積雪深がこれ以上大きくなると積雪量の変化に対して後方散乱は感度がなくなり、飽和状態になっている。同様の傾向は、積雪が湿った場合のモデル計算でも確認でき、含水率が大きくなるほど飽和に達する積雪深が浅くなることが分かる。積雪が完全に乾いている場合、積雪による消散効果が小さいため積雪深の変化に対して後方散乱係数はほとんど感度がない。もちろん、積雪深以外のパラメータによる後方散乱への寄与を観測日、地点、層位毎に検討していく必要があるが、この飽和状態の積雪深に達するまでは積雪層による消散効果の評価から、取得されたRADARSATデータを用いて積雪深を逆推定できる可能性が示唆される。この場合、土壌表面での散乱特性の把握が重要となる。

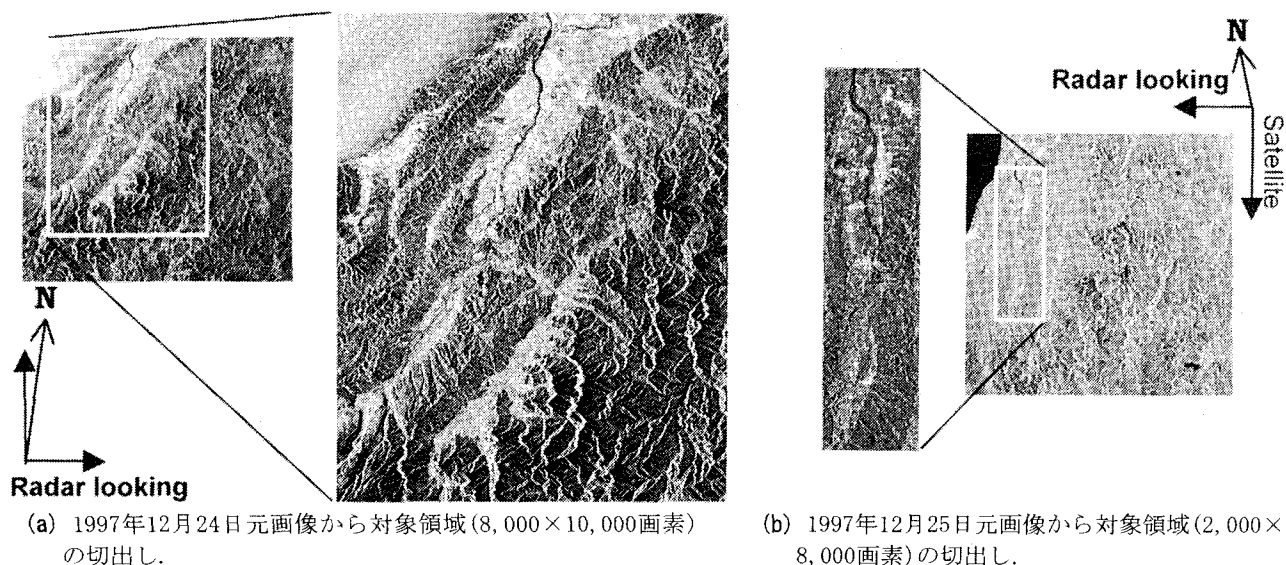


図-5 土壌表面粗度推定に使用した1997年12月のRADARSAT SAR画像。

5. 未知数推定アルゴリズムの提案と適用

(1) 土壌表面粗度の推定

無積雪時、すなわち土壌表面からの後方散乱係数は式(1)から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⁹⁾から表面相関関数(ρ)は指数相関関数で表せ、また12月の長岡域内2地点での観測から土壌水分は飽和状態であった。降雪後の翌1月、全地点での観測でも積雪下部の土壌水分は同様に飽和状態であったことから、土壌水分は飽和体積含水率と仮定し、連続したAscending, Descending両軌道での観測時間差である夜間約11時間で地表面粗度、含水率に大きな変化がなかったとすれば、両軌道で得られる二つの入射角でのRADARSAT観測データから残りの未知数である二つの粗度パラメータ(σ , l)を推定することが理論上可能となる。

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、計算機負荷の軽減のため、未知数を入力して後方散乱を求める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。図-4は逆推定のフローを表し、図中の上半分は本節、下半分は次節で説明を述べる。

a) 入射角の計算と2画像のマッチング

局所入射角(θ_s)は、SARアンテナからの距離に依存するものと地形の傾斜に依存するものの二つを補正する必要がある¹¹⁾が本研究では前者のみを考慮する。まず、無積雪時のAscending軌道、Descending軌道それぞれの画像から対象領域を切出し、後者を前者に1次幾何補正によりマッピングするとともに、レンジ方向のピクセル数からそれぞれの補正した θ_s を求める。ここでは1997年12月24日と25日に得られた画像から、図-5(b)の長岡域、十日町域を含む領域を切出し対象領域とした。

b) 土壌表面粗度推定用lookup table作成と推定

次に、散乱モデルを用いて以下の条件で土壌表面粗度

推定のためのlookup tableを作成する。この際、一つ目の仮定(図-4中、Assumption 1)として土壌水分は飽和体積含水率、土質は一般的な砂質土とし、この土壌状態は冬季の間変化しないとする。なお、比誘電率の算出にはDobson *et al.*のSemi-empirical model¹²⁾を使用した。

- ・ σ (cm) : 0.2–2.6, 0.2cm刻み,
- ・ l (cm) : 2.5–20.0, 2.5cm刻み,
- ・ θ_s (度) : 18.5–24.5および37.0–38.5, 0.5度刻み。

さらに、a)でマッピングした対応する両画像の画素毎の後方散乱係数と θ_s から、この画素の粗度を求める。

c) 土壌表面粗度マップの作成

これを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)での粗度分布図をスペckルノイズ、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画素の平均化を行い、40mメッシュでの土壌表面粗度マップを作成した。図-6は対象領域における推定された土壌表面粗度マップであり、(a)では白くなるほど大きい σ 、(b)では小さい l 、すなわち相対的に粗い地表面を表す。推定できなかった画素は黒で表す。

(2) 積雪深、積雪表面粗度の推定

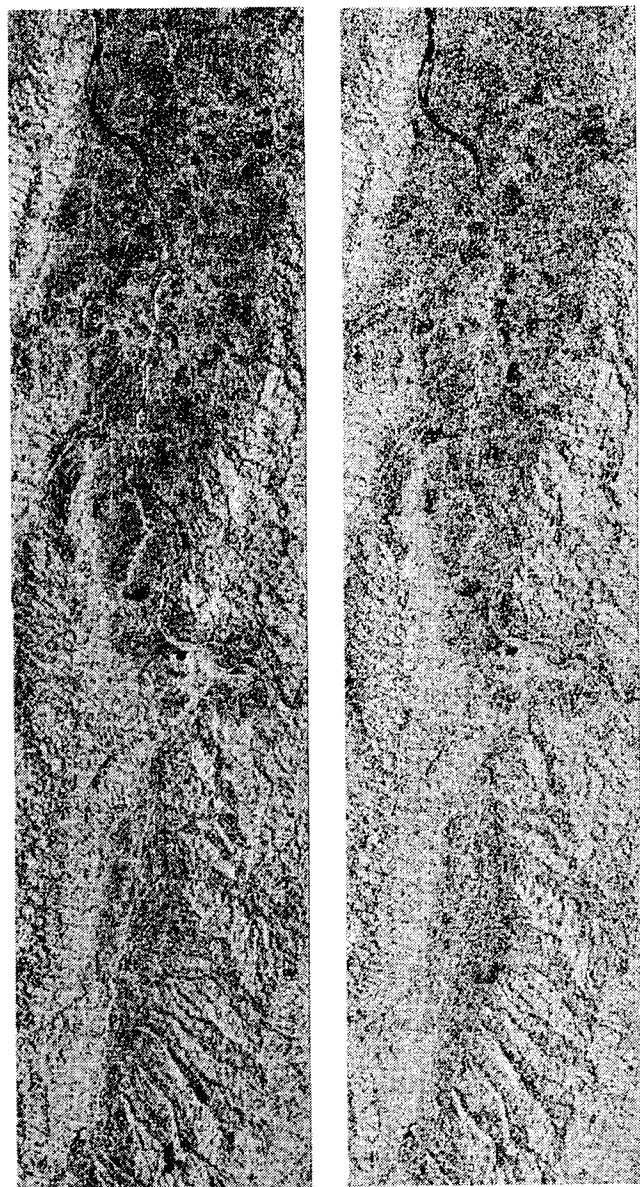
次に、作成された土壌表面粗度マップと1998年1月17、18両日のRADARSAT画像を用いて、1月の積雪深(h)、積雪表面粗度分布の推定を行う。

a) 入射角の計算と2画像のマッチング

土壌表面粗度推定時と同様に、1月の両画像から対象領域を切出し、 θ_s の算定とマッピングを行う。

b) 積雪パラメータ推定のlookup table作成と推定

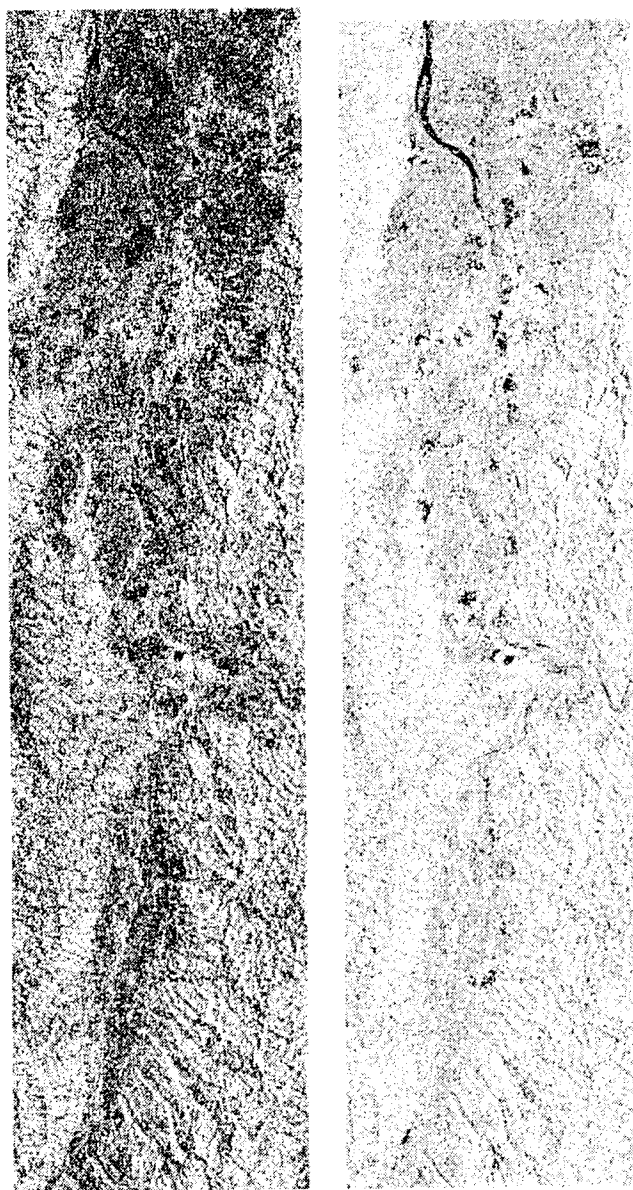
次に、積雪層からの散乱を表すモデル計算から積雪パラメータ推定用のlookup tableを作成する。この際、二つ目の仮定(図-4中、Assumption 2)として積雪密度および粒径は同一月内では同じとし、1月の観測結果から積雪含水率は1%とした。また、積雪表面粗度は土壌のそれと比較して小さいため、4章の検討から積雪状態毎に $\sigma(l)$ として一つのパラメータで表す。計算条件は、土壌



σ [cm]: 0 1.0 2.0 2.6 -
 l [cm]: 14 10 7.5 5.0 2.5 0

(a) 土壌 σ マップ. (b) 土壌 l マップ.

図-6 1997年12月の画像から推定した土壌パラメータに関する分布図(5×5画素平均).



h [cm]: 0 10 20 30 40 -
 $\sigma(l)$ [cm]: 0 0.2 0.3 0.4 0.5

(a) 積雪深(h)マップ. (b) 積雪粗度 $\sigma(l)$ マップ.

図-7 1998年1月の画像と図-6から推定した積雪パラメータに関する分布図(5×5画素平均).

表面粗度推定時のパラメータに以下を加えた.

- ・ h (cm) : 2, 5, 10, 20, 50, 100,
- ・ σ (mm) : 0.5-5.5, 1mm刻み.

対応する両画素の後方散乱係数と入射角, 土壌表面粗度からこの画素の積雪深, 積雪表面粗度を推定する.

c) 積雪深, 積雪表面粗度マップの作成

作成されたオリジナル分解能での積雪深, 積雪表面粗度分布図を5×5画素で平均化し, 40mメッシュでの積雪深, 積雪表面粗度マップを作成した. 図-7は推定されたマップであり, (a)では黒から白くなるほど大きい h , (b)では大きい $\sigma(l)$ を表し, 土壌表面粗度が推定できなかった画素は黒, 積雪パラメータを推定できなかった画素は白で表している.

(3) 推定された積雪深の検証

図-8は図-7(a)に含まれる地上観測5地点での積雪深の観測値と推定値の比較を示したものである. 観測値は1月17, 18両日の平均値, 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の平均値として表している. 図-8から積雪深20cm程度の3地点では両値は良く一致しているが, それ以上の積雪深になると完全に過小評価となった. これは, 図-3において含水率1%での計算値と観測値の不一致からも大まかには推察される結果である. 今後, さらに観測地点, 観測日毎に積雪層構造の違いによる後方散乱への効果に関する検討を行う必要がある.

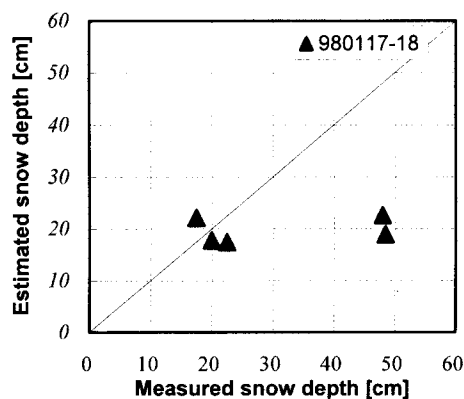


図-8 長岡城、十日町城内サイトでの推定積雪深の検証

6. 結論

本研究では、多時期のRADARSAT搭載SARによる積雪パラメータの空間分布推定の可能性について検討し、観測結果と散乱理論モデルのシミュレーションに基づき、積雪深の変化に対する消散効果の違いを利用した積雪深推定アルゴリズムを提案した。まず、降雪直前の連続した二日間に得られたSARデータとモデル計算から、土壌水分が飽和状態であるという仮定の下で土壌表面粗度の空間分布を推定し、これと降雪後のSAR画像2シーンから積雪深、積雪表面粗度の空間分布の推定する半経験的なアルゴリズムである。推定された積雪深は、20cm程度では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。この要因には、対象領域全域において一定と仮定した積雪含水率、積雪密度などの影響が考えられる。したがって、アルゴリズム中の課題として、今後さらに観測日、地点毎に積雪層構造の違いの評価、デジタル標高モデル(DEM)等を用いた地形効果の補正、他時期データによる異なる積雪状態下での検討などを行う必要がある。また、森林や植生、人工構造物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。

本アルゴリズムは、積雪層の消散効果を利用するため、さらに湿った積雪や完全な乾雪に対しては適用できない。しかし、例えば2003年打上げ予定の陸域観測技術衛星(ALOS)に搭載される、より長い波長を用いるSARや多偏波SARを用いることで、様々な積雪状態に対する本アルゴリズムの適用条件は拡張できると考えられる。これらの検討を加えた上で、積雪パラメータをより精度良く推定することで水文学的に最も重要である積雪相当水量の定量的なモニタリングが可能となる。

謝辞：本研究で使用したSAR画像はRADARSAT Application Development and Research Opportunity (ADRO)プログラムの一環としてカナダ宇宙局(CSA)より提供されたものである。また、現地観測は建設省土木研究所、長岡技術科学大学、福井工業大学、千葉大学、農水省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共同研究の成果であり、実験器材の準備

に関しては科学技術庁長岡雪氷防災実験研究所、農林水産省北陸農業試験場、名古屋大学各位の方々に多大なるご協力を賜りました。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, *Journal 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) 田殿武雄, 小池俊雄, 深見和彦, 寺川陽: 積雪の多様性とマイクロ波の応答特性, 水文・水資源学会1994年研究発表会要旨集, pp.108-109, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Fung, A.K.: *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Norwood, MA: Artech House, pp.49-73, 1994.
- 8) 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.
- 9) Tadono, T., Qong, M., Wakabayashi, H., Shimada, M., and Shi, J.: Study for estimating soil moisture distribution using polarimetric airborne SAR, *Proceedings of SPIE's Second International Asia-Pacific Symposium in Remote Sensing of Atmosphere, Environment, and Space*, 2000 (being submitted).
- 10) 田殿武雄, 深見和彦, 児玉法彰, Shi, J.: 表面粗度分布特性を考慮したSARによる積雪観測に関するシミュレーション, 水文・水資源学会1999年研究発表会要旨集, pp.120-121, 1999.
- 11) 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.
- 12) Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M. and El-Rayes, M.A.: Microwave dielectric behavior of wet soil, Part II: Dielectric mixing models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-23, pp.35-46, 1985.

(2000. 10. 2受付)