

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

Numerical simulations for SAR algorithm development
for soil and snow hydrological parameters

田殿 武雄¹・小池 俊雄²・Jiancheng SHI³
Takeo TADONO, Toshio KOIKE and Jiancheng SHI

¹ 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

² 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

³ Ph.D., Inst. for Computational Earth System Science, Univ. of California, Santa Barbara, USA

The objective of this study is to develop algorithms for estimation of soil and snow hydrological parameters by using Synthetic Aperture Radar (SAR) based on microwave radiative transfer theory. The backscattering coefficient of the land surface obtained by SAR is affected not only by soil moisture or snow depth but also by surface roughness and other factors. The ground-based measurement data obtained under the various conditions of the bare soil and snow was examined for understanding the characteristics of the distributions of two surface roughness parameters, that is, the standard deviation of surface height and the correlation length of surface. Multi-parameter SAR algorithms for estimation of soil moisture and snow surface parameters were developed based on numerical simulation by using the scattering model that includes Integral Equation Method (IEM) and first-order radiative transfer solution.

Key Words : *microwave remote sensing, surface roughness, soil moisture, snow, SAR*

1. はじめに

陸域地表面における土壌水分や積雪は、大気-陸域間での水循環を通してグローバルな気候システムに影響を及ぼすとともに、ローカルな水資源管理や予測に直接寄与する。例えば、積雪の融解にともなう土壌水分の増加が積雪の発生頻度を増加させることが指摘されており¹⁾、これが積雪の役割の一つであることも示唆されている。

土壌水分や積雪といった地表面水文情報の広域的な推定には、人工衛星によるリモートセンシングの利用が有効である。とりわけ能動型マイクロ波センサの合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)は、天候に左右されず高い空間分解能で地表面観測が可能で、液体水分のマイクロ波比誘電率が高いことから水文量を直接計測することになる。しかし、現在定常的に稼働している衛星搭載型SARは衛星の回帰日数が長いこと、1つのSARによる同一地点の観測頻度は低い。このためSARから推定される物理量は、定常的なモデルの入力値やリアルタイムもしくは日単位程度の時間スケールでの利用は不可能であるが、全球を低空間分解能ながら高頻度で観測で

きるマイクロ波放射計などと組み合わせることでオペレーショナルな水文情報の推定に貢献できると考えられる。

本研究では、SARによる土壌水分、積雪に関する水文情報モニタリングのアルゴリズム開発を目的として、散乱に大きく寄与する地表面粗度の分布特性に関して現地観測にもとづく検討を行った。さらに散乱モデルを用いて各パラメータが後方散乱に寄与する応答特性に関する検討を加え、複数のSARシステムによる同時観測を想定した物理量推定アルゴリズムの開発を行った。現在、多機能型SARを搭載した衛星の打ち上げが計画されているが、通常、衛星の設計寿命が数年間でしかないことを考えても、本研究で行うように今後得られるデータを想定した物理量推定アルゴリズムの開発は現段階から進めるべき課題と考えられる。

2. 地表面での散乱プロセスと散乱モデル

SARから得られるシグナルは、照射したマイクロ波のうち対象物で散乱しアンテナ方向へ戻ってくる強度を表した後方散乱係数(σ^0)の空間分布である。地表面での

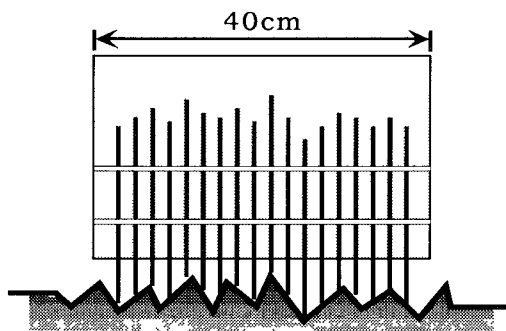


図-1 串型粗度計による土壌表面粗度の計測方法。上下自由に稼働する極細パイプを等間隔に配置し、土壌面に水平に設置して横方向から写真撮影し地表面凹凸を得る。

散乱プロセスを考えると土壌面などの半無限媒体を対象とした場合、後方散乱係数は媒体境界面で生じる表面散乱と内部で生じる体積散乱の和として表すことができる。

積雪の場合、雪が乾いていると照射したマイクロ波は積雪による消散が小さく、下部の土壌表面にまで到達することが考えられ、半無限媒体である土壌面上に散乱媒体となる積雪層が存在していると考えることができる。湿雪の場合、積雪層内部での消散が大きく、積雪層自体が半無限媒体として扱うことができ、土壌面の場合と同様の散乱プロセスと考えることができる。

本研究で使用する散乱モデルは、不連続な上下境界面を有する、球形粒子がランダムに埋め込まれた不均質層からの散乱を表面散乱と体積散乱の和として表しており、体積散乱項は放射伝達理論にもとづく一次近似の解法²⁾、表面散乱項は近年開発されたIEM(Integral Equation Method)モデル^{2),3)}を導入している。IEMモデルは、境界面の接線方向の電場および磁場をフレネルの反射係数で決まるKirchhoffモデルの項と、それを補う項で表した二組の積分方程式を解くことで後方散乱係数を求める。表面散乱を表す既往のSmall Perturbationモデル等⁴⁾と比較して、表面粗度に対するモデルの適応条件が広がっていることが特徴である。

一般に、土壌または湿雪などの半無限媒体からの後方散乱係数は、形式的に式(1)で表すことができる。

$$\sigma_{qp}^0 = f(\lambda, p, q, \theta_s, \sigma, l, \epsilon_r, S_v, d) \quad (1)$$

ここで、 λ , p , q , θ_s は使用するSARシステムで決まるマイクロ波の波長、送信偏波、受信偏波、入射角であり、 σ , l は散乱を記述するための表面粗度パラメータで、表面高さの標準偏差と表面相関長さである。 ϵ_r は比誘電率であり体積含水率に関係する。 S_v , d は散乱体が占める体積割合と粒径を表す。このように後方散乱係数は多くのパラメータの関数であり、このパラメータの多さがSARによる水文情報の推定を難しくしている。

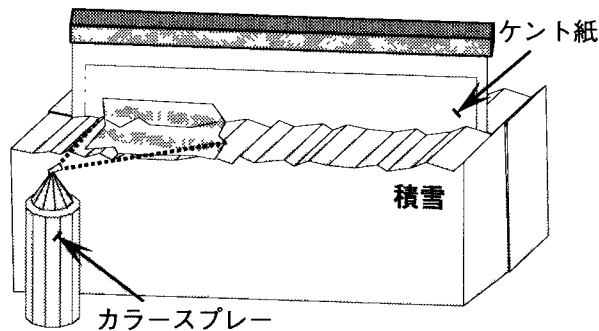


図-2 スプレー式による積雪表面粗度の計測方法。ケント紙を貼った板を積雪層に垂直に刺し、横からカラスプレーを吹き付けて積雪表面凹凸を得る。

3. 現地観測にもとづく表面粗度特性

(1) 表面粗度の計測と算出方法

図-1は土壌面における表面粗度の現地観測方法を模式的に表したものである。上下自由に稼働するように極細パイプが等間隔にセットされた幅40cmの串型粗度計をパイプ上端が土壌面の凹凸を表すように地面に水平に設置して横方向から写真を撮影し、これをデジタル化して表面高さのプロファイルを得た。また、図-2は積雪表面粗度計測の概念図であり、方法はケント紙を貼り付けた板を自然状態の積雪面に垂直に突き刺し、横方向からカラスプレーを吹き付けて積雪表面凹凸をケント紙に写し取る。ケント紙が乾燥後、これをデジタル化して表面高さのプロファイルを得た。

それぞれ得られた表面高さのプロファイルから、二つの地表面粗度パラメータ、表面高さの標準偏差(σ)と表面相関長さ(l)を求めた。 l は式(2)で求められる表面高さの自己相関係数が式(3)のように $1/e$ になるときの長さとして定義されている⁴⁾。

$$\rho(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} Z_i Z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad (2)$$

$$\rho(l) = 1/e \quad (3)$$

ここで、 Z_i はある一定間隔 Δx で計測された表面高さ、 $x' = (j-1)\Delta x$, j は1以上の整数、 N はサンプル数を表す。

(2) 土壌表面粗度の分布特性

土壌面における粗度の現地観測は、新潟県中之島町の稲刈り後の水田で串間隔4mmの串型粗度計を用いて、土壌が掘起こされた粗い地点84点(以後、水田粗面と記す)と掘起こしていない比較的滑らかな地点75点(同、水田滑面)と、北海道陸別、斜里町周辺の牧場・畑の積雪下

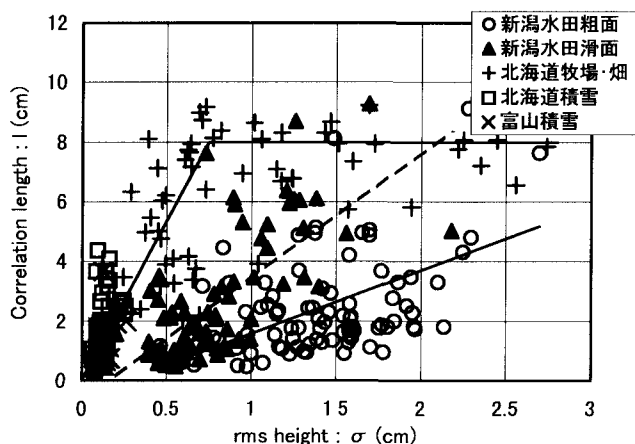


図-3 土壌面，積雪表面での粗度計測結果. 土壌について○：掘り起こした水田(粗面)，▲：掘り起こしていない水田(滑面)，+：北海道牧場・畑の結果とそれぞれの近似直線，積雪について□：北海道，×：富山での結果を表す.

部の土壌表面59点で串間隔2mmの粗度計を用いて行った. 図-3は σ と l の分布にどのような特性があるかを調べるために横軸が σ ，縦軸が l の関係を地表面状態ごとに示したもので○が水田粗面，▲が水田滑面，+が牧場・畑を表している. 図-3から土壌面での σ ， l はある固有の値を持っているわけではなく，地表面状態ごとに正の傾きを持つような分布になっていることが分かる. そこで，それぞれの地表面状態ごとに式(4)から(6)で表されるような近似直線を求めた. ただし，牧場・畑については $\sigma \geq 0.75$ cmで l が一定となっているように見える. これは粗度計の観測幅が40cmとそれほど長くなく，1つの粗度計による計測の限界であることが示唆される.

$$\text{水田粗面: } l = 2.1 \sigma - 0.6 \quad (4)$$

$$\text{水田滑面: } l = 4.2 \sigma - 0.7 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{牧場・畑: } & \sigma < 0.75 \quad l = 10 \sigma \\ & \sigma \geq 0.75 \quad l = 8 \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 積雪表面粗度の分布特性

同様に，積雪表面粗度の計測は北海道旭川市周辺と富山市周辺で行い，得られた結果を図-3中に示している. それぞれ□が旭川市周辺，×が富山市周辺を表している. 図-3において土壌表面粗度と積雪表面粗度を比較すると，積雪は土壌に比べ特に σ が非常に小さい範囲に分布していることが分かる. また土壌面の場合と同様に，積雪での σ と l にも固有の値があるわけではなく，ある範囲で分布しており，北海道と富山という地域差はそれほどないと思われる. 積雪表面は土壌表面に比べて外的要因によって変化しやすく，むしろ他の積雪パラメータ(積

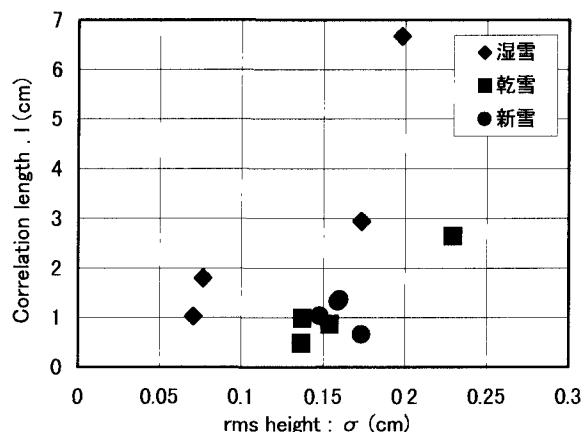


図-4 長岡での積雪表面粗度計測結果. ◆：密度・含水率ともに大きい湿雪，■：密度が大きく含水率が小さい乾雪，●：密度・含水率ともに小さい新雪を表す.

雪含水率，密度，粒径等)の変化に依存していることが予想される. そこで2月の連続した10日間，長岡技術科学大学構内において積雪表層断面観測と粗度計測を1日に朝夕2回，2方向ずつ行った.

図-4はこの結果を表したもので，3つの積雪タイプ(◆：積雪密度・含水率ともに大きい湿雪，■：密度が大きく含水率が小さい乾雪，●：密度・含水率ともに小さい新雪)に分類し，それぞれ2回分(4点ずつ)の計測結果を表したものであり，新雪(●)はおおよそ $\sigma = 0.15$ cm， $l = 1.0$ cm付近，乾雪(■)も同程度の値から北海道と富山の中間程度の分布を示していることが分かる. したがって，分布として見る場合は新雪と乾雪が同じ分布特性を持っているといえる. 湿雪(◆)は $\sigma = 0.20$ cm， $l = 7.0$ cm付近の1点を除き，北海道の分布よりも少し上に位置するような分布となった. よって，新雪や乾雪では降雪後の雪粒子が均一に積もって凹凸を形成しているために粗度の値が同程度に分布しているが，表面が融解して含水率が高くなると，この雪粒子で形成されていた凹凸が滑らかになるものと考えられる. 湿雪で σ ， l が大きくなった1点は，マイクロ波波長よりも大きいスケールの粗度で積雪表面のうねりの効果が入っていることが分かった. この結果から，積雪表面粗度の変化は積雪密度，含水率で表せるような積雪パラメータによってその分布を分類することが可能であると考えられる.

以上の検討から土壌，積雪表面ともに二つの表面粗度パラメータはおおよそ正の傾きを持つ分布になっていることが分かった. これは小さい σ の相関長さ(l)は短く，大きい σ の l は長いということである. したがって，式(4)から(6)で表されるような $\sigma - l$ 関係を仮定することで，式(1)における後方散乱係数の未知数の一つ減らすことできる. また，積雪表面粗度の値は土壌のそれに比較して特に σ が小さく， $\sigma - l$ の分布は積雪表層密度や含水率など積雪パラメータと相関があると思われる.

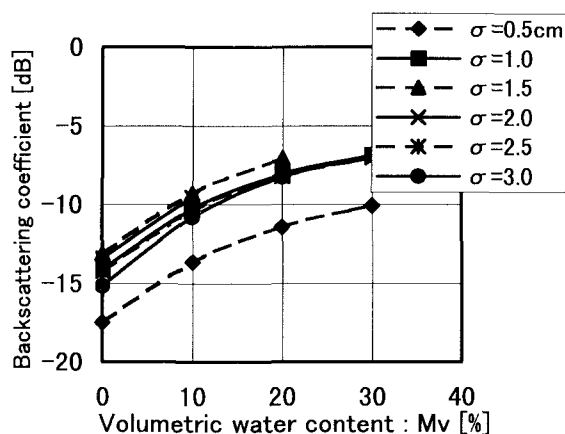


図-5 土壌面におけるマイクロ波応答特性. C-band, HH偏波, 入射角33度でのシミュレーション結果を表す.

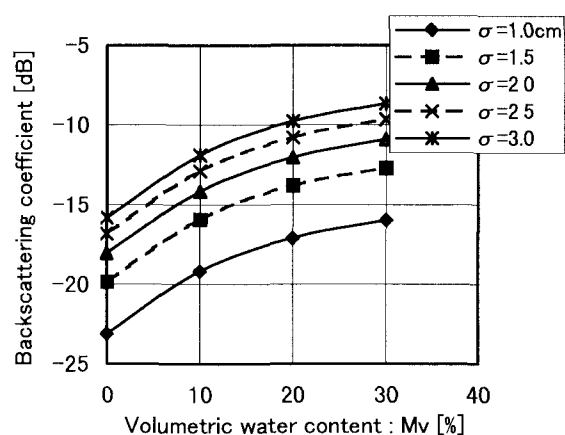


図-6 土壌面におけるマイクロ波応答特性. L-band, HH偏波, 入射角35度でのシミュレーション結果を表す.

3. 土壌面でのマイクロ波応答特性

前章で得られた知見をもとに、次に散乱モデルを用いたシミュレーションから各パラメータの変化に対する後方散乱係数の応答特性と、あるSARシステムを想定した未知数の推定アルゴリズムについて述べる。

(1) パラメータの変化に対する応答特性

図-5, 6は土粒子の体積率(S_v)を0.5, 粒径(d)を0.5mm, 式(5)で表される $\sigma-l$ 関係を持つ土壌面を仮定し、横軸が土壌体積含水率(M_v), 縦軸が後方散乱係数の関係を表したもので、 $\sigma(l)$ を変数としている。図-5がカナダの人工衛星RADARSAT搭載のSARシステムを参考にC-band, HH偏波, 入射角33度, 図-6が日本のJERS-1搭載のSARを参考にL-band, HH偏波, 入射角35度としている。図-5からC-bandでは σ が2.0cm以上になると粗度が大きくなっているにも関わらず、後方散乱係数が小さくなっていることが分かる。これは波長約5.7cmのC-bandでは粗度の影響が大き過ぎ、モデルが表現できていないと考えられる。一方、より波長の長いL-bandでは粗

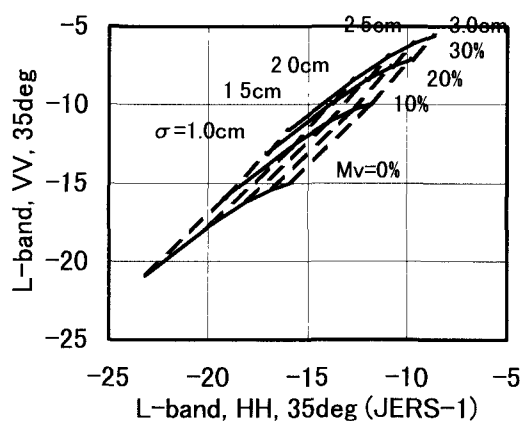


図-7 L-band, HH-VV偏波による土壌水分-粗度の同時推定. 実線: 体積含水率, 破線: 土壌表面粗度の違いを表す.

度の増大に対して後方散乱係数も大きくなっており、比較的リーズナブルな結果といえる。

(2) 複数のSARによる土壌水分-粗度推定の手法

そこで複数のSARシステムの組み合わせを想定して土壌水分、表面粗度の同時推定アルゴリズムを検討する。既往の研究でも同様に、複数のSARシステムを想定した粗度パラメータもしくは土壌水分の推定手法として複数の入射角による方法⁵⁾、異なる周波数による方法⁶⁾などが考えられている。また一つのSARシステムにより特定の条件下、例えば飽和含水率が既知で降雨時の後方散乱係数が得られればこの値から土壌表面粗度を推定し、推定された粗度と任意時に得られた後方散乱係数からその時の土壌水分を推定するアルゴリズムも提案されている⁷⁾が、いずれの手法も現在のところ実用に至っていない。

ここで示す土壌水分、土壌表面粗度の同時推定手法は、異なる偏波の組み合わせを想定したものである。図-7は横軸がL-bandでHH偏波、縦軸が現在の衛星搭載SARではデータが得られないL-bandでVV偏波を想定した等含水率(0~30%まで10%毎) - 等表面粗度(式(5)を導入した σ を1~3cmまで0.5cm毎)の曲線群を表したものである。可視センサデータなどから粗度分布を分類した上で、図-7から想定したSARシステムによりほぼ同時に得られた後方散乱係数の交点を内挿することで二つの未知数の同時推定が可能である。L-bandでVV偏波の後方散乱係数は、2003年に日本から打ち上げ予定の人工衛星ALOSに搭載のPALSAR(Phased Array type L-band SAR)で計測される。

4. 積雪面でのマイクロ波応答特性

(1) パラメータの変化に対する応答特性

次に積雪に関する検討を行う。積雪面を対象とした場合、媒体構成要素である積雪密度(ρ)や粒径(d)といった積雪パラメータの時間的な変化が激しいため、土壌

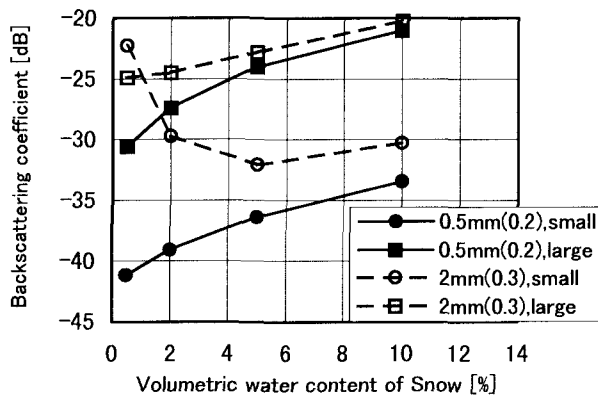


図-8 積雪面におけるマイクロ波応答特性。C-band, HH偏波, 入射角33度でのシミュレーション結果を表す。

面の場合とは異なり常に一定と仮定することができないが、密度と粒径は完全に独立変数とは考えにくい。したがって、密度は粒径の関数と仮定し、また2. (3) の検討からある積雪状態での $\sigma - l$ 関係を決めることが可能とすれば、未知数は積雪含水率 (Mv)、 $d(\rho)$ と $\sigma(l)$ の3つとなる。そこで、この3つの未知数の変化が後方散乱に寄与する効果について検討する。図-8はC-band, HH偏波, 入射角33度を想定し、横軸が積雪含水率、縦軸が後方散乱係数の関係を表したものである。積雪密度を粒径ごとに一定として粒径0.5mmに対して密度0.2(実線)、粒径2.0mmに対して密度0.3(破線)の2種類、表面粗度に図-3中の北海道での観測値を近似した $\sigma - l$ 関係から、 $\sigma - l$ の組み合わせを0.05 - 0.74(small), 0.25 - 3.1(large) (単位はcm) の2種類についてのシミュレーション結果を示したものである。図-8で含水率が小さい場合、粒径が大きいほど後方散乱係数も大きいため積雪層内部での体積散乱の効果が含まれていると考えられるが、含水率が大きくなるにつれ積雪パラメータの異なる2本の曲線が近づくため、後方散乱係数は表面粗度の大きさに依存していることが分かる。含水率10%で同じ積雪パラメータでも、粗度 σ が0.2cm (l が2.36cm) だけわずかに変わるだけで後方散乱係数は大きく変わっていることから、積雪表面粗度は値が小さいながらも、後方散乱への寄与は大きいということが分かる。

(2) 複数のSARによる積雪情報推定手法の開発

以上の検討を踏まえ、次に Mv 、 $d(\rho)$ 、 $\sigma(l)$ の3つの未知数を3つの異なるSARシステムによる同時観測を想定し、その推定可能性について検討する。まず、現在稼動しているSARシステムパラメータを参考にC-band, HH偏波(以下、C-HHと記す)、VV偏波(同、C-VV)とL-bandのHH偏波(同、L-HH)のライク偏波3つの組み合わせで検討する。なお、入射角の違いは考慮しないものとしてC-bandは33度、L-bandは35度について考える。図-9は横軸をC-VV、縦軸をC-HHについて含水率を2, 5, 10%の3種類、粗度を前述の2種類に0.15-1.92(middle)、粒径(密度)を前述の2種類に1.0mm(0.3), 3.0mm(0.4)を加えて合計36個の変数で求めた後方散乱係数の関係を3次元でプロッ

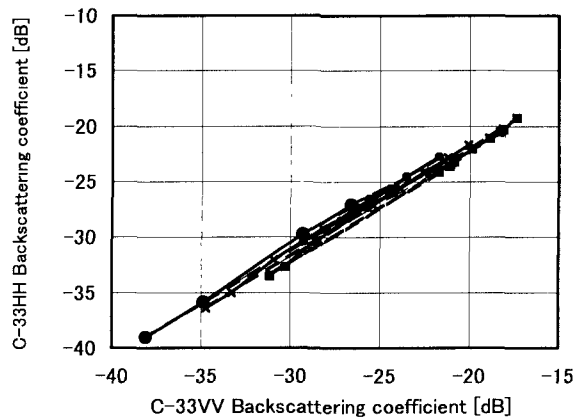


図-9 C-VV偏波とC-HH偏波による未知数推定可能な範囲。

表-1におけるSAR組み合わせ番号1による結果を表す。

表-1 6つのSARシステムから3つを選ぶ組み合わせの一覧。

番号	組み合わせ	番号	組み合わせ
1	C-HH/C-VV/L-HH	11	C-HH/L-VV/L-VH
2	C-HH/C-VV/L-VV	12	C-VV/C-VH/L-HH
3	C-HH/L-HH/L-VV	13	C-VV/C-VH/L-VV
4	C-VV/L-HH/L-VV	14	C-VV/C-VH/L-VH
5	C-HH/C-VV/C-VH	15	C-VV/L-HH/L-VH
6	C-HH/C-VV/L-VH	16	C-VV/L-VV/L-VH
7	C-HH/C-VH/L-HH	17	C-VH/L-HH/L-VV
8	C-HH/C-VH/L-VV	18	C-VH/L-HH/L-VH
9	C-HH/C-VH/L-VH	19	C-VH/L-VV/L-VH
10	C-HH/L-HH/L-VH	20	L-HH/L-VV/L-VH

トした等含水率、等表面粗度等積雪パラメータの曲線群を示したものである。もちろんL-HHの値を考慮する必要はあるが、図-9はほぼ直線に固まっており、想定したC-HH/C-VVの後方散乱係数が同時に得られたとしても2変数を分離して推定することは極めて困難と思われる。

そこで、現在はデータが得られないがL-bandのVV偏波(以下、L-VVと記す)、クロス偏波として両周波数におけるVH偏波(同、C-VH/L-VH)を加え、6つのSARシステムから3つを選ぶ合計20通りの組み合わせから、どの組み合わせによる同時観測が積雪パラメータの推定に適しているかを検討する。表-1は20通りのSARシステムの組み合わせをまとめたもので、表中番号は図-10の横軸の番号と対応している。図-9の組み合わせは番号1に相当する。最適なシステムの組み合わせとは、図-9の結果からも分かるように、各パラメータの変化に対する後方散乱係数のレンジが広いことが目安となる。そこで、各組み合わせについて図-9と同様に36個の変数に対して後方散乱係数の3次元プロットを作成し、各組み合わせごとに36点の中で2点間の距離の最小値と、最小値から順に1割分の平均値を求める。すなわち、1つの組み合わせについて ${}_{36}C_2 = 630$ 個の距離の最小値と、後方散乱係数のばらつきを考慮して最小から63個までの平均値を計算し、両者の和が最大となるシステムの組み合わせが、想定したパラメータの範囲で未知数の推定に最も適していると考

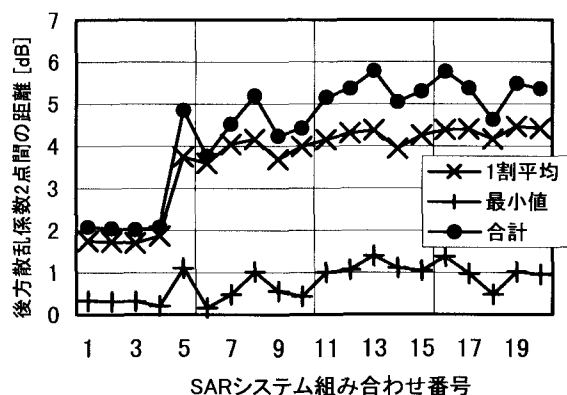


図-10 3システムの組み合わせに関する評価結果。×：最小1割の平均値，＋：最小値，●：両者の合計を表す。

える。図-10は最適システム組み合わせの評価結果を示したもので横軸がシステム組み合わせ番号、縦軸が2点間距離を表す。この結果から、クロス偏波を組み合わせた番号13のSARシステムの同時観測が積雪パラメータ推定に適していると考えられる。図-11は組み合わせ番号13のうち横軸がC-VV、縦軸がC-VIIの後方散乱係数を表し、図-9と同様の関係を表したものである。図-9と比較して明らかに推定可能なレンジが広がっていることが分かる。

この結果、想定したシステムで同時に後方散乱係数が得られれば、その交点を内挿することで3つの未知数の同時推定が可能である。C-bandのクロス偏波後方散乱係数は、1999年ヨーロッパから打ち上げ予定のENVISAT搭載ASAR(Advanced SAR)で計測できる予定である。

5. 結論

本研究では、衛星搭載SARによる土壌水分、積雪情報推定手法の開発を目的として、現地観測にもとづく地表面粗度の分布特性と、散乱モデルを用いたマイクロ波応答特性および未知数推定手法の開発を行った。粗度に関する検討から土壌、積雪表面ともに二つの表面粗度パラメータの分布特性が明らかになり、今後、例えば可視センサデータなどから土地被覆や土地利用状態を推定することができれば、マイクロ波散乱に寄与する粗度の分布特性を推定することができる。また、粗度に関する得られた知見を用いて、各パラメータの変化が後方散乱係数へ与える効果を検討し、さらに偏波特性を用いた未知数推定手法の一例として、2偏波システム同時観測による土壌水分-土壌表面粗度、クロス偏波を加えた3システム同時観測による積雪含水率-積雪表面粗度-積雪パラメータ同時推定の可能性を示した。ただし、本研究では積雪の検討において、主に湿雪を対象と考え積雪深に関する議論は全く行っていない。これは未知数を一つ増やすことになるため、今後さらに検討の必要がある。

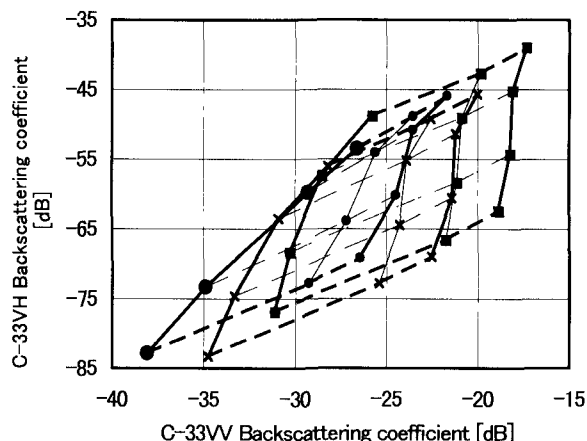


図-11 SAR組み合わせ番号13による結果。入射角33度、C-band、VV偏波とC-band、VH偏波の関係を表す。

謝辞：本研究は文部省科学研究費、国際学術共同研究、重点領域研究「衛星計測」と、文部省国際共同研究等経費「GAME」による研究成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Yasunari, T., Kitoh A. and T. Tokioka T.: Local and remote response to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.69, pp.473-487, 1991.
- 2) Fung, A.K.: *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, pp.49-73, 1994.
- 3) 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.
- 4) Ulaby, F.T., Moore R.K. and Fung A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive*, vol.II, Addison-Wesley Publishing Comp.,Inc., pp.816-991, 1981.
- 5) 仲江川敏之, 三枝修平, 池田聡司, 虫明功臣, 小池雅洋, 沖大幹：マイクロ波散乱計による土壌水分計測のための多入射角観測による地表面粗度の逆推定に関する検討, 水工学論文集, 第41巻, pp.927-932, 1997.
- 6) 立川康人, 片岡武, 椎葉充晴, 高棹琢馬：衛星SARデータとマイクロ波表面散乱機構の理論モデルを用いた地表面粗度パラメータの抽出, 水工学論文集, 第41巻, pp.933-938, 1997.
- 7) 重原俊男, 小池俊雄, 田殿武雄, Jiancheng Shi：地表面粗度特性を考慮したSARによる地表面土壌水分推定アルゴリズムの提案, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp.154-155, 1997.

(1998.9.30受付)