

数値散乱モデルと多偏波航空機SARを用いた 土壌水分・地表面粗度推定に関する検討

Study for estimating surface soil moisture and roughness parameters
using a numerical scattering model and polarimetric airborne SAR data

田殿 武雄¹・ムハタル チョン²・若林 裕之³・島田 政信³・

小林 達治⁴・Jiancheng SHI⁵

Takeo TADONO, Muhtar QONG, Hiroyuki WAKABAYASHI, Masanobu SHIMADA,
Tatsuharu KOBAYASHI, 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 非会員 博(理) 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)

³ 非会員 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)

⁴ 非会員 博(理) 郵政省通信総合研究所 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

⁵ Ph.D., Inst. for Computational Earth System Science, Univ. of California, Santa Barbara, USA

The goal of this study is to estimate the surface soil moisture and surface roughness using polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) data. In this study, a preliminary analysis for approaching this objective was conducted based on a sensitivity analysis of surface parameters. A numerical scattering model was used, and the results were compared using only like-polarized backscattering coefficients obtained from the data of an experiment conducted simultaneously with an airborne SAR. The surface correlation function was considered in this analysis. Because the problem is site-specific and depends upon the measurement accuracy of both the ground truth data and the SAR system including speckle noise, as well as the model uncertainty, the comparison results did not agree well with measured and inferred values of both the soil moisture and surface roughness. In particular, the moisture was underestimated and the roughness was overestimated.

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

1. はじめに

近年, 人工衛星に搭載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) を用いて, 広域的かつ高い空間分解能で陸域地表面の土壌水分量を定量的に推定しようという研究が進められているが, SARから得られる後方散乱係数(σ_{pp}^0 , ここで下付き p, q は送信偏波, 受信偏波を表す)は水分量に依存する比誘電率だけでなく地表面粗度や植生などの影響を複雑に受けるため, 普遍的かつ決定的な手法の開発に至っていない¹⁾. これは, 現在までに運用されている衛星搭載型SARは, いずれも一つのセンサで1周波数, 1偏波による観測しかできないため, 時間変化の著しい多くの未知数に対して同時に得られる情報が少ないことが要因の一つであり, 後方散乱係数と土壌水分量の間に定性的な依存性を見出し実験的な関係式を適用したり^{2), 3)},

何らかの仮定や別の情報, 知見を組合わせてアルゴリズムの開発が行われてきた⁴⁾. また, 衛星の回帰日数が長いため一つのSARシステムによる同一地点の観測頻度は低く, SARから推定された物理量を定常的に利用することも難しい状況である.

しかし, 2000年11月ヨーロッパから打上げ予定の人工衛星ENVISAT-1に搭載されるAdvanced SAR(ASAR)はC-bandで水平偏波送信-水平偏波受信(以後, HHと記す)/垂直偏波送信-垂直偏波受信(同, VV), もしくは水平偏波送信-垂直偏波受信(同, HV)/HH, 垂直偏波送信-水平偏波受信(同, VH)/VVのいずれかの組合わせによる同時観測モードが, また2002年8月日本から打上げ予定のAdvanced Land Observing Satellite(ALOS)に搭載されるPhased Array type L-band SAR(PALSAR)はL-bandで, 実験モードながらHH/HV/VH/VVの4偏波同時観測が可能である. またどちらも一回の観測幅が300km以上で観測可能なScanSARモードが用意され, これまでに比べて同一

地点の観測頻度が向上することが期待される。

多偏波同時観測による土壌水分推定に関する研究として、例えばOh *et al.* (1992)⁵⁾は地上で後方散乱係数が計測できるマイクロ波散乱計を用いた実験からco-polarized ratio($\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$, ここで下付き h, v は水平, 垂直偏波を表す), cross-polarized ratio($\sigma_{hv}^0/\sigma_{vh}^0$)から裸地における土壌水分, 地表面粗度を推定する経験的なモデルを開発した。また, Dubois *et al.* (1995)⁶⁾は1.5から11GHzまでの $\sigma_{hh}^0, \sigma_{vv}^0$ だけを用いた裸地土壌水分, 地表面粗度推定の経験的なモデルを開発し, これを1994年スペースシャトルに搭載されたSARによるShuttle Imaging Radar-C(SIR-C)ミッション, 同時期に行われたAirborne SAR(AIRSAR)それぞれのL-band多偏波観測データに適用した結果, 現地観測と良好な一致を示した。さらに, Hajnsek *et al.* (1999)⁷⁾は上述の二つの経験的なモデルをドイツ宇宙センターのL-band航空機SAR(E-SAR)データに適用したが, モデルが適用できる妥当な画素数は全体の約56%に留まり, 両モデルで推定された土壌水分は過少評価, 地表面粗度は過大評価という結果になった。日本でも三枝ら(1997)⁸⁾はOh *et al.* (1992)のモデルをパラメータも変えずにC-band散乱計データに適用したが, 粗度が大きくなると良い一致が見られなかった。

一方で, マイクロ波散乱理論にもとづく散乱モデルの発展が見られ, 例えばこれまでの古典的な表面散乱モデルであるSmall perturbation等⁹⁾と比較して地表面粗度に対するモデルの適用条件が広いIntegral Equation Method(IEM)モデルが開発された^{10), 11)}。Shi *et al.* (1997)¹²⁾は上述の二つの経験的なモデルは表面相関関数に関する説明がなされず, さらに使用された観測データが限られていること, テストサイト固有の問題が含まれることを指摘し, そこで1回散乱IEMモデルを用いた回帰分析を通して土壌水分, 地表面粗度推定アルゴリズムを開発した。これをL-bandのSIR-C, AIRSARデータに適用し, 推定値と観測値間のrms誤差が土壌水分については3.4%, 粗度については1.9dBという良好な結果を得た。

本研究では, このような背景のもと多偏波SARデータによる土壌水分推定に関する初期的な検討として, マイクロ波散乱理論にもとづく散乱モデルのシミュレーションからまず土壌水分, 粗度などの地表面パラメータが偏波ごとの後方散乱係数に寄与する感度解析を行った。さらに, 郵政省通信総合研究所(CRL)と宇宙開発事業団(NASDA)が共同で開発した航空機搭載型のPolarimetric and Interferometric SAR(PI-SAR)との同期観測実験から, 特に表面相関関数に関する検討を加えた上で, モデルシミュレーションとPI-SARデータの比較を行いこの可能性について検討した。

2. 散乱モデルと地表面での応答特性

(1) 散乱プロセスと散乱モデル

一般に, 土壌面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システムで決まるパラメータで, 使用するマイクロ波の波長, 送信偏波, 受信偏波, 入射角である。 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 は比誘電率であり土壌面を対象とした場合, 土壌体積含水率(M_v)に大きく依存する。 S_v, d は媒体を構成する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未知数の関数であり, 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と言える。

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項と体積散乱項の和として表しており, 表面散乱項には1回散乱を表すIEMモデルを導入している。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¹³⁾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を求めているが, 式(2)で表されるような l に依存した表面相関関数の評価を行う必要がある。

$$\rho(\xi) = \exp[-(\xi/l)^n] \quad (2)$$

ここで, $\rho(\xi)$ は一般的な表面相関関数, 乗数 $n=1$ のとき指数相関関数, $n=2$ のときガウス相関関数が仮定できる^{11), 12)}。体積散乱項には放射伝達理論にもとづく一次近似の解法¹¹⁾を導入し, また比誘電率(ϵ_r)と土壌体積含水率(M_v)の変換にはDobsonらにより開発されたsemi-empirical model¹⁴⁾を使用した。なお, 本研究で土質は一般的な砂質土を仮定している。

一般に土壌体積含水率が大きい場合, 照射されたマイクロ波は ϵ_r が大きくなるため土壌表面でのフレネルの反射係数が大きくなり, 結果的に土壌媒体内部に侵入するマイクロ波の強度は弱くなるため, 相対的に体積散乱の効果は小さくなり, 後方散乱は表面散乱の効果が卓越することになる。しかし土壌が乾いている場合, 媒体内部に侵入するマイクロ波の強度が大きくなるため, 相対的に体積散乱の効果も大きくなると考えられる。この効果を確認するために, 散乱モデルを用いたシミュレーションを行った。図-1は $\lambda=1.27\text{GHz}$ (L-band), $\theta_s=40^\circ$, $\sigma=1.4\text{cm}$, $l=15\text{cm}$, 指数相関関数を仮定し, 横軸が M_v , 縦軸が後方散乱係数の関係を表したもので, それぞれ $\times$ と $+$ は表面散乱のみを考慮した場合の σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 , 実線と破線は表面散乱と体積散乱両方を考慮した場合の σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 を比較したものである。図-1から偏波ごとに M_v がおおよそ4%以上になると表面散乱のみ, 表面+体積散乱のいずれも曲線がほぼ重なっており違いがないことが分かるが, 含水率がそれ以下になると両値に違いが現れ,

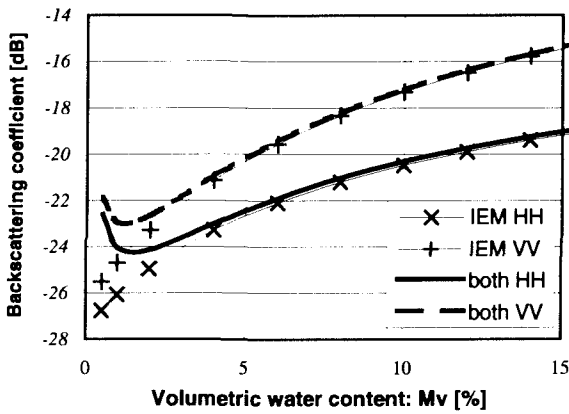


図-1 表面散乱のみと表面、体積散乱両方を考慮した場合の散乱モデルによる後方散乱係数の比較。×と+はIEMモデルによる σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 、実線と破線はIEMと体積散乱による σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 。周波数1.27GHz、入射角 40° 、 $\sigma=1.4\text{cm}$ 、 $l=15\text{cm}$ 、指数相関関数を仮定。

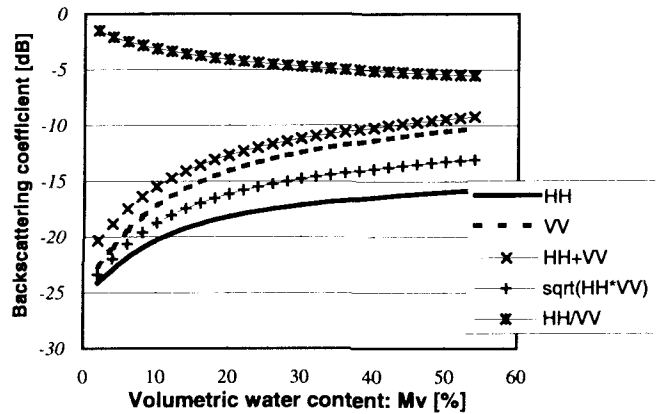


図-2 数値計算による各偏波状態における後方散乱係数の土壌水分量依存性。それぞれ σ_{hh}^0 (実線)、 σ_{vv}^0 (破線)、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ (×)、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ (+)、 $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (*)の偏波状態を表す。入力パラメータは図-1と同様。

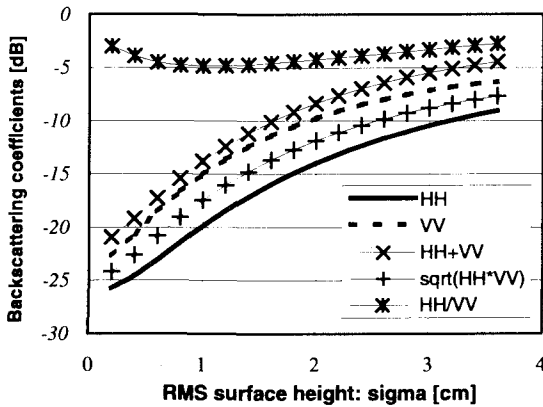


図-3 数値計算による各偏波状態における後方散乱係数のrms表面高さ依存性。それぞれ σ_{hh}^0 (実線)、 σ_{vv}^0 (破線)、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ (×)、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ (+)、 $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (*)の偏波状態を表す。 $Mv=30\%$ 、他の入力パラメータは図-1と同様。

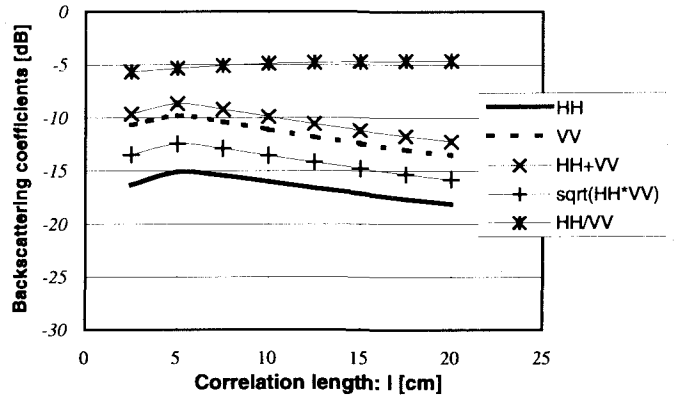


図-4 数値計算による各偏波状態における後方散乱係数の相関長さ依存性。それぞれ σ_{hh}^0 (実線)、 σ_{vv}^0 (破線)、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ (×)、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ (+)、 $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (*)の偏波状態を表す。 $\sigma=1.4\text{cm}$ 、他の入力パラメータは図-3と同様。

$Mv=0.5\%$ になると約4dBの差があることが分かる。この検討から本研究では、1回散乱IEMと一次近似の体積散乱効果を考慮した散乱モデルを使用して以下の検討を進めていく。

(2) 散乱モデルによる感度解析

次に、散乱モデルを用いて各地表面パラメータの変化が後方散乱係数に寄与する効果について、偏波ごと、また σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 の演算による偏波状態の組み合わせごとに調べた。この感度解析は多偏波SARデータから土壌水分推定アルゴリズムを開発する際、土壌水分の変化に対してなるべく感度が大きく、粗度の変化に対してなるべく感度の小さい、かつなるべく後方散乱係数のレベルが高い偏波の組み合わせを見付けるための参考とするものである。図-2から図-4はこの結果をまとめたもので、いずれも

$\lambda=1.27\text{GHz}$ 、 $\theta_i=40^\circ$ 、指数相関関数を仮定しており、縦軸は後方散乱係数(単位 dB)、横軸はそれぞれ図-2が Mv 、図-3が σ 、図-4が l を変数とした場合について、 σ_{hh}^0 (実線)、 σ_{vv}^0 (破線)、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ (×)、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ (+)、 $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (*)の関係を表したものである。各パラメータは裸地における現実的な値を使用している。

図-2では $\sigma=1.4\text{cm}$ 、 $l=15\text{cm}$ としており、 Mv の変化に対して σ_{hh}^0 、 σ_{vv}^0 ともに非線形に変化しており、 σ_{hh}^0 の方がわずかに早く飽和に達することが分かる。 Mv が2~50%に変化する間にそれぞれ σ_{hh}^0 では約8dB、 σ_{vv}^0 では約12dB、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ では約11dB、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ では約10dBのダイナミックレンジを持つ。図-3では $l=15\text{cm}$ 、 $Mv=30\%$ の湿った土壌を仮定しており、 σ が0.2~3.6cmの変化に対して σ_{hh}^0 、 $\sigma_{hh}^0 + \sigma_{vv}^0$ 、 $\sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$ ともに約17dB、 σ_{vv}^0 は約

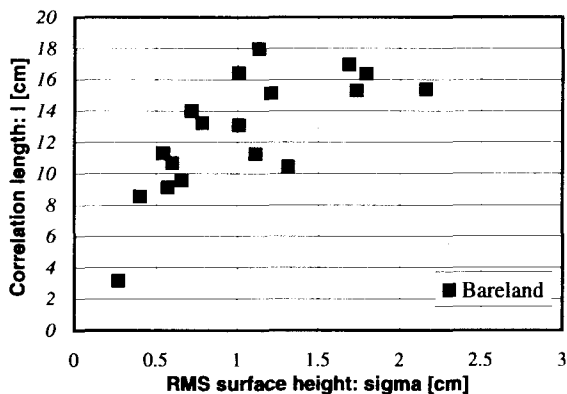


図-5 地表面粗度計測結果のまとめ。横軸は σ 、縦軸は l の関係を表す。

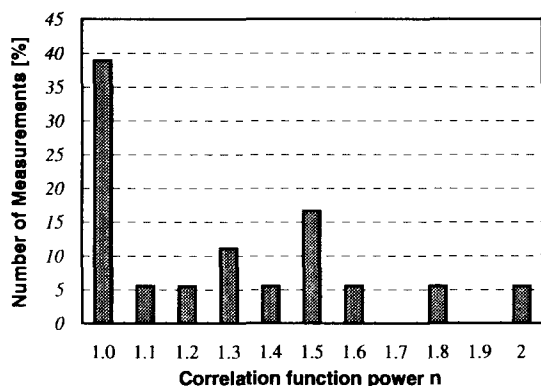


図-7 表面相関関数のフィッティング結果のまとめ。観測から得られた18プロファイル全てについて行い、乗数 n の頻度分布として表す。

16dBのダイナミックレンジを持つ。したがって、いずれの偏波状態についても M_v 、 σ の変化に対して後方散乱係数の感度は高いことが分かる。逆に、図-4から l が2.5～20cmに変化する間に $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$ のダイナミックレンジは約1dB、その他の偏波状態については約3dBであり、前述の M_v 、 σ の変化と比較して非常に感度が低いことが分かる。以上の検討から、 l の違いが後方散乱係数に寄与する効果はそれほど小さくなく、特に $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$ では1dB以下であることが分かった。

3. 観測結果との比較

(1) PI-SAR同期観測実験概要

CRL/NASDA航空機SAR(PI-SAR)との同期観測実験は、1999年7月14日北海道苫小牧市を中心に実施された。本観測の主目的は、コーナーリフレクターを用いたPI-SAR校正実験¹⁵⁾と、PI-SARによる植生観測であり、地上観測は北海道大学農学部所有の苫小牧演習林およびこの西北に位置する国有林一帯で行った。土壌水分観測はパス内の裸地および短い植生に覆われた3ヶ所にサイトを設け、

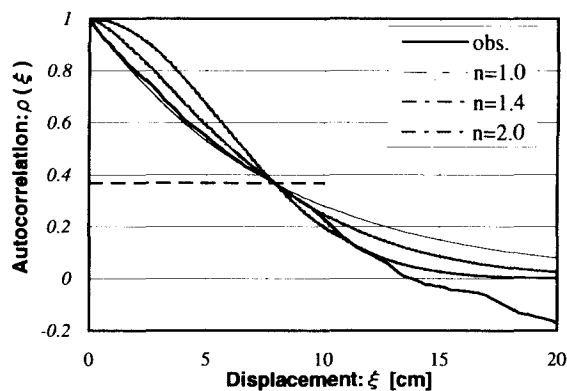


図-6 表面相関関数のフィッティングの一例。観測値(実線)に式(1)の乗数 $n=1.0, 1.4, 2.0$ (一点鎖線)と変化させた。

1ヶ所あたり約10m間隔で9測点を選点の上、Time-Domain Reflectometry(TDR)法(1測点あたり3回)および100ccサンプラーによる炉乾法での土壌水分計測、および幅80cmの間を2mm間隔で地表面凹凸のプロファイルを計測できる串型粗度計による地表面粗度観測¹⁶⁾(同、2回)等を実施した。以下の検討では主に、演習林内の裸地1ヶ所において得られたデータを使用する。ただし、当日の天候は残念ながら大雨で、土壌水分検証実験として必ずしも適した状態であったとは言い難いことを付記しておく。

(2) 表面粗度パラメータと表面相関関数の評価

演習林内裸地において得られた合計18本の地表面凹凸プロファイルから、ディジタル化により表面高さのプロファイルを求め、それぞれについて二つの粗度パラメータである表面高さの標準偏差(σ)と表面相関長さ(l)を求めた¹⁷⁾。図-5は得られた粗度パラメータの結果をまとめたもので横軸が σ 、縦軸が l の関係を表している。また、得られた18プロファイル全てに対して最も適合した表面相関関数を求めるために、式(2)で表される一般的な表面相関関数のフィッティングを行った。図-6はこの一例を示したもので、実線が実測から得られた自己相関関数、一点鎖線がそれぞれ式(2)の乗数 n を1.0、1.4、2.0と変化させた場合を表す。この例では $n=1.0$ とした場合が最も観測値と一致することが分かる。図-7は得られた18プロファイル全てについて、 $n=1.0\sim 2.0$ まで0.1間隔で変化させ同様の検討を行い、その結果を n の頻度分布としてまとめたものである¹²⁾。図-7からこのテストサイトにおける表面相関関数は約67%が $n\leq 1.4$ で表される指数相関であることが分かった。

(3) 観測と計算による後方散乱係数の比較

次に散乱モデルの再現性を確認するために、観測から得られた M_v 、 σ 、 l それぞれのパラメータを散乱モデルに代入し計算した後方散乱係数と、PI-SAR観測から得られた後方散乱係数の比較を行った。図-8はこの結果を示した散布図で、横軸が各測点におけるPI-SARによる後方散乱係数、縦軸が測点ごとに平均した M_v と2回の粗

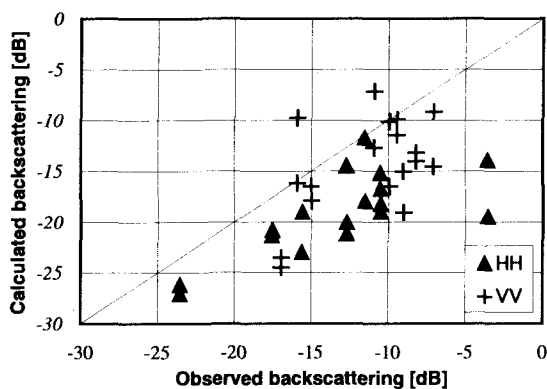


図-8 PI-SAR観測と散乱モデルの後方散乱係数の比較。横軸が観測値、縦軸が観測から得られた M_v , σ , l から求めた計算値。 σ_{hh}^0 (▲), σ_{vv}^0 (+)を表す。

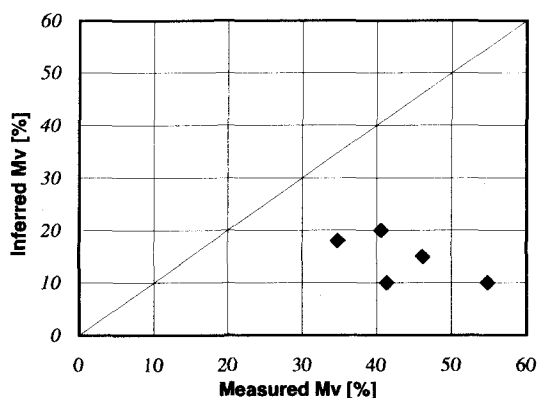


図-10 図-9から推定された含水率と観測値の比較。横軸が現地観測値、縦軸が推定値を表す。

度観測から得られた σ , l から計算した後方散乱係数の関係を表し、それぞれ▲が σ_{hh}^0 , +が σ_{vv}^0 を示す。図-8からいくつかの点は両値が一致していることが分かるが、特に σ_{hh}^0 はモデル計算結果が小さくなる傾向があることが確認できる。

4. 2偏波後方散乱係数の比較による未知数推定

以上の検討を踏まえて σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 の比較による単純な土壌水分、地表面粗度の推定を行った¹⁶⁾。これは観測から得られた後方散乱係数と散乱モデルによる計算値の比較だけで、どの程度未知数推定が可能かを確認するためのものである。本来なら観測された後方散乱係数から未知数を求める逆推定モデルを構築すべきであるが、逆推定アルゴリズムの単純化および計算機負荷軽減のため、現在のforwardプロセスを表現する散乱モデルのシミュレーションから逆推定のためのlookup tableを作成し、これと観測値の比較から未知数の推定を行う。

図-9はモデル計算から作成された、テストサイトを対

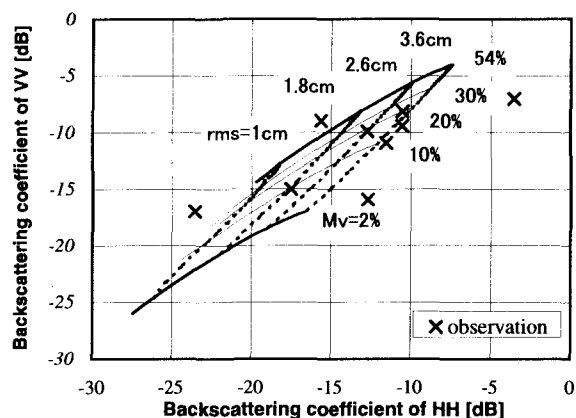


図-9 土壌含水率、地表面粗度推定のためのダイアグラム。横軸が σ_{hh}^0 , 縦軸が σ_{vv}^0 , それぞれモデル計算による等 M_v (実線), 等 σ (破線)の曲線群と観測値(x)を表す。 $\lambda = 1.27\text{GHz}$, $\theta_s = 38.9^\circ$, $l = 15\text{cm}$, 指数相関関数を仮定。

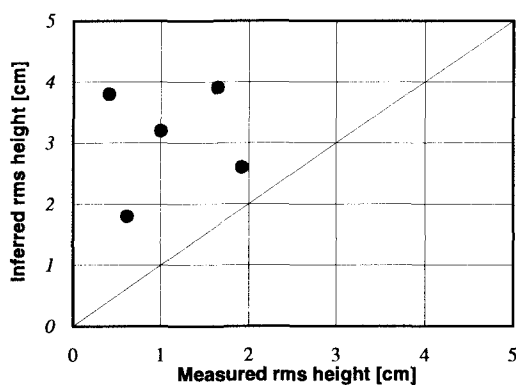


図-11 図-9から推定されたrms表面高さの観測値の比較。横軸が現地観測値、縦軸が推定値を表す。

象とした土壌水分、rms表面高さ推定のためのダイアグラムである。計算条件はテストサイトにおける入射角(θ_s)= 38.9° , 周波数(λ)= 1.27GHz , $l=15\text{cm}$, 3.(2)の検討から指数相関関数を仮定し, M_v は2~54%まで2%ごと, σ は0.2~3.6cmまで0.2cmごととし, 得られた結果から等含水率(実線), 等rms表面高さ(破線)の曲線を描いた。xは9測点のPI-SAR観測値を表す。図-9において理想的には観測値のプロットが曲線群の内部に入るはずであるが、図-8からも示唆されるように必ずしもモデルの再現性が良好ではないため、プロットの約半数は曲線群の外に位置した。さらに、図-9から未知数を推定できた5測点について M_v と σ それぞれの観測値との比較を図-10, 11に示す。図-10, 11ともに横軸が現地観測値、縦軸が図-9からの推定値の関係を表しているが、図-10から推定された M_v は完全に過小評価、図-11から σ は過大評価となっていることが分かる。推定できた画素数に関しても図-10, 11の結果も、1章で述べられたHajnsek *et al.* (1999)⁷⁾と同様の傾向となり、観測当日の天候および植生の影響が大きかったことが示唆される。

5. 結論

本研究では、多偏波SARデータによる土壌水分および地表面粗度推定に関する初期的な検討という位置付けで、散乱モデルのシミュレーションから土壌水分推定を想定した場合の体積散乱の効果について検討し、さらに各地表面パラメータの変化が後方散乱係数に寄与する効果を評価するために感度解析を行った。この結果、偏波ごとの後方散乱係数、また σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 の演算による偏波状態の組み合わせごとに含水率、rms表面高さおよび表面相関長さの応答特性が明らかになった。

次に、散乱モデル計算値と航空機搭載型多偏波SAR (PI-SAR)による観測値との比較を行った。特に、現地観測で得られた表面高さのプロファイルからIEMモデルで使用される表面相関関数の検討を加えた。観測された後方散乱係数と、観測で得られたパラメータから散乱モデルで計算された後方散乱係数を比較した結果、計算された σ_{hh}^0 が小さくなる傾向が確認できた。さらに、 σ_{hh}^0 と σ_{vv}^0 のみによる未知数推定ダイアグラムを作成し、観測値と比較したところ、約半数の画素についてのみ推定可能で、含水率は過少評価、粗度は過大評価という結果になった。これは、特に雨天時に実施した現地観測データの精度の問題、テストサイトに存在した植生の影響が大きいと考えられる。さらに、散乱モデルの再現性の問題、グラントレンジで2.5mという高空間分解能を持つPI-SARデータと現地観測点の位置合わせの問題、またスペクルノイズを含めたPI-SARデータの精度の問題が考えられる。今後、これらの問題点を考慮した上で多偏波SARによる土壌水分、地表面粗度推定のアルゴリズムを検討していくとともに、さらに精度の高い検証データの取得も試みたいと考えている。

謝辞：本研究における現地観測では北海道大学農学部日浦助教、若小牧演習林の奥山氏、農水省森林総合研究所沢田氏および三塚氏、また実験器材に関して東京大学生産技術研究所虫明研究室、長岡技術科学大学地球環境研究室各位のご協力を賜りました。さらにPI-SARデータ処理に関して郵政省通信総合研究所各位、(財)リモート・センシング技術センターの川田氏の多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Engman, E.T. and Chauhan, N.: Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing, *Remote Sensing Environ.*, Vol.51, No.1, pp.189-198, 1995.
- 2) Dobson, M.C. and Ulaby, F.T.: Active microwave soil moisture research, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.GE-24, pp.23-36, 1986.
- 3) Wang, J.R., Engman, E.T., Shiue, J.C., Rusek, M. and Steinmeier, C.: The SIR-B observations of microwave dependence on soil moisture, surface roughness, and vegetation covers, *IEEE Trans.*

Geosci. Remote Sensing, Vol.GE-24, pp.510-516, 1986.

- 4) 田殿武雄, 小池俊雄, Shi, J., Ding, Y., Chen, X., Wang, S. and Yang, M.: 地表面粗度の空間分布を考慮したSARによる凍土帯土壌水分の推定手法の開発, 水工学論文集, 第42巻, pp.103-108, 1998.
- 5) Oh, Y., Sarabandi, K. and Ulaby, F.T.: An empirical model and inversion technique for radar scattering from bare soil surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.30, pp.370-378, 1992.
- 6) Dubois, P.C., van Zyl, J.J. and Engman, E.T.: Measuring soil moisture with imaging radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.33, pp.915-926, 1995.
- 7) Hajnsek, I., Busche, T., Schmullius, C. and Ergenzinger, P.: Determination of hydrological parameters using Airborne-Radar data (DLR E-SAR), *IEEE IGARSS '99 Proceedings*, pp.1108-1110, 1999.
- 8) 三枝修平, 池田聡司, 仲江川敏之, 虫明功臣, 小池雅洋, 沖大幹: マイクロ波センサを用いた土壌水分量と地表面粗度の抽出 -そのII: 多偏波観測による推定-, 生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」, 第8巻, 東京大学生産技術研究所地球環境工学研究グループ, pp.110-116, 1997.
- 9) Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive*, Vol.II, Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., Chapter 12, pp.922-1033, 1982.
- 10) Fung, A.K., Li, Z. and Chen, K.S.: Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.30, pp.356-369, 1992.
- 11) Fung, A.K.: *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Norwood, MA: Artech House, pp.49-73, 1994.
- 12) Shi, J., Wang, J., Hsu, A.Y., O'Neill, P.E. and Engman, E.T.: Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol.35, pp.1254-1265, 1997.
- 13) Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive*, Vol.I, Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., Chapter 4, pp.186-255, 1981.
- 14) 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.
- 15) Wakabayashi, H., Kobayashi, T., Satake, M. and Uratsuka, S.: Airborne L-band SAR system: Characteristics and initial calibration results, *IEEE IGARSS '99 Proceedings*, pp.464-466, 1999.
- 16) 田殿武雄, 小池俊雄, and 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.
- 17) Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K.: *Microwave Remote Sensing. Active and Passive*, Vol.II, Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., Chapter 11, pp.816-921, 1982.

(1999. 9. 30受付)