

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

Inversive Technique of Surface Roughness Estimation Using
Multi-incident Angular Data by Microwave Scatterometer

仲江川 敏之*、三枝 修平†、池田 聡司‡

虫明 功臣*、小池 雅洋*、沖 大幹*

by Toshiyuki NAKAEGAWA, Shuhei SAEGUSA, Satoshi IKEDA,
Katumi MUSIAKE, Masahiro KOIKE and Taikan OKI

This paper explores the possibility of inversion technique of surface roughness estimation using multi-incident angular data by microwave scatterometer. We made field experiments to measure soil moisture, surface roughness and soil backscatter by C-band microwave scatterometer mounted on a car. Surface roughness observed 1 dimensionally is scattered widely even in a same land cover and we have to make more than eight observations to get the representative roughness. Algorithm of the inversion technique is developed based on the surface scattering model and surface roughnesses are estimated inversely. However the observed and estimated roughnesses are quite different each other and the latter one proves to be suitable for decision of relational curve for soil moisture-backscattering coefficients.

Keywords: microwave backscatter, surface roughness, soil moisture, multi-angular data, inversion technique

1 はじめに

マイクロ波後方散乱係数は表層土壌水分量と結び付けることが可能であり、マイクロ波散乱計搭載人工衛星から得られるデータを用いれば広域かつ同時期の表層土壌水分量を計測する手段たりえと考えられ、当研究室でも地上実験、衛星検証実験並びに理論的検討を行ってきた。後方散乱係数は土壌水分量以外にも地表面粗度の影響も極めて大きい。広域土壌水分量の情報を得るには地表面粗度の面的な情報も同時に得ることが不可欠である。マイクロ波レーダ搭載衛星 RADARSAT は入射角が可変であり、入射角を変化させることにより一つの土壌面に対し同時期に複数の情報を得ることができる。このデータを用いれば土壌水分量や地表面粗度といった複数の水文情報の推定に利用可能であると考えられる。

本稿では、実測した地表面粗度の代表性についてまず議論する。次に当研究室所有のマイクロ波センサによる後方散乱の多入射角観測を行ない、地表面粗度の推定を行なった結果について議論する。

2 既往の研究

能動型マイクロ波による土壌水分量観測に関して、Ulaby 等によって地上計測での先駆的な研究がなされて以来、航空機や人工衛星プラットフォームによる観測も実用化されるようになってきた。近年の研究動向については Engman 等 [1995] のレビューが詳しい。その中でも触れられているように、能動型マイクロ波散乱計では土壌水分のみならず地表面粗度にも大きな影響を受けるため、定量的な土壌水分観測については地表面粗度の影響を考慮しなければならない。Choudhury

*正会員 博士(工) 東京大学 生産技術研究所 〒106 港区六本木 7-22-1

†学生会員 東京大学 大学院 〒106 港区六本木 7-22-1

‡学生会員 千葉工業大学

et al.[1979] や Wang et al.[1980]、Oh et al.[1992] は粗度の影響を表す経験的な式を提案し、また物理光学分野で用いられていた散乱モデルのマイクロ波工学への適用と検証は Ulaby et al.[1986] によってなされている。

こうしたモデルを用いて土壌水分プロファイル [Njoku and Kong, 1977] や植生パラメータを後方散乱係数から逆推定する試み [Chauhan and Lang, 1989] が行なわれており、筆者等も地表面粗度の逆推定を試みている [沖ほか, 1995; 三枝ほか, 1996]。また立川ら [立川ほか, 1996] は多偏波による逆推定で観測値と推定値が一致していると報告している。

以上のように地表面粗度の逆推定に関する研究は既に試みられているが、多入射角観測による検討は未だなされていないのが現状である。以下では、多入射角観測実験並びに粗度の逆推定について述べる。

3 地上散乱実験

1996年7月、8月に東京大学生産技術研究所千葉実験所内の大気-土壌相互作用観測プロットで地上散乱実験が行なわれ、異なる土壌水分状態で計4回行なわれた。観測項目は後方散乱係数、土壌水分量、地表面粗度の3つである。また地表面粗度については、畝のある畑(千葉県農業試験場)、大きい畝のある耕地(千葉県農業機械化研修所)、グラウンド(明治大学菅田農場)でも地表面粗度を計測している。

土壌水分量と地表面粗度計測 千葉実験所の観測プロットは土壌種類は成田砂($\rho_B=1.19$)である。土壌水分量は50ccサンブラーによるサンプリングとTDR土壌水分計による計測をおこなった。また地表面粗度はレーザー式の変位計で0.01mm単位、間隔およそ3mm、長さおよそ110cmでレンジ方向に1次元で計測した。

後方散乱計測 観測に用いた散乱計システムは当研究室所有のC-バンドマイクロ波散乱計を用いた。周波数5.2(GHz)、偏波面HH(水平送信、水平受信)は固定で、入射角15、23、30、35°で計測した。このシステムを自動車に載せ、独立サンプルを取得するために1km/hrの速度で移動しながら1回の計測毎におよそ1200個のサンプリングを行なった。

4 地表面粗度の代表性

4.1 地表面散乱モデルと地表面粗度

Ulaby et al.[1986] がマイクロ波帯での適用性を試みた散乱モデルは周波数、入射角、偏波を始めとしたシステムパラメータと地表面状態を表す土壌水分量と地表面粗度によって表される。通常散乱理論モデルでは地表面粗度を2つのパラメータで特徴付けており、一つは表面高さの標準偏差(表面の凹凸の深さの指標:RMS Height σ)、もう一つは相関距離(表面の凹凸の密度の指標: Correlation Length l)である。

間隔 Δx で x_i における高さ z_i が得られた場合、 σ は

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N z_i^2 - N \bar{z}^2 \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

と表される。ここで N はサンプル数である。

また、相関長さ l は $x' = (j-1)\Delta x$ の間隔での基準化された自己相関関数

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

において $\rho(x')$ が $1/e$ に一致した時の x' の値をいう。相関距離は表面上の地点間の独立性を評価する指標となる。即ち、ある2地点が距離 l 以上離れているとその2地点は統計的に独立であると考えて良いことになる。

マイクロ波に対する粗度は計測する周波数によって異なるため、粗度を表す時は波数 k (単位:1/cm)を用いて絶対粗度($k\sigma, kl$)で示すことが多い。表1に周波数(波長)の違いによる波数を示した。1.275GHzがJ ERS-1、5.2GHzが車載型散乱計(E ERS-1は5.3GHzなので相対粗度と絶対粗度はほぼ同じとなる)、9.0GHzは比較のために載せたものである。

理論式はこの地表面粗度の大きさによって3つの散乱モデルがあり、各々の適用範囲は表2に示すように定められている。著者ら[1995]の結果によればリモートセンシング時に必要な土壌水分量-後方散乱係数曲線は粗度に対する感度が非常に高いので、精度の良い地表面粗度情報が必要となる。

表 1: マイクロ波帯の周波数とその波長、波数の関係。

周波数 f (GHz)	1.275	5.2	9.0
波長 λ (cm)	23.5	5.77	3.33
波数 k (1/cm)	0.267	1.089	1.886

表 2: 表面散乱モデルの地表面粗度に対する適用範囲。

Relatively Smooth	$kl > 6$	$l^2 > 2.76\sigma\lambda$	$m < 0.25$
Slightly Rough	$kl < 6$	$k\sigma < 0.3$	$m < 0.3$
Relatively Rough	$kl > 6$	$l^2 > 2.76\sigma\lambda$	$(2k\sigma \cos \theta)^2 > 10$

4.2 地表面粗度の分布範囲

図 1は 4 つの土地被覆で計測した時の地表面粗度を示している。グラウンドでは RMS 高さが小さいことや、耕うん直後の大きな凸凹のある畑では RMS 高さが大きいことが挙げられるが、比較的平らな耕地や畝のある畑では RMS 高さも相関距離も広範囲に分布している。このように地表面粗度は異なる土地被覆間では大きく異なりさらに、同一土地被覆でも地表面粗度はばらついている。

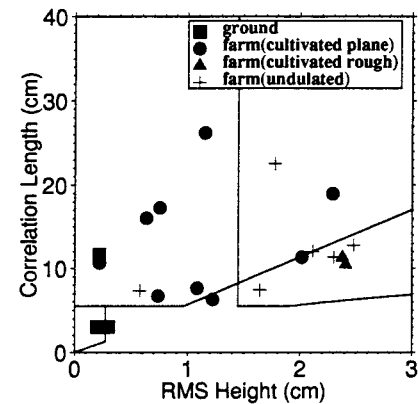


図 1: 各種土地被覆での地表面粗度分布範囲。

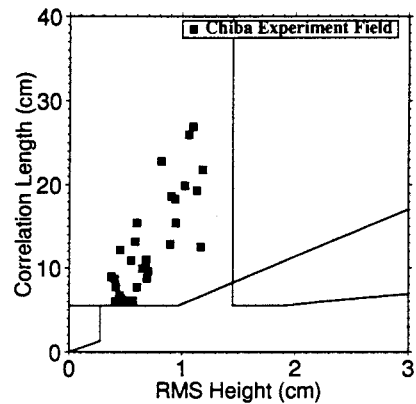


図 2: 同一観測サイト内での地表面粗度分布。東京大学千葉実験所観測プロット。

この同一地表土地被覆内での粗度のばらつきの大きさを調べるために、東京大学千葉実験所内の観測プロットで集中的に地表面粗度を観測した結果を図 2に示す。図中の各点はおよそ 30m×6m から任意の 30 地点を選び計測したものであり、一つのプロット内での粗度の分布を示したものである。このプロットは一度掘りかえした後に車で踏み固めているため平らなグラウンドの様になっている。この図では同一土地被覆内であっても地表面粗度が大きくばらついていることが分かる。

図 1と図 2では 1 測線のデータから算定された値であったために、ばらついた可能性がある。本来は凸凹が地表面でアジマス角と統計的に独立である場合のみ 1 次元化できるものであり、統計的に独立ということが成り立たないために生じているとも考えられる。

4.2.1 1 次元データとしての地表面粗度推定

1 回の測定では十分に粗度情報を計ることができない場合は複数の計測値を用いて検討する必要がある。ここでは 1 次元的な扱いで地表面粗度を推定する。

粗度パラメータ平均法 母集団 60 の計測データ全てを 1 次元で解析して得られた粗度パラメータから無作為に n 個を選んで平均を求めた時の変動係数を計算する。変動係数はそれぞれ 100 回の無作為抽出によって得られた平均値に対する値を示している。RMS 高さの大きいレンジ方向粗度は 8 個の平均で、変動係数が 0.1 以下になるが RMS 高さの小さいアジマス方向粗度は 20 個以上の平均でも変動係数が 0.1 以下にならなかった。相関長さについては斜め方向が 6 個、レンジ方向が 12 個アジマス方向では 20 個以上の平均を取らなければ変動係数が 0.1 以下にならなかった。このことは RMS 高さの大きい場合でも 8 測線以上で、粗度を計らなければならないことを示している。

1 次元結合法 上の例では求められた粗度を平均したが、この方法では無作為に選んだ n 個のデータを 1 次元方向に結合し、そのデータから粗度パラメータを求める。この方法の場合、同じ n 個の組み合わせでも順列によって粗度が異なることが考えられる。 n の値を変えながら変動係数を調べると、 n が大きくなると変動係数が小さくなる傾向は見られるものの、 n を 10 程度としても変動係数が 0.1 以下にはならず、代表的な地表面粗度を算定するには相応し方法とは言えない。

このように個々の測線上の地表面粗度の計測は容易であるが、領域を代表する値としての粗度を算定するには数多くの計測が必要であることが示された。ここで示した 2 つの手法では粗度パラメータ平均法の方が良い代表値推定法と言えるが、推定された粗度が真値であるかは 2 次元的な計測・解析と比較する必要がある。

5 地表面粗度の逆推定

上で述べた観測データを基に地表面状態の逆推定を行なう。既に述べたように、後方散乱係数を決定する地表面状態量は土壌水分量と地表面粗度を表す 2 つのパラメータであるので、計 3 つのパラメータとなる。従って 3 つの入射角で計測すれば 1 意に定まるが、ここでは簡単のために、土壌水分量は既知として、地表面粗度を表す 2 つのパラメータを逆推定する。

5.1 逆推定アルゴリズム

土壌水分量を既知とすると地表面粗度 (σ, l) は非線形二元連立方程式を解くことで求まる。ここでは後方散乱係数の粗度に対する感度や多重解の存在について明らかにするために図式的に解く。 $\sigma^\circ = \text{func.}(\sigma, l; M_v)$ を $\sigma-l$ 平面上に描いた場合、後方散乱係数の等値曲線群が求まる。この図を異なる入射角で描き、重ね合わせてできる交点から地表面粗度を逆推定する。

図式的な解法は次のような手順で求めることができる。

1. それぞれの入射角に対する地表面粗度-後方散乱係数等値線図を表面散乱モデルを用いて描く。
2. それぞれの観測値と同じ値の等値線を図上に書き込む (図 3 で Incident Angle = θ_1, θ_2 の Observed Value の線)。
3. 異なる入射角に対する地表面粗度-後方散乱係数等値線図を重ね合わせ、観測値の等値線同士の交点が逆推定された地表面粗度 (σ, l) となる (図 3 中の Incident Angle = θ_1, θ_2 の曲線の交点)。

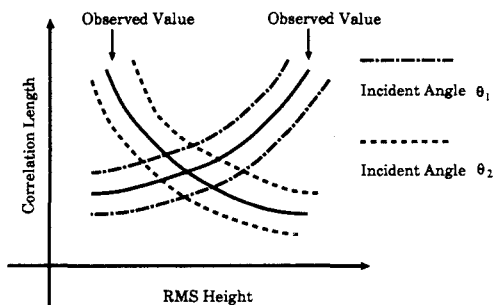


図 3: 等値線図への観測値の挿入。

5.2 推定された粗度と観測値の比較

上で述べた逆推定手順を踏んで地表面粗度を推定する。図 4 と図 5 に Small Perturbation Model による、土壌水分量が $0.051 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の時の入射角 15° と 35° の時の地表面粗度-等値線図を示す。両軸は波数 ($k=1.11$) の効果を除いた絶対粗度 (σ, l) で表示してある。これらの等値線図に後方散乱係数観測値をそれぞれの入射角について挿入すると、それぞれの値に対する (σ, l) の曲線が形成され、重ね合わせることによって求めた交点は $(\sigma, l) = (0.368, 2.85)$ である。同様に $15^\circ, 23^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ の中、2 組の入射角同士の組み合わせによっても各々交点を求めることができた (表 3)。

本来、様々な入射角の組合せに対しても同じ理論式を適用すれば、交点はただ 1 点に定まることが期待されるが、表 3 が示すように、大きくばらつくことが分かる。これら逆推定された粗度は図 2 に示した分布範囲には含まれるものの、第 4 章で議論した代表値とは大きく異なっている。従って、ここで得られた粗度が計測して得られる粗度を逆推定しているとは必ずしも言うことができない。

また、3 入射角で計測された後方散乱係数から土壌水分量も含めた逆推定を行なう場合、この結果から容易に推測できるように、逆推定された土壌水分量も地表面粗度も実際の値とは大きく異なってしまう。つまりこの実験結果では、理論モデルを用いた土壌水分量、地表面粗度の逆推定はできないという結論になる。

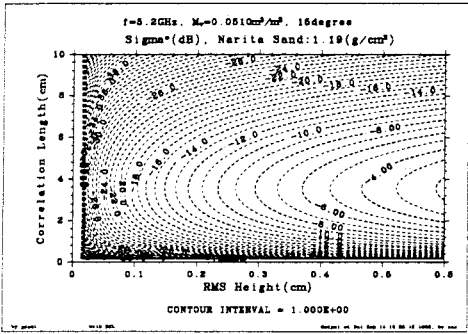


図 4: 地表面粗度に対する後方散乱係数。少し粗い面: 入射角 15°。土壌は成田砂で土壌水分量 0.051m³/m³。

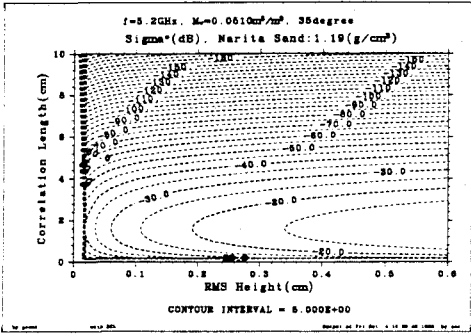


図 5: 地表面粗度に対する後方散乱係数。少し粗い面: 入射角 35°。土壌は成田砂で土壌水分量 0.051m³/m³。

表 3: 2 入射角による推定された地表面粗度、RMS 高さ σ と相関距離 l 。表中の PM は Perturbation Model (少し粗い面に対するモデル)、POM は Physical Optics Model (比較的滑らかな面に対するモデル) の領域で定まった解を示している。

理論モデル	入射角の組合せ	(σ, l)
PM	15°-23°	0.354, 3.70
PM	15°-30°	0.354, 3.50
PM	15°-35°	0.368, 2.85
PM	23°-30°	0.314, 3.30
PM	23°-35°	0.261, 2.35
POM	15°-23°	1.150, 11.00
POM	23°-35°	0.380, 3.60

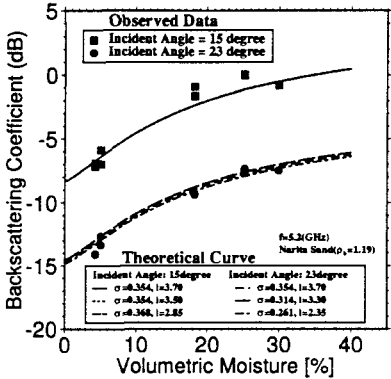


図 6: 逆推定された粗度を用いた土壌水分量-後方散乱係数曲線と実験によって得られた後方散乱係数。

6 推定された粗度における M_v と σ の関係

上で求めた地表面粗度を既知のものとして少し粗い面に対する Perturbation Model に代入し、土壌水分量-後方散乱係数の関係を入射角 15°および 23°の場合で計算した曲線群を図 6 に示す。同時に入射角 15°および 23°における後方散乱係数及び土壌水分量の観測値もプロットしている。入射角 15°、23°に対してそれぞれ 3 本の曲線を描いたが、15°の時の 3 曲線は重なっているため 1 本に見えており、また 23°の場合についても、図式解法のための粗度の読みとり誤差を考えると、ほぼ重なっていると考えて良い。

ここで描く M_v と σ の曲線群はどの曲線も M_v と σ の観測値 (入射角 15°であれば 0.051m³/m³=5.1%、-6.43dB) の 1 点は通るはずである。何故ならこの点を通るような粗度を求めたからである。この点でのみ交わる以外何の拘束条件も無いが、図 6 を見る限り表 3 に示したどの地表面粗度を用いても、すべての水分量で後方散乱係数値は一致している。このような曲線の一致は異なる地表面散乱モデルに対しても見られた。

図 6 に描いた曲線には逆推定した粗度を用いている。上で述べたように、この粗度は実測値とも大きく異なっているが、この粗度を用いた土壌水分量と後方散乱係数の曲線は図 6 に示したように推定に用いた以外の土壌水分状態での観測値とも良く一致している。逆に、実際の粗度を用いて同じ図を描くと観測値とは大きく異なった曲線が得られ、逆推定された粗度は実測した粗度とは一致しないが、マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分計測に必要な土壌水分量-後方散乱係数曲線の関係を決定することには役立つと言える。ここで求められた粗度は謂わば仮想的な粗度であるが、その粗度は実用上大変有効であると言える。

以上のことから、衛星検証などでは土壌水分量が既知とできる時、例えば非常に乾燥していてしおれ含水率になった

時や、降雨直後の湿潤な含水率となった時に後方散乱係数が計測できれば、土壌水分量と後方散乱係数の関係を表す曲線を求めることができることになる。

7 まとめと今後の課題

本研究では入射角が可変のマイクロ波センサ搭載衛星 RADARSAT の衛星データから地表面粗度を逆推定するためのアルゴリズムを構築するための基礎的な研究を行なった。これらは以下のようにまとめることができる。

- 当研究室所有のマイクロ波センサを用い、後方散乱係数を複数の入射角で測定し、また土壌水分量、地表面粗度を計測した。
- 計測した粗度の値には土地被覆毎に大きなばらつきがあり、また同一土地被覆内でも大きなばらつきがみられた。
- 土壌水分量を既知とした場合の2入射角データからの地表面粗度逆推定アルゴリズムを示し、観測値から図式解法によって地表面粗度を推定した。
- 多入射角測定から逆推定された粗度の値は多重解を持ち、大きくばらついた。またそれらと計測した粗度の値とは良い対応関係は見られなかった。
- 推定された粗度を用いて土壌水分量-後方散乱係数 $M_v - \sigma^0$ の曲線を描くと、粗度の値はばらついているにも関わらず、更には推定に用いた理論式が違うものがあるにも関わらず同じ形の曲線となり、 M_v と σ^0 の観測値とも良好な対応が見られた。

この研究では土壌水分量を既知としたが、衛星データへの適用を考えると土壌水分量も未知として扱う土壌水分・地表面粗度同時推定アルゴリズムの開発が必要となる。今後は同時推定アルゴリズムを開発し、RADARSAT/SAR データへの適用を試みたい。

References

- Chauhan, N. S., and R. H. Lang, Polarization Utilization in the Microwave Inversion of Leaf Angle Distributions, in *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. GE-27, 1989.
- Choudhury, B. J., T. J. Schmugge, R. W. Newton, and A. Chang, Effect of surface roughness on the microwave emission from soils, in *J. Geophys. Res.*, 1979.
- Engman, E. T., and N. Chauhan, Status of Microwave Soil Moisture Measurement with Remote Sensing., in *Remote Sens. Environ.*, Vol. 51, 1995.
- Njoku, E., and J. Kong, Theory of passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture, in *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 1977.
- Oh, Y., K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces, in *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. GE-30, 1992.
- 沖大幹, 虫明功臣, 輪笠一浩, 衛星搭載マイクロ波センサによる表層土壌水分量観測の理論式に基づいた検討, 第50回年次学術講演会概要集, 第2巻土木学会, 1995.
- 三枝修平, 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣, マイクロ波散乱の多入射角計測による地表面粗度推定の可能性, 土木学会年次学術講演会, 第51巻, 1996.
- 立川康人, 片岡武, 椎葉充晴, 高埴琢馬, マイクロ波表面散乱機構の理論モデルと SAR データを用いた地表面粗度パラメータの抽出, 水文・水資源学会 1996 年研究発表会要旨集, 第8巻, 1996.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing*, Vol. III, Artech House INC., 1986.
- 輪笠一浩, 沖大幹, 虫明功臣, マイクロ波散乱計による土壌水分抽出アルゴリズムの理論的検討, 水工学論文集, 39, 1995.
- Wang, J. R., and T. J. Schmugge, An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content, in *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. GE-18, 1980.