

マイクロ波散乱計による土壌水分量抽出アルゴリズムの理論的検討

Theoretical analysis on the algorithm to extract surface soil moisture using microwave scatterometer

輪笠 一浩* 沖 大幹† 虫明 功臣††

by Kazuhiro WAKASA, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

For hydrological models, information of surface-soil moisture content in terms of a large area is important. Then, using the microwave sensors' datum of satellites, such as E-ERS1 and J-ERS1, is expected in order to acquire soil moisture information of a large area. Nowadays, many studies and experiments are under investigation for practice.

This study will deal with the Microwave Scattering Model for the relation between soil moisture content and backscattering coefficient on the bare soil. The backscattering coefficient value is affected not only by the soil moisture content but by frequency, incident angle, surface roughness, and so on. We calculated backscattering coefficient based on the theory in some patterns, and compared the value of the theory with that of experiment.

Keywords: Microwave Scattering Theory, Surface-soil moisture content, Backscattering coefficient, Surface roughness

1. はじめに

水循環過程の研究において広域の土壌水文情報は不可欠な要素であるが、表層の土壌水分量は空間的、時間的に変動するためにこれまでの水分量抽出法では広域の面的な情報を得ることは困難であった。そこで、近年この情報を得る方法としてマイクロ波センサ搭載人工衛星の利用が期待されている。現在も基礎的な実験や野外観測が続けられ、実用に向け様々な検討が行なわれている。

衛星データ利用のためには、データ値(CCT値)から求まる後方散乱係数の土壌体積含水率への変換アルゴリズムを確立しなければならない。そこで本研究では変換アルゴリズムの基礎として、裸地面における「後方散乱係数-体積含水率」の関係をマイクロ波表面散乱理論に基づいて検討した。

2. 研究の概要

裸地面におけるマイクロ波の散乱はその土壌の体積含水率がある程度以上であれば表面散乱に依存することが知られている。F.T.Ulaby、R.K.Moore、A.K.Fungらによる表面散乱理論をもとに理論式の検討を行なった後、理論式を用いて後方散乱係数を算出した。つぎに理論式中のパラメータの値を変化させたさまざまなケースについて「後方散乱係数-体積含水率」の関係をグラフ化し、実験値との比較を行なった。

本研究において中心となるのは地表面粗度の依存性に関する検討である。表面散乱理論には、地表面の粗度により3つの理論式が提示されている。そこで粗度を条件とした理論式の選択を行ない後方散乱係数を算出するプログラムを作成した。

本研究では、裸地面を関東ローム土に限定する。マイクロ波の後方散乱係数は入射波の波長(周波数)と入射角、偏波面、地表面粗度、土壌の比誘電率、比透磁率の関数となっている。土壌の体積含水率によりその土壌の比誘電率が決まってくるのだが、比誘電率と体積含水率との関係式には、日大理工学部・長谷部研究室の三枝らの研究「Semi-Empirical Modelによる関東ローム土の誘電率評価」において求められているものを用いた。

周波数や入射角の依存性については現在データの得られるマイクロ波人工衛星E-ERS1、J-ERS1と車載型マイクロ波散乱計の諸元値について理論値を算出し、その検討を行なった。また偏波面に関してはHH(水平送信・水平受信)偏波面に限定した。

*学生会員 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士2年(〒106 港区六本木7-22-1)

†正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所助手(〒106 港区六本木7-22-1)

††正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所教授(〒106 港区六本木7-22-1)

3. マイクロ波散乱理論

土壌におけるマイクロ波散乱は表面散乱と体積散乱が考えられる。含水量の少ない乾燥した土壌においては表面散乱だけでなく入射波が深部まで侵入し体積散乱を生じる。しかしある程度湿潤した土壌であれば、後方散乱係数の土壌体積含水率に対する感度を検討するに当たっては表面散乱の影響が大きいものとして考えればよい。そこで、地表面による散乱が全て表面散乱であると仮定して検討することにした。

3.1 比誘電率と体積含水率の関係

表面散乱は比誘電率の他に入射角と地表面の粗度に大きく依存する。
比誘電率と体積含水率の関係式には以下のものを用いた。

Semi-Empirical Model : Dobson,et.al. (1985)

ε_r^α ≃ 1 + (ρ_b / ρ_{ss}) (ε_{ss}^α - 1) + Mv^β (ε_{fw}^α - 1)

- ε_r: 比誘電率、ρ_b: 乾燥密度、ρ_{ss}: 土粒子密度 (関東ロームで 2.8(g/cm³))
- ε_{ss}: 土粒子の比誘電率 (4.7 - j0)
- α: 土壌を構成する媒質が誘電率に寄与する状態を示すパラメータ (0.65)
- Mv: 体積含水率 (m³/m³)
- β: 土壌の構造によって決まるパラメータ (関東ロームで 1.644: 日大理工学部・長谷部研三枝ら (1993))
- ε_{fw}: 水の比誘電率。温度による変化は小さい。
- ε_{fw} = 4.9 + (74.1/(1 + jf/f₀)) (・f₀: 水の緩和周波数 (18.64GHz)、・f: 入射波周波数 (GHz))

3.2 地表面粗度

現時点で、表面散乱モデルは粗度を条件として 3 式提示されている。そこでまず粗度に関しての検討を行なった。
粗度を表すパラメータは 2 つある。(共に単位は cm)

- σ: 表面高さの標準偏差 (表面の凹凸の深さの指標) RMS Height
- l: 相関距離 (表面の凹凸の密度の指標) Correlation Length

粗度は入射波の波長に関わってくるので、普通粗度を表す時は波数: k を用いて (k σ, k l) とすることが多い。
本研究では周波数 1.275GHz(J-ERS1)、5.2GHz(車載型散乱計、E-ERS1: ただし E-ERS1 は 5.3GHz だがほぼ同じものとする)、9.0GHz(比較) について検討する。それぞれの波長と波数を整理して以下に示す。(表 1)
同一の地表面粗度 (σ, l) に対しても波長の違いにより相対的な粗度 (k σ, k l) が異なってくる。表面散乱モデルの理論式は相対的粗度と RMS Slope m (√2σ/l) を条件として 3 式のうちから選択した。
以上の条件を整理した表が 表 2 である。

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 1: 周波数とその波長、波数

Relatively Smooth	kl > 6	l ² > 2.76σλ	m < 0.25
Slightly Rough	kl < 6	kσ < 0.3	m < 0.3
Relatively Rough	kl > 6	l ² > 2.76σλ	(2kσ cos θ) ² > 10

表 2: 粗度条件

3.3 表面散乱理論式

表 2 のような領域のもとで HH 偏波面に関しては以下のような 3 式が提示されている。
Physical optics model for Relatively Smooth Surface

σ_{HH}^o = 2k² cos² θ [(μ_r cos θ - √(μ_rε_r - sin² θ) / (μ_r cos θ + √(μ_rε_r - sin² θ))]² exp[-(2kσ₁ cos θ)²]
× ∑_{n=1}[∞] [(4k²σ₁² cos² θ)ⁿ] × ∫₀[∞] ρⁿ(ξ) J₀(2kξ sin θ) ξ dξ

Perturbation model for Slightly Rough Surface

σ_{HH}^r = 8(2π/λ)⁴ σ₁² cos⁴ θ [(μ_r cos θ - √(μ_rε_r - sin² θ) / (μ_r cos θ + √(μ_rε_r - sin² θ))]² l² exp[-(2πl/λ sin θ)²]

Geometric optics model for Relatively Rough Surface

$$\sigma_{HH}^r = \frac{\left| \frac{\mu_r - \sqrt{\epsilon_r}}{\mu_r + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \exp(-\tan^2 \theta / 2m^2)}{2m^2 \cos^4 \theta}$$

σ_{HH}^r : 後方散乱係数、 λ : 波長、 σ_1 : 表面高さの標準偏差、 l : 相関距離、 $m \equiv \sqrt{2}\sigma/l$
 θ : 入射角、 μ_r : 比透磁率 ($\simeq 1$)、 ϵ_r : 比誘電率、 $\rho(\xi) = \exp(-\xi^2/l^2)$ 、 J_0 : Bessel 0 func.

これらの式で求められた後方散乱係数は値が大変小さいので普通 10 を底とする対数の 10 倍の値 (dB) の単位で表す。

4. 理論値の算出とその検討

4.1 周波数依存性

周波数の違いが後方散乱係数に与える影響について比較したグラフが図 1 である。ここでは入射角は 20 度に固定し、また同一地表面粗度 (σ, l) = (0.3, 10.0) に対して、[後方散乱係数-体積含水率] の関係を検討した。

同一地表面に対して周波数による違いが見られるのは相対的な粗度が異なってくるためであると考えられる。粗度 (0.3, 10.0) に対して相対的な粗度は 1.275 (GHz) では (0.08, 2.67)、5.2 (GHz) では (0.33, 10.9)、9.0 (GHz) では (0.57, 18.9) となり、用いる理論式が異なってくる。一般に同一地表面粗度に対しては周波数の違いは見かけ上相対的な粗度の違いとみなせる。粗度の違いは入射角による後方散乱係数の変化に影響を与えるという傾向がある。その傾向を調べるために次に入射角依存性について検討した。

4.2 入射角依存性

入射角の増加によって後方散乱係数がどのように変化するかを検討したグラフが図 2 である。周波数は 5.2 (GHz) に固定し、また体積含水率は 30 % とした。粗度は Relatively Smooth、Slightly Rough、Relatively Rough の 3 パターンをとった。

Relatively Smooth、Slightly Rough では、入射角の増大と共に後方散乱係数は小さくなっていく。粗度が小さいほどその減少率は大きく、滑らかな面ほど入射角の影響を受け易いという傾向が理論的に裏付けられたことを示している。

また Relatively Rough では後方散乱係数の大きさは入射角にはほとんど影響されないという傾向が読みとれるが、これは表面の凹凸による入射波の拡散成分が散乱の主成分となっているためであると考えられる。

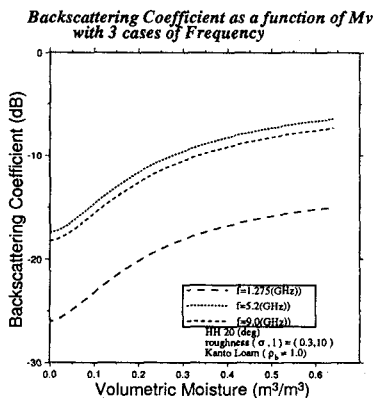


図 1: 周波数依存

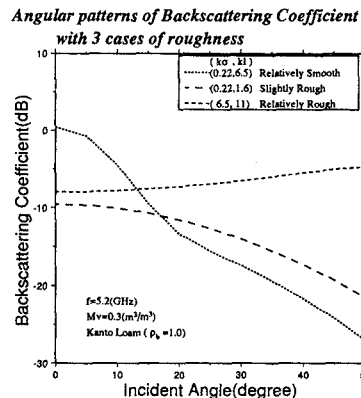


図 2: 入射角依存

5 理論値と実験値の比較

実験において計測されたパラメータを用いて [後方散乱係数-体積含水率] のグラフを作成し、そのグラフ上に実験値をプロットしたものが図 3 である。

理論式に代入したパラメータを以下に示す。

ここで、実験室内での関東ロームは飽和水分量が 80 % 程度になるようにしたので乾燥密度は 1.0 程度であると仮定する。また、地表面粗度に関しては場所によってムラがあるが比較的滑らかな面であるという条件のもとでその平均的な値を用いても大きな差異は無いということを確認してから以上のように設定した。

大局的には、オーダー、感度、など物理学的に見ても理論値に対して実験値が妥当な値をとっていることが観察できる。ただ局所的に見ると明らかに全体の傾向から外れていると思われる実験値があり、現段階では観測誤差であると考えている。

周波数 f	5.2 (GHz)
入射角 θ	20,25,30 (deg)
乾燥密度 ρ	1.0 (関東ローム)
地表面粗度 (σ , l)	(0.41,5.6)
相対的粗度 ($k\sigma$, kl)	(0.45,6.1)

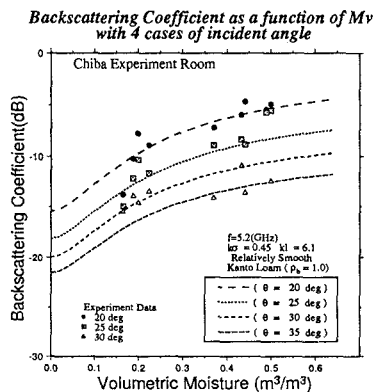


図 3: 理論値と実験値の比較

〔後方散乱係数・体積含水率〕の関係を示すためにこれまで用いられてきた変換式は、実験値から直線近似で回帰して求められた一次式であった。しかし高含水率状態における水分感度の減少という傾向を十分に説明することができなかった。この原因が実験システムによるものなのか物理学的背景によるものなのか不明解であったのだが本研究の理論値の算出によって物理学的根拠があることが示されたと考えている。

6 まとめ

本研究によって、マイクロ波の関東ローム土壌における表面散乱の理論的傾向をグラフ上に表現してその検討を行なうことができた。それによると

- 同一地表面粗度における後方散乱係数は周波数の違いにより異なり、それは相対的粗度の相違による。
- 地表面粗度と入射角の関係は粗度が小さいほど強く、滑らかな面ほど入射角による変化率が大きい。逆に粗度が大きければ入射角による変化は小さい。

などが確認できた。

また理論値と実験値との比較においては、

- 入射角の相違による後方散乱係数のオーダの違い、水分感度の物理学的妥当性を見い出せた。
- 高含水率状態における水分感度の減少の理論的裏付けができた。

参考文献

- [1] F.T.ULABY,R.K.MOORE and A.K.FUNG. MICROWAVE REMOTE SENSING Addison-Wesley Publishing Company vol.1,2,3 , 1982
- [2] 古濱 洋治、岡本 謙一、増子 治信. 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング. 電子通信学会.1986
- [3] 三枝 健二、佐藤 公規、山田 美由紀、長谷部 望.Semi-Empirical Model による関東ロームの誘電率評価. 電子情報通信学会秋季全国大会,B-158.1994
- [4] 洲上 吾郎、沖 大幹、虫明 功臣、杉田 倫明、深見 和彦、長谷部 望. 筑波域におけるマイクロ波散乱計による土壌水分集中観測. 水工学論文集 38, 783-788,1994
- [5] 三浦 一彦. マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分の測定と蒸発量推定への応用. 東京大学修士論文.1992