能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測

I. 室内実験

Soil Moisture Measurement by the Active Microwave Remote Sensing

I. Indoor Experiment

虫明功臣*・小池雅洋*・沖 大幹*・仲江川敏之*

Katumi MUSIAKE・Masahiro KOIKE・Taikan OKI・Tosiyuki NAKAEGAWA

(東京大学生産技術研究所)

Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo

A C band microwave scatterometer was designed and made for soil moisture measurement in a indoor experiments. After some electromagnetic experiments, many experiments were carried out to clarify the basic characteristics of the soil backscatter from its surface. These experiments give the following results: (i) C band microwave penetrates the soil to 10 cm depth, (ii) 2.5cm depth surface soil sampling is optimum to regress the soil moisture with the backscatter coefficients, (iii) the backscatter coefficients are sensitive to the incident angle in less than 30°, (iv) HH polarization is more sensitive to the soil moisture than the HV polarization, (v) surface roughness has a significant effect on the soil backscatter.

Key Words :active microwave scatterometer, soil moisture measurement, backscatter, incidental angular dependency, surface roughness

全球スケールでの合成開口レーダ(SAR)によるモニタリングが実用化段階に入り、水文学の領域では表層土壌水分量と積雪内水分量の定量的把握が期待されている。本研究では能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分量に焦点を当て、地上計測用マイクロ波Cバンド散乱計を製作し、これを用いて重要な各種特性について室内実験を行なった。まずアンテナ特性などのシステム特性を電波暗室で調べる実験を行なった。さらに、この実験システムを用いて、マイクロ波土壌侵入深、土壌水分感度、入射角依存性、地表面粗度の影響について室内実験を行ない、以下の点が明らかとなった。(i)Cバンドマイクロ波の土壌への侵入深は、それが最も大くなる乾燥時の鉛直入射状態でも10cm程度であり、SARの様なサイドルッキングレーダーでは土壌侵入深はより浅くなる。(ii)散乱計で観測される後方散乱係数と表層土壌水分量の関係を定式化する場合に実用的な表層土壌深は2.5cmである。(iii)後方散乱係数の入射角依存性は入射角が小さいほど顕著である。ただし、本室内実験システムでは30°以上の入射角については良い実験結果が得られなかった。(iv)HV偏波よりもHH偏波の方が後方散乱係数の土壌水分感度が高い。(v)対象土壌面が滑面と粗面とでは、後方散乱係数に非常に大きな差が生じる。

キーワード :能動型マイクロ波散乱計, 土壌水分計測, 後方散乱, 入射角依存性, 地表面粗度

I. はじめに

地表面熱収支, 特にそのボーエン比を算定することは地表面水循環過程を理解する上で非常に重要であるが, 表層土壌水分は土壌面のアルベドや蒸発効

率を決定するため, 結果としてそれらの算定に大きな影響を持っている。また降水によってもたらされる流出の分配率を決定するのも表層土壌水分であり, 洪水流出の予測に対しても表層土壌水分を知ることが重要である。これらは, 大気-陸域の相互作用を

*東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木7-22-1 TEL 03-3402-6231 Musiake Laboratory, 5th Division, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106 JAPAN

含む気候形成過程の解明に直接関わるのみならず、その成果として気候変動下での洪水予測や水資源評価の精度向上をもたらすことにもつながると期待されており、表層土壌水分の定量的把握がもたらす理工学的価値は非常に大きい。

大気―陸面相互を解明するには全球スケールの土壌水分量や水分貯留量(沖ほか, 1995)のデータが必要であるし、洪水流出の予測をするにも流域スケールのデータが必要である。こうした面的なデータを取得する方法としては衛星をプラットフォームとしたリモートセンシングが極めて有効である。土壌水分のリモートセンシングについては宇都宮(1990)によって詳しいレビューがなされている。その中で手法は大きく分3つに分けられてある。それはアルベドの変化を可視のセンサーでみるもの(Twomey *et al.*, 1986)、サーマルイナシアの変化を熱赤外のセンサーで見るもの(宇都宮, 1992)、誘電率の変化をマイクロ波で計測するもの(Ulaby *et al.*, 1978)である。マイクロ波は受動型と能動型とに分けられるが、とりわけ能動型センサーでは合成開口技術により可視センサーと同程度の解像度が実現され、河川流域内スケールの分布情報を得ることができる。

1991年から1992年にかけてSAR搭載の衛星、European Remote Sensing Satellite-1 (ERS-1)とJapan Earth Resources Satellite (J ERS-1)が打ち上げられ、全球スケールでのSARによるモニタリングが実用化段階に入った。

本研究では地上計測用の散乱計を製作し、それを用いて能動型マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分計測において最も重要な後方散乱特性についての室内実験を行なった。

II. 既往の研究

土壌の比誘電率は2～4程度であるのに対し、水の比誘電率は10GHz以下では70～80程度の値を取るため、土壌水分の増加にともなって土壌の比誘電率は増加する。物体表面での反射強度はFresnelの反射係数で定まるが、これは比誘電率の増加関数となっている。従って土壌水分が増加すると比誘電率、反射係数ともに増加するので、反射係数の一種である後方散乱係数を計測すれば、土壌水分をリモートセンシングで推定することが可能となる。

しかし、後方散乱係数にはFresnelの反射係数の他にも、地表面粗度や植生の影響も含まれている。Fresnelの反射係数が同じであっても、地表面の凸凹

表―1 周波数の文字表示

バンド名	周波数 (GHz)
L	1.0～2.0
S	2.0～4.0
C	4.0～8.0
X	8.0～12.0
Ku	12.0～18.0

が大きくなり電磁波が直角に照射される面が増加すると、拡散成分が多くなるので後方散乱係数は増加する。また、植生は、バンドにより多少の違いはあるが、キャノピーや幹枝で体積散乱を生じるので後方散乱係数は複雑に変化する。

地表面へ向けて照射されたマイクロ波の後方散乱は地表面状態とシステム特性によって定まる。地表特性としては土壌水分量(誘電率)、土壌水分プロファイル、植生、地表面粗度等があり、システム特性としては周波数、偏波、入射角等がある。マイクロ波帯では周波数毎に表―1に示すような名称が用いられている。これらの各要素に対する基本的な実験結果より、裸地面については、土壌水分を探知するのに適したセンサーの条件は周波数Cバンドで、入射角7°～17°、偏波面HHであり(Ulaby *et al.*, 1978)、また植生地についてはC band以上であれば植生の植え込み方向に対する影響は無い(Ulaby and El-Rayes, 1987)ことなどが報告されている。これを踏まえて、Dobsonほか(1986)は、土壌水分の推定にはCバンドでHH偏波、入射角が10°～20°程度が良いとしている。しかし、アロフェンが主構成鉱物で、乾燥密度が小さく比表面積が大きい関東ロームでは、Xバンドを用いるとHV偏波の感度の方が高いという結果(Hirosawa and Matuzaka, 1978)も得られており、土壌の構成物質と構造も後方散乱に影響を与えていることがわかる。また、日本の農耕地に使われている土壌について、乾燥時の後方散乱が土壌によって大きく異なるという観測結果を示し、それが土壌クラスト等の土壌構造に起因しているとの指摘もある(福本, 田中, 1995)。このように日本の土壌に対しても研究の蓄積が徐々に始まっているが、衛星プラットフォームで実現されるCバンドマイクロ波に対する関東ロームの後方散乱についての研究や、表面散乱モデルをマイクロ波に適用した理論的研究などについては、さらなる研究の積み上げが期待され

ている。

そこで筆者らは、衛星搭載の能動型マイクロ波センサによる土壌水分情報の抽出に関して、計測面および水文学的側面について基礎的検討を行なうために、関東ローンを対象としてCバンドマイクロ波散乱計で散乱実験を行なった。本論文では、散乱実験に基づいて関東ローンのマイクロ波散乱特性を調べ、理論モデルと比較した結果について報告する。

Ⅲ. 計測原理と実験システム

ここではマイクロ波散乱計による土壌水分計測の原理について簡単に記述し、さらに本研究で構築した散乱計システムと室内実験システムについて紹介する。

1. 計測原理

一般に、能動型マイクロ波センサーでは、送信電力(P_t)と受信電力(P_r)とがレーダ方程式によって次のように結びつけられる。

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{P_t G_t G_r}{R^4} (A_0 \sigma^0) \tag{1}$$

ここで G_t ：送信アンテナ利得、 G_r ：受信アンテナ利得、 A_0 ：マイクロ波照射面積、 σ^0 ：後方散乱係数、そして R は対象物までの距離である。この式に現れる変数の中で、 σ^0 のみが対象物の電磁気学的特性によって変化し、他の変数はすべて計測システムおよび観測条件のみに依存し、土壌水分によらない。土壌はその水分変化によって誘電率が変化し、結果として σ^0 が変化するため、 σ^0 を計測すれば原理的には土壌水分量が計測されることになる。

しかし既に述べたように σ^0 は土壌水分量のみならず、地表面粗度や植生などによっても大きく変化する。こうした影響は、電波工学の分野で、それぞれ個別に理論式が導かれており、計測結果との比較もなされている(Ulaby *et al.*, 1986a; Ulaby *et al.*, 1990; Fung *et al.*, 1992)。地表面粗度については、表面の凹凸の標準偏差であるR.M.S.高さ(Root Mean Square height: σ)と、同じ高さの凹凸の代表的な距離である相関距離(l)とによって定量化される。Ulaby *et al.*の著書(1986a)では、地表面粗度の違いによって適用範囲の異なる3つのモデルが示されている(表－2)。

2. Cバンドマイクロ波散乱計

土壌水分計測を主目的としているので、従来の成

表－2 地表面散乱モデルとその適用条件。ここで k は波数、 σ はR.M.S.高さ、 l は相関距離、 m はR.M.S.勾配で、 $2\sigma/l$ である。この表はUlaby *et al.* (1986a)をもとに作成した。

比較的滑らか Relatively Smooth	少し粗い Slightly Rough	比較的粗い Relatively Rough
Physical Optics Model	Perturbation Model	Geometrical Optics Model
$kl > 6$ $l^2 > 2.76\sigma\lambda$ $m < 0.25$	$kl < 6$ $k\sigma < 0.3$ $m < 0.3$	$kl > 6$ $l^2 > 2.76\sigma\lambda$ $(2k\sigma \cos \theta)^2 > 10$

表－3 Cバンドマイクロ波散乱計の諸元

周波数	5.2GHz
波長	5.77cm
送信電力	4.0dBm
アンテナ	28.9cmφ コニカルホーンアンテナ
最大受信電力	0dBm
最小受信感度	−110dBm
偏波	4 偏波 (HH、VV、HV、VH)

果を踏まえて波長はCバンド(5.2GHz)を選択した。また偏波はHH、VV、HV、VHの4つの組合せを手動で設定できるように設計した。本散乱計の諸元を表－3に示す。アンテナは開口面の直径(D)が5λ($\lambda=5.769\text{cm}$ ：波長)、エッジ長が8.333λの最適コニカルホーンである。またこのアンテナでは、Fraunhofer距離は $2D^2/\lambda=2.90\text{m}$ である。Fraunhofer距離よりも近い範囲では、有限の開口面を持つ実際のアンテナから送信された電界の位相のずれが大きいため、測定実験に際しては対象面との間隔をこのFraunhofer距離よりも長くする必要がある。

送信機出力は給電点での測定値であり、アンテナ装着部での反射は小さくなるように調整した。受信機には通常のスーパーヘテロダイン方式が用いられている。受信電力は受信電力信号あるいは自動利得制御回路(AGC)の制御信号として出力される。以後の実験には全てAGC信号を用いた。

3. 室内実験システム

写真－1は室内実験システムの概観を撮影したもので、図－1はその側面図を示している。このシステムはマイクロ波散乱計を設置する架台と試料を載せる試料回転台で構成され、東京大学生産技術研究

所千葉実験所水工実験棟に設置された。

散乱計架台は地上約5.4mの既成栈橋に取り付けられ、高さは3.0～5.4mの範囲で、マイクロ波の入射角は0°～50°の範囲で変えることができるよう設計されている。送信・受信アンテナの間にはレーザーポインタが設置され、散乱計ビームの中心と回転台上の土壌面の中心とを容易に合わせることができるようになっている。

試料回転台はレール上に配置され、ビーム中心を

写真-1 マイクロ波散乱実験用室内実験システム

図-1 マイクロ波散乱実験用室内実験システムの側面図

試料の中心と一致させるように前後の移動ができるようになっている。さらに、ある実験条件に対して複数の散乱電力をサンプリングできるように約0.5～2.0rpmでの回転が可能になっている。土壌試料は、回転台に載せた1.4×1.4×0.3mの発泡スチロール枠の中に充填した。

また、土壌面以外からの不要な散乱を防止するため外径5.0m、内径1.4mのドーナツ型の電波吸収体を試料枠に載せている。電波吸収体は市販されている発泡ウレタンにカーボンを加えた平坦シートである。厳密な意味では電波吸収体の形状や配置にも考慮した電波暗室での実験が望ましいが、本実験では必要最小限の配置にとどめた。

4. データ収集系

受信機から電圧値で出力されるデータ信号はパーソナルコンピュータのボード上で12ビットにA/D変換され、記録される。電圧値から受信電力への変換は、当初は工場内で作成した仮の校正曲線を用い、後に日本大学理工学部長谷部研究室において最終的な校正曲線を作成した。

マイクロ波散乱はランダム性が強く複数のサンプルを平均化しなければ信頼できる散乱値は得られない。試料を1回転させて得られる独立サンプル数 N は

$$N = 4\pi R \sin\theta / D = 4\pi H \tan\theta / D \quad (2)$$

で近似できる。ここで R は開口面と試料面の距離、 θ は入射角、 D はアンテナ径、 H は開口面と試料面の鉛直距離である。ただしこの式は入射角が15°以上の時のみ有効とされる。図-2に入射角と独立サンプル

図-2 入射角と独立サンプル数の関係。図中の各線は開口面と試料面の鉛直距離 H 毎の独立サンプル数を表している。

ル数の関係を示す。

例えば入射角が 20° の時、 $H=4\text{m}$ で独立サンプル数は60程度である。90%の信頼区間で後方散乱係数を得るには独立サンプルが200程度必要であると言われているので、これを満たすには4回転必要となる。しかし回転数を増やすと実験時間が長くなるため、オーバーサンプリングを行なって実効回転数を増やした。具体的には2回転で1200のサンプリング測定を行ない、それぞれを2組に分けて考えれば、それらが独立した300ずつ(≥ 60)のサンプリングを持つとみなせて、所要の回転数4を満たすことになると考えた。

IV. マイクロ波散乱特性に関する基礎実験

マイクロ波散乱計による土壤水分計測実験を開始する前に、システム特性の計測であるアンテナ較正と、土壤へのマイクロ波侵入深の検討を予め行なった。後者は対象となる試料の厚さを決定するために必要である。

1. アンテナ較正実験

アンテナ較正実験は文部省宇宙科学研究所の電波暗室において行なった。較正の結果は表-4の通りで、ほぼ設計利得の21.10dBと一致している。また、クロス偏波の利得は主偏波に対して25dB程度下がっており、偏波の分離は良好であると言える。

表-4 アンテナ較正実験結果。アンテナ利得、電力半値幅、システムとしての電力半値幅、最大受信電力、最小受信感度。

アンテナ利得 (dB)			
	送信	受信	
VV 偏波	21.25	21.35	
HH 偏波	21.15	21.35	
平均	21.20	21.35	
cross 偏波	-4.25	-3.05	
アンテナ単体の電力半値幅 (degree)			
	送信	受信	
VV 偏波	15.10	15.04	
HH 偏波	13.15	13.19	
システムとしての電力半値幅 (degree)			
VV 偏波	10.26		
HH 偏波	11.60		

送信されたビームの強度は中心が最大で、中心から離れるに連れて弱くなる。最大電界強度の $1/\sqrt{2}$ 、即ち3dB低い反射電力強度を半値幅と呼び、照射面積はこの半値幅内の領域として定義される。図-3にビーム中心からの角度と反射電力強度の測定結果を示す。これより半値幅は 11.60° となった。

2. マイクロ波の土壤への侵入深の検討

可視の波長帯では電磁波はごく表層にしか侵入しないが、マイクロ波帯では条件次第で数メートルまで侵入する事が実験的に知られている。ここでは、土壤水分計測実験を行なう際の試料の土壤深を決定するために、侵入深を計測する実験を行った(虫明ほか, 1990)。土壤は乾燥するほど、複素誘電率の絶対

図-3 ビーム中心角とビーム強度の関係：HH面。この曲線がアンテナの指向性を示している。

図-4 銅板上のCバンドマイクロ波の土壤侵入深。入射角は 0° で、土壤は攪乱された関東ロームで体積含水率15%。記号は実験値を曲線は理論値を示している。

値は小さくなるので、電磁波の減衰は小さくなり、侵入深は深くなる。この実験では最大侵入深を調べるため、底面に銅板を敷いた試料台の上に、2mmのふりかけた風乾状態の関東ローム(体積含水率15%)を1cmずつ盛り立てて、反射係数を計測した。この際、試料表面の粗度はReyleighの基準 $\lambda/8$ 以下であるように滑らかに整形した。なお、本研究では全ての実験において攪乱された関東ロームを用いている。

入射角 0° での実験結果は、図-4のようになる。後方散乱係数に翻訳してから反射係数に変換しているので、土壌厚が増すに連れて散乱計と土壌面との距離が短くなる効果は消去されている。図中の実線は多重反射モデルを考えて反射係数を計算した値で、その計算式は

$$\Gamma = \frac{\Gamma_0 - \exp(-2\gamma d)}{1 - \Gamma_0 \exp(-2\gamma d)} \quad (3)$$

で表される。 d は土壌厚、 Γ_0 は $d \rightarrow \infty$ の時の反射係数、 γ は伝播定数である。 Γ_0 と γ は、

$$\Gamma_0 = \frac{(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} + 1}{(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2}} \quad (4)$$

$$\gamma = j(2\pi/\lambda)(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \quad (5)$$

から計算され、 ϵ_r は複素誘電率、 μ_r は透磁率である。 ϵ_r は三枝ほか(1994)が関東ロームについて行った誘電率測定結果をDobsonほか(1985)のSemi-Empirical Modelに当てはめて、定めたパラメータを用いる。

$$\epsilon_r^\alpha \approx 1 + \frac{p_b}{p_{ss}}(\epsilon_{ss}^\alpha - 1) + M_v^\beta(\epsilon_{rw}^\alpha - 1) \quad (6)$$

ここで α は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、 p_b は乾燥土壌密度、 p_{ss} は土粒子密度、 ϵ_{ss} ($=4.7-j0$)は土粒子の比誘電率、 M_v は体積含水率、 ϵ_{rw} は温度 23.0°C における自由水の比誘電率で、水の緩和周波数(18.64GHz) f_0 を用いて

$$\epsilon_{rw} = 4.9 + \{74.1/(1 + jf/f_0)\} \quad (7)$$

と表される。 β は土壌構造を表すパラメータである。関東ロームについては $\alpha=0.65$ 、 $\beta=1.788$ が得られている(三枝ほか, 1994)。

図-4では実験値と理論値が非常に良く一致しており、理論的にもこの結果が裏付けられている。両者とも銅板深度の変化に伴い反射係数が減衰しながら振動しているが、これは深度の電磁気学的な厚さとマイクロ波の波長の相対関係によるものである。深度が10cmになると振幅は1dB程度になり、銅板の影響を殆んど受けていないことがわかる。10cm以上

の領域でも若干の不規則な振幅が見られるが、これはカップリング電力や反射波の位相差のずれなどが原因と考えられる。また湿潤状態の土壌について行った実験においても、同様な結果が見られ高々10cm程度で一定値となった。

以上の結果から実験をする際の土壌試料厚は10cm程度で良いと判断されたので、本研究の実験では余裕を持って20cmの厚さに土壌試料をつめて行なった。通常、衛星や飛行機などのプラットホームではサイドルッキングなので、同じ減衰量に対するマイクロ波の鉛直侵入深さはこれよりもより浅くなる。

V. 土壌水分計測に関する基礎実験

マイクロ波による土壌水分計測に関係する地表特性のうち土壌水分量、プロファイル、そして地表面粗度、システム特性のうち入射角と偏波について、上に述べた散乱計システムを用いて基礎的実験を行った。

1. マイクロ波の土壌水分感知深度

IV. 2. では土壌水分が鉛直に一定の場合の侵入深を調べたが、実際の土壌では土壌水分鉛直プロファイルが一樣でない場合の方がむしろ普通であろう。マイクロ波の後方散乱から表層土壌水分を推定する場合、土壌水分プロファイルが一樣でない場合には、表層という深さの取り方に土壌水分量が依存してしまうことになる。ここではマイクロ波が感知している表層深度を後方散乱係数と土壌水分量との相関、および土壌水分感度が最も良い深さと定義し、この深さを求める実験を行った(虫明ほか, 1991)。

試料については乾燥密度が $600(\text{kg}/\text{m}^3)$ 前後になるように充填し、徐々に水分を加えることによって土壌水分を変化させた。試料表面は滑面とした。また偏波条件はHH偏波とし、入射角を $0^\circ \sim 40^\circ$ まで 5° 毎に変化させて散乱実験を行った。土壌水分プロファイルは高さ2.5cmの50ccサンプラーを用いて表層から10cm深まで、4深度で採土し、炉乾法によって計測した。ここでは各深度での水平分布を考えて、4つの平均値を各深度での体積含水率としている。

図-5に深度2.5, 5.0, 7.5, および10.0cmの土壌水分量の時系列を示す。上の図は $0 \sim 2.5\text{cm}$ の平均土壌水分量で、下の図ではその値に対する差を示している。殆んどの期間で表層深度が浅いほど土壌が乾燥していることが読み取れるが、これは無降雨期間中に土壌水分の再分布が行われる様な場合の、露場

図一五 深度の違いによる表層土壌水分量の時間変化。上の図は表層2.5cmまでの体積含水率、下の図は表層深度を、5.0, 7.5, 10.0cmと変化させた時の2.5cm体積含水率からの差を示している。

における現実のプロファイルと一致するものである。38日と99日目は表層を湿らせたために、土壌水分量のプロファイルが逆転している。この実験では、1つの後方散乱係数観測に対して、4つの異なる深度で定義された表層土壌水分量を比較することができる。その例として表層深度を2.5cm、入射角を 20° として実験した時の土壌水分量と後方散乱係数の関係を示したのが図一六である。

このデータに対して線形回帰した結果では、相関係数が0.89、水分感度は $0.163(\text{dB}/\%)$ となった。図中の曲線は表面散乱モデルのPhysical Optics Model (Ulaby et al., 1986b; 輪笠ほか, 1995)に、誘電率を式(6)で、地表面粗度は実測値 $\sigma=0.413$ と $l=5.601$ を与えて計算したものである。統計的検定から異常値とみなせる一番乾燥している時のデータを除いて、実験値と理論値は良く一致しており、土壌の誘電特性と地表面粗度から土壌水分量と後方散乱係数の関係を導くことができることがわかる。また土壌水分量が50%程度の所で測定データが水分に対して感度が無くなるが、このことは理論式の結果とも一致している。

図一五と同じ期間に土壌深度と入射角を変えた実験を行ない、その結果から相関係数の変化の様子を

図一六 入射角を 20° とした時の後方散乱係数。表層土壌厚を2.5cmとした場合。土壌は関東ローム。図中の曲線はPhysical Optics Modelに実測の地表面粗度および誘電率を与えて算定した結果である。

図一七 入射角の違いによる土壌水分量と後方散乱係数の相関係数。土壌は関東ローム。図五と同じ期間に土壌深度と入射角を変えた実験を行なった結果で、各実験のデータ数は16である。

示したのが図一七である。 0° から 25° までの相関係数は0.874と非常に高い値を示しているが、 30° の所で急激に相関係数が低くなる。このような結果は既往の研究結果では見られないものである。この原因として、周囲からの不要反射による影響が考えられる。入射角が 40° の時、試料面での照射面はアンテナの半値幅内で直径0.73mとなり、電波吸収材を設置した直径よりも小さい。しかし、図一三に示すように、弱いながらサイドローブが存在しているため、

図—8 土壌水分量の違いによる滑面土壌に対するマイクロ波の入射角依存性。図—6, 7よりもセンサー位置を低く設定して行なった低位実験。土壌は関東ローム。地表面粗度は $\sigma=0.35$ (cm), $l=2.09$ (cm)。

この方向へ送信された電磁波がコンクリート製の床や室内実験システムの金属フレームなどで散乱して受信された可能性がある。

そこで、大きな入射角でのサイドローブの影響を除去するために、アンテナ位置を1m低くした低位実験を行った。低位実験では $H=2.80$ mとなり、入射角が15°以上でないとはFraunhofer距離以上とならないので、低位実験は15°以上の入射角で行った。低位実験における入射角依存性の結果を図—8に示す。図—7と異なり15°~30°まで単調に減少し、また30°~40°で後方散乱係数の増加も小さくなっている。従って照射面積を絞ったことにより、試料土壌以外からの雑音を小さくすることができ、両者を合わせて0°~40°までの角度依存特性が把握された。

0°から25°までの全ての入射角、表層深度のうち、最も相関が高いのは入射角0°、表層深度10cmの時で0.956、最も水分感度が高いのは入射角15°、表層深度10cmの時で0.11dB/%である。この結果はUlaby *et al.* (1978; 1979)の結果とも一致している。しかし表層深度が10cmのサンプリングは衛星検証実験では数多くのサンプルが必要になることを考えると現実的ではない。またこの結果は単に表層の土壌水分はばらつきが大きく、測定誤差が大きくなるためとも考えられる。比較した24個の相関係数の標準偏差は0.054であり、これらの間に有意な差異は見られな

図—9 入射角の違いによる滑面土壌に対するマイクロ波の入射角の依存性。HH偏波は入射角1°おき、HV偏波は入射角5°おきで計測した結果を示している。土壌は関東ロームで、体積含水率18.8%。

い。従って実用的には水分感度が高く、表層深度が小さいものが土壌水分深度として適切であると言える。すると、どの入射角に対しても水分感度が5cmよりも高い2.5cmを表層土壌水分深度とするのが現実的であることになる。この結果を踏まえて、以下では表層土壌水分量を深さ0~2.5cmとして解析を行なうことにする。

2. マイクロ波の入射角依存性

マイクロ波の入射角依存性についても例えばSchmugge *et al.* (1980)などの研究がなされている。航空機をプラットフォームとしたサイドルッキング映像レーダの場合、ニアレンジとファーレンジでは入射角が数10°異なることもあり、入射角依存性を考えずに後方散乱係数から土壌水分量などの物理量を抽出することはできない。ここでは滑面での入射角依存性を明らかにする。

体積含水率が18.8(%)で滑面の場合の実験結果を図—9に示す。この実験ではHH偏波は入射角を1°おき、HV偏波では入射角を5°おきに変えて計測を行なった。レンジの都合上0°~9°の結果は図に示していないが、HH偏波については、0°~15°の範囲では入射角依存性が高く、およそ1.6dB/deg.の感度がある。0°~15°の入射角で計測した場合、地形傾斜の影響も大きく、映像レーダのように広い領域をカ

パーする場合、イメージ内の各地点で入射角の影響を考慮する必要があることがわかる。15°~30°ではおよそ0.6dB/deg.の入射角感度で、入射角設定誤差の影響は0°~15°の場合に比べ1/3程度と小さい。このことは、実際に計測された後方散乱係数のばらつきも小さいことから裏付けられる。従って、この入射角範囲では1°程度の入射角の影響は余り考慮する必要が無いであろう。またここで、約5°周期で後方散乱の強度が振動しているのが特徴的である。この振動の山と谷の角度差で、センサーと試料間の距離 R は5.9cm~8.2cm程生じる。これはほぼ1波長に対応し、システムの測定特性によるものであると考えられる。これを確認するためにセンサーと試料間の距離を5cm程度変化させた実験では滑面、入射角15°の場合には5dBも変化する結果が、また後方散乱断面積が既知のアルミ球でも同様の結果が得られた。更にこの R の変化に対する後方散乱係数の感度は、入射角が大きくなるに従い小さくなり、またある程度の粗度がある場合は余り影響がないと言う結果が得られた。前者の結果は図-9からも読みとることができるものである。以上のことから考えると、図-9にある変動は電波吸収材の手前側の側面からの反射波によるもので、アンテナ位置から試料中心と側面とで電波のデュアルパスができ、その距離が波長の整数倍のところでマイクロ波が干渉して山と谷をつくると推察される。このような場合は無次元化電圧をリニアスケールで移動平均を掛ければ、このような影響を取り除くことができる(長谷部, 1997)。図-9に示した1点鎖線はこのようにして得られた結果である。

HV偏波の後方散乱係数はHH偏波に比べ20dB程低いが、入射角依存性はHVと同じような傾向を示している。従っていずれの偏波の場合でも入射角依存性を考慮する必要がある。Hirosawa et al. (1978)によれば関東ロームに対して9GHzのマイクロ波の場合、HV偏波の方がHH偏波に比べて水分感度が高いという結果が得られている。しかし筆者らが並行して行なった土壌水分と後方散乱係数の関係を調べる実験ではHV偏波を用いた時よりもHH偏波を用いた時の方が感度が良く、Hirosawa et al. (1978)と結果は一致しなかった。この点については様々な土壌に対する両周波数に対する後方散乱係数を比較しなければその違いを説明することはできないので、更なる観測実験が必要である。

3. 土壌面粗度の後方散乱係数への影響

土壌面粗度が後方散乱に与える影響は、土壌水分量が与える影響と同レベルであると報告されているが(Ulaby et al., 1979), この点について関東ロームに対する実験を行なった。ここでは3つの粗度を作り、それぞれが後方散乱に与える影響を調べた。

地表面粗度はメッシュを引いたアルミ板を土壌面に水平に差し込み、写真撮影したものをデジタイジングして、粗度パラメータを求めた。表-5に実験で設定した粗度を示す。

電磁波に対する表面の粗さはReighely基準とこれより厳密に定められたFraunhofer基準によって次に表される。

$$\sigma < \begin{cases} \frac{\lambda}{8 \cos \theta} & \text{Reighelyの基準} \\ \frac{\lambda}{32 \cos \theta} & \text{Fraunhoferの基準} \end{cases}$$

Cバンド5.2GHzに対してはそれぞれの基準で0.75cmと0.20cmとなる。従って、Fraunhoferの基準によ

表-5 粗度に対する後方散乱係数の影響を調べる実験で与えた地表面粗度のR.M.S.高さと相関距離。単位: cm。

実験	R-1	R-2	R-3
R.M.S. Height	0.32	0.61	1.74
相関距離	1.92	0.38	6.24

図-10 地表面粗度の違いによるマイクロ波後方散乱係数。土壌は関東ロームで、体積含水率は26.4%。低位実験。

れば実験R-1のみが滑面の条件に対する実験となる。

なお、ここでの実験は低位実験で入射角15度以上に対して行った。図-10に土壤水分は変えずに粗度を変えた時の、後方散乱係数の入射角依存性を示す。表面を平らに均した実験R-1では入射角の変化と共に後方散乱係数は大きく減少するが、粗度を付けた実験R-2, R-3では入射角が大きくなっても、大きな減少は見られない。これは表面が平らな場合、反射した電磁波には鏡面拡散成分が卓越しているためである。一方、表面に凹凸があると拡散成分が卓越するため、入射角が大きくなっても余り変化しない。この3つの実験から、対象地表面に僅かな凹凸があるか無いかで後方散乱係数の入射角依存性が大きく異なる事が分る。これは既往の研究成果とも一致している。この事実は衛星プラットフォームのデータから土壤水分量を抽出する際には地表面粗度を考慮しなければならないことを意味している。地表面粗度は土地被覆毎に大きく異なるので、結局、衛星からの土壤水分抽出にあたっては、地表面粗度分布地図が必要になることになる。

図-10中の曲線は散乱モデルで計算した結果であり、粗度条件からR-1はPerturbation Modelを、R-3はGeometrical Optics Modelを適用した。R-2の粗度に適用できるモデルは表-2の3つの中には無かった。R-1については観測値とモデル値が良く一致しており、モデルによっても入射角依存性をうまく推定できることが分かる。R-3では計算値の方が2 dB程度大きく算定されているが、入射角依存性は良く再現されている。

VI. ま と め

本研究ではCバンドマイクロ波散乱計と室内実験システムを構築し、表層土壤水分量のリモートセンシングのための基礎的な室内実験を行なった。その結果、以下の点を明らかにすることができた。

- (i) Cバンドマイクロ波の土壤への侵入深は、10 cm程度である。衛星搭載のサイドルッキングレーダーでは鉛直方向の土壤への侵入深はより浅くなる。
- (ii) 後方散乱係数と土壤水分量の関係式を定式化する場合に、マイクロ波散乱に結び付ける表層土壤深は2.5cmとして良い。
- (iii) 後方散乱係数の入射角依存性は入射角が小さいほど顕著である。
- (iv) 関東ローム土に対して、本実験システムでは

HV偏波よりHH偏波の方が土壤水分感度が高い。

- (v) 滑面と粗面とでは後方散乱係数に非常に大きな差が生じ、土壤水分量を抽出するには粗度の影響を考慮する必要がある。

本室内実験では、試料外部からの散乱により、0°から40°以上の入射角について一貫して実験を行なうことが難しかったので、屋外実験システムを構築し、様々な土地条件で屋外実験を行なった。これについては第II部で詳しく述べる。

謝辞：本散乱計システムを構築するに当たり、文部省宇宙研究所広澤春任教授には電波暗室を利用する便を図って頂く他、電磁波に暗い我々に基礎からシステム較正を始めとした実験方法をご教授頂きました。また日本大学理工学部長谷部望教授には本システムのアンテナを設計して頂いた他、実験結果を基に貴重な議論をして頂きました。また同大学の三枝健二講師にも様々な助言を頂き、時には実験に立ちあっていただきました。両氏の協力なしには適切な実験遂行は不可能であったと思われ、この場を借りて深く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたっては、当時千葉工業大学平田潔氏(現日本工営)、東京大学大学院三浦一彦氏(現鹿島建設)、輪笠一浩氏(現JR東海)の貢献によるところが大きい(平田, 1990); (三浦, 1992); (輪笠, 1995)。諸氏に甚大なる感謝の意を表する。

本研究は文部省科学研究費基盤研究(A)『マイクロ波散乱理論に基づく多入射角・多偏波計測による土壤水分・粗度の同時逆推定』(代表虫明功臣)と重点領域研究『衛星計測』「多様な地表面における熱水収支の動態の研究(代表小池俊雄:長岡科学技術大学)」の成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Dobson, M.C. and F.T. Ulaby (1986) : Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. GE*, **24**, 23-35.
- Dobson, M.C., F.T. Ulaby, M. T. Hallikainen and M. El-Rayes (1985) : Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. GE*, **23**, 35-46.
- Fung, A.K., Z. Li and K.S. Chen (1992) : Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface. *IEEE Trans. GE*, **30**,

- 356-369.
- 長谷部望 (1997) : 能動型マイクロ波システムによる電波暗室でない室内実験における外部からの雑音について, 私信.
- 平田潔 (1990) : マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測の基礎実験., 千葉工業大学卒業論文.
- Hirosawa, H. and S.K.Y. Matuzaka (1978) : Cross-polarized radar backscatter from moist soil. *Remote Sens. Environ.*, **7**, 211-217.
- 福本昌人, 田中米 (1995) : 土壌構造が誘電率特性およびマイクロ波の後方散乱特性に与える影響. 水文・水資源学会誌, **8**, 462-470.
- 三浦一彦 (1992) : マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分測定と蒸発量推定への応用. Master's thesis, 東京大学.
- 虫明功臣, 沖大幹, 小池雅洋, 弘中貞之 (1990) : マイクロ波リモートセンシングによる土壌水分追跡の室内実験—最大探知可能深—. 水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集, 38-41.
- 虫明功臣, 三浦一彦, 小池雅洋, 沖大幹 (1991) : マイクロ波散乱計土壌水分計測システムに影響を及ぼす各因子の検討. 水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集, 288-291.
- 沖大幹, 虫明功臣, 江守正多, 沼口敦 (1995) : 大気大循環モデルによる大河川の流域水循環と水収支推定. 水工学論文集, **39**, 103-108.
- 三枝健二, 佐藤公規, 山田美由紀, 長谷部望 (1994) : Semi-Empirical Modelによる関東ロームの誘電率評価. 1994年電子情報通信学会春季全国大会, B-158.
- Schmugge, T.J. (1980) : Effect of texture on microwave emission from soils. *IEEE Trans. GE*, **18**, 353-361.
- Twomey, A.S., C.F. Bohren and Mergenthaler (1986) : Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces. *Applied Optics*, **25**, 431-437.
- Ulaby, F.T. and M.A. El-Rayes (1987) : Microwave dielectric spectrum of vegetation, part II. *IEEE Trans. GE*, **25**, 550-557.
- Ulaby, F.T., P.P. Bradley and M. C. Dobson (1978) : Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part I - bare soil. *IEEE Trans. GE*, **16**, 286-295.
- Ulaby, F.T., P.P. Bradley and M. C. Dobson (1979) : Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part II - Vegetation - Covered Soil. *IEEE Trans. GE*, **16**, 286-295.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore and A. K. Fung (1986a) : *Microwave Remote Sensing*. Vol. III, Artech House INC., chapter Introduction to Random Surface Scattering and Emission, 922-1033.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung (1986b) : *Microwave Remote Sensing*. Vol. II, Artech House INC., 936-942.
- Ulaby, F.T., K.S.K. McDonald, M. Whitt, and M.C. Dobson (1990) : Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS). *Int. J. Remote Sens.*, **11**, 1223-1253.
- 宇都宮陽二郎 (1990) : 土壌水分のリモートセンシング—研究の紹介と今後の動向—. ハイドロロジー, **20**, 17-26.
- 輪笠一浩, 沖大幹, 虫明功臣 (1995) : 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**, 875-878.
- 輪笠一浩 (1995) : マイクロ波散乱理論に基づく表層土壌水分量の評価に関する研究. Master's thesis, 東京大学.
- 宇都宮陽二郎 (1992) : 土壌水分推定のためのサーマルイナシャーモデルに関する考察. 写真測量とリモートセンシング, 15-26.

(受付: 1997年6月3日, 受理: 1997年8月19日)