

土壤水分測定のためのマイクロ波散乱計実験システムの作成

Experiment system using microwave scatterometer for soil-moisture measurement

虫明 功臣*・沖 大幹*・小池 雅洋*

Katumi MUSIAKE, Taikan OKI and Masahiro KOIKE

1. はじめに

不飽和帯における土壤水分の挙動は、蒸発散、地表面流出の発生、雨水の保留および浸透、地下水涵養など、水循環の主要な過程と関連しておりきわめて重要である。しかしながら、最も水分変動が激しい地表付近の水分を非破壊で連続的に測定することは従来きわめて困難であったため、表層土壤水分のメカニズムについては、実証的研究が水循環機構の中でも最も遅れた分野となっていた。

一方、土壤の誘電特性が含水量によって大きく変化する性質を利用して土壤水分を計測する手法も提案されてきており、オンサイトの手法としてTDR (time-domain reflectometry) の原理を用いた測定法、リモートセンシ

ングを想定したマイクロ波散乱計に対する散乱強度の変化から土壤水分を推定する測定法などがある。マイクロ波散乱計についてはUlaby et. al. (1982) のグループなどアメリカでは実用化へ向けて種々のレベルで研究の積み重ねがなされており、日本ではHirosawa et. al.(1978) による基礎研究がある。しかし、水文学的立場からの応用研究は少なく立ち遅れている。きわめて近い将来にEERS-1やJERS-1などマイクロ波散乱計を搭載した地球観測衛星が打ち上げられ、グローバルな観測データが得られることを考えると、マイクロ波リモートセンシングによる土壤水分計測の地上基礎実験がきわめて重要であると言える。

以上を踏まえて、応用的立場から基礎実験をするための実験システムを作成した。室内基礎実験の主要な目的は、観測条件、および土壤水分以外の因子に対するマイクロ波散乱特性の変化を把握することである。観測条件としては観測周波数、入射角などがある。土壌面の条件としては地表面の粗さ、傾斜、植生、そして土壤特性な

表-1 マイクロ波散乱計システムの諸元

周波数	5.2GHz, 波長約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	
アンテナ利得	送信	受信 (dBi)
	VV偏波	21.25 21.35
	HH偏波	21.15 21.35
	平均	21.20 21.35
	cross	-4.25 -3.05
アンテナ単体の電力半値幅 (deg.)	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 (deg.)	VV偏波	10.26
	HH偏波	11.60
最大受信電力	0dBm	
最小受信感度	-110dBm (like偏波の実効-80dBm)	

註：VV偏波, HH偏波はそれぞれ磁界面, 電界面方向での測定を表す。

*京大生産技術研究所 第5部

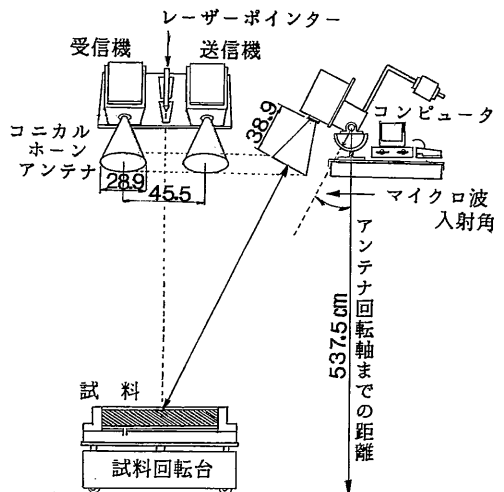


図-1 マイクロ波散乱計実験システム

研究速報
 どの影響が考えられている。

実験設備が整い、システム較正が終了し、第一次的な結果が得られたので以下に報告する。

2. 実験システムの概要

2.1 Cバンドマイクロ波散乱計

散乱計の諸元を表-1に示す。ビームの電力半値幅や利得の測定は文部省宇宙科学研究所の電波暗室において行った結果である。

アンテナは開口面の直径が 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り, 較正の結果はほぼ設計利得 21.10dBi 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。

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されている。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。実験ではすべて AGC 信号を用いた。最小受信感度は, HH 偏波あるいは VV 偏波の場合カップリングの影響で -55dBm 程度となっている。

2.2 散乱計架台および試料回転台

散乱計実験システムを図-1に示す。散乱計架台は東京大学生産技術研究所千葉実験所内水工実験棟にある地上約 5.4m の栈橋に取り付けられ, 入射角 (鉛直からの角度) を $0^\circ\sim 50^\circ$ の範囲で変えることができる。散乱計の間にはレーザポイントが設置され, ビーム中心と一致するように調整されている。

試料回転台はレールの上に設置され, 散乱計ビームの中心が回転台中心に照射するように移動可能である。台は約 $0.5\sim 2.0\text{rpm}$ で回転可能であり, ある実験状態に対して台を回転することにより複数の散乱電力をサンプリ

ングできるようになっている。また, 試料台底部には土壤試料の水分コントロールのための給排水口が設けられている。

アンテナ開口面から試料面までの距離は最短の場合で 380cm となり, これは波面での位相差が $\lambda/8$ になる限界距離 $R_c=2D^2/\lambda\approx 288\text{cm}$ より離れている。

逆に入射角が大きくなると, $140\text{cm}\times 140\text{cm}$ の試料面内に主ビームは入るものの, 主ビーム外に漏れる副ビームによる周囲からの反射が考えられるため, 回転台は幅 180cm にわたって電波吸収材で囲まれている。

2.3 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較正曲線は日本大工学部部長谷部研究室において実測・作成した。

3. マイクロ波の土壤への侵入深の検討

マイクロ波に対する土壤の散乱特性を測定するにあたり, 必要な土壤試料厚のチェックが必要である。このため以下のような予備実験を行った。

試料台の底面に銅板を敷き, 2mm メッシュのふるいにかけた風乾状態 (体積含水率 15%) の関東ロームを 1cm ずつ盛り立てていく。この場合表面状態は, 滑面であるための Rayleigh の基準, 表面粗度が $\lambda/8$ 以下であることを満たすようにする。

入射角 0° での実験結果は, 図-2 のようである。銅板からの反射電力を基準にした反射係数として整理してある。実線は多重反射モデルを考慮して反射係数 Γ を計算した値で, 反射係数

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

ここに,

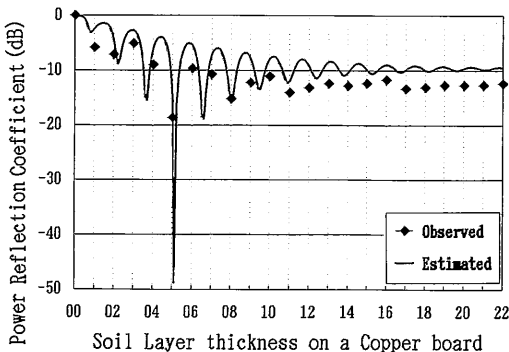


図-2 銅板上の土壤試料厚と反射係数

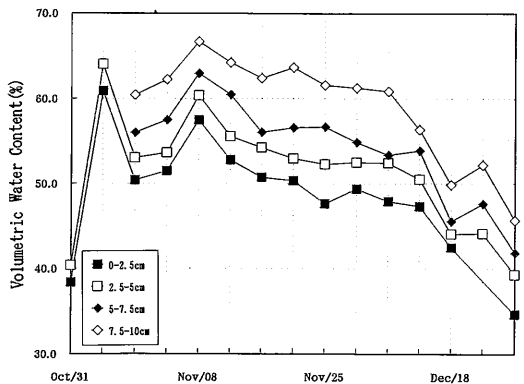


図-3 試料の土壤水分の乾燥過程

研究速報

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

$$\gamma = j(2\pi/\lambda_o) \cdot (\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \quad (3)$$

である。誘電率はHirosawa et al. (1978) の9.2GHzに対する測定値の図から

$$\text{複素誘電率 } \epsilon_r = 3.93 - j0.393$$

$$\text{透磁率 } \mu_r = 1.0$$

として与えた。なお、一般にマイクロ波の侵入深は電力値が境界面の1/eになる距離として定義され、この誘電率に対しては9.27cmとなる。

5~7cm程度の土壌厚さまでは底面に入れた銅板の影響が現れているが10cm以上土壌を入れればほぼ銅板の影響はないものと考えられる。ここで、銅板上に10cm程度以上土壌を敷き詰めた領域が振動しているのはカップリング電力や周囲の不要反射と、土壌からの反射波の位相差が土壌厚が変化する(アンテナ~試料間の距離が変化する)に伴って変化するためだと考えられる。これらの傾向は、より湿潤させた土壌についての実験結果にも見られた。

湿潤するにしたがって誘電率が大きくなるため、観測受信電力も大きくなり、結果としてマイクロ波が土壌へ侵入する距離は短くなる。したがって、最も乾燥した条件下でも10cm程度あれば良いので、土壌の厚さは20cmあれば充分であると言える。

4. 滑らかな土壌表面のマイクロ波散乱特性

4.1 レーダ方程式と後方散乱係数

この実験のレーダ方程式は、ビーム照射域内で後方散乱係数が σ^o が一定であるとする

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_t G_t G_r}{R^4} (A_o \cdot \sigma^o) \quad (4)$$

P_t : 送信電力 P_r : 受信電力

G_t : 送信アンテナ利得

G_r : 受信アンテナ利得

A_o : マイクロ波照射面積

σ^o : 後方散乱係数

(back scattering coefficient)

R : 対象物までの距離

である。 A_o は、ビーム幅から投影面の楕円近似をして

$$A_o = \pi \frac{(M+N)^2}{4} R \tan\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \cdot (M \cdot N)^{-(1/2)} \quad (5)$$

$$M = R\{\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan(\theta - \theta_o/2)\} \quad (6)$$

$$N = R\{\cos\theta \cdot \tan(\theta + \theta_o/2) - \sin\theta\} \quad (7)$$

として求めた。ここに、 θ_h 、 θ_o はそれぞれ照射面に水平、垂直方向のビーム幅、 θ は土壌面へのビームの入射角である。実験からは P_r が観測されるので、式(4)から σ^o が

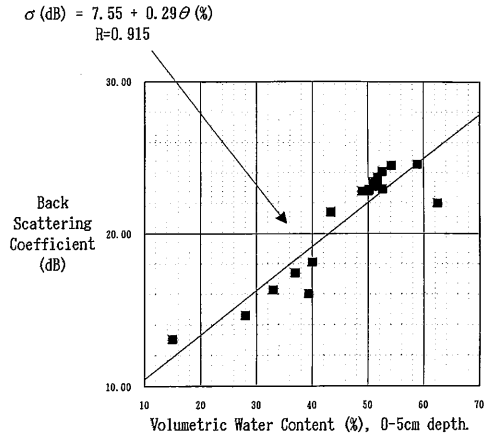


図-4 後方散乱係数の土壌水分依存性滑面、垂直入射、HH偏波。体積含水率は表層5cmの平均値。

求められる。

4.2 実験と結果

入射角 $0^\circ \sim 40^\circ$ について、土壌の含水率を変化させながら σ^o を測定した。実験にあたっては試料台の回転速度を1rpmとし、100msecごとに2分間サンプリングして得られた1,200個のデータを(対数でない)電力値で平均してその条件下の σ^o を求めた。

試験土壌はいったん飽和させた後、徐々に乾燥させた。観測期間中の体積含水率の変化を図-3に示す。体積含水率は、4深度(表層から2.5cm刻み)の乾燥密度を深度ごとに期間中は一定であるときみなして平均し、含水比との積から求めた。

$0 \sim 5.0$ cmの平均の含水率と、入射角 0° に対する σ^o との相関を示したのが図-4である。多少値はばらつくものの、後方散乱係数 σ^o (dB)と体積含水率(%)との間の相関係数は0.915となり、 σ^o の水分感度は0.29(dB/%)であった。実験した全ての入射角に対する σ^o と、各深度の体積含水率の組み合わせについて、この水分感度を求めたのが図-5、相関係数が図-6である。入射角 30° 付近からは、実験設備の関係からか、相関係数も悪くなり、水分感度も負の値を示すなどデータがやや疑わしい。しかし、 $0^\circ \sim 25^\circ$ の間で考慮すると、入射角が大きくなるにつれて深い土壌の体積含水率は浅い土壌の体積含水率に比べて感度、相関係数共に悪くなっており、斜め入射で表層付近の反射に対する寄与が増えるという妥当な結果となっている。また、得られた約0.2(dB/%)という水分感度の値から、1dBの精度で土壌の後方散乱係数が測定されれば、体積含水率の変化は約5%の精度で測定可能であることがわかる。

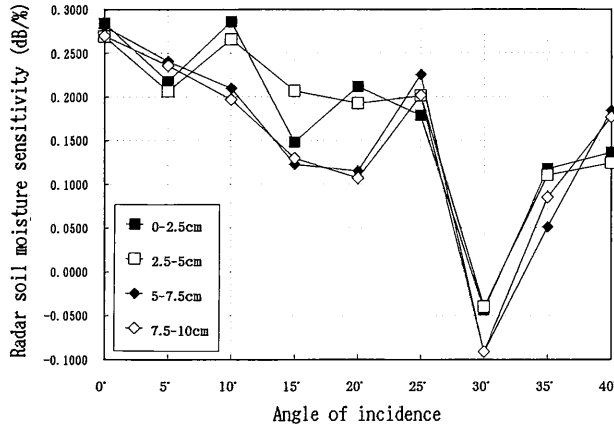


図-5 後方散乱係数の土壌水分感度 (dB/%)

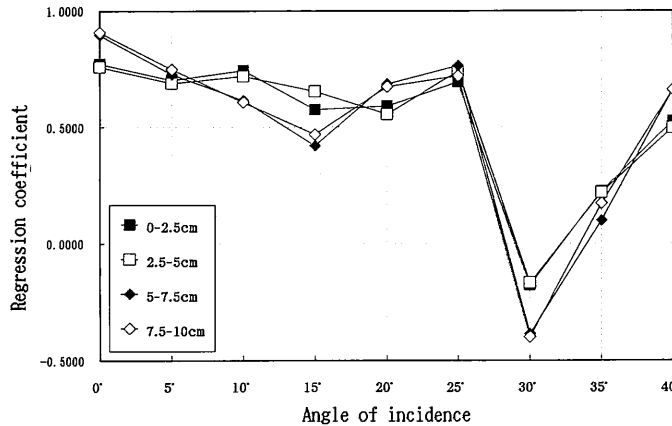


図-6 後方散乱係数と土壌水分との相関係数

5. 今後の課題

マイクロ波工学的な実験・観測の手法が徐々に蓄積され、ある程度満足のいくデータが得られるような散乱計～実験システムが構築された。これらにより、土壌水分の鉛直プロファイルの取り扱いといった水文学的な検討の段階に入る糸口をようやく得ることができた。今後はシステムの改良と共に、含水率はもちろん、偏波面、地表面粗度、土壌特性、および植生などのパラメータを変えて実験ケースを増やし、併せてモデル化についても検討していく予定である。

謝 辞

この研究については、文部省宇宙科学研究所の廣澤教授に実験ならびに解析の基礎からご指導いただき、また、日本大学理工学部の長谷部教授には頻繁にご教示を仰い

だ。さらに、実験環境を整えるにあたり、建設省土木研究所の水文研究室にお世話になった。また、散乱計取付架台と試料回転台の作成は、当研究所試作工場にお願いした。実験にあたっては千葉工業大学の福田慎一君の協力をあおいだ。なお、本研究は重点領域研究「地球環境」(代表者、東大・高木幹雄教授)の補助を受けている。ここに記して甚大なる感謝の意を表する。

(1991年1月22日受理)

参 考 文 献

Haruto, Hiroswa Setsu Komiya and Yukihiko Matsuzawa (1978): Cross-polarized Radar Backscatter from Moist Soil, Remote Sensing of Environment, 7, pp. 211-217.
 Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore, Adrian K. Fung, Microwave Remote Sensing (I)~(III), Addison-Wesley Publishing Company, 1982.