

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

# DETERMINATION OF SURFACE SOIL MOISTURE USING RADAR OBSERVATIONS AND SCATTERING MODELS

(和訳 レーダによる観測と散乱モデルに基づく表層土壌水分量の算定)

氏名 ロムショー シャキル アフマド

表層土壌水分量は、非常に重要な環境要素であり、陸面過程たとえば水文、気象、農業過程のモデリングのために必要不可欠なパラメータである。しかしその重要性にも関わらず、現在までのところ、水文、気象、農業モデルへ直接入力することが不可能なパラメータである。これは、時空間に亘る包括的な土壌水分計測が困難であることに起因する。この困難な時系列面的土壌水分の計測を可能たらしめるものとして、リモートセンシング技術、特にマイクロ波リモートセンシングが大いに期待されている。

面的土壌水分量計測へマイクロ波レーダリモートセンシングを適用するためには、地表面後方散乱係数 $\sigma^0$ の地表面の幾何学的・電気的特性に対する依存特性を理解することが必要である。この依存特性は、地表面粗度と植生の性質に強く影響されることによって、極めて複雑なものとなっている。土壌水分量推定アルゴリズムを開発するためには、地面および植生に関する精密な検証データに裏付けられた地上および衛星リモートセンシングと理論的モデリング手法を、様々な環境条件に対し適用することが必要である。そのため本研究では、様々な環境条件下での衛星データ解析と地上検証実験が、単一周波数（Cバンド）と多周波数（X,C,Lバンド）レーダシステムの両方を用いて行われた。実験結果は、表面散乱および体積散乱モデリングを用いて理論的に検討された。

土壌水分は様々な時空間スケールで変動を持つ。そのためタイ国・スコタイ水田域における検証実験では、約10haの地域を25m×30mのグリッドに分割して土壌水分を測定した。収集された12時期の観測土壌水分パターンを統計解析した結果、顕著な季節変動を見出した。乾燥期の土壌水分は広い空間において相関が高く、値の分散も小さいが、湿潤期には狭い空間相関性とより大きい分散が見られた。またヌジェット効果（空間相関性グラフの切片）は湿潤期により大きい値へと向かう傾向が見られた。これらの挙動は、地域の土壌水分分布を制御する水文学的、気象学的そして地形学的効果により説明することができる。タイ冬期の乾燥期間中、土壌水分量は非常に小さく地域内一様に分布している。

透水係数が小さいため土壌水分の水平方向の分布は小さい。逆に、湿潤期には土壌水分量は大きく、水平方向の変動も大きい。ヌジェット効果に見られた特徴は、乾燥期よりも湿潤期の方が変動の大きい土壌水分分布の空間変動あるいは測定誤差によると考えられる。

次に同じ領域において ERS-2 SAR 衛星による後方散乱係数と土壌水分変動の間に非常に高い相関と感度を見出した。そこで衛星データに関しても上記と同様の統計解析を適用した。衛星センサーは、地表面のある面積のマイクロ波信号を積分しているため、小スケールの空間変動の平滑化が想定される。しかし本研究では衛星データの空間相関性は実測土壌水分のものと同程度であった。分散に関しては衛星 SAR データの正規化により小さくなることが明らかになった。これは本研究で解析した全ての SAR データにおいて共通である。

さらに広い範囲の面的土壌水分分布を得るために、主成分分析(PCA)と変動係数法(CV)の2つの統計手法を、スコタイ水田域を含む約 830km<sup>2</sup> の領域における ERS-2 時系列データに適用した。その結果、流域規模での土壌水分空間分布の推定可能性を示すとともに、水文学における重要な概念である部分的流出寄与域—すなわち殆どの流出は土壌水分が時間的にあまり変化しない地域で生じるとするその地域—を地図上に特定できる可能性を示した。また、PCA 法は CV 法よりも適用性が高いことが判明した。

続いて、同領域において、理論的マイクロ波散乱モデルの適用可能性に関して研究を展開した。代表的な地表面散乱モデルである、IEM 散乱モデル、Dubois 散乱モデルは、ともに裸地面からの後方散乱には適用可能である。しかし植生がある場合、Dubois 散乱モデルの方が適用性が高い。そこで、Dubois 散乱モデルをタイの土壌水分量の推定に適用した。観測地域である狭領域の実測結果を用いた検証の結果、散乱モデルは非常に良い推定を示すことが判明した。しかし、スコタイ水田域に適用した水循環モデルシミュレーションより得られた広域土壌水分と広域マイクロ波後方散乱係数分布とを比較したところ、裸地面における空間分布は整合するが定量的には整合しないという結果が得られた。

以上より、理論的散乱モデルに関する検討を更に進めることが必要であることが認識された。そこで以降の本研究では、千葉実験所内において種々の実験を行い、その結果を各種散乱モデルにより詳細に検討した。

まず、地表面粗度と水分状態が変化する裸地条件下における IEM 散乱モデルの適用可能性を検討した。HH 偏波では散乱モデル推定値と実験結果との間に良い一致が得られたが、VV 偏波ではあまり良い一致は得られなかった。さらに、IEM 散乱モデルを用いて、地表面特性とセンサー構成の後方散乱係数に与える影響を理解するための感度解析を実行した。地表面高さの標準偏差 ( $\sigma$ ) は、最も敏感なパラメータで、特に入射角や周波数などが小さいほど敏感である。相関距離 ( $l$ ) も感度があるが、小さい入射角と周波数では感度が下がり、5cm 以下の場合感度がなくなる。 $\sigma$  と比較した場合、後方散乱係数に対する土壌水分の感度は、周波数に依存するが、数デシベル小さいことが判明した。

次に、体積散乱モデルを含む多くの散乱モデルを、高い草地を対象とした多偏波多入射角の C バンド散乱計システムを用いた実験により検証した。この条件では表面散乱モデル IEM と Dubois モデルは不適切であり、歪 Born 近似に基づく Lang's 体積散乱モデルがかなり良く後方散乱を算定することが示された。様々なフィールド条件下での実験結果に対して Lang's 体積散乱モデルを用いた感度解析を行ったところ、C バンドでは植生水分量への感度が一番高く、土壌水分への感度は二番目であった。つまり、対象とした種類と生長の植生状態でも SAR を用いた土壌水分探知が可能であることが示された。その可能性は、植生量の減少とともに増加する。後方散乱係数は表層土壌水分が小さくなるほどその感度は大きい。地表面パラメータや体積含水率に対する感度は、入射角が小さくなるにつれて大きくなるという結果が得られた。地面特性の感度は偏波に依存しないが、植生パラメータの感度は偏波に依存することが分かった。植生水分量の感度は入射角とともに増加し、また HH 偏波で大きいため、草地キャノピーは HH 偏波より VV 偏波でマイクロ波をより透過することが示された。

さらに、多周波システムによる土壌水分推定可能性を評価するため、X,C,L バンドの 3 周波数、多入射角、3 偏波による実験を麦耕地に対して行った。Lang's 散乱モデルを実験データの検証に使用したところ、C, L バンドの HH,VV 両偏波で特に良い一致が得られた。土壌水分の時間変動モニタリングは X バンドでは不可能であり、その可能性は波長が大きくなると増加することがわかった。L バンドは植生量が多い場合 ( $7.0\text{kg/m}^2$ ) でも土壌水分の変動に敏感であった。特に、入射角が小さいほど敏感であり、小さい入射角の L バンドによる地表面土壌水分推定の強い可能性が示された。これに対し C バンドは、小さい入射角で地面特性に、大きい入射角で植生パラメータにより敏感であった。

最後に、C, L バンドにおいて、土壌・キャノピー相互作用に対する地表面粗度の影響を調査するために、Lang's 体積散乱モデルを地表面散乱モデル(IEM)と結合した。その結果、L バンドでは地表面粗度の効果は、小さい入射角で HH, VV 両偏波に対し後方散乱係数の増加をもたらすが、入射角が大きくなると有意な変化をしないという結論が導かれた。また、C バンドでは、平坦から粗までの粗度の変化は大きな差を生み出さないことが示された。

以上より、土壌水分および植生の状況は場所により時期により大きく変動するが、植生下の地面に対しても、マイクロ波レーダーを用いた土壌水分計測が十分な可能性を持つことが示された。植生が密な領域では低周波数 (L バンド) 観測システムが有効であり、一方 C バンド観測システムは植生が密な領域には適用不可能である。残念なことに、土壌水分計測に相応しい単一のマイクロ波レーダーパラメータセットというものは有り得ないと言えよう。しかし、計測対象、すなわち地表面パラメータや植生パラメータを、複数のカテゴリーに分類したならば、あるカテゴリーに対して最も感度の高い単一のレーダーパラメータセットを設定することが十分可能であることが結論付けられる。