

論文の内容の要旨

論文題目： 衛星搭載型多偏波 SAR を用いた土壌水分分布評価手法の開発と
ALOS/PALSAR への適用

氏 名： 会田 健太郎

土壌水分は、地表面と大気間の水・熱輸送と降水の流出をコントロールすることにより、様々なプロセスを経て気候変動や洪水・干ばつなど全球規模の問題に影響を与え、水資源管理、農業生産においても重要な役割を担っている。そのため土壌水分の詳細な空間分布を把握するための手法として数 m の高分解能を持つ衛星搭載型の合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar) を利用した土壌水分モニタリングの研究開発が進められているが、実運用には至っていない。

SAR はアンテナから地表面に向けてマイクロ波を送信し、そのマイクロ波が地表面で散乱し再びアンテナ方向に戻ってきた強度を後方散乱係数として計測している。この後方散乱係数を決定づける現地パラメータは、大別すると土壌水分、地表面粗度、植生、土壌形態の4つとなる。今日の衛星 SAR に利用されている周波数は X, C, L の3つのバンドでありマイクロ波の周波数によってこれら現地パラメータの影響は異なる。本研究で注目する L バンドは、この中で最も周波数が低く波長が長いバンドである。これらのバンドで現地パラメータの影響を比較すると、L バンドは以下のような特徴を持っている。

- 土壌水分に対する応答性が高い： 散乱の強さは湿潤土壌の比誘電率に依存する。L バンドにおける湿潤土壌の比誘電率は C/X バンドよりも大きい。
- 大きな地表面粗度にも適用可能： モデル適用可能な粗度の範囲は波長との相対的な大きさに決定される。L バンドは C/X バンドよりも波長が長いことためモデルの適用範囲が実質的に広がる。
- 植生の影響が小さい： 物質による散乱は波長に反比例するため、波長が長いほど散乱が小さくなる。
- 土壌内部の情報が取得できる： 植生を透過するのと同様に、L バンドは土壌内部まで入り込む。そのため、土壌内部における体積散乱を適切に評価することで、より深い範囲の土壌水分や土壌特性などを把握できる可能性がある。

これらの理由から、L バンドが土壌水分観測に最適であると考えられる。

また、衛星 SAR の観測パラメータには、入射角や周波数、偏波があり、それらを変えて同時観測すれば、同じ地表面に対し複数の後方散乱係数を得ることができる。これにより複数の未知パラメータの同時評価が可能となるため、大きなメリットといえる。このうち衛星 SAR 単体で実現しているのは「複数偏波による同時観測」である。2002年には C バンドで2偏波同時観測が可能な ENVISAT/ASAR が打ち上げられ、2014年と2016年の Sentinel-A シリーズへと続いている。4偏波を同時に観測できる SAR は、2006年に JAXA (Japan

Aerospace Exploration Agency)から Lバンドを採用した ALOS/PALSAR (Advanced Land Observing Satellite/Phased array L-band Synthetic Aperture Radar)が打ち上げられ、以降 2007 年に X バンドの TerraSAR-X, C バンドの RADARSAT-2 が続々と投入された。ALOS/PALSAR は 2011 年に運用停止となったが、後継機の ALOS2/PALSAR2 が 2014 年に打ち上げられ、その後順調に運用されている。したがって、土壌水分観測に最適と考えられる Lバンド多偏波の衛星 SAR は、ALOS/PALSAR シリーズが唯一となっている。

SAR を用いた土壌水分推定における問題は、複数のパラメータの影響を含む後方散乱係数からどのように土壌水分だけを抽出するか、である。既往研究では、この問題の解決方法として現地パラメータと後方散乱係数を関係付けた経験式を構築したり、理論モデルを用いて現地データに適合することによって土壌水分を逆推定する、という方法などが提案されている。初期の衛星 SAR は、入射角、周波数、偏波がすべて固定であり 1 回の観測で計測できるのは一つの後方散乱係数だけであった。そのため、現地パラメータを減らしたり現地取得データを与える、また SAR の観測間隔が短ければ粗度や植生は変化しないと仮定したり土壌水分がないと仮定できる極度な乾燥状態や凍結状態から他の現地パラメータを推定する手法などが試みられてきた。

ここで多偏波 SAR の利用を想定すれば、複数の未知パラメータの同時評価が可能となるため土壌水分と粗度の同時推定やさらに植生を考慮して土壌水分を推定するなど今日まで多くの研究が報告されている。しかし、これら既往研究における未検討要素を 2 点挙げる事ができる。一つ目に、既往研究では地表面の表面散乱のみを対象にしており土壌内部の体積散乱を考慮していないことが挙げられる。Lバンドでは、特に乾燥した地表面において X バンドや C バンドに比べ地中深くまで侵入するため土壌内部の体積散乱も併せて評価する必要がある。これは、陸域の無視できない面積を占める乾燥地域や半乾燥地域への適用、乾季や旱魃時の状況を把握する上では重要になると考えられる。二つ目に、既往研究では同じ多偏波観測が継続することを前提としており多偏波と単偏波の両方に対応するアプローチは見られないことが挙げられる。多偏波 SAR 衛星の実際の運用においては、多偏波による観測頻度は非常に低く、ほとんどが単偏波または 2 偏波観測という現状がある。したがって多偏波データから土壌水分を推定するだけでは様々な用途で期待される観測頻度を実現するには不十分であり、単偏波データを活用するアルゴリズムとする必要がある。そこで、本研究の目的を以下の 2 つとした。

- ✓ 土壌水分推定に最適である「L バンド」の衛星搭載型多偏波 SAR を用いた土壌水分推定手法の開発
- ✓ 衛星搭載型多偏波 SAR の実運用状況を踏まえ、「多偏波と単偏波を活用して」土壌水分モニタリングを実現するアルゴリズムの開発

これら目的に基づき、本研究では Lバンドを世界唯一で採用している ALOS/PALSAR を用いて、最小限の現地データで、かつその実運用状況を考慮して、継続的に土壌水分をモニタリングする手法の開発を行った。

本研究では、Lバンドを用いることから明らかに植生を無視できる裸地を対象とし、現地パラメータと後方散乱係数の関係をシミュレーションするために土壌内部の体積散乱を考慮したマイクロ波散乱モデルを用いた。本研究で用いるマイクロ波散乱モデルは地表面における表面散乱と土壌内部における体積散乱それぞれの理論モデルを組み合わせたもので、表面散乱に IEM (Integral Equation Method)、土壌内部の体積散乱に放射伝達理論に基づいた解析手法を採用している。このモデルの現地パラメータは、土壌水分と、地表面での表面散乱にかかわる 2 つの地表面粗度パラメータ、そして土壌内部での体積散乱にかかわる 2 つの土壌パラメータ、これら合計 5 つである。これらで構成される土壌モデルは、粗度パラメータで表現される地表面を境界として、土壌パラメータで表現される均一な土粒子が深さ方向に半無限に広がっており、土壌水分が体積含水率に対応した粒径を持つ粒子として存在する、と仮定している。

このモデルに ALOS/PALSAR の多偏波データを適応することで推定可能なパラメータが 3 つとなるため、その他の 2 つのパラメータは現地観測を含めた何かしらの方法で同定しておく必要がある。そこで本研究では土壌パラメータを土性や土地利用などが同じ範囲であれば時空間的に一定であると仮定し、それを媒体にして SAR 後方散乱係数に適合を試みた。

本研究で提案するアルゴリズムは 3 つのステップで構成され、まず初めに対象地域の土壌パラメータを同定する。土壌パラメータは理論モデルにおける仮想的なパラメータであるため、実測可能な土壌水分と粗度から逆推定する手法を用いる。具体的には、多偏波 SAR 観測と同時にある 1 点で土壌水分と粗度を計測し、マイクロ波散乱モデルを用いて現地データから計算される後方散乱係数と SAR 後方散乱係数の差を最小とする土壌パラメータの値を同定値とし空間的に均一な土壌パラメータマップを作成する。そして次のステップで、同定した土壌パラメータを多偏波 SAR データに適用して土壌水分と 2 つの粗度パラメータを推定しそれぞれのマップを作成。最後のステップでは、先に得られた土壌パラメータと粗度パラメータを単偏波 SAR データに適用して土壌水分を推定しマップを作成する。以上がアルゴリズムの一連の流れであり、これにより衛星 SAR の観測偏波数にかかわらず全ての観測で土壌水分マッピングが可能となる。

本研究ではこのアルゴリズムの実現に向け、カンボジア北西部のバタンバン州に広がる水田地域で現地観測を実施した。現地の土壌サンプルからは、この地域の土壌は粘土土壌であり水を含んで膨らむ「膨潤」という現象により土壌水分の増加にともない固相率が減少することが確認でき、多偏波 PALSAR 同期観測で得られた土壌パラメータの同定結果においてもその性質に整合する関係が得られた。そして、その同定した土壌パラメータを用いて多偏波 PALSAR データから土壌水分と 2 つの粗度パラメータを推定した検証観測では、土壌水分は良好な精度であったが、2 つの粗度パラメータでは一方が過少評価、他方が若干過大評価であった。そして、2 つの異なる時期の推定粗度を用いて単偏波 PALSAR データから土壌水分を推定した結果からは、農地において適用する推定粗度は機械的に直近を与えるのではなく、年がことなっても農事歴に合わせることで土壌水分の推定精度向上につな

がることが示された。また、現地の 2 地点において全 PALSAR データから推定した土壌水分の時系列変化と現地の連続データと比較したところ、推定値が非常に良く追従していることが示された。これらの結果から、本アルゴリズムで作成した土壌水分マップの空間分布はある程度整合性を持った結果であると考えている。そして本アルゴリズムで得られた土壌水分マップにより、土壌水分の季節変化とともに灌漑による変化や降水範囲などを把握でき、簡易な被覆分類を施すことより洪水の広がりや稲の成長による植生の変化などをとらえることができる可能性を示した。

本研究で開発したアルゴリズムは、多偏波観測の観測頻度が少なく単偏波観測の観測頻度が多いといった実際の多偏波 SAR 衛星の運用において有機的にそれぞれの観測を結びつけることができ、詳細な土壌水分マップを定期的に提供できる非常に有効な手法であるといえる。また、本アルゴリズムは現行および今後投入される衛星 SAR への適用も可能であると考えており、実現すれば飛躍的な観測頻度向上につながる。そして、これまで全く考慮できなかった詳細な土壌水分分布のモニタリングによって各分野に貢献できると考えている。