

凍土を考慮したチベット高原における 単偏波SAR土壌水分推定アルゴリズムの開発

DEVELOPMENT OF A SINGLE POLARIZATION SAR ALGORITHM FOR SOIL MOISTURE INCLUDING THE EFFECTS OF PERMAFROST IN THE TIBETAN PLATEAU

会田健太郎¹・小池俊雄²・田殿武雄³・Jianchen SHI⁴
Kentaro AIDA, Toshio KOIKE, Takeo TADONO, Jianchen SHI

¹正会員 工修 東京大学特任研究員 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 工博 地球観測研究センター研究員 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙利用推進本部 (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

⁴Institute for Computational Earth System Science (ICESS), University of California, Santa Barbara, CA93106, USA.

The soil moisture in the Tibetan Plateau is considered to play a key role in the atmospheric heating, which affects the temporal variability of the Asian summer monsoon. Due to the characteristic topography and geocryology in the Tibetan Plateau, there is a large spatial inhomogeneity in soil moisture. Space-borne Synthetic Aperture Radars (SARs) are expected to observe detail soil moisture spatial distribution in large area. By considering seasonal change of the permafrost, this study improves a single polarization SAR algorithm for soil moisture, which uses a mid-winter SAR data for estimation of surface roughness. The results of the improved algorithm show reasonable soil moisture distributions in the Tibetan Plateau.

Key Words: *Tibetan Plateau, scattering model, soil moisture, surface roughness, permafrost, JERS-1, SAR, ALOS, PALSAR*

1. はじめに

チベット高原は、平均標高4000m以上の広大な範囲に永久凍土が分布し、季節的に融解する活動層は1~3mに達する。永久凍土の上層は、春から夏にかけての融解によって地表面に十分な水分を供給し、大気加熱にも大きな影響を与えている。また、微地形においても、土壌水分の分布は変化に富み、差の大きい不均一性を生み出しており、土壌水分の不均一性による蒸発量の誤評価が課題となっている。

また、モンスーンにともなう季節的降雨や、その年々変動の予測に必要な、大気・陸面相互作用とそれに関わる水循環過程の物理的なモデル化を実現するためにも、基礎・検証データとしての土壌水分の詳細な分布データが必要とされている。

チベット高原のような広大な領域で土壌水分分布を定量的に把握するためには、上空から広範囲を観測できる衛星リモートセンシングが有効である。特にこの場合、土壌水分の応答性が高く、10m程度という高分解能を実現している衛星搭載型SAR（合成開口レーダ）への期待

が大きい。

2. 既往の研究

衛星搭載型SARで観測される後方散乱係数は、土壌水分だけでなく地表面や土壌内部の複雑な相互作用に基づいた信号である。つまり一つの後方散乱係数から土壌水分の信号だけを抽出するには、その他多くのパラメータを何らかの方法で設定する必要がある。このことが土壌水分推定を困難にしている。

そこで田殿³は、詳細は後述するが冬期の土壌水分が凍結する凍土帯の特性と現地観測データをうまく組み合わせることで未知パラメータを設定し、単偏波SAR画像から50mメッシュの土壌水分マップを作成できることを示した。

しかし、この土壌水分推定アルゴリズムは、局所的な観測データに基づいており、また季節による凍土の土壌構造の変化が考慮されていないため、チベット高原全域への適用には至っていない。

3. 土壌水分推定アルゴリズムのプロセス

衛星搭載型SARで観測される後方散乱係数 σ^0 は、照射したマイクロ波が地表面および土壌内部で散乱し、そのうちアンテナ方向に戻ってくる信号の強度であり、衛星の仕様で決定する周波数 λ 、発信偏波 p 、受信偏波 q 、入射角 θ と、観測対象面のパラメータで決定する。

観測対象面のパラメータは、樹木や人工物がない地表面の場合、大きく分けて①地表面粗度 R 、②土壌水分 Mv 、③土壌構造の3つのパラメータで決定される。なお、土壌構造の要素は、土粒子の体積率 Sv と粒径 Sd である。

後方散乱係数の依存関係を形式的に記述すると以下のように表せる。

$$\sigma_{qp}^0 = f(\lambda, p, q, \theta, R, Mv, Sv, Sd) \quad (1)$$

観測対象を凍土帯とした場合、冬期には土壌水分が完全に凍結するためパラメータの一つである土壌水分を無視できる。そこで、田殿らは、凍土帯のチベット高原を対象として、マイクロ波散乱モデルを用いて冬期の後方散乱係数と現地計測した地表面粗度の関係を解析して得た土壌構造パラメータを導入することにより、冬期の後方散乱係数から地表面粗度を推定し、この地表面粗度を夏期の後方散乱係数に適用することで土壌水分推定を実現した。このアルゴリズムのフローを図-1に示す。

なお、田殿らが使用しているマイクロ波散乱モデル²⁾は、不連続な上下境界面を有する球形粒子がランダムに埋め込まれた不均質層からの散乱を、表面散乱項と体積散乱項の和として表しており、表面散乱項には1回散乱を表すIEMモデル、体積散乱項には放射伝達理論に基づく一次近似の解法を導入したモデルである。

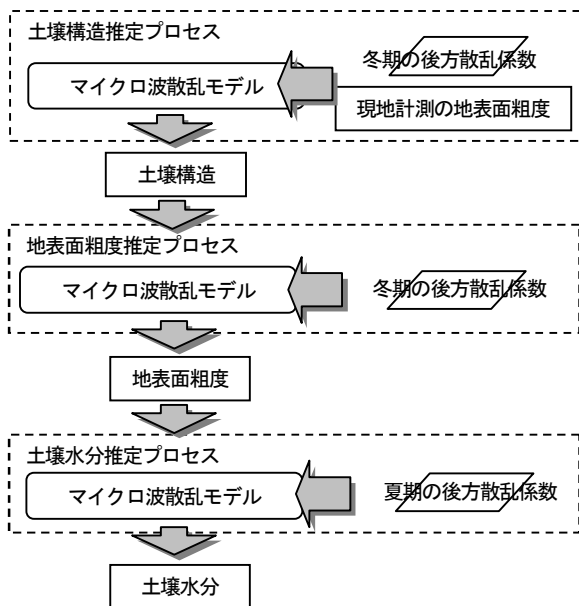


図-1 土壌水分推定アルゴリズムのフロー

4. 本研究の目的

本研究では、田殿らの単偏波SARを用いたアルゴリズムの推定精度向上とチベット高原全域への展開を試みた。

田殿らのアルゴリズムの問題点として、マイクロ波散乱モデルを用いて冬期の後方散乱係数から得た土壌構成を、凍土の季節変化を考慮せずに夏期にそのまま適用している点が上げられる。

図-2に示すように、夏期の湿潤土壌では、マイクロ波散乱に寄与する誘電率が大きい水の存在のために土壌内部の体積散乱は、表面散乱よりも相対的に小さい。しかし、冬期の土壌は、水分の凍結により非常に乾燥した状態であるため、体積散乱が湿潤土壌よりも相対的に増加する。また、氷は、土粒子とほぼ同じ誘電率を持つことから、土粒子と同等に体積散乱に影響を与えることができる。

したがって、冬期の後方散乱係数から表面散乱を正しく見積もるためには、土粒子、空気、氷の混合体による体積散乱の算定精度向上が必要であり、氷の効果をどのように扱うかが鍵となる。

これらの検討により、冬期の後方散乱係数から表面散乱に大きく依存する地表面粗度を推定する際の精度向上が期待でき、それに伴い土壌水分の推定精度向上にも繋がると考えられる。

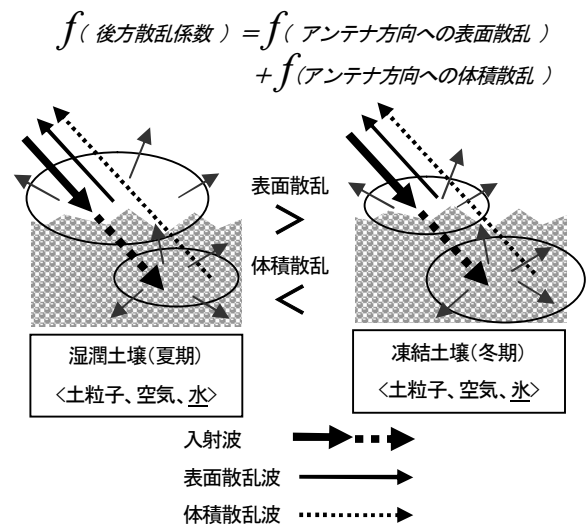


図-2 凍土におけるマイクロ波散乱の効果

5. 本研究の着目点

土粒子や氷粒子などマイクロ波の体積散乱に寄与する土壌中の粒子を「散乱体」と呼ぶことにし、季節変化による散乱体のモデル化を検討した。

(1) 季節変化に伴う水の誘電率の変化について

気温が下がり地温が0℃以下になると、土壌中の水分が土粒子とともに表層から凍結する。これが「凍土」であり、マイクロ波散乱においては、凍結前後で著しく異

なった性質を示す。

ここで重要なのは、水が液体から固体（氷）に変化することに伴う水の誘電率の変化と、土粒子に氷粒子が加わることで散乱体の構成が変化することである。マイクロ波帯での液体水の誘電率は60～80に対し、氷は3程度であり、乾燥土の誘電率2～4と同程度となる。そのため、誘電率に関しては土粒子と同等に扱うことができる。しかし、土粒子と氷粒子をマイクロ波散乱に依存する「散乱体」として考えると、体積率や粒径は不明確であり、物理的な計測は困難である。

(2) 水分の凍結にともなう散乱体のモデル化

土壌中の水分は、毛管現象によって保持されている自由水と土粒子の表面に電気的な結びつきにより吸着している結合水に分けることができ、主に凍結するのは土粒子の間隙に存在する自由水である。そこで、含水率と凍結後の関係をモデル化した。

図-3上段は、本モデルで仮定した水分の配置状況である。左端の水分量が少ない場合は、水分子が土粒子を膜で覆うように配置する。また、中央および右端の水分量が多い場合は水分子が張力によって土粒子同士をつないでトラス状に配置する。このトラスの程度は水分量によって変化し、凍結時は同様な配置を保つものとした。

図-3下段は、本モデルで仮定した氷の配置状況である。中央および右端のトラス状の氷は土粒子よりも小さな氷粒子で構成されるとし、大きな土粒子の間隙に小さな氷粒子が存在するように配置する。ただし、左端の水分量が少ない場合は、土粒子を覆う氷膜として扱うものとした。

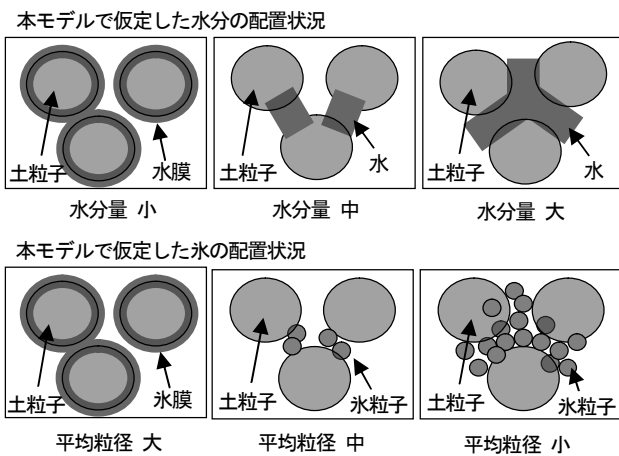


図-3 水分の凍結にともなう散乱体のモデル化

ここで、マイクロ波散乱のパラメータの一つとなる土粒子と氷で構成される散乱体の粒径は、土粒子と氷の誘電率がほぼ等しいことから平均粒径で与えることとした。したがって、凍結前の水分が少ないほど氷粒子が少ないため平均粒径は大きく、水分が多いほど氷粒子が多いため平均粒径は小さくなる。

また、散乱体の体積率は、土壌の体積率に氷の体積率を加えたものを与えることとした。

表-1に土壌水分量の大小による散乱体パラメータの相対的な違いをまとめた。

表-1 土壌区分と散乱体パラメータの相対的な違い

夏期 土壌水分量	小	中	大
冬期 氷量	小	中	大
散乱体粒径	大	中	小
散乱体体積率	小	中	大

(3) 水分の凍結にともなう散乱体パラメータの定式化

モデル化した各パラメータの依存関係を形式的に記述すると、以下ようになる。

$$\text{氷の体積率} : I_v = f(M_v) \quad (2)$$

$$\text{氷の粒径} : I_d = f(M_v) \quad (3)$$

$$\text{単位体積における氷粒子数} : n = f(I_v, I_d) \quad (4)$$

$$\text{散乱体体積率} : S_{Iv} = f(S_v, I_v) = f(S_v, M_v) \quad (5)$$

$$\text{散乱体粒径} : S_{Id} = f(S_d, I_d, m, n) \quad (6)$$

M_v : 土壌水分の体積率、 S_v : 土壌体積率

S_d : 土粒子の粒径、 m : 単位体積における土粒子数

土壌粒子と氷粒子で構成される冬期土壌の散乱体パラメータの物理的な関係は、以下ようになる。

$$\text{水分の凍結に伴う体積増加} : I_v = M_v \cdot 1.1 \quad (7)$$

$$\text{凍土の散乱体体積率} : S_{Iv} = S_v + I_v \quad (8)$$

凍土を構成する散乱粒子の平均粒径 :

$$S_{Id} = (S_d \cdot m + I_d \cdot n) / (m + n) \quad (9)$$

(4) 散乱体パラメータ (S_{Iv} , S_{Id}) の関連付け

ここで、散乱体パラメータを導入して後方散乱係数を形式的に記述すると、式(10)のように表される。

$$\sigma_{qp}^0 = f(\lambda, p, q, \theta, R, M_v, S_{Iv}, S_{Id}) \quad (10)$$

冬期の後方散乱係数から粗度 R を推定する時、衛星の仕様で決定する λ, p, q, θ を除くと、土壌水分量 M_v は 0% であるため、未知のパラメータは 2 つの散乱体パラメータ、散乱体体積率 S_{Iv} とその粒径 S_{Id} だけとなる。そこで、唯一の入力値である後方散乱係数から粗度を推定するために、 S_{Iv} と S_{Id} の関連付けを検討した。

a) 解析方法

チベット高原では、乾燥帯や湿潤帯など特徴的な領域に観測サイトが設けられ、1km四方で地表面粗度や土壌水分の分布が計測されている。そこで、まず冬期 SAR 画像から各サイト実測領域と同じ 1km 四方 (81×81pixel) の

後方散乱係数を入力値とし、散乱体パラメータを変数としたマイクロ波散乱モデルのシミュレーションから各サイトの粗度分布を推定した。次に、それを各サイトの実測粗度分布と比較し、再現性を検証する事で各サイトの土壌状態に適応できる Slv と $Slid$ の組み合わせを求めた。

そして、各サイトの Slv と $Slid$ の組み合わせから、チベット高原全域で適用できる Slv と $Slid$ の関係を求めた。

b) 解析結果

チベット高原に設けられている8つのサイトにおける解析から表-2に示した Slv と $Slid$ の組み合わせが得られた。表-2の結果から、 Slv が小さい場合は乾燥土壌、逆に Slv が大きい場合は湿潤土壌と判断できるが、現地調査で得られた状況とも適合しており、概ね妥当な結果であると言える。

表-2 チベット高原の8サイトにおける Slv と $Slid$ の組み合わせ

$Slid$ (cm)	Slv (体積比)	適用サイト
1.6	0.6	GEIZE, SHIQ, TOT
1.4	0.7	D66
1.2	0.8	D110
1.0	0.9	AMD
0.8	0.9	D105
0.6	0.9	MS3478

図-4は、8サイトの Slv と $Slid$ の組み合わせをプロットしたものであるが、この関係がチベット高原全体に適用可能な関係である考えられる。

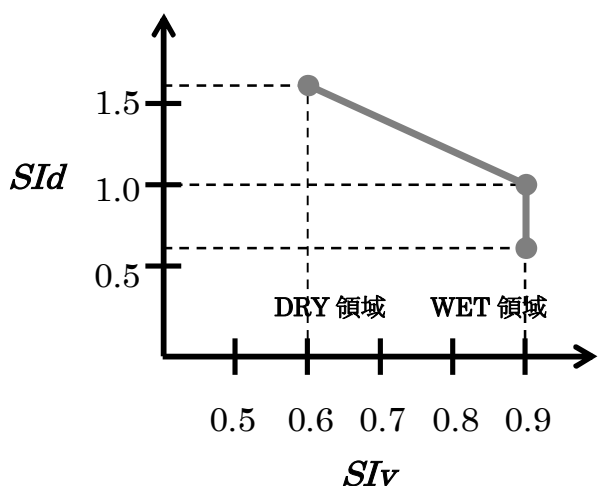


図-4 チベット高原全体に適用する Slv と $Slid$ の関係

表-2、図-4で表される Slv と $Slid$ の関係は、以下の式(11) (12)で表すことができる。

$$Slv = -0.5 \cdot Slid + 1.4 \quad (1.0 \leq Slid \leq 1.6) \quad (11)$$

$$Slv = 0.9 \quad (Slid \leq 1.0) \quad (12)$$



写真-1 サイトGAIZEの周辺状況. 平坦な乾燥地帯.



写真-1 サイトD66の周辺状況. 平坦で比較的乾燥した草原地帯.



写真-1 サイトMS3478の周辺状況. 凍土帯特有な凹凸が大きいアースハンモックが広がる湿潤地帯.

(5) 後方散乱係数と散乱体パラメータの関係付け

前節では、チベット高原全域に適用できる Slv と Std の関係を求めたが、唯一の入力値である後方散乱係数から Slv と Std の組み合わせを決定する必要がある。そこで、 Std に注目して後方散乱係数と散乱体パラメータの関係付けを検討した。

冬期から夏期の後方散乱係数の増加は、土壌水分の増加に起因するものと一般的に考える事ができる。そこで、SAR画像から各観測サイト1km四方を抽出し、夏冬の平均後方散乱係数を求めた。また、 Std は、形式的に式(13)のように表せ、土壌水分 Mv と関係を持っているため、後方散乱係数 σ^0 と Std を関係付けることが可能である。

$$Std = f(Slv) = f(Sv, Mv) \quad (13)$$

そこで、図-5に示したように Std と適応サイトの夏・冬後方散乱係数の差($d\sigma^0$)をプロットし、その関係を式(14)で表すことができた。

$$Std = -0.149 \cdot d\sigma^0 + 1.53 \quad (14)$$

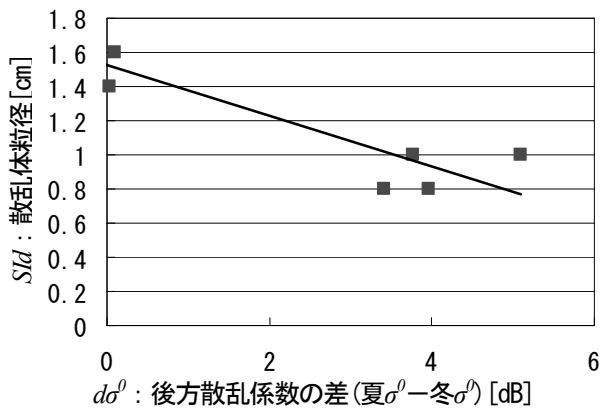


図-5 夏・冬後方散乱係数の差 $d\sigma^0$ と Std の関係

この結果から後方散乱係数と散乱体パラメータが関係付けられ、冬期の土壌中に発生する氷の体積散乱を考慮した粗度 R の定量的な推定が可能となる。

6. 氷体積率を考慮した地表面粗度推定結果

図-6は、チベット高原に設けられた4サイト(D66、AMD、MS3478、GAIZE)において、地表面粗度 R の推定分布と実測分布を重ね合わせて示したものである。左側が従来のアルゴリズム、右側が氷体積率を考慮した新アルゴリズムの推定結果である。なお、地表面粗度 R の値は、表面高さの標準偏差である。

新アルゴリズムの推定地表面粗度の分布は、アースハンモック帯であるMS3478の粗度が広い範囲で分布し、乾燥帯であるGERZEでは小さい値に狭い範囲で分布しており、地域的な特徴を表現できていると考えられる。従来

アルゴリズムの結果と比較すると、精度が上がり、推定できているピクセルも増えていることが明らかであり、冬期において氷による体積散乱効果を考慮することが重要であることがわかる。

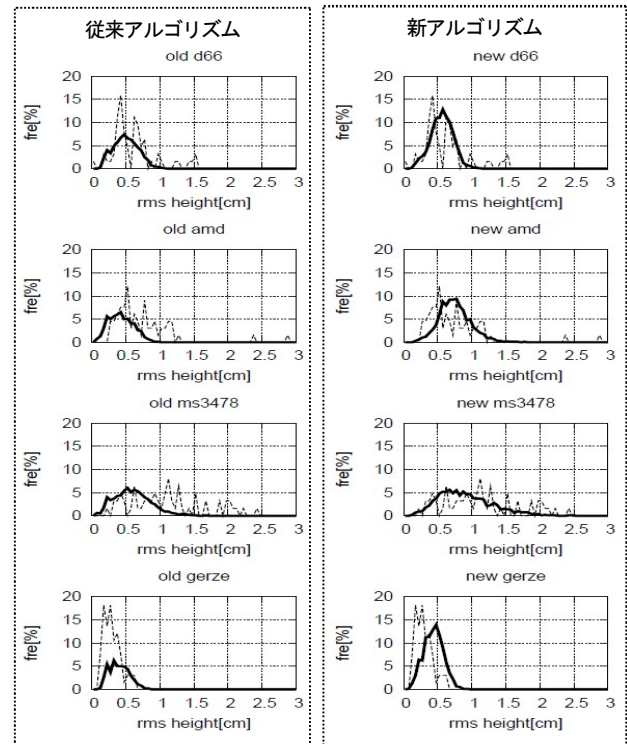


図-6 推定地表面粗度の分布. 実線が推定値、破線が実測値. 上段からサイトD66、AMD、MS3478、GAIZEである。

7. アルゴリズム適用結果

図-8は、チベット高原に設けたサイトの一つであるAMD周辺のSAR画像(図-7)を新アルゴリズムに適用して作成した土壌水分マップである。

図-8からは、土壌水分の分布が地形に依存していることを読み取ることができる。SAR画像と見比べてみると北側の山地の谷では含水率が高くなっており、南部の平地に広がるように乾燥していく様子がはっきりと捉えられている。

これは、石平ら³⁾で述べられているように、谷部は斜面効果によって湿潤となり、それが凍土の熱的性質を変化させるため活動層厚が薄くなり、相対的に、土壌水分の高い領域が出現することが土壌水分マップでも表されていると考えられる。

このように、SAR画像を用いて作成した50mメッシュの土壌水分マップからは、領域の土壌水分分布特性を詳細に把握することが可能である。

また、図-9は、チベット高原の6サイトを含む範囲で、本アルゴリズムを適用して作成した広域土壌水分マップである。本研究により、チベット高原全域への展開が可能となり、このような広域の土壌水分分布を把握することが可能となった。

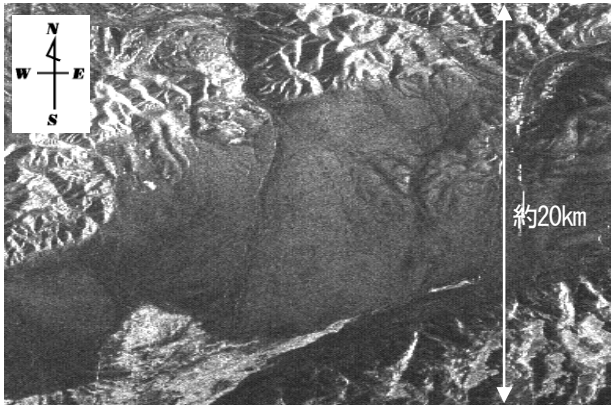


図-7 JERS-1のSAR画像(AMD周辺、1993年8月17日)

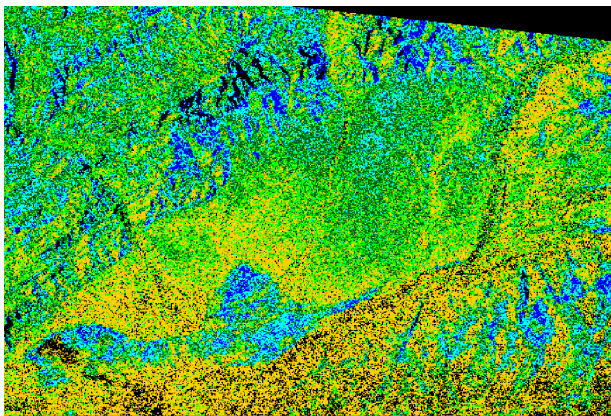


図-8 推定土壌水分の分布(AMD周辺、1993年8月17日)

8. 結論と今後の展望

本研究では、土粒子、空気、氷の混合体による体積散乱の算定精度向上を目指し、氷の効果を検討した。この結果、地表面粗度の推定精度が向上し、土壌水分推定をチベット高原全域に展開することができた。

土壌水分推定の過程は、粗度が求まっていれば、どの時期のSAR画像にも適応できるため、一旦粗度マップを作成すれば、繰り返し利用して土壌水分分布を把握することができる。したがって、観測間隔が長い衛星SARでも土壌水分分布の季節的な変化を捉えることができ、詳細なスケールでの分布変動を理解する上では重要なデータになると考えられる。

2006年1月24日には、多偏波による同時観測が可能なPALSAR（フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ）を搭載したALOS（だいち）が打ち上げられた。このセンサによって、広範囲の詳細な土壌水分分布の把握に大きな進展が期待できるが、凍土帯の特徴を十分に捉え単偏波SARのアルゴリズムの推定精度を高めておくことは、今後の多偏波SARを用いたアルゴリズムの開発においてより高い精度の確保を目指すため、重要なステッ

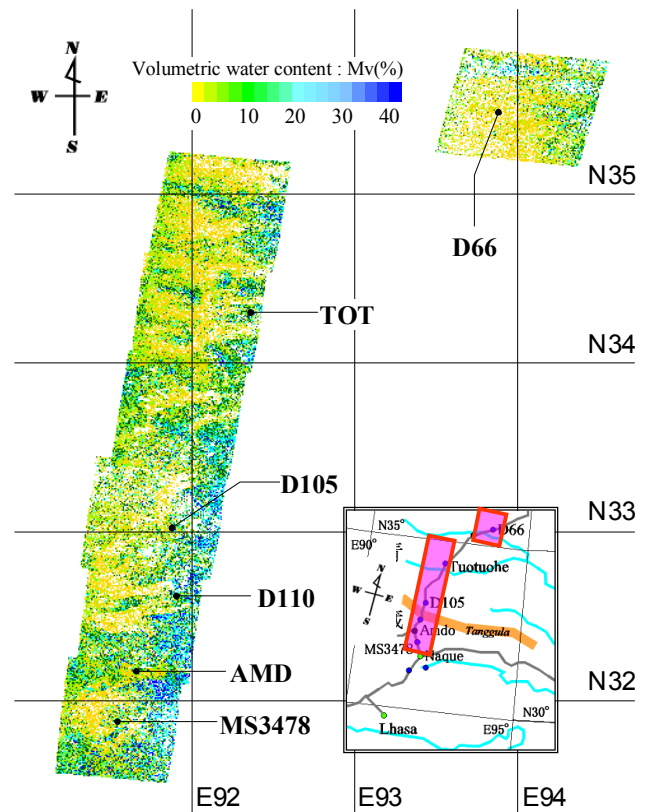


図-9 チベット高原の広域土壌水分マップ

(D66: 1993年9月27日, D66以外: 1993年8月17日)

プになると考えられる。

今後は、本研究の成果を踏まえ、多偏波SARを利用したアルゴリズムの開発に展開したいと考えている。

謝辞: 本研究は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の「陸域観測技術衛星（ALOS）データ利用公募型研究」による研究成果の一部であり、GAME-Tibetプロジェクトで得られた成果を使用している。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田殿武雄, 小池俊雄, Jiancheng SHI, DING Yongjian: 地表面粗度の空間分布を考慮したSARによる凍土帯土壌水分の推定手法の開発, 水工学論文集, Vol.42, pp.103-108, 1998.
- 2) Jiancheng Shi, James Wang, Ann Y. Hsu, Peggy E. O'Neil, and Edwin T. Engman: Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data, *IEEE TRANSACTION AND REMOTE SENSING*, VOL.35, NO.5, pp.1254-1266, 1997.
- 3) 石平博, 小池俊雄, 広瀬望, Wang Shaoling, Shen Yongping, Ye Bosheng: 永久凍土の融解過程に及ぼす地形効果の観測的研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.97-102, 1999.

(2008. 9. 30受付)