

改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)による 土壌水分・植生水分観測手法の開発

DEVELOPMENT OF AN ADVANCED MICROWAVE SCANNING RADIOMETER (AMSR-E)
ALGORITHM FOR SOIL MOISTURE AND VEGETATION WATER CONTENT

小池俊雄¹・中村佳照²・開発一郎³・Gombo Davaa⁴

松浦直人⁵・玉川勝徳⁶・藤井秀幸⁷

Toshio KOIKE, Yoshiteru NAKAMURA, Ichiro KAIHOTSU, Gombo DAVAA,
Naoto MATSUURA, Katsunori TAMAGAWA, Hideyuki FUJII

¹正会員 工博 東京大学大学院社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

²学生会員 工学 東京大学大学院社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

³非会員 工博 広島大学総合科学部自然環境科学 (〒739-8521 東広島市鏡山1丁目7-1)

⁴非会員 工学 Institute of Meteorology and Hydrology (Ulan Bator, Mongolia)

⁵非会員 宇宙航空研究開発機構 地球観測利用研究センター (〒104-6023 東京都中央区晴海1丁目8-10)

⁶非会員 工修 科学技術振興事業団 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

⁷正会員 工修 科学技術振興事業団 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

Soil moisture and water content in vegetation are the key parameters of land-atmosphere interaction, which affect the seasonal and interannual variations of the global and regional water cycle considerably. To monitor these parameters in global and regional scales effectively, an algorithm for the Advanced Microwave Scanning Radiometers (AMSR & AMSR-E) launched in 2002 has been developed in this paper. This paper presents a physically based radiative transfer model by considering the effects of extinction in soil layer and absorption and radiation in vegetation layer and a retrieval algorithm by using the satellite sensor data. A good accuracy of the algorithm is obtained through the algorithm validation in the Mongolia reference site of the Coordinated Enhanced Observation Project (CEOP). Consequently, a soil moisture data set is generated in Mongolia by applying the algorithm to the AMSR-E.

Key Words: Soil moisture, Vegetation water contents, Volume scattering, AMSR-E

1. はじめに

(1) 土壌水分・植生水分の重要性

陸域表面の水文量は大気との相互作用を通して、気候の季節変化や年々変動に深く関与している。とりわけ土壌水分量の変化は地表面の熱収支を変化させる働きがあるため、長期的な気候変動を考える上で重要な水文量の一つと考えられている。従って、土壌水分の把握は、気候変動を理解し、モデル化して、予測する上で重要なことである。土壌水分は地表面の蒸発散に強く影響を及ぼしており、地表に達した降水が河川への流出や蒸発散に分配される過程においても重要な役割を担っている。

また陸域の地表面は植生に覆われている場合が多く、土壌水分を考える場合において、植生の影響の考慮は必要である。植生自体も蒸散を通して水循環に影響を与えるなど、長期的気候変動を考える上で重要な要素となっ

ている。

(2) 衛星リモートセンシングの重要性

陸面水文量のグローバルな情報収集のために、衛星を用いたマイクロ波リモートセンシングによる観測手法が利用され始めている。これはマイクロ波が大気の影響を受けずに、昼夜関係なく定期的かつ広範囲に観測できること、液体水分が土壌と比べてマイクロ波領域で非常に高い誘電率を有しており、陸面水文量の観測に適していること、という二つの利点があるからである。

そこで本研究では、衛星からのマイクロ波観測によって地球規模の土壌水分と植生水分を観測する手法開発の基礎研究として、基礎となる放射伝達方程式およびアルゴリズムの開発、検証、衛星データを用いた地域土壌水分データセットの作成を目的としている。

(3) 改良型高性能マイクロ波放射計について

2002年に二つの改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E, AMSR)が宇宙開発事業団(NASDA)により開発され、AMSR-Eは米国航空宇宙局(NASA)の衛星Aquaに、AMSRはNASDAのみどり2号に搭載されて打ち上げられた。これら二つの衛星は順調に稼動しており、2003年6月よりNASDAからAMSR-Eのデータが各国際研究機関に提供されている。AMSR-Eの仕様は以下の表に示す通りである。

表 1 AMSR-Eの仕様

中心周波数 (GHz)	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0	89.0
						A系	B系
帯域幅 (MHz)	350	100	200	400	1000	3000	
偏波	水平および垂直						
3dBビーム幅 (°)	2.2	1.5	0.8	0.92	0.42	0.19	0.18
瞬時視野 (km)	43x75	29x51	16x27	18x32	8.2x14.4	3.7x6.5	3.5x5.9
サンプリング間隔 (km)	9x10					4.5x4	4.5x6
温度分解能 (K)	0.34	0.7	0.7	0.6	0.7	1.2	1.2
入射角 (度)	55.0					54.5	
ダイナミックレンジ (K)	2.7 - 340						
走査幅 (km)	約1450						
積分時間 (ミリ秒)	2.5					1.2	
量子化ビット数 (bit)	12	10					
走査周期 (秒)	1.5						

2. アルゴリズムの開発

(1) 放射伝達方程式の開発

a) 土壌面-植生層放射伝達モデル

土壌水分算定で用いる低い周波数領域のマイクロ波放射伝達では、波長が長いために大気の影響は無視できるので、衛星で観測されるマイクロ波放射輝度温度 T_{bp} は、植生の影響を含めて次のように表すことができる¹⁾。

$$T_{bp} = T_{bsp} \cdot e^{-\tau_c} + (1 - \omega_c)(1 - e^{-\tau_c})T_c \quad (1)$$

ここで添え字pは偏波をあらわし、 T_{bsp} は地表面から放射されるマイクロ波輝度温度であり、 τ_c 、 ω_c 、 T_c はそれぞれ植生層の光学的厚さ、単一散乱アルベド、物理温度である。式(1)の右辺第1項は植生層によって消散される地表面からの放射を表し、第2項は植生層自体からの上向き放射を表している。

土壌水分をDobsonの式に代入して土壌の混合誘電率を求め、土壌の体積散乱を無視すると、観測角と混合誘電率から求まるFresnel電力反射係数に土壌面粗度影響を含め、1からこれを差し引くことによって土壌面の放射率が求まり、この土壌の放射率と地表面物理温度の積が地表面放射輝度温度(T_{bsp})として、下記のように求められる¹⁾。

$$T_{bsp} = [1 - \{(1 - Q) \cdot \Gamma(\theta, p) + Q \cdot \Gamma(\theta, q)\} \cdot e^{-h' \cos^2 \theta}] \cdot T_s \quad (2)$$

この式において、 T_s は地表面物理温度、 Q は偏波混合率、 h' は粗度係数、 q は p と異なる偏波、 Γ はFresnel電力反射係数、 θ は観測角を表す。 θ はAMSR-Eでは55.0度であり、 Q と h' は土壌の表面粗度に依存する係数である。

b) 土層での消散・射出モデルの導入

式(2)の土壌からのマイクロ波放射伝達モデルでは、土壌面のみの性質を考慮しているが、乾燥土壌では土層中での放射伝達が重要であることが指摘されている。Fujiiらは、米国オクラホマ州での地上マイクロ波放射計による観測から、体積土壌水分10%以下の乾燥状態では、土壌水分が増加すると見かけの放射率(マイクロ波放射輝度温度を地表面温度で除した値)が増加することを見出した²⁾。一般には土壌水分が増加すると放射率は低下すると考えられており、全く逆の結果である。これは、土壌が乾燥すればするほど、侵入深さが増すために土層での放射伝達過程の影響が大きくなることに起因している。つまり、乾燥すればするほど土層での消散によって放射率が低下し、さらに、一般には土層深部の地温は地表面温度より低いために見かけの放射率が低下すると考えられる。

現在提案されているマイクロ波放射計による全ての土壌水分アルゴリズムは、土壌水分が増すほど放射率は低下するという原理に基づいており、Fujiiらの観測結果は、これらのアルゴリズムを乾燥地域に直接適用すると大きな誤差を生むことを示唆している。事実、AMSRの土壌水分アルゴリズム開発のために実施されたシミュレーションデータを用いたアルゴリズム性能国際比較実験では、アフリカや西アジアの乾燥地域で約20%と高い体積含水率が推定されており、この問題の解決が国際的に望まれていた。

そこで本研究では、土層での放射伝達過程を取り込むために、大気中の降水粒子の算定に用いられている4 stream fast model³⁾を土層中での放射伝達に適用し、その上に従来の土壌面モデルを組み合わせた新たな土壌系の放射伝達モデルを開発した。これは、土層を土壌水分によって定まる誘電率を有する吸収・放射体中に、多数の球形土粒子から構成される散乱体が埋め込まれた上部境界を有さない系と見なし、その上に厚さを有さない屈折・反射のみの効果を表す土壌面モデルを組み込んだもので、乾燥しているときは土層での消散過程の影響が強く、土壌水分が増加すると土層の影響はなくなり、土壌面からの放射の影響が支配的になるモデルである。地上での土壌水分、地温プロファイル観測と衛星観測により、一定値と見なす土粒子の大きさを定め、土壌の深さ250cmまでを5cm毎に放射伝達を計算する。

得られる放射率から滑らかな面でのFresnel電力反射係数を求め、これを式(2)に代入することにより、土層での消散過程を考慮した放射伝達方程式を得ることができる。

このモデルにおいて、土粒子は球形、均一粒径、独立した散乱体として仮定している。しかし現実の土壌は粒の大きさや形も様々であり、粒子同士がくっついている。このように放射散乱形態が異なっているため、現実とモデルとの土粒子の表現が異なっている。また、砂地や粘

土層といったテクスチャーの違いを考慮するために土層タイプによる区分が必要であるが、現段階では考慮しておらず、今後の課題として考察が必要であると考える。

c) 植生パラメータのモデル化

植生層の光学的厚さ τ_c と単一散乱アルベド ω_c は、厳密には植生の形態やその分布、空間個数密度、植生水分量等の多くのパラメータによって定まるが、既往の研究では τ_c は波長と植生水分量の関数として、次式で与えられている⁴⁾。

$$\tau_c = \frac{b' \cdot \lambda^x \cdot W_c}{\cos \theta} \quad (3)$$

式中のパラメータを算定するために、2002年米国アイオワ州で実施された土壌水分観測プロジェクトSMEX02に参加し、大豆畑にて地上マイクロ波放射計と土壌水分観測、植生水分観測を実施し、

$$b' = 9.32, \chi = -1.38$$

を得た。

一方、 ω_c はこれまで無視されることが多かったが、上記実験から下記の値が得られている。⁵⁾

6.9GHz: $\omega_c = 0.000$, 10.65GHz: $\omega_c = 0.095$,
36.5GHz: $\omega_c = 0.100$

(2) 逆解析手法について

放射伝達方程式はすべてのパラメータが与えられて放射輝度温度を求める式である。これを用いて衛星で観測される輝度温度から土壌水分と植生水分を推定するためには逆解析手法の開発が必要である。

a) PIとISWの2つの指標の導入について

前節の放射伝達方程式では、土壌水分、植生水分量、地表面物理温度、植生層物理温度の4つが観測対象となる。ここで、植生層の物理温度と地表面物理温度を等しいと仮定することにより、未知数を3つに減らすことができる。よって、周波数や偏波の異なる3種類の輝度温度の観測値を代入すると定式化することが可能となる。

さらに地表面温度の効果を排除するために偏波指標(PI)と土壌水分指標(ISW)を導入することにより、未知数を土壌水分と植生水分の2つに減らすことができ、2元連立方程式を解くことでこれらを求めることができる¹⁾。

以下にその二つの指標、PIとISWについて説明する。

b) 偏波指標(PI)⁶⁾

滑らかな地表面からのマイクロ波放射輝度温度は、一般にV偏波の値がH偏波のそれより大きくなる。土壌の上に植生層があると、層内での消散過程を経ることにより、偏波間の輝度温度の差は小さくなり、その度合いは植生層の光学的厚さに依存している。そこで同じ周波数帯のV偏波とH偏波の輝度温度の差を、両偏波間の平均で除した指標を植生層の効果を表す指標として導入する。両偏波での輝度温度の平均値で除すことにより、地表面物理温度の影響が取り除かれ、土壌水分と植生水分のみの違

いを表すことができる。

$$PI = \frac{T_{bv} - T_{bh}}{\frac{1}{2}(T_{bv} + T_{bh})} \quad (4)$$

ここで光学的厚さは植生水分量の関数で、式(3)より、PIが小さいということは植生水分量が多いということを表しており、逆に大きいと植生水分量が少ないということを表す。また、土壌水分が多くなると両偏波の輝度温度の差は大きくなるため、PIは植生水分量だけではなく、土壌水分の指標ともなる。

c) 土壌水分指標 (ISW)⁷⁾

水の誘電率は顕著な周波数依存性を示しており、その影響によって、滑らかな水面での放射率は高周波数領域では高く、低周波数領域で小さくなる性質がある。これを利用することによって、高周波数帯と低周波数帯の輝度温度の差を用いた下記の土壌水分指標(ISW)で、土壌水分量の大小を効果的に表すことができる。また、その周波数の違いが大きいほど指標として有用となるのでできるだけ離れた周波数2つを用いるのがよいとされている。これもPIと同様に、地表面物理温度の影響を取り除き、土壌水分と植生水分のみ影響を表すことができる。

$$ISW = \frac{T_{bi} - T_{bj}}{\frac{1}{2}(T_{bi} + T_{bj})} \quad (5)$$

ここで添え字i, jは周波数(i:高周波数, j:低周波数)を表し、土壌水分量が増加するとともにISWも増加する。

2002年に米国アイオワ州で実施されたSMEX02の観測結果より、地表面物理温度と植生層の物理温度を等しいとする仮定には疑問が提示されており、植生層の物理温度を地表面物理温度より高く設定すべきことが示された。この指摘は、上述の(2)-a)の仮定に反するが、温度差に対する感度実験により、5K程度までの温度差であればPI, ISWいずれの指標に対しても温度依存性は無視しうることが確かめられているので、本研究で植生層の物理温度を地表面物理温度より2K高く設定することとした。

d) ルックアップテーブルについて

以上より、一つの周波数で両偏波、また水平偏波で異なる周波数のマイクロ波輝度温度データを用いることで、PI, ISWが算定され、それに対応する土壌水分、植生水分を得ることができる。さらにこれらの算定値をある周波数の放射伝達モデルに入力し、衛星観測データと比較することにより、地表面物理温度も算定可能である。

放射伝達モデルの数値計算により、この二つの指標と土壌水分、植生水分を対応づけたものをルックアップテーブルと呼び、衛星データから得られた放射輝度温度を用いて土壌水分と植生水分を求める際の逆解析テーブルである。その作成方法、利用方法を次に示す。

1. 土層の放射伝達モデルにおいて、土粒子の大

きさを設定し、各周波数帯における体積散乱を考慮した地表面物理温度とFresnel電力反射係数を求める。

2. 求めた地表面物理温度とFresnel電力反射係数、光学的厚さ τ_c の中の b' 、 χ 、単一散乱アルベド ω_c を放射伝達方程式に代入し、偏波混合率 Q 、粗度係数 h' を適切に定めて、土壌水分が0~60%の範囲を1%刻みで、植生水分量0.0~2.0kg/m²の範囲を0.01kg/m²刻みとして、3種類の周波数と偏波の組み合わせで輝度温度を算定し、各条件下でのPI、ISWを算出する。
3. 放射伝達方程式によるシミュレーション結果を補間して、PI、ISWから土壌体積含水率と植生水分量を算定するための数表であるルックアップテーブルを作成する。
4. 地上検証データとルックアップテーブルを比較し、ルックアップテーブルが観測値をカバーできるように偏波混合率 Q 、粗度係数 h' を調節する。

このようにして得られたルックアップテーブルに、衛星AMSR-Eのマイクロ波放射計によって測定された輝度温度からPI、ISWを計算して代入することにより、土壌水分と植生水分を推定することができる。

以上により、本研究で用いるアルゴリズムの開発がなされた。

3. アルゴリズムの検証

(1) 検証地域について

検証対象エリアはCoordinated Enhanced Observing Period(CEOP)プロジェクトのモンゴルのリファレンスサイトである。

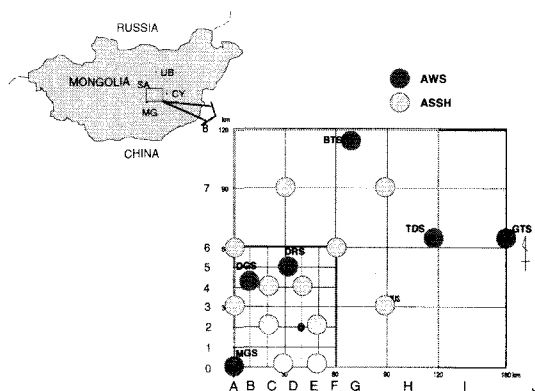


図1 モンゴルでの検証サイト

この地点は図-1で示したように、12の土壌水分観測サイト(ASSH)が南北120km、東西160kmの地域に配置されており、また6箇所のAutomatic Weather Station(AWS)も同じ地域に配置されている。このように、当サイトは、

衛星搭載マイクロ波放射計の地上分解能が粗いことを前提に土壌水分の空間的不均一性の影響を考慮した地上検証サイトとして設計され継続的な観測が実施されている。

(2) 各種パラメータについて

本研究で用いた各種パラメータの値について述べる。

本研究で使用する周波数は6.925GHz、10.65GHz、36.5GHzの3種類である。PIには10.65GHzを使用する。ISWでは二つの周波数帯が離れているほうが感度がよく、また低周波数帯が低いほど植生の影響を受けにくいということから6.925GHzと36.5GHzを用いることにしたが、グローバルな観測を考えた場合、アメリカや中東地域やインドなどでは、6.925GHzが地上電波による干渉を受けて使用できない場所があるため、ISWの算定に10.65GHzと36.5GHzを使用する2つのバージョンのアルゴリズムを考えた。以降、6.925GHzを使ったバージョンを6Gver、10.65GHzを使ったバージョンを10Gverと表記する。なお、土粒子の大きさについては、現段階で土壌タイプによる設定をしていないが、チベット高原もモンゴルも同じ砂質ロームであるので、チベット高原での現地データと衛星による検証結果に基づいた直径1.2mmという値を採用した。

(3) 衛星データの検証

検証期間は2002年7月~9月の3ヶ月間である。また1mm/日以上降雨直後のデータは、植生に付着する水分の影響の推定が困難であるため、対象外とした。

a) 空間不均一性を考慮した検証

次に土壌水分の各観測地点での地上観測データとその点に最も近い衛星データによる土壌水分推定結果とを比較した結果を図-2に示す。横軸が現地観測データであり、縦軸が衛星データより得られた推定値である。

図-2より、衛星による土壌水分推定値は地上観測値に対して大きくばらついている。現地観測データが地点データであるのに対して、衛星観測データのフットプリントが、表-1より6.925GHzの場合は43km×75km、10.65GHzの場合は29km×51kmであることを考えると、図-2のばらつきの一因は、土壌水分の空間的な不均一性にあると考えられる。

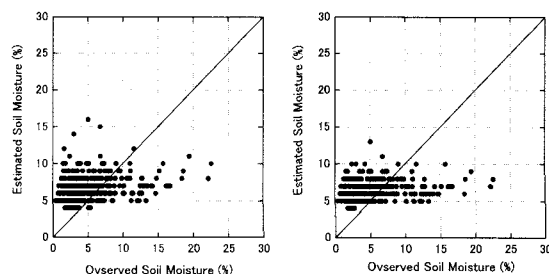


図2 各観測点での土壌水分推定結果
左が6Gver、右が10Gver

そこで、12箇所の地上観測データの平均値と、各点にもっとも近い衛星データを用いて算定した土壌水分推定値の平均値とを比較し、結果を図3に示す。図に示されるように、衛星観測データのフットプリントスケールで空間平均すると、土壌水分が体積含水率で10%以下であるにも関わらず、本アルゴリズムにおいて、推定値と観測値の差の絶対値の平均が6Gverで3.01%, 10Gverで2.98%という良い精度で有していることが示されている。

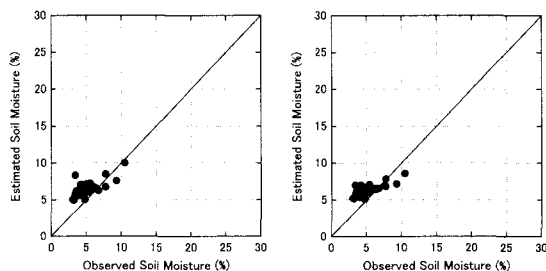


図3 空間平均をとった土壌水分推定結果
左が6Gver, 右が10Gver

b) 土壌水分の時間変動に対する検証結果

空間平均した後の推定結果と地上観測値とを用いて、時間軸上での検証結果を図-4に示す。実線が現地での土壌水分観測データであり、●が衛星データによる土壌水分推定値である。また上の棒は降雨を示している。

この結果より、時間的スケールで見ても衛星データを用いた土壌水分推定結果は、7月下旬から8月上旬における衛星センサーの絶対校正による欠測期間を除いて、現地観測データの変動の様子を再現していることがわかる。なお、降雨直後では本アルゴリズムは土壌水分を大きく推定してしまうことが確認することができる。

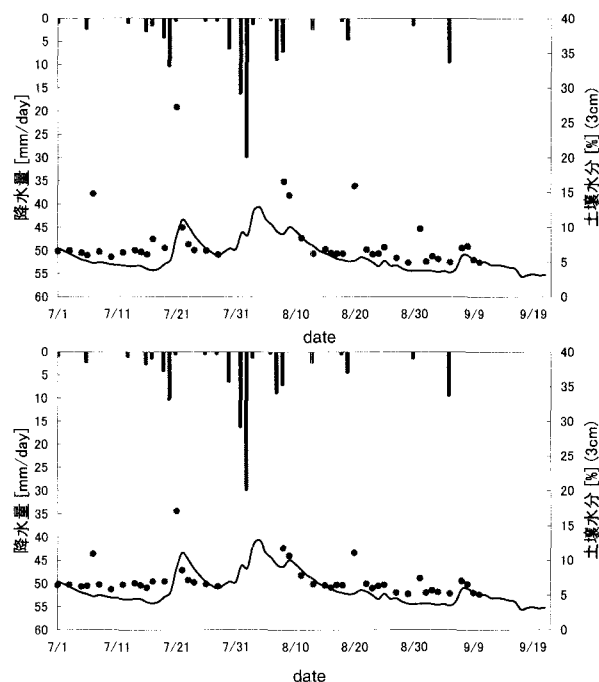


図4 時間スケールでの土壌水分推定結果
上が6Gver, 下が10Gver

c) 植生水分量の検証

植生水分量の観測は7/29～8/8に実施されており、この期間の平均値と7月の衛星データの推定値の平均値とを比較すると、地上観測値が30g/m²に対して衛星アルゴリズムによる推定値は54g/m²である。このような疎な植生の推定の検証結果としては十分な精度であると判断される。

4. モンゴル全土へのアルゴリズムの適応

前章においてアルゴリズムの妥当性が示されたので、モンゴル全土の衛星データに対して適用を試みた。空間的、時間的な平均が必要なので、10日間のデータを平均することにより、2002年7月から9月までの10日平均の土壌水分マップを作成した。それを図-5、図-6に示す。

このマップを見てわかる通り、モンゴル南部のゴビ砂漠においても、既存のアルゴリズムの結果と異なり乾燥した土壌水分が乾燥地として推定されている。北部からロシアにかけての地域において6Gverと10Gverで違いが見られるが、それは森林地帯において植生量がアルゴリズムの適応範囲外であるからと推測される。

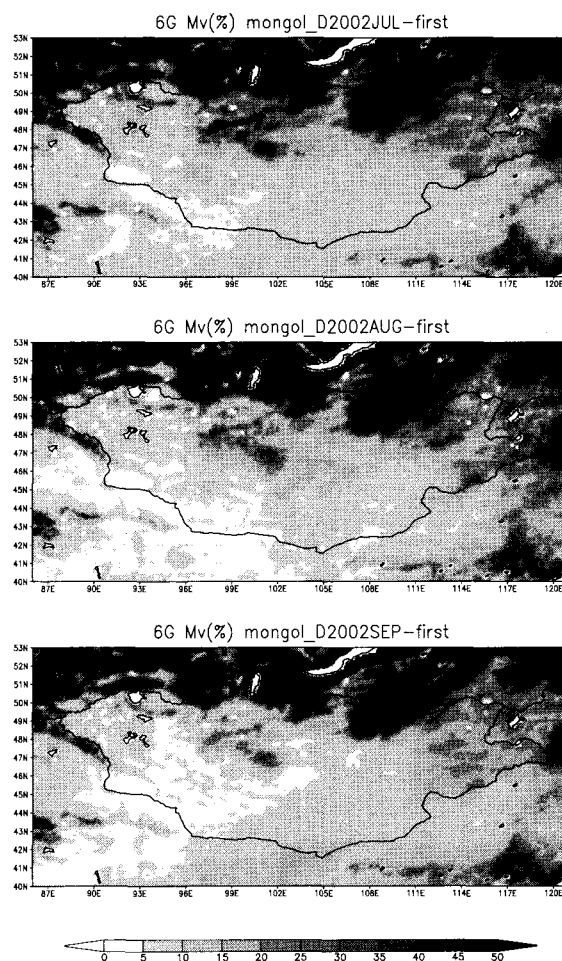


図5 モンゴル土壌水分マップ 6Gver
上が7月初旬, 中が8月初旬, 下が9月初旬, 単位は%

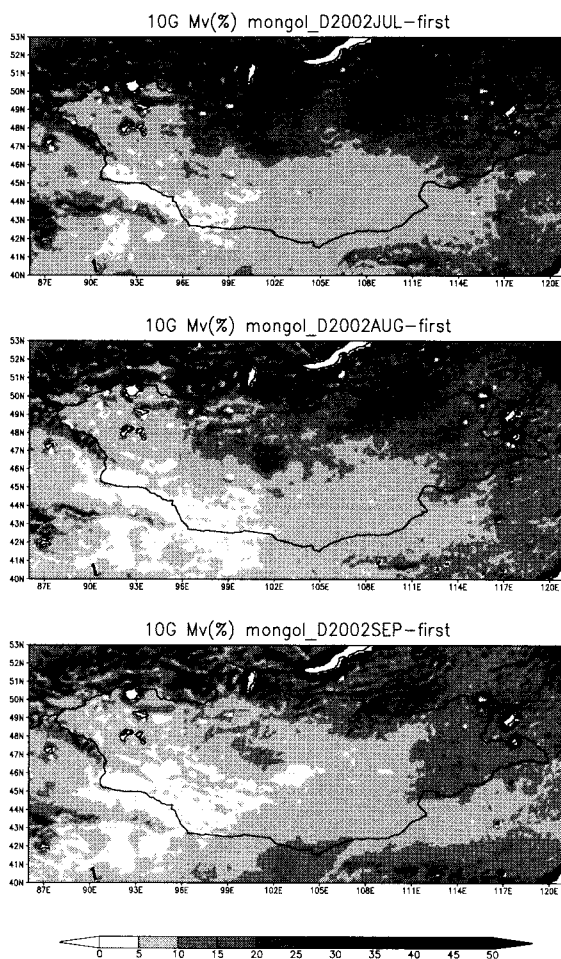


図6 モンゴル土壌水分マップ 10Gver

上が7月初旬, 中が8月初旬, 下が9月初旬 単位は%

また, 3(2)で述べたように, 6Gverのほうが, 植生の影響を受けないと思われるが, 地上電波による干渉により使用できない地域があることを考えると, 10Gverのほうが, 汎用性は高いと考える。遊牧が盛んなモンゴルにおいて, このように国全体のスケールで土壌水分マップが定常的に作成できることは, 同国の農業生産管理に大いに貢献するものと考えられる。

5. 結論

本研究より以下の結果を得た。

- 1) 土層におけるマイクロ波放射伝達過程をモデル化し, 放射伝達方程式に導入することにより, 乾燥地域にも利用可能な土壌水分, 植生水分量算定アルゴリズムが提案された。
- 2) 本研究で提案されたアルゴリズムをAqua/AMSR-Eデータに適用し, モンゴルでの現地観測サイトにおいて検証したところ, 6Gverと10Gverの二種類のアルゴリズムとも土壌水分, 植生水分量の

推定値が妥当であることが示された。

- 3) Aqua/AMSR-Eデータを用いてモンゴル全域での土壌水分マップの作成により, 広範囲での土壌水分の変動を捉えることができることが示された。

最後に本研究で開発された土壌水分算定アルゴリズムは, JAXA-NASAのAMSR/AMSR-E合同委員会での土壌水分のアルゴリズム評価会議において, 日本, アメリカ(2), イタリアから提案されていた4つのアルゴリズムのうち, 最も性能が良いとの評価を得て, 代表アルゴリズムとして選ばれ, これを用いての全地球の土壌水分マップが作られ, 世界に公開されることになった。

謝辞: 本研究は, 統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)および宇宙開発事業団AMSR/AMSR-E検証実験の一環として, 科学技術振興事業団戦略的創造研究(地球変動のメカニズム)および科学技術振興調整費(先導的研究)の支援の下, 日本およびモンゴルの多くの研究者の支援を得て実施したものである。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 小池 俊雄, 下茂 力, 太田 哲, 藤井 秀幸, 柴田 彰: 陸面水文量分布のグローバル推定のためのマイクロ波放射計アルゴリズムの開発と検証, 水工学論文集, Vol.44, pp247-252, 2000.
- 2) Fujii H., Koike, T., Ohta, T., Ishidaira, H., Jackson, T., Heathman, G.: Soil moisture observation under different vegetation conditions by GBMR, Proc. of 2000 IEEE IGARSS, pp1268- 1270.
- 3) Guosheng, Liu: A Fast and Accurate Model for Microwave Radiance Calculations, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.76, No.2, pp335-343, 1998.
- 4) Jackson, T. J., Schmugge, T. J.: Vegetation Effect on the Microwave Emission of Soils, Remote Sensing of Environment, Vol.36, pp203-212, 1991.
- 5) 渋谷 隆史, 小池 俊雄: 土壌-植生系のマイクロ波放射伝達方程式の検討, 東京大学工学部社会基盤工学科卒業論文, 2002
- 6) Paloscia, S., Pampaloni, P.: Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.26, No.5, pp617-621, 1998.
- 7) Koike, T. et al.: Spatial and Seasonal Distribution of Surface Wetness Derived from Satellite Data, Proceeding of the International Workshop on Macro-Scale Hydrological Modeling, pp87-90, 1996.

(2003.9.30受付)