

陸面データ同化手法を用いた土壌水分推定に 影響を及ぼす地表面不均一性に関する検討

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LAND SURFACE HETEROGENEITY FOR
ESTIMATION OF SOIL MOISTURE BY USING LAND DATA ASSIMILATION
SYSTEM DEVELOPED AT UNIVERSITY OF TOKYO

玉川 勝徳¹・小池 俊雄²・Hui LU²・Kun YANG³・Xin LI⁴・Huizhi LIU⁵
Katsunori TAMAGAWA, Toshio KOIKE, Hui LU, Kun YANG, Xin LI, Huizhi LIU

¹正会員 工修 東京大学 地球観測データ統融合連携研究機構 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学 地球観測データ統融合連携研究機構 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³非会員 工博 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

⁴非会員 理博 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, (Lanzhou 730000, Gansu, China)

⁵非会員 理博 Institute of Atmospheric Physics, CAS (Beijing, 100029, China)

This study shows one of the applications when estimating soil moistures with the land data assimilation system developed at the University of Tokyo (LDAS-UT). This LDAS-UT (DMRT) was applied to the data from the CEOP Tongyu Referece Site. The results of Tongyu reference site which is in north-east part of China (the land is used for cultivation in a semi-arid region) was estimated lower for the period of June to September 2003. The comparison between the observed and the estimated soil moistures resulted in measuring lower in the estimated than in the observed for the entire experimental period. Land surface heterogeneous vegetation was focused on to understand this result, and also the simulation method was adopted by the Land Surface Model. It was proved that the estimated soil moisture data was affected by the heterogeneous vegetation.

Key Words : LDAS-UT, Soil Moisture, Heterogeneity, AMSR-E, Vegetation, CEOP

1. はじめに

地球規模, 地域規模の水循環変動はそれぞれのスケール内での陸面の多様性が大きく影響しており, これらを定量的に理解する必要がある. とりわけ土壌水分量は地表面の熱収支に影響を及ぼす観点から, 長期的な水循環変動を考える上で重要な水文量の一つである.

土壌水分量を広域に定量的に把握する手法として, 衛星リモートセンシングで用いられるマイクロ波放射伝達モデルと陸面モデルとを組み合わせ, 衛星データを用いた陸面データ同化(LDAS)が有効である. 衛星データ

(マイクロ波)を用いた陸面データ同化システムでは, 陸面スキームにおける初期値を設定し, 観測データや数値気象予報モデルの出力を入力して, 土壌水分や地温などの土層の状態量の変化を予測する. 次に, この状態量の予測値を土層内におけるマイクロ波放射伝達モデルに入力して衛星で観測されるマイクロ波輝度温度を算定し, このマイクロ波輝度温度の算定値と衛星搭載マイクロ波

放射計観測値を比較し, その誤差が許容範囲に入るように様々な最適化手法を適用して妥当な初期値を推定している.

LDASを広域に適用する際には, 大きく次に示す5つの問題点を考慮する必要がある.

1. 土壌パラメータ推定の問題.
2. 陸面モデル適用性の問題
3. Forcingデータ(モデル出力値使用時)の問題
4. 放射伝達モデル適用性の問題
5. Footprint内の不均一性の問題

これらの問題点のうち, 1.の土壌パラメータの問題に対しては, Yangら¹⁾は, 陸面データ同化システムにおけるDual Passシステムを開発(LDAS-UT)し, Pass1で地表面パラメータの最適化を実施しパラメータ推定を行った後, Pass2でその最適化されたパラメータを入力値としてデータ同化をする手法を開発した. このシステムをチベット高原の東側に位置し湿潤とされる, 統合地球水循環観測研究プロジェクト(CEOP) BJ 気象観測所に適用

し、土壌水分と地表面におけるエネルギー収支の結果を改善した。また、Luら²⁾は東京都西東京市にある東大農場の理想的な地表面状態における地上観測実験サイトで得られた地上可搬型マイクロ波放射計の観測データ、自動気象観測データ、土壌・植生パラメータをLDAS-UTに適用し、最適化された土壌パラメータと観測された土壌パラメータの比較を行い、最適化された土壌パラメータの妥当性を検証した。

2.の陸面モデルの問題については、多様な気候条件下での適用可能性をCEOPの地上観測データを使って検証していく必要がある。

3.のForcingデータの問題については、Luら³⁾は中国の四川省の温江気象観測所に、外部強制力データとして地上で観測されたデータと数値気象モデルの出力を適用した場合の両者の比較検討を行い、数値気象モデル出力の放射データを見直すことで、土壌水分の推定精度が高くなることを示した。

4.の放射伝達モデルの問題については、玉川ら⁴⁾は、LDAS-UTをチベット高原の西側に位置し半乾燥帯であるGaize気象観測所に適用し土壌水分の推定を行い観測値と比較することにより、システムの妥当性を検討した。その中で、比較的降水が多い時期の土壌水分は精度良く推定されたものの、乾期において土壌水分の推定精度が低いことが示された。乾期における土壌水分が低い理由として、土壌が乾燥すると土中の体積散乱効果が大きくなると考えられるため、土中の体積散乱効果を考慮する必要が指摘され、その放射伝達モデル(DMRT)をLDAS-UTに組み込みGaize観測所に適用した。その結果を、図-1に示す。

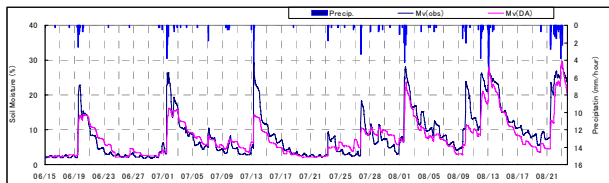


図-1 GaizeにおけるLDAS-UT (DMRT) を適用した土壌水分の推定結果

図-1に示すように、LDAS-UTで使用したマイクロ波放射伝達モデルを土中の散乱効果を考慮したモデルに改善したことにより、6月、7月における乾期における土壌水分を精度良く表現することが示された。

一方で、5.のFootprint内の不均一性の問題については、指摘はされてきたものの、具体的に論じられてくることがなかった。LDAS-UTの検証ステーションは、人工衛星や地上観測におけるマイクロ波放射計の空間分解能の範囲で比較的均一な観測サイトであり、観測点の土壌水分と推定された空間平均場の土壌水分の比較検討が容易であったのが理由である。

そのため、本研究では、CEOPアジアのリファレンスサイトの中で、中国北東部位置し、半乾燥帯でありなが

ら耕作地的な土地利用をしているTongyuステーションにLDAS-UT(DMRT)を適用し、土壌水分の推定を行い比較検証するとともに、観測値と推定された土壌水分が合わない場合、そのステーションにおける地表面の不均一性に着目し、土壌水分推定精度に関する検討をシミュレーションを基に実施することを目的とした。

2. LDAS-UTのTongyu観測所への適用

(1) LDAS-UTの概要

LDAS-UTは、地表面フラックス及び土壌水分算定のための陸面モデル (LSM)、マイクロ波放輝度温度推定のための放射伝達モデル (RTM)、観測された輝度温度と推定された輝度温度との誤差を最小化するスキームから構成されている。陸面モデルには、粗な植生域用に改良されたSiB2⁵⁾を用い、放射伝達方程式には土中からの放射伝達を稠密媒体の放射伝達モデル(DMRT⁷⁾と表面散乱モデルとして(AIEM⁸⁾)を組み込んだモデルを使用した。また、誤差の最小化スキームは、Shuffled Complex Evolution法⁹⁾を用いている。

LDAS-UTは、2系統(Pass1とPass2)で構成され、それぞれ独立に稼働している。まず、Pass1で陸面モデルと放射伝達方程式で用いられる土壌特性・空隙率・地表面粗度・相関長さ・土壌水分の初期値などのパラメータを月単位の長期にわたる外部強制力データと輝度温度から最適値を推定する。この推定は対象としている期間において1回のみ実施する。この推定が終了した後、推定した値をPass2の初期値として与える。Pass2では地表面付近の土壌水分とフラックスを日単位の同化サイクルから推定する。LDAS-UTの概要を図-2に示す。

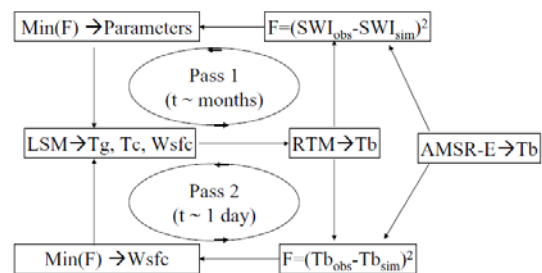


図-2 LDAS-UTの概要。

図-2で、LSMは陸面モデルを示し、Tg, Tc, Wsfc はそれぞれ地表面温度、植生温度、土壌水分を表し、RTMは放射伝達モデルを示し、Tbは輝度温度を表す。また、Fは誤差の最小化スキームを表している。SWIは、土壌湿潤指標 (Soil Wetness Index) を示し、

$$SWI = \frac{2(T_b^{18.7V} - T_b^{6.9V})}{(T_b^{18.7V} + T_b^{6.9V})} \quad (1)$$

で定義される¹⁰⁾。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。SWIはこの性質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土壌水分量の大小を効果的に表すことができる。SWIを用いることにより地表面物理温度の影響を取り除くことができるため、Pass1のように数ヶ月にわたる比較的長期における同化では地表面温度の変動による不安定を防ぐことを目的にSWIで同化をし、日単位のPass2では輝度温度で同化を実施した。

(2) Tongyu気象観測所の概要

Tongyu気象観測所は、中国北東部に位置しCroplandの観測ステーションが存在する。Croplandでは、5月～10月が耕作時期であり最大120cmの背丈のコーンが栽培されている。Tongyu 気象観測所の写真と概要を図-3と表-1に示す⁴¹⁾。



図-3 Tongyu Cropland 気象観測所

表-1 Tongyu 気象観測所の概要

緯度	44.416
経度	122.867
標高	184m
植生	耕作地
土壌	砂質・塩類土壌

(3) Tongyu気象観測所へのLDAS-UTの適用

a) 使用データ

本研究では、AMSR-Eの観測輝度温度データとして6.9GHz と 18.7GHz の 垂直偏波のデータを使用した。それは、AMSR-Eの低周波数の輝度温度データが高周波の輝度温度データよりも地表面の土壌水分算定に感度を有しており、また、垂直偏波が水平偏波の輝度温度データよりも植生の影響を受けにくいためである。外部強制力データとしては、自動気象観測装置で観測され30分毎に記録されている、風向・風速・気温・湿度・下向き短波放射・下向き長波放射・降水量を、また、初期パラメータとして植生をMODIS LAIから、土壌組成・土壌空隙率・圃場容水量・しおれ点・残留水位をISLSCIP2 Soil データを使用した。解析に使用したデータの概要を図-4 に示す。

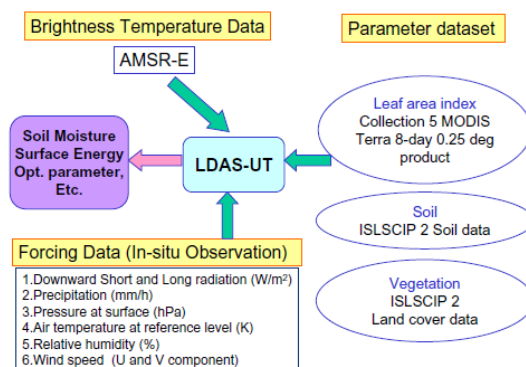


図-4 解析に使用したデータの概要

b) TongyuへのLDAS-UTの適用

LDAS-UTをTongyu気象観測所に適用した。対象期間は、2003年6月1日～9月30日の4ヶ月間である。Pass1によって最適化された値は、砂:51%, Cray:17%, 空隙率:0.38, 相関長さ:0.9, 粗度係数:0.3である。

また、図-5に推定された土壌水分(ピンク線)と観測された土壌水分(青線)を示す。なお、土壌水分の測定深度は表層から4.0 cmのデータを使用した。

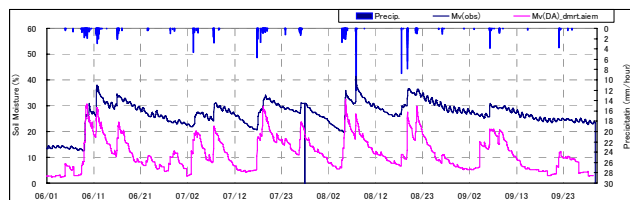


図-5 土壌水分の推定結果。LDAS-UTによる推定値(%)をピンク線、観測値(%)を青色線で示す。その期間における降水量(mm/30min)をグラフ上部に示す

Tongyuにおいては、対象期間の中で6月9日に発生した降水現象時にLDAS-UTの土壌水分推定値と観測値が約27%とほぼ同じ値を示しており、その後も降水イベントとともに推定された土壌水分値と観測値が近づく傾向にあるものの定量的には合っておらず、対象とした期間を通してLDAS-UTによる推定結果が低い傾向にあることが確認された。

3. 土壌水分推定精度に関する考察

LDAS-UTをTongyu気象観測所に適用した結果、観測値と推定値が合わないことが示されたが、本検討ではその要因について考察を実施する。

(1) LDAS-UTが持つ不確実性

LDAS-UTが持つ不確実性として大きく3つ挙げられる。1つは陸面モデル(LSM)の不確実性、2つ目はマイクロ波放射伝達モデル(RTM)の不確実性、3つ目が空間不均一性である。LSM, RTMは特殊な土壌条件、特殊な植生条件である時は挙動をうまく表現できず、これは、LDAS-UTが持つ本質的な問題であるが、これらについて

ては改良研究が進められている。本研究では、特に空間の不均一性に焦点を当て検討を行うこととする。

(2) 空間不均一性に関する検討

Tongyu 気象観測所におけるLDAS-UTを用いた土壌水分推定精度に関し、空間(衛星のフットプリント内)における不均一性として考えられるのは大きく3つ存在する。1つ目はLSM, RTMに関連する土壌特性の分布、2つ目は外部強制力データ(特に降雨)の分布、3つ目は植生分布である。この中で土壌特性の分布については、Tongyu気象観測サイトの管理者の報告¹²⁾によると、塩類アルカリ土壌が分布しており、この空間分布を考慮しなくてはならないが、今回はこの土壌に関する空間分布特性の情報が得られないため、均一として扱うこととした。また、降水の分布については、現地観測の降水量データを用いて降水が連続していない期間を選定することにより、降水の影響を除去した。植生の分布については、TERRA 衛星に搭載されたMODISセンサによって観測された250m解像度のNDVIと地表面温度データが存在するため、本検討では、これらのMODIS 地表面温度とNDVIを用いて検討を行うこととした。

a) 観測地点の空間代表性の検討

一般に、土壌水分が多い場合は蒸発散に必要な潜熱を地表面から吸収することにより地表面温度が低くなる傾向にあり、土壌水分と地表面温度の間には相関関係がある。そのため、まず、MODIS地表面温度データを用いて観測サイト(ポイントデータ)が衛星で観測されたフットプリントを代表しているかの検討を行った。

6月におけるTongyuの観測地点を中心としたMODISの地表面温度分布を図-6(上図)に示す。図の中に記されている楕円はAMSR-Eのフットプリントのおおよその領域を示す。

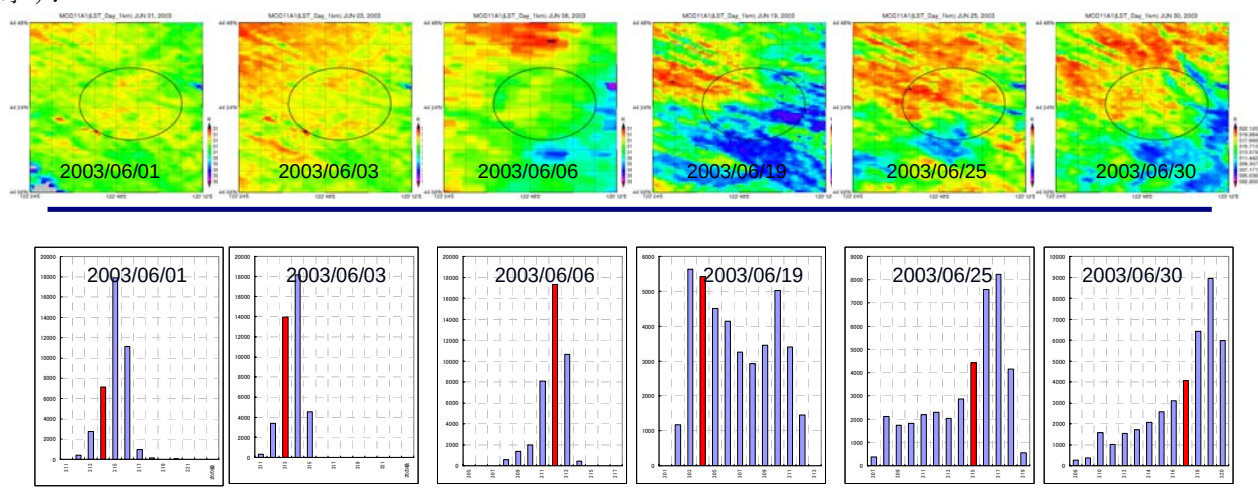


図-6 TERRA MODIS 地表面温度の画像(上図)とそのヒストグラム(下図) ヒストグラム

赤色バーは、Tongyu気象観測所が位置するデータを示す。

図-6(上図)よりMODIS 地表面温度データはフットプリント内で不均一に分布していることがわかる。フットプリント内における不均一性を定量的に評価するために、観測地点が位置するピクセル(データ)が他の地点を代表しているか(最頻値にあるか)の検討を行なった。フットプリントの領域内のデータを対象としたヒストグラムを図-6(下図)に示す。ここで、赤色で記されたバーがフットプリント内において、観測地点が位置するデータを示しているが、2003年6月6日以外は観測地点が位置するセルは領域内で最頻値ではなく、必ずしも領域を代表していない。このことから観測地点の土壌水分が地点を代表していない可能性が示された。

b) 植生の空間不均一性の検討

空間不均一性の検討にあたり、まず、対象とする日時を設定した。対象日の選定にあたってはCroplandであるため、播種して間もないと思われる植物活性度の低い6月を対象とし、且つMODISデータが雲の影響を受けない快晴(データ取得条件のよい日)を選ぶこととした。本検討で適用したLDAS-UTで使用している陸面モデル(Sib2)と放射伝達モデル(RTM)において、植生は疎な分布を対象としていること、また、RTMでは凍土の影響は考慮していないため、地温が0℃を下回る時期においても対象時期から除外をする必要がある。その結果、MODIS NDVI 16日 Composite Data から植物活性度に着目し、まず、2003/06/10 - 2003/06/25(16日間)を選定し、次にMODISの地表面温度の観測条件が良い日時を選定した結果、2003年6月19日 03:12 (UTC)のデータを用いて検討を行なうこととした。MODIS NDVIデータと地表面温度の分布を図-7に示す。

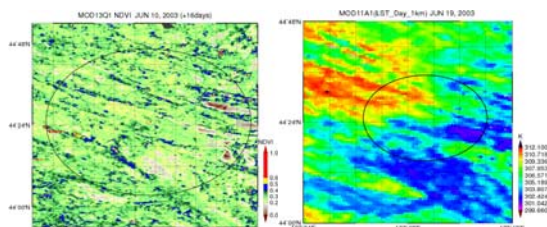


図-7 空間不均一性の検討に使用したMODIS NDVI (左)、MODIS地表面温度データ (右)

ここでは植生の分布が、土壌水分推定に影響する輝度温度条件を作るかについてシミュレーションを用いて検討した。

衛星観測で得られる輝度温度は、地表面の物理温度と放射率の積で算定される。ここで、物理温度はMODIS地表面温度データを用いた観測値が存在するが、一方で、フットプリント内における放射率の分布は観測値として存在しない。なお、合成開口レーダを用いることによって、地表面温度に関係せず後方散乱係数から反射率を算定し1から引くことで数十メートルの解像度で放射率の不均一性を出すことができ、ALOSに搭載されたPALSARは多偏波データがあるためこの可能性が含まれているが、本検討ではシミュレーションを用いた推定を行うこととした。

放射率を陸面モデルを用いたシミュレーションで推定しようとした場合、大きく4つのパラメータを考慮しなくてはならない。1つ目は土壌水分の初期値、2つ目は降水、3つ目は土壌特性、4つ目は植生値である。降水は地上の観測データを用いて影響の無い時期を選び、土壌特性はLDAS-UTのPass1で最適化された値を使用し、植生はMODIS観測値で算定できる。その結果、未知なパラメータは土壌水分の初期条件となる。そのため、本検討では、まず、土壌水分の初期値を5%、15%、25%と変化させ、また、NDVIを0.1、0.2、0.3、0.4と変えてLSMを実行し、対象とした6月19日に土壌水分の初期値の影響があるかを確認した。結果を図-8に示す。

図-8より土壌水分の初期値を変えた場合でも、対象とした6月19日には土壌水分の値は、ほとんど影響を及ぼさないことが確認された。次に、これらシミュレーションで推定された土壌水分と地表面温度の値を、RTMに初期値として与え、RTMを実行しそれぞれの放射率を推定し、輝度温度を推定した。さらに、得られた輝度温度データを用いて、土壌水分逆推定のための変換テーブル (Lookup Table) を用いて土壌水分を逆推定し、NDVI(植生)の違いが土壌水分推定に与える影響を調べた。結果を表-2に示す。

表-2は縦がLSMに使用した土壌水分の初期値、横がNDVIを示し、それぞれの違いによる土壌水分推定のシミュレーション結果である。LSMへの土壌水分の初期値の違いは、シミュレーション土壌水分の推定にほとんど影響しないが、NDVIが異なることにより土壌水分の推

定に22%～59%と大きな違いがみられた。

ここで、注意しなくてはならないことは、このシミュレーション土壌水分を求めるための変換テーブル (Lookup Table) は、本検討用に調整されたものではないため、値は定量的なものではなく、あくまでもNDVIの違いによって土壌水分算定に影響を及ぼすことを定性的に示したものである。

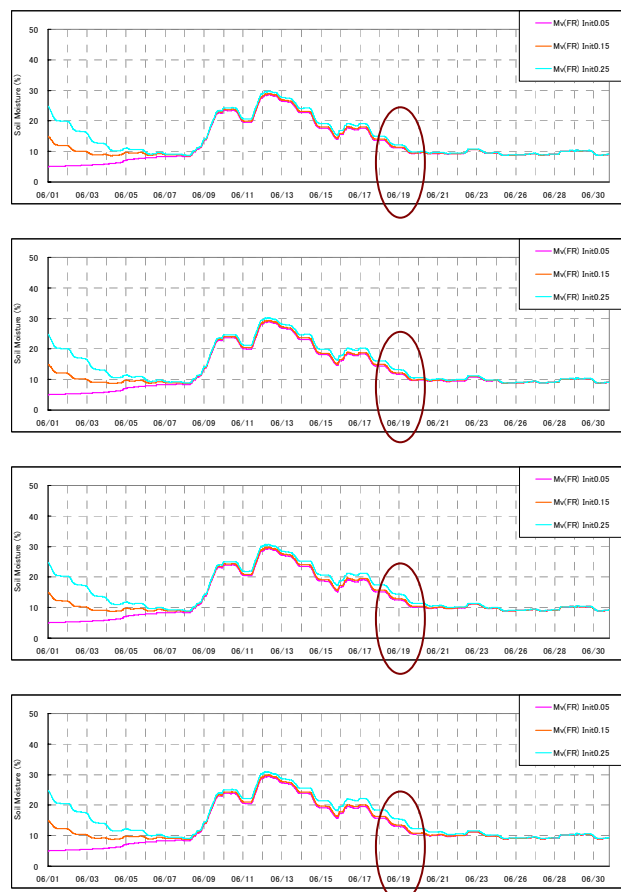


図-8 土壌水分の初期値とNDVIを変更させたときのLSMによる土壌水分 (上からNDVIが0.1、0.2、0.3、0.4)

表-2 LSMへの土壌水分の初期値とNDVIの違いによる土壌水分推定シミュレーション結果 (%)

		NDVI			
		0.1	0.2	0.3	0.4
Simulation	5%	22	37	46	57
Initial Soil	15%	22	37	46	59
moisture	25%	23	37	46	56

以上の検討より、植生がフットプリント内に不均一に分布することにより、土壌水分の推定精度にも影響を及ぼすことが定性的に示された。これにより、マイクロ波放射伝達モデルに植生被覆率 (ミクセルモデル) を導入する等のモデル改良することにより、土壌水分の推定精度が向上される可能性が示唆された。

なお、土壌水分の推定精度に関する定量的な評価は、

フットプリント内に複数の観測ステーションが存在する CEOP Mongol サイトでの検証や現地調査による検証用のデータが必要である。

4. 結論

本研究では、LDAS-UTをCEOPのリファレンスサイトの1つである中国のTongyu気象観測所に適用した。その結果、対象とした期間を通して観測した土壌水分と推定した土壌水分に推定誤差があることが示された。

この推定誤差に対して、観測地点が領域を代表しているかの検討を、MODISのNDVIと地表面温度データを用いて検討し、観測地点の土壌水分が領域を代表していない可能性が示された。また、LSM, RTMを用いたシミュレーションを実施し、植生が領域内に不均一に分布することにより、土壌水分の推定精度に影響を及ぼすことが示された。

謝辞：本研究は、統合地球水・エネルギー循環観測研究(CEOP)、宇宙航空研究開発機構AMSR/AMSR-E検証実験、および、国家基幹技術「データ統合・解析システム」の一環として、日本および中国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) Kun YANG, Takahiro WATANABE, Toshio KOIKE et al: *Auto-calibration System Developed to Assimilate AMSR-E Data into a Land Surface Model for Estimating Soil Moisture and the Surface Energy Budget*, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 85A, pp 229-242, 2007.
- 2) Lu Hui, Toshio Koike, Yang Kun, Li Xin, Graf Tobias, et al: *Estimation of Land Surface Parameters by LDAS-UT: Model Development and Validation on Tanashi Field Experiment*, 2007 AGU Fall Meeting, San Francisco, 12 December 2007.
- 3) Hui LU, Toshio KOIKE, Kun YANG, Xiangde Xu, Xin LI, Hiroyuki TSUTSUI, Yueqing LI, Xingbing ZHAO, Katsunori TAMAGAWA: *SIMULATING SURFACE ENERGY FLUX AND SOIL MOISTURE AT THE WENJIANG PBL SITE USING THE LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM OF THE UNIVERSITY OF TOKYO*, 水工学論文集第53巻, pp.1-6, March 2009.
- 4) 玉川 勝徳, 小池 俊雄, Hui LU, Kun YANG, 萩野谷 成徳, 石川 裕彦, Xiangde XU, Shihong WU: *陸面データ同化手法を用いたTibet Gaizeにおける土壌水分と地表面フラックスの推定*, 水工学論文集第53巻, pp.397-402, March 2009.
- 5) Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D. and Bounoua, L., 1996a. *A revised land-surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part I: Model formulation*, J. Climate, 9: 676-705.
- 6) Sellers, P.J., Los, S.O., Tucker, C.J., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Collatz, C.J. and D.A. Randall, 1996b. *A revised land-surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data*, J. Climate, 9: 706-737.
- 7) Tsang, L. and J.A. Kong : *Scattering of electromagnetic waves from a dense medium consisting of correlated Mie scatterers with size distributions and applications to dry snow*. J. EM Waves and Applications, 6, pp.265-286, 1992.
- 8) K. S. Chen, T. D. Wu, L. Tsang, Q. Li, J. C. Shi, and A. K. Fung: *Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method Simulations*, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, vol. 41, pp. 90-101, 2003.
- 9) Q. Duan, S. Sorooshian, & V.K. Gupta, "Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models", Journal of Hydrology, Vol.158, 265-284, 1994.
- 10) 小池俊雄・中村佳照・開発一郎・Gombo Davaa・松浦直人・玉川勝徳・藤井秀幸：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, 水工学論文集, 第48巻, 第2号, 3月(2004), pp. 217-222.
- 11) CEOP HP; <http://www.eol.ucar.edu/projects/ceop/dm/>
- 12) Dan, L., J. J. Ji, and H. Z. Liu, 2008: *Use of a land surface model to evaluate the observed soil moisture of grassland at the Tongyu reference site*. Adv. Atmos. Sci., 25(6), 1073-1084, doi: 10.1007/s00376-008-1073-6.

(2009. 9. 30受付)