

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

ESTIMATION OF THE SOIL MOISTURE AND LAND SURFACE FLUX
AT THE TIBET GAIZE STATION, BY USING LAND DATA ASSIMILATION
SYSTEM DEVELOPED AT THE UNIVERSITY OF TOKYO

玉川 勝徳¹・小池 俊雄²・Hui LU²・Kun YANG³・萩野谷 成徳⁴・石川 裕彦⁵・
XiangDe XU⁶・Shihong WU⁷

Katsunori TAMAGAWA, Toshio KOIKE, Lu HUI, Kun YANG, Shigenori HAGINOYA, Hirohiko
ISHIKAWA, XiangDe XU and Shihong WU

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

⁴正会員 工博 気象庁 気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

⁵正会員 理博 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁶非会員 工博 Professor, CAMS, CMA (Beijing 100081, China)

⁷非会員 Tibet Metrological Bureau (Linkuobeilu No.2, Lhasa, 850001, China)

The Land Data Assimilation System developed at the University of Tokyo (LDAS-UT) was applied to the Gaize Station at Tibetan Plateau for period of June to August 2007.

LDAS-UT consists of a land surface model (LSM) to calculate surface fluxes and soil moisture, a radiative transfer model (RTM) to estimate microwave brightness temperature, and an optimization scheme to search for optimal values of soil moisture through minimizing the difference between modeled and observed brightness temperature. LDAS-UT adopts a two-pass assimilation technique to solve parameterization problems. By applying LDAS-UT to Tibet Gaize station at dry period, the estimated soil moisture had some difference between observed one, but the sensible heat, latent head and ground heat flux estimated by LDAS-UT at same period had good agreement with observed one.

Key Words : LDAS-UT, Soil Moisture, Flux, Surface parameters, AMSR-E, Tibet

1. はじめに

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。ただし、ここで用いられる陸面スキームには、透水係数や地表面粗度を記述するパラメータが含まれており、またマイクロ波放射伝達モデルにも

地表面粗度や土粒子径、植生水分モデルパラメータなどが含まれておりそれらのパラメータの推定が鍵となる。

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するとともにForcing Dataに含まれない降水イベントの影響を再現した。また、Luら²⁾は東京都西東京市にある東大農場の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、推定された土壌水分の妥当性と最適化されたパラ

メータと観測されたパラメータの比較を行い、最適化されたパラメータの妥当性を検証した。しかし、両研究ともに湿潤地域での検討結果であるため半乾燥帯における観測データに基づいた精度の検証は行われていない。

そこで、本研究では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と地表面フラックス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証することを目的とした。

このLDAS-UTが正しく稼働する確証が得られれば、観測データがない半乾燥地域においてもForcingデータに数値気象予報センターからGlobalに出力されているモデル出力値を用いることにより全球における陸面モデルのパラメータの推定が可能となる。これをGCMの初期値とすればGCMの精度が向上すると思われる。本研究はそのための基礎研究でもある。

2. 方法

(1) LDAS-UT

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) , マイクロ波放射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新SiB^{3), 4)}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(DMRT⁵⁾)と表面散乱モデルとして(AIEM⁶⁾)を組み込んだモデルを採用した。また、誤差の最小化スキームは、Shuffled Complex Evolution法⁷⁾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-1 に示す。

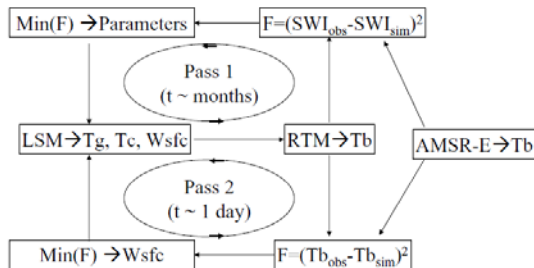


図-1 LDAS-UTの概要.

図-1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⁸⁾。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。また、この指標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。Pass1ではSWIで同化をし、Pass2では輝度温度で同化する手法を採用した。

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。

(2) チベット高原 Gaize 気象観測所の概要

チベット高原は湿潤的な東部と乾燥傾向にある西部に分けられる。Gaize (ガイゼ) 気象観測所はチベット高原の西部に位置する (図-2) 。

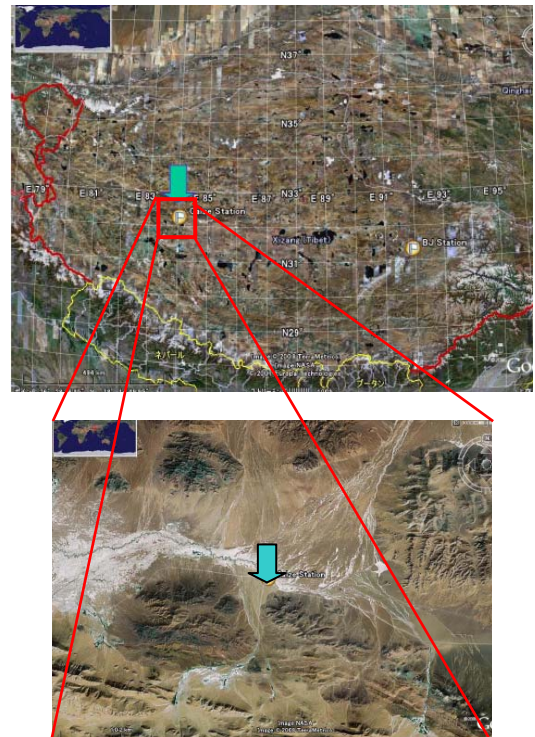


図-2 Gaize 観測所の位置図 上図：チベット高原全体、
下図：Gaize周辺拡大図 (Google Map より)

Gaize気象観測所は東西方向に緩やかに窪んだ地形で地表面には短い草が所々に散在する。雨季は草が生い茂るが乾期は裸地となる。このGaize気象観測所では、気象要素を自動的に測り記録する機能を有しておりその測定要素は、風速(2高度)・気温と相対湿度(2高度)・放射4成分・地表面放射温度・土壌水分量(3深度)・気圧・降水量・風向風速・地中熱流量(2深度)、そして地温(6深度)である。Gaize 気象観測所の概要を表-1と、図-3に示す⁹⁾。

表-1 Gaize観測所の概要

緯度	32°18' N
経度	84°03' E
標高	4,416 m
植生	裸地であるがまばらに 植生が生えている (5cm 未満の植生)
土壌	シルトローム



図-3 Gaize気象観測所

(3) 使用したデータ

本研究で使用したデータは、衛星データとしてAMSR-Eの6.9GHzと18.7GHzの垂直偏波を、Forcing Dataとして自動気象観測装置で観測され1時間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、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ISLSCP2 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。

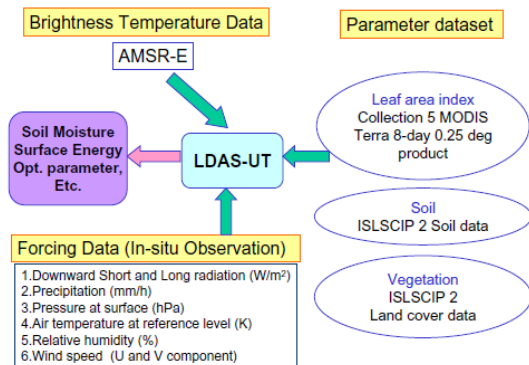


図-4 解析に使用したデータの概要

Forcingデータは、日中気象災害協力研究センタープロジェクトの枠組みで得られたデータを用いた。なお、取得した下向き短波放射データには、日中の約1,000W/m²以上の値近辺でMissing dataが多く存在したため、日中の下向き短波放射(Sd)と上向き短波放射(Su)の両方がある時間帯で、アルベド(Su/Sd)を求め、アルベドを2次関数で仮定し、これに欠測時の下向き短波放射を $Sd = \alpha \times Su$ から計算した。この方法で下向き短波放射の欠損値を補完し、Forcing データとして用いた。AMSR-Eは宇宙航空研究開発機構のAMSR/AMSR-E検証実験の一環で提供されたデータを使用した。

3. 結果と考察

2.3節で記述した衛星データ・地上観測データ・パラメータデータセットを用いてLDAS-UTを実行しチベット高原のGaize気象観測所に適用した。対象とした期間は、日中気象災害協力研究センタープロジェクトの枠組みでデータが取得されている2007年6月16日～8月23日である。なお、精度の検証については、式(2)で表現される、RMSE (Root Mean Square Error) を使用した。ここで M はモデル出力、 O は観測値を示す。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(M_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

(1) LDAS-UTによる土壌水分の算定結果

2007年6月16日～8月23日におけるLDAS-UTを用いた土壌水分、地表面温度の算定結果を図-5に示す。図-5に示すように、2007年6月16日～8月23日の期間において降水イベントごとに観測値・推定値ともに土壌水分が増加していることがわかる。また、湿潤期(8月)では土壌水分の推定値が合っているものの乾燥期(6月～7月)において観測値と推定値に差が生じていることがわかる。この差は、LDAS-UTで使用している放射伝達方程式に改善すべき点があると思われるため、今後この改善が必要と思われる。一方、地温はしばしば観測された値のピークより小さく推定されているものの期間内適切に算定されている。

(2) フラックス算定精度の検討

2007年6月16日～8月23日におけるLDAS-UTを用いて算定した正味放射・顕熱フラックス・潜熱フラックス・地中熱流量の算定結果を図-6に示す。

また、図-5において土壌水分の推定値と観測値の差が大きい時期として期間Aを定義しフラックス精度検証を実施した。期間Aは2007年6月/22日～6月/30日とした。

全期間と期間Aの時期における期間平均の正味放射、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量の散布図を図-7に示す。

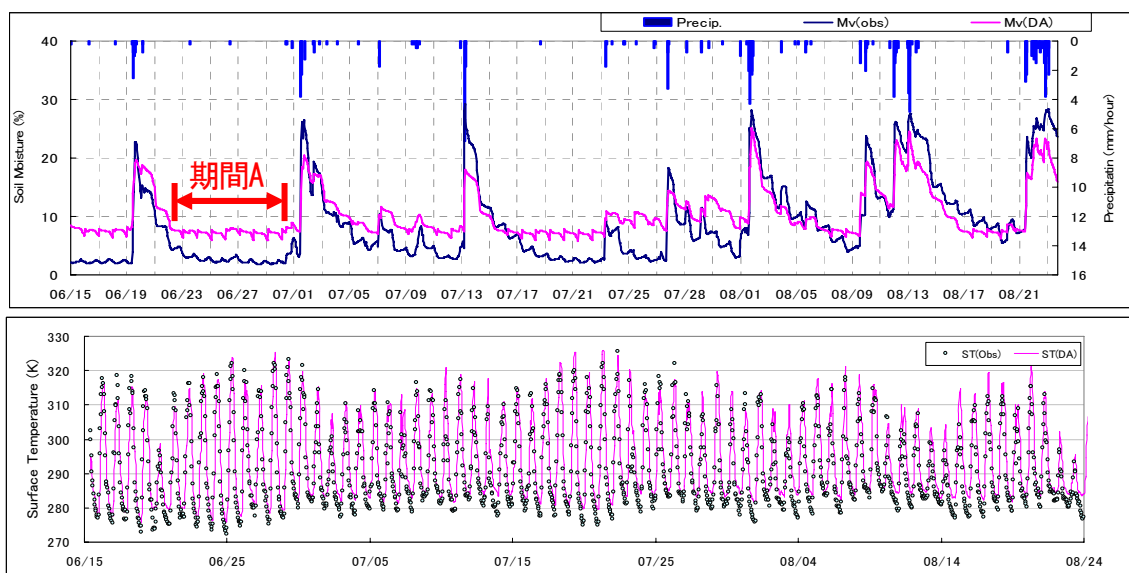


図-5 土壌水分(上图)と地表面温度(下图)の算定結果. なお、土壌水分で陸面モデルによる推定値をピンク線、観測値を青色線で示す。観測深度は1.5cmである。

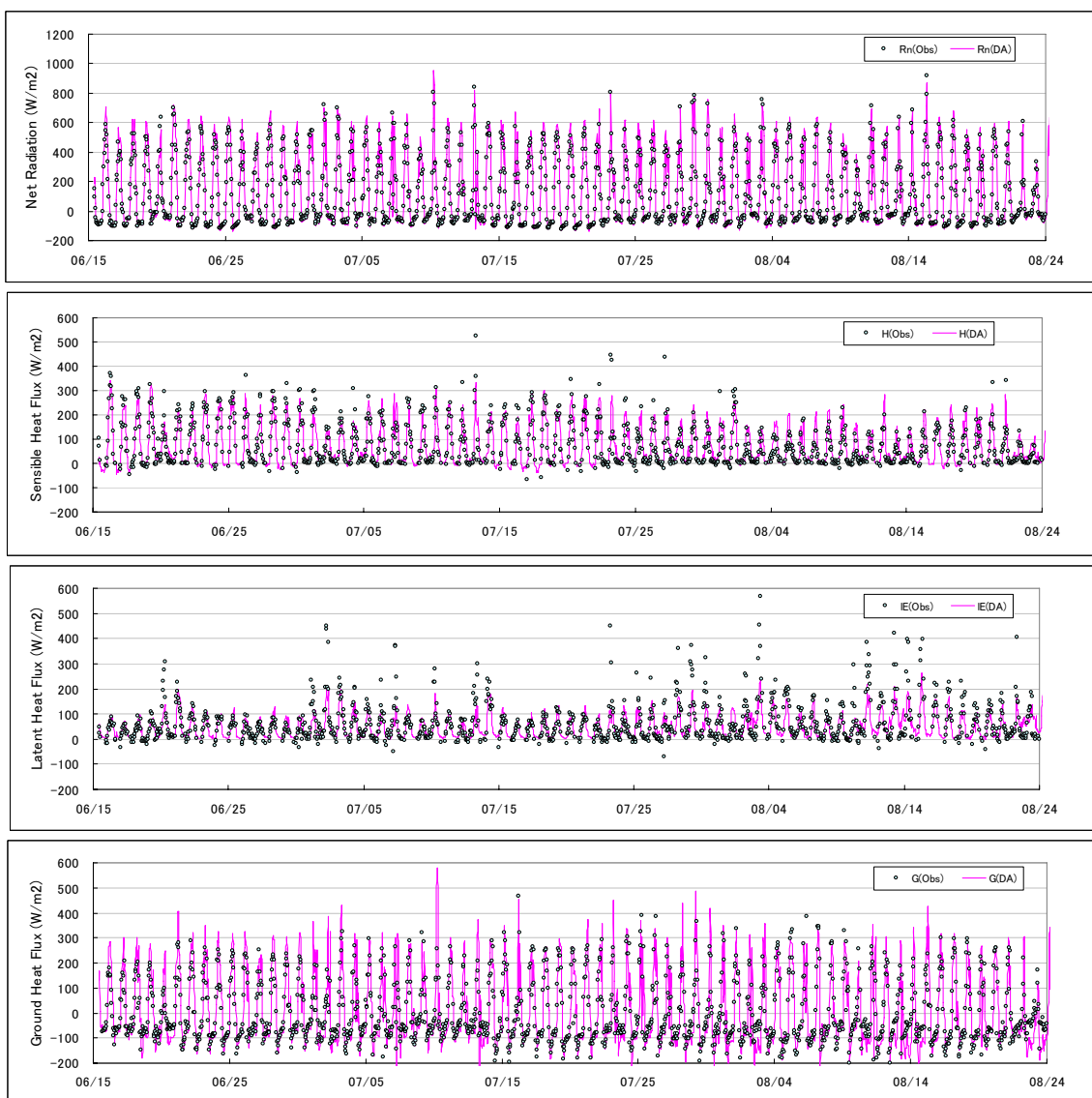


図-6 2007年6月16日～8月23日における日周変化の比較。(ピンク線がデータ同化結果で青が観測値。上段より、正味放射収支・顕熱フラックス・潜熱フラックス、地中熱流量、なおフラックスはボーエン比法により算定。)

全期間と期間AにおけるRMSEの値を表-2に示す。なお、表-2 には、土壌水分と地表面温度の値も同時に示す。

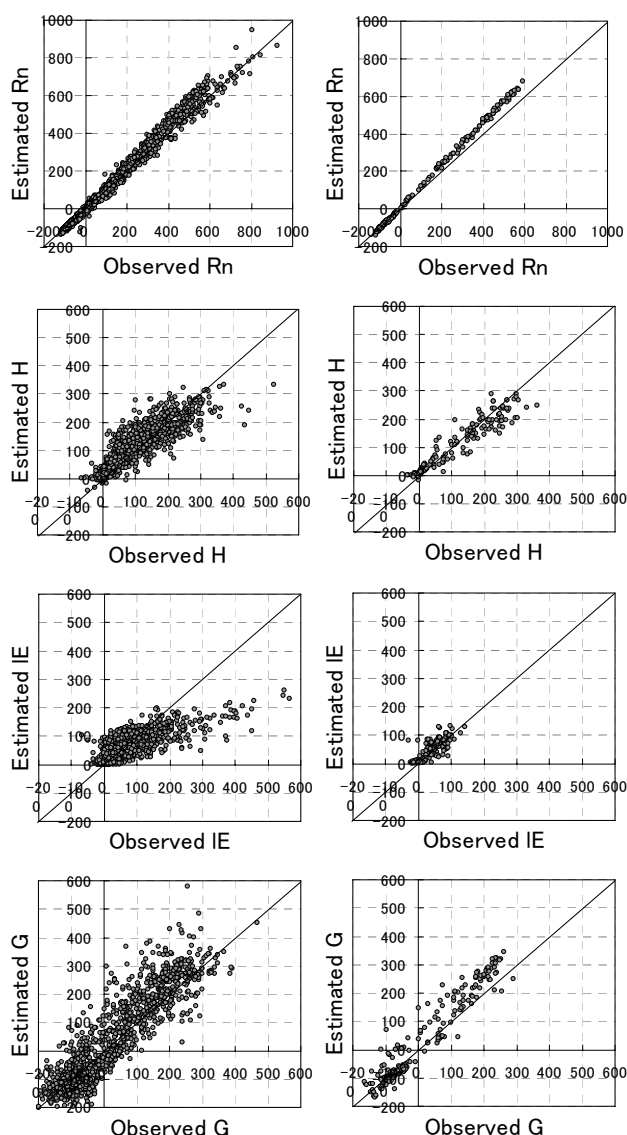


図-7 全期間(左列)と期間A(右列)における散布図:(上から正味放射、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量)

表-2 全期間と期間AにおけるRMSE値

項目	RMSE	
	全期間	期間A
正味放射	32.3	39.4
顕熱	42.4	29.6
潜熱	53.5	20.7
地中熱流量	60.4	48.8
土壌水分	3.9	4.5
地表面温度	4.4	3.7

図-5、図-7、表-2より、降雨が少ない乾燥期である期間Aにおいて、推定した土壌水分と観測した土壌水分に差があるが、顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(IE)、地中熱流量(G)で妥当な値となっていることがわかる。一方、降雨期を含む湿潤的な全期間では潜熱フラックス顕熱フラックスの誤差が大きくなっているが、その理由は降雨時におけるボーエン比法の適用の問題であると思われる。

4. 結論

本研究ではLDAS-UTを用いてAMSR-E の6.9GHzと18.7GHzの垂直偏波の輝度温度データを同化させ、チベット高原のGaize気象観測所における、土壌水分量と地表面フラックスの推定を行い推定値と観測値との比較を行った。その結果、2007年6月16日～8月23日の期間において湿潤期(8月)では土壌水分の推定値が合うことがわかった。一方、降雨が少ない乾燥期においては、推定した土壌水分と観測した土壌水分に差があるものの顕熱フラックス(H)、潜熱フラックス(IE)、地中熱流量(G)で妥当な値となっていることが示された。

謝辞：本研究は、統合地球水・エネルギー循環観測研究(CEOP)、日中気象災害協力研究センタープロジェクト、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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 萩野谷成徳, 門田勤, *半乾燥地域における土壌水分量の測定: 多様な地域における土壌水分モニタリングの実際* 電子モノグラフ No. 1, 筑波大学陸域環境研究センター, pp8-19, 2003.

(2008. 9. 30受付)