

CEOP・GEOSS・地球環境観測衛星ミッションの土壌水分観測

開発一郎¹・小池俊雄²・玉川勝徳²・太田 哲²・藤井秀幸³

Soil moisture observations in CEOP, GEOSS and earth observation satellite missions

Ichiro KAIHOTSU¹, Toshio KOIKE², Katsunori TAMAGAWA², Tetsu OHTA², and Hideyuki FUJII³

Abstract: Soil moisture plays an important role in climate change, water-energy cycle and vegetation change. This study mentioned the current conditions of soil moisture observations in CEOP, GEOSS and earth observation satellite missions and then discussed some results of ground-based soil moisture observation in the study area of AMPEX/MAVEX/CEOP in the Mongolian plateau and AMSR-E soil moisture estimation in Asia. We got that it is very important and useful for CEOP and GEOSS to monitor soil moisture by ground-based stations and earth observation satellites.

Key Words : CEOP, GEOSS, earth observation satellite, AMSR-E, soil moisture

1. はじめに

1990年代に世界気候計画 (World Climate Research Program) の副計画 GEWEX (Global Energy and Water cycle Experiment) のアジアモンスーン版, GAME (GEWEX Asia Monsoon Experiment) が始まった. GAME では地表面状態のエネルギー・水循環に与える影響が重要視され, 土壌水分や植生の観測及びパラメーターとしての研究が積極的に行われるようになり, その結果, 東アジアの複数の地点での土壌水分や植生の長期モニタリングやデータセットの構築がなされた. その後, GEWEX の一プロジェクトである CEOP (Coordinated Enhanced Observing Period) で 2001 年–2004 年に世界規模で長期の土壌水分モニタリングが行われた. さらに, GEOSS (Global Earth Observing System of Systems) では「水」トピックにおいて土壌水分の重要性が議論されてきている.

地球環境としての土壌水分を考えると, 点から面への観測, つまり地上観測からリモートセンシング技術を駆使した航空機や衛星による土壌水分観測が不可欠となってきている (Engman and Gurney, 1991).

本論文ではこのような国際的で主要な地球環境観測お

よび主要な地球環境観測衛星の土壌水分観測の実態を明らかにし, そこで得られた土壌水分観測の成果を基に土壌水分観測の意義と国際的な土壌水分観測の重要性について水循環・水資源の観点から議論するものである.

2. CEOP・GEOSS の地上土壌水分観測

2.1 CEOP

CEOP は GEWEX の GHP (GEWX Hydrometeorology Panel) プロジェクトの一つであり, GHP の目的である「水資源・土壌水分の季節・年変動の予測技術の立証」のために地球規模の長期地上水循環モニタリングサイト (Reference Site) を世界 35ヶ所に設置し, 新世代地球環境観測衛星と共に高品質データセットを作製することを特色としている. 特に GHP のために高品質の土壌水分データセットを提供することを具体的で重要な課題としている. CEOP は 2001 年–2004 年が最初の活動期であり, 現在は CEOP II (CEOP II は「Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project」と改称) が 2007 年から実施され, 2011 年までを予定している.

CEOP の具体的な成果は, URL [<http://www.ceop.net>] で常時見られ, 誰でも自由に Reference Site, モデル出力, 衛星のアーカイブデータが入手できる (要登録).

2.2 GEOSS

2002 年 8 月に南アのヨハネスブルグで開かれた「持続可能な開発に関する世界首脳会議」で全球地球観測システム (GEOSS) が発案され, 第 3 回地球観測サミット (2005 年 2 月, ブリュッセル) で GEOSS 構築のための「全球地球観測システム (GEOSS) 10 年実施計画」が採択された. GEOSS は地球温暖化や自然災害他の地球規模の問題解決のための地球観測を実施するものであり, 地球観測に関する政府間会合 (GEO: Group on Earth Observations) の 73 の参加国・機関が設立したシステムであり, より精度が高い情報を収集・発信し, 政府間機関から地方政府および個人に至る各レベルの政策立案者を支援するために既存の技術と新しい技術を結集する国際協力の取り組みである. 世界気象機関 (WMO) や国際連合教育科学文化機関 (UNESCO) 他も参加している. 日本においては, GEOSS は総合科学技術会議において「地球観測の推進戦略」(2004 年 12 月) として取りまとめられている.

¹Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, 1-7-1 Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8521, Japan. Corresponding author: 開発一郎, 広島大学大学院総合科学研究科

²Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

³Earth Research Observation Center, JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba 305-8505, Japan

2008 年 11 月 30 日受稿 2009 年 2 月 2 日受理
土壌の物理性 111 号, 5–8 (2009)

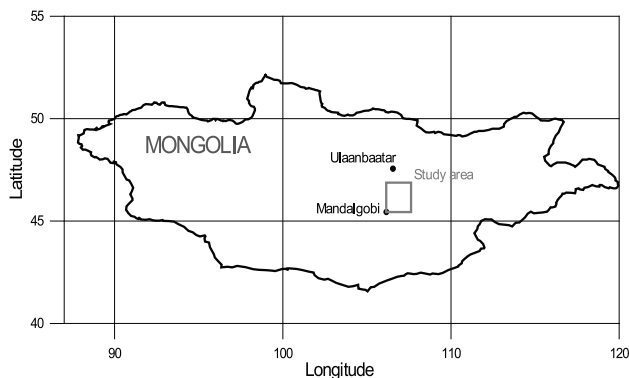


Fig. 1 モンゴル高原試験域。
Study area in the Mongolian plateau.

GEOSS の具体的な課題は「全地球での観測，データの処理・プロダクトと配信のサービス」にあり，観測対象分野（公共的利益分野）は災害，健康，エネルギー，気候，水，気象，生態系，農業，生物多様性の九つである．これらの中で「水トピック」は重要であり，具体的な計画として特に土壌水分と植物水分モニタリングを組み込んだ高機能地上水循環観測ネットワークの整備や衛星土壌水分モニタリングが挙げられている．GEOSS の構築・実施のためには，CEOP は重要で実際的なプロジェクトである．

3. 地球環境観測衛星による土壌水分観測

近年，リモートセンシング技術の進歩により，センサーを人工衛星に搭載して土壌水分をモニタリングできるようになってきた．実際の土壌水分観測にはマイクロ波が有効であり，センサーには能動型と受動型がある（Engman and Gurney, 1991）．前者は合成開口レーダー，後者はマイクロ波放射計が代表的なセンサーである．それぞれ短所と長所があるが，広域土壌水分の観点からではマイクロ波放射計が有効である．

2002 年から AQUA の AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS) による地球規模の土壌水分測定が行なわれている．このマイクロ波放射計の AMSR-E の地表面観測は，広域場の土壌水分・水循環研究および水文災害や水循環数値シミュレーションの地表面パラメータの決定のために有用であり，JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency: 宇宙航空研究開発機構) の衛星観測標準プロダクトとして世界規模で日単位の土壌水分データが公開されている．この AMSR-E 標準土壌水分プロダクトは後述の小池ほか (2004) の測定アルゴリズム（小池アルゴリズム）によるものであり，毎年その検証（Kaihotsu, 2005）が行なわれ，できるだけ高品質の土壌水分データが提供されている．

マイクロ波放射計は地表面からの電磁エネルギーを受信し，その輝度温度から土壌水分を推定する．輝度温度は以下の放射伝達方程式で表される（小池ほか，2004）．

$$T_b = \exp(-\tau_c) \cdot E_s \cdot T_s + [1 - \omega_c][1 - \exp(-\tau_c)] T_c \quad (1)$$

ここで， T_b ：マイクロ波放射輝度温度（衛星で観測）， τ_c ：植生層の光学的厚さ（測定周波数波長と植物水分量の関数）， E_s ：土壌放射率（土壌水分に依存）， T_s ：地表面土壌温度， ω_c ：植生層の単一散乱アルベド（ $=0$ と仮定）， T_c ：植生層物理温度である．これに基づいた土壌水分指標（SWI）と植生指標（PI）による土壌水分アルゴリズムは，2002 年に打ち上げられた AQUA の AMSR-E の JAXA 土壌水分測定標準アルゴリズムとして採択されている．

4. 観測結果

4.1 モンゴル試験域の土壌水分

半乾燥地域のモンゴル高原において地球観測衛星 AQUA と ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 他 の検証サイトとして国際検証試験域が設置されている (Fig. 1)．その大きさは東西 160 km で南北 120 km の非常に平坦な草地（ステップ）であり，年降水量は 100 mm から 200 mm である (Batima and Dagvadorj, 2000)．2001 年と 2002 年に，この試験域内に 4 つの AWS（自動気象観測ステーション）と 12 の ASSH（自動土壌水分ステーション）を 20–30 km 密度でそれぞれ設置した (Kaihotsu, 2005)．土壌水分測定には TDR 土壌水分計 (TIME-IT, IMKO) を用い，AWS については深度 3 cm から深度 1 m までの 4 深度，ASSH は深度 3 cm と 10 cm の 2 深度で土壌水分モニタリングを現在まで連続して行っている．この試験域は，AMPEX (ADEOS II Mongolian Plateau Experiment for ground truth) / MAVEX (MAVEX: Mongol AMSR-2 / AMSR-E / ALOS Validation Experiment) 試験域であり，モンゴル CEOP レفرنスサイトとしても登録されている．尚，地上モニタリングデータの一部はすでに前述の CEOP の Web サイトで公開され，近い将来全てのデータが公開される予定である．

本試験域での MGS（マンダゴビ サイト）の日平均土壌水分と降水量のモニタリング結果（2000 年–2006 年）を Fig. 2 に示す．土壌水分は深度 3 cm，10 cm，40 cm，100 cm までの 4 深度の結果である．降水量は，年変化としてはわずかながら減少気味であり，深度 3 cm と 10 cm の土壌水分は降水イベントによく応答しているが，深度 40 cm と 100 cm のそれには細かな応答はなく，

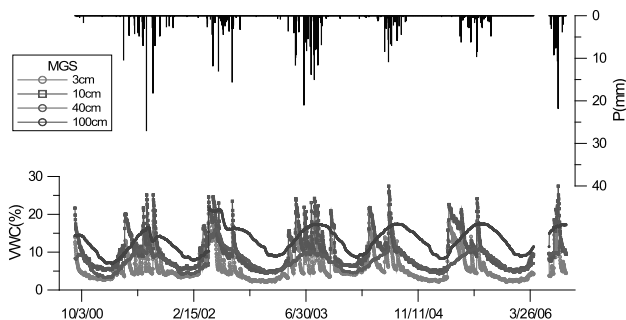


Fig. 2 MGS（マンダゴビ サイト）の AWS モニタリング結果（VWC: 日平均の土壌体積水分量，P: 降水量）の時系列．
A time series of AWS monitoring results at MGS (VWC: volumetric water content of daily mean soil moisture, P: precipitation).

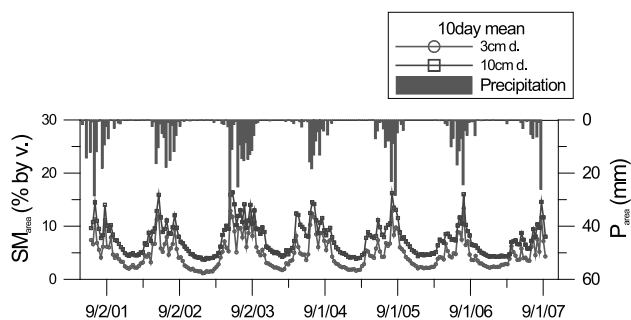


Fig. 3 全ステーションの10日平均面積土壌水分(SMarea)と面積降水量(P)の時系列.

A time series of ten day mean of area-averaged soil moisture (SMarea) and area precipitation (P).

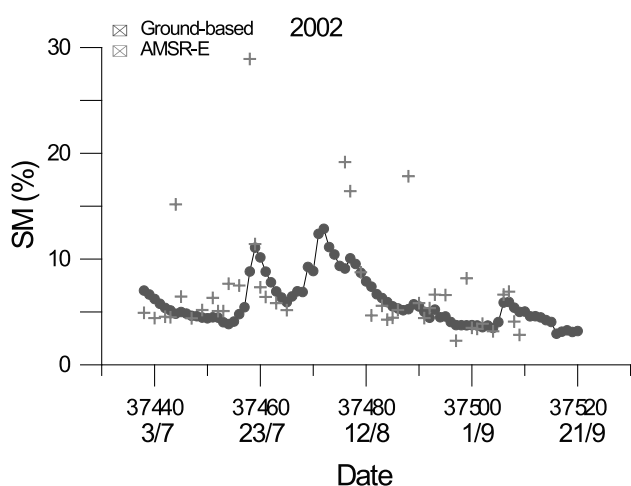


Fig. 4 試験域地上ステーションの日平均面積土壌水分(Ground-based)とAMSR-E土壌水分の比較.

Comparison of daily mean area-averaged soil moisture (Ground-based) with AMSR-E soil moisture estimation.

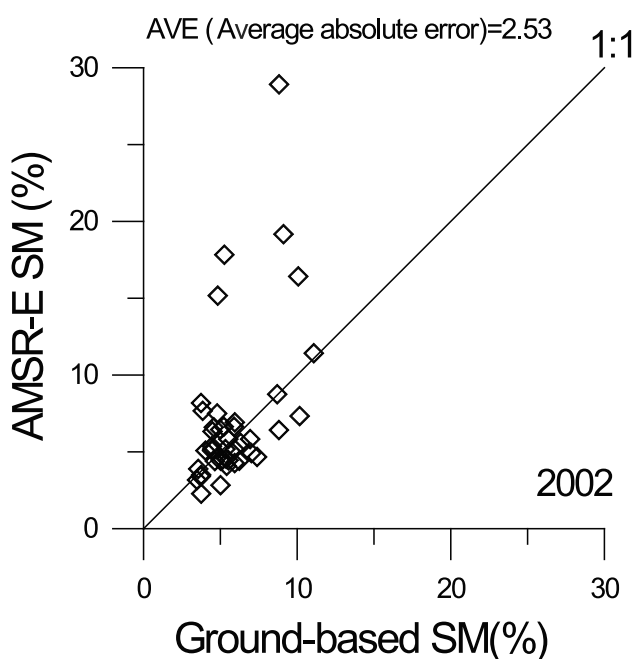


Fig. 5 試験域地上ステーションの日平均面積土壌水分(Ground-based)とAMSR-E土壌水分の関係.

Relationship between daily mean area-averaged soil moisture (Ground-based) and AMSR-E soil moisture estimation.

大体6月から7月にかけて最大値を有しながら年サイクル的な変動パターンがみられる。但し、10月中旬から翌年4月上旬までは、土壌は凍結しており、TDRの測定原理から考えると土壌水分の値は正確に測定されているとはいえない。

Fig. 3は、全ステーションの深度3cmと10cmの10日平均土壌水分を算術平均したいわゆる面積土壌水分と面積降水量(全AWS降水量の平均値)を表したものである。深度10cmの土壌水分の方が少し量的に多いが、その変化パターンに両者の違いはみられない。Fig. 2とFig. 3の結果は、降水があまり深い深度に達せず、結果として表面近くの土壌にとどまりながら蒸発していく可能性を示唆している。

4.2 AMSR-E 土壌水分の推定

AMSR-Eの土壌水分モニタリングは、2008年11月現在、ほぼ地球上の全ての陸地で毎日行われており、JAXAのEORC(Earth Observation Research Center:地球観測研究センター)は、前述の小池アルゴリズムを用いて土壌水分の標準プロダクトを全世界に提供している。

Fig. 4は前述のモンゴル高原試験域の全ステーションの土壌水分(SM:体積水分率)のモニタリングデータによる地上面積土壌水分(Ground-based)とAMSR-Eの土壌水分標準プロダクト(Ver. 5.0)の土壌水分量との比較、いわゆる検証結果を表している。両者の変動のタイミングはよく合っている上、値としても約15%を越えるスパイク的な変動値を除けば、比較的その差は小さい。時折みられるAMSR-Eのスパイク的な変動値は、地表面の草などにトラップされている一時的な水分に反応したものであり、実際の土壌水分ではないと考えられる。地上面積土壌水分(Ground-based)とAMSR-Eの土壌水分の相関(Fig. 5)をみてみると、このスパイク的な変動値の影響もあるが、少しAMSR-Eが過大評価していることが分かる。しかし、(2)式によるAVE(平均絶対誤差)は小さく、全体的に検証結果は良いといえる。

$$AVE = \frac{1}{n} \cdot \sum |\theta_{AMSR-E} - \theta_{ground-based}| \quad (2)$$

ここで n は自然数、 Σ は1から n までのサンメンションである。いずれにしても、さらに種々の地表面条件下での検証を重ね、土壌水分測定アルゴリズムの改良が必要があるが、本アルゴリズムの有用性が高いと考えられる。

この結果を踏まえ、実際にアジア地域の土壌水分量の推定を試みた。Fig. 6は、2005年の6月上旬と7月下旬の10日平均のAMSR-E土壌水分の分布を示している。この図は土壌水分量が60%以下、植物水分量が 2 kg m^{-2} (NOAA AVHRRのNDVI値から推定)の条件下の推定結果である(計算範囲外のところは灰色で示されている)。AMSR-Eの測定深度は土壌水分量に依存し、その範囲は地表面から深度数cmであり、本アルゴリズムの空間分解能は悪くて43kmである。

モンゴル、インドおよび中国北東部において、6月か

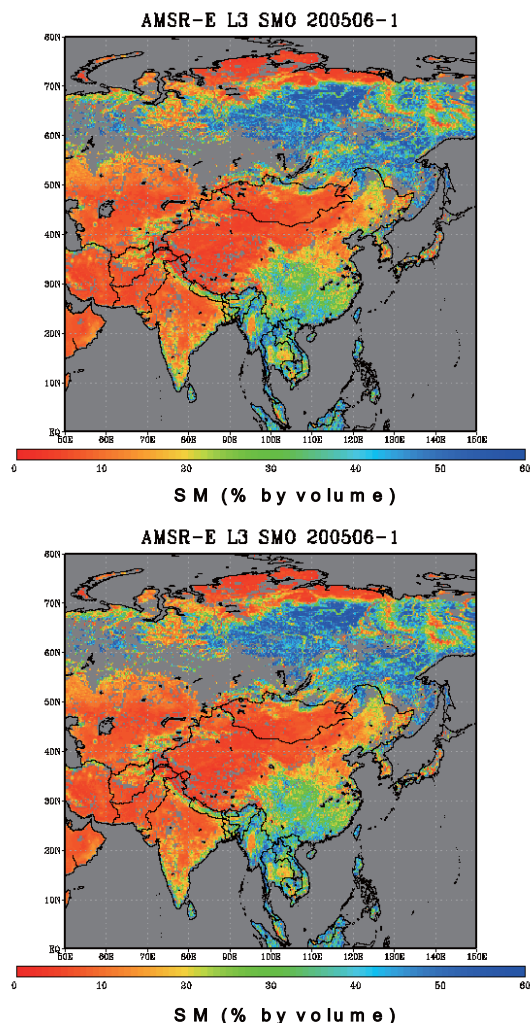


Fig. 6 アジア大陸における 2005 年の 6 月上旬 (上図) と 7 月下旬 (下図) の 10 日平均の AMSR-E 土壌水分の分布。Ten day mean estimation of soil moisture by AMSR-E in early June (upper figure) and late July (lower figure) in Asia.

ら降水量が増加し、それに伴って 7 月下旬に土壌水分量が顕著に増したことが読み取れる。つまり夏のモンスーンの影響を良く表している。この結果は、広域場での地球観測衛星土壌水分モニタリングの有用性が高いことを示唆しており、CEOP や GEOSS の推進においても衛星土壌水分モニタリングは大きな威力を発揮すると期待される。

5. おわりに

本研究では CEOP と GEOSS の土壌水分観測の意味について論じ、地球観測衛星の土壌水分モニタリングの有用性について述べた。具体的には、モンゴル高原での地球観測衛星検証 / CEOP 試験域での土壌水分モニタリング結果および AMSR-E の土壌水分測定アルゴリズムの検証結果を考察し、CEOP や地球観測衛星の土壌水分モニタリングの意義が高いことを示唆した。

GEOSS においても CEOP の土壌水分モニタリングは不可欠であり、世界各地で長期の地上土壌水分モニタリングの実施が重要である。また、AMSR-E をはじめとした複数の地球観測衛星が土壌水分観測を実施し、地球規模での土壌水分変動を把握してきており、地上と衛星の土壌水分観測の統合は実際的で非常に有効である。

引用文献

- Batima, P. and Dagvadorj, D. (2000): Climate changes and its impacts in Mongolia. JEMR Pub, 227p.
- Engman, E.T. and Gurney, R.J. (1991): Remote sensing in Hydrology, pp.127-154, Chapman and Hall, London.
- Kaihotsu, I. (2005): Grand truth for evaluation of soil moisture and geophysical / vegetation parameters related to ground surface conditions with AMSR and GLI in the Mongolian plateau, pp.5-21, JAXA.
- 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 (2004):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, 48 巻, 1 号, 217-222.

要 旨

本研究では、CEOP や GEOSS などの国際的な地球環境観測活動および主要な地球環境観測衛星の土壌水分観測の現況を明らかにし、そこで得られた土壌水分観測の成果から、土壌水分観測の意義と国際的な土壌水分観測の重要性について水循環・水資源の観点から議論した。具体的には、モンゴル高原での地球観測衛星検証 / CEOP 試験域での土壌水分モニタリング結果および AMSR-E の土壌水分測定アルゴリズムの検証結果を考察し、CEOP や地球観測衛星の土壌水分モニタリングの意義の高さを示し、地上と衛星の土壌水分観測の統合は実際的で非常に有効であることを示唆した。

キーワード：CEOP (協調観測強化期間), GEOSS (全地球観測システム), 地球環境観測衛星, 改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E), 土壌水分