

中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題

齊藤忠臣¹

Soil water monitoring and problems in the Loess Plateau, China

Tadaomi SAITO¹

Abstract: The Loess Plateau in northwestern China is one of the most seriously affected regions by soil erosion in the world. For afforestation on steep slopes in the Loess Plateau, a small scale water harvesting system, called "fish-scale-pit", is commonly used to reduce erosion and increase soil water storage. To evaluate the effectiveness of this system, soil water and heat movements have been monitored in an experimental site using various monitoring devices in the north of Loess Plateau. In this paper, I focused on the soil water monitoring using dielectric probes in this site. ECH₂O probes, models EC-5 and EC-20 (Decagon Devices), have been set at various depths in the site. Three main problems on the soil water monitoring caused by use of the probes were discussed: (i) temperature dependence of the probe outputs, (ii) data loss due to breakdowns of the probes and (iii) individual variability of the probes. It is difficult for users to solve the problems (ii) and (iii); further efforts by manufactures to provide irrefragible and precise probes are anticipated.

Key Words: dielectric probe, soil water monitoring, water harvesting, Loess plateau

1. はじめに

中国の黄土高原は、黄河中流域に広がる面積約 60 万 km² の半乾燥地帯であり、世界で最も水食の被害が深刻な地域として知られる。黄土高原において水食により発生する土砂は年間 16 億トンにもおよび、生態系の破壊と土壌劣化が急速に進み、農・林・牧業が深刻な打撃を受けている。さらに、水食により黄河に流入した土砂は、黄河の河床を上昇させ、下流域に住む人々の安全を脅かしている。この水食への対策の一つとして、傾斜地の耕地を森林もしくは草地に戻し緑化を行う大規模プロジェクト「退耕還林・還草」が、1999 年より中国政府主導で強力に進められている。退耕還林による斜面地での植林に際しては、魚鱗坑と呼ばれるウォーターハーベスティングが用いられている。魚鱗坑は斜面に半月状の穴と土手を作成し、これを並べたものであり、流出水捕集と水食防止の効果があるとされる(唐, 2004)。この魚鱗坑の効果を評価するため、黄土高原北部の調査地において、

実験区での水収支観測と、植林区での土壌・地形・植生調査が実施されてきた(Saito et al., 2009b)。本報では、この実験区における誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容を紹介した上で、その課題点を検討する。

2. 調査地と実験区の概要

調査地は、黄土高原北部に位置する陝西省神木県六道溝流域(北緯 38°47', 東経 110°21')に位置している。調査地の年降水量は 430 mm 程度であり、降雨の約 80% は 6~9 月の夏季に集中する。黄土高原地域において森林が形成されるためには、降雨量が 500 mm 以上必要とされており、調査地においては植林に際し魚鱗坑のようなウォーターハーベスティングが必要であるといえる。年平均気温は 8.4 °C と低く、冬季には土壌が深部まで凍結する。

Fig. 1 に実験区の概要図を示す。調査地内において、表面状態が均質な草本で覆われた傾斜 15° の斜面に、4 × 4 m の実験区を設定した。上流側 2 m 分を流出区とし、下流側に深さ 0.3 m の魚鱗坑を 2 つ作成した。なお、砂利マルチによる土壌面蒸発抑制効果を期待し、一つの魚鱗坑の底面は厚さ 5 cm の砂利層で覆われている。砂利の粒径は数 cm 程度であり、現地で入手し易い建材用のものを用いた。以後、Fig. 1 に倣い、流出区を A、通常の魚鱗坑を B、砂利で被覆された魚鱗坑を C とする。A、B、C それぞれの地中に、誘電率土壌水分センサー ECH₂O probe (デカゴン社)、EC-5 ならびに EC-20 モデルが多数埋設されている。これらのプローブは HOBO micro station (Onset) もしくは Em-5b (デカゴン社) データロガーに接続されている。本報では、HOBO micro station ロガーに接続され、深さ 0.05, 0.15, 0.35, 0.60 m に埋設された EC-20 プローブから得られたモニタリング結果に焦点を当てる。測定は 2005 年 8 月より開始され、2009 年現在も継続中である。また、実験区ならびに調査地流域内では、地温のモニタリングや気象・水文観測も実施されている。

3. 土壌水分モニタリング結果

モニタリング結果の一例として、Fig. 2 に 2005 年 8 月から 2006 年 5 月までの流出区 (A) における日平均土壌水分量と日降雨量を示す。図より、深さ 0.05 および 0.15 m の土壌水分が、基本的に降雨イベントとその後の

¹Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori, 680-8553, Japan. Corresponding author: 齊藤忠臣, 鳥取大学農学部

2009 年 10 月 5 日受稿 2010 年 1 月 15 日受理
土壌の物理性 114 号, 37-40 (2010)

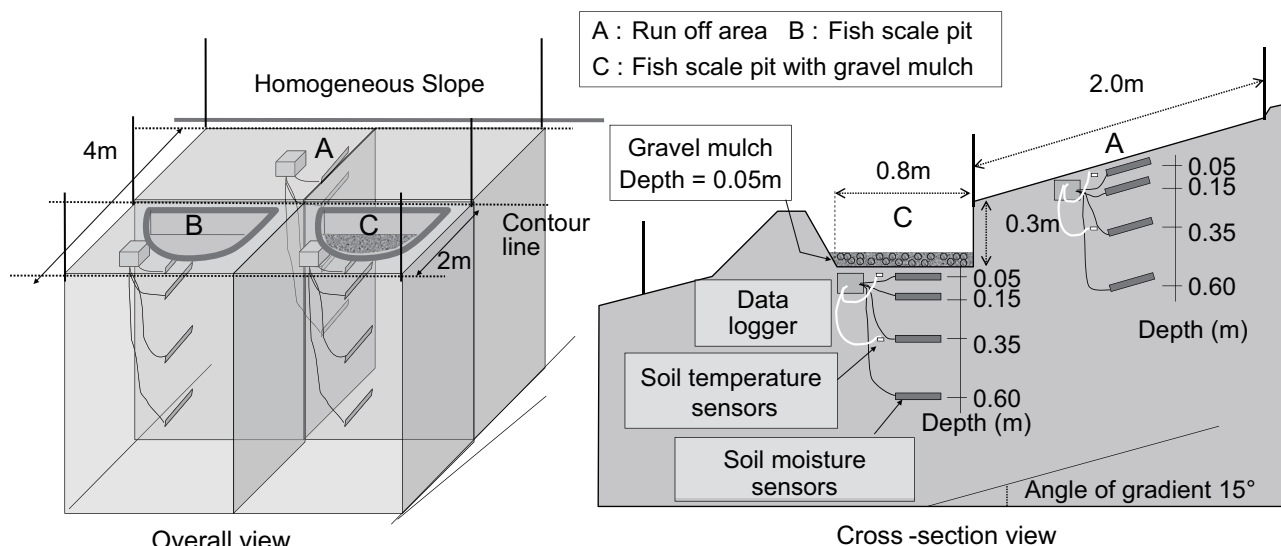


Fig. 1 魚鱗坑実験区の概要．
Schematic diagrams of the experimental site of fish-scale-pits.

浸透・蒸発の影響を受けて速やかに変動している事がわかる．また，冬季には土壤水分が少ない状態で保たれているが，これは冬季の雨量自体が少ないことに加え，土壤水が凍結し誘電率が低下したことによるものである．したがって，春季に各深さの地温が 0°C 以上となると，それぞれの水分が増大する傾向が確認される．これらの傾向は，B（魚鱗坑），C（砂利マルチ魚鱗坑）でも同様であった．また，A・B・C間の比較結果からは，通常型の魚鱗坑が必ずしも水分貯留の面において効果的とは限らず，砂利マルチとの組み合わせによる蒸発抑制が渇水年においても効果的である可能性などが示唆された．

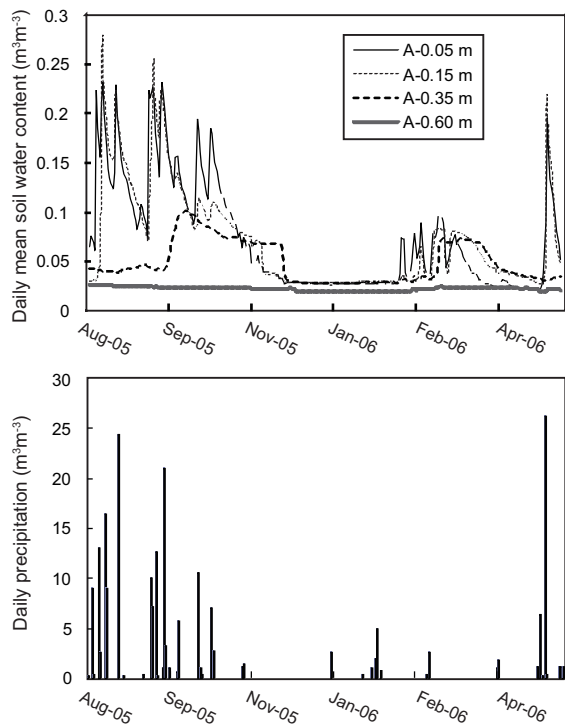


Fig. 2 流出区における日平均土壤水分量と日降雨量（2005年–2006年）．
Daily mean soil water content and daily precipitation in the runoff area (2005–2006).

4. モニタリングにおける課題

4.1 センサーの温度・塩依存性と校正

誘電率水分センサーの出力値は，温度・塩応答性を示すことが知られている．本調査地におけるモニタリング結果においても，特に EC-20 プロブで明確な出力値の温度依存性が見られたため，その校正手法を開発し，手法をモニタリング結果へと適用した（齊藤ら，2008）．Fig. 2 に示した土壤水分量のデータも，この手法を適用し校正されたものである．なお，次節以降の Fig. 3, 4 における水分モニタリング結果では，デカゴン社から提供されている温度依存を考慮しない線形校正式から得られた水分量を示しており，これらでは特に地表付近のプロブにおいて，地温変化に伴う水分の日振幅が明確に見られる．温度校正を行わなかった場合のモニタリング結果と温度依存がもたらす問題点については，齊藤ら（2008）に詳述されている．

また，複数の土壤とプロブモデルを用いた研究より，EC-20 プロブの温度依存性の主要因が，電気伝導度の温度依存性を介した，プロブの塩依存性に起因していることが明らかとなっている（Saito et al., 2009a）．EC-20 プロブは印加周波数が 5 MHz と低く，これにより塩依存性が強いいため，地温の上昇に伴う土壤中の見かけの電気伝導度の増加に伴い出力値が増大し，水分量が過大評価されることとなる．EC-20 の塩依存性とその校正法については，Saito et al. (2008) に詳しい．本調査地の地中では塩濃度の変化が少ないため，塩依存性の校正は必要でないが，塩濃度変化の激しい条件下での EC-20 プロブの適用は，塩・温度依存性の同時校正法を必要とするため，困難を極めるものと考えられる．

4.2 故障によるデータの欠損

2005 年 8 月より開始されたモニタリングは，Fig. 1 で示した期間までは順調であったものの，2006 年 5 月のデータ回収とバッテリー交換後からセンサーの故障が多

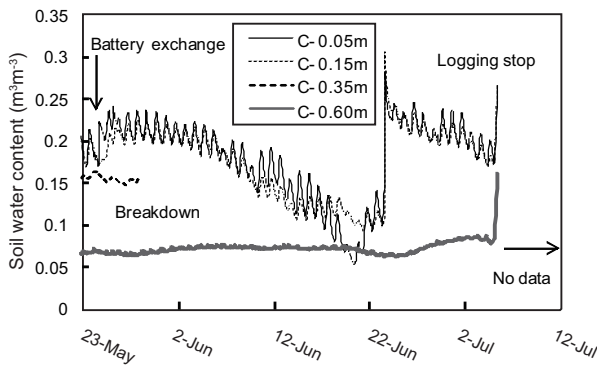


Fig. 3 センサー故障によるデータ欠損の例。
Example of data loss due to breakdown of the probes.

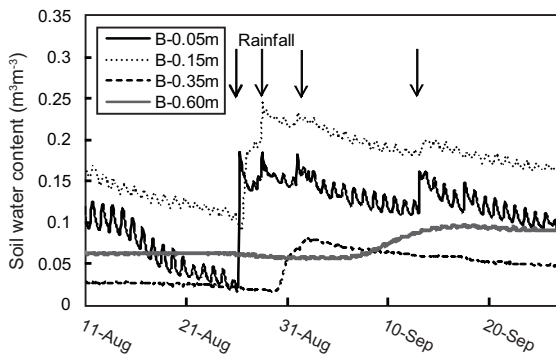


Fig. 4 プローブ個体差に起因する不可解な水分変化。
Inexplicable water content change caused by individual variability of the probes.

発し、データに欠損が見られるようになった (Fig. 3)。Fig. 3 の例では、C 地点において 5 月 28 日に深さ 0.35 m のセンサーが故障し、以降データが欠損していることがわかる。また、センサーの異常に伴いロガーの電力消費にも影響が出たためか、バッテリー交換後 2 か月弱でバッテリーが完全に消耗し、他のセンサーも含めたロギング全体が停止してしまった。設置した機器類はいずれも新品であり、故障の原因は不明であったが、埋設時にセンサーを可能な限り丁寧に扱う、既に防水加工となっている場所も含めあらゆる場所に防水加工を施す、といった対策を講じた。また、ロガー設置当初は、盗難や家畜による食害の防止の観点からロガーを地中に埋設したが、データ回収の際にロガーやケーブルを掘り出す行為が、多少なりともケーブルやその接続部分にダメージを与える可能性があるため、ロガーを地上部への据え置きとすることとした。これらが功を奏したのか、2007 年以降はセンサーの故障は少しずつ減少した。センサー故障はデータの欠損だけではなく、センサー交換時の現場の攪乱をも招くため、極めて重大な問題といえる。

4.2 プローブの個体差の問題

モニタリング結果において、プローブ個体差に起因すると思われる不可解な水分変化が頻繁に見られた (Fig. 4)。実験区の土壌は深さ方向に均一な黄土で、明確な層構造はない。Fig. 4 は B 地点における土壌水分の変化を

示したものであるが、降雨に伴う浸潤イベントに際し表層のプローブから深いプローブへと順に対応が見られるものの、その水分量は表層 (0.05 m) で低く、深さ 0.15 m では高く、0.35 m で再度低くなり、0.60 m で再度高くなる傾向にある。表層が深さ 0.15 m より水分が少なくなる理由として、蒸発による乾燥が考えられるが、降雨イベントの直後で表層土壌が十分に湿っている状況下においても、常に 0.15 m の水分量が表層の水分量を上回っており不可解である。深さ 0.35 m と 0.60 m における水分の逆転現象も、降雨イベントと浸潤のタイミング次第では起こりうるものであるが、Fig. 4 に示した期間以外でも常に逆転傾向が継続されており、これも不可解であるといえる。均質な土壌における降雨浸潤イベントにおいては、このような深さ方向にまだらな水分分布の発生は通常起こりえず、これらはプローブの個体差によってもたらされたものと考えられる。物理的に生じえない水分移動・分布が観測された場合、数値計算によって現象の再現が不可能となるため、深刻な問題といえる。

プローブの個体差の問題は、プローブ毎の校正試験の実施と校正曲線の作成により解決可能である。三石・溝口 (2007) は、プローブの個体差を取り除くための簡易キャリブレーション法を提案している。しかし、本報で取り上げた ECH₂O プローブのような安価なセンサーは、土壌分野以外のライトユーザーを特に多く持つと思われる。このようなライトユーザーの場合、土壌毎の校正試験は行っても、プローブ個体差の問題を知らず、プローブ毎の校正試験を行わないため、個体差による誤差を実際の現象と誤解し、データを誤って解釈をする可能性が高いものと考えられる。メーカーには個体差の小さいプローブの開発・製造・提供を強く期待したい。

5. おわりに

本報では、中国黄土高原における誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容とその 3 つの課題点を紹介した。特にプローブの故障と個体差の問題に関しては、ユーザー側の努力で解決できる範囲は限られており、製造・提供元の企業には丈夫で個体差の小さいプローブの開発・製造に向けた努力を期待したい。また、ユーザー側としても、不具合の情報やネガティブデータを製造元や他のユーザーと十分に共有することが重要であると思われる。より安価・安定・高精度な土壌水分モニタリングを可能とすることは、土壌物理分野に課せられた課題の一つであり、今後のユーザー間・企業間の更なる相互協力が望まれる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日本学術振興会による拠点大学交流事業ならびに科研費 (21780224) の助成を得た。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 三石正一, 溝口勝 (2007): デカゴン土壌水分センサーの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法に関する一考察. 第 49 回土壌物理学学会講演要旨集: 40–41 .
- 齊藤忠臣, 藤巻晴行, 安田裕 (2008): 誘電率水分計の温度依存性の校正. 土壌の物理性, 105: 15–29 .
- Saito, T., Fujimaki, H. and Inoue, M. (2008): Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes. *American Journal of Environmental Science*, 6: 683–692.
- Saito, T., Fujimaki, H., Yasuda, H. and Inoue, M. (2009a): Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1931–1937.
- Saito, T., Yasuda, H., Dhavu, K., Kawai, T., Abd Elbasit, M.A.M., Tsunekawa, A. and Li, S. (2009b): Relationships between soil, topography and tree growth in a water harvesting system in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land Studies*, 19: 65–68.
- 唐克麗 (2004): 中国水土保持. pp. 540–543, 科学出版社, 北京.

要 旨

中国の黄土高原は世界で最も水食の被害が深刻な地域として知られる。中国政府は水食対策の一つとして、大規模植林プロジェクト「退耕還林・還草」を実施しており、斜面地での植林に際しては、魚鱗坑と呼ばれるウォーターハーベスティングが用いられている。本報では、黄土高原北部の実験区における魚鱗坑の評価のための誘電率水分計を用いた土壌水分モニタリングの内容を紹介した上で、その課題点を検討した。本報で取り上げた課題は、i) センサーの温度・塩依存性、ii) 故障によるデータの欠損、iii) プローブの個体差の問題の3つである。特に ii) と iii) の課題に関しては、ユーザー側の努力で解決できる範囲は限られている。ユーザーと製造・提供元の相互協力の下、安定・高精度なプローブの開発・製造が期待される。

キーワード：誘電率水分計，土壌水分モニタリング，ウォーターハーベスティング，黄土高原