

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21780224

研究課題名（和文）ウォーターハーベスティング最適設計のための2次元土壌水分挙動モデルの開発

研究課題名（英文） Development of a simulation model to calculate two-dimensional soil water movement for optimal designing of water harvesting system

研究代表者 齊藤 忠臣（SAITO TADAOMI）

鳥取大学・農学部・講師

研究者番号：70515824

研究成果の概要（和文）：乾燥地の伝統的な表面流出水捕集技術であるウォーターハーベスティングを地域の環境条件に応じて最適設計できるようにするため、表面流出量と土壌面蒸発速度を高精度で予測可能な2次元土壌水分挙動モデルの開発を行った。中国ならびにヨルダンで圃場実験を実施した。また、数値計算に必要となる土壌の水分移動特性や、水分センサーによるモニタリング結果を高精度化するための室内実験を実施した。得られたデータを元に、まずは既存の水移動モデルを用いて計算を行い問題点を洗い出し、新規モデルの開発に着手した。

研究成果の概要（英文）：A simulation model to calculate two-dimensional soil water movement has been developed for optimal designing of water harvesting system depending on local environmental conditions which enable to estimate the amount of runoff and soil evaporation rate in high accuracy. Field experiments were carried out in China and Jordan. Several laboratory experiments were also carried out to obtain soil hydraulic parameters and to improve monitoring accuracy by soil moisture sensors. Some problems were clarified through calculation of soil water movements by an existing simulation model. A new model has been developed to solve these problems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：ウォーターハーベスティング、数値計算、水移動、乾燥地

1. 研究開始当初の背景

ウォーターハーベスティング（WH）は、乾燥・半乾燥地域における、土手や溝を用いた表面流出水捕集法であり、世界各地で農業や植林に不可欠な技術として伝統的に用いられてきた。また、灌漑に依存しない水資源

の確保と土壌侵食防止を可能とすることから、持続可能な技術として注目されている。WHシステムは、基本的な構造として、流出水が発生する「流出域」と、それを捕集するための「捕集域」から成る。流出域の広さや捕集域の形状等は、国や地域で様々に異なって

おり、主に伝統的知識や、技術書に基づいて設計がされている。しかし、その設計は現地の土壌・地形・気象条件に対し、十分に最適化されておらず、特に、トップダウン的なプロジェクトの下、新規かつ大規模に展開される WH においては、他地域における設計をそのまま転用したり、広域において画一的な設計を用いるケースが多く、その効率性や持続性には疑問が見られる (図 1)。



図 1. 中国黄土高原におけるウォーターハーベスティングの様子 (陝西省榆林). 世界でも最大規模の緑化プロジェクト「退耕還林」で使われる水平坑 (等高線溝) と魚鱗坑 (魚の鱗のような形状の穴). 地域によっては植林樹木の活着率が極めて低い.

地域の環境条件に応じた WH システムの最適設計には、水収支を中心としたシステムのモデル化と、そのモデルを用いた数値実験による設計パラメータの最適化が効果的であると考えられる。WH のモデル化についてはいくつもの既往研究があり、圃場実験における水収支の再現等が試みられている。しかし、多くの研究では、水収支の計算に単純なバケツモデルが採用され、WH において最も重要な要素である、流出発生量や土壌面蒸発速度がモデル自体によって予測されず、それらの実測値が入力パラメータとして使われる場合もある。このようなモデルでは、例え一定の実験条件下において結果を良く再現できたとしても、異なる環境条件における計算の信頼性は低く、数値実験による設計パラメータの最適化は困難であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、流出発生と土壌面蒸発速度を含む 2 次元土壌水分移動を高精度で予測出来るモデルを開発し、地域の環境条件に応じた WH システムの最適設計を可能とすることを目的とする。なお、WH システムには、洪水時の河川流出水を捕集するような大規模 WH と、数〜数十 m スケールの流出域における流出水を各捕集域内で集水する小規模 WH が存在す

るが、本研究では、後者の小規模 WH を対象としてモデル開発を行う。

3. 研究の方法

本研究は主に (1) 海外圃場実験、(2) 国内室内実験、(3) 既存モデルによる圃場実験のモデル化 (4) 新規モデルの構築、の 4 つの研究項目からなる。以下に各項目詳細を記す。

(1) 海外圃場実験：中国黄土高原ならびにヨルダンにおいて WH の実証実験を行った。以下では良好な結果の得られた中国黄土高原での実験について詳述する。実験サイトは黄土高原北部の陝西省神木六道溝流域内に作成した。現地の年平均降水量は約 400mm である。表面状態が均質な草本で覆われた傾斜 15° の斜面において、4×4m の実験区を設定した。上流側 2m 分を流出区とし、下流側に深さ 0.3m の WH (魚鱗坑) を 2 つ作成した。一つの魚鱗坑の底面を厚さ 5cm の砂利層で覆った。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。サイト内の地中の多地点に、誘電率土壌水分計と温度センサーを設置した (図 2)。

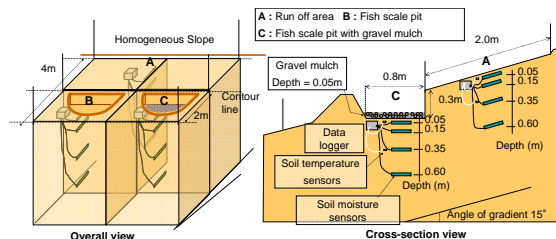


図 2. 黄土高原における圃場実験の概要

なお、現地では 2005 年より WH の実証実験が実施されており、当初の計画では本研究においてもこの既存のサイトを継続利用する予定であったが、2009 年に現地農民の火の不始末によりサイトが野火に巻き込まれ、機材等が焼失したため、同地点で新規にサイトを構築した。また、実際に WH が用いられている実験区近辺の植林地において、現地調査を実施し、樹木成長や水収支に影響を与える土壌・地形の要因を明らかにした。ヨルダンの圃場に関しては、ヨルダン科学技術大学内の実験圃場において、同大工学部マジッド・アブズレイグ教授が作成した砂溝を用いた WH のサイトを利用し、多地点での土壌水分モニタリングを実施した。

(2) 国内室内実験：数値計算に不可欠である土壌の水分移動特性に関する各種試験や蒸発試験を実施した。また、圃場における水分モニタリング結果の向上のため、誘電率水分計の個体差に関する研究や温度・塩依存校正に関する室内実験を実施した。特に、海外圃場での水分モニタリング結果は、乾燥地特有の地温の日格差・年較差の影響を強く受けていたため、水分計の温度依存性の校正法に

関する室内実験・研究を重点的に実施した。

(3) 既存モデルによる圃場実験のモデル化: 既存の水移動モデルによる WH のモデル化の精度評価と問題点の洗い出しのため、汎用性の高い 2 次元水移動モデルとして知られる HYDRUS_2D を用いて、海外圃場実験のモデル化を行った。(1), (2) より得られた土壌の水移動特性や気象データをモデルに与え、HYDRUS_2D を用いて土壌水分モニタリング結果をどこまで再現できるかを検討した。また、HYDRUS_2D の逆解析機能を利用し、現地での浸透実験の結果を元に、土壌水分移動特性の推定を行った。

(4) 新規モデルの構築: (3) で得られた既存のモデルにおける適用限界や問題点を考慮し、新規モデルの構築に着手した。蒸発速度の推定に大きく寄与する土壌面の水蒸気の与え方には熱力学的平衡近似の概念を用い、土壌面付近の計算格子を十分に細かくすることにより高精度での蒸発速度予測を目指した。また、発生した流出水が下流部の上部境界と関連付けられるよう工夫し、既存モデルの問題点の克服を試みた。

4. 研究成果

(1) 海外圃場実験結果: 黄土高原における圃場結果より、以下のような内容が明らかとなった。流出域・魚鱗構内の両方において、深さ 0.05 および 0.15m の土壌水分が、基本的に降雨イベントとその後の再分配の影響を受けて変動している事がわかった。渇水年においては、明確な流出イベントがほとんど観測されず、魚鱗坑による土壌水分の貯留効果はほぼ見られなかった。一方、砂利マルチをした魚鱗坑においては、流出域、通常の魚鱗坑のいずれと比べても土壌水分が高く、この傾向は特に深さ 35cm 以深において明確であった。砂利マルチによる蒸発抑制により、雨水が深部にまで到達し、水分貯留効果が得られたと考えられる (図 3)。

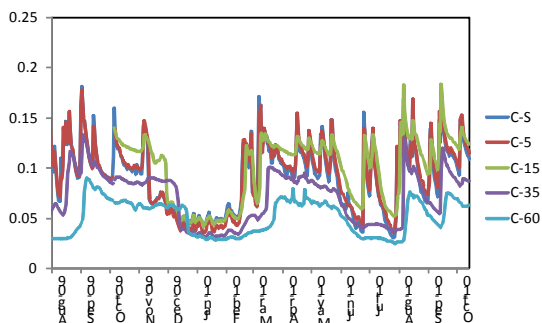


図 3. 砂利マルチ魚鱗坑内の水分変化の例

多雨年においては、流出を伴う降雨イベントが複数回みられ、その際には通常の魚鱗坑、砂利マルチ魚鱗坑ともに深さ 0.35m までの土壌が十分に湿潤状態となった。しかし、この

ような降雨イベントでは、流出域においても 0.35m までの土壌が十分に湿潤することが多く、魚鱗坑内の地中との水分の差異は明確でなかった。降雨イベントの後の再分配過程においては、各地点間に明確な差が見られた (図 4)。

降雨後の蒸発が開始すると、流出域 (A) では急激に水分が減少するが、通常の魚鱗坑 (B) では減少が緩やかで、砂利マルチ魚鱗坑 (C) では水分の減少が最も小さかった。これは、砂利マルチ魚鱗坑、通常の魚鱗坑、流出域の順番で、土壌面蒸発が少ないことによるものである。これらと連動し、0.15m 以深の土壌においても、同様の順番で土壌水分が高い傾向がみられた。通常の魚鱗坑の蒸発量が流出域より低くなる原因としては、i) 魚鱗坑底面は地表面よりくぼんでいるために風速が低くなる、ii) 魚鱗坑の壁面により影ができ地温が低くなる、といった要因が考えられる。特に ii) に関しては、夏季において壁面側の地表面温度が流出域の地表面温よりも数℃低い傾向が確認された。

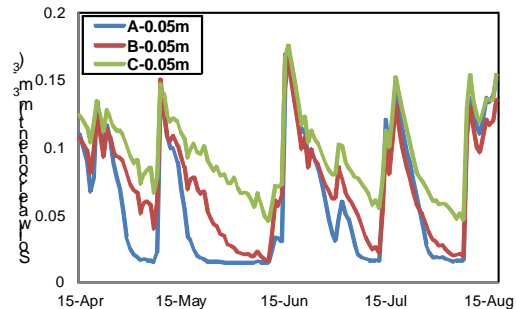


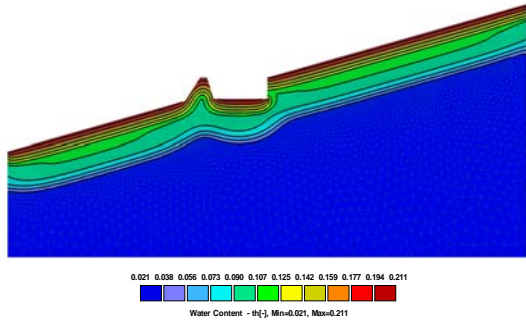
図 4. 春季から夏季における表層水分の比較

また、実際の植林地における樹木成長や土壌・地形の調査から、魚鱗坑の位置や流出域の傾斜等の地形要因が水移動を介して樹木成長に影響を与えていることが分かった。

(2) 国内室内実験: 国内室内実験では、特に誘電率水分計の温度依存性校正に関する研究において良好な成果が得られた。まず、静電容量法を採用した誘電率水分計を対象とし、水分を一定とした土壌カラムに温度変化を与える室内実験に基づいて、温度依存性を考慮した校正式を作成する手法を提示した。続いて、この手法を異なる土壌・誘電率水分計と適用し、手法の妥当性を評価すると同時に、得られた実験結果を元に、誘電率水分計の温度依存性の理論的背景について検討した。さらに、誘電率水分計の温度依存性の簡易校正手法として、室内校正試験式を用いずに、現場から得られる地温と水分の時系列データを用いて温度依存性校正式を作成する手法を提案した。これらの結果を圃場のモニタリング結果に適用し、モニタリング精度の向上を図った。

(3) 既存モデルによる圃場実験のモデル

化: Hydrus_2D を用いた黄土高原圃場実験のモデル化においては、特に通常の魚鱗坑の降雨浸潤過程の水分挙動を比較的良好に再現できた(図5)。また、ヨルダンの砂溝 WH においても、降雨浸潤過程の水分挙動を比較的良好に再現できた。しかし、既存モデルによるモデル化には以下のような問題点が存在した。



Project fish-scale-pit-2D-9
Results, Water Content, Time 8 - 1110 hours

図5. HYDRUS_2D による魚鱗坑サイトの水分分布計算結果の一例

①現地において実測された時間降雨の強度が非常に高い場合、計算が停止してしまうため、実測の降雨強度より低い降雨を長時間与える操作が必要となるケースがあった。

②砂溝・砂利マルチと周囲の土壌のような物性の著しく異なる乾燥した2種の土壌への浸潤の数値計算は極めて不安定であり、多くの計算停止や発散による誤差が発生した。

③上部境界条件に実蒸発フラックスを与えた場合、水収支が一致することは当然であるが、水分分布の傾向も概ね良好に一致した。一方、気象条件に応じHYDRUS_2Dが蒸発フラックスを計算した場合は、減率蒸発段階における蒸発速度が、実測蒸発速度と比べて過大評価されており、水収支に大きな誤差が生じた。

(4) 新規モデルの構築:(3)で得られた既存のモデルにおける適用限界や問題点を考慮し、新規モデルの構築に着手した。現時点では、流出域、集水域を分けてモデルを構築しており、各モデルとも限定的な条件下において一通りの水移動計算が行える状況である。流出域においては、高降雨強度条件下で表面流出量が比較的良好に推定で来ている。これまでに得られた成果を生かし、今後ともモデル開発を継続して行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Saito T., H. Yasuda, H. Fujimaki, K. Inosako and Y. Abe: Numerical

calculation of soil water movement in a water harvesting system with sand ditches using HYDRUS-2D. Journal of Arid Land Studies, (印刷中・査読あり)

- ② 齊藤忠臣. 中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題(研究ノート). 土壌の物理性, 114: 37-40. 2010. (査読あり)

- ③ Saito T., H. Yasuda, K. Inosako, A. Tsunekawa and S. Li. Evaluation of water balance and tree growth in a water harvesting system in the Loess Plateau, China. Proceedings of The 6th International Joint Symposium between Japan and Korea, Nov. 12, 2009, Kyushu University, Fukuoka, Japan, ISBN 978-4-9902906-1-0, pp.267-271. 2009. (査読なし)

- ④ Saito T., H. Fujimaki, H. Yasuda and M. Inoue: Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. Soil Science Society of America Journal 73: 1931-1937. 2009. doi:10.2136/sssaj2008.0128 (査読あり)

- ⑤ Saito T., H. Yasuda, K. Dhavu, T. Kawai, M. A. M. Abd Elbasit, A. Tsunekawa and S. Li: 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. 2009. (査読あり)

[学会発表] (計8件)

- ① Saito T., H. Fujimaki, H. Yasuda and M. Inoue. Calibration of temperature dependence of dielectric probes using time series of field data. Joint Meeting of the Second International Soil Sensing Technology Conference, the Soil Physics Technical Committee Annual Meeting, and the ASA Sensor-based Water Management Community, University of Hawaii, Honolulu, America, 2012. 1.3-7.

- ② Saito T., H. Yasuda, K. Inosako and J. Zheng. Evaluation of water balance in a water harvesting system in the Loess Plateau, China. International Workshop on Dryland Science for Food Security and Natural Resource Management under Changing Climate, Konya, Turkey, 2011. 12.7-9.

- ③ 齊藤忠臣・藤巻晴行・安田 裕・猪迫耕二・井上光弘:現場時系列データを用いた誘電率水分計の温度依存性校正, 土壌物理学会2011年大会, 北海道大学, 2011.10.28.

- ④ 齊藤忠臣. 乾燥地における表面流出水捕

集と土壌侵食防止に関する研究. 日本沙漠学会第22回学術大会, 2-3, 東京農業大学. 2011. 5.29.

- ⑤ Saito T., H. Yasuda, H. Fujimaki, K. Inosako and Y. Abe: Numerical Calculation of Soil Water Movement in a Water Harvesting System with Sand Ditches Using HYDRUS-2D. THE 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARID LAND (Desert Technology 10), Abstracts p. 85, Narita, Japan, 2011. 5.24-28.
- ⑥ Saito T., H. Yasuda, K. Inosako, A. Tsunekawa and S. Li. Evaluation of water balance and tree growth in a water harvesting system in the Loess Plateau, China. Abstracts of the 6th International Joint Symposium between Japan and Korea, p.41, Kyushu University, Fukuoka, Japan. 2009. 11.12.
- ⑦ 齊藤忠臣. 中国黄土高原における土壌水分モニタリングと課題. 土壌センサーの現状と未来 プログラム 25-26, 東京大学. 2009. 7. 11.
- ⑧ 齊藤忠臣・安田 裕・猪迫耕二・恒川篤史・鄭 紀勇・李世清. 中国黄土高原におけるウォーターハーベスティングの水収支評価. 2009 年度土壌物理学学会講演要旨集, 84-85, 明治大学, 2009. 10.24.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 忠臣 (SAITO TADAOMI)

鳥取大学・農学部・講師

研究者番号：70515824

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし