

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05827

研究課題名(和文) UAVによる土壌面温度観測に基づく畑地の不飽和透水係数の空間分布推定手法の開発

研究課題名(英文) Special variation of unsaturated hydraulic conductivities in a crop field based on soil surface temperature measurements using a UAV

研究代表者

坂井 勝 (SAKAI, Masaru)

三重大学・生物資源学研究所・准教授

研究者番号：70608934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：赤外線サーモグラフィカメラを搭載したUAVを用いて、畑地の土壌水分量のばらつきを反映した地表面温度を観測することができた。観測された地表面温度に、土中水分・熱移動モデルと気象条件を反映した地表面熱収支式の数値シミュレーションを適用することで、土壌の不飽和透水係数を推定することができた。特に、観測回数が限られるUAV測定について、土壌が湿潤な日と乾燥した日で地表面温度の観測をすることで、広い圧力範囲の透水係数を推定できる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動にともなう厳しい気象条件の元、持続可能な作物生産を行うには、土壌水分量の把握が重要である。特に、今後農地の集約化が進められ大規模化した時、圃場内の水分の空間的なばらつきが顕在化し、従来の土壌水分センサーによる点的な観測だけでは不十分となることが予想される。

土壌内部の水分量変化を予測する手法の一つに数値シミュレーションが挙げられるが、不飽和透水係数の原位での面的な決定が必要であり、土壌物理学にとっても残された最大の課題である。赤外線サーモグラフィカメラを搭載したUAVで観測した圃場の土壌面温度から透水係数の空間分布を推定する上で、本研究成果は非常に有用である。

研究成果の概要(英文)：Using a UAV equipped with an infrared thermography camera, we were able to observe surface temperatures reflecting variations in soil moisture content in a field. A coupled numerical simulation program of a soil moisture and heat transfer model and a surface energy balance model was developed. The unsaturated hydraulic conductivity of a soil was estimated by applying the developed program that reflects meteorological conditions to the observed surface temperatures. UAV measurement is limited in number of observations. Numerical experiment showed a possibility of estimating hydraulic conductivity over a wide pressure head range by observing surface temperature on wet and dry soil days.

研究分野：土壌物理学

キーワード：土中・水分熱移動 地表面熱収支 蒸発散 地表面温度 数値シミュレーション UAV 赤外放射温度計
空間分布

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動の影響にともなう集中豪雨や干ばつ頻度の増加が懸念される近年、畑地における作物栽培・生産の上でも、湿害や乾燥害が多収阻害要因の一つとして問題となっている。根圏土壌中の水分量は、作物根による吸水という直接的な生育要因であるのに加え、堆肥等で畑に施用された有機物の分解速度に影響を与えるという間接的な生育要因にもなる。厳しい気象条件の下、低環境負荷で持続可能かつ安定した作物生産に向け、最適な灌漑・施肥計画等の栽培管理を行うには、土壌水分量の把握が重要である。特に、今後農地の集約化が進められ大規模化した時、圃場内の水分の空間的なばらつきが顕在化し、従来の土壌水分センサーによる点的な観測だけでは不十分となることが予想される。

近年のスマート農業の推進、近接リモートセンシング技術の発展により、UAVで農地の画像を取得・解析することで、例えば植生指数 NDVI から作物の生育状況の面的な把握が可能になっている。土壌水分量に関しても、同様にマルチスペクトルカメラの解析から推定する研究が進められており、降雨後で土壌水分量が深さ方向に均一な条件下や湛水条件下では、有用な方法だと言える。一方、無降雨時の乾燥過程では、土壌表面数センチの乾燥が極端に進行するため、土壌面の水分量に依存する UAV のスペクトル情報だけでは、根圏の水分量を推定するのは困難である。そのため、土壌乾燥過程においても、根圏土壌中の水分量を圃場スケールで面的に把握する手法の開発が求められている。

土壌内部の水分量変化を予測する手法の一つに、不飽和土中の水分移動モデルを用いた数値シミュレーションが挙げられる。地表面熱収支モデルと組み合わせ、気象データに基づく境界条件を与えることで、土壌面の蒸発速度および土壌水分量の変化を予測可能である。その際、重要なパラメータの一つが土の不飽和透水係数であるが、室内実験で精密に求めた透水係数では必ずしも現場を再現できないことが知られている。この理由として、畑地の土壌の物理性が面的に不均一であること、耕起等の人的要因や降雨等の自然的要因で土壌面近傍の透水性が経時的に変化することが挙げられる。そのため、現場の水分移動を表す不飽和透水係数の原位置での面的な決定が必要であり、申請者が専門とする土壌物理学にとっても残された最大の課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、乾燥過程にある根圏土壌の水分量を圃場スケールで把握するために、UAV から得られる土壌表面データを用いて、土壌面近傍の不飽和透水係数を面的に推定する手法の提案である。まず赤外放射温度計を用いた裸地圃場の観測を行い、土中水分・熱移動モデルを用いた逆解析による不飽和透水係数の推定について検討した。また、観測数が限られた地表面温度データの透水係数推定への有効性について、数値実験で評価した。そして、赤外線サーモグラフィカメラを搭載した UAV で畑地の地表面温度の観測を行った。

3. 研究の方法

三重大学附属農場のダイズ栽培圃場で 2021~2023 年に現場観測を行った。圃場内の各深度、各水平位置に土壌水分・地温・EC センサーを設置し、20m×20m の圃場における土壌水分量の空間分布の観測、および気象データの観測を行った(図1)。圃場内に設けた裸地区画において、赤外放射温度計を用いた土壌面温度の連続測定を行った。さらに、定期的に赤外線サーモグラフィカメラを搭載した UAV で畑地の土壌面温度を撮影した。

土中水分・熱・溶質移動予測プログラム「HYDRUS-1D」と、土壌面と植被面における熱収支式を考慮した群落熱収支モデルの 2 層モデルの連結プログラムを開発した。気象条件等を反映した数値シミュレーションを行い、測定された地表面温度を再現する不飽和透水係数の推定を行った。また、観測数が限られた地表面温度データの透水係数推定への有効性について、数値実験で評価した。晴天時の気象データを反映した地表面熱収支式と HYDRUS-1D を用いて、裸地の土中水分・熱移動の順解析を行った。そして、順解析で得られた地表面温度を目的関数とし、逆解析で不飽和透水係数に影響を与えるパラメータの推定を行った。

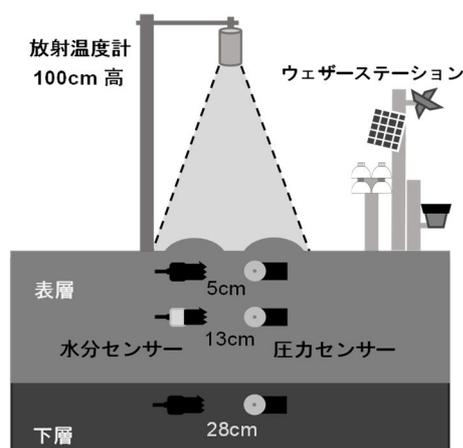


図1. 現場測定の概略図

4. 研究成果

4.1 地表面温度の測定に基づく不飽和透水係数の推定

図2(a)に2021/8/24~9/1の地表面温度の測定値を示す。土壌の乾燥が進行した8/27頃から、地表面温度が上昇した。図2(b)に積算蒸発量の計算値を示す。常に湿潤な条件下で計算した可能蒸発は、最大の蒸発量を示す。不飽和透水係数は Durner モデル与えた。

$$K(S_e) = K_s (w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^\ell \times \frac{\left(w_1 \alpha_1 \left[1 - (1 - S_{e1}^{1/m_1})^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - (1 - S_{e2}^{1/m_2})^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2}$$

ここで、 K_s は飽和透水係数、 S_e は有効飽和度、 w_i ($i=1, 2$) は重み係数 (-)、 α_i 、 n_i 、 m_i は曲線の形状を与えるパラメータ、 ℓ は間隙結合係数である。ここでは、 ℓ 値を変えた計算を行い、地表面温度の測定値と計算値を比較することで、表層 0~20 cm 深の K を検討した(図 3)。

$\ell = 0.5$ を用いた計算では 8/27 正午頃まで、透水係数が高い $\ell = -2$ では 8/28 正午頃までであり、その後透水係数の低下により蒸発速度が低下した。地表面温度の計算値(図 2(a))は、いずれの計算においても 8/27 までは地表面温度の測定値を良く再現した。土壌が湿潤な条件下では、透水係数に依らず数値計算は現場の蒸発速度を良く表していると言える。可能蒸発の計算は、8/27 以降日中で地表面温度の測定値を過小評価した。これは、蒸発速度の計算値が実際よりも大きく、潜熱消費を過大評価したことが原因である。一方 $\ell = 0.5$ では、8/27 以降で測定値を過大評価した。これは逆に、乾燥に伴う透水係数の低下が実際よりも大きく、蒸発速度を過小評価したためだと考えられる。 $\ell = -2$ では、8/30 以降は地表面温度を過大評価したが、全体的に測定値を良く再現した。 $\ell = -2$ で表される K が、現場の透水係数の低下、およびそれに伴う蒸発速度の低下をよく表していると言える。

以上より、地表面温度の測定に基づいて、表層 0~20 cm 深を均一な層と仮定した場合の、表層の水分・熱移動を再現する低水分領域の不飽和透水係数と圧力水頭の関係が推定可能であることが示された。

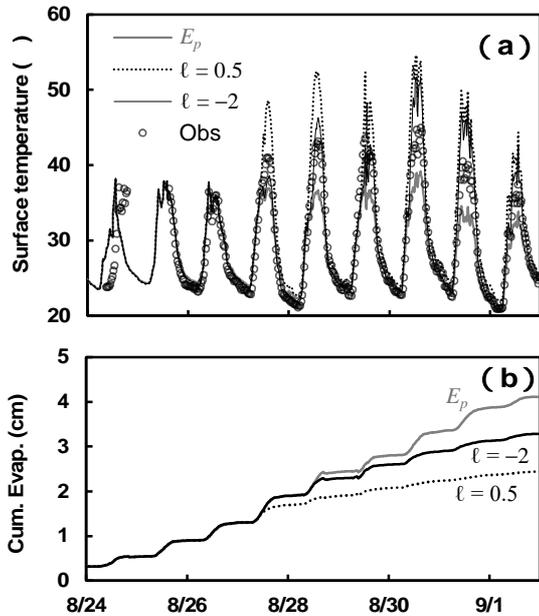


図 2. 地表面温度(a)と積算蒸発量(b)の計算値

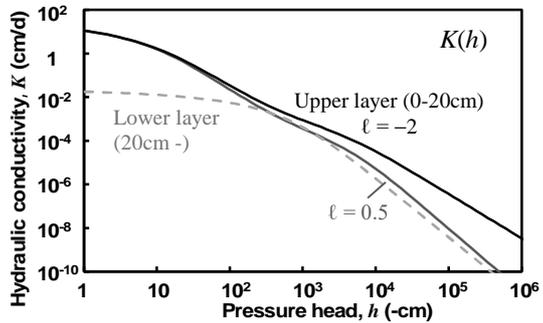


図 3. 推定された不飽和透水係数

4.2 不飽和透水係数推定に対する地表面温度データの有効性の検討

晴天時の気象データを反映した地表面熱収支式と HYDRUS-1D を用いて、裸地の土中水分・熱移動の順解析を行った。三重大学附属農場内の畑地土壌を想定し、表層 0~20 cm 深の作土層と 20 cm 以深の 2 層の土層を計算領域とし、それぞれ Durner モデルで水分特性曲線と不飽和透水係数を与え、作土層に $K_s = 52.6 \text{ cm d}^{-1}$ と $\ell = 0.5$ を与えた。初期圧力水頭を全層で -10 cm とし、7 日間の乾燥過程の計算を行い、得られた地表面温度や土壌水分量変化を人工的な観測データとした(図 4)。順解析で得られた地表面温度を目的関数とし、逆解析で不飽和透水係数に影響を与える K_s と ℓ の 2 パラメータのみの推定を行った。UAV 空撮による観測を想定し、目的関数には計算開始から 5 日目 14 時 (4.58 d) の地表面温度 1 点の場合と、それに 2 日目 14 時 (1.58 d) の地表面温度を加えた 2 点の場合の 2 ケースを検討した。推定パラメータの初期値については、 $K_s = 52.6 \text{ cm d}^{-1}$ と $\ell = 0.5$ に対して乱数でばらつきを与えた 10 通りの組合せを用意し ($0.5 < K_s < 500 \text{ cm d}^{-1}$, $-5 < \ell < 5$)、逆解析による不飽和透水係数の真値への収束性について検討した(図 5)。逆解析には汎用ソフト PEST を用いた。

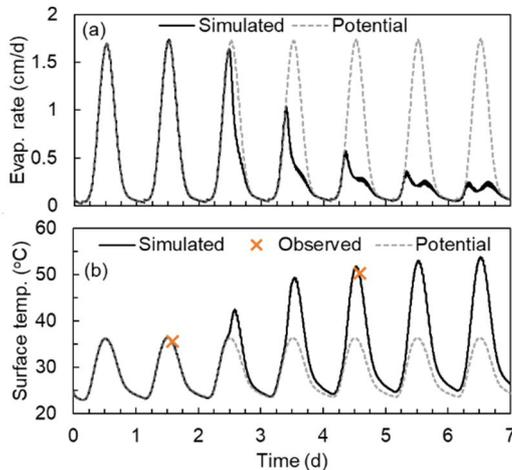


図 4. 順解析による(a)蒸発速度と(b)土表面温度

図6にそれぞれの透水係数で計算した、地表面温度と5 cm 深の体積含水率を示す(図中灰色線). 初期パラメータによる透水係数は真値(図5プロット)に対して、湿潤から乾燥領域において幅を持った設定となっている. 真値に対して低い透水係数を用いた場合は、早期の蒸発速度低下により、計算開始直後から地表面温度および土壌水分量を過大評価した. 一方、真値に対して高い透水係数を用いた場合は、可能蒸発期間が長くなるため、計算後期の地表面温度および土壌水分量を過小評価した.

減率蒸発段階の地表面温度1点(4.58 d)を目的関数として逆解析を行った場合、推定した透水係数は、主に圧力水頭が $-100 \sim -10,000$ cmの領域で真値へ比較的狭い範囲に集約した(図中青線). この時、1.5 dや2.5 dの減率蒸発段階に移行する時間帯に、日中の温度上昇をやや過大評価するものの、計算後半の温度変化を良く再現した. また5 cm 深の土壌水分量についても、計算後半でやや過大評価するケースがあるものの、真値を概ね良く再現した. ここから、減率蒸発段階の1回の観測でも、比較的乾燥領域の透水係数の情報を得ることが可能だと言える. さらに可能蒸発段階の地表面温度1点(1.58 d)を目的関数に加えることで(図中赤線)、透水係数の推定値は全圧力領域で真値とほぼ一致し、地表面温度と土壌水分量を良く再現した. 土壌が湿潤な日と乾燥した日で地表面温度の観測をすることで、広い圧力範囲の透水係数を推定できる可能性が示された.

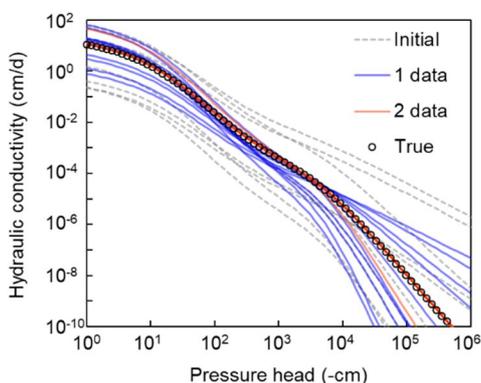


図5. 様々な初期パラメータから逆解析で推定した不飽和透水係数

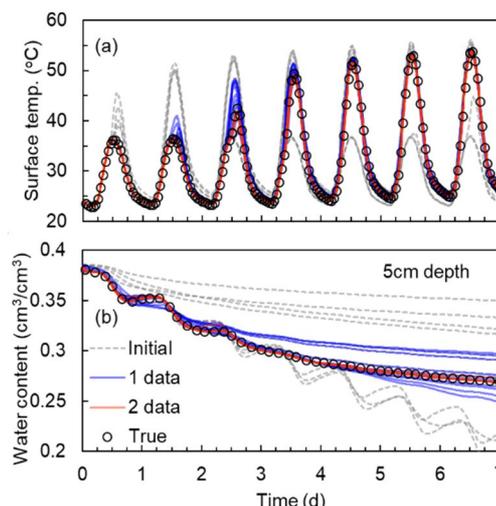


図6. 初期および逆解析パラメータで計算した (a) 地表面温度と (b) 5cm 深の体積含水率

4.3 UAVで観測した地表面温度

図7に2021/8/4 11時に撮影した圃場の地表面温度(左)と写真(右)を示す. 左上, 中右, 右下の3か所に裸地区画が位置している. 本圃場は斜面を切り開く形で造成されており、写真下が山側、写真上が斜面下側である. そのため、写真左上側に土壌水が集まる傾向にある. 温度観測の結果、左上の裸地区画が平均 34°C であるのに対し、右下の乾燥しやすい区画は平均 36°C とやや高い傾向を示した.



図7. UAVで観測した地表面温度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 坂井 勝	4. 巻 151
2. 論文標題 群落熱収支モデルを用いた蒸発散にともなう根圏土壤中の水分・熱移動の予測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 35～47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34467/jssoilphysics.151.0_35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 徳本家康、廣住豊一、坂井 勝、西脇淳子、加藤千尋、渡辺晋生、溝口 勝、石川洋平	4. 巻 142
2. 論文標題 放射線教育のためのアプリケーション開発とその実践例	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 300～306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.142.300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂井 勝, 今井翔馬	4. 巻 314
2. 論文標題 蒸発法による土壌クラスト層の水分移動特性の推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_9-I_16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂井 勝	4. 巻 151
2. 論文標題 群落熱収支モデルを用いた蒸発散にともなう根圏土壤中の水分・熱移動の予測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂井 勝, 北田彰隆
2. 発表標題 地表面温度の測定に基づく低水分領域の不飽和透水係数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂井 勝, 田中敦基, 長菅輝義
2. 発表標題 ダイズ栽培期間における土の水分移動特性の変化
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2022年度東京大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂井 勝
2. 発表標題 数値実験による不飽和透水係数推定に対する地表面温度データの有効性の検討
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和中久実, 坂井 勝
2. 発表標題 TEROS-21を用いた低ポテンシャル領域の測定値の評価
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂井 勝
2. 発表標題 群落熱収支モデルを用いた畑地の蒸発散と土壤水分・熱移動の予測
3. 学会等名 土壤物理学会大会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三口貴久代、取出伸夫、坂井 勝
2. 発表標題 ダイズの蒸散と根の吸水のFeddesモデルによる検討
3. 学会等名 土壤物理学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井 勝、小笠原駿太
2. 発表標題 蒸散流センサーによる流速測定の改善について
3. 学会等名 土壤肥料学会2021年度北海道大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Sakai, Akitaka Kitada
2. 発表標題 Estimation of soil water content in a bare field based on soil surface temperature measurements
3. 学会等名 2021 ASA, CSSA, & SSSA International Annual Meeting
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------