

ハイパースペクトルイメージングを用いた土中の不凍水分布の可視化手法の検討 Visualizing Unfrozen Water Content in Soils Using Hyperspectral Imaging

○名和将晃, 渡辺晋生

Masaaki Nawa, Kunio Watanabe

1. はじめに 凍土の利活用や凍上対策を効果的に進めるためには、凍土中に 0°C 以下でも液状で存在する水（不凍水）の分布を知ることが有益である。不凍水分布を非破壊、非接触で面的に捉える方法の一つにハイパースペクトルカメラ（以下 HSC）を用いた方法がある（鈴木, 2023）。しかし、不凍水分布の可視化には、検量線の性能向上やスペクトルのノイズ軽減など、多くの課題が残されている。そこで、含水率の違いを容易に調整できる未凍土を用いて、含水率の評価に十分な性能の検量線を作成するとともに、スペクトルのノイズを軽減し含水率分布を可視化する手法を検討した。そして、検討した手法を用いた不凍水分布の可視化を目指し、凍結過程にある土の観察を行った。

2. 試料と方法 藤森シルトの 2 mm 篩通過分を試料とした。HSC には、NH-1（エバ・ジャパン）を用いた。撮像素数は 480×640 画素であり、 $350 \sim 1100 \text{ nm}$ の波長の反射率を 5 nm 毎に撮影可能で、画素毎のスペクトルデータを取得できる。

2.2 可視化手法の検討 様々な含水率に調整した土を、撮影中の土表面からの水分蒸発を抑制するためガラス板で挟み試料セルを作成した。試料にハロゲン光を散乱幕を介して照射し、試料の上方約 20 cm に設置した HSC で試料表面からの反射スペクトルを測定した。本観察系では 1 画素が 0.1 mm 四方に相当する。走査速度は撮像時間で 1 分とした。試料中央部 1 cm^2 の領域の $500 \sim 950 \text{ nm}$ の平均スペクトルと Python 3 の scikit-learn ライブラリを用いて含水率の検量線を主成分

解析（PCR, PLS）により作成した。作成データに 25 試料の、テストデータに 7 試料のスペクトルを用いた。この際、主成分数は作成データに対する RMSE の累積寄与率から、検量線への過剰な適合を防ぐよう、RMSE が急激に低下する数とした。また、検量線の性能は RPD で評価した。

2.3 浸潤過程にある土の含水率の可視化

風乾土を $21 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ のガラスセルに充填し、試料セルを作成した。試料片端から 10 分毎に 4 回、 1.5 mL の蒸留水を添加し、最後の添加から 10 分後の試料表面の反射スペクトルを 2.2 節と同様の手順で測定した。そして、2.2 節で作成した検量線を用いて含水率分布の可視化を試みた。この際、ノイズを軽減するために、5, 10, 20, 30 画素毎に平均したスペクトルに対して Seaborn ライブラリを用いて含水率を表示した。また、撮影後に試料を 6 mm 間隔に分割し、試料の含水率の水平分布を測定した。

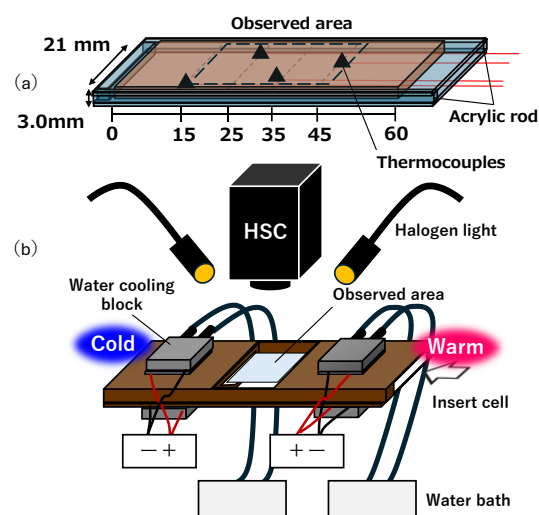


Fig. 1 Schematic of a) sample cell and b) freezing apparatus

三重大学生物資源学研究科 Graduate School of Bioresources Mie University

キーワード：凍土, PLS, ハイパースペクトルカメラ

2.4 不凍水量の推定 試料を 21 mm × 60 mm × 3.0 mm のスライドガラスに挟んで充填し、試料セルを作成した (Fig. 1a)。この際、セル内の任意の 4 点に熱電対を設置した。セル側面と低温側端面を防水し、セル高温側は空気の出入りが可能な開放系とした。試料セルを銅製の容器の間に挟み、上下にペルチェ素子と恒温水槽と接続した水冷式ブロックを設置することでセル両端の温度を制御した

(Fig. 1b)。装置の周囲はスタイロフォームで断熱した。ここで、低温側を -5℃、高温側を 2.5℃ に制御して試料を 24 時間凍結した。凍結過程にある試料の反射スペクトルを任意の時間に HSC で測定するとともに、試料内の温度分布を 1 分間隔で測定した。撮影後に試料を 5 mm 毎に分割し含水率を測定した。そして、2.3 節と同様に不凍水分分布の表示を試みた。

3. 実験結果と考察 Fig. 2 に主成分解析により作成した検量線で推定した含水率を示す。PLS の場合、決定係数は 0.80 だった。RPD は 4.11 であり十分な性能の検量線が作成できたとみなせる。一方、PCR の場合、決定係数は 0.78 となった。ただし、RPD は 4.40 となり、PLS の場合同様に十分な性能と評価できた。

Fig. 3 に水分添加 10 分後の試料の RGB 画像、PLS で作成した検量線により可視化した水分分布、実測の含水率分布を示す。浸潤前線は、RGB 画像 (Fig. 3a) に基づくと、図中左から 3.6 cm に位置した。一方、20 画素毎の可視化像 (Fig. 3b) では 3.6 cm を境に含水率が 0.25 以上と 0.20 以下に色分けされた。浸潤前線後方の湿潤領域の含水率は試料に水を 10 分毎に添加したため、0.2~0.4 で不均一に分布した (Fig. 3c)。可視化像もこうした水分分布をよく表した。水平方向に 6 mm 毎に分割した平均含水率は、実測値と推定値が RMSE=0.05 で一致した (Fig. 4)。凍土の反射率は未凍土に比べ低く、近赤外で凍土と未凍土を判別できた。また、未凍土と同様に、凍土中の不凍水量も概ね評価できた。

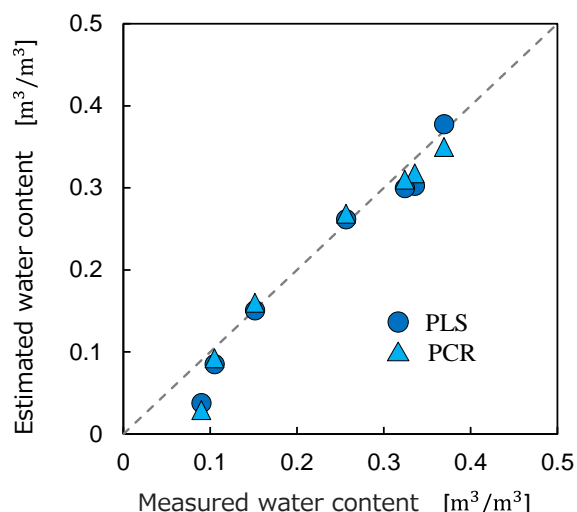


Fig. 2 Measured and PCR-estimated water content (a)

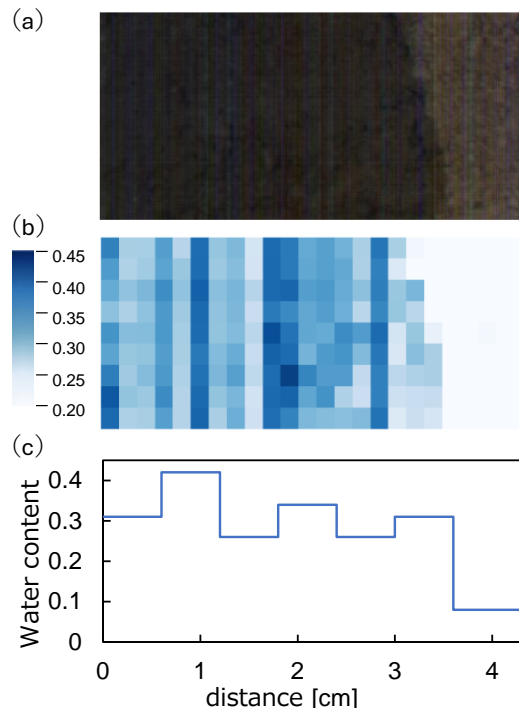


Fig. 3 a) Visible light image, b) HSC-visualized water content, c) Water content profile

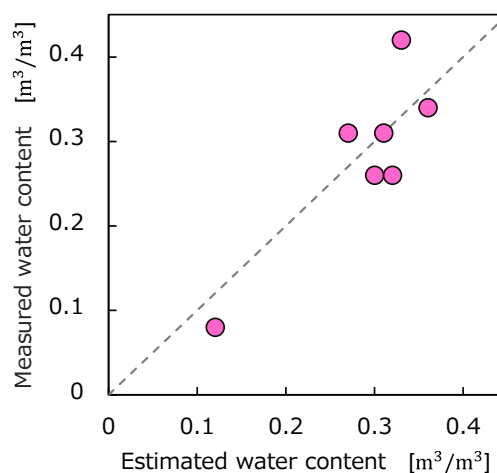


Fig. 4 Estimated water content in 6 mm sections