

凍土中の温度と不凍水量のハイパースペクトルカメラによる解析

Analysis of temperature and unfrozen water content in frozen soil using hyperspectral camera

鈴木健大, 渡辺晋生

Kenta Suzuki, Kunio Watanabe

はじめに 地表が寒気に晒されると間隙水が凍結し凍土が形成する。その際に未凍土中より凍結面に土中水が移動し、アイスレンズと呼ばれる氷の層として析出することがある。アイスレンズは凍結の進行とともに発生と成長を繰り返し、飛び飛びの層を形成する。アイスレンズ析出と凍土形成時の間隙水の固体への相転移による体積膨張に伴い周囲の土は持ち上げられ地表面が隆起(凍上)すると、暗渠や側溝などの灌漑排水系や建造物の基礎に深刻な影響を与える。こうした凍上害を防止することに加えて、地盤凍結技術を有効活用するためにアイスレンズ生成のメカニズムを解明することが必要である。この際、凍結面近傍の複雑な水分移動の詳細な理解が求められる。しかし、凍土中の 0°C 以下でも液状で存在する不凍水量の測定は容易ではない。そこで本研究では近赤外線の反射率の違いから温度分布、そして不凍水量分布を推定することを目指し、ハイパースペクトルカメラ(以下 HSC)を用いて温度の異なる凍土の観察を行った。

試料と方法 実験の試料には青粘土を用いた。青粘土は凍上性の高い土として知られる。2 mm 篩別した青粘土を含水率 0.55(飽和)とした。試料を体積 $W20 \times D60 \times H2.4$ mm、乾燥密度 1.29 g/cm^3 となるよう 2 枚のスライドガラスに挟んで充填し、試料セルを作成した。セル側面と低温側端面は防水し、高温側は空気の入りが可能な開放系とした。その際、高温側に約 0.6 g の蒸留水を追加した。Fig.1 に実験装置の概要を示す。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。

装置の周囲はスタイロフォームで断熱した。制御温度は低温側を -5°C 、高温側を 2.5°C として 24 時間凍結した。凍結過程の様子を HSC を用いて撮影し、撮影画像を解析した。HSC の有効波長範囲は $400 \sim 1000 \text{ nm}$ 、分解能は 5 nm である。解像度は $640 \times 480 \text{ pixel}$ (30.7 万画素) で縮尺は 1 pixel で約 0.05 mm である。撮影に要する時間は 48 秒である。撮影は暗室内で行い、凍結への温度の影響を最小限に抑えるためコールドライト(ハロゲン光)で光を照射した。温度変化はセル内に設置した 4 点の熱電対を用いて 1 分間隔で測定した。実験終了後には試料を 5 mm 毎に切り出して炉乾し含水比を測定した。

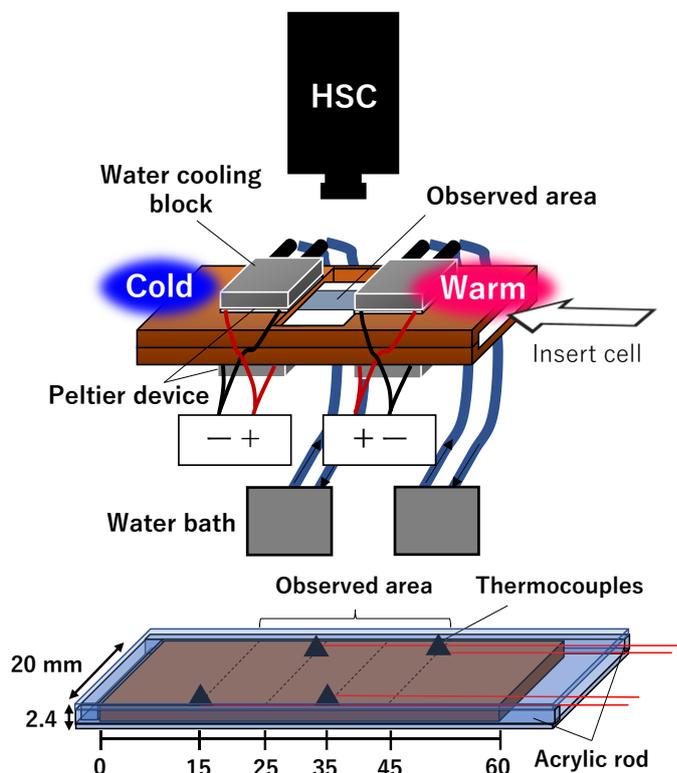


Fig.1 実験装置及び試料セルの概略図
Schematic diagram of experimental apparatus and cell

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

キーワード: 凍上・凍結、水分移動、熱移動、近赤外吸光

実験結果 Fig.2 に温度制御開始 6 時間経過後の試料の様子を示す。図中の色で囲まれている領域はスペクトルデータを取り解析を行った領域である。図中アイスレンズは黒い亀裂状に見える。また、アイスレンズより左側が凍土、右側が未凍土である。Fig.3 に測定データに基づく試料内部の温度分布を示す。図中の青帯はアイスレンズ位置を示す。温度勾配を与えると低温側より凍土が形成され 1 時間経過で試料左端より 27 mm まで達した (Fig.3)。凍結面、0°C 点は 0~6 時間で急激に進行し、以降はほとんど変化しなかった。1 時間以降はアイスレンズが凍結面近傍で発生し、飛び飛びの層を形成した。4 時間以降は最も高温側にできたアイスレンズ (最終アイスレンズ) が成長し、24 時間で厚さ約 2 mm となった。0°C 点は各時間でのアイスレンズ位置と概ね一致した。また、アイスレンズ位置は実験終了時の試料の含水比分布とも概ね一致した。Fig.4 に Fig.2 中の解析領域の分光スペクトルを示す。未凍土、凍土の反射率は 400~600 nm にかけて上昇し、その後なだらかに上昇した。凍土の反射率は未凍土に比べ数%低くなった。これにより凍土と未凍土の近赤外での判別が可能となった。また、同じ凍土でも低温側の領域の方の反射率が高くなった。さらに、凍土の反射率は時間経過とともに徐々に上昇した。ここで 750~850 nm の平均反射率と温度の関係を Fig.5 に示す。温度が低下すると反射率は増加した。0~-0.9°C は変化が見られず、-0.9~-1.2°C で急激に反射率は増加し、その後温度が低下してもあまり変化しなくなった。750~850 nm は水分子の近赤外線吸収領域に近い。温度低下に伴う不凍水量が反射率を増加させたと考えれば、-0.9°C までは凍土中の水はほとんど凍結しておらず、-0.9~-1.2°C にかけて急激に凍結して不凍水量は減少したと考えられる。今後は撮影法や光環境の改善を行い、HSC の画像に基づく凍土中の温度分布や不凍水量分布の定量化を目指す。

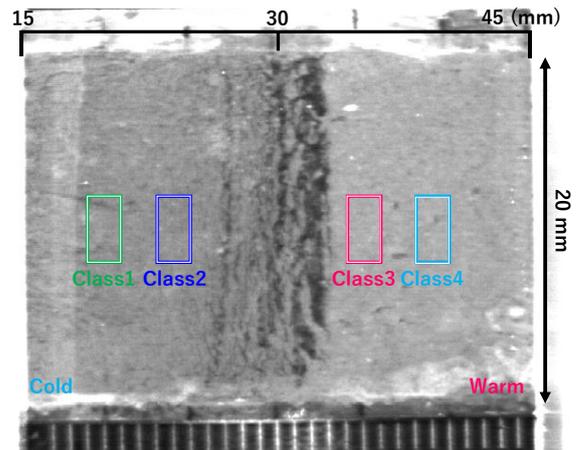


Fig.2 6 時間凍結時の試料の様子
Soil cooled after 6 hours

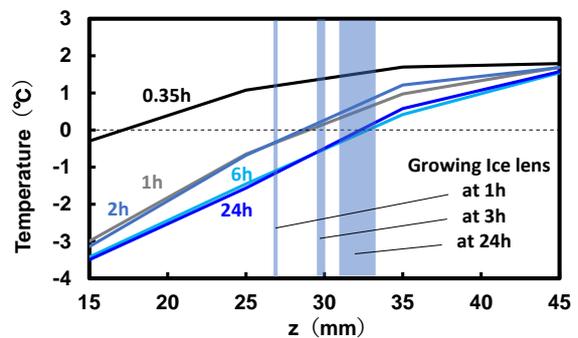


Fig.3 試料の温度分布の時間変化
Time change of temperature profiles

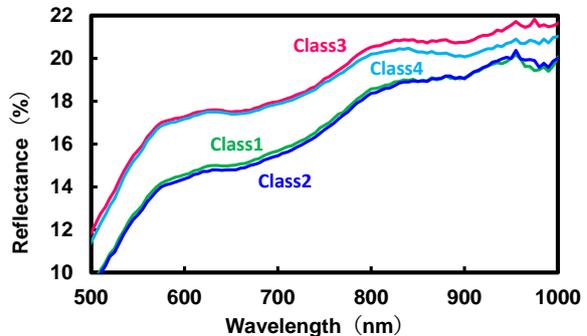


Fig.4 各解析領域の反射スペクトル
Spectral graph

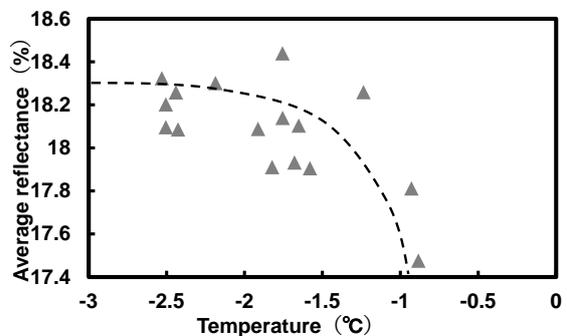


Fig.5 750~850 nm の平均反射率と温度
Relationship between average reflectance and temperature