

凍結過程にある土中のアイスレンズのハイパースペクトルカメラを用いた観察 Observation of ice lenses during soil freezing using a hyperspectral camera

鈴木健大¹・渡辺晋生¹

¹三重大学生物資源学研究科

要旨(Abstract) :

アイスレンズ析出量の測定精度向上を目指し、ハイパースペクトルカメラを用いて飽和土の凍結過程を観察した。その結果、水分量の違いや凍結によって特に近赤外線の反射率に違いが表れることがわかった。さらに反射率の違いから土と氷を区別し、図化することで視覚情報に基づいた区別に比べ、より正確にアイスレンズ析出量が測定できた。

キーワード：凍土，凍上，アイスレンズ

Key words: frozen soil, frost heaving, ice lens

1. はじめに

地表が寒気に晒され凍結する際、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。アイスレンズは発生と成長を繰り返し、とびとびの層を形成する。アイスレンズ析出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道路路面や建造物の基礎に深刻な被害を与える。こうした凍上害を防止するため、また、地盤凍結を有効利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、凍結面近傍での微細構造の変化、水分移動、氷の成長の仕方の詳細な観察が求められる。しかし、凍結面近傍に発生したアイスレンズ、凍土、未凍土を観察画像から視覚的に判別することは容易ではない。そこで本研究ではアイスレンズ析出量の測定精度向上を目指し、ハイパースペクトルカメラを用いた近赤外線によるアイスレンズの観察を行った。

2. 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 0.53 (飽和) とした。試料を 2 枚のスライドガラスの間に挟んで試料セルを作成した (Fig.1)。セルの側面と低温側を防水

し、高温側は空気の出入りが可能な開放系とした。その際、高温側から 0.7 g の蒸留水を追加した。Fig.2 に実験装置を示す。試料セルを銅製の容器の間に挟み、上下にサーモモジュールと恒温水槽と接続した水冷式ブロックを設置し、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。サーモモジュールと恒温水槽の設定温度は低温側を -5°C 、高温側を 3°C として 24 時間凍結した。凍結過程の試料の様子はハイパースペクトルカメラを用い解析した。ハイパースペクトルカメラの有効波長範囲は 400~1000 nm、分解能は 5 nm である。撮影は暗室で行い、ハロゲンランプ 2 台で光を照射した。反射や影を取り除くために実験装置と光源の間には拡散ファブリックを設置した。

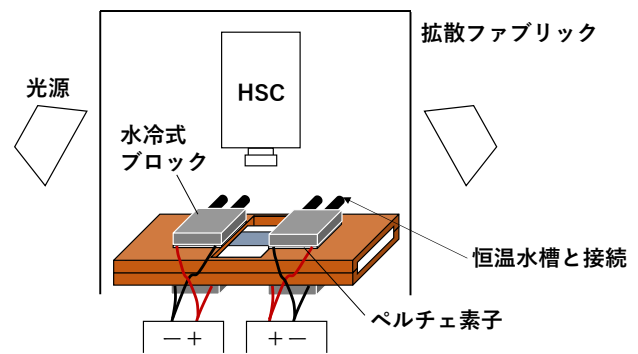


Fig.1 実験装置の模式図

Schematic of experimental apparatus

3. 結果

Fig.2 に飽和土 (第 1 軸) と風乾土 (第 2 軸) の分光スペクトルを示す。飽和土の反射率は 400~600 nm にかけて上昇し、その後、なだらかに上昇して 800 nm 付近でピークに達した。風乾土の反射率も飽和土と同様なスペクトルをとったが、その値は飽和土に比べ、2 倍以上高かった。含水量の低下により反射率は変化するといえる。

Fig.3 に 24 時間経過時の試料の様子 (実画像) を示す。図中の亀裂状の模様がアイスレンズである。温度勾配を与えると、低温側よりアイスレンズが発生と成長を繰り返し、とびとびの層を形成した。アイスレンズは低温側に発生したものに比べ、高温側に発生したものの方が厚く成長した。Fig.3 中の四角枠で示した領域の凍土、未凍土、アイスレンズの分光スペクトルを Fig.2 に示す。アイスレンズの反射率は 400~600 nm にかけてなだらかに上昇し、約 6% 付近を推移した。凍土の反射率は飽和土 (未凍土) と同様に 400~600 nm にかけて急激に、その後、なだらかに上昇して 800 nm 付近で約 20% をピークとして低下した。また、凍土の反射率は未凍土より数% 高かった。これは凍結による液状水量の低下が、乾燥と同様にスペクトルに表れたためと考えられる。アイスレンズ、凍土、未凍土のスペクトルの差は 780~1000 nm で最も顕著だった。そこでこの波長区間のスペクトルをそれぞれの教師スペクトルとして、画素毎に最も近い教師スペクトルに区分して色分けした。次に ImageJ を用いてアイスレンズ析出量を求めた。実画像から求めたアイスレンズ析出量は $107 \pm 89 \text{ mm}^2$ と大きな誤差を含んだが、一方、Fig.3 では $94.7 \pm 0.4 \text{ mm}^2$ と析出量の測定精度が向上した。凍土と未凍土については反射率は異なったが、同様の手法では明確に判別することはできなかった。撮影法や解析法の改善を行うことで凍土と未凍土の判別をすることが今後の課題である。

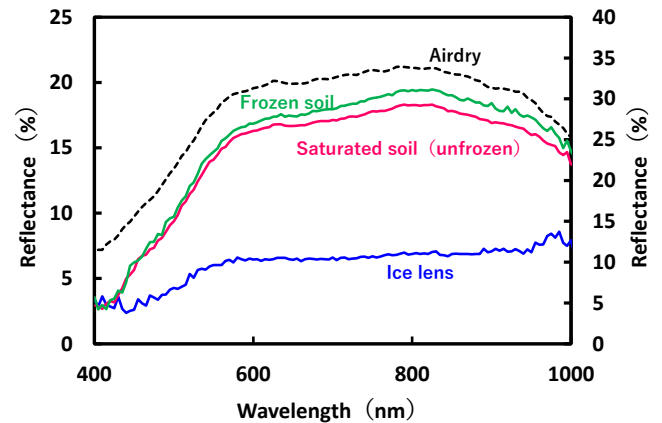


Fig.2 アイスレンズと各状態の土のスペクトル
Spectral graph

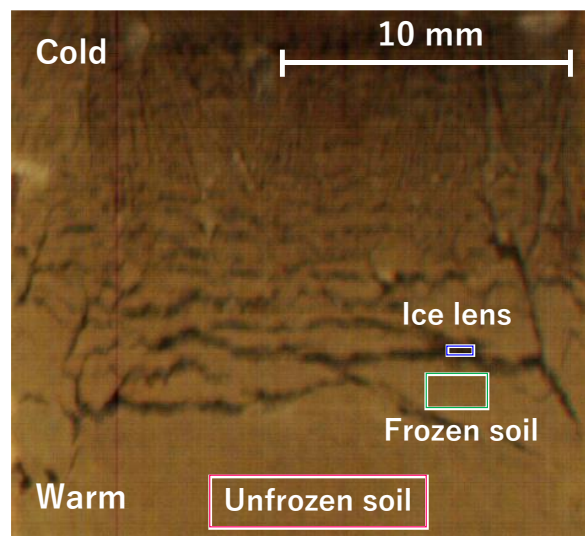


Fig.3 24 時間凍結時の試料の様子 (実画像)
Visual image of ice lenses in soil from 24hours

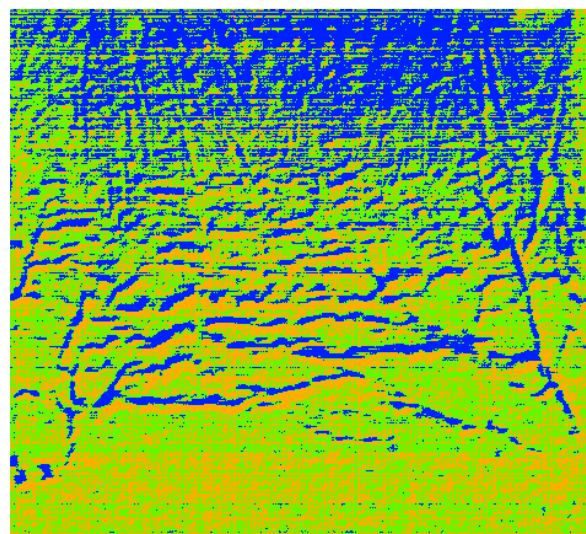


Fig.4 近赤外スペクトルを利用して色分けした
試料の様子
Hyperspectral image of soil frozen 24hours