

顕熱収支法による土壌凍結融解時の土壌氷量変化の推定

Sensible heat balance estimates of transient soil ice contents for freezing and thawing condition

○小島悠揮¹, Joshua L. Heitman², Gerald N. Flerchinger³, Tusheng Ren⁴, Robert Horton¹

Yuki Kojima, Joshua L. Heitman, Gerald N. Flerchinger, Tusheng Ren, Robert Horton

はじめに

土壌の凍結融解は冬季の水循環に影響を与える。凍土表面の透水性は土壌中の氷量に依存しており、凍土の氷量を推定することは水循環を理解する上で重要である。凍土の氷量を推定することは難しく、特に圃場では有効な測定法はない。唯一ヒートパルスプローブ（HPP）による土壌の体積熱容量測定を用いた土壌氷量の推定方法（体積熱容量法）があげられるが、 -4°C 以下の温度でしか土壌氷量を精度よく推定できない。本研究では、新たな土壌氷量の推定法として、複数のHPPを用いた顕熱収支法を提案し、その有効性を検討することを目的とする。

理論

顕熱収支法は HPP による土壌温度、熱伝導率、体積熱量の測定をもとに、土壌の熱収支から土壌凍結融解に関連する潜熱量を決定する。この潜熱量から凍土氷量が決定できる。HPP によって土中の異なる深度での土壌温度 T 、熱伝導率 λ 、体積熱量 C を測定し、Fig.1 に示されるような土層の熱収支を考える。土層の熱収支は境界における熱伝導フラックス H_u 、 H_l 、顕熱貯留量 ΔS 、そして潜熱量 L から成る ($H_u - H_l - \Delta S - L = 0$)。この熱収支項のうち、 H_u 、 H_l 、 ΔS は HPP によって測定された温度、熱伝導率、体積熱容量から簡単に計算でき、よって潜熱量 L が決定できる。土壌温度が 0°C 以下の時、この L は土壌凍結融解に関連しているので、氷の融解潜熱 L_f で除すことで土壌氷量の変化量が推定できる。

実験方法

高さ 30 cm、内径 9 cm の PVC カラム (Fig. 2a) にシルトロームを体積含水率 $0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ および乾燥密度 1.2 Mg m^{-3} に調整して充填した。16 本の HPP をカラム側面から土壌深度 0 cm

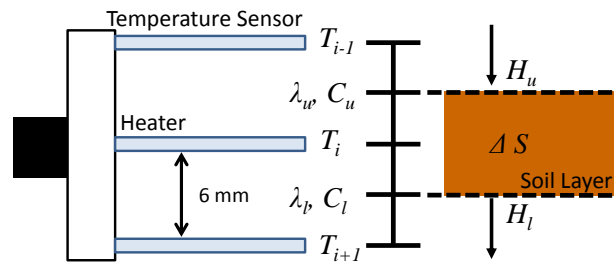


Fig. 1. Diagram of the sensible heat balance method with HPP to determine latent heat flux.

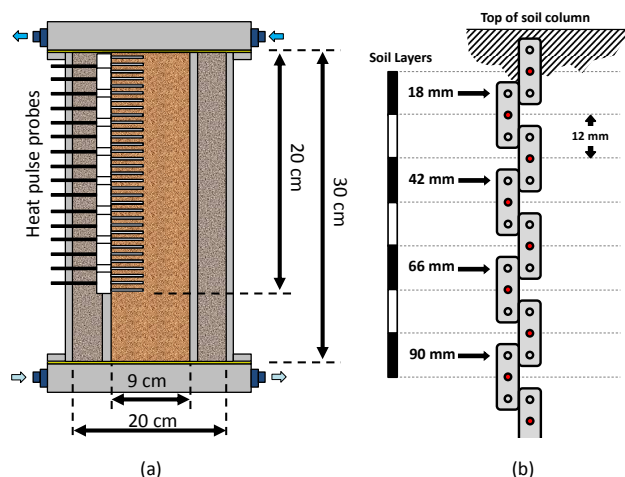


Fig. 2. (a) Schematic of an instrumented soil column. (b) A cross-sectional view of the HPP installation.

- 1) アイオワ州立大学農学科, Department of Agronomy, Iowa State University
 - 2) ノースカロライナ州立大学土壌科学科, Department of Soil Science, North Carolina State University
 - 3) アメリカ農務省農業研究部, USDA-ARS
 - 4) 中国農業大学土壌水文学科, Department of Soil and Water sciences, China Agricultural University
- キーワード：土壌凍結、ヒートパルスプローブ、顕熱収支法

から 20 cm に挿入した (Fig. 2b)。内径 9 cm の PVC カラムを内径 20 cm の PVC カラムの内側に配置し、カラム間は断熱のため乾燥した砂を充填した。カラムの両端は熱交換機に密着しており、上端、下端の温度をコントロールできる。カラム上端の温度は 24 時間かけ 5°C から -15°C まで降下させ、7 日間 -15°C に保った後に 24 時間かけて 5°C まで上昇させた。カラム下端の温度は実験期間中 5°C に維持した。HPP で土壌温度、熱伝導率、体積熱容量をそれぞれ 15 分、3 時間、3 時間間隔で測定した。線形内挿で 15 分間隔の熱伝導率および体積熱容量を推定した後、顕熱収支法によって潜熱量 L および土壌氷量を推定した。

結果と考察

Fig. 3 に顕熱収支法によって推定された潜熱量 L を示した。潜熱量 L は土壌温度が 0°C から -3°C の間、ダイナミックな凍結と融解（初期凍結と最終融解）が起きる温度範囲で大きなピークを示した。これは土壌凍結と融解に応じた潜熱量を顕熱収支法で捉えられることを示している。この潜熱量 L を L_f で除することで土壌氷量の変化が推定できるが、推定された氷量は負の値であったり、土壌間隙率を大きく超えるたりで現実的な値ではなかった。この非現実的な氷量は土壌温度が -3°C 以下の期間（以降延長凍結期間と呼ぶ）の潜熱量 L に起因していた。延長凍結期間の潜熱量 L は本来非常に 0 に近いはずだが、顕熱収支法は比較的大きな潜熱量 L を示した。よって延長凍結期間の潜熱量 L は顕熱収支法の感度を下回っており、これを正確に推定できなかったことが氷量推定の誤差となっていることがわかった。そこで、顕熱収支法を土壌温度が 0°C から -3°C の場合のみに使用し、-4°C 以下の場合には体積熱容量法から氷量を推定した (Fig. 4)。顕熱収支法と体積熱容量法の組み合わせによって推定された土壌氷量は現実的な値（約 $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ）、増加および減少を示した。よって、顕熱収支法を用いさえすれば、これまで困難であった温度領域 0°C から -3°C の土壌氷量変化が推定でき、さらに体積熱容量法と組み合わせることで幅広い温度領域（初期凍結、延長凍結、および最終融解期間）での氷量が推定できることがわかった。

まとめ

新たな凍土中の氷量を推定する手法として顕熱収支法の有効性を検討した。その結果、顕熱収支法を用いさえすれば既往の体積熱容量法では困難であった温度範囲 0°C と -3°C において氷量の変化を推定できた。また顕熱収支法と体積熱容量法を組み合わせることで初期凍結、最終融解期間のみではなく延長凍結期間の氷量の推定も可能であることが示された。

謝辞

本研究は全米科学財団助成金 (1215864) の補助を受けた。記して感謝する。

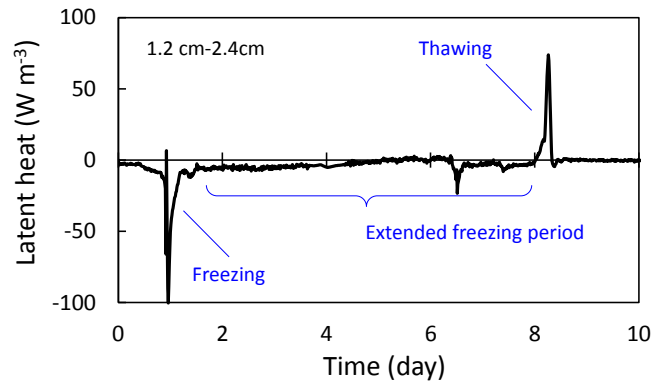


Fig. 3. Latent heat calculated with the sensible heat balance method for 1.2-2.4 cm depth.

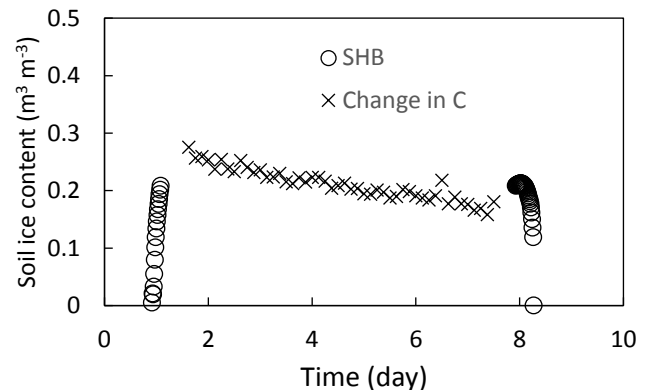


Fig. 4. Ice contents determined with a combination of the sensible heat balance method (SHB) and volumetric heat capacity method (change in C) at 1.2-2.4 cm depth.