

表層地盤冷却におけるヒートパイプ最適形状の検討 Optimizing heat pipe design for enhancing surface soil cooling

有村穂高¹, 鈴木拓実¹, 小島悠揮², 百瀬年彦³, 神谷浩二²

Hotaka ARIMURA, Takumi SUZUKI, Yuki KOJIMA, Toshihiko MOMOSE, Kohji KAMIYA.

1)背景と目的

気候変動による将来的な土壌温度の上昇が問題視されており、岐阜県では約 3°C の地温の上昇が見込まれている (Asano et al., 2023). これにより、土壌劣化、土壌生物の生態変化、土壌からの温室効果ガスの発生促進などが懸念されている. そこで、稼働エネルギーが不要で、半永久的に動作するヒートパイプ (HP) による土壌冷却が注目されている. 小島ら (2024) は HP を土壌中に埋設し、熱を地表面から地下方向に輸送することを検討した. HP は十分な土壌冷却効果を示したが、冷却範囲は限定的であった. この冷却範囲は HP の形状を工夫することで改善できる可能性がある. よって本研究では、冷却効率が高く、かつ冷却範囲の広い HP の形状を検討することを目的とした.

2)実験方法

2.1 数値解析的評価：偏微分方程式ソルバ Flex PDE を用いた 3 次元熱伝導解析を行った. 計算領域は幅 30 cm, 奥行き 30 cm, 深さ 100 cm とし、直線型 HP (長さ 50 cm), L 字型 (水平 20 cm、鉛直 50 cm), プロペラ型 (水平 27.5 cm, 鉛直 50 cm) をいずれも深さ 5 ~ 55 cm に埋設した (図 1). HP の熱伝導率は $1,000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 土壌は $1.00 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とした. 上面温度を 12 時間周期で 25°C から 50°C に変化させ、その他は断熱条件で、72 時間計算した.

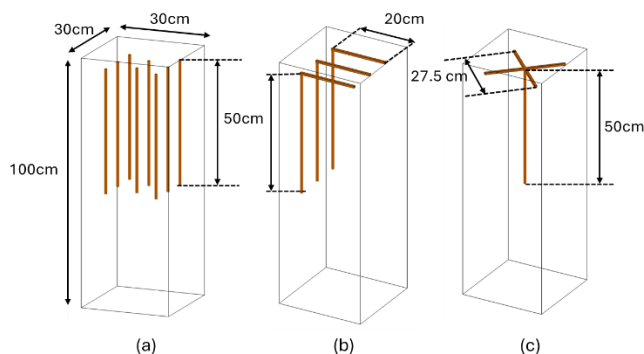


図 1 解析領域と (a) 直線型 HP, (b) L 字型 HP, (c) プロペラ型 HP

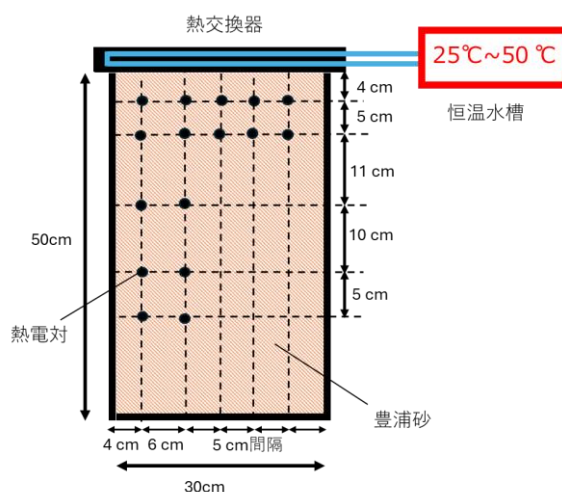


図 2 熱電対の設置間隔

2.2 実験的評価：幅 30 cm, 高さ 50 cm, 奥行き 10 cm の容器を作成し、体積含水率 $\theta=0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の豊浦砂を充填した. 今回、冷却効率の向上のため L 字型ヒートパイプを自作した. 素材には銅、ウィックには Kojima et al. (2021) に倣い、カオリナイト、骨炭末、活性炭、水を混合した焼結体を使用した. 市販の直線型

¹ 岐阜大学大学院自然科学技術研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University

² 岐阜大学工学部 Faculty of Engineering, Gifu University

³ 石川県立大学生物資源環境学部 Faculty of Bioresources and Environment, Ishikawa Prefectural University

キーワード：ヒートパイプ形状、表層土壌冷却、冷却範囲、ウィック

HP 2 本, 市販の HP をチューブベンダーで L 字型に曲げたもの, 自作 HP を埋設し (上端部が深さ 5 cm), 上端温度を 6 時間ごとに 25°C と 50°C で切り替え, 図 2 で示した熱電対で土中の温度変化を測定した。

3) 結果と考察

3.1 数値解析的評価: 深さ 0~10 cm の領域の平均温度を図 3 に表した。いずれの HP でも冷却効果が示された。平均温度は L 字型で 1.11°C 低下, 直線型で 1.90°C 低下した。一方で, 表層部水平方向の冷却範囲は L 字型のほうが大きかった。プロペラ型は効果が小さく, 平均温度は 0.48°C の低下にとどまり, 鉛直部の本数が 1 本しかなかったことが原因と考えられる。鉛直部の本数はある程度は確保しつつ, L 字型のような水平部も取り入れて冷却範囲の拡大, 均等な冷却を図るデザインが最適と考えられる。

3.2 実験的評価: 実験開始後 18 時間経過時の深度 4 cm の温度分布を図 4 に示した。直線型 HP は最大で 2.4°C の強い冷却が見られたが, HP から 5 cm 遠ざかると 0.3°C の冷却にとどまった。一方で, 市販の L 字型は最大でも 1.3°C の冷却となったが, 最低でも 1.0°C の冷却を保ち, 均等な冷却を示した。自作 L 字型は HP が機能せず, 最大で 0.42°C 上昇した。銅製で内部が空洞のため, HP 自体の体積熱容量が土に比べて小さいことが原因と考えられる。深さ 35 cm の HP 下端付近 (左端から 10 cm) の温度変化を図 5 に示す。いずれの HP も, 表層部の熱を下層部に急速に輸送した。L 字型が直線型より温度上昇が大きく, より多くの熱を運んでいた。自作 L 字型は HP 銅管の熱伝導で若干の熱輸送がされた。

4) おわりに

様々な形状の HP の土壌冷却効果を数値解析および室内試験によって評価した。数値解析により, 直線型は温度低下が大きい, L 字

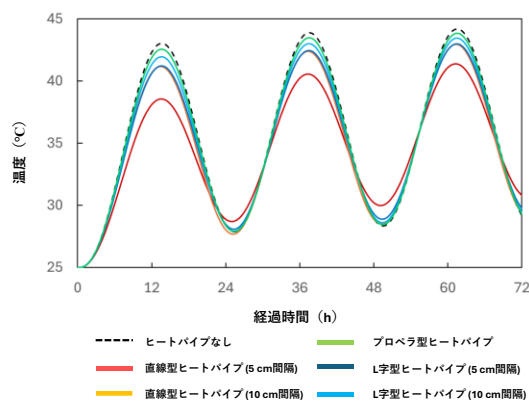


図 3 平均温度

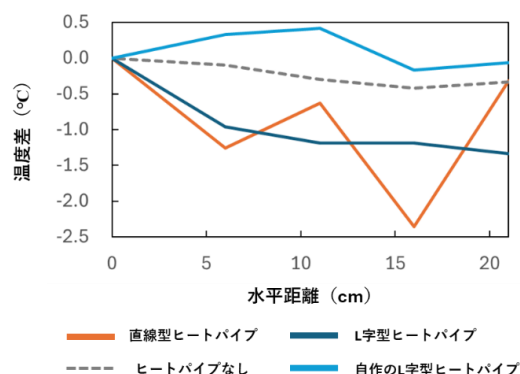


図 4 水平温度分布 (4 cm 深さ)

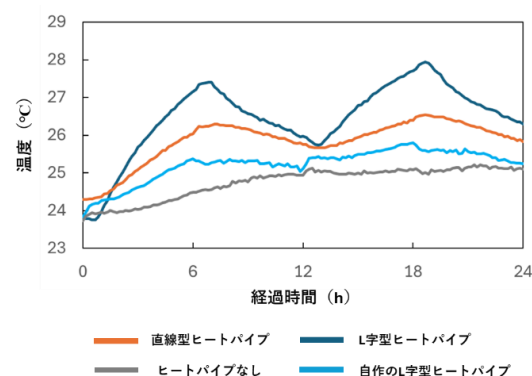


図 5 深さ 35 cm の温度変化

型は表層の冷却範囲が大きいことが明らかとなった。室内実験でも, 同様の結果が得られ, さらに地中に輸送できる熱量も多いことが明らかとなった。L 字型 HP の広い冷却範囲という特性を活かしつつ, 強い冷却効果を発揮するためにウィックや作動液などの内部構造を改善することが, 今後の課題である。

【引用文献】 Asano et al. 2023. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1165, 012045; 小島ら. 2024. 農業農村工学会大会講演会要旨集 3-21. Kojima et al. 2021. Computers and Electronics in Agriculture.

【謝辞】 越山科学技術振興財団の助成を受けた。