



ヒートパイプによる冬の表層地温上昇の検討

伴田千紘¹・百瀬年彦¹

Investigation on warming the surface ground temperature in winter using heat pipes

Chihiro HANDA¹ and Toshihiko MOMOSE¹

Abstract: A series of performance and demonstration tests was conducted in this investigation on warming the surface ground temperature in winter using heat pipes (HP). HP transferred underground heat from the lower layer to the surface layer, promoting agricultural crop growth. Performance tests were carried out using water, acetone, and refrigerant (CFC alternative, R134a) as working fluids, investigating their suitability for winter ground temperature conditions. The results indicate that filling the HP with 3% of the inner volume of refrigerant is an effective heating device. In the demonstration test, a 2-m HP was buried, and temperature comparisons were made at a depth of 15 cm with and without the HP. The temperature at 15 cm depth without the HP was about 2 °C. With HP, the temperature near the HP was about 8 °C. Although the thermal source successfully increased temperatures in the surface layer, it was observed that the effect of soil temperature rise was suppressed only by a few centimeters away from the HP.

Key Words : heat pipes, geothermal energy, agriculture in cold region, soil temperature, soil warming

1. はじめに

近年、国産オリーブオイルの市場価値は高まっており、地域振興を掲げて全国的にオリーブ栽培が広がっている（農林水産省, 2023）。石川県七尾市の能登島もその1つであるが、生産量は少なく増産が課題となっている。能登島は日本海側気候で冬の寒さが厳しい地域である。一方、国内のオリーブ主産地である香川県小豆郡の小豆島は、瀬戸内海式気候で冬に温暖という特徴を持つ地域である。その違いが、両地域でのオリーブ生育の違いを生み出していると考えられる。

北海道で樹木 44 種（針葉樹 4 種、広葉樹 40 種）を対象とした佐藤（1955）の研究によると、根系の生長が地上部の生長に大きく影響していることや、地上部の成長休止期でも地温を高くすると根端の伸長が盛んになる

ことが報告されている。また、ヤマシラカバでは冬期の土壌温度が低いと根の損傷が大きくなると言われている（Weigh and Karlsson, 2002）。柑橘類でも、冬期の地中加温は根を肥大させ春枝の伸長に影響を与えるという報告がある（森田ら, 1956）。冬の根域温度を高めることは、寒さによる根のダメージを抑え、春先の樹木生長につながると思われる。

小豆島における根域温度について、気象庁の地上気象観測点のうち、小豆島から最も近い地点である香川県高松市の値を参考としてみると、2月の根域温度（深さ 30 cm）は 8 °C であった（農林水産省・気象庁, 1982）。一方、能登島における2月の根域温度（深さ 30 cm）は、予備調査を行ったところ、2 °C であることが確認された。

根域を加温する方法の1つとして、電熱線ヒーターなどを使用する方法が挙げられる。電気を利用した加熱方法において、省エネルギーや温暖化防止の観点から太陽光発電を導入することもある。しかし、能登島のような日本海側の地域では、日射量が少ないため、安定した電力を得られない可能性がある。根域を加温するための温熱源として、地中熱に着目した。能登島の地温について、気象庁の地上気象観測点のうち、能登島に最も近い石川県輪島市の値を参考にしてみると、地中 2 m 地点は2月でも 11 °C あり（農林水産省・気象庁, 1984）、地表面付近に比べて暖かい状態である。

下層の地中熱を表層に輸送する技術として、ヒートパイプ（以下、HP）に着目した。HP は小さな温度差で大きな熱量を輸送できる高性能な伝熱素子である（日本ヒートパイプ協会, 2001）。密閉容器に作動液と呼ばれる少量の液体が真空封入され、液体とその飽和蒸気で満たされている。HP の原理は、液体の蒸発と凝縮という相変化に伴った潜熱授受、圧力差に伴う蒸気の移動および重力による液の還流により熱輸送を行う（木村, 2000）。HP の長所は、①構造が簡単で軽量であること、②外部からのエネルギーを必要としないこと、③メンテナンスの必要がないことなど、数多くある（古沢ら, 1980）。

HP は、融雪技術やアラスカのパイプライン支柱といった土木建築用としての利用や、CPU 冷却装置などの機器冷却用としての利用が主要となっている（大島, 1982）。農業分野での利用事例は、夏における農作物の低温貯蔵

¹ Ishikawa Prefectural University Graduate School, 1-308 Suematsu, Nonouchi-shi, Ishikawa 921-8836, Japan. Corresponding author: 伴田千紘, 石川県立大学大学院
2023年5月17日受稿 2023年9月18日受理

庫の冷熱源としての利用(土谷, 2004)や冬の施設栽培における畝の加温(森田ら, 2015)などがある。HPは作動液の種類や封入量, 形状などによって熱輸送量の限界値が決まるため(日本ヒートパイプ協会, 2001), 使用目的によって設計する必要がある。本研究では, 直管形状のHPを鉛直埋設し下層の地中熱を表層へ輸送することで, 表層地温の上昇を検討する。冬の地中環境下で効率的に熱を輸送するためには, 適切な作動液の選定が重要となる。また, 長期間にわたって熱輸送を継続させるためには, 適切な作動液の量を確保する必要がある。

したがって本研究では, ①室内実験により作動液の種類と量を選定し, HPの熱輸送能力について継続性を確認すること, ②実証試験を行いHPの地中加温性能を調べることの2点を目的とする。

2. 試料及び方法

2.1 室内実験

2.1.1 ヒートパイプの製造と作動液の種類

HPの製造には, 高い熱伝導性とロウ付けの容易さを持つ銅を使用した。銅管の両端に銅キャップを取り付け, リン銅ロウを用いてロウ付け接着を行い, 密閉容器を作製した。その後, 作動液を封入し, 真空密閉することでHP化した。

HPに封入する作動液として, ①水②アセトン③R134a(HFC-134a, 代替フロン。以下, 冷媒)の3種類を選定した。各作動液の物性値をTable 1に示す。蒸発潜熱は水が最も大きく, 冷媒が最も小さい値である。望月(2012)によると, 水の作動温度は30~250°Cと報告されている。本研究では地中熱を利用するため, 30°Cよりも低温の条件下で作動する作動液を選定する必要がある。望月(2012)の報告では, アセトンの作動温度は0~120°C, 冷媒は-25~90°Cとなっている。どの作動液が冬の地中環境に適しているかを調べるため, 冬の地中環境を想定したさまざまな条件下で性能試験を行った。性能試験では, 動作確認試験, 熱抵抗試験, および継続性実験を行った。

2.1.2 動作確認試験

外径25.4 mm, 長さ1 mのHPを作製し, 下部から6 cmのところまで作動液を封入した。水は25 g, アセトンは20 g, 冷媒は30 g充填し, これは内容積の6%に相当する。また, リファレンス(以下, Rf)として, 同サイズの銅管(外径25.4 mm, 長さ1 m, 蓋なし)を用意した。

Fig. 1のように, HPとRfの下端部約2 cmを水中に入れ, その後, 水温制御装置(THERMO MINDER SJ-10R, TAITEC社)を用いて水温を15°Cにまで上昇させた。この水温上昇過程においてHPとRfの上端および下端温度を測定した。定常状態における両端の温度差を求め, 両者を比較した。気温は実験装置付近の高さ1 m地点に

熱電対を用いて測定し, 実験中の室温条件は1.9(±0.2)°Cであった。なお, HPとRfの壁面を断熱材(発砲ポリエチレン素材, 厚さ1 cm)で覆い, 気温変動の影響を低減させた。本実験の測定にはデータロガーCR1000(Campbell社)を使用した。

2.1.3 熱抵抗試験

前項と同様の外径25.4 mm, 長さ1 mのHPを用いて試験を行った。作動液の適量を把握するため, 新たに3本のHPを作製し, 冷媒を下部から1 cm, 3 cm, 10 cmのところまで充填した。封入量は5 g, 15 g, 50 gであり, それぞれ内容積の1%, 3%, 10%に相当する。木村(2012)の性能測定方法を参考に, HPを加熱部・断熱部・冷却部に分けた(Fig. 2)。加熱部にはシリコンヒーター(ベルトヒーターSBH, 坂口伝熱社)を巻いた。直流電源装置(直流安定化電源PMX18-5A, 菊水電子工業社)を用いて, 伝熱量を0.5 W, 1.1 W, 2.0 W, 3.2 W, 4.5 W, 6.1 Wの6段階に分けて出力させた。加熱部と断熱部は発砲ポリエチレン素材の断熱材(厚さ2 cm)で覆い, HP底部からの放熱を防ぐためHPの底部も断熱をした(断熱材の厚さ10 cm)。冷却部は自然対流で放熱させ, 室温条件は約6~7°Cであった。熱抵抗値は以下の式によって算出した(望月, 2012)。

Table 1 作動液の物性値(日本熱物性学会編, 2008)。Physical properties of working fluid.

	水	アセトン	R134a
分子量	18.0	58.1	102.0
密度(kg m ⁻³)	999.8	785.0	1294.8
沸点(°C) 1気圧	100.0	56.5	-26.2
飽和水蒸気圧(kPa) 20°C	2.3	23.5	571.7
蒸発潜熱(kJ kg ⁻¹) 沸点	2257.0	551.9	216.0

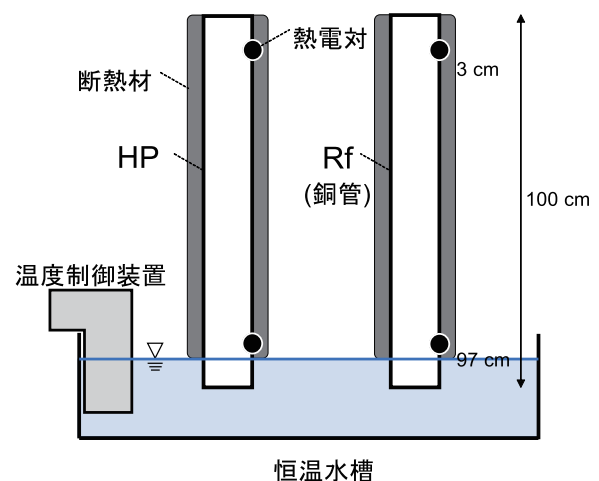


Fig. 1 室内におけるHPの性能評価試験の模式図。Schematic diagram of HP performance evaluation test indoor.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1)$$

ここで、 R は熱抵抗 ($^{\circ}\text{C W}^{-1}$)、 ΔT は温度差 ($^{\circ}\text{C}$)、 Q は伝熱量 (W) である。なお、温度差は Fig. 2 における HP の 25 cm 地点と 75 cm 地点の定常状態時の温度差とした。

2.1.4 熱輸送の継続性実験

実証試験に向け、HP のサイズを外径 25.4 mm、長さ 2 m とした。前項の熱抵抗試験により選定された作動液とその液量を HP に封入し、熱輸送の継続性を確認した。具体的には、加熱部と気温の温度差がより大きな条件でもドライアウトを起こすことなく熱輸送が継続するかどうかを確認した。ドライアウトとは、作動液が完全に蒸発してしまう現象である (倉前・松本, 1984)。ドライアウトが生じると、HP の熱輸送能力は低下してしまう。

前項までの試験では、気温が約 2°C または $6 \sim 7^{\circ}\text{C}$ の中で加熱部温度を約 $8^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ に調節して試験を行ったが、この試験では、加熱部温度を約 30°C とした。なお、実験中の室温条件は約 $8 \sim 16^{\circ}\text{C}$ であった。動作確認試験と同様の方法で、約 1 週間の測定を行った。

2.2 実証試験

実証試験は、①石川県立大学附属農場 (緯度 36.511, 経度 136.598, 以下、農場) ②能登島オリーブ畑 (緯度 37.127, 経度 136.927, 以下、能登島) ③石川県農林総合研究センター農業試験場能登駐在 (緯度 37.264, 経度 137.034, 以下、能登分場) の 3 圃場で行った。農場と能登分場では草地を試験区とし、能登島ではオリーブの樹の下を試験区とした。各圃場の年間平均気温 (2020 年～2022 年) は、農場が 15.8°C 、能登島が 13.4°C 、能登

分場が 12.6°C であった。なお、冬季 (12 月～2 月) の平均気温は、農場が 5.3°C 、能登島が 4.9°C 、能登分場が 2.6°C であった。

また、気象庁の地上気象観測点のうち、農場に近い地点である石川県金沢市と能登島や能登分場に近い地点である石川県七尾市の値を参考に、年間降水量 (mm) と降雪量 (cm) を調べた。年間降水量の平均値 (2020 年～2022 年) は、金沢市が 2483.0 mm、七尾市が 2151.3 mm であり、冬季 (12 月～2 月) でみると、金沢市が 643.3 mm、七尾市が 551.7 mm であった。2020 年～2022 年における年間降雪量の平均値は、金沢市が 131.3 cm、七尾市が 143.0 cm であった。

2.2.1 圃場の土壌物理性

各圃場にて、 100 cm^3 サンプラー (DIK-1801, 大起理化学工業株式会社) を用いて深さ 30 cm 地点の土壌を採取した。採取した試料は実験室内に持ち帰り、乾燥密度、土粒子密度、固相率、土性、熱伝導率の 5 項目について分析を行った。

試料は恒温乾燥炉に入れ、 105°C で 24 時間以上乾燥させた。乾燥試料の質量を測定し乾燥密度 (Mg m^{-3}) を算出した。炉乾燥試料を用いて土粒子密度と粒度試験を行った。土粒子の真比重測定法 (中野ら, 1995) を参考にして、ピクノメータを用いて土粒子密度を測定した。固相率は以下の式より算出した。

$$\frac{M_s}{\rho_s \times 100} \quad (2)$$

ここで、 M_s は炉乾燥試料の質量 (g)、 ρ_s は土粒子密度 (Mg m^{-3}) である。粒度試験ではふるい分析と沈降分析を行い (公益社団法人 土木学会, 2015)、粒径加積曲線を描いた。その後、国際土壌学会法により土壌三角図表 (宮崎ら, 2005) を用いて土性を求めた。

また、 100 cm^3 サンプラーの試料を毛管飽和させ、その熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) をヒートプローブ法 (粕淵, 1982) により測定した。HP が作動する期間である冬季の圃場はほぼ飽和状態であると仮定し、熱伝導率は毛管飽和試料を用いて測定した。

2.2.2 ヒートパイプの埋設と地温計測

農場では 2019 年 12 月 24 日に、能登島では 2020 年 2 月 12 日に、能登分場では 2020 年 2 月 26 日に HP を埋設し、実証試験を開始した。

試験地は加温区と無加温区に分け、両区は約 1 m 離れた位置に設けた。加温区には HP を埋設した。埋設方法は、杭打機 (RP-041M, 山田機械工業株式会社) を用いて HP とほぼ同径の SUS 管を約 2 m の深さまで打ち込み、杭抜き器 (ぬい太郎, 株式会社サンエー) で SUS 管を引き抜くことで縦穴を開け、そこに HP を挿入した。同様の方法で無加温区にはコントロールとして、HP と同径の塩ビパイプを埋設した (Fig. 3)。HP と塩ビパイプには同地点に熱電対を貼り付け、60 分毎の温度計測を

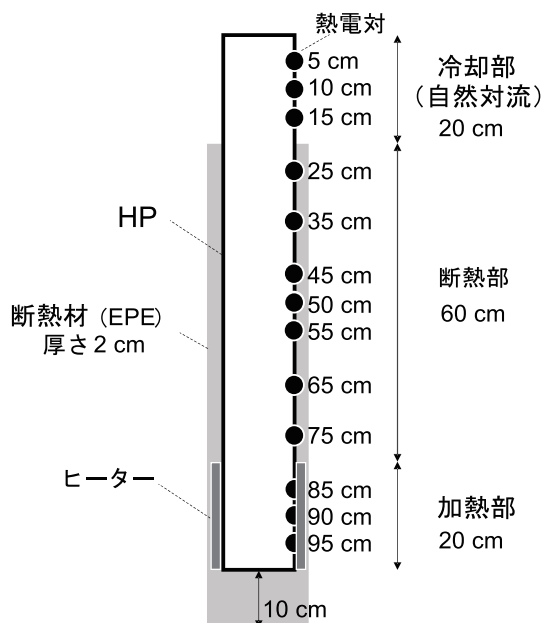


Fig. 2 HP の熱抵抗試験の模式図。
Schematic diagram of HP thermal resistance test.

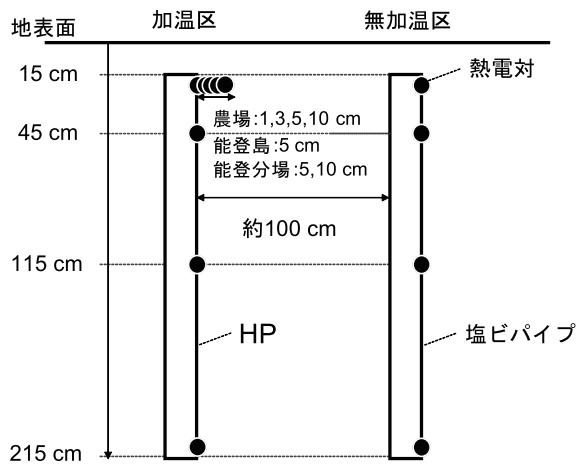


Fig. 3 試験圃場における HP と温度センサーの配置.
Placement of HP and temperature sensors in the test field.

Table 2 HP 両端の温度差.
Temperature difference at both ends of each heat pipe.

	Rf	HP _{water}	HP _{acetone}	HP _{R134a}
上端温度 (°C)	2.4	5.5	7.3	8.2
下端温度 (°C)	11.6	10.3	10.2	9.9
両端の温度差	9.2	4.8	2.9	1.7

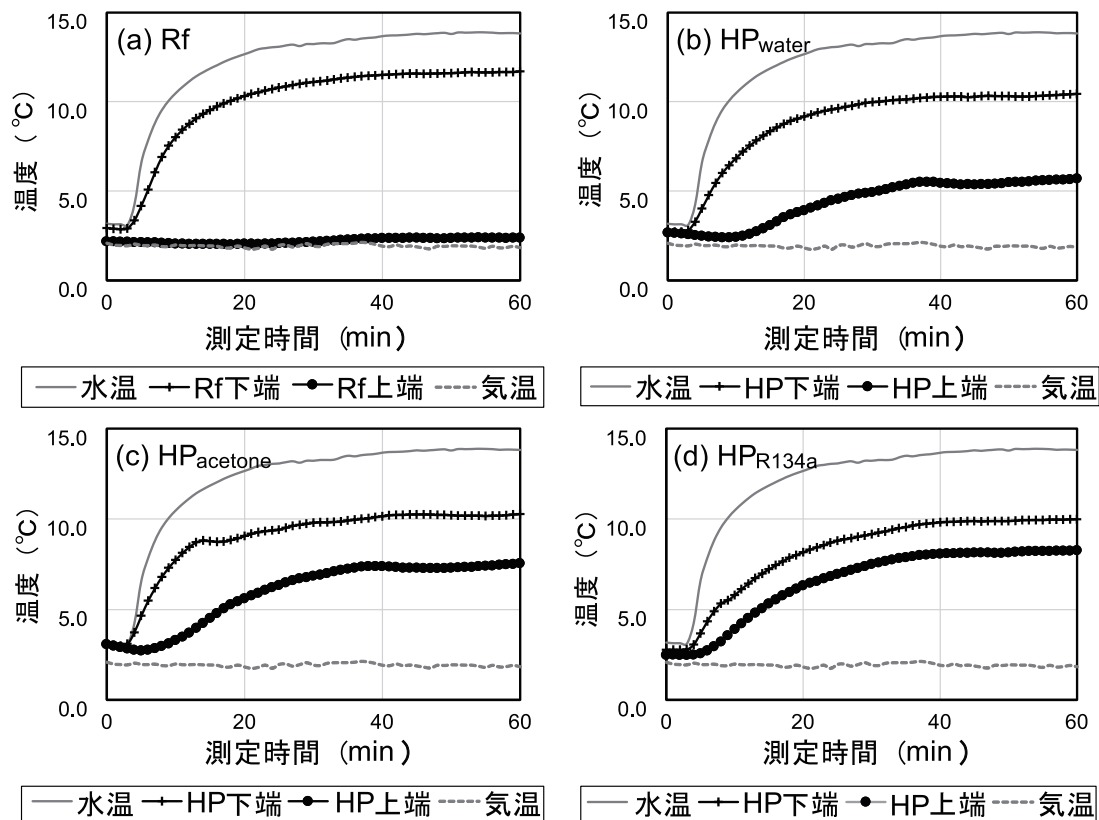


Fig. 4 性能評価試験時における HP 両端温度と水温・気温の推移.
Change in temperature at both ends of the HP, water temperature, and air temperature during the performance evaluation test.

行い、両区の地温を比較した。さらに、HP の加温範囲を調べるため、HP 上端部から水平方向に熱電対を設置し、地温計測を行った。農場では水平方向 1, 3, 5, 10 cm 地点、能登島では 5 cm、能登分場では 5, 10 cm 地点に熱電対を設置した。

計測機器は、農場と能登分場ではデータロガー TM-947SDJ (SATO TECH 社) および CR10X (Campbell 社) を使用し、能登島ではデータロガー TM-947SDJ, CR10X に加え CR23X (Campbell 社) も使用した。

3. 結果と考察

3.1 動作確認試験

動作確認試験の結果を Fig. 4 に示す。なお、(a) は Rf、(b) は作動液が水の HP (以下、HP_{water})、(c) はアセトンの HP (以下、HP_{acetone})、(d) は冷媒の HP (以下、HP_{R134a}) の結果である。また、上端温度がほぼ一定となった測定時間 45 ~ 60 分を定常状態と判断し、その時の上端温度と下端温度の平均値および両端の温度差を Table 2 に示

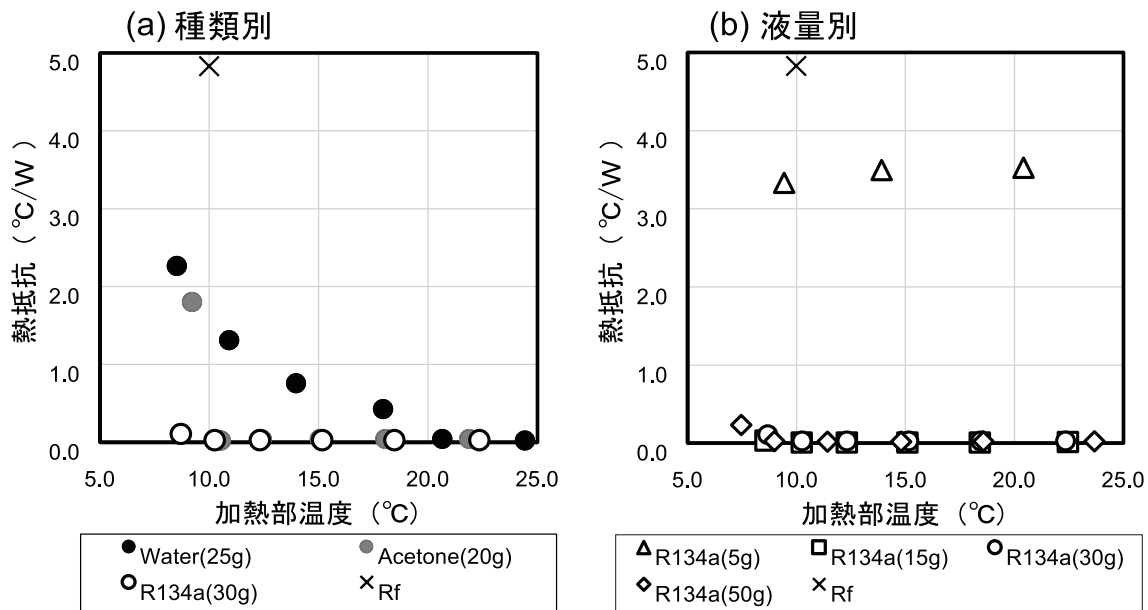


Fig. 5 熱抵抗試験の結果.
Results of thermal resistance test.

す。Rf の下端温度は約 12°C で定常状態となり、HP の下端温度はどの作動液に対しても約 10°C で定常となった。HP の下端温度が Rf よりも低い温度となったのは、作動液の吸熱によるものであると考えられる。HP は中の作動液が吸熱し蒸発することで潜熱輸送を行うため、HP の下端温度は低くなる。また、Rf の上端温度は気温とほぼ同じ推移となっているが、HP は 3 種類とも上昇している。これは潜熱輸送によって下の熱が上に輸送されたことを表している。両端の温度差は HP_{R134a} が最小値を示し、他に比べてより多くの熱を輸送することが明らかとなった。

3.2 熱抵抗試験

熱抵抗試験の結果を Fig. 5 に示す。(a) は作動液の種類別の結果であり、(b) は冷媒 (R134a) の量別の結果である。Fig. 5(a) において、加熱部温度が $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ の範囲で熱抵抗値をみると、 HP_{water} は $2.26^{\circ}\text{C W}^{-1}$ (加熱部温度 8.5°C)、 $\text{HP}_{\text{acetone}}$ は $1.80^{\circ}\text{C W}^{-1}$ (加熱部温度 9.2°C)、 HP_{R134a} は $0.11^{\circ}\text{C W}^{-1}$ (加熱部温度 8.7°C) であり、 HP_{R134a} が最も低い値となった。 HP_{R134a} は冬の地中温度のような低温条件下でも機能することが明らかとなった。冷媒が大きな熱輸送を行うことができる理由を考察するため、作動液の物性値 (Table 1) に着目する。Fig. 6 に作動液別の飽和蒸気圧曲線 ($0^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ の範囲を抜粋) を示す。なお、アセトンと冷媒の蒸気圧は佐藤 (1974) を参考に推算した。冬の地中環境である 11°C (下層) と 2°C (表層) の蒸気圧差をみると、水が 0.61 kPa 、アセトンが 5.84 kPa であるのに対し、冷媒は 114.0 kPa とその差は顕著である。冷媒は温度差が小さくても、水やアセトンよりも蒸気圧差が大きいため、多量の蒸気移動が可能となる。蒸発潜熱が小さくても蒸

気圧差が大きく多量の蒸気移動が生じたことで、大きな熱輸送を行うことができたと考えられる。したがって、野外地中の温度差において、水やアセトンよりも冷媒が有利であると考えられる。

次に Fig. 5(b) をみると、作動液の量が 5 g の場合は熱抵抗値が平均で $3.48 \pm 0.032^{\circ}\text{C W}^{-1}$ と大きく、Rf に近い値となった。これはドライアウトが生じていると考えられる。封入量が 5 g の場合では、作動液が全て蒸発し熱輸送機能が低下したことで、両端の温度差が大きくなったため、熱抵抗値が大きくなると考えられる。一方、封入量が 15 g , 30 g , 50 g の場合は熱抵抗値が平均で $0.01 \pm 0.004^{\circ}\text{C W}^{-1}$, $0.04 \pm 0.013^{\circ}\text{C W}^{-1}$, $0.06 \pm 0.035^{\circ}\text{C W}^{-1}$ と小さく、3 つともほぼ同じ値となった。作動

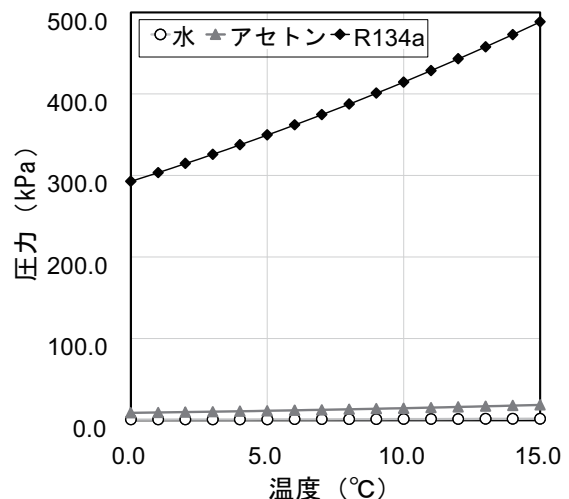


Fig. 6 作動液の飽和蒸気圧.
Saturated vapor pressure of working fluid.

液の封入量は15g(内容積の3%)以上あればドライアウトを生じないことが分かった。

以上の結果から、地中に埋設する(実証試験に用いる)HPは冷媒を内容積の3%充填したものとした。

3.3 熱輸送の継続性

実証試験では長さ2mのHPを用いるため、本実験でも長さ2mのHPを用いた。前項目までの性能試験時よりHPの内容積が2倍となるため、作動液は冷媒を約30g(内容積の3%,下部から6cmまで)封入した。動作確認と同様の方法で試験を行い、約1週間温度を測定した。その結果をFig.7に示す。Rf上端温度は気温変化とほぼ一致しているが、HP上端温度は25°C付近を維持している。これは作動液の循環が維持されており、HPが常に熱を輸送していることを示している。冬の地中温度よりも高温の条件下でも、つまりより多くの蒸気流が生じる条件下でも、潜熱輸送が持続したため、冬の圃場でも潜熱輸送は継続できると考えた。

3.4 土壌の物理性

各圃場の深さ30cm地点における土壌の物性値をTable3に示す。なお、反復数は $n=3$ である。各圃場の粘土(<0.002mm):シルト(0.002~0.02mm):砂(0.02~2mm)の割合は、農場が24%:40%:26%で、能登島が90%:8%:2%、能登分場が80%:10%:10%であり、土性三角図表に当てはめると、農場の土性は埴壌土(CL)、能登島と能登分場は重埴土(HC)であった。

熱伝導率は飽和状態時の測定値であり、3圃場ともほぼ同じ値であった。

3.5 実証試験

2019年12月から2022年7月までの各圃場における地温計測結果をFig.8に示す。なお、結果は月平均値である。

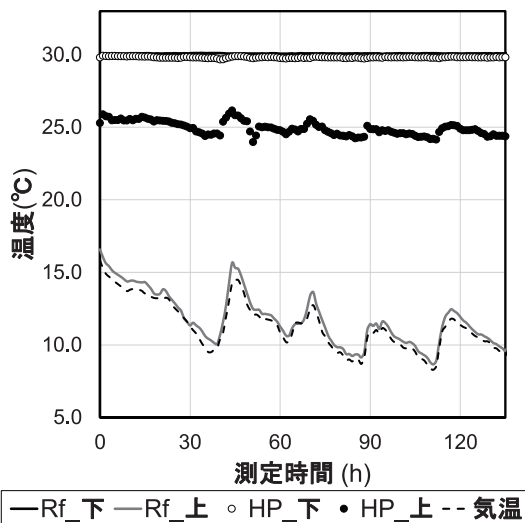


Fig.7 熱輸送の継続性実験におけるHPおよびRfの両端温度と水温・気温の推移。

Change in the temperature at both ends of HP and Rf, water temperature and air temperature during the continuity experiment of heat transport.

年間を通して、地中2mは15cm深よりも温度変動が小さく、比較的安定していることが分かる。3月~10月は地中2mの方が15cm深よりも低い温度となっており、11月~2月は地中2mの方が15cm深よりも高い温度分布となっている。HPは11月~2月の期間に作動することとなる。15cm深の温度についてHPの有無で比較すると、加温区(HP有)の方が高いことが分かる。これはHPによって下層の地中熱が表層に輸送され暖められていることを示している。そして加温区2m深の温度と加温区15cm深の温度がほぼ同じになっていることから、ドライアウトを起こすことなく熱輸送が維持できていると言える。HPを埋設した2019年度の冬から夏を越え、翌年の2020年度の冬とさらにその翌年度の冬もHPによる加温効果が見られた。

能登島における60分毎の地温計測結果のうち2020年2月下旬の10日間を抜粋しFig.9に示す。加温区15cm深の温度変動は小さく、8°Cを維持している。一方で無加温区15cm深は最低で4.5°C、最大で8.2°Cと大きく変動しており、日変化も大きい。加温区15cm深が8°Cを維持したことから、HPによって表層周辺に安定的な温熱源を作り出すことができた。

次に各圃場におけるHP上端の水平方向の温度分布をFig.10に示す。横軸はHP上端部からの水平距離を対数で表し、データは2022年2月の月平均値である。なお、HP上端からの水平距離0.1cmの温度はHPに貼り付けた熱電対の温度データを表している。HPの表面は約6.5~8.0°Cとなっており、そこから離れるにつれて徐々に温度が低下している様子がみられる。その温度分布について近似曲線を描くとほぼ直線形が得られ、HPから水平方向の温度分布は指数関数で近似できた。これは各年の12月~2月でも同様の結果が得られた。各月の近似曲線の傾きと切片および相関係数等についてTable4に示す。

近似式から、能登島と能登分場におけるHPから1cm横の温度を推定した。各月における近似式 $a \times \ln(x) + b$ に $x=1$ を代入することで、HPから1cm横の温度を推定した。ここで a は近似曲線の傾きであり、 b は切片である。 $\ln(1)$ は0となるので、HPから1cm横の温度は切片と同じ値となる。

さらに、HPから1cm横の温度低下率を以下の式で求めた。

$$(T_{HP} - T_1) / (T_{HP} - T_c) \times 100 \quad (3)$$

ここで、 T_{HP} はHPの上端温度(°C)、 T_1 はHPから1cm離れた地点の推定温度(°C)、 T_c は無加温区15cm深の温度(°C)である。各圃場での温度低下率の平均値は、農場が41.3%、能登島が35.2%、能登分場が46.4%であり、1cm離れると一気に温度が低下することが示唆された。同様にHPから5cm横の温度低下率についても算出した。なお、HPから5cm横の温度は測定値を用い

Table 3 圃場の土壌物理性.
Soil physical properties of each field.

	農場	能登島	能登分場
乾燥密度 (Mg m^{-2})	1.30 (± 0.06)	1.29 (± 0.07)	1.13 (± 0.02)
土粒子密度 (Mg m^{-2})	2.57 (± 0.01)	2.70 (± 0.01)	2.62 (± 0.00)
固相率	0.50 (± 0.02)	0.48 (± 0.03)	0.43 (± 0.01)
熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) ※飽和状態時	1.25 (± 0.06)	1.29 (± 0.01)	1.20 (± 0.05)

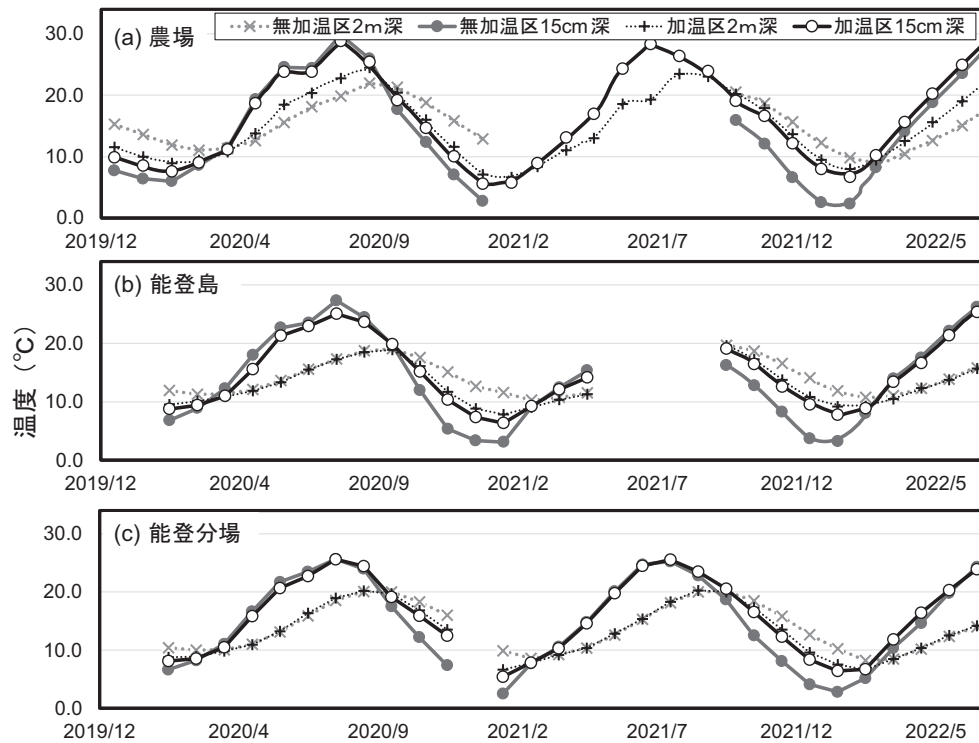


Fig. 8 各圃場における地温計測 (月平均値) の結果.
Results of soil temperature measurement (monthly average) in each field.

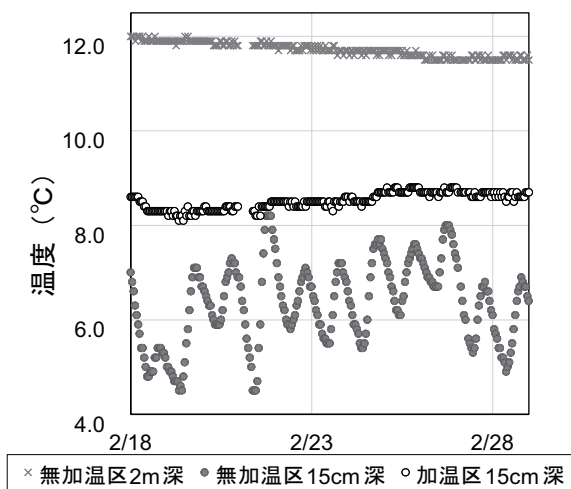


Fig. 9 能登島における2月下旬の10日間 (60分毎) の地温計測結果.
Results of soil temperature measurement for 10 days (every 60 minutes) in late February at Notojima Island.

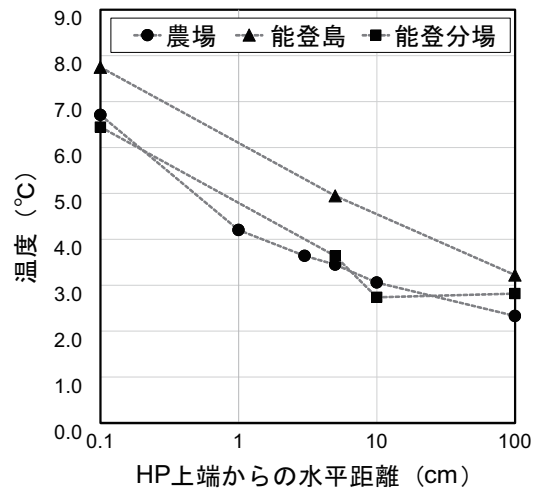


Fig. 10 HP から水平方向の温度分布.
Horizontal temperature distribution from heat pipe.

Table 4 HP から水平方向の温度分布における近似曲線の傾きと相関係数および HP から 1cm 横の推定温度とその温度低下率. Slope and correlation coefficient of the approximated curve in horizontal temperature distribution from HP, estimated temperature 1cm horizontally from HP and its temperature drop rate.

試験地	年月	HP の 上端 温度 (°C)	無加温区 15 cm 深 の温度 (°C)	近似 曲線 の傾き	近似 曲線 の切片	相関 係数	1 cm 横 の推定 温度 (°C)	1 cm 横 の温度 低下 (%)
農場	2020/ 2	7.6	6.0	-0.26	6.8	-0.91	6.8	49.7
	2020/12	10.1	7.0	-0.47	9.0	-0.98	9.0	35.9
	2021/ 1	5.6	2.8	-0.43	4.8	-0.98	4.8	28.1
	2021/ 2	5.7	—	—	—	—	—	—
	2021/12	12.2	6.6	-0.80	9.7	-0.97	9.7	43.8
	2022/ 1	8.0	2.6	-0.78	5.6	-0.97	5.6	43.8
	2022/ 2	6.7	2.3	-0.62	4.7	-0.95	4.7	46.8
能登島	2020/ 2	8.7	6.8	-0.28	8.0	-0.98	8.0	39.1
	2020/12	10.3	5.3	-0.72	8.7	-1.00	8.7	33.2
	2021/ 1	7.3	3.3	-0.58	6.0	-1.00	6.0	33.6
	2021/ 2	6.3	3.1	-0.47	5.2	-1.00	5.2	33.5
	2021/12	12.6	8.2	-0.63	11.0	-0.99	11.0	36.2
	2022/ 1	9.5	3.7	-0.85	7.4	-1.00	7.4	35.7
	2022/ 2	7.7	3.2	-0.66	6.2	-1.00	6.2	35.0
能登分場	2020/ 2	8.1	6.6	-0.24	7.3	-0.84	7.3	56.3
	2020/12	12.5	7.4	-0.77	10.4	-0.97	10.4	41.3
	2021/ 1	—	—	—	—	—	—	—
	2021/ 2	5.4	2.5	-0.45	4.2	-0.96	4.2	42.2
	2021/12	12.3	8.1	-0.65	10.4	-0.94	10.4	44.8
	2022/ 1	8.4	4.1	-0.67	6.3	-0.92	6.3	47.8
	2022/ 2	6.4	2.8	-0.57	4.8	-0.93	4.8	45.7

た。各圃場での温度低下率の平均値は農場が 65.5 %、能登島が 58.6 %、能登分場が 71.5 % となった。HP から 1 cm 横で約 40 %、5 cm 横で約 65 % の温度低下が推定され、HP から数 cm 離れただけで加温効果が抑制されることが示唆された。

4. 結論

寒冷地域でのオリーブ果実の生産性向上を目指し、HP と地中熱を利用して表層の地温上昇を試みた。HP を鉛直埋設することで下層の地中熱を表層に輸送する。

HP は外径 25.4 mm、長さ 2 m の銅管を用いて作製した。性能試験により、冬の地中環境条件下では、冷媒が最も効率的に熱を輸送することができることが明らかとなった。また、冷媒を内容積の 3 % 封入することで潜熱輸送が継続できることも分かった。

実証試験では、HP によって表層の HP 近傍の温度を上昇させることができた。具体的には、HP が埋設されていない場合の 15 cm 深の温度が約 2 °C であるのに対し、HP を埋設した場合は約 8 °C を維持した。冬の表層周辺に温熱源を作り出すことに成功したが、HP から 1 cm 離れると約 40 %、5 cm 離れると約 65 % の温度低下が推定された。HP から数 cm 離れただけで加温効果が

抑制されることが示唆された。樹木の根域全体を加温するためには、より広範囲を加温する技術の開発が課題となる。

謝辞

本研究は一般社団法人ヤンマー資源循環支援機構より研究助成（2020 年度）を受けました。能登島のオリーブ畑での調査および実証試験にあたり、能登島オリーブの会会長洲崎邦郎氏に多大な協力をいただきました。HP の製造に関して、松村物産株式会社の喜多剛士氏と株式会社 NAC の中居由友氏に多大なる助力をいただきました。英文 Abstract の執筆にあたり、石川県立大学教養教育センター Glen Norris 准教授にご尽力をいただきました。

引用文献

- 古沢 昭・佐藤純一・福井紘一郎 (1980): ヒートパイプの熱性能とその工業的応用. 精密機械, 46 (7): 893-897, doi:10.2493/jjspe1933.46.893.
- 柳瀬辰昭 (1982): 土壌の熱伝導率に関する研究. 農技研報告, B33: 1-54.

- 木村裕一 (2000): ヒートパイプ. 電気学会誌, 120(4): 231–234. doi:10.1541/ieejjournal.120.231.
- 木村裕一 (2012): ヒートパイプの製造と試験. 伝熱: Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 51(217): 33–38.
- 公益社団法人 土木学会 地盤工学委員会 (2015): 土質試験のてびき 第三版, pp. 25–33. 丸善出版株式会社, 東京.
- 倉前正志・松本政秀 (1984): ヒートパイプのドライアウト現象について. 化学工学論文集, 10(6): 736–743, doi:10.1252/kakoronbunshu.10.736.
- 宮崎 毅・長谷川周一・粕淵辰昭 (2005): 土壤物理学, pp. 3–4. 朝倉書店, 東京.
- 望月正孝 (2012): ヒートパイプの設計. 伝熱: Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 51(217): 27–32.
- 森田慎一・早水庸隆・桑垣 瞭・中村博行・山田貴延・堀部明彦・春木直人 (2015): 地中熱による地中加温熱量と農作物の生育促進に関する研究. 日本伝熱学会論文集, 23(1): 5–13, doi:10.11368/tse.23.5
- 森田義彦・板倉 勉・築取作次 (1956): 冬の地温が柑橘砧木の生育に及ぼす影響について. 園芸学会雑誌, 24(4): 222–226. doi:10.2503/jjshs.24.222
- 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓 (1995): 土壤物理環境測定法, pp. 28–30. 東京大学出版会, 東京.
- 日本ヒートパイプ協会編 (2001): 実用ヒートパイプ — 第2版 —, p. 5, p. 17. 日刊工業新聞社, 東京.
- 日本熱物性学会編 (2008): 新編熱物性ハンドブック, pp. 42–49, p. 72, p. 423. 養賢堂, 東京.
- 農林水産省, 気象庁 (1982): 地中温度等に関する資料. 農林気象資料第3号, p. 228.
- 農林水産省, 気象庁 (1984): 地中温度に関する資料 (続). 農林気象資料増補, p. 26.
- 農林水産省: 特産果樹生産動態等調査. https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokusan_kazyu/index.html (最終閲覧日 2023年4月13日)
- 大島耕一 (1982): ヒートパイプ技術の最近の進歩. 低温工学, 17(2): 76–83. doi:10.2221/jcsj.17.76
- 佐藤一雄 (1974): 物性定数推算法, p. 38, p. 196, p. 234. 丸善, 東京.
- 佐藤孝夫 (1995): 樹木の根系の成長に関する基礎的研究. 北海道林業試験場研究報告, 32: 1–54.
- 土谷富士夫 (2004): ヒートパイプによる人工永久凍土低温貯蔵庫. 日本雪氷学会誌, 66(2): 251–257, doi:10.5331/seppyo.66.251.
- Weih, M. and Karlsson, P.S. (2002): Low winter soil temperature affects summertime nutrient uptake capacity and growth rate of mountain birch seedlings in the subarctic, Swedish lapland. *An Interdisciplinary Journal*, 34(4): 434–439, doi:10.1080/15230430.2002.12003514.

要 旨

農作物の生育促進のため、ヒートパイプ（以下、HP）を利用して下層の地中熱を表層へ輸送し、地温を上昇させることを検討した。HP を作製し、性能試験および実証試験を行った。性能試験では、作動液として水、アセトン、冷媒（代替フロン、R134a）を選定し、どの作動液が冬の地中温度条件下に適しているかを調べた。その結果、冷媒を内容積の3% 封入することで効果的な加温装置となることが示唆された。実証試験では、2 m のHP を埋設し、HP の有無による15 cm 深の温度を比較した。その結果、HP 無しの場合の15 cm 深は約2 °C であるのに対し、HP 有りの場合はその近傍が約8 °C となった。HP によって冬の表層（15 cm 深）を上昇させることができた。表層周辺に温熱源を作り出すことに成功したが、HP から数 cm 離れただけで加温効果が抑制されることが示唆された。

キーワード：ヒートパイプ, 地中熱利用, 寒冷地栽培, 地中温度, 根域加温