

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07672

研究課題名(和文) 土壌の熱的物理特性を考慮した地中熱ヒートポンプの採・放熱効率の向上

研究課題名(英文) Development of heat exchanger for geothermal heat pump system by analyzing thermal regime of the soil layer in the agricultural field

研究代表者

岩田 幸良 (Iwata, Yukiyoshi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員

研究者番号：70370591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：省エネ効果が高いとされる地中熱ヒートポンプの農業利用を促進するため、低コストで導入が可能とされる水平型の熱交換器について、採熱効率の高い形状を検討した。一般的なスリンキータイプに比べ、本研究課題で提案した直管タイプの熱交換器は、深さ1.5mに埋設した場合に、冷・暖房時共に省エネ効果が高いことが実証された。また、三次元の数値シミュレーションの結果から、1.5 mに埋設したスリンキータイプの熱交換器は1 mに埋設した直管タイプの熱交換器と同程度の省エネ効果が期待できることが示された。以上のことから、直管タイプの熱交換器は従来のものよりも農業利用に適していると結論された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

省エネ効果が高いとされる建物の冷暖房装置である地中熱ヒートポンプについて、浅いところの地熱を利用するための水平型熱交換器周辺の地熱の移動様式を再現するシミュレーションモデルが開発された。これにより、熱交換器の形状や熱交換器の埋設深さの違いによる熱利用効率を事前に評価することが可能となった。開発した手法を用いることで、最も普及しているスリンキータイプの熱交換器に比べ、直管タイプの熱交換器の方が、省エネ効果が高いことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Geothermal heat pump system is a promising tool for energy-saving. We examined the shape of heat exchanger for the heat pump heating or cooling a green house. Two horizontal heat exchangers, the one was Slinky-type, which was one of the most popular heat exchangers, and the other was Straight-type, which was developed in this study. These were buried at 1.5 m depth and connected to the heat pumps for heating (cooling) greenhouses. Field observation experiment revealed that the effect of energy saving of the heat pump system with Straight-type heat exchanger is larger than that with Slinky-type. A 3D-numerical simulation implied that the effect of energy saving of the heat pump system with the Straight-type heat exchanger buried at 1 m depth will be similar to that with the Slinky-type buried at 1.5 m depth. These results clearly indicate that Straight-type heat exchanger is more beneficial tool for the agricultural use to heat or cool the greenhouse by the geothermal heat pump system.

研究分野：農地工学

キーワード：地中熱ヒートポンプ 水平型熱交換器 地温 数値シミュレーション 省エネ技術 冷暖房 温室

1. 研究開始当初の背景

有力な省エネ技術の一つとして地中熱ヒートポンプが注目されている。これまで、安定した地中深くの熱を利用できる鉛直型ヒートポンプが主に普及してきた。しかし、鉛直型ヒートポンプは深さ 50~100 m 程度まで縦穴（ボアホール）を掘り、そこに熱交換器を設置するため、ボーリングの機械を専門家が使用して作業をする必要があることから、設置費用がかかるために温室の冷暖房等の農業への利用は困難であると考えられてきた。

これに対し、熱交換器を 1.5~2.5 m 程度の深さに面的に設置する水平型ヒートポンプの導入により、イニシャルコストを削減することで、地中熱ヒートポンプを農業に利用することが検討されている。しかし、水平型ヒートポンプの採熱効率や採熱に必要な面積、最適な熱交換器の形状等、水平型ヒートポンプを導入した際の土壌からの採熱に関する詳細については不明な点が多く、研究開始当初には施工業者の経験に基づいて試行的に施工をするような状況であった。また、土壌中の熱移動の解析がこれらの問題を解決する上で有効であると考えられるが、水平型地中熱ヒートポンプについては熱交換器を施工した際の土壌中の熱の挙動を解析する標準的な手法も確立されていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、以下のことを目的に研究を実施した。

(1) 圃場試験を実施し、現在日本で主に採用されているスリンキータイプ（管をコイル状に巻いたタイプ）の熱交換器（以下、スリンキー型）と、同じ材料（硬質ポリエチレンチューブ）を直管にして埋設した熱交換器（以下、直管型）について、温室で冷暖房した際の省エネ効果を検証する。

(2) 熱交換器を埋設した圃場において、地温と土壌水分量の測定を実施し、同圃場から土壌を採取して測定した熱伝導率等の土壌の熱物性値を用いて、地中熱ヒートポンプの熱交換器を設置した圃場の熱動態を解明し、熱交換器の形状の違いが採熱効率に与える影響を明らかにする。

(3) 観測データや土壌の熱物性値を用いて三次元の数値シミュレーションを実施し、熱交換器を埋設した圃場の熱移動を再現する。得られた結果を用い、熱交換器の形状の違いが採熱効率に与える影響を検討することで、数値シミュレーションによる水平型熱交換器の評価手法を確立する。また、開発した数値シミュレーションにより熱交換器の埋設深さを変えたときの熱交換器の効率について検討する。

3. 研究の方法

(1) 圃場試験

農研機構農村工学研究部門の黒ボク土畑圃場において、間口 5.4 m、奥行き 9.9 m の温室を 2 棟設置し、それぞれに約 1.5 kW の地中熱ヒートポンプ 1 台を設置した。温室に隣接する圃場にスリンキー型と直管型の熱交換器を深さ 1.5 m に設置し、それぞれの温室のヒートポンプの熱源とした（図 1）。

2017 年 2 月から 2018 年 2 月まで観測を実施した。2017 年 2 月 20 日~5 月 9 日（設定温度 12~15℃）と 2017 年 11 月 27 日~2 月 12 日（設定温度 7~12℃）で温室の暖房運転を実施した。冷房については、8 月 2 日~9 月 27 日（設定温度 20℃）に夜間のみ実施した。

スリンキー型については、各熱交換器の上部と熱交換器と熱交換器の間の 3 地点で、直管型については、パイプの近傍の 2 地点とパイプとパイプの間の 1 地点において、深さ 0, 5, 10, 30, 50, 100, 150 cm の地温を測定した。また、これらの地点において、深さ 20, 50, 100, 150 cm において土壌水分量を測定した。さらに、熱交換器の影響が及ばない、熱交換器から離れた地点にも同じ深さに地

温計と土壌水分計を設置し、自然状態の畑の地温と土壌水分量を測定した。センサー設置時に各試験区から土層ごとに不攪乱土壌を採取し、熱伝導率、水分特性曲線、飽和透水係数等の土壌の基本的な物理性を測定した。

温室内の地中熱ヒートポンプと熱交換器を接続する部分に温度計を設置し、熱交換器からヒートポンプに入るときの不凍液（熱交換媒体）の温度と、ヒートポンプから出てくる不凍液の温度を測定した。また、熱交換器内の不凍液の流速を、ヒートポンプから熱交換器に出る地点で測定した。

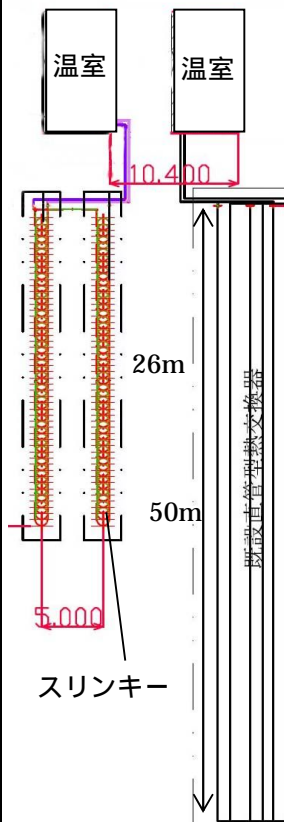


図 1 試験圃場における温室と熱交換器の位置

(2) 数値シミュレーション

熱移動の解析ソフトウェアである FEFLOW を用い、熱交換器を設置した圃場の地温、ならびに不凍液の温度の三次元の数値シミュ

レーションを実施した。ヒートポンプを動かす前の地温と不凍液の温度を初期条件とし、測定された土壌物理パラメータと不凍液の流速、不凍液の温度を用い、ヒートポンプを動かしたときの地温や不凍液の温度の経時変化を計算した。得られた結果を実測値と比較し、推定精度を検証した。直管タイプについては、深さ1mに埋設した際の熱交換器内の温度を計算し、熱交換器をより浅く埋設した際の冷暖房の効率について検討した。

4. 研究成果

(1) 地温と熱交換器内の不凍液の温度の推移

観測期間中の気温（気象庁のつくばの測候所のデータ）と、試験圃場で測定された深さ1.5mの地温の推移を図2に示す。熱交換器の影響を受けていない対照区では、1年を通して地温が13~20の間で推移していた。1mの深さでは気温の影響を受けて自然条件でも地温が変動するものの、深さ1.5mの地温は気温に比べると安定していたことがわかる。スリンキー区・直管区共に、冬季には暖房による吸熱により対照区に比べて地温が低下した。反対に、夏には冷房による放熱により、対照区よりも両処理区の地温が上昇した。スリンキー区の地温は対照区に比べて冷・暖房時共に10以上の差が生じたのに対し、直管区と対照区の地温の差は最大で7程度であり、両試験区の熱交換器近傍の地温の推移は異なった。一方、冷房や暖房を終了してから1カ月程度でスリンキー区と直管区の地温は対照区の地温とほぼ同じになった。冬の暖房により地温が低下した状態が夏の冷房時まで保持される、あるいは夏の冷房時に貯留された熱が冬の暖房時に有効に利

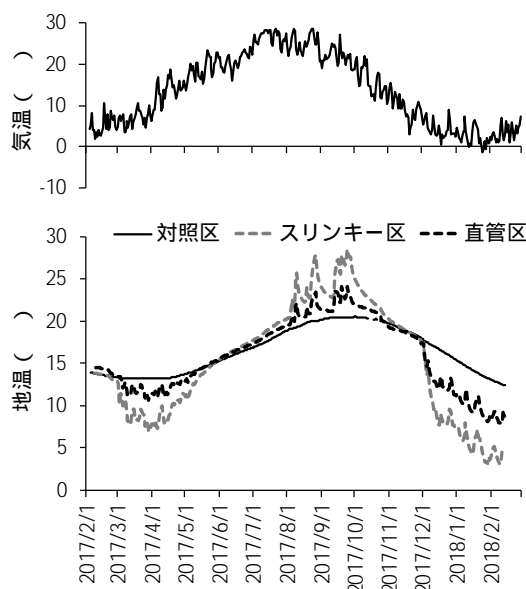


図2 観測期間中の日平均気温と対照区、スリンキー型熱交換器近傍、直管型熱交換器近傍における深さ1.5mの地温の推移。

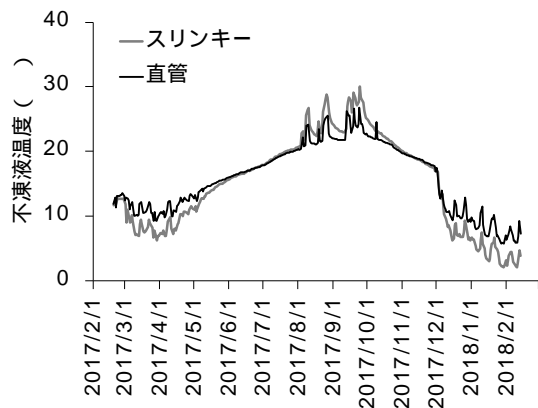


図3 熱交換器からヒートポンプに入るとき
の熱交換器内の不凍液の温度の推移

用されることで、より省エネ効果が高い地中熱ヒートポンプの運用が可能となることが期待されたが、こうした効果は今回の試験条件では期待できないことが明らかになった。

同期間の熱交換媒体である不凍液の温度の推移を図3に示す。スリンキー区に比較し、直管区の不凍液の温度は、冷房時に最大4低く、暖房時に最大5程度低かった。このことから、スリンキー型の熱交換器よりも直管型の熱交換器の方が、省エネ効果が高いことがわかる。

(2) 土壌水分量の推移と熱伝導率

気象庁のつくばの測候所で測定された降水量と、試験圃場における深さ50cmと100cmの土壌水分量の推移を図4に示す。両深さともに、降雨により土壌水分量は増加したが、1日あたり100mm以上、積算で416mmの降雨があった11月を除き、変動幅は $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以内に収まっていた。このことから、下層では土壌水分量は安定していたことがわかる。

各試験区の深さ100cm付近における土壌のマトリックポテンシャル(pF値)と熱伝導率の関係を図5に示す。pF1.5からpF3.5まで熱伝導率は $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 程度低下するが、pF1.5からpF2.0にかけての熱伝導率の低下に比べ、pF2.0よりも乾燥側では熱伝導率の低下は少なかった。採取した土壌の熱伝導率と、熱伝導率を測定したときの土壌水分量との間に線形関係が認められた(図6)。土壌水分量が $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 変化する場合、熱伝導率は $0.088 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 変化することを図6の回帰直線は示している。圃場で測定された土壌水分量の変化幅が、豪雨時を除き $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度であることと、一般的に排水性の良い圃場では降雨から一日後には圃場容水量であるpF2.0程度まで土壌水分が低下すること(図4)試験圃場ではpF2.0より乾燥した場合の熱伝導率の変化が少ないこと(図5)から、試験圃場では熱伝導率をほぼ一定と考えて熱移動の解析を実施しても良いと考えられた。

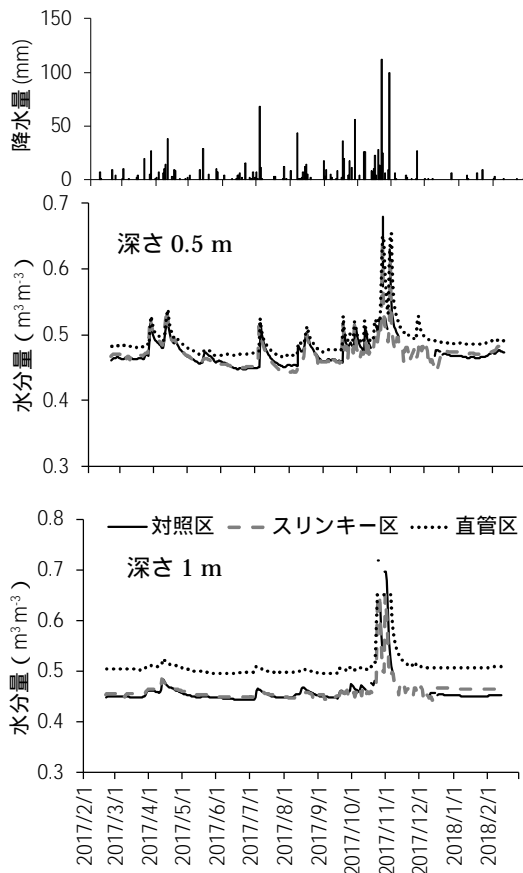


図4 観測期間中の日降水量と各試験区の深さ 0.5 m と 1 m の土壌水分量の推移 .

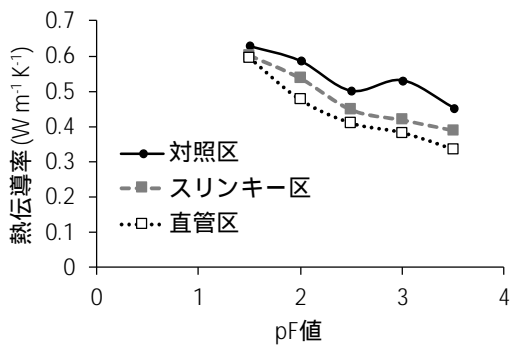


図5 各試験区の土壌水分状態 (pF 値) と熱伝導率の関係 .

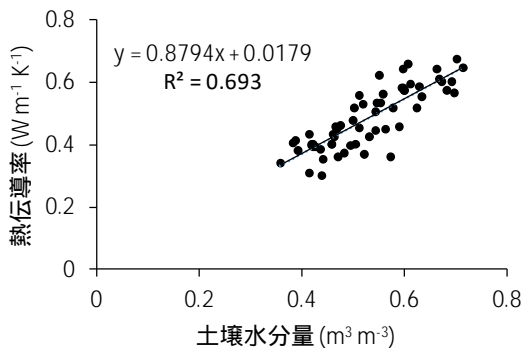


図6 サンプリングした土壌の土壌水分量と熱伝導率の関係 .

3) 数値シミュレーションによる地温・不凍液温度の再現と熱交換器による採熱の影響範囲の検討

そこで、土壌の熱伝導率として一定値を与え、地温と、熱交換器を循環する不凍液の温度の三次元の数値シミュレーションを実施した。

対照区における観測期間中の深さ 150 cm の地温の実測値と計算結果を図7に示す。両者の平均平方自乗誤差 (RMSE) は 0.28 であり、自然条件では正確に地温が計算できたと考えられる。

スリンキー区における熱交換器の直上の深さ 150 cm の地温の実測値と計算結果の比較結果を図8に示す。RMSE が 0.88 と対照区よりも若干推定誤差が大きいが、計算結果は実測値とおおむね一致しており、スリンキー区でも精度よく地温が計算できた。

直管区における直管近傍の深さ 1.5 m の地温の計算結果と実測値の推移を図9に示す。ヒートポンプ運転時以外の期間について、両者はおおむね一致した。しかし、夏季の暖房時には実測値が計算値よりも最大で 5 程度低く、暖房時には実測値と計算値は最大で 5 程度高くなった。RMSE も 2.1 であり、直管区ではヒートポンプ運転時に計算値と実測値の良好な一致がみられなかった。直管区は熱交換器がパイプ状のため、温度計を正

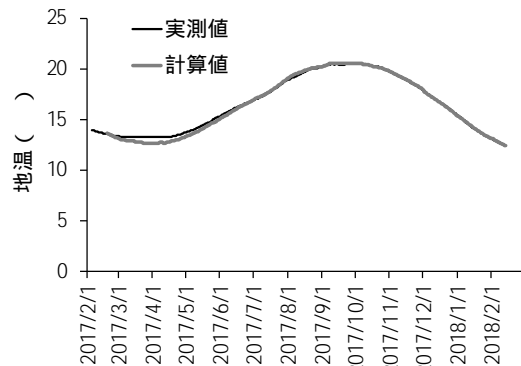


図7 対照区における深さ 150 cm の地温の実測値と計算結果の比較 .

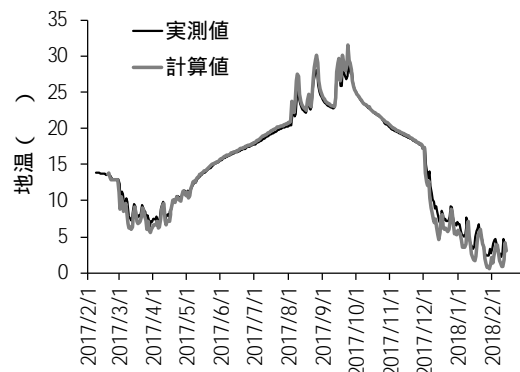


図8 スリンキー区の熱交換器直上地点における深さ 150 cm の地温の実測値と計算結果の比較 .

確に熱交換器の近傍に設置することが難しかった。このことから、計算値を参照した地点と実際の観測値の位置にズレが生じ、計算結果と実測値が一致しなかったと考えられる。実際、図 10 に示すように熱交換器からヒートポンプに入るときの不凍液の温度は、直管区で計算値と実測値がよく一致していたことから (RMSE=0.55)、直管区でも地温のシミュレーション結果は、実際のヒートポンプ運転時の温度変化をよく再現していたと考えられる。

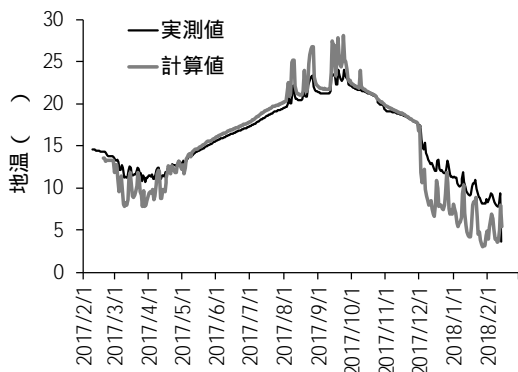


図 9 直管区の熱交換器近傍における深さ 150 cm の地温の実測値と計算結果の比較。

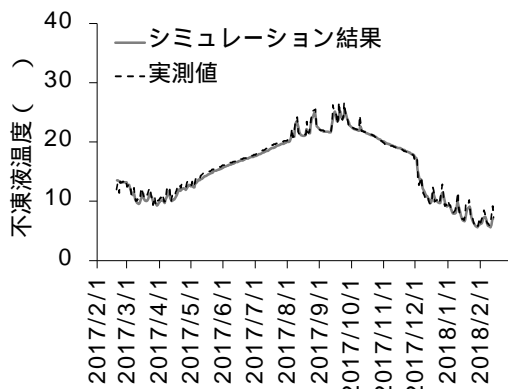


図 10 直管区の熱交換器からヒートポンプに入る不凍液の温度の実測値と計算結果の比較。

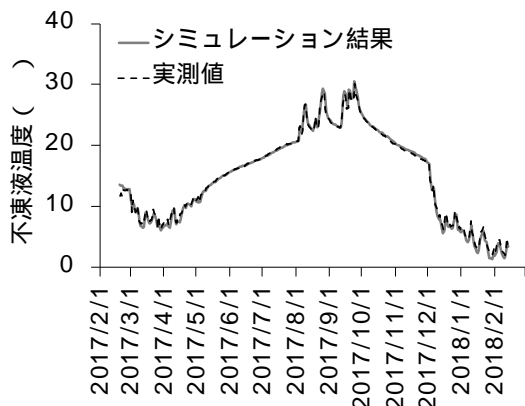


図 11 スリンキー区の熱交換器からヒートポンプに入る不凍液の温度の実測値と計算結果の比較。

スリンキー区についても、熱交換器内の不凍液の温度の計算結果と実測値の RMSE は 0.38 であり、計算結果は実測値とよく一致した (図 11)。

観測期間最終日におけるスリンキー区と直管区の熱交換器の中間地点 (地温と土壌水分の測定を実施した地点) の地温の 2 次元分布を図 12 に示す。図は、各深さに対応する対照区の地温 (すなわち、自然状態の地温) と各試験区の地温との差の分布として表示した。暖房により地中から熱を取ることで、自然状態の地温との差が 3 以上になるのは、スリンキー区では熱交換器の中心から 1 m 程度、直管区では熱交換器から 70 cm 程度であった。また、自然状態の地温に比べ、採熱により 1 地温が低下する範囲は、スリンキー区、直管区共に熱交換器中心から 1.5 m 程度であった。このように、三次元の数値シミュレーションを実施することで、熱交換器の影響範囲が明確になることから、三次元の数値シミュレーションは熱交換器の採熱効率を評価することで有用であると考えられる。

数値シミュレーションにより、直管タイプの熱交換器を深さ 1 m に設置したと仮定して、観測期間中のヒートポンプに入る不凍液の温度を計算した結果を図 13 に示す。計算結果から、直管タイプの熱交換器を深さ 1 m に埋設した場合でも、スリンキータイプの熱交換器を深さ 1.5 m に設置した場合よりもヒートポンプ入口の不凍液の温度が夏の冷房時には低く、冬の暖房時には高くなることが示唆される。このことから、直管タイプを深さ 1 m と浅く埋設しても、スリンキータイプの熱交換器を深さ 1.5 m に埋設した場合と同等

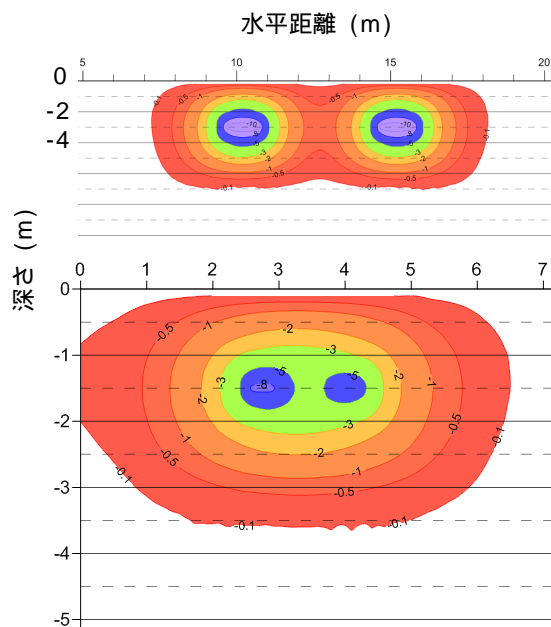


図 12 観測期間終日 (暖房終了時) における熱交換器周辺の地温の 2 次元分布 (上: スリンキー区; 下: 直管区)。

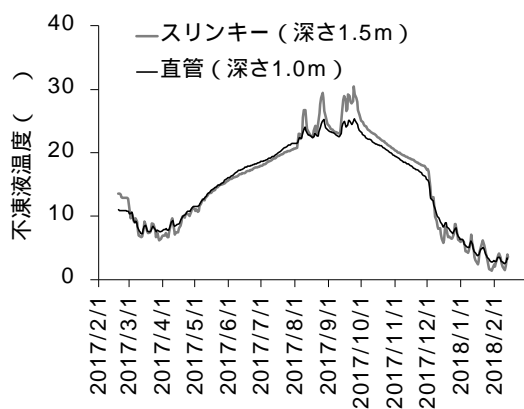


図 13 直管タイプの熱交換器を深さ 1 m に埋設した場合とスリンキータイプの熱交換器を深さ 1.5 m に埋設した場合のヒートポンプに入る不凍液の温度の比較 (数値シミュレーションによる結果)。

以上の省エネ効果が期待できることから、直管タイプの熱交換器を採用することで、省エネ効果を従来と同程度に維持しながら、従来よりも簡便に熱交換器を埋設できると考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yukiyoshi Iwata, Teruhito Miyamoto, Koji Kameyama, Manami Nishiya, Effect of sensor installation on the accurate measurement of soil water content, *European Journal of Soil Science* (査読あり), 68, 2017, pp. 817–828, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ejss.12493>

〔学会発表〕(計 3 件)

岩田幸良、宮本輝仁、亀山幸司、西谷麻菜美、キャパシタンス土壌水分計の設置方法がキャリブレーション式に与える影響：土壌の種類による違い、日本土壤肥料学会 2017 年度仙台大会、2017

Yukiyoshi Iwata, Limi Okushima, Yohei Uchida, Manami Nishiya, Soil physical properties for effective use of geothermal heat pump system with horizontal ground heat exchanger, 11th International Conference on Agrophysics, 2016

岩田幸良、宮本輝仁、西谷麻菜美、亀山幸司、設置方法と試料の乾燥密度が土壌水分センサーの出力値に与える影響、平成 28 年度土壤物理学会シンポジウム、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

国立研究開発法人 農業・食品産業技術
総合研究機構 農村工学研究部門・
上級研究員
岩田 幸良 (Iwata, Yukiyoshi)
研究者番号：7 0 3 7 0 5 9 1

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし