

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06327

研究課題名(和文) 自動埋設実現のための地中熱ヒートポンプ熱交換器の埋設深度と土壌との密着性の解析

研究課題名(英文) Evaluating acceptable conditions of soils around heat exchanger for geothermal heat pump system

研究代表者

岩田 幸良 (Iwata, Yuki Yoshi)

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：地中熱ヒートポンプの導入コストの削減のため、水平型熱交換器の自動埋設の可能性を検討した。土壌中の熱伝導プロセスを考慮して数値シミュレーションを実施したところ、ヒートポンプの稼働効率に影響を与える熱交換器出口の冷媒の温度が、冷房時に過大評価された。これを改善するために、不飽和土壌中に生じる水蒸気による熱輸送のプロセスを組み込む手法を開発した。開発した手法を用いて熱交換器の埋設深さや熱交換器周囲の熱伝導率を変化させたシナリオ解析を実施し、従来実施していた砂の充填が不要である可能性や埋設深度を浅くしても十分な採放熱が確保できることなど、熱交換器の自動埋設の可能性を示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地中熱ヒートポンプの数値シミュレーションの既往の研究では、熱伝導や地下水の流れによる熱輸送の効果は組み込まれていたが、不飽和土壌中の水蒸気移動の効果は検討されてこなかった。本研究により、水平型地中熱ヒートポンプで冷房する際に、地温の上昇と温度勾配により水蒸気移動による熱輸送が無視できないことが初めて指摘された。開発した計算方法は見かけの熱伝導率を地温のパラメータとして計算できるため、計算負荷が非常に小さく、実用上の有用性も高い。また、熱交換器の周囲に充填していた砂を使用しなくても良い可能性を示すなど、熱交換器埋設の低コスト化に関するいくつかの知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：To reduce the initial cost, horizontal geothermal heat pump system may be useful because there is a possibility to install heat exchanger cheaper. We conducted field research and 3-D numerical simulation for the horizontal heat pump system. First, we used a model considering heat conduction. We found that calculated temperature of the antifreeze solution at the outlet of the heat exchanger, which determines the efficiency of the heat pump system, were significantly higher than the observed values. This was probably because of the heat transportation of vapor flow, which occurs in unsaturated soil with high soil temperature and large thermal gradient. Thus, we developed a model to obtain apparent thermal conductivity, and found this method was useful for accurate calculation of the horizontal geothermal heat pump system. We also found the possibility that it may be possible not to use contact materials such as sand around the heat exchangers of horizontal heat pump system.

研究分野：農業農村工学

キーワード：地中熱ヒートポンプ 不飽和帯 水蒸気移動 水平型熱交換器 コンタクト資材 熱伝導率 数値シミュレーション 熱移動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地中熱ヒートポンプは有力な省エネ技術の一つであるが、空気熱源に比べて導入コストが高く、温室の冷暖房等の農業への利用については、投資した金額を回収するまでに時間がかかりすぎるため、導入が難しいとされてきた。地中熱ヒートポンプの熱交換器には鉛直型と水平型がある。鉛直型は深さ 50~100 m 程度まで熱交換器を埋設するため、安定した地熱を利用できることから熱交換効率が高いが、設置に専用の機材が必要であり、深い井戸を掘るためにコストがかかる。一方、水平型は深さ 1~2 m に熱交換器を埋設するが、この深さだと気温の影響を受けて地温も変動することから、鉛直型に比べると熱交換効率が低い。課題遂行者はこの水平型の熱交換器でも、広い面積に熱交換器を埋設することで熱交換効率が向上することを明らかにし、広い面積から熱をとるためには一般的に用いられるスリンキーよりも直管タイプの熱交換器の方が良いことを提案した(科研費基盤研究(C)、15K07672)。農業用のビニールハウスの近くの広大な農地から広く薄く熱を取ることができれば、効率よく温室を冷暖房することが可能であると考えられる。しかし、従来のようにバックホー等を用いて広い面積に熱交換器を埋設するのは、鉛直型と同様にかかなりのコストがかかる。そこで課題遂行者らはトラクター等の重機でけん引することで直管型の熱交換器を自動埋設する機械を開発した。

熱交換器と土壌との間に隙間がある場合、熱交換効率が極端に低下する。そのため、熱交換器を埋設する場合、周囲の土壌と熱交換器の密着性を確保するために砂をコンタクトマテリアルとして充填するのが一般的である。しかし、砂を入れながら熱交換器の管を土壌中に入れるのは、手間がかかる。また、砂の購入のためにも費用が必要である。コンタクトマテリアルを入れずに、かつ自動埋設することで効率的に直管型の熱交換器を埋設できれば、人件費や資材費等の熱交換器の設置に必要な費用を削減でき、地中熱ヒートポンプの農業利用が可能になると考えられる。しかし、コンタクトマテリアルを用いずに熱交換器を埋設しても土壌から十分な熱が取れるかについては不明な点が多い。

また、熱交換器の規模を決定するためには土壌中の熱の移動を考慮した数値シミュレーションが必要であると考えられる。水平型の地中熱ヒートポンプは浅層に埋設されることから、熱交換器のほとんどが飽和帯に位置する鉛直型の地中熱ヒートポンプとは異なり、空気と水が混在する不飽和帯に設置することが多い。不飽和帯においては土壌水分量の多少によって土壌の熱パラメータである熱伝導率と熱容量が変化することが知られており、これらの変動が数値シミュレーション結果に影響を与えることが懸念される。しかし、課題遂行者はこれらの値として圃場の平均的な値を用いても、計算結果が実測値をよく再現することを明らかにした(科研費基盤研究(C)、15K07672)ものの、農業利用を想定した長期的な数値シミュレーションにおいて、水平型の地中熱ヒートポンプ特有の不飽和帯のそれ以外の熱輸送プロセスや、数値シミュレーションで大きな誤差要因となりうる要素については、ほとんど明らかにされていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究課題では、以下のことを目的として研究を実施した。

(1) 水平型地中熱ヒートポンプの熱交換器が位置する不飽和帯における熱輸送を高精度で計算するために必要な熱輸送プロセスを解明する。また、数値シミュレーションにより得られた値と実測値を比較し、その違いの原因を考察することで、農業利用で想定される長期的な数値シミュレーションをする上で誤差要因となりうる要素を抽出する。

(2) 改良した数値シミュレーション手法を用いて、コンタクトマテリアルとして砂を充填した場合と、コンタクトマテリアルを用いない場合で土壌中の熱の移動に伴う熱交換器内の冷媒である不凍液の温度がどの程度異なるかを検討する。また、空洞ができて熱交換器と土壌の間に空洞ができた場合を想定して、どの程度まで熱交換器周辺の熱伝導率が低下しても、農業利用上問題がないかを検討する。

(3) 熱交換器の周囲に砂を充填した場合と、熱交換器周囲に砂を入れずに原位置の土壌を用いた試験区を設け、これらの試験区における熱交換器内の不凍液の温度を比較することで、コンタクトマテリアルを用いない場合の熱交換効率の低下の是非について検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 農研機構農村工学研究部門の試験圃場に、間口 5.4 m、奥行き 9.9 m のビニールパイプハウスを 2 棟設置した。従来通り熱交換器の周囲に砂を充填した直管型の熱交換器(以下、砂埋設直管型)と、砂の充填を省略し、原位置土壌である黒ボク土を埋め戻した直管型の熱交換器(以下、砂なし直管型)ならびにスリンキー型の熱交換器(以下、スリンキー型)を設置した。そ

それぞれのビニールハウスに 1.5 kW の水熱源のヒートポンプを設置し、1 棟目のヒートポンプには砂埋設直管型を、2 棟目のヒートポンプには砂なし直管型とスリンキー型を接続した。なお、2 棟目については、温室内に流路を切り替え可能な装置を設置し、目的に応じて砂なし直管型とスリンキー型の熱交換器を個別に使用できるようにした。温室と各熱交換器のレイアウトを図 1 に示す。

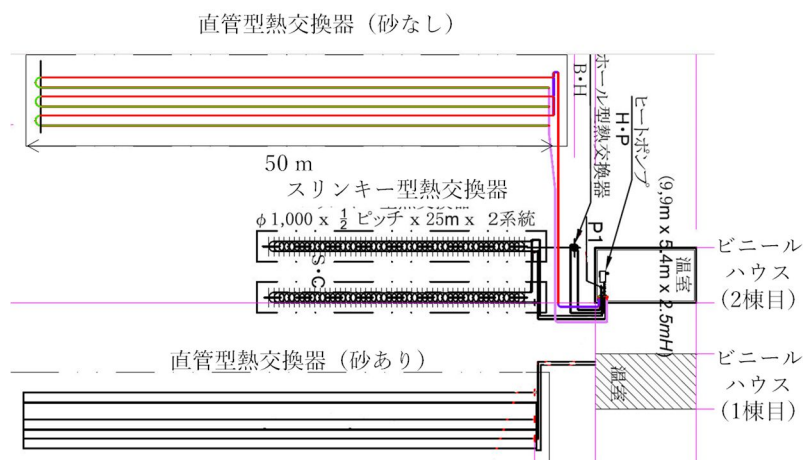


図 1 試験圃場におけるビニールハウスと熱交換器の配置

不凍液を冷媒として、熱交換器の中をポンプで循環させて、ヒートポンプ本体と土壌との間の熱交換を実施した。ヒートポンプから熱交換器への出入り口に白金抵抗温度計を設置し、不凍液の温度を測定した。また、熱交換器を設置した各試験区の中央地点において、熱交換器の直上と熱交換器と熱交換器の間地点に誘電率測定方式の土壌水分計を深さ 30, 50, 100, 150 cm に、熱電対を深さ 0, 5, 30, 50, 100, 150 cm に設置し、土壌水分量と地温の鉛直プロファイルを測定した。さらに、熱交換器の影響を受けない自然状態の地温プロファイルを測定するため、熱交換器を埋設した圃場と温室を挟んで反対側に位置する圃場に対照区を設置し、同様に土壌水分計と地温計を設置した。各試験区において、センサー設置時に土壌断面調査を実施し、各土層から 100 cm<sup>3</sup> 円筒サンプラーで未攪乱土を採取し、同時に攪乱土を採取した。未攪乱土は砂柱法と加圧板法で水分調整を実施し、ヒートプローブ法により各水分段階における熱伝導率と体積熱容量を測定した。また、攪乱土を用いて土粒子密度や土性の測定試験を実施した。

(2) 実験室で得られた熱伝導率と土壌水分状態（pF 値と土壌水分量）の関係と、試験圃場で観測された土壌水分量の測定結果から、試験圃場における平均的な熱伝導率と体積熱容量を特定した。これらの値を用いて、数値解析ソフトウェアの FEFLOW により、熱交換器内の不凍液と試験区における土壌内の熱の移動に関する 3 次元の数値シミュレーションを実施した。まず初めに、熱交換機を設置していない自然状態の試験区（対照区）について、地温の実測値とシミュレーションによる計算結果を比較し、推定結果の妥当性を評価した。次に、面積が小さく、単位面積当たりの採熱量が多いスリンキー型の熱交換器を埋設した試験区において、熱交換器から地中熱ヒートポンプに供給される不凍液の温度（出口温度）について、数値シミュレーションの計算結果と実測値を比較した。計算結果が実測値と一致しない場合は、その理由を考察し、計算結果が実測値と一致するように計算プロセスや土壌の熱的パラメータを変更した。

(3) 砂埋設直管型と砂なし直管型の熱交換器を用いて、冬にビニールハウスを暖房（暖房温度 8℃）し、各熱交換器の出口温度の測定結果を比較することで、砂の有無による採熱効率の違いを評価した。また、(2) で改良された数値シミュレーション手法を用いてシナリオ解析を実施し、自動埋設により隙間ができて熱交換器周辺の熱伝導率が極端に低下した場合の採放熱効率の低下度合いに関するシナリオ解析を実施した。また、埋設深度が熱交換効率に与える影響について、シナリオ解析を実施した。

#### 4. 研究成果

(1) 試験圃場の土壌水分量を考慮し、試験圃場において平均的と考えられる熱伝導率と体積熱容量を与えて、熱伝導の効果のみを考慮して熱交換器を埋設しない自然状態での地温の推移を計算したところ、熱交換器の影響を受けていない対照区で得られた地温の測定値と計算結果がほぼ一致した（図省略）。そこで、スリンキー型熱交換器を埋設した試験区について 3 次元の数値シミュレーションを実施し、熱交換器の出口温度を実測値と比較したところ、ヒートポンプが動いていない時にはおおむね計算結果は実測値と一致したが（図 2a）、特に冷房時に放熱することで熱交換器周囲の地温が高くなる夏に熱交換器の出口の不凍液の温度の計算結果が実測値よりも高い値を示した（図 2b）。熱伝導率と体積熱容量に関して感度解析を実施し、パラメータの調整を試みたが、これらのパラメータの補正では夏の冷房時の計算結果が実測値と一致することはなかった。

地温が高いときに温度勾配があると、不飽和土壌において高温側から低温側に水蒸気移動が発生して熱を輸送することから、熱伝導のみの場合と比較して見かけの熱伝導率が上昇することが知られている（新庄, 1977）。そこで、新庄（1977）が実験により求めた見かけの熱伝導率

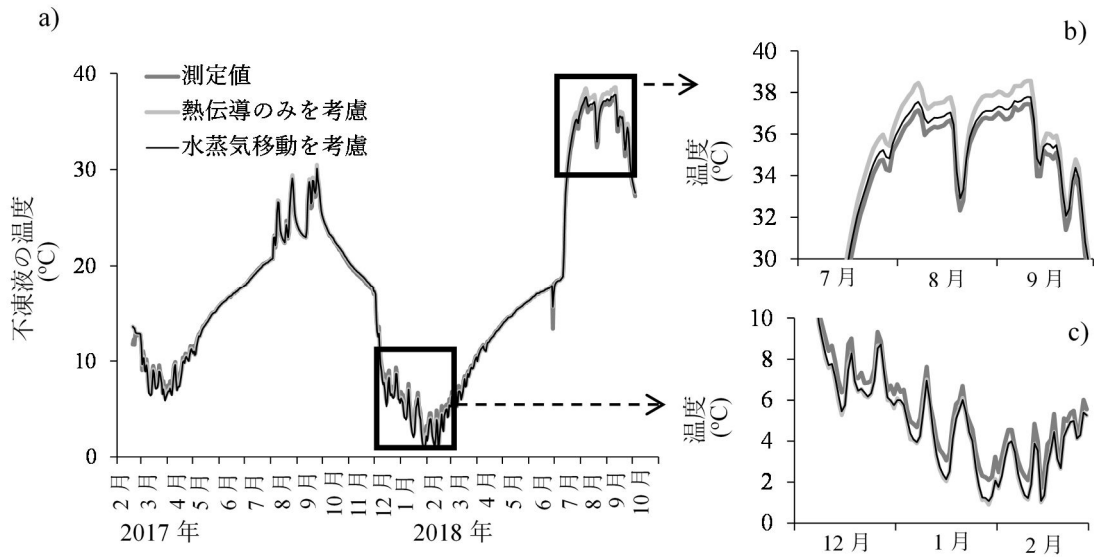


図2 スリンキー型熱交換器の出口の不凍液の温度の数値シミュレーションによる計算結果と実測値の比較 (b: 冷房時、c: 暖房時)

を決定するための土壌ごとのフィッティングパラメータについて、基本的な土壌物理性から導出する方法を考案し、試験圃場の基本的物理性のデータを用いてパラメータを計算した。得られたパラメータを用いて、新庄(1977)が提案した方法により水蒸気移動を考慮した見かけの熱伝導率と地温の関係式を求め、これを計算プロセスに組み込んで再計算したところ、冷房時の熱交換器出口の不凍液の温度の計算結果が実測値に近づいた(図2b)。このことから、開発した手法により土壌中の水蒸気移動による熱プロセスを考慮することで、良好に高温時の不飽和帯における熱輸送プロセスが再現できたことが確認された。

(2) 冬の暖房時においては、スリンキー型の熱交換器の出口における不凍液の温度の計算結果が実測値よりも低い値になり、特に不凍液の温度が低い時ほどその差が大きかった(図2c)。日中は日射によりビニールハウス内は高温になり、夜もハウス内を暖房することから、冬の暖房時には熱交換器やヒートポンプ内の不凍液の温度はビニールハウス内の温度よりも常に低温であると考えられる。実際、ビニールハウス内に設置した温度計と不凍液の温度を比較したところ、両者の間には日平均値で最大 10 程度の差が生じていた。この温度差と、温室内に露出している 1 m 程度の熱交換器の管の長さを元に、温室内で不凍液が受け取る 1 日あたりの熱量を試算したところ、1.8 MJ と計算された。この値は熱交換器内の不凍液の温度を 2.7 上昇させる熱量に相当することから、計算結果には冬の温室内における熱供給プロセスが含まれないことで、実測値よりも不凍液の温度が低くなったことが考えられた。

(3) 熱交換器の周囲に砂を入れて周囲の土壌と熱交換器との接触を確保した場合と、熱交換器を入れた後で原位置土壌をそのまま埋め戻した試験区について、暖房時の熱交換器出口の不凍液の温度を比較したところ、両者はほぼ同じ推移を示した(図3)。熱交換器周囲に充填した砂と、原位置の黒ボク土の熱伝導率を比較したところ、pF1.5 付近では砂の熱伝導率が黒ボク土の熱伝導率の 2 倍程度と大きい。pF 値の増加、すなわち土壌の乾燥に伴って砂の熱伝導率が急激に減少することから、水はけの良い黒ボク土では圃場含水量に相当すると考えられる pF2.0 付近(長谷川, 2000)では、砂の 0.77 W/mK に対し黒ボク土が 0.54 W/mK と、熱伝導率の値がかなり近くなった(図4a)。一方、黒ボク土の方が砂よりも水分を多く含

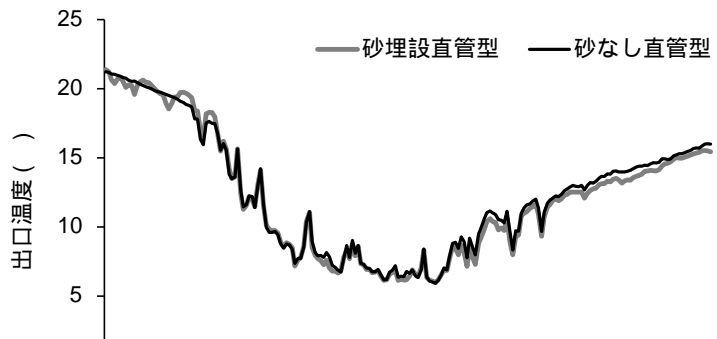


図3 熱交換器の周囲に砂を充填した場合と砂を用いずに原位置土壌のみを埋め戻した場合の冬の暖房時における熱交換器出口の不凍液の温度の比較

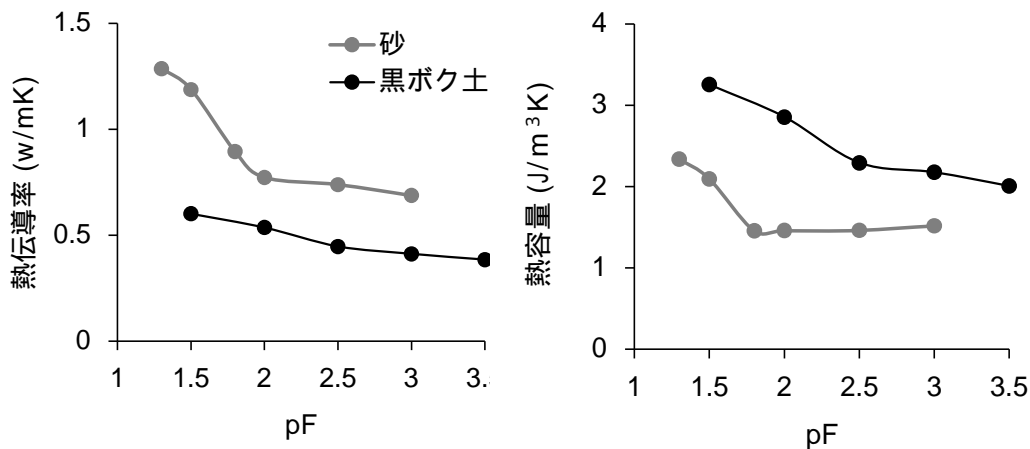


図4 試験圃場における砂と黒ボク土の土壤水分状態 (pF 値) と a) 熱伝導率、b) 体積熱容量の関係

むことから、体積熱容量は砂よりも黒ボク土の方が大きかった (図 4b)。熱伝導率が大きいほど採放熱には有利であることから、熱伝導率については砂を充填した方が熱交換に有利に働く。一方、体積熱容量が高いほど採放熱に有利であることから、体積熱容量の観点からは、黒ボク土の方が砂よりも熱交換効率を高める効果がある。これらのことから、結果的に砂でも黒ボク土でも採熱効率はそれほどかわらず、熱交換器内の不凍液の温度に明確な差が生じなかったと考えられる。

以上のことから、今回の試験圃場の黒ボク土のように土がよくほぐれるような土質の場合には、コンタクトマテリアルである砂を熱交換器の周囲に充填しなくても、原位置土壌を埋め戻すだけで、砂を充填した場合と同等の熱交換効率が確保できると考えられる。

(4) 熱交換器周囲の熱伝導率と体積熱容量が砂の場合と黒ボク土の場合で数値シミュレーションを実施し、熱交換器の出口の不凍液の温度を比較したところ、冷暖房時共に両者はほぼ一致した (図省略)。このことから、黒ボク土のように再度性が良く、ある程度の密着性が確保できると考えられる土壌については、原位置土壌を埋設するだけで十分な熱交換効率が期待できると考えられる。

熱交換器を埋設する際に空洞ができて、熱交換器と周辺土壌との熱交換が阻害された場合を想定し、熱交換器周囲の熱伝導率が原位置土壌の 1/2 程度の 0.3 W/mK と極端に低いときの熱交換器出口の不凍液の温度を計算し、熱交換器周囲に砂を充填した従来の方法で埋設した場合の計算結果と比較したところ、冷房時には最大 1

程度の違いが認められた。この違いは地中熱ヒートポンプの稼働効率に影響を与えるものの、例えばスリンキー型と直管型といった熱交換器の形状や熱交換器の設置面積の影響に比べると小さく、埋設時にできる空洞等の原因により熱交換器周囲の土壌の熱伝導率が多少低下しても、その影響がシステム全体の採熱効率に与える影響は限定的であることが示唆される。

同様に、深さ 1.5 m と深さ 1 m と直管型熱交換器の埋設深度を変化させて数値シミュレーションをしたところ、夏の暖房時において両者の差は最大で 1.5 程度であった (図省略)。熱交換器を浅く埋設することで採放熱効率は落ちるものの、熱交換器の形状や設置面積による温度差と比べると小さく、自動埋設により大幅に埋設コストを削減できるのであれば、許容できる範囲内であると考えられる。

< 引用文献 >

- 長谷川周一 (2000): 黒ボク土畑の圃場容水量の実態, 土壌の物理性 83, 41-46
- 新庄彬 (1977): 温度コウ配下における土壌内の水蒸気移動について, 農業土木学会論文集 69, 8-12

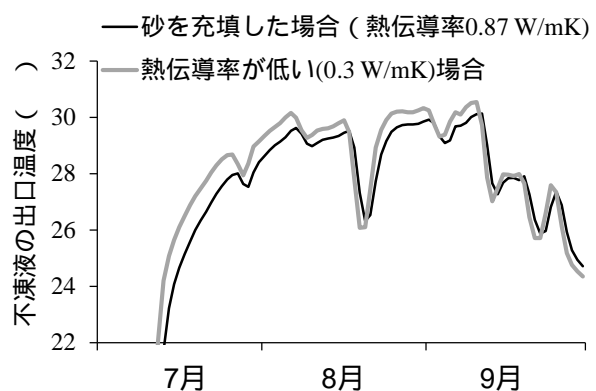


図5 熱交換器周囲の熱伝導率が極端に低い場合と熱交換器の周囲に砂を充填した場合の夏の冷房時における深さ 1.5 m に埋設した直管型熱交換器の出口温度の計算結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岩田幸良, 山本芳樹, 草間俊樹, 奥島里美, 亀山幸司, 宮本輝仁
2. 発表標題 Thermal regime in unsaturated soil around the heat exchanger for horizontal geothermal heat pump system: A field observation and numerical simulation
3. 学会等名 Soil Science Society of America Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩田幸良, 亀山幸司, 宮本輝仁, 稲葉智
2. 発表標題 加圧板法・蒸発法・鏡面露点法によるヤシガラ培地と土壤の水分特性曲線の比較
3. 学会等名 土壤物理学会シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 土壌中の熱伝導率の評価方法、評価装置、評価プログラム地中熱ヒートポンプシステムの設置支援方法	発明者 岩田幸良, 山本芳樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022-75299	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 芳樹  (Yamamoto Yoshiki)  (60463577)	日本工営株式会社中央研究所・総合技術開発第2部・課長   (92103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------