

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07035

研究課題名(和文) ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの熱・物質輸送現象の解明

研究課題名(英文) Clarification of heat and mass transport phenomena of heat cluster type geothermal heat pump

研究代表者

菊田 和重 (Kikuta, Kazushige)

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：90214741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地下水を積極的に利用するヒートクラスター型地中熱ヒートポンプは従来の土壌熱を主として利用するボアホール型と比較して4～5倍の採熱が可能であるが、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの普及のためには地下水の移動を含む土壌中の複雑な熱輸送を解明する必要がある。そこで本研究は、実機による試験結果や土壌や地下水のモデル実験を元に、この複雑な系の数値解析モデルの開発を行うことで、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプにおける熱・物質輸送現象の一部を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下水を積極的に利用するヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの複雑な熱移動現象の解明のために実機による試験ならびに土壌中の地下水の移動に関するモデル実験を行った。それらの結果を元に数値計算モデルの開発を行い熱移動現象の解明を試みた。

このような試みはこれまでになされておらず、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの複雑な熱移動現象の解明により、このタイプのヒートポンプの設計指針を与えることができれば地中熱ヒートポンプの普及に拍車がかかる。

研究成果の概要(英文)：The heat-cluster type geothermal heat pump that positively uses groundwater can collect 4 to 5 times as much heat as the conventional bore-hole type that mainly uses soil heat.

It is necessary to elucidate the complicated heat transport in soil including the movement of groundwater for the diffusion. Therefore, in this research, by developing the numerical analysis model of this complex system based on the test results by the actual equipment and the model experiment of soil and groundwater, a part of the heat and mass transport phenomena in the heat-cluster type geothermal heat pump could be revealed.

研究分野：熱エネルギー変換

キーワード：ヒートポンプ 地中熱 ヒートクラスター 再生可能エネルギー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

寒冷地では、冬期間に暖房で用いるエネルギー量は住宅で消費される全エネルギーの半分を占めており、給湯を含めると 70%程度にもなる。暖房・給湯には灯油やガスを燃料とするファンヒーターやボイラなどが使用されるが、ヒートポンプを用いた方が、エネルギーの消費や CO<sub>2</sub> の排出量を大幅に削減できる。しかしながら、低外気温時の暖房能力の低下や室外機に付着する霜を除去する際に暖房運転が停止することが原因で、寒冷地では空気熱源ヒートポンプは普及していない。

そのため、近年では地中熱ヒートポンプの有効利用が進められている。地中熱ヒートポンプは U チューブなどを地中に設置し、地中から採熱を行うヒートポンプ(図 1 左参照)であり、地中の温度が外気温によらず、一年を通してほぼ一定(10 ~ 15 )であることから、寒冷地での利用に適している。しかしながら、通常埋設のボアホール型地中熱ヒートポンプは、地中に直径 100 mm 程度の孔を 100 m ~ 150 m 程度掘削し、U チューブを地中に設置するため、掘削費用などの導入コストが非常に高くなり、国内の導入件数が年間 100 件程度にとどまっている。また、世界最大の導入実績のあるアメリカのエネルギー省の報告書 (Ground-Source Heat Pumps: Overview of Market Status, Barriers to Adoption, and Options for Overcoming Barriers, Final Reports, U. S. Department of Energy, 2009.)においても、導入コストが大きな普及阻害要因と指摘されている。

そこで、本研究では地下水を積極的に用いるヒートクラスター型地中熱ヒートポンプに注目した。今までも地下水は利用されてきたが、U チューブの一部が地下水と接触しており、接触した部分では地下水から採熱を行い、他の部分では地中からの採熱を行っているだけで、積極的に地下水を利用するには至っていない。一方で、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプ(図 1 右参照)は、U チューブの周りに直径 150 mm 程度の鉄管に囲まれた井戸が存在する構造となっており、土壌からではなく、U チューブの周りの井戸水より採熱を行う。鉄管には多数のスリットが存在し、パージポンプで井戸水を汲み上げることで、スリットから地下水が井戸に流れ込み、汲み上げた井戸水は地中に再び戻す仕組みとなっている。また、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプはボアホール型に比べ、採熱量が非常に大きく、掘削深さも 50 m 程度で済むことから導入コストを大幅に削減できる。また、既存の井戸を用いることにより、掘削費用をより抑えることができる。

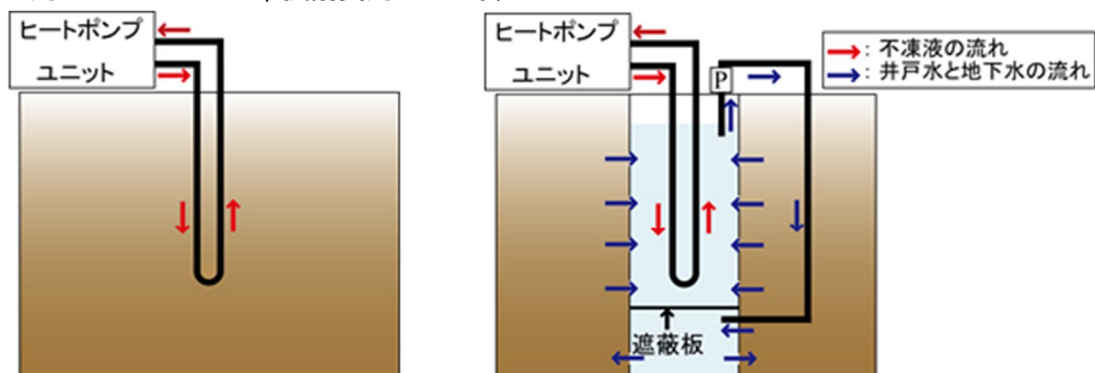


Fig. 1 地中熱ヒートポンプ (左: ボアホール型, 右: ヒートクラスター型)

### 2. 研究の目的

(1) ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの導入例が少なく、解明されていない点も多い。一つはヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの採熱量がボアホール型に比べて 4~5 倍にもなるかという点であり、もう一つはパージポンプの最適な運転条件が明らかにされていない点である。現在は常にパージポンプを作動させており、パージポンプに使用する電力は非常に大きいため、COP は高いもののパージポンプを含めたシステム全体の SCOP が大幅に低下していることから、パージポンプの最適な運転条件の決定は非常に重要である。上記の問題を解決するために最も重要な課題は、土壌中の複雑な熱輸送(土壌の熱伝導による熱輸送 + 地下水の移流による熱輸送による複合的な熱輸送)を把握する点にあると考えた。そこで本研究では、数値シミュレーションと実機を用いた実証実験により、土壌中の複雑な熱輸送を明らかにすることを目的とした。本研究では土壌の熱伝導および地下水の流れ、井戸水の流れを含んだ地中熱ヒートポンプの数値解析モデルを開発する。また、簡易的な実験モデルと苫小牧高専内に建設した実験住宅を用いて地中熱ヒートポンプの性能評価試験を行い、数値解析モデルの検証を行う。

(2) 本研究では、グラフィックボードを用いた大規模並列計算による三次元数値解析コー

ドを開発し、土壌の熱伝導と地下水の流れによる熱輸送量を定量的に評価することを目的とする。パージポンプの流量が多い場合には大量の井戸水を汲み上げるため、地下水の移流による熱輸送が支配的であると考えられるが、パージポンプが稼働しない場合あるいはパージポンプの流量が少ない場合には、土壌の熱伝導による熱輸送が支配的であると考えられる。そのため、本研究では、パージポンプの流量を変化させ、数値解析モデルにより、土壌の熱伝導による熱輸送量と地下水の移流による熱輸送を定量的に評価する。さらに、レイノルズ数やプラントル数、地下水の流れを表すダルシー数等の無次元数で記述できる土壌の熱輸送量を予測できるモデル式を提案する。モデル式の提案により、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの大きな設計指針を与える。

### 3. 研究の方法

#### (1) 土壌の熱伝導および地下水の流れ、井戸水の流れを含んだ地中熱ヒートポンプの三次元数値解析モデルの開発

地中熱ヒートポンプでは、Uチューブの直径が 26 mm に対して地中の深さは 50 m 程度もあるため、パーソナルコンピューターのレベルでは計算を行うことは非常に困難であり、数値解析コードの三次元化には大規模かつ超高速の並列計算が必要となる。そこで、新たな計算手法を導入し、さらに、GPU(グラフィックボード)による並列計算を行うことを考えている。

一般的な CPU では、計算コアは最大 22 コアであるのに対して、GPU では、計算コアは 2560 と CPU のおよそ 100 倍の計算コアを有する。しかしながら、GPU の固有のメモリは 8 GB 程度であり、大規模な計算を行うためには、CPU のメインメモリにデータを逐一転送する必要がある。そのため、計算コアの計算速度に対して転送速度が非常に遅いためメモリを 8 GB 以上用いる大規模な計算を行う際には計算速度がデータの転送速度に依存する結果となっている。そこで、近年開発された最先端の CPU と GPU の統一メモリによる大規模並列計算コードの開発を行う(図 2,3 参照)。統一メモリは、CPU のメインメモリに CPU と GPU がアクセスすることが可能であり、CPU と GPU で共通のデータを保持できるため、データの転送をほとんど行う必要がない。さらに、今までに非常に困難であった複数の GPU を用いた並列計算も統一メモリにより比較的容易に行うことが可能となる。さらに、複数の GPU を用いた超大規模並列計算により、スパコンを必要とするような計算を数十万円程度と非常に安価な計算機で行うことが可能となる。統一メモリを用いた複数の GPU による大規模並列計算コードを開発することで、三次元地中熱ヒートポンプの計算モデル化ならびに数値解析を行う。

#### (2) 相似性を満足するダウンサイズの実験装置(簡易実験モデル)の製作

複雑な熱・物質輸送現象の解明および数値解析モデルの開発のために、ダウンサイズの実験装置を製作する。レイノルズ数やプラントル数、ダルシー数などの無次元数から相似性の検証を行い、それを満足するように各寸法ならびに流量等を決定する。装置は可視化可能なようにアクリル板で囲み、質の異なる土壌のほか空隙率が明らかになっている多孔質体を装填する。数値解析モデルの検証のためには、土壌および多孔質体内の水の輸送の可視化および定量化は必須であり様々な手法を試みる計画であるが、三次元の流動現象を把握するために光学系やディテクターを自由に配置できるように工夫する。熱輸送に関しては、熱電対による温度計測のほか流動場を乱さないように放射温度計での計測を行う。

#### (3) 実験ハウスによるヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの性能試験

ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの性能試験は、苫小牧高専に建設された実験住宅を用いて行う。実機は既に設置されており、10 m ごとの地中の温度計測、井戸水の流量計測などが行えるようになっている。パージポンプの運転条件を変えて井戸水や還元水の流量を変化させた際の性能試験を行う。

#### (4) 簡易実験モデルの実験結果との比較による数値解析モデルの検証

開発した数値解析モデルの検証を簡易実験モデルと比較することで行う。数値解析モデルにより求めた地下水の流速および温度を簡易実験モデルにより得られた流速や温度と比較する。結果をもとに数値解析モデルの改良を繰り返し行う。

#### (5) 実機性能試験ならびに設計指針の確立

数値解析モデルにより明らかにした最適なパージポンプの運転条件をもとに、実機による性能試験を繰り返し行う。また、土壌の質や地下水の流量により異なると考えられるヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの設計指針を明確にする。

### 4. 研究成果

複雑な熱・物質輸送現象の解明および数値解析モデルの開発のために、ダウンサイズの実験装置の製作を行った。レイノルズ数やプラントル数、ダルシー数などの無次元数による相似性の検証を行い、それを満足するように各寸法ならびに流量等の決定を行った。装置は可視化可能なようにアクリル板で囲み、空隙率が明らかになっている多孔質体を装填し、地下水を模擬した流れの観察を可能にした。その結果、井戸内への地下水の流入の詳細な可視化や温度計測が可能と

なり、複雑な流動をともなう熱移動現象の解明に近づきつつある。この熱移動に関しては局所の温度計測から全体での温度場の推定に発展させることができた。

また、ヒートクラスター型地中熱ヒートポンプの性能試験は、苫小牧高専に建設した実験住宅を用いて行った。実機は既に設置されており、10 mごとの地中の温度計測、井戸水の流量計測が可能である。パーシポンプの運転条件を変えて井戸水や還元水の流量を変化させた際の性能試験を行った。様々な負荷パターンによるデータを定常的に取得しており、数値計算のモデル化を行なう際の重要な基礎データとなっている（下図参照）。

数値計算によるモデル化は、汎用のシミュレーションコードを用いてモデル化ならびにその検証を行なっているほか、GPUによる並列化を進め汎用のシミュレーションコードでは不可能な大規模計算が可能となるように開発を行なっている。本モデル化であるが、GPUによる並列化が概ね終了したため大規模計算による検証を引き続き行っている状況にある。

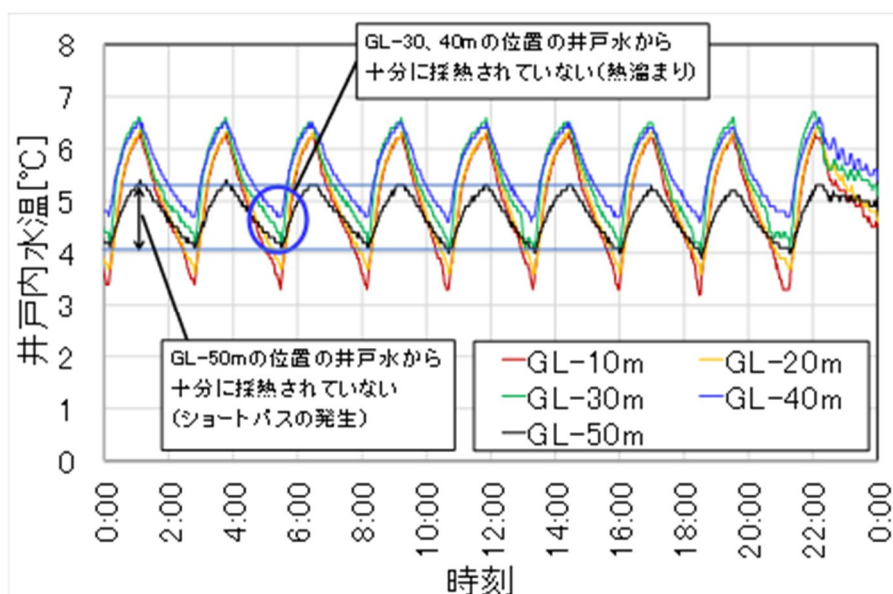
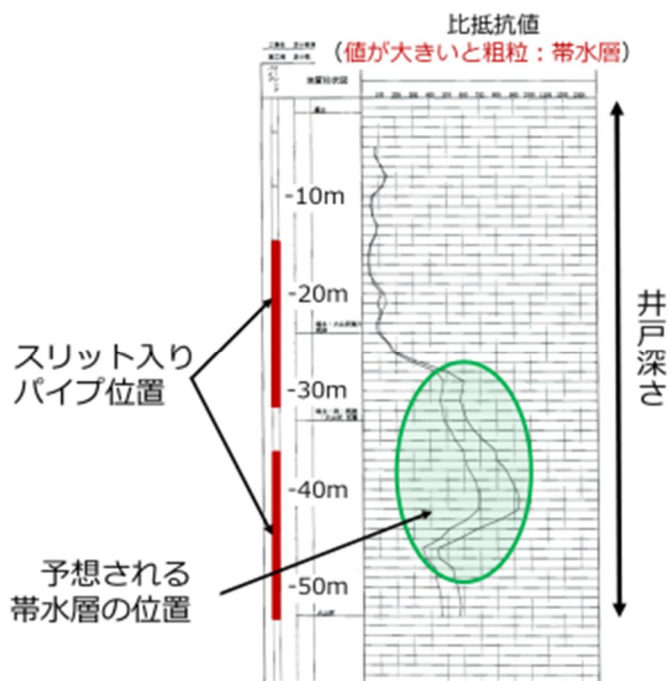


図 苫小牧高等工業専門学校における掘削時のさく井記録とヒートクラスター式地中熱交換器による採熱実験データ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 立蔵祐樹, 菊田和重, 小島洋一郎
2. 発表標題 太陽熱と地中熱を利用した熱供給システムに関する数値シミュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会環境工学総合シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究協力者	立蔵 祐樹  (TATEKURA Yuuki)		