

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760692

研究課題名(和文) 地中熱利用技術開発のための多孔質媒体中の水・熱輸送モデルの高度化に関する研究

研究課題名(英文) Development of a numerical model for fluid flow and heat transport through permeable porous media for shallow geothermal utilization

研究代表者

吉岡 真弓 (Yoshioka, Mayumi)

独立行政法人産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター・研究員

研究者番号：10575492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：多様化する地中熱利用技術の普及・発展のためには、地下浅層のような不飽和状態の土壤中の流体流動・熱輸送プロセスを表現できる数値シミュレーションモデルが必要である。本研究では、特に高透水性多孔質媒体を対象とした流体流動・熱輸送モデルの開発を目的とした室内での浸透実験および数値モデルの開発を行った。その結果、高透水性多孔質体中の流体流動であっても多相流モデルを適用し再現することができた。また、固・液(水)・気相それぞれの温度を個別に追跡できる数値モデルを提案した。提案した数値モデルを用いることで実験結果を概ね再現することができた。

研究成果の概要(英文)：A numerical simulation model for being able to estimate processes of fluid flow and thermal transport in unsaturated and high permeable porous media is required in order to develop the technique of shallow geothermal energy utilization. In this study, the infiltration experiments using 1 dimensional column and developing the numerical simulation model were carried out. As the results, the high-velocity flow in the permeable porous media was simulated by the model using multi-phases system. In addition, in the model the temperature of soil, liquid (water) and air were able to be simulated individually and the calculated results were agreement with the experimental results.

研究分野：地下水学、地中熱利用

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：数値モデリング 多孔質体 熱輸送 流体流動 多相流モデル

1. 研究開始当初の背景

地中熱利用 (Ground-source heat pump : GSHP) システムとは、地下浅層から深度 100m 程度までの熱環境を、ヒートポンプの (冷) 熱源として冷暖房や給湯に利用するシステムである。GSHP システムは一般的な (空気熱源) エアコンと比較して省エネルギー性が高いことから、技術開発や普及促進に近年注目が集まっている。

地中熱利用の分野ではヒートポンプの改良等の機械技術の発展に加え、地盤との熱交換効率の向上に繋がるシステムの開発にも注力されている。浸透枘と組み合わせることで地下涵養を促すと共に熱交換効率を向上させるシステム (吉岡他, 2011) や熱交換井の充填材として粒径の大きな砂利を用いる方法、また地下の比較的浅層 (2m 程度) に熱交換パイプを埋設する水平型地中熱利用システムなども実用化また研究開発されている。これらのシステムの設計のためには、浸透枘や砂利、また不飽和領域である浅層土壌といった比較的透水性の高い多孔質体中の流体流動や温度変化の大きな環境下での熱輸送評価が求められる。一般に、地下の多孔質体の流体流動はダルシー則で表され、熱輸送については固相と気相、液 (水) 相が瞬時に熱平衡に達するという仮定の元、土壌中の水飽和度の関数として熱容量や熱伝導率を与え、流体流動と熱輸送がモデル化されてきた (例えば、Diersh, 2008)。これは、これまで対象とされてきた地下の温度環境が比較的長時間のスケールであったこと、一般的な土壌では固相粒子が非常に小さく (1mm 以下)、固相と気液相が瞬時に熱平衡になるという仮定が成立したためであると考えられる。しかし、前述したように近年の省エネルギーシステムとしての地中熱利用技術を発展させるためには、高透水性媒体中における不飽和状態の流体流動・熱輸送プロセスの数値シミュレーションモデルが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、高透水性媒体中を流れる流体 (ここでは水) の流体流動およびそれに伴う熱輸送を、固相・液相・気相それぞれの温度を個別に追跡できる数値モデルの開発を目的とする。申請者はこれまでに大気・地下連成系・水熱環境モデル (Atmosphere - Subsurface Coupled Hydrothermal Environment Model: ASCHYTEM) を開発した (吉岡・登坂, 2010)。この数値モデルの特徴の 1 つは、大気と地下を完全連成させ、地下の固相・液相・気相の温度を個別に追跡する物理モデルを有していることである。しかし、本モデルにおいて、高透水性多孔質体を対象とした熱輸送プロセスの検証には至っていない。そこで、本研究では、円筒カラムを用いた浸透・熱輸送に関する室内実験を実施すると共に、モデルの改良を行い、高透水性多孔質体についても適用可能な地下にお

ける流体流動・熱輸送モデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

研究手法として、1) 円筒カラムを用いた浸透・熱輸送実験、2) 実験結果をもとにした数値シミュレーションモデルの開発、の 2 つのフローで実施した。それぞれについて概要を述べる。

(1) 円筒カラムを用いた浸透・熱輸送実験

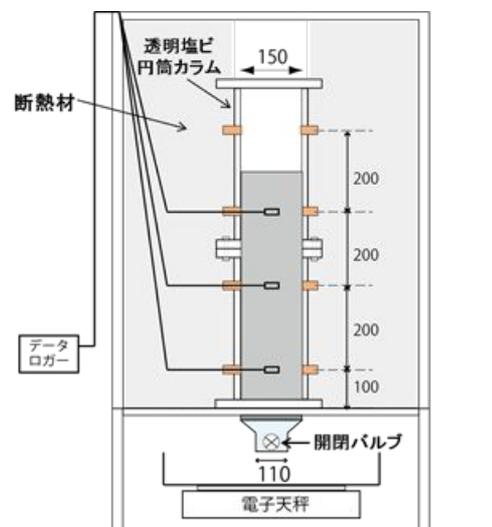
実験装置の構築

実験に用いたカラム装置を図 1 に示す。直径 15cm、高さ 40cm の透明塩ビのカラムを 2 つ接続し、各塩ビカラムには温度センサーを挿入するためのコネクタが取り付けられている。カラムはスタンドにボルトで固定できるようになっており、スタンドの下部にはバルブ付きの漏斗が固定されている。漏斗の下部には電子天秤と水受け用のコンテナが設置されており、排水量の変化を電子天秤で測定した。カラムが設置されているスタンドの周囲は、アクリル板でおおわれており、カラムとアクリル板の間は断熱材を充填している。

温度センサーには熱電対を使用し、データロガー (測定精度 ± 0.1) によりデータの記録を行った。センサーはカラムの下部から 10cm、30cm、50cm の各高の地点に、カラム中央に感温部が来るように設置した。また、カラム下部の排水口にもセンサーを取り付け、排水温度の変化も測定した。さらに、カラム上部および下部にもセンサーを設置し実験時の室内温度の変化についても計測した。

排水量の測定では、カラム下部の漏斗からの排水量変化を電子天秤で測定し、PC に記録できるようにしている。測定間隔は 1 秒とした。

カラム内には、直径 3mm のガラスビーズ (ソーダガラス、密度 $2.59 \times 10^3 \text{kg/m}^3$) を高さ 60cm まで充填した。充填したガラスビーズの総質



[単位: mm]

図 1 実験装置の概要

量と充填部分の体積から推定された間隙率は0.37であった。

実験方法

カラム内に充填させた多孔質媒体の絶対浸透率（飽和透水係数）を推定するため、まず、飽和流の測定を行った。試料の下部から高さ78cm（多孔質体の上部からは18cmの高さ）まで水をゆっくりと注入した。この初期状態から一度にバルブを解放したときの排水量の変化および水面の低下速度を測定することで、絶対浸透率を推定した。水位変化についてはビデオカメラにより測定した。

次に、不飽和状態における水の浸透とそれに伴う温度変化プロセスについて測定を行った。先述の飽和流れの実験から、自然に排水が生じなくなった状態を初期状態とした。カラム装置全体は、エアコンで一定状態に保った室内に1日以上置き、装置自体に大きな温度差が生じないようにしている。実験では、カラム上部から約500mlの温水を繰り返し注入し、排水量の変化およびカラム内の温度変化の測定を行った。注入は、実験開始時（0秒後）、150秒後、300秒後に行った。実験は2ケース行い、ケース1では40の温水を、ケース2では50の温水を用いた。温水は、注入直前まで恒温槽によって一定温度に保たれている。ケース1、2における注入水の各質量を表1に示す。

また、ケース3として、カラム上部から温水を連続滴下したときのカラム内の温度変化および排水量変化を測定した。実験前に測定した滴下量は約 $8.5 \times 10^{-3} \text{kg/s}$ であり、180秒間の連続的な滴下を行った。

(2) 数値シミュレーションモデルの改良

既存の地下における流体流動・熱輸送に関する数値モデルの多くは、地下の固液気相が瞬時に熱平衡に達するものと仮定し、多孔質媒体全体としての熱物性を取扱うものがほとんどである。しかし、透水性が高い（粒径が大きい）場合には流体流動も速やかに生じ、固液気相が熱平衡に達しないケースもありうる。そのような媒体の温度変化を計算するためには、各相の熱輸送プロセスを個別に追跡することが必要になってくる。各相温度を個別に追跡する数値モデルは、高透水性の多孔質体だけでなく、亀裂性の岩盤中の熱輸送プロセスにも応用できるものと考えられる。

ここでは、吉岡・登坂（2010）によって構築された水・熱輸送モデル（ASCHYTEM）を改良すると共に、本実験結果に適用することで多相流モデルにおける熱輸送プロセスの数値モデル化を行った。

モデルの概要

本モデルでは、大気 - 地下練成水熱輸送モデルでは、固・液・気3相、2相流体2成分系を取り扱う。ただし、水蒸気についても個別に追跡するため、3成分系と同様の方程式系となる。求める未知数は、気相圧力 P_a 、水

飽和度 S_w 、比湿（水蒸気） q 、固相温度 T_s 、気相温度 T_a 、水（液）相温度 T_w の6つである。基礎方程式等の詳細については吉岡・登坂（2010）を参照されたい。ここでは、本研究で新たに改良した相間の熱輸送について説明する。

固液気相間の熱輸送に関する物理モデル

本モデルでは、地下の固相（土質粒子、岩石等）、水相、気相それぞれの熱輸送プロセスを、同相間の熱伝導、異相間の熱伝達、水・空気の移流による熱輸送を考慮して追跡する。図2は、不飽和状態における土壤中の固・液・気相間の熱輸送関係の概念図を表したものである。水相は表面張力により固相である粒子の周りを取り囲むように存在していると考えられ、そのごく薄い水相を介して気相は熱交換を行っていると考えられる。相 $p1$ と相 $p2$ が接しており、各相の温度が異なる場合、接触面付近における相間の熱伝達量 F は次のように表現する。

$$F_{p1 \rightarrow p2} = \alpha_{p1,p2} (T_{p1} - T_{p2}) C_{p1,p2} \frac{1}{\Delta V} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_{p1,p2}$: $p1$ 相、 $p2$ 相間の平均熱伝達率 $[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ 、 $C_{p1,p2}$: 相 $p1$ と相 $p2$ の総接触面積 $[\text{m}^2]$ である。図2に示すように、実質的な熱輸送は、固相 - 液相間および液相 - 気相間で行われると考える。この時、固相 - 液相間の熱輸送における接触面積 $C_{s,w}$ は、残留飽和率以上であれば、最大となり、粒子の総表面積に相当する値($C_{s,all}$)で与えるものとする。気相と水相の接触面積については、多孔質体中の流路をチャンネルの集合体と仮定し、次の式で与えた。

$$C_{a,w} = C_{s,all} \sqrt{1 - S_w} \quad (2)$$

ここで、 S_w : 水飽和度[-]である。

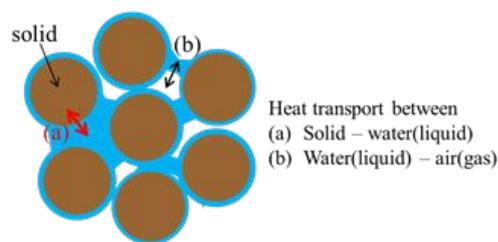


図2 固液気相間の熱交換の概念図

再現計算に用いたパラメータ

(1)で得られた実験結果に対し、で述べた改良型モデルを用いて再現計算を行った。計算格子は、多孔質体部分（長さ60cm）を20層に分割し（1層の厚さ：0.03m）、1次元の計算を実施した。多孔質体上部には、厚さ1mの大気層を設定している。計算に用いた熱・水理物性を表1に示す。また、表2として計算の初期状態を示す。

表1 計算に用いた熱・水理物性

絶対浸透率	$2.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	固相密度	2590 kg/m^3
間隙率	0.37	固相比熱	750 J/kgK
残留飽和率	0.01	固相熱伝導率	0.74 W/mK

表2 各状態量の初期状態

圧力	静水圧分布	固相温度	20.0
飽和度	0.02	気相温度	20.0
水蒸気量	0.014 kg/kg	水相温度	20.0

ここでは、注入量は最上部の大気層中の飽和度として表現し、注入時には瞬間的に注水量に応じた飽和度を与えることで表現している。

また、表1で示した絶対浸透率は、飽和流れにおける浸透実験から求めた。実験では、カラム内の水位変化のビデオ測定により、排水量変化のうち開始時から7秒までの間は多孔質体上部よりも上に水面があることから、飽和状態の流れが生じていたことになる。そのため、この期間の排水量から水位変化を換算し、下記の変水位試験の式を用いて絶対浸透率を推定した。

$$\ln h = -\frac{k}{L}t + \ln h_0 \quad (3)$$

$$k = \rho g K / \mu \quad (4)$$

ここで、 h : 水位[m]、 k : 透水係数[m/s]、 L : 長さ[m]、 t : 時間[s]、 h_0 : 初期水位[m]、 K : 浸透率[m²]、 ρ : 密度[kg/m³]、 μ : 粘性係数[Pa・s]である。式(3)より得られた $\ln h$ - 時間のグラフの傾きから透水係数を求めることができ、本実験で用いた多孔質媒体の飽和透水係数は、0.029m/s (絶対浸透率で $2.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) であった。この値は、粒径の揃った礫層よりも大きな値と言える。

4. 研究成果

ここでは、実験結果と計算結果を比較し、モデルの妥当性の検証および課題について考察する。紙面の都合上、ケース1について詳細を述べる。

流体流動に関する結果

図3はケース1における実験結果および計算結果それぞれの排水量変化と温度変化を示す。排水量変化については、計算結果は実験結果をよく再現できていると考えられる(図3(a))。ただし、実験での排水量変化の特徴として、各排水を行った直後(1~2秒後)に見られるわずかな排水が挙げられる。一方、排水温度については、注入直後に温度が変化する現象が見られないことから、カラム上部からの急な水の浸透に伴う間隙中の気相(空気)の移動により、間隙中に残留していた可動水が下方へ押し出されたものと考えられる。

本実験では、多孔質体の粒径が大きく間隙

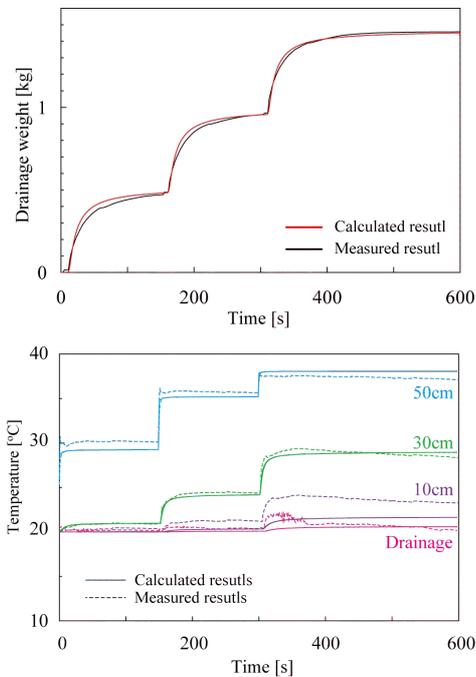


図3 (a)排水量変化(上) (b)温度変化(下)の実験結果と計算結果の比較。

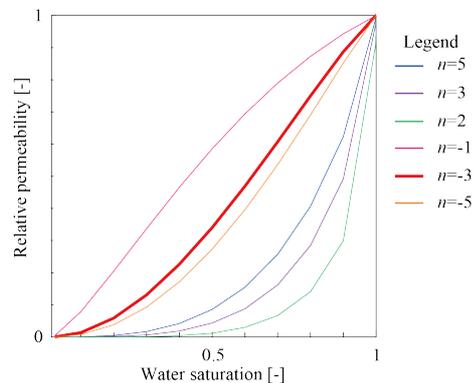


図4 水相の相対浸透率と飽和度の関係。

も大きいことから、毛管圧力の影響は小さいと考えられ、毛管圧力は水飽和度に関わらず一定であると仮定した。本計算では、van Genuchtenにより提案された式(van Genuchten, 1980)を用いており、図4では、その経験的パラメータの1つである n を様々な与えた場合の水相の相対浸透率も示している。本来、van Genuchtenの式は、水分特性曲線と相対浸透率曲線を同一のパラメータで扱えるところに特徴がある。そのため、今回対象としたような毛管圧力の影響の微小な試料では不飽和特性を van Genuchtenの式によって表現できるとは言い難い。しかし、相対浸透率曲線を求める上で、この式によって求めた曲線を利用できることは数値解析を行う上で非常に便利である。ここでは、経験的パラメータである n を用いて、実験結果に適應する係数を求めた。その結果、 $n=-3$ を与えたときに、図3に示すような排水量変化の計算結果を得ることができた。このとき、水相の相対浸透率は、水飽和度と直線的な関係であることが示された。一方、実験結果で得られた、注水直後の排水量の増加までの再

現には至っておらず、気相の相対浸透率については今後の課題と言える。

温度変化に関する結果

図3(b)では、各深度における温度変化の実験結果および計算結果を示している。50cm、30cmでは、各注水による温度変化をよく再現できていると言える。しかし、10cmおよび排水温度については、3回目の排水後の温度変化に計算と実験の差が大きく表れている。実験結果に見られた、3回目の注水の後、排水温度が上昇したのちに減少しているが、この現象は排水がほぼ終了したためであると考えられる。

この計算に用いた係数 α_{sw} , α_{aw} は、それぞれ $1.5e4$ および $5.0e2$ である。これらの値は、球体の熱伝達係数の経験式より推定した値である。図5は、係数 α_{sw} , α_{aw} を変化させた場

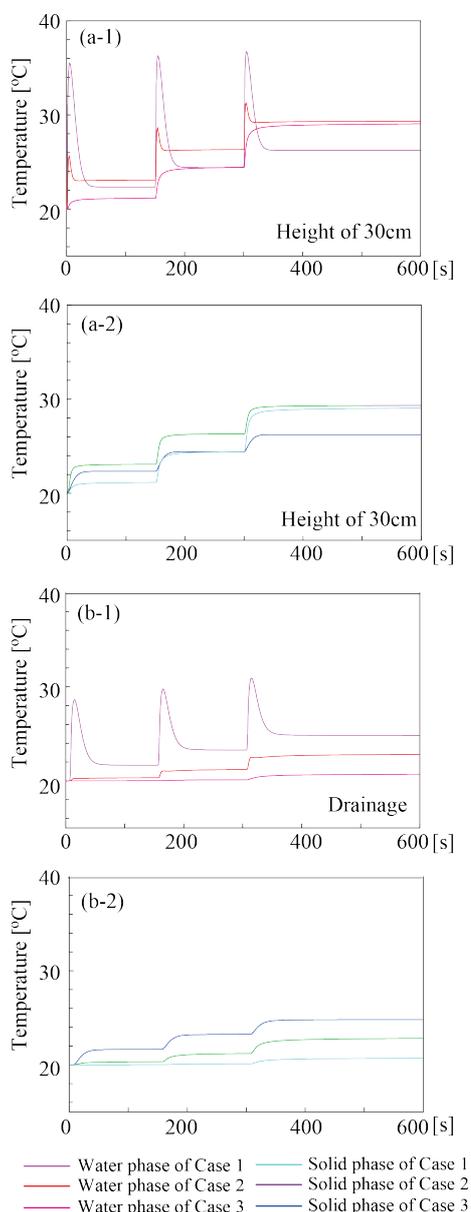


図5 係数の違いによる計算結果の違い。(a)はカラム底部から30cmの高さの地点、(b)はカラム最下部(排水)での温度。

合の計算結果の違いを示したものである。各計算に用いた係数を表3に示す。

表3 図5の計算に用いた係数

	α_{sw}	α_{aw}
Case1	1.0e2	1.0e2
Case2	1.0e3	1.0e3
Case3	1.0e4	1.0e4

これらの図より、 α_{sw} , α_{aw} が大きい場合、各相がほぼすぐに熱的平衡に達するため、各相の温度が同一に表される。一方、値が小さい場合、水相の熱が十分に固相に伝達されないため、固相の温度が十分に上昇せず、一方、水相は高温を保ったまま、排水されることになり、系全体の温度上昇が抑えられる結果となった。

本モデルの妥当性については、今後も様々な粒径のサンプルを用いて検証していく予定であるが、今回のような高透水性媒体においては適用できる可能性が示されたと考えられる。一方、図3で見られる高さ10cm地点での実験結果と計算結果の違いについては解明できておらず、今後検討が必要である。

本成果については近いうちに積極的に発表していく予定である。

<参考文献>

吉岡真弓, 笹田政克, 内田洋平, 高杉真司, 地中熱利用における雨水浸透枘の役割, 水循環 貯留と浸透, 第80号, 53-56, 2011
 吉岡真弓, 登坂博行, 都市散水効果の定量評価に向けた大気・地下連成 - 水・熱環境モデルの開発, 日本ヒートアイランド学会誌, 査読有り, vol.5, pp.11-23, 2010.
 Dierch, FEFLOW Manual, 2008
 van Genuchten, M, Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898, 1980.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文](計 件)
- [学会発表](計 件)
- [図書](計 件)
- [産業財産権] 出願状況(計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡真弓（YOSHIOKA, Mayumi）
（独）産業技術総合研究所・研究員
研究者番号：10575492

(2) 研究分担者

（ ）

研究者番号：

(3) 連携研究者

（ ）

研究者番号：