土木学会論文集C（地圏工学）, Vol. 70, No. 1, 54-66, 2014.

水理地質環境が熱応答試験のパラメータ同定に与える影響に関する実験的研究

濱野　太宏[1]・冨樫　聡[2]・上原　健人[3]・藤縄　克之[4]

[1]株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング　水資源事業部（〒113-0022 東京都文京区千駄木3-43-3）
（元信州大学　工学部土木工学科）

[2]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社　技術開発部（〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12）
E-mail: tomigashi@yachiyo-eng.co.jp

[3]信州大学大学院　理工学系研究科（〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1）

[4]正会員　信州大学教授　工学部土木工学科（〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1）
E-mail: fujinawa@shinshu-u.ac.jp

地盤の熱物性を求める目的で実施される熱応答試験の解析結果に，地下水流動や土壌水分が与える影響を定量的に評価するため，地下水位および浸透流量が調整でき，熱応答が測定できる室内実験装置を製作し，熱応答実験を実施した．飽和帯が卓越し，地下水流動が無視できる条件下での実験結果を用いて逆解析より求めた熱伝導率を，同様の環境下にある原位置試験より得られた結果と比較したところ，ほぼ同程度の値が得られた．そこで，浸透流量や地下水位を変えて熱応答実験を実施したところ，浸透流量が増大するほど，また土層の飽和度が高くなるほど見かけの熱伝導率が増大した．さらに実験により，地下水位が同じでも，不飽和帯における土壌水分の多い排水時の方が，土壌水分の少ない吸水時に比べて，見かけの熱伝導率が大きくなることが明らかになった．

Key Words : *thermal response tests, geothermal heat pump system, thermal conductivity, inverse analysis, parameter identification, laboratory experiment*

1.　はじめに

東日本大震災や福島第一原子力発電所のシビアアクシデントが契機となり，国内で再生可能エネルギーを積極的に活用する機運が高まっている．その手段として注目されているのが，地下熱ヒートポンプ（GSHP：Ground Source Heat Pump）[1)]を用いた空調や給湯システムである．GSHPは一年を通じて温度が安定している浅層地盤や地下水の熱特性に着目したエネルギー利用技術で，その方式にはボーリング孔に地盤との熱交換のためのU字管を埋設し，その管内に熱媒体を循環させて地層と直接熱交換させるクローズド方式と，地下水を揚水して地上で熱交換させるオープン方式がある．クローズド方式は地中熱ヒートポンプ（GeoHP）[2)]システムとも呼ばれ，近年，国内で急速に普及している．しかし，GeoHPシステムの建設には初期費用が嵩むことから，施工前の調査で熱応答試験を実施して導入サイトの地層の熱交換特性を把握し，その結果を熱交換井の長さや本数などの基本設計に反映させることが多い．ちなみに，「地中熱利用ガイドライン(環境省)」[3)]では適切なGSHPを設計する手段として熱応答試験[4)]（TRT：Thermal Response Test）が推奨されている．

熱応答試験では熱交換井が貫入している地層の平均的な熱伝導率を評価するが，同定された熱伝導率は地盤の飽和度のみならず地下水の流れにも大きく左右されるため，地盤固有の真の熱伝導率ではなく，「見かけの熱伝導率」として評価される．たとえば，岩田ほか[5)]は地下水流動が約12 m/dayと非常に大きい長野県大町市において地下水流動が熱特性の評価に与える影響を調べ，地下水流動に伴う移流効果によって熱交換量が5～13倍になっていると報告している．また，葛ほか[6)]は砂を充填したタンクを用いて熱交換実験を実施しており，新堀ほか[7)]や大久保ほか[8)]は数値解析によって地下水流速と見かけの熱伝導率の関係について考察し，移流効果が大きくなると見かけの熱伝導率が増加すると報告している．

さらに，不飽和帯においては吸水時と排水時で水分分布が異なる[9)]ばかりでなく，流線も大きく影響されることが浸透実験[10)]により確認されている．

また，Smits *et. al.*[11]が実施した，砂充填カラムによる吸水・排水時の熱伝導実験では，体積含水率が高くなるほど熱伝導率が大きくなることが明らかになっている．したがって，不飽和帯が卓越しているサイトでは熱応答試験から求まる熱伝導率が地盤の含水状況に左右されていることを理解しておく必要がある．

さて，熱応答試験の解析法に関しては，ケルビンの線源関数や円筒型熱源関数などの解析解を利用する解析的手法[12,13,14]と差分法や有限要素法などの数値解を利用する数値的手法[15,16,17]に分類できるが，観測の簡便さや解析の容易さより解析的手法（たとえば，藤井・駒庭[2]）が普及している．そこで，本報ではケルビンの線源関数に基づいて，実用上の留意点を考察する．

ケルビンによる熱応答試験の解析では，地下水流れのない均質，等方性，等圧，等温，無限遠の地層に完全貫入している熱交換井に一定の熱負荷が与えられている状況が想定されており，熱交換井での地盤加熱に伴う温度変化をT_r（$=T-T_0$）として支配方程式が解かれ，ケルビンの線源関数

$$T_r = \frac{Q_H}{4\pi b\lambda}\int_X^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}du = \frac{Q_H}{4\pi b\lambda}E(X) \qquad (1)$$

$$X = \frac{br^2(\rho C)}{4b\lambda t}$$

が得られている[12,18]．ここに，T は循環水の平均温度(K)，T_0は初期地層温度(K)，r は熱交換井中心からの半径(m)，Q_Hは熱交換量(W)，λは地層の熱伝導率(W/m/K)，b は熱交換井の有効深度(m)，ρは地層の密度(kg/m^3)，C は地層の比熱(J/kg/K)，(ρC)(J/m^3/K)は地層の体積熱容量である．従来より実施されてきた熱応答試験の解析法では，$E(X)$は$-\gamma-\ln X$で近似され，作図法により熱伝導率が計算されるが，ベキ級数展開の高次項を無視した近似解の精度はX に依存し[2]，従来法で十分な精度を担保するためには，解析データのサンプリング前に標準で60時間の，精密に行いたい場合には100時間程度の予備的な加熱を行うことが望ましいとされている[4]．

熱応答試験の計測時間を不適切に短縮した場合，解析に適用する X の範囲によっては解の近似精度が悪くなり，正確な熱物性値を求めることができなくなる従来法の欠点を補うため，上原・藤縄 [18]は $E(X)$を高次項（第30 項）まで評価するとともに，パウエルの共役傾斜法を利用して逆解析によりパラメータを同定する手法（以降，逆解析法と呼ぶ）を開発している．また，従来の作図法では熱伝導率しか同定できなかったため，同定されたパラメータを用いて評価した計算温度と実測温度とを比較して検証することが不可能であったが，逆解析法ではλと $r^2(\rho C)$が同時に同定されるため計算温度と実測温度の比較ができるようになるとともに，解析精度が向上し，熱応答試験の実施期間の短縮による調査コストの削減が可能になった．

これまで，原位置調査，数値解析，室内実験等に基づいて上述のような熱応答試験に関する研究が実施されてきたが，地下水流速や土壌水分が熱伝導率に与える影響に関する考察は不十分であった．そこで本研究では，実際に想定される様々な地盤環境を室内で模擬的に創出して熱応答試験の室内実験を実施し，地下水流速，地下水位，不飽和帯の土壌水分量や不飽和浸透流が，熱応答試験より同定される見かけの熱伝導率に与える影響を定量的に評価する．

2. 土槽を用いた室内熱応答実験の概要

原位置熱応答試験で評価される地盤の見かけの熱伝導率は，地盤固有の熱物性以外に，地下水流れや不飽和帯の層厚などの影響を受ける．そこで，本研究では様々な地盤環境が設定できる土槽と室内熱応答実験装置を製作し，熱応答実験を実施した．

(1) 実験装置

一般的な原位置熱応答試験装置の概念図を**図-1**に示す．熱応答試験装置は，水などの熱媒体を加熱してパイプ内を循環させる循環系と，地中に埋設したU字型熱交換器の入口および出口の熱媒体温度，加熱ヒーターの消費電力，熱媒体の循環流量などを計測する計測系より構成される．熱応答試験では，熱媒体を電気ヒーターで加熱し，循環ポンプにより実験地盤に埋設されたU字管および地上のパイプ配管内を循環させる．加熱された熱媒体は地盤内のU字管内を流動する過程で放熱し，温度変化するその地層の熱交換特性を評価する．製作した室内実験装置は，実験地盤と熱応答実験装置から構成される．実験装置の全体模式図を**図-2**に示す．

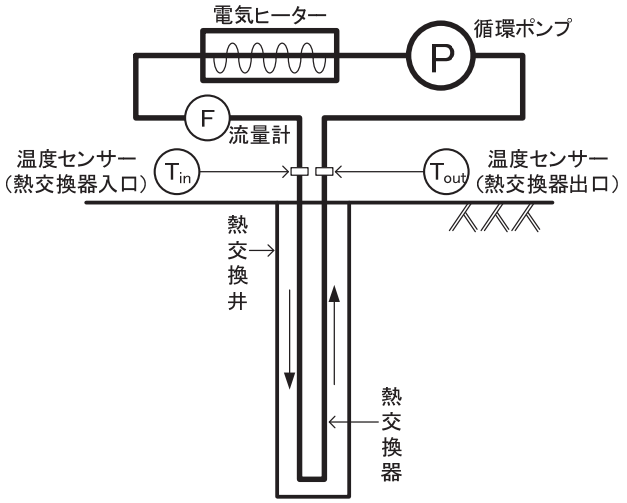
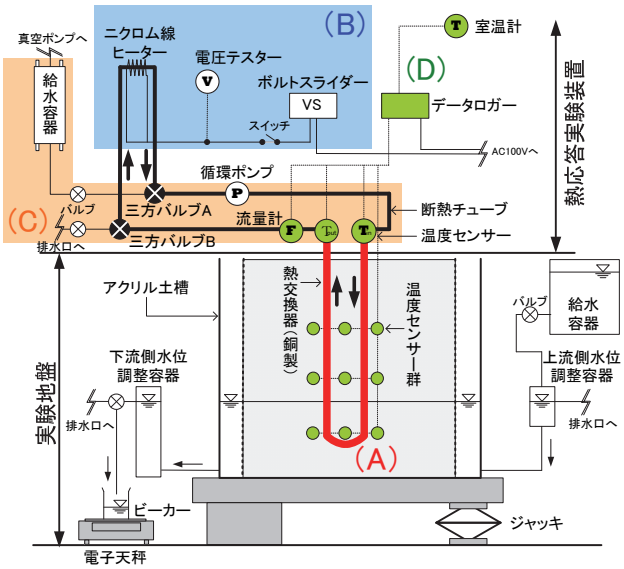


図-1 原位置熱応答試験装置の概念図



(A) 熱交換部，(B) 熱負荷部，(C) 熱媒体循環制御部，(D) 計測部

図-2　室内実験模式図

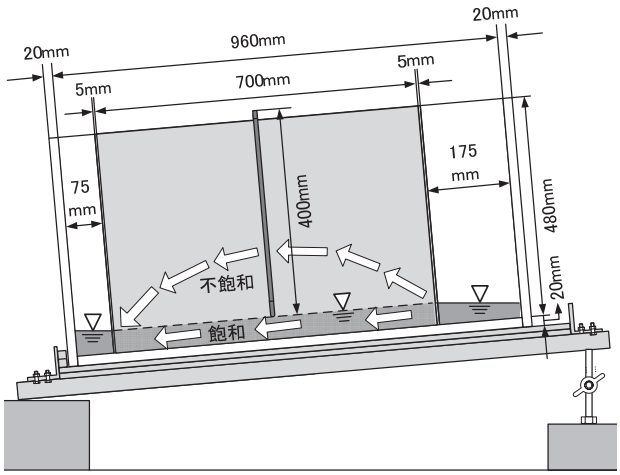


図-3　実験土槽と想定される浸透水の流動経路

a)　実験地盤

実験地盤は，原位置熱応答試験を実地に行う際の地盤環境を土槽を用いて模擬的に表現するためのものである．**図-2** の模擬地盤に示すように，装置は土槽のほか水位設定部（給水容器，水位調整容器），浸透量調節部（ジャッキ等）から構成される．

土槽は，**図-3** に示すような厚さ 20 mm の透明アクリル板製で，内寸は高さ 480 mm，幅 960 mm（左右の貯水部を除いた試料充填部は 700 mm）で，奥行きは 460 mm である．土槽の両端には水位調整用の貯水部が設けられている．試料充填部と貯水部は，アクリル板にパンチ穴を設け，さらに金網で被覆した透水性スリットにより分離されている．なお，貯水部の幅は，上流側が 175 mm，下流側が 75 mm である．

上流側のアクリル製水位調節部は給水容器と水位調整容器から，下流側の水位調節部は水位調整容器から成っている．実験時には，給水容器から上流側水位調整容器を通して土槽に水が供給される．なお，水位調整容器のうち，上流側は送水孔へ，さらに給水容器から土槽へ，水が供給され，上・下流の水位調節容器の高さを調整することで所定の水位が維持できる構造となっている．

浸透流がある場合の熱応答実験では熱交換部に直角に移流が生じることが望ましい．このような流れ場を形成するため，本研究では土槽を傾斜させることにより熱交換器と直交する流線が得られるよう工夫している．**図-4** に，実験時に想定される浸透流経路を模式的に示す．実験時の浸透量の調整は，土槽を傾斜させるためのジャッキと，敷石，滑り止めマット，土槽補強材等から構成される浸透量調節装置を用いる．このとき，上流側をジャッキアップさせて実験地盤を傾斜させ，上流側水位と下流側水位が同一深となるように調整して，U 字管に直交する浸透流を発生させる．

b)　熱応答実験装置

熱応答実験装置は，**図-2**に示す(A)熱交換部，(B)熱負荷部，(C)熱媒体循環制御部，(D)計測部に大別される．

(A)の熱交換部には熱伝導率 403 W/m/K の銅管（内径 10 mm，外径 12 mm）を用いて U 字管を製作した．**図-4** の（a）に示すように 2 本の銅管はステンレス製フレキシブルチューブ（内径 12 mm）で結合し，また（b）に示すように U 字管の出入口部には循環熱媒体の温度が計測できるよう温度センサーを挿入し，断熱加工により保護した．この銅製 U 字管からなる熱交換部を模擬地盤中央部に固定した状態で試料を充填した．なお，**図-3**, **図-4** に示すように地盤に埋設された U 字管の長さ（有効長さ）は 400 mm である．

(B)の熱負荷部は，埋設した U 字管内を循環させる熱媒体に一定の熱負荷を与える機能を有する．家庭用電源（AC100V）より電圧調整器（ボルトスライダー：山菱電機製摺動型単巻変圧器）で調整した電圧をヒーター部のニクロム線で発熱させ，熱媒体に一定の熱負荷を与える．なお，ニクロム線は**図-5** に示す構造をしており，断熱加工した格納容器内に設置した．ニクロム線ヒーターを収納するアクリル容器の形状は循環熱媒体を加熱した際に生じる気泡を容器上部に集めるためドーム型とし，システム外へ除去するように工夫した．ニクロム線の抵抗は 2.7 Ω である．一方，ヒーター内部の循環熱媒体温度を計測するため，**図-5** に示すようにアクリル容器内部に温度センサーを設置した．

(C)の熱媒体循環制御部は，循環ポンプ，三方バルブ，給水容器，断熱チューブおよび前述の U 字型熱交換部から構成されており，熱負荷を与えた熱媒体を U 字型熱交換部および熱負荷部を結ぶ閉鎖管路に一定流量で循

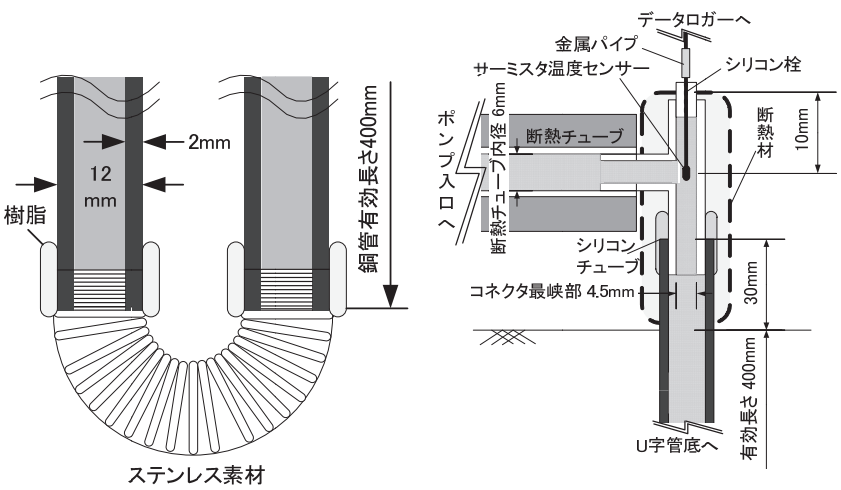


図-4　熱交換部の詳細

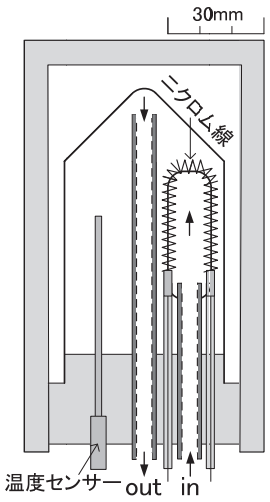


図-5　ニクロム線ヒーター模式図

環させる役割を果たす．熱媒体循環制御部を構成する各装置は保温性に優れたシリコン素材の断熱チューブで接続するとともに，循環中に熱媒体が外部と熱交換を行わないように断熱材で保護した．また，(C)に示すように，熱媒体循環制御部には 2 箇所に耐熱性のテフロン製三方バルブを設け，実験準備段階で閉鎖管路内に熱媒体を注入する際の管路内の流れの切り替えに使用した．さらに，実験準備段階で熱媒体となる脱気水を熱媒体循環制御部に注入するために給水容器を使用し，脱気水は容器に取り付けた真空ポンプにより生成した．なお，循環ポンプには熱媒体が一定の流量で循環でき，運転中の発熱が少ない東京理化器械製の RP-2000 型ローラーポンプを利用し，流量計には脈動に強い楕円ギア式の愛知時計電機製の OF-05ZAWN 型流量計を用いた．

(D)は計測部の関連機器である．熱応答実験時の計測項目には，U字型熱交換部の出入口部における循環熱媒体の温度，ニクロム線にかかる電圧，熱媒体の循環流量，および土槽内の実験地盤中の温度と実験室内温度がある．

実験地盤および循環熱媒体の温度の計測には，サーミスタ温度センサー（立山科学工業製RXB-44およびSXK-67）を用いた．針状センサーのRXB-44およびワイヤー状センサーのSXK-67の温度計測可能範囲および分解能は，いずれもそれぞれ0 ℃～50 ℃，0.01 ℃である．**図-6**に，実験地盤中心部に埋設されたU字管を通り浸透流に平行な断面に設置された温度センサーの位置を示す．なお，図中の▼は針状センサー（計10本），●はワイヤー状センサー（計17本）である．各温度センサーは**写真-1**に示すように，予めポリプロピレン製ネットに固定してから試料を土槽内に充填することで，できるかぎり所定の位置で計測できるように工夫した．なお，センサーは1本ずつ標準温度計でキャリブレーションを行い，実験時の測定値は補正した．

一方，地盤内の温度測定には，データロガー（立山科学工業製K722）を利用した．ニクロム線ヒーターにかかる電圧は，電圧テスター（エー・アンド・デイ製AD-5523Aデジタルマルチメータ）により計測した．また，実験時における熱媒体循環流量の計測には，計測範囲0.085～0.85 L/min，計測精度±2 %の流量計（愛知時計電機製OF-05ZAWN型）を用いた．熱応答実験は24 ℃設定の恒温室内で実施しているが，室内温度も同時に計測した．

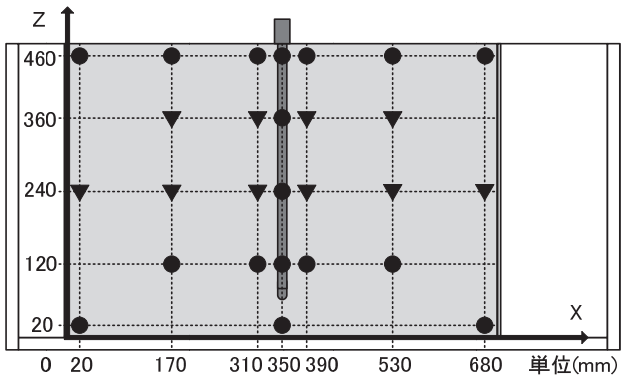


図-6　温度センサー配置図

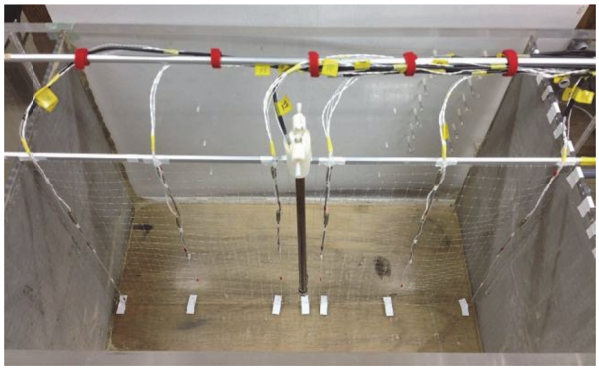


写真-1　浸透流方向の温度センサー

(2) 実験試料

実験には平均土粒子密度 2.63 g/cm^3 の豊浦標準砂を用い，間隙率 n =0.403 となるように土槽内に充填した．なお，熱応答実験に先立ち，豊浦標準砂を室内実験と同じ間隙率で充填した円筒カラムを用いて乾燥試料の吸水過程と飽和試料の排水過程の水分特性曲線を求めた．**図-7** は実験で得られた吸引圧と体積含水率θの関係をプロットしたもので，実線は排水（乾燥）主曲線，点線は吸水（湿潤）主曲線である．なお，van Genuchten[19]は，次式により有効飽和度 S_e を圧力水頭 h の関数として表現している．

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1+\alpha|h|^{\beta})^{\gamma}}, \quad \left(\gamma = 1 - \frac{1}{\beta}\right) \qquad (2)$$

ここに，θ_s は飽和体積含水率，θ_r は残留体積含水率，α，β は土壌に固有のパラメータである．パウエルの共役傾斜法を用いて実測値を van Genuchten の式にフィッティングさせて得られたパラメータを用いて計算した曲線が同図の実線と破線である．なお，実験値と計算値がベストフィットするように飽和体積含水率も同定変数としたため，吸水主曲線と排水主曲線の飽和体積含水率に若干の誤差がある．**図-7** より，吸水時は水面上部約 150 mm までは毛管上昇によりほぼ飽和状態となっていることがわかる．一方，排水時の空気侵入圧は約 250 mm となっており，吸水時と排水時で不飽和帯の水分分布が大きく異なっている．

豊浦標準砂の化学組成比[20]と構成成分の熱伝導率は，シリカ（SiO_2）が92.6～94.3 %と最も高く，8.2~8.4 W/m/K，次いで酸化アルミニウム（Al_2O_3）が3.5～3.8 %で30～43 W/m/K，酸化鉄（Fe_2O_3）が0.7 %で2～3 W/m/Kなどとなっている．そこで，これら構成物質の割合が計100 %となるように補正し，豊浦標準砂の等価熱伝導率を求めると9.1～9.4 W/m/Kとなる．

(3) 実験ケース

本研究では，乾燥状態，部分飽和状態（吸水時と排水時），および完全飽和状態の4パターンで，また浸透流速については流速ゼロ（傾斜度0%）のケースに実験地盤の傾斜角を変えた計3パターンの地盤環境を設定し，以下の条件下で実験を実施した．実験は**表-1**に整理したケースを，乾燥（STEP0），部分飽和（STEP1：吸水時），完全飽和（STEP2），部分飽和（STEP3：排水時）の順に実施した．STEP1とSTEP3では，いずれも水位を底部から50mmの高さに設定し，不飽和帯における土壌水分分布の影響を評価した．なお，STEP1～3においては，先ず傾斜度0%の実験を行った後，傾斜度を7%とした実験を行い，さらに傾斜度10%として実験を実施した．

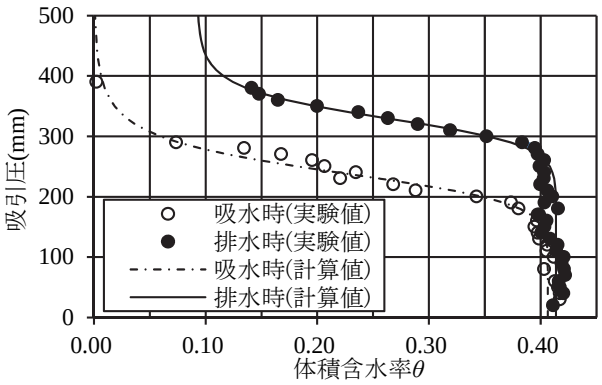


図-7 豊浦標準砂の水分特性曲線

表-1 室内実験ケース一覧

ステップ ＼ 浸透流条件		傾斜度 0% 浸透流なし	傾斜度 7% 浸透流量小	傾斜度 10% 浸透流量大
STEP0	乾燥	S0		
STEP1	部分飽和：吸水時	S1-1	S1-2	S1-3
STEP2	完全飽和	S2-1	S2-2	S2-3
STEP3	部分飽和：排水時	S3-1	S3-2	S3-3

(4) 実験手順

「ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験の標準試験方法」[4]における垂直型U字管式地中熱交換井を対象とした標準的な熱応答試験の実施要領を参考に，気泡が残らないように熱媒体循環部を熱媒体で満たし，以下の手順で実験を実施する．

1) 一定時間非加熱の熱媒体を循環させ，土槽内温度が実験室内温度と同程度になっていることを確認する
2) ヒーター部のボルトスライダーのスイッチを入れ，加熱を開始する
3) 熱媒体循環流量，電圧，温度を データロガーに記録する
4) 単位奥行き長さあたりの浸透流量 Q_w（計測した排水量を土槽奥行 460mm で除して算出）を計算するため，地下水流動下の実験では排水量を電子天秤で計測する
5) 実験開始より 120 分で実験を終了する

3. 熱応答実験結果

(1) 室内実験結果

表-1に示す全てのケースで各2回ずつ実験を実施した．なお，いずれのケースにおいても，評価された見かけの

熱伝導率λの相対誤差が5%以下であることを確認した．

室内実験により得られた温度記録より実験地盤の温度変化T_rを

$$T_r = (T_{in} + T_{out})/2 - T_0 \tag{3}$$

より，また熱交換量Q_Hを

$$Q_H = q(\rho C)(T_{in} - T_{out}) \tag{4}$$

より計算する．ここに，T_0は初期地盤温度（K），T_{in}，T_{out}はU字型熱交換部の入口および出口の温度（K），qは熱媒体循環流量（m^3/sec）である．

図-8 に，乾燥時と完全飽和時で浸透流が無い場合の熱交換機出入口温度と計測データの推移を示す．なお，左図には実験時に計測されたT_{in}，T_{out}および熱交換部出入口の平均温度T_{ave} (=(T_{in}+ T_{out}) /2)が，右図には熱媒体の密度，比熱，循環流量，出入口の温度差ΔT(=T_{in} −T_{out})，Q_Hおよび熱源による供給熱量W_Hが示してある．なお，W_Hは熱媒体の加熱に要した電力で，Q_Hは式(4)より算出したものである．本図により，乾燥時の出入口温度差は，完全飽和時のそれより小さく，地盤内での熱交換が少ないことが分かる．

図-9 は完全飽和試料で，浸透流なし，浸透流小，浸透流大の場合のT_{ave}を比較したものである．浸透流がないS2-1に対して，S2-2，S2-3と浸透流が増大するほど，温度変化が緩慢になっていることがわかる．これは，浸透流に伴う移流と熱分散により熱交換部周囲の熱が逸散し，温度上昇が抑制されるためである．傾斜度0%での乾燥時（S0），部分飽和の吸水時（S1-1），完全飽和（S2-1），部分飽和の排水時（S3-1）の実験におけるT_{ave}の経時変化を比較したものが**図-10** である．

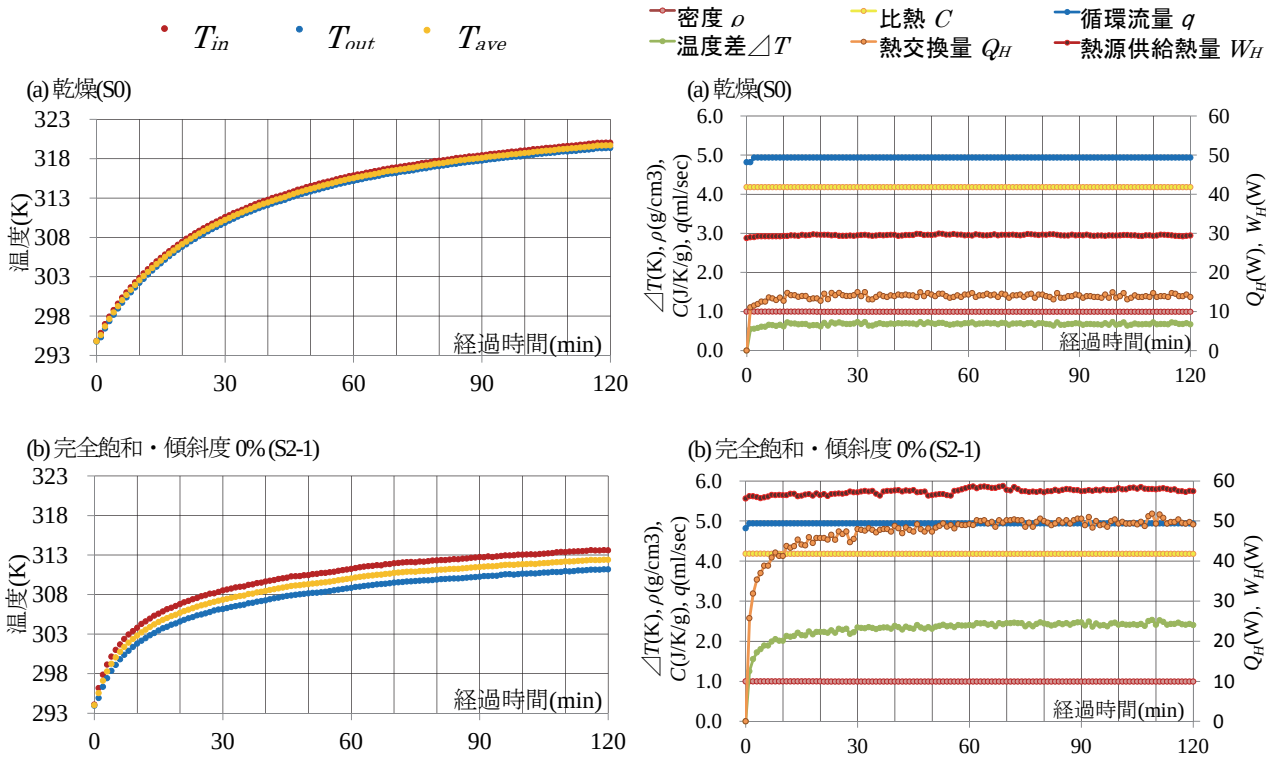


図-8　室内実験結果の一例（左図：熱交換部出入口温度の推移，右図：各実験データの推移）

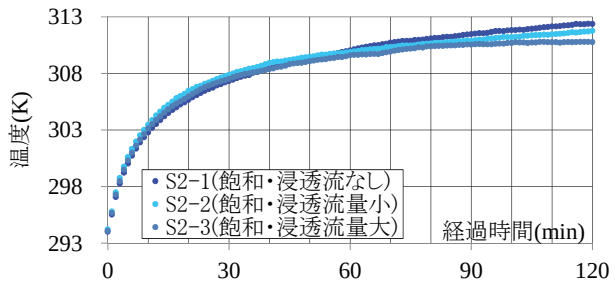


図-9　浸透流が実験結果に与える影響

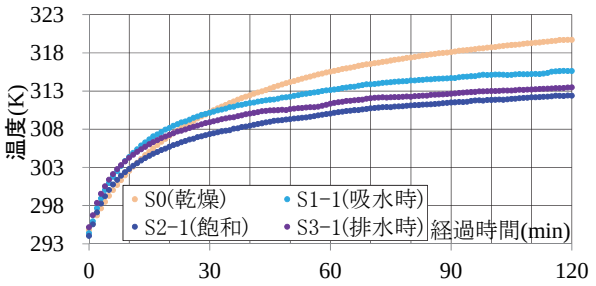


図-10　土壌水分量が実験結果に与える影響

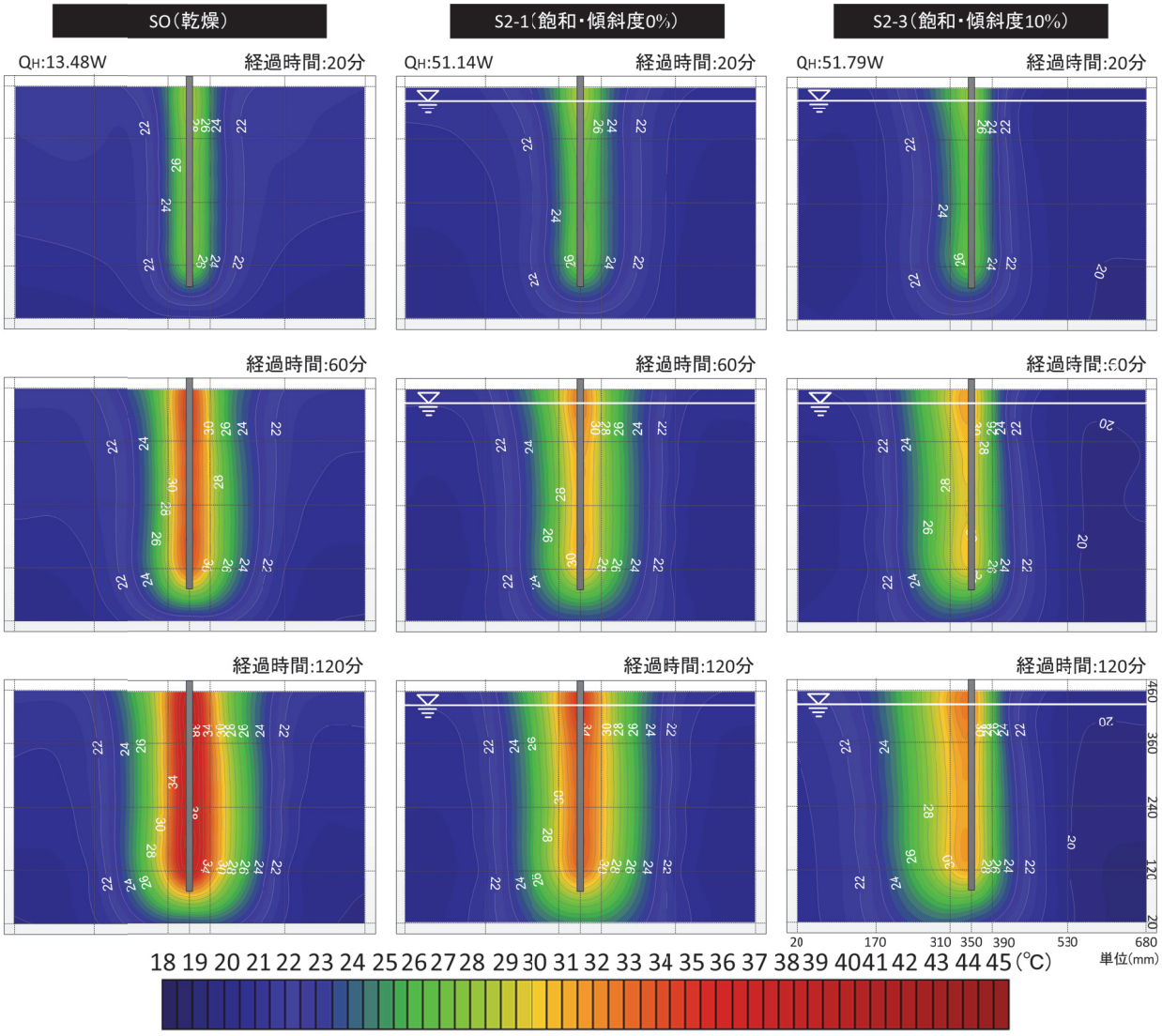


図-11　乾燥(S0)，完全飽和・傾斜度0%(S2-1)，完全飽和・傾斜度10%(S2-3)の実験における温度分布の経時変化

乾燥時と飽和時を比べると，飽和度が大きくなるほど温度変化が緩慢になっていることがわかる．これは飽和時の方が乾燥時より体積熱容量が大きく，かつ熱伝導率が大きくなるためである．また，同一水位であるが土壌水分分布が異なる S1-1 と S3-1 を比べると，土壌水分量の多い S3-1 の方が熱交換量が大きく，温度変化が緩慢となっており，乾燥・湿潤状態によって熱媒体の温度変化が左右されることがわかる．

図-11 に，乾燥状態（S0），完全飽和状態で傾斜度 0%（S2-1）および傾斜度 10%（S2-3）の実験における，加熱開始 20 分後，60 分後，120 分後（実験終了時）の土槽内温度分布を示す．実験終了時の熱交換量は，S0 の乾燥状態では 13.48 W であり，S2-1 の 51.14 W や S2-3 の 51.79 W より小さいにもかかわらず，U 字型熱交換部周囲の温度が高くなっている．一方，地下水流れが存在する S2-3 の実験では，熱プルームが浸透流による移流と分散により上流側で縮退し，下流側に拡大していることがわかる．

本実験結果は，**図-9**で浸透流量が大きくなるにつれて温度変化が緩慢になった理由が，浸透流の影響によることを明確に示すものである．なお，等温度線が想定されるような滑らかな曲線になっていない原因は，温度センサーの設置に固定ネットを使用したにもかかわらず，センサーの埋設位置が設計位置より微妙にずれてしまい，計測位置の誤差が反映されたためである．

図-12は，土壌水分と浸透流が，熱プルームに与える影響を調べたもので，左列が傾斜度0%，中央が傾斜度7%，右列が傾斜度10%の時の実験終了時の温度分布である．傾斜度0%（浸透流なし）の場合の実験結果を比較すると，土壌水分分布の如何を問わず，温度分布は熱交換部を中心とした軸対象となっている．また，実験地盤の体積含水率が最も小さい吸水時（S1-1）で，熱交換部周囲での温度上昇が最も大きいこと，部分飽和のS3-1では水位がS1-1と等しいにもかかわらず，完全飽和の

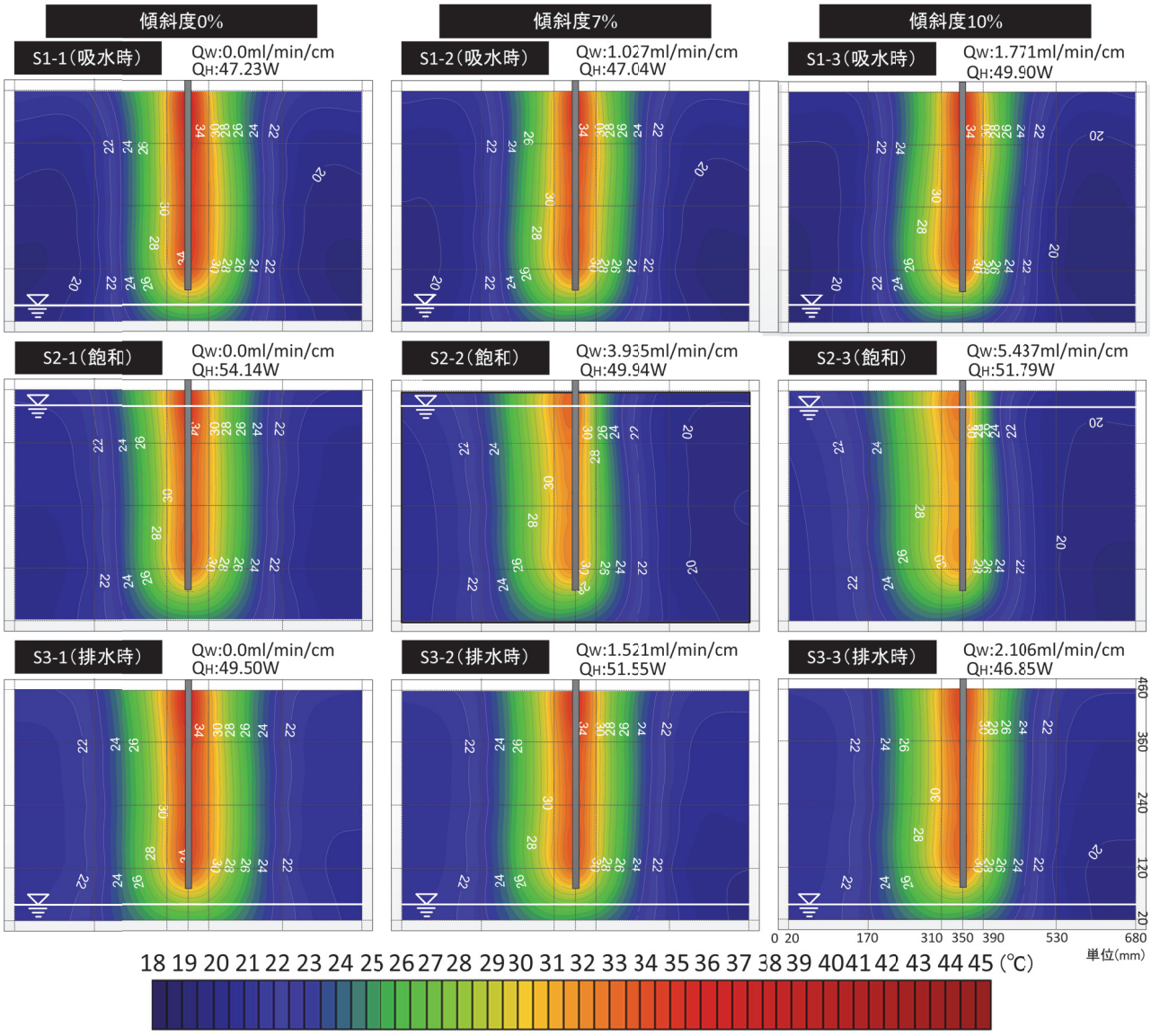


図-12　傾斜度0%（左列），傾斜度7%（中央），傾斜度10%（右列）の実験終了時（いずれも加熱開始後120分後）の温度分布

S2-1に比較的近い温度分布となっていることがわかる．

傾斜度を設けた場合の実験結果を見ると，傾斜度が大きくなり浸透流量が増大するにつれて，吸水時，飽和時，排水時のいずれにおいても熱プルームが下流方向に移動していることがわかる．この傾向は，最も土壌水分量の多い完全飽和の実験で顕著に見られる．

一方，部分飽和の実験では，設定水位（土槽底部より50mm）よりも上方に熱交換部下端（土槽底部より80mm）が位置しており，水面に近い実験槽下部ほど不飽和浸透流の影響を受けて熱プルームが下流側に移動していること，吸水時と排水時では土壌水分量の少ない吸水時の方が移流に伴う土槽上部の熱移動が小さくなっていることなど，不飽和浸透流の影響が如実に現れている．

(2)　熱的パラメータの同定結果

ケルビンの線源関数には，熱伝導率λおよび$r^2(\rho C)$の2種類の未知パラメータが含まれている．前述のように上原・藤縄[18]は，正確解にきわめて近い漸近解にパウエルの共役傾斜法を適用してこれらの未知パラメータを逆解析する手法を開発し，TRTアナライザーとして一般に公開している（信州TLO製）[21]．そこで，TRTアナライザーを用いて，熱応答実験結果を解析し，目的関数

$$F = \sum_{i=1}^{N} \left| T_{ri} - \overline{T_{ri}} \right|^2 \tag{5}$$

が最小になるように各ケースにおけるλおよび$r^2(\rho C)$を同定した．ここに，T_{ri}は実測されたi番目の温度変化(K)，$\overline{T_{ri}}$は計算されたi番目の温度変化(K)，Nはデータ固数である．なお，熱応答試験の解析理論では，Q_Hが一定であることが要件となっているが，**図-8**に示すように，原位置試験と異なり，実験では熱媒体循環部の全長に対してU字型熱交換部の割合が短くならざるを得ないため，実験開始直後に熱交換量が安定しない時間帯がある．そこで，実験結果よりλと$r^2(\rho C)$を逆解析する際，30分～

120分間の熱交換量の平均値を算出して熱交換量の平均値からの変化量が5％以内の区間を解析区間とした．

図-13は，部分飽和の吸水時，完全飽和時，部分飽和の排水時における実測値T_{ri}と計算値$\overline{T_{ri}}$を比較したものである．また，図のみでは理論曲線と実測値がよく一致しているように見受けられ，両者のズレが正確に判断しにくいため，パラメータの同定精度を，絶対総和誤差fを逆解析に用いたデータ固数Nで除し，データ1個あたりの誤差

$$f/N=\sum_{i=1}^{N}\left|T_{ri}-\overline{T_{ri}}\right|/N \tag{6}$$

で評価する．**表-2**にケースごとに計算されたf/Nを示す．

解析理論は，均一の媒体で，かつ間隙相中の流体が流動していないという前提で構築されている．この条件に合致しているのは傾斜度0％で完全飽和の実験のみである．**図-13(b)**および**表-2**より，完全飽和実験では，浸透流速がゼロ（傾斜度0％）の場合に最も実測値と計算値がよく合っている．一方，浸透流量の影響をみるため傾斜度ごとに平均した**表-2**のI値を見ると，傾斜度が大きくなる（浸透流速が大きくなる）につれて実測値と計算値の適合度が低下することがわかる．

一方，飽和度を変えた実験のうち，傾斜度0％と7％の実験では，完全飽和に比べて部分飽和時に理論解と実測値との適合度の低下がみられる．また，**表-2**のS値より飽和に近い排水時の方が吸水時より実測値と解析解の適合度が高くなる傾向が確認できる．

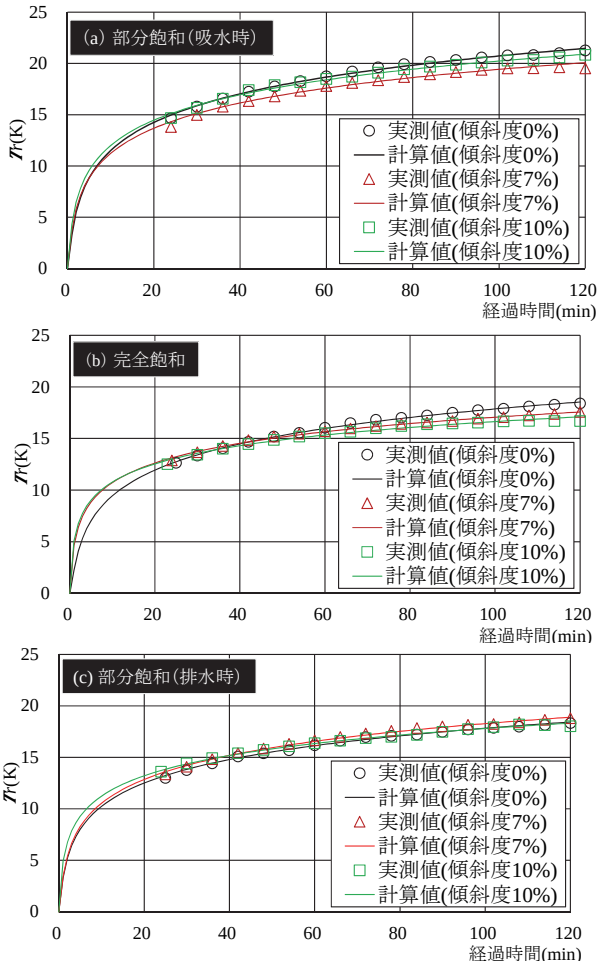


図-13　同定パラメータによる計算値と実測値の比較

4.　考察

(1)　見かけの熱伝導率と土壌水分量との関係

表-3は，ケース別に同定した見かけの熱伝導率（2回の平均値）を土壌水分量の多寡にあわせて並べたもので，表中括弧内はケース名である．本表より，傾斜度の有無に係わらず，土壌水分量が多いほど熱伝導率も大きくなること，浸透量が多くなると見かけの熱伝導率が上昇していることが分かる．

固相，液相，気相からなる混合系の土壌の熱伝導率の評価には，直列モデル，並列モデル，ド・ブリースのモデル[22]などが提案されているが，直列モデルでは過小評価，並列モデルでは過大評価となるため，ここでは次のド・ブリースの式を用いて2相系の熱伝導率を求める．

$$\lambda=\frac{n\lambda_f+(1-n)k_s\lambda_s}{n+(1-n)k_s} \tag{7}$$

$$k_s=\frac{1}{3}\left\{\frac{2}{1+(\lambda_s/\lambda_f-1)/8}+\frac{1}{1+(\lambda_s/\lambda_f-1)\cdot 3/4}\right\} \tag{8}$$

表-2　解析解と実測値の合致度（f/N）

土壌水分量S ＼ 浸透流I	傾斜度 0%	傾斜度 7%	傾斜度 10%	平均 S
部分飽和・吸水時	0.116	0.085	0.125	0.109
完全飽和	0.069	0.071	0.140	0.093
部分飽和・排水時	0.054	0.101	0.076	0.077
平均I	0.080	0.086	0.114	

表-3　実験より得られた見かけの熱伝導率と土壌水分量の関係

	見かけの熱伝導率(W/m/K)			
	乾燥	部分飽和		完全飽和
		吸水時	排水時	
傾斜度 0%	0.380 (S0)	2.345 (S1-1)	2.526 (S3-1)	2.630 (S2-1)
傾斜度 7%		2.503 (S1-2)	2.863 (S3-2)	3.560 (S2-2)
傾斜度 10%		2.642 (S1-3)	3.334 (S3-3)	3.998 (S2-3)
土壌水分量	少 ←→ 多			

ここに，λ_fはλ_wまたはλ_aで，添字の s は固相，w は液相，a は気相を表し，λ_f，λ_w，λ_a はそれぞれ固相，液相，気相の熱伝導率である．またk_sは土粒子の形状と方向などによって決まる重み係数である．そこで，間隙率を実験時の0.403，熱伝導率を豊浦標準砂9.25 W/m/K，水0.608 W/m/K，空気0.0259 W/m/Kとしてド・ブリース式で熱伝導率を求めると，乾燥（空気飽和）で0.238 W/m/K，完全飽和（水飽和）で3.028 W/m/Kとなり，熱応答実験より同定した熱伝導率はド・ブリース式による評価値より，完全乾燥ではやや大きめ，完全飽和ではやや小さめの値となったが，熱応答実験より得られた熱伝導率とほぼ合致する値であった．

(2) 見かけの熱伝導率と$r^2(\rho C)$との関係

熱交換井中心からの距離 r は，理論上は熱源位置から計測位置までの距離であるが，Uチューブにせよ，同軸管にせよ熱交換井は厳密には線源でなく，また熱交換井の構造上，正確に r を評価することもできない．一方，式(1)からもわかるように，r と (ρC) を独立して同定することは関数の構造上不可能である．このため，逆解析法では$r^2(\rho C)$を一つの未知パラメータを同定している．そこで，原位置熱応答試験の解析結果を交えながら，室内実験結果から評価した見かけの熱伝導率と$r^2(\rho C)$の関係について考察する．

上原・藤縄[18]は，既存調査[23]より地下水位が浅く，地下水流速も極めて小さいことが把握されている信州大学工学部キャンパス（A地点），深度60mから最深部にかけて地温が約4℃上昇している上田市の長野病院（B地点）[24]，千曲川の近傍で河川水と地下水の交流が予想され，近隣地点での揚水試験結果より評価された透水係数（0.35×10^{-2}～0.71×10^{-2}cm/sec）[23]から推定すると地下水流速が大きいと推定される(株)角藤（C地点），東京都千代田区の武蔵野台地に位置し，不飽和帯の厚さが10m～15m程度[25]で熱交換器長さの約1/5程度を占める笹田ビル（D地点）の4カ所で実施された熱応答試験結果をもちいて，熱伝導率の逆解析を行っている．

図-14は，信州大学工学部キャンパス（A-1，A-2），(株)角藤（C），笹田ビル(D)で実施した原位置熱応答試験より得られた熱伝導率と $r^2(\rho C)$ との関係を熱応答実験結果とともに整理したものである．$r^2(\rho C)$ は原位置試験と室内実験のスケールの違いを反映し，原位置試験の方が室内実験よりほぼ1オーダー大きくなっているものの，傾斜度0%の実験（S1-1, S2-1, S3-1）で求めた熱伝導率は地下水流速の小さいA-1，A-2の熱伝導率とほぼ同じ値となっている．一方，完全飽和のみならず部分飽和実験においても浸透流速が大きくなる(S1-1~3, S2-1~3, S3-1~3)と熱伝導率が大きくなるが，この傾向は原位置試験において地下水流速が大きいCの熱伝導率がA-1，A-2の熱伝導率より大きくなっている結果と符合する．また，不飽和帯の影響を受けているDとS1-1の熱伝導率は，いずれも小さくなっている．

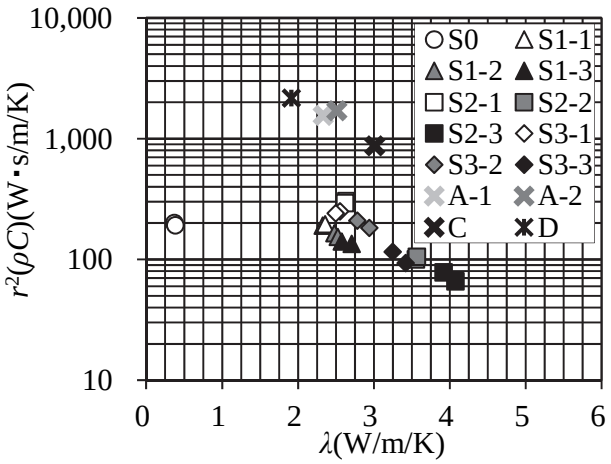


図-14 熱伝導率と $r^2(\rho C)$の関係

一方，完全飽和実験のみならず部分飽和実験においても，浸透流速が大きくなるにつれて，$r^2(\rho C)$ が小さくなっているが，原位置試験でもほぼ同様の傾向が見られることがわかる．

(3) 見かけの熱伝導率と浸透流量との関係

地盤中の熱移動は，熱伝導のみならず間隙流体の移流と移流に伴う熱分散に影響される[9]．したがって，浸透流存在下での熱応答試験結果にケルビンの線源関数を適用して同定された熱伝導率は移流および熱分散の影響を受けた見かけの熱伝導率となっていることが想定される．

表-3によれば，今回の実験結果を整理したもので，傾斜度が増大し，浸透流量が大きくなるほど，見かけの熱伝導率が大きくなることがわかる．特に，同じ水面高で実験した吸水時および排水時における部分飽和の同定値を比較すると，傾斜度0%の場合では排水時が吸水時より約8%大，傾斜度7%では約14%大，傾斜度10%では約26%大と，傾斜度の増大に応じて熱伝導率が増大していることがわかる．

一方，**図-15**は計測された浸透流量 Q_w と同定された見かけの熱伝導率との関係を示したもので，見かけ熱伝導率は，飽和度の如何によらず浸透流量が増えるにつれて大きくなり，完全飽和で傾斜度が10%の場合には，浸透流がない場合より約52%も大きくなっている．

(4) $r^2(\rho C)$と浸透流量との関係

$r^2(\rho C)$ が一体化されているので，原位置熱応答試験から直接 (ρC)を評価することはできないが，実験において乾燥あるいは完全飽和試料を用いた場合，次式より別途(ρC)を求めることができる．

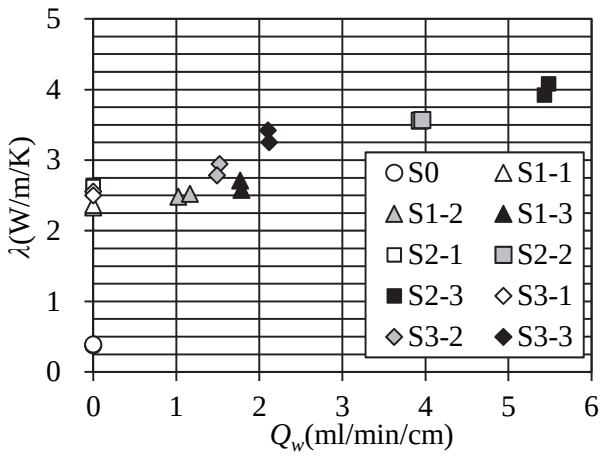


図-15　浸透流量と同定した熱伝導率との関係

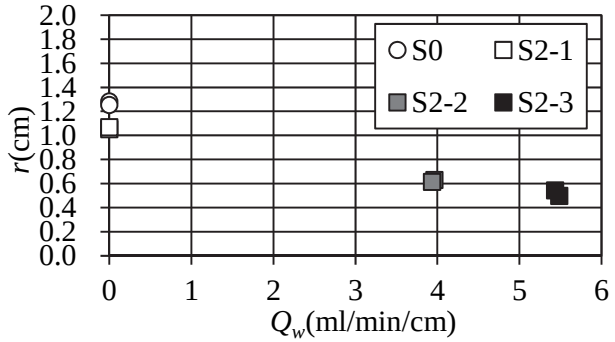


図-16　浸透流量と r の関係

$$(\rho C) = nS_w(\rho C)_w + n(1-S_w)(\rho C)_a + (1-n)(\rho C)_s \tag{9}$$

ここに，n は間隙率（-），S_w は飽和度（-），$(\rho C)_s$，$(\rho C)_w$，$(\rho C)_a$ はそれぞれ固相，液相，気相の体積熱容量であり，添字の s は固相，w は液相，a は気相を表している．

熱伝導率と同様に，(ρC)は地盤固有のパラメータであり，浸透流速に左右されることはない．そこで，実験地盤と同一の間隙率 n =0.403 でアルミ製小型容器に豊浦標準砂を充填させて密閉した乾燥状態および完全飽和状態の試料を約 80℃に加熱した後，室温程度の脱気水で満たした断熱容器に封入し，初期水温と初期試料温度および平衡時の温度を計測する方法で等価体積熱容量(ρC)を測定したところ，乾燥試料が 1.220 J/K/cm^3，飽和試料が 2.658 J/K/cm^{3}であった．

ここで，乾燥状態および完全飽和状態の傾斜度 0%，7%，10%の熱応答実験結果より同定された $r^2(\rho C)$を，乾燥試料あるいは完全飽和試料の等価体積熱容量(ρC)で除し，評価された熱交換井中心からの距離 r と浸透流量との関係を示したものが**図-16** である．

浸透流のない S0，S2-1 の実験結果より評価した r は約 1.1cm から 1.3cm 程度となる．現地で実施する熱応答試験の解析の際，計測地点までの距離 r は，熱交換井中心から熱交換器の出入口地点までの有効半径として便宜的に設定される [23]．同様の考え方で本実験での有効半径を計算すると，有効半径は 1.2cm から 2.0cm 程度と推定され，実験結果より評価された r はほぼ妥当であることがわかる．

一方，**図-16** から浸透流量が多くなると，評価される r が小さくなることがわかる．したがって，地下水流れの卓越するサイトでパラメータの妥当性を検証する際に，従前の方法で設定した有効半径を用いると適切な評価ができない可能性がある．

5.　おわりに

本研究では，浸透流量や地下水位が調整でき，熱源井による熱応答が測定できる室内実験装置を製作し，熱応答実験を実施するとともに，得られたデータに逆解析法を適用してパラメータ同定を行い，地下水流動や地盤の水分分布が原位置熱応答試験結果から求めた熱伝導率などのパラメータ同定値に与える影響を定量的に評価した．本研究により得られた知見は以下のとおりである．

1. 熱応答試験を室内で再現するための精密な実験装置を製作し，乾燥，吸水時部分飽和，完全飽和，排水時部分飽和の 4 パターンの飽和度と，土槽傾斜度 0%，7%，10%の 3 パターンの浸透条件を組み合わせた地盤環境下で熱応答実験を実施した．複数回行った同一室内実験の同定見かけ熱伝導率の相対誤差は 5%以下と高い再現性が確認できた。
2. 実験土槽内に計 27 本の温度センサーを埋設し，各実験ごとに詳細に地盤温度分布の経時変化を測定した．その結果，浸透流量ゼロ時においては，熱交換井を中心に同軸上に温度分布していることが確認でき，浸透流が存在する完全飽和および部分飽和の実験時においては，熱プルームは上流側で縮退し，下流側で拡大する様子が確認できた．
3. 実験より，浸透流量ゼロ時においては，土槽が完全飽和している場合に最も見かけの熱伝導率が大きくなること，同一の水位にもかかわらず土壌水分が多い排水時の方が土壌水分の少ない吸水時より見かけの熱伝導率が大きくなることが確認できた．
4. 実験土槽の傾斜度が大きくなり，浸透流量が多くなるほど見かけの熱伝導率が大きくなることが明らかになった．また，この傾向は原位置熱応答試験結果とも符合することを確認した．
5. 同定された $r^2(\rho C)$より，別途実験で計測した(ρC)を用いて r を評価した結果，流速ゼロの実験では得

られた r は適正な値であり，さらに浸透流速が大きくなるほど r が小さくなることがわかった．

以上，室内実験を実施し熱応答試験で広く用いられているケルビンの線源関数に使われている熱物性値を逆解析した結果，原位置熱応答試験が地下水位，土壌水分量，地下水流れによる影響を強く受けることを定量的に示すことができた．

謝辞：本研究の実施にあたり，元信州大学工学部土木工学科豊田富晴技官には実験全般において多くの有益なご助言を頂いた．また，信州大学工学部土木工学科卒業生の大山辰則氏，梶田明宏氏には室内実験装置の作成で多大なご尽力を頂いた．さらに原位置熱応答試験データは，(株)ジオシステムの高杉真司氏，館野正之氏，(株)角藤の塚田賢司氏，NPO 法人地中熱利用促進協会の笹田政克氏のご厚意により提供されたものである．ここに記して感謝の意を表する次第である．

参考文献

1) 長野克則：地下熱利用技術 2.地下熱利用技術とは，地下水学会誌，Vol.53，No.1，pp.83-90，2011.
2) 藤井光，駒庭義人：地下熱利用技術 7.サーマルレスポンス試験の原理と解析方法，調査事例，地下水学会誌，Vol.53，No.4，pp.391-400，2011.
3) 環境省 水・大気環境局：地中熱利用にあたってのガイドライン，http://www.env.go.jp/water/jiban/gl-gh201203/，pp.21-22，2012.（2013.4.30 閲覧）
4) (財)ヒートポンプ・蓄熱センター 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会編（主査 長野克則）：ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験の標準試験方法 Ver.2.0，pp.16，2010.
5) 岩田宣己，小林利文，深谷泫三郎，横原恵一，新堀雄一：地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプの実証試験，日本地熱学会誌，Vol.27，No.4，pp.307-320，2005.
6) 葛隆生，長野克則，武田清香，中村靖：地下水流れを有する砂槽内採放熱実証試験，空気調和・衛生工学会論文集，No.127，pp.1-9，2007.
7) 新堀雄一，岩田宣己，森不可止，深谷泫三郎：坑井を用いた地中熱利用 HP の設計と地下水流動との関係についての一考察，日本地熱学会誌，Vol.24，No.4，pp.339-348，2005.
8) 大久保博晃，藤井光，糸井龍一：同軸型地中熱交換器の室内モデル実験および数値モデリング，日本地熱学会誌，Vol.31，No.1，pp.51-62，2005.
9) 藤縄克之：環境地下水学，pp.55-57，共立出版，2010.
10) 長谷川純也，藤縄克之，江澤静一郎，豊田富晴，渡邉紹裕：土壌水分ヒステリシスが飽和・不飽和浸透流に及ぼす影響，地下水学会誌，Vol.53，No.1，pp.25-39，2011.
11) Smits, K. M., Sakaki, T., Limsuwat, A. and Illangasekare, T. H. : Thermal Conductivity of Sands under Varying Moisture and Porosity in Drainage–Wetting Cycles, *Vadose Zone Journal* (online), Vol. 9, No. 1, 2010.
12) Morgensen, P. : Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage, *Proceedings International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, pp. 625-657, 1983.
13) Ingersoll, A. C. and Plass, H. J. : Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, *Heating, Piping and Air conditioning*, Vol. 20, No. 7, pp. 119-122, 1948.
14) Gelhin, S. : Thermal Response Test Method Development and Evaluation, Doctoral thesis in Lulea university of technology, 2002.
15) 長野克則，落藤澄，西岡純二：土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究（第 2 報），空気調和・衛生工学会論文集，Vol.56，pp.25-34，1994.
16) Fujii, H., Akibayashi, S. and Ohshima, K. : Interpretation of Thermal Response Tests in Shallow Deposits, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 26, pp. 143-148, 2002.
17) 田子真，盛田耕二：講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」熱交換器の地中への設置，日本地熱学会誌，Vol.25，No.1，pp.125-139，2006.
18) 上原健人，藤縄克之：ケルビンの線源関数と共役傾斜法を用いた熱応答試験の逆解析法の開発とその適用－地下熱利用技術の高度化に関する一連の研究（その 3）－，日本地下水学会 2012 年春季講演会講演要旨，pp.104-109，2012.
19) van Genuchen, M. T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
20) 豊浦硅石鉱業株式会社 web サイト：http://www.toyourakeiseki.com/index.html（2013.4.30 閲覧）
21) 信州産学官連携機構 web サイト：http://www.sis2008.jp/ichiran/sisnews10.pdf（2013.10.8 閲覧）
22) de Vries, D. A. : Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Transactions American Geophysical Union*, Vol. 39, No. 5, pp. 909-916, 1958.
23) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：次世代型ヒートポンプシステム研究開発－地下水制御型高効率ヒートポンプ空調システムの研究開発－，平成 22 年度～平成 24 年度成果報告書，2013.
24) 長野県：再生可能エネルギー導入可能性調査（地下熱利用），平成 21 年度「緑の分権改革」推進事業報告書，2011.
25) 東京都土木技術支援・人材育成センター東京の地盤 web サイト：http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouhou/geo-web/101itibantyou.htm（2013.10.8 閲覧）

(2013. 5. 14 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY FOR INVESTIGATING THE INFLUENCE OF HYDROGEOLOGICAL ENVIRONMENT ON PARAMETER IDENTIFICATION BY THERMAL RESPONSE TESTS

Takahiro HAMANO, Akira TOMIGASHI, Kento UEHARA
and Katsuyuki FUJINAWA

Thermal response tests (TRTs) have been broadly applied to identify thermal properties of hydrogeological environments. In order to quantitatively evaluate the effects of groundwater flow and level, water content on analyzed results of TRTs, TRT equipments for laboratory experiments were constructed so that groundwater level and velocity of seepage flow can be adjusted. Inverse analyses of experimental results were conducted first for cases under saturated conditions with negligible groundwater flow, and showed reasonable agreement of the identified thermal conductivities with those obtained from in-site TRTs conducted under the same geo-environmental conditions as the laboratory experiments. Laboratory thermal response experiments were further carried out for various conditions of seepage flow, groundwater level, water content, and it turned out that apparent thermal conductivities increase according as seepage flow velocity and/or water saturation increase. Furthermore, laboratory thermal response experiments conducted at a constant groundwater level for investigating to the influence of soil-water hysteresis lead to a conclusion that apparent thermal conductivities of soils under drying condition with higher soil water content are larger than those under wetting condition with lower soil water content.