

# 地盤環境が熱応答試験結果に与える影響に関する実験的研究

濱野太宏(信州大工)、藤縄克之(同)

## 1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの一つである地中熱を利用したヒートポンプシステムを導入する機運が高まっている。このシステムの最適設計を行うためには、事前に地盤の熱交換特性を評価する熱応答試験(TRT)<sup>1)</sup>を行っておく必要がある。しかし、地盤の水飽和度や地下水の流速などに熱応答解析結果が大きく左右されるため、地盤環境が熱応答試験に与える影響を評価する必要がある。

そこで、室内実験用の熱応答試験装置と三次元アクリル水槽を用いた模擬地盤を製作し、地下水位と地下水流速を変えて熱応答試験を行い、地盤環境が熱応答パラメータに与える影響を検証した。以下では、製作した実験装置についての概要を説明し、次いで実験条件とその設定方法を示し、最後に実験結果について考察する。

## 2. 熱応答試験の基礎理論とパラメータの逆解析

地中に垂直に埋設したU字管に加熱した循環液を流してU字管出入り口の温度差から地盤の熱応答特性を調べる TRT では一般に次のケルビンの線源関数理論が用いられている。

$$T_r = \frac{Q_H}{4\pi(b\lambda)} \int_X^\infty \frac{e^{-u}}{u} du, X = \frac{r^2 b(\rho c)}{4b\lambda t} \dots (1)$$

ここに、 $T_r$ は加熱による地層の温度上昇量(K)、 $Q_H$ は地層への熱供給量(w)、 $b$ は熱交換部挿入深(m)、 $\lambda$ は地層の熱伝導率(w/m/K)、 $\rho$ は地層の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $c$ は地層の比熱(w・s/kg/K)、である。

なお、地盤部分と熱交換を行うU字型熱交換部の地上出入口にある温度センサーによる測定値から地盤の温度上昇量  $T_r$  とヒーターによる熱交換部による熱供給量  $Q_H$  をそれぞれ式 2、3 より算出する。

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

$$Q_H = \rho_w c_w q (T_{in} - T_{out}) \dots (3)$$

ここに、 $T_0$ は初期地層温度(K)、 $T_{in}$ は熱交換部入口温度(K)、 $T_{out}$ は熱交換部出口温度(K)、 $\rho_w$ は水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $c_w$ は水の比熱(w・s/g/K)、 $q$ はパイプ循環流量(ml/s)である。

## 3. 実験装置の概要

図1に本研究で製作した実験装置は熱応答試験装置と地盤環境装置を示す。熱応答試験においては、閉管内に充填された循環媒体(水)を加熱量が一定になるようにヒーターで加熱し、循環ポンプで一定流量循環させる。なお、式1で用いられている地盤の熱交換特性値である熱伝導率 $\lambda$ と体積熱容量 $r^2(\rho c)$ は逆解析手法<sup>2)</sup>で評価することができ、またヒーターには外径50mmのアクリル容器内にニクロム線を設置し、地盤内のU字型管には外径10mm、地中内長さ400mmの銅管を用いた。一方、地盤環境装置は20mm厚のアクリル板を用いて、7000×4600×4800(mm)の水槽を製作し、温度センサーを配置した後に豊浦標準砂を充填した。この装置は片側下部がジャッキで任意に上げることができ、水槽全体に傾斜を与えることにより浸透流速が調整できるようにした。

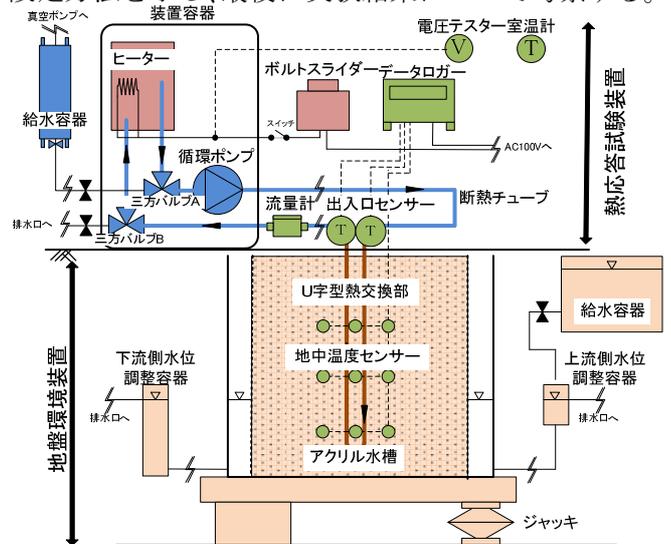


図-1 実験装置概略図



写真-1 実験装置俯瞰写真図

#### 4. 実験条件、実験・解析結果と考察

実験では、条件は試料が乾燥した状態と完全に水で飽和した状態および乾燥状態から吸水させた部分飽和と完全飽和から排水させた部分飽和の 4 パターンがあり、乾燥状態以外では傾斜が無い条件の他に傾斜を 2 段階で与えた 3 条件がある。水槽内の浸透流量については水槽から排水される流量を測定し、それを水槽の奥行きで除したものを浸透流  $Q_w$  とした。熱応答試験は 120 分間行い、解析では試験装置の条件である熱供給量  $Q_H$  が一定になるよう調整した。一条件につき実験を 3 回以上行ったが、ここでは熱伝導率値の相対誤差が 5% 以下の 2 つの解析結果を採用している。表 1 に各条件における実験結果の解析開始および終了時間とその区間データ数  $N$ 、熱供給量  $Q_H$ 、浸透流  $Q_w$ 、解析結果の熱伝導率  $\lambda$ 、体積熱容量  $r^2(\rho c)$ 、精度を表す  $f/N$  を示す。図 2 は、熱伝導率  $\lambda$ 、 $r^2(\rho c)$  の関係を、図 3 は浸透流  $Q_w$  と熱伝導率  $\lambda$  の関係を示したものである。浸透流速が大きくなるにつれてみかけ熱伝導率が大きくなるのがこれらの図よりわかる。

なお、パラメータの解析には 15~30 分以降のデータを用いた。これは、実験開始直後はヒーター部周辺で熱が吸収され、熱交換部に熱が伝わっているためである。

図 2、3 より、浸透流速が大きくなるほど熱伝導率は上昇すること、体積熱容量は低下する傾向があることがわかる。浸透流速が大きくなるとみかけ熱伝導率が大きくなる理由は地層中における熱交換が熱伝導だけでなく移流によっても影響を受けるためである。

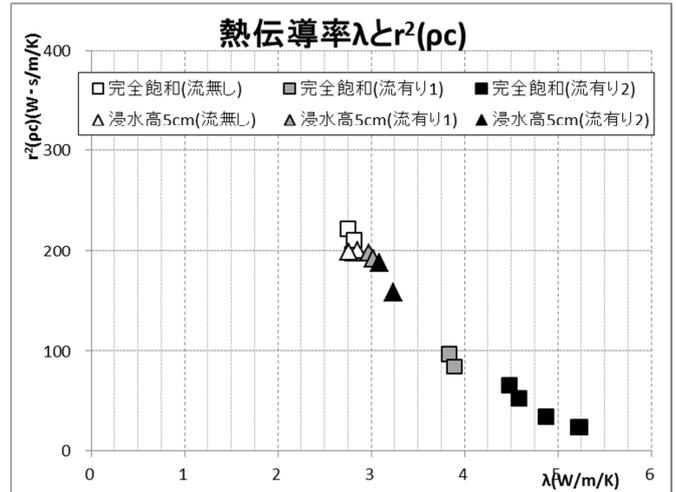


図-2 熱伝導率と  $r^2(\rho c)$  の関係

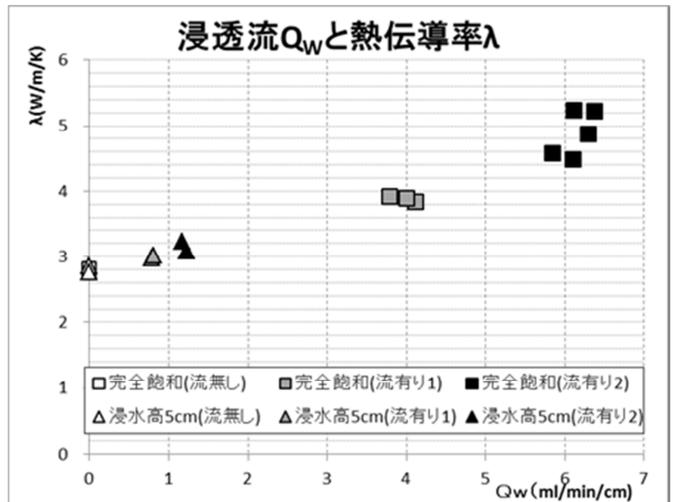


図-3 浸透流と熱伝導率の関係

表-1 各条件での実験・解析諸元値

条件	完全飽和												浸水高50mm(排水過程)						
	流無し			流有り1			流有り2						流無し		流有り1		流有り2		
	1	2	3	1	2	1	2	3	4	5	1	2	1	2	1	2			
$Q_H$	(W)	49.43	49.10	47.93	52.02	50.77	52.78	51.32	51.16	53.10	52.39	50.54	47.46	50.48	51.50	51.26	53.94		
開始	(min)	15	16	22	20	26	24	21	22	27	21	27	21	30	20	26	27		
終了	(min)	120												120					
$N$		106	105	99	101	95	97	100	99	94	100	94	100	91	101	95	94		
$r^2(\rho c)$	(sec·W/m²/K)	222.5	197.5	211.0	96.48	83.59	51.90	23.19	33.90	23.73	65.00	201.0	199.0	198.0	192.0	158.0	188.0		
$\lambda$	(W/m/K)	2.753	2.796	2.813	3.838	3.889	4.580	5.221	4.871	5.236	4.484	2.853	2.763	2.973	3.018	3.234	3.090		
$f/N$		0.126	0.171	0.065	0.160	0.112	0.136	0.143	0.113	0.209	0.232	0.096	0.157	0.096	0.121	0.067	0.063		
$Q_w$	(ml/min/cm)	-	-	-	4.113	4.001	5.842	6.371	6.299	6.113	6.102	-	-	0.784	0.812	1.170	1.221		

#### 5. おわりに

この実験より地盤環境では地下水流れが熱応答試験結果に大きな影響を与えていることがわかった。今後、乾燥条件と乾燥状態から吸水させた部分飽和の条件の追加実験を行い、飽和の程度による熱応答試験結果への影響も考察していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 藤井光・駒庭義人(2011)：地下熱利用技術 7、地下水学会誌、第 53 巻第 4 号、391-400
- 2) 上原健人・藤縄克之(2012)：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手法の開発とその応用、地下水学会 2012 年春季講演会講演要旨、104-109