

SWS 試験孔を利用した簡易サーマルレスポンス試験

東京都市大学 学生会員 ○杉山由夏
 東京都市大学大学院 学生会員 石垣拓也
 東京都市大学 正会員 末政直晃

1. はじめに

産業の発展に伴う化石燃料使用や発展途上国の経済成長によって、CO₂の排出量が増加傾向にあり、地球規模の環境問題に影響をもたらすと懸念されている。この問題に対し、再生可能エネルギーの1つである地中熱利用システムがCO₂の削減につながると期待されている。地上と地中の温度差を効率的に利用するシステムであり、地中熱を利用する方法としてヒートポンプシステムがある。それを導入する際、地盤の熱伝導率を測定するためにサーマルレスポンス試験(以下 TRT と略す)を行う必要がある。図-1 に TRT の仕組みを示す。TRT 自体が高コストであることや測定に長時間要することから、地中熱利用システムの普及の障壁となっている。

そこで本研究では、地中熱利用のさらなる普及を目的として、地盤の熱伝導特性を把握する TRT に着目し、より安価かつ小規模で可能な簡易 TRT の開発を行っている。本発表では、開発した TRT 装置を用いて行った実地盤試験の結果、ケルビンの線源関数理論を適用した有効熱伝導率の算出方法の検討とともに FEM による 3 次元非定常熱伝導解析によって算出した有効熱伝導率の妥当性について報告する。

2. SWS 試験孔を用いた簡易 TRT

既往の研究で櫻井ら²⁾は、宅地地盤調査などで用いられるスウェーデン式サウンディング試験(以下 SWS 試験と略す)の試験孔を利用した簡易 TRT を開発し、試験を行った。この試験では、積算熱量の経時変化を測定して地盤の有効熱伝導率の算出を試みた。SWS 試験孔の掘削径が 33mm であるのに対し、掘削孔に挿入する簡易 TRT 装置のロッドの径が 20mm であり、装置と地盤の間にわずかな溝(孔隙)が生じていた。そのため測定前に一定の放置時間を設けることによって、孔隙が自然閉塞したと仮定し試験を行った。しかし実際の孔隙の状態は不明確であり、測定値への影響が考えられる。そのため、本試験では土とヒーターが完全に密着するような簡易 TRT 装置を開発し、実地盤にて試験を行った。

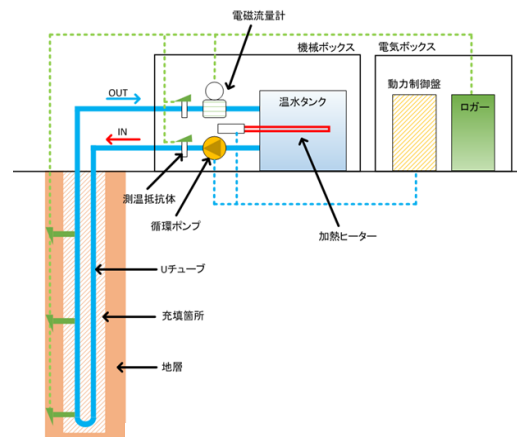


図-1 TRT の仕組み¹⁾

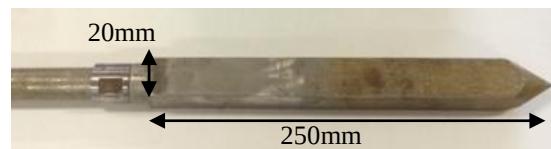


写真-1 試験装置



写真-2 測定器具



写真-3 試験の様子

キーワード 地中熱利用, サーマルレスポンス試験, 熱伝導率

連絡先: 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL03-5707-0104, E-mail:g1218045@tcu.ac.jp

2.1 装置概要

写真-1 に試験装置を示す。試験装置は長さ 250mm, 幅 20mm 四角柱のステンレス部分に熱電対ヒーターが内蔵されており, SWS 試験に用いるロッドの先端に装着可能となっている。写真-2 に測定器具(右: 簡易温度調節器, 左: 電力計)を示す。簡易温度調節器で温度を設定し, 電力計を用いて設定温度まで上昇するのに必要な消費電力を測定することで, ヒーターが発する熱量を求めることができる。

2.2 試験概要

写真-3 に試験場所を示す。試験は東京都市大学の敷地内で行った。地表面はアスファルト舗装で固められており, 地表面から深度 2m までがロームを主体とした埋土, 深度 2m~5m が有機質土で構成されている。SWS 試験のロッドが垂直に挿入できるように, アスファルト舗装と埋土の部分を削り, 大きな礫を取り出した。

次に, SWS 試験孔を掘削し, ロッドの先端に試験装置を取り付け挿入した。図-2 に試験概要を示す。発熱部の長さ 0.25m 分を孔底から地盤内に押し込むことによって, 土と装置を密着させることができる。測定は装置と周囲との温度変化が安定してから開始し, 1Hz のサンプリング周期で 1 時間測定を行った。

2.3 試験結果

表-1 に実験ケースを示す。Case1, 2 はともに同日に実施した。測定深度は 1m, 3m とし, 地表面温度は温度計よりそれぞれ 13℃, 12.5℃であった。また, 装置のロッド先端部の熱電対より加熱前の地中初期温度はともに 20℃であった。加熱時の熱源設定温度は両ケースとも 40℃とした。

図-3.1 に試験結果(1m), 図-3.2 に試験結果(3m)を示す。Case1, 2 とともに測定開始直後約 120 秒まで, 積算熱量は急激に増加した。これはヒーターが設定温度に達するまでの急激な電力消費が原因と考えられる。その後なだらかに積算熱量は増加した。櫻井ら²⁾が行った実験では, 積算熱量を測定した際に地中初期温度と熱源設定温度との差が大きいほど積算熱量の増加率も大きくなっていた。今回の実験では測定を行った地層の種類は異なるが, 地中初期温度と熱源設定温度がどちらのケースも同じであったことから, 積算熱量の増加傾向は近くなった。

3. ケルビンの線源関数理論

一般にサーマルレスポンス試験から地盤の有効熱伝導率を求める際には, 作図法(循環時法)が用いられている。この方法はケルビンの線源関数理論を適用し, 経時変化曲線の

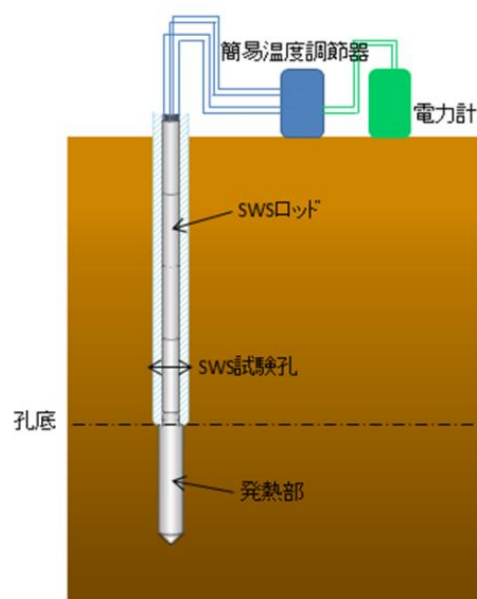


図-2 試験概要

表-1 実験ケース

	地中深さ (m)	熱源設定温度 (℃)	地表面温度 (℃)	地中初期温度 (℃)
Case1	1	40	13.0	20
Case2	3	40	12.5	20

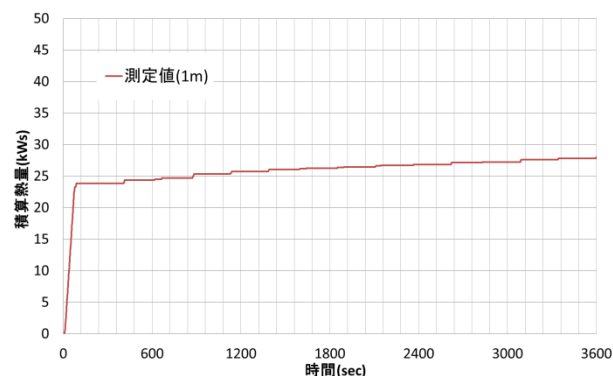


図-3.1 試験結果(1m)

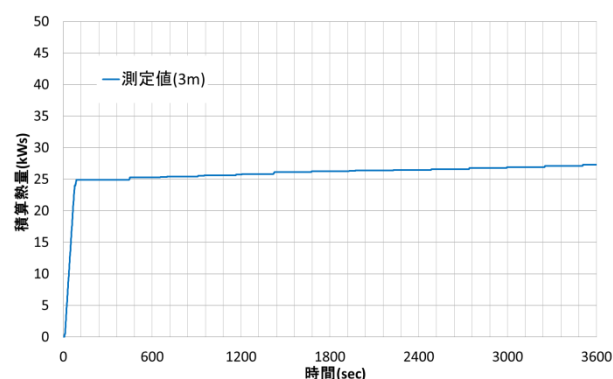


図-3.2 試験結果(3m)

傾きから有効熱伝導率を推定する方法である。ケルビンの線源関数理論を、ある均一な土壤内に地中熱交換器が埋設され、その表面に一定の熱量が流入するときの温度応答として置き換えて算出する。開発した簡易 TRT の試験結果をもとに、ケルビンの線源関数理論を用いて有効熱伝導率の算出方法を検討した。次式の(1),(2)から有効熱伝導率 λ を求めることができる³⁾。

$$\Delta T = m' \cdot \ln(t) + b \quad (1)$$

$$m' = \frac{q}{4\pi \cdot \lambda} \quad (2)$$

ここでは、積算熱量から熱量(W)を求め、地中熱交換量 q は熱量の平均を発熱部の長さで除した値とした。本装置ではロッド先端部の熱電対が示す温度が設定温度より 1°C 低くなった際、設定温度に温度回復を行うように自動的に熱量が出力される。このことから1秒あたりの熱量の経時変化を求め、熱量が大きく上昇した回数を ΔT とした。また、測定開始直後、ヒーター自体を温め、熱源となるステンレス部分が設定温度の 40°C に完全に達するまでに時間がかかる。そこで時間を見積もったところ、深度1mでは403秒、深度3mでは438秒となった。この時間を t_1 と設定し、そこから3000秒間についての有効熱伝導率を求めた。表-2に用いた各値と算出した有効熱伝導率を示す。その結果、1m深度では 0.688W/mK 、3m深度では 0.686W/mK となった。

3. G-HEAT/3D による3次元熱伝導解析

解析には、3次元非定常熱伝導解析ソフトウェア

「G-HEAT/3D」(株式会社地層科学研究所製)を用いた。解析演算には有限要素法が用いられている。モデルを3次元的に作成し、メッシュ分割を行うことで要素数を決定する。これにより温度分布、熱流量を求めることができるとともに、非定常モードによる温度経時変化を3次元で視覚的に把握することができる。

3.1 解析条件

表-3に解析条件を示す。解析に用いたそれぞれの材料の条件値は、ステンレスは既知の値⁴⁾、土の密度は以前にサンプリングした試料から算出した値を用いた。比熱は文献値⁵⁾を参考にし、熱伝導率は本試験から得られた測定値よりケルビンの線源関数理論を参考に算出した値を用いた。

3.2 深度1m地点解析モデル作製

図-4に解析モデル(1m)を示す。1mのモデルは半径5m、高さ5mの円筒型の地盤とし、境界条件はモデルの上面を地表面温度の 13°C 、1m面を地中初期温度の 20°C とした。中

表-2 用いた各値と算出した有効熱伝導率

	1m	3m
Q (W)	18.232	17.787
q(W/m)	72.928	71.149
$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	18	17
t1(s)	403	438
t2(s)	3403	3438
λ (W/mK)	0.688	0.686

表-3 解析条件⁴⁾⁵⁾

	熱伝導率 (W/mK)	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kgK)	熱源設定温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1m	0.688	1780	1800	-
3m	0.686	1780	1800	-
ステンレス	16.7	7700	440	40

簡易 TRT 装置

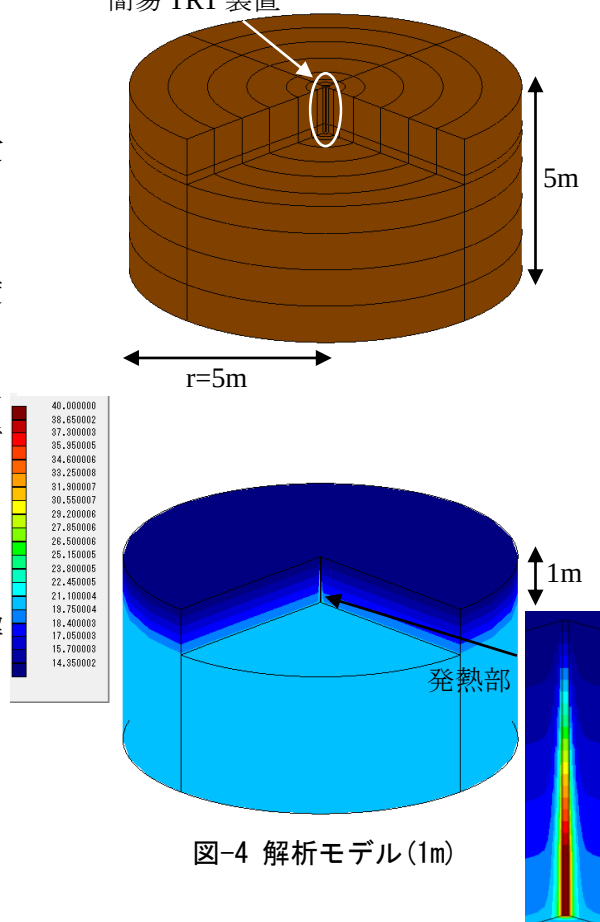


図-4 解析モデル(1m)

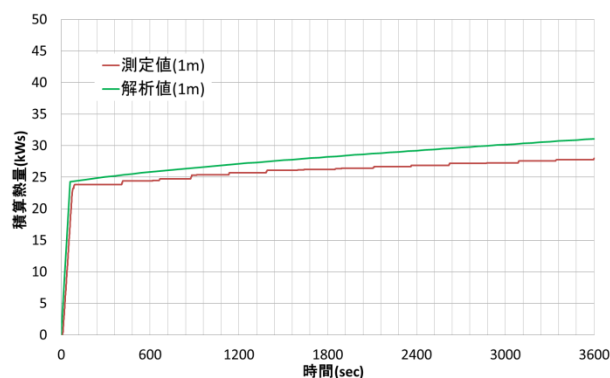


図-5 深度1m測定値と解析値の比較

中央には、1m のステンレスパイプが挿入されている。定常解析を行った後に、簡易 TRT 装置の発熱部であるステンレスパイプの先端 0.25m を 40℃ の固定温度境界として非定常解析を行った。

3.2.1 深度 1m 地点解析結果

図-5 に深度 1m の測定値と解析値の比較を示す。解析値は測定値より少し大きくなった。

3.3 深度 3m 地点解析モデル作製

図-6 に解析モデル(3m)を示す。3m のモデルは半径 5m、高さ 7m の円筒型の地盤とし、境界条件はモデルの上面を地表面温度の 12.5℃、3m 面を地中初期温度の 20℃とした。中央部には、3m のステンレスパイプが挿入されている。1m と同様に定常解析を行った後に、発熱部を 40℃ の固定温度境界として非定常解析を行った。

3.3.1 深度 3m 地点解析結果

図-7 に深度 3m の測定値と解析値の比較を示す。試験開始後 600 秒以降、積算熱量の増加率に違いが見られた。

3.4 考察

今回得られた熱伝導率は 1m 深度で 0.688W/mK、3m 深度で 0.686W/mK であり、一般的な有機質土の熱伝導率 0.7W/mK とほぼ一致した。しかし、それぞれの深度で算出した有効熱伝導率について解析を行った結果、どちらも解析値は測定値よりわずかに大きくなった。この要因として熱伝導率の他に、解析条件で用いた土の密度と比熱は推定値であったことから誤差が生じている可能性がある。今後、試験を行った地盤でサンプリングを行い、その試料から物性値を調べる必要がある。

4. まとめ

開発した簡易 TRT 装置を用いて、実地盤試験を行った。試験結果から熱量を求め、ケルビンの線源関数理論を参考に有効熱伝導率の算出を試みた。算出した結果、有効熱伝導率は深度 1m 地点、深度 3m 地点ともに約 0.7W/mK となった。

この値を用いて 3 次元非定常熱伝導解析を行った結果、測定値と解析値に差が見られたことから、熱伝導率に誤差が生じた可能性が考えられる。しかし、土の密度と比熱の条件は推定値であるため、実際に試験場所にてサンプリングを行い室内試験等で物性値を調べて検証する必要がある。また、理論式を参考とした有効熱伝導率の求め方についても検討を重ねていきたい。

5. 参考文献

- 1)三菱マテリアルテクノ株式会社 HP : http://www.mmtec.co.jp/stories/consulting/heatpump_e.html
- 2)櫻井勇治:「SWS 孔を利用した簡易サーマルレスポンス試験」東京都市大学卒業論文
- 3)官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案) 国土交通省 : <http://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>
- 4)ステンレス協会 HP : <http://www.jssa.gr.jp/contents/faq-article/q6/>
- 5)長野県 HP : <https://www.pref.nagano.lg.jp/ontai/kurashi/ondanka/shizen/documents/ueda3.pdf>

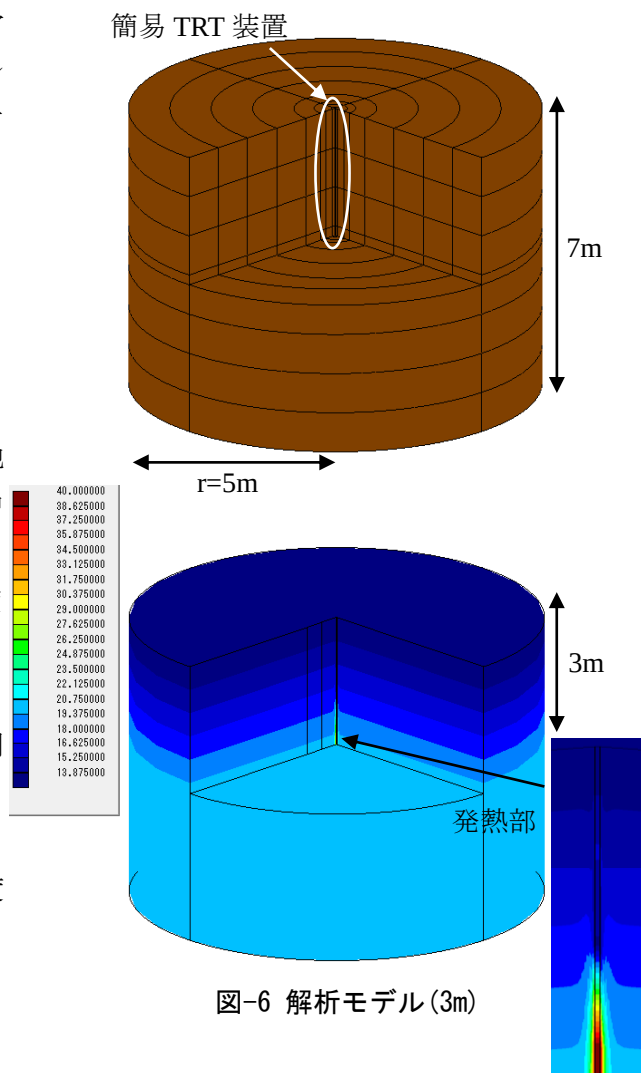


図-6 解析モデル(3m)

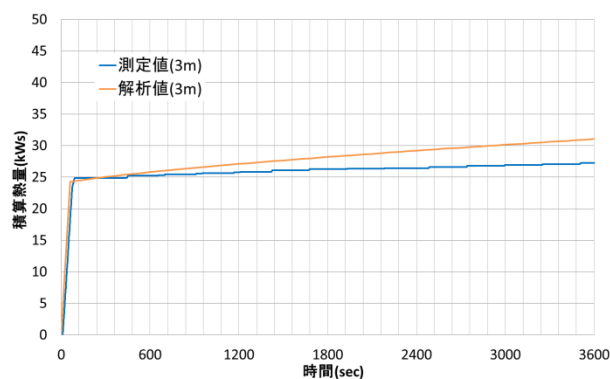


図-7 3m 測定値と解析値の比較