

熱負荷変動を最小化する機能を備えた熱応答試験装置の製作

○小助川 洋幸 ^{A)}

^{A)}秋田大学大学院国際資源学研究科

1. はじめに

配属先の研究室では、石油・天然ガス・地熱などの地下資源に関する研究を行っており、この中で筆者は主に地中熱利用関連の研究支援業務に携わっている。本報告では、業務で製作した現場試験装置について紹介する。

2. 地中熱とは

地中熱は、季節による温度変化が少ない地中の熱特性を示すものであり、この熱を利用することを地中熱利用という。地中の温度は、秋田市において深度 50m で約 15℃、深度 100m で約 17℃で年中一定である。夏は気温より冷たく、冬は気温より暖かいため、この気温との温度差が地中熱を利用する上でのメリットである。

3. 地中熱ヒートポンプシステム

地中の温度を直接使う場合、温度調整ができないため汎用性に乏しい。そこで、地中の熱をヒートポンプの熱源として利用する「地中熱ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump: GSHP) システム」を構築し、空調や給湯、融雪などを行うケースが多い。GSHP システムは、土壤に 100m 程度の井戸を掘削して熱交換チューブを埋設した地中熱交換器を設置し、チューブ内に水などの流体を循環して土壤と熱交換する (図 1)。原理的には一般的なエアコンと同様であるが、例えば夏に冷房する場合、エアコンは 30℃程度の熱い空気に熱を捨てるのに対し、GSHP システムは 15℃程度の土壤に熱を捨てるため、消費エネルギーを削減できる。特に夏冬のピーク時における省エネルギー効果が高いのが GSHP システムの大きな特徴である。

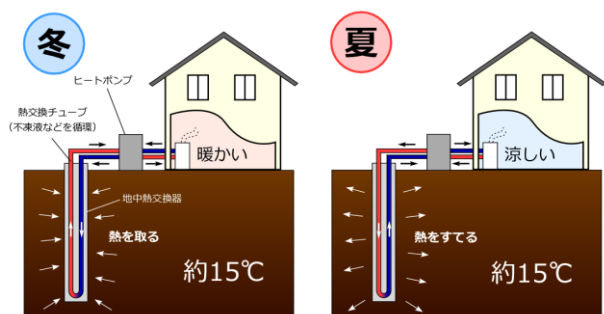


図 1 GSHP システムの概念図

4. 土壤熱伝導率の推定

前述の通り、GSHP システムは土壤の熱を熱源にするため、土壤の熱伝導率がシステムの効率を大きく左右する。この土壤熱伝導率を推定する手法として、熱応答試験 (Thermal Response Test: TRT) がある。図 2 に TRT および装置の概念図を示す。TRT は設置された地中熱交換器にヒーターなどで水を加温しながら循環し、その温度上昇傾向から土壤熱伝導率を推定するものである。TRT を行うための装置は、主にヒーター、循環ポンプ、流量計、温度センサーなどで構成されるが、基本的に装置としては市販されておらず、自前で製作するケースが多いため、配属先研究室でも製作することとなった。

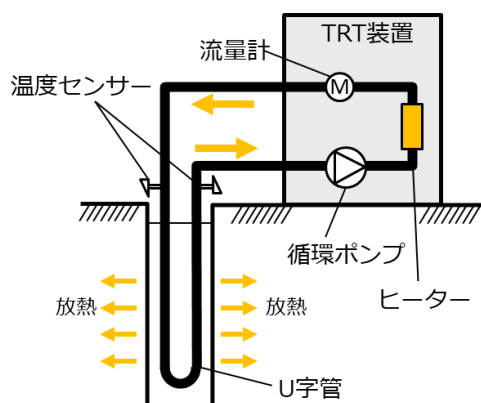


図 2 TRT および装置の概念図

5. TRT 装置の製作

TRT は、土壤に一定の熱負荷を 48 時間以上与えることが規定されており、また装置に使用する機器にも一定の能力や精度が求められる^[1]。装置の製作にあたり、他大学や企業が製作した装置や TRT 関連の文献を参考にしたが、TRT によって得られた循環水の温度変化に乱れがあるケースが散見された。TRT の解析では、地中熱交換器入口出口の平均水温を対数時間でプロットし、グラフの傾きから土壤熱伝導率を推定するのが一般的であるが、温度変化が不安定になると解析結果の精度に影響する (図 4 参照)。この要因として、電源電圧の変動、循環流量の乱れ、装置周辺の気温変化などが挙げられることから、これらの影響を最小化する熱負荷制御機能を備えた TRT 装置の製作に取り組んだ。

製作した TRT 装置を図 3 に示す。装置全体の制御には PLC (Programmable Logic Controller) を用いた。地中熱交換器入口出口水温と循環流量を取り込んで PLC 内で熱負荷を計算し、設定熱負荷を維持するようにヒーターの出力を調整する。循環流量は PLC からの制御信号をインバータに入力してポンプを稼働することにより設定流量を維持する。外気温変動の影響については制御による対応が難しいため、装置内外の配管に十分な断熱処理を施した。また、装置の稼働状況を常に監視し、漏水等による水涸れなどの異常が発生した場合に自動的に装置を停止する安全機能も備えている。



図 3 製作した TRT 装置 (1 号機)

装置完成後、秋田大学構内の試験井において、外乱として意図的に電源電圧を変動させた TRT を実施し、熱負荷制御の有無による解析結果を比較した (図 4)。制御なしの場合は電源電圧の変動により温度変化に乱れが生じ、グラフの傾きが不明確になったことによって、外乱がない場合の解析結果に対して 10~30%の差が現れた。それに対して制御ありの場合は安定した温度上昇が見られ、外乱を与えない場合と同等の解析結果が得られた^[2]。この結果より、熱負荷制御機能による土壌熱伝導率の推定精度の向上が明らかになったことから、本機能の有効性および製作した TRT 装置の動作安定性が示された。

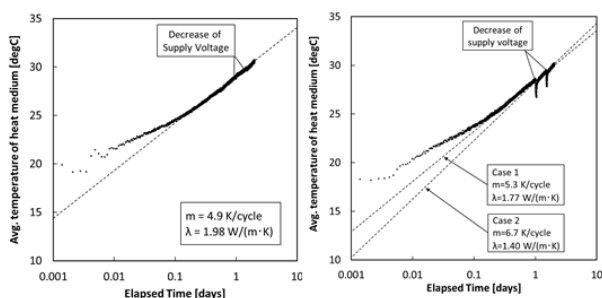


図 4 熱負荷制御機能の有無による TRT 結果の比較^[2] (左：制御あり、右：制御なし)

6. 海外における TRT の実施

TRT 装置 1 号機が完成した後、ある研究機関から東南アジアで TRT を実施したいとの相談があった。しかし、1 号機は大型で持ち運びが不便なうえ、海外の電源に対応しにくいことから、2017 年に小型の TRT 装置を新規製作することになった (図 5)。

まず、装置電源を海外で多く使われている単相 220V とし、それに合わせた機器を選定した。循環ポンプには、1 号機で使用した単相 100V のものではなく DC ブラシレスモーターを使用したものを採用し、計測制御機器を含めて DC24V のスイッチング電源で動作する。ケースには強固なプラスチック製の小型キャリーケースを用い、輸送時の衝撃に耐えるように各部品を強固に固定した。なお、1 号機で採用した熱負荷制御機能と安全機能も備えている。

完成した 2 号機は、計測制御ユニット、温水循環ユニット、およびケーブルやホースなどの付属品を収納するアクセサリボックスの 3 個構成となった。



図 5 海外用 TRT 装置 (2 号機)

本装置を用いて、これまでタイ、ベトナム、モンゴル、タジキスタン、台湾の 5 カ国において TRT を実施してきた。しかし海外における TRT では、日本では起こらないようなトラブルが発生するケースが多く、特に電源事情が乏しい国においては注意する必要がある。例えば、モンゴルの電源電圧は 220V であるが、TRT を実施した箇所では電圧がこれよりも低く、予定していた熱負荷より低い値で試験を実施せざるを得なかった。さらに昼と夜で電圧が変動する状況であったが、その影響は熱負荷制御機能により回避することができた。またタジキスタンでは、日常的に停電が発生することから TRT のために発電機を準備してもらったが、試験途中で発電機のエンジンから燃料漏れが発生したため、危険と判断して急遽商用電源に切り替え、停電が起きないことを祈りながら何とか TRT を終了した。



図6 ベトナム（上）およびタジキスタン（下）における TRT の様子

7. おわりに

現在は、1号機、2号機へ随時アップデートを施すとともに、現在の主力機である高出力タイプの3号機（2020年製作）、ケーブルヒーター方式の4号機（2024年製作）を製作し所持している。いずれの装置にも熱負荷制御機能を備えるとともに、3号機には Raspberry Pi を用いた遠隔監視制御装置も取り付け可能である。

これらの装置はこれまで様々なプロジェクトにおいて使用され、安定した成果を挙げている。しかし、TRT は途中で装置が停止するなどの事態が発生した場合、土壌の温度回復のために加熱時間の倍以上の期間を空けないと再試験ができないため、毎回慎重に取り組んでいる。特に海外における TRT の場合は、渡航期間が決まっているため、失敗は致命的である。これまで様々なトラブルはあったが、何とか回避して大事な試験データを得られてきたことは、自分にとっても大きな自信となっている。

最後に、装置製作や現場試験をはじめ、数多くの貴重な経験をさせていただいている、配属先研究室の教授に感謝の意を表す。



図7 TRT 装置3号機（高出力タイプ）



図8 TRT 装置4号機（ケーブルヒーター方式）

参考文献

- [1] 北海道大学環境システム工学研究室編、地中熱ヒートポンプシステム 改訂第2版、オーム社、130-135、(2020).
- [2] Hiroyuki Kosukegawa et al., Development of Thermal Response Test Device with Automatic Control System, Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25, (2015).