

沖縄島嶼における地中熱冷房システムに関する研究開発（その2）

— 熱応答試験について —

泉川達哉、名嘉健一郎*1

地表面から10mより深い部分の温度は、年間を通じてほぼ一定で、その地域の年間平均温度とほぼ同じだといわれている。地中熱冷房システムは、室外機の代わりに地中に設けた熱交換器を活用する省エネ技術である。工業技術センターでは、地中熱交換器を設計するのに必要な熱応答試験について、将来的に県内で実施することを目指し、試験装置の設計・製作および熱応答試験を行った。

1 はじめに

工業技術センターでは、タイガー産業株式会社、沖水化成株式会社および国立研究開発法人産業技術総合研究所と連携し、沖縄県の地域特性に適した新たなエネルギー需給構造を構築する取り組みとして、地中熱を活用した冷房システムに関する研究開発を行った。

ここでは、地中熱を活用する際に必要となる地盤の見かけ有効熱伝導率を求めた熱応答試験について報告する。

2 熱応答試験の概要

熱応答試験（以下、TRTとする）は、ヒーターで所定の熱量を与えた水を地中熱交換器に循環させ、その温度変化から、地盤の熱物性や地中熱交換器の熱交換能力を推定する試験であり、試験結果は地中熱交換器の本数や長さを決定するためのデータとして活用される。

地盤の熱伝導率には、水飽和状態を考慮した岩石や土壌固有の値である有効熱伝導率（ λ ）と、地下水流れの影響を含む見かけ有効熱伝導率（ λ_a ）があり、TRTで求めることができるのは見かけ有効熱伝導率（ λ_a ）である。TRTの手法や試験装置の仕様は、NPO法人地中熱利用促進協会の「一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書2018年8月版」²⁾(以下、技術書とする)を参考にした。

TRTの概要を図1に示す。地中熱交換器内部に設置した熱交換チューブへ水を循環させ、その時の流量と熱交換チューブの出入口温度を測定する。技術書には測定時間は標準で60時間、最短でも48時間以上とし、サンプリング間隔は1分とすることが定められている。水槽の水は電気ヒーターで加熱されているため、熱交換チューブ出入口温度の平均値は徐々に上昇していくが、熱交換器から地盤への伝熱量が大きいほど、緩やかな温度上昇となる。

試験における経過時間ごとの熱交換量 q_i は以下の式（1）で算出され、その平均値である式（2）を熱交換量 q （W/m）とする。

$$q_i = (L_i \cdot C \cdot \rho \cdot \Delta t_i \cdot 1000) / (60 \cdot D) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 L_i ：ある時間における循環流量（L/min）

C ：水の比熱（ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）（=4.19）

ρ ：水の密度（kg/L）（=1.0）

Δt_i ：ある時間における地中熱交換器の出入口温度差（ $^{\circ}\text{C}$ ）

D ：地中熱交換器の長さ（m）

$$\text{熱交換量 } q = (q_1 + q_2 + \dots + q_n) / n \dots \dots (2)$$

地中熱交換器の伝熱性能を示す見かけ熱伝導率

λ_a （W/m/K）は、以下の式（3）で求める。

$$\text{見かけ熱伝導率 } \lambda_a = q / (4\pi m') \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 m' は、TRTにおいて得られる熱交換チューブ出入口温度の平均値について、時間変化を表した片対数グラフの傾きから決定する。

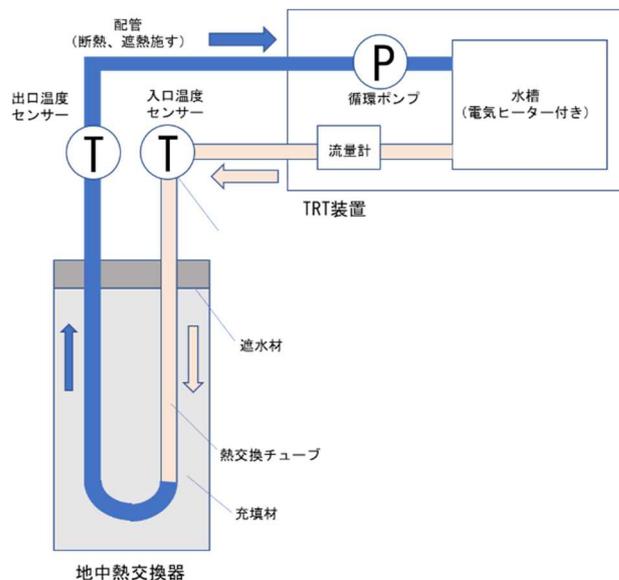


図1. TRTの概要

*1現タイガークロージャ株式会社

3 TRT装置の製作

製作したTRT装置の主な仕様を表1に示す。技術書ではTRT装置の要件として、ヒーターの容量を4 kW以上にすること、異常加熱に備え2つ以上の安全装置を備えること、JISC1604で示された測温抵抗体のクラスをAAもしくはAとすること等が示されているが、今回は納期の都合により測温抵抗体はクラスBを使用した。

製作したTRT装置を図2、図3に示す（外板を取り外した状態）、装置の外形はW1400×D950×H1000 mmである。動力盤の前面はアクリル製の透明な扉を取り付け、運転状況を容易に確認できるようにした。また外板の裏側や配管の表面は断熱処理することで外気の影響を受けにくい構造とした。

加熱用ヒーターは1 kW（定格容量）を5つ備え、各ヒーターへの通電を制御することで加熱量を2 kWから5 kWの間で調整可能とした。水槽へ出入りする水の温度および流量を測定し、動力盤内に設置したデータロガーへ値を保存、試験後はSDカードで試験データを取り出す方式とした。

安全装置として、以下の3つの異常を検知した場合、電源を落とす機能を設けている。

- (1) 水槽の温度が設定値以上になる
- (2) 循環水の流量が設定値以下になる
- (3) 水槽の水位が設定値以下になる

表1. TRT装置の仕様

品名	仕様
データロガー	日置LR8450
流量計	キーエンスFD-M50AY
ポンプ	エバラ25LPD6.15、3相200V
フロートスイッチ	ミスミFLOSK80
熱電対（水槽用）	ミスミTCKTF3.2-65-F3.0-M
測温抵抗体（出入り口用）	ミスミTCPTF3.2-65-F3.0-M
ヒーター	ミスミHP6、1 kW×5個

4 TRTの結果および考察

タイガークロージャ(株)の敷地内に設けた熱交換器A（水充填タイプ）に関するTRTの状況を図4に示す。図ではTRT装置がパレットなどで嵩上げされた状態になっているが、これは、熱交換チューブの屈曲性が思いのほか悪かったため、TRT装置を地面に置いた状態だと、TRT装置と熱交換器を連結する熱交換チューブが山なりになり、チューブ内にエアが残り水の循環ができなかったためである。後日、熱交換チューブを地表近くで切断

し、エルボを用いてTRT装置と連結すると、嵩上げ無しで試験を行うことができた。



図2. TRT装置（正面）

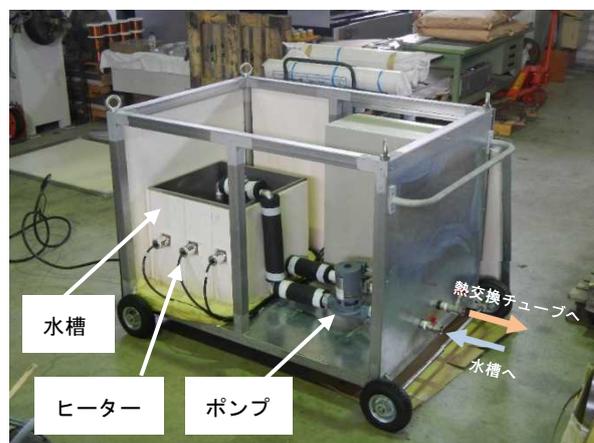


図3. TRT装置（背面）



図4. TRTの状況

TRT時の温度と流量の変化を図5に示す。試験の前半において多少流量にバラツキが確認できるが、熱交換チューブ出入りの温度は緩やかに上昇しており、良好なデータが得られたと考える。熱交換器の単位長さ当たりの熱交換量は式(2)から108.4(W/m)と算出された。熱交換器Aの長さは29 mなので、熱交換器全体での熱交換量は $108.3 \text{ (W/m)} \times 29 \text{ (m)} = 3,140 \text{ W}$ となる。定格容量1 kWのヒーターを3つ使用したので、算出された熱交換量は妥当な値だと考える。

図6は、見かけ熱伝導率を算出するため、出入り口温度の平均値を片対数グラフにプロットしたものである。ここでは30時間経過後の直線部について近似式をあてはめ、傾きを定めることにした。図示したように直線部の傾きは4.917となり、式(3)から見かけ熱伝導率は $1.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ と算出された。後日、TRTの専門業者が同じ熱交換器Aに対して行った試験では、見かけ熱伝導率は $1.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ であった。測温抵抗体のクラスが規定値ではなかったが良い結果が得られたと考えている。

5 まとめ

将来的に県内企業がTRTを担うことを目指し、TRTのノウハウを得るため試験装置の設計・製作およびTRTを実施した。技術書で示された手法に沿って作業を行うことで、TRTの目的である見かけ熱伝導率を求めることができた。今後は、測温抵抗体の精度向上や断熱処理の徹底などを行いつつ、今回とは異なる珪砂が充填されたタイプの熱交換器についても試験を行うなど、更なるノウハウの習得に努めたい。

本取り組みは「令和3年度先端技術活用によるエネルギー基盤研究事業補助金」(2019技015)で実施したものである。

参考文献

- 1) ボアホール型地中熱ヒートポンプシステム
大成建設技術センター報 第44号(2011)
- 2) 一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書
2018年8月版 NPO法人地中熱利用促進協会

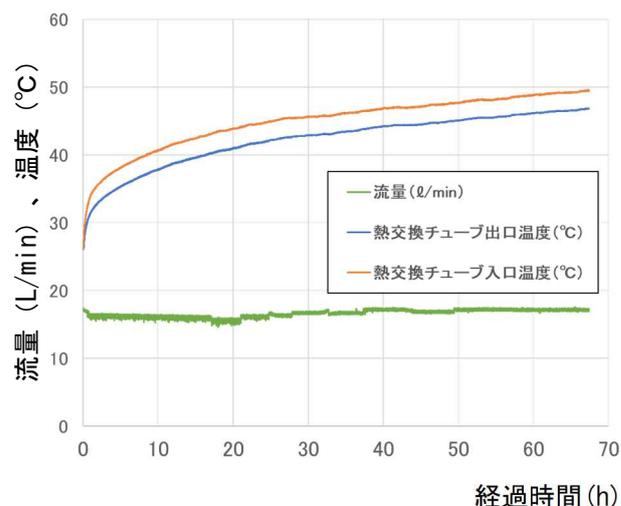


図5. 熱応答試験時の温度と流量の変化

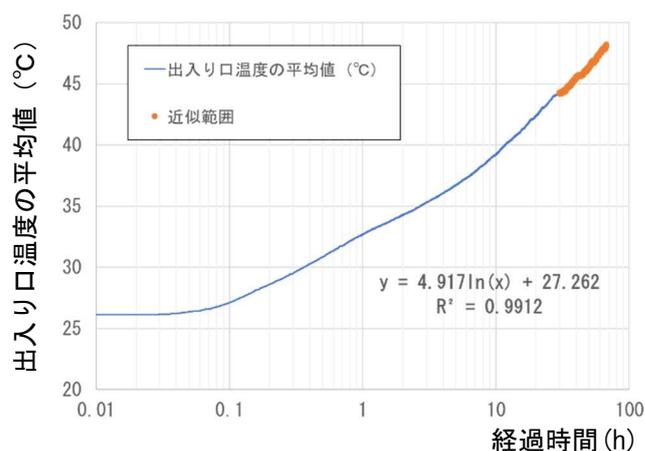


図6. 出入り口温度の平均値 (片対数グラフ)

Research and development of a geothermal cooling system in Okinawa islands (Part 2)

-A thermal response test-

Tatsuya IZUMIKAWA, Kenichiro NAKA^{*1}

Okinawa Industrial Technology Center

^{*1}Tiger Global Co., Ltd.

The temperature deeper than 10 meters below the surface of the ground is approximately constant throughout the year and is considered to be almost the same as the annual average temperature in the relevant area¹⁾. A geothermal cooling system is an energy-saving technology that uses a heat exchanger placed in the ground instead of an outdoor unit. With the aim of conducting a thermal response test necessary for designing a ground heat exchanger in the prefecture in the future, the Okinawa Industrial Technology Center designed and produced test equipment and conducted a thermal response test.

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。