

論文・報告

浅層土壌の地中熱を利用した空調の実験的検討

～短尺鋼管を用いた同軸型地中熱交換器の熱負荷試験について～

Thermal Tests on Downhole Heat Exchangers Using Short-Length Coaxial Steel Pipes

勝俣 盛^{*1}
Mori KATSUMATA

畠中 真一^{*1}
Shinichi HATAKENAKA

越後 滋^{*2}
Shigeru ECHIGO

稲田 正信^{*3}
Masanobu INADA

清水 礼二^{*4}
Reiji SHIMIZU

近年、諸外国では一般住宅やオフィスビルといった民生分野や工場などの産業分野における冷暖房や給湯などの熱需要に対して、地中熱を利用したヒートポンプシステムが広く普及している。しかし、わが国では他の再生可能エネルギーと比較して認知度が低く、かつ設備工事のイニシャルコストが負担となり一般化していない。そこで、研究目的は地中熱を利用した空調システムを低廉化するため、従来よりも浅い土壌に埋設する地中熱交換器を開発することである。その解決策として、短尺鋼管製の同軸型地中熱交換器を考案して製作し、施工試験を行った。次に地中熱交換器の特性・性能を把握するために、自社試験フィールドで熱応答試験、強制排熱試験を実施した。これらの結果から、短尺鋼管を用いた同軸型地中熱交換器は、従来のボアホール方式と同等以上の機能を有することがわかった。

キーワード：浅層土壌，地中熱ヒートポンプ，鋼管，同軸熱交換器，熱応答試験

はじめに

わが国は、1次エネルギー供給の8割以上を輸入に依存しており、国際社会の動向に左右されないエネルギーの安定供給、安全確保が強く望まれている^{1),2)}。このような社会情勢の中で、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故により、当年の夏は全国的に電力需給が逼迫した。東京電力管内で15%の電力抑制が要求されると、電力需要のうち約3割を占める空調需要の引き下げが喚起された。一般的に、空調設定温度は家庭で24.5℃、オフィスで26℃と言われ、全ての家庭が28℃に引き上げれば6～10%の節電効果が見込まれた^{3)～5)}。しかし、家庭での使用状況は、実際には設定温度が27℃前後、稼働時間が8時間未満であったとの調査結果がある⁶⁾。

この事故を契機に、今後のエネルギー政策が見直され、再生可能エネルギー技術の導入拡大が急務になった。近年、急速に普及している技術として、ヒートポンプが挙げられる⁷⁾。ヒートポンプは「既にある熱」を利用するため、投入した電気エネルギーに対して3～6倍の熱エネルギーを取得できる。

海外では空調の熱源に、地中熱ヒートポンプシステム (Ground Source Heat Pump System ; 以下、GSHP) が普及している。これは、地下数十～百数十 m まで掘削した鉛直孔に U 字管を埋設して、管内に熱媒を循環させて地中に排熱、あるいは地中から採熱する。この方法は施工が簡便であるが、わが国ではコストの殆どが掘削に費やされる。このため、コスト軽減を目的に建物基礎杭を熱交換器に利用する方法などが提案されている^{8)～12)}。しかし、オフィスビルなどの場合、基礎杭利用のみで全ての空調を賄うことは非常に困難である。一方、最大の市場となる一般住宅を対象に、高島ら¹³⁾はボーリング掘削しない方法を提案している。価格面で優れ、展開が期待されるが、都市型狭小住宅では適用困難と思われる。

これまで、著者らは自社建屋(写真1)の冷暖房にGSHPを導入して、基礎データを蓄積してきた^{14),15)}。この結果を踏まえて、より安価で高効率の短尺鋼管製の地中熱交換器を考案した。この地中熱交換器を用いて、製作・施工試験、熱応答試験(Thermal Response Test ; 以下、TRT)を実施した。さらに、冷房による強制排熱を行い、地中温度などの経時変化をモニタリングした。これらの試験結果から、有用な知見が得られたので以下に概説する。

*1 川田工業㈱技術研究所 主幹
*2 川田工業㈱技術研究所 所長

*3 川田工業㈱生産本部富山工場生産技術課 係長
*4 川田工業㈱建築事業部エコプラス推進室 室長



写真1 試験フィールド

1. 浅層地中熱交換システム

(1) 概要

一般的な GSHP は、地中に熱交換器を埋設するために、まず鉛直孔を掘削する。この施工費は、深度、孔径および土質・地質などで異なる。最も普及が進んでいる米国では3千円/m程度⁹⁾であるが、わが国では10~15千円/mである。地質が複雑で崩壊性の地層が多く、作業が煩雑になるためと言われている。例えば、小規模な戸建住宅(延べ床面積:100 m², 熱負荷係数:2.4W/(m²K))に導入する場合、延べ100m程度の掘削工事が発生し、それだけで数百万円の支出になる。

一方、海外では熱交換器を浅層に水平埋設する方法として、ループ状に配管するスリンキー方式も実績豊富である。施工費は比較的安価であるが、鉛直埋設より採熱量が劣るため、広い敷地面積が必要になる。長野¹⁶⁾は、延べ床面積に対して1.4倍必要と試算している。庭坪が狭小な都市型住宅には不向きである。

そこで、イニシャルコスト削減を目的に“自走式の車両系建設機械を用いて、高効率な短尺の地中熱交換器を浅層に埋設する方法”について検討した。まず、施工に関しては、穴掘建柱車を想定した。この車の最大掘削深さは、標準で-5m程度であるが、オーガー延長シャフトを装着することで-8m程度になる。全長8m未満の地中熱交換器であれば、鉛直孔に建て込むことができる。次に、高効率な地中熱交換器として、φ400mmの鋼管基礎杭(有効長さ:38.5m)を用いて140W/m採熱した事例¹⁷⁾が挙げられる。従って、浅層に埋設した短尺の地中熱交換器で、この採熱量が再現できれば、コスト削減可能と考える。

以上より、3坪スーパーハウス(以下、計測ハウス)内に設置したGSHP利用空調の熱源として、浅層土壌に埋設した短尺鋼管製の地中熱交換器4本(図1;①~④)に、ラインポンプ(以下、LP)、緩衝タンクを接続して、熱媒を循環させるシステムを構築した。このハウス内で稼働制御と計測機器の自動計測を行った。なお、土中の伝熱を確

認するため、地中熱交換器①、③の脇に温度観測井①、③を設けた。以下に各設備の概要を述べる。

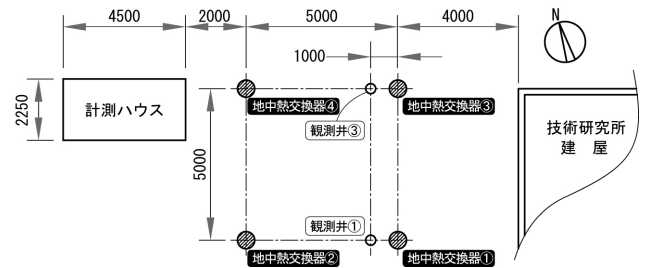


図1 平面配置図

(2) 地中温度

これまでの調査¹⁵⁾から、試験フィールドにおける深度方向の温度変化は図2のとおりであった。これより、深度-5m程度から約16°Cの不易層と見なすことができる。

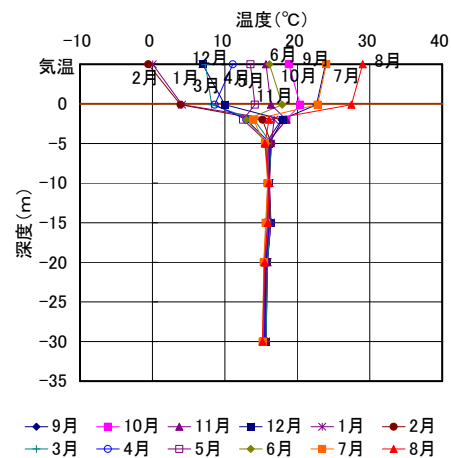


図2 月毎の温度変化(毎月1日, 24時間平均)

地表面に周期的な温度変化 A_0 °Cが与えられるとき、地中の温度変化 A °Cは深くなるにつれて小さくなる。また、その位相(最大値・最小値を示す時間)は、深いほど遅い。

一様な媒質で構成された土壌の場合、地表面からの深さ z mにおける温度変化 A とその位相の遅れ ϵ は式(1)、(2)で表すことができる¹⁹⁾。

$$A = A_0 \times \exp\left(-z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \quad (1)$$

$$\epsilon = z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} \quad (2)$$

ここで、 κ : 熱拡散率 [m²/sec]

τ : 周期 [sec]

$$\omega : \text{角振動数 [1/sec]} = \frac{2\pi}{\tau}$$

いま、土壌(ローム; 含水率36.6%)の熱拡散率 $\kappa = 0.26 \times 10^{-6}$ m²/sec²⁰⁾、地表面の温度変化 $A_0 = 24$ °C(図2)とすれば、深度-2mの温度変化は 16 ± 3.5 °C程度、位相の遅れ ϵ は約3ヶ月である。図2とよく一致している。従って、深度-2m程度であれば、地中の温度は、夏期の冷房排熱時に16°C以下、冬期の暖房採熱時に16°C以上になる。これ

は、熱交換が有利な環境と言える。

(3) 地質調査

ボーリング調査の結果、試験フィールドの地質は、表1のとおりであった。地中熱交換器を埋設する深度の土壌は、鹿沼土と呼ばれるローム(N値;5未満)で、保水性が高い土であった。土層断面を写真2に示す。深度-17m程度に地下水が認められたが、その移動は水平方向よりも上下方向に卓越していた。このため、地中熱交換器の埋設深度

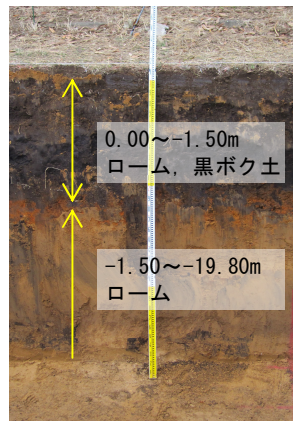


写真2 土層断面

では地下水移流に伴う熱拡散が期待できない¹⁸⁾。

一方、孔壁が深度-15m程度まで崩壊することなく自立したことから、無水で鉛直孔を掘削できると判断した。

表1 ボーリング調査の結果

深度 (m)	土壌
0.00 ~ -1.50	ローム, 黒ボク土
-1.50 ~ -19.80	ローム
-19.80 ~ -35.27	粘土混じり砂礫

(4) 設備構成

計測ハウスの外観と設備を写真3に示す。計測ハウスは、内寸法が幅4,350mm×奥行2,120mm×天井高2,140mmで、6畳相当の広さの軽量鉄骨造で断熱を施していない。ただし、ガラス窓から夏季の太陽光が直接射し込むと、温室効果により室内温度が異常上昇する恐れがある。このため、南面窓はレースカーテンと“緑のカーテン”を配置して、北面窓は省エネ窓ガラス断熱シートクリアを貼付して日射を遮った。さらに、地表面からの熱流を遮断するため、床組は防水合板12mm+スタイロフォーム25mm+防水合板12mmのサンドイッチ構造とした。



(a) 外観(南面)



(b) 部屋内状況

写真3 計測ハウス

このハウス中で、定格出力2kWの直膨式GSHP(EC007-1HZC)を冷暖房運転して、各種計測を行った。熱媒にはプロピレングリコール系不凍液(ウェストブラインPS)を20%に希釈して用いた。これを定格出力0.25kWのLP(25LPD)を用いて、一定流量17ℓ/minで循環した。なお、熱媒の温度収縮・膨張に伴う管内の圧力変動を吸収するために、回路に緩衝タンクを設けた。

熱媒の流量は、GSHPの吐出口に装着した電磁式流量計(FD-M50AY)と、熱交換器毎の吐出口に装着した渦式流量計(VF-2033-F01)で計測した。熱媒温度および室内温度制御には測温抵抗体を、その他はT型またはK型の熱電対を用いて測定した。また、室内の湿度計測には湿度センサー(B-530)を使用し、GSHPとLPの消費電力は、汎用電力トランスデューサ(PTS-2S)を用いてデータロガー(GL820)に記録した。

(5) 地中熱交換器

地中熱交換器は、鋼管製で同軸管方式を採用した。この方式は、熱媒の循環方向により、順循環(内管内に冷水を注入して、外管と内管の環状部から温水を取り出す)と逆循環(外管と内管の環状部に冷水を注入して、内管内から温水を取り出す)がある。田子ら²¹⁾は、深度方向に温度勾配が有る場合、逆循環で内管材質の熱伝導率を小さくすれば、採熱量が多くなることを報告している。そこで、本地中熱交換器は、熱媒を逆循環で、内管に断熱材を貼付すると共に、環状部に乱流促進板を配置して、性能向上を図った。なお、品質劣化の要因となり得る現場での溶接作業を避けるため、工場製品にした。

(6) 製作・施工試験

地中熱交換器の寸法は、生産性、輸送性および施工性を考慮して、全長5m以下、最外径φ500mm程度に決めた。全長5m以下であれば、平ボデーまたはクレーン付きの4tトラックに積載可能である。また、穴掘建柱車で施工する場合、掘削径は最大φ600mmである。鋼管に伝熱板(以下、フィン)を付けて、最外径がこの程度であれば、鉛直孔との隙間に、埋戻土を容易に充填できる。

これらより、一般構造用炭素鋼管(STK400)の外径355.6mm×肉厚6.4mmに、幅75mm×厚さ6mmの平鋼(SS400)を8枚取り付け付けた地中熱交換器③、④と、取り付けない地中熱交換器①、②を自社工場にてモジュール化した(写真4)。この平鋼はフィン効果を期待したもので、取り付けにより表面積が約2倍になる。



写真4 熱交換器の外観

鋼材の腐食については、内面は防錆材含有の不凍液を

充填すること、外面は腐食速度を0.02mm/年として腐食代2mmを考慮したことから、内外面とも黒皮のままで防錆処理を施していない。製作後に耐圧テストを行い、水漏れの無いことを確認した。

鉛直孔は、LHV工法(本体ベース0.7m³級ホイール式油圧ショベル)を採用して、アースオーガー(φ600mmスクリュー)で掘削した。掘孔後に、スクリューを脱着して、土被り2mとなるように地中熱交換器を深度-7mに埋設した(写真5)。このとき、鉛直孔と地中熱交換器の中心位置は一致していない。この間隙を、黒ボク土あるいは山砂(ベントナイト添加)で埋め戻し、施工性、充填性および熱交換性能を比較した。ここで、山砂にベントナイトを添加した理由は、その膨潤特性を利用して、埋め戻しが密実充填することを期待した。ただし、添加量が多いと止水材として機能する。また、山砂よりも熱拡散率が低く、充填材としての伝熱性能を損なう恐れがある。そのため、添加量は1孔0.9m³当たり顆粒状20kg(クニフォースNK-G)、パウダー状25kg(クニゲルMB)にした。なお、埋め戻しに際しては、いずれも注水しながら棒で突き固めた。

地中熱交換器①～④は、表2に示すとおり、以下Ex-①～④と表記する。

2. TRT

(1) 概要

熱交換性能は、短期的には地中熱交換器の熱抵抗、長期的には周辺土壌の熱交換性能の影響が大きい。すなわち短期的な熱抵抗特性は、地中熱交換器の材質、充填材、孔径などに依存する。また、浅層に短尺の大口径管を適用した地中熱交換器について観察されたデータが乏しい。そこで、表2に示した地中熱交換器の熱特性を把握する目的で、Case-1;熱交換器の表面積、Case-2;埋戻土の熱拡散率、Case-3;熱媒の入口温度をそれぞれパラメータとして、TRTを実施した。さらに、熱媒温度、加熱量を実測したデータから、下記の手順で熱抵抗、有効熱伝導率を導出した。

(2) 熱抵抗、有効熱伝導率の推定

地中熱交換量 q が一定の場合、熱媒温度 T_{ave} (入口温度と出口温度の平均値)の経時変化は、ケルビンの線源理論より、式(3)で表すことができる¹⁸⁾。

$$T_{ave} - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda} \left(-\ln \frac{r}{2\sqrt{\kappa t}} - 0.2886 \right) \quad (3)$$

ここで、 T_i : 初期地中温度 [°C]

q : 単位長さ当たりの熱交換量 [W/m]

λ : 地盤の有効熱伝導率 [W/(mK)]

r : 線熱源からの距離 [m]

κ : 熱拡散率 [m²/sec]

t : 時間 [sec]



(a) オーガー掘孔

(b) 熱交換器設置



(c) 埋設

(d) 山砂埋戻し+水締め

写真5 施工状況

表2 地中熱交換器の種類と配置

表記	地中熱交換器			
	Ex-①	Ex-②	Ex-③	Ex-④
管寸法	φ355.6mm×t6.4mm×L5000mm (JIS G 3444)			
フィン	なし	なし	あり	あり
埋戻土	山砂	黒ボク土	山砂	黒ボク土

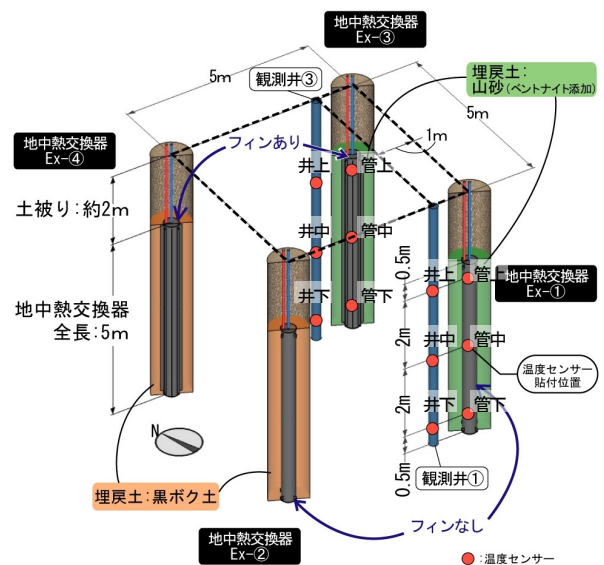


図3 地中熱交換器の配置と温度計測位置

式(3)を観察すると、時間とともに変化する変数は、時間 t のみであることがわかる。そこで、時間 t に依存しない項を定数 b で整理すると、次式(4)に置換できる。

$$T_{ave} - T_i = m \ln(t) + b \quad \text{ただし、} m = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (4)$$

ここで、式(4)の定数 m は、自然対数 $\ln(t)$ をx軸、熱媒温度 T_{ave} をy軸として、実測データを描画した単回帰式の“傾き”である。同じく、定数 b は切片である。

従って、有効熱伝導率 λ は、導出した m を式(4)に代入することで、算出できる(作図法)。

一方、地中熱交換器の熱抵抗 R は、次式(5)に λ を代入

して算出する(マッチング法)。

$$T_{ave} - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda} \left(-\ln \frac{r}{2\sqrt{\kappa t}} - 0.2886 \right) + qR \quad (5)$$

(2) Case-1

表面積が異なる地中熱交換器の熱交換性能を把握するため、フィンを取り付けないEx-①と取り付けたEx-③を対象に、等しい加熱量を加えるTRTを実施した。

試験の諸元を表3、模式図を図4、試験結果を図5、表4にそれぞれ示す。

表3 Case-1の諸元

項目	単位	地中熱交換器	
		Ex-①	Ex-③
試験期間	月日	加熱：3月30日～4月8日 回復：4月8日～4月18日	
配管	—	独立	独立
平均流量	ℓ/min	9.5	9.7
平均加熱量	W	1,099	1,007

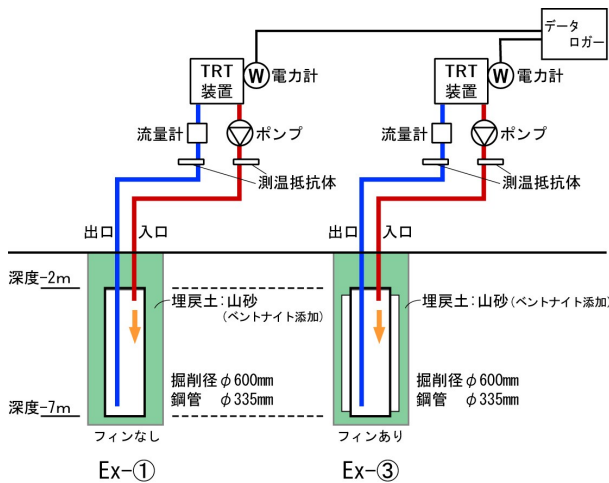


図4 Case-1の模式図

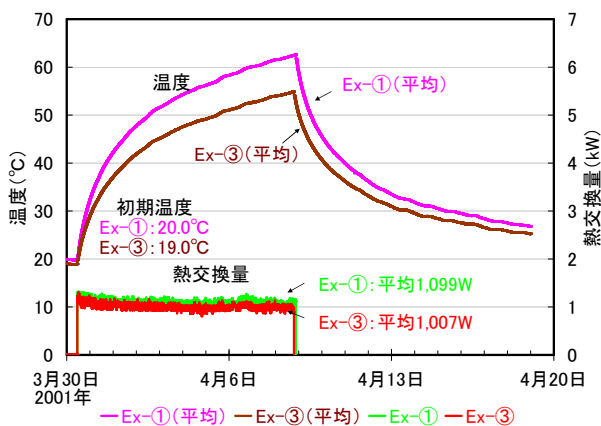


図5 熱媒平均温度と熱交換量の経時変化 (Case-1)

表4 Case-1の結果

項目	単位	地中熱交換器	
		Ex-①	Ex-③
単回掃式の傾き: m	—	11.40	10.22
熱交換量: q	W/m	219.8	201.4
有効熱伝導率: λ	W/(mK)	1.53	1.57
熱抵抗: R	K/(W/m)	0.061	0.047

有効熱伝導率が同程度であることから、土中の伝熱性能は、ほぼ同じ条件と判断できる。この環境で、熱抵抗はEx-③がEx-①よりも20%程度小さな値であった。つまり、短期的な熱交換性能は、表面積の拡大で向上する。

一方、長期的な熱交換性能は、地盤の熱伝導に大きく依存する。そこで、3ヶ月間24時間連続で冷房排熱を放熱し続けた時に熱媒平均温度が30℃を越えない平均排熱量を計算した。ここで30℃と設定したのは、冷房時の2次側熱媒温度がこの程度の値であれば、他メーカーのGSHPを使用しても、COPが空気熱源ヒートポンプよりも十分に高くなると見込まれるからである。その結果、Ex-①が32W/m、Ex-③で34W/mであった。その差は5%程度であり、熱抵抗から見た熱交換性能の差分約20%よりも非常に小さい。

先述のとおり、長期連続運転の条件下では周辺土壌の影響が支配的となり、熱交換器自体の性能の差が小さく表現されることが確認できた。これに対して、1日当たりの運転時間を12時間(稼働率50%)にすれば、連続運転の2倍となる64w/m、68w/mの排熱が可能である。

(3) Case-2

埋戻土の熱拡散率が異なる地中熱交換器の熱交換性能を把握するため、山砂(ベントナイト添加)で埋め戻したEx-③と黒ボク土で埋め戻したEx-④を対象に、等しい加熱量を加えるTRTを実施した。

試験の諸元を表5、模式図を図6、試験結果を図7にそれぞれ示す。なお、データ欠測の関係上、本ケースについては加熱過程についてのみ解析を行った。

表5 Case-2の諸元

項目	単位	地中熱交換器	
		Ex-③	Ex-④
試験期間	月日	加熱：5月18日から5月23日 回復：中止	
配管	—	並列接続	
平均流量	ℓ/min	9.6	7.4
平均加熱量	W	977	964

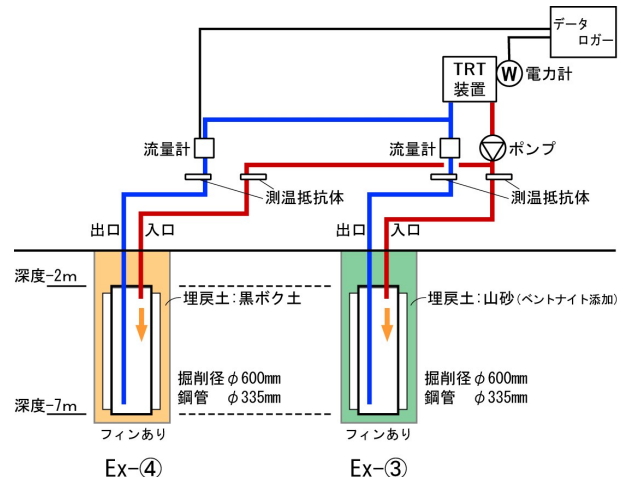


図6 Case-2の模式図

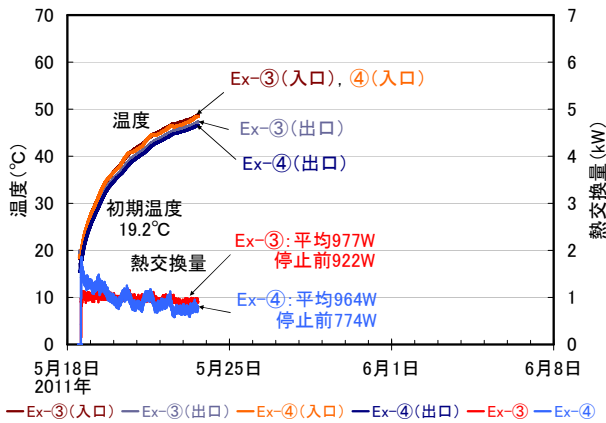


図7 熱媒温度と熱交換量の経時変化 (Case-2)

加熱開始直後の熱交換量は、Ex-④が多かった。これは、Case-1でEx-③を使用したのに対し、Ex-④は過去の負荷試験影響が小さかったためと思われる。これに対して、Ex-④の熱交換量が時間経過と共に低下し、Ex-③よりも小さくなったのは、埋戻土の影響であり、黒ボク土は熱交換性能が劣ることを示唆している。

計器不具合のため、時間経過と共にEx-④の流量が減少した。当然ながら、熱交換量が変動しており、作図法が適用できない。しかし、Case-1の結果から、地盤の有効熱伝導率は等しいと考える。また、加熱開始から十分に時間が経過しており、熱交換量の差は充填材の熱抵抗を反映した結果と言える。ここで、加熱停止前の熱交換効率を見ると、Ex-③が922W、Ex-④が774Wであった。このことから、黒ボク土の熱交換性能は、山砂(ベントナイト添加)よりも、16%程度低いと推察できる。ただし、Ex-④は流量が少なかったため、鋼管内での熱伝達率が低くなり、その影響が含まれた可能性もある。このため、本試験結果のみでは埋戻土の優劣が付けられなかった。

(4) Case-3

熱媒の流入温度が異なる地中熱交換器の熱交換性能を把握するため、Case-2の配管を直列接続に変更して、TRTを実施した。

試験の諸元を表6、模式図を図8、試験結果を図9、表7にそれぞれ示す。熱交換量はEx-④よりもEx-③が始終多かった。有効熱伝導率は1.51W/(m・K)であり、Case-1で求めた値1.57W/(m・K)とほぼ同じであった。有効熱伝導率を1.57W/(m・K)と仮定して、地盤までの熱抵抗を推定した結果、Ex-③の熱抵抗は0.040K/(W/m)で、これはCase-1求めた値0.047K/(W/m)と同程度であった。一方、Ex-④の熱抵抗は0.056K/(W/m)と推定される。これはEx-③よりも20%以上低い値であり、Case-2の結果でEx-③の熱交換性能が16%程度高かったこととも整合する。

表面積を拡大する目的で、フィンを取り付けた熱交換器を並列と直列としたときの加熱開始後の温度上昇データを比較した結果、熱交換に関する傾向はほとんど同じ

であった。一方、LPの吐出量に着目すると、流量を少なくできる直列接続がより経済的である。

表6 Case-3の諸元

項目	単位	地中熱交換器	
		Ex-③	Ex-④
試験期間	月日	加熱：6月23日～7月2日 回復：7月3日～7月13日	
配管	—	直列接続	
平均流量	ℓ/min	9.6	
平均加熱量	W	1,001	876

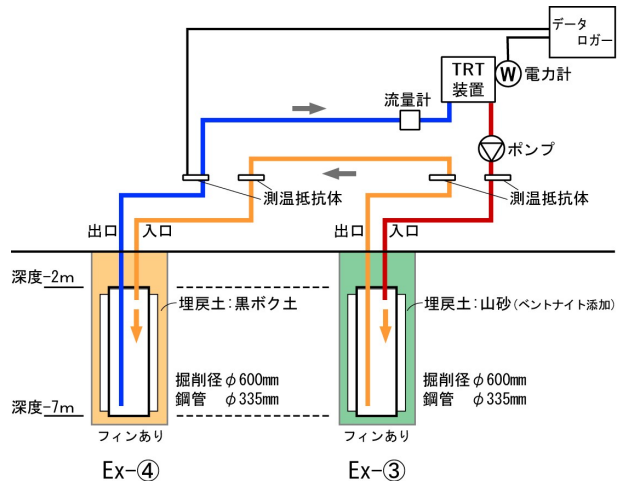


図8 Case-2の模式図

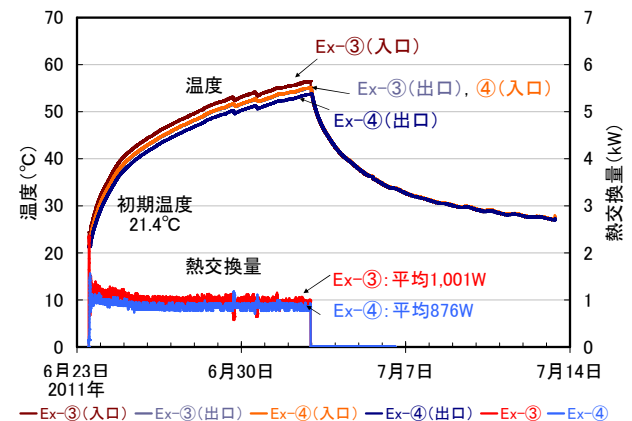


図9 熱媒温度と熱交換量の経時変化 (Case-3)

表7 Case-3の結果

項目	単位	地中熱交換器	
		Ex-③	Ex-④
単回帰式の傾き：m	—	9.86	
熱交換量：q	W/m	187.7	
有効熱伝導率：λ	W/(mK)	1.51	
熱抵抗：R	K/(W/m)	0.048	

(5) 考察

熱媒温度とヒートポンプ能力の関係²²⁾から、冷房COPは、1次側出口の温度を上げると低下し、2次側出口の温度を下げて低減する。暖房COPも同様である。従って、高効率なシステムを構築するためには、冷房運転の場合は、2次側冷房負荷を小さくして、1次側排熱量を多くした方がよい。しかし、これは地中熱交換器の全長を増や

し、2次側の放熱機器の伝熱面積を増やすことを意味する。つまり、消費電力などのランニングコストを抑えるために、熱交換器の量を増やす必要があるが、これはイニシャルコスト増加に繋がる。一方、その逆は熱交換器の低減により、消費電力の増加を招く恐れがある。

従って、システム構築に際しては、実際の空調稼働状況、償却期間など吟味して、ライフサイクルコストを試算することで過剰な設備投資を回避できると考える。

3. 冷房運転での強制熱負荷

(1) 概要

一般的な家庭において、当年夏の冷房設定温度は、27℃前後、空調稼働時間は平均 8 時間未満であったと思われる。このような運転と停止を繰り返す条件で GSHP を運用した場合、地中への排熱状況は、連続的な排熱負荷とは異なるものと思われる。そこで、GSHP を冷房運転した際に、その運転制御方法により熱交換性能がどのような変動するか、24 日間連続で計測した。

本試験では先の TRT の温度影響が残っていない Ex-①と Ex-②の熱交換器を並列接続して、強制熱負荷試験を行った。TRT の結果から明らかのように、安全側の設計条件として、熱媒温度の上限を 30℃とすれば高い COP を維持できる。しかしこれは、期間連続運転のベース・ロードには適当であるが、日運転時間が限られ、温度変動幅が著しい場合は、不経済設計に成りかねない。そこで、Case-4；オフィスなど業務で空調稼働時間が制限される場合（室内温度に関わらず熱媒温度制御で平日の日中 9 時間のみ運転）と Case-5；一般家庭など時間制限がない場合（室内温度制御で 24 日間連続運転）を想定して、基礎データ取得を目的に強制熱負荷試験を行った。試験の諸元を表 8 に、試験結果を図 10 に示す。なお、モニタリングは 1 分毎に行ったが、ここでは傾向をみるため、実務レベルの精度として、毎時 10 分間隔でデータをサンプリングした。

(2) Case-4

図 10(a) に示すとおり、土日祭日の運転休止により、熱媒温度は前週月曜の温度近くまで回復することがわかった。また、運転期間内の天候が優れず、気温上昇が抑えられたが、結果として熱媒温度は 40℃に達しなかった。

熱媒温度差(熱媒の入口温度-出口温度)は Ex-①(ΔT)が 1.50℃、Ex-②(ΔT)が 1.63℃であった。Ex-①よりも Ex-②が優れ、TRT の結果から考察した“黒ボク土<山砂(ペントナイト添加)”と異なる結果であった。この原因は、Ex-②は本試験で初めて熱負荷したものであり、Ex-①よりも前述した一連の試験の影響が少なかったことによるものと考えられる。図 10(c) に示した熱交換器の熱媒温度差、Ex-①(ΔT)と Ex-②(ΔT)を比較すると、試験開始直

後は Ex-②が高い温度であったが、試験終盤はほぼ同じであった。

(3) Case-5

消費電力に着目すると、熱媒温度制御運転時と比較して、GSHP は 512W から 524W に、LP は 228W から 231W にそれぞれ増加している。LP の運転時間が等しいので、本来消費電力は同じはずである。この差は熱媒温度上昇により LP が加熱されたため、効率が低下したものと考える。一方、HP の増分は冷房運転の時間延長によるものである。結果として、運転制御の変更に伴う消費電力の増分は数%であった。

オフィス用空調のように、平日の日中連続で稼働する GSHP でも、土日祭日および夜間に休止する方法で用いるのであれば、消費電力が断続的に増加するが、COP の低下は僅かと推察できる。

表 8 強制熱負荷試験の結果

項目	単位	種別	試験ケース	
			Case-4	Case-5
制御方法	-	モニタ	熱媒温度	室内温度
		位置	熱媒出口	天井近傍
制御温度	℃	停止	40.0	28.0
		再始動	39.8	28.2
日稼働時間	時間	GSHP	9時間	室温
		L P	24時間	24時間
平均温度	℃	室外	24.6	25.6
		室内	26.4	26.9
熱媒流量	ℓ / min	Ex-①	8.51	8.61
		Ex-②	8.43	8.52
熱媒温度差	℃	Ex-①	1.50	1.53
		Ex-②	1.63	1.47
排熱量	W	Ex-①	894	922
		Ex-②	962	877
消費電力	W	GSHP	512	524
		L P	228	231

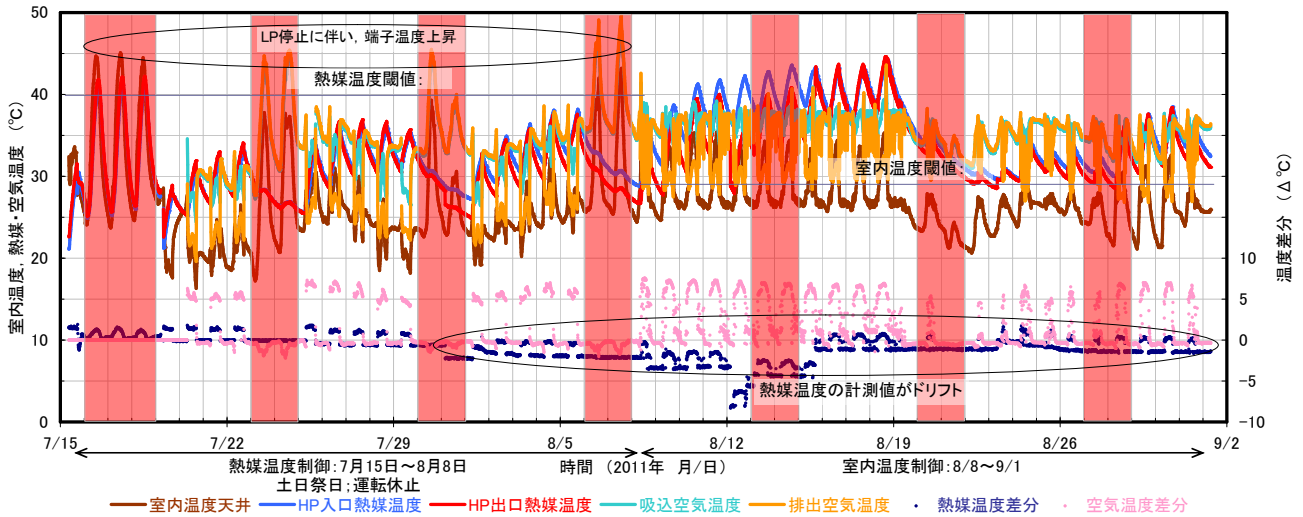
(4) 考察

熱媒を逆方向に循環しているため、冷房運転時の鋼管表面温度は“管上>管中>管下”の順に高い。一方、観測井①の初期温度は、“井中≒井下>井上”であった。これが、“井中>井下>井上”に変遷して、さらに熱負荷を継続したことで“井中>井上≒井下”になった。先述のとおり、浅深度の地中温度の変化は地表面に対して位相の遅れがある。これは、深度-2.5mの“井上”の初期温度が他より低いことと合致する。観測井の温度は、最終的に“井上>井中>井下”になると推定できる。

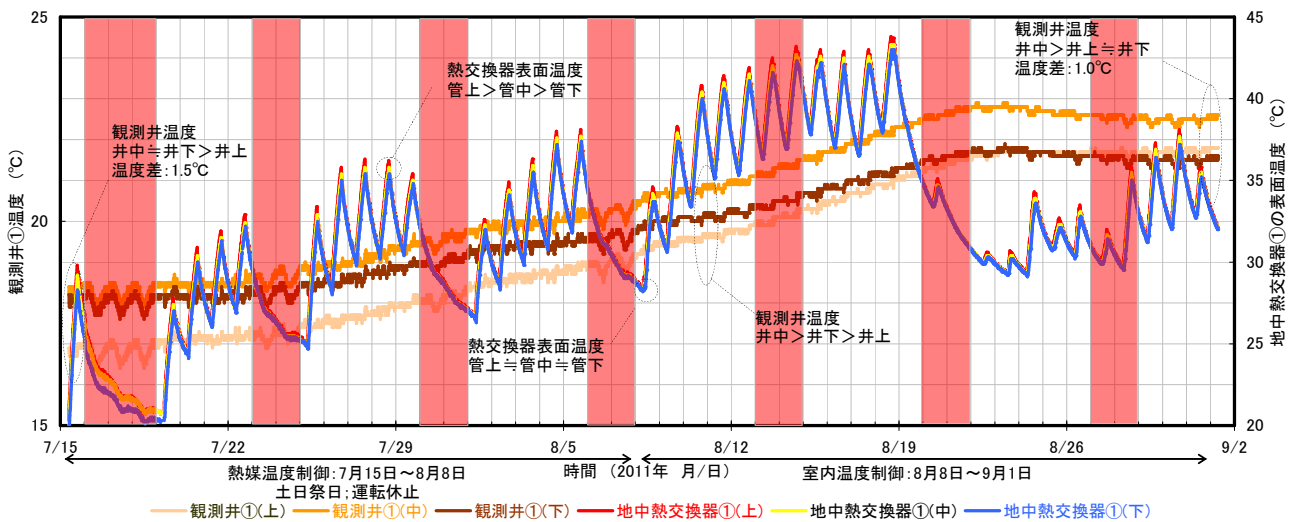
従って、空調の熱源に浅層土壌を利用することにより、温度勾配の大きな地中に排熱あるいは採熱でき、熱交換効率が向上すると考える。

4. まとめ

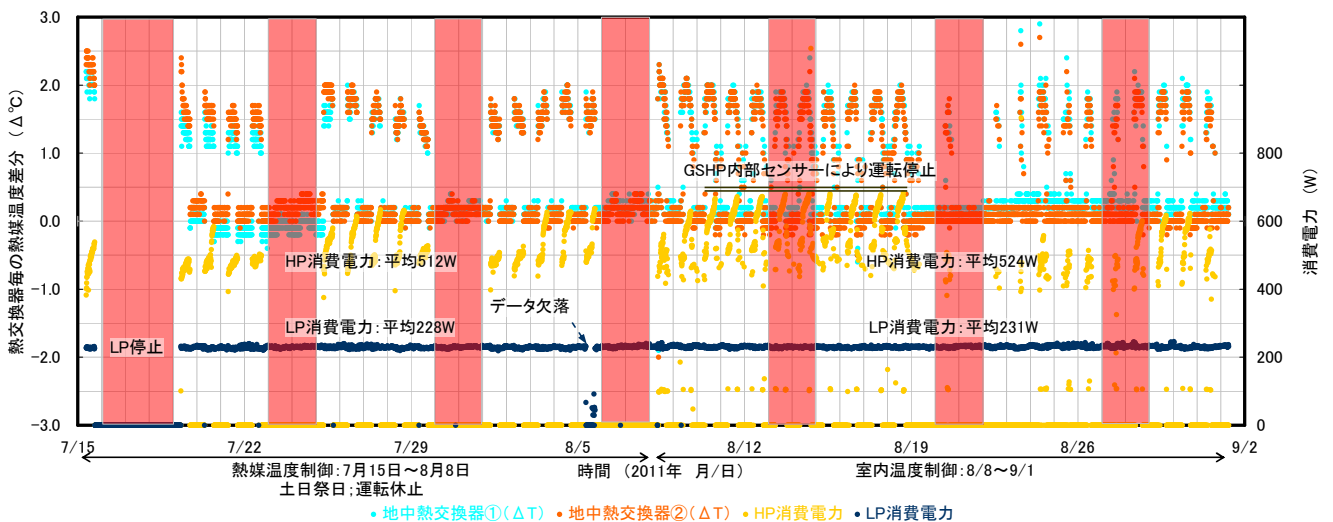
大規模な掘削工事を伴わずに、高効率の熱交換が期待出来る短尺鋼管を用いた同軸熱交換器を用いて、TRT と冷房運転による強制熱負荷試験を実施した。これらの結果



(a) 熱媒温度・空気温度とその差分



(b) 観測井①温度と地中熱交換器①の表面温度



(c) 熱交換器毎の熱媒温度差分と消費電力

図 10 室温制御 (図中赤色ハッチ: 休日)

から、熱交換器の温度特性およびGSHPの運転方法による熱交換性能の違い把握することができた。地下水流れがない浅層土壌でも、位相の遅れにより温度勾配の大きな地中に排熱でき、熱交換効率が向上することがわかった。具体的に、短期で76~94W/m、長期で32~34W/mの採熱を見込めることが実証できた。実際の稼働状況を想定した24日間試験でも180W/m程度の排熱が可能であった。

濱田ら²³⁾は、1年間の熱負荷試験により、夏期排熱量(約46GJ)と冬期採熱量(約36GJ)で、排熱・採熱のバランスが崩れているにも関わらず、熱交換器の表面温度が数日間の放置で自然状態に回復した事例を紹介している。この熱量は、当該地域の一般住宅で年間使用する量の2倍以上である。位相の遅れが期待できる浅層土壌は、熱収支が整合しなくても、地中熱温度が回復する可能性が高い。今後は、冬期暖房運転の結果を踏まえて、システムの最適化設計手法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 外務省：我が国の資源外交とエネルギー安全保障，2008.12.
- 2) 経済産業省：平成21年度エネルギーに関する年次報告書（エネルギー白書），2010.6.
- 3) 資源エネルギー庁：夏期最大電力使用日の需要構造推計（東京電力管内），2011.5.
- 4) 産業技術総合研究所：夏季における計画停電の影響と空調節電対策の効果を評価（第1報），2011.6.
- 5) 産業技術総合研究所：夏季における計画停電の影響と空調節電対策の効果を評価（第2報），産業技術総合研究所，2011.7.
- 6) ウェザーニューズ：ライフスタイル調査，2011.8.
- 7) 産業競争力懇談会：低炭素化社会づくりに向けたヒートポンプの革新的技術開発と普及促進，2010.3.
- 8) 関根，大岡，横井，柴，黄，南：場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの実用化に関する研究，大成建設技術センター報，第38号，pp.11-1-8，2005.11.
- 9) 大岡：建物基礎を利用した地中熱空調システム，日本地熱学会誌，第28巻，第4号，pp.431-439，2006.10.
- 10) 小間，林，坂本：鋼管杭を用いた地中熱利用空調システム，JFE技報，第24号，pp.35-41，2009.8.
- 11) 小三田，土屋，金子：コルゲート管を用いた二重管方式地中熱利用システム，大林組技術研究所報，No.74，pp.1-6，2010.12.
- 12) 中村：鋼管杭を有効利用した地中熱利用システムの開発，新日鉄エンジニアリング技報，Vol.2，pp.46-56，2011.1.
- 13) 高島，田子，山口：土的手法による低価格浅層抽熱システムの実用化可能性と問題点，日本地熱学会誌，第24巻，第4号，pp.365-371，2002.10.
- 14) 畠中，越後，佐藤：埋蔵エネルギーの取り出し方/地中熱交換器の基本性能の観測（第一報），川田技報，Vol.29，2010.1.
- 15) 畠中，越後，勝俣，佐藤，石下，臼谷：基礎杭型地中熱交換器

の性能評価と実用，川田技報，Vol.30，2011.1.

- 16) 長野，中村，落藤，横山：土壌熱源ヒートポンプに関する研究（第4報），空気調和・衛生工学論文集，No.60，pp.39-49，1996.2.
- 17) 北海道大学：地中熱ヒートポンプシステム，オーム社，2007.9.
- 18) 藤井：温度応答試験の実施と解析，日本地熱学会誌，第28巻，第2号，pp.245-257，2006.4.
- 19) 近藤（編著）：水環境の気象学，朝倉書店，1994.4.
- 20) 機械工学便覧：日本機械学会編，熱工学，丸善，2006.12.
- 21) 田子，盛田：熱交換器の地中への設置，日本地熱学会誌，第28巻，第1号，pp.125-139，2006.1.
- 22) 柴：地中熱ヒートポンプの構造と特徴，日本地熱学会誌，第27巻，第4号，pp.263-272，2005.11.
- 23) 濱田，中村，落藤，永坂，長野：垂直埋設U字管を用いた地中蓄熱型冷暖房システムの実験と解析，空気調和・衛生工学論文集，No.61，pp.45-54，1996.4.