

浅層土壌の地中熱を利用した空調の性能向上対策

～充填材の熱抵抗改善による熱交換性能の向上効果について～

Improvement of Heat Exchange Performance by Thermal Resistance of Grout

勝俣 盛*¹
Mori KATSUMATA

畠中 真一*¹
Shinichi HATAKENAKA

越後 滋*²
Shigeru ECHIGO

小神野 東賢*³
Token OKANO

清水 礼二*⁴
Reiji SHIMIZU

地中熱ヒートポンプシステム空調のイニシャルコスト削減を目的に、不易層よりも浅い深度で熱交換を行う設備を構築して、フィールド試験を実施した。この設備は地温の位相遅れを利用するもので、熱媒と地温の温度差が大きく、熱流束の向上と掘削費の低減が期待できる。2011年の夏季2ヶ月に行った昼間冷房運転から、短期間ではあるが180W/m程度放熱できた。しかし、長期連続運転を想定したシミュレーションでは、土壌の有効熱伝導率が支配的になり、約32W/mに低下することがわかった。一方、実稼働状態は冷房・暖房とも昼夜サイクルでON/OFFを繰り返し、停止時に地温がある程度回復する。このため、掘削孔内の熱抵抗を小さくすることで熱応答が改善できれば、温度勾配が鈍化するのを抑制できると考えた。そこで、本研究では充填材の熱拡散係数を指標に、実物大相当の供試体を用いた熱応答試験により、熱抵抗の改善効果を実験的に検討した。この結果、充填材の伝熱性能を改質することで、試算上採放熱量が約24%向上することが確認できた。

キーワード：地中熱ヒートポンプシステム、位相遅れ、熱抵抗、充填材、熱拡散係数

1. はじめに

一般的に、地温は日射と赤外放射の影響により深さ-30cm程度までは日変化し、深さ-10m程度までは年変化する。しかし、これ以深になると地温は一年を通じて一定とみなすことができ、不易層温度と呼ばれ当該地域の年平均気温と同程度になる¹⁾。このとき、深さ-3m～-5mの地温は、気温変化と数ヶ月の位相遅れが認められ、夏季は不易層温度よりも低く、冬季は逆に高くなる。このため、この深さに地中熱交換器を埋設して、地中熱ヒートポンプシステム(以下、GSHP)空調の採放熱を行えば、地温と熱媒の温度差が大きくなり、熱流束が向上する。結果として、地中熱交換器の埋設深さが浅くなるため、施工が容易になり、イニシャルコストの大部分を占める掘削費を低減できる。

2011年2月に、長さ5mの短尺鋼管製の同軸型地中熱交換器²⁾を自社試験フィールドに埋設して、夏季冷房運転による放熱試験を行った。約2ヶ月間の計測データから、室温設定28.0℃で、24日間連続稼働の放熱量は900W/本(180W/m)程度であった。一方、熱媒平均温度30.0℃で、90日間24時間連続放熱を想定したシミュレーションか

ら、161W/本(32W/m)に低下することが判明した。また、地盤の有効熱伝導率は1.15～1.48W/(m・K)で、地下水などの影響で経時的に変動した³⁾。試験フィールドは台地上で、浅層でのGSHP利用の適地とは言い難い。この環境である程度採放熱できれば、汎用性の高さが実証できる。

2012年1月～3月に実施した冬季暖房運転では、熱媒温度が氷点下になり、熱交換器表面に近接する間隙水の凍結が予想された。凍結融解を繰り返すと熱交換器表面に空隙が形成され、伝熱面積の減少が懸念される。地中熱交換器の熱性能は、短期的には掘削孔内の熱抵抗が、長期的には周辺地盤の有効熱伝導率の影響が支配的である^{2),5)}。一方、GSHP空調の実際の稼働状況は、冷房、暖房とも、昼夜サイクルでON/OFFを繰り返すことから、熱抵抗を小さくすることで、熱応答性が向上する。

本研究では、容易に入手可能な材料を対象に、熱拡散係数を実験的に計測し、充填材に適当な材料を選定した。次に、これらを用いた実物大相当の供試体を製作して室内で熱応答試験を実施した。この結果、充填材で常用される山砂を熱伝導の優れた人造黒鉛などに変更することで採放熱量を24%程度改善できると試算した。

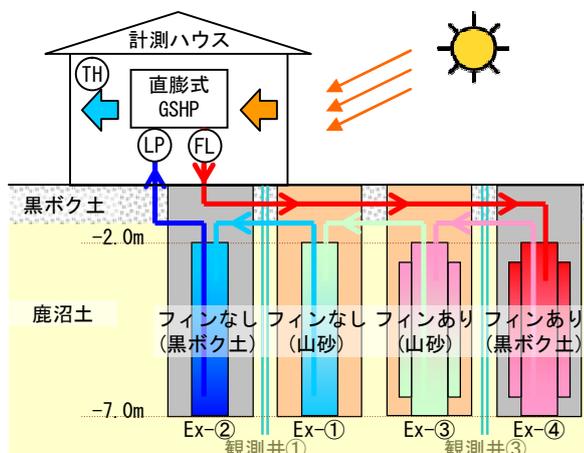
*1 川田工業㈱技術研究所 主幹
*2 川田工業㈱技術研究所 所長

*3 川田工業㈱建築事業部営業部エコプラス推進室 係長
*4 川田工業㈱建築事業部営業部エコプラス推進室 室長

2. 冬季暖房運転による採熱試験

(1) 試験概要

冷暖房能力 2kW クラスの直膨式 GSHP(米国 FHP 製; EC007-1HZC)を計測ハウス(3 坪スーパーハウス)に設備して、試験フィールドに埋設した短尺鋼管製の同軸型地中熱交換器に、ラインポンプ(荏原製作所製;25LPD5.15S, 効率 60.7%, 入力 239W)で熱媒(プロピレングリコール 20%)を循環させて地中に放熱,あるいは地中から採熱するシステムを構築した。地中熱交換器を埋設した深さ-2m~-7m の土壌は、鹿沼土と呼ばれる保水性が良い軽石混じりのロームである。この深度では地下水の効果が全く期待できない。システム構成図を図 1 に示す。



TH: 測温抵抗体, LP: ラインポンプ, FL: 流量計, Ex: 地中熱交換器

図1 システム構成図(地中熱交換器直列)

地中熱交換器(図 1; Ex-①~④)は、無塗装の一般炭素鋼管(STK400)で、外径φ355.6mm, 板厚 6.4mm, 長さ 5000mm とした。これにフィン(平鋼 8 枚; 幅 75mm, 板厚 6mm, 長さ 4500mm)の有無と充填材(山砂, 黒ボク土)を組み合わせる熱交換性能を比較した。

空調負荷に伴う温度変化は、主要部に設置した測温抵抗体(クラス B)あるいは T 熱電対により、1 分間隔で計測した。着目部は、深さ-2.5m, -4.5m および-6.5m の熱交換器表面温度と観測井温度, 室内空気温度および熱媒温度とした。観測井は、Ex-①から離隔約 1m に観測井①, Ex-③から離隔約 0.8m に観測井③を設け、硬質塩化ビニル管(VP, 20A)を挿入して保孔した。閉管に水充填後に、キャップをはめ、雨水などの侵入を防止したので外気の影響を受けない。なお、離隔の相違は施工誤差であるが、熱応答を比較する上で補正していない。詳細については文献 2)を参照されたい。

(2) GSHPの暖房性能

製品仕様書⁶⁾に記載された暖房性能を次に抜粋する。

標準的な暖房運転の設定は、熱媒流量 2.0GPM (7.60 /min) で、熱媒入口温度が 50~80°F (10.0~26.7°C), 空

気吸込温度が 60~80°F (15.6~26.7°C) であり、このとき COP が 3.5~5.2 である。一方、熱媒入口温度が 25~40°F (-3.9~4.4°C), 空気吸込温度が 60~80°F (15.6~26.7°C) のときは、低温時の暖房運転で、COP が 2.4~3.5 になる。

表1 低温水時の暖房性能

Entering Fluid Temp. (°F) ※1	Entering Air Temp. (°F) ※1	Total Capacity (MBtu/h) ※2	Power Input (kW)	COP
25°	70°	3.73	0.42	2.6
30°		4.21	0.43	2.8
40°		5.15	0.46	3.3

※1 華氏=(9÷5)×摂氏+32

※2 1kW=3.412Btu/h

(3) 試験方法

2011年9月末で夏季冷房運転²⁾を終了し、地温の回復を待つ冬季暖房試験(2012年1月23日~3月26日)を実施した。暖房運転に際しては、実稼働を想定して設定室温 20.0°C で期間 24 時間連続運転した。なお、GSHP が一定出力のため、計測ハウスの高さ 200cm 位置(天井高さ 214cm)の室温 TH をセンシングしながら ON/OFF 制御(20.0°C で ON, 20.2°C で OFF)した。

暖房放熱は、土壌に過負荷を与えるため、Ex-①, Ex-②の 2 本を並列配管して行った。このとき、熱媒流量を渦式フローセンサ(東京計測製; VF-2000I)でモニタリングしながら、各々 8.50 /min 程度になるようにバルブ調整した(図 2)。

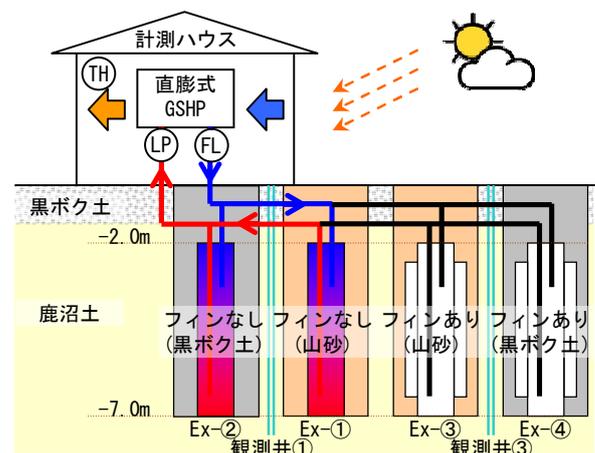


図2 暖房運転時のシステム構成図(地中熱交換器並列)

(4) 試験結果

試験フィールドの地温は不易層が 16.0°C, 深さ-2m が年平均 15.6°C (最低 12.4°C, 最高 18.7°C) である³⁾。この深さでは、気温変化に対する位相遅れが約 3 ヶ月で、8 月上旬と 1 月下旬に上昇と下降が変転する。さらに深くなるにつれて位相は遅れ、振幅が小さくなる⁷⁾。

これを踏まえて、図 4 より、以下のとおり考察できる。なお、GSHP の期間稼働率は 78.8% であった。

- およそ1週間で熱媒温度が氷点下に達しており、室温は設定温度20.0℃を下回ることもある。これは計測ハウスの断熱の問題であり、1日当たりの稼働率が上昇するものの、GSHPの消費電力が最大450W程度であることから、機器が過負荷になっているわけではない。
- GSHPは室温が低下し始める16時頃より始動し、翌12時ごろまで断続的に稼働した後に、外気温の上昇に伴い停止する。この停止時間中に、熱媒温度がある程度回復しており、稼働率を考慮した熱交換量を設計に反映することで、相当の熱交換器本数を低減できる。
- Ex-③表面温度、観測井①、③の温度から、地温は期間当初18℃程度と推定できる。Ex-③が期間最終17℃を下回ることから、冬季暖房において熱媒との温度差が大きく、有利な地温と考える。なお、Ex-①は当初約14℃であるが、機器試運転の影響が残存したと考える。
- 本試験では、Ex-③を使用していない。したがって、Ex-③の表面温度、観測井③の温度は、自然環境での推移をあらわす。当初、熱交換器の表面は深さ方向に温度差が生じておらず、期間中緩やかに低下する様子が見られる。観測井③(-2.5m)の温度変化と相関があり、地温の位相遅れの影響と考える。当該地区の月別最低気温は1月に観測されることから、冬季暖房3月頃には位相遅れが不利側に作用するものの、影響は軽微である。
- GSHPの稼働率は外気温によって異なるが、消費電力は平均417Wで、表1に示した範囲内である。また、LPは平均233Wであり、ほぼ定格で稼働している。熱媒温度差の期間平均は、Ex-①、②とも0.5℃程度であることから、充填材の熱性能の相違(山砂、黒ボク土)は計測精度より小さいものであった。
- 観測井温度が外気温と相関があるがごとく、鋭敏に日変動している。これはT熱電対の温度補償をデータロガー内部で行ったため、基準温度が室温となり、温度変動が激しい時間帯にその影響が付加されたと考える。

(5) 課題整理

熱交換性能の改善対策として、充填材の熱抵抗を低減させる方法が考えられる。同心円の異種材で構成される材料間充填材の熱抵抗Rは、内径 r_1 、外径 r_2 および充填材の熱伝導率 λ とすれば、熱抵抗は式(1)で表せる(図3)。

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad \dots (1)$$

これより、内径、外径に変更がなければ、大きな熱

伝導率をもつ充填材を採用することで熱抵抗を低減できることがわかる。そこで、本システム充填材の選定を目的に、各試料の熱特性について材料試験を行ったので、次に概要を記す。

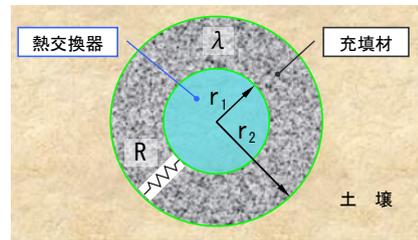


図3 充填材の断面モデル

3. 充填材の熱特性

(1) 熱特性に影響を及ぼす因子

熱伝導率 λ [W/(m・K)]は、体積含水率 θ [m³/m³]と土粒子を構成する鉱物の種類に依存する。土粒子の経時的な変化は無視できるが、体積含水率は降雨や蒸発散によって大きく変化する。土壤水分は空気よりも熱伝導率が大きいため、地下水による移流がない場合は体積含水率が増加すると土壤の熱伝導率も単調に増加する。一方、土壤の体積熱容量 C_v [J/(m³・K)]とすれば、熱伝導率は熱拡散係数 κ [m²/s]で決まる。

$$\kappa = \frac{\lambda}{C_v} \quad \dots (2)$$

$$C_v = c_s \rho_d + C_w \theta \quad \dots (3)$$

ここで、土粒子の比熱： c_s [J/(Mg・K)]

土壤の乾燥密度： ρ_d [Mg/m³]

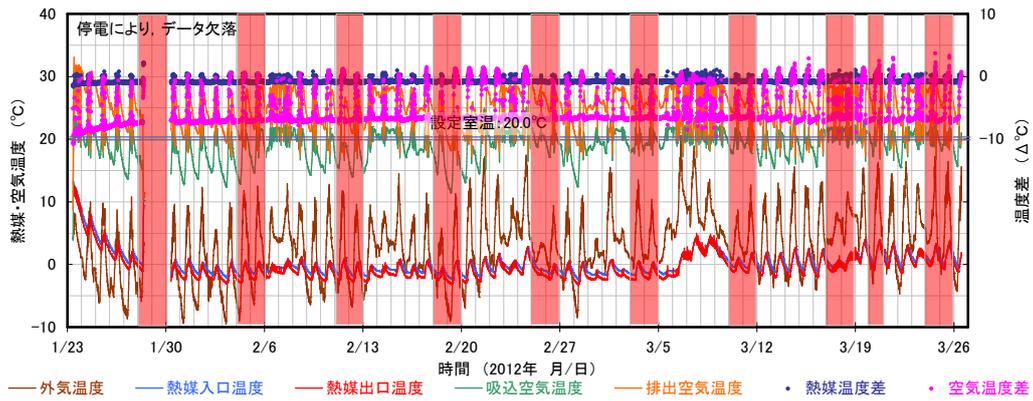
水の体積熱容量： $C_w = 4.18 \times 10^6$ J/(m³・K)

ただし、熱拡散係数も体積含水率に依存するが、体積含水率によって増加することも減少することもあり、 $\theta = 0.15 \sim 0.35$ m³/m³で最大になる⁸⁾。なお、土粒子を構成する主な鉱物の比熱は、 0.80×10^6 (石英) $\sim 0.90 \times 10^6$ (粘土鉱物)で、乾燥状態では大差ない。

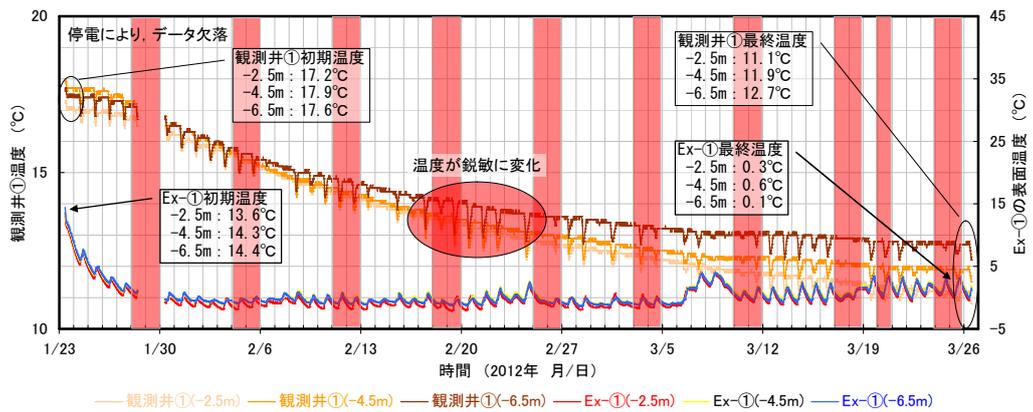
(2) 対象試料

熱抵抗の改善には、熱伝導率が優れ、施工性が良い硅砂などを充填する場合が多い。これに、高価ではあるが、炭化珪素やアルミナなどの熱伝導が優れる材料を添加する対策なども提案されている。具体的に、硅砂に炭化珪素を10%混合することで、熱交換性能が25%程度向上したとの研究報告⁹⁾もある。

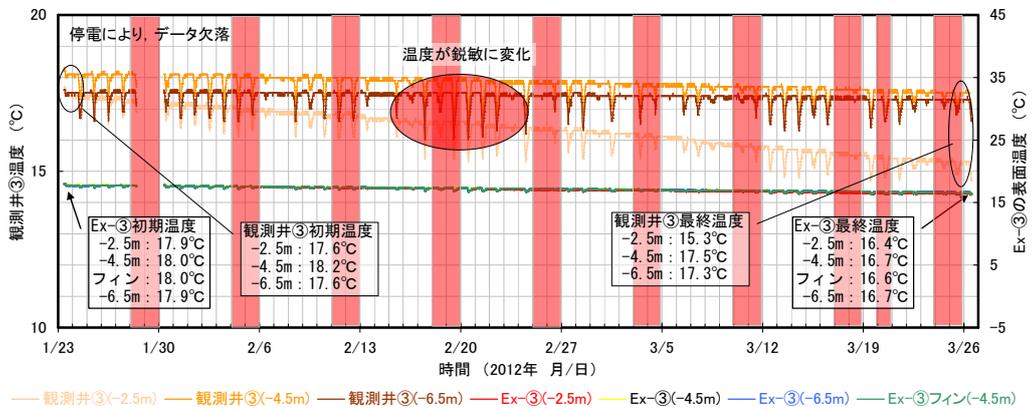
そこで、本試験では、試験フィールドで採取した黒ボク土と鹿沼土、掘削時に孔壁保護安定液の主材として用いられるベントナイト、充填材で常用される山砂、洗い砂および東北硅砂、改質材で使用実績がある炭化珪素、入手が容易で熱伝導が優れる人造黒鉛を対象試料とした(表2)。



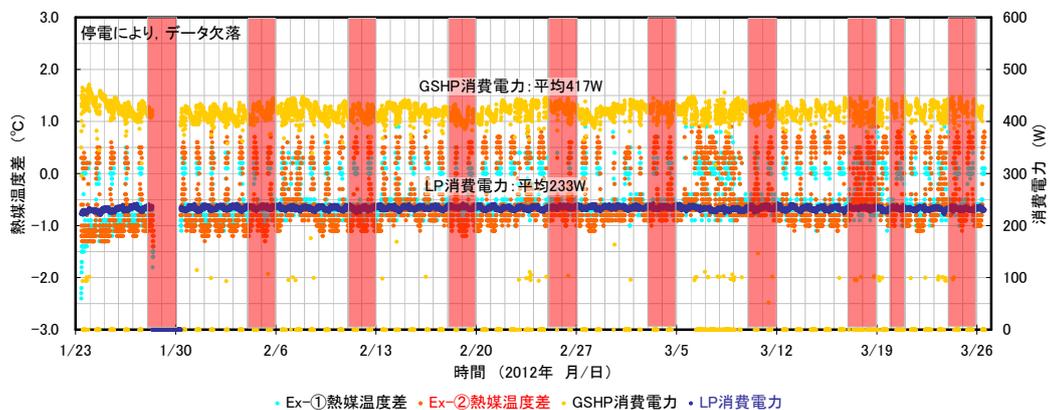
(a) 熱媒温度と空気温度



(b) Ex-①と観測井①



(c) Ex-③と観測井③



(d) 消費電力

図4 冬季暖房負荷試験の結果 (図中赤色ハッチング: 休日)

表2 試料一覧

呼称	品名または産地	粒度	真比重※
ペントナイト	クニゲルV1	—	2.6
黒ボク土	試験フィールド採取	—	2.4
鹿沼土	試験フィールド採取	—	2.4
山砂	ホームセンター購入	—	2.7
洗い砂	ホームセンター購入	—	2.7
東北珪砂	山形県大石田産	4号	2.6
炭化珪素	耐火物用(SiC; 98.5%)	24C	3.2
人造黒鉛	電極粉碎(固形炭素; 98.5%)	D50	2.0

※参考値

(3) 試験方法

本試験の目的は学術的な熱伝導率の導出ではなく、工業的に実用可能な精度で算定することである。このため、簡易設備で材料の熱性能が確認できるシリンダー法^{10), 11)}により、熱拡散係数を実験的に導いた。

まず、乾燥状態の伝熱性能を比較するため、試料は風乾(フライパン炒り)の後に、ジップ付きビニル袋にシリカゲル乾燥剤を封入して24時間以上暗室内で安置した。これを100cm³円筒サンプラーに詰め、1/1 000gまで計測できる電子天秤を用いて乾燥密度 ρ [g/cm³]を計量した。

次に、観賞魚用ヒーター(ジャックス製; ホットパック300)で加温した恒温水槽内に、試料を400ml充填した円筒シリンダー(蓋付きテニスボール缶; 半径a[m])缶①~③を高さの90%程度まで浸漬して、水温設定約35°Cで各缶中心温度が定常とみなせるまで、シリンダー中心部の相対土壌温度 T_r [°C]を1秒間隔で自動計測した(写真1)。

文献¹¹⁾に示された T_r に相当する測定時間 t から実測値 t/a^2 を計算し、そのときの理論値 $\kappa t/a^2$ に対して、 $y = \alpha x$ で直線回帰する。この直線の傾き α が熱拡散係数に相当する。係数算定は缶①~③の3本平均とし、間隙水の影響を確認するため、 $\theta = 0.00$ (風乾), 0.05, 0.10, 0.20および0.30を計測した。なお、熱電対太さの影響を抑えるとともに、深さ方向の温度バラツキをキャンセルするため、外径1mmのSUS製プローブ¹²⁾を製作して温度を計測した。

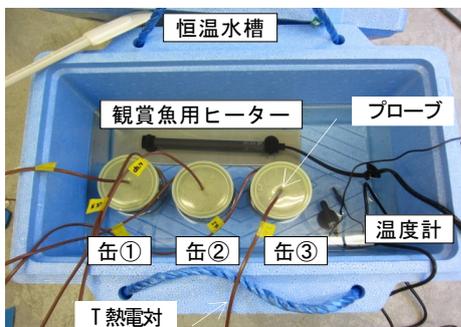


写真1 シリンダー試験の状況

(4) 試験結果

東北珪砂の $\theta = 0.00$ (風乾)の事例を以下に示す。図5に示す計測データを切片ゼロで直線回帰すると図6にな

る。よって、 α は缶①が $0.264 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、缶②が $0.253 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ および缶③が $0.254 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ である。これらの平均から、熱拡散係数は $0.26 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ と判断した。

各試料の乾燥密度と体積含水率毎の熱拡散率は表3、図7のとおりであった。いずれの試料とも、 $\theta = 0.05 \sim 0.30$ の範囲での熱拡散係数は、大きな差異が認められない。

乾燥密度の計量は、小容積のサンプラー使用、充填時の突き固め省略などから、ある程度の誤差を含むが、本検討を行う上では十分な精度と考える。

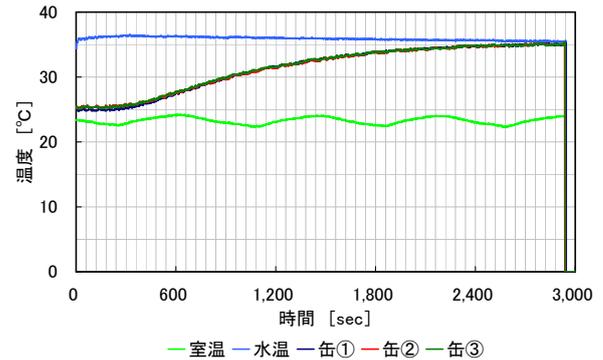


図5 東北珪砂の温度推移

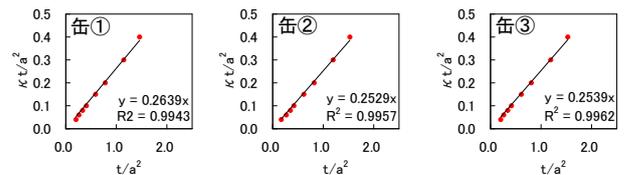


図6 切片ゼロの回帰直線

表3 乾燥密度 ρ [g/cm³]と体積含水率毎の熱拡散係数 κ [$\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$]

呼称	ρ	体積含水率 θ				
		0.00	0.05	0.10	0.20	0.30
ペントナイト	0.90	0.16	0.16	0.23	0.23	0.35
黒ボク土	0.92	0.16	0.20	0.22	0.23	0.20
鹿沼土	0.54	0.20	0.25	0.24	0.21	0.25
山砂	1.58	0.24	0.43	0.46	0.44	0.56
洗い砂	1.73	0.24	0.50	0.52	0.48	0.51
東北珪砂	1.71	0.26	0.98	0.95	0.80	0.85
炭化珪素	1.74	0.30	1.56	1.52	1.55	1.40
人造黒鉛	0.99	0.54	2.28	2.24	2.24	2.09

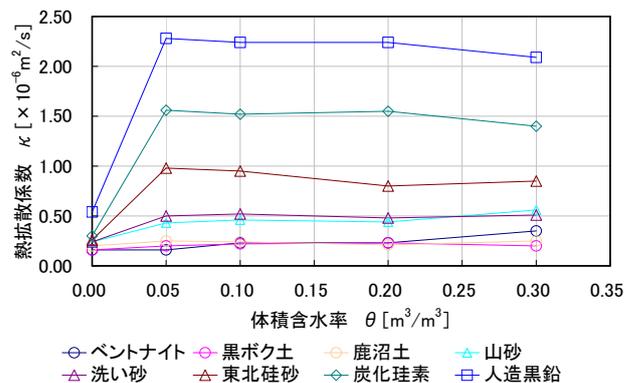


図7 各資料の熱拡散係数

(5) 充填材の選定

既往設備は、充填材に山砂および黒ボク土を採用した。これらは、材料費が安価であるが、充填性が劣る。実施工では散水しながら棒で突き固めたにも関わらず、数日後には充填材が沈下するなど、密実さの信頼性が乏しい。このため、施工性が良く、熱拡散率が大きな材料で、なおかつより安価な同等品を条件に、表4に示した川砂、珪砂、珪素および黒鉛を選定した。これらの熱応答性を実験的に比較したので以下に詳述する。

4. 実物大供試体による熱応答試験

(1) 試験概要

試験の手順は以下のとおり。掘削孔を摸した鋼製オープン型ドラム缶(板厚; 1.2mm, 容積; 200ℓ, 内面塗装; エポキシ樹脂塗料, 外面塗装; フタル酸樹脂塗料)の中心に熱交換器を設置して、隙間に試料を充填する。この熱交換器に一定熱量を与え続けると、試料温度が上昇するとともに、試料を伝導した熱がドラム缶表面から放出される。これらが釣り合うと、定常状態になる。このとき、流量が既知であるから、熱交換器の入口温度と出口温度の差から、試料毎の排熱量がわかる。

しかし、実際に計測してみると、入口、出口の温度差が僅かであり、この方法では十分な精度で評価できないことが分かった。このため、試料毎に熱拡散係数、比熱および密度の相違により、熱損失熱量に差が生じることに着目した。ここでは、水を基準に熱量を試算して、試料の熱抵抗を比較した。

(2) 比較試料

充填材の諸元を表4に示す。材料費は費用効果を評価する上でインシヤルコストに直接影響する。そこで、試料の嵩増しを目的に、伝熱性への影響評価を確認するため、碎石を一定量添加した場合も計測した。

試料使用に際しては、黒鉛以外は、表面に付着した粘土質や灰分などを水洗い除去した後に、天日干して使用した。碎石は、セメント微粉が表面に付着していたことから、再生骨材の砂岩と思われる。

表4 充填材の諸元

呼称	品名または産地	粒度 (粒径)	表乾密度 [g/cm ³]
碎石	ホームセンター購入	5号 (13~20mm)	2.6
川砂	ホームセンター購入	中目砂 (0.2~2.5mm)	2.6
珪砂	天然珪砂(栃木県鹿沼産)	N40 (0.5~1.2mm)	2.6
珪素	炭化珪素質骨材(SiC:90.1%)	A1 (2.0~3.3mm)	2.1
黒鉛	電極粉砕(固定炭素:99.39%)	— (0.5~5.0mm)	3.2

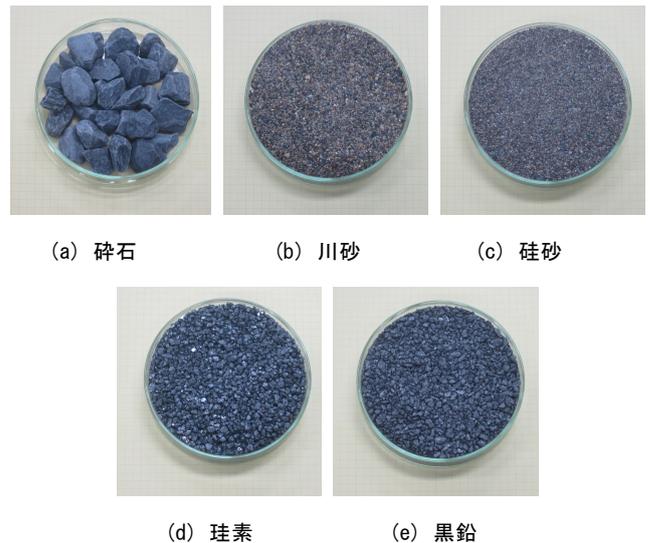
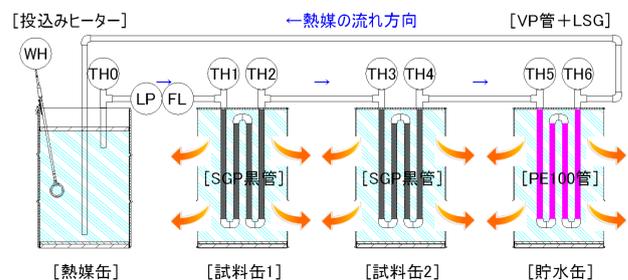


写真2 試料外観

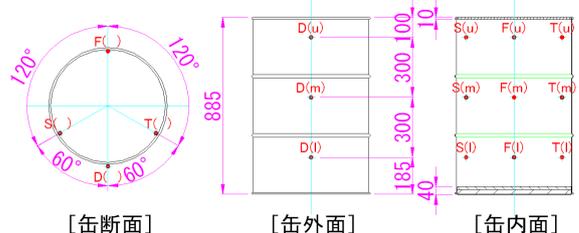
(3) 試験方法

熱媒缶中の熱媒を投込みヒーター1.5kW(設定温度80℃)で加熱して、配管用保温材(LSG-25P)で被覆した硬質塩化ビニル管(VP, 25A)の閉回路を約3600分間、一定流量で循環した。途中、全長2.6mの配管用炭素鋼管(SGP黒管, 25A)を試料缶1, 2の試料に挿入するとともに、同一長の高密度ポリエチレン管(PE100, 25A)を貯水缶に浸漬して熱交換した。ここで、缶側面のみから放熱するように、熱媒缶は全表面を、試料缶1, 試料缶2および貯水缶は上下面を断熱材で被覆した(図8)。



WH:電力計, LP:ラインポンプ, FL:流量計, TH0~6:測温抵抗体

(a) モデル図



●:T熱電対(ただし、缶外面D()は試料缶1のみ)

(b) 温度計測箇所

図8 実物大供試体試験

定常状態になると、投込みヒーターで熱媒を加熱した消費電力、被加熱試料の必要熱量とドラム缶表面から損失熱量およびその他損失熱量の総和が平衡になる。この

時の温度変化を計測して、水を基準に各試料の熱特性を比較した。温度計測は、循環水温を測温抵抗体(クラスB)で、試料温度および容器表面温度をT熱電対で計測した。また、投げ込みヒーターの消費電力量を電力計で直接計測した。

(4) 試験ケース

試験ケースを表5に示す。熱応答は熱拡散係数、含水率、密度および比熱などに依存する。本試験では、含水率の管理が困難であったことから、試料充填後に注水して、缶底に設けた排水孔から余剰水が自然排水され、その残りが隙間に保水された状態で性能比較した。本報では、これを湿潤状態、天日干した表乾を乾燥状態と表記する。

まず、試料の乾燥状態と湿潤状態の熱損失量を比較した。次に、含水率の影響が少ない熱拡散係数の相違、碎石の影響を比較した。いずれのケースとも試料充填作業に伴い生じた空隙と注水後の空隙エア抜きを目的に、ドラム缶側面をゴムハンマーで打撃した。

ケース毎に熱媒缶の容量と流量が異なるが、これは容量150ℓ、流量10ℓ/minを標準としたが、試験途中で流量が不安定になったことから、水頭を上げる目的で容量180ℓ、流量20ℓ/minに変更したためである。これに伴い、ヒーターの消費電力が1300Wから1200Wに低下した。なお、試験終了後に試料を撤去したところ、鋼管表面および周辺試料が外観的に乾燥していた。隙間水が空気に置換されたため、熱伝導の低下に繋がった可能性がある。

表5 実験ケースの試料組合せ

ケース	熱媒缶		試料缶1	試料缶2	貯水缶
	容量 [ℓ]	流量 [ℓ/min]			
Case01	150	10	珪砂(乾/均)	川砂(乾/均)	水
Case02			〃(湿/均)	〃(湿/均)	
Case03			〃(湿/積)	〃(湿/積)	
Case04			黒鉛(湿/均)	珪素(湿/均)	
Case05					
Case06	180	20	〃(湿/積)	〃(湿/積)	
Case07			水	水	
Case08					
Case10					

※乾：乾燥状態、湿：湿潤状態、均：均質充填、積：積層充填

また、試料に碎石を添加した場合の伝熱性能についても検討した。これは高価な試料を一部安価な碎石に置換するもので、材料費の抑制を期待した。試料充填に際しては、費用効果を比較するため、碎石と試料を均質に攪拌したケース(均質充填：図9(a))と、厚さ25cmの試料を、上下を碎石と試料の混合材で積層したケース(積層充填：図9(b))で行った。

試料(碎石と珪砂、碎石と川砂)は容積比率で、碎石：試料=約1.8:1.0になるように充填した。この比率は、

碎石を容量150ℓのバケツに満たした後に、その隙間に珪砂または川砂を流し込み、自己充填した容積から決めた。

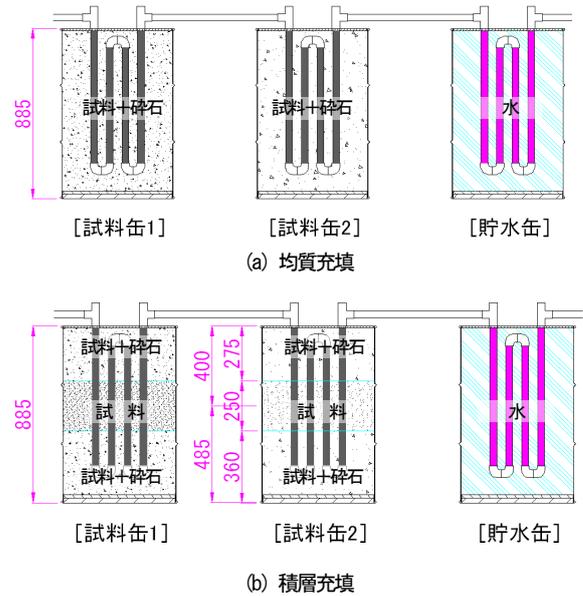


図9 試料充填方法

(5) 試験結果

Case10、試料缶1の事例を示す。計算は下記の手順で行った。

【計算諸元】

- 外気温度 31.5℃のとき、加熱3600分後に、試料缶1の表面温度が29.5℃から54.2℃で定常状態になったとする。
- 缶密度 : $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$
- 缶比熱 : $C = 0.473 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- 缶放熱面積 : $A = 1.428 \text{ m}^2$
- 内径 $d = 567 \text{ mm}$ 、板厚 $t = 1.2 \text{ mm}$ 、高さ $H = 800 \text{ mm}$
- 缶体積 : $V = 1.714 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
- 缶外径 : $d_0 = 0.5682 \text{ m}$
- Stefan Boltzmann定数 : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$
- 外気温度 : $T_0 = 31.5 + 273.15 = 304.65 \text{ K}$
- 缶表面温度(始) : $T_1 = 29.5 + 273.15 = 302.65 \text{ K}$
- 缶表面温度(終) : $T_2 = 54.2 + 273.15 = 327.35 \text{ K}$
- 缶表面の熱放射率 : $\epsilon = 0.87$
- 加熱時間 : $t = 216000 \text{ sec}$

a) 缶の必要熱量 : $Q_d [\text{W}]$

$$Q_d = (T_2 - T_1) \cdot \rho CV / t = 0.7 \text{ W}$$

b) 放射による損失熱量 $Q_r [\text{W}]$

放射による熱損失量 : $q_r = \epsilon \sigma (T_2^4 - T_0^4) [\text{W/m}^2]$ より、
 $\therefore Q_r = q_r \cdot A = 141.5 \times 1.428 = 202.1 \text{ W}$

c) 自然対流による損失熱量 $Q_c [\text{W}]$

境膜伝熱係数 h は、下記実験式より算出する。

$$h = 1.18 \times \{(T_1 - T_2) / d_0\}^{1/4} = 2.97 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

自然対流による熱損失量 $q_c = h(T_1 - T_2) [\text{W/m}^2]$ より

$$\therefore Q_c = q_c \cdot A = 67.4 \times 1.428 = 96.2 \text{ W}$$

以上より、熱損失等は $0.7 + 202.1 + 96.1 = 299 \text{ W}$

全試験ケースについて、上記計算を行うと結果は表6のとおりである。表中の(%)は、消費電力に対する熱損失を百分率で表した。

表6 実験結果 (単位: W)

試験名称	消費電力	容器熱量・放射・自然対流損失熱量		
	熱媒缶	試料缶 1	試料缶 2	貯水缶
Case01	1 302	98 (8%)	134 (10%)	350 (27%)
Case02	1 310	150 (12%)	189 (14%)	315 (24%)
Case03	1 321	142 (11%)	190 (14%)	359 (27%)
Case04	1 323	190 (14%)	127 (10%)	351 (27%)
Case05	1 295	155 (12%)	92 (7%)	346 (27%)
Case06	1 198	196 (16%)	120 (10%)	314 (26%)
Case07	1 196	165 (14%)	111 (9%)	310 (26%)
Case10	1 206	299 (25%)	285 (24%)	229 (19%)

(6) 考察

加熱量が同等であれば、試験ケース内の異種試料を比較でき、異なる試験ケースでも同一試料は定性的な比較が可能である。表6より、以下の知見を得た。

- Case10より、SGP黒管を使用した試料缶1(水)が25%、試料缶2(水)が24%およびPE100管を使用した貯水缶(水)が19%であった。試料の体積、比熱および密度が等しいことから、熱交換性能はPE100管よりもSGP黒管が約30%優れると言える。
- 熱容量は試料よりも水が断然大きい。貯水缶に着目するとCase03~Case07では26~27%になっており、計測精度は同等と判断できる。一方、Case02は24%で、他ケースと傾向が異なるため、信頼性が乏しい。
- Case01~Case03より、損失熱量は珪砂より川砂が大きい結果となっているが、熱拡散率は珪砂>川砂である。よって、粒度分布、間隙率などの影響が考えられる。
- 熱拡散係数は、珪砂>川砂≒碎石である。密度、体積含水率などが同等であれば、損失熱量もこの順序になる。Case02とCase03より、川砂均質(14%)≒川砂積層(14%)は想定通りであるが、珪砂均質(12%)<珪砂積層(11%)は反する。
- 熱拡散係数は、黒鉛>珪素≒碎石である。Case04, Case06より、黒鉛均質(14%)<黒鉛積層(16%)。Case05, Case07より、黒鉛均質(12%)<黒鉛積層(14%)、珪素均質(7%)<珪素積層(9%)で、想定通りである。

以上より、充填材に黒鉛を用いることで伝熱効率が向上すると考える。熱拡散係数以外にも、間隙率や粒度分布も重要な影響因子になると思われることから、実施工に関しては、密実性の確保にも配慮が必要である。

次に、標準的な材料定数を用いて熱伝導率を試算した。なお、試験フィールドの自然含水比(2010年10月実施)が120.3%(深さ0~10mの平均値)であったことから、含水比120%の洗い砂、東北珪砂、炭化珪素および人造黒鉛の熱伝導率λを試算した。熱拡散係数は体積含水率θ=0.10~0.30m³/m³の平均値を用いた。式(2)、(3)より、各土壌の熱伝導率は表7のとおり。熱伝導率は山砂

2.9W/(m・K)を基準とすると、黒鉛が12.6W/(m・K)で約23%向上すると試算した。

表7 各種土壌の伝熱特性

項目	単位	山砂	川砂	珪砂	珪素	黒鉛
c _s	kJ/(kg・K)	0.71	0.71	0.82	0.67	0.71
ρ _d	Mg/m ³	1.58	1.73	1.71	1.74	0.99
C _w	MJ/(m ³ ・K)	4.18				
θ	m ³ /m ³	1.20				
C _v	J/(m ³ ・K)	6.14	6.24	6.42	6.18	5.72
κ	m ² /s	0.47	0.50	0.90	1.51	2.21
λ	W/(m・K)	2.9	3.1	5.8	9.3	12.6

Ex-①(フィンなし、山砂φ600)で行ったサーマルレスポンス試験の結果から、熱抵抗R₀=0.047K/(W/m)、土壌の有効熱伝導率λ_{eff}=1.53W/(m・K)であった²⁾。このデータを用いて、熱媒を初期温度Ti=20.0°Cで、最終的な平均温度T_{ave}をパラメータに、90日24時間連続でシミュレートした結果を図10に示す。

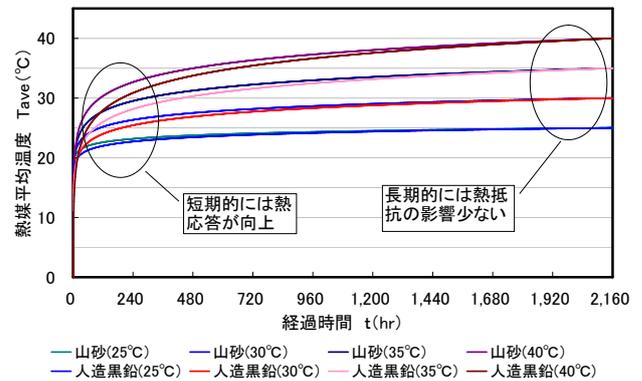


図10 Ex-①の熱交換性能の予測

単位長さ当たりの排熱量を整理した結果を表8に示す。ここで熱応答性を評価するため、10日経過時の熱媒温度を90日後の最終平均温度で割り戻した百分率(10日/90日)を併記した。充填材を山砂から黒鉛に改質することで、単位長さ当たりの採熱量は、32.1W/mから40.1W/mになる。このとき、10日/90日は山砂が87.8%、黒鉛が84.8%である。これより、充填材の熱抵抗が小さくなったので、短期的には、土壌に効率良く熱を伝導し、材料の温度上昇が抑制されていることがわかる。

表8 単位長さ当たりの排熱熱量推定

充填材	項目	単位	熱媒の最終平均温度[°C]			
			25	30	35	40
山砂	採放熱量	W/m	16.1	32.1	47.2	64.3
	10日/90日*	%	92.7	87.8	84.3	81.7
黒鉛	採放熱量	W/m	20.0	40.1	60.1	80.1
	10日/90日	%	90.9	84.8	80.4	77.2

* 90日後設定温度に対する10日経過時の温度を百分率で表記

また、実験結果からも明らかのように、熱伝導率の優れた高価な材料を積層充填することで、熱交換性能を低下させることなくその使用量を低減できる。特に、空調使用に

よる採放熱であれば、浅層土壌の位相遅れを有効に使うことができる。例えば、図 11 に示すように充填することで、高価な材料の使用量を抑え、かつ熱抵抗を上げることなく熱伝導の向上が図れる。

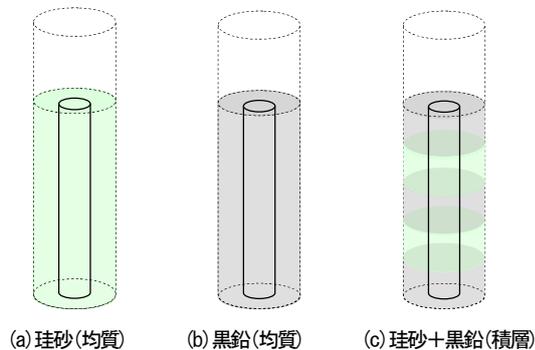


図 11 充填材の埋戻し方法

5. まとめ

実物大相当の供試体を用いた熱応答試験では、材料試験から得られた予想に反した結果となった。これは、人造黒鉛や炭化珪素は、材料試験時よりも粒径の粗い試料を選定したため、間隙空気の比率が大きくなり、保水性が劣ったと考える。しかし、試験の結果から、充填材の改質により、熱性能を数十パーセント改善できると推定できる。さらに、夏期冷房であれば、日中に地中に蓄えた熱を夜間に一部放射することでさらに向上が図れる可能性がある。

地中熱交換器を利用する GSHP は、1 本当たりの採熱量を正確に評価するためには、地盤の蓄熱効果を考慮するとともに、運転時間に即した煩雑なシミュレーションを実施しなければならない。この作業は設備規模に関わらず実施することが望ましい。しかしながら、これらの作業は施工期間の長期化を誘発しており、間接的にコスト増へと繋がっている。一方、小規模設備(10kW 程度)であれば、地中熱交換器を浅層に埋設することで、この作業を省略できる可能性がある。浅層は、地盤の蓄熱は期待できないが、地表からの放射により熱応答が早い。また、当該地域の平均気温と浅層の地盤条件で放熱量が一意的に決まるものと考えられる。今後は、さらなるコスト低減対策について、実験的に検証する所存である。

参考文献

- 1) 粕淵：土と地球，学会出版センター，2010. 5.
- 2) 勝俣，畠中，越後，稲田，清水：浅層土壌の地中熱を利用した空調の実験的検討，川田技報，Vol. 31，2012. 1.
- 3) 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.
- 4) 盛田：大地の熱の冷暖房への利用，環境省「学校校舎エコ改修と環境教育」事業，平成16年度環境建築研究会，第5回研究会，2004. 12.

- 5) 池上，関川，森谷，浅沼，新妻：条件有利地域における地中熱ヒートポンプシステムの採熱特性と最適運転報の検討，日本地熱学会誌，第32巻，第3号，pp. 169-183，2010. 7.
- 6) Florida Heat Pump：http://www.fhp-mfg.com/files/download/ECSeries_SpecGuide_REV0612.pdf
- 7) 田中，葛西，南条：地熱利用融雪システムの性能評価のための地中温度伝導度の推定，弘前大学大学院理工学研究科報告，Vol. 7，No. 2，pp. 27-40，2005. 2.
- 8) 宮江，加瀬，山本，増田，平田：太陽熱を利用した農地消毒時の土中温度の変化特性，土木学会論文集 B，Vol. 64，No. 4，pp. 267-279，2008. 11.
- 9) 三小田，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，大林技術研究所報，No. 74，pp. 1-6，2010. 12.
- 10) 宮崎，西村：土壤物理実験法，東京大学出版会，p. 156-167，2011. 3.
- 11) 登尾，徳本，向井田：シリンダーに充填した土壤の熱拡散係数を簡易に推定する方法，土壤の物理性，No. 101，pp. 5-10，2005. 11.
- 12) 佐藤，飯田，萩原：熱伝導率測定用ヒートプローブ製作のノウハウ，熱物性，Vol. 23，No. 2，pp. 111-112，2009. 5.