

水平採熱式地中熱ヒートポンプ用樹脂製柵状熱交換器の開発と導入評価

白土 博康, 保科 秀夫, 可児 浩
月館 司*, 立松 宏一*
櫻庭 高光**, 井浦 奉昭**, 山田 英和**

Development and Installation Evaluation of Palisaded Heat Exchangers combined Plastic Pipes for Horizontal Ground Source Heat Pump Systems

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Hiroshi KANI
Tsukasa TSUKIDATE*, Koichi TATEMATSU*
Takamitsu SAKURABA**, Tomoaki IURA**, Hidekazu YAMADA**

抄 録

水平採熱式地中熱ヒートポンプ用の熱交換器として、樹脂製柵状熱交換器を開発し、実証試験、数値計算により住宅への導入評価を行った。この熱交換器は熱融着接合により、両端に配置されるヘッダ管に細管を直交したものである。実験住宅での暖房採熱実験の結果、従来の熱交換器とほぼ同等の採熱量が得られた。暖房シーズンのシステムCOPは2.5であり、利用可能なレベルである。イニシャルコストが垂直採熱式の半分以下であるため、本システムには多大なコストメリットがある。最後に、水道管や基礎の凍結、凍上防止のため、最適な採熱温度が提言された。また、各地域における暖房シーズンの採熱量の設計値が決定された。

キーワード：樹脂製柵状熱交換器、水平採熱式地中熱ヒートポンプシステム、耐熱ポリエチレン、採熱設計

Abstract

A palisaded heat exchanger combined with plastic pipes for residential use was newly developed and estimated by field tests and calculation as a collector for horizontal ground source heat pump systems. The exchanger consisted of two header pipes, which were located both sides of the exchanger, and narrow pipes, which were orthogonally bonded to the header pipes by thermal fusion technique. The quantity of collected heat of the exchanger was nearly equal to that of the conventional “Slinky type” exchangers as a result of an experiment for heating at a test house. The COP of the system for heating was 2.5, which made it utilized. The system had remarkable cost advantage because the initial cost was less than half that of the systems using vertical heat exchangers. Finally, the suitable temperature for collecting heat from ground was proposed in order to prevent water freezing and frost heave of the foundation. The quantity of collected heat was also determined for heating at various areas in Hokkaido.

KEY-WORDS : Palisaded heat exchangers combined with plastic pipes, Horizontal Ground Source Heat Pump Systems, Heat-resistant Polyethylene resin, Heat Collecting Design

* 道総研 北方建築総合研究所,

* Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute

** 株式会社テスク, ** TSC Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：低コスト地中採熱システム及び温泉排湯等の熱回収システムの開発

1. はじめに

我が国においては、エネルギー資源のほとんどを海外からの輸入に頼っており、その自給率はわずか4%に過ぎない。北海道は積雪寒冷地であり、全国の他の主要都市に比べ、給湯、暖房負荷が大きいことから、熱エネルギーを有効かつ効果的に利用することは非常に重要である。特に、現在利用されていない再生可能エネルギーを活用することができれば、環境に対する負荷を大きく軽減できると考えられる。

再生可能エネルギーの一つに地中熱がある。北海道のような寒冷地においては、空気熱源ヒートポンプで高い成績係数を得ることが難しく、地盤を熱源とする地中熱ヒートポンプへの期待は大きい。これまでに道内で500件程度の導入実績があるが、一般に施工される垂直採熱式は、ボーリング等の高い施工費が障害となり、十分な普及には至っていない。一方、その他の採熱手法として深さ2m以内の浅い地中に熱交換器を埋設する水平採熱方式がある。この方式は専用の掘削設備などが不要であることから一般の工事業者で施工可能であり、低コスト化できる可能性が高い。垂直採熱方式に比べると単位長さあたりの採熱量は小さいが、ある程度密に熱交換器を埋設することで採熱量の増加が図られる。熱交換器を密に埋設する方式として、「Slinky」と呼ばれる方式が1980年代に提案されており、海外ではその設計資料も作成されている¹⁾。図1に「Slinky」方式の熱交換器の外観を示す。この方式は管をコイル状に水平、又は垂直に設置するもので、筆者らも含め、国内でも実証実験が行われている²⁻⁵⁾。しかしながら、管を横（水平）にして埋設する方式は1回路あたりの掘削面積が大きい、管を縦（垂直）にして埋設する方式は管の頭部にエア溜まりができやすいといった課題がある。このため、低コストで施工性がよい水平採熱用熱交換器がハウスメーカーや住宅設備業者から求められている。

これに対し当場と(株)テスクは、これまでに樹脂製の放射冷暖房用柵状ラジエータを開発し、実用化を推進してきた⁶⁻⁸⁾。図2にその外観を、図3にその一部を拡大した写真を示す。このラジエータは、樹脂管同士を熱融着技術で接合する手法で成型されており、樹脂管内部に熱源によって加温または冷却された水や不凍液（熱媒）を通水することによって、室内の冷暖房を行うものである。このラジエータのメリットは、①製造コストが安価、②大きさを自在にカスタマイズ可能、③樹脂管内部に仕切りを入れることが容易であるため、水の流れを自在に設計でき、その結果、エア溜まりを防止できるメリットがある。

本報では、樹脂製柵状ラジエータを水平採熱式地中熱ヒートポンプ用の熱交換器として新たに開発し、住宅用として導入評価を行ったものである。

まず、開発した柵状熱交換器の概要と強度試験について述べる。次に、当別の実験住宅での実証試験による省エネルギー



図1 「Slinky」方式の熱交換器の外観



図2 樹脂製柵状ラジエータの外観



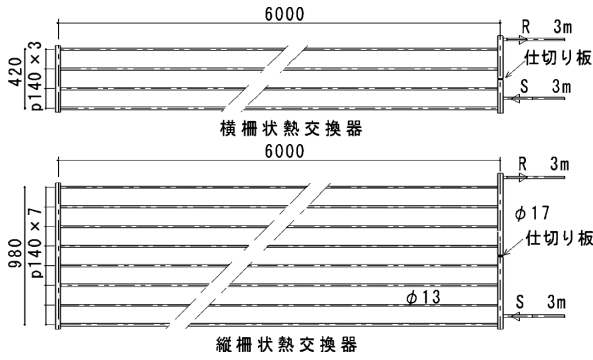
図3 樹脂製柵状ラジエータの一部を拡大した写真

性、経済性評価結果について述べる。最後に、数値計算による採熱設計の概要と各地域における年間採熱量の試算結果について述べる。

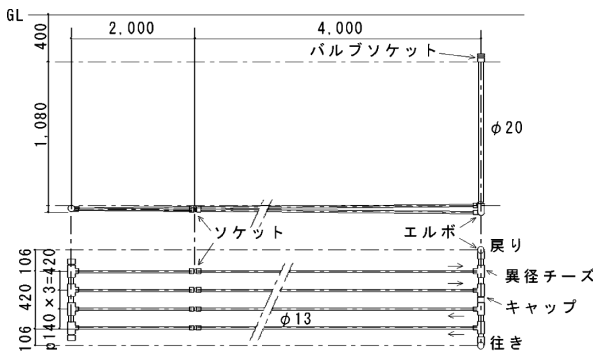
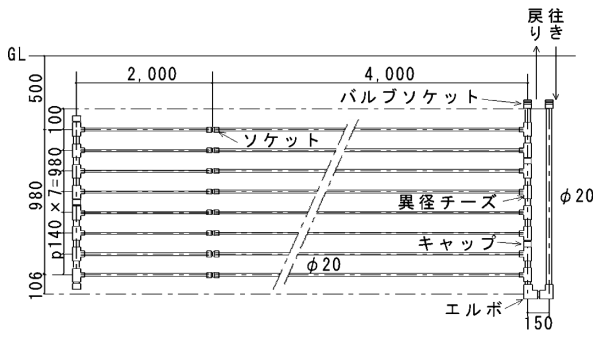
2. 柵状地中熱交換器の概要と強度試験

2.1 柵状地中熱交換器の概要

図4に作製した樹脂製柵状地中熱交換器の概要図を、図5に外観を示す。横柵状熱交換器と縦柵状熱交換器の2種類を製作しており、部材には、リサイクルが可能な耐熱ポリエチレン管と塩化ビニル管を用いている。耐熱ポリエチレン管で作製した熱交換器は、両端に配置される内径17mmのヘッダ管に内径13mmの細管を複数本140mm間隔で直交し、熱融着接合したものであり、ヘッダ管の片方には、内径13mm取出管（行き管、戻り管）を熱融着接合している。ヘッダ管の内部の所定位置には仕切り板が配置されており、行き管から入った循環水（不凍液）がヘッダ管で複数の細管に分配され、



(a)耐熱ポリエチレン管



(b)塩化ビニル管

図4 作製した樹脂製柵状地中熱交換器の概要図



図5 作製した樹脂製柵状地中熱交換器の外観 (左:耐熱ポリエチレン管縦柵状, 右:塩化ビニル管横, 縦柵状)

戻り管から排出される流路を形成しており、管内の圧力損失の低減を図っている。塩化ビニル管で作製した熱交換器は、管と継手を塩化ビニル用の接着剤で固定し、耐熱ポリエチレン管のものと同様の構造の熱交換器として作製した。ヘッダ管は内径20mm、細管は内径13mmである。

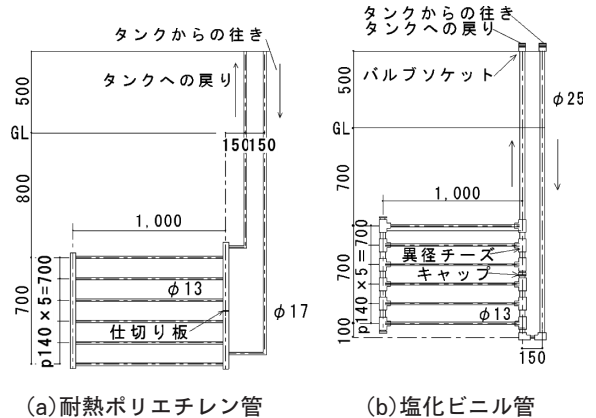
2.2 地中熱交換器の強度試験

図6に強度試験用地中熱交換器の試験体の概要図を示す。試験体は耐熱ポリエチレン及び塩化ビニルで作製した。図3、図4で示した実用機では8本、あるいは4本の細管にヘッダ管を耐熱ポリエチレンは融着、塩化ビニルは溶剤で接着させた構造としているが、強度試験用の細管は長さ1m、6本とし、縦に埋設した。細管のピッチは実用機に準じて作製している。

図7に地中熱交換器の強度試験の系統図を示す。耐熱ポリエチレン系統と塩化ビニル系統にわけ、それぞれをヘッダ方式で5系統にわけたものを用意した。次に土壌を横に7m、深さ1.5m掘り、熱交換器を埋設した。内部には冬期(11月から3月)のみ不凍液を連続的に設定3L/minで循環させ、特に温度設定はしていない。初年度の秋に各系統を埋設し、次年度、さらに次の年の秋にそれぞれ1試験体ずつ取り出した。図8に試験体の埋設状況を示す。

表1に取り出した熱交換器の強度試験方法を示す。熱交換器の強度評価は、目視による観察、耐圧試験、材料試験機による引張試験により行った。

耐圧試験は上水道による水圧により行い、常温、0.1MPaで5分間実施した。図9に材料試験機による引張試験の概要を示す。試験体を温度23±1℃の雰囲気中で24時間以上放置し、試験体の細管(試験部分)の長さが100mmとなるように試



(a)耐熱ポリエチレン管 (b)塩化ビニル管

図6 強度試験用地中熱交換器の試験体の概要図

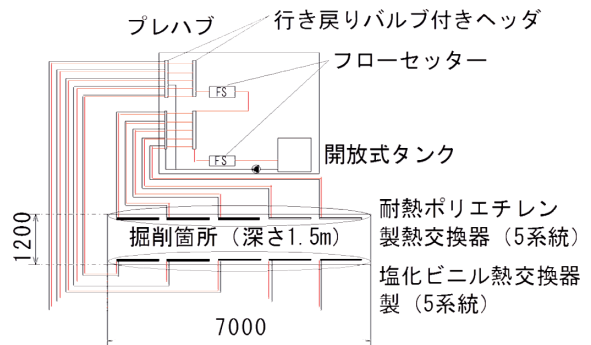


図7 地中熱交換器の強度試験の系統図

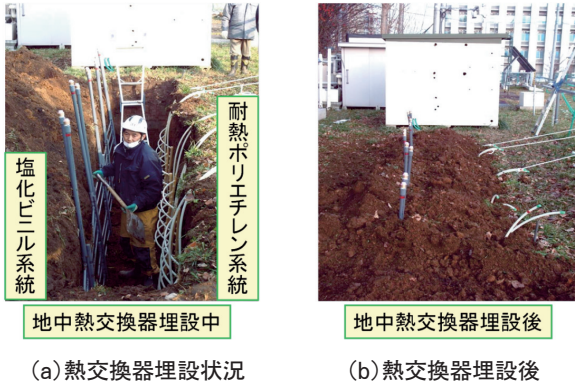


図8 試験体の埋設状況

表1 取り出した熱交換器の強度試験方法

試験No.	評価方法	試験機材
1	目視による観察	目視
2	耐圧試験	圧力計
3	材料試験機による引張試験	材料試験機

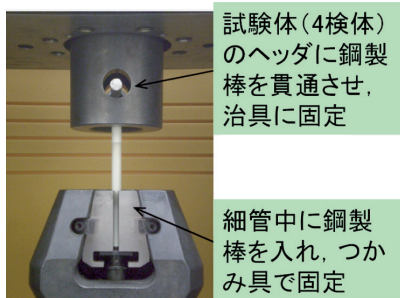


図9 材料試験機による引張試験の概要

試験機の治具に設置し、つかみ具で固定した。温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の雰囲気中で、試験速度 $20\text{mm}/\text{min}$ で試験片に引張荷重をかけて、試験機間隔が 100mm 移動するまでの最大荷重を測定した。

図10に2年経過後に取り出した試験体の外観を示す。熱交換器内部には開放圧の不凍液が充填されているが、塩化ビニル熱交換器の上部から1本目の細管には土圧によるものと考えられる明らかな変形が認められる。耐熱ポリエチレン試験体では漏れは見つからず、圧力低下もおこらなかった。一方、塩化ビニル試験体は開放圧で1箇所、 0.1MPa の圧力をかける前に1箇所漏れを確認した。図11に引張試験箇所を、図12に埋設前、1、2年経過後の耐熱ポリエチレン製試験体の最大点応力を示す。耐熱ポリエチレン試験体の最大点応力は $1.27 \sim 1.46\text{kN}$ でその後伸びが発生し、破断は認められなかった。試験部位、取り出し年度の違いによる有意な差はない。埋設前よりも埋設後の方がやや最大点応力はむしろやや高くなっており、今回の地中熱交換器の強度に問題はないと考えられた。一方、塩化ビニル試料についても、図11の同じ部位につ



図10 冬期2シーズン経過した試験体の外観

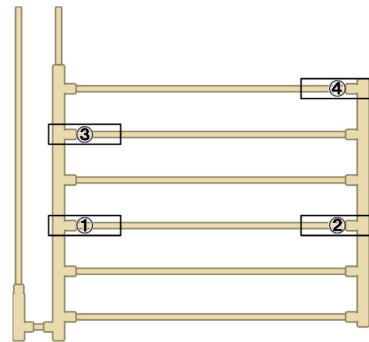


図11 引張試験箇所

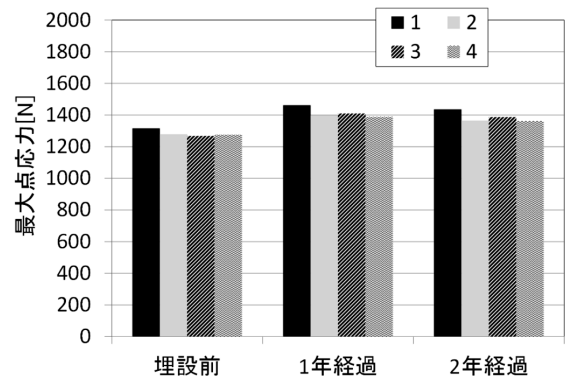


図12 耐熱ポリエチレン製試験体の最大点応力

いて埋設2年後のサンプルの引っ張り試験を実施したところ、最大点応力は $3.30 \sim 5.92\text{kN}$ と耐熱ポリエチレンよりも高かったが、全てのサンプルで破断した。このことから、塩化ビニルは実用上循環水漏洩の可能性が高い課題があると考えられた。

2.3 釧路工業技術センターでの実証試験における耐圧評価

釧路工業技術センターにおいて、積雪少量地における地中採熱実験を耐熱ポリエチレン、塩化ビニルを用いて実施した。地中熱交換器は図3と同じである。耐熱ポリエチレン、塩化ビニルの双方とも縦柵状熱交換器を2系統、横柵状熱交換器を1系統とした。これらを6系統並列回路とし、ヒートポンプの熱源として採熱した。

表2に釧路工業技術センターでの運転状況を示す。10月31日から運転したが、3月12日に一次側が漏水して循環しなくなり、運転を終了した。そこで6系統それぞれについて圧力

表2 釧路工業技術センターでの運転状況

日時	運転状況
10月31日	室内20℃として運転
11月19日	採熱管流量調整
11月26日	室内30℃として運転
12月2日	二次側戻り温度50℃で運転
3月12日	一次側漏水のためヒートポンプ停止、運転終了

0.065~0.075MPaで5分間保持することによって、耐圧試験を実施したところ、塩化ビニルの1系統（縦柵状）に漏れを確認した。

以上の結果から、地中熱交換器として耐熱ポリエチレンのみ利用可能であると判断し、住宅において、採熱の実証試験を実施した。

3. 当別の実験住宅での地中採熱実験

3.1 システムの設計、施工

図13に採熱実験を行った当別の実験住宅の外観を示す。本実験住宅は、木造2階建て、延べ床面積は132.0m²であり、総熱損失係数125W/Kを実現した低負荷住宅である。水平埋設地中熱交換器で採熱し、その熱を熱源としたヒートポンプにより暖房する。二次側（室内側）は樹脂製ラジエータ、熱交換換気ユニットで構成されている。



図13 採熱実験を行った実験住宅の外観

図14に地中熱交換器の設置位置を、図15に柵状熱交換器の概要図を示す。油圧ショベルカーで2系統幅800mmの溝を掘り、1つ目の溝（住宅側）に架橋ポリエチレン製の縦Slinky熱交換器（φ16）を、もう一つの溝に耐熱ポリエチレン製縦柵状熱交換器を配置した。縦Slinky熱交換器と縦柵状熱交換器の管長はそれぞれ81.3m、83.0mでほぼ同等である。縦柵状熱交換器の溝の底には横柵状熱交換器（管長はヘッダ管込みで41.8m）を配置し、合計5系統配置した。

図16にSlinky熱交換器の設置、埋設状況を、図17に柵状熱交換器の設置状況を示す。Slinky熱交換器、柵状熱交換器ともに金属メッシュに括り付け、埋設した。

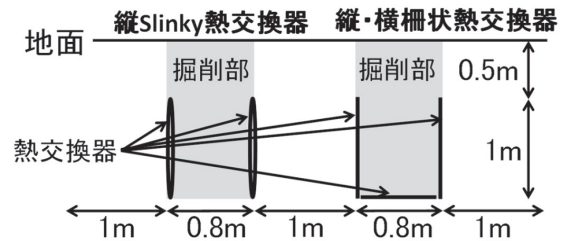
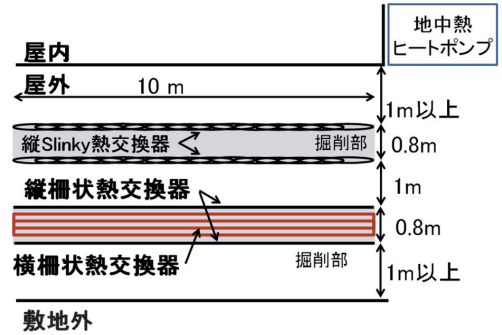


図14 地中熱交換器の設置位置

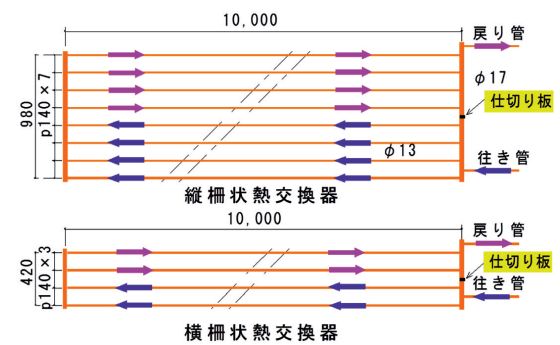


図15 柵状熱交換器の概要図



図16 Slinky熱交換器の設置、埋設状況



図17 柵状熱交換器の設置状況

3.2 システムの実測による評価

3.2.1 暖房実験における測定内容

図18に採熱側の系統図（計測器を含む）を、図19に土壤温度測定点を示す。Slinky熱交換器、柵状熱交換器の各系統を並列に配置し、不凍液（23vol%）を通水して採熱を行っている。ヒートポンプからの採熱部への行き配管には行き不凍液温度を測定する熱電対が設置され、各採熱系統には、ヒートポンプへの戻り温度を測定する熱電対、系統の流量を測定するパルス発信付き羽根車式流量計が設置されている。また、これらと行き戻りの平均温度に対する不凍液の比熱 C_{p1} 、行き戻りの平均温度に対する不凍液の密度 ρ_1 を用い、Slinky1系統の採熱量を代表すると(1)式で表される。一方、二次側には不凍液（21vol%）が通水されており、行き温度を測定する熱電対と系統の流量を測定するパルス発信付き羽根車式流量計、戻り温度を測定する熱電対、行き戻りの平均温度に対する不凍液の比熱 C_{p2} 、行き戻りの温度に対する不凍液の密度 ρ_2 を用いて放熱量は(2)式で表される。また、システムの省エネルギー性（以降、暖房SCOP）は暖房時にヒートポンプで消費する1日の積算電力量 E_h [WH] と1日の積算の二次側放熱量 Q_h [WH] を用いて(3)式で表される。ここで暖房SCOPは、循環ポンプや制御回路の電力量を含むものとした。

$$\text{Slinky1系統の採熱量} = C_p \times \rho_1 \times F_5 \times (T_5 - T_0) \text{ [W]} \quad (1)$$

$$\text{二次側の放熱量} = C_{p2} \times \rho_2 \times F_8 \times (T_8 - T_7) \text{ [W]} \quad (2)$$

$$\text{暖房SCOP} = Q_h / E_h \text{ [-]} \quad (3)$$

Q_h : 二次側の放熱量 [WH]

E_h : 暖房時のヒートポンプの消費電力量 [WH]

土壤温度として、本論文では幅10mの縦柵状熱交換器中央部地面から0.5、1.5mの場所、熱交換器から1m離れた場所の地面から0.5、1.5m、採熱部から5m以上離れた非採熱部の地面から0.5、1.5m設置した熱電対の温度について代表して述べる。

3.2.2 暖房実験結果

表3に暖房時の運転状況を示す。10月27日から運転を開始し、3月31日まで運転した。運転開始直後は負荷が少ないため二次側の戻り温度を低く設定し、負荷に応じて上昇させた。また、1階北側の床上1000mmの空気温度を代表空気温度とし、20℃でヒートポンプの二次側の循環ポンプをオンオフする制御とした。一次側の採熱については10月27日から12月23日まではSlinky熱交換器と縦柵状熱交換器の4系統に不凍液を循環させ、それぞれの熱交換器の採熱量の比較を行った。12月23日以降は、横柵状熱交換器へも不凍液を循環させ、シーズンの採熱量を把握した。なお、暖房システムの運転期間の日平均外気温は-1.0℃、最低外気温は-15.2℃であった。特に、2月上旬までは負荷が大きく、多くの日で24時間、ま

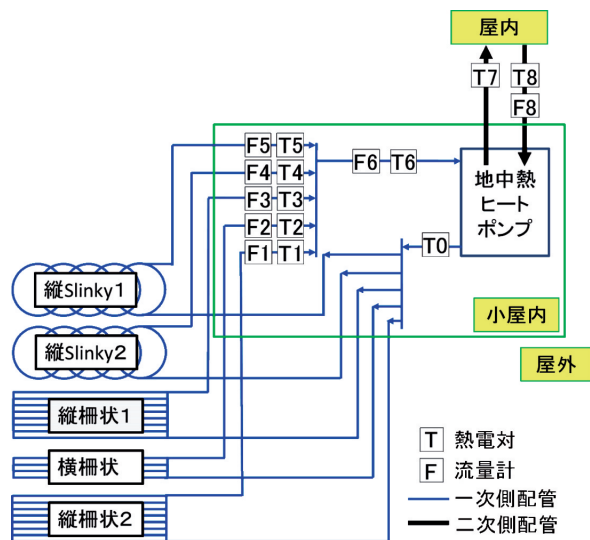


図18 採熱側の系統図（計測器を含む）

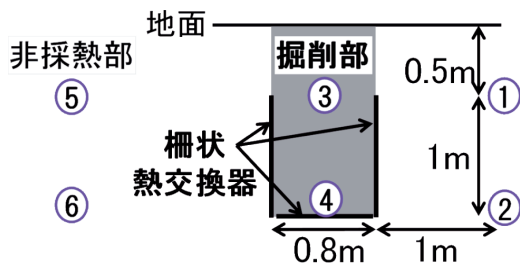


図19 土壤温度測定点

表3 暖房時の運転状況

日時	採熱系統	ヒートポンプ二次側戻り設定温度[℃]	室温設定温度[℃]
10月27日 15時20分-	Slinky2系統, 縦柵状2系統	26	20
11月10日 11時10分-		30	
12月7日 14時30分-		36	
12月23日 16時00分-		36	
1月4日 10時00分-	Slinky2系統, 縦柵状2系統, 横柵状1系統	36	20.5
2月5日 14時20分-		40	
3月11日 19時00分-		36	

たはそれに近い時間運転しているが、暖房負荷が低減するそれ以降は運転時間が短くなっている。

図20に二次側の平均放熱量の経時変化を、図21に全系統の平均採熱量の経時変化を示す。放熱量は暖房負荷が多い時間帯で最大3,000W程度となっている。それに対して全系統の平均採熱量は最大2,000W程度で推移している。図22に熱交換器別に暖房シーズンの積算採熱量を示す。12月23日までのSlinky熱交換器、縦柵状熱交換器の採熱量は888,889kWhではほぼ同等の値を示した。年間採熱量は5,104kWhであり、Slinky2回路で2,390kWh、柵状3回路で2,714kWhであった。図23にヒートポンプ一次側行き温度と暖房SCOPの経時変化を示す。ヒートポンプ一次側行き温度は土壤からの採熱とともに低下する。ただ、シーズンを通して-5℃以上で維持されてい

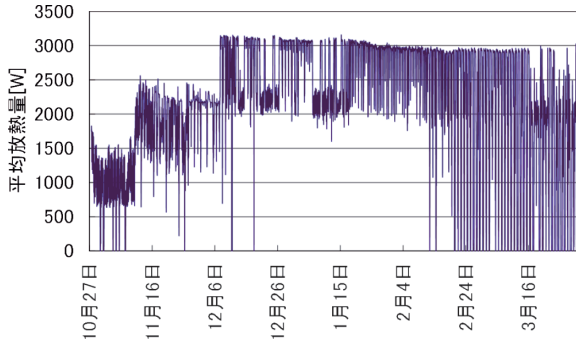


図20 二次側の平均放熱量の経時変化

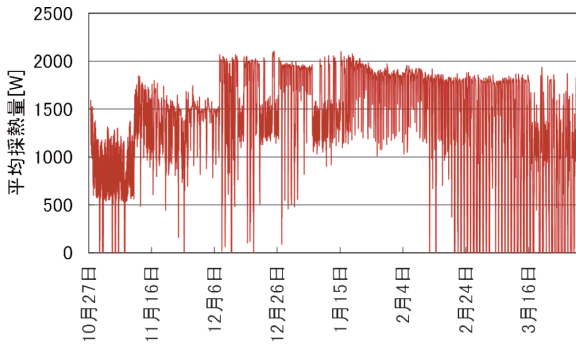


図21 全系統の平均採熱量の経時変化

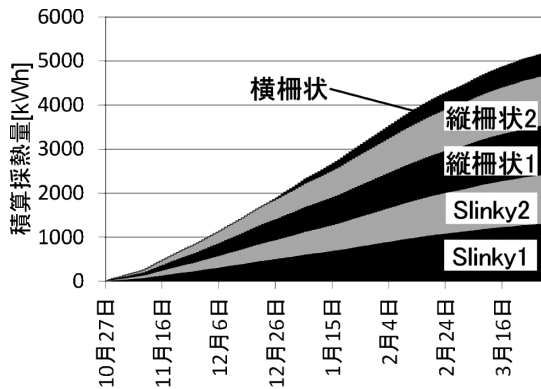


図22 熱交換器別の暖房シーズンの積算採熱量

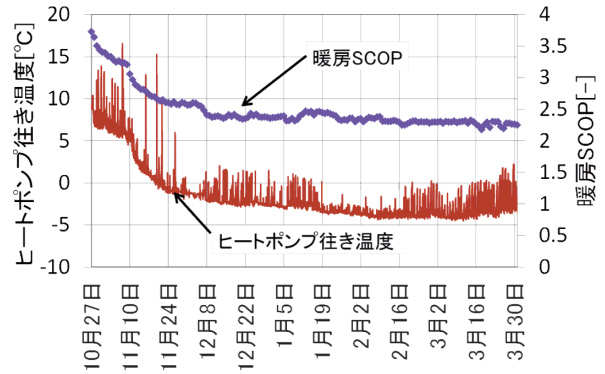


図23 ヒートポンプ一次側行き温度と暖房SCOPの経時変化

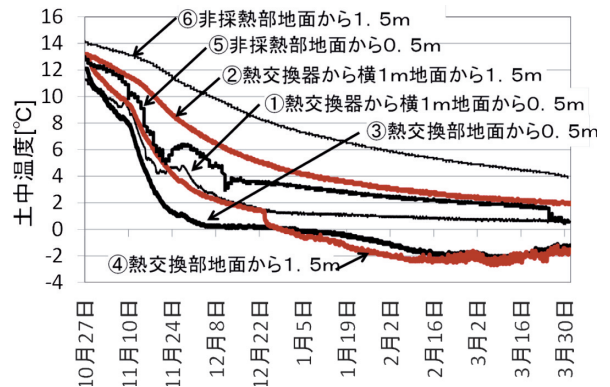


図24 土壌温度の経時変化

表4 一次エネルギー消費量の割合, 省エネ性, 経済性

検討項目	水平採熱式 (SCOP2.5)	垂直採熱式 (SCOP3.0)
一次エネルギー消費量の割合[-]	1.00	0.83
ランニングコスト[万円]	8.7	7.3
一次側施工コスト[万円]	76.7	150~200程度

た。暖房SCOPはヒートポンプ一次側温度の低下とともに低下するが、3月31日までのシーズンのSCOPは2.5であった。暖房SCOPを2.5、電力会社の発電効率を40%とすると1の投入一次エネルギーに対し、1の熱エネルギーが得られ、利用可能なレベルと考えられる。

図24に土壌温度の経時変化を示す。熱交換器周辺は採熱により -3°C 程度となるが、熱交換器から1m離れた場所では土壌温度 0°C 以上に維持されていることがわかる。

表4に一次エネルギー消費量の割合, 省エネルギー性, 経済性について垂直採熱式との比較したものを示す。ここでは計算条件として, 垂直採熱式のSCOPを3.0, 運転期間を当別で実測した10月27日から3月31日, 電力料金を北海道電力株式会社のEタイム3料金体系を使用し, 電源受給端効率を40%とした。水平採熱式の一次エネルギー消費量の割合は17%増加し, それに伴いシーズンのランニングコストは14,000

円程度高く, 87,000円程度の費用がかかる。一次側施工コスト(イニシャルコスト)には, ①熱交換器費用(Slinkyタイプの場合は樹脂製パイプ, 柵状タイプの場合は成型品の費用), ②土壌掘削, 熱交換器埋設費, ③油圧ショベルカーなど掘削重機の使用費用, ④運送代, 熱交換器埋設, 安全管理に伴う人件費などがかかる。ここでは, 二次側(住宅の室内の放熱側)の配管や放熱器については灯油ボイラーを熱源とする方式と同じであるので割愛し, 水平採熱式熱交換器の施工に伴う費用について言及する。上記の水平埋設式に対して50mの垂直埋設管を2列配置した例では, 安価な場合150万円程度, 堅い岩盤を掘る場合や運賃がかさむ場合は200万円程度かかるケースもある。シーズンランニングコストの差額, 一次側施工コストを考慮すると, 水平採熱式はコストメリットが十分にあるシステムと考えられる。

3.2.3 冷房実験における測定内容と実験結果

冷房実験の測定箇所、測定内容は暖房実験に準じた。なお、システムの省エネルギー性（以降、冷房SCOP）は冷房時にヒートポンプで消費する1日の積算電力量 E_c [Wh] と1日の積算の二次側放熱量 Q_c [Wh] を用いて(4)式で表される。ここで冷房SCOPは、循環ポンプや制御回路の電力量を含むものとした。

$$\text{冷房SCOP} = Q_c / E_c \text{ [Wh]} \quad (4)$$

Q_c : 二次側の放熱量 [Wh]

E_c : 冷房時のヒートポンプの消費電力量 [Wh]

表5に冷房時の運転状況を示す。7月27日から運転を開始し、9月16日まで運転した。1階北側の床上1,000mmの空気温度を代表空気温度とし、 $25.5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ でヒートポンプの二次側の循環ポンプをオンオフする制御とした。ヒートポンプ二次側戻り設定温度は 15°C とした。Slinky熱交換器と柵状熱交換器の採熱量の比較を行うため、横柵状熱交換器への不凍液の循環は8月22日以降とした。図25に冷房時の平均外気温度と運転時間を示す。ここで運転時間は二次側の循環ポンプの運転時間を示す。暖房時と比較して負荷が少ないため、運転時間は最大で9時間程度となっている。

表5 冷房時の運転状況

日時	運転状況と採熱系統	二次側戻り設定温度 $^\circ\text{C}$	室温設定温度 $^\circ\text{C}$
7月27日 15時00分-	Slinky2系統、縦柵状2系統	15	25.5 $^\circ\text{C}$
8月8日 14時00分-	停止・試運転	-	-
8月8日 16時30分-	Slinky2系統、縦柵状2系統	15	25.5 $^\circ\text{C}$
8月22日 21時00分-9月16日	Slinky2系統、縦柵状2系統、横柵状1系統	15	25.5 $^\circ\text{C}$

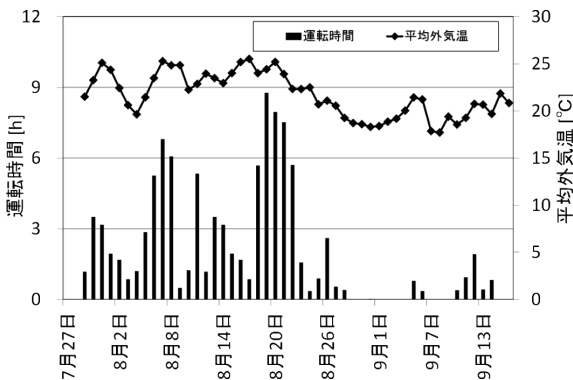


図25 冷房時の平均外気温度と運転時間

図26に二次側の時間別平均放熱量を、図27に全系統の時間別平均採熱量を示す。時間別平均放熱量は最大3,000W程度となっている。それに対して全系統の時間別平均採熱量は最大2,300程度となった。

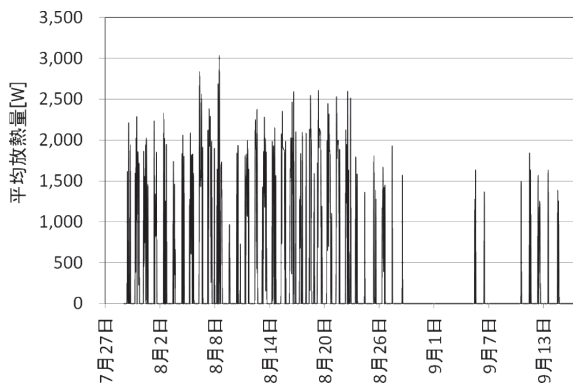


図26 二次側の平均放熱量

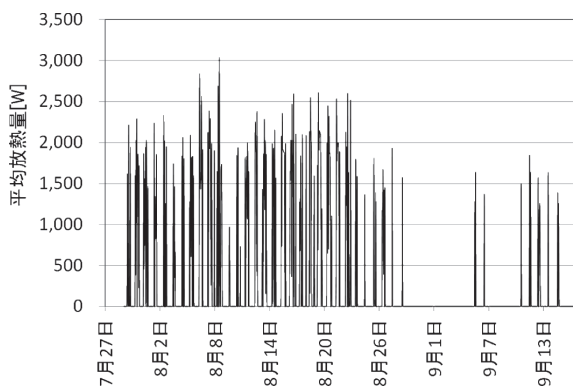


図27 全系統の平均採熱量

図28に熱交換器別の冷房シーズンの積算採熱量を示す。横柵状熱交換器へ通水していない8月22日までのSlinky熱交換器2系統、縦柵状熱交換器2系統の積算熱交換量はそれぞれ125.3, 109.7kWhであった。シーズン採熱量は267kWhであり、Slinky 2系統で139kWh、柵状3系統で128kWhであった。図29に冷房SCOPの経時変化を示す。9月16日までの冷房SCOPは4.1であった。

図30に土壌温度の経時変化を示す。5月まで暖房実験を行っていたため、熱交換部の地面から1.5mの冷房開始前の土壌温度は低い。冷房開始後は徐々に土壌温度の回復が見られ、9月には地面1.5mの場所でも 14°C 程度以上となり、暖房用熱源として活用可能と考えられる。

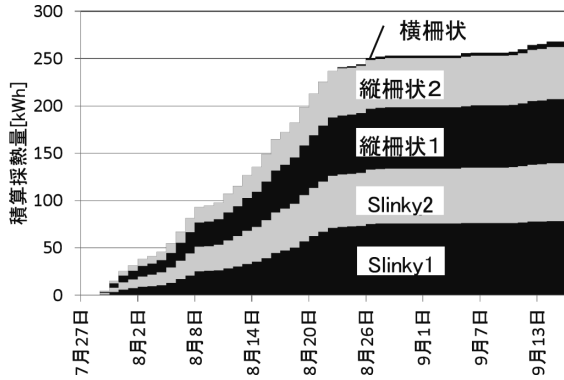


図28 熱交換器別の冷房シーズンの積算採熱量

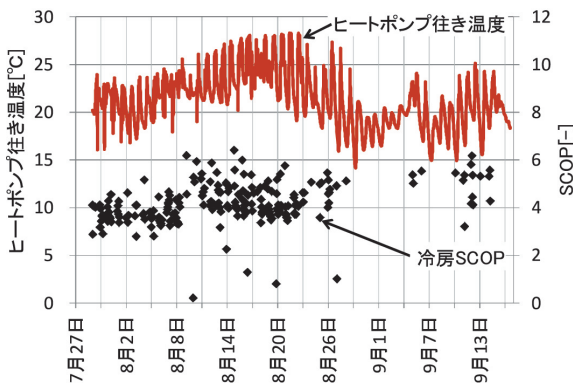


図29 冷房SCOPの経時変化

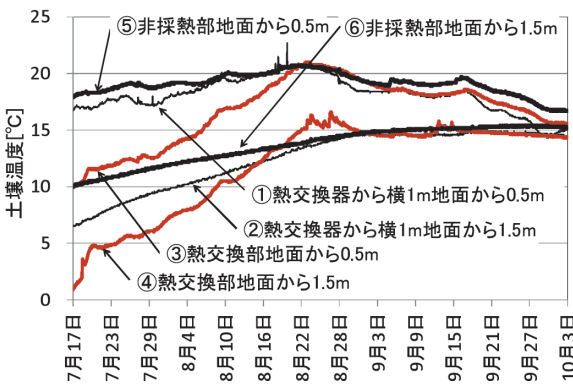


図30 土壌温度の経時変化

4. 採熱設計

4.1 土壌の凍結領域の推定

地中採熱によって水道管の凍結や基礎の凍上を引き起こすことがあってはならない。そこで、柵状熱交換器を対象に、数値計算により凍結領域を把握した。詳しい計算方法、計算条件は文献⁹⁾に記載した。ここでは、計算開始の6月1日において、深さ1～2m、溝外側から0.3mまでの領域が凍結していると仮定した。

図31にヒートポンプの行き温度の経時変化を、図32に土壌温度の経時変化を示す。ヒートポンプの行き温度の経時変化

は夏期冷房時において実測値との差が大きい、暖房時の温度はおおむね一致している。また、地中温度も暖房時にはおおむね一致している。夏期冷房時に誤差が大きかったのは工事による凍土の攪拌、配管と土（特に凍土）との密着性が影響したものと考えられる。気象データが実測場所のデータと異なるなど厳密な比較とはなっていないが、凍結領域の目安を検討するには十分な精度と考えた。

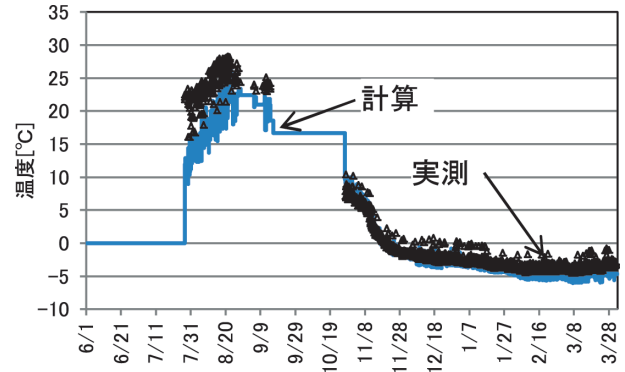


図31 平均採熱温度の比較

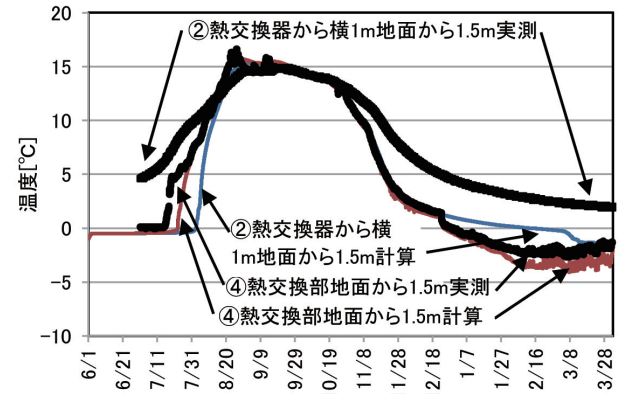


図32 地中温度（地面から1.5m）の比較

図33に体積含水率 $500\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の凍結領域（3月7日時点）を示す。灰色部分が 0°C 以下の領域である。3月7日以降は採熱量が減少し、採熱温度が上昇傾向にあるので、凍結領域の拡大はほとんど見られなかった。凍結領域は一番外側の熱交換器（ $x=1.3\text{m}$ ）から 0.5m 程度（ $x=1.8\text{m}$ ）までの範囲である。図34、図35に体積含水率が $400\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $300\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の凍結領域を示す。含水率が低いほど採熱温度は低下するので凍結領域は拡大することがわかる。凍結、凍上を防止するためには、採熱温度が -5°C 以上となるように設計し、水道管や基礎を熱交換器から 1.5m 以上離すことが必要と考えられる。

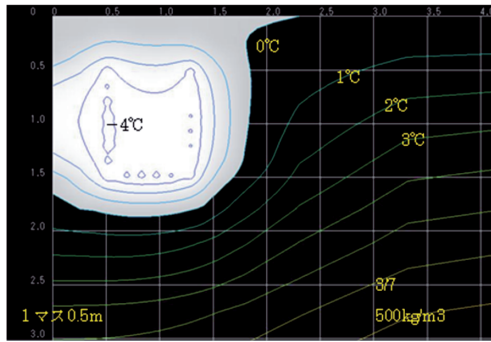


図33 体積含水率500kg/m³の場合の凍結領域（3月7日）

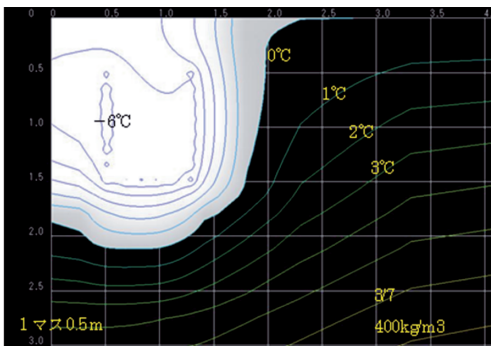


図34 体積含水率400 kg/m³の場合の凍結領域（3月7日）

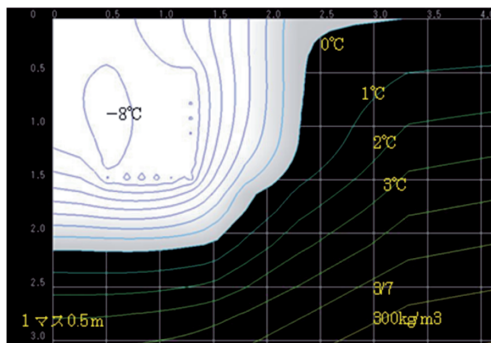


図35 体積含水率300kg/m³の場合の凍結領域（3月7日）

4.2 設計用年間採熱量の検討

ここでは数値解析により外気温が採熱量、採熱温度に及ぼす影響を明らかにし、設計用年間採熱量を示す。詳しい計算方法、計算条件は文献¹⁰⁾に記載した。物性値は、熱伝導率1.0 W/(m・K)（凍結時は1.67倍）、乾燥時の比熱1600kJ/(m³・K)、体積含水率320 kg/m³を標準の値として用いた。

熱交換器は当別での実測結果に相当するモデルとする。図36にそのモデルを示す。幅0.8m、深さ1.5mの溝の中に2系統設置し、また、溝は1m離して2つ設置することとした。図37に年間採熱量と平均採熱温度、最低採熱温度の関係を示す。平均採熱温度とは、時刻毎の採熱温度 θ に採熱量 Q で重みづけした平均値（ $=\sum Q\theta/\sum Q$ ）である。採熱温度の最低値は平均採熱温度より4～6 K程度低くなることわかる。

図38、図39に積雪がない場合、ある場合それぞれについて、札幌の年間採熱量と平均採熱温度の関係を示す。図38、図39

では1.5～480は地盤の物性値を熱伝導率1.5W/(m・K)、体積含水率480kg/m³を示す。他の条件でも同様に記している。含水率が低く、熱伝導率が小さくなると、採熱温度が低く、あるいは、採熱量が小さくなる。平均採熱温度0℃および-1℃の採熱量は、標準条件（1.0～320）の85%、熱伝導率1.5 W/(m・K)、体積含水率480kg/m³（1.5～480）の場合、標準条件の125%である。

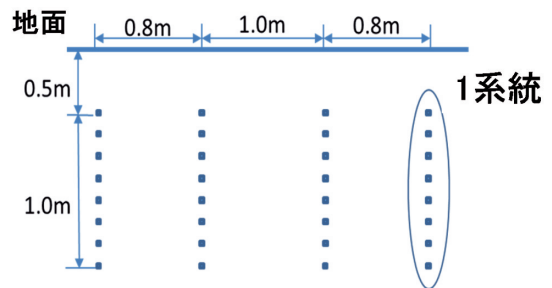


図36 採熱モデル

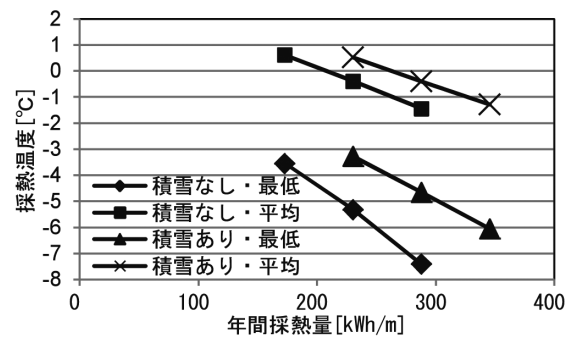


図37 年間採熱量と採熱温度（平均、最低）の関係

施工現場の土壌の物性値を正確に得ることは困難であり、また、運転パターンも状況により異なることを考慮すると、ある程度安全側に採熱量を見積もる必要がある。そこで、ここでは、平均採熱温度0℃及び-1℃を設計用の採熱温度として、採熱量を整理する。たとえば、採熱温度が-10℃でも運転可能な地中熱ヒートポンプがあるので、平均採熱温度を

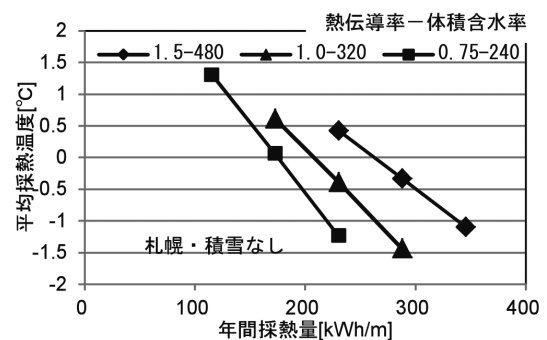


図38 年間採熱量と平均採熱温度に及ぼす地盤物性値の影響（札幌、積雪なし）

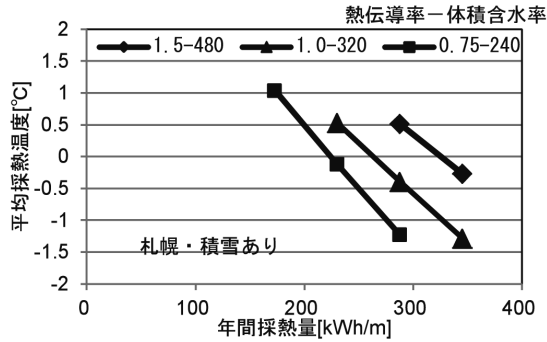


図39 年間採熱量と平均採熱温度に及ぼす地盤物性値の影響 (札幌, 積雪あり)

0°Cで設計しておけば、地盤の熱伝導率などが想定より小さくても運転上の問題は生じにくく、また、COP 3 以上で運転することも可能と考えられる。

4.3 設計用採熱量の作成

以上の検討結果から、暖房シーズンの採熱量の設定値を決定した。図40にモデル溝回路を示す。ここでは、図15と同じ形状の熱交換器を2溝6系統に配置する設定とした。図41に溝長さ1mあたりの年間採熱量を、表6に各地域における暖房シーズンの採熱量を示す。なお、「積雪あり」とは、採熱部及びその周囲少なくとも1mの範囲は除雪されず、12~3月の平均積雪が20cm程度以上ある状態とする。また、「0°C」「-1°C」とは採熱量で重みづけした運転期間の平均不凍液温度である。暖房シーズン採熱量は年平均気温と相関があることがわかる。なお、1溝2系統など他の系統については、文献に記載し、その採熱設計資料¹¹⁾として提示した。

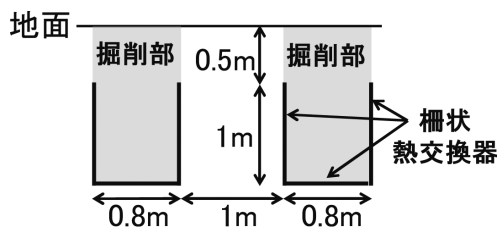


図40 モデル溝回路 (2溝6系統)

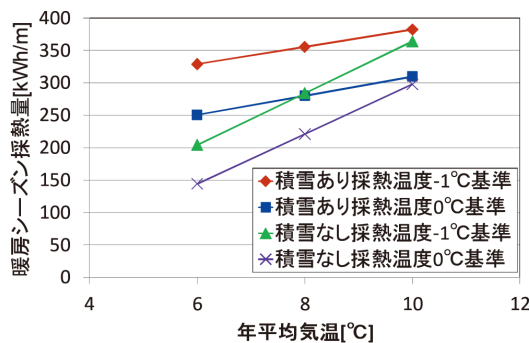


図41 溝長さ1mあたりの暖房シーズン採熱量

表6 各地域における溝長さ1m当たりの暖房シーズン採熱量 (kWh/m)

積雪条件	採熱温度	札幌	函館	旭川	釧路
積雪なし	0°C	239	263	162	170
	-1°C	300	328	221	230
積雪あり	0°C	298	300	262	255
	-1°C	370	373	338	333

5. まとめ

水平採熱式地中熱ヒートポンプ用として樹脂製柵状熱交換器を開発し、住宅への導入評価を行った。また、数値計算による採熱設計の概要と各地域における暖房シーズンの採熱量を試算した。以下に得られた知見についてまとめる。

(1)柵状地中熱交換器として、横柵状熱交換器と縦柵状熱交換器の2種類を製作した。部材には、塩化ビニルと耐熱ポリエチレン管を検討した。強度試験体を作製して埋設し、冬期に不凍液を循環させ、1, 2シーズン後の試験体の外観、耐圧試験、融着部の引張強度試験を実施した結果、耐熱ポリエチレン製が優れていることがわかり、実験住宅での採熱実証実験に使用した。その構造は両端に配置される内径17mmのヘッド管に内径13mmの細管を複数本140mm間隔で直交し、熱融着接合したものである。

(2)総熱損失係数125W/Kの当別の実験住宅で採熱(暖房)実験を行った結果、Slinky熱交換器、縦柵状熱交換器の採熱量はほぼ同等の値を示した。全系統のシーズン採熱量は5,104 kWhであり、Slinky 2回路で2,390kWh、柵状3回路で2,714 kWhであった。

(3)暖房シーズンの暖房SCOPは2.5であり、利用可能なレベルである。システムCOP3.0の垂直採熱式と比較して、水平採熱式の一次エネルギー消費量の割合は17%増加する。インシヤルコスト、シーズンランニングコストを考慮すると、水平採熱式はコストメリットが十分にあるシステムと考えられる。

(4)熱交換器周辺の土壌温度は採熱により-3°C程度となるが、熱交換器から1m離れた場所では土壌温度0°C以上に維持されていることがわかる。

(5)総熱損失係数125W/Kの当別の実験住宅で採熱(冷房)実験を行った結果、シーズン採熱量は267kWhであり、Slinky 2系統で139kWh、柵状3系統で128kWhであった。またシーズンの冷房システムCOPは4.1であった。

(6)5月まで暖房実験を行っていたため、熱交換部の地面から1.5mの冷房開始前の土壌温度は低いが、冷房開始後、徐々に土壌温度の回復が見られ、9月には14°C程度以上となり、暖房用熱源として活用可能と考えられる。

(7)柵状熱交換器を対象に、数値計算によりヒートポンプの行き温度、凍結領域を把握し、暖房時のヒートポンプの行き温

度はおおむね一致していること、地中温度も暖房時にはおおむね一致していることを確認した。含水率が低いほど採熱温度は低下するので凍結領域は拡大する。凍結、凍上を防止するためには、採熱温度が -5°C 以上となるように設計し、水道管や基礎を熱交換器から1.5m以上離すことが必要と考えられる。

(8)数値解析により外気温が採熱量、採熱温度に及ぼす影響を明らかにした。採熱温度の最低値は平均採熱温度より4～6 K程度低くなる。含水率が低く、熱伝導率が小さくなると、採熱温度が低く、あるいは、採熱量が小さくなる。安全側に採熱量を見積もるため、平均採熱温度 0°C 及び -1°C を設計用の採熱温度として、各地域における暖房シーズンの採熱量の設計値を決定した。

謝辞

本研究で使用した万能材料試験機は、公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

また、本研究の実証試験場所として、株式会社ホーム企画センターより実験住宅を、釧路工業技術センターより敷地の提供をいただきました。関係者に深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) Microgeneration Installation Standard MIS 3005, DECC
- 2) (株)北海道建築技術協会ほか：平成23年度 産学連携道産低炭素化技術振興モデル事業委託業務 「北海道型低炭素住宅の開発」報告書、(2012-2)
- 3) 山本和哉ほか：空気調和衛生工学会大会学術講演論文集, Vol.46, pp.181-184, (2012-3)
- 4) 長野克則ほか：空気調和・衛生工学会論文集, 58, (1995-6), pp.1-11
- 5) 長野克則ほか：空気調和・衛生工学会論文集, 60, (1996-2), pp.39-49
- 6) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集, 158, (2010-5), pp.15-21
- 7) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集, 164, (2010-11), pp.49-54
- 8) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集, 189, (2012-12), pp.47-54
- 9) 月館司ほか：空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, No.2, (2014-9), pp.41-44
- 10) 月館司ほか：空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, No.2, (2015-9), pp.49-52
- 11) (地独)北海道立総合研究機構, (株)テスク：水平採熱型地中採熱指針及びシステム施工の手引き, (2016-3)