

## 地中熱源ヒートポンプを導入した省エネルギー住宅

岩岡, 重樹  
株式会社アトム環境工学

渡辺, 俊行  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19128>

---

出版情報：都市・建築学研究. 15, pp.87-94, 2009-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン：  
権利関係：

## 地中熱源ヒートポンプを導入した省エネルギー住宅

### Study on an Energy Conservation House Using Ground Source Heat Pump System

岩岡重樹\*<sup>1</sup>, 渡辺俊行\*<sup>2</sup>

Shigeki IWAOKA and Toshiyuki WATANABE

The underground temperature is very steady throughout the year compared with the outside temperature. In winter it is higher than the outside temperature, and in summer it changes lower than the outside temperature, so the high COP (coefficient of performance) values is obtained in case of ground source heat pump systems. When underground heat is collected by using the ground source heat pump, a deep bore hole is needed and the bore hole drilling cost in Japan is more expensive than the other countries. This is the research of the energy conservation house using the ground source heat pump system that collects underground heat through the ground improvement piling.

**Keywords:** Energy conservation house, Ground source heat pump, Negative environmental impact

省エネルギー住宅、地中熱源ヒートポンプ、環境保全

#### 1. 序論

従来、住宅の暖房方法としては、灯油やガスを使用したファンヒーター、ボイラーによる温水循環パネル、電気によるストーブやエアコンが一般的であるが、冷房に関しては電気によるエアコンが圧倒的に多い。このエアコンは、トップランナー方式の採用により年々省エネ化が図られ、さらにコストの低減により本州温暖地を中心に普及が著しい。結果として、家庭用の暖冷房エネルギー消費量は増加の一途をたどっている。

住宅用のエアコンは圧縮式ヒートポンプと呼ばれる機器とファン等で構成されており、その省エネ性はヒートポンプの性能に大きく左右される。ヒートポンプとは、文字通り熱をくみ上げる機器のことで、温度の低いところから高いところへ熱を移動させるために使用される。

一般的には、ヒートポンプを用いて暖房をする場合、外気から熱を奪って室内へ熱を供給し、冷房の場合は、室内の空気から熱を奪って外気へ排熱する。そのため、

夏には室内からの排熱が外気を昇温させる結果となり、とくに建物が密集している都市部においてはヒートアイランドと呼ばれる現象を引き起こす原因の一つにもなっている。そこで、住宅における暖冷房エネルギーを削減し、ヒートアイランドの抑制にも有効な方法の一つとして、再生可能な自然エネルギーである地中熱を活用し、暖房や冷房、給湯をする地中熱源ヒートポンプシステムが注目されている<sup>1), 2), 3)</sup>。

この地中の温度は、その深さにもよるが、外気温と比較すると一年を通して非常に安定しており、冬季は外気温より高く、夏季は外気温よりも低く推移するため、高い成績係数（以下、COP）が得られる。とくに、外気温が低い寒冷地では地中熱源ヒートポンプは一般の外気熱源ヒートポンプに比べて有利な熱源であると考えられる。

しかし、地中熱源ヒートポンプを用いて地中熱を利用する場合、採熱を行うための熱交換パイプ（採熱管）を地中に埋設する必要がある。そのためにはボーリング等でボアホールを設置しなければならない。我が国においては、現段階ではこのボーリングに係る掘削費用が諸外国に比べて非常に高く、注目度とは裏腹に我が国では

※1 ㈱アトム環境工学

※2 都市・建築学部門

普及実用化の域に達しているとは言い難い。

そこで、本研究の地中熱源ヒートポンプシステムは、実用化を念頭に置き、採熱用熱交換パイプを建物の構造体である地盤改良用基礎杭の中に挿入することにより、ボーリングコストと採熱管設置のコストの一部を建築コストに吸収させ、システム自体のインシヤルコストを抑えることを試みたものである。

本稿では、2004年に埼玉県さいたま市に竣工した地中熱源ヒートポンプシステム導入の戸建住宅における夏季および冬季の室内温熱環境とエネルギー消費量の実測結果について述べる。

## 2. システム概要

### 2.1 測定対象建物と暖冷房システムの概要

測定対象建物はさいたま市に建つ3階建ての戸建住宅で、北・南・西側に隣家を有している。熱損失係数は2.58 W/m<sup>2</sup>K、夏期日射取得係数は0.06であり、ともに次世代省エネ基準で定められている性能基準値を満たしている。測定項目は、室内外温湿度、放熱器表面温度、及び1次側の流量及び水温で、測定間隔は30分である。表2-1に建物概要を、表2-2に測定項目を記す。

表 2-1 建物概要

建設地	さいたま市
延床面積	123.37 m <sup>2</sup>
気積	296.08 m <sup>3</sup>
熱損失係数	2.58 W/m <sup>2</sup> K
夏期日射取得係数	0.06
家族構成	4人(夫婦+子2人)

表 2-2 測定項目と機器

測定項目	測定機器
室内温湿度	温湿度データロガー
外気温湿度	〃
放熱器表面温度	〃
1次側流量	簡易流量計
1次側水温	温度データロガー

地中採熱については、建物土間コンクリート下に打設される金属鋼管製の地盤改良杭(内部中空、139.8mmφ)を用いて行う。杭長は約12mで打設される杭の総長は384mであり、熱交換器としてポリエチレン製のUチューブを杭内に挿入し採熱する。その内、12m×3本を1ループとして並列接続し、熱交換長36mの3ケースの採熱回路(鋼管の充填材により、ケース1:水道水、ケース2:珪砂、ケース3:川砂)をつくり、ケース2とケース3の実測を行った。

冬季の暖房運転時には、熱媒にブラインを用いてポリエチレン製Uチューブ内を循環ポンプにより循環させて地中熱を回収する。この地中熱を熱源とするヒートポンプによって加熱された温水を室内のファンコンベクターに搬送し、室内に温風を吹き出して暖房を行う。

夏季の冷房運転時には、地中放熱管を通して冷却された熱媒水が直接室内のファンコンベクターに送られ、室内に冷風を吹き出して冷房を行う。

図2-1(その1~4)に建物各階の平面図(基礎、1階、2階、3階)と測定点を示す。

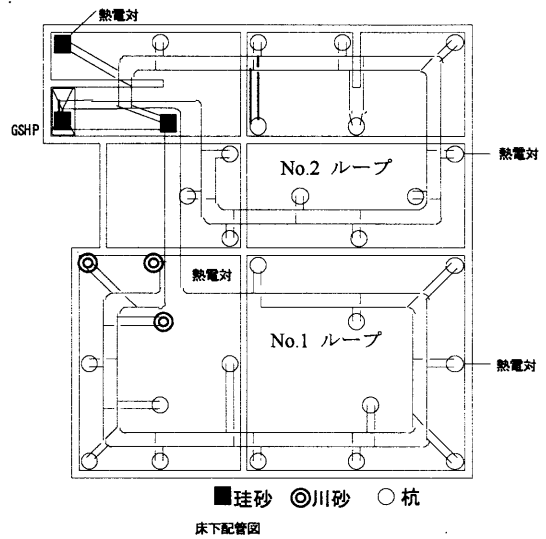


図 2-1 建物各階平面図(その1) 基礎平面図

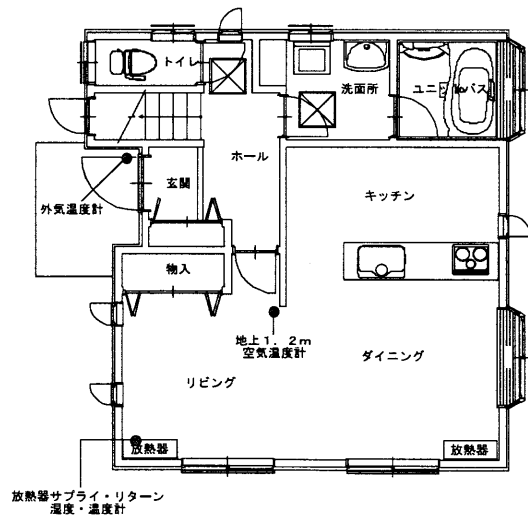


図 2-1 建物各階平面図(その2) 1階平面図

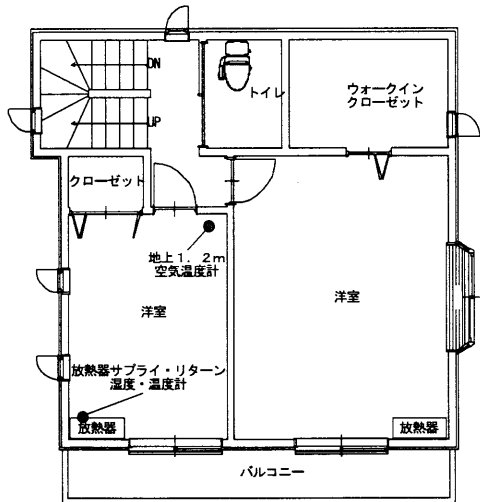


図 2-1 建物各階平面図 (その 3) 2 階平面図

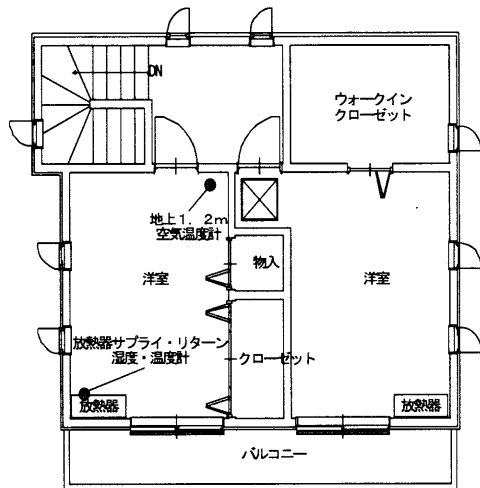


図 2-1 建物各階平面図 (その 4) 3 階平面図

また、地盤改良杭の杭長は12mで、採熱管を挿入した杭は計32本あるので、地中熱交換器である採熱管の総長は約384mである。暖冷房システムの概要を図2-2に、地中熱源ヒートポンプの暖房能力、COP、圧縮機の定格消費電力と室内放熱器の暖房能力、最大消費量の概要を表2-3に示す。また、測定期間中のシステムの運転スケジュールを表2-4に示す。

表 2-3 地中熱源ヒートポンプの概要

ヒートポンプ	暖房能力	7.0kW	冷媒
	COP	4.0	
	圧縮機 定格消費電力	1.7kW	R410A
室内器 (ファンコン ベクター)	最大 暖房出力	2.91kW	
	最大 消費電力	23W	

表 2-4 運転スケジュール

夏季 (2004年) 7月3日 ~8月31日	冬季 (2005年) 1月26日 ~2月21日	運転状況
7月7日~ 8日	—	メンテナンスのため運転停止
7月12日~ 20日	—	No.1 ループのみ運転
上記以外	1月26日~2 月21日	No.1 ループと No.2 ループ運転

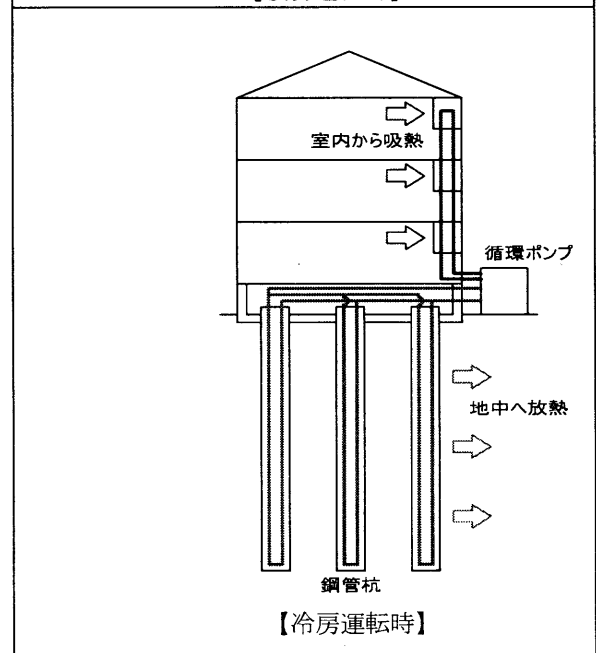
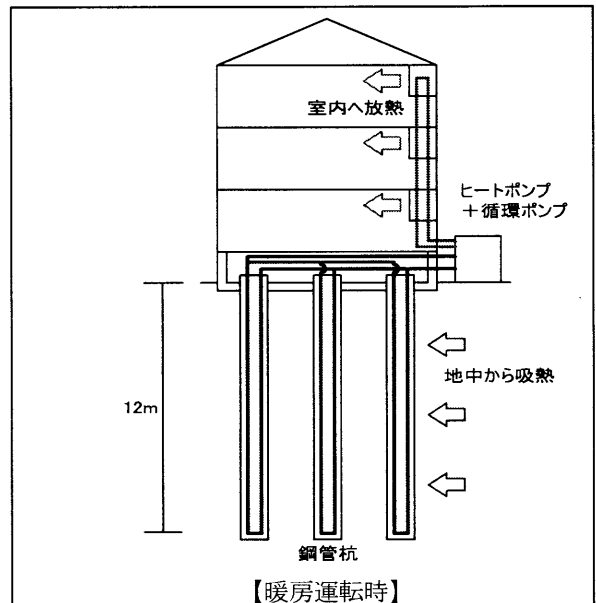


図 2-2 暖冷房システム概要

### 3. 地盤の有効熱伝導率と地下水の流速・流向

地中から採放熱可能な熱量は、地中熱交換器が設置される地質の状況、地下水の有無、地下水位、地下水の流動状況などによって左右される<sup>4),5),6)</sup>。

そこで、測定対象棟が建設され実際に地中熱利用を行う場所の地盤における総括的な採熱及び放熱性能を推定するため、地中熱交換器に対し一定の熱量を与え、水を循環させたときの循環水温度の変化を測定(10分間隔)、地中熱回収に不可欠な有効熱伝導率と地下水の流速および流向を測定した。

測定の結果、地下水については流向北西、流速 189m/年(0.52m/日)と安定しており、有効熱伝導率は 13.8 W/mK であり、地中熱回収に有効な地盤であることが推測される。試験概要を表 3-1 に、試験結果を表 3-2 に示す。

表 3-1 地盤および地下水の試験概要

有効熱伝導率	試験場所	埼玉県さいたま市	
	実施年月日	2004年2月17日～3月2日	
	試験概要	試験は地中熱交換器に対して、一定の熱量を与え、水を循環させたときの循環水温度を測定(10分間隔)する方法で行った。	
	杭外径	139.8mm φ (鋼管杭)	
	杭長	12m (総長 384m)	
有効熱伝導率	熱交換器	シングルUチューブ 間接方式(1インチ・杭内挿入)	
	杭内充填材	12m × 3 本並列接続：熱交換長 36m ケース1：水道水 ケース2：珪砂8号 ケース3：川砂	
	試験時間	60時間(3600分)以上	
地下水流速・流向	試験場所	同上	
	実施年月日	2003年12月3日	
	試験概要	試験は、孔内の土粒子をトレーサーとして用いる単孔式 CCD 映像法により測定した。試験は複数回実施し、その平均値を採用した。	

表 3-2 地盤および地下水の試験結果

有効熱伝導率	13.8W/mK
地下水流速・流向	流速：189m/年(0.52m/日) 流向：北西

### 4. 2004年夏季実測結果

#### 4.1 外気温湿度および地中温度

図 4-1 に、夏季実測期間の 2004 年 7 月 3 日から 8 月 31 日までの外気温及び湿度、地中温度(地下 10m)の推移を示す。

この間の外気温の最高は 39.3℃(7月20日 12:30)で、最低は 18.3℃(8月9日 18:00)、平均は 28.2℃であった。また、この期間における地中温度は平均 16.8℃でほぼ安定しており、冷房時における冷熱源としての有効性が確認できる。

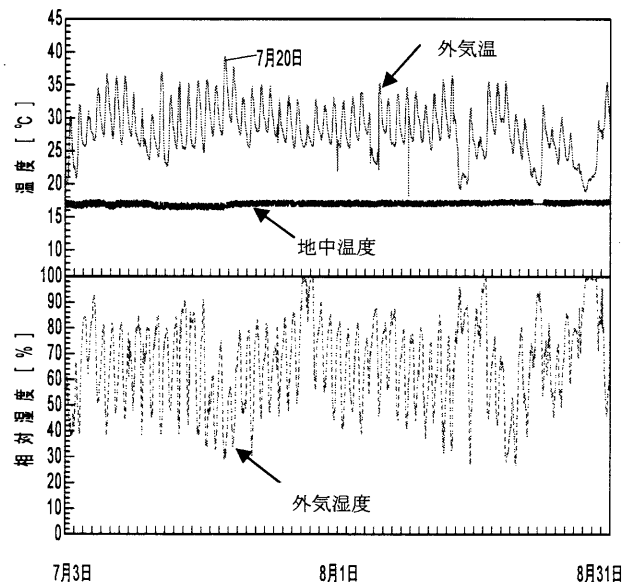


図 4-1 外気温湿度および地中温度の推移(夏季)

#### 4.2 室内空気温湿度

図 4-2 は、首都圏において外気温度が 39.3℃と最暑日となった 7 月 20 日と、その前後 1 日における室内空気温湿度の状況の推移である。この間は No.1 ループのみの単独運転が行われており、平均外気温は 32.1℃と高温であるが、室温の平均は 1F が 26.9℃、2F が 26.4℃、3F が 25.5℃に保たれており、相対湿度は 60%以下で全体的に快適な状態に保たれている。

ただし、竣工直後であることからコンクリートや木材など建築資材などからの放湿が懸念されるため、夏季全体を通して除湿器も断続的ではあるが運転されている。

#### 4.3 地中への放熱量

地中への放熱量については、式 1 から求める。

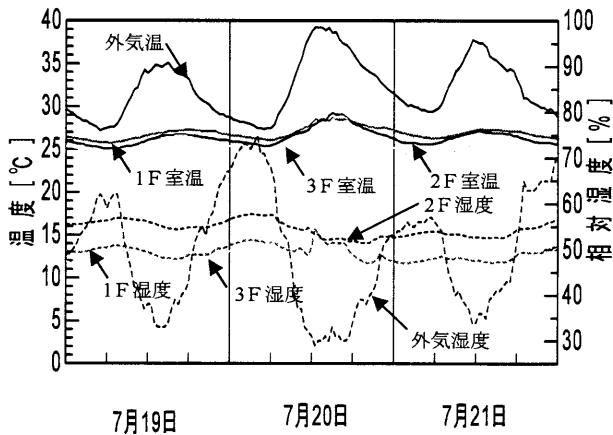


図 4-2 室内空気温湿度の推移 (夏季)

$$Q = 60 \times C \times \Delta T \times q \div 0.86 \quad \dots \text{式 1}$$

ここで、 $Q$ : 放熱量 [W],  $C$ : 比熱 [kcal/m<sup>3</sup>·K],  $\Delta T$ : 循環水の地中への出入温度差 [K],  $q$ : 循環水量 [L/min] である。

式 1 から算出した放熱量の平均 (測定期間のうち信頼性のあるデータのみ抽出) を表 4-1 に示す。夏季における放熱量の平均は、No.1 ループが 703W, No.2 ループが 921W で、合計すると 1624W となった。また、実験的に No.2 ループの運転を停止し、No.1 ループのみで運転をした場合、平均流量は約 2 倍になったものの平均温度差は 0.84K とあまり変化がなく、平均放熱量は No.1 ループと No.2 ループの合計よりも約 200W 小さい 1424W となった。

表 4-1 夏季の放熱量

ループ名	出入口平均温度差 [K]	平均流量 [L/min]	平均放熱量 [W]
No.1	0.80	12.6	703
No.2	0.95	13.9	921
No.1 (No.2 を停止した場合)	0.84	24.3	1424

#### 4.4 充填材としての川砂と珪砂の検討

図 2-1 に示すように、鋼管杭には川砂 (No.1 ループ) と珪砂 (No.2 ループ) が充填されたものが各 3 本あり、充填材の違いによる放熱量への影響について検討する。

表 4-2 は、川砂と珪砂の平均放熱量を示したものである。川砂に関しては、出入口平均温度差が 0.4K で平均放熱量は 352W となった。また、珪砂に関しては、出入口平均温度差が 1.1K で、平均放熱量は 1067W と、川砂の約 3 倍の放熱量が得られた。

表 4-2 充填剤別放熱量

	出入口平均温度差 [K]	平均流量 [L/min]	平均放熱量 [W]
川砂	0.4	12.6	352
珪砂	1.1	13.9	1067

川砂が充填された杭内の日平均温度を図 4-3 に示す。7 月上旬から 8 月中旬まで上昇傾向が続き、8 月下旬からは上昇と低下を繰り返している。No.1 ループの単独運転を行った期間 (7 月 12 日から 7 月 20 日まで) の川砂充填杭内の日平均温度は 1K ほど上昇している。

珪砂が充填された杭内の日平均温度を図 4-4 に示す。こちらも川砂充填杭と同様の昇温傾向が見られるが、地下 -11m の温度が高く、地下 -2m の値と近似している。No.2 ループの運転を停止した期間 (7 月 12 日から 7 月 20 日まで) の値に注目すると、地下 -11m の値は地下 -6m の値に近づいている。夏季は本来、地下 -2m, 地下 -6m, 地下 -11m の順に低くなるはずであり、地下 -11m の温度は送水管の影響を受けている可能性がある。

図 4-5 に、7 月 3 日から 9 月 22 日までの間の放熱量の実測値を、図 4-6 に最暑日となった 7 月 19 日の放熱量の実測値を示す。

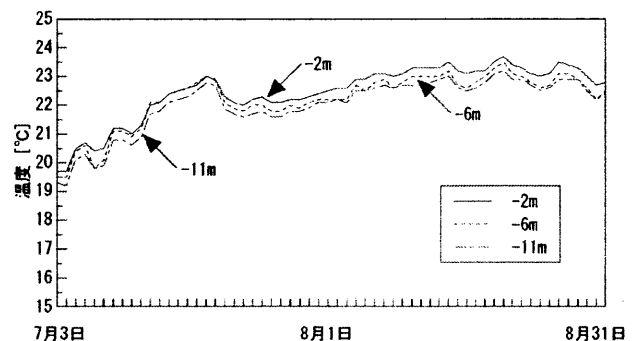


図 4-3 杭内の日平均温度の推移 (夏季、川砂充填杭)

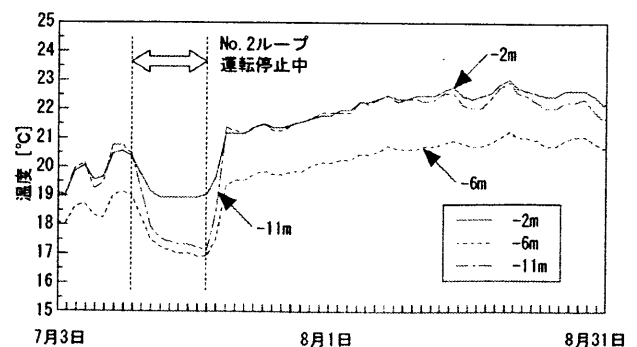


図 4-4 杭内の日平均温度の推移 (夏季、珪砂充填杭)

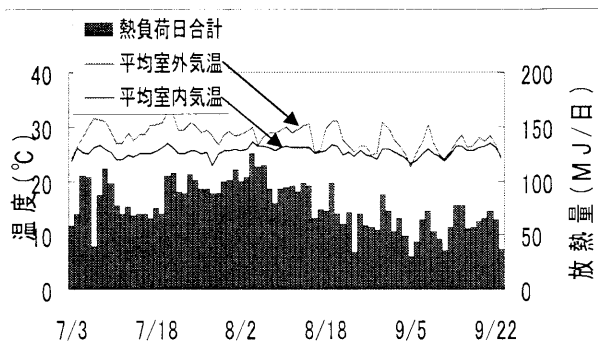


図 4-5 杭内の日平均温度の推移 (夏季、珪砂の場合)

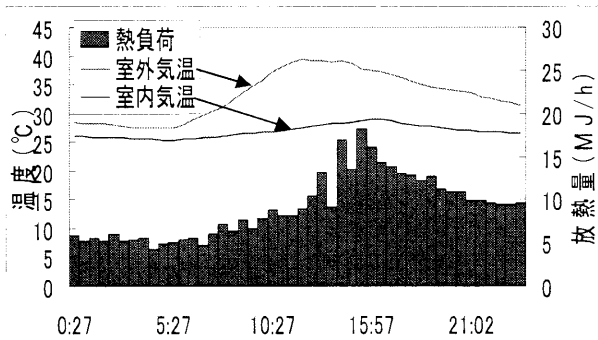


図 4-6 最暑日の測定結果

#### 4.5 消費電力量

7月20日18時から7月28日12時までの期間において、連続運転した場合の一次側放熱回路と二次側熱媒回路のポンプ電力量を測定した。その間の積算電力量は9.4kWhで、1時間当たりの消費電力に換算すると約50Wとなる。

また、室内器の送風ファンの消費電力は定格で最大23W/台であり、各階に2台のファンコイルユニットが設置されているため、 $23\text{W/台} \times 6\text{台} = 138\text{W}$ を室内器全体の消費電力とすると、 $50 + 138 = 188\text{W}$ がシステム全体の消費電力となる。これを1ヶ月あたりに換算すると  $188 \times 24 \times 30 = 135.4\text{kWh/月}$  となり、仮に1kWh当たりの電力料金を20円/kWhとすると、消費電力コストは  $135.4 \times 20 = 2,708$  円/月であり、夏季冷房時におけるランニングコストはかなり低く抑えられる。

### 5. 2005年冬季実測結果

#### 5.1 外気温湿度および地中温度

図 5-1 に、冬季実測期間 2005 年 1 月 26 日から 2 月 21 日までの外気温湿度と地中温度（地下 10m）の推移を示す。2 月 4 日から 2 月 8 日までは地中温度が欠測である。この間の外気温の最高は  $14.6^\circ\text{C}$ （2 月 10 日 12:00）、最低は  $0.1^\circ\text{C}$ （2 月 2 日 5:30）、平均は  $6.6^\circ\text{C}$  であった。また、地中温度は  $15.3^\circ\text{C}$  で安定しており、熱源としての有効性が確認できる。

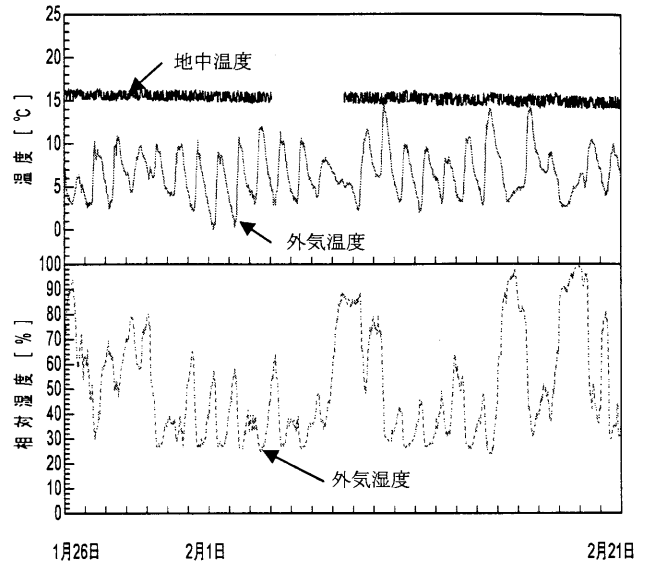


図 5-1 外気温湿度と地中温度の推移 (冬季)

#### 5.2 室内空気温湿度

図 5-2 は、最寒日となった 2 月 2 日とその前後 1 日における室内空気温湿度の推移である。この間の平均外気温は  $5.1^\circ\text{C}$  で、室温は  $15^\circ\text{C}$  から  $23^\circ\text{C}$  の間で若干低めに推移している。これは、居住者によりシステムを弱モードで運転したためであり、通常モードまたは強モードで運転した場合はこれよりも高い温度で推移するものと予想される。

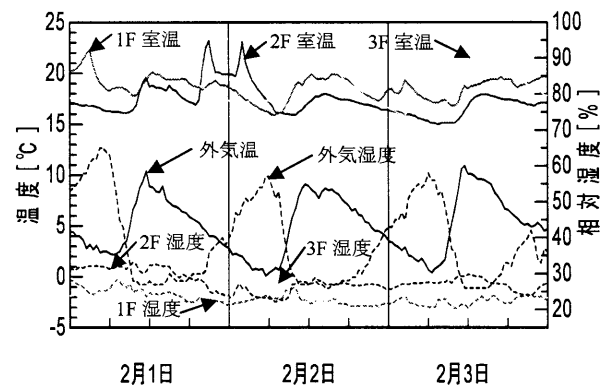


図 5-2 室内空気温湿度の推移

#### 5.3 地中からの採熱量

地中からの採熱量に関しては、夏季の場合と同様に式 1 から求める。算出された採熱量の平均を表 5-1 に示す。冬季における採熱量の平均は、No.1 ループが  $735\text{W}$ 、No.2 ループが  $1077\text{W}$  で、合計  $1812\text{W}$  となった。

表 5-1 地中からの採熱量(冬季)

ループ名	出入口平均温度差 [K]	平均流量 [L/min]	平均採熱量 [W]
No.1	0.54	19.5	735
No.2	0.78	19.8	1077

#### 5.4 充填材としての川砂と珪砂の検討

表 5-2 は、川砂と珪砂の平均採熱量を示したものである。川砂に関しては、出入口平均温度差が 0.41K で、平均採熱量は 557W となった。珪砂に関しては、出入口平均温度差が 0.72K で、平均採熱量は 995W となり、川砂

表 5-2 川砂と珪砂を充填した場合の冬季平均採熱量

	出入口平均温度差 [K]	平均流量 [L/min]	平均採熱量 [W]
川砂	0.41	19.5	557
珪砂	0.72	19.8	995

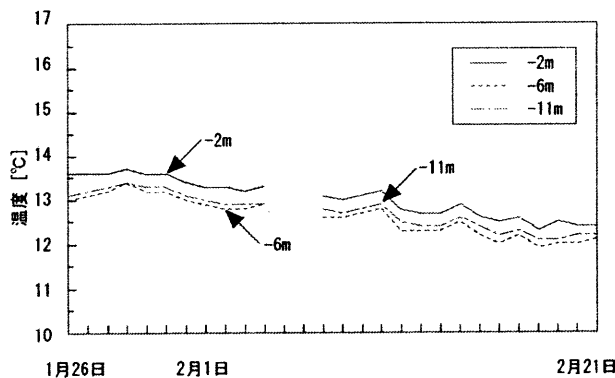


図 5-1 杭内の日平均温度の推移 (冬季, 川砂充填杭)

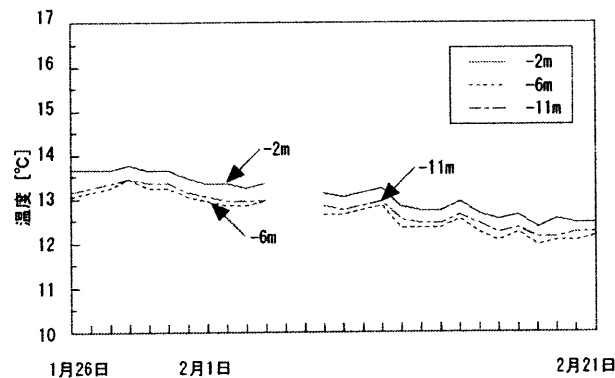


図 5-2 杭内の日平均温度の推移 (冬季, 珪砂充填杭)

の約 2 倍の採熱量が得られた。川砂が充填された杭内の日平均温度を図 5-1 に、珪砂が充填された杭内の日平均温度を図 5-2 に示す。夏季の場合と同様に、相対的にはどちらの場合も約 1 ヶ月間で 1K 程度の温度低下がある。

#### 5.5 消費電力量

2月1日12時から2月20日12時までの期間において、地中熱源ヒートポンプの消費電力量を測定した。その間の積算電力量は 98.7kWh で、1時間当たりの消費電力に換算すると約 216W となる。図 5-2 に、最寒日となった 2月2日と2月3日におけるヒートポンプの消費電力を示す。

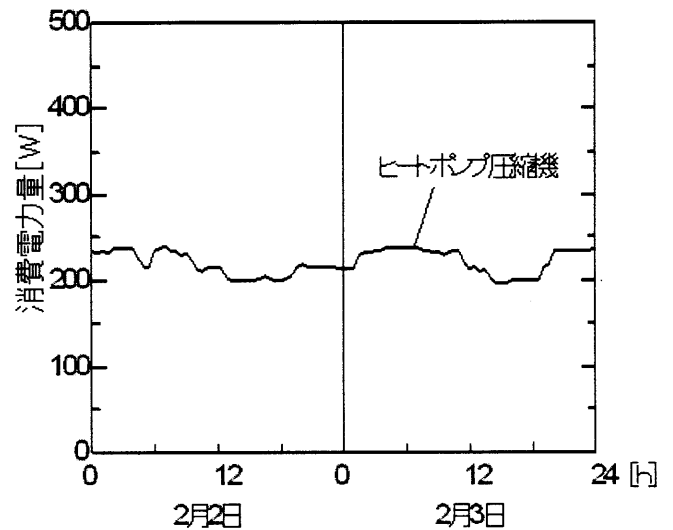


図 5-2 地中熱源ヒートポンプ消費電力の推移

室内器のファンは各階の居室に合計 6 台が設置されており、各々の消費電力は 23W である。一次側採熱回路と二次側熱媒回路の消費電力を夏季と同様と仮定すると、それぞれ 50W と 138W なので、 $216 + 50 + 138 = 404W$  がシステム全体の消費電力となる。

これを 1 ヶ月当りに換算すると、 $404 \times 24 \times 30 = 291kWh$ /月となり、仮に 1kWh 当たりの電力料金を 20 円/kWh とすると、冬季において全日セントラル暖房を行った時の暖房エネルギーコストは  $291 \times 20 = 5,820$  円/月であり、冬季暖房時におけるランニングコストはかなり低く抑えられる。冬季は地中温度が外気温より高いことから、地中熱を利用する地中熱源ヒートポンプ熱源は省エネルギー効果が高い。

#### 6. 結論

本稿では、地盤改良杭を用いて熱回収する地中熱源ヒートポンプシステムを導入した省エネルギー住宅 (2004 年竣工) における夏季および冬季の室内温熱環境とエネルギー消費量の実測結果について述べた。



- 1) 室内の温度に関しては、夏季は 26℃前後、冬季は 18℃前後で、全体的な居住性は快適な状態に保たれていた。夏季においては、竣工直後の測定であることから、コンクリートや木材などの建築材料からの放湿により相対湿度は高めであった。
- 2) 地中温度は年間を通じて 15℃から 16.8℃と安定しており、暖冷房用熱源として活用することができる。熱交換杭として利用した鋼管製地盤改良杭内に充填した材料に関しては、夏季、冬季ともに珪砂の熱交換量が大きく有効であった。ただし、夏季の場合、一部のループ内で昇温が見られ、送水管の影響や温度センサーの位置について検討する必要がある。
- 3) ランニングコストは、全日セントラル運転で夏季冷房時には 2,708 円/月であった。従来のエアコンを用いた一般的な暖冷房設備のランニングコストに比して 4 分の 1 程度になり、ランニングコストの大幅な削減が可能である。夏季冷房時においては、地中で冷却した熱媒水を直接室内ファンコンベクターに循環させることで 8.57 の高い COP が得られた。
- 4) 冬季において全日セントラル暖房を行った時の暖房エネルギーコストは 5,820 円/月であり、冬季暖房時におけるランニングコストはかなり低く抑えられる。冬季における COP は 4.59 であり、とくに寒地における地中熱源ヒートポンプシステムは有効である。
- 5) 再生可能な自然エネルギーの地中熱を利用することで、本システムの CO<sub>2</sub> 削減率は年間を通じて 78%であり、温暖化防止対策の一環として大いに期待される。
- 6) 一般的な基礎杭の掘削コストは 15,000 円/m であることから、通常のボーリングによってボアホールを設置した場合の採熱管の施工コストは 5,760,000 円となるが、地中管を設置する熱交換杭によく用いられる鋼管製地盤改良杭を利用することによって、その施工コスト（長さ 8m の鋼管杭 40 本を用いた場合）を 1,000,000 円まで削減することができた。

住宅や小規模建物の場合は、鋼管製地盤改良杭などを活用することにより、地中熱源ヒートポンプを利用した実用的な暖冷房システムで省エネルギー化および省コスト化が図れることを確認した。ただし、建物を建築する地盤の地質条件によって放熱量や採熱量は異なることから、地域性を考慮しながら異なる地盤に対応した熱量算

定が行える計算プログラムと、地盤改良杭などを利用した地中熱源ヒートポンプシステムの設計マニュアルの開発が必要であり、今後の課題としたい。

#### 謝辞

本研究に際しては、本実験棟の建設と測定の機会を与えていただいた株式会社藤島建設の関係者、ならびに多大なご支援をいただいた施主の飛田正美氏に深く感謝申し上げます。また、実測調査を行うに当たって、株式会社藤島建設設計部の前部長千代岡英一氏ならびにアトム建築環境工学研究所元技術開発課長佐々木隆氏には多大なご協力をいただきました。記して、ここに深甚の謝辞を表します。

#### 参考文献

- 1) 石川善美, 他 5 名: 建物の基礎杭を利用した地中熱源ヒートポンプシステムの性能評価に関する実験的研究 (その 3) 人口気象室を用いた実験結果のまとめ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.659-660, 2005.9.
- 2) 大岡龍三, 他 3 名: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その 6) 冷・暖房実験による性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.661-662, 2005.9
- 3) 関根賢太郎, 他 3 名: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その 7) 中規模ビルによる省エネルギー効果とコスト検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.663-664, 2005.9
- 4) 嶋脇興助, 他 4 名: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その 8) 地盤調査にもとづく土壌物性値の推定手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.665-666, 2005.9
- 5) 黄錫鎬, 他 3 名: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その 9) 地中熱移動シミュレーションに基づく採熱量予測モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.667-668, 2005.9
- 6) 南有鎮, 他 4 名: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究 (その 10) 地中熱移動シミュレーションの精度検証と各種土壌物性値の感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.669-670, 2005.9

(受理:平成 20 年12月 4 日)