

# 基礎杭型地中熱交換器の性能評価と実用

## Performance Assessment and Practical Use of Foundation Pile Type Ground Source Heat Exchanger

畠中 真一 \*1  
Shinichi HATAKENAKA

越後 滋 \*2  
Shigeru ECHIGO

勝俣 盛 \*3  
Mori KATSUMATA

佐藤 義則 \*4  
Yoshinori SATO

石下 誠治 \*3  
Seiji ISHIOROSHI

臼谷 雅裕 \*5  
Masahiro USUTANI

年間を通じて一定している地中の温度と外気の温度差を利用し、少ない電気エネルギーで冷暖房を行う地中熱利用技術は、CO<sub>2</sub>排出削減や都市のヒートアイランド化を抑制する効果が期待される事から、世界中から注目されている。筆者らは地中熱利用にかかる初期コストの低減についての検討を行う中で、基礎杭型地中熱交換器の実物大試験装置を製作施工した。さらに、これらの熱交換器を用いた熱応答試験により性能の確認を行った。また地中熱ヒートポンプを接続して事務所の空調に実用導入している。本文では、年間を通じて行った地中熱温度のモニタリングの結果や熱交換器の性能比較、および、実用化にあたっての課題と対策について述べる。

キーワード：地中熱，熱応答試験，U字管，基礎杭，ヒートポンプ

### はじめに

建設分野での地中熱の利用は、地下水の豊富な地域において井戸水を汲み上げて融雪の熱源として利用する事例が多い。地下水を直接汲み上げることができない地域でも、地中に埋設した管内に水を循環させることで地中温度を地表に取り出して利用することが可能であり、この方法を用いて融雪の熱源をはじめ、冷暖房の空調設備の温冷熱源として利用することで、化石燃料の依存を抑える試みが、環境意識の高まりとともに年々増加している。

地中の温度は年間を通じて一定<sup>1)</sup>しており、地中の温度と気温との温度差を利用したヒートポンプを導入することで、より少ない電気エネルギーで冷・温熱源が得られることから、CO<sub>2</sub>排出削減や都市部のヒートアイランド化を抑制する効果に期待が寄せられている。しかしながら、地中熱の利用に必要な熱交換用の深い井戸の掘削にかかる高いコストが普及を妨げていることから、筆者らは構造物の基礎杭を利用した熱交換器に着目し、実用化について検討を進めてきた<sup>2)</sup>。

本文では、地中熱ヒートポンプを導入するにあたっての事前調査として、深さ20mの基礎杭を熱交換器として使用した場合の熱伝導特性測定試験を行い、さらに実用化事例として事務所の空調に導入したので、その結果を報告する。

### 1. 熱交換器の性能評価

#### (1) 試験場所および試験方法

試験を実施した場所は、栃木県宇都宮市の東に隣接する芳賀郡の自社敷地内の試験フィールドである。写真1に示すように、●部には地中熱交換器の性能試験を行うため、5m間隔の格子の位置に9本の杭基礎を想定した実物大の杭と、比較のためのU字管を埋設した。また、これらを取り囲む1辺の長さが30mの三角形の頂点となる●部には、地下水の水位と移動状況を把握するための深度15mの観測井を設け、さらにバックグラウンド観測として、地中温度をモニタリングする目的で深度30mの温度観測井を●部に施工している。



写真1 地中熱試験施設全景

\*1 川田工業株式会社 係長  
\*2 川田工業株式会社 所長  
\*3 川田工業株式会社 主幹

\*4 川田工業株式会社  
\*5 川田工業株式会社 建築事業部 エコプラス推進室課長補佐

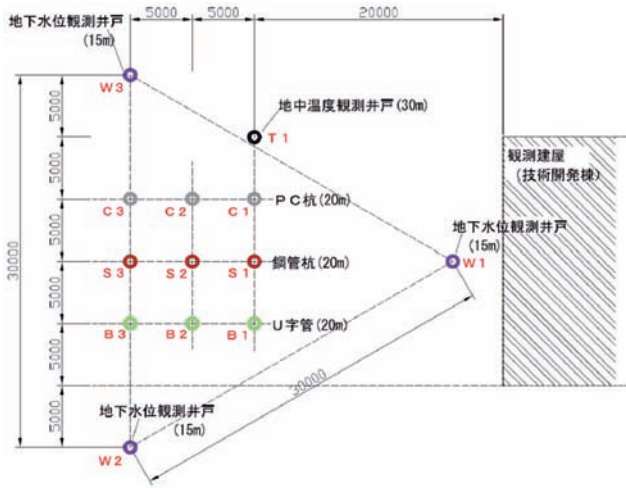


図1 配置平面図

表1 熱交換器の諸元

	U字管 B1~B3	鋼管杭 S1~S3	PC杭 C1~C3
外径	φ 34 mm	φ 406.4 mm	φ 400 mm
肉厚	t 3.5 mm	t 6.4 mm	t 65 mm
内径	φ 27 mm	φ 393.6 mm	φ 270 mm
深さ	20.0 m	20.0 m	20.0 m
種別	GUP-25A20	STK400	PHC-A 種

各熱交換器(杭)と観測井の配置平面図を図1に示す。試験フィールドを取り囲む地下水位観測井戸W1~W3での観測結果によると、周辺の地下水位は比較的変動が大きく、梅雨明けの夏の時期には-11~-12m程度の水位があるものの、冬期には観測井の測定限界である-15mを下回るといった季節性の変動のあることが、これまでの観測により確認されている。また、日単位の降雨にも比較的応答が早く、例えば40(mm/day)程度の降雨があると、その翌日から4~5日程度かけて地下水位は徐々に上昇し降雨前より最大で20~25cm程度上昇するなど、地下水の

移動としては水平動より上下の移動が支配的となる特性を持っている<sup>2)</sup>。

熱交換器としては、PC杭を使用したC1~C3、鋼管杭を使用したS1~S3、地中熱交換用に市販されているポリエチレン製のU字管を使用したB1~B3を5m間隔に配置した。いずれも深さ20mであり、これは関東近傍で施工される複層階建築物の基礎の深さを模擬したものである。それぞれの熱交換器の諸元を表1に示す。U字管の直径は一般に25Aと呼ばれている太さの管であり、また、鋼管杭とPC杭については、呼び径400ミリのものを使用した。施工にあたっては、アースオーガで直径500mmの先行掘削を行い、熱交換器を挿入後、周辺間隙を山砂で埋め戻した。

地中温度観測井T1は深さが30mあり、土中に直接埋め込んだ7本の熱電対により、地中温度の測定を行った。

(2) 深度別温度測定

地中温度測定井戸T1で観測した毎正時の測定結果の中から、深さ-30m、-10m、-5m、-2m、-0.1mにおける地中温度、および気温の変動を図2に示す。図中—で示す気温の観測結果には日射によるノイズが幾分か含まれており、日中温度が若干高めに観測された点があるものの、一日の夜間と日中で15~20℃程度の幅をもって温度変化を繰り返している事がわかる。これに対し深さ-0.1m(図中—)の地表付近ではその日の中間的な気温を中心として、3~5℃程度の変動にとどまっている。深さ-2m(図中—)では気温や地表の温度変化に連動した日単位での規則的な変動が見られなくなり、それとは別に季節による温度変化が気温より約3ヶ月遅れて顕れていることが観測されている。さらに-5m以深の地中では15~16℃程度の一定温度を保っていて、気温や日射の影響をほとんど受けないことが確認された。近隣の気象官署で

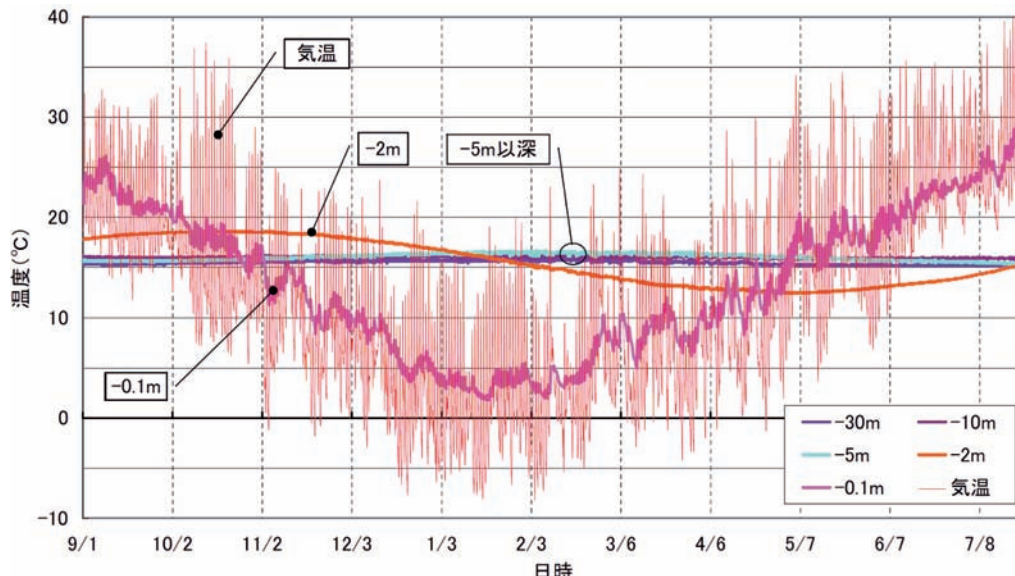


図2 地中温度測定結果

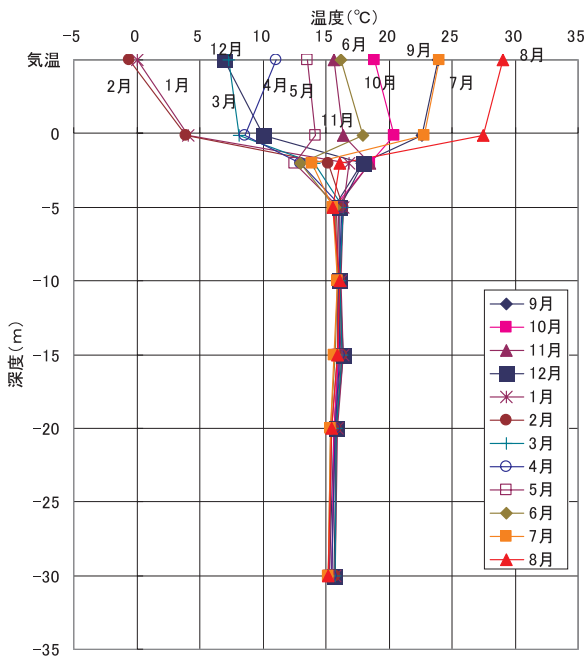


図3 月毎の温度変化 (毎月1日, 24時間平均温度)

ある宇都宮地方気象台での年間平均気温は 13.4℃であり、地中温度はこの地域の平均気温より約 2℃高い温度で安定していると言える。図3は、毎月1日の各深さにおける24時間の平均温度である。この結果からも-5m以深で気温変化の影響をほとんど受けない不易層温度を示していることが確認できる。

(3) 熱応答試験

表1に示した基礎杭を模した熱交換器は、杭施工前に先端を密閉してあり、地表部にも密閉できる鋼製蓋を取り付け、図4の右図に示すように中空部に灌水して循環

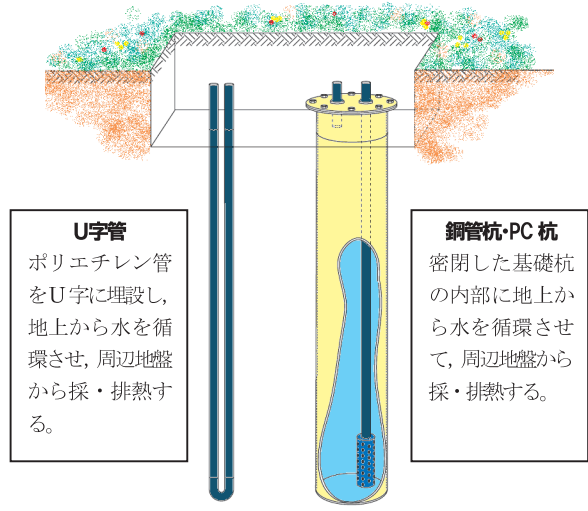


図4 地中熱交換器概念図

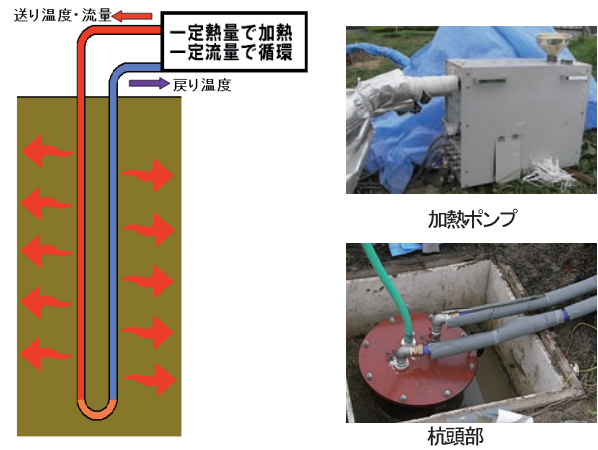


図5 熱応答試験概要図

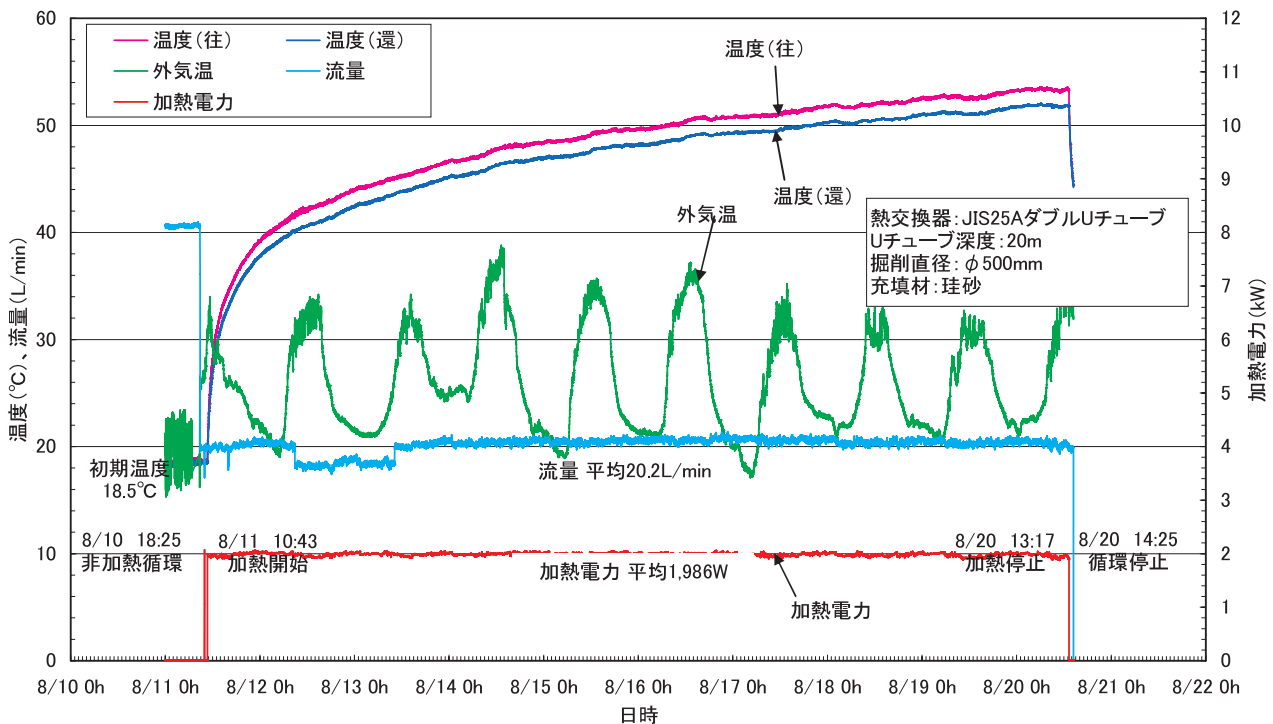


図6 熱応答試験の測定例 (U字管の例)



できる構造となっている。熱応答試験では、これらの熱交換器に図5に示すような加熱ポンプを接続し、加熱循環させながら流量と温度を計測することで、それぞれの熱交換効率を評価する。鋼管杭とPC杭の内部にはいずれも真水を充填し、U字管には2kW、鋼管杭とPC杭には3kWの一定の熱量を与えながら、一定の流量(約20L/min)で水を循環させ、約9日間にわたり送側と還側の循環水の温度を計測した。図6にU字管での計測結果の一例を示す。外気温が昼夜の変動を繰り返す中、加熱電力と流量がほぼ一定の値を保ち、行きと還りの温度が徐々に上昇している様子が確認される、ここで、行きと還りの温度差が地中に排熱された熱量を示していることになる。

熱交換器のように熱が同心円状に拡散するモデルでは、時間軸を対数表記することで温度変化が直線近似でき、充分時間が経過した後の温度変化の傾きと周辺地層の密度と比熱の推定値などから、有効熱伝導率 $\lambda_{eff}$ および熱抵抗 $R_b$ が求められる。得られた熱応答試験結果を表2に示す。熱交換器周辺の土質は地表から深さ20mまで殆ど関東ローム( $\lambda_{eff}=0.72$  W/(mK)程度<sup>3)</sup>)であるが、その一般的な値よりも大きい値が観測されたことより、地盤の水飽和度等が熱交換効率へ影響を及ぼしているものと考えら

表2 熱応答試験結果

	有効熱伝導率 $\lambda_{eff}$	熱抵抗 $R_b$
PC杭	1.15 W/(mK)	0.09 K/(W/m)
鋼管杭	1.27 W/(mK)	0.06 K/(W/m)
U字管	1.48 W/(mK)	0.21 K/(W/m)

れる。また、熱抵抗 $R_b$ についても、熱交換器の種類によって値が大きく異なり、最も普及しているU字管に比較するとPC杭では約半分、鋼管杭では1/3以下の熱抵抗値を示していることから、基礎杭を使用することにより地中での排熱や集熱が比較的高い効率で機能するものと考えられる。

## 2. 空調への実用化実験

熱交換性能試験の後、これらの熱交換器を実際にヒートポンプ(以下HP)に接続し、実際の空調に導入した場合の施工性や実用性、快適性などの確認を行うこととした。対象とした建築物は当社KBS建築物であり、筆者らが通常の業務で研究所として利用している建物の内、広さ30㎡強の執務室3部屋分にあたる約100㎡を対象とした。

### (1) 熱交換器の使用方法

熱交換器は、前述した鋼管製のS1~S3、コンクリート杭製のC1~C3、ポリエチレン製U字管のB1~B3、合計9本のすべてを利用するが、基礎杭を使用する場合には実用上起こりうる問題点を考慮し、各熱交換器の使い方を、次のように改変した。実用化段階での諸元を表3に示す。

#### ①鋼管杭形式

熱交換器として使用するにあたって、前の熱応答試験で行った同軸管形式では、内部を循環させるブライン(不凍液)の必要量が多くなるため、添加するプロピレングリコール(後述)の費用が高くなるという問題点が挙げられた。また、鋼管杭の施工時、鋼管を現場溶接によって

表3 地中熱交換器井の種類

呼称	B1・B2・B3	S1・S2	S3	C1・C2	C3
掘削形状	裸坑+Uチューブ	鋼管杭		PC杭	
外径 (mm)	( $\phi$ 34)	$\phi$ 406.4		$\phi$ 400	
肉厚 (mm)	(t3.5)	t6.4		t65	
内径 (mm)	( $\phi$ 27)	$\phi$ 393.6		$\phi$ 270	
深さ (m)	20.0	20.0		20.0	
種別	(GUP-25A20)	STK400		PHC-A種	
充填材料	—	水	—	水	山砂
熱交換方式	ダブル Uチューブ	クアッド Uチューブ	鋼管井戸	ダブル Uチューブ	ダブル Uチューブ
模式図					

※カッコ内はU字管の諸元

接合することから、溶接品質や経年腐食の問題から不凍液が地中や地下水中に漏出することも懸念されたため、同軸管形式はS3の1本のみとし、S1およびS2については鋼管杭の中に充填した水（水道水）の中に、ポリエチレン管を4往復（クアッドUチューブ）設置し、この中にラインを循環させて熱交換する形式を採用した。

②PC杭形式

既成のPC杭は両端の定着金具をPC鋼棒で繋ぎ、筒状のコンクリート部分にプレストレスを導入している。前述の熱応答試験の際には、この定着金具とコンクリートの境界面を通じて少量の水が漏出することが確認された。また他の事例のヒアリング調査によれば、循環水にコンクリートのカルシウム成分が溶出し、循環ポンプ等の機械類の中で結晶するケースが発生する可能性があることが判った。コンクリート自体にも微細なひび割れは許容されていることもあり、水密性が保証できる構造ではないこと等からPC杭を熱交換器として使用する場合についても杭体内部に充填した砂や水の中にポリエチレン製のU字管を配置することとした。

(2) 空調設計

空調の対象が建屋内の約100㎡のエリアであったことから、地中熱HPは10kWの製品（サンポット社製）を選択した。9本の地中熱交換器の合計深さは180m（=20m×9本）であり熱交換性能が比較的高い鋼管杭も含まれるため、10kWを越えるHPを接続しても熱供給が可能であると考えられる。しかしながら当システムにおいては今後の実験の中で、いくつかの熱交換器に絞った運転試験を想定していることと、空調対象エリアに対して過大なヒートポンプを設置することは、かえって過剰な電力を消費することが懸念されることから、HPの容量を必要最小限の容量に設定した。写真2は地中熱HPと従来の大気熱源HP

の外観であるが、容量の小さな5kWの大気熱源HPと比較しても地中熱HPはコンパクトな上、ファンを持たないため運転音も静かなものとなっている。図7には、HPを介して地中熱交換器（一次側）と室内空調（二次側）を接続する全体システム図を示す。

本システムでは、一次側・二次側とも水を主体とする熱交換媒体を循環させるため、配管には循環水の高低差と循環送水ポンプによって発生する圧力が作用するのみであることから、比較的簡易なジョイント類で構成することができた。

当該設備を設置する関東地方を含め本州以北のほとんどの地域では、冬期夜間の放射冷却や暖房時のヒートポンプの運転により一次側媒体は、氷点下に冷却される可能性が高いため、安定した空調運転を確保するためには、媒体に不凍液を使用して凍結を防止する必要がある。不



写真2 地中熱HPと従来型の大気熱源HP

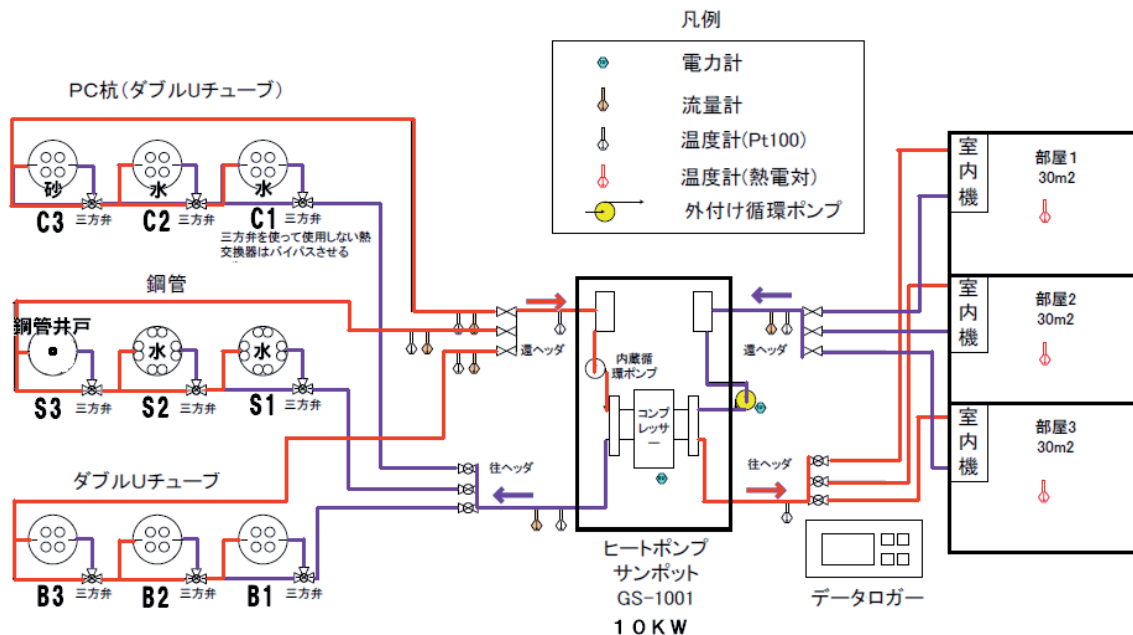


図7 空調システム図



写真3 ファンコイルユニット（室内機）

凍液は、塩類系 (CaCl<sub>2</sub> 等) やアルコール系 (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 等)、有機酸塩系 (CH<sub>3</sub>COOK 等) 等の物質を水に溶解させた時の凝固点降下を利用して凍結を防止するものであり、本システムの場合は、アルコール系に分類されるプロピレングリコール (CH<sub>3</sub>-CHOH-CH<sub>2</sub>OH : 以下 PG) を不凍液材料として添加することとした。PG は粘性を有するため、熱交換の性能を若干低下させる作用があるものの、食品添加物として認可されている成分であり、金属腐食性や生物への毒性が無く、万一環境へ漏出した場合でも分解される性質を持つことから、安全性が最も高いと判断された。本システムでは、熱交換媒体に 20%程度 PG を混合し、凍結温度が -7℃程度となる不凍液とした。

一方、室内側は広さ 30 m<sup>2</sup>強の執務室が 3 部屋であることから、冷房 3.7kW / 暖房 6.8kW のファンコイルユニット (ダイキン社製) を 3 台設置することとした。写真3 はファンコイルユニット (室内機) の設置状況であるが、熱源による構造の違いは、外観からは殆ど判らない。

### (3) 空調性能の比較

暖房時の運転効率を比較するため、システム図 (図7) に示す二次側 (室内側) の循環媒体の流量と温度の計測結果に基づく比較を行った。2010年3月~4月の暖房運転時期を利用して、約1週間毎に使用する一次側の熱交換器を切り替えながら計測を行った。各熱交換器での運転時のHPの消費電力に対する暖房熱量の比を、U字管との比較で整理し表4に示す。

熱交換器は循環形式毎にグルーピングしており、グループ毎に総延長が異なる上、室内では通常通りの執務を行っており日によって人数や外気温・風・日射などの条件も異なるため、単純な比較はできないものの、熱交換延長が最も長いU字管を1.00とした比較において、鋼管杭は延長が短いにも関わらず1.11~1.26の値を示しており、熱交換能力が最も高いと考えられる。

PC杭を利用したものでは、水を充填した場合には短い延長でもU字管を越える数値1.06を示しており、水の対流による効果<sup>4)</sup>が作用したものと考えられる。これと反対に、PC杭に砂を充填したケースではU字管を下回る数値0.83を示している。砂を充填したPC杭とU字管の違いは、地中での熱伝達過程におけるコンクリート層の有無のみで

表4 暖房運転での運転効率 (U字管比)

項目	U字管	鋼管杭		PC杭	
タイプ	B1+B2 +B3	S1+S2 水充填	S3 同軸管	C1+C2 水充填	C3 砂充填
熱交換器 本数(延長)	3本 (60m)	2本 (40m)	1本 (20m)	2本 (40m)	1本 (20m)
運転日数	5日	4日	5日	10日	6日
平均気温	8.9℃	6.0℃	7.4℃	9.4℃	11.8℃
運転効率	1.00	1.26	1.11	1.06	0.83

計測時期・・・2010年3~4月(暖房運転)  
 平均気温・・・宇都宮地方気象台発表の日平均気温  
 運転効率・・・平日の9:00~18:00における採熱効率のU字管比

あるが、今回の実験ではC3の1本のみを負荷をかけたことにより効率が低下した可能性も大きい。

今後、パラメータを整理して十分な計測日数を確保することで比較の精度を高め、空調温度や運転時間などを含めたチューニングを行ってゆくことにより、さらなる効率の向上を図りたいと考えている。

### おわりに

一般的な暖房の室外機は、ヒートポンプにより戸外の熱を室内に移動させているが、外気温が氷点下になると着霜を防ぐためにヒーターが作動し、ヒーターを熱源として暖房しているのと同様の状況に陥る。このため、地中熱のように冬期も 10℃以上で安定している地中熱を利用する意義は極めて高い。また、冷房の熱源は空気熱源が圧倒的に多く、都市部のヒートアイランド現象の一因であると言われていたが、ひとたび現象が発生すると冷房に要するエネルギーが増大し、大気中への排熱量が助長されるという悪循環に陥り、都市環境の悪化が引き起こされる。このように地中熱は安定した熱源であり、排熱の收容先を大気中以外へと分散させる手段としても極めて有効な手段であることから、地中熱利用の新しい形の開発とともに、ユーザーへの提案を継続的に行ってゆきたいと考えている。

本稿は文献 2)に引き続き第二報として発表するものである。

### 参考文献

- 1) 畠中, 越後, 石下, 佐藤, 清水, 高杉, 舘野: 地中熱の利用に向けた地盤の熱伝導特性試験, 土木学会第65回年次学術講演会, H22.9
- 2) 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
- 3) 北海道大学地中熱利用システム工学講座: 地中熱ヒートポンプシステム, オーム社, H19.9.25
- 4) 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No24, 2009.8 pp35-41