

K0610-25
0385-9851/07/¥500/論文/JCLS

〔省エネルギー〕

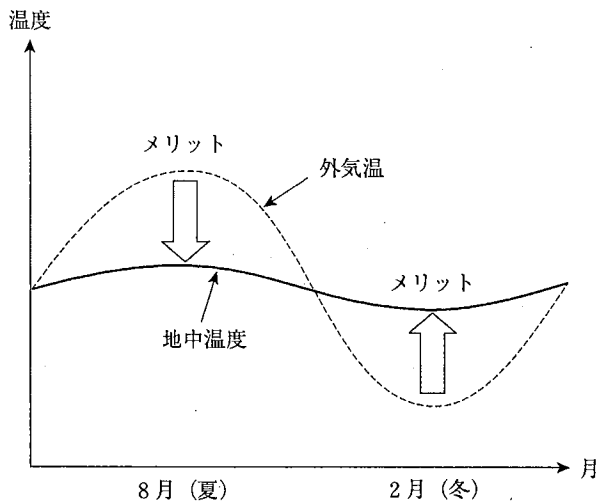
地中熱空調システム

大成建設(株) 関根賢太郎/東京大学 大岡 龍三
Kentaro Sekine Ryozo Ooka

ゼネラルヒートポンプ工業(株) 柴 芳郎
Yoshiro Shiba

1. はじめに

第1図に地中温度と外気温の関係を模式的に示す。地中の温度は、地表面および地表面から10mより浅い部分は、外気温や日射・積雪などの影響を受け、年間で大きく変動する⁽¹⁾。しかし、10mより深い部分に関しては、その地域の年間平均気温とほぼ同じであり、1年を通じて安定した温度を得ることが可能である。



第1図 地中温度と外気温の関係

土壌を熱源とする地中熱源ヒートポンプを利用した空調システム(地中熱空調システム)は、この土壌の恒温性と莫大な蓄熱能力を活かし、夏季冷房時に土壌をヒートポンプの放熱源(ヒートシンク)、冬期暖房時は採熱源(ヒートソース)として利用することで、熱源機の高効率運転や季節間を通じた排熱の有効利用による省エネルギー・二酸化炭素排出削減に貢献する空調システムである。また、建物からの空調排熱を大気に放熱しないため、都市部における熱汚染(ヒート

アイランド)防止にも寄与するものと期待できる。

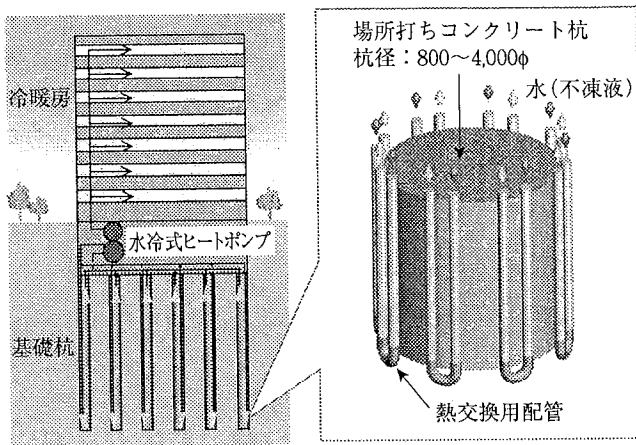
本システムは、寒冷地である欧米では広く導入され、その研究例および適用物件は数多くある。我が国でも古くから研究され⁽²⁾、適用物件もわずかではあるが増えてきている。しかし、地中熱交換器を埋設するための地盤掘削費が、欧米が3,000~5,000円/mであるのに対し、日本では、複雑な地盤性状による掘削時間の増加や少ない物件数で掘削機械導入コストの回収を行う必要があるなどの理由により10,000~20,000円/mと非常に高価である⁽³⁾。このことが地中熱空調システム導入のためのイニシャルコストの増大を招き、単純投資回収年数の面で従来の空調システムと比較すると不利となり、我が国の適用物件増加の障害となっている。事実、ボアホール方式用いた8,000m²規模の事務所ビルにおける研究⁽⁴⁾では、回収年数を36~58年と試算している。

そこで地盤掘削費の削減のため、建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムが提案され⁽⁵⁾⁽⁶⁾、モデル建物が各地で試験的に実用化されつつある⁽⁷⁾⁽⁸⁾が、そのほとんどが既製杭(コンクリート杭や鋼管杭)を利用した方式である。しかし近年、都市部の建築物は、既製杭搬入時の交通事情や杭のコスト削減の観点から場所打ちコンクリート杭の採用が多くなっている。

そこで、地中熱空調システムの都市部での拡張・普及のため、都市部で利用が多い場所打ちコンクリート杭を地中熱交換器として利用する地中熱空調システムの開発を行った。

2. システム概要

第2図に場所打ちコンクリート杭を利用した地中熱交換器の概要を示す。直径800~4,000mmの場所打ち杭の外周部に先端がU字型となっている樹脂製の熱

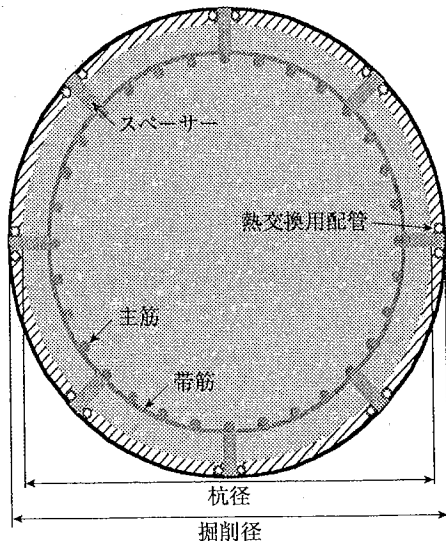


第2図 システム概要

交換用配管（呼径：20～25A程度）を複数本設置する。各杭からの配管をまとめ、循環ポンプを介して水冷式ヒートポンプ（地中熱源ヒートポンプ）に接続する。この配管内に水（凍結の恐れがある場合は不凍液）を循環させることにより、地中と熱交換を行う。熱交換用配管の本数は、杭径と地中採放熱量との関係から最適な本数を選択する。また配管材質としては、樹脂製の配管を使用するため半永久的に利用可能である。

第3図に熱交換用配管と鉄筋かごの配置図を示す。熱交換用配管は、場所打ちコンクリート杭の構造用鉄筋（鉄筋かご）に直接取り付けず、掘削孔と鉄筋かごの芯がずれないように鉄筋かごに取り付けられている偏芯防止用のスペーサーに取り付ける。

これにより、熱交換用配管が構造設計で決定された杭径内部ではなく杭径外周部に配置されるため、鉄筋



第3図 熱交換用配管と鉄筋かごの配置図

のかぶり厚さ確保と断面欠損による杭径の増加を防止している。また、杭外周部に設置することにより出来る限り熱交換用配管同士の熱干渉を抑え、採放熱量を最大化させることも意図している。

3. 実大実験

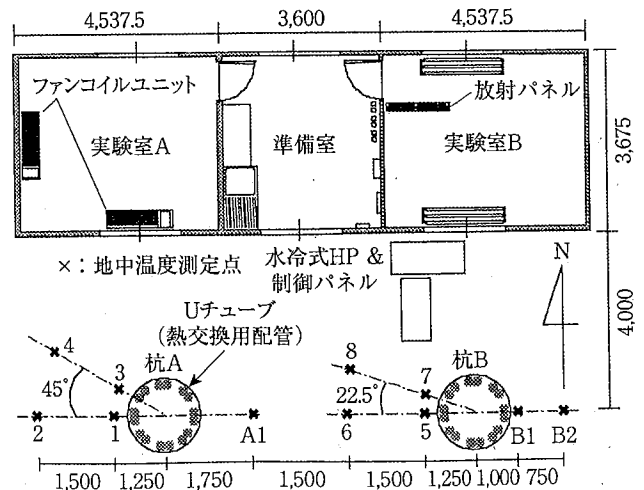
地中熱交換器の熱的特性の把握を目的として、東京大学生産技術研究所の千葉実験所内に構築した実大実験装置を用いて、夏期冷房および冬期暖房実験を行った。第4図、第5図に実験施設平面、システム概要を示す。

実験は夏期、水冷式ヒートポンプの冷房運転を行い地中へ放熱し、冬期は暖房運転を行い地中から採熱を行った。中間期はヒートポンプの運転を行わず、地中温度の回復を試みた。一日の運転スケジュールは、一般の事務所ビルを想定して月曜日から金曜日の9:00～17:00（8h）の運転とし、土・日曜は運転しないものとした。また、水冷式ヒートポンプを実験期間通じて最大能力で運転させるために、室内側で模擬負荷（冷却2.5kW、加熱2.8kW）の運転を行った。

3-1 冷房実験結果

(1) 熱源水温度

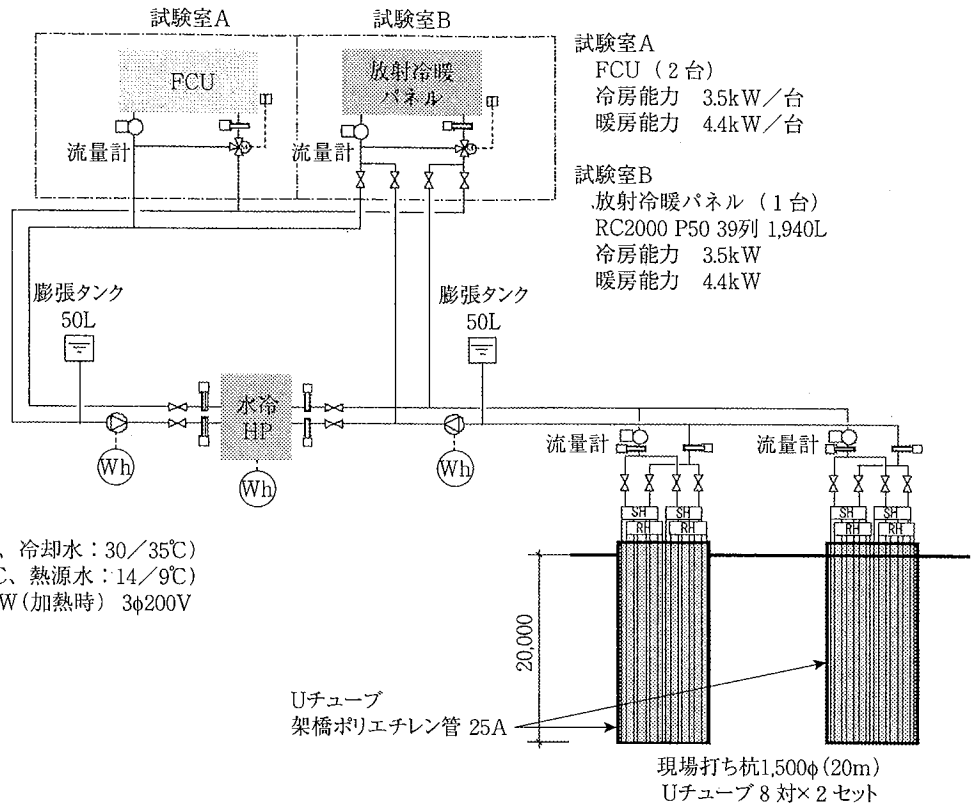
第6図に熱源水温度（土→ヒートポンプ（以降HP））と外気温度の関係を示す。実験を開始した6/16 9:00の熱源水温度（土→HP）は約19℃であった。開始後、熱源水温度（土→HP）は徐々に上昇し、8/13 16:00に29.2℃となり、開始時から約10℃上昇した。8/21に熱源水温度（土→HP）が水冷式ヒートポンプの冷却水温度設定（30℃）を超える可能性があったため、機器保護とCOP低下防止のため、模擬負荷の運転をOFFとして実験を継続した。



第4図 実験施設平面および地中温度測定点

〔測定項目〕

- ① 水冷HP往還温度
- ② 水冷HP流量
- ③ 水冷HP消費電力量
- ④ 地中熱交換パイプ表面温度
- ⑤ 地中熱交換パイプ往還温度
- ⑥ 地中熱交換パイプ流量
- ⑦ 熱源水ポンプ消費電力量
- ⑧ 地中温度
- ⑨ 地下水流量・流向
- ⑩ 土壌含水率
- ⑪ 外気温・湿度
- ⑫ 日射量
- ⑬ 風向・風速
- ⑭ 雨量 など



〔水冷ヒートポンプ〕

冷却能力：4.6kW(冷水：12/7℃、冷却水：30/35℃)
加熱能力：5.7kW(温水：40/45℃、熱源水：14/9℃)
消費電力：1.6kW(冷却時)、1.8kW(加熱時) 3φ200V
冷媒：R407C

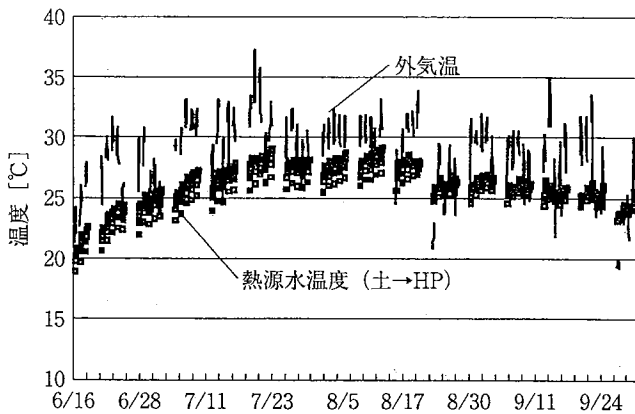
〔冷温水ポンプ〕

φ25×33L/min×12m×0.25kW

〔熱源水ポンプ〕

φ32×33L/min×25m×0.75kW

第5図 システム概要

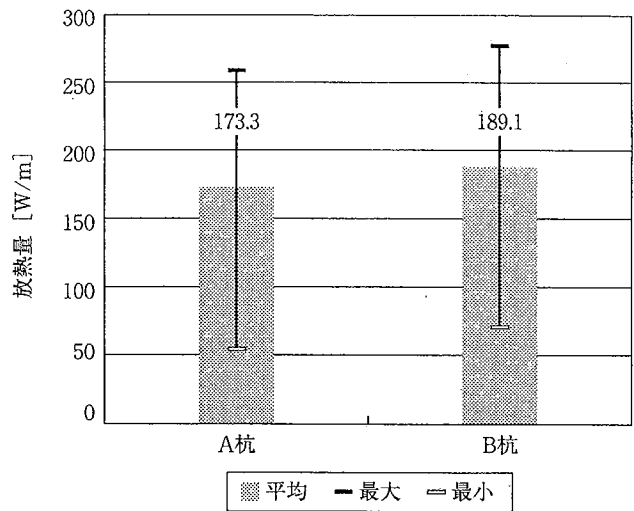


第6図 外気温度と熱源水温度

水冷式ヒートポンプ運転中の外気温度の平均は28.8℃、最高は37.2℃であった。一方、熱源水温度(土→HP)の平均は26.0℃、最高は29.2℃であり、平均で約2.2℃、最高で8.0℃外気より低い結果となった。

(2) 地中放熱量

第7図にそれぞれの杭から地中への放熱量を示す。実験期間中の放熱量の最大値は、277W/m・杭(杭B)であり、Uチューブ1対当りにすると34.6W/m・対であった。冷房期間での平均放熱量は、173W/m・杭(杭A)、189W/m・杭(杭B)であった。

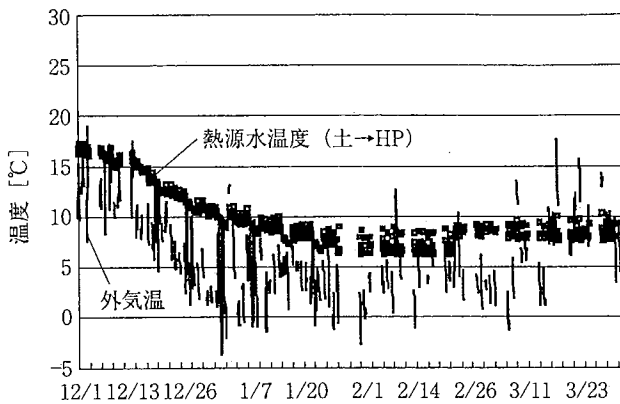


第7図 地中放熱量

3-2 暖房実験結果

(1) 熱源水温度

第8図に暖房実験中の熱源水温度(土→HP)と外気温度の関係を示す。暖房を開始した12/1 9:00の熱源水温度(土→HP)は、約17℃であり、実験後徐々に下がりはじめ、杭1本の運転に切り替えた1/27には約6℃にまで下がり、開始から約11℃の温度降下となった。水冷ヒートポンプ運転中の外気温度平均は、

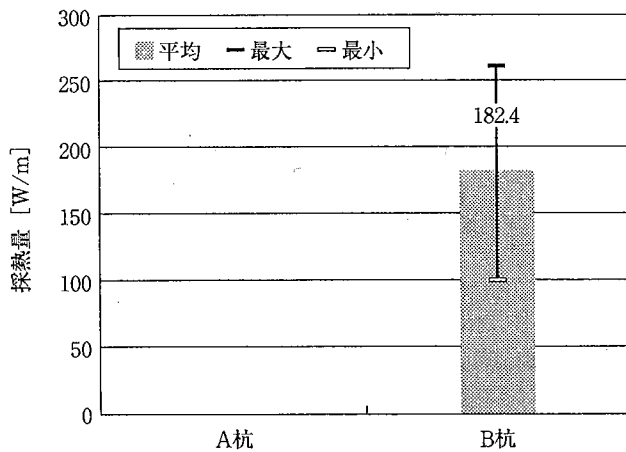


第8図 外気温度と熱源水温度

6.0℃、最低は-3.9℃であった。熱源水温度は、平均10.1℃、最低6.2℃と平均で約4℃、最低で10℃外気よりも高い結果となった。

(2) 地中採熱量

第9図に地中から杭への採熱量を示す。12/1より運転を開始したが空調負荷が少なく、水冷式ヒートポンプが容量制御運転となり杭採熱量が少ない結果となった。そこで、12/16より運転時刻を夜間に変更、1/27からは杭Aからの採熱をやめ、杭1本のみの運転とした。さらに、2/23より杭1本当りの流量を減らし実験を継続した。実験期間中の最大放熱量は、261(杭B) W/mであり、Uチューブ1対当りでは32.6 W/mであった。



第9図 地中採熱量

期間平均採熱量は、杭1本(流量:杭2本分の流量)運転期間(1/27~2/22)は、212W/mであった。さらに杭1本(流量:杭2本運転時の1本分の流量)に変更した期間(2/23~4/1)は182W/mとなった。

冷房・暖房実験の結果、今回提案した地中熱交換杭(直径1,500mm、Uチューブ8対)の実験サイトにおける最大採放熱量は260~280W/m(Uチューブ1対当たり32~35W/m)、期間平均で約180~200W/mの能力があることを確認した。

4. 省エネルギー効果

本システムを中規模事務所ビルに採用した場合の省エネルギー効果の試算を行った。検討対象は、東京にある事務所ビル(延床面積:6,600m²、空調面積:4,840m²、地上8階、地下なし)とし、杭方式および本数は場所打ち杭(直径:1.5m、杭長20m、30本)と仮定した。比較を行った空調システムは、熱源機器を台数分割して設置した中央熱源方式とし、全部を空冷ヒートポンプで行ったシステム(以降空冷HPシステム)と空冷ヒートポンプを台数分割した1台を地中熱利用の水冷式ヒートポンプに置き換えたシステム(以降地中熱空調システム)とした。なお計算比較は、空冷HPシステムの一部分が地中熱空調システムに置き換わった部分のみに限定した。

第1表に空冷HPシステムと地中熱空調システムの年間での消費電力量を示す。地中熱空調システムは、熱源水ポンプの消費電力量が付加されるが、COPが高くヒートポンプ消費電力量が減るため、消費電力量削減率は20%となった⁽⁹⁾。

第1表 省エネルギー効果

	空冷HPシステム	地中熱空調システム
HP消費電力量 [kWh]	215,297	167,454
ポンプ消費電力量 [kWh]	-	3,327
消費電力量合計 [kWh]	215,297 (100%)	170,781 (80%)
差 [kWh]	-	44,516 (20%)

5. イニシャルコスト

本システムのイニシャルコスト把握のために、実物件で施工を行った際のコスト把握を行った。

システムの適用を行った物件は、千葉県に計画された某大学施設である。1階エントランス部分(約100m²)の空調(冷却:2.5kW、加熱:2.8kW)に用いるために、場所打ち杭(直径:1.5m、杭長:18m、1本)に熱交換用配管(PE100 Uチューブ20A)を外周に8対設置した熱交換杭の施工を行った。写真1に施工状況を示す。

地中熱交換杭施工時に時間・人工などの確認を行い、併せて行った同形状の通常杭との比較を行い、熱

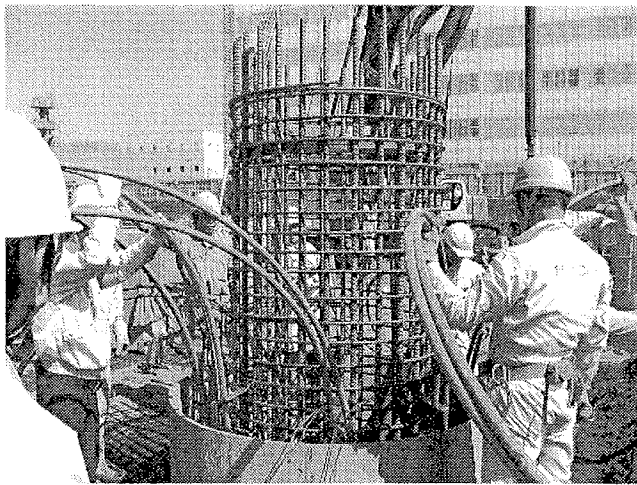


写真1 施工状況

交換杭の工事費を算出した。

一般的に用いられるボアホール方式と提案した場所打ち杭を併用したシステムの建設費の比較を第2表に示す。一般的なボアホール方式は、シングルUチューブとし、Uチューブ1対当りの採放熱量は、40円/mあるとした。また、掘削費は10,000円/mとした。提案したシステムの採放熱量は実大実験の値を用いた。

第2表 熱交換方式によるイニシャルコスト比較

熱交換方式	ボアホール (シングルUチューブ)	本システム (Uチューブ8対)
採放熱量 [W/m]	40	185
掘削コスト [円/m]	10,000 (配管設置込み)	-
配管費 [円/m]	2,000	4,995
配管施工費 [円/m]	-	1,955
杭工事費(増分) [円/m]	-	7,614
コスト計 [円/m]	12,000	14,564
採放熱量当り [円/W]	300	78

単位採放熱当りの提案システムの建設費は78円/mとなり、ボアホール方式の300円/mと比較すると約1/4となることを確認した。

今後は、環境配慮型建築などに本システムを積極的に導入していく予定である。

〔謝辞〕

本研究の一部は、平成15・16年度(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構『エネルギー使用合理化技術戦略的開発 エネルギー使用合理化技術実用化開発大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(研究代表者東京大学大岡龍三助教授)』によった。

<参考文献>

- (1) 渡辺 要：暖冷房設計用地中温度，空気調和・衛生工学会，第38巻，第2号，1964年2月号，pp.23-32
- (2) 長野克則・落藤 澄ほか：土壤熱源ヒートポンプシステムに関する研究(第1～4報)，空気調和・衛生工学会論文集，No.54(1994-2)，pp.55-66、No.56(1994-10)，pp.25-34、No.58(1995-6)，pp.1-11、No.60(1996-2)，pp.39-49
- (3) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：地球熱利用システム地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と課題(2004)，pp.7
- (4) 相賀 洋・石野久彌・三小田憲司・富家貞男：ボアホール地中熱交換器を用いた地中地盤蓄熱システムの性能評価に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.555(2002-5)，pp.77-84
- (5) 森野仁夫・岡 建雄：鋼管杭による土壤放熱・採熱に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.404(1989-10)，pp.49-57
- (6) 竹内正紀・宮本重信・木村照夫・坪田論治：基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション，空気調和・衛生工学会論文集，No.52(1993-6)，pp.59-69
- (7) 濱田靖弘・窪田英樹・中村真人・横山良太郎・落藤 澄・長倉香織・斎藤 央・圓山彬雄・照井康穂：空調用エネルギーパイルシステムに関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001)，pp.353-356
- (8) 加賀久宣・宮本重信・西畑正一・多田幹男・小林一郎・竹内正紀・大岡龍三：基礎杭利用地中熱空調システムの研究開発(その1)実大実験システムによる性能検証，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001)，pp.345-348
- (9) 関根賢太郎・大岡龍三・横井睦己・柴 芳郎・黄 錫鎬・南有鏡：場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(第1報)実験による熱特性の把握とフィージブルスタディ，空気調和・衛生工学会論文集，No.107(2006年2月)

【筆者紹介】

関根賢太郎

大成建設(株) 技術センター 建築技術研究所
環境研究室 省エネルギーチーム 主任研究員
〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1
TEL：045-814-7239 FAX：045-814-7256
E-Mail：kentaro.sekine@sakura.taisei.co.jp

大岡龍三

東京大学 生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター 助教授
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
TEL：03-5452-6435 FAX：03-5452-6432
E-Mail：ooka@iis.u-tokyo.ac.jp

柴 芳郎

ゼネラルヒートポンプ工業(株) 開発部 次長
〒459-8001 名古屋市緑区大高町已新田121
TEL：052-624-6368 FAX：052-624-6095
E-Mail：yoshiro.shiba@zeneral.co.jp