掘削杭熱交換システム (BHES) による 駐車場融雪と路面温度制御

Snow Melting and Control of Surface Temperature at Car Park Using Borehole Heat Exchanger System (BHES)

渡 邊 洋^{*1}・大 木 政 弘^{*2}
Hiroshi Watanabe Masahiro Ohki
福 原 輝 幸^{*3}・森 山 和 馬^{*4}
Teruyuki Fukuhara Kazuma Moriyama

SYNOPSIS

A field test of Borehole Heat Exchanger System (BHES) has been carried out at a car park on Fukui University campus. The purpose of the present study is to reveal the structure, working principle and performance of the BHES. The BHES basically consists of a borehole and an asphalt surfaced pavement covering a concrete panel in which a heat exchanger loop has been incorporated. The borehole is 70m in length and comprises an inner and an outer pipe. A heat carrier liquid circulates between the pavement and the borehole. The performance of the BHES is experimentally evaluated from the pavement and liquid temperatures along the BHES for a few years.

It is shown that the BHES can prevent the pavement temperature from rising more than 20°C in summer and has the thermal energy to melt a continuous snow fall of 2~3cm/hour under typical weather conditions in Fukui.

Keywords: snow melting, terrestrial heat, untapped energy, pavement cooling

1. はじめに

エネルギーの有効活用は、いつの時代においても社会問題として挙げられるが、近年の着眼点は地球規模で議論される環境問題およびエネルギー問題の解決にある¹⁾。今後は持続可能な社会を実現する流れも、より一層加速され、これにより雪氷対策技術も大きく変化すると予想される。例えば、消融雪用の熱源に注目すれば、エネルギー消費における質の向上とその消費量の抑制を兼ね合わせた熱源が、自

ずと安価な熱源として選択されることになる。

よって、これらに配慮すれば、太陽や地盤の有する熱エネルギー、いわゆる未利用の自然熱エネルギーの活用とその研究開発²⁾は、時宜と原理に適う。そこで、筆者等は、その中でも季節的に安定し、地域偏在性の小さな地中熱（発電などに用いる深層の高温地熱³⁾に対して、ここでは地下約300mまでを対象とした浅層の低温地熱）に注目し、路面温度制御を有する2種類の地中熱エネルギー利用融雪シス

本研究の一部は、1997年雪工学会全国大会にて発表された。

* 1 福井大学大学院博士後期課程システム設計工学専攻

* 2 村中建設株式会社

* 3 福井大学工学部環境設計工学科 教授

* 4 ミサワ環境技術株式会社

[本稿受理: 1998年7月3日, 修正原稿受理: 1998年9月29日, 討論期限: 1999年12月31日]

テム（地下貯水槽蓄熱システムと掘削杭熱交換システム）を提案している^{4,5)}。

本論文では、福井大学内駐車場で稼働する掘削杭熱交換システム（Borehole Heat Exchanger System, 以下 BHES と呼称）の融雪と路面温度制御に関する実験結果について述べる。

2. BHES による地中熱エネルギー利用のコンセプトと機能

BHES による地中熱エネルギー利用のコンセプトは、従来の融雪システム、すなわち地中熱エネルギーを融雪のみの熱源と捉える冬期間利用型ではなく、年間の路面温度制御に着目した通年利用型にある。その理由は2つある。1つは、地中熱エネルギーが相対的に夏期の気温よりも低く、冬期の気温よりも高いため、夏期は地中熱エネルギーを冷熱源として路面の冷却（アスファルトの流動化防止や路面の熱輻射の抑制）に、冬期には温熱源として路面の昇温（融雪や凍結防止）に利用できることにある。もう1つは、長期に渡る地中熱エネルギーの一方向的な抽出は地盤の温度低下を促すことから、システムの熱的な破綻を未然に防ぐことにある。すなわち、長期的な地中熱エネルギー利用と環境保全は、年間を通した熱エネルギーバランスの上に成立すると考える。

3. BHES の概要

3.1 BHES の季節的な熱の流れ

BHES は循環パイプが埋設された無散水融雪舗装体（一種の太陽熱エネルギー集熱器）と熱交換杭から構成され、両者における季節的な熱の流れを Figure 1 に示す。熱交換杭は内管と外管から成るポリエチレン製の二重同軸管である。その杭長はおおよそ 70m から 200m の範囲にあり⁵⁾、抽出したい熱エネルギー量や地盤構成条件などから、その長さが決定される。

無散水融雪舗装体と熱交換杭は水理的に閉回路で連結され、ラインポンプ（消費電力量：0.3kWh）により循環水（ポリプロピレングリコール20%溶液：

比重 1025kg/m³、比熱 4.1kJ/kgK、熱伝導率 0.5W/mK）が循環する。無散水融雪舗装体内の循環パイプより戻ってきた循環水は、熱交換杭内管を杭先に向かって下降した後、外管を上昇し、再び循環パイプ内を循環する。

冬期の場合、地盤温度は相対的に舗装体温度より高い。無散水融雪舗装体における融雪に伴い、循環パイプ内を循環する間に冷えた循環水は、熱交換杭に向かう。熱交換杭内では、相対的に温度の高い周囲地盤から循環水に向かって熱移動（これを熱エネルギー抽出と定義）が生じる。温められた循環水は、その熱エネルギーを無散水融雪舗装体内の循環パイプから舗装体へ放出し、路面の温度低下を抑制する。この過程で冷えた循環水は、再び熱交換杭内で地盤から熱エネルギーの供給を受け、温められる。

一方、夏期の場合、地盤温度は相対的に舗装体温度より低い。熱交換杭から舗装体へ向かう循環水は、循環パイプ内を循環する間に舗装体に蓄積された熱エネルギーを吸収する。温められた循環水は、熱交換杭に輸送され、相対的に温度の高い循環水から周囲地盤に向かって熱移動（これを熱エネルギー注入と定義）が生じる。これにより、地盤内に熱エネルギーが貯蔵される。この過程で冷えた循環水は、舗装体に向かい、再び舗装体内部の熱エネルギーを吸収し、舗装体の昇温を緩和する。

Figure 1 BHES における季節的な熱移動の概念図

3.2 福井大学内駐車場融雪システムの概要

福井大学内駐車場に設置された熱交換杭は、内管（ $\phi 56\text{mm}$ 、肉厚 3mm ）、外管（ $\phi 90\text{mm}$ 、肉厚 4mm ）、長さ 70m であり、地下約 $35\sim 55\text{m}$ 付近と、約 $80\sim 90\text{m}$ 付近にそれぞれ被圧帯水層がある。ポリエチレン製の熱交換杭は柔軟性に富み、施工および現場での加工が容易である。無散水融雪舗装体のコンクリート平板（ $2.5\text{m}\times 2\text{m}\times$ 厚さ 0.16m ）内部には、循環パイプ（ $\phi 15\text{mm}$ 鋼管）が多重平行流型に埋設される。なお、コンクリート平板上には厚さ 0.03m のアスファルト舗装が施され、総舗装面積は 60m^2 （ $5\text{m}\times 12\text{m}$ ）である。また、融雪性能比較のため、循環パイプを埋設しない通常舗装体も作成した。さらに、本システムでは、約 100 測点に及ぶ温度センサーにより、熱交換杭および無散水融雪舗装体の熱的な挙動が検出される。

4. 実験結果

4.1 熱エネルギー抽出試験

熱交換杭1本、 1m 当りでどれだけの熱エネルギーを地盤から抽出できるかを調べるための試験（熱エネルギー抽出試験）の概要をFigure 2に示す。本試験は1995年11月21日14時から、福井大学構内の駐車場で12時間に渡り行われた。試験方法は熱交換杭内管に一定温度に保たれた冷水（氷水：約 1.5t の氷塊を使用）を送水し、一定循環流量の下で熱交換杭出入口水温、熱交換杭内水温および周辺地盤温度（図中の●が、温度センサーであり、全 23 測点）が、それぞれ計測される。また、実験開始時には循環流量を 60l/min に設定し、それ以後は出口水温の時間的安定を確認の後、約 $1.5\sim 2$ 時間毎に $40, 25, 15, 10, 5\text{l/min}$ とそれぞれ変化させる非定常実験である。

Figure 3に地盤からの熱エネルギー抽出量 E_b （熱交換杭 1m 当たり）と循環流量 Q との関係を示す。また、同図では福井大学構内（沖積層、杭長 70m ）および兵庫県豊岡市（岩盤地質、杭長 100m ）の両者で得られた結果が比較される。なお、同図には福井大学の実験結果について、実験開始を初期時間とした以後の経過時間もそれぞれ併示した。 E_b は循環流量、循環水の体積熱容量、熱交換杭入口水

温および出口水温から算出され、同図に示すように、 Q の増加と共に E_b は非線形的に増大する。しかし、その増加の割合は Q の増加に伴い減少する。 Q が 25l/min の E_b を基準とすれば、 Q が 40l/min で E_b は 10% 、 60l/min で 30% 、それぞれ増大する。また、福井大学および豊岡市の実験結果を比較すると、両者に大きな違いはない。しかしながら、BHES設置場所の地質、帯水層の有無、地盤温度などの地域特性に起因して、長期的には熱交換杭の

Figure 2 熱エネルギー抽出試験の概要図

Figure 3 熱エネルギー抽出量と循環流量の関係

熱エネルギー抽出能力に違いが現れると予想されるため、熱エネルギー抽出試験から得る情報は重要となる。

Figure 4は循環流量毎 ($Q=5, 10, 15, 25, 40, 60$ ℓ/min) に熱交換杭軸方向の水温分布を示したもので、福井大学で行った熱エネルギー抽出試験の結果である。ここで図中の0mが内管入口、70mが熱交換杭下先端部、140mが外管出口に、それぞれ対応する (Figure 2を参照)。なお、同図の凡例内には、実験開始を初期時間とした以後の経過時間も

Figure 4 熱交換杭流下方向の水温分布

Figure 5 熱交換掘削杭における熱貫流率の特性

それぞれ併示した。 Q が25~60 ℓ/min の場合、内管内水温の上昇は小さいが、地盤からの熱エネルギー抽出により外管内での水温上昇が卓越する。 Q が5~15 ℓ/min の場合、内管では外管からの熱エネルギー抽出による水温上昇が、外管では管中央部から下部の間において地盤からの熱エネルギー抽出による水温上昇が、それぞれ認められる。一方、外管上部から中央部にかけては外管から内管への熱移動のために水温が低下する。 Q が小さくなるに伴い、熱交換杭の入口から出口に渡る水温差および水温分布の変化は大きくなり、熱交換杭上部では熱のショートサーキットが出現する。

Figure 5に前述の熱エネルギー抽出試験結果より得た内管と外管との間の熱貫流率 H_i および外管と地盤との間のそれ H_o について、それぞれ示す。なお、同図には、実験開始を初期時間とした以後の経過時間もそれぞれ併示した。ここで、両者の熱輸送における物理的特性に配慮すれば、前者では熱交換杭内管と外管における流体の乱れが、後者では外管と地盤との間の熱抵抗が、それぞれ寄与する。よって、 H_i は外管を流れる流体のレイノルズ数 R_o (同図上軸) を、 H_o では外管水温 T_{Lo} と地盤温度 T_G との温度差 ΔT_G (同図下軸) をパラメーターとして表現した。

図中にも示したように両者の関係は、それぞれ次式で与えられる。すなわち、

$$H_i = -302 + 227 R_o^{0.086} \quad (100 \leq R_o \leq 2400) \quad (1)$$

$$H_o = -9.8 + 2.6 \Delta T_G \quad (7 \leq \Delta T_G \leq 14) \quad (2)$$

まず、 H_i に注目する。 R_o の増加、すなわち流量、流速の増加と共に、 H_i は非線形的に増大するが、その増加の割合は、 R_o の増加と共に減少する。一方、 H_o は、本実験の範囲内では ΔT_G の増加と共に、ほぼ線形的に増加する。また、 H_i と H_o を比較すると、 H_i が相対的に大きい。

4.2 融雪状況

1996年2月1日の無散水融雪舗装体における融雪状況をPhoto.1に示す。本システムによる融雪効果は明瞭である。しかしながら、この日より断続的に降り続いた激しい降雪で福井県若狭地方の国道8号線は、完全な交通麻痺に陥ったこと⁶⁾を付記する。

Figure 6 に同日の降雪強度 h および通常舗装体と無散水融雪舗装体における積雪深 S_D の経時変化を示す。この日、6 時には無散水融雪舗装体路面では 1cm, 通常舗装体路面では 19cm の積雪深が、それぞれ計測された。しかし、8 時には前者で融雪の完了が確認された。14 時以降の降雪強度 h は 2~3cm/hour と大きく、通常舗装体路面の積雪深は 18.5cm (14 時) から最大 31.5cm (22 時) にまで増加した。一方、無散水融雪舗装体路面では 18 時以降にようやく積雪が確認され、22 時に最大積雪深 1cm を計測した。しかしながら、車両の通行に伴う雪の攪拌効果を考慮すれば、この状態から路面上の積雪が圧雪に至ることはない。なお、これまでの観測結果から本システムにおいて、4~5cm/hour を超過する降雪強度 h に対し、一時的な融雪能力の不足が観られる。しかしながら、 h が小さくなるに伴い、再び融雪は進行する。

Photo.1 1996年2月1日の融雪状況

Figure 6 降雪強度および通常舗装と無散水舗装における積雪深の経時変化

4.3 冬の路面温度制御

Figure 7 に1996年2月1日における無散水融雪舗装体内に埋設された循環パイプの入口水温 T_i (■), 出口水温 T_o (▲), 無散水融雪舗装体路面より深さ 0.01m の路温 T_p (○), 通常舗装体路面より深さ 0.01m の路温 T_n (▽) および気温 T_a (×) の経時変化を、それぞれ示す。 T_a は14 時付近を除いて氷点下であり、 T_n は積雪のため 0℃ 付近を推移する。一方、 T_p は朝方には約 1℃ であったが、融雪が終了し、日射の影響を受けた14 時には 8.2℃ にまで上昇する。しかし、14 時以降の降雪により T_p は低下し、再び約 1℃ で推移する。また、 T_i は T_o よりも常に高く、循環水が循環パイプを介して熱エネルギーを放出していることが判る。 T_i および T_o は降雪時に共に低下するが、路面の融雪が終了すると再び上昇する。

Figure 8 に無散水融雪舗装体 1 m^2 当たりの循環パイプからの熱エネルギー放出量 E_p の経時変化を示す。なお、2 月1日の熱交換杭における循環流量は 40 l/min , 2 月3日は 10 l/min である。2 月1日の E_p (●) は朝方の融雪時に約 0.14 kW/m^2 と比較的高いレベルにあるが、融雪の終了および日射の影響から14 時には 0.07 kW/m^2 に減少する。しかし、14 時以降の降雪により E_p は再び約 0.15 kW/m^2 に上昇する。このように自然な熱エネルギー収支の均衡は、過剰な熱エネルギー抽出の抑制も可能であるこ

Figure 7 2月1日の温度変化

Figure 8 舗装体からの熱エネルギー抽出量の経時変化

とが示唆される。一方、2月3日は10時頃まで無散水融雪舗装体路面上には降雪による僅かな残雪があったが、それ以降は際立った残雪は確認されなかった。よって、 $E_p(\triangle)$ は10時付近までは 0.07 kW/m^2 であるが、その後は約 0.05 kW/m^2 で一定となる。両日における E_p の差異は、Figure 3 で指摘した流量の減少に伴う、地盤からの熱エネルギー抽出量の低下に起因する。

4.4 夏期の路面温度制御と熱エネルギー抽出効率

Figure 9 に1996年7月17日における無散水融雪舗装体内に埋設された循環パイプの入口水温 T_i (■), 出口水温 T_o (▲), 無散水融雪舗装体路面より深さ 0.01m の路温 T_p (○), 通常舗装体路面より深さ 0.01m の路温 T_n (▽) および気温 T_a (×) の経時変化を、それぞれ示す。夏期における本システムの典型的な温度変化を表している。 T_i および T_o は T_p と相関があり、 T_p が日射の影響を受けて高くなると T_i および T_o も高くなり、 T_p が低くなると両者ともに低くなる。 T_i は T_o よりも常に低いことから、昼夜を通して熱交換杭から地盤へ熱エネルギーが注入されていたことが判る。また、 T_p は T_n より常に低く、14時には約 20°C の差が生じる。 T_n と T_a を比べると、最低気温の現れる6時頃でも $T_n > T_a$ であり、相対的に温度の高い通常舗装体から大気への熱輸送が認められる。しかしながら、 T_a と T_p を比べると0時から6時では $T_a > T_p$ となり、無散水融雪舗装体は、夜間において気温を低下させるように作用することが判る。

Figure 9 7月17日の温度変化

Figure 10 舗装体からの熱エネルギー抽出量と採熱効率の経時変化

Figure 10 は同日における無散水融雪舗装体 1 m^2 当たりの熱エネルギー抽出量 E_p (●) および熱エネルギー吸収効率 E_f (△) の経時変化を表す。ここで、 E_f は E_p をアスファルト舗装体 1 m^2 当たりに入射する短波放射量と長波放射量の和で除した値であり、無散水融雪舗装体に入射する放射量の吸収の程度を表す無次元数である。 E_p および E_f は短波放射量の日変化に密接に関係し、短波放射量が増加すると E_p および E_f は共に増大する。例えば、 E_p は夜間で 0.05 kW/m^2 前後にあり、日中で最大約 0.27 kW/m^2 に達する。一方、 E_f は夜間で約 $0.1 \sim 0.15$ 、日中で約 0.25 となる。

4.5 路面温度制御と年間の熱エネルギー収支

福井大学の BHES は自動制御で運転されており、自動制御方法のための閾値（舗装体温度）が経験的

に設定される。Figure 11 に、BHES の舗装体温度による自動制御運転の概要を示す。ここでは、融雪および凍結防止時にはアスファルト表面下 0.03m の舗装体温度が 8℃より低くなると稼動し、12℃より高くなると停止する。一方、舗装体の冷却時には 25℃より高くなれば稼動し、20℃より低くなれば停止する。そこで、この自動制御の有無に伴う BHES の熱的特性を調べるために、1996年（自動制御有り）と1997年（自動制御無し、常時ポンプ稼動）で比較検討を行った。

Figure 12 および Figure 13 には、1996年および1997年における無散水融雪舗装体温度 T_p （深さ 5mm）と通常舗装体温度 T_n （深さ 5mm）の関係を、それぞれ示す。また、両図には参考のために $T_p = T_n$ となる傾き 1 の実線も併示した。まず、Figure 12 に注目すると、 T_p および T_n は一次の相関関係にあり、その勾配は $T_p/T_n < 1$ であることが判る。また、夏期において T_n が 70℃付近にあるとき、 T_p は 50～55℃程度であり、舗装体は 15～20℃程度冷却される。一方、冬期では T_n が 0～5℃にあるとき、 T_p は 5～10℃程度にあり、5℃程度の昇温効果が観られる。なお、図中に併示した A の領域は、 T_n が 0℃付近を記録していることから、通常舗装体上に積雪があることを意味する。また、B の領域は無散水融雪舗装体上においても比較的大きな融雪負荷が生じていると判断される。

次に、Figure 13 に注目すると、前図と同様に冬の低温域では、A および B の領域が出現するものの、 T_p および T_n は一次の強い相関関係にあり、 $T_p/T_n < 1$ となるような勾配を有する。しかしながら、Figure 13 における勾配 T_p/T_n は、前図のそれよりも大きいように見受けられる。すなわち、自動制御を用いた運用に伴い、夏期における舗装体の冷却効果および冬期における舗装体の昇温効果は、ともに向上する。ただし、冬期においては昼間の一部で制御がかかるだけで、それ以外でシステムは稼動しているために、冷却効果に比較して昇温効果は識別し難い。経験的にこれらを換言すれば、システム稼働時間を節約しても融雪能力が低下しないことを意味する。これより、自動制御運転の採用は、舗装

Figure 11 BHES の舗装体温度による自動制御運転の概要

Figure 12 T_n と T_p の関係（1996年）

Figure 13 T_n と T_p の関係（1997年）

体における熱エネルギーの放出および吸収効率に対して、良好に作用することが示唆される。

両図で示した夏期における舗装体の冷却効果は、地盤への熱エネルギー注入に伴う副次的な効果である。しかしながら、一般的にアスファルト混合物舗装体の安定度および耐流動性は、約50℃を越えると著しく低下する⁷⁾。また、70℃の舗装体が有する安定度を基準とすれば、舗装体における15～20℃程度の温度低下は、約5～9倍の安定度の向上に寄与することも報告されている⁷⁾。よって、先述の舗装体の冷却効果は舗装体の流動化防止、耐久性の向上、ひいては道路舗装のメンテナンス作業の軽減に貢献することが期待される。ただし、舗装体内部の鉛直方向の温度分布は必ずしも一様ではなく、特に昼間においてはその温度勾配も大きいことから、舗装体における安定度の定量的評価は、十分な注意が必要となる⁸⁾。

Figure 14 は熱交換杭と地盤との間を移動する月毎の熱エネルギー量 E および E を稼働時間で除した単位時間当たりの熱エネルギー移動量 E_d について、1996年3月から1997年12月に渡り示したものである。熱エネルギーが熱交換杭から地盤へ移動する場合（熱エネルギー注入）を正、その逆（熱エネルギー抽出）を負と定義する。先述の通り、1996年は

自動制御運転で、一方1997年は常時稼働した際の結果である。まず、 E の季節的な変化に注目すると、夏期は正となり、冬期は負となるような周期性を持つ。また、1996年7月は好天に恵まれ、観測結果より路面温度も常に高い状態にあったことから、 E の値も23.3GJと突出している。さらに、 E の積算値は、1996年の夏期（5月から10月）で58.7GJ、冬期（11月から翌3月）で-25.0GJ、夏期（4月から10月）で51.0GJとなり、ともに夏期の熱エネルギー注入が、冬期の熱エネルギー抽出に比較して大きいことが判る。しかしながら、この差違による経年的な地盤温度の上昇は、これまでの計測データ（約2.5年）からは明瞭に観察されていない。この評価を行うためには、例えば、帯水層における地下水流れの影響や地盤の地質条件による熱的な特性などに充分配慮する必要があると考えられる。また、これに加え、 E の熱的な挙動が、路面温度の状態、気象条件、運転の制御手法（稼働時間）などの違いを反映することから、 E の絶対値による比較評価は、さらに長期に渡る計測データから慎重に行うことが重要である。ちなみに、夏期（8月は両者に欠測期間があるため、5、6、7、9月の稼働時間をそれぞれ積算した）の稼働時間は、1996年で1560時間、1997年で2928時間であり、後者は前者の1.9倍稼働していた。なお、これらを循環ポンプ（0.3kWh）で消費されたエネルギー量に換算すると1996年で1.7GJ、1997年で3.2GJとなり、約4ヶ月間で自動制御により48%の電気エネルギーが節約できたことになる。

次に、 E_d (○) の変化に注目すると、1996年において3月に最小値（-2.26kW）を、7月に最大値（2.50kW）を得る。一方、1997年においては2月に最小値（-0.70kW）を、7月に最大値（1.55kW）を得る。このことから、自動制御により、単位時間当たりの熱エネルギー抽出および注入量は向上することが知れ、本システムにおける熱エネルギー輸送特性は、運用手法の違いによっても影響を受けることが判った。

Figure 14 熱エネルギー抽出・注入の総量および単位時間当たりの抽出・注入量の月変化（1996年～1997年）

5. おわりに

地中熱エネルギー利用融雪システムとして、福井大学の駐車場に稼働する掘削杭熱交換システム(BHES)の熱的特性を実験的に調べた。BHESは暖地積雪地域の道路融雪や凍結防止および夏期のアスファルト流動化防止(路面温度上昇の抑制)に有効であり、本システムの自動制御運転により単位時間当たりの熱エネルギー抽出および注入能力は大幅に向上することが明らかとなった。以下に、本論で得られた知見を列挙する。

1. 熱エネルギー抽出能力は、設置場所における地盤温度や地層の構成条件などの影響を受けるため、熱エネルギー抽出試験によって熱貫流率などを事前に見積ることが重要である。
2. 内管と外管における熱貫流率は、外管のレイノルズ数により、一方、外管と地盤における熱貫流率は、両者の温度差により、それぞれ表現される。
3. 本システムでは、降雪時には約 $0.15\text{kW}/\text{m}^2$ の熱エネルギーを無散水融雪舗装体に供給する。
4. 本システムでは、夏期において舗装体に入射する放射エネルギーの約25%を吸収できる。
5. BHESにおける自動制御運転の採用は、単位時間当たりの熱エネルギー注入および抽出効率の向上に寄与し、それらは夏期の舗装体冷却効果および冬の舗装体昇温効果に、それぞれ作用することが確認された。

最後に、本論文をまとめる上で福井大学工学部のローレル・E・グッドリッチ教授に貴重なコメントを頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、エネルギー教育研究会編：講座・現代エネルギー・環境論，電力新報社，1997。
- 2) 例えば，Bjorn Sellberg：Challenge for Energy Storage in the 21st Century, Proceeding of 9th International Conference on Thermal Energy Storage MEGASTOCK'97, pp.7-12, Hokkaido, 1997。
- 3) 例えば，盛田耕二：坑井内同軸熱交換器方式による地熱エネルギー抽出に関する研究，1994。

- 4) 渡邊 洋・福原輝幸・黒田典之・川崎和来：貯水槽季節蓄熱方式による路面温度制御—第一報—，土木学会第50回年次学術講演会，1995。
- 5) 森山和馬・林 拓男・福原輝幸・渡邊 洋：掘削杭熱交換方式による地中熱利用と路面融雪システム，土木学会第50回年次学術講演会，1995。
- 6) 例えば，雪センター：雪に関わる各地の話題，雪センター発行，1996。
- 7) 小坂寛巳・山崎泰生：高架橋上のアスファルト舗装温度の測定について，舗装，第22号，9巻，pp.22-28，1987。
- 8) 牛尾俊介：アスファルト舗装のわだち掘れ予測手法に関する研究，土木学会論文集，第323号，pp.151-163，1982。

APPENDIX-NOTATION

D	(m)	： 地表からの深さ
E	(GJ)	： 熱交換杭と地盤との間を移動する月毎の熱エネルギー量
E _b	(kW/m)	： 熱交換杭1m当たりの熱エネルギー抽出量
E _a	(kW)	： Eを稼働時間で除した単位時間当たりの熱エネルギー移動量
E _f	(—)	： 熱エネルギー吸収効率
E _p	(kW/m ²)	： 無散水融雪舗装体1m ² 当たりの循環パイプからの熱エネルギー放出量
H _i	(W/m ² K)	： 内管と外管との間の熱貫流率
H _o	(W/m ² K)	： 外管と地盤との間の熱貫流率
h	(cm/hour)	： 降雪強度
L	(m)	： 熱交換杭入口から出口までの流下軸方向の距離
Q	(ℓ/min)	： 熱交換杭内の循環流量
R _∞	(—)	： 外管を流れる流体のレイノルズ数
S _D	(cm)	： 積雪深
T _a	(°C)	： 気温
T _G	(°C)	： 地盤温度
T _i	(°C)	： 循環パイプの入口水温
T _L	(°C)	： 熱交換杭内の流体温度
T _{Lo}	(°C)	： 外管水温
T _n	(°C)	： 通常舗装体路面の路温
T _o	(°C)	： 循環パイプの出口水温
T _p	(°C)	： 無散水融雪舗装体の路温
ΔT _G	(°C)	： 外管水温 T _o と地盤温度 T _G との温度差