

掘削杭熱交換方式による地盤蓄熱と路面温度制御

Control of car park surface temperature and thermal energy storage
using Borehole Heat Exchange System

大木政弘*・渡邊洋**・福原輝幸***・森山和馬****

By Masahiro OHKI, Hiroshi WATANABE, Teruyuki FUKUHARA and Kazuma MORIYAMA

Borehole Heat Exchange System (BHES) is introduced to control car park temperature, i.e. improvement of thermal environment at a car park in the campus of Fukui university. BHES consists of a borehole and pavement, which has an asphalt layer covering 12 concrete panels installed heat exchange piping. The borehole is 70m length and comprises outer and inner pipe. Diameters of the outer and inner pipe are 90mm and 56mm, respectively.

Thermal flow circulates in a closed loop connecting between the pavement and borehole to sustain ground water quality.

The efficiency and performance of BHES are evaluated experimentally and theoretically from viewpoint of seasonal thermal energy storage.

It is shown that BHES can suppress the rise of the pavement temperature of the park in summer and melt the snow on the same car park in winter using only geothermal heat.

Keywords : Borehole Heat Exchange System, seasonal thermal energy storage, geothermal heat

1. はじめに

近年、人口の増加や生活水準の向上に伴い、エネルギーの需要は急激に増大している。多くの場合、エネルギー利用の形態は最終的に熱エネルギーとして消費される。この消費は化石燃料や天然ガスなどの一次エネルギーにより供給が賄われており、温室効果ガスの増加を助長する。特に化石燃料は有限資源ゆえに、その節減と今後の人類の生活や産業活動との間の調和は極めて重要な課題である。

地球環境への配慮が重視されている今日、エネルギーの有効利用と共に、熱エネルギー源として半永久的に得られる太陽エネルギー、風力、地熱などの自然エネルギーや廃熱などの未利用エネルギーの利用が注目されている。しかしながら、未利用エネルギーは時間や季節によってその供給量も変動し易いため、現在のところ必ずしも有効に利用されているとは言い難い。よって、供給変動の大きいエネルギーに対して、それらを一旦貯蔵して需要変動に対応できるような貯蔵技術が必要となる。貯蔵期間は日スケールから季節スケールまでであるが、貯蔵方法は長期的になるほど技術的に難しくなる。

我が国の半分以上の面積を占める雪国での道路融雪対策は機械除雪を中心として、電気・重油などの一次エネルギーや地下水を利用した融雪方法を採用してきた。中でも、地下水や河川水を直接路面に散水して

* 学生会員 福井大学大学院博士前期課程環境設計工学専攻 (〒910 福井市文京3-9-1)

** 学生会員 福井大学大学院博士後期課程システム設計工学専攻 (〒910 福井市文京3-9-1)

*** 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

**** 正会員 ミサワ建設技術株式会社 (〒729-62 広島県三次市向江田町 4252-2)

融雪を行う散水融雪方式の採用が多い。しかし、地下水位の低下、それに伴う地盤沈下、水質汚染など、一次エネルギー利用と同様に地球環境に与える影響は非常に大きなものである¹⁾。

著者らは、環境に優しい自然エネルギーの中でも安定した熱源である地熱の利用方法に注目した。積雪地域である福井であっても、年間を通して地温は地表面下2 m以深で10℃から15℃の範囲にある²⁾。このような地域の気象や地盤（地熱）特性を考慮して、ここに地熱を利用した路面温度制御方法である掘削杭熱交換方式（通称 BHES）^{3), 4)}を提案する。この方式は、長さ100 m 前後の掘削杭を熱交換器として、舗装体を太陽エネルギーの集熱体としてそれぞれ捉える点に特徴がある。

本研究では、掘削杭熱交換方式による実証実験に基づいて、路面温度制御機能に伴う季節的な蓄熱特性と熱エネルギー輸送特性を紹介する。

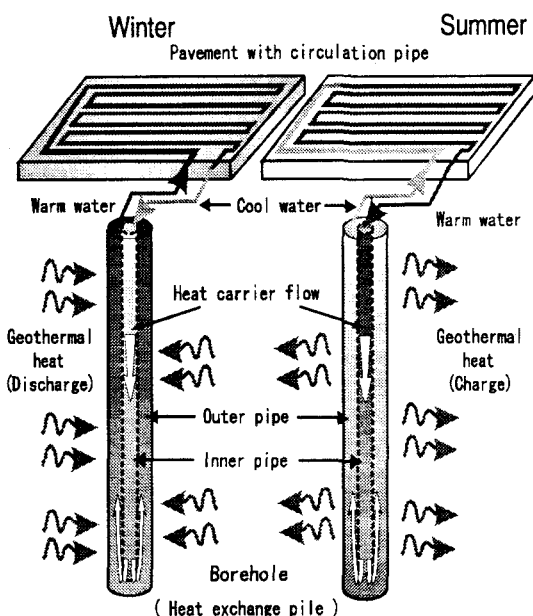


Figure 1 路面温度制御における熱移動の概念図

2 BHES による路面温度制御

本システムは上述したように季節蓄熱とその熱利用を基本とする。この概略を模式的に表したものが Figure 1 である。路面温度制御は夏期の場合、アスファルト舗装体の流動化の防止や太陽エネルギーの地盤への貯蔵に、冬期の場合、道路融雪や凍結防止にそれぞれ貢献する。

2.1 BHES の概要

BHES は Figure 1 に示されるように無散水融雪舗装体と熱交換杭で構成され、構造は以下の通りである。

- (1) 無散水融雪舗装体：コンクリート平板（25 m×2 m×0.16 m）内部に、循環パイプ（φ 15 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 3 cm のアスファルト舗装が施されており、総舗装面積は 60 m²（5 m×12 m）である。
- (2) 熱交換杭：内管（φ 56 mm、肉厚 3 mm）と外管（φ 90 mm、肉厚 4 mm）のポリエチレン製 2 重管であり、長さは 70 m である。

2.2 冬期と夏期の BHES の熱の流れ

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、循環ポンプにより循環水（プロピレングリコール）が循環する。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、地盤温度は舗装体温度より相対的に高い。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低温度の循環水に向かって熱移動（これを採熱と定義）が生じ、温められた循環水は循環パイプよりその熱エネルギーを舗装体へ放出する。温められた舗装体では路面の温度低下が抑制される。この過程で冷えた循環水は再び熱交換杭内で地盤より熱エネルギーの供給を受ける。

夏期の場合、地盤温度は舗装体温度より相対的に低い。熱交換杭から舗装体へ向かう低温度の循環水は、循環パイプ内を循環する間に舗装体に蓄積された太陽熱エネルギーを吸収し、温められた循環水は熱交換杭に輸送される。熱交換杭内では、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（これを放熱と定義）が生じ、地盤内に熱エネルギーが貯蔵される。この放熱により温度低下した循環水は舗装体に向かい、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。

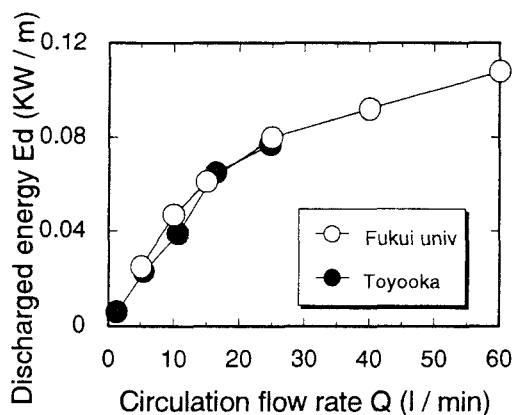


Figure 2 循環水量と採熱量の関係

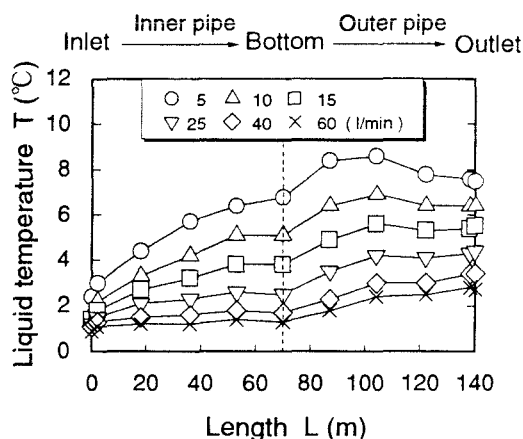
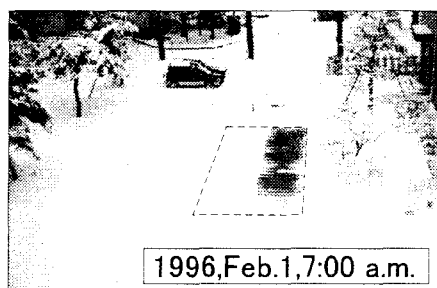


Figure 3 熱交換杭軸方向の水温分布



Time elapse

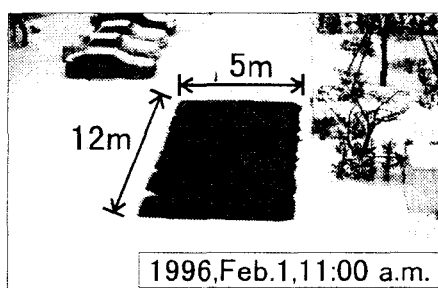


Photo 1 BHES による駐車場の融雪過程

3. 実験結果

3.1 採熱試験

熱交換杭 1 本当た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（採熱試験）の結果を Figure 2 に示す。この方法では BHES の熱交換杭内管に一定温度の冷水（氷水）を送水し、一定循環水量の下で熱交換杭内の水温が計測される。同図には地盤からの採熱量 E_d （熱交換杭 1 m 当たり）と循環水量 Q との関係が示され、福井大学構内（沖積層、杭長 70 m）で得られた結果および兵庫県豊岡市（岩盤地質、杭長 100 m）での結果が比較される。 E_d は循環水量、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る。 E_d は図中に示すように Q の増加とともに大きくなる。しかし、 E_d の増加の割合は循環水量の増加に伴い減少する。 $Q = 25$ l/min の E_d を基準とすれば、 Q が 40 l/min に増加することで E_d は 10%、60 l/min に増加した場合には 30%、それぞれ増大する。これは流量増加に伴う地盤と熱交換杭との間の熱交換係数の変化に起因する。また、福井大学（○）と豊岡市（●）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、地温などの地域特性の違いによって熱交換杭の採熱能力の変化が予想される。このことから、BHES の融雪能力を事前に知るためにも採熱試験は重要な意味を持つ。

Figure 3 は循環水量 Q と熱交換杭軸方向の水温との関係を示したもので、0 m が内管入口、140 m が外管出口にそれぞれ対応する。 Q が 25～60 l/min の場合、内管内での水温上昇は小さいが、地盤からの採熱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採熱による水温上昇が、外管では管中央部から下部の間において地盤からの採熱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わたる水温差および水温分布の変化は大きくなる。

3.2 冬期と夏期の路面温度制御と駐車場融雪試験結果

3.2.1 冬期の路面温度制御と駐車場融雪結果

Photo 1 は 1996 年 2 月 1 日の福井大学構内駐車場における無散水融雪路面の融雪状況を表す。7 時には温度制御路面では 1 cm、非温度制御路面では 19 cm の積雪深が計測された。しかし、8 時には温度制御路面では融雪がほぼ終了した。

Figure 4 は 2 月 1 日の 6 時と 14 時におけるアスファルト舗装体内部温度の鉛直分布を示したものである。温度制御されていないアスファルト舗装体温度 (T_{pn}) は積雪のために、6 時 (Δ) と 14 時 ($\blacktriangle$) では温度分布に違いが観られない。一方、温度制御されているアスファルト舗装体温度 (T_{pc}) では、その下方に設置された循環パイプからの熱エネルギーの供給を受けるために、6 時 ($\circ$) の舗装体底部での温度勾配の絶対値は、(Δ) のそれに比べて大きくなる。しかしながら、14 時 ($\bullet$) には、融雪も終了し日射による熱供給を路面から受けることにより、温度勾配は緩やかになる。なお、路温鉛直分布の経時変化は 6 時以降は 14 時の分布 ($\bullet$) に近づき、14 時以降は 6 時の分布 ($\circ$) に近づく挙動を示す。

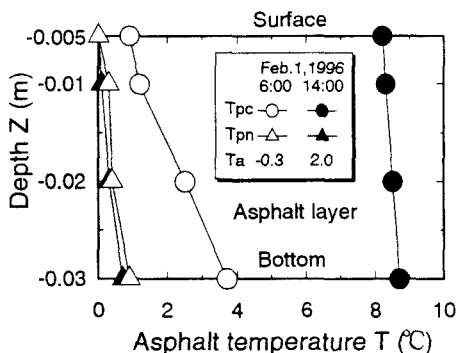


Figure 4 アスファルト舗装体温度の鉛直分布

Figure 5 は、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 ($\blacksquare$)、出口水温 T_o ($\blacktriangle$)、温度制御路面の深さ 1 cm の路温 T_p ($\circ$)、非温度制御路面の深さ 1 cm の路温 T_n (∇)、気温 T_a ($\odot$) および降雪強度 h ($|$) の経時変化を示したものである。 T_a は 14 時付近を除いて氷点下にあり、 T_n は積雪のため 0℃でほぼ一定である。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舗装体に放出していることが判る。 T_i および T_o は共に降雪時には低下するが、降雪が終わり路面の融雪が終了すると上昇する。 h は 14 時以降 2~3 cm/hour と大きく、非温度制御路面の積雪深は 18.5 cm (14 時) から最大 31.5 cm (22 時) にまで増加した。一方、温度制御路面では 18 時以降により積雪が確認され、22 時に最大積雪深 1 cm を計測した。これより路面温度制御による融雪効果の程が窺れる。

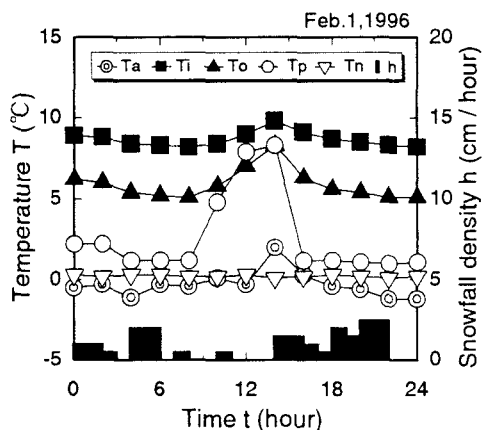


Figure 5 2 月 1 日の温度変化と降雪強度

Figure 6 は無散水融雪舗装体 1 m² 当たりの循環パイプからの放熱量 E_p の経時変化を示したものである。なお、2 月 1 日の熱交換杭での循環水量は 40 l/min、2 月 3 日は 10 l/min である。2 月 1 日において、 E_p ($\circ$) は朝方の融雪時に約 0.14 KW/m² と相対的に高

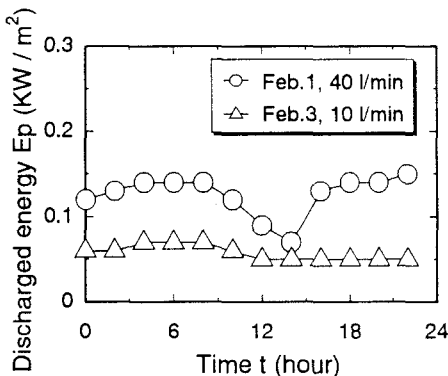


Figure 6 放熱量の経時変化

いレベルにあるが、融雪が終了し日射の影響も受けることにより、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 0.14 KW/m^2 に上昇する。一方、2 月 3 日は 10 時付近まで温度制御路面上に降雪による積雪があったが、それ以降は際立った降雪による積雪は確認されなかった。よって、 E_p (△) は 10 時付近までは 0.07 KW/m^2 であるが、その後はほぼ 0.05 KW/m^2 で一定となる。両日での E_p の差異は、Figure 2 で指摘したように循環水量が小さくなると地盤からの採熱量も低下することに起因する。

3.2.2 夏期の路面温度制御と採熱効率

Figure 7 は 7 月 17 日のアスファルト舗装体内部温度の鉛直分布を示したものである。温度制御されているアスファルト舗装体温度を T_{pc} 、温度制御されていない方を T_{pn} とする。6 時において T_{pc} (○) は T_{pn} (△) よりも低く、 T_{pc} および T_{pn} は共に一様である。だが 14 時になると舗装体が太陽熱エネルギーを吸収することにより、舗装の表面温度が上昇して T_{pc} (●) および T_{pn} (▲) の温度勾配は共に正となり、熱の下方移動が生じる。 T_{pc} と T_{pn} を比較すると、舗装体が吸収した太陽からの輻射エネルギーの一部は BHES により地盤に輸送されるために、 T_{pc} の上昇が緩和され、 T_{pc} は全体的に T_{pn} より $13 \sim 20^\circ\text{C}$ 程度低くなる。

Figure 8 は、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 (▲)、温度制御路面の深さ 1 cm の路温 T_p (○)、非温度制御路面の深さ 1 cm の路温 T_n (▽) および気温 T_a (◎) の経時変化を示したものである。 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低くなる。 T_i は T_o よりも常に低いことから、熱交換杭から地盤への放熱が昼夜を通して行わ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 の差があり、BHES による温度制御の効果が容認される。

Figure 9 は無散水融雪舗装体 1 m^2 当たりの採熱量 E_g (○) および採熱効率 E_f (E_g 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、▲) の経時変化を表す。 E_g 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_g および E_f は共に増大する。例えば、 E_f は夜間で約 $0.1 \sim 0.15$ 、日中で約 0.25 となる。

3.3 年間の熱エネルギー収支

Figure 10 は熱交換杭と地盤との間を移動する月当たりの熱エネルギー E を 94 年から 96 年にかけて表したものである。熱が熱交換杭から地盤へ移動する場合を正、その逆を負と定義する。なお、福井大学の地質が沖積層であるのに対し、広島県三次市は

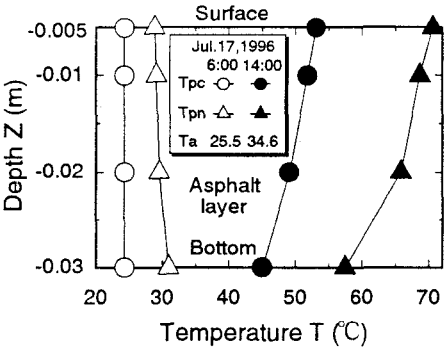


Figure 7 アスファルト舗装体温度の鉛直分布

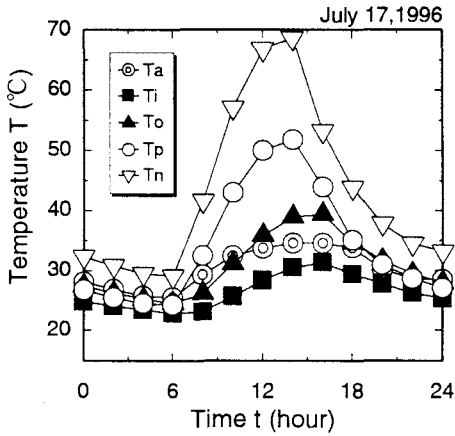


Figure 8 7 月 17 日の温度変化

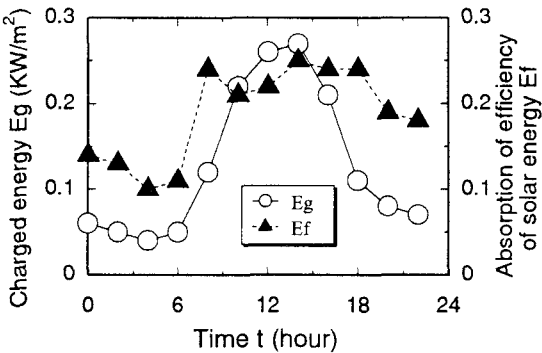


Figure 9 採熱量と採熱効率の経時変化

岩盤地質であり、杭長は200 mである。また、95年の三次市と96年の福井大学ではBHESの運転の自動制御が行われている。福井大学での自動制御方法は、冬期の場合にはアスファルト表面下3 cmの温度が8℃より低くなるとBHESは稼動し、12℃より高くなると停止する。一方、夏期の場合には25℃より高くなれば稼動し、20℃より低くなれば停止する。まず、福井大学では3月および4月のE(△)は自動制御による運転停止のため値は極めて小さい。しかし、5月以降Eは正となり、その値は三次市のそれ(■、○)に比べて大きい。

次に、三次市のデータの94年(■、自動制御なし)

と95年(○、自動制御あり)を比較する。同図より明らかなように、気象の違いはあるが自動制御の効果が現れるのは季節の変わり目であり、例えば3月における地盤からの採熱量は、94年に比べて95年では半減している。また、94年(■)に注目すると12月から3月にかけてのEの総和Edisは -2.3×10^4 MJ、4月から11月にかけてのEの総和Echは 3.8×10^4 MJであるから、1年の間に 1.5×10^4 MJの熱エネルギーが地盤に貯蔵されたことになる。この蓄熱が、冬期のBHESによる路面温度制御の安定性と信頼性に寄与する。なお、循環ポンプの消費電力は0.4KWであり、4月から11月および12月から3月にかけての積算ポンプ駆動エネルギーをEtcおよびEtdとすれば、 $Ech/Etc = 6.1$ 、 $Edis/Etd = 7.4$ である。

4. おわりに

掘削杭熱交換方式(BHES)は深層からの地熱採熱と周囲地盤への熱貯蔵の2つの機能を有する点に特徴がある。本研究を通して以下のような結論を得た。

- (1) 熱交換杭1本1 m当たりの採熱量は循環水量が5 l/minから60 l/minに増加するに伴い0.025 KW/mから0.11 KW/mに増大する。
- (2) 循環水量によって熱交換杭の採熱挙動に違いが観られ、循環水量が大きい場合には外管での温度上昇が著しいが、循環水量が小さい場合には内管と外管との間の熱移動も明瞭になる。
- (3) 路面温度制御により、冬期においては融雪効果が、夏期においては最大20℃程度の路面温度の昇温抑制効果が確認された。
- (4) 1年を通しての熱交換杭と地盤との間の熱エネルギー収支が明らかになり、熱交換杭1本当たりの年間放熱量は年間採熱量の約1.6倍である。

今後、掘削杭熱交換方式による熱貯蔵の実態を明らかにし、本方式の長期的かつ季節的な地熱利用の可能性をさらに検討する。

参考文献

- 1) 松川：平成7年版「日本の水資源(水資源白書)―水に関する危機対策―、地下水技術第37巻第9号、pp. 1-17、1995
- 2) 笹谷・福原・宮本・田中：アルミ棒を利用した地熱エネルギー抽出による路面凍結緩和、土木学会第45回年次学術講演会概要集、II-29、1991
- 3) 森山・林・福原・渡邊・足立：掘削杭熱交換方式による地熱利用と路面融雪システム、土木学会第50回年次学術講演会概要集、1995
- 4) 大木・福原・森山・高橋：掘削杭熱交換方式による地熱利用と路面融雪システムに関する一考察、土木学会第51回年次学術講演会概要集、1996

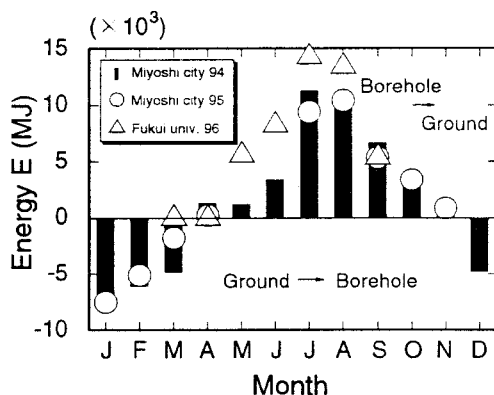


Figure 10 年間の熱エネルギー収支