



Title	垂直埋設管を用いた季節間土壌蓄熱に関する研究
Author(s)	長野, 克則; 落藤, 澄; 中村, 真人 他
Description	第2回衛生工学シンポジウム (平成6年11月10日 (木) -11日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 4 空調・エネルギー . P4-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 2, 157-162
Issue Date	1994-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7603">https://hdl.handle.net/2115/7603</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	2-4-8_p157-162.pdf



垂直埋設管を用いた季節間土壌蓄熱に関する研究

長野克則 (北海道大学)  
中村真人 (北海道大学)  
濱田靖弘 (北海道大学)  
半澤 久 (竹中工務店)

落藤 澄 (北海道大学)  
永坂茂之 (北海道大学)  
○朝桐大介 (北海道大学)

1. はじめに

使用可能なエネルギー量に制限のある環境下で求められるのは、エネルギーをより少なく、より無駄なく使うことである。膨大な熱容量を有する土壌を蓄熱体として利用し、冬期の冷蓄熱 (=ヒートポンプの熱源) と夏期の温蓄熱 (=排熱吸収源) により年周期のエネルギー循環を行う冷暖房システムは、投入するエネルギーを必要最低限に止めることを可能にするものと考えられる。我々は1993年秋に、深さ30mの形状の異なる3種類の垂直式土壌熱交換器を敷設し、ヒートポンプによる暖房と土壌冷蓄熱の実験を行った。同時に、埋設労力・コストの小さい架橋ポリエチレン管を管材としたU字管型・ダブルU字管型と、従来広く用いられてきた鋼管井戸型の蓄熱特性を実験的・解析的に比較した。

2. 土壌埋設熱交換器の設計法

U字管型、ダブルU字管型を用いて従来の鋼管井戸型に匹敵する蓄熱量を得るための設計法を、定常及び非定常解析により検討した。

2.1 定常解析による採熱特性の検討

定常解析は境界要素法を用いた。図1に解析の対象とする3種類の熱交換器の管配置を示す。ここでは単管 (鋼管井戸型)、2本管 (U字管型)、4本管 (ダブルU字管型) を計算対象とし、これらについて管口径、埋設間隔を変えて計算を行った。境界要素法においては図2のような計算領域を設定した。中心から周囲仮想境界までを4mとして、管壁位置および周囲仮想境界を温度境界に指定して、管壁面の採熱量  $Q [W/m]$  を求め、それを土壌の熱伝導率  $\lambda [W/(m \cdot ^\circ C)]$ 、管壁と周囲境界の温度差  $\Delta T [^\circ C]$  で除した無次元採熱量  $Q^* [=Q/(\lambda \cdot \Delta T)]$  で比較を行った。図3に埋設間隔が50mmおよび70mmの場合について管口径の違いによる無次元採熱量の変化を示す。図から管口径、埋設間隔が大きくなるに従って無次元採熱量は微増することが分かる。また単管、2本管、4本管となるにつれて、採熱量が約1.15倍、1.2倍となることが分かる。また、例えば口径が89.1mmの単管で得られる採熱量は約1.3である

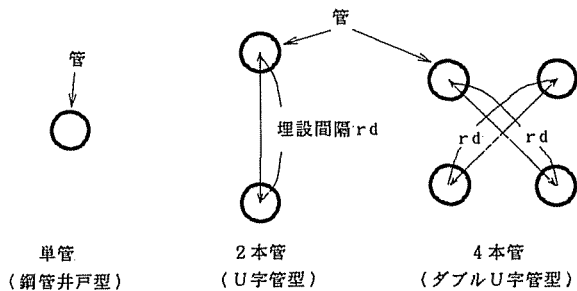


図1 解析の対象とする熱交換器の管配置

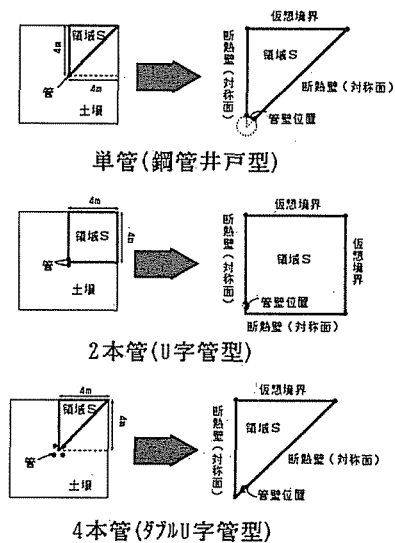


図2 境界要素法の計算領域

が、この時、間隔70mmの2本管、4本管が同じ採熱量1.3を得るためにはそれぞれ、口径30mm, 20mm程度でよいことが分かる。これより、細い管で2本、4本と配置する有効性が確認された。以上の検討を参考に実験での管寸法を図4の様に設定した。管口径は鋼管井戸型は89.1mmφ, U字管型およびダブルU字管型は17mmφで、埋設間隔は70mmとした。定常状態での無次元採熱量の比較を鋼管井戸型を基準として行った結果を表1に示す。U字管型は0.81倍、ダブルU字管型は0.96倍と、両者共に鋼管井戸型に近い採熱量が得られることが分かるが、特にダブルU字管型はほぼ同じ採熱量が得られることが推測される。

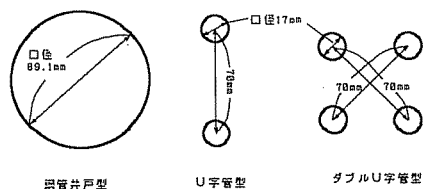


図4 実験で用いる各熱交換器の形状

## 2.2 非定常解析による採熱特性の検討

非定常解析はKelvinの線源理論を用いた。初期温度 $T_0$ が $0^{\circ}\text{C}$ である無限固体中に存在する無限線源から、単位時間、単位長さ当たり $Q$  [W/m]の熱量が発生している場合に、線源からの距離が $r$  [m]の地点の、時間 $t$  [h]における温度応答 $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]は次式によって算出される。

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda} \int_x^{\infty} \frac{1}{\beta} \exp(-\beta^2) d\beta, \quad x = \frac{r}{2\sqrt{\kappa t}}$$

$T$ : 温度応答 [ $^{\circ}\text{C}$ ]       $r$ : 線源からの距離 [m]

$Q$ : 熱量 [W/m]       $\kappa$ : 温度伝播率 [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]

$\lambda$ : 熱伝導率 [ $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ]    $t$ : 時間 [h]

管の中心位置に無限線源を配置し、管壁位置における固体温度を管壁温度とした。線源を2本直線状、および4本格子状に配置し、U字管型、ダブルU字管型を模擬した。これらについては隣接する線源の温度応答の重ね合せにより平均管壁温度を求めた。さらに、熱量に対する温度応答の線形

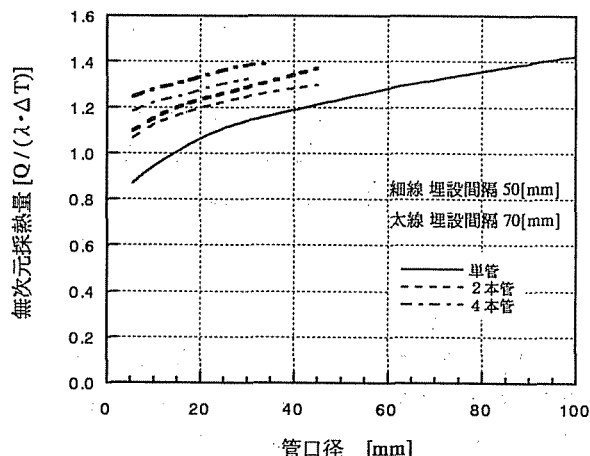


図3 管口径の違いによる無次元採熱量の変化

表1 定常解析による無次元採熱量の比

埋設管の種類	鋼管井戸型	U字管型	ダブルU字管型
比率	1.0	0.81	0.96

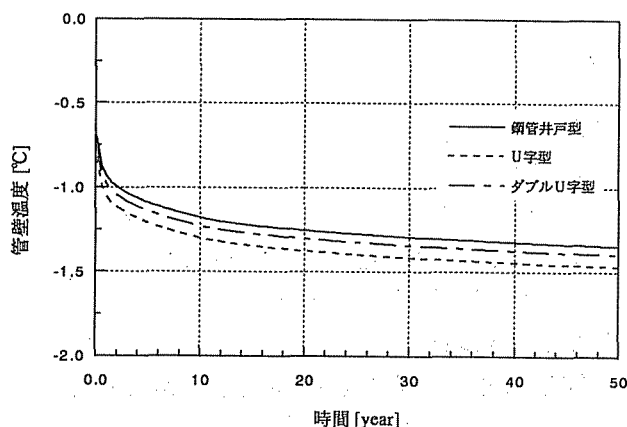


図5 線源理論による管壁温度の経時変化

表2 非定常解析による無次元採熱量の比

埋設管の種類	鋼管井戸型	U字管型	ダブルU字管型
6ヵ月後の比率	1.0	0.87	0.95
10年後の比率	1.0	0.91	0.96

性から鋼管井戸型の管壁温度を基準にした比の逆数を採熱量の比とした。

具体例として図5に、採熱量が1.0W/m、初期温度0°Cの場合の管壁温度の経時変化を示す。計算において土壌の物性値には熱伝導率 $\lambda=1.30$  [W/(m·°C)]、温度伝播率 $\kappa=0.0015$  [m<sup>2</sup>/h]を与えている。この図から、単管の管壁温度を基準とした比の逆数である採熱量の比を計算すると、その値は10年以降ほぼ一定となった。6カ月後と10年後の結果を表2に示す。U字管型、ダブルU字管型でそれぞれ、6カ月後では0.87倍、0.95倍となり、10年以降では0.91倍、0.96倍という結果が得られた。このことから定常計算と同様に非定常計算においてもダブルU字管型は鋼管井戸型に近い採熱量が得られることが予測された。

### 3. 土壌採熱実験

#### 3.1 実験装置

設置した3種類の土壌熱交換器の形状を図6に示す。熱交換器はU字管型、鋼管井戸型、ダブルU字管型で、深さ30m、直径110mmの掘削孔に埋設し、管と土壌の間隙をモルタルで充填した。鋼管井戸型(80A黒ガス管：外径89.1mm、肉厚4.2mm)は鋼管表面を通じて鋼管内部の不凍液が土壌と熱交換を行う。U字管型は往復管中心間隔70mmで、全長60mの往復過程で土壌と熱交換を行う。ダブルU字管型は、往復管中心間隔70mmの2つのU字管(全長60m×2)を図のように格子状に配置したものである。U字管、ダブルU字管、及び鋼管井戸の吸込・吐出管には13A架橋ポリエチレンパイプ(外径17mm、肉厚2.0mm)を用いた。図7に実験施設の平面図を示す。各熱交換器は5m間隔で埋設され、深さ8mの土壌温度測定用の観測井戸をU字管型からの径距離0.6m、7mの2地点に敷設した。各熱交換器と実験家屋内ヒートポンプの間の配管には断熱を施してあり、各系統は家屋内で分岐・合流する。図8に実験装置系統図を示す。図中の実線は暖房運転での作動流体の流れを示しており、土壌側はヒートポンプ蒸発側の温熱源となる。夏期には、まず、二点鎖線の系統でパッシブ冷房運転を行う。これは、冷凍機を用いずに、土壌側の冷熱を直接家屋に導く自然冷房方式である。不凍液温度が上昇し、利用限界温度に達した時点で、図中点線の冷凍機を用いた強制冷房運転に切り替え

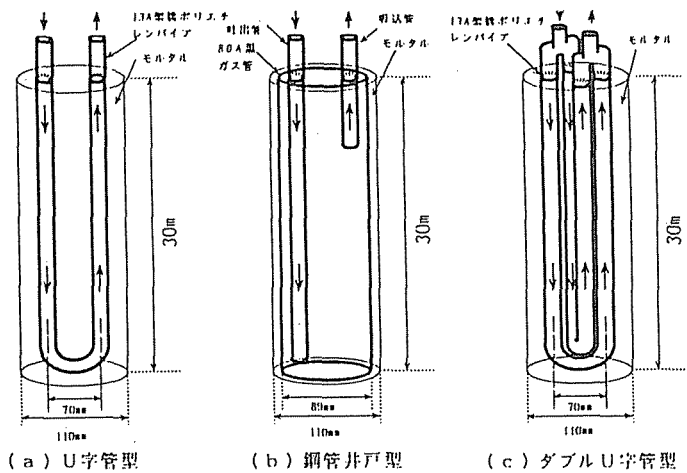


図6 土壌埋設熱交換器の形状

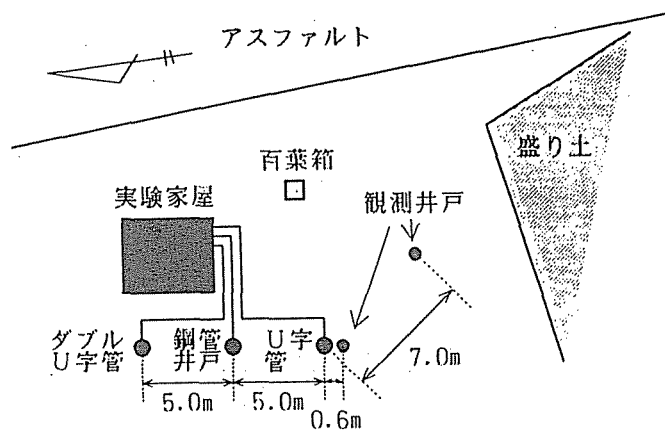


図7 実験施設平面図

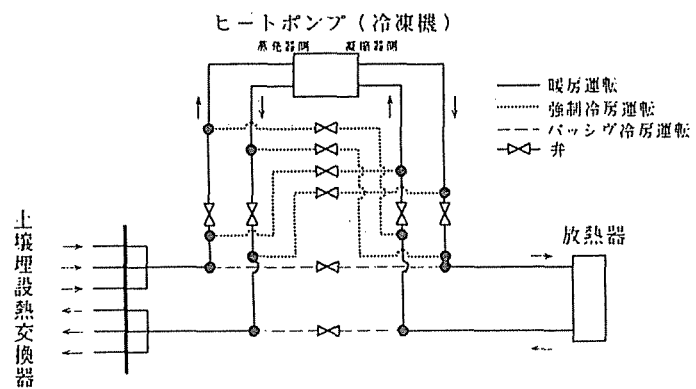


図8 実験装置系統図

る。この時、土壌側は冷凍機凝縮側の排熱吸収源となる。万一の液の漏洩に備えて、不凍液には生体影響の少ないプロピレングリコール水溶液(35wt.%)を採用した。

測定項目は表3に示す通りである。

### 3.2 土壌特性及び実験方法

図9に実験開始時の土壌温度垂直分布と、土質柱状図を示す。径距離0.6m地点に比べ、7m地点の温度は掘削工事が2ヶ月遅れて10月下旬に終了したために、若干温度が低くなっている。深さ8m地点の温度は約15°Cと比較的高い。また、実験開始時の深さ15m, 30m地点の管壁温度は9~10°Cであった。実験場所の土質については、深さ4m以深は高含水の砂(礫)層であった。この地点には地下水流が存在する可能性が高い。

ヒートポンプの連続運転による強制採熱実験は、工事終了(1993年10月28日)後、40日以上放置して12月10日に開始し、1994年4月28日までの140日間に渡って行われた。

### 3.3 実験結果と考察

#### 3.3.1 採熱温度及び採熱量・熱出力

図10に1次側(不凍液)・2次側(温水)出入口温度の経時変化を示す。1次側出入口平均温度の推移は極めて安定しており、実験期間平均値は-2.4°C、最低でも約-3.3°Cであった。従って、この地点の土壌は厳冬期の温熱源として極めて有効であることが実験的に明らかになった。不凍液温度が安定していることの原因としては、地下水流の影響や、土壌内に水分が豊富に存在し、潜熱による採熱量が非常に大きいこと等が考えられる。

図11に土壌採熱量、ヒートポンプ熱出力、圧縮機消費電力、循環ポンプ動力を

表3 測定項目と測定点

測定項目		測定機器
土壌温度	水平方向 [m]	T型熱電対
	鉛直方向 [m]	
	0.6	
管壁温度	鋼管井戸	サーミスタ温度計
	U字管	
	ダブルU字管	
外気温		サーミスタ温度計
室温		サーミスタ温度計
1次側不凍液温度(往・復, 計6点)		サーミスタ温度計
2次側温水温度(往・復)		サーミスタ温度計
循環流量(1次側3系統・2次側)		体積式流量計
2次側熱出力		積算熱電計
圧縮機仕事		200V普通電力計
ポンプ動力		100V普通電力計

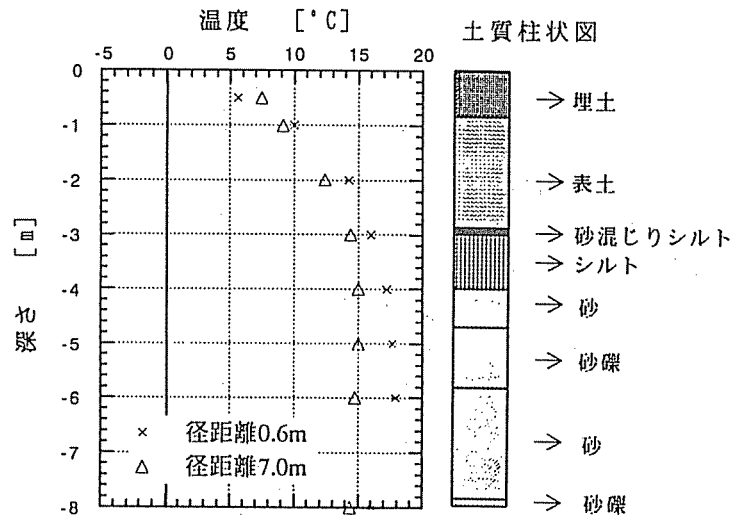


図9 実験開始時(1993.12.10)の土壌温度垂直分布と土質柱状図

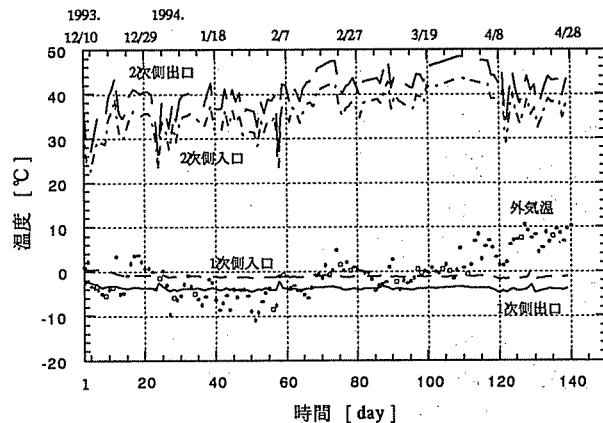


図10 1次側(不凍液), 2次側(温水)出入口温度の経時変化

示す。また、上段にはC.O.P. [= (熱出力) / (圧縮機消費電力量)] (図中破線) 及び、C.O.P.' [= (熱出力) / (圧縮機+循環ポンプ消費電力量)] (図中実線) を示す。C.O.P.'は2.3前後であったが、暖房能力は、札幌の一般的な戸建て住宅の負荷を賅うのに充分である。各熱交換器合計の平均日採熱量，熱出力はそれぞれ約265，480MJ/dayで，総採熱量は37.1GJ，総熱出力は67.2GJに達した。

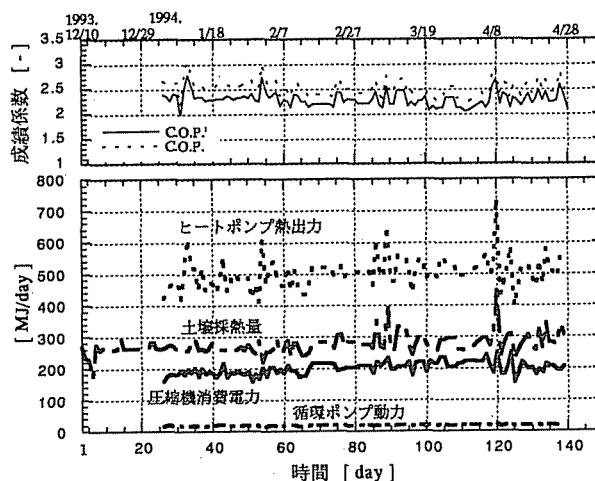


図11 採熱量，仕事量，熱出力及び成績係数の経時変化

### 3.3.2 各土壤熱交換器の採熱特性

図12に管壁温度及び土壤温度の垂直分布を示す。実験開始時の鋼管井戸型の温度は自然土壤に比べて低いですが，これは管内不凍液の対流による影響と考えられる。U字管からの径距離0.6，7m地点の土壤温度分布から，137日目においても，0.6m地点の土壤温度の顕著な低下は見られていない。実験開始から54日目の2月1日において，各管壁温度は0°C前後となっており，管周囲土壤の凍結が徐々に進行しているものと考えられるが，137日目においても管壁温度の垂直分布に大きな変化は見られなかった。

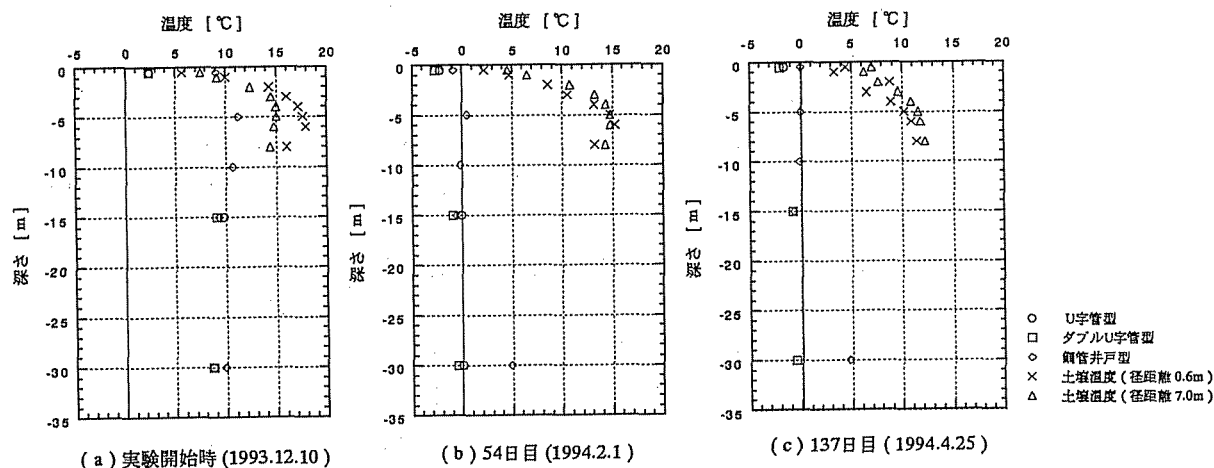


図12 管壁温度及び土壤温度垂直分布

図13に各熱交換器の採熱率（単位時間，単位掘削孔深さ当たりの採熱量：W/m）を示す。各熱交換器の伝熱特性の詳細な解析は次報に譲るが，各熱交換器とも運転開始後，数日間で採熱率は安定している。実験期間平均値は鋼管井戸型は35.6W/m，ダブルU字管型は35.2W/m，U字管型は27.8W/mであった。これらの値は，口径，採熱温度の違いもあるが，過去の実測値（約6W/m）<sup>1)</sup>と比較しても，かなり高い

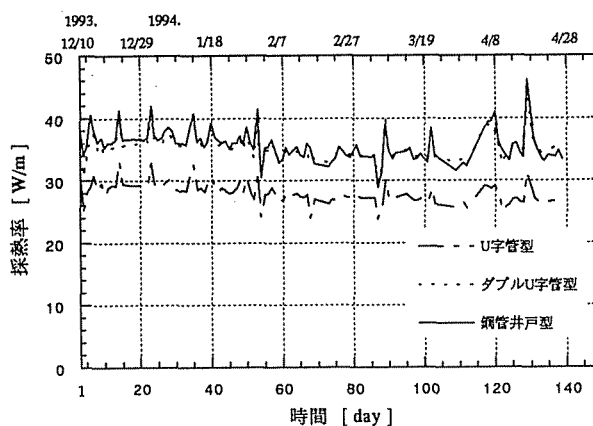


図13 採熱率の経時変化

値である。また、単位温度差（初期土壌温度と実験期間不凍液出入口平均温度の差）当たりに換算すると、鋼管井戸型、ダブルU字管型、U字管型で、それぞれ2.6, 2.5, 2.0W/(m・°C)であった。ダブルU字管型は鋼管井戸型に匹敵する採熱率を示しており、土壌熱交換器埋設費用軽減の可能性が示唆されている。

### 3.4 実験結果と計算結果の比較

定常解析において実験で得られた諸条件を与えて鋼管井戸型を基準とした採熱量の比を計算し、実測結果と比較した。計算においては管内壁面を熱伝達境界に指定し、管内不凍液温度、および、実験時の不凍液物性値と流量から計算した管内熱伝達率を与えて計算を行った。そして、

計算値と50日目および140日目の実測値を比較した。その結果を表4に示す。U字管型については計算値が0.87倍、実測値が0.79倍と、計算値がやや大きい。ダブルU字管型については両者とも0.99倍であった。

表4 実測値と定常解析における採熱量の比

埋設管の種類	鋼管井戸型	U字管型	ダブルU字管型
実測値の比率 (50日目/140日)	1.0	0.79/0.79	0.99/0.99
計算値の比率	1.0	0.87	0.99

### 4. まとめ

(1) 鋼管井戸型を基準とした採熱量の比は定常計算においては、U字管型で0.81倍、ダブルU字管型で0.96倍であった。非定常計算における採熱量の比はU字管型、ダブルU字管型でそれぞれ、6カ月後では0.87倍、0.95倍、10年後では0.91倍、0.96倍という結果が得られた。これより、特にダブルU字管型は鋼管井戸型に匹敵する採熱量が得られると予測された。

(2) 1993年秋に、深さ30mの3種類の垂直式土壌熱交換器（鋼管井戸型・U字管型・ダブルU字管型）を敷設し、実物大の季節間蓄熱利用冷暖房システムの実験施設を作成した。1993年12月10日から140日間に及ぶヒートポンプを用いた連続採熱（冷蓄熱）実験を行い、暖房運転が良好に行われることを確認した。

(3) 総採熱量は37.1GJ、ヒートポンプ熱出力は67.2GJに達した。実験期間平均採熱率は、鋼管井戸型で35.6W/m、ダブルU字管型で35.2W/m、U字管型で27.8W/mであり、非常に大きな値であった。ダブルU字管型は鋼管井戸型にほぼ匹敵する採熱率を示した。

(4) 今回の実験施設における期間平均不凍液温度は-2.4°Cであった。不凍液温度は安定した推移を示しており、この地点の土壌はヒートポンプの熱源として有効であることが実験的に明らかになった。

(5) 定常解析において実験時の条件を与えて鋼管井戸を基準とした採熱量の比を計算し、実測結果と比較を行った。その結果、採熱量の比はU字管型では若干実測結果よりも大きかったが、ダブルU字管型については両者はほぼ近い値であった。今回の実験で用いた熱交換器については7週間程度の短い採熱期間においても定常解析によりある程度の採熱特性の予測が可能であることが分かった。

#### [参考文献]

- 1) 落藤澄他：垂直埋設管を用いた不凍液循環型ヒートポンプによる土壌採熱の実験と解析  
空気調和・衛生工学会論文集No.51, pp.103-111, 1993