

地下水流れ中に設置されたヒートパイプ蒸発部の熱伝達解析
Heat Transfer Analysis of Heat Pipe Evaporator in Groundwater Flow

長岡技術科学大学 正 員 河 原 能 久
長岡技術科学大学 学生員 後 迫 茂
長岡技術科学大学 正 員 後 藤 巖

1. はじめに

ヒートパイプ（HPと略す）とは、減圧された密閉容器内に作動流体と呼ばれる気相と液相とに相互に変化しやすい媒体を封入した伝熱装置である。作動流体は蒸発部（入熱部）で潜熱を得て気化し、圧力差により凝縮部（放熱部）へ移動する。そこで潜熱を放出して液化し、容器壁またはウィックに沿って蒸発部へ還流する。このサイクルを連続させることにより温度の高い蒸発部から温度の低い凝縮部へ熱量を輸送する。

最近、地熱を熱源とするHP融雪装置の開発が進められている。これはHPにより地盤のもつ熱エネルギーのみを抽出し、輸送し、融雪に使用するというものである。HPの利用により、運転費や保守管理費がからないこと、地盤と融雪面との温度差が小さくても多量の熱量を汲み出しうること等の特徴を有する。地盤からHPへ流入する熱量は、地下水や地下水流れがない場合には容易に算出される。しかし、地下水流れが存在する場合のHPへ入熱量の計算方法は確立されていない。この場合、地下水流れがない場合に比べて、地下水が熱量を上流より供給するためにHPに流入する熱量（融雪に使用）の大きくなることが期待される。また、地下水位が高く、地下水流速の比較的大きい地域が雪国にはかなり多く存在する。

本研究は地下水流れ中に設置されたHPへ定常状態で流入する熱量、あるいはHP蒸発部外壁の平均ヌセルト数と平均温度とを得ることを目的としている。特に、地下水流速、HPの埋設間隔、地盤の熱伝導率の影響、ボーリング費用の低減のために実施されている1本のボーリング孔に2本のHPを設置する方法の有効性等を数値計算により検討する。

2. 数理モデル

2.1 解析対象

地下水流れが存在する地盤を熱源とするHP融雪装置の基本形を図-1に示す。装置は地下水中に蒸発部をもつ多数のHPから成りHPにより地熱を抽出し融雪面へ供給するものである。図(a)、(b)はそれぞれ1本のボーリング孔に埋設するHP本数が1本と2本の場合（それぞれTYPE-1、TYPE-2と呼ぶ）を表わす。本研究ではこの2種類の基本形について、HP列が均質地盤中に、地下水流れに直交するように設置された場合を解析対象とする。全てのHPには同一の熱負荷がかかることを仮定し、HPが等間隔で設置されることを考えると解析領域は図-2のようになる。HPへ入熱量やHP外壁温度分布等は隣接するHPの影響を受ける。このためHPでの温度の境界条件はHP内壁にて熱伝達率の形で与え、地盤内の水・熱輸送とHP管壁内の熱輸送とを同時に解く。

2.2 基礎方程式

地盤内の水・熱輸送に対して次の仮定を設ける。

- ①地盤材料の物体値は一様である。
- ②地下水流速と温度分布は水平2次元的である。（実験結果より¹⁾）

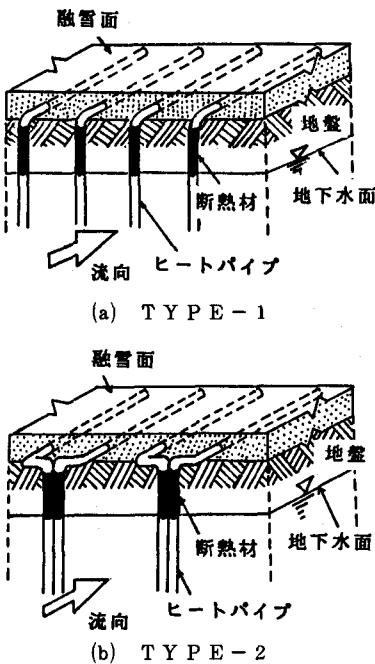


図-1 HP融雪装置

③地盤は飽和しており，地下水流れはダルシーの法則に従う。

④土粒子と水とは至る所で局所的に熱平衡状態にある。

以上の仮定のもとに図-2の座標系を用いると定常状態での地盤内の水・熱輸送の基礎式は以下のように表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1) \quad u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2)$$

$$(\rho c)_w \left(u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xx} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xy} \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yx} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yy} \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (3)$$

ここに， u ， v はそれぞれ x ， y 方向のダルシー流速， h はビエソ水頭， t は温度， $(\rho c)_w$ は水の熱容量， k は地盤の透水係数， λ_{xx} 等は地盤の有効熱伝導率である。

また，HP管壁内の熱輸送は熱伝導であり，HP管壁の熱伝導率を λ_p とすると次式で示される。

$$\lambda_p \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

2.3 境界条件

(a) TYPE-1 (図-2(a))

$$\left. \begin{aligned} -L/2 \leq x \leq L/2, \quad y = p/2 \quad \text{にて} \quad \partial t / \partial y = 0, \quad \partial h / \partial y = 0 \\ x = -L/2, \quad 0 \leq y \leq p/2 \quad \text{にて} \quad t = T_u, \quad h = H_u \\ x = L/2, \quad 0 \leq y \leq p/2 \quad \text{にて} \quad \partial t / \partial x = 0, \quad h = H_d \\ x^2 + y^2 = D_o^2 / 4 \quad \text{にて} \quad \partial h / \partial n = 0 \\ x^2 + y^2 = D_i^2 / 4 \quad \text{にて} \quad \lambda_p \partial t / \partial n = \alpha_i (t - T_c) \\ -L/2 \leq x \leq -D_o/2, \quad y = 0 \quad \text{にて} \quad \partial t / \partial y = 0, \quad \partial h / \partial y = 0 \\ D_o/2 \leq x \leq L/2, \quad y = 0 \quad \text{にて} \quad \partial t / \partial y = 0, \quad \partial h / \partial y = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに， $L/2$ はHP中心から解析領域の上下流端までの距離， p はHP埋設ピッチ， T_u は上流端での地盤温度， H_u ， H_d はそれぞれ上下流端でのビエソ水頭， D_o ， D_i はそれぞれHP外径，内径， T_c はHP中心温度（蒸気温度）， α_i はHP内壁での熱伝達率であり定数である。

(b) TYPE-2 (図-2(b))

この場合の境界条件は上式(5)のうち第6，7式が次のように変わるのみである。

$$\begin{aligned} -L/2 \leq x \leq L/2, \quad y = 0 \quad \text{にて} \\ \partial t / \partial y = 0, \quad \partial h / \partial y = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 地盤の透水係数

水の動粘性係数の温度依存性を考慮し，地盤の透水係数を温度の2次関数として以下のように表現した。

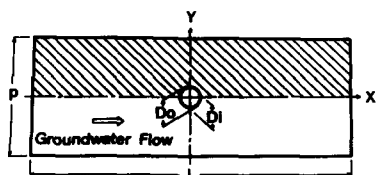
$$\begin{aligned} k(t)/k(15^\circ\text{C}) &= 0.641 + 2.18 \times 10^{-2} t \\ &+ 1.46 \times 10^{-4} t^2 \quad (0 \leq t \leq 30^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (7)$$

2.5 地盤の有効熱伝導率

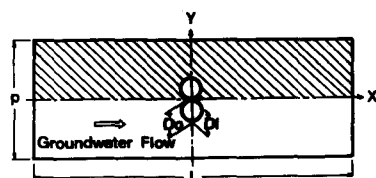
式(3)中の地盤の有効熱伝導率 λ_{xx} 等は地下水流れの存在する場合の主流方向の有効熱伝導率 λ_l ，主流と垂直方向の有効熱伝導率を λ_t とすると次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{xx} &= (\lambda_l u^2 + \lambda_t v^2) / (u^2 + v^2) \\ \lambda_{xy} &= \lambda_{yx} = (\lambda_l - \lambda_t) uv / (u^2 + v^2) \\ \lambda_{yy} &= (\lambda_l v^2 + \lambda_t u^2) / (u^2 + v^2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

地盤の有効熱伝導率 λ_l ， λ_t と地下水流速との関係については若干



(a) TYPE-1



(b) TYPE-2

図-2 解析領域と座標系

の研究^{2)~5)}がある。しかし、流速の小さい場合については今後検討する必要がある。ここでは、Yagi, Kunii, Waka³⁾の関係式を使用する。

$$\frac{\lambda_l}{\lambda_w} = \frac{\lambda_o}{\lambda_w} + \delta Pe_D, \quad \frac{\lambda_t}{\lambda_w} = \frac{\lambda_o}{\lambda_w} + \alpha\beta Pe_D, \quad Pe_D \equiv \frac{(\rho c)_w V d_{so}}{\lambda_w} \quad (9)$$

ここに、 λ_w は水の熱伝導率、 λ_o は流れのない場合の飽和地盤の有効熱伝導率、 V は空隙平均流速、 d_{so} は地盤の平均粒径、 $\delta, \alpha\beta$ は主として地盤材料で決まる定数であり、それぞれ0.7~0.8, 0.1~0.3の値をとる。

いま有効熱伝導率 λ_l, λ_t の大きさを調べる。後述の数値計算では地下水流速の目安となるペクレ数($Pe_D \equiv (\rho c)_w U u D_o / \lambda_o$)を 10^{-2} から10の範囲で変化させる。ここで $U u$ は解析領域上流端でのダルシ一流速である。このとき

$$\frac{Pe_D}{Pe_D} = \frac{V \cdot d_{so} \cdot \lambda_o}{U u \cdot D_o \cdot \lambda_w} \sim 2 \times 10^{-2} \times 5 = 10^{-1}$$

すなわち、 Pe_D は Pe_D の変化に対応し 10^{-3} から1程度の値をとる。したがって、

$$\frac{\lambda_l - \lambda_o}{\lambda_o} = \delta \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_o} \cdot Pe_D \sim 10^{-4} \sim 10^{-1}, \quad \frac{\lambda_t - \lambda_o}{\lambda_o} = \alpha\beta \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_o} \cdot Pe_D \sim 10^{-5} \sim 10^{-2}$$

$$\frac{\lambda_l - \lambda_t}{\lambda_o} = 10^{-4} \sim 10^{-1}$$

上式より地盤の有効熱伝導率 λ_l, λ_t は Pe_D の広い範囲にわたり λ_o と殆んど変わらないことが知られる。このため、数値計算においては特に理わからない限り $\lambda_l = \lambda_t = \lambda_o$ とする。また、このようにして計算された地盤内温度分布やHP外壁平均ヌセルト数は室内実験での結果と良好に一致することが確認されている。¹⁾

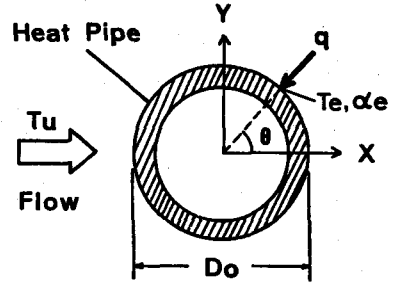


図-3 HPへ流入する熱量

3. 数値解析

基礎式(1)~(4)をFEM(Galerkin法)により数値解析した。要素としては三角形シンプレックス要素を使用し、解析領域を約1600(うちHP管壁96)総節点数約870に分割した。透水係数が温度に依存するため収束計算を行った。

HP外壁に沿う単位長さ当りに流入する熱流束($q(\theta)$)は接近する地下水水温(T_u), HP外壁温度($T_e(\theta)$), 局所熱伝達率($\alpha_e(\theta)$)を用いると次のように表わされる。ただし、 θ はHP周方向の角度である。

$$q(\theta) = (\lambda_{xx} \cdot \cos \theta + \lambda_{yx} \cdot \sin \theta) \frac{\partial t}{\partial x} + (\lambda_{xy} \cdot \sin \theta + \lambda_{yy} \cdot \cos \theta) \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_e(\theta) \cdot (T_u - T_e(\theta)) \quad (10)$$

また、単位長さに入流する熱量(Q)は次のように表わされる。

$$Q = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} q(\theta) D_o d\theta = \pi D_o \alpha_{em} (T_u - \bar{T}_e) \quad (11)$$

ここに、 α_{em} はHP外壁平均熱伝達率、 $\bar{T}_e$ はHP外壁平均温度である。

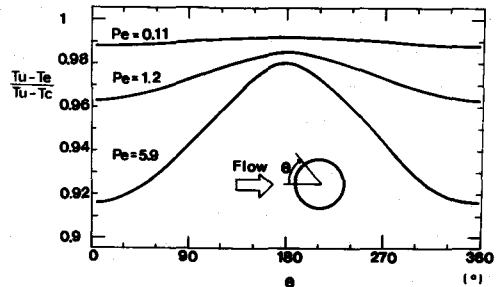


図-4 HP外壁温度分布

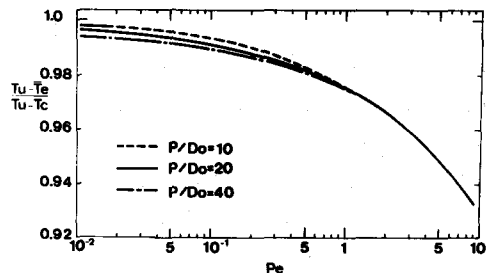


図-5 HP外壁平均温度

数値計算では主として地下水流速とHP設置間隔の影響を検討するために、上流端のビエゾ水頭 H_u とHP埋設ピッチ p とを変化させた。その他の量には次のような一定値を与えた。 $L=200\text{cm}$, $D_o=2.5\text{cm}$, $D_i=2.1\text{cm}$, $k(15^\circ\text{C})=5\times 10^{-2}\text{cm/s}$, $\lambda_o=5\times 10^{-8}\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$, $\lambda_p=1.28\times 10^{-1}\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$, $\alpha_i=1.22\times 10^{-1}\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ である。

解析領域の長さ(L)の影響をHP埋設ピッチが 2.5cm の場合に対して検討した。その結果、ペクレ数(Pe_D)が 0.1 以上であれば影響を無視しうることを確認した。

4. 計算結果

ここではHPへ流入する熱量(Q)、HP蒸発部外壁温度(T_e)、ヌセルト数(Nu)について述べる。上述の局所熱伝達率、平均熱伝達率はそれぞれ下記の局所ヌセルト数、平均ヌセルト数として表現される。

$$Nu(\theta) = \frac{\alpha_e(\theta)D_o}{\lambda_o} \quad Nu_m = \frac{\alpha_{em}D_o}{\lambda_o} \quad (12)$$

なお、地下水流速の大きさはペクレ数(Pe_D)で表わされる。結果はTYPE-1, 2に分けて述べる。

4.1 TYPE-1

(1) HP蒸発部外壁温度($p/D_o = 20$)

図-4にHP蒸発部外壁の周方向の温度分布を示す。ただし、接近する地下水温(T_u)とHP中心温度(T_c)を用いて無次元表示してある。外壁温度(T_e)はHP前面のよどみ点で最大となり、背面のよどみ点で最小となる。地下水流速が増すにつれ、最大値、最小値、両者の差は増大する。ペクレ数が5を越えても無次元温度は 0.9 以上あり外壁温度はHP中心温度にかなり近い。

図-5はHP外壁の周方向平均の温度($\bar{T}_e$)とペクレ数との関係を表わしたものである。ペクレ数の増加とともに平均温度は緩やかに増大する。

(2) HP蒸発部外壁ヌセルト数

HP外壁の局所ヌセルト数の分布をHP埋設ピッチが $p/D_o = 20$ の場合について示したものが図-6である。局所ヌセルト数はHP前面のよどみ点で最大値を、背面のよどみ点で最小値をとる。ペクレ数が增大するとHP前面での局所ヌセルト数の増加が著しくなり、HP前面からの熱流入が卓越してくる。

図-7はHP外壁の平均ヌセルト数とペクレ数との関係を表わしている。平均ヌセルト数はペクレ数の増加に

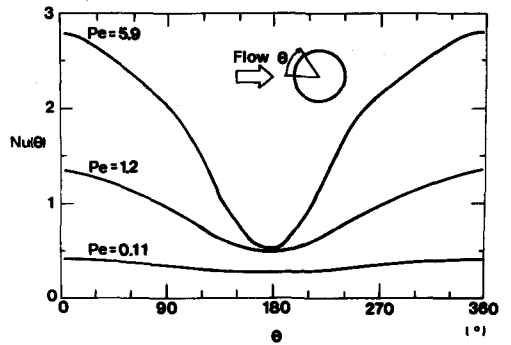


図-6 HP外壁局所ヌセルト数分布

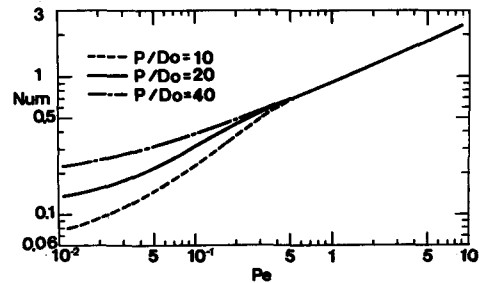


図-7 HP外壁平均ヌセルト数

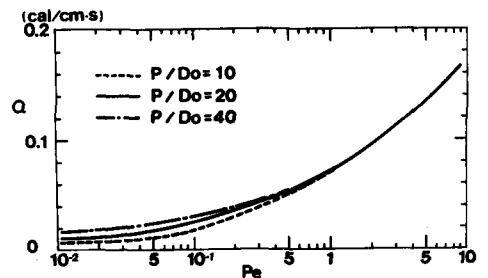


図-8 HPへ流入する熱量

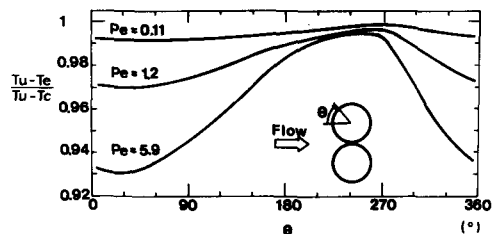


図-9 HP外壁周方向温度分布

伴い大きくなる。ペクレ数が1以上では、平均ヌセルト数はペクレ数の約0.42乗に比例する。

(3) HP埋設ピッチの影響

HP埋設ピッチ (p) は融雪能力と経済性から決められている。実施例では p/D_o が10～20程度である。ここでは、 p/D_o を10, 20, 40と変化させた。結果のうちHP外壁平均温度については図-5に、HP外壁平均ヌセルト数については図-7に記している。平均温度と平均ヌセルト数は、ペクレ数が0.5以下ではHP埋設間隔が増すにつれ増加する。しかし、ペクレ数が0.5を越えると殆んど変化しない。図-8はHPへ流入する熱量を比較した結果である。ペクレ数が0.1では p/D_o を10から2倍、4倍と増すにつれHPへの熱量は1.4倍、1.7倍と増加する。 p/D_o が10以上でペクレ数が0.5以上であればHPへの熱量は埋設ピッチには依存しないことが知られる。

(4) 地盤の有効熱伝導率の影響

地盤の有効熱伝導率を $5 \times 10^{-2} \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}$ のまわりに1割変動させた。熱伝導率の増加に伴いHP外壁平均温度は減少しHPへの熱量は増大する。しかし、同じペクレ数に対する平均ヌセルト数は殆んど変化しない。

4.2 TYPE-2 (HP埋設ピッチ $p/D_o = 20$)

(1) HP蒸発部外壁温度

HP蒸発部外壁の周方向温度分布を無次元化したものが図-9である。角度 (θ) の測り方を図中に示す。この場合、HP外壁温度は $\theta = 30^\circ$ あたりで最高となり、2本のHPが接触する $\theta = 270^\circ$ で最低となる。地下水流速が増すにつれて最高温度は上昇するが、その位置は殆んど移動しない。

図-10はHP外壁の周方向平均温度とペクレ数との関係を表わしたものである。ペクレ数の増加に伴い、平均温度は除々に上昇する。同じHP埋設ピッチでのTYPE-1の結果が併記されているが、TYPE-2の平均温度の方が緩やかに上昇する。HP接触点付近での温度低下が著しいためである。

(2) HP蒸発部外壁ヌセルト数

HP外壁の局所ヌセルト数の分布を図-11に示す。局所ヌセルト数は $\theta = 30^\circ \sim 130^\circ$ あたりで大きく、 $\theta = 260^\circ \sim 340^\circ$ あたりで小さい。地下水流速が増すと $\theta = 0^\circ \sim 150^\circ$ 付近で局所ヌセルト数が大幅に増加する。局所ヌセルト数が大きな値をとるのはTYPE-1では $\theta = 0^\circ \sim 100^\circ$ 、 $260^\circ \sim 360^\circ$ であったが、T

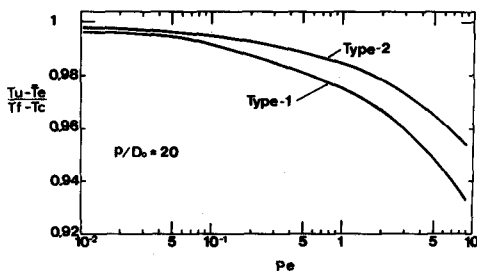


図-10 HP外壁平均温度

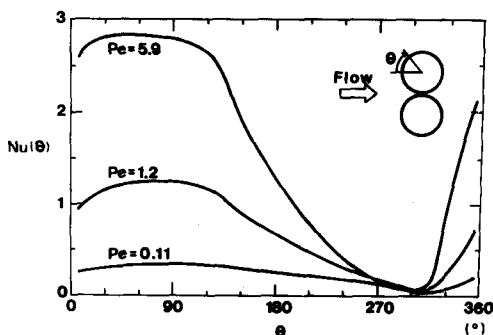


図-11 HP外壁局所ヌセルト数分布

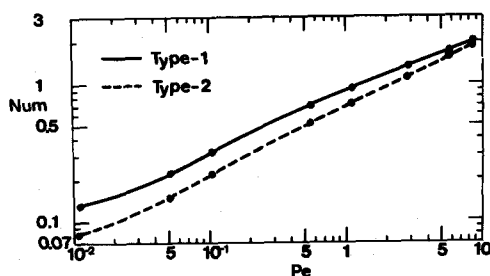


図-12 HP外壁平均ヌセルト数

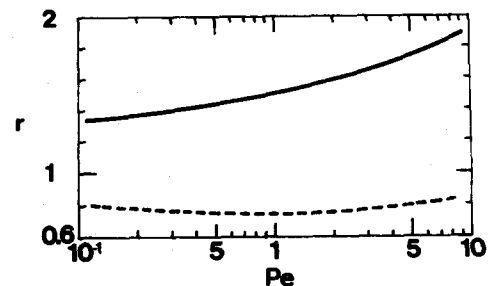


図-13 HPへ流入する熱量の比較

TYPE-2では $\theta = 0^\circ \sim 150^\circ, 350^\circ \sim 360^\circ$ と狭くなっている。しかし、最大値付近で平坦な形状となっている。

図-12はHP外壁の平均ヌセルト数とベクレ数との関係を表わしている。図中にはTYPE-1の同じ埋設ピッチの結果を記す。TYPE-1の平均ヌセルト数と比較すると、TYPE-2での値はすべてのベクレ数に対し小さくなっている。また、ベクレ数が大きくなるにつれ両者の差は小さくなる。

(3) HPへの流入熱量

1本のHPに流入する熱量を同じHP埋設ピッチのTYPE-1と比較すると、TYPE-2の方がすべてのベクレ数に対し小さい。これは前述のように、HP外壁平均温度と地盤との温度差についてはTYPE-2の方が大きいものの、平均ヌセルト数についてはTYPE-1をかなり下回るためである。しかし、ボーリング孔1本あたりの熱量となるとTYPE-2はTYPE-1を上回る。その様子を図-13に示す。図中の実線がTYPE-2の熱量とTYPE-1の熱量との比を表わしており、すべてのベクレ数で1を越えている。図中にはTYPE-2($p/D_o = 20$)の熱量とTYPE-1($p/D_o = 10$)のHP2本に流入する熱量との比を破線で示している。当然ながら、すべてのベクレ数に対しTYPE-2の熱量の方が小さい。TYPE-1、TYPE-2のいずれが有利かは、必要熱量から決まる単位長さ当りのHP本数及びボーリング費用とHP単価との比により定まる。上述の結果よりHP単価がボーリング費用に比べて安ければTYPE-2の方が経済的であり有利となることが知られる。

4.3 地盤の有効熱伝導率の異方性

地盤の有効熱伝導率を等方的とせず式(8)、(9)を用い計算した。平均ヌセルト数の結果を図-12に丸印で示す。TYPE-1、2のいずれの場合も殆んど変化しないことが知られる。HP外壁温度もHPに流入する熱量も殆んど変化せず、地盤の有効熱伝導率として静水時の値を用いてよいことが知られる。

5. 結 論

地下水流れ中に設置されたHPへ定常状態で流入する熱量、HP外壁温度分布、ヌセルト数を数値解析により検討した。以下のことが得られた。

- (1) 1本のボーリング孔に1本のHPを設置する場合において、HP外壁平均ヌセルト数、平均温度、流入熱量に及ぼす地下水流速、HP埋設間隔の影響を求めた。ベクレ数が大きくなるにつれHP外壁温度と接近地下水温との温度差は小さくなるが、平均ヌセルト数の増加が大きいため熱量が増す。HP埋設間隔の影響はベクレ数が0.5以下で顕著となる。
- (2) 同じボーリング孔にさらに1本のHPを増設すると、HP1本当りの熱量は減少するもののボーリング孔1本当りの熱量では大きくなる。HP単価がボーリング費用に比べて安ければこの方法は有効となる。
- (3) 地盤の有効熱伝導率としては式(9)を用いる限り飽和静水時の値を用いてよい。

参考文献

- 1) 後迫 茂, 河原能久, 後藤 巖: 土木学会年講, 第35回, 659-660, 1984
- 2) Yagi, S. and Kunii, D.: A. I. Ch. E. J., vol. 3, №3, 373-381, 1957
- 3) Yagi, S., Kunii, D. and Wakao, N.: A. I. Ch. E. J., vol. 6, №4, 543-547, 1960
- 4) Kunii, D. and Smith, J. M.: A. I. Ch. E. J. vol. 7, №1, 29-34, 1961
- 5) 佐藤邦明: 土木学会論文集, 第320号, 57-65, 1982
- 6) 田中 修: ヒートパイプ協会設立記念論文集, 33-46, 1982