

地下水流れ中におかれたヒートパイプ蒸発部の熱伝達について Heat Transfer to a Heat Pipe Evaporator from Ground water 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 林田貴範
長岡技術科学大学 正員 後藤 巖

1. はじめに

ヒートパイプ（以下HPと略す）とは、密閉容器に作動流体と呼ばれる気相と液相に相互に変化しやすい媒体を封入し、その相変化の潜熱を仲介にして、流動によって熱を輸送する装置である。作動流体は蒸発部（入熱部）で気化し、圧力差により凝縮部（放熱部）に至り、そこで液化し、管壁またはウィックに沿って蒸発部へ還流する。

GauglerやGrover等がHPの原理を発見して以来、NASA等でHPの開発が進められてきた。現在では民生用としても多方面に使用されているが、土木工学に関連する応用例としては次のものが挙げられる。アラスカパイプラインの基礎地盤の安定化工法、表層の地熱利用による道路融雪・路面凍結防止方法、トンネルのつらら防止対策、交通標識の着氷防止、地中蓄熱システムへの応用等である。^{2)~4)}それらの多くは地熱をHPへの入熱源とするものであり、運転費、保守管理費がかからないこと、加熱源と冷熱源との温度差が小さくても多量の熱を輸送するというHPの特性を利用するものである。そのような応用例における問題点は次の3項目であると考えられる。それらは、1)HP自体の伝熱特性の最適化（作動流体の種類、封入量、使用傾斜角度等）、2)入熱源からHP蒸発部へ流入する熱量の評価方法の確立、3)HP凝縮部から冷熱源へ放熱される熱量の算出方法の検討、あるいは、HP放熱方式の検討である。しかし、HPを鉛直に設置し使用する場合には、HPの伝熱特性が問題となることは少なく、また、放熱部の形式については用途に応じ定められることが多い。したがって、HPにより入熱源から汲み出す熱量の算出方法を見出せば、HPを利用したシステムの熱収支の事前評価が容易となる。

本論文は、そのはじめとして、定常なダルシー流中におかれたHP蒸発部の平均ヌセルト数の算出方法を得ることを目的とし、実験、理論的考察、数値計算を行った結果について述べたものである。

2. 理論的考察

飽和浸透流の存在する無限広さの地盤内に設置されたHP蒸発部外壁の局所ヌセルト数、平均ヌセルト数をGrosh⁵⁾らの方法を適用することにより求める。

2.1 基礎式及び境界条件

図-1に示す座標系を用いると、飽和浸透流中に置かれたHPまわりの2次元定常状態での温度場、速度場に対する方程式は次のようになる。

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \dots(1) \quad a \equiv \frac{\lambda_{ef}}{(\rho_c)_w} \quad \dots(2)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots(3) \quad \Phi = -kh \quad \dots(4)$$

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad \dots(5) \quad u = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad \dots(6)$$

u, v : 流速, T : 温度, a : 温度伝導率, λ_{ef} : 地盤の有効熱伝導率, $(\rho_c)_w$: 水の熱容量, Φ : 速度ポテンシャル, Ψ : 流れ関数, k : 地盤の透水係数, h : ピエゾ水頭

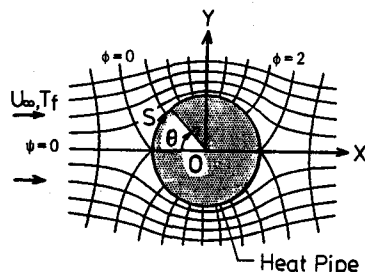


図-1 座標系

速度ポテンシャルと流れ関数とが直交座標系をなすことに着目し、式(1)の独立変数を (x, y) から (ϕ, ψ) に変換すると、次式となる。

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{1}{P_e} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \dots(7) \quad P_e \equiv \frac{U \infty D}{a} \quad \dots(8)$$

ここに、 ϕ ：無次元速度ポテンシャル ($\equiv \Phi / U \infty D$)、 ψ ：無次元流れ関数 ($\equiv \Psi / U \infty D$)、

$U \infty$ ：HPから十分に離れた地点での浸透水流速、 D ：HP外径、 P_e ：ペクレ数

HP前方のよどみ点における速度ポテンシャルを $\phi = 0$ と定めると、後方よどみ点での速度ポテンシャルは $\phi = 2$ となる。また、HP外壁での流れ関数を $\psi = 0$ と定める。このとき、境界条件は次のようになる。

$$0 \leq \phi \leq 2, \quad \phi = 0 \quad \text{にて} \quad T = T_e(\phi) \quad \dots(9a)$$

$$\phi < 0, \quad \phi > 2, \quad \phi = \phi \quad \text{にて} \quad \partial T / \partial \phi = 0 \quad \dots(9b)$$

$$\phi = \infty, \quad \phi = \phi \quad \text{にて} \quad T = T_f \quad \dots(9c)$$

$$\phi = -\infty, \quad \phi = \phi \quad \text{にて} \quad T = T_f \quad \dots(9d)$$

$$\phi = \phi, \quad \phi = \infty \quad \text{にて} \quad T = T_f \quad \dots(9e)$$

ここに、 T_f ：HPから十分離れた上流地点での浸透水水温、 $T_e(\phi)$ ：HP蒸発部外壁温度

2.2 HP蒸発部外壁温度について

境界条件の1つであるHP蒸発部外壁温度 $T_e(\theta)$ はHPの放熱条件、材質等により大きく変化する。本論文ではHP蒸発部での熱伝達についてのみ検討し、HP内部や凝縮部での熱輸送については触れないので、 $T_e(\theta)$ は無限広さの地盤でも実験結果と同一であると仮定し、式(10)または(11)、(12)で与える。

$$T_e(\theta) = \bar{T}_e - T_a \cos \theta \quad \dots(10)$$

$$\frac{T_f - T_e}{T_f - \bar{T}_e} = 1 + \sigma \cos \theta \quad \dots(11) \quad \sigma \equiv \frac{T_a}{T_f - \bar{T}_e} = 0.026 P_e^{0.72} \quad \dots(12)$$

ここに、 $\bar{T}_e$ ：HP蒸発部周方向平均温度、 T_a ：式(10)を用いた場合の温度振幅、 θ ：HP前方よどみ点から測った角度

式(11)は角度の関数として表わされているが、式(13)の関係を用いれば速度ポテンシャルの関数として書かれる。

$$\phi = 1 - \cos \theta \quad \dots(13)$$

$$\frac{T_f - T_e}{T_f - \bar{T}_e} = 1 + \sigma - \sigma \phi \quad \dots(14)$$

2.3 理論解について

2.3.1 主流方向の熱伝導が無視しうる場合

主流方向の熱伝導が移流による熱輸送に較べ、無視できる場合を取扱う。式(8)は次のように表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \quad \dots(15)$$

また、境界条件の式(9c)は次のようになる。

$$\phi < 0, \quad \phi = \phi \quad \text{にて} \quad T = T_f \quad \dots(16)$$

式(15)を境界条件(9)のもとに解くとHPに流入する熱流束 $q_e(\phi)$ は以下のよう⁵⁾に求まる。

$$q_e(\phi) = (T_f - \bar{T}_e) \lambda_{ef} \left(\frac{U \infty}{\pi a D \phi} \right)^{1/2} (1 + \sigma - 2\sigma \phi) \quad \dots(17)$$

HP外壁の単位面積を通過する熱量 $q_e(\theta)$ は次式から得られる。

$$q_e(\theta) = q_e(\phi) \cdot D \cdot d\phi / ds \quad \dots(18)$$

ここで、 s ：HP前方よどみ点からHP外周に沿って測った距離 ($\equiv D\theta / 2$)

式(13)を用いると、熱流束 $q_e(\theta)$ は

$$q_e(\theta) = 2(T_f - \bar{T}_e) \left(\frac{\rho_c \lambda_{ef} U_\infty}{\pi D} \right)^{1/2} (1 - \sigma + 2\sigma \cos \theta) (1 + \cos \theta)^{1/2} \quad \dots(19)$$

これより、HP蒸発部外壁での局所熱伝達率 $\alpha_e(\theta)$ 、局所ヌセルト数 $N_u(\theta)$ は次式のようにになる。

$$\alpha_e(\theta) = \frac{q_e(\theta)}{T_f - \bar{T}_e} = 2 \left(\frac{\rho_c \lambda_{ef} U_\infty}{\pi D} \right)^{1/2} \left(\frac{1 - \sigma + 2\sigma \cos \theta}{1 + \sigma \cos \theta} \right) (1 + \cos \theta)^{1/2} \quad \dots(20)$$

$$N_u(\theta) = \frac{\alpha_e(\theta) \cdot D}{\lambda_{ef}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} P_e^{1/2} \left(\frac{1 - \sigma + 2\sigma \cos \theta}{1 + \sigma \cos \theta} \right) (1 + \cos \theta)^{1/2} \quad \dots(21)$$

また、HP蒸発部外壁での平均熱伝達率 α_{em} 、平均ヌセルト数 N_{um} は以下のよう求められる。

$$\alpha_{em} = 2 \int_0^2 q_e(\theta) d\phi / \pi (T_f - \bar{T}_e) = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^{3/2}} \left(\frac{\rho_c \lambda_{ef} U_\infty}{D} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\sigma}{3} \right) \quad \dots(22)$$

$$N_{um} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^{3/2}} P_e^{1/2} \left(1 + \frac{\sigma}{3} \right) \quad \dots(23)$$

局所ヌセルト数の周方向の変化を示したものが図-2中の実線である。局所ヌセルト数はHP前方のよどみ点で最大となり、単調に減少しながら後方のよどみ点での0に至る。式(23)で示される平均ヌセルト数とベクレ数との関係は後述の図-11中の実線で表わされる。なお、HP外壁の周方向の温度分布の影響は式(12)で定義される σ によって表わされるが、ベクレ数が大きくない限り σ は十分小さい。

2.3.2 移流による熱輸送が無視しうる場合

熱伝導に較べ移流による熱輸送が無視できる場合、式(1)は円筒座標系で表わす方が簡単である。原点から距離 r だけ離れた地点で温度が指定されているとすると、HP外壁の平均ヌセルト数は局所ヌセルト数と同一であり、次式となる。

$$N_{um} = N_u(\theta) = \frac{2}{\ln(2r/D)} \quad \dots(24)$$

したがって、無限広さの地盤を考えると $N_{um} = 0$ となる。

3. FEMによる数値解析

実験結果におけるHP蒸発部平均ヌセルト数と式(1)~(6)の数値解との対比を行うためにFEMによる数値計算を行った。

3.1 定式化及び計算結果

基礎式(1)、(3)をGalerkin法により定式化した。要素としては、三角形一次要素を使用し、図-3に示すように実験装置の半分の領域を総要素数592、総節点数345分割した。要素内で温度分布を式(25)で表わすと、エネルギー方程式(1)は式(26)の n 個の連立方程式となる。

$$T = \sum_{i=1}^3 N_i(x, y) T_i \quad \dots(25)$$

$$\{D\} \{T\} = \{0\} \quad \dots(26)$$

$$\text{ただし, } D_{ij} = \sum_{e=1}^M a \left[\int_{A_e} \left\{ \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial N_i}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) + N_i u_e \frac{\partial N_j}{\partial x} + N_i v_e \frac{\partial N_j}{\partial y} \right\} dx dy \right] \quad \dots(28)$$

ここに、 N_i : 形状関数、 T_i : 節点での温度、 n : 総節点数、 M : 総要素数、 A_e : 要素の領域、 u_e, v_e : 要素 e での流速

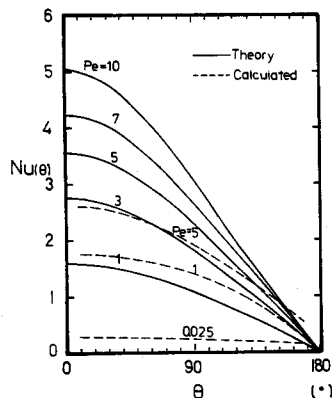


図-2 $N_u(\theta) \sim \theta$ の関係

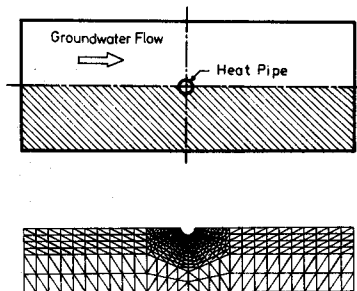


図-3 要素分割

境界条件は、次のように与えた。(B:実験装置の幅, L:地盤長さ)

$$-L/2 < x < L/2, \quad y = B/2 \quad \text{にて} \quad T = T(x) \quad \text{または} \quad \partial T / \partial y = 0 \quad \cdots (29a)$$

$$x < -D/2, \quad x > D/2, \quad y = 0 \quad \text{にて} \quad \partial T / \partial y = 0 \quad \cdots (29b)$$

$$x = -L/2, \quad 0 \leq y \leq B/2 \quad \text{にて} \quad T = T_f \quad \cdots (29c)$$

$$x = L/2, \quad 0 \leq y \leq B/2 \quad \text{にて} \quad \partial T / \partial x = 0 \quad \cdots (29d)$$

$$\text{HP管壁にて} \quad T = T(\theta) \quad \cdots (29e)$$

後述のように、実験装置側壁の断熱が不十分で、ベクレ数が小さい場合に側壁から地盤内への入熱が行われた。このため、実験値との対比を行う際には式(29a)の第1式のように温度分布を与えた。また、実験装置の幅の影響を検討する際には側壁は断熱されているものとした。

図-2に局所ヌセルト数の数値解の結果を破線で示す。側壁で断熱条件を与えたケースの結果である。理論解と数値解とを比較すると数値解は小さな値を与えることが確認される。平均ヌセルト数の計算結果については図-11に示してある。なお、無限広さの地盤に対する数値解と理論解との対比は現在検討中である。

4. 実験

HP定常作動時の地盤内温度分布, HP外壁温度分布, HPへの入熱量を測定し, HP蒸発部外壁の平均ヌセルト数とベクレ数との関係を求めた。

4.1 実験装置, 測定項目及び実験条件

実験装置の概要を図-4に示す。地盤のモデルとして水槽中央に砂槽(長さ80cm, 深さ70cm, 幅30cm, 透水係数: 0.070cm/s, 砂粒径: $d_{50} = 0.41\text{mm}$, 間隙率: 38.3%)を設け, 前後両面を金網で固定した。HPは地盤中央に60cm長さだけ鉛直に埋め込んだ。HPへの入熱源である浸透流は地盤両端に一定水位差を与えることにより生じさせた。また, 地盤前面と温水用恒温槽には投込みヒーターを設置し, 浸透水水温を一定に保つように制御した。HP凝縮部にはジャケットを取り付け, 定水位槽より一定量の冷却水を供給することにより放熱を行った。冷却水用恒温槽の温度制御は氷を投入することにより行った。装置全体は恒温室に設置され, 室温は浸透水水温に設定された。使用したHPの仕様は表-1に示すようである。

表-1 ヒートパイプ仕様

管材質	スチール
作動流体	アンモニア
還流方式	重力
全長	100cm
蒸発部	60cm
断熱部	10cm
凝縮部	30cm
外径	34mm
肉厚	3mm
ウイツク	なし
封入液量	蒸気空間の5%
その他	外壁に防錆塗装

地盤内温度分布が定常状態に達した後, 浸透水流量, 冷却水流量, 各位置での温度を測定した。流量は計量槽による体積測定結果から算出した。また, 測度測定にはT形熱電対(0.32mm径)を使用し, 地盤内38点, HP管壁18点, 他12点で測定した。HPへの入熱量は冷却水流量と冷却ジャケット出入口の冷却水温度差とから求めた。

実験条件を表-2に示す。HP放熱条件(冷却水流量, 水温)をほぼ一定に保ち, 浸透水流速を5ケース, 浸透水水温を3ケース

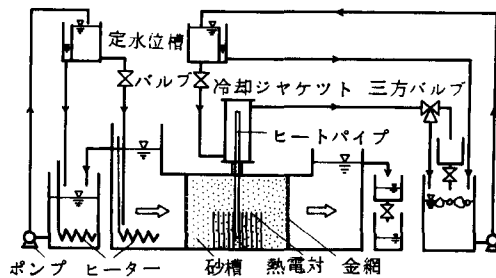


図-4 実験装置概略

表-2 実験条件

	Tf	Ud	Tc	qc
I	1 15.2	0.591×10 ⁻³	0.58	20.3
	2 15.9	0.832	1.15	19.5
	3 16.5	1.99	1.10	19.5
	4 16.4	4.03	0.65	18.8
	5 16.1	7.71	0.80	19.9
	6 16.0	12.5	0.98	20.3
II	1 20.3	0.405	0.95	19.3
	2 19.9	0.929	1.32	18.4
	3 19.5	2.02	0.83	20.7
	4 19.9	4.33	1.05	18.2
	5 19.7	8.63	1.10	18.3
	6 19.8	13.7	1.23	18.8
III	1 25.3	0.686	1.02	22.0
	2 25.1	1.51	0.80	22.0
	3 25.1	2.95	1.83	19.5
	4 25.0	3.95	1.35	18.6
	5 25.1	10.3	1.80	18.2
	6 25.1	17.1	1.55	20.1

(°C) (cm/s) (°C) (cm³/s)

中の記号は、 T_f :浸透水接近水温、 U_d :浸透水流速(断面平均流速)、 T_c :冷却ジャケット内平均水温、 q_c :冷却水流量を意味する。

4.2 実験結果及び考察

4.2.1 H P熱輸送量

H P熱輸送量(入熱量)と浸透水流速との関係を浸透水温をパラメータとして示したものが図-5である。浸透水流速が増加するにつれ、また、浸透水温が上昇するにつれ、H P熱輸送量が增大することが確認される。浸透水流速の増加はH P蒸発部の熱伝達率の増加をもたらし、浸透水流速一定の条件下での浸透水温の上昇は浸透水温とH P蒸発部平均温度との差の増大を起こすため、H P熱輸送量が増すと考えられる。

4.2.2 H P蒸発部平均温度

図-6は浸透水温とH P蒸発部平均温度との差と浸透水流速との関係を示すものである。H P放熱条件、浸透水温が一定であれば、浸透水流速が増すにつれ、温度差は減少する。H P熱輸送量は $Q = \alpha_{em}(T_f - \bar{T}_e)A$ (A :H P外壁表面積)により求まるが、図-5のように浸透水流速が増すにつれH P熱輸送量が增大するには、浸透水流速の増加に伴う温度差($T_f - \bar{T}_e$)の減少分を平均熱伝達率の増加分が上回るためであることがわかる。H P蒸発部平均熱伝達率は浸透水流速と地盤材料の性質とで定まるから、H Pの放熱条件を変化させH P蒸発部の温度を低下させられれば、より多量の熱量をH Pにより汲み出しうることが考えられる。

4.2.3 温度分布

(a) 地盤内温度分布

浸透水温がほぼ同一で浸透水流速が異なる場合の地盤内温度分布の測定例を図-7に示す。H P前面で等温線が密に、背面で下流に引き延ばされること、また、浸透水流速が増すにつれてその傾向が顕著になることが確認される。実験Ⅱ-5の等温線がややいびつなのは、地盤の締固めの不均一さに依ると思われる。

(b) H P管壁温度の管軸方向分布

図-7と同一の実験ケースにおけるH P管壁温度の管軸方向分布の測定結果を図-8に示す。

H P管壁温度は、冷却ジャケット内では冷却水流入口に対向する位置で複雑な分布となるが、地盤内では前面よどみ点(F-線)、背面よどみ点(B-線)に沿ってとも一様となっている。また、前面と背面との温度差は浸透水流速が増加

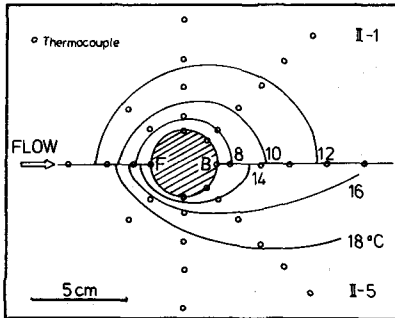


図-7 地盤内温度分布

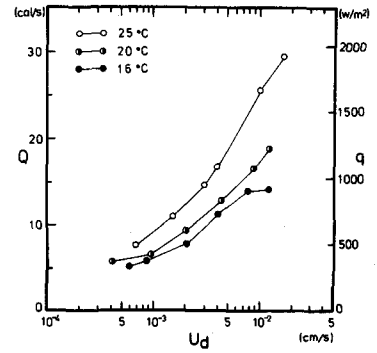


図-5 $Q \sim U_d$ の関係

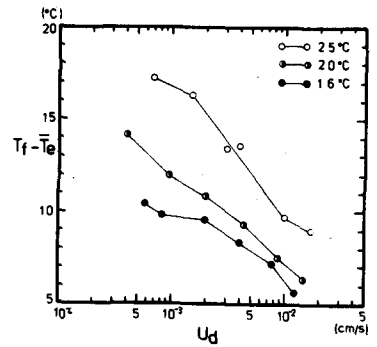


図-6 $T_f - \bar{T}_e \sim U_d$ の関係

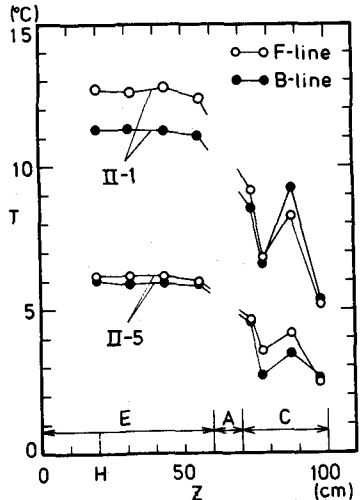


図-8 H P管壁温度の軸方向分布

するにつれ増す。これらの結果のうち前者は、HP埋設部全長が蒸発部として有効に作動していること、及び、地盤内のHPの熱収支については水平2次元内の問題として取扱ってよいことを意味している。なお、図中のE、A、Cはそれぞれ蒸発部、断熱部、凝縮部を表わす。

(a) HP蒸発部外壁温度の周方向分布

HP蒸発部外壁温度の周方向分布はHP自体の特性（材質、作動流体の種類、封入量等）とHPの放熱条件とによって定まるものである。図-9はベクレ数が同程度で浸透水水温の異なる実験で得られた結果の例である。HP周方向の温度分布を $\cos \theta$ で近似すると図中の実線となり、 $\cos \theta$ での近似が無理ではないと考えられる。図-10は無次元の温度振幅(σ)とベクレ数との関係を表わすものである。 $Pe=10$ で $\sigma=0.14$ 程度であり、ベクレ数が減少するにつけ、温度分布の影響は小さくなり、HP蒸発部管壁温度は一様であるとみなしてもよくなることが知られる。

4.2.4 HP蒸発部外壁平均ヌセルト数

図-11はHP蒸発部外壁平均ヌセルト数とベクレ数との関係を示したものである。実験では地盤の有効熱伝導率を測定していないので、ここではその値として $0.006 \text{ (cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg)}$ を与えた。図中には他の実験データ（地盤材料：粒径： $d_{50}=0.41 \text{ mm}$ ，透水係数： 0.14 cm/s ，間隙率： 50.6% ，有効熱伝導率： $0.005 \text{ (cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg)}$ ）をも記してある。また、図中の実線は理論式(22)を表わし、破線はFEM数値解であり、実験装置の側壁の温度分布を境界条件として入力したものを、点線は側壁の境界条件として断熱条件を用いた数値解を意味する。実験値とFEM-1と比較すると、ベクレ数が小さくなるにつれ良好な一致がみられる。地盤の均一性、熱量測定精度、有効熱伝導率の仮定等から考えると、実験値とFEM-1の数値解とは良い一致が得られたと判断される。また、FEM-1とFEM-2とを比較すると、両者の差の分だけ側壁からの熱の流入があったと考えられる。さらに、理論解とFEM-2との差が主として実験装置の大きさの影響であると考えられる。

5. 結論

定常なダルシー流中に置かれたHP蒸発部の平均ヌセルト数の評価方法を得る目的で、室内実験、理論的考察、FEMによる数値計算を行った。その結果、得られた知見は以下のように整理される。

- (1) 飽和浸透流の存在する地盤内に設置されたHP蒸発部外壁の温度は管軸方向に一様であることが確認された。これにより、HPまわりの熱収支の問題を水平2次元内の問題として取扱ってよいことが

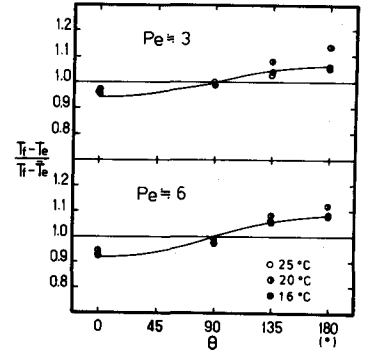


図-9 T_e の周方向分布

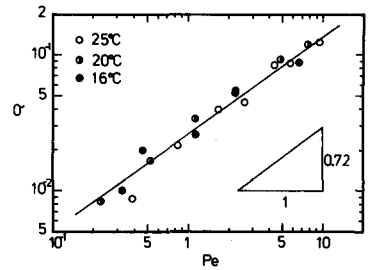


図-10 $\sigma \sim Pe$ の関係

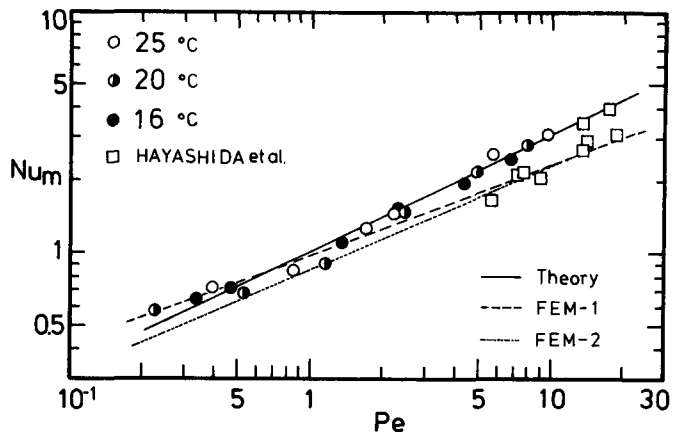


図-11 $Num \sim Pe$ の関係

示された。

- (2) 無限広さの地盤における飽和浸透流のエネルギー方程式を速度ポテンシャルと流れ関数との直交座標系で記述した。そして、主流方向の熱伝導を移流による熱輸送に較べ無視しうる場合、逆に、移流による熱輸送が熱伝導に較べ無視しうる場合について局所ヌセルト数、平均ヌセルト数を与える式を得た。
- (3) エネルギー方程式を有限領域に適用させるために FEM による定式化を行った。HP 蒸発部外壁の平均ヌセルト数とベクレ数との関係について数値解と実験値との比較を行った。その結果、両者はかなり良好な一致をみた。また、実験値には実験装置の大きさ、断熱方法の影響が入っていることが確認され、それらの大きさが見積られた。

今後の課題として次のことが挙げられる。

- (1) FEM による数値解析により、無限広さの地盤中におかれた場合の HP 蒸発部の局所ヌセルト数、平均ヌセルト数とベクレ数との関係式を得る。
- (2) 地盤材料の異なる場合について実験を行い、理論解と FEM の数値解との比較を行う。
- (3) 地盤の有効熱伝導率を実測する。
- (4) FEM による数値解析により、HP 埋設間隔等の影響を評価する。

なお、今回使用した HP の伝熱特性を示すものとして、HP 熱輸送量と HP 蒸発部平均温度と凝縮部平均温度との差の関係を図-12 に示す。この HP 自体の等価熱伝導率 ($\lambda_p \equiv QL / A(\bar{T}_e - \bar{T}_c)$), L : 蒸発部と凝縮部の中心距離, A : HP 内側断面積, $\bar{T}_c$: HP 凝縮部平均温度) を求めると、実験範囲内では $1 \sim 1.6 \times 10^4$ ($\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{deg}$) となり、銅のそれの約 30 ~ 50 倍である。

本論文をまとめるにあたり、長岡技術科学大学大学院生 後迫茂君に実験・データ整理で協力を得た。記して謝意を表す。

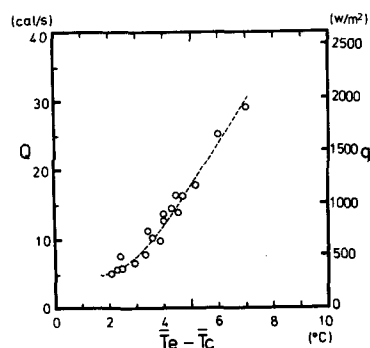


図-12 $Q \sim \bar{T}_e - \bar{T}_c$ の関係

参考文献

- 1) 大島耕一, 松下 正, 村上正秀: ヒートパイプ工学, 朝倉書房, 1979
- 2) 山西哲夫, 清水定明: ヒートパイプとその応用, オーム社, 1980
- 3) 田中 修: ヒートパイプを利用した融雪・凍結防止システム, ヒートパイプ協力設立記念論文集, pp. 33-46, ヒートパイプ協会, 1982
- 4) 忽那泰章: ヒートパイプの伝熱特性と地中蓄熱システムへの応用, ヒートパイプの最近の進歩と展望, ヒートパイプ協会, 1983
- 5) Grosh, R.J., R.D.Cess: Heat Transfer to Fluids With Low Prandtl Numbers for Flow Across Plates and Cylinders of Various Cross Sections, Trans. ASME, vol. 80, pp. 667-676, 1958