

長岡技術科学大学 学生員 後迫 茂
長岡技術科学大学 正員 河原 能久
長岡技術科学大学 正員 後藤 敏

1. はじめに 土壌のもつ自然エネルギーや温泉排水のエネルギーを利用したヒートパイプ(HPと略記)融雪・凍結防止システムの開発が進められている。本研究は、HPを地下水流れのある地盤に鉛直に設置し、地熱を熱源とする場合を取扱う。HP蒸発部が定常状態で汲み出す地熱量の算出方法を得ることを目的としている。地盤内及びHP蒸発部への伝熱解析は、より現実的なHP埋設方法への拡張を考慮し、有限要素法による数値解析とした。また、数値解を実験結果と比較し、解析方法の妥当性を検討した。

2. 実験概要 実験装置概略を図-1に示す。地盤のモデルとして水槽中央に砂槽(80×70×30 cm, $k = 0.11 \text{ cm/s}$, $e = 0.47$, $C_s = 2.05$)を設け、その中央にHP(スチール・アンモニア形, 100 cm, 外径34 mm, 蒸発部60 cm)を鉛直に埋め込んだ。地下水流れは地盤面端に一定水位差を与えることにより生じさせた。HP凝縮部にはジャケットを取り付け、一定量の冷却水を供給し放熱させた。水温はヒーター、水を用い温度調節した。実験では表-1に示すように、地下水流速、水温を変化させ、HPへの入熱量・地盤内温度分布・HP管壁温度等を測定した。

3. 数値解析

3.1 仮定 以下の仮定を設けた。

- (1) 地下水流速分布、地盤内温度分布は水平2次元である。
- (2) 地下水流れは、飽和しており、ダルシー則に従う。
- (3) 地盤材料と水はいたる所で熱平衡にある。
- (4) 地盤材料と水の物性値(熱伝導率、透水系数等)は変化しない。

3.2 基礎式及境界条件 解析領域は実験地盤の半分であり、座標系とともに図-2に示す。基礎式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$k \left(\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \alpha_e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

(h : ピエゾ水頭, t : 温度, k : 地盤の透水系数)
(α_e : 地盤の有効温度伝導率 ($\alpha_e = 0.005 \text{ cm}^2/\text{s}$))

境界条件は以下のようである。

$$\left. \begin{aligned} -L/2 \leq x \leq L/2, \quad y = B/2 \quad & \text{に} \quad t = T_s(x), \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \\ D/2 \leq x \leq L/2, \quad y = 0 \quad & \text{に} \quad \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \\ -L/2 \leq x \leq -D/2, \quad y = 0 \quad & \text{に} \quad \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表-1 実験条件

		Tf	Ud	Tc	qc
A	1	16.2	0.65	0.25	20.4
	2	15.6	1.67	0.55	21.1
	3	15.4	3.20	0.30	23.0
	4	15.4	7.32	0.25	22.9
	5	16.9	14.1	0.49	22.4
	6	16.8	22.7	0.50	22.7
B	1	21.0	1.24	0.68	20.9
	2	20.2	2.83	0.53	21.7
	3	19.9	4.60	0.48	22.9
	4	19.6	7.75	0.33	22.6
	5	19.2	14.7	0.45	22.0
	6	19.9	16.8	0.70	21.4
C	1	25.4	2.14	0.75	21.4
	2	25.0	3.58	1.10	21.1
	3	24.7	5.79	0.60	22.1
	4	24.6	9.39	0.93	22.2
	5	24.6	17.1	0.90	20.6
	6	24.6	25.3	0.88	21.6

(°C) × 10⁻³ (°C) (cm³/s)
(cm/s)

(Tf: 上流端の地下水温, Ud: 断面平均地下水流速)
(Tc: 冷却ジャケット内水温, qc: 冷却水流量)

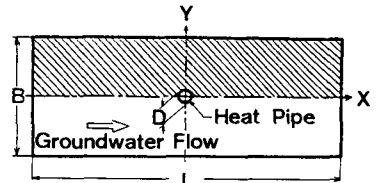


図-2 解析領域と座標系



図-3 要素分割

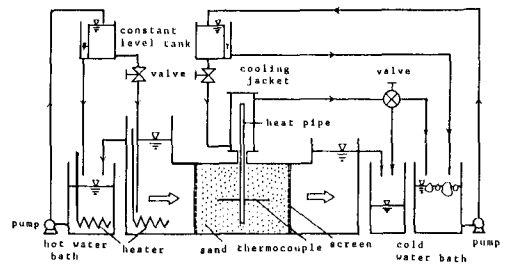


図-1 実験装置概略

$$\left. \begin{aligned} x &= -L/2, 0 \leq y \leq B/2 \text{ に } t = T_f, h = H_u \\ x &= L/2, 0 \leq y \leq B/2 \text{ に } \partial t / \partial x = 0, h = H_d \\ x^2 + y^2 &= D^2/4 \text{ に } t = T_e(x, y), \partial h / \partial n = 0 \end{aligned} \right\}$$

($T_s(x)$:水槽内壁温度, $T_e(x, y)$:HP外壁温度)
 H_u :上流端水位, H_d :下流端水位)

3.3 要素分割 要素としては2次元シンプレックス要素を用い、解析領域を節点数345、要素数592に分割した。分割状況を図-3に示す。

4. 数値解と実験結果との比較

4.1 地盤内温度分布

図-4は、HP前面・背面のよどみ点の延長線上の温度分布を示すものである。地下水流速が増すにつれ、HP前面の温度勾配が大きくなること、HP管壁温度が上昇することが見られる。数値解と実験値とはよく一致している。

図-5は地盤内温度分布を平面的に示すものである。地下水温はほぼ同一で、流速が小さい場合を図-(a)に、大きい場合を図-(b)に示す。数値解(破線)と実験値(実線)とは良好に一致している。等温線はHP前面で密に、背面で流下方向に引き延ばされること、地下水流速が増すにつれてその傾向が顕著になることが知られる。

HPに流入する熱量(Q)は蒸発部外壁平均熱伝達率(α_{em})、蒸発部外壁平均温度(T_e)、蒸発部長さ(L_e)を用いると次式で表わされる。 $Q = \alpha_{em} (T_f - T_e) \pi D L_e$ により、HPへの入熱量を求めるためには、 α_{em} 、 T_e と地下水流速との関係を知ることが不可欠である。 T_e は放熱形式、HP種類を与えてはじめて決定されるものであるため、ここでは α_{em} について検討する。図-6は α_{em} と地下水流速との関係を平均ヌセルト数($Num = \alpha_{em} D / \lambda_e$)とペクレ数($Pe = U_d D / \alpha_e$)との関係で示したものである。上流端の地下水温の影響は顕著ではなく、いずれも数値解(実線)と良好に一致をみている。数値解は上流端の地下水温が20°Cの場合に対応するものである。(λ_e:地盤の有効熱伝導率)

図-7は蒸発部外壁の熱伝達率の分布をより詳細に検討したものである。図中では局所ヌセルト数($Nu(\theta) = \alpha_e(\theta) D / \lambda_e$)と前方よどみ点からの角度(θ)との関係で示してある。HPへの入熱は、HP前面で大きいこと、ペクレ数の増加に伴い、その傾向が顕著になることがわかる。

5. おわりに HPへの流入熱量の算出に不可欠な $Num \sim Pe$ の関係を数値解析により求めることができた。今後は解析領域をHP管壁内にまで広げ、より実際的なHP埋設方法に対し、 $Num \sim Pe$ 関係式を得る予定である。また、非定常解析を試みる予定である。

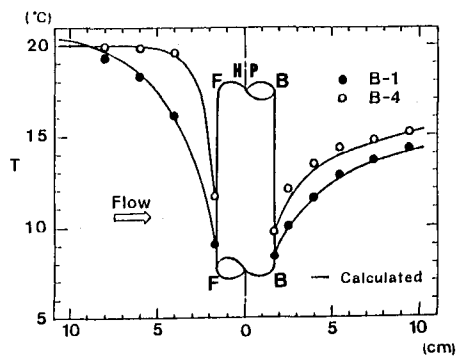
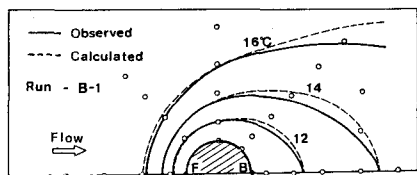
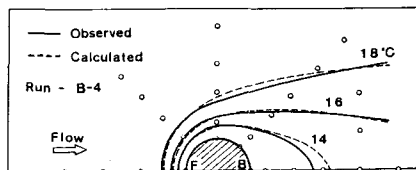


図-4 流下方向地盤内温度分布($\theta = 0^\circ, 180^\circ$)



(a) $T_f = 21.0^\circ\text{C}$, $U_d = 1.24 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$



(b) $T_f = 19.6^\circ\text{C}$, $U_d = 7.75 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

図-5 地盤内温度分布

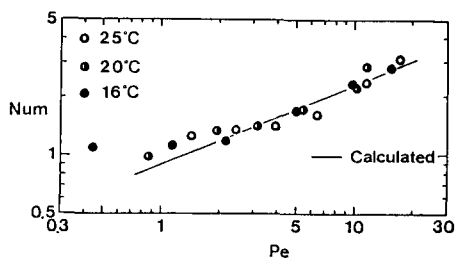


図-6 HP蒸発部平均ヌセルト数

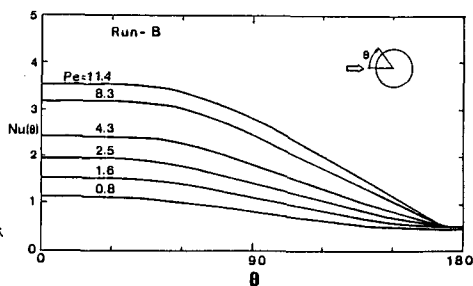


図-7 HP蒸発部局所ヌセルト数