

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

長岡技術科学大学 正員 河原 能久

## 1. まえがき

伝熱素子としてヒートパイプを使用する路面融雪システムの実用化が検討されつつある。本報告は、そのシステムへの入熱源として地下水温を利用する場合の定常時の利用可能熱量を求めることを目的としたものであり、地下水流速、水温が、ヒートパイプによる熱輸送量、ヒートパイプ加熱部熱伝達率、地盤内温度分布に及ぼす影響を実験的に検討した結果の第1報である。

## 2. 実験概要

(1) **実験装置** 実験装置の概略を図-1に示す。地盤のモデルとして、水槽中央に砂槽(寸法:長さ80 cm, 深さ70 cm, 幅30 cm, 透水係数:  $0.167 \text{ cm/s}$ , 砂粒径:  $d_{50} = 0.41 \text{ mm}$ )と設けた。また、地下水流は砂槽両端に水頭差を与えて生じさせた。砂槽前面と温水タンク内には投込みヒーターを設置し、一定水温を保つように制御した。ヒートパイプ加熱部にはジャケットを取り付け、冷水循環による放熱方式とした。断熱処理は砂槽、温水循環装置、冷却水循環装置(冷却ジャケット含)に施した。なお、砂槽上面での砂粒移動防止として上部に細かい金網を設置した。表-1に使用したヒートパイプの仕様を示す。

(2) **実験条件** 表-2に実験条件を示す。ヒートパイプ各部長さ、冷却水流量、水温と一定とし、浸透水温、流速とそれぞれ3ケースずつ変化させた。実験の地下水温は13℃程度であると考えられる。

(3) **測定項目** 砂槽内温度分布が定常に達した後、浸透水流量、冷却水流量、各点温度を測定した。なお、温度測定にはT形熱電対(径0.32 mm)を使用し、58箇所(砂槽内30点、ヒートパイプ管壁16点、他12点)の温度を15分間隔で測定した。また、ヒートパイプ管壁への熱電対の埋め込みは、深さ1 mm程度の孔とあり、接着剤固定とした。

## 3. 実験結果及び考察

(1) **温度分布** 図-2は実験Ⅲ-7における砂槽内温度分布を示すものである。図よりヒートパイプ前面で等温線が密に、背面で下流側に引き延ばされ

表-1 ヒートパイプ仕様

|      |           |
|------|-----------|
| 管材質  | スチール      |
| 作動液体 | アンモニア     |
| 環流方式 | 重力        |
| 全長   | 1000 mm   |
| 外径   | 34 mm     |
| 肉厚   | 34 mm     |
| ウイック | なし(コイル封入) |
| 封入流量 | 蒸気空間の約5%  |
| その他  | 外壁に防錆塗装   |

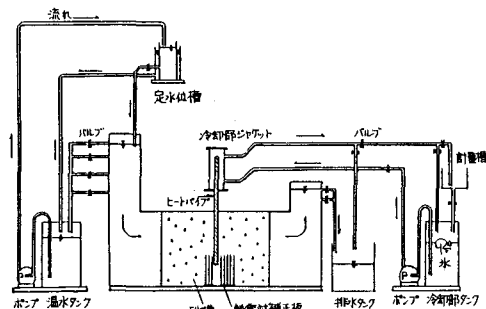


図-1 実験装置概略

表-2 実験条件

|       | I    |      |      | II   |      |      | III  |      |      |                               |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------------|
|       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |                               |
| 加熱部長さ | 60.0 |      |      |      |      |      |      |      |      | (cm)                          |
| 断熱部長さ | 10.0 |      |      |      |      |      |      |      |      | (cm)                          |
| 放熱部長さ | 30.0 |      |      |      |      |      |      |      |      | (cm)                          |
| 浸透水温  | 16.9 | 16.9 | 16.5 | 19.3 | 19.5 | 19.7 | 24.3 | 24.7 | 24.8 | (°C)                          |
| 水温差   | 5    | 10   | 15   | 5    | 10   | 15   | 5    | 10   | 15   | (cm)                          |
| 浸透流速  | 1.31 | 2.35 | 3.23 | 1.06 | 1.94 | 2.37 | 1.11 | 2.20 | 2.61 | $\times 10^3 (\text{cm/sec})$ |
| 冷却部水温 | 0.75 | 1.50 | 0.35 | 1.75 | 1.35 | 1.65 | 1.25 | 1.05 | 1.35 | (°C)                          |
| 冷却部流量 | 18.9 | 18.6 | 18.9 | 16.1 | 18.2 | 20.9 | 20.1 | 18.9 | 19.8 | ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  |

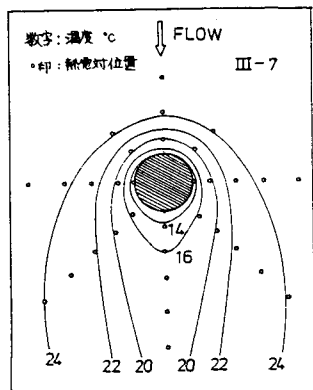


図-2 砂槽内温度分布

ている様子が見られる。浸透流速が増すにつれ、等温線の張り幅が狭くなり、後方へ引き延ばさるようになる。図-3は、実験Ⅲ-7におけるヒートパイプ管壁温度分布を示すものである。貯槽内（加熱部）においては管軸方向へ温度変化がほとんどみられない。また、前面が背面よりも $2^{\circ}\text{C}$ 程度高くなっている。この結果は、ヒートパイプ埋設部全体が加熱部として有効に作動していることを意味し、ヒートパイプ利用の有効性を示すものと考えられる。ジャケット内（冷却部）における温度分布のうち、上流側の1点が下流側のものより下に位置するが、これは冷却水入口に面しているために生じたものである。冷却部では、先端に向い右下りの傾向を示している。実験範囲内では放熱部温度は冷却水温より大きく、全長が放熱部として作動している。

(2) 熱輸送量 熱輸送量と浸透流速との関係を示したものが図-4である。横軸のレイノルズ数  $Red$  は  $ud/\nu$  である。（ $u$ : 流体流速、 $d$ : ヒートパイプ管径、 $\nu$ : 水の動粘性係数）この図より、浸透流速が増加するにつれ熱輸送量が増すことがわかる。同図には浸透水温を変えた結果が記されている。浸透水温が上昇すれば熱輸送量は増大する。すなわち、熱輸送量の増加はヒートパイプ加熱部熱伝達率の増大、浸透流水温とヒートパイプ管壁温度との温度差の増加による。

(3) ヒートパイプ加熱部熱伝達率 ヒートパイプ加熱部熱伝達率と浸透流速との関係を表わしたものが図-5である。縦軸のヌセルト数  $Nud$  は  $Qc/d\lambda$  である。（ $Qc$ : ヒートパイプ加熱部熱伝達率、 $d$ : ヒートパイプ径、 $\lambda$ : 水の熱伝導率）流速が増すにつれ、 $Nud$  ( $Qc$ ) が増加することがわかる。また、浸透水温が上昇するに伴い  $Nud$  が増す傾向がある。この結果はプラントル数の変化では説明できず、加熱部の熱伝達のモデル化、及び精度の高い実験結果を得た後検討するものとする。なお、図中の一点鎖線は一様流れに垂直に置かれた円柱の熱伝達率を与える式を示している。

$$Nud = 0.92 (Red)^{0.385} Pr^{1/3} \quad (\text{MacAdamsの式})$$

(4) ヒートパイプ自体の熱伝達率 図-6はヒートパイプ自体の伝熱特性として熱伝達率  $\alpha_p$  と熱輸送量との関係を示している。ここで熱伝達率は次式で定義される。 $\alpha_p = Qc / A \cdot \Delta T_{ec}$  ( $A$ : 蒸発空間面積、 $\Delta T_{ec}$ : 加熱部と放熱部管壁温度差) 図より、熱輸送量が増加するにつれ、ヒートパイプ自体の熱伝達率も増加すること、そのため、熱輸送が一層効率よく行われることがわかる。ヒートパイプの等価熱伝導率を求め、銅の値と比較する。等価熱伝導率  $\lambda_p (= Qc \cdot L / \Delta T_{ec})$  を求めると、測定範囲内では  $10,100 \sim 15,600 \text{ (kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{deg)}$  であり、銅の  $320 \text{ (kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{deg)}$  の30倍以上となり、低温度差でも多量の熱を輸送しうることが確認される。

## 5. あとがき

今後、実験精度を上げること、低流速まで測定範囲を広げること、温度場の数値計算を行う予定である。最後に、実験にあたり三井建設技術研究所の協力を得たことに記し謝意を表する。

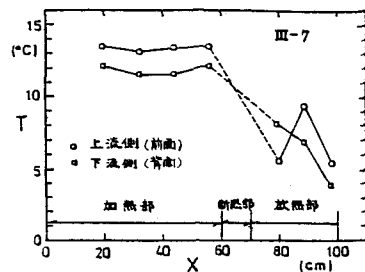


図-3 ヒートパイプ管壁温度分布

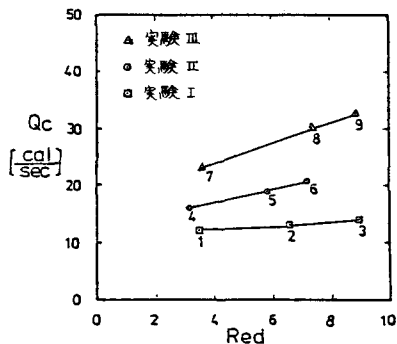


図-4 熱輸送量とレイノルズ数との関係

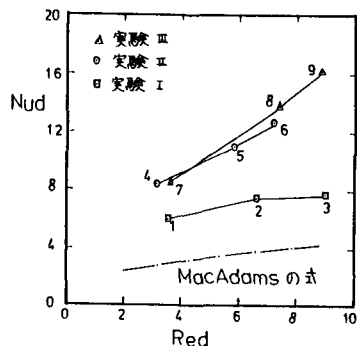


図-5 ヒートパイプ加熱部平均ヌセルト数とレイノルズ数との関係

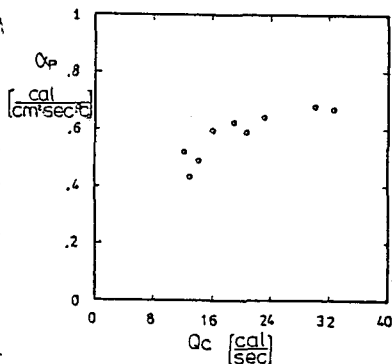


図-6 ヒートパイプ自体の熱伝達率と熱輸送量との関係