

埼玉大学工学部 正会員 ○佐藤 邦明
 埼玉県 萩野 隆一
 埼玉大学工学部 正会員 渡辺 邦夫

はじめに

地下における熱輸送現象は温泉学、地熱、地下熱貯留土木構造物など諸分野・問題に係って最近興味のもたれているものである。これらにおいて、大抵の場合に地下水と地盤・岩盤の熱伝播が一つの対象とされてくるが、周知のように一般に物質内では熱伝播様式は輻射、伝導、対流に區別され、三者の中でいずれかが支配的様式として論じうる。地下においては伝導と対流が支配的であると考えてよく、たとえば、水で飽和された多孔体中ではそこに温度差を生じると、空隙規模が小さいと伝導と自然対流が問題となり、空隙が小さいとほとんど伝導で流ってしまうことになる。また、飽和多孔体中に温水が浸入するとき強制対流、つまり熱密度流においては伝導、対流の両者が卓越した現象となる。

本研究は上述両者に注目して、特殊な設計を施した室内実験装置によって基礎的な二、三の熱伝播実験を行ったのでその一部を報告するものである。本報では特に熱伝導方程式の解と実験結果と比較・検討しつつ、現象モデルをどう考えればよいかについて考えてみる。

1. 実験装置と条件

実験装置は図-1に示すようなもので、大別して、(1)加熱・冷却部、(2)多孔体コンテナ、(3)温度調節水槽およびサーモスタット、(4)温度測定・記録部である。実験は多孔体コンテナの中に紙料(ガラス球、砂、標煤砂、ローム使用)を充てんして、その上下端に温度差をつけるか温水移流の実験で温水を定水頭で浸入させる。その様子は図-2に示したようであり、寸法やサーモスタットプローブの位置も図示されている。これら実験条件は次にのべる理論条件と同一にした。加熱・冷却部の温度は $-5 \sim 60^{\circ}\text{C}$ でいろいろな条件を与えた。

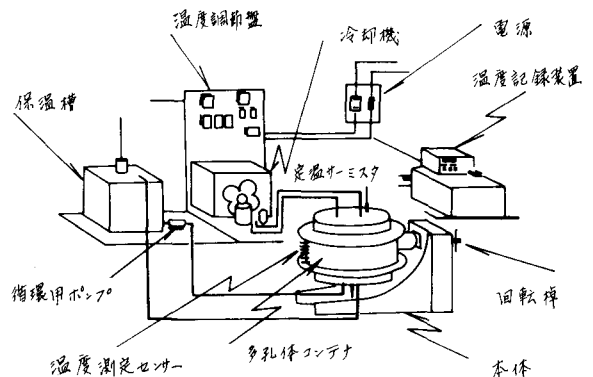


図-1 実験装置の概略

2. 理論と条件

上述したような実験条件に合わせて、理論解を求めるわけであるが、今回の研究では流体内温度差による自然対流は考えず、熱伝導方程式はフーリエ形式のものに注目した。

(1) 飽和多孔体の伝熱解

基本式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} ; \dots\dots (1)$$

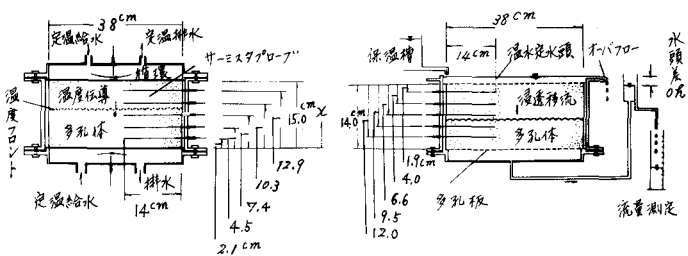


図-2 実験条件と理論条件

条件

$$X=0; T=T_0, X=l; T=T_e, t>0, t=0; T=T_i \text{ の下での解は}$$

$T=T_i$ の下での解は

$$T = T_0 + \frac{(T_e - T_0)}{l} X + \frac{4}{\pi} (T_i - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2}$$

$$e^{-a \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} X + \frac{2}{\pi} (T_e - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \frac{1}{S}$$

$$e^{-a \frac{S^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{S\pi}{l} X, \dots \dots \dots (2)$$

である。ここで、 T ; 温度、 X ; 距離、 t ; 時間、 a ; 温度伝導率、 T_0, T_e, T_i ; それぞれ上下端及び初期温度、 l ; 試料長である。

(2) 移流のある伝熱解

基本式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{(Sc)_f}{Sc} u \frac{\partial T}{\partial X} = a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \dots \dots \dots (3)$$

条件

$$X=0; T=T_0, X=l; T=T_e, t>0, t=0; T=T_i = T_e, X>0$$

の下で、解は

$$\frac{T - T_e}{T_0 - T_e} = \frac{e^{\frac{(Sc)_f u X}{a Sc} - \frac{(Sc)_f l u}{a Sc}} - e^{-\frac{(Sc)_f l u}{a Sc}}}{1 - e^{\frac{(Sc)_f l u}{a Sc}}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{S\pi} \frac{1}{1 + \left\{ \frac{(Sc)_f l u}{2S\pi a Sc} \right\}^2}$$

$$e^{\frac{(Sc)_f u X}{a Sc}} \sin S\pi \frac{X}{l} e^{-\left\{ \frac{a}{lu} S^2 \pi^2 + \frac{(ul)}{4a} \left\{ \frac{(Sc)_f}{Sc} \right\}^2 \right\} \frac{u}{l} t}, \dots \dots \dots (4)$$

である。ここで、 $(Sc)_f$; 流体比熱、 Sc ; 平均比熱、 u ; 流速である。

3. 結果と考察

実験結果の4例を図-3に示してあるが、これらは図-2に示した多孔体中の各点の温度経時変化が時間とパラメータに描かれたものであって、図中上2図はガラス球 $d_{50} = 0.8 \text{ mm}$ の場合であり、下2図は標準砂 $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$ の場合の移流のあるものである。特にガラス球の場合には下端を加熱した時は対流のため時間経過と共に温度分布が不安定となっていることが判かる。他の結果はすべて理論と同じ傾向をもつことが認められた。

温度伝導率 a の値は解曲線群と a のパラメーターに巻いておき、実験結果と同様に整理して比較して求める方法をとった。この方法により、飽和多孔体の場合、標準砂で平均的に $a = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$ 、ガラス球 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$ 、砂、 $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$ 、また、浸透移流のある場合、標準砂、 $a = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$ 、ガラス球 $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$ 程度の値であった。浸透流が $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ の範囲のためあまり両者に大差がなかった。特に、浸水移流のある場合の伝導は移流速度が小さいと流れによる輸送が小さいため、式(3)の左辺第2項を無視し得る。

参考文献

- 1) 小平吉男、物理数学、才=巻、若根 P 286 ~
- 2) 番取亮和、佐藤邦明; 地下熱密度流に関する基礎実験、第33回土木学会年講、昭和53年9月

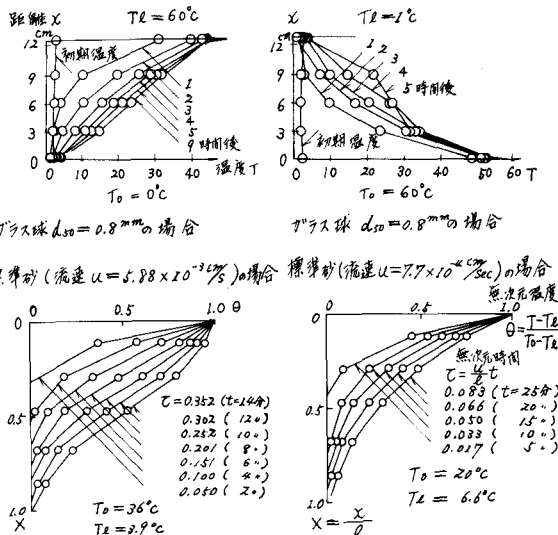


図-3 実験結果の代表例