

# 温水浸透に伴う多孔体中の 熱拡散過程と一相系熱輸送モデル

Single Phase Model on Heat Diffusion Process  
in Saturated Porous Media due to Hot-Water Seepage Flow

原田守博\*・高木不折\*\*・杉山陽一\*\*\*

By Morihiro HARADA, Fusetsu TAKAGI and Yoichi SUGIYAMA

This paper aims to evaluate the applicability of a single phase model for heat diffusion phenomena caused by saturated flow through porous media. These were based on laboratory experiments using vertical bead columns. Since permeability of bead column is increased by seepage of hot-water into cold porous media, a new method for the seepage experiment is adopted to fix Darcy velocity. The coefficient of heat diffusion,  $\kappa$ , which is a main parameter of the model was identified from the experimental data. The behavior of  $\kappa$  values under various conditions were investigated and was used as a means of evaluating the single phase model. In this research, it was shown that  $\kappa$  values are linear function of the heat transfer velocity. The relationship between the heat dispersivity  $\beta$  which characterizes  $\kappa$  values, and the spatial scale of flow is also discussed.

Keywords : heat diffusion process, porous media, heat dispersivity, single phase model, bead columns

## 1. はじめに

一般に地下水は、帯水層が地下深部に位置し恒温性を有するために、水温が年間を通じ安定しているという優れた水資源的価値をもっている。近年、こうした地下水の熱的特長を、地盤沈下などの障害を生ずることなく有効に利用する技術として、井戸注入による帯水層への熱エネルギー貯留技術 (Aquifer Thermal Energy Storage) が検討されている<sup>1)2)</sup>。A T E Sは、化石燃料に対する補助エネルギーとしてだけでなく、地表の廃熱処理や地下施設のクーリング技術としても可能性が期待されているが、一方で、広い地域においてA T E Sを実施した場合、地域の地下環境を人為的に乱す恐れがあり、実施にあたっては慎重に検討を重ねなければならない。本研究では、A T E Sの基本的な検討課題の一つである飽和浸透流に伴う熱拡散機構の解明をめざして、詳細な室内実験を行ったので報告する。

## 2. 一相系熱輸送モデルと本研究のねらい

浸透流に伴う熱拡散過程に関する研究はまだ緒に着いたばかりで数少なく、その物理機構は十分には解明

---

\* 正会員 工博 名城大学助手 理工学部土木工学科  
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科  
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

\*\*\* 学生員 名古屋大学大学院生 工学研究科博士前期課程 (同上)

されていない。これに対し、帯水層中の溶質の輸送過程は、地下水汚染問題とも関連して既に数多くの研究がなされ、現象を評価する解析モデルも一部で確立された段階にある。両者は、多孔体中の移流分散現象という点で類似の現象であり、溶質輸送における分子拡散と機構的分散は熱輸送における熱伝導と熱分散に対応する。いま仮に、流体の密度差に起因した自然対流は生じないという状況において、「固相と液相の温度が短時間に平衡に達する」という仮定が成り立つとすれば、よく知られた溶質輸送モデルを基礎とした一相系の熱輸送解析が可能となる。一相系熱輸送モデルの基礎方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right] - u^* \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1) \quad \kappa = \kappa_0 + \beta \cdot u^{*n} \quad (2)$$

ここに、 $T$ ：飽和多孔体の温度、 $\kappa$ ：熱拡散係数、 $\kappa_0$ ：温度伝導度<sup>3)</sup>（または温度伝導率<sup>4)</sup>）、 $\beta$ ：熱分散率（または熱分散長）、 $u^*$ ：多孔体と流体との熱交換のために生ずる遅れを考慮した浸透流速であり、 $n$ の値は一般に $n=1$ として取り扱われる。式(1)の右辺第1項は熱伝導・熱分散などの熱拡散効果を、第2項は移流による効果を表している。しかしながら、実際現象では、上記の仮定条件は必ずしも満たされないことが多いと考えられ、一相系の熱輸送モデルの有効性とその限界を評価することは工学的にきわめて重要な課題となる。そこで本研究では、多孔体粒子の粒径・浸透水の温度・流量の三者を変化させることによって様々な条件下での温水浸透実験を行い、熱伝導と熱分散の両者の効果を表す熱拡散係数の同定を通じて一相系解析モデルの評価を試みた。

### 3. 浸透実験の概要

本研究で行なった実験は、図-1に示すように、微細なガラスビーズを充填した鉛直飽和カラムA、B中に温水を浸透させ、埋設した温度センサーによって熱の拡散状況を計測するものである。カラムを鉛直にしたのは、他の研究者による実験<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>と同様に、流体の温度密度差による自然対流の発生を防ぐためであり、温水は上方から動水勾配に従ってカラム内を流下する。カラムの材質は温水浸透に伴う側方への熱損失を極力減少させるために、熱伝導性が高く熱容量の小さいものとして、肉厚1mmのステンレス管（内径10cm、全長50cm）を用い、さらにカラムや温水タンク等には化学繊維による断熱材が施してある。温水タンクにはコンピュータによって制御されたパイプヒーターが設置され、温水の温度は所定の値に保持される。

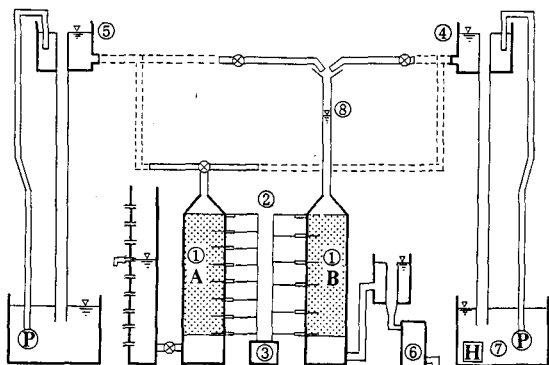


図-1 実験装置の模式図

- ① ビーズカラム ② 温度センサー ③ データロガー
- ④ 温水タンク ⑤ 冷水タンク ⑥ 面積流量計
- ⑦ ヒーター ⑧ 水頭調節パイプ

実験は、まず左側の冷水タンク⑥から冷水をカラム中へ浸透させ、定常状態になったのを見計らって右側の温水タンク④に切り替え、温水を浸入させる。このとき、高水槽からカラムへの水供給の方法として、定水頭法と変水頭法の二つの方法を採用した。定水頭法は、カラムAのように、水位が一定に保たれた二つの高水槽（温水および冷水）とカラムを飽和したパイプでつなぐことにより、カラムに対して一定の動水勾配で浸透させるものである。変水頭法は、カラムBのように、カラムの上部に細いパイプ⑧を立て、その中に同じ流量の冷水または温水を別々に流すものであって、二つの高水槽からの流出量を実験開始前に同一値になるようにバルブで調節しておくことにより、カラムに対し一定流量を供給する方法である。この変水頭法は、ビーズ層の透水係数が温水浸透に伴い時間的に増大することを想定して、カラム上部のパイプ内水位を自由

に変動させることによって、透水係数の変化による流量の変動を抑制することを目的としたものである。その際に、流量が安定しているか否かは、カラム下端に設置した面積流量計⑥によって確認される。

実験で用いたガラスビーズは、平均粒径が 0.3, 0.6, 1.0 mm という 3 種類のものであり、いずれも均等係数がほぼ 1.0 という均一な粒度分布をもっている。また、温度センサーは K 型熱電対（茅野電気(株)製）であり、図のようにカラム側方よりビーズ層に挿入してカラムの中心部分の流体温度を測定した。水温データはデータロガー③を経てコンピュータに集録され、0.1 度の精度で表示される。そして、後述するように、熱輸送モデルによる計算結果との比較や熱拡散係数の同定といった解析処理にかけられる。

#### 4. 定水頭実験とその問題点

温水浸透実験の主要なデータとして、各温度センサーでの温度上昇曲線が得られる。これらの温度上昇過程において、各センサー温度が最大上昇幅の 50% に達した時刻すなわち温水フロントが通過した時刻を、センサーの埋設位置との関係でプロットしたものが図-2 である。この図によると、プロットはセンサー位置が下方に向かうにつれて直線から下側にシフトしている。すなわち、温水フロントの降下速度は時間的に一定ではなく、カラム内へ温水が侵入するにつれて流速が徐々に速くなる様子が認められる。

カラムの動水勾配を一定に保っているにも拘らず、このような現象が起こるのは、透水係数が温水の浸透によって変化しているためである。言うまでもなく、透水係数  $K$  は浸透する流体の動粘性係数  $\nu$  をその内に含んでおり、 $K = k \cdot g / \nu$  と表される。ここに、 $k$  は多孔体の間隙構造によって規定される固有透過度で一定値であるが、 $\nu$  は温度に対して大きく変化する。図-3 は、 $\nu$  を物理定数として計算することによって得られる  $K$  の変化曲線に加えて、3 種類のビーズに対し種々の水温において行った透水試験の結果をプロットしたものである。これによると、透水係数  $K$  は水温の上昇につれ、僅かながら下向きに凸の曲線を描いて増大することがわかる。

今回の実験では、温水がカラムの上部より冷水を排除しつつ降下するので、ある時刻におけるカラム内は、図-4 のように冷水部と温水部とに大きく分かれた状態となる。このとき、カラム全体の透水係数  $K_m$  は次式で表すことができる。

$$K_m = \frac{L}{x/K_2 + (L-x)/K_1} = \frac{k g L}{x(\nu_2 - \nu_1) + L\nu_1} \quad (3)$$

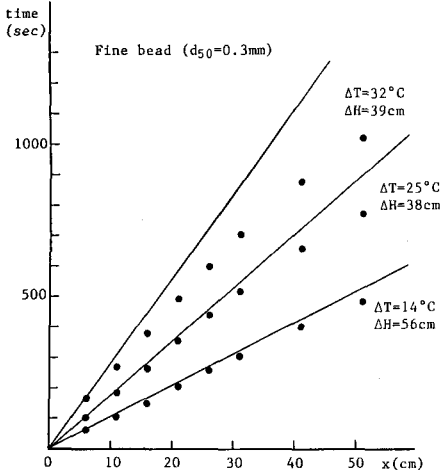


図-2 センサー埋設位置と温水フロントの通過時刻との関係（定水頭実験）

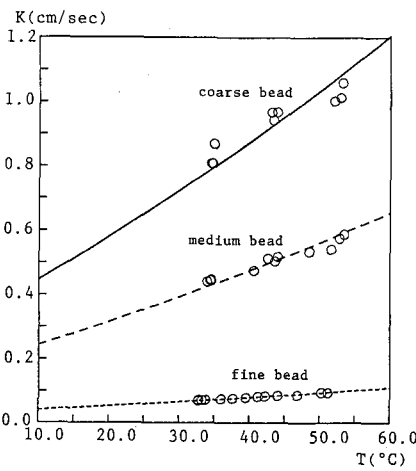


図-3 水温上昇による透水係数の増大

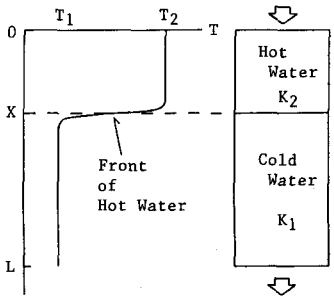


図-4 カラム内の温度分布と透水係数分布

ここに、 $L$ ：カラムの全長、 $x$ ：温水フロントの降下長さ、 $K_1, K_2$ ：冷水および温水が占める部分の透水係数、 $\nu_1, \nu_2$ ：冷水および温水の動粘性係数である。図-5は、冷水温度 $T_1$ が $10^\circ\text{C}$ のときに、温度 $T_2=15\sim 50^\circ\text{C}$ の温水が浸透する場合の $K_n/K_1$ の変動を上式をもとに求めたものである。これによれば、 $K_n$ は温度差が $5^\circ\text{C}$ 程度のうちはほとんど増大しないが、 $T_2=50^\circ\text{C}$ では温水フロントの降下に伴って分数関数的に急増し、フロントが末端にまで到達する頃には $K_1$ の2倍以上にも増大する。すなわち、動水勾配を一定とした条件下での実験では、浸透中に移流速度が大きく変動し、現象は強い非定常性をもつことになる。

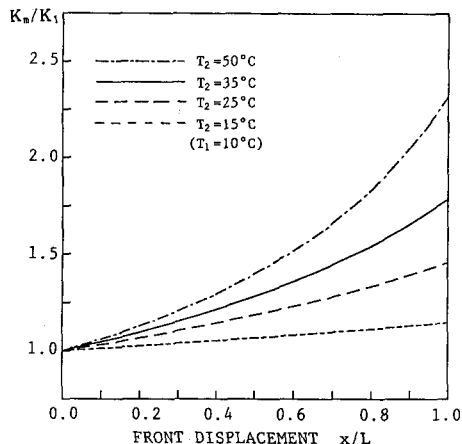


図-5 温水フロントの進行に伴うカラム全体の透水係数の増大

今回検討の対象としている解析モデルでは、式(2)に示したように、熱拡散係数とりわけ熱分散項の中に移流速度 $u$ が含まれており、流速の時間的変動は熱拡散係数そのものの変動を生じて、現象の解析を著しく複雑なものにする。本研究のように、実験データから解析モデルのパラメータを同定し、さまざまな実験条件下でのパラメータ値の安定性を尺度として熱拡散モデルの有効性評価を行うとする場合には、温水浸透下においても移流速度を一定とするような実験的工夫が必要となる。藤縄<sup>3)</sup>はその対策として、水頭設定タンクを時間的に上方へ移動させることを試みているが、ビーズが粗粒で実験全体が数分で終るような条件下では精度の高い調整は困難である。そこで本研究では、新しい試みとして、カラムへの水供給を前述したような変水頭法によって行うこととした。

## 5. 移流速度の定常化を目的とした変水頭実験

### 5-1 実験上の課題

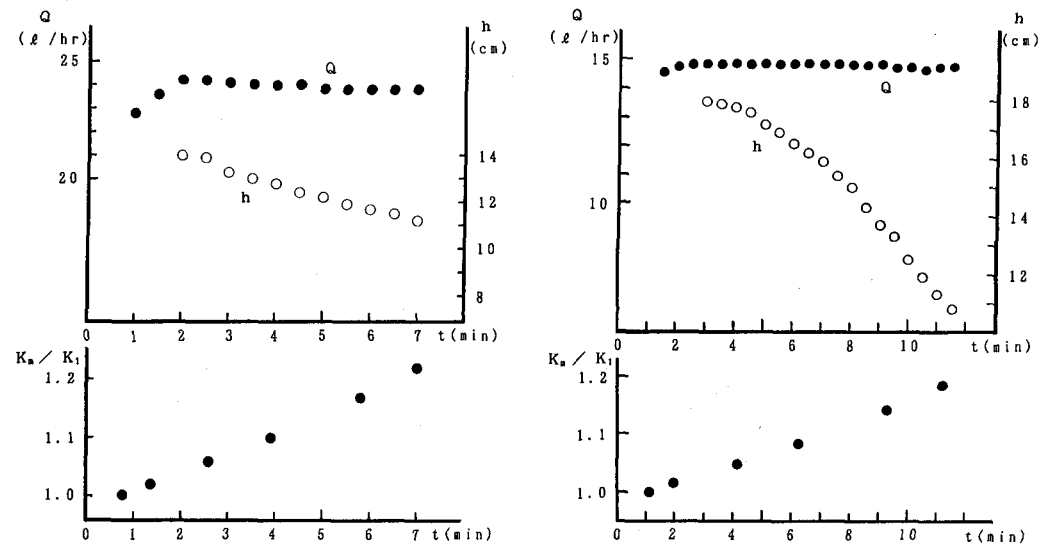
変水頭法による水供給は、カラムから鉛直に細いパイプを立て水面を自由に昇降させることによって、ビーズ層の透水係数の変動を動水勾配の変動として吸収しようとしたものであるが、実際に行うには二つの検討課題が生じてくる。一つはカラムから上方に立てた水頭変動パイプの内径である。パイプが太すぎると、高水槽から一定流量を流しても、パイプ内の水面変化による貯留量が大きく浸透流量の減少を招く。逆にパイプが細すぎると、高水槽からの流水の不安定性によってパイプ断面が塞がれることが起こりうる。今回の実験では、内径の異なる数本のパイプの中から対象とする流量による閉塞が常に生じない最も細いものを選び、パイプ内の貯留効果を極力小さくすることとし、結果的に内径7mmのものをを用いた。

変水頭法のもう一つの問題はパイプの長さである。パイプは透水係数の変動に応じた水頭変動分の長さを少なくとも必要とする。しかし、長すぎると、冷水から温水に切り替えたときにカラムへの温水供給が遅れるだけでなく、パイプ内で両者が混合してカラムへ供給される温水温度が緩やかに上昇する分布をもったものになり、境界温度としてステップ的な温度変化を与えることができない。この問題については、解析の際の境界条件としてカラム上部の温度センサーの測定値を与えることによって取り扱った。

### 5-2 流量の定常化

変水頭法の実験結果として、流量とパイプ内水位の時間的変化のデータ例を図-6に示す。左図は、粒径0.6mmのビーズ、右図は0.3mmのビーズを用いたもので、温度差はどちらも約 $10^\circ\text{C}$ である。上の図中の●印は流量データ、○印がパイプ内水位の変化であり、下図の●印は、各センサー位置への温水フロント（50%温度）の到達時刻をもとに、式(3)から計算した透水係数比 $K_n/K_1$ の時間変化を示している。この図のように、透水係数 $K_n$ は実験開始時から増加し続けるけれども、パイプ内水位の緩やかな低下から推測されるように、

動水勾配が徐々に減少し続けることによって、結果として流量を時間的にほとんど横ばい状態にすることに成功している。こうした流量の定常化の工夫は、他の実験条件に対しても概ね良好な結果を生んでいる。

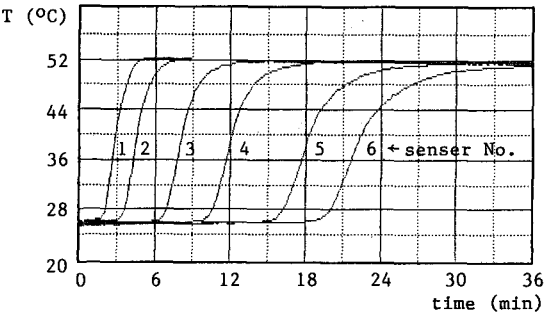


図－6 変水頭法による流量の定常化（ビーズ粒径 左 0.6mm, 右 0.3mm, 冷水 25℃, 温水 35℃）

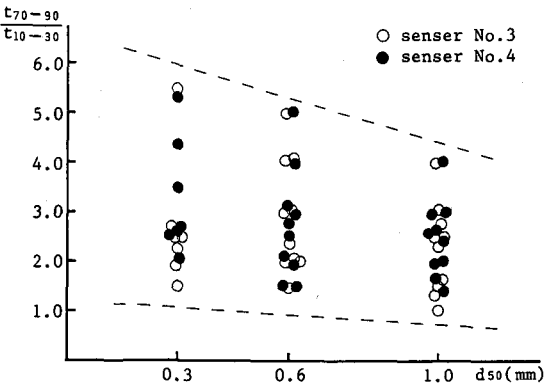
### 5-3 温度上昇曲線の前後非対称性

流量がほぼ定常的な状況下での各温度センサーの温度上昇曲線を図－7に示す。図中の各センサーでの最高温度は、カラム側壁からの熱損失のために、注入水温に比べ僅かに低くなるが、その差は温水と冷水の温度差の数パーセント以下であり、カラムの断熱は適切であったと考えられる。

つぎに、各センサーでの温度上昇は、図のように、立ち上がり部分に比べて平衡温度に漸近する部分の方が緩やかであり、上昇曲線全体が前後に非対称なものとなっている。こうした上昇曲線の歪は、従来の溶質の拡散実験においても若干認められる<sup>5)6)</sup>が、今回の熱拡散実験ではとりわけ顕著なものである。ここでは、この曲線の歪の原因を探るために、非対称性の尺度としてセンサー温度が変化幅の10%値から30%値に上昇するのに要した時間 $\Delta t_{10-30}$ と、70%値から90%値への上昇に要した時間 $\Delta t_{70-90}$ との比をとり、実験条件との関係を調べた。図－8は上昇曲線の非対称性とビーズの平均粒径との係わりをみたものであり、粒径が大きくなるほど曲線の歪は小さくなることが読み取れる。また、温度上昇曲線の非対称性と流速、温度差、流下距離などの係わりにつ



図－7 変水頭法による温度上昇データの一例



図－8 温度上昇曲線の非対称性とビーズ粒径

いては、曲線の歪が実験条件によって大きく変化している実験ケースとそうでないケースとが見られ、明確な傾向は掴めなかった。この温度上昇曲線の極端な歪は、後述するように、従来からの一相系熱輸送モデルでは表現できないものであり、今後、上記の結果をもとに上昇曲線が歪む原因を考察し、解析モデルに組み入れることを考えたい。

## 6. 一相系モデルによる熱拡散係数の同定

解析に用いる熱輸送モデルは、前述したような、均質な多孔体中の一次元定常流に対するものであり、式(1)を差分法によって解き数値的に解を得た。解析にあたって、初期条件は  $T(x, 0) = T_1$  (冷水温度) であり、境界条件として上流のセンサーでの実測温度上昇曲線を用い、下流側のセンサー位置での温度を計算して、測定データから熱拡散係数  $\kappa$  を最小自乗基準によって同定した。式中の移流速度  $u^*$  はセンサー間の温水フロントの移動時間から与えている。

図-9は、 $\kappa$  の同定時における実測値と計算値との適合状態の一例を示したものである。図の左の曲線は境界条件として用いた上流のセンサーでの温度データであり、右の曲線は下流センサーでの計算値、○印が実測データである。前述したように、各センサーでの温度上昇曲線は立ち上がり部分に比べて平衡温度に漸近する部分が緩やかであるが、今回の数値解析のように、上流での境界条件に実測値を用いても、データと計算値は完全には適合せず、解析モデルが温度上昇曲線の前後非対称性を表現しきれないことがわかる。

図-10は同定された熱拡散係数  $\kappa$  の値を移流速度  $u^*$  に対して示したものである。図には、ビーズの粒径や温度差に拘らず全ての実験ケースの同定値をプロットしているが、一つの実験でセンサーの異なる複数の同定値が存在する場合には、 $\kappa$ 、 $u^*$ ともにその相平均値を示した。図からわかるように、 $\kappa$  は  $u^*$  に対してほぼ線形的に増加する傾向が認められ、熱拡散係数の表現式(2)は ほぼ妥当であると考えられる。これら  $\kappa$  の同定値に式(2)を適合させたところ、図中の直線が得られ、温度伝導度  $\kappa_0 = 7.8 \times 10^{-4}$  (cm<sup>2</sup>/sec)、熱分散率  $\beta = 5.4 \times 10^{-2}$  (cm) という数値が得られた。ちなみに、 $\kappa_0$  の値について、佐藤<sup>4)</sup>は室内での飽和ガラスビーズ層の熱伝導実験において  $\kappa_0 = 2.4 \sim 3.5 \times 10^{-3}$  (cm<sup>2</sup>/sec) という値を示している。

つぎに、熱分散率  $\beta$  の値について検討する。従来より、室内実験で得られる溶質の分散率  $\alpha$  は、多孔体の幾何的特性に依存し、試料の平均粒径に近い値をとることが指摘されている<sup>6)</sup>。今回得た  $\beta$  値 0.54 (mm) もビーズ粒径 (0.3~1.0 mm) と同程度の値となった。したがって、室内実験での  $\alpha$  と  $\beta$  は類似の値をとるものと考えられる。一方、著者ら<sup>7)</sup>はすでに、現地での注入実験における  $\beta$  値も  $\alpha$  と同レベルの値であることを示しているが、今回の実験により、室内実験のスケールでも同様であることが明らかとなった。

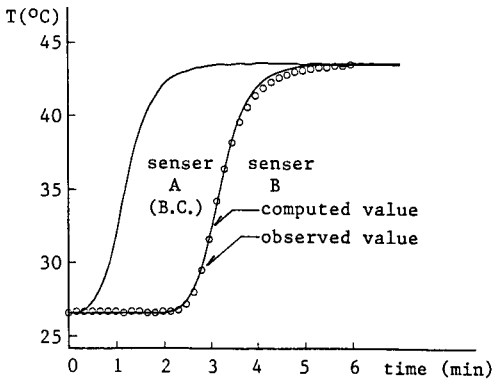


図-9  $\kappa$  の同定時の実測値と計算値の適合状態

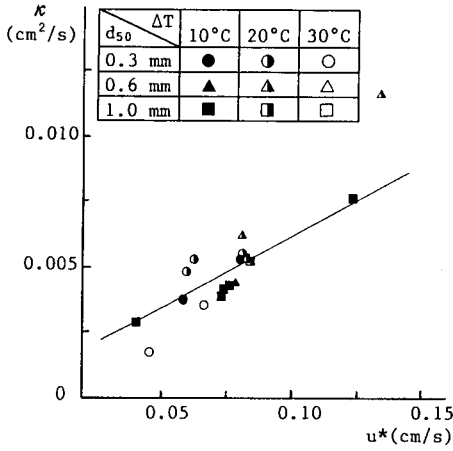


図-10 熱拡散係数  $\kappa$  の同定値と流速  $u^*$  との関係

図-11は、過去に得られた $\alpha$ および $\beta$ の値と今回の $\beta$ 値を実験の空間スケールとの係わりでプロットしたものである。図中の●が溶質の分散率 $\alpha$ 、○は現地実験<sup>7)</sup>から得た熱分散率 $\beta$ 値、そして◎が今回の室内実験から得た $\beta$ 値である。この図によると、今回の $\beta$ 値と現地実験における $\beta$ 値とは3オーダーの開きがあるが、実験のスケールが2オーダー異なることを考えると、拡散現象へのスケール効果が明確に現れた結果と考えられることができる。すなわち、今回の結果により、 $\beta$ と $\alpha$ は同レベルの値であるだけでなく、 $\beta$ にも $\alpha$ と同様にスケール効果が存在することが一層明らかなものとなった。そして、 $\beta$ は室内実験では多孔体の幾何的構造に依存し、平均粒径に相当した値をとるが、実際の帯水層での $\beta$ は、地質的な不均質性に起因した巨視的分散現象を支配する代表長さ、すなわち帯水層構成粒子よりも大きな特性長に対応した値をとるものと推察される。

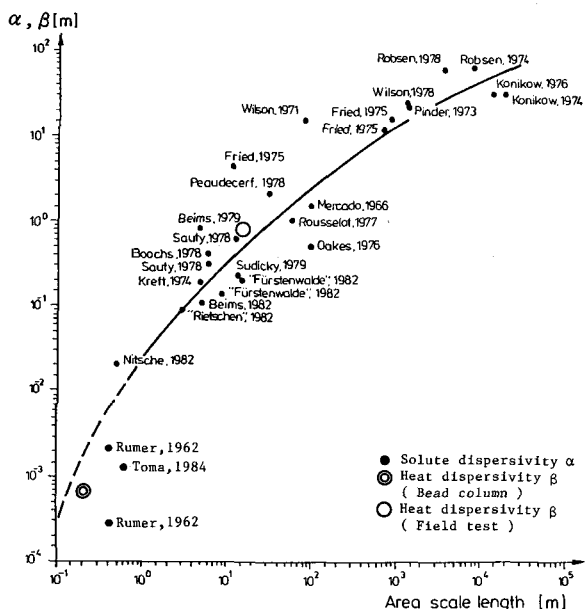


図-11 熱および溶質の縦方向分散率の空間スケールへの依存性 (文献8)に加筆)

## 7. おわりに

本研究によって得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) カラム上下端の水頭を固定した実験では、温水浸透に伴って移流速度の顕著な増大がみられる。
- (2) 温水フロントの進行により、カラム全体の透水係数 $K_m$ は分数関数的に増大する。
- (3) 温水浸透下において流量を一定化するために、透水係数の増大を動水勾配の低下として吸収するような実験手法を考案・導入したところ、良好な結果を得た。
- (4) 各センサーでの温度上昇曲線は、立ち上がり部分に比べ平衡温度に漸近する部分が緩やかで、前後に非対称に歪んだものとなる。この現象は、とくに粒径が小さい場合に顕著である。
- (5) 熱拡散係数 $\kappa$ の同定値は流速に対してほぼ線形的に増加する。 $\kappa$ の表現式(2)により、温度伝導度 $\kappa_0 = 7.8 \times 10^{-4} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ 、熱分散率 $\beta = 5.4 \times 10^{-2} \text{ (cm)}$ を得た。
- (6) 熱分散率 $\beta$ は、溶質の分散率 $\alpha$ と同様に、室内実験では多孔体の粒径に相当した値をとる。一方、現地では、巨視的分散を特性づける長さに対応した値をとると考えられ、現象の空間スケールへの依存性が高いものと推察される。

今回の実験では、流速が  $4 \times 10^{-2} \sim 1.5 \times 10^{-1} \text{ (cm/sec)}$ 、レイノルズ数にして $R_0 = 0.19 \sim 1.64$ という、従来の移流拡散実験に比べ若干大きめの値で行った。今後、流速の遅い場合も含めてさらに異なる条件での実験を実施し、一相系熱輸送モデルの妥当性の評価に多方面からアプローチしようと考えている。とくに、粒径が非常に大きい場合や流速がさらに速いケースでは、固相と液相とに温度差が生じ一相系のモデルの仮定が満たされなくなる可能性がある。将来的には、それを補完する二相系のモデルも検討する予定であるが、当面の課題としては、現象のより詳細な分析と、工学的な意味での一相系モデルの評価を進めるつもりである。

謝 辞：本研究を進めるに当たり，名城大学理工学部長 岩垣雄一教授より有益な助言を賜った。また，名城大学理工学部学生 市川英治君と武市竜也君には，実験およびデータの整理に積極的に協力して頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。なお，本研究の一部は，文部省科学研究費(一般研究C)と(財)中部電力基礎技術研究所，および(財)石田財団による研究助成を得て行われたことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 科学技術庁資源調査所：地下水の熱的利用に関する調査 — 帯水層蓄熱利用を中心として —，資料第151号，238p.，1988.
- 2) 横山孝男：地下帯水層内蓄熱(A T E S)及び熱分散に関する研究の世界における動向，地下水学会誌，Vol.29, No.3, pp.121~136, 1987.
- 3) 藤縄克之：流動地下水中の熱移動機構について，農業土木学会誌，56(8)，pp.47~54, 1988.
- 4) 佐藤邦明：飽和多孔体および温水浸透流における温度伝導率の実験的決定，土木学会論文報告集，第320号，pp.57~65, 1982.
- 5) 福井正美・桂山幸典：飽和多孔性媒質内における分子の拡散および分散現象に関する研究，土木学会論文報告集，第246号，pp.73~82, 1976.
- 6) 藤間 聡：地下水の分散特性，水工学に関する夏期研修会講義集，88-A-2，土木学会水理委員会，1988.
- 7) 原田守博・杉山陽一・高木不折：人工涵養に伴う被圧帯水層中の熱輸送に関する基礎的検討，第45回土木学会年次学術講演会，II-103，pp.258~259, 1990.
- 8) Kinzelbach, W. : "Groundwater Modelling", p.201(Fig.6.9), Elsevier, 1986.  
(上田年比古 監訳「地下水解析」，p.170, 森北出版，1990.)
- 9) Rumer, R. R. : Longitudinal Dispersion in Steady and Unsteady Flow, J. Hydraul. Div. ASCE, Vol.88, HY4, pp.147~172, 1962.