熱移動を伴う垂直二次元多孔質体における トレーサー応答

— その室内実験と数値モデルとの比較 —

新堀雄一*・洪 承 燮*・千田 侑*

Tracer response in a vertical, two-dimensional, porous medium accompanied by heat transfer — Comparison of the laboratory experiments with the numerical model —

Yuichi NIIBORI*, HONG Cheng-Xie* and Tadashi CHIDA*

Abstract

This paper describes tracer response in a vertical, two-dimensional, porous medium accompanied by heat transfer. The experiments are carried out using the packed bed ($150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 12\text{ mm}$) with glass beads, of which average diameter is 1 mm or 0.3 mm . The bed is vertically submerged into the thermostat at a temperature of about 340 K . Distilled water with room temperature is injected locally and continuously into the bed under a constant pressure gradient, also is produced out of the outlet. When the temperature in the bed attains to be steady, KCl solution of 0.1 mol/l is injected as a tracer for several minutes. The concentration is measured every a few minutes by an electrode set at the outlet. The experimental results of the tracer response and the temperature distribution are analyzed by the numerical model already proposed by the authors. The mathematical model is based on mass and heat transfer in a vertical, two-dimensional, permeable medium. This paper indicates that the calculated values of the tracer response and that of the temperature agree well with the experimental results. Some of the results indicated that the tracer response is quite different from that under the isothermal condition.

Key words: Tracer response, Vertical two-dimensional porous medium, Mass and heat transfer, Packed bed, Numerical model.

*東北大学工学部資源工学科

Department of Resources Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University

要 旨

本論文は熱移動を伴う二次元多孔質体から得られるトレーサー応答について述べたものである。実験は平均粒径 1 mm あるいは 0.3 mm のガラス粒子充填層(150 mm × 150 mm × 12 mm)を用いて行う。その充填層をおおよそ 340 K の恒温槽に垂直に浸し、一定の圧力勾配のもと、室温の蒸留水を連続的かつ局所的に入れ、流出口から生産させる。充填層内の温度が定常に到達したとき、0.1 mol/l の KCl 水溶液をトレーサーとして数分間注入する。その濃度は充填層の流出口に設置した電極により数分毎に測定する。トレーサーの応答および温度分布の実験結果は著者らが既に提案した数値モデルにより解析する。この数値モデルは垂直二次元の浸透媒体における物質および熱移動を基にしている。本論文ではその計算値がトレーサー応答および温度の実験値をよく表すことを示す。得られた応答の中に、温度が一様に分布している場合の応答とは全く異なる場合が存在する。

1. はじめに

トレーサー試験は地熱貯留層において還元井と生産井との相互関係を知る有効な手法の一つであり、従来より多くの研究が報告されている(Horne、1985、千田・新堀、1986、1990)。その解析法は一般に移流と混合拡散を考慮した混合拡散モデルを基礎としている。たとえば、Horne et al.(1982)や Tester et al.(1982)は、複数の独立した流路を仮定し、一次元の混合拡散モデルの解を重ね合わせることでトレーサー応答の実験値を説明できるとした。また、Robinson & Tester (1984)、Huyakone et al.(1986)はトレーサー応答の解析に二次元モデルの必要性を示し、わが国でも、湯原・秋林(1978)、Hayashi・Abé(1989)が二次元的な流れを考慮した解析を試みている。小倉ほか(1991)は、亀裂層と準亀裂層を考え、各々の層における流れ、混合拡散および亀裂層間の物質移動を考慮するモデルを提案し、複数の独立した流路を仮定しなくてもトレーサー応答を妥当なパラメータにより説明できることを示した。

一方、地熱貯留層は熱対流を伴うことが古くから知られており、従来より多くの研究者がその解析を行っている(たとえば、Faust & Marcer (1979 a, b)、秋林ほか(1982)、由佐(1983)、Pruess & Bødvarsson(1984)、新堀ほか(1984)、Kimura et al.(1987))。したがって、トレーサー応答の解析においても熱対流を考慮する必要がある。このことは地熱系において特有な問題であるにもかかわらず、未だ十分な検討がなされていない。そこで著者ら(新堀ほか、1986)は、熱対流を伴う垂直二次元の亀裂

層(Pruess & Bødvarsson、1984)へトレーサーが流入したことを想定して、その際のトレーサー応答を数値モデルにより求めた。地熱貯留層解析において亀裂層とは断層あるいは破碎帯などの無数の亀裂からなる層を意味し、ひとつひとつの亀裂に関する情報は現在のところ非常に少ない。そこで、その様な層を周囲岩体に比較して、浸透率の高い多孔質体とみなし、その内外の移動現象を解析する。本論文では、基礎的な検討として、二次元的な広がりを持つ多孔質体を充填層により表わし、室内実験により熱対流を伴う場合と無視できる場合とのトレーサー応答を得る。そして、それらを比較検討するとともに、実験値を先に提案した数値モデルにより解析する。

2. 実験

(1) 実験装置

図-1 は本実験において用いる充填層の詳細図である。この充填層は内寸の高さ(z 方向)、横(x 方向)および奥行き(y 方向)をそれぞれ 150 mm、150 mm および 12 mm としたアクリル製箱型容器(正味体積 $V = 265 \text{ cm}^3$)に、所定粒径のガラス粒子を充填したもので、その形状は平行平板のようにになっている。用いたアクリル板の厚さは 4 mm のものである。その側面には図-1 ($x-z$ 面)の○によって示す位置に計14本のクロメル-アルメル熱電対が設置されている。流出口は図-1 に示すように充填層の中心軸上の上端にあり、流入口は図中の A あるいは B の高さにおける中心軸上に位置する。流入口の位置は実験条件によりどちらかの一方を選択する。

図一 充填層の詳細および流入口、流出口、熱電対の位置

Fig-1 Detail of the packed bed and locations of the inlet, outlet and thermocouples.

図2に実験装置全体の概略図を示す。本装置は大別して以下に述べる(a)充填層、(b)恒温槽、(c)トレーサー検出部および(d)流入流出部からなる。

(a) 充填層

層内の温度分布を把握するために、熱電対に生じる起電力をA-D変換(三栄計器製7v11)し、パーソナルコンピュータ(NEC製PC9800)を経由して、温度としてフロッピーディスクに一定の時間毎に記録する。

(b) 恒温槽

流体が亀裂層内においてその周囲の岩盤から熱を得ることを想定し、充填層を所定温度の恒温槽内に浸す。その際、流出口が真上を向くように充填層を

固定する。

(c) トレーサー検出部

本研究ではトレーサーとして0.1 mol/lの塩化カリウム水溶液を用い、流出口の電気伝導度の経時変化を測定することにより応答を得る。あらかじめ電気伝導度と塩化カリウム溶液濃度との関係を調べたところ、濃度が0.1 mol/l以下の場合、濃度と電気伝導度は比例関係にある。また、電気伝導度には温度依存性があり、温度が高いと伝導度も高くなる傾向を持つが、温度が一定に保たれる場合、この比例関係は成立する。

(d) 流入流出部

流入部は流入水(蒸留水)のオーバーフローおよび塩化カリウム水溶液のオーバーフローを同一の高さに設置し、三方コックを経由して水もしくは所定濃度の塩化カリウム水溶液が充填層に流入するようにしてある。また、流出部にオーバーフローを設け、層に掛かる水頭を一定に保つ。すなわち、これらオーバーフローにより流量を一定にする。

三方コックは手動により操作するために恒温槽の外にある。三方コックと模擬亀裂層本体との間は内径8 mmのビニールチューブによりつなぎ、この間のトレーサーの分散をできるだけ防ぐためにガラス粒子(径1 mm)を充填した。また、その周囲に冷却管を設け、本実験において必要とする恒温槽(周囲)との温度差を保つ。

なお、流入口および流出口は内径6 mm、外径8 mmの円管を用いている。

(2) 実験方法

恒温槽を所定の温度に保ち、室温の蒸留水(約290 K)を充填層に一定流量にて流す。そして、層内が定常となったとき、三方コックを切り替えて、所定時間トレーサーを注入し、その後再び水を流す。定常状態は熱電対によって測定している温度がすべての点において ± 0.2 Kの範囲に収まったときとする。

(3) 実験結果

流入口をAの位置に設置し、平均流径1.0 mmのガラス粒子を充填して実験を行った。この場合の空隙率 ϵ は37%であった。このときの流量 Q は $4.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s}$ であり、空間時間 $t^* (= \epsilon V/Q)$ は36 minであった。図-3に定常状態における充填層内

図二 実験装置の概略図

Fig-2 Schematic diagram of experiment apparatus.

図一3 流入口をAに設置した場合の定常状態における温度分布

Fig-3 Temperature distribution for the case of inlet A in steady state.

の温度分布を示す。ここで、縦軸Zは充填層の中心軸を意味する。また、ZおよびX軸の値は充填層のX方向長さ x_f (=75 mm)により、無次元化したものである。一方、 θ は

$$\theta = \frac{\theta_f - \theta_{fo}}{\theta_r - \theta_{fo}} \quad (1)$$

により定義した無次元温度で、 θ_{fo} は流入口の温度、 θ_r は恒温槽の温度である。この実験では $\theta_{fo}=294$ K、 $\theta_r=339$ Kであった。図-3では実験値を内挿し、無次元温度 θ の値が0.1から0.9まで、0.2毎に等温線にして示してある。なお、図中の○は実験値をx方向およびz方向に沿って内挿することにより定めた各温度の位置であり、これらを結んで等温線としている。この図より流入流体は周囲から暖められ、流出口ではおおよそ無次元温度で0.7になっていることがわかる。同様に0.3 mmのガラス粒子を充填し、流入口をBの位置にした場合の定常状態における温度分布を図-4に示す。この場合の流量Q、空隙率 ϵ および空間時間 t^* はそれぞれ $3.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、0.37および51 minであった。また、設定した恒温槽温度 θ_r は339 Kであり、流入口温度 θ_{fo} は304 Kであった。この図より流入流体は流出口においてはほぼ無次元温度1になっており、恒温

図一4 流入口をBに設置した場合の定常状態における温度分布

Fig-4 Temperature distribution for the case of inlet B in steady state.

槽と同じ温度になっていることがわかる。

このような温度が一樣でない場合の充填層におけるトレーサー応答を図-5に示す。ここで、五角形の印が流入口位置Aの場合、四角形の印が流入口位置Bの場合である。また、比較のためにこれら2つの各々の場合において恒温槽に浸さず、層内の温度が一樣の場合のトレーサー応答もそれぞれ△印および○印により示してある。ここで、横軸は空間時間 t^* によって無次元化した時間 $T[-]$ ($=t/t^*$)であり、縦軸はトレーサー応答 c [mol/l]を代表濃度 c^* [mol/l]($=c_{ot}/t_{in}^*$ 、 c_o 、トレーサーの注入濃度、 t_{in} 、注入時間)によって割った無次元濃度である。このとき、 c/c^* のTによる積分値は1になる。また、横軸の時間 $T=0$ は流入口(AあるいはB)にトレーサーが到達したときである。この時間は三方コックから流入口までの空隙体積 V_d (=9.5 cm³)を流量Qによって割り求めた。図-5よりガラス粒子が大きく、流入口が高い位置にある場合、その応答は温度分布が一樣な場合よりみかけ上混合の度合いが大きいのことがわかる。一方、ガラス粒子の径が比較的小さく、流入口が低い位置にある場合は、温度分布が一樣な場合とほぼ一致する応答になっている。また、流入口の位置が流出口に遠い場合(流入口の位置B)は比較的近い場合(流入口の位置A)より空間時間に

図-5 実験から得られた正規化したトレーサー応答

Fig-5 Normalized tracer responses from the experiments.

対して遅くかつピークの低い応答が現れることがわかる。

なお、トレーサーの注入時間はいずれの実験も空間時間の十分の一である。

3. 数値モデル

著者らは、前報(新堀ほか、1986)において、本数学モデルの詳細を述べているので、ここでは最終的に得られた基礎方程式およびそのパラメータについて説明する。

基礎方程式は以下の通りである。すなわち、熱対流の影響を受ける二次元飽和定常流下における流線関数の連続の式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = -R_a \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (2)$$

また、定常状態におけるエネルギー(熱)収支式は

$$0 = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} - P_{eh} \left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + 2N_u (1 - \theta) \frac{x_l}{b_y} \quad (3)$$

により、物質収支式は次式により表わす。

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{P_e} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right) - \left(U \frac{\partial C}{\partial X} + W \frac{\partial C}{\partial Z} \right) \quad (4)$$

ここで、 X 、 Z 、 U 、 W 、 P_{eh} 、 P_e 、 N_u 、 R_a および C は以下に定義される無次元数である。

$$X = \frac{x}{x_l}, \quad Z = \frac{z}{x_l}, \quad U = \frac{a u x_l}{b_{in} u_0}, \quad W = \frac{a w x_l}{b_{in} u_0}$$

$$P_{eh} = \frac{b_{in} u_0}{a k_h}, \quad k_h = \frac{\lambda_{ef}}{c_{pf} \rho_f}, \quad P_e = \frac{b_{in} u_0}{a E}, \quad N_u = \frac{(\lambda_r/l) x_l}{\lambda_{ef}},$$

$$R_a = \left| \frac{x_l k g \rho^2 \beta (\theta_r - \theta_{f0})}{\mu^2} \right| / \left| \frac{b_{in} u_0 \rho_f}{a \mu} \right|, \quad C = \frac{c}{c_0}.$$

$$C_{-0} = \lim_{x \rightarrow -0} C, \quad C_{+0} = \lim_{x \rightarrow +0} C$$

これらの記号の意味は末尾に一括して示す。また、 ψ は無次元の流線関数であり

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial Z}, \quad W = -\frac{\partial \psi}{\partial X}$$

と定義する。

図6は境界条件を模式的に示したものである。図中の斜線部は不透水性かつ断熱を仮定している。また、流出口 $0 < X < X_{out}$ 、 $Z = a$ において温度、濃度ともに流れ方向の勾配を0とする。一方、本モデルは流入口を $X = 0$ 、 $Z_{in} \leq Z \leq Z_{ind}$ とする。ここに無次元温度 $\theta = 0$ の流体が流入し、トレーサーは次式にしたがって流入する。

$$-\frac{\partial C}{\partial X} = P_e (C_{-0} - C_{+0}) \quad (5)$$

図-6 境界条件

Fig-6 Boundary Conditions.

ここで、 C_{-0} 及び C_{+0} は、 $Z_{in} \leq Z \leq Z_{ind}$ において次式により定義する。

$$C_{-0} = \lim_{x \rightarrow -0} C, \quad C_{+0} = \lim_{x \rightarrow +0} C$$

(5)式に示す流入口における濃度の境界条件は、一般に Closed Vessel 境界条件(Levenspiel, 1972)と呼ばれる。

また、初期においてトレーサー濃度は0とし、トレーサーの入力を次のように表わす。

$$0 \leq T \leq T_{in}, \quad C_{-0} = 1$$

$$T_{in} < T, \quad C_{-0} = 0$$

一方、流線関数の流入口および流出口における境界条件は

$$X = 0, \quad Z_{in} \leq Z \leq Z_{ind} \quad (\text{流入口})$$

$$\phi = \phi_1 \frac{Z - Z_{in}}{Z_{ind} - Z_{in}}$$

$$0 \leq X \leq X_{out}, \quad Z = a \quad (\text{流出口})$$

$$\phi = \phi_1 \frac{X}{X_{out}}$$

である。本モデルでは無次元流入幅 $Z_{ind} - Z_{in}$ は b_{in}/x_1 に等しいため、代表の流線値 ϕ_1 は a となる。

なお、実験において流体が流出口から電極に達するまでの時間は数値モデルに含まれていない。そこで、本研究ではこの時間をむだ時間 T_d [-] として計算値を遅らせる。 T_d の値は充填層の上部($Z=a$)から電極の上端までの体積 V_{out} を基に $T_d = (V_{out}/Q)/t^*$ に従って求める。ここで空間時間 t^* は先に述べたように空隙体積 εV を Q で割った値であり、結果的に T_d の値は Q に依存しない。本実験では $V_{out} = 5.2 \text{ cm}^3$ 、 $\varepsilon = 0.37$ 、 $V = 265 \text{ cm}^3$ より $T_d = 0.05$ を得た。

本数値モデルの無次元パラメータは無次元流入流速 $U_0 (= a/(Z_{ind} - Z_{in}))$ 、熱移動に関するペクレ数 P_{eh} 、物質移動に関するペクレ数 P_e 、熱対流の生じ易さを表わすレイリー数をレイノルズ数によって割った値 R_a 、ヌッセルト数 N_u および無次元のトレーサー流入時間 T_{in} である。 T_{in} の値は本実験の

操作に従い0.1となる。また、 U_0 、 P_{eh} 、 R_a および N_u の値は表1に示す値を基に算定する。ここで浸透率 $k [\text{m}^2]$ は内径19 mm、長さ15 cmの垂直円筒管に所定粒径のガラス粒子を充填した測定値である。また、水の物性値は充填層内のおおよその平均温度である323 Kの値を基準とし、甲藤(1983)および日本化学会編便覧(1984)から引用した。なお、 P_{eh} における充填層内の有効熱伝導率 $\lambda_{ep} [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ は空隙率 ε [-]、水の熱伝導率 $\lambda_w [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ およびガラス粒子の熱伝導率 $\lambda_s [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ から $\lambda_{ep} = \varepsilon \lambda_w + (1 - \varepsilon) \lambda_s$ (秋林ほか(1980))により求める。また、 N_u における $\lambda_r [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ は温度境界層の熱伝導率、 $l [\text{m}]$ はその厚さであり、本研究では前者を充填層と恒温槽間とを仕切るアクリル板の熱伝導率、後者をその厚さとする。一方、流速 u_0 は流量 Q 、流入口の幅 b_{in} および亀裂層の幅 b_y を用いて $u_0 = Q/(2b_{in}b_y)$ より求める。次に物質移動に関するペクレ数 P_e の値について述べる。本モデルは二次元の物質移動を扱っているため、 P_e の定義は通常用いられるものとは異なる。一般に地熱貯留層の解析において用いる一次元のペクレ数は $P_{e1D} = x_1^* u^* / E$ である(千田・新堀, 1986)。ここで、 P_{e1D} の添え字1Dは本論文の P_e と区別するために便宜上に付したものであり、 $u^* [\text{m/s}]$ および x_1^* は流動系を代表する流速および長さである。 P_{e1D} と P_e との関係は E を消去すると、 $P_e = P_{e1D} (b_{in} u_0) / (a x_1^* u^*)$ となる。いま、二次元の場合の代表長さ x_1^* を流入口から流出口までの直線距離とする。そして、流体が、縦(z 方向) x_1^* 、横(x 方向) x_1^* の二次元領域(但し、 y 方向

表-1 パラメータ
Table-1 Parameters

Parameters	Symbol	Value
Thermal conductivity		
glass beads	$\lambda_s [\text{W/m} \cdot \text{K}]$	1.13
water	$\lambda_w [\text{W/m} \cdot \text{K}]$	0.64
acrylic plate	$\lambda_r [\text{W/m} \cdot \text{K}]$	0.21
Porosity	$\varepsilon [-]$	0.37
Specific heat of fluid	$c_{pf} [\text{J/kg} \cdot \text{K}]$	4.18×10^3
Density of fluid	$\rho_{f0} [\text{kg/m}^3]$	9.88×10^2
Width of acrylic plate	$l [\text{m}]$	4.0×10^{-3}
Permeability	$k [\text{m}^2]$	
for ϕ_{1mm} glass beads		6.8×10^{-10}
for $\phi_{0.3mm}$ glass beads		5.5×10^{-11}
Depth length	$b_y [\text{m}]$	1.2×10^{-2}
Width of inlet	$b_{in} [\text{m}]$	6.0×10^{-3}
Length of x direction	$x_{in} [\text{m}]$	7.5×10^{-2}
Ratio of length	$a(z_1/x_1) [-]$	2
Viscosity	$\mu [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	5.5×10^{-4}
Volumetric expansion coefficient	$\beta [1/\text{K}]$	4.7×10^{-4}
Gravity acceleration	$g [\text{m/s}^2]$	9.8

の幅は b_y)において、流量 $Q/2$ で断面 $x_1^*b_y$ を一様に(一次的に)流れることを考える。本研究では代表流速 u^* をこのときの値、すなわち $Q/(2x_1^*b_y)$ を仮定する。一方、 u_0 の値は上述した二次元モデルの定義より $Q/(2b_{in}b_y)$ であるから、 P_e と P_{eID} との関係は $P_e = P_{eID}/a$ となる。本研究ではこの関係を用いて P_e の値を P_{eID} および $a(=2)$ の値より算出する。なお、この方法は同じ流量でも、 x_1^* が比較的小さいとき、 u^* を大きく見積り、逆に x_1^* が大きいときは、 u^* を小さく見積ることができるが、あくまでも一つの目安にすぎないので、 P_e の違いによる応答の違いについては図-12において後述し、考察する。 P_{eID} の値は円筒管の充填層(内径19 mm、長さ145 mm、空隙率37%)を用いて、実験により評価し、平均粒径0.3 mmの粒子を充填した場合、流量 $2.6 \text{ cm}^3/\text{min} \sim 5.3 \text{ cm}^3/\text{min}$ の範囲(流速 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s} \sim 3.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)において、 $P_{eID} = 60$ を得た(Niibori et al., 1992)。また、1 mmの粒子の場合も同様の実験条件により、 $P_{eID} = 20$ を得た。なお、これらの値は従来の報告(Levenspiel, 1972、化学工学協会編、1988)に矛盾しない。

さて、本モデルは解析的に解を得ることができない。そこで基礎方程式を差分法(Jacobi法)により解く。すなわち、まず、(2)式および(3)式を解き、層内の定常状態における温度分布および流線を求める(具体的には、(3)式に非定常項を加味した式を離散化し、温度および流線関数についての仮想的な初期値から(2)式および(3)式を満たすまで数値計算をする。なお、その際の収束条件はすべての温度、流線値について相対誤差 10^{-5} 以内に収束したときとした)。次に得られた流線と(4)式より流出口におけるトレーサー応答を求める。また、差分のための離散距離 ΔX 、 ΔZ および時間刻み ΔT は得られた数値解が物質収支およびエネルギー収支式を満たすことを利用して、その誤差が1%以内に収まるように設定した(新堀ほか、1986)。なお、本研究では移流項に対して、upwind differential explicit methodを適用した。この方法による計算は比較的安定であるが、誤差を生じる可能性があるので、上述のように数値解の確認を行った。また、一次元の解析解と数値解との比較を行い、ペクレ数が 10 から 10^2 の場合、両者はよく一致することを確認した。

4. 実験結果と計算結果の比較

図-7(a)、(b)に流入口的位置をA(中心の無次元高さ $Z=1.5$)とし、平均粒径1.0 mmのガラス粒子を充填した場合の定常状態における充填層内の測定温度(図中○印)および計算値(図中実線)を示す。この計算の無次元パラメータの値は、 $U_0=25$ 、 $P_{eh}=4$ 、 $R_a=20$ 、 $N_u=4$ であり、流量 Q を基に得られる流速($u_0=3.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)、温度差($\theta_r - \theta_{fo} = 45 \text{ K}$)および表1に示した各パラメータの値より求めることができる。図-7(a)は $Z_X=0$ 、すなわち中心軸上の温度分布であり、図-7(b)は $X_Z=1.5$ における温度分布である。これらの図より計算値は実験値をおおよそ表していることがわかる。図-8(a)にこの場合の計算によって得られる流線値 ψ を示す。ここでは $\psi_I=a$ を代表流線値として、その比として0.2毎に示してある。この結果から得られた充填層内の流れは、温度が一樣に分布している場合(図-8(b))に比較して、層内を広がって流れていることがわかる。

図-9に流入口をAの位置にし、層内の温度が一樣でない場合におけるトレーサー応答の実験値(図中、五角形)および計算結果(図中、実線)を示す。この場合のペクレ数 P_e は10である。また、比較のために、温度が一樣に分布している場合の実験値(図中、△印)および $P_e=10$ の計算結果(図中、破線)も併せて示す。図-9より、計算値は実験結果をよく表わし、温度が一樣に分布していない場合、一樣な

図-7 定常状態における温度の実験値と計算値との比較(流入口Aの場合)

Fig-7 Comparison of the calculation with the experimental data of temperature in the steady state (case of inlet A).

場合に比較して、明らかにピークの低い、みかけ上混合の大きな応答になることを評価している。

図-10に流入口的位置をB(中心の無次元高さ $Z=0.5$)に設置し、粒径 0.3 mm のガラス粒子を充填した場合の計算値と実験値の比較を図-9と同様に示す。ここで図中の実線および□印は温度が一樣で

図-8 流線の計算値 (a) 図7の場合、(b) 等温条件の場合

Fig-8 Calculations of the stream lines (a) for the case of Fig. 7, and (b) for the case under the isothermal condition.

図-9 流入口をAに設置した場合のトレーサー応答の計算値と実験値との比較

Fig-9 Comparisons of the calculations with the experimental data of tracer responses for the case of the inlet A.

ない場合における計算値と実験値であり、破線および○印は一樣な場合の計算値と実験値である。計算値におけるペクレ数 P_e はいずれの場合も30である。図-11に温度分布の実験値と計算値を図-7と同様に示す。この場合の無次元数の値は $U_o=25$ 、 $P_{eh}=3$ 、 $R_a=1.8$ 、 $N_u=4$ であり、先に示した値と異なるのは流入流速($u_o=2.2 \times 10^{-4}\text{ m/s}$)、温度差($\theta_r - \theta_{fo}=35\text{ K}$)および浸透率($k=5.5 \times 10^{-11}\text{ m}^2$)である。この場合において実験により得た応答は、図-10に示すように、温度が一樣に分布してい

図-10 流入口をBに設置した場合のトレーサー応答の計算値と実験値

Fig-10 Tracer responses of the calculations and the experimental data for the case of the inlet B.

図-11 流入口をBに設置した場合の温度の計算値と実験値

Fig-11 Temperature of the calculation and the experimental data for the inlet B.

る場合とほとんど差がない。数値モデルはこのこともよく表わしている。比較のために図-7から図-9において用いた $R_a=20$ の応答を図-10において点線により示す。この場合の応答は実線に比較してあきらかに遅れることがわかる。図-10に示した場合の流入口の位置は先に示した、図-7から図-9の場合の比較して低く、熱対流が境界 $Z=0$ の制約を受け易い。したがって、 R_a の値が比較的大きい場合でも、温度が一樣な場合の応答との違いが小さい可能性があるが、図-10から、 $R_a=20$ の場合の応答は温度が一樣な場合の応答とは明らかに異なることが確認できる。

図-12に図-9に示した $P_e=10$ の計算値と $P_e=100$ の場合、すなわち、混合拡散をきわめて小さいものとした場合の応答(計算値)を示す。この図より、温度が一樣でない場合の $P_e=10$ の応答(図中の実線)と $P_e=100$ の応答(図中の一点鎖線)の差はそれほど大きなものではないことがわかる。また、温度が一樣な場合についても、 $P_e=10$ の応答(図中の破線)と $P_e=100$ の応答(図中の点線)との差は大きなものではない。このことは、 P_e の値を厳密に評価しなくとも、二次元領域における移流項、すなわち速度分布を評価すれば、計算値は実験値をおおよそ表すことを意味する。

図-12 $P_e=10$ の場合(図9)と $P_e=10^2$ の場合の応答(計算値)の比較

Fig-12 Comparisons of the calculated responses for $P_e=10$ and $P_e=10^2$.

5. おわりに

本論文では垂直で二次元的に広がる亀裂層を単純化した充填層を作成し、層内の温度が一樣でない場合のトレーサー応答を実験的に求めた。その応答を、温度が一樣に分布している場合の応答と比較し、両者の応答が必ずしも一致しないことを示した。また、著者らが既に提案した数値モデルをこれらの実験値に比較したところ、計算値は実験値におおよそ一致することが分かった。さらに、温度が一樣に分布していない場合のトレーサー応答が一樣に分布している場合に比較してみかけ上混合の大きなものになるのは主に流速分布の違いにあることを示した。

記号

a	: 充填層の鉛直方向長さ(= ax_1)を表わす係数	[—]
b_{in}	: 流入口の幅	[m]
b_y	: 充填層の幅(y方向)	[m]
c	: トレーサー濃度	[mol/m ³]
c_0	: トレーサー注入濃度	[mol/m ³]
c^*	: 代表濃度(= $c_0 t_{in}/t^*$)	[mol/m ³]
c_{pf}	: 流体の比熱	[J/g · K]
E	: 混合拡散係数	[m ² /s]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
k	: 浸透率	[m ²]
l	: 温度境界層の厚さ	[m]
p	: 圧力	[kg/m · s ²]
Q	: 体積流量	[m ³ /s]
t	: 時間	[s]
t^*	: 空間時間(= $\epsilon V/Q$)	[s]
T_d	: 無次元のむだ時間 (= $V_{out}/(\epsilon V)$)	[—]
t_{in}	: トレーサーの注入時間	[s]
u	: x 方向の流速	[m/s]
u_0	: 流入流速	[m/s]
u^*	: 代表流速	[m/s]
V	: 充填層の全体の体積	[m ³]
V_d	: 三方コックから流入口までの空隙体積	[m ³]
V_{out}	: 流出口から電極の上端を満たすまでの体積	[m ³]
w	: z 方向の流速	[m/s]
x	: 充填層の水平方向距離	[m]

$2x_1$	: 充填層の水平方向長さ	[m]
x_1^*	: 代表長さ	[m]
z	: 充填層の鉛直方向距離	[m]
β	: 体積膨張係数	[1/K]
ϵ	: 空隙率	[—]
θ_f	: 流体の温度	[K]
θ_{f0}	: 流入流体の温度	[K]
θ_r	: 恒温槽温度	[K]
λ_{ep}	: 充填層内の有効熱伝導率	[W/m · K]
λ_r	: 温度境界層の熱伝導率	[W/m · K]
μ	: 粘度	[Pa · s]
ρ_f	: 流体の密度	[kg/m ³]

引用文献

- 秋林 智・湯原浩三・田中正三(1980): 開いた地熱貯留層の対流に関する研究(II)―上面から水の流出・流入がある場合の地熱貯留層の対流実験、日本地熱学会誌、2、107-119.
- 秋林 智・湯原浩三・田中正三(1982): 開いた地熱貯留層の対流に関する研究(V)―開いた対流モデルの実際の地熱系への応用、日本地熱学会誌、4、143-158.
- 小倉啓明・新堀雄一・千田 佑(1991): 断裂系地熱貯留層におけるトレーサー応答解析、日本地熱学会、13、95-105.
- 化学工学協会編(1988): 「化学工学便覧改訂5版」、丸善、東京、p.988.
- 甲藤好郎(1983): 「伝熱概論」、丸善、東京、p.443.
- 千田 佑・新堀雄一(1986): 地熱貯留層におけるトレーサー応答解析、地熱エネルギー、11、146-157.
- 千田 佑・新堀雄一(1990): 地熱貯留層モデル、資源・素材学会誌、106、705-712.
- 新堀雄一・千田 佑・田中正三(1984): 地熱貯留層内の流れ及び伝熱に及ぼす浸透率分布の影響、日本地熱学会誌、6、263-277.
- 新堀雄一・和嶋延寿・千田 佑・田中正三(1986): 地熱貯留層におけるトレーサー応答に及ぼす伝熱の影響―その理論的考察―、日本地熱学会誌、8、261-276.
- 日本化学会編(1984): 「化学便覧基礎編改訂3版」、丸善、東京.
- 由佐悠紀(1983): 地熱環境下における地下水流動の数値実験―ポテンシャル流と熱対流の競合、日本地熱学会誌、5、23-38.
- 湯原浩三・秋林 智(1978): 大岳地熱地域における還元熱水の挙動、日本鉱業会誌、94、509-514.
- Faust, C. R. and J. W. Mercer (1979a): Geothermal Reservoir Simulation — 1. Mathematical Models for Liquid- and Vapor-dominated Hydothermal Systems-, Water Resour. Res., 15, 23-30.
- Faust, C. R. and J. W. Mercer (1979b): Geothermal Reservoir Simulation — 2. Numerical Solution Techniques for Liquid- and Vapor-dominated Hydothermal Systems-, Water Resour. Res., 15, 31-46.
- Hayashi, K. and H. Abé (1989): Evaluation of Hydraulic Properties of the Artificial Subsurface System in Higashihachimantai Geothermal Model field, J. Geothermal Res. Soc. Jpn., 11, 203-215.
- Horne, R. N., K. A. Breitenbach and M. P. Fossum (1982): Retention of Chemical Tracers in Geothermal Reservoirs, Proc. 8th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., 289-294.
- Horne, R. N. (1985): Reservoir Engineering Aspects of Reinjection, Geothermics, 14, 449-457.
- Huyakorn, P. S., P. F. Andersen, O. Guven and F. J. Molz (1986): A Curvilinear Finite Element Model for Simulating Two-Well Tracer Tests and Transport in Stratified Aquifers, Water Resources Res., 22, 663-678.
- Kimura, S., G. Schubert and E. J. Straus (1987): Instabilities of Steady, Periodic, and Quasi-Periodic Modes of Convection in Porous Media, Trans. AIME, J. Heat Transfer, 109, 350-355.
- Levenspiel, O. (1972): *Chemical Reaction Engineering*, Second Edition, JOHN WILEY & SONS, Inc., New York.
- Niibori, Y., A. Kounosu and T. Chida (1992): Fundamental Study on Tracer Response Analysis for Water-Steam Flow Accompanied by Boiling in a Porous Medium, J. Geothermal Res. Soc. Jpn., 14, 129-144.
- Pruess, K. and Bódvarsson, G. S. (1984): Thermal Effects of Reinjection in Geothermal Reservoir with Major Vertical Fractures, J. Pet. Tech., 36, 1567-1578.
- Tester, J. W., R. L. Bivins and R. M. Potter (1982): Interwell Tracer Analyses of a Hydraulically Fractured Granitic Geothermal Reservoir, SPEJ, Aug. 1982, 537-553.
- Robinson, B. A. and J. W. Tester (1984): Dispersed Fluid Flow in Fractured Reservoirs: An Analysis of Tracer-Determined Residence Time Distribution, J. Geophysical Res., 89, 10, 374-10, 384.

(受付: 1993年9月30日、受理: 1994年1月12日)