

(43) 放射浸透流における熱及び溶質の実験的研究

埼玉大学工学部

正会員

佐藤 邦明

福井大学工学部

正会員

福永 輝幸

三菱金属(株)中央研究所

正会員

○佐々木康夫

はじめに

飽和多孔媒体中における熱や溶質の移流分散・拡散に関して従来一次元一様流についてカラム実験を中心に研究が進められ、塩分の分散係数がレイノルズ数の関数として決定されており、実用に供されている。しかし、注水井から帯水層への塩水注水や水質の異なる水の地下環境と似た現象のように放射浸透流による分散・拡散について一次元一様流におけるものとは違った分散・拡散係数が必要となろう。この点については従来あまり研究が進んでいない。本報はこの点に注目して室内で小型の放射浸透流発生装置を用いて塩水の注水と温度こう配をもつ塩水の注水試験を試み、それぞれの放射流分散方程式の解と対比して分散・拡散係数を実験的に決定した。その結果が従来的一次元一様流の結果と比較して検討された。放射浸透流における分散・拡散現象が一次元流のそれと比べ小さくなり、分散・拡散係数は熱及び濃度こう配を持つ場合に算出され得ることが判明したので、ここに報告するものである。

1. 実験装置と実験手順

実験装置は図-1のように直径1.20m、厚さ0.10mの内筒状の多孔媒体を7層層、定水頭供給部、流量測定槽、定温浴槽及び温度、塩分測定センサーと測定記録計等よりなる。実験は大きくして、①定圧塩水注水試験、②定圧定温塩水注水試験、③定圧ブリーチング試験に分けられる。いずれの実験も基本的に

は初め定常放射流に、同じ定常状態で溶質及び淡水が流入した際の各点での濃度と温度分布を短時的に測定するものであって、実験条件と同じ条件下で放射移流分散方程式と伝熱方程式を解りて、それらの解曲線と対比して分散及び熱拡散係数を決定しようとするものである。実験手順は、まず多孔媒体層に砂を充てんしスポンジラバーを置いて蓋をボルト締めして完全な止水を施す。ついで水圧をかけつつ気泡の混入を防止しつつ給水し、放射浸透流の流量を計るが、多孔媒体を7層層には予めの塩分濃度測定用プローブとサーミスターセンサーはセツトされているので濃度と温度測定器と記録計の調整を行う。そこで、放射浸透流における圧力分布をマンメータで計り、流量を定圧下で計り透水係数を求める基礎資料を得る。この段階で決定した浸透流が得られた事を確認した後、直ちに多孔媒体

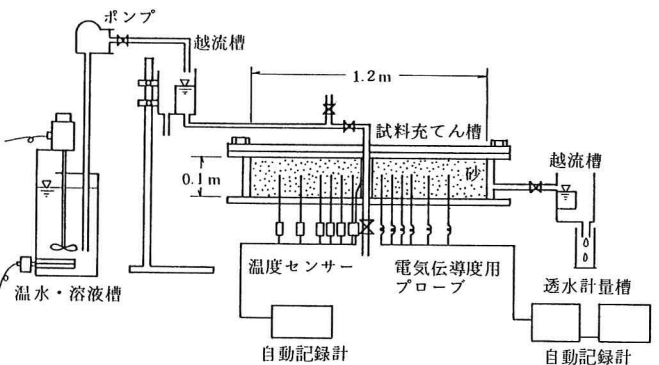


図-1 実験装置とそのシステムの概要

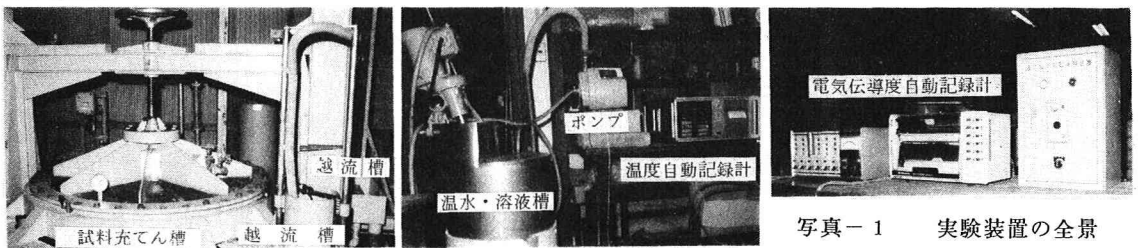


写真-1 実験装置の全景

の中央に設けられたバルブを止め塩水、定温塩水、淡水に切り換え、バルブを開放して塩水や淡水流を発生させ各点の塩分濃度や温度の経時の変化を測定することになる。実験条件と実験結果は表-1にまとめて示し、実験装置の全景は写真-1に示した。

表-1 実験条件と実験結果

充てん材料	実験ケース	透過条件	透水係数 (cm^2/s)	解析項目	$r = 0.1575\text{m}$	$r = 0.2075\text{m}$	$r = 0.2575\text{m}$	$r = 0.3075\text{m}$	$r = 0.4075\text{m}$	$r = 0.5075\text{m}$
河過砂 $d_{50} = 2.25\text{mm}$ 空隙率 = 44.6% 等価熱伝導率 $= 1.50\text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 等価熱容量 $= 751\text{ kcal}/\text{m}^3$	Exp.-1	溶液 浸透	2.15×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	5.08×10^{-11} 3.67	3.06×10^{-11} 2.79		2.60×10^{-11} 1.88		
	Exp.-2	溶液 浸透	7.77×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	3.81×10^{-11} 1.33	2.89×10^{-11} 1.01		1.95×10^{-11} 0.681	1.47×10^{-11} 0.514	1.18×10^{-11} 0.413
	Exp.-3	定温溶液 浸透	1.89×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	1.71×10^{-11} 3.24	1.30×10^{-11} 2.46		0.878×10^{-11} 0.563	0.551×10^{-11} 0.331	
	Exp.-4	定温溶液 浸透	2.72×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	1.10×10^{-11} 4.88	1.30×10^{-11} 3.70		2.50×10^{-11} 1.89	1.51×10^{-11} 1.51	
	Exp.-5	定温溶液 浸透	1.14×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	5.08×10^{-11} 3.74	3.06×10^{-11} 1.83		2.60×10^{-11} 0.893	1.91×10^{-11} 0.707	1.58×10^{-11} 0.558
	Exp.-6	ブリーチン グ	1.21×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	3.97×10^{-11} 2.11	2.41×10^{-11} 1.60		1.63×10^{-11} 1.08	1.23×10^{-11} 0.815	0.99×10^{-11} 0.654
	Exp.-7	溶液 浸透	3.84×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	3.40×10^{-11} 12.0	2.40×10^{-11} 8.60	1.40×10^{-11} 5.60	1.10×10^{-11} 4.60		
	Exp.-8	溶液 浸透	8.56×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	15 52	9.8 35	7.6 27	6.2 22		
	Exp.-9	定温溶液 浸透	4.92×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	6.2 15.1	4.7 12	3.4 9.0	3.2 7.6		
	Exp.-10	定温溶液 浸透	8.23×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	25.0 20.8	17.0 66.0	11.0 34.0	8.41 25.0		
	Exp.-11	定温溶液 浸透	7.01×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	3.0 65	2.3 50	1.4 34	1.1 25		
	Exp.-12	ブリーチン グ	8.47×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	38 79	27 53	19 40	12 26		
	Exp.-13	ブリーチン グ	9.73×10^{-3}	$D_r(\text{cm}^2/\text{s})$ Re	24.0 59.0	16 40	11 30			

2. 実験結果とその検討

2.1 塩分、定温塩分と淡水浸透の経時の変化

図-2 (a) ~ (f) はそれぞれ Exp.-1, 4, 6, 7, 11, 12 の場合における塩分、定温塩分の各点における塩分濃度と温度の経時の変化を示してある。一次元一様流における場合と類似に放射流の場合にはもともと距離 r が大きい所では分布がフラットになる。この事はこれらの図から読みとれる。つまり、放射流の場合には一様流と異なり r が小さい位置では見掛け上塩分、温度の分散係数や拡散係数は大きくなるのである。

2.2 放射流における塩分・温度の分散・拡散係数の決定法

本報では、基本的に水で飽和された多孔体に濃度差及び温度差を与えた場合の溶質の移流・拡散モデルと付熱モデルを考える。ただし、本モデルでは水平スケールに比べ鉛直スケールは十分小さくとして、水平一次元放射流とみなし、ラーゼ数 Ra ($Ra = \beta \Delta T \cdot k H (PC) / K$ β : 流体の体積膨張率, ΔT : 温度差, H : 砂層厚, PC : 等価熱容量, k : 透水係数, K : 等価熱伝導率) は十分小さく、= 重拡散は生じないものとしている。

こうした塩分分散方程式は保存法則より

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{D_r}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - u_r \frac{\partial C}{\partial r} \quad (1)$$

となる。ここに、 C : 濃度, D_r : 拡散係数である。 $u_r = \frac{u_0 r_0}{r}$ と Ogata⁷⁾ に従って $D_r = D_0 u_0 r_0 / r = \alpha / r$ ($D_0 = \alpha u_0 r_0$, α : 流れと多孔体に関する定数, u_0 : $r = r_0$ での流速) の関係を式(1)に代入し無次元化すると次式を得る。

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{D_0^*}{r^*} \frac{\partial^2 C^*}{\partial r^{*2}} - \frac{1}{r^*} \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (2)$$

ここに、 $C^* = C/C_0$ (C_0 : 溶質の初期濃度), $D_0^* = D_0/u_0 r_0$ である。式(2)の初期・境界条件は次の式(3)で与えられる。

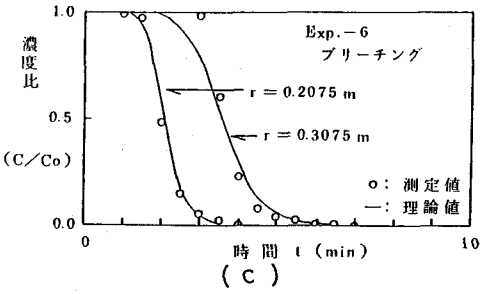
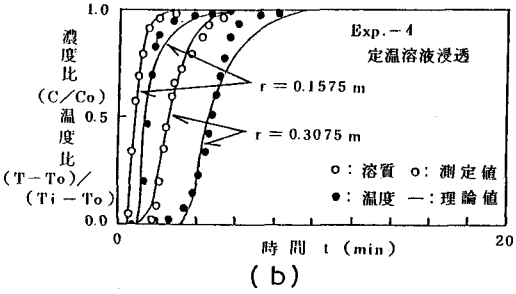
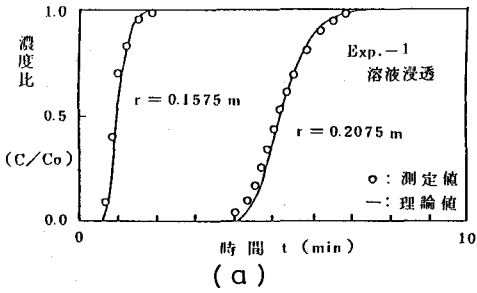


図-2 塩分・温度の経時の変化の測定、解析結果 (河過砂)

$$\left. \begin{aligned} C^* = 1, r^* = 1, t^* \geq 0 \\ C^* = 1, r^* = \infty, t^* \geq 0 \\ C^* = 1, r^* > 1, t^* = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

一方、熱量に関する保存法則より熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \gamma u_r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4)$$

ここに、 T : 温度、 r : 放射流の中心から半径方向への距離、 $K = \lambda / (PC)$: 熱拡散係数 (λ : 等価熱伝導率)、 u_r : 半径方向流速、 $\gamma = (PC)_w / (PC)$ 、 $(PC)_w$: 染体の定圧熱容量である。現象を支配する物理量を用いて式(4)を無次元すると式(5)となる。

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = K^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) - \frac{\gamma}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \quad (5)$$

ここに、 $T^* = (T - T_0) / (T_i - T_0)$ 、 $t^* = t / (r_0^2 / u_{r0})$ 、 $r^* = r / r_0$ (T_0 : 初期温度、 T_i : 投入温水温度、 r_0 : 中心サ半径、 u_{r0} : $r = r_0$ での浸透流速)である。式(5)に対する初期・境界条件は式(6)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T^* = 1, r^* = 1, t^* \geq 0 \\ T^* = 0, r^* = \infty, t^* \geq 0 \\ T^* = 0, r^* > 1, t^* = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

また、ブリーチングの場合には、濃度、温度とも基礎式は同じであり初期・境界条件を変えて式(7)を用いて解いた。実際の計算では、ノイマンの定定条件を満たしながら式(2)、式(5)を時間に関して前進差分、空間に関して中央差分を用い、それぞれ陽解法によった。

$$\left. \begin{aligned} C^* = 0, r^* = 1, t^* \geq 0 \\ C^* = 1, r^* = \infty, t^* \geq 0 \\ C^* = 1, r^* > 1, t^* = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7) \quad (\text{温度の場合は } C^* \text{ が } T^* \text{ に置きかわる})$$

塩分散係数は、式(2)の解曲線と図-2(a)~(f)のような濃度の経時の変化の測定結果と比較して best fit curve を与える各分散係数が求まるべき値であつて、コンピュータにより実験結果の濃度分布に理論解による値を best fit させることが可能である。このようにして求めた各分散係数に対する理論と実験の適合の程度が図-2に同時に示してあり、両者は比較的良好に一致していることが判る。

同様に、熱伝導係数の場合には式(5)によって解析を進めることになる。基礎方程式の形式は塩分散の場合と変りないが、熱の場合には塩分の場合のように溶質に対応する熱が多孔媒体に吸収されるために見掛け上熱伝導係数が小さく表われることになる。この点は図-2(b)、(e)を対比して知ることができる。

結果的に、この種の現象を水理的に予測しようとする際は分散及び熱伝導係数の値を明確に知ることが必要と熱対流に付いては対流効果をつかむことがより大切になる。一般に、これらの係数はレイノルズ数 Re あるいはペクレ数 Pe の関数と見のが基本的には妥当であるから、図-3~6には分散・熱伝導係数 D_r , D_{rr} , D_{ro} , K_{rr} とレイノルズ数 Re の関係を示してある。

図-3の $D_r / \nu \sim Re$ の関係は $Re = u_r d_{50} / \nu$ で定義して式変換すると、 $D_r / \nu = a_1 Re^{b_1}$ となる。ここに、 $a_1 = 0.21$, $b_1 = 0.95$, ν : 水の動粘性係数、 u_r : r の距離での浸透流速、 d_{50} : 充てん砂の50%粒径である。図-4の関係は、 $D_{rr} / \nu = a_2 Re^{b_2}$ ($a_2 = 0.34$, $b_2 = 1.01$) となる。図-5の場合には $K_{rr} / \nu = a_3 Re^{b_3}$ ($a_3 = 0.26$

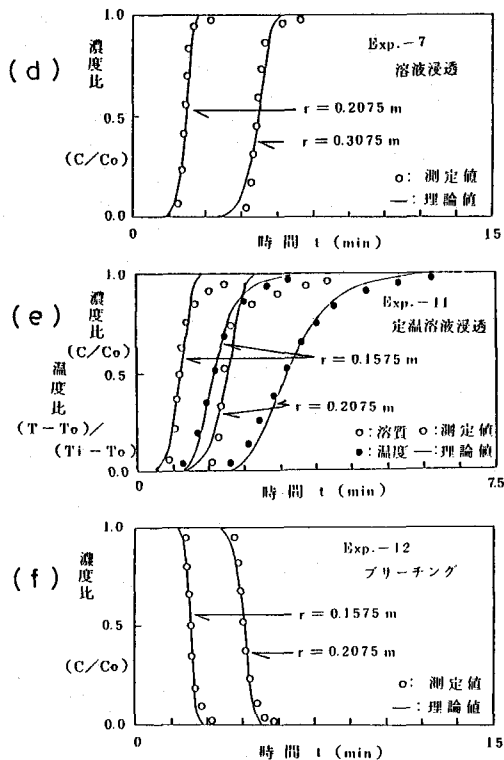


図-2 塩分・温度の経時の変化の測定、解析結果 (標準砂)

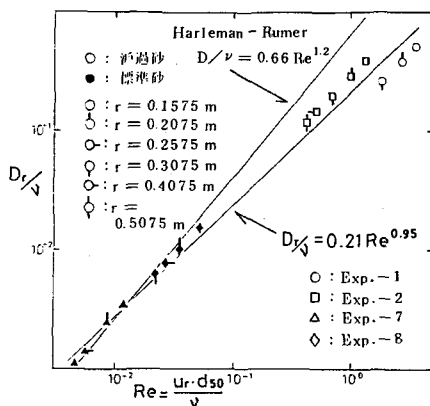


図-3 分散係数 D_r とレイノルズ数 Re の関係

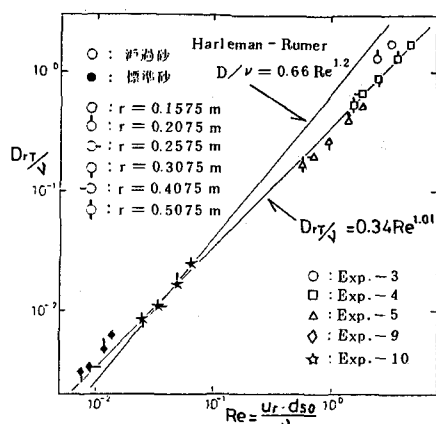


図-4 熱を伴う分散係数 D_{rT} とレイノルズ数の関係

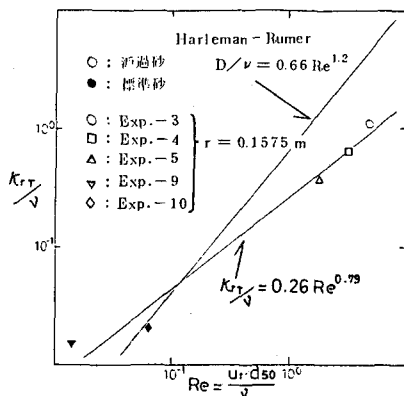


図-5 熱拡散係数 K_{rT} とレイノルズ数 Re の関係

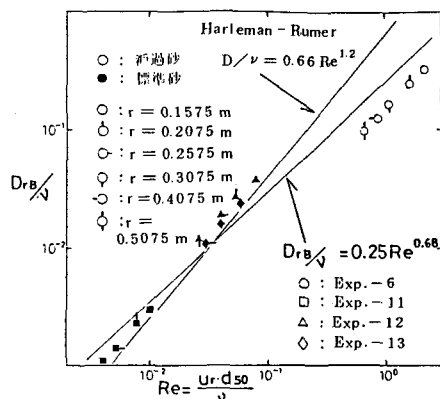


図-6 分散係数 D_{Dr} とレイノルズ数の関係

、 $b_3 = 0.79$) となり、図-3と図-5の定数と指数を比べて判るように、 $a_1 < a_3$ 、 $b_1 > b_3$ であることから塩分拡散の方が熱拡散より基本的に輸送形態が単純することが判り、拡散現象としては塩の方が支配的性質を有していることが明らかにされた。また、図-6のブリーチングの場合は、 $DDr/v = a_4 Re^{b_4}$ ($a_4 = 0.25$ 、 $b_4 = 0.68$) となり、図-3の値と比較すると $a_1 < a_4$ 、 $b_1 > b_4$ になっている。

おすび

放射浸透流における溶質、温度の配とも溶質及びブリーチングの三者に於いて室内放水実験により分散・拡散現象が実験的に研究されたが、一次元一様流の場合と同様に熱・溶質ともに破過曲線そのものが放射流のせいでフラットになる。温度の配とも溶質分散は今回行った実験の範囲では放射流のレイノルズ数がある程度大きくなると、あまり大きく熱の影響は受けながら、時間が経過すると溶質フロントがゆっくり進むために影響を受けるようになる。今回求めた溶質の分散係数 D とレイノルズ数 Re の関係はそれぞれ、 $D_r/v = 0.21 Re^{0.95}$ 、 $D_{rT}/v = 0.34 Re^{1.01}$ 、 $D_{Dr}/v = 0.25 Re^{0.68}$ となり、熱拡散の場合は $K_{rT}/v = 0.26 Re^{0.79}$ となった。

参考文献

- 1) Akio Ogata: Seory of dispersion in a granular medium, Geological survey professional paper 441-I, 1970
- 2) D. R. F. Harleman and R. R. Rumer: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, J. Fluid Mech. Vol. 16, pp. 385-394, 1963

(43) Experimental Study on Diffusion of Heat and Solutes in
Radial Seepage Flow

by Kuniaki Sato*, Teruyuki Fukuhara**
and Yasuo Sasaki***

Diffusion phenomena of heat and solutes in radial seepage flow give somewhat different characteristics as compared with those in one-dimensional uniform seepage. The present paper describes how to determine the coefficient of dispersion and diffusion in a laboratory, and also relationships between dispersion coefficient and Reynolds number. Experiments are carried out by two different conditions: solute dispersion and solute dispersion having the temperature gradient for two kinds of sands. In all experiments, solute water and heated solute water displace the stagnant water from the center well in the disk shaped aquifer under the constant pressure head. The solute concentration and temperature with time are simultaneously measured at the different points, and coefficients of heat diffusion and solute dispersion are determined by comparing those of theoretical solutions under the same initial and boundary conditions. The experimental relationships between coefficients and Reynolds number Re , based on the experimental results are given by $Dr/v = 0.21 Re^{0.95}$ for solute dispersion, $Dr/v = 0.34 Re^{1.01}$ for heated solute dispersion and $Dr/v = 0.25 Re^{0.68}$ for bleaching.

* Hydroscience and Geotechnology Laboratory, Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama

** Department of Construction Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui

*** Department of Planning and Project Coordination, Central Research Institute, Mitsubishi Metal Corp.