

1. はじめに：本研究は、等方等質で分散物質粒子と浸透層構成粒子との間に吸着などの相互作用のない浸透層の浸水流れへ、分散物質として塩水を流入させることにより、流れ方向の分散程度を示す縦分散係数  $D_1$  および流れ方向に垂直な分散程度を示す横分散係数  $D_2$  を実験的に求めたものである。

2. 分散モデル：等方等質な浸透層内の流れにおける分散物質の質量保存式は、二次元で考えると次式となる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここに、 $S$  = 分散物質濃度； $u$  = 流速 [= 流量 / (透水断面積・空隙率)]； $x, y$  = 流れ方向およびそれに垂直にとった座標系； $D_1$  = 縦分散係数； $D_2$  = 横分散係数； $t$  = 時間である。

縦分散モデル：縦分散係数を求めるために、流入源が  $y$  方向に一定なモデルを考える。すなわち、図-1 のように一定濃度  $S_0$  の分散物質を、距離  $x=0$  で常に濃度  $S_0$  であるように流入させる。この場合、 $y$  方向に濃度変化はなく、式(1)は  $\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$  となり、これを  $S(0, t) = S_0$  ( $t \geq 0$ )、 $S(x, 0) = 0$  ( $x \geq 0$ )、

$S(\infty, t) = 0$  ( $t \geq 0$ ) の条件のもとに解き、微小項を無視すると次式(2)を得る。

$$1 - 2 \frac{S}{S_0} = \operatorname{erf} \left( \frac{x - ut}{\sqrt{4D_1 t}} \right) \quad (2) \quad D_1 = \frac{1}{4} \left( \frac{\sum \xi_i^3 (x - ut_i) / \sqrt{t_i}}{\sum \xi_i^2 t_i} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 $\operatorname{erf}$  = 誤差関数である。与えられた距離  $x$  で時間  $t_i$  の相対濃度  $(S/S_0)_i$  を測定すれば、式(2)を用いて縦分散係数  $D_1$  が求まるが、多くのデータを利用するために式(2)において  $\xi_i = (x - ut_i) / \sqrt{4D_1 t_i}$  とおき、最小自乗法を適用して式(3)で縦分散係数  $D_1$  を求める。

横分散モデル：横分散係数を求めるために、 $-\infty < y < +\infty$  の領域でつぎのモデルを考える。すなわち、図-2 に示すように、 $x=0, y>0$  の領域では濃度  $S=0$ 、 $x=0, y<0$  の領域では濃度  $S=S_0$  であるような流入源を考える。このとき、分散現象が定常に達したのちに、 $y=+\infty$  で  $S=0$ 、 $y=-\infty$  で  $S=S_0$  である。また、式(1)は、 $\frac{\partial S}{\partial x} \ll \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}$  であるので、 $u \frac{\partial S}{\partial x} = D_2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}$  となり、これを  $S(0, y) = S_0$  ( $-\infty < y \leq 0$ )、 $S(0, y) = 0$  ( $0 < y < +\infty$ )、 $\frac{\partial S}{\partial y} = 0$  ( $y = \pm \infty$ ) の条件のもとに解くと次式(4)を得る。

$$1 - 2 \frac{S}{S_0} = \operatorname{erf} \left( \frac{y}{\sqrt{4D_2 x/u}} \right) \quad (4)$$

分散現象が定常になったのちに、与えられた距離  $x$  で鉛直方向  $y$  の濃度分布  $(S/S_0)_i$  を測定すれば、式(4)において  $\eta_i = y_i / \sqrt{4D_2 x/u}$  とおき、最小自乗法を適用して求まる次式(5)で横分散係数  $D_2$  が求まる。

$$D_2 = \frac{u}{4x} \left( \frac{\sum \eta_i y_i}{\sum \eta_i^2} \right)^2 \quad (5)$$

3. 実験装置および実験方法：実験に用いた浸透層は空隙率 38.8% で、均一粒径 1mm のガラスビーズからなっている。また、分散物質として 0.2% 食塩水を用いた。実験装置は図-3 に示すように、ヘッドタンク、接続管、

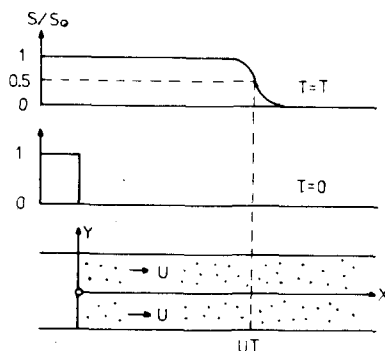


図-1 縦分散モデル

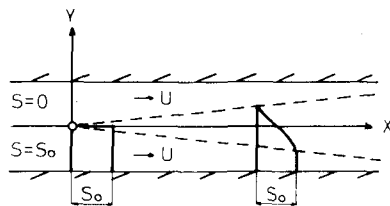


図-2 横分散モデル

越流型ヘッドタンク、接続管、本体、排水管からなっている。本体上流端から 10 cm と 290 cm のところに鋼網製スクリーンが設けてあり、両スクリーン間を浸透層としている。上流側のスクリーン位置を原点 ( $x=0$ ) とすると、 $x=50$  cm, 150 cm, 250 cm の位置で塩分濃度が濃度計により測定できる。濃度計は、塩分濃度の差異により電導度が異なることを利用したものであって、濃度計センサー中央部に 5 mm の間隔をあげて設置

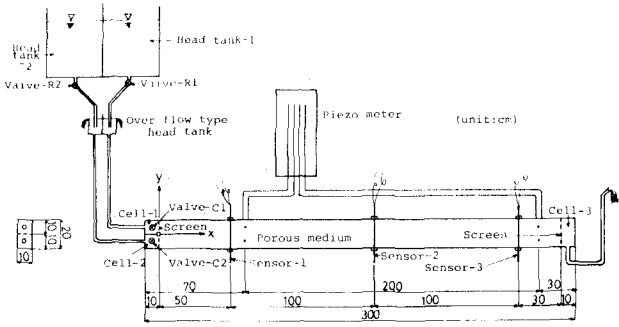


図-3 実験装置全体の概略図

した2個の白金線電極間の電気抵抗を測定する。ここで、縦分散係数は、縦分散モデルに一致するように淡水で飽和された浸透層内に塩水を流入させ、 $x=50$  cm, 150 cm, 250 cm の  $x=0$  における時間的塩分濃度分布を、濃度計で測定される電気抵抗から求め、式(3)で計算される各点の  $D_1$  の平均をとって求める。また、横分散係数は、横分散モデルに一致するように淡水で飽和された浸透層内に淡水と塩水を流入させ、分散現象が定常になったのちに  $x=50$  cm, 150 cm, 250 cm で  $y$  方向の塩分濃度分布を、濃度計で測定される電気抵抗から求め、式(5)で計算される各点の  $D_2$  の平均をとって求める。

4. 実験結果および考察：縦分散および横分散の実験結果を、それぞれ表-1、表-2に示している。そして、その実験結果と Harleman & Rumer<sup>1)</sup> の実験結果を  $D/\nu$  と  $Re(=ud/\nu)$  について示したものが、図-4 である。ここに、 $d$  は浸透層構成粒子の平均粒径； $\nu$  は動粘性係数である。図-4よりわかるように、縦分散係数  $D_1$  は、横分散係数  $D_2$  より大きな値をとっている。これは、流れ方向の質量輸送が、流れ方向に垂直な質量輸送より大きいことを意味している。また、本研究では式(6)、Harleman & Rumer の実験によると式(7)が得られている。

$$\left. \begin{aligned} D_1/\nu &= Re^{1.26} \\ D_2/\nu &= 0.04 Re^{0.72} \\ D_1/D_2 &= 25 Re^{0.54} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} D_1/\nu &= 0.66 Re^{1.2} \\ D_2/\nu &= 0.036 Re^{0.7} \\ D_1/D_2 &= 18.3 Re^{0.5} \end{aligned} \right\} (7)$$

平均粒径 0.96 mm、有効径 0.86 mm、均等係数 1.14 のプラスチック球を浸透層構成粒子として実験を行なった Harleman & Rumer の実験値と均一粒径 1 mm のガラスビーズを構成粒子として実験を行なった本研究の実験値は、塩分濃度の測定精度を考えると、たいへんよく一致しているといえる。今後、浸透層構成粒子特性（粒度分布、粒子の形状、空隙率など）の違いによる縦分散係数および横分散係数について検討する必要がある。

(参考文献)

1) Harleman, D.R.F., and Rumer, R.R.: Longitudinal and Lateral dispersion in an isotopic porous media, J. Fluid Mech. Part 3, vol. 16, pp. 385~394, July 1963.

| Run No. | $u$<br>(cm/sec) | $D_1$<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | $v$<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | $D_2/\nu$ | Reynolds No.<br>$Re=ud/\nu$ |
|---------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------|
| L0-1    | 0.0144          | 0.0006302                       | 0.01112                       | 0.0574    | 0.126                       |
| L0-2    | 0.0553          | 0.005245                        | 0.01045                       | 0.502     | 0.526                       |
| L0-3    | 0.0978          | 0.01469                         | 0.01032                       | 1.42      | 0.950                       |
| L0-4    | 0.139           | 0.01673                         | 0.01112                       | 1.51      | 1.250                       |
| L0-5    | 0.167           | 0.01891                         | 0.01032                       | 1.63      | 1.618                       |
| L0-6    | 0.199           | 0.02052                         | 0.01123                       | 1.83      | 1.772                       |
| L0-7    | 0.209           | 0.02619                         | 0.01032                       | 2.54      | 2.025                       |
| L0-8    | 0.299           | 0.04368                         | 0.01019                       | 4.31      | 2.934                       |
| L0-9    | 0.344           | 0.04742                         | 0.01098                       | 4.32      | 3.133                       |
| L0-10   | 0.385           | 0.05746                         | 0.01019                       | 5.64      | 3.778                       |
| L0-11   | 0.400           | 0.05095                         | 0.01032                       | 4.94      | 3.876                       |
| L0-12   | 0.499           | 0.05844                         | 0.01057                       | 5.53      | 4.721                       |

表-1 縦分散の実験結果

| Run No. | $u$<br>(cm/sec) | $D_2$<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | $v$<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | $D_2/\nu$ | Reynolds No.<br>$Re=ud/\nu$ |
|---------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------|
| LA-1    | 0.0627          | 0.0003016                       | 0.01112                       | 0.0271    | 0.563                       |
| LA-2    | 0.0830          | 0.0003574                       | 0.01135                       | 0.0315    | 0.731                       |
| LA-3    | 0.103           | 0.0003898                       | 0.01141                       | 0.0389    | 0.903                       |
| LA-4    | 0.139           | 0.0005667                       | 0.01112                       | 0.0510    | 1.250                       |
| LA-5    | 0.153           | 0.0005692                       | 0.01217                       | 0.0418    | 1.257                       |
| LA-6    | 0.198           | 0.0006413                       | 0.01230                       | 0.0641    | 1.610                       |
| LA-7    | 0.212           | 0.0006185                       | 0.01135                       | 0.0545    | 1.868                       |
| LA-8    | 0.228           | 0.0006263                       | 0.01106                       | 0.0626    | 2.061                       |
| LA-9    | 0.285           | 0.0008330                       | 0.01204                       | 0.0691    | 2.367                       |
| LA-10   | 0.358           | 0.001193                        | 0.01117                       | 0.107     | 3.205                       |

表-2 横分散の実験結果

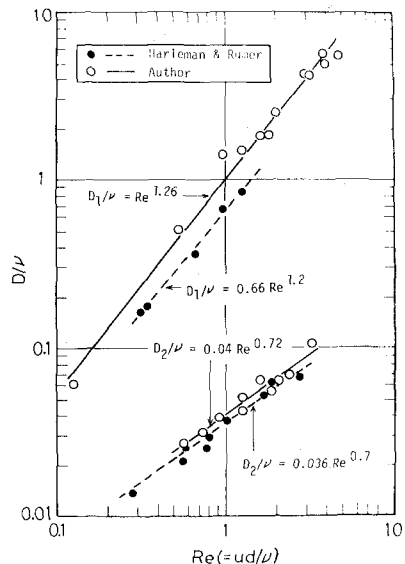


図-4 分散係数とレイノルズ数の関係