

II-6 モーメント法による巨視的分散係数の推定

室蘭工業大学 正会員 藤間 聡
同 上 学生員 高島 英博

1. まえがき

多孔体内の保存系溶解物質（以後、トレーサと称す。）の分散は、微視的分散と巨視的分散に大別される。前者は、トレーサ自身の分子拡散および分散物質の分子群の主流方向平均移動距離と一分子の主流方向移動距離との差により生ずる。一方、後者は分散物質が通過する層の主流方向平均移動距離と全断面平均移動距離との差により生ずる。微視的分散に関する研究は現在に至るまで数多くなされており、その研究成果から微視的縦方向分散係数は浸透流速と構成材料固有の分散率との積で表示されることが知られている¹⁾。しかし、巨視的分散過程にこの微視的分散係数を適用した場合、実測値と著しくかけ離れた結果を得ることが多い²⁾。この原因は、構成材料の空隙径の偏差により生ずる微視的分散に対し、巨視的分散は地層構造の不均一性に起因するためと考えられる。本研究では、Chatwin が提示したモーメント法³⁾を用いて透水係数が既知である成層帯水層の巨視的縦方向分散係数の定式化を図り、溶解物質の分散形態とその経時変化を究明する。

2. 成層帯水層における分散過程の定式化

本研究で解析対象とする成層帯水層は図-1に示す透水係数の異なる多層から構成されている。

2-1. 分散方程式

成層帯水層の任意位置におけるトレーサの分散過程を次式で与える。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V \frac{\partial c}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} (D_2 \frac{\partial c}{\partial z}) \quad \dots (1)$$

ここに、 c ；トレーサ濃度、 V ；浸透流速（実流速）
 D_1 ；微視的縦方向分散係数、 D_2 ；微視的横方向分散係数、 x ；主流方向の座標、 y 、 z ；主流方向に直角方向の座標、 t ；時間をそれぞれ示す。

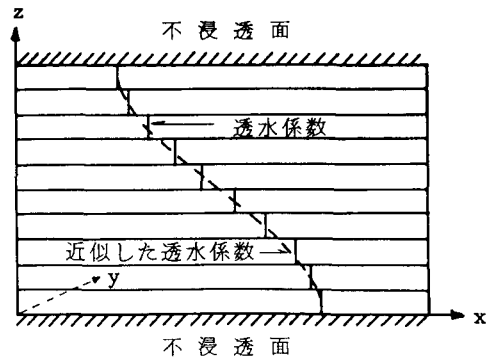


図-1. 成層帯水層モデルと透水係数分布

(1) 式の取り扱いを容易にするため、変数変換を行い無次元化すると次式となる。但し、 y 方向の分散過程は無視できるものとして二次元解析とする。

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + a \chi \frac{\partial C}{\partial \xi} = \psi_1 \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\psi_2 \frac{\partial C}{\partial \zeta}) \quad \dots (2)$$

$$\tau = \frac{\bar{D}_2}{h^2} t, \quad \xi = \sqrt{D_2/D_1} \frac{1}{h} (x - \bar{V} t), \quad \zeta = \frac{z}{h}, \quad a = \frac{h \bar{V}}{\sqrt{D_1 D_2}}, \quad \chi = \frac{V - \bar{V}}{\bar{V}}, \quad \psi_1 = \frac{D_1}{D_1}, \quad \psi_2 = \frac{D_2}{D_2}, \quad C = \sqrt{D_1/D_2} \frac{h c}{c_0}$$

ここに、 h ；全層厚、 c_0 ；トレーサ初期濃度、 $\bar{V}$ ；全層にわたる平均値をそれぞれ示す。

ここで、(2) 式の初期、境界条件に関してはトレーサを時刻 $\tau = 0$ 、地点 $\xi = 0$ に瞬間放出とした場合を考えるるとそれぞれ次式となる。

$$\text{初期条件: } C = 0 \quad \tau = 0 \quad \dots (3) \quad \text{境界条件: } \psi_2 \frac{\partial C}{\partial \zeta} = 0 \quad \zeta = 0 \text{ or } 1 \quad \dots (4)$$

2-2. モーメント法

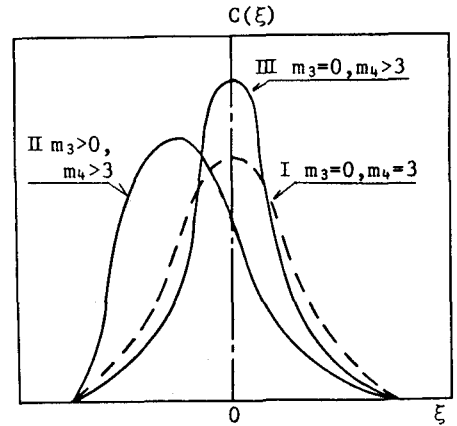
鉛直方向に流速分布を有する流れにおける分散現象を取り扱う方法としてモーメント法がある⁴⁾。ここで、以下に同方法を概説する。

無次元濃度 C のモーメント C_p および平均値回りのモーメント m_p を次式で定義する。但し、下付添字 p はモーメントの次数を表す。

$$C_p = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^p C \, d\xi \quad \dots (5)$$

$$m_p = \int_0^1 C_p \, d\zeta = \int_0^1 \int_{-\infty}^{\infty} \xi^p C \, d\xi d\zeta \quad \dots (6)$$

(6) 式において、 m_1 は平均濃度位置を示し、移動座標系 ξ では $m_1 = 0$ となる。 m_2 は分散 (variance) σ^2 を示し、平均濃度位置 m_1 からの偏差となる。 m_3 はピーク点での左右非対称性の程度を示す歪度であり、正規分布のとき $m_3 = 0$ となる。 m_4 はピーク部の高低の程度を示す尖度であり、正規分布のとき $m_4 = 3$ となる。図-2



は C が正規分布のときと、3, 4 次モーメントがそれぞれ確率密度関数 C に影響を及ぼすときの比較である。分布型 I は C が正規分布のときであり、 $m_3 = 0$ 、 $m_4 = 3$ となる。分布型 II は $m_3 > 0$ 、 $m_4 > 3$ のときの分布であり、ピーク部が中央部より左にあり、平均位置が左にずれている。分布型 III は $m_3 = 0$ 、 $m_4 > 3$ のときの分布であり、正規分布と平均位置は同じであるが分散 σ^2 が小さくなることがわかる。ここで、これらの p 次モーメントを用いて無次元分散方程式 (2) 式を変形する。(2) 式に ξ^p を乗じて $-\infty \sim +\infty$ まで積分し (5) 式の関係を用いると次式が得られる。

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} = a \chi p C_{p-1} + p(p-1) \psi_1 C_{p-2} + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\psi_2 \frac{\partial C_p}{\partial \zeta}) \quad \dots (7)$$

(7) 式を $0 \sim 1$ まで積分し (6) 式の関係を用いると次式となる。但し、(7) 式の右辺第 3 項は境界条件によって消滅する。

$$\frac{\partial m_p}{\partial \tau} = a p \int_0^1 \chi C_{p-1} \, d\zeta + p(p-1) \int_0^1 \psi_1 C_{p-2} \, d\zeta \quad \dots (8)$$

2-3. 巨視的縦方向分散係数

図-1 に示す成層帯水層における透水係数分布が次式の余弦関数で近似できる場合の巨視的縦方向分散係数の定式化を行う。

$$k = \bar{k}(1 + \eta \cos(\pi \zeta)) \quad \dots (9)$$

ここに、 k ; 任意高さにおける透水係数、 $\bar{k}$; 断面平均透水係数、 η ; 任意定数をそれぞれ示す。巨視的縦方向分散係数 K_1 は、トレーサ分子の分散 (variance) σ_x^2 との間に次式の関係がある。

$$K_1 = \frac{1 d \sigma_x^2}{2 d \tau} = \frac{\bar{D}_1}{2} \frac{d \sigma^2}{d \tau} = \frac{\bar{D}_1}{2} \frac{d m_2}{d \tau} \quad \dots (10)$$

ここに、 K_1 ; 巨視的縦方向分散係数、 σ_x^2 ; $x-z$ 座標系におけるトレーサの分散 (variance)、 σ^2 ; 無次元移動座標系 ξ におけるトレーサの分散 (variance) をそれぞれ示す。

以上の定式化から巨視的縦方向分散係数は (10) 式に (8) 式を代入することによって得られる。(7) 式に含まれる無次元微視的横方向分散係数 ϕ_2 は各層の構成材料により異なりうる関数であるため、 D_2 が一定の場合と D_2 が流速および分散率に比例する場合の三つにわけて解析する。

(i) D_2 が一定の場合

この条件は流速が小さく Peclet 数が 10 以下のときに適用することができる。このとき、微視的横方向分散係数は有効分子拡散係数にほぼ等しく⁹⁾、 $D_2 = \bar{D}_2$ となり無次元微視的横方向分散係数 ϕ_2 は 1 となる。従って、 $\phi_2 = 1$ を (7) 式に代入し、1 次モーメント C_1 を求めると次式となる。

$$C_1 = \frac{a\eta}{\pi} \cos(\pi\zeta) (1 - \exp(-\pi^2\tau)) \quad \dots (11)$$

(8)、(11) 式を(10) 式に代入すると、巨視的縦方向分散係数 K_1 は次式で示される。

$$K_1 = \bar{D}_1 + \frac{\bar{V}^2 h^2 \eta^2}{2D_2 \pi^2} (1 - \exp(-\pi^2\tau)) \quad \dots (12)$$

(12) 式より K_1 はトレーサ放出直後では微視的縦方向分散係数のスケールで揺がり、長時間経過後、平均流速、全層厚等の影響によりトレーサ放出直後に比べ非常に大きなスケールとなることがわかる。

次に、(7)、(8) 式を用いて平均値回りの2,3,4 次モーメントを求めると次式となる。

$$\begin{aligned} m_2 &= \frac{a^2 \eta^2}{\pi^2} \left(\tau - \frac{1}{\pi^2} (1 - \exp(-\pi^2\tau)) \right) \\ m_3 &= \frac{3a^3 \eta^3}{8\pi^3} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \left(\tau - \frac{1}{\pi^2} (1 - \exp(-\pi^2\tau)) \right) \\ m_4 &= \frac{3a^4 \eta^4}{8\pi^4} \left(\frac{\pi^2}{8} + \frac{3}{4} + \frac{1}{\pi^2} \right) \left(\tau - \frac{1}{\pi^2} (1 - \exp(-\pi^2\tau)) \right) - \frac{a^4 \eta^4}{\pi^6} (\tau \exp(-\pi^2\tau) \\ &\quad + \frac{2}{3\pi^2} (1 - \exp(-\pi^2\tau)) + \frac{1}{12\pi^2} (1 - \exp(-4\pi^2\tau))) + 3m_2^2 \end{aligned} \quad \dots (13)$$

(ii) D_2 が流速に比例する場合

この条件は、各層の分散率がほぼ等しいときに適用することができる。このとき、微視的横方向分散係数 D_2 は横方向分散率 A_2 と流速の積で表すことができ無次元微視的横方向分散係数 ψ_2 は次式となる。

$$\psi_2 = \frac{D_2}{D_2} = \frac{A_2 V}{A_2 V} = 1 + \eta \cos(\pi\zeta) \quad \dots (14)$$

ここに、 A_2 ; 横方向分散率を示す。この ψ_2 を(7) 式に代入して得られる微分方程式の解 C_1 は解析的に求めることができないため分散項の寄与が小さいトレーサ放出直後の過渡解とトレーサ分子の移動が一樣になった定常解に分けて求める。

分散過程初期：

$$\frac{\partial C_1}{\partial \tau} = a\eta \cos(\pi\zeta) \quad \dots (15)$$

上式の過渡解 C_1 は次式となる。

$$C_1 = a\eta \tau \cos(\pi\zeta) \quad \dots (16)$$

(8)、(16) 式を(10) 式に代入すると、分散過程初期の巨視的縦方向分散係数 K_1 は次式となる。

$$K_1 = \bar{D}_1 + \frac{\bar{V}^2 \eta^2 \tau}{2} \quad \dots (17)$$

分散過程定常期：

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} (\psi_2 \frac{\partial C_1}{\partial \zeta}) = -a\eta \cos(\pi\zeta) \quad \dots (18)$$

よって、定常解 C_1 は次式となる。

$$C_1 = \frac{2}{\pi^2} \log \left[\frac{2(1 + \eta \cos(\pi\zeta))}{1 + \sqrt{1 - \eta^2}} \right] \quad \dots (19)$$

したがって、分散過程定常期の巨視的縦方向分散係数 K_1 は次式となる。

$$K_1 = \bar{D}_1 + \frac{\bar{V}^2 h^2 \eta^2}{D_2 \pi^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{\eta^2}{8} + \frac{\eta^4}{16} + \dots \right) \quad \dots (20)$$

(20) 式の右辺第1 項のみを考慮した巨視的縦方向分散係数 K_1 は(12) 式の $\tau \rightarrow \infty$ の値と一致する。

(iii) D_2 が分散率に比例する場合

透水係数は構成材料の代表粒径の二乗に比例することが知られている⁸⁾。

$$k = \alpha d^2 \quad \dots (21)$$

ここに、 α ; 任意乗定数、 d ; 構成材料の代表粒径をそれぞれ示す。上式と(9) 式から ψ_2 は次式となる。

$$\psi_2 = \frac{A_2 V}{A_2 \bar{V}} = \frac{(1 + \eta \cos(\pi \xi))^{3/2}}{1 + 3\eta^2/16} \quad \dots (22)$$

上式を用いて、1次モーメントの過渡解 C_1 を求めると次式となる。

$$C_1 = -\frac{a\eta}{\pi^2} (1 + \frac{3\eta^2}{16}) (\frac{1}{\sqrt{\eta \cos(\pi \xi) + 1}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \eta}}) \quad \dots (23)$$

(23) 式を (10) 式に代入すると巨視的縦方向分散係数 K_1 は次式となる。

$$K_1 = \bar{D}_1 + \frac{\bar{V}^2 h^2 \eta^2}{2\pi^2 \bar{D}_2} (1 + \frac{3\eta^2}{16}) \quad \dots (24)$$

(24) 式の右辺第1項のみを考慮した巨視的縦方向分散係数 K_1 は (12)、(20) 式の値と一致する。

2-4. 断面平均濃度

成層帯水層は断面方向に流速分布を有するため、トレーサ分子の移動距離も断面方向に差異を生ずる。このため、(a) 観測井の一定水深に測定器を設置した場合、(b) 観測井の断面平均濃度を測定した場合、においては異なった濃度分布を得る。

本研究では、後者の断面平均濃度を前節で述べたモーメント法を用いて定式化を行う。

(2) 式の解を求めることは、トレーサを瞬間放出とした場合、応答関数である濃度の確率密度関数を求めることに帰着する。確率密度関数 $C(\xi)$ をフーリエ変換して次式で定義される特性関数 $\Phi(r)$ を導入する。

$$\Phi(r) = E(e^{ir\xi}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ir\xi} C(\xi) d\xi \quad \dots (25)$$

ここに、 r ; 任意の実数値パラメータ、 i ; 虚数単位、 $E(\cdot)$; 期待値をそれぞれ示す。

この特性関数 $\Phi(r)$ の対数をとると、次式の無限べき級数で表されるキュムラント母関数 $\phi(r)$ を得る。

$$\phi(r) = \log \Phi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(ir)^j}{j!} \lambda_j \quad \dots (26)$$

ここに、 λ_j ; j 次のキュムラントを示す。この λ_j と平均値回りの p 次モーメント m_p との間に次式の関係が成立する。

$$\lambda_1 = m_1 = 0, \lambda_2 = m_2, \lambda_3 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}, \lambda_4 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 \quad \dots (27)$$

λ_2 は分散 σ^2 であり、 σ^2 を用いると (26) 式より特性関数 $\Phi(r)$ は次式となる。

$$\Phi(r) = \exp(-\frac{r^2 \sigma^2}{2}) \exp(1 + \frac{(ir)^3}{3!} \lambda_3 + \frac{(ir)^4}{4!} \lambda_4 + \dots) \quad \dots (28)$$

(28) 式を (25) 式に代入した後、フーリエ逆変換すると次式となる。

$$C(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ir\xi - \frac{r^2 \sigma^2}{2}) \exp(1 + \frac{(ir)^3}{3!} \lambda_3 + \frac{(ir)^4}{4!} \lambda_4 + \dots) dr \quad \dots (29)$$

(29) 式にエルミート多項式の積分形を用いると次式となる。

$$C(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}) [1 + \frac{\lambda_3}{6} \text{He}_3(\frac{\xi}{\sigma}) + \frac{\lambda_4}{24} \text{He}_4(\frac{\xi}{\sigma}) + \dots] \quad \dots (30)$$

ここで、 He_i ; i 次のエルミート関数を示し、 He_3 、 He_4 はそれぞれ次式で定義される。

$$\text{He}_3 = (\xi/\sigma)^3 - 3(\xi/\sigma), \text{He}_4 = (\xi/\sigma)^4 - 6(\xi/\sigma)^2 + 3$$

(30) 式に前述した (13) 式の平均値回りの2,3,4次モーメントを用いると断面平均濃度を得る。

2-5. 微視的分散係数の同定

巨視的縦方向分散係数を決定するには、微視的分散係数を正確に把握しなければならない。本研究では、この微視的分散係数を最適同定するためにPowellの共役方向法を用いる。この方法は、非線形関数の最小化問題に対する解法であり、その妥当性は著者の一人⁷⁾によって確かめられている。

最適同定に用いた3次元分散方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_1 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_2 \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \dots (31)$$

初期条件: $c = 0 \quad t = 0$ 境界条件: $c = c_0 e^{-\gamma t} \quad x = 0, c = 0 \quad x = \infty$

地点 $x=0$ における境界条件は、分散実験においてトレーサを瞬間放出する際に矩形波状にすることが不可能であるため、トレーサの挙動に従って濃度減衰率 γ を導入した。(31) 式の解は次式となる。

$$c = \frac{c_0 Q}{8\pi D_1 R} \exp(-\gamma t) \left[\exp\left(\frac{Vx - \beta R}{2D_1}\right) \text{Erfc}\left(\frac{R - \beta t}{\sqrt{4D_1 t}}\right) + \exp\left(\frac{Vx + \beta R}{2D_1}\right) \text{Erfc}\left(\frac{R + \beta t}{\sqrt{4D_1 t}}\right) \right] \quad \dots (32)$$

ここに、 $R = [x^2 + (D_2/D_1)y^2 + (D_1/D_2)z^2]^{1/2}$, $\beta = [V^2 - 4D_1\gamma]^{1/2}$

c_0 ; 初期濃度、 Q ; 流量、 γ ; 放出井におけるトレーサ濃度減衰率、Erfc ; 余誤差関数をそれぞれ示す。

(32) 式の右辺第2項は、 R の増加に伴ない余誤差関数が急速に0に収束するため、次式を用いた。

$$c = \frac{c_0 Q}{8\pi D_1 R} \exp(-\gamma t) \exp\left(\frac{Vx - \beta R}{2D_1}\right) \text{Erfc}\left(\frac{R - \beta t}{\sqrt{4D_1 t}}\right) \quad \dots (33)$$

3. 結果および考察

本研究に用いた成層帯水層は、図-3に示す透水係数分布を余弦関数で近似した水平五層帯水層モデルであり、各層の水理諸元を表-1に示す。このモデルは、総層厚 $h=50\text{cm}$ 、幅 $w=60\text{cm}$ 、長さ $g=100\text{cm}$ であり上、下面とも不透透面の被圧状態とした。本解析において、透水係数分布は(9)式を用いて次式とする。

$$k/\bar{k} = 1 + 0.84 \cos(\pi \zeta) \quad \dots (34)$$

微視的分散係数 D_1, D_2 を決定するため、各層を構成する砂の均一帯水層を高さ $h=30\text{cm}$ 、幅 $w=40\text{cm}$ 、長さ $g=70\text{cm}$ の寸法で個々に設置し、分散実験を行った。トレーサには濃度1%の塩水100ccを用いて瞬間線放出し、濃度測定はトレーサ放出井から20cm、50cm離れた観測井でトレーサ放出後15秒間隔で500回測定した。図-4は第4層を構成する砂の均一帯水層において動水勾配を0.03とし、トレーサ注入井から50cm離れた観測井で測定されたものである。同定値は125個のデータを(33)式を用いてPowell法により浸透流速、微視的分散係数 D_1, D_2 を最適同定し得られた。同図の低濃度部において同定値と測定値は一致していないが、これらの相対誤差は3%以内であり浸透流速、微視的分散係数 D_1, D_2 は的確に同定されていると考えられる。同解析法により得られた各層の縦方向分散率 A_1 、横方向分散率 A_2 をそれぞれ図-3に示す。

図-5は平均濃度位置を無次元時間 $\tau = 0 \sim \infty$ 間に関して(11)式から求めたものである。同図から $\tau = 0$ のときに瞬間線放出されたトレーサが時間経過と共に浸透流速に従って平均濃度位置は移動し、 $\tau > 0.3$ で平均濃度位置は定常状態になると考えられる。

動水勾配 $i=0.03$ で行った分散実験結果は、平均浸透流速 $\bar{v}=0.01757\text{cm/s}$ 、平均微視的分散係数 $\bar{D}_1=0.00331\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $\bar{D}_2=0.00048\text{cm}^2/\text{s}$ となり、トレーサの有効分子拡散係数 $0.00002\text{cm}^2/\text{s}$ を用いてPeclet数を求めると $Pe=41.7$ を得た。本実験は、各層の横方向分散率はほぼ等しく前述の D_2 が流速に比例している場合の条

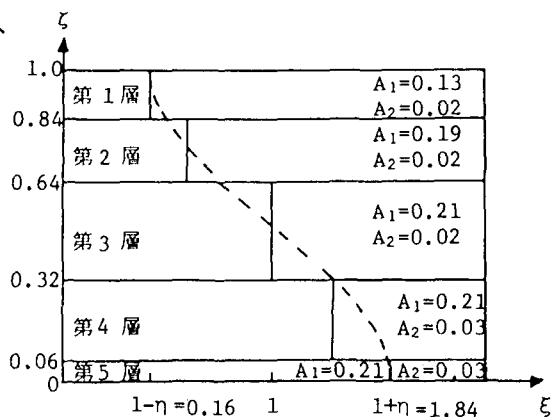


図-3. 透水係数分布

表-1. 各層の水理諸元

層	層厚 (cm)	透水係数 (cm/s)	粒径範囲 (mm)
第1層	8.0	0.03	0.15-0.30

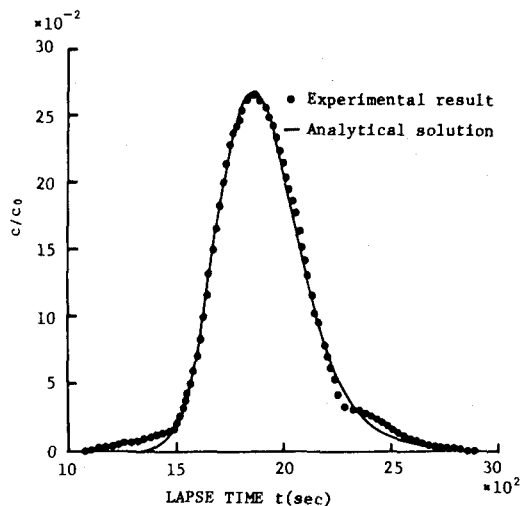


図-4. 第4層における同定値と測定値

件に適合するので(17)式を用いて分散過程初期の巨視的縦方向分散係数を求めると次式となる。

$$K_1 = 0.00331 + 0.00011t \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad \dots(35)$$

また、(20)式を用いて分散過程定常期の巨視的縦方向分散係数 K_1 を求めると次式となる。

$$K_1 = 0.00331 + 71.19 \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad \dots(36)$$

(35)、(36)式より、トレーサ放出から180時間(35)式に従い巨視的縦方向分散係数は増加し、その後分散過程定常期に入り巨視的縦方向分散係数 K_1 は(36)式の一定値になると考えられる。(36)式の K_1 を用いて巨視的縦方向分散率を求めると約40mとなり微視的縦方向分散率の約2万倍の値となった。一方、トレーサ放出から180時間後のトレーサ分子群の平均移動距離は約115mとなり、室内実験規模では分散過程定常期の分散現象を測定することはできないため、本研究では推定値のみ示す。

分散実験により測定された断面平均実測濃度と(30)式より得られた断面平均濃度を図-6に示す。実測濃度は、トレーサ注入井から50cm離れた観測井の高さ方向3点平均濃度である。同図より計算値はピーク部で差異を生ずるが全体的な傾向を精度よく表していると考えられる。以上の結果、モーメント法は本実験においては巨視的分散係数および濃度分布を十分な精度で推定できる。今後、数多くの水理条件の下で実験を行い、この方法の有用性を確かめていく所存である。本研究の実験および資料整理において本学土木工学科河海講座 山岸等技官、4年目学生北見光弘、菅原将文両君の協力を得たことを記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Klotz, D., Seiler, K.P., Moser, H. and Neumaier, F.: Dispersivity and Velocity Relationship from Laboratory and Field Experiments, Jour. Hydrology, 45, pp.169-184, 1984.
- 2) Pickens, J.F., and Grisak, G.E.: Scale-Dependent Dispersion in a Stratified Granular Aquifer, Water Resour. Res., 17(4), pp.1191-1211, 1981.
- 3) Chatwin, P.C.: The Approach to Normality of the Concentration Distribution of a Solute in a Solvent Flowing along a Straight Pipe, J. Fluid. Mech. 43, pp.321-352, 1970.
- 4) 前出 3)。
- 5) Fried, J.J. and Combarous, M.A.: Dispersion in Porous Media, Ad. Hydrosience, 7, pp.221-227, 1971.
- 6) Kovacs, G.: Seepage Hydraulics, Developments in Water Science, 10, Elsevier, pp.241-245, 1981.
- 7) 藤間 聡: 非線形最適化手法による飽和多孔体の分散係数の同定について, 土木学会北海道支部論文報告集, 41, pp.183-188, 1984.

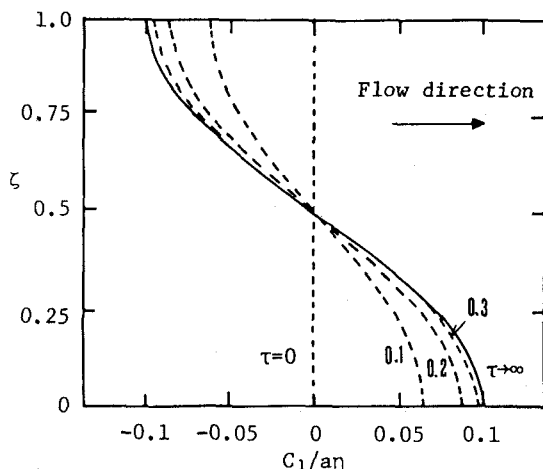


図-5. 平均濃度位置

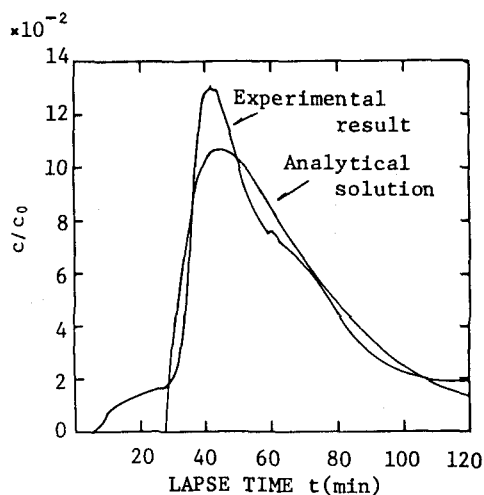


図-6. 断面平均濃度