

# 地盤汚染の影響予測に用いる 分散長の決定法について

小橋秀俊<sup>1</sup>・三木博史<sup>2</sup>・平山光信<sup>3</sup>・菱谷智幸<sup>4</sup>・山本博之<sup>5</sup>・大北康治<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ主任研究員(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所 技術推進本部総括技術研究官(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

<sup>3</sup>正会員 工博 大成基礎設計(株) 取締役技術本部長(〒113-0022 東京都文京区千駄木 3-43-3)

<sup>4</sup>正会員 工博 (株)ダイヤコンサルタントジオテクニカル事業部課長(〒330-8660 埼玉県さいたま市吉野町 2-273-3)

<sup>5</sup>正会員 鹿島建設(株) 技術研究所土木技術研究部 主管研究員(〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>6</sup>正会員 (株)鴻池組 東京本店 土木営業部 部長(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-11)

近年、建設工事で地盤汚染に遭遇し、大量の汚染土壌を処理するなどの事態が発生している。そのため、移流分散数値解析による汚染物質の挙動予測とモニタリングによる検証を行いながら、管理する手法の確立が必要となっている。しかしながら、移流分散解析プログラムへの入力定数の決め方や精度については未だ不明点が多い。そのうち、分散長に関してはスケール効果があり、実務上は文献値の使用に頼らざるを得ないのが現状である。本研究ではパラメータの感度解析、カラム試験、大型土槽実験に取り組み、①流速を的確に把握することの重要性、②7m程度までのスケールでは、測定値と文献値は概ね適合すること、③文献値を用いた場合到達範囲を安全側に予測できること、などが確認された。

**Key Words :** ground pollution, advection-dispersion analysis, longitudinal dispersivity, experiment

## 1. はじめに

近年、建設用地内で不法投棄等による地盤汚染に遭遇するケースが増え、浄化技術で処理しきれない大量の土壌が残留するなどの事態が発生している。そのため、移流分散数値解析による汚染物質の挙動予測とモニタリングによる検証を行いながら、汚染物質が隣接部や近傍の地下水へ拡散しないよう管理する手法が必要となっている。しかしながら、解析プログラムに入力する定数の決め方や精度については未だ不明点が多い。建設省土木研究所土質研究室(現独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム)ではこうした問題意識の下に、財団法人土木研究センター及び民間21社との間で、建設省官民連帯共同研究「地盤環境の性状保全型建設技術の開発」(平成9~11年度)を実施した。本論文はそのなかで、5m内外の規模における分散長の入力決定法について、パラメータの感度解析、小型カラム試験、大型カラム実験、大型土槽実験に取り組み検討した成果を報告するものである。

## 2. 分散長入力の現状と問題点

水溶性汚染の移流分散数値解析プログラムとして国内では、一次元理論解によるもの、平面二次元と三次元プログラム(有限要素系と差分系あわせて約15コード)が開発され、いくつかが公開されている。その基礎式は移流項(地下水実流速による移行)、拡散分散項(溶質濃度拡散と流体力学的分散の効果)、遅延項(吸脱着現象の蓄積による物質移行の遅れ効果)の3項から構成されている<sup>1)</sup>。このうち、拡散分散項に関する現状と課題は以下のとおりである。

a) 拡散分散項は溶質濃度拡散と流体力学的分散とから成る。建設実務で問題とする実流速の場合には、濃度拡散は無視できるほど小さく、拡散分散項は流体力学的分散係数 $D_h$ と考えてよい。流体力学的分散係数 $D_h$ は間隙流速(実流速)にほぼ比例し、一般にその比例定数が分散長と呼ばれている。分散長のうち流速方向のものを縦分散長 $\alpha_L$ 、それと直角方向の分散長を横分散長 $\alpha_T$ 、 $\alpha_T/\alpha_L$ を縦横分散比と称している。間隙率分布等の不均質性が介在しない小規模なスケールであれば、分散

長はレイノルズ数と実流速の関数で表され平均粒径に近い値と言われている<sup>2)</sup>。

- b)しかし、実際には空間的に間隙率が変化するなどの不均質性が存在するため、分散長は観測規模が大きくなるにしたがって増大する。これにより、野外では室内実験で得られる分散長よりもはるかに大きな値を取る<sup>2),3)</sup>。実務ではこのようなスケール効果の影響が卓越していると考えられている。
- c)スケール効果に関しては、Moujin Xu<sup>4)</sup>、Kinzelbach<sup>5)</sup>などにより、過去の研究者が実測し統計的に整理した相関関係などがまとめられている。このなかで Neuman<sup>7)</sup>がスケール 100m 以内で縦分散長  $\alpha_L=0.0175L^{1.46}$ (単位は m, L: 観測規模)という関係式を示したことが紹介されている<sup>4)</sup>。Beims は過去の観測事例 (60cm~10000m) を整理し、散布図と相関曲線を描いている<sup>5)</sup>。2 つの縦分散長を表-1 にまとめた。Moujin Xu は縦分散長の増加の割合は距離を検討し、1000m を超えると著しく鈍化すると指摘している。文献値にばらつきがあるのは、実流速の把握精度の信頼性がデータ間で異なることが一因と考えられる。また、縦横分散比については 1/10~1/30 とされる場合が多いものの、実流速の把握精度が低い場合には 1/3~1/5 を使用すべきとの見解もある<sup>2),5),6)</sup>。
- d)これまで国内外の研究者によって、カラム試験や模型実験などによる縦分散長や縦横分散比の実測例は多い<sup>7)</sup>。中・大型の実験は Helmut Kobus<sup>8)</sup> や Betz, C.<sup>9)</sup>、Couloulos, H.<sup>10)</sup>らによっても行われているが、本実験ではカラムスケール(数 10cm)から大型土槽スケール(10m)まで、同じ砂で複数の溶質に対して(種類、流速、濃度、初期条件)などの設定を変えながら統一的行ったことが特徴である。
- e)実務では規模とともに時間的な制約がある。そのため、案件ごとに実測に基づいた分散長を定量することが難しく、文献値の使用に頼らざるを得ない。建設用地で遭遇する汚染土壌については、動

きにくく、到達範囲の空間的な拡大よりも、近傍の着目距離に対する到達時間が問題となる場合が多い。そのため、10m 以内の短いスケールでも、縦分散長に求められる設定精度、文献値の表示精度、定量値の安定性や再現性を検証しておくことは有意義である。

### 3. 分散長に関するパラメータの感度解析

有害物質の到達範囲を予測する場合に、分散長の入力設定で生じる変動幅を確認するとともに、分散長設定に至る一連の手順のなかで、過誤に結びつく要因を把握するため、パラメータの感度解析を試みた。解析では平面二次元の有限要素系コード (Dtransu-2D-EL) を用いて、長さ 7m×幅 4m の平面領域内での 20 日後の到達範囲を比較した。領域内は飽和地盤とし、非吸着物質が定点から低濃度で継続注入されると仮定した。解析ケースと入力定数は表-2 のとおり、実流速 2 レベル×縦分散長 3 レベル×縦横分散比 4 レベルの合計 24 ケースとした。なお、流速設定に当たっては、後述の大型土槽実験ケースの実流速 1m 内外では、到達範囲が解析領域 (7×4m) を大幅にスケールアウトすることから、10cm/日と 1cm/日の 2 レベルとした。図-1 はそのコンター線であり、以下のような所見が得られた。

a)比濃度 10%線以上 (図-1 の網かけ領域) の下流流心上の到達距離は、いずれのケースとも実流速の流下スケール (図-1 中の矢印) に追従し、縦分散長値の入力設定による変化は少ない。これに対して、比濃度 2%以下の低濃度線は速流スケールのかかなり前方を移行し、入力値による変化が極めて大きい。Case1-1 と Case2-1 シリーズの比較、Case1-2 と Case2-2 シリーズの比較、Case1-3 と Case2-3 シリーズの比較などの結果から、変動は実流速が大きいケースほど大きいことがわかる。

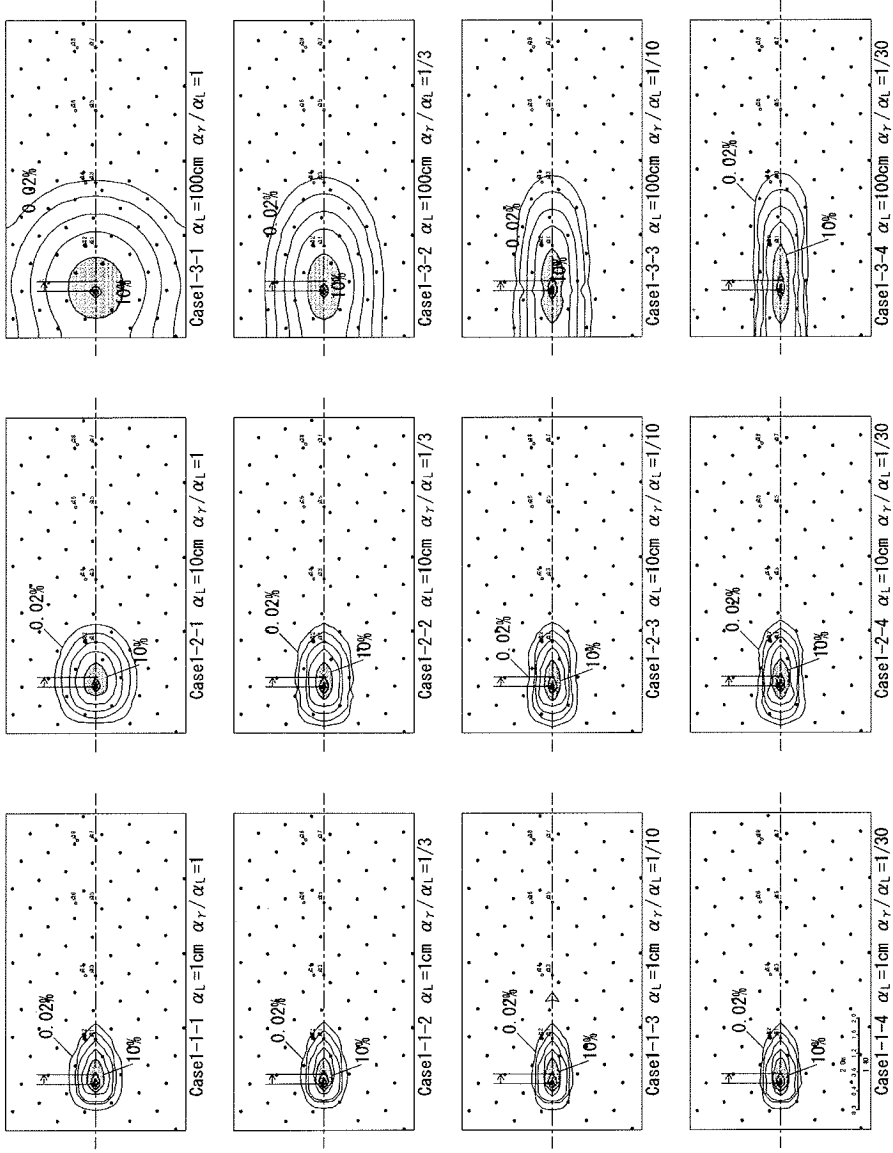
表-1 縦分散長と観測規模に関する過去の知見

観測規模	60cm	1m	2m	5m	10m	100m	1,000m	10,000m
Neumanによる縦分散長	0.83cm	1.8cm	4.8cm	18cm	50cm	14.5m	—	—
Beimsによる縦分散長	約1cm	約3cm	約4cm	約10cm	約30cm	約3m	約10m	約50m

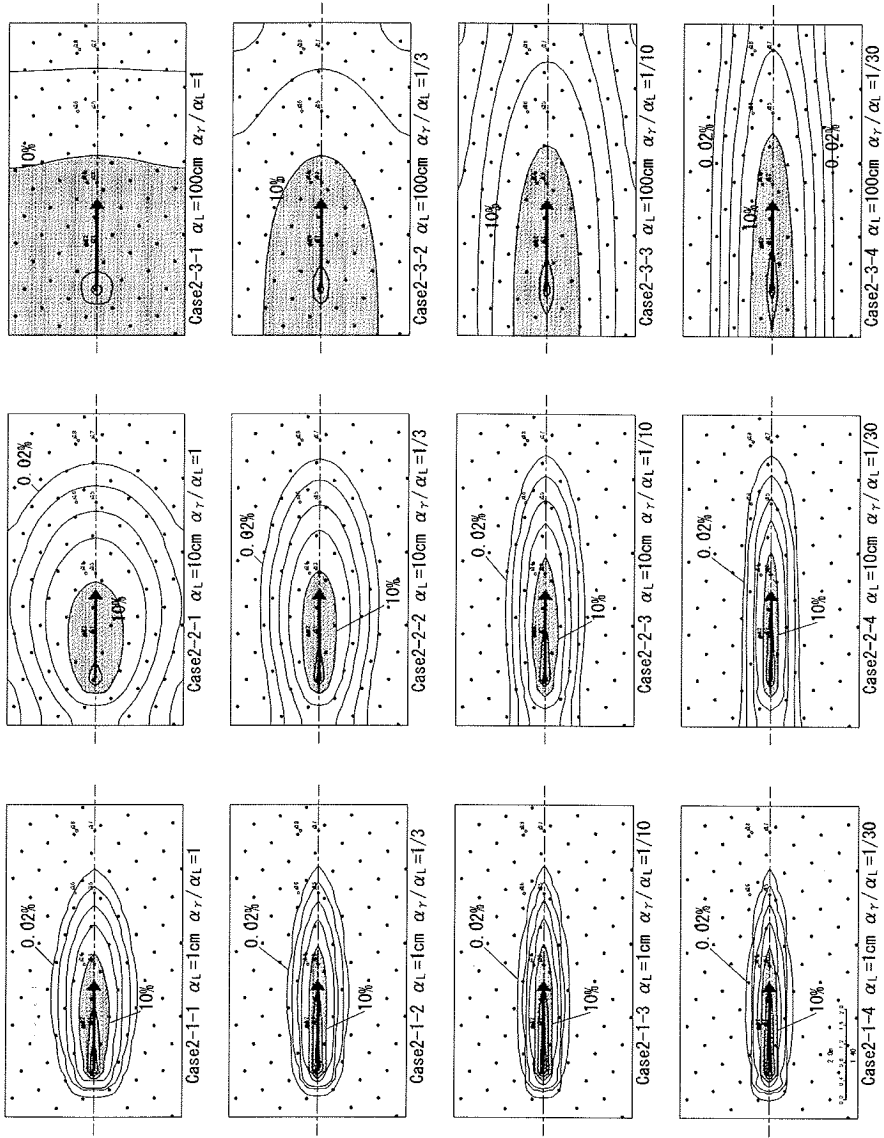
表-2 到達範囲に関する定数感度解析ケース一覧

分散長	縦分散長: $\alpha_L=1\text{cm}$				縦分散長: $\alpha_L=10\text{cm}$				縦分散長: $\alpha_L=100\text{cm}$			
	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30	縦横比 1/1	縦横比 1/3	縦横比 1/10	縦横比 1/30
実流速: $V_f$ 1cm/日	Case 1-1-1	Case 1-1-2	Case 1-1-3	Case 1-1-4	Case 1-2-1	Case 1-2-2	Case 1-2-3	Case 1-2-4	Case 1-3-1	Case 1-3-2	Case 1-3-3	Case 1-3-4
実流速: $V_f$ 10cm/日	Case 2-1-1	Case 2-1-2	Case 2-1-3	Case 2-1-4	Case 2-2-1	Case 2-2-2	Case 2-2-3	Case 2-2-4	Case 2-3-1	Case 2-3-2	Case 2-3-3	Case 2-3-4

<比較条件> 注入開始20日後の汚染到達形状にて比較を行う



網かけ部は比濃度10%以上の領域、矢印は実流速による移動スケール、コンター線は下流側より比濃度0.02%、0.1%、0.5%、2%、10%、50%、75%  
 図-1 a) 分散長の入力条件と濃度コンター線の到達範囲  
 実流速1cm/日の20日後の濃度分布曲線(Case1シリーズ)



網がけ部は比濃度 10%以上の領域、矢印は実流速による移動スケール、コンター線は下流側より比濃度 0.02%, 0.1%, 0.5%, 2%, 10%, 50%, 75% 分散長の入力条件と濃度コンター線の到達範囲  
 図-1 b) 分散長の入力条件と濃度コンター線の到達範囲  
 実流速 10cm/日の 20 日後の濃度分布曲線 (Case2 シリーズ)

- b) 縦横分散比の設定値によって、下流流心上の到達距離はあまり変化しないが、到達幅の変化は大きい。到達幅の変化は、Case1-1 と Case1-2 と Case1-3 シリーズの比較、Case2-1 と Case2-2 と Case2-3 シリーズの比較により、実流速及び縦分散長の入力値が大きいほど顕著であることがわかる。以上のことは、実流速が大きく、低比濃度（数%レベル以下）に関心がある場合ほど、分散長の入力に注意を払う必要があることを示している。
- c) 到達範囲を予測する場合、実流速と対象期間から大体の観測規模を設定し、これに対応した縦分散長の入力を行う必要がある。その際、観測規模を介して、実流速の把握精度が縦分散長及び横分散長に反映する。例えば、観測規模 2m の場合 ( $V_r=10\text{cm/日}$  の 20 日後) は縦分散長  $\alpha_L=4\sim 5\text{cm}$  と推定される。仮に  $V_r=10\text{cm/日}$  の下で縦分散長  $\alpha_L=1\text{cm}\sim 10\text{cm}$ 、縦横分散比  $1/1\sim 1/30$  で変化しても、到達範囲の変動は Case2-1 シリーズ～Case2-2 シリーズの範囲内に収まる。しかし、透水係数や有効間隙率の設定誤差のため、実流速が 1 桁小さく  $V_r=1\text{cm/日}$ 、観測規模が 20cm、縦分散長  $\alpha_L=0.5\text{cm}$  と評価されると、予測到達範囲が Case1-1 シリーズよりも縮小する。実流速とりわけ透水係数の把握精度の確保が極めて重要と考えられる。

#### 4. 小型カラム試験にもとづく縦分散長の同定

##### (1) 破過試験及び縦分散長同定の方法

溶液の種類、濃度条件、流速条件を変化させても、得られる縦分散長の同定値に再現性があるか

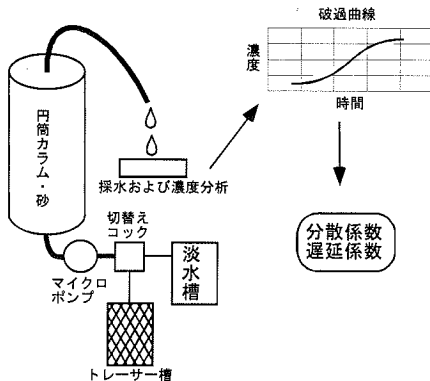


図-2 小型カラム試験の概要

どうか、大幅な変動を生じるか否かを確認するため、本小型カラム試験を実施した。小型カラム試験は図-2のような試験装置系に、砂（茨城県美浦産：表-3参照）を充填し飽和させた小型カラム（ $\phi 9$ ないし  $2\text{cm}\times h30\text{cm}$ ）をセットし、1,1,1-トリクロロエタン、塩水の水溶液に対して、初期状態、濃度、流速の設定を変えた破過試験を実施した。試験ケースは表-4に示す総計19ケースである。このうち、初期状態の設定については、試料土中の溶質濃度ゼロの状態から一定濃度の溶液を与える投与過程（合計12ケース）と、試料土内の溶質濃度を所定値にした状態から淡水を流す洗浄過程（合計7ケース）の大きく2過程とした。また、流速設定については実流速を  $0.5\sim 50\text{m/日}$  の範囲で変化させ、溶質濃度は塩水で4レベル（100, 200, 500,  $1,000\text{mg/l}$ ）、1,1,1-トリクロロエタンで2レベル（58,  $300\text{mg/l}$ ）とした。そして、他端面から流出してくる溶液濃度の時刻歴（破過曲線）を測定し、濃度分布理論解による同定から縦分散長を求めた。実施手順と主な留意点は次のとおりである。

a) カラム試料土の充填に際しては、含水比と重量を管理することにより、間隙率や透水係数になるべくばらつかないように配慮した。試料土の透水係数はカラム底面より淡水を定流量注入し（マイクポンプで圧送）、上面からの流出状況が定常化を確認したのち、流出量、注入圧、カラム長及び断面積から算出した。有効間隙率については、塩水の通過時間（与えた濃度の0.5倍濃度が流出するまでの時間）から実流速  $V_r$  を求め、断面流速（ダ

$$C_e(t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{R_d x - V_r t}{2(DR_d t)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{V_r x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{R_d x + V_r t}{2(DR_d t)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

$D = \alpha_L V_r$      $\alpha_L$ : 縦分散長,  $V_r$ : 実流速

ここに、 $C_e$  は比濃度で、上流側境界溶質濃度を1とした場合の濃度比である。また、関数  $\operatorname{erfc}$  は余誤差関数を表す。

表-3 小型カラム試験に用いた試料土

砂（茨城県美浦産）		
自然含水比		5.20%
粒度	礫分	6%
	砂分	91%
	シルト分	3%
	粘土分	—
pH		5.1
有機物含有量		0.68%
CEC		771mg/kg乾量

ルシー流速)  $V_d$  との比率を計算した。その結果、間隙率とほぼ等しいことが確認されたため、これを有効間隙率とした。

- b) 溶液については、食塩及び 1,1,1-トリクロロエタンを所定濃度まで脱気水に溶解させた。濃度測定法は塩水は電気伝導度、有機塩素系化合物はガスクロマトグラフによった。なお、試料砂に含有される自然由来のナトリウムが濃度測定の外乱要因とならないよう、事前に十分な内部通水を行った。
- c) 一次元の移流分散基礎式を、定常流れ場 ( $V_r$  : 一定) 及び上流側境界溶質濃度が一定という条件下で解くと、境界線からの下流端面までの距離 :  $x$ 、時間 :  $t$  として式(1)で表される。これに測定濃度値と時間を入力し、最小自乗法により拡散分散係数 :  $D$  と遅延係数 :  $R_d$  を求めた。

解で同定して得られた拡散分散係数、縦分散長、遅延係数等の一覧を表-4に、主なケースの濃度歴と同定曲線を図-3に示す。その結果、以下の点が確認された。

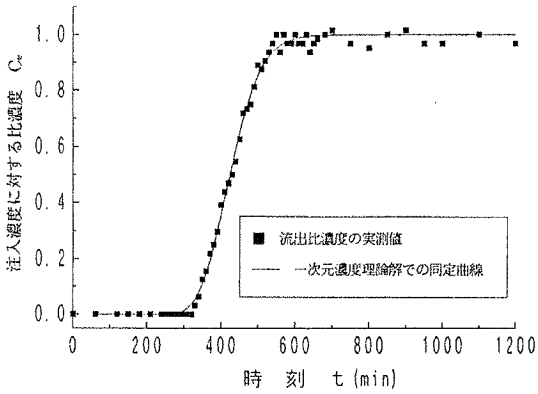
- a) 本試験で得られた拡散-分散係数は、いずれのケースとも  $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$  のオーダーとなっており、濃度拡散係数のオーダー ( $10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ ) を大きく上回る。ここで発生した拡散-分散現象は流体力学的分散によるものと考えられる。
- b) 塩水、1,1,1-トリクロロエタンなどの溶液の種類、試験方法(投与過程と洗浄過程)、濃度レベル、実流速(0.5~50m/日程度)によって、特異なばらつきはみられず、縦分散長  $\alpha_L$  は概ね 0.3~1cm の安定した値が得られた。19 ケースの平均値は 0.54cm となり、Neuman の縦分散長値(長さ 30cm 規模で 0.30cm) と大体一致した。

## (2) 一次元理論から得られた縦分散長

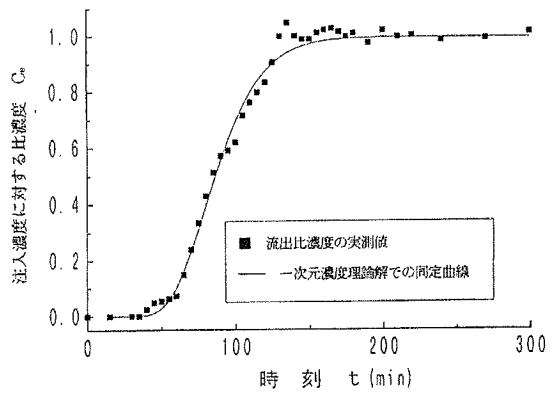
小型カラム試験 19 ケースに対して、一次元理論

表-4 小型カラム試験ケース、試験条件、試験結果一覧

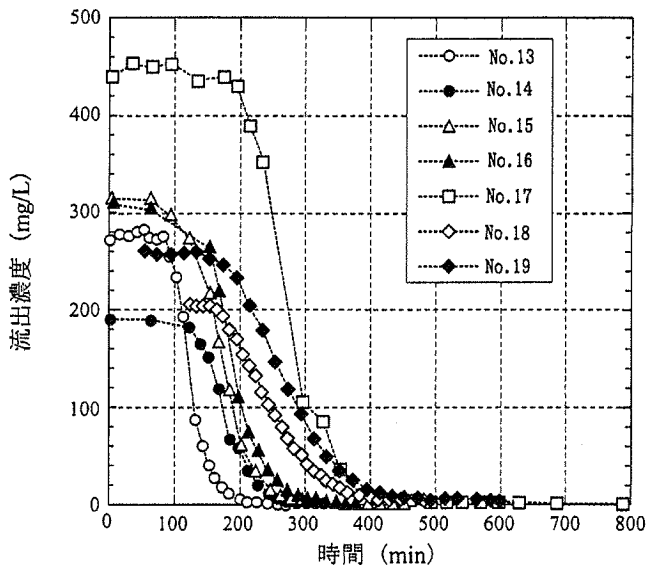
物質及び濃度		ケース No.	実流速 $V_r$ (m/日)	拡散-分散係数 $D_L$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	縦分散長 $\alpha_L$ (cm)	遅延係数 $R_d$	
投与過程	1,1,1-トリクロロエタン 58mg/l	No. 1	0.794	$3.80 \times 10^{-4}$	0.41	1.00	
		No. 2	5.96	$6.07 \times 10^{-3}$	0.88		
		No. 3	16.2	$5.45 \times 10^{-3}$	0.29		
	塩水	500mg/l	No. 4	0.695	$2.25 \times 10^{-4}$		0.28
			No. 5	14.9	$6.48 \times 10^{-3}$		0.38
			No. 6	56.6	$4.17 \times 10^{-2}$		0.64
		200mg/l	No. 7	32.6	$1.81 \times 10^{-2}$		0.48
			No. 8	2.4	$7.07 \times 10^{-4}$		0.26
			No. 9	9.9	$7.90 \times 10^{-3}$		0.69
		1,000mg/l	No. 10	28.0	$9.72 \times 10^{-3}$		0.30
			No. 11	1.7	$2.77 \times 10^{-4}$		0.14
			No. 12	10.4	$3.51 \times 10^{-3}$		0.29
洗浄過程	1,1,1-トリクロロエタン 300mg/l	No. 13	3.19	$2.26 \times 10^{-3}$	0.61	1.00	
		No. 14	2.19	$1.53 \times 10^{-3}$	0.61		
		No. 15	2.16	$1.98 \times 10^{-3}$	0.79		
		No. 16	2.05	$1.47 \times 10^{-3}$	0.62		
		No. 17	1.46	$9.34 \times 10^{-4}$	0.52		
	塩水 100mg/l	No. 18	2.19	$2.62 \times 10^{-3}$	1.04		
		No. 19	2.05	$2.55 \times 10^{-3}$	1.07		
平均 (No. 1~No. 19)		—	—	—	0.54	—	
<p>&lt; 供試体の条件 &gt; ・ 使用カラム : No. 1~12 は <math>\phi 9\text{cm} \times \text{h}30\text{cm}</math>, No. 13~19 は <math>\phi 2.2\text{cm} \times \text{h}30\text{cm}</math>          ・ 有効間隙率 <math>n_e</math> : 0.38~0.47          ・ 透水係数 <math>k</math> : (No. 1~6) <math>1.69 \times 10^{-2} \text{cm/s}</math>, (No. 7~12) <math>3.30 \sim 8.50 \times 10^{-2} \text{cm/s}</math>, (No. 13~19) <math>6.93 \times 10^{-3} \text{cm/s}</math></p>							



(a) No 1 1,1,1-トリクロロエタン  $V_r=0.794\text{m}/\text{日}$



(b) No 2 1,1,1-トリクロロエタン  $V_r=5.96\text{m}/\text{日}$



(c) No 13~19 1,1,1-トリクロロエタン及び塩水 (洗浄過程)

図-3 小型カラム試験の流出濃度歴と同定曲線

## 5. 大型カラム実験にもとづく分散長の同定

### (1) 大型カラム実験及び同定方法

一般に拡散-分散現象は流速方向のみでなく、流速と直交する二ないし三次元的な成分(横分散)も存在する。そこで、図-4(a)のような大型カラム試験装置(鋼製 $\phi 50\text{cm} \times h165\text{cm}$ )に流れ場を形成したのち、塩水を注入し濃度分布変化を観測した。塩水の到達形状が紡錘形ないし電球形になると予想されるため、有限要素法の軸対称二次元解析プログラム(Dtransu-2D)を用いて、縦分散長と縦横分散比

の同定を試みた。流れ場は  $V_r=0.25\text{m}/\text{日}$ 、注入する塩水濃度は  $10,000\text{mg}/\text{l}$  とした。使用プログラムは密度流との連成を扱えるタイプの型式ではあったが、塩水を鉛直下方に流しており、密度流を疑わせる現象(後述の大型土槽実験でみられた塩水の顕著な沈降等)が確認できなかったことから、塩水の密度調整を行わず、密度流の影響を考慮しない移流分散解析とした。実験手順及び実施上の留意点は次のとおりである。

a) 小型カラムと同一の砂試料(前述'表-3)を、ほぼ  $30\text{cm}$  ごとに踏み固めながら大型カラムに充

填し、最終的に間隙率（有効間隙率） $n=0.4$  程度に仕上げた。試料砂に含有される自然由来のナトリウムなどを、内部通水によって十分に掃流し、濃度測定に支障が出ないように配慮した。

- b) 大型カラムは上端面のみを二重断面構造とし、外側断面に流れ場として  $V_f=0.25\text{m/日}$  となるよう淡水を注水、中心部の円形断面（ $\phi 5\text{cm}$ ）からは、塩水（ $10,000\text{mg/l}$ ）をマイクロポンプで同速度となるよう定流量注入した。
- c) 塩水濃度分布の測定については、採水時に流れ場が攪乱されないよう、**図-4 (b)** に示す上・中・下3断面の原位置で地盤比抵抗を計測する方法によった。比抵抗センサー（電気伝導度計）は鋼棒の3ヶ所に抵抗線を巻き、各深度（上面から5cm, 65cm, 125cm）に計15点を設置した。設置にあたっては電気的な相互干渉を考慮し、カラム中心方向の設置間隔を10cm、縦断面内で位置がそろわないような配置とした。
- d) 比抵抗値を塩水濃度に換算するため、カラム内の地盤を各濃度の塩水で飽和させ、予め地盤の比抵抗値と塩水濃度の対応関係を検定した。塩水濃度は**図-4 (b)** に示すように、長さ3種類の採水管を各深度（底面から140cm, 80cm, 20cm）、中心線から0cm, 10cm, 20cmのポイント（計9点）で測定した。その結果、 $1,000\text{mg/l}$  以下の範囲では比抵抗による濃度の測定感度は  $1.6\ \Omega\text{m}$  で  $1,000\text{mg/l}$ 、 $2.4\ \Omega\text{m}$  で  $300\text{mg/l}$ 、 $3.0\ \Omega\text{m}$  で  $200\text{mg/l}$ 、 $5.8\ \Omega\text{m}$  で  $100\text{mg/l}$ 、 $10.6\ \Omega\text{m}$  で  $40\text{mg/l}$  であることが確認された。しかしながら、 $2,000$

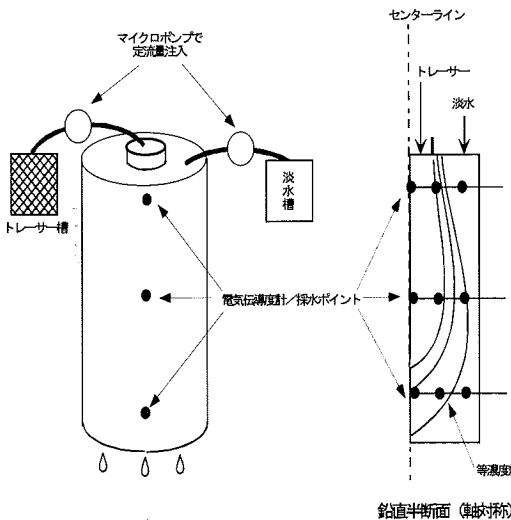
$\sim 10,000\text{mg/l}$  の範囲では比抵抗値が急激に変化したため（ $1.3\sim 1.2\ \Omega\text{m}$ ）、この濃度域の測定精度が低下することを念頭に計測に臨んだ。

- e) 軸対称二次元解析プログラム（Dtransu-2D）による縦分散長と縦横分散比の同定については、実流速  $0.25\text{m/日}$  のもとで、縦分散長4レベル（ $3\sim 30\text{cm}$ ）に対し縦横分散比を7あるいは3レベル（ $1/100\sim 1/1$ ）で入力し、計測データと最も近い組み合わせを求めた。

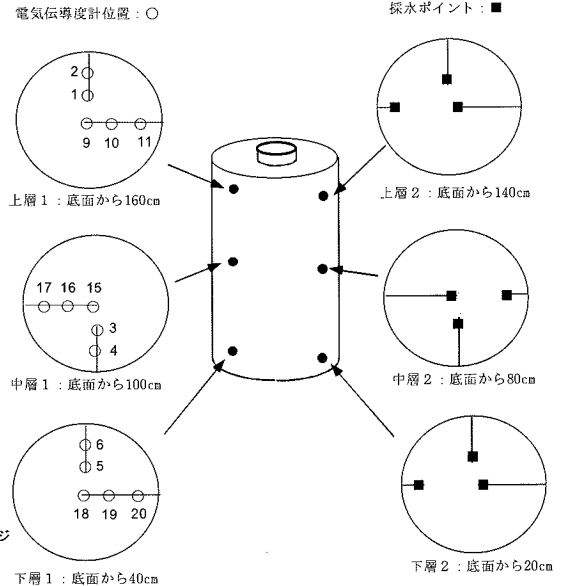
## (2) 軸対称二次元解析プログラムでの縦分散長、縦横分散長比

各測点における比抵抗値の時間推移を**図-5**に、いろいろな縦分散長と縦横分散比の組み合わせによる同定結果を**図-6**に示した。これらにより以下の所見が得られた。

- a) 15 地点の比抵抗センサー（**図-4 (b)** 中の Channel 番号が測点 No を表す）のうち、中心線上の No9, 15, 18 の3測点塩水の到達による比抵抗値の明確な低下（濃度上昇）が認められた。**図-5**によると上層の No9 が約4時間後に  $1.14\ \Omega\text{m}$ （ $8,000\text{mg/l}$ 、比濃度80%相当）まで、中層の No15 が約30時間後に  $1.29\ \Omega\text{m}$ （ $2,100\text{mg/l}$ 、比濃度21%相当）まで、下層の No18 は約50時間後に  $1.59\ \Omega\text{m}$ （ $1,400\text{mg/l}$ 、比濃度14%相当）まで変化している。



(a) 概念図



(b) 比抵抗（電気伝導度）センサー及び採水ポイントの位置

図-4 大型カラム実験の概要



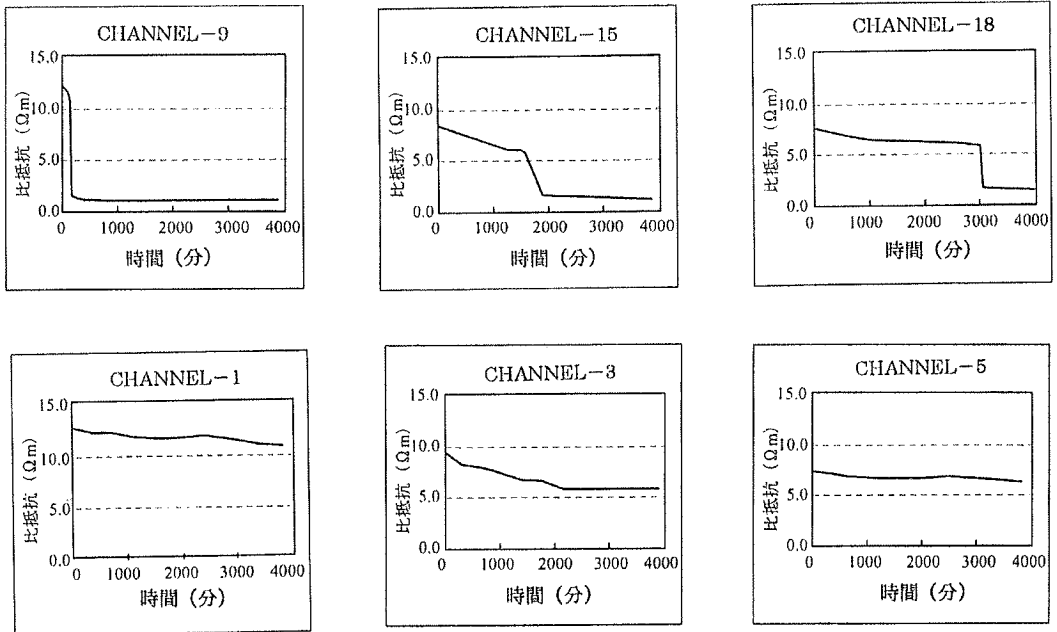
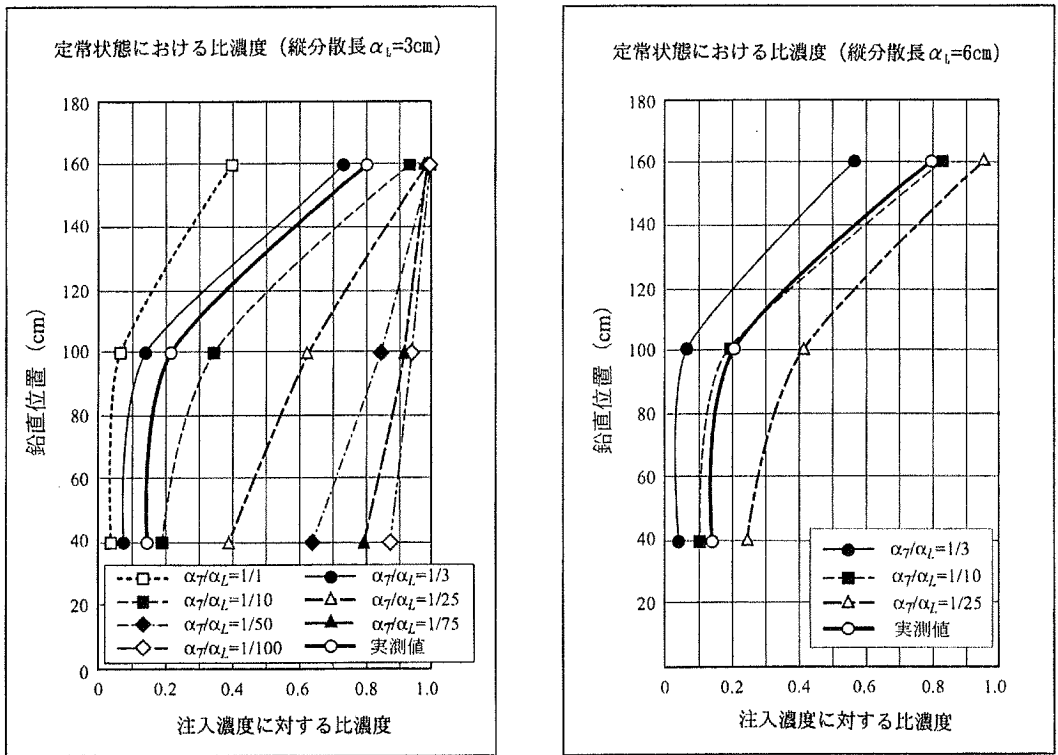


図-5 大型カラム内の各測定点における比抵抗の時間推移 (上段：カラム中心測点，下段：中心から10cmの測点)



凡例の数字は縦横分散比 ( $\alpha_T/\alpha_L$ ) を表す

図-6 軸対称二次元解析を用いた大型カラム試験結果に対する分散長の同定

b) 中心線より 10cm 離れた測点 (No1,3,5 及び No10,16,19) では、比抵抗値が徐々に低下する傾向がみられるが、3Ωm (比濃度 3%に相当) を下回る比抵抗値は観測されなかった。このことから、比濃度 3%を超える塩水の広がり、高々半径 10cm の範囲にとどまると推定される。また、中層及び下層部の No3, 5,16,19 では、65 時間後に比濃度 1%相当の比抵抗値 (5~7Ωm) が計測された。しかし、初期値が既に 50mg/l 相当の比抵抗値を示す測点があるなど外乱要因も多いため、これを以って比濃度 1%の到達とみるのは難しいと考えられる。

c) Beims の知見によれば移行規模  $L=1.5\text{m}$  に対する縦分散長  $\alpha_L=5\sim 6\text{cm}$ 、Neuman の知見 ( $\alpha_L=0.0175L^{1.46}$  単位:m) では  $\alpha_L=3.2\text{cm}$  となる。これらを参考に軸対称二次元解析プログラムで、縦分散長:  $\alpha_L$  及び縦横分散比:  $\alpha_r/\alpha_L$  の組み合わせを同定した結果、定常化後の中心線上の濃度分布については、**図-6** のように  $\alpha_L=6\text{cm}$  の  $\alpha_r/\alpha_L=1/10$  の適合性が最も高く、次いで  $\alpha_L=3\text{cm}$  の  $\alpha_r/\alpha_L=1/3, 1/10$  が良好であることがわかった。しかし、これら 3 ケースの横断面内の到達範囲については、比濃度 10%のコンター線が中心線から半径 8~10cm の範囲に及んでおり、比濃度 1%のコンター線は半径 10cm の領域を大幅に超える同定結果となった。

d) このように、実際には塩水の横断面内の広がりは、解析結果よりもかなり狭い範囲にとどまることがわかった。しかしながら、今回の比抵抗法では横断面内の濃度が十分な精度で把握できず、縦横分散比の特定には至らなかった。この点については、次に述べる 1,1,1 トリクロロエタン溶液の大型土槽実験で、より定量精度の高い分析法を用いた検証に委ねることとした。

## 6. 大型土槽実験にもとづく分散長の同定

### (1) 大型土槽実験及び同定方法

長さ 7m 規模の大型土槽の砂地盤内に地下水の流れ場を形成し、5m 内外の観測規模における縦分散長の確認、流れに直角方向の横分散 (縦横分散比) の確認を行なった。実験では 1,1,1-トリクロロエタン溶液を与えて濃度分布の推移を観測した。その他、比較の意味で塩水についても同一条件下で観測し、軸対称二次元の移流分散解析プログラム (Dtsansu-2D) により、縦分散長と縦横分散比の組

み合わせを同定した。実験ケースは**表-5**に示すとおり、実流速  $V_r=1\text{m/日}$  に制御し両者の挙動比較を試みた。また、1,1,1-トリクロロエタンは透過性が高い物質であるため、大事をとり地面と隔離されたガラス土槽 (**図-7** 参照: 長さ 13m×奥行き 1m×深さ 3mの右半分を仕切ったもの) を使用した。主な実施手順と留意点は以下のとおりである。

a) 大型土槽の模擬地盤として、前記の小型カラム試験及び大型カラム実験と同じ材料、同じ条件で砂地盤 (透水係数  $k=1.5\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 、間隙率  $n=0.44$ ) を作製したのち、実流速  $V_r=1.0\text{m/日}$  程度の地下水流を再現した。その際、実験施設の流量メーターと土槽内の流水断面積から、地盤の透水係数の確認を行った。

b) ケース 1 では事前のトライアルで、移行とともに塩水が沈降する傾向がみられたため、注入点 ( $\phi=5\text{cm}$  の球形) から調整塩水 (塩水 10,000mg/l に 40g/l のアルコールを加えて密度調整したもの) を注入した。ケース 2 では密度流の影響はないものと見なし、1,1,1-トリクロロエタン溶液 (58mg/l) をそのまま注入した。そして、 $L=1.0, 2.5, 4.0, 5.5\text{m}$ 離れた A, B, C, D 断面の測定点 (**図中**○印) より、1 日当たり 1~2 回の割合で 215 時間 (約 9 日間) 採水し、溶液濃度を測定した。塩水の濃度分析は電気伝導度計 (濃度分解能: 300mg/l 程度: 注入濃度の 3%程度)、1,1,1-トリクロロエタンはガスクロマトグラフ (検量下限値: 0.005mg/l: 注入濃度の 0.009% 足らず) によった。

c) 注入する塩水濃度は 10,000mg/l とした。ただし、予備検討の際に密度流による沈降が確認されたため、アルコールによる密度調整を行った。また、1-1-1 トリクロロエタン溶液については、揮発によるロスが生じないように、飽和溶解濃度 (常温で約 1,000mg/l) を大幅に下回るレベル (58mg/l) に濃度設定した。これを医療用点滴パックに充填し、パック内及び送液チューブ内に空間あるいは空隙が発生しないよう、また揮発による濃度低下が生じないように確認しながらポンプ圧送を行った。ポンプ圧送の流量は、注入点で流れ場に開放された時に、土槽内の実流速 (1.0m/日) と等しくなるよう調整した。

表-5 大型土槽実験ケース一覧

	投与溶液	実流速 上段は目標値 ( ) は実施値	水質分析の方法
ケース1	塩水 10,000mg/l アルコールを用いて密度調整	1.0m/日 (0.96m/日)	<電気伝導度計> 採水地点は 28 地点とし、溶液投入から 12 時間もしくは 24 時間おきに、216 時間 (9 日間) が経過するまで実施する。
ケース2	1,1,1-トリクロロエタン溶液 58mg/l	1.0m/日 (1.10m/日)	<ガスクロマトグラフ> 採水地点は 28 地点とし、溶液投入から 12 時間もしくは 24 時間おきに、216 時間 (9 日間) が経過するまで実施する。
<大型土槽地盤の特性> 乾燥密度: 1.50t/m <sup>3</sup> , 飽和湿潤密度: 1.83t/m <sup>3</sup> , 間隙比: 0.77, 有効間隙率: 0.44 透水係数: 1.5×10 <sup>-2</sup> cm/s, 土粒子比重: 2.66			
<流れ場の設定条件> 平均流水断面積: 2.69m <sup>2</sup> , 断面流量: 800~970 cm <sup>3</sup> /分, 動水勾配: 0.033			

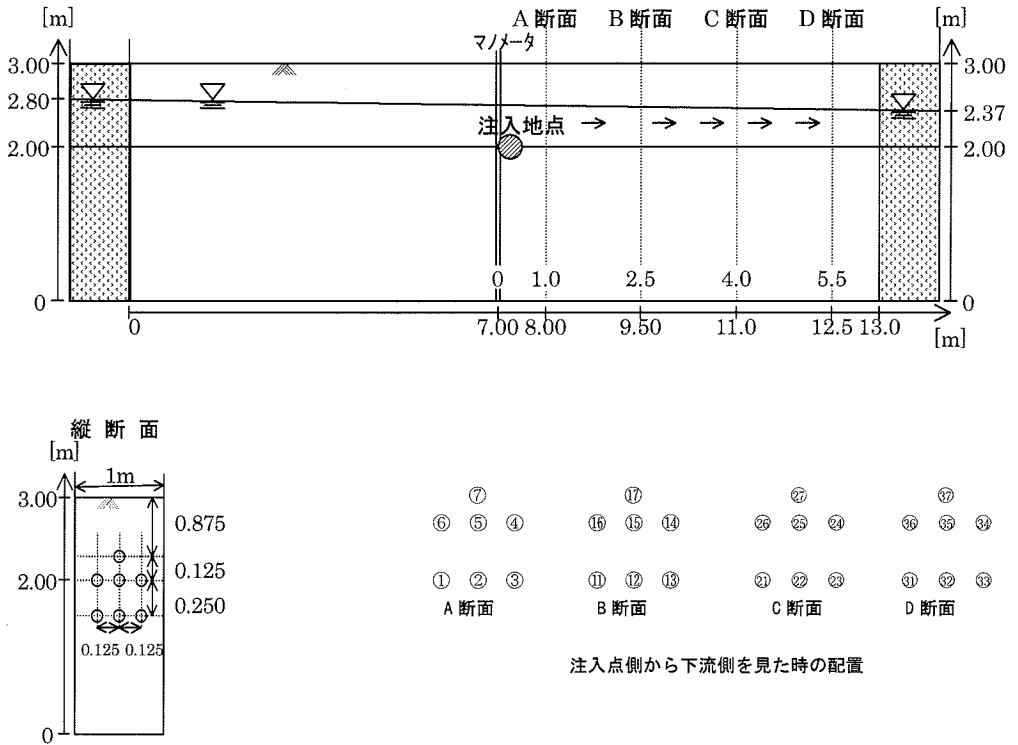


図-7 大型土槽地盤及び測定点

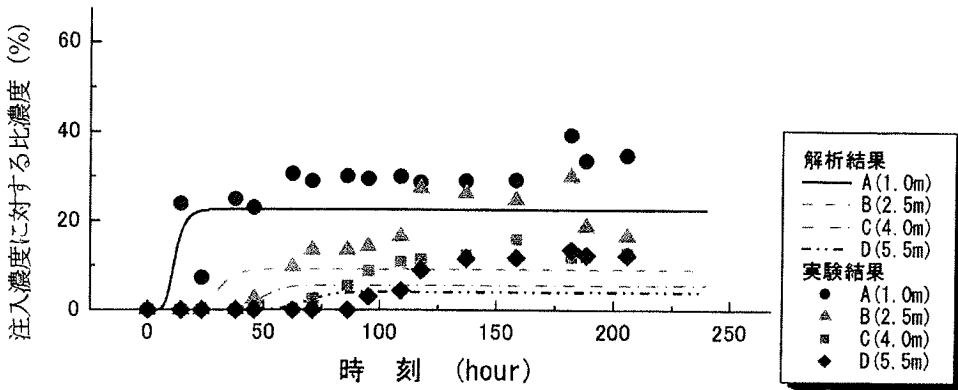
d) 軸対称二次元移流分散解析プログラムを用いた同定では、流速方向 1~1.5m ごとに（移行規模の 1/4~1/5 ピッチに）設定した前述 A~D 断面の中心点の濃度推移が良好に再現でき、そのなかで、断面内の到達範囲が最も近い縦分散長と縦横分散比の組み合わせを特定した。

**(2) 軸対称二次元移流分散解析プログラムでの縦分散長，縦横分散比**

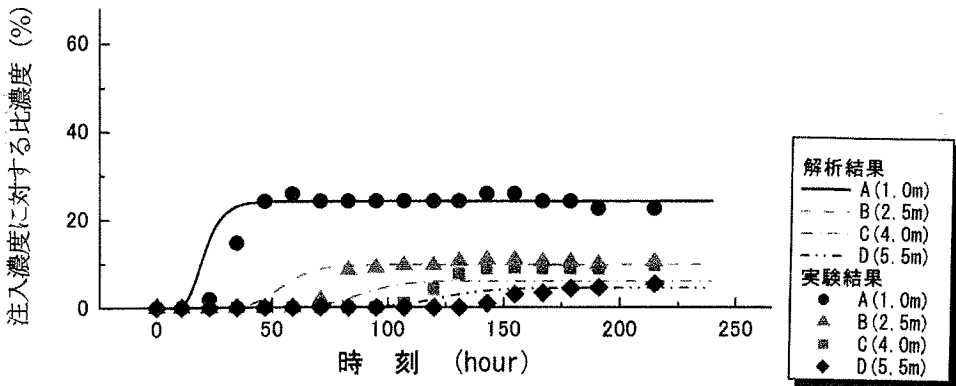
塩水ケースと 1-1-1 トリクロロエタン溶液ケースとにおいて、土槽内で実測された濃度分布の推移を整理した。また、軸対称二次元移流分散解析プログラムを用いて同定した際に、適合性の高かった縦分散長と縦横分散比の組み合わせにおける濃度推移と濃度分布を求め、以下のことが明らかとなった。

a) 図-8 (a)(b)中のプロットはそれぞれ、ケース 1（塩水）及びケース 2（1,1,1-トリクロロエタン）で測定された各断面中心点（No5,15,25,35）における濃度推移（注入濃度に対する比濃度表示）を示す。表-9はケース 2（1,1,1-トリクロロエタン）の全測点の濃度歴である。ケース 2（1,1,1-トリクロロエタン）においては、A断面で約 50 時間後に比濃度 25% が到達し定常化，B断面では 70 時間後に比濃度 15% が，C断面では約 150 時間後に比濃度 9% が到達し定常化定常化している。D断面では約 200 時間後に比濃度 5% が到達した後，216 時間までは漸増傾向が続いている。

b) 測定結果のプロットをみると、ケース 1（塩水）はケース 2（1,1,1-トリクロロエタン）に比べて、



(a) ケース 1（塩水： $\alpha_L=5\text{cm}$ ,  $\alpha_T/\alpha_L=1/25$ ）



(b) ケース 2（1,1,1-トリクロロエタン： $\alpha_L=5\text{cm}$ ,  $\alpha_T/\alpha_L=1/25$ ）

図-8 大型土槽の中央線上の測定点で観測された拡散状況の時刻歴

比濃度値が全体に高い、立ち上がり時期がやや早いなどの傾向がみられる。この点に関しては、事後に実験期間中の平均的な実流速がケース1では1.1m/日、ケース2では0.96m/日であったことが確認されており、流心線上の挙動について、両者の間に問題とすべき相違はないと考えられる。

c) ケース1 (塩水) においては、中心点以外では濃度検知された測点はなかった。事前に土槽から採水した場合の電気伝導度の検量下限値を確認したところ、300mg/l 程度 (比濃度 3%程度、電気伝導度で約 500  $\mu$ S/cm) であることが確認されたことから、塩水の比濃度 3%以上の到達範囲は、高々直径 25cm の範囲内に収まるものと考えられる。

d) ケース2 (1,1,1-トリクロロエタン) では表-6 に示すとおり、断面中心点から上左右に 12.5cm 離れた測点においては、A~D いずれの断面でも濃度検出があった。しかし、25cm 下方の測点 (No1~3, No11~13, No21~23, No31~33) では全期間を通じ濃度検出はなかった。

e) 各断面とも実際の濃度分布は、中心点に対して必ずしも対称形とはなっておらず、偏りの大きな断面 (B,C 断面の右測点) も存在する。しかし、一般的にみると、①A 断面は 72 時間で現象が定常化し中心点から半径 12.5cm のところに比濃度 0.03~0.05%が到達していること、②B 断面は 120 時間で定常化し半径 12.5cm に比濃度 0.05~0.1%が到達していること、③C 断面は 144 時間

表-6. 各断面内の濃度分布及びその推移 (ケース2 : 1,1,1-トリクロロエタン) (注入濃度に対する比濃度 : %)

採水点No(上流側から見た面内の配置)	A断面			B断面			C断面			D断面		
	No.6	No.5	No.4	No.16	No.15	No.14	No.26	No.25	No.24	No.36	No.35	No.34
	No.1	No.2	No.3	No.11	No.12	No.13	No.21	No.22	No.23	No.31	No.32	No.33
24時間	ND	ND	ND	ND			ND			ND		
48時間	0.019	0.13	0.026	ND			ND			ND		
72時間	0.048	0.091	0.05	ND	0.028	0.57	ND			ND		
96時間	0.059	0.053	0.04	0.045	0.16	1.6	ND			ND		
120時間	0.026	0.021	0.021	0.045	0.12	1.6	0.16	0.034	2.9	ND		
144時間	0.036	0.031	0.031	0.059	0.11	1.7	0.28	0.36	5	0.19	0.93	0.6
168時間	0.026	0.022	0.022	0.05	0.1	1.5	0.26	0.47	4.7	0.57	0.053	0.91
192時間	ND	0.021	0.021	0.043	0.13	1.27	0.26	0.48	4.8	0.79	0.18	1
216時間	0.026	0.031	0.031	0.05	0.14	1.3	0.33	0.57	5	0.95	0.22	1.3

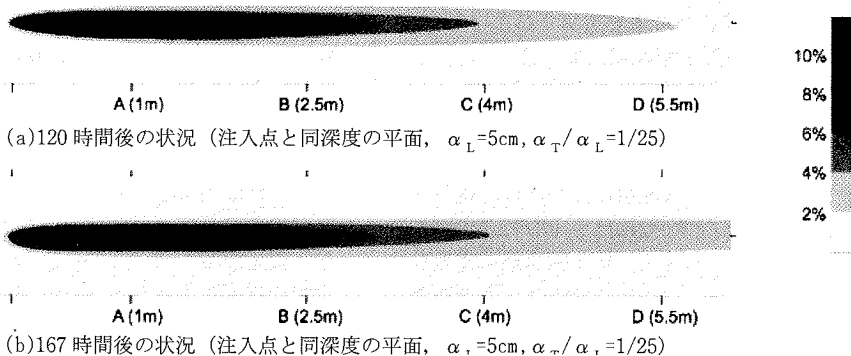


図-9 軸対称二次元解析プログラムより得られた汚染拡散状況の平面図(塩水, 1,1,1-トリクロロエタンとも)

で定常化し、半径 12.5cm に比濃度 0.5%程度のコントアが到達していること、④D 断面は測定末期(192~216 時間)も濃度上昇及び到達範囲の拡大が進行中で、半径 12.5cm 近傍に比濃度約 1%のコントア線があること、などが指摘できる。

- f)このように、1,1,1-トリクロロエタンが下流側へ移行するにしたがって、断面内の拡散範囲が徐々に拡大しており、比濃度 1%以上の領域は最下流の D 断面において、半径 12.5cm 程度にのぼる。また、分析に用いたガスクロマトグラフの定量下限値が 0.005mg/l (比濃度 0.009%) であることから、比濃度 0.001%のコントア線が半径 25cm の範囲を超えることはないことがわかった。
- g) **図-8** (a)(b)の実線部は、軸対称二次元移流分散解析を用いて再現した各断面中心点 (No5,15,25,35) の濃度推移である。Beims の縦分散長と観測規模との対応関係によれば、5~6m 規模の縦分散長  $\alpha_L=10\text{cm}$ 、Neuman の知見によれば  $\alpha_L=18\sim 24\text{cm}$  である。これに対して、ケース 1 (塩水) 及びケース 2 (1,1,1-トリクロロエタン) と、縦分散長  $\alpha_L=5\text{cm}$  と縦横分散比  $\alpha_T/\alpha_L=1/25$  の組み合わせを入力した場合に、大型土槽の断面中心点で測定された濃度推移と最も良好に適合した。ケース 2 の D 断面 (120 時間後付近) のように、濃度ゼロからの立ち上がり時期が解析結果の方が早いなど、部分的にはズレがみられるが、増加後の定常化しつつある比濃度、他断面の挙動などを総合的に判断すると、この組み合わせが最も適合性が高いと判断される。
- h) **図-9** (a)(b)は同入力条件下における、120 時間後及び 167 時間後 (地下水の移動距離が各 5m,7m となる時間帯) の、中心点を含む縦断面内のコントア到達範囲である。C, D 断面において 168 時間後の比濃度 2%のコントアが中心線を挟んで幅 38cm (C,D 断面内で半径 19cm の円) に及んでおり、実際に測定された幅 25cm (C,D 断面内で半径 12.5cm の円) に比べて太く再現された。
- i)このように、本大型土槽実験における 1,1,1-トリクロロエタン溶液の挙動は、Beims 及び Neuman の知見で得られる縦分散長値の 1/2~1/5 程度、縦横分散比も既往の研究データ (1/10) よりも小さな値で再現された。文献値のなかには、野外フィールドなどで流速の把握精度が十分でない事例も混在している。そのため、本土槽実験のような入念な施工管理下ならびに流速管理下にある土槽地盤、あるいは地盤状況 (透水性、間隙分布、流速) が十分な調査密度で把握されている場合には、

文献値を用いることによって、実際より安全側 (大きめな到達範囲) の評価ができると考えられる。

## 6. まとめ

地盤汚染の影響予測に用いる分散長 (縦分散長、縦横分散比) に関して、パラメータの感度解析、小型カラム試験、大型カラム試験、大型土槽実験を行い以下のような結論が得られた。

- a)パラメータの感度解析の結果、比濃度 10%以上の流心上の到達距離は、ほぼ流速に追従するが、低比濃度線 (数%レベル以下) の場合は、縦分散長の入力条件によって大きく変化することが確認された。低比濃度を追跡する場合には入力に注意を要する。また、実流速の把握が不十分であると対象スケールを誤り、適切な分散長の入力ができなくなる。文献値のばらつきよりも大幅な誤認を招く可能性があるため、代表流速の設定は極めて重要な要因と考えられる。
- b)長さ 30cm の小型カラム試験 23 ケースで測定された縦分散長値  $\alpha_L$  は、溶液の種類、試験方法 (投与過程と洗浄過程)、濃度、実流速 (0.5~50m/日程度) によらず、概ね 0.3~1cm (平均 0.54cm) となった。また、塩水を用いた 1.65m 規模の大型カラム実験でも、縦分散長  $\alpha_L=3\sim 6\text{cm}$  及び縦横分散比  $\alpha_T/\alpha_L=1/10$  を得た。これらは Neuman や Beims の文献値と概ね一致した。
- c)7m 規模の大型土槽実験で 1,1,1-トリクロロエタンの流速方向及び流水断面方向の挙動を測定し、軸対称二次元移流分散解析プログラムで同定した。その結果、縦分散長  $\alpha_L=5\text{cm}$  と縦横分散比  $\alpha_T/\alpha_L=1/25$  の組み合わせの適合性が良好であった。ただし、解析では 5~6m 下流側横断面の比濃度 2%線が実際よりも太く再現され、縦分散長値は Beims 及び Neuman の縦分散長値 (10cm~24cm 程度) の 1/2~1/5 レベル、縦横分散比も既往の研究データ (1/10) よりも小さな値を示した。
- d)このように、実験が大型になるほど、文献値が実測に基づく縦分散長より大きくなる傾向がみられた。これは小規模な場合の文献値には、室内実験など均質で管理された流速下のものが多いのに対し、数m規模では、今回実施の大型土槽実験よりも不均質性が大きなデータが混在しているからと考えられる。そのため、7m 内外など室内試験の規模を超える場合には、流水断面ないし区

間の代表流速を適切に把握し、不均質性の影響を軽減したうえで、文献値の適用を行なっておけば、移流分散現象の過小評価が回避されるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 西垣誠, 菱谷智幸 : 土壌・地下水汚染の予測技術, 基礎工, Vol.27, No1. , pp.40-42, 1999.
- 2) 神野健二編著 : 地下水中の物質輸送数値解析, 九州大学出版会, pp.1-11, pp.47-72, 2001.
- 3) 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓 : 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, pp.163, 1995.
- 4) Xu, M. and Eckstein, Y. : Use of Weighted Least-Squares Method in Evaluation of the Relationship Between Dispersivity and Field Scale, pp.905-908, GROUND WATER, 1995.
- 5) 上田年比古監訳, W キンツェルパッハ著 : パソコンによる地下水解析, 森北出版, pp.169-171, 1990.
- 6) 地盤工学会地盤汚染の調査・予測・対策に関する研究委員会 : 第3回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.11-21, 1999.
- 7) 中村充利, 川端淳一, 土弘道夫 : 地下水中の物質移行特性の評価手法について (室内カラム試験による検討), 第3回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.201-204, 1999.
- 8) Kobus, H. : The Role of Large-Scale Experiments in Groundwater and Subsurface Remediation Research : The VEGAS Concept and Approach, Groundwater and Subsurface Remediation, Research Strategies for In-situ Technologies, Springer-Verlag, 1-18, 1996.
- 9) Betz, C., Farber, A. and Schmidt, R. : Lab and Technical Scale Experiments for NAPL Removal by Steam Injection into Porous Media, Groundwater: An Endangered Resource, Proc. of Theme C, 27th IAHR Congress, ASCE, San Francisco, CA, USA, 101-106, 1997.
- 10) Coumoulos, H., Soga, K. & Illangasekare, T.H. : 1g and centrifuge tests on DNAPL migration in saturated porous media with inclined layers - modelling techniques, Proc. Of International Symposium on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics, La Baule, 301-308, 2000.

(2002. 11. 15 受付)

## THE DETERMINATION OF LONGITUDINAL DISPERSIVITY IN PREDICTING THE INFLUENCE OF GROUND CONTAMINATION

Hidetoshi KOHASHI, Hiroshi MIKI, Mitsunobu HIRAYAMA,  
Tomoyuki HISHIYA, Hiroyuki YAMAMOTO and Yasuji OHKITA

Recently, people often meet the ground contamination in construction work, and this is large amount and should be treated. It is, therefore, necessary to establish the management scheme of using advection-dispersion numerical method and observation on contaminant behavior. This study deals with how to determine the dispersivity. Since the property becomes larger as observation scale increases, it is difficult to know its value based on real behavior. Several experiments on the behavior led the followings: (1) Flow velocity is dominant, (2) Experimental data nearly fit to document data, and (3) Contaminant plume predicted by using document data is larger than real one.