

エタノールを利用した高密度ベントナイトスラリー（その2）

— 移流分散解析によるスラリー止水壁中のエタノール拡散の評価 —

石川 明 浅田 素之 田崎 雅晴 堀内 澄夫
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

High Density Bentonite Slurry using Ethanol (No.2)

— Advection-dispersion analysis for ethanol diffusion in ethanol/bentonite slurry cutoff wall —

by Akira Ishikawa, Motoyuki Asada, Masaharu Tasaki and Sumio Horiuchi

Abstract

In-situ soil mixing using high density bentonite slurry, in which ethanol is used for increasing bentonite content, has been studied for flexible impermeable cut-off wall installation. Bentonite swelling in the mixture due to in-situ exchanging of ethanol by groundwater makes permeability lower and strength higher, and a part of ethanol releases outside of the cut-off wall. Ethanol in the surrounding soil will be diluted and decomposed, however, there is no study about the exchanging phenomena. A series of parametric and analytical studies was carried out, and the following results ensure the usages of the ethanol bentonite slurry in the ground; (1) ethanol diffusion area in the soil can be predicted within 15~20% error by applying appropriate values of molecular diffusion coefficient and bio-decomposition rate, (2) ethanol exchanging rate also can be estimated within 3%, (3) ethanol diffusion area can be controlled within 1.5m from the cut-off wall by exerting a differential water level.

概要

エタノールベントナイトスラリー止水壁中のエタノールの挙動に関する移流分散解析結果を示した。エタノールはベントナイトスラリーの高密度化のために用い、原位置で土とスラリーを混合後に地下水と置換させる。置換によって止水壁中のベントナイトが膨潤し、低透水性、自己修復性を有する固体状態の止水壁ができる。地盤中に排出されたエタノールは濃度拡散、微生物分解により徐々に拡散するが、その挙動は従来ほとんど解明されていない。本研究では、止水壁中のエタノールの挙動を移流分散解析により求め、実験結果と比較して以下の結論を得た。(1) 分子拡散係数と微生物分解速度を考慮することによりエタノール拡散範囲を15~20%の誤差で予測できる、(2) 止水壁内のエタノールと地下水の置換速度を3%以内の誤差で予測できる、(3) 止水壁に2.7の動水勾配を作用させることによりエタノール拡散範囲を1.5m以内に抑えられる。

§ 1. はじめに

エタノールによりベントナイトスラリーは高密度化できるが、このスラリーはエタノールと地下水の置換によって、はじめてスラリー状態から固体状態へと構造化し、ベントナイトが本来有する低透水性、膨潤性、自己修復性を発現する¹⁾。例えば、土とベントナイトスラリーとを原位置で混合すると、内部のエタノールが地下水と置換わるにしたがって止水壁としての性能を発揮させることができる。エタノールの使用はベントナイトスラリーの密度増加に必須の条件であるが、地中でのエタノールの使用は数例があるだけで、その挙動はほとんど解明されていない^{2,3)}。特に、エタノールが周辺地盤に拡散し、地下水への影響を及ぼすことが懸念されるが、その程度と

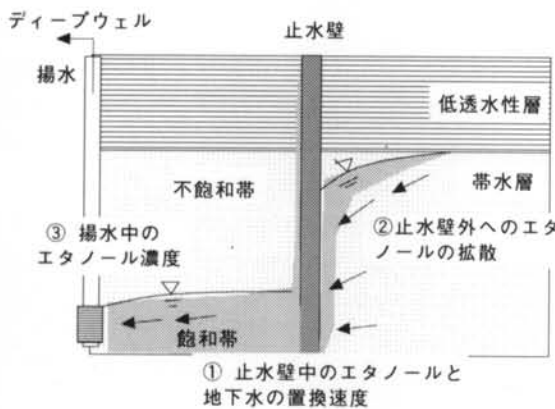
範囲については検討例がない。

止水壁中のエタノールは自然状態でも濃度拡散、生物分解等により徐々に濃度が減少していくが、置換をより促進させ早期に止水壁としての所定性能を得るために止水壁内外に水頭差をつけることを検討している。例えば、図-1のように止水壁で仕切られた内部の地下水を低下させる方法も有効かと考えられる。現実的な置換速度を事前に予測するためには、①止水壁中のエタノール/地下水の置換速度、②止水壁外へのエタノールの拡散範囲、③ディープウェルで揚水した地下水中のエタノール濃度等を明らかにする必要がある。本止水壁工法の特徴的な現象として、止水壁の透水係数が 10^{-8} (cm/s)オーダーと低く地下水の流速が小さいため分子拡散によるエタノールの拡散が無視できないこと、エタノールが一定の濃度以

下になると地中に存在する微生物により急速に分解すること、などがある。

以上のようにエタノールベントナイトスラリーの使用による地下水環境への影響を調べるため、これらに影響を及ぼすパラメーター（分子拡散係数、減衰定数）をカラム、バッチ試験から求めた。求めたパラメーターをもとに20m³土槽で実施した止水壁モデル実験結果を対象として解析を進め、手法の妥当性を検証した。

以下、2章に密度依存を考慮した移流分散解析の概要、3章にパラメーターの決定方法、4章に20m³土槽実験の解析結果と実験結果の比較、5章にまとめを示す。



図一 止水壁中のエタノールの挙動

§ 2. 解析手法⁴⁾

密度依存を考慮した飽和・不飽和領域の地下水浸透流方程式は、質量保存則とダルシー則から次式で表される。

$$\frac{\rho}{\rho_0} F \frac{\partial h}{\partial t} = \tilde{\nabla} \cdot \left[\tilde{K} \cdot \left[\tilde{\nabla} h + \frac{\rho}{\rho_0} \tilde{\nabla} Z \right] \right] + \frac{\rho}{\rho_0} q \quad (1)$$

$$F = \alpha \frac{\theta}{n_e} + \beta \theta + n_e \frac{dS}{dh} \quad (2)$$

ここで、

h : 圧力水頭, \tilde{K} : 透水係数テンソル, Z : 位置水頭
 q : 湧きだし、吸い込み流量, ρ : 濃度 C での水の密度
 ρ_0 : 濃度 0 での水の密度, ρ' : 湧き出し、吸い込みの流体の密度, θ : 体積含水率, α' : 媒体の圧縮率, β' : 水の圧縮率, S : 飽和度, n_e : 有効空隙率

(1)式の初期条件、境界条件は、

初期条件

$$h = h_i(x, y, z) \text{ in } R \quad (3)$$

境界条件

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_d \quad (4)$$

$$-\tilde{n} \cdot \tilde{K} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \tilde{\nabla} h = q_n(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_n \quad (5)$$

である。また(1)式において、濃度と密度の関係式は次の(6)式で表される。

$$\rho = \rho_0(a_1 + a_2 C) \quad (6)$$

本解析ではエタノール溶媒の濃度と密度の関係を表すため、 $a_1 = 1, a_2 = -0.15$ を用いた。この線形近似によりエタノール濃度 40wt%以下の濃度—密度関係はよく近似できる。

一方、濃度の支配方程式は次式で表される。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + \tilde{V} \cdot \tilde{\nabla} C - \tilde{\nabla} \cdot (\theta \tilde{D} \cdot \tilde{\nabla} C) = - \left[\alpha' \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda \right] (\theta C + \rho_b S) - (\theta K_w C + \rho_b K_s S) \quad (7)$$

$$+ m - \frac{\rho}{\rho_0} q C + \left[F \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} \tilde{V} \cdot \tilde{\nabla} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] C$$

$$S = K_d C \quad (8)$$

ここで、

ρ_b : 媒質の体積密度, C : 溶媒の濃度, S : 単位質量の固相に吸着された溶質濃度(M/M), \tilde{V} : 地下水の実流速, \tilde{D} : 分散係数テンソル, λ : 減衰定数, $m = q C_{in}$: 湧き出しまたは吸い込みにより流入する濃度フラックス, K_d : 分配係数

(7)式の初期条件、境界条件は、

初期条件

$$C = C_i(x, y, z) \text{ in } R \quad (9)$$

境界条件

$$C = C_d(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_d \quad (10)$$

$$\tilde{n} \cdot (-\theta \tilde{D} \cdot \tilde{\nabla} C) = q_n(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_n \quad (11)$$

また、(7)式における分散係数テンソル D は次式で表される。

$$\theta \tilde{D} = a_T |\tilde{V}| \tilde{\delta} + (a_L - a_T) \tilde{V} \tilde{V} / |\tilde{V}| + \theta a_m \tau \tilde{\delta} \quad (12)$$

ここで、 $|\tilde{V}|$: 地下水実流速 V のノルム, $\tilde{\delta}$: クロネッカーのデルタテンソル, a_T : 横分散長, a_L : 縦分散長, a_m : 分子拡散係数, τ : 屈曲率

溶媒の濃度拡散を決定する分散係数テンソル \tilde{D} は、地下水の実流速に依存する分散 (Dispersion) と濃度勾配による分子拡散 (Molecular Diffusion) の和で表現でき、地下水の流速が速い場合は分子拡散の影響は無視できる場合がある。しかし、今回対象とする止水壁の透水性は

10^{-8} (cm/s) オーダーと低く地下水の流速が遅いため、分子拡散係数 a_m はエタノールの濃度拡散において支配的なパラメーターの1つとなり、次章で述べるカラム試験によりその値を求めた。

密度依存を考慮した移流分散解析では、(6)式の溶媒の濃度—密度関係式を介して、(1)式の浸透流方程式と(7)式の濃度の支配方程式を連成させて解く。

§ 3. パラメーターの決定

3.1 土中のエタノール分子拡散係数⁵⁾

土中でのエタノール分子拡散係数を求めるために実施したカラム拡散実験の概要を図—2に示す。豊浦砂を乾燥密度 1.740 g/cm^3 、透水係数 $k=2.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ でカラム内に充填し蒸留水で飽和した。豊浦砂上部に質量比で砂 100、エタノール 8、水 35、ベントナイト 10 で混練したスラリーを厚さ 21cm で詰めた。

スラリー混合物投入後、約1ヶ月後まで一定の時間間隔でサンプル用コックから間隙水を抜き取りエタノール濃度を分析した。サンプルポイント番号はスラリーに近い順から No. 18, No. 17, ... とした。試験終了後、スラリー混合物を深度別に厚さ 2~3cm 毎に採取し、抽出試験により間隙中のエタノール濃度を深度ごとに測定した。

実験に対応して行った1次元拡散解析の初期条件、境界条件を図—2に併記する。

・スラリー/土混合物の初期エタノール濃度

$$C_0 = 1.4 \times 10^5 \text{ mg/L}$$



図—2 カラム実験と対応する拡散解析の初期、境界条件

・初期条件 ($t=0$)

$C/C_0=1$ in スラリー/土混合物 $Z=0 \sim 21\text{cm}$

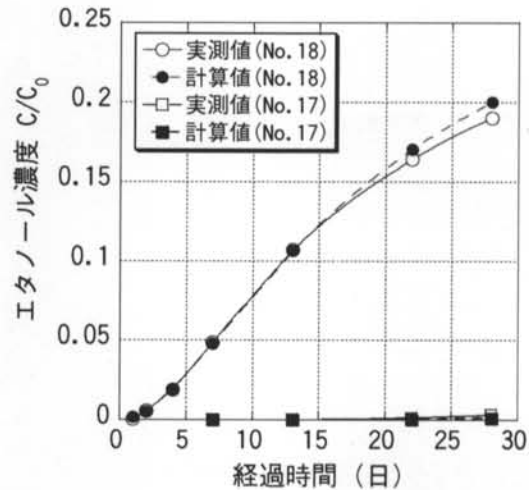
$C/C_0=0$ in 豊浦砂 $Z=21 \sim 200\text{cm}$

・境界条件

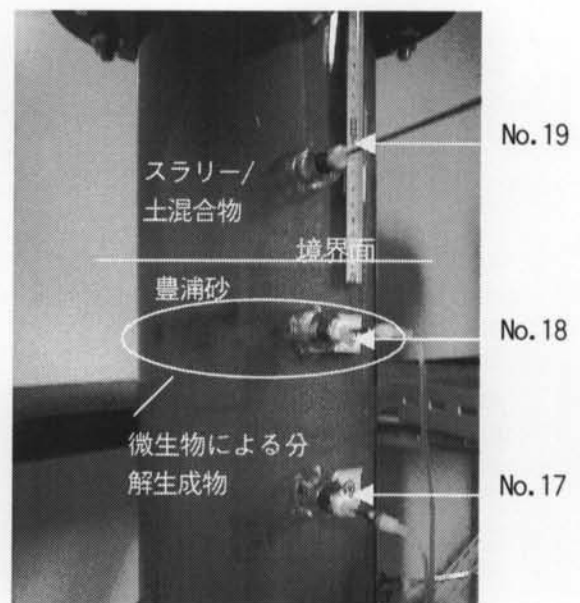
$C/C_0=1$ on カラム上端 $Z=0\text{cm}$

となる。本実験では地下水の流れはないため、分子拡散係数 a_m をパラメーターとして変化させ実験値に最も近い時間—濃度曲線から値を決定した。

サンプルポイント No. 18, No. 17 のデータと解析結果を図—3に示す。実測値、解析値ともにエタノール濃度は時間経過とともに上昇する。試験開始後13日以降で計算値が実測値よりわずかに高いのは微生物等による分解の影響と考えられる。写真—1は材令18日におけるカラムの状況であり、分解生成物により砂が黒く変色している様子がわかる。



図—3 カラム砂中のエタノール濃度解析値と実測値



写真—1 材令18日でのカラム上部の状況

13日までの結果でフィッティングした結果、エタノールの土中での分子拡散係数 $a_m=3.7\times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$ と決定した。この値は、水-エタノール2成分系でのエタノールの分子拡散係数 $1.1\sim 1.2\times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$ ⁶⁾の約1/3であり、拡散速度の遅延分は土粒子による分子拡散阻害による影響と考えられる。したがって、屈曲率 τ を1とし、土中のエタノール分子拡散係数を $a_m=3.7\times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$ と設定して以下の解析を進めた。

試験開始から42日後、スラリー/土混合物を深度別に採取しエタノール濃度を測定した。図-4に実測値と解析値を示す。豊浦砂に近い部分ほどエタノール濃度が低下しているが、こうした傾向が解析でも十分表現できている。実測、解析結果から、42日間で高さ21cmのスラリー中に含まれるエタノールの約10%が濃度拡散により豊浦砂側に排出されることがわかった。

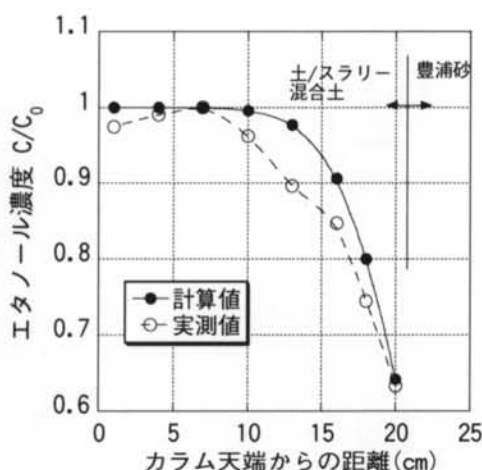


図-4 スラリー/土混合物中のエタノール濃度解析値と実測値

3.2 減衰定数⁷⁾

エタノールは自然界において、エチルエステルやエタノールアミンの形で存在し、エタノールそのものではほとんど存在しない。

土壌	10g
NH ₄ Cl	1mM
KH ₂ PO ₄	0.2mM
MgCl ₂	0.2mM
CaCl ₂	0.2mM
エタノールまたはグルコース(表2)	
Na ₂ SO ₄ (嫌気のみ)	5mM
Na ₂ S ₂ O ₄ (嫌気のみ)	1mM
蒸留水	100ml

表-1 反応系の組成

エタノールの生物分解は環境中に存在する電子受容体に大きく影響される。好気条件では酸素が電子受容体になり、最終的に炭酸ガスへ酸化され、電子受容体となった酸素は水に変換される。嫌気条件では硫酸還元や硝酸還元による酸化や、他の有機物を利用した発酵的代謝が行われる。

エタノールの分解速度を調べるため、表-1に示す反応系を構築し、表-2の条件で室温にて静置培養を行った。ブランクとして土を添加しない系、微生物活性の高い土(黒土)、及び一般的な微生物分解を確認するためにグルコースを添加した系を同時に検討した。好気と嫌気の両方の条件を検討した。

試験は土壌10gに水が100mLとなるようにバッチサンプルを作成し、20℃の恒温槽に入れて培養した。好気条件下での培養試験ではシリコン栓を用いた。嫌気条件下の試験は、気相部を窒素:炭酸ガス(8:2)で置換後、硫酸イオンとして硫酸ナトリウム(Na₂SO₄)を終濃度5.0mM、還元剤としてジチオライト(Na₂S₂O₄)を終濃度1.0mMとなるように添加しプチル栓にて密栓した。

好気性条件でのエタノール分解特性を図-5に示す。エタノール濃度2.5mM(100mg/L)の条件では、約5日ですべてのエタノールが分解された。エタノール濃度10mM(500mg/L)の条件において、黒土、S2(埋立砂)は5日、S3(関東ローム)、S4(東京洪積砂)は3週間、S1(東京沖積砂)は1ヶ月でエタノールが分解された。エタノール濃度25mM(1,000mg/L)の条件では黒土は2週間で分解し、S2(埋立砂)は40日、その他の土では80日で分解された。

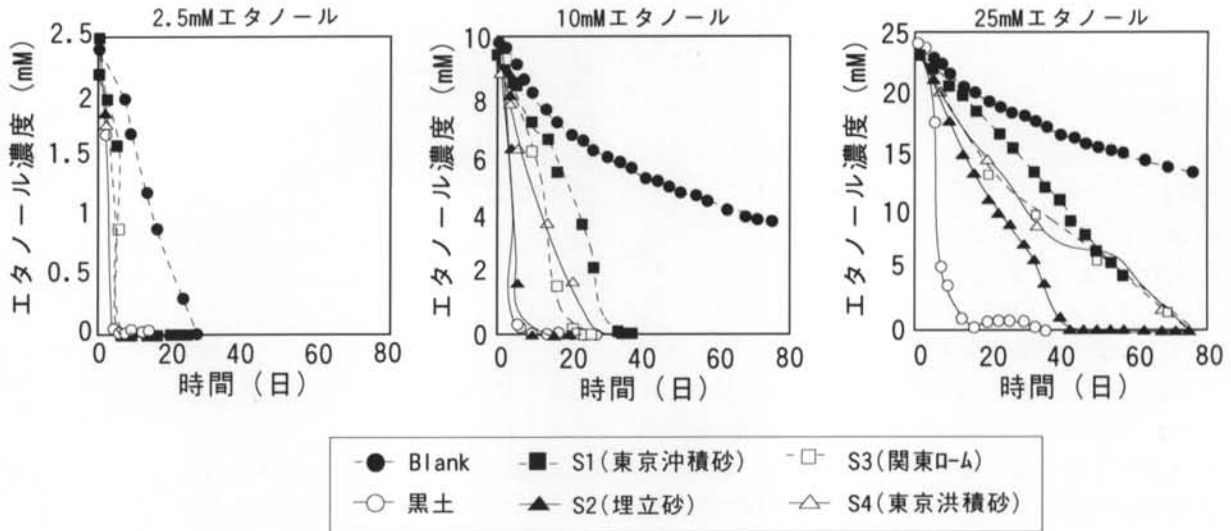
一方、嫌気性条件でのエタノール分解特性を図-6に示す。エタノール濃度2.5mM(100mg/L)の条件では約20日間ですべてのエタノールが分解された。エタノール濃度10mM(500mg/L)の条件において、黒土、S2(埋立砂)、S3(関東ローム)は20日でエタノールが分解され、S1(東京沖積砂)、S4(東京洪積砂)は1~2mMのエタノールが2~3ヶ月では分解されずに残った。25mMでは黒土、S3(関東ローム)は40日で分解し、S2(埋立砂)は60日で分解された。S1(東京沖積砂)、S4(東京洪積砂)では10~15mMのエ

土壌種: None(blank)、黒土、S1(東京沖積砂)、S2(埋立砂)、S3(関東ローム)、S4(東京洪積砂)

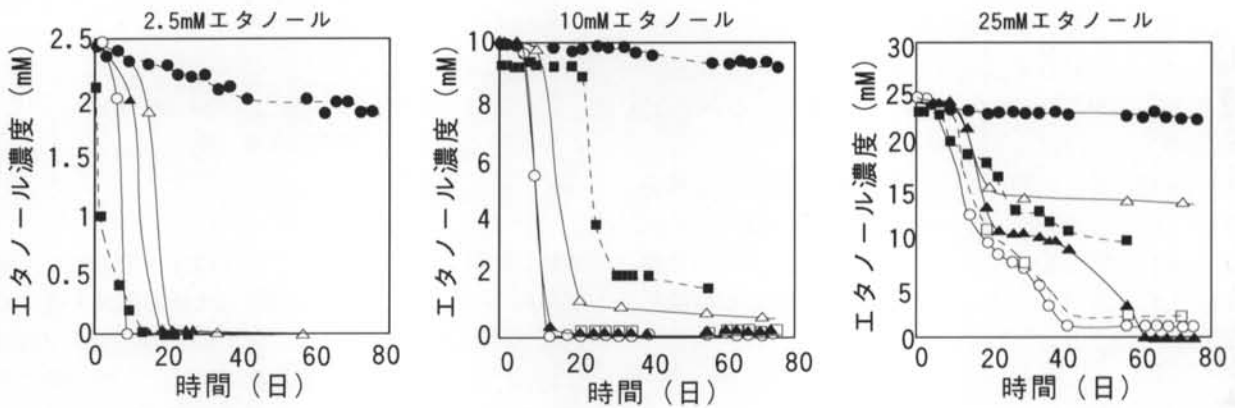
エタノール濃度: none, 0.1mM(≒5mg/L), 0.25mM(≒10mg/L), 0.5mM(≒25mg/L), 1.0mM(≒50mg/L), 2.5mM(≒100mg/L), 5.0mM(≒250mg/L), 10mM(≒500mg/L), 25mM(≒1,000mg/L)

グルコース濃度: 2.0mM(≒250mg/L)

表-2 使用土壌および基質濃度



図—5 好気性条件下でのエタノールの分解特性



図—6 嫌気性条件下でのエタノールの分解特性

タノールが分解されずに残った。

以上の結果から、好気、嫌気の各条件でエタノールの分解速度式を(13)式のように定義すると各土壌での減衰定数 λ は表-3のようになった。次章の止水壁モデル実験ではこれらの値と土槽中のエタノール濃度変化を参照して、減衰定数 λ の値を決定した。

$$C = C_0 e^{-\lambda t} \quad (13)$$

C_0 : 初期エタノール濃度(mM)、 λ : 減衰定数(1/d)、 t : 時間(d)、 C : t 日後のエタノール濃度(mM)

§ 4. 止水壁モデル実験の解析^{(9), (10)}

4.1 解析条件

§ 3. で求めたパラメーターを参照し止水壁モデル実験(詳細はその1を参照)の数値解析を行い、実験結果

土壌種	λ 好気条件	λ 嫌気条件
黒土	0.1291	0.0636
S1(東京冲積砂)	0.0266	0.0174
S2(埋立砂)	0.0811	0.0337
S3(関東ローム)	0.0438	0.038
S4(東京洪積砂)	0.0347	0.0073

表—3 好気、嫌気各条件下での減衰定数 λ

の再現性を調べた。解析は20³土槽の鉛直断面について行った。図—7に解析メッシュとその境界条件を示す。解析精度はメッシュ依存性があるため、エタノールの濃度勾配が大きい止水壁近傍および土槽上部のメッシュ幅を細かくした。以下に初期条件、境界条件を示す。

・スラリー/土混合物の初期エタノール濃度

$$C_0 = 1.8 \times 10^5 \text{ (mg/L)}$$

・初期条件 ($t=0$)

$$C/C_0 = 1 \text{ in 止水壁}$$

$$C/C_0 = 0 \text{ in 砂}$$

水位 $h_0 = 180\text{cm}$ in 砂、止水壁

・境界条件

非排水側水位

$h_d = 180\text{cm}$ at $t=0\sim 96(\text{d})$

on 土槽右端 (非排水側)

排水側水位

$h_d = 180\text{cm}$ at $t=0\sim 12(\text{d})$

$h_d = 20\text{cm}$ at $t=12\sim 96(\text{d})$

on 土槽左端 (排水側)

解析に用いた定数を表—4に示す。ここで、砂、スラリー止水壁の透水係数、間隙率は実験で用いた試料より直接求めた値であり、分散長と減衰定数は実験値に近い濃度分布状態になるよう解析を複数回実施して求めた。砂地盤の減衰定数 $\lambda = 0.018(1/\text{d})$ は表—3の嫌気条件に近い値となった。土槽中の水は空气に触れており実際には好気性に近い条件と思われるが、実験に用いた砂は実験前に水道水でよく洗浄しており、実験開始時の微生物が少なかった影響と考えられる。止水壁部分はエタノール濃度が高く分解の影響は少ないと推測されたため、 $\lambda = 0$ とした。分子拡散係数 a_m は前章で述べたカラム実験で求めた値を使用した。エタノールは土に吸着しないため、分配係数 $K_d = 0$ とした。

砂の不飽和特性を図—8に示す。今回実施した土槽実験では、砂を土槽底面から185cm、水位を底面から180cmのレベルに設定しているが、水面から185cmまでの地盤は限界毛管水頭(AEV)の範囲内であり、実際にはほぼ飽和状態であったと考えられる。

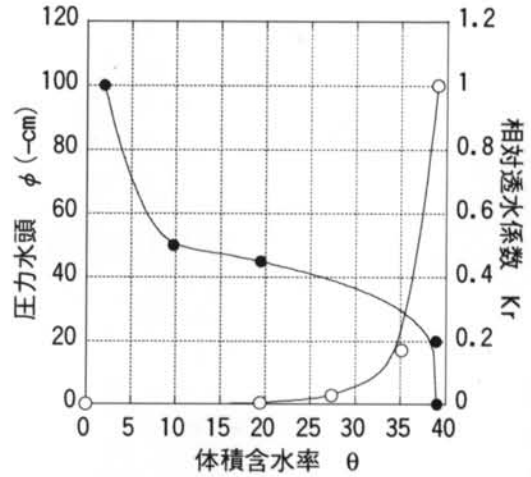
4.2 解析結果

4.2.1 土中内のエタノール濃度分布

図—9に実験結果を示す。動水勾配により止水壁外(排

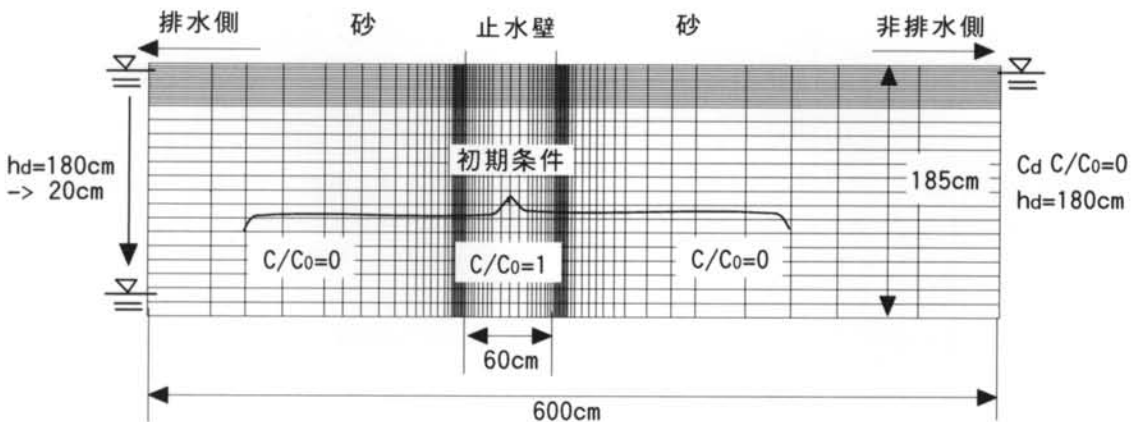
パラメーター			砂地盤	止水壁
透水係数	k	cm/s	4.0×10^{-3}	4.0×10^{-8}
有効空隙率	n_e	-	0.39	0.48
縦分散長	a_L	cm	0.2	0.2
横分散長	a_T	cm	0.02	0.02
分子拡散係数	a_m	cm^2/s	3.7×10^{-6}	3.7×10^{-6}
分配係数	K_d	ml/g	0	0
減衰定数	λ	1/d	0.018	0

表—4 モデル実験解析で用いたパラメーター

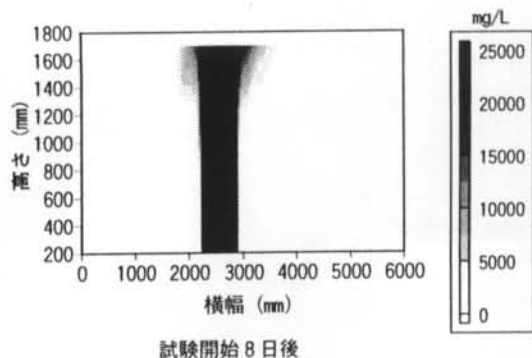


図—8 砂地盤の不飽和特性

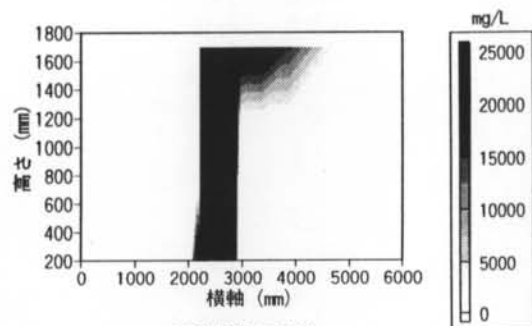
水側)に押し出されたエタノールは止水壁近傍を土槽下部に向かって流れ、土槽底面付近の飽和領域を通過して土槽外へ排出される。これは、不飽和土の透水性が飽和土に比べて小さくなるためである(飽和度90%で飽和透水係数の1/5程度)。図—9に対応する解析結果を図—10に示すが、排水側の土槽底面近くの濃度が高くなる傾向をよく表している(27,97日後の図)。排水側不飽和部分は、



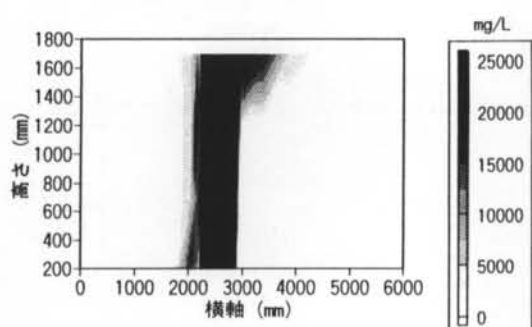
図—7 解析メッシュと初期・境界条件



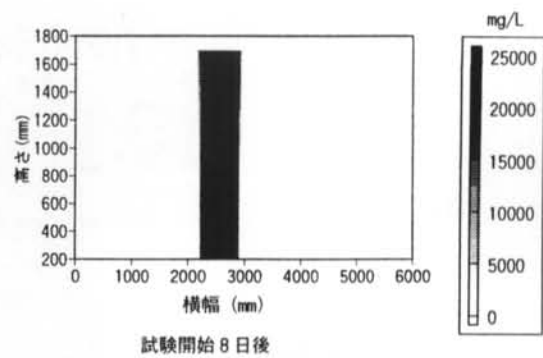
試験開始 8 日後



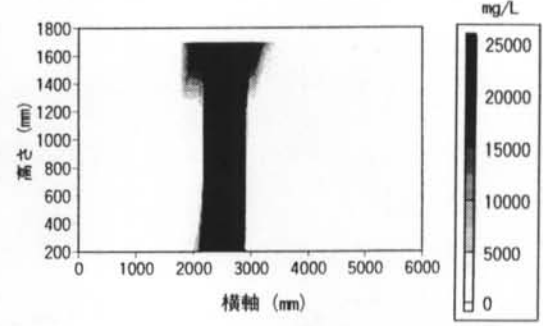
試験開始 27 日後



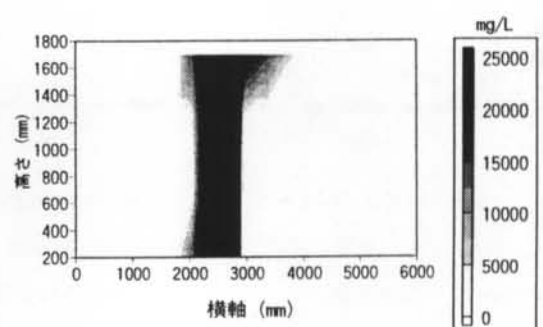
試験開始 97 日後



試験開始 8 日後



試験開始 27 日後



試験開始 97 日後

図—9 エタノール濃度分布図 (実験結果)

図—10 エタノール濃度分布図 (解析結果)

エタノールの蒸発等の影響を解析で考慮していないためうまく表現できなかった。本解析は固・液 2 相系で解析しており、図—10 に示した不飽和部分のエタノール濃度は間隙に存在する溶液中の濃度であり、空隙の体積で換算したエタノール濃度でない。一方、非排水側ではエタノールが水より軽い為、密度差によりエタノールが浮き上がる傾向をよく表している。エタノールは止水壁近傍を土槽上部に向かって水面付近まで流れ、外部に向かって拡散する。解析で求めたエタノールの拡散範囲は最大 1.2~1.3m であり、実験で観察された最大値 1.5m に近い値となっており、15~20%の誤差で拡散範囲を再現した。拡散したエタノールの濃度は 0.5% であり止水壁内のエタノール濃度 18% と比較して低濃度である。

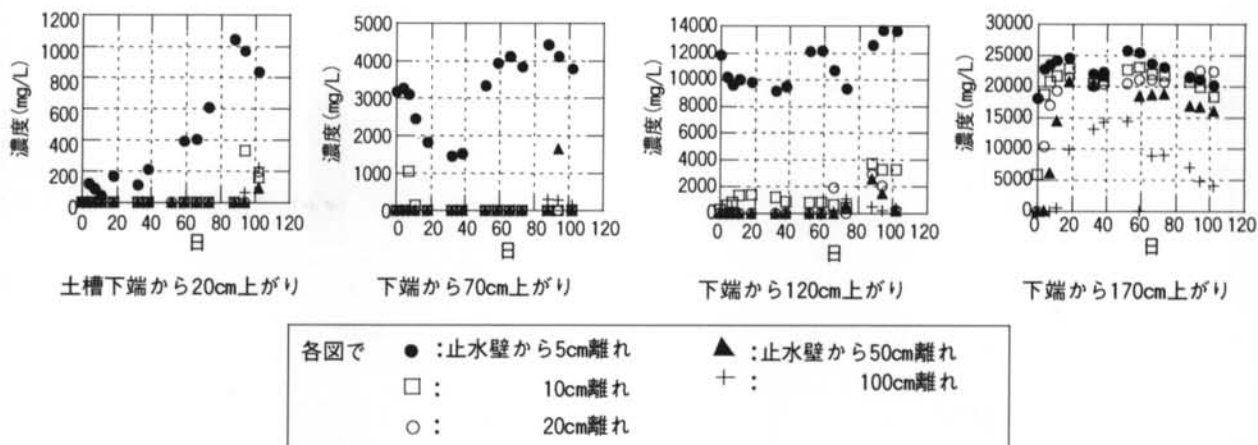
実験結果との相違点として、水面付近に上昇したエタノールが横方向に拡散する速度は実験結果のほうが速い。実験結果では、1ヶ月後に拡散範囲が最大になりその後

は分解により徐々に範囲が狭まっているが、解析では3ヶ月後に拡散範囲が最大となりエタノールが遅れて広がる傾向が見られる。この原因は、止水壁を構築する際に生じた砂地盤のゆるみ領域やクラックの存在により上部砂地盤の透水性が部分的に高くなっており、上部に上昇したエタノールが速やかに横方向に拡散したためと考えられる。

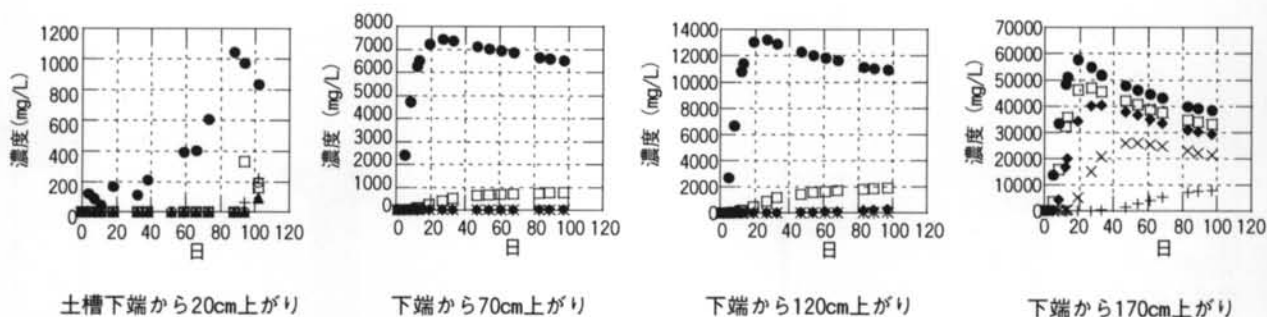
以上のように、数値解析はエタノールの地盤中への広がり傾向を再現でき、地下水環境への影響評価に有効であることがわかった。

4.2.2 土中内のエタノール濃度経時変化

図—11 に非排水側観測点の濃度経時変化(実験結果)を図—12 に対応する解析結果を示す。非排水側では水とエタノールの密度差のためにエタノールが上昇するため、観測点のレベルが高くなるにつれエタノール濃度が高くなった。



図—11 非排水側砂中のエタノール濃度経時変化（実験結果）



図—12 非排水側砂中のエタノール濃度経時変化（解析結果）

実験結果では、止水壁から 5cm 離れた観測点で、土槽下端から 20cm 上がり、同 70cm 上がり、同 120cm 上がりでそれぞれエタノール濃度 0.1%弱、0.3~0.4%、1~1.2%と徐々に高くなっている。これに対して、解析結果は対応する観測点でそれぞれ 0.2%、0.6~0.7%、1~1.3%となり、解析結果と若干の濃度差はあるが実験結果の傾向を 0.3%の誤差で再現している。

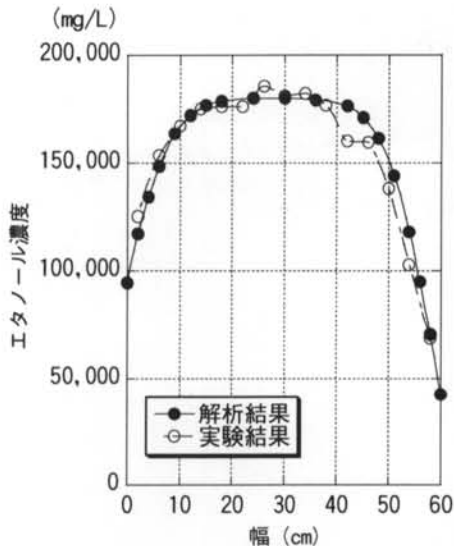
土槽下端から 170cm 上りの観測点では、実験結果のエタノール濃度が 2~2.5%となっているのに対して、解析結果は最高 6%に達し値に大きな差が見られる。この原因として、実験結果は土槽上部の砂の緩みなどにより、土槽上部に浮き上がったエタノールの横方向への拡散速度が解析結果よりも速かったこと（前項参照）、不飽和毛管帯(180~185cm)へのエタノールの上昇と蒸発により相当量のエタノールが移行したことなどが考えられる。前項でも述べたが本解析では固・液 2 相系で計算したため、エタノールの蒸発等を正確に評価できなかった。不飽和帯でのこの種の課題は 3 相系の解析のすべてに共通するものであり、エタノール挙動も含めて今後の課題と考える。

エタノール減衰定数 $\lambda = 0.018(1/d)$ を導入した効果は、図—12 中の各観測点で試験開始 20 日後からエタノール濃度が徐々に低下することに見られる。実験結果でも図—11 最右図（下端から 170cm 上がり）で微生物分解の影響と推測されるエタノール濃度低下が見られ、解析によってこの現象がうまく表現できている。

4.2.3 止水壁内の残留エタノール濃度

試験開始から 102 日後の試料解体時に、深度毎に止水壁のサンプリングを行い、止水壁間隙中のエタノール濃度を測定した（エタノール分布図はその 1 参照）。深度毎に 7 点（土槽下端から 20, 45, 70, 95, 115, 140, 160, 170cm）のエタノール濃度を平均化し、水平方向の濃度分布の調べた。実験結果を図—13 の○に示す。非排水側端部で濃度が最も低く、排水側端部の濃度も低くなる傾向を示している。止水壁中の動水勾配と濃度拡散の複合的な作用により、止水壁中のエタノールが地下水と置換している。本実験では試料作成時に止水壁間隙中に含まれたエタノールのうち、102 日間で 14%のエタノールが水と置換した。

図—13 の●は解析結果であり、サンプリング結果をよく再現している。本解析により止水壁中のエタノール/水



図—13 スラリー内の残留エタノール分布
(試料解体時：試験開始から102日後)

置換速度を3%以内の誤差で再現できることになる。

エタノールと水の置換速度は止水壁にかかる動水勾配を大きくすることによって改善できると予想している。

4.2.4 排水中のエタノール濃度

排水中のエタノール濃度は、実験結果は最大濃度0.073%であった。一方、解析結果は0%に近い濃度となった。排水側での微生物分解の効果を過大評価していること、解析精度として0.1%以下の低濃度の評価が難しいこと、などが乖離の理由として考えられる。

§ 5. おわりに

エタノールベントナイトスラリー止水壁中のエタノールと水の置換に関する移流分散解析結果を示し、数値解析の止水壁設計への適用性を明らかにした。

以下に結論を示す。

1) カラム実験と数値解析から土中のエタノールの分子

拡散係数 $a_m=3.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ を得た。これは水・エタノール2成分系でのエタノールの分子拡散係数の約1/3である。

2) バッチ試験から微生物による好気、嫌気条件下でのエタノールの減衰定数 λ を求めた。その結果、好気性条件では $\lambda=0.02 \sim 0.13$ 、嫌気性条件では $\lambda=0.007 \sim 0.064$ を得た。

3) これらの定数をもとに 20m^3 土槽で行われた止水壁モデル実験の解析を実施した。その結果、止水壁内のエタノール/水の置換速度を3%以内の誤差で再現した。また、水とエタノールの密度差による土中内でのエタノールの浮き上がり状況を再現し、エタノールの地盤への拡散範囲を15~20%の誤差で表した。

不飽和領域では、エタノールの蒸発等を解析で評価していないために、正確に評価し得なかった。エタノールの蒸発を考慮するためには気・液・固3相系の解析をする必要があり、不飽和土中でのエタノールの分解速度の検討を含めて今後の課題である。

本実験では、止水壁に2.7の動水勾配をつけることにより、エタノールの拡散範囲を1.5m以内に抑えられた。原地盤においても同様な方法でエタノールの外部への拡散範囲を抑制できると予測している。止水壁にかかる動水勾配は止水壁内のエタノール/水の置換速度にも影響するため、現地盤で施工する場合はより大きい動水勾配をかける予定である。

以上の結果から、エタノールベントナイト止水壁の構築に伴う地盤中へのエタノールの拡散範囲、濃度の評価や止水壁内のエタノール/地下水置換速度の設計に本解析手法が有効であることが明らかになった。

謝辞

本研究はアルコール専売事業特別会計研究開発委託費により経済産業省からの委託事業として実施したものであり、支援していただいた経済産業省に感謝いたします。

<参考文献>

- 堀内澄夫：有機溶媒／ベントナイトスラリーによる止水壁の構築，土木学会第47回年次学術講演会，pp.1024-25, 1992
- C.Hofstee, N.Rowse, J.Braun, O. Trotschler, H.-P. Koschitzky: Remediation of Dense Non Aqueous Phase Liquid (DNAPL) Contamination in the Saturated Zone by Alcohol Flooding, VEGAS report, University of Stuttgart.
- Ronald W.Falta, Cindy M.Lee, Scott E.Brame, Eberhard Roeder, John T.Coates, Charles Wright, A Lynn Wood, and Carl G.Enfield: Field test of high molecular weight alcohol flushing for subsurface nonaqueous phase liquid remediation, Water Resource Research, Vol.35, No.7, pp.2095-2108, 1999
- Gour-Tsyh Yeh, Jing-Ru Cheng, Hwai-Ping Cheng: 3DFEMFAT Users' Manual of a 3-Dimensional Finite Element Method of Flow and Transport through Saturated-Unsaturated Media, The Pennsylvania State University.
- 石川, 浅田, 川口, 堀内: "エタノール/ベントナイトスラリー止水壁のエタノール濃度拡散の評価", 第35回地盤工学研究発表会講演 pp.1521-1522, 2000.6

- 6) 化学工学便覧 (化学工学編) 改訂六版 p.111
- 7) “平成 11 年度 アルコールを利用した止水壁の構築技術に関する研究開発報告書”, 社団法人 アルコール協会, 2000.3
- 8) “平成 12 年度 アルコールを利用した止水壁の構築技術に関する研究開発報告書”, 社団法人 アルコール協会, 2001.3
- 9) 浅田, 石川, 堀内: “エタノール/ペントナイトスラリー止水壁モデル実験(その 1)”, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1265-1266, 2001.6
- 10) 石川, 浅田, 堀内: “エタノール/ペントナイトスラリー止水壁モデル実験(その 2)”, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1267-1268, 2001.6
- 11) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: “飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析法に関する研究”, 土木学会論文集, No.511/Ⅲ-30, pp.135-144, 1995.3
- 12) Kazumasa Itoh, Hiroyuki Tosaka, Osamu Matsubara, Yoshio Hirota: “Numerical modeling of volatile and slightly soluble contaminant flow in unsaturated and saturated zone”, Groundwater Updates, Springer-Verlag Tokyo 2000, pp.357-362.