

3-8 最終処分場の性能評価に関する誘電法を用いた計測技術の高度化

岡山大学大学院環境学研究科・社会基盤環境学専攻

竹下 祐二

岡山大学廃棄物マネジメント研究センター

小松 満

1. 研究概要

(1) 研究目的

廃棄物最終処分場の建設時における性能評価において地下水の浸透挙動を把握することが重要である。また、降雨浸透に伴う浸出水の量を低減することは埋立完了後の管理費の低減に大きく寄与する。そこで、本事業では、地盤中の水分量を計測する誘電法に注目し、処分場周辺の地下水や処分場内の降雨浸透、浸出水の移動現象を計測する手法についての適用性の検討を目的とした。なお、廃棄物問題において最終処分場の適正化は大きな課題であるが、アジア・太平洋地域では欧米の先進国と異なる点として降雨による影響が大きく、日本における処分場に関する技術は適用性が高いものと考えられる。ここで期待される効果としては、アジア地域特有の適用技術として、実測データに基づいた評価手法を確立することが可能となることが挙げられる。

(2) 研究概要

廃棄物最終処分場における浸出水の移動現象を取り扱う上では、地表面からの降雨浸透挙動を評価する浸透流解析と物質の移動挙動を評価する移流分散解析による数値解析手法が主に用いられる。その中で、モデルの初期条件や境界条件に加えて、表-1に示すような地盤の物性値(パラメータ)を正確に入力することが適切な評価を行う上での前提となる。ただし、解析技術の向上に比べて、これらの物性値を特に原位置において測定する手法は未だ確立段階にある。特に原位置では試験装置や試験条件の制限が多く、迅速かつ簡便な試験方法の確立が課題となっている。

表-1 浸透流解析/移流分散解析に必要な代表的物性値

浸透流解析	移流分散解析 (浸透流解析に追加する項目)
(1) 透水係数 (LT^{-2})	(5) 有効間隙率 (-)
(2) 不飽和透水係数 (LT^{-2})	(6) 縦分散長、横分散長 (L)
(3) 水分特性曲線 (pF 曲線) (-)	(7) 分子拡散係数 (L^2T^{-1})
(4) 比貯留係数 (L^{-1})	(8) 屈曲率 (-)
	(9) 減衰定数 (T^{-1})
	(10) 分配係数 (遅延係数) ($M^{-1}L^3$)

本研究では、これらの物性値を適切に測定する手法について誘電率の計測技術を用いた簡便な手法の提案を目指し、初年度は浸透流解析で用いられる不飽和透水係数や水分特性曲線について室内試験及び原位置試験の適用性を検討した。

本年度は、移流分散解析に必要な、有効間隙率及び分散係数の基となる分散長についての検討を実施した。それらの内容について下記にまとめる。

① 誘電率計測法を用いた地盤の有効間隙率の測定方法

誘電率測定センサーを地盤に挿入し、そのセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入し、誘電率の変化から有効間隙率を求める原位置試験方法の提案。

② 誘電率計測法を用いたトレーサー試験による地盤の分散係数（分散長）の測定方法

独自開発の誘電率センサーである FDR 法及び昨年度の海外調査で入手したプロトタイプ
の誘電率センサーについて、トレーサー試験を用いて浸出水の移動挙動の測定法としての
適用性を検討した。

3. 研究報告

(1) 誘電率計測法を用いた地盤の有効間隙率の測定方法

1) はじめに

汚染物質の地下水への浸出に伴う移行について、近年、解析シミュレーション技術が発達し、汚染状況やその範囲が把握可能となっている。しかし、地盤内の地下水浸透特性に関わる物性値を測定する統一された試験法の確立が遅れているため、より正確な評価を行う上での障害となっている。特に、物質の移行特性に大きく関係するパラメータである有効間隙率は原位置で迅速かつ正確に求める試験法が無いため、その測定方法の確立が求められている。そこで、誘電率測定センサーを地盤に挿入し、そのセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入し、誘電率の変化から有効間隙率を求める方法を提案した。ここで対象となる汚染物質を注入物質として用いると、それぞれの物質の浸透に対応した有効間隙率を把握することが出来る。今回は、その基礎的研究として飽和地盤を対象とし、室内にて間隙率を調整した砂試料に対してエタノール溶液を注入し、有効間隙率を算定した。さらに、得られた結果に対して、別途トレーサー試験を行い、その妥当性を検証した。

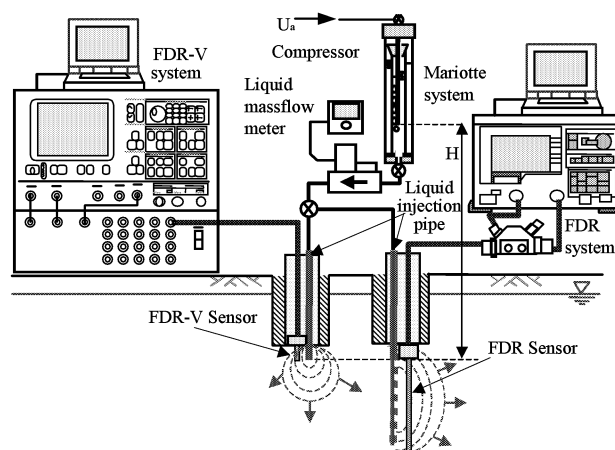


図-1 原位置における注入による地盤の誘電率測定手法概略図

2) 注入による地盤の誘電率測定手法

図-1 に本研究で対象とする手法の概略図を示す。用いた誘電率計測法は本研究室で独自開発した FDR 法である。測定器と同軸ケーブルで接続した電極をパイプを介して地盤内に

挿入する。同じパイプ内に注入管を設置しており、ここから水と誘電率の異なる液体を注入してその変化量から地盤の有効間隙率を算定する。なお、FDR-V 法は電極の先端部のみの測定であるので局所的な値を、FDR 法は電極の全域にわたって測定するので挿入した部分の平均値を測定する。

3) 飽和地盤の間隙率の測定

飽和地盤において電極を挿入し、液体を注入する前の誘電率を測定すれば、体積含水率と誘電率の関係から間隙率が求まる。図-2 に3種類の供試体についてあらかじめ測定しておいた校正曲線を示す。これを用いて測定した結果を図-3 に示す。一部、電極の挿入による攪乱の影響が現れているが、最大10%程度の誤差で測定可能である。

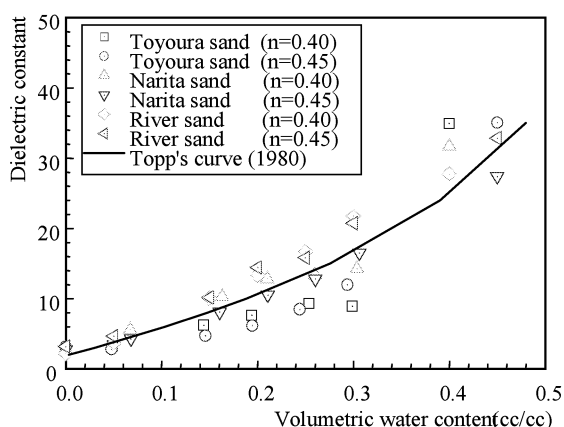


図-2 砂試料に対する校正曲線

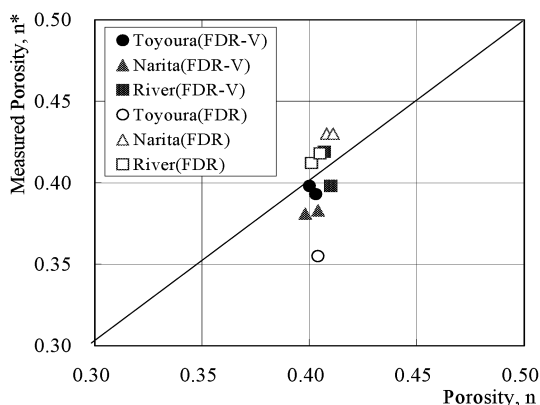


図-3 飽和砂供試体の間隙率の測定結果

4) 注入による飽和砂試料に対する測定結果

次に、先の供試体に対してエタノール水溶液（95%）を注入して誘電率の経時的な変化を測定した。その一例として、成田砂に対して実施した結果を図-4 に示す。注入直後から誘電率が低下し始めており、ほぼ同時間で一定値に収束した。

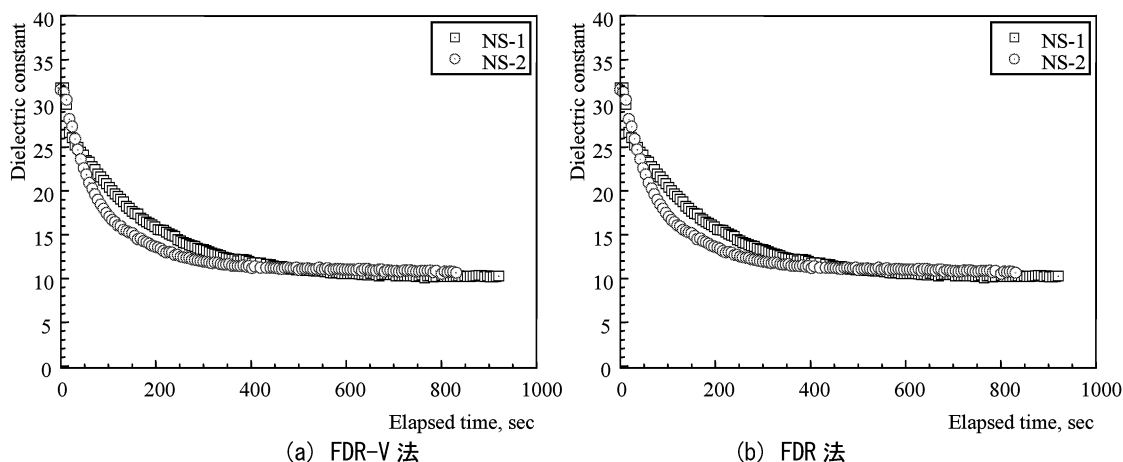


図-4 注入時の誘電率の経時変化：成田砂(エタノール 95%水溶液)

次に、これらの結果より、有効間隙率を次式により算定した。

$$\varepsilon_{ep} = \varepsilon_s(1-n) + \varepsilon_w(n-n_e) + \varepsilon_{eth} \cdot n_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ε_s 、 ε_w 、 ε_{eth} ：土粒子、水、エタノール水溶液の誘電率、 n ：地盤の間隙率、 ε_{ep} ：注入後の地盤の誘電率である。

表-2に、それぞれの測定結果を示す。いずれも間隙率の約80~95%程度の値となった。また、FDR-Vの方がFDRよりもやや高い値を示す傾向が現れている。これは、端面で測定するFDR-V法と比較して広範囲のFDR法の方がより注入による浸透部分の平均値を示しているためである。

表-2 注入による有効間隙率測定結果

Method	Sand	Dielectric constant		Porosity	Measured	Ratio of
		$\varepsilon_{initial}$	ε_{final}	n	n_e^*	n_e^*/n
FDR-V	Toyoura	32.75	8.18	0.400	0.382	0.955
		32.37	8.49	0.403	0.381	0.945
	Narita	31.76	10.39	0.404	0.356	0.881
		31.57	10.93	0.398	0.340	0.854
	River	34.65	10.04	0.407	0.366	0.899
FDR	Toyoura	33.02	9.06	0.410	0.384	0.937
		29.59	9.92	0.404	0.363	0.899
	29.59	10.05	0.404	0.361	0.894	
	Narita	35.65	12.08	0.408	0.334	0.819
		35.66	10.98	0.411	0.354	0.861
	River	34.05	10.92	0.401	0.343	0.855
		34.49	11.66	0.405	0.337	0.832

5) トレーサー試験による測定結果の妥当性の検証

次に、上記で得られた結果の妥当性を検証するため、図-5のような鉛直一次元トレーサー試験装置を用いて実際の有効間隙率を測定した。トレーサーは、単位体積重量を水と等しくしたエタノール調整水溶液を用い、パルス状に注入した。図-6に豊浦砂に対する流出水の濃度経時変化を示す。有効間隙率の算定には、 $C/C_0=0.5$ となった時間を用いた。図-7に、表-2の注入試験結果とトレーサー試験で得られた有効間隙率の関係を示す。この図から両者はほぼ良好な一致を示しているものと判断できる。

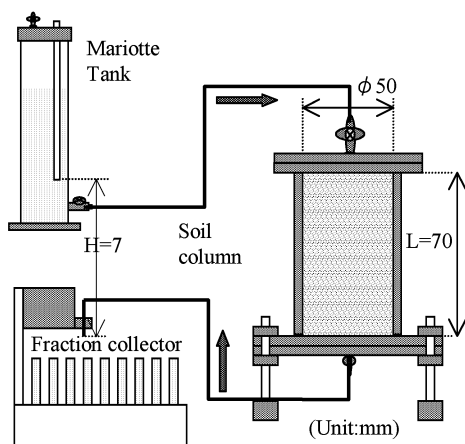


図-5 トレーサー試験装置

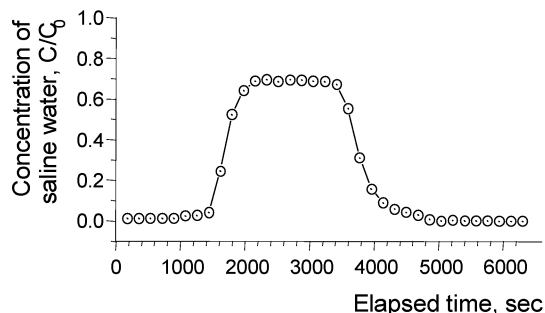


図-6 流出水の濃度経時変化（豊浦砂）

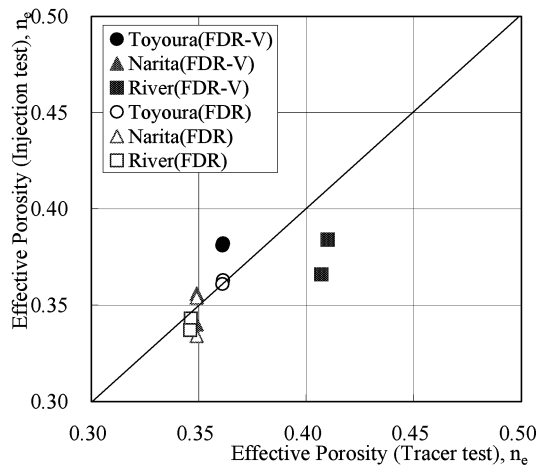


図-7 有効空隙率の測定結果の比較

(2) 誘電率計測法を用いたトレーサー試験による地盤の分散係数の測定方法

1) はじめに

地盤中での汚染物質の移動は、地下水に混合して移動する物質と地下水に混合しないで非混合流体として移動する物質がある。前者は移流分散解析で取り扱えるが、後者は複数の流体や気体が混合しないで移動するため、多相流の浸透問題として取り扱われる。ここでは、地下水に混合して移動する物質を取り扱うが、水溶性物質として取り扱いが可能な程度の濃度であれば、地下水に混合しない物質の移動も評価できるものと考えられる。

移流分散解析の3次元の基礎方程式は次式で示される。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 D ：分散テンソル、 v ：流速テンソル、 C ：濃度、 R ：遅延係数（溶液の土粒子表面や内部に吸着する項で、粘性土ではこの項が大きく、土壌が持っている浄化能力として表される）である。

式(2)を定量的に取り扱うには、 D_x, D_y, D_z である分散係数 (L^2/T) と R を求める必要がある。分散係数は、Scheidtger (1961) と Bear (1961) によって分散テンソル (D_{ij}) として、次式が提案されている。

$$D_{ij} = \alpha_T |\mathbf{v}| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} + D_m \tau \delta_{ij} \quad \dots \quad (3)$$

$$\text{一次元では、} D = \alpha_L v + D_m \tau \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 α_L ：縦分散長 (L)、 α_T ：横分散長 (L)、 v_i ： i 方向の間隙流速 (L/T)、 $|\mathbf{v}|$ ：間隙流速の平均値 (L/T)、 D_m ：分子拡散係数 (L^2/T)、 τ ：屈曲度、 δ_{ij} ：クロネッカのデルタ ($i=j$ のとき $\delta_{ij}=1$ 、 $i \neq j$ のとき $\delta_{ij}=0$) である。

分散長の求め方として、一般には一次元カラム試験による2つの方法があり、一つはカラム途中でのトレーサーの濃度変化を計測する方法と、もう一方は、下流端での流出水の濃度変化を計測する方法である。

本研究では、カラム途中でのトレーサーの濃度変化を誘電率センサーにより計測し、その経時変化から分散係数を求める方法に対する適用性を検討することとした。

2) 分散係数の測定方法 (カラム途中での濃度変化を計測する方法)

上述の式(2)を一次元の支配方程式として式(5)に示す。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、Rは吸着に関する項であるが、一般に安全側評価ではR=1とすることで分散係数Dが主たるパラメータになる。この分散係数は、流れのない時は拡散係数になる。したがって、この値は次式の関係で表され、**図-8**に示すように流速によって大きくなる。

$$D = \alpha v + D_0 = \alpha v + D_m \tau \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 α : 分散長 (長さの単位で均質な砂 ($D_{10}=0.1\text{mm}$) ではこの値は小さく、0.01cm程度)、 v : 間隙内流速 (実流速とも呼ばれ、ダルシーの法則で求められる流速 v_d を有効間隙率 n_e で割った値で次のように定義される) である。

$$v = \frac{v_d}{n_e} \quad \dots\dots\dots (7)$$

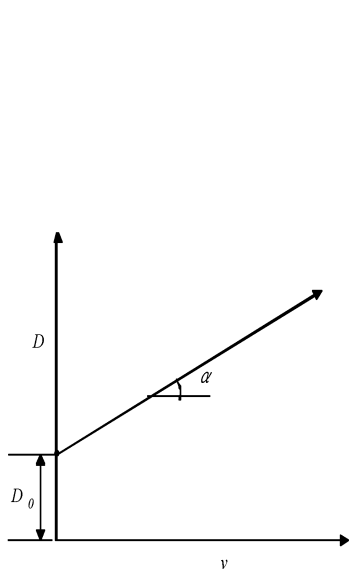


図-8 分散係数の流速による依存性

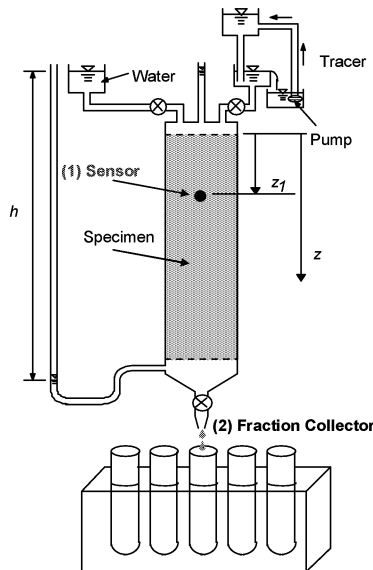


図-9 一次元トレーサー試験

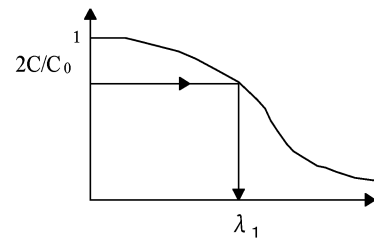


図-10 余誤差関数

ここで、**図-9**に示すような一次元鉛直カラムによるトレーサー試験において、一定の流速(v)で浸透している所($C=0$)に一定濃度(C_0)の溶液を $t=0$ に浸透させた時に、ある時間 t における z の点での濃度($C(z, t)$)は、式(5)でR=1として、次の初期条件、境界条件を定める。

$$\text{初期条件: } C(z, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{境界条件: } \left. \begin{array}{l} C(0, t) = C_0 \\ C(\infty, t) = 0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

上記の条件より、式(5)の方程式の解は、次式になる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\lambda) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{z - vt}{2\sqrt{Dt}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

なお、 $\text{erfc}(\lambda)$ は次式で表される余誤差関数で、**図-10**の関係として示される。

$$\text{erfc}(\lambda) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\lambda \exp(-y^2) dy \quad \dots\dots\dots (12)$$

したがって、式(10)、(11)より、**図-9**の一次元の移流分散実験によって、 $z=z_1$ の点での濃度 $C(z, t)$ の経時的な変化を測定し、その結果より (z_1, t_1) の値を定め、**図-8**より λ_1 の値を求めると、分散係数は次式より求められる。

$$D = \frac{1}{4} \frac{(z_1 - vt_1)^2}{(\lambda_1)^2 t_1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

この方法と同じ手法で、種々の流速での分散係数の値を計測して、流速 (v) と分散係数の関係を**図-8**のように求め、その勾配 (α) が浸透方向の分散長で縦分散長 (α_1) と呼ばれる。

3) 一次元鉛直カラムによるトレーサー試験

上述の試験方法を基に、**図-11**に示す試験装置でトレーサー試験を行った。試料に豊浦砂を用い、間隙率 0.40 (有効間隙率 0.38)の飽和供試体を作成した。トレーサーは3段階の濃度 (3.0%、1.0%、0.3%)の塩化ナトリウム水溶液とした。また、供試体中心高さには、FDR センサーと米国製のプロトタイプ誘電率センサー (D社製、 $\epsilon = 1 \sim 80$ 、 $EC = 0 \sim 23 \text{mS/cm}$)を設置した。試験は、まず、供試体作製後に供試体下部から蒸留水を通水して気泡等を完全に除去した。次に、供試体上部から脱気水を通水することで流速を求めた後、トレーサー液に切り替えて、センサーの出力値の経時変化を記録した。出力値が一定状態に落ち着いた後、再度脱気水に切り替えて、トレーサー液を供試体から排出した。試験終了後は供試体下部から蒸留水を通水して、余分なトレーサー液をフラッシングさせて初期状態に戻した。そして、再度上下流の水頭差を増すことで流速を高めて試験を繰り返し実施した。

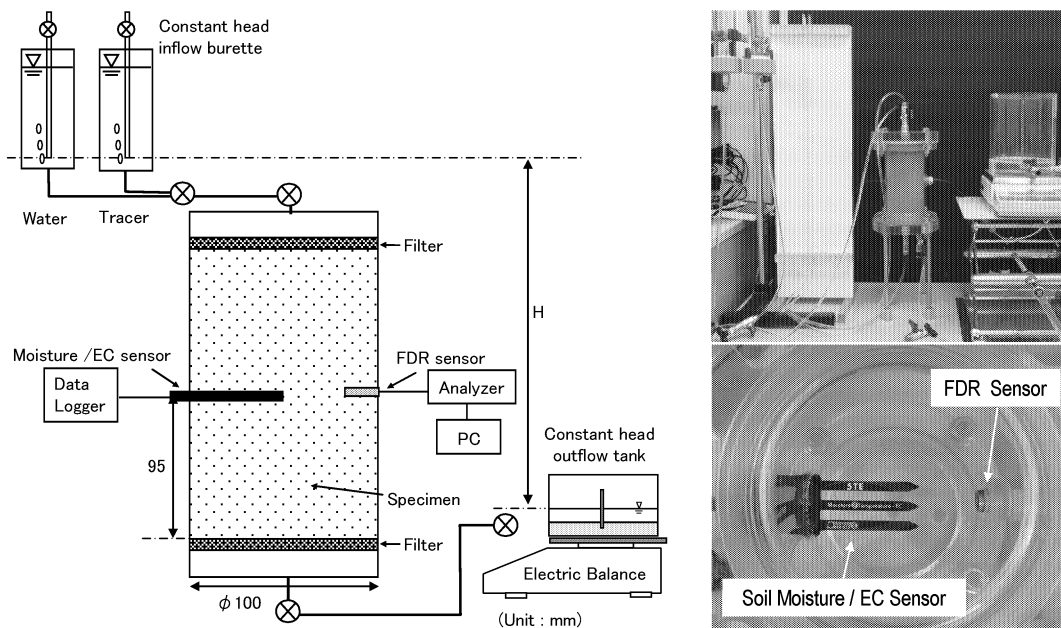


図-11 一次元鉛直カラムによるトレーサー試験装置の概要と試験状況 (誘電率計測センサー)

4) トレーサー試験結果

① センサーの計測限界に対する検討

トレーサー溶液濃度 $C=3.0\%$ 及び $C=1.0\%$ で実施した試験結果を図-12 及び図-13 にそれぞれ計測結果とその値を基にまとめた破過曲線（濃度の経時変化）を示す。いずれも FDR センサーでは濃度の経時変化を測定することが出来たが、誘電率センサーでは電気伝導度の測定限界を超えたため、濃度が上昇している過程で計測不能となった。また、水分量の測定値においては、FDR センサーはほぼ一定値を記録しているが、誘電率センサーはトレーサー溶液がセンサー付近に到達した時点で大きな変動が生じる結果となった。このことより、FDR センサーは高濃度のトレーサーに対する適用性が高く、その一方で、誘電率センサーは高濃度における測定では、濃度の測定値に加えて水分量の測定値にも大きな誤差を含む可能性が示唆された。

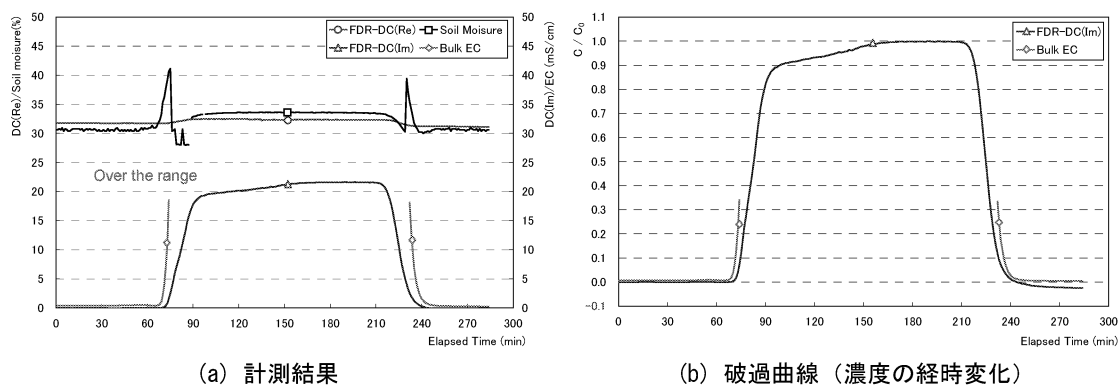


図-12 トレーサー試験結果 ($C=3.0\%$ 、 $i=0.026$ 、 $v=1.67 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)

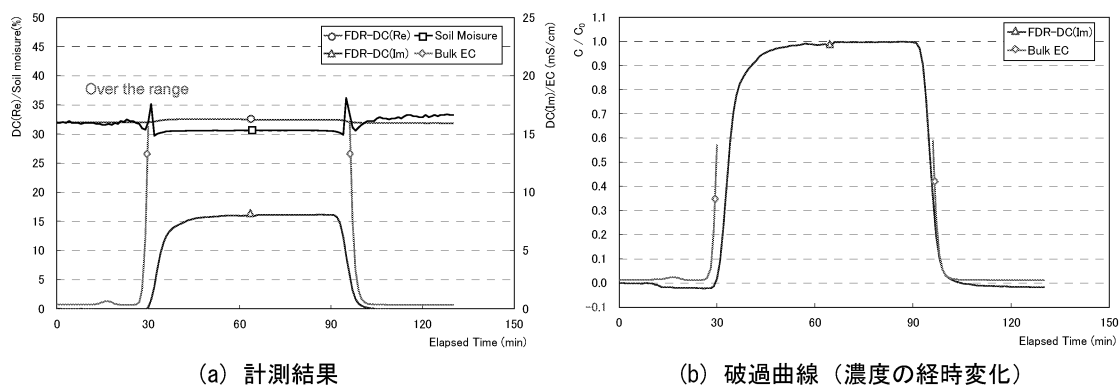
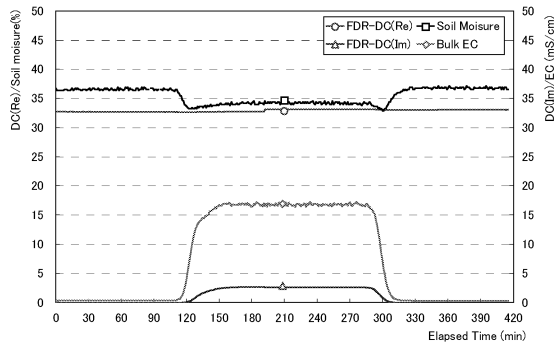


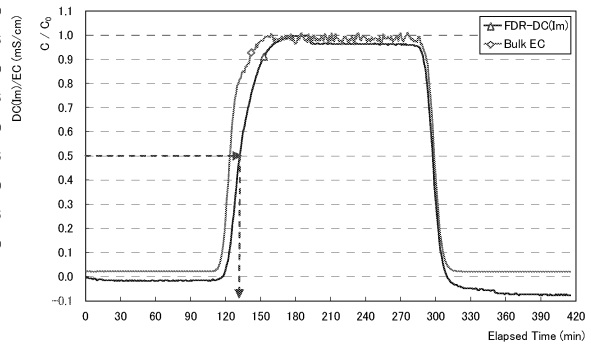
図-13 トレーサー試験結果 Tracer test results ($C=1.0\%$ 、 $i=0.105$ 、 $v=4.23 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)

② 分散係数の算定

上述の結果を踏まえ、トレーサー溶液の濃度を $C=0.3\%$ として、3段階に動水勾配（流速）を変化させて実施した試験結果を図-14～図-16 にそれぞれ示す。このトレーサー濃度では、誘電率センサーも計測限界を超えることはなく、濃度の経時変化をとらえることができた。ここで、FDR センサーの測定値を基に、図-17 に比濃度と実流速の関係を示す。流速が増加するに従い、濃度が上昇し始める時間が早くなっていることが分かる。なお、水分量の計測値に対しては、この濃度（海水の 1/10 程度）でも誘電率センサーでの変動が認められた。

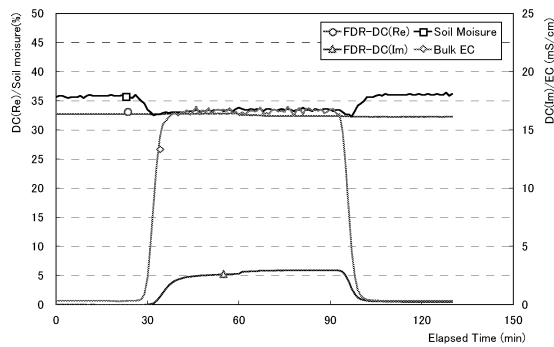


(a) 計測結果

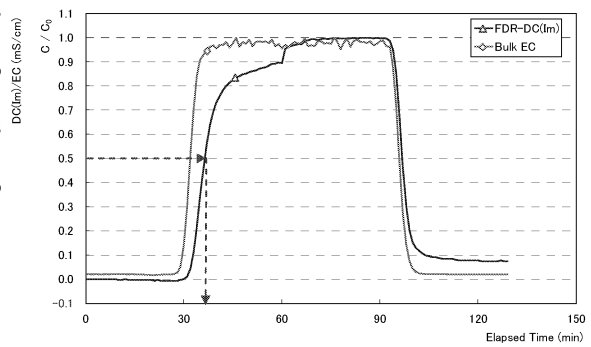


(b) 破過曲線（濃度の経時変化）

図-14 トレーサー試験結果〈ケース 1〉 (C=0.3%、 $i=0.026$ 、 $v=1.26 \times 10^{-3}$ cm/s)

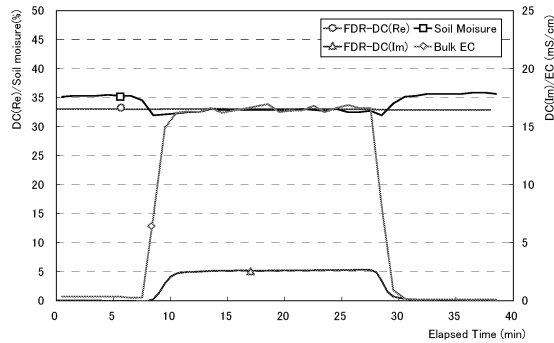


(a) 計測結果

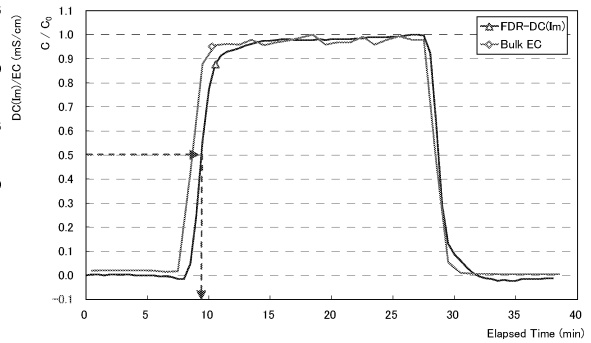


(b) 破過曲線（濃度の経時変化）

図-15 トレーサー試験結果〈ケース 2〉 (C=0.3%、 $i=0.105$ 、 $v=4.07 \times 10^{-3}$ cm/s)



(a) 計測結果



(b) 破過曲線（濃度の経時変化）

図-16 トレーサー試験結果〈ケース 3〉 (C=0.3%、 $i=0.421$ 、 $v=1.53 \times 10^{-2}$ cm/s)

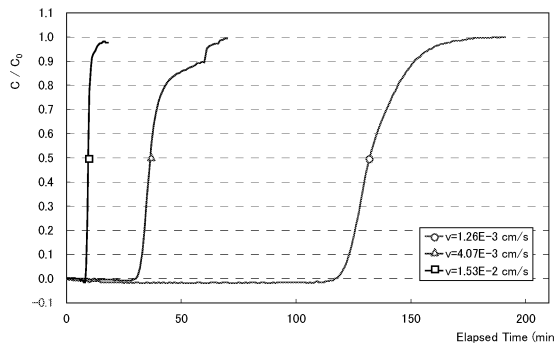


図-17 比濃度と実流速の関係

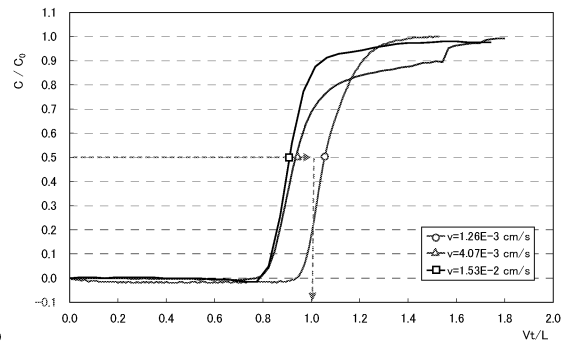


図-18 比濃度と Vt/L の関係

分散係数の算定にあたり、式(13)の関係から、比濃度 0.5 の時間 t において、 $Vt/L=1$ を満足する必要がある。そこで、比濃度と Vt/L の関係を図-18 に示す。トレーサーの注入開始時間の誤差と考えられる若干の差異があるもの、概ね $Vt/L=1$ を満足しているものと判断できる。そこで、破過曲線の濃度変化を基に余誤差関数を求め、分散係数を求めた。各間隙内流速（実流速）に対して得られた分散係数を図-19 に示す。同図より、縦分散長は約 4.5cm となった。

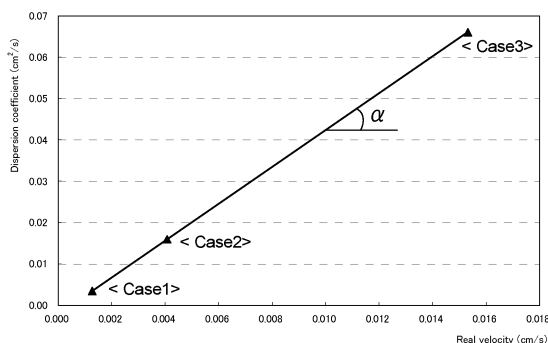


図-19 分散係数と間隙内流速（実流速）の関係

次に、海外の処分場で採取された浸出水をトレーサー溶液として、通水を行った結果を図-20 に示す。また、各トレーサー溶液を電気伝導度計、FDR センサー、誘電率センサーで測定した結果を表-3 に示す。処分場の浸出水はトレーサー試験で用いた塩化ナトリウム溶液よりもかなり低い濃度であったが、砂カラム中での濃度変化をとらえることができた。なお、誘電率センサーは、塩化ナトリウム 0.3%水溶液では測定限界を超える結果となった。

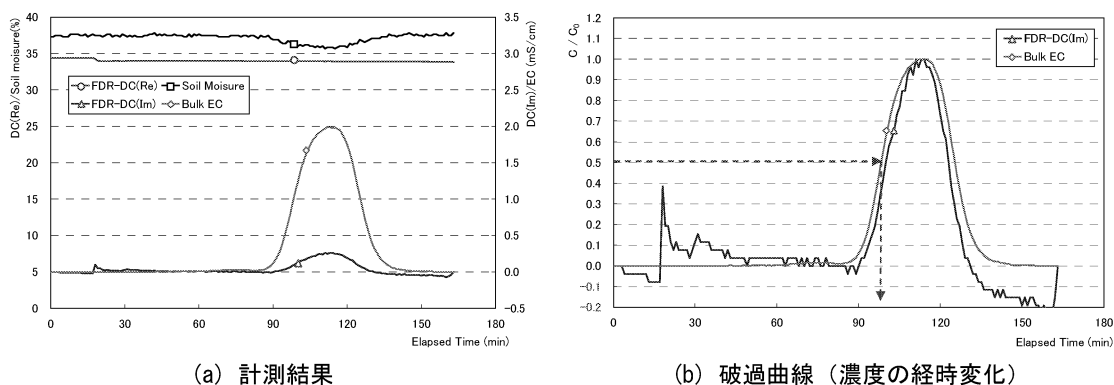


図-20 トレーサー試験結果(処分場浸出水、 $i=0.042$ 、 $v=1.66 \times 10^{-3}$ cm/s)

表-3 トレーサーの電気伝導度とセンサー出力値

トレーサー溶液	電気伝導度計	FDRセンサー	誘電率センサー
	EC	DC	EC
	(mS/cm)	(ϵ_p)	(mS/cm)
塩化ナトリウム3.0%水溶液	41.2	72.7	×
塩化ナトリウム1.0%水溶液	14.8	14.5	×
塩化ナトリウム0.3%水溶液	4.91	-7.78	×
処分場浸出水	0.84	—	—

×:計測範囲外, —:未計測

(3) 研究成果のまとめ

① 誘電率計測法を用いた地盤の有効間隙率の測定方法

誘電率測定センサーを地盤に挿入し、そのセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入し、測定値の変化から有効間隙率を求める方法を提案した。その有効性を検討するための基礎データの把握を目的として、まず室内試験において数種類の砂地盤に対して注入試験を行った。その結果、各測定値とも間隙率の約 80～95%程度の結果が得られ、別途実施したトレーサー試験結果と比較して良好な一致を得た。

② 誘電率計測法を用いたトレーサー試験による地盤の分散係数（分散長）の測定方法

室内で一次元鉛直カラムトレーサー試験を実施し、誘電率計測法を用いてカラム途中での濃度変化を計測する方法より分散係数を求めた。その結果、FDR センサーは高濃度のトレーサーに対する適用性が高いが、誘電率センサーは高濃度における測定では濃度の測定値に加えて水分量の測定値にも大きな誤差を含む可能性が示唆された。また、実際に海外の処分場で採取された浸出水に対しても濃度測定が可能であることを示したことから、浸出水の漏洩検知としての利用に対する可能性を示した。

3. 今後の計画

最終年度は、原位置における地盤の移流・分散挙動の測定手法の提案を行う予定である。具体的には、上述の FDR センサー及び誘電率センサーを用い、原位置にて地盤の降雨浸透を評価する透水試験や浸出水の移動現象を評価するボーリング孔を利用したトレーサー試験を行い、各物性値の原位置測定方法について検討する。

4. 活動資料

特になし。

以上