

# 原位置不飽和透水試験と広範囲の移流拡散解析

## In-situ Unsaturated Hydraulic Conductivity Tests and Advective Diffusion Analysis for Wide-area

森田修二\* 今泉和俊\*\* 三澤孝史\*\* 浅野 剛\*\*

### 要 旨

本研究では、津波堆積物等による広範囲の地下水汚染の予測精度の向上を図るために原位置の不飽和透水試験法の開発と数値解析手法の改良を行った。本報の原位置試験法は簡易な方法であるが、不飽和特性のパラメータや飽和透水係数の同定が可能であり、地表における圧力条件を任意に設定できる効率的な測定方法である。また、広範囲の地下水汚染の解析を目的として移流拡散解析のEL法（拡散項と移流項の計算を分離）の改良を提案した。既往の実験結果により解析精度を検証し、現地モデル解析により広範囲の解析に適用可能であることを確認した。

キーワード：原位置不飽和透水試験、移流拡散解析、オイラリアン・ラグランジアン法

### 1. まえがき

東日本大震災では、自然由来の重金属類を含んだ津波堆積物による土壌汚染が報告<sup>1)</sup>されている。今後、降雨などにより津波堆積物から流出する重金属物質が地下水汚染を引き起こすことが予想される。また、震災地で発生したガレキの集積場から人工物（家電、機械等）の重金属類が流出することも考えられる。このような地下水汚染の対策には、地下水の流れを把握する必要がある。地下水流速の測定では、飽和領域の透水係数を求めるために揚水試験が行われるが、不飽和領域における透水係数の測定方法はまだ確立されていない。

今回、原位置における不飽和透水試験機を開発し、岩手県下閉伊郡山田町の震災ガレキ処理（破碎・選別等）現場で適用し、飽和領域については従来の揚水試験を実施した。なお、当現場ではガレキの仮置場から重金属類が流出する可能性があったため、ガレキ仮置場を中心に土壌分析も実施した。

また、地下水汚染のシミュレーションには移流拡散解析が行われるが、代表的な解析手法としてはオイラー法やオイラリアン・ラグランジアン法（EL法）が知られている。しかし、広範囲の解析にはオイラー法は不向きであり、現実的にはEL法に限られる。一方、EL法にも数値分散という問題点がある。本報告ではEL法に改良を加えた解析手法を提案し、その精度の検証と現地对象にしたケーススタディを行った。

ガレキ処理現場での地下水流の調査と土壌汚染調査、および数値解析によるシミュレーションという一連の取り組みを行ったのでこれらの結果をまとめて報告する。

### 2. 原位置不飽和透水試験

#### 2.1 試験方法

原位置での不飽和透水試験には幾つかの方法が提案されているが、いまだ確立されてはいない。例えば、地盤に注水しながら地中のサクシオンや体積含水率を測定して不飽和特性を確認する方法がとられる。竹下ら<sup>2)</sup>の提案するものは土の体積含水率のみを測定する簡易な方法であり、不飽和特性を表すVanGenuchtenモデル（VGモデル）のパラメータの算定を目的としている。本研究では、竹下らの方法に改良を加え現地の透水性に応じて測定時間を短縮する測定装置を開発した。図-1に装置の概要を示し、試験方法の手順を以下に示す。

- i. 地中に測定孔を削孔（径 $\phi=30\text{mm}$ 、深さ $L=1\text{m}$ ）
- ii. 土壌水分計を測定孔に設置（センサーと孔壁間は削孔土で充填してよく締固める）
- iii. 地表面に密閉蓋型給水装置を設置（漏水が無いように土壌水分計を固定）

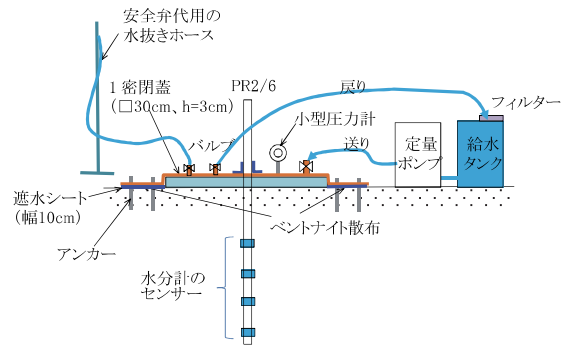


図-1 原位置不飽和透水試験装置の概要

\*西日本支社土木技術部 \*\*技術研究所

- iv. 密閉蓋型給水装置に定量電動ポンプで給水し、バルブ調整と小型圧力計で圧力を一定に管理
- v. 土壌水分計により深度ごとの含水率の変化を測定
- vi. 数値解析により VG モデルの不飽和特性を同定

なお、土壌水分計には Delta-T 社製のプロファイルプローブ PR2/6 を用いた。地表面から 10cm、20cm、30cm、40cm、60cm、100cm の深度の土の体積含水率が測定できる。測定中は定量ポンプ（イワキ電磁定量ポンプ EHN-C36、最大吐出圧 0.2MPa）で定流量の真水を給水し、配管して給水タンクに循環させた。密閉蓋に取り付けた配管のバルブ調整で蓋内の圧力を一定に管理した。

2.2 試験結果

a. 予備実験

予備実験として砂質地盤で原位置不飽和透水試験を実施した。写真-1には実験状況の例を示した。この実験では、密閉蓋を使用せず塩ビ管内の水位を一定にして地表面から地中に真水を浸透させた。給水条件は、塩ビ管内径がφ30cm、静水位は GL+1cm である。土壌水分計のセンサー深度を表-1に示す。計測点 no.5 は地下水位以下であり、no.4 も初期含水率が高い状況であった。図-2に実験結果を示したが、地盤の透水性が高く、no.1~no.3 の含水率に有為な変化が測定できる時間（約5分）で終了とした。表-2には数値解析で求めた飽和透水係数と不飽和特性値（式(1)、式(2)参照）を示す。

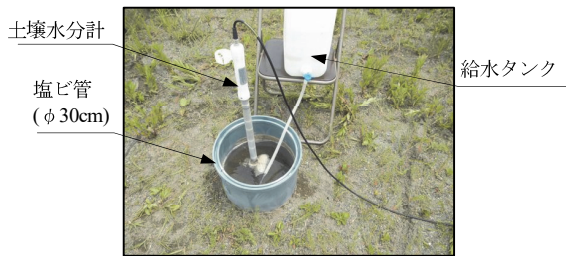


写真-1 原位置不飽和透水試験の例

表-1 計測点の深度

計測点	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5
深度 GL(m)	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.9

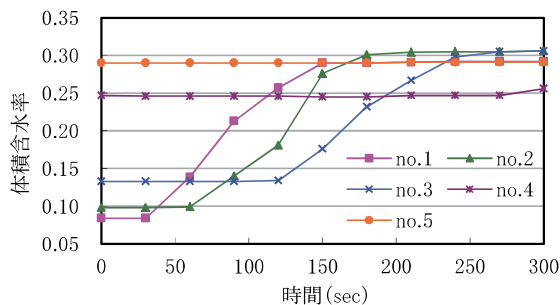


図-2 体積含水率の経時変化

なお、初期水位は GL-0.9m としている。図-3に体積含水率のシミュレーション結果を示す。解析には図-4に示す要素分割を用い、2次元の軸対称解析を行った。

実験結果と解析結果に差違はあるが、一般に土壌は不均一で透水係数がオーダーで評価されることから、本実験でも一定の評価ができています。no.4 は初期状態から含水率が高いことが解析結果でも評価ができています。図-5には給水1分後と5分後の含水率のコンターを示す。GL-0.4m 付近までは徐々に水が浸潤し、GL-0.5m 以深では初期から含水率が高い状況が表されている。

b. 原位置不飽和透水試験

図-6には、前述のガレキ処理現場の全景を示す。北エリア (no.1) と中央エリア (no.2)、南エリア (no.3) の3か所で原位置の不飽和透水試験を実施した。現地の表土は真砂を締固めた埋土であり、非常に透水性が悪い状況であった。

表-2 VGモデルのパラメータ

透水係数 k(m/s)	残留体積含水率 $\theta_r$	飽和体積含水率 $\theta_s$	m	n	$\alpha$
$1 \times 10^{-4}$	0.08	0.31	0.74	3.85	2.0

$$\text{飽和度} : S_e = \left\{ 1 + (\alpha\phi)^n \right\}^m \quad (m=1-1/n) \quad (1)$$

$$\text{比透水係数} : k_r = S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^n \right\}^2 \quad (2)$$

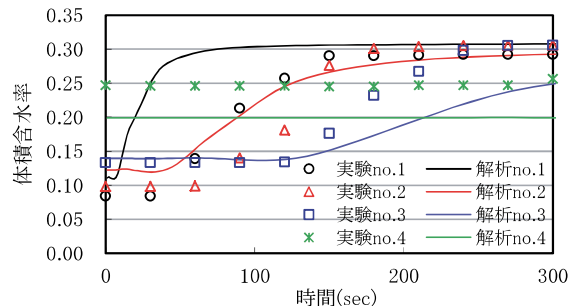


図-3 体積含水率のシミュレーション結果

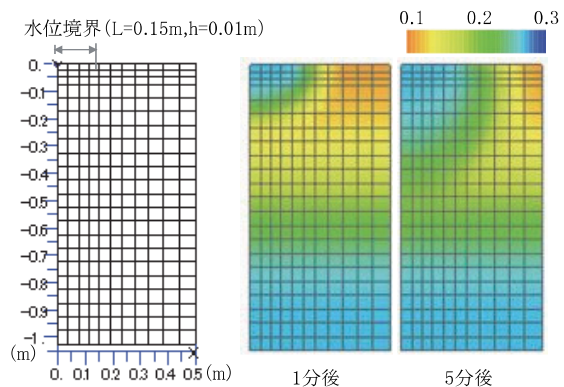


図-4 要素分割 (軸対称モデル)

図-5 含水率のコンター

図-7に気象庁による山田町の降雨記録を示す。計測は2014年4月7日から6日間実施している。計測の3日前に76.5mmの降雨があり、地盤の含水率がやや高い状況と思われる。

図-8には、地点 no.1 における体積含水率の測定結果を示した。青線は地表の水圧（密閉蓋内）を示す。水圧は0.01MPaから0.04MPaまで段階的に上昇させて実験時間の短縮を図った。水圧を増加させることで含水率の上昇が段階的に促進されており、深度の浅い測点（GL-0.1m、-0.2m）でその傾向が明確である。初期含水率が深度によって異なっているのは降雨の影響や地中の土質状況（砂利の混入等）によるものと考えられる。深度GL-0.8mでは含水率の変化が小さく、測定開始から400分経過後にわずかに上昇している。

図-9には地点 no.2 における測定結果を示す。地点 no.1 に比べて水圧が低く（0.01~0.025MPa）、測定時間



図-6 ガレキ処理現場の全景

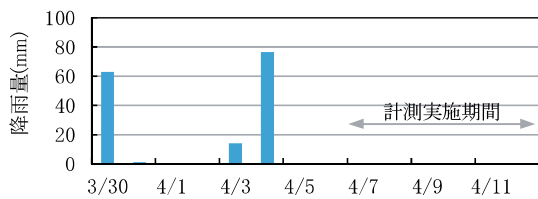


図-7 気象庁による山田町の降雨記録

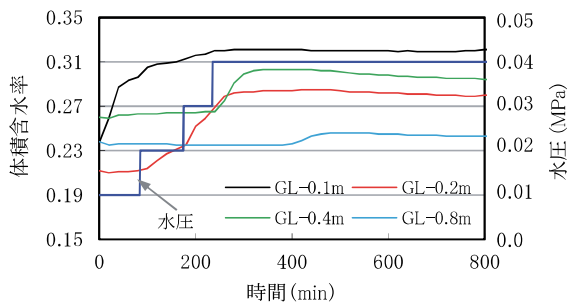


図-8 体積含水率の測定結果（地点 no.1）

を短くしたため体積含水率が上昇したのはGL-0.2mまでであった。写真-2には測定状況を示す。

表-3には、数値シミュレーションで求めた不飽和特性値等を示し、図-10にはVGモデルの不飽和特性曲線を示す。なお、解析モデルは図-4と同じである。

図-11と図-12には体積含水率の数値解析結果と計測値の比較を示す。数値解析では、初期水位（ $\phi_0$ ）は全地点で深度によらずGL-2mと仮定したが、後述する揚水試験で確認した第1帯水層の水位を参考に決定した。図中には地表の水圧条件も示す。数値解析結果では、水圧変化に伴う含水率の上昇もよく再現できており、計測結果がよくシミュレートできていることが分かる。飽和透水係数は $0.8 \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ m/min}$  ( $1.3 \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ )のオーダーであり、試験地点によるばらつきは小さい。地点ごとの不飽和特性を比較すると、no.1とno.2の $\theta - \phi$ 曲線は小さいサクションで体積含水率が急激に低下しており、不飽和域の透水性が飽和領域に比べて相対的に小さいことを示している。

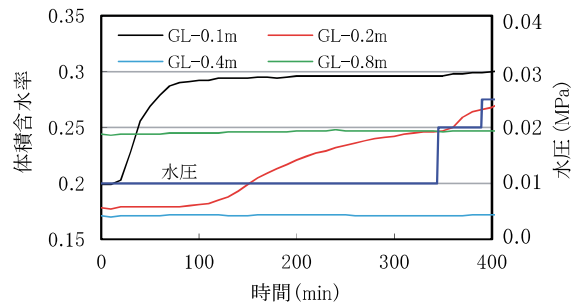


図-9 体積含水率の測定結果（地点 no.2）

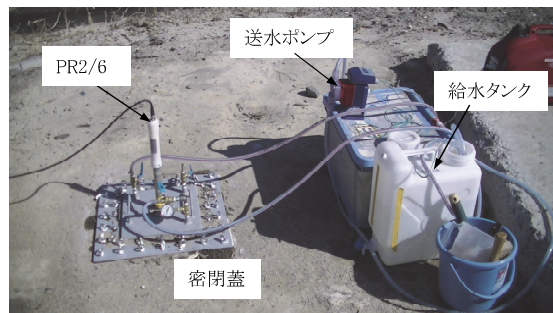


写真-2 原位置不飽和透水試験（地点 no.2）

表-3 不飽和特性値の一覧

試験位置	no.1	no.2	no.3
残留体積含水率 $\theta_r$	0.21	0.17	0.17
飽和体積含水率 $\theta_s$	0.33	0.30	0.29
m (式(1), (2))	0.5	0.5	0.5
n (式(1), (2))	2.0	2.0	2.0
$\alpha$ (式(1))	10	10	2.0
初期水位 $\phi_0$ (m)	-2	-2	-2
透水係数 k(m/min)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-6}$

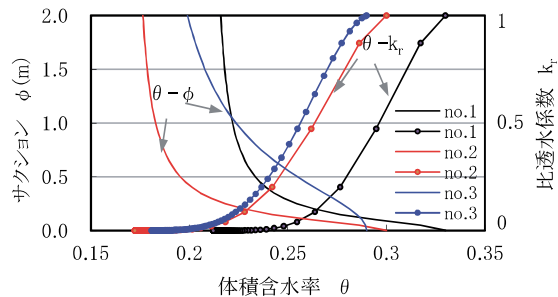


図-10 VGモデルの不飽和特性

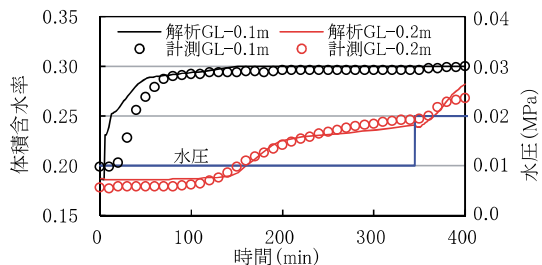


図-11 体積含水率の解析結果 (地点 no.2)

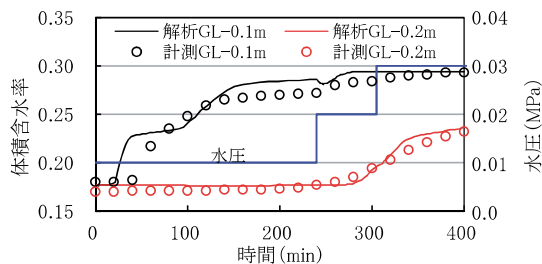


図-12 体積含水率の解析結果 (地点 no.3)

3. 揚水試験

同じくガレキ処理現場において揚水試験を実施した。図-6に揚水試験の計測位置を示す。表-4には揚水試験を行ったボーリングの深度ごとの土質区分を示した。GL-1.2m~GL-2.2mに難透水層があり、上部の第1帯水層と下部の第2帯水層に分かれている。第1帯水層と第2帯水層を対象とした揚水試験をそれぞれ実施した。

第1帯水層を対象に非定常法による揚水試験(地盤工学会 JGS 1314、式(3))を実施した。試験結果を図-13と表-5に示す。透水係数は  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s のオーダーであった。不飽和透水試験で求めた透水係数とオーダーが異なる差があり、今後の検討課題である。

$$k = \frac{(2.3d)^2 \times \log(4L/D)}{8 \times L} \times \frac{\log(s_1/s_2)}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

d: 測定管内径 (0.072m), L: 試験区間長 (0.15m), D: 試験孔径 (0.066m),  $s_1, s_2$ : 水位差 (m),  $t_1, t_2$ : 水位差の時刻

第2帯水層では、定常法(JGS1314、式(4))と回復法(JGS1315、式(5))による揚水試験を行った。試験結果を図-14と表-6に示す。透水係数は  $1.0 \times 10^{-5}$  m/s のオーダーであり、第1帯水層と同等の数値であった。

[定常法]  $k = \frac{2.3 \times Q \times \log(4L/D)}{2\pi \times s_0 \times L} \quad (4)$

[回復法]  $k = \frac{2.3 \times Q}{4\pi \times a \times b} \quad (5)$

Q: 揚水流量 ( $2.19 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s),  $s_0$ : 定常時の水位差 (3.11m)  
L: 試験区間長 (6.8m), a:  $s - \log(t/t')$ の直線部の1サイクル水位低下量 (0.25m), b: 帯水層の厚さ (6.8m), t': 揚水停止後の時間, t: 揚水開始後の時間

表-4 深度ごとの土質区分

深度 (m)	土質区分	色調	記事	水位(GL-m)
0 ~ 0.5	埋土(砂礫)	茶褐	混入礫はφ5~70mm程度	1.15 (第1帯水層)
~ 1.25	埋土(シルト質砂)	淡茶	微細砂主体でシルトを帯びる	
~ 2.20	砂混りシルト	黒灰	有機物混入	難透水層
~ 2.85	砂	黒灰~黄茶	含水多い細砂	0.45 (第2帯水層)
~ 5.20	礫混り砂	黒灰~黄褐	混入礫はφ5~30mmの直角礫多い	
~ 10.0	真砂	白灰	花崗岩の強風化帯	

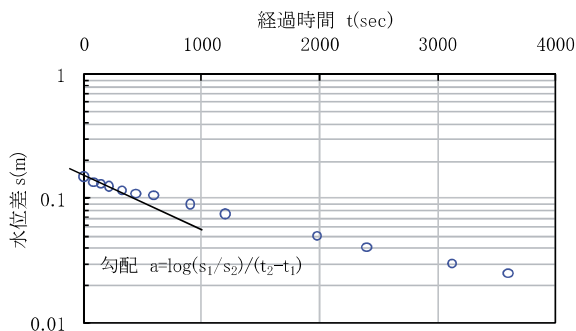


図-13 揚水試験(非定常法)の孔内水位の変化

表-5 第1帯水層の透水係数

試験深度 (GL-m)	地下水位 (GL-m)	土質名	試験方法	透水係数 k(m/s)
1.10~1.25	1.15	シルト質砂	非定常法	$7.90 \times 10^{-6}$

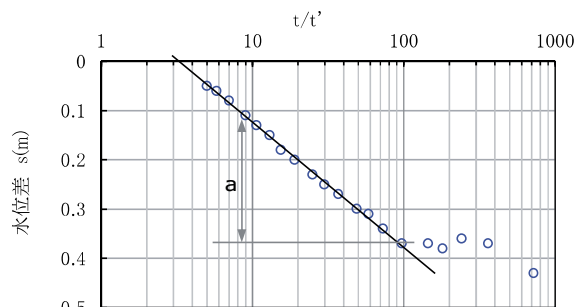


図-14 揚水試験(回復法)の孔内水位の変化

表-6 第2帯水層の透水係数

深度 (GL-m)	地下水位 (GL-m)	土質名	透水係数 k(m/s)	
			定常法	回復法
2.0~9.0	0.45	シルト質砂,真砂	$8.98 \times 10^{-6}$	$2.36 \times 10^{-5}$



4. 土壌分析

図-15には、ガレキ処理現場におけるガレキ仮置場の変遷(2011年8月⇒11月⇒2012年9月⇒2013年2月)を示す。この経緯を踏まえて土壌分析を行う地点を10か所(丸付数字)に絞り込んだ。各地点では表層50cmについて10m区画の5点混合方式で第2種特定有害物質(水銀を除く)の土壌分析を行った。

土壌分析の結果は溶出、含有(表-7、表-8参照)ともに全て環境基準値以下で多くが定量範囲未満であり、ガレキ仮置場からの重金属類の流出は認められない。

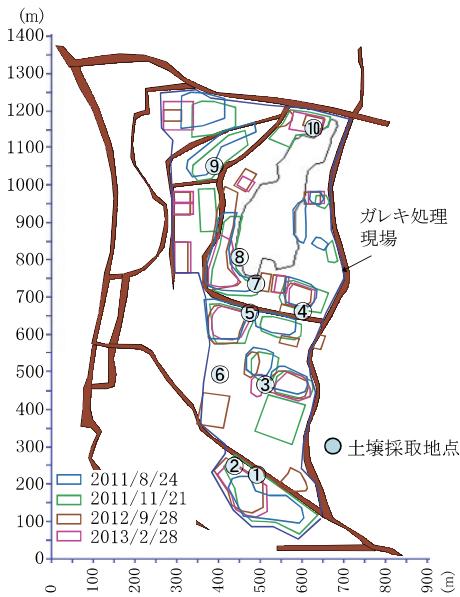


図-15 ガレキ仮置場の変遷

表-7 土壌分析の結果一覧(溶出量、単位:mg/L)

地点	Cd	Cr	CN	Se	Pb	As	F	B
1	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	<0.08	<0.1
2	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.16	<0.1
3	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.10	<0.1
4	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.30	<0.1
5	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.22	<0.1
6	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.10	<0.1
7	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.12	<0.1
8	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	<0.08	<0.1
9	<0.001	0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.21	<0.1
10	<0.001	<0.01	—	<0.002	<0.005	<0.005	0.09	<0.1

「—」は検出されず

表-8 土壌分析の結果一覧(含有量、単位:mg/kg)

地点	Cd	Cr	CN	Se	Pb	As	F	B
1	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
2	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
3	<15	<25	<5	<15	15	<15	<400	<400
4	<15	<25	<5	<15	16	<15	<400	<400
5	<15	<25	<5	<15	100	<15	<400	<400
6	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
7	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
8	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
9	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400
10	<15	<25	<5	<15	<15	<15	<400	<400

5. 改良EL法による移流拡散解析

地下水汚染の移流拡散解析では、浸透流方程式(式(6))と移流拡散方程式(式(7))を解くことになる。

EL法は式-7の第1項~第3項までの拡散項にオイラー法、第4項~第6項までの移流項にラグランジアン法を適用する手法であり、解析プログラムによって解法上の特徴<sup>3)</sup>がある。本手法では、移流項の扱いを単純化しており、流速による物質移動と濃度の再配分を繰り返し、移流元の濃度の算定にはアイソパラメトリック要素の形状関数(図-16参照)を使用する。また、移流項と拡散項の解析フローを図-17に示す。

一般に不飽和領域の浸透流は非線形性が強く、並行して移流拡散方程式をEL法で解く場合は、メッシュサイズとタイムステップの関係が解析精度に大きく関わる。広範囲の解析を行う場合は必ずメッシュサイズが制限され、適したタイムステップが必要となる。また、流速が場所と時間で変化するという問題もある。本手法では、要素ごとに移流項を解くタイムステップを決定することにした。流速が時々刻々と変化的なことから、要素ごとに移動距離を累積させて移流項の計算<sup>4)</sup>を行う。移流項の取扱いを単純化したことで要素ごとに移流項を解くタイムステップが任意に変更できる手法である。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \mu \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q_1 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial C}{\partial t} + Q_2 = 0 \quad (7)$$

$k$ : 透水係数、 $\mu$ : 比水分容量、 $\phi$ : 全水頭、 $Q_1$ : 降雨等の流量、 $D$ : 分散係数、 $v$ : 地下水の実流速、 $C$ : 物質濃度、 $Q_2$ : 物質の流量

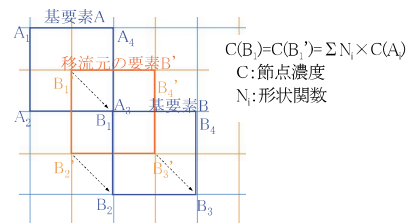


図-16 移流項のモデル化

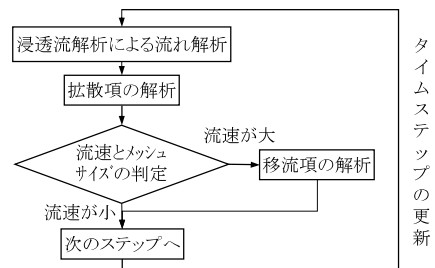


図-17 改良EL法の解析フロー

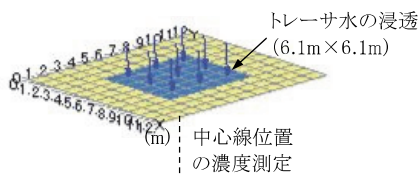


図-18 Warrickの実験概要

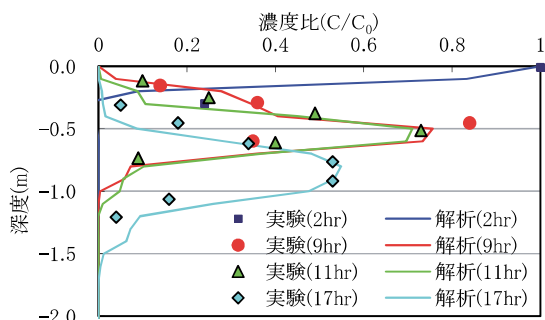


図-19 中心線上の濃度比分布

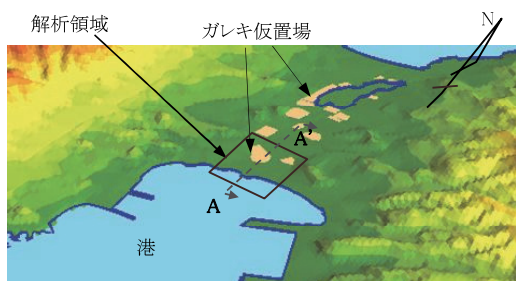


図-20 現地の地形のモデル化

図-18には過去に Warrick らが実施した実験概要<sup>3)</sup>を示す。本実験ではトレーサ水を 2.8 時間かけて浸潤させた後に原水を 17.5 時間かけて浸潤させ、地表面からの浸潤水の濃度を測定している。図-19には鉛直方向の濃度分布の時間変化について、改良 EL 法と実験結果の比較を示す。実験では 6.1m×6.1m にトレーサ水を浸潤させているが、解析では平面問題として取扱った。トレーサ水の濃度と浸潤深さがよく評価できており、EL 法特有の数値分散（物質濃度がメッシュ幅に分散）が抑制できている。

図-20 にガレキ処理現場のモデル地形を示す。沿岸部に重金属類を含むガレキ仮置場があり、降雨で重金属類が地下水に流出する状況を想定した。現地の土壌分析結果から重金属類の流出は認められなかったが、仮想のモデル解析を行った。解析領域は 500m×400m、帯水層厚は 20m と設定した。節点数及び要素数は約 4 万、地表部の要素幅は 40cm である。

境界条件には、現地の平均日降雨量 (5mm/day) と海水位 (潮位変動±1m) を考慮した。揚水試験結果と原位置不飽和透水試験結果を参考に透水係数は  $1 \times 10^{-5}$  m/s、不飽和特性は VG モデル ( $n=2.0$ ,  $\alpha=10$ ,  $\theta r=0.15$ ,  $\theta s=0.30$ ) とした。なお、塩水の密度流は考慮していない。図-21 に 6 か月後 (1800 ステップ、 $\Delta t=0.1$  日) のガレ

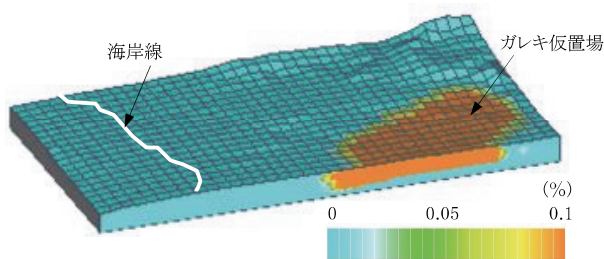


図-21 A-A' 断面の濃度比コンター (6 か月後)

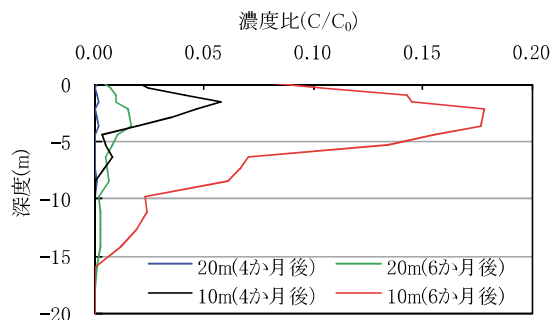


図-22 下流側の濃度比分布

キ仮置場の A-A'断面の濃度比コンター (0.1%以下の低濃度部分を表示)、図-22 にはガレキ仮置場から 10m と 20m 海側地点の濃度比の深度分布を示す。6 か月経過した時点でも、ガレキ仮置場から 20m 離れた地点の濃度は数%以下であり、拡散範囲は極めて狭い領域に限定されるという結果であった。

## 6. あとがき

本報告では、改良型原位置不飽和透水試験法を開発し、現地での適用性を確認した。現地の地盤が難透水性で十分な深さまで試験を実施できなかったが、今後は様々な土質の地盤に適用し、さらに改良を行いたい。また、EL 法に改良を加えた移流拡散解析によって、広範囲の地下水汚染の解析が可能であることを示したが、低濃度域では数値誤差が生じてやや不安定な部分が見られた。今後はさらに解析精度の向上を図りたい。

### 【参考文献】

- 1) 駒井 武、川辺能成、原 淳子、坂本靖英、張 銘、「東日本沿岸における津波堆積物の性状に関する緊急調査」、GSJ 地質ニュース、Vol.1、No.6、pp.181-184、2012.6
- 2) 竹下祐二、杉井俊夫、「不飽和地盤における原位置透水試験」、土と基礎、54-5、pp.10-12、2006.5
- 3) 菱谷智幸、西垣 誠、橋本 学、「物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する研究」、土木学会論文集 No.638/III-49、pp.59-69、1999.12
- 4) 森田修二、狩野正人、「津波堆積物など広範囲の移流拡散解析における EL 法の適用」、第 68 回土木学会学術講演会、第 3 部門、pp.371-372、2013.9