

1,4-ジオキサン地下水汚染修復のための 高精度数値シミュレーションに関する研究

岡島 優人¹・古市 徹²・石井 一英³

¹非会員 北海道大学博士前期課程 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: y.okajima0814@gmail.com

²正会員 北海道大学特任教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: t-furu@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

産業廃棄物を起因とした、1,4-ジオキサン地下水汚染を効率的に修復するためには、数値シミュレーションによる汚染状況の把握と修復効果予測が有効である。しかし、土壌吸着性及び微生物分解性に乏しい1,4-ジオキサンは地下水流れに大きく依存して移動するため、複雑な地形・地質条件下においては、地下水位の計算値と観測値のみを用いて透水係数を推定する手法では、現場1,4-ジオキサン汚染濃度場の表現が困難な場合がある。そこで本研究では、複雑な地形・地質構造のため地下水流れが複雑な三重県桑名不法投棄現場を対象とし、地下水位に加えて濃度情報を用いて透水係数を求める手法を適用した。その結果、現場1,4-ジオキサン濃度分布の予測精度が向上することを示し、本モデルが汚染修復予測に貢献できることを示した。

Key Words : *illegal dumping, 1,4-dioxane, groundwater contamination, estimation of hydraulic conductivities, prediction of remediation effectiveness*

1. 研究背景と目的

産業廃棄物の不法投棄を起因とした土壌・地下水汚染の修復対策の立案に有効なツールとして、数値シミュレーションが使用されている¹⁾。現在、全国の不法投棄現場では平成21年度の水質汚濁防止法の改正による1,4-ジオキサンの地下水環境基準項目への追加に伴い、1,4-ジオキサン地下水汚染が深刻な問題となっている。

本研究対象となる三重県桑名不法投棄現場でも、1,4-ジオキサンによる地下水汚染が問題となっており、修復が求められている。効率的な修復のためには1,4-ジオキサン汚染機構を解明し、修復予測を行う必要がある。当該汚染現場では、過去に揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compound, VOC) による汚染修復のために廃棄物層内のフラッシング及び周辺地下水の揚水処理を実施してきた^{2,3)}。そのためこれまで、多数のボーリング調査が行われてきており、地下水位や1,4-ジオキサン濃度の測定情報が豊富である。よって、数値シミュレーション解析による1,4-ジオキサン汚染機構の解明と修復予測を行うことが有効であり、数値シミュレーション技術の検証にもなると考えた。

1,4-ジオキサンは土壌粒子への吸着や微生物分解がほ

ぼ無視できることから、地下水流れに大きく依存して移動する。これまでの研究により、地下水位の計算値と観測値の最小二乗誤差による透水係数の最適化を行っても、1,4-ジオキサン濃度分布の再現が困難であった³⁾ため、地下水流れの計算精度向上が求められてきた。そこでHemら³⁾ (これ以降、Hemの解析と呼ぶ) は当該現場を対象に1,4-ジオキサン地下水汚染予測を試み、透水係数をある地下水位計算誤差の範囲内で許容できる、いくつかの透水係数候補を抽出し、その各候補の透水係数値を用いて、1,4-ジオキサン濃度分布を計算し、その中から最も濃度の観測値を表現する透水係数値を求めた。しかし、濃度における観測濃度と計算値の最適化を行ったわけではなかった。一方、Bithinら⁴⁾は、地下水位情報に加えて、濃度情報を用いて透水係数や他の関連パラメータを最適化する手法を仮想2次元平面に適用した。このような地下水位と濃度の両方の情報を用いてパラメータを推定する試みは既に行われている^{5,6)}。しかし、地下水位情報に対し大小値が異なる濃度情報をどの程度加味すべきか議論されていない。また、これまででは、一層のみ、水平方向の流れのみの比較的単純な流れ場を有する理想条件下での解析であり、多層構造及び鉛直方向の流れも含む複雑な地下水流れを有する実際の現場への適用を通じた、

濃度情報を考慮することの有効性が検討されていないと考えられる。

本研究では三重県桑名不法投棄現場の1,4-ジオキサン修復対策を検討するため、以下を研究目的とする。

- ① 1,4-ジオキサン地下水汚染予測精度向上のために地下水位情報に濃度情報を加味して透水係数値を推定し、当該現場1,4-ジオキサン汚染地下水モデルを構築する。
- ② 構築したモデルに基づき、当該現場で予定されている恒久対策を模擬した修復効果予測を行い、対策の効果を考察する。

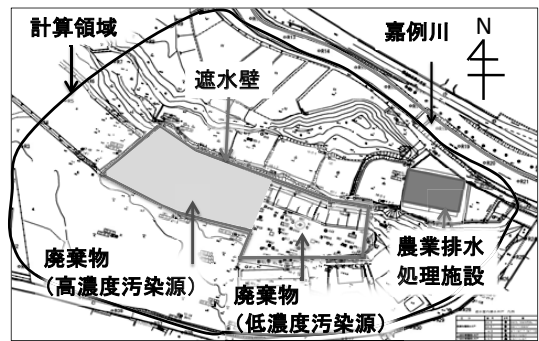


図-1. 三重県桑名不法投棄現場平面図

2. 不法投棄修復対策事業と数値シミュレーションの課題

(1) 三重県桑名市不法投棄事案

a) 概要

図-1は現場平面図である。現場北部方向には嘉例川が流れている。現場は嘉例川が形成した河岸段丘の右岸段丘面に位置する。現場地下水流れ場は3つの帯水層から形成されており、それぞれの地下水流れが異なる動きをしていることが特徴である。

不法投棄された廃棄物は第一帯水層と第二帯水層に埋設されている。廃棄物の種類は燃え殻、鋳さい、廃プラスチック類、廃油である。平成9年10月に不法投棄場所の隣地で農業集落排水処理の建設工事が行われた際、切土面から油分が浸出し、不法投棄が発覚した。不法投棄現場の掘削調査及びボーリング調査の結果、広さ約3,000 m²の範囲で廃棄物が確認され、最大で深さ約15 m、総量約27,000 m³が埋設されていると推定された。また、過去の調査⁹⁾により、1,4-ジオキサン高濃度汚染源と低濃度汚染源があることが判明している。

b) 修復対策事業の経緯

当該現場は平成8年に不法に廃棄物が投棄された。産業廃棄物特措法による財政的援助に基づき、当時問題となっていたVOCの地下水汚染対策を実施した。対策内容は汚染源である廃棄物を残置させたまま、図-1に示す位置に遮水壁を設置、遮水壁内の汚染地下水を揚水することでVOCによる地下水汚染の修復を完了した。

しかし、平成21年度の水質汚濁防止法改正に伴い、当該現場で1,4-ジオキサン汚染が検出された。そのため、VOC対策時の廃棄物を残置させたままでは1,4-ジオキサンの修復完了は困難と判断され、廃棄物の部分撤去を含む恒久対策が計画された⁷⁾。なお、今回延長した財政的援助⁸⁾は平成34年度に終了するので、それまでの確実な修復完了が求められる。

表-1. VOCと1,4-ジオキサンの物性比較

物性	トリクロロエチレン	1,4-ジオキサン
溶解度	(g/L) 0.779 ⁹⁾	213.9 ⁹⁾
土壌吸着係数(K _{oc})	(L/kg) 68 ¹⁰⁾	1.23 ¹⁰⁾
減衰定数	0.25-2.58 ¹¹⁾	0
遅延係数	1.03-1.34	1.00-1.01
遅延係数の計算にあたっては、 $\rho_d = 1.5(\text{kg/L}), n = 0.3(-), f_{oc} = 0.001 - 0.0001$ ¹¹⁾ を用いた。		

(2) 当該現場における1,4-ジオキサン地下水汚染数値シミュレーション上の課題

a) 概要

1,4-ジオキサンはVOCの安定剤として用いられており、多くのVOC汚染現場で検出されている。表-1に代表的なVOCとしてのトリクロロエチレンと1,4-ジオキサンの各物性の比較を示した。なお、遅延係数Rは以下の式で導いた。

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{n} K_d \cdots \cdots (1)$$

$$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc} \cdots \cdots (2)$$

ここで、K_d: 分配係数 (L/kg)、 ρ_d : 土粒子密度 (kg/L)、n: 有効間隙率(-)、K_{oc}: 土壌吸着係数 (L/kg)、f_{oc}: 土壌中の有機物含有割合(-)である。

トリクロロエチレンと1,4-ジオキサンの土壌吸着係数を比較すると1,4-ジオキサンはトリクロロエチレンと比べてほとんど土壌に吸着しないことが分かる。また、本解析では、1,4-ジオキサンの遅延係数を安全側の値として、1.00(-)を用いることにした。

b) 従来の汚染地下水モデル構築手法

地下水中の汚染を予測する場合、従来はその移動媒体となる地下水流れ場を表現し、その後、汚染予測として汚染濃度場を推定する場合が多い。地下水流れ場は式

(3)の3次元不飽和-飽和の浸透流方程式、汚染濃度場は式(4)の移流分散方程式を用いて推定する¹²⁾。なお、本解析は当該現場地下水流れ場の季節変動が小さいため、式(3)の右辺を0の定常計算とする。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = 0 \quad \dots (3)$$

$$R\theta \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \theta V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta rc + Q_c \quad \dots (4)$$

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{V_x V_x}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_y V_y}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_z V_z}{\|V\|} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x V_y}{\|V\|} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、K: 透水係数 (m/day), h: 地下水位 (m), W: 単位面積あたりの流入出 (m³/m³), t: 時間(day), i, j: 座標方向, c: 濃度 (mg/L = g/m³), θ : 体積含水率 (-), D: 分散テンソル (m²/day), V: 実流速 (m/day), r: 減衰定数 (1/day), Q_c: 源泉項 (g/m³), α_L : 縦分散長 (m), α_T : 横分散長 (m)である。なお、分散テンソル中の分子拡散項は、移流が卓越する場では無視できることから省略した。

(3) 高精度数値シミュレーション手法の適用

Hemの解析等の1,4-ジオキサン解析では、式(7)の目的関数H(K)を最小にするように透水係数Kを求め、地下水流れ場を最適化した後に、汚染濃度場を推定した。

$$H(K) = \sum_{m1}^{n1} (h_{cal,m1} - h_{obs,m1})^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、h_{cal}: 計算地下水位値 (m), h_{obs}: 観測地下水位値 (m), n1: 水位観測数, m1: 観測番号である。

一方、本研究では、式(8)のように濃度情報に重み付けを乗じた項を加えた目的関数F(K)を最小化するように透水係数を推定することを試みた。

$$F(K) = \sum_{m1}^{n1} (h_{cal,m1}^r - h_{obs,m1}^r)^2 +$$

$$\lambda \sum_{m2}^{n2} (c_{cal,m2}^r - c_{obs,m2}^r)^2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、h_{cal}^r: 地下水位計算値の相対値, h_{obs}^r: 地下水位観測値の相対値, c_{cal}^r: 濃度計算値の相対値, c_{obs}^r: 濃度観測値の相対値, λ : 濃度情報の重み付けである。

地下水位と濃度を同時に評価するため、両者の相対化を式(9)のように行った。

$$h_{obs}^r = \frac{h_{obs} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c_{obs}^r = \frac{c_{obs}}{c_{max}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、h_{obs}: 観測地下水位 (m), h_{min}: 最小観測地下水位 (m), h_{max}: 最大観測地下水位値 (m), c_{obs}: 観測濃度 (mg/L), c_{max}: 最大観測濃度値 (=0.534 mg/L, 現地観測値より) であり、地下水位の計算値及び濃度計算値も同様に相対化した。

今までの1,4-ジオキサンの解析では、式(8)の第一項の地下水位誤差の評価のみ、つまり地下水流れ場を先に最適化した ($\lambda=0$)。一方、本研究で適用する手法では、式(8)の第二項の濃度誤差をも考慮する。これは、1,4-ジオキサンが地下水流れに大きく依存して移動するという特性を踏まえると、1,4-ジオキサン濃度情報には、地下水流れに関する情報も含んでいると考え、その情報を透水係数の推定に利用しようというものである。その時、どの程度濃度情報を考慮すればよいかは、観測位置や観測数、濃度値の絶対値など多くの要因が関係しており、一律に決めることはできない。そこで本研究では、 λ を重み付けとして、濃度情報をどの程度考慮すべきかを考察することとした。

3. 高精度数値シミュレーション手法を用いた当該現場1,4-ジオキサン汚染地下水モデル構築

(1) 計算手順

a) 解析プログラムの選定

鉛直方向の地下水流れを考慮した3次元解析が可能であり、有限要素法に基づくオイラーラグランジアン法による移流分散解析が可能なソフトウェアであるGeoModeler (ジーエムラボ (株)) を使用した。

b) 計算領域

当該現場の平面図を基図にした。計算領域は東西に約200 m、南北に150 m、そして深度方向は約50 mとした。

c) 地形・地質モデル

モデル構築に用いた情報は、平面図、断面図、ボーリング情報、遮水壁等の構造物である。図-2に示すよう

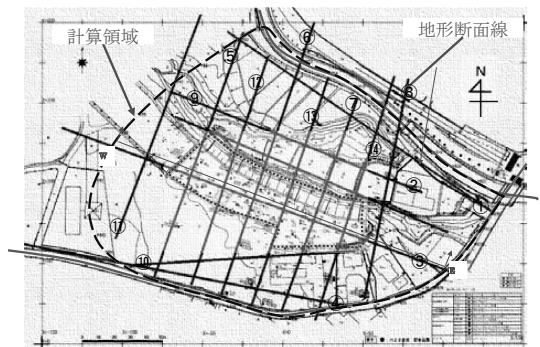


図-2 断面ライン

に地質断面ラインを計14ラインを入力した。地質情報は、廃棄物層を含め合計10層と遮水壁と農業排水処理施設の地下タンクの2つの構造物を扱った。各地層の透水係数初期値は表-2のように設定した。本研究で最適化を行う地層は、主たる帯水層である砂礫層1, 2, 3の3つの層とした。なお、遮水壁は基盤となる凝灰角礫岩に根入れされるように深度約50 mとし、幅はソフトウェアの都合上約1 mに設定した。農業排水処理施設の地下タンクは深度約20 m、幅は東西約20 m、南北約10 mの大きさに設定した。さらに遮水壁の透水係数を 1.0×10^{-7} cm/sに設定した^{13, 14}。農業排水処理施設はコンクリートの透水係数を報告書¹⁵から 1.2×10^{-10} cm/sに設定した。

d) 降雨、水位及び濃度データの設定

地下水位は平成 23 年 1 月の観測値を、濃度情報は平成 23 年 1 月から 5 月の平均値を用いた¹⁶。計算領域境界水位は過去の解析³で算出された値を用いた。降水量は年間平均値¹⁷を参考に 5 mm/day を用いた（蒸発量等は考慮しなかった）。汚染源は廃棄物層に相対濃度 1.0

と設定した。

e) 計算アルゴリズム

新濃度情報を考慮した解析での計算アルゴリズムを図-3 に示す。透水係数の推定には、非線形最小二乗法の一つである修正マルカート法¹⁸を用いた。

(2) 当該現場における重み付け値の推定

本研究では実汚染現場への濃度情報を加味した3次元解析の有効性を考察するために、式(3)の λ を0, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 5と変化させ式(8)の最適化を行った。その結果を図-4に示す。まず、 λ と水位誤差二乗和の関係から見ると、 $\lambda=0$ （地下水位情報のみ考慮）の時、水位誤差二乗和が最小値となり、濃度情報が考慮される $\lambda=0.05$ 以上になると徐々に水位誤差二乗和が大きくなった。 λ と濃度誤差二乗和の関係に関しては、 $\lambda=0$ （地下水位情報のみ考慮）の時、濃度誤差二乗和が最大になるが、濃度情報が考慮される $\lambda=0.05$ 以上になると徐々に濃度誤差二乗和が小さくなり、濃度誤差二乗和が最小となる $\lambda=1$ を境に、これ以上 λ が大きくなっても濃度誤

表-2. 透水係数

	初期値	地下水位+濃度	地下水位のみ
	透水係数[cm/s]		
盛土 ³⁾		1.0×10^{-3}	
廃棄物層 ³⁾		1.0×10^{-5}	
粘土層1 ³⁾		2.7×10^{-7}	
砂礫層1	4.7×10^{-3}	4.7×10^{-3}	4.7×10^{-3}
粘土層2 ³⁾		2.7×10^{-7}	
砂礫層2	6.3×10^{-3}	6.2×10^{-3}	6.3×10^{-3}
粘土層3 ³⁾		7.2×10^{-8}	
砂礫層3	6.3×10^{-3}	6.9×10^{-5}	6.3×10^{-2}
風化帯 ³⁾		3.1×10^{-2}	
凝灰角礫岩 ³⁾		3.4×10^{-7}	
遮水壁 ¹¹⁾¹²⁾		1.0×10^{-7}	
処理施設 ¹³⁾		1.2×10^{-10}	

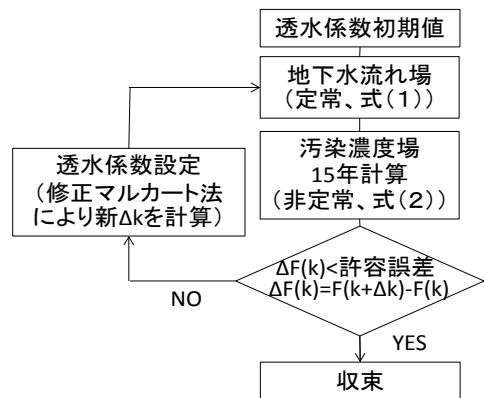


図-3. 計算アルゴリズム

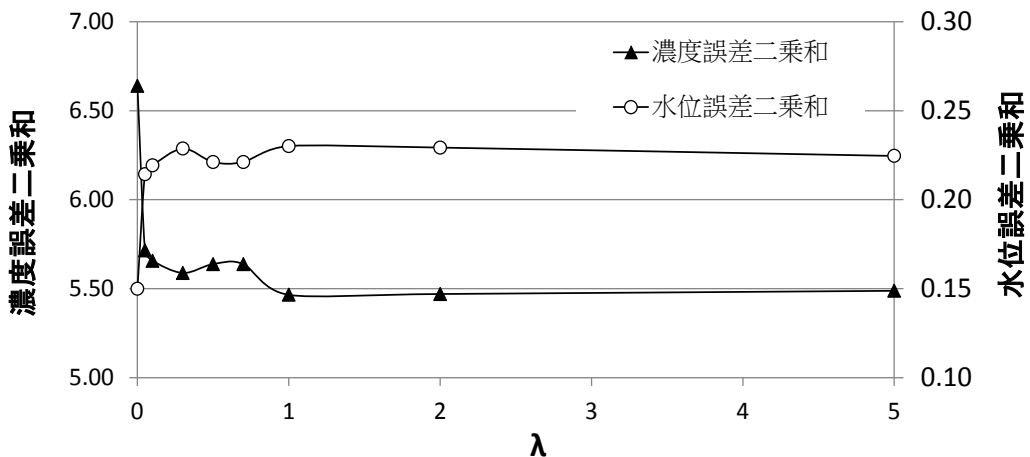


図-4. 誤差二乗和と λ の関係

差二乗和に大きな変化が見られなくなった。これは $\lambda=1$ 以上の場合、濃度情報が地下水位情報に対して相対的に大きくなり、これ以上、濃度情報を加味しても各誤差二乗和に大きな影響を与えないことを示していると言える。これ以降、現場では λ が1の場合が最適な重み付けとして解析をすすめる。

(3) 濃度情報を考慮した解析 ($\lambda=1$) と地下水位情報のみ考慮した解析 ($\lambda=0$) の比較

a) 計算値と観測値の比較

濃度情報を考慮した解析 ($\lambda=1$) による観測水位と計算水位及び観測濃度と計算濃度の関係を図-5及び図-6、地下水位情報のみ考慮した解析 ($\lambda=0$) による観測水位と計算水位及び観測濃度と計算濃度の関係を図-7及び図-8に示す。

まず、地下水位情報のみを考慮した解析 ($\lambda=0$) から考察する。 $\lambda=0$ の場合、地下水位計算値と観測値の差が小さく、現場地下水流れ場を良く表現できている。しかし、濃度計算値と観測値の関係については、第二帯水層 (●) の濃度観測値が高い箇所の誤差が大きく、現場汚染濃度場を表現しているとは言い難い。それに対して濃

度情報を考慮した解析 ($\lambda=1$) では、第一帯水層 (○) の地下水位計算値と観測値の差が大きくなったが、第二帯水層 (●) の濃度計算値と観測値の差が小さくなり、地下水位情報のみを考慮した解 ($\lambda=0$) よりも現場汚染濃度場を良く表現できたと言える。なお、濃度観測値 0.005mg/Lの点は遮水壁近くで1,4-ジオキサン検出限界 (0.005mg/L)以下を示し、計算上は高濃度であることから、元来観測値との整合が難しい箇所である。

b) 1,4-ジオキサン濃度分布の形状評価

濃度情報を考慮した解析 ($\lambda=1$) による第二帯水層及び第三帯水層の1,4-ジオキサン濃度分布を図-9と図-10に、地下水位情報のみ考慮した解析 ($\lambda=0$) による第二帯水層及び第三帯水層の1,4-ジオキサン濃度分布を図-11と図-12に示す。さらに、観測値から作成した第二帯水層及び第三帯水層の1,4-ジオキサン濃度コンターを図-13と図-14に示す。

これらを比較すると、第二帯水層について、図-11の地下水位情報のみを考慮した解析 ($\lambda=0$) では、図-13に示す観測値から作成されたコンターで示している北東部河川方向への汚染移動が見られないのに対して、図-9に示すように濃度情報を考慮した ($\lambda=1$) はコン

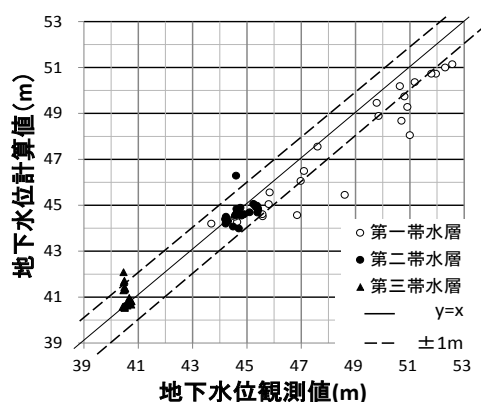


図-5. 計算水位と観測水位の関係 ($\lambda=1$)

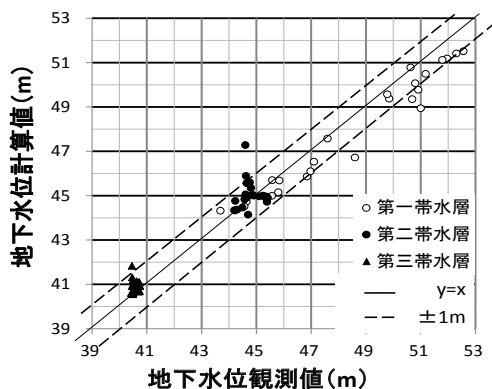


図-7. 計算水位と観測水位の関係 ($\lambda=0$)

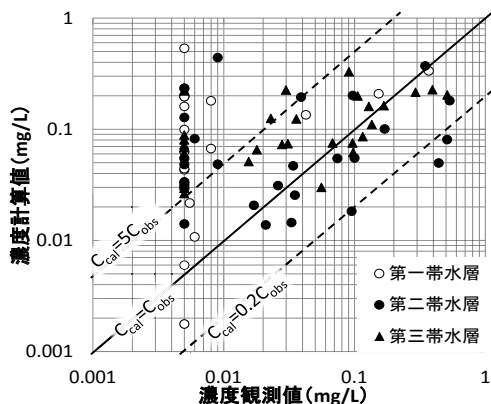


図-6. 計算濃度と観測濃度の関係 ($\lambda=1$)

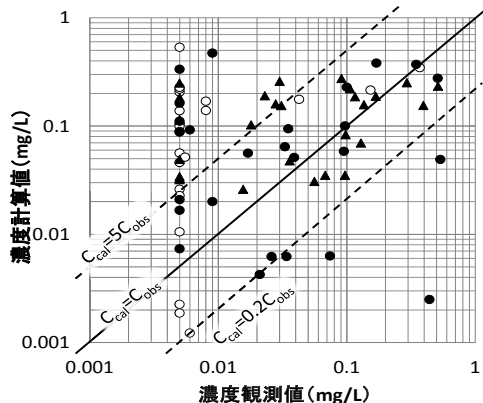


図-8. 計算濃度と観測濃度の関係 ($\lambda=0$) (凡例は図5と同様)

ターで示している汚染移動方向をほぼ表現できている。
また、第三帯水層に関しても、図-12 の地下水位情報のみを考慮した解析 ($\lambda=0$) では、図-14 の観測値コンターと比較し、南部方向への過度な汚染移動が見られるのに対して、図-10 に示すように濃度情報を考慮した解析 ($\lambda=1$) の方が観測値コンターと比較し、南部方向への過度な汚染移動が見られない。よって、濃度情報を考慮する解析 ($\lambda=1$) の方が現場 1,4-ジオキサン濃度分布の形状を表現できているといえる。

以上より、濃度計算値と観測値の整合性と濃度分布の形状評価の 2 点から、濃度情報を考慮する解析の方が有効であると言える。

4. 恒久対策後1,4-ジオキサン地下水汚染予測

(1) 解析の目的

以上、濃度情報を考慮した解析により構築されたモデルを用いて、現在、当該汚染現場で計画されている恒久対策（1,4-ジオキサン高濃度箇所廃棄物の撤去、廃棄物残置箇所周辺の遮水壁補強、撤去箇所の埋戻工及び揚水処理）の効果予測を行う。また、参考に廃棄物全量撤去の効果予測を行う。

(2) 計算条件

図-1 に示したように、遮水壁内の廃棄物を高濃度汚

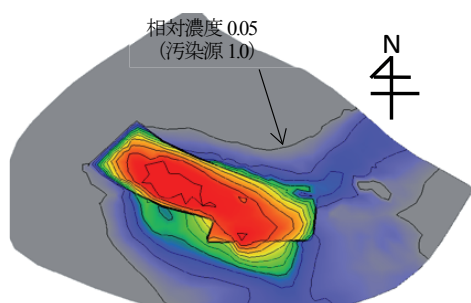


図-9. 1,4-ジオキサン濃度分布
(第二帯水層, $\lambda=1$)

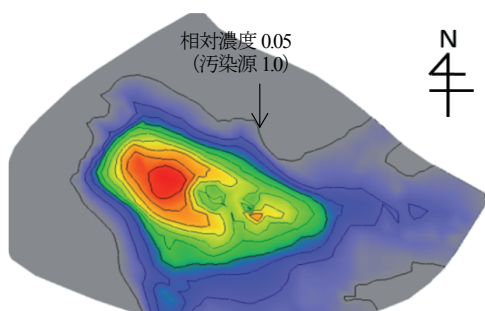


図-10. 1,4-ジオキサン濃度分布
(第三帯水層, $\lambda=1$)

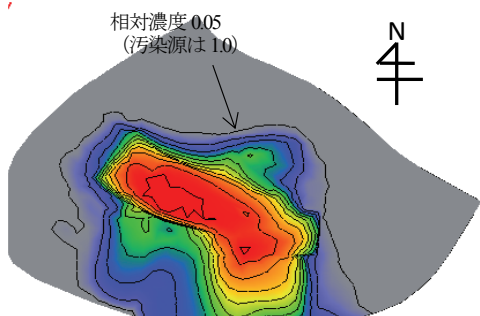


図-11. 1,4-ジオキサン濃度分布
(第二帯水層, $\lambda=0$)

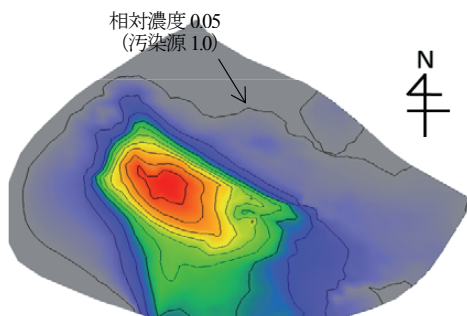


図-12. 1,4-ジオキサン濃度分布
(第三帯水層, $\lambda=0$)

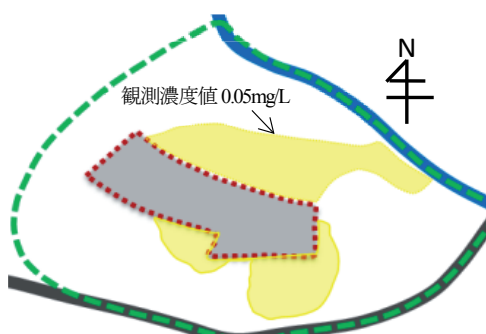


図-13. 1,4-ジオキサン濃度コンター
(第二帯水層, 実測値から作成)

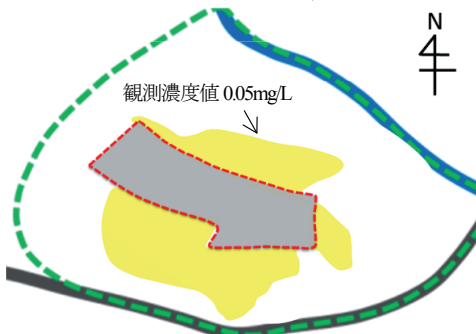


図-14. 1,4-ジオキサン濃度コンター
(第三帯水層, 実測値から作成)

染源と低濃度汚染源に分割し、高濃度汚染源を部分撤去後、盛土に置き換えて地形地質モデルを新たに構築した。また、低濃度汚染源を囲むように遮水壁を設置した。さらに、廃棄物全量を撤去し、盛土に置換した場合も作成した。

計算条件は、地形・地質モデル以外のパラメータも含め、前節で求めたものを用いた。廃棄物が残置された低濃度汚染源のみに相対濃度 1.0 を設定し、汚染源撤去後に埋め戻した盛土箇所の汚染濃度を相対濃度 0 と設定した。計算時間は平成 28 年 1 月を高濃度部分撤去完了とし、それから 10 年間計算した。地下水流れ場と汚染濃度場の初期値は前章で構築したモデルによる計算結果をそのまま使用した。

揚水条件については、図-15 に示すように廃棄物残置箇所第二帯水層から $7 \text{ m}^3/\text{day}$ 、壁外汚染拡散方向の 2 箇所から $2 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水の計 $11 \text{ m}^3/\text{day}$ 、第三帯水層には図-16 のように壁内 3 箇所からそれぞれ $7 \text{ m}^3/\text{day}$ 、壁外 3 箇所から $2 \text{ m}^3/\text{day}$ の計 $27 \text{ m}^3/\text{day}$ の合計 $38 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水を行うこととした。

(3) 計算結果と考察

廃棄物全量撤去と部分撤去の第三帯水層の修復効果予測結果を図-17 及び図-18 に示す。全量撤去の場合は、相対濃度で 0.240 と低濃度に 1,4-ジオキサンが残留しているのに対し、部分撤去の場合は相対濃度 0.620 と比較的濃度の高い汚染が残留する可能性があることが分かる。

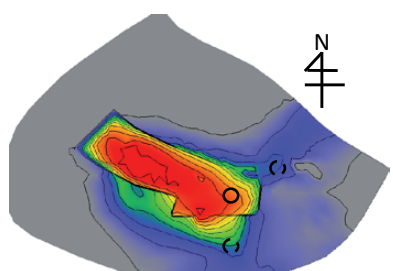


図-15.修復効果予測の初期濃度分布と揚水箇所（第二帯水層）

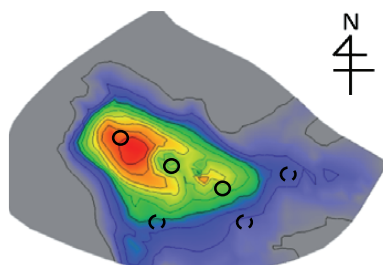


図-16.修復効果予測の初期濃度分布と揚水箇所（第三帯水層）

○ 壁内揚水箇所 ⊗ 壁外揚水箇所

平成 34 年度までの修復完了という目標を達成するために、揚水条件の検討を行うとともに、第三帯水層の 1,4-ジオキサン濃度の減衰傾向を把握するなど、修復効果をモニタリングすべきであると考え。

5. 結論と今後の課題

(1) 結論

①複雑な地下水流れを有する実汚染現場での 3 次元解析を通して、地下水位情報に加えて観測濃度情報を制約として考慮し透水係数を決定する解析が、地下水位情報のみで透水係数を推測する解析よりも高精度に 1,4-ジオキサン地下水汚染モデルを構築できることを示した。特に、汚染現場によって依存する、地下水位情報に対する観測濃度情報の重み付けについて考察を加えることができた。

②高精度 1,4-ジオキサン地下水汚染モデルを用いて修復効果予測を行ったところ、廃棄物を部分撤去する現行対策では、第三帯水層に 1,4-ジオキサン汚染残留の可能性があり、今後現場で実施されるモニタリングで注視する必要があることを指摘した。

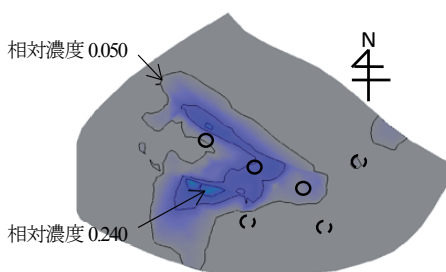


図-17.全量撤去後修復予測（第三帯水層，H34年時点）

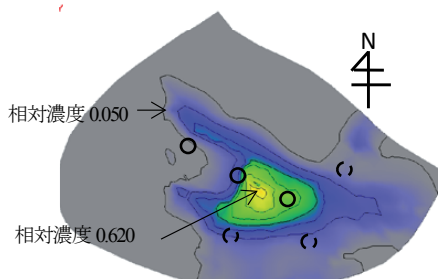


図-18.部分撤去後修復予測（第三帯水層，H34年時点）

○ 壁内揚水箇所 ⊗ 壁外揚水箇所

謝辞

本研究を行うにあたっては、ヒアリングやデータ提供にご協力いただいた三重県及び解析ソフトの技術的な指導をしていただいたジーエムラボ株式会社の皆様には感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば, 古市徹 監修, 土壌・地下水汚染診断・修復支援システム開発研究会 編著:土壌地下水汚染～循環共生をめざした修復と再生～, オーム社, 2006
- 2) 西田憲一, 古市徹, 石井一英: 不法投棄現場の 1,4-ジオキサン のフィールドデータによる地下水汚染特性の解析, 都市清掃, Vol. 66, No. 312, pp. 219-227, 2013
- 3) R. Hem, T. Furuichi, K. Ishii, and Y.C. Weng: A New Ap-porach for Prediction of 1,4-Dioxane Distribution in Groundwater at an Illegal Dumping Site in Japan, 土木学会論文集 G, Vol. 69, No. 6, pp.II247-258, 2013
- 4) Bithin Datta, Dibakar Chakrabarty, Anirban Dhar: sim-ultaneous identification of unknown groundwater pol-lution sources and estimation of aquifer paramet-ers, Journal of Hydrology, Vol376, pp48-57, 2009
- 5) Ne-Zheng Sun and William W.-G Yeh: Coupled Inverse Problems in Groundwater Modeling 1. Sensitivity Anal-ysis and Parameter Identification, Wat. Resour. Res., Vol. 26, No. 10, pp.2507-2525, 1990
- 6) A. Medina and J. Carrera: Coupled Estimation of Flow and Solute Transport Parameters, Wat. Resour. Res., Vol. 32, No. 10, pp. 3063-3076, 1996
- 7) 三重県: 三重県桑名市五反田地内産業廃棄物不法投棄事案に係る特定支障除去等事業実施計画, 平成 25 年 3 月 26 日 環境大臣同意 (変更), 2013
- 8) 環境省: 特定産業廃棄物に起因する支障の除去等を平成三十四年度までの間に計画的かつ着実に推進す
るための基本的な方針の公表について
- 9) Thomas K.G. Mohr: Environmental Investigation and Remediation, 1,4-Dioxane and other Solvent Stabilizer, CRC Press, Boca Raton, 2010
- 10) 経済産業省: 初期リスク評価書暫定版 1,4-ジオキサン, 2002
- 11) Wiedemeier, TH, Rifai, HS, Newell, CJ, and Wilson J.T: Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, John Wiley & Sons, Inc. 1999
- 12) 日本地下水学会, 地下水流動解析のとりまとめに関する研究グループ編, 地下水シミュレーション～これだけは知っておきたい基礎理論～, 技報堂出版, 2010
- 13) 小泉哲也, 進藤明彦, 土田孝, 山本修司, 小笹裕昭, 山田耕一, 小久保裕:鋼矢板継手部における透水量に関する実験と考察, 土木学会第 56 回年次学術講演会,VII-019, pp38-39,2001
- 14) 全国都市清掃会議:廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領2010 改訂版,2010
- 15) 森本康明, 小野貴史, 大下英吉:コンクリート内部に存在する鉄筋とコンクリート界面における統一的透水係数の構築,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, No.1, 2003
- 16) 三重県からの提供
- 17) Japan Meteorological Agency
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?pre_c_no=53&block_no=0500&year=2010&month=09&day=11&view=p1(2015 年 1 月訪問)
- 18) 中川徹, 小柳義夫:最小二乗法による実験データ解析 プログラム SALS,東京大学出版会,pp95-120,1982

(2015.7.16 受付)

STUDY OF A HIGH-PRECISION NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR 1,4-DIOXANE-CONTAMINATED GROUNDWATER REMEDIATION

Yuto OKAJIMA, Toru FURUICHI, Kazuei ISHII

In illegal dumping sites, evaluation of conataminant distribution by numerical simulation is required to remediate effectiverty 1,4-dioxane groundwater contamination. However, estimation of hydraulic conductivities using only groundwater level data is not enough to evaluate 1,4-dioxane distribution in a real site with complex geographic and geological structure because sorption and biodegradation in 1,4-dioxane is vanishingly small and migration of 1,4-dioxane strongly depends on groundwater flow. This study applied a numerical simulation method to optimize hydraulic conductivities using observed concentration data in addition to groundwater level data to Kuwana illegal dumping site that has complex geographic and geological structure. As a result, our model improved estimation of 1,4-dioxane concentration distribution in groundwater, and the model can contribute to prediction of remediation effectiveness in the site.