

数値シミュレーションによる 青森・岩手県境不法投棄現場の廃棄物全量撤去 後の1,4-ジオキサン地下水汚染予測

岡島 優人¹・古市 徹²・石井 一英³

¹非会員 北海道大学修士課程 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: y-okajima@ec.hokudai.jp

²正会員 北海道大学教授 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

青森・岩手不法投棄現場は、廃棄物全量撤去後に1,4-ジオキサン地下水汚染を修復する必要がある。吸着や微生物分解がほとんど生じない1,4-ジオキサンの特性を考慮すると、汚染分布予測には、地下水流れの予測精度向上が重要であり、特に当該現場では降雨しか涵養源はないため、降雨の季節変動を考慮する必要がある。そこで本研究では、廃棄物全量撤去後を想定し、季節ごとの地下水流れに基づく1,4-ジオキサンの3次元地下水汚染予測を行った。その結果、青森県側の広範囲に1,4-ジオキサン汚染が広がっている可能性と降雨量の設定によっては1,4-ジオキサンの分布が大きく変りうることを示した。さらに、県境北部の鋼矢板設置後は、青森県側に1,4-ジオキサン汚染流入が懸念されるため、岩手県側の地下水位の管理が重要であることを示した。

Keywords : illegal dumping, 1,4-dioxane, groundwater contamination, 3-D numerical simulation

1. 序論

(1) 研究背景

近年、産業廃棄物の不法投棄による土壌・地下水汚染問題が深刻化している。土壌・地下水汚染修復対策計画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⁾。

本研究の対象となる青森・岩手県境不法投棄事案は、平成21年に新たに環境基準項目として追加された1,4-ジオキサンによる廃棄物層下の地山帯水層の地下水汚染が発覚したことから、新たに1,4-ジオキサンの汚染修復対策を検討する必要性が生じた。伊黒の解析²⁾(これ以降、過去の解析と呼ぶ)により岩手県側北部の鋼矢板の無い部分から青森県側への1,4-ジオキサン汚染地下水の流出の恐れが判明している。吸着や微生物分解がほとんど生じない1,4-ジオキサンは、揮発性有機化合物(Volatile Organic Compound, VOC)と比べて、地下水流れに大きく依存して移動すると考えられる。そのため、1,4-ジオキサンの解析には地下水流れモデルの精度が重要と考えられる。さらに、青森県側の全量撤去が進むにつれて廃棄

物撤去前に実施された地形・地質データと撤去後に判明した地形・地質データに大きな違いがあることが分かってきた。したがって、廃棄物全量撤去後の1,4-ジオキサン地下水汚染の解析のためには、地形・地質モデルを更新する必要がある。一方、本現場は高台に存在するため、地下水の涵養源は降雨のみであり、さらに現地での降雨量は季節によって大きく変動していることから、地下水位及び地下水流れも季節によって大きく変動すると考えられる。そのため、地下水位の季節変動を考慮した複数の地下水流れモデルによる1,4-ジオキサン地下水汚染の解析が必要とされている。

(2) 研究目的

青森岩手県境不法投棄現場の1,4-ジオキサン修復対策を検討するために、以下を研究目的とする。

- ①廃棄物全量撤去後の地下水流れモデルを構築する。
- ②季節変動による地下水流れの変動を考慮し、現状の1,4-ジオキサン汚染状況の把握を行う。
- ③北部県境鋼矢板設置後の地下水流れを模擬した場合の1,4-ジオキサン汚染予測を行う。

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) 青森・岩手県境不法投棄事案

a) 概要

本現場は青森県三戸郡田子町及び岩手県二戸市山間部にまたがる原野約27 haに位置する。平成3年頃、産業廃棄物処理業者が不法投棄を開始した。不法投棄された廃棄物は当時（平成14年）の調査によると青森県側67万 m^3 、岩手県側21万 m^3 の合計88万 m^3 であった。投棄された廃棄物種類は、パーク堆肥様物、汚泥、RDF様物、廃油、医療系廃棄物であり、検出された化学物質はトリクロロエチレンなどのVOCである。

b) 修復対策事業の経緯

平成12年から14年にかけて現場の汚染状況の調査が行われ、廃棄物及び地下水中のVOCの汚染が判明した。

図-1のように、平成17年から汚染拡散防止対策として青森県側下流側に鉛直遮水壁が施工され、平成18年から廃棄物全量撤去が開始された。青森県側に関しては平成25年度に全量撤去が完了する予定である³⁾。

表-1は、地下水中に検出された1,4-ジオキサン濃度の濃度である⁴⁾（図-1に示した現場平面図の井戸番号に対応）。1,4-ジオキサンの環境基準値である0.05 mg/Lと比較すると高濃度の1,4-ジオキサンにより地下水が汚染されていることが分かる。

(2) 当該事案における1,4-ジオキサンによる地下水汚染解析上の課題

a) 1,4-ジオキサンの特性

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-2にVOC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。

$$R = \left(1 + \frac{\rho_d}{n} K_d\right) \quad (1)$$

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

K_d : 分配係数, ρ_d : 土の体積重量, n : 間隙率, K_{oc} : 土壌吸着係数, f_{oc} : 土壌中の有機物含有割合

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) 1,4-ジオキサン地下水汚染解析上の課題

1,4-ジオキサンの移動は地下水流れに強く依存するた

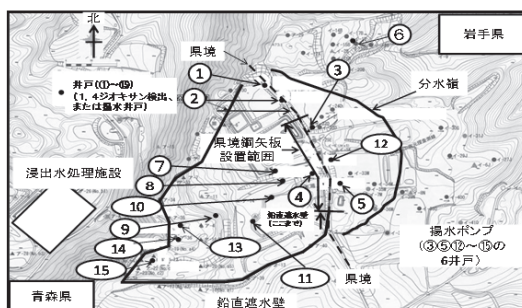


図-1 青森・岩手県境不法投棄現場の平面図

表-1 1,4-ジオキサン検出濃度

(①～⑥:H23.5,⑦～⑨:H24.7,⑩～⑮:H24.9に採水)

検出井戸No.	濃度 (mg/L)	検出井戸No.	濃度 (mg/L)
①	0.29	⑦	0.15
②	0.043	⑧	0.28
③	2.1	⑨	1.8
④	0.48	⑩	0.57
⑤	0.37	⑪	<0.005
⑥	0.42		

表-2 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 ⁵⁾	213.9 ⁵⁾
土壌吸着係数(K_{oc}) (L/kg)	68 ⁶⁾	1.23 ⁶⁾
減衰定数 (-)	0.25-2.5	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、

$\rho_d = 2.0 \text{ (kg/L)}, n = 0.3 \text{ (-)}, f_{oc} = 0.001 - 0.0001^7$ を用いた。

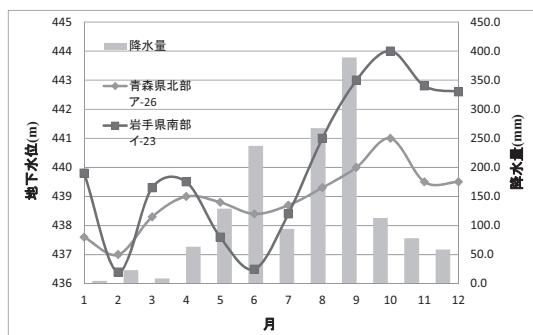


図-2 平成23年度青森・岩手県境不法投棄現場における降水量と地下水位の関係⁸⁾

め、1,4-ジオキサンの汚染予測には、地下水流れモデルの精度向上が重要である。

そのために本研究では、廃棄物全量撤去後を想定した追加調査により地形・地質データの更新も行うこととした。

さらに、本現場の涵養源は降雨による浸透水のみであることから、地下水流れは降水量に応じて季節ごとに変化する。図-2は、平成23年の降雨及び青森県側北部と岩手県南部地下水位の一部をグラフで表したものである。降水量に応じて両地下水位が変動していることが分かる。平成23年は青森県側北部で年間地下水位変動約3m、岩

手県側南部で約5mの変動が認められた。以上より、1,4-ジオキサンによる地下水汚染解析は、地下水流れの季節変動を考慮して行うこととした。

3. 廃棄物全量撤去後の地下水流れモデルの構築

(1) モデル化の目的

汚染源と推定される箇所、汚染源を設置した場合の青森県側汚染状況を解析する。さらに、県境北部に鋼矢板設置後の地下水流れを模擬し、モニタリングの必要性に関して考察する。

(2) モデル化の手順

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次元解析が可能な解析ソフトGeoModeler（ジーエムラボ（株））を使用した。

b) 地形・地質モデル

現場地図の標高データ、地質調査による断面図（各地層深度）、計算領域、鋼矢板を設定し、現場の3次元地形・地質モデルを作成した。

c) 地下水流れモデル

降雨浸透量、観測地下水位、揚水量を設定する。3次元定常解析により、観測水位と計算水位の差が最小化するように帯水層の透水係数を決定した。3次元地下水モデルの基本方程式は式(3)である²⁾。

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

K : 透水係数, h : 地下水頭

d) 汚染物質輸送モデル

汚染の最大の広がり解析するという安全側の立場で、汚染源に相対汚染濃度1を一定条件で設定し、3次元解析により汚染濃度分布を推定した。なお、汚染物質の移流・分散輸送は非定常で計算した。本研究では1,4-ジオキサンの移流分散方程式として、式(4)を用いる²⁾。

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

R : 遅延係数, θ : 体積含水率, ρ : 流体密度, c : 濃度, D_{ij} : 分散テンソル, V : 実流速, λ : 減衰定数, Q_c : 源泉項

分散テンソル D は式(5)及び(6)を用いた。

$$D_{ii} = \alpha_L \frac{V_i V_i}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_j V_j}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_k V_k}{\|V\|} \quad (5)$$

$$D_{ij} = D_{ji} = D_{jk} = D_{kj} = D_{ki} = D_{ik} = 0 \quad (6)$$

$(i, j, k) = (x, y, z)$

α_L : 縦分散長, α_T : 横分散長,

e) 将来予測

将来的な現場の状況の変化を反映させたモデルにより、地下水流れと汚染分布の推移を解析した。

(3) 地下水流れモデルの構築

a) 計算領域

両県の現場の平面図を基図にした。計算領域は、青森県側は鉛直遮水壁近傍の観測井戸、岩手県側も観測井戸のある点を結んで設定し、計算領域は東西に約700m、南北に500m、そして深度方向は約50mとなった（図-3）。

b) 廃棄物全量撤去後の地形・地質モデル

図-3のように断面ラインを計17箇所を設定し、各ラインに地質断面を入力した。青森県側は平成24年度の調査をもとに作成された最新の断面図を、岩手県側は過去の解析で使用された断面図を使用した。

地質情報としては、地表に近い順に「盛土」、「降下火砕物2」、「ローム層」、「降下火砕物1」、「火砕物堆積物」、「凝灰角礫岩」の計6層を取り扱うことにした。メッシュの大きさは15mで設定した。観測地下水位データは平成23年度と24年度のものであることから、この期間中の青森県側東部でのキャッピング⁸⁾を考慮し、キャッピング部分のみ浸透能を0.1に設定した。また、鋼矢板を計算領域内県境部（北部を除く）に設定した（幅は1m、凝灰角礫岩に根入れされるように深度（20～30m）を設定）。さらに鋼矢板の透水係数を 1.0×10^{-5} cm/sに設定した。鋼矢板の透水係数は、継手部の対策を行うことにより、鋼矢板全体の平均で 1.0×10^{-6} cm/s以下になるという報告がある⁹⁾。一方、現行の管理型最終処分場の計

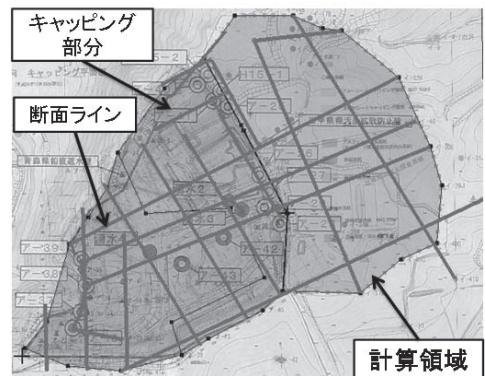


図-3 計算領域および入力断面ライン

画・設計・管理要領¹⁰⁾では、 1.0×10^5 cm/s以下が鉛直遮水工の目安になっていること、さらに安全側の値として 1.0×10^5 cm/sを用いることにした。

c) 降雨量及び揚水量の設定

まず年間の平均的な地下水流れを想定したモデルを構築する（以降、地下水位平均期と呼ぶ）。平成23年の6月の地下水位を利用した。図-2の降水量と地下水位の関係から、降雨後およそ1カ月遅れで地下水位に反映されているため、平成23年5月の降水量から、蒸発量等を考慮し浸透量を算出し、それを降雨条件として与えた。現地で実際に行われている揚水位置及び揚水量を計算条

件として与えた。

d) 透水係数の推定

観測水位と計算水位の差の二乗和が最小になるように透水係数を推定した。本研究では、地下水流れに大きく影響する主な帯水層である「降下火砕物2」、「降下火砕物1」、「火砕流堆積物」の3層の透水係数を変数とした（表-3）。図-4は観測水位と計算水位の比較であるが、両者の誤差が約±2 mの範囲に収まっていることから、本研究で構築した地下水流れモデルは現場の地下水流れを表現できたとと言える。表-3は各層の透水係数初期値と推定値である。図-5に、地下水位平均期の地下水位コンターを示す。

表-3 透水係数の初期値及び推定値

地層	飽和透水係数(cm/s)	
	推定後	初期値
盛土	4.55×10^{-3}	4.55×10^{-3}
降下火砕物2	1.21×10^{-2}	1.35×10^{-3}
ローム層	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-5}
降下火砕物1	1.50×10^{-3}	1.35×10^{-3}
火砕物堆積物	4.96×10^{-3}	5.06×10^{-3}
凝灰角礫岩	2.89×10^{-5}	2.89×10^{-6}

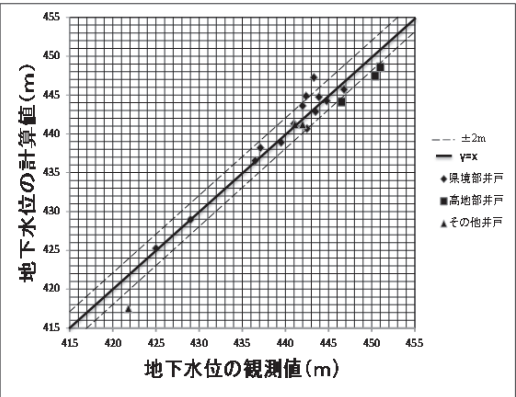


図-4 観測水位と計算水位の比較

(4) 地下水位の季節変動を考慮した地下水流れモデル

透水係数は表-3の推定値のまま固定し、観測地下水位、降雨量については、表-4のように地下水位最高期及び最低期に対応した数値にそれぞれ設定し、観測水位と計算水位の差の二乗和が最小になるように上流側の境界条件の水位を決定した。その結果、平均期の水位よりも、最高期で2.8 m高く、最低期で1.4 m低く設定する必要があることが分かった。図-6と図-7は、最高期及び最低期の地下水流れモデルの地下水位コンターである。最高期、最低期で等水位線が上流では、約5 m変化した。以上より、最低期、平均期及び最高期で地下水流れが大きく変化することが推測される。

表-4 最高・最低期の降水データ及び境界水位条件

	最高期	最低期	平均期（参考）
地下水位観測期	H23.9—10	H24.2—3	H23.6—11
浸透量	7.95	0.4	1.5
境界水位条件	平均期+2.8	平均期-1.4	

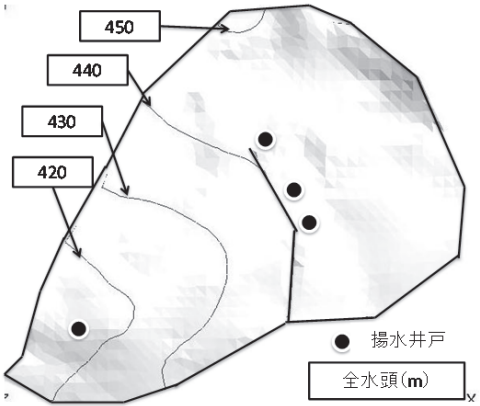


図-5 地下水位平均期の地下水流れモデル（計算領域周辺の黒線は鉛直遮水壁、内部の黒線は鋼矢

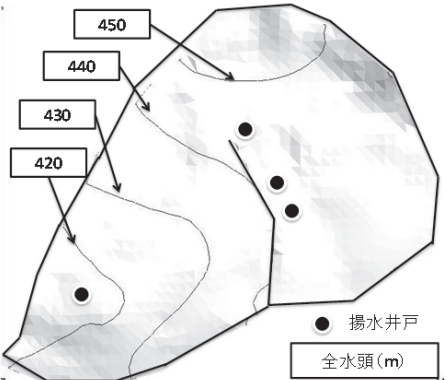


図-6 地下水流れコンター（地下水位最高期）

5. 廃棄物全量撤去後1,4-ジオキサン汚染予測

(1) 青森県側 1,4-ジオキサン汚染予測

a) 解析の目的

地下水位の変動を考慮した複数の地下水流れモデルを用いた場合の1,4-ジオキサンの汚染分布を考察する。

b) 計算条件

高濃度の1,4-ジオキサン汚染が検出された岩手県側北部と青森県側県境付近の2箇所が汚染源であると想定した。汚染源は相対濃度1で一定条件に設定し、計算時間は汚染源設置から10年間計算した。なお、地下水流れは定常流とした。本来は、汚染源は時間経過とともに洗い出しのため減衰する条件として与える必要があるが、安全側にたった解析として、一定として与えることとした。今回は一次近似的な推定という位置づけであり、廃棄物撤去後の地下水流れと1,4-ジオキサン分布の一つの可能性を示すに過ぎない。

c) 計算結果と考察

結果を図-8と図-9に示す。両図を比較すると1,4-ジオキサン拡散距離や方向に違いがあるのが分かる。地下水流れの影響を大きく受ける1,4-ジオキサンの分布の予測精度を向上するためには、地下水位の変動を考慮する必要がある。

(2) 県境北部遮水壁設置後の地下水流れと1,4-ジオキサン分布の将来予測

a) 解析の目的

県境北部に鋼矢板設置後の地下水流れを模擬した場合の1,4-ジオキサン汚染予測を行う。

b) 計算条件

鋼矢板を県境北部まで延長した（凝灰角礫岩まで根入れするまでの深度（30m）とした）。さらに図-10に示すように揚水井戸を追加した。それ以外はこれまでの条件と同様に解析した。

c) 計算結果と考察

図-10に県境北部鋼矢板及び揚水井戸を設置した後の地下水位コンターを示す。追加揚水しているにもかかわらず、岩手県側北部の地下水位が上昇していることが分かった。

次に、地下水位平均期の地下水流れモデルによる汚染解析を行う。汚染源を設定した後10年後の汚染分布を初期条件として、2箇所汚染源を除去した場合と岩手県側北部の汚染源のみ除去できなかった場合の2通りを想定して、さらに20年間の計算を行った。

×解析結果として、凝灰角礫岩の直上の地下水位中の1,4-ジオキサン分布を示すことにする。なお、1,4-ジオキサン環境基準値が0.05 mg/L、現場で検出された最大汚染濃度が約2.5 mg/L¹⁾であることから、相対濃度0.02のライ

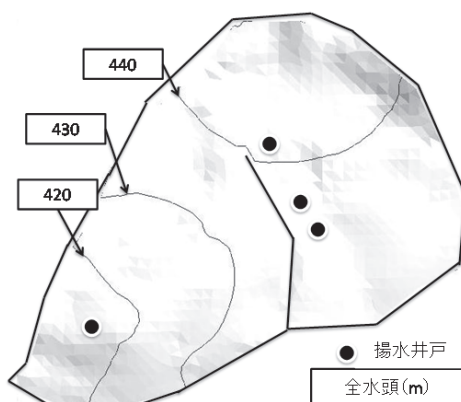


図-7 地下水流れコンター（地下水位最低期）

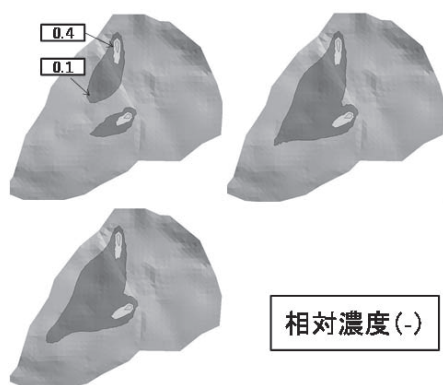


図-8 地下水位最低期の汚染分布（左上汚染源設置1年後、右上5年後、左下10年後）

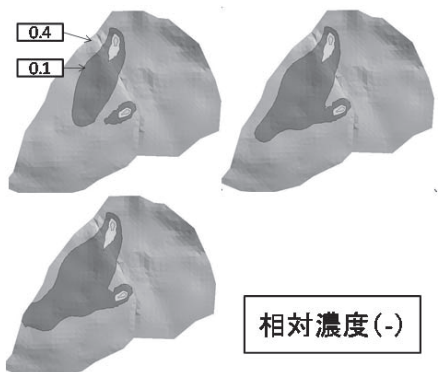


図-9 地下水位最高期の汚染分布（左上汚染源設置1年後、右上5年後、左下10年後）

ンが環境基準値相当となる。

①2箇所とも汚染源を除去した場合

図-11に結果を示す。汚染源がないため汚染の修復が進行しているが、本解析条件では産廃特措法の延長期間である10年以内に修復完了できない可能性がある。そのため、揚水井戸を追加するなどの追加修復対策を検討す

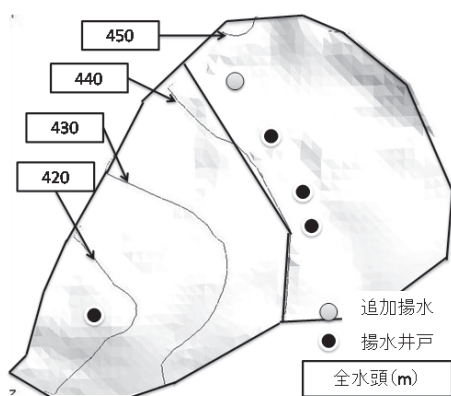


図-10 県境北部鋼矢板、揚水設置後の地下水位平均期地下水流れコンター図（黒線は鋼矢板）

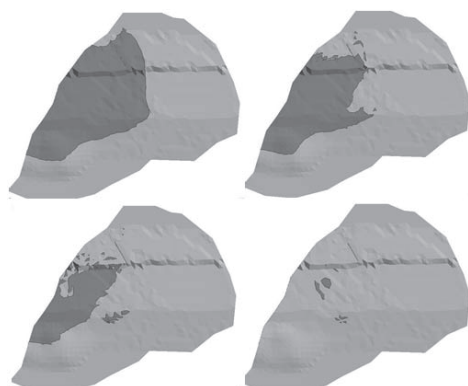


図-11 凝灰角礫岩真上の汚染将来予測（左上 1 年後、右上 5 年後、左下 10 年後、右下 20 年後）

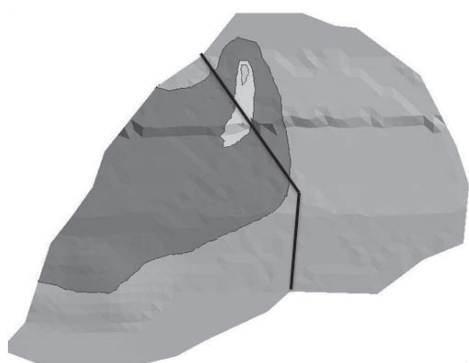


図-12 県境北部鋼矢板、揚水後の凝灰角礫岩真上の汚染将来予測 10 年後（黒線は鋼矢板）

の必要がある可能性を示唆した。

②岩手県側北部汚染源が除去できなかった場合

図-12に結果を示す。鋼矢板及び揚水井戸を追加した後も、青森県側に広範囲に汚染拡散してしまう可能性を示している。よって、今後モニタリングを徹底的に行い、青森県側への汚染地下水流出状況を把握する必要がある。

6. 結論

(1) 結論

- ①廃棄物全量撤去後の地形・地質構造に基づいて地下水流れモデルを構築できた。
 - ②季節ごとの地下水変動を考慮した地下水流れモデルにより汚染解析を行ったところ、青森県側の広範囲にわたって1,4-ジオキサン汚染が存在する可能性を指摘した。
 - ③県境北部に鋼矢板設置後の地下水流れを模擬したところ、岩手県側の地下水流れ変化が大きく、青森県側1,4-ジオキサン汚染流入が懸念されるため、岩手県側の地下水位の管理が重要であることを示した。
- よって岩手県側は青森県側への汚染地下水流出を防ぐために追加汚染拡散防止対策実施後も汚染状況の経過を観察する必要がある。

(2) 今後の課題

現場全域での1,4-ジオキサンの実態調査と地下水流れの精度向上のために、県境北部及び岩手県側北部の地質構造及び地下水位調査が必要である。

謝辞

ヒアリングやデータ提供にご協力いただいた青森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) 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・地下水汚染一循環共生をめざした修復と再生一, オーム社, 2006
- 2) 伊黒 千早, 古市 徹, 石井 一英, 金 相烈: 3次元数値シミュレーションによる修復対策後の地下水流動変化に基づく1,4-ジオキサンの拡散予測ー青森・岩手県境不法投棄事案の恒久対策を目指してー, 土木学会論文集 G, Vol.68, No.6, II_265-272, 2012
- 3) 青森県: 第47回県境不法投棄現場現状回復対策推進協議会, 資料2, 2013
<http://www.pref.aomori.lg.jp/nature/kankyo/kyougikai47.html>
- 4) 青森県担当者へのヒアリング
- 5) Thomas K.G. Mohr: Environmental Investigation and Remediation, 1,4-Dioxane and other Solvent Stabilizer, CRC Press, Boca Raton, 2010
- 6) 経済産業省: 初期リスク評価書暫定版1,4-ジオキサン, 2002
- 7) Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J., and Wilson J.T.: Nat-

- ural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, John Wiley & Sons, Inc. 1999
- 8) 青森県担当者へのヒアリング
- 9) 小泉哲也, 神藤明彦, 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
- 10) 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
- 11) 青森県担当者へのヒアリング
- (2013. 7. 19 受付)

NUMERICAL SIMULATION FOR PREDICTION OF 1,4-DIOXANE GROUNDWATER CONTAMINATION AFTER REMOVAL OF WASTE AT AOMORI-IWATE ILLEGAL DUMPING SITE

Yuto OKAJIMA, Toru FURUICHI, Kazuei ISHII

At Aomori-Iwate illegal dumping site, a measure to remedy groundwater contaminated by 1,4-dioxane are required after removal of all waste. Considering the characteristic of 1,4-dioxane with little sorption and biodegradation, it is important to predict groundwater flow precisely. Especially, seasonal change of the groundwater flow at the site with no recharge water other than precipitation. This study conducted 3-dimensional groundwater contamination analysis for 1,4-dioxane after removal of all waste, considering seasonal change of the groundwater flow. As a result, our analysis showed a probability of 1,4-dioxane spreading in the broad area at Aomori side and of change in the distribution of 1,4-dioxane depending on setting of precipitation. In addition, after implementation of the steel sheet piles on the north boundary of two prefectures, since there is a probability that 1,4-dioxane contaminated groundwater can flow into Aomori side from Iwate side, it is important to control groundwater head at Iwate side by adequate pumping management.