

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1, 4-ジオキサン地下水汚染修復の予測・評価のための 統合的数値判定手法の開発 (5-1505)

平成27年度～平成29年度

Development of an Integrated Numerical Method for Prediction and Evaluation of 1,4-Dioxane-contaminated
Groundwater Remediation

〈研究代表機関〉
北海道大学

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 数値シミュレーション技術の開発 （北海道大学） 要旨	13
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 多主体多目的意思決定手法の開発 （北海道大学） 要旨	55
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	85

I. 成果の概要

課題名 5-1505 1,4-ジオキサン地下水汚染修復の予測・評価のための統合的数値判定手法の開発

課題代表者名 石井 一英（北海道大学大学院工学研究院環境創生工学部門環境管理工学分野循環計画システム研究室准教授）

研究実施期間 平成27～29年度

累計予算額 26,115千円（うち平成29年度：7,960千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 1,4-ジオキサン、地下水汚染修復、数値解析、修復期間予測、意思決定、ANP、態度変容、視覚化

研究体制

- (1)数値シミュレーション技術の開発(北海道大学)
- (2)多主体多目的意思決定手法の開発(北海道大学)

1. はじめに(研究背景等)

有害廃棄物の不法投棄等など廃棄物による土壌・地下水汚染が未だ問題として残っている。平成15年に「特定産業廃棄物に起因する支障の除去等に関する特別措置法」により平成24年度末までに、特定産業廃棄物による生活環境上の支障またはそのおそれの除去を目的に修復事業が展開された。しかし、多くの汚染現場では平成24年度末までに汚染修復が終了しないため、平成25年度から特措法が10年間延長され、平成34年度末の修復完了を目指して各修復対策が行われているところである。修復延長の主な理由の一つに、平成21年度に環境基準項目に追加された1,4-ジオキサンによる汚染が発覚したことが挙げられる。

1,4-ジオキサンは、一般的に溶解度が高く、水・オクタノール分配係数も小さい、かつ微生物分解性もラボスケールの実験では確認されているが、実汚染現場での分解報告が無いため、土壌の性質にもよる多くの場合、土壌への吸着、揮発、微生物分解による作用がほとんど無視できる。従って、1,4-ジオキサンは、地下水流れと共に移動する。特に、複雑な地形・地質条件に伴う複雑な地下水流れを有する汚染現場では、1,4-ジオキサンの挙動も複雑となり、調査や数値解析による予測や修復を困難なものとしている。通常、汚染解析には地下水浸透流と移流分散による解析が用いられる。観測データに基づき、逆推定により透水係数を決定した後に、さらに逆解析により有効間隙率や分散能を決定する。しかしこのtwo-step methodでは、複雑な地下水流れ条件下での濃度分布を必ずしも良く表現できないという問題が指摘されている。そこで本研究では、汚染機構の解明や修復対策の立案のため、1,4-ジオキサン汚染予測の精度向上を目指したパラメータ決定法を検討することにした。

一方、汚染修復中の現場では、当初予想した通り修復対策がうまく進行しないことが多い。このような問題に対して、古市はVF-UP（Verified Follow UP）を提唱している。VF-UPとは、「技術的・社会的な不確実性因子による想定外のリスクを考慮し、修復完了までは中間評価を設けて、当初の修復対策の効果を検証し、その評価に応じて当初の目標・計画を最適かつ実現可能な見直し（順応的な改善）を行い、修復完了後のモニタリングの間に、修復効果をも検証する」ことを言う。対策開始前の修復対策の意思決定については多くの研究や一般住民とのリスクコミュニケーションの例など多く報告があるが、このような修復中の中間評価段階における意思決定を扱った研究はほとんどない。そこで本研究では、中間評価段階における意思決定手法を扱うことにする。意思決定には、事業主体となる行政（産業廃棄

物不法投棄事案の場合）や専門家が中心的に関わることが多い。住民との合意形成も重要であり、行政が一度決定した修復対策であっても、住民説明の時点で反対され住民合意が困難な場合がある。そこで本研究では、まずは意思決定に関与する専門家や行政関係者の合意形成を円滑に進めるために、修復対策を検討する際の評価構造が主体間に異なることに着目し、その構造の違いを定量的に明らかにし、その情報に基づき各主体の態度が変容し、再度評価を行うといった対話形式の意思決定手法の構築を目指す。

2. 研究開発目的

本研究は、1,4-ジオキサン地下水汚染を、関係者の合意を得て円滑に修復するために、①高精度数値シミュレーションによる修復予測と評価手法、及び②技術・社会的側面を考慮した多主体多目的意思決定手法の2つを統合した数値判定手法の開発を実汚染現場への適用を通じて行う。具体的には、図-1に示すように、修復前及び修復中の観測データを最大限に

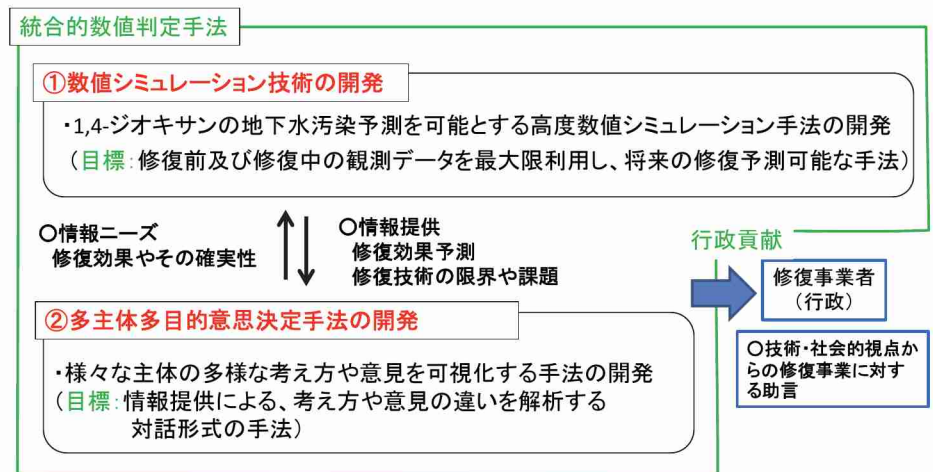


図-1 本研究の研究開発の目的

利用し、1,4-ジオキサンの地下水汚染分布を推定し、将来の修復予測可能な手法として開発すること、そして、様々な主体の多様な考え方や意見を可視化する手法を開発することを目的としている。さらに、意思決定側からの情報ニーズに応じ、数値シミュレーション結果を情報提供することにより、意思決定に関与する専門家や行政担当者の考え方や意見の違いを解析する対話形式の手法として開発し、これらの解析内容を修復事業者である行政に、技術・社会的視点からの修復事業に対する助言として提供することを目的としている。

3. 研究開発の方法

(1) 数値シミュレーション技術の開発

図-2に示すように、まず①文献調査により、土壌・地下水汚染層内での1,4-ジオキサンの挙動及び数値モデルにおける透水係数等のパラメータ推定に関する情報を整理した。次に②当該現場に対して、2つの推定方法を用いて透水係数等のパラメータ推定を行い、推定された1,4-ジオキサンが観測値をどの程度表現できるか比較した。次に本研究で開発したパラメータ推定のアルゴリズムを検証するために、模擬モデルを用いて③Coupled estimation methodの基本特性の把握を行った。その基本特性を踏まえ、④当該汚染現場のパラメータ推定を再度行い、今後修復対策が実施された場合の、地下水中の1,4-ジオキサン濃度の減衰の予測を行った。揚水量等の感度解析を行い、今後修復対策を実施する上での考慮点や課題について言及した。これらの情報は、もう一つのサブテーマである「II-2 意思決定手法の開発」での被験者への情報提供に利用される。最後に⑤Coupled estimation methodを、他の汚染現場

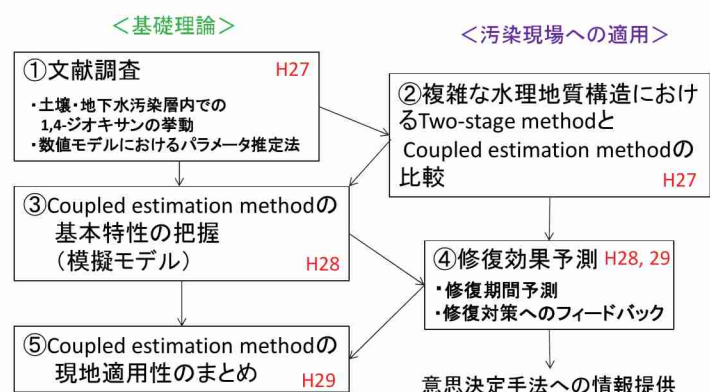


図-2 数値シミュレーションの研究開発の手順

最後に⑤Coupled estimation methodを、他の汚染現場

へ適用する際の適用性についてまとめる。本報告では、紙面の関係上、汚染現場への適用を中心に述べる。

(2) 多主体多目的意思決定手法の開発

図-3に研究開発の手順を示す。H27年度は、多主体多目的意思決定手法に関する文献調査を行い、本研究の目的に合致した手法をピックアップする。そして、行政、専門家、住民の各主体の評価構造のモデル化をISM

(Interpretive Structural Modeling)法及びDEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)法を用いて、今後修復対策の検証や見直しのために必要なニーズを抽出し、数値シミュレーション技術開発にインプットした。

H28年度は、前年度ピックアップされた手法として、人間の試行錯誤的かつ複雑な判断思考回路をネットワーク

としてモデル化できるANP手法を適用することにした。そして、各主体が優先する目標や代替案を分析し、各主体間の評価構造の違いや、各評価の得点や重み付けの違いを明らかにする。さらに、その情報を各主体にフィードバックし、それらの追加情報が評価に影響を及ぼすのか、個人の態度の変容過程を解析すると共に、集団としての集合度合いの変容過程を解析する。

H29年度は、実際の中間評価に関連するステークホルダーへのヒアリング、アンケート調査を通じ、各主体の評価構造を構築し解析する。修復改善案に対して、改良ANP手法（ヒアリング時間を短縮し回答者の負担を軽減するため構造を簡略化した）を適用することにより修復改善案の選択を試みる。特に、上記数値シミュレーションによる修復予測結果を提供し、その前後の評価の変容を考察する。以上より、対話形式の意思決定手法を構築する。本報告では、紙面の関係上、数値シミュレーションによる修復効果予測を情報提供した後の改良ANP手法の適用を中心に述べる。

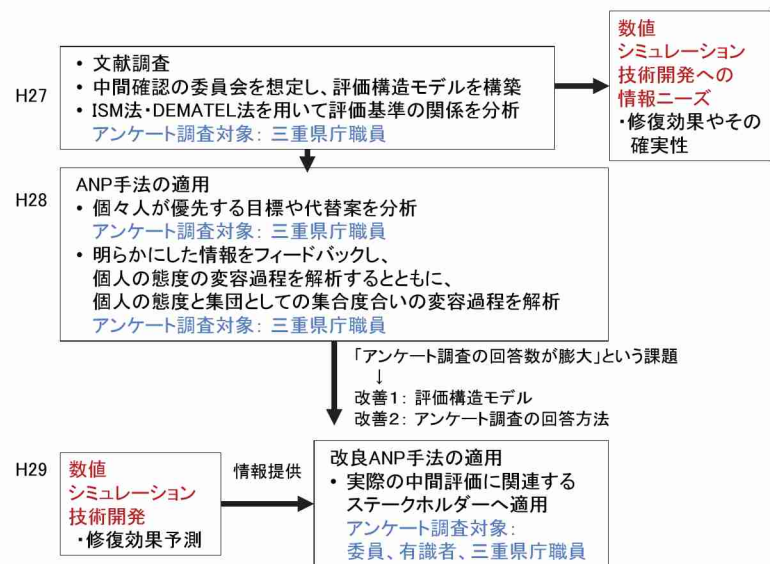


図-3 多主体多目的意思決定手法の開発手順

4. 結果及び考察

(1) 数値シミュレーション技術の開発

1) 三重県桑名市不法投棄現場の課題

本研究で対象とする三重県桑名市不法投棄現場の平面図を図-4に示す。不法投棄廃棄物が存在する面積は、約2,800 m² であり、廃棄物体積は30,000 m³、最大深さは14.7 mである。揮発性有機化合物（Volatile Organic Compound, VOC）を含む有害廃棄物が、1996年に不法に投棄され、1997年に発覚した。表-1に示すように、2002年から2007年にかけて、VOCを対象とした地下水汚染対策が講じられ、2002年に図-5に示すように鉛直遮水壁とキャッピングによる封じ込め、廃棄物層内及び地下水揚水処理、処理水の循環による廃棄物層中のVOCの洗い出しが行われた。その結果、VOCによる地下水汚染は、地下水環境基準値以下にまで修復された。しかし、2009年に地下水環境基準に追加された1,4-ジオキサンによる汚染が発

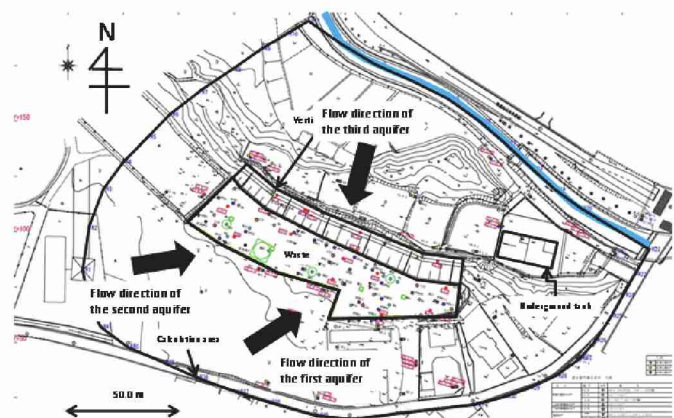


図-4 当該汚染現場の平面図

現。2009年に地下水環境基準に追加された1,4-ジオキサンによる汚染が発

覚した。再び現地調査が行われ、2012年より、1,4-ジオキサン[※]の汚染拡散防止を目的とした廃棄物層内の地下水揚水、遮水壁外の揚水処理が開始された。2017年11月には、1,4-ジオキサン[※]が高濃度で検出された廃棄物（全体量のおおよそ2/3）を撤去処理し、現在、遮水壁内外の地下水揚水処理により、1,4-ジオキサン[※]による地下水汚染を修復しているところである。本事業は、特措法の対象となっていることから、2023年3月末までに修復事業を終える予定である。

表-1 三重県桑名不法投棄現場の修復対策の経緯と今後の対策予定

年	出来事
1996	不法投棄
1997	不法投棄が発覚
2002	鉛直遮水壁等設置、VOC除去を目的に廃棄物層に対してフラッシング開始
2007	VOCsによる地下水汚染修復完了、揚水ポンプ等の停止
2009	1,4-ジオキサン [※] 環境基準追加に伴い分析、1,4-ジオキサン [※] 検出
2011.1	※観測データをシミュレーションに利用
2012.1	修復対策（第一段階） 1,4-ジオキサン [※] の汚染拡散防止を目的に廃棄物層内の地下水揚水開始 遮水壁外の1,4-ジオキサン [※] 地下水汚染修復のために地下水用水開始 ※観測データ（～2016.9）をシミュレーションに利用
2017.11	修復対策（第二段階） 廃棄物の部分撤去完了、遮水壁内外の地下水揚水処理開始
2023.3	事業終了予定（平成34年度末）

当該汚染現場は、河岸段丘面に位置し、地質は砂層と粘土層の互層構造であり、深部には難透水層性地盤が存在する。図-5に示すように、帯水層は表層から第一、第二、及び第三帯水層存在し、廃棄物層は第二帯水層にまで達している。そして図-4に示すように、各帯水層の地下水流れ方向が異なっているのが当該汚染現場の特徴である。第一帯水層と第二帯水層は、河岸段丘の地形が反映され、河川方向への地下水流れが卓越しているのに対して、第三帯水層はより広域的な地形・地質条件が反映され、北西方向から南東方向へ流れており、第一及び第二帯水層とは逆の流れを有している。VOCによる地下水汚染は、第一及び第二帯水層が主であったが、1,4-ジオキサン[※]による汚染は、主に第二及び第三帯水層にみられた。

当該汚染現場の課題を以下にまとめる。

① 1,4-ジオキサン[※]の地下水汚染機構が不明

図-6は、2011年時点で第二帯水層と第三帯水層の環境基準値を超えて1,4-ジオキサン[※]が検出された領域を示している。図-5に示したように、廃棄物層は第二帯水層までしか存在しないのに、第三帯水層の汚染が見られ、かつ地下水流れに逆らうように分布している。また、2002年に鉛直遮水壁（スラリー壁+シート）が第三帯水層の下部の難透水層まで設置されているにもかかわらず、第二、及び第三帯水層の遮水壁外の汚染が見られる点である。なぜこのような汚染分布になったのか、数値シミュレーションにより明らかにする必要がある。

② 廃棄物の部分撤去後の修復対策の効果予測

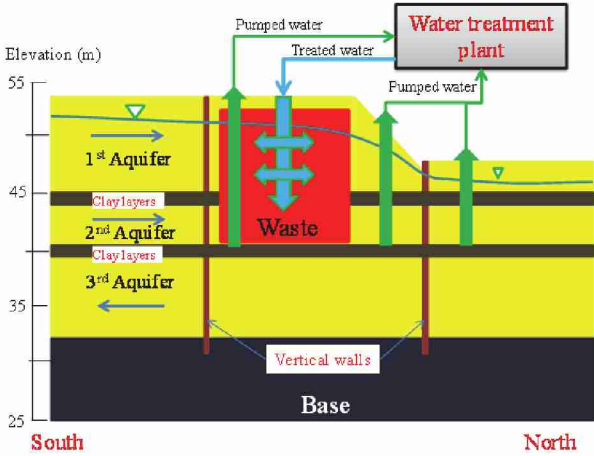


図-5 不法投棄現場の代表的な断面の見取り図

2017年11月に図-7に示す箇所の廃棄物の部分撤去が完了し、廃棄物撤去後の埋め戻し後、下部帯水層の地下水揚水処理が開始される予定である。また、残置された廃棄物層についても、廃棄物層内汚染水を「揚水－処理－処理水の注入」によるフラッシングにより1,4-ジオキサンの修復が行われることになっている。撤去エリアと残置エリアの地下水の修復目標は、排水基準値である0.5 mg/Lとされているが、修復期限目標である2023年3月末までに達成できるかどうか、不明な点が課題である。数値シミュレーションによる修復効果予測により、達成可能であるかどうか評価が必要である。

③ 追加対策や修復期限延長などの検討

2023年3月末までに、遮水壁外の地下水は環境基準値（0.05 mg/L）以下、遮水壁内の地下水および廃棄物層内の水は排水基準値以下にまで修復を終えることを目標としているが、修復の進捗状況によっては、揚水井戸の追加や揚水量の変更といった追加対策を行う、あるいは修復期限を延長するなどの措置が必要となるかもしれない。数値シミュレーションによって、対策の進捗状況を模擬し、必要な措置を予め検討することができる。

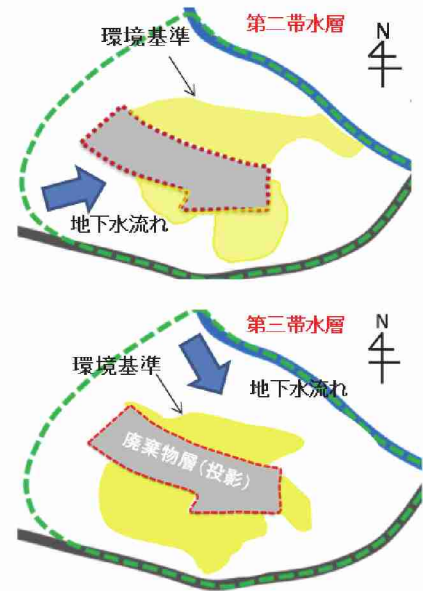


図-6 1,4-ジオキサン環境基準超過領域（2011年時点、上：第二帯水層、

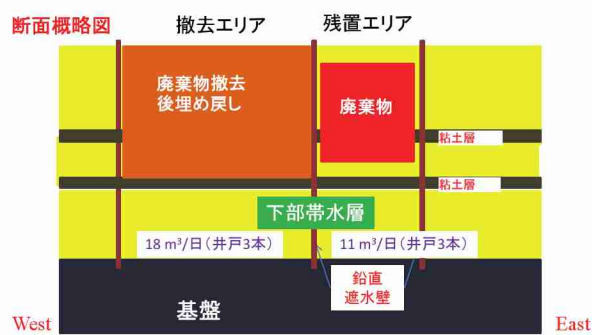
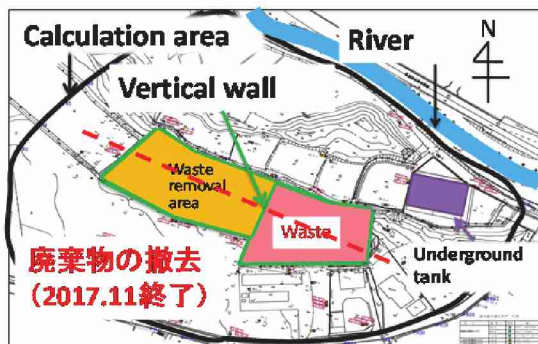


図-7 廃棄物部分撤去エリアと廃棄物残置エリア

2) 1,4-ジオキサン地下水汚染機構の解明

① 当該汚染現場の数値モデルの構築

全92のボーリングのデータを用いて図-8のような3次元地形地質モデルを構築し、GEOModeler（ジーエムラボ社、<http://www.gmlabo.co.jp/>）を用いて3次元数値モデルを作成し、地下水流れと1,4-ジオキサンの輸送をシミュレートする。GEOModeler は、有限要素法をベースとしたソフトウェアであり、地下水流れ（式(1)）、溶質輸送（式(2)～(5)）及び熱輸送の問題を、Euler-Lagrange法に基づき扱うことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q, \quad (1)$$

$$nR \frac{\partial c}{\partial t} = -v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(nD_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - nrc - Q_s, \quad (2)$$

$$R = 1 + \rho_d / n K_d, \quad (3)$$

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij}, \quad (4)$$

$$\alpha_T = \frac{1}{10} \alpha_L, \quad (5)$$

ここで、 i, j ($= 1, 2, 3$) は総和規則による表示、 k : 透水係数 [m/s]、 h : 地下水頭 [m]、 S_s : 比

貯留係数[1/m]、 Q ：湧きだし項 [1/s]、 x ：空間軸 [m]、 t ：時間 [s]。なお、本研究では、地下水流れを定常状態として扱った。 n ：有効間隙率[-]、 R ：遅延係数[-]、 c ：濃度[mg/L]、 v ：ダルシー速度[m/s]、 D ：分散係数 [m²/s]、 r ：減衰定数[1/s]、 Q_s ：source and sink項[mg/L/s]、 ρ_d ：土壌粒子密度 [kg/L]、 K_d ：分配係数 [L/kg]、 V ：間隙速度[m/s]、 α_L ：縦分散能[m]、 α_T ：横分散能、 α_m ：分子拡散係数 [m²/s]、 τ ：屈曲率、 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタである。

② パラメータの推定

従来は、地下水位の観測値を用いて透水係数を推定し、濃度の観測値を用いて有効間隙率及び分散能を求めるtwo-stage methodが用いられる場合が多かった。しかし、この手法だと、1,4-ジオキサン濃度の観測値が持つ、トレーサーとしての流れの情報（地下水流速や流向）が、透水係数の推定に反映されないという欠点がある。特に、当該現場のような水理地質構造が複雑な現場では、地下水位観測値だけでは、複雑な地下水流れが推定できない。そこで本研究では、上記の欠点を補うことができる式(6)～(10)に示すcoupled estimation methodを用いた。この手法は、従来から提案されていたものの、計算時間はかかるため、実汚染現場への適用はほとんどみられなかった。

$$H^r = \sum w_h (h_{cal}^r - h_{obs}^r)^2, \quad (6)$$

$$C^r = \sum w_c (c_{cal}^r - c_{obs}^r)^2, \quad (7)$$

$$\text{Min } F = H^r + \lambda C^r \quad (8)$$

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

$$h_{cal}^r = \frac{h_{cal} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c_{cal}^r = \frac{c_{cal}}{c_{max}}, \quad (10)$$

本研究では、全17層の透水係数値の感度解析を行い感度の高い5つの層を抽出した後、coupled estimation methodにより、透水係数5つと縦分散能5つの合計10のパラメータの同時推定を行った（表-2）。また事前に行った解析で、有効間隙率と透水係数はトレードオフの関係にあることが分かったので、透水係数を優先した。観測値と計算値の比較を図-9に示す。環境基準値である0.05 mg/L以上の値に着目すると、観測値と計算値は±1オーダーmg/Lの範囲入っており、計算値が観測値を表現していると言える。特に、1 mg/Lを超える高濃度の観測点においては、計算値と観測値はほとんど一致している。

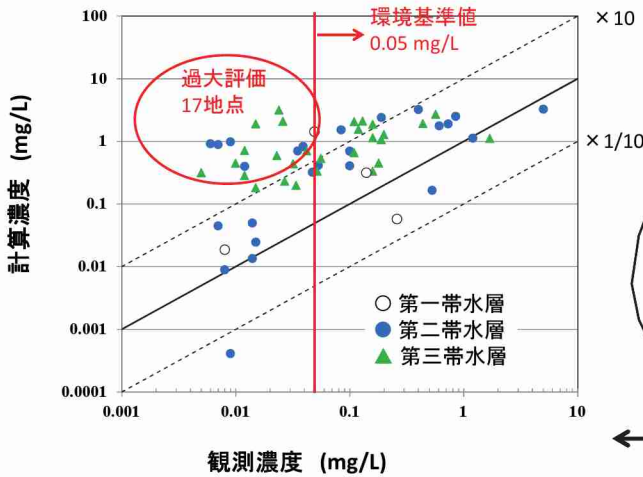


図-9 観測値と計算値の比較

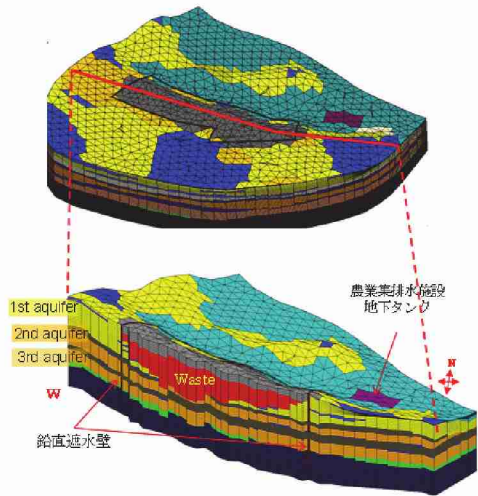


図-8当該現場の3次元地形・地質モデル

表-2 推定されたパラメータ

対象の層	透水係数 [m/day]	分散能 a_L [m]
砂礫層 (tDg2, 第一帯水層)	1.83×10^{-2}	1.00
砂礫層 (tDg, 第一帯水層)	3.67	1.00
粘性土層 (Dc2)	1.97×10^{-2}	1.00
砂礫層 (Dg2, 第二帯水層)	2.28	1.00
砂礫層 (Dg1, 第三帯水層)	0.437	1.05

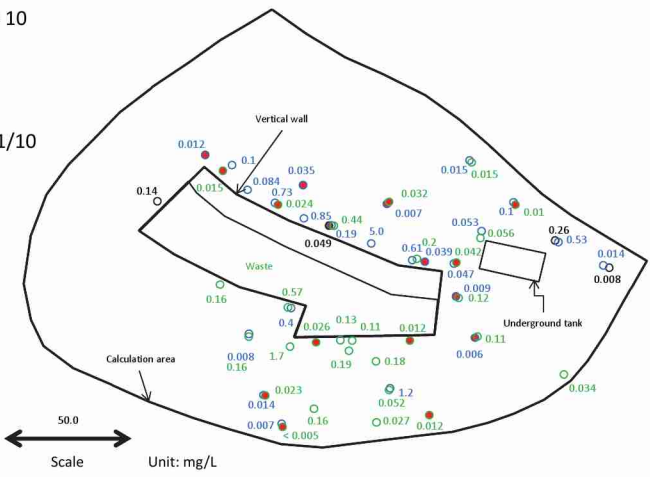


図-10 過大評価17観測地点の位値（赤丸印）

一方、環境基準値よりも小さな領域では、観測濃度が比較的低いにもかかわらず計算値は0.1~1.0 mg/Lに集中する傾向が見られ、観測値に比べて過大評価している地点が17あることが分かった。これらの位置を図-10に示す(赤丸印)。これは、汚染源としての廃棄物層内において、1,4-ジオキサン濃度は濃い領域と薄い領域があるにもかかわらず、廃棄物層内の1,4-ジオキサンの濃度は一律に相対濃度で7.0 mg/Lで与えることに起因すると考えられる。廃棄物層中の1,4-ジオキサンの分布を考慮したモデルを構築すべきである。また、本来ならば、廃棄物層中の1,4-ジオキサンは、時間の経過と共にその濃度低下がみられ、廃棄物層中の1,4-ジオキサンの絶対量は減っていくはずである。しかしこの点についても、汚染源濃度は、計算期間中は一定であると仮定して計算している。このことが、計算値が観測値を過大に評価している原因であると考える。

③ 1,4-ジオキサン修復対策前(2011年1月)での汚染機構の解明

第二帯水層については、図-11a)に示すように遮水壁設置前に地下水流れ沿って、廃棄物層から北側に移動した1,4-ジオキサンが、遮水壁設置後に、汚染拡散防止と未汚染水の置換により図-11c)のような分布となった推測された。この特徴的な分布は、先に示した図-6上の同時期の第二帯水層の濃度分布と形状が類似している。第三帯水層については、廃棄物層内中の1,4-ジオキサンが第三帯水層に移動し、図-11b)のように1,4-ジオキサンが南北方向に押し出されるように移動したものと考えられる。図-11d)に示すように遮水壁設置後は、第二帯水層同様に、遮水壁による1,4-ジオキサンの汚染拡散防止と未汚染水による置換が生じたものと考えられる。以上、coupled estimation methodを用い

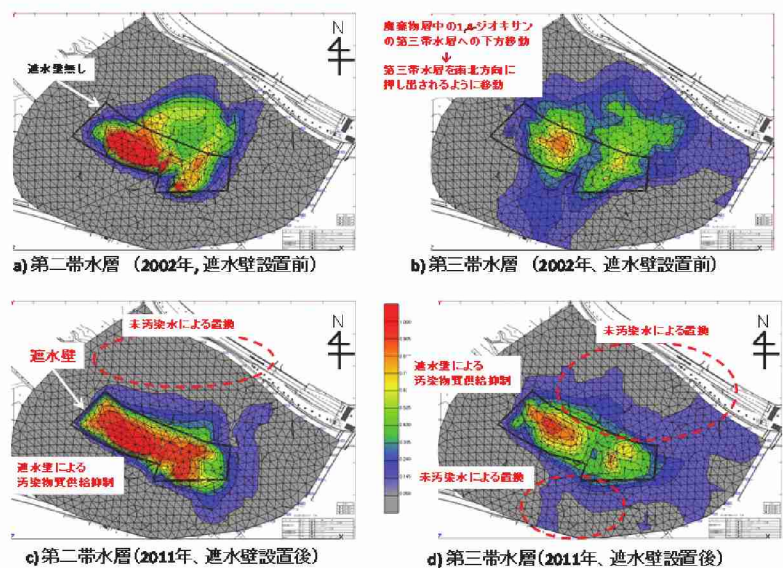


図-11 遮水壁設置前後の1,4-ジオキサン濃度分布の変化

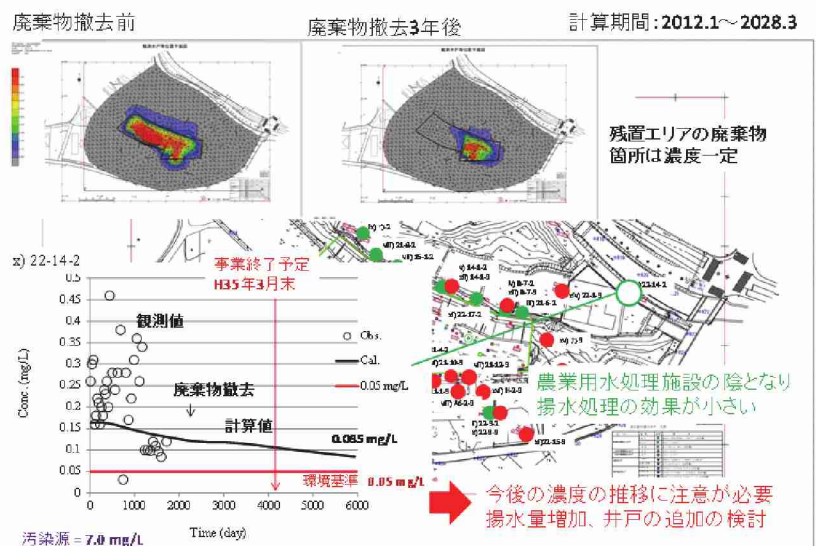


図-12 第二帯水層の修復効果予測及び22-14-2地点での1,4-ジオキサン濃度の変化

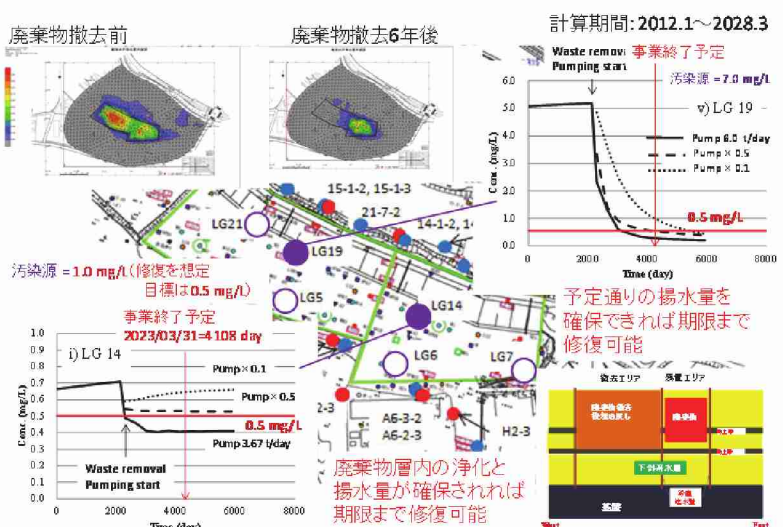


図-13 第三帯水層の修復効果予測及び廃棄物撤去エリア下部帯水層の1,4-ジオキサン濃度の予測結果

ることによって、複雑な地下水流れを模擬することができ、これまで不明であった2011年1月までの第二帯水層と第三帯水層の1,4-ジオキサン汚染機構を明らかにすることができた。

3) 修復効果予測と修復対策へのフィードバック

2017年11月に廃棄物撤去終了後に行われる修復効果の予測の結果を図-12(第二帯水層)及び図-13(第三帯水層及び下部帯水層)に示す。今後の修復対策への課題や留意点もあわせて、三重県への指導内容を下記にまとめる。

- 1) 遮水壁外の地下水の修復(第二帯水層及び第三帯水層)は、予定事業期間内に終わることができると考える。但し、河川付近の第二帯水層にある一部の高濃度井戸(22-14-2)の濃度推移に注意する必要がある、揚水量の増加や追加の井戸を検討する必要がある。
- 2) 遮水壁内の下部帯水層の修復について、①廃棄物撤去エリアの下部帯水層(LG19井戸参照)は、予定事業期間内に終わることができると考えられる。②廃棄物残置エリアの下部帯水層は、残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度に大きく依存する。残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度の減衰がなければ、残置エリア下部帯水層の修復も難しい。③撤去・残置エリア共通として、下部帯水層から予定通りの流量で揚水できない可能性がある。その場合は、特に残置エリアでの修復は大幅に遅れる可能性もある。

(2) 多主体多目的意思決定手法の開発

1) ANP手法の適用

ANP手法はAHP手法を発展させた評価手法であり、基本的には目標、評価基準、代替案の3層からなる評価構造モデルである。ANP手法の代表的な特徴である相互依存関係

(Interdependence)とフィードバック(Feedback)を下記に示す(図-14)。

- ①相互依存関係(Interdependence)：各階層内の要素間同士の影響のことであり、ある階層のある要素が同じ階層の他の要素に対して、どれくらいの影響を与えているかを考慮して評価することである。最終的には、他の要素に影響を与えているある要素は重み付け(重要度)が大きくなり、影響を受けている要素は重み付け(重要度)は小さくなるという関係になる。

- ②フィードバック(Feedback)：下層からみた上層の優先度(「重要さ」や「特徴的か」)を考慮することであり、下層の持つ本来の特徴を評価に反映することが可能となる。

結果として、評価者の主観的な価値判断や要素間の複雑な相互作用を捉えることができる手法を適用する。

ANP手法適用にあたっては、図-15に示す評価構造モデルを用いた。従来は一対比較により評価を行っていたが、回答者の負担を軽減するために、図-16

に示すように、質問に対して該当する指標の順位付けとその指標間の程度の差を伺う形式に改善し、この回答結果から、一定の基準に従って一対比較の結果へ変換し解析を行った。

Analytical Network Process (ANP)

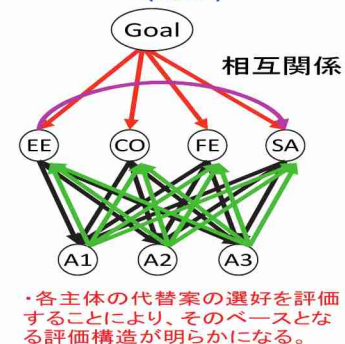


図-14 ANP手法のイメージ

(EE: 環境影響、CO: コスト、FE: 実効性、SA: 住民受容性、A1~A3: 代替案)

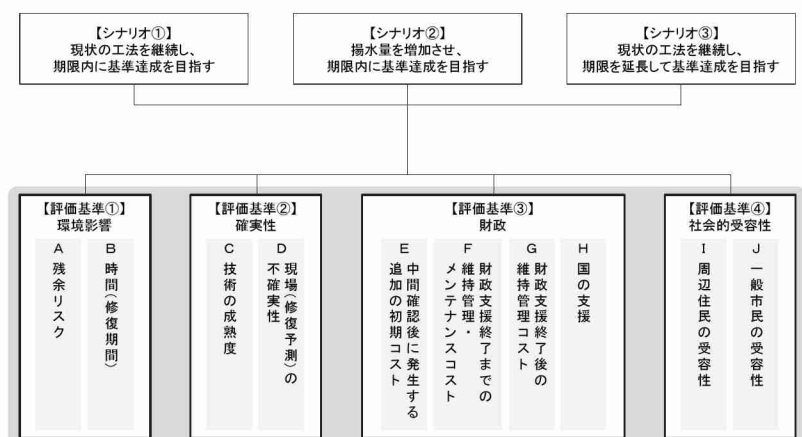


図-15 評価構造モデル

例：シナリオ①に対して、それぞれの評価基準の重視する度合いを教えてください。

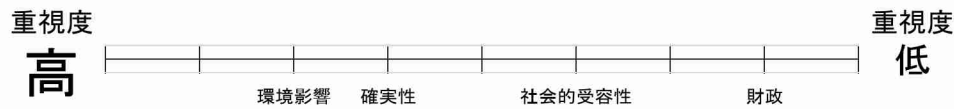


図-16 優先順番と度合いによって回答を行う場合のヒアリング票の一例

アンケートの回答者は、当該現場の意思決定に関連する7名であり、行政担当者3名（A～C氏）、委員会メンバー2人（D, F氏）、有識者2名（E, G氏）である。前節の数値シミュレーション結果の説明後、回答を得た。ANPでの解析結果を図-17に示す。修復シナリオの優先順位がパーセンテージ（ウェイト）で示されている。さらに、得られた個人評価ウェイトを用いて、ヒアリング

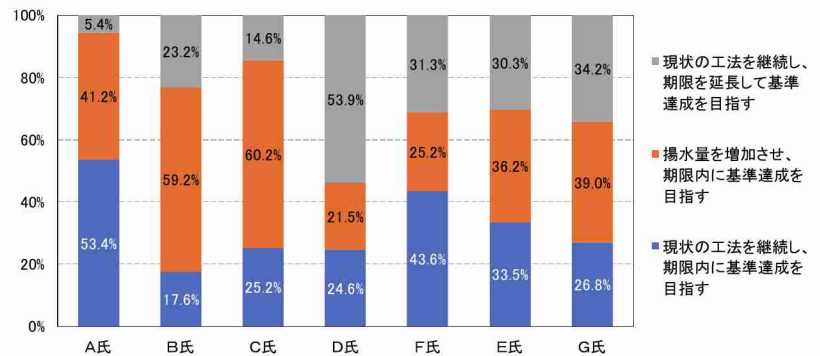


図-17 シナリオの個人評価ウェイトの結果

対象者同士の類似性を把握するため、2つの評価ウェイト（例えばwとn）間の類似度を算出することができる Compatibility Quotient（以下、CQ）値を導入した。そして群平均法によるデンドログラムを作成し、回答者のグルーピングを可視化した結果を図-18に示す。

$$CQ(w, u) = \frac{n^2}{\sum_{i,j=1}^n \left(\frac{w_i}{w_j} \right) \left(\frac{u_j}{u_i} \right)} \quad (11)$$

まず行政担当者であるA氏とC氏は、数値シミュレーション結果を説明する前に行った結果では、現状の工法を継続し期限内に基準達成を目指す（シナリオ①）の立場を取っていたが、数値シミュレーション結果の説明後は、確実性を重要視するようになり、揚水量を増加させ期限内に基準達成を目指す立場に態度が変容した。一方、委員や有識者は、現状の工法を継続するが、期限を延長して基準達成を目指すという立場であり、期限延長も考慮すべきであるという意見であった。

すなわち、図-19に示すように、数値シミュレーション技術の開発と多主体多目的意思決定手法の開発を、実際の汚染現場である三重県桑

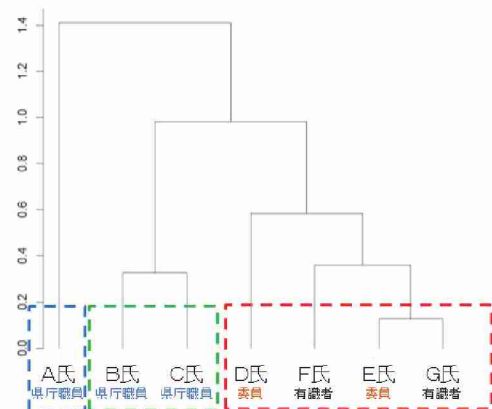


図-18 回答者のグルーピング

統合的数値判定手法

①数値シミュレーション技術の開発

・1,4-ジオキサン地下水汚染予測を可能とする高度数値シミュレーション手法の開発
（目標：修復前及び修復中の観測データを最大限利用し、将来の修復予測可能な手法→達成）

○情報ニーズ

修復効果やその確実性



○情報提供

修復効果予測
修復技術の限界や課題

行政貢献

②多主体多目的意思決定手法の開発

・様々な主体の多様な考え方や意見を可視化する手法の開発
（目標：情報提供による、考え方や意見の違いを解析する対話形式の手法→達成）

このままの修復手法で期限内に修復を終わらせるという考え方から、
・修復手法を追加（変更）して期限内に確実に修復を終わらせる
・修復期限を延長することも考慮すべき
といった考え方への変化が見られた。

修復事業者（行政）

○技術的視点
・揚水井戸位置や揚水量の助言
・モニタリングによる進捗管理
・修復終了の見通し
○社会的視点
・期限延長の検討
・予算措置

他の汚染サイトでも適用可能

図-19 数値シミュレーションと多主体多目的意思決定手法の関係性

名市不法投棄現場への適用を通じ行うことにより、1,4-ジオキサンの地下水汚染機構の解明に基づく将

来の修復予測が可能となり、修復時の課題や留意点について指摘が可能となった。一方、意思決定の関連者の評価は、このままの修復手法で期限内に終わらせるという考え方が主流であったが、数値シミュレーションの結果を受けて、修復手法を追加（変更）して期限内に確実に修復を終わらせる、あるいは修復期限を延長することも考慮すべきという意見への変容が定量的に把握することができた。

これらの①数値シミュレーション技術による1,4-ジオキサン地下水汚染修復予測と②多主体多目的意思決定手法による評価者の態度変容の両者の定量的な情報は、最終意思決定者であり、修復事業者である行政にとって、技術的・社会的視点の両側面からその修復対策のサポートを可能とするものである。さらに、他の1,4-ジオキサンの土壌・地下水汚染現場への適用も可能となるものである。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) 数値シミュレーション技術の開発

①これまで1,4-ジオキサン地下水濃度分布の推測が困難であったが、本研究では、1,4-ジオキサン濃度の観測値をトレーサーとして捉え、そのトレーサーの持つ流れに関する情報（地下水位流速や流向）を透水係数の推定にも利用できるCoupled estimation methodを用い、複雑な地下水位流れとその地下水流れに沿って移動する1,4-ジオキサンの濃度分布の高精度の推定が可能となった。

②修復中の1,4-ジオキサン濃度の減衰過程に数値シミュレーションを適用した結果、修復終了時期やモニタリング必要期間などのより高度な推定が可能となった。

2) 多主体多目的意思決定手法の開発

合意形成を得るための行政手続きや判断方法は様々ある（委員会形式での評価、住民説明会、世論調査など）が、これまでは考え方や価値観が異なる複数の評価者の意見の傾向を把握する、特に定量的にかつ視覚的に把握する手法はなかった。本研究では、人間の試行錯誤過程をシステマティックに表現できるANP (Analytic Network Process)を用いて、個人評価ウェイトの類似度を解析することにより、複数評価者のグルーピング及び意見の集約度を定量的に、しかも視覚的に評価することが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) 数値シミュレーション技術の開発

三重県桑名市不法投棄事案における1,4-ジオキサン地下水汚染機構の説明や修復対策に貢献している。なお、研究代表者は、本事案の協議会の座長を務めており、座長としての下記のような指導を、本研究で得られた成果に基づいて行っている。

① 遮水壁外の地下水の修復は、予定事業期間内に終わることができると考える。但し、河川付近の第二帯水層にある一部の高濃度井戸の濃度推移に注意する必要がある。

② 遮水壁内の下部帯水層の修復について、①廃棄物撤去エリアの下部帯水層は、予定事業期間内に終わることができると考えられる。②廃棄物残置エリアの下部帯水層は、残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度に大きく依存する。残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度の減衰がなければ、残置エリア下部帯水層の修復も難しい。③撤去・残置エリア共通として、下部帯水層から予定通りの流量で揚水できない可能性がある。その場合は、特に残置エリアでの修復は大幅に遅れる可能性もある。

2) 多主体多目的意思決定手法の開発

③ 1,4-ジオキサンの今後のモニタリング結果によっては、揚水井戸の追加など追加的対策が必要となる可能性があるため、その措置のための準備が必要である。

④ 修復期限にまでに、環境基準値及び排水基準値を満足するという方針でかまわないが、廃棄物層中の1,4-ジオキサンの濃度低下がその前提条件となる。モニタリング結果に基づき、修復期限延長も視野に入れながら、対策を行っていくことが重要である。

⑤ 本研究で用いた手法は、実際に誰もが使えるソフトウェアとして既に販売されている。さらに、実際に本研究で対象とした現場担当者からは、今後の1,4-ジオキサン地下水汚染を修復する際の課題や留

意点、そして今後の修復の方向性などを検討する上で、非常に有用であるとの反応を頂いている。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

1) 数値シミュレーション技術の開発

- ①他の修復が長引いている1,4-ジオキサンによる地下水汚染現場に対して、本研究の成果を活用することにより、汚染機構に基づいた的確な修復対策を行うことを可能とし、結果的に見通しを持った修復対策が可能となり、かつ修復費用の削減が可能となる。
- ②本研究の次のステップである汚染源探索が可能となると、分解生成物を考慮すると分解する前の物質の汚染源探索問題にもつながる。現在、環境政策上、課題となっている隣接敷地からのもらい汚染の効果的な汚染源探索するための解析ツールを提供することができる。
- ③今後の、特に水理地質構造や汚染形態が複雑であり、単純なモデルでは解析ができないような土壌・地下水汚染の解析ツールとして利用することが可能となる。

2) 多主体多目的意思決定手法の開発

本手法は、特に委員会形式でのディスカッションにおいて、価値観の異なる複数委員の考え方の距離を定量評価することで、複数委員のグルーピングを可能とする。そのため、大勢となる意見を集約することが可能である。一方で、委員の中には少数派も存在し、少数派の意見は声の大きな大勢派の意見に隠れてしまって、汲み入れることは難しいと考えられる。本手法により、少数派の意見を把握することも可能であると考えられる。すなわち、本研究の成果は、価値観が異なる複数人の評価の分布を定量評価することで、環境政策上の意思決定に必要な大勢となる意見の抽出、あるいは少数意見の抽出を可能とする。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

＜査読付き論文＞

- 1) 鷲尾卓、藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏：土木学会論文集G, Vol. 73, No.6, pp. II_1-10 (2017).
多主体多目的意思決定問題における評価者のグルーピングと変容の可視化に関する研究

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama and Shoei Imai: The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016).
Application of a coupled estimation method using flow and transport equations to a real 1,4-dioxane groundwater contamination site with complex hydrogeological structure
- 2) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii and Toru Furuichi: The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016).
Study on Multi-criteria Decision Making with Multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternatives for an Illegal Waste Dumping Site
- 3) 今池祥平、石井一英、藤山淳史、佐藤昌宏、古市徹：第44回環境システム研究論文発表会講演集, pp.1-8(2016).
1,4-ジオキサン地下水汚染予測の精度改善のためのパラメータ決定法に関する研究
- 4) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii, Toru Furuichi: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016).
Study on Multi-criteria Decision Making with multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternative for an Illegal Waste Dumping Site by Use of ANP Method
- 5) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Shohei Imai: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016).
Comparison of the Two-stage Method and Coupled Estimation Method to Estimate 1,4-dioxane Groundwater Contamination

- 6) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Yumika Shishido: The 32nd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA(2017).
Coupled Estimation Method for Determination of Flow and Transport Parameters using Transient Observation Data during Remediation of 1,4-Dioxane Groundwater Contamination
- 7) A. Fujiyama, K. Ishii, M. Sato, T. Furuichi and S. Washio: Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM(2017).
Study on categorization of multievaluators into groups for selecting remedial goals and methods at illegal dumping sites using analytic network process
- 8) K. Ishii, T. Furuichi, A. Fujiyama and M. Sato: Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM(2017).
Flow and transport parameter estimation for 1,4-dioxane groundwater contamination at an illegal dumping site
- 9) 石井一英、藤山淳史、佐藤昌宏、古市徹、宍戸祐美果：第45回環境システム研究論文発表会講演集(2017).
1,4-ジオキサン濃度データを用いた地下水汚染シュミレーションのパラメータ決定に関する研究、
- 10) 藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏、鷺尾卓：環境科学会2017年会、pp44(2017).
多主体多目的意思決定問題における評価者のグルーピングと変容の可視化に関する研究－不法投棄現場の汚染修復事業を対象として－
- 11) Kazuei Ishii, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Toru Furuichi: The 33rd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Annapolice, USA(2018).
Prediction of 1,4-dioxane contamination distribution during countermeasures at an illegal dumping site by numerical simulation

7. 研究者略歴

研究代表者

石井 一英

北海道大学工学部卒業、博士(工学)、現在、北海道大学大学院工学研究院准教授

研究分担者

1) 古市 徹

京都大学工学部卒業、工学博士、現在、北海道大学大学院工学研究院客員教授

2) 藤山 淳史

北九州市立大学国際環境工学部卒業、博士(工学)、現在、北海道大学大学院工学研究院特任助教

II. 成果の詳細

II-1 数値シミュレーション技術の開発

国立大学法人北海道大学大学院工学研究院

環境創生工学部門環境管理工学分野循環計画システム研究室 准教授 石井一英

環境創生工学部門寄附分野循環・エネルギー技術システム分野 客員教授 古市 徹

平成27～29年度累計予算額：19,216千円（うち平成29年度：5,240千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

1,4-ジオキサンによって汚染されている三重県桑名市不法投棄現場への適用を通じて、高精度数値シミュレーションの手法の開発を行った。当該現場は、3つの流れ方向が異なる帯水層が、汚染源となる廃棄物層から流出した1,4-ジオキサンにより汚染されていたが、観測値のみではその汚染機構が不明であった。さらに、今後廃棄物層の部分撤去と揚水処理により1,4-ジオキサン地下水汚染の修復を行う予定にしているが、修復期限である2023年3月までに、環境基準値及び排水基準値を達成できるか不明であった。数値シミュレーションを当該現場へ適用する際の最重要ポイントは、観測データを用いたモデル化、特に関連パラメータの推定である。そこで本研究では、1,4-ジオキサン濃度観測値の持つ情報、すなわちトレーサーとしての情報（地下水流速と流向）を流れ場（透水係数）の推定に用いることができるcoupled estimation methodを用いて、パラメータを推定することにより、従来良く使われてきたtwo-stage methodよりも高精度に1,4-ジオキサンの観測値を表現することが可能となった。さらに、そのモデルを用いて、廃棄物の部分撤去後の修復対策の1,4-ジオキサン濃度の減衰を予測することができた。一連の解析結果により、おおむね修復期限までの基準達成は可能であるが、一部の高濃度で1,4-ジオキサンが観測されている井戸には注視が必要であり、揚水量の増加や揚水井戸の追加を検討する必要があること、さらに残置廃棄物層中の1,4-ジオキサンの修復が予定通り進まない場合あるいは揚水量が確保できない場合は、修復期限までに基準達成することが困難になる可能性があることを指摘した。

[キーワード]

1,4-ジオキサン、地下水汚染修復、数値解析、修復期間予測

1. はじめに

有害廃棄物の不法投棄等など廃棄物による土壌・地下水汚染が未だ問題として残っている。平成15年に「特定産業廃棄物に起因する支障の除去等に関する特別措置法」により平成24年度末までに、特定産業廃棄物による生活環境上の支障またはそのおそれの除去を目的に修復事業が展開された。しかし、多くの汚染現場では平成24年度末までに汚染修復が終了しないため、平成25年度から特措法が10年間延長され、平成34年度末の修復完了を目指して各修復対策が行われているところである。修復延長の主な理由の一つに、平成21年度に環境基準項目に追加された1,4-ジオキサンによる汚染が発覚したことが挙げられる。

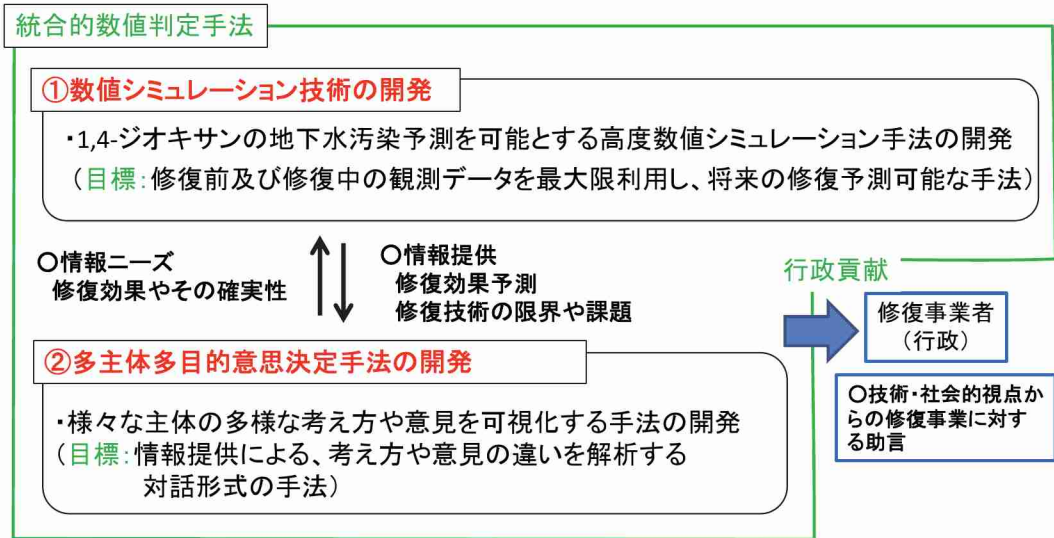
1,4-ジオキサンは、一般的に溶解度が高く、水・オクタノール分配係数も小さい、かつ微生物分解性もラボスケールの実験では確認されているが、実汚染現場での分解報告が無いため、土壌の性質にもよるが多くの場合、土壌への吸着、揮発、微生物分解による作用がほとんど無視できる。従って、1,4-ジオキサンは、地下水流れと共に移動する。特に、複雑な地形・地質条件に伴う複雑な地下水流れを有する汚染現場では、1,4-ジオキサンの挙動も複雑となり、調査や数値解析による予測や修復を困難なものとしている。通常、汚染解析には地下水浸透流と移流分散による解析が用いられる。観測データに基づき、逆推定により透水係数を決定した後に、さらに逆解析により有効間隙率や分散能を決定する。しかしこのtwo-step methodでは、複雑な地下水流れ条件下での濃度分布を必ずしも良く表現できないという問題が指摘されている¹⁾。そこで本研究では、汚染機構の解明や修復対策の立案のため、1,4-ジオキサン汚染予測の精度向上を目指したパラメータ決定法を検討することにした。

一方、汚染修復中の現場では、当初予想した通り修復対策がうまく進行しないことが多い。このような問題に対して、古市²⁾はVF-UP (Verified Follow UP) を提唱している。VF-UPとは、「技術的・社会的な不確実性因子による想定外のリスクを考慮し、修復完了までは中間評価を設けて、当初の修復対策の効果を検証し、その評価に応じて当初の目標・計画を最適かつ実現可能な見直し（順応的な改善）を行い、修復完了後のモニタリングの間に、修復効果をも検証する」ことを言う。対策開始前の修復対策の意思決定については多くの研究や一般住民とのリスクコミュニケーションの例など多く報告があるが、このような修復中の中間評価段階における意思決定を扱った研究はほとんどない。そこで、本研究では、中間評価段階における意思決定手法を扱うことにする。意思決定には、事業主体となる行政（産業廃棄物不法投棄事案の場合）や専門家が中心に関わるが多い。住民との合意形成も重要であり、行政が一度決定した修復対策であっても、住民説明の時点で反対され住民合意が困難な場合がある。そこで本研究では、まずは意思決定に関与する専門家や行政関係者の合意形成を円滑に進めるために、修復対策を検討する際の評価構造が主体間に異なることに着目し、その構造の違いを定量的に明らかにし、その情報に基づき各主体の態度が変容し、再度評価を行うといった対話形式の意思決定手法の構築を目指す。

2. 研究開発目的

本研究は、1,4-ジオキサン地下水汚染を、関係者の合意を得て円滑に修復するために、①高精度数値シミュレーションによる修復予測と評価手法、及び②技術・社会的側面を考慮した多主体多目的意思決定手法の2つを統合した数値判定手法の開発を実汚染現場への適用を通じて行う。具体的には、図(1)-1に示すように、修復前及び修復中の観測データを最大限に利用し、1,4-ジオキサンの地下水汚染分布を推定し、将来の修復予測可能な手法として開発すること、そして、様々な主体の多様な考え方や意見を可視化する手法を開発することを目的としている。さらに、意思決定側からの情報ニーズに応じ、数値シミュレーション結果を情報提供することにより、意思決定に関与する専門家や行政担当者の考え方や意見の違いを解析する対話形式の手法として開発し、これらの解析内容を修復事業者である行政に、技術・社会的視点からの修復事業に対する助言として提供することを目的としている。また、平成27年度～29年度までの各年度の計画を表(1)-1に示す。

本章では、①数値シミュレーション技術の開発について述べる。



図(1)-1 本研究の研究開発の目的

表(1)-1 全体研究計画

サブテーマ		平成 27 年度計画	平成 28 年度計画	平成 29 年度計画
(1)	数値シミュレーション技術の開発	(1) 三重県桑名市不法投棄現場を対象に、地下水位や1,4-ジオキサン濃度等の既存データを精査し、高精度1,4-ジオキサン濃度分布予測に必要な現地調査データの蓄積、スクリーニングを行う。平成27年度は、透水系数と分散能の同時推定、観測値の重み付けからなる向上策を検討し、従来法よりも1,4-ジオキサン濃度の推定が改善されることを示す。	(1) 三重県桑名市不法投棄現場を対象に、揚水処理等による修復対策中の1,4-ジオキサン濃度の変化に関する非定常データを用いて、地下水位変動及び濃度分析誤差から推察される許容誤差水準を精度目標として、モデルのパラメータ（以下、修復中パラメータ）の決定を行う。そして、修復前に求められたモデルパラメータと修復中パラメータの精度比較分析を通して、揚水処理による修復効果の高精度予測を可能とする数値シミュレーション技術を確立する。	(1) これまで作成した高精度1,4-ジオキサン地下水汚染モデルを用いて修復開始から中間評価時までの汚染濃度変化をシミュレーションし、修復の進捗状況の評価とモデルの検証を行う。修復が予定よりも遅延している場合には、数値シミュレーションにより原因解明を行うとともに、修復改善案を示し、その修復改善効果を数値シミュレーションにより予測・評価を行う。
(2)	多主体多目的意思決定手法の開発	(2) 多主体による意思決定手法の研究レビューを行い、立場の異なる様々な評価結果の集約や総合化のための手法を検討し、適用可能な手法をピックアップする。行政、専門家、住民の各主体の評価構造のモデル化をISM (Interpretive Structural Modeling)法及びDEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)法を用いて明らかにする。	(2) 前年度に作成した各主体の評価構造モデルを精査し、各主体へのヒアリングやアンケート予備調査に基づき、人間の試行錯誤的かつ複雑な判断思考回路をネットワークとしてモデル化できるANPを適用する（模擬ANP評価）。そして、各主体間での評価構造の違いや、各評価の得点や重み付けの違いがどのように評価に影響を及ぼすのかを分析することで、対話形式の意思決定手法開発のための各主体の意思決定構造の特徴付けを明らかにする。	(2) 実際の中間評価に関連するステークホルダーへのヒアリング、アンケート調査を通じ、各主体の評価構造を構築し解析する。修復改善案に対して、ANPを適用することにより修復改善案の選択を試みる。特に、上記数値シミュレーションによる修復予測結果を提供し、その前後の評価の差異を考察する。以上より、対話形式の意思決定手法を構築する。

3. 研究開発方法

3.1 三重県桑名不法投棄現場

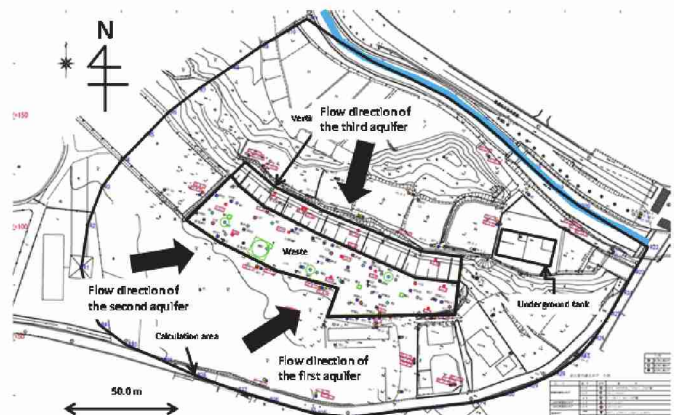
3.1.1 概要

本研究で対象とする三重県桑名市不法投棄現場の平面図を図(1)-2に示す。不法投棄廃棄物が存在する面積は、約2,800 m² であり、廃棄物体積は30,000 m³、最大深さは14.7 mである^{1,3)}。揮発性有機化合物(Volatile Organic Compound, VOC)を含む有害廃棄物が、1996年に不法に投棄され、1997年に発覚した。2002年から2007年にかけて、VOCを対象とした地下水汚染対策が講じられ、2002年に図(1)-3のように鉛直遮水壁とキャッピングによる封じ込め、廃棄物層内及び地下水揚水処理、処理水の循環による廃棄物層中のVOCの洗い出しが行われた。その結果、VOCによる地下水汚染は、地下水環境基準値以下にまで修復された⁴⁾。しかし、2009年に地下水環境基準に追加された1,4-ジオキサンによる汚染が発覚した。

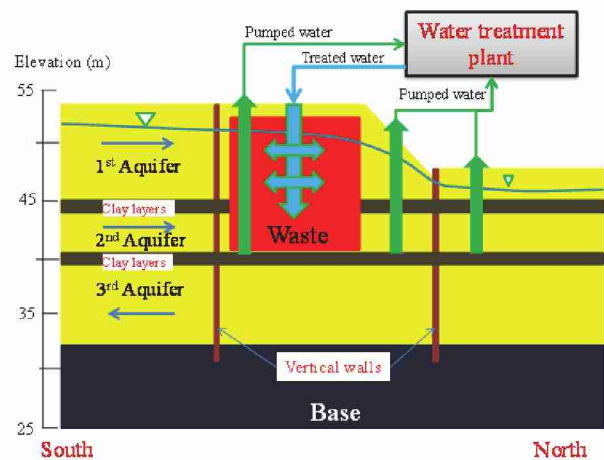
当該汚染現場は、河岸段丘面に位置し、地質は砂層と粘土層の互層構造であり、深部には難透水層性地盤が存在する。図(1)-3に示すように、帯水層は表層から第一、第二、及び第三帯水層存在し、廃棄物層は第二帯水層にまで達している。そして図(1)-2に示すように、各帯水層の地下水流れの方が異なっているのが当該汚染現場の特徴である。第一帯水層と第二帯水層は、河岸段丘の地形が反映され、河川方向への地下水流れが卓越しているのに対して、第三帯水層はより広域的な地形・地質条件が反映され、北西方向から南東方向へ流れており、第一及び第二帯水層とは逆の流れを有している。VOCによる地下水汚染は、第一及び第二帯水層が主であったが、1,4-ジオキサンによる汚染は、主に第二及び第三帯水層にみられた⁵⁾。

3.1.2 修復対策の経緯と今後の対策予定

当該汚染現場の修復対策の経緯と今後の対策について表(1)-2に示す。先に述べたように、1996年に不法投棄が行われ、1997年に発覚した。現地調査等を踏まえ、2002年に汚染拡散防止対策として鉛直遮水壁及びキャッピングが施され、VOC除去を目的に廃棄物層内の汚水を「揚水－処理－処理水の注入」を繰り返すフラッシングが開始された。2007年にVOC除去を目的とした修復事業は終了した。2009年に1,4-ジオキサンが環境基準に追加され、当該汚染現場でも分析したところ、廃棄物層内及び周辺地下水から1,4-ジオキサンが検出された。再び現地調査が行われ、2012年より、1,4-ジオキサンの汚染拡散防止を目的とした廃棄物層内の地下水揚水、遮水壁外の揚水処理が開始された。2017年11月には、1,4-ジオキサンが高濃度で検出された廃棄物(全体量のおおよそ2/3)を撤去処理し、現在、遮水壁内外の地下水揚水処理により、1,4-ジオキサンによる地下水汚染を修復しているところである。本事業は、特措法の対象となっていることから、2023年3月末までに修復事業を終える予定である。



図(1)-2 当該汚染現場の平面図



図(1)-3 不法投棄現場の代表的な断面の見取り図

表(1)-2 三重県桑名不法投棄現場の修復対策の経緯と今後の対策予定

年	出来事
1996	不法投棄
1997	不法投棄が発覚
2002	鉛直遮水壁等設置、VOC除去を目的に廃棄物層に対してフラッシング開始
2007	VOCsによる地下水汚染修復完了、揚水ポンプ等の停止
2009	1,4-ジオキサン環境基準追加に伴い分析、1,4-ジオキサン検出
2011.1	※観測データをシミュレーションに利用
2012.1	修復対策（第一段階） 1,4-ジオキサンの汚染拡散防止を目的に廃棄物層内の地下水揚水開始 遮水壁外の1,4-ジオキサン地下水汚染修復のために地下水用水開始 ※観測データ（～2016.9）をシミュレーションに利用
2017.11	修復対策（第二段階） 廃棄物の部分撤去完了、遮水壁内外の地下水揚水処理開始
2023.3	事業終了予定（平成34年度末）

3.1.3 当該汚染現場の課題

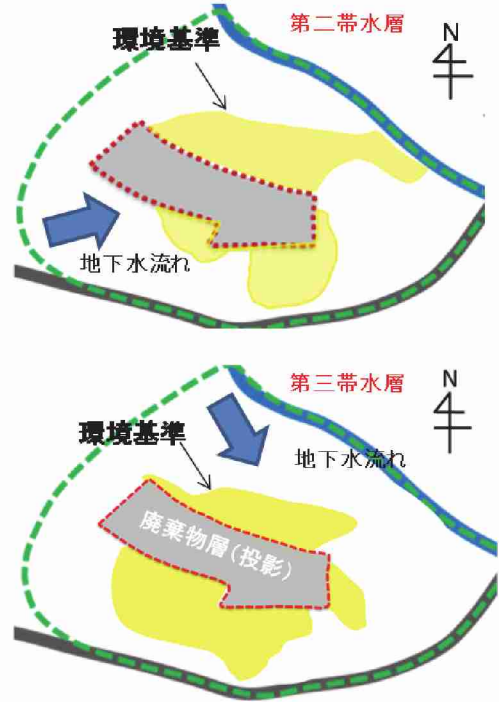
当該汚染現場の課題を以下にまとめる。

1) 1,4-ジオキサンの地下水汚染機構が不明

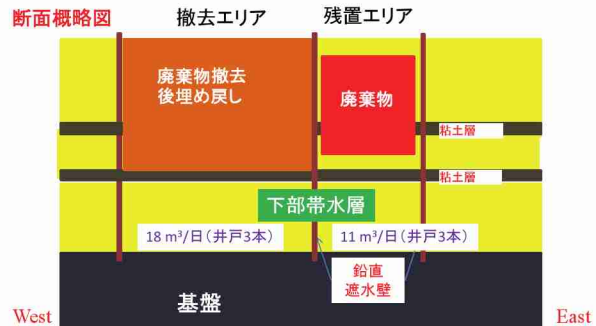
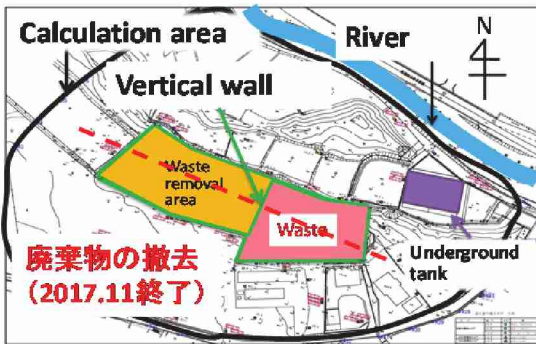
図(1)-4は、2011年時点で第二帯水層と第三帯水層の環境基準値を超えて1,4-ジオキサンが検出された領域を示している。図(1)-3に示したように、廃棄物層は第二帯水層までしか存在しないのに、第三帯水層の汚染が見られ、かつ地下水流れに逆らうように分布している。また、2002年に鉛直遮水壁（スラリー壁+シート）が第三帯水層の下部の難透水層まで設置されているにもかかわらず、第二、及び第三帯水層の遮水壁外の汚染が見られる点である。なぜこのような汚染分布になったのか、数値シミュレーションにより明らかにする必要がある。

2) 廃棄物の部分撤去後の修復対策の効果予測

2017年11月に図(1)-5に示す箇所の廃棄物の部分撤去が完了し、廃棄物撤去後の埋め戻し後、下部帯水層の地下水揚水処理が開始される予定である。また、残置された廃棄物層についても、廃棄物層内汚染水を揚水－処理－処理水の注入によるフラッシングにより1,4-ジオキサンの修復が行われることになっている。撤去エリアと残置エリアの地下水の修復目標は、排水基準値である0.5 mg/Lとされているが、修復期限目標である2023年3月末までに達成できるかどうか、不明な点



図(1)-4 1,4-ジオキサン環境基準超過領域（2011年時点、上：第二帯水層、下：第三帯水層）



図(1)-5 廃棄物部分撤去エリアと廃棄物残置エリア

が課題である。数値シミュレーションによる修復効果予測により、達成可能であるかどうか評価が必要である。

3) 追加対策や修復期限延長などの検討

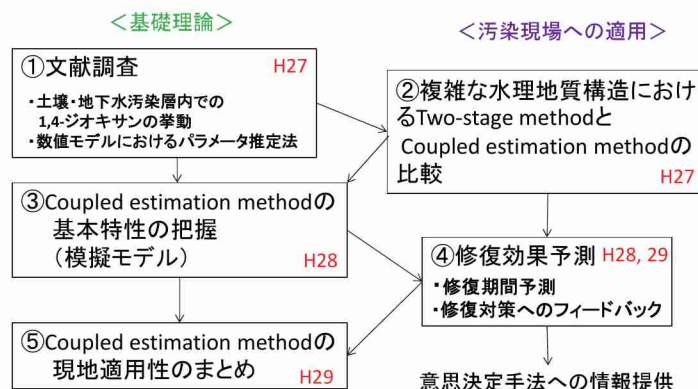
2023年3月末までに、遮水壁外の地下水は環境基準値（0.05 mg/L）以下、遮水壁内の地下水および廃棄物層内の水は排水基準値以下にまで修復を終えることを目標としているが、修復の進捗状況によっては、揚水井戸の追加や揚水量の変更といった追加対策を行う、あるいは修復期限を延長するなどの措置が必要となるかもしれない。数値シミュレーションによって、対策の進捗状況を模擬し、必要な措置を予め検討することができる。

3.2 研究開発の手順

上記、1)～3)の現場の課題を解決するために、図(1)-6に示す手順で数値シミュレーション手法の開発を行った。

まず①文献調査により、土壌・地下水汚染層内での1,4-ジオキサンの挙動及び数値モデルにおける透水係数等のパラメータ推定に関する情報を整理した。次に②当該現場に対して、2つの推定方法を用いて透水係数等のパラメータ推定を行い、推定された1,4-ジオキサンが観測値をどの程度表現できるか比較した。

次に本研究で開発したパラメータ推定のアルゴリズムを検証するために、模擬モデルを用いて③Coupled estimation methodの基本特性の把握を行った。その基本特性を踏まえ、④当該汚染現場のパラメータ推定を再度行い、今後修復対策が実施された場合の、地下水中の1,4-ジオキサン濃度の減衰の予測を行った。揚水量等の感度解析を行い、今後修復対策を実施する上での考慮点や課題について言及した。これらの情報は、もう一つのサブテーマである「Ⅱ-2 意思決定手法の開発」での被験者への情報提供に利用される。最後に⑤Coupled estimation methodを、他の汚染現場へ適用する際の適用性についてまとめる。



図(1)-6 数値シミュレーションの研究開発の手順

3.3 文献調査

3.3.1 土壌・地下水汚染層内での1,4-ジオキサンの挙動

1,4-ジオキサンによる地下水汚染対策上の課題を絞り込むため、環境中における挙動を把握するのに必要な物性、及び現時点で適用されている1,4-ジオキサンの修復技術に関する文献調査を行った。

3.3.2 数値モデルにおけるパラメータ推定法

当該汚染現場を対象に数値モデルを構築するにあたり、透水係数、有効間隙率、分散能のパラメータを、現地観測データを踏まえて決定する必要がある。観測値のもつ情報をできるだけ有効に活用できるパラメータ推定手法について文献を調査した。

3.4 複雑な水理地質構造におけるTwo-stage methodとCoupled estimation methodの比較

上記文献調査より、Two-stage methodとCoupled estimation methodが存在し、その利用し易さ、計算時間が短時間で済むなどによりTwo-stage methodの方がよく利用されていることが分かった。しかし、Coupled estimation methodの方が、濃度情報の持つトレーサーとしての流れの情報が活用できることが分かった。ここでは、当該現場へ2つのパラメータ推定方法を適用し比較を行った。

3.5 Coupled estimation methodの基本特性の把握

3.4節での結果、数値シミュレーションにより当該現場での1,4-ジオキサン濃度分布はある程度表現で

きたものの、課題が残った。すなわち本研究で開発したパラメータ推定のアルゴリズムを検証するために、2種類の模擬モデル（点源汚染モデルと廃棄物層モデル）を作成し、透水係数、有効間隙率及び分散能を与え、模擬観測データを生成した。次に、模擬観測データを用いて、逆に透水係数、有効間隙率及び分散能を推定し、元々の設定値と合致するかどうか確かめた。また、透水係数、有効間隙率及び分散能の3つのパラメータ推定における初期値の影響や同時に推測するパラメータ数などの考察を加えた。

3.6 数値シミュレーションによる修復効果予測と修復対策へのフィードバック

3.4節で抽出された課題として、遮水壁設置の時期や地下水揚水などの修復履歴を考慮したモデル化が必要であることが分かったので、修復履歴を考慮し再度Coupled estimation methodによるパラメータ推定を試みた。また、3.5節より透水係数と有効間隙率は、トレードオフの関係にあり、片方が決まると他方も決まることから、オーダーで変化する透水係数の推定を優先し、全17層の透水係数値の感度解析を行った。感度解析より、特に感度の大きい5つの層を抽出し、5つの透水係数と5つの縦分散能の推定を行った。

次に、1,4-ジオキサン対策の第一段階として実施された、廃棄物層内の地下水位低下と周辺地下水の揚水処理を考慮したモデル化を行い、その期間の1,4-ジオキサンが減衰していく非定常データを用いて再度パラメータ推定を行った。

最後に、第二段階として実施される廃棄物の部分撤去後の地下水揚水処理による修復効果予測を行い、排水基準値を期限内に達成できるかどうか数値シミュレーションにより評価した。さらに地下水揚水量について感度解析を行うなど、数値シミュレーションにより得られた知見や課題、考慮事項等を指摘した。

3.7 Coupled estimation methodの現地適用性のまとめ

最後に、本研究でその有効性が確かめられたパラメータ推定方法であるCoupled estimation methodを現地へ適用する際の考慮事項等についてまとめた。

4. 結果及び考察

4.1 文献調査

4.1.1 土壌・地下水汚染層内での1,4-ジオキサンの挙動

1) 1,4-ジオキサンとは

1,4-ジオキサンは、1,1,1-トリクロロエタンなどの塩素系有機溶剤の安定剤として広く用いられてきており⁶⁾、基準設定される以前にも、不法投棄現場や最終処分場において高濃度で検出された例が報告されてきた⁷⁻⁹⁾。特措法の支援を受けた汚染現場では、塩素系有機溶剤で汚染されていたため、多くの現場で1,4-ジオキサンによる汚染が発覚し、現在もなお、修復対策が行われている。

2) 環境中での挙動

①基本物性

1,4-ジオキサンの環境中の挙動を把握するために、1,4-ジオキサンの基本的物性を表(1)-3に示す。

次に、特に重要な物性である揮発性、水溶解性、土壌吸着性、生物分解性について他の汚染物質である揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs）と比較しながら説明する。主として、著書⁶⁾を参考にした。

②揮発性

揮発性に関連する物性として、分子量、蒸気圧、蒸気の比重、拡散係数、ヘンリー定数について表(1)-4に示す。蒸気圧はトリクロロエチレン（TCE）やテトラクロロエチレン（PCE）と同程度であり、1,4-ジオキサン原液から揮発はあるが、ヘンリー定数については、他のVOCに比べて3桁も小さいことから揮発量は極めて小さいと考えられる。

表(1)-3 1,4-ジオキサン¹⁰⁾の物理化学的性質

Property	Value
Chemical Abstracts Service (CAS) Number	123-91-1
Physical Description (physical state at room temperature)	Clear, flammable liquid with a faint, pleasant odor
Molecular weight (g/mol)	88.11
Water solubility	Miscible
Melting point (°C)	11.8
Boiling point(°C) at 760 mm Hg	101.1
Vapor pressure at 25°C (mm Hg)	38.1
Specific gravity	1.033
Octanol-water partition coefficient (log K _{ow})	-0.27
Organic carbon partition coefficient (log K _{oc})	1.23
Henry's law constant at 25°C (atm m ³ /mol)	4.80×10 ⁻⁶

表(1)-4 揮発性に関連する物性値の比較

Compound	Molecular Weight (g/mol)	Vapor Pressure (mm Hg, 25°C)	Vapor Density Relative to Air (g/cm ³)	Diffusivity (cm ² /s)	Henry Constant (atm m ³ /mol)
1,4-Dioxane	88.1	38.09 ¹¹⁾	3.03 ¹²⁾	0.229 ¹³⁾	4.80×10 ⁻⁶ ¹⁷⁾
Methyl Chloroform	133.42	100 ¹⁴⁾	4.63 ¹²⁾	0.078 ¹³⁾	8.00×10 ⁻³ ²⁰⁾
Dichloromethane	84.93	355 ¹⁴⁾	2.93 ¹⁵⁾	0.101 ¹³⁾	3.25×10 ⁻³ ¹⁹⁾
Trichloroethylene	131.39	60 ¹⁴⁾	4.53 ¹⁶⁾	0.079 ¹³⁾	9.85×10 ⁻³ ¹⁹⁾
Tetrachloroethylene	165.83	14 ¹⁴⁾	5.7 ¹⁶⁾	0.072 ¹³⁾	1.77×10 ⁻² ¹⁸⁾

③水溶解性

水溶解性の測定例を表(1)-5に示す。他のVOCと比べて、極めて水への溶解度が高いことが分かる。先のヘンリー定数とあわせて考えると、水に溶解した1,4-ジオキサンからの揮発は極めて小さくなると考えられる。

表(1)-5 VOCと1,4-ジオキサンの溶解度の比較

Compound	Solubility (mg/L)	Temperature (°C)
1,4-Dioxane	213,900 ²¹⁾	25
Methyl Chloroform	1,334 ²²⁾	25
Dichloromethane	20,000 ²³⁾	25
Trichloroethylene	1,280 ²⁴⁾	25
Tetrachloroethylene	200 ²⁵⁾	25

④収着性

表(1)-6に、VOCと1,4-ジオキサンの有機炭素吸着係数及び分配係数の計算例を示す。一般に有機炭素吸着係数が大きいほど、土壌粒子中の有機物に収着しやすいと考えられている。1,4-ジオキサンは他のVOCよりも小さい。よって、土壌有機物割合 f_{oc} との積である分配係数も他のVOCと比較して小さいため、収着しづらいと考えられる。しかし、土壌の中には、泥炭のように有機物割合が高い土壌も存在する。その場合は、分配係数は大きな値となるため、土壌の収着は無視できない場合もある。

表(1)-6 VOCと1,4-ジオキサンの有機炭素吸着係数および分配係数の計算例

Compound	Log K _{oc}	Estimated K _d (K _{oc} × f_{oc}) f_{oc} is assumed to be 0.1.
1,4-Dioxane	1.23 ²⁰⁾	0.10
Methyl Chloroform	2.18 ²³⁾	15.2
Dichloromethane	0.944	0.88
Trichloroethylene	2.1	12.6
Tetrachloroethylene	2.56	36.4

⑤生物分解性

生物分解性に関しては包括的な情報整理は未だ行われておらず、文献調査等から生物分解性のランキングを行ったSyracuse Research CorporationのGIODEGと呼ばれるデータベースがある。そのデータベースによると、1,4-ジオキサンは、好気・嫌気条件共に、biodegrades sometimes(BST), biodegrades slowly (Slow), biodegrades fast (Fast)の3段階の内、Slowに分類されている (Syracuse Research Corporation, BIODEG, Syracuse Research Corporation, 2007)

また、実際の汚染現場での1,4-ジオキサンの微生物分解は報告されていないが、ラボ実験では、1,4-ジオキサンの微生物分解が、表(1)-7のように報告されている。

国内では、*Pseudonocardia dioxanivorans* D17を用いた生物処理リアクターの研究が行われている²⁶⁾。

表(1)-7 1,4-ジオキサンの微生物分解報告例 (ラボ実験)

Summary		Reference
Substrate: 1,4-Dioxane (DX) alone		
Pure culture	Six <i>Rhodococcus</i> strains tests; none grew on DX alone.	27)
	<i>Mycobacterium vaccae</i> Strain JOB5 catabolized 100 ppm DX < 50%, that is, growth not supported.	28)
	Isolated Strain CB1190 from THF (Tetrahydrofuran) enrichments; DX degraded at 30 °C in 18 h from 4 mM to 10 µM without THF.	29)
	<i>Rhodococcus</i> Strain DEE5151 from diethyl ether enrichment cultures did not degrade DX.	30)
	Isolated <i>Pseudonocardia dioxanivorans</i> , the only known pure culture that grows on DX alone. Cell grew at 30°C for up to 28 days.	31)
	DX served as a growth substrate for <i>Pseudocardia dioxanivorans</i> Strain CB1190 and <i>Pseudocardia benzenivorans</i> Strain B5.	32)
Mixed culture	No oxygen demand on DX at 30°C for 72-96 h.	33)
	No oxygen demand in a 20-day BOD test on DX. No biodegradation of DX by sewage cultures at 1 year, aerobic shaker bath at 30°C achieved 44.5% DX removal in 32 days including a 10-day lag.	34)
	DX completely degraded at 150 mg/L; sludge microbes utilize DX as sole source of carbon and energy. Incomplete biodegradation at concentration of > 150 mg/L; by-product toxicity indicated.	35)
	Soil microbes did not degrade DX aerobically or anaerobically on representative groundwater samples.	36)
Fungi and other	<i>Aureobasidium pullulans</i> grew on DX after lag of 36 h, 90% of 50 ppm DX was degraded in the next 36 h.	37, 38)
	Fungi from dioxane-contaminated site soils did not degrade DX.	36)
	<i>Cordyceps sinensis</i> (a fungal insect pathogen) cultivated with DX as sole source of carbon; DX degradation nearly complete (90%) after 3 days. Degradation product was ethylene glycol.	39)
Substrate: 1,4-dioxane with THF as cometabolite		
Pure culture	Six <i>Rhodococcus</i> strains tested; DX completely degraded with 7.5 mM THF.	27)
	Biodegradation of DX with THF by <i>Pseudonocardia</i> sp. Strain ENV478.	40)
Mixed	Complete biodegradation of DX and THF by sludge	41)

culture	microbes at 35°C, biodegradation of DX dependent upon THF presence.	
	Biodegradation of DX with THF as cometabolite; DX without THF failed to stimulate biodegradation by soil microbes.	42)
Fungi and other	Phytoremediation of DX with hybrid poplars, CB1190+THF; 100 mg/L DX removed within 45 days with cosubstrates THF and 1-butanol.	43)
Substrate: 1,4-Dioxane with other cometabolites		
Pure culture	<i>Mycobacterium vaccae</i> Strain JOB-5 cometabolically degrades cyclic ethers after growth on straight-chain/branched alkanes; catalyzed by alkane monooxygenases.	44)
	Cometabolic transformation of DX observed for monooxygenase-expressing strains induced with methane, propane, tetrahydrofuran and toluene; <i>Methylosinus trichosporium</i> Strain OB3b, <i>Mycobacterium vaccae</i> Strain JOB5, <i>Pseudonocardia</i> Strain KR1, <i>Ralstonia pickettii</i> PKO1, <i>Burkholderia cepacia</i> Strain G4, and <i>Rhodococcus</i> Strain RR1.	45)
	Biodegradation of DX with sucrose, lactate, yeast extract, 2-propanol, and propane, by <i>Pseudonocardia</i> sp. Strains ENV478 and env425.	41)
Fungi and other	Graphium sp., a filamentous fungus, degrades DX by cometabolism after growth on THF or gaseous alkanes, catalyzed by cytochrome P450 monooxygenase.	46)
	Phytoremediation with 1-butanol.	43)

⑥1,4-ジオキサンの環境中の挙動のまとめ

以上より、土壌・地下水汚染現場での1,4-ジオキサンの挙動については以下の様に考えられる。

- (1) 1,4-ジオキサン原液からの揮発は無視できないが、極めて水溶解度が高いため、大半の1,4-ジオキサンは、土壌水や地下水中に溶存して存在する。しかも、ヘンリー定数が他のVOCよりも極めて小さいことから、溶解した1,4-ジオキサンの揮発はほとんど無視しうる。
- (2) 土壌粒子への収着性については、他のVOCよりも有機炭素吸着係数が1桁程度小さいことから、基本的には無視しうる。しかし、有機物割合が多い土壌の場合は、収着を考慮しなくてはならない場合も考えられる。
- (3) 難分解性と呼ばれている1,4-ジオキサンであるが、条件が整ったラボ実験により1,4-ジオキサンの微生物分解が確認されている。しかし、実際の汚染現場での分解の報告は無いのが実情である。
- (4) 以上、地下水汚染の解析において、安全側の評価に立つならば、揮発、収着、微生物分解のいずれの現象も無視できる程小さいとして解析を行うことが好ましいと考える。

3) 修復技術

1,4-ジオキサンによる地下水汚染の修復技術としては、揚水処理を行い、促進酸化法による水処理（過酸化水素+UVまたはオゾン）が適用可能である¹⁰⁾。また、研究段階の技術として、原位置処理として化学酸化処理（オゾンのような強酸化剤を井戸に注入）やファイトレメディエーション（hybrid poplarsを利用）、バイオリアクター処理、光触媒処理（Au・TiO₂）がある⁴⁷⁾。また、分散と希釈機能によるMNAも検討されており、微生物分解も条件が整えば期待できる。例えば、Ching et al.⁴⁸⁾によれば、半減期7年間 0.099[1/y]の条件が良く合ったとの報告がある。

実規模で修復に成功しているのは、地下水揚水+生物処理or促進酸化処理（UV+過酸化水素、オゾン+過酸化水素）。また、Mohr et al.⁶⁾は、1,4-ジオキサンによる地下水汚染修復技術を表(1)-8のように整

理している。

表(1)-8 1,4-ジオキサンによる地下水汚染修復技術

Remediation Technologies	Content	Applicability to 1,4-dioxane
Air stripping	曝気により水中の汚染物質を気相へ移動させ、活性炭等により吸着処理する。	1,4-ジオキサン原液の揮発性は高いものの、水溶解性が大きいいためエアストリッピングによる除去は難しい。
Activated carbon	活性炭による水中の汚染物質を吸着し除去する。	除去率が50%以下であり、活性炭量が大量に必要であることから、実現場での利用は現実的ではない。
Natural Attenuation	揮発、吸着、微生物分解、移流・分散、希釈により濃度減衰を期待する。	主たる機構として移流・分散が期待できる。土着微生物による分解も期待できるが、その有効性を確認するためには現地調査が必要である。
Phytoremediation	植物に汚染物質の摂取させ、汚染物質を回収する。	雑種のポプラを用いた実証試験が行われ、その成果が報告されている。主な除去機構は、植物への摂取と蒸散であり、大気中の1,4-ジオキサンの半減期は小さいので、長期的にみれば有効な手法である可能性がある。
Bioremediation	微生物分解による分解であり、リアクター処理、原位置処理などの手法がある。	実験室、現地パイロット試験において、1,4-ジオキサンをエネルギー源として利用する、あるいは共代謝によって利用する微生物が確認されている。有害物質で汚染された現場であることを考慮すると、バイオスティミュレーションの条件が揃わないと高い分解率は期待できない。リアクター処理については、現場スケールで実証されているが、好気微生物のバイオオーギュメンテーションや、特定の微生物のバイオスティミュレーションに関しては実証されていない。
Chemical oxidation	オゾン、過酸化水素などの強酸化剤により分解する	化学酸化により1,4-ジオキサンを分解できる。その分解機構や反応速度について理解が進んでいる。揚水された汚染地か水中の1,4-ジオキサンについては、基準以下にまで処理できる。しかしながら、原位置処理については未だパイロット試験段階であり、ごく小さなスケールでしか実証されていない。

4.1.2 数値モデルにおけるパラメータ推定法

1) 基本方程式

式(1)-1に、一般的な地下水流れ方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q, \quad (1) \cdot 1$$

ここで、 i, j ($= 1, 2, 3$) は総和規則による表示、 k : 透水係数 [m/s]、 h : 地下水頭 [m]、 S_s : 比貯留係数[1/m]、 Q : 湧きだし項 [1/s]、 x : 空間軸 [m]、 t : 時間 [s]。なお、本研究では、地下水流れを定常状態として扱った。

汚染物質の輸送方程式は、式(1)-2から(1)-6に示す移流分散方程式を用いた。

$$nR \frac{\partial c}{\partial t} = -v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(nD_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - nrc - Q_s, (1) \cdot 2$$

$$R = 1 + \rho_d / n K_d, (1) \cdot 3$$

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij}, (1) \cdot 4$$

$$\alpha_T = \frac{1}{10} \alpha_L, (1) \cdot 5$$

ここで、 n ：有効間隙率[-]、 R ：遅延係数[-]、 c ：濃度[mg/L]、 v ：ダルシー速度[m/s]、 D ：分散係数[m²/s]、 r ：減衰定数[1/s]、 Q_s ：source and sink項[mg/L/s]、 ρ_d ：土壌粒子密度[kg/L]、 K_d ：分配係数[L/kg]、 V ：間隙速度[m/s]、 α_L ：縦分散能[m]、 α_T ：横分散能、 α_m ：分子拡散係数[m²/s]、 τ ：屈曲率、 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタである。

2) パラメータ決定法に関する既往の研究

実際の汚染現場では、地下水位や汚染物質濃度に関する実測値に基づき、透水係数、有効間隙率、分散能（縦分散能が分かれば、式(1)-5より横分散能は推測可能）を求める必要がある。このように、観測結果と合うようにこれらのパラメータを推定することは逆問題と呼ばれている。逆問題の体系的研究として、Carrera and Neumanの研究⁴⁹⁻⁵¹⁾が有名であり、Yeh⁵²⁾とCarrera⁵³⁾は、流れと輸送パラメータの逆推定に包括的なレビューを行っている。第一の問題は、輸送方程式を解く前に既知のフラックス情報が必要なことである。そのため、かつては流れ場を既知であるとして輸送方程式は解かれており、分散能の逆推定が行われていた。

Strecker and Chu⁵⁴⁾は、流れと輸送のパラメータの同時推定を初めて行った。彼らは2段階に分けて解析を行った。第1段階で輸送パラメータを仮定して透水係数を求め、第2段階で輸送パラメータを求める。しかし、このTwo-stage methodでは全ての観測情報を使い切れていない、なぜならば濃度場は透水係数の関数でもあるからである。逆に言うと、濃度の観測データはトレーサーとしての流れの情報が内在されているが、その情報が透水係数の推定に活かされていないということである。Van Rooy et al.⁵⁵⁾はtwo-stage methodとは異なる方法を用いた。第1段階ではクリジングを用いて透水係数場を求め、第2段階で汚染源と分散係数を求めた。Keidser and Rosbjerg⁵⁶⁾は、その手法を拡張しTwo-stage feed-back procedureを用いて、第1段階で輸送パラメータを仮定して透水係数をもとめ、第2段階で輸送パラメータを求め、さらにその輸送パラメータを用いて、第1段階を繰り返し、パラメータを求めている。

Wagner and Gorelick⁵⁷⁾は流れと輸送パラメータを、最小二乗法による非線形回帰問題として定式化し、制約付シンプレックス法にて最適解を求めている。Medina et al.⁵⁸⁾は最尤法によるパラメータ推定手法を提案している。Wagner⁵⁹⁾も同様の手法を用いて、流れと輸送パラメータだけでなく、汚染源の位置を事前情報無しで求めている。Sun and Yeh⁶⁰⁾は、coupled problemを広義に定義し、目的関数を流れ場と濃度場、それぞれに定義し、それらを重み付けによって結合した。そしてスカラー化し最小問題とした。Datta, B. et al.⁶¹⁾は、地下水位及び濃度の観測値と計算値のそれぞれの二乗誤差を観測値で除して相対化したものの総和を最小化し、流れと輸送パラメータ及び汚染源の同時推定を行っている。

ここで、上記のSun and Yeh⁶⁰⁾の目的関数は式(1)-6の通りである。

$$F_{exist_1} = w_h \sum \frac{(h_{cal} - h_{obs})^2}{\sigma_h^2} + w_c \sum \frac{(c_{cal} - c_{obs})^2}{\sigma_c^2} \quad (1) \cdot 6$$

ここで、 h_{cal} 及び c_{cal} は地下水位と濃度の計算値であり、 h_{obs} 及び c_{obs} 地下水位と濃度の観測値である。 w_h 及び w_c 重み付けであり、0か1の値をとる。各総和記号は、地下水位及び濃度の各観測数の

総和を示す。

一方、Datta et al.⁶¹⁾の目的関数は、式(1)-7と式(1)-8の通りである。

$$F_{exist_2} = \sum w_h (h_{cal} - h_{obs})^2 + \sum w_c (C_{cal} - C_{obs})^2, \quad (1)-7$$

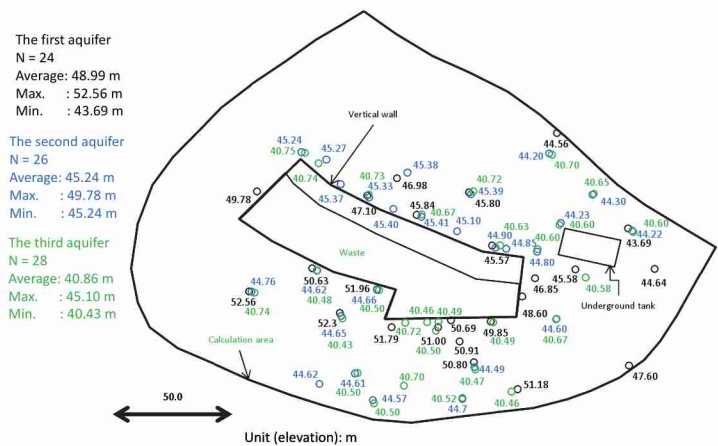
$$w_h = \frac{1}{(h_{obs} + \theta)^2}, \quad w_c = \frac{1}{(C_{obs} + \epsilon)^2}, \quad (1)-8$$

ここで、 θ 及び ϵ は一定値であり、100 [m] と 100 [mg/L]である⁶¹⁾。この目的関数においては、観測値と計算値の二乗和を標準化するために、重み付けが用いられている。

4.2 複雑な水理地質構造におけるTwo-stage methodとCoupled estimation methodの比較

4.2.1 数値シミュレーションパラメータ推定に使用する観測データのスクリーニング

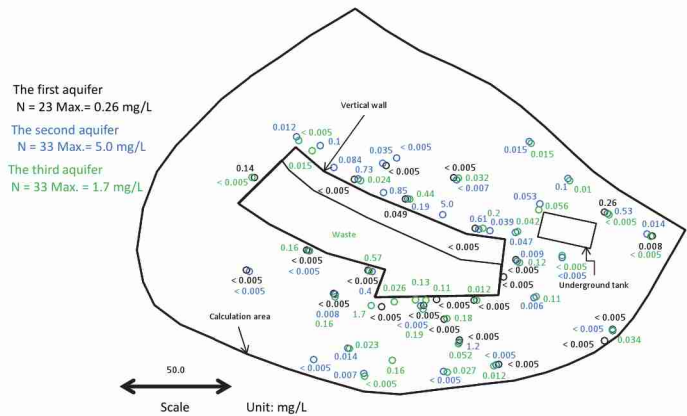
本研究では、1,4-ジオキサン⁶²⁾の修復効果を推定する数値モデルを構築することを目的としている。そのため今年度は、2012年に揚水等の1,4-ジオキサン地下水汚染対策を開始する前の状態を模擬するパラメータ決定を行う。図(1)-7及び図(1)-8に、1,4-ジオキサン地下水汚染対策開始の前年にあたる2011年1月時点の地下水位と1,4-ジオキサン濃度の帯水層別の測定値を示す。これらの値を観測値として以下、解析を行うこととした。なお、第一帯水層、第二帯水層及び第三帯水層の観測値は、それぞれ24箇所、26箇所、そして28箇所になる。



図(1)-7 数値シミュレーションで用いた地下水位の観測値（黒：第一帯水層、青：第二帯水層、緑：第三帯水層）

4.2.2 3次元地形・地質モデルの構築

当該地の地表は、高位段丘堆積物の小起伏地形に覆われている。高位段丘堆積物は、段丘の標高30～160mの頂部や斜面上部に点在しており、明瞭な段丘面をしている。段丘堆積物の下部には、前期更新世の堆積岩類が分布し、その下部には後期中新世から鮮新世の堆積岩類が分布している。ボーリング調査結果と地質情報の対比により、後期中新世から鮮新世の堆積岩類は東海層群であり、当該地の基盤層であると考えられる²⁾。この基盤層は主に泥砂互層からなっており、東海層群上部層の大泉累層であると思われる。一方、段丘堆積物と基盤層の間に分布する堆積物は、基盤層と同じような堆積をした礫質土が存在し、その特徴から力尾累層であると考えられる。力尾累層⁶²⁾とは、東海層群上部の大泉累層の上に重なる礫質堆積物であり、大泉累層とほぼ調和的に変形し、丘陵そのものを構成している。これらの情報を加味した、当該現場の地質構造の模式図を図(1)-9と表(1)-9に示す。



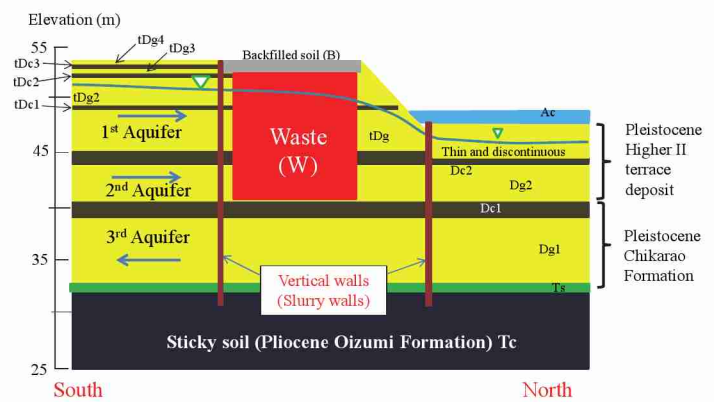
図(1)-8 数値シミュレーションで用いた1,4-ジオキサン濃度の観測値（黒：第一帯水層、青：第二帯水層、緑：第三帯水層）

次にボーリング柱状図より得られた地質情報に基づき、3次元の地形・地質モデルを構築した。全92のボーリングのデータを用いて、図(1)-10に示す14の測線の地質構造の断面図を作成しそれらの情報を、GEOModeler（詳細は後述）に入力し、同一な地質をなめらかな線にて内挿補間し、図(1)-11に示すような3次元地形・地質モデルを構築した。構築の際には、自然地盤9層の他に、廃棄物層及び鉛直遮水壁（難透水性地盤までの深さに応じて18.5 m ～ 25 m）、農業集落水处理施設の地下埋設タンクを人工物として入力した。

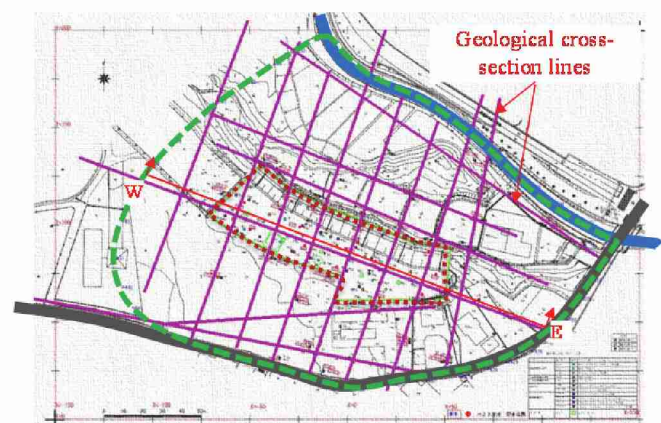
表(1)-9 当該現場の地質構造対応表

Period	Formation	Aquifer	Materials	Symbols	Color ¹⁾
Artificial structure			Waste	W	Red
			Backfilled soil	B	Grey
Pleistocene	Higher II terrace deposit		Sticky soil (3)	Ac	Light blue
			Gravelly soil	tDg4	Yellow
			Sticky soil	tDc3	Dark blue
			Gravelly soil	tDg3	Light yellow
			Sticky soil	tDc2	Dark blue
		The first aquifer	Gravelly soil	tDg2	Light yellow
			Sticky soil	tDc1	Dark blue
		The first aquifer	Gravelly soil	tDg	Light yellow
			Sticky soil	Dc2	Dark blue
		The second aquifer	Gravelly soil	Dg2	Orange
Pleistocene	Chikarao Formation		Sticky soil	Dc1	Dark blue
		The third aquifer	Gravelly soil	Dg1	Light yellow
			Sandy soil	Ts	Green
Pliocene	Oizumi Formation		Sticky soil (base)	Tc	Dark grey
Artificial structure			Wall	Wall	Brown
			Tank	Ta	Dark blue

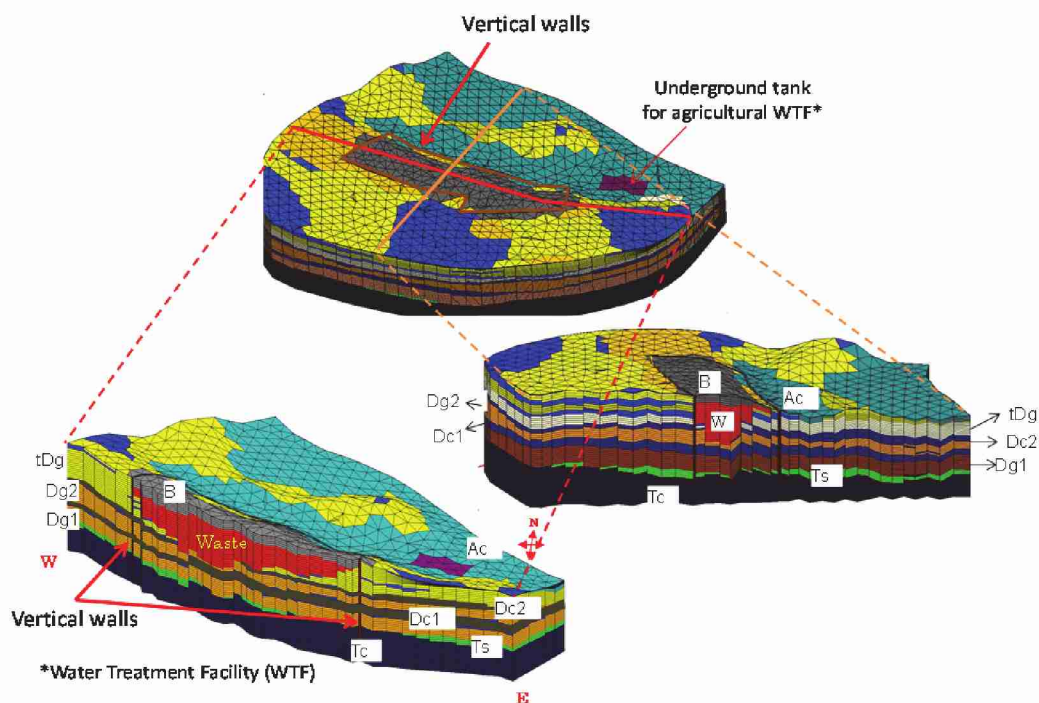
1): Color is used in Figure (1)-11.



図(1)-9 当該現場の地質構造の模式図



図(1)-10 地形・地質モデル作成のために用いられた地質断面の側線



図(1)-11 当該現場の3次元地形・地質モデル

4.2.3 境界条件及び初期値

先に述べたように、各帯水層の地下水位データ（第一帯水層24箇所で標高44～52 m、第二帯水層26箇所で44～45.5 m、第三帯水層28箇所で40.5～40.7 m）を用いて地下水位等圧線を作成し、それらの値に基づき、境界条件となる地下水位を設定した。降雨量は、地下水位と降雨量の関係より、これまでそれほど因果関係は見られないため、極めて小さい値である0.05 mm/dayとした。

移流・分散解析については、廃棄物層全体に相対濃度1を与え計算期間の15年間一定とした。境界条件については各帯水層の上流側に濃度を0として計算期間の15年間一定とした。また降雨についても濃度を0として計算した。

4.2.4 推定すべきパラメータ

two-stage methodとcoupled estimation methodを比較するために、まず主な地下水流れを形成している第一帯水層（tDg層）、第二帯水層（Dg2層）及び第三帯水層（Dg層）の3つの帯水層の透水係数値, k_1 , k_2 , k_3 , 有効間隙率, n , 縦分散能, α_L を変数として観測値に基づき求めることとした。なお、有効間隙率と縦分散能は各層で共通の値とした。上記以外の地層の透水係数、や他のパラメータである遅延係数や減衰定数については、表(1)-10及び表(1)-11に示す（*印は現地測定値を表す）また、盛土、廃棄物層、遮水壁、地下タンクについては、古市²⁾による検討を参考に与えた。なお、遅延係数及び減衰定数については、先の文献調査より、1及び0として計算を行った。

表(1)-10 透水係数値

Layer	Parameters
	k [m/day]
1. Waste (W)	8.6×10^{-3}
2. Backfilled soil (B)	8.6×10^{-1}
3. Sticky soil (Ac)	2.3×10^{-4}
4. Gravelly soil (tDg4)	8.2×10^{-1}
5. Sticky soil (tDc3)	2.3×10^{-4}
6. Gravelly soil (tDg3)	8.2×10^{-1}
7. Sticky soil (tDc2)	2.3×10^{-4}
8. Gravelly soil (tDg2)	8.2×10^{-1}
9. Sticky soil (tDc1)	2.3×10^{-4} *
10. Gravelly soil (tDg)	8.2×10^{-1} *
(the first aquifer)	Variable k_1
11. Sticky soil (Dc2)	2.3×10^{-4} *
12. Gravelly soil (Dg2)	1.2×10^0 *
(the second aquifer)	Variable k_2
13. Sticky soil (Dc1)	6.2×10^{-5} *
14. Gravelly soil (Dg1)	2.0×10^{-1} *
(the third aquifer)	Variable k_3
15. Sandy soil (Ts)	2.7×10^{-1} *
16. Sticky soil (base) (Tc)	2.9×10^{-4} *
17. Vertical wall (Wall)	1.72×10^{-4}
18. Tank (Ta)	1.0×10^{-7}

表(1)-11 輸送に関するパラメータ値

Parameters	Value
Effective porosity, n	Variable [-]
Longitudinal dispersivity, α_L	Variable [m]
Retardation factor, R	1.0 [-]
Decay constant, r	0 [1/day]

4.2.5 パラメータ推定方法の比較

1) 本研究でのパラメータ推定方法

本研究では式(9)～式(13)のように、Sun and Yeh⁶⁰⁾とDatta et al.⁶¹⁾とは異なる目的関数を用いて、透水係数、有効間隙率及び分散能を求める。すなわち、two-stage methodでは、

$$H^r = \sum w_h (h_{cal}^r - h_{obs}^r)^2, \quad (1)-9$$

$$C^r = \sum w_c (c_{cal}^r - c_{obs}^r)^2, \quad (1)-10$$

一方、coupled methodでは、

$$F = H^r + \lambda C^r, \quad (1)-11$$

ただし、

$$h_{obs}^r = \frac{h_{obs} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c_{obs}^r = \frac{c_{obs}}{c_{max}}, \quad (1)-12$$

$$h_{cal}^r = \frac{h_{cal} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c_{cal}^r = \frac{c_{cal}}{c_{max}}, \quad (1)-13$$

である。ここで、上付文字の r はその値が相対値であることを示す。 λ は重み付けであり、地下水位情報に対して濃度情報をどの程度加味するかを表す。 h_{max} と h_{min} は地下水位の最大値と最小値であり、 c_{max} は濃度の最大値である。 w_h 及び w_c は、観測値の重み付けである。本研究における目的関数と既存のSun and Yeh⁶⁰⁾及びDatta et al.⁶¹⁾との違いは、相対化と重み付けにある。本研究では、地下水位のデータは

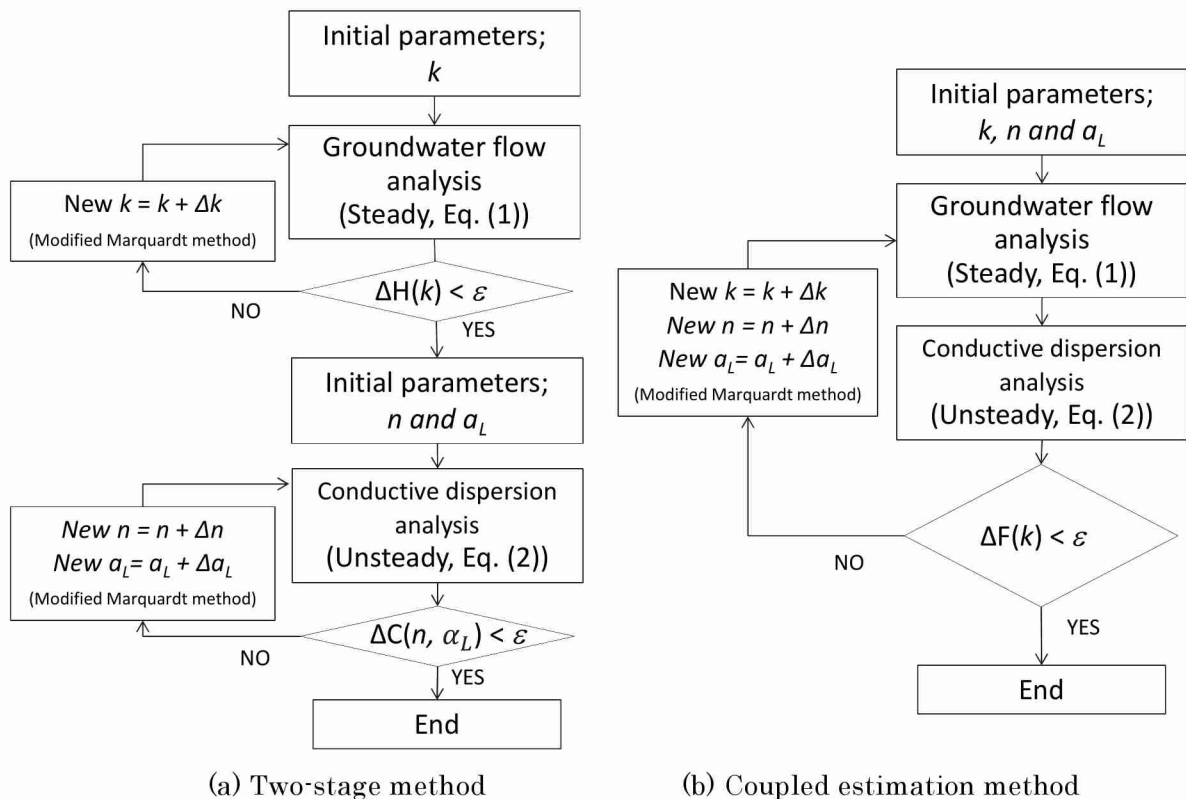
観測値の最大値と最小値を用いて、濃度は濃度観測値の最大値を用いて相対化を行っている。加えて、重み付けについてはSun and Yeh⁶⁰⁾との0か1ではなく、本研究では実数値として λ を定義し、地下水位情報に比べて濃度情報をどの程度加味すれば良いのかを考察できるようにした。

本研究では、GEOModeler (GMLabo社、<http://www.gmlabo.co.jp/>) を用いて3次元数値モデルを作成し、地下水流れと1,4-ジオキサン⁶⁰⁾の輸送をシミュレートする。GEOModeler は、有限要素法をベースとしたソフトウェアであり、地下水流れ、溶質輸送及び熱輸送の問題を、Euler-Lagrange法に基づき扱うことができる。

図(1)-12に、two-stage method及びcoupled methodの計算アルゴリズムを示す。two-stage methodにおいては、地下水流れを表す式(1)-1がまず解かれ、観測地下水位と計算地下水位の誤差の二乗和である H^* が最小となるように透水係数値が求められる。その際には修正マルカート法を用いた⁶³⁾。次に、観測濃度値と計算濃度値の誤差の二乗和である C^* が最少となるように、有効間隙率及び分散能が求められる。

一方、coupled methodでは、式(1)-1及び式(1)-2の地下水流れと輸送方程式を解いてから、式(1)-11の目的関数 F が最小になるように、透水係数、有効間隙率及び分散能を同時に求める。両者の違いは、coupled methodにおいて、透水係数の推定の際に濃度情報を加味できることである。

1,4-ジオキサンは、多くの場合、土壤に収着しづらく、微生物分解も期待できないため、地下水流れに沿って1,4-ジオキサンは地下水中を移動する。よって、複雑な地形・地質条件の場合は、複雑化された地下水流れに沿って1,4-ジオキサンも複雑に移動する。two-stage methodでは、地下水流れ場に最も影響を及ぼすパラメータである透水係数の推定に地下水位情報しか用いていない。一方、coupled methodの場合は、透水係数の推定に濃度情報も加えて推定することができる。すなわち、地下水位の観測値と計算値で決まる誤差の二乗和が最小であることを犠牲にし、逆に濃度の観測値と計算値の誤差の二乗和を優先してパラメータを求めることで、1,4-ジオキサンの濃度分布の推定精度を向上させることができると考えた。



図(1)-12 two-stage methodとcoupled estimation methodの計算アルゴリズム

2) パラメータの最適値と誤差

表(1)-12にtwo-stage methodとcoupled methodにより求められたパラメータの値を示す。ここで、重み付け λ は0.01から10まで10倍ずつ変化を与えて計算した。two-stage methodの場合は、まず地下水位の情報を用いて、地下水位の観測値と計算値の差の二乗和である H^r が最小になるように透水係数を用いた後、濃度情報を用いて、濃度の観測値と計算値の差の二乗和である C^r が最小になるように、有効間隙率と分散能を求めている。一方、coupled methodの場合は、観測値と計算値の誤差の二乗和である H^r と C^r を重み付け λ を用いた線形和が最小になるように、透水係数、有効間隙率及び分散能を一度に求めることになる。

よって、表(1)-12から分かるように、coupled methodとの比較において、two-stage methodの場合は地下水位の観測値と計算値の誤差の二乗和である H^r が最小となっている。一方、coupled methodの場合は、濃度情報を加味しながらパラメータを求めているので、地下水位に関する精度を犠牲にして、濃度の観測値と計算値の誤差の二乗和である C を小さくするようにパラメータの最適化を図る。そして、濃度情報をどの程度考慮するか、すなわち λ が大きくなるにつれ、地下水位の誤差は大きくなり、濃度の誤差は小さくなることが分かる。

表(1)-12 求められたパラメータの値と誤差

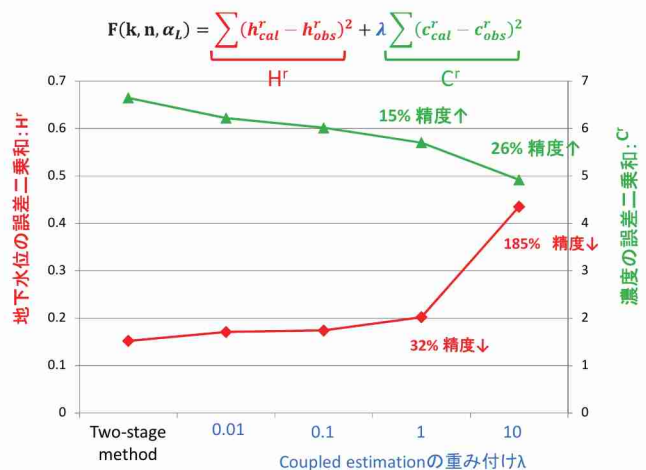
Parameters	Two-stage method	Coupled estimation method			
		$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 10$
k_1 (m/day)	4.211	0.731	0.790	0.485	0.109
k_2 (m/day)	5.170	0.674	1.223	1.440	0.005
k_3 (m/day)	0.262	0.167	0.201	0.066	0.086
n (-)	0.344	0.242	0.214	0.212	0.136
a_L (m)	4.139	5.967	1.986	3.556	2.856
Error					
H^r	0.152	0.171	0.174	0.202	0.435
C^r	6.643	6.218	6.015	5.701	4.916

この様子をわかりやすくするために、図(1)-13に地下水位及び濃度誤差の二乗和と λ の関係を示した。 λ が大きくなるにつれて、地下水位の誤差が大きくなり、濃度の誤差が小さくなることが分かる。また、 λ が10の値になると、地下水位の誤差が急に大きくなり、その割には濃度誤差の改善は進まないことも分かる。よって、今後は $\lambda=1$ の結果を用いて考察することにする。

3) 観測値と計算値の比較

図(1)-14と図(1)-15に、地下水位及び濃度の観測値と計算値の比較を示す。各図において直線が観測値と計算値が等しいラインであり、点線が、目標とする推定精度となっている。

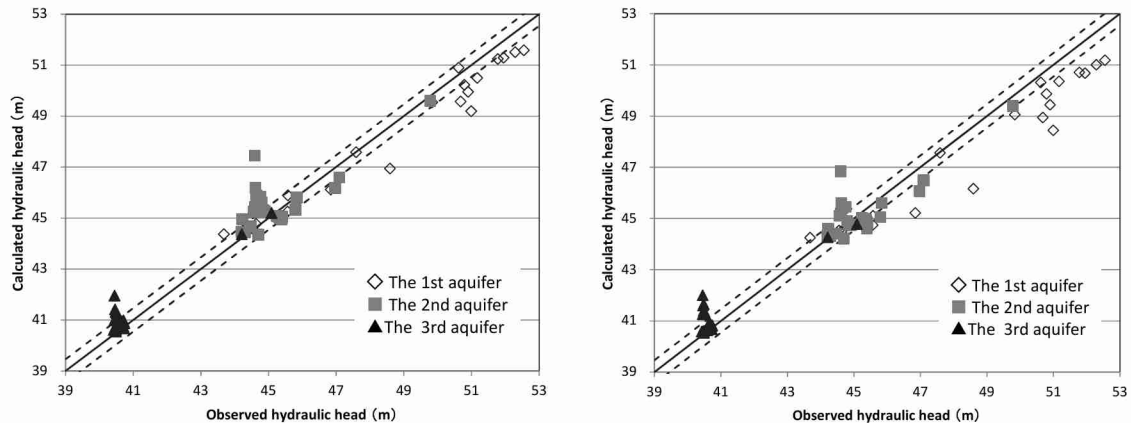
推定精度目標値については、これまでの地下水位の季節変動（測定誤差も含まれている）および1,4-ジオキサンの濃度変動（こちらも測定誤差も含まれている）を踏まえて、各井戸の標準偏差をまず求める。さらに、全ての井戸の標準偏差の平均値を算出することで、目標とすべき推定精度を算出した。その結果、地下水位に関しては、 $h_{obs} \pm 0.46$ (m)であり、濃度については $(1 \pm 0.32)c_{obs}$ (mg/L)と求められた。なお、濃度は変動係数の考え方を採用しており、各井戸の標準偏差を平均値で除したものを用いて、全井戸の平均値を求めている。



図(1)-13 推定誤差の比較

図(1)-14の地下水位に関しては、**two-stage method**に比べて**coupled method**の方が第一及び第三帯水層が直線より外れていることがわかる反面、第二帯水層の値のずれが小さくなっていることがわかる。一方、図(1)-15の濃度については、特に第二帯水層の濃度データが直線に近寄っていることが分かる。しかしながら、図(1)-15の点線丸で囲った値のように、濃度が大きい、修復にとっては重要な点であるにも関わらず、改善が不十分な地点もあることがわかる。

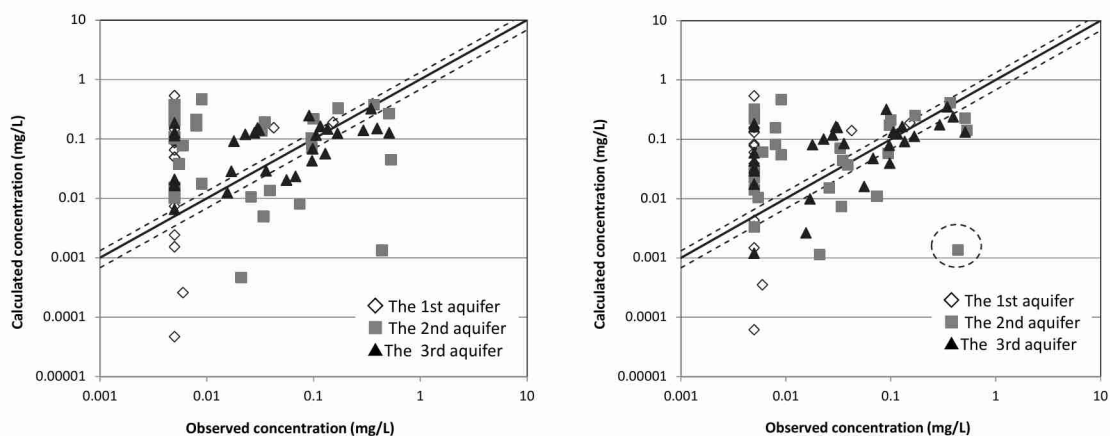
なお、1,4-ジオキサン濃度の定量限界である0.005 mg/L以下で検出されたデータは、0.005 mg/Lと入力して観測値と計算値の誤差を計算している。



(A) Two-stage method

(B) Coupled estimation method ($\lambda=1$)

図(1)-14 地下水位の観測値と計算値の比較



(A) Two-stage method

(B) Coupled estimation method ($\lambda=1$)

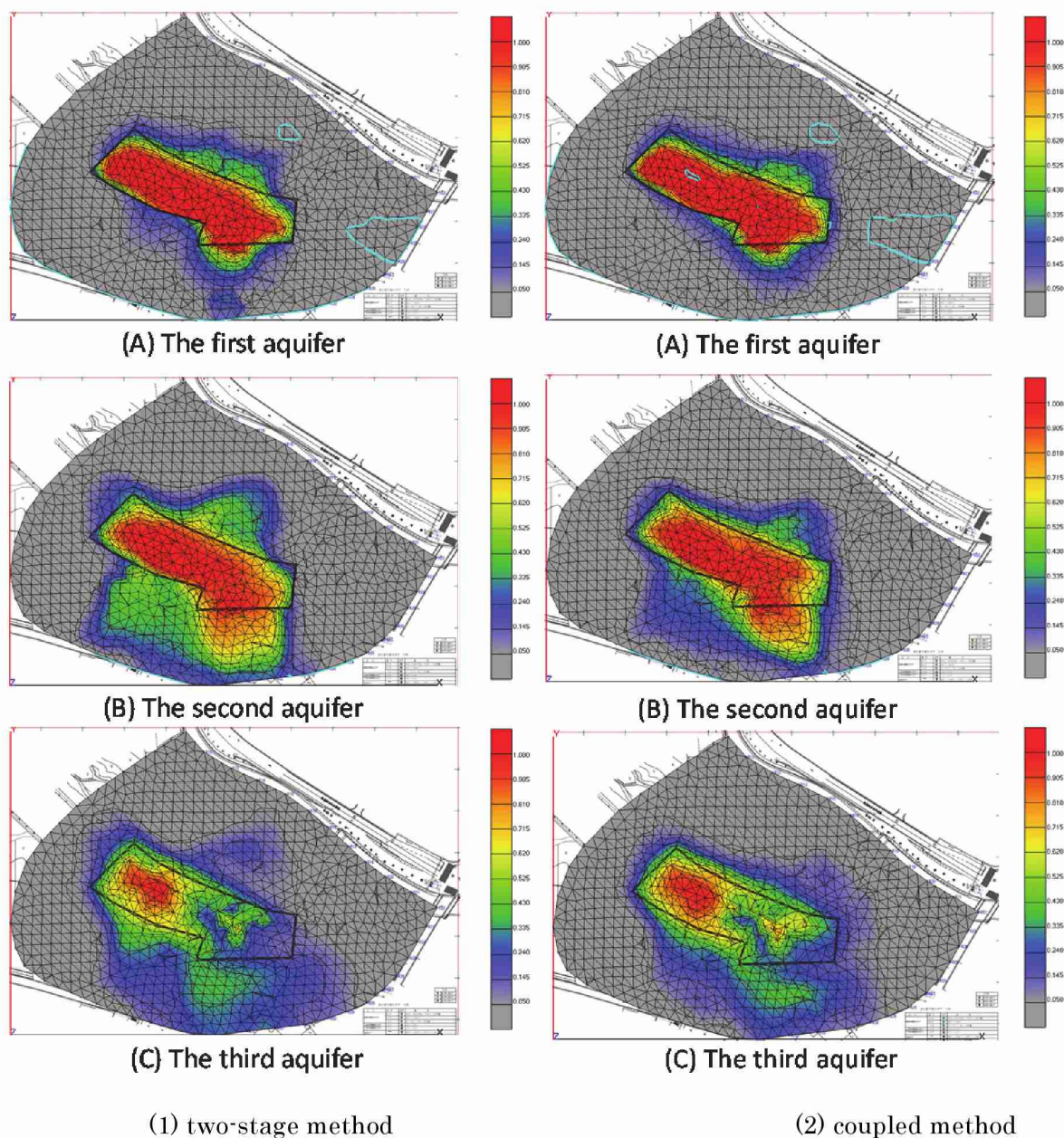
図(1)-15 濃度の観測値と計算値の比較

4) 1,4-ジオキサンの濃度分布

two-stage method及び**coupled method**によって求められた濃度コンターを図(1)-16に示す。両手法の比較において、両者の濃度分布には違いがある。表(1)-12からも分かるように、**two-stage method**の方が、全帯水層の透水係数の推定値が**coupled method**よりも大きいので、1,4-ジオキサンの広がりが、特に第二及び第三帯水層で顕著であることがわかる。

第二帯水層については、先に示した図(1)-4(上)の観測値においては廃棄物層から南西側への汚染の広がりはそれほど大きくないのに対して、図(1)-16の**two-stage method**では、かなり大きな広がりを見せており、**coupled method**の方が妥当性があると言える。一方、廃棄物層から北東方向への広がりについては、両者とも図(1)-4(上)に比べて分布の広がりが十分であるとは言えない。しかしながら、1,4-ジオキサンの移動方向としては、**coupled method**の方がより北東方向を向いて移動していると評価される。

第三帯水層については、two-stage method及びcoupled methodの両者の比較において顕著な違いは無いが、廃棄物層北側への1,4-ジオキサンの広がり方に着目すると、図(1)-4 (下)との比較においては、coupled methodの方が、観測値から作成されたコンターに近いと評価することができる。



図(1)-16 両手法による濃度分布の比較

4.2.6 本解析の課題

以上、two-stage methodとCoupled estimation methodの両者の比較においては、濃度情報の持つトレーサとしての流れの情報を透水係数の推定に活かすことができるcoupled estimation methodの方が、複雑な地下水流れ場での1,4-ジオキサンの地下水汚染分布を推定するのに有効であることを示した。しかしながら、図(1)-17に第二帯水層の観測値、計算値等をまとめるが、今回の推定は十分では無い。中には、環境基準値以上の1,4-ジオキサンが検出されている井戸で、2オーダーも推定値が小さいところもある（緑の○印）。さらに、第二帯水層北東エリアと予備南西エリア（赤で囲った領域）では、濃度分布の形状も明らかに異なることが分かる。これらの推測改善を図る必要がある。

これまでの解析の課題としては、

①手法上の課題

Coupled estimation methodでは、透水係数、有効間隙率、分散能の3つのパラメータを複数の帯水層

に渡って推定することになる(3つの帯水層であれば、最大9つのパラメータ)。透水係数は、砂や粘土など構成物質により、その値はオーダーで変化する。一方、有効間隙率は、 10^{-1} のオーダー、分散能は、スケール依存性はあるが、当該桑名不法投棄現場であれば、 $10^0 \sim 10^1$ のオーダーであろう。すなわち、探索範囲が大きく異なる上、その値の変化が結果に及ぼす感度が異なる複数のパラメータを同時推定することが果たして可能であるかという課題がある。さらに、式(1)-1と式(1)-2から分かるように、透水係数と有効間隙率は、汚染物質移動速度に対してトレードオフの関係にある。例えば、透水係数が大きくなると移動速度は大きくなり、透水係数が小さくなると移動速度は小さくなる。一方、有効間隙率は逆であり、有効間隙率が大きくなると移動速度は小さくなり、有効間隙率が小さくなると移動速度は大きくなる。すなわち、ある濃度分布を表現しうるパラメータの組合せが複数存在する可能性がある。さらに、パラメータ推定の初期値によっても推定値が異なることが考えられる。これらの点から、Coupled estimation methodの基本特性の把握を行う必要がある。

②現場のモデル化の課題
本モデルでは、1996年に1,4-ジオキサンを含む廃棄物が不法に投棄され、2011年までの15年間の計算値と観測値を比較し、パラメータを推定している。その際、2002年に設置された鉛直遮水壁についてはソフトウェアの制約上、1996年から設置されたと仮定して計算を行っている。そのため、1,4-ジオキサンの分布に違いが生じたと考えられる。このような修復履歴の変化を考慮することは、解析上極めて重要である。ソフトウェア上の制約を克服して、修復履歴を考慮した解析により、新たにパラメータを推定する必要がある。

②現場のモデル化の課題

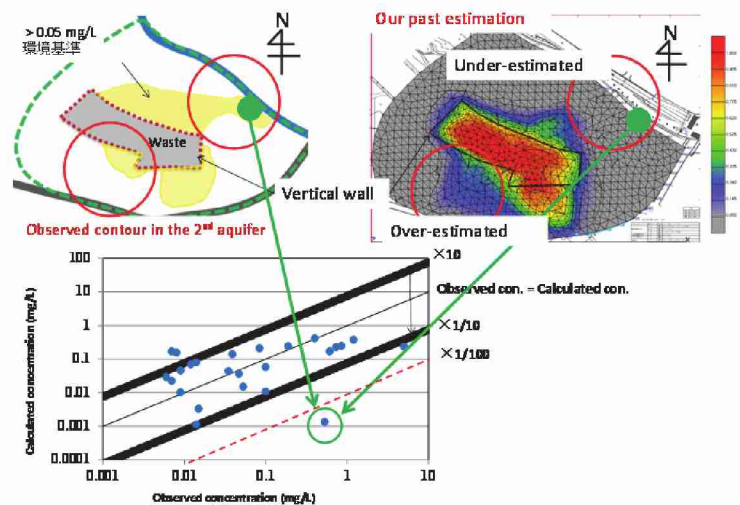
本モデルでは、1996年に1,4-ジオキサンを含む廃棄物が不法に投棄され、2011年までの15年間の計算値と観測値を比較し、パラメータを推定している。その際、2002年に設置された鉛直遮水壁についてはソフトウェアの制約上、1996年から設置されたと仮定して計算を行っている。そのため、1,4-ジオキサンの分布に違いが生じたと考えられる。このような修復履歴の変化を考慮することは、解析上極めて重要である。ソフトウェア上の制約を克服して、修復履歴を考慮した解析により、新たにパラメータを推定する必要がある。

4.3 Coupled estimation methodの基本特性の把握

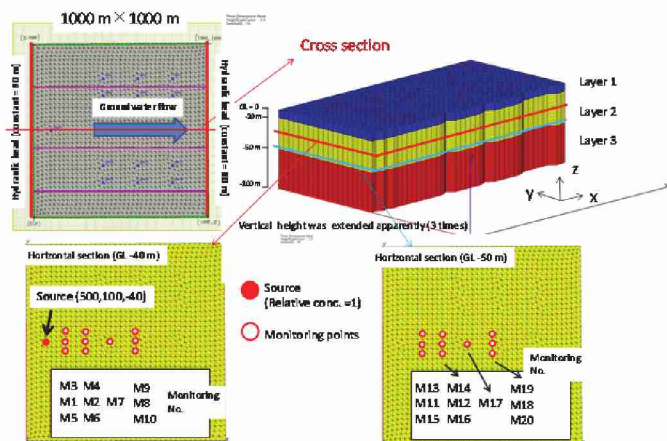
4.3.1 点源汚染モデル

1) モデルの作成

図(1)-18に示すように、3層からなる縦1000 m×横 1000 m×深さ 100 mの3次元の直方体の計算領域を想定した(1層目(Layer 1): 地表面から-20 m、2層目(Layer 2): -20 m～-50 m、3層目(Layer 3): -50 m～-100 m)。地下水の上流側に地下水位90 mの水位一定、下流側には地下水位80 mの水位一定条件を与えた。汚染源は、座標(500 m, 100 m, -40 m)に点源として与え、計算時間内で相対濃度1で一定とした。地表面から-40 mと-50 mの2つの断面に10点ずつ、合計20点の観測点を設けた(M1～M20)。



図(1)-17 第二帯水層の観測値と計算値の比較



図(1)-18 点源汚染モデルの概要

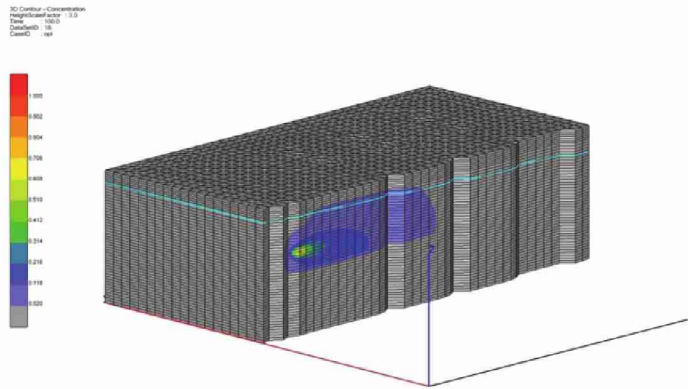
2) 模擬観測データの生成

表(1)-13に、模擬観測データを生成するために設定したパラメータの値を示す。地下水流れは定常、汚染物質の移動は非定常で500日間計算を行った。図(1)-19に、模擬観測濃度データの一例を示す。また、図(1)-20に観測点M2における濃度の時間変化を示す。

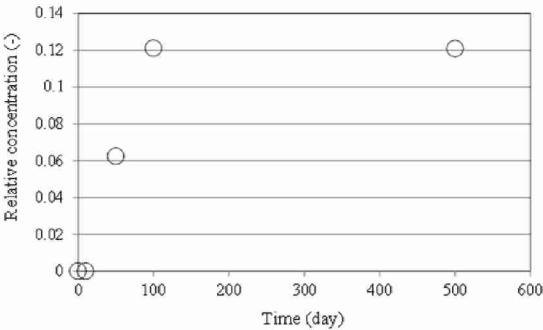
本解析では、定常の地下水位データと非定常の模擬観測濃度データの2つを、実際の観測データであると見なして、2層目の透水係数、有効間隙率及び分散能の3つのパラメータの同時推定を試みる。そして、推定されたパラメータが表(1)-13の2層目の透水係数、有効間隙率及び分散能と一致するかどうか検討する。

表(1)-13 模擬観測データ生成のためのパラメータ

Layer	Hydraulic conductivity [m/day]	Effective porosity [-]	Dispersivity [m]
1	10	0.25	10
2	100	0.25	10
3	1	0.25	10



図(1)-19 模擬観測濃度データの一例
(100日後、y=500 mの鉛直断面)



図(1)-20 模擬観測濃度データの一例
(観測点M2)

3) パラメータ推定結果と考察

①パラメータの推定結果

点源汚染モデルにおける2層目の透水係数、有効間隙率、及び分散能を、Coupled estimation methodを用いて推定するにあたり、各パラメータの推定範囲を次のように設定した。

- ・透水係数 k 10 ~ 1000 m/day (真値 100 m/day)
- ・有効間隙率 n 0.2 ~ 0.35 (真値 0.25)
- ・分散能 α_L 5 ~ 30 m (真値 10 m)

さらに、パラメータの推定の初期値として、各推定範囲の最小値と最大値を設定することにした。よって、初期値の組合せは、表(1)-14のように8通り存在する。なお、ケース5の場合は、透水係数1000 m/dayを初期値とすると収束しなかったため、500としてある。このことは後に考察する。

表(1)-14の右段に、各初期値から探索を開始した場合の推定結果を示す。なお、括弧書きは、既知のパラメータからの偏差をパーセンテージで表したものである。透水係数を最小値である10 m/dayから探索を開始したケース1~4では、透水係数は真値よりも小さく推定され、その誤差は-1.13%~-3.41%であった。透水係数とトレードオフの関係にある有効間隙率は小さく推定されており、その後差は-1.2%~-3.6%であった。一方、分散能はほとんど誤差が無く推定されていた。

一方、透水係数の最大値である1000 m/dayから探索を開始したケース5~8では、推定誤差が大きくなる傾向にあった。特に、ケース5では、透水係数1000 m/dayおよび有効間隙率0.2から探索を開始しているが、この場合は収束せずに解析は終了した。このように、物質移動速度が大きくなるような初期値(透

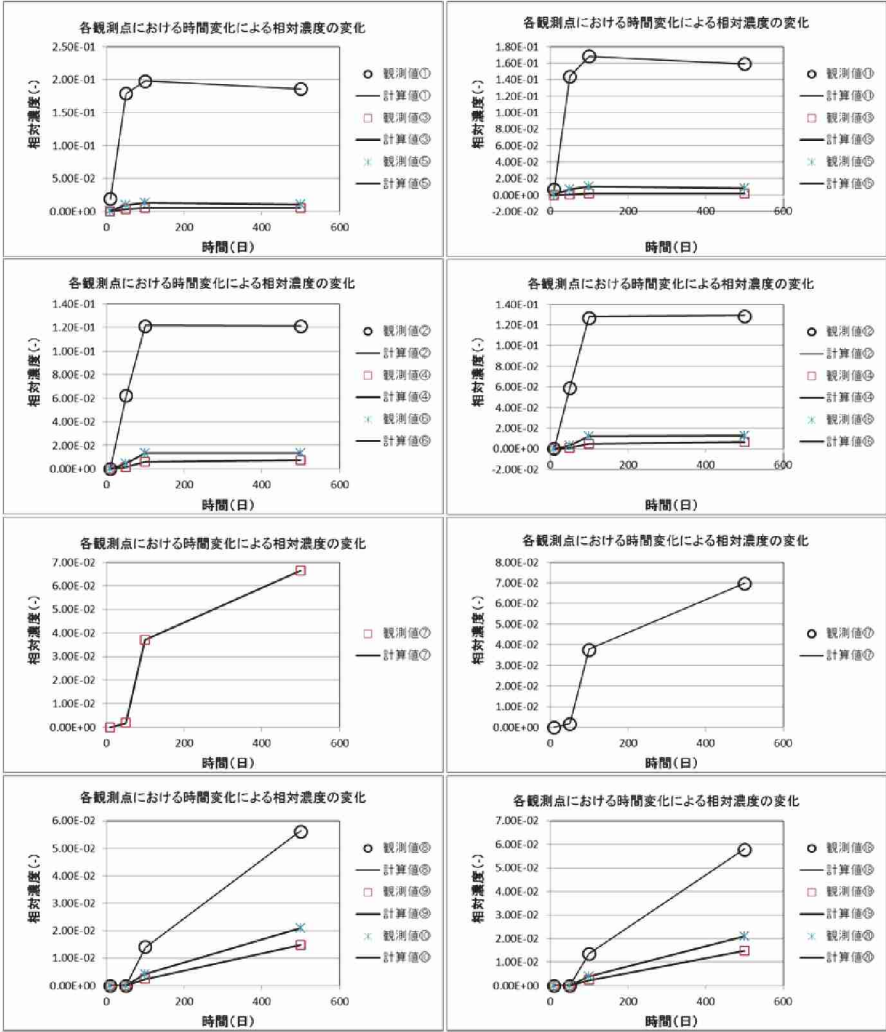
水係数であれば最大値、有効間隙率であれば最小値)としたときに、推定誤差が大きくなる傾向にあった。特に、ケース8では、透水係数の誤差が25.74%、有効間隙率の誤差が27.2%、及び分散能の誤差が-1.0%であり、他のケースと比較して大きかった。

表(1)-14 パラメータ推定の初期と結果

Case no.	Initial value			Estimation result (estimation error [%])		
	k [m/day]	n[-]	α_L [m]	k [m/day]	n[-]	α_L [m]
1	10	0.2	5	98.87 (-1.13)	0.247 (-1.2)	10.0 (0.0)
2	10	0.2	30	98.17 (-1.83)	0.245 (-2.0)	10.0 (0.0)
3	10	0.35	5	98.21 (-1.79)	0.245 (-2.0)	10.0 (0.0)
4	10	0.35	30	96.59 (-3.41)	0.241 (-3.6)	10.0 (0.0)
5	500	0.2	5	97.85 (-2.15)	0.240 (-4.0)	10.0 (0.0)
6	1000	0.2	30	91.46 (-8.54)	0.227 (-9.2)	10.1 (1.0)
7	1000	0.35	5	118.65 (18.65)	0.300 (20.0)	9.9(-1.0)
8	1000	0.35	30	125.74 (25.74)	0.318 (27.2)	9.9(-1.0)
Given parameter values				100	0.250	10.0

次に、推定されたパラメータを用いた計算結果が、模擬観測濃度データとどの程度、違いがあるのか考察することにした。比較的推定誤差が大きかったケース8での全観測点での模擬観測濃度データと計算値の比較をそれぞれ図(1)-21に示す。なお、計算値は模擬観測濃度データと同じ時間で出力されているので、その間を補間するデータは無いため、折れ線グラフとなっている(本来は、滑らかな曲線になる)。なお、観測点の表記であるが、M1は①、M2は②(以下同じ)と対応している。

全ての観測点において、模擬観測濃度データと計算値の誤差はいずれの場合においても極めて小さいことが分かる。観測点①における模擬観測濃度データ値は0.1859、計算値は0.1861となり、誤差1%以内に収まっている。また観測点⑩における模擬観測濃度データ値は0.2103、計算値は0.2099となり、この場合においても誤差1%以内に収まっている。また、他の断面において、観測点⑩においては模擬観測濃度データ値0.1593、計算値0.1592であり、観測点②においては模擬観測濃度データ値0.2109、計算値0.2110であり、いずれの場合においても誤差1%以内と



図(1)-21 ケース8における模擬観測濃度データと計算値の比較
(観測点M11 (①) ~M20 (⑩))

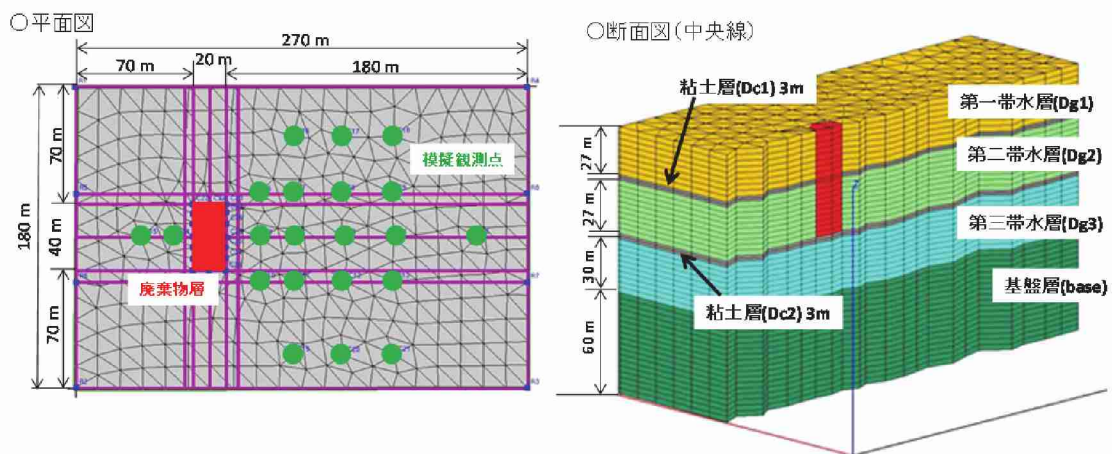
なっていた。

以上の結果から、本研究で想定した探索範囲内で、初期値を変えながら、透水係数、有効間隙率、及び分散能の3つのパラメータの同時推定を試みた結果、模擬観測濃度データ値および計算値の誤差は誤差1%以内に収まっていた。透水係数・有効間隙率・分散能の3つのパラメータ自体の推定誤差は決して小さなものではなかったが、計算結果の濃度分布の結果においては、パラメータの推定誤差が大きく影響している訳ではなく、むしろ実際の濃度分布の計算は、模擬観測濃度データを良く表現できることから、Coupled estimation methodによる透水係数、有効間隙率及び分散能の3つのパラメータの同時推定は有効であることが分かった。

4.3.2 廃棄物層モデル

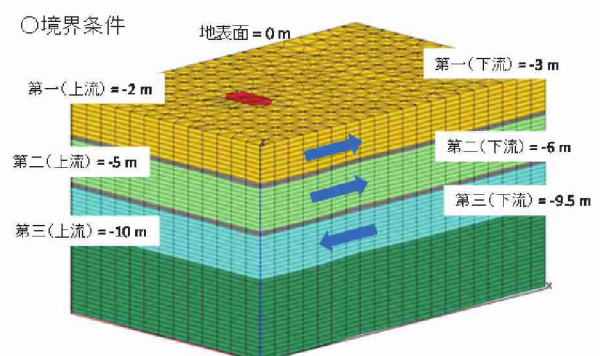
1) モデルの作成

次に、点源汚染ではなく、当該汚染現場の廃棄物層及び地層構造に近い模擬モデルを作成する殊にする。図(1)-22に示すように、4層からなる縦180 m×横 270 m×深さ 150 mの3次元の直方体の計算領域を想定した（第一帯水層(Dg1)：地表面から-27 m、粘土層(Dc1)：層圧3 m、第二帯水層(Dg2)：地表面から30 m～57 m、粘土層(Dc2)：層圧3 m、第三帯水層(Dg3)：地表面から60 m～90 m、基盤層(base)：層圧60 m）。図(1)-23に示すように、地下水の上流・下流側に各層毎に水位一定条件を与えた。なお、第三帯水層のみ、第一及び第二帯水層と地下水流れが逆になっている。



図(1)-22 廃棄物層モデルの概要

汚染源は、図(1)-22に示すように、40 m×20 m×57 mの領域として与え、第二帯水層の底部まで廃棄物層(waste)が存在するものとし、計算期間内、相対濃度1で一定とした。第一帯水層～第三帯水層の各層の深さ方向の中心位置に、図(1)-22の緑の点に模擬観測点を設けた。なお、本廃棄物層モデルは、計算便宜上のスケールを想定したモデルであり、当該汚染現場のスケールよりも大きい。



図(1)-23 廃棄物層モデルの境界条件

2) 模擬観測データの生成

表(1)-15に、模擬観測データを生成するために設定したパラメータの値を示す。地下水流れは定常、汚染物質の移動は非定常で1500日間計算を行った。図(1)-24に、模擬観測濃度データの一例を示す。

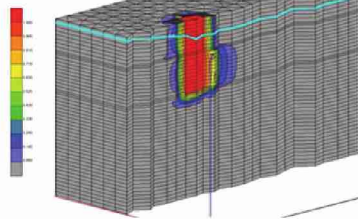
本解析では、定常の地下水位データと非定常の模擬観測濃度データの2つを、実際の観測データであると見なし、表(1)-15に示した黄色の16つのパラメータの同時推定を試みる。そして、推定されたパ

ラメータが表(1)-15の透水係数、有効間隙率及び分散能と一致するかどうか検討する。

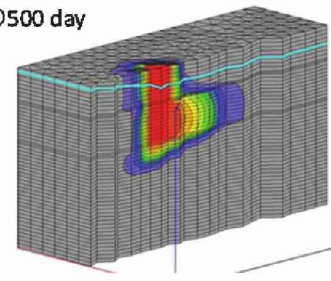
表(1)-15 模擬観測値データ生成のためのパラメータ値

	透水係数 (m/day)	有効間隙率	分散能 (m)	変数
Dg1	5.00E-01	0.2	5	
Dc1	1.00E-04	0.2	5	
Dg2	1	0.2	5	
Dc2	1.00E-03	0.2	5	
Dg3	1.00E-01	0.2	5	
base	1.00E-04	0.2	5	
waste	5.00E-02	0.2	5	

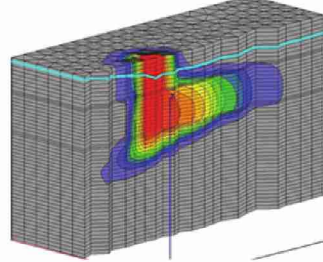
○100 day



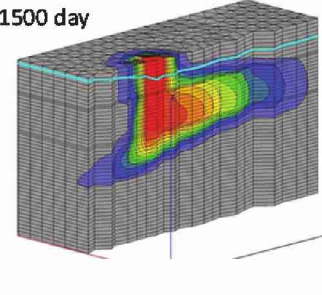
○500 day



○1000 day



○1500 day



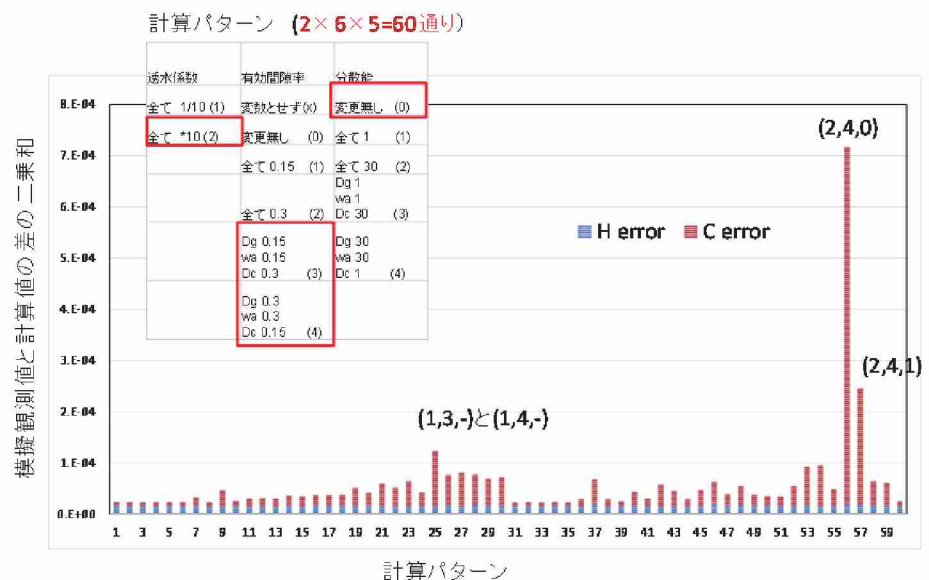
図(1)-24 廃棄物層モデルの模擬観測データ

3) パラメータ推定結果と考察

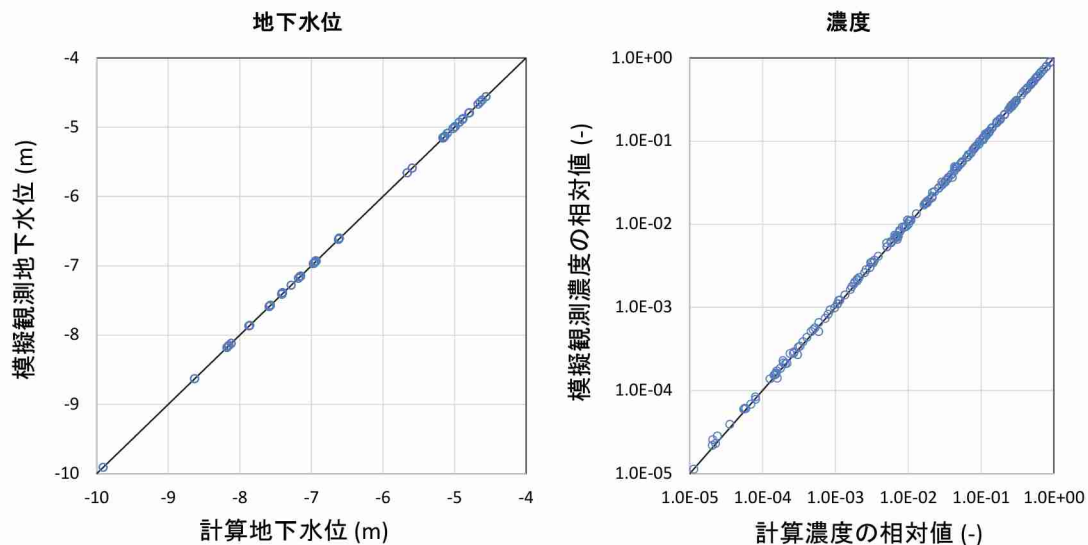
初期値の設定の仕方については、図(1)-25に示すように、透水係数については、(1)すべて真値の1/10、(2)すべて真値の10倍の2通り)、有効間隙率については、(x)変数とせず、(0)変更せず(真値)、(1)すべて0.15、(2)すべて0.3、(3)Dg層とwaste層は0.15、Dc層は0.3、(4)Dg層とwaste層は0.3、Dc層は0.15の6通り、縦分散能については、(0)変更せず(真値)、(1)すべて1、(2)すべて30、(3)Dg層とwaste層は1、Dc層は30、(4)Dg層とwaste層は30、Dc層は1の5通りとした。全組合せは60通りある。

図(1)-25に、各計算パターンにおける模擬観測値と計算値の差の二乗和を示す。地下水位(H error)と濃度(C error)を示しており、括弧書きについては、

例えば、(2,4,0)は、透水係数は(2)すべて10倍値、有効間隙率は(4) Dg層とwaste層は0.3、Dc層は0.15、縦分散能は(0)変更せず(真値)を初期値として計算したパターンを示す。結果としては、相対的に濃度の誤差の大きい、大きな値でも 10^{-4} のオーダーであった。比較的誤差の大きなパターンの傾向として、透水係数値をすべて10倍した値を初期値として用いた場合、有効間隙率が、Dg層(及びwaste層)とDc層を上下界に設定した場合について比較的大きな誤差となることが分かる。点源汚染モデル同様に、透水係数値については真値よりも大きな値を初期値に用いると推定誤差が大きくなる傾向にあった。次に最も誤差の大きかったパターン(2,4,0)について、模擬観測値と計算値の比較を図(1)-26に示す。地下水位及び濃度と共に、模擬観測値と計算値のずれはほとんど無いことが分かる。以上より、当該現場を想定した廃棄物層モデルにおいても、本研究で開発したCoupled estimation methodのアルゴリズムが正しく、複数のパラメータを同時に推定することができることが示された。



図(1)-25 模擬観測値と計算値の差の二乗和の比較



図(1)-26 廃棄物層モデルにおける模擬観測値と計算値の比較（パターン(2,4,0)）

4.3.3 Coupled estimation methodの基本特性のまとめ

以上、点源汚染モデル及び廃棄物層モデルを用いた解析により、Coupled estimation methodの基本特性として、以下のことが分かった。

- ①従来のTwo-stage methodでは、地下水位観測値より透水係数がまず求まる。その次に、濃度観測値により有効間隙率が決まる。地下水位観測値により推測されない地下水流れ（流速、流向）は模擬できない。一方、Coupled estimation methodは、透水係数と有効間隙率を同時に推定するので、濃度観測値にあうような地下水流れの推定を可能としている。地下水位と濃度観測値の両方を考慮したより統合的な推定が行えることを意味している。
- ②透水係数と有効間隙率の推定値は、トレードオフの関係があるため、Coupled estimation methodについては、初期値によっては真値を推定できない場合があるが、地下水位や濃度の再現性は問題なかった。
- ③本研究の設定条件下では、透水係数よりも有効間隙率の初期値が推定値に大きな影響を及ぼした。
- ④有効間隙率は、実測の間隙率ではなく、各現場の汚染物質の実際の輸送を考慮したパラメータであるという性質上、現地データや土質等により、有効間隙率の推定範囲を絞り込んでおくことが重要である。
- ⑤今回の解析では、透水係数値の推定範囲は2オーダーであったが、実際の探索においてはもっと広い範囲で探索する必要があると考えられる。その点を考慮すると、Coupled estimation methodを現地へ適用する際には、透水係数とトレードオフの関係にある有効間隙率については予め妥当な値を与えておき、透水係数のみを変数として、推定を行う方が現実的であると考えられた。

4.4 数値シミュレーションによる修復効果予測と修復対策へのフィードバック

4.4.1 パラメータ推定結果

以上の検討を踏まえ、当該現場の透水係数と分散能のパラメータの推定を再度行う。その際、2002年の遮水壁設置時期を考慮した。すなわち、1996年～2001年（2160日間）は遮水壁無し、2002年～2011年（3240日間）は遮水壁有りの条件で計算を行い、先の解析と同様に2011年1月時点の観測値にあうようにパラメータを推定する。なお、目的関数（式(1)-11）を計算する上で必要となる式(1)-12と式(1)-13の地下水位の最大・最小値及び濃度の最大値は、それぞれ、56 m, 40m, 7.0mg/Lとした。

まず、パラメータ推定に先立ち、全透水係数の感度解析を行い、どの透水係数値を変数として推定するのがよいか考えることにした。遮水壁とタンクの透水係数を除く16層の透水係数をそれぞれ1%増加さ

せ計算し、式(1)-14により感度を算出した。

$$\text{Sensitivity}_i = \sum \frac{|h_{cal}^{r,initial_i} - h_{cal}^{r,+1\%_i}|}{h_{cal}^{r,initial_i}} + \sum \frac{|c_{cal}^{r,initial_i} - c_{cal}^{r,+1\%_i}|}{c_{cal}^{r,initial_i}} \quad (1)-14$$

ここで、上付文字initial_iは初期値、+1%_iはi番目の層の透水係数を1%増加したことを意味する。透水係数が1%増加した際の、観測地点の地下水位及び濃度の相対的な変化をすべて足しあわせて評価することを意味している。

感度解析の結果を表 表(1)-16 透水係数の感度解析結果及びパラメータ設定値

(1)-16に示す。感度の大きい順に、括弧書きで順位を示した。これより、Dg2層（第二帯水層）、tDg層（第一帯水層）、tDg2層（第一帯水層）、Dg1層（第三帯水層）、Dc2層（第一帯水層と第二帯水層の間の粘土層）の5つの層が他の層と比べて感度が大きかった。この5つの層の透水係数値及び縦分散能の合計10個のパラメータを同時推定することにした。なお、有効間隙率については、先の考察により固定値として変数としなかった。また、他の層の透水係数や

Layer	Parameters		Sensitivity _i (Rank order)	n [-]	α _L [m]
	k [m/day]				
1. Waste (W)	8.6×10 ⁻³		0.0302 (9)		
2. Backfilled soil (B)	8.6×10 ⁻¹		0.0079 (13)		
3. Sticky soil (Ac)	2.3×10 ⁻⁴		0.0004 (15)		
4. Gravelly soil (tDg4)	8.2×10 ⁻¹		0.0158 (12)		10
5. Sticky soil (tDc3)	2.3×10 ⁻⁴		0.0000 (16)		
6. Gravelly soil (tDg3)	8.2×10 ⁻¹		0.0888 (6)		
7. Sticky soil (tDc2)	2.3×10 ⁻⁴		0.0019 (14)		
8. Gravelly soil (tDg2)	8.2×10 ⁻¹		0.2263 (3)		10
(the first aquifer)	Variable k _{tDg2}				Variable α _{LtDg2}
9. Sticky soil (tDc1)	2.3×10 ⁻⁴ *		0.0197 (10)		10
10. Gravelly soil (tDg)	8.2×10 ⁻¹ *		0.2323 (2)		10
(the first aquifer)	Variable k _{tDg}			0.25	Variable α _{LtDg}
11. Sticky soil (Dc2)	2.3×10 ⁻⁴ *		0.1329 (5)		10
	Variable k _{Dc2}				Variable α _{LtDc2}
12. Gravelly soil (Dg2)	1.2×10 ⁰ *		0.2480 (1)		10
(the second aquifer)	Variable k _{Dg2}				Variable α _{LtDg2}
13. Sticky soil (Dc1)	6.2×10 ⁻⁵ *		0.0802 (8)		10
14. Gravelly soil (Dg1)	2.0×10 ⁻¹ *		0.2037 (4)		10
(the third aquifer)	Variable k _{Dg1}				Variable α _{LtDg1}
15. Sandy soil (Ts)	2.7×10 ⁻¹ *		0.0849 (7)		
16. Sticky soil (base) (Tc)	2.9×10 ⁻⁴ *		0.0193 (11)		10
17. Vertical wall (Wall)	1.72×10 ⁻⁴		-		
18. Tank (Ta)	1.0×10 ⁻⁷		-		

縦分散能の値は、表(1)-16に示す通りである（*は現地観測データである）。

表(1)-17に、各パラメータの探索範囲および推定値を示す。この際、定量限界値以下である0.005 mg/L以下のデータについては、式(1)-10と式(1)-11での観測値の重み付けを0として実質上、推定には用いていない。

4.4.2 観測値と計算値の比較

次に、1,4-ジオキサン濃度の観測値と計算値の比較を図(1)-27に示す。

環境基準値である0.05 mg/L以上の値に着目すると、観測値と計算値は±1オーダーmg/Lの範囲入っており、計算値が観測値を表現していると言える。特に、1 mg/Lを超える高濃度の観測点においては、計算値と観測値はほとんど一致している。

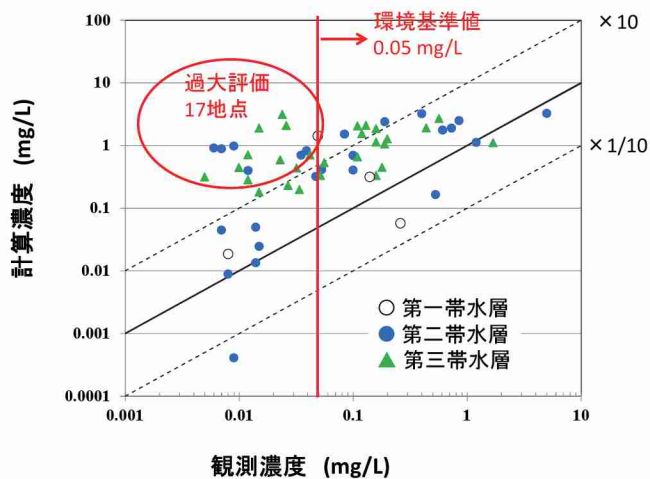
一方、環境基準値よりも小さな領域では、観測濃度が比較的低いにもかかわらず計算値は0.1～1.0 mg/Lに集中する傾向が見られ、観測値に比べて過大評価している地点が17あることが分かった。これらの位置を図(1)-28に示す（赤丸印）。これは、汚染源としての廃棄物層内において、1,4-ジオキサン濃度

表(1)-17 推定されたパラメータ値

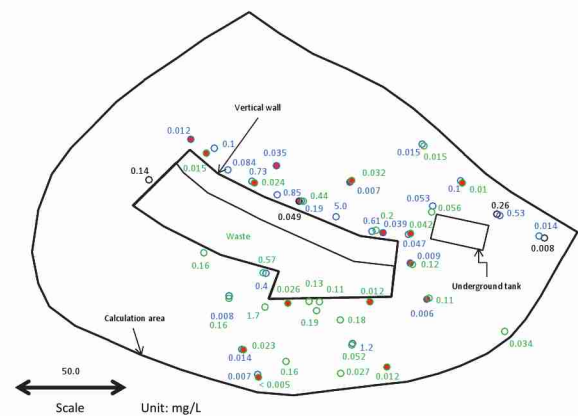
Selected parameters to be estimated				
Layer	k [m/day]	Search range	α _L [m]	Search range
8. Gravelly soil (tDg2)	1.83×10 ⁻²	1.0×10 ⁻² –1.0×10 ¹	1.00	
10. Gravelly soil (tDg)	3.67	1.0×10 ⁻² –1.0×10 ¹	1.00	
11. Sticky soil (Dc2)	1.97×10 ⁻²	1.0×10 ⁻⁶ –1.0×10 ¹	1.00	1.0 - 30
12. Gravelly soil (Dg2)	2.28	1.0×10 ⁻¹ –1.0×10 ²	1.00	
14. Gravelly soil (Dg1)	0.437	1.0×10 ⁻² –1.0×10 ¹	1.05	

は濃い領域と薄い領域があるにもかかわらず、廃棄物層内の1,4-ジオキサン濃度はいずれの箇所も相対濃度で7.0 mg/Lで与えることに起因すると考えられる。図(1)-28からも分かるように、廃棄物層に比較的近い観測地点であっても、その廃棄物層中の1,4-ジオキサン濃度が低ければ、観測値も低くなる可能性が高い。しかし、廃棄物層中の1,4-ジオキサンを考慮していない本モデルでは、そこまでは表現できない。

また、本来ならば、廃棄物層中の1,4-ジオキサンは、時間の経過と共にその濃度低下がみられるはずである。廃棄物層中の1,4-ジオキサン量は減っていくはずである。しかしこの点についても、汚染源濃度は、計算期間中は一定であると仮定して計算している。このことが、計算値が観測値を過大に評価している原因であると考えられる。



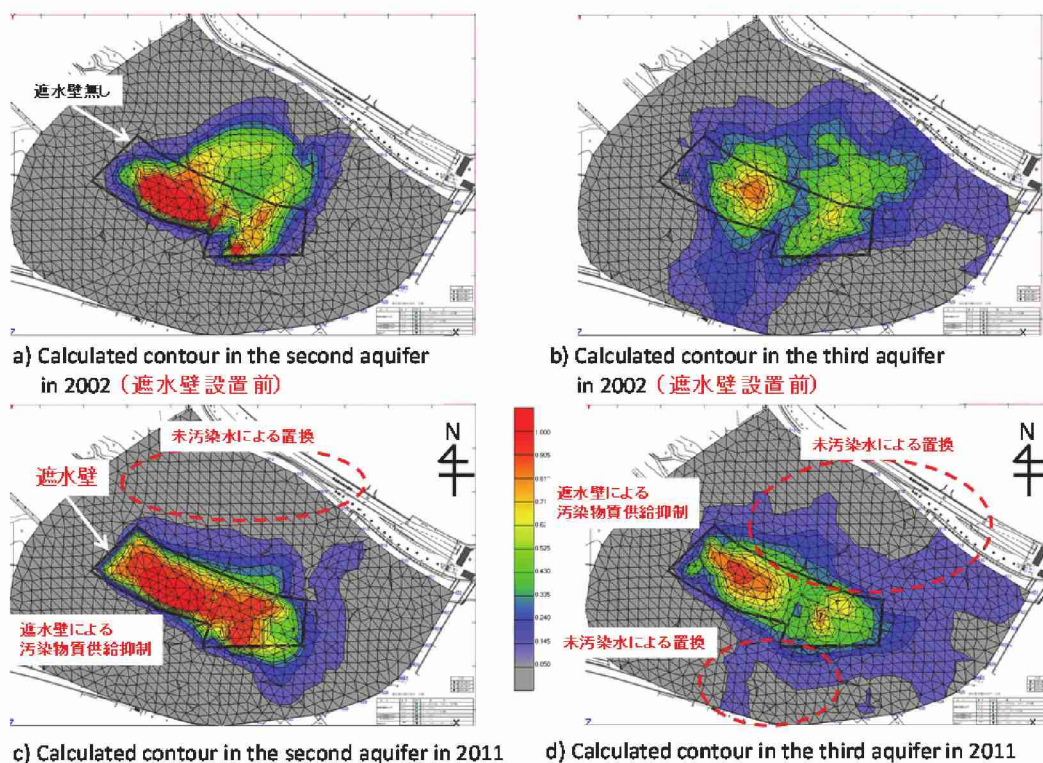
図(1)-27 観測値と計算値の比較



図(1)-28 過大評価17観測地点の位置
(赤丸印)

4.4.3 1,4-ジオキサン修復対策前までの汚染機構の解明

次に、2002年の遮水壁設置直前及び2011年1月時点の第二、第三帯水層の1,4-ジオキサン分布を図(1)-29に示す。



図(1)-29 遮水壁設置前及び設置後の1,4-ジオキサン濃度分布の変化

第二帯水層については、図(1)-29a)に示すように遮水壁設置前は地下水流れ沿って、廃棄物層から北側に1,4-ジオキサンが移動している状況が伺える。遮水壁設置後は、廃棄物層からの1,4-ジオキサンの汚染拡散防止の効果と、遮水壁による地下水流れの変化により、未汚染水の置換が生じ、図(1)-29c)のような1,4-ジオキサン濃度分布になった。この特徴的な分布は、先に示した図(1)-4上の同時期の第二帯水層の濃度分布と形状が類似している。

第三帯水層については、元々廃棄物層は存在しない。第二帯水層の方が第三帯水層の地下水位が高いので、まず廃棄物層内中の1,4-ジオキサンが第三帯水層に移動する。さらに、第三帯水層は全体として地下水位の差が小さく、地下水流れが緩慢なので、第二帯水層から第三帯水層へ押し出すように流れた地下水流れが南北方向に生じ、その流れに沿って、1,4-ジオキサンが南北方向に移動したものと思われる。これが、北から南方向へ流れる第三帯水層において、その地下水流れに反して1,4-ジオキサンが移動した原因である。遮水壁設置後は、第二帯水層同様に、遮水壁による1,4-ジオキサンの汚染拡散防止と未汚染水による置換が生じたものと考えられる。

以上、coupled estimation method及び修復履歴である遮水壁設置時期を考慮することによって、これまで不明であった2011年1月までの第二帯水層と第三帯水層の1,4-ジオキサン汚染機構を明らかにすることができた。

4.4.4 修復効果予測

1) 修復対策の内容

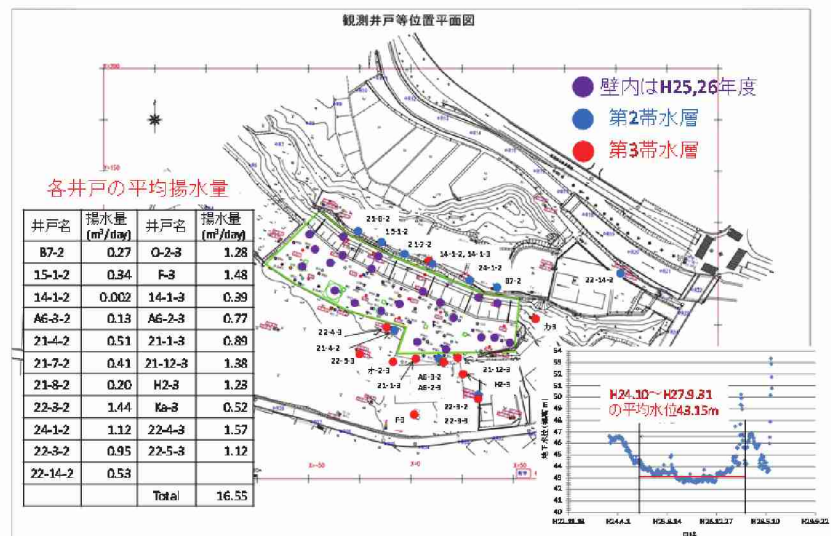
修復対策は、先に述べたように2段階で行われた。

①第一段階目

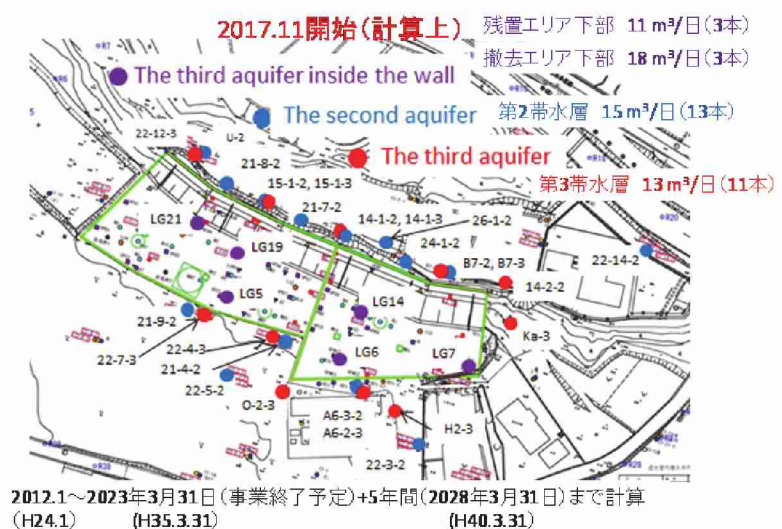
廃棄物層からの1,4-ジオキサンの拡散防止を主な目的として、図(1)-30に示すように、廃棄物層内地下水を25~33 t/day揚水することで低下させる（標高で43.15 mまで低下。さらに壁外の汚染地下水の揚水処理（16箇所、約16 t/dayの揚水）を行う。この対策は、2012年から開始されており、2016年9月までの周辺井戸の1,4-ジオキサン濃度の低下に関するデータがあるので、本研究による推測の検証に利用する。

②第二段階目

先の図(1)-5に示したように、2017年11月に箇所の廃棄物の部分撤去が完了し、廃棄物撤去後の埋め戻し後、下部帯水層の地下水揚水処理が開始される予定である。また、残置された廃棄物層についても、廃棄物層内汚染水を揚水—処理—処理水の注入によるフラッシングにより1,4-ジオキサンの修復が行われることになっている。さらに、遮水壁外の汚染地下水も揚水処理することになっている。遮水壁内の下部帯水層及び遮水壁外からの揚水井戸の配置を図(1)-31に示す。LG6, LG7, LG14が残置廃棄物の下部帯水層からの揚水井戸、LG5, LG19, LG21が廃棄



図(1)-30 第一段階の修復対策の内容



図(1)-31 第二段階の揚水井戸の配置

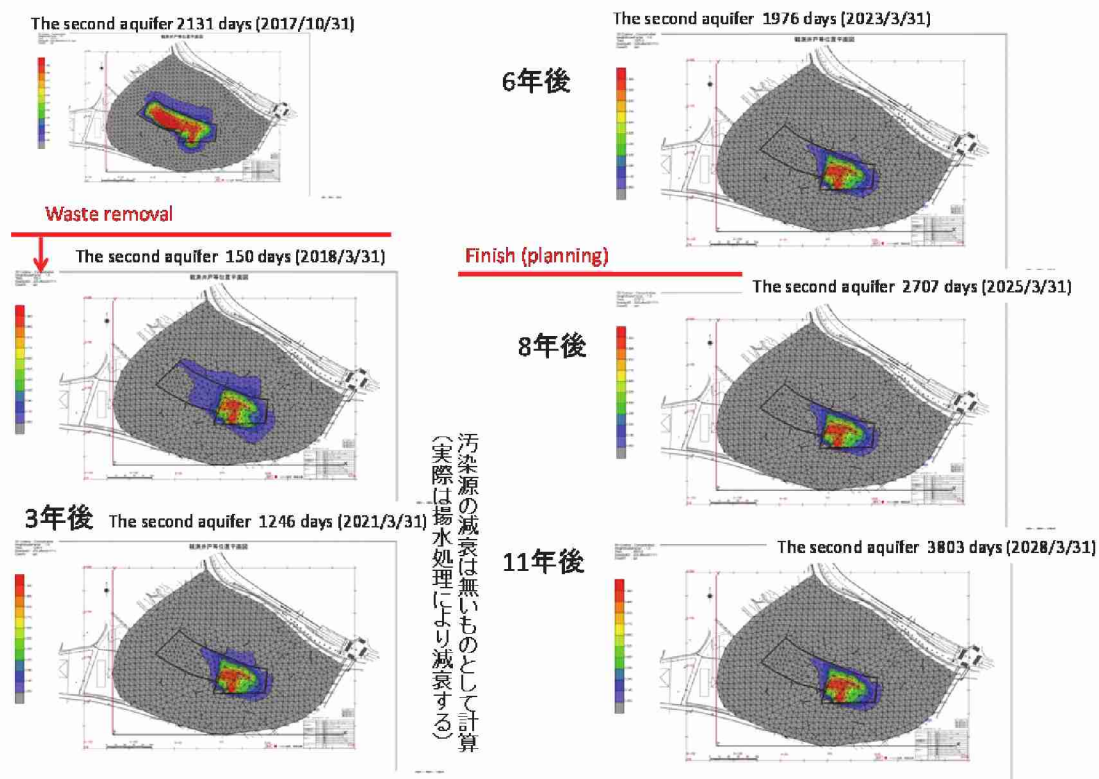
地下水も揚水処理することになっている。遮水壁内の下部帯水層及び遮水壁外からの揚水井戸の配置を図(1)-31に示す。LG6, LG7, LG14が残置廃棄物の下部帯水層からの揚水井戸、LG5, LG19, LG21が廃棄

物撤去エリアの下部帯水層からの揚水井戸、それ以外が遮水壁外の揚水井戸である。なお、残置される廃棄物層内の1,4-ジオキサンフラッシングについては、計算上考慮されていない。すなわち、今後の推定においても、汚染源の減衰は無いものとして計算している。

2) 1,4-ジオキサン濃度予測

①第二帯水層

図(1)-32に第二帯水層の1,4-ジオキサン地下水汚染修復効果予測を示す。廃棄物撤去後、廃棄物撤去エリアの帯水層は浄化され、事業終了目標期限である2023年3月31日の時点では遮水壁外も含め、1,4-ジオキサン濃度が低下してく様が見て取れる。残置廃棄物の影響で、残置エリアでは、1,4-ジオキサンは高濃度に存在するが、これは先に述べたように、残置廃棄物層内での1,4-ジオキサンのフラッシング効果は計算上考慮していないためである。

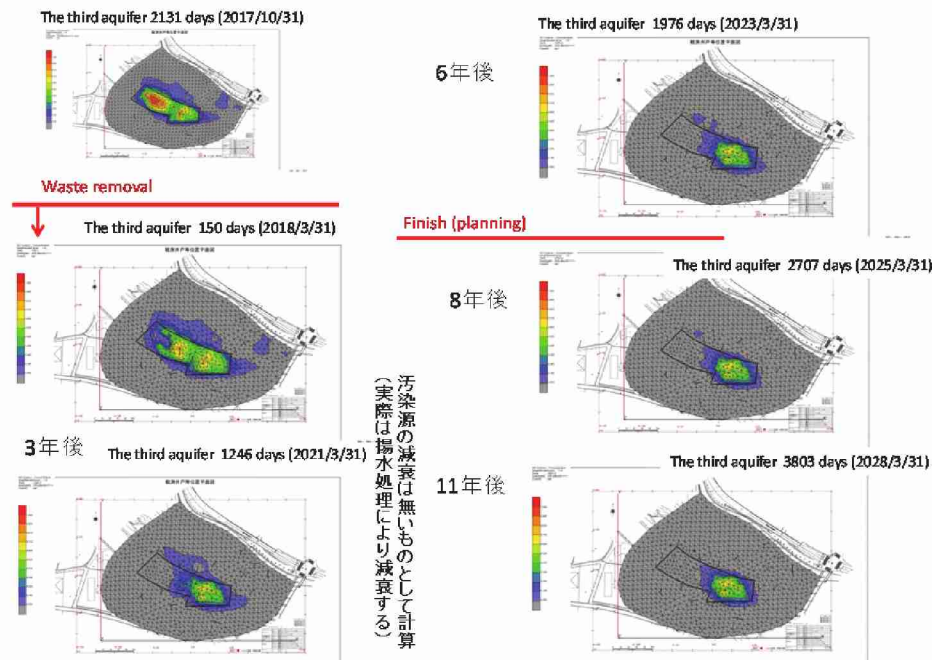


図(1)-32 第二帯水層の1,4-ジオキサン地下水汚染の修復効果予測

②第三帯水層

同様に、図(1)-33に第三帯水層の1,4-ジオキサン地下水汚染修復効果予測を示す。廃棄物撤去後、下部帯水層に対する揚水処理により、1,4-ジオキサン濃度は低下していく。事業終了目標期限である2023年3月31日の時点では、廃棄物残置エリア及びそのごく近傍で、1,4-ジオキサンが残存するものの、目標の達成は可能であると考えられる。先の考察同様に、残置廃棄物に対する計算は考慮されていないが、残置廃棄物の直下の下部帯水層からも揚水することから、上部の廃棄物から下部帯水層への1,4-ジオキサンの移動が、継続的に生じていると考えられる。すなわち、残置廃棄物中の1,4-ジオキサンの回収が予想よりもうまく行かない場合は、残置エリアの下部帯水層の修復も遅延することを意味している。

なお、残置廃棄物層内の1,4-ジオキサンの測定結果について、図(1)-34に示す。かつては、2.5 mg/L以上の井戸もあったが、2018年9月頃のデータでは、最大でも1.1 mg/L程度まで1,4-ジオキサン濃度の低下がみられている。



図(1)-33 第三帯水層の1,4-ジオキサン地下水汚染の修復効果予測

3) 観測値と計算値の比較

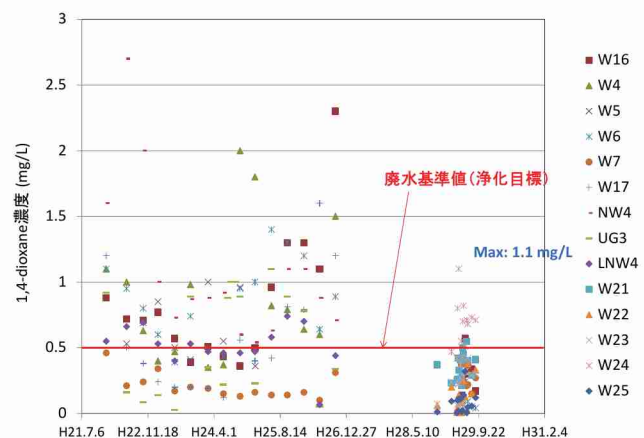
すべての観測井戸の第一段階の修復中の1,4-ジオキサン濃度の変化を考慮して、再度パラメータ推定を行ったが、先に求めたパラメータよりも精度の高いものは求めることができなかった。

その点を踏まえて、当該現場において、最も河川に近く過去に比較的高濃度で1,4-ジオキサンが検出されていた22-14-2（第二帯水層のこれまでの1,4-ジオキサンの観測値と計算値の比較を図(1)-35に示す。

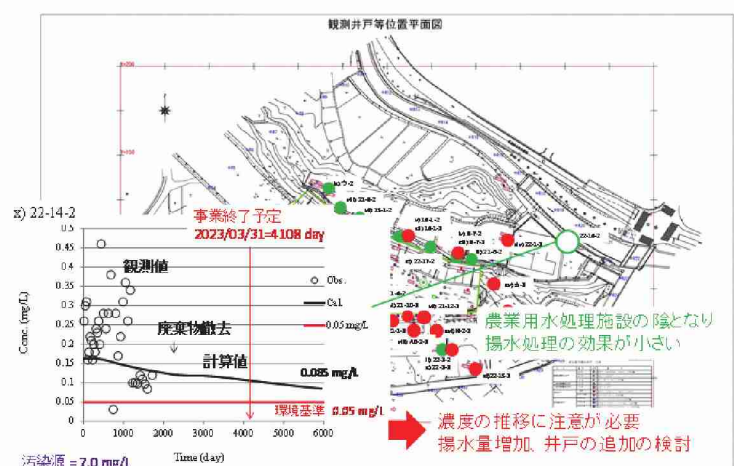
計算値が濃度を過小評価している点、観測値の濃度減衰の速度と計算値の濃度減衰の速度が異なる点などから、計算値が必ずしもこの井戸の観測値を表現しているとは言えない。しかしながら、計算値よりこの地点の1,4-ジオキサン地下水修復の速度は他の井戸よりも遅延する可能性があることを示している。これは、廃棄物層とこの22-14-2地点の間に農業集落用の排水処理施設が存在し、その地下タンクの陰に22-14-2地点が存在することから、揚水処理の効果が小さいと考えられる。

次に、第三帯水層の観測値と計算値の比較について考察する。図(1)-36及び図(1)-37に結果を示す。

図(1)-37に示す3つの井戸に対しては、観測値と計算値は概ね一致していると言えるが、



図(1)-34 残置廃棄物層内の1,4-ジオキサン濃度



図(1)-35 第二帯水層22-14-2地点での1,4-ジオキサン濃度の変化

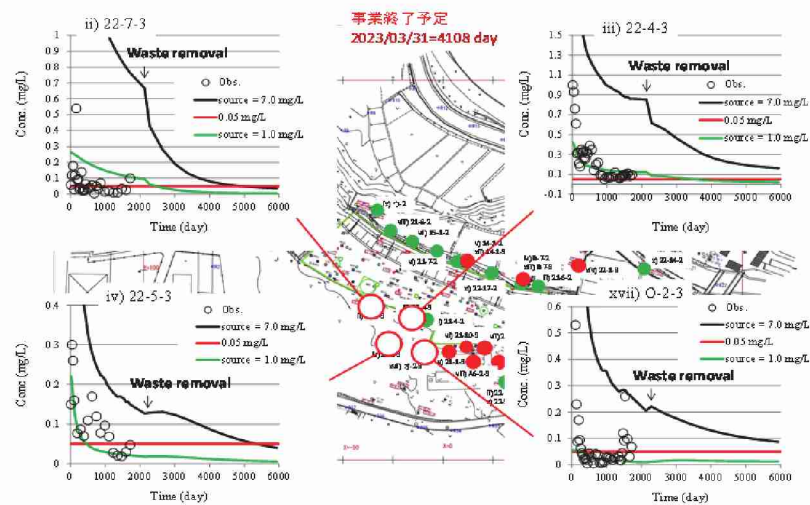
図(1)-36に示す4つの井戸については、計算値が過大評価していることが分かる。これまでは、第二帯水層で検出された最大地下水濃度7.0mg/Lを用いてこれまで計算を行ってきた。しかし、廃棄物層内の1,4-ジオキサン濃度は空間的に一定ではない。そこで、残置廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度の最大値が1.1 mg/Lであったことから、汚染源濃度を1.0 mg/Lにして計算したのもも同図に示した。図(1)-36に示した4つの井戸についても、観測値と計算値がほぼ一致するようになった。

廃棄物中の1,4-ジオキサンの濃度の空間分布が分かり、計算期間中濃度一定の条件を外し、汚染源の絶対量が把握できると、より観測濃度を表現できるようになると考えられる。

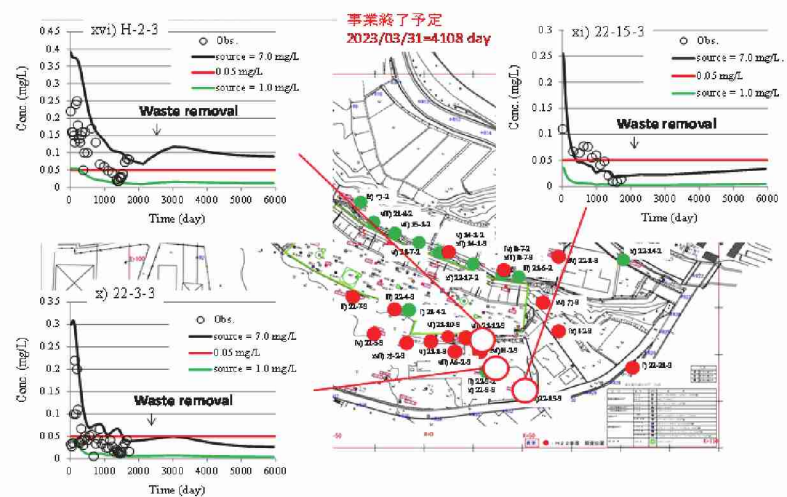
4) 揚水量に関する考察

廃棄物撤去エリア下部帯水層の1,4-ジオキサン濃度の将来予測の結果を、図(1)-38に示す（汚染源濃度は7.0 mg/Lを利用）。廃棄物層が撤去され、汚染源が除去されたことから、1,4-ジオキサン濃度は速やかに低下し、予定通り揚水できれば、事業終了予定までの修復は可能であることが分かった。しかしながら、揚水処理で問題となるのは、計画通り揚水量を確保できるかである。透水係数が小さい地層では、揚水するとその井戸周辺の地下水が無くなってしまい、水位の回復をまってからまた揚水を継続するということがよくある。従って、予定揚水量の0.5倍と0.1倍の揚水しかできなかった場合を想定した結果もあわせて示す。LG19及びLG5の井戸では、揚水量が小さくなるにつれ、濃度減衰が緩慢となり、修復期限までの修復が困難になる可能性が分かった。

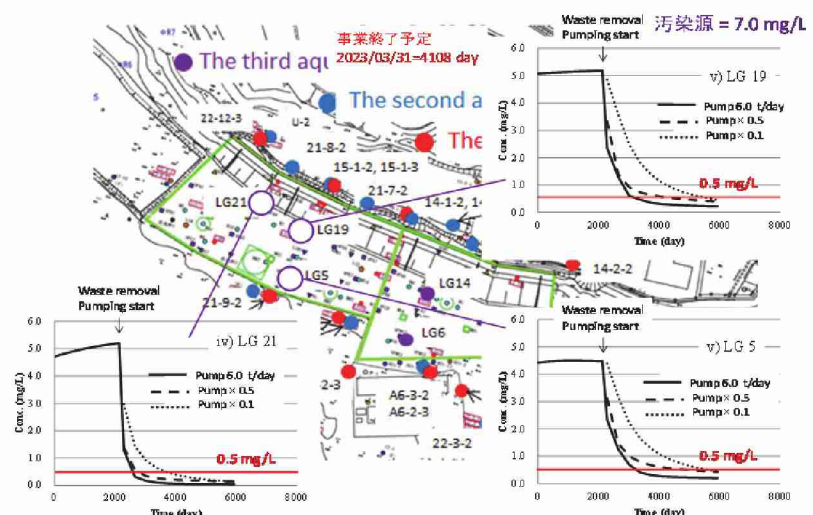
次に、廃棄物残置エリア下部帯水層の1,4-ジオキサン濃度の将来予測の結果を、図(1)-39に示す。残置



図(1)-36 第三帯水層の観測値と計算値の比較(1)



図(1)-37 第三帯水層の観測値と計算値の比較(2)

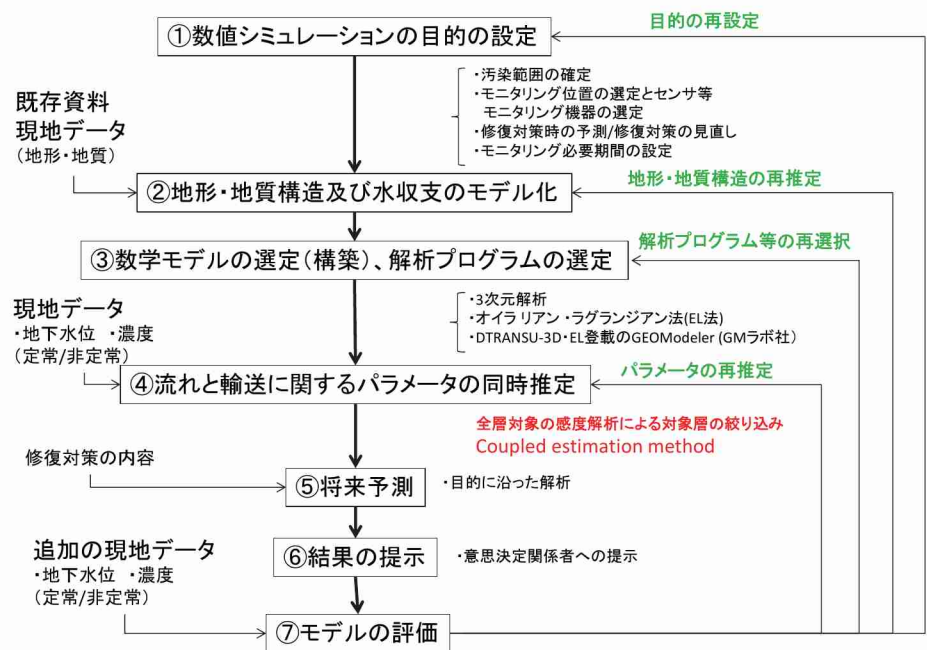


図(1)-38 廃棄物撤去エリア下部帯水層の1,4-ジオキサン濃度の予測結果

などの具体的な修復内容を考慮した数値シミュレーションにより、修復効果予測を行うことが主な目的となる。結果を見ながら、最適な井戸の位置や揚水量を検討することが可能となるだけでなく、修復時に考慮すべき現場特有の課題を抽出することも可能となる。

b) 修復対策実施中

修復対策実施中は、修復対策を実施する前に行われた数値シミュレーション結果と実際のモニタリングデータが合致するかどうか検証する。モデルの修正やパラメータの再推定が必要な場合は、この修復段階のデータを用いて修正や再推定することが可能となり、徐々にモデルが現場にあったものとなると期待できる。一方で、修復予測よりも実際の修復進捗状況が遅い場合、予想通りの修復効果が得られない場合には、追加の修復対策の検討や、修復目標期限の延長など、対策の変更も検討することができる。



図(1)-40 1,4-ジオキサンの効率的修復対策のための
数値シミュレーション技術の適用方法

c) 修復対策終了時

環境基準値や排水基準値など、修復目標を達成する、あるいは達成する目前では、修復対策終了の判断が重要となる。数値シミュレーションを用いることで、いつ目標値を満足するのか、リバウンドすることが無いのか、いつまでモニタリングを続けたら、修復対策終了の判断ができるのか、検討することができる。

②地形・地質構造及び水収支のモデル化

地形・地質構造に関する既存データ（地図、地質図など）を用いて、さらに現場踏査、ボーリング調査等で得られた柱状図等のデータを用いて、現場周辺の地形・地質構造モデルを構築する。地下水の流れは、地質の構造や勾配によって著しく変化するのでデータは多い方が、モデルの精度は良くなる。しかし、汚染現場の規模と必要なボーリング数に関する議論は、一概にすることはできない。現場によって、地形・地質構造のヴァリエーションが大きすぎるからである。このような場合、予算に見合ったボーリング調査を行い、一度簡略的なモデルを作成してから、モデルでうまく表現できない箇所や汚染解析上、重要な領域を絞り込んだ上で、再度ボーリング調査を行うなど、段階的に課題を解決しながら調査を進めることが重要となる。

③数学モデルの選定（構築）、解析プログラムの選定

かつてはコンピュータの性能が低速であったため、実汚染現場レベルの3次元モデルの解析は時間がかかりすぎるため、準三次元解析や断面二次元解析、平面二次元解析と、次元を落として計算される場合が多かった。また、地形地質構造も、現地データをデフォルメ、簡略したものが多かった。

しかしながら、現在はコンピュータの速度が格段に速くなったため、またメモリ容量も大きいことから汚染現場の3次元モデルが容易に構築でき、さらに様々な条件で計算することが可能となった。将来的には量子コンピュータなど、更なる計算能力の向上が期待できる。そのような点で、現場の複雑な地形・地質構造を表現でき、さらに移流分散解析の数値解析上の誤差が少ないオイラリアン・ラグランジアン法(EL法)に基づくDTRANSU-3D・EL登載のGEOModeler (GMラボ社)による解析が今後の主流になると思われる。後述するが、本研究で開発したCoupled estimation methodが本モデルに登載され、誰でも使えるようになっている。

④流れと輸送に関するパラメータの同時推定

ここでは、数値シミュレーション適用時点での、地下水位と濃度のデータ（定常・非定常）を用いて、流れと輸送に関するパラメータを推定する。これまでは、two-stage methodによるパラメータ推定が行われてきた。まず、透水係数などの地下水流れに関するパラメータを先に決めてから、その地下水流れに基づき、有効間隙率や分散能といった汚染物質輸送に関するパラメータを決定する方法である。しかし、この方法だと、1,4-ジオキサン濃度のデータが有するトレーサーとしての情報（濃度の大きさと移動速度）が、有効間隙率と分散能の推定にしか活用されない。このトレーサーとしての情報を有効に活用し、流れと輸送に関するパラメータを同時に推定するCoupled estimation methodの方が有効である。計算時間は、two-stage methodより長くなるが、コンピュータ速度の向上と共に、計算必要時間も削減されると思われる。

なお、本研究で扱った汚染現場のように、地層数が多い場合には、全層対象の感度解析を行って、パラメータ推定すべき層の数を限定してから解析する方が、効率良くパラメータを決定できる。

⑤将来予測

数値シミュレーション適用時点までのパラメータが推定され、観測値と計算値の一致がある誤差の範囲でみられたら、次は、将来の予測が可能となる。修復対策を行わない場合、どのような状況になるのか（汚染修復の必要性の判断）、遮水壁及びキャッピングを設置した場合の効果予測（汚染拡散防止対策の効果予測）、あるいは揚水井戸を設定しその効果を見る（揚水処理の修復効果予測）などの修復対策の選択のための根拠となる将来予測が可能となる。

また、揚水井戸の配置や揚水量の最適化、遮水壁の根入れの深さなど、修復対策に設計にも利用することが可能である。

⑥結果の提示

これらの結果を、修復事業者や意思決定判断をサポートする専門家、委員会の委員等に提示する。単なる結果だけではなく、解析によって得られた、修復対策の確実性や不確実性、課題や留意点に関する情報の方がむしろ重要であり、意思決定判断の材料となり得る。本研究では次節のⅡ-2で、意思決定者へ数値シミュレーション結果を情報提供している。

⑦モデルの評価

多くの場合、修復実施前の予測結果は、修復対策内容の選択や確認、説明根拠のために利用されるのみで、修復中のモニタリングデータとの整合性の評価や修復進捗状況の管理のために利用されることは少ない。

本研究での提案は、修復中のモニタリングデータを利用して、修復対策の進捗状況を管理し、その進捗状況によっては、対策内容を変更したり、追加対策を講じたり、あるいは修復目標期限を延長するなど、修復対策の見直しを検討すべきということである。そして、その修復対策の見直しは、修復中のモニタリングデータを利用して、再度モデル化を行うべきということである。図(1)-39には、必要に応じて、地形・地質構造の再推定、解析プログラム等の再選択、パラメータの再推定に戻ってモデル化することが示されている。

以上のようなプロセスを、修復段階の進捗と共に、繰り返し適用することで、修復効果の検証を行いながら、モデルが改善され、将来予測の元に修復対策の進捗管理が可能となるものと考えます。このような数値シミュレーションの現地への適用において、本研究で開発したCoupled estimation methodによるパラメータ推定は、修復の各段階で得られる現地データを最大限に有効に活用できるという点で、従来よりも優れたパラメータ推定手法であると言える。

4.6 本研究成果の活用について

4.6.1 ソフトウェア化

本研究で開発したCoupled estimation methodと同様のアルゴリズムで地下水汚染に関するパラメータを推定できる手法が、本研究で主に利用したジーエムラボ株式会社

(<http://www.gmlabo.co.jp/>) が販売するGEOModelerに登載され、誰でも使えるツールとして提供されている。パンフレットの

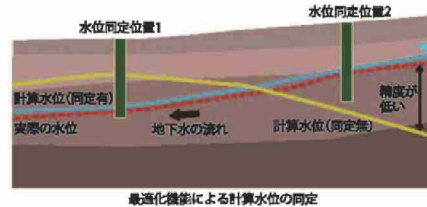
一部を図(1)-41に示す。感度法によるパラメータの推定が、本研究の成果の利用である。また、実際のソフトウェアでの稼働状況を図(1)-42に示す。

高精度な現況水位の再現

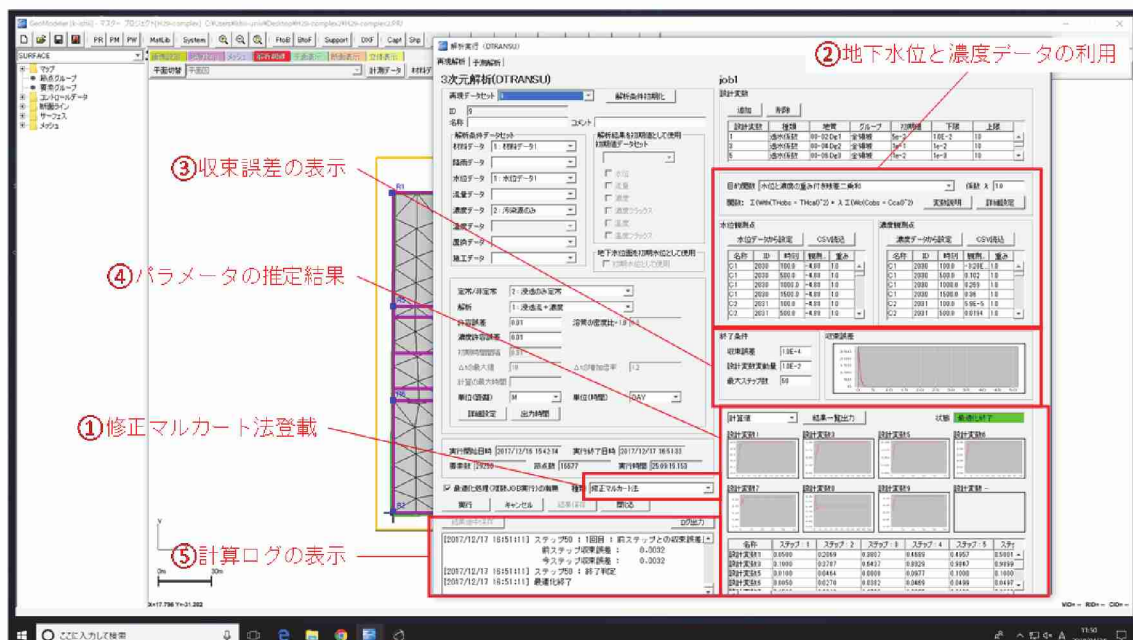
浸透流解析（現況再現）

地下水モデリングは、現況水位を精度良く再現する（実際の水位と計算水位の差を小さくする）ことが重要である。しかし、不確定条件の多い地下水モデリングは多くのトライアルが必要であり、手間と計算コストが生じていました。

ジオモデラーは、目的関数（計測データ）の設定機能や設計変数の最適化機能（感度法、応答曲面法）により、この不確定条件の最適化を容易に行う事ができ、迅速にトライアルを実施することができます。



図(1)-41 ジーエムラボ株式会社が提供するGEOModelerのパンフレット（感度法が本研究の成果の登載）



図(1)-42 ジーエムラボ株式会社が提供するGEOModelerのパラメータ決定時の解析画面（Coupled estimation methodが登載）

4.6.2 行政への貢献

4.4.5節に示したように、本研究の成果については、三重県三重県庁廃棄物適正処理プロジェクトチームの担当者に説明し、修復対策事業の進め方について助言を4回にわたって行った。特に下部帯水層の揚水指導、修復進捗管理のあり方について助言を行った。下記に担当者から頂いたコメントを記す。

「1,4-ジオキサンの汚染地下水は、水と同様の挙動を示すとされていますが、地点によって低減が様でなく、また、揚水により上昇を示す例もあり、良好といえない場合のモニタリング結果をどのように評価するか、現場サイドでは苦慮しているところです。

今回の研究成果で示された課題は我々の認識とも一致するものであり、現場適用性の高い拡散予測手法が開発されることは、対策の大きな助けとなることと考えています。今後、特措法事業の残り期間が短くなっていく中で、ジオキサン対策の進捗管理は、より一層重要となることから、他事案も含めた幅広い活用が期待されると思います。」

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ①これまで現地データに基づく1,4-ジオキサン地下水汚染濃度分布の推測が困難であった。その理由は、廃棄物の不法投棄現場であり、不均質な廃棄物層を伴う複雑な地形・地質構造を有する地下水流れの推測（透水係数の推測）が、従来のボーリング調査や地下水位の観測値によるモデル化のみでは不十分であったからである。それに対して、本研究では、1,4-ジオキサン濃度の観測値をトレーサーとして捉え、そのトレーサーの持つ流れに関する情報（地下水位流速や流向）を透水係数の推定にも利用でき、かつ透水係数と流れに関するパラメータ（有効間隙率及び分散能）を同時に推定できる手法であるCoupled estimation methodを用いた。これにより、複雑な地下水位流れとその地下水流れに沿って移動する1,4-ジオキサンの濃度分布の高精度の推定が可能となった。
- ②従来の数値シミュレーション技術は、修復技術適用する前の修復工法の決定や設計（揚水位置や揚水量）に用いられることが多かった。それに対して本研究では、修復中の1,4-ジオキサン濃度の減衰過程に数値シミュレーションを適用した。その結果、修復終了時期やモニタリング必要期間などのより高度な推定が可能となった。
- ③本研究では、廃棄物層を均質として扱わざるを得なかったが、廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度分布や汚染源濃度減衰を考慮する、あるいは観測データから逆推定する手法の開発が望まれる。これは、一般化すると、汚染データから汚染源の位置や強度を求める問題につながる。

以上まとめると、1,4-ジオキサンの地下水汚染に対して、復前及び修復中の観測データを最大限利用し、将来の修復予測可能な手法を、現地への適用性も踏まえて構築できた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

三重県桑名市不法投棄事案における1,4-ジオキサン地下水汚染機構の説明や修復対策に貢献している。なお、研究代表者は、本事案の協議会の座長を務めており、座長としての下記の様な指導を、本研究で得られた成果に基づいて行っている。

- 1) 遮水壁外の地下水の修復は、予定事業期間内に終わることができる。と考える。
但し、河川付近の第二帯水層にある一部の高濃度井戸の濃度推移に注意する必要がある。
- 2) 遮水壁内の下部帯水層の修復について、
 - ① 廃棄物撤去エリアの下部帯水層は、予定事業期間内に終わることができる。と考えられる。
 - ② 廃棄物残置エリアの下部帯水層は、残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度に大きく依存する。
残置する廃棄物中の1,4-ジオキサン濃度の減衰がなければ、残置エリア下部帯水層の修復も難しい。
 - ③ 撤去・残置エリア共通として、下部帯水層から予定通りの流量で揚水できない可能性がある。そ

の場合は、特に残置エリアでの修復は大幅に遅れる可能性もある。

- ④また、本研究で開発した数値シミュレーション手法は、実際に誰もが使えるソフトウェアとして既に販売されている。さらに、実際に本研究で対象とした現場担当者からは、今後の1,4-ジオキサン地下水汚染を修復する際の課題や留意点、そして今後の修復の方向性などを検討する上で、非常に有用であるとの反応を頂いている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ①1,4-ジオキサンによる地下水汚染は、多くの不法投棄現場で今もなお、修復を長引かせる原因となっている。本研究対象の三重県桑名市事案だけでなく、青森・岩手県境不法投棄事案においても、汚染源となる廃棄物を全量撤去してもなお、1,4-ジオキサンの地下水汚染の修復が継続されている。修復が長引く原因を早急に解明し、そしてその原因に応じた対策を的確に講じていくことが、早期の修復につながるだけでなく、特措法として税金が投入されている修復費用の削減につなげることができる。このような背景の中、本研究では、修復が困難な1,4-ジオキサンの汚染機構を、現地観測データを有効的に活用することで明らかにし、そして将来の修復予測を可能とし、さらに修復中の観測値と予測値を比べそのギャップの原因を探り、そして新たな修復対策へとつなげていくことができる、数値シミュレーション手法を開発した。
- ②現在、修復が長引いてコスト増に窮している現場、及び今後の新たな1,4-ジオキサンの地下水汚染に対して、本研究で開発した数値シミュレーション手法を適用することにより、1,4-ジオキサンの汚染機構を従来よりも効率的に明らかにすることができ、そして修復前、修復中において精度の高い修復予測を行えることから、期間やコストに見通しを持って修復することが可能となる。すなわち、1,4-ジオキサンによる地下水汚染の期間的、コスト的に効果的な修復に大きな貢献をすると考える。
- ③技術的成果の今後の課題としてあげた汚染源探索が可能となると、1,4-ジオキサンの汚染源探索だけではなく、分解生成物を考慮すると分解する前の物質の汚染源探索問題にもつながる。現在、環境政策上、課題となっている隣接敷地からのもらい汚染の効果的な汚染源探索するための解析ツールを提供することができる。
- ④今後の、特に水理地質構造や汚染形態が複雑であり、単純なモデルでは解析ができないような土壌・地下水汚染の解析ツールとして利用することが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama and Shoei Imai: The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016). Application of a coupled estimation method using flow and transport equations to a real 1,4-dioxane groundwater contamination site with complex hydrogeological structure
- 2) 今池祥平、石井一英、藤山淳史、佐藤昌宏、古市徹：第44回環境システム研究論文発表会講演集, pp.1-8(2016).

1,4-ジオキサン地下水汚染予測の精度改善のためのパラメータ決定法に関する研究

- 3) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Shohei Imai: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016).

Comparison of the Two-stage Method and Coupled Estimation Method to Estimate 1,4-dioxane Groundwater Contamination

- 4) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Yumika Shishido: The 32nd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA(2017).

Coupled Estimation Method for Determination of Flow and Transport Parameters using Transient Observation Data during Remediation of 1,4-Dioxane Groundwater Contamination

- 5) K. Ishii, T. Furuichi, A. Fujiyama and M. Sato: Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM(2017).

Flow and transport parameter estimation for 1,4-dioxane groundwater contamination at an illegal dumping site

- 6) 石井一英、藤山淳史、佐藤昌宏、古市徹、宍戸祐美果：第45回環境システム研究論文発表会講演集(2017).

1,4-ジオキサン濃度データを用いた地下水汚染シュミレーションのパラメータ決定に関する研究

- 7) Kazuei Ishii, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Toru Furuichi: The 33rd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Annapolice, USA(2018)/

Prediction of 1,4-dioxane contamination distribution during countermeasures at an illegal dumping site by numerical simulation

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Hem, R., Furuichi, T., Ishii, K. and Weng, Y.C.:土木学会論文集G, Vol. 69, No. 6, pp.II247-258 (2013).

A New Approach for Prediction of 1,4-Dioxane Distribution in Groundwater at an Illegal Dumping Site in Japan.

- 2) 古市徹編著：オーム社 (2013)

環境汚染現場の修復～実務者のための新アプローチ～

- 3) Ishii, K., Furuichi, T. and Imai, T.: Proc. Sardinia 01, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Vol. III, 723-734 (2001)

A Study on Remedial Alternatives of Soil and Groundwater Contamination Caused by Improperly Controlled Landfill Sites: A numerical Simulation Case Study.

- 4) 西田憲一、古市徹、石井一英:土木学会論文集G, Vol. 67, No. 6, II489-500(2011).

不法投棄現場のVOC汚染地下水の浄化プロセスの評価とその対策に関する研究,

- 5) 西田憲一、古市徹、石井一英:都市清掃, Vol. 66, No. 312, pp. 219-227 (2013).

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

- 6) Mohr, T. K. G., Stickney J. and Dibuisseppi, B.: CRC Press, printed in the USA (2010).
Environmental investigation and remediation: 1,4-Dioxane and other solvent stabilizers
- 7) Yasuhara, A.: Toxicological & Environmental Chemistry, Vol. 51, No. 1-4, pp.113-120(1995).
doi: 10.1080/02772249509358229
Chemical Components in Leachates from Hazardous Wastes Landfills in Japan,”
- 8) Yasuhara, A., Shiraishi, H., Nishikawa, M., Yamamoto, T., Nakasugi, O., Okumura, T.,
Kenmotsu, K., Fukui, H., Nagase, M., and Kawagoshi, Y.: Waste Management and Research,
Vol. 17, pp. 186-197 (1999).
Organic Components in Leachates from Hazardous Waste Disposal Sites
- 9) Yasuhara, A., Shiraishi, H., Nishikawa, M., Yamamoto, T., Uehiro, T., Nakasugi, O., Okumura,
T., Kenmotsu, K., Fukui, H., Nagase, M., Ono, Y., Kawagoshi, Y., Baba, K., and Noma, Y. :
Journal of Chromatography A, Vol. 774, No. 1-2, pp. 321-332 (1999).
doi:10.1016/S0021-9673(97)00078-2.
Determination of Organic Components in Leachates from Hazardous Waste Disposal Sites in
Japan by Gas Chromatography-Mass Spectrometry
- 10) U.S. EPA; January (2014).
Technical fact sheet- 1,4-Dioxane
- 11) Daubert, T.E. and Danner, R. P.: New York: American Institute of Chemical Engineers(1985).
Data compilation tables of properties of pure compounds.
- 12) Verschueren, K.: New York: Van Nostrand reinhold Company(1996).
Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals, 3rd Edition.
- 13) U.S. EPA: Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, EPA
530-R-99-004, 1998.
Industrial Waste Air Model technical Background Document.
- 14) Dow Chemical Company : www. Chlorinatedsolvents.com (accessed May 29, 2006)(2006).
Chlorinated solvents – physical properties. Form No. 100-06358.
- 15) Kirk, R and Othmer, D.: New York: Wiley (1982).
Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.
- 16) Budavari, S., Ed.: Rahway, NJ: Merck and Col, Inc. (1996).
The Merck Index – An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals.
- 17) Park, J.H., Hussam, A, Couasnon, P., Fritz, D. and Carr, P.W.: Analytical Chemistry, 59(15)
1970-1976 (1987).
Experimental reexamination of selected partition coefficients from Rohrschneider’s data set.
- 18) Gossett, J.M.: Environmental Science and Technology, 21(2), 202-208 (1987).
Measurement of Henry’s law constant for C1 and C2 chlorinated hydrocarbons.
- 19) Leighton, D.T. and Calo, J.M.: Journal of Chemical and Engineering Data, 26(4), 382-385(1981).
Distribution coefficients of chlorinated hydrocarbons in dilute air-water systems for
groundwater contamination applications.
- 20) Lyman, W.J.: In: W.J. Lyman, W.F. Reehl, and D.H. Rosenblatt (Eds), Handbook of Chemical
Property Estimation Methods: Environmental Behavior of Organic Compounds, Chapter 4.
Washington, DC: American Chemical Society(1990).
Adsorption coefficients for soils and sediments.
- 21) Reid, E.W., and Hoffman, H.E.: Industrial and Engineering Chemistry, 21(7), 695-697(1929).
1,4-Dioxan.
- 22) Banerjee, S., Yalkowsky, S.H., and Valvani, S.C.: Environmental Science and Technology,
14(10), 1227-1229(1980).
Water solubility and octanol/water partition coefficients of organics: Limitations of the
solubility partition coefficient correlation.
- 23) Pankow, J.F. and Cherry, J.A.: Portland, OR: Waterloo Press (1996).
Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and
Remediation.
- 24) Horvath , A.L., Getzen, F. W., and Maczynska, Z.: Journal of Physical and Chemical Reference
Data, 28(2), 395-629(1999).
IUPAC-NIST Solubility Data Serries 67: Halogenated ethanes and ethenes with water.

- 25) Coca, J. and Diaz, R.: Journal of Chemical Engineering Data, 25(1), 80-83 (1980).
Extraction of furfural from aqueous solutions with chlorinated hydrocarbons.
- 26) 山本哲史, 斎藤祐二, 池道彦, 清和成, 井上 大介: 大成建設技術センター報, 第46号, pp.53-1 – 53-4(2013).
1,4-ジオキサン汚染地下水の生物浄化に関する研究: 1,4-ジオキサンによる地下水汚染の特徴と生物浄化の可能性
- 27) Bernhardt, D and Diekmann, H.: Applied Microbiology and Biotechnology, 36(1), 120-123(1991).
Degradation of dioxane, tetrahydrofuran, and other cyclic ethers by an environmental *Rhodococcus* strain.
- 28) Burbach, B.L. and Perry, J.F.: Applied Microbiology and Biotechnology, 59(4), 1025-1029(1993).
Biodegradation and biotransformation of groundwater pollutant mixtures by *Microbacterium vaccae*.
- 29) Parales, R.E., Adamus, J.E., White, N., and May, H.D.: Applied Microbiology and Biotechnology, 60(12), 4527-4530(1994).
Degradation of 1,4-dioxane by an actinomycete in pure culture.
- 30) Kim, Y.H. and Engesser, K.H.: Applied Microbiology and Biotechnology, 70(7), 4398-4401(2004).
Degradation of alkyl ethers, aralkyl ethers, and dibenzyl ether by *Rhodococcus* sp. Strain DEE5151, isolated from diethyl ether-containing enrichment cultures.
- 31) Mahendra, S. and Alvarez-Cohen L.: International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 55, 593-598(2005).
Pseudonocardia dioxanivorans sp. nov., a novel actinomycete that grows on 1,4-dioxane.
- 32) Mahendra, S. and Alvarez-Cohen L.: Environmental Science and Technology, 40 (17), 5435-5442(2006).
Kinetics of 1,4-dioxane biodegradation by monooxygenase-expressing bacteria.
- 33) Fincher, E.L. and Payne, W.J.: Applied Microbiology and Biotechnology, 10(6), 542-547(1962).
Bacterial utilization of ether glycols.
- 34) Klecka, G.M. and Gonsior, S.J.: Journal of Hazardous Materials, 13(2), 161-168(1996).
Removal of 1,4-dioxane from wastewater.
- 35) Roy, D., Anagnostou, G., and Chaphalkar, : Journal of Environment Science and Health, Part A: Environmental Science, 29(1), 129-147(1994).
P.Biodegradation of dioxane and diglyme in industrial waste.
- 36) Taylor, S.W., Lange C.R., and Lesold, E.A.: Ground Water, 35(6), 973-980(1997).
Biofouling of contaminated ground-water recovery wells: Characterization of microorganisms.
- 37) Patt, T.E. and Abebe, H.: The Upjohn Company, Kalamazoo, MI(1995).
United States Patent 5,399,495: Microbial degradation of chemical pollutants, Assignee,
- 38) Deshpande, M.S., Rale, V.B., and Lynch, J.M.: Enzyme and Microbial Technology, 14(7), 514-527(1992).
Aureobasidium pullulans in applied microbiology: A status report.
- 39) Nakamiya, K., Hashimoto, S. Ito, H., Edmonds, J.S., and Morita, M.: Applied Microbiology and Biotechnology, 71(3), 1254-1258(2005).
Degradation of 1,4-dioxane and cyclic ethers by an isolated fungus.
- 40) Vainberg, S., McClay, K., Masuda, H., Root, D., Condee, C., Zylstra, G.J., and Steffan, R.J.: Applied Microbiology and Biotechnology, 72(8), 5218-5224(2006).
Biodegradation of ether pollutants by *Pseudonocardia* sp. strain ENV478.
- 41) Zenker, M.J., Borden, R.C., and Barlaz, M.A.: Proceedings of the Fifth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, San Diego, CA, April 19-22, Columbus, OH. Battelle Press(1999).
Investigation of the intrinsic biodegradation of alkyl and cyclic ethers,
- 42) Zenker, M.J., Borden R.C., and Barlaz, M.A.: Biodegradation, 11(4), 239-246(2000).
Mineralization of 1,4-dioxane in the presence of a structural analog,
- 43) Kelly, S., Aitchison, E.W., Deshpande M., Schnoor, J.L., and Alvarez, P.J.J.: Water Research, 35(16), 3791-3800(2001).
Biodegradation of 1,4-dioxane in planted and unplanted soil, Effect of bioaugmentation with *Amycolat* sp. CB1190.

- 44) Hyman, M.: North Carolina State University, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Research(1999).
Final report on aerobic cometabolism of ether-bonded compounds,
- 45) Mahendra and Alvarez-Cohen: Environ Sci Technol. 40, 17, 5435-42(2006).
Kinetics of 1,4-dioxane biodegradation by monooxygenase-expressing bacteria.
- 46) Skinner, K.M.: PhD Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR(2007).
Characterization of the molecular foundations and biochemistry of alkane and ether oxidation in filamentous fungus, A *Graphium* species.
- 47) William Diguiseppi, P.G. and Caroline Whitesides, P.G.: Applied Research and Practice, vol. 2, Spring (2007).
Treatment options for remediation of 1,4-dioxane in groundwater, Environmental Engineer.
- 48) Ching, D., Y. Zhang, E., Glover, J. H., and Woodward, D.: Proceedings of the fifth international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds, Monterey, California, May 22-25(2006).
1,4-dioxane solute transport modeling in support of Natural Attenuation Determination.
- 49) Carrera, J. and Neuman, S. P.: Water Resour. Res., 22(2), 199-210(1986).
Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information.
- 50) Carrera, J. and Neuman, S. P.: Water Resour. Res., 22(2), 211-227(1986)
Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. Uniqueness, stability, and solution algorithms.
- 51) Carrera, J. and Neuman, S. P.: Water Resour. Res., 22(2), 228-242(1986).
Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 3. Application of synthetic and field data.
- 52) Yeh, W. W.-G.: Water Resour. Res., 22(2), 95-108(1986).
Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem,
- 53) Carrera, J.: NATO-ARW Ser. C: Mathematical and Physical Science, vol. 224, edited by E. Custodio et al., pp. 549-583, D. Reidel, Norwell, Mass.(1987).
State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport equations, in Analytical and Numerical Groundwater Flow and Quality Modeling,
- 54) Strecker, E. W., and W. Chu. Groundwater, 24(1), 56-62(1986).
Parameter identification of a groundwater contaminant transport model.
- 55) Van Rooy, D., A. Kedser, and D. Rosbjerg: IAHS Publ., 185, 11-23(1989).
Inverse modeling of flow and transport, in Groundwater Contamination,
- 56) Kedser, A., and d. Rosbjerg: Water Resour. Res., 27(9), 2219-2232(1991).
A comparison of four inverse approaches to groundwater flow and transport parameter identification.
- 57) Wagner, B. J., and S. M. Gorelick: Water Resour. Res., 22(8), 1303-1313(1986).
A statistic methodology for estimating transport parameters: Theory and applications to one-dimensional advective dispersive systems.
- 58) Medina, A., J. Carrera, and G. Galarza: Model CARE 90: Calibration and reliability in groundwater modeling, IAHS Publ., 195, 185-194(1990).
Inverse modeling of coupled flow and solute transport problems.
- 59) Wagner, B. J.: J. Hydrol., 135, 275-303(1992).
Simultaneous parameter estimation and contaminant source characterization for coupled groundwater flow and contaminant transport modeling.
- 60) Sun, N.-Z, and . W. W.-G, Yeh: Water Resour. Res., 26(10), 2507-2525(1990).
Coupled inverse problems in groundwater modeling, 1. Sensitivity analysis and parameter identification.
- 61) Datta B., Chakrabarty D., and Dhar A.: Journal of Hydrology, 376, 48-57(2009).
Simultaneous identification of unknown groundwater pollution sources and estimation of aquifer parameters.
- 62) 吉田史郎、他：第四期研究, Vol. 29, No.4 (1990)
東海層群最上部と力尾累層（弥富累層相当層）の対比とその地史的意義

- 63) Fletcher, R.: Harwell Report, AERE-R. 6799(1971).
A Modified Marquardt Subroutine for Nonlinear Least Squares.

Ⅱ－２ 多主体多目的意思決定手法の開発

北海道大学大学院工学研究院

環境創生工学部門環境管理工学分野循環計画システム研究室 准教授 石井一英

環境創生工学部門寄附分野循環・エネルギー技術システム分野 特任助教 藤山 淳史

平成27～29年度累計予算額：6,899千円（うち平成29年度：2,720千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

汚染修復対策の決定、廃棄物最終処分場の立地選定など、環境行政上の意思決定では、委員会や協議会形式など関係者の意見を聞く場面や意見を取りまとめる場面が多く存在する。中には、関係者の立場や価値観は大きく異なる場合もあり、意見を取りまとめることが困難なこともある。一方、本研究で扱う1,4-ジオキサンによる汚染問題の場合、汚染修復は当初予想した通り進まない場合もある。これまでの対策を検証し、修復が予定よりも進んでいないと評価された場合には、今後の追加対策の必要性や、基準達成し修復事業終了予定時期を遅らせるなど、新たな意思決定をする必要性が生じる。そこで本研究では、修復対策を検討する際の評価構造が主体間に異なることに着目し、その構造の違いを定量的に明らかにし、その情報に基づき各主体の態度が変容し、再度評価を行うといった対話形式の意思決定手法の構築を行った。本研究では、人の試行錯誤過程をより良く表現できるモデルとして知られているANP (Analytic Network Process)手法を用いて、当該汚染現場の行政担当者、委員、有識者の合計7名に対してアンケート調査を行った。数値シミュレーションによる修復効果予測と今後の修復上の課題や留意点を説明した後の回答では、これまでの工法を継続し期限内に基準達成を目指すという考え方から、態度変容がみられた。行政担当者は、追加対策を講じて期限内の基準達成を目指すという考え方に、委員と有識者は、期限を延長して基準達成を目指すという考え方に変容した。このように、追加情報に基づく評価者の態度変容を可視化できる対話形式の意思決定手法の構築が可能となった。

以上により、1,4-ジオキサン地下水汚染を、関係者の合意を得て円滑に修復するために、①高精度数値シミュレーションによる修復予測と評価手法、及び②技術・社会的側面を考慮した多主体多目的意思決定手法の2つを統合した数値判定手法の開発を実汚染現場への適用を通じて行うことができた。

〔キーワード〕

意思決定、ANP、態度変容、視覚化

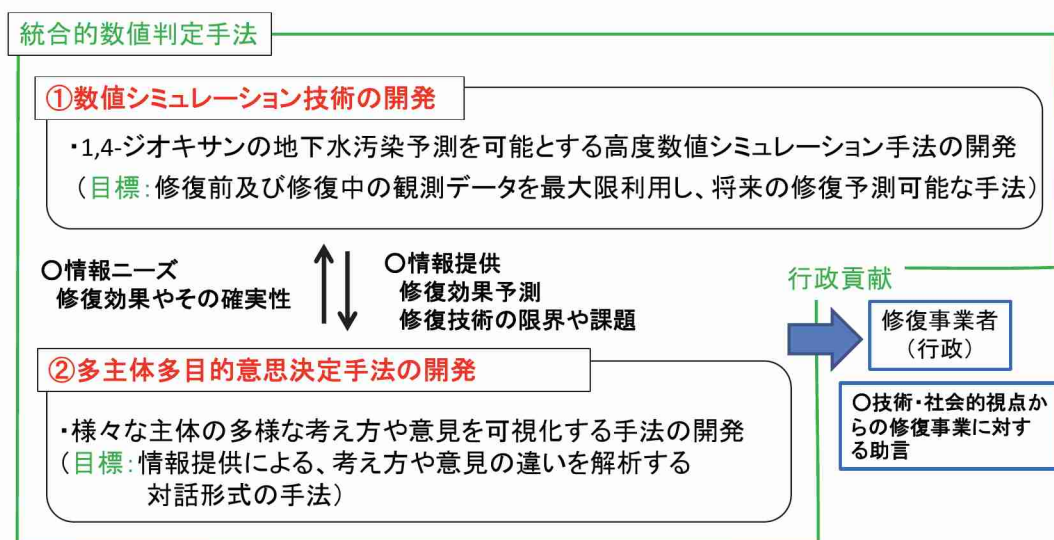
1. はじめに

汚染修復中の現場では、当初予想した通り修復対策がうまく進行しないことが多い。このような問題に対して、古市¹⁾はVF-UP (Verified Follow UP) を提唱している。VF-UPとは、「技術的・社会的な不確実性因子による想定外のリスクを考慮し、修復完了までは中間評価を設けて、当初の修復対策の効果を検証し、その評価に応じて当初の目標・計画を最適かつ実現可能な見直し(順応的な改善)を行い、修復完了後のモニタリングの間に、修復効果をも検証する」ことを言う。対策開始前の修復対策の意思決定については多くの研究や一般住民とのリスクコミュニケーションの例など多く報告があるが、このような修復中の中間評価段階における意思決定を扱った研究はほとんどない。そこで、本研究では、中間評価段階における意思決定手法を扱うことにする。意思決定には、事業主体となる行政(産業廃棄物不法投棄事案の場合)や専門家が中心に関わることが多い。住民との合意形成も重要であり、行政が一度決定した修復対策であっても、住民説明の時点で反対され住民合意が困難な場合がある。そこで本研究では、まずは意思決定に関与する専門家や行政関係者の合意形成を円滑に進めるために、修復対策を検討する際の評価構造が主体間に異なることに着目し、その構造の違いを定量的に明らかにし、その情報に基づき各主体の態度が変容し、再度評価を行うといった対話形式の意思決定手法の構築を目指す。

2. 研究開発目的

本研究は、1,4-ジオキサン地下水汚染を、関係者の合意を得て円滑に修復するために、①高精度数値シミュレーションによる修復予測と評価手法、及び②技術・社会的側面を考慮した多主体多目的意思決定手法の2つを統合した数値判定手法の開発を実汚染現場への適用を通じて行う。具体的には、図(2)-1に示すように、修復前及び修復中の観測データを最大限に利用し、1,4-ジオキサンの地下水汚染分布を推定し、将来の修復予測可能な手法として開発すること、そして、様々な主体の多様な考え方や意見を可視化する手法を開発することを目的としている。さらに、意思決定側からの情報ニーズに応じ、数値シミュレーション結果を情報提供することにより、意思決定に関与する専門家や行政担当者の考え方や意見の違いを解析する対話形式の手法として開発し、これらの解析内容を修復事業者である行政に、技術・社会的視点からの修復事業に対する助言として提供することを目的としている。また、平成27年度～29年度までの各年度の計画を表(2)-1に示す。

本章では、②多主体多目的意思決定手法の開発について述べる。



図(2)-1 本研究の研究開発の目的 (再掲)

表(2)-1 全体研究計画（再掲）

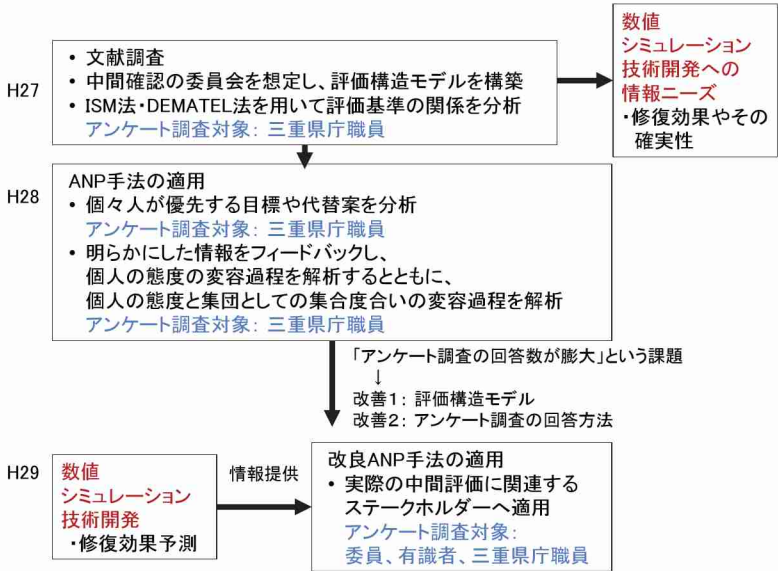
サブテーマ		平成 27 年度計画	平成 28 年度計画	平成 29 年度計画
(1)	数値シミュレーション技術の開発	(1) 三重県桑名市不法投棄現場を対象に、地下水位や1,4-ジオキサン濃度等の既存データを精査し、高精度1,4-ジオキサン濃度分布予測に必要な現地調査データの蓄積、スクリーニングを行う。平成 27 年度は、透水系数と分散能の同時推定、観測値の重み付けからなる向上策を検討し、従来法よりも1,4-ジオキサン濃度の推定が改善されることを示す。	(1) 三重県桑名市不法投棄現場を対象に、揚水処理等による修復対策中の1,4-ジオキサン濃度の変化に関する非定常データを用いて、地下水位変動及び濃度分析誤差から推察される許容誤差水準を精度目標として、モデルのパラメータ（以下、修復中パラメータ）の決定を行う。そして、修復前に求められたモデルパラメータと修復中パラメータの精度比較分析を通して、揚水処理による修復効果の高精度予測を可能とする数値シミュレーション技術を確立する。	(1) これまで作成した高精度1,4-ジオキサン地下水汚染モデルを用いて修復開始から中間評価時までの汚染濃度変化をシミュレーションし、修復の進捗状況の評価とモデルの検証を行う。修復が予定よりも遅延している場合には、数値シミュレーションにより原因解明を行うとともに、修復改善案を示し、その修復改善効果を数値シミュレーションにより予測・評価を行う。
(2)	多主体多目的意思決定手法の開発	(2) 多主体による意思決定手法の研究レビューを行い、立場の異なる様々な評価結果の集約や総合化のための手法を検討し、適用可能な手法をピックアップする。行政、専門家、住民の各主体の評価構造のモデル化をISM (Interpretive Structural Modeling)法及びDEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)法を用いて明らかにする。	(2) 前年度に作成した各主体の評価構造モデルを精査し、各主体へのヒアリングやアンケート予備調査に基づき、人間の試行錯誤的かつ複雑な判断思考回路をネットワークとしてモデル化できる ANP を適用する（模擬 ANP 評価）。そして、各主体間での評価構造の違いや、各評価の得点や重み付けの違いがどのように評価に影響を及ぼすのかを分析することで、対話形式の意思決定手法開発のための各主体の意思決定構造の特徴付けを明らかにする。	(2) 実際の中間評価に関連するステークホルダーへのヒアリング、アンケート調査を通じ、各主体の評価構造を構築し解析する。修復改善案に対して、ANP を適用することにより修復改善案の選択を試みる。特に、上記数値シミュレーションによる修復予測結果を提供し、その前後の評価の差異を考察する。以上より、対話形式の意思決定手法を構築する。

3. 研究開発方法

3.1 研究開発の手順

図(2)-2に研究開発の手順を示す。
H27年度は、多主体多目的意思決定手法に関する文献調査を行い、本研究の目的に合致した手法をピックアップする。そして、行政、専門家、住民の各主体の評価構造のモデル化をISM (Interpretive Structural Modeling)法及びDEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)法を用いて、今後修復対策の検証や見直しのために必要なニーズを抽出し、数値シミュレーション技術開発にインプットした。

H28年度は、前年度ピックアップされた手法として、人間の試行錯誤的かつ複雑な判断思考回路をネットワークとしてモデル化できるANP手法を適用することにした。そして、各主体が優先する目標や代替案を分析し、各主体間の評価構造の



図(2)-2 多主体多目的意思決定手法の開発手順

違いや、各評価の得点や重み付けの違いを明らかにする。さらに、その情報を各主体にフィードバックし、それらの追加情報が評価に影響を及ぼすのか、個人の態度の変容過程を解析すると共に、集団としての集合度合いの変容過程を解析する。

H29年度は、実際の中間評価に関連するステークホルダーへのヒアリング、アンケート調査を通じ、各主体の評価構造を構築し解析する。修復改善案に対して、改良ANP手法（ヒアリング時間を短縮し回答者の負担を軽減するため構造を簡略化した）を適用することにより修復改善案の選択を試みる。特に、上記数値シミュレーションによる修復予測結果を提供し、その前後の評価の差異を考察する。以上より、対話形式の意思決定手法を構築する。

3.2 多主体による意思決定手法の研究レビュー

本研究での開発すべき多主体多目的意思決定手法の修復汚染対策における位置づけを明確にした上で、意思決定手法のレビューを行い、本研究で適用する手法の絞り込みを行う。

3.3 ISM法及びDEMATEL法による評価構造モデル化の方法

意思決定手法のレビューによりAHP・ANP手法を適用することになったことから、本研究では、三重県桑名市不法投棄現場の中間評価（確認）時を想定し、問題の要素間の関係を「目標」「評価基準」「代替案」の階層構造により整理し、評価構造を設定した。なお、AHP・ANP手法を用いる前に、数学モデルを用いて客観的に評価基準間の関係を把握することを目的に、まずはISM法とDEMATEL法を用いて解析を行う。

3.3.1 評価構造の設定

1) 目標の設定

修復対策実施中の中間確認段階では、主体によって図(2)-3のような考え方があ

①現状の計画を継続し、予定通り環境基準達成を目指す。

②現状の計画を継続することで、予定通り環境期jんを達成することは可能であるが、より確実な達成を目指すため追加対策を施す。

③これまでの計画では、期限までに環境基準を達成することが困難なので、対

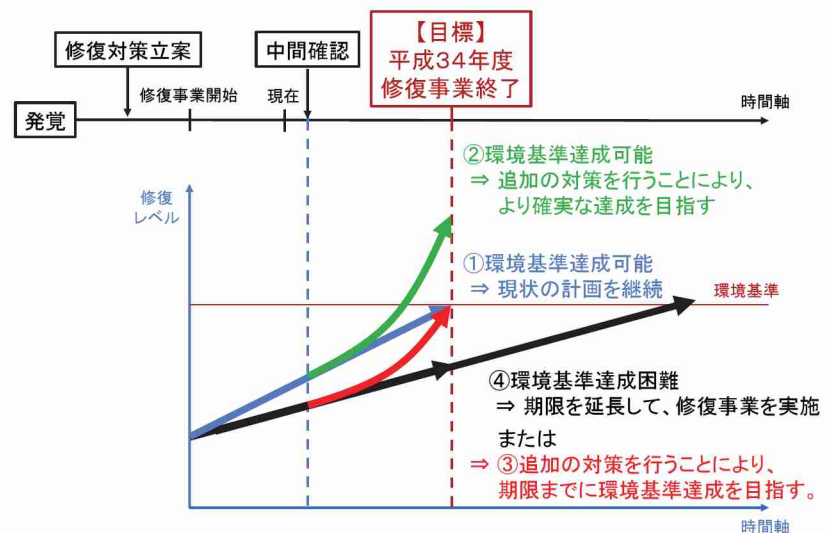
策を追加し、期限内の環境基準達成を目指す。あるいは、

④期限を延長して、環境基準達成を目指す。

上記を踏まえて、本研究で想定した中間確認時の「目標」を下記に示すとともに、そのイメージを図(2)-4に示す。

- ・目標①：期限内に環境基準を達成し、終了する。
- ・目標②：期限を延長して設定し、延長期限までに環境基準を達成する。
- ・目標③：期限を設定せずに延長し、モニタリング継続により環境基準達成を目指す（自然減衰（MNA：Monitored Natural Attenuation）を許諾する）。

現在の修復事業は平成34年度の修復事業終了を目指して進められていることから、目標①が現状の基



図(2)-3 修復実施中の中間段階での各主体の考えの相違

本的なスタンスとなる。目標②については、平成34年度を絶対的な修復完了期限とせず、時間的な余裕を持つことでコストを抑えつつ修復事業に取り組む場合を想定し、設定した。目標③については、周囲への環境リスクがなく、かつ、目標②以上にコストを抑えて修復事業に取り組む場合を想定し、設定した。

2) 代替案の設定

本研究で想定した中間確認後の「代替案」を下記に示すとともにその関係性を図(2)-2に示す。

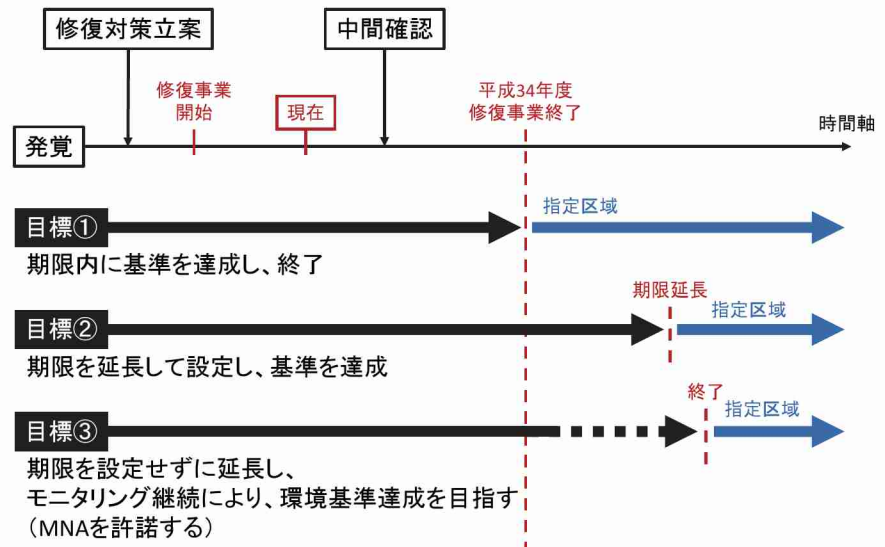
- ・代替案①：現状の工法を継続
- ・代替案②：揚水井戸の位置を変更
- ・代替案③：化学酸化法の適用
- ・代替案④：揚水量の増加

代替案①「現状の工法を継続」とは、現在、恒久対策として高濃度汚染域の廃棄物及び汚染土壌（一部）を撤去し、場外処分を行うとともに、遮水壁内外の井戸から揚水した汚染地下水を水処理施設で処理し浄化を図っ

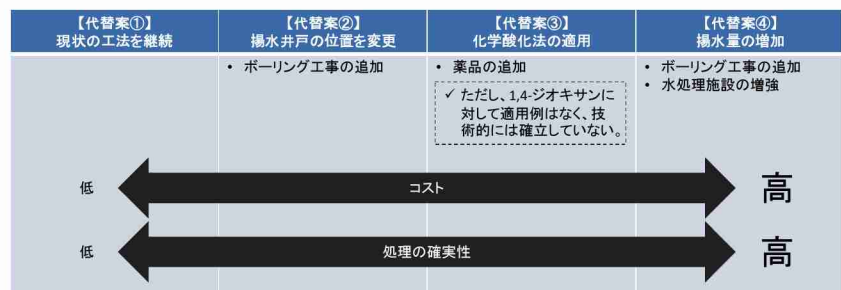
ており、中間確認後も予定通りこの工法を継続して行くというものである。代替案②③④については、代替案①に追加して行うことを想定している。代替案②については、別途行われているシミュレーションの結果を用いてより効率的に修復が進むよう揚水井戸の位置を変更することを想定しており、揚水井戸の位置変更に伴う新たなボーリング工事が必要となる。代替案③については、化学酸化法を適用することで地中の修復を促進させることを想定している。しかしながら、1,4-ジオキサンに適用された例はないため、技術的には確立していないのが現状である。代替案④については、揚水井戸を追加し、かつ、揚水量を増加させて修復事業を実施することを想定しているため、現在の水処理施設だけでは処理できなくなるため、新たな水処理施設の増強が必要となることを想定している。このように、代替案①から②、③、④へ移行するにつれ、処理の確実性は増す一方でコストも増加するという関係になっている。

3) 評価基準の設定

本研究で設定した評価基準を表(2)-2に示す。今回の研究では不法投棄現場の修復事業における中間評価（確認）を対象としていることから、評価基準の第1レベルには、汚染現場を含め空間的・時間的な影響を表す項目として「環境影響」、対象・現場（地下）・技術ともに不確実なことを扱っているためその影響を表す項目として「確実性」、修復事業を実施する際に発生する費用の項目として「財政」、修復事業自体が社会的にも受け入れられて実施される必要があることからその項目として「社会的受容性」の4つを設定した。第2レベルとしては環境影響の中には「残余リスク」と「時間（修復期間）」の2つを、確実性の中には「技術の成熟度」と「現場（修復予測）の不確実性」の2つを、財政の中には「中間確認後に発生する追加の初期コスト」「財政支援終了までの維持管理・メンテナンスコスト」「財



図(2)-4 本研究で設定した目標



図(2)-5 本研究で設定した代替案

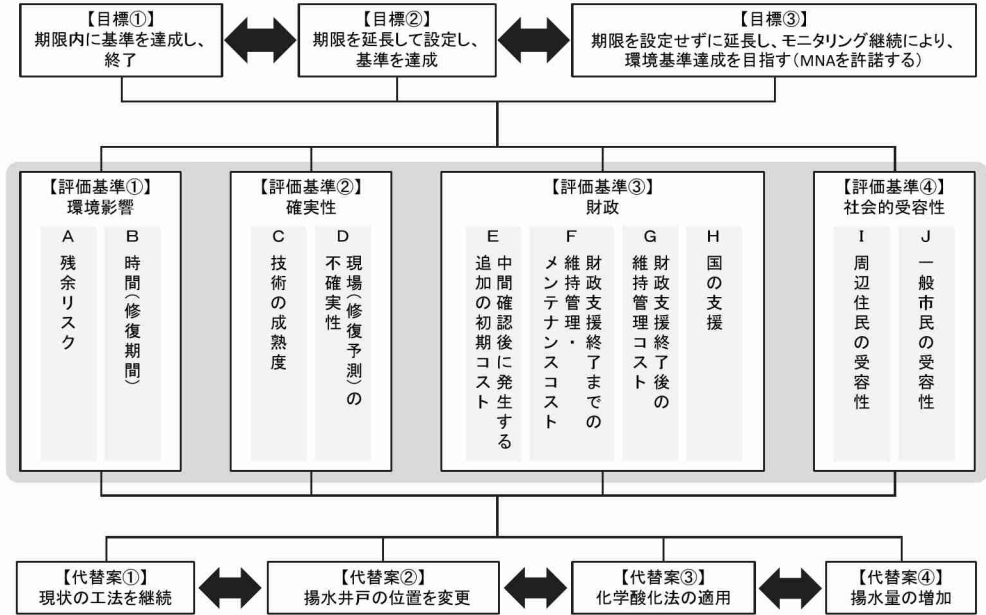
政支援終了後の維持管理コスト」「国の支援」の4つを、社会的受容性の中には「周辺住民の受容性」と「一般市民の受容性」の2つを設定した。なお、「残余リスク」とは修復事業終了時点で廃棄物が残置していることに加え、それが原因によって引き起こされる環境リスク（例えば、地下水汚染など）のことであり、一般的には低い方が望まれる項目である。「時間（修復期間）」とは修復完了までにかかる時間のことであり、一般的には短い（目標年次までに無事に達成し、終了する）方が望まれる項目である。「技術の成熟度」とは、国内外での実績に照らし合された代替案の技術の完成度であり、一般的には処理の確実性を確保するために確立された技術が望まれる項目である。「現場（修復技術）の不確実性」とは、汚染源の新たな発覚や新たな環境基準項目の追加など現時点では想定されていない不足の事態が起こる可能性のことであり、一般的には確実性の高い修復事業が行われることが望まれる項目である。「中間確認後に発生する追加の初期コスト」とは中間確認後に新たな工法を追加した場合に発生する追加の初期コストのことであり、「財政支援終了までの維持管理・メンテナンスコスト」とは、財政支援終了までに修復事業を継続していくための人件費なども含めた維持管理・メンテナンスコストであり、「財政支援終了後の維持管理コスト」とは、財政支援終了後にモニタリングなどを継続していくために必要となる維持管理のためのコストのことであり、一般的にはいずれも低い方が望ましい項目である。「国の支援」として、現時点では平成34年度までに予定されている修復事業のみであるが、中間評価を実施した際、仮に追加の修復事業が必要となった場合や平成34年度以降に修復期間が延長された場合は、これらの追加にかかる費用に対し、一般的には国の支援があった方が望ましい項目である。「周辺住民の受容性」とは、現場周辺の住民には直接的な環境リスクもあるため、周辺住民にも受け入れられる修復事業を実施する方が望ましい項目である。「一般市民の受容性」とは、本修復事業には税金の一部が投入されていることから、税金という形で間接的に負担している一般市民（国民、県民）にも受け入れられる修復事業を実施する方が望ましい項目である。

表(2)-2 本研究で設定した評価基準

		内容
環境 影響	A 残余リスク	廃棄物が残余していることによって引き起こされるリスク。(例えば、地下水汚染 など)
	B 時間（修復期間）	修復完了までにかかる時間。
確実性	C 技術の成熟度	国内外での実績による代替案の技術的完成度。 1,4-ジオキサンに関しては環境基準になったばかりのため、まだ確立していない（国内の適用例はない）。
	D 現場（修復予測）の不確実性	現場で起こりうる不測の事態（例：汚染物質拡散の新たな発覚など）。現状、追加対策を行って何とか修復させているという状況で、現場では予想通りにいかないことが多い。
財政	E 中間確認後に発生する追加の初期コスト	中間確認後、新たな工法を選択した場合に発生する追加の初期コスト。
	F 財政支援終了までの維持管理・メンテナンスコスト	財政支援終了まで、修復事業を継続していくために必要な人件費や維持管理・メンテナンスコスト。
	G 財政支援終了後の維持管理コスト	財政支援終了後に必要となる維持管理のためのコスト。
	H 国の支援	財政支援延長（追加）の可能性。
社会的 受容性	I 周辺住民の受容性	主に、近隣の住民を対象とした直接的な環境リスク。
	J 一般市民の受容性	税金という形で間接的に修復費用を負担する一般市民の関心。

4) 評価構造の設定

以上の想定した内容をもとに、本研究で設定した評価構造を図(2)-6に示す。



図(2)-6 本研究で設定した評価構造

5) 取り扱う問題と評価構造の特徴

今回扱う汚染修復の問題は、様々な立場や意見を持ったステークホルダーがいることから、より難しい問題となる。例えば、中間確認の際に何らかの諸事情によりこのままの修復事業を継続しただけでは、平成34年度までに修復事業が完了することが難しくなった場合（目標①の達成が難しくなった場合）、修復事業の見直しが行われ、下記のような意思決定を行う必要がでてくる場合が考えられる。

- ・今後の方向性①：新たな工法を追加し、平成34年度までに修復事業を完了させる。つまり、目標は①のままで、代替案を①から②，③，④へと処理の確実性の高い物へ変更する。（コストを増加させてでも、修復期限は厳守する。）
- ・今後の方向性②：新たな工法は追加せずこれまでの工法を継続し、平成34年度にはこだわらずに期限を延長する。つまり、代替案は①のままで、目標を①から②へ変更する。（修復期限を延長することで、コストを抑える。）

このように意思決定に係るステークホルダーが何を重視するかによって、目標自体も代替案自体も変わる可能性を有している問題である。また、廃棄物という難しい物を扱っていることに加え、地下という見えない物を扱っていることを考えると、中間確認の際に順調に修復事業が行われていること（目標①で代替案①を継続しても平成34年度までに完了する見通しがある）が確認されても、より確実な修復完了を求める意思決定に係るステークホルダーがいる場合、例えば、代替案を①から②へ変更するなど何らかの対応を望む場合も考えられる。

3.3.2 ヒアリング調査および構造化手法

1) ヒアリング方法

本研究で設定した評価構造に対する解析を行うため、自治体で廃棄物関連を担当している方々9名（A氏～I氏）に、ヒアリング調査を実施した。なお、今回は行政の廃棄物関連担当者としているが、当該汚染現場に対してはほとんど初めて情報を与えられた、いわゆる一般住民に近いレベルの方から、長年不法投棄現場対策に従事している専門家までを対象としている。

ヒアリング調査は、①今回対象としている桑名市不法投棄事案の概要説明、②今回設定した評価構造の説明（前節1) ①節の説明）、③ヒアリング調査（回答方法の説明と質問項目への回答）の手順で実

施した。なお、1回あたり1～3人を対象とし、今回対象としている桑名市不法投棄事案に詳しい方に対しては、①の「現場の概要説明」については割愛した。

図(2)-3に示した評価構造の中の評価基準であるAからJまでの10の項目について、全ての組合せについて回答して頂いた。質問項目へ回答して頂く際に用いた回答票を図(2)-7に示す。回答方法として、ISM法では要素*i*が要素*j*に影響を与えていれば1を、与えていなければ0を回答して頂き、DEMATEL法では要素*i*が要素*j*に影響を与えていればその程度を1～4の4段階で回答（与えていなければ、ISM法と同様に0を回答）して頂く必要がある。要素*i*が要素*j*に影響を与えている場合の回答方法（度合いの有無）に違いはあるものの、要素間の一対比較を行うことに違いはないため、今回のヒアリング調査ではDEMATEL法を想定した回答のみを行って頂いた。ISM法の解析を行う際は、影響を与えていた場合の1～4をISM法の解析用に0または1に変換し、解析を行なった。

	要素 <i>j</i>	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
要素 <i>i</i>		A 残余リスク	B 時間（修復期間）	C 技術の成熟度	D 現場（修復予測）の不確実性	E 中間確認後に発生する追加の初期コスト	F 財政支援終了までの維持管理・メンテナンスコスト	G 財政支援終了後の維持管理コスト	H 国の支援	I 周辺住民の受容性	J 一般市民の受容性
A 残余リスク											
B 時間（修復期間）											
C 技術の成熟度											
D 現場（修復予測）の不確実性											
E 中間確認後に発生する追加の初期コスト											
F 財政支援終了までの維持管理・メンテナンスコスト											
G 財政支援終了後の維持管理コスト											
H 国の支援											
I 周辺住民の受容性											
J 一般市民の受容性											

図(2)-7 ヒアリング調査で用いた回答票

2) 構造化手法

本研究では、ヒアリング調査によって得た回答をISM (Interpretive Structure Modeling) 法とDEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) 法を用いて解析を行った。

ISM法は、コンピュータを媒介として、我々が個々の中に抱く社会や企業の複雑な問題のイメージを、システム構成要素の一対比較によって明確な姿として浮かび上がらせ、全体像を一目で把握させようとするものである。構造モデル、すなわち要素間の相互関係パターンは、Interpretive Structural Model と呼ばれる多階層の有向グラフとして図示され、それが再び人間の直感や想像力を刺激して問題の本質に迫る手法として知られている（樫木と河村, 1981）。ヒアリング調査によって得られた一対比較の結果を、0と1の数値に変換し、図(2)-8に示すような2値行列 (binary matrix) M を作成した。

2値行列 M に単位行列 I を加えて $N = M + I$ とし、プール台数演算のもとで行列の乗算を $(M + I)^{r-1} \neq (M + I)^r = (M + I)^{r+1} = T$ が得られるまで行い、可到達行列 (reachability matrix) T を計算した。

可到達行列とは、行列 T の要素 t_{ij} が1であるならば、有向グラフ上で頂点*i*から頂点*j*へパスをたどることによって到達できることを意味しており、要素 t_{ij} が0ならば、頂点*i*から頂点*j*へ到達できないことを表している。つまり、可到達行列 T はもとの2値行列 M におけるすべての直接的な関係とともに、推移性によって得られる間接的な関係も同時に示されていることになる。例として、I氏の可到達行列 T を図(2)-9に示す。可到達行列を求めた後、レベル化し、最小辺の有向グラフを作成する。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
B	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
I	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図(2)-8 2値行列 (例：I氏)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
B	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
C	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
D	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
I	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

図(2)-9 可到達行列 (例：I氏)

一方、DEMATEL法は、「意思決定の試行と評価の実験 (DEcision Making Trial and Evaluation Laboratory)」の頭文字をとったものであり、現在、世界が直面している複雑・困難な問題を解決しようというパテル研究所の大規模の研究プロジェクトの名称である。DEMATEL法とは、そのプロジェクトで考案された方法論の一つである(樫木と河村, 1981)。DEMATEL法は、ISM法と類似しており、異なる点は、先にも述べた通りISM法は0と1で関係性の有無を表現しているのに対して、DEMATEL法は、0~4までの関係性の強度を考慮できる点にある。

ヒアリング調査によって得られた結果を、直接影響行列 (direct matrix) N^* とする。例として、I氏の直接影響行列を図(2)-10に示す。直接影響行列 N^* の各行の値を加算し、その最大の値で全要素を除することにより正規化を行い、この正規化直接行列を N とする。正規化を行うことで、直接的な影響だけでなく間接的な影響も把握することが可能となる。例として、I氏の正規化直接影響行列を図(2)-11に示す。

正規化直接行列を累乗して間接影響を求める。間接影響はある要素 i から累乗分の節点を経由した後、節点 j へ到達する度合いを表す。正規化直接行列の成分は、正規化されているため、累乗を増やす、すなわち経由点が多くなるにつれて間接影響は弱くなっていく。この間接影響の効果に直接影響の効果を加えた総合影響行列 S は単位行列 I を用いて、 $S = N(I - N)^{-1}$ で求まる (なお、 $^{-1}$ は逆行列を示す)。この総合影響行列を分析することにより、間接的な波及効果も含めて各要素間の相互関係を総合的に評価することが可能となる。さらに、総合影響行列の行和 D と列和 R を用いて、影響度 ($D \cdot R$) と関連度 ($D+R$) が求まる。これらに次のような意味がある。

○影響度 ($D \cdot R$)

($D \cdot R$) の値が正で大きいほど、その項目は他に大きな影響を与えており、逆に負になるようなら、影響を受ける方が影響を与えるより大きいことを意味する。

○関連度 ($D+R$)

($D+R$) は影響を受けるにせよ、また与えるにせよ、その項目が他の項目との間に持つ関係の大小を表していることと考えられる。

例として、I氏の正規化直接影響行列および影響度、関連度を図(2)-12に示す。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	3	0	1	2	3	2	0	3	1
B	1	0	2	1	1	3	2	2	2	2
C	3	3	0	1	2	1	1	0	2	2
D	3	3	0	0	3	3	2	1	3	1
E	0	1	0	0	0	1	2	1	2	1
F	1	2	0	0	1	0	3	1	1	1
G	1	1	0	0	2	0	0	0	1	0
H	1	1	0	0	3	3	1	0	0	1
I	1	3	0	0	2	3	2	2	0	2
J	0	2	0	0	2	1	1	0	1	0

図(2)-10 直接影響行列 (I氏)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	0	0.158	0	0.053	0.105	0.158	0.105	0	0.158	0.053
B	0.053	0	0.105	0.053	0.053	0.158	0.105	0.105	0.105	0.105
C	0.158	0.158	0	0.053	0.105	0.053	0.053	0	0.105	0.105
D	0.158	0.158	0	0	0.158	0.158	0.105	0.053	0.158	0.053
E	0	0.053	0	0	0	0.053	0.105	0.053	0.105	0.053
F	0.053	0.105	0	0	0.053	0	0.158	0.053	0.053	0.053
G	0.053	0.053	0	0	0.105	0	0	0	0.053	0
H	0.053	0.053	0	0	0.158	0.158	0.053	0	0	0.053
I	0.053	0.158	0	0	0.105	0.158	0.105	0.105	0	0.105
J	0	0.105	0	0	0.105	0.053	0.053	0	0.053	0

図(2)-11 正規化直接影響行列 (I氏)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	D行和
A	0.086	0.318	0.033	0.076	0.255	0.318	0.279	0.098	0.287	0.164	1.914
B	0.148	0.185	0.125	0.077	0.225	0.319	0.275	0.183	0.239	0.213	1.988
C	0.238	0.335	0.035	0.085	0.268	0.24	0.234	0.094	0.26	0.22	2.008
D	0.251	0.364	0.038	0.034	0.347	0.369	0.324	0.165	0.328	0.191	2.41
E	0.041	0.132	0.014	0.01	0.083	0.132	0.182	0.095	0.159	0.104	0.951
F	0.1	0.198	0.021	0.017	0.152	0.102	0.25	0.102	0.135	0.115	1.191
G	0.076	0.108	0.011	0.01	0.152	0.063	0.062	0.034	0.104	0.041	0.662
H	0.093	0.146	0.015	0.013	0.237	0.238	0.16	0.05	0.086	0.112	1.15
I	0.122	0.294	0.031	0.023	0.246	0.3	0.259	0.179	0.123	0.198	1.774
J	0.035	0.17	0.018	0.012	0.167	0.125	0.131	0.046	0.114	0.052	0.869
R列和	1.189	2.249	0.342	0.357	2.133	2.206	2.155	1.045	1.834	1.409	

	D+R	D-R
A	3.10	0.73
B	4.24	-0.26
C	2.35	1.67
D	2.77	2.05
E	3.08	-1.18
F	3.40	-1.02
G	2.82	-1.49
H	2.20	0.11
I	3.61	-0.06
J	2.28	-0.54

図(2)-12 正規化直接影響行列・影響度・関連度 (I氏)

次に、影響度（D・R）を縦軸に、関連度（D+R）を横軸に構造グラフを描く。縦軸の上の方に影響が強い項目（問題となる項目）が位置し、下の方にはあまり他と関係がなく、受け身の項目（達成目標となる項目）が位置する。

本研究においては、修復対策を決定する際の評価軸の優先順位を問うているので、主要達成目標とは、「最重要視している目標となるべき評価軸」を表現していることになり、主要課題とは、「当該現場での修復対策を決定する際に課題解決すべき評価軸」と解釈することができる。

3.4 ANP手法の適用

3.4.1 ANP手法の特徴

評価手法はそれぞれ強み、弱みをもっており、扱う問題によって適切に評価手法を選択する必要がある。現実の意思決定問題において、代替案の優先順位は、ある代替案が他の代替案の選択に対して影響を与えているように、要素間同士でも複雑に影響を与え合っているのが現状である。また、その影響の有無や度合いは、立場などにより評価者各々で異なってくる。本研究では、評価手法として評価者の主観的な価値判断や要素間の複雑な相互作用を捉えることができるANP手法を適用する。従来のAHP手法では、1つの目標に対して、評価基準を経て代替案を選択するというものであったのに対し、本研究では複数の目標の選択であることに加え、代替案から評価基準への影響などもあることを踏まえ、ANP手法の方が最適であると判断し、選択した。

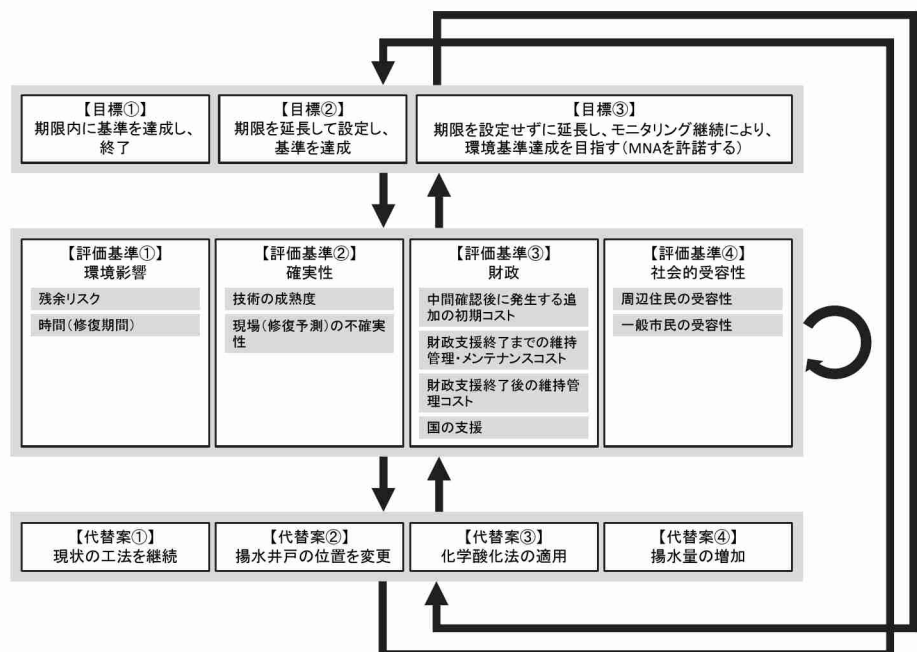
ANP手法はAHP手法を発展させた評価手法であり、基本的には目標、評価基準、代替案の3層からなる評価構造モデルである。ANP手法の代表的な特徴である相互依存関係（Interdependence）とフィードバック（Feedback）を下記に示す。

- ・相互依存関係（Interdependence）：各階層内の要素間同士の影響のことであり、ある階層のある要素が同じ階層の他の要素に対して、どれくらいの影響を与えているかを考慮して評価することである。最終的には、他の要素に影響を与えているある要素は重み付け（重要度）が大きくなり、影響を受けている要素は重み付け（重要度）は小さくなるという関係になる。

- ・フィードバック（Feedback）：下層からみた上層の優先度（「重要さ」や「特徴的か」）を考慮することであり、下層の持つ本来の特徴を評価に反映することが可能となる。

3.4.2 評価構造

本研究でANP適用時に用いた評価構造を図(2)-13に示す。目標、評価基準、代替案がネットワーク構造で結ばれ、それぞれが相互に影響し合う構造とした。相互依存関係については、評価基準間のみを考え、目標と代替案についてはそれぞれの要素間での影響はなく、独立したものとして扱った。



図(2)-13 本研究で設定した評価構造

3.4.3 解析方法

1) ヒアリング票への回答方法

本研究ではANP手法を採用しており、構築した評価構造モデルの各要素それぞれに対し、2つの項目間での一対比較を行うことにより、相対的な重み付けを決定した。本研究で使用したヒアリング票の一

例を表(2)-3に示す。なお、本研究における重要性の尺度については、同じくらいが1、やや重視が3、かなり重視が5、非常に重視が7、極めて重視が9の合計9段階で回答して頂いた。

表(2)-3 ヒアリング票の一例

例：目標①「期限内に基準を達成し、終了」に関してどちらの項目を重視しますか。

	極めて重要	非常に重要	かなり重要	やや重要	同じ位	やや重要	かなり重要	非常に重要	極めて重要	
評価基準① 環境影響							○			評価基準② 確実性
評価基準① 環境影響								○		評価基準③ 財政
評価基準① 環境影響				○						評価基準④ 社会的受容性
評価基準② 確実性							○			評価基準③ 財政
評価基準② 確実性			○							評価基準④ 社会的受容性
評価基準③ 財政		○								評価基準④ 社会的受容性

2) ANP手法によるSupermatrixを用いた個人評価ウェイトの算出方法

回答して頂いたヒアリング票をもとに、9段階の重要性の尺度に変換し、表(2)-4の一対比較値の列に示すように整理を行った。次に、整理した一対比較値を用いて、幾何平均法により重みベクトルを算出した。同様の方法を用いて全ての項目で重みベクトルを算出し、各ヒアリング対象者の結果を図(2)-14に示す

Supermatrix（超行列）で整理した。与えられた評価値は全て正であり、かつ一つの対象が与える評価値の総和は1である。つまり、Supermatrixの各列の要素の和は1となっており、Supermatrixが確立行列であることを意味している。得られたSupermatrixは値が収束するまで何度も掛け合わせ、収束して最終的に得られたSupermatrixが各要素の重み付け、つまり本研究で設定した相互関係およびフィードバックを考慮した要素間の重み付け（個人評価ウェイト）となっている。

	目標①	目標②	目標③	評価基準①	評価基準②	評価基準③	評価基準④	代替案①	代替案②	代替案③	代替案④
目標①											
目標②											
目標③											
評価基準①											
評価基準②											
評価基準③											
評価基準④											
代替案①											
代替案②											
代替案③											
代替案④											

図(2)-14 本研究で設定したSupermatrix

表(2)-4 一対比較値とそれをもとに算出した重みベクトル

	一対比較値				重みベクトル
	評価基準①	評価基準②	評価基準③	評価基準④	
評価基準①	1	1/5	1/7	3	0.086
評価基準②	5	1	1/5	5	0.237
評価基準③	7	5	1	7	0.627
評価基準④	1/3	1/5	1/7	1	0.050

3) Compatibility Quotient値の算出方法

得られた個人評価ウェイトを用いて、ヒアリング対象者同士の類似性を把握するため、2つの評価ウェイト間の類似度を算出することができるCompatibility Quotient（以下、CQ）値を導入した。例えば、ある個人 w と u のCQ値は式(2)-1から求めることができ、CQ値が1に近いほど、個人同士が近いことを示している。なお、 i と j は各要素を、 n は要素の総和である11を示している。

$$CQ(w,u)=\frac{n^2}{\sum_{i,j=1}^n\left(\frac{w_i}{w_j}\right)\left(\frac{u_j}{u_i}\right)}$$

(2)-1

4) デンドログラムを用いた可視化と集約度の算出方法

算出したCQ値を用いて、群平均法によりデンドログラムを作成し、可視化を行った。なお、デンドログラムは下から交わるほど距離が近いことを示している。さらに、個人間の類似度だけではなく、ヒアリング対象者全体としての意見の変容を定量化するため、集約度という指標を導入した。集約度は、デンドログラムの結合点の距離を全て合計することで算出する。

5) ヒアリング調査

① ヒアリング対象者

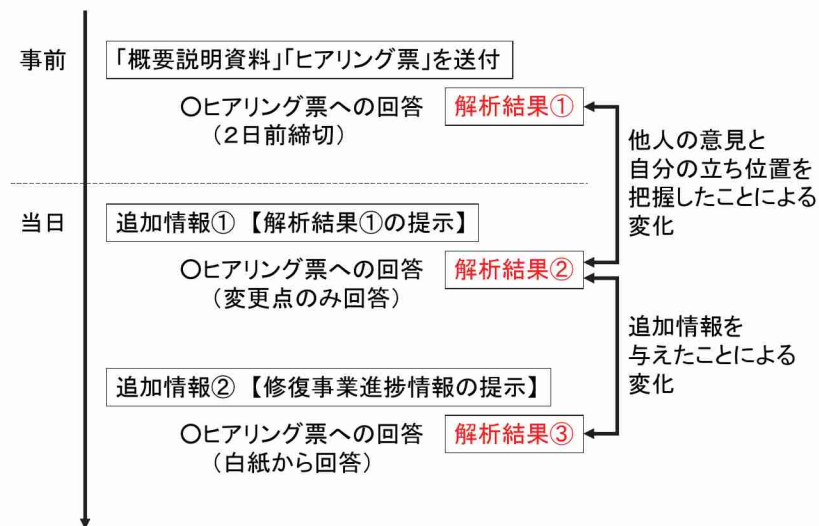
本研究では、当該汚染修復現場の担当者だけでなく、今回初めて汚染修復現場の詳細な情報を与えられた方（一般市民に近い方）を含む合計11名（表(2)-5）の行政関係者にヒアリング調査を実施した。なお、本研究では不法投棄事案というシビアな問題を扱っていることに加え、構築した評価構造モデルの中には、研究として本研究で独自に設定した項目（例えば、目標②の修復事業完了期限の延長）が含まれているため、一般市民へヒアリングを行うことは不適切であると考え、今回は行政関係者内でヒアリングを実施した。

表(2)-5 ヒアリング対象者一覧

		所属
当該事案担当者  当該事案について、 初めて詳細な情報を与えられた 方 (一般市民に近い方)	A氏	当該事案担当者
	B氏	他事案担当者（昨年度まで、対象事案担当者）
	C氏	当該事案担当者
	D氏	他事案担当者
	E氏	不法投棄事案 事務関連担当者
	F氏	不法投棄事案 事務関連担当者
	G氏	他部署
	H氏	他部署
	I氏	他部署
	J氏	他部署
	K氏	他部署

② ヒアリング方法

本研究のヒアリング調査の流れを図(2)-15に示す。調査の流れとしては、①事前に当該現場のこれまでの修復歴等の情報を整理した「概要説明資料」と「ヒアリング票」を送付し、当該現場について状況等を把握して頂いた後、2日前までにヒアリング票へ回答し、返送して頂いた。②回答して頂いた結果を解析【解析結果①】し、ヒアリング調査当日、11名の回答を解析した結果【追加情報①】をヒアリング対象者に提示し、自身と他者の結果の違いや全体での自分の立ち位置を認識して頂いたうえで、回答結果に変更点があれば修正して頂いた。なお、解析した結果を提示する際、各々はA氏～K氏のアルファベットで記載したままとし、回答者本人のみにご自身がどのアルファベットであるのか開示した。なお、この回答結果を解析した結果を【解析結果②】とする。③さらに、現場の最新の修復対策の進捗状況【追加情報②】を提示し、現状をより詳細に把握して頂いたうえで、白紙の状態から再度評価を行って頂いた。この解析結果を【解析結果③】とする。



図(2)-15 ヒアリング調査の流れ

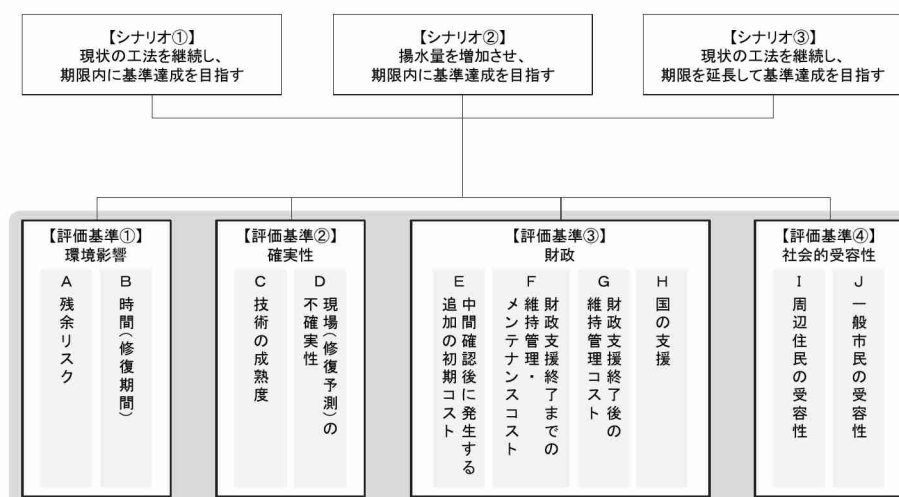
3.5 数値シミュレーション結果を踏まえた改良ANPモデルの適用

3.5.1 評価構造の改良

これまでのANPモデルは、質問数が多いため回答者の負担が大きかったことから、これまでの結果を踏まえて、評価構造の改良を行うこととした。先に構築した図(2)-13の評価構造モデルから「目標③」「代替案②」「代替案③」の3項目を削除し、下記の4項目とした。

- ・目標①：期限内に基準を達成し、終了
- ・目標②：期限を延長して設定し、基準を達成
- ・代替案①：現状の工法を継続
- ・代替案④：揚水量の増加

さらに、残った目標と代替案の組み合わせにおいても、「現状の修復事業を継続する場合」「期限を厳守するために追加の工法を選択する場合」「追加費用を抑えるために現状の工法を継続しつつ、期限を延長する場合」の3パターンであることから、これらの組み合わせをシナリオとして設定し直した。評価基準については、平成27年度に設定した4項目のままとし、図(2)-16に示す通り、「シナリオ」と「評価基準」の2層からなる評価構造モデルに改善した。



図(2)-16 平成29年度に改善した評価構造モデル

3.5.2 ANPアンケート回答方法の提案

さらに回答者の負担を軽減するために、一対比較に代わる回答方法を提案する。

そこで今年度は図(2)-17に示す通り、質問に対して該当する指標の順位付けとその指標間の程度の差を伺う形式に改善を行った。なお、その後の解析自体はANP手法を適用するため、アンケートに回答して頂いた結果を一定の基準に従って一対比較へ戻し、解析を行う。このアンケート回答方法の改善を行うことにより、改良された評価構造モデルの場合、質問数は165問から11問へと削減することができた。

例：シナリオ①に対して、それぞれの評価基準の重視する度合いを教えてください。



図(2)-17 優先順番と度合いによって回答を行う場合のヒアリング票の一例

3.5.3 アンケート調査

対象事案の実際の間接評価に関連するステークホルダーを含め合計7名（表(2)-6）にアンケート調査を実施した。

アンケート調査の流れとしては、当該対象事案の間接評価で修復効果予測の結果が報告されたことを想定し、まず初めに数値シミュレーションの結果である修復効果予測の結果を情報として提示した。次に、アンケート調査を行うにあたり設定した評価構造モデルとアンケートへの回答方法について説明を行った。その後、アンケート票へ回答を行って頂いた。

表(2)-6 アンケート対象者一覧

	所属
A氏	県庁職員 対象事案担当者
B氏	県庁職員 対象事案担当者
C氏	県庁職員 一昨年度まで対象事案担当者（現在は、県内の他不法投棄事案担当）
D氏	対象事案関連委員会 委員
E氏	対象事案関連委員会 委員
F氏	有識者
G氏	有識者

それ以降の解析方法については、3.4節と同等である。

4. 結果及び考察

4.1 多主体による意思決定手法の研究レビューの結果

汚染修復も含む廃棄物管理全般な問題を解決するためには、人の健康や生活環境の保全、温室効果ガスの排出量、経済性、エネルギー回収など資源保全（リサイクルや再生利用含む）、住民の満足度など、複数の目的を満足することが望まれている。どのような廃棄物処理方法や施設立地が最適なのか、上記の目的に照らし合わせて評価され、意思決定される。このような多目的の意思決定分析はMulti criteria decision analysis (MCDA)と呼ばれている。評価軸（目的）は相互にトレードオフの関係となる場合があり、一般的にすべての目的を満足する解は得られない。このようなことから、評価軸に優先順位付けを行うことで結果的に適切な実行可能な意思決定を行う場合が多い。また、評価の内容は定量的に評価できるものばかりと限らない。定性的でしか評価できない評価軸も存在する。その場合は選好（効用）評価による方法がとられる。

4.1.1 既存のMCDA手法

1) AHPとANP

最も一般的でよく使われているMCDA手法の一つはAHPであり、Saaty²⁾によって開発されたもので

ある。ANPは、AHPの拡張形であるが、より複雑な問題を扱えるもう一つの手法であると認識されている³⁾。AHPもANPも、一対比較を用いて、相対的な重み付けを評価することで、各要素の重み付けを決定する。

AHPは目的、評価軸、代替案とボトムアップ式に階層構造を構築することを基本としている一方で、ANPは評価軸間の相互関係及び代替案から評価軸のフィードバックを考慮できる手法である。AHPは、評価者の主観により評価を行っていく上で、評価者の首尾一貫性を評価できることが利点である。主観的な評価のあいまい性を扱う手法としてFuzzy AHPやFuzzy ANPも提案されており、Mardani et al.⁴⁾が包括的なレビューを行っている。

2) MAUT

MAUTは、Keeney and Raiffa⁵⁾によって開発された最適化モデルであり、得点に基づき代替案を比較する手法である。この得点は、評価軸に関する代替案のパフォーマンスを足しあわせたものとなる。MAUTは個々人の選好を効用関数を用いて定量化し、属性間のトレードオフを考慮する。そして効用を最大とするような代替案を選択する。MAUTの難しい点は、効用関数を作成するのに対話形式の調査環境が必要であることである⁶⁾。

3) PROMETHEE

PROMETHEEは優先順位付けを行う手法であるが、AHPとは異なり、最適な代替案を選択する代わりに、代替案の優越性に基づき順序づけを行う⁷⁾。すなわち、代替案同士を比較し、より多くの評価基準において、あるいはより好ましい評価基準において良い成績をおさめる、他の代替案よりも勝っているならば、その代替案は上位にランキングされる。PROMETHEEでは、代替案の順位付けは、各評価基準の最適点からの偏差に基づいている⁸⁾。定量化された順位付けを行うために一般化された評価基準を用いている⁹⁾。

4) ELECTRE

ELECTREは、もう一つの優先順位付けを行う手法であり、複雑な数学的プロセスを用いて選りすぐれた代替案を導き出す。多くの評価基準で好ましく、かつ全ての評価基準において許容レベルを同時に超える代替案が高い評価を受ける⁶⁾。AHPのように一対比較法を用いているが、ELECTREは代替案や評価軸が多数の場合、評価基準同士の埋め合わせができない場合、統一されていない尺度の統合化が困難な場合は優れていると言われている。

5) TOPSIS

TOPSISはHwang and Yoon¹⁰⁾によって開発された一連の手法であり、最も理想的な代替案からの最も近くにあり、最も望ましくないものから最も距離がある代替案を導き出す^{8, 11)}。代替案に対して、各基準に重み付けを与え、各基準に対して、最も理想的なものと最も望ましくないものからの距離を定量化する。その両者の距離の比と両者の距離の和によって、代替案の順位付けを行う。

4.1.2 多主体参加型的意思決定

Soltani et al.¹²⁾は、1991年～2013年までの一般廃棄物管理に用いられたMCDAのレビューを行っている(全68論文が対象)。その結果、多目的評価手法として最も良く用いられているものはAHP/ANP/Fuzzy ANP(33論文)、続いてELECTRE(13論文)、PROMETHEE(10論文)、TOPSIS(7論文)、その他(20論文)であった。またMCDAが用いられた目的は、施設立地が39論文であり、処理方法の検討が31論文であった。さらに26論文が、政府や行政、一般住民、専門家、他の団体など複数のステークホルダーでの評価を行っている。しかしながら、既存の研究論文ではこれらステークホルダーは、個々人として扱われており、他の人の意思決定に影響を及ぼさないし、選好を変えることもない。しかし実際のグループでの意思決定は、個人自身の選好だけではなく、他にどのような選択肢の可能性がありうるのか、または他人の選好の結果に依存するはずであると述べており、多主体の対話型の手法の必要性を示唆している。

4.1.3 目指す意思決定のあり方とそのための手法

まず、意思決定手法、それ自体の目的について述べる。意思決定手法は、最終意思決定者が最終意思決定をするための手段として用いるものであり、その手法によって得られた解を鵜呑みにして最終意思決定するのではない。すなわち、意思決定を支援するのが意思決定手法開発の目的である。評価軸が少ない場合、意思決定に関わるステークホルダーが極少数の場合は、最終意思決定者は、代替案の定量的な評価に基づき、ステークホルダーの意見を聴衆すれば、最終意思決定は可能である。しかし、本研究で扱う汚染修復の問題は、コストのみならず、環境影響、適用技術の熟成度、住民合意など評価軸が多岐にわたる上に、価値観の異なる様々なステークホルダーの意見を反映して、最終意思決定者は、意思決定する必要がある。このような場合、どのような評価基準がより優先されるべきか、ステークホルダーの総意は何か、あるいは異なる意見の論点は何かなど、定量的に明らかにするツールが有効であると考えられる。

さらに、意思決定手法には、最終意思決定者にとっての情報提供のみならず、話し合いに参加しているステークホルダー自身にとっても、有効なツールになり得る。例えば、意見の異なる他人との優先順位の違いなどを、定量的に視覚化することによって、自分の考え方を修正することができる。また、他人の考え方が分かることによって自分の態度も変容（例えば、反対から賛成へ）することもある。このように対話形式で意思決定手法を用いることにより、多主体からなる会議でのステークホルダーの意見が、一つの方向に収れんすることが期待できる。あるいは、収れんせずとも、対立軸が明らかになることと、論点が明らかになることが期待される。

本研究では、意思決定手法の役割を次のように定め、研究開発を進めることにする。

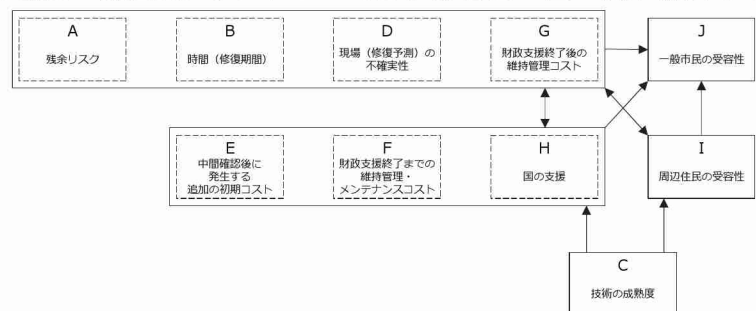
- ①最終意思決定者にとっての情報提供（優先順位及び対立論点の明確化、総意の把握）
- ②ステークホルダーの態度の変容を促進（自身の位置づけの把握、他人との価値観の相違の把握）

そして、比較的適用事例が多く、曖昧な回答に対しても展開応用可能なAHP、ANP手法を用いることにする。

4.2 ISM法及びDEMATEL法による評価構造モデル化の結果

4.2.1 各主体の評価構造の比較

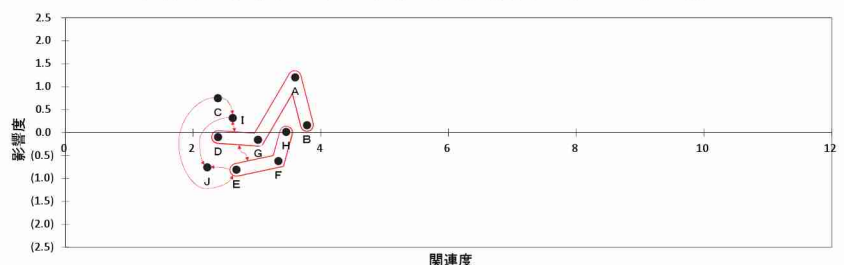
9名（A氏～I氏）のISM法による有向グラフとDEMATEL法による影響度・関連度グラフを図(2)-5～図(2)-13に示し、各人に対して考察を行っていく。そこで構造グラフにおいては、構造の上流側は課題として認識している、あるいは前提として認識している評価項目に相当し、下流側が最終目標であると認識しているとして考察を行った。また影響度・関連度グラフにおいては、影響度の正の側が課題として考えている評価項目（他の項目に影響を与える傾向が強い）、負の側を最終目標として考えている評価項目（他の項目から影響を受ける傾向が強い）であるとした。



i) A氏（図(2)-18）

A氏は「一般市民の受容性」を最も優先度の高い項目だと考えており、影響度合いは異なるものの全ての項目が一般市民の受容性に影響を与えていると考えている。また、「技術の成熟度」が最も影響が大きい項目（修復対策を検討する際に最も問題となる項目）であると考えており、それが他の項目全てに影響を与え

図(2)-18 (1) ISM法による構造グラフ (A氏)

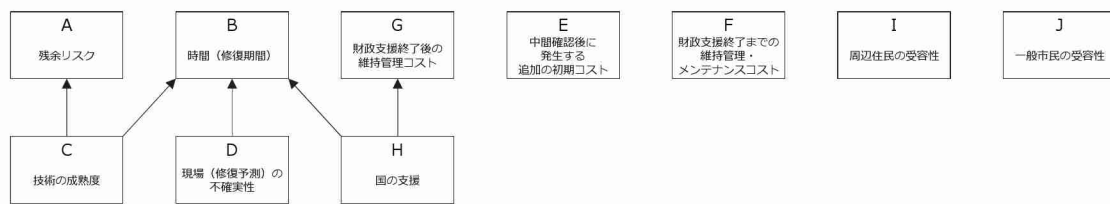


図(2)-19 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (A氏)

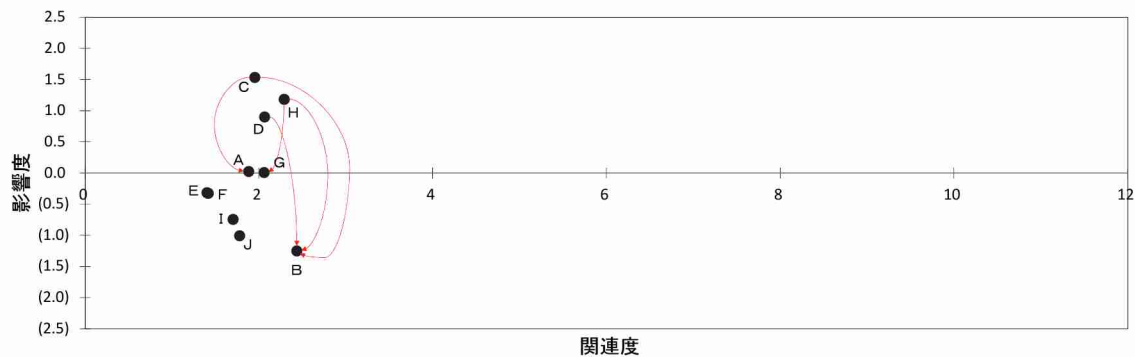
と考えている。受容性という観点から、修復事業を実施する際にどのような技術を選択するかによって、周辺住民に受け入れられるかどうかとも変わるうえ、その結果（影響）が一般市民の受容性にも影響を与えていると考えている。コストという観点においても、技術選択は修復事業期間に必要となるコストなどに影響を与え、将来にわたって不確実と思われるような項目（残余リスク、修復期間、修復事業の不確実性、財政支援終了後の維持管理コスト）と相互に影響しあいながら、それらが最終的には一般市民の受容性にも影響を与えていると認識している。そのため、コストへの影響はあるものの、国の支援を受けつつ、より実行可能性の高い修復技術を選択することが、将来へのリスクを低減させつつ、周辺住民を含む一般市民にも受け入れられる修復事業につながると考えている。

ii) B氏（図(2)-20）

B氏は「時間（修復期間）」が最も優先度の高い項目だと考えており、これには「技術の成熟度」「現場（修復予測）の不確実性」「国の支援」が強く影響を与えていると考えている。



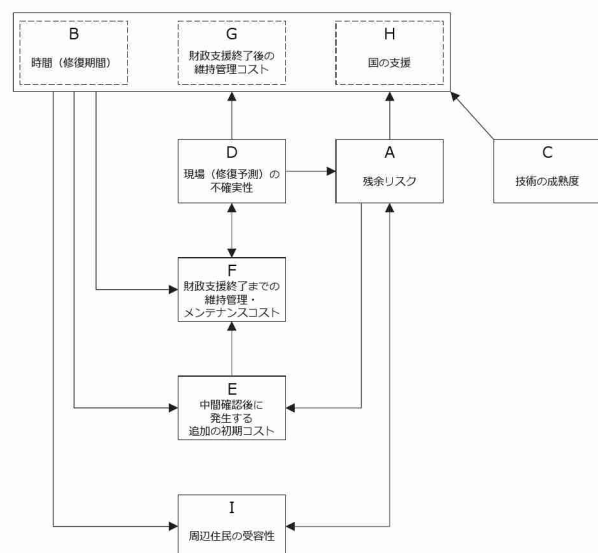
図(2)-20 (1) ISM法による構造グラフ (B氏)



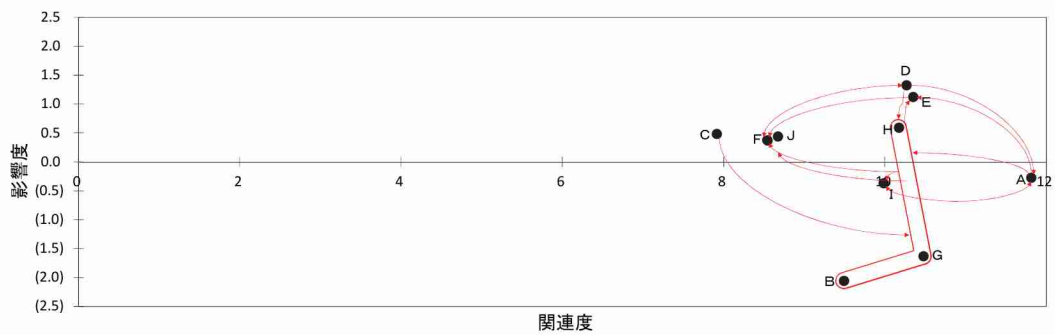
図(2)-20 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (B氏)

iii) C氏（図(2)-21）

構造上のループが多く、正確な解釈が難しいが、C氏は「周辺住民の受容性」や「時間（修復期間）」を重要視していると考えられる。そのための現場の不確実性やそこから生じる残余リスクを課題として認識しており、それから生じる財政支援終了後の維持管理コストの増加を懸念している。



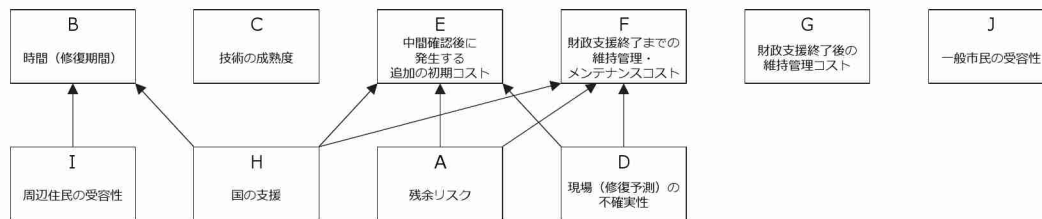
図(2)-21 (1) ISM法による構造グラフ (C氏)



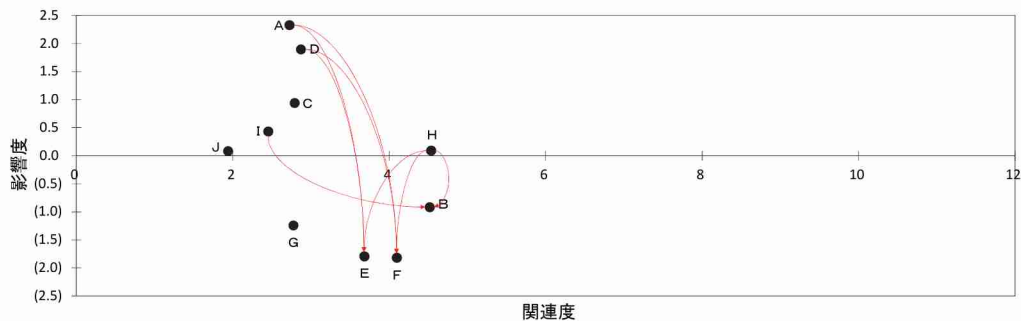
図(2)-21 (2) DEMATEL法による影響度・関係度グラフ (C氏)

iv) D氏 (図(2)-22)

D氏は修復期間中のコスト（追加の初期コストおよび維持管理・メンテナンスコスト）が最も優先度の高い項目だと考えており、それには「残余リスク」や「現場（修復事業）の不確実性」、「国の支援」が最も影響を与えていると考えている。また、「周辺住民の受容性」や「国からの支援」も影響を与えている項目であると考えており、それらから影響を受ける「時間（修復期間）」も比較的重要視している項目と認識している。



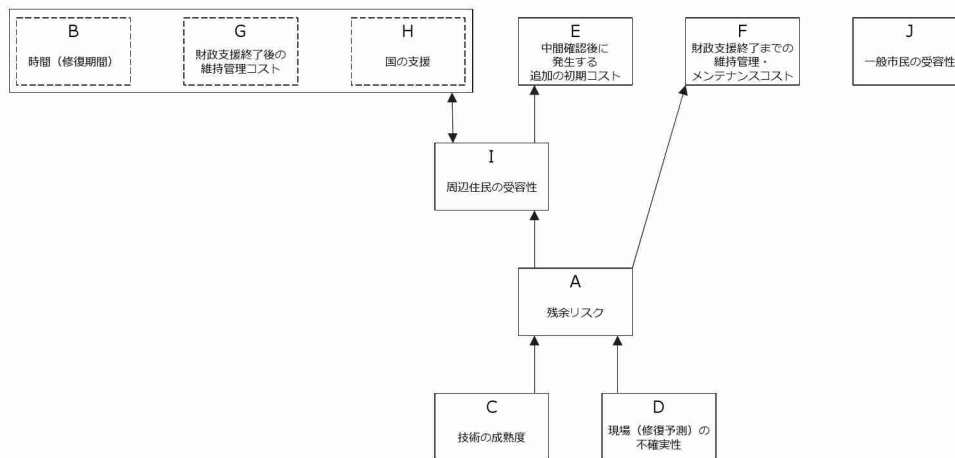
図(2)-22 (1) ISM法による構造グラフ (D氏)



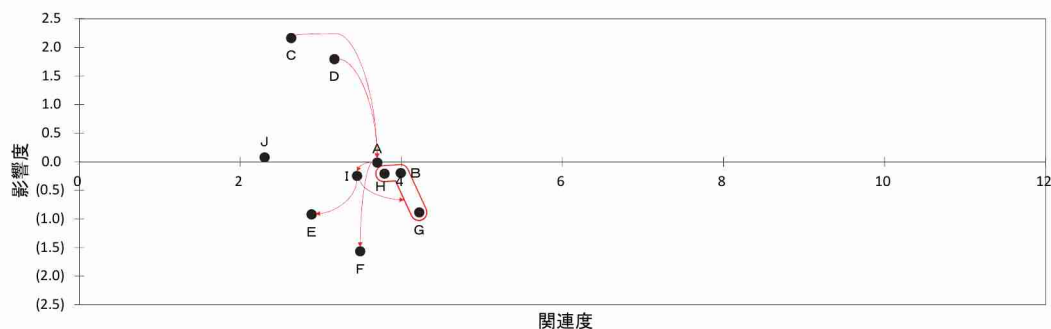
図(2)-22 (2) DEMATEL法による影響度・関係度グラフ (D氏)

v) E氏 (図(2)-23)

E氏は修復期間中のコスト（追加の初期コストおよび維持管理・メンテナンスコスト）が最も優先度の高い項目だと考えている。「技術の成熟度」や「現場（修復予測）の不確実性」が強く影響を与える項目だと認識しており、そこから生じる「残余リスク」の大きさが、「周辺住民の受容性」、最終的には様々なコストに影響を及ぼすと認識している。



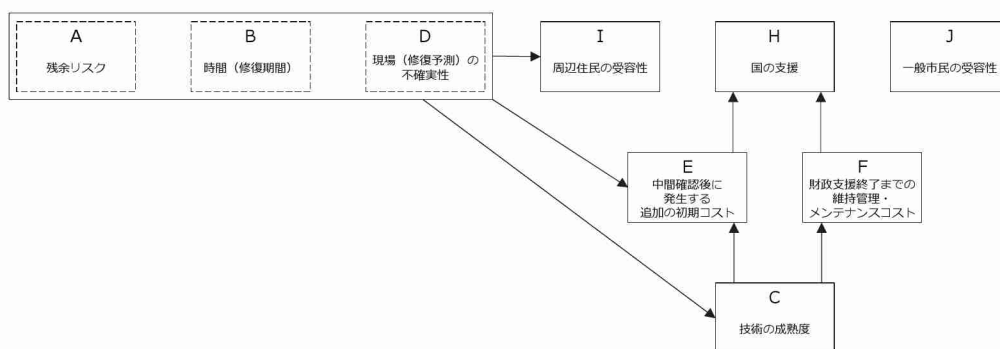
図(2)-23 (1) ISM法による構造グラフ (E氏)



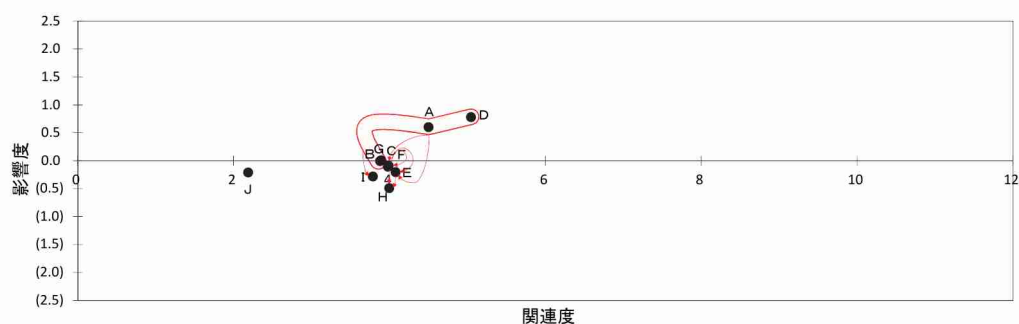
図(2)-23 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (E氏)

vi) F氏（図(2)-24）

優先順位は必ずしも明確ではないが、「国の支援」を重要視していると考えられる。また、「残余リスク」や「時間（修復期間）」、「現場（修復予測）の不確実性」が影響を与えている項目であり、対策を検討するうえで重要な項目であると認識している。



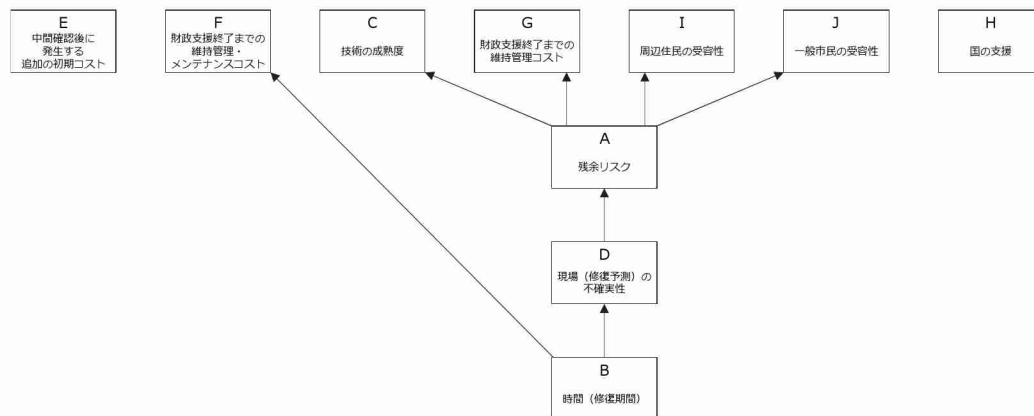
図(2)-24 (1) ISM法による構造グラフ (F氏)



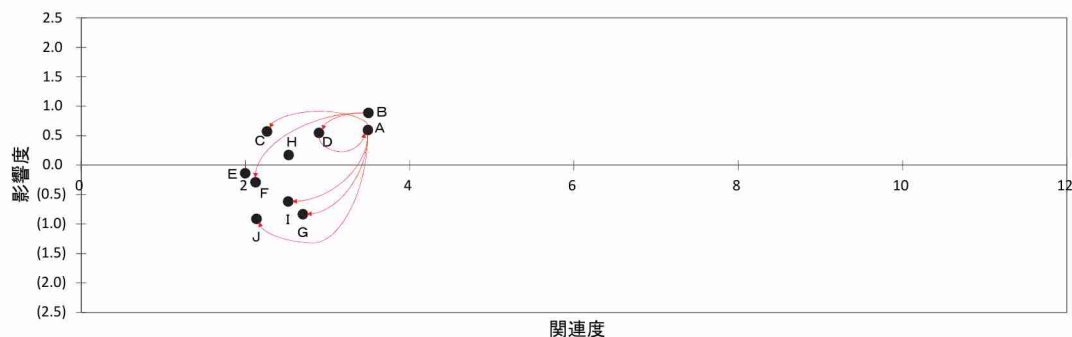
図(2)-24 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (F氏)

vii) G氏 (図(2)-25)

G氏は「周辺住民や一般市民の受容性」、「財政支援終了後の維持管理コスト」を優先度の高い項目だと考えている。また、「時間（修復期間）」が他に影響を与えている項目だと考えていることから、期限内に修復事業を終わらせることを前提に、現場の不確実性や残余リスクの大きさを課題として認識している。



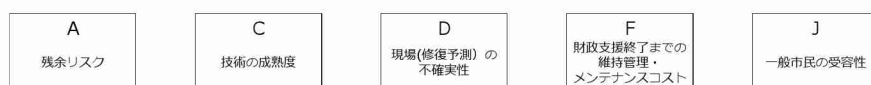
図(2)-25(1) ISM法による構造グラフ (G氏)



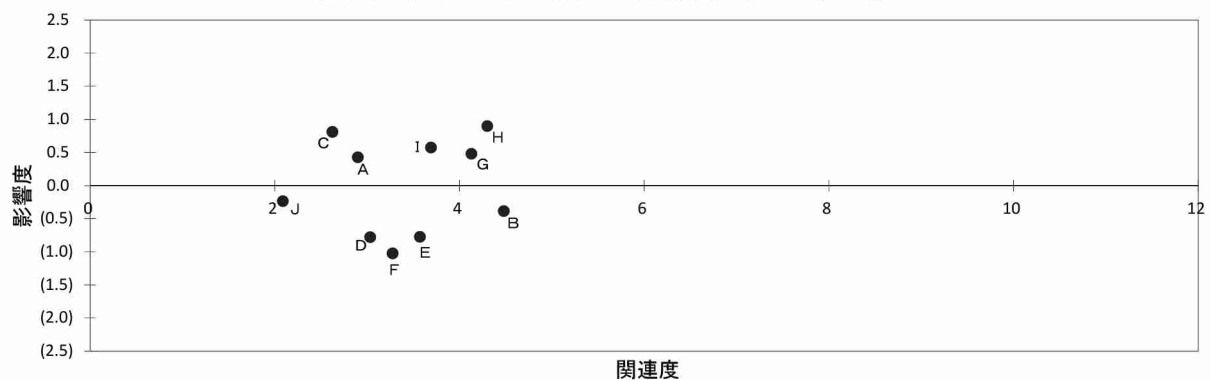
図(2)-25 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (G氏)

viii) H氏 (図(2)-26)

H氏に関しては、明確な構造を見いだせなかった。ISM法やDEMATEL法による質問項目は膨大であり回答方法なども複雑であるため、被験者によってはこのように構造が見いだせない場合もある。



図(2)-26 (1) ISM法による構造グラフ (H氏)



図(2)-26 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (H氏)

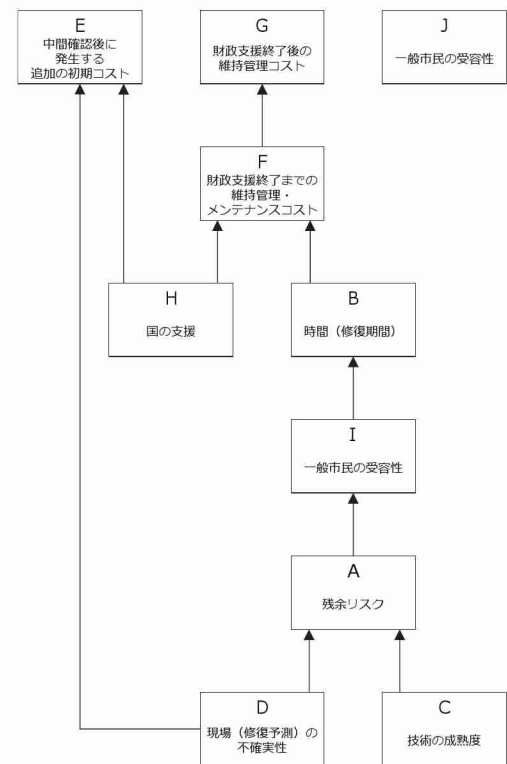
ix) I氏 (図(2)-27)

I氏は「財政支援終了後の維持管理コスト」「中間確認後に発生する追加の初期コスト」を最も優先度の高い項目だと考えている。また、「現場（修復予測）の不確実性」や「技術の成熟度」が強く影響を与えている項目だと考えていることから、現場の有する不確実性や技術の成熟度を前提として、現場の残余リスクが周辺住民の受容性に影響を及ぼすとし、さらにそれら修復対策に必要な時間によって、維持管理・メンテナンスコストに影響を与えているとしている。そして国の支援によって、初期コストと維持管理・メンテナンスコストを削減することが、財政支援終了後のコスト削減につながると考えている。

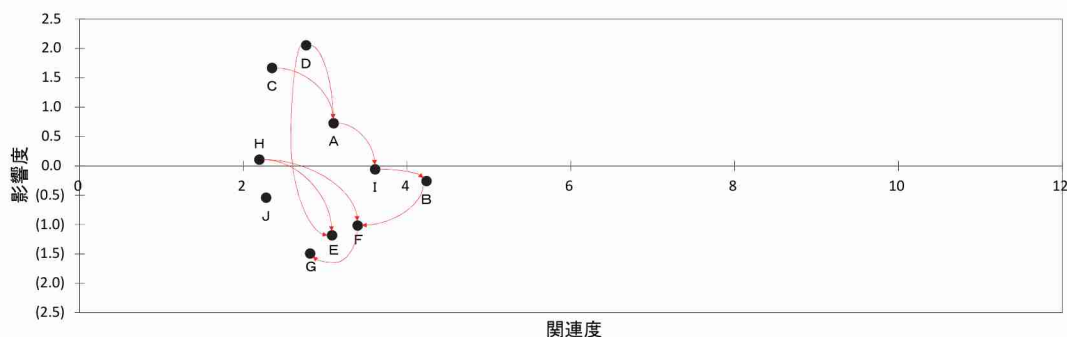
4.2.2 ヒアリング結果に基づく被験者のグルーピング

以上の結果をまとめ、H氏を除く8人のグルーピングを試みる。

目標とすべく評価軸に着目したグループとして、以下の2つに分けられる。



図(2)-27 (1) ISM法による構造グラフ (I氏)



図(2)-27 (2) DEMATEL法による影響度・関連度グラフ (I氏)

○周辺住民と一般住民の受容性、修復期間を目標とするグループ

・・・A氏、B氏、C氏、G氏

この内、A氏は一般住民、C氏は周辺住民と時間、B氏は時間、G氏は一般住民と時間を目標としていた。

○コストを目標とするグループ

・・・D氏、E氏、F氏、I氏

このうち、D氏とE氏は初期コスト、維持管理・メンテナンスコスト、F氏は国の支援による県の負担コストの低減、I氏は、財政支援終了後のコストの削減を目標としていた。

次に、当該現場の課題として強く認識されている評価軸として、全ての被験者が、残余リスク、現場の有する不確実性、技術の成熟度を上げている。すなわち、現地調査やこれまで修復過程で得られたデータ等及び数値シミュレーション等の解析の修復予測に基づき、適用実績があり信頼のできる技術を選択し、できる限り不確実性と残余リスクを低減するような修復代替案を選択するための情報を求めていると言える。

4.3 ANP手法適用の結果

4.3.1 ヒアリング対象者11名の個人評価ウェイト算出結果

ヒアリング対象者11名の個人評価ウェイトを算出した、ヒアリング当日の事前調査結果を表(2)-7に示す。11名の個人評価ウェイトを目標、評価基準、代替案に分けてみると、目標の中では、目標①に重きを置いている人が8名、目標②に重きを置いている人が1名、目標③に重きを置いている人が2名となった。評価基準の中では、評価基準①に重きを置いている人が4名、評価基準②に重きを置いている人が4名、評価基準③に重きを置いている人が1名、評価基準④に重きを置いている人が3名となった。なお、H氏は評価基準①と②のウェイトが同じであった。代替案の中では、代替案①に重きを置いている人が2名、代替案②に重きを置いている人が1名、代替案③に重きを置いている人が1名、代替案④に重きを置いている人が8名となった。なお、D氏は代替案②と代替案④のウェイトが同じであった。11名全体での傾向を見てみると、目標①と代替案④、すなわち期限内に基準を達成という目標で、揚水量の増加という工法を選択する人が最も多い傾向であった。

表(2)-7 解析結果①（事前）個人評価ウェイト

（デンドログラムの結果と見比べ易いよう、列は図(2)-28の結果と対応させ並べ替えている。）

	C氏	F氏	A氏	B氏	I氏	J氏	K氏	D氏	E氏	G氏	H氏
目標①	0.186	0.112	0.202	0.200	0.101	0.136	0.084	0.120	0.173	0.134	0.154
目標②	0.080	0.154	0.050	0.058	0.082	0.069	0.067	0.118	0.062	0.099	0.091
目標③	0.020	0.019	0.034	0.028	0.103	0.080	0.134	0.048	0.051	0.053	0.041
評価基準①	0.190	0.077	0.089	0.197	0.135	0.079	0.105	0.098	0.095	0.120	0.138
評価基準②	0.087	0.153	0.147	0.161	0.123	0.077	0.075	0.138	0.174	0.136	0.138
評価基準③	0.080	0.146	0.156	0.035	0.057	0.084	0.073	0.044	0.088	0.090	0.077
評価基準④	0.071	0.051	0.036	0.036	0.114	0.188	0.175	0.148	0.072	0.083	0.076
代替案①	0.129	0.092	0.097	0.075	0.029	0.035	0.094	0.060	0.078	0.046	0.046
代替案②	0.081	0.089	0.037	0.030	0.081	0.070	0.046	0.104	0.060	0.081	0.077
代替案③	0.011	0.017	0.027	0.021	0.095	0.030	0.045	0.018	0.056	0.069	0.053
代替案④	0.064	0.089	0.124	0.159	0.081	0.151	0.102	0.104	0.091	0.089	0.110

4.3.2 CQ値とデンドログラムを用いたヒアリング対象者11名のグルーピング

11名のヒアリング対象者に対して、個人評価ウェイトのCQ値を算出した結果を表(2)-8に示す。なお、各行と列で交わっている箇所が評価者同士のCQ値を示している。11名の中で、最もCQ値が高いのは、G氏とH氏の0.978であった。G氏とH氏の個人評価ウェイトを比較してみると、目標および評価基準、代替案の全てのクラスターにおいて最も優先する項目が一致していた。なお、本研究では全ての個人評価ウェイトを用いてCQ値による類似性を求めているため、評価構造全体での類似性を評価していることになる。そのため、ある2者で評価構造のクラスター内で優先する項目が同じであったとしても、今回のCQ値算出では2者の類似性が高い結果とはなっていない。

算出したCQ値を用いて、群平均法によりデンドログラムを作成した結果を図(2)-28に示す。最もCQ値の値が大きかったG氏とH氏が最も距離が近いことがデンドログラムで可視化することによっても確認された。デンドログラムより、G氏とH氏が構成するクラスターに最も近いのはE氏であり、その次に近いのはD氏であることがわかった。

得られた個人評価ウェイトおよびCQ値、デンドログラムを用いて、ヒアリング対象者のグルーピングを行った。グルーピングを行った結果、大勢としては大きく4つのグループに分けることができた。

C氏とF氏のグループは、代替案①のウェイトが高くなっていることから、「現状の工法を継続することを重視しているグループ」と解釈することができる。

A氏とB氏のグループは、目標①と代替案④のウェイトが高くなっていることから、「期間内に修復することが重要であり、そのためには揚水量を増加させることも必要であると考えているグループ」と解釈できる。

I氏とJ氏、K氏のグループは、評価基準④と代替案④のウェイトが高くなっていることから、「修復

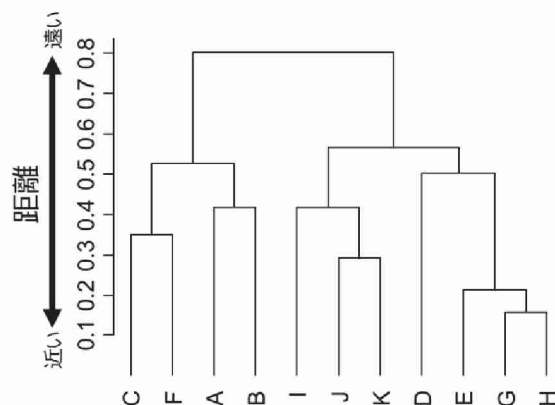
事業を進めるうえで社会的受容性が重要であり、そのためには揚水量を増加させることも必要であると考えているグループ」と解釈することができる。

D氏とE氏、G氏、H氏のグループは、目標①と評価基準②、代替案④のウェイトが高くなっていることから、「期限内に修復事業を終了させるためには確実性が重要であり、そのためには揚水量を増加させる必要があると考えているグループ」と解釈ができる。

以上のように、本手法を用いることで、大きなグループ分けができ、さらにそのグループとしての意見の大きな傾向を把握することが可能となった。

表(2)-8 解析結果①（事前）CQ値算出結果

	A氏	B氏	C氏	D氏	E氏	F氏	G氏	H氏	I氏	J氏	K氏
A氏		0.748	0.696	0.581	0.853	0.750	0.720	0.761	0.507	0.588	0.569
B氏			0.692	0.642	0.742	0.597	0.659	0.753	0.514	0.540	0.523
C氏				0.727	0.654	0.787	0.595	0.667	0.402	0.542	0.509
D氏					0.748	0.709	0.772	0.810	0.667	0.818	0.715
E氏						0.708	0.928	0.930	0.775	0.753	0.753
F氏							0.691	0.729	0.452	0.558	0.481
G氏								0.978	0.896	0.802	0.752
H氏									0.838	0.799	0.712
I氏										0.776	0.761
J氏											0.832
K氏											



図(2)-28 【解析結果①】CQ値によるデンドログラム

4.3.3 追加情報による態度の変容と可視化

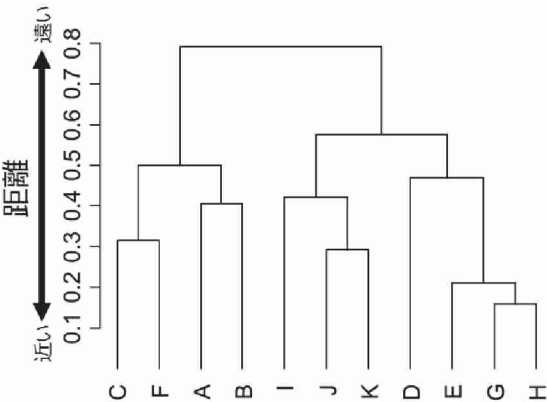
1) 評価結果【追加情報①】のフィードバック

事前に回答して頂いた回答の解析結果を提示したところ、D氏とF氏の2名が回答の修正を行った。なお、D氏は6項目、F氏は9項目の修正を行っており、修正前後での個人評価ウェイトの変化を表(2)-9に、修正後のデータを用いて作成したデンドログラムを図(2)-29に示す。D氏の変化について見てみると、修正前後で評価基準①と③のウェイトが大きくなり、評価基準②と④のウェイトが小さくなったものの、評価基準内でのウェイトの大きさの順序について変化はなかった。修正前後でのD氏とE・G・H氏のグループとの距離の変化をCQ値を用いて比較してみたところ、0.501から0.470へと値が小さくなっており、修正前後で距離は近くなっていることが確認された。次に、F氏の変化について見てみると、目標①と②が変化し、修正後では同じ値となった。また、評価基準では、評価基準③が小さくなり、評価基準①と④のウェイトが大きくなった。修正前後で最も距離の近いC氏との関係については、CQ値を用いて比較してみると、0.350から0.315へと値が小さくなっており、修正前後で距離は小さくなっていることが確認された。このように個人評価ウェイトとデンドログラムを用いて修正前後で比較することにより、

変化を定量的に把握することが可能となった。

表(2)-9 D氏とF氏の修正前後での個人評価ウェイトの変化

	D氏		F氏	
	回答1	回答2	回答1	回答2
目標①	0.120	0.121	0.112	0.133
目標②	0.118	0.117	0.154	0.133
目標③	0.048	0.048	0.019	0.020
評価基準①	0.098	0.104	0.077	0.092
評価基準②	0.138	0.131	0.153	0.153
評価基準③	0.044	0.052	0.146	0.129
評価基準④	0.148	0.142	0.051	0.054
代替案①	0.060	0.061	0.092	0.092
代替案②	0.104	0.103	0.089	0.088
代替案③	0.018	0.018	0.017	0.017
代替案④	0.104	0.103	0.089	0.088



図(2)-29 D氏とF氏修正後【解析結果②】のCQ値によるデンドログラム

2) 最新の修復対策進捗状況【追加情報②】の提示

最新の修復対策進捗状況提供後の個人評価ウェイトを表(2)-10に、デンドログラムを図(2)-30に示す。グルーピングを行った結果、大勢としては大きく2つのグループに分けることができた。

G氏とH氏、E氏、I氏、J氏、A氏、D氏は目標①と代替案④のウェイトが高くなっていることから、「期限内に修復事業を終了させるために、揚水量を増加させることも必要であると考えているグループ」と解釈することができる。

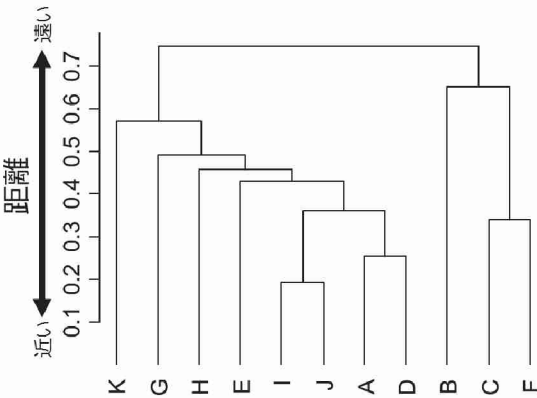
C氏とF氏は目標①と代替案①のウェイトが高くなっていることから、「現状の工法を継続し、期限内の修復事業終了を目指すグループ」と解釈することができる。

なお、追加情報②の提示により、B氏とK氏は、目標①から②への変容が見られた。その結果、B氏はA氏から、K氏はJ氏とは異なる意見を持っていると判定された。しかしながら、結果的に図(2)-7のように、B氏とK氏が一緒のグループを形成するのではなく、それぞれ別のグループにグルーピングされた。これは、他の項目のウェイトのバランスが影響しているためであり、このようにグループ化できない場合もあり、手法上の限界とも言える。

以上のように、グルーピングとそのグループの意見の傾向を把握できるだけでなく、追加情報の前後で結果を比較することにより、意見の変容についても把握することが可能となった。

表(2)-10 最新の修復対策進捗状況提供後【解析結果③】の個人評価ウェイト
(デンドログラムの結果と見比べ易いよう、列は図(2)-7の結果と対応させ並べ替えている。)

	K氏	G氏	H氏	E氏	I氏	J氏	A氏	D氏	B氏	C氏	F氏
目標①	0.083	0.121	0.105	0.171	0.156	0.115	0.153	0.096	0.084	0.181	0.133
目標②	0.121	0.109	0.089	0.057	0.050	0.084	0.070	0.095	0.160	0.079	0.133
目標③	0.082	0.055	0.092	0.057	0.080	0.087	0.063	0.095	0.042	0.025	0.020
評価基準①	0.108	0.138	0.164	0.083	0.140	0.073	0.075	0.093	0.190	0.165	0.075
評価基準②	0.040	0.131	0.136	0.192	0.071	0.110	0.133	0.089	0.159	0.106	0.157
評価基準③	0.127	0.082	0.060	0.090	0.074	0.067	0.152	0.165	0.028	0.087	0.139
評価基準④	0.153	0.077	0.069	0.064	0.144	0.179	0.068	0.081	0.052	0.071	0.057
代替案①	0.102	0.016	0.050	0.096	0.053	0.055	0.038	0.045	0.062	0.134	0.092
代替案②	0.052	0.082	0.112	0.050	0.050	0.042	0.057	0.086	0.044	0.096	0.089
代替案③	0.019	0.037	0.017	0.050	0.024	0.038	0.047	0.032	0.012	0.013	0.017
代替案④	0.112	0.150	0.106	0.091	0.159	0.151	0.143	0.122	0.168	0.043	0.089



図(2)-30 最新の修復対策進捗状況提供後【解析結果③】のデンドログラム

3) 集約度

集約度を算出した結果、解析結果①では4.242、解析結果②では4.144であった。追加情報①によってグループ間の距離が近くなっただけでなく、全体としての意見の集約に繋がったことが確認された。また、解析結果③の集約度は4.491となり、追加情報②を与えることによって全体としての距離は大きくなった。一方、解析結果①では、4つのグループに分かれたのに対し、追加情報②を与えた場合のグループは2つに集約された。

4.4 数値シミュレーション結果を踏まえた改良ANPモデルの適用結果

4.4.1 改良ANPモデルと前ANPモデルの比較

アンケート調査を行う際に設定した評価構造モデルが異なるため、完全な比較はできないが、A氏とC氏は今回の改良ANPモデルのアンケート調査（2018年2月調査）だけでなく、前節の前ANPモデルに対する調査（2016年3月）にもご協力頂いていたため、今回と過去の解析結果について、比較を行った。A氏およびC氏の解析結果を図(2)-31に示す。なお、結果のカッコ内の数値は、それぞれの指標（例えば、目標）を100%とした際のそれぞれの項目の評価ウェイトの大きさを示しており、各指標間での評価ウェイトが最も大きかったものを赤枠で囲み、線で結んでいる。

今回設定したシナリオ①とは、2016年度調査の際の目標①と代替案①の組み合わせに相当するため、解析結果より、A氏はシナリオに対する考え方は変わっていないものの、評価する基準が変わってきたものと思われる。具体的には、今回評価基準の中で評価ウェイトが最も大きかった環境影響は2016年調査の際も比較的大きかったが、2016年度に評価ウェイトが大きかった財政は今回小さくなる一方で、確実性の値が大きくなった。一方、C氏は評価基準の優先順位に大きな変化はないものの、今回シナリオ

は②の評価ウェイトが大きな結果となっており、提示した修復効果予測の結果を踏まえ、期限内に終わらせるためには、追加の対策が必要であると潜在的に考えているのではないかと考えられる。

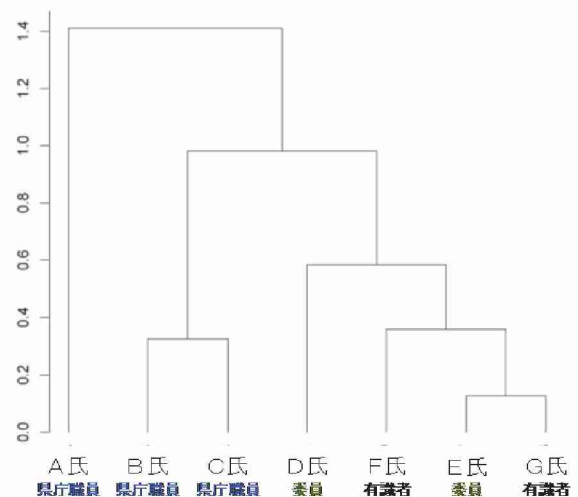


図(2)-31 過去の調査結果との比較 (左：A氏、右：C氏)

4.4.2 アンケート調査対象者のグルーピング

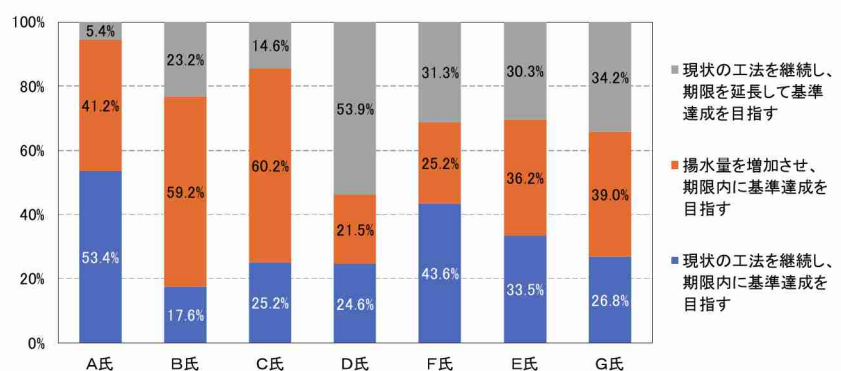
アンケート対象者7名の個人評価ウェイトを算出し、全個人評価ウェイトを用いて個人間の類似性を表すCQ値を算出した。次に、算出したCQ値を用いて、群平均法によりデンドログラムを作成した結果を図(2)-32に示す。デンドログラムの結果から、大きくA氏のみ異なるものの、その他のアンケート対象者については、県庁職員のグループとそれ以外の委員・有識者のグループに分かれる結果となり、ステークホルダーによって評価構造が異なることが確認された。

シナリオの個人評価ウェイトの結果を図(2)-33に示す。結果に示されている通り、県庁職員と委員・有識者では顕著に違いが表れていた。県庁職員は、平成34



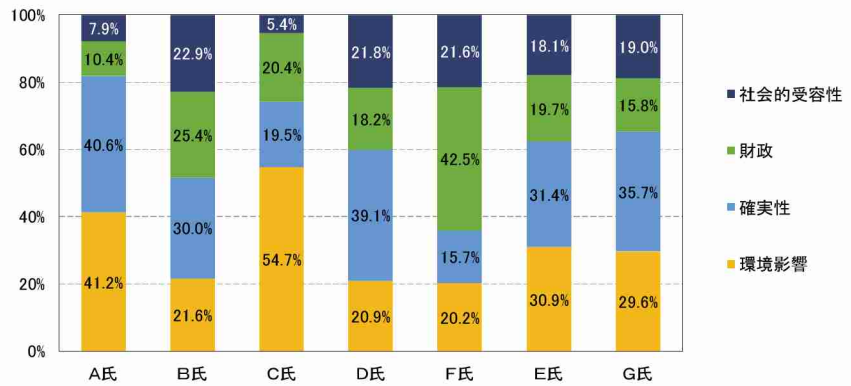
図(2)-32 CQ値によるデンドログラム

年度までに修復事業を終了させることを目標に取り組んでいる担当者であり、期限内に修復事業を終わらせるシナリオの占めるウェイトが大きい結果となった。一方、委員・有識者はシミュレーション結果により修復事業の見通しに懸念が生じたため、期限を延長するシナリオも考慮に入れるメンバーが表れたものと推測される。



図(2)-33 シナリオの個人評価ウェイトの結

次に、評価基準の個人評価ウェイトの結果を図(2)-34に示す。A氏とB氏、D氏、E氏、G氏は確実性のウェイトが大きくなっていた。これは、「地下で全てを把握することはできない」ことに加え、「不法投棄(ごみ)を扱っている」ことから、潜在的に現場の不確実性を懸念しているためであると考えられる。有識者のF氏は財政のウェイト



図(2)-34 評価基準の個人評価ウェイトの結果

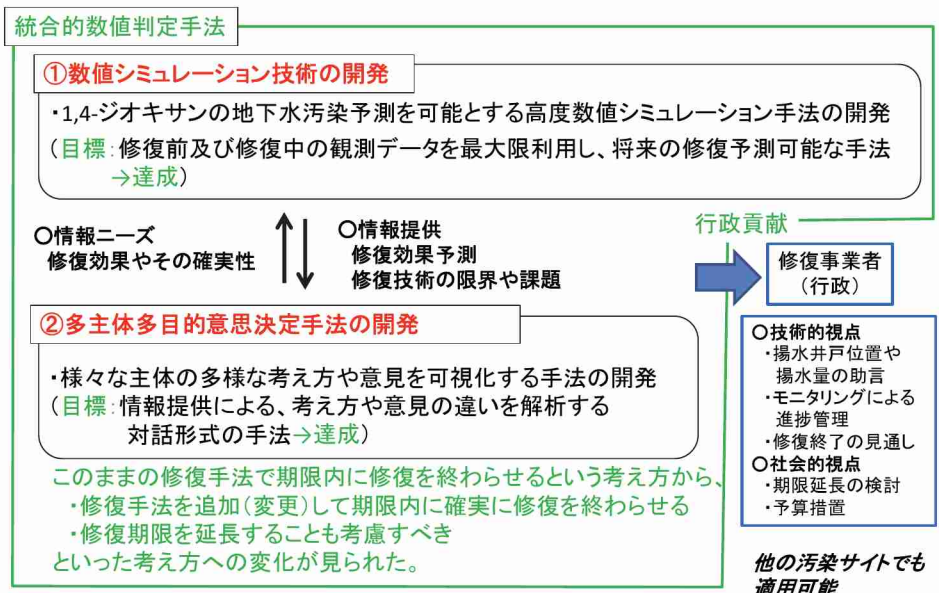
イトが大きい結果となった。これは、情報提供を行った修復効果予測の中で財政面については深く触れていなかったため、今後の修復事業においても財政に対する懸念があったものと推測される。県庁職員のA氏とC氏は社会的受容性のウェイトが小さい結果となった。これは対象事案の修復事業において周辺住民との関係は良好であることを日頃の業務を通じて、潜在的に認識しているためではないかと考えられる。

4.4.3 統合的数値判定手法～数値シミュレーションの結果を踏まえた評価者の態度変容

最後に、本研究の2つの研究開発目的である①数値シミュレーションと②多主体多目的決定手法を合わせた統合的数値判定手法について、図(2)-35を用いて述べる。

当該不法投棄現場の1,4-ジオキサン地下水汚染修復実施中の中間確認段階で、これまでの対策を検証し、今後の追加対策の必要性や修復期限目標の変更などの新たな意思決定を行うにあたり、②多主体多目的意思決定手法の開発過程におけるISM・DEMATELを用いた評価により、廃棄物の部分撤去や揚水処理による1,4-ジオキサンの修復効果予測及びその修復の確実性に関するニーズが高いことが分かった。これらの情報ニーズを受けて、数値シミュレーションでは、1,4-ジオキサンの修復前及び修復中の観測データを最大限利用し、将来の修復予測可能な手法を開発し、当該汚染現場の1,4-ジオキサン地下水汚染の修復予測を行った。その結果、廃棄物の部分撤去後、1,4-ジオキサンの地下水汚染修復は、当初の想定通り、修復期限までに環境基準値、あるいは排水基準値を満足することができると予想されたが、一部の高濃度の井戸については、濃度の推移によっては揚水井戸の追加など、追加的対策が必要なこと、そして、揚水量が確保できない場合は、修復期限までに目標値を達成できない可能性があること、さらに残置廃棄物層内中の1,4-ジオキサン濃度の低減に時間がかかれば、その下部の帯水層の修復も遅れる可能性のあることを示唆した。すなわち、的確な修復予測に基づき、修復技術の限界や課題を指摘した。

この数値シミュレーションによる情報を踏まえ、評価者らのこれまでの修復対策に対する考え方は変容することが定量的に、しかも視覚的に把握できるようになった。すなわち、これまでこのままの修復手法で



図(2)-35 数値シミュレーションと多主体多目的意思決定手法の関係性

期限内に終わらせるという考え方が主流であったが、数値シミュレーションの結果を受けて、修復手法を追加（変更）して期限内に確実に修復を終わらせる、あるいは修復期限を延長することも考慮すべきという意見への変容が定量的に把握することができた。

これらの①数値シミュレーション技術による1,4-ジオキサン地下水汚染修復予測と②多主体多目的意思決定手法による評価者の態度変容の両者の定量的な情報は、最終意思決定者であり、修復事業者である行政にとって、技術的・社会的視点の両側面からその修復対策のサポートを可能とするものである。さらに、他の1,4-ジオキサンの土壌・地下水汚染現場への適用も可能となるものである。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

汚染修復など過去の負の遺産への対策や廃棄物焼却炉や最終処分場などの迷惑施設の建設にあたっては、周辺住民とのリスクコミュニケーションに基づく合意形成が極めて重要である。合意形成を得るための行政手続きや判断方法は様々ある（委員会形式での評価、住民説明会、世論調査など）と考えられる。いずれの場合も、複数委員の意見、あるいは多数の意見を集約して、意思決定を行う必要があるが、これまではこのような考え方や価値観が異なる複数の評価者の意見の傾向把握する、特に定量的にかつ視覚的に把握する手法はなかった。

それに対し本研究では、特に階層評価手法であるAHPの拡張版であり、より人間の試行錯誤過程をシステムティックに表現できるANP (Analytic Network Process)を用いて、個人評価ウェイトの類似度を解析することにより、複数評価者のグルーピング及び意見の集約度を定量的に、しかも視覚的に評価することが可能となった。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

三重県桑名市不法投棄事案における1,4-ジオキサン地下水汚染機構の説明や修復対策に貢献している。なお、研究代表者は、本事案の協議会の座長を務めており、座長としての下記の様な指導を、本研究で得られた成果に基づいて行っている。

- ・1,4-ジオキサンの今後のモニタリング結果によっては、揚水井戸の追加など追加的対策が必要となる可能性があるため、その措置のための準備が必要である。
- ・修復期限にまでに、環境基準値及び排水基準値を満足するという方針でかまわないが、廃棄物層中の1,4-ジオキサンの濃度低下がその前提条件となる。モニタリング結果に基づき、修復期限延長も視野に入れながら、対策を行っていくことが重要である。

<行政が活用することが見込まれる成果>

環境政策上、意思決定を行っていく場面は多数存在する。しかも、それらの評価基準は、定量的に表現でき比較できるものばかりではなく、定性的でかつ比較できないものの方が多く存在する。さらに、価値観の異なる複数人による合意形成を図っていくプロセスでもある。本研究では、汚染修復等の負の遺産への対策を問題として扱った場合の、複数の意思決定者の意見のばらつき具合やその集約度を定量的に評価し、さらにその態度の変容過程を視覚化できる手法を開発した。

本手法は、特に委員会形式でのディスカッションにおいて、価値観の異なる複数委員の考え方の距離を定量評価することで、複数委員のグルーピングを可能とする。そのため、大勢となる意見を集約することが可能である。一方で、委員の中には少数派も存在し、少数派の意見は声の大きな大勢派の意見に隠れてしまって、汲み入れることは難しいと考えられる。本手法により、少数派の意見を把握することも可能であると考えられる。すなわち、本研究の成果は、価値観が異なる複数人の評価の分布を定量評価することで、環境政策上の意思決定に必要な大勢となる意見の抽出、あるいは少数意見の抽出を可能とする。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 鷺尾卓、藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏：土木学会論文集G, Vol. 73, No.6, pp. II_1-10 (2017).
多主体多目的意思決定問題における評価者のグルーピングと変容の可視化に関する研究

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii and Toru Furuichi: The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016).
Study on Multi-criteria Decision Making with Multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternatives for an Illegal Waste Dumping Site
- 2) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii, Toru Furuichi: The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016).
Study on Multi-criteria Decision Making with multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternative for an Illegal Waste Dumping Site by Use of ANP Method
- 3) A. Fujiyama, K. Ishii, M. Sato, T. Furuichi and S. Washio: Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM(2017).
Study on categorization of multievaluators into groups for selecting remedial goals and methods at illegal dumping sites using analytic network process
- 4) 藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏、鷺尾卓：環境科学会2017年会、pp44(2017).
多主体多目的意思決定問題における評価者のグルーピングと変容の可視化に関する研究 –不法投棄現場の汚染修復事業を対象として–

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 古市徹編著：オーム社 (2013)
環境汚染現場の修復～実務者のための新アプローチ～
- 2) Saaty T.: McGraw Hill, New York(1980).
The Analytic Hierarchy Process.
- 3) Khan, S. and Faisal, M.N.: Waste Management, 28(9), 1500-1508(2008).
An analytic network process model for municipal solid waste disposal options.
- 4) Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K.: Expert Systems with Applications, 42, 4126-4148(2015).
Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from

- 1994 to 2014,
- 5) Keeney, R.L. and Raiffa H.: Wiley and Sons, New York(1976).
Decision Analysis with Multiple Conflicting Objectives.
 - 6) Pohekar, S.D. and Ramachandran, M.: Renew. Sustain. Energy Rev., 8(4), 365-381(2004).
Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review.
 - 7) Linkov, L., Varghese, A., Seager, T.P., Bridges, T., Kiker, G.: Comp. Risk Asses. Environ. Decision Anal., 15-54(2004).
Multi-criteria decision analysis: a framework for structuring remedial decisions at contaminated sites.
 - 8) Kabir, G., Sadiq, R., Tesfamariam, S.: Struct. Infrastruct. Eng., 1-35(2013).
A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management,
 - 9) Brans, J.P., Vincke P., Mareschal, B.: Eur. J. Oper. Res., 24(2), 228-238(1986).
How to select and how to rank projects: the Promethee method.
 - 10) Hwang, C.L. and Yoon, K.: Springer-Verlag(1981).
Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: A state-of-the-art Survey.
 - 11) Cheng, S., Chan, C.W., Huang, G.H.: Environ. Sci. Health, Part A: Toxic/Hazard, Substances Environ. Eng., A, 37(6), 37-41(2002).
Using multiple criteria decision analysis for supporting decisions of solid waste management.
 - 12) Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., Sadiq, R.: Waste Management, 35, pp 318-328(2015).
Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review,

III. 英文Abstract

Development of an Integrated Numerical Method for Prediction and Evaluation of 1,4-Dioxane-contaminated Groundwater Remediation

Principal Investigator: Kazuei ISHII

Institution: Faculty of Engineering, Hokkaido University
 N13, W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, JAPAN
 Tel: +81-011-706-7284 / Fax: +81-011-706-7287
 E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

[Abstract]

Key Words: 1,4-dioxane, Groundwater contamination remediation, Numerical analysis, Prediction of remedial period, Decision making, ANP, Attitude change, visualization

This study developed an integrated numerical method for prediction and evaluation of 1,4-dioxane-contaminated groundwater remediation, including a numerical simulation method with high accuracy and a multiobjective group decision making method, through application of our method to a real contaminated site.

The objective site in this study was a illegal dumping site, causing groundwater contamination by 1,4-dioxane. The site has three aquifers with the different direction in groundwater flow. The all aquifers were contaminated by 1,4-dioxane from illegally dumped waste. Although there were a lot of investigation data, 1,4-dioxane contamination mechanism in three aquifers was not clarified. From now on, removal of the part of waste, and pumping and treatment of contaminated groundwater will be conducted as remedial actions. However, it was not elucidated whether if the contaminated groundwater is met with environmental quality standard and/or effluent standard in 1,4-dioxane until March 2023 that is a remedial goal at the objective site in this study.

The most critical problem in application of numerical simulation to the site is calibration of the numerical model by determining the related parameters, such as hydraulic conductivity, effective porosity and dispersivity, using observation data. This study attempted to use a coupled estimation method. The coupled estimation method can use the both data in hydraulic head and contaminant concentration to determine all parameters simultaneously. The coupled estimation provided us good determination of parameters so that observation data and calculation data were consistent with higher accuracy than conventional two-stage method because the coupled estimation method can use effectively tracer information such as groundwater flow velocity and direction to determine hydraulic conductivities. While in the two-stage method, hydraulic conductivities were determined by using observation data in hydraulic head and then effective porosity and dispersivity are determined by using observation data in concentration separately.

In addition, our model predicted future 1,4-dioxane decreasing during countermeasures including removal of the part of waste, and pumping and treatment of contaminated water. As the result, contaminated groundwater will be remedied under the environmental quality standard in Japan until March 2023. However, some area should be monitored carefully

because the concentration of 1,4-dioxane was high and the concentration decreasing was estimated to be slow by the numerical simulation. Additional measures such as increasing the pumping rate or additional wells might be needed. If the 1,4-dioxane concentration within the remaining waste layer is not decreased as planned, or if the pumping rate is decreased significantly, the 1,4-dioxane concentration might not be decreased to the effluent standard until March 2023.

There are many cases where making consensus among committee are needed during decision making process in the field of environmental policy making, such as determination of remedial actions at illegal dumping sites and siting of landfill sites. Since standpoint and value of the committee is different and diversified, consensus making is sometimes difficult. In case of remediation for 1,4-dioxane groundwater contamination, the progress of remediation is sometimes slower than planned. Based on review of the remedial processes, new decision making is needed to conduct additional countermeasures and to postpone the remedial goals.

This study attempted to develop an interactive decision making method, focusing on difference in evaluation structures for evaluators during discussion on remedial activities. This study applied Analytical Network Process (ANP), which can deal with complex mind of human such as trial and error, to 7 persons: three persons working at the administration, two committee persons, and two intellectual persons. Before explanation of the result of numerical simulation, the current remedial action to meet the standard until March 2023 was dominant, however after the explanation of the result of numerical simulation, the attitude and opinion of the persons were changed. The administrators changed their attitude to the mind that additional countermeasures might be needed to meet the standard until March 2023. On the other hand, the opinion from committee and intellectual persons was that extension of a deadline to meet the standard should be considered. This study successfully developed a interactive and multiobjective group decision making method to visualize attitude change of persons by additional information.

As conclusion, in order to smoothly conduct remedial actions for 1,4-dioxane groundwater contamination based on the related person's consensus, 1) prediction and evaluation method of remedial actions by numerical simulation with high accuracy and 2) multiobjective group decision making method considering technical and social aspects were developed and were integrated into a numerical method through application of the method to the real contaminated site.