環境研究総合推進費　環境問題対応型　（安全が確保される社会部会）
研究課題番号　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

（H27～H29年度, 累積予算額26,115千円）

研究代表者　○北海道大学　石井一英
分担研究者　北海道大学　古市　徹
藤山淳史

1．研究背景と研究目的（及び研究体制）

行政対応が必要な1,4-ジオキサン地下水汚染を、
住民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
（北海道大学　石井一英、古市　徹）
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
（北海道大学　藤山淳史、石井一英）
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。

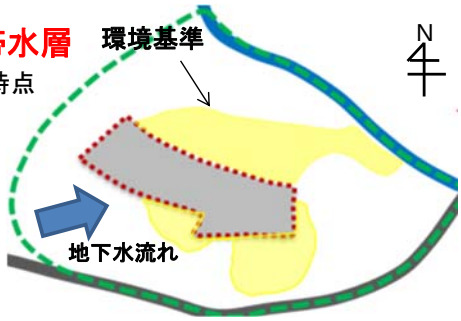
実汚染現場：三重県桑名市五反田事案

適用理由
- ・1,4-ジオキサンによる地下水汚染を修復中でありH34年度末まで修復終了を目指している。
- ・データが豊富でありシミュレーション技術開発に適している。
- ・汚染発覚時から助言・修復活動を共にしてきた（現協議会の委員長）

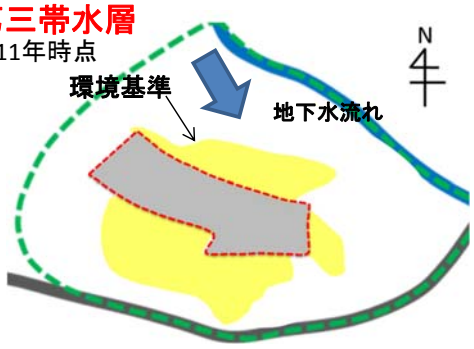
2. 三重県桑名市不法投棄現場の1,4-ジオキサン地下水汚染の課題

課題1 （数値SIM）
1,4-ジオキサンの汚染機構？
・遮水壁(2002年設置）があるのになぜ
・廃棄物層が無い第3帯水層の汚染
（地下水流れとは異なる方向に）

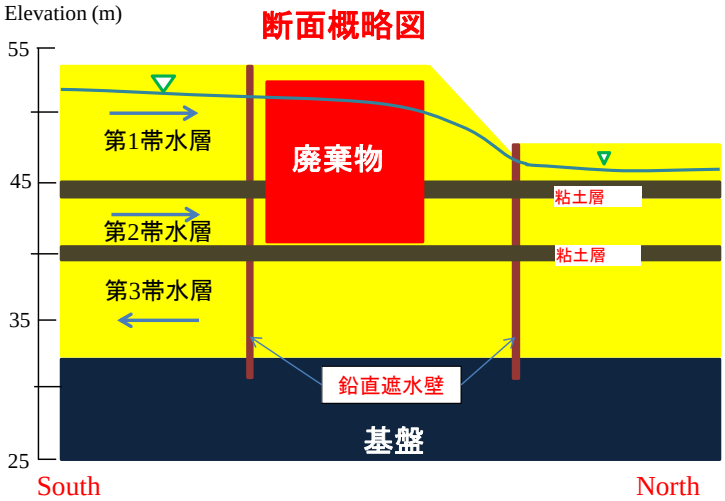
第二帯水層 環境基準
2011年時点



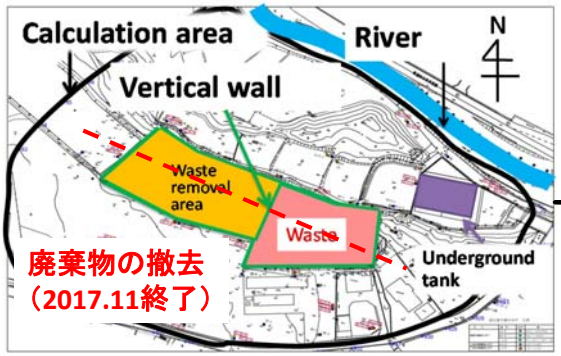
第三帯水層
2011年時点



断面概略図



3. 今後の修復対策の内容と課題

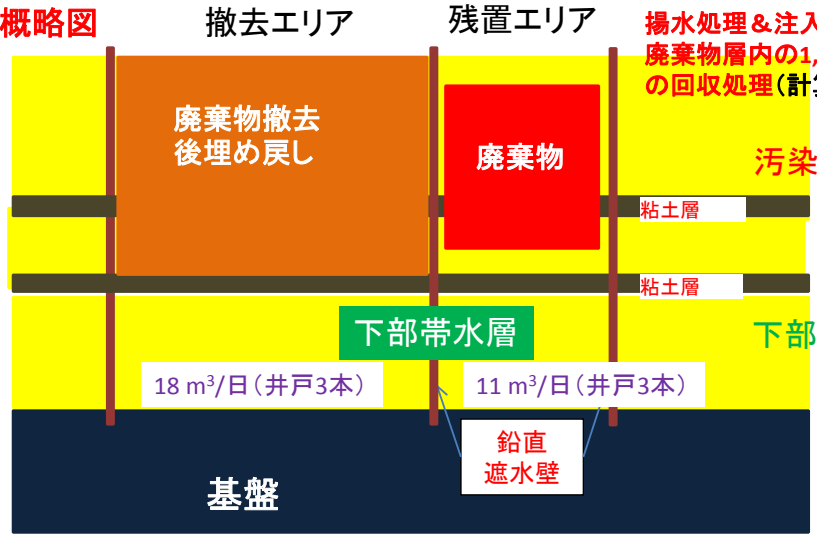


遮水壁外の揚水処理
第2帯水層
15 m³/日
（13本）
第3帯水層
13 m³/日
（11本）

課題2（数値SIM）
・廃棄物部分撤去後修復予測
（H34年度末までに終了できるか）

課題3（意思決定）
・追加対策の必要性や期間延長など、意思決定への影響

断面概略図



揚水処理＆注入による廃棄物層内の1,4-ジオキサンの回収処理（計算外）

汚染源濃度 → 0.5 mg/L
（排水基準値）

下部帯水層の揚水処理
→ 0.5 mg/L
（排水基準値）

4. 3次元地下水汚染解析

(1) Two stage method（従来）

第1段階 地下水流れ　　地下水位の観測値

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

↓ 地下水流れを固定して

第2段階 移流分散　　濃度の観測値

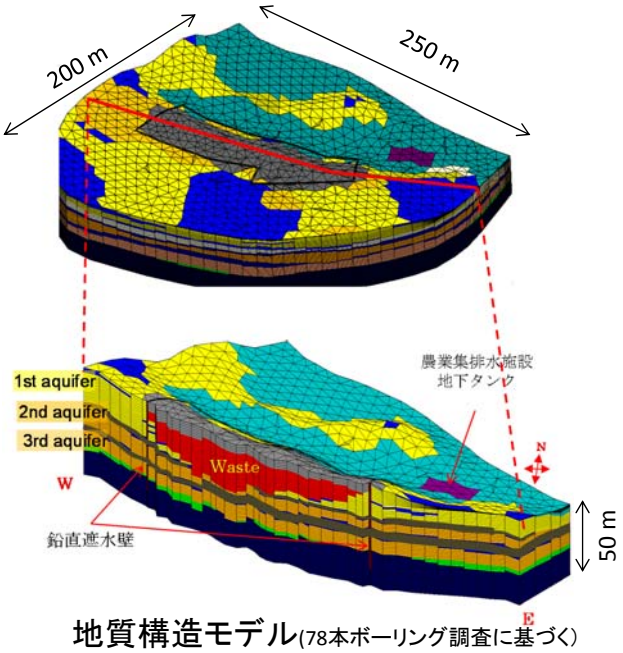
$$nR\frac{\partial c}{\partial t} = -v_i\frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(nD_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}\right) - nrc - Q_s \quad (2)$$

$$D_{ij} = \alpha_T\|V\|\delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T)\frac{V_iV_j}{\|V\|} + \alpha_m\tau\delta_{ij} \quad (3)$$

$$\alpha_T = \frac{1}{10}\alpha_L \quad (4)$$

課題
- 濃度情報の持つトレーサーとしての流れに関する情報が活用されていない
- 1,4-ジオキサン（吸着・微生物分解ほとんど無視）の複雑な地下水流れ場での移動の解析には不向き

k: 透水係数, h: 地下水位, Q: 湧き出し項
c: 濃度, D: 分散係数, v: ダルシー流速, R: 遅延係数 =1, r: 減衰係数 =0
Q_c: 湧き出し項（汚染物質）, n: 有効間隙率, V: 間隙流速, α_L : 縦分散能
α_T : 横分散能, α_m : 分子拡散係数, τ : 屈曲率, δ_{ij} : クロネッカのデルタ



地質構造モデル（78本ボーリング調査に基づく）

○解析ソフト

GEOModeler (GMラボ株式会社)

- DTRANSU-3D・EL
  - 有限要素法
  - オイラリアン・ラグランジアン法(EL法)
    （現場の複雑性に対応）
- 節点数　60312点、要素数　113,520個

境界条件：各帯水層毎に水位一定
汚染源：廃棄物層全体に相対濃度1で固定

5. Coupled estimation methodによるパラメータ推定

地下水流れ＋移流分散による同時推定　　透水係数, k　有効間隙率, n, 縦分散能, α_L

地下水位の観測値　　濃度の観測値

$$F(k, n, \alpha_L) = \sum w_h(h^r_{cal} - h^r_{obs})^2 + \lambda\sum w_c(c^r_{cal} - c^r_{obs})^2$$

地下水位の計算値　　重み付け　　濃度の計算値

地下水位データに対する濃度データの考慮の大きさ

- 透水係数の推定に、濃度情報（地下水流れに関する情報を有する）が利用される。
- 実汚染現場（三次元、複数帯水層）での適用はほとんどない（計算時間がかかりすぎる）。

①全17層の透水係数値の感度解析による感度の高い層の抽出

↓

②Coupled estimation method によるパラメータ推定（5個の透水係数と5個の分散能の合計10個）
Intel Xeon CPU E5-1620 3.5 GHz で約15日間

表　推定されたパラメータ　注：有効間隙率は0.2で固定（透水係数とトレードオフの関係）

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

注：観測値及び計算値の相対化（地下水位と濃度を対等に評価）

$$h^r_{obs} = \frac{h_{obs} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c^r_{obs} = \frac{c_{obs}}{c_{max}}, \quad h^r_{cal} = \frac{h_{cal} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad c^r_{cal} = \frac{c_{cal}}{c_{max}}$$

6. 観測値と計算値の比較(1,4-ジオキサン濃度)

過大評価している部分もある

・汚染源(廃棄物)一定の条件
・汚染源の近くの井戸
・第三帯水層東側

環境基準値を超える井戸で
±1オーダーmg/Lの範囲で一致

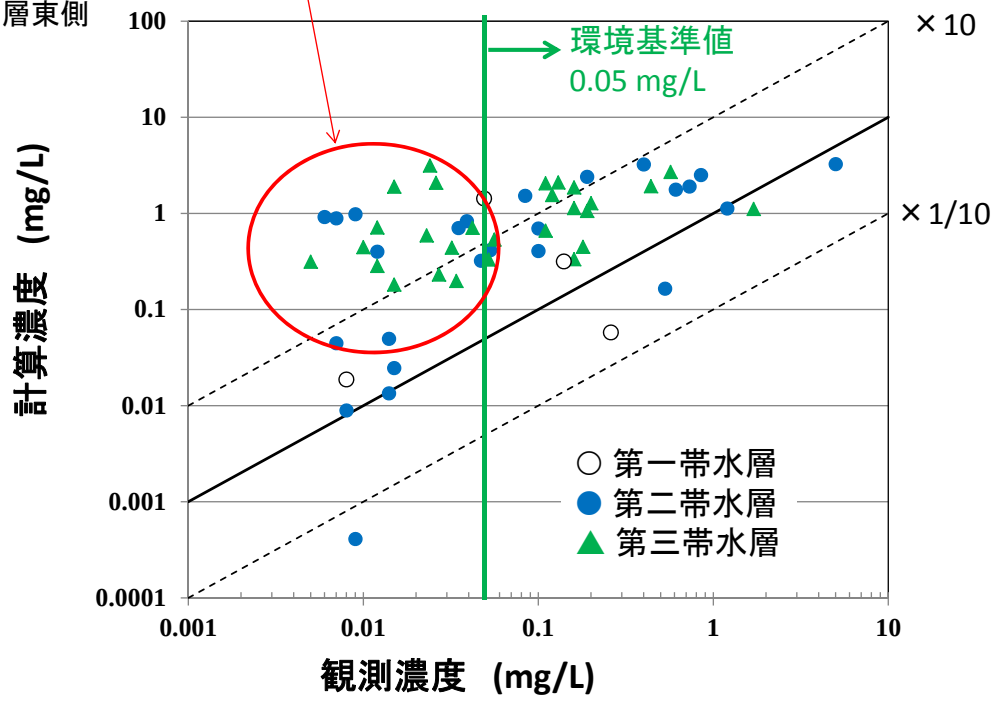
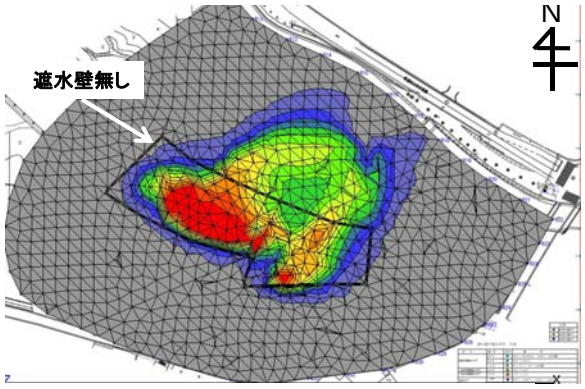


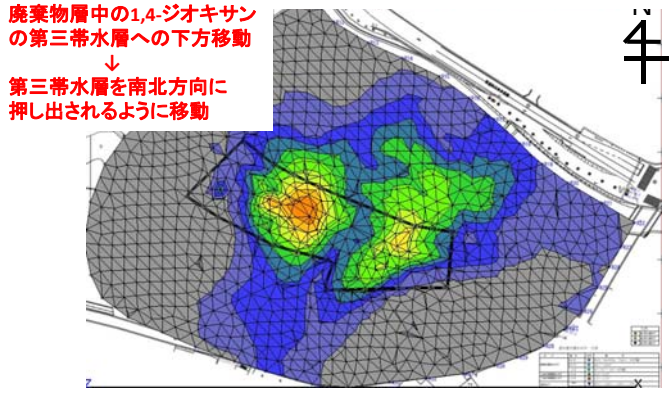
図　観測濃度と計算濃度の比較

7. 1,4-ジオキサン汚染機構の解明(課題1)

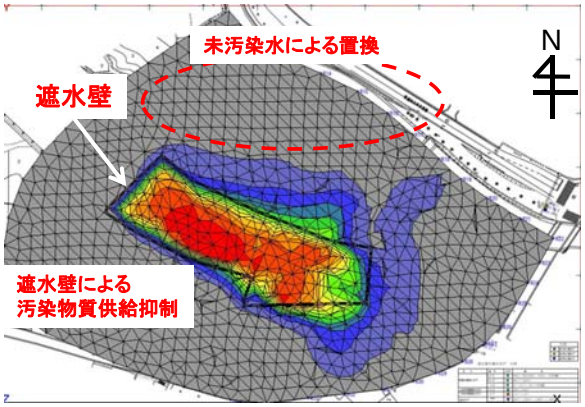
(計算期間:1996-2011)



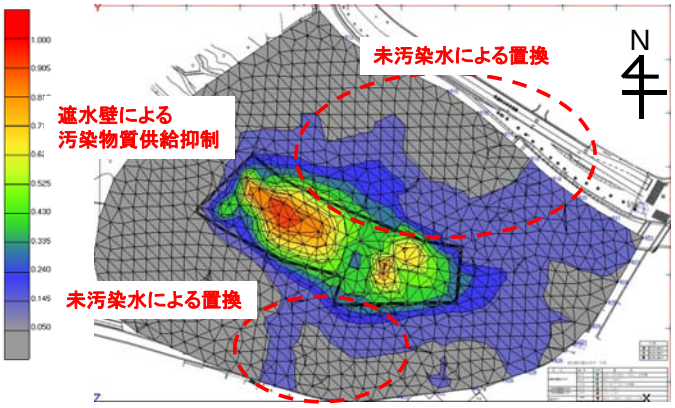
a) 第二帯水層　(2002年, 遮水壁設置前)



b) 第三帯水層　(2002年、遮水壁設置前)



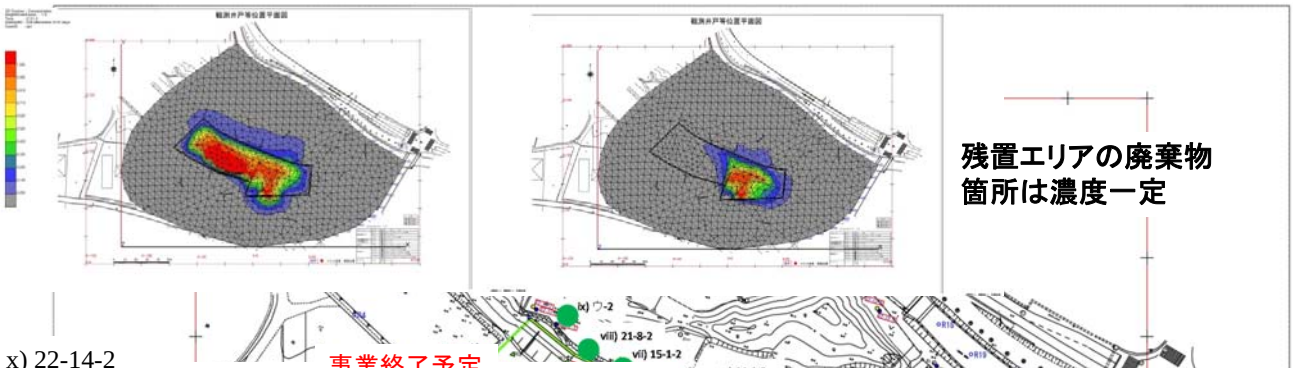
c) 第二帯水層(2011年、遮水壁設置後)



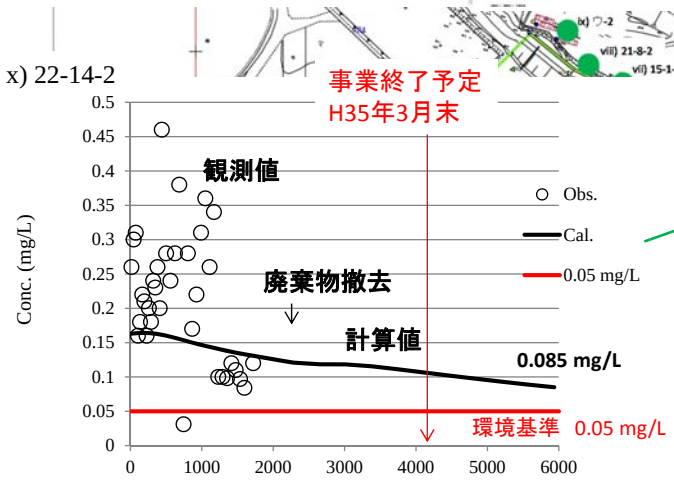
d) 第三帯水層(2011年、遮水壁設置後)

8. 今後の修復予測（第2帯水層）（課題2）

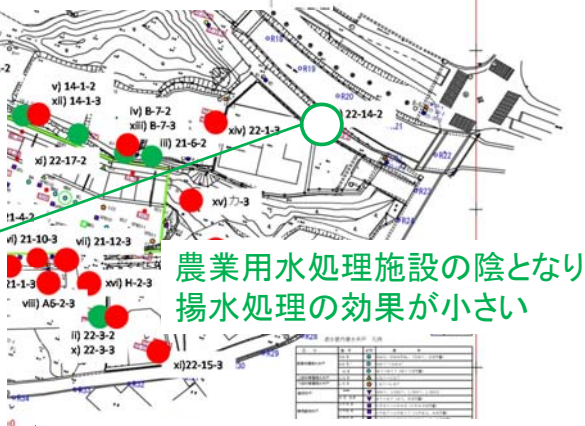
廃棄物撤去前　　廃棄物撤去3年後　　計算期間：2012.1～2028.3



残置エリアの廃棄物箇所は濃度一定



汚染源 = 7.0 mg/L

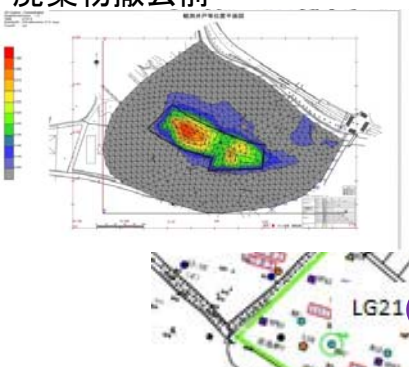


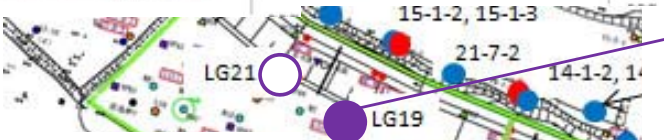
農業用水処理施設の陰となり揚水処理の効果が小さい

今後の濃度の推移に注意が必要
揚水量増加、井戸の追加の検討

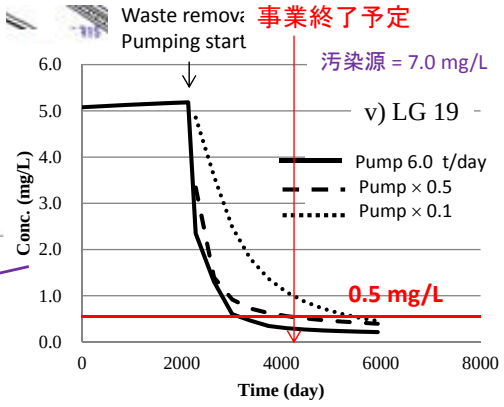
9. 今後の修復予測（下部帯水層）（課題2）

廃棄物撤去前　　廃棄物撤去6年後　　計算期間：2012.1～2028.3

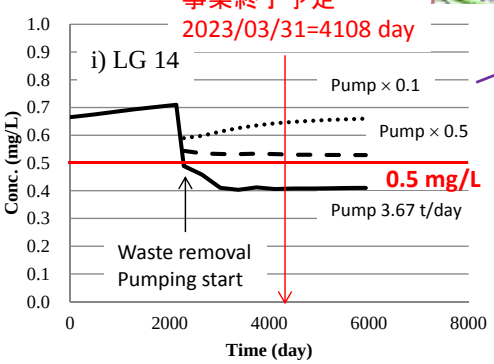


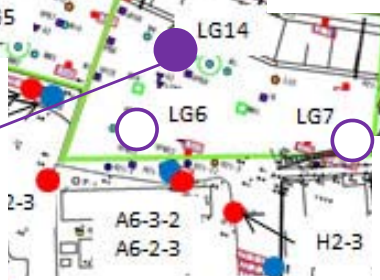


汚染源 = 1.0 mg/L（修復を想定
目標は0.5 mg/L）

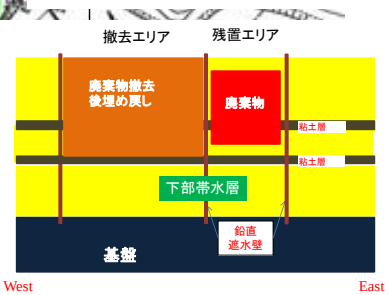


予定通りの揚水量を確保できれば期限まで修復可能





廃棄物層内の浄化と揚水量が確保されれば期限まで修復可能



10. 多主体多目的意思決定手法の研究フロー

平成27年度
- ISM法・DEMATEL法を用いて評価基準と情報ニーズの分析

アンケート調査対象：三重県庁職員

→ ・修復効果やその不確実性に関する情報が必要

平成28年度
- ANP手法による個人の選考評価
- CQ値を用いた対象者のグルーピング

アンケート調査対象：三重県庁職員

平成29年度

数値シミュレーション技術開発
- 修復効果予測

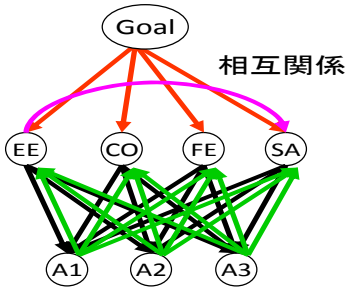
情報提供

「アンケート調査の回答数が膨大」という課題
↓
改善1：評価構造モデル縮約
改善2：アンケート調査の回答方法の改選

- 対象者の態度変容の解析
- 総体としての意見集約

アンケート調査対象：委員、有識者、三重県庁職員

Analytical Network Process (ANP)



・各主体の代替案の選好を評価することにより、そのベースとなる評価構造が明らかになる。

CQ値（Compatibility Quotient）
個人間のベクトルの類似性を測る

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

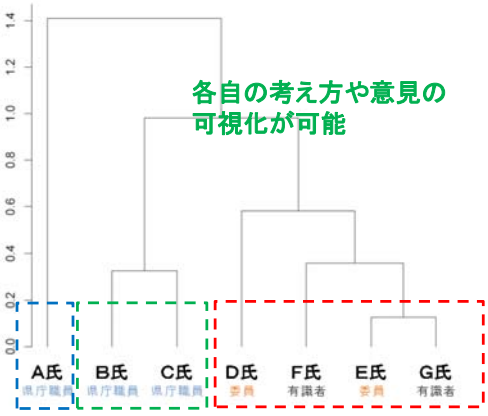
CQ値：1に近いほど類似
n：項目数の総和11

11. 態度変容と意見集約（課題3）

○評価構造モデル（質問数11問、所要時間10分）

【シナリオ①】現状の工法を継続し、期限内に基準達成
【シナリオ②】揚水量を増加させ、期限内に基準達成
【シナリオ③】現状の工法を継続し、期限を延長して基準達成

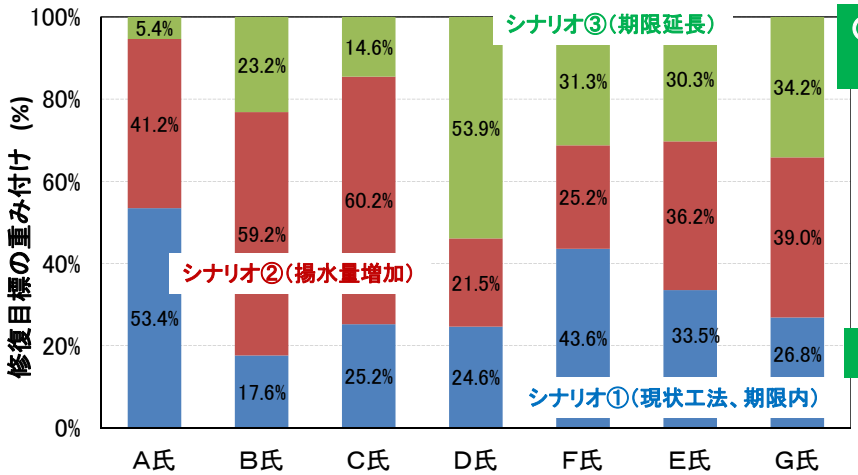
【評価基準①】環境影響
【評価基準②】確実性
【評価基準③】財政
【評価基準④】社会的受容性



CQ値を用いたデンドログラム

○解析結果

※資料では①と②が逆（お詫び）



○A,C氏（昨年度と共通者）の意見変化

・現状の工法で期限内（シナリオ①）の意見が多かった。

・「確実性」をより重視するようになり、揚水量を増加させても期限内に終了させる

○委員、有識者の意見

・「確実性」を重視して、期限延長も考慮すべき

12. 本研究全体のまとめ

①行政への修復事業の進め方の助言（4回）
・下部帯水層の揚水指導、修復進捗管理
②Coupled estimation method が、GEOModelerへ登載されソフトウェアとして販売
（シミュレーション標準ツールとしての社会実装）

統合的数値判定手法

①調査・解析（数値シミュレーション）

・1,4-ジオキサンの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：修復前後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

②意思決定に関与する専門家や行政関係者

・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、
・修復手法の追加（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。

行政貢献

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

13. 研究発表等(1)

査読付論文

Kazuei Ishii, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato and Toru Furuichi:
Mechanism of 1,4-dioxane groundwater contamination under a complex hydrogeological condition with a waste layer and vertical walls by using a three-dimensional simulation optimization method
Waste Management（投稿中）

鷲尾卓、藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏：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、土木学会論文集G, 2017（登載決定）

学会発表等

1) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama and Shoei Imaike: Application of a coupled estimation method using flow and transport equations to a real 1,4-dioxane groundwater contamination site with complex hydrogeological structure , The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016)
2) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii and Toru Furuichi: Study on Multi-criteria Decision Making with Multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternatives for an Illegal Waste Dumping Site, The 31st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, CD-ROM(2016)
3) 今池祥平、石井一英、藤山淳史、佐藤昌宏、古市徹：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, 第44回環境システム研究論文発表会講演集, pp.1-8(2016)
4) Atsushi Fujiyama, Kazuei Ishii, Toru Furuichi; Study on Multi-criteria Decision Making with multiple Evaluators to Evaluate Remedial Alternative for an Illigal Waste Dumping Site by Use of ANP Method, The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016)
5) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Shohei Imaike; Comparison of the Two-stage Method and Coupled Estimation Method to Estimate 1,4-dioxane Groundwater Contamination, The 9th Asia-Pacific Landfill Symposium, APLAS Hong Kong 2016, CD-ROM(2016)

14. 研究発表等(2)

学会発表等

6) Kazuei Ishii, Toru Furuichi, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Yumika Shishido; Coupled Estimation Method for Determination of Flow and Transport Parameters using Transient Observation Data during Remediation of 1,4-Dioxane Groundwater Contamination, The 32nd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA(2017)

7) A. Fujiyama, K. Ishii, M. Sato, T. Furuichi and S. Washio: Study on categorization of multievaluators into groups for selecting remedial goals and methods at illegal dumping sites using analytic network process, Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM, 2017

8) K. Ishii, T. Furuichi, A. Fujiyama and M. Sato: Flow and transport parameter estimation for 1,4-dioxane groundwater contamination at an illegal dumping site, Proceeding of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2017, CD-ROM, 2017

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

10) 藤山淳史、石井一英、佐藤昌宏、鷲尾卓：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 ー不法投棄現場の汚染修復事業を対象としてー、環境科学会2017年会、pp44、2017

11) Kazuei Ishii, Atsushi Fujiyama, Masahiro Sato, Toru Furuichi: Prediction of 1,4-dioxane contamination distribution during countermeasures at an illegal dumping site by numerical simulation, The 33rd International Conference on Solid Waste Technology and Management, Annapolice, USA(2018)