

Environment Research and Technology Development Fund Final Research Report

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【3-2103】

体系的番号： （JPMEERF20213003）

研究課題： 「先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築」

Research Title: Establishment of Landfill Emissions Model for Determining the Post-Closure Care Period by Physics- and Statistics-Combined Approach

研究代表者： 石森 洋行

研究代表機関： 国立研究開発法人国立環境研究所

研究分担機関： 埼玉県環境科学国際センター

研究領域： 資源循環領域

キーワード： 廃棄物最終処分場、廃止期間、データ同化、対話型プラットフォーム、実務者との連携強化

令和6（2024）年5月

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	3
1. はじめに（研究背景等）	5
2. 研究開発目的	5
3. 研究目標	6
4. 研究開発内容	8
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 研究目標の達成状況	10
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	13
6. 研究成果の発表状況の概要	15
6-1. 成果の件数	15
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	15
7. 国際共同研究等の状況	15
8. 研究者略歴	15
II. 成果の詳細	17
II-1 サブテーマ1「予測モデル構築・精緻化とそのための現地調査」	17
[サブテーマ1要旨]	17
1. サブテーマ1研究開発目的	17
2. サブテーマ1研究目標	17
3. サブテーマ1研究開発内容	18
4. サブテーマ1結果及び考察	19
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	32
II-2 サブテーマ2「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」	34
[サブテーマ2要旨]	34
1. サブテーマ2研究開発目的	34
2. サブテーマ2研究目標	34
3. サブテーマ2研究開発内容	35
4. サブテーマ2結果及び考察	36
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	44
III. 研究成果の発表状況の詳細	45
(1) 成果の件数	45
(2) 誌上发表	45
(3) 口頭発表	46
(4) 知的財産権	47
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	47
(6) マスメディア等への公表・報道等	48
(7) 研究成果による受賞	48
(8) その他の成果発表	48

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

## I. 成果の概要

## &lt;課題情報&gt;

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【3-2103】
研究課題：	「先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築」
研究代表者：	石森 洋行（国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域、主任研究員）
重点課題（主）：	【重点課題⑫】社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発
重点課題（副）：	【重点課題⑤】災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（3-2）自治体の廃棄物処理における運営課題の指標化及び将来予測手法等に関する研究 （3-5）一般廃棄物処理施設の社会的受容向上に関する研究
研究領域：	資源循環領域

## &lt;キーワード&gt;

廃棄物最終処分場
廃止期間
データ同化
対話型プラットフォーム
実務者との連携強化

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1「予測モデル構築・精緻化とそのための現地調査」

## &lt;サブテーマ1リーダー及び研究分担者&gt;

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立環境研究所	資源循環領域	主任研究員	石森洋行	
埼玉県環境科学国際センター	資源循環・廃棄物担当	主任研究員	磯部友護	

## ＜サブテーマ1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	北村洋樹（2021年6月～2022年2月、2022年4月～2023年3月）

## サブテーマ2 「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」

## ＜サブテーマ2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立環境研究所	資源循環領域	上級主幹研究員	石垣智基	
国立環境研究所	資源循環領域	室長	山田正人	

## ＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	北村洋樹（2021年6月～2022年2月、2022年4月～2023年3月）
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	SUTHASIL NOPPHARIT（2021年4月～11月・3月）
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	Ham Geun-Yong（2021年4月～5月・12月・2月～3月、2022年6月）
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	Rajeev Kumar Singh（2022年12月～2023年2月）
国立環境研究所	資源循環領域	特別研究員	PAYOMTHIP Panida（2023年4月～9月、2023年12月、2024年3月）
国立環境研究所	資源循環領域	高度技能専門員	永元 加奈美（2021年11月～12月）

## ＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	24,787千円	7,436千円	32,223千円
2022	23,778千円	7,133千円	30,911千円
2023	20,079千円	6,024千円	26,103千円
合計	68,644千円	20,593千円	89,237千円

## 1. はじめに（研究背景等）

廃棄物最終処分場の経営上の重要課題である維持管理期間、主に浸出水水質の経時変化を予測するための手段は、未だわずかな事例における経験に頼ったものが主流である。それぞれの処分場では廃棄物の質や量の不均一性、気候また形状の多様性により、物質挙動の不確実性が大きく、このような手法を用いても維持管理期間を予測することはできない。この問題を解消するために用いられる演繹的なアプローチには物理シミュレーションがあるが、一般的に均質化された多孔質媒体モデルを援用しており、計算に与えるべき廃棄物用のパラメータを一意的に定められないことや、不均一性を表現しようとしてモデルの精緻化を進めれば計算時間の肥大化に繋がり実用面からかけ離れること、加えて、そもそもモデルを検証するための実測データが得られにくい等の問題を抱えている。帰納的なアプローチには実測データに基づいた統計解析がある。その事例として、平成17年度の環境省委託報告書には維持管理期間の推定が示されているが、わずか十数か所の廃棄物最終処分場の実測データを用いた物理法則を考慮しない単純な回帰分析に留まっている。いずれの手法も現実を再現していない計算結果を与え、維持管理期間を実際よりも短期に評価していることが多い。結果として埋立終了後の収入が得られない期間の施設の維持管理に必要な費用を増大させ、最終処分場の経営上の最大のリスクをもたらすことに繋がる。このリスクのために経営が破綻した場合には、誰も維持管理するものがない負の遺産が地域社会に放置されることになる。

この問題の根幹は、実際には全ての処分場に存在する実測データの収集とその検証、すなわち研究者と実務者の連携の不足にあると考える。本研究の動機は、埋もれたビッグデータの掘り起こしと有効活用によって、廃棄物最終処分場研究の根幹の課題を解決し、最終処分場経営の最大のリスクを低減させることである。時代とともに科学技術は進化し、より優れた社会基盤に更新されることで、独創的な発想が生まれ多様なアプローチによって技術革新を推進している。最近ではその技術革新にデータサイエンスが活かされていることが多く、データサイエンスをより身近なものにすることで日常生活や業務の省力化、効率化する社会が指向されており、そのための情報基盤も高度化し次々と整備が進んでいる。こうした時代の流れとともに最終処分場に関わる情報技術も高度化できるはずである。データサイエンスに情報は必須である。しかし得られた情報は、意識して集積し、保管し、管理していかなければいずれ散逸してしまう。特に最終処分場という施設は経営情報の秘匿だけでなく風評被害の恐れから情報の開示には閉鎖的であり、分散バックアップが難しい。また数十年にもわたる施設の維持管理のなかで、人事異動、離職や退職、情報端末の故障や更新、紙文書の廃棄または所在不明などにより、現場で得られた貴重な情報が消失してゆく。また、最終処分場における維持管理情報は、処分場が適正に管理され、生活環境が保全されていることを示すために、法的に計測、記録ならびに一定期間の保管が義務付けられたものであり、経営上の価値に実務者たちは気付いていないことが多い。

最終処分場における発展には、まず現場の情報の重要性を実務者らに認識させることが肝要である。

## 2. 研究開発目的

本研究課題は、その行動変容を促すために、情報の有効活用方法をWebアプリケーションという手段を通じて訴えるものである。研究者が得意とする可視化、分析、予測の一連操作を実務者自身がWebアプリを通じて手軽に利用できる環境を提供する。実務者がこのシステムを日常管理のなかで利用することで、維持管理の適正化や将来の姿を見据えながら能動的に業務に携わることができる。同時にそこに入力されたデータは最終処分場の研究発展に不可欠な情報として蓄積され、我が国の財産として残すことができる。本研究期間では、このような情報の循環利用を手段として、最終処分場の維持管理問題を解決するための仕組み作りを推進してきた。

本研究では、最終処分場の維持管理における廃止期間の問題を対象とし、将来予測モデルの実用化を目指して進めた。自然現象の抽象化による数理モデリングは必然的に外乱因子を排除するため、モデル計算と現実の乖離が生じることは自明である。特に最終処分場においては、廃棄物の不確実性と不均質性が乖離を拡大させる。こうした問題に対して、校正（Calibration）やデータ同化（Assimilation）を用いることで乖離を補正し、より信頼性の高い予測を提供する手段が存在する。将来予測モデルの実用

面における展開を見据えて、予測の信頼性を実測データから補完することを目的した。

サブテーマ1では確からしい予測を与えるための半データ同化将来予測モデルの構築を行い、サブテーマ2では埋もれた時系列データの掘り起こしと、収集および一元管理するための戦略を検討した。

### 3. 研究目標

<p>全体目標</p>	<p>最終処分場の廃止期間を、研究者の予測モデルと実務者の実測データの組み合わせによって推定可能な新しい研究手法を構築する。サブテーマ1では実務者による操作を見据えた実用的な予測モデルの構築を行うとともに、サブテーマ2では当該研究の必要性を実務者に呼びかけそれに必要な実測データの提供を促すものである。</p> <p><u>(技術的成果)『実測データ収集のための研究者-実務者の連携を促す情報基盤』</u></p> <p>各サブテーマ間を有機的に結びつけるための情報基盤は、物理シミュレーションの予測誤差を得るためのツールである。限定された利用者間(ユーザーIDとパスワードを発行)で安全に利用可能なものとする。得られる値は、最終処分場の諸元を入力条件とした物理シミュレーションからの計算値と、既存の実測データを集めたデータベースから統計学的モデリングによって見積もられた補正值である。計算値と補正值の和から、浸出水濃度またはガス放出量の経年変化を描くものである。ここでのデータベースとは研究協力者である全環研や全産連から得られた最終処分場の諸元や実測データを格納・蓄積・管理し、ファイアウォールでブラックボックス化することで機密情報の悪用・流出等の防止を徹底する。</p> <p>この情報基盤の具体的な活用事例として、(a) 既存の処分場3件、(b) 実測データをもたない処分場3件、(c) これから新設する処分場1件について、後述の半物理・半統計的な将来予測計算によって廃止期間の予測結果を示す。</p> <p><u>(学術的成果)『不均質・不確実性を考慮した半物理・半統計的な将来予測計算』</u></p> <p>最終処分場の物質動態解析では、日本では数値埋立モデルに代表されるように、欧米でも数百種類もの化学物質の相互反応を考慮したモデル等が開発されている。こうした物理シミュレーションは、場所によって異なる廃棄物の物性や環境条件、溶出特性、ガス化特性等を精密にモデル化し、理論的に裏付けた物質動態の予測結果を与える。しかし、その精度を検証する術がなく、計算負荷も高いため限られた専門家しか扱えない。汎用性に欠けるため当該分野は学術として停滞しつつある。</p> <p>物理シミュレーションによる廃止期間の予測には限界があるため、本研究ではこれまで全く使われていなかった実測データを活用することで半経験的な予測を試行する。半経験的である反面、実用性を高めることができる。より多くの研究者、更には実務者を巻き込んだ意見交換や情報共有が可能になり技術発展につながる。</p> <p>本提案手法のアイデアは、最終処分場の物質動態に寄与する物理法則のうち、主要な成分と、主要ではない成分(物理法則ではあるものの物理モデリングが極めて困難なもの)に分割している点にある。主要な成分とは、均質な多孔質媒体中の流れを表わす移流分散現象である。しかし、廃棄物特有の水みちをもつ最終処分場に対しては直接適用できないのが問題である。本研究では水みちを有効間隙率と屈曲率で表現することでこの問題</p>
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>を克服する。一方主要でない成分とは、水みち以外に存在する廃棄物からの物質輸送である。溶出やガス化によって発生した化学物質が分子拡散によって輸送されるものであり流れ場には無関係な量である。これは時間に強く影響を受ける成分といえる。精密な物理モデルが無くても、実測データがあれば時系列解析によって予測できる。不均質で不確実性をもつ最終処分場の実測データを用いた時系列解析からは、不均質・不確実性を考慮した予測結果が得られるのは自明であろう。物理モデルを複雑化するよりも計算負荷は低く、実用性がある。</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

サブテーマ 1	「予測モデル構築・精緻化とそのため現地調査」
サブテーマ 1 実施機関	国立環境研究所、埼玉県環境科学国際センター
サブテーマ 1 目標	<p>(令和 3 年度)『水みちモデル構築のための研究対象とする最終処分場の選定』</p> <p>①ボーリング調査によってコア試料の採取と電気探査の調査地点の決定する</p> <p>②降雨前後の比抵抗分布の変化から最終処分場に発生し得る水みちを可視化する</p> <p>③コア試料を X 線 CT 分析に供して、3 次元間隙構造をデジタルデータとして得る</p> <p>(令和 4 年度)『廃棄物埋立層の水みちを考慮した移流分散解析技術の構築』</p> <p>①最終処分場調査を継続実施し、埋立層の組成と水みちの発生傾向を関係付ける</p> <p>②3 次元間隙構造を解析空間とした数値実験により有効間隙率と屈曲率を求める</p> <p>③求めた有効間隙率と屈曲率を、コア試料を用いたカラム試験によって検証する</p> <p>④水みちを考慮した物理シミュレーション（移流分散解析）を情報基盤に実装する</p> <p>(令和 5 年度)『実測データとの比較から予測誤差を評価、統計分析による類型化』</p> <p>①水みちを考慮した移流分散解析と集めた実測データの差から予測誤差を求める</p> <p>②予測誤差を最終処分場の諸元との相関性を調べて、予測誤差の類型化を行う</p> <p>③最終処分場ごとに類型化された予測誤差情報を、学習データとするための前処理と定常化方法を検討し、将来研究への見通しを立てる</p>
サブテーマ 2	「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」
サブテーマ 2 実施機関	国立環境研究所
サブテーマ 2 目標	(令和 3 年度)『全国環境研協議会との連携により実測データの収集を開始』

	<p>①準備済みの情報基盤をデモ版として試験公開し、実測データの収集を開始する</p> <p>②地方環境研究所との連携し、最終処分場の実態把握とデモ版の解説を行う</p> <p>③最終処分場調査に同行し、廃止の決定要因となる浸出水とガス放出量を調べる</p> <p>④廃止に向けた手続き・技術的課題のアンケートを行い実務者の要望を把握する</p> <p><u>(令和4年度)『実測データ収集の効率化のための実務者視点での情報基盤の改良』</u></p> <p>①物理シミュレーションの予測誤差を評価するための、実測データの収集を行う</p> <p>②収集した実測データをデータベース化し、情報基盤のアップデートを行う</p> <p>③全国産業廃棄物連合会と協力して技術セミナー・意見交換会を開催し研究協力者を募り、同時に本研究の進捗を廃棄物資源循環学会で報告し情報公開に努める</p> <p><u>(令和5年度)『廃止期間推定機能等を実装した情報基盤の公開と第三者評価』</u></p> <p>①予測対象とする最終処分場の廃止期間を、サブテーマ1で開発した物理シミュレーション(計算値)と統計学的モデリング(予測対象となる最終処分場に適した予測誤差を補正值とする)の和から求め、これらの機能を情報基盤に実装する</p> <p>②情報基盤の試用による廃止期間の推定や維持管理方策の改善への活用についてアンケートによる追跡調査を行い、実用化に向けた今後の研究課題を抽出する</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. 研究開発内容

サブテーマ1では、データ同化に適した将来予測モデルを開発し、ここで必要となる水みちに係るモデルパラメータを現場調査に基づき評価した。実務面での運用を図るため、現場で取り得るデータを基に予測モデルを設計し、計算負荷軽減のために簡易化を指向した。特徴は、予測誤差をモデル化する点である。従来の自然現象を対象とした物理モデリングとは異なり、その計算結果を用いて実測データから除去することで、既往の物理モデリングの結果とどの程度かけ離れているのか、すなわち予測誤差を求めた。ここで物理モデリングには、多孔質媒体内流れを記述する移流分散方程式に水みちの影響を考慮したDual Porosity Modelを用いた。Dual Porosity Modelを実測データのトレンドを表現するための時系列モデルと扱えば、実測データはそのトレンド上に分散するばらつきと見なせるので最小二乗問題(フィッティング)に帰着できる。物理モデリングを予測のトレンドとする本提案手法を、半データ同化将来予測モデルと呼ぶ。実測データ一つひとつに対するデータ同化するよりも、ロバストで軽量の予測計算が実現できる。さらに、この予測を確実なものにするために、予測モデルに含まれる水みちに係るモデルパラメータについて、最終処分場廃棄物物理立層で取り得る値域を精緻化した。実際の最終処分場2か所(不燃残渣主体の埋立地、焼却灰主体の埋立地)を対象として、高密度電気探査による水みち形成過程のモニタリングを行うとともに、詳細解析のために当該調査地点から不攪乱試料を採取しX線CT分析等を用いることで、水みちに係る間隙率と有効間隙率を求めた。

サブテーマ2では、実務者の持つ実測データが有効利用できていない現状を踏まえ、現場情報の重要性を実務者自身に認識するために個別打合せやシンポジウムを開催した。実務者自身が抱える課題と解決について情報共有の場を設けることで、研究者と実務者間の連携強化のみならず、実務者同士の連携

強化を促進した。提供された実測データは、サブテーマ1の研究目的に利用するとともに、研究者の手によって、データの一元管理、可視化、統計分析、および将来予測のための情報基盤の構築にも活用した。これにより管理対象の最終処分場について、過去、現在、未来の俯瞰的な理解を支援し、実務者自身は実測データが最終処分場の適正管理に不可欠であることの認識を新たにし、実測データの更なる提供と周辺実務者からの提供の加速化を図った。また、開発中の情報基盤に関しては、実務者が自身のPCで体験する機会を設け、フィードバックによって実務に役立つように改良を重ねた。本研究期間で実測データの提供依頼は主に茨城県、埼玉県、福島県、千葉県、福岡県内の一部の一般廃棄物最終処分場、および全国数か所の産業廃棄物最終処分場に行った。最終処分場の情報はデリケートであるため、研究代表者または分担者からの直接依頼は避け、相手最終処分場の事情を深く知る県庁や大学関係者、または全国産業資源循環連合会に相談した上で、彼らからの仲介も最終処分場実務者にアプローチした。

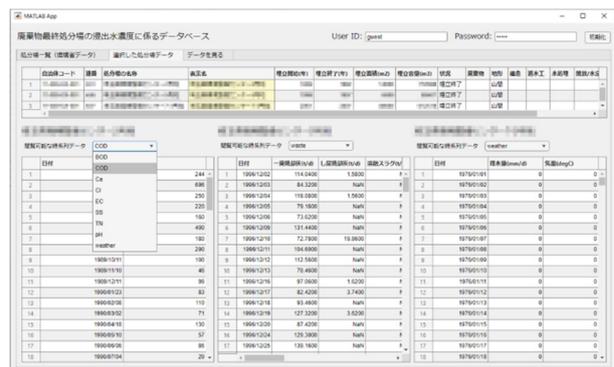
## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

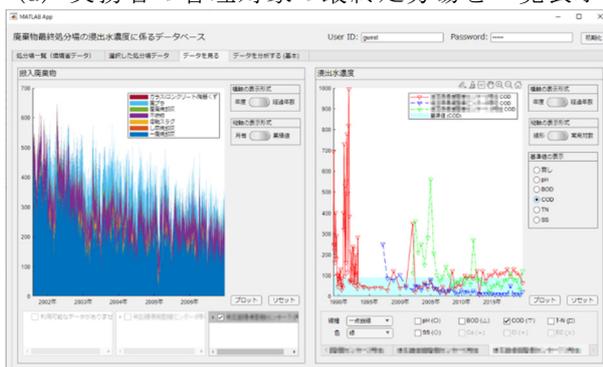
最終処分場における情報技術の発展には現場情報の重要性を実務者らに認識させることが肝要であり、その行動変容を促すために、情報の有効活用をWebアプリケーションという手段を通じて訴えることができた。研究者が得意とする可視化、分析、予測の一連操作を実務者自身がアプリを通じて手軽に利用できる環境を提供する(図0-1)。実務者がこのシステムを日常管理のなかで利用することで、維持管理の適正化や将来の姿を見据えながら能動的に業務に携わることができ、同時にそこに入力されたデータは最終処分場の研究発展に不可欠な情報として蓄積され、我が国の財産として残すことができる。



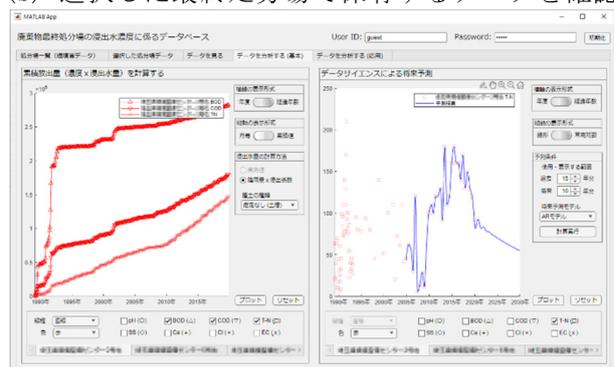
(a) 実務者の管理対象の最終処分場を一覧表示



(b) 選択した最終処分場で保有するデータを確認



(c) 保有するデータの可視化と比較



(d) 研究者のスキルを活用したデータ分析

図0-1 実務者にデータの有効活用を促すために開発したWebアプリケーション

ユーザー名	ハッシュ値	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	...	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B	...	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C	...	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
D	...	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
E	...	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F	...	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
G	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
H	...	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
I	...	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
J	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
K	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
L	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
M	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
N	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
ゲスト	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
管理者	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

図0-2 Webアプリケーション上に蓄積したデータの閲覧権限の設定

(0... 閲覧不可、1... 閲覧可能を表す。前提としてマトリックスの対角成分には「1」が与えられており、ユーザーは自身の処分場データのみを閲覧できることを意味する。上図の場合では、すべてのユーザーは、自身の処分場のみならず、G列においても「1」と設定されており、これはGの処分場データも閲覧できることを意味する。また、ゲストはG処分場データのみを閲覧でき、管理者は全ての処分場データを閲覧できる権限となっている。)

また当該Webアプリは、図0-2のようにユーザーが閲覧権限を設定することができる。ユーザー（例えば、実務者）が別のユーザー（例えば、行政官や研究者）に閲覧許可を与えることで、維持管理の実態を時系列で詳細に情報提供できるので、形質変更、廃止、跡地利用等の行政的判断を支援し、実態を鑑みた研究を促し技術開発を推進できる。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>..... 2. 目標を上回る成果をあげた

「先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築」

全体目標	全体の達成状況
<p>最終処分場の廃止期間を、研究者の予測モデルと実務者の実測データの組み合わせによって推定可能な新しい研究手法を構築する。サブテーマ1では実務者による操作を見据えた実用的な予測モデルの構築を行うとともに、サブテーマ2では当該研究の必要性を実務者に呼びかけそれに必要な実測データの提供を促すものである。</p> <p><u>(技術的成果)『実測データ収集のための研究者-実務者の連携を促す情報基盤』</u></p> <p>各サブテーマ間を有機的に結びつけるための情報基盤は、物理シミュレーションの予測誤差を得</p>	<p>最終処分場における情報技術の発展には現場情報の重要性を実務者らに認識させることが肝要であり、その行動変容を促すために、情報の有効活用をWebアプリケーションという手段を通じて訴えることができた。研究者が得意とする可視化、分析、予測の一連操作を実務者自身がアプリを通じて手軽に利用できる環境を提供する。実務者がこのシステムを日常管理のなかで利用することで、維持管理の適正化や将来の姿を見据えながら能動的に業務に携わることができ、同時にそこに入力されたデータは最終処分場の研究発展に不可欠な</p>

るためのツールである。限定された利用者間（ユーザーID とパスワードを発行）で安全に利用可能なものとする。得られる値は、最終処分場の諸元を入力条件とした物理シミュレーションからの計算値と、既存の実測データを集めたデータベースから統計学的モデリングによって見積もられた補正值である。計算値と補正值の和から、浸出水濃度またはガス放出量の経年変化を描くものである。ここでのデータベースとは研究協力者である全環研や全産連から得られた最終処分場の諸元や実測データを格納・蓄積・管理し、ファイアウォールでブラックボックス化することで機密情報の悪用・流出等の防止を徹底する。

この情報基盤の具体的な活用事例として、(a) 既存の処分場3件、(b) 実測データをもたない処分場3件、(c) これから新設する処分場1件について、後述の半物理・半統計的な将来予測計算によって廃止期間の予測結果を示す。

（学術的成果）『不均質・不確実性を考慮した半物理・半統計的な将来予測計算』

最終処分場の物質動態解析では、日本では数値埋立モデルに代表されるように、欧米でも数百種類もの化学物質の相互反応を考慮したモデル等が開発されている。こうした物理シミュレーションは、場所によって異なる廃棄物の物性や環境条件、溶出特性、ガス化特性等を精密にモデル化し、理論的に裏付けた物質動態の予測結果を与える。しかし、その精度を検証する術がなく、計算負荷も高いため限られた専門家しか扱えない。汎用性に欠けるため当該分野は学術として停滞しつつある。

物理シミュレーションによる廃止期間の予測には限界があるため、本研究ではこれまで全く使われていなかった実測データを活用することで半経験的な予測を試行する。半経験的である反面、実用性を高めることができる。より多くの研究者、更には実務者を巻き込んだ意見交換や情報共有が可能になり技術発展につながる。

本提案手法のアイデアは、最終処分場の物質動態に寄与する物理法則のうち、主要な成分と、主要ではない成分（物理法則ではあるものの物理モデリングが極めて困難なもの）に分割している点にある。主要な成分とは、均質な多孔質媒体中の流れを表わす移流分散現象である。しかし、廃棄物特有の水みちをもつ最終処分場に対しては直接適用できないのが問題である。本研究では水みちを有効間隙率と屈曲率で表現することでこの問題

情報として蓄積される。また蓄積されたデータの有効活用のひとつとして、最終処分場の浸出水濃度をデータ同化によってより正確に予測する手段を開発した。理論に従う物理モデルを用いてトレンドを計算し、トレンドからの変動分を統計学的モデルによって推定し、両者の計算結果を重ね合わせることで浸出水濃度を予測するものである。

<p>を克服する。一方主要でない成分とは、水みち以外に存在する廃棄物からの物質輸送である。溶出やガス化によって発生した化学物質が分子拡散によって輸送されるものであり流れ場には無関係な量である。これは時間に強く影響を受ける成分といえる。精密な物理モデルが無くても、実測データがあれば時系列解析によって予測できる。不均質で不確実性をもつ最終処分場の実測データを用いた時系列解析からは、不均質・不確実性を考慮した予測結果が得られるのは自明であろう。物理モデルを複雑化するよりも計算負荷は低く、実用性がある。</p>	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「予測モデル構築・精緻化とそのための現地調査」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p><u>(令和3年度)『水みちモデル構築のための研究対象とする最終処分場の選定』</u></p> <p>①ボーリング調査によってコア試料の採取と電気探査の調査地点の決定する</p> <p>②降雨前後の比抵抗分布の変化から最終処分場に発生し得る水みちを可視化する</p> <p>③コア試料をX線CT分析に供して、3次元間隙構造をデジタルデータとして得る</p>	<p><u>(令和3年度)『水みちモデル構築のための研究対象とする最終処分場の選定』</u></p> <p>①不燃残渣主体、及び焼却灰主体の埋立箇所を見つけ試料分析で検証した後、調査地点とした。</p> <p>②数か月連続モニタリング可能な計測システムを構築し、比抵抗分布から水みちを可視化した。</p> <p>③調査地点における不攪乱試料を採取し、当該埋立層の精密3次元間隙構造を明らかにした。</p>
<p><u>(令和4年度)『廃棄物埋立層の水みちを考慮した移流分散解析技術の構築』</u></p> <p>①最終処分場調査を継続実施し、埋立層の組成と水みちの発生傾向を関係付ける</p> <p>②3次元間隙構造を解析空間とした数値実験により有効間隙率と屈曲率を求める</p> <p>③求めた有効間隙率と屈曲率を、コア試料を用いたカラム試験によって検証する</p> <p>④水みちを考慮した物理シミュレーション（移流分散解析）を情報基盤に実装する</p>	<p><u>(令和4年度)『廃棄物埋立層の水みちを考慮した移流分散解析技術の構築』</u></p> <p>①不燃残渣埋立層と焼却灰埋立層での水みちの形成過程の違いを電気探査によって調査した。</p> <p>②不燃残渣埋立層と焼却灰埋立層の間隙構造を画像解析に基づき有効間隙率等で特性化した。</p> <p>③不攪乱試料をカラム試験容器に移設できず実施できなかった。代替措置として過去のライシメータ試験結果から有効間隙率と屈曲率を算出しモデルパラメータの取り得る範囲を検証した。</p> <p>④水みちを考慮した物理モデルを構築し、Web上で数値解析できる機能を情報基盤に実装した。</p>
<p><u>(令和5年度)『実測データとの比較から予測誤差を評価、統計分析による類型化』</u></p> <p>①水みちを考慮した移流分散解析と集めた実測データの差から予測誤差を求める</p> <p>②予測誤差を最終処分場の諸元との相関性を調べて、予測誤差の類型化を行う</p> <p>③最終処分場ごとに類型化された予測誤差情報を、学習データとするための前処理と定常化方法を検討し、将来研究への見通しを立てる</p>	<p><u>(令和5年度)『実測データとの比較から予測誤差を評価、統計分析による類型化』</u></p> <p>①サブテーマ2で収集した実測データを用いて、物理モデルとの予測誤差を求めた。</p> <p>②サブテーマ2で収集した処分場の諸量を説明変数として予測誤差を類型化し、モデル化した。</p> <p>③実測データの蓄積に応じて予測誤差モデルの更新をAIによって自動化するために、説明変数と予測誤差を結び付けに機械学習を導入した。</p>

<【サブテーマ2】達成状況>・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>(令和3年度)『全国環境研協議会との連携により実測データの収集を開始』</p> <p>①準備済みの情報基盤をデモ版として試験公開し、実測データの収集を開始する</p> <p>②地方環境研究所との連携し、最終処分場の実態把握とデモ版の解説を行う</p> <p>③最終処分場調査に同行し、廃止の決定要因となる浸出水とガス放出量を調べる</p> <p>④廃止に向けた手続き・技術的課題のアンケートを行い実務者の要望を把握する</p> <p>(令和4年度)『実測データ収集の効率化のための実務者視点での情報基盤の改良』</p> <p>①物理シミュレーションの予測誤差を評価するための、実測データの収集を行う</p> <p>②収集した実測データをデータベース化し、情報基盤のアップデートを行う</p> <p>③全国産業廃棄物連合会と協力して技術セミナー・意見交換会を開催し研究協力者を募り、同時に本研究の進捗を廃棄物資源循環学会で報告し情報公開に努める</p> <p>(令和5年度)『廃止期間推定機能等を実装した情報基盤の公開と第三者評価』</p> <p>①予測対象とする最終処分場の廃止期間を、サブテーマ1で開発した物理シミュレーション(計算値)と統計学的モデリング(予測対象となる最終処分場に適した予測誤差を補正值とする)の和から求め、これらの機能を情報基盤に実装する</p> <p>②情報基盤の試用による廃止期間の推定や維持管理方策の改善への活用についてアンケートによる追跡調査を行い、実用化に向けた今後の研究課題を抽出する</p>	<p>(令和3年度)『全国環境研協議会との連携により実測データの収集を開始』</p> <p>①情報基盤のデモ版をパンフレットとして用いることで多くの実務者との研究協力が得られた。</p> <p>②埼玉県環境科学国際センターと連携しシンポジウムを開催し、実務者との意見交換を複数回行った。</p> <p>③研究者と実務者の連携強化として、実務上の課題解決のために実測データ収集のみならず処分場調査等を行い解決策の提示を進めてきた。</p> <p>④上記②のシンポジウムにおいて、実務者から廃止に向けた取組みや課題等の情報を収集した。</p> <p>(令和4年度)『実測データ収集の効率化のための実務者視点での情報基盤の改良』</p> <p>①実測データの収集範囲を、茨城県、千葉県、福島県、及び産業廃棄物最終処分場へと拡大した。</p> <p>②実測データのデータベース化を行い、情報基盤上で可視化、分析、予測が行えるようにした。</p> <p>③廃棄物資源循環学会等で口頭発表を積極的に行い、開発中の情報基盤に対する客観意見を収集した。それを踏まえて情報基盤の完成度を高めた状態で民間処分場に研究協力依頼を始めた。</p> <p>(令和5年度)『廃止期間推定機能等を実装した情報基盤の公開と第三者評価』</p> <p>①サブテーマ1で開発した水みちを考慮した物理モデルと予測誤差モデルに基づき、実測データの推移を考慮しながら予測モデルを随時見直す予測手法を考案し情報基盤に実装した。そのデモンストレーションをシンポジウムや民間処分場に行うことでより多くの研究協力を得た。</p> <p>②研究協力を得た実務者に対して当該研究成果を説明し、客観的評価を得るとともに実用上への展開の見込み、及び更なるデータを集めるための戦略について前向きなコメントを多数得た。</p>

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

廃棄物の最終処分研究は重要な社会的課題のひとつであり、維持管理や安定化といった研究がなされている。これまで国内外問わず、大学や研究機関、最終処分場事業者らが基礎研究や現場調査を継続してきたが、決定的な方法論が得られていない状況であった。その最大の障壁が廃棄物の不均質性と不確実性であり、それを克服するための手段が無いために最終処分研究は停滞しつつある。

本研究成果は、情報に対する社会的認知度の高まり、情報を扱うための基盤が整備された現在において初めて得られたものである。特に、既存の研究成果では扱えなかった埋立廃棄物の不確実性と不均質性を最終処分場の実測データで補完する新しい予測手段を構築していることが特筆すべき点である。また実測データの蓄積は、実務や研究、技術開発等のすべてにおける持続的発展には不可欠な要素でありそれを一元管理するためのWebアプリケーション（対話型プラットフォーム）は、社会に広く普及することで我が国のみが持つ財産となる。

<行政等に既に貢献した成果>

埼玉内最終処分場設置団体連携会議の成果のひとつとして、県内の一般廃棄物最終処分場の廃止に係る技術支援を行った。こうした実務者側からの個別相談は決して一方向ではなく、研究者側にとっても実態を知り対話型プラットフォームを実用展開するための有難いチャンスであり双方向からの廃止に向けた取り組みを行うことができた。こうした取り組みを行うことで、当該の処分場管理者にとってモチベーションの向上につながったと考えられ、その後の連携会議では、情報共有や学術的知見の習得、若手職員の研修を目的として積極的な参加を得ることができた。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

最終処分場の将来予測をより確かなものにするために、維持管理情報を整理した。処分場管理者および行政において、いままで測定されていなかったデータの収集や先端技術の活用を行うことで、本研究の廃止期間予測モデルやプラットフォームが完成し、実用面でも利用可能なものとなるだろう。

(1) 対話型プラットフォームを用いた実測データの一元管理と共有

- ✓ 最終処分場実務者の人事異動等における引継ぎを容易にかつ正確に行うことができる。
- ✓ 最終処分場実務者が形質変更や廃止、跡地利用を進める際には、学識者や県担当者に閲覧許可を付すことで最終処分場の理解を促すことができるので、適切な助言や判断の支援になる。

(2) 維持管理積立金の査定を各処分場の実態と学術的見解を勘考して支援

- ✓ 本研究を完遂し廃止までの期間が予測できれば過不足ない積立金の算定が可能になる。
- ✓ 維持管理積立金の使用時期と用途が制限されるなかで、収入がある埋立期間中に先行して実施しておかなければならない工事等が将来予測によって明確化できる。

## 6. 研究成果の発表状況の概要

## 6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	0
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	10
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	0

## 6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
3	石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人：都市清掃、363、74、pp.14-21（2021）最終処分場の実用的な将来予測手法とそのための対話プラットフォームの構築
1	Ishimori H., Isobe Y., Ishigaki T., Yamada M.: Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.191-196 (2022) Undisturbed Sampling of Waste Layer and Its X-ray CT Image Analysis for Estimating Water Channel Flow
2	Isobe Y., Ishimori H., Ishigaki T., Yamada M.: Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.191-196 (2022) Time-lapse Electrical Resistivity Tomography to Search Water Channel Flow in the Semi-aerobic Landfill.

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
石森洋行	立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 立命館大学講師を経て、 現在、国立環境研究所主任研究員 専門は環境地盤工学、研究テーマは最終処分場の物質動態解析

<研究分担者（サブテーマリーダー）略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 磯部友護	埼玉大学理工学研究科博士課程修了 博士（学術） 現在、埼玉県環境科学国際センター主任研究員 主に物理探査（比抵抗探査）を研究	2021年度 ～ 2023年度
2) 石垣智基	大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 龍谷大学准教授を経て、 現在、国立環境研究所上級主幹研究員 主に廃棄物の適正管理を研究	2021年度 ～ 2023年度

## II. 成果の詳細

### II-1 サブテーマ1「予測モデル構築・精緻化とのための現地調査」

#### [サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、最終処分場から発生する浸出水濃度の将来予測モデルを、物理現象によって浸出水濃度のトレンドを与える物理モデルと、物理モデルでは説明できない予測誤差の統計学的モデルの和によって表現した。

物理モデルの構築では計算負荷の低減を図った。その結果、物理モデルでは扱えない予測誤差分を実測データによって補完するような、データ同化を実務上利用できるレベルにまで向上させた。具体的には、水みちを考慮した単純な基礎方程式を用いて無次元化を行い、パラメータを縮減することで、調整すべきパラメータをシャーウッド数のみに限定した。基礎方程式を数値計算することなく、シャーウッド数で表現される解をバイリニアモデルによって近似した。調整すべきパラメータがシャーウッド数のみに限定される背景には、廃棄物埋立層内の間隙特性が現実的に取り得る範囲が決まっていると仮定しているためである。この仮定を検証するために、実際の廃棄物埋立層を対象に、高密度電気探査を用いて水の浸透経路を可視化し、不攪乱試料を採取しX線CT分析に供することで三次元間隙構造を明らかにした。不燃残渣主体の廃棄物埋立層では水みちが顕著に形成されることが判明し、間隙率は水平方向に高いネットワーク化が確認された。

最終処分場実務者から提供を受けた時系列データを用いて半データ同化型の将来予測手法を開発し、実測データの蓄積とともにモデルパラメータを更新することでより正確な予測結果を求めることができた。さらに、モデルパラメータを類型化し、機械学習を活用した最適化プロセスを開発した。このプロセスは、実測データのない最終処分場におけるパラメータ推定に有効であると考えられ、サブテーマ2で開発中のWebアプリケーションに実装することで、データ蓄積に応じたパラメータの自動更新が可能となる。これらの成果は、最終処分場の実務と研究の持続的発展に寄与すると期待される。

#### 1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では、データ同化に適した将来予測モデルを開発し、ここで必要となる水みちに係るモデルパラメータを現場調査に基づき評価した。実務面での運用を図るため、現場で取り得るデータを基に予測モデルを設計し、計算負荷軽減のために簡易化を指向した。特徴は、予測誤差をモデル化する点である。従来の自然現象を対象とした物理モデリングとは異なり、その計算結果を用いて実測データから除去することで、既往の物理モデリングの結果とどの程度かけ離れているのか、すなわち予測誤差を求めた。ここで物理モデリングには、多孔質媒体内流れを記述する移流分散方程式に水みちの影響を考慮したDual Porosity Modelを用いた。Dual Porosity Modelを実測データのトレンドを表現するための時系列モデルと扱えば、実測データはそのトレンド上に分散するばらつきと見なせるので最小二乗問題（フィッティング）に帰着する。実測データ一つひとつに対するデータ同化するよりも、ロバストで軽量の予測計算が実現できる。さらに、この予測を確実なものにするために、予測モデルに含まれる水みちに係るモデルパラメータについて、最終処分場廃棄物埋立層で取り得る値域を精緻化した。実際の最終処分場2か所（不燃残渣主体の埋立地、焼却灰主体の埋立地）を対象として、高密度電気探査による水みち形成過程のモニタリングを行うとともに、詳細解析のために当該調査地点から不攪乱試料を採取しX線CT分析等を用いることで、水みちに係る間隙率と有効間隙率を求めた。

#### 2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「予測モデル構築・精緻化とのための現地調査」
サブテーマ1 実施機関	国立環境研究所、埼玉県環境科学国際センター

サブテーマ1 目標	<p>(令和3年度)『水みちモデル構築のための研究対象とする最終処分場の選定』</p>
	<p>①ボーリング調査によってコア試料の採取と電気探査の調査地点の決定する</p> <p>②降雨前後の比抵抗分布の変化から最終処分場に発生し得る水みちを可視化する</p> <p>③コア試料を X 線 CT 分析に供して、3 次元間隙構造をデジタルデータとして得る</p>
	<p>(令和4年度)『廃棄物埋立層の水みちを考慮した移流分散解析技術の構築』</p>
	<p>①最終処分場調査を継続実施し、埋立層の組成と水みちの発生傾向を関係付ける</p> <p>②3次元間隙構造を解析空間とした数値実験により有効間隙率と屈曲率を求める</p> <p>③求めた有効間隙率と屈曲率を、コア試料を用いたカラム試験によって検証する</p> <p>④水みちを考慮した物理シミュレーション（移流分散解析）を情報基盤に実装する</p>
	<p>(令和5年度)『実測データとの比較から予測誤差を評価、統計分析による類型化』</p>
<p>①水みちを考慮した移流分散解析と集めた実測データの差から予測誤差を求める</p> <p>②予測誤差を最終処分場の諸元との相関性を調べて、予測誤差の類型化を行う</p> <p>③最終処分場ごとに類型化された予測誤差情報を、学習データとするための前処理と定常化方法を検討し、将来研究への見通しを立てる</p>	

### 3. サブテーマ1 研究開発内容

サブテーマ1では、廃棄物最終処分場における廃止期間の予測手法を構築した。物理シミュレーションと統計学的モデリングを融合させることで、従来の予測手法では扱えなかった埋立廃棄物の不均質性と不確実性を実測データによって補完し、実用面での運用を見据えた新しい将来予測モデルを提案した。本モデルでは、埋立廃棄物内の物質動態には未だ知りえない自然現象や境界条件が多く、確定的な理論付けはできないという前提に立つ。図1-1のように、従来の物理モデリングでは外乱因子の存在によって予測対象の規模や時間とともに予測が正確でなくなるため、実測データに同化するよう適宜モデルまたはモデルパラメータを見直すものである。

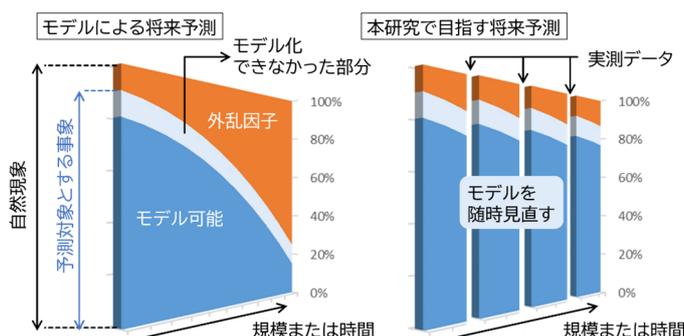


図1-1 半データ同化による将来予測の概念図

図1-1のように、従来の物理モデリングでは外乱因子の存在によって予測対象の規模や時間とともに予測が正確でなくなるため、実測データに同化するよう適宜モデルまたはモデルパラメータを見直すものである。

本研究では、廃棄物最終処分場から発生する塩化物イオン濃度を予測対象とした。廃棄物に含まれる塩化物イオンは、最終処分場内に降る雨水によって洗い流され、最終処分場末端にある浸出水処理施設に流れる浸出水（原水）の濃度は時間と共に減衰する。この減衰が所定基準値未満に達した時点を廃止の目安になると仮定し、その年数を数値解析により算出した。塩化物イオンに着目した理由は、長期予測を実現するために不可欠な水みちの影響を明らかにする必要があり、塩化物イオンは水みちの動態を

調べるためのトレーサーとして適切である。

初年度（令和3年度）および2年目（令和4年度）は、浸出水濃度の長期予測を実現するために、実際の埋立廃棄物層内の水みちの動態を現地調査し、X線CT分析による三次元精密間隙構造を解析することで水みちに係るパラメータを同定した。これにより、埋立廃棄物に発生する水みちが洗い流しに及ぼす影響を表現した。すなわち、初期段階では水みち上に存在する塩化物イオンが優先的に洗い流され、その洗い流しを終えた後は、水みち以外に存在する塩化物イオンが分子拡散によって水みち上に再溶出し浸出水中には低濃度の塩化物イオンが長期にわたり検出されるといった表現が可能になった。長期予測に適した物理モデルを得た。

最終年度（令和5年度）は、水みちを考慮した物理モデルでも正確な予測ができない分を予測誤差と定義し、予測誤差自体に統計学的モデリングを行った。最終処分場からの浸出水挙動の予測を、理論的なトレンドを得るための物理モデルと、理論では説明できない予測誤差を与える統計学的モデルの和によって実現させた。ここで予測誤差を調べるために、サブテーマ2による実測データの収集と連携し、最終処分場毎に予測誤差を求めて類型化を行った。類型化を行うことで、実測データを持たない最終処分場（例えば、これから新設する最終処分場）であっても、特徴に近似した最終処分場の予測誤差を引用することで将来予測が実現可能となった。

#### 4. サブテーマ1 結果及び考察

##### (1) 水みちを考慮した物理モデル

浸出水濃度のトレンドを得るために、水みちを考慮した物理モデルを作成した。最も単純で古典的な基礎方程式を採用し、無次元化によってパラメータの縮減することで計算負荷が少ない特長を持つ。この計算負荷の低減は、データ同化を反復計算する際に実務への展開を容易にし、使い勝手を向上させるための要件である。調整すべきパラメータはシャーウッド数のみに絞られた。パラメータの同定には物理モデルを数値解析で解くといった煩雑な操作が必要であるが、その解をバイリニアで近似（シャーウッド数で表現される非線形な解を、テーリング前の第一減衰定数とテーリング後の第二減衰定数の2つの直線で近似）することにより、さらなる計算負荷の低減が実現された。

廃棄物埋立層内の物質動態を表す基礎方程式には、前述の通り、確定的なものは存在しない。埋立廃棄物には未だ解明されていない自然現象は多く存在すると考えられるが、それらは不確定要素として扱い実測データによって補完することとする。そのためここで援用する基礎方程式には、実用上、可能な限り単純なものが望ましい。そこで、多孔質媒体内の物質輸送を表す最も古典的で単純な式を採用した。すなわち、

$$\frac{\partial C_m}{\partial \tau} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C_m}{\partial \xi^2} - \frac{\partial C_m}{\partial \xi} + K^* \tau^{-a} + \frac{1}{\theta_m} \frac{Sh}{Pe'} (C_{im} - C_m) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial \tau} = \frac{1}{Pe'} \frac{\partial^2 C_m}{\partial \xi^2} + K^* \tau^{-a} - \frac{1}{\theta - \theta_m} \frac{Sh}{Pe'} (C_{im} - C_m) \quad (2)$$

である。廃棄物埋立層の深さ方向における鉛直次元物質輸送を仮定し、多孔質媒体中の移流分散方程式を無次元化したものである。無次元パラメータは次式で定義し、

$$\xi = \frac{z}{L}, \quad \tau = \frac{tv}{L}, \quad C_m = \frac{c_m}{c_{peak}}, \quad C_{im} = \frac{c_{im}}{c_{peak}} \quad (3)$$

空間スケールは廃棄物埋立層の厚さで正規化し、時間スケールは廃棄物埋立層を通過するのに要する時間で正規化している。ここで、 $\xi$ ：廃棄物埋立層表面からの深度方向ベクトル  $z$  軸を廃棄物埋立層の厚さによって正規化した独立変数、 $\tau$ ：経過時間  $t$  をトラベルタイムによって正規化した独立変数、 $C_m$ ：可動水濃度を浸出水のピーク濃度  $c_{peak}$  で正規化した従属変数、 $C_{im}$ ：不動水濃度をピーク濃度で正規化した従属変数、 $\theta$ ：体積含水率、 $\theta_m$ ：可動水相の占有率である。また、 $v$ ：間隙内流速 (m/s) を表し  $v = u/\theta_m$  から計算される。

無次元化の意図は計算結果に影響を与えるパラメータを4種類に縮減することである。間隙特性 ( $\theta$ 、 $\theta_m$ )、無次元溶出速度 ( $K^*$ )、ペクレ数 ( $Pe$ 、 $Pe'$ )、およびシャーウッド数 ( $Sh$ ) となる。各無次元パラメータの中身は、

$$K^* = \frac{1}{\theta_m} \cdot \frac{\rho_d K}{c_{\text{peak}}} \left(\frac{v}{L}\right)^{a-1} \quad (4)$$

$$Sh = \frac{k_m L^2}{D_e} \quad (5)$$

$$Pe = \frac{vL}{D + D_e}, \quad Pe' = \frac{vL}{D_e} \quad (6)$$

であり、 $L$ ：廃棄物埋立層の厚さ (m)、 $k_m$ ：物質移動係数 (1/s)、 $D$ ：分散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $D_e$ ：有効拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\rho_d$ ：乾燥密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。

ここで、以下の条件を考慮することで、実測データの蓄積に応じて精緻化すべきパラメータはシャーウッド数 ( $Sh$ ) のひとつとなる。

- 最終処分場の容量が一杯までには十分な年月を要するので、埋立終了後からの維持管理期間では、埋立廃棄物からの溶出 (無次元溶出速度  $K^*$ ) はゼロとみなせる。
- ペクレ数  $Pe$ 、 $Pe'$  の算出に必要な雨水浸透速度は、現地に降る降水量を測定していれば、または気象庁等天候データを引用すれば既知量となる。
- 廃棄物埋立層の間隙特性  $\theta$ 、 $\theta_m$  については現実的に取り得る値域は絞られ大よその目安を付けることができる。その目安を得るための現地調査とその結果については後述 (3) にて述べる。その数値の多少の違いはあっても計算結果に影響は、オーダーレベルで変化するシャーウッド数  $Sh$  に比べると小さいと考えられるため、間隙特性  $\theta$  と  $\theta_m$  は既知量として扱い得る。

したがって、実測データの蓄積に応じて、式(1)と式(2)を回帰式としたデータフィッティングを都度行うことで、より長期の予測に適用可能なシャーウッド数を逐次修正していくことができる。

図1-2は、式(1)と式(2)から求まる浸出水濃度のプロファイルに与えるシャーウッド数の影響を調べた結果である。有限要素法を用いた汎用シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics ver 6.2を用いた。シャーウッド数は、間隙中の不動水相から可動水相への物質移動係数を無次元化したパラメータである。その値を小さいほど不動水相に蓄えられた汚濁物質はより緩やかに可動水相に移行し、可動水相を経由して埋立地から浸出する。ゆえに、シャーウッド数が小さいほどテーリング現象が顕著になる。すなわち、埋立終了から早い段階では、間隙中に存在する汚濁成分のうち可動水相に存在するものは雨水浸透によって洗い流され、結果として埋立地から浸出する汚水濃度は時間とともに速やかに減衰する。しかし可動水相中の汚濁物質が洗い流されても、雨水浸透が及ばない不動水相内に残留している汚濁物質が分子拡散によって可動水相に移行するため、可動水相は再度汚染されて雨水浸透によって埋立地外に浸出する。このとき不動水相から可動水相への移行速度が律速となる。そのため、テーリング時の汚水濃度の時間変化率は小さく、長期にわたり低濃度状態が続くプロファイルとなる。

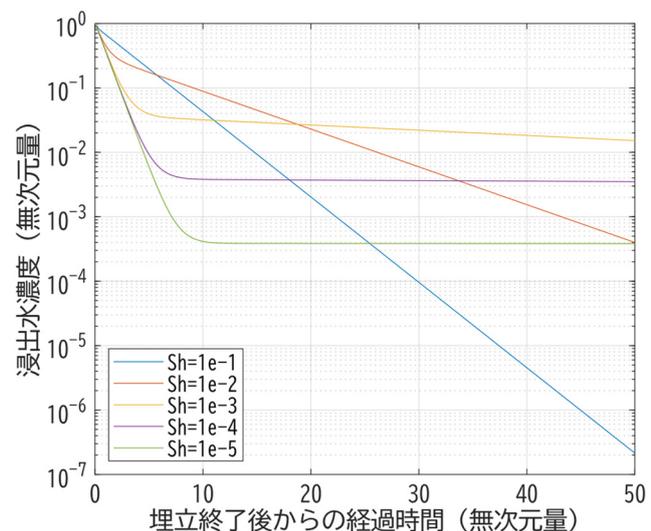


図1-2 浸出水濃度に与えるシャーウッド数の影響

本研究で目指す将来予測では、埋立廃棄物の不確実性と不均質性を克服するために、将来予測に必要なシャード数を実測データの蓄積とともに随時調整し、精緻な数値とすることでより先の将来に対して確実な予測を与える。しかし、式(1)と式(2)からなる連立偏微分方程式を解き最適なシャード数を同定するのは手が掛かり、ましてやデータの蓄積とともにこのプロセスを常に繰り返すことは煩雑である。将来予測を求めている最終処分場実務者にとって利便性が高い方法とは言えない。そこで本研究では最終的にはデータフィッティングで補正することのメリットを活かし、式(1)と式(2)からなる偏微分方程式を厳密に解くことなく、図1-2を表現可能なバイリニアモデルを回帰式に用いた。

## (2) 廃棄物埋立層の間隙構造と流れの特性化

水みちを考慮した物理モデルに与える間隙特性を調べるために実際の廃棄物埋立層を対象に、高密度電気探査による水の浸透経路を可視化するとともに、その特性化を行うために不攪乱試料を採取しX線CT分析に供することで三次元間隙構造のパラメータとして表現した。不燃残渣主体の廃棄物埋立層では水みちの形成が顕著にみられ、間隙構造は深度方向よりも水平方向にネットワーク化されておりそのため間隙率は深度方向に低くなる特長がみられた。すり鉢状の水みちが形成されやすいと示唆された。一方で焼却灰主体の廃棄物埋立層では水みちは認められたが、不燃残渣に比べるとその程度は小さかった。間隙率は不燃残渣よりも小さな値であり、深度方向の依存性は認められなかった。

### (2-1) 不燃残渣埋立層内の雨水浸透挙動

調査対象とする1つ目の最終処分場には、搬入廃棄物の管理に係る密な情報を長期にわたり取得しており、且つ一般廃棄物及び産業廃棄物ともに受け入れている県営施設を選定した。当該処分場の実態を把握するために、実務者がもつ図面データ、搬入廃棄物の履歴、及び埋立位置情報を集め、3次元CADに一元管理することで埋立状況を見える化した。3次元CAD上に可視化した埋立廃棄物の組成分布と密度分布を考慮し、水みち研究に最も適していると考えられる箇所を調査地点として選定した。選定した調査地点には、質量比で焼却灰52%、不燃物20%、および廃プラスチック28%が埋め立てられていることが記録上から確認した。

高密度電気探査を行い、注水試験時の比抵抗分布の変化から推察した。電気探査に使用した機材には、SYSCAL Monitoring Unit (IRIS社) と比抵抗分布解析ソフトRES2DINV (Geotomo社) である。図1-3は水



図1-3 水みちを把握するための注水試験と高密度電気探査

表1-1 本研究で実施した電気探査の測定条件と特徴

	本研究で用いた条件	従来
電極数	48本	48本
電極間隔	0.5 m	1.0 m
測線長	23.5 m	47 m
探査深度	3.7 m	7.4 m
空間分解能	12.5点/m <sup>2</sup>	7.5点/m <sup>2</sup>
時間分解能	12回/日	6回/日
その他	数か月もの長期連続計測を見据えて、ソーラーパネルとリチウムイオンバッテリーによる独立電源と空調機、また遠隔操作するためのリモートコントローラー、WIFI、データサーバーを導入した。	

みちを把握するための注水試験時の高密度電気探査の様子である。表1-1に測定条件を示す。電源管理やリモート制御を導入することで、電気探査の空間分解能と時間分解能を従来よりも約2倍に向上することができ、水みちの可視化と長期モニタリングを実現させた。

高密度電気探査の結果を図1-4に示す。水試験前後での埋立層の比抵抗構造の変化を示しており、

注水試験前の比抵抗構造（図1-4 a）より、表層から深度0.5 m、及び3.5 m以深に高比抵抗領域が層状に分布しており、これはそれぞれ中間覆土層を反映したものである。また、深度0.5-3.0 mの埋立廃棄物層をみると1.5 m以深で30 Ω・m以下の低比抵抗領域が広く分布しており、深部ほど含水率が高くなっている可能性が示された。一方、廃棄物層の右側を見ると比抵抗が高くなっており、探査測線の近くにガス抜き管が存在していることで透気性や排水性が高くなっている影響であると考えられた。また、注水試験後（図1-4 b）では廃棄物層での比抵抗が全体的に低下する傾向が確認された。これは、注水試験により水が浸透し処分場内部の含水率が高くなることにより比抵抗は低くなったと考えられた。期的な挙動の調べる上では、前述の比抵抗構造を指標とするよりも、比抵抗変化率を指標とすることで注水による比抵抗の変化から水みちの動態をより視覚的に捉えられると考えられる。注水試験時において顕著な比抵抗変化率が確認された一例を図1-5に示す。本研究では注水時間を1時間とした注水試験を、3日間のインターバルを設けて、合計3回実施しており、図1-5は3回目の注水試験後における結果である。注水を開始した直後の探査における比抵抗構造を基準とした、注水開始1時間後（即ち注水終了時）、注水終了から4時間後、94時間後の比抵抗変化率の分布である。注水終了時では比抵抗変化率は-10~10%程度と顕著な変化は見られなかったものの、注水終了3時間後では深度1.0 m前後の表層では25%かつ深度1.5 mより深い層では-30%と大きく変化しており、注水により浸透した水が表層から深部に移動した結果であると推定された。他方、注水終了94時間後をみると負の比抵抗変化率領域が小さくなっている結果となり、浸透した水は比抵抗構造外に移動し、含水率が低下したことが示された。このような比抵抗変化率の変動が大きい領域では水が移動しやすいことを意味し、この領域が水みちに相当すると考えられ、その観察には高密度電気探査が有効であることが確認された。

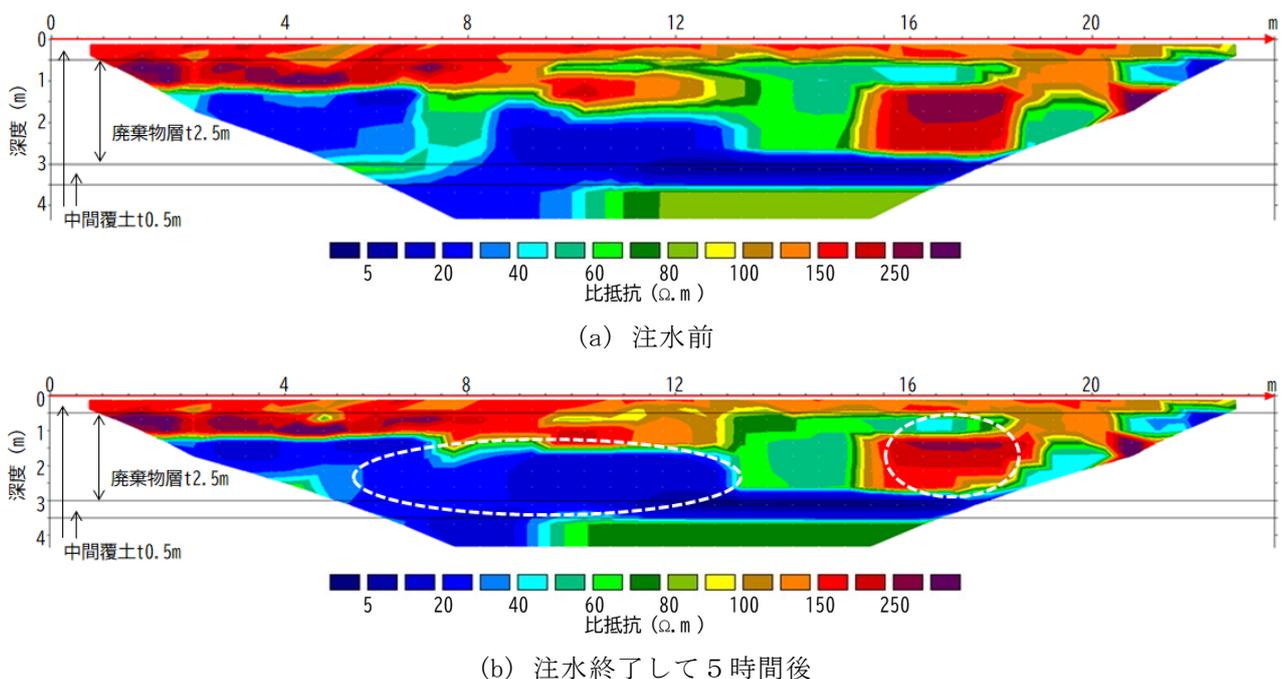


図1-4 不燃残渣埋立層の注水試験前後の比抵抗構造

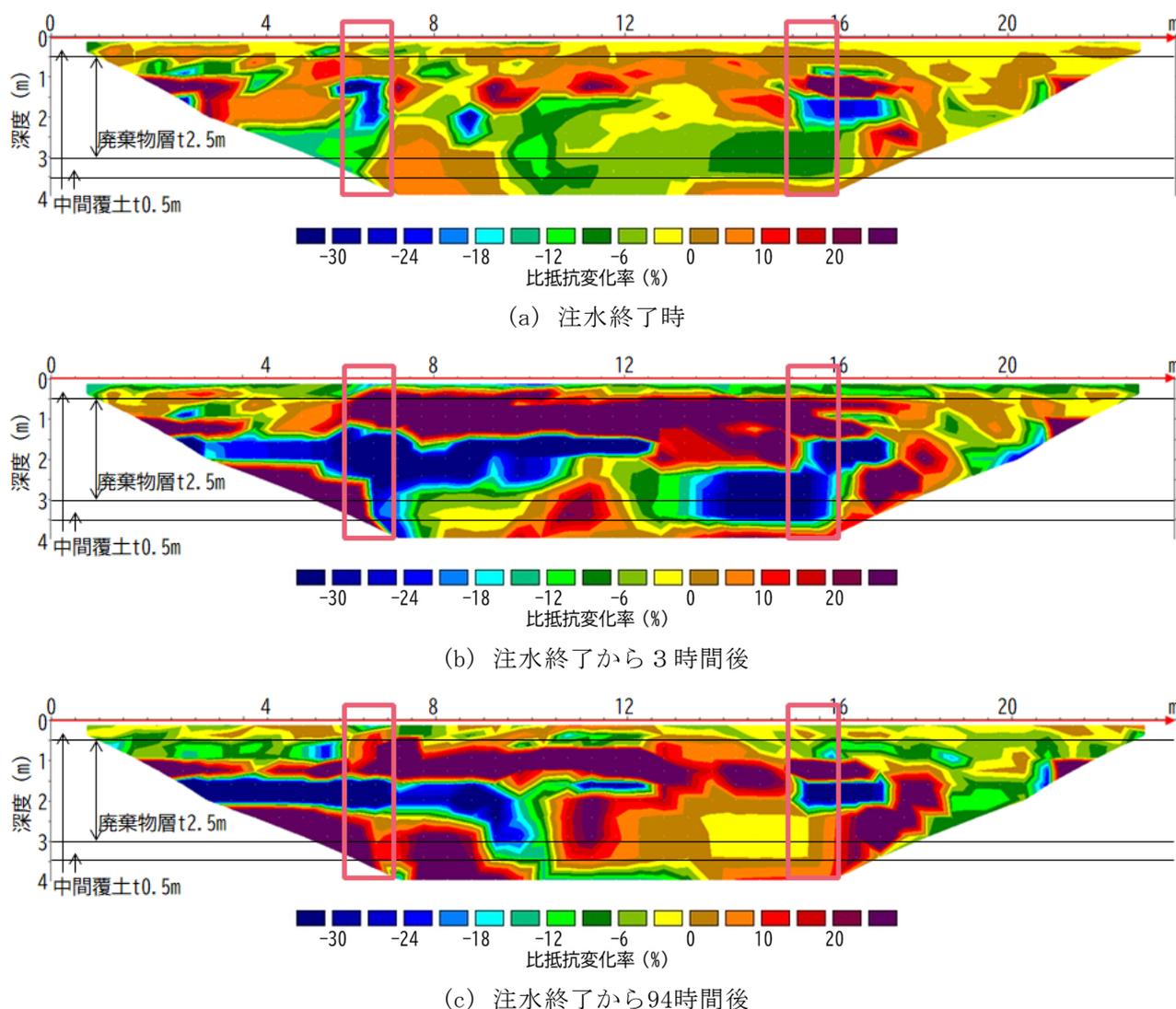


図1-5 不燃残渣埋立層の注水試験後からの比抵抗変化率の時系列変化

## (2-2) 不燃残渣埋立層の間隙構造

廃棄物埋立層の不攪乱試料の採取は実例の少ない希少な挑戦である。当該処分場の管理上の制約を加味しつつ、不攪乱試料の採取方法を、土木工事専門業者との意見交換や事前の試験掘削を行った上で最終的には図1-6に示すような手順で決定した。すなわち、(1) 後述するX線CT分析装置の仕様と測定条件を勘案して採取すべき不攪乱試料の大きさ(W250×D250×H600 mm)に合わせて、作業場所としての堅坑をW1500×奥行3000×H1600 mm掘削した。(2) 露出した廃棄物埋立層表面に対して木製の採取容器を押し当てパイプサポートで容器を押し込みつつ容器周りの廃棄物を手掘りし除去した。(3) 埋立層に対して採取容器を完全に押し込んだ後、容器背面を縁切りした。(4) 埋立廃棄物で満たした採取容器を地上に引き上げ、その表面をカッターやニッパー等を用いて平らに均した。(5) 埋立廃棄物で満たした採取容器を同木製の蓋で覆いビス止めし、運搬時の内部試料の攪乱を防ぐために木箱表面から建築工用透明接着剤を間詰め材として注入し固定した。(6) 埋立廃棄物を封入した採取容器をX線CT分析装置室に運び入れ、その容器ごとX線CT分析に供した。なお、このような採取手段を用いた理由は、ボーリング等でのケーシングパイプの押し込みではパイプ周りの廃棄物を巻き込む恐れが事前に認められたこと、また木材は低密度でありX線の透過性が高いので木製の採取容器に詰めた廃棄物を数十センチレベルの大きさでX線CT分析が実現できること、さらに木材は塩ビやアクリルに比べて強度のみならず弾性にも優れるため採取容器を埋立層表面に押し込んでも破損しにくい利点をもつことが挙げられる。

図1-7はX線CT分析によって求めた間隙構造である。測定条件は、450 kVのマイクロフォーカス線源を

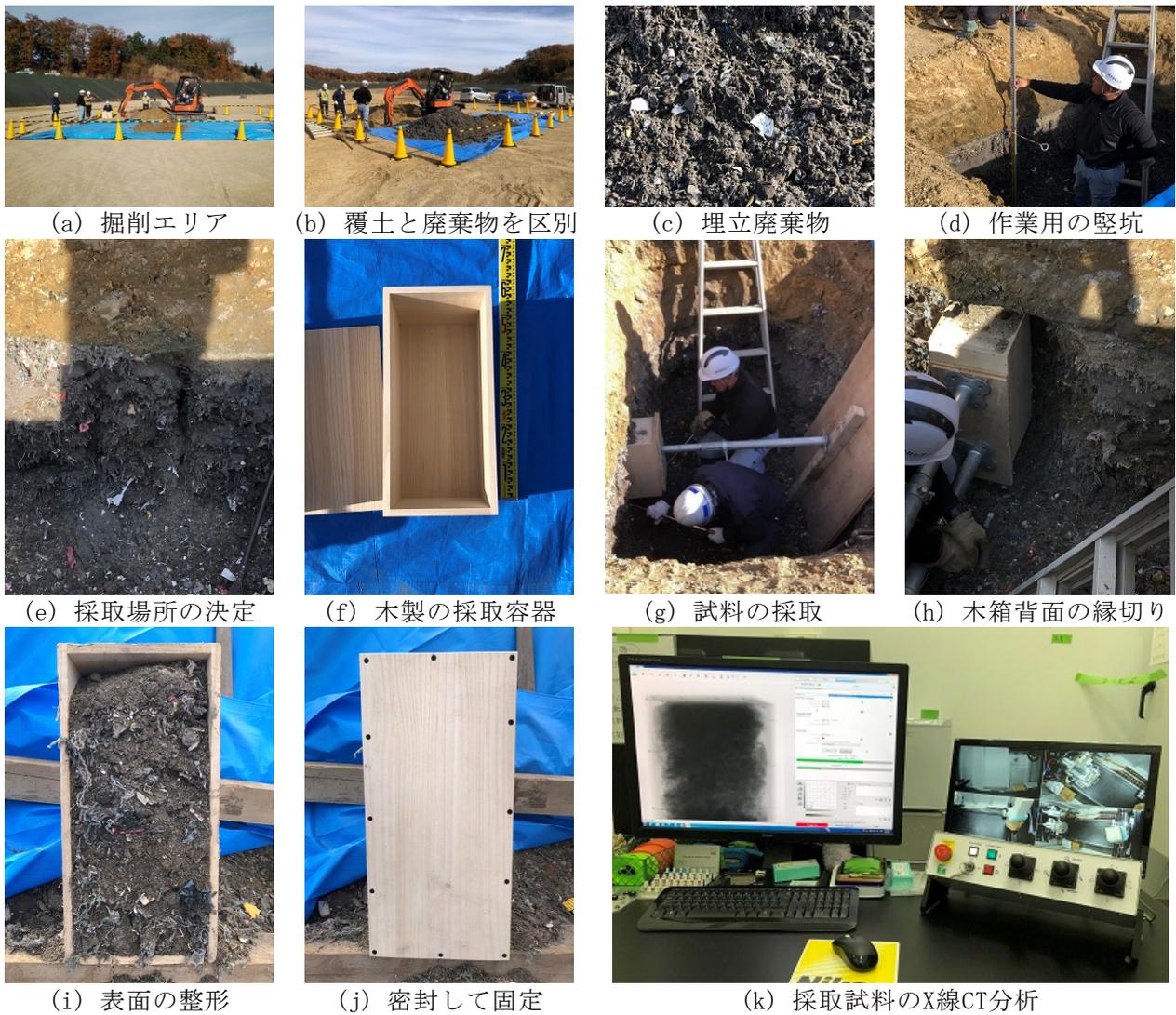


図1-6 不燃残渣埋立層からの不攪乱試料の採取手順

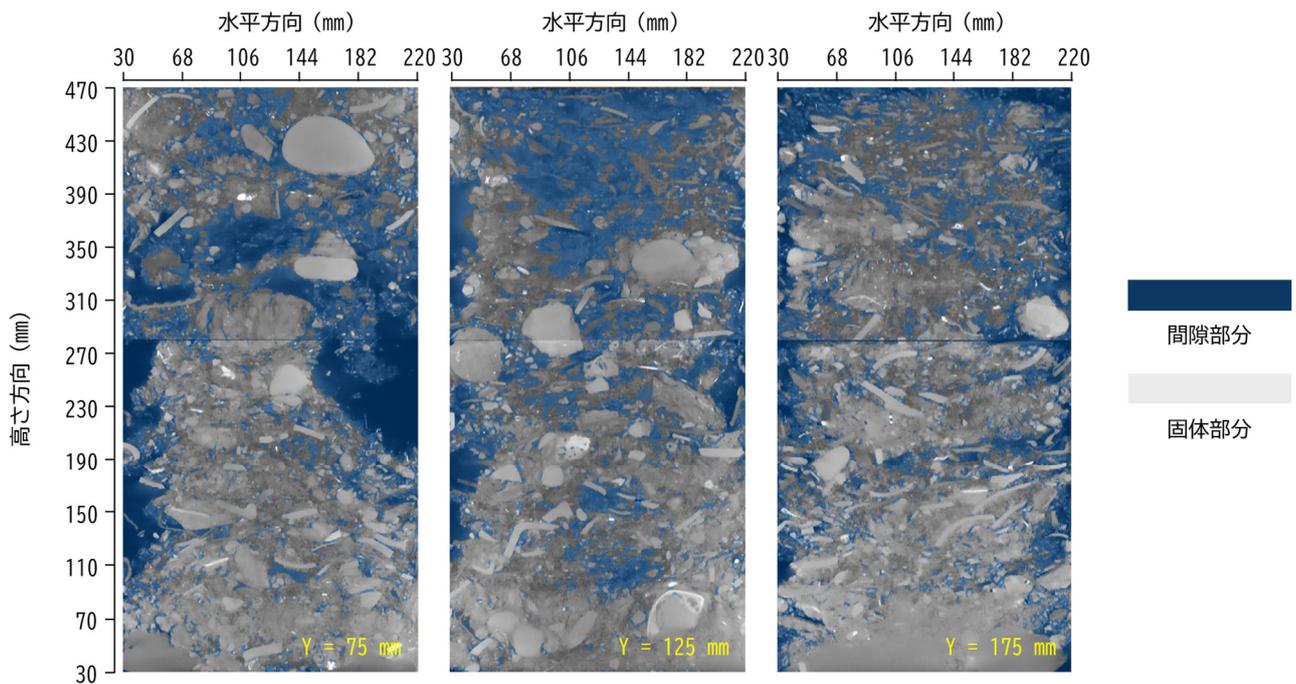


図1-7 X線CT分析によって求めた不燃残渣埋立層の間隙構造

使用し、空間分解能は0.146 mmとした。分解能と撮影範囲はトレードオフの関係にあり、本研究では廃棄物の不均質性を捉えるために撮影範囲を最大化することを優先し、一方で分解能は粗い設定とした。X線CT分析に供した試料は複合材料である。間隙に存在する空気から、固相となる繊維、プラスチック、焼却灰、金属など様々に存在し、比重として0.001~7.8まで分布する。X線CT分析から得られるCT画像では材料密度をコントラストして表現するため、複合材料ではCT画像から各構成材料のみを抽出することが難しい課題がある。そのため、間隙相と固相を切り分けるための閾値の設定によって図1-7に示した結果が多少変わる可能性は否めない（特に、空気と繊維の切り分けは確実であるとは言えない）。抽出した間隙構造に対する特性化については、後述（2-5）にて述べる。

### （2-3）焼却灰埋立層内の雨水浸透挙動

調査対象とする2つ目の最終処分場は焼却灰主体の最終処分場である。当該の処分場では搬入廃棄物の埋立箇所についての記録は残されていなかったため、調査地点における埋立廃棄物の詳細は不明であったが、当時からの現場担当者によれば10年前に焼却灰を埋め立てた箇所であり、当時の焼却灰には金属が多く含まれていたとの情報が得られた。大きな金属は搬入時に人力で取り除いてきたが、細かな金属までは取り除くことができなかつたため焼却灰とともに埋め立てられたとのことであった。図1-8に示す比抵抗分布をみても、不燃残渣埋立層の比抵抗値よりも低い値が得られており、これは焼却灰中の塩分や焼却灰に紛れた金属による影響だと考えられる。注水前の比抵抗分布と比較して、注水終了後から8時間経過した時点での比抵抗分布は、図1-8bの白で囲ったエリアに比抵抗値の低下が認められた。特に測点上の12~16 m地点において、注水による比抵抗値の低下が顕著であり、ここを優先して流れる水みちが発生していることが推察された。

また図1-9では比抵抗変化率で表現し、比抵抗変化率がマイナスであると注水前と比べて水分量が高くなったことを意味し、比抵抗変化率がプラスであると水分量が低くなった、即ち間隙中の水が排水されたことを表す。図1-9中の赤で囲ったエリアに着目すると、測点上の11~13 m地点最新部では、注水終了と注水終了から7時間が経過するまでは、最深部の比抵抗変化率はプラスであり注水による浸透の影響が及んでいないが、図1-9cに示すように注水終了から120時間経過すると、比抵抗変化率はマイナスに変化し水の浸透によって最深部が帯水したことがわかる。徐々にであるが水の浸透が深度方

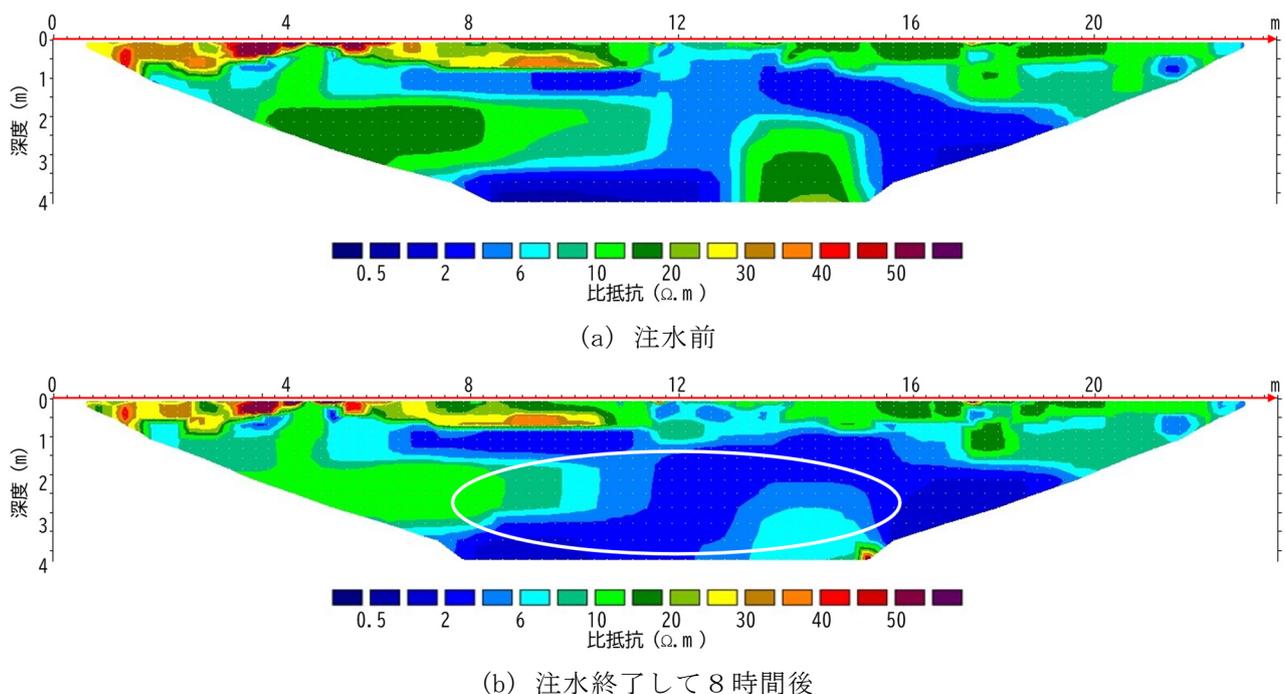


図1-8 焼却灰埋立層の注水試験前後の比抵抗構造

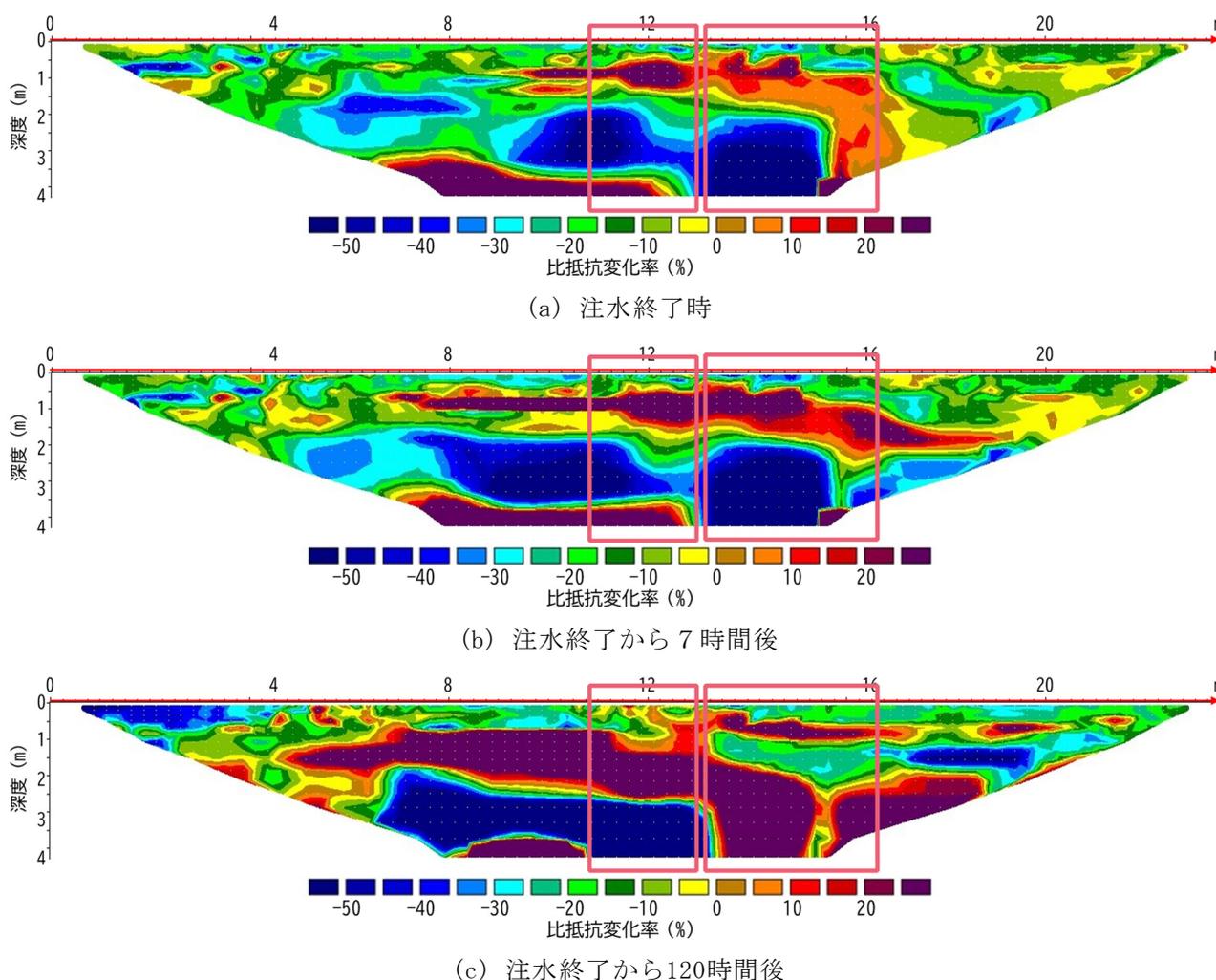


図1-9 焼却灰埋立層の注水試験後からの比抵抗変化率の時系列変化

向に及んでいることが確認できた。一方で、測点上の13～16 m地点の最深部では比抵抗変化率の変化は更に顕著であり、水の浸透が速く、明確な水みちが認められた。注水終了時と注水終了から7時間が経過するまで比抵抗変化率はマイナスを示し、注水によって水が速やかに浸透することで帯水したことを意味する。しかし注水終了から120時間経過すると、比抵抗変化率はプラスに変化し、帯水部分から水が引いたことを意味する。注水によって帯水されて排水されるまでの水分移動が120時間以内に生じていることから、11～13 m地点の水分移動よりも速いことがわかる。このことから、11～13 m地点よりも13～16 m地点の方が相対的に速い流れが存在し水みちになったと結論付けられる。

#### (2-4) 焼却灰埋立層の間隙構造

図1-10は、焼却灰埋立層から不攪乱試料を採取してX線CT分析に供したときの断面画像である。採取方法は図1-6と同じであるが、当該の焼却灰埋立層は硬化していたためエンジンカッターで矩形に切り取り試験体を作成した。作成した試験体の大きさはW80×D80×H450 mmであり、不燃残渣の試験体に比べるとサイズは小さい。これは、不燃残渣に比べると焼却灰は密実であるためX線を透過させるためには試験体の奥行きを短くする必要があったためである。

不燃残渣埋立層(図1-7)と比べると、焼却灰埋立層では間隙が点在し、密実な多孔質媒体であることがわかる。間隙率の深さ方向の依存性についてもほぼ確認できず、試料採取時に影響を受けたと考えられる試験体上端と下端を除けば、一様とみることができる。抽出した間隙構造に対する特性化については、後述(2-5)にて述べる。

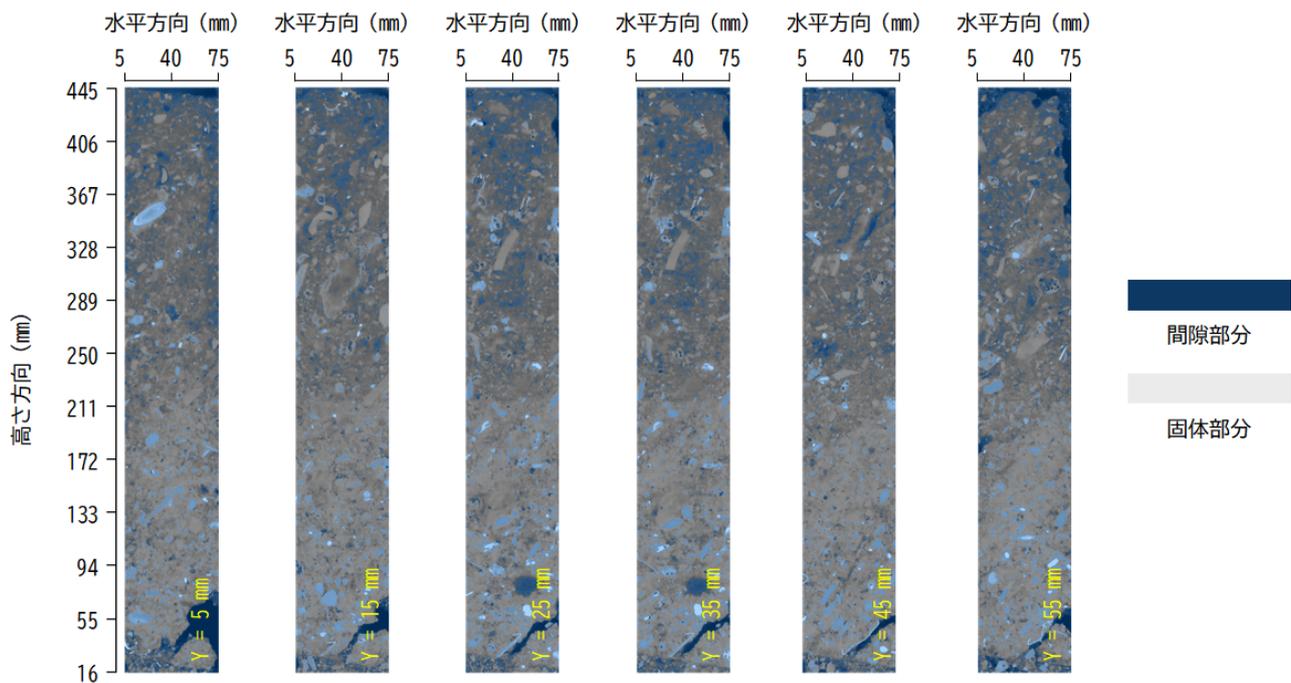
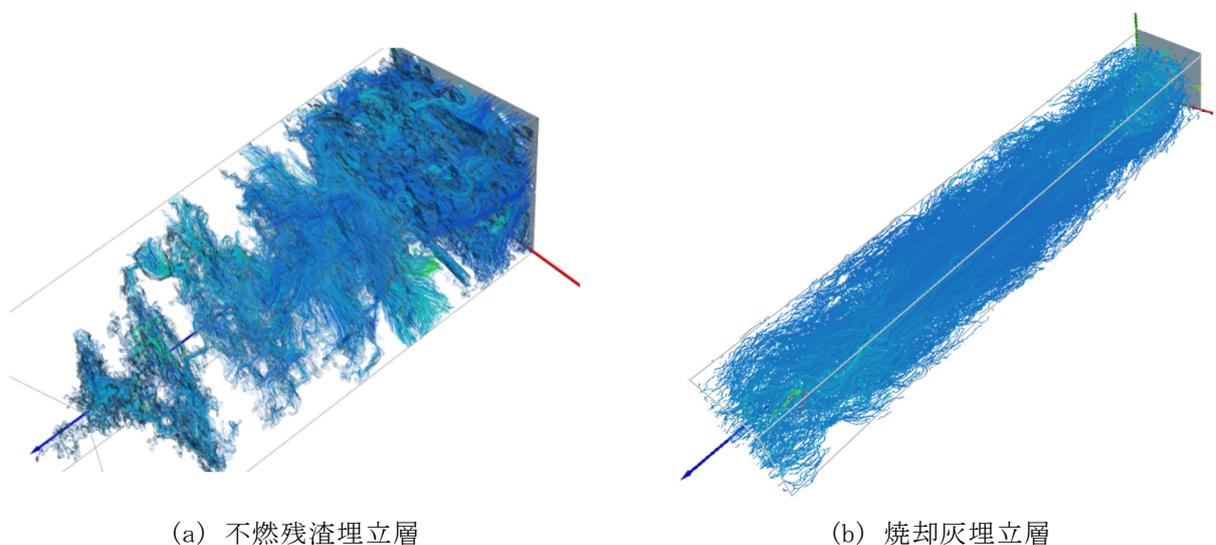


図1-10 X線CT分析によって求めた焼却灰埋立層の間隙構造

#### (2-5) 水みちの特性化

不燃残渣埋立層と焼却灰埋立層のCT画像から間隙部分を抽出し、間隙構造内部を流れる水の浸透挙動をFEM流体解析によって調べた。基礎方程式にはナビエ・ストークス方程式を使用し、モデルパラメータは流体密度と粘性係数のみであり、これらには水の物性を与えた。図1-11は流体解析によって求めた間隙内部の流線である。不燃残渣埋立層では地表面から浸透した雨水は、地表面近傍では深度方向に均等に浸透するが、深くなるにつれて間隙を縫うように選択的に浸透する挙動を示した。均等な浸透ではなく、浸透経路が徐々に絞られるようなすり鉢状の水みちになることがわかった。一方で、焼却灰埋立層では、流速の大きさは異なるものの深度方向に均等な浸透となった。流れが及ばない箇所（不動水相）は少なく、すべての廃棄物が雨水と接触し得るので、焼却灰埋立層からの浸出水濃度は高くなり得ると考えられる。なお流体解析で用いたナビエ・ストークス方程式は飽和条件下で球解しているため、実際の水みちとの差異がどの程度なのかはまだ解明できていない。より現実に即した解析を行うためには、不飽和条件を考慮可能な気液二相流に発展すること、また間隙壁との境界条件には水の表面張力の



(a) 不燃残渣埋立層

(b) 焼却灰埋立層

図1-11 FEM解析によって求めた間隙構造内の流線

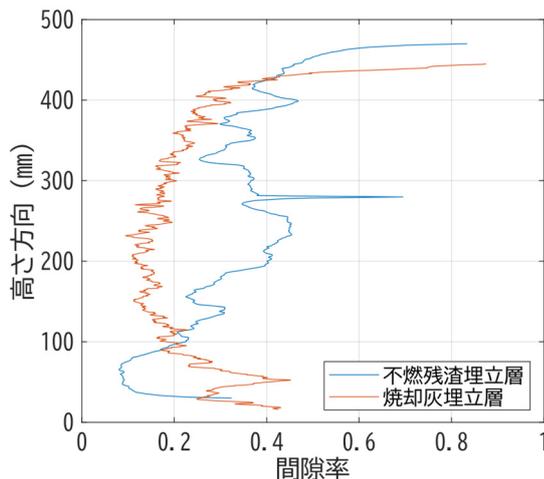


図1-12 画像解析から求めた間隙率分布

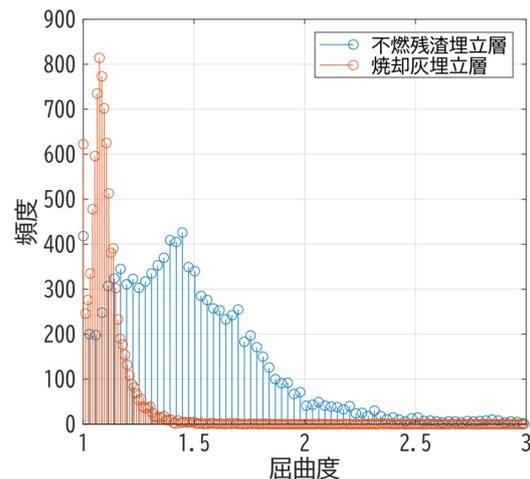


図1-13 画像解析から求めた屈曲度分布

影響を加味することなどの改善が考えられ、解析技術面での精緻化を進めることで、水みちの評価結果の妥当性を調べることも今後の学術的課題のひとつである。

図1-12は、CT画像から画像解析によって求めた間隙率の深度方向の分布である。試験体の上端と下端では試料採取時の影響を受けているため、試験体端部の30 mmをトリミングして間隙率分布を求めると、不燃残渣埋立層では $\phi = 0.00059 \cdot z + 0.180$  ( $\phi_{ave} = 0.328$ ) となり、焼却灰埋立層は $\phi = 0.00005 \cdot z + 0.188$  ( $\phi_{ave} = 0.195$ ) であった。ここで、 $\phi$ : 間隙率、 $z$ : 高さベクトル (mm) を表す。間隙率は、不燃残渣埋立層は平均値となり0.328となり概ね土壌とほぼ類似した値となったが、深度方向への依存性があり埋立層表層から深くなるほど間隙率が小さくなる傾向がみられた。一方、焼却灰埋立層では平均値で0.195であり土壌よりも約40%程度小さい間隙率であった。今回試験対象とした焼却灰は10年前に埋め立てられたものであり自然固化していたことから小さい間隙率となった可能性が考えられる。なお焼却灰埋立層に関しては間隙率の深度方向依存性は認められなかった。

図1-13は、CT画像から画像解析によって求めた屈曲度のヒストグラムである。屈曲度は流路の蛇行性を表す指標であり、屈曲度が1のとき蛇行しない流れとなり、1以上の数字になるにつれて蛇行性が強くなる。したがって、水みちのように、間隙を選択的に浸透する場合には流れが蛇行していると言えるので、屈曲度は水みちに相関のあるパラメータだと考えた。画像解析に基づいて屈曲度を調べたところ、焼却灰埋立層の屈曲度は1.07をピーク値としてシャープなヒストグラムとなり、一方不燃残渣埋立層の屈曲度は1.44をピーク値とするもののブロードなヒストグラムとなった。不燃残渣と焼却灰を屈曲度の点から比較したところ特徴的な差異が認められ、水みちが発生するか否かを判断する指標のひとつとなり得ることが示唆された。

### (3) 半データ同化型将来予測手法

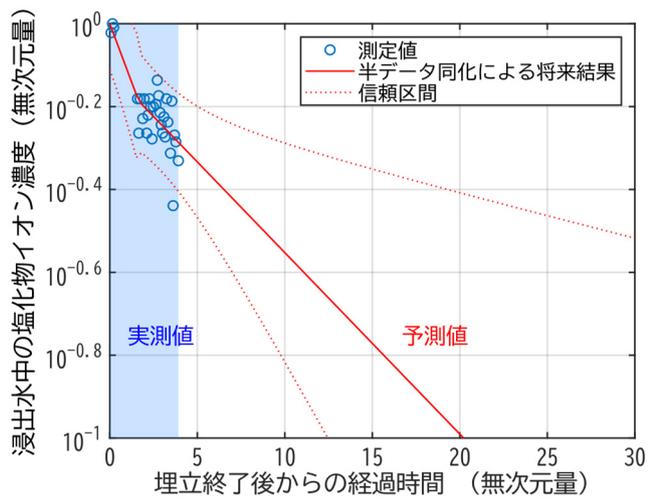
本研究で開発した半データ同化型将来予測手法は、時系列データの背後にある物理法則を捉え、予測のトレンドとして活用することが特長である。近年、データサイエンスの分野では時系列解析がオープンソース化され、各分野での活用が進んでいる。しかしながら、データの変動だけでなく、その変動を引き起こしている物理法則を考慮することにより、より正確で説得力のある将来予測結果を提供することが可能となる。実測データの蓄積と共にモデルの更新が進む中で、将来予測モデルが収束する様子が確認された後は、維持管理コストを削減するための戦略に役立てることができる。例えば水質分析の頻度を減らす等は廃止までの最終処分場実務者の負担軽減に寄与する。

図1-14に、最終処分場からの浸出水に含まれる塩化物イオン濃度を予測した結果を示す。横軸は無次元経過時間であり、縦軸は無次元濃度である。プロットは実測データであり、実線は理論モデルを回帰式としてフィッティングした将来予測結果である。図1-14 a では埋立終了から時間が十分に経過していない場合、時系列データはプロット数として30個に限られるが、少ない実測データでも

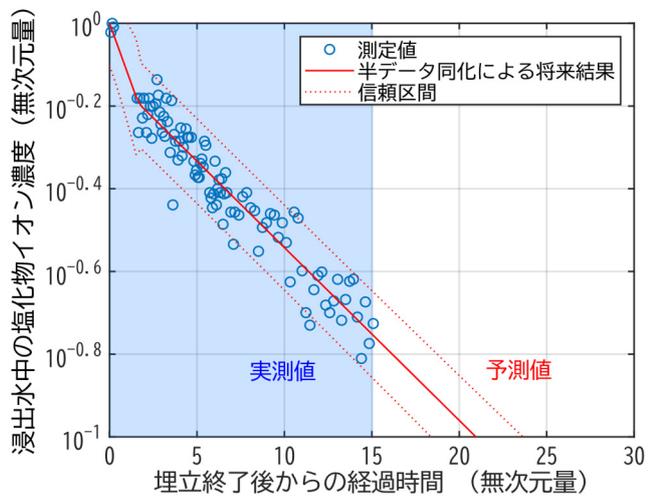
理論モデルで補完することでより先の将来を予測できるようになる。例えば維持管理が辞めることのできる基準値を濃度0.1に仮定すると、この時点での維持管理期間は無次元時間として20程度となる。なお、無次元化時間から実時間に換算するときには式(3)を使用する。経過時間が進むにつれて、時系列データも増えるのでその都度予測モデルを更新できる。図1-14bでは時系列データがプロット数として100個まで蓄積されたときの予測結果を表し、このときの維持管理期間は20.7となる。予測される維持管理期間には大きな差は現れていないものの、データの蓄積によって信頼区間の幅は狭くなり、予測の信頼性向上に寄与している。さらに時間が経過し、その中で蓄積されたデータによって予測モデルの更新を行うと、図1-14cのように、維持管理期間は32.1となり大きく見直されていることがわかる。

図1-15には、データの蓄積とともに、将来予測モデルを決定するためのパラメータに与える影響を表している。実線はパラメータの代表値の推移であり、実線上下にある色付きエリアはパラメータの95%信頼区間である。実測データが少ない時点では、将来予測モデルに与えるパラメータにばらつきが認められるが、データの蓄積に応じて、パラメータの信頼区間は狭くなった。特に、図1-15aに示す減衰定数は、この条件では、無次元時間が20を超えると一定のパラメータが同定された。図1-15bの変曲点時間については、データの蓄積とともに信頼区間が狭くなる傾向にあるが、減衰定数よりはばらつきが生じ得るパラメータであることがわかった。

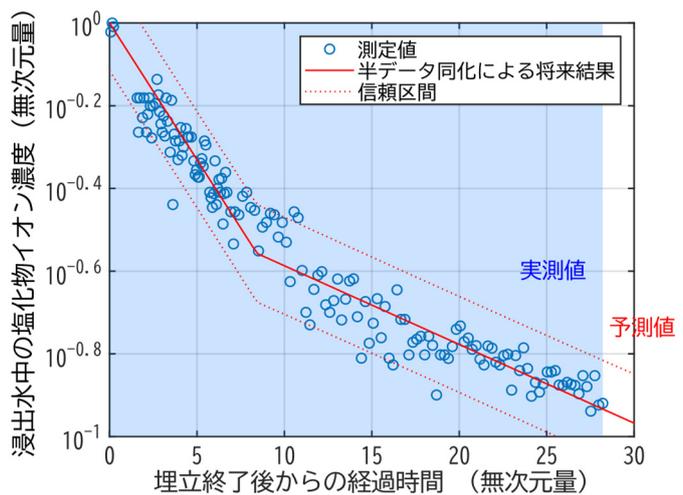
将来予測モデルを確定化するためには、それに与えるパラメータは、データの蓄積に対して変動すること無く一定値に収束している必要がある。本研究で仮定したバイリニアモデルでは、第二減衰定数と変曲点時間を収束させることができず、すなわちデータの蓄積によってパラメータは微小変化しその都度異なった将来予測結果を与えることを意味する。しかし自然現象の将来を確定的に予測することはできないので、不確実性と不均質性をもつ最終処分場において将来予測結果にどこまでの変動を実用上許容し得るのか次第である。バイリニアモデルが運用可能であるか否か、それともバイリニアモデルが表すテリング後の表現を改良する必要があるのかの議論を行う必要があると考える。



(a) 経過時間が短くて十分なデータが無いとき

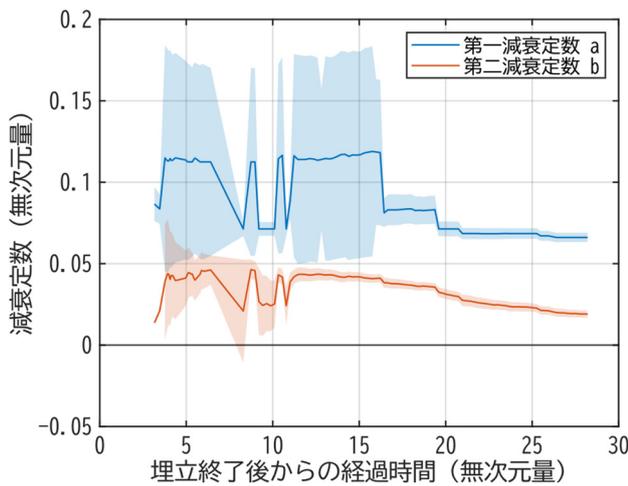


(b) 経過時間とともにデータが蓄積されたとき

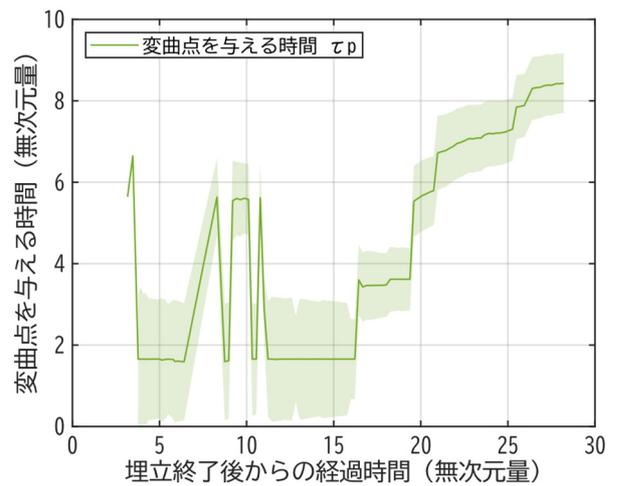


(c) データの蓄積によって正確な予測が実現

図1-14 半データ同化による将来予測



(a) 第一減衰定数と第二減衰定数



(b) バイリニアモデルの変曲点となる無次元時間

図 1-15 データの蓄積量と予測モデルのパラメータの関係

本研究により将来予測結果を更新するための仕組みが構築できた。将来予測には様々な手法があり、時系列解析もそのひとつである。しかし実測データの傾向のみに着目した予測手法である。それに対し本法の特長は、時系列データの裏にある物理法則を捉えて予測に活かすことで、より正確で説得力のある将来予測結果を提供できる点である。また実測データの蓄積とともにモデル更新が進むなかで、将来予測モデルが収束していくことが確認できた後からは、維持管理コスト削減のために水質分析の頻度を減らすなどの戦略を組み立てることができる。廃止に至るまでの維持管理の負担を軽減させるため等の社会還元性のある効果が期待される。

(4) 類型化による他処分場の予測

実測データを持つ最終処分場から求めたモデルパラメータを類型化した。これは、実測データのない最終処分場におけるモデルパラメータを推定する手段となる。モデルパラメータの推定には王道的な重回帰分析の他にも、近年盛んな機械学習を用いることも可能である。一連の機械学習モデルに対して学習データを与え、その中から検証用データを最も精度で推定可能な機械学習モデルを決定するための最適化プロセスを開発できた。サブテーマ2で開発を進めているWebアプリケーションに実装することで、データの蓄積とともにモデルパラメータを自動更新するシステムが構築できる。AIによるシステム管理により、長期運用と最終処分場研究の持続的発展が期待される。

処分場A～Wまでの浸出水中の塩化物イオン濃度の時間変化を図1-16に示す。縦軸は塩化物イオン濃度をピーク値で正規化した無次元濃度であり、横軸は経過時間を降雨が廃棄物埋立層を通過するのに要する時間（トラベルタイム）を無次元時間で正規化し、ピーク濃度を示す無次元時間をゼロとして整理したものである。なお、ピーク濃度を示すタイミングは塩化物イオン濃度の場合概ね埋立終了時期と一致していた。一致しないのは、埋立期間中において埋立物の種類に大きな変化が認められる処分場であり（例えば、始めは焼却灰を受け入れていたものの途中から受け入れていない等）、その場合は埋立期間中

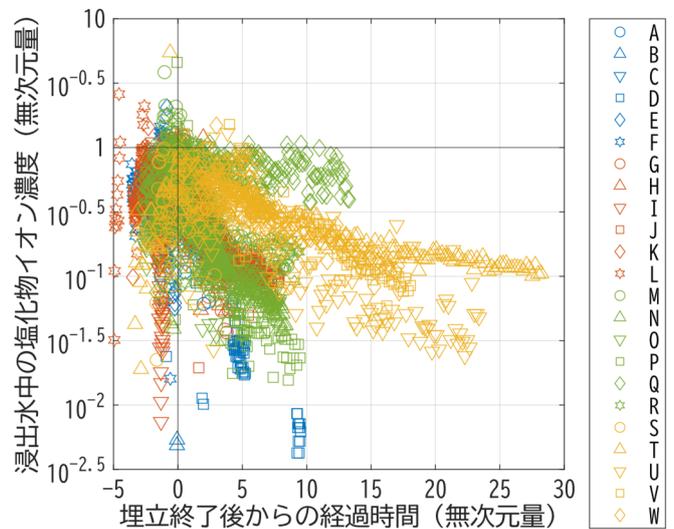


図 1-16 浸出水中の塩化物イオン濃度の時間変化

から塩化物イオン濃度はすでに減少傾向を示していた。

埋立終了後、浸出水濃度が所定値未満になるまでの維持管理期間（または廃止期間）は、塩化物イオン濃度の洗い流しが進むにつれて濃度の時間変化率は緩やかになる。ピーク濃度を迎え、その後の塩化物イオン濃度の時間変化率は様々であるが、その形状は概ね片対数軸上でバイリニアな直線であり、その勾配は反応工学でいう一次反応速度定数（時定数）と等価であり、この時定数をもって時間変化率を整理した。片対数軸上に表した無次元濃度と無次元時間の関係をバイリニアで近似したときの傾きを表1-2の通り算出した。ただし片対数軸上での傾きは直接的には時定数になるが、時定数では実際の物理的意味に直感付けるのは難しいので、次式によって半減期に変換してモデルパラメータを整理した。

$$\tau_{1/2, 1st} = \frac{\ln(2)}{k_1}, \quad \tau_{1/2, 2nd} = \frac{\ln(2)}{k_2} \quad (7)$$

ここで、 $k_1$ ：片対数軸上にある濃度の時間変化をバイリニアで表現したときの1番目の直線勾配、 $k_2$ ：バイリニアで表現したときの2番目の直線勾配、 $\tau_{1/2, 1st}$ ：第一半減期、 $\tau_{1/2, 2nd}$ ：第二半減期を表わす。なお時定数（ここでいう直線勾配）と半減期は、本来、時間に係る単位をもつパラメータであるが、評価対象とする図1-16は無次元濃度と無次元時間の関係であるため、ここで述べる半減期とは無次元化されたパラメータである。したがって表1-2に示す半減期を実時間スケールに戻すには、式(3)に従って、処分場深さ  $L$  と降雨浸透速度  $u$ 、体積含水率  $\theta$  を用いて、実時間  $t$  に変換する必要がある。

得られた第一半減期と第二半減期の値をみると、第二半減期の方が第一半減期よりも約5倍長くなっていた（最小で2.8倍、最大で8.2倍）。これは埋立終了直後のような間隙中に塩化物イオンが溶存している場合には洗い流しによってその濃度変化率は第一半減期の値が示すように短い時間で低濃度化が進むものの、間隙中の塩化物イオンがほぼ洗い流されて低濃度になってからの濃度変化率は第二半減期が示すように約5倍の時間をかけて徐々に低濃度が進むことを意味している。

第一半減期と第二半減期に与える処分場の諸量について相関分析を行い、その回帰式を求めた。目的変数には半減期を定義し、説明変数には埋立開始年月日、埋立年数（埋立終了年月日から埋立開始年月日を減じた年数として算出）、処分場面積、処分場容量、処分場深さとした。これらの目的変数と説明変数は各々の平均値と標準偏差を用いて標準化（Z-score normalization）を行った。埋立開始年月日を説明変数に加えた理由は、塩化物

表1-2 予測誤差を最小化するためのモデルパラメータ

処分場	無次元第一半減期	無次元第二半減期
A	1.37	評価には継続計測が必要
B	1.93	評価には継続計測が必要
C	評価には継続計測が必要	評価には継続計測が必要
D	2.99	評価には継続計測が必要
}	}	}
J	2.82	14.94
K	0.79	評価には継続計測が必要
L	評価には継続計測が必要	評価には継続計測が必要
M	3.76	10.37
N	1.53	7.37
O	2.01	7.66
P	1.07	7.6
Q	38.5	評価には継続計測が必要
R	評価には継続計測が必要	評価には継続計測が必要
S	35.1	評価には継続計測が必要
T	9.63	30.88
U	2.09	17.04
V	10.44	評価には継続計測が必要
W	5.72	23.51

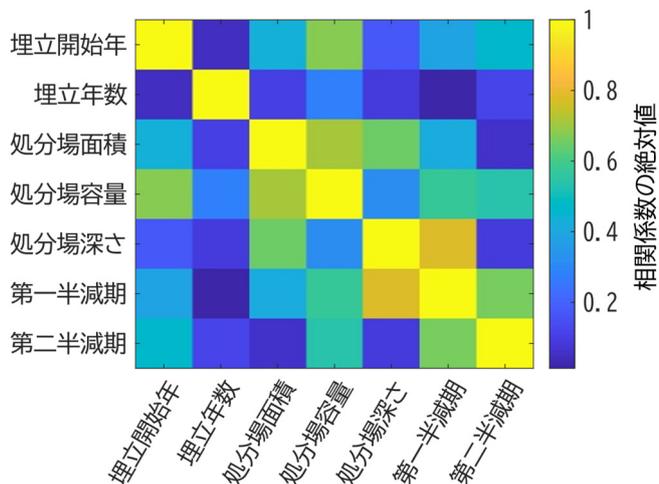


図1-17 各変数間での相関係数

イオン濃度の動態に与える影響因子として埋立廃棄物の種類や廃棄物最終処分場最深部に敷設された集排水の仕様にも依存すると考えられるが、それらの情報を集めるのは容易ではなかったため、埋立開始年月日とその間接的な指標になり得ると考えたためである。図1-17は第一半減期と処分場諸因子の相関係数を示す。図中のコントラストは相関係数の絶対値である。第一半減期に与える因子は、影響力の強いものから順に、処分場深さ、処分場容量、次いで処分場面積と埋立開始年であった。また第二半減期に対して影響力の強い因子は、第一半減期、処分場深さ、次いで処分場容量と埋立開始年であった。予測に必要となる第一半減期と第二半減期を、影響力の大きい因子に紐づけ、線形回帰モデルを作成したところ次式となった。

$$\tau_{1/2, 1st} = \begin{bmatrix} 0.662 \\ -1.08 \\ 1.463 \\ -0.22 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{処分場深さ} \\ \text{処分場容量} \\ \text{処分場面積} \\ \text{埋立開始年度} \end{bmatrix}, \quad \tau_{1/2, 2nd} = \begin{bmatrix} 0.721 \\ -0.26 \\ 0.078 \\ 0.236 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{第一半減期} \\ \text{処分場深さ} \\ \text{処分場容量} \\ \text{埋立開始年度} \end{bmatrix} \quad (8)$$

このような類型化を行うことで、実測データの無い最終処分場に対してもその諸量を式(8)に代入することで第一半減期と第二半減期を見積もることができ、バイリニアモデルによる将来予測を行うことができる。ここでは説明のために線形回帰モデルを仮定したが、実際にはモデルパラメータの推定に機械学習の応用が可能である。

統計的な予測の信頼性はデータ量に依存する。本研究では全97施設からのデータ提供を受けたが、そのうち塩化物イオン濃度をモニタリングしている施設は23施設に限られ、さらに第二半減期を算出できるまでの十分な長さの時系列データは9施設となった。このような限られたデータでは類型化の確度はもちろんのこと、回帰モデル作成においても、データをモデル作成用（学習用）と検証用に分けられずその妥当性評価まで進めることができない。そのため実測データの収集と蓄積は、引き続き継続していかなければならない。

### 5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

一部を除いて、研究目標は概ね達成した。実施できなかった一部とは、最終処分場から得た不攪乱試料を用いたカラム溶出試験である。不攪乱試料端面とカラム試験容器端面に隙間が生じることからカラム試験を実現することができなかったが、代替としてライシメータ試験を新規に行う基礎実験を行うことで対応した。当該推進費だからこそ挑戦的な研究ができ、学術的にも実務的にも有意な研究成果を得ることができたと自己評価する。今後の課題も明確し更なる発展が期待される。

なお本来は法令によって定められた汚濁成分を対象に維持管理期間や廃止に至るまでの時間を解析することが望ましい。しかし、研究の最優先事項は、各種化学物質の動態に共通する水みちの影響を解明することである。この理由は、法令で定められた汚濁成分の物質動態評価を進める際、水みちだけでなく各物質の反応性も考慮する必要があるからである。ここでいう反応性とは、最終処分場内の酸素濃度を指し、これに関わる指標のモニタリングは実務者にとって困難であり、本研究で得た97施設の実測データをもみても酸素濃度を測定しているのは僅か数施設に限られる。この課題に対する将来的な展望として、汚濁成分に着目した際の維持管理期間や廃止に至るまでの時間を解析するためには、本研究によって得られた塩化物イオンの予測結果に対して（図1-19）、次な

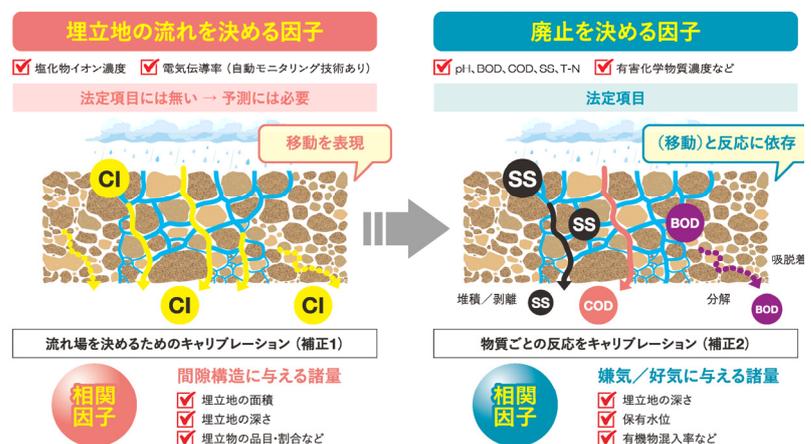


図1-19 流れを予測するための当該研究と今後の展開

る研究課題では包括的な減衰定数を乗じることで汚濁成分濃度に係る実測データにフィッティングさせる等の戦略を見据えている。

## Ⅱ-2 サブテーマ2 「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」

### [サブテーマ2 要旨]

サブテーマ2では、一般廃棄物と産業廃棄物の最終処分場における維持管理の課題に対処するため、無償提供されるWebアプリケーションの開発を行った。このアプリケーションは実務者のもつ実測データの一元管理、可視化、分析を支援し、実務者が維持管理において実測データを有効活用することを促すものであり、実測データの提供によって研究者と実務者間の連携強化にも寄与した。またシンポジウムを通じて自治体間の交流と協力が促進され、Webアプリケーションの更なる改良に向けたユーザビリティ評価とフィードバックの分析が行われた。ここで得られた知見は、開発したWebアプリケーションが最終処分場の将来予測と長期維持管理を適正化するためのツールであり、その信頼性向上と更なる発展のための研究協力の加速化と実用化に資するものであった。

### 1. サブテーマ2 研究開発目的

サブテーマ2では、実務者の持つ実測データが有効利用できていない現状を踏まえ、現場情報の重要性を実務者自身に認識するために個別打合せやシンポジウムを開催した。実務者自身が抱える課題と解決について情報共有の場を設けることで、研究者と実務者間の連携強化のみならず、実務者同士の連携強化を促進した。提供された実測データは、サブテーマ1の研究目的に利用するとともに、研究者の手によって、データの一元管理、可視化、統計分析、および将来予測のための情報基盤の構築にも活用した。これにより管理対象の最終処分場について、過去、現在、未来の俯瞰的な理解を支援し、実務者自身は実測データが最終処分場の適正管理に不可欠であることの認識を新たにし、実測データの更なる提供と周辺実務者からの提供の加速化を図った。また、開発中の情報基盤に関しては、実務者が自身のPCで体験する機会を設け、フィードバックによって実務に役立つように改良を重ねた。本研究期間で実測データの提供依頼は主に茨城県、埼玉県、福島県、千葉県、福岡県内の一部の一般廃棄物最終処分場、および全国数か所の産業廃棄物最終処分場に行った。最終処分場の情報はデリケートであるため、研究代表者または分担者からの直接依頼は避け、相手最終処分場の事情を深く知る県庁や大学関係者、または全国産業資源循環連合会に相談した上で、彼らからの仲介もと最終処分場実務者にアプローチした。

### 2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「モニタリングデータの掘り起こしのための戦略的かつ効率的な情報基盤の構築」
サブテーマ2 実施機関	国立環境研究所
サブテーマ2 目標	<p>(令和3年度)『<u>全国環境研協議会との連携により実測データの収集を開始</u>』</p> <p>①準備済みの情報基盤をデモ版として試験公開し、実測データの収集を開始する</p> <p>②地方環境研究所との連携し、最終処分場の実態把握とデモ版の解説を行う</p> <p>③最終処分場調査に同行し、廃止の決定要因となる浸出水とガス放出量を調べる</p> <p>④廃止に向けた手続き・技術的課題のアンケートを行い実務者の要望を把握する</p> <p>(令和4年度)『<u>実測データ収集の効率化のための実務者視点での情報基盤の改良</u>』</p> <p>①物理シミュレーションの予測誤差を評価するための、実測データの収集</p>

	<p>を行う</p> <p>②収集した実測データをデータベース化し、情報基盤のアップデートを行う</p> <p>③全国産業廃棄物連合会と協力して技術セミナー・意見交換会を開催し研究協力者を募り、同時に本研究の進捗を廃棄物資源循環学会で報告し情報公開に努める</p> <p><u>(令和5年度)『廃止期間推定機能等を実装した情報基盤の公開と第三者評価』</u></p> <p>①予測対象とする最終処分場の廃止期間を、サブテーマ1で開発した物理シミュレーション(計算値)と統計学的モデリング(予測対象となる最終処分場に適した予測誤差を補正值とする)の和から求め、これらの機能を情報基盤に実装する</p> <p>②情報基盤の試用による廃止期間の推定や維持管理方策の改善への活用についてアンケートによる追跡調査を行い、実用化に向けた今後の研究課題を抽出する</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 3. サブテーマ2 研究開発内容

実務者に対して実測データの提供を依頼しても、そのデータは機密性が高くデリケートな情報であるため、断れることがほとんどである。この問題に対処するため、研究者は実務者にもメリットがある形で研究協力を依頼した。具体的には、実務者の悩みをヒアリングし、その解決に必要な実測データを提供してもらうことで、データの分析を行い、問題解決につながるブレークスルーを示した。また、実務者とのコンタクトは、研究者自らが直接申し入れるのではなく、県担当者や大学関係者など、相手方の事情に詳しい第三者の協力を得て、彼らを介して打合せを行った。このような連携を継続することで、研究者と実務者との連携が強化され、その結果としてより詳細なデータの提供や更新が得られるので、一連の流れをシステム化し廃棄物研究の発展に資する情報基盤の開発を行った。

初年度(令和3年度)には、最終処分場実務者と連携して実測データの収集を進めた。このため、準備済みの情報基盤をデモ版として試験公開し、実測データの有効活用の重要性を訴えた。大学関係者、県担当者、地方環境研究所と協力し、個別ヒアリングを通じて最終処分場の実態を把握し、デモ版の情報基盤について解説を行った。さらに、最終処分場を現地で訪れ、廃止の決定要因となる浸出水とガスの放出、およびそれらの時間変化特性に影響を与える現場諸条件を調査した。特に広域的な研究協力が得られた埼玉県内では、最終処分場実務者向けシンポジウムを計画し、廃止に向けた手続きや技術的課題に関するアンケートを実施した。その結果を基に、現場調査や分析、解析技術を紹介し、実務者が抱える課題の解決に向けて実測データの有効活用の在り方を検討した。

2年目(令和4年度)は、実測データの収集効率を向上させるため、実務者からのフィードバックを基に情報基盤を改良し、実務で利用可能なシステムを構築した。実測データの収集は、サブテーマ1の将来予測モデル構築に係る研究において物理シミュレーションの予測誤差を調べるためでもあるため、これらの実測データと類型化の成果はデータベース化した後、実測データを持たない最終処分場の予測が可能な情報基盤へと発展させた。また、実測データの収集範囲を拡大し、一般廃棄物最終処分場に加えて産業廃棄物にも対応する方向で進めた。このために全国産業廃棄物連合会と協力し、技術セミナーや意見交換会を開催し、研究協力者の募集を行った。さらに、廃棄物資源循環学会や全国都市清掃研究・事例発表会において研究の進捗を報告し、研究成果の公開にも努めた。

最終年度(令和5年度)は、最終処分場の廃止期間を推定する機能を持つ情報基盤が公開した。この情報基盤では、本研究課題のタイトルにもある『物理シミュレーションと統計学的モデリングを融合した半データ同化予測手法』を導入した。特に、予測モデルとモデルパラメータはAIにより自動的に更新され、実測データの蓄積に基づいてより信頼性の高い将来予測を可能とする。実務者にとって、過去から現在に至るデータを基に未来を予測し、最終処分場の俯瞰的な理解と維持管理方策の決定を支援する

システムとなるようにアウトプットした。また、実測データが存在しない最終処分場についても、類型化の結果に基づいて特徴が近似する他の最終処分場のデータを引用することで、将来予測することを可能とした。また当該情報基盤の普及と予測の信頼性向上には実測データの更なる収集が不可欠である。そのため、連携強化とデータ収集の加速化を実現させるための情報基盤の活用方法についての意見交換を行い、今後の研究課題を抽出した。

#### 4. サブテーマ2 結果及び考察

##### (1) 実測データを収集するための戦略

実務者に対する具体的支援の一環として、無償提供するWebアプリケーションの段階的開発と、それを支援するパンフレットの作成が行った。Webアプリケーションは、実測データの一元管理、可視化、分析を可能にし、日々の業務におけるデータ活用を促進させた。またパンフレットは研究の理解を深め、関心を喚起するための重要なツールとして機能し、研究協力の仲介と実務者との連携を促進するのに寄与した。これにより目標を大幅に上回る97箇所最終処分場からのデータ収集が達成された。

実務者と連携する際には、彼らにもメリットがある研究開発が不可欠であった。特に最終処分場実務者は、実測データが独り歩きすることで誤解や風評被害への発展を懸念しているため、研究協力の依頼に対し慎重な対応が求められた。この課題への対応として、研究者は実務者に対し、実務者の視点に合わせて彼らの抱える課題解決に資する具体的支援を提供することに重点を置いた。具体的には、管理対象の最終処分場に関する実測データを基に俯瞰的な理解を進めるための、Webアプリケーションの段階的な開発を進め無償で提供された。

実測データをオンライン上で一元管理し、可視化および分析するWebアプリケーションである。このアプリケーションでは、実務者が実測データを単に基準判断のために用いるだけでなく、維持管理を能動的に進めるための実測データの有効活用を目的としている。煩雑なデータ集計を自動化するため、最終処分に係る研究者の手によってスクリプト化しており、日々の業務に追われる如何なる実務者にとっても容易に利用できるものとした。

アプリケーション開発はWeb上（以降、対話型プラットフォームと呼ぶ）で行われた（図2-1）。実務者からのフィードバックを受けやすく、その反映箇所が分かりやすい特性を持ち、バージョンアップも容易であるため、これらの特徴が研究協力に対するモチベーション向上に有効であると考えたためである。このプラットフォームは、データの分析機能や計算負荷だけでなく、視認性や操作性などのユーザビリティにも配慮する必要があるため、バックエンド（プログラマ）とフロントエンド（デザイナー）の監修のもとで行われた。実務者は、時限付きのユーザーIDとパスワードを使用してプラットフォームにアクセスし、常に最新のサービスを利用できるようにした。

開発したアプリケーションを武器に、研究協力を募るためにパンフレットを作成した（図2-2）。このパンフレットは、研究者と実務者の連携を図る上での重要なツールとして機能し、開発されたアプリの利点や操作方法をわかりやすく説明するために用いられた。パンフレットには対話型プラットフォームの概要やそこに実装しているWebアプリケーションの特徴が図解と共に示されており、実務者が短時間で情報を理解し、関心を持つように、デザイナー監修のもと作成した。

このパンフレットの配布は、個別打合せやシンポジウム、学会発表などの場で行われ、実務者が直接手に取り、内容を閲覧できるようにされた。個別打合せを申し込む際には、大学関係者や県職員を介して仲介を依頼する際にもパンフレットが有効



図2-1 対話型プラットフォーム



図2-2 研究協力の依頼に用いたパンフレット

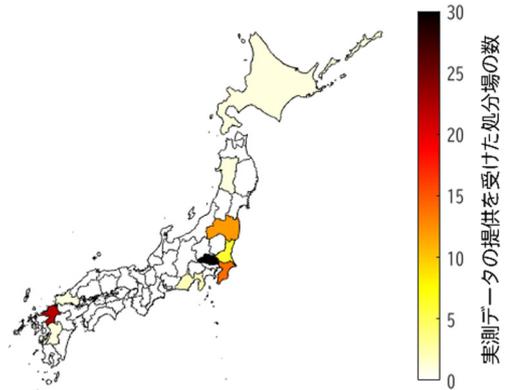


図2-3 実測データの提供を受けた処分場

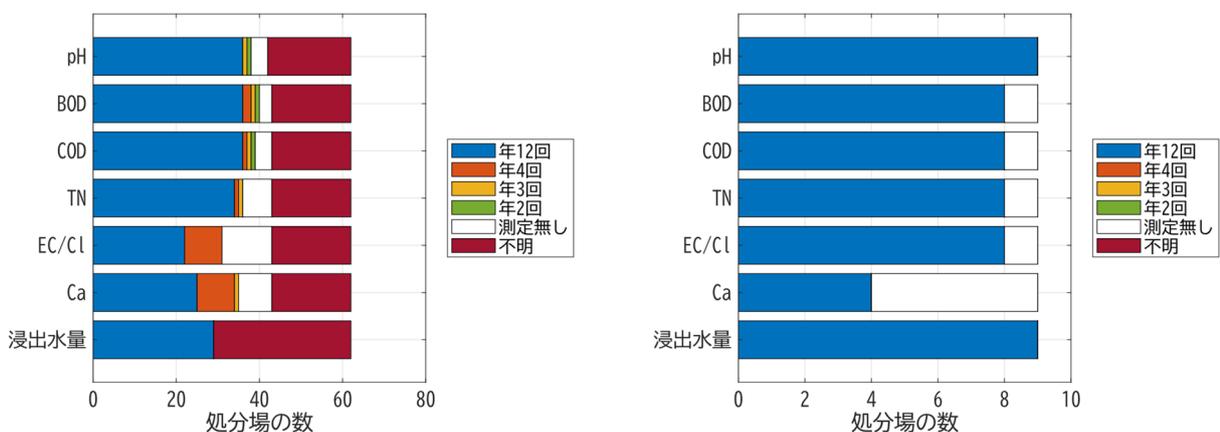
に活用された。これにより、最終処分場実務者が抱える課題解決に資する研究であることが強調され、仲介が促進された。本研究期間中に集められた実測データは全国97箇所の最終処分場に及び(図2-3)、これは当初の目標であった50箇所を大幅に上回る成果であった。

(2) 収集した実測データの内容

一般廃棄物最終処分場においては、埼玉県、千葉県、茨城県、福島県、福岡市から実測データの提供を受けた。実務においてこれらの実測データは基準の適合判断のみに使用されている状況であった。これは、担当者が事務職であったり、業務が多忙であるために、データの整理や考察に至らないこと、また事象の進行が遅い最終処分よりも、焼却や収集運搬の方を優先した日常業務であることに起因していた。一方、産業廃棄物最終処分場では全国9箇所からの研究協力を得た。数十年にわたる詳細なデータの収集と管理が行われていた。しかし、これらの膨大なデータを効果的に活用し、維持管理に反映させるために、専門的知見と説得力のあるデータ分析方法が必要であった。

収集したデータは、最終処分場の維持管理に関連する時系列情報である。これには、主に搬入廃棄物の種類と量、埋立位置、浸出水の原水濃度、浸出水の水量、および浸出水処理施設での点検日報が含まれる。本研究は実務者との連携を図ることを優先すべき目的としているため、実務担当者のデータ提供に関わる負担を考慮し、必要最小限のデータから依頼してきた。データ量を徐々に増加させる過程で、担当者の関心や要望に応じて、データの収集範囲を図面、ガス、温度データまで拡大することが一部の処分場で実現された。ただし本研究では、浸出水濃度の時系列変化に焦点を当てた予測を扱うため、搬入廃棄物、埋立位置(処分場の図面)、ガス、温度に関する考察は省略する。

図2-4は、浸出水データを水質項目ごとの測定頻度で整理したものである。これは実務者から提供



(a) 一般廃棄物最終処分場

(b) 産業廃棄物管理型最終処分場

図2-4 浸出水データの測定頻度

を受けたデータに基づいており、一般廃棄物最終処分場と産業廃棄物管理型最終処分場の両方で原水濃度は毎月測定されている状況が明らかとなった。また「不明」と記されたデータポイントについては、担当者自身がまだ情報の所在を把握していない状況を表している。このような状況は、今後の連携を通じて改善されることが期待されており、データの有効活用に向けた理解が深まることで、より詳細なデータが得られる可能性を示唆している。また浸出水量に関する情報は担当者が把握していないことが多く見受けられた。これは、浸出水量が法令による基準項目に含まれていないので担当者が意識して注目のべき項目ではない、という認識を持っていることが伺える。浸出水処理施設の日々の管理は委託業者が行っていることが多く、その記録は日報として残されているものの、自治体所管部局まで細かな情報共有が行われていない状況が推察される。

(3) 実測データを有効活用するための情報基盤

最終処分場における情報技術の発展には現場情報の重要性を実務者らに認識させることが肝要であり、その行動変容を促すために、情報の有効活用をWebアプリケーションという手段を通じて訴えることができた。研究者が得意とする可視化、分析、予測の一連操作を実務者自身がアプリを通じて手軽に利用できる環境を提供した。実務者がこのシステムを日常管理のなかで利用することで、維持管理の適正化や将来の姿を見据えながら能動的に業務に携わることができ、同時にそこに入力されたデータは最終処分場の研究発展に不可欠な情報として蓄積され、我が国の財産として残すことができる。またユーザー（例えば、実務者）が別のユーザー（例えば、行政官や研究者）に対する閲覧権限を設定できるので、維持管理の実態を時系列で詳細に情報提供できるので、形質変更、廃止、跡地利用等の行政的判断を支援し、実態を鑑みた研究を促し技術開発を推進できる。

廃棄物最終処分場は操業年数が数十年に及び、現在は廃止が進む時期にある。また最終処分場の大型化や長寿命化が進む中で、同時に少子高齢化と財源逼迫などの社会構造の変化に直面することが予想される。また、ゲリラ豪雨や地震などの不測の災害に見舞われる可能性も否めない。以上より将来を見据えた最終処分場の維持管理と廃止は重要な社会的課題であるので、着実に進めるために既存情報の有効活用が重要である。本研究では、近年の情報技術の特長を活かし、データの有効活用を促進するWebアプリケーションをMATLAB R2023b Web App Serverを用いて開発した。このアプリケーションには、維持管理データの一元管理と可視化、研究者スキルを用いたデータ分析、将来予測の機能を実装した。

図2-5は、Webアプリケーションにアクセスした際の画面である。処分場実務者に対してシステム管理者から個別にユーザーIDとパスワードが発行され、これらを画面右上のテキストボックスに入力することで、実務者が管理する処分場の一覧が概要と共に表形式で表示される。一覧から、詳細なデータを閲覧したい処分場を選択し、チェックボタンを有効にすると、図2-6のように新たなタブが表示され、選択した処分場の保有データを確認することが可能である。この例では、3つの処分場について保有している時系列データ

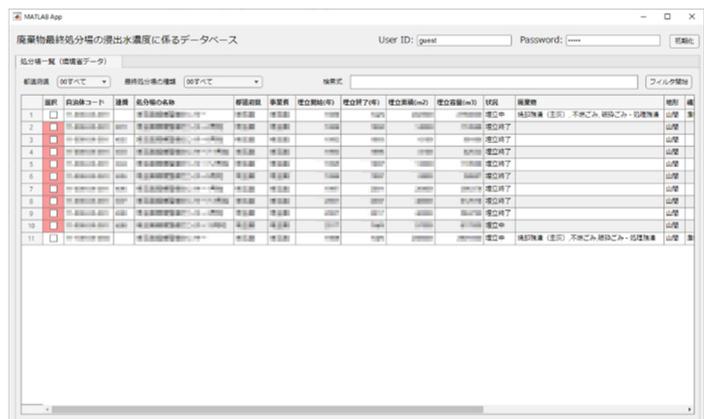


図2-5 実務者の管理対象の最終処分場を一覧表示

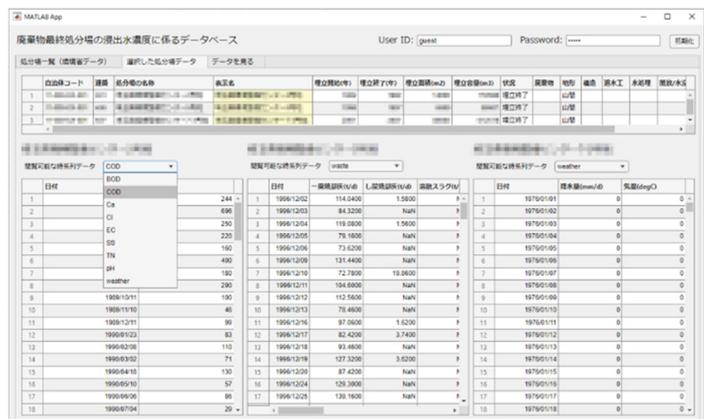


図2-6 選択した処分場で保有するデータを確認

をプルダウンメニューから確認している。1番目の処分場では、時系列データの中から浸出水原水のCODを選択し、測定日時と計測値をテーブル形式で閲覧している。2番目の処分場では日付ごとに搬入される廃棄物の種類と量が出力されており、このデータは最終処分場の計量所で記録された情報に基づいている。3番目の処分場では、当該地の気象情報（降水量、気温、湿度、大気圧）が日付ごとに出力されており、これらのデータは最寄りの気象観測所の記録を参照するようにしている。このようにして提供されるデータはデジタル情報として一元管理され、実務者自身以外は閲覧できないようにシステム化されている。このシステムは、強固なセキュリティに守られたWebアプリケーションとして構築し、実務者にデータの有効活用が訴えるものである。なお処分場の実務者は、自身のデータに対する他ユーザーの閲覧権限を自由に設定できる。デフォルト設定では他ユーザーはデータを閲覧できないが、図2-7に示されているように、閲覧権限を他ユーザーに付与することも可能である。この権限付与により、研究者や県担当者がデータを閲覧できるようになるため、実態に応じた適切な学術的助言や研究開発が促進される。さらに、形質変更、廃止、跡地利用の行政的判断を支援できる。

続いて表示される三枚目のタブをクリックすると、図2-8のようなデータ可視化画面が現れる。実務者の関心事のひとつに、建設当時から現在に至るまでの処分場が受け入れた廃棄物の種類や、浸出水の変化を把握し、他の処分場と比較して各施設の特徴を定量的に理解することが挙げられる。Webアプリケーションの特長として、繰り返し行われる作業をスクリプト化することで、誰もがワンクリックで作業を行えるようにできる点がある。このシステムでは、膨大な時系列データの時間変化を調べるためのグラフ化を行い、そのグラフの横軸を年度で表現するか、埋立開始後からの経過年数で表現するかを選択可能にし、また縦軸はデータをそのままプロットするか、積算してプロットするか、対数軸上にプロットするかをワンクリックで切り替えられるようにした。ビッグデータの扱いは、コンピュータ操作に手練れであっても、比較対象となる項目数や処分場数が多く、追加データが生じるにつれて相当な作業時間を要する。データが考察されずに放置され、やがて散逸してしまうことはしばしば発生するが、このような問題をWebアプリケーションによって回避することで、実務者はデータへの執着と有効活用に専念できるので能動的な維持管理が期待される。

ユーザー名	ハッシュ値	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	...	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B	...	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C	...	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
D	...	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
E	...	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F	...	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
G	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
H	...	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
I	...	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
J	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
K	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
L	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
M	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
N	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
ゲスト	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
管理者	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

図2-7 プラットフォーム上に蓄積したデータの閲覧権限の設定

(0... 閲覧不可、1... 閲覧可能を表す。前提としてマトリックスの対角成分には「1」が与えられており、ユーザーは自身の処分場データのみを閲覧できることを意味する。上図の場合では、すべてのユーザーは、自身の処分場のみならず、G列においても「1」と設定されており、これはGの処分場データも閲覧できることを意味する。また、ゲストはG処分場データのみを閲覧でき、管理者は全ての処分場データを閲覧できる権限となっている。)

データの可視化後に現れる四枚目のタブをクリックすると、図2-9のように浸出水濃度の時間変化をわかりやすく表現することや、浸出水濃度の時系列変化からその後の将来を予測計算できる。これらの作業は専門知識と経験を要するが、研究者の手によってスクリプト化してWebアプリケーションに実装することで実務者も手軽に利用できるようになる。具体的には、浸出水濃度と浸出水量を掛け算した値を時間方向に積算することで、当該処分場から放出した汚濁物質質量（負荷量と呼ばれる指標）を求めている。濃度と水量の単純な掛け算であるものの、濃度と水量の計測日時が同期していない場合には同期するために複雑な内挿処理が必要となる。これは一般的な表計算ソフトウェア上で単純対処できるものではなく、条件分岐や例外処理等の複雑なプロセスをプログラミングによって確実に処理し計算結果を得るのが通例である。また、時系列解析による将来予測においても同様である。時系列解析を用いた将来予測は複雑な計算を要するが、研究者の手によってスクリプトを作成し、これをWebアプリケーションとして提供することにより、実務者はワンクリックで予測を行うことが可能となる。ただし、用いる計算手段や過去のデータ量によって予測結果が変わるため、実務者が条件を試行錯誤的に選択し、適切な予測結果を得るための経験を積むことも重要となる。Webアプリケーションは、高度な分析結果を提供するだけでなく、分析結果に影響を与える因子を理解するための環境をも提供することができる。

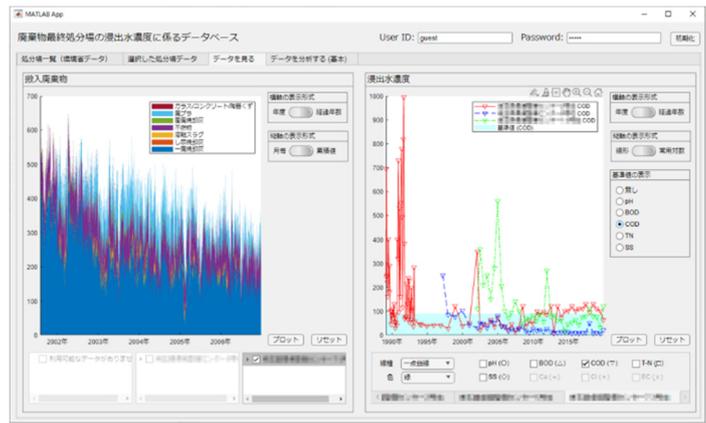


図2-8 保有するデータの可視化と比較

このようなWebアプリケーションの特長を活かすことで、研究者と実務者はそれぞれの得意分野を生かし、連携を強化しながら技術開発を進めるための理想的な手段となるであろう。この考え方が広く普及すれば、実測データのビッグデータ化が進み、将来予測の信頼性向上に寄与する。また、研究者と実務者の連携に基づいた双方向の技術開発により、社会実装の早期化が期待される。

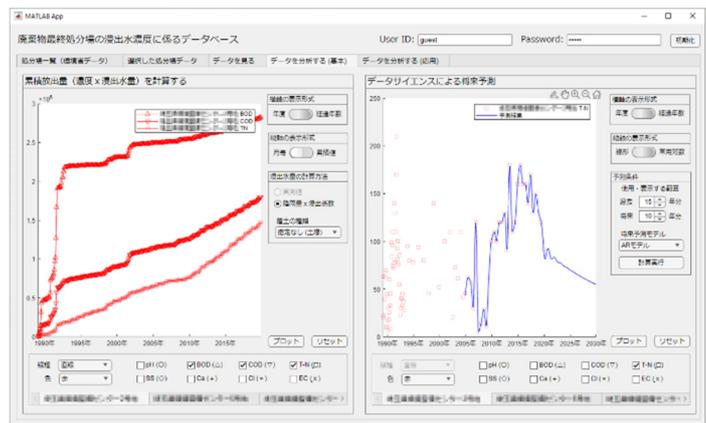


図2-9 研究者のスキルを活用したデータ分析

このようなWebアプリケーションの特長を活かすことで、研究者と実務者はそれぞれの得意分野を生かし、連携を強化しながら技術開発を進めるための理想的な手段となるであろう。この考え方が広く普及すれば、実測データのビッグデータ化が進み、将来予測の信頼性向上に寄与する。また、研究者と実務者の連携に基づいた双方向の技術開発により、社会実装の早期化が期待される。

このようなWebアプリケーションの特長を活かすことで、研究者と実務者はそれぞれの得意分野を生かし、連携を強化しながら技術開発を進めるための理想的な手段となるであろう。この考え方が広く普及すれば、実測データのビッグデータ化が進み、将来予測の信頼性向上に寄与する。また、研究者と実務者の連携に基づいた双方向の技術開発により、社会実装の早期化が期待される。

(4) 研究者と実務者の連携強化に係るシンポジウム

シンポジウムを開催し、Webアプリケーションによるデータの有効活用を模索した。この取り組みは研究者との連携強化のみならず、自治体間の交流と協力の促進にも効果が認められた。一般廃棄物最終処分場では、カルシウムスケール、施設の老朽化、人手不足の共通課題が明らかになった。一方産業廃棄物最終処分場に関しては、災害廃棄物処理、維持管理の資金不足、人手不足、技術伝承といった実務上の課題を特定した。一処分場よりも規模が大きくなりがちな産廃処分場にとって、Webアプリケーションは適切な管理と理解を深めるための助けであった。一産と産廃に共通する将来展望として、人手不足の解消、失敗経験や問題解決の共有、技術継承にも期待するとの意見が得られた。

表2-1はこれまで開催してきたシンポジウムの概要である。図2-10は意見交換会での冒頭に行っている話題提供の様子である。研究者や県職員、または注目するような事例をもつ実務者等から廃棄物最終処分場についての科学や動向、および実態を、やさしい内容かつ短い時間でプレゼンテーションすることから開始しており、後の意見交換会が活発になるような流れを意識した。図2-11では、テーブルごとに分かれて、事前収集したトピックについて各自自治体が悩んでいることを共有し、各自自治体

が行ってきた工夫や改善策を情報交換することで、自治体間での連携強化を促すことができた。

図2-12は開発中のWebアプリケーションを実際に体験するための研修会の様子である。参加者全員が実際に手で触ってアプリを動かし、どのような流れでデータベースまたはシミュレーションを使うのかを体験し、その実務への展開を議論するために実施した。全員がWebアプリケーションに同時にアクセスすると、アプリケーションを載せているサーバーに著しい負荷がかかり不測のトラブルによって研修自体が失敗に終わる恐れが考えられたため、こうした合同研修会ではWebアプリケーションは事前に手元のノートパソコンにインストールしておき、参加者がWebにアクセスすることなくオフラインで快適に操作できるようにした（ただし講師のノートパソコンでは、実際に対話型プラットフォームにログインし、そこからWebアプリケーションにアクセスしその上で操作を行った）。研修会でも当該のWebアプリケーションが最少の手数で目的を達成できることをアピールするために、講師による操作説明とデモンストレーションは短く終えるよう企画した。事前準備したクイックリファレンスの流れに従って操作説明を行い、残す時間は各実務者の好きな条件で試用するための時間に充てた。

こうした意見交換会や研修会の幹事は現在県担当者主体で進めている。しかし参画する実務者は多いので、一方向からのニーズに偏らず双方向から必要な知識と情報を蓄積するためにも、今後持ち回りで進めることも有効であると考えられた。意見交換会や研修会では、実務者からのフィードバックが得られるように、日常業務での悩みや研究者側に期待すること等のアンケートを実施してきた。近年では自然言語処理の発展も目覚ましいので、従来行っていた議事録の配布にとどまらず、得られた情報を自然言語処理を通じて客観的なサマリー（図2-13）として全員に共有することで、シンポジウムを継続するための動機付けと連携強化の加速化を狙ってきた。

表2-1 連携強化を目的としたシンポジウムの開催

	開催日	参加団体	内容
第0回	R3. 11. 30	24団体 (28名)	連携会議発足の提案 廃止予測ツールの紹介
第1回	R4. 03. 11	17団体 (23名)	有識者による基調講演 廃止予測ツールのデモ
第2回	R4. 07. 25	24団体 (32名)	参加団体からの話題提供 シミュレーションの体験
第3回	R5. 01. 31	17団体 (21名)	データベースツールの体験 雨水排除対策事例の紹介 グループワーク
第4回	R5. 07. 11	19団体 (26名)	有識者による基調講演 処分場モニタリングのデモ
第5回	R6. 02. 29	20団体 (30名)	参加団体からの話題提供 維持管理対策の事例紹介 データベースツールの体験



図2-10 有識者による最終処分場のやさしい解説



図2-11 自治体間での盛んな意見交換と情報共有



図2-12 開発したWebアプリケーションの体験

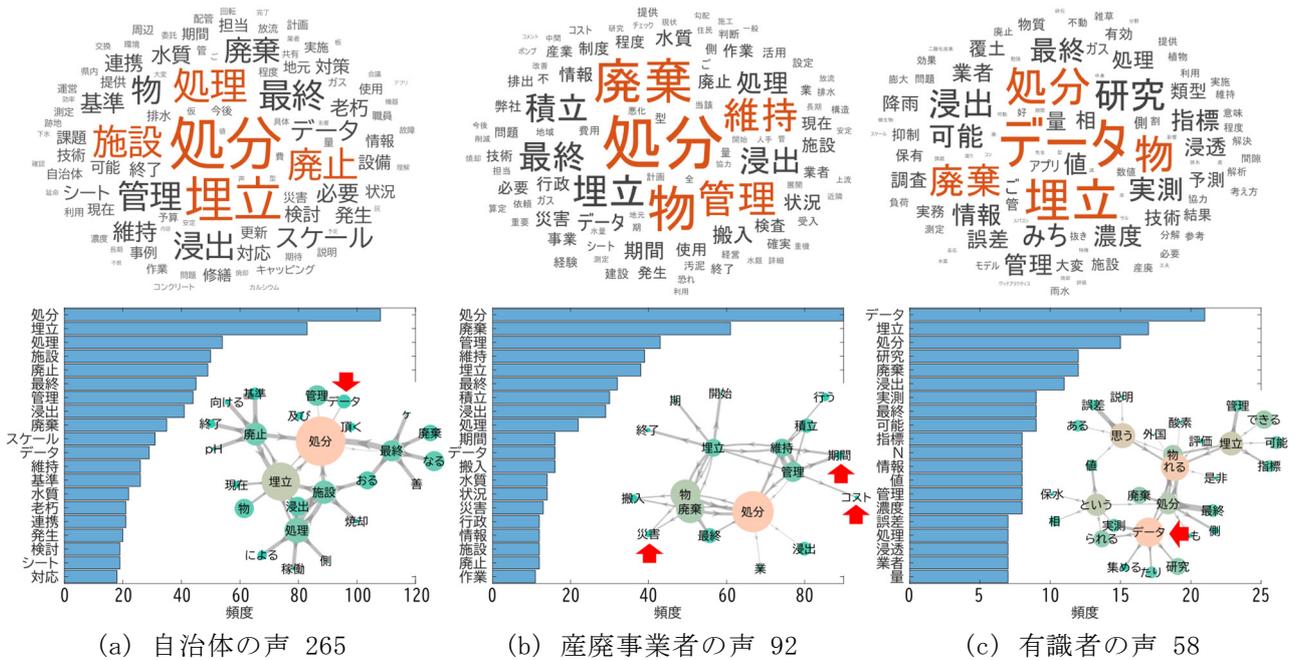


図 2-13 グループワークの結果を自然言語処理によってサマリー化した結果

(5) 実務者からのフィードバック

Webアプリケーションが廃棄物最終処分場の適正管理および廃止の検討に寄与するためには、改良が不可欠である。この改良手段の一つとして、ユーザビリティの評価を行う手法として場面想定法に基づき、実務者からのフィードバックを集めた。フィードバックはテキスト情報として返されるため、それを客観的かつ機械的に分析し、俯瞰的に理解する手段として自然言語処理が有効であることが示された。研究者と実務者との協力を促進するアプローチを、担当者の属性や悩みに応じて適切に調整することができるため、研究者と実務者の連携強化には欠かせない手段であると考えられた。

場面想定法に従いフィードバックを得た。

図 2-14 は被験者（実務者）に配布した事前説明資料の一例である。開発を加速させるような良い意見をもらうためには、実務者に対して当該のWebアプリケーションの利用状況と利用シナリオの説明が不可欠である。利用シナリオとは、例えば、(1)「廃棄物最終処分場の維持管理はいつまで続くのかな?」といったきっかけを設定し、(2)「過去のデータを見返して、他の類似事例を探してみよう」のような具体的なアクションを想定し、(3)ブレークスルーとなるWebアプリケーションを用いることで「このような将来をたどる可能性がある」と知り、(4) ユーザー側が得られる効果「私たちの廃棄物最終処分場も早めの対策を講じる必要があるようだ。関係者内で詳しい議論の展開を進めよう」を得るといった流れのことを指す。

利用シナリオにはいくつものパターンが想定されるため、実務者には前提条件を統一することで、研究者が欲する意見や要望等を得やすくする工夫を行った。すなわち当該Webアプリケーションの導入前の状況がどうなのか（過去）、開発したWebアプリケーションをどのように運用するのか（現在）、それによって期待される将来（未来）を、どの実務者からも共通の認識をもった上でフィードバックが得られるように、土台を整えた。

フィードバックの集約例を図 2-15 に示す。あるシンポジウムの終了後に配布されたアンケートの

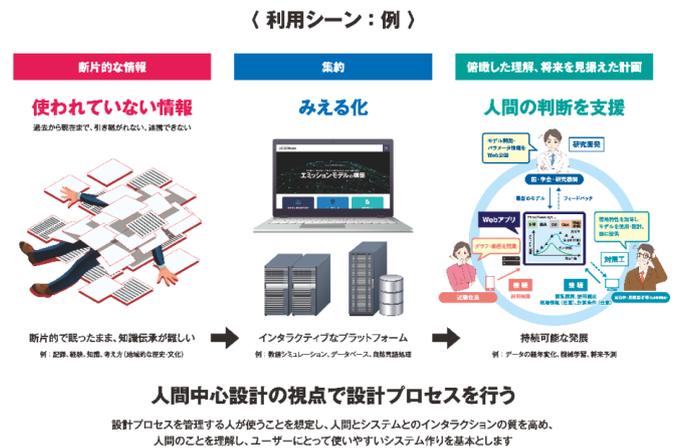


図 2-14 フィードバックを得るために用いた資料

自由記述欄に記載された約2800文字の内容をテキストマイニング技術であるWord2Vecを用いてサマリー化したものである。Word2Vecは自然言語処理の手法の一つであり、単語を空間内にマッピングし、その類似度を視覚的に表現する技術である。この技術により、文書に含まれる単語間の相関の強さが幾何学的距離で示すことができる。アンケート結果からは、「スケール」という単語が頻出しており、実務者Aが特にこの課題に悩んでいることが明らかである。また、管理、施設、廃止、事例といった単語が近傍に位置しており、これは実務者Aがスケールの問題だけでなく、廃止や維持管理についても課題と感じていることを示している。さらに、実務者Oも類似の課題に直面しており、実務者Eは施設の老朽化や維持管理といった長期的な課題に関心を持っている一方、実務者Pは基準や対応策の習得に関心があることが認められる。

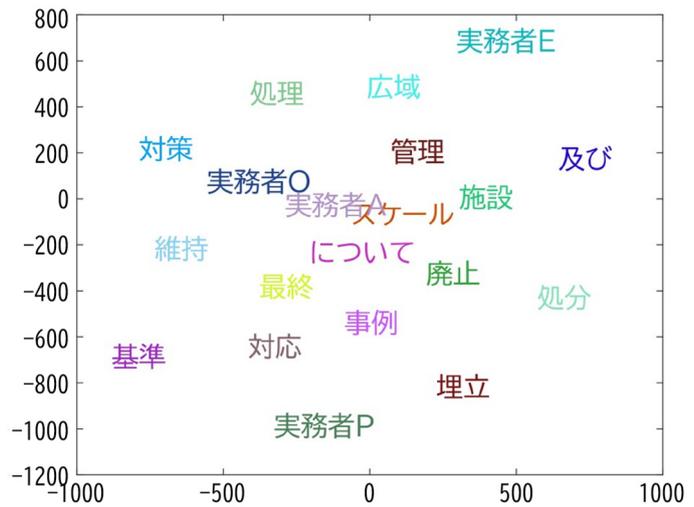
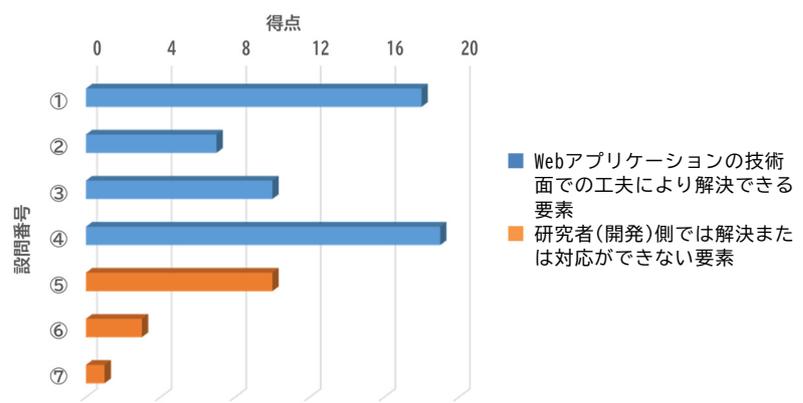


図2-15 アンケート結果を類似回答ごとに整理

このように、自然言語処理は大量のアンケート結果を機械的に要約できる。最終処分場の管理に応用する利点は、先の図2-15に示したように、実務者同士の類似度や高頻出単語から低頻出単語へのフロー図を可視化できる点にある。数十年にわたる維持管理の過程で担当者が異動することがあっても、これまでの変遷を一望できるイメージとして捉えることが可能であり、大量の既存文書を改めて読む手間を軽減できる。さらに、経年による意識の変化を実務者の属性（所属、役職、年齢、経歴、専門性など）に応じて分析することも可能になり、実務者向けの研究協力のアプローチをより適切なものに行うことができるので、連携強化を加速化させるための手法として期待される。Webアプリケーションの導入前後での意識変化を客観的に調べるための手段としても利用できる。

図2-16は、廃棄物最終処分場の実測データや関連情報の集約を進めるに際し、実務者に情報提供を促す方法を検討した事例である。この事例では、実務者が情報提供をためらう理由をヒアリングし、その要因を除去することで情報集約の加速を図ることを目的とした。その結果、「データ提供側が作業量を見積もるために、要求するデータの種類と量を明示してほしい」との意見が最も多かった。また、「提供したデータが独り歩きして風評被害等を招かないようなセキュリティや秘密保持を説明してほしい」との意見も多く見られた。他に、「担当者の入れ替わりが多い職場でデータの所在が分からなくなる」という理由で情報提供が困難になっている状況も確認された。これらの課題は技術的な改良により解決が可能であり、Webアプリケーションを実装している対話型プラットフォームを改善することで、実務者の情報提供に対する意識変化が図れると考えられる。



- ① データを提供した場合に、万が一第三者にわたった際の風評被害を恐れている
- ② データが何に活かされるのかイメージできないので、モチベーションが上がらない
- ③ データの所在はわかるが、提供するための資料集めとデータ整理が面倒で、そのための時間も無い
- ④ データのうち、どこの何がほしいのか具体的に示してもらわないと必要な作業量が見積れない
- ⑤ データの所在がそもそもわからない
- ⑥ データを提供するまでの決裁ルートが無い、もしくは面倒である
- ⑦ その他

図2-16 実務者が情報提供に対して二の足を踏む理由

また、Webアプリケーションのクイックリファレンスには、図2-17

に示された感想が記載されていた。アンケートに回答した実務者の中で、このようなWebツールを必要とする者は95%に上り、またアプリで使用されている理論に関する口頭解説の必要性を訴えた者は90%でした。この結果から、研究者と実務者との間で知識や情報の共有および活用の意識が顕著に表れており、本研究によって連携を強化するための着実なアプローチが行われていると評価した。一方、理論に関するレジュメ内容については、「分かりやすい」「やや分かりやすい」と答えた者と「やや分かりにくい」「分かりにくい」と答えた者がそれぞれ7人ずつおり、さらに内容を明瞭にする必要があることが明らかになりました。今回のレジュメ内容は、研究者側ができる限り分かりやすく作成したつもりですが、実務者には様々な専門分野の幅広い参加者がいるため、レジュメの作成にも実務者からのフィードバックや助言を反映し、さらには日々多くの情報を発信している新聞社や出版社などからの支援や指導を受けることも重要であると考えられる。

## 5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

すべての研究目標を達成した。特に、提供に際して手間がかかる時系列データであるにも関わらず、研究協力を得た処分場の数は当初目標50を大幅に上回り97にも達成した。このことは、実務者との連携強化に向けたアプローチ方法が適切であったことを裏付けるものであり、データの有効活用は実務者においても元々から必要性を感じていたと考えられる。本研究を契機となり今後の進展が期待される。

① ツール等を体験学習する必要性	とても必要 9人	やや必要 9人	必要ない 1人		
② 研修時間（今回は20分程度）	長すぎる 1人	やや長すぎる 0人	ちょうど良い 14人	やや短すぎる 3人	短すぎる 1人
③ ツールの使いやすさ	使いやすい 4人	やや使いやすい 8人	普通 5人	やや使いにくい 1人	使いにくい 0人
④ ツールの操作マニュアル	分かりやすい 4人	やや分かりやすい 6人	普通 7人	やや分かりにくい 2人	分かりにくい 0人
⑤ 理論に係るレジュメ内容	分かりやすい 3人	やや分かりやすい 4人	普通 5人	やや分かりにくい 6人	分かりにくい 1人
⑥ 理論に係る口頭解説（講義）の必要性	とても必要 7人	やや必要 10人	必要ない 2人		
⑦ 自由記述欄	<p>機能が追加され、より現実に近い形になっていくと、このツールの重要度が増していくのかなと思う 理論を理解するのにはもう少し勉強しないと難しいが、ツールは活用させて頂きたいと思います 実務でどのように使うのかを個別相談 個別相談の時間が欲しい。専門用語が多いので詳しい解説がほしい いつ廃止基準を下回ったのが表示されると分かり易いと感じた 処分場面積、深さ、容積、埋立物の種類、量が選択できると更に現実味がでて良いと思います 画面上の文字サイズUP、結果グラフのサイズ調整、ブラウザ上での起動が大変良い 色を取り入れると見やすい、csv出力、予測結果と実測値の差・信頼度・有用度・的中度等の指標がほしい 理論上の話を時間をかけて伺ってみたい</p>				

図2-17 Webアプリケーション体験者からの感想

## Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

## (1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	0
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	10
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	0

## (2) 誌上発表

## &lt;査読付き論文&gt;

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

## &lt;査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）&gt;

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
1	Ishimori H., Isobe Y., Ishigaki T., Yamada M.: Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.191-196 (2022) Undisturbed Sampling of Waste Layer and Its X-ray CT Image Analysis for Estimating Water Channel Flow
2	Isobe Y., Ishimori H., Ishigaki T., Yamada M.: Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.191-196 (2022) Time-lapse Electrical Resistivity Tomography to Search Water Channel Flow in the Semi-aerobic Landfill

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
3	石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人：都市清掃、363、74、pp.14-21（2021）最終処分場の実用的な将来予測手法とそのため対話プラットフォームの構築

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
4	石森洋行、廃棄物資源循環学会埋立処理処分研究部会第3回数値埋立工学ワーキンググループ（2021）先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築
5	石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人、COMSOL Week 2021（2021）COMSOL Serverを用いた対話型プラットフォームの構築と廃棄物埋立地の適正管理に向けた将来予測モデルの実用化
6	磯部友護、石森洋行、石垣智基、山田正人、第33回廃棄物資源循環学会研究発表会（2022）比抵抗探査モニタリングを用いた廃棄物最終処分場の水みち探索に関する研究
7	石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人、第27回計算工学講演会計算工学講演会（2022）数値解析機能を実装した対話型プラットフォームによる廃棄物埋立地の適正管理のための実用的な将来予測手法
8	磯部友護、石森洋行、第34回廃棄物資源循環学会（2023）比抵抗探査を用いた廃棄物最終処分場の長期モニタリングに関する研究
9	【予定】石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人、第29回計算工学講演会、掲載決定済み、2024年6月10日～6月12日開催（2024）中身が見えない埋立地の予測のための半データ同化の実

	現に向けて～実務者との対話型プラットフォーム～
--	-------------------------

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
10	石森洋行、石垣智基、山田正人、磯部友護、新井悠也、国分宏城、第44回全国都市清掃研究・事例発表会（2023）最終処分場実務者と研究者でのナレッジ共有のための対話型プラットフォーム
11	磯部友護、長谷隆仁、新井悠也、石森洋行、第44回全国都市清掃研究・事例発表会（2023）埼玉県の一般廃棄物最終処分場における実務者間の連携構築
12	石森洋行、磯部友護、石垣智基、山田正人、第33回廃棄物資源循環学会研究発表会（2022）廃棄物埋立地の適正管理に向けた対話型プラットフォームの構築と研究者-実務者間の連携強化
13	磯部友護、長谷隆仁、加戸光、石森洋行、第50回環境保全・公害防止会（2023）埼玉県内の一般廃棄物最終処分場担当者の連携による課題解決に向けた取り組み

## (4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき事項はない。				

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
14	2021	第0回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者28名、2021年11月30日、於 埼玉県環境整備センター（2021）先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築
15	2021	第1回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者23名、2022年3月11日、於 埼玉県環境整備センター（2022）先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築～デモンストレーション
16	2022	環境科学国際センターゴールデンウィーク特別企画、参加者82名（当該発表分のみ）、2022年5月8日、於 埼玉県環境科学国際センター（2022）先が読めない廃止期間を半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築
17	2022	国立環境研究所公開シンポジウム2022、参加者180名（当該発表分のみ）、2022年6月26日、於 オンライン（2022）先が読めない廃止期間を評価するための数値モデルの構築
18	2022	第3回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者21名、2023年1月31日、於 埼玉会館（2023）埋立地における雨水排除と浸出水対策
19	2022	令和3年度環境科学国際センター講演会、参加者数不明（例年の傾向によれば全体で500名程度）、2023年2月3日、於 埼玉会館（2023）先が読めない廃止期間を、半物理・半統計的に評価するための最終処分場エミッションモデルの構築
20	2023	SCIENCE TO SOCIETY～地域を支える環境研究～、参加者200名（オンライン140名含む）、2024年2月7日、於 さいたま商工会議所（2024）「ゴミの終活」を科学する！～最終処分場の新たな管理への挑戦～
21	2024	【予定】COMSOL Conference 2024 Tokyo、2024年12月6日、於 秋葉原UDXギャラリー/ネクスト（2024）現場から学ぶ、現場のための数値解析：廃棄物処理処分における研究と実務のシナジー

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
22	2022	第2回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者32名、2022年7月25日、於 埼玉県環境整備センター（2022）やさしい安定化の科学

23	2022	第2回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者32名、2022年7月25日、於 埼玉県環境整備センター（2022）最終処分場の将来を予測するための数値シミュレーションWebアプリの体験
24	2022	第3回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者21名、2023年1月31日、於 埼玉会館（2023）廃棄物最終処分場の浸出水濃度に係るデータベースの体験型学習
25	2022	令和4年度福井県環境研究センター環境研修会、参加者51名（オンライン35名含む）、2023年3月3日、於 福井県衛生環境研究センター、不確実な廃棄物最終処分場にDXで挑む—理論計算と実測データの相互補完でより正確な将来を予測—
26	2023	公益社団法人全国産業資源循環連合会処分場早期安定化分科会、参加者29名、2023年4月11日、於 全国産業資源循環連合会（2023）実測データ等の提供依頼と解説及び維持管理積立金に関するアンケート
27	2023	MATLAB EXPO 2023、参加者173名（当該発表分のみ）、2023年5月31日、於 グランドニッコー東京台場（2023）広域データ収集とビッグデータ解析で廃棄物埋立地のカオスに挑む
28	2023	国立環境研究所公開シンポジウム2023、参加者数不明（昨年の傾向によれば全体で450名程度）2023年6月22日、於 オンライン（2023）、廃止期間のより正確な予測のための広域データ収集と分析用Webアプリ
29	2023	第4回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者40名（県職員14名含む）、2023年7月11日、於 埼玉県環境整備センター（2023）最終処分場の維持管理や廃止のためのモニタリング
30	2023	第5回埼玉県内最終処分場設置団体連携会議、参加者30名、2024年2月29日、於 クリーンセンター大崎（2024）予測ツールを用いたデータの有効活用

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

## (8) その他の成果発表

成果番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

## Abstract

## [Research Title]

Establishment of Landfill Emissions Model for Determining the Post-Closure Care Period by Physics- and Statistics-Combined Approach

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Ishimori Hiroyuki
(PI ORCID) :	
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki JAPAN Tel: +81 29 850 2692 Fax: +81 29 850 2016 E-mail: ishimori.hiroyuki@nies.go.jp
Cooperated by :	Center for Environmental Science in Saitama
Keywords :	Waste landfill、 Post-closure care period、 Data assimilation、 Interactive platform、 Strengthening collaboration with practitioners

## [Abstract]

For the development of information technology at waste landfills, it is essential to make practitioners aware of the importance of on-site information. In order to encourage their behavioral change, it is possible to appeal to the effective use of information through many functions of web applications. In this research project, we developed an application environment where practitioners can easily use the visualization, analysis, and forecasting that researchers specialized in through online. By using this system in daily work, practitioners can proactively engage in maintenance and management of landfills while forecasting their fates. Data entered in the system can be accumulated as information essential for research and technology developments. Therefore, as an effective use of the accumulated data, we also have developed a new method to more accurately predict chemical concentrations leaching from landfills through data assimilation. The trend was calculated using a physical model based on traditional theory and the variation from the trend was estimated using a statistical model, resulting in forecasting leachate concentrations by overlapping each calculation result.

## [References]

- Ishimori H., Isobe Y., Ishigaki T., Yamada M. (2022) Undisturbed Sampling of Waste Layer and Its X-ray CT Image Analysis for Estimating Water Channel Flow, Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.191-196
- Isobe Y., Ishimori H., Ishigaki T., Yamada M. (2022) Time-lapse Electrical Resistivity Tomography to Search Water Channel Flow in the Semi-aerobic Landfill, Proceedings of the 11th Asia-Pacific Landfill Symposium, pp.211-216

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別紙

## 【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
<p>採択時コメント「同様な目的を持った検討は過去にも種々なされている。ニーズの高いテーマであり、決定打となるような成果が望まれる。ただし、水みちだけで解決できるか疑問である。シミュレーション結果については、明解な検証を伴うことを期待する。」</p>	<p>当該研究は、従来のような物理モデルでは信頼性のある将来予測結果は得られないという前提に立っています。この課題を克服するために、実測データと物理モデルの差に着目し、すなわち予測誤差を統計学的にモデリングします。物理モデルに適正な補正を与えることでより正確な予測を目指すものです。</p> <p>根底にある考え方はデータ同化であり、正確な予測をするためには実測データにあうようにモデルを更新するもので、これまでの最終処分場において不足していた考え方です。実測データが豊富にある処分場であれば確からしい予測を与えますが、実測データが無い場合の予測については予測誤差モデルの信頼性に左右されるのでご指摘の通り検証が重要になります。どこまでの検証が行えるかは実務者が持つデータの中身や研究協力の可否に左右されるので、実務者へのアプローチ方法を模索しつつ、地道なデータ収集を継続する必要があります。</p> <p>なお、当該研究期間では97施設の時系列データを得ることができました。しかし、当該研究が着目する塩化物イオンを測定し、なおかつ長期変化を解析するための数十年にわたる実測データをもつのは9施設へと絞り込まれることから、今後もその他多くの施設にも研究協力を求めていく必要があると考えています。</p>
<p>採択時コメント「処分場の構造、埋立廃棄物の性状、処分場内の分布、雨の降り方は様々であるうえに、それらのデータが整備されていない処分場がほとんどである。モデルの検証に当たっては、十分なデータが整っている処分場を対象に行い、データが整備されることでできるようになることを見える化すること、そして、今後の処分場への提案として、埋立時に記録すべきデータの種類や予測に必要な諸元が整理されることを期待する。また現場のニーズは予測よりも廃止の早期化にある。成果として見込んでおられる「長期化の原因究明」及び「適正な維持管理に向けた提案」の延長にあるとは考えるが、早期化方策の検討や他の処分場で実施されている方策の導入効果の事前検証ができるようなモデルを期待したい。方策の効果の大小を半定量的にでも示すことが有用である。」</p>	<p>大切なコメントをありがとうございます。最優先課題は処分場がどのようなデータを持っているのかを確認することであり、どのために処分場に対して効果的な研究協力依頼を進めることと設定しました。</p> <p>ご助言を意識して研究を行いました。モデル開発を進めるにあたって十分なデータ（長期にわたる塩化物イオン濃度の測定）をもつ処分場を9施設（全97施設中）見つけました。データの見える化は処分場が今後もデータ管理と有効活用を促すために重要であり、実務者を支援するWebアプリケーションを構築しました。埋立時に最低限記録すべきデータは浸出水量であり、推奨項目として塩化物イオン濃度または電気伝導率としました。</p> <p>今後の研究課題についてもコメントありがとうございます。対策効果の事前試算は重要と考え、モデルの点から支援できる研究展開を検討します。</p>

<p>採択時コメント「優れた実務研究である。以下について考慮に入れて欲しい。水みちモデルの考えは妥当であるが、シミュレーションの予測値との差を誤差（見かけの値）というのは再考すること。その要因が、水みちのポリウムのマクロな値を類型化していくプロセスで、類型化の中間指標の側に入るか、シミュレーションのサブパラメタの側に入るかはまだ決まった話ではないので、これを誤差というのでは論点を誤る恐れがある。」</p>	<p>非常に重要にコメントをありがとうございます。大変よく理解致しました。濃度予測におけるテーリング現象（洗い流しは初期は効率的に進み濃度の時間変化率は大きい、徐々に洗い出しの効率が下がり濃度低下率が小さくなる）を物理モデルに反映するのは最低限の要件と考え、マクロな値をモデルパラメータとしました。しかし水みちの挙動は他細かな要因にも左右され、その解明や実用面への展開は困難だと考えられるため、マイクロな要因は不確実性要素として予測誤差モデルの中で包括的に扱い類型化指標から推定する戦略を採用しました。この戦略が妥当であるのかは、塩化物イオン濃度の実測データによる検証が重要ですが、本研究期間で得た塩化物イオンのデータは9施設（全97施設中）であり十分ではありません。今後も実務者との連携（研究協力依頼）を進めます。</p>
<p>採択時コメント「処分場の維持管理の予想確率は大きな課題であることは、間違いない。従来の物理モデルシミュレーションの限界を考えて、現実に合わせて合理的な考え方の提案で、特に処分場の管理実務実施者との情報交換を重要視するのは前進と言える。第一要素として水路モデルの導入がどこまで効果がでるのか期待される。」</p>	<p>ありがとうございます。私も研究メンバーも最終処分場での物理モデルシミュレーションを研究していますが、廃棄物の不均質性が研究と技術の発展、及び実用上の展開を難しくしている原因と理解しています。本研究では廃棄物の不均質性を予測誤差と捉えて統計学的なモデリングを施すことで、従来の物理モデルを補正します。そのためには、コメント頂いたように、実務者との連携が最重要であり、非公開情報を持つ彼らとの研究協力を得るためのアプローチを研究することが一番の特徴になります。</p>
<p>採択時コメント「浸出水の質がピーク以後はみずみちができない部分の影響を受けるというのはどのような証拠で設定したのか？」</p>	<p>廃棄物埋立層内部の話なので確実な証拠があるわけではありませんが物理モデリングで無視できない要素の一つです。多孔質媒体分野ではテーリング現象と呼んでおり、主に地盤汚染の浄化が長期化する原因として古くから知られております。多孔質媒体中の汚染物質を洗い流すとき、水みち部分が先行し、その後水みち以外からの溶け出すので、浸出水の最終的な時間変化率は分子拡散律速になります。廃棄物は土壌よりも水みちを形成しやすい多孔質媒体と考えますので、テーリング（水みち）の影響を加味した物理モデリングが不可欠です。したがって、本研究ではサブテーマ1を設けて検討を進めました。</p>
<p>採択時コメント「予測誤差の類型化に関して取り組む本研究の成果（考え方）は、他の現象に関する数値モデルの予測誤差の類型化にも寄与すると考えられる。ぜひ、今後は、要因分析に関する知見の応用にも取り組んで欲しい。」</p>	<p>大変貴重なアドバイスをありがとうございます。この助言を受けて、他現象や他分野への応用の可能性を考えながら当該研究を進めてまいりました。定点での将来予測手法を構築しました。物理モデリングが困難な事象や、不測事態と外乱因子が多い分野、または長期にわたる予測が求められる分野において、有効性が際立つと考えられます。他分野への展開としては、構造物の寿命予測（数十年にもわたる長期劣化）や土砂災害予測（土は廃棄物と同じように不確実性がある）、交通流や人流の予測です。特に交通流と人流に関しては、予測誤差モデルという</p>

	<p>考え方を導入することで実用上の予測は可能になると思いますが、予測誤差の中身（車両の種類、目的地、速度、道路特性、また人の場合であれば年齢層等といった個性）を解析し物理モデルの発展にも資すると考えます。ご助言頂きましたように要因分析への展開も十分可能性はあると考え、研究を進めてまいります。</p>
<p>採択時コメント「水みちもデルを導入することは実務的に役立つ可能性が高い。ただ、影響因子も多いので、難易度の高い研究であろう。」</p>	<p>コメントをありがとうございます。環境研究総合推進費だからこそ、革新性のある挑戦的な研究アプローチが設定でき大きな社会貢献を推進するための研究資金と捉えてこの3年間最大限の努力を続けて参りました。社会実装を考えた場合、実務者が現状どのようなデータを持っているのかを認識することが最重要と考え、実務者に研究協力を取り付けるためのアプローチ方法を研究することでこのたび97施設から時系列データを得ることができました。</p> <p>物理モデル化できない部分は予測誤差として包括的にモデリングを行っていますが、頂戴したコメントのように影響因子（説明変数）が多いため難易度は高いのですがそのためのアプローチには機械学習（原因と結果を結びつける）というツールが近年普及しています。こうした近年の技術を活用し、「実現可能性はある」ところまで本研究では見出すことができました。</p>
<p>採択時コメント「埋め立て終了後の維持管理期間が長期化すると、維持管理自体の質の低下などが予想され、維持管理期間を適切に予測し、かつそれを短縮するためのツールとして本研究が活かせたらと考える。成果を期待している。」</p>	<p>ありがとうございます。まさに頂いたコメントのような問題意識を私共も持っており、各処分場の維持管理に対して将来性を予測する必要性を考えました。本家研究では実務者自身で利用可能な将来予測手法を提案しました。維持管理方策の判断支援の一助になれば幸いであり、今後も実務者からのフィードバックを受けて改良を続けて参ります。また、維持管理方策の効果予測に関するニーズに対しても次の研究課題として考えて参りたいと思います。</p>
<p>中間評価コメント「最終的な成果物がどの程度実用性を持つかが懸念される。現地実務者と研究者が効率的に交流することで予測精度が上がるというメカニズムがよくわからない。交流するとどのようなデータが得られて、それをどのように使うと精度が上がるのかがわからない。」</p>	<p>率直なコメントをありがとうございます。最終処分場には多くの外乱因子が存在するため精度良く予測することは不可能です。当該研究は、従来の物理モデルによる予測には限界があることを前提に立っています。</p> <p>物理モデルと実測データとの差、即ち予測誤差に着目するのを特徴とします。予測誤差を処分場の大きさや埋立廃棄物の種類等の諸量と結び付けて統計学的なモデリングを行うことで、従来の物理モデル適正な補正を与えることができ、より確からしい予測が期待されます（データ同化という考え方です）。</p> <p>予測誤差を求めるにしても、モデルの検証するにしても、最終処分場の管理に係る実務研究を進めるためには、実務者がどのような情報やデータをもっているのかを知ることが必然です。しかし最終処分場は風評被害を恐れていますので、情報提供に対してナーバスな実務者をどうやって研究協力まで取り付けるのか</p>

	<p>とったアプローチ方法を研究することが非常に大切です。それをサブテーマ2で取り組み、実務者と研究者の連携が進むことで、実用的な研究を進めるためのデータ（定点における時系列な水質データ等）が得られるので、予測誤差に着目した予測モデルの構築や検証が行えるようになります。</p>
<p>中間評価コメント「サブテーマ1では、水みちに注目してモデル化を行っているようだが、廃止期間の決定に対してなぜそれが最大の要因なのかよく分らなかった。今提案しているモデル（水みちのモデルなど）の妥当性はどのように検証しようとしているのか。大きなアウトカムが期待できるので、このまま頑張って貰いたい。」</p>	<p>コメントありがとうございます。廃棄物層内の汚濁物質の洗い流しは地盤汚染の浄化メカニズムと同じであり、テーリング現象という課題があります。水みち上の汚濁物質は優先的に洗い流され浸出水濃度の時間低下率は大きいですが、その後水みち以外の汚濁物質が溶け出すため浸出水濃度の時間低下率は小さくなってしまいます。水みち以外からの溶け出す速度が分子拡散律速となるためです。そのため、浸出水濃度がある一定以下まで達すると、その後の濃度低下を見込むには極端に大幅な時間を必要とします。つまり、維持管理期間を予想以上に長引かせている原因となっています。</p> <p>廃止期間の推定には古典的な物理モデルや単純な回帰分析が用いられますが（実際環境省による委託報告書（H17）でも回帰分析による廃止期間の予測値が示されています）、これらは指数関数なので上記のテーリング現象は表現できません。その結果、廃止期間の予測値は実際よりも短くなります（実際H17から20年近く経過した今現在でも廃止まで至った処分場が少ないことをみれば廃止期間の見積が短かったのは明らかです）。</p> <p>そのためより正確な予測をするためには少なくともテーリング現象（マクロな水みち）を考慮した物理モデルに改める必要があります。その妥当性評価は、マクロな水みちは実際の埋立地における雨水挙動を電気探査によって可視化したり、X線CT分析によって間隙構造を求めることで流体解析により検証しました。</p>
<p>中間評価コメント「実務者と連携しながら実装を目指した研究であり、初期に目標とした成果を一定程度得ている。ただし、現実の場は様々であり、実用性のある成果を得てもらいたい。関連して、シミュレーションに学習能力をもたせ、新たなデータの利用で結果の更新は可能か。」</p>	<p>ありがとうございます。ご意見を反映して研究を実施致しました。本研究で構築した半データ同化型予測手法（予測誤差をモデル化する点が特徴）の検証には多くの現場における実測データとの検証が必要であり、本研究期間では97施設の研究協力を得ましたが、水みち解明につながる塩化物イオンの長期データを保有するのは9施設に限られており十分な検証数ではありません。引き続き、実務者との連携強化を図り研究協力依頼を拡大することで検証を重ねて参ります。</p> <p>新たなデータの利用での結果の更新は本研究によって実現しました。ここでのご意見誠にありがとうございます。予測誤差モデルの正確さは、物理モデルと実測データを比較した回数に比例します。持続的な発展を見据えれば、予測誤差モデルの更新は自動化することが望ましいため、データの蓄積に応じて、AIが複数</p>

	の類型化モデルの中から最適なものを随時選択するシステムとしました。
<p>中間評価コメント「研究目標の達成状況という観点からは一定の進捗になっている一方、目標困難度に近い研究構造としての適切性に関する設定についての再議論が望まれる。」</p>	<p>アドバイザーやプログラムオフィサーによる研究計画と進捗の評価を受けながら、客観的にも目標到達し得ると考えられるなかで研究を進めてきました。結果として私共の設定した目標には到達しております。</p> <p>なお困難度については、当該研究の位置付けは、予測誤差に着目し統計学的なモデリングを行うことで、従来の物理モデルに対して補正を与えてより確からしい予測手法を構築すること（サブテーマ1）であり、そのためには実測データを持つ実務者との連携（サブテーマ2）を同時並行して進める必要性がありました。</p> <p>「予測手法の構築」と「実務者との連携」は実現可能と結論付けておりそれが目標達成となります。もちろん、検証を十分なものにするために実測データを拡充する、実務者の連携範囲を広域化する等、様々な点で肉付けは今後も引き続き行わなければなりません、提案技術の骨格はしっかりと確立できました。</p>
<p>中間評価コメント「実務的かつ難易度の高い研究に積極的に取り組んでいる。水路の把握調査で、深度が3.7mと1層目での調査になっている。モデルの精度向上の点から考えると、2層目、3層目までを考慮した調査が必要ではないか。56 か所の処分場の実測データを得たことは、成果の普及につながるし、環境行政の進展の一助となる。」</p>	<p>大変貴重なご意見をありがとうございます。大変重要と考えていますが、第3層等のより深い深度での現地調査は当該研究では計画しておらず、調査可能な現場の選定や予算の観点から実施は難しいと判断しました。しかし当該研究によって次の知見が得られましたので、今後は深い廃棄物埋立層をターゲットとした研究を提案したいと考えております。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 水みちを調べるための2つのアプローチが適切であったことが証明された</li> <li>— 研究成果からも不燃残渣埋立では深度方向にすり鉢状の水みちが形成される以上の知見よりご意見頂きました課題は重要であり、本手法によって解明可能と判断しております。今後研究を進めて参ります。</li> </ul>
<p>中間評価コメント「大変面白い取り組みである。まだまだ埋立地の活用は必要であり、現実的な成果を挙げている。ただし、実際の廃棄物処分のデータと同期するのがポイントであると述べていたが、その同期データがどのくらい必要であるのかまだ不明である。理論的解析の一つとして行われるサブテーマ1の位置づけとサブテーマ2の関係がわかりにくい。」</p>	<p>ご意見ありがとうございます。内容がわかりやすいように報告書や発表資料の作成は今後改めて参ります。</p> <p>当該研究は、予測誤差に着目し統計学的なモデリングを行うことで、従来の物理モデルに対して補正を与えてより確からしい予測手法を構築すること（サブテーマ1）であり、そのためには実測データを持つ実務者との連携（サブテーマ2）を同時並行して進めているものです。</p> <p>予測に対してどれくらいのデータ量が必要なのかは大変重要な研究要素と考えられます。ただサンプルとなる実測データが必要になり、今回構築した予測モデルでは9施設（全体では97施設ですが、水みち解明に必要な塩化物イオンを測定していて、なお且数十年にわたる長期モニタリングを行っているのは9施設）となり、学習用と検証用にわけることができず現時点では解明できません。引き</p>

	<p>続き実測データを収集し研究を継続するなかでご指摘の件は解明して参ります。</p>
<p>中間評価コメント「統計的データの蓄積とその類型化をベースに廃止までの維持管理要点を明らかにする際には数値シミュレーションの位置づけを補助的にすることが必要ではないか。水路考慮のモデルにしても予測は難しい。」</p>	<p>質問の意図を正確に理解していないかもしれませんが、当該研究は物理モデルによる予測では限界があるという前提で進めております。予測誤差に対してモデル化することを特徴とする研究です。</p> <p>予測を難しくする廃棄物の不均質性と長期間における外乱因子は、予測誤差として包括的に扱います。従来の物理モデルと実測データとの比較によって予測誤差を求め、統計学的なモデリングを行うことで、物理モデルに補正を与えより確かな予測を得るものです。「予測は難しい」を補完するために実測データが必要であり、実測データを持つ実務者との連携を進めるための研究です。</p>
<p>中間評価コメント「研究テーマはやや風呂敷を広げすぎの感がある。予測の精度、パラメータの精度をどのように高めるかが課題である。必要なデータをどのように入手するか。本当に使える実用性のあるモデルをどのように開発するか。課題が多く残されている。」</p>	<p>質問の意図を正確に理解していないかもしれませんが、正にご指摘の点、そのものをクリアするための研究です。その回答となる研究成果も得ております。</p>
<p>中間評価コメント「サブテーマ1についてはほぼ計画通りの成果が得られている。しかし処分場は①処分場ごとに条件が異なる、②埋立地内の場所的ばらつきがある、③データ取得が限定的あるいは困難である。よって④処分場類型化によって予測するのは非現実的であり、さらに5～6枚の広いニーズへの貢献までにはとても遠いと思われる。」</p>	<p>頂戴したコメントに至った理由が正しく解釈できなく、また前向きな改善策等が書かれていないので、適切な回答ができずご容赦ください。</p> <p>①～③はそういった特性をもつのが最終処分場であり、こうしたその認識を前提で研究者は実務上の課題に対して解決策を考えます。そのため、従来の物理モデルによる予測には限界があるところから研究計画を着想しています。</p> <p>実測データを実務者が持っているのであれば予測誤差を埋めるようにモデルを随時更新していくための研究です。1回限りの計算で数十年後の予測をしてそれで終わりとするものではございません。外乱因子が多いからこそモデル補正を随時行うための研究（サブテーマ1）が必要があり、補正パラメータを求めるために実測データを集めるための研究（サブテーマ2）が必要です。</p> <p>当初研究計画に基づいて成果を得ており、ご指摘の事項を全て対処可能な予測手法を構築しています。</p>
<p>中間評価コメント「水みち存在下での浸出水予測モデルの高精度化（実用として使える精度）を行うに、実測データを利用して、有効間隙率と屈曲度をパラメータとして利用することに取り組まれている。シミュレーションの予測値との差（誤差）を補正するために、これらパラメータでは不十分（実用上）であった場合には、次の手立て（他のパラメータ導入など）を考える予定か。代替案を用意する必要があるのではないか。複数の処分場でのモデル適用より、</p>	<p>貴重なご意見を誠にありがとうございます。当該研究では、最終処分場の予想は物理モデルでは対応し切れないという前提に立ち、実測データとの違い、すなわち予測誤差に統計学的なモデリングを施して予測の補正を行うものです。そのため、新しい予測手法としての完成度は収集できる実測データの数に依ります。</p> <p>当該研究期間では97施設の浸出水水質に係る時系列データを得ておりますが、長期予測を実現させるために水みちを考慮した予測手法の検証は、BODやCOD等の</p>

<p>手法の確立を達成していただきたい。予測誤差の類型化として、どこまでを想定されているのかは現状では不透明であり、この点での進捗を望む。これとモデルの高精度化（実用レベルでの）がなされれば、研究目標（廃止期間の予測）を達成できると考える。また、モデルのキャリブレーションの手法は重要な知見と考える。他の事象を表現するモデルにも適用できるかどうか、検討いただきたい。」</p>	<p>反応成分ではなく、塩化物イオン濃度であることと且つ長期間にわたるモニタリングである必要があります。予測誤差モデルの構築に用いることができたデータは最終的に9施設であるので検証が十分であるとは言えない状況です。</p> <p>ご意見を頂きました件について、パラメータが不十分となる可能性が考えられるのは予測誤差モデルの説明変数であり、まだサンプル数が限られているため説明変数の数は少なくて済んでいますが、検証のためにサンプル数が増えると正確な予測誤差を得るために説明変数の数を増やす必要性があると考えます。こうした場合の措置として、実測データの蓄積に基づいてモデル更新すること対応可能です。予測誤差と説明変数を結びつけるために、寄与率や機械学習に基づいてAIがモデルを自動更新する仕組みを導入し、運用上であってもより優れたモデルが選択されます。</p> <p>本技術は、定点における将来予測に制限されますが、計算負荷が少ないため自治体等でも運用可能です。そのため他分野への展開としては、構造物の寿命予測（数十年にもわたる長期劣化）や土砂災害予測（土は廃棄物と同じように不確実性がある）、交通流や人流の予測が考えられ、最終処分場と同じように、得られた実測データは閾値判定のみならず、本技術に入力して近未来の将来を得ることでリスク回避は一層強化できると考えられます。</p>
<p>中間評価コメント「最終処分場の廃止期間に関するシミュレーションでの検討ではあるが、現場からのデータ吸い上げと、どの程度精度検証ができるかが課題との意見が多く出された。個人的には、まずはモデル計算でどの程度使えるのかのモデル設計の定量的目標を示していただきたい。」</p>	<p>貴重なコメントをありがとうございます。資料とプレゼンテーションが適切でなかったと反省し今後改めたいと思います。下記、長文失礼いたします。</p> <p>従来研究のような物理モデルの精緻化を進めるものではありません。当該研究では、最終処分場には廃棄物の不均質性や予測し得ない外乱因子が多く存在するので物理モデルによる予測には限界があることを前提とした研究です。物理モデルが実際と乖離するのは当然であり、その誤差に着目して統計学的なモデリングを行うことを特徴とします。処分場の類型毎に予測誤差を見積もるための統計学的モデル（機械学習モデル等）を得ることで、正確な予測を行うための補正を物理モデルに与えることが可能になります。したがって、1回限りの計算で数十年後の予測をしてそれで終わりとするものではなく、実務者が持つ実測データが蓄積するごとにモデルを随時更新するものです（データ同化の概念）。</p> <p>全体からのご意見に対する回答になりますがモデル実験ではないので精度を求めることはできません。特定現象に着目した物理モデルが自然現象と異なるのは当たり前なので物理モデルの精緻化ではなく、モデルと自然現象の差に対してモデリングし物理モデルに補正を与えることで確からしい予測とするものです</p>

	<p>(精度に関する発言が非常に多くて困惑しましたが、計算工学やソフトウェア工学でも同様に精度という用語に定義はなく、人によって解釈が異なり混乱を招く原因になるので、モデルは自然現象の一部を切り出したものであることを強調すべきであるとの助言を頂いております)。</p> <p>個人から頂いたコメントでは、今回開発した予測計算がどの程度使えるものなのかの検証を問う質問と理解し回答致します。予測誤差モデルによって補正するという研究成果を検証するためには、実測データが必要ですが、水みちのみに直接関与する塩化物イオン濃度で長期データを持つのは9施設です。ここから予測誤差モデルを構築していますが、サンプルが少ないので十分な検証であるとは言えません。しかし、時系列データ (BODやCOD等の反応成分) の提供は97施設から頂いておりますので、データ提供のアプローチとしては適切だったと考えて、今後も実務者に対する研究協力依頼を拡大し検証を重ねて参ります。</p>
<p>中間評価コメント「モデルが実用的かどうか、そこが研究の価値を決める核心であり、その点を1処理場のデータからではなく、一般性のある形で実証していただきたい。もし無理だというのなら、それは最初からわかっていたはずのことであり、実証できないモデルを一人歩きさせてはいけない。</p>	<p>資料とプレゼンテーションが適切でなかったと反省し今後改めたいと思えます。1つの処分場ではありません。収集できる実測データの数に依ります。</p> <p>従来研究のような物理モデルの精緻化を進めるものではありません。当該研究では、最終処分場には廃棄物の不均質性や予測し得ない外乱因子が多く存在するので物理モデルによる予測には限界があることを前提とした研究です。物理モデルが実際と乖離するのは当然であり、その誤差に着目して統計学的なモデリングを行うことを特徴とします。処分場の類型毎に予測誤差を見積もるための統計学的モデル (機械学習モデル等) を得ることで、正確な予測を行うための補正を物理モデルに与えるものです。したがって、1回限りの計算で数十年後の予測をしてそれで終わりとするものではなく、実務者が持つ実測データが蓄積するごとにモデルを随時更新するものです (データ同化の概念)</p> <p>一般性という言葉が正しく解釈がしていなかったらご容赦頂きたいのですが、次の回答を準備致しました。予測誤差を統計学的にモデリングして、データに合うように予測モデルを修正していくものなので、一般性があるかどうかは話は別として、データを保有する実務者自身にとっては有益な結果をもたらすものです。実測データの種類や量に応じて予測誤差モデルの形は変わるため、データの蓄積に応じて随時モデル修正する仕組みは取り入れています。</p>

以上