

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 総合研究報告書

大規模災害における廃棄物の災害外力・地域特性に応じた

処理技術・管理システムに関する研究

(3K163011)

平成 28 年度～平成 30 年度

Large-scale Disaster Waste Treatment and Management System Considering Disaster and Region
Characteristics

名古屋大学 中野 正樹

2019 年 5 月

目 次

I．成果の概要	・ ・ ・ ・ ・ 1
1．はじめに（研究背景等）	
2．研究目的	
3．研究方法	
4．結果及び考察	
5．本研究により得られた主な成果	
6．研究成果の主な発表状況	
7．研究者略歴	
II．成果の詳細	
II－1 発災前・後から処理処分・利活用までの災害廃棄物等処理事業管理システムの検討・ ・ ・ ・ ・ 14	
要旨	
1．はじめに	
2．研究目的	
3．研究方法	
4．結果及び考察	
5．本研究により得られた成果	
6．国際共同研究等の状況	
7．研究成果の発表状況	
8．引用文献	
II－2 地域特性・災害特性を考慮した災害廃棄物等の種類・発生量の時系列に沿った把握・予測・ ・ ・ 33	
要旨	
1．はじめに	
2．研究目的	
3．研究方法	
4．結果及び考察	
5．本研究により得られた成果	
6．国際共同研究等の状況	
7．研究成果の発表状況	
8．引用文献	

Ⅱ－３ 災害廃棄物等から破碎・選別処理された分別土の利活用の促進・・・・・・・・・・	54
要旨	
1. はじめに	
2. 研究目的	
3. 研究方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
Ⅲ. 英文 Abstract	・・・・・・・・ 74

I. 成果の概要

補助事業名 環境研究総合推進費補助金 循環型社会形成推進研究事業（平成 28 年度～平成 30 年度）

所管 環境省 及び 独立行政法人 環境再生保全機構

研究課題名 大規模災害における廃棄物の災害外力・地域特性に応じた処理技術・管理システムに関する研究

課題番号 3K163011

研究代表者名 中野 正樹（名古屋大学）

国庫補助金実績額 122,907,000 円（うち平成 28 年度：33,246 千円、平成 29 年度：45,980 千円、平成 30 年度：43,681 千円）

研究期間 平成 28 年 6 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

本研究のキーワード 災害廃棄物、分別土、復興資材、情報通信技術、処理管理システム

研究分担者 遠藤 和人（国立環境研究所）
 肴倉 宏史（国立環境研究所）
 江種 伸之（和歌山大学）
 勝見 武（京都大学）
 加藤 雅彦（明治大学）
 酒井 崇之（名古屋大学）
 谷川 寛樹（名古屋大学）

1. はじめに（研究背景等）

東日本大震災では約三千万トンという大量の災害廃棄物等が発生し、復旧・復興の妨げとなった。来たる南海トラフ巨大地震などの大規模災害においては、さらに大量の災害廃棄物が発生することから、災害廃棄物の迅速かつ効率的な処理・利用が、早期復旧・復興の重要な鍵となる。

これら災害廃棄物は、そのほとんどが仮置場において選別されて受入先が決まっているが、混合物が処理・利用の足かせとなっている。迅速かつ効率的な処理・利用のためには、2 次仮置場での高度選別処理において混合物から生産される選別品、すなわち不燃物、可燃物、分別土の発生量を予測することが重要となる。さらに、選別品の中でも、大量に生産され、復興事業に利用される可能性のある分別土を如何に利活用するかも重要となる。仮に利用せずにすべてを処分することになれば、逼迫する最終処分場に大きく影響し、環境負荷は図り知れない。

災害廃棄物の速やかな処理・利用のためのもう一つの重要な点として、処理事業に携わる地方自治体に対する発災前の処理計画の策定、発災後の計画更新、管理等の支援が挙げられる。大規模災害が発生した場合、迅速かつ効率的に災害廃棄物等を処理していくためには、処理実行計画の策定や更新に対し、処理過程において逐次的に入ってくる情報をリアルタイムで利用できる枠組みが重要となる。また災害処理事業に直接携わる各地域（地方自治体）に対しては、発生する廃棄物性状の予測、処理方法の策定、処理過程における災害廃棄物の量・質の動きの把握、復旧・復興計画における復興資材の利用計画も踏まえた統合的な処理事業を、逐次実行・更新できる仕組みが必要になる。

2. 研究開発目的

本研究は、大規模災害において、災害処理にあたる市町村レベルの自治体が、特に分別土の利活用を目指した処理技術および進捗管理を実施できる災害廃棄物等処理事業管理システムの提案を目的とする。

提案する管理システムは後述の図 1 でも示すが、平時・発災前の日常業務、災害廃棄物処理計画の作成だけでなく、発災後の災害廃棄物等の処理・利活用も対象にして、発災直後の情報をもとにした災害廃棄物実行計画の作成、その後の進捗管理と実行計画の更新の効率的な実施を支援するというものである。

本管理システムはサブテーマ(3)に含まれるが、システム構築のため、具体的に以下の3つのサブテーマを推進する。

- 1) 処理事業の入り口側の課題、すなわち災害廃棄物や分別土の量・質の動きを整理する仕組み構築に向けた災害廃棄物等の量や質の推定手法を構築する(サブテーマ(1))。
- 2) 処理事業の出口側の課題、災害廃棄物の中でも特に、復興の妨げとなっていた混合物処理について、高度選別処理で得られる選別品としての分別土の処理・有効活用を目指し、短期・長期の力学挙動、環境影響を把握する(サブテーマ(2))。
- 3) 災害廃棄物の発生量、処理計画の作成、復興資材の利活用等を統合的に管理するシステムの要求性能を明らかにして、災害廃棄物等の処理や利活用を促進するための考え方を提案する(サブテーマ(3))。

これら3つのサブテーマを推進することで、災害廃棄物処理に関連して収集、管理が主であったデータを分析し、災害廃棄物等の処理・利活用に資する実験、解析による新たな知見も加えて事前に準備することができ、発災後に処理事業で得られるデータの効率的な活用を盛り込んだ災害廃棄物等の処理や利活用を促進するための仕組みの考え方を提案する。

3. 研究方法

本研究は3つのサブテーマからなる。最終報告会での委員からの指摘もあり、まず本研究の中心となる管理システムの全体像を示したのち、そのシステムを支える要素研究を紹介する。すなわち、サブテーマ(3)、(1)、(2)の順番とする。

(1) 発災前・後から処理処分・利活用までの災害廃棄物等処理事業管理システムの検討【サブテーマ(3)】

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

本研究の主目的である災害廃棄物等処理事業管理システム開発のため、東日本大震災で災害廃棄物処理事業に携わった自治体職員などとの議論を重ね、システムに実装すべき機能を整理する要件定義を行った。その実施過程は、①システム化コンセプトの整理、②システムグランドデザイン、③システム利用フローの整理、そして④システム要件定義書の作成となる。

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

一次仮置場、二次仮置場、最終処分場の位置情報をハザード情報(災害情報)などの GIS データと重ね合わせることで、三重県四日市市および他地区における災害廃棄物輸送の所要時間を算出した。ハザード情報としては、L1、L2 の地震と津波の情報を、さらに緊急輸送道路の通行規制も考慮している。

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

一次集積所から最終処分場までの処理フローにおいて、災害廃棄物の処理および輸送計算を行う収集運搬モデルを提案した。本モデルでは、一時集積所や一次・二次仮置場へと搬入された災害廃棄物が、実際には破碎・分別処理等を経て搬出されるため、分別・破碎処理等を搬出可能変換作業と定義し、その作業効率を搬出可能変換量としてパラメータ化し、災害廃棄物処理における処理運搬に要する日数を計算した。そして

東日本大震災において山田町の災害廃棄物処理で実際にかかった日数と比較するとともに、四日市市への適用も試みた。

（２）地域特性・災害特性を考慮した災害廃棄物等の種類・発生量の時系列に沿った把握・予測【サブテーマ(1)】

１）物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

対象地域を四日市市とし、GIS上に蓄積された建築物１棟ごとの建築資材データ、すなわち物質ストックデータに対し、四日市市から提供された課税台帳を用いて建築年代を割出し、三重県地震被害想定（平成26年3月）のL1、L2地震の計測震度データ、建物の被害率曲線を用いて、計測震度に応じた被害率を加味することで250mメッシュごとの災害廃棄物発生量と種類の分布を算出した。さらに、対象地域を三重県北勢地域の4市町（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）まで広げ、災害廃棄物発生量・質分布の推定を実施した。他地域へと展開するため、既に全国統一的に整備されている500mメッシュの物質ストックデータに対し、統計データによる市町ごとの構造別建築年代割合を用いている。さらに、地域ごとに保有する物質ストックデータの特徴を整理し、先述の災害廃棄物発生量と種類の推計結果を比較し、災害廃棄物発生量・質と地域特性との関連を示した。

２）災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法

災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法を検討するため、平成28年8月末に発生した台風10号による岩手県久慈地区の災害廃棄物を対象とし、災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法のレビューワークをまとめた。すなわち、発災後の仮置場において、被災地より集積された多種多様の災害廃棄物の山をUAV(Unmanned Aerial Vehicle)で空撮計測を行い、空撮画像を活用した災害廃棄物の体積計測と、画像解析技術を用いた混合廃棄物の組成分析を実施し、迅速かつある程度の精度で廃棄物の発生量と質（組成別重量）の推定が可能かを検証した。

３）二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

東日本大震災の岩手県山田、久慈地区の災害廃棄物処理業務において情報通信技術に基づいて取得・蓄積された災害廃棄物処理実績データを用いて、二次仮置場での処理、特に高度選別処理前後の廃棄物の経時変化や、高度選別処理後の選別品と受け入れ先の関係を分析した。さらに高度選別処理前後において、混合物と選別品（可燃物、不燃物、分別土）との関係性と時間依存性ならびに影響因子等を解析し、「分別係数」という新しい概念を導入し、与条件下での合理的な処理を構築する上での考え方を提示した。

４）風水害で発生した廃棄物発生量の予測

過去の大規模風水害における被害の概要を調査し、災害廃棄物発生量に着目して情報整理を行った。そして、対象地域は四日市市とし、三滝川水系、鈴鹿川水系、朝明川水系のそれぞれについて、河川氾濫による浸水想定結果から物質ストックデータを用いた風水害の災害廃棄物発生量・質分布の推定を行った。さらに、風水害で発生した分別土の力学・化学特性を明らかにし、災害廃棄物処理事業管理システムへの導入について検討した。

（３）災害廃棄物等から破碎・選別処理された分別土の利活用の促進【サブテーマ(2)】

１）模擬津波堆積土・分別土の処理・利用のための化学特性の把握と品質評価

四日市港周辺で採取した海底堆積物、河口堆積物から5種類の比率で混合し、模擬津波堆積土を作製した。そして、5つの粒度を持つ模擬津波堆積土に対し、有害物質（ここでは重金属類を対象）の比率を変えて混合し、重金属類吸着等温線から土壌環境基準値を超過する際の重金属類吸着量（以下、超過吸着量）を推定した。また推定した重金属類超過吸着量からどれくらいの重金属類が漏出源から漏出した場合に、土壌環境

基準値を超過する津波堆積土が発生するか見積もった。また、土壤環境基準値を超過しない程度の重金属類が吸着した模擬津波堆積土に対し、夾雑物（不燃系としてはコンクリート片、可燃系としては木片）の混入率を段階的に増加させた模擬分別土を作製し、重金属類の溶出性が変化するかを明らかにし、土壤環境基準値を超過しない夾雑物の混入率、すなわち許容混入率を提示することを試みた。

さらに、土壤環境基準値を超過する夾雑物の模擬分別土に対して、不溶化材（CaO、MgO、セメント系固化材）を重量比で 5% 添加混合した試料に対する重金属類の溶出性を評価し、不溶化による溶出量低減への有効性を検証した。

2) 模擬津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

1) で説明した海底堆積物、河川堆積物の 5 種類の混合土砂を作製し、津波堆積土を模擬し、東日本大震災での代表的な津波堆積土と比較した。また、各種室内土質試験を実施することにより、津波堆積土の復興資材として利活用する際の物性、力学特性を把握した。また、木片腐朽が進行した究極の状態として、水に溶けて空隙を作る肥料を用い、木片混入率に換算した肥料混入率を変化させた実験を、模擬津波堆積土に対して実施し、木片腐朽が強度特性に及ぼす影響を調べた。その結果を用いて、一軸圧縮強度 50kPa を利用基準として許容木片混入率を算出し、許容木片混入率を推定する試験方法を提案した。また、津波堆積土に許容木片混入率の木片を混ぜた模擬分別土を作製し、木片腐朽菌が繁殖しやすいファンガスレーに供試体を埋め、1 年以上経過後に一軸圧縮試験を実施し、木片の腐朽が分別土の強度特性に及ぼす影響を把握した。さらに、許容混入率を上回る木片が混入した分別土について、セメント固化による改良効果を調べた。また、不燃系夾雑物としてコンクリート片の混入率が物性および強度特性に及ぼす影響を調べた。

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

本研究では、水流による土砂の移動を考慮した津波解析モデルを用い、南海トラフの巨大地震で被災が予想される四日市市を対象に、津波断層による津波の発生から四日市市までの波の伝搬、および津波堆積物の発生量と粒度分布を求め、津波堆積物発生原単位および汚染の分布について検討した。解析条件としては、津波断層モデルと地形データは、内閣府により提供の、日本平面直角座標第 06 系用を用いた。津波断層モデルのシナリオは、四日市港に到達した波高が最大となった、ケース⑦を採用した。

4) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利活用のための品質評価と処理フローの提案

有害物質の含有を考慮した木片混入分別土の処理・利活用のため、1)、2) の成果に基づき、東日本大震災で災害廃棄物処理にあたった自治体職員と議論することにより、品質評価を含む処理フローを、東日本大震災における岩手県復興資材処理マニュアルを参考に作成した。

4. 結果及び考察

(1) 発災前・後から処理処分・利活用までの災害廃棄物等処理事業管理システムの検討【サブテーマ(3)】

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

災害廃棄物処理管理システムの要件定義書を作成する過程で、システムを利用する状況（平時、発災後）における必要な情報と、各情報を出力する為に必要な機能を体系的に整理することができた。また、本研究のサブテーマで研究を進めている廃棄物量の推定に係る手法や数値モデル、処理計画に必要な情報を出力するシミュレーションモデルなどの様々な機能を追加・連携することが可能な統合プラットフォームとしてのシステム全体像を把握することができた。図 1 に本管理システムの概要を、各サブテーマとの連携も含め示す。

平時・発災前

① 日常業務対応

- ・処理施設の管理
- 稼働数, 処理能力, 残余容量, 残余年数

② 災害廃棄物処理計画

- ・災害廃棄物発生量の予測(ストックデータ) サブ(1)
- ・有害物質影響範囲の把握(化学特性) サブ(2)
- ・仮置場候補の選定(GISモデル) サブ(3)
- ・輸送経路の最適化(輸送モデル) サブ(3)
- ・二次仮置場の設計(分別係数) サブ(1)
- ・制約条件下での処理日数の予測(運搬・処理モデル) サブ(3)

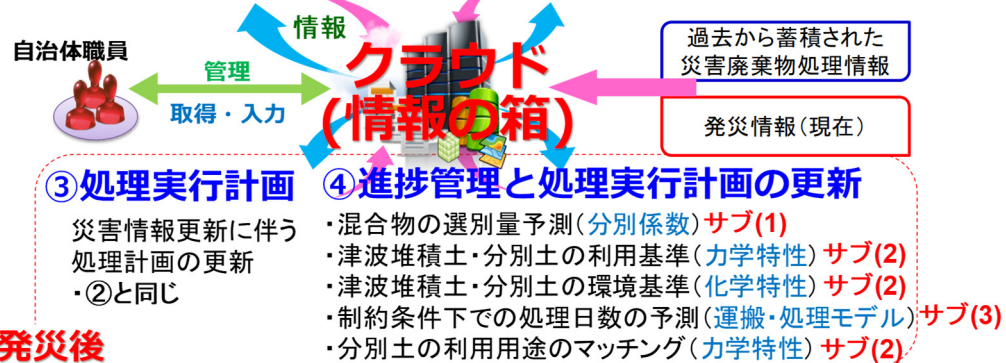


図1 災害廃棄物等処理事業管理システムの概要

システムモックアップを利用して、本研究チーム、東日本大震災で災害廃棄物処理事業に携わった自治体職員などとのディスカッションを重ね、システム利用フローの整理を行った。また、利用フローに沿ったシステムに蓄積される情報の入力・出力データの整理も実施した。図2は、平時・発災前における日常業務・災害廃棄物処理計画の作成のシステム入出力データのイメージである。

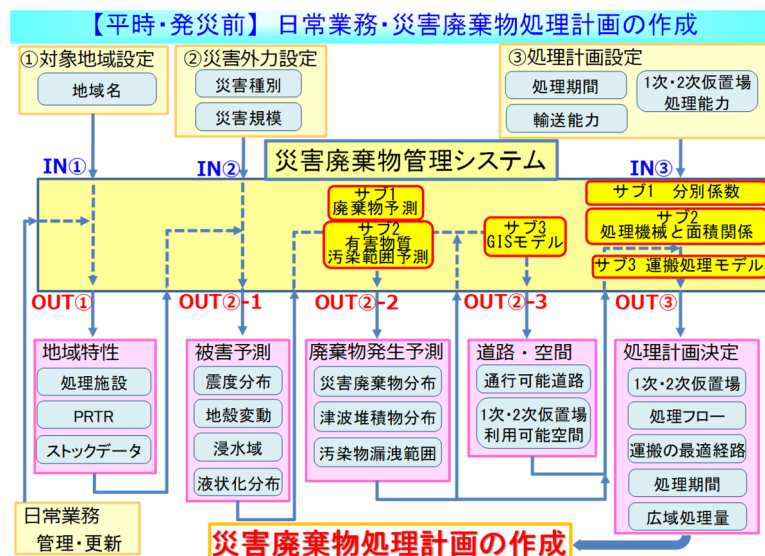


図2 システム入出力データのイメージ(平時・発災前)

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

四日市市において、津波被害や地盤被害を考慮した上で、最短時間の輸送経路を提案することが可能となった。また、四日市市周辺も含めた北勢地域に対する GIS シミュレーションも行った。GIS データを用いるため、他地域でも津波浸水域や液状化のハザードマップや仮置場の候補地のポリゴンデータがあれば、日本全国各地でシミュレーションが可能であることを示している。このことから、震災規模や津波、液状化などの状況に応じて仮置場候補地が利用できるかを事前に本シミュレーションで確認して、計画しておくことが有効であることを示した。

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

東日本大震災において山田町の災害廃棄物処理で実際にかかった日数は、平成 23 年 12 月 7 日から平成 26 年 5 月 31 日までの 906 日であった。一方、モデルによる解析では、処理完了日は 991 日となっており、災害廃棄物処理に要する期間を 1 割ほど過大評価した。この原因としては、パラメータ設定での仮定で、計算される保管可能重量は、余裕をもって設計される現実の値と比較し小さくなる可能性があるため、保管可能重量の設定において現実よりも小さな値が採用され、仮置場の使用に余裕がない設定となったことなどが推察される。しかし、本過大評価は 1 割程度であったため、本モデルは実際の災害廃棄物処理を概ね再現でき、概ね妥当な処理日数を算出可能であるという結論を得た。本研究でモデルに必要な情報は整理できており、その情報を用いることで、各自治体が計画する災害廃棄物処理計画における条件下で、目標とする日数で災害廃棄物処理が完了するかについて、検証可能となった。

(2) 地域特性・災害特性を考慮した災害廃棄物等の種類・発生量の時系列に沿った把握・予測【サブテーマ(1)】

1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

図 3 は、物質ストックデータを用いて、災害廃棄物の発生量及び質の分布を 250m メッシュで推計した結果を示す。沿岸のコンビナートよりわずかに内陸の地域で災害廃棄物発生量が多いことがわかる。四日市市全域の災害廃棄物発生量は L1 地震では 18.6 万 t、L2 地震では 142.9 万 t である。L2 地震では、L1 地震の約 8 倍の廃棄物が発生すると考えられる。L1 地震では単位メッシュ当たり 200t 以上の災害廃棄物が発生する地域は一部であるが、L2 地震では市面積の約 3 分の 1 の地域で 200t を超える災害廃棄物が発生する。

L2 地震における積み上げ方式（本研究）と内閣府方式の災害廃棄物発生量を、それぞれ木材と非木材に分けて小学校区ごとに比較すると、木材の発生量は積み上げ方式と内閣府方式に大きな差が見られないものの、非木材の発生量は市全体では内閣府方式の方が多いが、一部の小学校区では傾向が逆転し積み上げ方式の方が多結果となった。その要因の 1 つは、積み上げ方式では推計対象を上部部材のみとしたことである。下部部材が災害廃棄物として発生するかどうかは、災害の規模や復興の際に基礎を撤去するかどうかなど、発災前の段階では未確定な要素が多い。したがって積み上げ方式では下部部材を推計の対象から除外した。2 点目は、原単位を全国一律に設定せず、地域特性に応じた物質ストックデータから算出している点である。

さらに、対象地域を三重県北勢地域の 4 市町（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）に広げ、災害廃棄物発生量・質分布の推定を実施し、推計した災害廃棄物の資材別割合に地域特性が反映されていることを確認した。日本全国の物質ストックデータは GIS 上に整理されており、本手法は全国に展開することができる。

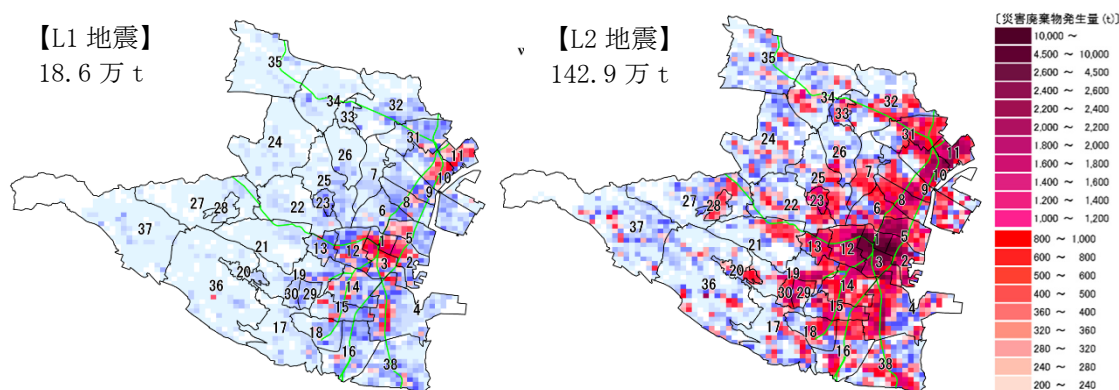


図 3 四日市市の災害廃棄物発生量分布の算出図

2) 災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法

実際の災害発生後の災害廃棄物集積状態に対する UAV による容積計測は、十分な精度を維持しつつ、その所要時間の短さと非接触性から高頻度の測量が可能となり、集積開始時から測量を繰り返すことで高精度の集積履歴記録に使えることを定量的に実証できた。

3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

図 4 は山田地区での、混合物に関する二次仮置場の処理フローにおける高度選別処理前後の廃棄物の質量の経時変化である。

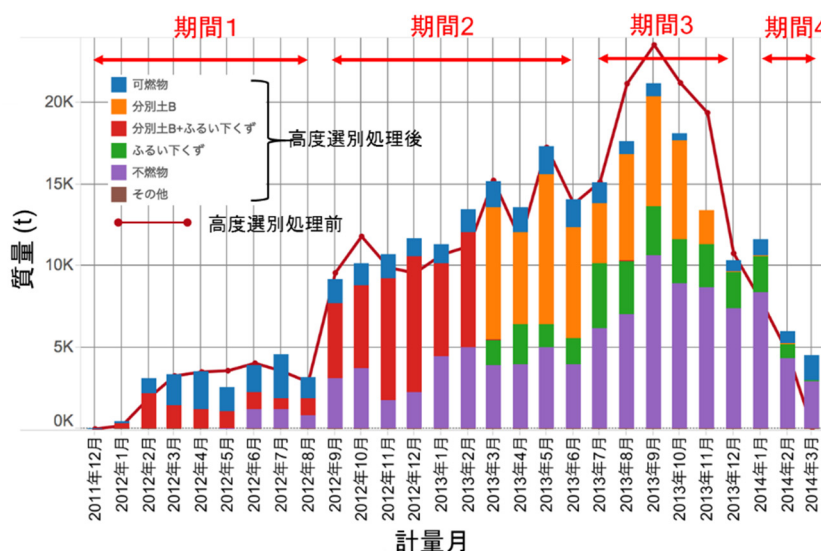


図 4 山田地区・二次仮置場からの搬出質量

図 4 より、二次仮置場への搬入量（高度選別処理前）と搬出量（高度選別処理後）が月ごとに概ね一致しており、取得データの有用性が示された。また、搬入出の廃棄物の種類・量から、図 4 に示すように 4 つの期間に分けることができた。初期には搬入物は大きさが 40mm オーバーの「混合物大」が多く、搬出物は「可燃物」が多くの割合を占めていた。そして時間とともに搬入物は大きさが 40mm アンダーの「混合物小」が、搬出物は土砂類が増加した。期間 3 で処理量のピークを迎え、期間 4 では処理が収束を迎えたことがわかる。この混合物処理に関する実測データは、災害廃棄物処理の実態と整合が取れていた。搬入量についてのみ示すが、期間 1 では密度が小さい可燃系物質の混合割合が高い混合物大のみで、これは発火や悪臭の危険性を伴う可燃系の物質を早期に処理する必要があったからである。期間 2 では密度が大きい土砂系物質の混合割合が高い混合物小の搬入が始まり、処理量が増加に応じて混合物小の割合が増加している。期間 3 では混合物小の処理質量が増加し、割合においてはほとんどを占めているが、これは受け入れ先の条件より、一定以上の純度の不燃物を製造する必要があるため、そのために不燃物を繰り返し処理したことによる。

実測データのさらなる活用として、二次仮置場での高度選別処理において、処理前の土砂混合物に対し、処理後選別される可燃物、不燃物、分別土がどのような割合になるか、それら誤差の二乗和が最小となるように算出した「分別係数」という新しい概念を提案した。表 1 は、4 つの処理期間において得られたそれぞれ一定の範囲の分別係数である。処理過程における分別係数を時系列で逐次算出できることから、可燃物、不燃物、分別土の発生量を予測し、処理能力から処理時間が推定できる。その結果、早期に、処理能力を上げることや広域処理量を変更するなどの処理マネジメントが可能となる。また、本手法における計測を行うことにより、各地で分別係数を算出でき、本手法は全国に展開することができる。

表 1 4 つに区分した期間ごとに求めた平均分別係数（山田地区）

期間	X_1 (混合物大と 可燃物)	X_3 (混合物大と ふるい下くず)	X_4 (混合物大と 不燃物)	Y_2 (混合物小と 分別土B種)	Y_3 (混合物小と ふるい下くず)	Y_4 (混合物小と 不燃物)
期間1	0.53	0.32	0.16	0.67	0.00	0.33
期間2	0.43	0.15	0.42	0.64	0.10	0.26
期間3	0.87	0.13	0.00	0.27	0.19	0.54
期間4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.75

4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

物質ストックデータを用い風水害の発生量推定の検討を行った。これにより、各地域、様々な災害に対して、ハザードの分布情報を空間的に入手し、データベース化したストックデータと重ね合わせることで、災害廃棄物発生量と種類の分布を推計することができる。また、2 地域と限定的ではあるが、力学特性・化学特性ともに良質土と変わらず、津波地震災害での処理過程で十分に分別土として取り扱えることがわかった。

(3) 災害廃棄物等から破碎・選別処理された分別土の利活用の促進【サブテーマ(2)】

1) 模擬津波堆積土・分別土の処理・利用の化学特性の把握と品質評価

重金属類の種類、津波堆積物の粒度によって堆積物への重金属類の吸着特性が異なり、細粒分の多い堆積物ほど吸着量が多くなった。そして超過吸着量を算定し、土壤環境基準値を超過する津波堆積土が発生する、すなわち漏出源からの重金属類の許容漏出量を試算した。表 2 は漏出源から最大到達距離の 500m における重金属類の許容漏出量を示す。地域ごとで発生する津波堆積土の粒径等の性状や対象となる重金属類の種類を考慮していきながら、津波堆積土、分別土の環境安全性を評価する必要があること、発災前に津波堆積土の調査地点およびその有害物質の種類をスクリーニングできる可能性があることを示した。

表 2 漏出源からの重金属類の許容漏出量

海底：河口	最大保有量				
	As	F	B	Pb	Ni
	(kg)			(t)	
3 : 0	35.2	1.41	20.5	5.02	17.4
2 : 1	15.8	1.18	12.6	0.87	7.34
1 : 1	12.7	0.95	11.3	0.55	2.53
1 : 2	4.40	0.87	8.67	0.56	2.16
0 : 3	2.93	0.17	0.46	0.04	0.14

さらに、コンクリート片、木片が混入することで分別土からの重金属類の溶出量に変化することを明らかにした。特に、木片よりもコンクリート片の混入によって変化が大きい。そして得られたデータより、分別土における夾雑物の許容混入率を提示した。また、土壤環境基準値（Pb、As、Ni）を超過した分別土に対して不溶化が有効であることを明らかにした。特に、MgO 資材 5wt% を添加することで、いずれの夾雑物種、重金属類種においても溶出量が土壤環境基準値未満になることがわかった。

2) 模擬津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

模擬津波堆積土は、最適含水比であれば高い強度を有し、粒度に応じて強度が変化することから、乾燥さ

せることや粒度調整による改良可能性を示すことができた。また、肥料で腐朽を模擬することにより、簡易的に完全に腐朽した状態における分別土の強度を把握でき（図5）、それにより許容木片混入量を得ることができた。また、木片腐朽促進下で木片を腐朽させた場合についても試験を行い、腐朽により強度低下を引き起こした。しかし、許容木片混入率を求める際使った一軸圧縮強度 50kPa をいずれのケースも超えている。許容木片混入率を上回る木片を有する分別土については、セメント改良が効果的であることがわかった。

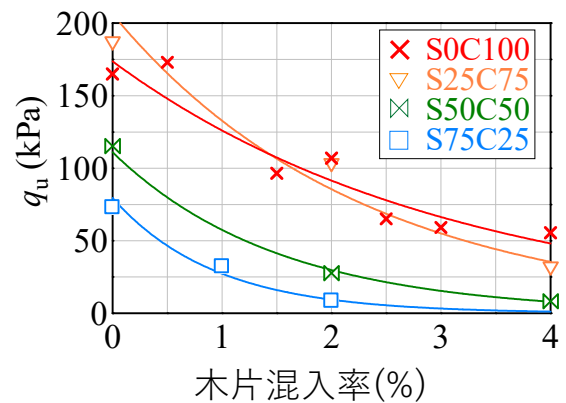


図5 木片混入率と一軸圧縮強度の関係

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

生成される津波堆積物の量と粒度に着目し、津波解析、海底堆積物移動を連成させる数値モデルを示した。津波堆積物の発生量は、津波浸水面積が内閣府の結果より約 44% 大きいにもかかわらず、発生量が最多と計算された粒径 0.25 mm の場合でも、津波浸水面積と津波堆積物発生原単位の積に比べ、1/3 未満に留まった。四日市港は伊勢湾の奥にあり、津波速度が緩やかで、大量の津波堆積物が発生した宮城県や岩手県の津波とは異なり、海底土砂の巻き上げ量が異なることが津波堆積物発生量の違いの一因として考えられる。本モデルにより、津波堆積物の復興資材化を想定した粒度分布を予測でき、将来、汚染分布状況を予測することが可能となる。

4) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利用のための品質評価と処理フローの提案

品質評価を備えた津波堆積土・分別土の処理フローを作成した。図6にはその簡易版を示す。この処理フローにより、津波堆積土・分別土を有効利活用するため、どのように処理、評価すべきかが明確になった。

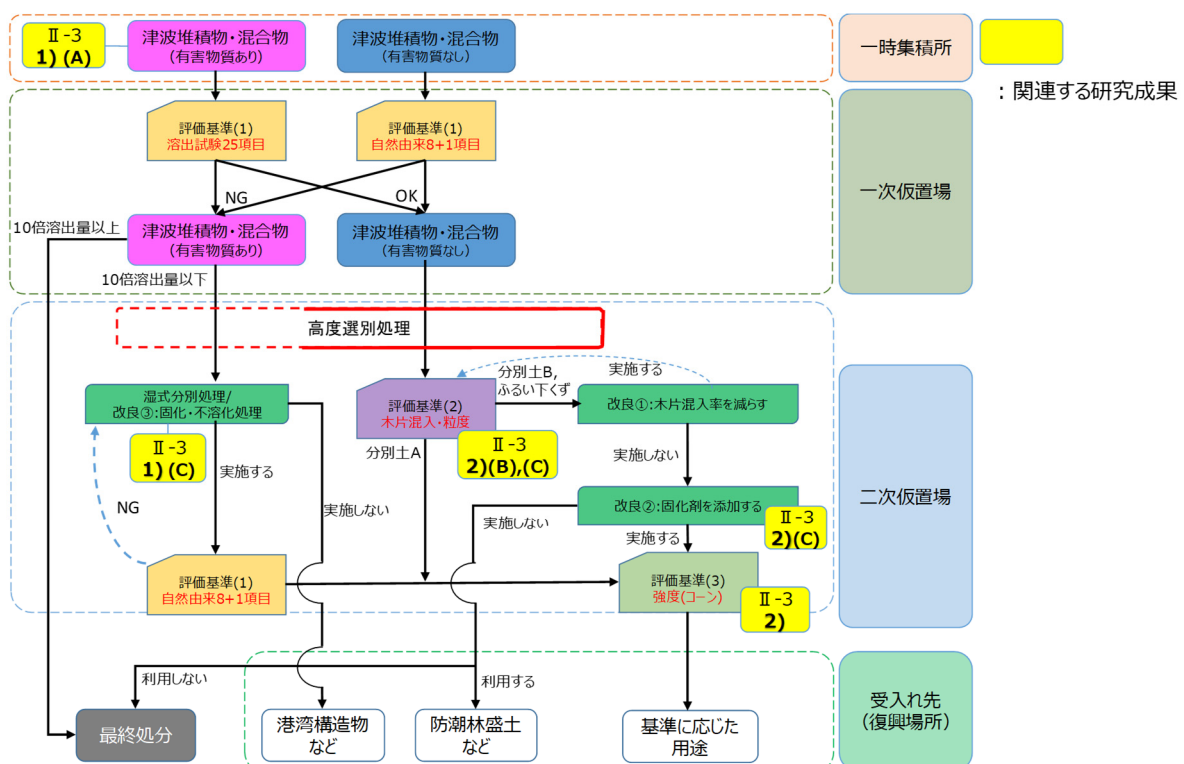


図6 品質評価を備えた津波堆積土・分別土の処理・利用までの処理フロー

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

大規模災害が発生した場合、災害発生前（事前）・発生時・発生後の各段階において、実効性のある災害廃棄物処理業務の具体的な作業内容を抽出し、それらをクラウド上で効率的に運用するためのシステム仕様を示した。本システムを支える要素研究の一部は以下、2)～5)に示す。

2) 収集運搬・処理連動モデルの開発

災害廃棄物の収集運搬過程から仮置場・受入先での処理能力などを考慮した処理フロー全過程を説明するモデルを開発した。このモデルにより、種別ごとの災害廃棄物量、一次・二次仮置場での処理能力、保管ヤード容量、広域処理量、収集運搬能力を設定することにより、各自治体が目標とする日数で災害廃棄物処理が完了するかについて検証可能となった。

3) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

今までは全国統一的な原単位を用いて発生量を予測していたが、本研究では、対象地域の建物資材のストックデータを用いるため、地域特性を反映した災害廃棄物の種類と量を算定することが可能となった。

4) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

災害廃棄物処理において問題となっていた混合物に関して、高度選別処理前後の混合物と選別品の選別率を「分別係数」と定義して処理期間ごとに算出し、災害廃棄物処理の実態と整合が取れていたことを確認した。この分別係数によって選別品の発生量予測が可能となった。

5) 分別土の利活用の促進に関する研究

津波堆積土の粒度により重金属類の吸着特性が異なること、またコンクリート片、木片の混入により重金属類溶出量に変化することを示し、夾雑物の許容混入率を提示した。また、土壤環境基準値超過の分別土に不溶化が有効であることを示した。強度の観点から、津波堆積土は、含水比・粒度調整により利用用途が広がることを示した。また、これまで木片混入分別土の利用は困難であったが、木片を肥料で置き換え、完全腐朽を模擬することにより、木片腐朽を考慮した分別土の強度特性を把握し、許容木片混入率を得る方法を示すことができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

災害対応の経験がない自治体関係者に対し、災害廃棄物処理計画、実行計画の作成、進捗管理を支援する。また 2019 年度環境省重点施策のうち、1. (2) 国土のストックとしての価値の向上の②廃棄物処理施設の整備や自立・分散型エネルギーシステムの構築を進めるとともに、大規模災害に備えた万全な災害廃棄物処理体制の構築や災害廃棄物の円滑・迅速な処理を図ること等により環境施策を通じた国土強靱化への対応に取り組む」の災害廃棄物処理に関する環境政策に貢献する。

2) 収集運搬・処理連動モデルの開発

運搬車両台数の拡充、仮置場の拡張等様々な要因による処理日程の変動や、仮置場・最終処分場の廃棄物の種別に基づく割り当てにも対応しており、災害廃棄物の種類ごとに優先的に被災地から除去する設定も可

能であることから、可燃性の災害廃棄物や毒劇物や環境汚染を引き起こす可能性のある災害廃棄物を優先的に処理する計画も設定可能で、環境に配慮した処理計画策定の一助となる。

3) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

日本全国の物質ストックデータは GIS 上に整理されており、対象自治体のハザードデータとストックデータを GIS 上で重ね合わせ、建物の被害率曲線を用いれば、地域特性に応じた災害廃棄物発生量と種類の分布を、全国どの地域でも様々な災害に対し算出することができる。そのため、地域特性に応じた災害廃棄物処理計画作成の一助となる。この方法は、災害直後の被害情報を得ることにより、発災後の発生量予測も可能である。

4) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

提案するシステムによって、処理過程における分別係数を時系列で算出でき、分別土の発生予測が可能となり利活用が促進される。また、例えば当初計画よりも分別土の発生量が大きかった場合には、一時保管ヤードが必要になるなど、自区内の仮置き場所計画の必要性の有無を、早期に判断でき、処理時間の短縮・延長のための処理設備の更新計画にも寄与する。

5) 分別土の利活用の促進に関する研究

発災前に、許容値を越える有害物質を含む津波堆積土のスクリーニングができる可能性があり、発災後の経費、時間、労力などの軽減に繋げられる。また、許容混入率以下となるように混合廃棄物を高度分別処理することで、環境安全性を担保した分別土を生産できると期待される。そして土壤環境基準値を超過する分別土が発生しても、比較的容易に行える対策である不溶化を行うことで、利活用できる可能性がある。また、発災前後に簡易実験を行うことにより、強度に関する木片混入分別土の許容混入率が得られ、また、許容値以上であっても、セメントによる改良効果が示され、分別土の利活用促進に貢献できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

1) 中野正樹、酒井崇之、神野琢真、池上浩樹、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 65-70 (2017)
「災害廃棄物・津波堆積物を想定した砂・粘土混合土砂の物性把握と有効利用への提案」

2) 鍋田稔、野口真一、中村吉男、中野正樹、加藤雅彦、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 229-236 (2017)

「東日本大震災で発生した津波堆積物の分別土砂中の夾雑物混入率に関する文献調査」

3) T. Katsumi, M. Okawara, M. Kawashima, K. Endo, H. Sakanakura, S. Iwashita, A. Takai, and T. Inui: Journal of JSCE, Vol. 5, No. 1, pp. 145-156 (doi: 10.2208/journalofjsce.5.1_145), (2017)

“Soils recovered from disaster debris - Characterization and utilization”

4) 勝見武、大塚義一、三方浩允、切川卓也、土木学会論文集 G (環境)、74 巻、3 号、pp. 126-141、(2018)
「情報通信技術に基づき蓄積された災害廃棄物処理実績の検証と分別係数の提案」

5) 谷川元治、加藤雅彦、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 439-442 (2017)

「地域特性による模擬津波堆積物を用いたヒ素等重金属類の吸着特性と潜在的危険保有量の推定」

6) 眞鍋磨弥、肴倉宏史、鈴木隆央、勝見武、乾徹、高井敦史 (2017) 第 12 回環境地盤工学シンポジウム、発表論文集、431-438

「津波堆積物を想定した河川及び海底堆積物の拡散溶出特性の評価」

7) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、土木学会論文集 G (環境)、74 巻、5 号、pp. I_195-I_202、(2018)

「災害廃棄物の適切な処理計画策定支援を目的とした収集運搬・処理連動モデルの開発」

8) T. Yamaguchi, T. Sato, M. Katoh, Journal of Environmental Management, Vol. 233, pp. 89-96 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.12.033), (2019)

“Post-depositional changes in elemental leaching from recovered soils separated from disaster waste and tsunami deposits generated by the Great East Japan Earthquake and tsunami”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 中野正樹、酒井崇之、神野琢真、池上浩樹、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 453-454 (2017)
「地震津波災害で発生した分別土砂の長期力学特性の把握」
- 2) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、神野琢真、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 461-462 (2017)
「災害で発生する津波堆積物を想定した砂・粘土混合土砂の物性把握」
- 3) 鍋田稔、野口真一、中村吉男、中野正樹、加藤雅彦、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 1537-1538 (2017)
「東日本大震災で発生した災害廃棄物等の分別土砂に関する夾雑物混入率を中心としたアーカイブ調査」
- 4) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、土木学会第 72 回年次学術講演会、pp. 647-648
「尿素肥料による想定木片混じり土の長期強度特性の把握」
- 5) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、高井敦史、熊谷静花、加藤雅彦、谷川元治、平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 283-284
「2016 年台風 10 号での豪雨災害で発生した土砂の有効利用促進のための物性把握」
- 6) Nakano, M., Sakai, T. and Nonoyama, H., Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul (Korea), 2017
“Long-term Mechanical Behavior of Disaster Debris Soil Considering Wood Chips Deterioration”
- 7) 谷川元治、加藤雅彦、第 52 回地盤工学研究発表会 (2017)
「模擬津波堆積物への鉛吸着特性評価に基づく危険鉛保有量の推定」
- 8) 谷川元治、加藤雅彦、第 28 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「地域特性を考慮した模擬津波堆積物に対するホウ素吸着特性」
- 9) 眞鍋摩弥、肴倉宏史、鈴木隆央、勝見武、乾徹、高井敦史、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 1987-1988 (2017)
「河川・海底堆積物中無機成分の拡散溶出試験による評価」
- 10) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、中野正樹、2017 年度土木情報学シンポジウム講演集、pp. 315-318 (2017)
「災害廃棄物収集運搬モデルを用いた災害廃棄物処理のシナリオ分析」
- 11) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、中野正樹、平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会、VII-059 (2017)
「災害廃棄物処理計画の策定支援を目的とした災害廃棄物収集運搬モデルの提案」
- 12) 中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、第 53 回地盤工学研究発表会、pp. 543-544、(2018)

「木片腐朽過程を考慮した木片混じり土砂の長期力学特性の把握」

13) 谷川元治、加藤雅彦、第53回地盤工学研究発表会(2018)

「模擬分別土砂へのコンクリート片混入による重金属等溶出性の変化」

14) 竹内涼、加藤雅彦、第53回地盤工学研究発表会(2018)

「模擬分別土砂への木屑片混入による鉛溶出性の変化」

15) 谷川元治、加藤雅彦、第29回廃棄物資源循環学会研究発表会(2018)

「コンクリート片混入によってヒ素溶出が増加した模擬分別土砂の不溶化」

16) 今枝龍之介、中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、H30年度土木学会中部支部研究発表会、(2019)

「豪雨災害により発生した災害廃棄物の特徴と分別土の力学特性の把握」

17) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、今枝龍之介、第54回地盤工学研究発表会(2019)

「地震・津波災害で発生が想定される木片混入分別土の長期力学特性の把握」

18) 中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、今枝龍之介、第54回地盤工学研究発表会(2019)

「想定木片混入分別土の長期力学特性の骨格構造概念に基づく解釈」

19) 中村吉男、野口真一、肴倉宏史、鴫田稔、第54回地盤工学会研究発表会(2019)

「木片の混入が分別土砂の締固めに与える影響について」

20) 中村吉男、小島淳一、小澤一喜、藤崎勝利、池尻健、第54回地盤工学会研究発表会(2019)

「分別土砂の品質管理における落球探査試験の適用性について」

7. 研究者略歴

研究代表者：中野 正樹

名古屋大学大学院工学研究科修了、工学博士、現在、名古屋大学大学院工学研究科教授

研究分担者

1) 勝見 武

京都大学大学院工学研究科修了、現在、京都大学大学院地球環境学堂教授

2) 谷川 寛樹

九州大学大学院工学研究科修了、現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授

3) 加藤 雅彦

名古屋大学大学院生命農学研究科修了、現在、明治大学農学部講師

4) 酒井 崇之

名古屋大学大学院工学研究科修了、現在、名古屋大学大学院工学研究科助教

5) 肴倉 宏史

北海道大学大学院降格研究科修了、現在、国立研究開発法人国立環境研究所主任研究員

6) 遠藤 和人

京都大学大学院修了、現在、国立研究開発法人国立環境研究所主任研究員

7) 江種 伸之

九州大学大学院工学研究科修了、現在、和歌山大学システム工学部教授

Ⅱ．成果の詳細

本研究は 3 つのサブテーマからなる。最終報告会での委員からの指摘もあり、まず本研究の中心となる管理システムの全体像を示したのち、そのシステムを支える要素研究を紹介する。すなわち、Ⅱ－1 がサブテーマ(3)、Ⅱ－2 がサブテーマ(1)、Ⅱ－3 がサブテーマ(2)の順番とし、成果を報告する。

Ⅱ－1 発災前・後から処理処分・利活用までの災害廃棄物等処理事業管理システムの検討【サブテーマ(3)】 [要旨]

本研究は、大規模災害において、災害処理にあたる市町村レベルの自治体が、処理・利用および進捗管理などの災害廃棄物等処理事業を実施できる管理システムの提案を目的とした。また本システムに組込まれる 2 つのモデルを提案した。以下に主な成果を示す。

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

災害廃棄物処理管理システムの要件定義書を作成したことで、システムを利用する状況（平時・発災前、発災後）における必要な情報と、各情報を出力する為に必要な機能を体系的に整理することができた。また、本研究のサブテーマで研究を進めている廃棄物量の推定に係る手法や数値モデル、処理計画に必要な情報を出力するシミュレーションモデルなどの様々な機能を追加・連携することが可能な統合プラットフォームとしてのシステム全体像を把握することができた。

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

四日市市だけでなく周辺地区（北勢地域）も対象とし、津波被害や地盤被害を考慮した上で、最短時間の輸送経路を提案することが可能となった。GIS データを用いるため、他地域でも津波浸水域や液状化のハザードマップや仮置場の候補地のポリゴンデータがあれば、シミュレーション可能となる。

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

各地における災害廃棄物の発生量と質、仮置場の最大保管量や位置、最終処分場の処理能力や位置、各施設をつなぐ道路の距離や車両速度、そして収集運搬車両や分別破碎機器の性質や台数を条件として入力することにより、災害廃棄物処理に要する日数を算出するモデルを開発した。本モデルを活用することで、各自治体が計画する災害廃棄物処理計画における条件下で、目標とする日数で災害廃棄物処理が完了するかについて、検証可能となった。

1. はじめに

東日本大震災では約三千万トンという大量の災害廃棄物等が発生し^{1)、2)}、復旧・復興の妨げとなった。このような大規模災害が発生した場合、迅速かつ効率的に災害廃棄物等を処理していくためには、処理実行計画の策定や更新に対し、処理過程において逐次的に入ってくる情報をリアルタイムで利用できる枠組みが重要となる。また災害処理事業に直接携わる各地域（地方自治体）に対しては、発生する廃棄物性状の予測、処理方法の策定、処理過程における災害廃棄物の量・質の動きの把握、復旧・復興計画における復興資材の利用計画も踏まえた統合的な処理事業を、逐次実行・更新できる機能が必要になる。

2. 研究開発目的

本研究は、大規模災害において、災害処理にあたる市町村レベルの自治体が、処理・利用および進捗管理などの災害廃棄物等処理事業を実施できる管理システムの提案を目的とする。図 1 に災害廃棄物等処理事業管理システムの概要を示す。平時・発災前の日常業務、災害廃棄物処理計画の作成だけでなく、発災後の災害廃棄物等の処理・利活用も対象にして、発災直後の情報をもとにした災害廃棄物実行計画の作成、その後

の進捗管理と実行計画の更新の効率的な実施を支援する。本研究はサブテーマ(3)に対応し、以下、管理システムの提案およびシステムに組み込まれる2つのモデルについて説明する。

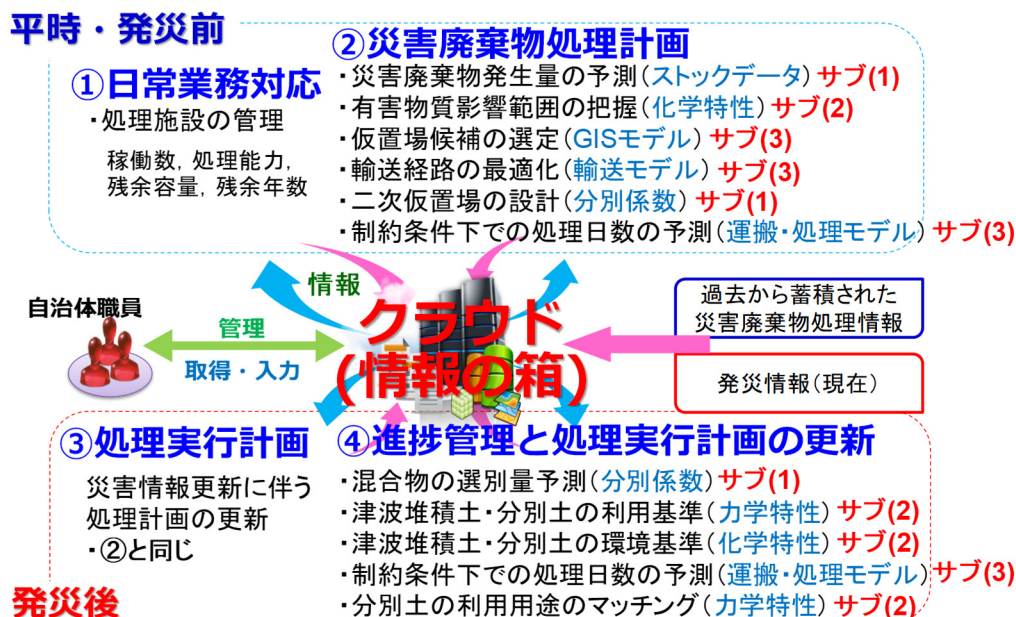


図1 災害廃棄物等処理事業管理システムの概要

3. 研究開発方法

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

「災害廃棄物等処理事業管理システム」の要件定義を行った。要件定義とは、本システムを開発するためにまず初めに行う作業で、システム利用者(本研究チーム)の要求を整理し、解決策を決定(定義)することである。本要件定義により、後述する各サブテーマの研究成果、例えば発災前の事前情報・既存情報から処理計画の策定に必要な廃棄物発生量や処理期間を算出する機能などが確実に本管理システムに組み込まれることになる。要件定義の実施過程は、①システム化コンセプトの整理、②システムグラウンドデザイン、③システム利用フローの整理、④システム要件定義書の作成の4過程であり、その具体を以下に示す。この過程を経て④に示す要件定義書が完成する。これらの過程では、研究チーム、東日本大震災で災害廃棄物処理事業に携わった自治体職員などとのディスカッションを行っている。

① システム化コンセプトの整理

研究テーマに沿ったシステム構築のコンセプトを整理。災害廃棄物処理計画に必要なシステムコンセプトを洗い出し。

② システムグラウンドデザイン

システム化コンセプトをブレイクダウンし、システムの全体像と機能分類を整理。

③ システム利用フローの整理

グラウンドデザインに沿ったシステムモックアップを作成し、研究協力者、有識者と共に災害廃棄物処理フローを整理すると共に、システムで処理される情報の入力・出力データを整理。

④ システム要件定義書の作成

①～③で整理した情報をもとに、IT技術者向けのシステム階層の基本コンセプトとして、システム構築観点でのシステム要件定義書を作成

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

図 2 に GIS モデル作成およびシミュレーションの概要図を示す。三重県より入手した一次仮置場、二次仮置場、最終処分場の位置情報をハザード情報（災害情報）などの GIS データと重ね合わせることで、災害廃棄物輸送の所要時間を算出した。なお、ハザード情報としては、L1、L2 の地震と津波の情報を利用している。また、緊急輸送道路の通行規制も考慮している。得られた結果から平時と災害時における所要時間を比較し、さらに、利用できなくなる仮置場を抽出する。本検討では、四日市市だけでなく周辺地区（北勢地域）も含めたシミュレーションも行った。この際、ジャンクションにおける U ターンを許可するか否か、一方通行、右左折規制の有無など、様々なケースを検討した。

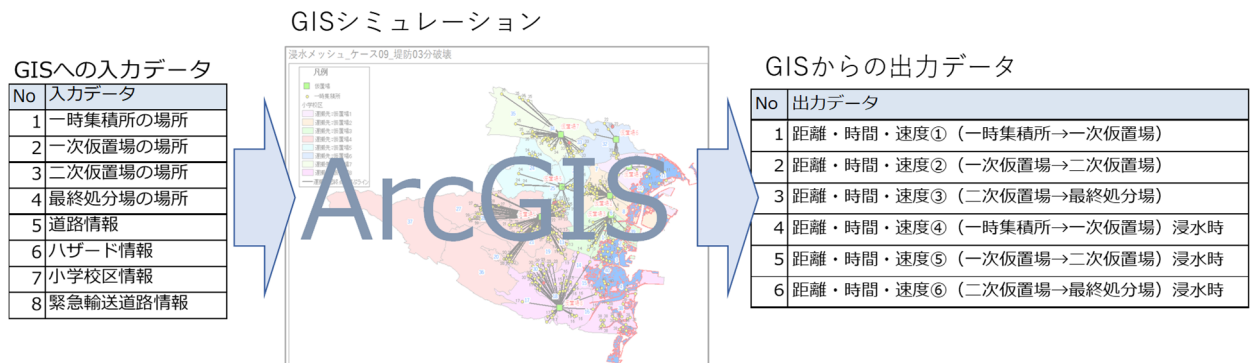


図 2 四日市 GIS モデル作成およびシミュレーションの概要図

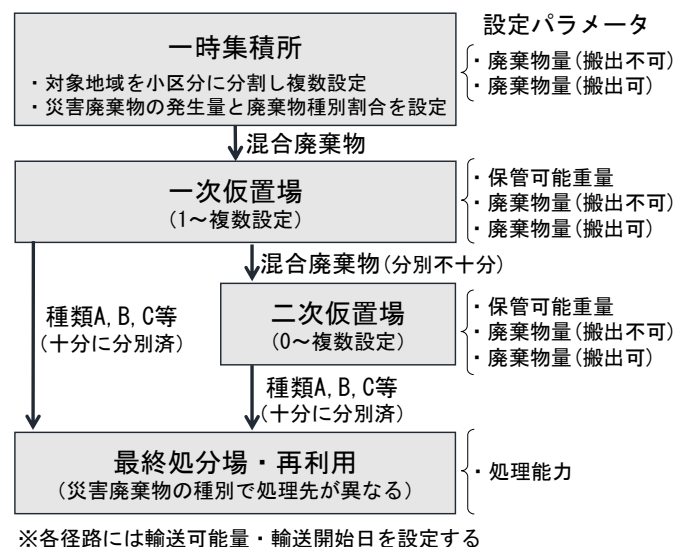


図 3 モデルの概念図

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

一次集積所から最終処分場までの処理フローにおいて、災害廃棄物の処理および輸送計算を行う収集運搬モデルを提案した。モデルの概要を図 3 に示す。本モデルでは、一時集積所や一次・二次仮置場へと搬入された災害廃棄物が、実際には破碎・分別処理等を経て搬出されるため、分別・破碎処理等を搬出可能変換作業と定義し、その作業効率を搬出可能変換量としてパラメータ化し、災害廃棄物処理における処理運搬に要する日数を計算する。この際、一時集積所、各仮置場、最終処分場を自由に接続可能なモデルとなっている。図 4 は、一時集積場や仮置場における搬出可能変換量の概念図を示す。表 1 は本モデルで設定するパラメー

タを示す。一次・二次仮置場に搬入された災害廃棄物は、破碎や選別といったその施設で行うべき処理を終えておらず、そのままでは搬出不可能な状態にある。こうした災害廃棄物は、破碎・分別処理等の搬出可能変換作業を経て、搬出可能な状態に変化すると定義できる。ここで、搬出不可能な状態にある災害廃棄物量を廃棄物量(搬出不可)、搬出可能な状態のものを廃棄物量(搬出可)とし、本モデルではこの2つの合計量が各施設の保管可能重量を超えないように制御している。

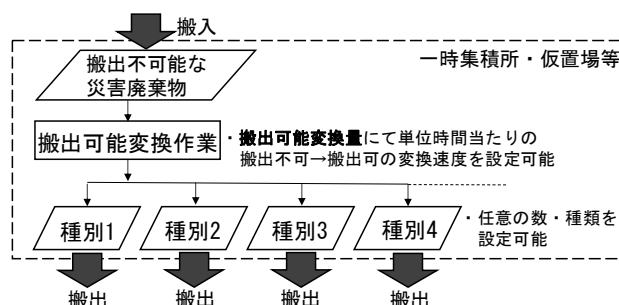


図4 搬出可能変換量の概念図

表1 輸送処理を制御するパラメータ

初期ごみ量[t]	各一時集積所に集積される災害廃棄物の初期値、一時集積所ごとに設定する
保管可能重量[t]	各施設で保管可能な災害廃棄物の最大量
廃棄物量[t] (搬出不可)	一次・二次仮置場から搬出するための各処理が終わっておらず、搬出できない災害廃棄物量、災害廃棄物の種別ごとに算出する。
廃棄物量[t] (搬出可)	一次・二次仮置場から搬出するための各処理が終わり、搬出可能な災害廃棄物量、災害廃棄物の種別ごとに算出する。
搬出可能変換量 [t/day]	各施設に災害廃棄物が搬入され同施設から搬出可能となるまでの作業効率、各一時集積所、一次仮置場および二次仮置場に設定する
処理能力[t/day]	一日に処理できる災害廃棄物量、最終処分場ごとに設定する
輸送可能量 [t/hour]	単位時間内に搬出先へ輸送できる廃棄物量、搬出経路ごとに設定する[t/hour]
輸送開始日[day]	発災から各経路が使用開始となるまでに要する日数。経路ごとに設定する。

東日本大震災で甚大な被害を受けた岩手県山田町を対象に、本モデルを適用し、モデルの妥当性を検証した。岩手県山田町を検証対象とした理由は、同町は大量に発生した災害廃棄物の処理過程に関する詳細な記録が残り、災害廃棄物の種別や発生量、収集運搬車両の台数や積載量、仮置場や最終処分場の位置、および分別破碎処理に用いられた各種機械について、時系列に沿った詳細な記録があるからである³⁾。これは、II-2の3)において取得したデータであるが、開発モデルの検証をする上では、最適なデータであった。検討においては、本記録をもとにモデルの初期値と各種パラメータを設定した。また、本研究で対象としている南海トラフ巨大地震における被災が想定される都市として、三重県四日市市も対象として適用可能であるか検証を行った。

4. 結果及び考察

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

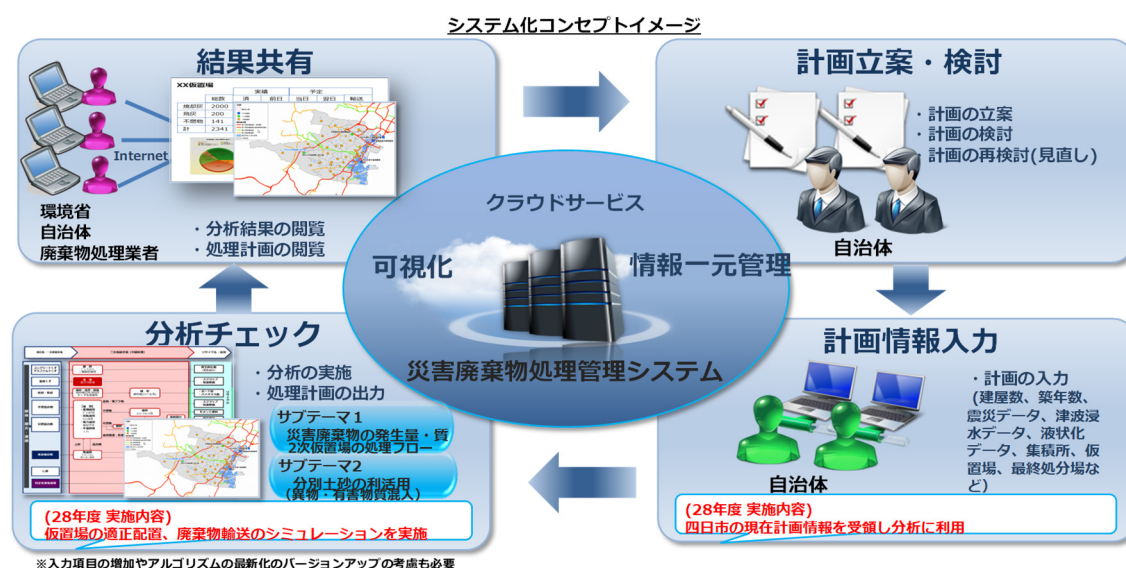
① システム化コンセプトの整理

災害廃棄物等処理システムは、大規模災害の発生に備えて自治体職員（市町村）が災害廃棄物処理管理に必要な情報をリアルタイムで集計・分析しクラウドサービスにて情報を共有・可視化する。産官学民の大規

模災害の教訓、実データ、研究により蓄積された情報をシステムに蓄積し、廃棄物処理計画や、廃棄物量推定などの災害廃棄物処理管理に必要な情報を出力する機能を持つようにする。

システム化コンセプトで整理した要求事項は以下の通りである。

- システムの利用者は自治体職員とする
- クラウドサービスを利用して、集計・分析された情報の共有化
- 過去の廃棄物処理実績や研究により蓄積された情報をシステムに実装
- 平時・発災前に既存処理施設の情報を登録し管理を行う
- 平時・発災前は、既存処理施設、廃棄物発生量推定から災害廃棄物処理計画を策定する
- 発災後は、平時に更新された最新情報と災害廃棄物発生量をもとに、処理に要する日数を含め、災害廃棄物処理実行計画を作成する。
- 発災後は、処理実績や災害廃棄物量の推定結果等の情報を更新し、処理実行計画の進捗管理を行う。
- 必要に応じて、処理実績による処理実行計画を更新すると共に、再利用マッチングを行う



② システムグランドデザイン

システムのグランドデザインにおいて、システムコンセプトで整理した要件をもとに「災害廃棄物等処理事業管理システム」の全体像と機能分類を整理した（図7）。また、大規模災害の発災前に利用する機能と発災後に利用する機能の整理も行った。

＜発災前機能＞

- ユーザ管理、施設情報管理、シミュレーション、処理計画作成

＜発災後＞

- DiMAPS 連携による災害実績データの取り込み、再シミュレーション、実行計画の作成と更新、進捗管理



図7 システムグランドデザイン

災害廃棄物処理事業管理システム

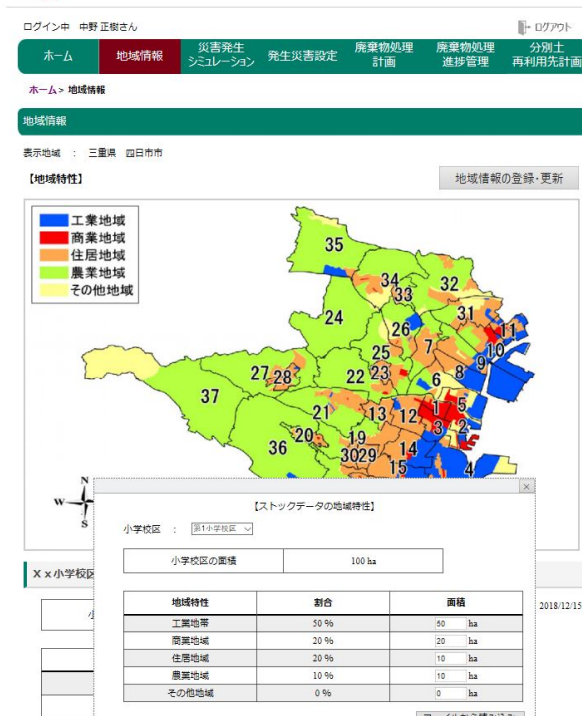


図8 システムモックアップ画面の例

③ システム利用フローの整理

システムグランドデザインをもとに、「災害廃棄物等処理管理システム」の利用をイメージできるシステムモックアップを作成した。なおシステムモックアップとは、機能は実装せず画面イメージのみを作成し、システム利用イメージを共有する手法のことである。ここでは、システムモックアップ画面として、地域情報、災害発生シミュレーション、発生災害設定、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画を作成した。図8には地域情報、廃棄物処理計画の一面を示している。

システムモックアップを利用して、本研究チーム、東日本大震災で災害廃棄物処理事業に携わった自治体職員などとのディスカッションを重ね、システム利用フローの整理を行った。また、利用フローに沿ったシステムに蓄積される情報の入力・出力データの整理も実施した。

図9は、平時・発災前における日常業務・災害廃棄物処理計画の作成のシステム入出力データのイメージである。システム利用者である自治体職員は、自分の自治体対象地域を選定する(①対象地域設定)。それが入力データとなり、出力データとして、地域特性、すなわち焼却施設など処理施設の情報、PRTR情報、またⅡ-2で説明するストックデータ(対象地域のGIS上に蓄積された建築物1棟ごとの建築資材データ)などを得る。これらの情報は、日常業務として管理・更新される。

発災前の処理計画の作成についてのステップにおいては以下のデータのやり取りが行われる。職員は、対象とする災害の種類、規模を入力する(②災害外力設定)。そのデータは、先の地域特性の情報を得て、出力データとして対象地域の被害予測結果を得る。その結果は、本研究成果であるサブテーマ(1)のストックデータを用いた廃棄物発生量予測(Ⅱ-2、1)、Ⅱ-3、3))、サブテーマ(2)の有害物質汚染範囲予測(Ⅱ-3、1))により、出力データとして、廃棄物発生予測、すなわち災害廃棄物発生量、発生分布、汚染物質の漏洩範囲などを得る。GIS上で被災状況が得られたことから、サブテーマ(3)のGISモデル(Ⅱ-1、2))により、出力データとして、通行可能道路や場所、さらに一次・二次仮置場の利用可能空間を得る。職員は、③処理計画設定条件として、処理期間、輸送能力、一次・二次仮置場処理能力などを入力することで、サブテーマ(1)の分別係数データ(Ⅱ-2、3))、サブテーマ(2)の処理機械と必要面積、サブテーマ(3)での災害廃棄物収集運搬モデル(Ⅱ-1、3))を用いることにより、発災前の処理計画の作成が出力データとして得られる。

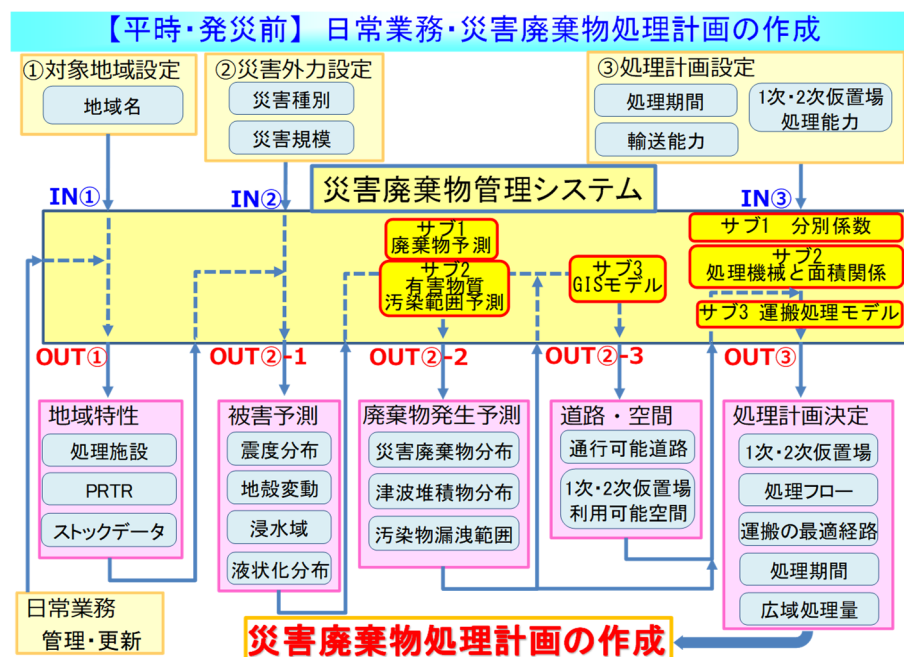


図9 システム入出力データのイメージ(平時・発災前)

図 10 は、発災直後の処理実行計画作成のシステムである。平時・発災前の処理計画作成と流れはほぼ同じであるが、不確実であった災害外力、すなわち災害の種類と規模が明確になり、被害予測ではなく被害情報を得ることになる。この情報は DiMAPS など様々な機関が提供している情報を利用する。その後の入出力データは更新されたデータになり、そのデータに基づき、処理実行計画の作成が出力データとして得られる。

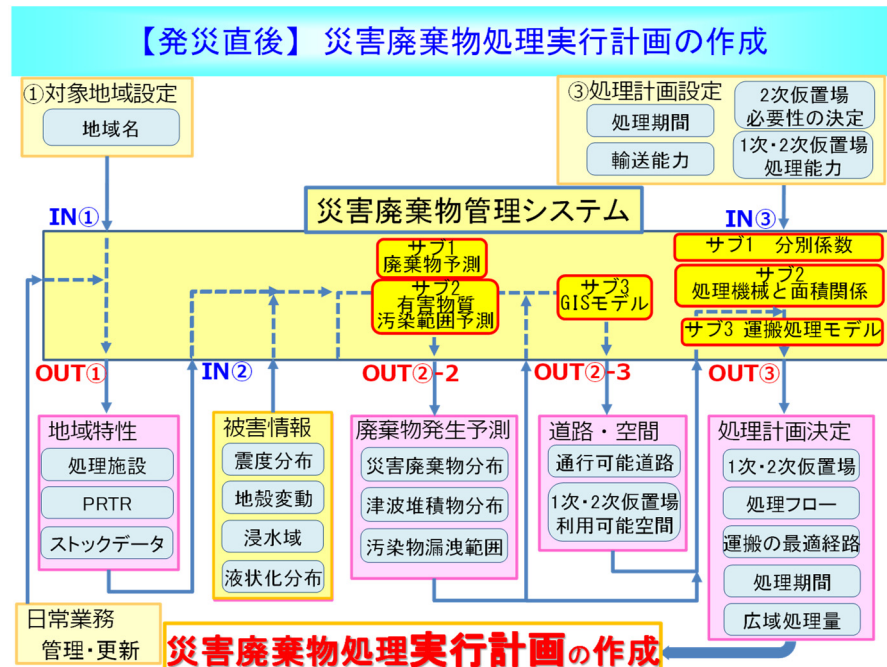


図 10 システム入出力データのイメージ(発災直後)

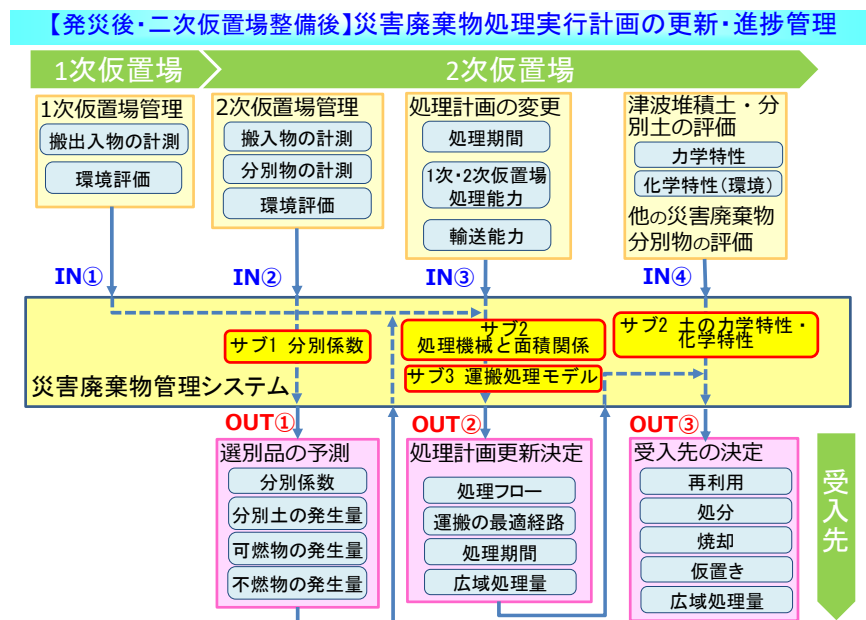


図 11 システム入出力データのイメージ(発災直後)

図 11 は、発災後の二次仮置場整備後の進捗管理と処理実行計画作成の更新のシステムである。各搬出入地点(被災地・一次仮置場・二次仮置場・一時保管ヤード・中間処理施設等)において、搬出入トラックに対し、日時や質量に紐づけられた様々なデータを蓄積し、データベース化させる。復旧が進み一次仮置場での

災害廃棄物発生量は計測による予測に変わる（Ⅱ－２、２）。また二次仮置場に運ばれた廃棄物のうち、高度選別処理が施された廃棄物については、高度分別処理前後の各組成の質量割合を関係づける「分別係数」を算出し、可燃物、不燃物、分別土の発生量を予測し、必要に応じて処理計画の変更を行う（Ⅱ－２、３）。本研究で注目している津波堆積土、分別土については、サブテーマ(2)の成果である津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性、化学特性の把握と品質保証（Ⅱ－３、１）、２）、４）により、利活用のための品質評価と改良による品質向上等を行い、復興資材として利用するためのマッチング情報を提供する。

④ システム要件定義書の作成

システム化コンセプト、システムグラウンドデザイン、システムモックアップを利用してシステム利用フロー、利用フローに沿ったシステムに蓄積される情報の入力・出力データの整理を実施し、システム利用フロー、入出力データの情報をもとに、システム構築に必要な要件をまとめたシステム要件定義書を作成した。システム要件定義書とは、３．１）にも示した通り、開発するシステムの仕様を決める重要なステップであり、システム上で行う業務やシステムのあるべき姿を定め、システム利用者の要求を整理して具現化の方法を検討し、IT 技術者向けのシステム階層の基本コンセプトを取り纏めた書類のことである。

要件定義の詳細は、別書「災害廃棄物処理事業管理システム要件定義書 第 1.0 版」に記載している。システム構築に必要な 4 つの要件定義項目、すなわち業務要件定義、機能要件定義、非機能要件定義、運用要件定義の定義概要を以下に示す。

表 2 システム利用者一覧

No	利用者	説明・事業役割
1	自治体（都道府県）	マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画を実施する。
2	自治体（市区町村）	マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画を実施する。
3	処理業者	マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、分別土再利用先計画の閲覧及び、廃棄物処理進捗管理を実施する。
4	国（環境省）	マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画を閲覧する。
5	研究者	マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画を閲覧する。

表 3 サブシステム概要

No	サブシステム	概要
1	マスタ管理	ユーザ情報、施設情報、地域情報等システムで共通的に利用する情報を管理する。
2	災害発生シミュレーション	災害種類や災害特性、災害規模等から、災害廃棄物発生量、津波堆積物発生量、有害物質発生量をシミュレーションする。
3	廃棄物処理計画	災害発生シミュレーションの算出結果、地域特性や GIS データ等を使用して、災害廃棄物量の選別、仮置場選定を行い、災害廃棄物処理計画書を作成する。
4	廃棄物処理進捗管理	災害廃棄物処理計画書に基づいて実施される復興処理について、仮置場や処理施設での作業進捗状況を管理する。
5	分別土再利用先計画	分別土の品質評価フローに基づいて、再利用先の計画を作成する。

(A) 業務要件定義

システム化の対象となる業務の流れを明確化し、定義（決定）したものである。業務要件定義では、災害廃棄物処理管理システムが利用される業務についての概要と、その業務を行うシステム利用者の定義(表2)、システムが持つサブシステムの定義（表3）を行っている。業務要件を行うことで、業務要件定義では、システムコンセプト、グランドデザインをもととする業務（災害廃棄物処理事業）に対してのシステムの必要性と業務を遂行する人、どのように事業を進めるかの観点で定義をまとめている。

(B) 機能要件定義

構築するシステムにシステム利用者が求める機能のことであり、システムの開発プロジェクトで構築するシステムの目標となるため、プロジェクトのゴール設定といえる。具体的には、システムの操作画面や表示・出力したい各種の帳票およびシステムで自動化したい項目の要件を決定（定義）するものである。機能要件定義では、業務要件で定義したサブシステムが業務を遂行する為にシステムが持つべき機能とその機能を IT によってどのように実現していくかを定義した。定義した要件は以下の通りである。

- 機能一覧、マスタ管理、災害発生シミュレーション、廃棄物処理計画、廃棄物処理進捗管理、分別土再利用先計画、外部システム連携、テーブル定義

機能実現のための概念レベルで設計を実施し、必要な情報を洗い出した上でのデータベース設計（テーブル定義）と各機能エンジンへの入出力データを定義している。各機能に対して、本研究で検討された数値モデルやアルゴリズムレベルの実装設計は次期システム構築の時期に実施することを想定している。なお、要件の例として、ユーザ管理のマスタ設定例を図12に、各機能エンジンへの入出力データは前述の図9～11、データベース上の各テーブル同士の関係を示した図（ER図、Entity Relationship Diagram）を図13に示す。

◆権限マスタ

項目名	権限ID	権限種別
属性	数値	文字列
No.		
1	1	マスタ管理
2	2	災害発生シミュレーション
3	3	廃棄物処理計画
4	4	廃棄物処理進捗管理
5	5	分別土再利用先計画

◆権限グループマスタ

項目名	権限グループID	権限ID	権限レベル
属性	数値	数値	文字列
No.			
1	1	1	編集
2	1	2	編集
3	1	3	編集
4	1	4	編集
5	1	5	編集
6	2	1	閲覧
7	2	2	閲覧
8	2	3	閲覧
9	2	4	編集
10	2	5	閲覧

自治体職員用の権限グループ。
すべてのサブシステムを編集可能。

処理業者用の権限グループ。
廃棄物処理進捗管理のみ編集可能で、残りは閲覧のみ可能。

◆ユーザマスタ

項目名	ユーザID	ユーザ名	地域ID	権限グループID
属性	数値	文字列	数値	数値
No.				
1	1	自治体 職員A	1	1
2	2	自治体 職員B	2	1
3	3	処理 業者A	1	2
4	4	処理 業者B	2	2

図12 ユーザ管理のマスタ設定例

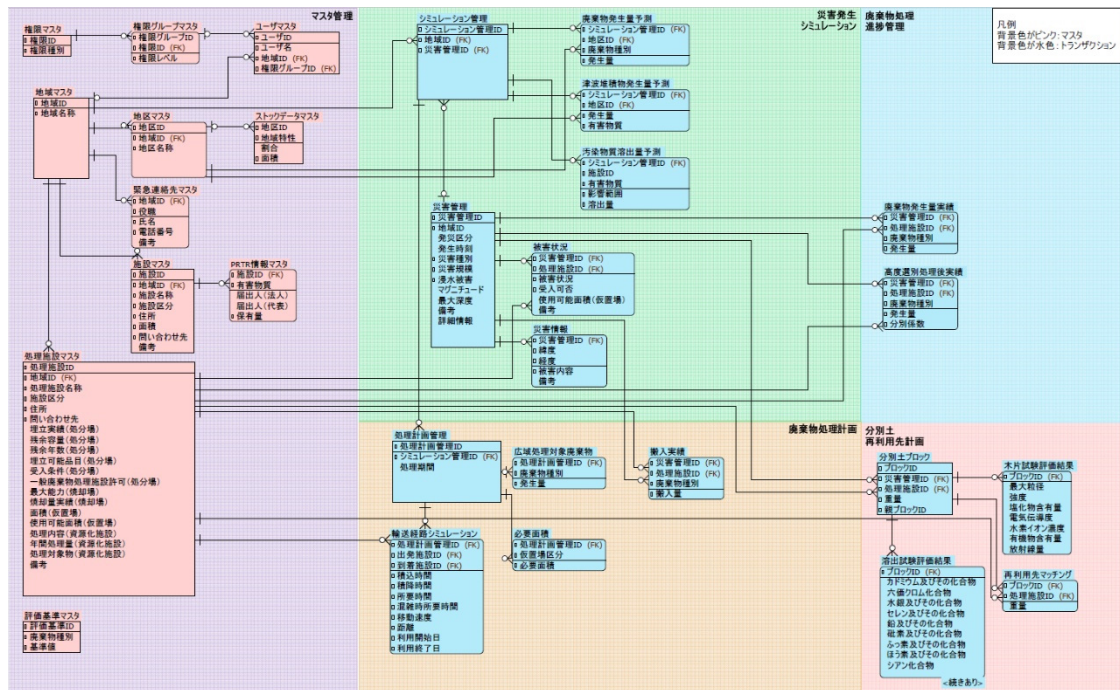


図 13 データベース上の各テーブル関係を示す ER 図

(C) 非機能要件定義

機能要件以外の全般が含まれ、主にシステムの強度や品質に関わるものである。IPA（情報処理推進機構）では、つぎの非機能要件を 6 大項目として定義している。すなわち、i 可用性（システムの継続利用）、ii 性能・拡張性（システム性能、将来の拡張）、iii 運用・保守性（運用と保守のサービル）、iv 移行性（現行システムからの移行）、v セキュリティ（セキュリティの確保）、vi 環境・エコロジー（設置環境や規格）に関する項目である。

本研究では、これまでの災害廃棄物処理業務で生じた各種の課題解決策として実行（実現）したい各機能の稼働率や動作時間・出力情報の精度他といったシステム性能およびシステム実装段階でのセキュリティ・保守サービスなどの要件を決定する。以下が本研究における非機能要件である。

- 災害廃棄物処理事業管理システムの利用者、信頼性・可用性・安全性に関する要件、拡張性に関する要件、セキュリティに関する要件、性能に関する要件、監視に関する要件、バックアップ・リストアに関する要件、操作性に関する要件、制約事項

本研究で検討した「災害廃棄物処理事業管理システム」は、いつ起こるかわからない大規模災害に対応するシステムとして高い信頼性と可用性が求められる。システムのサービス提供時間は 24 時間、365 日稼働を基本とし（表 4）、システム障害が発生させないための対策として、負荷分散装置の配置やディスクの冗長化を想定したサーバ構成を検討している。万が一システム障害が発生した場合に備えて、バックアップ・リストアに関する要件、障害発生時の復旧目標を定めている。

表 4 信頼性 障害発生時の復旧目標定義

優先度	解決目標時間	優先度の定義
緊急	6 時間以内	業務全体に支障をきたす問題
重要	1 営業日以内	部分的に支障をきたす問題
軽微	1 週間以内（5 営業日）	ただちに対応が必要でない問題

(D) 運用要件定義

運用要件は、システムの運用に関する要件が文書化されたものである。たとえば、あらゆるシステムには運用業務が付随しており、開発段階で運用のことを想定していなかったために、現場の負荷やコストの増大、人的リソースのショートが起きることは少なくない。つまり、システムを実際に業務で使用することを想定し、運用要件を定義しておくことは重要である。以下が本研究における運用要件である。

- 運用対象システム、運用支援体制、運用対応時間、運用対応業務

システムを運用していくための体制として、表 5 に示すように、利用者として自治体の情報管理責任者、システム運用事業者のプロジェクトマネージャ、システム運用マネージャ、システム運用担当者の配置を想定している。システム運用事業者の各担当が行う対応業務として、利用者である情報管理責任者からの問い合わせや、障害発生時の原因究明、復旧業務を定義している。

表 5 システム運用体制役割定義

担当組織	機能／役割	業務内容
自治体	情報管理責任者	災害廃棄物処理事業管理システムの運用責任者であり、システムに必要な情報を集約し、システム運用支援メンバーへの作業依頼、障害問合せの役割を担う。
担当事業者	プロジェクトマネージャ	システム運用マネージャ、システム運用担当者の管理責任者であり、配下の担当者と連携し業務の実施を管理する。
	システム運用マネージャ	システム利用者への教育、啓蒙、品質向上対策等、定期的に業務とシステムの差異を分析し、問題点の洗い出し、改善策の検討、その実施を行う。
	システム運用担当者	必要データの入力や更新等を実施する。障害発生時には、障害の一次切り分けとサービス復旧オペレーションを実施する。

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

表 6 は GIS シミュレーションのケースを示す。一時集積所、一次仮置場、二次仮置場、最終処分場までのルートについて、浸水、液状化、道路規制の有無を条件に 10 ケースとした。図 14 には、ケース 1 についての一時集積所から一次仮置場 A、B への輸送図を示す。輸送にかかる所要時間は、浸水、液状化、道路規制の有無によって変化する。例えば表 7 が示すように一次仮置場から二次仮置場までの各ルートにおけるケース 1、2、7 を比較する。地震による浸水を考慮し（ケース 2）、さらに道路規制されると（ケース 7）、何も考慮しなかった場合（ケース 1）に比べ、移動距離は最大で 2 倍以上になり、所要時間も増加する。また、図 15 に示すように、L2 地震による浸水（ケース 3 と 8）では、廃棄物処理計画での二次仮置場 A は、津波の被害により利用不可となることが、本シミュレーションでわかった。震災規模や津波、液状化などの状況に応じて仮置場候補地が利用できるかを事前に本シミュレーションで確認して、計画しておくことが有効である。

図 16 に四日市市周辺も含めた北勢地域に対するケース 3 の GIS シミュレーション結果を示す。四日市市みの場合と同様にシミュレーションすることが可能で、日本全国各地でシミュレーションが可能であることを示している。災害廃棄物処理が自区内処理だけでは難しく、広域処理が必要となる際、本シミュレーションは有用となる。

表 6 想定ケース

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
浸水	なし	L1	L2	なし	なし	なし	L1	L2	なし	なし
液状化	なし	なし	なし	L1	L2	なし	なし	なし	L1	L2
道路規制	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり	あり	あり

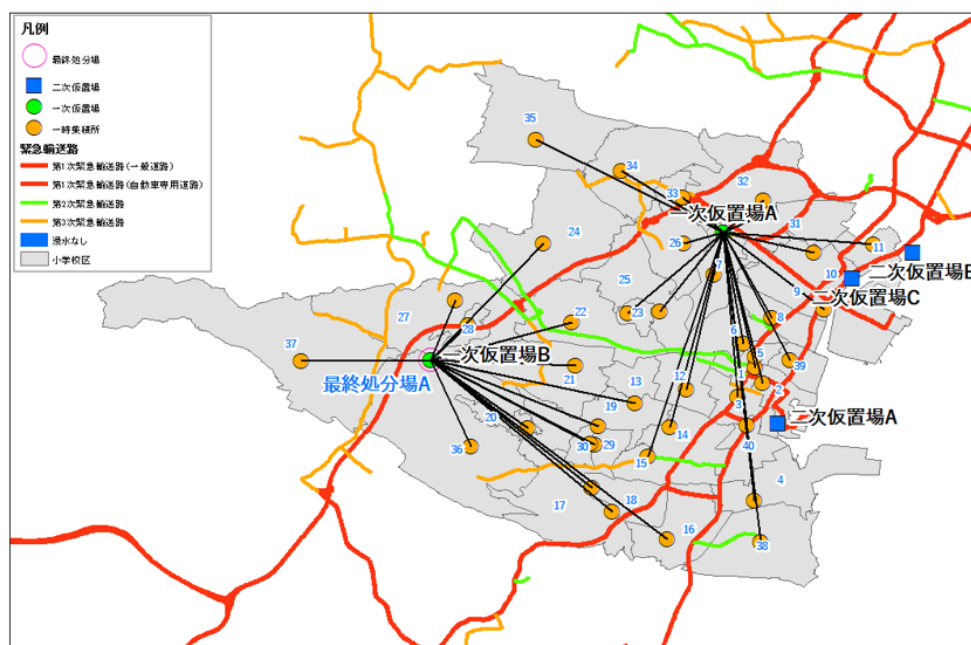


図 14 一時集積所から一次仮置場への輸送図（ケース 1、四日市市のみ）

表7 一次仮置場から二次仮置場への輸送距離と所要時間の比較

ケース	浸水	液状化	道路規制	ルート1の距離・所要時間	ルート2の距離・所要時間
1	なし	なし	なし	5306m・13.0min	12272m・28.2min
2	L1	なし	なし	8697m・15.6min	21941m・34.6min
7	L1	なし	あり	11206m・24.8min	23681.2m・52.3min

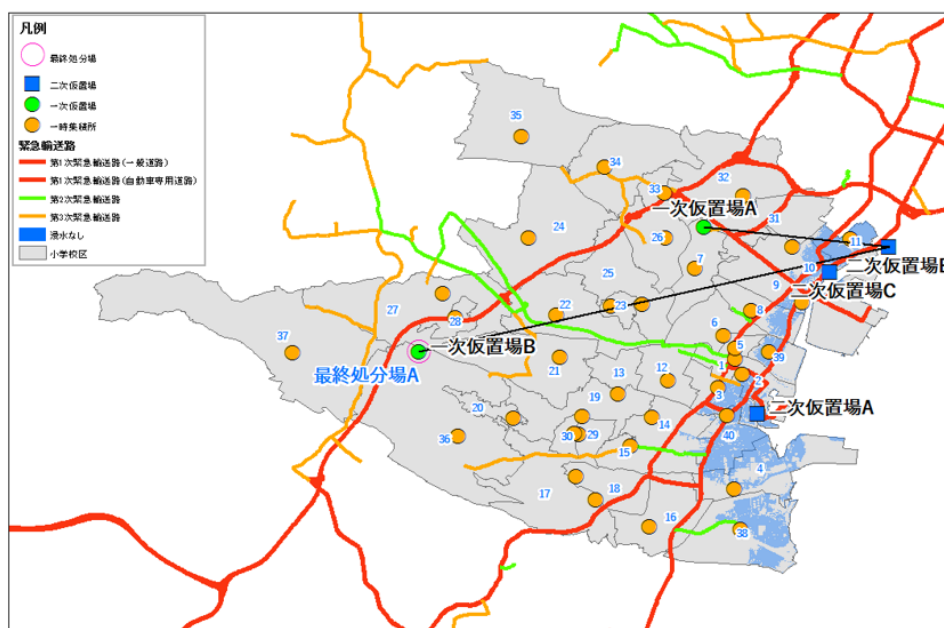


図 15 浸水域と二次仮置場(ケース 3、四日市市のみ)

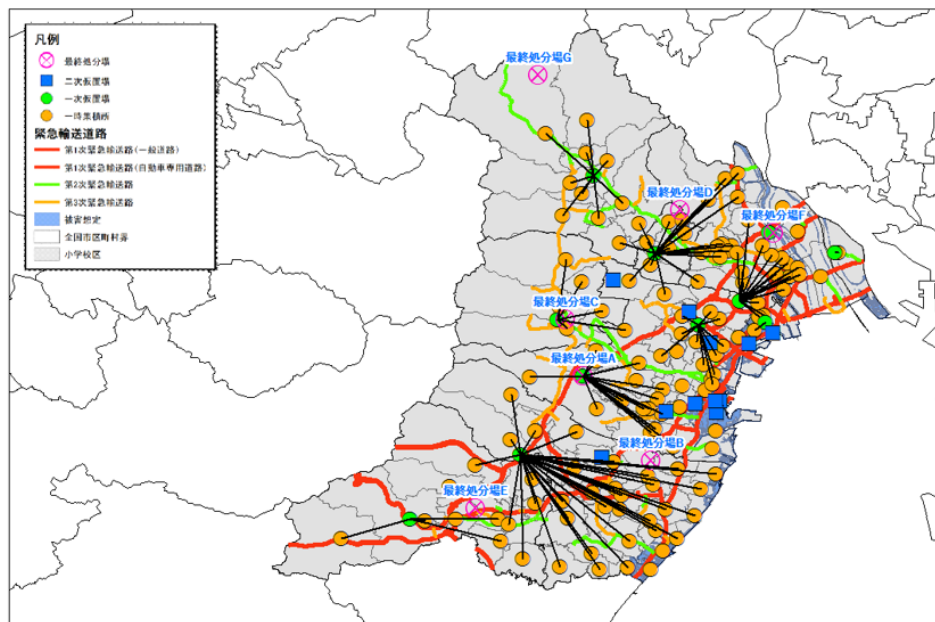


図 16 一時集積所から一次仮置場への輸送図（ケース 3、広域処理想定）

3）災害廃棄物収集運搬モデルの提案

図 17 に岩手県山田町における東日本大震災時の災害廃棄物処理フローを示す³⁾。また、表 8 に一次仮置場、二次仮置場の保管可能重量および搬出可能変換量を示す。搬出可能変換量については、文献 3) を参考に決定した。これらのパラメータを用いてモデルの検証をしたところ、東日本大震災において山田町の災害廃棄物処理で実際にかかった日数は、平成 23 年 12 月 7 日から平成 26 年 5 月 31 日までの 906 日であった。一方、モデルによる解析では、処理完了日は 991 日となっており、災害廃棄物処理に要する期間を 1 割ほど過大評価した。この原因としては、本モデルでは各仮置場に仮置き可能な廃棄物の最大重量を、保管可能重量と定義し各仮置場にパラメータとして設定することが必要となるが、これの入手が困難だったためである。本研究では、各一時・二次仮置場において搬入された廃棄物量から搬出された廃棄物量を引くことで、各月日の廃棄物保管重量を計算し、これが最大となった日の保管重量を保管可能重量として設定した。この方法では、計算される保管可能重量は、余裕をもって設計される現実の値と比較し小さくなる可能性があるため、保管可能重量の設定において現実よりも小さな値が採用され、仮置場の使用に余裕がない設定となったことなどが推察されうる。しかし、今回の過大評価は 1 割程度であったため、本モデルは実際の災害廃棄物処理を概ね再現でき、概ね妥当な処理日数を算出可能であるという結論を得た。

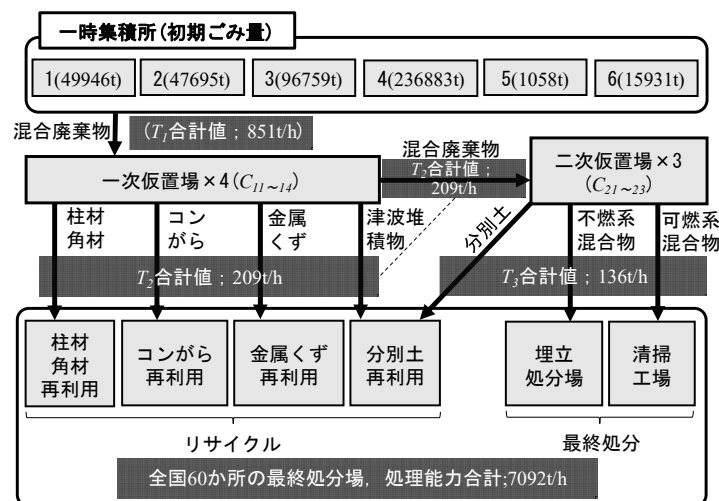


図 17 東日本大震災時の災害廃棄物処理フロー（岩手県山田町）

表 8 一次仮置場・二次仮置場の保管可能重量および搬出可能変換量

パラメータ名/各種日数		パラメータ値
搬出可能変換量 [t/h]	C_{11}	87
	C_{12}	16
	C_{13}	5
	C_{14}	19
	C_{21}	67
	C_{22}	1
	C_{23}	42
仮置場容積[t]	一次仮置場1	1898
	一次仮置場2	751
	一次仮置場3	365
	一次仮置場4	692
	二次仮置場1	1802
	二次仮置場2	293
	二次仮置場3	924

次に、四日市市における検討を行った。災害廃棄物発生量については、内閣府方式⁴⁾を採用した。また、三重県の災害廃棄物処理計画を参考に図 18 に示す処理フローを設定した。仮置き場での保管可能重量については、環境省の災害廃棄物対策指針を参考に決定した。表 9 には、車両台数、搬出可能変換量および各施設の処理能力と収集完了日・処理完了日の一例を示す。

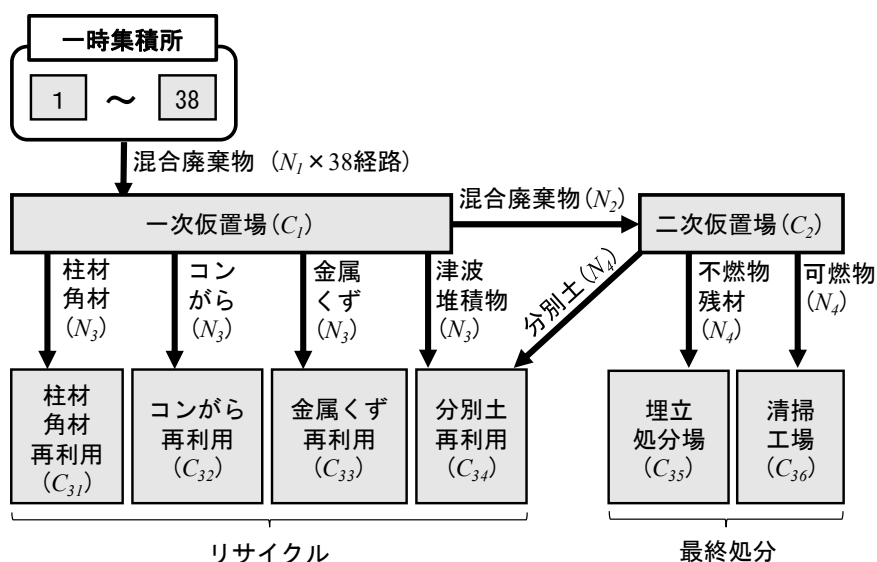


図 18 本解析で設定した処理フロー。()内は各経路で設定を要する車両台数 ($N_1 \sim N_4$)、搬出可能変換量 (C_1 、 C_2)、処分場・再利用の処理能力 ($C_{31} \sim C_{36}$) を示す。

災害廃棄物処理計画は、3年で処理完了とするため、本解析においては、900日为目标として解析を実施した。解析結果として得られたパラメータ群を表 9 に示す。Case1 では、災害廃棄物の仮置場における保管を災害廃棄物の種類に依らず均等に割り振った。Case2 では、災害廃棄物の発生割合を体積割合に基づき保管スペースを割り振った。各パラメータを表 9 よりも小さい値とした場合、処理完了日が 900 日を上回ることが確認された。

表 9 車両台数、搬出可能変換量および各施設の処理能力と収集完了日・処理完了日の一例。

運搬車両台数右の()内は経路数を示す

パラメータ名/各種日数		Case1	Case2
搬出可能変換量 [t/h]	C_1	698	711
	C_2	69	69
処理能力 [t/day]	$C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}$	1,005	1,005
	C_{35}	282	282
	C_{36}	198	198
運搬車両台数 [台]	N_1	23 (38)	27 (38)
	N_2, N_3	14 (5)	14 (5)
	N_4	4 (3)	4 (3)
処理完了日		900	899
集積完了日		851	833

まず Case1 では、運搬車両台数について、38 か所の一時集積所から一次仮置場に収集する台数が $38 \times 23 = 874$ 台と最も多くなっており、全体の 9 割を占める。次いで一次仮置場から災害廃棄物を搬出する車両が合計で 70 台、二次仮置場からの搬出に要する台数が 12 台となり、合計 956 台の収集運搬車両が必要となった。また、搬出可能変換量に着目すると、一次仮置場では二次仮置場の 10 倍にあたる 698[t/h]の分別処理速度を要した。これは、処理フローが 38 か所の一時集積所から 1 つの一次仮置場に災害廃棄物の集中する構造のため、大量の混合廃棄物が短時間で集まり、これを分別し二次仮置場や処分場に搬出できる状態にすることが要求されたためと考えられる。また、一次仮置場に仮置きされたごみ量では、解析開始 5 日後から 619 日後までの 614 日もの間、一次仮置場が満杯であったことが確認され、本解析条件においては一次仮置場の搬出可能変換量が搬出完了日・処理完了日を決定づけるパラメータとして作用したと推察された。また Case2 においては、運搬車両台数について、一時集積所から一次仮置場に収集する台数が $38 \times 27 = 1026$ 台、一次仮置場の搬出可能変換量も 771[t/h]と Case1 よりも大きくなった。すなわち Case2 では、Case1 と比較して一次仮置場が大きくなり搬入可能な廃棄物量が増え、一次仮置場への廃棄物の集中がより一層強まり、これを処理するために必要な分別機器が多くなった。本結果より、適切な災害廃棄物処理のためには、廃棄物種別ごとの発生量の比率のみでは仮置場面積を設定できないことを示唆している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能の整理

本研究で検討している災害廃棄物処理管理システムの要件定義書を作成したことで、システムを利用する状況（平時・発災前、発災後）における必要な情報と、各情報を出力する為に必要な機能を体系的に整理することができた。また、本研究のサブテーマで研究を進めている廃棄物量の推定に係る手法や数値モデル、処理計画に必要な情報を出力するシミュレーションモデルなどの様々な機能を追加・連携することが可能な統合プラットフォームとしてのシステム全体像を把握することができた。

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

本モデルを用いることで、津波被害や地盤被害を考慮した上で、最短時間の輸送経路を提案することが可能となった。GIS データを用いるため、他の地域でも津波浸水域や液状化のハザードマップや仮置場の候補地のポリゴンデータがあれば、シミュレーション可能であり、今回四日市市だけではなく、広域処理を想定

したシミュレーションを実行した。このように日本全国の地区への一般化ができた点が重要であると考えている。

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

本モデルにより、収集運搬車両等を活用した災害廃棄物の収集運搬過程および仮置場・処分場での分別・破碎・最終処分過程を表現した。各地における災害廃棄物の発生量と質、仮置場の最大保管量や位置、最終処分場の処理能力や位置、各施設をつなぐ道路の距離や車両速度、そして収集運搬車両や分別破碎機器の性質や台数を条件として入力し、災害廃棄物処理に要する日数を算出した。本モデルを活用することで、各自治体が計画する災害廃棄物処理計画における条件下で、目標とする日数で災害廃棄物処理が完了するかについて、検証可能となった。

(2) 環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

1) 災害廃棄物処理事業を統合的に管理するシステムの要求性能

災害廃棄物処理事業を担当する自治体関係者に対し、発災前の災害廃棄物処理計画の作成だけでなく、発災後の災害廃棄物等の処理・利活用も対象にして、災害廃棄物実行計画の作成、その後の進捗管理と実行計画の更新の効率的な実施を支援する。2019年度環境省重点施策のうち、1.(2) 国土のストックとしての価値の向上の②廃棄物処理施設の整備や自立・分散型エネルギーシステムの構築を進めるとともに、大規模災害に備えた万全な災害廃棄物処理体制の構築や災害廃棄物の円滑・迅速な処理を図ること等により環境施策を通じた国土強靱化への対応に取り組む」の災害廃棄物処理に関する環境政策に貢献する。今後の展望として、現段階では概念設計レベルであるシステム要件から、基本設計、詳細設計へと段階を進めていくことを目指す。将来的には、本研究での数値モデルをベースとした、AI や IoT などの先進的な技術による機能実装も検討の余地があると考えている。

2) 南海トラフ巨大地震を想定した四日市および他地区 GIS モデルの作成と輸送時間のシミュレーション

災害廃棄物処理管理システムにおいては、実際に災害が起きた場合に浸水域や液状化、道路の寸断状況など、リアルタイムに情報が得られる。このような情報を GIS モデルに入力することによって、道路の復旧などにより時々刻々と変わることが推定される最適な輸送経路を常に得ることが可能となる。それにより、災害廃棄物処理の円滑化を推進することが可能となる。

3) 災害廃棄物収集運搬モデルの提案

各自治体が計画している災害廃棄物処理計画について、収集運搬・処理連動モデルで災害廃棄物処理に要する日数を計算することで、各自治体が目標とする処理日数を満たす計画となっているかについて、定量的に評価可能である。また、運搬車両台数の拡充、仮置場の拡張や新設、最終処分場の新設や広域処理を容易に設定可能であることから、上記の処理日数を満たさない場合において、条件を満たす計画を検討可能である。さらに、仮置場・最終処分場の廃棄物の種別に基づく割り当てにも対応しており、災害廃棄物の種類ごとに優先的に被災地から除去する設定も可能である。このため、可燃性の災害廃棄物や有害物質や環境汚染を引き起こす可能性のある災害廃棄物を優先的に処理する計画も設定可能で、環境に配慮した計画策定の一助となると期待できる。また、実際に災害が起きた際の状況を入力し、シミュレーションし直すことで、処理計画の妥当性を迅速に評価可能である。具体的には、限られた運搬車両台数・分別破碎機器の台数で実施された災害廃棄物処理において、実計画とは異なる車両・各種機器の各施設・経路への配分を実施した場合

に、実計画よりも短い時間で災害廃棄物処理が実施されれば、災害時における運搬車両や分別破碎機器の配分に関する新たな知見が見いだされる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、土木学会論文集 G (環境)、74 巻、5 号、pp. I_195-I_202、(2018)
「災害廃棄物の適切な処理計画策定支援を目的とした収集運搬・処理連動モデルの開発」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 中野正樹、建設機械施工、Vol. 69、No. 7、2017、「大規模災害で発生する災害廃棄物対策に向けて」
- 2) 中野正樹、『INDUST』3月号、「大規模災害で発生する廃棄物の処理技術・管理システムの構想」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、中野正樹、2017 年度土木情報学シンポジウム講演集、pp. 315-318 (2017)、
「災害廃棄物収集運搬モデルを用いた災害廃棄物処理のシナリオ分析」
- 2) 坂口直也、田内裕人、江種伸之、大塚義一、中野正樹、平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会、VII-059 (2017)
「災害廃棄物処理計画の策定支援を目的とした災害廃棄物収集運搬モデルの提案」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 中野正樹、酒井崇之、名古屋大学(テクノ・フェア名大)、2017 年 10 月 21 日、参加者 500 名、大規模災害における廃棄物の災害外力・地域特性に応じた処理技術・管理システムに関する研究
- 2) 佐々木秀幸、TKP 名駅桜通口カンファレンスセンター、2017 年 11 月 1 日、参加者 15 名、東日本大震災と台風第 10 号災害を経験して思うこと
- 3) 中野正樹、酒井崇之、名古屋大学(テクノ・フェア名大)、2018 年 10 月 20 日、参加者 500 名、大規模災害における廃棄物の災害外力・地域特性に応じた処理技術・管理システムに関する研究
- 4) 2019 年 3 月 13 日、名古屋にて、市民向けシンポジウム「大規模災害における廃棄物の処理・利活用について～管理システムの提案～」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

※本研究費の研究成果による受賞等があれば記載すること。ない場合は、「特に記載すべき事項はない。」と必ず書くこと。

8. 引用文献

- 1) 廃棄物資源循環学会：災害廃棄物、p. 16、中央法規出版、2009.
- 2) 土木学会：災害廃棄物の処分と有効活用―東日本大震災の記録と教訓、p. 15、丸善出版、2014.
- 3) 奥村組（株）：山田地区災害廃棄物破碎・選別等業務委託 実績報告書、2014.
- 4) 環境省：産業廃棄物管理票に関する報告書及び電子マニフェストの普及について（通知）、環廃産発第061227006号、2006.

Ⅱ－２ 地域特性・災害特性を考慮した災害廃棄物等の種類・発生量の時系列に沿った把握・予測【サブテーマ(1)】

〔要旨〕

本研究は、災害廃棄物処理計画、処理実行計画作成のために必要となる、発災前後での災害廃棄物発生予測手法の提案、混合物からの選別品の発生量予測の提案を主な目的とする。以下に得られた成果を示す。

１）物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

物質ストックデータを用いて、災害廃棄物の発生量及び質の分布を 250m メッシュで推計した。また、対象地域を三重県北勢地域の 4 市町（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）に広げ、災害廃棄物発生量・質分布の推定を実施し、推計した災害廃棄物の資材別割合に地域特性が反映されていることを確認した。

２）災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法

実際の災害発生（今回は水害）後の災害廃棄物集積状態の迅速な容積計測に対する UAV 測定の効率性と精度に関する有効性が確認された。

３）二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

ICT を利用し災害廃棄物処理で取得・蓄積した実績データを用い、高度選別処理前の混合物ならびに高度選別処理後の可燃物、不燃物、ふるい下くず、分別土の構成関係を分析し、災害廃棄物処理の実態と整合が取れていたことを確認した。高度分別処理前後の各組成の質量割合を関係づける「分別係数」を新たに定義し、可燃物、不燃物、分別土の発生量を予測し、早期に、処理能力を上げることや広域処理量を変更する等の処理マネジメントが可能となるなど処理事業に貢献できる可能性を得た。

４）風水害で発生した廃棄物発生量の予測

物質ストックデータを用い風水害の発生量推定の検討を行った。これにより、ハザードの分布情報を空間的に入手し、あらかじめデータベース化したストックデータと重ね合わせることで、災害廃棄物発生量と種類の分布を推計することができる。また、2 地域と限定的ではあるが、力学特性・化学特性ともに良質土と変わらず、今回の処理フローで十分に分別土として取り扱えることがわかった。

１．はじめに

災害廃棄物処理事業に関して、各自治体は、災害前の災害廃棄物処理計画の作成だけでなく、発災後の災害廃棄物等の処理・利活用も対象にして、発災直後の情報をもとにした災害廃棄物実行計画の作成とその更新を行う必要がある。しかし、災害処理経験がないとか財政上の問題などの理由で、実効性のある処理計画が未だ作成されていない自治体は数多くある。このことは発災後の処理実行計画作成・更新も不十分である自治体が多いことも意味する。

処理計画作成のためには、発災前の簡易な災害廃棄物発生量予測、発災後の簡易計測による発生量予測が重要である。また、災害廃棄物処理過程において、ボトルネックとなる混合物の処理についての対応も重要となる。この混合物処理に関する対応は、二次仮置場での高度選別処理において混合物が選別される不燃物、可燃物、分別土の発生量予測が重要となる。なお選別品の 1 つである分別土は復興資材として、復興事業のインフラ整備に利用されるべきであり、その重要性は非常に高い。

２．研究開発目的

本研究では、災害廃棄物処理計画、処理実行計画作成のために必要となる、発災前後での災害廃棄物発生予測手法の提案、混合物からの選別品の発生量予測の提案を目的とする。また、近年頻繁に発生する風水害に伴う廃棄物について、発生量予測とともに、その特性を明らかにし、災害廃棄物処理事業管理システムへ

の導入について検討することも目的とする。下記にそれぞれの目的テーマを示すが、すべて災害廃棄物等処理事業管理システムにおける要素研究として位置付けられる。

- 1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測
- 2) 災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法
- 3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案
- 4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

3. 研究開発方法

1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

(A) 物質ストックデータによる四日市市の災害廃棄物発生量・質分布の推定

対象地域を三重県四日市市とし、GIS 上に蓄積された建築物 1 棟ごとの建築資材データ、すなわち物質ストックデータに対し、四日市市から提供された課税台帳を用いて建築年代を割出し、三重県地震被害想定（平成 26 年 3 月）の L1、L2 地震の計測震度データ¹⁾、建物の被害率曲線¹⁾を用いて、計測震度に応じた被害率を加味することで 250m メッシュごとの災害廃棄物発生量と種類の分布を算出した。

(B) 災害廃棄物発生量・質分布の推定の四日市市周辺自治体（北勢地区 4 市町）への適用

四日市市以外の地域にも適用性・汎用性を確認するため、対象地域を三重県北勢地域の 4 市町（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）として、災害廃棄物発生量・質分布の推定を実施した。他地域へと展開するため、既に全国統一的に整備されている 500m メッシュの物質ストックデータに対し、統計データによる市町ごとの構造別建築年代割合と内閣府被害想定（平成 24 年 8 月）の建物の被害率曲線²⁾を用いて、計測震度に応じた 250m メッシュごとの災害廃棄物発生量と種類の分布を算出した。なお、250m メッシュ物質ストックデータは、基盤地図情報の建物ポリゴンを用いて 500m メッシュのデータを按分して整理した。

(C) 災害廃棄物発生量・質と地域特性との関連の整理

用途地域等から工業地域、商業地域、住居地域、農業地域の地域特性を設定し、地域ごとに保有するストックデータの特徴を整理した。さらに、この物質ストックデータの地域特性と積み上げ方式による災害廃棄物発生量と種類の推計結果を比較し、地域特性との関連を整理した。

2) 災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法

東日本大震災にて行われた災害廃棄物量の計測方法について調査を行い、岩手県災害廃棄物処理詳細計画（第二次（平成 25 年度）改訂版）³⁾を参考に推計方法をまとめ、ヒアリングにより留意点について整理した。

それを踏まえ、平成 28 年 8 月末に発生した台風 10 号による岩手県久慈地区の災害廃棄物を対象とし、災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法のレビューワークをまとめた。すなわち、発災後の仮置場において、被災地より集積された多種多様の災害廃棄物の山を UAV(Unmanned Aerial Vehicle)で空撮計測を行い、空撮画像を活用した災害廃棄物の体積計測と、画像解析技術を用いた混合廃棄物の組成分析を実施し、迅速かつある程度の精度で廃棄物の発生量と質（組成別重量）の推定が可能かを検証する実験を実施した。その詳細は以下の通りである。

● UAV 空撮による迅速な廃棄物量計測方法の検討

本実験は、仮置場の災害廃棄物等を UAV と 3D レーザースキャナ（LS）で現地計測を行って、仮置き状態の種類別に災害廃棄物等の 3D モデルを構築することで、UAV と LS での計測手順（効率）や精度の比較を行った。

➤ 廃棄物体積計測手順（手順としては、UAV と LS 共に共通）

- ① 廃棄物搬入前仮置場の 3 次元点群データからノイズ除去を行った地盤面データの抽出（グラウンドデータ）
- ② 3D レーザースキャナ及び UAV を使用し 3 次元点群データを作成（オリジナルデータ）
- ③ 点群処理ソフトを使用し、ノイズ除去を行ったデータを作成（フィルタリングデータ）
- ④ ①で抽出したグラウンドデータと、③のフィルタリングデータを比較し瓦礫の体積を算出（図 1）

UAV による体積計測により算出された廃棄物量の精度を確認する為、レーザースキャナによる 3D データからの計測結果と UAV 体積計測結果の比較を行った。（図 2）

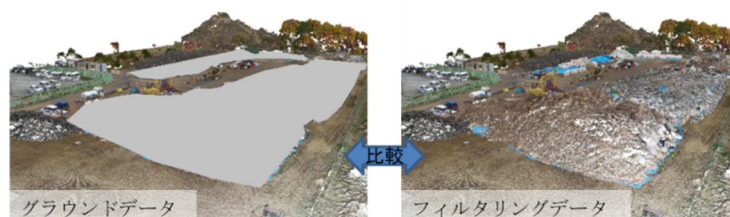


図 1 グラウンドデータとフィルタリングデータの比較

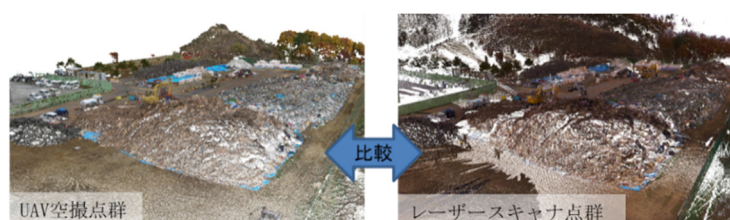


図 2 UAV 空撮データとレーザースキャナ点群の比較

● UAV 空撮画像解析による廃棄物組成割合の推定

UAV により撮影された混合廃棄物の静止画像を分析し、その素材組成率を推定する事を目標として検討を行った。廃棄物組成素材ごとに固有色があり、色相の変化はしないと仮定して画像ピクセル毎の色相から素材色を推定する事で、仮置場の災害廃棄物の組成および重量を推定する事ができると考える。

➤ 廃棄物組成推定方法

- ① 混合廃棄物サンプル画像の色相変換を行い、色相と素材対応を定義（図 3、表 1）
- ② UAV 空撮画像の色相変換を行い、廃棄物の組成割合と素材比重から廃棄物重量を推定（図 4）

元画像	色相画像	廃棄物組成(目視)
		・袋、布など大きなものが目立つ ・隙間に土が多い
		・ビニール袋、紙袋、ペットボトル等中に物が入ったものが目立つ。 ・隙間に土が多い

表 1 色相と素材の対応の例

色相	素材
赤紫～黄	木、土、紙
水色～紫、白	ビニール
黄緑～緑青	プラスチック
黒、灰	不明

図 3 サンプル画像の色相変換

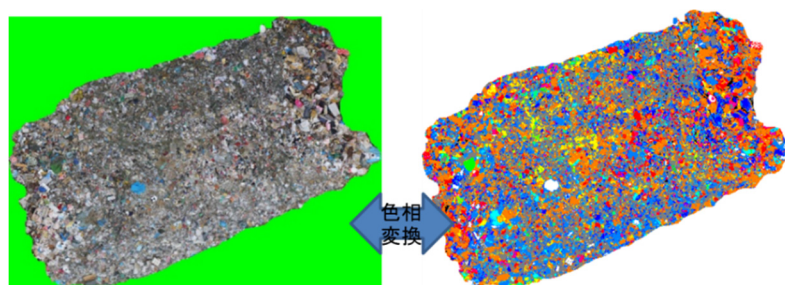


図 4 UAV 空撮画像の色相変換

3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

東日本大震災での岩手県山田、久慈地区の災害廃棄物処理業務において情報通信技術に基づいて取得・蓄積された災害廃棄物処理実績データを用いて、二次仮置場での処理、特に高度選別処理前後の廃棄物の経時変化や、高度選別処理後の選別品と受け入れ先の関係を分析した。実績データは、各搬出入地点（被災地・一次仮置場・二次仮置場・一時保管ヤード・中間処理施設等）において、トラックが重量計測地点を通過する度に日時や質量に紐づけられた様々なデータが自動的にクラウド上に蓄積され、経時的かつ連続的に運搬ごとのデータが記録・保存されるとともに、大容量の保存情報を評価・分析しやすい様式でデータベース化したことが従来と大きく異なる。さらに高度選別処理前後において、混合物と選別品（可燃物、不燃物、分別土）との関係性と時間依存性ならびに影響因子等を解析し、「分別係数」という新しい概念を導入し、与条件下での合理的な処理を構築する上での考え方を提示した。

4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

(A) 過去に発生した大規模風水害についての情報整理

過去の大規模風水害における被害の概要を調査し、災害廃棄物発生量に着目して情報整理を行った。調査対象は「国立環境研究所災害廃棄物情報プラットフォーム」（平成 31 年 3 月時点）に公表されている処理実行計画・記録誌を参照し⁴⁾、複数の地方自治体に被害を及ぼした風水害を対象とした。調査対象とした大規模風水害を表 2 に示す。

表 2 調査対象とした大規模風水害

災害名	調査対象とした被災自治体	被害が発生した主な災害
台風第 12 号による大雨と暴風	三重県	・河川氾濫による洪水災害
平成 27 年 9 月関東・東北豪雨	栃木県	・河川氾濫による洪水災害
	茨城県	・河川氾濫による洪水災害
	岡山県	・河川氾濫による洪水災害
平成 30 年 7 月豪雨	広島県	・土石流等の土砂災害
		・河川氾濫による洪水災害

(B) 風水害の浸水シミュレーション結果を用いた四日市市の風水害の災害廃棄物発生量・質分布の推定

1) と同様の物質ストックデータを用いた風水害の災害廃棄物発生量・質分布の推定を行った。対象地域は三重県四日市市とし、三滝川水系、鈴鹿川水系、朝明川水系のそれぞれについて、河川氾濫による浸水想定結果から災害廃棄物量・質の分布を推定した。河川氾濫による外力は地震動ほど強くないため、被災した建物の多くは解体されないものと考えられる。ただし、木造建物が 1 階天井を超えて浸水した場合には原則全壊判定となり、場合によっては流失・倒壊することもあるため、解体され建物構造部材が廃棄物として発生する。木造建物の 1 階天井までの高さを 2.0m と仮定し、浸水深が 2.0m 以上の区域が保有する木造建物のストックデータから風水害による災害廃棄物の発生量を推計した。

(C) 風水害分別土の性状把握

風水害で発生した分別土の特性を明らかにし、災害廃棄物処理事業管理システムへの導入について検討する。対象とする分別土は、2016 年台風 10 号で岩手県岩泉町にて発生した分別土(岩泉試料)と、2018 年 7 月豪雨にて広島県呉市にて発生した分別土(呉試料)であり、化学的性質、物理的性質、力学的性質を把握するために、各種室内試験を実施し、風水害で発生した土砂に関して有効利活用可能であるかどうか検討を行った。

4. 結果及び考察

1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

(A) 物質ストックデータによる四日市市の災害廃棄物発生量・質分布の推定

250m メッシュで算出した L1 地震・L2 地震の災害廃棄物発生量分布を図 5 に示す。沿岸のコンビナートよりわずかに内陸の地域で災害廃棄物発生量が多いことがわかる。四日市市全域の災害廃棄物発生量は L1 地震では 18.6 万 t、L2 地震では 142.9 万 t である。L2 地震では、L1 地震の約 8 倍の廃棄物が発生すると考えられる。L1 地震では単位メッシュ当たり 200t 以上の災害廃棄物が発生する地域は一部であるが、L2 地震では市面積の約 3 分の 1 の地域で 200t を超える災害廃棄物が発生する。

L2 地震における積み上げ方式と内閣府方式の災害廃棄物発生量を、それぞれ木材と非木材に分けて小学校区ごとに比較した結果を図 6 に示す。木材の発生量は積み上げ方式と内閣府方式に大きな差が見られないものの、非木材の発生量は市全体では内閣府方式の方が多いが、一部の小学校区では傾向が逆転し積み上げ方式の方が多い結果となった。積み上げ方式と内閣府方式で推計結果に差が生じた要因は 2 点考えられる。1 点目は、本研究では推計対象を上部部材のみとしたことである。下部部材が災害廃棄物として発生するかどうかは、災害の規模や復興の際に基礎を撤去するかどうかなど、発災前の段階では未確定な要素が多い。したがって積み上げ方式では下部部材を推計の対象から除外した。一方で、内閣府方式では上部や下部の違いは考慮せず原単位を設定しているため、非木材の割合が高い下部部材も原単位に含まれている。このため、非木材の発生量の推計結果に大きな差が生じたと考えられる。2 点目は、内閣府方式では原単位を全国一律に設定していることである。四日市市は近鉄四日市駅を中心に市街地を形成しているため、社会資本が集中し非木材を多く保有している。実際、積み上げ方式の方が非木材の発生量が多く推計された小学校区は、近鉄四日市周辺の非木材を多く保有する地域と一致している。内閣府方式ではこのような地域の特徴の差を反映することができないため、結果に差が生じたものと考えられる。

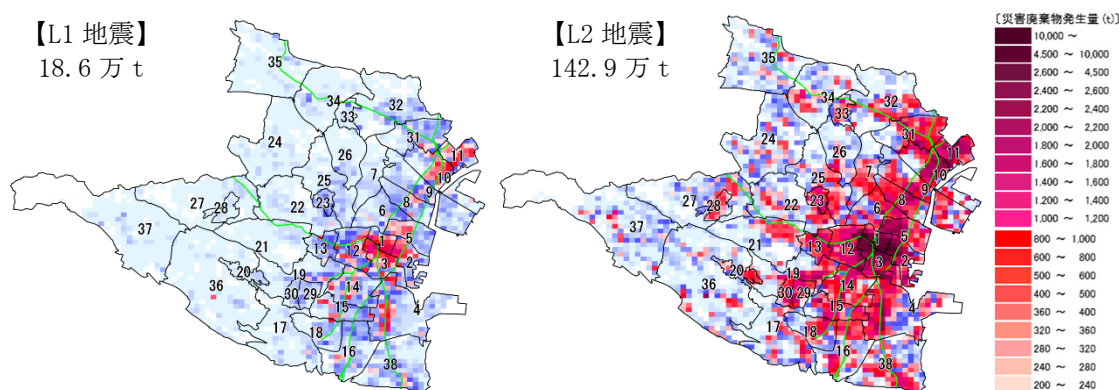


図 5 四日市市の災害廃棄物発生量分布の算出図

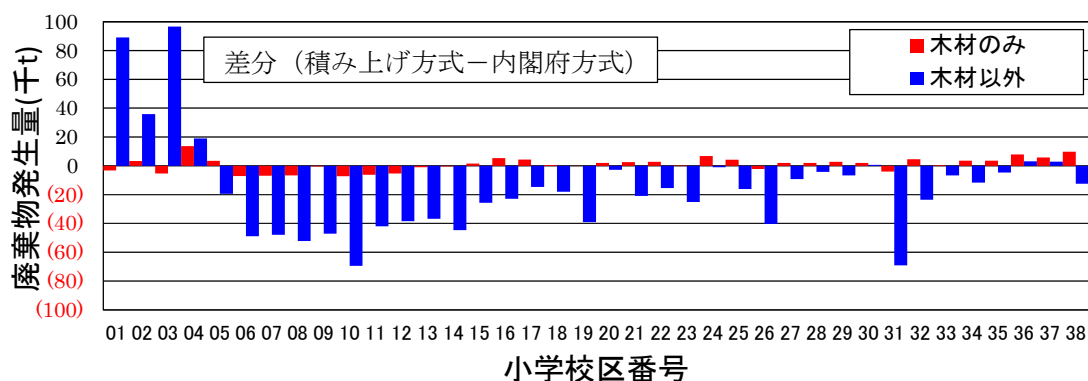


図6 積み上げ方式と内閣府方式の比較

本予測手法の妥当性を検証するため、東日本大震災において、津波被害の大きかった岩手県、宮城県、福島県の3県の津波の遡上範囲内に蓄積された物質ストックデータと環境省から発表されている災害廃棄物発生量の推計値を比較した結果を図7に示す。比較結果から、3県全てにおいて、環境省から発表された災害廃棄物発生量よりも、津波の遡上範囲内に蓄積されたストックデータの方がやや多い。津波の浸水深さによっては被害の発生しない建築物も含まれるため、浸水深さに応じた被害割合を加味することで、積み上げ方式による災害廃棄物の推計値も下方に修正されるはずである。このように、本研究で用いたストックデータは、災害廃棄物として発生する量を内包しており、被害率を適切に設定することにより、実態に即した災害廃棄物の発生量の推計が可能と考える。

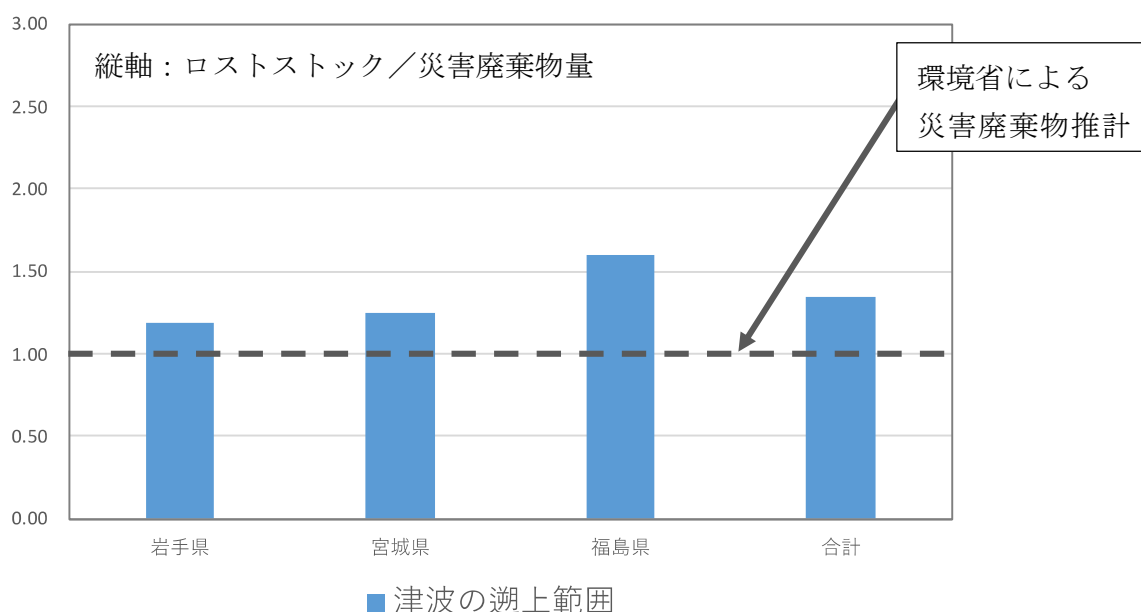


図7 東日本大震災におけるロストストックと災害廃棄物量の比較

(B) 災害廃棄物発生量・質分布の推定の四日市市周辺自治体（北勢地区4市町）への適用

四日市市が位置する三重県北勢地域の他のいくつかの自治体（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）における、災害廃棄物の資材別割合の推計結果を図8に示す。周辺4市町全てにおいて、四日市市よりも木材の占める割合が高く8～13ポイント程高く推計された。一方で、コンクリートの占める割合は四日市市よりも低く、特にいなべ市と菰野町では20ポイント程低く推計された。平成25年度住宅・土地統計調査（総務省）

によると⁵⁾、住宅総数のうち木造住宅の占める割合が四日市市では61%であるのに対し、周辺4市町では68%～79%と木造住宅の占める割合が高い。このような市町ごとの住宅の特徴が推計した災害廃棄物の資材別割合に反映されているものと考えられる。

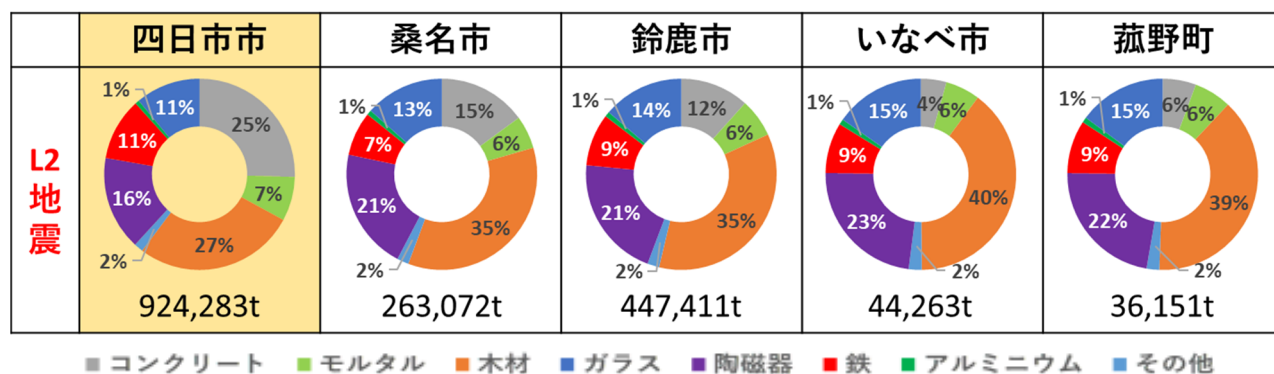


図8 四日市市周辺自治体での災害廃棄物の資材別割合

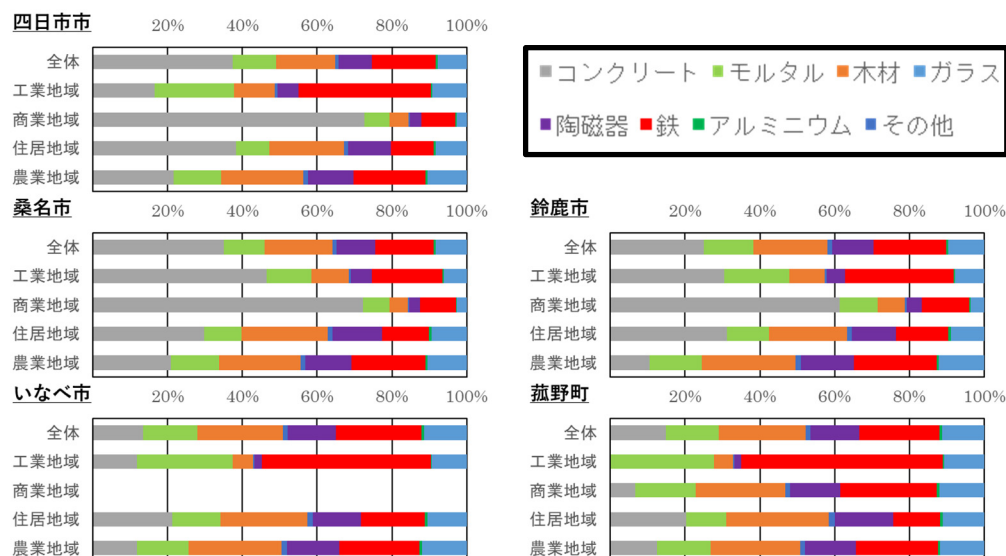
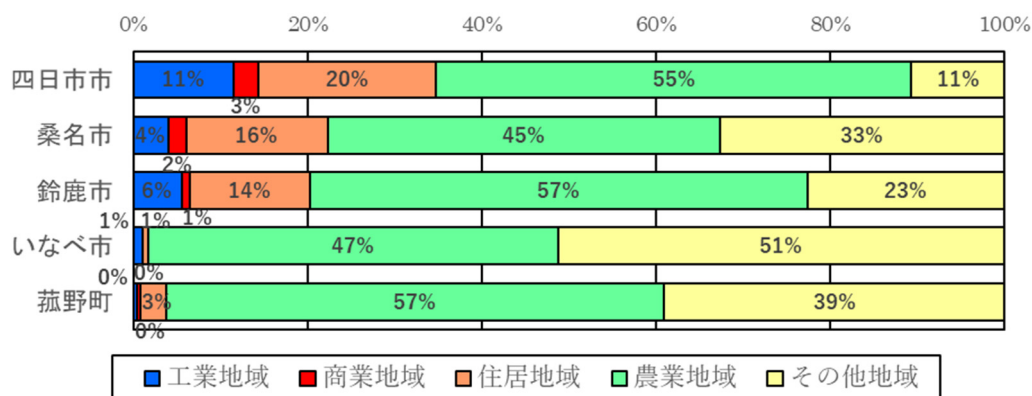


図9 周辺市町の地域特性

(C) 災害廃棄物発生量・質と地域特性との関連の整理

対象市町における地域特性（工業地域、商業地域、住居地域、農業地域）の面積割合と地域特性ごとのストックデータの資材別割合を図9に示す。対象市町全てで、農業地域の占める割合が最も高い。四日市市で

は四日市港を中心としたコンビナートを形成していることから、工業地域の占める割合も比較的高い。資材別割合は比較的人口規模の大きな四日市市、桑名市、鈴鹿市では商業地域と住居地域のコンクリートの占める割合が高いが、人口規模の小さいいなべ市や菰野町では木材の占める割合が高い。いなべ市や菰野町は住居地域の占める割合が極めて低く農業地域の占める割合が高いことから、密集市街地が少なく、商業地域や住居地域が農業地域に近い特徴を持っていると考えられる。災害廃棄物の資材別発生量は、桑名市、鈴鹿市では災害廃棄物に占めるコンクリートの割合が11～16%であるのに対して、いなべ市、菰野町では4～7%であり、桑名市、鈴鹿市の方が5～10ポイント程高く推計された。このように地域が有する特徴が災害廃棄物の質に反映されている。

2) 災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の計測方法

東日本大震災で行われていた一次仮置場に集められた災害廃棄物量の計測方法と留意点を以下に示す。

災害初期の県実行計画策定時点での発生量算出は、発生原単位を用いた机上計算であった。H23年8月からの県詳細計画において、発生量は推計時点での処理済量と残存量（仮置場の残量及び今後発生が見込まれる量）の合算により算出した。すなわち、一次仮置場に集積された災害廃棄物の体積をGPS測量とレーザー距離計を用いた簡易測量により定量化し、各災害廃棄物の山の表面を撮影して組成比率を求め、次に、組成比率に応じた重量換算を行い、発生推計量を算定した。当該計画を策定した時点では、災害廃棄物の処理が本格的に開始されていない状況にあったことから、仮置場に搬入された災害廃棄物の測量換算値により算定した。平成24年5月及び平成25年5月の当該計画の改訂にあつては、現地での処理が進んできたことから、測量換算値に加え、処理実績値、災害廃棄物の搬入量、処理量等を考慮し、実績に応じた重量換算係数や組成比率を踏まえて推計することにより推計精度を高めた。

発生量を算出する際留意すべき点として、広域的に一度に大量の災害廃棄物が発生したこと、多種多様なものが混合状態となっていたこと、集積された災害廃棄物の山には空隙が多かったこと、柱材・角材等は重機選別により細かく碎かれ、体積が縮小する場合があったこと、短期間で発生量を推定する必要があったことなどが挙げられた。

上記の東日本大震災での計測方法の留意点を踏まえ、災害発生後の仮置場に存在する災害廃棄物量の新たな計測方法の結果を示す。

● UAV空撮による迅速な廃棄物量計測方法の検討結果

UAV空撮画像から解析した廃棄物量結果と3Dレーザースキャナ(LS)から解析した廃棄物量結果を、それぞれ表3、表4に示す。

表3 レーザースキャナによる廃棄物量解析結果

UAV 岩手県久慈市災害廃棄物ボリューム解析結果				
番号	種別	切土量(m³)	盛土量(m³)	合計(m³)
1	不燃物(小)	0.0	23.2	23.2
2	タイヤ	0.0	129.7	158.9
3	可燃物(木くず・家具)	0.0	2074.8	2074.8
4	可燃物	6.9	2215.5	2208.6
5	可燃物(家具)	0.0	34.2	34.2
6	廃プラ	0.0	5.6	5.6
合計		4483		
全体比較		132.1	3883.9	3751.8

※3Dレーザースキャナでの計測では、堅牢な地盤に三脚を据えて計測をする必要があり、仮置きされている廃棄物の状態により、計測可能な種別だけの計測を行った

表 4 UAV 空撮による廃棄物量解析結果

UAV 岩手県久慈市災害廃棄物ボリューム解析結果				
番号	種別	切土量(m ³)	盛土量(m ³)	合計(m ³)
1	自転車	0.0	110.7	110.7
2	家電	0.0	192.2	192.2
3	不燃物(大)	2.6	2066.7	2064.1
4	不燃物(小)	0.0	23.2	23.2
5	家電(リサイクル)	0.3	905.2	904.9
6	タイヤ	0.0	158.9	158.9
7	可燃物(木くず・家具)	0.0	2205.5	2205.5
8	可燃物	0.0	2106.1	2106.1
9	たたみ	0.0	622.9	622.9
10	廃プラ	0.0	92.3	92.3
11	可燃物(家具)	0.0	37.8	37.8
12	石膏ボード	0.0	88.5	88.5
13	廃プラ	0.0	44.3	44.3
14	廃プラ	0.0	7.5	7.5
15	枝葉	0.7	623.7	623.0
合計		9285.5		
全体比較		122.3	9844.4	9722.1

また、計測にかかる時間の比較も実施した。計測時間の比較結果を表 5 に示す。

結果としては、十分な体積計測精度と計測所要時間の大幅な短縮が確認でき、災害発生時の仮置き場において迅速な計測ができると考えられる。

表 5 廃棄物量計測時間の比較

計測場所	面積	計測方法	計測時間
久慈	36006m ²	レーザースキャナ	3 時間
		UAV	10 分

● UAV 空撮画像解析による廃棄物組成割合の推定結果

UAV にて空撮された可燃系混合物のオルソ画像に対して色相変換を行い、各色相に対応した廃棄物素材の割合を算出した。色相変換したオルソ画像から色相に対応する素材の割合を表 6 に示す。なお、1 オルソ画像（「正射変換」を行った画像）は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換された画像のことである。

表 6 可燃物系混合物オルソ画像の廃棄物組成割合

色相	割合	素材
赤紫～黄	35.3%(± 10.6%、木 or 紙 24.7%)	木、土、紙
水色～紫、白	27.7%	ビニール
黄緑～緑青	2.2%	プラスチック
黒、灰	34.8%	不明

● UAV 空撮による廃棄物量計測結果と画像処理による組成割合結果から求める推定重量結果

UAV 空撮による廃棄物量計測結果、画像処理による廃棄物組成割合結果と、各廃棄物素材の比重から廃棄物重量の推定を行った。廃棄物素材の比重は、土を 1.3t/m³、可燃物（木 or 紙、ビニール、プラスチック）を 0.26t/m³⁶⁾ として計算を行った。各組成割合を土：[Vm]、木 or 紙：[Vw]、ビニール：[Vv]、プラスチック：[Vp] で表すときの廃棄物かさ比重[S]は以下の式で求められる。

$$\text{かさ比重} \quad S = 1.3V + 0.26(Vw + Vv + Vp) \quad (1)$$

実験を実施した可燃系混合物体積[2106.1 m³]（表4の8）に対して、上記方法による推定結果を表7に示す。

表7 可燃系混合物 廃棄物組成・重量推定

組成	割合(%)	重量(t)
土	10.6	76
木 or 紙	24.7	178
ビニール	27.7	200
プラスチック	2.2	16
不明	34.8	251
合計	100	721

3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

表8は山田地区、久慈地区で蓄積された災害廃棄物処理での追跡実績データである。運搬物やその重量など8個の種別からなる238万個(2,380,760=297,595×8)の膨大なデータが集積され、多様な観点での災害廃棄物処理を可視化・定量化することでトレーサビリティ技術の有効性を検証した。災害廃棄物処理業務における運搬過程には、被災地区から受け入れ先までの各径路の搬出地点においてデータが取得された。データの採取期間は、平成23年12月から平成26年3月までの27カ月間で、その間に山田町と野田村で合計297,594個(山田町:241,392個、野田村:56,202個)の運搬データが取得された。

表8 災害廃棄物処理での追跡実績

適用場所	車載器数	延運搬回数	種別	取得データ数
山田町	32台	241,392回	8個※	1,931,136個
野田村	22台	56,203回	8個※	4,449,624個
合計	54台	297,595回	—	2,380,760個

※8個の種別：1 運搬物、2 運搬重量、3 運搬日時、4 運搬者、5 車両種類、6 運搬元、7 運搬先、8 運搬距離

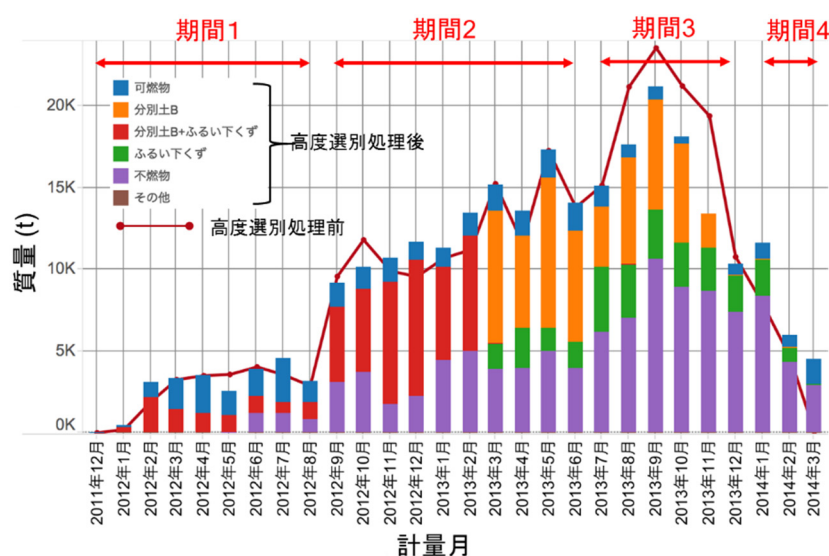


図10 山田地区・二次仮置場からの搬出質量

図10は山田地区での、混合物に関する二次仮置場の処理フローにおける高度選別処理前後の廃棄物の質量の経時変化である。図10より、二次仮置場への搬入量（高度選別処理前）と搬出量（高度選別処理後）が月

ごとに概ね一致しており、取得データの有用性が示された。また、搬入出の廃棄物の種類・量から、4つの期間に分けることができる。初期には搬入物は大きさが40mmオーバーの「混合物大」が多く、搬出物は「可燃物」が多くの割合を占めていた。そして時間とともに搬入物は大きさが40mmアンダーの「混合物小」が、搬出物は土砂類が増加した。期間3で処理量のピークを迎え、期間4では処理が収束を迎えたことがわかる。

この混合物処理に関する実測データは、以下に示すように災害廃棄物処理の実態と整合が取れていた。搬入量については、期間1では密度が小さい可燃系物質の混合割合が高い混合物大のみで、これは発火や悪臭の危険性を伴う可燃系の物質を早期に処理する必要があったからである。期間2では密度が大きい土砂系物質の混合割合が高い混合物小の搬入が始まり、処理量が増加に応じて混合物小の割合が増加している。期間3では混合物小の処理質量が増加し、割合においてはほとんどを占めているが、これは受け入れ先の条件より、一定以上の純度の不燃物を製造する必要があるため、そのために不燃物を繰り返し処理したことによる。搬出量において、期間1では、全体に比べて処理量は少なく、可燃物、分別土及びふるい下くず、不燃物が発生しているが、これらは混合物大からのみの選別品であると考えられる。期間2では、混合物小の搬入に伴い処理量が増加している。また、選別品の割合は比較的一定を保っており、安定した処理がなされていたことがうかがえる。期間3では可燃物、分別土Bの割合が減少しているのに対して、不燃物は約70%まで増加している。受け入れ基準に応じた不燃物を搬出するために繰り返し処理されていたことから、不燃物の質量と割合が増加している。なお、分別土Bの生産は期間3で終了している。期間4では処理の収束に伴い、可燃物の割合が増加しているが、これは期間3までに二次仮置場にて一時保管した可燃物を搬出していることが考えられる。

この混合物処理に関する実測データは、さらに各選別品がいつ、どこに、どのくらい受け入れられたかの情報も把握できる。図11に、山田地区の高度選別処理を経て二次仮置場から搬出された選別品の処理方法、および各廃棄物が受け入れ先へと搬入された月と質量を示す。選別品は、「可燃物」、「分別土B」、「ふるい下くず」、「不燃物」の4種類であり、処理方法は「再生利用」、「焼却」、「セメント原料」、「埋立」の4種類である。ここでの再生利用とは、土砂が復興資材として利用されることを指す。可燃物は100%が焼却処理されている。分別土Bは20.9%が再生利用、59.6%がセメント原料、19.4%が埋立されている。ふるい下くずは、1.0%が焼却、29.0%がセメント原料、70.3%が埋立されている。焼却後は埋立された。不燃物は24.5%がセメント原料、75.5%が埋立されている。

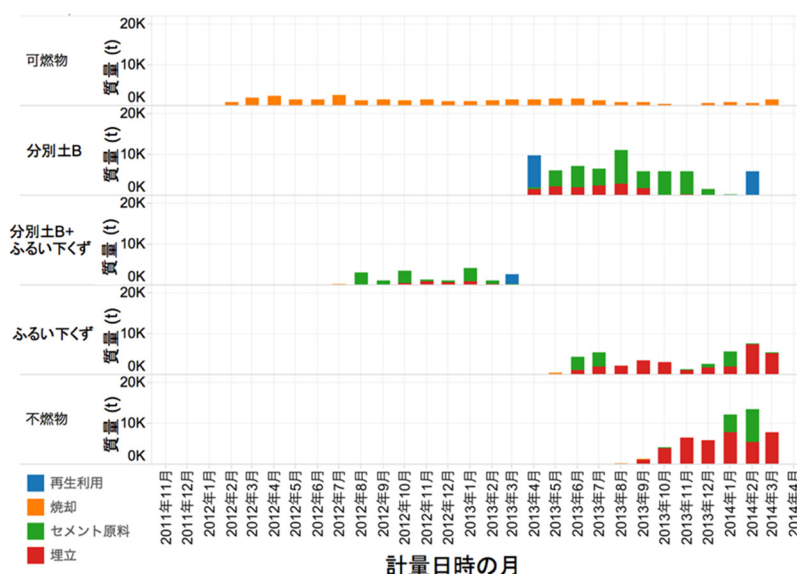


図11 山田地区・選別品の受け入れ先への搬入質量

高度選別処理後の選別品のうち土砂類（不燃物、分別土 B、ふるい下くず）は最終的に、復興資材として再生利用、埋立処分、セメント原料のいずれかの方法で処理された。これらの関係性について、経時的に分析したところ、受け入れ条件が比較的厳しくないセメント原料としての利用がバッファとして機能していることが裏付けられた。

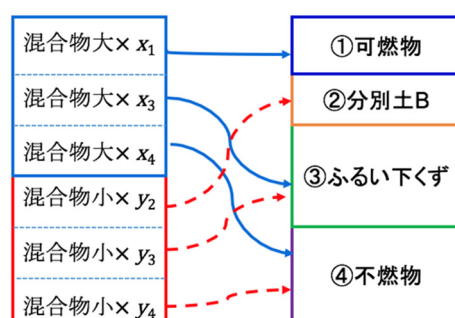


図 12 高度選別処理前後の混合物と選別品の構成関係

山田地区・久慈地区で行われた高度選別処理前後において、混合物（処理前）と選別品（処理後）に注目し、その関係性と時間依存性ならびに影響因子等を解析し、「分別係数」という新しい概念を導入することで与条件下での合理的な処理を構築する上での考え方を提示する。土砂混合物（処理前）は、「混合物大（40mm オーバー）」と「混合物小（40mm アンダー）」で、選別品（処理後）は、「可燃物」、「分別土 B」、「ふるい下くず」、「不燃物」である。これらの質量関係を表す係数として、図 12 のように「分別係数 x_i , y_i ($i=1, 2, 3, 4$,)」を定義する。「 x_i , y_i 」は、それぞれ混合物大、混合物小に含まれる各選別品の割合を示しており、「 i 」には図に示す選別品の番号が入る。処理フローの構成上、混合物大からは可燃物、ふるい下くず、不燃物が、混合物小からは分別土 B、ふるい下くず、不燃物が得られる。また、可燃物は混合物大からのみ、分別土 B は混合物小からのみ得られ、ふるい下くず、不燃物は混合物大、混合物小のどちらからも生成された。そして、土砂混合物と選別品の質量関係を山田地区の実績データをもとに、分別係数を算出した。なお、厳密には場内での一時的な保管等の影響を受け、一定期間において搬入質量と搬出質量が異なることもあり、週ごとに搬出量を搬入量に合わせて補正している。分別係数の計算結果を表 9 に、期間ごとの平均分別係数を表 10 に示す。

表 9 分別係数の計算結果

		x_1 (混合物大と可燃物)	x_3 (混合物大とふるい下くず)	x_4 (混合物大と不燃物)	y_2 (混合物小と分別土B)	y_3 (混合物小とふるい下くず)	y_4 (混合物小と不燃物)
期間1	2011.12~2012.2	0.32	0.68	0	0	1	0
	2012.1~2012.3	0.56	0.44	0	0	0	1
	2012.2~2012.4	0.61	0.39	0	0	0	1
	2012.3~2012.5	0.65	0.35	0	0	0	1
	2012.4~2012.6	0.54	0.35	0.11	0	1	0
	2012.5~2012.7	0.51	0.26	0.23	0	1	0
	2012.6~2012.8	0.47	0.25	0.28	0	1	0
	2012.7~2012.9	0.42	0.19	0.39	0.7	0	0.3
期間2	2012.8~2012.10	0.37	0.18	0.45	0.74	0.02	0.24
	2012.9~2012.11	0.36	0	0.64	0.79	0.16	0.05
	2012.10~2012.12	0.38	0.07	0.55	0.83	0.15	0.02
	2012.11~2013.1	0.36	0.1	0.54	0.76	0.1	0.14
	2012.12~2013.2	0.41	0.2	0.39	0.63	0.02	0.35
	2013.1~2013.3	0.42	0.23	0.35	0.61	0.06	0.33
	2013.2~2013.4	0.43	0.33	0.24	0.61	0.04	0.35
	2013.3~2013.5	0.45	0.33	0.22	0.65	0.05	0.3
期間3	2013.4~2013.6	0.54	0.04	0.42	0.59	0.14	0.27
	2013.5~2013.7	0.63	0	0.37	0.48	0.2	0.32
	2013.6~2013.8	0.72	0.27	0.01	0.41	0.18	0.41
	2013.7~2013.9	0.95	0.05	0	0.34	0.18	0.48
	2013.8~2013.10	1	0	0	0.35	0.16	0.49
	2013.9~2013.11	1	0	0	0.26	0.18	0.56
	2013.10~2013.12	1	0	0	0.15	0.21	0.64
	2013.11~2014.1	1	0	0	0.04	0.24	0.72
期間4	2013.12~2014.2	1	0	0	0	0.25	0.75
	2014.1~2014.3	1	0	0	0	0.26	0.74

表 10 期間別の平均分別係数

	x_1 (混合物大と可燃物)	x_3 (混合物大とふるい下くず)	x_4 (混合物大と不燃物)	y_2 (混合物小と分別土B)	y_3 (混合物小とふるい下くず)	y_4 (混合物小と不燃物)
期間1	0.53	0.32	0.16	0.67	0.00	0.33
期間2	0.43	0.15	0.42	0.64	0.10	0.26
期間3	0.87	0.13	0.00	0.27	0.19	0.54
期間4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.75

「可燃物」、「分別土 B」、「ふるい下くず」、「不燃物」について、期間ごとの平均分別係数を用いた算出値と実績データの値との比較をしたが、ここでは、「分別土 B」、「ふるい下くず」の結果を図 13、14 に示す。図 13 (分別土 B) では、期間 1～4 まで全体的に精度の高い一致が見られる。2013. 11 以降には差異が生じているが、これは「分別土 B」の運搬は 2013. 11 に終了しているが、期間 3 内においては、一定の平均分別係数を用いているため、最後まで「分別土 B」が発生していると計算されてしまうからである。図 14 (ふるい下くず) では、期間 2 において精度の高い一致が見られる。

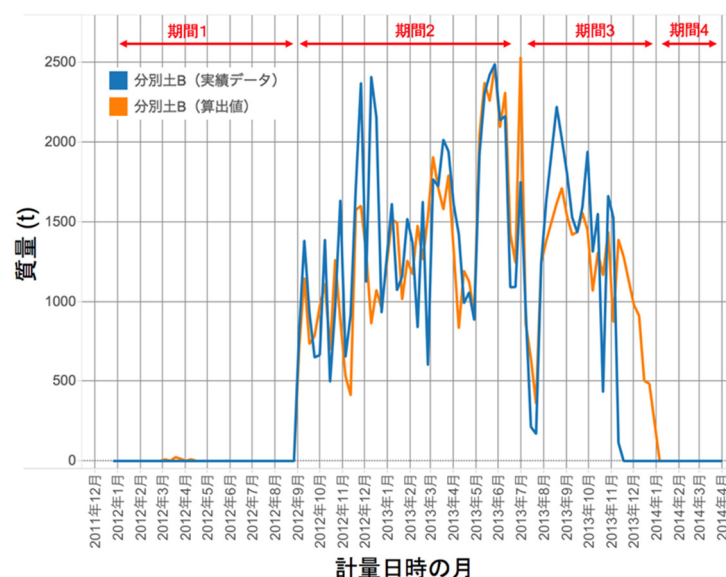


図 13 分別土 B における実績データと算出値の比較

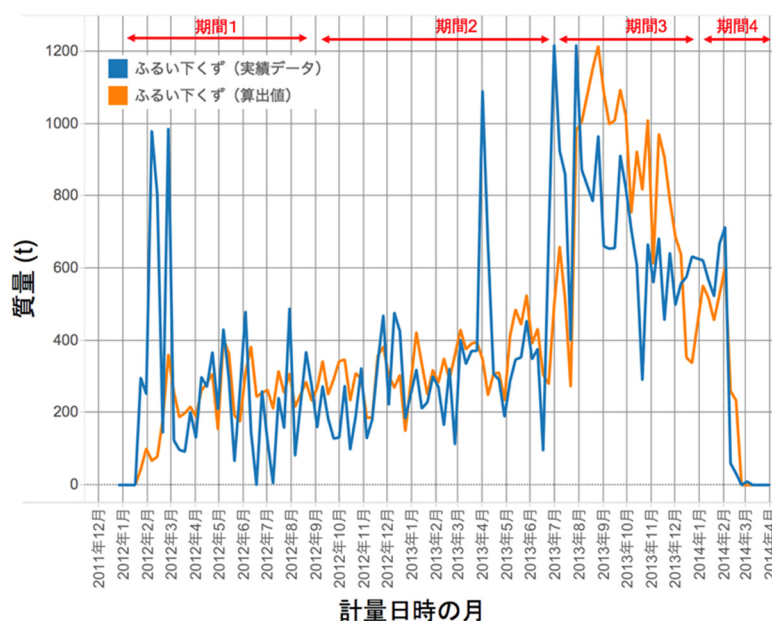


図 14 ふるい下くずにおける実績データと算出値の比較

以上より、期間 2 の各平均分別係数の値は山田地区での土砂混合物処理において、ベンチマークとして扱ってもよいと考えられる。今後の処理においても、今回の期間 2 のように、処理の開始から一定期間経ち、搬入が安定した時期においては、リアルタイムの処理データから平均分別係数を算出し、受け入れ状況に応じて処理設計することで、処理の合理化を行うことができると考えられる。

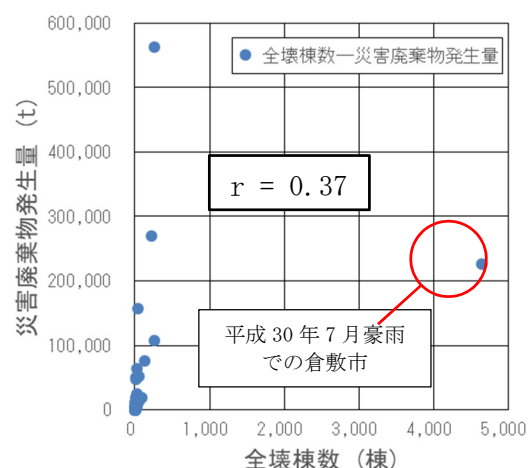
さらに、処理過程における分別係数を時系列で算出できることから、可燃物、不燃物、分別土の発生量を予測し、処理能力から処理時間が推定できる。その結果、早期に、処理能力を上げることや広域処理量を変更するなどの処理マネジメントが可能となる。例えば、分別係数の算出から、可燃物において、当初計画時よりも可燃物発生量が小さいと判明した場合には、実行中の焼却処理施設の処理能力、処理時間の短縮などが把握でき、広域処理量がどの程度必要かどうかの早期判断が可能となる。また、分別土において、当初計画よりも土砂の発生量が大きかった場合には、一時保管ヤードが必要になるなど、自区内の仮置き場所計画の必要性の有無を、早期に（処理中）に判断できる。

4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

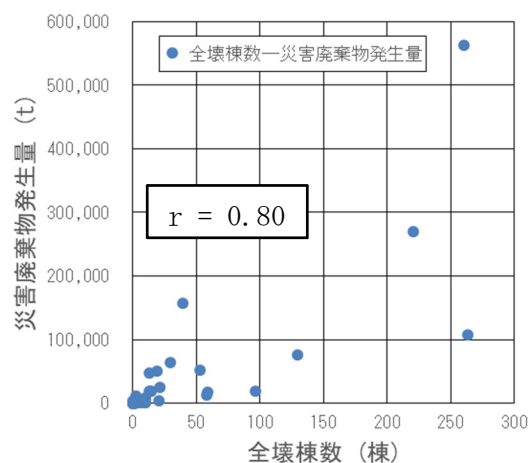
(A) 過去に発生した大規模風水害についての情報整理

大規模風水害における全壊棟数と災害廃棄物発生量の関係を図 15 に示す。対象とした全災害での各自治体の全壊棟数と災害廃棄物発生量の関係は、相関係数が 0.37 であり弱い正の相関を示している。このうち、平成 30 年 7 月豪雨において被害が集中した岡山県倉敷市は被害の規模が大きく異なる。平成 30 年 7 月豪雨での倉敷市を除いた場合の全壊棟数と災害廃棄物発生量の関係は、相関係数が 0.80 であり強い正の相関を示している。なお、土砂災害が同時に発生した場合には、災害の様相により土砂の発生状況が大きく異なる。平成 30 年 7 月豪雨災害に係る広島県災害廃棄物処理実行計画（平成 30 年 8 月 31 日）⁷⁾では、廃棄物混入土砂と建物解体廃棄物を分けて災害廃棄物発生量を整理している。そこで、平成 30 年 7 月豪雨での広島県内の市町村を対象に、全壊棟数と災害廃棄物全量の関係並びに混入土砂を除く建物解体廃棄物の関係を整理した。相関係数は災害廃棄物全量の場合が 0.79、混入土砂を除く建物解体廃棄物の場合が 0.99 であり、災害廃棄物全体よりも混入土砂を除く建物解体廃棄物の方が全壊棟数との相関関係がある。

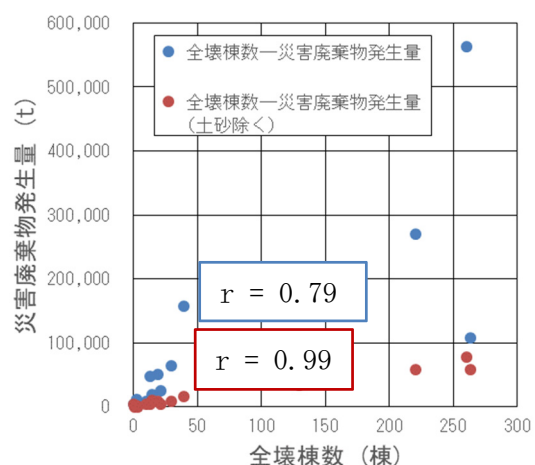
大規模風水害の情報整理から分かる特徴は次の 2 点である。1 点目は、混入土砂量が被災市町村によってばらつきがあることである。災害廃棄物全量と全壊棟数との関係は、強い正の相関を示しているが、混入土砂を除く建物解体廃棄物よりも相関係数が小さい。風水害のうち土砂災害は混入土砂量が多くなるが被害は局所的である。一方で、河川氾濫では混入土砂量が少な



(a) 全対象



(b) 倉敷市除く



(c) 土砂を除いた比較

(平成 30 年 7 月豪雨での広島県の事例)

図 15 全壊棟数と災害廃棄物発生量の比較

くなるが被害は面的に広がる。このように、風水害は発生する災害の種類や規模、場所の違いによって混入土砂量に違いがあり、相関係数が比較的小さくなったものと考えられる。2 点目は、風水害による災害廃棄物発生量は、全壊棟数との相関が極めて高いことである。これは、半壊判定となった建物からは廃棄物あまり出ていないことを示している。すなわち半壊判定の建築物は建物の状態を維持し、重量の大きい建物部材は廃棄物として発生しないものと考えられる。

(B) 風水害の浸水シミュレーション結果を用いた風水害災害廃棄物発生量・質分布の推定

河川氾濫による浸水想定結果から災害廃棄物発生量の分布と資材別割合の推計結果を図 16 に示す。四日市市全域の災害廃棄物発生量は三滝川水系で約 0.7 万 t、鈴鹿川水系で約 13.9 万 t、朝明川水系で約 16.0 万 t である。四日市市全域の地震動による災害廃棄物発生量が L2 地震では 142.9 万 t であることから、L2 地震の 10 分の 1 程度の災害廃棄物発生量が見込まれる。ストックデータは建築基準法などを基に設定される資材投入量から整理されており、資材投入量の資材別割合が建築年代により変わらない木造建築物を用いた推計では、災害廃棄物の資材別割合に水系による違いが見られない。本研究では、非木造建築物を検討の対象から除外しているが、災害の規模によっては非木造建築物の構造部材も廃棄物として発生し得る。そこで、浸水想定区域のうち浸水深が 2.0m を超える区域が保有するストックデータの資材別割合を図 17 に示す。市北部を流れる鈴鹿川水系ではコンクリートの割合が多く、市南部を流れる朝明川水系では鉄の割合が多い。堤防の破堤箇所近傍など、非木造建築物に被害が発生する可能性のある場所では、発生する災害廃棄物の資材別割合に地域差が発生する可能性がある。

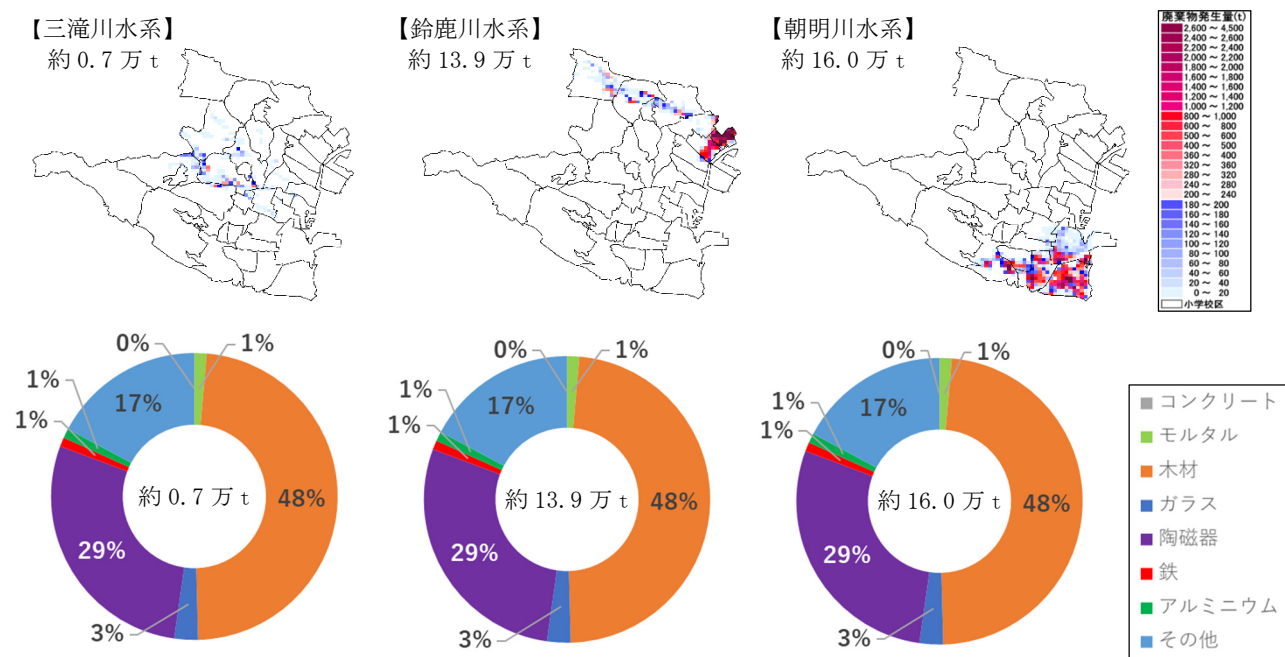


図 16 災害廃棄物の発生量分布と資材別割合（左：三滝川推計、中：鈴鹿川水系、右：朝明川水系）

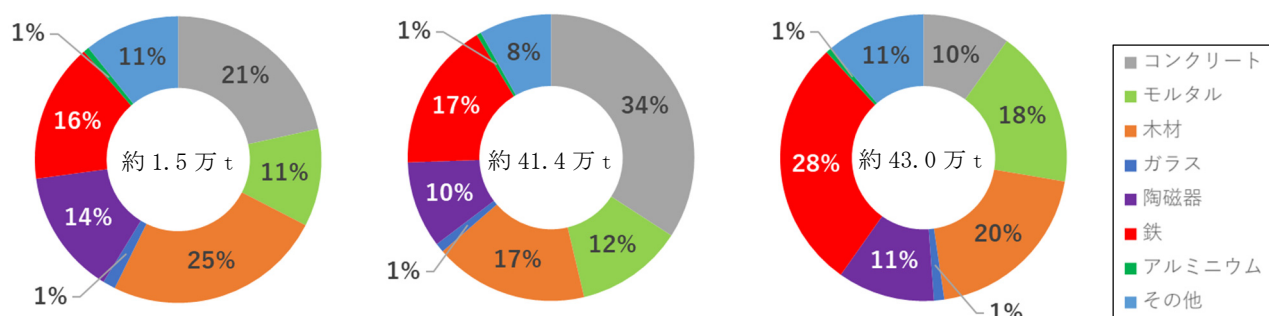


図 17 被害エリアの保有資材別割合（左：三滝川水系、中：鈴鹿川水系、右：朝明川水系）

(C) 風水害で発生した土砂から発生した分別土の性状把握

図18は岩泉試料と呉試料の組成である。両試料ともに四分法で1.5kgを採取し、2mmふるい上で水洗いしながら分級した後、ふるい残留分に対して木屑などの夾雑物を手選別することで得ている。岩泉試料は夾雑物が0.08%であり非常に少ない。呉試料については、100mmふるいを通過したものであるため夾雑物が5%程度であった。東日本大震災における分別土の夾雑物は、分別前のもので15%程度夾雑物が入っているものもあるが⁸⁾、分別することで夾雑物は今回の組成程度になっており、分別作業は組成に大きく影響する。図19に粒径加積曲線を示す。いずれの試料も一般的な土質材料と概ね同じ値であった。均等係数は岩泉試料が600.2、呉試料が121.5でいずれも大きな値であり、曲率係数は岩泉が1.0で呉が1.7であり、1～3の間にあることから、粒径分布はいずれの試料もなだらかである。

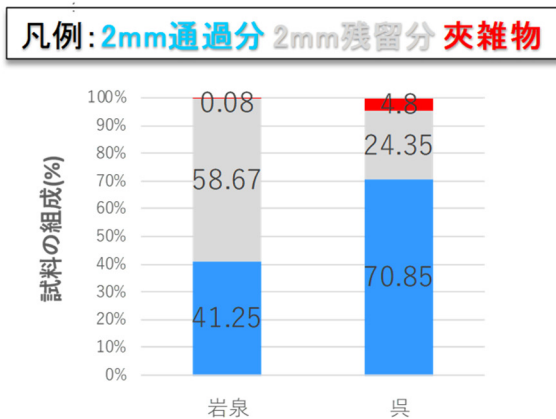


図18 風水害で発生した分別土の組成

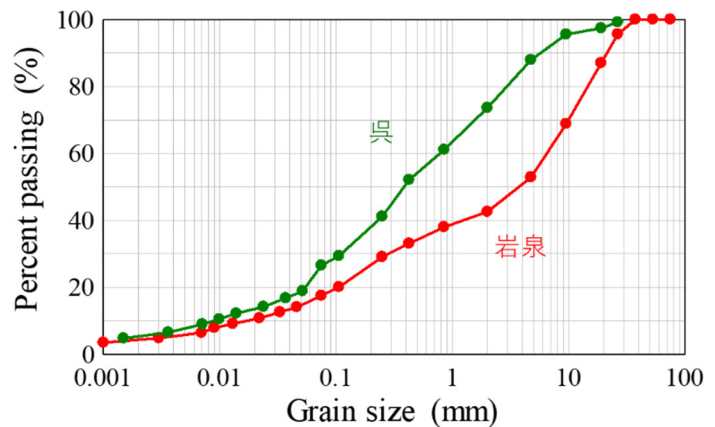


図19 風水害で発生した分別土の粒径加積曲線

図20に非排水三軸圧縮試験結果を示す。比較のため盛土材として利用されているA試料、B試料、C試料の結果も示す⁹⁾。いずれの試料も、締固め度95%の供試体を、二重負圧法等で十分飽和させ、等方圧100kPaで圧密後、せん断を行っている。岩泉試料と呉試料のいずれも、塑性膨張を伴う硬化挙動が顕著にみられ、A、B、C試料と比較しても、同程度か高い最大軸差応力を示す。なおC試料で造成された盛土は高い耐震性を有していることが数値解析的に示されており⁹⁾、それよりも最大軸差応力の大きい岩泉試料や呉試料で造成された土構造物は十分な締固めにより高い耐震性を有することが期待される。

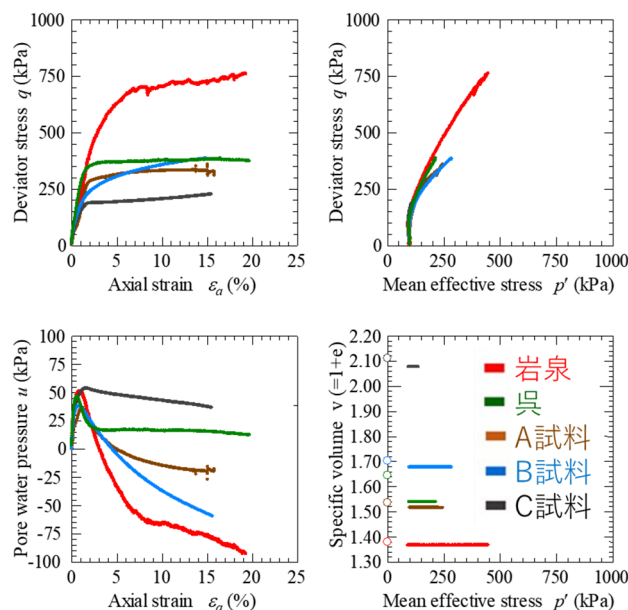


図20 非排水三軸試験結果

各試料の pH および電気伝導度 (EC) を計測した。試験結果を表 11 に示す。比較のため、東日本大震災の津波堆積土の値も示した⁸⁾。また、基準値は東日本大震災の時の復興マニュアルのものである¹⁰⁾。いずれも基準値を満たしている。今回限定的な 2 地域からの分別土であるが、力学特性・化学特性ともに良質土と変わらず、津波地震災害での処理過程で十分に分別土として取り扱えることがわかった。今回対象とする災害廃棄物処理事業管理システムは風水害の分別度処理をも対象にすることが可能であることを示唆している。

表 11 pH と電気伝導度

試料名	pH	基準値	EC (mS/m)	基準値
岩泉	8.3	6～9	21.7	200
呉	7.5		8.6	
津波堆積土(砂層)	5.9		107.3	
津波堆積土(粘土層)	5.2		323.1	

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

物質ストックデータを用いた積み上げ方式により、災害廃棄物の発生量及び質の分布を 250m メッシュで推計した。また、対象地域を三重県北勢地域の 4 市町（桑名市、鈴鹿市、いなべ市、菰野町）に広げ、災害廃棄物発生量・質分布の推定を実施し、推計した災害廃棄物の資材別割合に地域特性が反映されていることを確認した。本手法は、災害廃棄物処理の入り口側の課題、すなわち災害廃棄物の量と質を「平時・発災前」、「発災後」とともに空間的に把握することが可能となり、他のサブテーマと連携して目指す災害廃棄物等処理事業管理システムに資するデータを提供するものである。

2) 災害発生後の一次仮置場に集められた災害廃棄物量の計測方法の提案

本実験結果から、実際の災害発生（今回は水害）後の災害廃棄物集積状態の迅速な容積計測に対する UAV 測定の効率性と精度に関する有効性が確認された。具体的に混合可燃物の廃棄物量計測結果であれば、UAV 計測は 2106.1 m³（表 6 の⑧）に対し、LS 計測は 2215.5 m³（表 7 の④）、また計測時間で比較すると、岩手県久慈地区仮置場での LS 計測は 3 時間に対して、UAV 計測は 10 分となっている。これらの結果から、今回の計測方法は、十分な精度を維持しつつ、その所要時間の短さと非接触性から高頻度の測量が可能となり、集積開始時から測量を繰り返すことで高精度の集積履歴記録に使えることを定量的に実証できた。

また画像情報からの組成分析は、大量の災害廃棄物からサンプリングをして組成推定していた従来方法と比べると、UAV のオルソ画像から、廃棄物の山全体の表面画像を解析することができ、サンプリングによるばらつきをなくすることができる。画像解析からの廃棄物組成推定は、UAV 測量との相性が高い一方、気候・日照条件や廃棄物表面の泥汚れなどによる色相変化、袋詰め廃棄物の分類など、今後の課題としてのさらなる検証の必要性を明らかにした。

3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

首都圏直下地震や南海トラフ地震など巨大災害の発生が危惧される中、災害により発生しうる膨大な廃棄物に対して迅速かつ円滑な処理を行うための科学的知見の蓄積が求められており、過去の事例の検証が重要となっている。そのような中で、ICT を利用した災害廃棄物処理の実績データを取得することの重要性を確認した。加えて、取得・蓄積された実績データを分析することにより処理の実態を検証するとともに、高度

分別処理前後の各組成の質量割合を関係づける「分別係数」を定義し、その算出を行った。高度選別処理前の混合物ならびに高度選別処理後の可燃物、不燃物、ふるい下くず、分別土の構成関係を分析した結果、処理の進捗に応じた構成関係の変化が定量的に示されるなど、災害廃棄物処理システムの構築に有用なデータが得られ、災害廃棄物処理の事後検証に貢献した。加えて、膨大なデータを解析することにより高度選別処理を一般化し、将来の大災害における災害廃棄物処理の円滑な実施への貢献が期待できる成果が得られており、学術上の価値に加えて、全ての種類の災害廃棄物にも適用可能な「分別係数の拡張」など、実務上の有用性と発展性も高い。

4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

物質ストックデータを用い風水害の発生量推定の検討を行った。これにより、ハザードの分布情報を空間的に入手し、あらかじめデータベース化したストックデータと重ね合わせることで、災害廃棄物発生量と種類の分布を推計することができる。また、2 地域と限定的ではあるが、力学特性・化学特性ともに良質土と変わらず、津波地震災害での処理過程で十分に分別土として取り扱えることがわかった。今回対象とする災害廃棄物処理事業管理システムは風水害の処理をも対象にすることが可能である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 物質ストックデータを用いた地域特性に応じた発災前、発災直後の災害廃棄物発生量予測

災害廃棄物を処理する際、その地域ごとに発生する災害廃棄物や津波堆積土の量や種類は異なり、それが地域特性となる。自治体が持っている物質ストックデータを用い、各災害のハザード分布情報を得ることで、各自治体の地域特性および災害特性に応じた災害廃棄物の発生量・種類を予測することができる。そのため、地域特性に応じた災害廃棄物処理計画を作成する一助となり得る。

2) 災害発生後の一次仮置場に集められた災害廃棄物量の計測方法の提案

UAV を活用した災害廃棄物量の計測方法は、レーザー測量等の従来の測量方法と比べて 2 時間程度の大幅な作業時間削減が見込まれる。日々変化する災害廃棄物現場（仮置場など）に対しては、比較的安価な UAV を現地に配備することで、高頻度で測量・推定を実施できる作業の容易性もあり、迅速な処理が必要となる災害廃棄物処理現場での効率的な情報収集と分析に大きく貢献できるものと考ええる。これらの UAV を用いた機能や利便性により、様々な種類の災害が発生した際の災害廃棄物の容積を迅速・高精度に把握することが可能になるとともに、画像処理手法（今回は色相変換による廃棄物組成判別方法）における課題を抽出した。今後、AI 等含めた先端技術を応用することによる更なる検証により災害廃棄物の質の推定向上への貢献にも繋がる知見が得られた。

3) 二次仮置場の混合物の高度選別処理による選別品の発生量予測のための分別係数の提案

東日本大震災の災害廃棄物処理データをもとに提案した「分別係数」は、災害廃棄物の選別工程による処理前後の物質収支を、情報通信技術を活用した運搬車両重量の計測結果より算出することができる。「分別係数」を得ることで、災害の発生前後における災害廃棄物の処理計画や処理実行計画にとって重要な処理対象物の種類別の処理量がある程度の精度で予測可能となり、円滑で適切に処理を実施することができる。また、

予測値から分別後の選別品をどこでどのように使うのかマッチングしていくことで、迅速な処理事業を推進することができる。

「分別係数」は、実際の災害廃棄物処理の現場においても比較的容易に算出可能であり、災害廃棄物処理技術に関する社会実装という観点でも環境政策への貢献は高い。加えて、首都圏直下地震や南海トラフ地震等の大規模災害だけでなく、近年頻発する豪雨災害等における災害廃棄物処理への対応も可能であり、高度選別の対象物のみではなく、全ての災害廃棄物に対応する「分別係数の拡張」へ向けた水平展開も期待できる。

4) 風水害で発生した廃棄物発生量の予測

今回検討した試料においては、風水害で発生した試料についても、有効利活用可能であることを示した。東日本大震災で発生した分別土と比較して、化学的には塩分の影響がなく、物理・力学的には、夾雑物が少ないため、有効利用しやすいと考えられる。近年、風水害の発生頻度が高く、土砂が多く発生している中で、風水害時の分別土の利用促進は重要である。

6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) T. Katsumi, M. Okawara, M. Kawashima, K. Endo, H. Sakanakura, S. Iwashita, A. Takai, and T. Inui: Journal of JSCE, Vol.5, No.1, pp.145-156 (doi: 10.2208/journalofjsce.5.1_145), (2017)

“Soils recovered from disaster debris - Characterization and utilization”

2) 勝見武、大塚義一、三方浩允、切川卓也、土木学会論文集 G (環境)、74 巻、3 号、pp.126-141、(2018)

「情報通信技術に基づき蓄積された災害廃棄物処理実績の検証と分別係数の提案」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

1) T. Katsumi, M. Okawara, A. Takai and T. Inui: Proceedings of the 3rd Indo-Japan Workshop on Geotechnics for Natural Disaster Mitigation and Management (2017)

“Review of the material properties of recovered soils obtained from 2011 East Japan disaster debris for post-disaster management”

(2) 口頭発表(学会等)

1) 谷枝里子、山口和範、奥岡桂次郎：土木学会平成29年度全国大会第72回年次学術講演(2017)

「大規模災害における地域特性を考慮した積み上げ方式の災害廃棄物発生量予測

2) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、高井敦史、熊谷静花、加藤雅彦、谷川元治平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp.283-284

「2016 年台風 10 号での豪雨災害で発生した土砂の有効利用促進のための物性把握」

- 3) 今枝龍之介、中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、H30 年度土木学会中部支部研究発表会、(2019)

「豪雨災害により発生した災害廃棄物の特徴と分別土の力学特性の把握」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 勝見武、2018 年 11 月 13 日、平成 30 年度 リサイクルポートセミナー（主催：リサイクルポート推進協議会）「基調講演「リサイクルポート施策の高度化と大規模災害における災害廃棄物処理について」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

土木学会論文賞、公益社団法人土木学会、平成 29 年 6 月 9 日受賞、高井敦史・川島光博・勝見武・乾徹・岩下信一・大河原正文（東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土の品質とその変化）

土木学会論文賞、公益社団法人土木学会、勝見武・大塚義一・三方浩允・切川卓也（情報通信技術に基づき蓄積された災害廃棄物処理実績の検証と分別係数の提案）

8. 引用文献

- 1) 三重県、三重県地震被害想定調査結果、2014 年、<http://www.pref.mie.lg.jp/D1BOUSAI/84544007861.htm>
（四日市市を通じて三重県よりご提供頂いた）
- 2) 内閣府、南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）、2012 年
- 3) 国立環境研究所災害廃棄物情報プラットフォーム、<https://dwasteinfo.nies.go.jp/>、最終アクセス日 2019 年 3 月
- 4) 岩手県再廃棄物処理詳細計画（改訂版）、https://www.pref.iwate.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/006/041/01_kaitei_keikaku.pdf 最終アクセス日 2019 年 3 月
- 5) 平成 25 年度住宅・土地統計調査、<https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/tyousake.html> 最終アクセス日 2019 年 3 月
- 6) 国立環境研究所 災害廃棄物の重量容積変換について（第一報）
- 7) 広島県災害廃棄物処理実行計画 <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/eco/saigai-haikibutsu.html>
最終アクセス日 2019 年 3 月
- 8) 高井 敦史、保高 徹生、遠藤 和人、勝見 武、東日本大震災における津波堆積土の分布特性と物理化学特性、地盤工学ジャーナル Vol.8、No.3、pp.391-402、2013
- 9) Sakai, T. and Nakano, M.: Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure, Soils and Foundations, Vol.55, No.2, pp.1069-1085, 2015.
- 10) 岩手県、復興資材活用マニュアル（改訂版）、2013

Ⅱ－３ 災害廃棄物等から破碎・選別処理された分別土の利活用の促進【サブテーマ(2)】

〔要旨〕

本研究では、災害廃棄物処理過程において、ボトルネックとなっていた混合物の処理について、復興資材として利活用できるように、混合物からの選別品である分別土に対し力学挙動および化学挙動を把握し、利活用促進にむけた知見を得、処理フローにおける品質評価の手法を提案することを目的とした。得られた成果を以下に示す。

1) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための化学特性の把握と品質評価

重金属類の種類、津波堆積物の粒度によって堆積物への重金属類の吸着特性が異なり、細粒分の多い堆積物ほど吸着量が多いこと、コンクリート片、木片が混入することで分別土からの重金属類の溶出量に変化することを明らかにした。特に、木片よりもコンクリート片の混入によって変化が大きい。そして得られたデータより、夾雑物の許容混入率を提示した。また、許容混入率を用いることで、発災前に津波堆積土の調査地点およびその有害物質の種類をスクリーニングできる可能性があることを示した。

2) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

模擬津波堆積土は、乾燥させることや粒度調整により強度が上昇することを示した。また、肥料を用い木片腐朽を模擬することにより、簡易的に完全木片腐朽状態における分別土の力学挙動を得ることができ、それにより許容木片混入量を得ることを示し、簡易試験法を提案した。許容木片混入量を上回る木片を有する分別土については、セメント改良が効果的であることがわかった。

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

生成される津波堆積物の量と粒度に着目し、津波氾濫、海底堆積物移動を連成させる数値モデルを示し、津波堆積物の復興資材化を想定した粒度分布を予測できた。

4) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利用のための品質評価と処理フローの提案

有害物質含有を考慮した津波堆積土・分別土の品質評価を備えた処理フローを作成した。

1. はじめに

本研究では、災害廃棄物処理過程において、ボトルネックとなっていた混合物の処理について、分別係数を提案して、それを利用することにより、2 次仮置場で混合物が選別される不燃物、可燃物、分別土の発生量を予測することができるようになった（Ⅱ－2、3）の成果）。しかし、選別品の1つである分別土が、復興事業のインフラ整備に利用されるためには、その品質の評価が重要となっている。

ところが、分別土は木片やコンクリート片が混入しており、木片腐朽やコンクリート片混入などが分別土の力学挙動に及ぼす影響が把握できておらず、分別土を用いた土構造物の長期的な安定性が懸念されている。また、南海トラフ巨大地震などの津波地震災害において、化学コンビナート工業地域が被災した場合、工場から漏れ出た化学物質が土砂と混合することや、その土砂自体が自然由来の重金属を保有している可能性も懸念されている。有害物質を含む津波堆積土、分別土の利活用のための化学特性の把握もまだ不十分である。

2. 研究開発目的

本研究は、復興資材として利活用できるように、混合物からの選別品である分別土に対し、化学特性および力学特性を把握し、利活用促進にむけた知見を得、処理フローにおける品質評価の手法を提案することを目的とする。なお復興資材として津波堆積土も対象とする。また、分別土に関して、力学特性としては木片混入やコンクリート片混入が長期強度に及ぼす影響を、化学特性としてはそれらが有害物質の吸着に及ぼす影響を、ともに室内試験により把握する。下記にそれぞれの目的テーマを示すが、すべて災害廃棄物等処理

事業管理システムにおける要素研究として位置付けられる。

1) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための化学特性の把握と品質評価

- (A) 模擬津波堆積土への重金属類吸着特性に基づく漏出源からの重金属類の許容漏出量の推定
- (B) 夾雑物が混入した模擬分別土からの重金属類の溶出性の変化と夾雑物の許容混入率の推定
- (C) 夾雑物の混入によって溶出性が増加した分別土に対する溶出抑制対策（不溶化対策）

2) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

- (A) 模擬津波堆積土の力学試験による安全性評価
- (B) 肥料混入土の強度特性の把握と木片混入分別土の許容木片混入量の推定方法の提案
- (C) 許容木片混入率およびそれ以上の木片混入分別土の長期力学特性の把握
- (D) コンガラを混入させた分別土の力学特性の把握

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる津波堆積物の予測と環境質の推定

4) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利活用のための品質評価と処理フローの提案

3. 研究開発方法

1) 模擬津波堆積土・分別土の処理・利用の化学特性の把握と品質評価

(A) 模擬津波堆積土への重金属類吸着特性に基づく漏出源からの重金属類の許容漏出量の推定

四日市港周辺で採取した海底堆積物、河口堆積物を5種類の比率で混合し、模擬津波堆積土を作製した。海底堆積物は粘土に代表される細粒土、河口堆積物は砂に代表される粗粒土の粒度を持つ。そして、5つの粒度を持つ模擬津波堆積土に対し、有害物質（ここでは重金属類を対象）の比率を変えて混合し、①重金属類吸着等温線から重金属類吸着特性を評価し、②重金属類吸着等温線から土壤環境基準値を超過する際の重金属類吸着量（以下、超過吸着量）を推定した。また③推定した重金属類超過吸着量を基にどれくらいの重金属類が漏出源から漏出した場合に、土壤環境基準値を超過する津波堆積土が発生するか見積もった。なお、有機系、無機系の有害物質が存在する中、本研究では重金属類、鉛、ヒ素、フッ素、ホウ素、ニッケル（ニッケルは、土壤汚染対策法における特定有害物質ではない）を対象とした。重金属類を対象としたのは、多くの汚染事例が報告されており、また自然由来による汚染事例も多いからである。しかしながら重金属類以外の他の物質についても同様に評価することが望まれる。

(B) 夾雑物が混入した模擬分別土からの重金属類の溶出性の変化と夾雑物の許容混入率の推定

分別土の夾雑物として、不燃系としてはコンクリート片が、可燃系としては木片が主に挙げられる。また、前者はアルカリ性を示し、後者は水溶性の有機物を含む。そのため、土壤環境基準値を超過しない津波堆積土が存在したとしても、これら夾雑物により重金属類の溶出性が変化し、土壤環境基準値を超過する分別土となる可能性がある。そこで、土壤環境基準値を超過しない程度の重金属類が吸着した模擬津波堆積土に対し、夾雑物の混入率を段階的に増加させた模擬分別土を作製し、重金属類により溶出性が変化するかを明らかにするとともに、土壤環境基準値を超過しない夾雑物の混入率、すなわち許容混入率を提示することを試みた。具体的には、前項と同様の模擬津波堆積土に土壤環境基準値を超過しない程度に重金属類（鉛、ヒ素、フッ素、ホウ素、ニッケル）を吸着させ、この吸着模擬津波堆積土に、0.5 mm 以下としたコンクリート片、木片を質量比で0～20%混合し、重金属類の溶出性を評価した。夾雑物の最大混入率は、文献調査によって得た東日本大震災における夾雑物の最大混入値を用いた¹⁾。

(C) 夾雑物の混入によって溶出性が増加した分別土に対する溶出抑制対策（不溶化対策）

(B)の結果、コンクリート片、木片いずれも許容混入率が存在することがわかった。ここでは、夾雑物によって土壤環境基準値を超過する分別土が発生した場合を想定し、その対策法として不溶化を取り上げた。

対象は、各堆積土において許容混入率が存在したコンクリート片におけるヒ素、木片における鉛、ニッケルとした。具体的には、土壤環境基準値を超過する夾雑物の模擬分別土に対して、不溶化材（CaO、MgO、セメント系固化材）を重量比で 5% 添加混合した試料に対する重金属類の溶出性を評価し、不溶化による溶出量低減への有効性を検証した。

2) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

(A) 模擬津波堆積土の力学試験による安全性評価

分別土よりも利用が進んでいる津波堆積土に対しても、復興資材としての利活用促進のため、化学特性と同様に力学特性を把握し、安全性に対する品質評価を行った。津波堆積土として、1) (A) で示した海底堆積物、河川堆積物の 5 種類の混合土砂を作製し、津波堆積土を模擬し、東日本大震災での代表的な津波堆積土と比較する。また、各種室内土質試験（土質物理試験、締固め試験、コーン貫入試験）を実施することにより、津波堆積土の復興資材として利活用する際の物性、力学的安定性を評価した。

(B) 肥料混入土の強度特性の把握と木片混入分別土の許容木片混入量の推定方法の提案

木片が混入した分別土は、木片の腐朽により強度がどのように変化するかが不明で、有効利用の足かせとなっていた。そこで木片腐朽が進行した究極の状態として、分別土に空隙ができると仮定し、水に溶けて空隙を作る肥料を用いた実験を行い、木片腐朽が強度特性に及ぼす影響を調べた。土構造物の強度を求める試験の一つである一軸圧縮試験を採用し、(A) で示した模擬津波堆積土に対し、肥料混入量を変化させ、強度の変化を把握した。さらに、利用基準として一軸圧縮強度 50kPa として、許容木片混入量を把握した。

(C) 許容木片混入率およびそれ以上の木片混入分別土の長期力学特性の把握

本研究では、想定津波堆積土に許容木片混入率の木片を混ぜた想定分別土を締め固めることで供試体を作製し、ファンガスセラーに供試体を埋め、1 年以上経過後に一軸圧縮試験を実施し、木片の腐朽が分別土の強度特性に与える影響を把握した。ファンガスセラーとは、木片腐朽菌が繁殖しやすい恒温多湿な部屋に設置された腐葉土槽で、木片腐朽促進実験で利用される。さらに、許容混入率を上回る木片が混入した分別土について、セメント固化による改良効果を調べた。

(D) コンクリート片を混入させた分別土の物性・力学特性の把握

1) の分別土の夾雑物と同様に、可燃系としては木片、不燃系としてはコンクリート片とし、ここではコンクリート片の混入率が物性および強度特性に及ぼす影響を調べた。土材料として重要となる締固め特性および強度特性把握のため一軸圧縮試験を実施した。

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

本研究では、水流による土砂の移動を考慮した津波解析モデルを用い、南海トラフの巨大地震で被災が予想される四日市市を対象に、津波堆積物の発生量と粒度分布を求め、津波堆積物発生原単位および汚染の分布について検討した。津波解析モデルは、内閣府の平面二次元非線形長波理論²⁾に、小谷ら(1998)による遡上波先端部の処理³⁾を加え、Leapfrog 法と Staggered 格子を用い離散化したものである。津波の遡上先端では、水深が小さく移流項（連続式の第 2 項）が過大になり、計算を発散させる計算点が生じるため、梶島(1994)の Case 1⁴⁾に従って移流項を離散化した。連続式および運動量保存式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial z_h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = 0 \dots (1)$$

$$\frac{\partial v h}{\partial t} + v \frac{\partial v h}{\partial x} + g h \frac{\partial z_h}{\partial x} + \frac{f}{h^2} v h |v h| = 0 \dots (2)$$

ここに、 z_h は水面標高、 z_d は地面標高、 h ($= z_h - z_d$) は水深、 f ($= g n^2 h^{-\frac{1}{3}}$) は海底摩擦係数、 n はマンニングの粗度係数である。浮遊流砂移動モデルには、高橋ら(1999)のモデル⁵⁾を採用した。

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial vch}{\partial x} = E - D \cdots (3)$$

$$E = 0.012\tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdots (4)$$

$$D = w_0 c \cdots (5)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D - E \cdots (6)$$

ここに、 c は浮遊流砂の水中濃度、 E は砂が地面から浮上する量、 D は砂が地面に降着する量、 τ_* は無次元掃流力、 s は砂粒の水中比重、 g は重力加速度、 d は砂流の粒径、 w_0 は砂粒の沈降速度、 m は間隙を考慮しない堆積物の厚さである。 w_0 はRijnの式⁶⁾により、 τ_* はManning則により、それぞれ求めた。粒径が浮遊流砂の浮上と沈降に与える影響は、 E が $\sqrt{d}$ に、 D が $\sqrt{d} \sim d^2$ に、それぞれ比例して変化することで表現される。粒径が大きくなるほど浮上量に対して降着量が卓越し、地面が侵食されにくくなるとともに、浮遊流砂の水中濃度が上昇しづらくなる。これにより、砂の移動が抑制され、陸上に津波堆積物として形成されづらくなる。

解析条件としては、津波断層モデルと地形データは、内閣府⁷⁾により提供の、日本平面直角座標第06系を用いた。津波断層モデルのシナリオは、四日市港に到達した波高が最大となった、ケース⑦を採用した。以下、地震の発災時点を0 s、鉛直方向の原点を東京湾平均海面（T.P.）とする。初期水位は、0 s時点の四日市港における満潮時の水位（1.2 m）による水平な水面とした。海底土砂は、粒径がそれぞれ異なる7種類の独立した単一砂とした。粒径は0.075 mm、0.25 mm、0.85 mm、2 mm、4.25 mm、19 mm、75 mmである。これを、初期水位より低い所に厚さ1 mで与えた。それ以外の場所では、初期地盤より侵食されないよう、厚さ0 mで与えた。土粒子密度 ρ_s は2650 kg/m³、間隙率 λ は0.5とした。なお、境界条件は、全方向で流入流出境界とした。時間刻み幅 Δt は、10 mの落差でCFL条件を満たす $\Delta t = 2^{-4}$ sを用いた。重力加速度 g は、標準重力加速度9.80665 m/s²を用いた。マニングの粗度係数 n は、地形データに付随の分布を活用した。

以上のモデルを用い、津波断層による津波の発生から四日市市までの波の伝搬、および津波堆積物の生成を解析した。津波解析モデルに関する検証は、四日市市などに到達した波形および津波浸水面積を、解析結果と内閣府⁷⁾による結果を、それぞれ比較することで行った。土砂の移動については、津波堆積物が生成された地点における堆積物量の推移の確認により検証した。浸水面積は、初期状態で水深が0であり、後に水深が0より大きくなったセルについて面積の総和をとり求めた。津波堆積物の生成量は、初期水位より高い陸地における堆積量の合計を求めた。

4）力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利活用のための品質評価と処理フローの提案

有害物質の含有を考慮した木片混入分別土の処理・利活用のため、1）、2）の成果を導入した品質評価と処理フローを、東日本大震災で災害廃棄物処理にあたった自治体職員との議論を踏まえて、東日本大震災における岩手県復興資材処理マニュアル⁸⁾を参考に作成した。品質評価に対する評価基準として、環境に関する基準、木片混入分別土の利用に関する基準、強度に関する基準の3つとした。

4．結果及び考察

1）津波堆積土・分別土の処理・利用の化学特性の把握と品質評価

(A) 模擬津波堆積土への重金属類吸着特性に基づく漏出源からの重金属類の許容漏出量の推定

模擬津波堆積土として、海底堆積物と河口堆積物（いずれも2.0 mm以下）を乾燥質量比で3:0、2:1、1:1、1:2、0:3の5種類で混合したものとした。幅広い混合比で作製することで、実際に発生する可能性のある津波堆積土を網羅できると考えたからである。なお、図7で示すが、東日本大震災で発生した津波堆積土の粒度の範囲をほぼ網羅している。また、採取した海底堆積物、河口堆積物は、土壤環境基準値を超過する重

金属類を含んでいないことを確認している。

鉛、ヒ素を代表として、図 1、2 に鉛、ヒ素吸着等温線をそれぞれ示す。また、表 1 に対象とした重金属類の超過吸着量を示す。河口堆積物のみ(海(海底堆積物):河(河口堆積物)=0:3)における超過鉛吸着量は 0.001 (mg/g) であり、海底堆積物のみ(海:河=3:0)における超過鉛吸着量 0.110 (mg/g) と比較し、鉛吸着特性が極めて低かった。このことから河口堆積物が流失した場合、低濃度の鉛漏出が発生した場合でも土壤環境基準値を超える津波堆積土が発生する可能性が推測された。またヒ素は、河口堆積物のみ(海:河=0:3)では 0.0001 (mg/g) であったのに対して、海底堆積物のみ(海:河=3:0)では 0.0008 (mg/g) と、堆積物の混合比を問わず、吸着特性が低かった。したがって、いずれの粒径特性を有する津波堆積土においても少量のヒ素が漏出することで土壤環境基準値を超過する津波堆積土が発生する危険性が高いと考えられた。海底堆積物と河口堆積物の混合時には、鉛、ヒ素ともに海底堆積物の混合比が高いほど超過吸着量も高い傾向であったが、海:河=3:0 と海:河=0:3 の超過吸着量の差に比べると、超過吸着量に大差はなかった。このことから、海底堆積物と河口堆積物が混合した津波堆積土が発生した場合は、鉛、ヒ素漏出の汚染による危険性は同程度と推測された。海底堆積物は細粒分が多く、粘土鉱物を多く含んでいる。粘土鉱物の重金属類吸着量は砂よりも高い。また、陽イオンで主に存在する鉛のほうが陰イオンとして主に存在するヒ素よりも粘土鉱物に吸着されやすい。そのため、海底堆積物を多く含んだ模擬津波堆積土のほうが重金属類の超過吸着量が高く、またヒ素よりも鉛の超過吸着量が高くなったと考えられた。

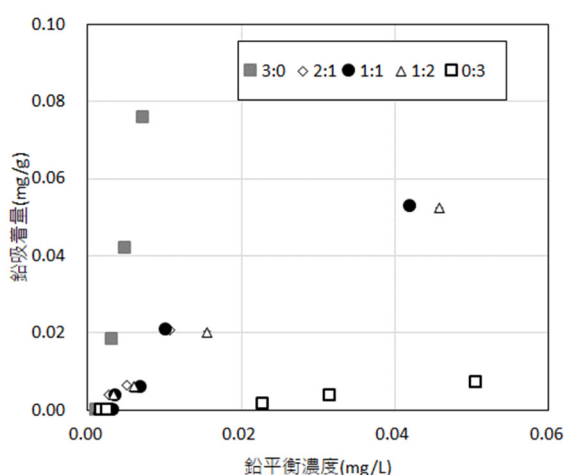


図 1 模擬津波堆積土に対する鉛吸着等温線

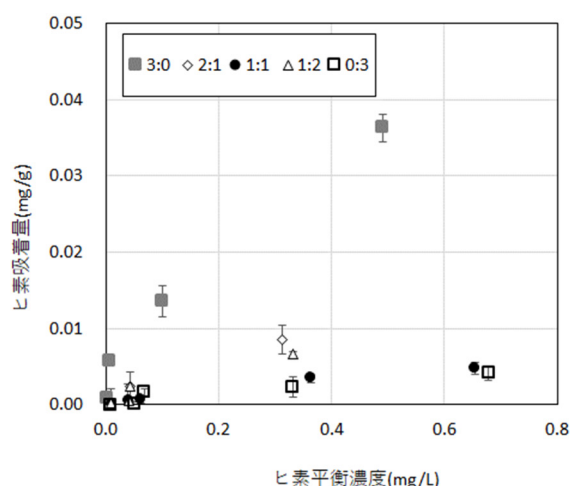


図 2 模擬津波堆積土に対するヒ素吸着等温線

表 1 重金属類の模擬津波堆積土に対する超過吸着量

海底:河口	吸着量				
	As	F	B	Pb	Ni
(mg/g)					
3 : 0	0.0008	0.031	0.382	0.110	0.380
2 : 1	0.0003	0.026	0.307	0.019	0.160
1 : 1	0.0003	0.021	0.235	0.012	0.055
1 : 2	0.0001	0.019	0.123	0.012	0.047
0 : 3	0.0001	0.004	0.010	0.001	0.003

超過吸着量を基に、土壤環境基準値を超過する津波堆積土が発生する、すなわち漏出源からの重金属類の許容漏出量を試算した。試算方法の概要を図3に示す。推定シナリオは、ある一地点から重金属類が一定の範囲を均等に漏出し、均等に堆積物に吸着すると仮定した。実際の漏出条件は、本シナリオとは異なると想定される。しかし、環境安全性を評価すべき津波堆積土の範囲を発災前にスクリーニングするという視点

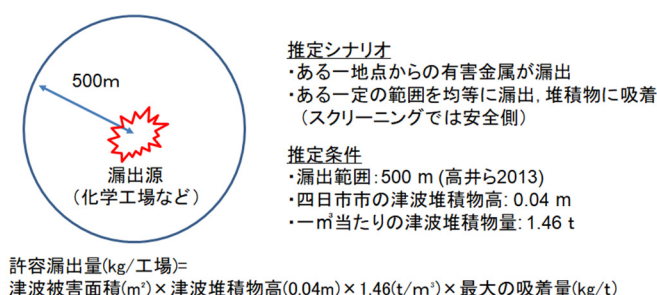


図 1-3 重金属類の許容漏出量の試算概要

では安全側に位置付けられる。また、推定条件として、漏出範囲は、東日本大震災時の文献値を参考に、最大到達距離の500mとした。津波堆積土高を0.04m、堆積物密度を1.46 t/m³とした。試算した結果を表2に示す。鉛の許容漏出量は、海：河＝3：0では5.02 t、海：河＝0：3では0.04 tと見積もられ、両者で大きな差が生じた。このことから津波堆積土の性状、および土砂性質により、許容鉛漏出量に大きな差が生じることが示唆された。また、河口堆積物が津波堆積土となって生じた場合には、比較的低濃度の鉛の漏出でも土壤環境基準値を超過する可能性が示唆された。海：河＝2：1、1：1、1：2の混合比率の津波堆積土は、それぞれ0.87、0.55、0.56 tと比較的に差がないと考えられた。ヒ素の許容漏出量も海底堆積物の混合比が高いほど多かったが、その量は他元素と比較すると非常に小さかった（2.93～35.2 kg）。以上のことから、地域ごとで発生する津波堆積土の粒径等の性状や対象となる重金属類の種類を考慮していきながら、津波堆積土、分別土の環境安全性を評価する必要がある。

表 2 漏出源からの重金属類の許容漏出量

海底：河口	最大保有量				
	As (kg)	F	B	Pb (t)	Ni
3 : 0	35.2	1.41	20.5	5.02	17.4
2 : 1	15.8	1.18	12.6	0.87	7.34
1 : 1	12.7	0.95	11.3	0.55	2.53
1 : 2	4.40	0.87	8.67	0.56	2.16
0 : 3	2.93	0.17	0.46	0.04	0.14

(B) 夾雑物が混入した模擬分別土からの重金属類の溶出性の変化と夾雑物の許容混入率の推定

鉛、ヒ素を代表として、夾雑物の混入による模擬分別土からの鉛、ヒ素溶出量を図4、5にそれぞれ示す。コンクリート片の混入率の増加に従い、いずれの堆積物混合比においても鉛溶出量は低下する傾向を示し、土壤環境基準値を超過することはなかった。コンクリート片混入によってpHが上昇し（データ省略）、鉛平衡濃度が減少したためと考えられた。特に、pHが10以上、すなわちコンクリート片混入率が10wt%以上になると、鉛平衡濃度は、いずれの堆積物混合比においても低位で一定となった。このことから、pHの上昇によって鉛の水酸化物、炭酸塩が形成し、鉛平衡濃度が低下したと考えられた。以上のことから、土壤環境基準値を超過しない程度に鉛が含まれる津波堆積土にコンクリート片が混入しても鉛溶出量が土壤環境基準値を超過する可能性は低いと言える。コンクリート片が混入した分別土の環境安全性は、コンクリート片混入率が0%の津波堆積土の環境安全性を評価することにより、分別土の有効利用に資することが可能であることが

示唆された。全堆積物混合比のいずれかの木屑混入率で鉛平衡濃度は、土壤環境基準値を上回った。全堆積物混合比とともに木屑混入率 0 から 3%にかけて鉛平衡濃度が増加する傾向を示し、5%以降は堆積物の混合比によって増減した。一般に pH が低くなるほど鉛の溶出は促進される。しかし、木屑混入率増加に伴い pH が低下したが（データ省略）、Pb 平衡濃度は増加したため、pH 変化は鉛溶出にほとんど寄与しないと考えられた。したがって、堆積物混合比によって鉛平衡濃度が異なる傾向を示したのは、木屑粒子への鉛の吸着と木屑由来の溶存有機物との錯体形成による溶出が同時に生じたためと考えられた。

ヒ素の平衡濃度は、いずれの堆積物混合率においてもコンクリート片混入率 3%にかけ増加したが、その後混入率 20%にかけ減少した。コンクリート片の混入によって pH が増加し（データ省略）、主に陰イオンとして存在しているヒ素の溶出が促進されたものの、更なるコンクリート片の混入によってカルシウムイオン濃度が上昇、カルシウムイオンを介したヒ素の架橋形成によってヒ素平衡濃度が低下したと考えられた。海底

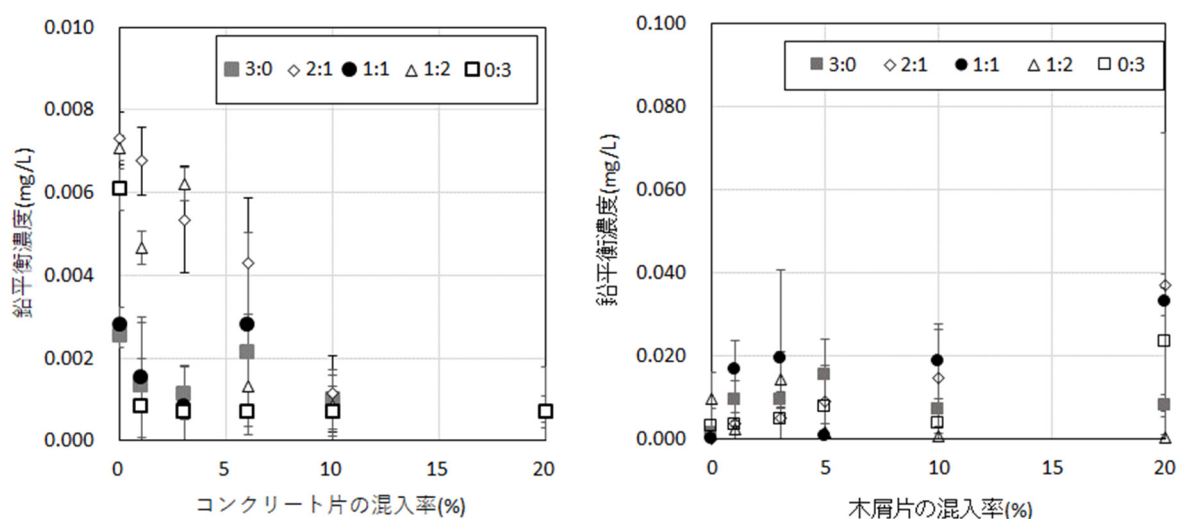


図 4 夾雑物の混入による模擬分別土からの鉛溶出量

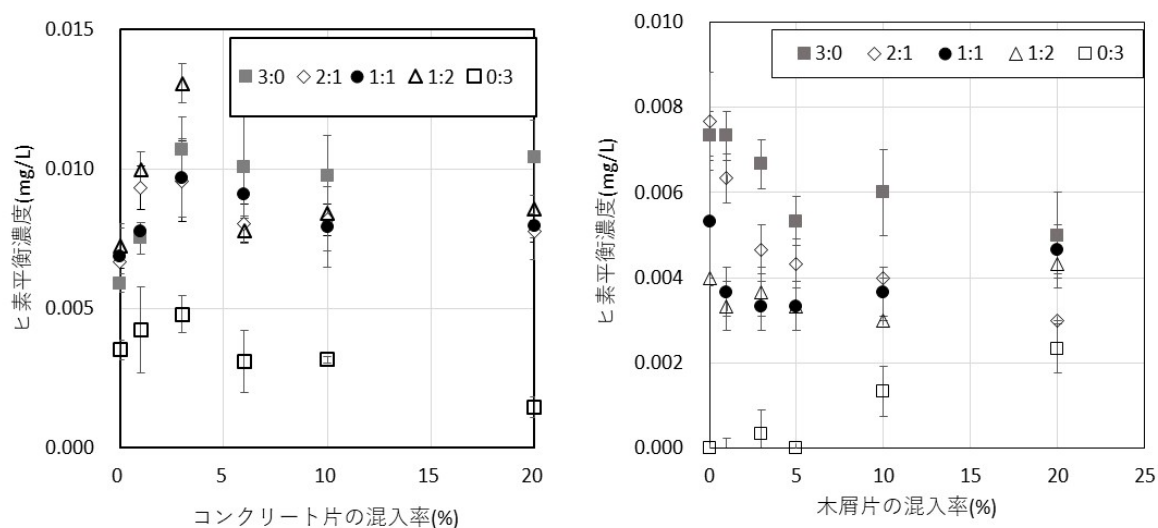


図 5 夾雑物の混入による模擬分別土からのヒ素溶出量

堆積物が混合されている試料(海:河=3:0、2:1、1:1、1:2)では、コンクリート片の混入率 3%では土壤環境基準値を超過するものの、河口堆積物のみの試料(海:河=0:3)では、コンクリート片が混入しても、土壤環境基準値を上回ることにはなかった。海底堆積物は河口堆積物と比較し、粘土鉱物を多く含むことから、比表面積

が大きく、非晶質鉄等の陰イオンの収着媒体を多く含む。そのため、海底堆積物が含まれている混合率では、堆積物そのものに多くのヒ素が吸着されていたため、コンクリート片混入によって土壤環境基準値を超過した溶出を示したことが考えられた。いずれの堆積物混合比および木屑混入率においても、ヒ素平衡濃度は土壤環境基準値である 0.01 mg/L を下回った。ヒ素平衡濃度の変化は、海底堆積物の混合比が高い 3:0、2:1 では木屑の混入率が増加すると As 平衡濃度は低下した。他方、海:河=1:1、1:2 ではほぼ一定で、海:河=0:3 ではヒ素平衡濃度が増加する傾向を示した。また、As 平衡濃度は木屑の混入率が同じ場合、海底堆積物の堆積物混合比が減少するにつれて低かった。ヒ素平衡濃度の低下は、カルシウムイオンを介したヒ素イオンの堆積物粒子や木片粒子への収着などが考えられた。

表 3、4 にコンクリート片、木片の許容混入率を示す。許容混入率とは、許容混入率以上の夾雑物が分別土に含まれていた場合、重金属類の溶出が土壤環境基準値を超過する恐れのある混入率を指す。したがって、2 次仮置場における高度分別処理などにおいて、夾雑物混入率のひとつの参考値になりうると思われる。夾雑物の許容混入率は、夾雑物の種類、重金属類の種類、堆積物の種類によって大きく異なることがわかった。したがって、分別土処理、利活用の際には、分別土の理化学性が通常の土砂とは異なることに留意しつつ、地域ごとで発生する津波堆積土の粒径等の性状や対象となる重金属類の種類、夾雑物の種類を考慮しながら、分別土の環境安全性を検討することが重要である。

表 3 分別土への許容コンクリート片混入率

海底:河口	許容混入率				
	As	Pb	F	B	Ni
	(%)				
3 : 0	3.0	N/A	1.0	N/A	N/A
2 : 1	3.0	N/A	3.0	N/A	N/A
1 : 1	3.0	N/A	3.0	N/A	N/A
1 : 2	3.0	N/A	3.0	N/A	N/A
0 : 3	N/A	N/A	3.0	N/A	N/A

N/A : 許容混入率は存在しない

表 4 分別土への許容木片混入率

海底:河口	許容混入率				
	As	Pb	F	B	Ni
	(%)				
3 : 0	N/A	3.0	N/A	N/A	0
2 : 1	N/A	5.0	N/A	N/A	0
1 : 1	N/A	0	N/A	N/A	0
1 : 2	N/A	1.0	N/A	N/A	20
0 : 3	N/A	10	N/A	N/A	20

N/A : 許容混入率は存在しない

(C) 夾雑物の混入によって溶出性が増加した分別土に対する溶出抑制対策（不溶化対策）

図 6 に不溶化材を添加した模擬分別土における重金属類の

溶出量を示す。コンクリート片混入におけるヒ素、木片混入における鉛、ニッケルの溶出量は、不溶化資材未添加では土壤環境基準値（ニッケルにおいては水道管理目標設定値）を上回ったが、資材を 10wt% 添加混合することでいずれの資材においても土壤環境基準値あるいは水道管理目標設定値を下回った。これらの結果は、夾雑物が混入し、重金属類の溶出量が増加した分別土においても不溶化資材を添加することで、重金属類の溶出を抑制できることを示す。

2) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

(A) 模擬津波堆積土の力学試験による安全性評価

模擬津波堆積土は、河口堆積物と海底堆積物（いずれも 2.0 mm 以下）を乾燥重量比で 100% : 0%、75% : 25%、50% : 50%、25% : 75%、0% : 100% で混合した土砂とし、それぞれの混合土砂を順に S100C0、S75C25、S50C50、S25C75、S0C100 と呼ぶ。表 5 に土粒子密度および工学的分類を、図 7 に粒径加積曲線と東日本大震災における津波堆積土の粒径加積曲線⁹⁾を示す。図 7 は、5 種類の混合土砂が東日本大震災における津波堆積土の粒径の範囲を内包していることを示しており、南海トラフ巨大地震における津波堆積土の主体となる土砂としてみなすことができる。

図 8 に締固め試験結果（最大乾燥密度 ρ_{dmax} ～最適含水比 w_{opt} 関係）を示し、表 6 にコーン試験結果を示す。図 8 に示すように、砂の混合率が多くなるほど締固め曲線はシャープに、最大乾燥密度は大きく、最適含水比は小さくなる。また、表 6 のようにすべての混合土砂は最適含水比において $q_c=800\text{kPa}$ を上回る強度を有している。

表 5 土粒子密度と工学的分類

項目	S100C0	S75C25	S50C50	S25C75	S0C100
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.627	2.637	2.650	2.664	2.681
地盤材料の分類名 分類記号名	細粒分 礫まじり砂 S-FG	礫まじり 細粒分質砂 SF-G	礫まじり 細粒分質砂 SF-G	砂質 細粒土 FS	砂混じり 粘土 CH-S

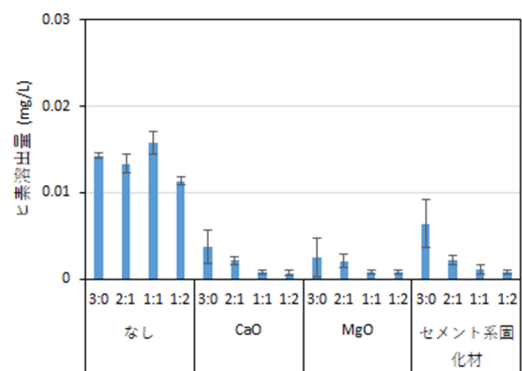
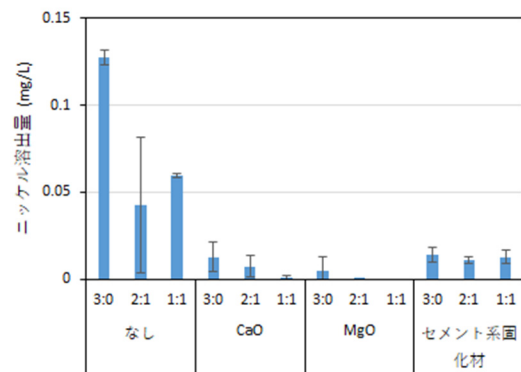
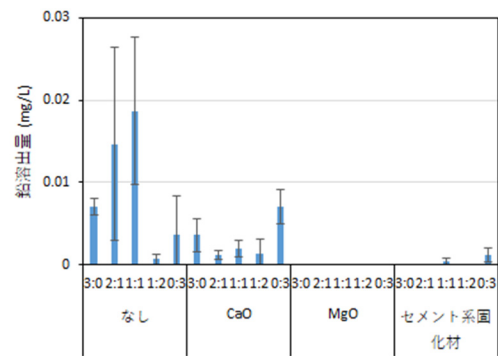


図 6 木片混入による鉛、ニッケル、コンクリート片混入によるヒ素の不溶化材添加による溶出量

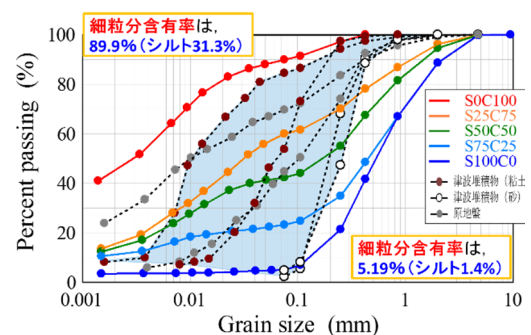


図 7 粒径加積曲線

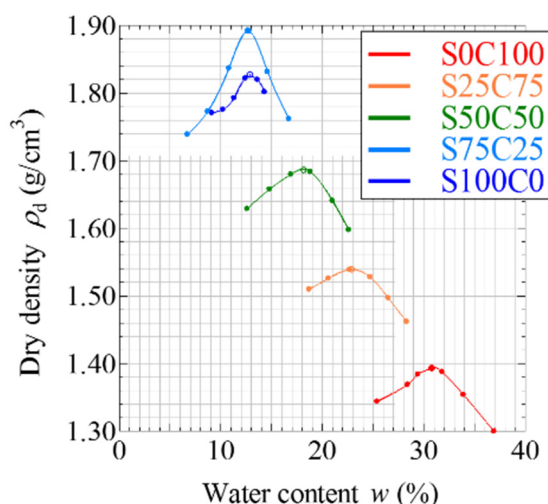


図8 締固め曲線

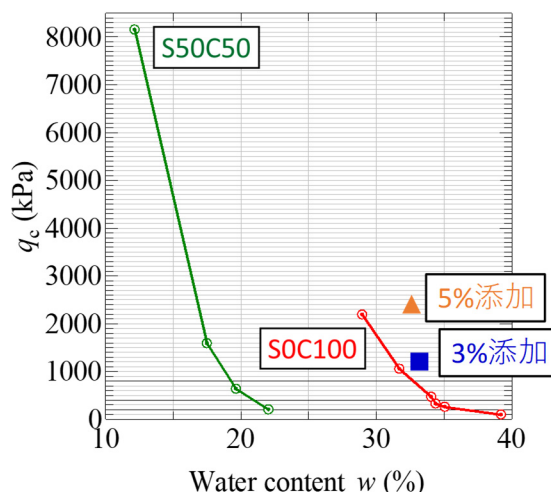


図9 含水比によるコーン指数の変化

表6 コーン試験結果

試料名	S100C0	S75C25	S50C50	S25C75	S0C100
コーン指数 q_c (kPa)	8947.2	3402.5	1675.6	2037.0	3102.2

図9にコーン指数 q_c ~含水比 w 関係を示す。図9より含水比が高くなるほどコーン指数が低下し、復興資材として活用できない可能性がある。逆説的にいうと、最適含水比では十分な強度を有していることから、含水比を下げることで、つまり乾燥も津波堆積土にとって有効な改良工法の一つといえる。さらに図9から粒度調整も改良工法の一つに挙げられる。さらに、 $w=40\%$ で泥土に分類されるS0C100に対して粉末状のセメント添加による改良効果を調べた。乾燥重量比で3.0%、5.0%のセメントを添加した後、1層25回で突き固めて作製した供試体を7日間恒温室で空気養生し、コーン貫入試験を行った結果も図9に示す。図9よりセメントを添加するだけでも含水比は低下し、強度については5%程度乾燥側のものと同程度を示し、セメントによる強度の改良効果を確認することができた。

(B) 肥料混入土の強度特性の把握と木片混入分別土の許容木片混入量の推定方法の提案

図10は、木片混入率と一軸圧縮強度の関係を示す。津波堆積土はS0C100～S75C25の4種類の粒度、それぞれ締固め度95%に密度を調整している。横軸の木片混入率は、木片と肥料の密度から体積比を算出し、設定木片混入率に対応する肥料を混入している。肥料混入率が高くなるほど、強度が低下している。その傾向は津波堆積土の粒度の影響も受ける。特にS25C75については混入率0%において最も強度が大きかったが、強度の低下度合いが最も大きくなった。

図11、図12はS0C100とS50C50に注目し、密度の違い、すなわち締固め度Dc95%と100%の供試体に対する一軸圧縮強度を比較した。混入率が0%に近づくほど締固め度を上げれば強度は上昇し、0%においては一軸圧縮強度で300kPa以上もの差があった。しかしながら、締固め度100%であっても混入率が大きくなるほど強度が低下する傾向は同じであり、締固め度95%の時と同様に混入率5%で一軸圧縮強度は50kPa程度となった。図13よりS50C50についても強度低下の挙動はS0C100と似た傾向であり、混入率2%で一軸圧縮強度の差が10kPa程度となった。

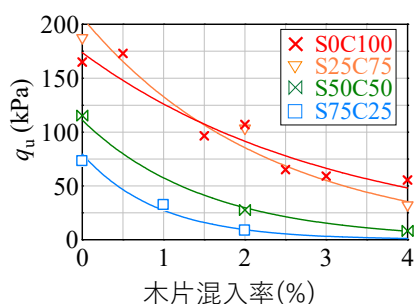


図 10 木片混入率と一軸圧縮強度の関係 (Dc95%)

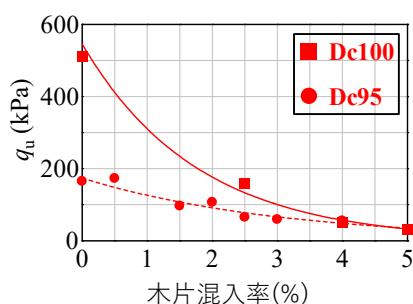


図 11 締固め度の影響-S0C100 比較

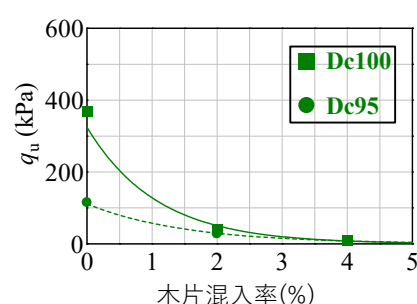


図 12 締固め度の影響-S50C50 比較

分別土の地盤材料として利用できる強度の基準を一軸圧縮強度 50kPa 以上として、木片の許容混入率を求めた。この値は、建設汚泥処理土利用技術基準において地盤材料として利用できる最低の値に対応する。表 7 は、模擬分別土の粒度、密度（締固め度）に対する木片の許容混入率を示している。

分別土の粒度が変化すると、つまり細粒分が多くなると、木片許容混入率は増加する。今回、強度特性の把握に一軸圧縮強度を採用しており、細粒分が多くなると土の粘着力が大きくなることがその理由の一つと考えられる。また、締固め度を増加させると、木片許容混入率を増加させることができる。しかし締固めの効果がそれほど大きくない原因の一つは、木片混入率は土粒子質量を基準にしているため、締固め度を上げると木片質量も多くなると考えている。したがって、木片を多く含む土砂については、木片を含まない土砂と混合し、土粒子質量を増やし木片混入率を減らすことで、強度を増加させる方が有効利用には効果的であると考えている。

なお、ここでの結果は、四日市港湾からの浚渫土砂であり、災害場所に応じて、土砂の物性は異なることから、全ての津波堆積土に対応するものではない。許容木片混入率の算定の 1 つの方法を提案している。

表 7 木片許容混入率

締固め度	S75C25	S50C50	S25C75	S0C100
95	0.5%	1.5%	3.5%	4%
100		2%		4.5%

(C) 許容木片混入率およびそれ以上の木片混入土の長期力学特性の把握

図 13 は、ファンガスセラーに 1 年放置した木片混入供試体と放置 0 日の木片混入供試体の一軸圧縮強度の関係を示す。○印は 1 年放置したケース、□印は放置 0 日のケースをそれぞれ示している。木片混入土は S0C100～S75C25 の 4 種類の粒度、それぞれ締固め度 95%としている。S75C25 を除き、腐朽により強度低下を引き起こしていることがわかる。しかし、許容木片混入率を求める際使った一軸圧縮強度 50kPa をいずれのケースも超えている。図 14(a)～(c)は、試験後、供試体から木片を取り出し、マイクロスコープにより撮影した木片断面の拡大観察画像である。どの粒度も木片の腐朽が進行しており、特に S75C25、S50C50 に比べ、S25C75 の方がより腐朽が進んでいる。粘土分が多いほど含水比が多くなり、土中の水分により木片腐朽は進むと考えられる。

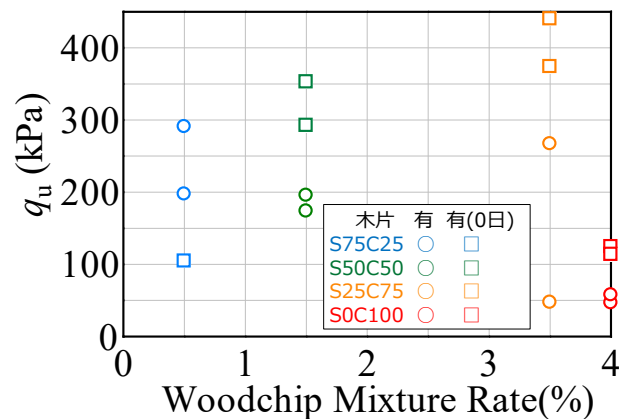


図 13 木片腐朽の有無による一軸圧縮強度の変化

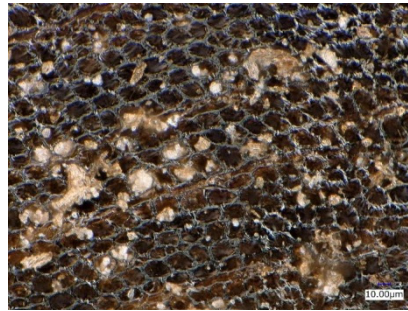
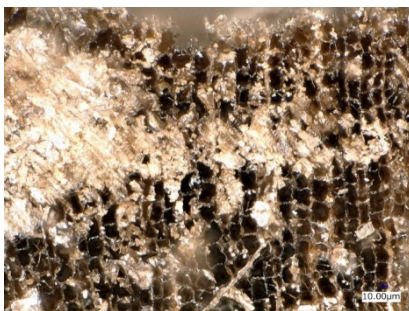


図 14(a) 木片の拡大写真 (S75C25) 図 14(b) 木片の拡大写真 (S50C50) 図 14(c) 木片の拡大写真 (S25C75)

図 15 に許容木片混入率を超えた木片混入供試体に対するセメント混入の効果を示した三軸圧縮試験結果を示す。木片が多く混入したとしても、セメントを混入させることにより、木片が腐朽する前の状態よりも強度が大きくなることがわかった。また、セメント添加量が増えると強度が大きくなる。供試体がアルカリ性になることにより、腐朽が抑制されていることや、セメントの固化作用により強度が増加したことが考えられる。

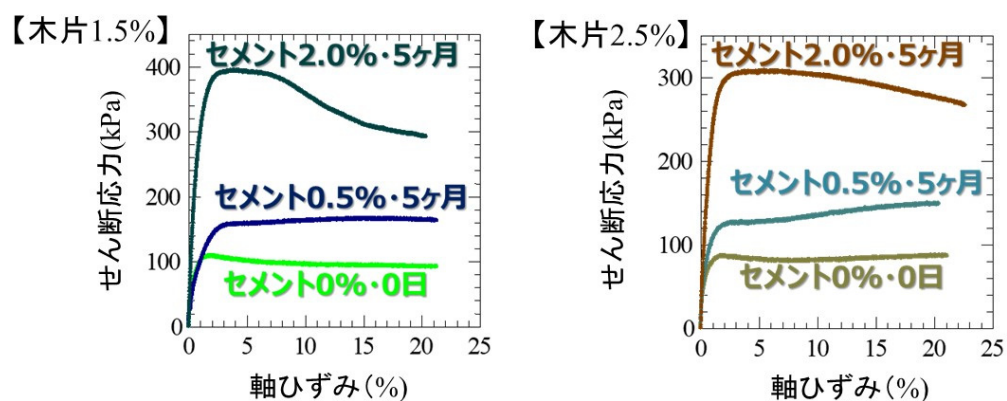


図 15 木片腐朽の有無による一軸圧縮強度の変化

(D) コンクリート片を混入させた分別土の物性・力学特性の把握

(A) で示した S50C50 (図 16 ピンク○) および S75C25 (図 16 青□) に不燃物の夾雑物の代表としてコンクリート片を混ぜた。コンクリート片の原粒度は図 16 の黒△であるが、図 16 の黒▲になるよう粒度を調整した。コンクリート片を元の試料の乾燥重量の 10、20、30%混合した。図 16 に示すときは混合率 30%の場合、

P30 と示す。S50C50 にコンクリート片を 30%混合した場合は、S50C50P30 となる。粒度試験結果としては、代表として 30%混ぜたものを示す。コンクリート片 30%混合後の S50C50 はピンク●、S75C25 は青■となった。コンクリート片を混合することにより、粗粒分が増えて、粒径加積曲線は右下にシフトする。

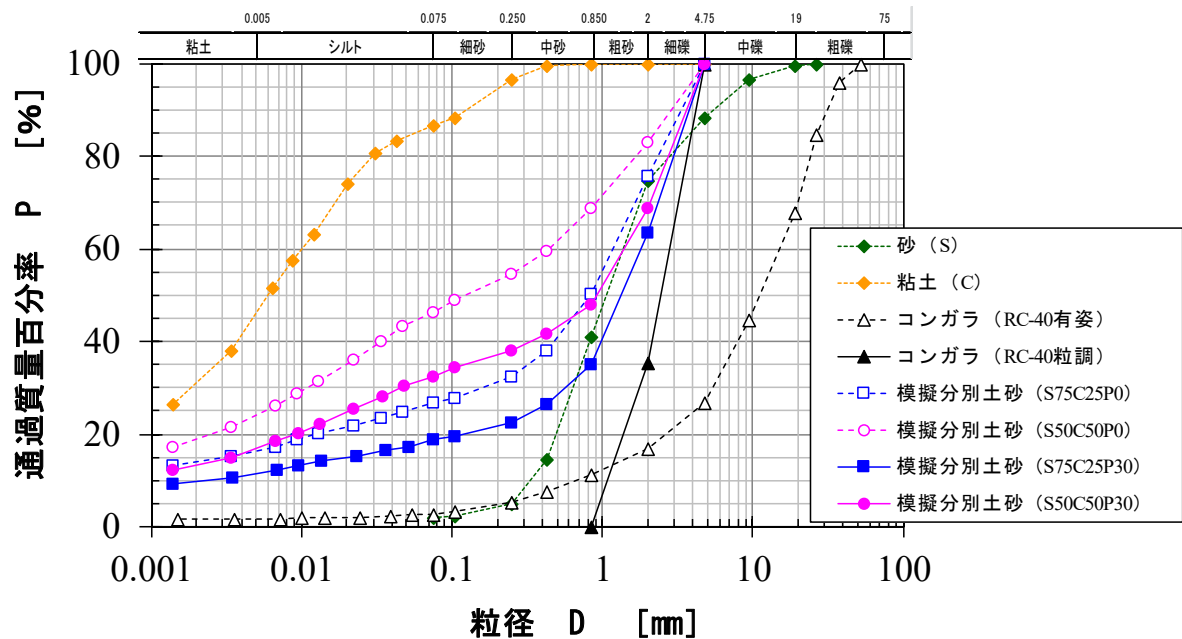


図 16 粒径加積曲線 (S : S100C0、C : S0C100、S75C25、S50C50 は図 7 と同じ)

図 17 に締固め曲線を示す。締固め特性はコンガラ混入率が大きくなるにつれて、最大乾燥密度が小さくなり、最適含水比が大きくなる。コンガラを入れて粗粒分が増えるものの、結果として粒径加積曲線が立つてくるため、締固めづらくなつたと推察される。図 18 に一軸圧縮強さとコンガラ混入率の関係を示す。コンガラ混入率が大きくなるにつれて、一軸圧縮強度が減少した。強度が減少した理由としては、締固めにくくなる理由と同じで、粒径幅が狭くなるためだと考えられる。しかし、強度としては 2) (B) で用いた一軸圧縮強度 50kPa を最低でも 2 倍以上上回っており、復興資材として十分な強度を有することがわかった。

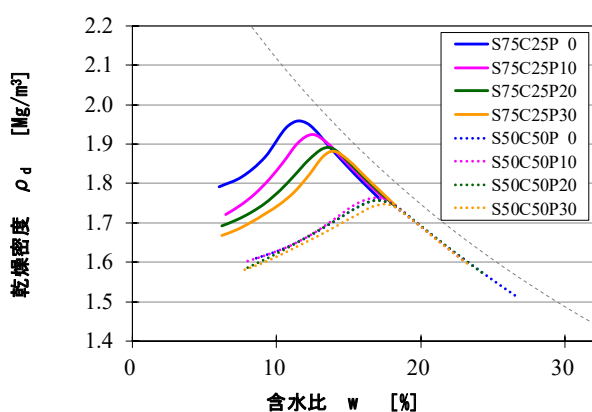


図 17 コンクリート片混合分別土の締固め曲線

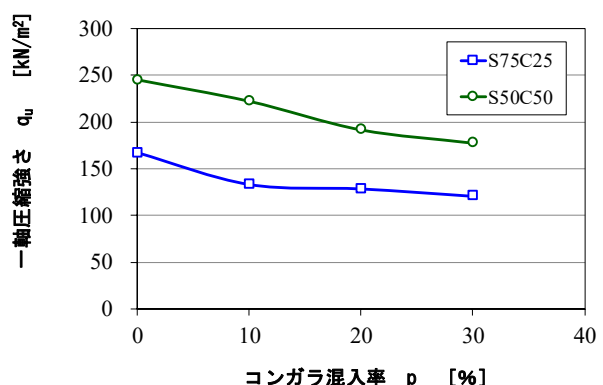


図 18 コンクリート片混入率と一軸圧縮強度の関係

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

四日市市への到達波形は、最大波高と最小波高で、内閣府⁷⁾との差が20 cm以内であった。津波浸水範囲は、本研究のモデルによる解析の方で浸水範囲が大きくなっている(図 19～21)。内閣府⁷⁾では越堤により堤防が破堤するのに対し、本研究では地形データに含まれる堤防のみ考慮したためと考えられる。

津波堆積物の生成が集中した東経 136.636101°、北緯 34.953523°地点において、粒径 0.075 mm、2 mm、75 mm の津波堆積物量推移、および浮遊流砂の水中濃度推移を確認した（図 22～24）。粒径 0.075 mm では、津波の到達による水位の上昇とともに、水中濃度が 90 kg/m³ 程度まで上昇したのち、沈降による濃度の低下が確認できた。一方、2 mm と 75 mm では水中濃度が 0 kg/m³ である時間がほとんどであった。粒径 0.075 mm では第 2 波でも堆積量が増加したが、粒径 2 mm と粒径 75 mm では増加しなかった。粒径 75 mm の堆積量は、粒径 0.075 mm の堆積量を基準にすると、わずか 0.3% であった。このことから、粒径が小さいほど輸送されやすいという特徴が表現されたと考えられる。

図 25 に示す津波堆積物の発生量は、津波浸水面積が内閣府⁷⁾の結果より約 44% 大きいにもかかわらず、発生量が最多と計算された粒径 0.25 mm の場合でも、津波浸水面積と津波堆積物発生原単位の積に比べ、1/3 未満に留まっている。四日市港は伊勢湾の奥にあり、津波速度が緩やかで、徐々に水位が上昇するような挙動で浸水する。大量の津波堆積物が発生した宮城県や岩手県の津波とは異なり、海底土砂の巻き上げ量が異なることが津波堆積物発生量の違いの一因として考えられる。堆積物の分布は、図 26 に示す。

さらに、海底土砂が 7 種の粒径で構成されていると仮定し、疑似的な粒径加積曲線を作成した（図 27）。たとえば、鉛溶出は粒径 0.25 mm 以下で 0.25 mm 超の粒子より 3 倍程度大きくなると報告されている¹⁰⁾。そこで、0.25 mm 以下で 3/14、0.25 mm 超に 1/14 の鉛含有量を仮定し、粒径毎の鉛含有量を汚染負荷量として求め、津波堆積物による汚染の分布を可視化した（図 28）。

本研究より、津波堆積物分布の各地点で粒度分布を予測することができ、1) (A) の粒径分布、有害物質の吸着量の成果を適用することで、粒度が影響する有害物質の吸着量から、将来は、有害物質の漏出量に対しその漏出範囲を予測できるようになる。

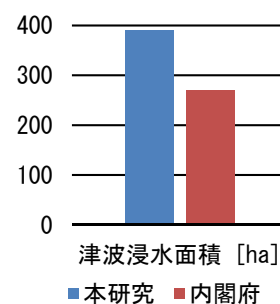
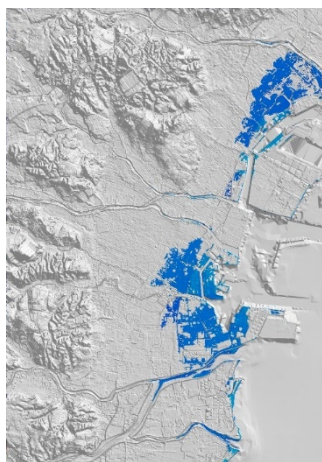


図 19 津波浸水範囲の解析結果 図 20 内閣府による浸水範囲 図 21 浸水面積の比較

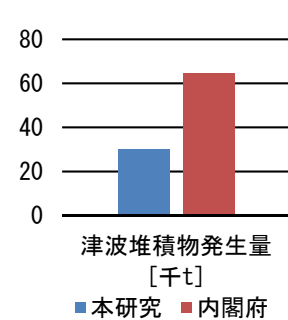
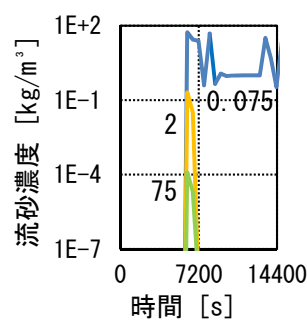
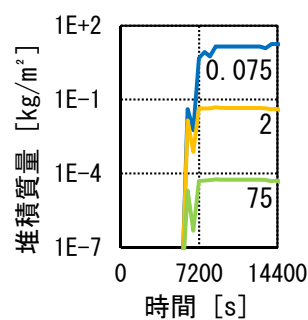
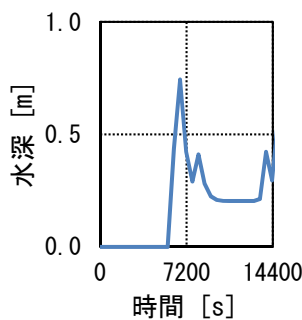


図 22 水深

図 23 単位面積あたり堆積質量

図 24 浮遊流砂水中濃度

図 25 堆積物発生量の比較

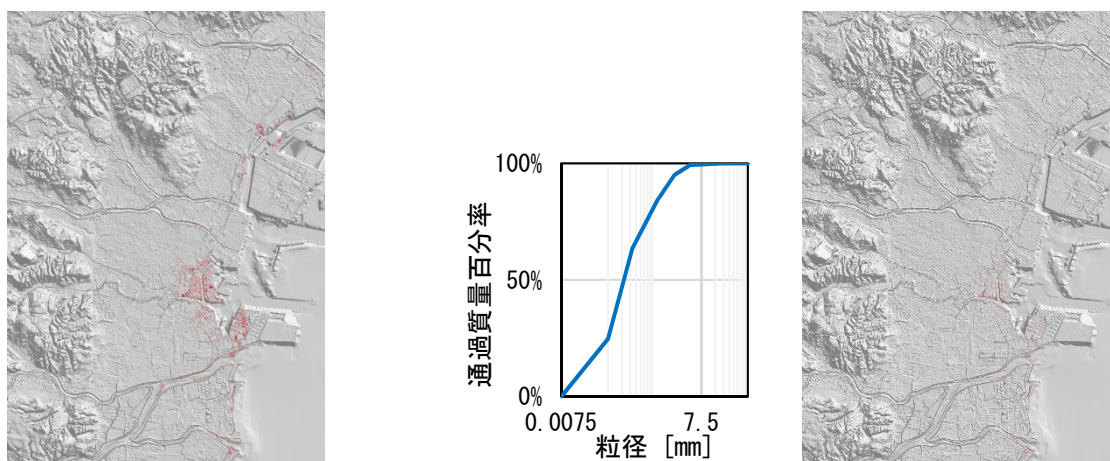


図 26 堆積物分布(75 μm)の解析結果 図 27 仮定した粒径分布 図 28 鉛汚染分布の解析結果

4) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利活用のための品質評価と処理フローの提案

津波堆積土・分別土の処理・利活用の処理フローを図 29 に示す。紙面の都合上、簡易版となっている。また本研究の成果 1)、2) との関係を示している。処理フローは一時集積所から受入先(最終処分と利活用先)までとなっている。

一時集積所において、有害物質を有する津波堆積土と有さない津波堆積土に分けている。これは、1) (A) の成果で、有害物質となり得る物質を持つ工場から有害物質が一定の範囲に均等に漏出し、均等に津波堆積物に吸着すると仮定し、土壤環境基準値を超過する津波堆積土が発生する範囲を、発災前にスクリーニングすることで得られる。被害を受けた場合に有害物質が漏出する恐れのある工場の位置を、GIS 上で把握しておくことで、一時集積所内での分類あるいは一時集積所自身进行分类することが可能となる。

それぞれの集積所からの一次仮置場に運搬された津波堆積土は、評価基準(1)により環境に関する評価がなされる。有害物質を含む堆積土については、第一種～三種特定有害物質の溶出量・含有量基準および対象化学物質、含まない堆積土であっても、自然由来の物質が入っている恐れがあるため、自然由来 8 項目(重金属類)についての評価を行う。図 29 は示していないが、評価基準(1)を満足した津波堆積物は、仮設道路などの緊急復旧の利用が求められる場合は、フレキシブルコンテナバックに詰めて利用する。ここでは、2) (A) の力学特性の成果が用いられる。なお、あくまで「仮」復旧資材であり、本復旧の際に用いる場合は、改めて二次仮置場へのフローへと進むことになる。一方、利用の緊急性を有しない場合は、一次仮置場で保管される。また混合物については、評価基準(1)を満足する場合でも、一次仮置場で保管される。

二次仮置場において、評価基準(1)を満足しない場合は、津波堆積物も土砂混合物も、港湾施設への利用可能性を考慮し、土壤汚染対策基本法の 10 倍の溶出量か否かで判定を行う。10 倍溶出量以上である場合は、最終処分を行う。10 倍溶出量以下である場合は、そのまま港湾施設の資材として利用できるとする。港湾施設以外の用途へと広げるためには、湿式分別処理を行うか、高度選別処理を施したあとに改良して品質を高める。改良方法については、1) (C) の成果である固化不溶化処理を行う(図中の改良③)。固化不溶化した後は、評価基準(1)で品質評価を行ったあと、評価基準(3)のコーン試験を実施し、発生土利用基準に基づいた強度に関する評価を行う。発生土基準は、第 1 種から第 4 種まで分類され、土構造物などの適用用途標準が示されており、復興資材としての分別土と用途のマッチングを行うことができる。

一時集積所から一次仮置場に移され保管された有害物質を保有していないと判断された津波堆積物と混合物は、二次仮置場に運搬され、高度分別処理が行われる。そこで木片の少ない分別土 A とそれ以外(分別土 B、ふるい下くず)とに分ける。分別土 A は、評価基準(3)のコーン試験により、上記と同様に分類する。必

かにした。特に、MgO 資材 5wt%を添加することで、いずれの夾雑物種、重金属類種においても溶出量が土壤環境基準値未満になることがわかった。

2) 模擬津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

模擬津波堆積土は、初期含水比や粒度に応じて強度が変化することから、乾燥させることや粒度調整による改良可能性を示すことができた。また、肥料で腐朽を模擬することにより、簡易的に完全に腐朽した状態における分別土の力学挙動を把握でき、それにより許容木片混入量を把握することができた。また、木片腐朽促進下で木片を腐朽させた場合についても試験を行い、腐朽により強度低下を引き起こした。しかし、許容木片混入率を求める際使った一軸圧縮強度 50kPa をいずれのケースも超えている。許容木片混入量を上回る木片を有する分別土については、セメント改良が効果的であることがわかった。

3) 土砂の移動を考慮した津波解析モデルによる土砂堆積物の予測と環境質の推定

津波堆積物の生成については、これまでも研究成果が挙げられているが、ここでは、生成される津波堆積物の量と粒度に着目し、津波氾濫、海底堆積物移動を連成させる数値モデルを示した。本モデルにより、津波堆積物の復興資材化を想定した粒度分布を予測することができ、将来、汚染分布状況を事前に予測することが可能となる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 津波堆積土・分別土の処理・利用の化学特性のための把握と品質評価

想定津波堆積土を用いて、発災前に、津波堆積土の調査地点およびその有害物質の種類をスクリーニングできる可能性があることを示した。発災前に情報を得ることで、発災後の経費、時間、労力などの軽減に繋がられる。また、夾雑物の混合量を許容混入率以下にすることで、環境安全性を担保した分別土を生産することができる」と期待される。許容混入率よりも大きい場合についても、不溶化することにより、分別土の利活用の可能性を示すことができ、分別土の有効利活用促進に貢献できた。

2) 津波堆積土・分別土の処理・利用のための物性・力学特性の把握と品質保証

発災前に、肥料による分別土の粒度に応じた許容木片混入量を得る方法を提案した。発災前にこれらの情報を得ることにより、発災後に粒度試験と強熱減量試験を実施し、有効利活用可能であるかどうかを判定することができる。このことから、分別土の有効利活用を促進するだけでなく、被災時に迅速な処理が可能になることが考えられる。また、許容値以上であっても、セメントにより、有効利活用することができる可能性を示しており、分別土の利活用促進に貢献できると考えている。

3) 力学特性・化学特性を考慮した分別土の処理・利活用のための品質評価と処理フローの提案

夾雑物が分別土の力学的、環境的な挙動に及ぼす影響を事前に把握し、復興資材の有効利活用のマッチングに向けた基礎データとして、有害物質含有を考慮した津波堆積土・分別土の品質評価を備えた処理フローを提案した。この成果は、本研究成果を社会実装していく上で重要な知見と言える。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 中野正樹、酒井崇之、神野琢真、池上浩樹、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 65-70 (2017)
「災害廃棄物・津波堆積土を想定した砂・粘土混合土砂の物性把握と有効利用への提案」
- 2) 鴫田稔、野口真一、中村吉男、中野正樹、加藤雅彦、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 229-236 (2017)
「東日本大震災で発生した津波堆積土の分別土中の夾雑物混入率に関する文献調査」
- 3) 谷川元治、加藤雅彦、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 439-442 (2017)
「地域特性による模擬津波堆積土を用いたヒ素等重金属類の吸着特性と潜在的危険保有量の推定」
- 4) 眞鍋磨弥、肴倉宏史、鈴木隆央、勝見武、乾徹、高井敦史 (2017) 第 12 回環境地盤工学シンポジウム、発表論文集、431-438
「津波堆積土を想定した河川及び海底堆積物の拡散溶出特性の評価」
- 5) T. Yamaguchi, T. Sato, M. Katoh, Journal of Environmental Management, Vol. 233, pp. 89-96 (DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.12.033), (2019)
“Post-depositional changes in elemental leaching from recovered soils separated from disaster waste and tsunami deposits generated by the Great East Japan Earthquake and tsunami”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 谷川元治、加藤雅彦、第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集 (2017)
「地域特性を考慮した模擬津波堆積土による各種元素吸着特性に基づいた潜在的危険保有量の推定」
- 2) 谷川元治、加藤雅彦、第 24 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (2018)
「模擬分別土の重金属類溶出特性とコンクリート片混入率との関係」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中野正樹、酒井崇之、神野琢真、池上浩樹、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 453-454 (2017)
「地震津波災害で発生した分別土の長期力学特性の把握」
- 2) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、神野琢真、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 461-462 (2017)
「災害で発生する津波堆積土を想定した砂・粘土混合土砂の物性把握」
- 3) 鴫田稔、野口真一、中村吉男、中野正樹、加藤雅彦、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 1537-1538 (2017)
「東日本大震災で発生した災害廃棄物等の分別土に関する夾雑物混入率を中心としたアーカイブ調査」
- 4) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、土木学会第 72 回年次学術講演会、pp. 647-648
「尿素肥料による想定木片混じり土の長期強度特性の把握」
- 5) Nakano, M., Sakai, T. and Nonoyama, H., Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul (Korea), 2017
“Long-term Mechanical Behavior of Disaster Debris Soil Considering Wood Chips Deterioration”
- 6) 谷川元治、加藤雅彦、第 52 回地盤工学研究発表会 (2017)
「模擬津波堆積土への鉛吸着特性評価に基づく危険鉛保有量の推定」

- 7) 谷川元治、加藤雅彦、第 28 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「地域特性を考慮した模擬津波堆積土に対するホウ素吸着特性」
- 8) 眞鍋摩弥、肴倉宏史、鈴木隆央、勝見武、乾徹、高井敦史、第 52 回地盤工学研究発表会、pp. 1987-1988 (2017)
「河川・海底堆積物中無機成分の拡散溶出試験による評価」
- 9) 中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、第 53 回地盤工学研究発表会、pp. 543-544、(2018)
「木片腐朽過程を考慮した木片混じり土砂の長期力学特性の把握」
- 10) 谷川元治、加藤雅彦、第 53 回地盤工学研究発表会 (2018)
「模擬分別土へのコンクリート片混入による重金属等溶出性の変化」
- 11) 竹内涼、加藤雅彦、第 53 回地盤工学研究発表会 (2018)
「模擬分別土への木片混入による鉛溶出性の変化」
- 12) 谷川元治、加藤雅彦、第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2018)
「コンクリート片混入によってヒ素溶出が増加した模擬分別土の不溶化」
- 13) 池上浩樹、中野正樹、酒井崇之、今枝龍之介、第 54 回地盤工学研究発表会 (2019)
「地震・津波災害で発生が想定される木片混入分別土の長期力学特性の把握」
- 14) 中野正樹、酒井崇之、池上浩樹、今枝龍之介、第 54 回地盤工学研究発表会 (2019)
「想定木片混入分別土の長期力学特性の骨格構造概念に基づく解釈」
- 15) 中村吉男、野口真一、肴倉宏史、鍋田稔、第 54 回地盤工学会研究発表会 (2019)
「木片の混入が分別土の締固めに与える影響について」
- 16) 中村吉男、小島淳一、小澤一喜、藤崎勝利、池尻健、第 54 回地盤工学会研究発表会 (2019)
「分別土の品質管理における落球探査試験の適用性について」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 中野正樹、名古屋大学 ES ホール、2017 年 6 月 14 日、参加者 100 名、南海トラフ巨大地震中部地域地盤災害研究委員会最終報告会
- 2) 中野正樹、名古屋国際会議場、2017 年 7 月 14 日、参加者 70 名、第 52 回地盤工学研究発表会のディスカッションセッション
- 3) 中野正樹、サイエンストーク、2018 年 11 月 21 日、参加者 8 名、災害廃棄物を有効利用するためには
- 4) 加藤雅彦、明治大学アカデミックフェス 2018、2018 年 11 月 23 日、参加者約 30 名、目に観えない土壌を科学的に研究して食糧生産と都市環境保全に貢献する

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 鵜田稔、野口真一、中村吉男、中野正樹、加藤雅彦：東日本大震災で発生した災害廃棄物等の分別土に関する夾雑物混入率を中心としたアーカイブ調査、第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp. 229-236 (2017)
- 2) 内閣府：津波予測のための長波近似理論
(<http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/2/1-2-8-01.html>)
- 3) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫:GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法、海岸工学論文集、45、356-360、1998.
- 4) 梶島岳夫：対流項の差分形式とその保存性、日本機械学会論文集 B 編、60 (574)、2058-2063、1994.
- 5) 高橋智幸、首藤伸夫、今村文彦、浅井大輔：掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発、海岸工学論文集、46、606-610、1999.
- 6) Rijn, L. C. van: Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publications, The Netherlands, 1993.
- 7) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会.
- 8) 岩手県：復興資材活用マニュアル（改訂版）、2013
- 9) 高井敦史他：東日本大震災における津波堆積土の分布特性と物理化学特性、地盤工学ジャーナル、vol. 8、No. 3、pp. 391-402、2013.
- 10) 小川泰正、山田亮一、山崎慎一、井上千弘、土屋範芳：堆積岩類からの重金属類の水溶出試験結果に対する粒径の影響堆積岩類からの重金属類の水溶出試験結果に対する粒径の影響、資源地質、63 (3)、125-131、2013.
- 11) 勝見武、廃棄物混じり土砂の特性化と、混入可燃物の Deterioration の影響、科学研究費報告書、2014

Ⅲ. 英文 Abstract

Large-scale Disaster Waste Treatment and Management System Considering Disaster and Region Characteristics

Principal Investigator: Masaki Nakano

Institution: Department of Civil and Environmental Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Aichi 464-8603, JAPAN
Tel: +81-52-789-4622 / Fax: +81-52-789-4624
E-mail: nakano@civil.nagoya-u.c.jp

Cooperated by: Kyoto University, Meiji University, Wakayama University, National Institute for Environmental Studies,

[Abstract]

Key Words: Disaster waste, recovered soil, Treatment and management system, Information and Communication Technology, Reconstruction material

On March 11, 2011, the Great East Japan Earthquake generated more than 30 million tons of disaster waste. This hindered recovery and reconstruction in the disaster-stricken area. In particular, recovered soil was not quickly reused, and it prevented rapid recovery. The present study explored a disaster waste management system to improve the ways by which local government officials can effectively manage and utilize the treatment of disaster waste, especially recovered soil. The conclusions obtained in this study are as follows:

1) The concept of a disaster waste management system that is in place before and after disasters was clarified. The system included a prediction of the amount of waste and recovered soil, an evaluation of the usage standard of recovered soil, and optimization of the treatment time and so on, which is shown in 2) to 5).

2) A geographical information model was developed to optimize the transportation routes for disaster waste, depending on the type of disaster. In addition, a model was proposed to calculate the waste treatment processing time from the disaster-stricken area to the final disposal site. The validity of the model was verified with data for the Great East Japan Earthquake.

3) A method to predict the amount of disaster waste using the material stock of buildings and infrastructure was established, and it was found that the amount and type of disaster waste depends on regional characteristics.

4) A “coefficient of separation” was newly defined as an index for the relationship between the mass ratios of waste fractions before and after treatment. Reasonable values of “coefficients of separation” were obtained for waste mixtures before treatment, and for burnable fraction, unburnable fraction, recovered soil, and residue after treatment. The obtained coefficients were

reasonably reflected treatment process with time. The coefficient of separation was shown to be a useful index for determining the disaster waste treatment policy.

5) The influence of wood chips and concrete chips on the mechanical and chemical properties of recovered soil mixtures was investigated. Consequently, the effects of the soil grain size and mixture on the amount of absorbed contaminants were also clarified. The optimum amount of wood chips and concrete for long-term stable structures made from recovered soil was found. In conclusion, in the present study, a comprehensive method for evaluating standards for effective use of recovered soil was proposed.