

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

巨大地震による災害廃棄物に関わる社会リスクをふまえた

サステイナブルな適応策評価

(3K153008)

平成 27 年度～平成 29 年度

Assessment of Sustainable Adaptation Measures to Manage Disaster Waste from Great Earthquake
against Related Social Risks

関西大学 北詰 恵一

平成 30 年 5 月

目 次

I. 成果の概要	・ ・ ・ ・ ・ 1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究目的	
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 震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価 要旨	・ ・ ・ ・ ・ 16
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 震災被害想定に応じた震災廃棄物量のコンティンジェント推定の評価 要旨	・ ・ ・ ・ ・ 34
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 震災廃棄物と再資源化物の輸送にかかる脆弱性と輸送の評価 要旨	・ ・ ・ ・ ・ 59
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- 4 社会リスク評価を介した震災廃棄物の処理・リサイクル拠点の適地評価 要旨	・ ・ ・ ・ ・ 75
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- 5 震災廃棄物の環境上適正な資源化技術の開発と評価 要旨	・ ・ ・ ・ ・ 87
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

• • • • • 101

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 27 年度～平成 29 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 巨大地震による災害廃棄物に関わる社会リスクをふまえた持続可能な適応策評価

課題番号 3K153008

研究代表者名 北詰恵一（関西大学）

国庫補助金 81,940,000 円（うち平成 29 年度：24,700,000 円）

研究期間 平成 27 年 5 月 29 日～平成 30 年 3 月 31 日

本研究のキーワード 災害廃棄物、震災廃棄物処理計画、レジリエンス、社会リスク、適応、プロセスモデル

研究分担者 小林 晃（関西大学）
尾崎 平（関西大学）
盛岡 通（関西大学）
秋山孝正（関西大学）
井ノ口弘昭（関西大学）
巖 網林（慶應義塾大学）
古谷知之（慶應義塾大学）
丹治三則（慶應義塾大学）（平成 27 年度のみ）
鶴田浩章（関西大学）
上田尚史（関西大学）

1. はじめに（研究背景等）

大都市部を中心に発生した阪神淡路大震災と仙台市および地方都市・町村を津波が襲った東日本大震災、さらに 2 回の地震が連続して発生した熊本地震での各経験は、廃棄物量・質・分布の想定が各地域特性によって大きく異なることに対応し、不確実な状況変化に対しても頑健な対応を可能にする仕組みが必要であることを提起した。また、被災時期によって都市化・人口減少の進行具合も異なり、想定状況変化も著しい。被災後の対策だけでなく平常時の工夫や施策も、円滑な災害廃棄物処理に求められることも改めて認識されている。南海トラフ地震で被災すると想定される地域は、人口規模や都市・農漁村の状況や産業構成において広域かつ多様である。私たちは、貴重な経験を踏まえ、その地域に即した息の長い、レジリエントな対応策を考え、実施していかなければならない。災害廃棄物処理計画および実行計画の作成はある程度進んできたものの、個々の市町村に至るまでその地域特性を十分に反映し、また、他の関連する計画と整合性を取りながら進めていく体制とするには、なお一層の取り組みが求められる。さらに、人口減少に端を発する都市、産業、市民生活の構造変化に対応した柔軟な見直しプロセスの確立も必要である。このため、都市コンパクト化を主とした詳細な土地利用構造の反映、震災廃棄物の量・質および分布推計量からの乖離を想定した対応、それに基づく処理・リサイクル拠点分布、さらに時系列上に変化しつつ時限の定まった処理期間内での域内外輸送、廃棄物の資源化技術変化などを踏まえ、それらの評価モデルを総合的体系的に構築し、さらに人口変化に代表される社会リスクを考慮した地域の特徴を踏まえた地域区分別のレジリエンス政策が強く求められる。

2. 研究開発目的

本研究は、次の点を明らかにすることを目的とする。

- ①さまざまな人口規模の市町村に対して、人口減少下での都市構造や関連する産業動向を踏まえて、想定される津波被害を考慮した地域類型を行い、それに基づく事前・事後を見通した効果的な震災廃棄物処理対策を体系的に整理する。その際、被災時点での人口減少の進展や都市構造変化を社会リスクとして捉え、それらに応じた柔軟な対応が可能なプロセスとすることにより、その社会リスクに適切に対応できる仕組みを構築する。
- ②都市構造の違いを表現できる原単位や推計方法を開発することで震災廃棄物の量と質の発生量分布推計をより精緻に行い、いくつかに分けた復興フェイズごとの廃棄物量の変化や輸送ネットワークの復旧状況に応じて柔軟に推計できる輸送モデルの構築を行う。これは、被災状況が想定と異なっている場合、処理時間をより短くする輸送を可能にすることを狙いとしている。
- ③震災廃棄物の資源化のための連携シナリオの構築と技術開発を行う。廃棄物の処理状況に応じた再資源利用可能性の整理やその向上のための実験を行い、膨大に発生する廃棄物の処理を一定期間内に終えるために、対象地域の仮置き場や処理施設の容量別分布状況などから、行政界を超えた事前・事後の連携対象、内容、方法と技術的な可能性を明らかにする。
- ④ 戦略的レジリエント政策による平時と災害時の双方に効果のある廃棄物処理政策について、社会リスクの影響や変動する発生量・輸送・処理への柔軟な対応、および自治体間や企業等との連携によって、より高い資源循環や低炭素化を実現する政策提言をプロセスモデルの形で行う。

3. 研究方法

(1) 震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価

まず、震災廃棄物対策の特徴を適切に表現

表1 現地視察ヒアリングリスト

し、網羅的に整理するため、レジリエンスの概念を定める。同時に、社会リスクを踏まえるために人口減少によって震災廃棄物対策に影響を及ぼす関係要素として行政や都市構造や産業動向を整理の軸として抽出し、双方を用いた整理表に取り組むべき対策を盛り込んだ「震災廃棄物対策マトリックス」を作成する。また、自治体が関連計画も含めて対策を実行する際に重要となる計画体系を整理し、総合的な取り組みへの示唆を得ることとする。

2015.06.26.~29.	東松島市, 石巻市, 女川町, 名取市
2015.11.08.~11.	高知県黒潮町, 高知市, 徳島県美波町等
2016.03.03.~04.	和歌山県串本町
2016.03.06.~07.	大分県臼杵市
2016.03.11.、05.12.	兵庫県（阪神淡路の経験と熊本地震支援）
2016.06.20.	和歌山県（県の取組と熊本地震支援）
2016.07.26.~27.	愛知県豊橋市, 田原市, 湖西市
2017.02.20.~21.	徳島県徳島市・香川県・環境省
2017.02.27.	高知県高知市
2017.03.02.	静岡県浜松市
2017.10.29.~30.	熊本県熊本市・益城町

さらに、地域特性を踏まえた政策を考えるため、同様の評価軸を使って、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域である139市町村を類型化し、類型ごとに「震災廃棄物対策マトリックス」を使って重要な施策の抽出を行う。また、地震が発生するまでに数十年経過する場合の人口減少に起因する社会状況変化によるリスクに適切に対応するために、政策の繋がりで構成されるプロセスモデルを示すこととする。これにより、震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価を可能にすることを目指す。

なお、情報収集については、文書だけでなく、2つの大きな地震の被災地、熊本地震被災地および南海トラフ地震対策を特徴的に行っている自治体等を訪ねてヒアリングをして情報を集めた。表1がヒアリングを実施した自治体等である。このヒアリングの成果は、他の研究テーマにも活かされている。

(2) 震災被害想定に応じた震災廃棄物量のコンティンジェント推定の評価

震災廃棄物量のコンティンジェント推定を、いずれの対象地域でも可能となることを想定し、一方で地域や地区の特性を反映できるよう、図2に示すフローで行う。

第一に一般的に入手可能な住宅・土地統計 14)ならびにゼンリンの住宅地図（建物ポイントデータ）を用いて、建物一棟毎に建物属性（建て方、階数、構造、時期別）の推計を行う。

第二に、250m メッシュ単位での外力条件を与える。その外力には、南海トラフ地震の事前対応として内閣府中央防災会議が公表している各地震、各津波シナリオに基づく震度(250m メッシュ)、浸水深(10m ピッチ、ポイントデータ)に関するデータを用いる。災害後は、防災科学技術研究所が構築した地震動マップ即時推定システム(QuakeMap)にて数時間毎に公表される250m メッシュ分解能による震度情報を用いる。

これらの震度情報などは更新される度にそのデータセットを置き換えることで、逐次、災害廃棄物の発生量の計算が可能である。

第三に、東日本大震災時のデータに基づく建物の構造別・築年代別の倒壊確率を用いて、評価する空間単位（最小空間単位250m）毎に全半壊の量を計算する。空間単位は250m、500m メッシュなど任意に設定できる。本研究での空間単位は1km メッシュとした。

第四に、全半壊、構造別の原単位を用いて空間単位での災害廃棄物発生量を推定する。地震による全半壊による廃棄物量の発生原単位は、現在、各自治体の災害廃棄物処理基本計画において、最も一般的に利用されている震災廃棄物対策指針(1998)に対応し、全半壊した延べ床面積あたりの発生量を算定する。また、津波堆積物は災害廃棄物堆積物(2014)に準拠し、算定する。原単位の数値自身については、今後の見直された場合、そのデータセットを置き換えることで対応可能である。

なお、この推定モデルの妥当性は、東日本大震災において被災した東松島市における実績値と比較することとする。

また、原単位の幅ならびに外力の違いによるコンティンジェントな災害廃棄物発生量の算定、さらに、耐震化や堤防強化などの対策を講じた場合の低減効果を算定し、後段のプロセスである仮置場の必要面積や仮設焼却炉の規模に与える影響について考察を行う。ここでは、仮置場における保管量の基本的な考え方を、「年間処理量分を仮置場に保管する」とした。仮設焼却炉については、1炉当たりの処理能力：300t/日、稼働日数：310日の条件において、処理期間を仮置場の必要面積の算定と同様に、2年、2.5年、3年で処理した場合の各ケースにおける必要基数の算定を行った。

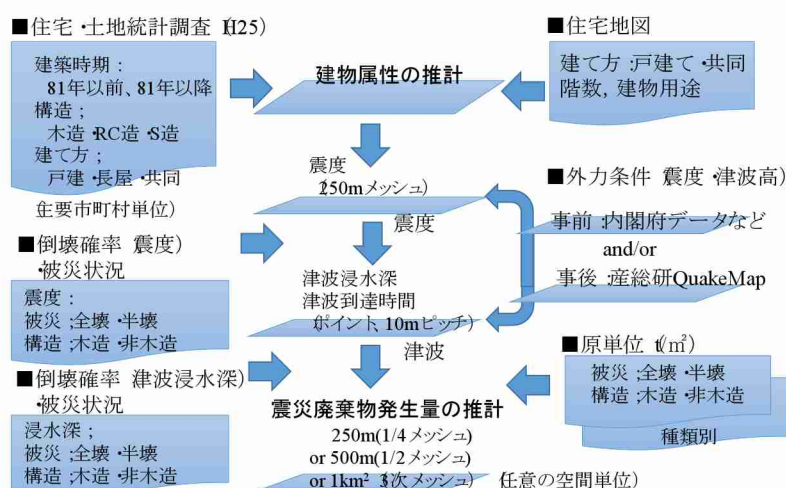


図2 地震津波災害による廃棄物発生量の推定フロー

(3) 震災廃棄物と再資源化物の輸送にかかる脆弱性と輸送効果の評価

震災廃棄物と再資源化物の輸送問題を明らかにするために、災害廃棄物輸送計画システムの構成を検討し、それに基づく輸送モデルを構築することとする。災害廃棄物輸送計画システムは図3、輸送モデルの構成は図4に示す。特に、輸送モデルは、交通量配分および輸送問題のサブモデルで構成されている。交通量配分

のサブモデルでは、廃棄物輸送にかかる所要時間を算定する。このとき、一般交通の OD パターン、道路ネットワークを考慮して、交通量配分モデルを用いて 1 日単位の平均的な道路交通状態を推計する。この結果を用いて、廃棄物輸送の各 OD 間の所要時間を算定する。輸送問題のサブモデルでは、廃棄物の最適輸送パターンを算定する。このとき、交通量配分のサブモデルで算定された OD 間所要時間を用いて、総走行時間が最小となる輸送パターンを決定する。なお、推計値の評価は、あいまい量が多いことからファジィ測度を用いて行う。

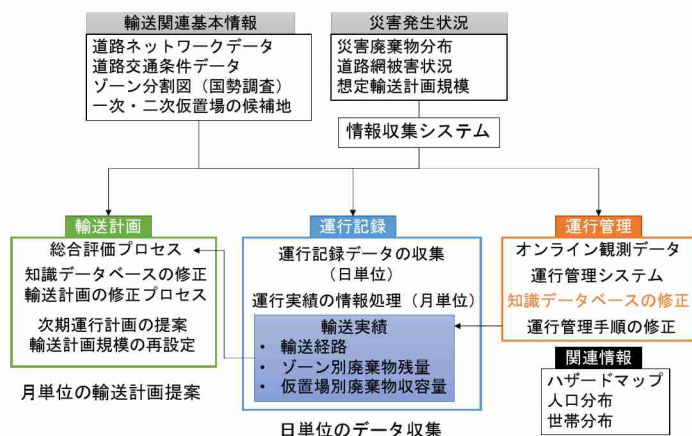


図3 災害廃棄物輸送計画システムの構成

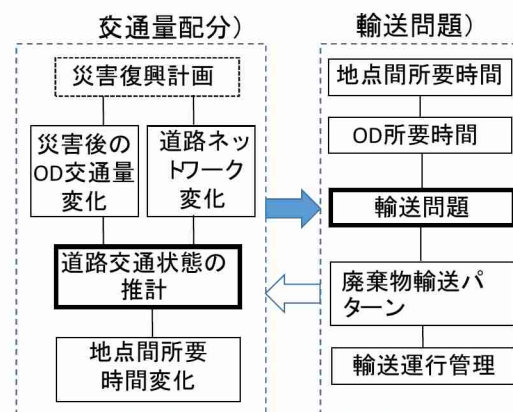


図4 災害廃棄物輸送モデルのフロー

（4）社会リスク評価を介した震災廃棄物の処理・リサイクル拠点の適地評価

災害廃棄物処理における社会リスクの因子を、図5に基づき分析した。分析方法はIPCCの「災害リスク＝災害因子×脆弱性（暴露、感受性、適応力）」を採用している。

社会リスクを介した津波災害廃棄物の発生と処理の要因分析

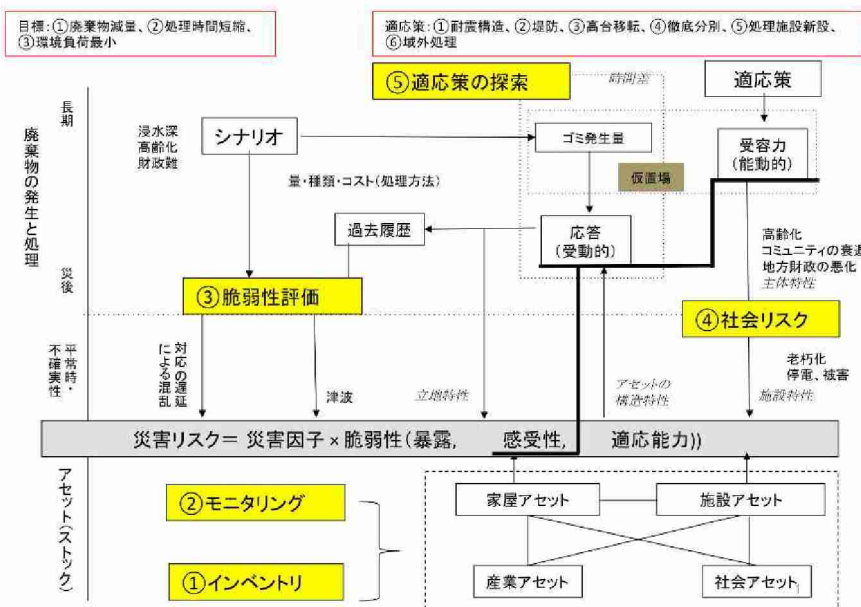


図5 社会リスクを介した津波災害廃棄物の発生と処理の要因分析

本研究において、災害因子は地震による津波災害リスクを考える。暴露は津波浸水深で、市街の立地条件と人口密度が影響する。感受性は建物・施設の構造的な特性を表す。適応能力に社会リスクが主に現れる。災害の発生は不確実性が高い。中長期的に人口、土地利用、建物の構造と利用、防潮堤、処理施設の整備・運営状況も影響する。高齢少子化による地域防災力の弱体化、財政状況の悪化による防災・減災施設の維持更新の遅れといった

たネガティブな側面と、事前復興計画の策定と推進によって地域防災力の強化、事前移住や防潮堤の整備、建物の更新改造による構造強化によるポジティブな適応策も考えられる。結論として、災害廃棄物処理計画は廃棄物発生量の削減、処理時間の短縮、環境影響の抑制を目標に検討し、そのための方策と支援ツールを検討することを目的にした。

それを踏まえて、評価対象地域のデータベースを構築した上で、仮置き場の候補地選定を行った。選定方法は、図 6 に示す通りである。土地利用をベースに、災害時拠点、避難施設、用途地域を踏まえ、仮置き場候補地としての前提条件を満たす候補地選定方法を提案した。次に、自治体のニーズや被害の程度にあった適切な候補地を選別するため、2 つの選定シナリオを提案した。用地取得容易性に着目したシナリオでは、公有地や空地、自然地から、土地所有者と候補地としての適性を評価し、用地取得コストや土壌汚染リスクへの配慮を示した。また輸送効率性に着目したシナリオでは、廃棄物処理施設までの距離や津波被災エリアからの距離を選定条件とし、交通渋滞の発生や運搬時の環境面リスクへの配慮を示した。上記のモデルを作成したうえで、2 つのシナリオ別に、静岡県遠州地域を事例とした仮置き場候補地の選定と評価を行った。

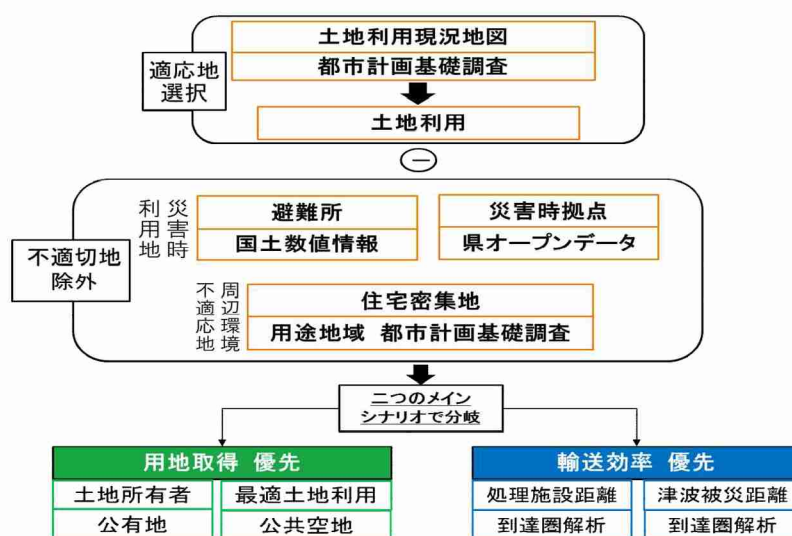


図 6 仮置き場候補地選定モデル

を評価し、用地取得コストや土壌汚染リスクへの配慮を示した。また輸送効率性に着目したシナリオでは、廃棄物処理施設までの距離や津波被災エリアからの距離を選定条件とし、交通渋滞の発生や運搬時の環境面リスクへの配慮を示した。上記のモデルを作成したうえで、2 つのシナリオ別に、静岡県遠州地域を事例とした仮置き場候補地の選定と評価を行った。

（５）震災廃棄物の環境上適正な資源化技術の開発と評価

実験による検討の前に、震災廃棄物の処理・有効活用の事例の収集と整理を行った。調査対象は震災関連の学会関連資料、各震災に関連する自治体等の報告書等の出版物とし、東日本大震災にかかわった関係者へのヒアリングも実施した。

それに次いで、震災廃棄物の適地資材利用を目指したリサイクル技術開発の基礎実験を行った。

震災廃棄物の有効利用後に膨張によるひび割れの発生や有害物の溶出に影響が大きいと考えられる膨張性を有する廃棄物に着目した。使用したのは、密度は大きい、膨張性を有するためにコンクリート用骨材としても JIS に定められていない電気炉還元スラグである。ここでは、電気炉還元スラグの膨張性や環境への影響を明確にすることを試みた。使用材料は、電気炉還元スラグと鋳物灰とし、その他に、火力発電所から排出されるフライアッシュも使用した。それぞれを微粉末、細骨材（5 mm 以下）として使用した。蛍石は、製鋼過程における溶鋼からの不純物除去のために使用するが、ふっ素を多く含むため、健康・環境問題上課題となっている材料である。

試験内容として、還元スラグの物性、環境安全品質、化学成分の調査および還元スラグを使用したモルタル、コンクリートの強度、長さ変化、膨張性の調査を行った。なお、鋳物灰とフライアッシュは、還元スラグの膨張性を制御する材料として使用した。

還元スラグの密度試験は、コンクリート用骨材の密度試験方法を用い、アルカリシリカ反応性については JIS A 1145 の化学法を用い、膨張性については鉄鋼スラグ水和固化体に適用されている粉化率試験を用いて検討した。還元スラグの環境安全品質と化学成分については、同種スラグである電気炉酸化スラグの JIS A 5011-4 にしたがって、試験を行った。各種試験

モルタルの強度および長さ試験については、JIS R 5201 のセメントの強さ試験、JIS A 1129-3 の長さ試験方法に準じて行った。膨張性試験については JIS A 6202 の膨張材の膨張性試験に準じて行った。

4. 結果及び考察

(1) 震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価

表2 震災廃棄物対策マトリックス

対象領域 レジリエンス特性		行政	都市構造	産業
頑健性 (Robustness)	緊急 処理	【役場庁舎の防護対策など】 ・建物の耐浪化等 ・施設の配置見直し	【ライフライン・インフラ施設の 防護】 ・電力・水道等の耐震化 ・交通施設の耐震化	【処理関連施設の防護対策】 ・既存施設の耐震診断 ・既存施設の耐震性強化 ・津波浸水対策
	本 処理	【情報収集・連絡体制の強化】 ・連絡手段の多重化、防御 ・連絡体制の整備 ・連絡手段の訓練	【ライフライン・インフラ施設の 機能維持】 ・ライフラインの多重・分散化 ・交通の代替・アクセス性向上	【処理関連施設の緊急対応】 ・電力・燃料・冷却水等の確保 ・補修に必要な資機材の確保 ・補修予定事業者との協力体制
資源 (Resource fulness)	緊急 処理	【初動時に必要な人材確保】 ・自衛隊・消防等の協力体制 ・総括・指揮に係る人材確保 ・土木・建築職を含む人材確保	【一次仮置き場の設置対策】 ・分散した用地の確保 ・緊急時における他の土地利 用ニーズとの整合	【解体や運搬に係る協定・資機 材の確保】 ・建設・運搬業との協定締結 ・業務に係る資機材の確保
	本 処理	【広域連携に資する協力体制】 ・人材や資機材の連携体制 ・広域処理に係る連携体制 ・受入処理に係る広報	【二次仮置き場の設置対策】 ・港湾などの低利用空間検討 ・都市づくりでの空間確保 ・後土地利用を考慮した選定	【中間処理や処分に係る協定・ 資機材の確保】 ・既存施設での処理・協力検討 ・建設業・リサイクル業との協定
即応力 (Rapidly)		【処理体制構築に係る施策】 ・処理関連計画の策定・改定 ・行政職員に対する訓練 ・住民に対する啓発・広報	【緊急対応への備え】 ・ライフライン・インフラ施設の 点検・補修体制 ・情報の電子化による管理	【非常時の事業継続計画】 ・処理施設における復旧対策 ・建設業における出動体制 ・有害物質の流出に係る対策

【】大項目、・中項目

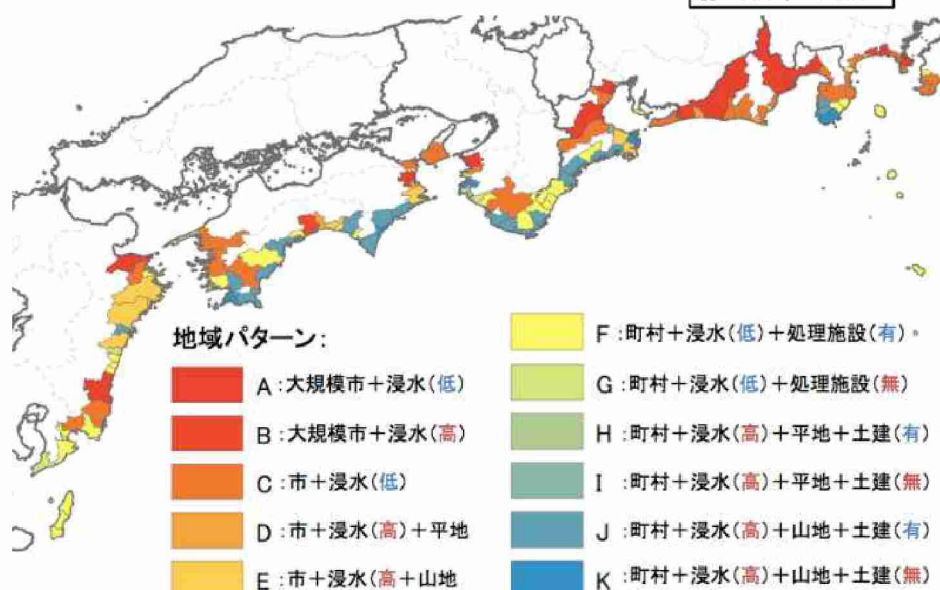


図7 2015年における地域類型パターン

(2) 震災被害想定に応じた震災廃棄物量のコンティンジェント推定の評価

図8は、推定モデルを東松島市に適用した結果である。災害廃棄物発生量の全体の比較から、本研究により構築したモデルによる推定結果が実測よりも約10%程度多い結果となっている。この要因を考察した結果、全半壊の建物数の推定結果が、実測よりもやや多い結果となっており、このことが一因として考えられ、市域全体を震度6強、計測震度6.4で計算を行ったことが原因と考えられる。次に、内訳についてみると実測と比べて推定値は、木くずが85%に対して、コンがら、金属くずが1.1倍、その他が1.4倍であった。このように「その他」の割合が高く、「木くず」の割合が低い結果となったのは、今回のモデルが、阪神淡路

レジリエンス特性と、行政、都市構造、産業の対象領域に基づいて作成した「震災廃棄物対策マトリックス」は表2に示す結果を得た。このマトリックスによる対策項目の整理は、市町村ごとに異なる地域課題に即した対策内容の明確化を促すことを目的としている。地域特性別に重点的な政策が選択されることになる。

また、多様な対象地域の地域特性をふまえた地域類型化の結果は、図7に示す通りであり、市の人口規模、浸水率、地形、処理施設の有無や土木建設産業の動向などによって11種類に分類できた。また、2015年と2040年で類型結果が異なり、重点となる震災対策が異なる市町村も見出すことができた。これにより、社会リスクを踏まえた時間軸に沿った政策の連なりを考えていく必要性が指摘できる。

大震災後に策定された指針に基づき算定していることから、阪神淡路大震災と東日本大震災の分別率の差がこのような結果を招いたと思われる。

以上より、本モデルは概ね妥当な結果が得られることが示された。ただし、実測値と推定値の比較より、全体の誤差は、+10%程度であり、かつ、内訳別の比較結果より、分別率の設定に留意する必要があることが示された。

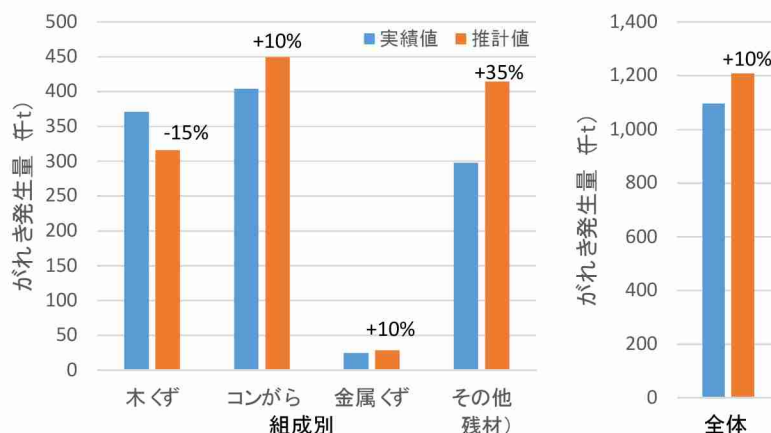


図8 東松島市を対象とした実測値と推定値との比較

図9に、市町村別の災害廃棄物の発生量の空間分布と総量の推計結果を示す。地図上の1メッシュのサイズは、1kmメッシュ(3次メッシュ)である。また、棒グラフの表記において、高知市は、他の市町村に比べて極めて発生量が多いことから、別目盛りにて表現している。なお、同結果には津波堆積物は含んでいない。

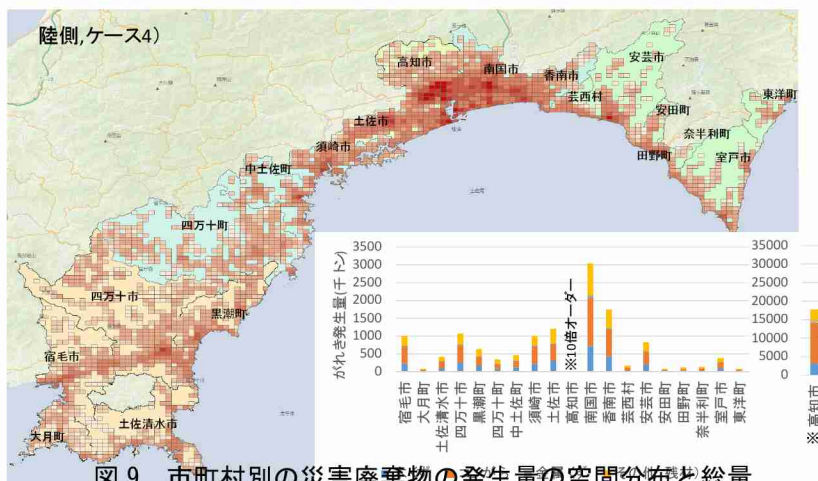


図9 市町村別の災害廃棄物の発生量の空間分布と総量

次に、コンティンジェントな推定について検討するために、採用する

原単位の振れ幅や震度の違いによる算定結果の比較を行った結果が図10である。原単位を1σ上振れ、下振れとした場合の総発生量は、基準ケースに対して、それぞれ139%、92%となった。発生量の幅では、上振れ側の影響の方が大きい。ごみ種別では、基準ケースに対し、下振れおよび上振れケースの発生量の比率は木くず、焼却ごみが0.81と1.27、埋立ごみが0.85と1.25、金属くず、再生資材(土材系)が0.94と1.00、再生資材(コンガラ)が0.98と1.57である。このようにごみ種別により、その推定幅が異なる。今回の結果では、再生資材(コンガラ系)の振れ幅が大きくなる。

また、図11に各対策を実施した場合のごみ種別発生量の算定結果を示す。各種の対策を組み合わせた複合化対策を実施した場合、非常に厳しい外力条件であっても2割程度の削減効果が見込まれる。

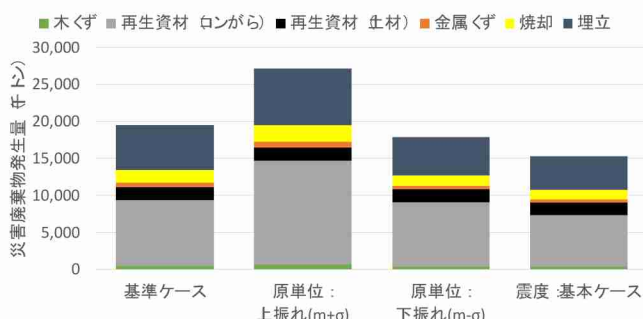


図10 原単位の振れ幅、震度の違いによる算定結果の比較(ごみ種別)

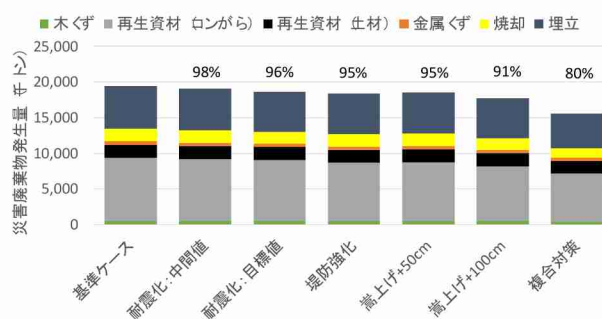


図11 各種対策による災害廃棄物発生量の軽減効果(ごみ種別)

さらに、評価ケース毎の廃棄物発生量に応じた仮置場面積ならびに仮設焼却炉の必要基数を図 12 に示す。仮置場の必要規模に与える影響は、事前準備により、処理期間を長く確保できる場合、仮置場の必要面積は少なくて済む。処理期間の時間関数で表現されるため、処理期間が 2 年に対して 3 年、2.5 年と長く確保できた場合、それぞれ必要な面積は 67%, 80% 程度となる。そのため、早期に処理を開始する有用性が認められる。また、仮設焼却炉の必要規模に与える影響についても、早期に処理を開始することにより必要基数は少なくて済む。基準ケースの場合、処理期間が 3 年の場合、処理期間 2 年と比べて必要基数は 4 基も少なくて処理することが可能である。早期に処理を開始する有用性は高い。対策がなされ、廃棄物発生量が低減された場合でも、処理期間が 3 年と 2 年では、必要基数は 3 基程度少なくて済み、早期開始の有用性は得られる。

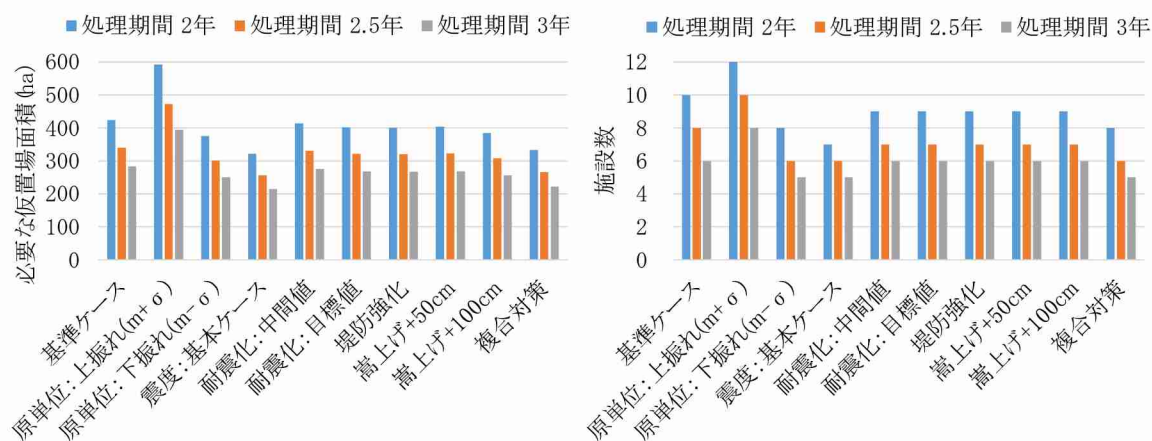


図 12 災害廃棄物発生量の算定結果が仮置場（左）、仮設焼却炉（右）の必要規模に与える影響

（3）震災廃棄物と再資源化物の輸送にかかる脆弱性と輸送効果の評価

ここでは、災害廃棄物輸送計画システムについて述べる。図 13 が輸送実績表示画面である。廃棄物の分布がゾーン単位に赤点で示され、仮置場の仮置き量は棒グラフで表されている。指定した期間の状況が 1 日単位で動画表示される。このような視覚的表示により、廃棄物輸送の計画を検討することが可能である。これを用いると、例えば、高知市内の災害廃棄物の発生地から 1 次仮置場への輸送を想定し、走行したデータなどを 1 秒単位で示すことができ、リンクの流入時刻および流出時刻を算定することができる。このような表示システムを用いれば、発災後、時々刻々と変化する廃棄物量分布や仮置場の状況、道路の通行可能状況などを反映して柔軟な輸送計画を作成することができる。



図 13 災害廃棄物輸送計画システムの輸送実績表示画面

(4) 社会リスク評価を介した震災廃棄物の処理・リサイクル拠点の適地評価

社会リスク評価については、次のように結論づけた。すなわち、災害廃棄物処理はインフラ、建物、施設のストック、災害因子、災害への抵抗、社会的対応能力によって影響されるため、不確実性が高い。災害廃棄物処理計画は災害になった時に、復旧・復興の支障にならないようにスムーズに処理することが目的である。そのための中長期対応策を明らかにした。①平常時に地域における土地・家屋・施設・輸送路の状況をよく把握すること、②必要であれば事前に対策しておくこと、③災害の時に備えておくことである。①の平常時の状況把握のために土地・家屋・施設・輸送路の状況をモニタリング、更新する体制を構築する。②の事前対策は建物耐震性の強化、堤防の整備、空き家の事前撤去などを含む。③の災害時に備えるとは、災害廃棄物の集積、処理、処分がスムーズに行えるように処理計画を策定し危機体制をとっておくことである。

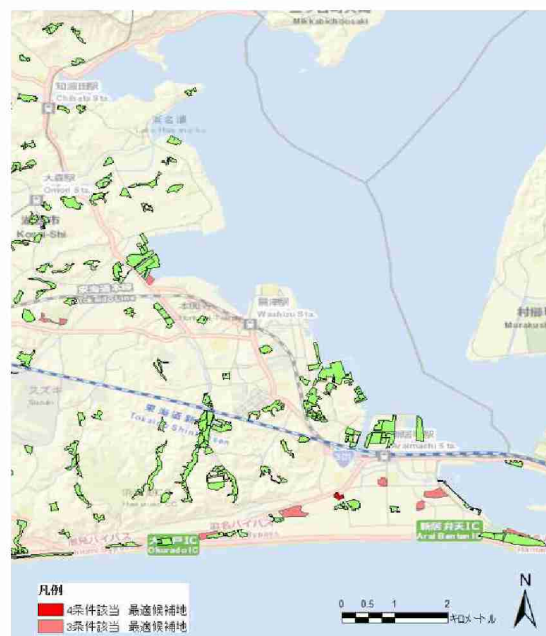
また、適地評価の結果は、表3および図14に示す。モデルを適用し評価した湖西市では、必要な仮置場面積に対し、各シナリオを適用することによって、仮置場候補地を絞り、必要十分な有効な土地を選択するのに有効であることを示した。ただし、仮置場候補地は海岸側の低地に偏在することがあり、各自治体のシナリオ選択への課題になる。

表3 発生量推計と仮置場必要面積, 仮設住宅必要面積

		湖西市	磐田市	浜松市
静岡県推計	レベル1	約60万t～67万t	約219万t～223万t	約734万t～754万t
	レベル2	約98万t～120万t	約260万t～310万t	約860万t～990万t
本研究推計	ケース1	約100万t	約120万t	—
仮置場必要面積概算		37ha	48ha	(参考) 250ha
仮設住宅必要面積概算		5.4ha	3.6ha	31.2ha



津波浸水エリア内仮置場候補地



複数条件該当仮置場候補地

図14 仮置場の候補地の選定

(5) 震災廃棄物の環境上適正な資源化技術の開発と評価

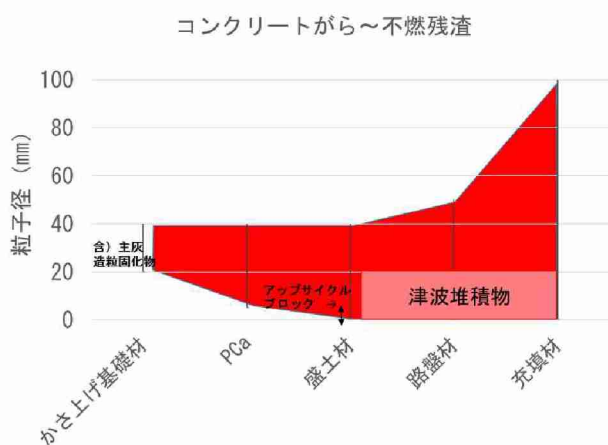


図 15 震災廃棄物の利活用イメージ

ここでは、粒子径と利活用の範囲について整理した図 15 を示す。粒子径が大きなものから、細かく砕いていく過程で用途が変化していくことがわかる。充填材、路盤材、盛土材、プレキャストコンクリート製品、かさ上げ基礎材、アップサイクルブロックなどそれぞれに適正な粒子径が存在し、その中に津波堆積物や主灰の造粒固化物も適用可能である。このような粒子径と用途との関係を念頭において、計画を立てることが震災時に有効になると考えられる。また、盛土や嵩上げ工事が先行して行われることを想定して、40 mm 以下程度の使用が早期に多くなることを考えておくことも重要である。

図 16 は、これまでの検討を踏まえてとりまとめたプロセスモデルである。行政、都市構造、産業のそれぞれの場面で、人口減少に端を発した社会リスクをあらかじめ想定し、震災廃棄物量推計、輸送モデル推計、処理拠点適地評価、資源化のための技術状況などを踏まえ、適切な状況把握のもとに、プロセスの各段階に適した対策をタイムリーに行うことが重要である。

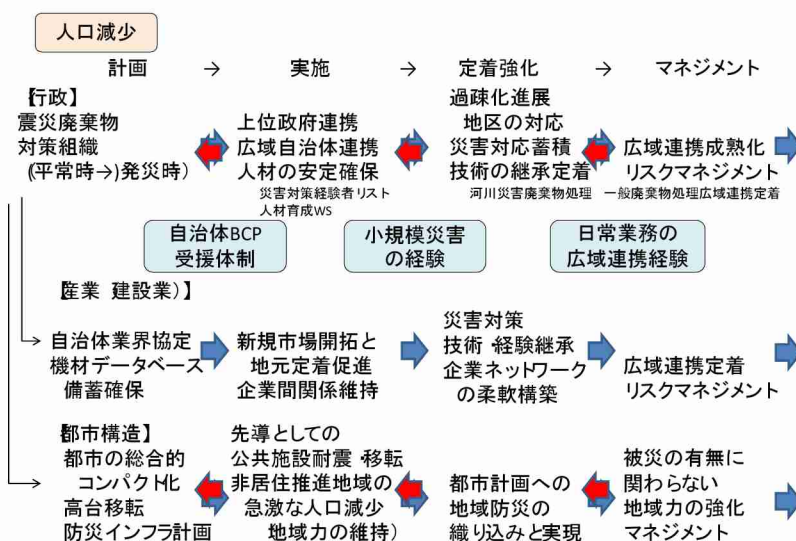


図 16 震災廃棄物対策プロセスモデル

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- 1) 人口減少に端を発し、行政ガバナンスの低下や産業規模の減少など、大きな社会リスクが発生するものの、これまでの研究では、それらが計画に与える影響について示してこなかった。本研究は、市町村の類型別施策体系と類型変化によって明確に示し、さらにプロセスモデルとして段階を追って対応していく方法を示した。
- 2) 災害廃棄物発生量の推定について、これまでの地域特性の配慮がなされていなかった課題に対して、汎用性のあるデータと住宅地図を用いて、建物一棟単位での属性を付与する機能を追加し、外力条件にも地域特性を考慮した災害廃棄物発生量の算定が可能なモデルを構築した。このモデルは、実際の被災都市で妥当性を検証しており、総量として1割程度過大の結果となった。コンティンジェントな廃棄物発生量が与える影響を検討した結果、原単位には振れ幅があることを理解した上で、事前準備、事後の対応を行うことが必要であることを示し、また、複合的に施策を組み合わせ、災害に備えることがより効果的であることを示した。

- 3) GIS とコンピュータプログラムを用いて、災害廃棄物輸送計画システムを構築した。これは、長期の輸送計画、1 日単位の運行計画、リアルタイムの運行管理を行うものである。収集された GPS データなどを処理する方法を示した。
- 4) これまでの適地評価手法に加えて、東北被災地の検証とヒアリングを通して、災害廃棄物の発生と構成において地域性が重要な因子になることをより細やかに明らかにした。災害廃棄物の予測は、地域の自然条件（地形）、社会条件（都市構造、廃棄物の発生分布、特殊廃棄物の有無、適応力（事前復興計画とその内容）に影響されると定めることができた。また、この手法を複数の地域に適用し、汎用データと簡単な GIS 操作により適切な推計フローで行うことで、上記の地域性を反映した推計ができたことから、地域の特性を踏まえつつ手法の汎用性は確保されることが確認できた。
- 5) 膨張性の影響のある物質も、粒子を細かくすることで、膨張の影響や環境への影響を抑制することができるケースもある。このように現時点で、大量に処分をしている産業副産物についても、使える形態や使える場所に使用することで、平時から最終処分量を削減して、災害時への余力を蓄えておくことも重要であることがわかった。

（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) 市町村に対する類型化による震災廃棄物対策のマッピングを行った「震災廃棄物対策マトリックス」は、国の指針や都道府県の指示によって作成してきた各市町村の震災廃棄物処理計画および関連計画を、地域特性に応じたものにしていくときの方向性を示している。
- 2) 構築した災害廃棄物発生量の推定モデルは、汎用性が高く、全国の市町村に適用することが可能であり、未だ廃棄物処理基本計画の策定に至っていない自治体ならびに、既に計画を策定しているが、地域特性を考慮できていない同計画の見直しの際に、活用されることが期待される。
- 3) 災害廃棄物輸送計画システムは、比較的入手が容易なデータを基礎として構築しており、データを準備することで利用が可能である。また、交通状況変化を考慮した輸送計画は、震災廃棄物輸送の効率化につながる。さらに、廃棄物輸送に対する評価を行うことで、計画の見直しに役立つと考えられる。
- 4) 汎用データと簡単な GIS 操作によって自治体自身が災害廃棄物発生量の推計と仮置場候補地の選定を可能にすることを確認した。ただし、適用した地域においても選定された候補地では十分ではないケースが多い。そこで、この推計結果をもとに、事前に事務手続きを進めて発災時に円滑に候補地選定が進むよう効果的に事前交渉を進める計画を立てることに役立つものと考えられる。
- 5) 再資源化活用先として充填材や路盤材は多くの利活用が見込めるが、津波堆積物の活用先であることから、粒子径を小さくし 40mm 程度にすると、盛土材やかさ上げ基礎材などに使えることになる。2 次仮置き場では、1 次仮置き場と比較すれば留め置く時間を確保することができるので、粒子径を細かくする過程を盛り込んだ処理計画が重要となる。

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) H. Inokuchi and T. Akiyama: Proceedings of SCIS & ISIS 2016, Sa7-1-4 (2016)
Debris Treatment Planning for Large-Scale Earthquakes Using Fuzzy Information
- 2) 金森貴洋、 巖網林 : SFC Journal、湘南藤沢学会、16, 152-169 (2016)
集団移転団地における高齢者の徒歩アクセシビリティ評価—東日本大震災における宮城県気仙沼市の事例—
- 3) Wanglin Yan and William Galloway: Springer: The Netherlands, 396p (2017)
Rethinking Resilience: Adaptation and Transformation、
- 4) 尾崎平、稲森優吾、盛岡通 : 環境共生、 Vol. 30, 32-42 (2017)
巨大地震に対する地域のレジリエンス評価指標の提案 -四国南岸三市町を対象に-

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 巖網林、Rob Roggema、大場章弘、Luke Middleton、金森貴洋 : SFC Journal、湘南藤沢学会、16、26-59、
Invited Paper (2016)
共創型復興まちづくりの実践とレジリエンスの形成
- 2) 巖網林 : 環境情報科学 Vol. 46(1) 特集解説、 61-66 (2017)
震災レジリエンスと環境共生 : 人口減少社会における復興とは、
- 3) 巖網林、Rob Roggema : 環境情報科学、環境情報科学センター、46- 1 (2017)
ランドスケープ計画を通じた復興まちづくりの実践、
- 4) K. Yokoyama & W. Yan: Internet Journal of Society for Social Management Systems Vol. 12, 1-11 (2017)
Reduction Effects on Amount and Disposal Cost of Debris by Planned Clearance of Vacant Houses
—A Case Study of Enshu, Shizuoka Prefecture, Japan—
- 5) K. Kishimoto, T. Okajima and W. Yan : Internet Journal of Society for Social Management Systems Vol. 11(1), 170-179. (2017)
Modelling the Site Selection of Temporary Yards for Disaster Waste Treatment, — Case Study of Enshu Area, Shizuoka Prefecture, Japan —.
- 6) Wanglin Yan, Kaito Yokoyama and Jinling Hua : Internet Journal of Society for Social Management Systems, 12, 1-12 (2017)
Statistical Analysis of Tsunami Waste and the Treatment in the Great East Japan Earthquake

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Keiichi Kitazume: the 10th International Symposium in Science and Technology 2015, CD-ROM (2015)
“An Approach of Preparedness for Dealing with Debris and Waste from Great Tsunami”
- 2) A. Kobayashi, K. Yamamoto and Y. Tsukada: International Conference on “Landslides and Slope Stability” (2015)
“Prediction of Failure of Small Earth-Fill Dams by Heavy Rain”
- 3) 北詰恵一、小林晃 : 第 18 回日本環境共生学会学術大会 (2015)
「人口減少下の都市構造変化を考慮した震災廃棄物処理のあり方」

- 4) Keiichi KITAZUME, Taira OZAKI and Toru MORIOKA: Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, CD-ROM (2015)
 “Risk-Based Environmental Preparedness for Dealing with Debris and Waste from Great Tsunami”
- 5) 井ノ口弘昭, 秋山孝正: 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol. 52, No. 55 (2015)
 「災害廃棄物の時間変化に着目した廃棄物処理手順の定式化」
- 6) 丹治三則: 第 26 回廃棄物資源循環学会 (2015)
 「東日本大震災の廃棄物処理における二次仮置場の運営課題に関する調査研究」
- 7) Akira. Kobayashi, Takuto. Hayashi, Yasuhiro. Tsukada and Kiyohito. Yamamoto: The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2015)
 “Effect of the seismic vibration direction on the water leakage of gravity-type concrete dam
 Japanese Geotechnical Society Special Publication”
- 8) 丹治三則: 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会 (2016)
 「一般廃棄物処理の広域化計画に伴う災害廃棄物処理の費用便益分析」
- 9) Hiroaki Inokuchi, Takamasa Akiyama: International Seminar on Soft Computing in Urban and Transport Planning at University of Waterloo (2016)
 “Comprehensive evaluation of disaster debris processing with fuzzy integral”
- 10) Dai Yokoyama, Hiroaki Inokuchi, Takamasa Akiyama: International Seminar on Soft Computing in Urban and Transport Planning at University of Waterloo (2016)
 “Formulation of fuzzy transport problem for debris treatment planning”
- 11) 横山大、井ノ口弘昭、秋山孝正: 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、IV-56 (2016)
 「大規模災害廃棄物処理における輸送計画問題に関する提案」
- 12) 小橋昭文、北詰恵一: 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2016)
 「人口減少都市構造変化を踏まえた震災被害要因の抽出」
- 13) 東田直樹、北詰恵一: 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2016)
 「南海トラフ地震に向けた地区分類別震災廃棄物処理対策」
- 14) 小橋昭文、北詰恵一、東田直樹: 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-01、pp. 2790-2794 (2016)
 「人口減少都市構造変化を踏まえた震災被害要因による地域類型」
- 15) 尾崎平、盛岡通、稲森優吾: 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-02、pp. 2795-2799 (2016)
 「南海トラフ地震に対する地域のレジリエンス指標の検討」
- 16) 秋山孝正、井ノ口弘昭、樋口吉隆、龍野恵則、岸野啓一: 土木計画学研究・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-04、pp. 2804-2808 (2016)
 「現実事例に基づく災害廃棄物輸送計画の立案手順についての検討」
- 17) 井ノ口弘昭、秋山孝正、横山大: 土木計画学研究・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-05、pp. 2809-2813 (2016)
 「大規模災害における廃棄物輸送問題の定式化に関する研究」
- 18) 北詰恵一: 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-06、pp. 2814-2817 (2016)
 「人口減少市町村における大規模地震による廃棄物処理のための事前・事後復興の枠組み」
- 19) H. Inokuchi and T. Akiyama: The 10th International Conference on Optimization: Techniques and Applications (ICOTA 10) (2016)

“The disaster debris transport problem with network equilibrium constraints”

- 20) Keiichi KITAZUME: 11th International Symposium in Science and Technology at Kansai University 2016 (2016)

“Disaster risk reduction and recovery in earthquake debris and waste management”

- 21) D. Yokoyama, T. Akiyama and H. Inokuchi: 11th International Symposium in Science and Technology at Kansai University 2016 (2016)

“The practical algorithm for solving debris transport problem”

- 22) 井ノ口弘昭、秋山孝正: ファジィシステムシンポジウム講演論文集(CD-ROM)、Vol. 32、pp. 561-564 (2016)

「震災廃棄物輸送に関するファジィ測度を用いた評価手法の提案」

- 23) 小橋昭文、北詰恵一、清水紀行: 土木学会第 71 回年次学術講演会 (2016)

「南海トラフ地震に対する災害廃棄物処理計画体系」

- 24) 井ノ口弘昭、秋山孝正: 土木計画学研究・講演集(CD-ROM)、Vol. 54 (2016)

「大規模災害における廃棄物輸送の評価手法の提案」

- 25) 横山魁・巖網林: 第 19 回環境共生学会学術大会講演集、立正大学品川キャンパス、2016 Sep17-18、日本環境共生学会(2016)

「南海トラフ巨大地震による津波災害廃棄物発生量の推計—静岡県遠州を事例として」

- 26) 尾崎平、稲森優吾、盛岡通: 日本環境共生学会学術大会発表論文集、Vol. 19、177-186(2016)

「巨大地震に対する地域のレジリエンス性評価指標の提案—四国南岸三市町を対象に—」

- 27) 尾崎平、盛岡通: 廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、Vol. 27、153-154 (2016)

「建物属性の推計に基づく地震・津波災害による廃棄物発生量の推計」

- 28) Inokuchi and T. Akiyama: Proceedings of TRB 96th Annual Meeting、17-05502 (2017)

“The practical formulation of disaster debris transport planning with traffic conditions”

- 29) 小橋昭文、北詰恵一: 土木学会関西支部年次学術講演会 (2017)

「南海トラフ巨大地震における地域連携を見据えた災害廃棄物処理対策の提案」

- 30) 小橋昭文、富原弘喜、北詰恵一、尾崎平: 第 55 回土木計画学研究発表会・春大会 (2017)

「人口減少市町村における事業所の 産業別存続状況を踏まえた震災復興分析」

- 31) 小橋昭文、吉田拓史、北詰恵一: 第 72 回年次学術講演会土木学会全国大会 (2017)

「災害廃棄物処理における地域性を考慮した港湾 BCP 政策」

- 32) 北詰恵一、小橋昭文: 日本環境共生学会 第 20 回学術大会 (2017)

「社会リスクを考慮した効果的な災害廃棄物処理のためのプロセスモデル」

- 33) 小橋昭文、北詰恵一: 第 56 回土木計画学研究発表会・秋大会 (2017)

「災害廃棄物処理におけるレジリエンス評価の考え方」

- 34) 北詰恵一: 日本地域学会第 54 回年次大会 (2017)

「レジリエントな都市形成のための行政計画の関連性分析」

- 35) Akifumi Kobashi and Keiichi Kitazume: Asian Conference on Engineering and Natural Sciences(2017)

“Disaster Waste Management Countermeasure Proposals for Regional Partnership against Nankai Trough Earthquake and Tsunami Disasters”

- 36) 尾崎 平、盛岡 通: 第 20 回日本環境共生学会 学術大会 (2017)

「災害廃棄物の推定結果が中間処理施設規模に与える影響」

- 37) Hiroaki Inokuchi and Takamasa Akiyama: International symposium in science and technology(2017)

“Transport Planning of Disaster Debris Referring to Uncertain Conditions”

7. 研究者略歴

研究代表者：北詰 恵一

東京大学大学院工学系研究科博士課程前期課程修了、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部教授

研究分担者

1) 小林 晃

京都大学農学部卒業、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部教授

2) 尾崎 平

関西大学大学院工学研究科博士前期課程修了、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部准教授

3) 盛岡 通

京都大学大学院工学研究科単位取得満期退学、工学博士、現在、環境都市工学教授（平成 29 年度より関西大学先端科学技術推進機構研究員）

4) 秋山 孝正

京都大学大学院工学研究科新交通土木工学専攻修士課程修了、工学博士、現在、関西大学環境都市工学部教授

5) 井ノ口 弘昭

名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻修了、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部准教授

6) 巖 網林

東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修了、博士（工学）、現在、慶應義塾大学環境情報学部教授

7) 古谷 知之

東京大学大学院工学研究科都市工学専攻修了、博士（工学）、現在、慶應義塾大学総合政策学部教授

8) 鶴田 浩章

九州大学大学院工学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部教授

9) 上田 尚史

名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程修了、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部准教授

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－ 1 震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価

[要旨]

本研究は、南海トラフ巨大地震における被害想定地域の広域性・多様性に応じた、レジリエントな地域別震災廃棄物処理対策の提案を目的としている。また、今後 30 年間で約 70～80%とされている発生確率であっても実際に発生するまでの長期性に配慮し、人口減少による地域状況の変化が引き起こす事前対策内容とのズレである社会リスクにも柔軟に対応することを視野に入れる。そのため、国や自治体が定めた震災廃棄物分野における既存指針や計画項目にレジリエンス概念を適用することで、市町村の施策を整理した。震災廃棄物を取り扱う上でのレジリエンス概念の特徴としては、被災市民にとって早期に生活空間を確保するための迅速な解体・撤去を必要とする生活圏内での緊急処理と、1次～2次仮置き場以降の比較的資源化率に重点をおく本処理にフェイズを分けた考え方が必要である点を指摘した。また、震災廃棄物対策を行う上で重要となる行政・産業・都市構造ごとの指標を用いた類型化を行うことで、政令指定都市から小町村まで広範囲にわたる対象市町村における現在から将来の地域特性の違いを明らかにした。この類型化を用いることで、本研究の政策評価の汎用性を向上させることに繋がると考えている。さらに、分類された地域特性ごとに必要な事前対策内容を整理した「震災廃棄物対策マトリックス」を提案するとともに、具体的な自治体を対象にその利用の仕方を示し、妥当性を検証した。同時に、自治体内の関連する都市計画などの計画や上位政府の計画との関係について、具体的な都市で内容比較分析を行い、震災廃棄物処理計画にとって重要となる地域防災計画を中心として計画間の整合がよりとりやすいように関係図を作成した。また、市町村の中には、将来において急激な人口減少が予測されるために 30 年の期間に分類された類型グループが変わり、行政ガバナンスの力や建設業・廃棄物処理業を中心とする産業構造などの違いから必要な震災廃棄物処理策が異なっていくことを示し、社会リスクを見据えた震災廃棄物処理対策の必要性を明らかにした。そして、この社会リスクに対応するため、行政、都市構造、産業のそれぞれ立場から進めるべきプロセスモデルを提案した。

1. はじめに

我が国では、過去の災害から得られた経験を活かし、今後発生する恐れのある南海トラフ巨大地震などの大規模自然災害に適切に対応することが求められる。そのため、内閣官房が策定する「国土強靱化計画」¹⁾では、「起きてはならない最悪の事態」を回避するための施策群が、府省庁横断的な「プログラム」として整理されている。上記のプログラムには「大量に発生する災害廃棄物の処理の停滞により復旧・復興が大幅に遅れる事態」への対応が含まれていることから、震災廃棄物（ここでは南海トラフ巨大地震を想定とするため震災廃棄物とする）を迅速かつ適切に処理することが重要である。

なかでも本研究では、南海トラフ巨大地震を想定した震災廃棄物処理の事前対策を検討するにあたって、2つの課題を挙げる。1つ目は、太平洋沿岸地域に広がる被害想定地域の広域性である。内閣府が定める南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域は、平成 26 年 3 月現在で 1 都 13 県 139 市町村に及ぶ。この中には、平野部に市街地が広がる大都市から島嶼部の村に到るまで、人口規模や地勢が異なる様々な自治体が含まれている。東日本大震災では岩手・宮城県の市町村で災害廃棄物処理事業の違いがみられたことから²⁾、被害地域が広域である南海トラフ巨大地震では処理内容がより複雑化する恐れがある。2つ目の課題は、今後 30 年間に発生確率が 70～80%であったとしても、震災が発生するまでに経過するであろう事前対策期間の長期性である。被害想定地域の中には今後 30 年間に 60%以上も人口減が予測される自治体が確認できる³⁾。こ

のような人口減少は、都市のあり方さえも変えてしまうため、地域状況の変化による事前対策とのズレを、震災廃棄物対策における社会リスクとして捉える必要がある。

上記の課題からも、南海トラフ巨大地震における震災廃棄物処理対策では、各地域で基本的な対策内容の検討に併せて発災までの長期的な視点を踏まえ、地域状況に即した適切な対応が重要である。

2. 研究開発目的

南海トラフ巨大地震発災時は、東日本大震災を大きく上回る甚大な被害が想定されており、発災時の国や都道府県の業務は多岐にわたるため、被災市町村では十分な支援が行き届かない恐れがある。したがって、市町村は地域の早期復旧・復興に資する震災廃棄物処理について、可能な限り独自で対応し得る事前対策を講じることが求められる。しかしながら、全国的に災害廃棄物処理計画の策定状況が低い現状からも多くの地域が処理における対策不足が考えられるため、地域の復旧・復興に影響を与える恐れがある。

そこで本研究では、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域（139 市町村）を対象に、被害想定地域の広域性・多様性に応じた、効果的な地域別災害廃棄物処理対策の提案を目的とする。より具体的には、

- ・震災廃棄物処理を想定したレジリエンスの概念をフェイズに対応づけながら提案し、震災廃棄物処理政策を体系的に整理する。
 - ・多様な市町村を類型化するにあたって、東日本大震災を中心としたこれまでの震災経験から主要因を導き出し、対象市町村を分類する。この際、人口減少に端を発する社会リスクによって、現在の分類と将来に分類が変化することも考慮に入れる。
 - ・個々の市町村が計画作成をすることを想定して、体系化された震災廃棄物処理政策が市町村類型ごとに重点とされるものを選ぶ手順を示すとともに、都市計画を始めとする多分野や上位政府との関係を整理する。
 - ・社会リスク変化によって作成した計画の移り変わりを円滑に進めるためのプロセスモデルを構築する。
- といった目的を設定する。

3. 研究開発方法

(1) 基本的な考え方と情報収集

現在の震災廃棄物対策は、東日本大震災等の経験を基に改定された災害廃棄物対策指針⁴⁾から展開されている。この指針は、都道府県及び市町村における災害廃棄物処理計画の作成を促す役割を担う。実際に、指針と自治体で策定済みの計画とを比較すると、主な対策内容の流れは指針に沿った内容であることが確認できる。指針が基本的な計画内容の流れを示す一方で、地域状況に即した対策の実現にあたっては、個々の市町村が多岐にわたる業務内容から重点的に取り組むべき対策内容を明確にする必要がある。そのためには、指針が示す一連の対策項目とは別に、震災廃棄物に係る対策内容を適切に表現し、網羅的に整理することが必要である。そこで、指針や既存計画の

表1 現地視察ヒアリングリスト

対策項目に、近年自然災害対策分野で浸透しつつあるレジリエンスの概念を適応し、市町村が取り組むべき対策を「震災廃棄物対策マトリックス」として整理する。

なお、具体的な内容については、計画文書だけでなく、2つの大きな地震の被災地、熊本地震被災地および南海

2015. 06. 26. ~ 29.	東松島市, 石巻市, 女川町, 名取市
2015. 11. 08. ~ 11.	高知県黒潮町, 高知市, 徳島県美波町等
2016. 03. 03. ~ 04.	和歌山県串本町
2016. 03. 06. ~ 07.	大分県臼杵市
2016. 03. 11.、05. 12.	兵庫県（阪神淡路の経験と熊本地震支援）
2016. 06. 20.	和歌山県（県の取組と熊本地震支援）
2016. 07. 26. ~ 27.	愛知県豊橋市, 田原市, 湖西市
2017. 02. 20. ~ 21.	徳島県徳島市・香川県・環境省
2017. 02. 27.	高知県高知市
2017. 03. 02.	静岡県浜松市
2017. 10. 29. ~ 30.	熊本県熊本市・益城町

トラフ地震対策を特徴的に行っている自治体等を訪ねてヒアリングをして情報を集めた。表1がヒアリングを実施した自治体等である。このヒアリングの成果は、他の研究テーマにも活かされている。

(2) レジリエンスの考え方と震災廃棄物対策マトリックスの策定

自然災害対策分野においてレジリエンスの概念が使用されつつあり、国土強靱化が目指す「強くてしなやかな国づくり」では、その意味合いが強調されている。しかしながら、我が国の自然対策分野では未だに、東日本大震災以前の概念である「防災」に係る施策が多い。盛岡⁵⁾は、UNISDRのMaking Cities Resilientが示す10の行動のうち、我が国では都市の回復力やレジリエンスのための制度や仕組みが希薄であると述べていることから、レジリエンスに係る施策が不十分であることが伺える。そこで本研究は、今後も検討が必要とされるレジリエンス概念を震災廃棄物対策分野に適応するにあたり、既存研究から「レジリエンスを考慮すべき対象」および「レジリエンスを構成する特性」という2つの側面に着目した整理を行う。

塩崎ら⁶⁾は自然災害対策分野におけるレジリエンス概念の整理から、レジリエンス評価の対象を組織・制度、社会・経済、物理システムとしている。本研究では、これらの都市領域を災害廃棄物対策の枠組みとして読替えた行政、産業、都市構造を、対策を行うべき3つの領域とした。表2で、領域ごとの概要及び具体例を示す。

表2 震災廃棄物対策でレジリエンスを考慮する対象

対象領域	概要/具体例
行政	自治体組織が行政業務を円滑に進めるための対策
	処理計画の策定, 職員への教育, 行政間連携
都市構造	処理を行う場や施設である環境に係る対策
	仮置場用地確保, 交通インフラ・ライフライン対策
産業	処理を実施する民間事業者に係る対策
	地元建設業・廃棄物処理業者等の緊急対応

自然災害におけるレジリエンス特性は4つのR（頑健性・冗長性・資源・迅速性）として表現されることがある⁷⁾。この4Rは、自然災害に対するレジリエンスを評価する既存研究で度々用いられることがあり、その評価対象は地域コミュニティや企業、都市インフラなど様々である。したがって、震災廃棄物対策分野へのレジリエンス適応を検討する際にも4Rで表されるレジリエンス特性に着目する。そのうえで、復旧に充てる資源の充実性を表す「資源」に関しては、震災廃棄物の処理過程におけるフェイズの違いに配慮する。具体的には、図1で示す緊急処理・本処理フェイズごとに、処理を行う用地（生活圏、低・未利用地）、業務内容に伴う資機材・関連産業の違いなどが挙げられる。4Rの「資源」は緊急処理・本処理に2分割した上で、震災廃棄物対策におけるレジリエンス特性を表3で示す5特性とした。

表3 震災廃棄物対策におけるレジリエンスの特性

レジリエンス特性	説明
頑健性 (Robustness)	所定のレベルの外力に耐える力 (施設や建物の防護対策など)
冗長性 (Redundancy)	非常時に機能を維持する能力 (情報機器・電力等の代替・多重化など)
資源 (Resourcefulness)	緊急時に充てる資源の充実性 (被災地・1次仮置場の必要資機材など)
	本処理に充てる資源の充実性 (2次仮置場・受け入れ先の必要資機材など)
迅速性 (Rapidity)	迅速に復旧・復興するための施策 (処理全般に係る計画や訓練など)

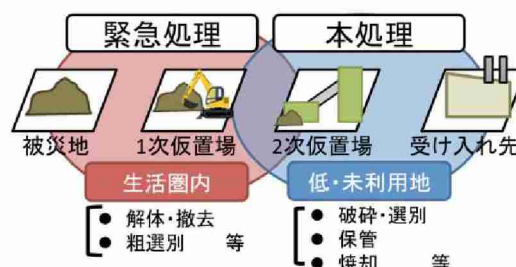


図1 処理フェイズによる業務内容・用地の違い

2つのレジリエンス側面を考慮し、市町村の備えるべき対策項目の網羅性を考慮した上で、「震災廃棄物対策マトリックス」を作成することとする。

(3) 地域防災計画を中心とした計画体系の整理

人口減少に端を発する社会リスクの影響を受ける震災廃棄物処理計画および密接に関連する地域防災計画は、都市計画を中心とした他の計画および上位計画との関係性を整理する必要があることから、次のような方法で整理した。すなわち、国土強靱化地域計画、都市計画・マスタープラン、公共施設再配置計画、社会資本総合整備計画、住宅関連計画などを取り上げ、具体的な対象地域として、地震・津波リスクが高く、また比較的諸計画が揃っている代表的な市町村として、高知市、および複数都市の比較のために浜松市・磐田市・湖西市を選択肢、計画間の同テーマの条文比較をすることで行った。各計画の記載されていなくても、実際には整合のとれた取り組みが行政部署間で行われている場合もありうるが、ここでは計画に明示されているからこそ、複雑な交渉を必要とする事前復興時にも、また発災後の緊急時においても円滑な取り組みがなされるとの立場に立って、計画に明記されていることを基本とした。

(4) 地域類型化と社会リスク想定

地域類型化は、先述のレジリエンスの考え方に対応し、行政、都市構造、産業別に、被災および震災復興状況が大きく異なる要因を抽出して行うこととした。また、人口減少による社会リスクは、人口問題研究所の人口予測をベースに各要素への影響を予測して行った。

(5) プロセスモデルの構築

先述のヒアリングにより、南海トラフ地震の対策を積極的に行っている市の環境部局および防災部局に対し、想定と異なった場合の対策や社会リスクが顕在化した場合についての質問を投げかけ、それらの回答をもとに作成した。

4. 結果及び考察

(1) 震災廃棄物対策マトリックスの策定

表4 震災廃棄物対策マトリックス

対象領域 レジリエンス特性		行政	都市構造	産業
頑健性 (Robustness)	緊急 処理	【役場庁舎の防護対策など】 ・建物の耐震化等 ・施設の配置見直し	【ライフライン・インフラ施設の 防護】 ・電力・水道等の耐震化 ・交通施設の耐震化	【処理関連施設の防護対策】 ・既存施設の耐震診断 ・既存施設の耐震性強化 ・津波浸水対策
	本 処理	【情報収集・連絡体制の強化】 ・連絡手段の多重化、防御 ・連絡体制の整備 ・連絡手段の訓練	【ライフライン・インフラ施設の 機能維持】 ・ライフラインの多重・分散化 ・交通の代替・アクセス性向上	【処理関連施設の緊急対応】 ・電力・燃料・冷却水等の確保 ・補修に必要な資機材の確保 ・補修予定事業者との協力体制
資源 (Resource fulness)	緊急 処理	【初動時に必要な人材確保】 ・自衛隊・消防等の協力体制 ・総括・指揮に係る人材確保 ・土木・建築職を含む人材確保	【一次仮置き場の設置対策】 ・分散した用地の確保 ・緊急時における他の土地利 用ニーズとの整合	【解体や運搬に係る協定・資機 材の確保】 ・建設・運搬業との協定締結 ・業務に係る資機材の確保
	本 処理	【広域連携に資する協力体制】 ・人材や資機材の連携体制 ・広域処理に係る連携体制 ・受入処理に係る広報	【二次仮置き場の設置対策】 ・港湾などの低利用空間検討 ・都市づくりでの空間確保 ・後土地利用を考慮した選定	【中間処理や処分に係る協定・ 資機材の確保】 ・既存施設での処理・協力検討 ・建設業・リサイクル業との協定
即応力 (Rapidly)		【処理体制構築に係る施策】 ・処理関連計画の策定・改定 ・行政職員に対する訓練 ・住民に対する啓発・広報	【緊急対応への備え】 ・ライフライン・インフラ施設の 点検・補修体制 ・情報の電子化による管理	【非常時の事業継続計画】 ・処理施設における復旧対策 ・建設業における出動体制 ・有害物質の流出に係る対策
【】大項目、・中項目				

「震災廃棄物対策マトリックス」は表4のようになった。このマトリックスによる対策項目の整理は、市町村ごとに異なる地域課題に即した対策内容の明確化を促すことを目的としている。地域特性別に重点的な政策が選択されることになる。

(2) 地域防災計画を中心とした計画体系の整理

図2に、地域防災計画を中心とした計画体系整理の結果を示す。実際に計画文書に他計画との関連が示されているものもあるのはもちろんであるが、計画文書の比較により、他計画の方針を受けた具体化、個別項目の考慮、事業の調和・調整の必要性などが意識された関係となっている。実際には、市町村間でこの体系通り行われている場合と、計画文書には明示されていない場合があることを確認している。本体系図は、むしろ、本来体系的・整合的に進めなければいけない計画策定時の円滑な進行のために用いるものと理解することができる。

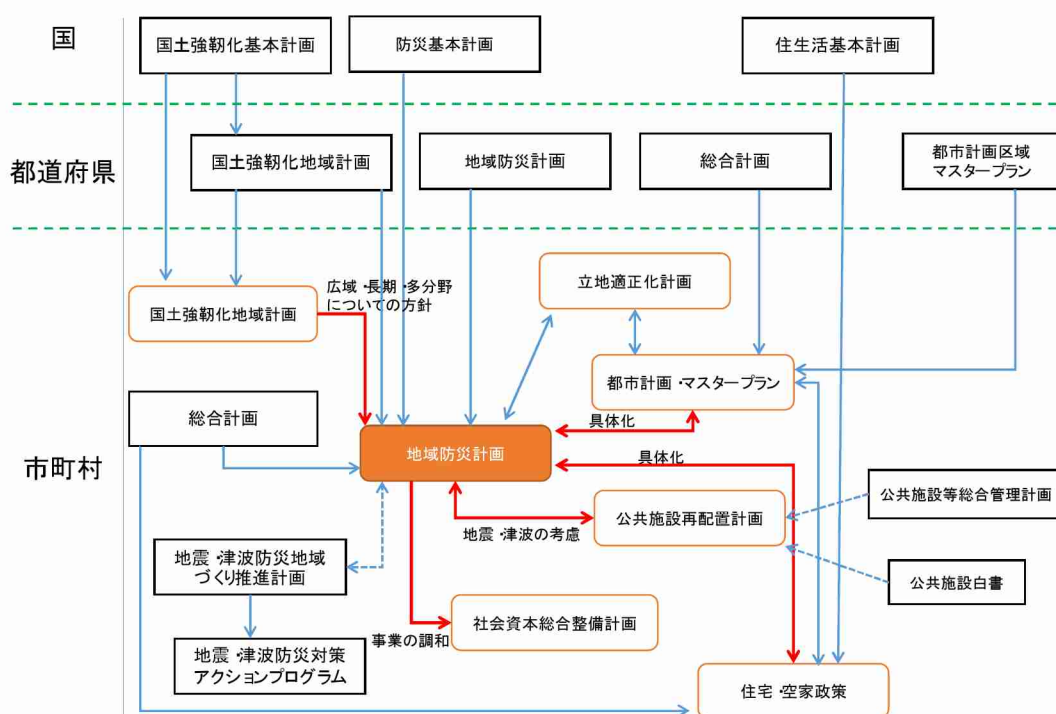


図2 地域防災計画を中心とした行政計画体系

(3) 地域類型化と社会リスク想定

地域類型化にあたっては、被災地域が広域であり処理工程に地域差が見られた東日本大震災での事例²⁾から、影響要因を取り上げた。

1) 震災廃棄物処理の事業主体

東日本大震災では、処理の事業主体が様々であった。この違いは主に独自処理と県委託の2種類に分けられる。独自処理では迅速な処理対応を行える一方、県委託では業務上の手続き等の期間が必要となる。この事業主体の違いには2つの影響要因が関係する。

表5に示すように、まず、震災・津波被害の規模が事業主体の違いに影響を与える要因であると考えられる。実際に、周辺地域と比べて震災廃棄物量が少ない地域（久慈市・普代村・松島町等）では独自での処理

活動が進められた。これら独自処理を進めた地域の中には町村規模の自治体が含まれていることから、被災状況と事業主体は大きく関わる事が分かる。

次に、事業主体に影響を与える要因として自治体の規模を挙げる。市として定められている地域では独自処理が進められていた傾向が見られる（釜石市、大船渡市、仙台市等）。一方で、大規模な市町村である宮古市や石巻市等では県委託による処理が行われた。しかしながら、これらの地域を含むブロックや処理区における処理の中核地域として機能していたことから、市である大規模な自治体では、独自処理として震災廃棄物処理を実施する行政能力が高いと考えられる。

表 5 独自処理を行った市町村

県	市町村	人口	建物用地浸水率 (%)
岩手県	洋野町	17,913	1.0
	久慈市	36,872	5.9
	普代村	3,088	8.0
	釜石市	39,574	27.3
	大船渡市	40,737	28.6
	陸前高田市	23,300	33.3
宮城県	松島町	15,085	25.0
	利府町	33,994	2.0
	仙台市	1,045,986	10.5

2) 仮置場用地の確保

震災廃棄物の分別・中間処理・保管などの役割を担う仮置場の確保は不可欠である。後に示すように、仮置場は処理完了までの長期性やその後における土地の利活用の観点から、基本的に公有地での確保が優先される。しかしながら、十分な用地が確保できない場合は民有地の借上げが検討される。東日本大震災時、表 6 に示すように、宮城県沿岸北部の気仙沼市・南三陸町では平野が少ない地勢であることから、仮置場用地の確保が困難であった。従って、津波被害に遭った農地等による借り上げによって仮置場の設置が進められた。一方、平野が多い宮城県沿岸南部の市町村では公有地に設置した大規模な仮置場による処理が進められていたことが確認できる。

表 6 市町村別の可住地面積率及び民有地仮置場面積

市町村	可住面積率 (%)	借り上げ民有地面積 (km ²)
気仙沼市	28.0	0.62
南三陸町	22.5	0.22
仙台市	43.2	0.00
名取市	71.4	0.00
岩沼市	77.3	0.00
亘理町	83.4	0.00
山元町	66.2	0.00

3) 処理関連産業との関わり

震災廃棄物処理で必要とされる関連産業も地域差を特徴付ける要素の一つである。本研究では、被害の程度によって異なった震災廃棄物の処理方針と関連産業の関連性を整理した。

まず、被害が比較的少ないことから既存施設で震災廃棄物の独自処理を行った地域を表 7 に示す。これらの地域では、平常時に廃棄物の処理活動を担う一般廃棄物処理施設が重要であると考えられる。さらに、広域連合での処理が行われている市町村群の実態を考慮すると、連携体制の調整や廃棄物輸送には、処理施設の立地が状況を踏まえた対応が必要となる。

表 7 既存施設で震災廃棄物処理を行った市町村

市町村	施設の立地	廃棄物処理施設
洋野町	－	久慈広域連合ごみ焼却場（2.5t/日） H. 23. 9 受入開始～ H. 26. 3 受入完了
久慈市	○	
普代村	－	
松島町	－	宮城東部衛生処理組合（30t/日） H23. 3 受入開始～ H. 25. 3 受入完了
利府町	○	

一方、被害が甚大であった市町村では、産業との係りが非常に複雑であった。処理関連産業が活躍した代表的なモデルケースとしては、大船渡市での太平洋セメント第 5 号キルンを用いた焼却及び復興資材としてのセメント生産が挙げられる⁸⁾。しかしながら、セメント業は原料型産業であるため、岩手・宮城沿岸地域の中でも特殊な処理であったことに留意が必要である。

なかでも、大規模な震災廃棄物処理事業では、解体や破砕・選別などの中間処理や仮置場の設置など、あらゆる場面で建設業が携わる。参考までに宮城県の各被災市町村（完全独自処理であった仙台市を除く）を対象に、独自処理率と各地域に存在する土木工事事業所数との関係性を図 3 に示す。独自処理率とは、市町村が県委託外で処理を行なった震災廃棄物量が発生震災廃棄物の全体量に占める割合である。散布図からは、土木工事事業所の数と独自処理率に関係がみられることが確認できる。特に、完全な県委託処理であった山元町では、緊急時の啓開・解体・運搬作業等に求められる地元建設業が機能していなかった恐れがある。その他の地域では、たとえ委託での処理が進められた地域であっても、建設業等における適切な解体作業によって、

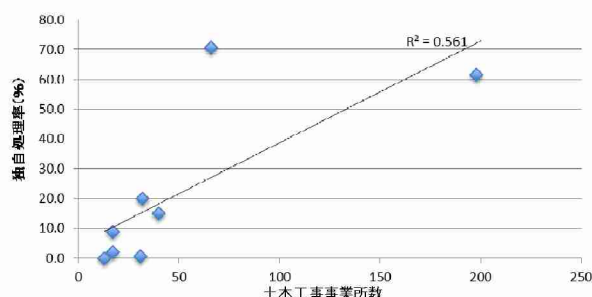


図 3 土木工事事業所数と独自処理率

これらの結果、地域別の廃棄物処理への影響要因は、表 8 のようにまとめられる。

表 8 地域別処理事例と影響要因

事例	影響要因	概要
(1)	津波浸水率	被害が小さい地域では独自処理の可能性
	自治体規模	大規模自治体以外では県委託での処理
(2)	可住地面積率	山地が多い地域では民有地の借上げが必要
(3)	処理施設の有無	施設が無い地域では広域処理を実施
	建設業の多寡	建設業が多い地域では高い独自処理率

4) 震災廃棄物対策に係る地域類型化

これまでの分析により地域類型化のためのツリーを構築した。図 4 で示す地域類型化ツリーを用いて 139 市町村の類型化を行なった。この類型化では、前章で述べた地域別の処理に係る影響要因が考慮されており、行政・産業・都市構造ごとに設定した簡易的な指標から構成されている。また、社会リスクとして捉えるべ

き人口減少が引き起こす地域状況の変化を検討するため、将来の人口推計を元にした 2040 年時点の市町村に対する類型化も同時に行う。

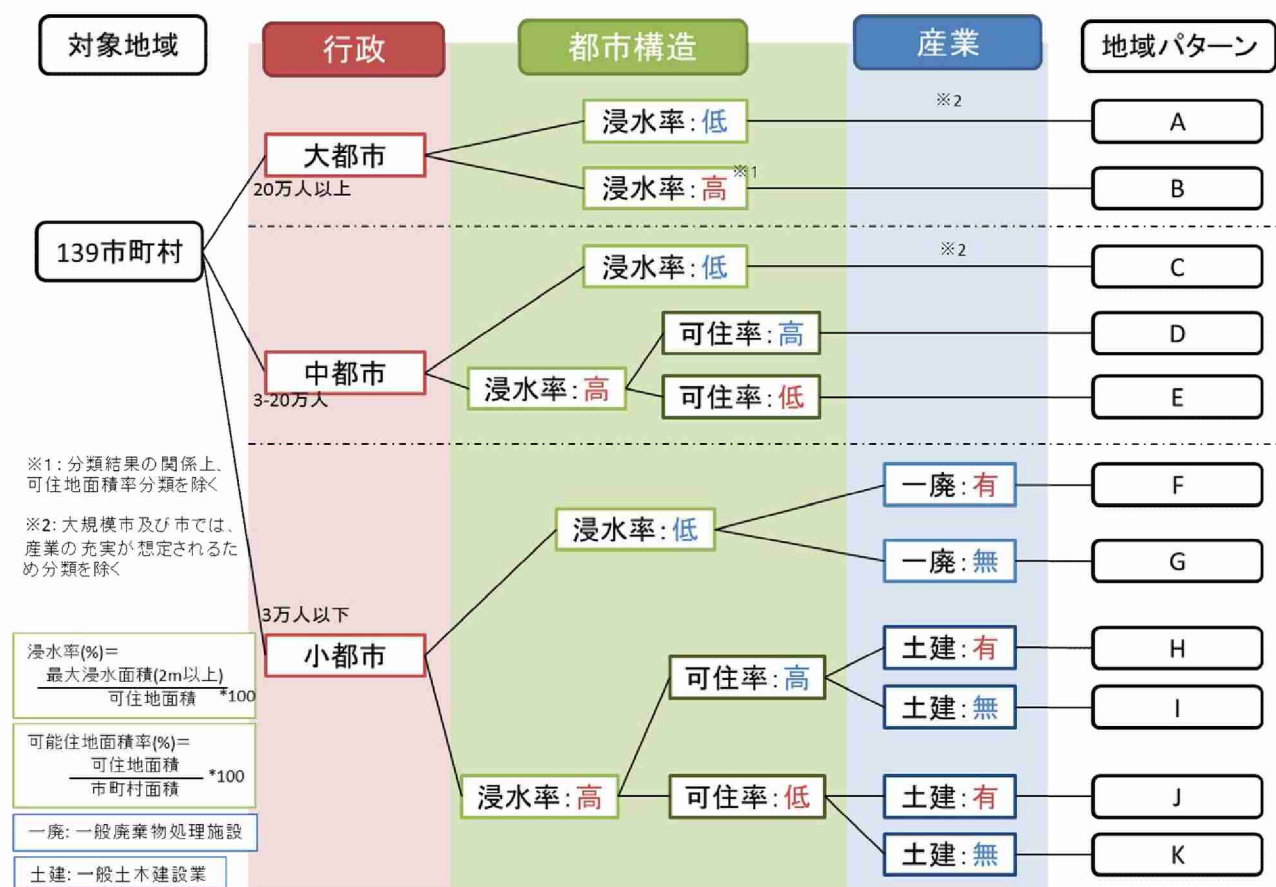


図4 地域別震災廃棄物処理に係る地域類型化ツリー

a) 行政（人口規模によって異なる行政機能）

震災廃棄物は一般廃棄物に区分され、その処理責任は市町村にあるとされている。一方で、東日本震災の以降、法律施行規則の一部が改正されたことにより非常時には都道府県等への委託が可能となった。したがって、各市町村では非常時における行政業務上の対応力をあらかじめ想定した上で、震災廃棄物対策を適切に進める必要がある。本研究では、震災廃棄物対策を実施する主体である市町村の行政機能の差を、人口規模で表す代理指標として用いる。類型化の閾値である人口規模 20 万人は中核市以上の市であるべき条件である。この地域では、行政上の事務に関する権限や事業に取り組む職員数などから裏付けられる行政機能により、臨機応変な対応が期待される。また人口規模 3 万人は市町村合併特例法を考慮した閾値であり、これを下回る町村規模の自治体では受援を必要とする可能性がある。

b) 都市構造（都市地域における浸水被害・地勢状況）

都市構造の観点から震災廃棄物対策の違いを検討するため、本研究では、被害の程度を表す津波浸水率と、仮置場用地確保に関する影響要因としての可住地面積率の二段構成で類型化指標を設定した。

はじめに、津波最大ケース 2m 以上の津波浸水面積と可住地面積の割合を被害の程度を表すための指標とした（閾値：対象地域 139 市町村の浸水率平均）。特に、浸水率が高い地域に関しては、大量の震災廃棄物が発生する恐れがあり、大規模な処理事業を視野に入れる必要がある。そこで浸水率が高い地域においては、仮置場用地や廃棄物輸送手段の充実性を示す指標として市町村面積における可住地面積の割合で分類した（閾値：50%）。

c) 産業（処理の実施に必要な事業所の有無）

産業指標では、地域を問わず震災廃棄物処理で必要となる建設業および廃棄物処理業に焦点を当てる。ただし、これらの類型化指標は産業の存続が危ぶまれる人口 3 万人以下の小都市のみを対象とした分類指標とする。

建設業については、解体・運搬だけでなく、仮置場の設置や中間処理等、震災廃棄物処理全体を通して様々な技術が求められる産業である。その役割は、廃棄物の発生量に伴って重要性を増すため、浸水率が高い地域に限定した指標を設定した。具体的には、処理に求められる資機材や人材の充実を考慮した上で、中規模産業以上（従業員規模 20 名以上）の土木工事業の有無を分類指標とした。

廃棄物処理産業は、地域の処理能力に直接関わる産業である。特に被害が少ない地域では処理施設の有無が自区処理の可否に大きく係り、支援の必要性を判断する要因であることから、廃棄物処理業は浸水率が低い地域に限定した指標とする。具体的には、行政区域内の一般廃棄物処理施設の有無を分類指標とした。

これらをまとめものが表 9 になる。

表 9 地域類型化指標

分類要素	分類項目および指標
行政	大規模市・市・町村（域値：人口 20 万人・3 万人）
都市構造	・浸水率(%)：2m 以上浸水域面積 / 可住地面積×100 ・可住地面積率(%)：可住地面積 / 市町村面積×100
産業	・土木工事業所（中規模以上）の有無 ・市町村内における一般廃棄物処理施設の有無

*使用データ：【行政】市町村別人口数(国勢調査, H. 27), 【都市構造】全国都道府県市区町村別面積調査(国交省, H. 28), 南海トラフ被害想定(内閣府, H. 24), 【産業】従業員規模別建設事業所事業所数(経済センサス, H28), 廃棄物処理施設データ(国土数値情報, H24), 【人口減少】日本の将来推計人口(H. 25 人口問題研究所)

対象地域の類型化では、南海トラフ巨大地震が 2040 年に発生した場合を想定し、人口減少による地域状況の変化に留意する。そのため、行政・産業の類型化要素に、人口問題研究所における 2040 年の将来推計人口を活用することで、地域パターンの推移を表す。特に産業指標に関しては将来における事業所の有無を、図 5 で示す人口規模別の事業所存在確率⁹⁾を用いて判断する。この存在確率とは、全国の市町村を一定の人口規模で区分し、事業所が存在するかの判断を行い、市町村区分毎に事業者が存在している市町村数の割合を示したものである。本研究では、存在確率が 50%を切る規模の場合、「事業所無し」として類型化に反映している。



図 5 人口規模別の事業所存在確率

上記の地域類型を行うことで、現在と将来における地域特性を 11 の地域パターンに区分した。現在（2015 年時点）における類型結果からは、F~K の小都市に該当する市町村が多く、非常時には多くの地域で支援が必要になる可能性がある。一方、A や C に該当する大規模かつ被害が比較的小さいことが想定される地域が集中して存在しており、上記で述べた小都市との分布が二極化している傾向が確認できる。したがって、同県・地域ブロックであっても、適切な地域連携が行えない恐れがある。

また現在から将来（2040 年時点）における類型化の推移を見ると A~ B の大規模都市では変化が見られないうが、C~ E の市の規模であった一部の市町村では町村規模へと推移していることから、行政機能の低下が考

えられる。また町村規模の自治体においても、G や K が増加していることから、震災廃棄物処理における主要な事業所が地域から消えてしまうことが懸念される結果となった。

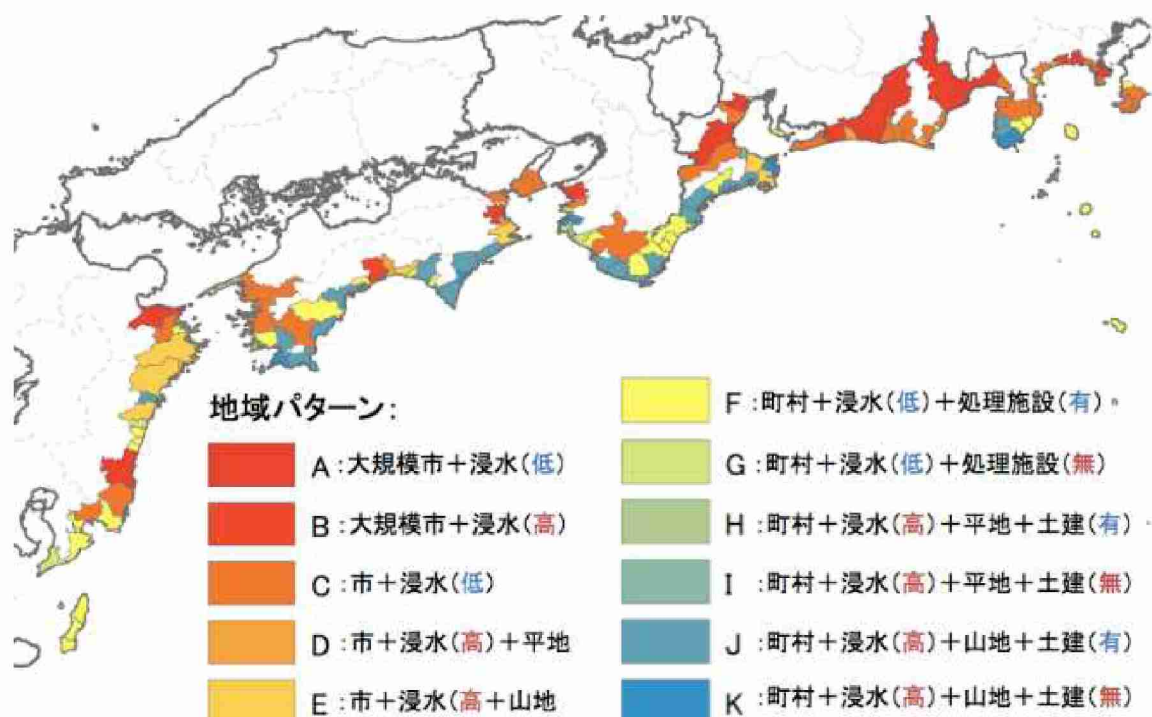


図6 2015年における地域類型パターン

表10 地域類型項目と該当市町村

地域パターン		2015年	2040年
A	大規模市 + 浸水率(低)	浜松市	－
B	大規模市 + 浸水率(高) (+山地)	高知市	－
C	市 + 浸水率(低)	磐田市	－
D	市 + 浸水率(高) + 平地	湖西市	－
E	市 + 浸水率(高) + 山地	阿南市	－
F	町村 + 浸水率(低) + 処理施設(有)	古座川町	熱海市
G	町村 + 浸水率(低) + 処理施設(無)	日高町	芸西村
H	町村 + 浸水率(高) + 平地 + 土建(有)	御坊市	小松島市
I	町村 + 浸水率(高) + 平地 + 土建(無)	田野町	－
J	町村 + 浸水率(高) + 山地 + 土建(有)	黒潮町	香南市
K	町村 + 浸水率(高) + 山地 + 土建(無)	美波町	牟岐町

*2040年の当該市町村として示す市町村は類型化の変化が見られた地域

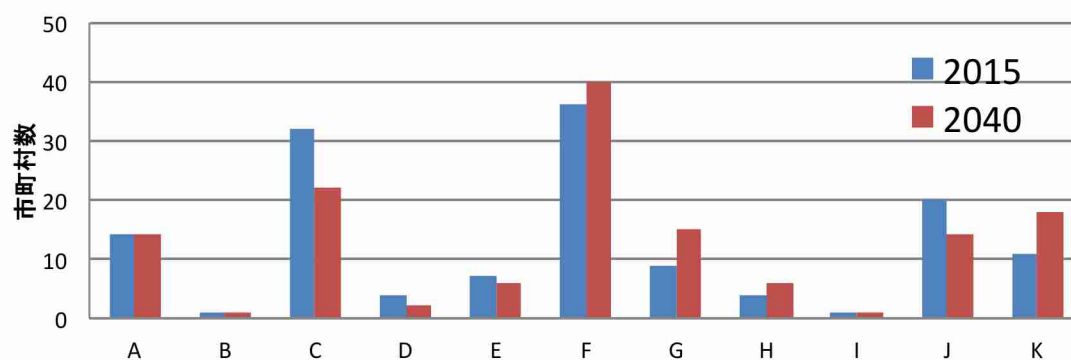


図7 現在・将来における地域パターン別の市町村数

(4) 地域パターン別の重点対策領域

上記の地域パターンごとに、対策を進める上で重要となる対策領域を震災廃棄物対策マトリックスを用いて決定する。それに伴い、重点対策領域を決定する手順を以下で示す。

① 地域課題と重点対策の設定：

地域類型に用いた行政・都市構造・産業の指標から、地域によって特徴付けられる課題を推測する。また、その課題に対して特に取り組むべき重点対策を検討する。

② 重点対策に関連する対象の指定：

重点対策の実施に係る対象を、行政・都市構造・産業に区分された地域要素ごとに決定する。

③ レジリエンス特性を用いた重点対策領域の決定：

重点対策の実施に係る地域要素を対象に、適切なレジリエンス特性を指定することで重点対策領域を決定する。

上記のプロセスを実施することで、地域パターンごとの重点対策領域を決定した。表 11 では、決定された地域パターンに該当する重点対策領域を震災廃棄物対策マトリックスにおいて集計した。なお、同じ領域に該当する地域パターンであっても、その領域が示す対策内容には地域差があることに留意すべきである。

表 11 各地域パターンにおける重点対策領域対照表

地域パターン	行政	都市構造	産業
頑健性	B, D, E, H, I, J, K	B, D, E, H, I, J, K	B
冗長性	A, B, D, E, G, H, I, J, K	B, D, E, G, H, I, J, K	A, B
資源	緊急処理	F, I, K	B, J, K
	本処理	A, B, D, E, G, H, I, J, K	A, B, E
即応力	A, B, C, D, E, F	A, B, D, E, G, H, I, J, K	A, B, C, F, G, H, J

具体的な市町村を対象とした地域別震災廃棄物対策の提案を行う。それに伴い、前章で述べた重点対策領域の決定手順を具体的に示す。さらに、当該市町村の既存対策とマトリックスを比較し、地域が目指すべき対策の方向性を示唆した。

(a) 地域パターン A：浜松市

地域パターン A は大都市かつ浸水率が低い地域である。これらの地域では、既存施設や関連産業の能力次第で独自処理が完結する可能性がある。しかしながら、大都市では周辺地域処理の受入等の支援が必要とされる可能性がある。

したがって重点対策領域は、表 12 に示すように、周辺地域への支援を見据えた仮置場の用地検討（都市構造×資源【本処理】）かつ、既存処理施設による協定締結や非常時における緊急体制の検討（産業×冗長性・資源【本処理】・即応力）双方の対策とした。また、広域連携体制における支援側としての体制構築や計画策定（行政×冗長性・資源【本処理】・即応力）が求められるケースも考えられる。

浜松市の災害廃棄物処理計画¹⁰⁾では、表 13 で示すように産業領域に関する記載が多く見られた。具体的には、既存処理施設における処理や民間施設活用の検討をだけでなく（資源【本処理】）、施設の復旧に係る資機材の確保（冗長性）についての記載も見られる。一方で、計画全体として支援側での想定や対策が希薄であるため、広域連携に係る体制構築（行政×資源【本処理】）等の対策を具体的に進めることが必要である。

表 12 地域パターン A における重点対策領域

地域パターンA		行政	都市構造	産業
頑健性				
冗長性		連絡手段・体制の整備 による広域との迅速な情報交換		処理関連施設の燃料等確保・補修体制整備 による緊急対応の強化
資源	緊急処理			
	本処理	広域連携に係る体制の構築 による人材・資機材・用地の支援	都市づくりでの二次仮置場確保 による周辺地域への支援を見据えた用地検討	二次仮置場設置・処理施設双方に係る協定 による震災廃棄物への対応
即応力		処理関連計画の策定・改定 による中心都市としての独自処理・支援	ライフラインの点検・補修体制強化 による緊急時における迅速な対応	処理施設における復旧対策 による迅速な処理対応の検討

表 13 重要対策領域と既存災害廃棄物処理計画の比較

地域パターンA 重点対策領域			浜松市災害廃棄物処理計画 浜松市環境部 平成29年	
行政	冗長性	連絡手段・体制の整備 による広域との迅速な情報交換	2-1 組織体制 情報集取	災害時の情報共有項目例 被害状況：周辺自治体の被害状況 災害廃棄物処理全般： ・県、国、自治体の支援情報 ・廃棄物関連事業者の被害状況、活動状況
	資源 【本処理】	広域連携に係る体制の構築 による人材・資機材・用地の支援	2-2 協力・支援体制	県を通じて情報収集・指摘・助言を受けながら、自衛隊や警察、周辺自治体、廃棄物関係団体等による、災害時の連絡体制・協力支援体制の構築を図る
	即応力	処理連計画の策定・改定 による中心都市としての独自処理・支援		—
都市構造	資源 【本処理】	都市づくりでの二次仮置場空間確保 による周辺地域への支援を見据えた用地検討		—
	即応力	ライフラインの点検・補修体制強化 による緊急時における迅速な対応	1-5 対象とする業務	災害廃棄物処理に係る主な業務 【初動期】被害状況の把握： ライフライン（電気、ガス、上下水道）の被害状況の確認 【応急対応】処理施設の復旧： 必要な資機材、人員、燃料、水、電気、薬剤等の確保
産業	冗長性	処理関連施設の燃料等確保・補修体制整備 による緊急対応の強化	1-5 対象とする業務	災害廃棄物処理に係る主な業務 【応急対応】処理施設の復旧： 必要な資機材、人員、燃料、水、電気、薬剤等の確保
	資源 【本処理】	二次仮置場設置・処理施設双方に係る協定 による迅速な処理対応の検討	3-2 がれき類等の処理 (6)仮置場	設置及び初期の運営については、協定を締結している民間事業者と連携して業務遂行能力の高い事業者（産業廃棄物処理業者、土木建設事業者）を選定し、委託して行うことを基本とする
	即応力	処理施設における復旧対策 による処理対応の検討	3-2 がれき類等の処理 (7)仮置場	がれき類等については、本市の処理施設での処理を基本とする。ただし、被害状況、がれき類等の発生量や性状等から目標期間内で処理を完了することが困難な場合は、本市の休止施設の再稼働に加え、本市内外の民間処理施設や他自治体の処理施設等、あらゆる処理の可能性を検討する。なお、市外処理施設の確保に当たっては県、国、民間事業者団体等へ支援を要請する。

(b) 地域パターン F→G：古座川町

F は、町村規模である一方で、浸水率の低さや、自区内に一般廃棄物処理施設が立地していることから、処理を独自で実施できる可能性がある。よって、非常時であっても迅速な処理を実行するため、既存の処理施設を維持管理することが必要である。また、G はさらに F から処理施設を除いたケースであり、処理施設を所有する近隣市町村などによる廃棄物受け入れや、国による代行処理が必要となる。

各パターンの対策領域を表 14 で示す（F 黄セル、G 青セル）。F は、非常時に処理施設が機能することが重要であり、施設の耐震性強化や、施設機能維持に係る燃料や資機材の確保（産業×頑健性・冗長性）が必要となる。一方 G では、処理施設が存在しない状況での震災廃棄物対策となるため、周辺市町村との協定（行政×資源【本処理】）、廃棄物輸送を考慮した交通インフラの代替性確保や緊急時の補修体制の強化が必要であると考えられる。また、産業×即応力で示される領域では、同領域であっても求められる対策内容が異なることが考えられる。地域パターンが経年変化によって F→G へと変換する社会リスク・ケースである古座川町では、国土強靱化地域計画¹¹⁾に記載されている震災廃棄物対策として、産業×頑健性・冗長性を表す処理施設

設の耐震化の記載がある。しかし、パターン G を想定するとすれば対策内容が大きく変化することから、長期的に処理施設の在り方を検討した対応が必要となる。

表 14 地域パターン F・G に関する重要対策領域

地域パターンG	行政	都市構造	産業
頑健性			
冗長性	避難手段・体制の整備 による自力先との迅速な情報交換	交通の代替・アクセスの向上 による迅速な広域輸送への備え	処理関連施設の燃料等確保・補修体制整備 による緊急対応の強化
資源	緊急処理 自衛隊・消防等の協力体制 による緊急処理能力の担保		建設業・輸送業との協定締結 による震災廃棄物の選別・輸送
	本処理 広域に係る連携体制の構築 による震災廃棄物受け入れ先の検討		既存廃棄物施設・リサイクル業との協定 による独自処理率向上
即応力	処理関連計画の策定・改定 による独自処理対応力の構築	交通インフラ施設の点検・補修体制強化 による緊急時における迅速な対応	F: 建設業における出動体制 G: 広域連合間でのBCP策定

(5) プロセスモデルの構築

市町村の特性に応じて重点的な震災対策が定められたとしても、人口減少に起因する社会リスクによって、その必要とする取り組みは変化していく。人口減少にさらされる自治体の行政、建設業を中心とした産業、都市構造を定める都市計画関連計画が、進めていくプロセスは、個々の計画→実施→定着強化→マネジメントの流れの中で図 8 のように整理される。このプロセスモデルに沿って、年次計画を立てて進めていくことが重要である。

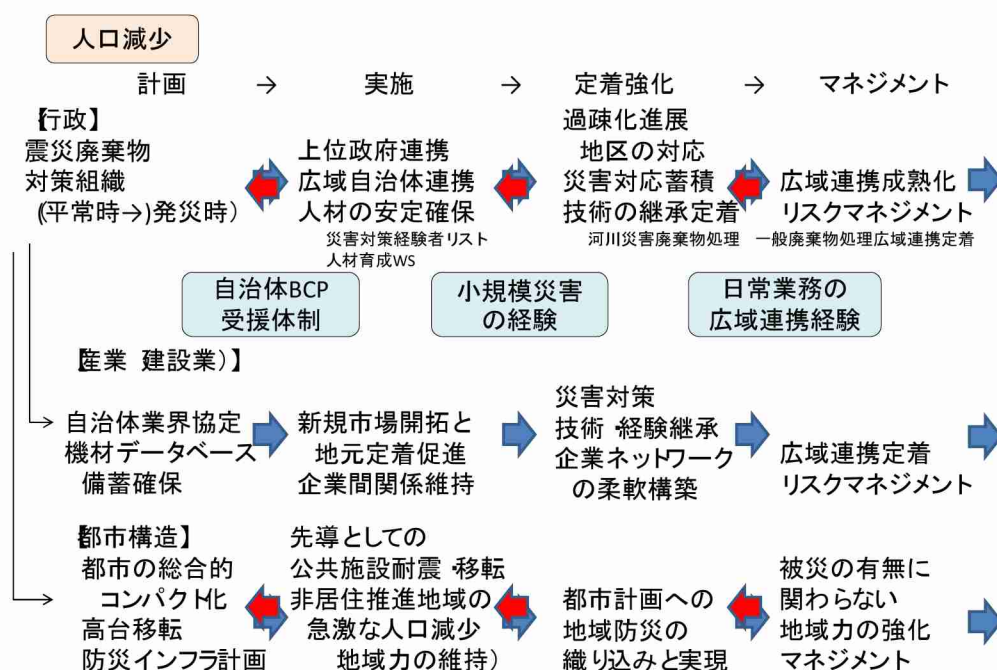


図 8 震災廃棄物対策のためのプロセスモデル

(6) おわりに

レジリエンスの対象およびその特性を、震災廃棄物対策項目に当てはめることで「震災廃棄物対策マトリックス」を策定することができた。また、処理の方向性に違いをもたらす影響要因と人口減少による地域状況の変化に配慮した類型化を行うことで、広域かつ多様であった対象地域を A-K の 11 地域パターンに分類す

ることができた。さらに、地域パターンごとに重点的に取り組むべき課題を設定し、その詳細を震災廃棄物対策マトリックスで表現することにより地域別で異なる方向性を示し、社会リスクの影響を受ける市町村の震災廃棄物対策における重点対策領域を示すことができた。その際には、密接に関連する地域防災計画を中心とした体系図を作成し、それによってより円滑に体系的な計画作成が実施できるとともに、人口減少による社会リスクを踏まえた将来起こりうる事象に対し、計画的・段階的に進めていくためのプロセスモデルを構築した。これらによって、震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策が実施されるものと期待される。

なお本研究では、都市構造における将来の経年変化が考慮されていない。しかしながら、南海トラフ巨大地震による甚大な被害が想定されている太平洋沿岸市町村では、防潮堤の建設や高台移転等の対策が進められている地域も確認できる。そのため、津波浸水被害の緩和による地域類型パターンの変化が考えられる。したがって、事前対策として都市構造が大きく変化する地域では、モデルケースとして都市構造の経年変化に対応することも視野に入れる必要がある。

現在、震災廃棄物対策の分野では、オールジャパンでの処理対策が求められている。その実現に向けては、関係団体における役割の明確化や連携・協力体制の構築、広域処理に係る体制の構築などが求められている。本研究内で示した内容は市町村別の震災廃棄物対策の提案であったが、ごみ処理の広域連合や県、地域ブロック単位でも、明確な対策内容の検討が必要である。そのため、本研究で示した地域パターンを広域的に把握することも併せて重要である。

本研究は、後述するⅡ- 2～ 5の研究に繋がる要素を持ち合わせている。Ⅱ- 2に対しては、地域特性に応じた類型化により重点が異なる震災廃棄物政策を効果的なものとするための地区別の詳細廃棄物量のコンテンツジェント推計が必要であることを示唆している。Ⅱ- 3に対しては、緊急処理の必要な生活圏における廃棄物の運送と1次仮置き場から2次仮置き場や受け入れ先に向けての廃棄物の輸送にフェイズを分けて考え、想定と異なる条件下での迅速な輸送計画の作成ツールの必要性を示している。Ⅱ- 4に対しては、事前計画では十分には確保できない仮置き場等の拠点適地評価について、都市構造や行政の変化プロセスの中で具体化していくことを示しており、一定の適地評価手順によって決定したものがそのベースとなるため、明示的な評価手順で決定していくことの必要性を示している。Ⅱ- 5に対しては、特に資源化率の向上が指向される2番目のフェイズにおいて、どこまで処理を実行して再資源化のための利活用の可能性を高めるかというバランスのための枠組みと技術開発の必要性を示している。これ以降、これらの分析結果を受けて、Ⅱ- 2～ 5の研究を報告していく。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 1) これまで震災廃棄物処理計画を地域特性に応じて進めていく具体的な枠組みを提示してこなかったが、本研究は、南海トラフ巨大地震の対象となる地域特性に対応した対策として、行政、都市構造、産業の側面から捉えて地域を類型化し、生活空間・低・未利用地の2つのフェイズを意識したレジリエンスの要素に応じて、政策を体系化した。
- 2) 人口減少に端を発し、行政ガバナンスの低下や産業規模の減少など、大きな社会リスクが発生するものの、これまでの研究では、それらが計画に与える影響について示してこなかった。本研究は、市町村の類型別施策体系と類型変化によって明確に示し、さらにプロセスモデルとして段階を追って対応していく方法を示した。

（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) 市町村に対する類型化による震災廃棄物対策のマッピングを行った「震災廃棄物対策マトリックス」は、国の指針や都道府県の指示によって作成してきた各市町村の震災廃棄物処理計画および関連計画を、地域特性に応じたものにしていくときの方向性を示している。
- 2) 地域防災計画を中心として、都市計画と関連計画、および上位計画との関係を整理した体系図は、これまでも意識はされていた計画体系ではあるだろうが、実質的な関連性確保をすべての自治体で整合的に行ってきたわけではないこともヒアリングより確認している。このような体系図により、具体的な調整や関連性確保の取り組みが、従来に比べて円滑に行えるものと期待される。
- 3) 震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策のためのプロセスモデルは、来るべき南海トラフ地震対策を順次進めている自治体に、次に何をすべきかを示すものとなっている。あらかじめ対応しておくことで、積極的なリスク対策を行ってその負荷を小さくすることと、それでもなおあらかじめ想定していたことと異なることが起こったとしてもその経験によって効果的に対応できることを、ともに実現するためのプロセスのデザインにより、複数のつながりのある政策体系とすることができる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

特に記載すべき事項はない。

＜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）＞

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) Keiichi Kitazume: the 10International Symposium in Science and Technology 2015, CD-ROM(2015)
“An Approach of Preparedness for Dealing with Debris and Waste from Great Tsunami”
- 2) A. Kobayashi, K. Yamamoto and Y. Tsukada: International Conference on “Landslides and Slope Stability” (2015)
“Prediction of Failure of Small Earth-Fill Dams by Heavy Rain”
- 3) 北詰恵一, 小林晃: 第18回日本環境共生学会学術大会(2015)

「人口減少下の都市構造変化を考慮した震災廃棄物処理のあり方」

- 4) Keiichi KITAZUME, Taira OZAKI and Toru MORIOKA: Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, CD-ROM(2015)
 “Risk-Based Environmental Preparedness for Dealing with Debris and Waste from Great Tsunami”
- 5) Akira. Kobayashi, Takuto. Hayashi, Yasuhiro. Tsukada and Kiyohito. Yamamoto : The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering(2015)
 “Effect of the seismic vibration direction on the water leakage of gravity-type concrete dam
 Japanese Geotechnical Society Special Publication”
- 6) 小橋昭文、北詰恵一：平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会（2016）
 「人口減少都市構造変化を踏まえた震災被害要因の抽出」
- 7) 東田直樹、北詰恵一：平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会（2016）
 「南海トラフ地震に向けた地区分類別震災廃棄物処理対策」
- 8) 小橋昭文、北詰恵一、東田直樹：第 53 回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-01、pp. 2790-2794(2016)
 「人口減少都市構造変化を踏まえた震災被害要因による地域類型」
- 9) 北詰恵一：第 53 回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM)、Vol. 53、No. 49-06、pp. 2814-2817(2016)
 「人口減少市町村における大規模地震による廃棄物処理のための事前・事後復興の枠組み」
- 10) Keiichi KITAZUME: 11th International Symposium in Science and Technology at Kansai University 2016（2016）
 “Disaster risk reduction and recovery in earthquake debris and waste management”
- 11) 小橋昭文、北詰恵一、清水紀行：土木学会第 71 回年次学術講演会（2016）
 「南海トラフ地震に対する災害廃棄物処理計画体系」
- 12) 小橋昭文、北詰恵一：土木学会関西支部年次学術講演会（2017）
 「南海トラフ巨大地震における地域連携を見据えた災害廃棄物処理対策の提案」
- 13) 小橋昭文、富原弘喜、北詰恵一、尾崎平：第 55 回土木計画学研究発表会・春大会（2017）
 「人口減少市町村における事業所の 産業別存続状況を踏まえた震災復興分析」
- 14) 小橋昭文、吉田拓史、北詰恵一：第 72 回年次学術講演会土木学会全国大会（2017）
 「災害廃棄物処理における地域性を考慮した港湾 BCP 政策」
- 15) 北詰恵一、小橋昭文：日本環境共生学会 第 20 回学術大会（2017）
 「社会リスクを考慮した効果的な災害廃棄物処理のためのプロセスモデル」
- 16) 小橋昭文、北詰恵一：第 56 回土木計画学研究発表会・秋大会（2017）
 「災害廃棄物処理におけるレジリエンス評価の考え方」
- 17) 北詰恵一：日本地域学会第 54 回年次大会（2017）
 「レジリエントな都市形成のための行政計画の関連性分析」
- 18) Kifumi Kobashi and Keiichi Kitazume : Asian Conference on Engineering and Natural Sciences(2017)
 “Disaster Waste Management Countermeasure Proposals for Regional Partnership against Nankai Trough Earthquake and Tsunami Disasters”

(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) 建設技術展 2015 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社、一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2015 年 10 月 28~ 29 日、マイドームおおさか、52 名)『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 2) 建設技術展 2016 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社 一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2016 年 10 月 26 日~ 27 日、マイドームおおさか、61 名)、『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 3) 循環型社会形成推進研究発表会 (主催：環境省、2016 年 12 月 13 日、東京会場 (中央大学駿河台記念館、聴講者約 100 名)「巨大地震による災害廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価」と題してパネルディスカッション参加
- 4) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか。」(主催：関西大学、共催：徳島大学、2017 年 2 月 24 日、グランフロント大阪北館タワーB10 階、ナレッジキャピタルカンファレンスルームタワーB、RoomB 05+06、参加者 95 名)にて「社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価」と題して報告、「南海トラフ地震に向けた地域の取り組み」をテーマにパネルディスカッション
- 5) 建設技術展 2017 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社 一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2017 年 10 月 25 日~ 26 日、マイドームおおさか、約 60 名)、『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 6) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか」(主催：関西大学、2018 年 1 月 26 日、関西大学梅田キャンパス 8 階、KANDA I Me R I S Eホール 06、参加者 70 名)にて「震災・社会リスクをふまえたレジリエント政策の評価」と題して講演
- 7) 越境地域政策研究フォーラム (愛知大三遠南信地域連携研究センター、2018 年 2 月 10 日、愛知大学豊橋校舎、聴講者 20 名)「巨大地震に備える災害廃棄物処理計画」と題して分科会講演、「災害廃棄物計画の実施へ」というテーマでパネルディスカッション参加

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊建産速報 (平成 29 年 2 月 28 日、WEB、「関西大学が公開シンポ開く 巨大地震の適応策等議論」)
- 2) 鋼構造ジャーナル (平成 29 年 3 月 6 日、鋼構造出版、12 頁、「巨大地震にどう備えるか」防災関係者 100 名が参加 関大と徳島大の公開シンポ」)
- 3) 建通新聞 (平成 30 年 3 月 9 日、建通新聞社、大阪、6 頁、「災害廃棄物の処理に重要な役割を果たす建設業界、地域知る建設業者が不足、復旧・復興のリスクに」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 内閣官房：国土強靱化計画-強くて、しなやかなニッポンへ-, 2014
- 2) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：東日本大震災における災害廃棄物処理概要報告書, 2016
- 3) 国立社会保障・人口問題研究所：日本な地域別将来推計人口, 要旨, 2013
- 4) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針, 2014
- 5) 盛岡通：災害対策と気候変動適応の道としてのレジリエンス, 環境情報科学, 2017
- 6) 塩崎由人, 加藤孝明, 菅田寛：自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理, 土木学会論文集 D3(土木計画学), 2015
- 7) MCEER: Engineering Resilience Solutions, The Uni-versity at Buffalo, The State University of New York, 2008.
- 8) 川辺孝治：大船渡工場の災害復旧と災害廃棄物処理, コンクリート工学誌, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 50 巻, 1 号, p. 91-93, 2012
- 9) 小橋昭文, 富原弘喜, 北詰恵一：人口減少市町村に置ける事業所の産業別存在状況を踏まえた震災復興分析, 土木計画学, 2017
- 10) 浜松市環境部：浜松市災害廃棄物処理計画, 2017
- 11) 和歌山県古座川町：国土強靱化地域計画 ～ 清流の輝きを しなやかに未来へつなぐまち 古座川町 ～ , 2017

Ⅱ- 2 震災被害想定に応じた震災廃棄物量のコンティンジェント推定の評価

[要旨]

本サブテーマにおける研究開発目的は、社会リスクをふまえた持続可能な適応策の評価に資する震災廃棄物発生量の推定モデルを構築し、震災廃棄物のコンティンジェント推定の結果が仮置場や中間処理施設の規模設定など災害廃棄物処理のマネジメントに与える影響を評価することである。

そのため、はじめに、災害廃棄物発生量の推定について、これまでの地域特性の配慮がなされていなかった課題に対して、汎用性のある住宅・土地統計調査データと住宅地図を用いて、建物一棟単位での属性を付与する機能を追加し、外力条件として、事前計画には、内閣府等のデータを、事後は、産総研の QuakeMap のデータを用いることで、地域特性を考慮した災害廃棄物発生量の算定が可能なモデルを構築した。本モデルの妥当性を東日本大震災で被災した東松島市をモデル都市として検証した結果、総量として 1 割程度過大な推定となったが、概ね良好な精度で結果が得られることを示した。一方、課題として、ごみ種別の算定については、地域ならびに時代に応じた分別率を設定する必要があることも述べた。

次に、高知県沿岸域をモデル地域とした災害廃棄物発生量の推定に基づく脆弱性の評価を行い、高知沿岸域が極めて脆弱なエリアであり、特に高知市は、現有施設の 3 倍程度の仮設焼却炉が必要な程、処理量が膨大であることを示した。さらに、現在、災害廃棄物対策指針に示されている建物 1 棟当たりの発生量原単位について、同手法による算定では、地域特性を考慮できず、高知県沿岸域ならびに静岡県西部の自治体を対象とした検討の結果、特に、地方部においては、過小となる可能性があることを指摘した。

最後に、コンティンジェントな廃棄物発生量が与える影響を検討した結果、原単位には振れ幅があることを理解した上で、事前準備、事後の対応を行うことが必要であることを示し、特に、上振れの場合には、後段プロセスの仮置場や仮設焼却炉などの規模にも大きな影響を与えることを示した。また、これまで取り組まれている建物の耐震化施策や、これからの対策である嵩上げや危険地域からの移転などの施策は、廃棄物発生量の低減にも有効であり、それらを複合的に組み合わせて、災害に備えることがより効果的であることを示した。また、事前対応による早期の処理開始が自治体の抱える仮置場の確保の問題にも有効であることを定量的に示した。

1. はじめに

1995 年の阪神・淡路大震災、2011 年の東日本大震災を経験し、環境省では大規模災害への対応を考慮した総合的な災害廃棄物対策の基本的な方向についてグランドデザインをとりまとめている¹⁾。また、南海トラフ地震や首都直下型地震に対する備えのために、都道府県、市町村において災害廃棄物処理基本計画（以下、処理計画）が策定されつつある²⁾。その最大の目的は、膨大な災害廃棄物の円滑な処理を確保すること、ならびに発災前の周知な事前準備と発災後の迅速な対応を行うためである。

浅利³⁾の政令指定都市を中心とした全国 61 市を対象とした災害廃棄物への対応項目の重要度に関するアンケートによれば、事前・事後とも仮置場の確保が最も重要とされている。仮置場の必要面積は、がれきの発生量と質に大きく依存するため、事前計画における災害廃棄物の発生量の推計ならびに、発災直後の災害廃棄物発生量の推計が重要となる。また、災害廃棄物の発生量は、処理体制の立案や中間処理施設の規模の立案など、マネジメント全体に大きな影響を与える。そのため、汎用性が高く、事前ならびに事後の各段階における状況に応じた（ギャップを埋める）推定モデルが必要であり、発災前後でシームレスな災害廃棄物発生量の推定可能なモデルが求められる。

2. 研究開発目的

本サブテーマにおける研究開発目的は、社会リスクをふまえたサステナブルな適応策の評価に資する震災廃棄物発生量の推定モデルを構築し、震災廃棄物のコンティンジェント推定の結果が仮置場や中間処理施設の規模設定など災害廃棄物処理のマネジメントに与える影響を評価することである。そのために、以下の具体的な目的を設定した。

- ① 震災廃棄物量の推定のための建築ストック、社会インフラのストックのデータベースを構築し、構造、築年数、延床面積を考慮した廃棄物発生量の予測モデルを構築すること。
- ② 南海トラフ巨大地震津波避難対策特別強化地域における都市規模の異なる複数の自治体を対象に廃棄物発生量を推定し、構築モデルの有用性と限界を示し、その汎用性を明示すること。
- ③ モデル推定に基づき、各サブテーマの成果も踏まえ、コンティンジェントな災害廃棄物発生量の推定、対策による低減効果からレジリエンス評価を行い、さらにコンティンジェントな推定結果が仮置場の必要面積や仮設焼却炉の規模に与える影響等の評価を行うこと。

3. 研究開発方法

(1) 研究開発の位置づけ

1) 行政が策定している災害廃棄物処理計画にみる災害廃棄物発生量推定の問題点

災害廃棄物処理計画の策定状況について、国立環境研究所の災害廃棄物情報プラットフォーム⁴⁾に登録されている災害廃棄物処理計画の策定自治体数は109（2018年1月現在）であり、南海トラフ巨大地震津波避難対策特別強化地域の1都13県139市町村のうち策定済みの自治体は、1都11県20市町に留まっている。また、同計画を策定している自治体における災害廃棄物発生量の推計方法は、震災廃棄物対策指針（1998年）⁵⁾に基づく方法（方法1）、ないしは災害廃棄物対策指針（2014）⁶⁾に基づく方法（方法2）のいずれかで推計がなされている。各方法の推定方法ならびに問題を表1に示す。

表1 自治体の災害廃棄物処理計画において採用されている廃棄物発生量の推計方法とその問題点

	方法1（「震災廃棄物対策指針」（1998））	方法2（災害廃棄物対策指針（2014））
算定式	全壊棟数(棟)×平均延床面積(m ² /棟) ×原単位(t/m ²)	Σ(倒壊棟数(棟)×原単位(t/棟))
原単位	木造可燃：0.194、非木造可燃：0.101 木造不燃：0.502、非木造不燃：0.809 (t/m ²)	全壊：117、半壊：23、床上浸水：4.60、 床下浸水：0.62 (t/棟)
各方法の問題点	- 全壊棟数からのみの算定であり、半壊等被災の程度が考慮されていない。 - 多くの市町が、平均延床面積を市域全体の延床面積を棟数で除して算定した値を採用しており、中心部や郊外部などの延床面積の差など、地区特性が考慮されていない。 - 原単位が阪神淡路大震災の被災市町の災害廃棄物の総処理量を総解体延床面積で除した値（平均的な値）を床面積当たりの廃棄物量とみなしている。	原単位が阪神淡路大震災と東日本大震災（岩手県・宮城県のみ）の被災市町村の全壊棟数と災害廃棄物の処理量の関係から1棟当たりの廃棄物量とみなしており、地区特性として現れる延床面積の大小や構造等を見逃している。
共通の問題点	- 地区特性（延床面積、構造、築年代）を見逃した推計となっており、地区毎の脆弱性、発生量の違いを反映できていない。 - 災害廃棄物発生量の推定の空間単位が市町単位となっている自治体があり、仮置場の空間配置や、輸送計画の策定に必要な発生量の空間分布を把握することができない。 - 多くの自治体が、危機管理部局等により算定された全壊棟数等の値を乗数としており、地区ごとの震度や浸水深などが未考慮となっている。	

表 1 に示すように現行の災害廃棄物発生量の推定方法の問題点は、方法 1、2 ともに全壊棟数あるいは倒壊棟数が市町全体での値を用いる自治体が多く、市町内における地区毎の震度や津波の被害の大きさの違いが考慮されていない。

また、原単位について、方法 1、2 ともに、震災時の実績データに基づき設定されている。「震災廃棄物対策指針（1998）」の原単位（方法 1）は、神戸市を始め、被災した 10 都市（9 市+淡路島）の構造別（木造、鉄筋コンクリート、鉄骨造）の棟数および延床面積と、家屋解体に伴い発生したがれき量（構造別、可燃・不燃）を集計し、10 都市の合計値を用いて作成している。一方、「災害廃棄物対策指針（2014）」の原単位（方法 2）は、阪神淡路大震災等の市町村と東日本大震災（岩手県・宮城県）の市町村の建築物の被害全壊棟数と災害廃棄物の処理量の関係より回帰式を求め、設定されている。そのため現状の原単位は、複数の自治体の集計データより作成された平均的な値である。すなわち、この原単位には幅があることを理解した上で、計画行為がなされるべきであるが、現状、そのような検討はなされていない。

2) 災害廃棄物に関する技術資料に基づく仮置場の必要量の計算方法の問題点

環境省の災害廃棄物に関する技術資料によれば、仮置場の必要面積の算定方法は次式で表現されている⁷⁾。

$$\text{必要面積} = \text{集積量} \div \text{見かけ比重} \div \text{積み上げ高さ} \times (1 + \text{作業スペース割合}) \quad (\text{式 1-1})$$

$$\text{集積量} = \text{災害廃棄物の発生量} - \text{処理量} \quad (\text{式 1-2})$$

$$\text{処理量} = \text{災害廃棄物の発生量} \div \text{処理期間} \quad (\text{式 1-3})$$

本算定方法では、年間の処理量以上のものを保管できるスペースを必要な仮置場面積と定義しているものと解釈できる。

しかし、本算定式を用いた場合の問題点は、事前対応による準備がなされている場合ほど、必要面積が増えることである。つまり、事前計画に基づき早期に災害廃棄物処理がなされた場合、処理期間を長く確保することができるが、その場合、必要面積量が増えるという矛盾が生じる。

3) 既往研究のレビューに基づく災害廃棄物発生量推定の学術的動向

災害廃棄物量の推定手法に関して、平山らは東日本大震災をケースとした津波廃棄物に対する対応計画策定システムにおける初動時での津波廃棄物発生量の推定手法⁸⁾や熊本地震をケースとした災害初動期における災害廃棄物量の推計⁹⁾を行っている。ここでは産総研の地震動マップ即時推定システムから得られる災害情報に基づくデータを用いた災害初動期の廃棄物量の推定手法の構築という点に特徴を有する。また、平川らは時系列データを加えた 4d-GIS を構築し、失ったストック量を推計しており¹⁰⁾、時間軸の考慮と詳細な建物ストックを考慮した点に特徴を有する。さらに、長谷川ら^{11)、12)}は、災害廃棄物の推計は行っていないが、地域メッシュ統計を利用したメッシュ単位の木造建物数、非木造建物数、それらの建物の建築時期を推計する方法を提案している。

しかし、いずれの研究も平均的な原単位を用いた災害廃棄物の推定にとどまり、数少ないデータから作成された原単位の持つ幅に言及したものは見られない。また、モデルの汎用性や複数都市への適用性に関する検討は乏しく、さらに、推計結果が仮置場の必要面積や中間処理施設規模に与える影響に関する検討は見られない。

4) 災害廃棄物発生量モデル構築の意図

平山らの研究⁹⁾は災害直後の災害廃棄物発生量の推定を目的としている。それに対し、本研究で構築するモデルは、災害前の事前計画に必要な災害廃棄物発生量の推定ならびに災害直後の外力状況に応じた災害廃棄物発生量の推定を可能なものとする。事前の災害廃棄物発生量の推定目的は、主に自治体における必要な一次仮置場、二次仮置場の必要面積ならびに空間分布や体制等の事前計画、検討に用いることである。一方、災害直後の廃棄物発生量の推定目的は、仮置場の場所に加え、主に仮設焼却炉の必要性やその規模の検討など処理計画、マネジメントに用いることである。

現在の災害廃棄物処理計画を策定している自治体のうち、南海トラフ地震エリアにおいては、内閣府中央防災会議の推定結果をもとにしたL1、L2規模での発生量の推定を行っているところが多く（高知県など）、加えて断層型の地震動に対する災害廃棄物の推定を行っている（香川県など）ところもある。いずれの場合も、ある条件における事前の推定震度ならびに津波到達域に基づく結果であり、実際に発生する地震動ならびに津波到達域とは異なる。また、発災以後の推定量についてもばらつきは大きい。図1は東日本大震災の宮城県における広域ブロックにおけるプロポーザル時期を基準とした各時期の変動の大きさを示したものである¹³⁾。当初に比べ、最終時点における廃棄物量が、大きく上回ったところ、逆に下回ったところが見られる。そのため、事前ならびに事中の各段階における状況に応じた（ギャップを埋める）推定が必要であり、発災前後でシームレスな災害廃棄物発生量の推定可能なモデルが求められる。

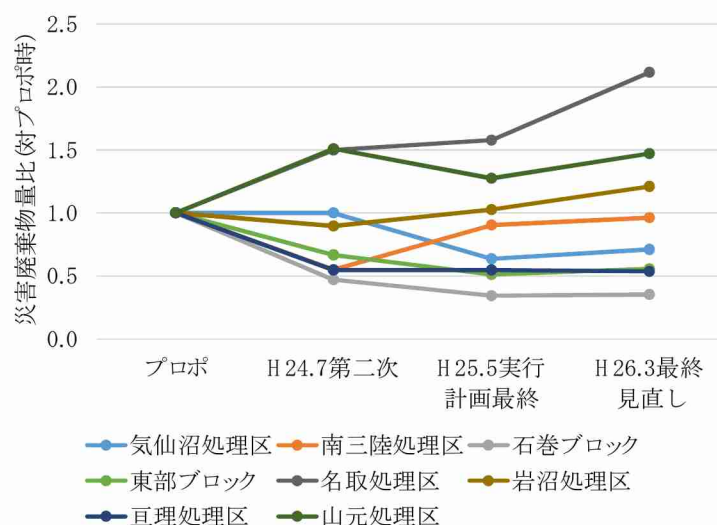


図1 東日本大震災（宮城県）における災害廃棄物量の推移¹³⁾

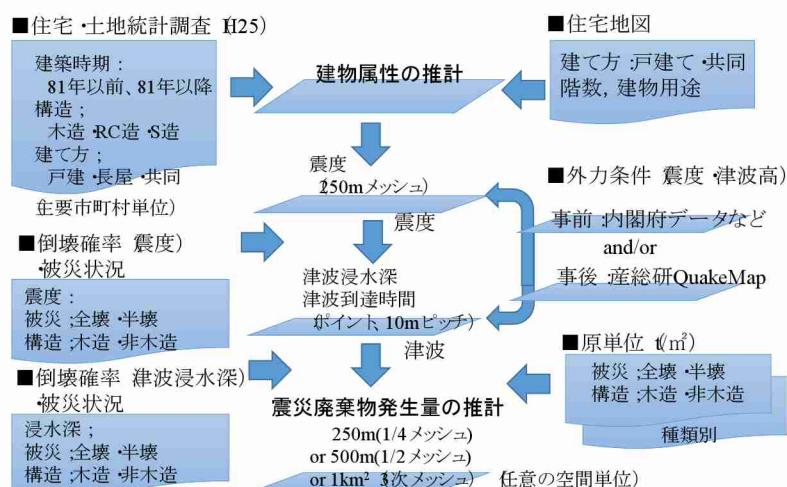


図2 地震津波災害による廃棄物発生量の推定フロー

(2) 災害廃棄物の推定モデルの構築方法

1) 構成要素

本研究の災害廃棄物発生量の推計フローを図2に示す。本システムはGISおよびExcelを用いる。

第一に一般的に入手可能な住宅・土地統計¹⁴⁾ならびにゼンリンの住宅地図（建物ポイントデータ）¹⁵⁾を用いて、建物一棟毎に建物属性（建て方、階数、構造、時期別）の推計を行う。

第二に、250mメッシュ単位での外力条件を与える。その外力には、南海トラフ地震の事前対応として内閣府中央防災会議が公表¹⁶⁾している各地震、各津波シナリオに基づく震度(250mメッシュ)、浸水深(10mピッチ、ポイントデータ)に関するデータを用いる。災害後は、防災科学技術研究所が構築した地震動マップ即時推定システム（QuakeMap）¹⁷⁾にて数時間毎に公表される250mメッシュ分解能による震度情報を用いる。

これらの震度情報などは更新される度にそのデータセットを置き換えることで、逐次、災害廃棄物の発生量の計算が可能である。

第三に、東日本大震災時のデータに基づく建物の構造別・築年代別の倒壊確率¹⁸⁾を用いて、評価する空間単位（最小空間単位250m）毎に全半壊の量を計算する。空間単位は250m、500mメッシュなど任意に設定できる。本研究での空間単位は1kmメッシュとした。

第四に、全半壊、構造別の原単位を用いて空間単位での災害廃棄物発生量を推定する。地震による全半壊による廃棄物量の発生原単位は、現在、各自治体の災害廃棄物処理基本計画において、最も一般的に利用されている震災廃棄物対策指針(1998)に対応し、全半壊した延べ床面積あたりの発生量を算定する。また、津波堆積物は災害廃棄物対策指針(2014)に準拠し、算定する。原単位の数値自身については、今後の見直された場合、そのデータセットを置き換えることで対応可能である。

2) 建物属性

地震による建物倒壊は、建物の構造（木造/非木造）ならびに建築時期が影響する。本研究では、建物属性の推計のために、都道府県および一定規模以上の市町の住宅に関連する集計データである住宅・土地統計調査（平成25年）¹⁴⁾と、建物一棟一棟の位置、用途、階数、名称などの情報が示されているデジタル住宅地図（建物ポイントデータ）¹⁵⁾を用いた。

具体的には集計データである住宅・土地統計調査より、建て方（戸建、長屋、共同：3種）、構造（木造、非木造：2種）、階数（戸建：1F、2F、3F：3種類、共同：3～5F、6～10F、11F以上：3種類）、築年代（80年以前、81年以降：2種類）のクロス集計表を作成し、建物属性の条件付き確率を算出する。また、築年代については開発時期などの違いによりある程度の空間的な偏りがあると考えられる。本研究では国勢調査より市町の平均年齢と各空間単位（ここでは3次メッシュ（1km²グリッド））の平均年齢の比率をとり、平均年齢が高いほど、築年代は古いと仮定をおき、築年代に重み付けを行った。その上で、建物にコンピュータにより、一様分布で0～1の乱数を与え、算出した条件付き確率をもとに建物属性を割り充てた。

3) 災害（外力）条件

使用する外力のデータセットは、南海トラフ地震の事前対応として内閣府中央防災会議が公表¹⁶⁾している各地震（5ケース）、各津波（11ケース）のケースに応じた震度、浸水深に関するデータを用いる。本データは、震度が250mメッシュ、浸水深が10m間隔のポイントデータで提供されている。なお、本研究では分解能を合わせるために、浸水深についても10m間隔のポイントデータと250mメッシュと重ね合わせ、250mメッシュ内の平均水深を算定し、外力として使用することとした。また、本モデルの適用性として、災害後の推定には、防災科学技術研究所が構築した地震動マップ即時推定システム（QuakeMap）¹⁷⁾にて数時間毎に公表

される 250m メッシュ分解能による震度情報を用いることを想定している。また、津波浸水深については、東日本大震災の事例を見ても、早急に調査が実施されていることから、実測に基づく値を用いることを想定している。

4) 倒壊確率および被災状況

事前対応のための地震による建物の被災確率は、内閣府中央防災会議の地震による全壊率及び全半壊率¹⁸⁾より、全壊率、半壊率を求めた。津波による建物の被災確率は、東日本大震災時の国土交通省都市局の調査データ¹⁹⁾を元に設定した。事後では、被災調査情報（空中写真含む）に基づく全壊率、半壊率の補正を行うことが可能である。用いた倒壊確率を図3に示す。

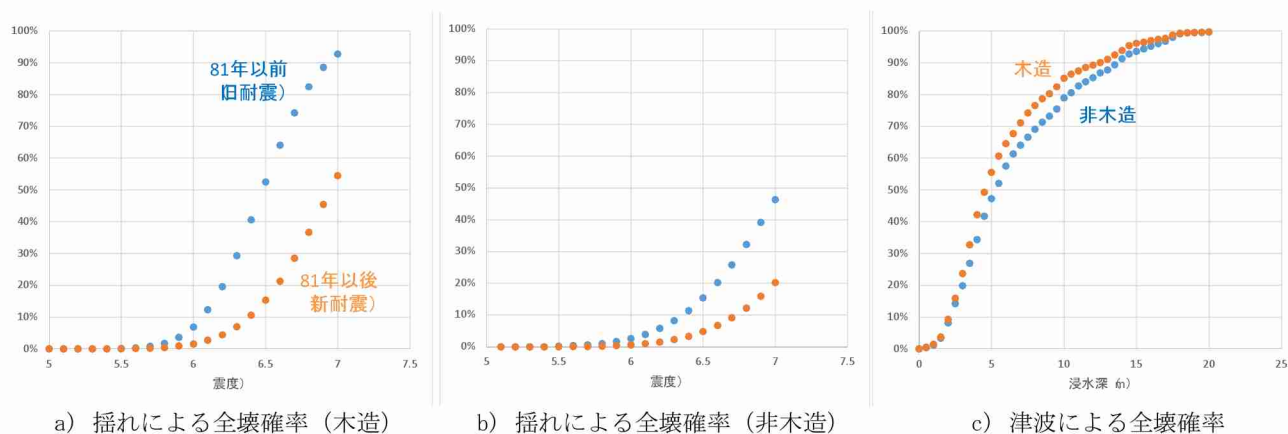


図3(1) 震度（揺れ）ならびに津波浸水深と全壊確率の関係

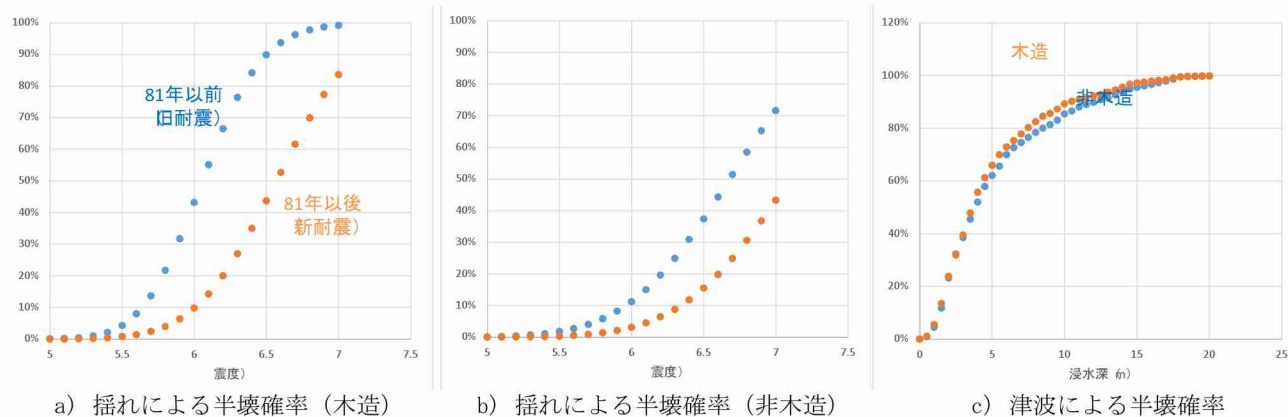


図3(2) 震度（揺れ）ならびに津波浸水深と半壊確率の関係

5) 原単位

自治体において策定されている災害廃棄物処理計画では、震災廃棄物対策指針（1998）、あるいは災害廃棄物対策指針（2014）のいずれかの原単位が採用されている例が多い。先に問題点を指摘したように、災害廃棄物対策指針（2014）に基づく方法では、1棟当たりの原単位であり、都市部、地方部の違いによる1棟あたりの床面積の違いや、同一市町においても中心部と郊外部の違いによる1棟当たりの床面積の違いが反映されない。そのため、本研究では震災廃棄物対策指針（1998）に基づく方法にて発生量の推定を行う。ただし、同指針の原単位は阪神淡路大震災の被災市町（10都市）の結果から設定されているため、推定幅があると思われる。そのため、本研究では、現状の原単位を用いた場合と、振れ幅として $\pm 1\sigma$ をとった場合の廃棄

物量を算定する。その上で、仮置場や中間処理施設の規模に与える影響を考察する。使用した原単位を表 2 に示す。

表 2 本研究で使用した廃棄物発生量の原単位

	木造・可燃	木造・不燃	非木造・可燃	非木造・不燃
原単位 (x)	0.194	0.502	0.101	0.809
$x - \sigma$	0.157	0.367	0.082	0.850
$x + \sigma$	0.226	0.504	0.149	1.414
$x - \sigma / x$	0.81	0.73	0.81	1.05
$x + \sigma / x$	1.44	1.37	1.82	1.66

6) 災害廃棄物発生量

本モデルにより算定された災害廃棄物の空間分布は GIS を用いて表現する。GIS 上には、上述した建物属性レイヤに、震度および浸水深の外力条件のデータセットレイヤを重ね併せており、地震、津波の外力（震度・浸水深）と建物の構造別・年代別の被災確率から全壊、半壊の棟数を算定し、被災建物毎の延床面積に建物属性別の原単位を乗じて、発生量を算定し、任意の空間単位での集計が可能である。ただし、外力メッシュの分解能が 250m メッシュであることから、空間集計単位の最小の解像度は 250m である。そのため、500m メッシュ、1km メッシュなど、任意の空間単位による集計が可能である。

構造別ごみ種別の推定は、震災廃棄物対策指針（1998）の方法に従い、「木くず」「コンがら」「金属くず」「その他（残材）」の構成割合（表 3）を乗じて算定した。次に「木くず」～「その他（残材）」に「津波堆積物」を加えた上で、岩手県の処理実績に基づき、処理・選別前の「木くず」～「津波堆積物」に対して、処理・選別後の「柱材・角材」「再生資材（コンがら）」「再生資材（土材系）」「金属くず」「焼却（可燃ごみ）」「埋立処分」のごみ種別の構成（発生）割合（表 4）を設定し、推計した。今回は、岩手県の処理実績に基づき算定を行ったが、今後、リサイクル技術の向上などに応じて、構成割合が見直された場合には係数を変更することにより対応が可能である。

表 3 構造別ごみ種別の廃棄物量の割合⁵⁾

		木くず	コンがら	金属くず	その他
木造	可燃物	100%	0%	0%	0%
	不燃物	0%	44%	3%	53%
非木造	可燃物	100%	0%	0%	0%
	不燃物	0%	96%	4%	0%

表 4 ごみ種別の構成（発生）割合

	柱材・角材	コンクリート	可燃物	金属くず	不燃物	土材系
木くず	15%	0%	55%	0%	30%	0%
コンがら	0%	80%	0%	0%	20%	0%
金属くず	0%	0%	0%	95%	5%	0%
その他	0%	0%	0%	0%	85%	15%
津波堆積物	0%	0%	0%	0%	20%	80%

（３）災害廃棄物の推定モデルの妥当性の検証方法

構築モデルの検証を行うために、本研究では、東日本大震災において被災した東松島市を対象に災害廃棄物発生量の算定を行い、実測値との比較を行う。

東松島市は2005年4月に旧矢本町・鳴瀬町が合併し、面積は102km²、人口4.3万人の市であった。津波浸水高は、野蒜海岸で10.35m、大曲浜で5.77mであった。浸水面積は、37km²（全体面積の36%）うち市街地12km²のうち8km²（65%）が浸水した。家屋被害は、全壊、半壊で1万棟を超えており、災害廃棄物の発生量は、合計1,098千トンにのぼる²⁰⁾。

構築モデルによる災害廃棄物発生量の推定にあたり、災害条件として、メッシュ毎の震度分布が不明であることから、震度については、気象庁により公開されている2011年3月11日14:46の東松島市における震度6強を全域に与えた。また、津波の分布については、復興支援調査アーカイブを基に実測値を用いた(図4)。算定に用いた原単位は、標準（平均）の原単位（x）である。

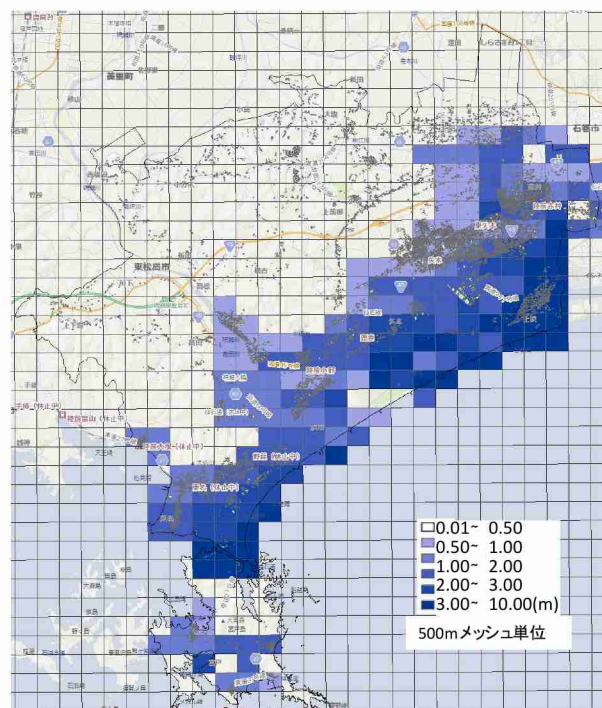


図4 算定に用いた津波浸水高の分布

（４）災害廃棄物発生量の推定に基づく脆弱性評価の方法

1) モデル対象地域

モデル対象地域は、高知県沿岸域のうち、南海トラフ巨大地震津波避難対策特別強化地域に指定されている10市8町1村（計19自治体）の複数の都市を対象とした。対象地域の位置図ならびに、廃棄物処理ブロックの関係を図5に示す。また、各市町村別、廃棄物処理ブロック別の各種面積、人口、世帯数、住宅地平均地価を表5に示す。

対象エリア全体の人口は約64万人、うち、10万人以上の都市は高知市のみであり、他の都市は5万人未満である。人口、世帯数は、高知市が他の市町村と比べて極めて多い。県内の約45%の人口が高知市内に居住している。廃棄物処理ブロック別に見た場合、高知市（中央中部）以外のブロック人口は、3万人～9万人である。

2) 災害廃棄物発生量の推定条件

a) 外力条件

ここでは、内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会（第二次報告）で示されている外力ケースの中から、震度ケースとして陸側ケースを、津波ケースとして、ケース④を使用する。使用したケースの外力の分布を図6に示す。

震度ケースについて、基本ケースとは、東海地震、東南海・南海地震の検討結果を基に設定されたベースケースであり、陸側ケースとは、基本ケースの強震動生成域を陸側に移動させたケースである。地点によっては陸側ケースよりも基本ケースの震度の方が大きいところもあるが、全体的には陸側ケースの方が、震度が大きく、広範に渡り震度7が想定されるため、陸側ケースを用いることとした。

津波ケースについて、ケース④とは、「四国沖」にすべり域を設定したケースであり、高知県沿岸域に到達する津波高が高くなるケースである。

b) 原単位

廃棄物推定の原単位は表2に示した標準（平均）の原単位を用いる。

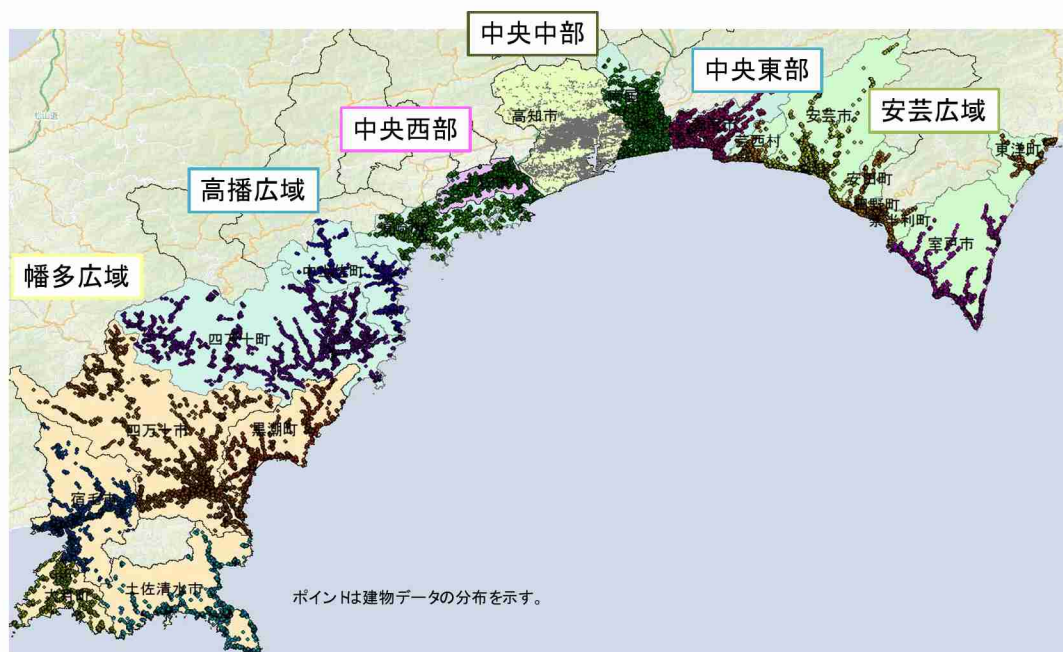


図5 対象地域（高知県沿岸域）の立地と廃棄物処理ブロック

表5(1) 市町村別の各種面積、人口、世帯数、住宅地平均地価

	面積 (km ²)	可住地面積 (km ²)	都市計画 区域面積 (ha)	市街化 区域面積 (ha)	人口 (人)	世帯数 (世帯)	住宅地 平均地価 (千円/m ²)
宿毛市	286	47	2,413	0	22,168	10,231	15.7
大月町	103	21	0	0	5,770	2,803	9.0
土佐清水市	266	36	8,087	0	15,471	7,811	16.8
四万十市	632	98	4,304	0	35,553	16,423	22.7
黒潮町	189	32	4,130	0	12,309	5,636	14.5
四万十町	642	83	7,442	0	18,767	8,724	14.8
中土佐町	193	24	1,682	0	7,651	3,608	13.8
須崎市	135	33	3,118	0	23,427	10,736	31.6
土佐市	91	43	9,159	0	28,390	12,154	32.6
高知市	309	135	16,805	5,072	337,489	161,246	73.7
南国市	125	64	6,618	540	48,480	21,594	48.9
香南市	126	54	4,532	0	34,157	14,456	28.4
芸西村	40	10	0	0	3,954	1,734	13.5
安芸市	317	37	524	0	18,994	8,733	28.9
安田町	52	10	0	0	2,923	1,313	12.5
田野町	7	3	0	0	2,878	1,311	14.9
奈半利町	28	7	0	0	3,501	1,786	13.2
室戸市	248	45	2,159	0	15,270	7,997	14.1
東洋町	74	10	1,570	0	2,865	1,561	13.9

表5(2) 廃棄物処理ブロック別の各種面積、人口、世帯数、住宅地平均地価

	面積 (km ²)	可住地面積 (km ²)	都市計画 区域面積 (ha)	市街化 区域面積 (ha)	人口 (人)	世帯数 (世帯)	住宅地 平均地価 (千円/m ²)
幡多広域	1,476	236	18,934	0	91,271	42,904	15.7
高幡広域	971	140	12,242	0	49,845	23,068	20.1
中央西部	91	43	9,159	0	28,390	12,154	32.6
中央中部	309	135	16,805	5,072	337,489	161,246	73.7
中央東部	252	119	11,150	540	82,637	36,050	38.7
安芸広域	766	122	4,253	0	50,385	24,435	15.9

3) 脆弱性評価の方法

ここでは、市町村別に、ごみ種別の災害廃棄物発生量を算定し、特に、焼却ごみに着目し、脆弱性の評価を行う。評価指標は、平時のごみ焼却量に対する災害時のごみ焼却量の比（何年分に相当するかを意味する）、ならびに3年で焼却処理を完了することを前提とした上で、現有施設の処理能力に対する焼却処理に必要となる処理能力の比（どれだけの倍率の処理能力が必要かを意味する）で評価する。

その上でブロック別の比較評価を行い、ブロック別の脆弱性の特徴について考察を行う。

(5) 複数の市町を対象とした廃棄物発生量の推定に基づく地域特性の比較方法

ここでは、複数の市町を対象に廃棄物発生量の推定を行い、全壊建物1棟当たりの発生量を比較し、地域による発生量の違いを評価する。

1) モデル対象地域

対象地域は、先に示した高知県沿岸域の19自治体に加え、静岡県西部の湖西市、磐田市、浜松市（中区、東区、西区、南区、北区、浜北区、天竜区）の3市（2市、7区）を対象とする。湖西市、磐田市、浜松市も、南海トラフ巨大地震により大きな被害が生じることが想定されており、南海トラフ巨大地震津波避難対策特別強化地域に指定されている。2市、7区の各種面積、人口、世帯数、住宅地平均地価を表6に示す。

また、図7に人口と可住地面積ならびに、人口と住宅地平均地価の関係をプロットしたものを示す。湖西市、磐田市、浜松市の7区を加えることにより、人口規模として5万人から25万人の範囲が追加され、住宅地の平均地価も5～7万円/㎡の範囲が追加され、地域特性を考察する上で必要となるサンプルが補間された。

表6 市区別の各種面積、人口、世帯数、住宅地平均地価

	面積 (km ²)	可住地面積 (km ²)	人口 (人)	世帯数 (世帯)	住宅地平均地価 (千円/㎡)
中区	44.34	42.74	231,818	102,580	90.5
東区	46.29	45.95	126,419	49,719	70.9
西区	114.71	76.49	112,041	41,394	55.2
南区	46.84	44.93	100,284	39,439	54.5
北区	295.54	132.53	93,859	34,195	35.7
浜北区	66.50	53.12	94,120	32,385	61.0
天竜区	943.84	90.44	32,418	12,838	11.8
磐田市	163.45	136.43	165,156	60,416	48.0
湖西市	86.56	49.45	58,753	21,700	49.1

2) 災害廃棄物発生量の推定条件

a) 外力条件

高知県沿岸域の外力条件は、先と同様である（震度：陸側ケース、津波：ケース④）。静岡県西部の外力条件は、内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会（第二次報告）で示されている外力ケースの中から、震度

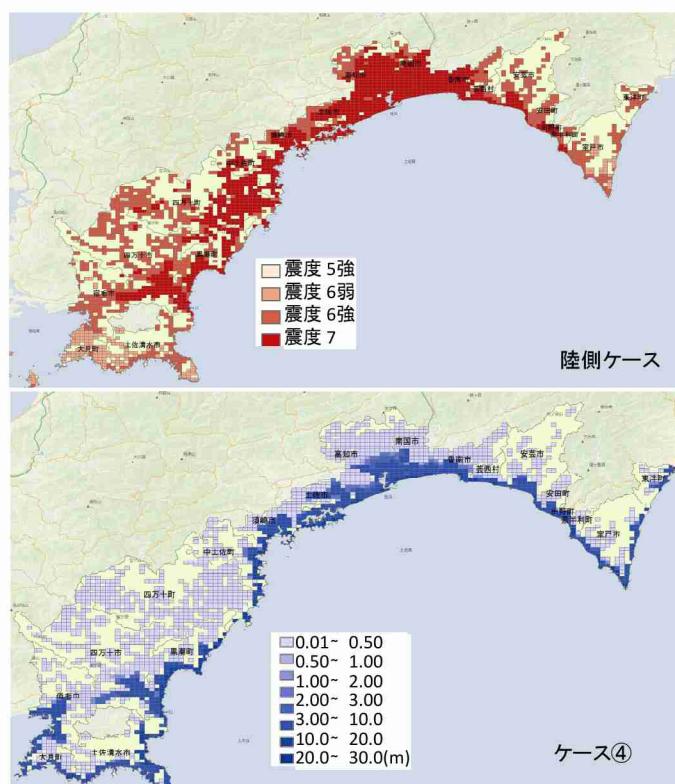


図6 災害廃棄物発生量推定に用いた外力ケース

ケース：基本ケース、津波ケース：ケース①を使用する。使用したケースの外力の分布を図8に示す。

震度ケースについて、基本ケースとは、東海地震、東南海・南海地震の検討結果を基に設定されたベースケースであり、陸側ケースとは、基本ケースの強震動生成域を陸側に移動させたケースである。津波ケースについて、ケース①とは、「駿河湾～紀伊半島」にすべり域を設定したケースであり、静岡県沿岸に到達する津波高が高くなるケースである。

b) 原单位

廃棄物推定の原単位は表 2 に示した標準（平均）の原単位を用いる。

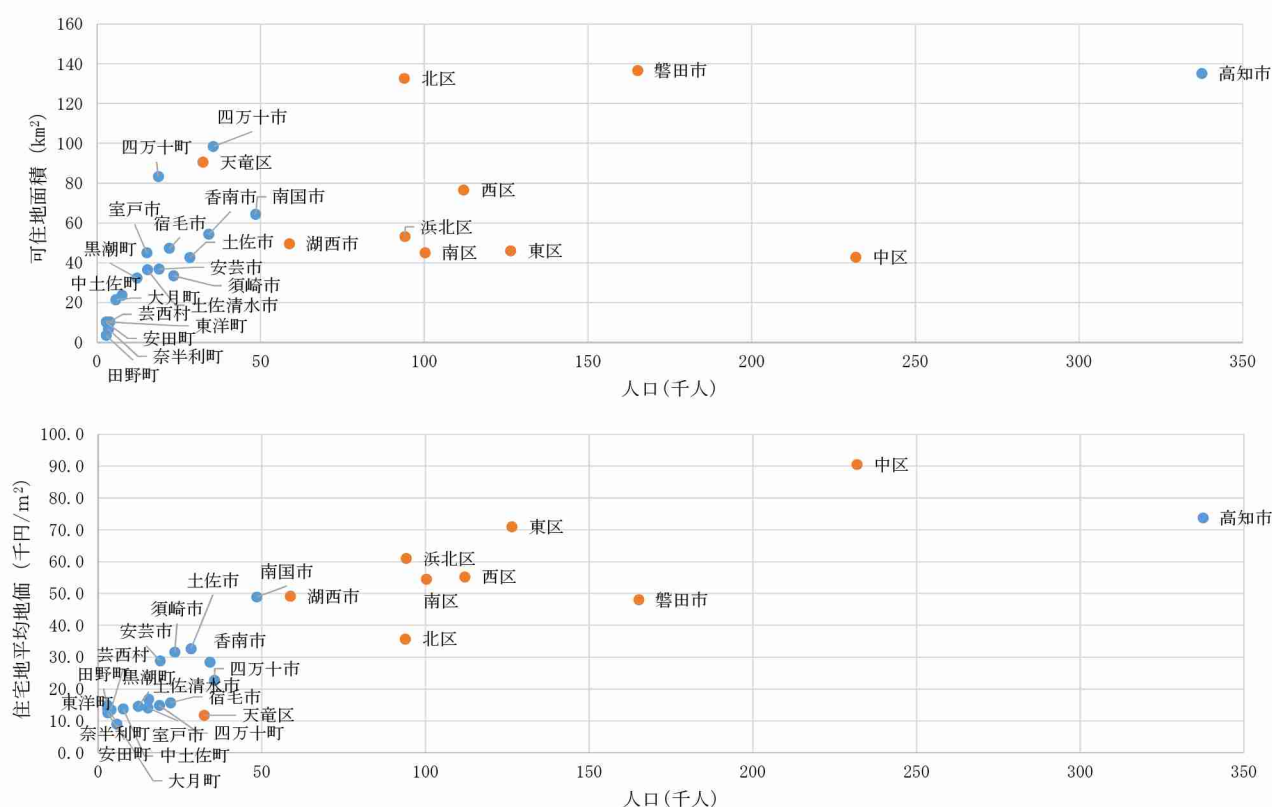


図7 対象とした市区町村の人口と可住地面積（上段）、人口と住宅地平均地価（下段）の関係

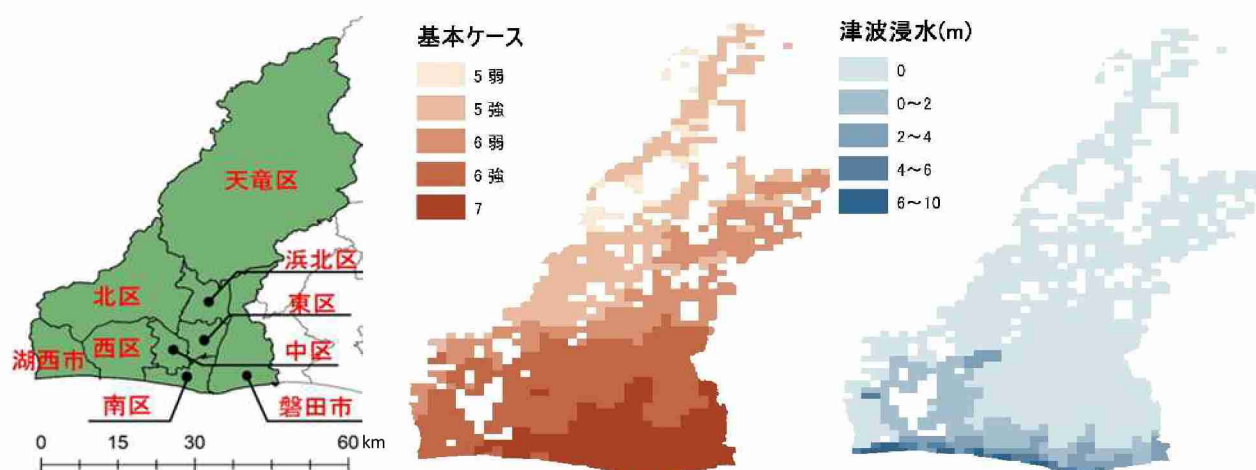


図 8 静岡県西部を対象とした震度と津波浸水深の分布

3) 地域特性の評価の方法

現在、災害廃棄物処理計画の策定にあたり、災害廃棄物発生量の推計方法には表 1 で示した延床面積をもとに算定する方法と、全壊、半壊等の被害状況の建物数をもとに算定する方法の 2 種類が主に採用されてい

る。先に示した問題点のとおり、いずれの方法においても問題点を有しているが、特に、後者の建物数をもとに算定する方法は、地域による影響の差が生じやすいと考えられる。そのためここでは、複数の市町を対象に、本モデルで構築した延床面積をもとに算定する方法を用いて廃棄物発生量の推定を行い、全壊建物1棟当たりの発生量を比較し、地域による発生量の違いを評価する。

(6) コンティンジェントな災害廃棄物発生量の推定とマネジメントに与える影響

ここでは、災害廃棄物発生量の推定モデルを用いて、原単位の幅ならびに、外力の違いによるコンティンジェントな災害廃棄物発生量の算定ならびに、耐震化や堤防強化などの対策を講じた場合の低減効果を算定し、後段のプロセスである仮置場の必要面積や仮設焼却炉の規模に与える影響について考察を行う。

1) モデル対象地域

ここでは、複数の異なる条件において災害廃棄物の発生量を算定するため、広域的な廃棄物の算定は行わず、高知県高知市をモデル対象都市とする。高知県内の人口の約45%が居住している四国太平洋側の中心都市である。高知市内の建物棟数は、平成25年度版の住宅・土地統計によれば約15.4万棟（内、木造：8万棟、非木造：7.4万棟）存在している。

2) 評価ケース

コンティンジェントな条件設定として、ここでは原単位、外力、対策の3分類を設定した。

原単位は、先に示したように延床面積を用いる方法であっても、その原単位は阪神淡路大震災の被災都市である10自治体の集計結果に基づいて設定されている。各被災都市の構造別種類別の延床面積当たりの発生量を表7に示す²¹⁾。各都市において発生量にバラツキが見られることから、今回は原単位の幅の影響を考察するために、震災廃棄物対策指針に示される原単位(x)を用いた場合と、バラツキの振れ幅として $\pm 1\sigma$ をとった場合の廃棄物発生量を算定する。用いた原単位は先述の表2に示す通りである。

外力としては、震度、津波の2種類が想定される。先に算定した高知県沿岸域でのシミュレーションの結果から、廃棄物発生量には、震度による影響の方が大きい。そのため、先のシミュレーションでは陸側ケースのみによる評価であったが、ここでは、基本ケースによる評価も行う。

対策としては、震度に対しては耐震化や移転、津波に対しては堤防強化や嵩上げ、移転などが考えられる。ここでは、これらのうち耐震化、堤防強化、嵩上げによる対策を行った場合の廃棄物発生量の低減効果について考察を行う。以上の項目を取り上げ、本研究において対象とした評価ケースの一覧を表8に示す。

表7 阪神淡路大震災の被災都市における構造別種類別の延床面積当たりの廃棄物発生量²¹⁾

	木造・可燃	木造・不燃	鉄筋・可燃	鉄筋・不燃	鉄骨・可燃	鉄骨・不燃
神戸市	0.206	0.599	0.117	0.854	0.053	0.358
尼崎市	0.193	0.425	—	0.877	0.079	0.726
西宮市	0.180	0.395	0.140	1.426	0.140	1.131
芦屋市	0.179	0.392	0.148	1.508	0.139	1.125
伊丹市	0.134	0.373	0.108	1.480	0.106	1.136
宝塚市	0.179	0.392	0.053	1.321	—	—
川西市	0.174	0.392	0.098	1.426	—	—
明石市	0.264	0.430	0.140	1.330	0.140	1.130
三木市	0.225	0.489	—	—	—	—
淡路地域	0.179	0.468	0.129	1.388	0.140	1.213
平均	0.191	0.436	0.117	1.290	0.114	0.974
標準偏差	0.035	0.068	0.031	0.248	0.036	0.315
M N	0.134	0.373	0.053	0.854	0.053	0.358
M A X	0.264	0.599	0.148	1.508	0.140	1.213

表 8 評価ケースの一覧

	ケース名	原単位	地震	耐震化	堤防強化	嵩上げ
	0 基準(Ref.)	標準	陸側	現状	震度6弱以上で破堤	なし
原単位・ 外力の 影響	1 原単位の影響(1)	標準+ σ	陸側	現状	震度6弱以上で破堤	なし
	2 原単位の影響(2)	標準- σ	陸側	現状	震度6弱以上で破堤	なし
	3 震度の影響	標準	基本	現状	震度6弱以上で破堤	なし
対策に よる 軽減 効果	4 耐震化の影響(1)	標準	陸側	中間値	震度6弱以上で破堤	なし
	5 耐震化の影響(2)	標準	陸側	目標値	震度6弱以上で破堤	なし
	6 堤防強化の影響	標準	陸側	現状	津波が超えたら破堤	なし
	7 嵩上げの影響(1)	標準	陸側	現状	震度6弱以上で破堤	+50cm
	8 嵩上げの影響(2)	標準	陸側	現状	震度6弱以上で破堤	+100cm
	9 対策の複合化	標準	陸側	目標値	津波が超えたら破堤	+100cm

3) 仮置場・仮設焼却炉の必要規模の算定方法

1) 仮置場の必要面積の算定方法

先述の通り、現状の技術資料に基づく仮置場の必要面積の算定方法の考え方は、「全体の発生量から1年間で処理できる量を差し引き、残った量を仮置場に保管する」という考え方のため、処理期間が長くなるほど、必要面積が多く必要という矛盾が生じる。

そのため、ここでは仮置場における保管量の基本的な考え方を、「年間処理量分を仮置場に保管する」とした。実際のマネジメントにおいても、確保できる仮置場量ならびに仮設焼却炉等の中間処理施設の処理能力以上に全壊等した建物の除却・運搬はできないため、ここでは上記のように定義した。その上で式2により必要面積の算定を行った。

$$\text{必要面積} = \text{集積量} \div \text{見かけ比重} \div \text{積み上げ高さ} \times (1 + \text{作業スペース割合}) \quad (\text{式 2-1})$$

$$\text{集積量} = \text{処理量} \quad (\text{式 2-2})$$

$$\text{処理量} = \text{災害廃棄物の発生量} \div \text{処理期間} \quad (\text{式 2-3})$$

ここで、各パラメータは技術資料⁷⁾に従い、見かけ比重(可燃:0.4、不燃:1.1)、積み上げ高さ:5m、作業スペース割合:1とした。なお、処理期間を事前に準備が行えており早期に実施できた場合として3年間、東日本大震災と同等の期間の2年間、およびその間の2.5年で処理した場合の3ケースにおける必要量を算定した。

2) 仮設焼却炉の必要能力の算定方法

ここでは仮設焼却炉1炉当たりの処理能力:300t/日、稼働日数:310日の条件において、処理期間を仮置場の必要面積の算定と同様に、2年、2.5年、3年で処理した場合の各ケースにおける必要基数の算定を行った。

4. 結果及び考察

(1) 災害廃棄物の推定モデルの妥当性の検証

東松島市を対象とした災害廃棄物発生量の算定結果を図9、10に示す。空間分布について、沿岸部で、かつ相対的に住宅が密集している矢本、大曲地区ならびに野蒜地区等における災害廃棄物の発生量が多いことが分かる。

また、災害廃棄物発生量の全体の比較から、本研究により構築したモデルによる推定結果が実測よりも約 10% 程度多い結果となっている。この要因を考察した結果、全半壊の建物数の推定結果が、実測よりもやや多い結果となっており、このことが一因として考えられる。今回、市域全体を震度 6 強、計測震度 6.4 で計算を行ったことが原因と考えられる。

次に、内訳についてみると実測と比べて推定値は、木くずが 85% に対して、コンがら、金属くずが 1.1 倍、その他が 1.4 倍であった。このように「その他」の割合が高く、「木くず」の割合が低い結果となったのは、今回のモデルが、阪神淡路大震災後に策定された指針に基づき算定していることから、阪神淡路大震災と東日本大震災の分別率の差がこのような結果を招いたものと思われる。

以上より、本モデルは概ね妥当な結果が得られることが示された。ただし、実測値と推定値の比較より、全体の誤差は、+10% 程度であり、かつ、内訳別の比較結果より、分別率の設定に留意する必要があることが示された。

(2) 災害廃棄物発生量の推定に基づく脆弱性評価

1) 災害廃棄物の発生量の分布と総量

図 11 に構築したモデルを用いて算定した市町村別の災害廃棄物の発生量を示す。地図上の 1 メッシュのサイズは、1km メッシュ (3 次メッシュ) である。また、棒グラフの表記において、高知市は、他の市町村に比べて極めて発生量が多いことから、別目盛りにて表現している。なお、同結果には津波堆積物は含んでいない。

第一に、発生量の空間特性として、東側に位置する安芸広域エリアは、居住地が沿岸部沿いに集中しており、津波に起因する発生量の割合が相対的に高い。一方、土佐市から香南市までの中央西部・中部・東部エリアは、内陸部にも居住地が広がっているが (図 5)、震度 7 のエリアが広範であるため、揺れに起因する発生量の割合が相対的に高くなっている。

第二に、総量に関して、高知市からの発生量が支配的であり、対象地域の総発生量に対する高知市からの発生量の割合は 58% と半数以上を占める。高知市に次ぐ規模の南国市からの発生量の割合は 10% 程度である。なお、廃棄物発生量の割合は、概ね人口割合と高い相関関係にある (図 12)。

第三に、市町村別のごみ種別の発生割合 (図 11 中の棒グラフ) に着目すると、いずれの都市も、発生量の多いごみ種別はコンがらである。しかし、そのコンがらの割合は、都市部である高知市の場合、62% と高く、それ以外の都市の場合、40~50% 程度に留まる。一方、木くずの割合は、高知市が 18% であるのに対し、他の

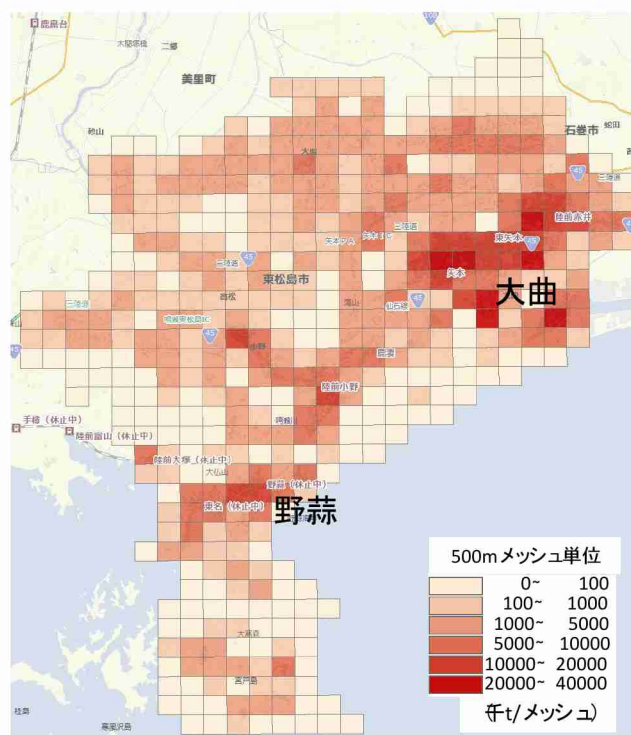


図 9 東松島市を対象とした推定結果

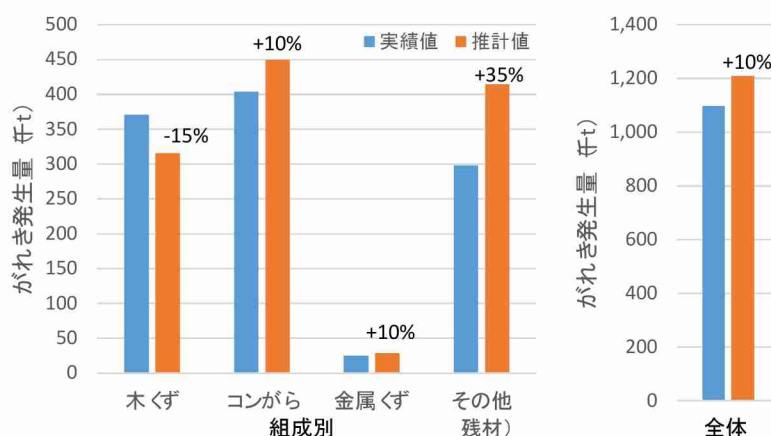


図 10 東松島市を対象とした実測値と推定値との比較

市町村が 23~ 25%程度である。非木造の高層建築物が多い都市部と、木造を中心とした低層建物の多い地方部において、発生するごみ種別の割合が異なることがわかる。

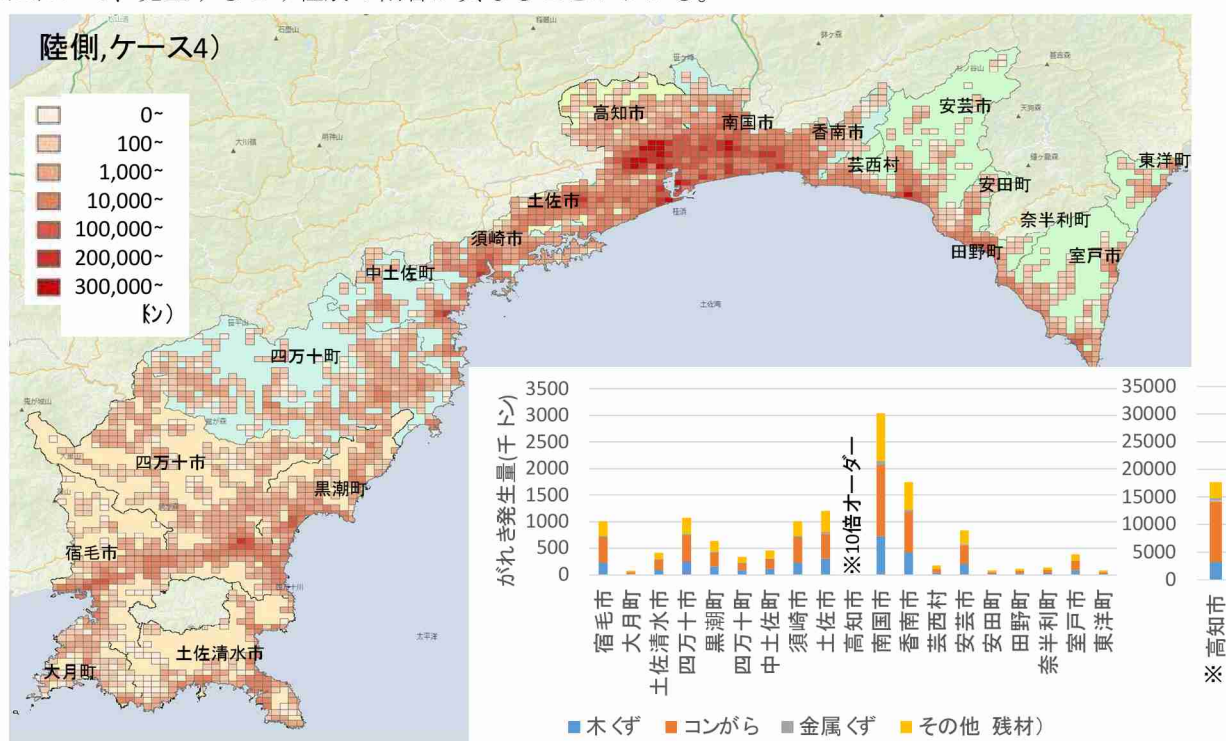


図 11 市町村別の災害廃棄物の発生量の空間分布と総量

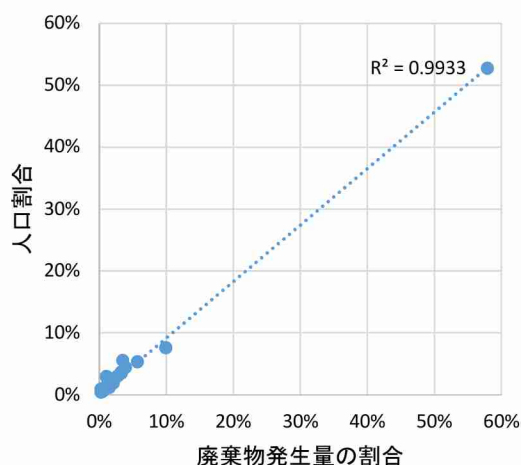


図 12 廃棄物発生量の割合と人口割合の関係

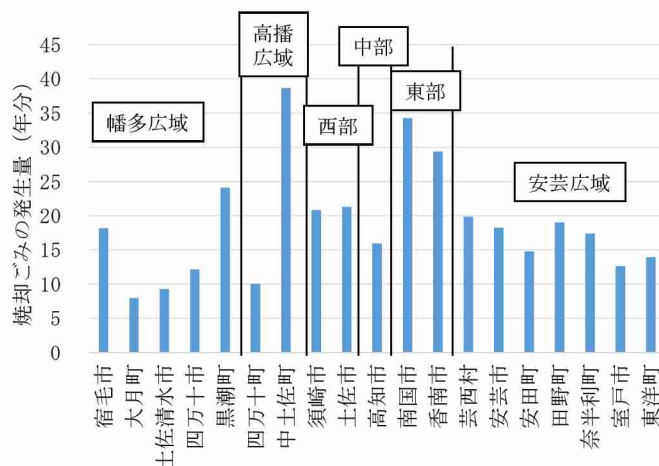


図 13 平時に対する災害時に発生する焼却ごみ量の比

2) 脆弱性評価

はじめに、平時の年間焼却量に対する災害時の発生するごみ焼却量の比をとり、平時の何年分に相当するごみ焼却量が発生するのかを求め、発生量に対する脆弱性を評価する (図 13)。

19 自治体の平均値、中央値はそれぞれ 18.8、18.2 年である。標準偏差は 8.2 年である。最小でも大月町の 8 年分、最大では、中土佐町の 39 年分となり、平時の年間焼却量に比べて、多量の焼却ごみが発生する。特に平均値を上回る焼却ごみが発生する自治体は、黒潮町、中土佐町、須崎市、土佐市、南国市、香南市、芸西村、田野町の 4 市 3 町 1 村である。

立地的には、中土佐町から芸西村までの高知県中央部に位置するエリアの脆弱性が高く、特に中土佐町、南国市、香南市は、平均+1 σ (標準偏差) よりも大きいことが明らかとなった。

また、廃棄物処理ブロック単位でみると、幡多：14.4年、高幡：17.2年、西部：21.1年、中部：15.9年、東部：32.3年、安芸：16.4年であり、いずれのブロックにおいても仮設焼却炉が必要になることが想定される。特に、中央東部、中央西部は、発生量に対する脆弱性が高いブロックのため、平時より災害時を想定した廃棄物の収集・運搬に関するマネジメントの事前準備が特に必要である。

次に、現有の焼却施設の処理能力に対して、3年で処理することを前提とした場合に必要とされる処理能力との関係より、現有の焼却施設の処理能力の脆弱性を評価する（図14）。先に示した発生量から分かるとおり、いずれのブロックにおいても現有施設の余力での焼却処理を行うことは困難であり、仮設焼却炉が必要である。仮設焼却炉の計画、建設、運営を検討する場合、現有施設規模と同程度であれば、比較的スムーズに実施できると思われるが、現有施設規模を大きく上回る施設規模が必要な場合にはその運営実施が困難となることが想定されうる。

現有施設の処理能力について、高幡広域、安芸広域ブロックの現有の焼却処理能力は、それぞれ25t/日、80t/日と小さく、他のブロックは100t/日以上処理能力を有している。また、県内最大規模の処理能力を有する中央中部の処理能力は約600t/日である。一方、必要な焼却処理能力は、中央中部（高知市）が約2,000t/日と突出して高い処理能力を必要とするが、他のブロックは180～700t/日程度である。脆弱性評価として、現有施設能力と必要処理能力の比をとった場合、幡多：3.2倍、高幡：10.3倍、西部：

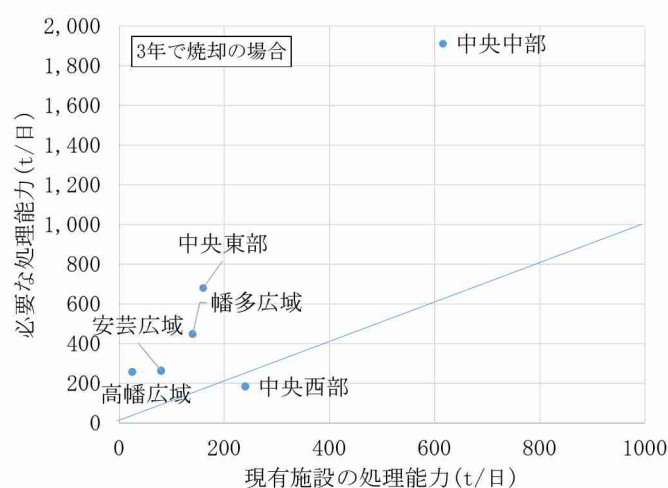


図14 現有焼却施設の処理能力と必要な処理能力の関係

0.8倍、中部：3.1倍、東部：4.2倍、安芸：3.3倍であることから、高幡広域ブロックの脆弱性

が高いことが分かる。焼却処理のマネジメントの観点からは、中央中部（高知市）以外のブロックに必要な仮設焼却施設の規模は、県内最大規模の処理能力600t/日と同程度か、それ以下であるため、県と広域ブロックが連携することにより対応可能と考えられる。一方、中央中部（高知市）は、現有の最大施設規模の3倍程度の処理能力を有する規模の施設運営が必要であることから、事前のマネジメントに関する準備が特に必要である。

（3）複数の市町を対象とした廃棄物発生量の推定に基づく地域特性の比較・考察

高知県沿岸部19自治体ならびに、静岡県西部3自治体を対象に廃棄物発生量を算定し、木造1棟の全壊により発生する廃棄物発生量と人口との関係を図15に示す。人口以外に市域面積、可住地面積、住宅地平均地価など、都市規模を表すそれらの指標と廃棄物発生量の関係をプロットしてみたが、図15に示すように、都市規模の指標として人口を用いた場合が最も適合度が高かった。

本結果より、静岡県西部の浜松市の各区、磐田市、湖西市ならびに、高知市における1棟当たりの廃棄物発生量の平均値は132t/棟（範囲：111～146t/棟）に対し、高知県の高知市以外の市町村における1棟当たりの廃棄物発生量の平均値は230t/棟（範囲：187～276）である。このように都市部と農山村部では、1棟当たりの廃棄物発生量が異なる。このことから、棟当たりの原単位に基づく推計は、地域特性を反映しづらいと判断できる。

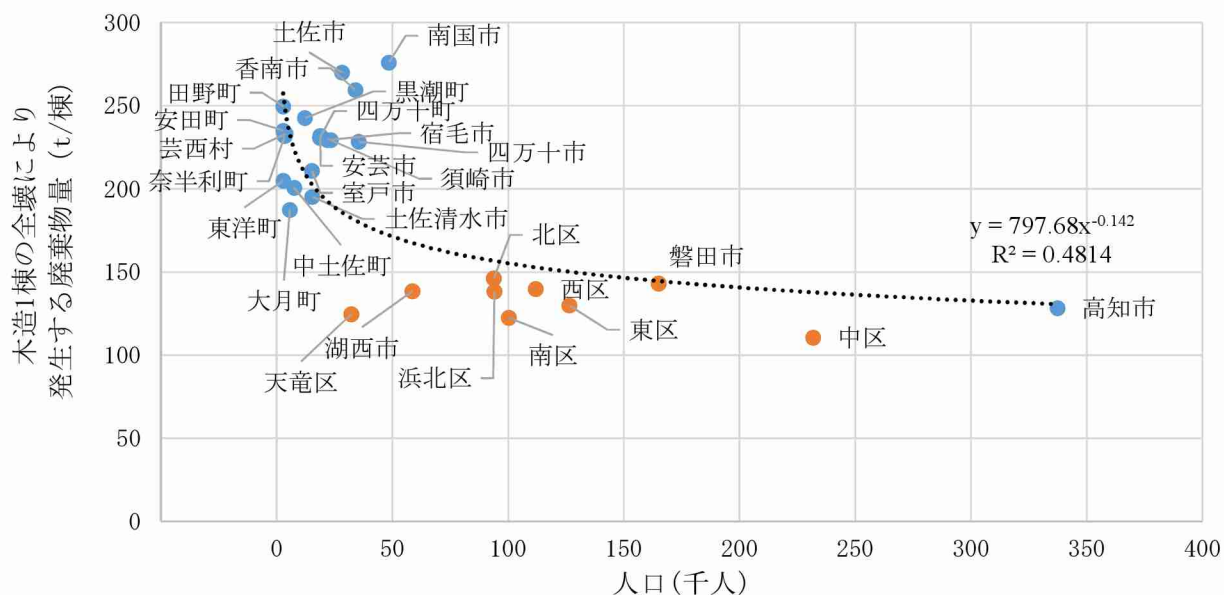


図 15 木造 1 棟の全壊により発生する廃棄物発生量と人口規模との関係

(4) コンティンジェントな災害廃棄物発生量の推定とマネジメントに与える影響

1) 原単位の振れ幅（上振れ、下振れ）、震度の違いによる推定結果の比較

構築したモデルによる災害廃棄物のごみ種別発生量の算定結果の一例として、基準ケース（ケース 0）の結果を図 16 に示す。本モデルは図に示すように被災場所の木くず、コンがら、金属くず、その他、津波堆積物の各種別の量を算定し、表 4 に示した構成割合を用いて、最終的に、「木くず」「再生資材（コンがら系）」「再生資材（土材系）」「焼却ごみ」「埋立処分」の種別毎に算定が可能である。

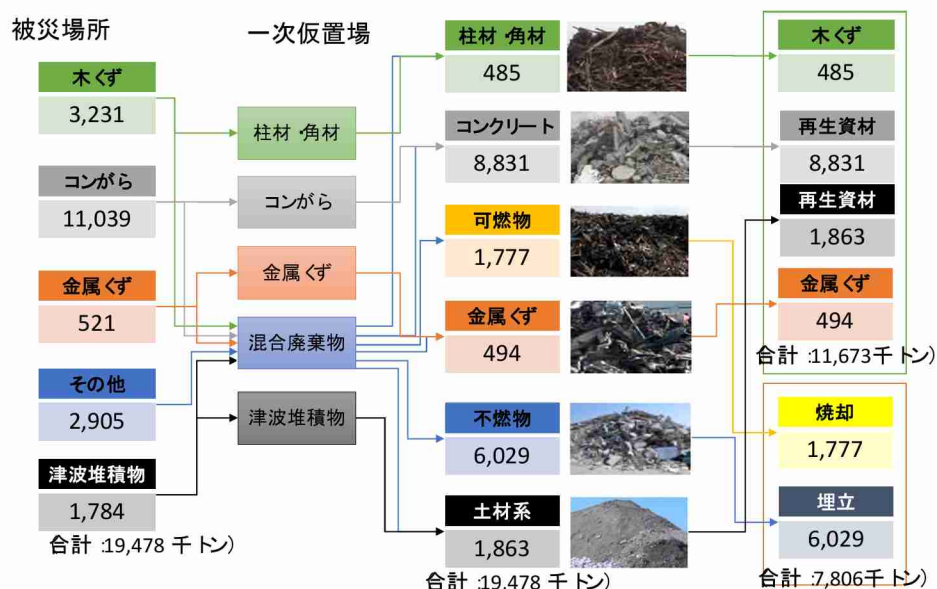


図 16 基準ケース（ケース 0）における災害廃棄物のごみ種別発生量

図 17 に原単位の振れ幅を考慮した場合（ケース 1、2）ならびに震度が異なる場合（ケース 3）のごみ種別発生量の算定結果を示す。原単位を 1σ 上振れ、下振れとした場合の総発生量は、基準ケースに対して、それぞれ 139%、92%となった。発生量の幅では、上振れ側の影響の方が大きい。ごみ種別では、基準ケースに対し、下振れおよび上振れケースの発生量の比率は木くず、焼却ごみが 0.81 と 1.27、埋立ごみが 0.85 と 1.25、金属くず、再生資材（土材系）が 0.94 と 1.00、再生資材（コンがら）が 0.98 と 1.57 である。このように

ごみ種別により、その推定幅が異なる。今回の結果では、再生資材（コンガラ系）の振れ幅が大きくなる。

次に、震度の違いについて、基準ケースとした陸側ケースに対して基本ケースの震度を用いた場合（ケース3）、総量は約79%となった。高知市の場合、陸側ケースでは広範に震度7のエリアが広がっていることから、このような差につながった。このため、震度の条件次第で、廃棄物発生量は大きく異なる。震度7と震度6強の違いであっても全壊・半壊の建物棟数は大きく異なり、震度7のエリアが広い程、廃棄物発生量は多くなり、非常に大きな影響を与える。

図18に原単位の振れ幅、震度の違いによる災害廃棄物発生量の空間分布ならびにメッシュ毎の延床面積と発生量の関係を示す。

基準ケースと上振れケースでは、メッシュ毎の発生量は、平均で1.4倍程度大きくなり、図中のヒートマップも発生量の多い濃い色を示す割合が増加している。また、下振れの場合、基準ケースに比べ、約0.9倍程度であるため、図中のヒートマップに大きな違いは見られない。このことから上振れの方が空間的にも広範に影響を与える。

次に、震度の違いについて、陸側ケース（ケース0）と基本ケース（ケース3）では、ヒートマップの状況が大きく異なる。特に中央より北側（上側）のエリアにおいては、発生量が少なくなっている。これは震度の分布が、南側は両ケースとも震度7のエリアであるが、陸側ケースの場合、中央より北側も震度7の範囲が広がっているのに対し、基本ケースでは、震度6強、6弱のエリアが広がっているためである。また、ケース3の散布図から決定係数がやや低くなっているのは、この震度分布が異なることにより、床面積が同じであっても、震度が異なると、発生量に違いが生じる。それは、ケース0とケース3のヒートマップの比較から、見ても読み取ることができる。また、基準ケースにおいて、同程度の延床面積であっても廃棄物発生量が異なることが分かる。これは同じ延床面積であっても、メッシュ内に存在する建物属性（木造・非木造、新耐震・旧耐震）の分布が異なるためである。

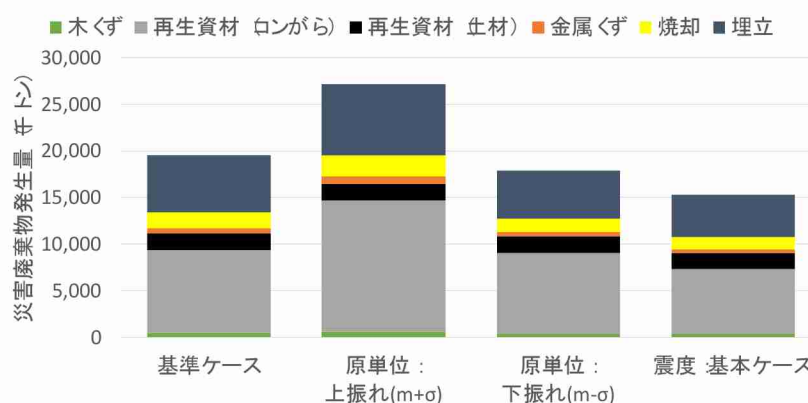


図17 原単位の振れ幅、震度の違いによる算定結果の比較（ごみ種別）

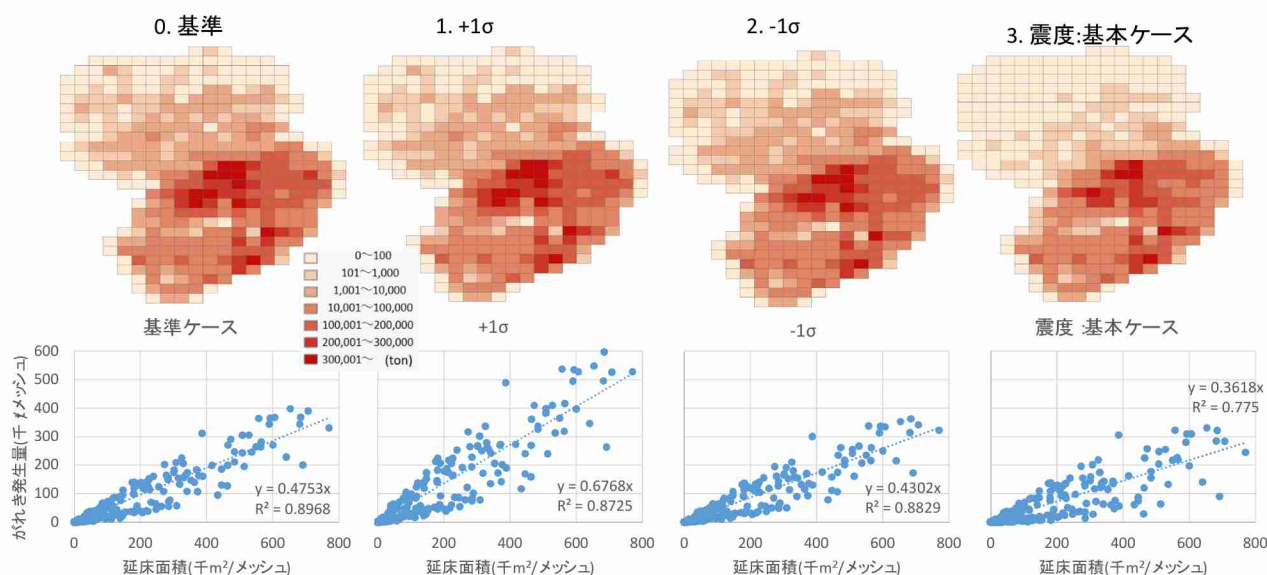


図 18 原単位の振幅、震度の違いによる算定結果の比較（空間分布・メッシュ別発生量）

2) 対策による災害廃棄物量の軽減効果

図 19 に各対策を実施した場合のごみ種別発生量の算定結果を示す。また、図 20 に発生量の空間分布とメッシュ毎の延床面積と発生量の関係を示す。

耐震化による削減効果は、目標値である耐震化率 90%を達成したとしても、4%程度である。この要因は、基準ケースの設定震度を、震度 7 が広範に分布する陸側ケースとしているため、耐震化を行ったとしても倒壊する確率が高いためである。そのため、追加的に、震度を基本ケースとした場合の耐震化効果を算定した結果、2 割程度の削減効果が得られた。そのため、阪神淡路大震災、熊本地震で発生した震度 7 のエリアが広範囲にわたる場合には耐震化による削減効果は限定的であるが、震度 6 強、6 弱の地震の場合には、効果的と判断できる。

堤防強化による削減効果は 5%程度である。今回の堤防強化策は、堤防高の嵩上げではなく、揺れによる破堤対策を行った場合を想定している。空間分布をみると高知市中心部（図中の中央部）の廃棄物発生量が軽減されており、局部的には効果は見られるが、揺れによる建物倒壊の影響も大きいいため、全体としての削減効果は限定的である。

また、嵩上げによる削減効果は+50cm で 5%、+100cm で 9%程度である。津波浸水域に関しては、嵩上げをすることにより倒壊被害の軽減が期待できる。また、空間分布から高知市中心部（図中の中央部）の発生量が軽減されていることがわかる。ただし、本施策は、事業者、市民の理解も必要とし、かつ費用面の負担も大きい。また、対策の推進にも長期間を要するため、容易ではない。

各種の対策を組み合わせた複合化対策を実施した場合、非常に厳しい外力条件であっても 2 割程度の削減効果が見込まれる。

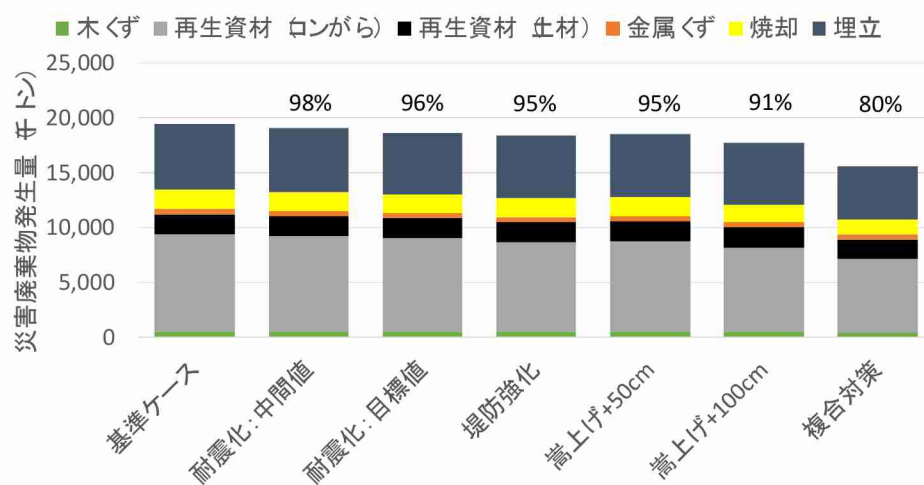


図 19 各種対策による災害廃棄物発生量の軽減効果 (ごみ種別)

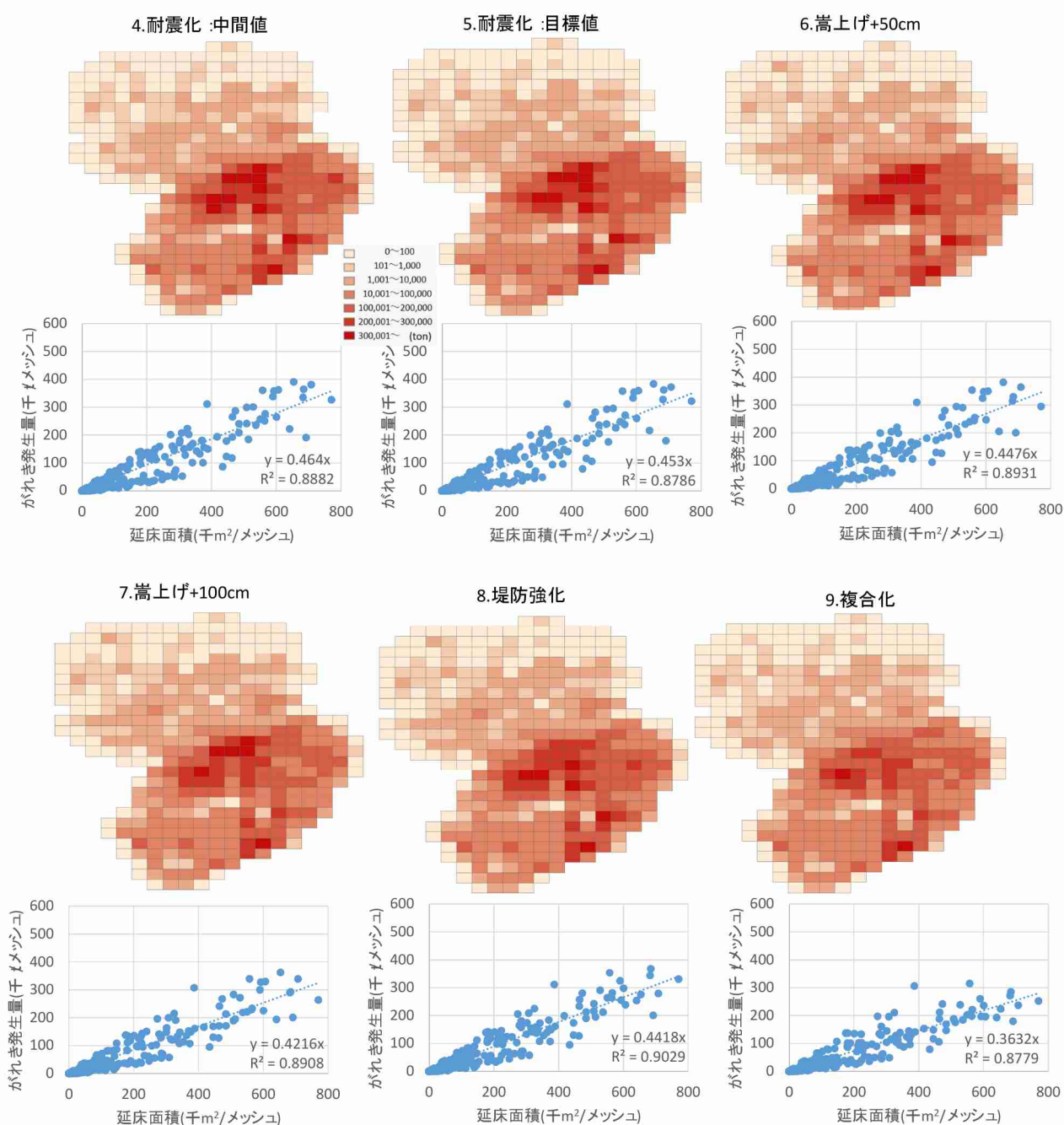


図 20 各種対策による災害廃棄物発生量の算定結果の比較 (空間分布・メッシュ別発生量)

3) 災害廃棄物発生量の算定結果が仮置場・仮設焼却炉の必要規模に与える影響

評価ケース毎の廃棄物発生量に応じた仮置場面積ならびに仮設焼却炉の必要基数を図 21 に示す。

a) 仮置場の必要規模に与える影響

事前準備により、処理期間を長く確保できる場合、仮置場の必要面積は少なくて済む。処理期間の時間関数で表現されるため、処理期間が 2 年に対して 3 年、2.5 年と長く確保できた場合、それぞれ必要な面積は 67%, 80% 程度となる。そのため、早期に処理を開始する有用性が認められる。次に、原単位の上振れ、下振れの影響は、下振れの場合、必要な面積は 0.9 倍程度となり、上振れの場合、1.4 倍程度必要な面積が増加する、各種対策による影響も仮置場の必要面積は、発生量に依存するため、廃棄物発生量の削減効果に応じた必要面積の軽減効果が得られる。

仮置場については、多くの自治体、特に人口規模が大きい都市ほど、仮置場の選定において苦慮している。仮置場の問題に関しては、より動的なモデルによる推定が必要であるという課題を含むが、上振れした場合、仮置場の必要箇所、面積の不足問題に対して、さらに厳しい結果を与えることになる。

b) 仮設焼却炉の必要規模に与える影響

ケース間の比較を処理期間 2.5 年の結果を基に述べる。基準ケースの場合、必要施設数は 8 基である。原単位の上振れ、下振れの影響としては、上振れの場合、+2 基、下振れの場合、-2 基となる。このため、原単位の与える影響は大きいことが分かる。また、各種対策を実施した場合の効果としては、単独による対策の場合（ケース 4~ 8）、いずれも-1 基、複合対策の場合（ケース 9）-2 基であり、対策を行うことにより、後段プロセスの仮設焼却炉の規模も軽減できる。

次に、処理期間が異なることによる影響について、早期に処理を開始することにより必要基数は少なくて済む。基準ケースの場合、処理期間が 3 年の場合、処理期間 2 年と比べて必要基数は 4 基も少なくて処理することが可能である。早期に処理を開始する有用性は高い。対策がなされ、廃棄物発生量が低減された場合においても、処理期間が 3 年と 2 年では、必要基数は 3 基程度少なくて済み、早期開始の有用性は得られる。

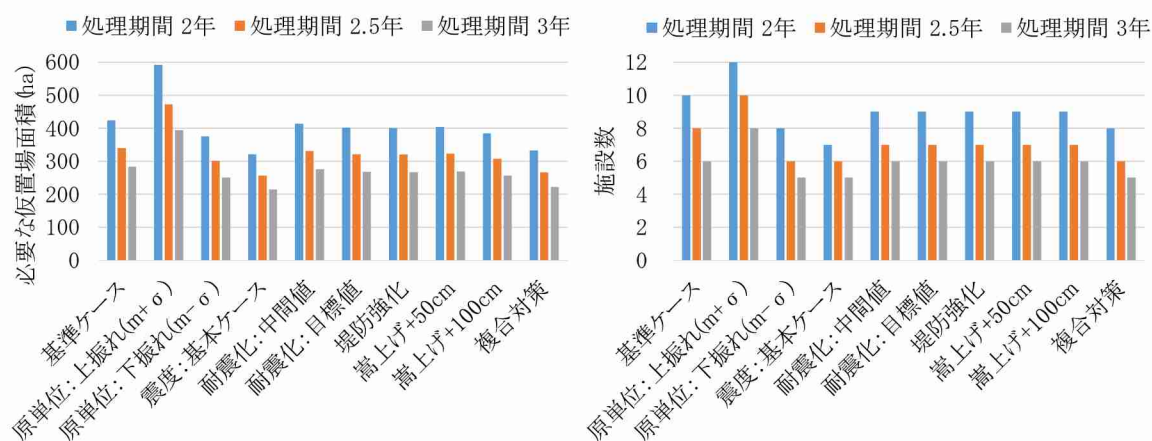


図 21 災害廃棄物発生量の算定結果が仮置場（左）、仮設焼却炉（右）の必要規模に与える影響

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

第一に、災害廃棄物発生量の推定について、これまでの地域特性の配慮がなされていなかった課題に対して、汎用性のある住宅・土地統計調査データと住宅地図を用いて、建物一棟単位での属性を付与する機能を追加し、外力条件として、事前計画には内閣府等のデータを、事後は産総研の QuakeMap のデータを用いることで、地域特性を考慮した災害廃棄物発生量の算定が可能なモデルを構築した。また、東日本大震

災で被災した東松島市をモデル都市として、モデルの妥当性を検証した結果、総量として 1 割程度過大の結果となったが、概ね良好な精度で総量の推定ができることを示した。一方、課題として、ごみ種別の算定については、地域ならびに時代に応じた分別率を設定する必要がある。

第二に、現在、災害廃棄物対策指針に示されている建物 1 棟当たりの発生量原単位について、同手法による算定では、地域特性を考慮できず、高知県沿岸域ならびに静岡県西部の自治体を対象とした検討の結果、特に、地方部においては、過小となる可能性があることを指摘した。本研究で構築したモデルは、この問題点も解決しうるものである。

第三に、コンティンジェントな廃棄物発生量が与える影響を検討した結果、原単位には振れ幅があることを理解した上で、事前準備、事後の対応を行うことが必要であることを示し、特に、上振れの場合には、後段プロセスの仮置場や仮設焼却炉などの規模にも大きな影響を与えることを示した。

最後に、これまで取り組まれている建物の耐震化施策や、これからの対策である嵩上げや危険地域からの移転などの施策は、廃棄物発生量の低減にも効果がみられ、それらを複合的に組み合わせて、災害に備えることがより効果的であることを示した。また、事前対応による早期の処理開始が自治体の抱える仮置場の確保の問題にも有効であることを定量的に示した。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

災害廃棄物処理に関する自治体との意見交換の会議において、本研究において算定した結果について知見を提供し、今後の災害廃棄物処理の検討の基礎資料として活用された（2017 年 2 月 27 日、高知市環境部環境政策課）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・構築した災害廃棄物発生量の推定モデルは、汎用性が高く、全国の市町村に適用することが可能であり、未だ廃棄物処理基本計画の策定に至っていない自治体ならびに、既に計画を策定しているが、地域特性を考慮できていない同計画の見直しの際に、活用されることが期待される。
- ・高知県沿岸域の 19 の市町村ならびに静岡県西部の 9 の市区を対象に災害廃棄物発生量の推定を行い、都市部と地方部においては、1 棟当たりからの発生源単位が異なることを示した。今後の災害廃棄物処理基本計画の策定、見直しにおいて、発生量の算定においては、棟当たりの発生量ではなく、延床面積当たりでの算定方法が活用され、地域に応じた発生量の推定がなされることが期待される。
- ・原単位の振れ幅を考慮した算定の結果、上振れの場合には 1.4 倍程度、下振れの場合には 0.9 倍程度の結果になることを示した。今後の災害廃棄物処理基本計画の策定・見直し、ならび事後の行動計画の策定の際には、原単位にも振れ幅が含まれていることを理解した上で、その影響の大小と対応についても想定しておくことが重要であることを政策提言した。
- ・耐震化対策、堤防強化、土地の嵩上げは、人命保護だけではなく、災害廃棄物発生量の軽減にも効果的であり、また、事前準備による早期の処理実施は、後段プロセスである仮置場や仮設焼却炉の規模の縮小にも寄与することを示し、事前対応の重要性と効果が期待できることを政策提言した。

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

<論文（査読あり）>

- 1) 尾崎平、稲森優吾、盛岡通：環境共生、Vol. 30、32-42(2017)
「巨大地震に対する地域のレジリエンス評価指標の提案－四国南岸三市町を対象に－」

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 盛岡通：環境情報科学、Vol. 46、No. 1、58-65（2017）
「震災レジリエンスと環境共生－人口減少社会における復興とは【展望－1】災害対策と気候変動適応の道としてのレジリエンス」
- 2) 盛岡通：環境情報科学、Vol. 46、No. 1、66-78（2017）
「震災レジリエンスと環境共生－人口減少社会における復興とは【展望－2】強靱化を超える IRGC のリスクガバナンスの視座に学ぶ」

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 尾崎平、盛岡通、稲森優吾：第 53 回土木計画学研究発表会（2016）
「南海トラフ地震に対する地域のレジリエンス指標の検討」
- 2) 尾崎平、稲森優吾、盛岡通：第 19 回日本環境共生学会学術大会（2016）
「巨大地震に対する地域のレジリエンス性評価指標の提案－四国南岸三市町を対象に－」
- 3) 尾崎平、盛岡通：第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2016）
「建物属性の推計に基づく地震・津波災害による廃棄物発生量の推計」
- 4) 尾崎平、盛岡通：第 20 回日本環境共生学会学術大会（2017）
「災害廃棄物の推定結果が中間処理施設規模に与える影響」
- 5) 尾崎平、盛岡通：第 28 回廃棄物資源循環学会研究発表会（2017）
「災害廃棄物発生量の推計に関する原単位の影響」
- 6) 尾崎平、盛岡通：環境科学会 2017 年会（2017）
「マイクロ建物推定による災害廃棄物発生量予測と仮置場の選定に関する一考察」

(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) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか。」（主催：関西大学、共催：徳島大学、2017 年 2 月 24 日、グランフロント大阪北館タワーB10 階、ナレッジキャピタルカンファレンスルームタワーB、Room B 05+06、参加者 95 名）にて「南海トラフ地震に向けた地域の取り組み」をテーマにパネルディスカッションモデレート

- 2) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか」(主催：関西大学、2018年1月26日、関西大学梅田キャンパス8階、KANDA I Me R I S Eホール06、参加者70名)にて「震災被害想定に応じた震災廃棄物量のコンティンジェント推定の評価」と題して講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊建産速報(平成29年2月28日、WEB、「関西大学が公開シンポジウム 巨大地震の適応策等議論」)
- 2) 鋼構造ジャーナル(平成29年3月6日、鋼構造出版、12頁、「巨大地震にどう備えるか」防災関係者100名が参加 関大と徳島大の公開シンポジウム)

(6) その他

- 1) 第19回日本環境共生学会学術大会「優秀発表賞」尾崎平(巨大地震に対する地域のレジリエンス性評価指標の提案 - 四国南岸三市町を対象に-)、2016年9月17、18日、立正大学(東京都)

8. 引用文献

- 1) 環境省(2014)
「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて」
- 2) 環境省：<http://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/earthquake/committee/arikata.pdf> (2016)
「大規模災害発生時を見据えた災害廃棄物対策の今後のあり方について」
- 3) 浅利美鈴：第28回廃棄物資源循環研究発表会(2017)
「災害廃棄物処理に対する自治体の取り組みや意識に関する調査」
- 4) 国立環境研究所：<http://dwasteinfo.nies.go.jp/>
「災害廃棄物情報プラットフォーム」
- 5) 厚生省(1998)
「震災廃棄物対策指針」
- 6) 環境省(2014)
「災害廃棄物対策指針」
- 7) 環境省：<http://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/guideline/pdf/parts/gil1-14-4.pdf> (2014)
「災害廃棄物対策指針 情報ウェブサイト、技術資料1-14-4」
- 8) 平山修久、河田恵昭、奥村与志弘：廃棄物資源循環学会誌、Vol.23、No.1、3-9(2012)
「東日本大震災における災害廃棄物量の推定と災害対応」
- 9) 平山修久、大迫政浩、林春男：地域安全学会論文集、No.30、1-7(2017)
「災害初動期における災害廃棄物量の把握システムの構築-2016年熊本地震でのケーススタディによる-」
- 10) 平川隆之、黒岩史、鬼頭祐介、田中健介、谷川寛樹：日本LCA学会誌、Vol.7、No.4、374-378(2011)
「東日本大震災により失った建設ストックの推計」
- 11) 長谷川浩一、翠川三郎：日本建築学会構造系論文集、第497号、75-80(1997)
「地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測-その1 築年代別の木造建築物棟数の推定-」
- 12) 長谷川浩一、翠川三郎：日本建築学会構造系論文集、第521号、41-47(1997)
「地域メッシュ統計を利用した広域での非木造建築物群の震害予測-」

- 13) 宮城県環境生活部震災廃棄物対策課(2014)
「災害廃棄物処理業務の記録」
- 14) 総務省統計局(2014)
「平成 25 年住宅・土地統計調査」
- 15) ゼンリン(2016)
「建物ポイントデータ」
- 16) 内閣府(2012)
「南海トラフ巨大地震モデル検討会、地震動について (CD-ROM)」
- 17) 産総研: <https://gbank.gsj.jp/Quake/> (2013)
「地震動マップ即時推定システム」
- 18) 東京都防災ホームページ: http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/000/402/part3-4-2.pdf
「各被害の想定手法」
- 19) 国交省都市局(2012)
「津波被災市街地復興手法検討調査 (とりまとめ)」
- 20) 東松島市: <http://www.city.higashimatsushima.miyagi.jp/kurashi/H26%E2%91%A41.pdf> (2014)
「災害廃棄物」
- 21) 兵庫県生活文化部環境局環境整備課 (1997)
「阪神・淡路大震災における災害廃棄物処理について」

Ⅱ- 3 震災廃棄物と再資源化物の輸送にかかる脆弱性と輸送効果の評価

[要旨]

震災廃棄物輸送にかかる脆弱性（レジリエンス）に対応した廃棄物輸送計画システムを構築した。これは、(1)1 カ月程度を想定した長期の輸送計画、(2)1 日単位の運行計画、(3)リアルタイムの運行管理を行うものである。ここで、(1)長期の輸送計画では、交通量配分モデルを用いて道路混雑状況を推計し、それに基づいて輸送量を算定するものである。このとき、居住地の変化、復興作業のための車両などで OD 交通量パターンは平常時と大きく相違することが考えられるため、OD 交通量の推計プロセスを含む。さらに、現在までの輸送結果に対して、あいまい量を考慮した評価を行い、輸送計画に反映させる。また、(2)1 日単位の運行計画では、当日の運行計画を提示するものである。前日などに予定した輸送が行えなかった場合は、見直しのプロセスを含む。さらに、(3)リアルタイムの運行管理では、GPS・タブレット端末からの情報、VICS 情報などを用いて、交通事故や突発的な交通混雑に対応し、ドライバーに情報を提供する。

本システムにより、①廃棄物量推計値の変化、道路交通条件の変化に即時的に対応する輸送計画見直し案の提示が可能となった。② 廃棄物輸送の運行時におけるオンライン情報（GPS・VICS）を活用したクラウド型運行管理方法を提案した。③廃棄物運搬記録・輸送計画提案に対して GIS の空間表現を用いて、動的变化の明示的表現が可能となった。

1. はじめに

わが国の大規模災害として、これまで阪神淡路大震災（1995 年）・東日本大震災（2011 年）が発生しており、関連地域における災害復興が現在も進展している。一方で、熊本地震（2016 年）では、これらの災害経験を踏まえた各方面からの対応が推進されている。これらの対応のなかでも、災害廃棄物の処理は関連地域の災害復興に係る重要な課題であるといえる。さらに、将来的な発生が推測される南海トラフ地震においては、広範囲で膨大な廃棄物処理計画策定の必要性が指摘されている。

震災廃棄物の処理は、市町村および都道府県が業者に委託し、業者が処理場の整備・被災家屋の解体・輸送を含めた処理手順を検討していることが多い。今後発生が予想されている南海トラフ地震・首都直下地震をはじめとする巨大災害に対応するため、事前に災害廃棄物の処理手順を構築することが必要である。

2. 研究開発目的

本研究では、災害廃棄物を効率的に輸送する計画立案システムを構築することを目的とする。具体的には、①阪神淡路大震災および東日本大震災における廃棄物処理に関する現実的事例を基に、大規模災害廃棄物輸送に関する現実的な処理手順を体系化する。②道路の通行止め・人々の生活パターンの変化などにより、震災発生からの時間経過に応じて変化する交通状況を組み込んだ廃棄物輸送問題を定式化し、その解法を提案する。③廃棄物処理過程を評価し、見直すことで効率的な輸送計画を立案することが可能となることから、災害廃棄物輸送に関する評価方法の構築を行う。④交通状態の大幅な変化に対応する OD 交通量の推計を行う。⑤廃棄物の輸送計画を立案する計画情報システムを構築する。

3. 研究開発方法

3.1 災害廃棄物処理計画の立案手順の整理

これまでの現実事例に基づく検討結果を踏まえて、災害廃棄物処理に関する基本の手順を整理する^{1)~6)}。すなわち災害廃棄物処理においては、廃棄物処理計画の立案と実施に関して、基本プロセスを検討する必要があることがわかった。これらの災害廃棄物処理の基本的フローを図1に記載している。

本図の基本フローに関して重要な点を挙げる。①災害廃棄物の円滑な輸送のためには、事前の現状道路網の状況を把握しておく必要がある。②災害時には、道路網の損傷など道路ネットワークの健全性をモニタリングにより検討する。③一方で、災害発生時には的確な廃棄物処理量の推計が必要である。④災害廃棄物の空間的な推計結果にもとづき一次処理場・二次処理場の空間的配置および必要処理規模が設定できる。⑤一次処理場・二次処理場の設定後は、短期的な廃棄物輸送問題の解決にあたる。⑥輸送問題の解の提示に基づく実際の運行に関しては、現実的運行管理技術を導入する必要がある。⑦最終的に廃棄物輸送に関して、定期的な観測・評価を実行することで、時間経過に伴う廃棄物輸送計画の変更を検討する。これらの手順の実行にあたっては、各地域特性に対応した現実的修正が必要不可欠である。

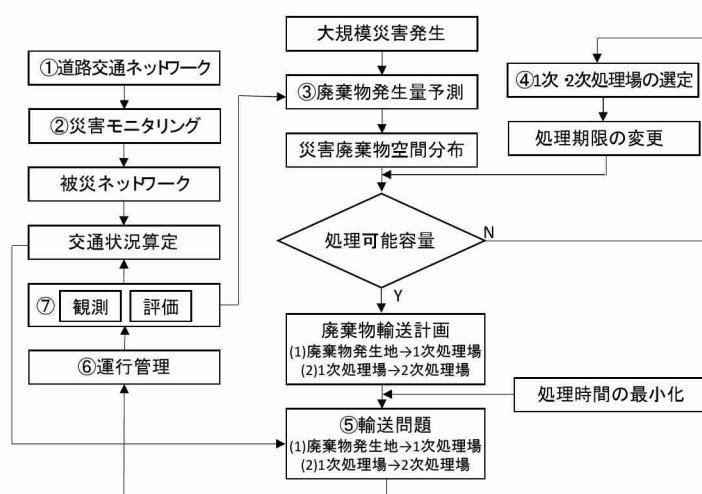


図1 災害廃棄物処理の基本的フローの整理

3.2 廃棄物輸送計画システムの構成

ここでは、震災廃棄物の輸送計画情報システムの構成を検討する。本研究では、図2に示すように、廃棄物の発生地から1次仮置場、2次処理場までの輸送を対象とする。これらの輸送に関して、情報の収集、輸送計画の立案、情報提供、輸送管理を行う。

つぎに、廃棄物輸送計画システムの構成を検討する。図3に本研究で構築するシステム構成を示す。輸送実績を記録し、

閲覧することは、輸送計画を立案する際に必要となる。また、輸送実績の把握は、業者への輸送費用の支払いのためにも必要である。このため、輸送実績の表示を行う機能を設ける。具体的には、震災廃棄物の未処理量の分布（ゾーン単位）、1次仮置場・2次処理場の仮置き量を1日単位で動画表示を行う。

輸送計画の立案のサブメニューでは、輸送結果の見直しおよび長期の輸送計画を立案する。輸送結果の見直しプロセスは、輸送量が計画量よりも少ない場合に、その原因および対策を検討するためのものである。また、長期の輸送計画は、被災道路の復旧、仮置場の新設・廃止など、輸送に影響を与える環境変化が発生した場合に、輸送計画を見直すものである。

さらに、運行管理サブメニューでは、タブレット端末および車両に搭載したGPSデータを受信し、表示することで運行状況をリアルタイムで把握するものである。道路の通行止め、交通事故などの発生時は、必要

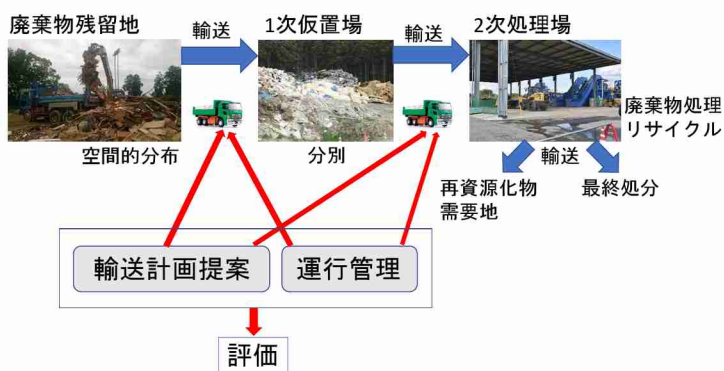


図2 災害廃棄物輸送計画の範囲

に応じてドライバーのタブレット端末に情報を送信する。

また、輸送計画を立案する際の参考情報として、ハザードマップや震災前および現状の人口分布・世帯分布などのデータを必要に応じて視覚的に表示する。

データの蓄積のイメージを図4に整理する。各車両には、GPSおよびタブレット端末を搭載し、操作時あるいは一定時間間隔でサーバーへデータを送信する。また、VICS（道路交通情報通信システム）が利用可能な場合は、各道路の交通情報も収集する。災害廃棄物輸送計画システムでは、これらの蓄積データにアクセスし、処理を行う。

これらの運行記録データの例を図5に示す。GPSデータは、1秒単位で緯度・経度・速度データを記録している。このデータをサーバーで加工し、マップマッチングにより、リンク単位の所要時間データを作成する。また、タブレット端末からのデータは、各作業の情報が時刻や運転者 No. などとともに保存される。これらの運行記録データを集計し、廃棄物輸送の実績データを作成する。

以下では、システム内の各モデルに関して具体的に検討する。

3.3 災害廃棄物輸送モデルの構築

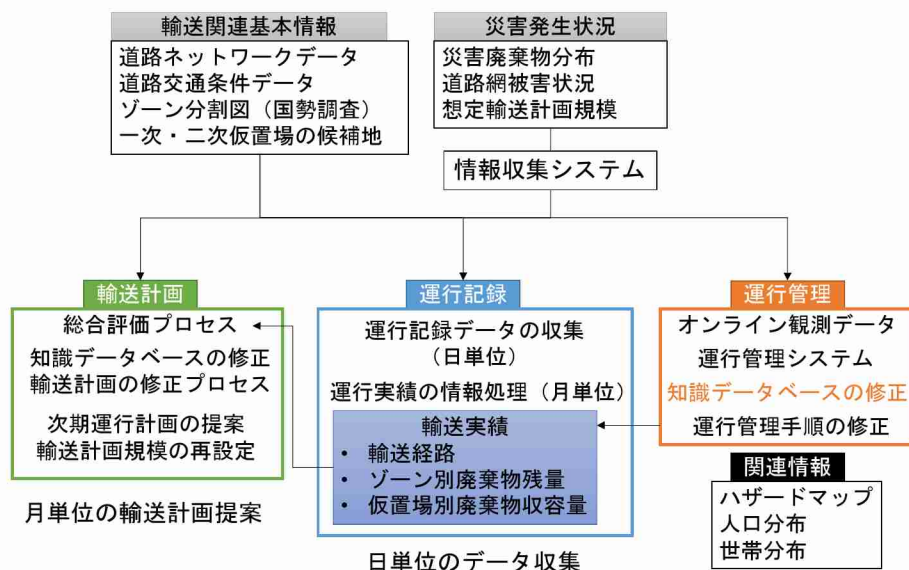


図3 災害廃棄物輸送計画システムの構成

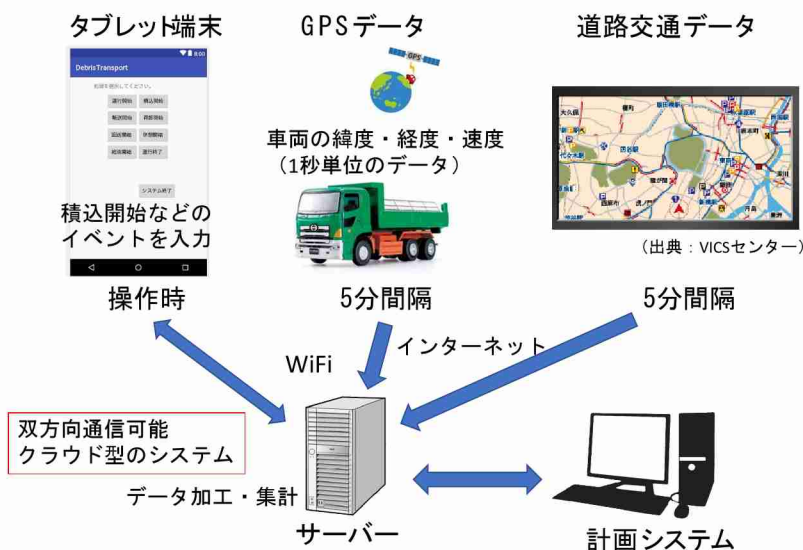


図4 災害廃棄物輸送計画システムのデータ蓄積のイメージ



図5 災害廃棄物輸送計画システムの運行記録データ例

ここでは、現実の事例を踏まえて、災害廃棄物の輸送に関するモデルを構築する^{7),8)}。現実には、道路の損傷により通行が出来なかった道路が、復旧により通行可能になる箇所が存在する。また、時間の経過とともに、救援物資の輸送、仮設住宅の資材の輸送などの状況が変化する。これらの影響を考慮したモデルとして図6に示すフローを設定する。

本フローは、交通量配分および輸送問題のサブモデルで構成される。交通量配分のサブモデルでは、廃棄物輸送にかかる所要時間を算定する。このとき、一般交通のODパターン、道路ネットワークを考慮して、交通量配分モデルを用いて1日単位の平均的な道路交通状態を推計する。この結果を用いて、廃棄物輸送の各OD間の所要時間を算定する。

つぎに、輸送問題のサブモデルでは、廃棄物の最適輸送パターンを算定する。このとき、交通量配分のサブモデルで算定されたOD間所要時間を用いて、総走行時間が最小となる輸送パターンを決定する。

ここで、利用者均衡状態を基にする交通量配分モデルは式(1)で与えられる^{9), 19)}。

$$\min Z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega, \quad x_a = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} \quad \forall a \in A, \quad f_k^{rs} \geq 0, \quad x_a \geq 0$$

ここで、 Ω はODペア集合、 K_{rs} はODペア $r-s$ の経路集合、 A はリンク集合、 x_a はリンク a の交通量、 q_{rs} はODペア $r-s$ の交通量、 f_k^{rs} はODペア $r-s$ ・経路 k の経路交通量、 $\delta_{a,k}^{rs}$ は $\delta=1$ （リンク a にODペア $r-s$ の k 番目の経路が含まれる場合） $\delta=0$ （リンク a にODペア $r-s$ の k 番目の経路が含まれない場合）を示す。ここでは、一般交通のOD交通量を与えて、各リンクの交通量・所要時間を算定する。つぎに、各廃棄物発生地から各処理場への最短輸送経路を求め、所要時間を算定する。このとき、ダンプトラックは輸送終了後に、次の廃棄物の輸送のため、廃棄物発生地に戻ると想定される。このため、往復の所要時間で評価する。

つぎに、最適輸送パターンを求めるため、輸送問題を考える。一般的な輸送問題では、複数の供給地・需要地があり、それぞれの供給地・需要地において供給量・需要量が与えられ、またそれぞれの供給地・需要地間の輸送費用が与えられている。このときの輸送費用が最小となる輸送パターンを求める問題である。本研究においては、1日あたりの廃棄物の総輸送時間を最小化する輸送パターンを求める。このため、輸送問題を式(2)のように定式化する。

$$\min w = \sum_{rs} t_{rs} \cdot q_{rs} \quad (2)$$

s. t.

$$d_r = \sum_s q_{rs} \quad \forall r \in \Omega_1 \text{ (廃棄物供給量)}, \quad d_s = \sum_r q_{rs} \quad \forall s \in \Omega_2 \text{ (廃棄物需要量)}, \quad q_{rs} \geq 0$$

ここで、 t_{rs} は供給地 r から需要地 s への往復所要時間を示す。

図6に示すフローに基づき、各サブモデルを用いて、一般交通のODパターンの変化に応じた廃棄物の最適輸送パターンを算定する。

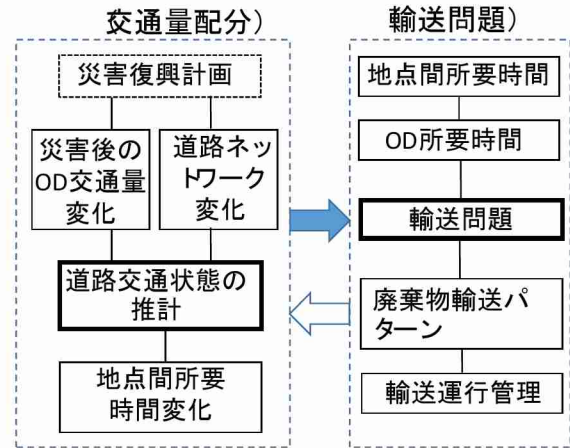


図6 災害廃棄物輸送モデルのフロー

3.4 OD交通量の推計方法

ここでは、将来の交通状態を推計するために必要な OD 交通量を予測する方法を検討する⁹⁾。通常の交通需要推計においては、過去の OD 表および将来の発生・集中交通量を基に推計が行われる。しかしながら、震災が発生した場合は、発生前の OD パターンと大きく相違すると予測される。したがって、ここでは観測交通量から OD 交通量を推計する方法を検討する。

OD 交通量は、以下の式に示す重力モデルで与えられるものとする。

$$Q_{rs} = \alpha \cdot A_r \cdot B_s \cdot C_{rs}^{\gamma} \quad (3)$$

ここで、 Q_{rs} : ゾーン rs 間のトリップ数、 A_r : ゾーン r の発生指数、 B_s : ゾーン s の集中指数、 C_{rs} : ゾーン rs 間の所要時間、 α, γ : 定数である。

リンク交通量の同時確率最大の考え方より、つぎの対数尤度関数を定義する。

$$\ln L = \sum_a \left\{ -\frac{1}{2} \ln 2\pi - \frac{\omega}{2} \ln \alpha X_a^{(n)} - \ln \sigma - \frac{1}{2} \frac{(x_a^* - x_a^{(n)})^2}{(\alpha X_a^{(n)})^{\omega} \sigma^2} \right\} \quad (4)$$

この対数尤度を最大化するパラメータ α, σ^2 を求める。

これらの結果、OD 交通量は以下のアルゴリズムを用いて計算できる。

Step 0 : パラメータ ω, γ を設定する。

Step 1 : リンク交通量がゼロの時の、各ゾーン間の最短所要時間 $C_{rs}^{(0)}$ を計算する。

Step 2 : リンク交通量の算定値からリンクパフォーマンス関数を用いてリンク所要時間を算定する。算定されたリンク所要時間を基に、各ゾーン間の最短所要時間 $C_{rs}^{(n)}$ を計算する。

Step 3 : 以下の式でリンク交通量 $X_a^{(n)}$ を計算する。

$$X_a = \sum_r \sum_s A_r B_s (C_{rs}^{(n)})^{\gamma} P_{a,rs}, \quad X_a^{(n)} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) X_a^{(n-1)} + \frac{1}{n} X_a$$

Step 4 : 観測交通量と推計交通量の差が最小となるように、最尤法を用いてパラメータ α を求める。

Step 5 : 次式を用いてリンク交通量を算定する。

$$x_a^{(n)} = \alpha \cdot X_a^{(n)}$$

Step 6 : パラメータ α が収束していないときは、Step.2 へ戻る。

Step 7 : 観測交通量 x_a^* と推計交通量 $x_a^{(n)}$ の誤差が最小であるか判定し、最小でない場合はパラメータ ω, γ を変更して Step.1 へ戻る。

3.5 災害廃棄物輸送に関する評価指標の設定

ここでは、東日本大震災の事例を参考として、災害廃棄物輸送に関する評価項目を検討する。廃棄物輸送に関する評価は、多様な側面から行う必要がある。このため、表 1 に示す 4 項目を設定する。

被災地では復興作業が進められるが、災害廃棄物が被災地域・廃棄物仮置場に残留されている場合、施設建設などの妨げとなる。したがって、復興が遅れるとともに、経済損失が発生する。このため、「①廃棄物残留による不便益」の評価指標を設定する。評価指標値は、(地代) × (廃棄物残留期間) で計算することが可能である。

つぎに、廃棄物輸送の費用を検討する。大規模震災の場合、廃棄物処理に関する費用は、最終的には国か

表 1 災害廃棄物輸送の評価項目

項目	内容
①廃棄物残留による不便益	被災地域・廃棄物仮置場に残留される廃棄物の早期の撤去により復興作業が進展する。
②輸送費用	廃棄物輸送に利用できるトラック台数、人員は限られており、効率的な輸送を行う。
③地域相互格差	公平性を確保した廃棄物処理を行う。地域ごとのアンバランスを解消する。
④安全運行	一般道路・高速道路を利用するトラックの交通事故発生を防止する。

らの補助金で賄われ、自治体の負担はほとんど発生しない。しかしながら、廃棄物輸送に利用可能なダンプトラックなどの機材、人員は限られているため、効率的な輸送が必要である。このため、「②輸送費用」を設定する。これは、（出発地・目的地別輸送単価）×（輸送量）で計算する。

つぎに、廃棄物処理の地域格差を考える。自治体が実施する事業は、公平性が求められる。このため、特定の地域を優先した廃棄物処理は、地域住民の不満につながる。このため、「③地域相互の格差」を設定する。この評価値は、地域 i の処理済み廃棄物量 $d_i(t)$ 、地域 i の廃棄物総量 q_i に対して、次式を用いて格差指標値 s を計算する。

$$r_i(t) = \frac{d_i(t)}{q_i}, \quad \bar{r}(t) = \frac{1}{n} \sum_i r_i(t), \quad s = \frac{1}{T} \sum_t \left\{ \frac{1}{n} \sum_i (r_i(t) - \bar{r}(t))^2 \right\} \quad (5)$$

これは、地域の廃棄物処理量の分散の時間平均を表す指標である。

つぎに、廃棄物輸送の安全性を考える。廃棄物輸送は、一般車両が通行する一般道路・高速道路等を用いて行われる。このため、廃棄物輸送ダンプトラックが関係する交通事故などの発生が懸念される。このため、「④安全運行」を設定する。これは、廃棄物輸送トラックの交通事故発生件数の時間平均を用いて算定する。

これらの4指標を用いて、廃棄物輸送に関する総合評価を行う。

3.6 ファジィ積分を用いた評価手法

ここでは、廃棄物輸送の評価方法を検討する。災害廃棄物の輸送に関して、あいまい量が多い。本研究では、「測度におけるファジィネス」を扱うファジィ測度を用いて構築する^{11)~13)}。これは、いくつかの属性をもつ評価対象をファジィ測度により総合的に評価するための方法である。

表1に示した4種類の評価値に対して、一対比較法を用いて各評価指標のウェイトを算定する。たとえば、一対比較行列がつぎのように与えられたとする。

$$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 4 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/4 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

この一対比較行列より、各評価項目の重要度を算定すると、以下のようになる。

$$w = \{0.343, 0.151, 0.093, 0.413\}$$

このとき、ファジィ測度はつぎのように算定される。

$$\begin{aligned} g_1 &= 0.106, g_2 = 0.035, g_3 = 0.020, g_4 = 0.143, g_{12} = 0.196, g_{13} = 0.157, \\ g_{14} &= 0.476, g_{23} = 0.064, g_{24} = 0.251, g_{34} = 0.205, g_{123} = 0.273, g_{124} = 0.757, \\ g_{134} &= 0.636, g_{234} = 0.345, g_{1234} = 1 \end{aligned}$$

菅野積分では、 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \Lambda \geq h(x_n)$ の関数に対して、次式のように計算される。

$$\int_X h(x_i) \circ g(\bullet) = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge g(X_i)] \quad (6)$$

この計算は、Min-Max 演算に相当する計算方法である。

4. 結果及び考察

4.1 災害廃棄物輸送モデルの適用

災害廃棄物輸送モデルを適用し、最適輸送パターンについて検討する。

(1) 災害廃棄物輸送モデルの設定

ここでは、モデルの設定条件を整理する。既存事例では、廃棄物処理は、市町村を単位として行われることが多い。このため、1 市町村の廃棄物輸送を想定し、モデルを構築する。また、海上輸送・鉄道輸送を行った事例も存在するが、本研究では 10t 積ダンプトラックによる陸上輸送のみを想定する。

本研究で設定する処理場および道路ネットワークモデルを図 7 に示す。

廃棄物の発生地として 1~ 3 の 3 箇所を設定する。また、処理場として A~ C の 3 箇所を設定する。さらに、一般交通の起終点として a~ d の 4 箇所を設定している。

このうち、起終点 a は、市の中心施設として、災害対策本部などが立地していると想定する。これらのセントロイドは道路ネットワークで結ばれている。道路ネットワークはリンク数:32、ノード数:25 である。各リンクに対して、次式に示す BPR 型リンクパフォーマンス関数を設定する⁸⁾。

$$t_a = t_{a0} \left(1 + 0.48 \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^{2.82} \right) \quad (7)$$

ここで、 t_{a0} は自由走行時間、 C_a はリンク交通容量、 x_a はリンク交通量を示す。なお、セントロイドと接続しているリンクに対して $t_{a0}=3.0$ 、 $C_a=2000$ 、その他のリンクに対しては、 $t_{a0}=10.0$ 、 $C_a=1000$ を設定する。

つぎに、各廃棄物発生地における廃棄物量を表 2 のように設定する。ここでは、廃棄物の輸送に必要な期間として 500 日を想定している。これより、1 日当たりの必要輸送量が算定される。

また、同様に処理場における廃棄物受入量を表 3 に示す。ここでは、処理場 C は大規模な処理施設として設定している。

(2) 復興過程に応じた災害廃棄物輸送パターンの算定

ここでは、復興過程に応じた廃棄物の輸送パターン

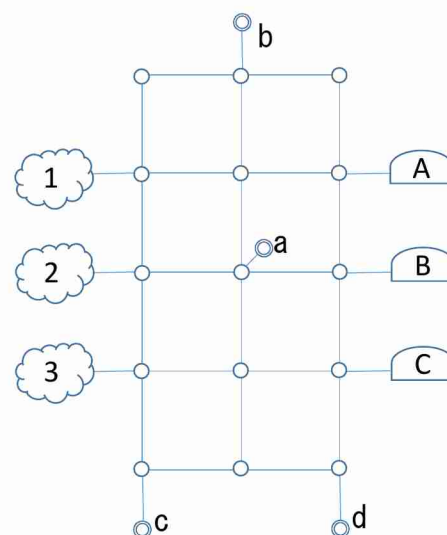


図7 道路ネットワークモデル

表2 ゾーン別廃棄物量

発生地	廃棄物量 (トン)	1日当たり必要 運搬量(トン)
ゾーン1	400,000	800
ゾーン2	300,000	600
ゾーン3	500,000	1,000

表3 処理場別廃棄物受入量

処理場	廃棄物受入 量(トン)	1日当たり受入 量(トン)
処理場A	300,000	600
処理場B	300,000	600
処理場C	600,000	1,200

を求める。はじめに、廃棄物輸送以外の一般交通の OD 交通量を設定する。OD 交通量は、各地域の震災復興の程度など、さまざまな要因により変化する。ここでは、3期に分けて検討する。第1期の一般交通の OD 表を表4に示す。震災後の初期では、災害対策

表4 一般交通の OD 表 (第1期)

0 \ D	a	b	c	d
A		800	800	800
B	800		500	500
C	800	500		500
D	800	500	500	

単位：台／日

本部を中心とする交通量が多いと想定し、セントロイドaを起終点とする OD 交通量を多く設定する。

交通量配分モデルを用いて、各リンクの交通量および所要時間を求める。計算結果を基に廃棄物輸送の各地点間の所要時間を算定した結果を表5に示す。

表5 往復輸送時間(第1期) 単位：分

0 \ D	A	B	C
1	52.0	73.1	99.1
2	73.4	53.4	77.8
3	99.1	78.2	52.0

ここで算定された所要時間および1日当たりの廃棄物輸送必要量などを用いて、輸送問題を解く。これにより、1日当たりの最適輸送パターンが求まる。計算された輸送パターンを図8に示す。発生地1・2では2箇所の処理場に分けて輸送される。一方、発生地3では全量が処理場Cへ運搬される。

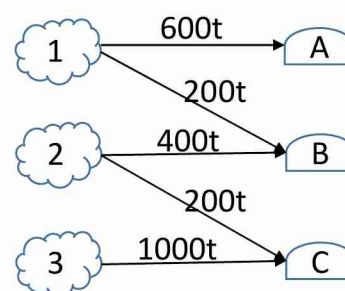


図8 最適輸送パターン (第1期)

つぎに、復興中期を想定して一般交通の OD 表を設定する。この場合、第1期と比較して救援物資の輸送量が減少することを考慮して、aを起終点とする OD 交通量は、やや少なく設定する。一方、仮設住宅の建設、各施設の復旧工事等が進むため、周辺の交通量はやや多い設定とする。これらの状況を組み入れた一般交通の OD 表を表6に示す。この OD 表を用いて、各発生地と処理場を往復するための所要時間を算定した。算定結果を表7に示す。

表6 一般交通の OD 表 (第2期)

0 \ D	a	b	c	d
a		400	400	400
b	400		600	600
c	400	600		600
d	400	600	600	

表7 往復輸送時間(第2期) 単位：分

0 \ D	A	B	C
1	52.0	73.5	96.2
2	73.4	52.2	74.8
3	96.2	74.8	52.1

第1期と比較して、輸送時間が短縮された OD ペアが多いが、1-B 間などの一部の OD ペアにおいて、輸送時間が増大している。

この輸送時間を基に、輸送問題により輸送パターンを求めた結果、図8に示した第1期と同一の輸送パターンが算定された。

つぎに、さらに復興が進む第3期を設定する。第3期の一般交通の OD 表を表8に示す。このとき、救援物資などの輸送はほとんどなくなることを想定し、aを起終点とする OD 交通量は少ない設定とする。また、周辺部間の交通量も第2期と比較して、やや少ない設定とする。この OD 交通量をもとに、交通量配分モデルを適用した結果を表9に示す。

表8 一般交通の OD 表 (第3期)

0 \ D	a	B	c	d
a		100	100	100
b	100		300	300
c	100	300		300
d	100	300	300	

表9 往復輸送時間(第3期) 単位：分

0 \ D	A	B	C
1	52.0	72.1	92.3
2	72.1	52.0	72.2
3	92.4	72.2	52.0

全ての起終点間において第2期と比較して、所要時間は等しいか短くなっている。

この輸送時間を用いて輸送問題により輸送パターンを求めた結果、第1期である図8と同一の輸送パターンが算定された。

つぎに、各期の輸送費用（総輸送時間）を比較する。各期の1日当たりの総輸送時間を図9に示す。廃棄物の輸送量および輸送パターンは各期ともに同じであるが、道路の混雑状況の違いにより、総輸送時間が相違する。第1期と比較して、第2期は0.7%減、第3期は1.4%減である。

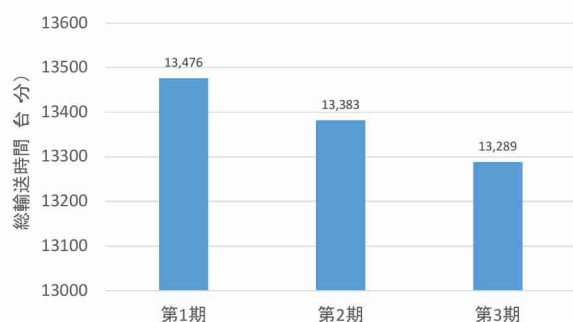


図9 各期の総輸送時間

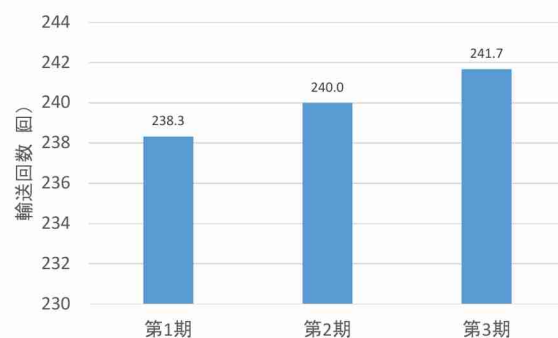


図10 総輸送時間を基にした1日当たり輸送量

(3) 輸送時間の平準化を行った輸送パターンの算定

今回のODパターンでは、第1期において一般交通のOD量が多いため、総輸送時間が多くなる。現実には、利用可能なダンプトラックに限られているため、総輸送時間に限りがあり、一定であると考えられる。このため、各期で輸送時間が等しくなるように輸送量を調整することを考える。

1日あたりの輸送量の算定結果を図10に示す。

このとき、全ての期において、1日あたりの総輸送時間は13,382分である。若干であるが、第1期の輸送量を少なくし、第3期に輸送量を増やすことで、輸送効率が向上することがわかった。ただし、総輸送時間を平準化するためには、将来的な一般交通の交通需要を事前に把握しておくことが必要である。

4.2. 道路状況を考慮した災害廃棄物輸送

大規模災害の発生時は、道路の損傷などにより、通行止めとなる区間が想定される。このため、道路の復旧状況を考慮した輸送問題を考える。ここでは、図11に示すように第1期において3か所の通行止めを想定する。このとき、交通量配分モデルを用いて、廃棄物輸送の各地点間の所要時間を算定した結果を表10に示す。通行止めのない場合の結果である表5と比較すると、最大で3-C間において91分の増加となっている。この所要時間を基に輸送問題を解いた結果、総輸送時間は25,562分となった。したがって、第1期は、通行

表10 往復輸送時間(第1期) 単位: 分

0 \ D	A	B	C
1	94.8	75.6	111.9
2	77.0	55.6	91.9
3	181.0	159.6	143.0

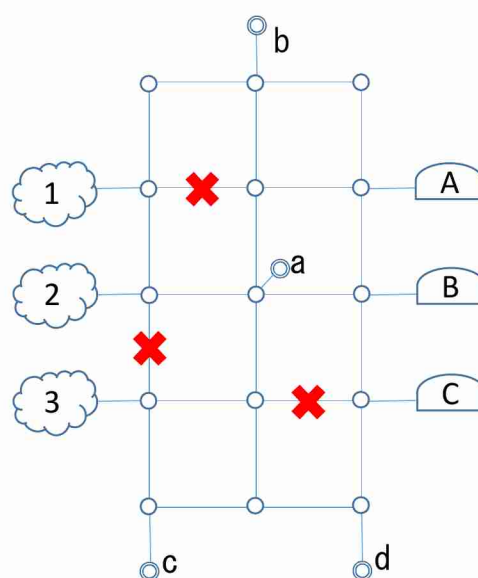


図11 道路ネットワークの被災設定 (第1期)

止めのない場合と比較して 90%の輸送時間増加となる。

第 2 期以降は、道路の復旧により通行止めが解除されたと想定する。このとき、各期で輸送時間が等しくなるように輸送量を調整することを考える。1 日あたりの輸送量の算定結果を図 12 に示す。第 1 期の輸送量は、第 2 期の 52%となっている。また、通行止めのない場合の図 10 と比較すると、第 2 期・第 3 期において、それぞれ 19%の輸送量増加となる。このように、道路の通行止めは、輸送時間に影響を与え、道路の復旧を想定した廃棄物輸送計画が必要であることがわかる。

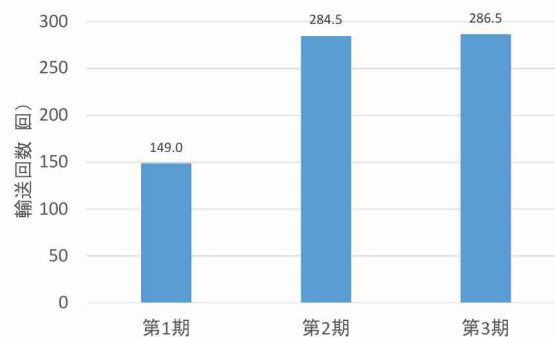


図 12 通行止めを考慮した各期の 1 日当たり輸送量

4.3. 震災廃棄物輸送に関する評価

つぎに、震災廃棄物輸送の評価例を示す。ここでは、表 11 に示す 4 事例に関して検討する。

このとき、各指標値に対してメンバシップ関数を設定する必要がある。評価指標「①不便益」に対するメンバシップ関数を図 13 に示す。不便益が大きい場合にメンバシップ関数値は小さい右下がりの関数形である。

つぎに、評価指標「②輸送費用」に対するメンバシップ関数を図 14 に示す。輸送費用に関しても、右下がりの関数形で設定する。

表 11 災害廃棄物輸送評価事例

	① 不便益	② 輸送費用	③ 地域格差	④ 安全運行
事例 A	950	700	0.15	1.70
事例 B	1300	600	0.10	1.30
事例 C	850	650	0.30	2.10
事例 D	750	750	0.05	0.75

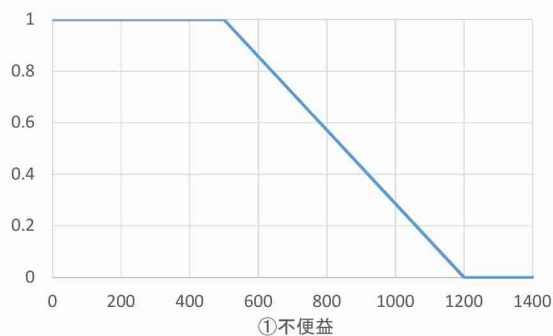


図 13 「①不便益」に対するメンバシップ関数

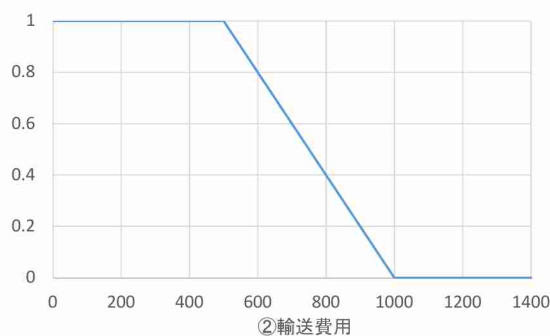


図 14 「②輸送費用」に対するメンバシップ関数

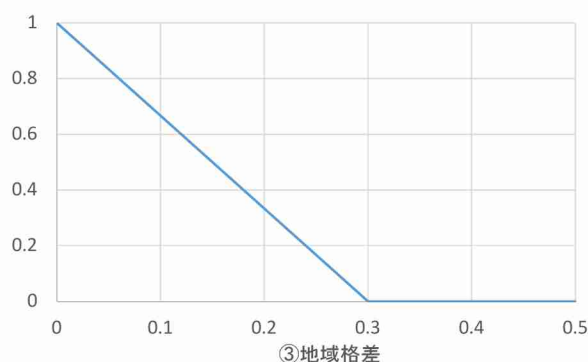


図 15 「③地域格差」に対するメンバシップ関数

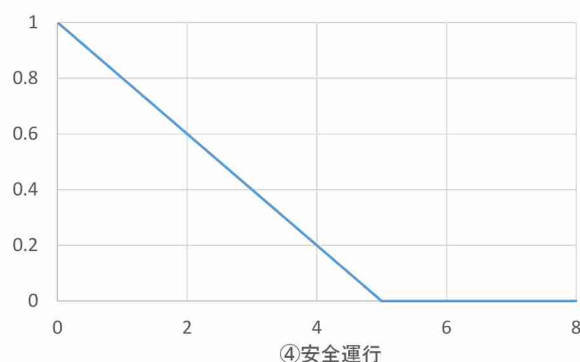


図 16 「④安全運行」に対するメンバシップ関数

また、評価指標「③地域格差」に対するメンバシップ関数を図 15 に示す。地域格差は、ゼロを目指すことから、メンバシップ関数は、0 の点から減少する関数を設定する。

つぎに、評価指標「④安全運行」に対するメンバシップ関数を図 16 に示す。安全運行に関しても、ゼロを目指すことから、0 の点から減少するメンバシップ関数を設定する。

これらのメンバシップ関数を用いて、メンバシップ値を求める。各事例のメンバシップ値を表 12 に示す。

表 12 各事例のメンバシップ値

	① 不便益	② 輸送費用	③ 地域格差	④ 安全運行
事例 A	0.357	0.600	0.500	0.660
事例 B	0.000	0.800	0.667	0.740
事例 C	0.500	0.700	0.000	0.580
事例 D	0.643	0.500	0.833	0.850

ここでは、事例 A に対する計算手順を示す。はじめに、4 指標のメンバシップ値を降順に並べる。これを基に、(1)～(5)の計算手順で求める。

1) 「④安全運行 : 0.660」と $g_4 = 0.143$ の演算

$$\min(0.660, 0.143)=0.143$$

2) 「②輸送費用 : 0.600」と $g_{24} = 0.251$ の演算

$$\min(0.600, 0.251)=0.251$$

3) 「③地域格差 : 0.500」と $g_{234} = 0.345$ の演算 $\min(0.500, 0.345)=0.345$

4) 「① 不便益 : 0.357」と $g_{1234} = 1$ の演算 $\min(0.357, 1.000)=0.357$

5) Max 演算 $\max(0.143, 0.251, 0.345, 0.357)=0.357$

したがって、事例 A に対する総合評価値は 0.357 と算定できる。同様に、事例 B, C, D に対して評価を行った結果を表 13 に示す。

表 13 各事例の評価結果

	評価値	評価順位
事例 A	0.357	3
事例 B	0.345	4
事例 C	0.500	2
事例 D	0.636	1

本表より、事例 D の評価値が最大である。事例 D は、②輸送費用は高額であるが、他の指標値は小さく、総合的に良い評価となっている。一方、事例 B は、輸送費用は安価であるが、評価項目のウェイトが比較的大きな①不便益が大きいため、悪い評価となった。このように、総合的な評価が行えることがわかった。

4.4 震災廃棄物輸送計画システム

本研究では、GIS（地理情報システム）とコンピュータプログラムを組み合わせる災害廃棄物輸送計画システムを構築する。本研究で用いる GIS ソフトウェアは世界のシェアが高い ESRI 社の ArcGIS（ArcGIS Desktop Ver. 10.5）を用いる。また、プログラムの開発環境として、Microsoft 社の Visual Studio 2015（Visual BASIC）を用いる。

また、初期に準備するデータとして、①地図データ（GIS）、②ゾーンデータ（総務省公開データ）、③交通量配分用道路ネットワークデータ（国土交通省）、④人口分布データ（自治体）などが挙げられる。これらは、震災発生前からデータを準備することが可能である。ここでは、ゾーンデータとして、国勢調査の小地域統計データを用いた。また、交通量配分用道路ネットワークデータは、国土交通省四国地方整備局および中部地方整備局より提供いただいた。

システムのメインメニュー画面を図 17 に示す。メニュー項目は、図 3 に示した「運行記録」「輸送計画」「運行管理」「関連情報」であり、それぞれの項目を選択すると、サブメニューが表示されるようになっている。また、GIS と連動し、必要に応じて GIS 上に表示される仕組みとなっている。

また、図 18 に示す輸送実績表示画面では、廃棄物の分布がゾーン単位に赤点で示され、仮置場の仮置き量は棒グラフで表されている。指定した期間の状況が 1 日単位で動画表示される。このような視覚的表示により、廃棄物輸送の計画を検討することが可能である。

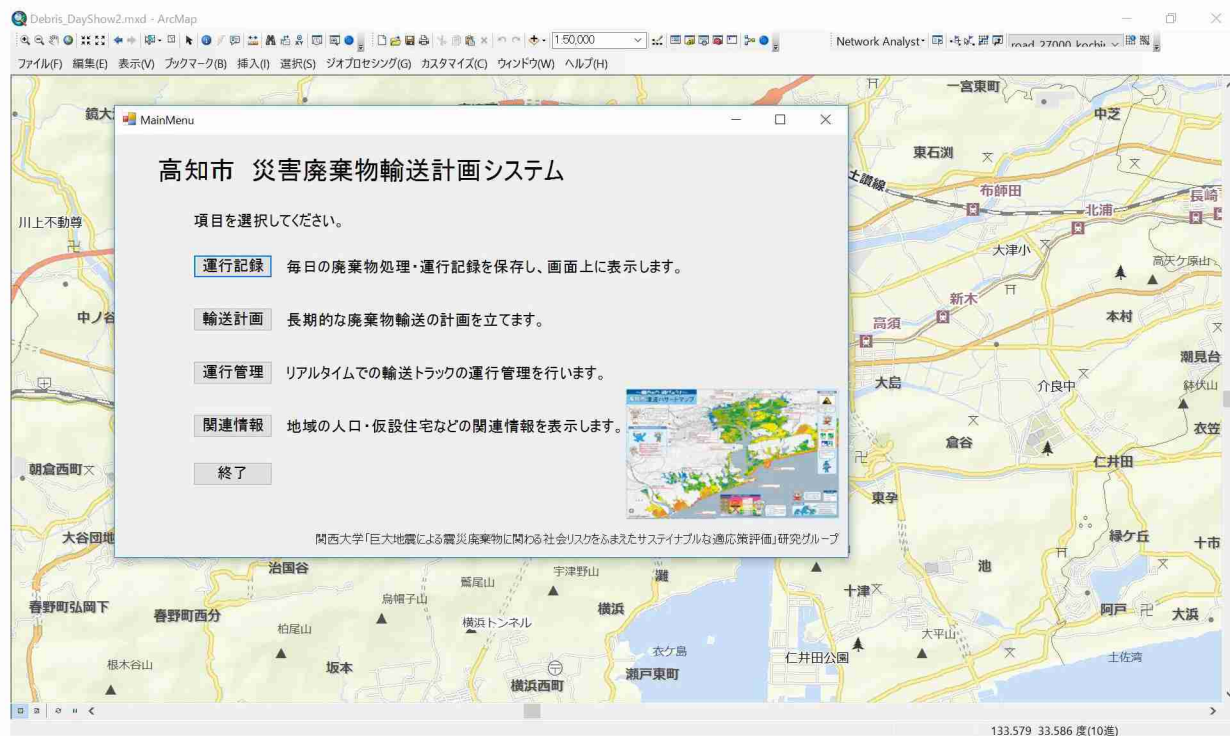


図 17 災害廃棄物輸送計画システムのメインメニュー画面



図 18 災害廃棄物輸送計画システムの輸送実績表示画面

さらに、GPS データの処理について例を示す。図 19 は、高知市内の災害廃棄物の発生地から 1 次仮置場への輸送を想定し、走行したデータである。走行距離は 5.1km、走行時間は 16 分 24 秒である。

図 20 は図 19 の一部を拡大したものである。GPS データは 1 秒単位で収集している。この 1 秒単位の座標データを道路リンクに割り当てることで、リンクの流入時刻および流出時刻を算定することができる。したがって、各リンクの所要時間が分かり、これをデータベースに蓄積して利用できる。



図 19 GPS の収集データ



図 20 GPS データの加工

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、災害廃棄物を効率的に輸送する計画立案システムを構築した。本研究の科学的意義は、つぎのようにまとめられる。

- 1) 廃棄物処理に関する現実的事例（阪神淡路大震災・東日本大震災・熊本地震）を基に、大規模災害廃棄物輸送に関する現実的な処理手順を体系化した。
- 2) 震災発生からの時間経過に応じて変化する交通状況を組み込んだ廃棄物輸送問題を定式化し、その解法を提案した。具体的には、OD 交通量パターンの推計、交通量配分を含めて推計を行う方法を示した。
- 3) 廃棄物輸送結果の評価を行う方法を示した。評価指標として、①廃棄物残留による不便益、②輸送費用、③地域相互格差、④安全運行の4指標を設定した。このとき、あいまい情報を考慮した評価方法を用いた。
- 4) GIS とコンピュータプログラムを用いて、災害廃棄物輸送計画システムを構築した。これは、長期の輸送計画、1日単位の運行計画、リアルタイムの運行管理を行うものである。収集されたGPSデータなどを処理する方法を示した。

(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>

災害廃棄物輸送計画システムは、比較的入手が容易なデータを基礎として構築しており、データを準備することで利用が可能である。また、交通状況変化を考慮した輸送計画は、震災廃棄物輸送の効率化につながる。さらに、廃棄物輸送に対する評価を行うことで、計画の見直しに役立つと考えられる。

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) H. Inokuchi, T. Akiyama : Debris Treatment Planning for Large-Scale Earthquakes Using Fuzzy Information, Proceedings of SCIS & ISIS 2016, Sa7-1-4, 2016.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 井ノ口弘昭, 秋山孝正 : 災害廃棄物の時間変化に着目した廃棄物処理手順の定式化, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.52, No.55, 2015.
- 2) 井ノ口弘昭, 秋山孝正, 横山大: 大規模災害における廃棄物輸送問題の定式化に関する研究, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.53, No.49-05, 2016.
- 3) 秋山孝正, 井ノ口弘昭, 樋口吉隆, 龍野恵則, 岸野啓一 : 現実事例に基づく災害廃棄物輸送計画の立案手順についての検討, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.53, No.49-04, 2016.
- 4) 井ノ口弘昭, 秋山孝正 : 震災廃棄物輸送に関するファジィ測度を用いた評価手法の提案, ファジィシステムシンポジウム講演論文集(CD-ROM), Vol.32, pp.561-564, 2016.
- 5) 井ノ口弘昭, 秋山孝正 : 大規模災害における廃棄物輸送の評価手法の提案, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.54, 2016.
- 6) H. Inokuchi, T. Akiyama: The practical formulation of disaster debris transport planning with traffic conditions, Proceedings of TRB 96th Annual Meeting, 17-05502, 2017.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 横山大, 井ノ口弘昭, 秋山孝正: 大規模災害廃棄物処理における輸送計画問題に関する提案, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, IV-56, 2016.
- 2) H. Inokuchi, T. Akiyama: The disaster debris transport problem with network equilibrium constraints, The 10th International Conference on Optimization: Techniques and Applications (ICOTA 10), 2016.
- 3) D. Yokoyama, T. Akiyama, H. Inokuchi: The practical algorithm for solving debris transport problem, 11th International Symposium in Science and Technology at Kansai University 2016, 2016.
- 4) H. Inokuchi, T. Akiyama: Transport planning of disaster debris referring to uncertain conditions, International symposium in science and technology 2017, OCE41, 2017.

(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) 建設技術展 2015 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社、一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2015 年 10 月 28~ 29 日、マイドームおおさか、52 名)『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 2) 建設技術展 2016 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社 一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2016 年 10 月 26 日~ 27 日、マイドームおおさか、61 名)、『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 3) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか。」(主催：関西大学、共催：徳島大学、2017 年 2 月 24 日、グランフロント大阪北館タワーB10 階、ナレッジキャピタルカンファレンスルームタワーB、RoomB 05+06、参加者 95 名)を実施
- 4) 建設技術展 2017 近畿「ええもん使こて、ええモン創ろ！」(主催：日刊建設工業新聞社 一般社団法人近畿建設協会、特別共催：公益社団法人土木学会関西支部、2017 年 10 月 25 日~ 26 日、マイドームおおさか、約 60 名)、『巨大地震による震災廃棄物に関わる社会リスクをふまえたサステナブルな適応策評価』と題してポスター・ブース参加
- 5) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか」(主催：関西大学、2018 年 1 月 26 日、関西大学梅田キャンパス 8 階、KANDA I MeRISEホール 06、参加者 70 名)にて「震災廃棄物と再資源化物の輸送にかかる脆弱性と輸送効果の評価」と題して講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊建産速報(平成 29 年 2 月 28 日、WEB、「関西大学が公開シンポ開く 巨大地震の適応策等議論」)
- 2) 鋼構造ジャーナル(平成 29 年 3 月 6 日、鋼構造出版、12 頁、「巨大地震にどう備えるか」防災関係者 100 名が参加 関大と徳島大の公開シンポ」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 廃棄物資源循環学会：「災害廃棄物分別・処理実務マニュアル」，ぎょうせい，2012.
- 2) 環境省：「災害廃棄物処理情報サイト」，
http://kouik-ishori.env.go.jp/disaster_waste/outline_processing/in-dex.html，2015.
- 3) 環境省：「東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針（マスタープラン）」，2011.
- 4) 神戸市環境局：災害廃棄物処理事業業務報告書，1998.
- 5) 宮城県：「災害廃棄物処理業務の記録」，2014.
- 6) 仙台市：「東日本大震災 仙台市 震災記録誌」，2013.
- 7) 永田尚人，平山修久，河田恵昭，成田高一：ガレキの緊急輸送ネットワーク構築に関する一考察，廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，Vol.20，pp.57-58，2009.
- 8) 藤原健史，中村彰太：地図情報を用いた災害廃棄物の発生量予測と収集輸送計画，EICA(環境システム計測制御学会)，Vol.17，No.4，pp.58-66，2013.

- 9) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析，丸善，pp.39-71, 1998.
- 10) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第 編 利用者均衡配分モデルの展開，丸善，pp.25-57, 2006.
- 11) 本多中二，大里有生：ファジィ工学入門，海文堂，pp.119-135, 1989.
- 12) 浅井喜代治：ファジィ経営科学入門，オーム社，pp.43-54, 1992.
- 13) 高萩栄一郎：ファジィ測度とファジィ積分モデルによる総合評価法，日本経営数学会誌，Vol.31, No.2, pp.85-112, 2010.

Ⅱ- 4 社会リスク評価を介した震災廃棄物の処理・リサイクル拠点の適地評価

[要旨]

津波廃棄物の発生、処理に影響するリスク要因を分析し、社会リスクを配慮した持続可能な対策の方向性を検討した。それによって、災害廃棄物処理計画は廃棄物の減量、処理時間の短縮、環境影響の抑制を目的にする方針を確認した。東日本大震災後の災害廃棄物処理実績報告より岩手県と宮城県における津波廃棄物発生と処理実績を検証し、浸水区域における全壊と半壊区域の面積と災害廃棄物量との関係性を検証した。本研究の対象地域のひとつである愛知県三河地域、静岡県遠州地域において災害廃棄物発生量を試算し、1次仮置き場、2次仮置き場の候補地を抽出し、中間処理施設の必要能力を検討した。これらの結果を踏まえて、愛知県田原市、豊橋市、静岡県湖西市、浜松市の行政担当者と住民にヒアリングと現地視察を行い、災害リスクの意識、津波対策、災害廃棄物処理計画、特殊災害廃棄物について行政の体制と市民の意識を確認した。また、同様の方法で、他の研究テーマと同様の対象地域となる高知市にこの推計手法を適用し、震災廃棄物量のコンティンジェント推計およびそれらの輸送にかかる脆弱性・輸送効果の評価に対する適切な条件として関連づけることができ、またこの手法が複数の地域で適用可能であることを確認した。

1. はじめに

既存廃棄物推計モデルおよび市町村災害廃棄物処理計画は土地・建物・人口・施設の現況ベースに策定されているものが多い。しかし、災害の発生は不確実が高く、災害廃棄物処理は人口、土地利用、家屋状況、施設の状況によって変わる。愛知県東部、静岡西部が面する三遠南信地域が面する遠州湾は南海トラフ巨大地震の震源域の1つと予想されており、内閣府の想定によると静岡・愛知・三重の3県ではそれぞれ死者10.9万、2.3万、4.3万人、全壊家屋31.9万、38.8万、23.9万棟の被害が推計されている。この巨大災害においては、社会の高齢化、インフラの老朽化、交通・情報・エネルギーシステムのメルトダウン、産業サプライチェーンの寸断など、様々なリスクが伴っている。同地域は災害廃棄物処理計画の策定について先進的に取り組まれており、市町村にまたがった広域連携も従来から活発に行われている。さらに、巨大災害対策に関して、愛知県・静岡県は中部ブロック、静岡県は関東ブロックとも連携を取っている。

2. 研究開発目的

中長期の社会リスクにおいて災害廃棄物の発生と処理に影響する要因を分析し、廃棄物発生の減量、処理時間の短縮、環境影響の抑制を内容としたサステナブルな適応策を検討した。愛知県東部三河地域、静岡県西部遠州地域を対象に、想定巨大災害の災厄なケースについて簡易モデルを用いて廃棄物発生量を推定した。1次、2次仮置き場の必要面積と候補地を抽出した。中間処理施設の既存能力と必要新規能力を試算した。その上で、高知市にも適用し、その地域汎用性を確認することも目的として設定する。

3. 研究開発方法

1) 災害廃棄物処理における社会リスクの分析

災害廃棄物処理における社会リスクの因子を分析した(図1)。分析方法はIPCCの「災害リスク=災害因子×脆弱性(暴露、感受性、適応力)」を採用した。本研究において、災害因子は地震による津波災害リスクを考える。暴露は津波浸水深で、市街の立地条件と人口密度が影響する。感受性は建物・施設の構造的特性を表す。適応能力に社会リスクが主に現れる。災害の発生は不確実性高い。中長期的に人口、土地利用、建物の構造と利用、防潮堤、処理施設の整備・運営状況も影響する。高齢少子化による地域防災力の弱体化、財政状況の悪化による防災・減災施設の維持更新の遅れといったネガティブな側面と、事前復興計画の策定

と推進によって地域防災力の強化、事前移住や防潮堤の整備、建物の更新改造による構造強化によるポジティブな適応策も考えられる。結論として、災害廃棄物処理計画は廃棄物発生量の削減、処理時間の短縮、環境影響の抑制を目標に検討し、そのための方策と支援ツールを検討することを目的にした。

社会リスクを介した津波災害廃棄物の発生と処理の要因分析

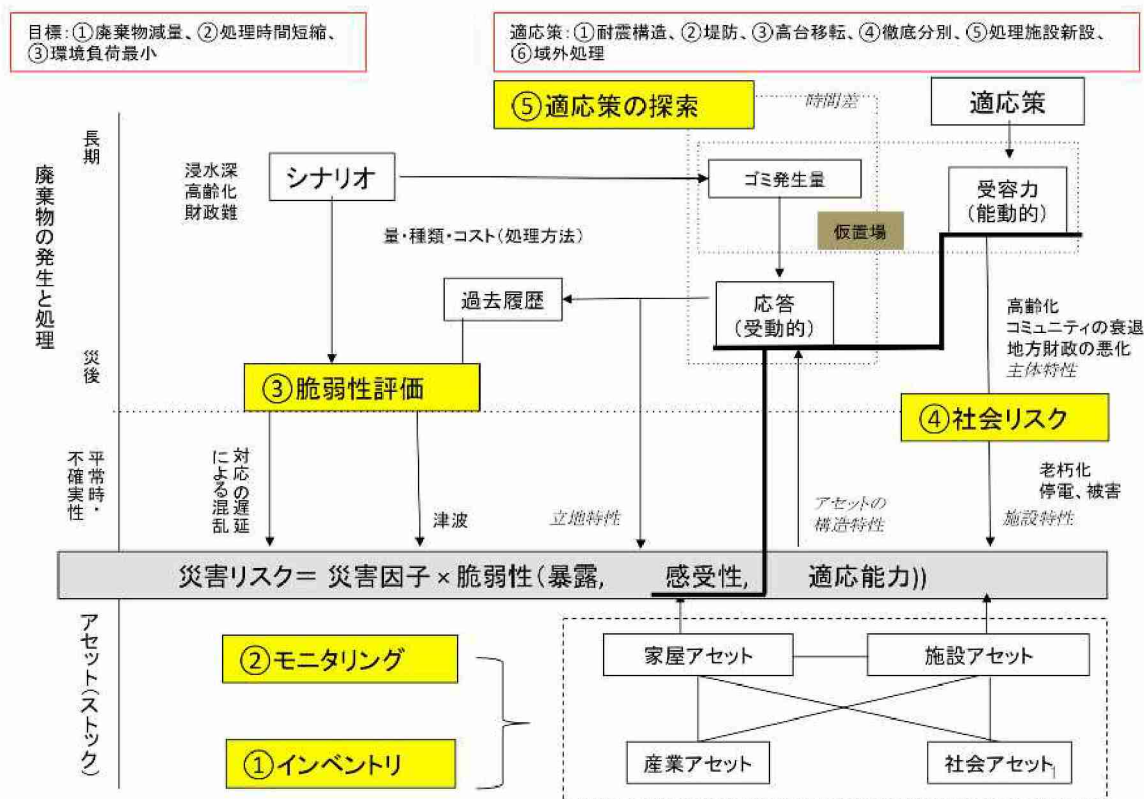


図1 社会リスクを介した津波災害廃棄物の発生と処理の要因分析

(2) 東北被災地域・東海地域の地理データベースの構築

市町村レベルにおける災害廃棄物処理計画策定を支援するツールとしての地理データベースを構築した。このデータベースは3つの部分から構成されている。①空間データ基盤：全国ベースの空間データ基盤を整備した。②東北地域：市町村別（一部、処理ブロック別）に浸水、家屋倒壊、津波廃棄物の発生、構成、処理、コストなどの情報を集約し、災害廃棄物が発生する要因と結果を検証する。③静岡県：災害リスク高い東海地域をケースとするため、当地域の津波災害シナリオ、災害廃棄物処理計画の策定実態などを整理した。整備したデータ項目の詳細：

- ①空間データ基盤：地形 [国土数値情報]、水系（海岸線、河川、湖沼） [国土数値情報]、人口（町丁目） [国勢調査]、建物 [ゼンリン住宅地図データベース、都市計画基礎調査]、道路 [ESRI ジャパン道路網]、交通（港湾、駅、鉄道） [国土数値情報]、土地利用細分メッシュ（100mメッシュ） [国土数値情報]
- ②東北被災地域：浸水区域と面積 [国土交通省、国土地理院]、浸水人口 [消防庁]、浸水建物 [国土交通省]、建物被害（流出、全壊、半壊、床下浸水） [国土交通省]、市町村別災害廃棄物・津波堆積物の量・内訳、処理方法、処理費用 [廃棄物処理施設の処理実績報告各種]
- ③静岡県：浸水深 1m 別浸水面積 [中央防災会議南海トラフ巨大地震モデル検討会「陸域における津波浸水深データ（全 11 ケース×堤防破壊 2 ケース）」をもとに浸水深 1m 別浸水面積を算出]、浸水人口 [浸水域データとマイクロベース社製の人口データ（50m メッシュ）をオーバーレイすることで算出]、浸水建物 [浸水域

データとゼンリン社製の建物データをオーバーレイすることで算出]、建物被害[国土交通省が公開している東日本大震災における建物と津波浸水深の関係を津波被害関数として表現し津波浸水深とゼンリン社製の建物データから確率的に算出]、廃棄物処理施設の処理実績[環境省が公表している一般廃棄物処理実態調査結果の市町村ベース・施設ベースの処理実績や施設情報]、市町村別災害廃棄物処理計画策定状況・内容[環境省の報告書やホームページ等、東海地域沿岸市町村の報告書やホームページ等を参照]

(3) 東北震災廃棄物処理実績からみた災害廃棄物の発生の実証的分析

東日本大震災において、岩手県、宮城県は災害廃棄物の 68%を占めていた。津波災害廃棄物発生量を影響する要因を検証するために、公表された各種廃棄物処理報告書をベースに全 27 市町村別（一部、地域ブロック別）の①被災状況：浸水区域 4 区分（A：全壊・流失、B：半壊・一階浸水、C：一部浸水、D：被害なし）面積、浸水人口、浸水建物（全壊・半壊・床下浸水）、②廃棄物発生：災害廃棄物、津波堆積物の発生量、内訳（木くず、可燃物、不燃物、コンクリートがら、金属くず、漁具・漁網、その他の計 7 種類）、③処理状況：処理方法（焼却、リサイクル）、事業方法（県依頼・市町村独自）、処理費用（事業費及び国庫補助金交付額）、処理期間（準備期間、建設期間、処理期間、復旧期間）、④処理施設状況（既存、新設、運転期間）について、詳細に調査し、データベースを作成した。報告書より集めたデータについて集計方法、詳細性、正確性、信頼性について逐次検証し、場合によって関係機関に電話して確認を行った。これらのデータをもとに 27 市町村（またはブロック）別の災害廃棄物（津波廃棄物と津波堆積物）の発生量、浸水面積、浸水人口、事業費等との関係を分析し、ヘクタール当たり、被災人口当たりの市町村別災害廃棄物の発生量と、トン当たりの災害廃棄物処理コストを計算した。

(4) 静岡県における津波災害廃棄物の推定

津波災害廃棄物発生量原単位を設定するために、1) 構造設計者へのヒアリングと実務指南書から、津波災害廃棄物発生量原単位を W 造で 0.4 から 0.6（トン／平方メートル）、S 造で 1.0（トン／平方メートル）、RC 造で 1.2（トン／平方メートル）と導出、2) 中央防災会議の東海、東南海、南海地震に係る被害想定手法の資料から過去の推計時における津波災害廃棄物発生量原単位を木造で 0.6（トン／平方メートル）、非木造で 1.0（トン／平方メートル）と整理した。遠州の住宅構造割合をみると、S 造より RC 造が多いことから、本研究では、木造と非木造の津波災害廃棄物発生量原単位をそれぞれ 0.6（トン／平方メートル）、1.1（トン／平方メートル）に設定した（表 1）。

表 1 本研究における建設資材投入割合

建設資材	建設資材投入量 100 m ² あたり			単位容積質量 (t/m ³)	建設資材投入割合	
	W 造	S 造	RC 造		木造	非木造
セメント	8.3 t	14.7 t	31.0 t	—	4.9 %	5.5 %
コンクリート	20.8 m ³	37.2 m ³	87.8 m ³	2.3	28.2 %	34.9 %
骨材・石材	38.7 m ³	65.7 m ³	113.3 m ³	2.6	59.4 %	56.4 %
木材	19.2 m ³	1.1 m ³	3.2 m ³	0.6	6.8 %	0.3 %
鋼材	1.1 t	13.9 t	10.0 t	—	0.7 %	2.9 %

「国土交通省（2016）：建設資材・労働力需要実態調査〔建築部門〕（平成 25 年度原単位）の結果について」をもとに作成

ArcGIS Desktop を用いて、1) 津波浸水域内の建物を抽出、2) 3 階未満かつ建築面積が 500 平方メートル未満の建物を木造、3 階以上または建築面積が 500 平方メートル以上の建物を非木造と仮定し、東日本大

震災における津波浸水深と建物被災の関係から津波浸水深 1メートルごとに構造別の全壊および半壊の津波被害関数を構築、津波浸水域内における各建物の「全壊」「半壊」「被災なし」確率を計算、3) 津波浸水域内の各建物の延べ床面積（＝建築面積×階数）に構造別の津波災害廃棄物発生量原単位（全壊は半壊の 1/2）と建設資材投入割合を乗じ、各建物の潜在的な津波災害廃棄物発生量を算出、4) 津波浸水域内各建物の潜在的な津波災害廃棄物発生量に各被災確率を乗じることで、南海トラフ巨大地震による東海地域の津波災害廃棄物発生量を推計した。

（５）静岡県における仮置き場の候補地の選定方法

各地において災害廃棄物処理計画を策定している。しかし、仮置き場候補地の選定条件が統一されていない。また、仮置き場の配置の際に輸送の効率を考慮していない。どの自治体も汎用的なデータと簡単な GIS の操作で候補地選定を行うことができるよう、仮置き場候補地選定モデルを作成した（図 2）。まず土地利用をベースに、災害時拠点、避難施設、用途地域を踏まえ、仮置き場候補地としての前提条件を満たす候補地選定方法を提案した。次に、自治体のニーズや被害の程度にあった適切な候補地を選別するため、2 つの選定シナリオを提案した。用地取得容易性に着目したシナリオでは、公有地や空地、自然地从、土地所有者と候補地としての適性を評価し、用地取得コストや土壌汚染リスクへの配慮を示した。また輸送効率性に着目したシナリオでは、廃棄物処理施設までの距離や津波被災エリアからの距離を選定条件とし、交通渋滞の発生や運搬時の環境面リスクへの配慮を示した。上記のモデルを作成したうえで、2 つのシナリオ別に、静岡県遠州地域を事例とした仮置き場候補地の選定と評価を行った。

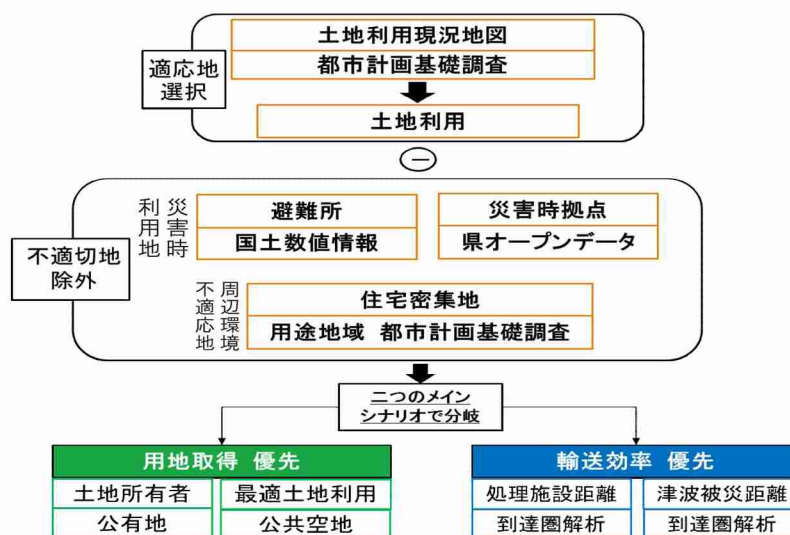


図 2 仮置き場候補地選定モデル

（６）廃棄物処分施設の整備実態と処理能力の評価

東日本大震災における中間処理施設の実績と静岡県内の処理施設の整備状況を調べた。東日本大震災が発生した際、岩手、宮城、福島 の 3 県において約 2200 万 t もの多量の瓦礫が発生した。災害廃棄物処理は 2011 年の災害の際には多くの自治体が廃棄物の処理を県に委託した。中には市町村で処理指針を策定し独自処理を行う事例も見られた。事業の委託内容は市町村によって異なるが、事務委託をするかどうかの判断基準は市町村によって様々であった。地元の雇用確保を考えて廃棄物の独自処理を進めるなど、経済的側観点から意思決定をする地域もあれば、県に委託した場合、手続きに時間を要することを危惧して自ら処理を行う自治体もあった。南海トラフ巨大地震において発生すると予想されている災害廃棄物は 3 億 2 千万 t であり、

これらの災害廃棄物等を3年間で処理を完了することを目標としている。東北の事例から災害前に既存施設における処理可能量を調査することは発災後の迅速な処理指針決定に繋がると判明しているため、既存施設が発災後3年間で処理できる廃棄物量を求めることとした。

静岡県内における南海トラフ巨大地震由来の災害廃棄物等の想定発生量と照らし合わせ、環境省が目標とする3年間で処理する可能性を推定した。推定に当たって、環境省の定めた試算方法の通り震度6弱の揺れを受ける施設の被災後1年間の処理能力低下率を35%、震度6強以上の場合63%処理能力が低下すると仮定した。その後処理能力低下を考慮に入れた処理能力(t/日)に、稼働年数、処理余裕率の3つの要素を指標とし低位・中位・高位の3つに処理シナリオを分け、それぞれに対応した分担率を掛けた。その後施設ごとの処理能力を都道府県別のデータに集約。これが1年目の県別一般廃棄物処理場の総処理量となる。2年目以降の試算方法は処理能力が平常時と同程度まで回復するとし、各施設の元々の処理能力で同様の手順を踏み試算を行った。

また、一般廃棄物処理場と産業廃棄物処理場の処理可能量を合計した数値で試算した。考察する陸側ケースの地震では災害廃棄物等の発生量が極めて多いため、また既存施設の最大処理可能量を求めるため高位シナリオで処理した場合に限定した。一般廃棄物処理量は市町村が独自に行った処理分、事務組合が保有する処理施設に搬出した分、他地域への事務委託分の合計である。広域連携によって処理された分も各市町村が処理を行った扱いとなっていた。そのため静岡県内の焼却処理施設の処理能力及び平時に各市町村、処理区が有する施設の焼却能力、焼却実績を元に推計した。処理区は独自処理を行っている市区町村と一部事務組合を基本とし、処分は処理完了目標3年間の内、後半の1年半を充てるものとする。

(7) 地域特性を配慮した特殊廃棄物

災害時に発生が予測される廃棄物のうち、地域特性に応じた地域に特徴のある廃棄物を分析した。東海地域では、農業地域、漁港、太陽光発電所などでは、それぞれに特徴的な廃棄物の発生が想定される。そうした地域特性が災害廃棄物処理計画に反映されるよう、地域性に着目した。愛知県田原市において、災害廃棄物の発生源は、家畜、栽培施設、農業機械が顕著である。家畜は、津波によりその死骸が腐敗性廃棄物となるほか、養鶏場や養豚場の建屋の被害が想定される。特に腐敗性廃棄物は田原市をはじめ各市町村にとって強い関心事項である(田原市, 2016 や 新潟市, 2016 など)。また、栽培施設は津波堆積物との混合が考えられ、その処理が難航する恐れがある。また電照菊栽培が盛んな田原市では、重油やタンク、大型冷蔵庫、照明など多岐にわたる廃棄物の発生が想定される。農業機械においても、高額な被害の発生と、所有者特定に難航する恐れがあり、復興に向けての処理時間と長大化が考えられる。こうしたことから、本研究では、家畜、栽培施設、農業機械を取り扱い、農業由来の災害廃棄物を検討した。具体的には、津波浸水想定域、農業地域、家畜飼育数、栽培施設面積、農業用機械などのデータから、各小地域において家畜による腐敗性廃棄物の量や被害ビニールハウス面積、被害農業用機械の数を推計した。また空中写真によるビニールハウスの判読や現地での聞き取り調査を通じ、より正確なデータベースの整備を進めている段階である。

(8) 高知市への適用

地域間の汎用性を確認することが目的であることから、使用データソースおよび推計フローなどを共通とし、土地利用条件、災害時利用条件、二次災害防止条件、面積条件、仮置場候補地の選定という手順で行うこととした。

4. 結果及び考察

(1) 社会リスク分析

図1に示すように、災害廃棄物処理はインフラ、建物、施設のストック、災害因子、災害への抵抗、社会的対応能力によって影響されるため、不確実性が高い。災害廃棄物処理計画は災害になった時に、復旧・復興の支障にならないようにスムーズに処理することが目的である。そのための中長期対応策を明らかにした。①平常時に地域における土地・家屋・施設・輸送路の状況をよく把握すること、②必要であれば事前に対策しておくこと、③災害の時に備えておく。平常時の状況把握のために土地・家屋・施設・輸送路の状況をモニタリング、更新する体制を構築する。事前対策は建物耐震性の強化、堤防の整備、空き家の事前撤去などを含む。③災害時に備えるとは、災害廃棄物の集積、処理、処分がスムーズに行えるように処理計画を策定し危機体制をとっておくことである。

(2) データベース

空間データ基盤をベースに地理データベースを整備し、GISに投入したことで、災害廃棄物の発生量、仮置き場の候補地を概略的に評価することを可能にした。災害リスクの影響因子で分析したように暴露は地域条件に依存し、脆弱性は地域の自然的、社会的条件によって影響を受ける。データベースの機能は対象課題において検証した。

(3) 災害廃棄物発生量の実績分析について

津波廃棄物の発生は震源地の位置、被災地の位置、地形・地質、土地利用、建物・家屋の位置、向き、構造、年数、周辺環境等と関係し、正確に推定することは難しい。東日本大震災における岩手県、宮城県の状況について検証した。津波災害廃棄物の量について岩手県は災害廃棄物 422 万トン、津波堆積物 160 万トン、宮城県はそれぞれ 1110 万トンと 754 万トンである。質について、不燃物の割合が高く、岩手県は 83%、宮城県は 75%に占める。不燃物におけるコンクリートがらの比率は 2 県それぞれ 52%と 51%を占めた。半数以上の市町村にて災害廃棄物総量の 50%以上となっている。災害廃棄物の処理費用は 1 トン当たり 2.6 万円から 6.1 万円まで市町村間のバラツキが大きかった。災害廃棄物処理は発災から 3 年以内に終わらせる条件があるため、単純にコスト抑制という視点では検討できない。

国土交通省「東日本大震災による被災現況調査結果について（第1次報告）」（平成23年8月4日）が100mメッシュ単位で浸水深と建物被災状況を把握した。そこから岩手県と宮城県27市町村建物被災全域と4つの区域区分の面積を抽出し、区域A, B, C, Dの面積を説明変数に、災害堆積物発生量、津波堆積物発生量、コンクリートがらを被説明変数に重回帰分析を行った。結果を表3にまとめた。石巻市は飛び抜けて都市規模、被害規模が大きいこと、平野都市のことを考え、この分析から外した。26市町村（ブロック処理があったため、実質21データ）を対象とした重回帰分析、重回帰分析の結果を表2にまとめた。

表2 岩手県・宮城県被災市町村における災害廃棄物の発生量と被災区域面積との重回帰分析
被説明変数と有意水準

説明変	災害廃棄物総量	棄却	津波廃棄	棄却	津波堆積	棄	コンクリートが	棄却
R ²	0.844		0.851		0.758		0.721	
重回帰	0.000		0.000		0.000		0.000	
A区域面	0.005	*	0.021	*	0.001	*	0.000	*
B区域面	0.000	*	0.000	*	0.596		0.467	
C区域面	0.847		0.858		0.028	*	0.554	
D区域面					0.197			

サンプル数が小さいため、この分析は参考程度にしかできないが、興味深い傾向が見られた。災害廃棄物総量、津波廃棄物、コンクリートがらはともに A 区域、つまり建物全壊・流失区域に集中している。B 区域、つまり半壊区域は津波堆積物、コンクリートがらの発生に大きく影響しない。津波堆積物は C 区域に多く集中する傾向が見られた。建物倒壊・流失の少ないものの、多くの津波堆積物が集まる可能性は高い。

(4) 東海地域における津波災害廃棄物の推定

本研究の方法で算出した湖西市の津波災害廃棄物発生量を表 3 に示した。従来の潜在的災害廃棄物推計法より 27 万トン少ない。

表 3 湖西市における津波災害廃棄物発生量推計結果（単位：トン）

	セメント	コンクリート	骨材・石材	木材	鋼材	合計
潜在的津波災害廃棄物	60,906	366,307	688,377	48,869	18,981	1,183,440
先行研究の津波災害廃棄物	54,342	325,790	617,486	45,954	16,257	1,059,829
本研究の津波災害廃棄物	46,734	280,255	530,783	39,342	14,032	911,146

津波災害廃棄物発生量の推計には、地震・津波の発生時期や規模をはじめとする不確実性が伴う。さらに、建物構造判定等の条件分岐や津波災害廃棄物発生量原単位等のパラメータ設定により、過大推計にも過小推計にもなりうる。しかし、条件分岐やパラメータ設定の選択方法に対する明文化された共通ルールがない。例えば、静岡県湖西市において条件分岐やパラメータ修正を実施したところ、津波災害廃棄物発生量は 20 万トンの振れ幅が確認できた。この推計は津波廃棄物しか含まれない。(3) 項での検証でわかったようにまちによって、津波廃棄物と同等規模の津波堆積物が集まる可能性がある。

(5) 東海地域における仮置き場の候補地の選定について

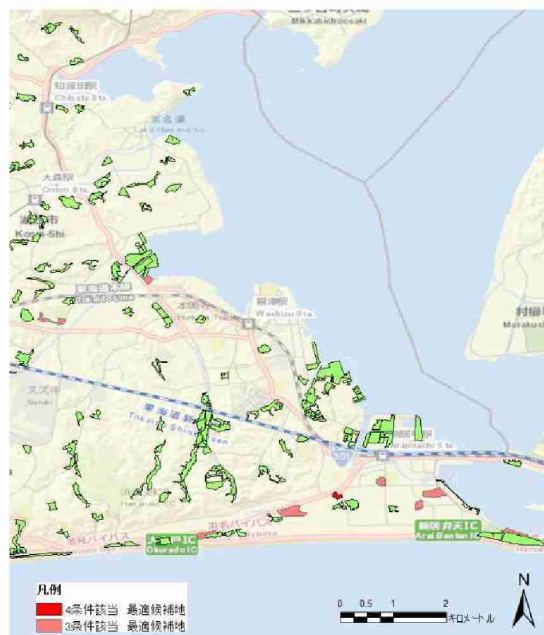
汎用データと簡単な GIS 操作によって仮置き場の候補地を選択できることを示した。また、その仮置き場候補地は、各自治体のニーズや被害の程度によって、用地取得容易性と輸送効率性の両シナリオにより、適切に選択可能であることを示した。モデルを適用し評価した湖西市では、必要な仮置場面積に対し、各シナリオを適用することによって、仮置き場候補地を絞り、必要十分な有効な土地を選択するのに有効であることを示した(表 4、図 3)。ただし、仮置き場候補地は海岸側の低地に偏在することがあり(表 5)、各自治体のシナリオ選択への課題になる。中長期的な土地利用の変化や人口減少は将来の仮置き場候補地選択に影響を及ぼさうと考えられる。各自治体は仮置き場の候補地を公開していない。住民合意の形成、周辺環境への影響の評価を事前に行うことが求められる。

表 4 発生量推計と仮置き場必要面積、仮設住宅必要面積

		湖西市	磐田市	浜松市
静岡県推計	レベル 1	約 60 万 t ~ 67 万 t	約 219 万 t ~ 223 万 t	約 734 万 t ~ 754 万 t
	レベル 2	約 98 万 t ~ 120 万 t	約 260 万 t ~ 310 万 t	約 860 万 t ~ 990 万 t
本研究推計	ケース 1	約 100 万 t	約 120 万 t	—
仮置き場必要面積概算		37ha	48ha	(参考) 250ha
仮設住宅必要面積概算		5.4ha	3.6ha	31.2ha



津波浸水エリア内仮置場候補地



複数条件該当仮置場候補地

図3 仮置場の候補地の選定

表5 複数条件該当仮置場候補地表

FID	面積(ha)	施設名	土地利用	公共地	処理5分	津波被災
142	1.1	新居体育館	公共空地	1	1	1
2	2.2	新居浄化センター	公共施設用地	1	1	1
1	1.1	□	公共空地	1	1	0
4	1.1	□	公共空地	1	1	0
6	2.0	□	公共空地	1	0	1
7	1.4	梶田グラウンド	公共空地	1	0	1
9	1.8	□	公共空地	1	0	1
152	1.8	□	公共空地	1	0	1
151	4.2	みなと運動公園	公共空地	1	0	1
121	5.7	□	その他空地	0	1	1

(6) 廃棄物処理施設の整備実態と評価

東日本大震災では、各市町村における既存の廃棄物処理施設の活用、仮設処理場の設置を進め、自治体で処理しきれない分は県内及び他県と協力し広域処理を選択した。最終的に岩手県・宮城県においては当初の目標である3年以内での処理を達成し、岩手県に至っては平時の県内処理量の14年分相当の廃棄物を同期間に処理した。

南海トラフ巨大の地震、関東地方が大きく被災するケースにおいて、静岡県に要焼却廃棄物145万トン、要埋め立て残物量181万トンの試算となった(施設分布は図4を参照)。

推計方法の改善点があることがわかった。各施設の処理可能量の値が年間処理実績に対して分担率を掛けたもので余裕率を無視する高位処理の場合、処理能力に対して年間処理量が極端に少ないと実際の災害廃棄物処理可能量と乖離してしまう(年間処理量0の場合、処理分担量も0に)。市町村ベースでの試算例として湖西市を対象に推計を行った。湖西市内には一般廃棄物処理施設が2箇所存在したが1つは施設が廃止され、もう1つは焼却施設が休炉しており、湖西市は浜松市西区、南区に焼却業務の大半を事務委託している。この3地域を広域処理体制と見なし推計した。休炉している湖西市環境センターでは定期的な整備が行われて

おり処理施設の機能は保っているため、災害廃棄物処理には使用できると仮定した。浜松市 2 区共に推定処理最大量の大半を一般廃棄物処理に割かれていたため既存施設のみで区内の災害廃棄物を 18 ヶ月以内に処理することは不可能であったため、浜松 2 区の残余分を湖西市環境センターへ搬入した場合を考えて試算したが約 31 万 t の可燃物が残留する結果となった。湖西市と浜松市のように平時から事務手続きを行っている地域では災害後の事務委託も比較的円滑に進むと考えられる。そのため処理地域全体での処理能力が不足する場合でも可能な限り域内での処理を行うことが望ましい。

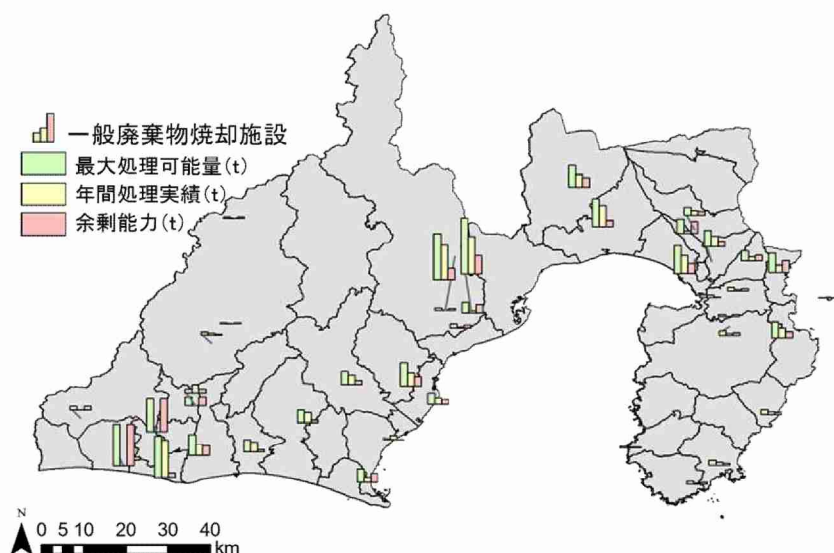


図 4 静岡県における廃棄物焼却施設の整備・運営実態

(7) 地域特性を配慮した特殊廃棄物

地域特性に応じた、地域に特殊な災害廃棄物の量および特性を分析する。愛知県田原市の事例では、豚や鶏による腐敗性廃棄物が地域によって大量発生することが想定され、その処理の方法について詳細に分析する必要があった。また栽培施設は多くが被害を受ける(図5)。田原市では電照菊の栽培などが盛んであることから、津波被害が発生した際には、栽培施設そのものに加え、ランプ、重油の処理などが災害廃棄物として必要となることが分かった。農業機械においても、その被害額は高額におよび、田原市の農業へ多大なる影響を及ぼす恐れを指摘できた(図6)。田原市における農業の事例をはじめ、各地の地域に特徴ある災害廃棄物の処理については、各地域を個別に観察し、現地調査を踏まえながら分析していく必要があると分かった。



図 5 農業集落ごとの栽培施設の被害面積

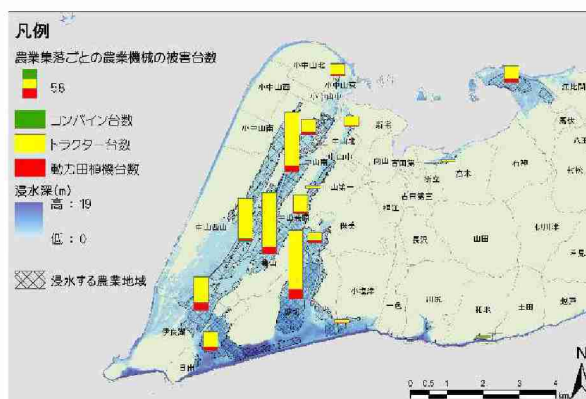


図 6 農業集落ごとの農業機械の被害台数

(8) 高知市での適用結果

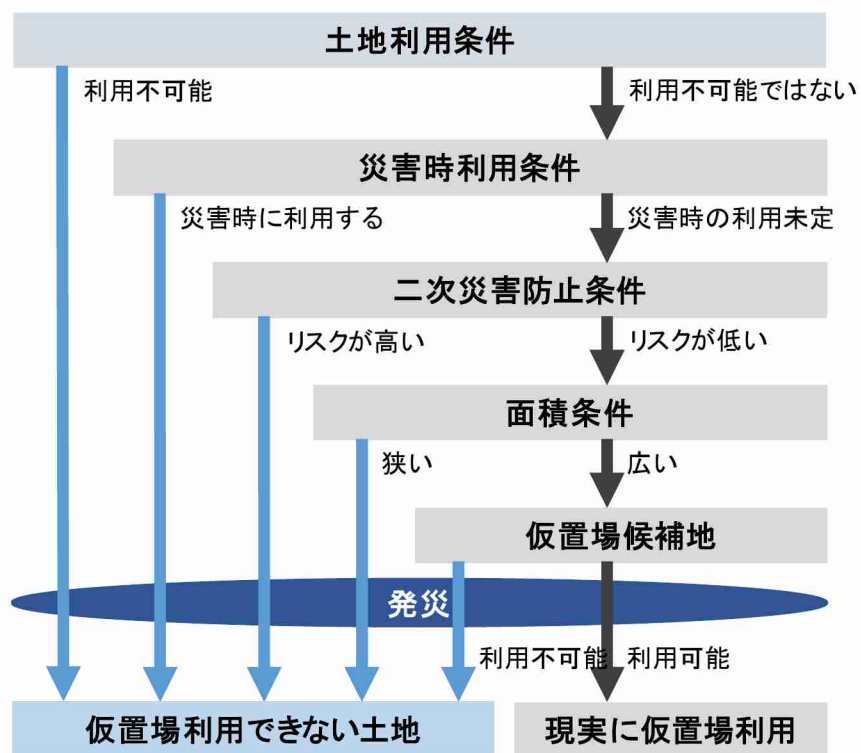


図7 仮置場選定フロー

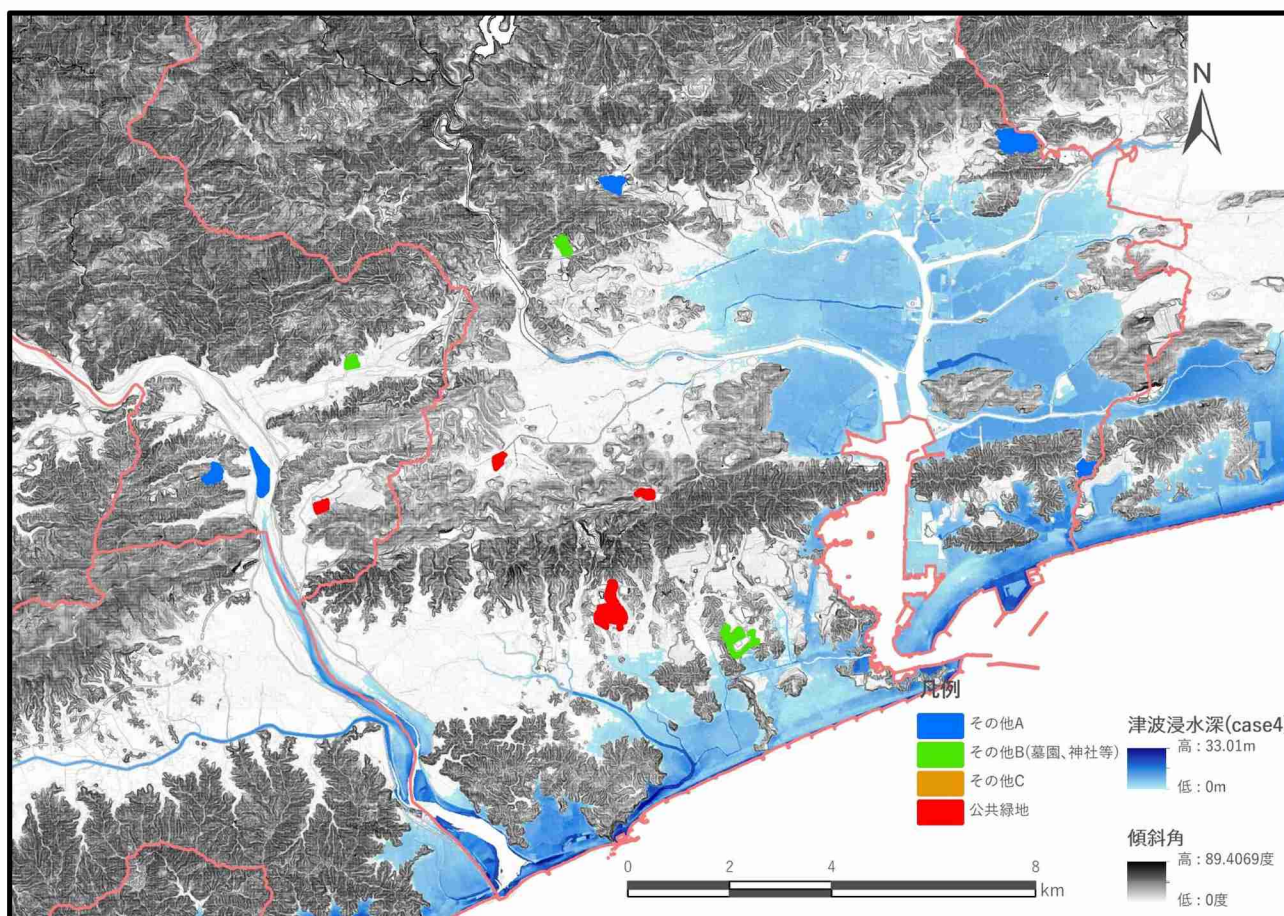


図8 高知市における仮置場選定結果

図 7 が、選定フローであり、これに基づいて、図 8 に示すように高知市における仮置場選定結果を得た。中心市街地は、海岸沿いにはないものの河川を通じた津波浸水深の浸透があり、まとまった公共用地は、その間に立地している。推計結果は、そのような高知市の特徴が反映されているものと認められる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでの適地評価手法に加えて、東北被災地の検証とヒアリングを通して、災害廃棄物の発生と構成において地域性が重要な因子になることがより細やかに明らかにした。災害廃棄物の予測は、地域の自然条件（地形）、社会条件（都市構造、廃棄物の発生分布、特殊廃棄物の有無、適応力（事前復興計画とその内容）に影響されると定めることができた。

また、この手法を複数の地域に適用し、汎用データと簡単な GIS 操作により適切な推計フローで行うことで、上記の地域性を反映した推計ができたことから、地域の特性を踏まえつつ手法の汎用性は確保されることが確認できた。

(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>

汎用データと簡単な GIS 操作によって自治体自身が災害廃棄物発生量の推計と仮置場候補地の選定を可能にすることを確認した。ただし、適用した地域においても選定された候補地では十分ではないケースが多い。そこで、この推計結果をもとに、事前に事務手続き進めて発災時に円滑に候補地選定が進むよう効果的に事前交渉を進める計画を立てることに役立つものと考えられる。

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) Wanglin Yan and William Galloway, Rethinking Resilience: Adaptation and Transformation, Springer: The Netherlands, 396p. (2017)
- 2) 金森貴洋, 巖網林, 集団移転団地における高齢者の徒歩アクセシビリティ評価—東日本大震災における宮城県気仙沼市の事例— SFC Journal, 湘南藤沢学会 16, 152-169 (2016)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 巖網林, 震災レジリエンスと環境共生: 人口減少社会における復興とは, 環境情報科学 Vol. 46(1) 特集解説, 61-66 (2017)

- 2) 厳網林, Rob Roggema, ランドスケープ計画を通じた復興まちづくりの実践, 環境情報科学, 環境情報科学センター 46-1 (2017)
- 3) 厳網林, Rob Roggema, 大場章弘, Luke Middleton, 金森貴洋, 共創型復興まちづくりの実践とレジリエンスの形成 SFC Journal, 湘南藤沢学会 16, 26-59. Invited Paper (2016) . . .

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 横山魁・厳網林, 南海トラフ巨大地震による津波災害廃棄物発生量の推計—静岡県遠州を事例として, 第 19 回環境共生学会学術大会講演集, 立正大学品川キャンパス, 2016 Sep17-18, 日本環境共生学会 (2016)

(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) 越境地域政策研究フォーラム(愛知大三遠南信地域連携研究センター、2017 年 1 月 28 日、愛知大学豊橋校舎)、厳網林・横山 魁・久嶋 悠暉・岡島 拓哉・岸本 慧大:「巨大災害に対する地域脆弱性の評価と事前計画の策定支援—災害廃棄物処理を事例として—」講演
- 2) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか。」(主催: 関西大学、共催: 徳島大学、2017 年 2 月 24 日、グランフロント大阪北館タワーB10 階、ナレッジキャピタルカンファレンスルームタワーB、RoomB 05+06、参加者 95 名) を実施
- 3) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか」(主催: 関西大学、2018 年 1 月 26 日、関西大学梅田キャンパス 8 階、KANDA I Me R I S E ホール 06、参加者 70 名) にて「社会リスク評価を介した震災廃棄物の処理・リサイクル拠点の適地評価」と題して講演
- 4) 越境地域政策研究フォーラム(愛知大三遠南信地域連携研究センター、2018 年 2 月 10 日、愛知大学豊橋校舎、聴講者 20 名)「巨大地震に備える災害廃棄物処理計画」と題して分科会講演、「災害廃棄物計画の実施へ」というテーマでパネルディスカッション参加

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊建産速報(平成 29 年 2 月 28 日、WEB、「関西大学が公開シンポ開く 巨大地震の適応策等議論」)
- 2) 鋼構造ジャーナル(平成 29 年 3 月 6 日、鋼構造出版、12 頁、「巨大地震にどう備えるか」防災関係者 100 名が参加 関大と徳島大の公開シンポ」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。」

Ⅱ- 5 震災廃棄物の環境上適正な資源化技術の開発と評価

[要旨]

震災廃棄物の環境上適正な資源化を図ることを目指し、有効活用の状況について調査するため、学術論文および自治体の報告書などの文献調査、および東日本大震災関係者へのヒアリングを行った。最終処分率は低く抑えることができており、その状況は分別を徹底して行うことのみでは決まらず、廃棄物の種類や品質や処理施設の存在にも影響されていることを確認した。また、利活用の観点から、木くず、処理困難物の取り扱い、分別の徹底などに大きな課題があると考えられる。コンクリートがらの利活用イメージとしては、より手間をかけて粒子径を細かくすれば利活用の機会は増え、特に 40mm で盛土材等の利活用が大きく広がることが整理できた。さらに、震災廃棄物の利活用機会の多い充填材やアップサイクルロック等において、特に問題になる膨張によるひび割れの発生に着目し、基礎実験を行った。実験項目は、還元スラグの物性、環境安全品質および化学成分、還元スラグを使用したモルタルの各種試験、還元スラグ粗骨材を用いた検討である。この結果、膨張性の影響のある物質も、粒子を細かくすることで、膨張の影響や環境への影響を抑制することができるケースもあることがわかった。大量処分する産業副産物についても、使える形態や場所を把握して使用することで、平時から最終処分量を削減して、災害時への余力を蓄積することの重要であることを指摘した。

1. はじめに

南海トラフ巨大地震から発生する震災廃棄物の量は膨大であり、多くを最終処分とすることには限界がある。再資源化率の向上が重要となるが、震災廃棄物を再資源化として利用するには、多くの課題がある。まず、震災廃棄物には、平時の一般廃棄物には多くは含まれない種類の廃棄物が大量に含まれ、その分別が重要となる。東日本大震災においても、この分別をそれぞれの市町で行い、その対応が分かれたものもある。資源化率を高めるための分別のあり方を知る必要がある。また、有害成分の混入や物性への影響などが課題となる。特に、利用可能性の高い充填材やアップサイクルロック等においても問題となる膨張性については、不明の点も多い。そこで、震災廃棄物を用いたコンクリートの膨張性に関する性質とそれを抑える手法について明らかにする必要がある。これにより、資源化率を高め、膨大に発生する廃棄物を環境上適正に処理するとともに、平時からの対応にも示唆を得ることも重要である。

2. 研究開発目的

これらの背景を踏まえた震災廃棄物の再資源化対策を明確にするために、本研究は、次の点を目的とする。

- ・東日本大震災および阪神大震災等の大地震の際に行われた震災廃棄物の処理、有効活用の事例の収集と整理、類型化を行う。
- ・震災廃棄物の種類別の適地資材利用を目指したリサイクル技術の開発を行うために震災廃棄物と想定した材料について実験を行い、その性質を明らかにする。
- ・それらを基に、巨大地震時の震災廃棄物の効率的な適正処理を行うことに寄与することを目指して検討を行う。

3. 研究開発方法

(1) 震災廃棄物の処理、有効活用の事例の収集と整理

調査対象は震災関連のシンポジウム、コンクリート工学年次論文集、セメント・コンクリート論文集、廃棄物資源循環学会関連論文集、各震災に関連する自治体等の報告書等の出版物^{1)~7)}とし、東日本大震災にか

かわった関係者へのヒアリングも実施した。抽出した内容としては、廃棄物の種類、処理方法および状況、再利用状況、問題点等とした。

（２）震災廃棄物の適地資材利用を目指したリサイクル技術開発の基礎実験

① 実験概要

震災廃棄物を充填材やアップサイクルブロック等に有効利用する際に問題となるのは、低密度の廃棄物、収縮が大きい廃棄物、有害物質を含む廃棄物、膨張性を有する廃棄物等である。ここでは、有効利用後に膨張によるひび割れの発生や有害物の溶出に影響が大きいと考えられる膨張性を有する廃棄物^{8),9)}に着目した。使用したのは、密度は大きい、膨張性を有するためにコンクリート用骨材としても JIS に定められていない電気炉還元スラグである。ここでは、電気炉還元スラグの膨張性や環境への影響を明確にすることを試みた。

② 使用材料

使用した主な材料は、図 1～3 に示す電気炉還元スラグと鋳物灰とした。その他に、火力発電所から排出されるフライアッシュも使用した。それぞれを微粉末、細骨材(5 mm以下)として使用した。蛍石は、製鋼過程における溶鋼からの不純物除去のために使用するが、ふっ素を多く含むため、健康・環境問題上課題となっている材料である。



図 1 電気炉還元スラグ
(蛍石使用なし)



図 2 電気炉還元スラグ
(蛍石使用あり)



図 3 鋳物灰

③ 検討項目および試験方法

試験内容として、還元スラグの物性、環境安全品質、化学成分の調査および還元スラグを使用したモルタル、コンクリートの強度、長さ変化、膨張性の調査を行った。なお、鋳物灰とフライアッシュは、還元スラグの膨張性を制御する材料として使用した。

1) 還元スラグの物性

還元スラグの密度試験は、コンクリート用骨材の密度試験方法を用い、アルカリシリカ反応性については JIS A 1145 の化学法を用い、膨張性については鉄鋼スラグ水和固化体に適用されている粉化率試験を用いて検討した。

2) 環境安全品質および化学成分

還元スラグの環境安全品質と化学成分については、同種スラグである電気炉酸化スラグの JIS A 5011-4 にしたがって、試験を行った。

3) 還元スラグを使用したモルタルの各種試験

モルタルの強度および長さ試験については、JIS R 5201 のセメントの強さ試験、JIS A 1129-3 の長さ試験方法に準じて行った。膨張性試験については JIS A 6202 の膨張材の膨張性試験に準じて行った。

4. 結果及び考察

(1) 震災廃棄物の処理、有効活用の事例の収集と整理

① 震災廃棄物の処理分別例

まず、震災廃棄物の処理分別例として、主に二次仮置き場における分別例を表1に示す。分別処理をすることが有効活用につながることは各方面で報告されており、各処理区においてどのような分類を行ったかを各地方自治体の報告書^{1)~6)}から抽出したものである。表中の○は分類の実績があったものを示し、△は明確には分類していないが、一般には「その他」としてまとめられているものを示している。

大きな分類としては、そこまで大きな違いはないが、被害の程度や震災廃棄物の種類によって若干異なっている。また、最終処分率に着目してみると、およそ0.5%~2.7%となっており、分別の徹底により最終処分率を低く抑えることができている。これは単に分別を細かくしたかどうかだけでは決まらず、廃棄物の種類や品質、処理施設の存在や設備にも影響されている。

表1 震災廃棄物の処理分別例

	岩手県	気仙沼	南三陸	石巻	名取	岩沼	亶理	山元	仙台市	福島県	宮城県東部	多賀城市
柱材・角材	○											
木くず		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
可燃物	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
不燃系廃棄物	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
津波堆積土	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
コンクリートがら	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
アスファルトくず		○	○	○	○	○	○	○	○		○	
金属くず	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
漁具・漁網	○		○	△	△	○						
腐敗性廃棄物		○										
家電・自動車・船舶		○			△				○	○		
危険物・有害物等					△							○
その他	○	○		△	△	○			○		○	○

次に、震災廃棄物の処理分別について、東日本大震災と他の代表的な地震と比較したのが表2である。

表2 震災廃棄物の処理分別に関する東日本大震災と他の地震との比較

東日本大震災	阪神大震災	新潟中越地震	熊本地震
柱材・角材		廃木材	石こうボード
木くず	木くず	木くず	木くず
可燃物	可燃物	可燃ごみ・粗大ごみ	紙くず
不燃系廃棄物	不燃物	不燃ごみ・粗大ごみ	混合廃棄物
津波堆積土			
コンクリートがら	コンクリートがら	コンクリートがら	コンクリート片
アスファルトくず		石こうボード	
金属くず	金属くず	金属くず	金属くず
漁具・漁網		廃プラスチック	
腐敗性廃棄物		ガラス・陶磁器	
家電・自動車・船舶		廃家電	
危険物・有害物等		壁土	石綿含有物
その他	その他	その他(残渣等)	その他
総量;2,300万トン	総量;1,450万トン	総量;15万トン	総量;289万トン

表より、木くずや可燃物、不燃物、コンクリートがら、金属くず等の分類は他の地震においても見られ、一般的な分別であることがわかる。その他の分類がそれぞれの地震の特徴や地域性を示すものとなっている。東日本大震災や新潟中越地震では、かなり細かく分別しているが、阪神大震災や熊本地震ではそれほど細かい分別は行われていないことがわかる。また、東日本大震災と阪神大震災を再生利用率⁷⁾という観点で見ると、阪神大震災の場合は、38%が再生利用されたことになっている。これは大規模な処分場あるいは埋立の計画があったことが大きく、東日本大震災では82%の再生利用率であり、これには大規模処分場がなかったことや木くずリサイクルの受け皿が増加したこと、焼却灰の造粒固化あるいは不溶化处理技術の進歩、建設リサイクル法の施行も影響していると考えられる。このように時代背景の変化も再生利用率に影響を与えていることがわかる。

② 利活用の用途

例えばコンクリートがらは、かなり多くの量が発生するわけであるが、破碎をして路盤材、盛土材、裏込材に使うという例が多くなっている。例として、津波堆積土と混合して盛土材、裏込材として活用したケースやコンクリート用の再生骨材としてプレキャストコンクリート製品や港湾用のブロックに使った事例がある。また、どの程度の量が使われているかということで言うと、仙台市の例ではコンクリートがらは、総量が61万t発生したものの、そのうち10万9,000t、それから津波堆積土が130万t発生したものの、そのうち28万4,000tをコンクリートがらと津波堆積土、30対70の重量比で混ぜて盛土材に使った事例もある。また、東日本大震災で特徴的であった津波堆積土については、埋め戻し材、盛土材などの土木資材に使った事例、それから組成と性質によっては最終処分をしたり海洋投入したりということがあっても、やはりコンクリートがらと混合させて土質改良をしたり、そのまま盛土材で使うようでは使用量が少ないということで、単一のもので使うというよりは使えるように何かと混ぜて使うというようなケースが多いということになっている。さらに、ふるい下残渣というものの、これは木くずなどの有機物が混入していて強熱減量が10%を超えることでとても品質が低下しているようなものになる。このようなものは植林基盤とか緑化基盤材、アップサイクルブロック、高度洗浄分別に使えて、事例としては岩沼市の千年希望の丘、ここで植林基盤としてコンクリートがらや津波堆積物などと混合利用したり、亶理の処理区ではアップサイクルブロック1.9万t、1万9,000個のブロックに使用したりした例がある。ただし、課題として、やはり品質が安定しないということもあり、コンクリートに使用したとしても、静弾性係数が低下したり耐凍害性が課題になったりすることも生じるということである。

③ 課題および問題点

1) 木くず

柱材や角材は、使えるものはそのまま利用しようとするが、どうしても土砂が混合していたり腐食による品質低下があると、ボイラー燃料用かチップへの利用が多くなるということになる。また地域によってはサーマルリサイクルも考えられる。ただし、土砂をふるい落とすという過程が必要になるので、フィンガースクリーンやトロンメルが必要になり、そのような施設導入の問題、あるいは経費の問題が生じる。

2) 処理困難物

処理困難物としては、農薬薬品を含有した津波堆積物や電線、電柱、水産廃棄物、動産、庭石、地中構造物等がある。それから、焼却飛灰、不燃残渣、石膏ボード、漁網、石綿含有物、これらをできるだけ処分しなくて済むような技術が期待されるところでもある。

3) 分別

分ければ資源ということは各地で叫ばれていたことで、選別を徹底することによってリサイクル処理が促進されることが示されている。特に、事例として東松島市ではローラー方式手選別の効率が良かったと報告

されており、ベルトコンベア様式と比べてメリットが多いという報告もある。また、振動式風力選別機、ジャンピングスクリーン、高精度自動選別装置、比重差選別機システムのような高度なシステムを使ってより多くを選別して分別していくという事例もある。

4) ヒアリングの結果

東北大の久田教授にヒアリングを行った結果、コンクリート瓦礫と津波堆積土の混合利用が有効だということが分かり、それを促進しようとしたが、工事で使用するタイミングの調整が非常に難しいこと、さらにコンクリート瓦礫は、コンクリート骨材として使用するというをまず考えたが、盛土材や路盤材、嵩上げ材としての利用が最終的には多かったことが明らかとなった。これは、復旧工事の順序により、盛土や嵩上げ工事が先行して行われるため、そちらに多く流れてしまうということによるもので、そのような想定や保管も重要となる。さらに、資材化したものは復旧工事で使用することを想定して、できるだけ工事現場に近い場所に保管するべきであり、できるだけ遠くに運ばず近くにあるものを使うということが現実だからであるということが明らかになり、これらのことも今後の課題として考慮しておくべきことと言える。

④ 利活用イメージ

図4に前述の調査結果を踏まえた震災廃棄物の利活用イメージを示す。粒子径が大きなものから、細かく砕いていく過程で用途が変化していくことがわかる。充填材、路盤材、盛土材、プレキャストコンクリート製品、かさ上げ基礎材、アップサイクルブロックなどそれぞれに適正な粒子径が存在し、その中に津波堆積物や主灰の造粒固化物も適用可能である。このような粒子径と用途との関係を念頭において、計画を立てることが震災時に有効になると考えられる。

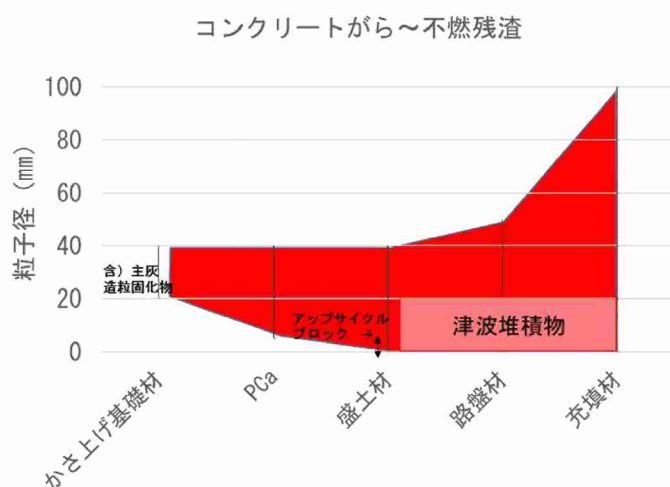


図4 震災廃棄物の利活用イメージ

また、(3) 4)にも記載したように、復旧工事の順序により、盛土や嵩上げ工事が先行して行われることを想定して、40 mm以下程度の使用が早期に多くなることを考えておくことも重要である。

(2) 震災廃棄物の適地資材利用を目指したリサイクル技術開発の基礎実験

① 還元スラグの物性

還元スラグの絶乾密度は、骨材粒で 3.06g/cm^3 、微粉末で 2.59g/cm^3 であり、骨材としての密度は天然の骨材と比較すると15～20%程度大きいこととなる。アルカリシリカ反応性については、表3に示すように「無害である」という結果が得られた。よって、還元スラグの膨張性に加えてコンクリート材料として使用する場合に、さらにアルカリシリカ反応による膨張が発生する恐れは低いと判断される。表4に還元スラグの粉化率試験の結果を、比較例として転炉スラグや碎石・川砂の値も併記して示す。表4よりわかるように、還元スラグの粉化率は転炉スラグよりは小さいが、碎石・川砂と比較すると十分大きいものであり、膨張性を有することがわかる。また、傾向としては粒子径が大きい方ほど膨張性が大きくなっていることがわかる。

表3 電気炉還元スラグのアルカリシリカ反応性試験の結果

		アルカリ濃度減少量 (Rc) mmol/L	溶解シリカ量 (Sc) mmol/L	判定
蛍石なし (2015 年)	No. 1	44	2	無害
	No. 2	40	2	
	No. 3	38	2	
	平均	41	2	
蛍石あり (2015 年)	No. 1	93	1	無害
	No. 2	89	2	
	No. 3	89	1	
	平均	90	1	
蛍石なし (2016 年)	No. 1	49	1	無害
	No. 2	49	0	
	No. 3	48	1	
	平均	49	1	
蛍石あり (2016 年)	No. 1	110	3	無害
	No. 2	107	2	
	No. 3	111	3	
	平均	109	3	
蛍石なし (2017 年)	No. 1	140	1	無害
	No. 2	135	1	
	No. 3	137	1	
	平均	137	1	
電気炉酸 化スラグ (2017 年)	No. 1	24	1	無害
	No. 2	26	1	
	No. 3	25	1	
	平均	25	1	
判定基準	a)溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 以上で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の範囲では、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 未満となる場合、その骨材を無害と判定し、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 以上となる場合、その骨材を無害でないと判定する。 b)溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 未満でアルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の場合、その骨材を無害と判定する。 c)アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 以上の場合は判定しない。			

表 4 電気炉還元スラグの粉化率試験結果

粒子径	10~ 20 mm	5~ 10 mm	2.5~ 5 mm
蛍石なし (2015 年)	1.57	0.43	0.42
蛍石なし (2016 年)	4.72	3.36	2.76
蛍石あり (2015 年)	1.70	0.57	0.82
蛍石あり (2016 年)	3.61	3.46	3.77
転炉スラグ (2015 年)	24.8	19.3	17.2
碎石・川砂	ほぼ 0	ほぼ 0	ほぼ 0

② 環境安全品質および化学成分

環境安全品質について、還元スラグそのものにおける含有量の分析結果を表 5 に、溶出量の分析結果を表 6 に示す。試験方法と分析項目は、含有量試験では JIS K 0058-2 スラグ類の化学物質試験方法- 第 2 部：含有量試験方法に従い、カドミウム、鉛、六価クロム、ひ素、水銀、セレン、ふっ素、ほう素について分析を行った。溶出量試験では、JIS K 0058-1 スラグ類の化学物質試験方法- 第 1 部：溶出量試験方法に従い、含有量試験と同様に 8 項目について分析を行った。表中の「JIS 基準値」は、JIS A 5011-4 電気炉酸化スラグ骨材に関する値である。含有量および溶出量のいずれにおいても、ふっ素が JIS 基準量を上回っており、注意が必要である。また、電気炉酸化スラグと比較すると、電気炉酸化スラグの場合のふっ素の含有量は 850mg/kg、ほう素の含有量は 240mg/kg、ふっ素の溶出量は 0.73mg/kg、ほう素の溶出量は 0.5mg/kg であり、電気炉還元スラグは電気炉酸化スラグと比較して、含有量も溶出量も大きいことがわかる。さらに、表 7 にモルタル中の含有量の測定結果を示し、表 8 にモルタルからの溶出量の測定結果について示す。環境安全品質には、ほかにも分析項目があるが、最も危惧される 3 項目を選定して分析を行った。表より、ふっ素とほう素の含有が検出され、蛍石を使用していない場合 (RSP) より使用した場合 (FRSP) にふっ素の含有量が増えているが、すべての検出値は基準量以下である。溶出量についても、ふっ素だけが検出されているが、いずれも基準量以下であり、セメント固化により有害物質の溶出も抑制されていることがわかる。

表 5 電気炉還元スラグの含有量測定結果 (単位 : mg/kg)

分析項目	蛍石なし (2015 年)	蛍石なし (2017 年)	蛍石あり (2015 年)	定量下限値	JIS 基準値
カドミウム	<0.3	<0.3	<0.3	0.3	150 以下
鉛	2.4	<0.5	1.7	0.5	150 以下
六価クロム	<0.6	<0.6	<0.6	0.6	250 以下
ひ素	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	150 以下
水銀	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	15 以下
セレン	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	150 以下
ふっ素	14000	25000	25000	1	4000 以下
ほう素	780	980	930	3	4000 以下

表 6 電気炉還元スラグの溶出量測定結果 (単位: mg/kg)

分析項目	蛍石なし(2015 年)	蛍石なし(2017 年)	蛍石あり(2015 年)	定量下限値	JIS 基準値
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.01 以下
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.01 以下
六価クロム	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	0.05 以下
ひ素	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.01 以下
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005	0.0005 以下
セレン	<0.001	0.008	<0.001	0.001	0.01 以下
ふっ素	18	11	10	0.01	0.8 以下
ほう素	0.009	0.6	0.093	0.001	1 以下

表 7 電気炉還元スラグ微粉末を使用したモルタル中の含有量 (単位: mg/kg)

分析項目	プレーン	蛍石なし(2015 年)	蛍石あり(2015 年)	定量下限値	基準量
セレン	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	150 以下
ふっ素	210	1400	3500	1	4000 以下
ほう素	32	81	120	3	4000 以下

表 8 電気炉還元スラグ微粉末を使用したモルタルからの溶出量 (単位: mg/L)

分析項目	プレーン	蛍石なし(2015 年)	蛍石あり(2015 年)	定量下限値	基準量
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.01 以下
ふっ素	0.17	0.66	0.50	0.08	0.8 以下
ほう素	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	1 以下

還元スラグの化学成分について調べた結果を示したものが表 9 である。分析方法は、JIS A 5011-4 コンクリート用スラグ骨材- 第 4 部: 電気炉酸化スラグ骨材 附属書 A (規定) 電気炉酸化スラグ骨材の化学成分分析方法に準じて行い、酸化カルシウムは附属書 A の「A.6.4 ICP 発光分光分析法」、二酸化けい素は附属書 A の「A.7.2 二酸化けい素重量法」、酸化マグネシウムは附属書 A の「A.8.3 ICP 発光分光分析法」、全鉄は附属書 A の「A.9.4 ICP 発光分光分析法」で測定した。比較として、JIS A 5011-4 に定められる電気炉酸化スラグの値も示した。JIS 規定値は、電気炉酸化スラグについて定められている値であり、CaO と FeO については、その規定値以上の値が見られる。また、塩基度が 2.0 を上回ると膨張性が高いことを示すと言われており、電気炉酸化スラグと比較してもかなり大きく、還元スラグの膨張性が大きいことがわかる。ただし、電気炉酸化スラグは膨張性を抑制するためのエージングを適用した場合の値となっている。

表 9 還元スラグの化学成分

	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	全鉄 FeO (%)	塩基度 (CaO/SiO ₂)
蛍石なし (2015 年)	51.8	22.7	4.7	2.1	2.28
蛍石なし (2016 年)	49.2	23.4	4.9	1.7	2.10
蛍石あり (2015 年)	54.3	25.4	5.5	2.2	2.14
蛍石あり (2016 年)	52.0	23.0	4.1	0.9	2.26
蛍石あり (2017 年)	51.1	26.2	5.3	0.4	1.95
電気炉酸化スラグ	25.8	17.4	7.0	23.9	1.48
JIS 規定値	40.0 以下	-	50.0 以下	2.0 以下	

③ 還元スラグを使用したモルタルの各種試験

1) 還元スラグ微粉末を用いた検討

1) モルタルの配合

モルタルの配合については、表 10 を用いて行った。配合は、要求される強度が比較的低い消波ブロックや根固めブロック製品としての利用を見据え配合を設定した。還元スラグは、0.6 mm以下の微粉末状 (RSP と FRSP) として使用した。微粉末はコンクリート用混和材の位置付けで、セメント質量に対して 25%を置換したもの (RSP25 と FRSP25)、さらにフライアッシュを 25%置換したもの (RSP25F25 と FRSP25F25)、鋳物灰も 25%置換したもの (RSP25A25 と FRSP25A25)、比較としてプレーンモルタル (N) を使用した。目標空気量は 1%とし、目標フロー200±10 mm、石膏は還元スラグ質量の 5%量を使用した。

表 10 モルタルの配合 (セメント置換)

配合名	単位量(kg/m ³)								
	W/B	W	C	RSP	FRSP	Ash	FA	石膏	S
N	50	300	600	0	0	0	0	0	1292
RSP25F25			300	150		0	150	8	1234
RSP25A25							150		0
RSP25			450	0	0	1283			
FRSP25F25			300	0	150	150	1211		
FRSP25A25						150	0		1257
FRSP25			450		0		1260		

2) 試験項目

モルタルの試験においては、モルタルの強度試験と長さ変化試験を行った。

3) 試験結果および考察

図 5 と図 6 にモルタル供試体の曲げ強度、圧縮強度試験の結果を示す。図から明らかなように、RSP と FRSP をセメント置換した場合に、N には及ばないもののある程度の強度発現がみられることから、CaO による結合材としての機能が發揮されていることがわかる。膨張抑制のために鋳物廃砂とフライアッシュを使用した場合には、セメント分の減少による強度低下が明らかであり、強度低下を避けるためにはセメント内割ではなく、外割で使用する必要がある。ただし、このような状況でも圧縮強度で 10N/mm² 程度は発現していることから、捨てコンクリートや充填材などでの使用は十分可能であり、ふっ素の溶出抑制には効果がある可能性がうかがえる。

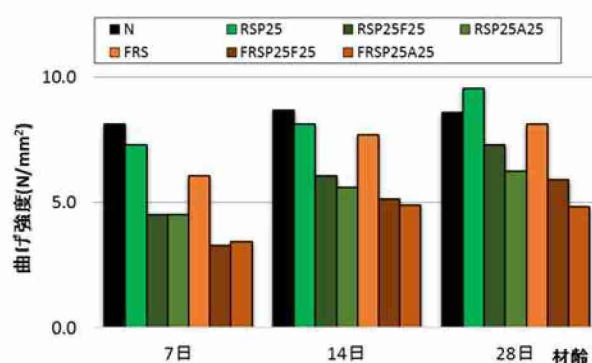


図5 曲げ強度試験の結果

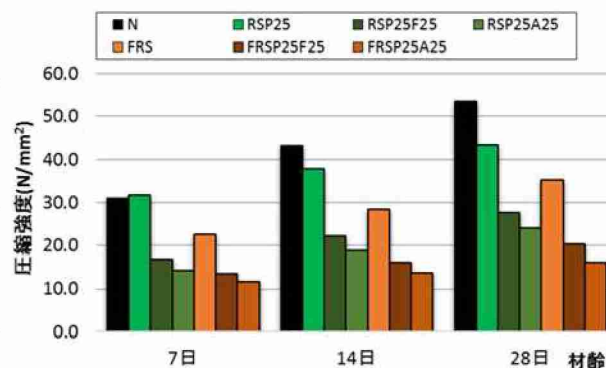


図6 圧縮強度試験の結果

還元スラグ微粉末をセメントに置換して用いた場合、スラグ微粉末自体の膨張性が小さくなることから、モルタルの膨張も小さかった。よって、膨張性のある材料でもより細かい粒子径にして使用すると、膨張が発現しにくいことがうかがわれる。

2) 還元スラグ細骨材を用いた検討

1) モルタルの配合

モルタルの配合については、表 11 を用いて行った。還元スラグは、5 mm以下の細骨材微粉末状（RS と FRS）として使用した。還元スラグ細骨材は骨材として、細骨材体積に対して 10%を置換したもの（RS10 と FRS10）、さらにフライアッシュを 10%置換したもの（RS10F10 と FRS10F10）、鋳物灰も 10%置換したもの（RS10A10 と FRS10A10）、比較としてプレーンモルタル（N）を使用した。目標空気量は 1%とし、石膏は還元スラグ質量の 5%量を使用した。

表 11 モルタルの配合（細骨材置換）

配合名	単位量 (kg/m ²)									
	W/C	S/C	W	C	RS	FRS	Ash	FA	石膏	S
N	50	2.2	300	600	0	0	0	0	8	1294
RS10F10		1.7			142		0	113		1036
RS10A10								154		0
RS10		1.9			0	130	0	113		1036
FRS10F10		1.7					154	0		1166
FRS10A10										
FRS10		1.9								

2) 試験項目

モルタルの試験においては、モルタルの強度試験と長さ変化試験を行った。

3) 試験結果および考察

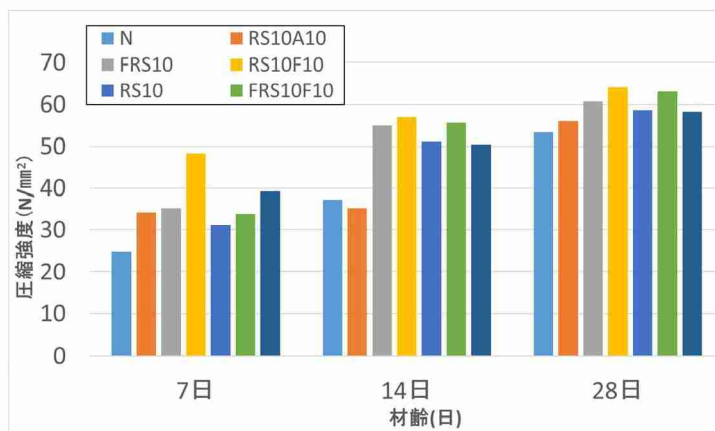


図7 モルタルの圧縮強度試験結果

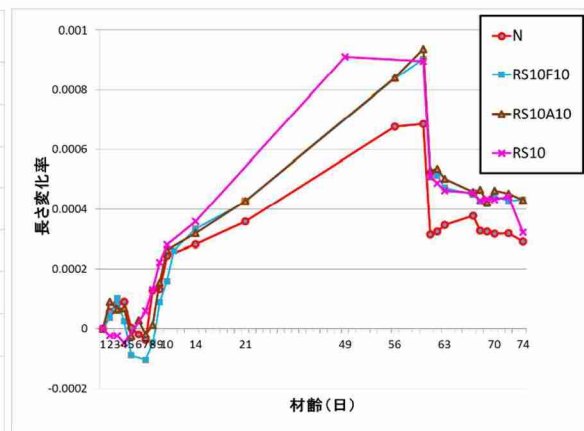


図8 モルタルの長さ変化試験結果

図7に圧縮強度試験結果を示す。還元スラグをセメントに置換するのではなく、細骨材に置換することで強度低下なく、プレーンモルタルより高い強度発現を可能にすることができた。モルタル供試体において、大きな膨張が発生することになれば、圧縮強度は低下することが考えられ、強度低下が生じていないことから、大きな膨張は発生していないことが推測できる。

図8に長さ変化試験の結果を示す。材齢7日までは水中に浸漬し、それ以降、室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で測定を行い、材齢60日で水分供給のため再度水中に浸漬して、測定の際には気中に出して測定を行った。縦軸の長さ変化は、+方向が収縮、-方向が膨張を示しており、RS10は初期の水中浸漬時に膨張を示しているが、材齢が経過するとプレーン（N）よりも大きな収縮を示しており、還元スラグの膨張が顕在化していないことがわかる。

3) 還元スラグ粗骨材を用いた検討

1) コンクリートの配合

コンクリートの配合については、W/C60%として、プレーンのN、粗骨材質量のうち20%を電気炉還元スラグ粗骨材に置換したRS20、同様に40%置換したRS40、膨張抑制対策にフライアッシュをセメント質量の20%使用したRS20FA20とRS40FA20、鋳物灰をセメント質量の20%使用したRS20A20、RS40A20の7配合を用いた。電気炉還元スラグは、蛍石を使用していないスラグで5mm～20mmの粗骨材として使用した。スランブは8±2.5cm、目標空気量は5.0%とした。

2) 試験項目

コンクリートの試験においては、コンクリートの強度試験と長さ変化試験を行った。

3) 試験結果および考察

図9にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。電気炉還元スラグを使用しても、Nと比較して強度低下は認められておらず、フライアッシュや鋳物灰を使用した場合においてもセメント置換しているにも関わらず強度低下は発生していない。よって、鋳物灰には結合材に近い効果があることがわかる。

図10にコンクリートの長さ変化試験の結果を示す。縦軸は収縮ひずみであるが、マイナスとなっているので膨張を示すことになる。Nと比較して明らかに電気炉還元スラグを使用した場合に、膨張傾向が顕著になっている。よって、粉体や細骨材と比較して粗骨材のように粒子が大きくなると膨張傾向が顕著になることがわかる。ただし、今回の試験の範囲ではフライアッシュや鋳物灰の膨張抑制効果は明確にできなかった。

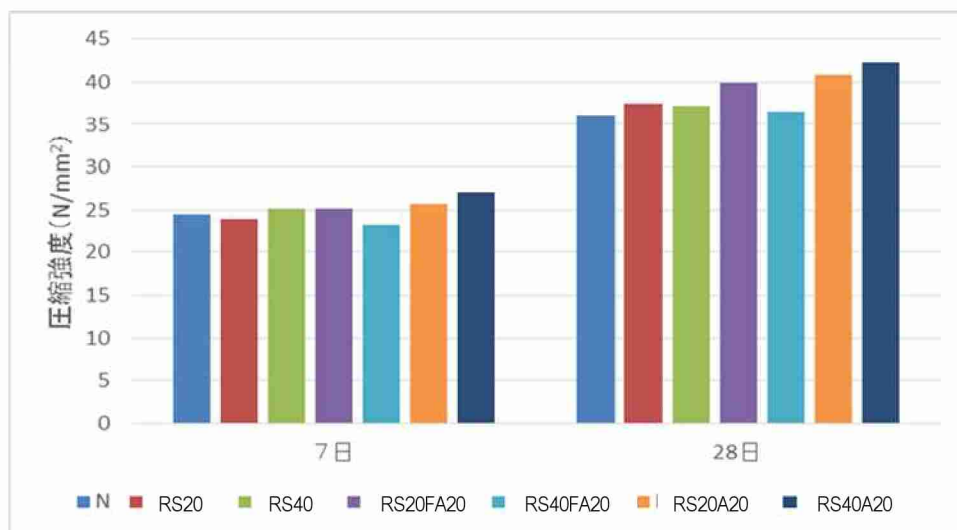


図9 コンクリートの圧縮強度試験結果

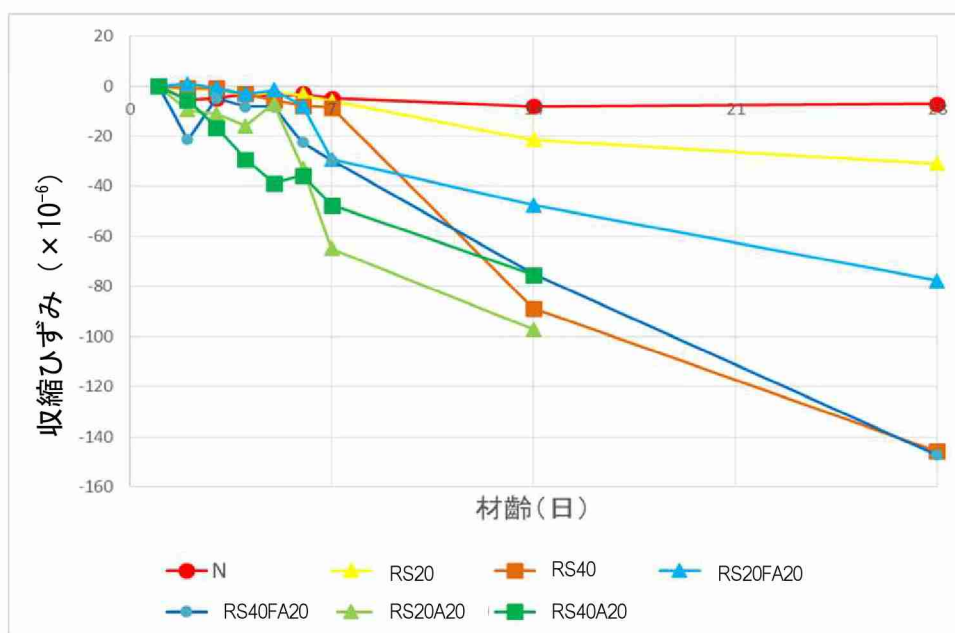


図10 コンクリートの長さ変化試験結果

以上のことから、次のようなことが明らかとなった。

- ・電気炉還元スラグの膨張性は、転炉スラグより小さいが、化学成分分析より電気炉酸化スラグと比較して遊離石灰量が多く、膨張性が高いと言える。
- ・電気炉還元スラグのアルカリシリカ反応性は、無害である。
- ・電気炉還元スラグの環境安全品質は、蛍石を使用した場合、ふっ素含有量が大きくなるが、セメント固化で安全性が向上する。
- ・電気炉還元スラグは細かい粒子にすることで、膨張の悪影響を抑制することができる可能性が高い。
- ・電気炉還元スラグを使用したモルタルの強度は、セメント置換で強度低下が発生するが、捨てコンや充填材としては十分であり、細骨材置換では、強度低下は発生していない。粗骨材としてコンクリートに使用する場合には大きな強度低下は認められなかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

以下に、本検討の範囲における知見をまとめる。

- 1) 仮置き場等の土地が確保できれば、分別を細かくして、選別等の徹底を行うことでリサイクル処理促進につながる。
- 2) 有効な利活用には、廃棄物の品質、粒子径、破碎・選別の処理、設備、復興資材としての利用のタイミングが関係してくるので、それらに配慮した計画が有効である。
- 3) 一般廃棄物処理施設、最終処分場、中間処理施設、民間処理施設の組合せで有効な処理が可能となることうかがえる。よって、地域における廃棄物処分等の現有設備の調査が重要であると考えられる。
- 4) 膨張性の影響のある物質も、粒子を細かくすることで、膨張の影響や環境への影響を抑制することができるケースもある。このように現時点で、大量に処分をしている産業副産物についても、使える形態や使える場所に使用することで、平時から最終処分量を削減して、災害時への余力を蓄えておくことも重要である。

(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) 再資源化活用先として充填材や路盤材は多くの利活用が見込めるが、津波堆積物の活用先であることから、粒子径を小さくし 40mm 程度にすると、盛土材やかさ上げ基礎材などに使えることになる。2 次仮置き場では、1 次仮置き場と比較すれば留め置く時間を確保することができるので、粒子径を細かくする過程を盛り込んだ処理計画が重要となる。
- 2) 震災廃棄物を利活用する際に懸念される膨張性については、粒子径を小さくすることで、その影響を抑えられる。平時において産業副産物の処理を進めておくことで、発災時の処理の余裕を確保し、粒子径を細かくして利活用の可能性を広げる取り組みが求められる。

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）>

特に記載すべき事項はない。

<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）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(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) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか。」(主催：関西大学、共催：徳島大学、2017年2月24日、グランフロント大阪北館タワーB10階、ナレッジキャピタルカンファレンスルームタワーB、RoomB05+06、参加者95名)を実施
- 2) 公開シンポジウム「われわれは巨大地震にどう備えどう向き合うべきか」(主催：関西大学、2018年1月26日、関西大学梅田キャンパス8階、KANDAI MeRISEホール06、参加者70名)にて「震災廃棄物の環境上の世知な資源化技術の開発と評価」と題して講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日刊建産速報(平成29年2月28日、WEB、「関西大学が公開シンポ開く 巨大地震の適応策等議論」)
- 2) 鋼構造ジャーナル(平成29年3月6日、鋼構造出版、12頁、「巨大地震にどう備えるか」防災関係者100名が参加 関大と徳島大の公開シンポ)。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 環境省東北地方環境事務所，一般財団法人 日本環境衛生センター；東日本大震災により発生した被災3県（岩手県・宮城県・福島県）における災害廃棄物等の処理の記録，2014.9
- 2) 宮城県環境生活部震災廃棄物対策課；災害廃棄物処理業務の記録＜宮城県＞，2014.7
- 3) 名取市；東日本大震災名取市の記録，2014.10
- 4) 国土交通省総合政策局鋼橋事業企画調整課環境・リサイクル企画室；災害廃棄物等処理・活用事例集，2015.2
- 5) 岩手県；東日本大震災津波により発生した災害廃棄物の岩手県における処理の記録，2015.2
- 6) 公益社団法人 地盤工学会；災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言－解説－，2014.3
- 7) 災害廃棄物処理に係る阪神・淡路大震災20年検証委員会；災害廃棄物処理に係る阪神・淡路大震災20年の検証，2015.3
- 8) 桑山忠，山田優，小林繁；電気炉還元スラグの膨張安定性の評価，第26回土質工学研究発表会概要集，pp.1907 - 1908，1991
- 9) 桑山忠，山田優，小林繁，本多淳裕，三瀬貞；電気炉還元スラグの吸水膨張と安定化処理，材料，第459号，pp.29- 35，1991

Ⅲ. 英文 Abstract

Assessment of Sustainable Adaptation Measures to Manage Disaster Waste from Great Earthquake against Related Social Risks

Principal Investigator: Keiichi KITAZUME
Institution: Department of Civil, Environmental and Applied Systems
Engineering, Kansai University
3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680, JAPAN
Tel: +81-6-6368-0892 / Fax: +81-6-6330-3770
E-mail: kitazume@kansai-u.ac.jp

Cooperated by: Keio University

[Abstract]

Key Words: Disaster waste and debris, Disaster waste disposal plan, Resilience, Social risk, Adaptation, Process model

It is predicted that a great earthquake will occur along the Nankai Trough and Great Tsunami will strike seacoast areas at approximately 80% probability within 30 years. On the other hand, the areas include not only metropolitan areas but also small towns and will be projected to reduce the population.

The current research aims are as follows. (1) To categorize municipalities from the viewpoints such as population size, urban structure and dominant industry type, and suggest adequate disaster waste management measures according to the category. (2) To develop models which are able to evaluate the amount of debris and waste by a grid on geographic information system (GIS), and also to simulate transportation of waste and debris under the condition of dynamic amount of them and fluctuating road networks. (3) To plan scenarios for the collaboration of municipalities and other institutions, and develop some technologies for higher performance of recycling debris and waste. (4) to propose strategic and resilient policy measures which are able to improve the level of recycle and reduce emissions by treating them both before and after earthquake.

The experiences of the Great Hanshin-Awaji and the Great East Japan earthquake followed by the Kumamoto earthquakes are carefully referred by field surveys and hearing to municipal staffs. The referred information and statistics are used to develop the model and simulation on the case-study cities.

The results of this research are as follows. (1) The categorization especially by two different phases on urbanized and low-used area, and population size and urban structure are key factors to allocate adequate policy measures of treating debris and waste. (2) The evaluation model of waste keeps error within 10% and can indicate the difference in amount of debris between urban and rural area. (3) The transportation model can present dynamic situation of transporting debris and waste on GIS for frequent revise of transportation plan. (4) The model can also indicate the candidate sites of facilities to treat debris and waste considering many conditions such as land use at ordinary times and a time of emergency and required area, and is applied to case-study cities. (5) Available cases of recycle are allocated in a table to understand availability of the kind of debris and waste. In addition, experiments of concrete materials indicate that the size of particle is key factor to select a recycle method.