

東日本大震災で発生した災害廃棄物の広域処理に関する一考察（第一報） —費用と処理期間の低減効果—

独立行政法人国立環境研究所 加用千裕、石垣智基、山田正人、大迫政浩
財団法人日本環境衛生センター 立尾浩一

1. はじめに

2011年3月11日に東日本で発生した大地震ならび大津波により、東北3県（岩手県、宮城県、福島県）の広範囲に大量の災害廃棄物が発生した。震災から8カ月経過した現在（2011年11月）、これら災害廃棄物のほとんどは総計314カ所の仮置場（または集積所、保管所）に集められた状態である。

廃棄物の堆積の長期化は、粉じんや悪臭などの周辺的生活環境の支障となり、いくつかの仮置場では自然発火による火災が発生している。さらに、仮置場が土地を占有することによって復旧復興の妨げになっている点も否定できないことから、早期の復旧復興に向けて災害廃棄物の迅速な処理処分が必須であるといえる。

しかし、我々の推計によると、災害廃棄物の量は岩手県で4.5百万t、宮城県で16.7百万t、福島県で4.0百万tにのぼり、各県の一般廃棄物年間処理量のそれぞれ約10倍、20倍、5倍であり、各市町村や県内処理ではとうてい捌ききれぬ量でない。すなわち、仮置場に堆積された災害廃棄物の速やかな撤去に向けては県域を越え、産業廃棄物の処理能力や再生利用を活用した広域処理の体制を整備する必要がある。

本研究では、広域処理による費用と処理期間の低減効果を評価するため、宮城県で発生した災害廃棄物を対象とし、処分や再利用用途によって廃棄物を分類したうえで、東日本（北海道、東北、関東）全域に立地する一般廃棄物および産業廃棄物処理処分施設、ならびに製紙、肥料、発電などの再生利用先への最適配分を「線形計画法」で求めた。

2. データセット

2.1 災害廃棄物

宮城県の全市町村の仮置場81カ所における災害廃棄物を、評価対象とした。また、災害廃棄物の種類は、不燃物（コンクリート、瓦・陶磁器、ガラス、石膏ボード、金属、混合物の一部、津波土砂の一部）、可燃物（畳、プラスチック、混合物の一部、津波土砂の一部）、木くず（製紙用、木質ボード用、肥料・敷料用、燃料・焼却用）とした。

各災害廃棄物の発生量は、倒壊建物由来の発生量を〔損害の程度・建物種別の損壊棟数（5月末時点）〕×〔平均延床面積（ m^2 ）〕×〔発生原単位（ t/m^2 ）（災害廃棄物の発生原単位について（第一報）〕で求め、倒木発生量を〔海岸林被害面積（ m^2 ）〕×〔面積当たり倒木重量（ t/m^2 ）〕で求めた。

なお、津波土砂量は、災害廃棄物に付着しているものだけを対象とし、北海道大学にお

ける組成分析調査の結果を参考として、[発生量×0.10]により算定した。

参考までに、岩手県と福島県を含めた3県における発生量の推計結果を図1に示した。本稿で広域処理を検討した宮城県で発生した災害廃棄物量は、約16.7百万tと推計され、環境省の公表値15.8百万tよりも大きく、宮城県の公表値18.2百万t（宮城県、宮城県災害廃棄物処理実行計画（第1次案）—災害廃棄物処理の基本的考え方—、2011年7月）よりも小さい値となった。また、仮置場の位置は便宜上、各市町村役場の所在地と仮定したうえで評価に供した。

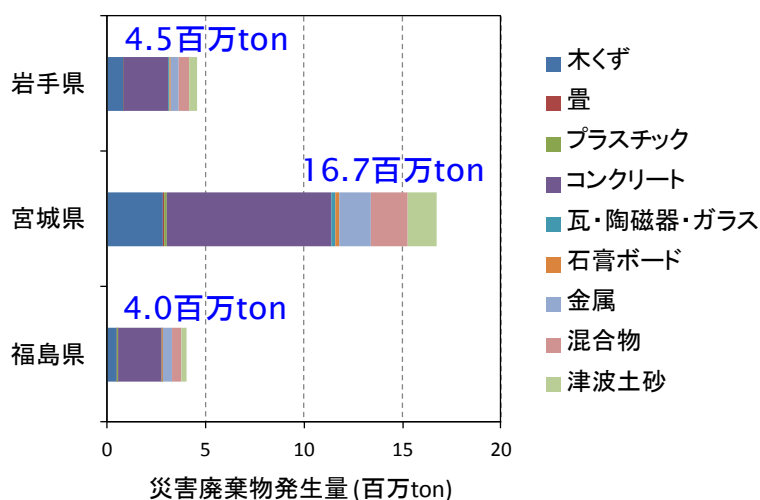


図1 災害廃棄物発生量推計結果

2.2 処理・処分・再生利用施設

災害廃棄物の受け入れ先として、日本全国における総計1万81施設の廃棄物の処理・処分施設と木くずの再生利用施設を考え、評価対象とした。

対象とした施設は、不燃物の安定型最終処分場（産業廃棄物用）と管理型最終処分場（一般廃棄物用、産業廃棄物用）、可燃物の焼却処理施設（一般廃棄物用、産業廃棄物用。ただし、現在稼働・計画中の仮設焼却炉は対象としていない）、木くずの再資源化施設（製紙工場、木質ボード工場、肥料・敷料工場）と燃料利用施設（バイオマス発電所、製紙工場、セメント工場）である。それぞれの処理・再生利用施設における日受入可能量は、統計資料および関連業界団体からの情報収集（全国木材資源リサイクル協会連合会、木質バイオマス需給調査、2008年）に基づいて、当該施設の処理（生産）能力に対する年間稼働日数と処理可能率を表1のように設定した。なお、最終処分場については、日受入可能量を10t車で1日10回搬入と仮定した。処理施設の位置として各施設の所在地の緯度経度を設定した。また、処理費用として、輸送費は、仮置場と処理施設の緯度経度から求めた直線距離を輸送距離とし、10t車の輸送単価600円/km・台（けんせつ、積算資料、2008年）を用いて求めた。

処理費は、複数の文献〔東京都渋谷区、廃棄物処理手数料（東京都清掃工場など処理施設へ直接持ち込む場合）、山田正人、平成 21 年度循環型社会形成推進科学研究費補助金研究報告書、破碎選別による建設系廃棄物の地域循環システムの設計に関する研究（K2157）、2010 年〕をまとめて、表 2 のように設定した。

なお、本稿では仮置場までの解体・輸送費と仮置場における分別・選別の費用は計上していない。

表 1 処理施設における受入可能量の設定値

	年間稼働日数(日)	処理可能率(%)
製紙工場	250	23
木質ボード工場	250	50
肥料・敷料工場	250	50
バイオマス発電所	365	50
製紙工場(燃料利用)	250	23
セメント工場(燃料利用)	310	30
焼却施設(一般廃棄物)	330	27
焼却施設(産業廃棄物)	250	50

表 2 処理施設における処理費の設定値

	処理単価(円/t)
製紙工場	-8,500
木質ボード工場	-4,420
肥料・敷料工場	-1,000
バイオマス発電所	-1,250
製紙工場(燃料利用)	-1,000
セメント工場(燃料利用)	10,000
焼却施設(一般廃棄物)	14,500
焼却施設(産業廃棄物)	9,480
安定型最終処分場	10,000
管理型最終処分場(一般廃棄物)	14,500
管理型最終処分場(産業廃棄物)	20,000

3. 解析方法

3.1 解析手順

災害廃棄物を不燃物、可燃物、木くずに分類し、①から⑨（図 2 参照）の優先順位に従って、総計 10 種類の廃棄物が各仮置場から各処理・処分・再生利用施設までの最適配分を解析した。

不燃物は、一部が素材産業に利用され、その残りが安定型最終処分場と管理型最終処分場へ配分されることとした。可燃物は、全量が焼却施設へ輸送されることとした。木くずは、良質なものをから製紙工場、木質ボード工場、肥料・敷料工場の順に再資源化施設へ配分され、その残りが発電所・燃料利用施設と焼却施設へ輸送されると設定した。ただし、焼却施設には、表1で設定した処理能力から可燃物の処理量を差し引いた余剰受入可能量までが配分されることとした。

なお、再利用、焼却ならびに埋立処分の前処理である破碎・選別処理は、重機や移動式機械等によって仮置場にて行われることを想定した。各廃棄物種類の配分手順は、以下のとおりである。

- ①不燃物（コンクリートの90%、金属95%）：素材産業へ輸送
- ②不燃物（コンクリートの10%、瓦・陶磁器・ガラス、金属の5%）：安定型最終処分場へ輸送
- ③不燃物（石膏ボード、混合物の65%、津波土砂の80%）：管理型最終処分場へ輸送
- ④可燃物（畳、プラスチック、混合物の35%、津波土砂の20%）：焼却施設へ輸送
- ⑤製紙用木くず（木くず全量の22%）：製紙工場、木質ボード工場、肥料・敷料工場、発電所・燃料利用施設、焼却施設へ輸送
- ⑥木質ボード用木くず（木くず全量の29%）：木質ボード工場、肥料・敷料工場、発電所・燃料利用施設、焼却施設へ輸送
- ⑦肥料・敷料用木くず（木くず全量の8%）：肥料・敷料工場、発電所・燃料利用施設、焼却施設へ輸送
- ⑧燃料用木くず（木くず全量の41%）：発電所・燃料利用施設、焼却施設へ輸送
- ⑨焼却残渣（焼却処理量の20%）：管理型最終処分

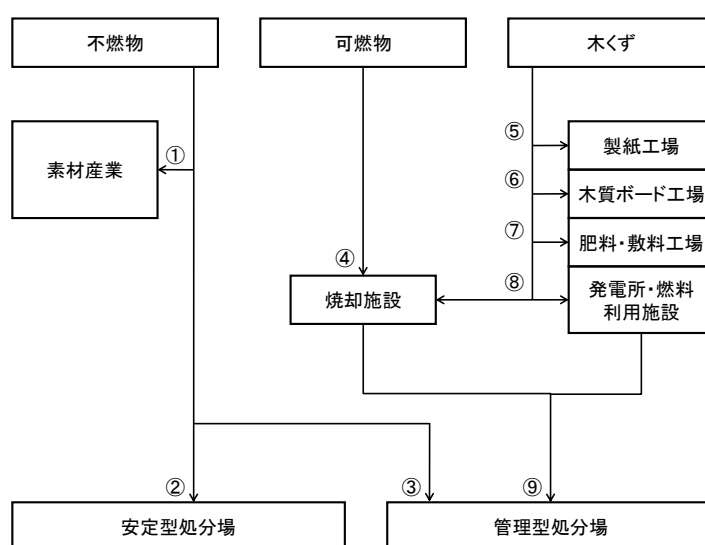


図2 解析手順

3.2 線形計画法による最適化モデルの構築

上述の解析手順（図2）に従って、それぞれの災害廃棄物における各仮置場から各処理・処分・再生利用施設への配分の総費用（輸送費・処理費）最小化を目的とした線形計画モデルを構築した。

<目的関数：総費用最小化>

$$c_{1,1} \cdot x_{1,1} + c_{1,2} \cdot x_{1,2} + \dots + c_{i,j} \cdot x_{i,j} \rightarrow \min$$

<制約条件①：仮置場条件>

$$\begin{aligned} x_{1,1} + x_{1,2} + \dots + x_{1,j} &= w_1 \\ x_{2,1} + x_{2,2} + \dots + x_{2,j} &= w_2 \\ &\vdots \\ x_{i,1} + x_{i,2} + \dots + x_{i,j} &= w_i \end{aligned}$$

<制約条件②：施設条件>

$$\begin{aligned} x_{1,1} + x_{2,1} + \dots + x_{i,1} &\leq p_1 \\ x_{1,2} + x_{2,2} + \dots + x_{i,2} &\leq p_2 \\ &\vdots \\ x_{1,j} + x_{2,j} + \dots + x_{i,j} &\leq p_j \end{aligned}$$

<制約条件③：非負条件>

$$x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{i,j} \geq 0$$

ここで、

i：仮置場（仮置場のある市町村役場）

j：処理・処分・再生利用施設（再資源化施設、燃料利用施設、焼却処理施設、最終処分場）

$x_{i,j}$ ：仮置場 i から施設 j へ輸送される廃棄物量（t）

$c_{i,j}$ ：仮置場 i から施設 j へ輸送される廃棄物の輸送・処理単価（円／t）

w_i ：仮置場 i にある廃棄物量（t）

p_j ：処理・処分・再生利用施設 j の受入可能量（t）

なお、期間については、1年間の処理の最適化から解析を開始し、解析の優先順位①から⑨（図2）の過程で、仮置場の総廃棄物量（t）が処理施設の総受入可能量（t／年）を超過した場合、2年目の処理を解析し、以後、同様に期間を延長して解析を行うこととした。

4. 想定したシナリオ

宮城県の仮置場に集積された災害廃棄物を対象として、

- ・宮城県内ですべての廃棄物を処理する（宮城県内処理）シナリオ
- ・宮城県と産業廃棄物処理施設が数多く立地する福島県で廃棄物を処理する（宮城県・福島県内処理）シナリオ
- ・東日本全体において廃棄物を処理する（東日本処理）シナリオ

——の3つを想定した。

なお、宮城県・福島県内処理シナリオは、放射能汚染問題で福島県内の廃棄物処理が進まず、同県内における処理施設が機能していないことから、ほとんど汚染のない岩手県、宮城県の災害廃棄物の処理によるその有効活用の可能性を検討するために設定した。打撃を受けた産業廃棄物処理業界保護の意義も見出せよう。また、東日本処理シナリオでは、処理先として、北海道、青森県、秋田県、山形県、宮城県、新潟県、群馬県、栃木県、茨城県、埼玉県、東京都、千葉県を対象とし、宮城県と同様に災害廃棄物を抱える岩手県と福島県は対象外とした。

5. 結果

5.1 宮城県内処理シナリオ（図3～図6参照）

宮城県内処理シナリオでは、すべての災害廃棄物の処理完了期間は8年であり、長期にわたる結果となった。

廃棄物種類ごとにみると、不燃物の安定型と管理型の最終処分に要する期間はそれぞれ8年と6年、可燃物の焼却処理に要する期間は4年、木くずの再資源化・焼却処理の期間は8年となった。

最適化（最小化）した総処理費用は、885億円と推計された。廃棄物種類ごとでは、不燃物の安定型最終処分は122億円、不燃物の管理型最終処分は402億円、可燃物の焼却処理は156億円、木くずの再資源化処理と焼却処理は205億円と推計された。廃棄物1t当たりの平均費用は、1.1万円/tとなった。

廃棄物種類ごとでは、不燃物の安定型最終処分は1.1万円/t、不燃物の管理型最終処分は1.5万円/t、可燃物の焼却処理は1.4万円/t、木くずの再資源化処理・焼却処理は0.7万円/tと算出された。

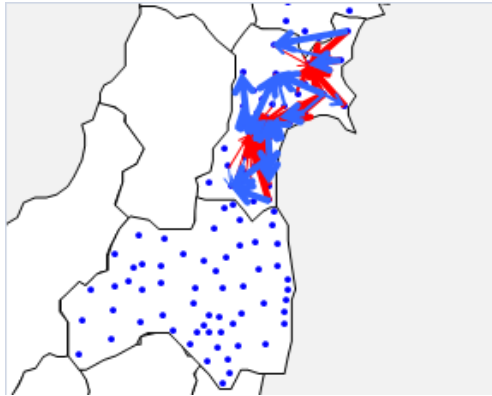


図3 宮城県内処理シナリオにおける不燃物の安定型処分場（赤色）、管理型処分場（青色）への配分

※ 細矢印：20 t, 中矢印：1000 t, 太矢印：10000 t

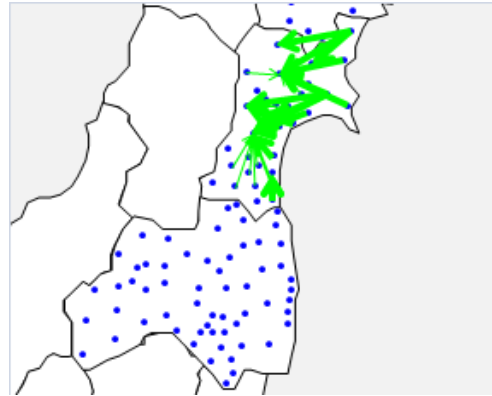


図4 宮城県内処理シナリオにおける可燃物の焼却施設（黄緑色）への配分

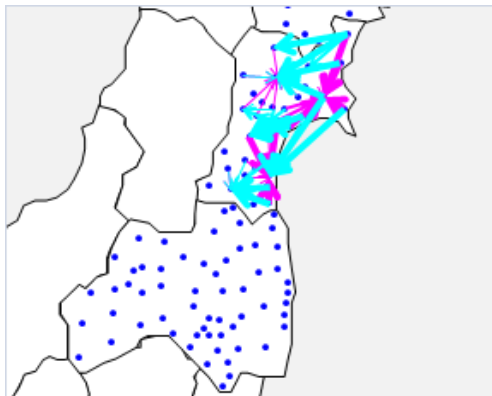


図5 宮城県内処理シナリオにおける木くずの製紙工場（桃色）、木質ボード工場（水色）への配分

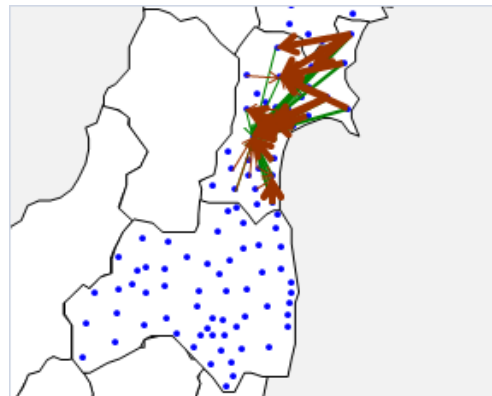


図6 宮城県内処理シナリオにおける木くずの肥料・敷料工場（緑色）、燃料利用・焼却施設（茶色）への配分

5.2 宮城県・福島県内処理シナリオ（図7～図10参照）

宮城県の災害廃棄物を宮城県・福島県内で処理するシナリオでは、処理完了期間は4年と推計された。廃棄物種類ごとにみると、不燃物の安定型最終処分は2年、不燃物の管理型最終処分は3年、可燃物の焼却処理は2年、木くずの再資源化処理・焼却処理は4年となった。宮城県内における災害廃棄物全体の約44%が同県内で処理され、残りの約56%が福島県内で処理される結果となった。

また、総処理費用は1,113億円となり、各廃棄物種類についてみると、不燃物の安定型最終処分は168億円、不燃物の管理型最終処分は476億円、可燃物の焼却処理は176億円、木くずの再資源化処理・焼却処理は293億円と推計された。さらに、廃棄物1t当たりの平均費用は1.4万円/tであった。廃棄物ごとでは、不燃物の安定型最終処分は1.5万円/t、不燃物の管理型最終処分は1.8万円/t、可燃物の焼却処理は1.5万円/t、木くずの

再資源化処理・焼却処理は 1.0 万円／t となった。

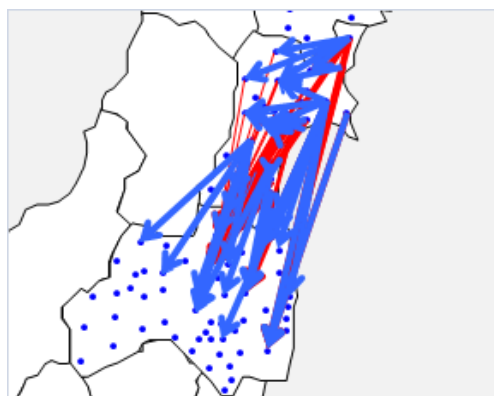


図7 宮城県・福島県内処理シナリオにおける不燃物の安定型処分場（赤色）、管理型処分場（青色）への配分

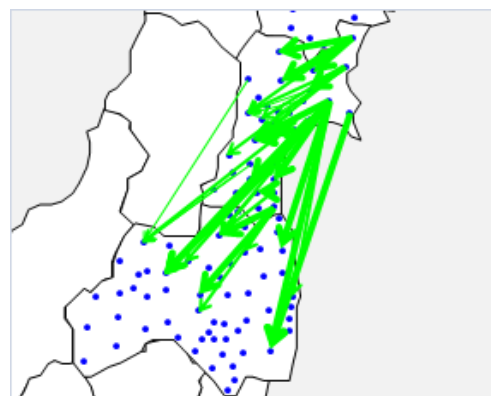


図8 宮城県・福島県内処理シナリオにおける可燃物の焼却施設（黄緑色）への配分

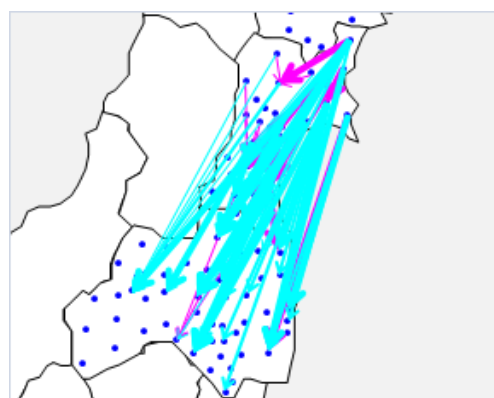


図9 宮城県・福島県内処理シナリオにおける木くずの製紙工場（桃色）、木質ボード工場（水色）への配分

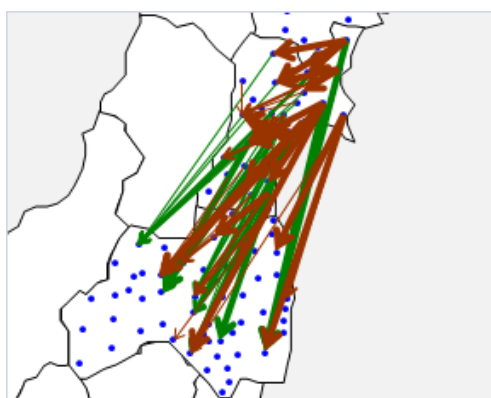


図10 宮城県・福島県内処理シナリオにおける木くずの肥料・敷料工場（緑色）、燃料利用・焼却施設（茶色）への配分

5.3 東日本処理シナリオ（図11～図14参照）

対象処理施設を東日本に広げると、1年以内に処理が終了すると推計された。

宮城県内における災害廃棄物全体の約18%が同県内で処理され、県外への移動は、北海道、青森県、秋田県、山形県、新潟県、群馬県、栃木県、茨城県、埼玉県、東京都、千葉県の対象地域全体に及んだ。総処理費用は1,476億円となり、廃棄物種類ごとにみると、不燃物の安定型最終処分は194億円、不燃物の管理型最終処分は616億円、可燃物の焼却処理は202億円、木くずの再資源化処理・焼却処理は463億円となった。廃棄物1t当たりの平均費用は、1.9万円／tと推計された。

各廃棄物種類については、不燃物の安定型最終処分は1.8万円／t、不燃物の管理型最終

処分は 2.3 万円／t、可燃物の焼却処理は 1.8 万円／t、木くずの再資源化処理・焼却処理は 1.6 万円／t となることがわかった。

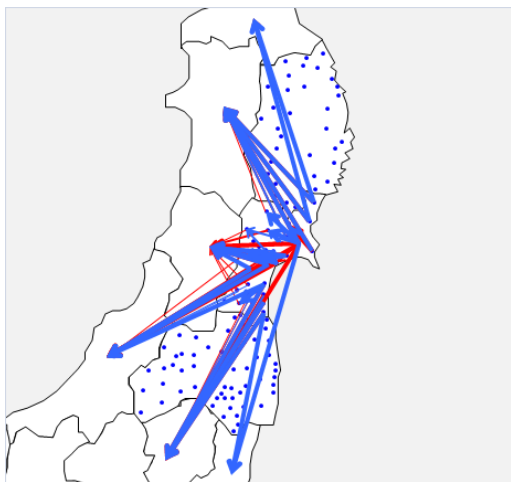


図 11 東日本処理シナリオにおける不燃物の安定型処分場（赤色）、管理型処分場（青色）への配分

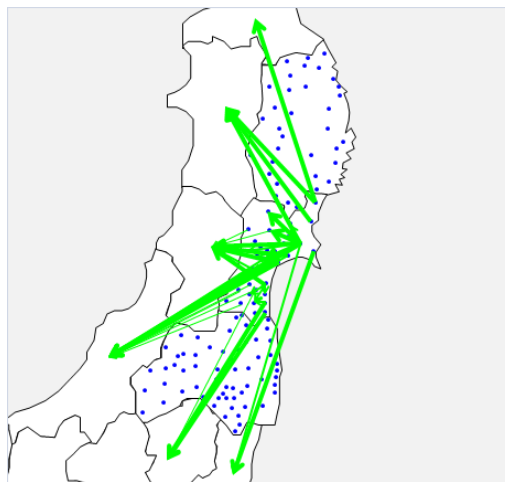


図 12 東日本処理シナリオにおける可燃物の焼却施設（黄緑色）への配分

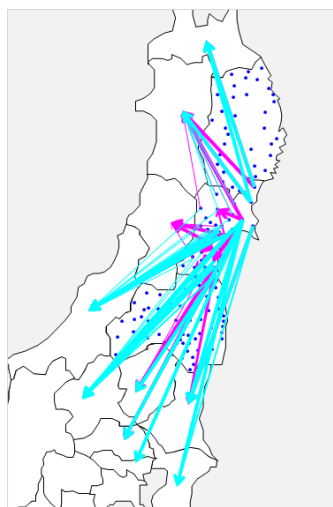


図 13 東日本処理シナリオにおける木くずの製紙工場（桃色）、木質ボード工場（水色）への配分

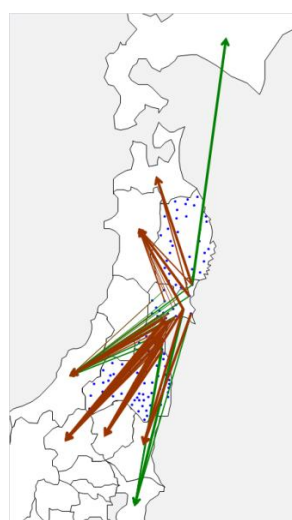


図 14 東日本処理シナリオにおける木くずの肥料・敷料工場（緑色）、燃料利用・焼却施設（茶色）への配分

6. 考察

想定したシナリオにおける処理完了期間を比較すると、宮城県内処理シナリオでは 8 年、宮城県・福島県内処理シナリオでは 4 年となった。宮城県に隣接する福島県の処理・処分施設の能力を有効に活用するだけでも処理期間を半分に短縮できることが示された。

また、北は北海道、南は東京都・千葉県までの範囲で広域処理を行うことによって、1

年以内に処理を終えることが可能となることが示された。ただし、本研究における宮城県の災害廃棄物発生量推計値（16.7 百万 t）は、宮城県による公表値（18.2 百万 t）よりも小さく見積もられている。

本研究では、倒壊家屋の撤去由来の廃棄物と海岸防災林等由来の倒木を対象としているため、たとえば港湾・漁業施設由来の災害廃棄物や、工場・事業所より流出した災害廃棄物などは含まれていない。したがって、実際の発生量が本研究の推計よりも大きい場合は、上記の推計結果よりも処理完了までの期間が延びるだろう。

一方、総処理費用は、宮城県内処理シナリオが 885 億円（1 t 当たり平均 1.1 万円）であるのに対し、宮城県・福島県内処理シナリオは 1,113 億円（1 t 当たり平均 1.4 万円）、東日本処理シナリオは 1,476 億円（1 t 当たり平均 1.9 万円）となり、それぞれ宮城県内処理シナリオの約 1.3 倍、約 1.7 倍となった。

各シナリオの総処理費用の内訳（処理費と輸送費）を図 15 に示す。広域処理は、処理の効率化による処理速度と処理費の低減という観点からは効果的である半面、輸送費による処理費用の全体的なかさ上げにつながることに留意すべきである。

宮城県が県議会環境生活常任委員会で示した災害廃棄物処理費用 4,000 億円（1 t 当たり 2.2 万円）（河北新報、2011 年 5 月 21 日）と比べると、県内処理と広域処理のいずれのシナリオにおいても低いコストとなったが、本稿の処理費用には仮置場までの解体・輸送と仮置場における分別・破碎・選別等の費用が含まれておらず、さらに、過剰供給による再資源化処理施設における買い取り価格の低下等も想定されるため、実際の処理費用は本稿の推計額よりも大きくなると考えられる。

一方、包括的な災害防止協定に伴う初動の撤去・搬入を中心に、実際の相場よりも高めの契約金額によって速やかな処理が進められたことや、地元の業者との作業契約を中心に、産業（ひいては生活）保護・補償の側面があったこと等、本研究では設定しきれていない現状を反映しており、本研究の推計額と乖離が生じた可能性も考えられる。

〈3.1〉で述べたように、不燃物に含まれ、保管による劣化が少ないコンクリートがらと金属類の各シナリオにおける再生利用率は、一律にそれぞれ 90%、95%と設定した。木くずでは、製紙、木質ボード、肥料・敷料、燃料利用量を再生利用量とすると、宮城県内処理シナリオの再生利用率は 43%、宮城県・福島県内処理シナリオでは 46%、東日本処理シナリオでは 59%であり、広域処理により、資源が需要のある再生利用先にもうまく配分される効果が表れている。

しかし、本研究では不燃物や木くずを最大限再資源化することを想定しており、品質や需給バランスにより再資源化が難しい場合には、焼却処理や埋立処分の増分による処理費用の増加が見込まれる。

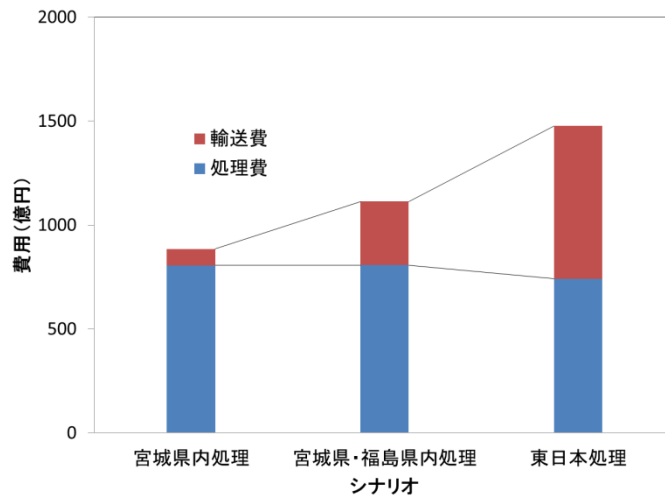


図 15 総費用の内訳（仮置場までの解体・輸送、仮置場破砕選別費含まず）

7. おわりに

本稿では、広域処理による費用と処理期間の低減効果を評価するため、宮城県で発生し 81 カ所の仮置場に集められた災害廃棄物を対象とし、処分や再利用用途によって廃棄物を 10 種類に分類したうえで、東日本（北海道、東北、関東）全域に立地する総計 1 万 81 施設の一般廃棄物および産業廃棄物処理処分施設、ならびに製紙、肥料、発電などの再生利用先への最適配分を線形計画法で求めた。

自区内処理である宮城県内処理シナリオと比較して、産業廃棄物処理能力が大きく、放射能問題で県内の廃棄物を受け入れられない福島県を加えた宮城県・福島県内処理シナリオ、より広域な東日本処理シナリオを比較すると、処理期間でそれぞれ、8 年、4 年、1 年となり、広域処理のメリットが示された。処理費用では、それぞれ 885 億円（1 t 当たり平均 1.1 万円）、1,113 億円（1 t 当たり平均 1.4 万円）、1,476 億円（1 t 当たり平均 1.9 万円）と、主に輸送に伴う費用の増分が示された。木くずでは、宮城県内処理シナリオの再生利用率は 43%、宮城県・福島県内処理シナリオでは 46%、東日本処理シナリオでは 59%であり、広域処理による資源配分最適化の効果が示された。

本稿は、仮置場までの解体・輸送と仮置場における分別・破碎・選別等の費用を含まないなど、実際の総費用を推計したものではないが、現状の一般廃棄物処理施設を主体とした方策に加えて、民間の産業廃棄物処理施設や再資源化施設を活用することのメリットを処理期間において表すことができたと考える。災害廃棄物は、法制度上は一般廃棄物に分類されるが、性状は（建設系の）産業廃棄物に近いものであり、産業廃棄物処理施設は十分に活用できる。

復興復旧のための迅速な処理・処分のためには、官民が協同したより広い視野での広域処理の戦略が必要である。