

最適化手法による地震災害発生木くずの再生利用・適正処理計画支援ツールの構築

東京農工大学 農学研究院 自然環境保全学部門

加用 千裕

1. はじめに

2011年3月11日に東日本で発生した大地震および大津波により、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。これら災害廃棄物は、最大で318カ所(2011年9月時点)の仮置場に集められていたが、徐々に処理が進み、2013年7月現在は総計128カ所(環境省、災害廃棄物等処理の進捗状況、2013年8月30日)まで減少している。ただし、災害廃棄物の処理完了率は、岩手県で62%、宮城県で77%、福島県で42%であり、被災地の復興に向けて更なる処理・処分が必須となっている。著者らの推計によると、地震発生当初の災害廃棄物の発生量は、岩手県で4.5百万トン、宮城県で16.7百万トン、福島県で4.0百万トンにのぼり、各県の一般廃棄物年間処理量のそれぞれ約10倍、20倍、5倍であった。各市町村や県内だけではとうてい処理しきれぬ量でなく、特に、木くずは、岩手県で0.6百万トン、宮城県で2.0百万トン、福島県で0.4百万トンにのぼった。著者らは、地震発生直後から、仮置場に集積される災害廃棄物の速やかな撤去に向けて、県域を越える広域処理も考慮した再生利用や処理・処分の効果・影響を検討してきた。本発表では、木くずを中心とした災害廃棄物の県内あるいは広域での再生利用・処理・処分による費用や処理期間を評価するため、宮城県で発生した災害廃棄物を対象として、宮城県内での処理や東日本全体での処理といったシナリオを想定しながら、製紙、肥料、発電などの再生利用施設や処理・処分施設への最適配分を線形計画法で解析した研究成果について報告する。

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対象とした。災害廃棄物の種類は、木くず(製紙用、木質ボード用、肥料・敷料用、燃料・焼却用)、可燃物(畳、プラスチック、混合物の一部、津波土砂の一部)、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)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]×[平均延床面積(m^2)]×[発生原単位($トン/m^2$)]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($トン/m^2$)]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、[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。

本研究で対象とした宮城県で発生した災害廃棄物量は、約 16.7 百万トンと推計され、環境省の公表値 17.6 百万トン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。

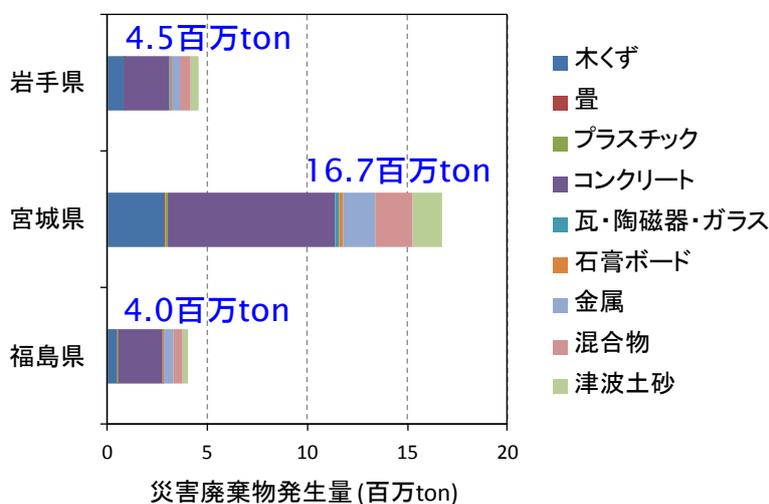


図-1 災害廃棄物発生量推計結果

2.2. 再生利用・処理・処分施設

災害廃棄物の受け入れ先として、日本全国における総計 10,081 カ所の木くずの再生利用施設と廃棄物の処理・処分施設を対象とした。対象とした施設は、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）、可燃物の焼却処理施設、不燃物の最終処分場である。それぞれの再生利用・処理・処分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）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設定した。再生利用・処理・処分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、10トン車の輸送単価 600 円/km・台（けんせつ、積算資料、2008）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）をまとめて設定した。

3. 解析方法

3.1. シナリオ

宮城県の全市町村における 81 カ所（2011 年 11 月時点）の仮置場に集積された災害廃棄物を対象として、宮城県内における再生利用・処理・処分施設で全ての廃棄物を処理する（宮城県内処理）シナリオと、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 2 つを想定した。なお、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、千葉県における 10,081 ヶ所の再生利用・処理・処分施設を対象とし、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。

3.2. 解析手順

災害廃棄物を木くず、可燃物、不燃物に分類し、図-2 に示した①から⑨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。特に、木くずは、良質なものを製紙工場、木質ボード工場、肥料・敷料工場の順に再資源化施設へ分配され、その残りが発電所・燃料利用施設と焼却施設へ分配されると設定した。

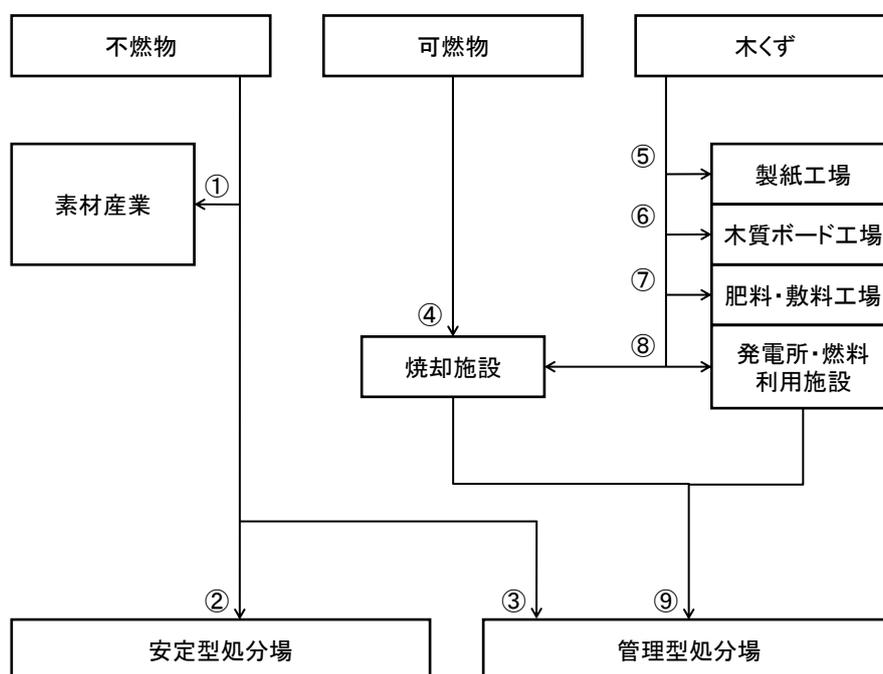


図-2 解析手順

3.3. 線型計画法による最適化モデル

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再生利用・処理・処分施設への配分の線形計画モデルを構築した。目的関数は、総費用(輸送費・処理費)最小化とし、制約条件は、仮置場における各廃棄物の物質収支、各施設における廃棄物の受入可能量、配分される廃棄物の非負条件とした。

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

$$x_{1,1} + x_{1,2} + \dots + x_{1,j} = w_1$$

$$x_{2,1} + x_{2,2} + \dots + x_{2,j} = w_2$$

⋮ ⋮

$$x_{i,1} + x_{i,2} + \dots + x_{i,j} = w_i$$

制約条件②：施設条件

$$x_{1,1} + x_{2,1} + \dots + x_{i,1} \leq p_1$$

$$x_{1,2} + x_{2,2} + \dots + x_{i,2} \leq p_2$$

⋮ ⋮

$$x_{1,j} + x_{2,j} + \dots + x_{i,j} \leq p_j$$

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. 結果

宮城県内処理シナリオ（図-3、図-4 参照）では、全ての災害廃棄物の処理完了期間は 8 年であり、長期に渡る結果となった。廃棄物種類ごとにみると、不燃物の最終処分に要する期間は 8 年、可燃物の焼却処理に要する期間は 4 年、木くずの再生利用・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。そのうち、木くずの再生処理と焼却処理は 205 億円と推計された。廃棄物 1 トン当たりの平均費用は 1.1 万円/トンとなった。特に、木くずの再生利用・焼却処理は 0.7 万円/トンと算出された。また、木くずの再生利用率（木くず発生量に占める製紙・木質ボード・肥料・敷料・燃料利用量の割合）

は43%となった。

東日本処理シナリオ(図-5、図-6 参照)では、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1476億円となり、宮城県内処理シナリオの約1.7倍と推計された。木くずの再生利用・焼却処理は463億円となった。廃棄物1トン当たりの平均費用は1.9万円/トンと推計され、木くずの再生利用・焼却処理は1.6万円/トンとなること分かった。なお、木くずの再生利用率は59%であった。

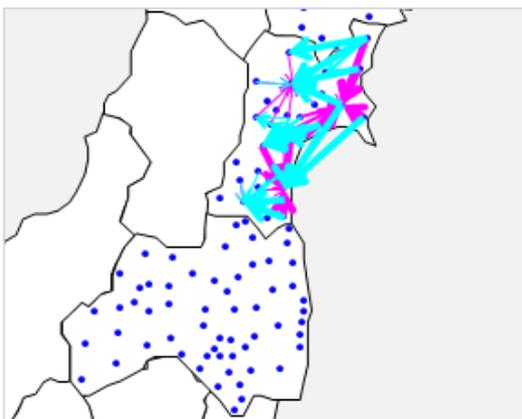


図-3 宮城県内処理における木くずの製紙工場と木質ボード工場への配分

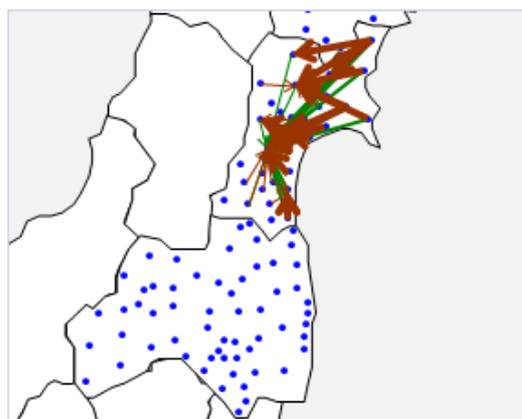


図-4 宮城県内処理における木くずの肥料・敷料工場と燃料利用・焼却施設への配分

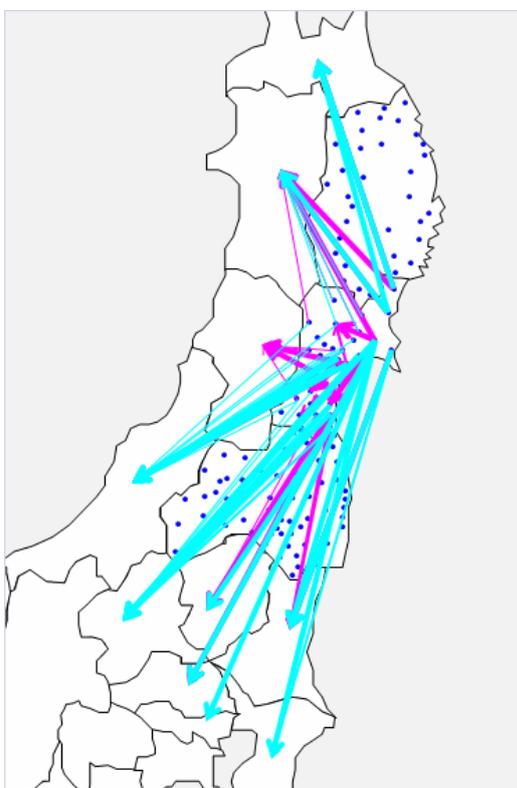


図-5 東日本処理における木くずの製紙工場と木質ボード工場への配分

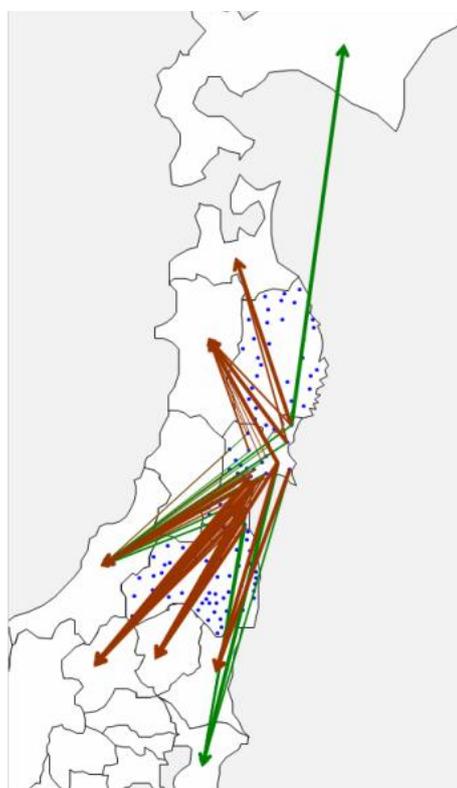


図-6 東日本処理における木くずの肥料・敷料工場と燃料利用・焼却施設への配分

5. 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年であったが、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。一方、総処理費用は、宮城県内処理シナリオが885億円(1トン当たり平均1.1万円)であるのに対し、東日本処理シナリオは1476億円(1トン当たり平均1.9万円)となり、宮城県内処理シナリオの約1.7倍となった。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。また、木くずの再生利用率をみると、宮城県内処理シナリオでは43%、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うまく配分される効果が表れていた。ただし、本研究では、不燃物や木くずを最大限再生利用することを想定しており、品質や需給バランスにより再生利用が難しい場合には、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。

6. おわりに

本研究では、県内処理と広域処理による費用と処理期間を評価するため、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種類に分類した上で、東日本(北海道、東北、関東)全域に立地する総計10,081カ所の製紙、肥料、発電などの再生利用施設ならびに廃棄物処理・処分施設への最適配分を線形計画法で求めた。宮城県内処理シナリオと広域な東日本処理シナリオを比較すると、処理期間で8年と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トン当たり平均1.1万円)と1476億円(1トン当たり平均1.9万円)となり、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%、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。本研究は、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、民間の木くずの再利用施設や産業廃棄物処理施設を活用することのメリットが処理期間において示され、復興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と考えられる。また、本研究で構築した最適化モデルと関連データセットは、東日本大震災における災害廃棄物問題への対応に限らず、将来の発生が懸念されている首都圏直下地震、東海・東南海・南海地震等の備えとして、木くず等の災害廃棄物の保管・輸送・再生利用・処理・処分システムを設計する際に有用となると考える。