

特定廃家電由来の災害廃棄物の処理に伴う ライフサイクルコストの試算 ～南海トラフ巨大地震を事例として～

若林 陽平¹・蔡 佩宜²・田畑 智博³

¹非会員 神戸大学学生 人間発達環境学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区鶴甲3-11)

E-mail: 156d430d@stu.kobe-u.ac.jp

²非会員 神戸大学学術推進研究員 人間発達環境学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区鶴甲3-11)

³正会員 神戸大学准教授 人間発達環境学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区鶴甲3-11)

本研究は、将来の自然災害に伴い発生する災害廃棄物の処理に伴うライフサイクルコストを試算した。本稿では、南海トラフ巨大地震の被害想定地域である三重県南伊勢町を事例として、特定廃家電由来の災害廃棄物の運搬、1次・2次仮置場での保管・分別、処理・リサイクル等の各プロセスでのコストの算出を行った。

結果として、ライフサイクルコストは約 1.2 億円となった。また、町内で 2 次仮置場を 1 ヶ所設置する場合と 9 ヶ所に分散させて設置する場合とでの運搬費用を考察した結果、分散シナリオのほうが集中シナリオより約 14 億円安くなった。災害廃棄物の運搬に伴う渋滞発生を考慮した場合でも、2 次仮置場を分散させて設置することで、道路の混雑時間を減少させることができることがわかった。

Key Words : disaster waste, temporary storage site, transportation, life cycle cost, specified kinds of home appliances

1. はじめに

予防原則の観点から鑑みて、将来発生しうる自然災害に伴って発生する災害廃棄物の処理方法を事前に検討しておくことは望ましい。南海トラフ巨大地震の被害想定地域では、地震発生に伴う災害廃棄物の処理方法を検討あるいは計画している自治体が多い。例えば、三重県¹⁾が作成した災害廃棄物処理計画では、災害廃棄物発生量の推計結果をもとに、仮置場や仮設焼却炉の設置、自区内処理や広域処理等、災害廃棄物処理システムの構築に関する幅広い検討を行っている。しかし、インベントリデータの不足等の理由から、災害廃棄物処理システムを稼働させることを想定した場合のコストや環境負荷等に関する試算は殆ど行われていない。例えば、既往研究^{2),3)}においても、コスト試算は実施されているものの、仮置場

の設置場所の選定や運用等といった、災害廃棄物処理システムに欠かせない具体的なプロセスを踏まえたコスト検討は殆ど行われていない。筆者らの研究グループではこれまでに、災害廃棄物の運搬、仮置場の運用、処理等のプロセスを考慮したライフサイクルに係る環境負荷の試算を行っている⁴⁾。本稿では、ライフサイクルコスト手法を用いて、災害廃棄物処理システムのコストを試算することを目的とする。これにより、自治体が災害廃棄物処理に関する計画を作成する際の経済的な意思決定支援に繋げるための示唆を提供することを目指す。

本稿では、南海トラフ巨大地震の被害想定地域である三重県南伊勢町を事例対象地域とする。本稿では特に、町内での仮置場の選定、仮置場や処理施設を空間的に捉えた輸送システムの構築、処理期間を考慮したトラック渋滞費用の分析を行う。

2. 研究の方法

(1) システム境界

本研究で対象とする災害廃棄物は、家庭由来の災害廃棄物(建物, 耐久消費財)と津波堆積物とする。特にライフサイクルコストの試算は、特定廃家電(冷蔵庫, 洗濯機, エアコン, TV)由来の災害廃棄物を対象として行う。加えて、発生場所から仮置場までの運搬、仮置場の運用については、特定廃家電以外の家庭由来の災害廃棄物と津波堆積物もコストを試算する。なぜならば、災害廃棄物は特定廃家電のみ発生するわけではなく、様々な災害廃棄物が運搬され仮置場に搬入されるためであり、全ての家庭由来の災害廃棄物と津波堆積物に係るコストも試算したほうが、実態に即していると判断したためである。

本稿で対象とするシステム境界を図-1に示す。本図は、三重県¹⁾の災害廃棄物処理計画を参考にして作成した。なお、自区内での処理は建物と耐久消費財を考慮した。各地区で発生した災害廃棄物は、1次仮置場まで運搬されて保管される。続いて、2次仮置場まで運搬され、2次仮置場内で分別される。その後、処理施設へ輸送されて処理される。特定廃家電は町外の家電リサイクル工場まで運搬されて、処理されるものとする。機能単位は、特定廃家電由来の災害廃棄物1t当たりのコストとする。自区内での処理では、家庭由来の災害廃棄物1t当たりのコストとする。

(2) 災害廃棄物発生量の推計

本稿では、南海トラフ巨大地震の発災に伴う津波被害を対象として、家庭由来の災害廃棄物発生量を推計する。三重県は、500m メッシュ居住人口データ、津波ハザードマップポイントデータを公開している。ここでは、津波浸水深 2m 以上となるメッシュ内の建物 は全壊すると想定し、上記データを地理情報システム上で重ね合わせて推計した。なお、家屋全壊一棟当たりの廃棄物量は117tとした。これに、表-1の災害廃棄物の種類別発生量の比率を乗じることで、種類別の災害廃棄物発生量を推計した。津波堆積物は、見掛け比重(1.46t/m^3)⁶⁾に1メッシュの面積($2,500\text{m}^2$)と津波堆積物蓄積高さ(0.04m)⁶⁾を乗じることで算出した。図-2に、推計のイメージ図を示す。居住メッシュのみを対象として、災害廃棄物が発生するメッシュは合計 29 メッシュとなった。

(3) 仮置場の選定および設置容量の推計

仮置場は、公有地(学校のグラウンド、公園)と私有地(駐車場、荒地、海岸)を設置候補とした。これを踏まえ、Google Earth を用いて仮置場の候補地と面積を算出した(図-3)。その結果、候補地は218カ所となった。これらの仮置場候補地を 500m メッシュでマッピングした結果、

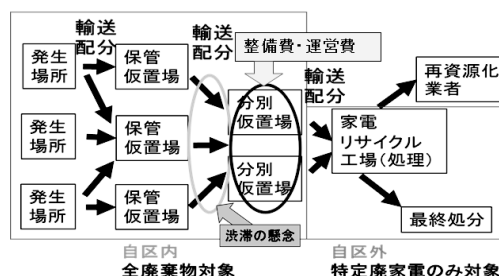


図-1 災害廃棄物処理のシステム境界

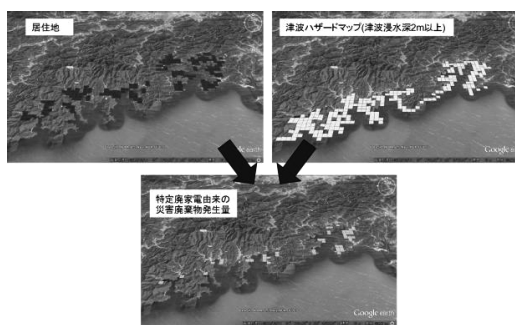


図-2 災害廃棄物の発生量推計(500m メッシュ)

表-1 災害廃棄物種類別の質量^{5),6)}

災害廃棄物 m/t	全体比率
可燃物	2.5 13%
不燃物	0.9 22%
コンクリート	0.83 53%
がら	13.67 3%
金属くず	3.8 7%
木くず	2.2 2%
特定廃家電	
特定廃家電 t/台	m/台
自動車	1.45
テレビ	0.01 0.23
冷蔵庫	0.06 0.40
洗濯機	0.05 0.36
エアコン	0.04 0.22



図-3 仮置場の候補地の選定

合計 29 メッシュとなった。なお、高知市災害廃棄物処理計画 2 次仮置場は 1ha 以上としている⁸⁾、これを踏まえ、本稿でも、2 次仮置場は 1ha 以上の余裕スペースがある候補地に設置するものとする。それ以外の候補地は、1 次仮置場とする。

各メッシュで発生する災害廃棄物は、その近隣にある 1 次仮置場まで運搬されるものとする。これを踏まえ、仮置場候補地面積が十分かどうかを、仮置必要面積と比

較する。ただし、仮置場内のトラック等の重機の移動スペースを考慮して、候補地内で災害廃棄物が保管できるスペースは、全体面積の60%とする。

仮置必要面積は、先述の災害廃棄物発生量の推計結果に、種類別の災害廃棄物の見掛け比重(表-1)を乗じ、災害廃棄物の積み上げ高さ(5m)⁹⁾で除することで算出した。

(4) ライフサイクルコストの算出

図-1 で示したプロセス別のコスト原単位を表-2 に示す。これらのデータは、佐伯¹⁰⁾、家電リサイクル工場への聞き取り調査等をもとに作成した。これらのコスト原単位を、災害廃棄物発生量に乘じることで、各プロセスのコストを算出した。なお、輸送費は、次項の輸送モデルを用いて算出した。

(5) 輸送モデル

各メッシュで発生する災害廃棄物は、近隣の1次仮置場メッシュに輸送されるが、仮置場によっては、搬入量が多くなり仮置場の容量がオーバーフローする可能性が考えらる。そこで線形計画法を用いて、仮置必要面積と1次仮置場面積の仮置容量を比較し、オーバーフローする場合は他の余裕があるメッシュに災害廃棄物を配分することを考える。モデル式を式(1)~式(4)に示す。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ij} \times l_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^n w_i = W_I \quad (2)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j=1}^n w_j = W_J \quad (3)$$

$$W_J = W_I \times \frac{S_d}{S_D} \quad (4)$$

但し、 W ：総廃棄物輸送量[t]、 i ：災害廃棄物発生メッシュ、 j ：1次仮置場メッシュ、 w_{ij} ： i - j 間の廃棄物輸送量[t]、 W_I ：災害廃棄物発生量の合計[t]、 W_J ：1次仮置場配分先の災害廃棄物受入量[t]、 l_{ij} ： i - j 間の距離[km]、 S_D ：1次仮置場の面積容量[m²]、 S_d ：各1次仮置場の面積容量[m²]。

続いて、輸送量の配分結果を踏まえて、次式より輸送費用とトラック輸送能力を算出する。また、トラック輸送能力、往復回数等を乗じることで、トラック台数を算出する。

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{w_{ij}}{A_{ij}} \times H \times M \right) \quad (5)$$

表-2 廃棄物処理作業の原単位

	テレビ	エアコン	冷蔵庫	洗濯機	単位
保管・分別	52918				円/ton
中間処理	49	161	492	174	
リサイクル	80	37	39	30	
最終処分	9				

$$A_{ij} = D_{ij} \times T \times R \quad (6)$$

$$D_{ij} = \frac{H}{2 \times \left(\frac{l_{ij}}{V} + U \right)} \quad (7)$$

但し、 S ：輸送費用 [円]、 A_{ij} ：トラック輸送能力[t・日/台]、 D_{ij} ： i - j における1日当たり往復回数[回/日]、 T ：トラックの積載容量 [t] (4tトラック(発生場所~1次仮置場)=4, 10tトラック(2次仮置場~家電リサイクル工場)=10)、 R ：トラックの積載率[-] (=0.7¹¹⁾)、 H ：1日当たり稼働時間[h/d] (=8h or 24h)、 V ：輸送速度 [km/h] (一般道路=37.1, 高速道路=66.3km/h¹²⁾)、 U ：トラック積み下ろし時間 [時] (=0.155¹³⁾)、 M ：1時間当たりトラック稼働単価 [円/時] (4tトラック= 4,775, 10tトラック= 6,950¹³⁾)。

(6) トラック渋滞分析モデル

災害廃棄物の運搬にはダンプトラックなどの大型車が使用されるため、仮置場周辺では渋滞がおけると予想される。特に、1次仮置場から2次仮置場までの運搬で、2次仮置場の入口や幹線道路で渋滞が発生する恐れがある。これを踏まえ、渋滞時間とそれに伴い発生する費用を算出する。まず、渋滞時間を推計するために、トラック輸送回数を算出する。

$$C_{ij} = \frac{w_{ij}}{T \times R \times P} \quad (8)$$

但し、 C_{ij} ： i - j 地点間のトラック輸送回数[台]、 P ：輸送期間[月]。

続いて、2つの地点において、渋滞時間および渋滞費用を算出する。

・2次仮置場の入口

仮置場入口の交通ボトルネック容量より算出する。

$$B = \sum_{j=1}^n (b_j \times M_{10r}) \quad (9)$$

但し、 B ：仮置場におけるボトルネック渋滞総費用[円]、 b_j ： j 地点におけるボトルネック渋滞時間 [時]。

・幹線道路

ここでは、町内の幹線道路を図-4に示すように13のリンクに分割して、次式により渋滞時間を算出する。

$$Z = 2 \times \sum_{k=1}^n (t_k (C_k) \times M_{10r}) \quad (10)$$

$$t_k (C_k) = t_0 \times \alpha \times \left(\frac{C_k}{C_a} \right)^{\beta} \quad (11)$$

但し、 Z ：幹線道路における渋滞総費用 [円]、 t_0 ：自由旅行時間（ゼロフロー時）[時]、 t_k ：旅行時間[h]、 C_k ：幹線道路における 1 時間当たりのトラック輸送回数 [台/時]、 C_a ：1 時間当たりのトラック交通容量 [台/時] (=380¹⁴⁾、 α 、 β ：交通パラメータ ($\alpha=0.48$ 、 $\beta=2.82$)。

(7) 2 次仮置場の整備費と運営費

表-2 で示した仮置場のコスト原単位は、聞き取り調査により算出した結果を用いている。しかし、渋滞発生等の影響により 2 次仮置場の運用期間が計画よりも増減した場合は、仮置場のコストも変動することが予想される。そこで、2 次仮置場の事業費は、次式より算出する。ここでは、初期整備と運営に係る費用を対象とする。

$$MC = DS \times (FS + P \times SM) \quad (12)$$

但し、 MC ：2 次仮置場事業費[円]、 DS ：2 次仮置場面積 [m^2]、 FS ：仮置場の初期整備費[円/ m^2] (=4,447¹⁵⁾)、 SM ：運営費仮置き場運営費[円・月/ m^2] (=380¹⁰)。

3. 結果と考察

(1) 災害廃棄物発生量と仮置場

結果として、家庭由来の災害廃棄物および津波堆積物は、約 143 万 t となった。これをもとに仮置必要面積を算出すると、約 29ha となった。これに対して、仮置場候補地の面積は約 54ha であり、合計値で見れば、町内で仮置場を十分に賄える計算となった。しかし、仮置き場候補地に占める公有地面積は約 10% しかなく、私有地に頼らなければ、災害廃棄物の保管・分別は難しいということがわかった。

続いて、各 1 次仮置場メッシュの候補地面積と必要面積との比較結果を図-5 に示す。図は、候補地面積と必要面積の差分を余剰面積で表している。即ち、余剰面積がマイナスになる仮置場は、近隣の災害廃棄物を他の仮置場に配分しなければならないことを意味している。結果として、全 29 メッシュのうち、5 メッシュが、余剰面積がマイナスであった。これらのメッシュでは、面積の 20% が余るように調整して、他の余剰面積があるメッシュに災害廃棄物を配分した(図-6)。

2 次仮置場の設置場所を図-7 に示す。余剰面積が 1ha 以上ある仮置場を 2 次仮置場にとすると仮定した場合、9



図-4 町内の幹線道路

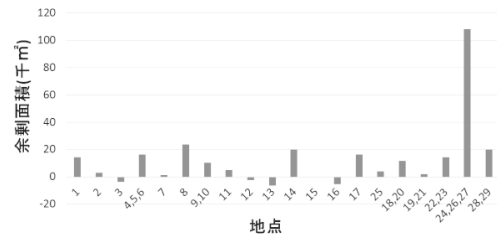


図-5 1 次仮置場別の災害廃棄物の余剰面積

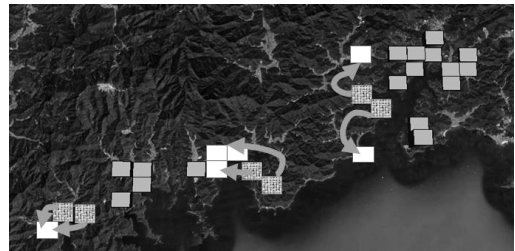


図-6 廃棄物配分の予測

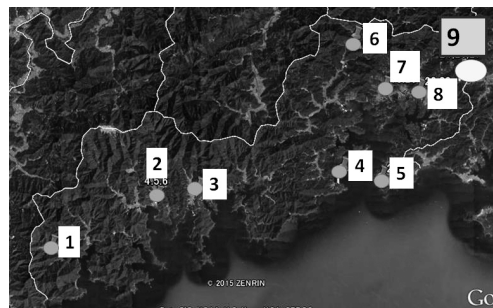


図-7 2 次仮置場の設置場所

ヶ所設置可能であった。また、9 番目の仮置場は、単体で約 10ha の面積があり、単独で 2 次仮置場を設置することも可能である。

(2) ライフサイクルコスト

特定廃家電由来の災害廃棄物の処理を対象としたライフサイクルコストの結果を図-8 に示す。ここでは、2 次仮置場を 9 ヶ所設置した場合とした。結果として、ライ

フサイクルでのコストは約1.2億円となった。このうち、仮置場における保管・分別費用が最もかかり、次に分別仮置場～リサイクル工場間輸送費用となり、処理に関する費用はほとんどかからないことがわかった。

(3) 2次仮置場の設置数とコストとの関係

2次仮置場を単独で設置するか9ヶ所で分散させて設置するかにより、運搬費用や運営費用は変化することが予想される。そこで、2次仮置場を単独で設置する場合をシナリオ1、2次仮置場を9ヶ所設置する場合をシナリオ2として、シナリオ間でのコストの差を算出した。

8時間/日の作業を行うと仮定したとき、シナリオ1の1次仮置場～2次仮置場間におけるトラック総必要台数は約12万3千台、コストは約28億円となった。シナリオ2では、トラック総必要台数は約7万5千台、コストは約47億円となった。シナリオ間でのコストの差分は約19億円であり、シナリオ2のほうがコスト面から有利であることがわかった。

(4) 2次仮置場の設置数と混雑時間との関係

トラック渋滞分析モデルを用いて、各シナリオの混雑時間とコストを算出した結果を、図-9、図-10に示す。結果より、2次仮置場が単数の場合と複数の場合とでは大きく渋滞が解消されることが分かった。廃棄物の輸送期間を6か月間で比べてみたときボトルネックの渋滞時間において、シナリオ1は約580(時/日)であり、シナリオ2の3倍であることがわかる。幹線道路の場合だと、シナリオ1は351(時/日)に対して、幹線道路は17時間であった。費用面でもシナリオ1は総額8億円に対し、シナリオ2は約2億円であり、シナリオ1の場合では輸送期間が約33か月間で渋滞や渋滞費用が解消されるが、シナリオ2の場合だと約15か月で渋滞や渋滞費用が解消されることがわかった。一方で、図-11の仮置場事業費の結果から見てみると先述したシナリオ1とシナリオ2における輸送コストの差を考慮したとき、約36か月間以上であれば、シナリオ2がシナリオ1より約19億円以上の差が出るということがわかった。よって1次仮置場～2次仮置場の輸送期間を3年に設定した場合は、シナリオ1のほうがコスト面から有利であるが、一方で、三重県¹⁾のように2年で自区内処理を完了するというを計画している場合は、コストもそうだが、渋滞の観点からシナリオ2のほうがよいといえる。

4. おわりに

本稿では将来の自然災害に伴い発生する災害廃棄物の処理に伴うライフサイクルコストを試算することを目的

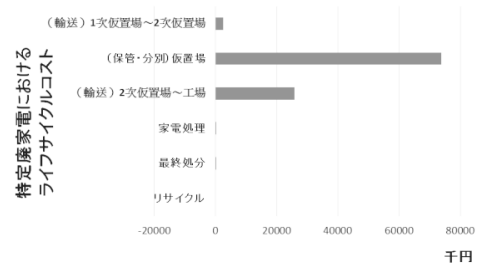


図-8 ライフサイクルコストの結果

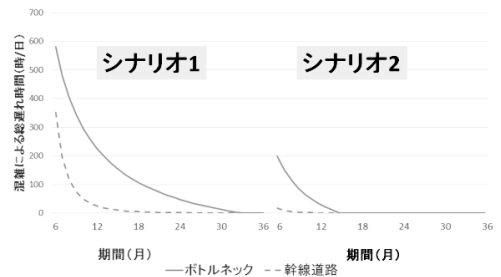


図-9 トラック総混雑時間 (8時間/日作業)

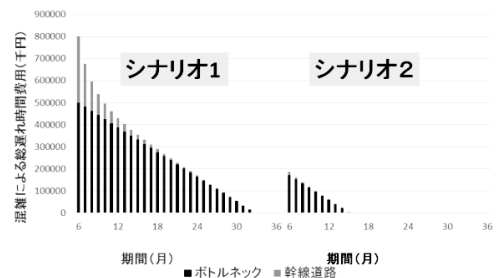


図-10 混雑総費用 (8時間/日作業)

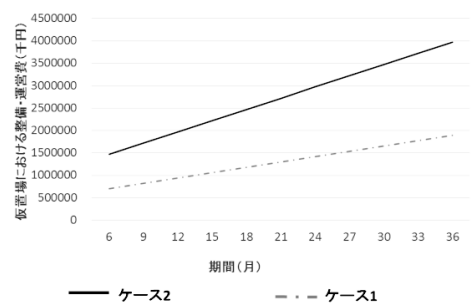


図-11 仮置場における整備・運営費

とし、三重県南伊勢町を事例対象地域として、特定廃家電由来の災害廃棄物の処理に伴うコストの試算を行った。また、輸送モデルを構築し、仮置場間での災害廃棄物の配分、2次仮置場の設置数、渋滞発生に関する費用分析を行った。結果として、廃家電由来の災害廃棄物を対象とした場合のライフサイクルコストは1.2億円であることが示された。廃棄物の処理費用よりも搬入・保管・分別費用が圧倒的にかかることがわかった。またその際、事例地域内では仮置場の公有地率が非常に低いことがわ

かり、民有地を使用しなければならないことが分かった。また、分別仮置場を1カ所に集中するか9ヶ所設けるシナリオを比較した結果、輸送期間が3年以内であれば、仮置場を複数に設定したほうが費用面や渋滞面ではよいという結果が得られた。これらの結果から、災害廃棄物処理計画の作成において、仮置場の選定や廃棄物の撤去・輸送・保管・分別時のコストの把握、渋滞に伴う処理コストの変化を慎重に考えることの重要性が示された。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(3K143015)の助成を受けて実施した。個々に記して、謝意を表す。

引用文献

- 1) 三重県：三重県災害廃棄物処理計画，2015，<http://www.eco.pref.mie.lg.jp/details/index.asp?cd=2015030524>
- 2) 伊川純慶，中久保豊彦，東海明宏：レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物(可燃系廃棄物)処理の対策効果分析，土木学会論文集 G(環境)，71，pp.II_253-II_262，2015。
- 3) 丹治三則：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，第11回日本LCA学会研究発表会論文集，pp.174-175，2016。
- 4) 田畑智博，若林陽平，蔡佩宜：災害廃棄物処理システムの構築に関する考察，第11回日本LCA学会研究発表会論文集，pp.178-179，2016。
- 5) 高知県：高知県災害廃棄物処理計画(基本計画)の各種推計方法等について，2013，http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030801/files/2013112500397/2013112500397_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_life_97136_354228_misc.pdf
- 6) 田畑智博，張欧，山中優奈，蔡佩宜：統計・ウェブ情報を用いた耐久消費財由来の災害廃棄物発生原単位の推計とその利用，土木学会論文集 G(環境)，Vol.71，pp.II_441-II_449，2015。
- 7) 国立環境研究所：災害廃棄物の発生原単位について(第一報)，2011，https://www.nies.go.jp/shinsai/genntanni_no1_110628.pdf
- 8) 国立環境研究所：高知市災害廃棄物処理計画 Ver.1(概要版)，2015，http://dwasteinfo.nies.go.jp/topic/project_man/after_kochi_city_summary.pdf
- 9) 荒井康裕，池田有斗，稲員とよの：震災廃棄物の輸送計画に関するモデル分析，土木学会論文集 G(環境)，Vol.71，pp.II_263-II_270，2015。
- 10) 佐伯孝，佐野隼翼，蔡佩宜，田畑智博：災害時に発生する廃棄物の発生・処理に関する研究，第10回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，pp.28-29，2015。
- 11) 市橋市：市原市福増クリーンセンター第二工場(ごみ焼却施設)基幹的設備改良事業に係る費用対効果分析結果，2014，https://www.city.ichihara.chiba.jp/kurashi/gomi/clean_center_const/hukumasukikankairyuu.files/hiyoutaikoukabunnsekikukka.pdf
- 12) 国土交通省：平成22年度道路交通センサス，2011，<http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>
- 13) 環境省：東日本大震災に係る災害廃棄物処理事業の取り組みについて，2012，<https://www.env.go.jp/jishin/attach/no110527004.pdf>
- 14) 元田良孝，倉内文孝，清水哲夫，嶋本寛，吉田樹，宇佐美誠史：震災発生時の避難行動と復興途上の交通運用管理の研究，第14回JICE研究開発助成成果報告会，2014，<http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/review/assurances/results/h24-05h.pdf>

(2016.8.26 受付)

LIFE CYCLE COSTING OF TREATMENT OF DISASTER WASTE DERIVED FROM SPECIFIED KINDS OF HOME APPLIANCES -CASE STUDY OF AN AREA EXPECTED TO BE AFFECTED BY THE NANKAI MEGA-THRUST EARTHQUAKE- Yohei WAKABAYASHI, Peii TSAI and Tomohiro TABATA

As part of pre-disaster waste management, this study estimated the life cycle cost for treatment of waste generated from future natural disasters. In this study, the town of Minami-Ise in Japan was identified as being within an area expected to be affected by Nankai Mega-thrust earthquake. Disaster waste derived from specified kinds of home appliances was evaluated in this study.

The results of the life cycle costing process, which considered factors such as transportation, storage, segregation at primary and secondary temporary storage sites, and treatment, estimated the total cost at approximately 1.2 billion JPY. We also assessed the difference in transportation costs for two scenarios: (1) one secondary temporary storage site located in the study area, and (2) nine secondary temporary storage sites placed throughout the study area. The results showed that scenario (2) costs approximately 14 billion JPY less than scenario (1). We also confirmed that scenario (2) offers the advantage of avoiding traffic congestion during disaster waste transportation.