

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

井ノ口 弘昭¹・秋山 孝正²・横山 大³

¹関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:hiroaki@inokuchi.jp

²関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:akiyama@kansai-u.ac.jp

¹関西大学大学院 理工学研究科 環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: k469575@kansai-u.ac.jp

大規模災害に伴って発生する災害廃棄物の輸送は、地域に対する物資輸送と早期復興のための基本要件となっている。しかしながら、現実の災害廃棄物輸送においては、道路交通環境や廃棄物発生量など時系列的な不確定要素が想定される。また廃棄物輸送の基本的理念は、リサイクルを含む早期の廃棄物処理の完了であると考えられる。本研究では、これらの理念を踏まえて、定量的な廃棄物処理プロセスを提案可能な基本問題を定式化する。すなわち、廃棄物処理問題における基本要素を整理するとともに、各種の不確実性を前提にした基本的な数理計画問題を定式化する。具体的には、従来型の線形輸送問題 (transport problem) を前提として、災害廃棄物輸送問題に対応する目的関数と制約条件の記述方法を検討する。すなわち現実的要素を追加的に拡張可能な定量的な基本問題が定式化される。さらに、現実ネットワークに対する問題設定から実用性を検証する。

Key Words : debris treatment, transport problem, traffic assignment

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災では、地震・津波により宮城県・岩手県・福島県などにおいて甚大な被害が発生した。また、2016年4月の熊本地震災害においても、地震による被害が発生している。被災地では、家屋の倒壊・流失が多く発生している。早期の復興のために、震災廃棄物の早期の処理が必要不可欠である。

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・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。このため、本研究では、大規模災害における廃棄物輸送手順を検討する。ここでは、廃棄物発生地から処理場までの輸送に関して検討する。このとき、震災発生からの時間経過に応じて交通状況が変化するため、変化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。

2. 災害廃棄物処理に関する事例整理

ここでは、災害廃棄物処理に関して、既存事例を整理し、方法を検討する。既存事例として、東日本大震災に関して処理手順を整理する。災害廃棄物処理の基本フローを図-1に示す¹⁾。

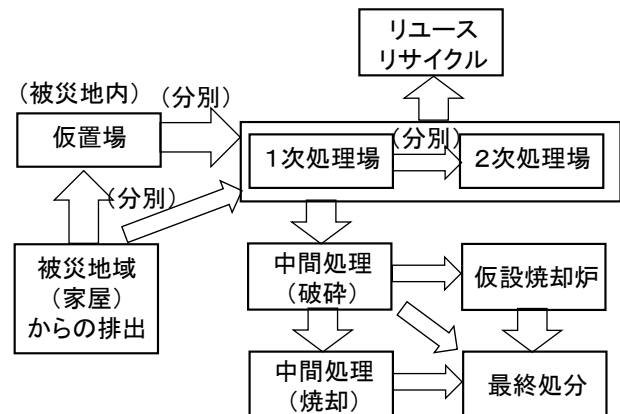


図-1 災害廃棄物処理の基本フロー

倒壊などにより解体された建築物は、第1次処理場に集められる。第1次処理場では、木くず、コンクリートくず、金属くずなどに荒選別が行われる。この第1次処理場への搬入は、生活環境に支障が生じうる災害廃棄物に関しては平成23年8月、その他の災害廃棄物に関しては平成24年3月までに行うことが目標とされていた²⁾。これらの処理は、市町村から委託を受けた業者が行っている。また、第2次処理場では、分別・中間処理・焼却などが行われる。これらの処理の完了目標は、平成26年3月末とされており、放射性物質による汚染が発生した福島県の一部の地域を除いて、目標期間内に処理が完了している。この処理は、第2次処理場への搬入を含めて、県から委託を受けた業者が行う³⁾。

処理場への輸送に関して、がれき量が多いため、多くのダンプトラックが必要となる。このため、多数の地域でGPSを用いた車両運行管理システムを導入し、リアルタイムで運行状況を管理していた⁴⁾。また、一部の地域では、道路混雑を避けた経路誘導が行われていた。

ここでは、処理場への輸送に関して、道路混雑状況を考慮した計画が必要と考え、輸送問題を定式化する。

本研究に関連する既存研究として、震災廃棄物の輸送ネットワークについて考察した研究が挙げられる⁵⁾。これは、自動車専用道路・河川空間を活用した輸送ネットワークの構築に関して検討したものである。また、GISを用いて震災廃棄物の発生量を推計し、輸送計画を立案する研究が報告されている⁶⁾。本研究では、これらの成果を踏まえて検討する。

3. 災害廃棄物輸送モデルの構築

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。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-2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。

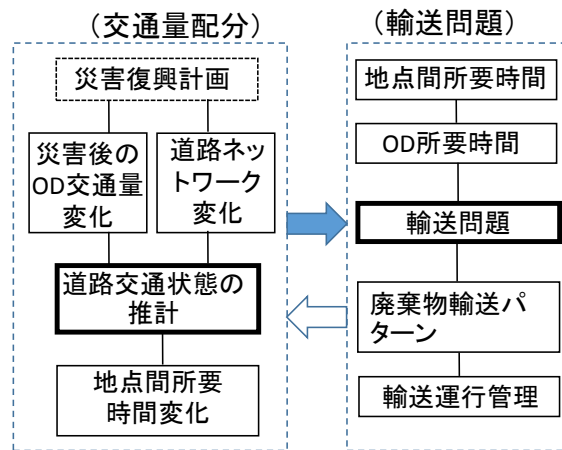


図-2 災害廃棄物輸送モデルのフロー

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⁷⁾。

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

s.t.

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega$$

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

$$f_k^{rs} \geq 0, x_a \geq 0$$

ここで、 Ω はODペア集合、 K_{rs} はODペア rs 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 rs の交通量、 f_k^{rs} はODペア rs ・経路 k の経路交通量、 $\delta_{a,k}^{rs}$ は $\delta=1$ （リンク a にODペア rs の k 番目の経路が含まれる場合） $\delta=0$ （リンク a にODペア rs の k 番目の経路が含まれない場合）を示す。ここでは、廃棄物輸送以外の一般交通の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ため、この所要時間も算定し、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。

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

s.t.

$$d_r = \sum_s q_{rs} \quad (\text{廃棄物供給量})$$

$$d_s = \sum_r q_{rs} \quad (\text{廃棄物需要量})$$

$$q_{rs} \geq 0$$

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-2 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。

4. 災害廃棄物輸送モデルの適用

本章では、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-3 に示す。

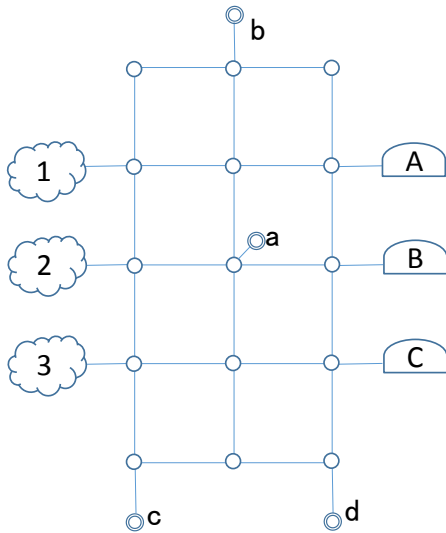


図-3 道路ネットワークモデル

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⁾。

$$t_a = t_{a0} \left(1 + 0.48 \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^{2.82} \right) \quad (3)$$

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-1 のように設定する。

表-1 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

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-2 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。また、必要輸送量の合計と廃棄物受入量の合計は等しくしている。

表-2 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

(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-3 に示す。

表-3 一般交通の OD 表 (第 1 期)

O \ D	a	b	c	d
a	-	800	800	800
b	800	-	500	500
c	800	500	-	500
d	800	500	500	-

震災後の初期では、災害対策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4に示す。

表-4 往復輸送時間(第1期) 単位：分

O \ 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4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。

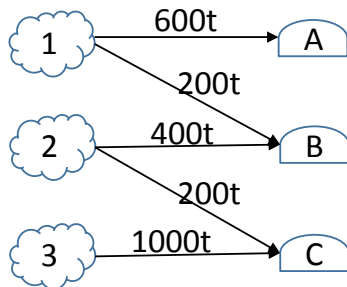


図-4 最適廃棄物輸送パターン (第1期)

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5に示す。

表-5 一般交通の OD 表 (第2期)

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

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6に示す。

表-6 往復輸送時間(第2期) 単位：分

O \ 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、輸送時間が增大している。

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4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7に示す。

表-7 一般交通の OD 表 (第3期)

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

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8に示す。

表-8 往復輸送時間(第3期) 単位：分

O \ 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4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5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。

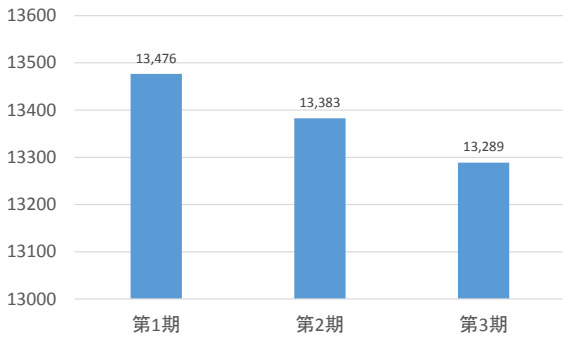


図-5 各期の総輸送時間

(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。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。これは、作業時間の平滑化および輸送効率の向上を目指すものである。

1 日あたりの輸送量の算定結果を図-6 に示す。

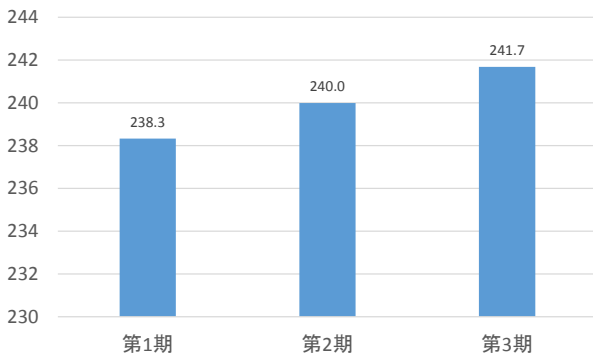


図-6 総輸送時間を基にした 1 日あたり輸送量

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必要がある。

5. おわりに

本研究では、交通状況変化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。本研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 災害廃棄物輸送モデルのフローを提案した。交通量配分と輸送問題のサブモデルで構成され、それぞれの定式化を行った。
- 2) 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した。今回の設定では、道路交通状況の変化による最適輸送パターンの変化は観測されなかったが、総輸送時間は各期で相違することが確かめられた。
- 3) 輸送時間の平準化を行った最適輸送パターンを算定した。この結果、初期は 1 日あたりの輸送量を若干少なくし、第 3 期に多くすることで、輸送効率の向上につながることを確認された。

今後の課題として、道路ネットワークの損傷程度、仮置場の容量・処理施設の処理速度などを考慮した輸送計画をモデル化することが挙げられる。

最後に本研究は、環境省環境研究総合推進費（3K-153008）「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持続可能な適応策評価」の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 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://kouikishori.env.go.jp/disaster_waste/outline_processing/index.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) 宮城県：「災害廃棄物処理業務の記録」，2014.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析，丸善，pp. 39-71，1998.
- 8) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第 II 編 利用者均衡配分モデルの展開，丸善，pp. 25-57，2006.

(2016. 4. 22 受付)