

準動学的表現による汚染土壌運搬問題の定式化

今泉 孝章¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: imaizumi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

東日本大震災による福島原発の事故により放射性物質が各地の土壌に残存している。従ってこの土壌を速やかに処理施設へ運搬することが求められるが、従前の危険物輸送問題とは異なる特徴を持っている。そこで、本研究ではこのような地域に存在する汚染土壌の運搬における特有の問題を考慮したモデルの構築を行う。

Key Words : *hazardous materials transportation, contaminated soil, semi-dynamic, bi-level programming*

1. はじめに

危険物輸送に関して交通の分野からは、事故が発生したときのリスクを軽減するための輸送経路計画などの方策を中心に過去に多くの研究が存在する。例えば、東日本大震災により被災した福島第一原発の事故により多くの放射線物質が各地の土壌に残存しており、安心して安全な暮らしのためにはこの汚染土壌を速やかに処理施設へと運搬することが求められる。しかしながら国、地元自治体をはじめとした多くのステークホルダーが関係していることや、土壌の運搬のための経路をどうするのか、どの程度資源(人、運搬車両)を活用できるのか、集約して運搬を行う場合それをどこに配置するのかといった問題が輸送以外にも存在する。そこで本研究では危険物輸送において、特に地域の存在する汚染土壌の輸送問題に注目し、従前の危険物輸送とは違った特徴をもつことを明確にしたうえで、それを考慮したモデルの構築を行う。

2. 本研究の位置づけ

危険物輸送問題について、朝倉ら(2002)¹⁾は危険物輸送車両がある都市に及ぼす被害のリスクの大きさを距離と危険物の被害の範囲の程度を表わす減衰パラメータ、活動水準によって定量化し、経路ごとのリスクの評価に用いることができると述べている。長江、赤松(2007)²⁾は現実の危険物輸送を想定し、リスクが最小となる単一経路ではなく、複数経路への車両を分散する方法を述べている。Bahar Y.Kara and Vedat Verter(2004)³⁾、Erhan Erkut and Fatma Gzara(2008)⁴⁾はネットワークデザイン問題として定式化を行い利用経路を制限することによって危険物車両の制御する枠組みを提案している。また Paola

Cappanera and Maddalena Nonato(2014)³⁾はネットワークデザインのような強い規制ではなく、ある特定のノード(チェックポイント)を通ることを義務付けることで経路をコントロールし輸送リスクを減少させる枠組みを提案している。以上の既往研究はアプローチは異なるが、すべて危険物輸送車両が通行する経路を制御することでリスクを減少させることを試みている。しかし、汚染土壌輸送については以下のような特徴がある。

- 短期間に大量の汚染土壌をできるだけ速やかに最終輸送先へ運搬したい。
- 各輸送元、最終輸送先で利用できる車両の台数に限りがある。
- 道路容量、集約場と最終輸送先の受け入れ容量が存在する。
- 迷惑施設である集約場をどこに開設するかが未決定である。
- 各輸送元管理者、最終輸送先管理者など複数のステークホルダーが存在する。

したがって本研究では輸送経路以外に、時間軸、車両台数、集約場開設場所、受け入れ可能容量を考慮した定式化を行う。

3. 問題の定式化

問題の定式化に際し以下の仮定を設ける。

- 時間軸を一定時間をもった期に分割して考える。
- 複数の集約場の候補地から実際に配置する集約場とその容量を決定する。
- 輸送元、集約場に汚染土壌がある場合、量に応じた保管迷惑コストがかかる。
- 輸送を開始する際、すべての大型車両を各輸送元へ

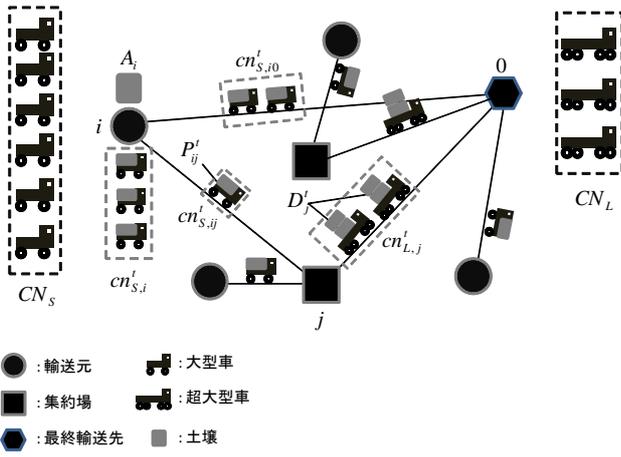


図-1 汚染土壌の運搬模式図

配分するが、輸送元の土壌がなくなるまで輸送元における大型車両の配分は変わらない。

- 各期ごとに輸送元は配分された大型車両を各集約場、最終輸送先へ配分し運搬を行う。土壌がなくなった場合は適当な輸送元にその大型車両を分配する。
- 各期ごとに最終輸送先は各集約場へ超大型車両を配分し運搬を行う。
- 集約場、最終輸送先に容量を超過する土壌が運搬された場合には保管迷惑コスト以外に余分なコストがかかる。
- 輸送元、集約場、最終輸送先の間を移動する際は移動コストがかかる。

図-1 に汚染土壌の運搬の模式図を示す。

このとき操作変数としては集約場の配置、容量、輸送元への大型車両への初期割り付け、各期における輸送元から集約場への大型車の割り付け、最終輸送先から集約場への超大型車の割り付けが考えられる。集約場の配置、容量、輸送元への大型車両の初期割り付けは長期的な意思決定であり、一方各期における輸送元から集約場への大型車両の割り付け、最終輸送先から集約場への超大型車両の割り付けは短期的な意思決定であるといえるので二段階最適化問題として定式化を行う。表-1 に定式化で用いる変数を示す。

(1) 下位問題 ~各期におけるコスト~

各期におけるコストは、(a) 輸送元での土壌保管迷惑コスト、(b) 集約場での土壌保管迷惑コスト、(c) 土壌運搬コスト、(d) 集約場、最終輸送先で超過した土壌の滞留コストで構成される。(a) は式で表わされる。

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} M_i^t \quad (1)$$

このとき式 (2)~(10) の制約条件がある。

表-1 変数の定義

$G = (\mathbf{L}, \mathbf{N})$	リンク \mathbf{L} とノード \mathbf{N} から成るネットワーク。
\mathbf{I}	輸送元ノードの集合。但し、 $ \mathbf{I} = I$, $\mathbf{I} \in \mathbf{N}$
\mathbf{J}	集約場ノードの集合。但し、 $ \mathbf{J} = j$, $\mathbf{J} \in \mathbf{N}$
0	最終輸送先ノード。但し、 $\mathbf{I} \cup \mathbf{J} \cup 0 = \mathbf{N}$
A_i	輸送元 i の土壌の送料。 $i \in \mathbf{I}$
CN	各輸送元から利用可能な車両総数。
$cn_{S,i}^t$	t 期に輸送元 i に割り付けられた車両の数。 $i \in \mathbf{I}$
$cn_{S,in}^t$	t 期に輸送元 i からノード n に割り付けられた車両の数。 $i \in \mathbf{I}$, $n \in \mathbf{J} \cup 0$
CL_L	最終輸送先から利用可能な車両総数。
$cn_{L,j}^t$	t 期に最終輸送先から集約場 j に割り付けられた車両の数。 $j \in \mathbf{J}$
ca_S	輸送元から出発する大型車両の運搬容量。
ca_L	最終輸送先から出発する超大型車両の運搬容量。
P_{in}^t	t 期にノード i から n に運搬される土壌の量。 $i \in \mathbf{I}$, $n \in \mathbf{J} \cup 0$
D_j^t	t 期に集約場 j から最終輸送先へ運搬される土壌の量。 $j \in \mathbf{J} \cup 0$
W	キャパシティを考慮するために区切った一期の長さ
k_n^t	t 期のノード n の (流入量-流出量) の値。 $n \in \mathbf{N}$
X_i^t	t 期末の輸送元 i における土壌の量。 $i \in \mathbf{I}$
Y_n^t	t 期末のノード n における土壌の量。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
M_n^t	t 期のノード n での土壌保管コスト。 $n \in \mathbf{I} \cup \mathbf{J}$
E_n^t	t 期末のノード n で受け入れることができなかった土壌の量。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
μ_n	ノード n でのボトルネック容量 (単位期あたりの受け入れることのできる土壌の最大量)。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
α_n	ノード n で溢れた土壌に関するコストパラメータ。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
T_n^e	ノード n への土壌の運搬とノード n からの土壌の運搬がどちらもとも終了する期。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
T_{max}	T_n^e のうち最大のもの。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
T_{min}	T_n^e のうち最小のもの。 $n \in \mathbf{J} \cup 0$
ε	$T_{max} - T_{min}$ の許容範囲を指定する変数。
L_n	ノード n を開設する場合 1, そうでなければ 0 の変数。 $n \in \mathbf{I} \cup 0$, $L_0 = 1$
Z_n	集約場 j を開設する場合の迷惑コスト。 $n \in \mathbf{I} \cup 0$
r_{nm}	ノード n から m までの移動コスト。 $n \in \mathbf{I} \cup \mathbf{J}$, $m \in \mathbf{J} \cup 0$

$$M_n^t = \frac{1}{2} W (X_n^{t-1} + X_n^t) \quad n \in \mathbf{I} \quad (2)$$

$$A_i = \sum_{t=1}^{T_{max}} \sum_{n \in \mathbf{J} \cup 0} P_{in}^t \quad i \in \mathbf{I} \quad (3)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + k_n^t \quad i \in \mathbf{I} \quad (4)$$

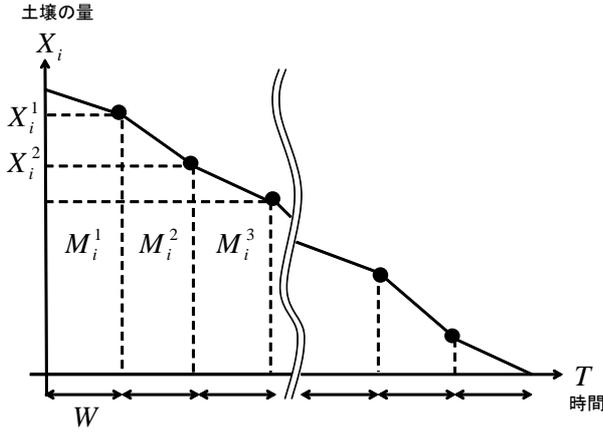


図-2 汚染土壌量の変化模式図: 輸送元

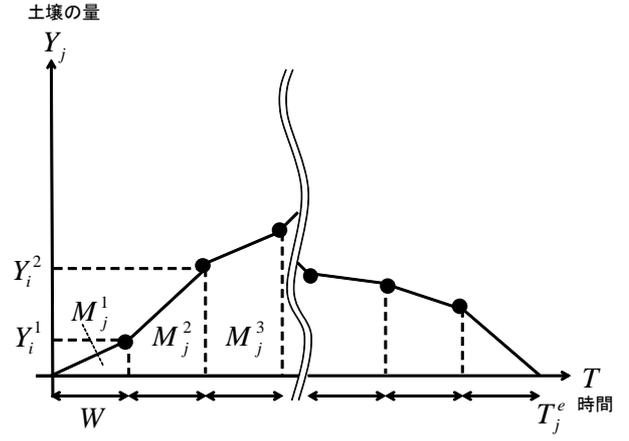


図-3 汚染土壌量の変化模式図: 集約場

$$X_i^0 = A_i \quad i \in \mathbf{I} \quad (5)$$

$$X_0^{T_{\max}} = \sum_{i \in \mathbf{I}} A_i \quad (6)$$

$$k_n^i = \sum_{n'=0}^J P_{mn'}^t \quad n \in \mathbf{I}, n' \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (7)$$

$$P_{in}^t = cn_{S,in}^t \cdot ca_S \quad n \in \mathbf{I}, n' \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (8)$$

$$cn_{S,i}^t = \sum_{n=0}^J cn_{S,in}^t \quad i \in \mathbf{I}, n \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (9)$$

$$CN_S = \sum_{i=1}^I cn_{S,i}^t \quad i \in \mathbf{I} \quad (10)$$

図-2は輸送元における土壌量変化の模式図を表わしたものである。時間が経つにつれ単調に減少していることがわかる。

式(2)は輸送元での土壌保管迷惑コストが図-2中の各期間の台形の面積であることを示している。

式(3)は輸送元の土壌の量についての保存条件である。式(4)は集約場における今期の土壌の量は前期の土壌の量に今期の土壌の変化量を加えたものと等しいことを示している。式(5)は輸送元土壌の初期量に関する条件である。式(6)は最終輸送先へ運搬される土壌の量はすべての輸送元の土壌の量の総和であることを示している。式(7)は輸送元の土壌の変化量に関する条件である。式(8)は輸送元から運搬される土壌の量が割り付けられた大型車の数にその容量を乗じたものに等しいことを示している。式(9),(10)は大型車の数に関する保存条件である。

(b)は式(11)で表わされる。

$$\sum_{j \in \mathbf{J}} M_j^t L_j \quad (11)$$

このとき式(12)~(18)の制約条件が存在する。

$$M_n^t = \frac{1}{2} W (Y_n^{t-1} + Y_n^t) \quad n \in \mathbf{J} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^{T_j^e} k_j^t = 0 \quad j \in \mathbf{J} \quad (13)$$

$$Y_n^t = Y_n^{t-1} + k_n^t \quad n \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (14)$$

$$Y_n^0 = 0 \quad n \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (15)$$

$$k_n^t = \sum_{i=0}^I P_{in}^t - D_i^t \quad n \in \mathbf{J}, i \in \mathbf{I} \quad (16)$$

$$D_j^t = cn_{L,j}^t \cdot ca_L \quad j \in \mathbf{J} \cup 0 \quad (17)$$

$$CN_L = \sum_{j=1}^J cn_{L,j}^t \quad j \in \mathbf{J} \quad (18)$$

図-3は集約場における土壌量変化の模式図を表わしたものである。増加と減少を繰り返しながら最後は土壌の量が0になっているのがわかる。

式(12)は輸送元での土壌保管迷惑コストが図-3中の各期間の台形の面積であることを示している。

式(13)は集約場の土壌は最終的には0になることを示している。式(14)は集約場における土壌の量は前期の土壌の量に土壌の変化量を加えたものと等しいことを示している。式(15)は集約場の土壌の初期量に関する条件である。式(16)は集約場の土壌の変化量に関する条件である。式(17)は最終輸送先へ運搬される土壌の量が割り付けられた超大型車の数にその容量を乗じた

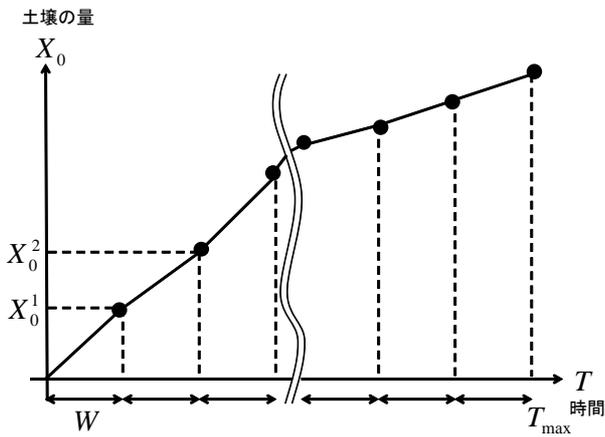


図-4 汚染土壌量の変化模式図: 最終輸送先

ものに等しいことを示している. 式 (18) は超大型車の数に関する保存条件である. また, 図-4 に最終輸送先における土壌量変化の模式図を示す. 時間が経つにつれ単調に増加しているのがわかる.

(c) は式 (19) で表わされる.

$$\sum_{i \in I} \sum_{n \in J \cup 0} cn_{S,in}^t r_{in} + \sum_{j \in J} cn_{L,j}^t r_{j0} \quad (19)$$

これは輸送元, 集約場, 最終輸送先を移動した車両の台数に各施設間の移動コストを乗じたものに等しい.

(d) は式 (20) で表わされる.

$$\sum_{n \in J \cup 0} \alpha_n \frac{E_n^t}{\mu_n} L_n \quad (20)$$

このとき式 (21) のような制約条件がある.

$$E_n^t = \max(0, E_n^{t-1} + k_n^t - \mu_n W) \quad n \in J \cup 0 \quad (21)$$

式 (21) は今期受け入れることができない土壌の量は前期に受け入れることができなかった土壌の量と今期に流入してきた土壌の量がボトルネック容量を引いたものであること示している. 従って式 (20) はボトルネック容量に対する今期受け入れることができなかった土壌の量の比率にコストパラメータを乗じたものである.

以上より下位問題の最小化すべき目的関数は式 (22) で表わされ, これを最小化するために $cn_{S,ij}^t$ を操作する.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} M_i^t + \sum_{i \in J} M_i^t L_j + \sum_{n \in J \cup 0} \alpha_n \frac{E_n^t}{\mu_n} L_n \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{n \in J \cup 0} cn_{S,in}^t r_{in} + \sum_{j \in J} cn_{L,j}^t r_{j0} \end{aligned} \quad (22)$$

(2) 上位問題 ~全期におけるコスト~

全期におけるコストは (a) 各期におけるコストの総和, (b) 集約場の開設コストから構成される. (a) は式 (22) を

全期にわたって足し合わせたものであるので, 式 (23) のように表わされる.

$$\sum_{t=1}^{T_{\max}} \left(\sum_{i \in I} M_i^t + \sum_{i \in J} M_i^t L_j + \sum_{n \in J \cup 0} \alpha_n \frac{E_n^t}{\mu_n} L_n + \sum_{i \in I} \sum_{n \in J \cup 0} cn_{S,in}^t r_{in} + \sum_{j \in J} cn_{L,j}^t r_{j0} \right) \quad (23)$$

(b) は式 (24) のように表わされる.

$$\sum_{n \in J \cup 0} L_n Z_n \quad (24)$$

このとき制約条件として式 (25) がある.

$$T_{\max} - T_{\min} \leq \varepsilon \quad (25)$$

式 (25) は各集約場において土壌の量が 0 になるタイミングを ε よりも小さくするための制約条件である.

以上より下位問題の最小化すべき目的関数は式 (26) で表わされ, これを最小化するために $L_n, \mu_n, cn_{S,i}^0$ を操作する.

$$\sum_{t=1}^{T_{\max}} \left(\sum_{i \in I} M_i^t + \sum_{i \in J} M_i^t L_j + \sum_{n \in J \cup 0} \alpha_n \frac{E_n^t}{\mu_n} L_n + \sum_{i \in I} \sum_{n \in J \cup 0} cn_{S,in}^t r_{in} + \sum_{j \in J} cn_{L,j}^t r_{j0} \right) + \sum_{n \in J \cup 0} L_n Z_n \quad (26)$$

4. まとめと今後の課題

汚染土壌の危険物輸送問題において, 従前の研究のように経路のみならず保管・容量・車両台数などを考慮したうえで問題の定式化を行った. 長期的な意思決定である集約場の配置と容量と各輸送元への大型車の配分を上位問題の操作変数とし, 短期的な意思決定である各期における輸送元から集約場, 最終輸送先への大型車の配分と最終輸送先から各集約場への超大型車の配分を下位問題の操作変数とした.

今後の課題は以下の 4 点である. 1 点目は数値計算による解の性質の検証である. 今回は定式化するだけにとどまったが, どのような輸送戦略が最適であるのかの知見を得るために簡単なネットワークを使った数値計算を行う必要がある.

2 点目は解法アルゴリズムの構築である. 上位問題, 下位問題ともに離散変数をもつ組み合わせ最適化問題である. 従って大規模なネットワークでの計算を想定する場合ヒューリスティクス手法が必要となる.

3 点目は道路ネットワークを明示的に扱う場合への拡張である. 今回は車両の集中による不効用を集約場, 最終輸送先における期あたりの受け入れ可能土壌の量のみによって表現した. しかし, 現実の輸送においては狭い道路に大型車両が集中することによる混雑の問題などが発生することが予想される.

4 点目は混雑による不効用と関連するが, 大型車の集中による道路へのダメージの考慮である. 短期間に多数の大型車両が通行することにより道路は通常よりも早

く劣化すると考えられる。道路のダメージを考慮した場合の車両の最適な配分戦略を考え、道路ダメージを考慮しない場合と比較することは意義のあることと言える。

参考文献

- 1) 朝倉康夫, 羽藤英二, 青山洋, 伊藤龍秀: 危険物輸送を考慮した道路ネットワークのリスク評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26, 2002.
- 2) 長江剛志, 赤松隆: 危険物輸送のためのカタストロフ回避戦略, 土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 4, pp. 509-523, 2007.
- 3) Paola Cappanera, Maddalena Nonato: The Gateway Location Problem: a cost oriented analysis of a new risk mitigation strategy in Hazamat Transportation, Social and Behavioral Science, pp. 918-926, 2014.
- 4) Erhan Erkut, Fatma Gzara: Solving the hazamat transport network design problem, Computers & Operations Research, Vol. 35, pp. 2234-2247, 2008.
- 5) Bahar Y.Kara, Vedat Verter: Designing a Road Network for Hazardous Materials Transportation, Transportation Science, Vol. 38, pp. 188-196, 2004.
- 6) 土木学会土木計画学研究委員会交通需要予測技術検討小委員会: 道路交通需要予測の理論と適用 第2編 利用者均衡配分モデルの展開, 土木学会, 2006.

Formulation of contaminated soil transportation problem using semi-dynamic method

Takaaki IMAIZUMI and Eiji HATO

A lot of radio active substance exist in the soil in Fukushima by the accident of the Fukushima Nuclear Power Plant caused by the Great East Japan Earthquake. So, it is required that we transport it to the treatment plant as soon as quickly, but this problem has different characteristics from those of the prior hazardous materials problem. In our paper, we formulate the model which considers the characteristics of the contaminated soil transportation.