

沿道及び交通状況を反映した危険物輸送経路の リスク評価と最適経路決定問題

尾頭 尚人¹・杉下 佳辰²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail:n.ogashira@plan.cv.titech.ac.jp

²学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail:k.sugishita@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail:asakura@plan.cv.titech.ac.jp

爆発物や毒物などを積載した危険物輸送車が、交通ネットワーク上を日常的に走行している。交通事故などが原因でこれらの危険物が漏出した場合、周辺住民や交通ネットワークに甚大な影響を与える可能性がある。本研究では、危険物が漏出することによる沿道にいる人々への影響と交通ネットワーク上で利用者均衡状態にある一般車両への影響の両者を反映させて、走行経路のリスクを定量的に評価するとともに、危険物輸送車が走行するのに最適な経路や配分量を決定するモデルを構築した。また、これらのモデルを仮想ネットワークに適用し、評価基準や危険物の種類による危険物輸送車の最適走行経路の比較を行った。

Key Words : hazardous materials transportation, risk assessment, user equilibrium, routing

1. はじめに

産業活動を支える上で、危険物の扱いは避けられない。特に先進工業国では膨大な量の危険物が日常的に取り扱われている。ここでの危険物とは人々や資産、環境に害を与える可能性がある物質のことである。国連では危険物を火薬類、高圧ガス、引火性液体類、可燃性物質類、酸化性物質類、毒物および伝染性病原体、放射性物質、腐食性物質、その他有害性物質に分類している¹。

大抵の場合、危険物の発生・生産場所と処理・使用場所は異なる（例えば製油所とガソリンスタンド）ため、輸送する必要がある。世界では1年間に約40億トンの危険物が輸送されている。輸送手段としては車、鉄道、船、飛行機などがあるが、多くの輸送で車が利用されている。アメリカでは、車での危険物輸送重量は全輸送重量の43%程度であるのに対して、輸送回数は全輸送回数の94%である²。そのため危険物輸送中の事故の多くは、車での輸送中に発生している。

危険物輸送車の事故を、輸送中に危険物が容器から漏出する出来事と定義し、以下では「漏出事故」と呼ぶ。漏出事故は他車との接触や横転、危険物積載方法の誤りなどが原因で起きる。漏出事故の発生確率は極めて低いが、

万が一発生した場合、大損害をもたらす可能性がある。日本では、漏出事故は年間20件程度起きている³。2008年8月の首都高速5号線事故では、横転したタンクローリーから大量のガソリンが漏出して大火災が発生した。これにより、道路が73日間通行止めとなった。2015年6月には、京都市で他車に接触したタンクローリーから大量の塩酸が漏出し、周辺住民の避難や道路の閉鎖が余儀なくされた。海外でも、漏出事故は度々起きており、2013年2月には中国河南省で火花を積んだトラックが突如爆発し、橋が崩落した。2017年6月には、パキスタン中部で横転したタンクローリーからガソリンが漏出し、100人以上が引火して発生した爆発の犠牲になった。

上述した例のように漏出事故は甚大な被害をもたらす可能性があるにも関わらず、道路上の危険物輸送経路に関する法律は十分とは言えない。日本では、道路法第46条によって水底トンネルおよび長大トンネルの通行が禁止または制限されている。このような規制の範囲内で輸送業者が選んだ経路を自由に走行しているのが現状である。多くの場合は、旅行時間が最小となる経路を選択していると予想される。このような経路は、漏出事故が起きたとき甚大な影響を与える危険性を持つ経路である可能性がある。

また、危険物輸送車はテロリストの攻撃の対象となりやすい。2007年以降、イラクの人口密集地域で毒物を積載したトラックが狙撃される事件が度々起き、その内の1件は有毒ガスが放出し多数の死傷者が出た。このような前例から、シンガポールでは、危険物輸送車追跡システム(HITVTS)を導入して、走行経路の管理を行っている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、危険物輸送車が走行する経路が持つ潜在的なリスクについて、沿道状況や交通状態を考慮した上で評価するとともに、最適な走行経路や配分量を求めることを目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

(1) 既往研究の整理

道路ネットワーク上の危険物輸送に関する研究はここ30年間で多くなされている。研究の焦点は大きく分けて2つある。1つ目は危険物輸送車がある経路を走行するリスクを定量的に求めることであり、2つ目はリスクマネジメントの観点からどの経路を走行するのが最適かを決定することである。

リスク評価に関して、Batta and Chiu⁴⁾は、ある経路上での漏出事故による影響を拡散した危険物の被害を受ける人の数とし、被災面積と人口密度の積から求めている。これにその経路で漏出事故が起きる確率を掛けてリスクを定義している。この考え方は多くの研究で用いられており、本研究でも利用する。朝倉ら⁵⁾は、沿道にある都市が漏出事故によって被害を受ける確率を都市までの距離や危険物の拡散の度合いから求め、その都市の活動水準を考慮し、経路を走行するリスクを評価している。Erkut and Ingolfsson⁶⁾は、リスク評価に人々の危険物に対する嫌悪感を反映させており、より大損害をもたらす危険物であるほど指数関数的にリスクを高くしている。

走行経路の決定に関して、Erkut et al.⁷⁾は、局所的経路問題と広域的経路問題に分類している。局所的経路問題とは各危険物輸送車が独立して走行経路を決める問題であり、Batta and Chiu⁴⁾はリスク最小経路を最適経路としている。Revelle et al.⁸⁾は、危険物輸送車が走行する経路沿いの人数の合計が最小となる経路を最適経路としている。一方、大域的経路問題とは、ネットワーク全体を見た上で各危険物輸送車の走行経路を決める問題であり、一本の経路に危険物輸送車を集中させるべきではないという考えが根底にある。長江・赤松⁹⁾は、危険物輸送車の各経路への配分比を求める問題が、凸計画問題に帰着できることを明らかにし、これを利用した効率的な数値解法を開発している。Garridoa and Bronfman¹⁰⁾は、各経路の最大許容リスクなどを制約条件とし、漏出事故による影響の条件付期待値を最小化する線形分数計画問題を解くこ

とで、危険物輸送車の各経路への配分を求めている。

リスクだけでなく走行費用も考慮して経路を検討する研究もいくつかある。杉木ら¹¹⁾は、経路を変更することによる走行費用やリスクの変化を定量的に求め、より少ない費用の増加でリスクを削減できる効率的な経路変更のあり方を示した。またFan et al.¹²⁾は、走行する経路のリスクと走行費用に重みを付けて加え合わせたものを目的関数としており、それぞれをどの程度重視するかによって重みを変化させ、最適な経路を決めている。

(2) 本研究の位置づけ

危険物輸送車に関する多くの既往研究では、他の一般車の存在について触れられていない。しかし現実では、道路ネットワーク上を危険物輸送車と一般車は入り混じって走行している。したがって、漏出事故が起きた場合、沿道への影響だけでなく交通への影響も大きいと予想される。特に主要幹線道路が漏出事故により閉鎖された場合、莫大な金銭的損害が発生する。本研究では、沿道と交通の両者への漏出事故による影響を想定し、リスク評価モデルを構築する。

3. 危険物輸送経路のリスク評価モデル

危険物輸送が走行するリスクの定量的評価を行うモデルについて説明する。

(1) 問題設定

モデルを構築する上で前提となる問題設定を示す。

- 本モデルは、複数のノードとリンクからなる有向ネットワークに適用する。ノードは交差点、リンクは道路を表している。
- ネットワーク上を、一般車と危険物輸送車の2種類の車が走行する。
- 一般車は、利用者均衡に基づいて配分される。なお、各リンクの旅行時間は一般車の交通量のみの関数で表される。
- 危険物輸送車が漏出事故を起こす確率は時間に比例する。また、同じリンク上なら、リンクのどの位置でも漏出事故による影響は等しい。さらに漏出事故により他のリンクが閉鎖されることはない。
- 危険物の種類によって、漏出半径、費用換算の値(人的損失費)、リンク閉鎖時間が異なる。

(2) 記号表記

本モデルで用いる記号の定義をまとめる。

G : 平常状態のネットワーク

N : ネットワーク G のノード集合

A : ネットワーク G のリンク集合

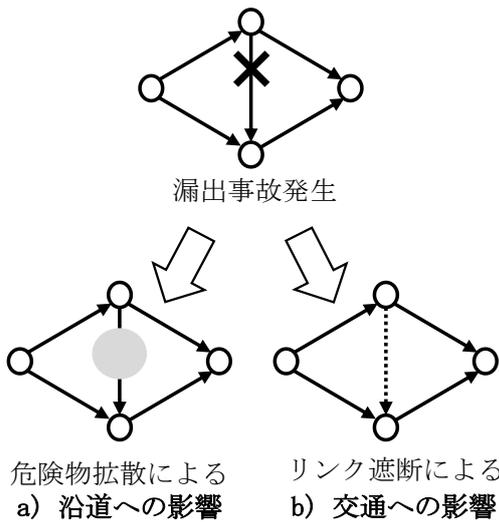


図-1 危険物漏出事による影響

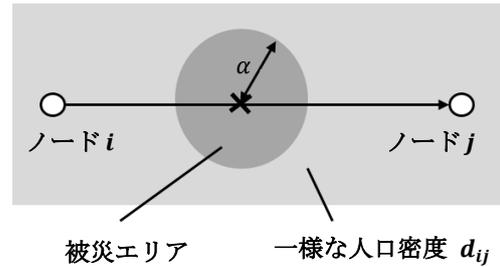


図-2 沿道への影響

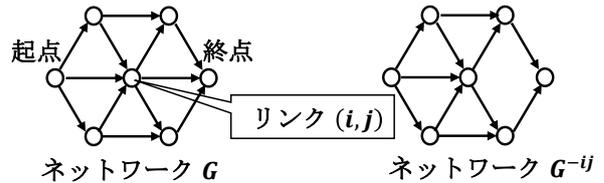


図-3 交通への影響

- d_{ij} : リンク (i, j) の沿道の人口密度
- t_{ij} : リンク (i, j) の走行時間
- x_{ij} : リンク (i, j) の一般車の交通量
- p_{ij} : リンク (i, j) の漏出事発生確率を走行時間により重み付けしたもの
- TT : ネットワーク G の一般車の総旅行時間
- G^{-ij} : G からリンク (i, j) を取り除いたネットワーク
- TT^{-ij} : ネットワーク G^{-ij} の一般車の総旅行時間
- c_{ij}^H : リンク (i, j) 上の漏出事による沿道への影響
- c_{ij}^T : リンク (i, j) 上の漏出事による交通への影響
- c_{ij} : リンク (i, j) 上の漏出事による影響
- r_{ij} : リンク (i, j) で危険物を輸送するリスク
- K : ネットワーク G の経路集合
- R_k : 経路 $k \in K$ で危険物を輸送するリスク
- α : 危険物の種類による, 被災エリアの半径
- β : 危険物の種類による, 人的損失費
- γ : 危険物の種類による, リンク閉鎖時間
- u : 時間価値

ただし, リンク $(i, j) \in A$ はノード $i \in N$ からノード $j \in N$ へ向かうリンクを表している. また α, β, γ は危険物の種類により与える確定的な値である.

(3) 漏出事による影響

漏出事が発生したときの影響の大きさを定量的に評価する方法を述べる. 本研究では図-1のように,

- a) 沿道への影響
- b) 交通への影響

の2つの影響を考える.

a) 沿道への影響

沿道への影響を, 漏出した危険物に曝される人の数とし, Batta⁴⁾の考え方をを用いる. 漏出した危険物の影響を受ける範囲を被災エリアとすると, 形状は図-2の

ような漏出事が起きた位置を中心とする円で表される. なお, 円の半径 α は危険物の種類によって決まる. また, リンク (i, j) の沿道の人口密度 d_{ij} を与件とすると, 危険物に曝される人の数は, 被災エリアの面積と沿道の人口密度の積として表される.

以上より, リンク (i, j) で漏出事が起きたとき沿道への影響の大きさは式(1)となる.

$$c_{ij}^H = \pi \alpha^2 \times d_{ij} \times \beta \quad (1)$$

ただし, β は漏出事による1人当たりの損失額であり, 危険物の種類により異なる.

b) 交通への影響

交通への影響を, 漏出事が起きたリンクが使えなくなることによる一般車の総旅行時間の変化とする. 図-3のように, 通常ネットワーク G と漏出事が起きたリンクが使えなくなったネットワーク G^{-ij} を考える. 各ネットワークでは, 一般車は利用者均衡に基づいて配分されている. ネットワーク G の一般車の総旅行時間は

$$TT = \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} t_{ij} \quad (2)$$

であり, ネットワーク G^{-ij} についても利用者均衡配分を実行して総旅行時間 TT^{-ij} を計算できる. これらから, 漏出事による1日当たりの総旅行時間の増加は $TT^{-ij} - TT$ となる. これにリンク (i, j) が復旧するまでの日数 γ を掛けることにより, 長期的な交通への影響を求めることができる.

以上より, リンク (i, j) で漏出事が起きたときの交通への影響の大きさは式(3)となる.

$$c_{ij}^T = (TT^{-ij} - TT) \times \gamma \times u \quad (3)$$

ただし, u は一般車1台の単位時間当たりの損失額, すなわち時間価値である.

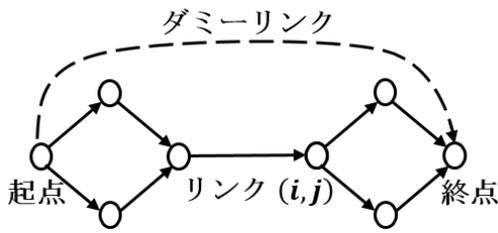


図4 ダミーリンク

また、図-4のようにリンクを取り除くことで、ネットワークが途切れる場合は、OD間を直接結ぶダミーリンクを用いる。一般車はこのリンクにより終点到に辿り着けるが、リンクが途切れる前の最短走行時間よりも極めて長い時間が掛かるようにリンクコスト関数を設定する。

a), b)で求めた沿道への影響の大きさと交通への影響の大きさの和を、リンク(i,j)での漏出事故による影響の大きさとし、式(4)に示す。

$$c_{ij} = c_{ij}^H + c_{ij}^T \quad (4)$$

(4) リスク評価

危険物輸送車がリンク(i,j)を走行するリスクの評価方法を示す。リンク(i,j)で漏出事故が起きたときの影響の大きさの期待値、すなわちリンク(i,j)上での漏出事故の発生確率と影響の大きさの積をリスクと定義する。しかし、漏出事故は稀な事象であるため、発生確率を与えることは難しい。そこで、リンク(i,j)漏出事故の発生は走行時間 t_{ij} に比例すると仮定し、相対的な漏出事故発生確率を式(5)のように重み付けする。

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}}{\max_{(i,j) \in A} t_{ij}} \quad (5)$$

これを用いて、リンク(i,j)を走行するリスクは式(6)となる。

$$r_{ij} = p_{ij} \times c_{ij} \quad (6)$$

また、危険物輸送車が経路kを走行するリスクは、式(7)のようにその経路を構成する各リンクを走行するリスクの総和とする。

$$R_k = \sum_{(i,j) \in A} r_{ij} \delta_{ij,k} \quad (7)$$

なお、 $\delta_{ij,k}$ はクロネッカーのデルタであり、リンク(i,j)が経路kに含まれるとき1、含まれないとき0となる。

(5) モデルのインプット・アウトプット

第3章で説明したモデルをまとめる。インプットとして与えるパラメーターを以下に示す。

- ネットワークGの形状(隣接行列)
- リンク(i,j)のリンクコスト関数
- リンク(i,j)の沿道の人口密度 d_{ij}

- 一般車のOD表
 - 危険物輸送車のOD表
 - 危険物の種類によるパラメータ(α, β, γ)
- アウトプットを以下に示す。
- リンク(i,j)の漏出事故による影響の大きさ c_{ij}
 - リンク(i,j)を走行するリスク r_{ij}

4. 危険物輸送最適経路決定モデル

第4章で定義した影響の大きさやリスクをもとに、危険物輸送車があるODペア間を走行するときの最適経路を決めるモデルについて説明する。危険物輸送車が1台の場合と複数台の場合に分けて考える。

(1) 記号表記

第4章で新たに用いる記号の定義をまとめる。

A_k : 経路kのリンク集合

m_{ij} : 危険物輸送車をトータルでm台配分したときのリンク(i,j)の危険物輸送車の累積交通量

M: 危険物輸送車のOD交通量

r_{ij}^m : 危険物輸送車をトータルでm台配分したときのリンク(i,j)の累積リスク

R_k^m : 危険物輸送車をトータルでm台配分したときの経路kの累積リスク

(2) 1台の危険物輸送車が走行する場合

最適経路を決定する方法として、二つの基準を与える。

a) リスク最小基準

式(8)のように、経路リスクが最小となる経路を最適走行経路とする。リンク(i,j)の重みを、このリンクを走行するリスク r_{ij} として、最短経路探索アルゴリズム(本モデルではダイクストラ法)を利用する。なお、これはBatta⁷⁾が提案したものと同様である。

$$\min_{k \in K} R_k \quad (8)$$

b) ミニマックス基準

式(9)のように、漏出事故による影響の大きさの最大値が最小となる経路を最適経路とする。

$$\min_{k \in K} \left(\max_{(i,j) \in A_k} c_{ij} \right) \quad (9)$$

式(8)は漏出事故の発生確率を考慮したリスクから最適経路を決めている一方、式(9)は漏出事故が起きた後の影響のみから最適経路を決めている。このように、生起確率が非常に低い影響が非常に大きいカストロフ的災害では、影響のみを評価することが多い¹³⁾。

しかし、ODペア間のすべての経路を列挙して式(9)を評価することは難しいため、本モデルでは次のようなアルゴリズムを用いる。ただしn回目の試行で求めた経路を k_n とする。

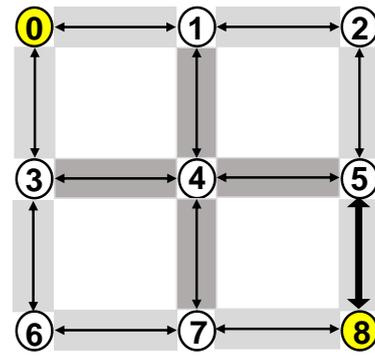
Step 0 : ダイクストラ法により, 経路を構成する各リンクの漏出事故による影響の大きさの総和が最小となる経路を求めて, k_1 とする.

Step 1 : 経路 k_n を構成するリンクから最も影響の大きさが大きいリンクを特定し, その影響の大きさを求める.

Step 2 : Step 1 で求めた数値以上の影響の大きさを持つリンクをネットワークから取り除く.

Step 3 : ダイクストラ法により, 経路を構成する各リンクの影響の大きさの総和が最小となる経路を求めて k_{n+1} とし, $n = n + 1$ で Step 1 に戻る. ネットワークが途切れて求まらない場合は, 経路 k_n を最適経路とする.

なお, これは Bell¹⁴⁾ が提案したものと同様である.



リンクコスト関数

- リンク (5, 8), (8, 5)
 $t = 1 + 0.5x$
- それ以外のリンク
 $t = 1 + x$

人口密度	1000
人口密度	100

図-5 適用するネットワーク

(3) 複数台の危険物輸送車が走行する場合

同じOD間を複数の危険物輸送車が走行する場合について考える. 各危険物輸送車の経路を, 同じ a) の基準に基づいて決めると, 全てが同一の経路に流れることになる. 危険物輸送車が繰り返し同じ経路を走行する度に, その経路上で漏出事故が発生するリスクは上がる. したがって, その経路の沿道に住む人や, 経路を利用する一般車は不満を持つ可能性がある. また, 複数台が集中することで漏出事故時の被害が大きくなる可能性もある. 以上から, 危険物輸送車をいくつかの経路に分散させる方法を示す.

リンク (i, j) に危険物輸送車が累積 m_{ij} 台走行した場合, リンク (i, j) のリスクは $r_{ij} \times m_{ij}$ になるとし, これをリンク (i, j) の累積リスク r_{ij}^m と定義する. すなわち,

$$r_{ij}^m = r_{ij} m_{ij} \quad (10)$$

となる. また, 経路 k の累積リスク R_k^m は

$$R_k^m = \sum_{(i,j) \in A_k} r_{ij}^m \quad (11)$$

となる. ある 1 つの OD ペア間を M 台の危険物輸送車が走行するとき, 特定の経路の累積リスクだけが高くなることを避けるため, 以下のアルゴリズムのように危険物輸送車を 1 台ずつ配分していく.

Step 0 : 1 台目は式(8)に基づくリスク最小経路を選択する. 走行経路を記憶し, 2 台目以降は Step 1 へ進む.

Step 1 : m 台目は式(12)となる経路を選択する. 走行経路を記憶する.

$$\min_{k \in K} (R_k + R_k^{m-1}) \quad (12)$$

Step 2 : $m > M$ となれば計算を終了する. そうでなければ, $m = m + 1$ として Step 1 に戻る.

このアルゴリズムにより M 台の危険物輸送車の各経路への最終的な配分量が求まる. なお, 危険物輸送車の OD

表-1 一般車と危険物輸送車の OD

車の種類	OD
一般車	ノード 2 → 6 : 100 台
	ノード 6 → 2 : 50 台
危険物輸送車	ケース 1 ノード 0 → 8 : 危険物 I が 1 台
	ケース 2 ノード 0 → 8 : 危険物 II が 1 台
	ケース 3 ノード 0 → 8 : 危険物 I が 10 台

表-2 危険物のパラメータ

危険物	漏出半径 α	費用換算値 β	リンク閉鎖日数 γ
I	1	1,000	1
II	0.05	400,000	20

ペアが複数ある場合は, 計算する OD の順番により配分パターンが変わる可能性があるため注意が必要である.

5. 仮想ネットワークへの適用

(1) 状況設定

第 3 章, 第 4 章のモデルを図-5 のような仮想ネットワークに適用する. リンクは双方向に移動できるとし, 沿道の人口密度は 1000 と 100 の 2 つの状態を与える. このネットワーク上を一般車と危険物輸送車が走行し, これらの OD を表-1 にまとめる. 一般車は利用者均衡に基づき OD 間に配分され, 危険物輸送車はノード 0 からノード 8 へ向かうとする. 輸送する危険物の種類や車両数から 3 パターンのケースを考える. 各ケースを計算する目的は, ケース 1 は評価基準による最適走行経路の違いを見ること, ケース 2 では輸送する危険物の種類による最適走行経路の違いを見ること, ケース 3 では複数の経路への配分を確認することである. 表-2 は 2 種類の危険

表-3 漏出事故による影響の大きさ・リスクの計算結果(ケース1)

リンク (i,j)	c_{ij}^H $\times 10^5$	c_{ij}^T $\times 10^5$	c_{ij} $\times 10^5$	r_{ij} $\times 10^5$	リンク (i,j)	c_{ij}^H $\times 10^5$	c_{ij}^T $\times 10^5$	c_{ij} $\times 10^5$	r_{ij} $\times 10^5$
(0,1)	3.14	0.08	3.22	0.83	(4,5)	31.42	0.04	31.46	7.25
(0,3)	3.14	0.30	3.45	1.71	(4,7)	31.42	0.16	31.58	13.94
(1,0)	3.14	0.30	3.45	1.71	(5,2)	3.14	0.36	3.50	1.78
(1,2)	3.14	0.33	3.47	1.69	(5,4)	31.42	0.16	31.58	13.94
(1,4)	31.42	0.21	31.63	15.20	(5,8)	3.14	0.38	3.52	1.05
(2,1)	3.14	1.24	4.38	4.19	(6,3)	3.14	0.32	3.46	1.69
(2,5)	3.14	1.36	4.50	4.50	(6,7)	3.14	0.36	3.50	1.78
(3,0)	3.14	0.08	3.21	0.83	(7,4)	31.42	0.04	31.46	7.25
(3,4)	31.42	0.05	31.47	7.87	(7,6)	3.14	1.36	4.50	4.50
(3,6)	3.14	0.12	4.38	4.19	(7,8)	3.14	0.09	3.24	0.97
(4,1)	31.42	0.05	31.47	7.87	(8,5)	3.14	0.09	3.24	0.51
(4,3)	31.42	0.21	31.63	15.20	(8,7)	3.14	0.38	3.52	0.20

表-4 漏出事故による影響の大きさ・リスクの計算結果(ケース2)

リンク (i,j)	c_{ij}^H $\times 10^5$	c_{ij}^T $\times 10^5$	c_{ij} $\times 10^5$	r_{ij} $\times 10^5$	リンク (i,j)	c_{ij}^H $\times 10^5$	c_{ij}^T $\times 10^5$	c_{ij} $\times 10^5$	r_{ij} $\times 10^5$
(0,1)	3.14	1.53	4.67	1.20	(4,5)	31.42	0.85	32.27	7.43
(0,3)	3.14	6.10	9.24	4.58	(4,7)	31.42	3.27	34.69	15.31
(1,0)	3.14	6.10	9.24	4.58	(5,2)	3.14	7.20	10.34	5.27
(1,2)	3.14	6.52	9.66	4.71	(5,4)	31.42	3.27	34.69	15.31
(1,4)	31.42	4.28	35.70	17.16	(5,8)	3.14	7.54	10.68	3.19
(2,1)	3.14	24.75	27.89	26.68	(6,3)	3.14	6.33	9.47	4.62
(2,5)	3.14	27.26	30.40	30.40	(6,7)	3.14	7.20	10.34	5.27
(3,0)	3.14	1.53	4.67	1.20	(7,4)	31.42	0.85	32.27	7.43
(3,4)	31.42	1.07	32.49	8.12	(7,6)	3.14	27.26	30.40	30.40
(3,6)	3.14	24.75	27.89	26.68	(7,8)	3.14	1.88	5.02	1.50
(4,1)	31.42	1.07	32.49	8.12	(8,5)	3.14	1.88	5.02	0.80
(4,3)	31.42	4.28	35.70	17.16	(8,7)	3.14	7.54	10.68	6.17

表-5 最適経路走行経路

ケース	基準	最適輸送経路	R_k	$\max_{(i,j) \in A_k} c_{ij}$	走行時間
1	リスク最小	0 → 1 → 2 → 5 → 8	8.07×10^5	4.50×10^5	106.53
	ミニマックス	0 → 3 → 6 → 7 → 8	8.65×10^5	4.38×10^5	117.80
	走行時間最小	0 → 1 → 4 → 5 → 8	2.43×10^6	3.16×10^6	66.03
2	リスク最小	0 → 3 → 4 → 5 → 8	2.33×10^6	3.25×10^6	66.40
	ミニマックス	0 → 3 → 6 → 7 → 8	3.80×10^6	2.79×10^6	117.80
	走行時間最小	0 → 1 → 4 → 5 → 8	2.90×10^6	3.57×10^6	66.03

物の特性を表すパラメータである。危険物 I は広範囲に小さい被害を与える拡散物質のようなものを想定し、危険物 II は局所的に大きい被害を与える爆発物のようなものを想定している。費用換算値 β は漏出事故の影響を受けた人の 1 人当たりの損失額を表すパラメータだが、危険物 I では避難による損失、危険物 II では負傷による損失が発生するとする。また時間価値 u を 15 とする。これらの換算値は Erkut⁷⁾ を参考に与える。

(2) 計算結果

a) ケース 1

ケース 1 の計算結果を表-3、最適輸送経路を表-5に示す。表-3より、全てのリンクにおいて漏出事故による沿道への影響 c_{ij}^H が交通への影響 c_{ij}^T の数倍から数百倍ある

ことが確認でき、漏出事故による影響 c_{ij} として沿道への影響 c_{ij}^H が高い割合を占めている。したがって、表-5から確認できるように、リスク最小およびミニマックス基準では人口密度が高いリンクを避けるような経路を最適としている。さらにリスク最小基準とミニマックス基準では異なる経路が最適となったが、経路を走行するリスク R_k などに大きな差はない。一方、走行時間最小となる経路(多くのドライバーが選択する可能性が高い経路)では、人口密度が高いリンクを通る経路が最適となっている。この経路は、他の基準による最適経路よりも漏出事故による影響の大きさ c_{ij} やリスク R_k が高く、危険物輸送車の走行を避けるべき経路であることが分かる。

b) ケース 2

ケース 2 の計算結果を表-4、最適輸送経路を表-5に示

表-6 各危険物輸送車の最適経路

台目	走行経路
1	0→1→2→5→8
2	0→3→6→7→8
3	0→1→2→5→8
4	0→3→6→7→8
5	0→3→4→5→8
6	0→1→2→5→8
7	0→3→6→7→8
8	0→1→2→5→8
9	0→3→6→7→8
10	0→1→4→7→8

表-7 各経路への最適配分量

経路	台数	R_k^{10}
0→1→2→5→8	4	4.22×10^6
0→1→4→5→8	0	5.61×10^6
0→1→4→7→8	1	6.90×10^6
0→3→4→5→8	1	4.67×10^6
0→3→4→7→8	0	5.96×10^6
0→3→6→7→8	4	4.59×10^6

す。ケース 1 (表-3)では漏出事故による影響として沿道への影響が高い割合を占めていたのに対し、ケース 2 (表-4)では両者の影響が反映されている。また、表-5を確認すると、ミニマックス基準ではケース 1 とケース 2 の最適経路は同じだったが、リスク最小基準ではケース 2 において人口密度が高いリンクを走行する経路が最適となった。したがって、広範囲に小さい被害を与える危険物を輸送する場合(ケース 1)は沿道の人口密度が低い経路が最適となる一方、局所的に大きい被害を与える危険物を輸送する場合(ケース 2)は交通への影響を考慮すると人口密度が高い経路でも最適となる可能性があることを確認できた。

また、ケース 2 のリスク最小基準と走行時間最小基準を比較すると、リスクには差があるが走行時間はほぼ同じである。すなわち走行時間の増加を抑えながらリスクを大きく減らす経路への転換が可能であることが示唆される。

c) ケース 3

ケース 3 の各危険物輸送車の最適経路を表-6、各経路への最適配分量を表-7に示す。多くの危険物輸送車は人口密度が低い経路に配分されるが、数台は人口密度が高い経路に配分されることが確認できる。各々の危険物輸送車が仮に式(8)のリスク最小基準に基づいて走行した場合、経路 0→1→2→5→8 を 10 台走行することになる。この経路の累積リスク R_k^{10} は 8.07×10^6 となり、表-7で示したこの経路の累積リスクの倍近くなる。したがって、式(12)に基づいて危険物輸送車を配分することにより、この経路の累積リスクは大きく抑えられている。

6. 結論と今後の課題

(1) 結論

本研究の成果を章ごとにまとめる。第 1 章では、危険物輸送車の現状および本研究の目的について述べた。第 2 章では、既往研究を整理し、本研究の位置づけを示した。既往研究では漏出事故による影響として沿道への影響のみを考えていたが、本研究では経路が閉鎖することによる交通への影響も考慮した。第 3 章では、漏出事故による沿道への影響と交通ネットワーク上で利用者均衡状態にある一般車両への影響の両者を反映させて、走行経路のリスクを定量的に評価するモデルを構築した。第 4 章では、第 3 章で定義した漏出事故による影響の大きさやリスクをもとに危険物輸送車の最適な走行経路や配分量を決定するモデルを構築した。第 5 章では、これらのモデルを仮想ネットワークに適用することで、最適経路の評価基準や危険物の種類による最適経路の違いや、複数の経路への配分を確認できた。また、走行時間の増加を抑えながらリスクを大きく減らす経路への転換が可能であることが示唆された。

(2) 今後の課題

本研究では、交通への影響を考える際、利用者均衡配分を(リンクの本数+1)回行っている。したがって大規模ネットワークに適用した場合、計算時間がかかり掛かるため、計算時間を短くする工夫を取り入れていく。

また、最適輸送経路を決める際、走行時間を考慮していないため、走行時間が大幅に長くなる経路が最適となる可能性がある。したがって、走行時間も取り入れた最適輸送経路の基準を作ることでより現実的な経路を決めることが可能となる。

さらに、複数の危険物輸送車の配分方法は、ある 1 つの OD ペア間を 1 種類の危険物を輸送するという最も簡単な状況を想定している。今後、より一般的(複数の危険物・OD ペア)なモデルに展開していく。

参考文献

- 1) United Nations Economic and Social Council's Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, UN recommendation on the transport of dangerous goods, model regulations, 2001.
- 2) Hazardous materials shipments. Office of Hazardous Materials Safety, Research and Special Programs Administration, US Department of Transportation, Washington, DC, 1998.
- 3) 総務省消防庁報道発表ホームページ www.fdma.go.jp/neuter/houdou_01/houdou28nen.html
- 4) Batta, R. and Chiu, S. S.: Optimal obnoxious paths on a network: transportation of hazardous materials, Operations Research, Vol. 36, No. 1, pp. 84-92, 1988.
- 5) 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.
- 6) Erkut, E. and Ingolfsson, A.: Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning, *Transportation Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 165-179, 2000.
 - 7) Erkut, E., Tjandra, S. A., and Verter, V.: Hazardous materials transportation, *Handbooks in operations research and management science*, Vol. 14, pp. 539-621, 2007.
 - 8) ReVelle, C., Cohon, J., and Shobrys, D.: Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes, *Transportation Science*, Vol. 25, No. 2, pp. 138-145, 1991.
 - 9) 長江剛志; 赤松隆. 危険物輸送のためのカストロフ回避戦略. 土木学会論文集 D, 63.4: 509-523, 2007.
 - 10) Garridoa, R. A. and Bronfmanb, A. C.: Equity and social acceptability in multiple hazardous materials routing through urban areas, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016.
 - 11) 杉木直, 早野亮, 朝倉康夫: 道路ネットワークにおける危険物輸送リスクを考慮した走行経路評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 30, pp. CD-ROM, 2004.
 - 12) Fan, T., Chiang, W.-C., and Russell, R.: Modeling urban hazmat transportation with road closure consideration, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 35, pp. 104-115, 2015.
 - 13) 中山昌一郎, 朝倉康夫: 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 2014.
 - 14) Bell, M. G.: Mixed route strategies for the risk-averse shipment of hazardous materials, *Networks*, 2006.

(2017.7.31 受付)