

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*

Evaluation of Transportation Route Considering Hazardous Materials Risk in a Road Network*

杉木直**・早野亮***・朝倉康夫****

By Nao SUGIKI**・Makoto HAYANO***・Yasuo ASAKURA****

1. はじめに

効率的な物流を支える道路ネットワークの信頼性評価に関して、OD間の連結性や時間信頼性指標の研究は行われてきたものの、交通（移動体）自体がリスクを持つ危険物輸送のリスク評価や信頼性分析に関する研究はほとんど見られない。危険物輸送車両が事故に巻き込まれる可能性は低いものの、その事故が周辺住民等に与える被害は非常に大きく、輸送物資自体が内包するリスクを道路ネットワークの信頼性評価に反映させることは非常に重要な課題となっている。

本研究では、道路ネットワーク上を危険物輸送車両が走行する際のリスク評価モデルを用いて算出されるリスク最小経路と、効率的輸送経路となる（時間費用を含む）コスト最小経路を比較することにより、より少ない費用でリスクを削減できる効果的な経路変更のあり方を検討するための枠組みを示す。北海道の道路網を対象にプローブ調査によって得られた危険物輸送車両の実走行経路データを用いて個別車両の輸送経路特性を把握し、全道ネットワークにおける危険物輸送経路の評価を行う。本研究は、これらの適用を通じ、削減しうるリスクとその際に必要なコストの観点から、リスク最小経路への転換可能性を検討することを目的とするものである。

2. 危険物輸送のリスク評価モデル

危険物輸送車両がOD区間内の選択経路を移動中、

*キーワード：危険物輸送、リスク評価モデル、ネットワーク信頼性、プローブ調査

**正員、修（情報）、（株）ドーコン 総合計画部

（札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号

TEL011-801-1555、FAX011-801-1556）

***正員、（株）ドーコン 防災保全部

****正員、工博、神戸大学大学院 自然科学研究科

事故や危険物格納容器の破損により積載危険物が漏出した場合、沿道のある地点が被害を受ける確率を考える。都市*i*が位置 (x_i, y_i) に離散的に分布していると仮定する。位置 (x, y) に存在する危険物輸送車両と都市*i*との直線距離 d_i は式(1)で与えられる。

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

危険物による被害は一定範囲内が全被害数の大部分を占め、一定距離をおくと被害はほとんどなくなり、それをさらに超えると被害はなくなると考えられるが、想定外の最悪の事態が発生した場合や、沿道住民の危機管理意識定着のため、「遠距離でも被害は小さいが一定の被害が発生するかもしれない」と仮定しよう。都市が被害を受ける確率は危険物までの直線距離によって指数的に減少するとすれば、積載危険物が漏出した危険物車両から距離 d_i に位置する都市*i*の被害確率 $P(d_i)$ は式(2)のように表される。

$$P(d_i) = \exp[-\alpha d_i] \quad (d > 0) \quad (2)$$

α ：危険物の種類による減衰パラメータ
危険物輸送車両がリンク $l[a, z(x, y), b]$ を移動するとき、都市*i*が被害を受ける確率の期待値 $P_i[i]$ は式(3)で表される。なお、漏出事故が発生する確率は走行距離に比例するが、単位走行距離あたりの事故発生確率はリンクによらず一定であるとしている。

$$P_i[i] = \int_a^b p(d_i(z)) dz \quad (3)$$

都市*i*の人口を N_i とすると、沿道全ての都市に与える被害者数の期待値 D_i は、

$$D_i = \sum_j N_j P_j[i] \quad (4)$$

となる。以上より、OD間において経路*k*を走行する場合のトータルリスク R_k は式(5)で表される。

$$R_k = \sum_l \delta_{k,l} D_l \quad (5)$$

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1 & (l \in k) \\ 0 & (l \notin k) \end{cases}$$

3. ネットワークにおける輸送経路評価手法

任意の OD ペアにおける複数の経路に対して、コストおよびリスクがそれぞれ最小となる経路が考えられる。すなわち、経済的に最適なコストが最小となる経路と、人口集中地区避け迂回するリスク上最適な経路である。これらを図 1 に示すようにそれぞれコスト最小経路 c_{\min} 、リスク最小経路 r_{\min} と定義する。

コストとリスクはそれぞれの経路に対して評価可能であり、コスト最小経路に沿って求めたコスト及びリスクを $R[c_{\min}]$ 、 $C[c_{\min}]$ 、リスク最小経路に沿って求めたコスト及びリスクを $R[r_{\min}]$ 、 $C[r_{\min}]$ とする。これらの間には以下の関係が成り立つ。

$$C[c_{\min}] \leq C[r_{\min}] \quad (6)$$

$$R[c_{\min}] \geq R[r_{\min}] \quad (7)$$

2つの経路が持つコストおよびリスクの差分によって、以下の指標を定義する。

$$\Delta C = C[r_{\min}] - C[c_{\min}] \quad (8)$$

$$\Delta R = R[c_{\min}] - R[r_{\min}] \quad (9)$$

式(9)はコスト最小経路からリスク最小経路への転換によって削減可能なリスク ΔR であり、式(8)はその際に必要とされるコストの増分 ΔC であると解釈できる。これらの比 $\Delta R / \Delta C$ が大きい経路では、相対的に少ないコストでリスク最小経路への転換が可能である。したがって、リスク - コスト比 $\Delta R / \Delta C$ を用いてネットワークにおけるリスク最小経路への転換の容易性を検討することが可能である。

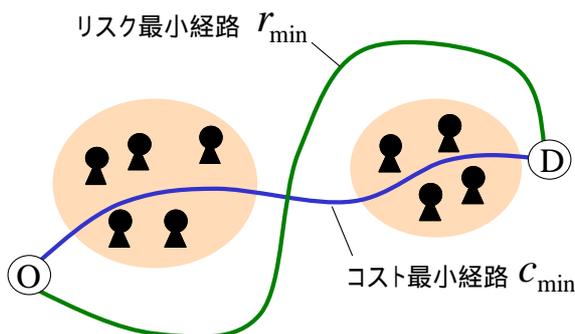


図 1 コスト最小経路とリスク最小経路

4. 分析用リンクデータベースの構築

図 2 に示す北海道の道路ネットワーク (H13 年度時点) を対象として各リンクのコストとリスクに関するデータベースを構築し、輸送経路の評価を行う。

(1) コストデータ

走行コストは、時間費用、走行費用、高速利用料金の和である一般化費用で定義する。経路 k のコストは通過リンクの属性に基づいて次のように表される。

$$C_k = \sum_l TMVL \cdot L_l / V_l + \sum_l TGAS / TMIL \cdot L_l + \sum_l TDCG \cdot L_l \cdot \delta_k^H + TERM \cdot N_l^H + FHCG \cdot N_l^{FH} \quad (10)$$

$TMVL$: 時間価値 $TGAS$: ガソリン代

$TMIL$: 燃費 $TDCG$: 対距離料金

$TERM$: ターミナルチャージ

$FHCG$: 均一区間料金

L_l : リンク l の距離 V_l : リンク l の速度

N_l^H : 高速道路 (対距離料金) 利用回数

N_l^{FH} : 高速道路 (均一料金) 利用回数

$\delta_l^H = \begin{cases} 1 & \text{リンク} l \text{ が対距離料金区間} \\ 0 & \text{リンク} l \text{ が対距離料金区間以外} \end{cases}$

ネットワークの規模は、リンク数 7108、ノード数 5764 である。

(2) リスクデータ

各リンクの被害人口リスクは、H12 年国勢調査による 3 次メッシュ人口データを利用し、式 (5) に基づいて算定した。その際、リンクの両端ノードとメッシュとの距離を求め、それらの平均値をリンクとメッシュとの距離に代替し、式 (3) の積分計算を簡略化した。減衰パラメータは $\alpha = 1.0$ と設定した。また、これらのリスクは一般道リンクに対してのみ算定され、事故発生確率の低い高速道路にはリスクは存在しないものとした。

5. 実走行経路情報を用いた個別輸送経路の評価

H13 年度および H14 年度に危険物輸送車を対象とした GPS プローブ調査が行われ、実走行経路のデータが得られている。実走行経路とリスク最小経路及びコスト最小経路の比較を行い輸送経路の実態を把握する。サンプル数

(ODペア数)は67である。

実走行データの経路について、3.の定義によるコスト $C[real]$ およびリスク $R[real]$ の算出結果を図2に示す。コストとリスクは、一般的には距離とともに増加するが、人口の多い札幌市などを通過する経路では、コストに比較してリスクの増加が大きい傾向が見られる。

実走行経路のあるODペア間でコスト最小経路およびリスク最小経路を探索した。図3はひとつのサンプルについて各経路を探索した結果である。実走行経路はコスト最小経路と非常に似通った経

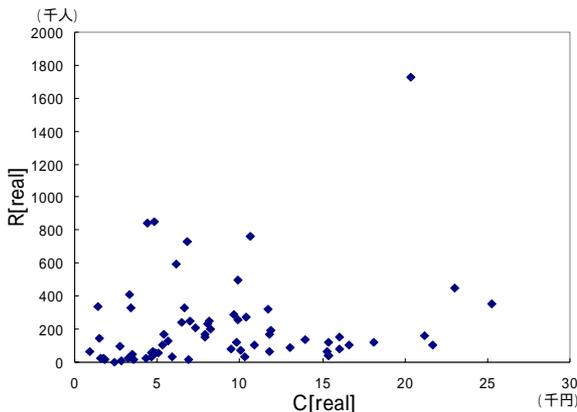


図2 実走行経路におけるコスト・リスク

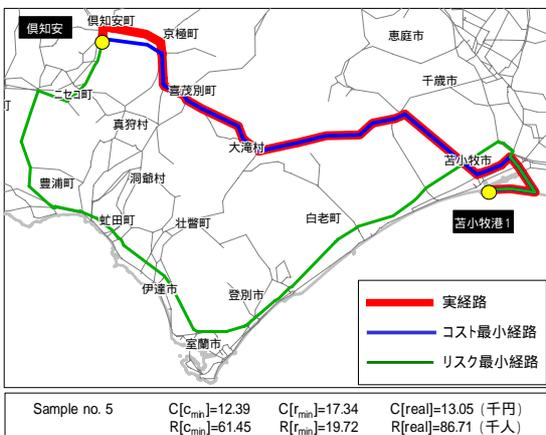


図3 コスト・リスク最小経路と実走行経路の例

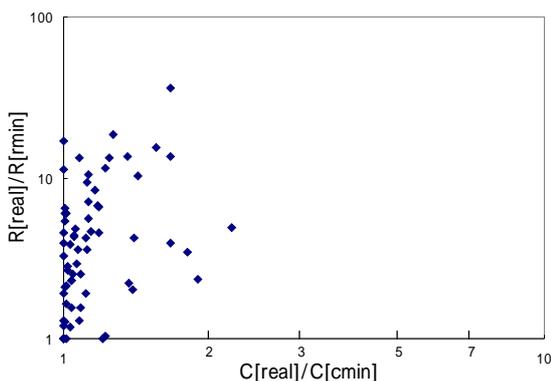


図4 実走行経路の評価

路であり、コスト最小経路からは大きく乖離していることがわかる。

図4は実走行経路のコスト及びリスクを、コスト最小経路のコスト $C[C_{min}]$ およびリスク最小経路のリスク $R[r_{min}]$ でそれぞれ除した評価値を各サンプルについてプロットしたものである。実走行経路のコストはほとんどが最小コストの1.2倍程度に収まっているのに対し、リスクは最小リスクの10倍程度まで幅広く分布しており、大きいものでは35倍程度まで達している。

これらの分析から、危険物は時間や費用を優先させた経済的なルートで輸送されており、潜在的に大きなリスクを内包していることが推察される。

6. 道内における危険物輸送経路の評価

H11年平日センサスデータから、積載品目のうち揮発油、石油製品、化学薬品を運搬したトリップのある市町村間を対象ODペアとして、道内全域の危険物輸送に関する道路ネットワークの評価を行う。

危険物交通量が存在するODペア間について、コスト最小経路とリスク最小経路を探索し、全て

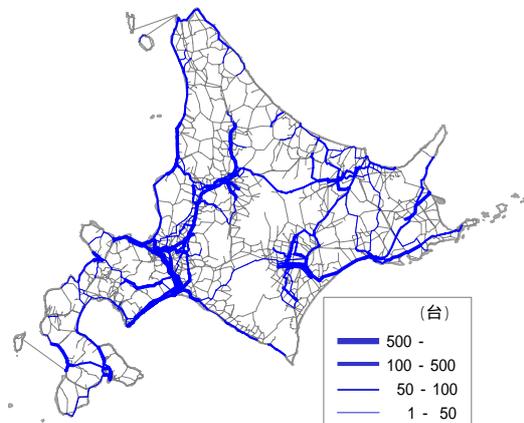


図5 コスト最小ケースにおけるリンク交通量

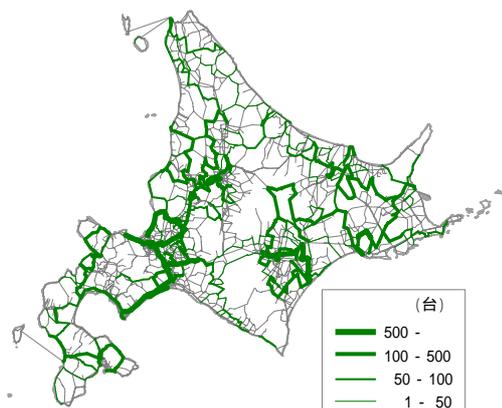


図6 リスク最小ケースにおけるリンク交通量

のトリップがコスト最小経路を通行した場合のリンク別交通量を図 5 に示す。一方、リスク最小経路を通行した場合のリンク別交通量を図 6 に示す。これらと比較した結果、特に道東、道北、道南地域では、コスト最小経路とリスク最小経路の通過リンクが大きく異なっていることがわかった。また、道央部では、リスク最小経路がリスクの少ない高速道路を通過する傾向が見られることも確認できた。

式(8)および式(9)より ΔC 、 ΔR を算出し、各市町村間 OD についてプロットしたものを図 7 に示す。図の左上に位置する OD ペアほど少ないコスト増で大きなリスクの削減が可能であることを意味する。逆に右下に位置するほど削減されるリスクが小さいにも関わらず大きなコスト増が必要であり非経済的な OD ペアである。トリップエンドのいずれかが札幌の OD ペアは左上に位置するものが多く、リスク最小経路への転換候補として考えられる。

各市町村間 OD について $\Delta R/\Delta C$ の値を算出した結果を図 8 に示す。値が大きくなっている OD ペアは札幌、苫小牧、室蘭、旭川等を結ぶものであり、これらは相対的に少ないコストでリスク最小経路への転換が可能である。逆に遠距離間を結ぶ OD ペアでは相対的に大きなコストが必要であり、転換が困難であることがわかる。この他、遠郊部の短距離トリップではコスト最小経路とリスク最小経路が一致するケースが見られた。

以上より、人口の集積する都市間の中距離輸送を中心に、リスク最小経路への転換により危険物輸送リスクを削減することが、その際のコスト増分を加味した上でも現実的に可能であることが示された。

7. おわりに

本研究ではネットワーク上での輸送リスク評価モデルを構築し、コスト最小経路とリスク最小経路の比較による危険物輸送リスクを考慮した道路ネットワークの信頼性評価手法を提示した。また、北海道の道路ネットワークに適用し、経路の転換によりリスクの削減が現実的に可能

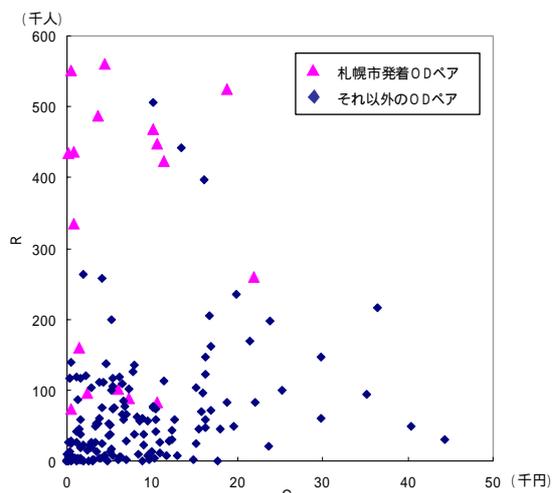


図 7 市町村間 OD ペアの ΔC および ΔR

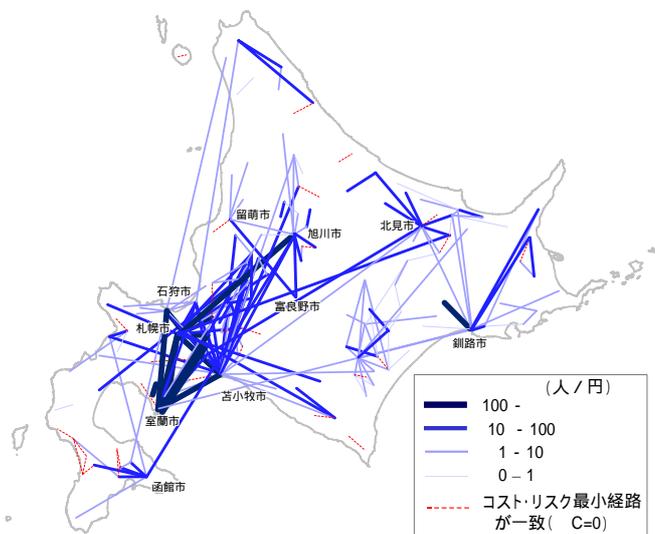


図 8 市町村間 OD ペアにおける $\Delta R/\Delta C$

な OD ペアが存在することが示された。今後は、ネットワークの信頼性における個々のリンクの評価を行い、リスクに対して脆弱なブラックスポットの抽出を行う予定である。

【謝辞】

本研究に際し、データ提供など協力をいただいた国土交通省北海道開発局札幌開発建設部はじめ、関係者の皆様に深くお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) Tatsuhide Ito, Makoto Hayano, Toshiyuki Naito, Yasuo Asakura, Eiji Hato and Tadayuki Wada : Empirical Analysis on Hazardous Material Transportation Using Road Traffic Census and Accident Data, City Logistics III, Taniguchi, E. and Thompson, R.G. (eds.), Institute for City Logistics, pp.245-258, 2003.
- 2) 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, CD-ROM, 2002.