

危険物輸送を考慮した道路ネットワークのリスク評価*

Risk Assessment for Road Network Considering Hazardous Material Transport

朝倉康夫**，羽藤英二***，青山洋****，伊藤龍秀*****
by Yasuo Asakura, Eiji Hato, Hiroshi Aoyama, Tatsuhide Itoh

1. はじめに

交通ネットワークの信頼性評価に関する研究では、OD ペア間の連結性や時間信頼性をはじめとする多様な信頼性評価指標が提案されている^[1]。これまでの研究では、交通ネットワークシステムの信頼性に影響を及ぼす要因として、(1) ネットワークを構成するリンクやノード、またはそれらを含む供給システム側の要素の機能障害、または(2) 交通需要の日変動(day-to-day dynamics)や利用者行動(たとえば経路選択)のばらつきなどの需要側の要素の不確実性に着目してきた。

ネットワーク連結性指標は(1)のみを考慮したものであるし、時間信頼性指標は主に(2)に起因する不確実性を評価しようとするものである。(1)と(2)を同時に考慮して、パフォーマンスの期待値または確率分布から信頼性を評価した研究も行われている^[2]。しかし、需要側の不確実性を信頼性評価に反映させる場合でも、ネットワーク上を流れるフロー(あるいは個々の移動体・車両)自体が周辺環境に対して持つリスクは考慮されていない。

道路ネットワークを利用する車両の中には、火災物や劇毒物といった危険物を輸送する車両が一定の割合で含まれている。後述するように、危険物輸送は様々な法律により厳格に規制されており、輸送中に危険物が漏出するような重大事故が発生する確率は小さいと考えられる。しかし、一旦危険物輸送車両が事故に巻き込まれて周辺に危険物が漏出したときには、周辺の自然および社会環境に甚大な影響を与えることは明らかである。道路ネットワークシステムの信頼性を総合的に評価するには、交通フロー自体が持つリスク

、言い換えれば危険物輸送車両の通行によるリスク要因を考慮する必要があるものと思われる。

本研究の目的は、危険物輸送車両のように移動体自体がリスクを持つケースに着目し、交通ネットワークの信頼性分析のためのリスク評価手法についての基礎的検討を行うことにある。具体的には、以下の2点を目的としている。

- (1) 交通ネットワーク上で危険物が漏出したときの影響について、輸送ルートを持つリスクの大きさの序列を相対的に比較するための指標を提案すること。
- (2) 危険物輸送を考慮した交通ネットワーク評価について、リスク指標を用いたいくつかの考え方を提示すること。

なお、沿道環境に対してリスクを持つという意味では、大気汚染や騒音・振動などの視点から沿道環境に負荷を与える車両をリスク発生源としてとらえ、以下に述べるモデルの枠組みの中でそれらをネットワーク評価に取り込むことも可能である。その意味では、「危険物輸送車両」を「ネットワーク上のリスク移動体」に一般化してモデル化すべきかもしれないが、議論を複雑にしないため、以下では危険物輸送に限定して検討を進めるとにしたい。また、ネットワークの種類も道路ネットワークに限定する。

2. 危険物輸送の実態と関連研究

(1) 危険物輸送の実態

危険物輸送(hazardous material transport)についてわが国では、火薬類取締法、高圧ガス保安法、毒物および劇物取締法、消防法、放射線障害防止法、薬事法等の法律によりその輸送方法や条件が定められており、水底トンネルの通行時には道路奉仕高齡で「通行の禁止または制限」が設けられている。これらの法律のうちネットワーク上での輸送経路に言及したものは限定的であり、ITSの国際標準化(ISO/TC204)に関するビジネスチームレポート^[3]によれば、「危険物に関する

* Keywords: 交通ネットワーク, 危険物輸送, リスク評価

** 正会員 工博 神戸大学大学院自然科学研究科
(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町, asakura@kobe-u.ac.jp)

*** 正会員 博(工) 愛媛大学工学部環境建設工学科
(〒790-8577 松山市文京町, hato@en2.ehime-u.ac.jp)

**** 学生員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程
(〒790-8577 松山市文京町)

***** 正会員 農修 (株)ドーコン研究開発部
(〒004-0051 札幌市厚別区厚別中央 1-5-4-1)

法律は、その製造、貯蔵に関して数多くの法規制を持ちながら、その輸送については一部を除いて表示を行うことのみで大半が自由走行しているのが実態のようである」とされている (pp.29)。

危険物輸送中の事故については、消防法で規定する危険物を輸送中に発生した事故の状況が消防白書に公表されている。平成6年から10年の5年間についてみると、危険物輸送中の事故件数は158件(火災70件、漏えい88件)であり、年間平均で30件以上の事故が発生していることになる。人的被害(死傷者数)は5年間に22名である。

最近発生した危険物輸送車両の事故として、国道8号線(石川県加賀市熊取町)で発生したタンクローリーの横転漏えい事故(H.13.1.24)、首都高速1号線で発生したタンクローリー横転漏えい事故(H.11.12.15)、首都高速2号線で発生したタンクローリー爆発事故(H.11.10.29)が挙げられる^[4]。発生件数は必ずしも多いとはいえないが、首都高速2号線の事故では高速道路を通行中の車両だけではなく高架道路下の一般道路通行中の車両・歩行者も事故に巻き込まれるなどの重大事故となっている。また、危険物車両は関係していないが、平成12年3月から4月には、山陽自動車道のトンネル、大阪府の水越トンネル、首都高速湾岸線でいずれも火災事故が発生するなど、潜在的なリスクは小さくないものと考えられる。

米国では危険物輸送に関して、危険物発送数、移動数の統計が公開されている^[5]が、わが国の危険物輸送状況の詳細は必ずしも明らかではない。現在、その実態を知るために、北海道地域を対象に道路交通センサスによる分析、危険物輸送事業所へのヒアリング、交通事故マッチングデータによる分析を進めているところである。

(2) 危険物輸送に関する研究

交通ネットワーク上での危険物輸送に関して、輸送経路の最適化の視点から多くの研究がなされている。たとえば、Nozick et. al^[6]は、交通ネットワーク上で時刻に応じて経路を適切に変更することにより、リスクを最小にするような危険物輸送のモデル化に関する研究である。この研究では、事故の発生率の空間パターンが時間的に変化することを考慮しつつ、多目的の経路探索アルゴリズムを用いた最適な輸送経路決定アルゴリズムを提案している。

William et. al^[7]は、GISを利用した危険物輸送の最適な経路を決定するための意思決定システムに関する研究である。この研究では、複数の

制約(距離、沿道人口、事故確率など)の下で、旅行時間を最小にする経路選択問題をヒューリスティックに解くアルゴリズムを組み込んだ実用的な(実ネットワークを扱える)意思決定支援システムが提案されている。

この他、わが国ではITSのサービス分野のひとつとして危険物車両の位置管理システムなどの研究・開発が行われているが、ネットワークのリスク評価や信頼性分析と関連づけた研究は見られない。

3. 輸送ルート of リスク評価モデル

ODペア間のある1本の経路を1台の危険物車両が移動する場合に、その経路が持つリスクを評価する方法について考えよう。以下の前提を置く。

- ネットワークを含む地域内に複数の都市が離散的に立地している。都市*i*の位置を座標(x_i, y_i)で表し、都市活動の水準を N_i で表す。
- 危険物の移動速度は一定とする。
- 危険物輸送車両から危険物が漏出する確率はネットワーク上の位置によらず一定とする。
- 危険物から距離*d*の地点の位置にある都市が被害を受ける確率*p(d)*は距離の増加とともに低減する。
- 確率*p(d)*は都市が被害を受けるか否かだけを表現し、被害の大きさは考慮しない。時間の次元も考慮しない。すなわち、危険物の漏出によって一定の大きさの被害が瞬時に発生する。

危険物が*x*軸上を移動すると考える。危険物の位置($x, 0$)と都市*i*との距離 d_i は、
$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + y_i^2}$$

である。

危険物と都市との距離により被災確率が指数的に低減するとすれば、この都市が被害を受ける確率は、

$$p(d_i) = \exp\left(-a\sqrt{(x - x_i)^2 + y_i^2}\right)$$

である。

ここに a は距離による被害の減衰パラメータであり、危険物の種類に応じて決められる。被害が広範に及ぶような危険物では $a=0$ であり、沿道でしか被害が発生しない危険物では $a>0$ である。危険物が x 軸上を $-\infty$ から $+\infty$ へと移動するとき、危険物の位置と被災確率との関係を描くと図1となる。

都市*i*の活動水準は N_i であるから、危険物車両から距離 d_i に立地する都市での損失の大きさは、 $N_i p(d_i)$ である。危険物が($x, 0$)の地点で漏出したとき、地域全体での損失は、

$$L(x) = \sum_i N_i p(d_i)$$

である。

危険物車両の移動(-∞から+∞)にともなう地域全体での損失 $L(x)$ の変化のイメージは図2である。 x_1, x_2, x_3 は3都市の位置(x座標)である。

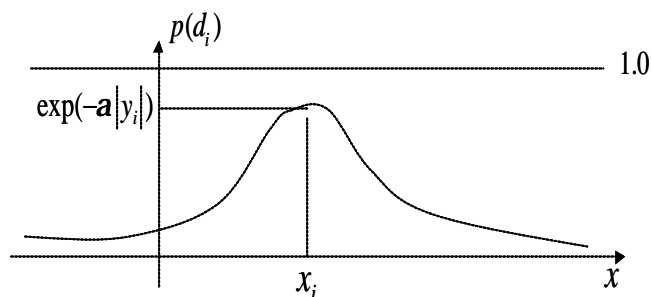


図1 危険物の移動に伴う被災確率の変化

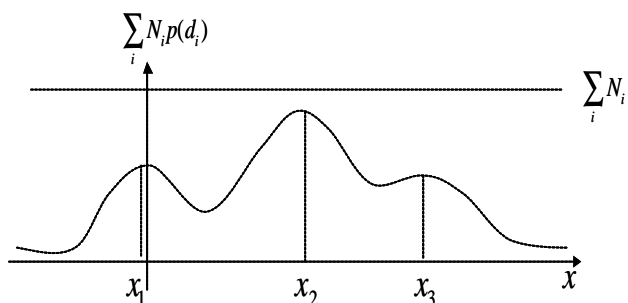


図2 危険物の移動に伴う地域全体での損失の変化

OD間の経路がx軸上の区間 $a \leq x \leq b$ で表現できるとき、経路のリスクは $L(x)$ の積分値

$$R_{ab} = \int_a^b L(x) dx = \int_a^b \left(\sum_i N_i p(d_i) \right) dx$$

により評価できる。この値は経済活動水準と経路距離の積の次元を持つ損失の大きさであり、経路のリスクそのものではない。しかし、輸送ルートとして複数の代替ルートがある中での経路リスクの序列づけ、あるいは相対的評価に利用できるものと考えている。

リスクが少ない経路とは R_{ab} の値が小さい経路であり、それは経路長が短く、経路と都市との距離が離れた経路であることはいうまでもない。一般ネットワークで指定されたODペア間のリスク最小経路を求める簡易な方法は、以下のとおりである。(1)すべてのリンクについて相対的なリスク評価値を求める。これにはリンクの始点ノードから終点ノードまでリンクに沿って $\sum N_i p(d_i)$ を積分すればよい。(2)この値をリンクの長さに置き換える。(3)最短経路探索により求めた経路がリスク最小経路である。

パラメータと経路のリスクについては以下のことがいえる。の値が大きいき()、被害確率は距離の増加により急激に小さくなる

ので、経路上の都市以外は被害にあうことはほとんどない。このときは、経路上に都市を含まないような経路がリスク最小経路である。一方、の値が小さいとき()、危険物からの距離に無関係に被害確率 $p(d) \rightarrow 1$ となるので、距離最小経路とリスク最小経路は一致する。逆説的ではあるが極論すれば、被害が広範に及ばない危険物は輸送経路長が長くなっても都市部を避け、逆に、被害甚大な危険物は都市部を通過しても構わないからできるだけ輸送経路長が短い経路を走行すべきということになる。

さて、先に置いた前提条件のうち、条件b), c) について「リンクごとに一定とみなす」という条件の緩和は容易である。リンクでの事故発生確率等を反映させてリンクごとに危険物漏出の発生確率が異なると仮定することも可能である。また、単位移動距離あたりの発生確率を一定と仮定すれば、リンク長が同じなら移動速度の速いリンクの被害発生確率は相対的に小さくなる。このようにして求めたリンクごとの危険物漏出の発生確率は、 $p(d)$ に乗じる形で用いればよい。

4. 危険物輸送を考慮したネットワーク評価

(1) ネットワーク全体でのリスク評価

特定ODペア、特定経路ごとのリスク評価から、ネットワーク全体でのリスク評価への拡張は比較的容易である。交通ネットワークは平常時(通行規制などは実施されていない)の状態にあって、輸送ルートの選択は危険物輸送業者の自由に(法規制の範囲で)任されている状態を考える。危険物の種類ごとにOD交通量と輸送ルートの観測データがあれば、危険物の種類ごとにODペアごとの経路リスクを集計すれば現状ネットワークの評価が可能となる。危険物車両の輸送ルートは一般車両と異ならないとすれば、輸送ルートの観測データがない場合には何らかの経路選択モデルにより経路選択率を計算しても構わない。ネットワーク全体でのリスク評価指標は、危険物輸送を考慮した平常時のパフォーマンス評価指標のひとつといえるだろう。

(2) 通行規制の影響評価

交通システム側に障害(災害、工事など)が発生し、ネットワークを構成する一部のリンクまたはノードが通行不能となったときのネットワークパフォーマンスを評価して、当該リンクやノードの影響度の大小を比較することはネットワーク

分析の常套手段である。危険物輸送の場合にも、リンクまたはノードの通行規制がネットワーク全体のリスクをどの程度増加させることになるのかを知ることは需要である。異常気象時の通行規制区間のように通行不能となることが多いリンクについては、規制に伴うネットワーク全体への影響度を調べるべきである。リスクの増大が顕著に見られるようなリンク・ノードについては、適切な迂回ルートの指定・整備が重要となる。もちろん、通行規制だけではなく、新たに通行可能となる区間や路線がリスクをどの程度低減させることができるかを評価することが重要であるのはいうまでもない。

(3) 危険物輸送のマネジメント

ここまでの議論では、経路の選択は基本的に危険物輸送業者の自由あるとして、交通ネットワークシステム全体のリスク評価を考えてきた。最後に、輸送ルートの決定に対して、危険物輸送に伴うリスクを考慮したルート(3で検討したリスク最小経路)への経路変更を輸送業者に促すことができるでしょう。このときのいわば「システム最適配分」によるネットワーク全体でのリスク評価値を求め、現状(リスクの考慮が明示的ではない場合)との差異を知っておくことは意味があるものと思われる。リスクマネジメントの効果が最大限発揮されたときのシステム状態に向けて、改善できる幅がどの程度あるかを知り、最適状態に向けて経路を変更すべき OD ペアやその経路について議論できるからである。

5. おわりに

本研究では、危険物輸送に代表される「交通フローまたは移動体自体が持つリスク」を道路ネットワーク評価に反映させるためのひとつの考え方を示した。ただ、ネットワークの信頼性評価の全体枠組みとの関連性を議論するには至っていないし、また、提案したモデルはきわめて初歩的なものである。今後、モデル構成を厳密に検討したうえで数値計算等を通して詳細に分析する必要があると考えている。発生確率は小さいもののいったん発生したときのインパクトが甚大であるだけに、短期・長期の道路ネットワーク計画の中で危険物輸送を考慮することは重要である。ITのサービス分野にも含まれているリアルタイムの交通運用におけるリスクマネジメントや、長期

的なネットワーク整備計画への反映が期待される。

参考文献

- [1] Bell, M.G.H. & Cassir, C. (2000) Reliability of Transport Networks. Research Studies Press, England.
- [2] Yasuo Asakura, Masuo Kashiwadani, Eiji Hato (1999) Flow Model and Performability of a Road Network under Degraded Conditions. Transportation and Traffic Theory, (Ceder, A.(ed.) Pergamon, Proc. 14th ISTTT, pp.257-281.
- [3] ISO/TC204/危険物輸送ビジネスチーム(2000) ISO/TC204 危険物輸送ビジネスチーム成果報告書。
- [4] 消防庁災害情報ホームページ
<http://www.fdma.go.jp/html/infor/index.html>
- [5] 米国の危険物輸送に関するホームページ
<http://hazmat.dot.gov/>
- [6] Nozick K. Linda, List F. George, Turnquist A. Mark (1997) Integrated Routing and Scheduling in Hazardous Materials Transportation. Transportation Science, Vol.31, No.3, pp.200-215.
- [7] William C. Frank, Jean-Claude Thill, Rajan Batta (2000) Spatial Decision Support System for Hazardous Material Tuck Routing. Transportation Research C, Vol.8, pp.337-359.