

災害時における交通ネットワーク信頼性評価指標の提案*

Reliability Measures for Transport Network in Degraded Conditions

間嶋信博**, 朝倉康夫***, 柏谷増男****, 越智大介*****

by Nobuhiro Mashima, Yasuo Asakura, Masuo Kashiwadani and Daisuke Ochi

1. はじめに

本研究では、災害時におけるドライバーの行動の不確実性を考慮したネットワークフローモデルを用い、様々な信頼性評価指標を提案することを目的とする。提案した信頼性評価指標を用いドライバーの交通選択行動の不確実性と信頼性との関係について考察する。

以下、2. では災害時の経路選択行動に関する従来の研究について述べる。3. では災害時における道路利用者の交通選択行動とそれを反映したネットワークフローモデルを示す。4. では信頼性評価指標について説明し、5. で簡単な計算例を示す。

2. 災害時の経路選択行動に関する従来の研究

朝倉他¹⁾は、過去に災害による通行規制に遭遇した経験の有無とその際の交通選択行動および仮想的な通行規制条件下での交通選択行動について、四国地域の一般ドライバーを対象にアンケート調査を実施した。通行規制に遭遇しても85%のドライバーはトリップを中止することではなく、そのほとんどが迂回ルートを利用することや、経路変更の際には75%のドライバーがリスクの高いルートへの変更を余儀なくされていることが明らかにされた。通行規制時の中止・迂回・待機の行動は、時間差や時間比によりある程度説明できること、中止行動モデルは迂回・待機モデルよりも説明力がやや低下することが示された。得られた行動モデルを四国地域の道路ネットワークに適用し、交通量配分モデルの基礎的検討を行った結果、規制の影響を受けるトリップ数は

全体の3%程度であったが、トリップの中止率・迂回率はドライバーの実際の行動とよく一致することが確認されている。

3. 災害時における道路利用者の交通選択行動

通行規制時の利用者の交通行動は平常時と比べてより不確実なものである。災害時の交通フローの記述の際には、行動の不確実性が原因で渋滞や混乱が発生することを考慮しなければならない。本研究では、通行規制時における交通選択行動の特徴として、次の点に着目する。(1)利用者のリンクコストの認知に関する不確実性を考慮する。(2)ネットワークのサービス水準の変化によるトリップ中止行動を考慮する。

前者は、利用者は必ずしも利用経路の完全な旅行時間情報を得ることはあり得ないことを反映している。平常時であっても全てのドライバーがネットワークのリンク属性を正確に認知していることは非現実的である。災害時のようにネットワークが部分的に非連結となるような場合には、ドライバーのネットワーク認知は平常時に比較してより低下し、リンクコストの認知に対する不確実性が増大すると思われる。

後者は、災害時にはODペア間のサービスの低下によるトリップ中止行動を考慮することである。災害による一部の道路区間が通行規制を受けることにより、ネットワークのサービス水準が平常時より低下することがある。そのとき、トリップメーカーの中にはトリップを断念するものも現れると思われる。

災害時の交通行動を記述したフローモデルは、利用者のトリップ中止行動と経路選択行動のばらつきの両方を同時に考慮することが望ましい。ここでは、発生および分布段階を統合したNested構造のモデルを考える(図-1)。構造を複雑にしないためドライ

*keywords : 交通配分, 交通ネットワーク, 信頼性評価

** 学生員 愛媛大学大学院博士前期課程環境建設工学専攻
(〒790-8577松山市文京町, TEL.089-927-9829, FAX.089-927-9843)

*** 正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

**** フェロー 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

***** 正会員 修(工) セントラルコンサルタント

バーの目的地選択（分布段階）は考慮せず，OD ペアは与件であるとする．発生と経路選択の確率は，以下のような Nested Logit モデルで表される．

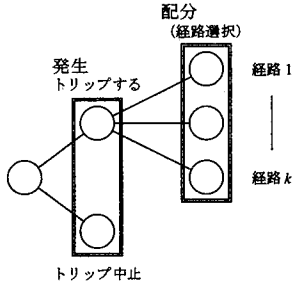


図-1 発生・配分統合モデルの選択ツリー構造

$$\Pr[k/r, s] = \frac{\exp(-\theta_1 c_k^{rs})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_k^{rs})} \quad (1)$$

$$\Pr[r, s] = \frac{\exp\{-\theta_2(S_{rs} + C_{rs})\}}{\exp\{-\theta_2(S_{rs} + C_{rs})\} + \exp(-\theta_2 R_{rs})} \quad (2)$$

$$\bar{\Pr}[r, s] = 1 - \Pr[r, s] \quad (3)$$

$P[k/r, s]$: OD ペア rs 間の第 k 番目の経路選択確率

$P[r, s]$: OD ペア rs 間でトリップを選択する確率

$\bar{P}[r, s]$: OD ペア rs 間でトリップを中止する確率

c_k^{rs} : OD ペア rs 間の第 k 番目の経路費用

R_{rs} : トリップ中止による固有の費用

C_{rs} : OD ペア rs 間の固有の費用

θ_1, θ_2 : パラメータ

S_{rs} は，経路選択の期待最小コストであり，次式で与えられる．

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta_1} \ln \left[\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_k^{rs}) \right] \quad (4)$$

これらの条件を満足するようなネットワークフローは次の最適化問題を解くことにより得られる．証明は省略する．

$$\begin{aligned} \min. Z(f, q, \bar{q}) = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{r, s \in \Omega} \bar{q}_{rs} (R_{rs} - C_{rs}) \\ & + \frac{1}{\theta_1} \sum_{r, s \in \Omega} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \ln \left(\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \right) \\ & + \frac{1}{\theta_2} \sum_{r, s \in \Omega} \left[q_{rs} \ln \left(\frac{q_{rs}}{T_{rs}} \right) + \bar{q}_{rs} \ln \left(\frac{\bar{q}_{rs}}{T_{rs}} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

subject to

$$q_{rs} + \bar{q}_{rs} = T_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (7)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall k \in K_{rs}, r \in R, s \in S \quad (8)$$

$$T_{rs} \geq q_{rs} \geq 0, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (9)$$

ここに， T_{rs} は OD 交通量の上限， q_{rs} はトリップする OD 交通需要， \bar{q}_{rs} はトリップしない OD 交通需要である．

4. 災害時における信頼性評価

(1) 信頼性評価の枠組み

本研究では，災害時のネットワーク上でのフローを **3.** で述べた交通フロー分析手法によって推定し，その結果を用いて様々なパフォーマンスに関する信頼性評価を行う．災害時の信頼性評価においてネットワーク状態は確率的に発生する事象であり，そのパフォーマンスもある確率分布に従う．したがってパフォーマンスを推定することができれば様々な指標を累積分布関数や期待値として考えることができる．信頼性評価指標の算出プロセスは以下の通りである．

【Step 1】状態ベクトルおよび発生確率

災害発生後に生じうるネットワークの状態をベクトル表示し，その発生確率 $P(\mathbf{x})$ を計算する．

$$P(\mathbf{x}) = \prod_a p_a^{x_a} (1 - p_a)^{(1-x_a)} \quad (10)$$

ここに， p_a はリンク連結確率， x_a は状態ベクトル \mathbf{x} の要素であり，リンクが連結され通行可能であれば 1，そうでなければ 0 である．

【Step 2】ネットワークフローの記述

それぞれの状態のネットワークに対し，**3.** で述べた方法で交通流を記述し，いくつかのパフォーマンスを表す指標 $Z(\mathbf{x})$ を求める．

【Step 3】信頼性評価指標の算出

ネットワークのすべての状態または一部の状態に対して交通流を記述して得られたパフォーマンスの累積分布関数や期待値を求め信頼性評価指標とする．

期待値 R は次式で求めることができる。

$$R = \sum_{x \in X} Z(x)P(x) \quad (11)$$

パフォーマンスとしてリンク走行時間を例にとり累積分布関数を示す。求められたリンク走行時間の小さい方から状態発生確率を足し合わせていけば累積分布関数を求めることができる。(図-2)。

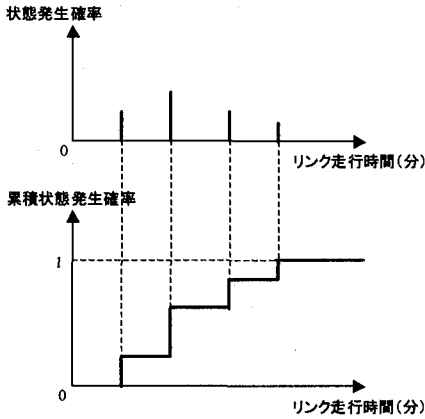


図-2 リンク走行時間の累積分布関数

(2) 信頼性評価指標の算出方法

(a) OD ペア rs 間での評価指標

災害時における OD ペア間での評価指標として OD 発生交通量, OD 所要時間などのパフォーマンスを考慮することができる。ここでは, ドライバーのトリップ中止行動を考慮する上で最も適切であると思われる消費者余剰 CS_{rs} (式(12))を考慮する。

$$CS_{rs} = \int_0^{q_{rs}} D^{-1}(\zeta) d\zeta - \Phi_{rs} T_{rs} \quad (12)$$

$$\Phi_{rs} = -\frac{1}{\theta_2} \ln[\exp(-\theta_2 S_{rs}) + \exp(-\theta_2 R_{rs})] \quad (13)$$

ここに, $D^{-1}(\zeta)$ は逆需要関数である。式(13)で表される Φ_{rs} はトリップ発生の期待最小コストであり, トリップを行ったときの期待最小コスト S_{rs} とトリップを中止したときのコスト R_{rs} の合成コストである。

(b) ネットワーク全体での評価指標

ネットワーク全体のパフォーマンスとして総交通費用, 総消費者余剰を考慮する。総交通費用は式(14)

の通りである。

$$TC = \sum_{a \in A} t_a(x_a) x_a + \sum_{r,s \in \Omega} R_{rs} \bar{q}_{rs} \quad (14)$$

ここで, 第1項はリンク走行時間とリンク交通量の積の総和である。第1項のみを考えると災害時にはドライバーのトリップ中止行動によって総走行時間が減少する可能性があり, 総走行時間は必ずしもネットワーク状態の良否と対応しない。そこで第2項を付加することによりトリップ中止行動のコストを考慮する。

総消費者余剰とは式(12)で示される消費者余剰をすべての OD ペアで足し合わせたネットワーク全体の評価指標であり, 次式で示される。

$$TOCS = \sum_{r,s \in \Omega} CS_{rs} \quad (15)$$

(c) リンクでの評価指標

リンクにおける評価指標としてリンク交通量, リンク所要時間などのパフォーマンスを求め, これらを累積分布関数や期待値として考えることができる。リンクに関するパフォーマンスはドライバーのトリップ中止行動がおり込まれたものと考えられる。

5. 小規模ネットワークでの数値計算例

ネットワーク構成を図-3, リンク属性を表-1に示す。リンク属性(自由走行時間, 容量)はすべて一様であるとした。OD は図-3 に示す1つのペアについてのみ考え OD 交通量の上限は6000台とした。非連結になる可能性のあるリンクの通行可能確率はすべて0.7である。 $C_{rs}=0$, R_{rs} を自由走行時における OD ペア間の最短経路上の所要時間の2倍とする。

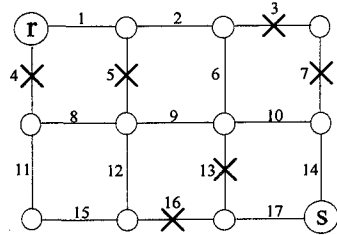


図-3 仮想ネットワーク(数字はリンク番号)

表-1 リンク属性

リンク長 (km)	自由速度 (km/h)	自由走行時間 (min)	交通容量 (台)
5	60	5	5000

ドライバーの経路選択行動の不確実性と信頼性に着目するため発生段階のパラメータは固定 ($\theta_2=1.0$) とする。ドライバーが情報を得ている場合として経路選択パラメータ $\theta_1=10.0$ 、情報がなくランダムに経路を選択する場合として $\theta_1=0.1$ の2つのケースを想定し信頼性との関係について累積分布関数より考察を行った。

(1) 総交通費用について

ネットワーク全体の評価指標として式(14)の総交通費用を取り上げ数値計算を行う。図-4に総交通費用の累積分布関数を示す。図-4に示すように災害が発生しネットワーク状態が変化してもドライバーが情報を得ていれば総交通費用の増加は少ない。逆にドライバーが情報を得ていなければ総交通費用は大きく増加する。このことから災害時においてドライバーが情報を得ていればネットワークパフォーマンスを向上させることにつながると考えられる。

(2) リンク走行時間について

リンク単位での評価指標としてリンク走行時間を取り上げ数値計算を行う。図-5はリンク1、図-6はリンク7のリンク走行時間の累積分布関数である。

図-5が示すようにドライバーが情報を得ていない場合の方がリンク走行時間が大きくなっている。ドライバーに情報がない場合は災害が発生しネットワークのサービス水準が低下してもそれに関する情報を認知しておらず、ドライバーが情報を得ている場合に比ベトリップを中止しにくく発生交通量が大きいためであると思われる。ただしこのことは、必ずしもすべてのリンクに対して成立するとはいえない。図-6が示すようにドライバーに情報がある方がリンクのパフォーマンスが悪くなることもあることに注意しなければならない。

6. おわりに

本研究では、災害時における様々な信頼性評価指標を提案した。信頼性評価指標を用いドライバーの交通選択行動の不確実性に着目し信頼性との関係について考察を行った。小規模ネットワークにおける数値計算の結果から、ドライバーが情報を得ていればネットワーク全体でみると信頼性の向上につながる。しかし、リンクに着目するとドライバーに情

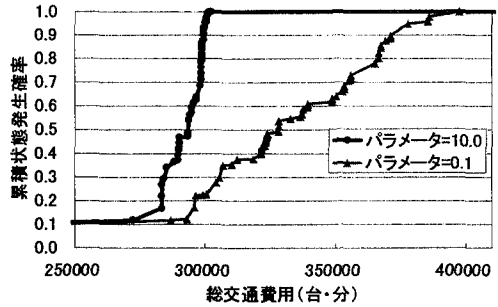


図-4 総交通費用の累積分布関数

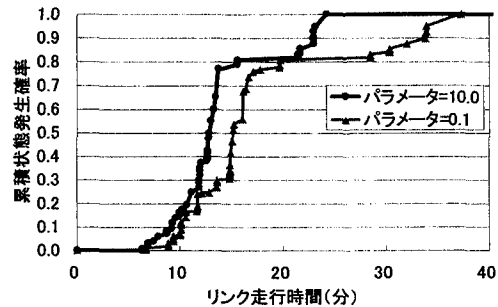


図-5 リンク走行時間の累積分布関数 (リンク 1)

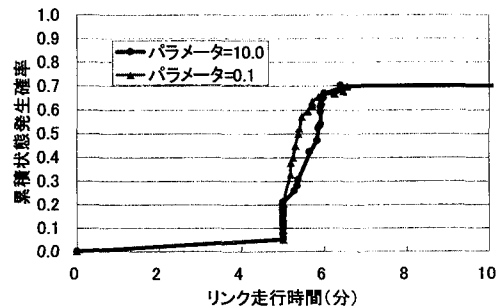


図-6 リンク走行時間の累積分布関数 (リンク 7)

報があっても必ずしもすべてのリンクでパフォーマンスの向上につながるわけではないことがわかった。なお消費者余剰を考える上で、ドライバーの情報の有無による需要関数の違いを考慮する必要があると思われる。これは今後の課題である。

【参考文献】

1) 朝倉康夫, 柏谷増男, 高木一浩, 藤原健一郎 (1997) 災害による道路通行規制時の交通選択行動に関する実証分析. 土木計画学研究・論文集, No14, pp371-380.