

災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル*

An Evaluation Model of Road Network Reliability with Degraded Links by Natural Disasters

朝倉康夫**, 柏谷増男***, 為広哲也****

by Yasuo ASAKURA, Masuo KASHIWADANI and Tetsuya TAMEHIRO

1. はじめに

道路網あるいはODペア間の信頼性評価に関する研究は、ネットワークが連結されているか否かを表す連結性（連結確率）と、許容される所要時間の範囲内でトリップ可能か否かを表す時間信頼性（遅刻確率あるいは到着確率）の両面から行われている。災害時あるいは異常時には連結性、通常時あるいは平常時にはネットワークが機能的に連結網であることを前提に時間信頼性を適用するのが適切であると考えられている。

しかし、災害時であっても許容される時間や迂回距離の範囲でトリップが完結できなければ、交通目的が達成されない場合も少なくない。通信や情報のネットワークと違い、空間的移動にきわめて大きな時間を要する人や物の交通の場合には、迂回できる範囲に上限があるからである。また、従来の「連結度指標」はネットワーク上の2点間あるいはネットワーク全体が連結されているか否かを確率表現した指標であり、ネットワークの構造的な連結性を評価するには適した指標であるが、ネットワーク上での交通の流れやネットワークが有する交通処理能力を必ずしも反映しているとは言えないように思われる。

本研究は、「許容される範囲内の交通処理能力を維持した状態での連結性」に着目するものであり、次の3点を具体的な目的としている。

- (i)災害時における道路網の信頼性評価モデルの枠組みについて考察すること。
- (ii)ネットワークが部分的に切断された場合の交通流の記述方法を開発すること。
- (iii)提案したモデルを四国地域の道路網へ適用し、モデルの実用性を調べること。

以下、2では信頼性評価に関する従来の研究のいくつかを紹介する。3ではモデルの枠組みについて述べ、4～6ではそれらの詳細を説明する。7では提案したモデルを四国道路網へ適用した結果について述べる。

2. 信頼性評価に関する従来の研究

従来の道路交通網の信頼性評価に関する研究の総括は、水利用と道路網の整備問題に限定して社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチを総括した岡田ら¹⁾にまとめられている。ここでは、従来研究のうち、災害時を対象としているかあるいは災害時の道路網評価にも適用の可能性を持つもので、かつネットワークの交通機能に焦点を当てた一部の研究に限定してその内容を簡単に紹介する。

飯田・若林²⁾は、システム信頼性理論に基づいて、道路区間（リンク）の通行規制確率が与えられたとき、ネットワーク上の任意の2点間（ODペア間）の連結確率を計算する方法を提案している。リンク通行可能確率は与件で、相互に独立（故障の発生は独立）であると仮定している。単純な構造のネットワークでも、直列・並列構造に分解できなければ連結確率の厳密解を求めることは難しいため、近似解法を提案している。ひとつの方法は、モンテカルロシミュレーションに持ち込むことである。他のひとつの方法は、ミニマルパスを用いる方法とミニマルカットを用いる方法を組み合わせたものである。この研究の利点は、複雑な構造のネットワークでも、任意のODペア間の連結確率の近似値を比較的容易に計算できることである。問題点は、各リンクの通行可能確率を与件としていることと、交通の流れを明示的には考慮していないことである。

高山³⁾は、道路管理者により実施される事前規制を対象として、道路網の連結性能から見た信頼性評価手法（トポロジー変換法）を提案し、奥能登地域への適用計算を行っている。この方法は、ノード集約やリンクの短絡によりネットワークをいくつかのサブネットワークに分割して端点間の連結信頼度を厳密に計算し、

*)Keywords; ネットワーク交通流, 防災計画, 交通網計画

**)正会員, 工博, 愛媛大学工学部土木海洋工学科

(〒790 松山市文京町, TEL.0899-24-7111, FAX.0899-23-0672)

***)正会員, 工博, 愛媛大学工学部土木海洋工学科 (同上)

****)学生員, 愛媛大学大学院工学研究科博士前期課程 (同上)

その結果を集約して道路網全体の連結度を求めるものである。リンクの通行可能確率は、過去10年間のアメダスデータを用いて連続雨量が規制基準を越えた回数により推定している。この研究では、リンクの通行可能確率を推定する具体的な方法を示しているが、ネットワークの構造が複雑な場合にはODペア間の連結確率を必ずしも簡単に計算できないという問題を持つ。通行規制が交通流に及ぼす影響については、飯田・若林の研究と同様に考慮されていない。

これらの研究と異なるアプローチから、道路網の信頼性を論じた研究として森津⁴⁾を挙げることができる。この研究では、災害に対する信頼性を最大にする道路網計画問題を最適道路網構成問題として扱っている。災害時の道路網の状態を表すために、リンクレベル、災害強度レベル、災害パターンなどの概念を導入し、総所要時間を最小にするネットワーク最適化問題と到達トリップ数の最大化問題を定式化するとともに、既存の最適ネットワーク構成問題に帰着させてその解法を述べている。交通フローについても明示的に取り扱っているが、提案された諸概念は必ずしも実際の災害の分析を通して得られたものではないので、その実証は課題として残されている。

Sanso and Milot⁵⁾は、都市交通網において交通事故などの障害が発生した状態におけるネットワーク（あるいはODペア）のパフォーマンス指標を評価できるモデルを開発している。この研究は、交通事故発生時のドライバーの挙動、特に、情報が提供されたドライバーの行動を記述することにより、交通量配分に事故の要素を取り込みながら信頼性の評価を行おうとする点に特徴がある。しかし、このことはかなり難しく、交通事故のように突発的かつ規制時間が短い場合に、均衡概念が成立するかどうかについても議論の余地が残されている。

Du and Nicholson⁶⁾は、災害によりネットワーク上に通行規制区間が発生し、システムの機能が低下した状態のときに、ネットワーク（あるいはODペア）が維持している交通処理能力の推定を行い、これに基づいて道路網の信頼性評価を行うモデルの枠組を提案している。信頼性の評価指標を適切に選べば、システムの機能低下による社会経済的な影響の評価を行うことができ、道路網のパフォーマンスと信頼度の改善を評価できる点にこの方法の利点がある。ネットワークが部分的に切断された状態における交通流を記述するための方法論に問題が残されているほか、具体的な数値例も示されていないが、信頼性評価の枠組としてはかなり一般性を持つ方法であると思われる。

一方、道路網の信頼性評価に関する実務的な研究としては、昭和61年から63年の3年間にわたり、建設省道路局と各地方建設局により進められたもの⁷⁾がある。地域の特性を考慮して多様な災害のタイプを扱ったものであるが、ネットワークの一部が機能しなくなった場合の交通流の記述については必ずしも十分ではないものと思われる。

以上に紹介してきた従来の研究では、通行規制された道路ネットワーク上での交通流の記述や、サービスレベルの低下に伴う需要の減少について必ずしも十分に考慮されているとはいえない。災害時における交通流の変化を考慮したネットワークの連結度指標については、指標化の方法論や実際への適用の面で検討の余地が多く残されていると考えられる。本研究では、これらの点を踏まえて、信頼性評価の枠組について考察するとともに、災害時の道路網交通流の記述方法を新たに開発し、方法論の四国地域への適用を試みるものである。

3. 信頼性評価の枠組み

豪雨などによって、土砂崩れなどの災害が発生したり、事前規制が行われたりすると、道路網は交通容量が低下したりあるいは全面通行止めになる区間をいくつか含む状態になる。Du and Nicholson はこのような状態のネットワークに対して交通フロー分析を行ない、ネットワークの交通処理能力（たとえば、交通量や所要時間など）を推定し、それにより信頼性を評価するモデルの枠組を提案している。

ネットワークの故障の状態は、状態ベクトル $\mathbf{x}_s = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)$ で表される。ベクトルの要素はネットワークの個々のリンクが機能を停止している（通行不能）か否かを表す0,1変数である。リンク i が通行可能なら $x_i = 1$ 、通行不能なら $x_i = 0$ である。

ネットワーク中に N 箇所の規制区間があるとき、起こりうる状態ベクトルの数（通行止めのパターン）は全部で 2^N 個である。すべての通行規制パターンを列挙して交通フローを推定し交通処理能力を調べあげるという手順を経て信頼性を評価することは、膨大な計算量が必要であるため効率的とは言えない。そこで、考えられるすべての通行止めパターンの中から部分的に状態ベクトルを抽出して、この部分集合だけについて考えるものとする。これを状態ベクトル空間と呼ぶ。交通処理能力の推定は、この部分集合に含まれる個々の状態に対してのみ行うものとする。信頼性評価の手

順を段階的に示すと次のようになる。

【step .1】状態ベクトル空間 X の明確化
考えられるすべての通行止めの状態集合の中から部分的に抽出した状態を状態ベクトル $\mathbf{x}_s$ で表す。その集合により状態ベクトル空間を $X = \{\mathbf{x}_s\}$ とする。

【step .2】発生確率 p_s の推定

状態ベクトル空間 X に含まれるそれぞれの状態ベクトル $\mathbf{x}_s \in X$ について、発生確率 p_s を推定する。

【step .3】交通フローの推定

それぞれの状態ベクトル $\mathbf{x}_s$ に対して後述する方法でネットワークの交通フロー分析を行い、 $\mathbf{x}_s$ に対するネットワークのフロー水準やサービス水準を推定する。

【step .4】稼働・停止関数 $Z(\theta, \mathbf{x}_s)$ の計算

ネットワークに故障がない状態（平常時）と比較したとき、状態 $\mathbf{x}_s$ での交通フロー水準やサービス水準が基準値（ θ ：別途に設定）を満足しているか否かを稼働・停止関数 $Z(\theta, \mathbf{x}_s)$ で表す。ODペアやネットワーク全体が機能しているとき、 $Z(\theta, \mathbf{x}_s) = 1$ 、そうでないとき $Z(\theta, \mathbf{x}_s) = 0$ である。

【step 5】信頼性の計算

信頼性を「ある基準値 θ に対して、ODペアあるいはネットワーク全体が機能している確率」と定義する。基準値 θ に対する信頼性を $R(\theta)$ とすると、 $R(\theta)$ は各状態の発生確率による稼働・停止関数の加重平均で与えられる。

$$R(\theta) = \sum p_s Z(\theta, \mathbf{x}_s) \quad \dots\dots\dots(1)$$

Du and Nicholson によって提案された枠組では、状態ベクトル空間を限定する方法や個々の状態ベクトル発生確率を推定する方法については述べられていない。

[step.3] の交通フロー分析の方法についても、需要変動型の利用者均衡問題を用いる方法が示されているが、均衡配分では規制時間の大小による迂回や待機、トリップの中止を記述するには限界がある。本研究では、これらの点について具体的な方法を提案する。以下では、各ステップごとに詳細に説明する。

4. 状態ベクトルの発生確率の推定

[step.1] における状態ベクトル空間 X の明確化については、考えられるすべての通行止めの状態集合の中から発生確率の高い状態だけを抽出して、この部分集合

を状態ベクトル空間 X とする。

一般に、過去に実際に生じた通行止めの状態は、考えられるすべての状態集合の中で発生確率が高い状態であると考えられる。そこで、過去の通行止めのデータから得られる1組の通行止めのパターンを1つの状態ベクトルとするというパターン分類による方法で状態ベクトルを抽出し、それらの集合を状態ベクトル空間 X とする。たとえば、ある台風の通過によっていくつかの道路区間において通行規制が行われたという場合には、これらの規制は一連の通行規制とみなされるので、これらを1組の規制パターンとするというものである。

次に、それぞれの状態ベクトルの発生確率の推定方法を説明する。ある通行規制パターン S （状態ベクトル $\mathbf{x}_s$ ）の発生確率とは、「通行規制が発生したときにそれがパターン S である確率」と定義する。これは通行規制が発生したという条件の下での条件付き確率である。すなわち、状態ベクトル $\mathbf{x}_s$ の発生確率 p_s は、

$$p_s = \text{状態ベクトル } \mathbf{x}_s \text{ の発生日数} / \text{総規制日数} \quad \dots\dots\dots(2)$$

により求められる。

ある状態ベクトルの発生日数は、以下のようにして求める。通行規制リンクが1本の場合には、そのリンクの規制継続時間により規制日数を求める。通行規制リンクが複数の場合には、その中で最も長い規制継続時間から規制日数を求めるものとする。

この方法で状態ベクトル空間を示し、発生確率を推定する場合には、次の問題点が生じる。

ひとつは、過去の通行規制実績により状態ベクトル空間を決定するため、過去に発生しなかった通行止めパターンは将来にわたっても発生しないことである。過去のデータが十分に豊富であり、道路網形態や規制基準に大きな変化がなければこの方法でも十分であり、現況ネットワークの信頼性評価の際には問題は生じない。しかし、蓄積されたデータの量が十分でない場合には必ずしも適切ではない。

他のひとつは、パターンの発生確率を直接求めるために、個々のリンクについて通行規制が行われる確率を考慮していないことによる問題である。これは、将来リンクの整備水準を向上させたときに、それによって信頼性がどの程度向上するかというような効果の計測が難しいことを意味する。長期的にはネットワークの形態や規制基準の変更も考えられるので、将来ネットワークの信頼性評価においては問題となる。

これらの問題点を解消する代替的な方法は、個々のリンクごとに通行止めになる確率 p_i を求めておき、ネットワーク全体で発生しやすい通行止めのパターンを確率的に求めるものである。通行規制がリンク間相互で独立であれば、状態ベクトルの発生確率は

$$p_s = \prod p_i^{x_i} (1 - p_i)^{1 - x_i} \quad \dots\dots\dots(3)$$

である。 p_s の大きい順に状態ベクトルを取り出し、その集合を状態ベクトル空間とすればよい。

この方法であれば、物理的な道路構造の改良などに伴って規制基準が変更されたとき、そのことを個々のリンクの通行止め確率に反映させることができる。これにより、規制基準の変更が信頼度に及ぼす影響が分析できるし、間接的には災害時の信頼度からみた道路整備効果の分析が可能となる。

各区間の通行止めの確率が独立であれば式(3)による計算は容易であるが、現実にはリンクの通行止めは相互に相関している。相関がある場合に、個々のリンクの通行止め確率から状態の発生確率を推定することはかなり難しい。

5. ネットワーク交通流の記述方法⁸⁾

大規模な法面崩壊のように一部のリンクが欠損した状態がある程度長期間継続する場合や、通行止めの形態がパターン化しており利用者がそれを熟知しているような場合には、平常時でなくても利用者均衡仮説は妥当性をもつと考えられる。しかし、突発的な通行止めや事前規制のように通行止めの継続時間が長くない場合には、均衡概念は必ずしも適当でないであろう。

また、決定論的な利用者均衡配分は、すべての利用者がすべての経路について完全な情報を得ており、その情報を基にして合理的な経路選択を行うことが前提になっている。しかし、実際には、利用者の知覚する所要時間は真の所要時間に対して知覚誤差を含んでいると考えられるし、すべての利用者がすべての経路について一様に完全な情報を持っているとは限らない。通行規制が実施された場合には、この傾向がより顕著になるであろう。

平常時でも異常時でも、利用者は許容できる時間の範囲内でトリップを完了することができなければそのトリップの目的を達成できない場合が少なくない。異常時であっても、利用者は許容できる時間の範囲内で

トリップ可能な迂回路がなければ車によるトリップを中止するかもしれない。

これらの点を考慮して、リンクの所要時間がある確率分布で与えられているとしたとき、許容できる所要時間による利用者の迂回と待機およびトリップの中止という選択行動をモデル化した配分を考える。モデル化に際し、以下の仮定を設ける。

- (1)リンクの所要時間は相互に独立な確率変数である。その期待値と標準偏差をそれぞれ μ_a , σ_a で表わす。
- (2) μ_a , σ_a はあらかじめ与えられており、異常時にいて他のリンクが通行止めでも当該リンクが通行止めでなければその値は変わらない。
- (3)リンク a が通行止めになった場合、所要時間の期待値 μ_a' は通行止め時間 d_a と平常時の μ_a の和で表わされる。 σ_a の値は変わらない。
- (4)ODペア間の最短所要時間が許容できる範囲内（平常時の所要時間の m 倍以下）であればドライバーはその経路を選択する。そうでなければ、そのODペアのトリップは中止される。

以上の仮定に基づいて、利用者の迂回と待機および車によるトリップの中止を考慮した配分方法を示す。この方法は、Burrell による確率的配分法⁹⁾に、通行規制されたリンクの規制の程度 ($\mu_a' = \mu_a + d_a$) を考慮したものであり、OD表を N 分割してそれぞれの繰返しごとにOD間の最短経路へすべてのOD交通量を流す（あるいは、配分されないOD交通量として集計する）方法である。なお、ODペア ij について1回当たりの配分交通量は $\Delta D_{ij} = D_{ij}^0 / N$ で表わされる。

【step. 1】リンク所要時間の期待値の変更
通行止めになったリンクのみ、その所要時間の期待値を通行止め時間だけ大きくして $\mu_a' = \mu_a + d_a$ とする。
 $n = 1$ (n : 繰返し回数) とする。

【step. 2】リンク所要時間の設定
リンクの数だけ標準正規乱数 $\varepsilon_a \sim N(0,1)$ を発生させリンク所要時間を $t_a = \mu_a + \varepsilon_a \sigma_a$ で表わす。通行規制されたリンクの場合は、 μ_a の代わりに μ_a' を用いる。

【step. 3】最短経路探索

それぞれのODペアについて最短経路探索を行い、（最短経路上の所要時間） $< m$ （平常時の所要時間）

ならば、その経路へ ΔD_{ij} をAll- or-Nothing 配分する。
 そうでないならトリップが中止されるので別途に中止トリップ数をODペアごとに集計する。

【step.4】交通量の集計

配分されなかったOD交通量，リンク交通量を記憶する。

【step.5】計算終了についての判断

$n=N$ ならば計算終了。そうでなければ、 $n=n+1$ と
 いてstep.2へ。

配分結果により、あるODペアにおいて、中止されたトリップ数は配分されなかったOD交通量により示され、その影響はリンク交通量の減少量によりわかる。また、通行止めリンクを流れたフローは、一時待機して結局そのルートを利用したものとみなす。

なお、ここで提案した配分方法は、リンク所要時間が交通量の関数ではないという点で混雑効果を考慮したものではないが、一部のリンクが通行規制された場合の迂回やトリップの中止を扱うことができるという点で従来の方法とは異なる。

6. 稼働・停止関数

平常時の交通処理能力を基準にして、ネットワークの一部が物理的に機能しなくなったときの交通処理能力の比を、システムが機能しているか否かを判定するための指標とする。この指標が災害時でも維持する必要があると考えられる基準値(θ)を満足しているか否かにより、システムが機能しているか否かを判断する。

平常時と比較した処理能力の比は、交通量（フロー）に基づく水準と所要時間に基づくものの両者を考えることができるが、5. で述べた配分方法の特性から、フローによる指標を採用することにする。

災害などによる通行規制時には、かなり大きな迂回をしなければ目的地にたどり着けないなどの理由により、トリップの目的によってはそのトリップを取りやめる出控えなどが生じるであろう。これによるOD交通量の減少が著しく大きい場合、そのネットワークがたとえ構造的には連結網であっても、実質的に機能しているネットワークとは言えないであろう。

そこで、災害時における交通需要が平常時からどの程度減少しているかを指標に信頼性を考えてみよう。すなわち、平常時のOD交通量に比較して、ある状態

ベクトルにおけるOD交通量が許容できる減少の範囲にあるか否かにより、そのODが機能しているか否かを判定するのである。具体的に数式で表現すると、次のようになる。

ODペア ij 間の平常時のOD交通量 $f_{ij}(x_0)$ に対する状態ベクトル x_s でのOD交通量 $f_{ij}(x_s)$ の減少率を $y_{ij}(x_s)$ とすると、

$$y_{ij}(x_s) = [f_{ij}(x_0) - f_{ij}(x_s)] / f_{ij}(x_0) \quad \dots\dots(4)$$

である。明らかに、 $0 \leq y_{ij}(x_s) \leq 1$ である。

減少率 $y_{ij}(x_s)$ が許容できる範囲内であれば、そのODペアは機能しているとし、そうでなければ停止しているとしよう。許容しうる減少率の上限を θ とすれば、状態ベクトル x_s のときのODペア ij の稼働・停止関数 $Z_{ij}(\theta, x_s)$ は以下のように表すことができる。

$$y_{ij}(x_s) \geq \theta \quad \text{のとき} \quad Z_{ij}(\theta, x_s) = 1 \quad \dots\dots(5)$$

$$y_{ij}(x_s) < \theta \quad \text{のとき} \quad Z_{ij}(\theta, x_s) = 0$$

なお、許容減少率 θ ($0 < \theta < 1$) は、すべてのODペアについて一律に設定されるものとする。

OD交通量の減少率の程度で稼働・停止関数を定義できるのは、前段で述べたフロー分析によりOD交通量の減少が考慮されている場合に限られており、迂回と待機および中止を考慮した配分などにより、状態ベクトルに対するフローを計算する場合には有効な指標である。このときOD間の信頼度とは、「交通需要の減少率がある基準値(θ)以下である確率」ということになる。なお、ネットワーク全体の評価についても同様に考えると、ネットワーク全体（すべてのODペア）において、平常時と比較した総需要の減少率を指標に稼働・停止関数を定義でき、その結果から道路網全体の信頼性を評価できる。

7. 四国ネットワークへの適用計算¹⁰⁾

(1) 通行規制パターンの発生確率

状態ベクトル空間の明確化とその中に含まれている状態ベクトルの発生確率の推定は、4. に示した方法に従って過去の通行規制実績を用いて行う。用いる四

国内での過去の通行規制実績は、四国地方建設局の直轄国道のみを対象とした通行止め調査である。作業の都合上、平成元年から平成5年までという最近5年間の規制実績を用いることにし、事故や工事などによる通行規制は除外して、自然災害による規制のみについて考えることにする。たとえば、「崖崩れ」などの災害、事前規制、災害の復旧工事などによる通行規制である。

状態ベクトル空間の明確化の結果について説明する。ここでは、通行止め実績から得られる1組の通行止めのパターンを1つの状態ベクトルとするというパターン分類を用いる。類似した通行止めパターンを適宜集約することになるが、パターンの類似度を一意に定めることは難しい。そこで、「規制区間の組み合わせ」と「規制の継続時間」の両者が全く同じである通行規制パターン以外は異なるとして集約を行った。

通行止め調査では、5年間に128回の通行規制が報告されている。これは規制区間に計上されているので、同じ日に複数の区間で規制されたような場合は異なった規制とみなされる。そこで、規制開始日時と終了日時から判断して一組の規制であると考えられる場合には、一つのパターンに集約した。その結果、規制区間単位では128回となる通行規制は、ネットワーク全体では48パターンの規制に集約できた。それぞれのパターンの発生回数はいずれも1回であった。

(2) 通行規制時の迂回を考慮した交通量配分

トリップの迂回、待機および中止を考慮した配分(以下では迂回配分と呼ぶ)によるネットワークのフロー分析の特徴を見るために、平常時と異常時に対する配分結果の比較を行う。

平常時のネットワークの規模は、リンク数(往復計)2,106本、ノード数697、うちセントロイド数258である。リンクの自由走行時間は規制速度、リンク容量は道路種別、車線数、沿道条件を参考に定めた。リンクの走行時間関数はBPRタイプの関数である。配分対象ODは平成2年度の道路交通センサスのBゾーンOD表で、配分トリップ数は2,567,121である。迂回配分に用いるリンク走行時間の期待値 μ_a の値を設定するために、別途に通常の分割等時間配分(分割数=20)を行なってリンク走行時間を求めた。走行時間の標準偏差は平均値に比例するものとし、変動係数の値を0.2とした。迂回の上限值を表すパラメータ m の値は $m=1.5$ とした。これらの値は事前に行なった小規模数値計算の結果、信頼性の値が安定する上限のパラメータ値である。

表-1 迂回配分によるリンクフローの再現精度

観測リンクフローの平均値(台/日)	16,412
推定リンクフローの平均値(台/日)	15,085
観測値と推定値の相関係数	0.871

まず、平常時のネットワークに対して迂回配分を計算し、再現精度を調べた(表-1)。観測リンクは24時間交通量が観測されている101本のリンクである。観測値と推定値の相関は高く、平均値には10%程度の誤差が発生しているものの再現性は概ね良好であるといえる。なお、迂回の上限に関するパラメータ m の値の妥当性について、交通行動モデル分析などによりそれを検証するには至っていないが、平常時ネットワークに対する配分の再現性から判断する限り、設定した値はほぼ妥当であると考えられる。

異常時としては、1993年9月3日～4日に四国地方を襲った台風による通行規制と同じ規制が行われた場合とする。このときの通行規制箇所を図-1に示す。配分計算はBゾーンOD表(258×258)で行うが、計算結果の評価は集約ペア(64×64)で行うことにする。

配分の結果、総配分トリップ数2,567,121のうち中止されたのは37,909トリップであり、ネットワーク全体における2080個(内々ペアも含む)のODペアのうち116のペアでトリップの中止があった。これらのODペアの配分対象トリップ数は739,707で、これらは中止には至っていないが影響を受ける可能性のあるトリップであるといえる。総配分トリップ数の約30%が影響を受ける可能性があるわけで、通行規制の影響は大きいことがわかる。

OD交通量の減少率(トリップ中止率)が100%となったODペアは15ペアで、これらのODペアの中止トリップ数は3,184トリップである。中止率が50%を超えるODペアは34ペアで、同じく中止トリップ数は11,990トリップである。中止率の高いODペア(ここでは、中止率50%以上)の空間的分布は、徳島市から室戸市までの国道55号線沿い、松山市周辺から今治市までの国道196号線沿い、あるいは高知県境付近の国道33号線沿い、高知市周辺から愛媛県境までの国道33号線沿い、あるいは中村市周辺までの国道56号線沿いというようになりかなり広範囲に及んでいる。これらのODペアは、相対的にトリップ長が短いか、または高速道路を利用できないようなODペアであることがわかった。

表-2は、松山市と四国内の特定の地点を結ぶODペア間の所要時間について比較したものである。平常

時と比較すると、いずれのODペアでも約30分以上所要時間が増加することになる。とくに、窪川町をはじめ、高知県西部のゾーンへの所要時間の増大が著しい。平常時との比率をとると、所要時間は1.2～1.3倍に増加している。松山市からこれらの地域へのトリップは、高速道路を利用することができないためである。所要時間比による迂回の上限（m）の値は1.5であるために、ほとんどのODペアではトリップの中止には至っていないが、中止になる限度一杯の状態であるといえる。

表－2 ODペア間の所要時間の比較

	平常時 所要時間 A (分)	異常時 所要時間 B (分)	時間差 C=B-A	時間比 D= B / A
徳島市	309	347	38	1.12
海南町	352	408	56	1.16
井川町	190	228	38	1.20
高松市	204	242	38	1.19
高知市	195	233	38	1.19
窪川町	257	335	78	1.30
東洋町	335	413	78	1.23
大豊町	167	205	38	1.23
宇和島市	214	242	27	1.13
西条市	113	155	42	1.37

ネットワーク上の特定地点での交通量を比較したものを表－3に示す。大規模な通行止めのために中止されるトリップが多くなり、各地点での交通量が減少したと思われる。しかし、高速道路上の交通量は、増加しているかあるいは減少してもその減少率が国道上よりも小さい。

以上より、大規模な通行止めの状態においては、許容される迂回時間の範囲内の経路を持つODペアが少なくなるために中止トリップ数が多くなり、高速道路が重要な利用代替経路になっていることがわかる。

表－3 リンク交通量の比較

地点	平常時	異常時	交通量	交通量
	交通量	交通量	差	比
	A(台/日)	B(台/日)	C=B-A	D=B / A
国道33号 県境	508	0	- 508	0.0
久万	28390	24314	- 4076	0.86
砥部	3618	1813	- 1805	0.50
柳谷	1822	0	- 1822	0.0
吾川	1571	0	- 1571	0.0
伊野	16712	14268	- 2444	0.85
国道11号桜三里	14962	0	-14962	0.0
川之江	10083	8414	- 1669	0.83
多度津	9426	12605	+3179	1.34
白鳥	16518	14302	- 2216	0.87
鳴門	14860	14892	+32	1.00
高速松山道西条	21027	21576	+549	1.02
高知道南国	8950	9006	+56	1.01
高松道善通寺	26924	25687	- 1237	0.95

(3) ODペア間の信頼性評価

計算手順はまず、先に求めた48通りの状態ベクトルのそれぞれに対して迂回配分（Bゾーン）を計算し、中止トリップのOD表（集約64ゾーン）を求める。OD交通量の許容減少率(θ)に対して稼働・停止関数の値を計算し、状態の発生確率により加重平均することによって、OD間の信頼度を求める。なお、θの値につ

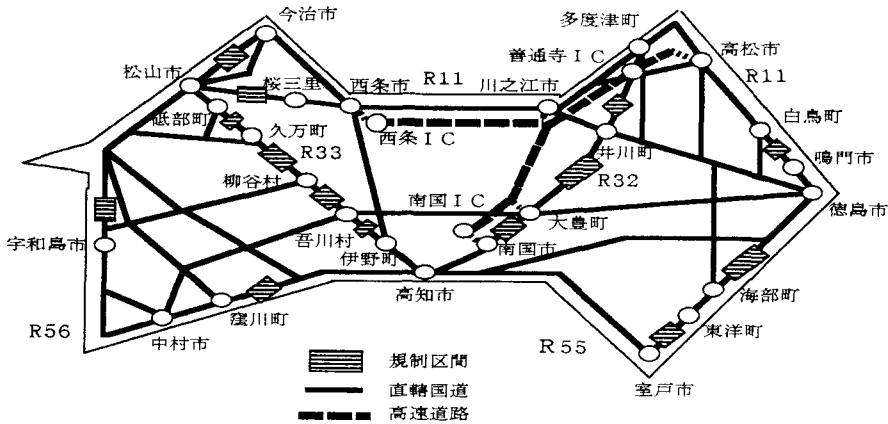


図-1 異常時の通行規制区間(平成5年9月3~4日)

いて、0～1の範囲で θ をパラメトリックに変化させて複数の計算を行ったが、以下では代表的に $\theta = 0.5$ の場合を取り上げその結果について考察する。

信頼度が1でないODペアの数は全部で65ペアで、これらのODペアの配分対象トリップ数は57,563となった。最も信頼度が低いODは、愛媛県上浮穴郡→高知県高岡郡で、2番目に低いODペアは徳島県鳴門市→香川県大川郡であった。

$\theta = 0.5$ の下で最も信頼性の低いODの信頼度は $R = 0.917$ であり、すべての通行規制が等しい確率で発生すると仮定すると、100回規制があればそのうち8回は50%以上の利用者がトリップを中止せざるを得ないことを意味する。0.917という数字は一見高い信頼度であるようにも見える。しかし、信頼度 $R = 0.917$ のODペア（愛媛県上浮穴郡→高知県高岡郡）では、48の規制のうち13パターンでトリップ中止率が50%を越えた。各規制の発生回数はすべて1回であるので、このODペアは、一連の通行規制が発生すれば約30%の確率で50%以上の利用者がトリップを中止せざるを得ないということになる。OD間の信頼度とは、「交通需要の減少率がある基準値（ θ ）以下である確率」であり、 $R = 0.917$ という値は一見高い信頼度であるように見えるが、トリップを諦めなければならないことによる活動機会の損失を考慮すると、このODペアの信頼度は高いとはいえないと考えられる。

信頼度が相対的に低い（ $R \leq 0.985$ ）ODペアの空間的分布を見ると、(1)松山市およびその周辺－愛媛県・高知県境あるいは高知市周辺の国道33号線沿い、(2)愛媛県今治市、東予市、西条市－愛媛県温泉郡あるいは上浮穴郡の国道11号線、33号線沿い、(3)高知県室戸市－高知市とその周辺や愛媛県境の山間部、徳島県南部（阿南市、海部郡）の国道33号線、55号線沿い、

(4)徳島県三好郡－香川県坂出市あるいは高知県南国市の国道32号線沿い、(5)高知県須崎市－高知県中村市といった国道56号線沿いということがわかった（図－2）。国道32号線、33号線沿いの山間部のODペアは信頼度が低いという実態を数字で裏付ける結果となった。

なお、 θ の値を0.9に設定しても、信頼度の値が1とならないODペアが41ペア（被影響トリップ数30,920）存在した。トリップ中止率が90%になるまでは機能しているように基準を緩和しても、なおこれらのOD間では完全な交通が確保できないことが示された。これらのODペアは比較的距離が短いにもかかわらず海岸線を経由するなどの理由で迂回路が存在しないものが多い。松山や高知といった県庁所在地の近郊でも、このようなケースがみられ、信頼度の低いODは必ずしも山間部に限定されないことも示された。

8. まとめ

本研究によって得られた成果は以下のように集約できる。

- (1)災害時におけるネットワーク交通流の変化を考慮できる道路網信頼性評価モデルの枠組みについて考察した。状態ベクトルの発生確率の推定に関して、通行規制データをパターンに分類する方法を提案した。
- (2)道路網の一部のリンクが通行規制された場合のネットワーク交通流の変化を記述できる交通量配分手法を提案した。この方法はBurrellの確率配分法に通行規制されたリンクの規制時間の長さを組み込んだもので、迂回の上限を設定することにより、規制によるトリップの中止や一時待機を考慮することができる。
- (3)平常時の交通需要に比較した災害時の需要の減少率がある基準値（ θ ）以下である確率をOD間の信頼度

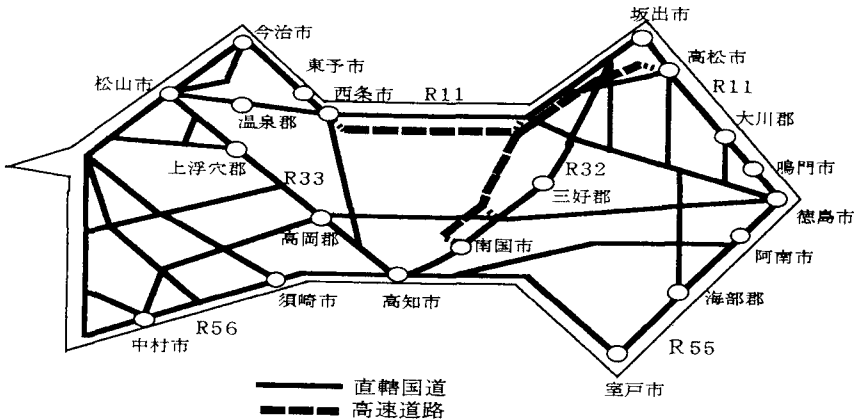


図-2 信頼度が相対的に低い地域

と定義し、稼働・停止関数の期待値を求めることでその値を計算できることを示した。

(4)豪雨による通行規制が頻発する四国地域の道路網を対象に、提案した方法論の適用計算を試みた。特定の通行規制パターンに対し迂回を考慮した配分計算を行って、平常時に比較してOD交通量の減少が大きく通行規制の影響を受けやすい地域を明らかにした。さらに、信頼度の計算を行って、信頼度が相対的に低いODペアを示した。

提案した信頼性評価モデルによる四国地域への適用計算の結果、モデルの適用可能性が認められたが、一方、残された問題点も少なくない。とくに、次の4点は今後の検討課題とした。

(1)データと作業量の制約から通行止め区間を直轄国道に限定したが、県管理の国道や主要地方道での通行規制を考慮した適用計算を行なう必要がある。

(2)災害時での道路網の交通処理能力の低下や迂回交通のボトルネックへの集中などによって起こると予想される所要時間の大幅な増大を考慮する必要がある。この点については、迂回配分において交通量の増減によるリンクの所要時間の変化を考慮できるよう修正を進めている。また、容量制約のある需要変動型利用者均衡配分によりネットワークフローを記述する方法についても計算を行なっているので、稿を改めて発表する予定である。

(3)リンクの整備水準を向上させたときの効果を計測できるように状態ベクトルの発生確率の設定法を改良する必要がある。リンク間の相関を考える場合には、解析的な方法は困難である可能性が強いので、モンテカルロ法などによる状態ベクトルの抽出法が有効であろう。すべての状態ベクトルを抽出しなくても、確率的に発生しやすいもののみを調べれば効率的に信頼度の計算が可能であることは既にわかっているので、現在検討を進めているところである。

(4)現況道路網の評価については、本研究で示したような信頼度の相対的に低い地域を発見するために提案したモデルを使うことができる。さらに、道路整備費用に対する信頼度向上効果の相対的な比較などにより、

道路整備効果を評価する際の指標のひとつとして、信頼度モデルを利用することができると考えられる。しかし、道路整備計画の中での信頼度評価モデルの利用に関する具体的な手順については、これまで必ずしも十分に検討されているとはいえず、今後の重要な課題の一つとしたい。

最後に本研究を進めるにあたり、データ提供等にご協力いただいた建設省四国地方建設局道路部道路計画2課の皆様に感謝いたします。

参考文献

- (1) 岡田憲夫, 若林拓史, 多々納裕一(1993) 社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ. 土木学会論文集, No.464/IV-19, pp.33-42.
- (2) 飯田恭敬, 若林拓史, 福島博(1989) 道路網信頼性の近似解法の比較研究. 土木学会論文集, No.311/IV-11, pp.107-116.
- (3) 高山純一(1989) 異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.559-565.
- (4) 森津秀夫(1984) 最適交通網構成手法に関する基礎的研究. 京都大学学位論文, pp.133-147.
- (5) Sanso, B. and Milot, L. (1994) A Reliability Model for Urban Transportation Planning. Preprints in TRISTAN-II Conference in Capri, pp.617-622.
- (6) Du, Z.P. and Nicholson, A.J. (1993) Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis. Research Report 93- 8, Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, NZ.
- (7) 建設省道路局(1988)道路交通の信頼性評価に関する研究. 第41回建設省技術研究会, pp.330-361.
- (8) 為広哲也, 朝倉康夫, 柏谷増男(1995) 災害時の通行規制下における道路網の信頼性評価モデル. 土木計画学研究・講演集, No.17, pp. 583 - 586.
- (9) 土木学会編(1987)交通ネットワークの分析と計画. 第18回土木計画学講習会テキスト, pp.46-47.
- (10) 為広哲也(1995) 自然災害による通行規制を考慮した道路網信頼性の評価モデル. 愛媛大学修士論文.

朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也

災害時の道路網信頼性の評価においては、これまで主にネットワークの構造的な連結性が問題とされてきたが、部分的に機能が低下したネットワークの交通処理能力は必ずしも考慮されていたとはいえない。本研究では、(1) 災害時における道路網信頼性の評価モデルの枠組に関する考察、(2)一部のリンクが使用できなくなった場合の迂回、待機、トリップの中止を記述できる簡便な交通量配分モデルの提案、(3)四国地域道路網への適用計算を行なった。その結果、提案した信頼性評価モデルおよび配分モデルは、実際規模の道路網へも十分に適用可能であり、災害時の通行規制によるトリップ中止量の推定や、相対的に信頼度の低いODペアの抽出が可能であることが示された。

An Evaluation Model of Road Network Reliability with Degraded Links by Natural Disasters

By Yasuo ASAKURA, Masuo KASHIWADANI and Tetsuya TAMEHIRO

This paper discusses the model framework for evaluating road network reliability with degraded links by natural disasters. A traffic assignment model is developed considering drivers' behaviour of route diversion and trip suspension in the network. The expected loss of travel demand between an origin-destination (OD) pair is used as a reliability measure. The model is applied to the Shikoku area network with thousands of links and hundreds of zones. The numbers of suspended OD trips are estimated for the degraded networks and the model shows the OD pairs with comparatively lower reliability.
