

確率利用者均衡を用いた道路網の時間信頼性評価^{*}

Reliability of Travel Time in a Network through Stochastic User Equilibrium^{}*

井上博司^{**}・飯田祐三^{***}・岸野啓一^{****}・長谷川哲郎^{*****}

By Hiroshi INOUE^{**}・Yuzo IIDA^{***}・Keiichi KISHINO^{****}・Tetsuro HASEGAWA^{*****}

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、交通施設の受けた被害によって、市民生活や企業活動に様々な影響が及んだ。その中で企業物流に着目すると、高速道路をはじめ幹線道路が被災したことにより、被害地域外の企業に対しても輸送時間の増加やルート変更・輸送手段変更などの影響が広範囲にわたって及んだことが明らかになっている。

その際、道路網の被害が最小限に食い止められれば影響の程度は軽減されたと容易に想像でき、道路網の信頼性を高めることは今後の防災対策を考える上での重要課題の一つと考えられる。そこで、阪神地域の道路網を対象に重要なリンクを抽出し、そのリンクの被災の有無による影響の違いを試算することなどを通じて、ネットワークやリンクの信頼性の評価を試みた。

2. 道路網の信頼性に関する研究の概要

道路網の信頼性という概念はかなり以前から提唱されてきている。それらは地震や豪雨・降雪等自然災害時において、リンクが通行不能となってもネットワークの連結性が保たれる確率を指標化したものである。一方、自然災害は希な事象であり、平常時に

おける安定した信頼性のある道路サービスの提供も同様に重要であることから、平常時における旅行時間の信頼性を指標化する研究もなされている。飯田・若林の研究では、災害等によってリンクが閉塞する確率を与えたときに、円滑な走行移動が不可能となり、道路網が機能しえなくなる確率を、システム工学的手法によって求めている¹⁾。また平常時における旅行時間の信頼性について、ネットワーク上の交通流の確率分布を想定し、リンク交通量が容量を超過し、ネットワークが閉塞状態に達する確率を求めている²⁾。一方朝倉の研究では、OD交通量を確率変動させることによって得られたリンク旅行時間の確率分布をもとに、道路網上の旅行時間の信頼性を指標化している³⁾。これらの研究においては、道路網上での交通量や旅行時間の確率変動を巧みに表現しているが、従来のネットワーク交通流理論とは必ずしも調和していない面があり、なお理論の改良の余地があるように思われる。

本研究においては、ネットワーク交通流理論でこれまで十分に検討されてきている確率利用者均衡理論を用いて、道路網上の交通量、旅行時間、経路選択のランダム変動を記述し、これをもとに道路網上の旅行時間の信頼性を指標化する試みを行う。この方法は理論的に明解ではあるが、計算法の効率性が必ずしも高くないため計算量がかなり多くなる。しかし昨今の計算機の発達によって、このことは大きな障害とはならないものと思われる。

3. 確率利用者均衡を用いた旅行時間の信頼性

(1) 確率利用者均衡の概要

確率利用者均衡の概念は Daganzo & Sheffi によって提唱されたものであり⁴⁾、利用者の旅行時間に対する認知が利用者によって一定ではなく確率変動す

^{*}キーワード：配分交通、経路選択、ネットワーク交通流

^{**}正員、工博、岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科
(岡山市津島中2-1-1、TEL086-251-8162、FAX086-253-2993)

^{***}正員、中央復建コンサルタンツ株式会社企画室(大阪市淀川区西宮原1-8-29、TEL06-393-1122、FAX06-393-1126)

^{****}正員、同上 計画設計部 (TEL06-393-1198、FAX06-393-1145)

^{*****}正員、工修、同上 計画設計部

ることを前提として、利用者が認知旅行時間を最小にするように経路選択するときに現出するフローの平衡状態を確率利用者均衡と定義している。認知旅行時間が正規分布に従うことを仮定したときプロビット型、ガンベル分布に従うことを仮定したときにはロジット型の選択問題となる。確率利用者均衡がある種の最適化問題と等価であることが Sheffi & Powell, Daganzo 等によって示されている^{5),6)}が、この最適化問題は期待値演算を含んでいるため、求解の計算に直接用いることは困難である。実用的な計算法として連続平均化法 (Method of Successive Average) が有用であることが示されており、プロビット型およびロジット型問題に対する解法が提案されている⁷⁾。

(2) 道路網の時間信頼性評価

いまOD交通量 $\{q_{rs}\}$ が与えられたとき、確率利用者均衡条件は次式で表される。

$$f_{rs}^{rs_k} = q_{rs} P_{rs_k}^{rs} \quad \forall k, r, s \quad (1)$$

ここに、

$$P_{rs_k}^{rs} = \Pr(C_{rs_k}^{rs} < C_{rs}^{rs}, \forall 1 \neq k \in K_{rs}) \quad (2)$$

$C_{rs_k}^{rs}$: rs 間の経路 k の認知旅行時間、 $f_{rs_k}^{rs}$: rs 間の経路 k の交通量、 $P_{rs_k}^{rs}$: rs 間の経路 k の選択率。

また当然のことながら、

$$C_{rs_k}^{rs} = \sum_a T_a \delta_{rs_k}^{rs_a} \quad \forall k, r, s \quad (3)$$

$$t_a = t_a(x_a), \quad \forall a \quad (4)$$

$$\sum_k f_{rs_k}^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s \quad (5)$$

T_a : リンク a の認知旅行時間、 t_a : リンク a の実旅行時間、 $t_a(x_a)$: リンク a のパフォーマンス関数。プロビット型モデルでは、 T_a は平均値 t_a 、分散 βt_a の正規分布に従うと仮定される。

rs 間の経路 k の実際の旅行時間は、

$$c_{rs_k}^{rs} = \sum_a t_a \delta_{rs_k}^{rs_a}, \quad \forall k, r, s \quad (6)$$

である。

いま道路網上の交通流が確率利用者均衡にしたがうことを仮定する。このとき rs 間の旅行時間はそれぞれの経路によって異なるので、任意に 1 トリップを抽出するとき、その旅行時間は離散的確率変数と

みなすことができる。

rs 間の任意のトリップの実旅行時間を c^{rs} とすると、その確率密度は、

$$f(c^{rs_k}) = \Pr(c^{rs} = c^{rs_k}) = P_{rs_k}^{rs} \quad (7)$$

となる。

いまそれぞれのODペアについて、旅行時間の基準値を外生的に与える。rs 間の旅行時間の基準値を c^{rs*} とすると、任意の 1 トリップの旅行時間が基準値 c^{rs*} を上回らない確率

$$F(c^{rs*}) = \Pr(c^{rs} \leq c^{rs*}) \\ = \sum_{k, c^{rs_k} \leq c^{rs*}} P_{rs_k}^{rs} \quad (8)$$

を求めることができる。この確率を全ODペアについて、OD交通量による加重平均をとった値

$$R = \sum_{rs} q_{rs} F(c^{rs*}) / \sum_{rs} q_{rs} \quad (9)$$

を道路網の時間信頼度と定義する。この値は、任意の 1 トリップがOD間の旅行時間の基準値を上回らない確率を表している。

ここで各OD間の旅行時間の基準値をどのように設定するかが問題である。そこでいま、OD交通量 $\{q_{rs}\}$ が、基準となる道路網 N^* 上に流れて確率利用者均衡の平衡状態となったときの、それぞれの起終点間の旅行時間の平均値および標準偏差を μ^{rs*} 、 σ^{rs*} とする。このとき、 μ^{rs*} 、 $\mu^{rs*} + \sigma^{rs*}$ 、 $\mu^{rs*} + 2\sigma^{rs*}$ …をそれぞれサービスレベルA、サービスレベルB、サービスレベルC…での基準旅行時間とする。

このようにすると、基準道路網に対して新たな路線の整備やリンクの付加が行われた場合、あるいは災害等によりリンクや路線の通行が不可能となった場合に、道路網全体で旅行時間の信頼度がどのように変化するかを求めることができる。これにより道路網の時間信頼性評価や、路線整備の優先順位決定などに役立つ情報を得ることができ、また道路管理において重点的に管理を行う必要のある区間を知ることができよう。

4. 阪神地域道路ネットワークへの適用

(1) 適用の概要

神戸市、芦屋市、西宮市を中心として、これに隣

接する周辺都市を含む阪神地域の道路ネットワークにおいて、道路網の時間信頼度評価の適用を行ってみた。まず基準道路網を、現状の道路網に第11次道路整備5カ年計画でオーソライズされている新規路線を加えた阪神地域の幹線道路網体系とした。コーディングを行った結果、ノード数571、リンク数843、セントロイド数98のネットワークとなった。OD交通量は、諸資料より推計した98×98ゾーンペア自動車OD交通量を用いた。

リンクパフォーマンス関数は、BPR関数

$$t_a(x_a) = t_{0a} \{1 + 2.62(x_a / c_a)^4\} \quad (10)$$

を用いた。ここに、 c_a ：リンクaの交通容量、 t_{0a} ：リンクaのゼロフロー時の所要時間。

高速道路の料金は、既存の道路については現状の値を用い、新規路線については料金率などにより推定して、時間価値を52円/分として時間換算した。

時間信頼度の算定は次の手順で進めた。まず基準ネットワークにおける確率利用者均衡（ $\beta=0.5$ ）を、モンテカルロ・シミュレーションを用いたインナーイテレーション1回、および連続平均化法によるアウトターイテレーション100回の反復によって求め、これに基づいてODペアごとの所要時間の平均値および標準偏差を算定した。

次に、基準ネットワークにおいて交通処理を行う上で重要な役割をもつと考えられるいくつかのリンクを、(1)リンク交通量の大きさ、(2)リンク交通量とパフォーマンス関数の微係数の積の大きさによって選択した。これらのリンクが災害や事故等により通行が不可能となった場合を想定し、時間信頼度がどのように変化するかを算定した。

まずリンクが通行不可能となった場合の確率利用者均衡を基準ネットワークにおけると同様に求め、この確率利用者均衡時におけるOD間の所要時間分布を、反復数50回のモンテカルロ・シミュレーション（インナーイテレーション）によってランダム・サンプリングした。その上で、各サービスレベルに相当する時間信頼度を算定した。

(2) 計算結果

基準ネットワークにおける時間信頼度ならびに選択した重要リンクが通行不可能となった場合におけ

る時間信頼度の計算結果を表1に示す。基準ネットワークにおける時間信頼度は、サービスレベルA 0.789、サービスレベルB 0.926、サービスレベルC 0.979となっており、OD間の旅行時間はほぼサービスレベルBまでの範囲内に収まっていることがわかる。選択した重要リンクが通行不可能となった場合には、時間信頼度はサービスレベルAで10～12,3%程度、またサービスレベルBで10%程度低下している。とくに影響の大きいのは、名神、中国道、第2名神であり、ついで阪神高速神戸線、湾岸線、国道2号、国道171号などが大きく信頼度の低下をきたしている。これらは地域道路網の骨格をなす路線であり、その一部が通行不可能となることによって影響が道路網全体に及び、時間信頼性の大きな低下をきたすことがわかる。

5. おわりに

確率利用者均衡を用いた道路網の時間信頼性評価の方法について述べた。このモデルでは、旅行時間の不確定性は経路選択の不確定性に起因し、またそれは旅行時間の認知が不確定であることに起因しているという前提に立っている。その上で何らかの原因によってネットワークが変化したとき、旅行時間が基準となる旅行時間を上回らない確率を時間信頼度と定義し、全ODペアに対する平均的な値を求める方法を示した。

またこの方法を阪神地域での道路ネットワークに適用し、大規模な実的なネットワークにおいても計算可能であることを実証した。計算された時間信頼度はほぼ妥当な値を示しており、この値を計画道路網評価の一つの指標として用いることができよう。本モデルの適用における問題は、確率利用者均衡の計算に効率的なアルゴリズムがないことであるが、モンテカルロ・シミュレーションと連続平均化法により計算可能である。

今後本時間信頼性評価法の適用について検討を進めていきたいと考えている。たとえば、新規路線の時間信頼度の面からの評価や、大規模災害によって多くの道路が被災したとき、復旧を進める路線の優先順位決定への適用等を行いたい。これらについては今後の課題としたい。

表一 1 時間信頼度の計算結果

切断リンク 番号	路線名	基準ネット での旅行時 間(min)	全ODペア ーの平均旅 行時間(min)	サービブレ ルAの時 間信頼度	サービブレ ルBの時 間信頼度	サービブレ ルCの時 間信頼度
基準ネット	—	—	37.06	0.789	0.926	0.979
1061	名神	3.27	38.72	0.641	0.772	0.850
1063	名神	15.93	37.62	0.666	0.808	0.884
1023	中国道	6.06	38.14	0.629	0.783	0.859
1025	中国道	7.65	37.82	0.658	0.805	0.876
9011	第2名神	5.99	39.03	0.662	0.810	0.874
9015	第2名神	13.13	38.52	0.621	0.770	0.844
9019	第2名神	9.13	37.42	0.680	0.822	0.887
3087	第2神明	7.90	37.75	0.690	0.827	0.884
2001	加古川BP	5.90	37.48	0.707	0.833	0.895
3053	阪高神戸線	3.08	37.36	0.673	0.810	0.886
3055	阪高神戸線	3.01	37.44	0.662	0.818	0.895
3097	阪高湾岸線	1.62	38.11	0.662	0.789	0.865
9411	阪高湾岸線	6.25	37.42	0.662	0.822	0.883
3137	阪高北神戸線	2.55	37.05	0.694	0.837	0.894
9473	南北線	11.65	37.78	0.661	0.784	0.857
9457	神崎川線	12.81	37.71	0.658	0.800	0.874
4027	国道2号	6.30	37.75	0.687	0.825	0.885
4035	国道2号	5.70	37.32	0.683	0.826	0.883
4049	国道2号	18.67	38.35	0.681	0.806	0.848
4053	国道2号	21.92	38.75	0.662	0.773	0.837
4095	国道171号	15.55	38.15	0.655	0.765	0.823
4171	国道173号	13.50	37.22	0.684	0.831	0.896
4253	国道175号	39.94	38.01	0.708	0.863	0.910

参考文献

- 1) 飯田恭敬、若林拓史、福島博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究、土木学会論文集、第407号/IV-11、pp.107-116、1989.
- 2) 若林拓史、飯田恭敬、井上陽一：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法、土木学会論文集、第460号/IV-19、35-44、1993.
- 3) 朝倉康夫、柏谷増男、熊本仲夫：交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価、土木計画学研究・論文集、No.7、pp.235-242、1989.
- 4) Daganzo, C.F. and Ahff, Y. : On stochastic models of traffic assignment, Transportation Science, 16(3), pp.253-274, 1977.
- 5) Sheffi, Y. and Powell, W.B. : An algorithm for the Equilibrium assignment problem with random link times, Networks, 12(2), pp.191-207, 1982.
- 6) Daganzo, C.F. : Unconstrained extremal formulation of some transportation equilibrium problems, Transportation Science, 16(3), pp.332-360, 1982.
- 7) Sheffi, Y. and Powell, W.B. : A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks, Transportation Research, 15B(1), pp.53-64, 1981.