

経路選択原則の相違と道路網信頼性の関係

Change in Road Network Reliability due to Different Rules of Route Choice

中川真治*・飯田恭敬**・若林拓史***

By Shinji NAKAGAWA, Yasunori IIDA and Hiroshi WAKABAYASHI

Because, depending on the needs of drivers for higher traffic services against serious traffic congestion, the quality of road network is required to be higher, the importance of new indicators for road network quality is increasing in the near future. In this study, reliability is regarded as a new indicator for the quality of traffic service, and, using assignment technique, the change in terminal reliability due to traffic management is considered. Firstly, reliability analysis is carried out for two types of assignment rules, user-equilibrium and stochastic user-equilibrium rule with 1-OD-2-link network, under several cases of road network conditions. Secondly, relationships between reliability and traffic management schemes are demonstrated, where the parameter in the stochastic assignment rule is associated with the degree of information which drivers are acquainted with.

It is shown that those relationships are not unique among the initial conditions of road network, and that, based on these conditions, this variation can be explained without difficulty. Therefore, the importance of a new strategies of traffic management, considering the relationships between reliability and route choice rule, is increasing.

1. はじめに

近年、我が国の都市部では交通渋滞が慢性化しており、都市のシンボリックな存在となっている。都市は単独では存立し得ず、他の都市との人的・物的交流に大きく依存していることを考慮すると、人や物の円滑な移動を阻害する交通渋滞を緩和する努力が必要である。しかし、都市部における地価高騰、地域環境に対する住民意識の高揚などにより、道路の新規建設は極めて困難となっている。そのため、既存の道路網を適切に管理運用することによって渋滞緩和を図る必要がある。

キーワード：連結信頼性、時間比配分、情報提供

* 正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科
(〒380 長野市若里500)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室
(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教 土木工学科
(〒572 寝屋川市幸町26-12)

一方、経済発展に伴い、生活水準は大きく向上しており、多くの財やサービスに対して人々のニーズは高度化している。社会基盤施設の1つとして人々に交通サービスを提供する道路も例外ではない。単に目的地までの道路が存在すればよいというレベルでは満足は得られない時代である。今後は、道路網の量的な整備を模索するだけでなく、利用者のニーズの高度化に対応するために、質的な整備を考えることの重要性が増大すると思われる。道路延長や舗装率・整備率といった物理的存在としての道路に関する指標は重要であるが、質的な整備状況を把握するには不十分であり、これらを補完するための新しい道路網整備水準指標が必要である。

本研究では、道路網の質的な整備水準を表す指標として信頼性を考える。道路網の信頼性には、与えられた旅行時間で目的地に到達できる確率である時間信頼性と、道路網が事故や渋滞によって通行不可能ではなく目的地への連絡性が保証されている確率

である連結信頼性という2つの考え方が存在する。以下では、連結信頼性について考える。先述したように、利用者の高度なニーズに対応するためには、適切な交通管理運用策が必要である。本研究では、情報提供などの交通管理運用策の導入を念頭において、これによって変化する信頼性と交通状態の関係について分析する。具体的には、時間比配分と等時間配分という異なる配分原則を利用者の経路選択原則と位置づけ、連結信頼性との関係についての比較分析を行う。その際、交通管理運用策による影響を考慮するために、時間比配分におけるパラメータを利用者の有する情報のレベルと関連づける。

2. 等時間原則と時間比原則の関係

時間比原則において、全経路数が N 本であるODペア (r,s) の k 番目の経路の選択確率 p_k^{rs} は、次式で与えられる。

$$p_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta t_k(V_k))}{\sum_n \exp(-\theta t_n(V_n))} \quad (1)$$

ここに、 $t_k(V_k)$ はリンク交通量が V_k の時の経路 k の走行時間である。また、 θ はパラメータであり、ドライバーが経路の旅行時間の大きさに関して持っている情報のレベルを表すものと考えることが可能である¹⁾。つまり、 $\theta=0$ のときには $p_k^{rs}=1/N$ が常に成立し、経路の旅行時間とは無関係にOD交通量が各経路に均等に配分される。

一方、 θ の値が大きくなるにつれて、旅行時間の短い経路の選択確率が高くなることを以下に簡単に説明する。ODペア (r,s) に m 本の時間最短経路が存在すると仮定し、その経路名を k_j ; $j=1, \dots, m$ とす。このとき、最短経路 k_j の選択確率は次のように書くことができる。

$$p_{k_j}^{rs} = \frac{1}{m + \sum_{n \neq k_j} \exp[-\theta(t_n(V_n) - t_{k_j}(V_{k_j}))]} \quad (2)$$

この式より、 $\theta = \infty$ のときに m 本の最短経路の選択確率は各々 $1/m$ となる。このとき、その他の経路の選択確率は0となるから、 $\theta = \infty$ のときの時間比配分の結果は等時間配分に一致する。

以上より、パラメータ θ の値が小さい場合は、経路の旅行時間に関して利用者の有する情報が不完全である(均等配分)ことを示し、逆に θ が大きい場合は、利用者の有する情報が完全である(等時間配分)ことを示すと考えることができる。つまり、 θ の値が0から ∞ へと増加していくとき、配分結果は均等配分から等時間配分へと近づいていく。

したがって、異なるパラメータ θ の値に対して求められた時間比配分結果について信頼性解析を行うことにより、利用者の有する情報のレベルの変化による信頼度の変化についての検討することが可能と考えられる。以下では、配分交通量によって規定される交通状態を利用者の有する情報のレベルと関連づけて、連結信頼度を用いて比較分析を行う。

3. ノード間信頼度の定式化

本研究では、1OD2リンクという簡単な道路網を対象として、時間比配分と等時間配分によるリンク交通量を求め、各配分原則における連結信頼度の比較分析を行う。その際、リンク信頼度、ノード間信頼度の両方について分析する。

ここでは、リンク信頼度の定式化、及びノード間信頼度の算定方法について述べる²⁾。まず、リンク信頼度を「ある期間中、当該リンクにおいて円滑な走行が保証される確率」として定義する。また、リンク信頼度を規定する要因を、時間OD交通量がある確率分布に従う確率変数であることと考える。つまり、OD交通量の変動が各リンクの交通量変動として伝達され、リンクの円滑走行の確率が規定されると考える。なお、本研究では、ある一定の時間帯のOD交通量が日によって変動する状況をOD交通量の変動と考える。

次に、リンク信頼度の定式化に関して以下の4つの前提を設ける。

- (1) リンク信頼度を、「当該リンクへの交通需要が交通容量を越えない確率」と定義する。
- (2) OD交通量は正規確率変数である。
- (3) リンクへの交通需要はOD交通量の変動に伴って確率的に変動する。
- (4) リンクの交通容量は一定であり、かつ外生的に与えられる。

これらの仮定の下に、混雑率から次式によりリン

く $k(k=1,2)$ の交通量の変動係数 CV_k を算出する。

$$CV_k = \alpha \exp\{-\beta(g_k + \delta)\} + \gamma \quad (3)$$

ここに、 g_k はリンク k の混雑度、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ はパラメータであり、OD交通量の変動パターンが反映されるような値をとる。また、平均OD交通量に対する配分交通量をリンク交通量の平均値とする。リンク交通量の分散は式(3)により算出される変動係数に平均値を乗じた標準偏差を2乗して求められる。

以上によって、リンク信頼度 r_k を次のように定式化することができる。

$$r_k = \int_0^{C_k} f(V_k) dV_k \quad (4)$$

ここに、 V_k はリンク k の交通量、 C_k は同じく交通容量である。

ノード間の円滑走行が保証されないのは、両方のリンクが走行不能となる場合であることから、ノード間信頼度 R を次のように定義することができる。

$$R = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (5)$$

ここで述べた信頼度計算の方法は、1回の交通量配分の結果を用いてリンク信頼度の推定を行うことができるため、詳細かつ膨大な統計的調査を行わずに比較的容易に推定することが可能である。したがって、交通管理運用策の代替案の比較に対して有効な手法といえる。

4. 交通量配分と信頼度計算の初期条件

時間比原則・等時間原則に基づく交通量配分計算は表-1に示すような3つのケースに対して行った。

ケース1は容量が同じであるが、自由走行時間に違いがある場合、ケース2と3は容量・自由走行時間の両方が異なる場合である。ただし、ケース2では、容量の大きいリンク1の方が自由走行時間が大きく、逆にケース3では、容量の大きいリンク1の方が自由走行時間が小さい。

交通量配分においては、OD交通量の小さい間は自由走行時間の大小が分担率に影響を持つが、OD交通量が大きくなると交通容量の大小がより大きな影響を持つと思われる。そのため、ここに設定した3つのケースの間で配分形態が異なると考えられ、

表-1 交通量配分のケース

ケース	リンク 1		リンク 2	
	C_1	$t_{1,0}$	C_2	$t_{2,0}$
1	2000	15	2000	10
2	2000	15	1500	10
3	2000	10	1500	15

(C_k : Veh/h , t_k : min)

結果として信頼度の挙動にも何らかの影響があるものと思われる。特に、3つの道路網の条件を反映した挙動が示されれば望ましい。

なお、OD交通量は2つの経路の交通容量の和を道路網容量として、道路網容量の0.5倍から1.5倍まで変化させる。

各リンクの走行時間関数として、式(6)に示すような修正BPR関数を用いる。

$$t_k(V_k) = t_{k,0} \left\{ 1.0 + 2.62 \left(\frac{V_k}{C_k} \right)^{5.0} \right\} \quad (6)$$

次に、時間比配分のパラメータ θ の値がどの程度になれば等時間配分と見なせる配分結果が得られるかを確認する必要がある。配分計算の結果、上述した条件設定の場合について、 $\theta=10$ 程度になれば、等時間配分結果に類似した配分結果が得られることがわかった。したがって、時間比配分計算においてパラメータ θ の値を余り大きくとる必要はないと考えられる。以下では、 $\theta=0, 1.0$ の2つの値についてのみ時間比原則に基づく配分計算を行う。

5. 経路選択原則と道路網信頼性の関係

本節では、以上に述べた諸前提の下で行った時間比原則・等時間原則に基づく配分交通量に対する信頼性解析の結果について述べる。

時間比配分のパラメータ θ の変化と信頼度の関係は表-1に示した3つの道路網条件を反映した挙動を示すことがわかった。以下では、各ケースごとにパラメータ θ の変化に対するリンク信頼度・ノード間信頼度の挙動について考察する。

①ケース1

図-1に各リンクの信頼度を示す。この図は、横軸にOD交通量、縦軸にリンク信頼度の値をプロットしたものである。図-1によると、2つのリンクの信頼度は $\theta=0$ （均等配分）のとき一致し、 θ の増加にしたがって両者の差が大きくなり、 $\theta=\infty$ （等時間配分）のときに差が最大となることがわかる。また、ノード間信頼度に関しては、図-2のような結果が得られた。図-2において、横軸は図-1と同様にOD交通量を示しており、縦軸はノード間信頼度を表している。図-2によると、 θ の値が0から増加していく場合、ノード間信頼度の値に比較的小さな上昇が見られる。これは前述したように両リンクの信頼度の差が等時間配分に近づくにつれて増加するためである。

時間比配分のパラメータ θ の変化によるリンク信頼度の変化は、次のように説明することが可能である。つまり、式(4)によって定式化されるリンク信頼度は当該リンクの容量によって規定されるため、リンク容量が同一の場合には、交通量の面で余裕のあるリンクの信頼度が高くなる。ケース1の場合、自由走行時間が短いのはリンク2であり、 θ の値が増加するにつれて、その分担率がリンク1よりも高くなるために、リンク容量に対する余裕はリンク2の方が小さくなる。したがって、本ケースではリンク1の方が信頼度が高くなり、その差は θ の増加につれて大きくなる。

②ケース2

リンク信頼度に関するグラフを図-3に示す。このケースでは、自由走行時間の短いリンク2の方が信頼度が低くなるという傾向はケース1と同じである。しかし、図-3に示されるように、パラメータ θ の増加につれて、ケース1では（図-1）リンク信頼度の差が大きくなるのに対して、ケース2ではその逆に信頼度の差が小さくなることがわかる。ケース1と2の道路網条件を比較してみると、ケース2では交通容量に大小関係が存在することが、ケース1との相違をもたらしていると考えられる。

つまり、OD交通量が大きくなるにしたがって、走行時間関数の式(6)において、自由走行時間 $t_{k,0}$ の効果に比べて、べき乗の形で影響する $(V_k/C_k)^{5.0}$ の効果の方が上回るため、リンク容量の大きいリンク1

の分担率の方が高くなると思われる。この傾向は θ の値が大きくなる、すなわち等時間配分に近づくにつれて顕著になるため、同じOD交通量について見た場合、 θ の大きい場合の方がリンク1の分担率が大きくなる。したがって、リンク1の信頼度は θ の増加につれて小さくなる。これは同時に、リンク2の信頼度が θ の増加につれて大きくなることを表しているため、前述したようにケース1とは違う結果が得られることになる。

次に、図-4にOD交通量とノード間信頼度の関係を示す。リンク信頼度の差が均等配分から等時間配分に向かうにつれて小さくなることから、ケース1とは逆にノード間信頼度は θ の増加と共に小さくなることがわかる。

ケース2は2つのリンクの交通容量の相違がリンク信頼度の挙動に大きな影響を及ぼし、結果としてノード間信頼度の値にも影響を及ぼしていることを示す典型的な例といえる。

③ケース3

このケースでは、前の2ケースとは異なった興味深い挙動が示される。まず、リンク信頼度の変化についてのグラフを図-5に示す。この図によると、ケース3では、均等配分から等時間配分へと移行する途中でリンク信頼度の大小関係が逆転することがわかる。すなわち、均等配分（ $\theta=0$ ）のときにはリンク1の方が信頼度が高くなっているのに対して、等時間配分（ $\theta=\infty$ ）のときにはリンク2の方が信頼度が高くなっている。また、 $\theta=1.0$ 付近で2つのリンク信頼度がほぼ一致している。ケース3においては、リンク1の方が自由走行時間が小さく、かつ交通容量も大きいので、OD交通量が小さい場合も大きい場合も一貫してリンク1の分担率が高くなる。しかも、同じOD交通量については、 θ が大きくなるにつれてリンク1の選択確率が高くなる。したがって、 θ の値が大きくなって、リンク1の分担率が過度に高くなると、リンク1の余裕に比べてリンク2の余裕が小さくなり、その結果としてリンク信頼度の大小関係が逆転が生じると考えられる。

次に、図-6にOD交通量とノード間信頼度の関係についてのグラフを示す。前述のリンク信頼度の大小関係が途中で逆転するという挙動に対応して、同じOD交通量に対するノード間信頼度の値は、 θ に対して減少傾向から増加傾向へと転じる。ただし、等

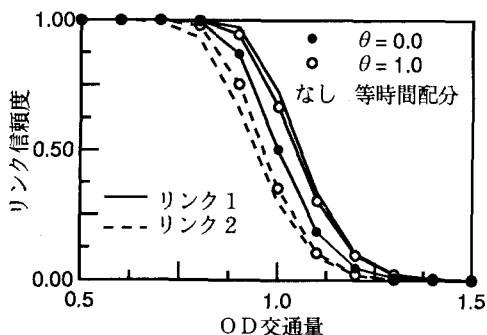


図-1 リンク信頼度 (ケース1)

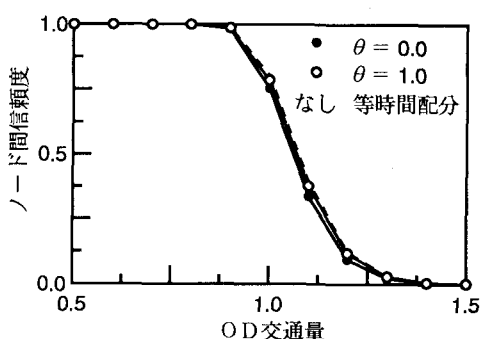


図-2 ノード間信頼度 (ケース1)

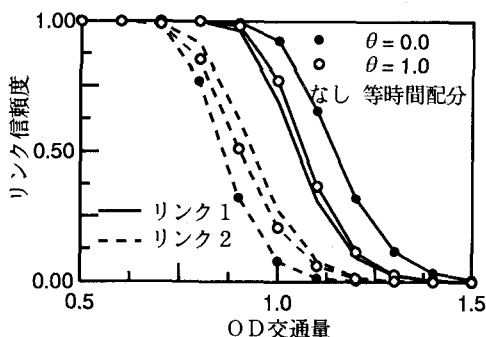


図-3 リンク信頼度 (ケース2)

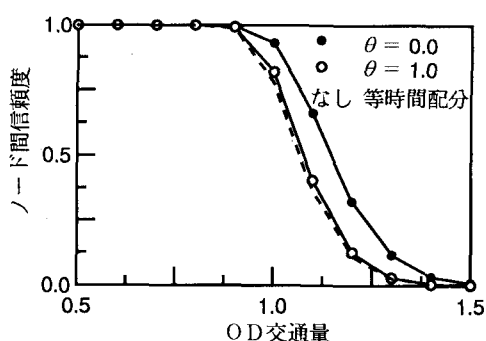


図-4 ノード間信頼度 (ケース2)

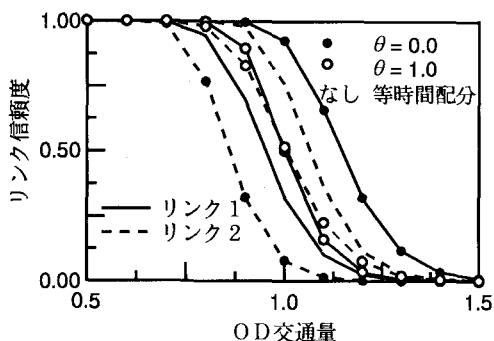


図-5 リンク信頼度 (ケース3)

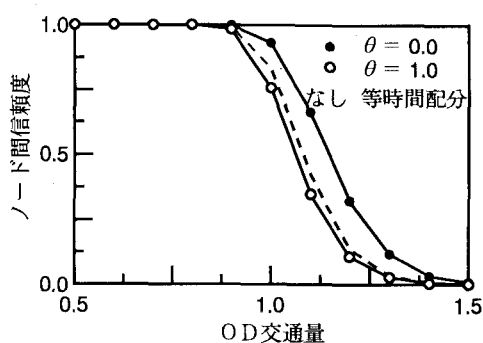


図-6 ノード間信頼度 (ケース3)

時間配分時のノード間信頼度の値は均等配分時の値よりも小さい。

ここで、ドライバーの有する情報のレベルと関連づけて、ケース2とケース3の比較考察を試みる。先に述べたように、交通量配分では、OD交通量がある程度大きくなると、走行時間関数において自由走行時間の効果に比べて混雑率の効果の方が上回る

と考えられる。そのために、いずれのケースにおいても交通容量の大きいリンク1の方が分担率が高くなる。ところが、ケース2ではリンク1の方が自由走行時間が大きいので、完全情報に近づいても（パラメータ θ が大きくなっても）リンク1の選択が抑制されると思われる。これに対して、ケース3では自由走行時間がリンク1の方が小さいので、リンク

1の選択を抑制するものがなく、交通量が集中してしまい、リンク信頼度がリンク2を下回ると結果となってしまふ。

以上の3ケースに関する考察を通じて、信頼性が旅行時間とは異なる指標であることがわかる。その例として、旅行時間の面では最も公平であるといえる等時間配分フローを信頼性の立場から考える。

ここでは、2地点間のノード間信頼度の大きい配分フローが信頼性の観点から望ましいと考える。このとき、等時間配分のノード間信頼度が最も高いのは、ケース1のみであり、ケース2とケース3では均等配分時よりも低い値である。つまり、信頼性の立場から見ると、不完全情報の状態から完全情報の状態に誘導することに関して、道路網の条件に対応した誘導策を講じることの必要性が示唆される。

6. まとめ

本研究では、利用者のニーズの高度化や新しい交通管理運用策の導入に対応して、交通サービスの質的な向上の重要性が高まると思われる中で、新しい道路網整備水準指標として信頼性を取り上げた。特に、旅行時間情報提供といった交通管理運用策による信頼性向上について考察することを目的として、配分理論と信頼性解析という静的な分析手法を用いて、利用者の有する情報のレベルによる道路網信頼性の変化について検討した。

その結果、時間比配分のパラメータ θ の変化によるリンク信頼度・ノード間信頼度の挙動はリンク容量や自由走行時間といった道路網の条件によって異なることが明らかとなった。つまり、利用者のもつ情報のレベルが上がるとき、連結信頼性という指標を用いて考えると、交通サービス水準が低下する道路網（例えば、先述のケース2、及び、ケース3）と上昇する道路網（例えば、ケース1）の両方が存在することが示唆される。しかし、前節でも述べたように、これらの挙動は交通容量・自由走行時間の大小関係といった道路網条件を的確に反映したものである。したがって、道路網条件を考慮して信頼性を向上させるような経路分担が可能ではないと思われる。利用者の同意が得られるような誘導策の1つとして信頼性を考慮した誘導策が必要であると考えられる。

次に、今後の課題について述べる。まず第1に、分析対象の道路網をネットワーク規模に拡大する必要がある。交通管理運用策の導入により利益を享受する利用者も存在すれば、不利益を被る利用者も存在すると考えられる。どの程度の割合の利用者が利益を享受するのかという問題を検討する必要がある。これには、対象道路網の拡大が不可欠である。

第2に、動的な分析を行う必要性について検討するべきである。本研究では、交通管理運用策として情報提供の導入を念頭に置いている。時々刻々と与えられる情報が交通状態に及ぼす影響を考える際には時間軸を組み込んだ分析が必要と思われる。しかし、信頼性という指標は動的に変化する指標というよりは、ある一定の時間帯の交通状態を平均的に見た場合に対応する静的な指標であると考えられる。そこで、動的分析における信頼性の位置付けを明確にする必要がある。

第3に、時間信頼性を用いた分析が必要である。高度な交通サービスのための指標としては、時間軸を考慮した方がより現実的であると思われる。

第4に、完全情報の仮定についての検討を行う必要がある。本研究では、利用者の有する情報のレベルを時間比配分のパラメータ θ と関連させて分析を行ったが、現実にはこの関連性については不明である。また、情報提供を念頭においた分析を行う場合に等時間配分の実現を前提にする必要があるのかという問題もある。

最後に、信頼性を考慮した新しい経路分担の考え方の必要性について述べる。信頼性は今後の道路サービスにとって重要かつ必要な指標である。これまでは、信頼性を用いて与えられた交通状態を分析するのが主体であったが、どのような交通管理運用策をとれば信頼性向上が見込めるのかについて検討する必要がある。その際、各経路ごとの信頼性の分布状況とODペア間の信頼性の間の trade-off の関係が問題になると考えられる。

[参考文献]

- 1) 佐木綱監修、飯田恭敬編著：交通工学, pp.79-83, 国民科学社, 1992.
- 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, No.458/IV-18, pp.35-44, 1993.