

降雪および交通規制の不確定性環境下における高規格道路網の信頼性解析*

Travel Time Reliability and Connectivity Reliability of Expressway Network under Uncertain Environment of Snowfall and Traffic Regulation *

若林拓史**

by Hiroshi WAKABAYASHI **

1. はじめに

道路ネットワークの信頼性を高く維持することは地域の経済的社会的活動・文化的交流や防災上の観点からきわめて重要である。今日、交通ネットワークの信頼性が重要視されるようになってきた背景には、

- (1) 平常時においては、
 - 1) 時間価値の増大、
 - 2) 広範囲に要請されるようになってきた Just in Time 生産や無在庫販売等の生産・経済活動の発展、
 - 3) 経済活動のスピード化・正確性への要請、
 - 4) 人々のせっかち化、などがある。また、
 - (2) 災害時においては、
 - 5) 代替路の確保、
 - 6) 所要時間内到達性の確保、
- 等がある。

従来の交通システムの設計や運用は、平均的な交通需要のもとで、システムは期待される機能を常に発揮するとしてなされてきた面が多い。これに対し信頼性の概念は何らかの変動を前提としている点に特徴がある。

道路網信頼性の評価指標としては、連結信頼性や所要時間信頼性等が提案されている¹⁾²⁾。これらの信頼性は何らかの変動を前提としているが、従来は交通量の変動等、交通の需要側にその変動を求めるものが多かった。その後、Chen ら³⁾によって容量信頼性が提案され、信頼性のブレとしてサービスの供給側にも変動を求めた研究がなされた。本研究では、連結信頼性と所要時間信頼性を評価指標とするが、対象とするブレは需要側、供給側の双方であると考えている。この需要側、供給側の双方の変動を考慮した信頼性は、パフォーマンス信頼性として位置づけられる。

上記で述べたように、近年では所要時間の予期せぬブレや遅れの防止に対する社会的経済的要請が高くなってきている。本研究の対象とする名古屋～大阪間の高規格道路には、名神高速道路および東名阪自動車道(国道25号名阪国道等も含む)の2ルートがある。このうち、名神高速道路は、文字通り、日本の物流・人流の大動脈であり、その機能の発揮が年間を通じて期待されている。

しかしながら、その経由地に関ヶ原という豪雪地帯があり、冬期においては通行止めや梯団作業等の種々の規制が頻繁に実施されている。例えば、平成12年度の統計では、関ヶ原、米原JCT間で106回、米原JCT、彦根間では129回も積雪による通行規制が行われた⁴⁾。また、平成7年12月には連続30時間、翌平成8年1月には連続28時間の通行止め規制が実施されている。

本研究は、冬期の悪天環境下のもと、名古屋～大阪間の高規格道路を対象に所要時間信頼性解析・連結信頼性解析を行うものである。また、今後第二名神高速道路の開通が期待されている。本研究では、上記の2ルートに加えて第二名神高速道路も評価対象路線に加えて信頼性解析を行う。

2. 信頼性に定義と意義

連結信頼性とは、所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上で走行移動が保証される確率的指標と定義される。本研究では、これを単一の経路において評価することとする。複数経路による連結信頼度を評価するには、従来、筆者らによって提案されている方法を用いればよい¹⁾。この指標は事故や工事、及び災害時などに果たして目的地へ到達できるのかを評価する指標として有効である。

一方、所要時間信頼性とは、目的地までの所与到達時間を保証する確率、あるいは、ある確率で到達可能な走行所要時間の上限値(最大許容所要時間)である。この信頼性は、所要時間の安定性を示す指標であり、道路利用者に対し所要時間の正確性と迅速性の情報を提供するものである。この指標では、空港や駅などへ向かう時間価値の高いトリップを評価するのに有効である。また高規格道路においては、所要時間信頼性が有効な評価指標であると考えられる。高速道路や高規格道路の利用では、移動所要時間の短縮が利用目的であるため、所要時間の信頼性評価はユーザーにとって重要である。また高速道路の代替経路は高速道路しか考えられず、現状において代替経路は少ないので所要時間信頼性での評価が有効だと考えられる。

3. 天気予報から交通規制までの流れとモデル化

悪天候によって交通規制が実施されるまでの流れを述べる。このフローを図-1に示す。まず、実際の天気を予報する天気予報が発表される。このとき、冬期の場合には降雪かそうでないかが発表される。降雪、非降雪の両

* キーワード: 交通ネットワーク信頼性, 所要時間信頼性, 連結信頼性, 降雪と交通規制, 高速道路整備効果分析

** 正会員 名城大学都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘, Tel:0574-69-0131, Fax: 0574-69-0155)

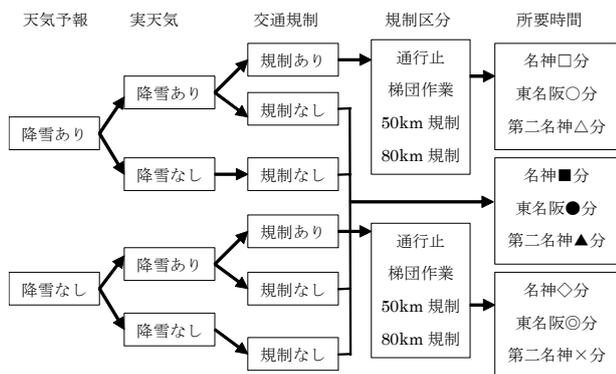


図-1 天気予報から交通規制までの流れ

者において、それぞれ実際の天気が降雪になるか、降雪にならないかの2通りの事象が発生する。降雪がない場合には、当然のことながら降雪に起因する交通規制は実施されない。降雪がある場合には、その程度により、交通規制の実施が決定される。

交通規制には以下の4段階がある。高規格道路上において、降雪や降雨など悪天候により施行される交通規制は、規制度合いの高い順に「通行止め」、「梯団作業」、「50km/h規制」、「80km/h規制」などがある。梯団作業とは、名神高速道路の彦根・関ヶ原間において昭和58年より開始された交通規制であり、除雪車両2台が梯団を組み除雪作業を行なうと同時に、一般車両の先導も行なう低速走行除雪作業のことである⁹⁾。上記交通規制が実施された場合、走行速度にも大きな影響を及ぼす。もし実施された交通規制が通行止めであれば、そのリンクは寸断したと考えられ、連結信頼度の評価対象となる。しかし、梯団作業や50km規制などであれば、走行速度に影響はするものの、走行は可能であるので、連結信頼性は確保され、所要時間信頼性の評価対象となる。本研究では、以上述べた4段階の交通規制に、「規制なし」を加えて、

- 1) 通行止め、2) 梯団作業、3) 50km/h規制、
 - 4) 80km/h規制、5) 規制なし、
- の5段階の交通規制とした。

4. 降雪予報から道路網信頼性を求めるフレームワーク

4.1 天気予報と交通規制

悪天候下での信頼性解析は、交通規制がその気象条件下のみで生じるため、単なる通行規制時間の調査(例えば、1年を通じて通行規制が行われた回数や通行規制継続時間)では不十分であり、天候の条件付確率で考える必要がある。沿道で実現した実際の天気を知ることは困難であるため、本研究では天気予報分布から交通規制のレベルを推定する条件付き確率モデルを構築する。提供される天気予報を与件とした交通規制レベルの条件付き確率を $p_{a,rj|w_i}$ とし、

$$p_{a,rj|w_i} = \text{Prob}(\text{リンク } a \text{ における規制レベルが } j \mid \text{天気}$$

予報がレベル i) (1)

を算定する。ここに、 r_j は交通規制のレベル、 w_i は天気予報の集約レベル(後述)を表す。これと後述する各規制レベル下での所要時間推定モデルを組み合わせることで所要時間信頼度を推定する。

4.2 空間平均速度および所要時間の計測

本研究では、対象道路区間の空間速度および単位区間所要時間の分布を知る必要がある。このため、フローディング調査によって空間速度の分布を計測する。

4.3 従属故障の問題

従来、信頼性解析では故障事象は独立性の仮定の下で理論的構築がなされてきた。この理由は、数学的定式化が容易なためである。これに対して、従属故障は困難で重要な課題であるとされてきている⁹⁾。また、従属故障については、独立の前提に基づいた結果を技術者の経験に基づいて補正されたりする場合が多かった。

熊本⁹⁾は、従属故障についての研究についてレビューし、限定された条件の下で大きく分けて共通原因起因事象やシステム間従属性、コンポーネント間従属性の3種類の従属故障があることを明らかにし、さらにこれらを細かく分類して9種類の従属故障の解析方法があることを述べている。しかし、いずれの解析方法についても、例えば、共通原因従属故障については故障する複数のユニットを1ユニットと記述すれば独立の方法論と大差なく、本質的な従属故障の解析方法とは十分なり得ていないのが実情である。ここに、熊本⁹⁾も述べているところの、「困難で重要な課題」が存在する。

本研究では、以下の2種類の従属性を考慮する必要がある。

- 1) 車両の走行状態の隣接区間従属性。
- 2) 降雪による交通規制の隣接区間従属性。

1)は、詳しくは後述するが、高速道路の区間毎、あるいは単位距離毎にドライバーの走行挙動の独立性が現実としては成立しないことである。つまり、あるドライバーの全区間の走行状態は区間を通じて、ある一定の従属的な走行状態が保たれているので、信頼性評価ではこのことを考慮しなければならないことである。2)は、悪天候によって高速道路の隣接区間で、交通規制に従属関係が生じることである。つまり、独立の仮定を設ければ数学的な定式化が容易で、解法も容易となる。しかし、実際には、降雪による通行規制(例えば、通行止め)がある区間に実施されれば隣接区間も同様の交通規制が行われやすいという現実を反映したものとはならない。したがって、1)および2)の従属性を明示的に考慮する必要がある。

4.4 所要時間信頼度の算出法

所要時間信頼度をODペア間を t 時間以内に旅行可能な確率と定義する。ODペア間は多数のリンクで構成さ

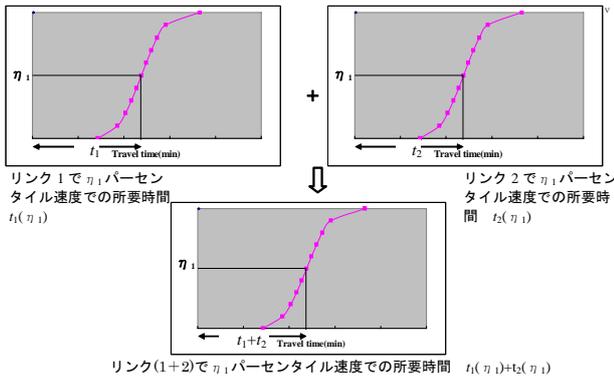


図-2 巡航速度順位保存の仮定(リンク間で走行状態の従属性を仮定)

れるので、各リンク毎の規制レベル r_j での所要時間の確率密度関数を $h_{a,r_j}(t)$ とする。この所要時間の確率密度関数は、各リンクの規制レベル r_j 毎に与えるものとする。リンク a での所要時間の確率分布関数 $H_{a,r_j}(t)$ を考えると、

$$H_{a,r_j}(t) = \int_0^t h_{a,r_j}(t) dt. \quad (2)$$

で与えられる。この $H_{a,r_j}(t)$ が、規制レベル r_j のもと、リンク a 上で所要時間が t 時間以内である所要時間信頼度を与える。

4.5 リンク間での走行状態の従属性の考慮

各道路区間でドライバーの走行状態の独立性を仮定すると、例えば、所要時間分布に正規分布を仮定すると、正規分布の再生性の性質によって全区間の所要時間分布は表現できる。しかし、このようにすると、分散が大きくなるとともに、実際のドライバーの走行状態を正しく表現できていないという問題を生じる。

これに対し、本研究では「巡航速度順位保存」を仮定する。いいかえれば、各区間を通じてそれぞれの車両は同一のパーセンタイル速度で走行するという仮定である。この仮定によって、図-2に示す考え方で複数の区間での所要時間信頼性を求める。

式(2)で述べたリンク a での所要時間の確率分布関数 $H_{a,r_j}(t)$ の逆関数を考える。すなわち、リンク a における累加確率 p_1 のもとでの所要時間 t は、

$$t_{p_1,a} = H_{a,r_j}^{-1}(p_1) \quad (3)$$

で与えられるので、OD ペア間の所要時間 $t_{p_1,L}$ は、

$$t_{p_1,L} = \sum_{a \in L} H_{a,r_j}^{-1}(p_1) \quad (4)$$

で求めることができる。この考え方によってリンク間での同一ドライバーによる走行速度の従属性が表現できる。

ODペア間の構成リンク数を l とすれば 5^l とおりの交通規制の組み合わせが存在するので、求めるODペア間のそれぞれの累加確率 p_1 に対しての所要時間信頼性は、その実現確率、 $\prod_{a \in L} p_{a,r_j|w_i}$ と式(4)からなる期待値

$$\sum_{r_j} \left\{ \prod_{a \in L} p_{a,r_j|w_i} t_{p_1,L} \right\} = \sum_{r_j} \left\{ \prod_{a \in L} p_{a,r_j|w_i} \sum_{a \in L} H_{a,r_j}^{-1}(p_1) \right\} \quad (5)$$

で求められる。

5. データベースの構築

天候のデータソースと交通規制のデータソースは別々である。これらのデータを結合し天気予報と交通規制との関係式を構築するためのデータベースを作成した。まず、高速道路の交通規制データは(旧)日本道路公団名古屋管理局提供の交通規制データである。対象区間は本研究で豪雪地域とみなしている関ヶ原地域を含む、名神・東名高速道路の京都東IC～三ヶ日IC間および北陸自動車道の一部、また東名阪自動車道の亀山～名古屋間の各IC間についてであり、各種交通規制の実施時刻が詳細に記述されている。交通規制はインターチェンジ間およびインターチェンジ間に府県境がある場合には府県境で区間を分割し、これに各地方気象台発表の天気予報を併記する形で構築した。天気予報データの詳細については紙面の関係で割愛する。一例を表-1に示す。

表-1 交通規制と降雪確率の関連づけ(1995.12.27~28, 名神上り, 区間7)

日付	時間帯	規制時間(単位:分)				
		降雪確率	通行止め	橋団	10km/h規制	50km/h規制
...
12月27日	0:00~6:00	80	360	0	0	0
12月27日	6:00~12:00	60	360	0	0	0
12月27日	12:00~18:00	70	360	0	0	0
12月27日	18:00~24:00	60	360	0	0	0
12月28日	0:00~6:00	60	360	0	0	0
12月28日	6:00~12:00	60	180	0	180	0
12月28日	12:00~18:00	50	0	0	360	0
12月28日	18:00~24:00	20	0	0	360	0
...

6. 計算結果と考察

最初に、何も交通規制が実施されない状況下での所要時間信頼性解析を行った。次に、種々の降雪予報下での所要時間信頼性解析および連結信頼性解析を行う。

ここでは、各府県に種々の天気予報パターンを付与し、各経路上における交通規制の生起確率をもとに、所要時間の信頼性解析を行なう。得られる所要時間の確率分布は、所与天気予報下で発生しうる交通規制のすべての組み合わせによる期待値的な所要時間分布となる。

この天気予報パターン(パターン1:図-3)では、天

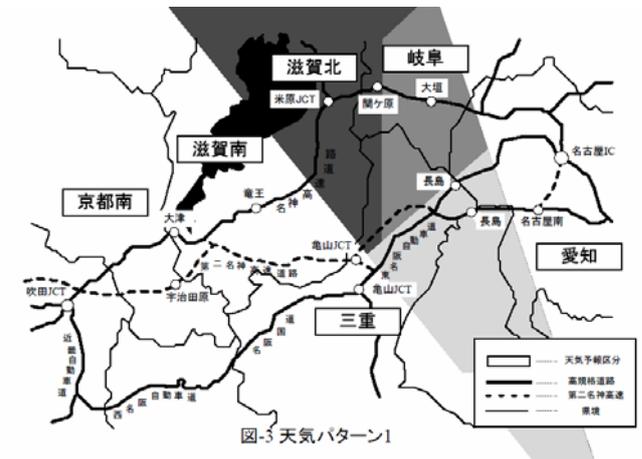


図-3 天気パターン1

表-2 所要時間信頼性の変化(上り, 天気パターン1)

非連結信頼性	
名神	32.73%
東名阪	15.70%
第二名神	17.13%

	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
名神(平常時)	71.23	92.74	101.76	108.29	113.86	119.04	124.42	129.98	136.32	145.54	182.78
東名阪(平常時)	97.44	119.09	128.25	134.71	140.33	145.53	150.74	156.36	163.02	171.97	209.45
第二名神(平常時)	55.80	72.64	79.71	84.83	89.19	93.25	97.46	101.82	106.78	114.00	143.18
名神(降雪予報下)	93.84	114.62	123.33	129.63	135.02	140.02	145.22	150.58	156.80	165.61	201.60
東名阪(降雪予報下)	98.19	119.84	129.00	135.47	141.08	146.28	151.50	157.11	163.77	172.74	210.20
第二名神(降雪予報下)	61.08	77.90	84.96	90.07	94.42	98.48	102.68	107.04	112.03	119.20	148.33

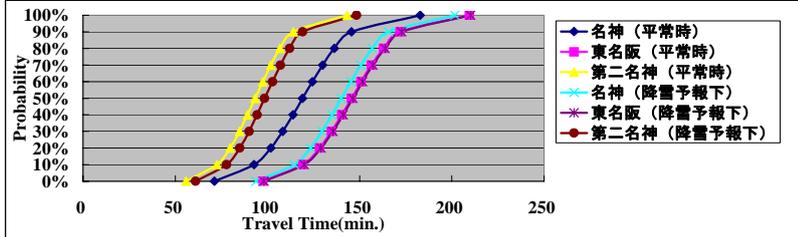


図-4 所要時間信頼性の変化(上り, 天気パターン1)

気集約レベルを降雪確率について愛知=0%~20%, 岐阜=30%~50%, 滋賀北部=60%~100%, 滋賀南部=0%~20%, 京都南部=0%~20%, 三重=0%~20%とした。降雪地区を示したものが、図-3である。本天気パターンでは滋賀北部に高い降雪確率、また隣接する岐阜県にも中レベルの降雪確率を与え、平成7年のクリスマス豪雪に近い状況を再現した。計算結果を、表-2と図-4に示す。

紙面の関係で記述を省略したが、式(5)の計算では、構成区間数を l とすれば 5^l とおりの交通規制の組み合わせが存在し、計算量が膨大となる問題が生ずる。このため、交通規制の区間での相関分析を行い、区間をブロック化して計算を簡略化している。それでも、ブロック数を l とすれば 5^l とおりの交通規制の組み合わせが存在する。発生する規制の組合せの中で、最も生起確立が高かったものは、名神上りでは「竜王IC~米原JCT」が「50km/h規制」, 「米原JCT~関ヶ原」が「梯団作業」となり、両区間が「梯団作業」がそれに続いている。その他の区間では「規制なし」である。名神下りでは「大垣~米原JCT」が「梯団作業」, 「米原JCT~竜王IC」で「50km/h規制」の生起確率が最も高かった。上りと下りで規制区間のブロック化に差違が見られるが、これはこの区間が上り公売であり、大型車の走行に配慮した交通規制がデータにも表れているものと考えられる。

図-4 から見て次のようなことが言える。まず、平常時の所要時間信頼性は、第二名神が最も所要時間が小さく、また所要時間の変動も小さいと言える。所要時間は次に現名神高速道路、東名阪の順に大きくなる。次に悪天候予報下での所要時間の変動は、この天気予報パターン(図-3)のもとでは、名神高速道路の所要時間の増加が著しく、他のルートは大きな影響を受けないことが分かる。また、表-2 から、名神ルートの連結信頼性不信頼度が30%程度となり他の2ルートの倍程度になることも推定された。しかしながら、この降雪予報下においても、名神ルートの所要時間及び所要時間信頼性は東名阪ルート

よりも悪化することはない。また、第二名神ルートの所要時間が、平均値および変動においてもほとんど悪化しないのは、そのルート選定に理由があるが、特筆に値すると考えられる。この意味からも、第二名神の社会的経済的な寄与は大きいことが推察できる。

7. まとめ

本研究では、冬期の降雪環境下における高規格道路網の信頼性解析を行うための方法論を構築した。本モデルは、入力を天気予報、出力を名古屋~大阪間の所要時間信頼性および連結確率信頼性とした。このため、種々の降雪パターンが発生する冬期の地域間信頼度の分析が行える。結論として、名神ルートは豪雪地帯である関ヶ原を經由している影響で降雪の影響を受けやすいが、梯団作業が行われる可能性が高く、通行止めには至らないケースが多かった。しかしながら、梯団作業の影響で所要時間信頼度に与える影響が大きかった。その背景には、名神高速道路は大阪・名古屋間を結ぶ自動車交通網の大動脈であるため、ネットワークの寸断を容易には実施できない事情が伺える。第二名神高速道路の開通による影響は大きく、豪雪地帯を經由して、また経路長も名神高速道路に比べて約50km短縮されているので、旅行時間信頼性の向上および連結信頼性の向上に与える影響は大きい。第二名神高速道路は、中国自動車道と名神高速道路との補完効果で、西日本と東京を結ぶ信頼性も向上させる。東京は日本の大消費地であり、東京との輸送信頼性を確保することは、今後の我が国の活性化、地方分散化を進める意味からも意義深いといえる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、交通規制のデータをご提供いただいた日本道路公団名古屋管理局に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯田恭敬・若林拓史：プール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法，土木学会論文集，No.395/IV-9,pp.75-84,1988.
- 2) 若林拓史・飯田恭敬：交通管理運用策による道路システムの所要時間信頼性向上効果，土木計画学研究・講演集15(2),pp.99-102,1992.
- 3) Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H. (1999). A Capacity Related reliability for Transportation Networks. Journal of Advanced Transportation, 33(2), 183-200.
- 4) 大阪府ホームページ 平成12年度集計JHデータより，<http://www.pref.osaka.jp/kotsudoro/daini/index2.html>
- 5) 日本道路公団：『みち』，No109，pp.4-11，1998.
- 6) 熊本博光：PRA(確率論的リスク評価)ガイド，日本原子力研究所昭和62年度受託調査『信頼性解析手法の現状調査』調査報告書，昭和63年2月。