

# 一般国道と高速自動車国道が並行する区間 における通行止め期間に関する研究

峪龍一<sup>1</sup>・内田賢悦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail:ryuichitani@eis.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail:uchida@eis.hokudai.ac.jp

平成 28 年 8 月に北海道に接近した台風 10 号に伴う降雨によって、道央圏と十勝地方を結ぶ国道 274 号が大規模に被災し、平成 29 年 1 月現在、不通となっている。国道 274 号が不通となる期間、並行する道東自動車道が道央圏と十勝地方を直接連絡する唯一の経路となる。そのため、国道 274 号に加えて、道東自動車道も同時に不通となるとき、道央・十勝間の接続性が著しく低下することが懸念されている。本研究では、一般国道と高速自動車国道が並行する区間を考え、道路が被災する確率と被災から復旧までに要する時間から、対象とする期間全体において、それぞれの道路、あるいはその両方が通行止めとなる時間を確率変数として求めるモデルを提案する。確率的な通行止め時間を求めることによって、道路ネットワークの冗長性を確率的に評価し、被災による途絶の影響を考慮した接続性を検討することが可能となる。

**Key Words:** *tayphoon, heavy rainfall, connectivity, redundancy, expressway, highway*

## 1. はじめに

平成 28 年 8 月下旬に、台風 10 号が北海道に接近し、道内に甚大な被害をもたらした。長く続いた降雨によって河川が増水し、土砂災害が発生したため、橋梁の損壊や道路の途絶が多く発生した。特に、十勝地方と道央を連絡する国道 274 号は橋りょう・覆道等が合計 66 か所にわたり被災し、平成 29 年秋頃に通行止めを解除することを目標として復旧作業が行われている<sup>1)</sup>。国道 274 号が被災してから復旧するまでの期間、道央圏と十勝地方を結ぶもう一つの経路である道東自動車道が通行止めとなるとき、道央・道東間の接続性は著しく低下し、社会経済的に重大な影響をもたらす。自然災害によって、都市間が連絡されない事態を回避するためには、接続性の高い道路ネットワークを構築する必要がある。

そこで、本研究では、一般国道と高速自動車国道（それぞれ以下、国道、高速道路と表記する。）が並行する区間を考え、対象とする期間  $t$  において、道路が災害によって通行止めとなる期間（待ち時間）を確率変数として求めるモデルを提案する。提案するモデルでは、国道と高速道路がそれぞれ被災するときの待ち時間に加えて、2つの道路が同時に被災するときの待ち時間を求めることが可能となる。また、提案するモデルを用いて、OD

ペア間の経路が途絶する時間（非連結時間）を数値計算した事例を示す。



図1 道東自動車道（緑線）と国道 274 号（赤線）  
地理院地図（電子国土 Web）を加工して作成

## 2. モデルの仮定

提案するモデルについて、以下の 4 つの仮定をおく。

- ある道路が被災するとき、復旧するまでに再び同じ道路が被災することはない。
- 国道と高速道路における災害の発生回数は確率分布として表現され、それらは統計的に独立している。
- 道路が被災して通行止めとなった場合、復旧するまで

の時間は確率分布として表現され、それらは統計的に独立している。

- 道路が被災してから復旧するまでの時間は災害の発生回数から独立している。

### 3. 災害リスクの定式化

国道は期間  $t$  において  $x_n$  回被災するリスクにさらされており、被災によって通行止めとなつてから復旧するまでに要する待ち時間を  $D_n$  とする。同様に、高速道路は期間  $t$  に  $x_e$  回被災するリスクにさらされており、被災によって通行止めとなつてから復旧するまでに要する待ち時間を  $D_e$  とする。待ち時間  $D_n$  と  $D_e$  はそれぞれ対数正規分布に従うものとし、式(1)で表す。なお、式(1)における  $d_i$  と  $\sigma_i$  はそれぞれ  $D_i$  に対応する正規分布の平均と分散を意味する。

$$D_i \sim LN(d_i, \sigma_i^2) \quad \forall i \in \{n, e\} \quad (1)$$

本研究で考える待ち時間とは、ある地点間の連絡ができない状態が継続する時間を意味する。ただし、2 本ある経路の内の 1 本が通行止めとなる場合、それに起因して生じる混雑による移動時間の増加は考慮していない。待ち時間を経路が通行止めとなる期間として定義しているため、混雑によって移動時間が増加したとしてもある地点間が連絡可能である場合は、待ち時間は 0 となる。

本研究では、期間  $t$  における国道と高速道路の被災回数は互いに独立したポアソン分布に従うものとする。国道または高速道路が  $x_i$  回被災する確率は式(2)で表される。

$$P(X_i = x_i) = \frac{(v_i \cdot t)^{x_i}}{x_i!} \cdot \exp(-v_i \cdot t) \quad \forall i \in \{n, e\} \quad (2)$$

期間  $t$  における、国道または高速道路の待ち時間とその期待値、分散は以下の通りである。いずれも平均通行止め回数と対象期間、通行止め 1 回あたりの待ち時間によって表される。

$$\begin{aligned} T_i &= \sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i \cdot D_i \\ &\sim LN\left(d_i + \ln\left(\sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i\right), \sigma_i^2\right) \\ &= LN\left(d_i + \ln(v_i \cdot t), \sigma_i^2\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E[T_i] &= \sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i \cdot E[D_i] \\ &= \sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i \cdot \exp\left(d_i + \frac{1}{2} \cdot \sigma_i^2\right) \\ &= v_i \cdot t \cdot \exp\left(d_i + \frac{1}{2} \cdot \sigma_i^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[T_i] &= \sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i \cdot \text{var}[D_i] \\ &= \left(\sum_{x_i=0}^{\infty} P_i(X_i = x_i) \cdot x_i\right)^2 \cdot \exp(2 \cdot d_i + \sigma_i^2) \cdot \exp(\sigma_i^2 - 1) \\ &= (v_i \cdot t)^2 \cdot \exp(2 \cdot d_i + \sigma_i^2) \cdot \exp(\sigma_i^2 - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

次に、国道と高速道路が 1 本ずつ並行するときの待ち時間を考える。本研究における待ち時間の定義に従い、国道あるいは高速道路の少なくとも一方が通行可能であるとき、待ち時間は 0 である。したがって、国道と高速道路が同時に被災するときの待ち時間を考える。ここで、国道と高速道路が同時に被災するとき、待ち時間がより短い道路 ( $\min(D_n, D_e)$ ) が選ばれるものとする。

期間  $t$  において、国道または高速道路が  $x_i$  回被災するとき、 $x_i \cdot D_i$  の待ち時間が生じる。また、期間  $t$  に占める待ち時間の比率は  $x_i \cdot D_i / t$  となる。ここで、期間  $t$  において、国道と高速道路に同時に待ち時間が生じている確率は、待ち時間の比率の積として、式(6)で与える。なお、国道と高速道路の待ち時間は互いに独立である点に注意が必要である。

$$P_{ne}(x_n, x_e) = \frac{x_n \cdot x_e}{t^2} \cdot E[D_n] \cdot E[D_e] \quad (6)$$

期間  $t$  において国道が  $x_n$  回、高速道路が  $x_e$  回被災するとき、国道と高速道路に同時に待ち時間が生じている回数が  $y$  となる確率は二項分布に従うものとし、式(7)で与える。

$$\begin{aligned} P(Y = y; x_n, x_e) &= \binom{\min(\hat{x}_n, \hat{x}_e)}{y} \cdot (P_{ne}(x_n, x_e))^y \\ &\quad \cdot (1 - P_{ne}(x_n, x_e))^{\min(\hat{x}_n, \hat{x}_e) - y} \end{aligned} \quad (7)$$

where

$$\hat{x}_i = \text{int}(x_i \cdot E[D_i]) \quad \forall i \in \{n, e\} \quad (8)$$

ここで、式(8)は道路が  $x_i$  回被災するときの待ち時間の期待値の整数部分を意味しており、二項分布の計算に用いられる。以上の関係から、期間  $t$  における待ち時間  $T_1$  とその期待値と分散はそれぞれ以下の通り表される。

$$T_1 = \sum_{x_n=0}^{\infty} \sum_{x_e=0}^{\infty} \sum_{y=1}^{\min(\hat{x}_n, \hat{x}_e)} \left( P_n(X_n = x_n) \cdot P_e(X_e = x_e) \right) \cdot P(Y = y; x_n, x_e) \cdot y \cdot \min(D_n, D_e) \quad (9)$$

$$E[T_1] = \sum_{x_n=0}^{\infty} \sum_{x_e=0}^{\infty} \sum_{y=1}^{\min(\hat{x}_n, \hat{x}_e)} \left( P_n(X_n = x_n) \cdot P_e(X_e = x_e) \right) \cdot P(Y = y; x_n, x_e) \cdot y \cdot E[\min(D_n, D_e)] \quad (10)$$

$$\text{var}[T_1] = \left( \sum_{x_n=0}^{\infty} \sum_{x_e=0}^{\infty} \sum_{y=1}^{\min(x_n, x_e)} \left( \begin{matrix} P_n(X_n = x_n) \cdot P_e(X_e = x_e) \\ \cdot P(Y = y; x_n, x_e) \cdot y \end{matrix} \right) \right)^2 \cdot \text{var}[\min(D_n, D_e)] \quad (11)$$

式(9), (10), (11)では, より小さな待ち時間である道路が選ばれる. より小さな待ち時間 ( $\min(D_n, D_e)$ ) の平均と分散を求める手法を付録 A に示す. また, 式(2), (7)において, 階乗を計算する上で必要な数値計算上の注意点を付録 B に示す.

#### 4. 数値計算

上記で提案する定式化を検証するため, 仮想的な国道と高速道路を対象として, 数値計算を行った. 国道と高速道路のそれぞれにおいて, 被災によって通行止めとなつてから, 復旧するまでに要する待ち時間の平均と分散と, 待ち時間に対応する正規分布の平均と分散を表 1 に示す. なお, 対象とする期間  $t$  は 100 年間とする. 国道と高速道路が 1 年間に被災する平均回数はそれぞれ 0.01 回, 10 回とする. 図 1, 2 はそれぞれ国道と高速道路が 100 年間に  $x_i$  回被災する確率を表している. 今回の数値計算では, 国道については, 今般の国道 274 号の被災のように, 被災の頻度は少ないものの復旧までに長い時間を要する大規模な災害を想定している. 高速道路については, 降雨や降雪による路面状況の悪化のような, 被災の頻度が多く, 短期間で復旧可能な軽微な災害を想定している. 上記の想定のもと, 表 1 のように待ち時間を設定している.

表 1 国道と高速道路の待ち時間と対応する正規分布の平均と分散

	正規分布		待ち時間 (対数正規分布)	
	平均	分散	平均[日]	分散[日 <sup>2</sup> ]
国道	5.7	0.570 <sup>2</sup>	351.6	217.8384 <sup>2</sup>
高速道路	0.1	0.01 <sup>2</sup>	1.1	0.0111 <sup>2</sup>

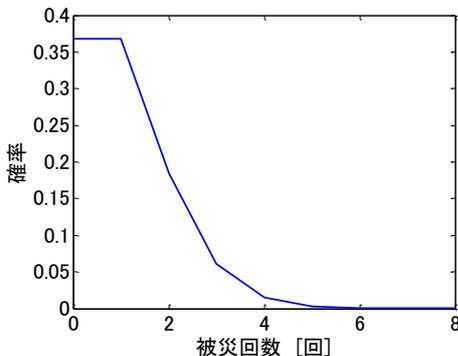


図 1 国道が  $x_i$  回被災する確率

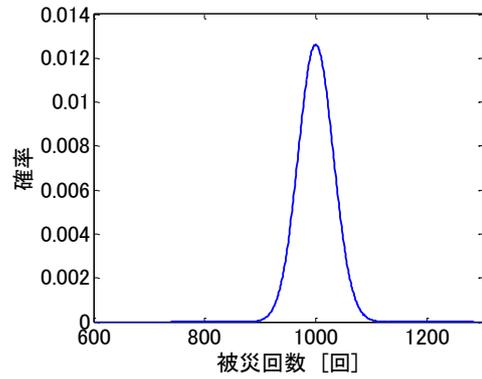


図 2 高速道路が  $x_e$  回被災する確率

100 年の期間において, 高速道路と国道がそれぞれ被災するとき, それぞれが復旧するまでの待ち時間は図 3 の通りである. さらに, 国道と高速道路が同時に被災するとき, いずれか一方が復旧するまでの待ち時間は図 4 の通りである. 図 3, 4 から, OD ペア間を結ぶ道路が 2 本のとき, 1 本のときよりも, 大幅に待ち時間が削減されていることがわかる. この理由は, 同時に 2 本の道路が通行止めになる確率は極めて小さいためである. 以上の結果は, 道路のリダンダンシーの効果は待ち時間の減少として評価できることを示唆している.

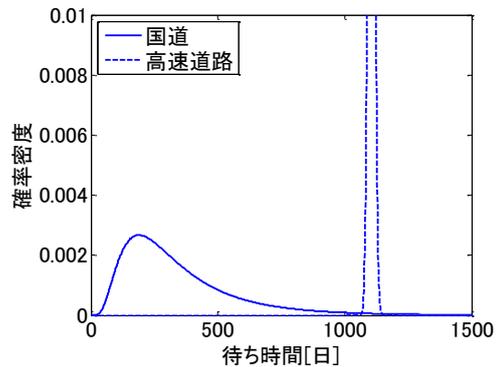


図 3 国道と高速道路が被災するときの待ち時間

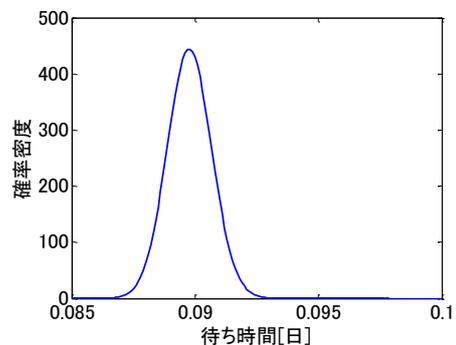


図 4 国道と高速道路が同時に被災するときの待ち時間

次に, 具体的なテストネットワークを対象として, OD ペア間が途絶する期間を考える. すなわち, OD ペア間の経路の途絶を対象とする. 検討する 4 つのテストネットワークを図 5 に示す. なお, 今回の計算では同時に

3か所以上のリンクが途絶する確率は極めて小さいため、1か所または2か所のリンクが同時に被災する状況を仮定している。そのため、各テストネットワークにおけるODペア間の非連結時間は表2のように表される。なお、1年間におけるリンクの平均被災回数はリンクの長さに依存するものとする。そのため、各リンクの平均被災回数を表3のように設定する。図6はそれぞれの平均被災回数 $x$ のとき、道路が $x$ 回被災する確率を示す。各リンクが被災してから復旧するまでの待ち時間は対応する正規分布の平均を0.1、分散を $0.05^2$ としている。なお、問題の単純化のため、対象とする期間 $t$ は1年間とする。

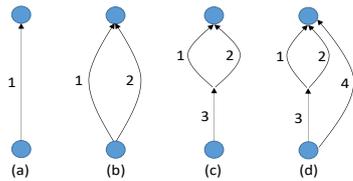


図5 テストネットワーク

表2 各テストネットワークの通行止め期間

テストネットワーク	通行止め期間
a	$P_1 T_1$
b	$P_1 T \min(T_1, T_2)$
c	$P_3 T_3 + P_1 P_2 \min(T_1, T_2)$
d	$P_1 P_2 \min(T_1, T_2)$

表3 各リンクの年間平均被災回数

テストネットワーク	リンク番号	平均被災回数
a	1	2
b	1	2
	2	2
c	1	1
	2	1
	3	1
d	1	1
	2	1
	3	1
	4	2

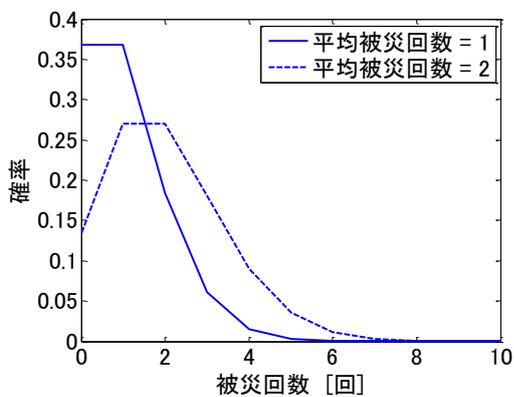


図6 道路が $x$ 回被災する確率

4つのテストネットワークの通行止め期間は図7、8の通りである。ネットワークを構成するリンクが増えるにつれて、ODペア間の非連結時間は小さくなる。本研究で提案するモデルに基づくと、並行する2本のリンクが同時に通行止めとなる期間は極めて小さくなるのがわかる。したがって、テストネットワークの非連結時間は図9のような関係となり、ODペア間のリンク数が増えて、ネットワークが冗長化することによって、非連結時間が小さくなることを示している。

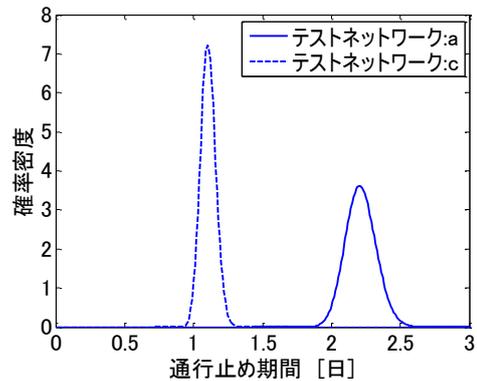


図7 通行止め期間 (テストネットワーク a と c)

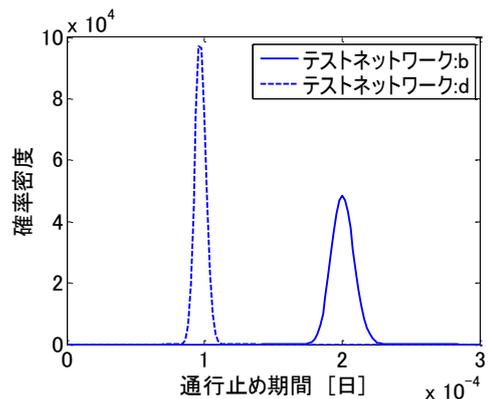


図8 通行止め期間 (テストネットワーク b と d)

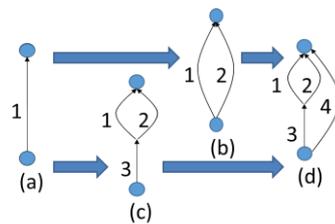


図9 非連結時間の減少過程

## 5. まとめ

本研究では、道路が被災した場合の通行止め期間を確率分布として求めるモデルを提案した。道路の被災回数はポアソン分布に従い、道路が被災してから復旧するまでに要する待ち時間は対数正規分布に従うと仮定することによって、対象とする期間 $t$ における通行止め期間(待ち時間)を対数正規分布に従う確率変数として求めることが可能となる。

仮想的な国道と高速道路を対象とした数値計算の結果、並行する 2 本の経路が同時に通行止めとなる期間は極めて小さいことがわかる。複数のテストネットワークを対象として、OD ペア間が連結されない期間を計算する例も示した。OD ペア間の非連結時間を確率変数として求めることによって、道路ネットワークのリダンダンシーを確率的な待ち時間として評価できることが示された。今後は、提案するモデルを実際のネットワークに適用するとともに、道路ネットワークの被災に伴って生じる迂回交通による混雑の影響を考慮できるよう、モデルの拡張を検討する予定である。

## 付録

### 付録 A

Lien (2005) から  $\min(D_n, D_e)$  の期待値は、式(A1)から求められる。

$$E[\min(D_n, D_e)] = E[D_n] \cdot \Phi\left(\frac{d_e - d_n - \sigma_n^2}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2}}\right) + E[D_e] \cdot \Phi\left(\frac{d_n - d_e - \sigma_e^2}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2}}\right) \quad (\text{A1})$$

ここで、上式右辺の  $\Phi(\cdot)$  は標準正規分布の累積分布関数である。また、2 次のモーメント、 $E[(\min(D_n, D_e))^2]$  は式(A2)として表現される。なお、対数正規分布では任意のモーメントが求められる点に注意が必要である。

$$E[(\min(D_n, D_e))^2] = E[D_n]^2 \cdot \Phi\left(\frac{d_e - d_n - 2 \cdot \sigma_n^2}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2}}\right) + E[D_e]^2 \cdot \Phi\left(\frac{d_n - d_e - 2 \cdot \sigma_e^2}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2}}\right) \quad (\text{A2})$$

where

$$(D_i)^2 \sim LN(2 \cdot d_i, 2^2 \cdot \sigma_i^2) \quad \forall i \in \{n, e\} \quad (\text{A3})$$

以上より、 $\min(D_n, D_e)$  の分散は式(A4)の通りである。

$$\text{var}[\min(D_n, D_e)] = E[(\min(D_n, D_e))^2] - (E[\min(D_n, D_e)])^2 \quad (\text{A4})$$

## A STUDY ON DISRUPTION PERIOD IN THE SECTION COMPOSED OF NATIONAL HIGHWAY AND EXPRESSWAY

Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposes a estimation model for a stochastic disruption period of highway and expressway. In this model, it is assumed that the disruption times of each road follows a Poisson distribution and the disruption period per one event follows a lognormal distribution. Thus, the total disruption period is calculated as a random variable following lognormal distribution. The numerical experiment demonstrates that the redundancy of road network contributes to avoidance of the disruption.

### 付録 B

被災頻度の多い道路ネットワークにおいて、式(2)に示したポアソン分布と式(7)に示した二項係数を計算する際に、式をそのままコード化して数値計算を行うと、オーバーフローまたはアンダーフローが生じる。後者については、式(7)の右辺の確率項がほとんど 0 となる場合、つまり、式(7)がほとんど 0 となる場合には二項係数を計算する必要がないことに留意すればよい。すなわち、ある程度大きな確率が得られた場合にのみ、式(7)を計算することで上記の問題に対応可能である。一方、式(2)におけるポアソン分布は以下のように変形可能である。

$$P(X = x) = \frac{(v \cdot t)^x}{x!} \cdot \exp(-v \cdot t) = \exp(x \cdot \ln(v \cdot t) - v \cdot t - \ln x!) \quad (\text{B1})$$

ここで、式中の階乗を近似計算する手法として、式(B2)に示すスターリングの公式が知られている。

$$x! \approx x \cdot \ln x - x \quad (\text{B2})$$

しかし、式(B2)を式(B1)に適用した場合、その近似精度が低いため、ポアソン分布の全確率が 1 とならないことに注意が必要である。そこで、より精度を高めた式(B3)を適用することによって、全確率を 1 に近づけることが可能となる。

$$x! \approx \sqrt{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot \left(\frac{x}{e}\right)^x \quad (\text{B3})$$

### 参考文献

- 1) 帯広開発建設部, 東日本高速道路株式会社北海道支社: 平成 29 年秋頃を目標に国道 274 号日勝峠の通行止め解除, 2016, <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/osirase/press/pdf/douro28049.pdf>, (最終閲覧日 2017 年 4 月 25 日)
- 2) Lien, D.: On the minimum and maximum of bivariate lognormal random variables, *Extremes* 8, pp.79-83, 2005.

(2017.4.28 受付)