

# 苦情発生を考慮した道路巡回政策

小濱 健吾<sup>1</sup>・貝戸 清之<sup>2</sup>・小林 潔司<sup>3</sup>・古野 幸夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院経営管理講座 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)  
E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 国土交通省 近畿地方整備局 滋賀国道事務所 (〒 520-0803 大津市竜が丘 4-5)  
E-mail: furuno-y86vq@kkrr.mlit.go.jp

本研究では、路上落下物などの道路障害物の発生に起因する苦情の発生メカニズムをモデル化し、障害物・苦情に関するリスク管理水準を考慮した最適道路巡回政策を決定するための方法論を提案する。具体的には、道路障害物の増加が苦情の発生頻度に影響を及ぼすという関係を明示的に考慮するために、道路障害物の発生過程を下位モデル、苦情の発生過程を上位モデルとするような階層的隠れポワソンモデルを定式化する。その上で、巡回費用と応急対応費用で構成される総費用を最小にするような道路巡回政策を求めめるための最適巡回政策モデルをマルコフ決定モデルとして定式化する。最後に、一般国道を対象とした適用事例を通じて、本研究で提案した方法論の有用性について実証的に分析する。

**Key Words :** *hierarchical Poisson hidden model, claims by citizen, road patrol, Markov decision model*

## 1. はじめに

道路は、国民の日常生活や経済社会を支える根幹的な施設である。路上落下物や路面変状・損壊などの道路異常は、道路の安全な供用に支障をきたすだけでなく、道路利用者の道路に対する満足度を低下させることになる。このため、道路管理者は道路の安全確保、利用者の満足度維持（サービス水準の維持）という2つの側面から、道路巡回業務を行う必要がある。

通常、道路巡回業務はパトロール車を利用して定期的実施される。そのため、道路巡回費用は、路上落下物や路面損壊・変状の有無（以下、道路障害物）に関わらず、固定的に発生する。さらに、近隣住民や道路利用者からの連絡（以下、苦情）があった場合、応急的に道路障害物を除去するための処理（以下、応急対応）を行う。道路の巡回頻度を増やすことにより、応急対応の発生頻度を小さくすることが可能である。一方、高頻度の道路巡回は巡回費用の増加を招く可能性がある。このように、道路障害物および苦情の発生と、道路の巡回費用の間にはトレードオフの関係があり、管理者は道路障害物に起因するリスクの管理目標を設定した上で、定期巡回費用と応急対応費用で構成される総費用を可能な限り削減する巡回方策を検討する必要がある。

本研究では、道路障害物と苦情に対応するための応急対応の発生過程を数え上げ過程としてモデル化する。

道路障害物の発生頻度が高くなれば、苦情の発生頻度が増加する可能性がある。苦情の発生過程を分析するためには、道路障害物の発生モデルを内蔵するような苦情発生モデルを定式化する必要がある。本研究では、道路障害物の増加が苦情の発生頻度に影響を及ぼすという関係を考慮するために、道路障害物の発生過程を下位モデル、苦情の発生過程を上位モデルとする階層的隠れポワソンモデルを定式化する。その上で、階層的隠れポワソンモデルに従って発生する道路障害物の発生・除去過程をマルコフ連鎖モデルで表現し、定期巡回費用と応急対応費用で構成される総費用を最小にするような最適巡回政策を決定するための最適巡回政策モデルをマルコフ決定モデルとして提案する。

以上の問題意識の下に、本研究では苦情の発生による応急対応を考慮にいたした最適巡回政策を求めめるための方法論を提案する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を説明する。**3.**では、階層的隠れポワソンモデルを定式化し、**4.**で最適巡回政策モデルを定式化する。最後に、**5.**で実際の国道を対象とした適用事例を通して本研究の有効性について分析する。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 従来の研究概要

道路障害物の発生過程に関しては、障害物の到着がランダムに発生するような数え上げ過程、基本的には

ポワソン過程としてモデル化できる。しかし、伝統的なポワソン過程は、事象の到着率が確定的であることに加え、ある期間中における事象の平均発生件数と、その分散が同一になるという特性を有する。現実の道路障害物の発生過程が、このような特性を有している保証はなく、より柔軟なモデル化が必要となる。貝戸等<sup>1)</sup>は道路障害物の発生過程を、到着率の異質性を考慮した混合ポワソン過程<sup>2)</sup>としてモデル化した。具体的には道路障害物の到着率をポワソンモデルで表現するとともに、その異質性をガンマ分布で表現したポワソンガンマ発生モデルを用いて道路障害物の発生過程を表現した。本研究では道路障害物に起因する苦情発生メカニズムを対象とする。道路障害物の発生頻度が多くなるほど、苦情発生頻度も多くなる。このように道路障害物の発生過程と苦情の発生過程の間には相互関係が存在する。このような観点から、小濱等<sup>3)</sup>は苦情の到着率の時間的異質性を考慮するために、道路障害物の発生過程をポワソンモデルとして明示的にモデル化するとともに、道路障害物の発生モデルを内蔵したような苦情発生モデルを階層的隠れポワソンモデルとして定式化している。なお、本研究で用いる階層的隠れポワソンモデルは、小濱等<sup>3)</sup>がすでに提案したものであり、それ自体に新規性はない。一方、道路巡回政策に関しては、すでに小濱等<sup>4)</sup>は、道路障害物に起因するリスクの管理指標をモデル化し、所与の予算制約の下で道路障害物に起因するリスクを可能な限り小さくするような巡回政策を決定している。しかし、そこでは、定期的な実施される巡回業務のみに着目しており、苦情に対応するための応急対応業務は考慮されていない。吉田<sup>5),6)</sup>は、道路巡回業務において、対症的措置が計画的措置に劣らず重要であることを述べ、対症的措置のパフォーマンス指標としてのレスポンスタイムの効果的な活用方法を考察している。本研究では、計画的措置費用である定期巡回費用、対症的措置費用である応急対応費用で構成される総費用を最小とするような最適巡回政策を決定する。筆者等の知る限り、道路障害物の発生とそれに伴う苦情発生リスクを明示的に考慮したうえで、巡回費用と応急対応費用で構成される総費用を最小にするような最適巡回政策を求めた研究事例は本研究以外に見あたらない。

## (2) リスク管理指標

道路管理者は、複数の連続する道路区間を対象として道路巡回を行い、道路障害物の除去に務めている。本研究では、1回の道路巡回により一括してリスク管理を行う道路区間の集合を管理基本区間と呼ぶこととする。貝戸等は、道路管理者が道路障害物に起因するリスクを管理する場合、1) 道路障害物の発生頻度と、2) 道路

障害物に対する発生抑止や早期除去の社会的・経済的重要性という2つの視点が必要となることを指摘している<sup>1)</sup>。道路障害物の発生頻度が多い道路区間ほど、道路障害物を頻繁に除去することが必要となる。一方、道路障害物の発生頻度が同一であっても、人口の多い都市部では道路利用者や近隣住民からの苦情発生数が増加する<sup>3)</sup>。このため、道路障害物の到着率が同一でも、苦情の到着率の大きい区間ほど頻繁に道路巡回を実施し、道路障害物を除去することが必要となる。したがって、本研究では、1) 巡回時点において発見する道路障害物数と、2) 道路障害物に起因する苦情発生数という2種類のリスク管理指標を提案する。以下では、提案する2種類のリスク管理指標をまとめて道路障害リスクと呼ぶ。道路障害物、および苦情は道路区間ごとに生じする局所的な事象である。したがって、対象とする路線を細分化し、細分化された個々の単位道路区間ごとに道路障害リスクのリスク管理指標を定義することが必要となる。一方で、道路管理者は複数の路線を同時に管理しており、ネットワーク全体としての道路障害リスクを管理する視点が必要となる。本研究では、このようなリスク管理問題の特性に配慮し、道路障害リスクを道路管理者が管理する路線全体にわたって、一様に一定水準以下に抑制するような道路巡回政策について検討する。

## (3) 苦情とリスク管理

本研究では、定期的な道路巡回業務により除去されるような道路障害物、例えば、補修合剤を用いて応急的に対処されるポットホールや、直ちに回収される路上落下物等を対象とする。道路巡回により障害物が除去されるが、その後発生した障害物は次回の道路巡回が実施されるまで、路上に放置されることになる。道路利用者や沿道住民による苦情は、道路障害物の発生に関する情報をもたらす。苦情の対象となる障害物の内容は多様であるが、障害物の内容によっては、その放置が交通事故等の発生につながる可能性や利用者、沿道住民に不効用をもたらす。そのため、苦情が発生すれば応急対応により道路障害物が除去される。1. で言及したように、道路巡回の頻度を多くすれば巡回費用が増加するが、苦情の発生数は減少する。逆に、道路巡回頻度を少なくすれば、巡回費用を低減させることができるが、一方で応急対応件数が増加し、応急対応費用の増加を招くことになる。したがって、効率性の観点にたてば、定期巡回費用と応急対応費用の総和で定義される総費用を最小にするような最適巡回頻度を定義することができる。苦情は道路障害物の発生に関する貴重な情報源の1つではあるが、道路障害物の発生は道路の利用状況や沿道環境に依存している。このた

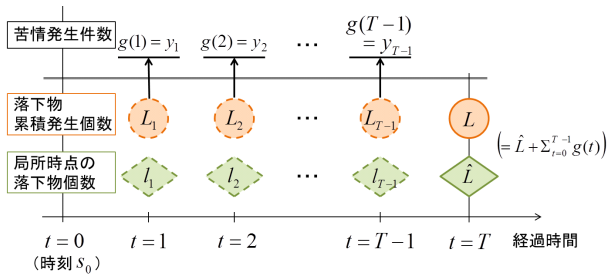


図-1 局所時点の設定

め、各道路管理単位ごとに費用最小化の観点から求めた道路巡回政策が、望ましい道路障害リスクのリスク管理水準を達成するとは限らない。管理対象とする路線全体に対して包括的な視点から道路障害リスクのリスク管理水準を決定することが望ましい。すなわち、道路障害リスクを効果的に管理するためには、費用効率性とリスク管理水準の双方を同時に考慮しながら、費用抑制と道路利用者の満足度向上を同時に達成可能な道路巡回業務のあり方を考えていくことが重要である。本研究では、道路障害物の発生とそれに伴う苦情の発生過程を確率モデルを用いて表現するとともに、提案した確率モデルを用いて望ましいリスク管理水準を維持しながら、期待費用を可能な限り抑制しうるような道路巡回頻度を求めることとする。

### 3. 階層的隠れポワソンモデル

#### (1) モデル化の前提条件

本研究では、小濱等<sup>3)</sup>が提案した階層的隠れポワソンモデルを用いて道路障害物・苦情発生過程を記述する。階層的隠れポワソンモデルに関しては既発表であるが、以下では読者の便宜を図るためその概要を紹介する。階層的隠れポワソンモデルを定式化するために、図-1に示すような時間軸を導入する。道路管理者がカレンダー時刻  $s_0$  に道路巡回を実施し、道路障害物を取り除く。さらに、それ以降の時刻にわたって道路巡回を定期的実施し、道路障害物を管理する問題を考える。対象とする道路は複数の単位区間により構成される。ここでは記述を簡略化するために、当面の間、ある単位区間にのみに着目して議論を進める。

いま、カレンダー時刻  $s_0$  を初期時点  $t = 0$  とする離散時間軸  $t = 0, 1, 2, \dots, T$  を導入する。離散時間軸上の点を時点とよび、カレンダー時刻と区別する。離散時間軸上の期間長を1に基準化する。初期時点  $t = 0$  において、道路巡回が実施され道路障害物が完全に除去される。時点  $t = T$  に再び道路巡回が実施され、道路障害物が完全に除去される。対象期間  $[0, T]$  における道路障害物の累積発生個数を  $L$  とする。対象期間にお

ける各時点  $t$  における初期時点からの道路障害物の累積発生個数を表す状態変数を  $L_t$  ( $t = 0, \dots, T$ ) とする。さらに、期間  $[t, t+1)$  における苦情の発生数を表す状態変数を  $g(t) = y_t$  ( $y_t = 0, 1, \dots$ ) と表記する。苦情が発生しない場合、 $g(t) = 0$  が成立する。期間  $[t, t+1)$  に苦情が発生すると、直ちに苦情の対象となった道路障害物を取り除かれる。時点  $T$  における道路巡回業務により、対象とする道路に存在する道路障害物の個数  $\hat{L}$  ( $\hat{L} = 0, 1, \dots$ ) が判明し、同時に道路障害物が完全に除去される。期間  $[0, T]$  中に苦情により除去される障害物が存在するため、時点  $T$  の道路巡回業務で発見される障害物数  $\hat{L}$  と、期間中に発生する障害物総数  $L$  の間には、 $\hat{L} \leq L$  が成立する。この時、期間  $[t, t+1)$  内の道路障害物に関する情報は獲得できないが、道路障害物に関して、

$$L_0 = 0 \leq \dots \leq L_t \leq L_{t+1} \leq \dots \leq L_{T-1} \leq L \quad (1a)$$

$$L = \hat{L} + \sum_{t=0}^{T-1} g(t) \quad (1b)$$

が成立する。式(1a)は、対象期間における道路障害物の累積発生個数は時点  $t$  の進行に対して単調非減少であり、式(1b)は、道路障害物の累積発生個数は、時点  $T$  における道路巡回業務で確認された道路障害物の個数と対象期間内において苦情により取り除かれた道路障害物の個数の和であることを示す。

#### (2) 道路障害物の到着過程

道路障害物が対象とする単位区間にポワソン過程に従って到着すると考える。さらに、対象期間における単位道路区間の使用環境を表す特性ベクトルを  $\mathbf{x} = (x^1, \dots, x^Q)$  と表す。  $Q$  は特性ベクトルの数を表す。到着率  $\lambda$  が特性ベクトル  $\mathbf{x}$  に依存すると考え、

$$\lambda = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} \quad (2)$$

と表記する。ただし、 $\boldsymbol{\beta} = (\beta^1, \dots, \beta^Q)'$  は未知パラメータベクトルである。記号  $\prime$  は転置操作を表す。単位期間  $[t, t+1)$  の期間長を1に基準化した場合、単位道路区間に  $m$  個の道路障害物が到着する確率は、ポワソン分布

$$p(m_t|\lambda) = \exp(-\lambda) \frac{\lambda^{m_t}}{m_t!} \quad (3)$$

と表すことができる。

#### (3) 階層的隠れポワソン過程

道路巡回業務、および各時点  $t = 0, \dots, T$  に発生する苦情とそれに対する対応状況に関する情報により、対象期間中に発生する道路障害物の累積発生個数  $L$ 、および時点  $T$  における道路巡回業務で確認された道路障害物の個数  $\hat{L}$  に関する情報を獲得することができる。し

かし、時点  $t$  ( $t = 1, \dots, T-1$ ) においては、道路障害物の個数に関する情報を獲得できない。ここで、期間  $[t, t+1)$  に着目する。期間  $[t, t+1)$  の期首に、当該期における道路障害物が到着すると考え、時点  $t$  において路上に放置されている道路障害物の個数を  $l_t$  と表す。路上に放置された障害物個数  $l_t$  は、観測者に観察できない確率変数であるが、ひとまず道路障害物の個数  $l_t$  が既知であると仮定する。

いま、時点  $t$  ( $t = 0, \dots, T-1$ ) において苦情が発生し、取り除かれた道路障害物の個数  $g(t) = y_t$  も観測されている。一方、時点  $t$  ( $t = 1, \dots, T-1$ ) において存在する道路障害物の個数に関する情報は獲得できないが、時点  $T$  において巡回業務が実施されることにより、式(1a),(1b)が成立することは保証される。ここで、期間  $[t, t+1)$  において苦情が到着率  $\nu(l_t) > 0$

$$\nu(l_t) = \bar{z}_t \alpha \quad (4)$$

で表されるポワソン過程に従って生起すると考える。ただし、 $\bar{z}_t = (l_t, \mathbf{z})$  であり、 $\mathbf{z} = (z^1, \dots, z^P)$  は、説明変数ベクトルである。 $\alpha = (\alpha^0, \alpha^1, \dots, \alpha^P)'$  と表記する。 $P$  は説明変数の数を表す。 $\alpha^0$  は説明変数  $l_t$  に対する係数パラメータである。 $\nu(l_t)$  は、期間  $[t, t+1)$  に対して定義されている。この時、苦情が時点  $t$  において平均  $\nu(l_t)$  のポワソン過程に従って到着すると考える。期間  $[t, t+1)$  の期間長が 1 に基準化されていることにより、期間  $[t, t+1)$  中に  $y_t$  個の苦情が発生する条件付き確率  $\pi(y_t|l_t)$  は、

$$\begin{aligned} \pi(y_t|l_t) &= \exp\{-\nu(l_t)\} \frac{\{\nu(l_t)\}^{y_t}}{y_t!} \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる。ただし、 $0! = 1$  である。 $l_t = 0$  の時は苦情が発生しないため、 $\pi(y_t|0)$  は定義されないが、便宜上、 $\pi(y_t|0) = 0$  とする。また、同一障害物に対する複数の苦情は、単一の苦情とみなすこととする。ここで、

$$\hat{\pi}(y_t|l_t) = \frac{\pi(y_t|l_t)}{\sum_{y_t=0}^{l_t} \pi(y_t|l_t)} \quad (6)$$

を定義すれば、式(5)に関して

$$\sum_{y_t=0}^{l_t} \hat{\pi}(y_t|l_t) = 1 \quad (l_t = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

が成立する。

#### (4) 尤度の定式化

初期時点  $t = 0$  において道路障害物の個数が 0 であり、時点  $t$  ( $t = 0, \dots, T-1$ ) における観測値ベクトル  $\bar{\xi} = \{\bar{y}, \bar{x}, \bar{z}, \hat{L}\}$  が観測される条件付き確率(尤度)  $\mathcal{L}(\bar{\xi}, \theta)$  を定義する。ただし、観測値ベクトル  $\bar{\xi}$  は、苦情発生数ベクトル  $\bar{y}$ 、道路区間の使用環境を表す特

性ベクトル  $\bar{x}$ 、苦情の発生に影響をおよぼす説明変数ベクトル  $\bar{z}$ 、および、道路障害物の個数  $\hat{L}$  によって構成される。また、記号「 $\bar{\cdot}$ 」は観測値であることを意味し、 $\theta = (\alpha, \beta)$  は未知パラメータベクトルを意味する。尤度  $\mathcal{L}(\bar{\xi}, \theta)$  を、時点  $t_0$  に巡回業務を実施して道路障害物を取り除いたという条件の下で、1) 対象期間において苦情発生数ベクトル  $\bar{y}$  が測定され、2) 最終時点  $T$  に道路障害物の個数  $\hat{L}$  が観測される条件付き確率(尤度)の積として定義する。尤度  $\mathcal{L}(\bar{\xi}, \theta)$  は、

$$\mathcal{L}(\bar{\xi}, \theta) = \prod_{t=0}^{T-1} \pi(\bar{y}_t|l_t, \bar{z}) p(m_t|\lambda) \quad (8a)$$

$$\begin{cases} m_t = L_{t+1} - L_t \\ 0 = L_0 \leq \dots \leq L_t \leq \dots \leq L_T = \bar{L} \\ L_{t+1} = \hat{L}_t + \sum_{i=0}^t \bar{y}_i \\ \bar{L} = \hat{L} + \sum_{i=0}^{T-1} \bar{y}_i \end{cases} \quad (8b)$$

と定義できる。上式で定義した尤度を用いることにより、1) 除去された道路障害物は、前回の道路巡回の実施時点から苦情の発生時点までに生起し、2) 当該の障害物の発生確率は、苦情の発生時刻に近くづくほど大きい、という道路障害物の発生過程の特性を表現することが可能となる。

階層的隠れポワソンモデルの尤度関数(8a),(8b)は、パラメータに関して高次の非線形多項式となっており、1階の最適化条件が(複素数解を含めて)非常に多くの解を有している<sup>7)</sup>。当然のことながら、苦情の発生確率  $\pi(\bar{y}_t|l_t)$ 、道路障害物の発生確率  $p(L_{t+1} - L_t|\lambda)$  の推計値は実数解でなければならない。さらに、これらの確率の推計値として、数ある実数解の中から 0 と 1 の間にある解を選択しなければならぬ。最尤法の代わりにベイズ推計法を用いれば、高次の非線形多項式を解く問題を回避できる。しかし、尤度関数(8a),(8b)が、極めて多くの項を含んでおり、計算量が膨大になってしまう欠点がある<sup>8),9)</sup>。このような最尤法の難点を克服するために、尤度関数の完備化操作が必要となる。完備化操作を用いた階層的隠れポワソンモデルの推計方法の詳細は参考文献<sup>3)</sup>に譲ることとする。

## 4. 最適巡回政策モデル

### (1) 道路障害物の発生・除去過程

再び、カレンダー時刻  $s_0$  を初期時点  $t = 0$  とする離散時間軸  $t = 0, 1, 2, \dots, \infty$  を考える。対象とする道路において、離散時間軸上で道路巡回業務が実施される時点を  $t = 0$ 、つぎの道路巡回が実施される時点を  $t = T$  と表す。道路巡回時点  $t = 0$  および  $t = T$  において、道路障害物が完全に取り除かれる。連続する 2 つの道路巡回が実施される間の期間長  $T$  は政策変数であるが、当面の間与件と考える。各期間  $[t, t+1)$  ( $t < T$ ) におい

てイベントが発生する順序関係を、以下のようにモデル化する。すなわち、1) 各期間の期首に当該期における道路障害物が到着する。2) 当該期の期首に路上に存在する道路障害物を与件として、苦情事象が到着する。3) 苦情が発生した道路障害物は除去される。苦情が発生しなかった道路障害物は路上に放置され、つぎの期間の期首まで持ち越される。初期時点  $t = 0$  から最終時点  $t = T$  に至るまでの各期間において、路上に存在する道路障害物数の推移過程をマルコフ連鎖モデルを用いて表現する。

いま、状態変数  $l_t$  ( $l_t = 0, 1, \dots, M$ ) を用いて、時点  $t$  に路上に存在する道路障害物数を表現する。ただし、 $M$  は十分大きな正の整数である。各期間の期首にポワソン分布に従って道路障害物が到着する。したがって、理論的には状態変数の数は無限大となるが、状態変数の数  $M$  を十分大きくとっておけば、実用的には問題がない。いま、期間  $[t, t+1)$  の期首を考える。期間  $[t-1, t)$  において、 $\hat{l}_{t-1}$  ( $\hat{l}_{t-1} = 0, 1, \dots, M$ ) 個の道路障害物が路上に放置されると考える。期間  $[t, t+1)$  の期首に、式 (3) に従って道路障害物がポワソン到着する。すなわち、当該期間の期首に  $m_t$  ( $m_t = 0, 1, \dots$ ) 個の道路障害物が到着する確率は

$$p(m_t|\lambda) = \exp(-\lambda) \frac{\lambda^{m_t}}{m_t!} \quad (9)$$

と表される。この時、道路障害物の到着事象によって、路上に存在する道路障害物数は変化する。道路障害物が到着した直後の時点で定義した道路障害物数を状態変数  $l_t$  ( $l_t = 0, \dots, M$ ) と表せば、状態変数  $\hat{l}_{t-1}$  から状態変数  $l_t$  への推移確率  $p_{\hat{l}_{t-1}, l_t}$  は

$$p_{\hat{l}_{t-1}, l_t} = \begin{cases} p(m_t|\lambda) & l_t = m_t + \hat{l}_{t-1} < M \\ 1 - \sum_{m_t=0}^{M-\hat{l}_{t-1}} p(m_t|\lambda) & l_t = M \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (10)$$

と定義される。推移確率  $p_{\hat{l}_{t-1}, l_t}$  を  $(\hat{l}_{t-1}, l_t)$  要素とする  $(M+1) \times (M+1)$  行列を  $\mathbf{p}$  と表記する。

つぎに、期間  $[t, t+1)$  の期首に  $l_t$  個の道路障害物が存在している場合を考える。期間  $[t, t+1)$  において苦情が到着率  $\nu(l_t) > 0$  で表されるポワソン過程に従って生起する。この時、期間  $[t, t+1)$  中に  $y_t$  個の苦情が発生する条件付き確率  $\hat{\pi}(y_t|l_t)$  は式 (6) で表現される。苦情が発生した道路障害物は直ちに除去される。また、苦情が発生しなかった道路障害物は路上に放置され、次の期間の期首まで持ち越される。このため、期間  $[t, t+1)$  の期首に路上に存在する  $l_t$  個の道路障害物の内、 $y_t$  個が期間  $[t, t+1)$  の内に除去され、残りの  $\hat{l}_t = l_t - y_t$  個が時点  $t+1$  の道路障害物として放置される。したがって、苦情発生に伴う応急対応業務により、路上に放置される道路障害物の数が  $l_t$  から  $\hat{l}_t$  へ推移する確率  $\pi_{l_t, \hat{l}_t}$

は

$$\pi_{l_t, \hat{l}_t} = \begin{cases} \hat{\pi}(y_t|l_t) & \hat{l}_t = l_t - y_t \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (11)$$

と表される。推移確率  $\pi_{l_t, \hat{l}_t}$  を  $(l_t, \hat{l}_t)$  要素とする  $(M+1) \times (M+1)$  行列を  $\boldsymbol{\pi}$  と表記する。さらに、推移確率行列  $\boldsymbol{\Pi}$  を推移確率行列  $\mathbf{p}$ 、 $\boldsymbol{\pi}$  を用いて

$$\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{p}\boldsymbol{\pi} \quad (12)$$

と定義する。この時、時点  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ ) において、前期の期末から  $\hat{l}_{t-1}$  個の道路障害物が路上に放置されたまま残る確率を  $\hat{\mu}_t(\hat{l}_{t-1})$ 、時点  $t$  ( $t = 0, \dots, T$ ) において期間  $[t, t+1)$  における道路障害物が到着した後に  $l_t$  個の道路障害物が路上に存在する確率を  $\mu_t(l_t)$  と表せば、路上放置確率ベクトル  $\hat{\boldsymbol{\mu}}_t = \{\hat{\mu}_t(0), \dots, \hat{\mu}_t(M)\}$ 、 $\boldsymbol{\mu}_t = \{\mu_t(0), \dots, \mu_t(M)\}$  はそれぞれ、

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_t = \hat{\boldsymbol{\mu}}_0(\boldsymbol{\Pi})^t \quad (13a)$$

$$\boldsymbol{\mu}_t = \hat{\boldsymbol{\mu}}_0(\boldsymbol{\Pi})^t \mathbf{p} \quad (13b)$$

と表される。ただし、 $\hat{\boldsymbol{\mu}}_0 = (1, 0, \dots, 0)$  である。式 (13a), (13b) で表されるように、道路障害物の発生・除去過程は、推移確率行列  $\boldsymbol{\Pi}$ 、および  $\mathbf{p}$  を用いたマルコフ連鎖モデルを用いて定式化できる。

## (2) リスク管理指標

### a) 道路障害物放置数の VaR

ある道路区間に着目する。巡回間隔を  $T$  とした時に、期間  $[t, t+1)$  の期首に道路障害物の個数  $l_t$  がある許容水準 (以下、リスク管理限界と呼ぶ)  $\bar{L}$  以上となる確率は、

$$P_\alpha(l_t \geq \bar{L}|T) = \sum_{u=\bar{L}}^M \mu_t(u) \quad (14)$$

と表される。ただし、 $[\bar{L}]$  は  $\bar{L}$  を超える整数の中で最小の整数を表す。道路障害物発生過程には、不確実性が存在するため、リスク管理限界を常に満足するとは限らない。そこで、巡回時に路上に放置されている障害物の個数がリスク管理限界を超過する確率を  $\omega_\alpha$  以下に抑制することを目標とする場合を考える。確率  $\omega_\alpha$  は、道路障害物放置リスクを表す指標であり、障害物放置信頼水準と呼ぶこととする。ここで、障害物放置信頼水準  $\omega_\alpha$  と道路巡回間隔  $T$  を所与とした際の、期間  $[t, t+1)$  の期首における道路障害物放置数に関する VaR (Value at Risk) 指標  $\text{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  を、

$$\begin{aligned} \text{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T) &= \arg \max_L \left\{ L | P_\alpha(l_t \geq L|T) \leq \omega_\alpha \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

と定義する。ただし、 $\arg$  は、式 (15) の右辺を最大にする  $L$  を指定する記号である。このように、道路障害物放置リスクは、障害物放置信頼水準  $\omega_\alpha$  とリスク管理限

界  $\bar{L}$  という 2 つのパラメータを用いて表現できる。ここで、集合  $\Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L})$  を、

$$\Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L}) = \left\{ T \mid \text{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T) \leq \bar{L} \right\} \quad (16)$$

と定義する。集合  $\Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L})$  は、「障害物放置信頼水準  $\omega_\alpha$  の下で、道路障害物の放置数をリスク管理限界  $\bar{L}$  以下に抑えることが可能な道路巡回間隔  $T$  の集合」を表している。

### b) 苦情発生数の VaR

期間  $[t, t+1)$  において苦情が  $y_t$  個発生する無条件確率  $\psi_t(y_t)$  は、

$$\psi_t(y_t) = \sum_{l_t=0}^M \hat{\pi}(y_t | l_t) \mu_t(l_t) \quad (17)$$

と表すことができる。したがって、期間  $[0, t+1)$  において苦情が  $y_t$  個発生する確率  $\Psi_t(y_t)$  は、苦情の無条件発生確率 (17)、および期間  $[0, t)$  において苦情が  $y_{t-1}$  個発生する確率  $\Psi_{t-1}(y_{t-1})$  を用いて、再帰的に

$$\Psi_t(y_t) = \sum_{0 \leq \rho \leq \min\{y_t, Y\}} \psi_{t-1}(\rho) \Psi_{t-1}(y_t - \rho) \quad (18)$$

と定義される。ただし、期間  $[0, t+1)$  における苦情発生数  $y_t$  の定義域は、 $0 \leq y_t \leq Y$  となる。ただし、 $Y$  は十分大きい正の整数である。つぎに、期間  $[0, t+1)$  における苦情の発生確率ベクトルを  $\Psi_t = \{\Psi_t(0), \dots, \Psi_t(Y)\}$  と表す。ただし、 $\Psi_t(Y) = 1 - \sum_{y_t=0}^{Y-1} \Psi_t(y_t)$  と表す。さらに、行列  $\psi_{t-1}$  を

$$\psi_{t-1} = \begin{pmatrix} \psi_{t-1}(0) & \psi_{t-1}(1) & \cdots & \psi_{t-1}(Y) \\ 0 & \psi_{t-1}(0) & \cdots & \psi_{t-1}(Y-1) \\ \vdots & 0 & \cdots & \psi_{t-1}(1) \\ 0 & 0 & \cdots & \psi_{t-1}(0) \end{pmatrix} \quad (19)$$

と定義する。この時、式 (18) をベクトル表記すれば

$$\Psi_t = \Psi_{t-1} \psi_{t-1} \quad (20)$$

と表される。これより、 $\Psi_t$  は

$$\Psi_t = \Psi_0 \prod_{t=0}^{t-1} \psi_t \quad (21)$$

と表される。ある道路区間に着目し、巡回間隔  $T$  を与件とする。期間  $[t, t+1)$  において苦情発生数  $y_t$  がリスク管理限界  $\bar{Y}$  以上となる確率は、

$$P_\beta(y_t \geq \bar{Y} | T) = \sum_{u=\lceil \bar{Y} \rceil}^M \Psi_t(u) \quad (22)$$

と表される。ただし、 $\lceil \bar{Y} \rceil$  は  $\bar{Y}$  を超える整数の中で最小の整数を表す。苦情発生過程には、不確実性が存在するため、所与のリスク管理限界を常に満足するとは限らない。確率  $\omega_\beta$  は、苦情発生リスクを表す指標であり、苦情発生信頼水準と呼ぶこととする。ここで、苦情発生信頼水準  $\omega_\beta$  と道路巡回間隔  $T$  を所与とした際

の、期間  $[t, t+1)$  における苦情発生数に関する VaR 指標  $\text{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T)$  を、

$$\text{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T) = \arg \max_y \left\{ y \mid P_\beta(y_t \geq y | T) \leq \omega_\beta \right\} \quad (23)$$

と定義する。ただし、 $\arg$  は、式 (23) の右辺を最大にする  $y$  を指定する記号である。集合  $\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y})$  を、

$$\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}) = \left\{ T \mid \text{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T) \leq \bar{Y} \right\} \quad (24)$$

と定義する。集合  $\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y})$  は、「苦情発生信頼水準  $\omega_\beta$  の下で、苦情の発生数をリスク管理限界  $\bar{Y}$  以下に抑えることが可能な道路巡回間隔  $T$  の集合」を表している。このように、苦情発生リスクは、信頼水準  $\omega_\beta$  とリスク管理限界  $\bar{Y}$  という 2 つのパラメータを用いて表現できる。

当然のことながら、信頼水準、リスク管理限界を小さくすればするほど、道路巡回頻度を増加させることが必要となり、巡回費用が増加することを意味する。道路管理者は、信頼水準とリスク管理限界を設定することにより、最適巡回間隔を決定することができる。

### (3) 期待総費用

通常、道路巡回は、複数の道路区間から構成されている管理基本区間ごとに実施される。いま、管理する道路網において、ある管理基本区間に着目し、道路巡回費用および苦情発生による応急対応費用の和である総費用の期待値を考える。まず、管理基本区間に含まれるある単位道路区間  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) を巡回間隔  $T$  で巡回した際の 1 日あたりの期待総費用を算出する。期間  $[t, t+1)$  の期首に道路障害物が  $l_t^j$  個存在したとする。苦情の発生により発生数に応じた道路障害物が除去され、存在していた道路障害物  $l_t^j$  個から苦情の発生数  $y_t^j$  に対応する道路障害物  $y_t^j$  個を取り除いた、残りの  $\hat{l}_t^j$  個が道路障害物として次の期間の期首まで放置される。苦情発生による応急対応 1 件につきトリップ費用  $C_{tr}^j$  が掛かるとすると、期間  $t$  における期待応急対応費用  $\theta^j(t)$  は、

$$\theta^j(t) = \sum_{\hat{l}_t=0}^M \sum_{l_t=0}^M \mu_t^j(l_t) \pi_{l_t^j, \hat{l}_t^j}^j (l_t^j - \hat{l}_t^j) C_{tr}^j \quad (25)$$

となる。ただし、 $\pi_{l_t^j, \hat{l}_t^j}^j$  は苦情発生に対する応急対応により変化する道路障害物の放置個数の推移確率であり、式 (11) で定義される。また、 $l_t^j - \hat{l}_t^j$  は苦情の発生数である。したがって、道路巡回 1 回あたりの巡回費用を  $C_{pt}$  とすれば、ある管理基本区間を道路巡回間隔  $T$  で巡回した際の、1 日あたりの期待総費用  $E_c[T]$  は、

$$E_c[T] = \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{t=0}^{T-1} \theta^j(t) + C_{pt} \right\} T^{-1} \quad (26)$$

と表すことができる。

表-2 道路障害物および苦情データ概要

	人口集中地区 (DID 地区)	市街地	平地	山地	平均	合計	備考
a) 道路総延長 (km)	264.5						
b) 道路区間数 (1km/区間)	32	47	142	29	-	250	
c) 平均貨物車交通量 (台)	7,080	6,900	5,811	5,361	6,126	-	
d) 平均旅行速度 (km/h)	26	36	40	44	38	-	
e) 障害物個数	939	1,947	5,703	1,055	-	9,644	
f) 障害物個数区間平均	29.3	41.4	40.2	36.4	38.6	-	e)/b)
g) 苦情発生件数	47	46	105	8	-	206	
h) 苦情発生件数区間平均	1.469	0.979	0.740	0.276	0.824	-	g)/b)
i) 苦情件数/障害物個数	0.050	0.024	0.018	0.008	0.021	-	g)/e)

表-1 苦情分類

道路障害物		道路構造物		
動物死骸	落下物	ポットホール	路面凹凸 (騒音・振動)	その他
113	93	13	41	71
付属物		交通事故		合計
故障・損傷	撤去	その他		
80	10	43		6
				470

(4) 最適巡回政策モデルの定式化

2. (2) で言及したように、道路巡回費用と期待応急対応費用の間にはトレードオフの関係がある。したがって、費用効率性の観点にたてば、定期巡回費用と期待応急対応費用の総和で定義される期待総費用を最小にするような最適巡回間隔を求めることができる。苦情は道路障害物の発生に関する貴重な情報源の1つではあるが、苦情によりすべての道路障害物の発生を確認できるわけではない。応急対応によって除去されない道路障害物が路上に放置される可能性が存在する。このため、各道路管理単位ごとに費用最小化の観点から求めた道路巡回政策が、道路障害物放置リスク、苦情発生リスクの観点から、望ましいリスク管理水準を達成するとは限らない。道路巡回業務の効率化と適正化を達成するためには、費用効率性と道路利用者の安全性を同時に達成するような道路巡回間隔を検討することが重要である。道路障害物放置リスクのリスク管理水準、苦情発生リスクのリスク管理水準として、既に 4. (2) で VaR を定義している。これらリスク管理水準を保証しつつ、期待総費用を可能な限り小さくするような最適巡回間隔を求めることとする。

いま、ある管理基本区間において、政策変数である巡回間隔を  $T$  と表す。実行可能な巡回政策の集合を  $D$  とすると、管理基本区間ごとにリスク管理水準を保証しつつ、期待総費用を可能な限り小さくするような最適巡回間隔を求める最適巡回政策モデルは、

$$\min_{T \in D} E_c[T] \tag{27a}$$

subject to

$$T \in \Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L}) \tag{27b}$$

$$T \in \Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}) \tag{27c}$$

と定式化できる。

5. 適用事例

(1) 対象道路区間の概要

最適巡回政策モデルを現実の国道における道路巡回問題に適用する。表-1 は、適用事例としてとりあげた国道（総延長は 264.5km）において、ある 1 年間に記録された苦情の発生数（それに対する応急処理件数）を表す。苦情は、道路障害物、道路構造物、付属物、交通事故に分類されており、総数が 470 件である。これらのうち、道路障害物に着目すると動物死骸に関連する苦情が 113 件、落下物が 93 件で総数 206 件となっており、総苦情発生数の約 44% を占めている。これは、それ以外の道路構造物に関連する苦情（約 27%）、付属物（約 28%）、交通事故（約 1%）と比較しても顕著である。本適用事例では道路障害物の発生に伴って生じる苦情に着目して議論を進めていく。階層的隠れポワソンモデルの推計にあたっては、基本道路区間を 1km に設定した。さらに、対象道路の総延長 264.5km のうち、一部区間設定が困難な道路区間を除外した結果、合計 250 個の基本道路区間を設定した。表-2 に、道路障害物と苦情に関するデータ概要を示す。

(2) 階層的隠れポワソンモデルの推計

本研究では小濱等<sup>3)</sup>が推計した階層的隠れポワソンモデルを採用する。MCMC 法を用いたモデルの推計方法や推計結果の詳細に関しては小濱等<sup>3)</sup>を参照して欲しい。表-3 に、階層的隠れポワソンモデルのうち、道路障害物に対するポワソン発生モデル（下位モデル）の推計結果を示す。本研究においては、道路障害物の個数が苦情の発生過程に影響を及ぼすという関係を明示化するために、道路障害物の発生に対するポワソンモデルを下位モデル、苦情の発生に対するポワソンモデルを

表-5 マルコフ推移確率行列

障害物個数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.9923	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0014	0.9909	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0020	0.9903	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0030	0.9894	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.9881	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0062	0.9861	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090	0.9833	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0131	0.9793	0.0075	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0189	0.9734	0.0074	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0273	0.9649	0.0074
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0395	0.9596

表-3 ポワソンモデルの推計結果 (道路障害物: 下位モデル)

		定数項	旅行速度 (km/h)	貨物車交通量 (台/日)
推計値	標本平均	-6.595	1.307	1.034
	90%信頼区間	-6.672	1.234	0.947
		-6.523	1.390	1.125
	Geweke 検定量	-0.133	0.119	0.114
対数尤度	17,436			
AIC	-34,868			

表-4 ポワソンモデルの推計結果 (苦情: 上位モデル)

		定数項	土地区分 DID・市街地	障害物発生数
推計値	標本平均	-7.696	0.757	1.875
	90%信頼区間	-7.960	0.531	0.744
		-7.418	0.971	2.633
	Geweke 検定量	0.157	0.014	-0.155
対数尤度	-1619.0			
AIC	3246.0			

上位モデルと呼ぶ。道路台帳等から利用可能な道路構造や道路環境を表す変数 (例えば, 交通量, 旅行速度, 交差点数, ひび割れ率など, 合計 49 変数) を網羅的に組み合わせてモデルを推計した。これらのモデル群の中から, 各パラメータの推計値が, 符号条件や Geweke 検定統計量による収束条件を満たすモデルの AIC を計算し, AIC の値が最も低くなるモデルを選択した。その結果, 旅行速度と貨物車交通量の 2 つを説明変数として採用した。なお, 各説明変数は最大値を 1 として基準化している。また, MCMC 法によるサンプリング過程の定常性を Geweke 検定統計量<sup>10)</sup>を用いて判定した。Geweke 検定統計量の絶対値はいずれも 1.96 を下回っており, 有意水準 5% で「定常状態に収束している」という仮説を棄却できない。表-3 のパラメータ推計値の標本平均を用いて, 道路障害物発生過程をポワソン過程としてモデル化する。ある道路区間における道路障

害物の到着率は具体的に

$$\lambda = \exp(-6.595 + 1.307x_1 + 1.034x_2) \quad (28)$$

と表現することができる。x<sub>1</sub> は旅行速度, x<sub>2</sub> は貨物車交通量である。

苦情発生モデル (上位モデル) の推計結果を表-4 に示す。推計の結果, 土地区分 (DID 地区・市街地か, 否か), 障害物発生数が説明変数として採用された。ただし, 土地区分は定性パラメータであることから, DID 地区および市街地を 1, それ以外 (平地, 山地) を 0 とするダミー変数を与え, 障害物の発生数は 5 個が 1 となるように基準化している。土地区分に関する未知パラメータの推計値が正值であることから, DID 地区と市街地の方が苦情発生確率が大きくなる。障害物発生数に関しても, 未知パラメータが正值であり, 障害物の発生が多くなると苦情発生率が増加することがわかる。表-4 のパラメータ推計値の標本平均を用いて, 苦情の発生過程をポワソン過程としてモデル化する。苦情到着率は具体的に

$$\mu(l_t) = \exp(-7.696 + 0.757x_1 + 1.875\bar{l}_t) \quad (29)$$

と表現できる。x<sub>1</sub> は土地区分,  $\bar{l}_t$  は基準化後の道路障害物の発生数である。

このように, 階層的隠れポワソンモデルを用いることにより道路障害物発生率と苦情発生率の相互関係を考慮した上で, 障害物発生数に応じた苦情の発生確率を算出することが可能となる。

### (3) 分析結果の考察

階層的隠れポワソンモデルの推計結果を用いて, 苦情の発生確率分布, 道路障害物の発生確率分布を求めた。これらの確率分布に基づいて, 道路障害物の発生・除去過程をマルコフ連鎖モデルを用いて表すことができる。マルコフ連鎖モデルの推移確率行列の各要素は, 式 (10),(11) により定義される。期間 [t-1, t) の期末における路上放置障害物数  $\hat{l}_{t-1}$  を与件として, 期間 [t, t+1)



表-6 定常状態における道路障害物の個数分布

個数	確率	個数	確率
0	0.0021	6	0.2046
1	0.0117	7	0.1175
2	0.0439	8	0.0464
3	0.1133	9	0.0126
4	0.2009	10	0.0023
5	0.2446		

の期首における道路障害物の発生、苦情に対する応急処置により、当該期間の期末に路上放置される道路障害物数  $\hat{l}_t$  に推移する確率で構成される推移確率行列  $\Pi$  を推定した結果を表-5 に示す。表-5 でとりあげた道路区間は全道路区間の中で特に道路障害物の発生確率、および苦情の発生確率が大きな区間である。ここでは、状態変数の数を  $M = 10$  に設定している。

表-5 より、路上放置された道路障害物の推移確率  $\Pi_{\hat{l}_{t-1}, \hat{l}_t}$  は、 $0 \leq \hat{l}_{t-1} \leq 5$  の時、 $\Pi_{\hat{l}_{t-1}, \hat{l}_t+1} > \Pi_{\hat{l}_{t-1}, \hat{l}_t-1}$  が成立する。一方、 $6 \leq \hat{l}_{t-1} \leq 10$  においては、逆の関係が成立する。このことより、当該区間においては、かりに苦情による応急対応のみで道路障害物の除去を行なった場合、道路に放置される道路障害物の数は概ね5個を中心として分布することが推察できる。実際に、路上放置される道路障害物の定常確率分布を、

$$\hat{\mu} = \hat{\mu}\Pi \tag{30}$$

を満足するような確率ベクトル  $\hat{\mu}$  を用いて定義した場合、表-6 に示すような定常確率ベクトルを得ることができた。この結果より、定期的な道路巡回を実施せず、苦情に対する応急対応のみで道路障害物を除去した場合、確率0.65で4~6個の道路障害物が放置されていることを理解できる。すなわち、応急対応業務のみでは道路障害物をすべて除去することは不可能であり、定期的に道路巡回を実施して、すべての道路障害物を除去することが必要であることが理解できる。なお、確率ベクトル  $\hat{\mu}_t$  に関する状態変数の数を  $M = 10$  に設定しているが、路上放置される道路障害物の個数は概ね10個以下の状態で分布しており、本事例に関する限り  $M = 10$  という設定は実用的に問題ないと考える。つぎに、定期的な道路巡回を実施した後に、時間の経過に伴う路上放置確率  $\mu_t$  の変化パターンを分析した結果を図-2 に示している。道路巡回が実施された直後は道路障害物の放置数は0個であるが、時間とともに道路障害物が放置される確率が増加していく。同区間において、道路巡回後に4日が経過すれば、路上に少なくとも1個の道路障害物が放置される確率が0.5となる。

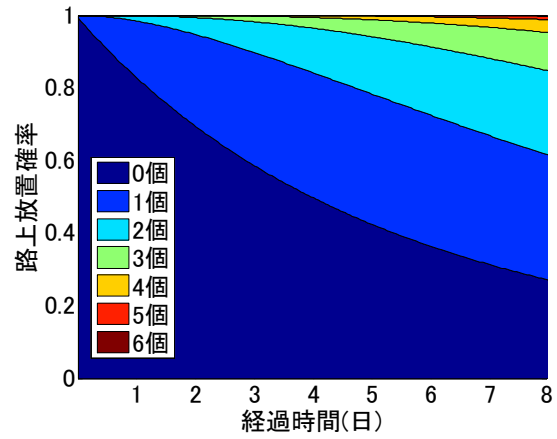


図-2 路上放置確率の経時変化

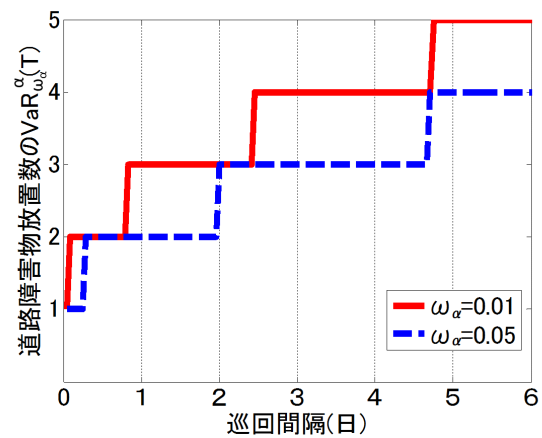


図-3 巡回間隔と  $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  の関係

a) VaR 指標

本事例で対象とする道路区間の中で特に道路障害物の発生確率が大きな1区間を取り上げ、VaR 指標を求めた。対象道路区間の道路特性は、旅行速度が73.6(km/h)、貨物車交通量が5311(台/日)、土地区分がDID・市街地である。障害物放置信頼水準  $\omega_\alpha$  を0.05、あるいは0.01に設定するとともに、道路障害物放置数の  $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  と巡回間隔の関係を分析した。その結果を図-3 に示している。図中、赤色の実線が信頼水準  $\omega_\alpha = 0.01$  に対応し、青色の破線が  $\omega_\alpha = 0.05$  に対応している。いずれの信頼水準においても、巡回間隔を短くすると  $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  の値は小さくなる。また、信頼水準を小さくすると  $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  は大きくなり、同一のリスク管理水準を満足するためには巡回間隔を短くしなければならない。  $\omega_\alpha$  値を0.01から0.05に緩和することにより、巡回間隔が0.25日、2.0日、4.7日のときに  $VaR_{0.05}^\alpha(T)$  は、それぞれ「1 → 2」、「2 → 3」、「3 → 4」へ変化する。本分析結果を用いて、道路管理者は  $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  の値を設定すれば、それに対応する最適巡回間隔を求めることができる。

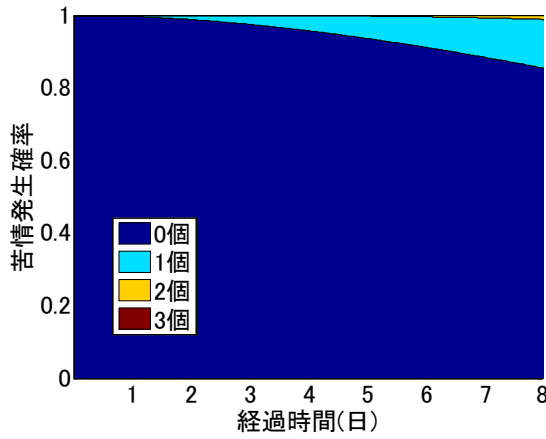


図-4 苦情発生確率の経時変化

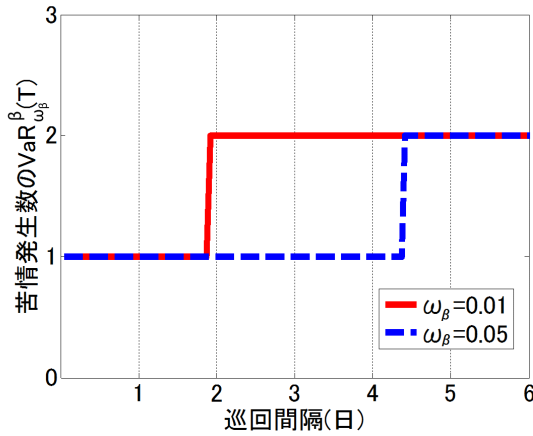


図-5 巡回間隔と  $VaR_{\omega_\beta}^\beta(T)$  の関係

式 (13a),(13b) に示したマルコフ連鎖モデルを用いて、期間  $[t, t + 1)$  における苦情発生数の無条件確率  $\psi_t(y_t)$ 、時点  $t$  における路上放置確率ベクトル  $\mu_t$ 、期間  $[0, t + 1)$  における苦情発生数の累積確率分布  $\Psi_t = (\Psi_t(0), \dots, \Psi_t(Y))$  を求めることができる。図-4は、道路巡回実施後に経過した時間  $t$  と  $\Psi_t$  の関係を示している。対象とする道路区間では、道路巡回実施後 6.5 日後に、少なくとも苦情が 1 件以上発生する確率が 0.1 を超えることがわかる。図-5に、苦情発生信頼水準を 0.05、あるいは 0.01 に設定し、その場合における苦情発生数に関する  $VaR_{\omega_\beta}^\beta(T)$  と巡回間隔の関係を分析した結果を示している。道路障害物放置数の場合と同様に、信頼水準を小さくすると苦情発生数の  $VaR_{\omega_\beta}^\beta(T)$  は大きくなり、同一のリスク管理水準を満足するためには巡回間隔を短くしなければならないことがわかる。また、 $\omega_\beta = 0.05$  と設定した場合に着目すると、巡回間隔が 4.4 日の時に  $VaR_{0.05}^\beta(4.4)$  は 1 から 2 へと増加する。

表-7 費用設定

	トリップ費用 (千円)	巡回費用 (千円)
路線 A	10	104
路線 B	11	105
路線 C	11	111

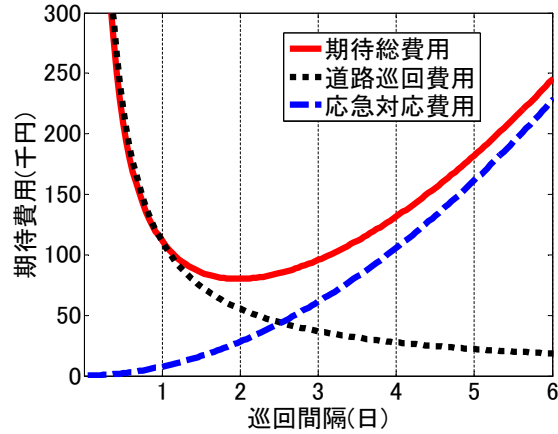


図-6 路線 A における期待費用

b) 期待総費用

本事例では、道路区間 250 区間に対して管理基本区間が 3 つ定められており、各管理基本区間に対して個別に道路巡回が実施されている。3 つの管理基本区間をそれぞれ路線 A、路線 B、路線 C とすると、路線 A に 69 区間、路線 B に 85 区間、路線 C に 96 区間が含まれる。表-7 に、各路線におけるトリップ費用、道路巡回 1 回あたりの巡回費用を示している。以下では路線 A に焦点を絞り、議論を進めることとする。路線 A における巡回間隔と期待費用の関係を図-6 に示す。黒色の点線は 1 日あたりの道路巡回費用であり、青色の破線は 1 日あたりの応急対応費用、赤色の実線は期待総費用を表す。期待総費用は、1 日あたりの道路巡回費用と 1 日あたりの応急対応費用の和である。図-6 に示すように、巡回間隔を減らすと応急対応費用は小さくなるが、道路巡回費用は大きくなる。一方で、巡回間隔を増やすと、道路巡回費用は小さくなるが、応急対応費用は大きくなる。したがって、道路巡回費用と応急対応費用の間にはトレードオフの関係が存在することがわかる。また、道路巡回費用が巡回間隔に対して単調減少、応急対応費用が単調増加であるため、期待総費用のグラフは凸形となり、期待総費用を最小とするような巡回間隔が存在することが保証される。路線 A において、道路障害物に関するリスク管理水準を考慮せず、期待総費用のみを最小とするような巡回間隔は図-6 より 1.9 日であり、期待総費用は 80.1 千円である。

c) リスク管理水準と最適巡回政策

リスク管理水準を考慮に入れた最適巡回政策について分析する。道路巡回業務は管理基本区間ごとに実施されるため、最適巡回間隔は管理基本区間ごとに異なる。以下では路線 A に着目し最適巡回間隔を求めることとする。5.3a) で分析した VaR 指標は、基本道路区間を単位とした局所的な評価指標である。道路障害物の放置は、路線を通過する道路交通だけでなく、各基本道路区間を主として利用する沿道住民に対して事故リスクに繋がる危険性がある。このため、道路障害物に関わるリスクは、すべての基本道路区間に対して一律に一定の水準以上を確保することを管理目標に設定することが望ましいと考える。このような立場から、本研究では各路線の VaR 指標を、当該の路線に含まれる道路区間の中で最悪の VaR を用いて定義すれば、巡回間隔  $T$  とした時の路線の VaR 指標は、

$$\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T) = \max_j VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T, j) \quad (31)$$

$$\tilde{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T) = \max_j VaR_{\omega_\beta}^\beta(T, j) \quad (32)$$

と定式化できる。ただし、 $VaR_{\omega_\alpha}^\alpha(T, j)$  は、着目する路線に含まれる道路区間  $j(j = 1, \dots, J)$  を巡回間隔  $T$  で巡回した際の道路障害物放置数に関する VaR 指標値であり、 $VaR_{\omega_\beta}^\beta(T, j)$  は、路線 A に含まれる道路区間  $j$  を巡回間隔  $T$  で巡回した際の苦情発生数に関する VaR 指標値である。図-7 は、 $\omega_\alpha = 0.05$  としたときの  $\tilde{VaR}_{0.05}^\alpha(T)$  と期待総費用の関係を示す。図中の各点に対して、それを実現する巡回間隔が一意的に対応する。図-7 において赤色の破線より左側の部分では、 $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  の値を減少させるためには期待総費用が増加し、パレート最適な道路巡回政策の領域であることが理解できる。道路管理者は  $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$ 、および期待総費用の関係を比較考量しながら最適巡回間隔を求めることが必要となる。たとえば、 $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  を 1 に抑えるための期待総費用は 356 千円であり、このときの巡回間隔は 0.3 日である。また、 $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  を 2 に抑えるための期待総費用は 80.1 千円であり、巡回間隔は 1.9 日となる。苦情発生リスクに関しても同様の分析を実施することができる。図-8 は  $\omega_\beta = 0.05$  としたときの  $\tilde{VaR}_{0.05}^\beta(T)$  と期待総費用の関係を示す。本事例においては、苦情の発生確率が小さいために、苦情発生リスクを抑えるための最適巡回間隔が存在し、巡回間隔が 1.9 日の時に  $\tilde{VaR}_{0.05}^\beta(1.9) = 1$  となる。

以上の分析結果より、路線 A に関して、道路管理者が  $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T) = 2$  を許容した場合、1.9 日、すなわち概ね 2 日間隔で道路巡回を実施することにより、道路障害物放置リスクと苦情発生リスクのリスク管理水準を満足しながら、期待総費用を最小化することができる。さらに、5.3b) の分析結果より、リスク管理水準を考

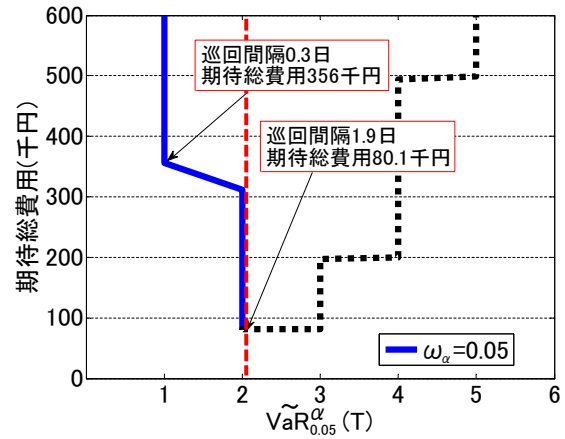


図-7  $\tilde{VaR}_{0.05}^\alpha(T)$  と期待総費用の関係

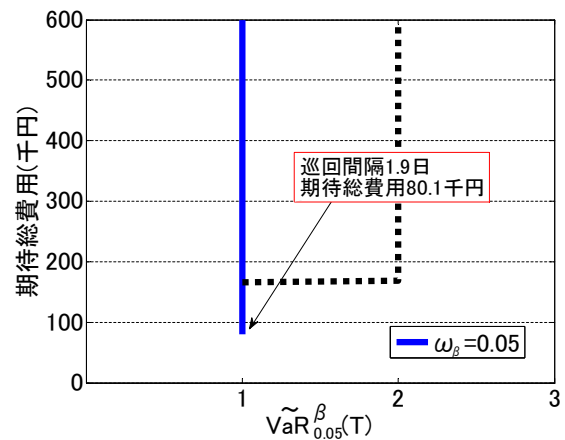


図-8  $\tilde{VaR}_{0.05}^\beta(T)$  と期待総費用の関係

慮しない条件の下でも期待総費用の最小化を達成することが保証される。なお、道路管理者が道路障害物放置数に関する  $\tilde{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T)$  を 2 未満に抑制することを目指す場合、巡回間隔をより短縮することが必要となる。しかし、期待総費用が増加することを覚悟することが必要となる。

(4) 今後の展開

本研究で提案した最適巡回政策モデルは、道路巡回業務の高度化、合理化のための政策評価の道具として有用であると考えられる。社会基盤施設の維持管理に関する活動は、例えば予算計画や点検（日常パトロールや定期点検）、補修工事等、数多く存在する。坂井等<sup>11)</sup>は、ロジックモデルを用いて、維持管理業務の実施が維持管理の目標や成果に及ぼす因果関係を論理的に記述している。ロジックモデルは、予算執行、点検の実施、補修の実施といった活動（インプット）が、安全性や快適性の確保等で示される維持管理の最終目標の達成のための影響を計測するためのツールである。同時に、

成果（アウトカム）の達成状況を定期的にモニタリングし、システム全体の改善を行うためのインプットの見直しを行う。その際に、道路維持管理業務の高度化のための政策評価が重要な課題となるが、本研究で提案した最適巡回政策モデルは道路巡回政策（インプット）の政策評価のために重要な役割を果たすことになる。

ロジックモデルは、階層的マネジメントサイクルの上位に位置する評価機能において、日常管理の「Plan-Do-Check-Action」のマネジメントフローを監視する役割を有している。実際に道路巡回業務に関しても、その妥当性と実施状況をモニタリングするためのロジックモデルを開発する必要がある。道路巡回業務に対するロジックモデルにおいて最終アウトカムには安全・安心、あるいは道路利用者の満足度が設定されることになる。このうち、安全・安心に関しては道路障害物の発生を VaR の観点から検討した事例がある<sup>1)</sup>。その一方で、道路利用者の満足度に関しては、苦情の発生率が重要な評価指標になると考えられる。今後、本研究の成果を用いて、道路巡回業務に関するロジックモデルの実用化を目指した研究事例の蓄積が必要になると考える。

## 6. おわりに

本研究では、道路障害物・苦情に関するリスク管理水準を考慮した上で、各管理区間単位ごとに最適巡回政策を決定する方法論を開発した。具体的には、階層的隠れポワソンモデルに従って発生する道路障害物の発生・除去過程をマルコフ連鎖モデルで表現した。さらに、道路障害物放置数および苦情発生数に関するリスク管理指標を VaR として定量化し、これらのリスク管理水準を保証しつつ、道路巡回費用と応急対応費用の和で示される期待総費用を最小とするような最適巡回政策モデルを開発した。最後に、一般国道を対象とした適用事例を通じて、本研究で提案した方法論の有用性を実証的に検証した。今後以下のような課題が残されている。本研究では、一般国道の特定路線を対象として適用分析を実施したものである。多様な道路特性変数を考慮に入れるためには、今後幅広い路線にまたがって巡回データを収集するとともに、本研究で提案した方法論を用いて適用事例を蓄積することが必

要である。また、本研究で提案した手法は、道路施設だけでなく、他の交通施設の巡回政策の検討にも適用可能である。その場合、それぞれの交通施設の特性に応じたリスク管理限界の確定が重要な検討課題となる。

なお、本研究は新都市社会技術融合創造研究会「道路付帯施設・情報管理施設のアセットマネジメントに関する研究プロジェクト(プロジェクトリーダー：小林潔司)」の活動成果の一部である。研究を実施するにあたり、国土交通省近畿地方整備局道路管理課および滋賀国道事務所より多大な支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.
- 2) McNeil, J. A., Frey, R. and Embrechts, P.: *Quantitative Risk Management*, Princeton University Press, 2005.
- 3) 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司, 福田泰樹, 板垣勝則: 道路障害物に関する苦情発生分析, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.1, pp.32-46, 2013.
- 4) 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌: 道路障害リスクと道路巡回の合理化方策, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.14, pp.87-98, 2007.
- 5) 吉田武: 道路維持管理における対症的措置のパフォーマンス指標としてのレスポンスタイム, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.110-114, 2008.
- 6) 吉田武: 道路維持管理における対症的維持の意義と改善, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.208-213, 2010.
- 7) Titterton, D. M., Smithe, A. F. M. and Makov, U. E.: *Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions*, John Wiley & Sons, 1985.
- 8) Robert, C. P.: Mixtures of Distributions: Inference and Estimation, in Gillks, W. R., Richardson, S. and Spiegelhalter, D. J.(eds.): *Markov Chain Monte Carlo in Practice*, Chapman & Hall, 1996.
- 9) Celeux, G., Hurn, M. and Robert, C. P.: Computational and Inferential Difficulties with Mixture Posterior Distributions, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.95, pp.957-970, 2000.
- 10) Geweke, J.: Evaluating the Accuracy of Sampling-based Approaches to the Calculation of Posterior Moments, in: Bernardo, J. M., Berger, J. M., Dawid, A. P. and Smith, A. F. M.(eds.): *Bayesian Statistics 4*, pp.169-193, Oxford University Press, 1996.
- 11) 坂井康人, 上塚晴彦, 小林潔司: ロジックモデル (HELM) に基づく高速道路維持管理業務のリスク最適化, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.14, pp.125-134, 2007.

(2013. 2. 27 受付)

## ROAD PATROL POLICIES WITH REFERENCE TO CLAIM GENERATION

Kengo OBAMA, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI and Yukio FURUNO

In this study, the authors develop a model of claim generation about road obstacle subjects, such as fallen objects, and propose a methodology for determining the optimal road patrol policy considering the risk control (service) level regarding obstacles and claims. In detail, in order to explicitly take into account the relation in which the increase of road obstacles influences the frequency of claims, the authors formulate a hierarchical hidden Poisson model with the lower system being the generation process of road obstacles and the higher system being the generation process of claims. Then, the optimal patrol policy model for designing a road patrol policy for minimizing the total cost composed of the expenses for patrol and emergency treatment is defined as a Markov decision model. In addition, the effectiveness of the methodology proposed in this study is verified through the case study applying to an actual national road.