

苦情発生を考慮した道路巡回政策

小濱健吾¹・貝戸清之²・小林潔司³・

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒 611-8540 京都市西京区桂 4 京都大学桂 C)

E-mail: k.obama@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

²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

³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

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た上で、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、道路障害物の発生過程を定常ポワソン過程、および苦情の発生過程を到着率が道路障害物数に依存する非定常ポワソン過程としてモデル化する。その上で、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階層的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。さらに、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を実証的に検証する。

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

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。道路管理者にとっては、道路を保全し道路交通の安全確保を図ることはもちろん、近隣住民や道路利用者の要望を満足することも、重要な責務である。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に行われる。そのため、道路巡回費用は、路上落下物や路面損壊・変状の有無に関わらず、固定的に発生する。一方、道路区間により、単位期間中の路上落下物や路面損壊の発見確率は多様に変動する。道路の巡回頻度を増やすほど、道路の安全性や交通流の確保に支障をきたす事象（以下、道路障害物）の発生に迅速に対応することができ、道路障害物を長時間路上に放置するリスクは小さくなる。また、通常の道路巡回業務とは別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を行う（以下、応急業務）。しかし、応急業務の件数が多いと、近隣住民や道路利用者の当該道路に対する満足度の低下につながる。道路の巡回頻度を増やすことにより、応急業務の発生頻度や苦情件数を

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き、結果的に社会的費用が増加してしまう可能性がある。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発生リスクの管理目標を設定した上で、定期巡回費用と応急業務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（応急業務）の発生過程を、各事象がランダムに発生するような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。したがって、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。そこで、本研究では道路障害物の発生過程を定常ポワソン過程、および苦情の発生過程を到着率が道路障害物数に依存する非定常ポワソン過程としてモデル化する。その上で、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階層的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。階層的隠れポワソンモデルを実データに基づいて推計する場合、苦情に関しては、苦情が管理者に寄せられた時刻（発生時点）のみが、定期的な道路巡回業務においては、発生数が記録されるのみであり、これらのデータからは、道路障

害物の発生時点に関する正確な情報が入手できないという問題がある。このため、道路障害物の発生に関する部分的情報を用いて、階層的隠れポワソンモデルを推計する方法論を開発することが必要となる。

以上の問題意識のもとで、本研究では、道路障害物に起因する苦情の発生メカニズムを階層的隠れポワソンモデルとして定式化する。さらに、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、最適道路巡回政策を決定するための方法論を提案する。以下、2. で本研究の考え方を説明する。3. では、階層的隠れポワソンモデルを定式化し、4. で最適道路巡回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を実証的に検証する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

社会基盤施設のアセットマネジメントにおいては、マルコフ劣化ハザードモデル¹⁾の開発により劣化予測技術が飛躍的に進展した。マルコフ劣化ハザードモデルを拡張する形で継続的な高度化が行われた。たとえば、小林等²⁾は、健全度の測定値に観測誤差が存在する場合を対象として、マルコフ推移確率を推計するための隠れマルコフ劣化ハザードモデルを提案している。さらに、林等³⁾は複数の劣化過程がそれぞれ独立にマルコフ過程に従い、その中でもっとも劣化が進展した劣化事象が代表的な事象として選択されるメカニズムを競合的劣化ハザードモデルを用いて表現した。また、小林等⁴⁾は道路舗装の路面の健全度の劣化過程と、舗装全体の耐力力の低下過程のように複合的劣化過程を階層的隠れマルコフ劣化ハザードモデルを用いて定式化した。これらのような複雑な混合確率モデルの推計は、最尤法では現実的に困難な場合が多かったが、近年のMCMC法^{5),6)}に基づくベイズ推計^{7),8)}の発展により推計が可能となった経緯がある。

道路障害物の発生過程に関しては、各事象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⁹⁾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¹⁰⁾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リスクを表現した。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。本研究では、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する。苦情の発生は道路利用者からの通報という形で発生状況を観測できるが、道路障害物の発生状況は日常的な道路巡回業務を通してのみ観測できる。さらに、苦情が発生した時点において、道路上に存在する道路障害物の総数に関する情報は獲得できない。本研究では、このような観測頻度の異なる道路障害物データと苦情データを用いて、階層的隠れポワソンモデルを推計する方法を提案し、さらに、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、分析する方法論を提案する。著者等の知る限り、階層的隠れポワソンモデルを用いた道路障害物の発生過程や苦情発生過程を分析した研究事例は見当たらない。

(2) 苦情とリスク管理

本研究では、ポットホール、路上落下物等、定期的な道路巡回作業により除去されるような道路障害物を対象とする。道路障害物の内容は多様であるが、障害物の内容によっては、障害物の放置が交通事故等の発生につながる危険性がある。道路巡回により障害物が除去されるが、障害物は次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放置は、交通事故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ため、苦情が発生すれば応急業務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、苦情の発生件数は減少する。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、逆に応急業務件数が増加し、応急業務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、定期的巡回費用と応急業務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、苦情事象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、望ましい道路障害物の発生リスク管理水準を達成する

とは限らない。リスク管理の水準の観点からは、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物のリスク管理水準を決定することが望ましい。すなわち、道路障害物の発生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) モデルの基本構成

道路障害物の発生頻度が大きくなれば、道路障害物に対する苦情件数は増加する。定期的な道路巡回により道路障害物が除去され、その発生個数が記録される。しかし、苦情が発生すれば、非定期的な応急業務により道路障害物は除去される。このため、道路巡回ごとに観測される路上障害個数の時系列データと苦情の発生件数の時系列データの間には相互作用が存在している。さらに、これら2つの時系列データは、道路巡回あるいは応急業務を実施した時点においてのみ観測されるため、いずれの時系列データを用いても、道路障害物が発生した時点に関する情報は入手できない。定期的な道路巡回情報により、前回の道路巡回時点以降に発生し、かつ応急業務により除去されずに路上に放置された道路障害物の総数に関する情報を獲得することができる。応急業務が実施されたという事実より、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、ことが判明する。このように定期的な道路巡回と苦情に対する応急業務を通じて、道路障害物の発生に関する部分的な情報を獲得することができる。

本研究では図-1に示すように、道路障害物の発生がポアソン過程に従って到着すると考える。一方で、苦情事象は、その到着率が路上に放置された道路障害物数に依存するような状況依存的ポアソン過程に従って到着する。道路巡回や応急業務によって道路障害物が除去されない限り、新たに発生した道路障害物は路上に放置・蓄積される。路上に放置される道路障害物数が、時間とともに変動するため、苦情の発生過程は苦情の到着率が時間とともに変動するような非定常ポアソン過程に従うことになる。以上の問題意識の下に、本研究では道路障害物の発生過程をポアソン過程としてモデル化するとともに、苦情の発生過程を苦情事象の到着率が道路障害物数に依存して変動するような非定

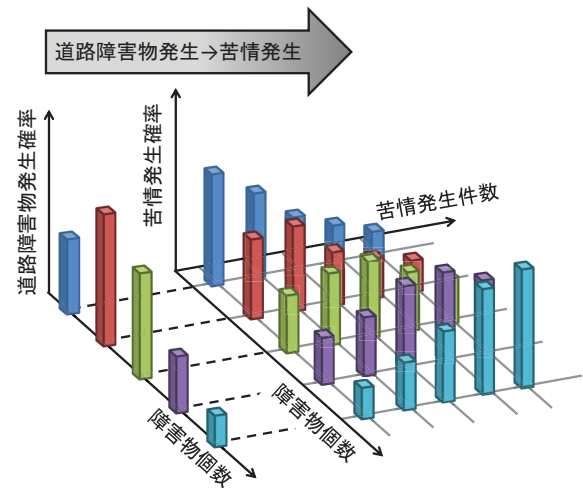


図-1 苦情の発生メカニズム

常ポアソン過程としてモデル化する。しかし、上述したように、道路上の道路障害物数に関する情報は、定期巡回時点においてのみ観測される。各時点における道路障害物数を直接観測できないため、各期における苦情の到着率を確定的に把握することは不可能である。そこで、道路障害物のポアソン過程モデルを用いて推定した各時点における道路障害物数の確率分布を用いて、苦情到着率の期待値を求めるような混合ポアソン過程を定式化する。すなわち、本研究で提案する苦情発生・道路障害物到着モデルは、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構造を持ち、これら2つのサブモデルを連結する役割を果たす道路障害物数が直接観測できないような状態変数で表せる階層的隠れポアソンモデルとして定式化される。

3. 階層的隠れポアソンモデル

(1) モデル化の前提条件

階層的隠れポアソンモデルを定式化するために、図-2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取り

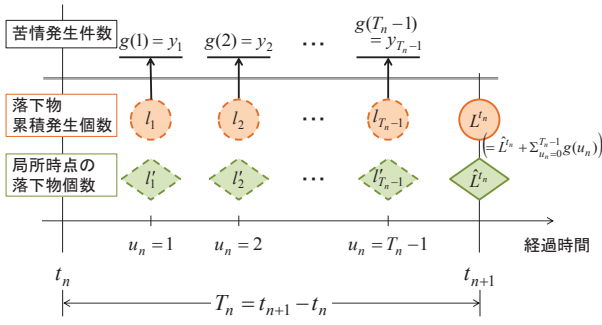


図-2 局所時点の設定

除かれる．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件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が取り除かれる．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取り除かれる．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．表記の簡単化のために，当面の間のみ，苦情が発生しても道路障害物が取り除かれずと仮定する．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 $x = (x^1, \dots, x^Q)$

と表す． Q は特性ベクトルの数を表す．到着率 λ が特性ベクトル x に依存すると考え，

$$\lambda = x\beta \quad (2)$$

と表記する．ただし， $\beta = (\beta^1, \dots, \beta^Q)'$ は未知パラメータベクトルである．記号 $'$ 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，苦情による撤去を考えない場合，ポアソン分布

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

と表すことができる．

(3) 階層的隠れポアソン過程

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 ，および苦情によって取り除かれずに放置されている道路障害物の個数 \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 $\mu(l_t) > 0$

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

で表されるポアソン過程に従って生起すると考える．ただし， $\bar{z}_t = (l_t, z)$ であり， $z = (z^1, \dots, z^P)$ 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． α^0 は説明変数 l_t に対する係数パラメータである． $\mu(l_t)$ は，局所期間 $[t, t+1)$ 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 $\mu(l_t)$ のポア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，

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

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，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件数の観測値ベクトル \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，

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

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

と定義できる．上式で定義した尤度を用いることにより，2. (3) で示したような，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，という苦情発生過程の特性を表現することが可能となる．

階層的隠れポア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¹¹⁾．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ない．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¹²⁾⁻¹⁵⁾．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に譲ることとする．

4. 最適道路巡回モデル

(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 $t = 0, 1, 2, \dots, \infty$ を導入する．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 $t = 0$ ，つぎの道路巡回が実施される時点 $t = T$ と表す．道路巡回時点 t_n 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 $[t, t+1)$ 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，各期の期首に当外期における道路障害物が到着する．ついで，2) 当該期の期首に路上に存在する道路障害物と与件として，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，つぎの期の期首まで持ち越される．道路巡回の実施時点 $t = T$ において，すべての道路障害物は除去される．

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，各期 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， t 期の期首を考える． $t-1$ 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ると考える． t 期の期首に，式 (3) に従って道路障害物がポワソン到着すると考える．すなわち，当該期の期首に 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 $\Pi_{\hat{l}_{t-1}, l_t}$ は

$$\Pi_{\hat{l}_{t-1}, l_t}$$

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

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

つぎに， t 期の期首に 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 $\mu(l_t) > 0$ で表されるポアソン過程に従って生起すると考える．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 $\hat{\pi}(y_t|l_t)$ が式 (??) 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．このため， t 期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 $t+1$ 期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 Φ_{l_t, \hat{l}_t} は

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

と表される．推移確率 Φ_{l_t, \hat{l}_t} を (l_t, \hat{l}_t) 要素とする $(M+1) \times (M+1)$ 行列を Φ_t と表記する．この時， t 期の期首に l_t 個の道路障害物が路上に放置される確率を $\nu_t(l_t)$ ， t 期において苦情が発生した後に \hat{l}_t 個の道路障害物が路上に放置される確率を $\hat{\nu}_t(\hat{l}_t)$ と表せば，路上放置確率ベクトル $\nu_t = \{\nu_t(0), \dots, \nu_t(M)\}$ ， $\hat{\nu}_t = \{\hat{\nu}_t(0), \dots, \hat{\nu}_t(M)\}$ はそれぞれ，

$$\nu_t = \nu_0 \Phi_0 \Pi_1 \cdots \Phi_{t-1} \Pi_t \quad (12)$$

$$\hat{\nu}_t = \nu_0 \Phi_0 \Pi_1 \cdots \Phi_{t-1} \Pi_t \Phi_t \quad (13)$$

と表される．

(2) リスク管理指標

a) 道路障害物発生数の VaR

ある道路区間 k に着目する．巡回間隔 T^k とした時に， t 期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}^k 以上となる確率は，

$$P^\alpha(l_t \geq \bar{L}^k | T^k) = \sum_{m=\lceil \bar{L}^k \rceil}^M \nu_t(m) \quad (14)$$

と表される．ただし， $\lceil \bar{L}^k \rceil$ は \bar{L}^k 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，所与の管理限界を常に満足するとは限らない．確率 ω_α は，道路障害物発生リスクを表す指標であり，障害物発生信頼水準と呼ぶこととする．ここで，障害物発生信頼水準 ω_α と道路巡回間隔 T^k を所与とした際の， t 期期首における道路障害物発生数に関

する VaR 指標 $\text{VaR}_\omega^\alpha(T^k)$ を，

$$\text{VaR}_{\omega_\alpha}^\alpha(T^k) = \arg \max_{L^k} \left\{ P^\alpha(l_t \geq L^k | T^k) \leq \omega_\alpha \right\} \quad (15)$$

と定義しよう．ただし， \arg は，式 (15) の右辺を最大にする L^k を指定する記号である．ここで，集合 $\Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L}^k)$ を，

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

と定義しよう．集合 $\Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L}^k)$ は，「障害物発生信頼水準 ω_α の下で，道路障害物の発生数をリスク管理限界 \bar{L}^k 以下に抑えることが可能な道路巡回間隔の集合」を表している．このように，道路障害物の発生リスクは，信頼水準 ω_α とリスク管理限界 \bar{L}^k という 2 つのパラメータを用いて表現できる．

b) 苦情発生数の VaR

巡回間隔 T^k とした時に， t 期において苦情発生数 y_t がリスク管理限界 \bar{Y}^k 以上となる確率は，

$$P^\beta(y_t \geq \bar{Y}^k | T^k) = \sum_{l_t=0}^M \sum_{m=\lceil \bar{Y}^k \rceil}^{l_t} \nu_t(l_t) \hat{\pi}(m|l_t) \quad (17)$$

と表される．ただし， $\lceil \bar{Y}^k \rceil$ は \bar{Y}^k 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，所与の管理限界を常に満足するとは限らない．確率 ω_β 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 ω_β と道路巡回間隔 T^k を所与とした際の， t 期における苦情発生数に関する VaR 指標 $\text{VaR}_\omega^\beta(T^k)$ を，

$$\text{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T^k) = \arg \max_{Y^k} \left\{ P^\beta(l_t \geq Y^k | T^k) \leq \omega_\beta \right\} \quad (18)$$

と定義しよう．ただし， \arg は，式 (18) の右辺を最大にする Y^k を指定する記号である．ここで，集合 $\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}^k)$ を，

$$\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}^k) = \left\{ T^k \mid \max_t \{ \text{VaR}_{\omega_\beta}^\beta(T^k) \} \leq \bar{Y}^k \right\} \quad (19)$$

と定義しよう．集合 $\Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}^k)$ は，「苦情発生信頼水準 ω_β の下で，苦情の発生数をリスク管理限界 \bar{Y}^k 以下に抑えることが可能な道路巡回間隔の集合」を表している．このように，苦情の発生リスクは，信頼水準 ω_β とリスク管理限界 \bar{Y}^k 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，厳しい道路巡回政策を採用することを意味する．実際に道路管理者は，信頼水準とリスク管理限界を設定することで，最適な巡回間隔を決定することができる．

(3) 期待総費用

対象とする道路区間 k を巡回間隔 T^k で巡回した際の 1 日あたりの期待費用を算出する． t 期の期首に道路障害物が l_t 個存在したとする．苦情の発生により発生件数に応じた道路障害物が除去され，残りの \hat{l}_t 個が道路障害物として放置される．苦情発生による応急対応 1 件につきトリップ費用 C_{tr}^k がかかるとすると， t 期における応急対応費用 $\Psi(t)$ は，

$$\Psi(t) = \sum_{\hat{l}_t=0}^M \sum_{l_t=0}^M \nu_t(l_t) \Phi_{l_t, \hat{l}_t} \delta_{l_t, \hat{l}_t} C_{tr}^k$$

$$\delta_{l_t, \hat{l}_t} = \begin{cases} l_t - \hat{l}_t & l_t \geq \hat{l}_t \\ 0 & l_t < \hat{l}_t \end{cases} \quad (20)$$

となる．したがって，道路巡回 1 回あたりの巡回費用を C_{pt}^k とすれば，道路区間 k を道路巡回間隔 T^k で巡回した際の一日あたりの期待総費用 $E_c[T^k]$ を，

$$E_c[T^k] = \left\{ \sum_{t=0}^{T^k-1} \Psi(t) + C_{pt}^k \right\} T^{k-1} \quad (21)$$

と表すことができる．

(4) 最適道路巡回モデル

2. (2) で言及したように，道路巡回費用と応急業務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，定期的巡回費用と応急業務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．応急業務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．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，道路障害物の発生リスク，苦情の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，苦情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道路巡回間隔を求めることとする．

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，ある道路網において，管理基本区間 i に着目し，管理基本区間に含まれる道路区間の巡回間隔を T_i^j ($j = 1, \dots, J_i$), ($i = 1, \dots, I$) とすると， $T_i^1 = T_i^2 = \dots = T_i^{J_i}$ が成立する．ただし， J_i は管理基本区間に含まれる道路区間の総数である．このとき，実行可能な巡回政策の集合を D と

すると，最適道路巡回モデルは，

$$\min_{T_i^j \in D} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} E_c[T_i^j] \quad (22a)$$

subject to

$$T_i^j \in \Omega_{\omega_\alpha}^\alpha(\bar{L}^k)$$

$$T_i^j \in \Omega_{\omega_\beta}^\beta(\bar{Y}^k) \quad (22b)$$

と定式化できる．

5. 適用事例

(1) 対象道路区間の概要

階層的隠れポアソンモデルを国道を対象とした苦情分析に適用する．表-1 は，実際の国道（総延長は 264.5km）に対する，ある 1 年間の苦情件数（それに対する応急処理件数）を記録したものである．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，全苦情件数の約 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．したがって，以降では道路障害物の発生と苦情の発生に着目して議論を進める．

表-2 に道路障害物と苦情に関するデータ概要を示す．本研究では，道路障害物と苦情の発生を考える上での基本単位となる道路区間を 1km として考える．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，合計で 250 区間を設定できた．さらに，各道路区間は人口集中地区（以降，DID 地区）市街地，平地，山地の 4 つの地区区分に分類できる．DID 地区とは，市区町村の区域内で人口密度が 4,000 人/km² 以上の基本単位区が互いに隣接して人口が 5,000 人以上となる地区である．以下に，4 つの地区区分に対して，b) 道路区間数，c) 平均交通量，d) 平均旅行速度，e) 障害物個数，f) 障害物個数区間平均，g) 苦情発生件数，h) 苦情発生件数区間平均，i) 苦情件数/障害物個数を記載する．b) 区間数は DID 地区：32 区間，市街地：47 区間，平地：143 区間，山地：29 区間となっており，平地の区間数が多いことが読み取れる．e) 障害物個数は 1 年間に道路巡回業務により発見された道路障害物の個数である．障害物総数は 9,644 個であり，その中の約 59%（5,703 個）が平地で発生していることになる．さらに，f) では 1 区間あたりの障害物の発生個数を各地区区分で比較している．道路区間平均でみると，道路障害物の発生が市街地（41.4 個）で多いことがわかる．一方で，g) 苦情発生件数に着目すると総数 206 件のうち，その約 51% が平地で発生している．しかし，

表-1 苦情分類表

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

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	143	29	-	251	
c) 平均交通量 (台)	7,080	6,900	5,819	5,361	6,112	-	
d) 平均旅行速度 (km/h)	26	36	36	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	39.9	36.4	38.4	-	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	0.734	0.276	0.779	-	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-3 ポアソンモデルの推計結果 (道路障害物)

	定数項	旅行速度 (km/h)	貨物車交通量 (台/日)	
推計値	標本平均	-6.5947	1.3071	1.0343
	90%信頼区間	(-6.672 -6.523)	(1.234 1.390)	(0.947 1.125)
	Geweke 検定量	-0.1333	0.1188	0.1139
対数尤度	17,436			
AIC	-34,868			

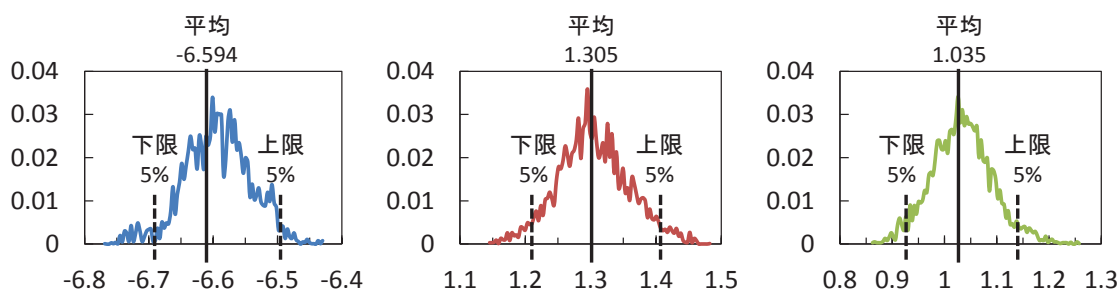


図-3 事後分布の標本結果 (サンプル数: 5,000)

この点に関しても h) 1 区間あたりの平均件数で確認すると、もっとも苦情の発生件数が多いのは DID 地区で 1.469 となっている。さらに、1 個の障害物に対する苦情件数 (苦情件数を障害物の発生個数で割ったもの) を i) に示すが、数値の大きい順に DID 地区: 0.050, 市街地: 0.024, 平地: 0.018, 山地: 0.008 となっている。以上の 1 次分析を踏まえ、苦情の発生件数には土地区分 (DID 地区, 市街地か, 否か) の影響が大きいという前提のもとで詳細な分析を進めるものとする。

(2) 階層的隠れポアソンモデルの推計

a) ポアソン発生モデル (道路障害物)

表-3 に、階層的隠れポアソンモデルのうち、道路障害物に対するポアソン発生モデル (下位システム) の推計結果を示す。道路台帳等から利用可能な * の情報のうち、Geweke 検定統計量, 符号条件, AIC などから総合的に判断し、旅行速度と貨物車交通量の 2 つを特性変数として採用した。なお、各特性変数は最大値を 1 として基準化したものを用いている。本研究では、階層的隠れポアソンモデルを推計する際に、MCMC 法を用いて未知パラメータの事後分布からのサンプリングを行っている。ただし、サンプリングの初期段階においては、パラメータの初期値設定の影響が残存している。

このため、シミュレーション回数 v が十分大きな値になるまでは、パラメータ標本の発生過程が定常過程に到達していないと考え、発生したパラメータ標本を除去した。具体的には、MCMC 法によるシミュレーション回数を 10,000 回とし、最初のサンプリング数 $v=5,000$ をパラメータが定常分布に到達するまでの回数と考え、残りの $\bar{v}=10,000$ までのサンプルをパラメータ標本として採用する。さらに、各パラメータが定常過程に到達したかどうかを Geweke 検定統計量を用いて判定する。Geweke 検定統計量は絶対値で 1.96 を下回ると、パラメータの分布が定常に達しているという帰無仮説を棄却することができない。表-3 には、各未知パラメータに対して標本平均、分布の 90%信頼区間、Geweke 検定統計量を示す。図-3 は MCMC により求めた各パラメータ標本である。黒線でパラメータの標本平均、点線でパラメータの上下限 5%を示している。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アソン過程としてモデル化する。道路障害物の到着率は具体的に

$$\lambda^k = \exp(-6.594 + 1.3047x_1^k + 1.035x_2^k) \quad (23)$$

と表現することができる。ここでは、旅行速度: x_1^k 、貨物車交通量: x_2^k をポアソン到着率の説明変数として用いている。式 (3) を用いて、障害物の発生過程を表すポアソン分布を算出する。図-4 のそれぞれの分布は巡回間隔 z を 1 日、5 日、10 日と設定したときの道路障害物の発生分布を示している。なお、特性変数は、旅行速度、貨物車交通量ともに全道路区間の平均値を採用することにより導出した。凡例には、各巡回間隔 T^k における障害物発生個数 L^k の期待値 $E[L^k|T^k]$ を示す。たとえば、任意時点で実施した道路巡回業務からの経過日数が 1 日の時点では、発生数の期待値 $E[L^k|T^k]$ は、0.10 個であり 0 個の確率が約 90%を占め、1 個の確率が約 10%で、2 個以上の確率が極めて少ない分布となっている(図中の青色)。しかし、経過時間が 5 日、10 日と増加することにより、発生個数 0 個の確率が低下し、発生数の多い方へ分布が移動する。経過日数 10 日時点では、確率分布のピークは発生個数 1 個であり、その確率は約 38%となる。

つぎに、障害物発生に関するポアソン分布の分布関数を算出する。ある道路区間 k において、経過時間(巡回間隔)が T^k のとき道路巡回で障害物が L^k 個以上発見される確率は、

$$P(L^k, T^k | \lambda^k) = 1 - \sum_{l_k=1}^{L^k-1} p(l_k, T^k | \lambda^k) \quad (24)$$

と定義できる。図-5 に障害物発生個数を 1 個以上としたときの累積発生確率を示す。図中に 3 本の曲線(分布関数)を示しているが、青色は旅行速度と貨物車交通

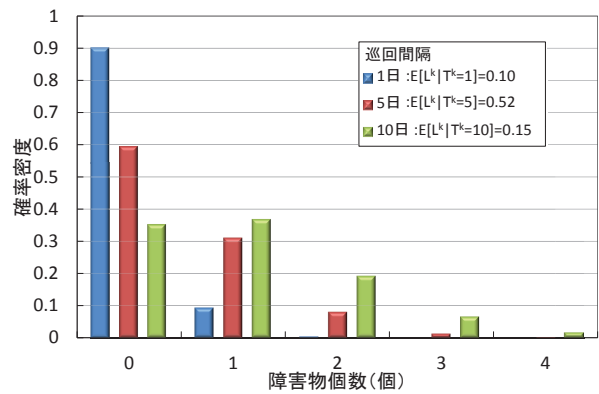


図-4 道路障害物発生確率分布(旅行速度,貨物車交通量平均)

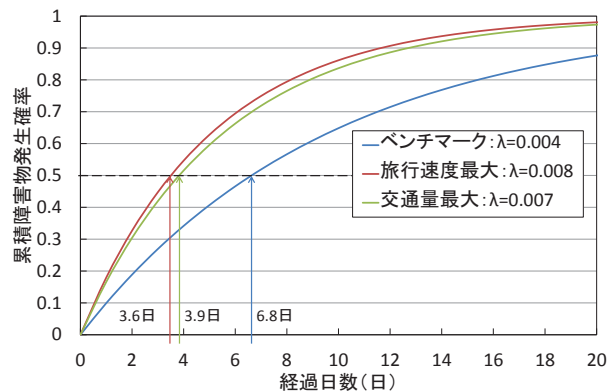


図-5 障害物累積発生確率

量ともに平均値を用いたベンチマークに相当するケース、赤色は旅行速度最大のケース、緑色は貨物車交通量最大のケースである。このとき、旅行速度、貨物車交通量それぞれの平均値は 37.7 (km/h)、6,112 (台/日)であり、最大値は 73.6 (km/h)、12,935 (台/日)であった。また同図の凡例中には、それぞれのケースのポアソン到着率も示している。また、障害物の累積発生確率が 50%に到達する時点に着目すると、ベンチマークケースで 6.8 日、旅行速度最大の道路区間で 3.6 日、貨物車交通量最大の道路区間で 3.9 日となることが読み取れる。

b) ポアソン発生モデル(苦情)

苦情発生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)、障害物発生数が特性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た。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。また、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。この

表-4 ポアソンモデルの推計結果（苦情）

		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 -7.418)	(0.531 0.971)	(0.744 2.633)
	Geweke 検定量	0.157	0.014	-0.155
対数尤度	-1619.0			
AIC	3246.0			

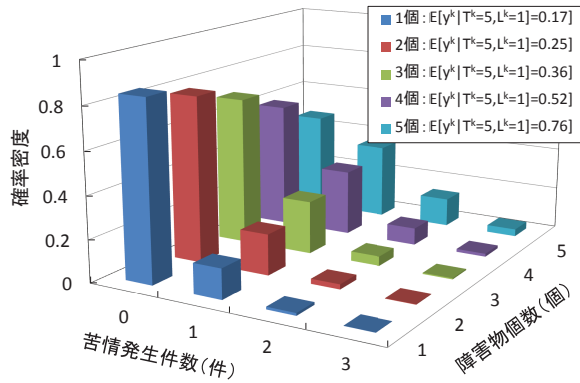


図-7 苦情発生のポアソン分布（土地区分：DID 地区）

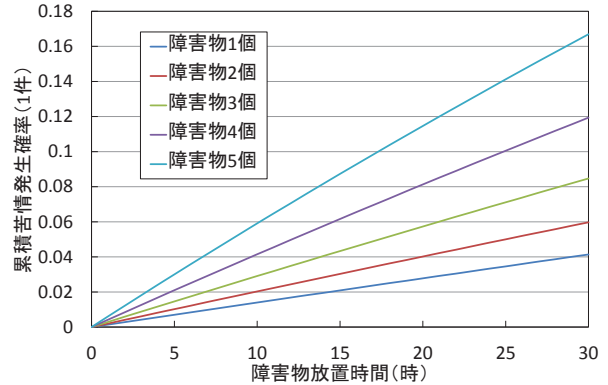


図-8 苦情の累積発生確率（土地区分：DID 地区）

ように、階層的隠れポアソンモデルを用いることにより道路障害物到着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。図-6はMCMCにより求めた各パラメータ標本である。当然ながら、苦情の未知パラメータについても、標本数は5,000となる。黒線で各パラメータの標本平均を、破線で上下限5%を示す。

表-4のパラメータ推計値の標本平均を用いて、苦情発生の確率分布を示す。苦情到着率は具体的に

$$\mu^k = \exp(-7.696 + 0.757x_1^k + 1.875x_2^k) \quad (25)$$

と表現できる。図-7に、DID地区に属する任意の道路1区間において直近の道路巡回から5日経過した時点における苦情発生分布を求めた結果を示す。同図では道路障害物1個から5個までの5ケースに対するポアソン分布を例示している。5時間経過時点という同一の時間断面であっても、障害物の発生個数の増加に応じて、ポアソン分布の形状が変化している（苦情の発生確率が増加している）ことがわかる。さらに凡例に点検間隔 T^k 、障害物発生個数 L^k を所与とした苦情発生件数 y^k の期待値 $E[y^k | T^k, L^k]$ を示す。障害物1個のときのポアソン分布の期待値は0.169件であり、障害物の増加に従って0.246, 0.358, 0.521, 0.758件と期待値も増加している。さらに、同一の道路区間を対象として、式(24)に基づいて分布関数を算出する。図-8に苦情発生件数を1件以上としたときの障害物発生個数に応じた苦情の累積発生確率を示す。障害物の増加と苦情の累

積発生確率も増加するという、これまでと同様の傾向を確認できる。

c) 潜在変数の推計

本研究で用いた階層的隠れポアソンモデルは各サンプルに対して、設定した期（図-2の局所時点）ごとに路上区間に存在する障害物個数を潜在変数を用いて表現することができる。表-5は、苦情が発生したある区間 k の n 回目の道路巡回後の期ごと（巡回間隔：1日，1期：1時間）の道路障害物個数の推移と累積障害物個数の推移を示している。例えば、1期目では障害物の個数は0個である。8期目で障害物が1個発生する。10期目で障害物が1個発生し、路上に存在する障害物は2個となる。次に16期目に苦情が発生し、その1期後には苦情が発生した障害物に対しては取り除かれ、17期以降路上に存在する障害物個数は1個となる。累積障害物個数は巡回間隔内に発生した障害物の個数を数えるので、2個である。24期には $n+1$ 回目の巡回が行われ、路上に存在する障害物が取り除かれる。

苦情が発生した区間を対象として、路上に障害物が放置された累積放置時間 S_n^k を求める。累積放置時間 S_n^k は潜在変数の推計値 $\tilde{r}_n^k = (\tilde{r}_1^k, \dots, \tilde{r}_{T_n-1}^k)$ を用いて、

$$S_n^k = \sum_{u_n=1}^{T_n-1} \tilde{r}_{u_n}^k \quad (26)$$

と表すことができる。図-9に苦情が発生した区間における障害物累積放置時間の頻度分布を示す。本ケースでは、平均累積時間は12.37時間である。同図におい

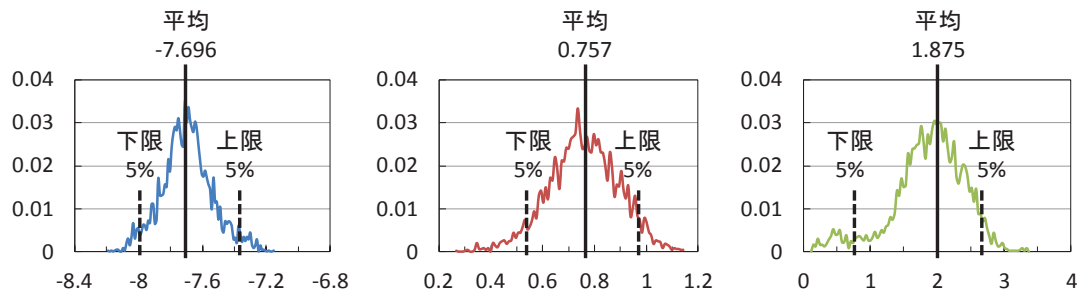


図-6 事後分布の標本結果 (サンプル数: 5,000)

表-5 苦情発生区間における潜在変数の推移

	1	...	7	8	9	10	...	16 (苦情発生)	17	...	24 (道路巡回 n+1)
道路障害物 (個)	0	...	0	1	1	2	...	2	1	...	1
累積障害物発生個数 (個)	0	...	0	1	1	2	...	2	2	...	2

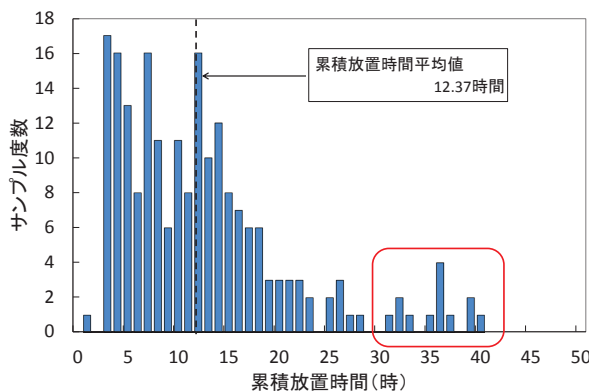


図-9 累積放置時間 (全障害物)

て、赤線で囲んだ 15 区間に着目する。これらの区間では、障害物累積放置時間が 33 時間から 43 時間と極めて長くなっている。抽出した 13 区間のうち 7 区間はバイパス等の自動車専用道路区間であり、旅行速度が平均 70.7(km/h) と大きく、総障害物個数も 2 個と多い。しかし、DID, 市街地区間は 5 区間であり、障害物が発生しても苦情が発生する確率は低いので結果的に累積放置時間が長くなっていると推測できる。つまり、以上の区間は苦情が少なく障害物が放置されやすい区間であり、障害物に起因して発生する交通事故等の重大なリスクを考えると注意が必要な区間である。

(3) 最適巡回モデルの考察

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リスクが大きな 1 区間を取り上げ、VaR 指標を分析する。対象とする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。障害物発生信頼水準を ω_α を 0.05 から 0.01 の間で変化させたときの道路障害物発生数の VaR と巡回間隔の関係を図-10 に示す。信頼水準を小さくすればするほど道路障害物発生数の VaR は大きくなり、同一のリスク水準を維持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、 $\omega_\alpha = 0.05$ と設定した際の VaR $^\alpha$ に注目すると、巡回間隔が 0.25 日, 1.95 日, 4.7 日のときに VaR $^\alpha$ がそれぞれ 1 から 2, 2 から 3, 3 から 4 へと増加している。道路管理者は VaR $^\alpha$ と巡回間隔を見比べ、任意に設定したリスク管理水準を達成する最適な巡回間隔を決定することができる。

図-11 に、苦情発生信頼水準を 0.05 から 0.01 の間で変化させたときの苦情発生数の VaR と巡回間隔の関係を示す。苦情発生信頼水準 ω_β 、巡回間隔のいずれを変化させても、苦情発生数の VaR は変化せず、VaR $^\beta = 1$ となっている。これは、本事例でとりあげた道路区間においては苦情の発生する確率がきわめて低いためであると考えられる。

b) 期待総費用

本事例では、道路区間 250 区間に対して道路巡回を実施する際、管理基本区間数は 3 であり、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地区 A, 地区 B, 地区 C とすると、地区 A に 69 区間, 地区 B に 85 区間, 地区 C に 96 区間が含まれる。表-6 に、各地区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。巡回間隔と期待総費用の関係を図-12 に示す。期待総費用は、1 日あたりの応急対応費用と 1 日あたりの道路

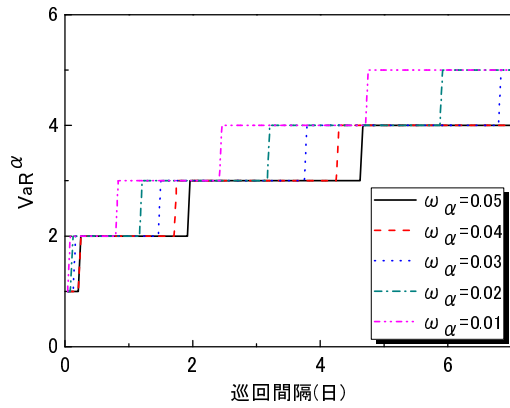


図-10 道路障害物数の VaR

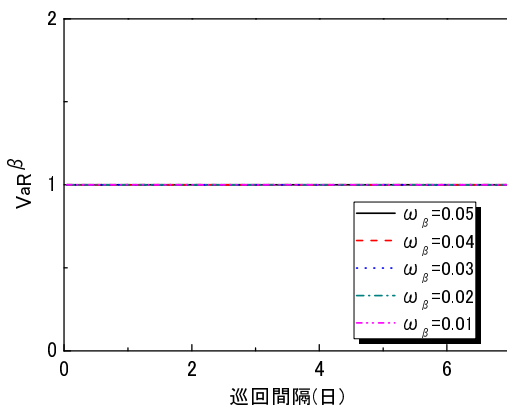


図-11 苦情発生数の VaR

巡回費用の和である。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、期待総費用のグラフは図-12のように凹形をしている。各地区に対して期待総費用を最小とするような巡回間隔は、図-12より、地区 A、地区 B に対しては巡回間隔を 2 日とし、地区 C に対しては巡回間隔を 1.75 日とすればよいことがわかる。このとき、対象とする道路区間における期待総費用は、地区 A が 80.1 千円、地区 B が 80 千円、地区 C が 97.7 千円となり、合計で、257.8 千円となる。

c) 最適巡回間隔

5.3(a), 5.3(b) で分析した VaR 指標、期待総費用に基づいて、任意のリスク信頼水準に対する最適な巡回間隔を決定する。道路巡回業務は管理基本区間ごとに実施されるため、最適な巡回間隔は各管理基本区間ご

表-6 費用設定

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

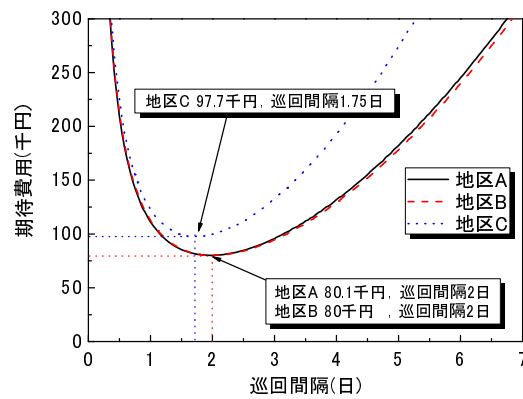


図-12 期待総費用

と異なる。したがって、以下では地区 A を取り上げ、地区 A の最低巡回間隔を決定することとする。図-13 に、 $\omega_\alpha = 0.05$ としたときの VaR^α と期待総費用の関係を示す。図-11 より、苦情発生数の VaR 指標は巡回間隔を変化させても一定値をとるため、本事例においては最適巡回間隔を決定するための VaR 指標として、道路障害物発生数の VaR 指標のみを用いている。また、VaR 指標は地区 A に含まれる全ての道路区間に対して定義されるが、ここでは、各道路区間の VaR の中で最大となる VaR を地区 A の VaR としている。図-13 から、道路巡回業務にかかる費用を増加させればさせるほど VaR^α は減少することがわかる。しかし、費用の際限なしの増加は道路巡回業務に割り当てることのできる予算の関係から現実的ではない。道路管理者は、 VaR^α 、および期待総費用の関係を見比べながら最適な巡回間隔を決定する必要がある。たとえば、 VaR^α 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、 VaR^α 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 2 日となる。このように、最適道路巡回モデルを用いて、道路管理者は、各管理基本区間に対して、任意のリスク管理水準に応じた最適な道路巡回間隔を決定することができる。

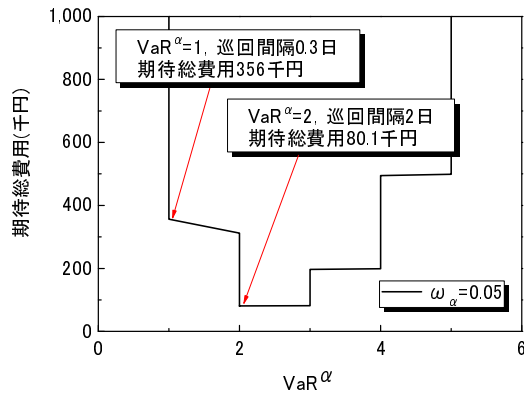


図-13 地区 A の VaR-期待総費用曲線

6. おわりに

本研究では、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な道路巡回政策を決定するために、階層的隠れポア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する最適道路巡回モデルを開発した。さらに、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方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り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る。

参考文献

- 1) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.

- 2) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2008.
- 3) 林秀和, 貝戸清之, 熊田一彦, 小林潔司: 競合的劣化ハザードモデル: 舗装ひび割れ過程への適用, 土木学会論文集 D, Vol.65, No.2, pp.143-162, 2009.
- 4) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 5) 和合肇: ベイズ計量経済分析, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその応用, 東洋経済新報社, 2005.
- 6) 伊庭幸人: 計算統計学のフロンティア-計算統計 II, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店, 2005.
- 7) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2006.
- 8) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
- 9) 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.
- 10) McNeil, J.A., Frey, R. and Embrechts, P.: *Quantitative Risk Management*, Princeton University Press, 2005.
- 11) Titterton, D.M., Smithe, A.F.M. and Makov, U.E.: *Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions*, John Wiley & Sons., 1985.
- 12) 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.
- 13) Robert, C.P., Rydén, T. and Titterton, D.M.: Bayesian inference in hidden Markov models through the reversible jump Markov chain Monte Carlo method, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol.62, pp.57-75, 2000.
- 14) Dempster, A.P., Laird, N. M. and Rubin, D. B.: Maximum likelihood from incomplete data via the EM Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol.39, pp.1-38, 1977.
- 15) 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.
- 16) Diebolt, J. and Robert, C.P.: Estimation of finite mixture distributions through Bayesian sampling, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol.56, pp.363-375, 1994.
- 17) 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.