

道路構造を考慮した交通事故の要因分析と道路区間の危険度指標

A Multiple Count Analysis for Road Traffic Accidents incorporating Structural Characters and Scoring the Risk of Occurrence

安野貴人*

Takato Yasuno

*博 (工) 株式会社ニュージェック, 技術開発グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1 丁目 12-13)

Although the road traffic accident has a decrease tendency on the aggregate value, all road units where accidents occurred frequently are not canceled in the disaggregate level. There are many accident factors of each road unit, such as the traffic volume, the driver's condition, the road structure, etc., they also overlap. Among them, the paper focuses the road structure conditions, such as a crossing and a curve and so forth, a road manager can aim at a maintenance improvement according to the potential risk for accidents. The paper proposes the technique to analyze accident factors incorporating the road structures, and also to specify the both factors in two kinds of accidents simultaneously. Furthermore, using the estimated parameters for road structures, the indices to score the danger for each road units are derived. It applies to a domestic road and shows the usefulness extracting the prioritized candidates for safety policy, and further comments.

Key Words: Traffic Accident, Structural Character, Correlated Count, Risk Scoring

キーワード: 交通事故, 構造特性, 相関カウントモデル, 危険度評点

1. はじめに

国内の道路交通事故の死者数は、モータリゼーション進展に伴い増加し、昭和 45 年に 16765 人と過去最悪となった。この年、交通安全対策基本法が制定され、交通事故件数と死者数は減少し、昭和 54 年に死者数が 8466 人と半減した。再び、交通事故死者数は増加し、昭和 63 年以降 8 年間連続 1 万人を超えた。平成 5 年以降、交通事故死者数は減少に転じ、平成 8 年全国で 1 万人を下回り、平成 16 年 7358 人となった。道路交通事故の全国総数でみると減少傾向にあるが、各地域の道路では交通事故の危険性が潜在する区間が残っている。地域の道路管理者は、交通事故の発生箇所の実状を把握し、事故要因の特定が課題となる。その事故要因をふまえ、未然に交通事故発生を予防するための効果的な交通安全対策を実施することが求められている。

地域間の比較に用いる交通事故指標は、事故件数を交通量と道路延長の積で除した 1 億台・1 キロ当たり事故率を用いる場合が多い。事故多発の傾向にある路線を抽出するには、道路延長における交通事故の集計値が使用できる。しかし、一定の予算の中で、危険度が高い道路区間を抽出して、集中的に対策を講じる場合、台・キロ当たり事故率の指標は限界がある。交通量は、すべての箇所で調査されるとは限らない。長い道路延長の中に異質な要因を有する区間が混在するが、台・キロ当たりの

事故率は、これらを集約することとなり、交通事故に起因する道路の構造的な要因を抽出することが困難になる。本稿では、道路区間を分析単位とし、各区間の道路構造を反映した交通事故の要因を特定することを試みる。

道路交通事故の主な発生要因は、運転者・歩行者の人的な要因と道路条件の構造的な要因に大きく分解される。前者は、道路管理者が直接制御できない運転者のマナーや健康状態やスピード嗜好である。一方、道路の構造的な要因は、道路管理者が設計段階から供用段階で、交通事故対策を通じて事故の要因抑制が可能である。本稿では、交通事故の要因として道路の構造的な要因に着目する。また、運転者の人的な要因は、道路管理者が観測できない異質なバイアスとして考慮する。もし、交通事故の要因を特定した結果、道路のある構造が有意な要因となる区間では、その構造的な改善が求められる。道路構造の要因は、車線数、歩道、交差点の有無、縦断勾配、平面線形等の構造条件の組み合わせによって、道路区間の危険度は異なってくると考えられる。こ中から事故の要因を特定し、それらを考慮した交通事故の危険度指標を道路区間ごとに算定することが重要な課題となる。

道路交通事故の種類は、人身事故、死亡事故、高齢者の事故など、様々な交通事故統計がある。人身事故が多い道路区間で、致死率が高いとは限らないが、同一区間で発生する人身事故と死亡事故は相互に相関関係がある場合が多い。人身事故が多くとも、死亡事故が少ない区

間では、死亡事故対策の優先度は高くないと判定される。人身事故が多く、なおかつ死亡事故も多い区間は、危険箇所として重点対策の必要性が高いと判定される。このように、2種類の交通事故の発生件数を組み合わせ、双方の相関を考慮することにより、事故発生の分布の特徴から危険度領域の分類が可能となる。また、単一種類の事故変数を対象に、それをいくつかの事故要因により説明するモデルは、十分に良好な推計精度を期待できない問題がある。同一区間に発生する異なる種類の事故発生件数の間に正の相関を考慮し、同時に推定するカウント分析は、効率の良い推定量が得られる可能性がある。

本稿では、道路構造に着目した交通事故の要因を特定し、それらの要因を考慮した危険度指標を算出し、対策優先箇所の抽出手法を提案することを目的とする。2.で、交通事故の要因特定と優先箇所の抽出問題を整理する。3.で、2種類の交通事故件数を対象とし、道路区間の構造条件を考慮した結合カウント分析の手法を提案し、その推定結果を反映した危険度指標を導出する。4.で、本手法を国内の道路に応用し、対策優先候補を抽出した結果を示す。5.で、本手法の有用性と今後の課題に言及する。

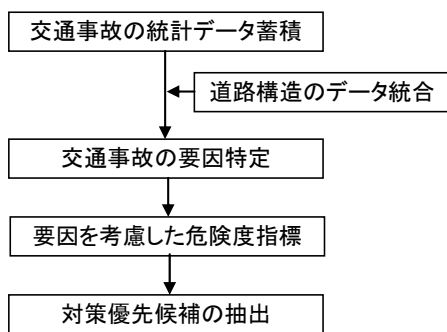


図-1 道路構造を考慮した対策区間抽出の流れ

2. 交通事故の要因特定と優先箇所の抽出問題

2.1 交通事故の要因と道路構造

図-1に、道路構造を考慮した対策区間の抽出の流れを示す。交通事故の発生履歴に関する統計データが蓄積されてきている。要因分析の道路延長単位が問題となる。要因分析の単位と事故対策の単位区間延長とを整合させる必要がある。路線単位の場合、その中に異質な特性を有する区間が混在し、事故の要因を特定し難くなる問題がある。過小に細分すると、データ整備の時間と労力が膨大となる。本稿では、延長500mを要因分析の最小単位区間とする。各区間で発生した交通事故の件数が統計データとして蓄積された状況を想定する。事故発生に関する道路の構造的な要因特定のため、カーブや交差点等の道路区間の構造条件に着目する。各単位区間の交通事故統計と道路構造のデータを相互に統合する。

道路交通事故の発生要因は、道路の設計変数や形状等の構造的な要因、速度超過等の運転者個人の人的な要因、

歩行者や二輪車等の安全意識の要因、交通利用状況の流動的な要因、高齢化や沿道条件等の社会的要因、雨天走行や冬期凍結等の自然的要因など様々な要因が考えられる。このうち、道路の構造的な要因は、当該区間のカーブや勾配の形状や車線数や歩道や交差点の有無等があげられる。道路の構造的な要因は、道路管理者が道路の設計段階から供用段階において、事故対策を施すことができる範囲内にある。交通事故の要因を特定した結果、危険度を大きくする道路構造を有する区間では、その道路構造の改善が求められる。

一方、運転者の要因は、道路管理者がいかに安全な条件を整備したとしても、運転者本人のスピード嗜好や健康状態が事故の引き金となりうる。さらに、運転者の人的要因や歩行者の安全意識は、道路管理者が直接コントロールできない外生的な要因である。交通の流動的要因や高齢化等の社会的要因や雨量や気温等の自然的要因も、同様である。本稿では、これらの間接的要因は、道路管理者が観測できない異質な誤差項として扱うこととする。

2.2 対策優先度と危険度指標

道路管理者が維持管理する道路全数を対象に、道路構造を考慮した交通事故の要因を特定できたとする。それらの要因を用いた交通事故の危険度指標を算定すると、一般に、多数の道路区間が対策の候補として列挙されると考えられる。その多くの候補の中から、限られた対策予算を有効に用いて効果的な交通事故対策を実施するため、どの道路区間から対策を実施していくかの優先順位を選定する必要がある。交通事故の統計データから、重大な交通事故が多発している道路区間に対処する必要があることは言うまでもない。交通事故が実際に発生してから事後的に交通事故対策を行う立場からは、道路構造を考慮した事故要因の特定は必要性が薄い。一方、交通事故の要因を特定した結果から、それらを考慮した危険度指標を算定すると、潜在的に交通事故の危険度が高い道路区間が得られる可能性がある。この場合、交通事故の発生がいまだ顕在化していないが、過去に発生した交通事故から特定した要因を考慮すると、交通事故の発生リスクが想定される道路区間が抽出される。このように抽出された危険な道路区間は、道路管理者が交通事故を未然に予防しようとする際に有用な情報を提供する可能性がある。交通事故が発生する前に、事前に交通事故対策を行うには、事後対策に加えた追加的な予算が必要となる。このように、道路構造を考慮した交通事故の要因特定と危険度指標の算定は、予防的な交通事故対策の科学的な理由を提供するために必要となる。

3. 道路構造を考慮した交通事故分析

3.1 交通事故の結合カウント分析

(1) 複数の交通事故の結合カウント分析

2種類の確率変数をカウントしたデータを対象とする

モデルの研究がいくつか行われている²⁾。ポアソン分布に従う2種類の従属変数が説明変数と共通の誤差で構成されるモデルが提案された。平均と分散の連立式をモーメント法で推定できるが、誤差項の共分散行列が唯一とは限らず、正定値性に関する推定量の性質に問題が残った。この他、多数の確率変数を結合した柔軟な相関構造を分析できるモデルが開発されているが、多次元の確率変数による複雑な定式化となり、推定で高度な計算が必要となる。例えば、2つの結合正規分布の異質バイアスを導入したポアソン対数正規混合モデルは、その密度関数が解析的に表現できないため、シミュレーションを基礎とせざるをえない³⁾⁴⁾。これらの2種類以上の変数を包括したモデルは複雑な定式化となり、推定上の計算効率と唯一の解に到達する探索の安定性が低下する問題がある。これらの手法は多くの外的要因を操作した際の事故発生リスクの感度分析に有用と考えられるものの、本稿の目的に照らして、交通事故の要因特定に必ずしも適しているとは考えられない。

2種類のカウント変数を対象に、その相関構造を考慮したモデルの中で、3変数削減法(Trivariate Reduction Method)は、3つの確率変数を導入し、1つの変数を共通の誤差項として扱い、簡素化できる点で操作性に優れている。2つのカウント変数と共通誤差項の確率変数が相互に独立な場合、双方のカウント変数間の相関係数を明示的に表現可能である。分析者が直接観測できない異質なバイアスを考慮し、各々の確率分布の積に非観測の異質な共通誤差項を有する混合モデルが提案されている⁵⁾。ここで、非観測の異質なバイアスは、2つのカウント変数に共通に含有される。これは、1つの異質性パラメータを明示的に含むのみで操作性に優れる。2つのカウント変数の結合密度関数は、負の2項分布の形式に解析的に表現可能である。よって、結合尤度関数を定式化でき、最尤法で推定可能となる。本稿では、同一の道路区間における2種類の交通事故のカウントデータを対象に、3変数削減法の考え方に沿って、それらが道路の構造的要因で説明されるモデルを特定化することとする。

(2) 異質な誤差項を特定化した相関カウントモデル

いま、道路管理者が維持管理する道路区間が n 単位あるとする。当該区間で発生する交通事故において、2種類の交通事故を対象とする。一つ目の種類の交通事故の発生件数を正の整数の確率変数 y_1 と表し、二つ目の種類の交通事故の発生件数を正の整数の確率変数 y_2 と表す。ポアソン分布の各々のパラメータは、

$$\lambda_1 = \exp(x_1' \alpha), \lambda_2 = \exp(x_2' \beta) \quad (1)$$

と交通事故の要因となる変数で構成される k 次元の列ベクトル x_1, x_2 によって、指数線形に特定化されるとする。

ここに、 α, β は、2種類の交通事故の要因パラメータを表し、 k 次元の列ベクトルである。

2種類の交通事故のカウント変数において、道路管理者が観測できない異質なバイアスを簡素なガンマ関数に

より表現する相関カウントモデルを仮定する。ガンマ関数に従う確率変数 ν を導入し、次の積の形で表現する。

$$y_1 \sim Poi(\lambda_1 \nu) \quad (2), \quad y_2 \sim Poi(\lambda_2 \nu) \quad (3)$$

ここで、非観測の異質なバイアスを反映した確率変数 ν は、次の密度関数を有するガンマ分布に従うと仮定する。

$$g(\nu) = \nu^{\gamma-1} \exp(-\nu) / \Gamma(\gamma), \nu > 0 \quad (4)$$

ここで、形状パラメータ γ 、スケールパラメータ1である。このとき、結合密度関数は、2変量の負の2項分布となり、次のように表される。

$$f(y_1, y_2 | x_1, x_2) = \int_0^\infty f_1(y_1 | x_1, \nu) f_2(y_2 | x_2, \nu) g(\nu) d\nu \quad (5)$$

ここで、異質なバイアスの条件付きのポアソン分布の密度関数は、それぞれ次のように表される。

$$f(y_j | x_j, \nu) = \exp(-\lambda_j \nu) (\lambda_j \nu)^{y_j} / (y_j)!, j = 1, 2 \quad (6)$$

展開して整理すると式(5)は次式に導出される(付録A.)。

$$\frac{\Gamma(y_1 + y_2 + \gamma)}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} \right)^{y_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} \right)^{y_2} \left(\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} \right)^\gamma \quad (7)$$

この混合モデルは、誤差項において異質なバイアスの形状パラメータ γ のみを含む簡素なモデルとなっている。

従って、2種類の交通事故のカウントの結合確率分布は、結合負の2項分布となる。この時、2種類の交通事故の間の相関係数は、次式となることが知られている⁸⁾。

$$\text{Cor}[y_1, y_2] = \lambda_1 \lambda_2 / \sqrt{\lambda_1^2 + \gamma \lambda_1} \sqrt{\lambda_2^2 + \gamma \lambda_2} \quad (8)$$

これは、ポアソン分布のパラメータの定義より、正でなければならない制約がある点に注意する。

(3) 結合尤度関数

結合尤度関数は、結合密度関数を用い次式で表される。

$$L = \prod_{i=1}^n f(y_{1i}, y_{2i} | x_{1i}, x_{2i}) \quad (9)$$

ここで、下付きの添字 i はサンプル番号を表す。ここで対数を取り展開すると対数尤度関数は次式に整理される。

$$\begin{aligned} \log L = & \log \Gamma(y_1 + y_2 + \gamma) - \log \Gamma(\gamma) \\ & - \log(y_1! y_2!) + y_1 \log(\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + 1)) \\ & + y_2 \log(\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + 1)) + \gamma \log(1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + 1)) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、ガンマ分布 $\Gamma(u)$ は数値計算の実行が可能である。この対数尤度関数を最大化するような α, β, γ を探索する最尤推定法によりパラメータ推定が可能である。

3.2 事故要因による危険度指標

(1) 交通事故の危険度指標

要因パラメータの推定値を用いて、交通事故の発生件数に関する期待値の推定値を算定することができる。

$$f(y_j | x_j) = \int_0^\infty f_j(y_j | x_j, \nu) g(\nu) d\nu, j = 1, 2 \quad (11)$$

ここで、式(4)(6)より、次のように展開される。

$$= \int_0^\infty \frac{\exp(-\lambda_j \nu) (\lambda_j \nu)^{y_j}}{(y_j)!} \cdot \frac{\nu^{\gamma-1} \exp(-\nu)}{\Gamma(\gamma)} d\nu \quad (12)$$

展開して整理すると式(12)は次式に導出される(付録B.)。

$$\frac{\Gamma(y_j + \gamma)}{y_j! \Gamma(\gamma)} \cdot \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_j + 1}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_j + 1}\right)^{\gamma} \quad (13)$$

このように、各区間において、2種類の交通事故に関する発生確率は負の2項分布となる。このとき、負の2項分布の期待値は、それぞれ次式に表現される(付録B.)。

$$S_1(x_{1i}) = \hat{\gamma} \cdot \hat{\lambda}_{1i}(x_{1i} | \hat{\alpha}), i = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$S_2(x_{2i}) = \hat{\gamma} \cdot \hat{\lambda}_{2i}(x_{2i} | \hat{\beta}), i = 1, \dots, n \quad (15)$$

この式に、推定したパラメータと各区間における道路構造条件を代入すると、各区間における2種類の交通事故件数に関する期待値の推定値をそれぞれ算定可能である。ポアソン分布のパラメータが正である仮定とガンマ分布関数の制約から、負の2項分布の期待値は、正の値をとる。式(14)(15)で、異質なバイアスのパラメータは、2種類の交通事故に共通である。一方、道路区間の構造条件とそれに応じて推定したパラメータは、2種類の交通事故によって異なる。この推定値は、当該区間において、交通事故がどれくらい多く発生すると期待されるかを表現したものである。したがって、式(14)(15)は、各区間における交通事故の危険度指標を意味していると解釈できる。この交通事故発生期待値が大きければ、事故発生の危険度が高いと判定することが可能である。

(2) 対策優先候補の抽出

2種類の事故の間の相関係数と各区間の危険度指標を用いて、対策優先候補の区間を抽出する進め方を示す。1)2種類の交通事故のペアを選定する、2)当該ペアに関する道路構造と非観測誤差のパラメータを推定する、3)各区間の危険度指標を算定する、4)危険度指標が大きい区間から優先候補として抽出する。道路区間のレベルで対策優先候補を抽出する手法としては、危険度が最も大きい区間から一定数を抽出する手法が考えられる。この場合、2種類の交通事故が同時に多く発生する区間や一つの交通事故に偏在して発生する区間が抽出される。また、視覚的に、グループ内における危険度指標のヒストグラムを描いて、分布の中央値と右側の極端な外れ値との適切な危険度の閾値を設定する手法がある。閾値の基準を科学的に設定する必要があるが、危険度が高い方から97%、95%、90%等の危険度指標の分位値を設定する手法⁶⁾は、道路区間の危険度を大きい方から説明することができる。たとえば、97%分位値に相当する区間は、そこで100区間走行する中で3区間の確率でしか発生しえない交通事故、あるいは、当該区間を100台が日々走行した際に3台が交通事故を起こすような危険度を意味すると解釈される。交通事故が多発する道路区間は、このような危険度指標を推定した抽出を行うまでもなく、実際の交通事故の実績値が目立つ場合が多い。交通事故を未然に防ぐ予防的な対策にあたっては、交通事故の発生がいまだ顕在化していないが、危険度指標のみが大きい値をとる道路区間に留意する必要がある。このような道路区間は、道路構造を考慮した交通事故分析により特

定された交通事故の要因となる道路構造を抱えているので、その構造改善が対策の課題となってくる。

表-2 分析する2種類の交通事故

種類1の交通事故	種類2の交通事故
人身事故(死亡除く)	死亡事故

4. 応用結果

4.1 分析の対象

国内のある地域の道路区間625単位において、過去5年間に発生した交通事故件数を分析の対象とする。単位区間の道路延長は、原則500mに統一する。表-2のように、同一区間における2種類の交通事故を分析対象とする。ここで、人身事故は、死亡事故を除いた値である。2種類の交通事故ペアについて、相関カウントモデルと危険度指標を推定する。このペアの間に、正の相関関係があるかどうかを確認するため、交通事故件数から相関係数を計算すると、相関係数は0.24である。

表-3 相関カウントモデルによる事故要因の推定結果(人身事故と死亡事故の相関を考慮)

人身事故				死亡事故			
要因パラメータ	推定結果	p値		要因パラメータ	推定結果	p値	
定数(人身事故)	α_0	0.35187	[.00]***	定数(死亡事故)	β_0	-1.75119	[.00]***
車線数	α_1	0.38462	[.00]***	歩道延長割合(%)	β_1	3.975E-03	[.13]
歩道延長割合(%)	α_2	0.01337	[.00]***	最大勾配(%)	β_2	0.38426	[.09]*
交差点密度(箇所/km)	α_3	0.02705	[.02]**	相関・尤度			
平面線形(rad/km)	α_4	-3.213E-03	[.00]***	異質性の形状	γ	1.41823	[.00]***
最大勾配(%)	α_5	0.02858	[.21]	対数尤度	-2867.8		情報量基準BIC 2900.0

表記)「*」:p<0.10で10%有意」「**」:p<0.05で5%有意」「***」:p<0.01で1%有意を表す。

4.2 推定結果

(1) パラメータ推定結果

人身事故と死亡事故の対象に、相関カウントモデルを応用し、事故要因パラメータを推定した結果を表-3に示す。人身事故の要因では、単位区間内の車線数、歩道延長割合、平面線形が1%有意となっている。その符号から、車線数が多い区間ほど、人身事故が起きやすい。車線変更や後ろからの追い越しが柔軟にできる区間では、人身事故の危険性も相対的に大きいと考えられる。歩道延長割合が大きい区間ほど、人身事故が起りやすい。歩道の割合が多い区間では、車両も歩行者も多いため、人身事故の危険性が大きいと解釈される。平面線形が小さい区間ほど、人身事故が起りやすい。蛇行する区間は注意するが、直線は速度を出しやすい理由が考えられる。つづいて、交差点密度が5%有意となっている。交差点箇所を多く含む区間ほど、事故が起りやすい。車両や歩行者等が相互に交差する回数が増えるため、人身事故の危険性も大きくなると考えられる。最大勾配は、人身事故に有意な要因となっていない。一方、死亡事故の要因では、単位区間の最大勾配が10%有意となっている。縦断方向の勾配が大きいほど、特に下り方向にて速

度を出しやすい理由が考えられる。歩道延長割合は、死亡事故に有意な要因となっていない。道路区間の異質性を表す形状パラメータは、1.418で1%有意で各区間は相互に同質な区間ではないことが認められる。

(2) 道路区間の危険度指標の推定結果

人身事故と死亡事故の相関カウントモデルにおいて推定した要因パラメータ値を用いて、625単位の道路区間に関して、人身事故の危険度指標を計算した。

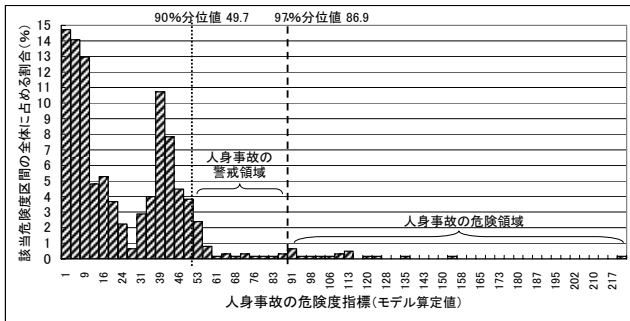


図-2 人身事故の危険度指標のヒストグラム

図-2に、人身事故の危険度指標に関するヒストグラムを示す。全体的な形状をみると、分布の中心が2つ存在し、平均1~12件の人身事故が起こりやすい最頻グループと、平均35~40件の人身事故を起こしやすい2番目に頻度が多いグループに分離されている。これらの分布の中心から乖離した極端に大きい危険度指標をとる区間が見られる。この意味で、人身事故は、右側に尾を伸ばしたヘビーテイル形状となっている。

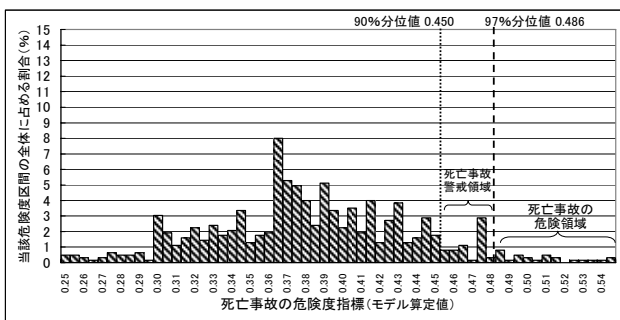


図-3 死亡事故の危険度指標のヒストグラム

図-3に、死亡事故の危険度指標に関するヒストグラムを示す。全体的な形状をみると、0.36~0.38の値を中心に、人身事故よりも平坦に分散する形状となっている。これらの分布の中心から乖離して、極端に大きい死亡事故の危険度指標をとる右側の区間が見られる。

(3) 対策優先区間の候補抽出

対策優先区間の抽出の考え方として、まず人身事故を減らし、次に事故が発生したとしても死亡事故に至らないように、対策優先区間を抽出することとする。交通事故の対策優先区間の候補抽出のために、閾値の代案を設定して危険領域と警戒領域を構成する。まず、2種類の交通事故の危険領域が重なる領域を相関危険領域として

設定する。対策優先することを判定する閾値を危険度指標の97%分位値と設定し、交通事故の危険領域を構成する。これは、100区間のうち3件の確率で起こりうる交通事故の発生する危険度を有する道路区間を意味する。さらに、副次的な警戒を判定する閾値を危険度指標の90%分位値と設定し、交通事故の警戒領域を構成する。これは、10区間のうち1件の確率でより頻繁に起こりうる交通事故が発生する危険度を有する区間を意味する。

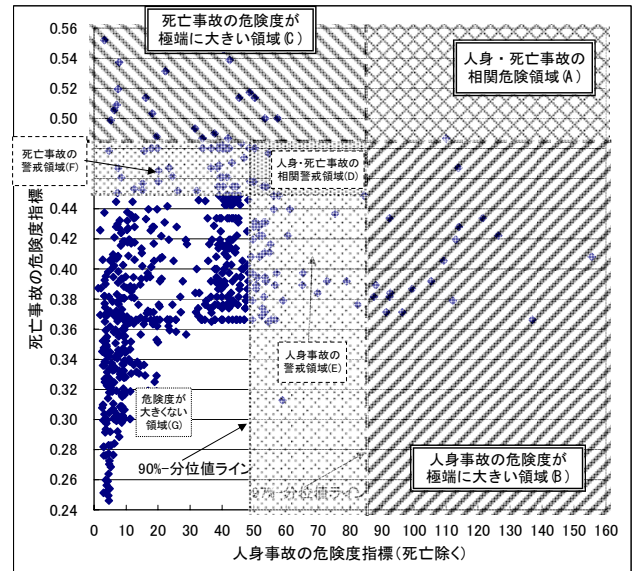


図-4 対策優先区間の抽出(人身事故と死亡事故)

図-4で、領域Aで、人身事故と死亡事故ともに危険度が大きい区間が1区間抽出される。領域Bで、人身事故の危険度が極端に大きい18区間が抽出された。領域Cで、死亡事故の危険度が極端に大きい21区間が抽出された。領域Dで、2種類の交通事故の警戒領域が重なる領域を相関警戒領域として設定する。領域Eは、人身事故の警戒領域における42区間を表す。領域Fは、死亡事故の警戒領域における36区間を表す。ただし、領域Gでは、極端に大きな危険度はないが、警戒領域に近接する区間は、次の対策候補として監視が課題である。

5. おわりに

5.1 本稿のまとめ

本稿では、道路構造を考慮した交通事故の要因を特定し、それらの要因を考慮した危険度指標を算出し、対策優先箇所を抽出する手法を提案した。2種類の交通事故の間に正の相関がある状況で、道路区間の構造条件を考慮した相関カウントモデルを導出し、推定手法を示した。本手法の特徴は、2種類の交通事故を複眼的に捉え、危険度が増幅する候補区間を抽出できる点にある。実際に、国内地域の道路に応用し、推定結果を用いた対策優先候補の抽出支援情報を示した。本稿の結果に関する限り、本手法は、道路構造を考慮した交通事故の要因特定と危

危険度指標の算定において有用であると結論づけられる。今後、多くの地域でも良好に応用できるかどうか、汎用性向上に資する分析結果を蓄積する必要がある。

5.2 今後の開発課題

本稿で提案した手法は、道路構造条件を考慮し、2種類の交通事故の危険度指標を評価するもので、双方の危険度が増幅する区間を抽出する上で有用である。交通事故の実績値を用いると、客観的な危険度指標を算定できるので、事故がすでに発生した区間を抽出したものは、事後的対策の候補情報となる。この場合の盲点は、いまだ発生していないが潜在的な危険箇所を見逃す点である。予防的対策のためには、過去の発生履歴に上がっていないが、沿道住民がヒヤリ、ハットした区間にも着目する必要がある。日常利用する歩行者や運転者に、事故に至らないが危なかった体験や事故しかけた危機感の意識について、主観的な危険意識のデータ取得が課題となる。今後、事故発生履歴データに加え、沿道住民の危険意識データを統合分析し、予防的な対策候補を抽出することが科学的かつ市民ニーズに対応した総合的判断のうえで重要であるが、この場合も、本手法が有用であると考える。これらの開発課題にも取り組んでいきたい。

謝辞：匿名査読者3名より、総合所見を通じたご唆とご意見を賜った。ここに感謝の意を表します。

付録 A. 負の2項分布の結合密度関数の導出

条件付きの結合密度関数(12)は次式に展開される。

$$= \prod_{j=1}^2 \frac{\exp(-\lambda_j v) (\lambda_j v)^{y_j}}{y_j!} \cdot \frac{v^{\gamma-1} \exp(-v)}{\Gamma(\gamma)} dv \quad (A1)$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1 v} (\lambda_1 v)^{y_1} \cdot e^{-\lambda_2 v} (\lambda_2 v)^{y_2}}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} v^{\gamma-1} e^{-v} dv \quad (A2)$$

$$= \frac{\lambda_1^{y_1} \lambda_2^{y_2}}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} \int_0^{\infty} v^{(y_1+y_2+\gamma)-1} e^{-(\lambda_1+\lambda_2+1)v} dv \quad (A3)$$

ここで $\lambda_j > 0$ である。(A3)積分項を $(\lambda_1 + \lambda_2 + 1)v = s$ と変数変換すると、積分区間は変わらない。式(A3)は、 $(\lambda_1 + \lambda_2 + 1)dv = ds$ より、次のように変換される。

$$= \frac{\lambda_1^{y_1} \lambda_2^{y_2}}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} \cdot \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + 1)} \times \int_0^{\infty} \left(\frac{s}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} \right)^{(y_1+y_2+\gamma)-1} e^{-s} ds \quad (A4)$$

ここで、ガンマ分布の定義は次式で表される。

$$\Gamma(u) = \int_0^{\infty} s^{u-1} \exp(-s) ds \quad (A5)$$

これに留意しながら(A4)を整理していく。

$$= \frac{\lambda_1^{y_1} \lambda_2^{y_2}}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} \cdot \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + 1)^{(y_1+y_2+\gamma)}} \times \int_0^{\infty} s^{(y_1+y_2+\gamma)-1} e^{-s} ds \quad (A6)$$

$$= \frac{\lambda_1^{y_1} \lambda_2^{y_2}}{y_1! y_2! \Gamma(\gamma)} \cdot \frac{\Gamma(y_1 + y_2 + \gamma)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + 1)^{(y_1+y_2+\gamma)}} \quad (A7)$$

第2項の分母におけるポアソン分布のパラメータの和について、3つの累乗に展開して整理する。このようにして、式(7)が導出される。

付録 B. 条件付きの負の2項分布の密度関数の導出

条件付きの負の2項分布の密度関数(12)を展開する。以下では、表記の便宜上、添字 j を省略表記する。

$$= \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda v} (\lambda v)^y}{y!} \cdot \frac{v^{\gamma-1} e^{-v}}{\Gamma(\gamma)} dv = \frac{\lambda^y}{y! \Gamma(\gamma)} \int_0^{\infty} v^{y+\gamma-1} e^{-v(\lambda+1)} dv \quad (B1)$$

ここで、 $\lambda > 0$ である。(B1)積分項を $(\lambda+1)v = t$ と変数変換すると、積分区間は変わらない。式(B1)は、 $(\lambda+1)dv = dt$ より、次のように変換される。

$$= \frac{\lambda^y}{y! \Gamma(\gamma)} \left(\frac{1}{\lambda+1} \right)^{y+\gamma} \int_0^{\infty} t^{y+\gamma-1} e^{-t} dt \quad (B2)$$

ここで、積分項は $\Gamma(y+\gamma)$ と表される。累乗に留意して、整理すると式(13)が導出される。ガンマ分布の性質より、 $y! = \Gamma(y+1)$ である。式(13)は、更に次式に変形される。

$$\frac{\Gamma(y+\gamma)}{\Gamma(y+1)\Gamma(\gamma)} \left(\frac{1}{1+\lambda} \right)^y \left(\frac{\lambda}{1+\lambda} \right)^y = \binom{y+\gamma+1}{y} \left(\frac{1}{1+\lambda} \right)^y \left(\frac{\lambda}{1+\lambda} \right)^y \quad (B3)$$

これは、パラメータ γ, λ を含む負の2項分布の関数形となっている。式(B3)にて、負の2項分布の平均と分散は $E[y] = \gamma \cdot \lambda$ (B4)、 $Var[y] = \gamma \cdot \lambda(1+\lambda)$ (B5) と導出される。(B4)を用いて式(14)(15)が導出される。

参考文献

- 1) 関東地方整備局甲府河川国道事務所・山梨県土木部：交通事故対策優先候補箇所の抽出（案），2005。
- 2) たとえば、Gourieroux, C., A. Monfort and A. Trognon："Pseudo Maximum Likelihood Methods：Applications to Poisson Models", *Econometrica*, 52, pp.701-720, 1984。
- 3) Munkin, M. et al.："Simulated Maximum Likelihood Estimation of Multivariate Mixed-Poisson Models with Application", *Econometrics Journal*, 2, pp.29-48, 1999。
- 4) Chib, S. and I. Jeliazkov："Marginal Likelihood from the Metropolis-Hastings Output", *Journal of the American Statistical Association*, 96, pp.270-281, 2001。
- 5) Marshall, A.W. et al.："Multivariate Distributions Generated from Mixtures of Convolution and Product Families", in *Statistical Dependence*, Block, H.W. et al.(Eds.), IMS Notes-Monograph Series, Vol.16, pp.371-393, 1990。
- 6) 安野貴人：構造ヘルスマニタリングにおける管理指標の原型と設定手法の提案，コンクリート技術シリーズ，76，第II編，pp.77-84，土木学会，2007。

(2007年8月17日受付)