

地震被害情報の逐次処理による緊急時意思決定プロセスのシミュレーション

岐阜大学大学院 学生会員 金澤伸治

岐阜大学工学部 正会員 能島暢呂・杉戸真太

1. はじめに 地震後早期に被害状況を把握することは、緊急対応を迅速・正確に行うための要件であり、被害の全貌の概略を即時推定して初動体制を確立することと、確認被害を取り込んで推定結果を更新し、精度の向上を図ることが重要となる。従来の研究^{1),2)}では、ベイズ確率の方法³⁾に基づいて、部分的な被害情報より全体の被害箇所数を逐次推定する方法と、被害発生率の逐次確率比検定に基づく逐次決定モデルを提案している。本研究では、被害発生危険度が空間的に変動する対象地域を、被害率が一樣と見なせる小区画に細分化して、個々の区画における被害予測および被害調査の推移から、意思決定を個別に行うという前提条件のもとで従来のモデルを適用し、岐阜市を対象とした逐次推定過程のシミュレーションのケーススタディーを示す。

2. 被害情報の逐次処理の概念 図1は、被害の確認・推定に基づく地震時意思決定過程をモデル化した概念図である。(1)は施設に生じた確認被害のみにより行動をおこすものであり、(4)は地震動強度や経験的判断に基づく被害発生率の即時推定のみにより行動をおこすものである。両者の特徴をうまく取り入れたものが(2)と(3)である。地震動強度情報に基づいて即時推定された被害発生率を直接利用するのではなく、時々刻々と入手される確認被害を用いて、ベイズの定理により事前分布を事後分布に更新し、その被害発生率から被害の全体像を概略的に推定するものである。(2)では、推定された被害箇所数の大小を緊急対応の意思決定の材料とするのに対し、(3)では、被害発生率の大小を緊急対応の意思決定の材料としている。

3. 被害発生率と被害箇所数の逐次推定 図2のように、全長 L_T の構造物において被害が全長にわたって一様ランダムに発生すると仮定する。この構造物の一部の長さ L_0 を調べたところ n_0 箇所の被害が発生していることが明らかになったとすると、単位長さあたりの被害発生率 λ の確率分布はガンマ分布、総被害箇所数 N_T の確率分布は負の2項分布で与えられ、その平均値 μ_N と標準偏差 σ_N は次式のようになる¹⁾。

$$\mu_N = n_0 + \frac{L_T - L_0}{L_0 + L'_0} (n_0 + n'_0 + 1) \quad \sigma_N = \frac{\sqrt{(L_T - L_0)(L_T + L'_0)(n_0 + n'_0 + 1)}}{L_0 + L'_0} \quad (1)$$

ただし L'_0 と n'_0 は、被害発生率の確率分布を規定する平均値 μ_λ と変動係数 δ_λ が与えられた場合、共役事前分布であるガンマ分布を仮定すれば、 $n'_0 = 1/\delta_\lambda^2 - 1$ 、 $L'_0 = (n'_0 + 1)/\mu_\lambda$ で求められる。

4. 被害発生率の逐次確率比検定による逐次決定過程 いま「被害発生率が λ_0 （帰無仮説 H_0 ）以下であれば緊急対応を行わず、 λ_1 （対立仮説 H_1 ）以上であれば緊急対応を行う（ $\lambda_0 < \lambda_1$ ）」という行動のルールを想定して、被害情報が蓄積されるプロセスにおける意思決定のタイミングについて考察するため、Waldによる逐次確率比検定（SPRT）⁴⁾を導入すると、調査済み長さ L_0 に対する被害確認数 n_0 の条件式を得ることができる¹⁾。

$$\frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 < n_0 < \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 \quad (2)$$

ここで、 α は仮説 H_0 が正しいのに棄却する誤り（第一種の誤り）を犯す確率（生産者危険）、 β は仮説 H_0 が正しくないのに棄却しない誤り（第二種の誤り）を犯す確率（消費者危険）である。この条件式を満たす間は決定を保留し、上限を破れば緊急対応を行い、下限を破れば緊急対応を行わないことを決定する。調査開始前 L_0 の時点で既に式(2)が満たされない場合は、即時推定の結果に基づいて、リアルタイムに意思決定を行うのが適当であると判断される。

5. 岐阜市における緊急対応のケーススタディー 岐阜市は、岐阜—宮線（M=7.3）の断層を震源として、49小学校区別に上水道管の被害予測を行っている⁵⁾。図3は被害発生率の分布を示したものである。本研究では、この被害想定結果と同一の被害発生率を用いて、被害間隔を与えて被害パターンを生成し、緊急対応意思決定のシミュレーション

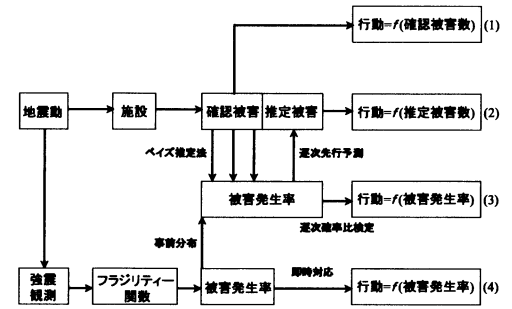


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

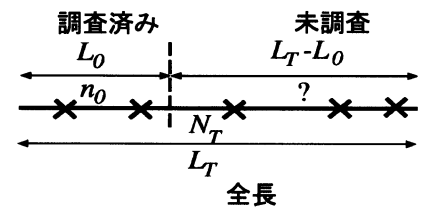


図2 確認被害に基づく被害の逐次先行予測

キーワード：地震時緊急対応、ベイズ推定法、逐次確率比検定、確認被害、被害発生率

連絡先：〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 TEL：058-294-2466

を行う。ただし岐阜県被害想定において用いられた地盤ゾーニングマップと小学校区の対応を検討し、校区内での被害発生率を一律と仮定した。事前情報 n'_0 , L'_0 については、各校区の被害発生率を μ_λ とし、変動係数 $\delta_\lambda=30\%$ として求めた。被害発生率の逐次確率比検定に用いるパラメータは、 $\lambda_0=0.50$, $\lambda_1=1.0$, $\alpha=\beta=0.10$ とした。

6. 結果と考察 被害の逐次推定過程の一例として、黒野校区をとりあげて説明する。各パラメータは、 $L_T=94$, $L'_0=9.3$, $n'_0=10.1$, $\lambda_0=0.5$, $\lambda_1=1.0$, $\alpha=\beta=0.10$ であり、モンテカルロ法を用いて、被害発生率 $\lambda=1.20$ として被害パターンを生成した結果、実際の被害箇所数 N_T は 132 となった。図 4(a) の実線は被害発生率の事前分布を表し、他の線は時々刻々と蓄積される確認被害数を取り入れて逐次更新した $L_0=10\sim90$ での被害発生率の事後分布の推移を表している。被害情報の蓄積によって分散が減少し、真値に近づく様子が確認できる。図 4(b) の横軸は調査済みの距離 L_0 、縦軸は被害箇所数を表し、点線は各段階での確認被害数 n_0 を示す。ベイズ推定法による逐次推定結果は $\mu_N \pm \sigma_N$ をエラーバー付きで示している。また図中の 2 直線は、条件式 (2) の上下限値を表している。ベイズ推定法による推定被害箇所数は、実被害数の概略を捉え、被害の確認情報の入手に伴う変動が小さいことがわかる。また、「緊急対応を行う」という決定が調査開始前に行われている。最後に、全校区における意思決定内容を図 5 に示す。(a) は意思決定結果を色の濃淡で表し、(b) と (c) は「緊急対応を行う」および「緊急対応を行わない」という決定が下された時点での、全長 L_T に対する調査長さをパーセント表示した頻度分布である。「緊急対応を行う」、「緊急対応を行わない」という決定がされている校区は、それぞれ 36 校区、10 校区である。そのうち、調査開始前に決定されている校区は 27 校区、5 校区となっており、このような場合には、地震動強度のみから緊急対応の有無を決定できるケースであることを示している。また、意思決定が「保留」されたのは 2 校区であった。

7. おわりに 本研究では、被害発生率に関する即時推定を確認情報の蓄積に応じて逐次更新し、被害の全体を概略推定するとともに、逐次確率比検定により判断を下すタイミングを検討する意思決定についてモデル化されたものを示し、そのモデルを用いて、岐阜—宮線を想定した場合の岐阜市内の上水道管の意思決定過程のシミュレーションを行った。被害発生率を一律とみなせるようなエリア分割方法や、種々のパラメータの合理的な設定方法など、検討を要する問題が多く残されているため、今後の課題としたい。

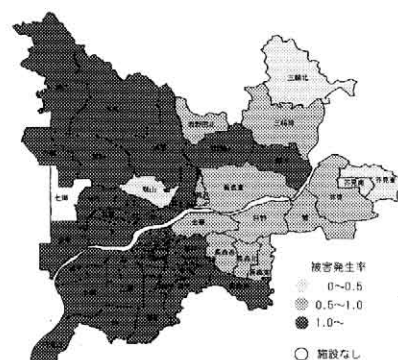
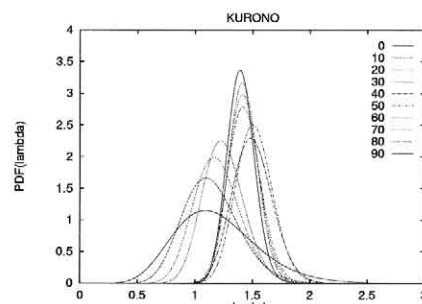
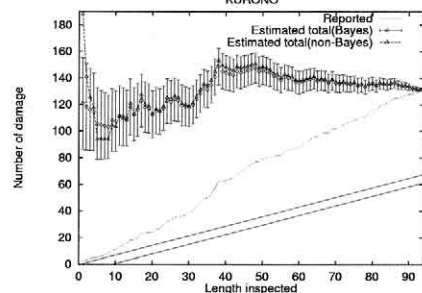


図 3 上水道管の被害発生率分布

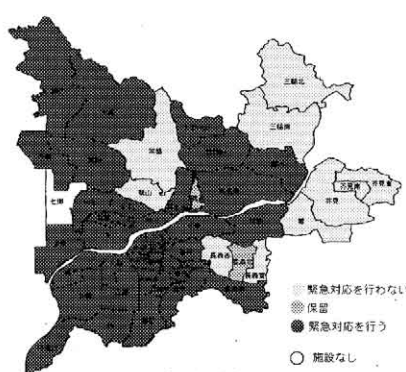


(a) 被害発生率の逐次推定

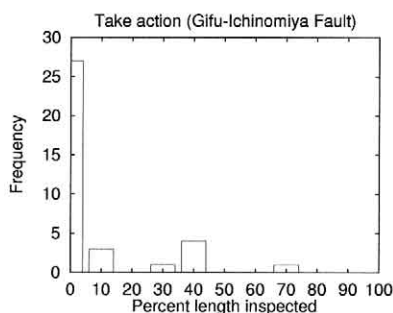


(b) 緊急対応意思決定過程

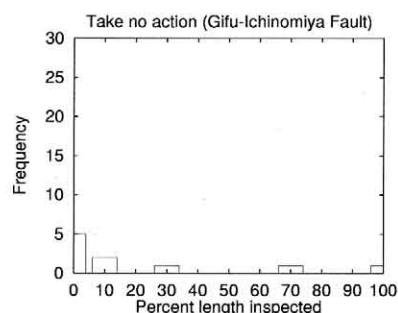
図 4 黒野校区における上水道管の逐次推定過程



(a) 意思決定結果



(b) 緊急対応を行う場合の調査長さ (%) の頻度分布



(c) 緊急対応を行わない場合の調査長さ (%) の頻度分布

図 5 岐阜—宮線を想定した場合の上水道管に関する意思決定

【参考文献】1) 能島暢呂：ベイズ推定に基づく被害の逐次推定に関する考察，第 18 回日本自然災害学会学術講演会，pp.49-50，1999.10. 2) 能島暢呂・杉戸真太：被害情報の逐次処理による地震時意思決定過程のシミュレーション，地域安全学会第 9 回研究発表会，地域安全学会梗概集 No.9，pp.52-55，1999.11. 3) Ang, A.H-S and Tang, W.H. (伊藤學・亀田弘行共訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1977. 4) 三根久・河合一：信頼性・保全性の数理，朝倉書店，pp.70-89，1982. 5) 岐阜市：平成 9 年度岐阜市防災アセスメント調査報告書，1998.3.