

# 地震動情報と実被害情報の統合処理に基づく広域被害分布の早期把握

岐阜大学 正会員 能島暢呂・杉戸真太  
パブリックコンサルタント 正会員 金澤伸治

1. はじめに 地震発生後の迅速・正確な被害把握は、被害拡大を軽減するための要件である。筆者らはこれまで、地震動情報とフラジリティー関数に基づく被害推定を出発点として、部分的な実被害情報によりこれを更新し、被害の全体像を逐次推定するモデルを提案した<sup>1)</sup>。本研究では、逐次確率比検定 (SPRT) による逐次決定過程モデルを加えて、大被害地域を早期に特定して緊急対応を実施することを支援するモデルを提案する。なお、線的・面的施設を対象としたモデルについては文献<sup>2)</sup>で既報であり、ここでは、建物のような可付番的な施設を対象としたモデルに拡張した。

## 2. 被害の逐次推定手法と逐次決定過程の定式化

### 2.1 被害情報の逐次処理の概念

図1は、地震動情報と実被害情報の統合処理による被害推定の逐次更新と、これに基づく意思決定過程の概念図である。強震観測網により地震動強度情報が得られると、フラジリティー関数を介して被害推定が行われる。本研究ではこれをベイズ確率の方法における事前情報（「地震発生前」との混同を避けるため、調査開始前の「事前情報」を「即時情報」と表現する）として扱う。時々刻々と入手される被害の確認情報を用いて事前分布を事後分布に更新し、被害の全体像を逐次先行予測するとともに、逐次確率比検定を適用して緊急対応の意思決定に役立てることを狙いとしている。

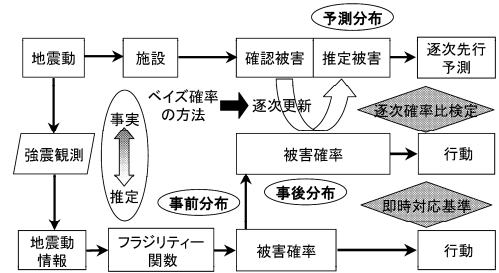


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

### 2.2 被害箇所数の逐次推定手法の定式化

図2のように、被害区分を  $K$  段階（例えば  $K=3$  で、 $k=1$ :全壊  $\times$ ,  $k=2$ :半壊  $\Delta$ ,  $k=3$ :無被害  $\circ$ ）として、全要素数  $M_T$  の構造物群において被害が全要素にわたって一様・独立・ランダムに発生すると仮定し、被害区分  $k(=1, \dots, K)$  の被害発生数  $n_k$  が被害確率  $p_k$  の多項分布に従うものとする。このとき、全体のうち一部の要素  $M_0$  を調査したところ、被害箇所数の内訳が  $n_{0k}$  個であったとして、被害箇所数を逐次推定する問題を考える。

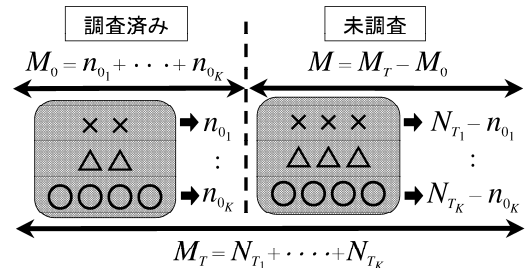


図2 確認被害に基づく被害の逐次先行予測

調査開始前の被害確率の事前分布として、多項分布の共役分布であるディリクレ分布を用いると、要素  $M_0$  あたり  $n_{0k}$  の被害情報が得られた後の被害確率  $p_k$  の事後分布は、ディリクレ分布で得られる。この確率密度関数において、変数  $p_k$  の平均値  $\mu'_{p_k}$  および標準偏差  $\sigma'_{p_k}$  は次式で与えられる。

$$\mu'_{p_k} = \frac{n_{0k} + n'_{0k} + 1}{M_0 + M'_0 + K} \quad \sigma'_{p_k} = \sqrt{\frac{(M_0 + M'_0 - n_{0k} - n'_{0k} + K - 1)(n_{0k} + n'_{0k} + 1)}{(M_0 + M'_0 + K)^2(M_0 + M'_0 + K + 1)}} \quad (1)$$

ここに  $M'_0$  と  $n'_{0k}$  は「仮設的事前標本」と呼ばれ、初期被害推定が「要素  $M'_0$  あたり  $n'_{0k}$  箇所の被害が予想される」という形で表わされたものである。要素数  $M_T$  の構造物群の被害発生数が  $n_{T_k}$  となる確率の予測分布は、多項分布とディリクレ分布の混合分布としてディリクレ多項分布で得られる。従って、総被害発生数  $n_{T_k}$  の平均値  $\mu'_{n_{T_k}}$  および標準偏差  $\sigma'_{n_{T_k}}$  は、式(1)を用いて次式で与えられる。

$$\mu'_{n_{T_k}} = n_{0k} + \mu'_{p_k}(M_T - M_0) \quad \sigma'_{n_{T_k}} = \sigma'_{p_k} \sqrt{(M_T - M_0)(M_T + M'_0 + K)} \quad (2)$$

### 2.3 逐次確率比検定による逐次決定過程の定式化

「被害確率  $p_k$  が  $p_s$  以下（帰無仮説  $H_0$ ）なら緊急対応を行わず、 $p_f$  以上（対立仮説  $H_1$ ）なら緊急対応を行う」という行動のルールを設定し、要素被害の逐次検査に基づく逐次確率比検定 (SPRT) を導入する。 $M_0$  の要素を調査した段階での被害発生数を  $n_0$  として、確率  $p$  の事後分布より、次式の尤度比

$$R_p = \left(\frac{p_f}{p_s}\right)^{n_0 + n'_0} \left(\frac{1 - p_f}{1 - p_s}\right)^{M_0 + M'_0 - n_0 - n'_0 + K - 2} \quad (3)$$

を求め、 $\frac{\beta}{1 - \alpha} < R_p < \frac{1 - \beta}{\alpha}$  を満たす間は決定を保留、 $R_p$  が上限を破れば仮説  $H_1$  を採用、下限を破れば仮説  $H_0$  を採用する。ただし、 $\alpha$  は仮説  $H_0$  が正しいのに棄却する誤りを犯す確率、 $\beta$  は仮説  $H_1$  が正しくないのに棄却しない誤りを犯す確率である。式を整理すると、 $M_0$  に対する  $n_0$  の条件式が得られ、調査状況に応じた意思決定がモデル化される。

$$\frac{(M_0 + M'_0 + K - 2) \log \frac{1 - p_s}{1 - p_f} + \log \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\log \frac{p_f(1 - p_s)}{p_s(1 - p_f)}} - n'_0 < n_0 < \frac{(M_0 + M'_0 + K - 2) \log \frac{1 - p_s}{1 - p_f} + \log \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\log \frac{p_f(1 - p_s)}{p_s(1 - p_f)}} - n'_0 \quad (4)$$

キーワード：リアルタイム地震防災システム、強震観測、被害調査、緊急対応、意思決定支援

連絡先：(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学工学部, TEL:058-293-2416, E-mail: nojima@cive.gifu-u.ac.jp)

3. ケーススタディ

3.1 前提条件と使用データ 兵庫県南部地震における芦屋市を対象としたケーススタディを示す。被害区分は  $K=3(k=1:全壊, k=2:半壊, k=3:無被害)$  とした。即時情報である地震動情報としては、関西地震観測研究協議会により神戸市東灘区の本山第一小学校で観測された計測震度 6.1 を、芦屋市全域の代表震度として採用した。 fragility関数は文献<sup>3)</sup>のデータを用いた。被害確率の事前分布における不確定性を考慮するため、半壊確率  $\mu_{p_2}$  の変動係数  $\delta_{p_2} = 60\%$  としてディリクレ分布で推定した。実被害情報については、建設省建築研究所による建物被害データ<sup>4)</sup>より、低層独立住宅に関するデータを用いた。被害情報の入手パターンは町単位の被害データを標本空間としてモンテカルロ法によるランダム・サンプリングにより作成した。緊急対応の判断基準となる全壊確率は  $p_s=0.1$  および  $p_f=0.2$  とし、許容誤り確率は、 $\alpha=\beta=0.05$  を採用した。

3.2 被害推定の逐次更新の例 楠町(芦屋市東部の国道2号線沿い)に関する結果を示す。楠町での推定震度は 6.4 で、低層独立住宅の全棟数  $M_T=196$  のうち全壊  $n_{0_1}=45$  棟(全壊率 23.0%)という大被害を受けた。図3は全壊被害の確認・逐次推定過程で、横軸は調査済み棟数  $M_0$ 、縦軸は全壊棟数を表す。ステップ状の点線は被害情報の入手パターンである。不規則な変動を示す1本の実線は、式(2)の平均値  $\mu'_{N_{T_1}}$ 、これを挟む2本の破線は  $\mu'_{N_{T_1}} \pm \sigma'_{N_{T_1}}$ 、平行する2本の実線は条件式(4)の上下限値を表す。全壊棟数の即時推定は過小評価となっているが、早い段階でその傾向は是正され、 $M_0=37$  で「緊急対応あり」と決定されている。図4は三角座標系で表示した被害確率の更新過程である。事前分布 ( $M_0=0$ ) は全壊率 3%付近のピークに集中しているが、意思決定時点 ( $M_0=37$ ) では全壊率が 20%を超えることがほぼ確実となっている。全数調査終了時 ( $M_0=196$ ) には、実態に近いところに分布が集中している。

3.3 芦屋市の49町に対する結果 芦屋市の49町に適用した意思決定結果についてのまとめを示す。表1に示すように意思決定結果の内訳は、「緊急対応あり」28町、「決定保留」2町、「緊急対応なし」19町であった。概ね全壊率に適合した良好な結果が得られた。意思決定結果の町単位の分布を図5(a)に示すように、全壊率の大小に応じた適切な判断がなされ、被害甚大地域には緊急対応が行われる結果となっている。図5(b)に意思決定時の調査棟数と全壊率の関係を示す。全壊率が10%を大きく下回るか20%を大きく上回る場合には、意思決定が迅速な傾向にある。反面、全壊率が判定基準の境界値付近の値(10~20%)である場合には、多くの調査を要する。

4. おわりに 本研究では、地震動情報に基づく被害推定と実被害情報を統合処理することによって、推定結果を逐次更新し、被害の早期把握と迅速・正確な緊急対応を支援する数理モデルを提案した。上記以外の数値計算例として、町単位での詳細な震度を利用できる場合についても検討を行ったところ、意思決定までの調査棟数がより少なく、迅速かつ正確な判断が可能となることが明らかとなっている。地震直後の初期被害推定と実被害の間には、ある程度の食い違いが生じることは避けられない。様々な被害情報の統合処理による推定更新が、重要な役割を果たすことが期待される。参考文献 1) 金澤伸治・能島暢呂・杉戸真太・清水浩二：実被害情報の逐次処理による地震被害のリアルタイム推定モデル，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1433-1436，2001.8。 2) 能島暢呂・杉戸真太・金澤伸治：被害情報の逐次処理による地震時緊急対応の意思決定支援モデル，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.129-142，2001.7。 3) 山口直也・山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.325-336，1999.1。 4) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，1996。

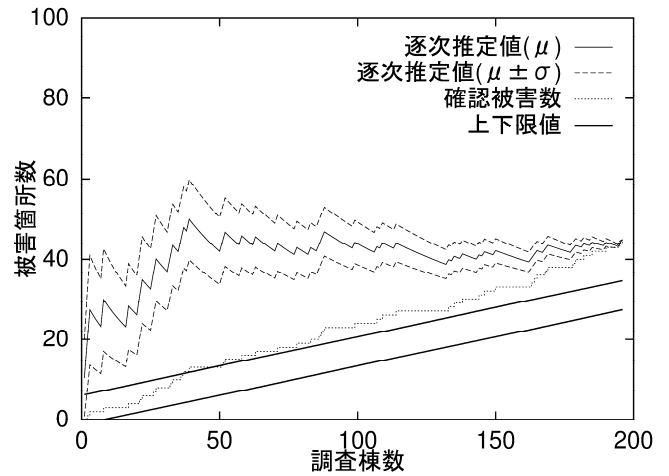


図3 全壊被害の確認・逐次推定過程(楠町)

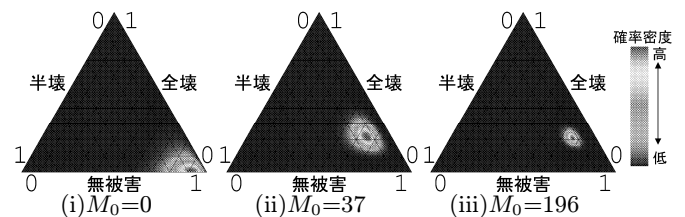
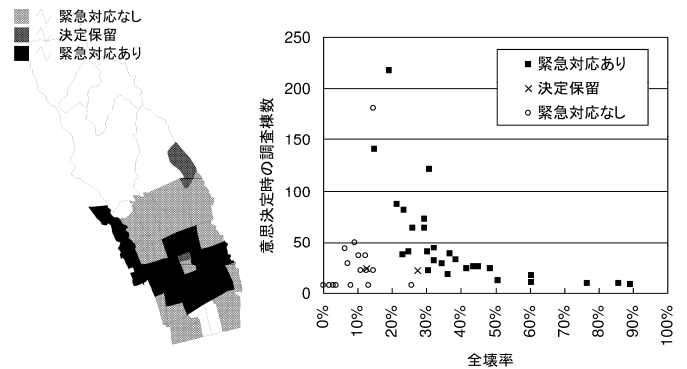


図4 被害確率(ディリクレ分布)の更新過程(楠町)

表1 芦屋市49町における全壊率と意思決定結果

全壊率区分	緊急対応あり	決定保留	緊急対応なし	計
$0 \leq p_1 \leq 0.1$	0	0	11	11
$0.1 < p_1 < 0.2$	2	1	7	10
$0.2 \leq p_1$	26	1	1	28
計	28	2	19	49



(a) 町単位の分布

(b) 全壊率と調査棟数

図5 芦屋市49町における意思決定結果