

## 被害推定の逐次更新機能を有する緊急対応の 意思決定支援シミュレータの開発

### Development of a Decision Support Simulator for Emergency Response Based on Sequential Damage Estimation

能島 暢呂<sup>1</sup>

Nobuoto NOJIMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>岐阜大学工学部 社会基盤工学科  
Department of Civil Engineering, Gifu University

In post-earthquake emergency, decision makers are often involved in a trade-off between rapidness and preciseness of important actions. To best balance these two requisites, a decision support simulator has been developed on the basis of two different sources of damage information: real-time damage assessment and actual damage information. Damage estimates are updated in a sequential manner following Bayesian updating theory. SPRT(Sequential probability ratio test)-based algorithm provides a rational basis for adequate action policies. Numerical examples demonstrate the effective procedures of the implemented algorithms. Total damage can be outlined in terms of probability distributions and their central values. The hardest-hit areas in need of prioritized relief can be identified.

**Key Words :** *post-earthquake emergency response, decision support simulator, sequential damage estimation, damage investigation, Bayes' theorem, prioritization of emergency response*

#### 1. はじめに

地震発生直後の緊急対応に要求されるのは、迅速かつ正確な判断と行動によって被害の拡大を防止・軽減することである。早期被害把握を目的として、様々な地震被害推定システムが開発され、実務で活用されている。こうしたシステムでは、地震動推定や被害関数などに関する様々な不確定要因のため、被害推定のばらつきは避けられない。したがって推定値が被害の実態から乖離しているような場合においても、軌道修正しながら柔軟な対応を可能とするのが理想的である。

ところが従来のシステムでは、被害推定値は確定的に与えられ、実被害情報を取り込んで推定を逐次更新してゆく機能を備えていない。即時的な調査行動開始あるいは、施設・設備の緊急制御のように一度限りの目的のためには有効とはいえ、被害の全貌を把握するのに、依然として確認情報の蓄積を待たねばならないとすれば、結果的には判断の遅れをまねくことになる。

一方、危機管理の基本の一つに「最悪に備える」ことが挙げられる<sup>1)</sup>。目標とすべき「最悪レベル」を設定するのは容易なことではない。根拠もなく極度の悪条件を想定したところで、その可能性はきわめて低いし、実効性のある対策行動に結びつかなければそれは単なる精神目標に過ぎない。

以上より、震後対応の場面において「最悪」とはいえないまでも、考える限りの可能性を想定し、合理的に対応するための要件は、次の3点にまとめられよう。

- (1) 被害推定がばらつくことを前提に、その不確定性を定量化することによって推定幅を客観的に規定し、被害の概略把握を行うこと。
- (2) 時々刻々と得られる被害情報を統合処理し、被害推定を逐次更新することによって、精度向上を図ること。
- (3) 迅速性と正確性のバランスに配慮して、災害対応を合理的に行うことができるように意思決定を支援すること。

こうした要件を満たすシステムの開発を目的として提案された枠組みの一例を図1に示す<sup>2)</sup>。まずはじめに、地震動情報と被害関数を用いて初期被害推定を行う。その結果を確定値ではなく確率分布で表し、ベイズ確率の方法<sup>3),4)</sup>における事前分布として扱う。さらに被害の確認情報を用いて事後分布に逐次更新し、被害の全体像を逐次先行予測する。その過程で逐次確率比検定を適用して緊急対応に関する行動の代替案を提示する、というものである。

本研究では、上記に示したような枠組みのもとで、震度分布推定～初期被害推定～実被害情報の統合処理～被害推定・意思決定の逐次更新～推定被害集計までの一連の流れを実行できる、新しいタイプのシミュレータを開発した。

開発にあたっては、都道府県～市町村レベルの自治体における震後対応の意思決定支援を念頭に置き、建物被害を推定対象に定めて、図1の基本アルゴリズム<sup>2)</sup>に加えて、推定被害集計の機能追加や意思決定基準の多様化な

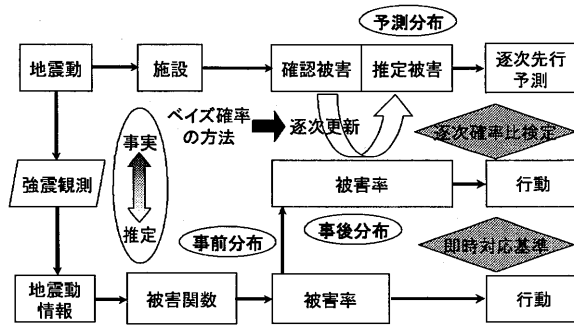


図1 被害情報の統合処理による意思決定の枠組み<sup>2)</sup>を修正

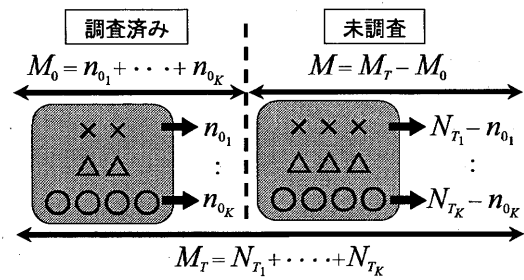


図2 確認被害と推定被害を表す変数<sup>2)</sup>

どの拡張を行ってシステムに実装した。また推定結果の可視化のためGIS機能やパネル表示機能を組み込んだ。さらに、各種パラメータ設定のためのユーザー・インターフェース環境を構築し、使用環境や使用目的に合わせてシミュレータのチューニングができるようにした。

以下、2.と3.では、シミュレータをつかさどるパラメータ群の説明のため、被害推定の逐次更新と集計に関する基本アルゴリズム<sup>2)</sup>および拡張アルゴリズムの概要を示す。4.ではシミュレーション試行事例を示し、被害推定の逐次更新、緊急対応の優先地域の抽出、各種パラメータの影響、被害集計のばらつき評価、などに関する総合的な考察を行う。

## 2. 被害推定の逐次更新と集計のアルゴリズム

### (1) 建物被害棟数の確率分布

ある最小評価単位（メッシュや町丁目）の中に、 $M$ 棟の建物群があり、建物の被害区分を $K$ 段階（例えば $K=3$ で、 $k=1$ :全壊 $\times$ 、 $k=2$ :半壊 $\Delta$ 、 $k=3$ :無被害 $\circ$ )とする。被害が確率 $\mathbf{p} = \{p_k | k=1, \dots, K\}$ に従って、全要素にわたって一様かつランダムに発生する場合、被害区分 $k(k=1, \dots, K)$ ごとの被害数 $\mathbf{n} = \{n_k | k=1, \dots, K\}$ は、次式の多項分布に従う。

$$P(\mathbf{n} | M, \mathbf{p}) = M! \prod_{k=1}^K \frac{p_k^{n_k}}{n_k!} \quad \text{ただし、} \quad M = \sum_{k=1}^K n_k \quad [1]$$

### (2) 被害関数による建物被害率の事前分布

式[1]の $p_k$ を被害率を表す確率変数と考える。地震直後の段階においては、地震動情報と被害関数に基づいて被害率が推定される。これを確定値ではなく確率変数として扱うために、一旦「 $M'_0$ 棟あたり $n'_{0k}$ 棟の被害が予想される」という意味を付与したパラメータに変換して確率分布の母数とする。これは「仮設的事前標本<sup>3)</sup>」と呼ばれるものであり、被害関数の推定精度が高いほど、すなわち初期推定の確信度が高いほど、分母にあたる $M'_0$ を大きな値に設定する。調査開始前の被害率 $p_k$ の事前分布としては、式[1]の多項分布の共役分布であるディリクレ分布（多変量ベータ分布ともよばれる）

$$f_p(\mathbf{p} | M'_0, \mathbf{n}'_0) = \Gamma(M'_0 + K) \prod_{k=1}^K \frac{p_k^{n'_{0k}}}{\Gamma(n'_{0k} + 1)} \quad [2]$$

とすることによって、次項に示すように、確率分布の更新がパラメータの更新のみの操作に簡略化される。

### (3) 被害調査開始後の建物被害率の事後分布

図2のように、全棟数 $M_T$ のうち一部の要素 $M_0 (< M_T)$ を調査したところ、被害の内訳が $n_{0k}$ 棟であったという実被害情報が得られたとして、被害率の推定値を更新する。この場合、被害率 $p_k$ の事後分布は、次式のディリクレ分布で得られる。

$$f'_p(\mathbf{p} | M_0, M'_0, \mathbf{n}_0, \mathbf{n}'_0) = \Gamma(M_0 + M'_0 + K) \prod_{k=1}^K \frac{p_k^{n_{0k} + n'_{0k}}}{\Gamma(n_{0k} + n'_{0k} + 1)} \quad [3]$$

式[2]と式[3]の違いは、 $M'_0$ が $M_0 + M'_0$ に、 $n'_{0k}$ が $n_{0k} + n'_{0k}$ に更新された点のみである。被害関数による初期被害推定と、被害調査による実被害情報との統合処理は、このように簡単なパラメータ処理だけで行われる。この確率密度関数において、変数 $p_k$ の平均値 $\mu'_{p_k}$ と標準偏差 $\sigma'_{p_k}$ は次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$\mu'_{p_k} = \frac{n_{0k} + n'_{0k} + 1}{M_0 + M'_0 + K} \quad [4]$$

$$\sigma'_{p_k} = \sqrt{\frac{(M_0 + M'_0 - n_{0k} - n'_{0k} + K - 1)(n_{0k} + n'_{0k} + 1)}{(M_0 + M'_0 + K)^2 (n_{0k} + n'_{0k} + 1)}} \quad [5]$$

### (4) 建物被害棟数の予測分布

全棟数 $M_T$ の建物群の被害棟数が $n_{Tk}$ となる確率分布は、式[1]の多項分布と式[3]の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。

$$P(\mathbf{n} | M, M_0, M'_0, \mathbf{n}_0, \mathbf{n}'_0) = \frac{\prod_{k=1}^K \binom{n_k + n_{0k} + n'_{0k}}{n_k}}{\binom{M + M_0 + M'_0 + K - 1}{M}} \quad [6]$$

これは式[1]の母数 $p_k$ の不確実性を考慮したものであり、一般に「予測分布<sup>4)</sup>」と呼ばれる。総被害棟数 $n_{Tk}$ の平均値 $\mu'_{n_{Tk}}$ と標準偏差 $\sigma'_{n_{Tk}}$ は次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$\mu'_{n_{Tk}} = n_{0k} + \mu'_{p_k} (M_T - M_0) \quad [7]$$

$$\sigma'_{n_{Tk}} = \sigma'_{p_k} \sqrt{(M_T - M_0)(M_T + M'_0 + K)} \quad [8]$$

### (5) 建物被害棟数の集計

メッシュあるいは町丁目（以下では、単にメッシュと表記）などの最小評価単位（添字 $i$ で識別）で求められた被害棟数を平均値 $\mu_i$ と標準偏差 $\sigma_i$ と表し、これら市

区町村単位（添字  $l$  で識別）の推定値  $\mu_l$  と  $\sigma_l$ ，ならびに，県全体の推定値  $\mu_{pref}$  と  $\sigma_{pref}$  に集計する．集計のための一般式は次式の通りである．

$$\mu_l = \sum_{i \in l} \mu_i \quad [9]$$

$$\sigma_l = \sqrt{\sum_{i \in l} \sigma_i^2 + \sum_{i \in l, j \in l, i \neq j} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad [10]$$

$$\mu_{pref} = \sum_l \mu_l \quad [11]$$

$$\sigma_{pref} = \sqrt{\sum_l \sigma_l^2 + \sum_{l, m, l \neq m} \rho_{lm} \sigma_l \sigma_m} \quad [12]$$

ここで， $\rho_{ij}$  はメッシュ  $i$  と  $j$  の被害推定の相関係数， $\rho_{lm}$  は市町村  $l$  と  $m$  の被害推定の相関係数である．市町村の推定値の標準偏差  $\sigma_l$  ならびに県全体の推定値の標準偏差  $\sigma_{pref}$  は，相関係数が正の大きな値をとるほど大きくなり，無相関や負相関の場合は小さくなる．

しかしながら，メッシュ相互あるいは市町村相互の相関係数をすべてのペアに対して定めることは困難であり現実的ではない．ポートフォリオ地震リスク分析においては，予想損失額の総額の標準偏差  $\sigma_T$  を評価する際に，完全相関と無相関を仮定した結果に  $(1-w):w$  の重みを付けて加重平均する方法がとられる<sup>5)</sup>．

$$\sigma_T = (1-w) \sum_i \sigma_i + w \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} \quad [13]$$

シミュレータでは，二段階よりなる被害集計において，メッシュから市町村への集計に関して一定値  $\rho_{muni} \equiv \rho_{ij}$  とし，同様に，市町村から県全体への集計に関して一定値  $\rho_{pref} \equiv \rho_{lm}$  として，両者を可変パラメータとする．

### 3. 緊急対応の意思決定のアルゴリズム

#### (1) 全壊率に関する周辺分布

地震時には様々な被害が同時多発するので，限りある人的・物的資源を有効活用するには，被害状況に応じて優先付けする必要がある．その判断基準としては，人的被害や必要支援量との関係が深い全壊率が最適と考えられる．全壊率が低ければ当該地域での自律的対応も可能であろうが，全壊率が高くなるほど多くの外的支援を要するからである．

そこでまず，式[3]のディリクレ分布および式[6]のディリクレ多項分布を，着目する被害区分である全壊 ( $k=1$ ) に関して周辺化して次元化する．全壊に関するパラメータ  $n_{01}$  および  $n'_{01}$  を，簡単のため改めて  $n_0$  および  $n'_0$  と書くと，全壊率の周辺確率密度関数を表すベータ分布は次式で与えられる．

$$f_p(p | M_0, M'_0, n_0, n'_0) = \frac{\Gamma(M_0 + M'_0 + K)}{\Gamma(n_0 + n_0 + 1) \Gamma(M_0 + M'_0 - n_0 - n'_0 + K - 1)} p^{n_0 + n'_0} (1-p)^{M_0 + M'_0 - n_0 - n'_0 + K - 2} \quad [14]$$

また，全壊棟数の周辺確率関数を表すベータ二項分布は次式で与えられる<sup>補註(1)</sup>．

$$P(n | M, M_0, M'_0, n_0, n'_0) = \frac{\binom{n+n_0+n'_0}{n} \binom{M+M_0+M'_0-n-n_0-n'_0+K-2}{M-n}}{\binom{M+M_0+M'_0+K-1}{M}} \quad [15]$$

シミュレータでは，被害推定値を式[4][5][7][8]のように平均値と標準偏差で表すが，初期段階では推定値のばらつきが大きく，分布の歪みが大きくなることもあるため，分布形状も示すことが望ましい．ディリクレ分布およびディリクレ多項分布は多次元分布であるため図示しにくい，式[14][15]のように周辺化すれば容易に図示できる．また，平均値，最頻値，中央値，任意パーセントイル値の出力も容易に行えるという利点もある．

#### (2) 逐次確率比検定による意思決定

いま「全壊率が  $p_f$  以上なら緊急対応を優先し， $p_s$  以下なら緊急対応を優先しない」という行動規範を設定し，逐次確率比検定(SPRT)を導入する．まず  $M_0$  棟の建物を調査した段階での全壊棟数を  $n_0$  として，式[14]より全壊率の尤度比

$$R_p = \frac{f_p(p_f | M_0, M'_0, n_0, n'_0)}{f_p(p_s | M_0, M'_0, n_0, n'_0)} = \left(\frac{p_f}{p_s}\right)^{n_0+n'_0} \left(\frac{1-p_f}{1-p_s}\right)^{M_0+M'_0-n_0-n'_0+K-2} \quad [16]$$

を求める．そしてこの値が

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < R_p < \frac{1-\beta}{\alpha} \quad [17]$$

を満たす間は「調査継続」， $R_p$  が上限を破れば「緊急対応を優先する」，下限を破れば「緊急対応を優先しない」と判断する<sup>2)</sup>．ただし  $\alpha$  は，優先する必要がないところを優先すると判断する誤りを犯す確率， $\beta$  は優先すべきところを優先しないと判断する誤りを犯す確率である．迅速性より正確性を重視したい場合に  $\alpha$  と  $\beta$  を低く設定すれば慎重な判断となる．逆に，正確性より迅速性を重視したければ  $\alpha$  と  $\beta$  を上限 50% までの範囲で高く設定すれば大胆な判断となる．

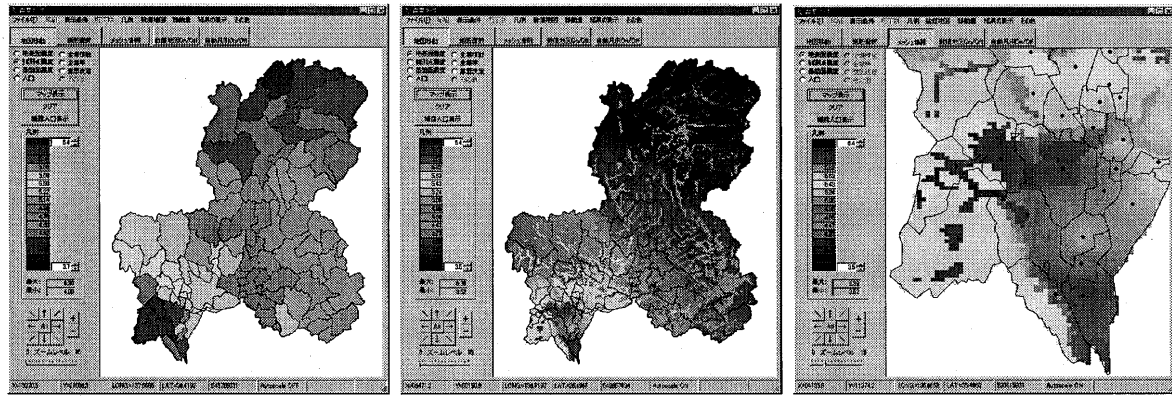
このような緊急対応の意思決定は，選挙の開票速報に例えられよう．候補者が実績豊富で前評判が高く，出口調査の結果が良好なら，当選の可能性は高い．そして開票が始まると，得票率が高ければ，開票率が低い時点でも「当選確実」となることが多い．

地震直後に初期被害推定が行われ，被害率の見当をつけておけば，被害調査の早い段階で（場合によっては調査開始前の段階で即時的に）緊急対応を優先すべき対象を抽出することができるのである．

#### (3) 逐次確率比検定における様々な判断基準

全壊率は相対的指標であるが，全壊棟数のような絶対的指標，すなわち被害総量そのものが意味を持ち，これに基づく判断を求められる場面も考えられる．この場合，「全壊棟数が  $n_f$  以上なら緊急対応を優先し， $n_s$  以下なら緊急対応を優先しない」という行動規範を設け，式[15]を用いた尤度比

$$R_p = \frac{P(n_f | M_0, M'_0, n_0, n'_0)}{P(n_s | M_0, M'_0, n_0, n'_0)} \quad [18]$$



(a) 各市町村の観測点計測震度 (最大 6.30, 最小 4.00) (b) 地表面の推定計測震度 (最大 6.38, 最小 3.52) (c) 地表面の推定計測震度 (最大 6.38, 最小 3.52)

図3 想定関ヶ原-養老断層系地震 (M=7.7) を想定した場合の推定計測震度分布

による意思決定基準を導入すればよい。

さらに、全壊率や全壊棟数の上限基準値 ( $p_f$  ならびに  $n_f$ ) 以上の確率と下限基準値 ( $p_s$  ならびに  $n_s$ ) 以下の確率を用いた確率比

$$R_p = \frac{P(p \geq p_f)}{P(p \leq p_s)} = \frac{\int_{p_f}^1 f_p(p | M_0, M'_0, n_0, n'_0) dp}{\int_0^{p_s} f_p(p | M_0, M'_0, n_0, n'_0) dp} \quad [19]$$

$$R_p = \frac{P(n \geq n_f)}{P(n \leq n_s)} = \frac{\sum_{n=n_f}^{M_T} P(n | M_0, M'_0, n_0, n'_0)}{\sum_{n=0}^{n_s} P(n | M_0, M'_0, n_0, n'_0)} \quad [20]$$

に基づく意思決定基準も導入可能である。ここで、上下限値を等値すると、パーセンタイル値に基づいて行う判断と実質的に等価になる。

#### 4. 被害推定と意思決定のシミュレーション

本研究では、岐阜県内の木造建物を対象として、震度分布推定～推定被害集計の一連の流れを実行できるシミュレータを開発した。任意の地震を想定したデモンストレーションが可能であるが、本章では、想定関ヶ原-養老断層系地震 (マグニチュード: M=7.7, 震源: 東経 136.5183度, 北緯 35.3497度, 深さ 16km, 岐阜県南西部の三重県との県境付近) を想定地震としてシミュレーションを試行する。その手順は以下のとおりである。

- (i) 震度情報ネットワークからの震度情報の受信
- (ii) 各観測点における工学的基盤レベルでの震度推定
- (iii) 各メッシュの工学的基盤面での震度の補間推定
- (iv) 各メッシュにおける表層地盤での震度推定
- (v) 各メッシュにおける初期被害推定と意思決定
- (vi) 全域における初期被害推定と意思決定
- (vii) 市町村単位・県全体における初期被害集計
- (viii) 各メッシュにおける実被害情報の収集
- (ix) 実被害情報との統合処理による逐次更新
- (x) (viii)～(ix)の繰り返し

ただしここで「メッシュ」とは、2分の1地域メッシュ (約500m四方) のことであり、シミュレータでは一貫してこれを最小評価単位としている。

上記のうち(i)～(iv)については文献<sup>6)</sup>に示されたサブシ

ステムを用いたため、ここでは詳細を省略して下記(1)に結果のみ示す。ここでは(v)～(x)を中心に、下記(2)～(6)に記述する。

##### (1) 市町村観測震度に基づく推定震度分布

図3(a)は想定関ヶ原-養老断層系地震による各市町村ごとの観測点計測震度の設定値である<sup>補注(2)</sup>。図3(b)はこれに基づいて地表面の計測震度をメッシュ単位で補間推定した結果であり、震源付近の広い範囲で震度6弱以上 (黄～橙色) の揺れとなっている。その範囲の拡大図を図3(c)に示す。一部では震度6強以上 (濃橙～赤色) となっている。

##### (2) 各メッシュにおける初期被害推定と意思決定

任意のメッシュを選択すると図4に示すパネルが表示される。最上段の「メッシュ属性」の欄には、メッシュコード、メッシュ人口、工学的基盤面震度、地表面震度などが表示され、「建物属性」には耐震性区分ごとの棟数が表示されている。

木造建物の被害予測に関しては、「岐阜県東海地震等被害想定調査報告書」<sup>7)</sup>の手法に従った。建築年代と屋根の重量種別の組み合わせに応じて、耐震性の低い順に A, B, C, Dの4ランクにグループ分けされ、それぞれについて、全壊および半壊の被害関数が設定されている。「被害関数」の欄には、地震直後の段階で被害関数から算出した被害率  $\mu'_{pk}$  を、 $M'_0$  および  $n'_{0k}$  にパラメータ化したものが表示されている。 $M'_0$  は可変であるが、被害関数まわりの原データのばらつきを分析した検討結果を踏まえて、今回のシミュレーションでは  $M'_0 = 10$  を採用した。この値が小さ過ぎると初期被害推定のばらつきが過大となり、大き過ぎると実被害情報による更新が遅くなることに注意が必要である。なお  $n'_{0k}$  は、 $n'_{0k} = \mu'_{pk} (M'_0 + K) - 1$  により求められる。

その下段には、推定被害率および推定被害棟数 (平均値±標準偏差) が表示されるが、地震直後の段階では、実被害情報を含まない初期推定結果となっている。このパネルでは、実被害情報を入力して被害推定を逐次更新することも可能である。

最下段は、緊急対応の意思決定結果を示している。3. で述べた意思決定の基準値  $p_f$  および  $p_s$  を大きく設定す

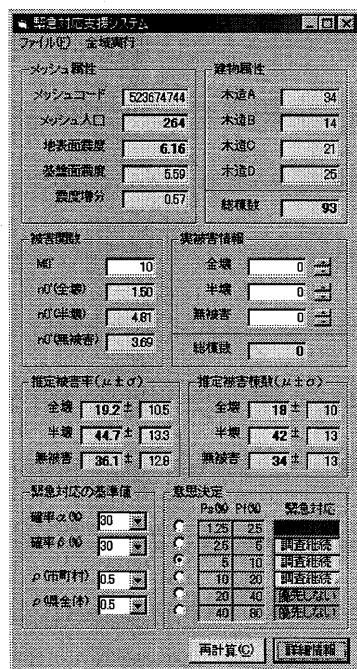


図4 メッシュ単位の建物被害と緊急対応の意思決定

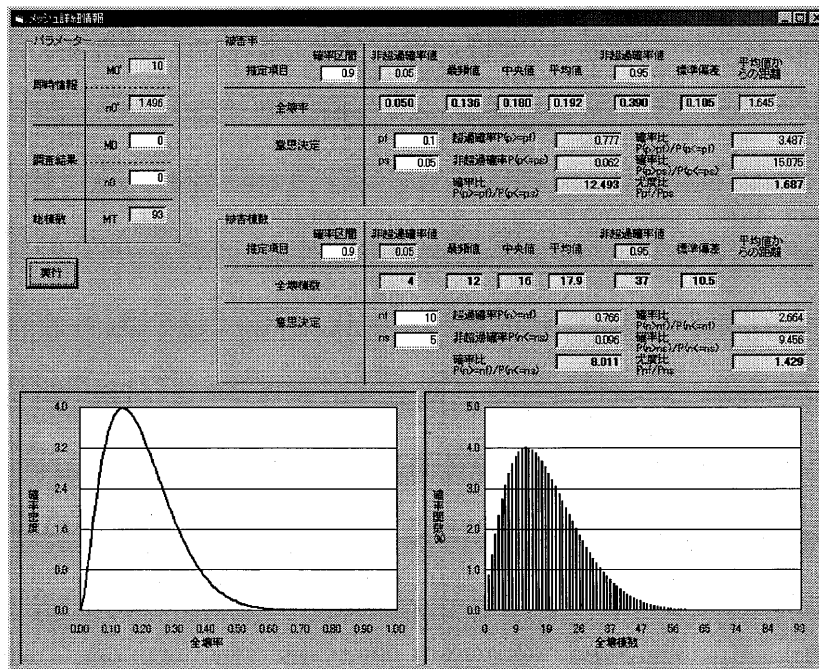


図5 メッシュ単位の全壊率・全壊棟数の確率分布と代表値の表示 (下段左: ベータ分布, 下段右: ベータ二項分布)

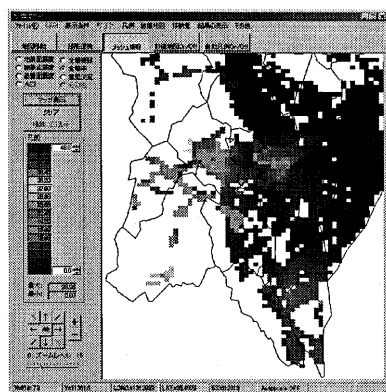


図6 全壊率の初期推定 (平均値) (最大 39.0%)

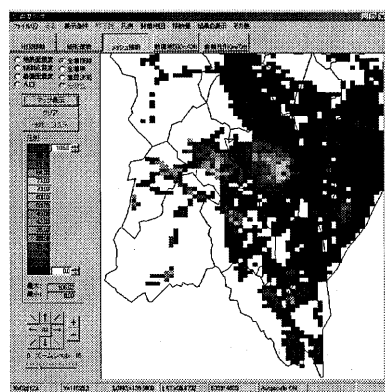


図7 全壊棟数の初期推定 (平均値) (最大 105 棟)

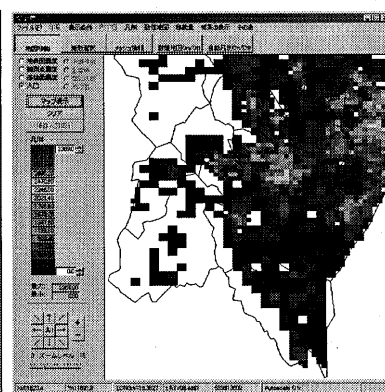


図8 人口分布 (最大 3,369 人)

ると、激甚被害を受けたメッシュのみが限定的に抽出される。逆に基準値を小さく設定すると、被害の可能性のあるメッシュが広く抽出される。本シミュレータでは図4のパネルに示すように、全壊率1.25%から80%までの7種類の閾値を取り上げ、5種類のペアについて可変的に結果を表示している。図4の表示例では、 $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%)$ では「緊急対応を優先する」、 $(p_s, p_f) = (10\%, 20\%)$ までは「調査継続」、それ以上では「緊急対応を優先しない」となっている。これらのパラメータについては、地震の規模、被災地の状況および災害対応能力、緊急対応の目的などに応じて適宜選択したうえで結果を参照することとなる。

図5は、周辺分布をとることで次元化されたメッシュ単位の全壊率や全壊棟数の確率分布やその代表値などをまとめて表示するパネルである。図4と同一のメッシュのものを示しており全棟数は93棟である。初期被害推定の不確定性をみるため、ここでは代表値を列挙する。

全壊率はベータ分布に従うが、図5左下に示すように、

ばらつきが大きく正の歪を持つ。平均値19.2%、標準偏差10.5%、最頻値13.6%、中央値18%、90%信頼区間に対応する5パーセンタイル値5%、95パーセンタイル値39%となっている。 $M'_0 = 10$ とした場合に見込まれるばらつきの程度が視覚的に理解されよう。

全壊棟数はベータ二項分布に従い、図5右下に示すように全壊率と同様に正の歪を持つ。平均値17.9棟、標準偏差10.5棟、最頻値12棟、中央値16棟、5パーセンタイル値4棟、95パーセンタイル値37棟と求められている。

意思決定基準の指標については、全壊率、全壊棟数ともに、確率比を用いた場合の方が尤度比を用いた場合よりもコントラストが強調されている。

$(p_s, p_f) = (5\%, 10\%)$  : 尤度比 1.69 確率比 12.49

$(n_s, n_f) = (5\text{棟}, 10\text{棟})$  : 尤度比 1.43 確率比 8.01

本研究では、全壊率の尤度比を用いた結果を示すこととするが、目的によっては、他の3種の意思決定基準を選択する余地もあろう。

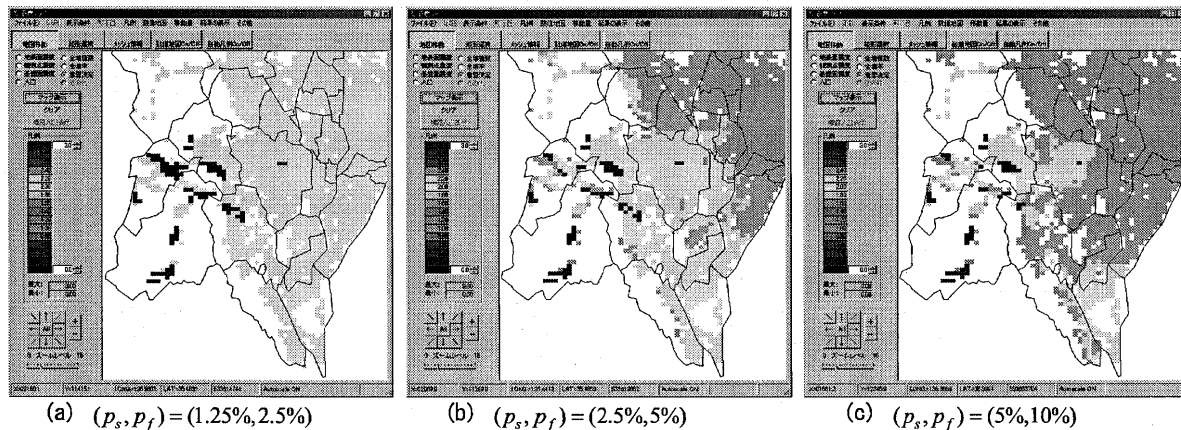


図9 建物被害の初期被害推定に基づく緊急の対応意思決定結果 ( $\alpha = \beta = 30\%$ )

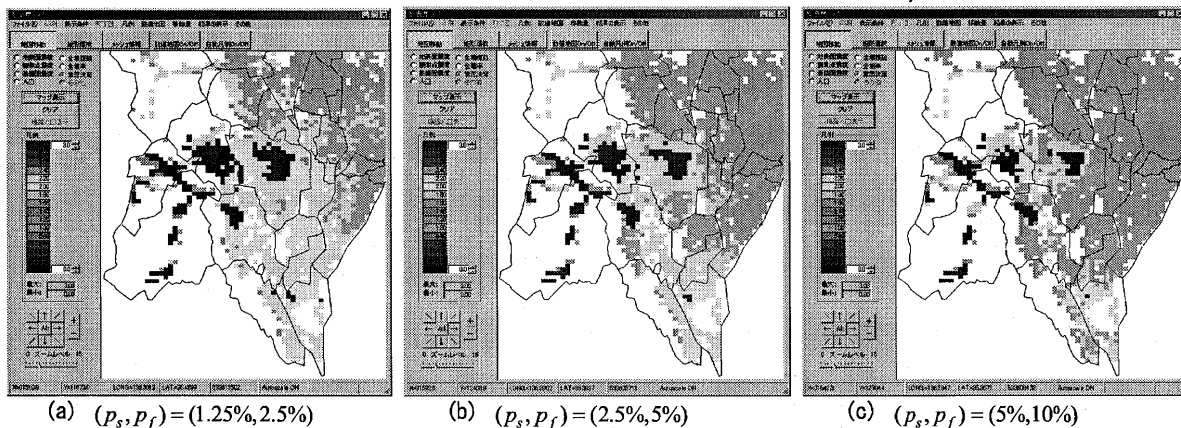


図10 更新された意思決定結果 ( $\alpha = \beta = 30\%$ , ほぼ初期推定通りで調査進捗 10%)

(3) 全域における初期被害推定と意思決定

メッシュ単位の評価を全域で実行し、面的な評価を行う。図6は、図3(c)と同じ領域について、推定計測震度に基づく建物全壊率の初期推定結果(平均値)を示したものである。図の西側に全壊率が極めて高いメッシュが点在するほか、図中央付近の領域に広がっている。図7は全壊棟数の初期推定結果(平均値)である。図8に示す人口分布と図6の全壊率の重なり合いの効果で、全壊棟数の多いメッシュが現れている。

次に、緊急対応の意思決定については、 $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%)$ ,  $(2.5\%, 5\%)$ ,  $(5\%, 10\%)$ の3ケースで比較する。許容誤り確率については、 $\alpha = \beta = 30\%$ としたが、この設定の妥当性については、(5)のパラメータスタディで検証する。

地震直後の初期被害推定に基づく緊急対応の意思決定結果を図9に示す。緊急対応を優先する地域は「赤」、優先しない地域は「青」、調査継続として判断を保留する場合は「黄」の色分けで表示している。

まず  $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%)$  のケースにおいては、ほとんど「調査継続」となっており、初期推定のみによる判断は保留されているが、一部のメッシュでは即時的に「緊急対応を優先する」と判断されている。この時点で「緊急対応を優先しない」と判断されたメッシュは皆無である。一方、 $(p_s, p_f) = (2.5\%, 5\%)$  のケースでは、表示領域の北東部の広い地域で「緊急対応を優先しない」と

判断されている。この傾向は  $(p_s, p_f) = (5\%, 10\%)$  のケースではいっそう強く、「緊急対応を優先する」および「調査継続」と判断されたメッシュは、かなり狭い範囲に限定されていることがわかる。

(4) 実被害情報との統合処理による逐次更新

推定震度分布に基づく初期被害推定が出されると、次に、詳細な被害情報の収集が行われる。ここでは簡単のため、対象地域全域で偏りなく一律に調査が進められると仮定して、得られた実被害情報と初期被害推定とを統合処理する過程をシミュレートする<sup>補註(3)</sup>。比較のため、以下の3パターンの結果を示して考察する。

a) 実被害情報の入手によって逐次判明する被害程度が、初期被害推定とほぼ同程度で推移するパターン

被害調査が全体の10%まで進捗し、全壊率の初期推定値と同程度の割合で全壊被害が報告されるパターンを想定する。統合処理による緊急対応意思決定の更新結果を図10に示す。図9において「調査継続」となっていた地域のうち、震源から遠距離の北東部を中心とした広範囲で「緊急対応を優先しない」に転じている。実被害情報との統合処理によって被害推定の確からしさが向上したことを表している。逆に、全壊率が高い地域では「緊急対応を優先する」に転じていることがわかる。

b) 実被害情報の入手によって逐次判明する被害程度が、初期被害推定を下回る被害程度で推移するパターン

被害調査が全体の10%まで進捗し、全壊率の初期推定値よりも約30%低い割合で全壊被害が報告されるパター

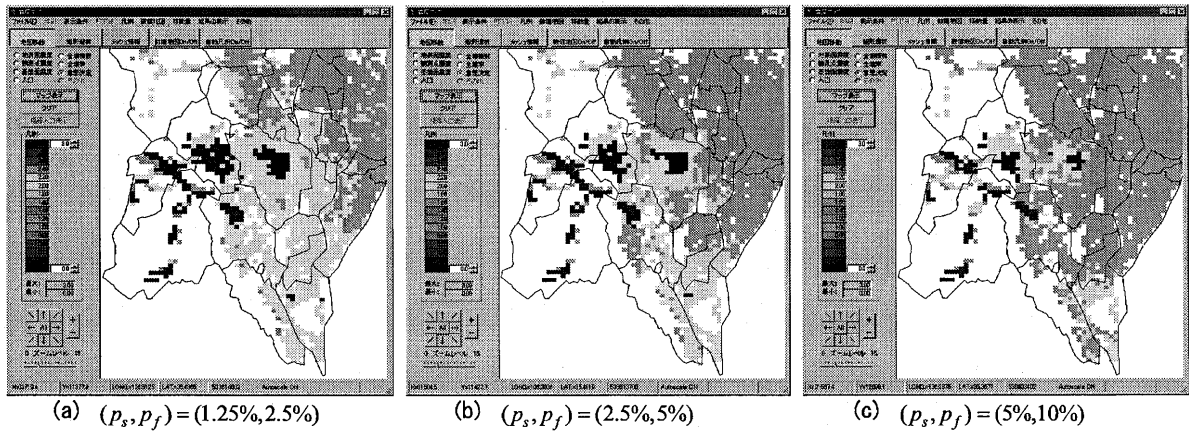


図11 更新された意思決定結果 ( $\alpha = \beta = 30\%$ , 実被害が約30%少なめで調査進捗10%)

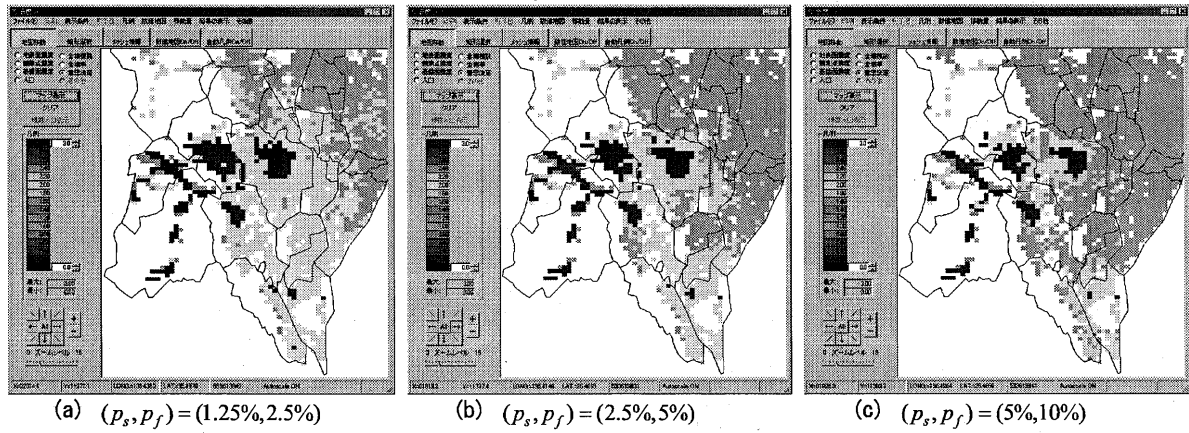


図12 更新された意思決定結果 ( $\alpha = \beta = 30\%$ , 実被害が約30%多めで調査進捗10%)

ンを想定する。図11は緊急対応意思決定の更新結果であり、図10と比較すると、全般的に「緊急対応を優先」が少なく「緊急対応を優先しない」が多くなっており、被害の実態が反映されている。

c) 実被害情報の入手によって逐次判明する被害程度が、

初期被害推定を上回る被害程度で推移するパターン

被害調査が全体の10%まで進捗し、b)とは逆に、全壊率の初期推定値よりも約30%高い割合で全壊被害が報告されるパターンを想定する。図12は緊急対応意思決定の更新結果であり、図10および図11と比較すると、「緊急対応を優先」が多く「緊急対応を優先しない」が少なくなっており、被害の実態が反映されている。

(5) 意思決定基準のパラメータが結果に及ぼす影響

全壊率の基準値のペア  $(p_s, p_f)$  が意思決定結果に及ぼす影響については、図9～11に示したとおりであるが、ここでは、許容誤り確率を表す  $\alpha$  と  $\beta$  が及ぼす影響とあわせて考察する。

建物数が0ではない岐阜県内の計8,841メッシュにおける意思決定結果が、調査進捗に伴ってどう変化したかを比較する。ここでは上記a)のパターン、すなわち実被害情報が初期被害推定とほぼ同程度の場合を対象とした。

まず図13は、 $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%)$  とした結果である。図13 (a)に示す  $\alpha = \beta = 20\%$  のケースでは、調査がある程度進捗しても「調査継続」が続き、慎重な態度を貫くあまり、意思決定が遅くなる傾向を示している。これは

「拙速」の逆にあたる「巧遅<sup>1)</sup>」のパターンであるといえる。

逆に図13 (c)に示すように  $\alpha = \beta = 40\%$  とすると、初期推定の段階で、多くのメッシュで「優先しない」という決定がなされている。しかし調査進捗に伴って、一旦「優先しない」とされたメッシュが「調査継続」もしくは「優先する」に逆転する傾向がみられる。これは「拙速」な判断であったことを意味しており、災害対応のうえでは回避すべき事態である。

一方、図13 (b)に示す  $\alpha = \beta = 30\%$  のケースでは、図10(a)のみたように、進捗10%の段階で「優先しない」が急増するものの、その後に意思決定結果が逆転することはない。「調査継続」の一部が「優先する」に転じ、その残りが「優先しない」となっており、結果として「調査継続」が漸減するという形となっている。これは、グレーゾーンに対して注意を払い続けることを意味しており、冒頭に述べた「最悪に備える」という観点からも望ましい傾向である。

次に図14は、 $(p_s, p_f) = (2.5\%, 5\%)$  とした結果である。

図13と比較すると、 $\alpha = \beta = 20\%$  のケースで、進捗10～40%の間における「優先しない」の増加傾向が顕著である点が異なっている。ただし意思決定に多くの被害調査を要している点には変わりはない。また  $\alpha = \beta = 40\%$  のケースでは、図13と同様に意思決定結果の逆転が認められる。 $\alpha = \beta = 30\%$  のケースでは、初期推定の段階で「優先しない」が大多数を占めており、図9(b)のみたよ

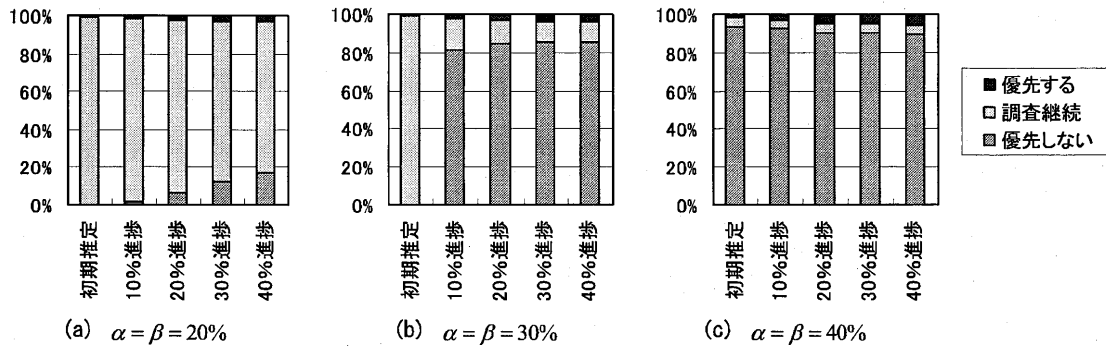


図 13 許容誤り確率のパラメータ設定が及ぼす影響 ( $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%)$ , ほぼ初期推定通り)

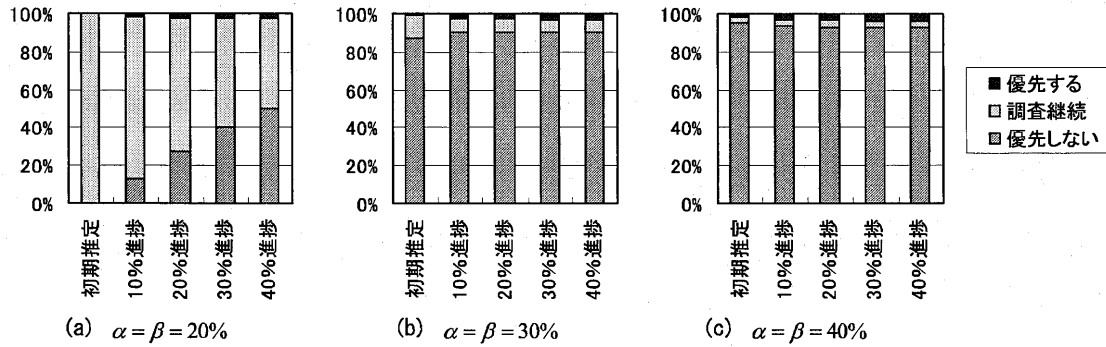


図 14 許容誤り確率のパラメータ設定が及ぼす影響 ( $(p_s, p_f) = (2.5\%, 5\%)$ , ほぼ初期推定通り)

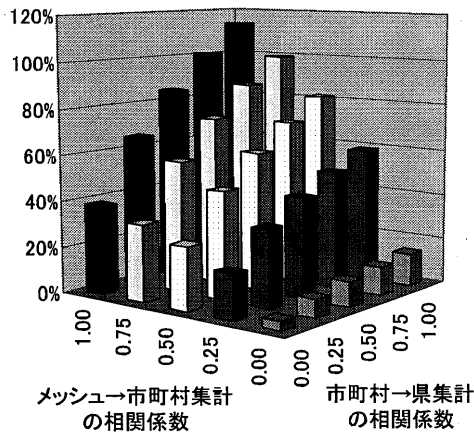


図 15 相関係数の組合せと集計結果の変動係数の関係

県全体の推定被害状況						
全数平均	全数標準偏差	半数平均	半数標準偏差	無被害平均	無被害標準偏差	
10,314	6,245	31,888	11,411	714,051	12,189	
市町村別の推定被害状況						
市町村名	全数平均	全数標準偏差	半数平均	半数標準偏差	無被害平均	無被害標準偏差
岐阜市	566	1158	2705	3010	106633	3261
大垣市	3288	2150	10314	3471	30190	3708
富山市	0	0	0	0	31029	0
多治見市	0	0	0	0	29939	0
関市	2	9	19	56	28887	58
中津川市	0	0	0	0	30395	0
美濃市	1	3	75	141	10077	141
瑞浪市	1	0	0	0	12636	0
羽島市	394	618	1559	1220	24509	1350
惠那市	0	0	0	0	18185	0
美濃加茂市	0	0	0	0	14002	0
土岐市	0	0	0	0	29334	0
各務原市	20	63	164	326	38648	340
可児市	0	0	2	10	24580	10
川島町	19	57	72	112	4157	125
岐南町	25	74	150	193	6079	206
笠松町	58	131	238	268	7593	297
瀬濃町	24	57	100	117	3350	129
海津町	447	310	1295	479	3532	522
石川町	152	149	506	249	2566	276
南濃町	346	238	1060	477	4955	528
業平町	876	552	2424	866	7893	915
上石津町	611	235	1582	280	917	206
垂井町	1868	890	4507	1168	5885	1177

図 16 市町村単位・県全体の全壊棟数の集計表示

うに、この全壊率レベルにおいては、緊急対応の対象をかなり限定できることを示している。

図示は省略するが、 $(p_s, p_f) = (5\%, 10\%)$ でも同様の比較を行った結果、「優先しない」が全体的に増加し、「優先する」と「調査継続」が減少したほかは、上記と類似の傾向を示す結果となった。

以上より、今回の検討範囲では $\alpha = \beta = 30\%$ のケースで迅速性と正確性のバランスのとれた判断がなされていることが確認できる。図9～図12において $\alpha = \beta = 30\%$ と設定したのは、この検討を踏まえての判断である。ただし $\alpha$ と $\beta$ の値を、絶対的な基準のもとに定めることはできない。これらのパラメータは、意思決定を行ううえで迅速性と正確性のバランスをどう考えるか、という基本

姿勢を反映するものであることを強調しておく。

(6) 市町村単位・県全体における被害集計の逐次更新

式[10]および[12]に示したように、メッシュから市町村単位への集計、および、市町村単位から県単位への集計の際には、それぞれ相関係数を設定する必要がある。

図 15 は、 $\rho_{muni}$ と $\rho_{pref}$ をそれぞれ 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 の 5 種類の値で変化させ、県全体の全壊棟数の標準偏差を全ケース共通の平均値で除して、変動係数に換算して比較したものである。組合せによって、変動係数は 4%から 114%に広く分布している。相関係数 $\rho_{muni}$ の設定が $\rho_{muni}$ より大きな影響を示しているが、この傾向は集計対象となるメッシュ数および市町村数に依存するも



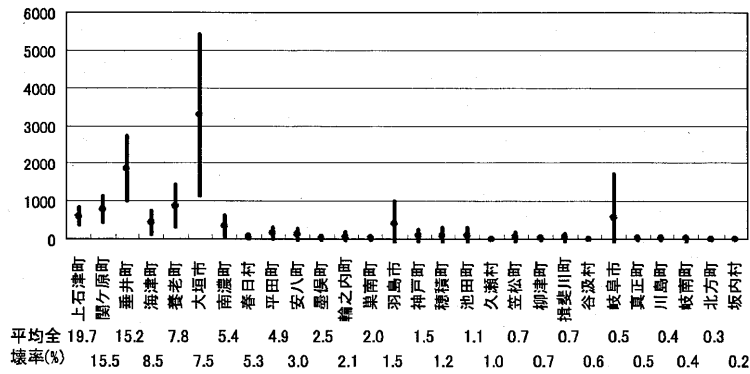


図 17 市町村単位的全壊棟数の初期推定値 (平均値±標準偏差)

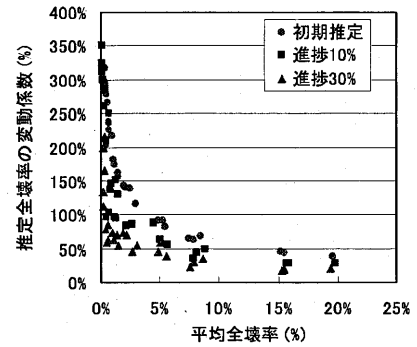
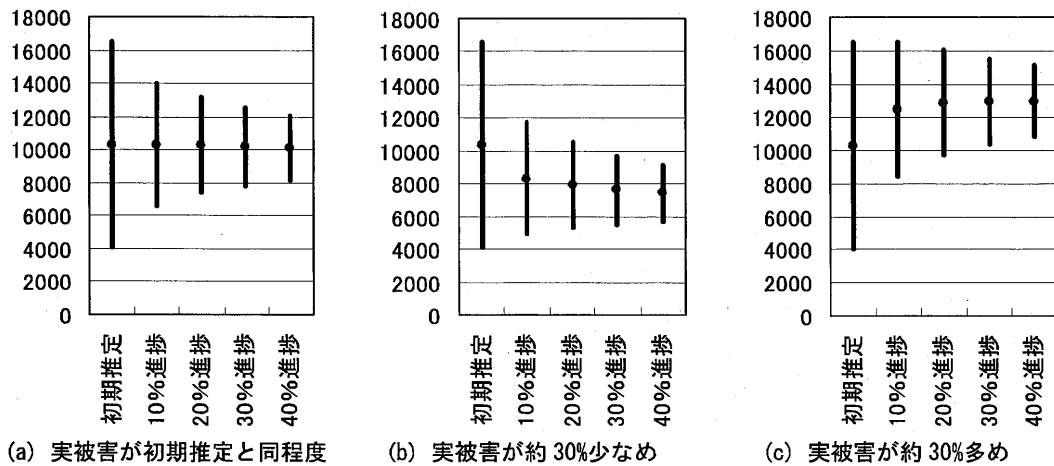


図 18 市町村単位の平均全壊率と全壊棟数の変動係数 (ほぼ初期推定通り)



(a) 実被害が初期推定と同程度 (b) 実被害が約30%少なめ (c) 実被害が約30%多め  
図 19 実被害情報入手の各段階における推定全壊建物棟数の平均値±標準偏差

のである。ここでは図 15 において、完全相関と無相関のほぼ中間的な傾向を示す  $\rho_{muni} = \rho_{pref} = 0.5$  を採用した例を示すこととした<sup>補注(4)</sup>。これは、式[13]で  $w = 0.52$  とした場合に相当する。

平均値および標準偏差で表現されたメッシュ単位の評価結果をもとに、市町村単位および県全体の推定全壊棟数を集計して求めたものを図 16 に示す<sup>補注(2)</sup>。図 17 は、市町村単位的全壊棟数の初期推定値 (平均値±標準偏差) を、平均全壊率の大きな順に示した結果である。大垣市では被害率が高く全壊棟数も多い一方、岐阜市では被害率は低くても全壊棟数が多い。ばらつきの相対的な大小関係は、全壊棟数よりも全壊率と関連が深いように見受けられる。

そこで、市町村単位の平均全壊率と全壊棟数の推定値の変動係数 (標準偏差÷平均値) の関係を図 18 に示す。全壊率が低い市町村では推定値の変動が大きい傾向が明確に現れている。こうした市町村は広範囲に及ぶため、被害総量の推定においては、誤差の蓄積効果で推定精度が悪化すると考えられる。また同図からも、調査進捗に伴って変動係数が全体的に減少することが確認できる。

最後に、岐阜県全域における集計結果を示す。図 19 は、初期推定段階および調査進捗 10%~40% の各段階における全壊建物棟数の平均値±標準偏差の変化を示したものである。図 19(a) は実被害が初期被害推定とほぼ同程度で

あったケースである。初期被害推定は約  $1.03 \pm 0.62$  万棟と推定幅が広く約 4.1 倍のレンジであるが、進捗 10% で約  $1.03 \pm 0.36$  万棟とレンジは約 2.1 倍まで狭められている。その後も調査進捗に伴って推定精度が向上し、進捗 40% では約  $1.01 \pm 0.20$  万棟まで収束している。このケースは推定値の平均値はほぼ一定で推移している。

図 19(b) は、実被害が初期被害推定より 30% 程度少なかったケースである。初期推定結果は、進捗 10% で約 80% にあたる約  $0.83 \pm 0.34$  万棟に下方修正され、被害の実態に近づいている。その後、進捗 40% では約  $0.74 \pm 0.17$  万棟まで収束している。この結果より、被害調査が偏りなく適切に実施されれば、10% 程度の調査でもかなりの精度向上が見込まれることがわかる。このケースでは、初期被害と実被害との乖離が 30% であるために、初期被害推定の推定幅 (平均値±標準偏差) の範囲内に真値が入っており、被害の概略把握に成功している。

図 19(c) は実被害が初期被害推定より 30% 程度多かったケースである。調査進捗 10% で初期推定結果の約 120% にあたる約  $1.25 \pm 0.40$  万棟に上方修正されて被害の実態に近づいている。このケースでも初期被害推定の推定幅は真値をとらえている。

今回のシミュレーション結果は、初期被害推定の推定幅内に真値をとらえることを保証するものではない。しかし、推定結果の不確定性を定量的に評価し、逐次更新により精度向上を図ることの意義は大きい。例えば、実

際の被害が想定平均値よりも小さかったとしても、安全側の初動体制により迅速に事態収拾できれば、初期被害推定の有効性が発揮される。逆に、実際の被災状況が想定平均値よりも大きかったとしても、これを想定内の事態として初動体制を確立すれば、円滑な災害対応が可能となる。

## 5. 結 語

本研究では、地震後の緊急対応における意思決定支援を目的として、被害推定の逐次更新機能を有する新型シミュレータを開発し、そのシミュレーション試行事例を示した。得られた知見と今後の課題を以下にまとめる。

- (1) 被害推定の不確定性を定量的に評価して推定幅を明示することによって、被害の実態に即して柔軟に災害対応を行うために有用な情報を得ることができることを示した。
- (2) 調査進捗に伴って逐次更新される被害推定値は、真値に漸近する方向に是正されるとともに、推定幅が徐々に狭められることを定量的に示した。
- (3) 被害率の低い市町村においては、推定値の変動が大きく、その蓄積効果が、被害総量の推定精度に影響している可能性を指摘した。
- (4) 今回の条件設定（初期被害推定と実被害との乖離度合いが±30%で、被害調査が偏りなく適切に実施される）のもとでは、10%程度の調査でもかなりの精度向上が可能であった。
- (5) 任意のレベルの意思決定基準に準じて、一定の統計的な確からしさのもとに、緊急対応を優先すべき地域を抽出可能であることを示した。許容誤り確率のパラメータについては $\alpha = \beta = 30\%$ で良好な結果を得た。また、優先対象のグレーゾーンにおいては迅速な判断を避けることが必要であることを示した。
- (6) 本研究で示した試行結果は、シミュレーションの条件設定に依存したものであり、各種設定条件や対象地域の属性に応じて、事前に個別的に検討しておく必要がある。
- (7) 特に、被害関数の推定精度を表す仮設的事前標本、被害集計における相関係数、意思決定基準の各種パラメータ等は結果に大きく影響するため、目的や状況に応じて適切に定める必要がある。

## 謝 辞

本研究は、文部科学省 大都市大震災軽減化特別プロジェクト（平成14～18年度）「Ⅲ 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 1. 震災総合シミュレーションシステムの開発」における分担課題「地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの開発（代表：能島暢呂）」による研究成果をもとに、新たな検討を行った成果を取りまとめたものである。関係各位に謝意を表すものである。

## 補 注

(1) 式[15]の直接評価は煩雑なため、本シミュレータでは、これを前進・後退の漸化式で表した次式を用いて確率分布の逐次計算を行っている。

$$P(n|M, M_0, M'_0, n_0, n'_0) = \frac{M-n+1}{n} \frac{n+n_0+n'_0}{M_0+M'_0+M-n_0-n'_0-n+K-1} P(n-1|M, M_0, M'_0, n_0, n'_0) \quad [21]$$

$$P(n|M, M_0, M'_0, n_0, n'_0) = \frac{n+1}{M-n} \frac{M_0+M'_0+M-n_0-n'_0-n+K-2}{n+n_0+n'_0+1} P(n+1|M, M_0, M'_0, n_0, n'_0) \quad [22]$$

(2) 2002年3月末時点での市町村数は99であったが、2002年4月以降市町村合併が進行し、2007年5月現在では42(21市19町2村)まで減少した。しかし岐阜県震度情報ネットワークの震度情報が現在も99の旧市町村単位で得られていることと、被害集計に関してもより多くの情報を含むことから、シミュレータでは99の旧市町村区分を基本としている。

(3) 激甚な被災地域では被害情報の収集・伝達が困難なため、実被害情報による推定更新のペースは遅いと考えられる。初期被害推定が特に重要な役割を果たす。こうした時間的なムラや、被災状況の地域的なムラを考慮した試行については、本論文では割愛したが、当然ながらシミュレート可能である。

(4) 全壊棟数の相関は、地震動強度の空間相関や建物属性の地域相関の影響を受けると考えられる。前者については、離間距離の関数として相関係数を規定する方法がある<sup>8)</sup>。

## 参考文献

- 1) 佐々淳行：完本 危機管理のノウハウ，PART 1 信頼されるリーダーの条件，文藝春秋，1991.11，pp.15-180.
- 2) 能島暢呂・杉戸真太・金澤伸治：地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル，土木学会論文集，No.724/I-62，2003.1，pp.187-200.
- 3) 渡部洋：ベイズ統計学入門，福村出版，1999.9.
- 4) 繁樹算男：ベイズ統計入門，東京大学出版会，1985.4.
- 5) 兼松孝：災害リスクのアセスメント：地震リスクの定量化，防災の経済分析（多々納裕一・高木朗義編著），頸草書房，2005.6，pp.49-71.
- 6) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・濱本剛紀：震度情報ネットワークによる震度曝露人口のリアルタイム推計，地域安全学会論文集，No.6，2004.11，pp.181-190.
- 7) 岐阜県：岐阜県東海地震等被害想定調査報告書，2002.
- 8) 林孝幸・福島誠一郎・矢代晴実：地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響，日本建築学会構造系論文集，第600号，2006.2，pp.203-210.

(原稿受付 2007.5.27)

(登載決定 2007.7.28)