

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プロトタイプ構築

濱本 剛紀¹・能島 暢呂²・杉戸 真太³

¹ 岐阜大学大学院工学研究科 博士前期課程 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:h3101027@guedu.cc.gifu-u.ac.jp

² 岐阜大学工学部社会基盤工学科 助教授 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:nojima@cive.gifu-u.ac.jp

³ 岐阜大学流域圏科学研究センター 教授 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:sugito@cc.gifu-u.ac.jp

地震直後の種々な緊急対応は、迅速性と正確性が要求される。本研究では防災担当者に有効利用される実用システムの開発に向けて、地震動情報に基づく早期被害推定と実被害情報の統合処理によって、推定結果をベイズ確率の方法により逐次更新し、被害状況の早期把握と迅速かつ正確な緊急対応の意思決定支援を行うシステムを提案する。ここでは各域での震後対応行動指針について GIS を有効活用して、視覚的に捉えられ、迅速な初動体制の確立を容易とした。またある意思決定についての逐次決定過程や推定被害数の逐次更新過程等を図示することにより、意思決定が下されるまでの過程を明確にした。

Key Words :Real-time disaster prevention, seismic observation, damage investigation, emergency response, decision support

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。被害状況把握に関する情報源としては、巡回や目視などによる実被害の確認情報や、強震観測網により得られる地震動強度情報にフラジリティ関数を適用することによる被害推定などが挙げられる。実被害の確認情報を活用する場合、正確な対応が可能であるが、情報確定までに多くの時間を要し、迅速性を著しく損なう。一方、フラジリティ関数などを用いた被害推定を被害情報として活用する場合、迅速に被害状況の全容を推測する事が可能であるが、推定結果が実態と異なり正確性に欠ける場合も多い。

そこで能島らはこれまで、これらの各種情報源を統合処理し、各々の欠点を相互補完し得る数理モデルの構築を行い¹⁾、全壊家屋数等の実被害情報の早期把握および迅速な緊急対応を支援するシステムの開発を目指してきた。

本研究では、地震発生後にほぼリアルタイムで詳細な震度分布図を推定し、それによって得られる震度情報を利用する。そして、地震後ある程度時間が経過した後に、時々刻々と得られる実被害情報と、既に得られている震度情報の両者を提案モデルに基づき統合処理し、震後対応を支援する実用システムの開発に向けて、情報処理モ

ジュールとユーザーインターフェースのプロトタイプ構築を行った。

本稿では、震後対応支援の数理モデルと構築中のプロトタイプの概要について報告する。

2. 被害の逐次推定手法と逐次決定過程の概要¹⁾

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として扱う。その後、時々刻々と入手される実被害の確認情報を扱い、事前分布を事後分布に逐次更新し、被害の全体像を逐次先行予測し、被害状況の概況を把握する。

また更新された被害確率に逐次確率比検定を適用し、緊急対応の有無に関する意思決定を行う。またその際、実被害情報により被害確率を更新する前の段階で、即時対応基準によって、意思決定の有無の決定が可能な場合もある。

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、

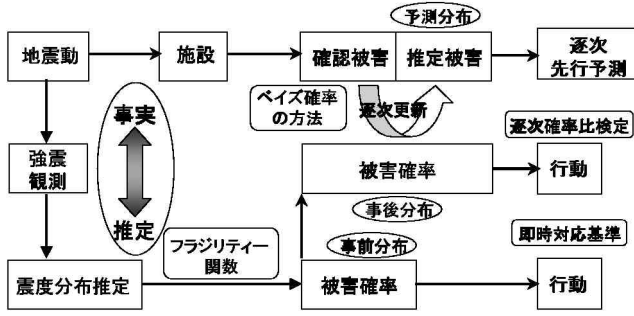


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

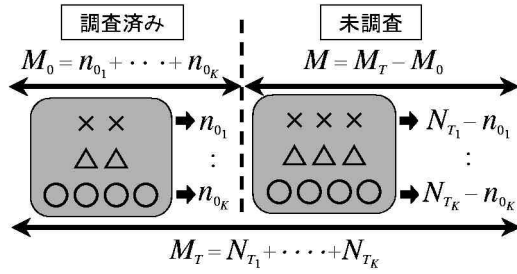


図2 確認被害に基づく被害の逐次先行予測

$k=1$:全壊 $\times$, $k=2$:半壊, $k=3$: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_{0_k} 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.

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_{0_k} 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 μ'_{p_k} および標準偏差 σ'_{p_k} は次式で与えられる.

$$\mu'_{p_k} = \frac{n_{0_k} + n'_{0_k} + 1}{M_0 + M'_0 + K} \quad (1)$$

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

ここに M'_0 と n'_{0_k} 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'_{0_k} 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)・(2) を用いて次式で与えられる.

$$\mu'_{N_{T_k}} = n_{0_k} + \mu'_{p_k} (M_T - M_0) \quad (3)$$

$$\sigma'_{N_{T_k}} = \sigma'_{p_k} \sqrt{(M_T - M_0)(M_T + M'_0 + K)} \quad (4)$$

ベイズ確率の方法を用いた場合, 被害情報の入手に伴う推定被害数の変動の度合いが比較的小さくなり, 推定の初期段階から, 最終的な実被害の概略を捉え易い利点が挙げられる.

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 , 初期被害推定事前分布を規定する「仮設的事前標本」のパラメータを M'_0, n'_0 として, 確率 p の事後分布より, 次式の尤度比

$$R_p = \left(\frac{p_f}{p_s}\right)^{n_0 + n'_0} \left(\frac{1-p_f}{1-p_s}\right)^{M_0 + M'_0 - n_0 - n'_0 + K - 2} \quad (5)$$

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, α は仮説 H_0 が正しいのに棄却する誤り (第1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2種の誤り) を犯す確率 (消費者危険) である. それぞれ大きな値に設定した場合, 迅速な意思決定が可能であるが, 判断を誤る危険性が高まる. 一方それぞれ小さな値に設定した場合, より正確な判断を行うことができるが, 意思決定に長い時間を要する.

式を整理すると, M_0 に対する n_0 の条件式 (式 (6)) が得られ, 調査状況に応じた意思決定がモデル化される.

$$\begin{aligned} & \frac{(M_0 + M'_0 + K - 2) \log \frac{1-p_s}{1-p_f} + \log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\log \frac{p_f(1-p_s)}{p_s(1-p_f)}} - n'_0 < n_0 \\ & < \frac{(M_0 + M'_0 + K - 2) \log \frac{1-p_s}{1-p_f} + \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\log \frac{p_f(1-p_s)}{p_s(1-p_f)}} - n'_0 \end{aligned} \quad (6)$$

3. 震後対応支援システムのプロトタイプ構築

3.1 概要

本研究では県レベルから市町村レベルでの震後対応に求められる機能を中心にプロトタイプを構築した.

県レベルでの初動体制においてまず求められる情報は, 広域における震度分布である. 本研究では, 震源情報および強震観測点からの震度情報を基に, 県内での詳細な震度分布の推定を行う. 強い揺れを受けた市町村の分布が明らかになると, 次は市町村レベルでの震後対応に焦点を移す. まず各域内での詳細な震度分布とフラジリティ関数に基づき初期被害推定を行い, 具体的な被害状況を把握する. その後の実被害情報の収集に伴い, ベイズ推定法を用い被害推定結果の逐次更新を行う. それと同時に逐次確率比検定を適用し, 域内の各地区に対し震後対応指針を決定する.

以降では震度分布推定結果および意思決定結果を表示

するプロトタイプについてデモンストレーション画面を交えて解説する．意思決定支援システムに関しては利用目的により 2 種類の画面を作成した．一つは対象地域を分割し，それぞれに対し最適な震後対応指針を決定するものである．GIS(地理情報システム) を有効的に活用する事によって，その結果や詳細な被災状況について視覚的に捉えられるようにした．もう一つは分割された任意の一地区を選択し，実被害情報の収集過程，全壊棟数の逐次推定過程および逐次確率比検定に基づく逐次決定過程等の確認を可能としたものである．

3.2 震度情報ネットワークシステムを利用した即時詳細震度分布推定²⁾

地震発生後，震度計設置点において震度が観測される．本研究では設置点の地盤条件を考慮し，それを工学的基盤レベルの値に変換する．次に計算対象地点近隣の設置点における基盤面震度と距離減衰式³⁾により計算した震度値との残差を，距離に反比例した重みを付け平均し，これを補正值とする．それを計算対象地点での距離減衰式により求めた基盤面震度値に加える．この操作をあらゆる地点に関して繰り返し行うことにより面的補間を行い，工学的基盤面の推定震度分布を得る．さらに地盤の非線形増幅特性を考慮した上で，それを表層地盤レベルに変換する．

岐阜県では「岐阜県震度情報ネットワークシステム」が構築され，地震発生後直ちに県内全市町村に設置された震度計より得られる震度情報が，県庁に集約される．図 3 は，東海地震の震度情報が得られた場合を想定し，2 分の 1 地域メッシュ(約 500m 四方) 単位で震度分布推定を行った結果を表示したものである．メッシュごとの地盤条件の違いによる「揺れやすさ」の相違がよく反映されていることが確認される．

3.3 フラジリティ関数を用いた被害推定

震度値から被害確率の事前分布を即時推定する際にはフラジリティ関数を用いる．事前分布の精度を上げるためには，フラジリティ関数を適用する地域の建物属性が一樣であることが望ましい．本研究では対象地域を，地盤条件による「揺れやすさ」の違いあるいは建物の耐震性の分布特性の違いに基づいて幾つかの地区に分割し，各々に適合したフラジリティ関数を用いる．

現在のところは，各々の地域における主体となる建物の脆弱性を三段階に分類し，それぞれに対して最適なフラジリティ関数を用いているが，今後は，各地区における建物の構造種別に応じたフラジリティ関数を適用し，さらなる推定精度の向上を目指す．

3.4 意思決定支援システムの「市町村表示画面」

図 4～図 6 は市町村レベルでの利用を想定した「市町村表示画面」の一部である．対象市町村域を幾つかの地区に分割した上で，各地区に関して被害推定を行う．また実被害情報の収集状況に従う意思決定結果を，図 4 のような地図画面に表示する．これによって対象地域内の震後対応行動指針を視覚的に捉えることができる．

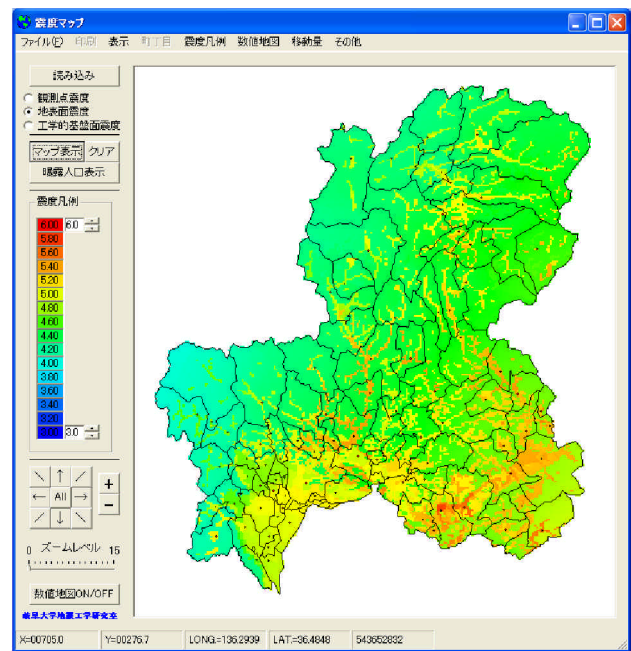


図 3 想定東海地震発生時における震度分布図の即時推定

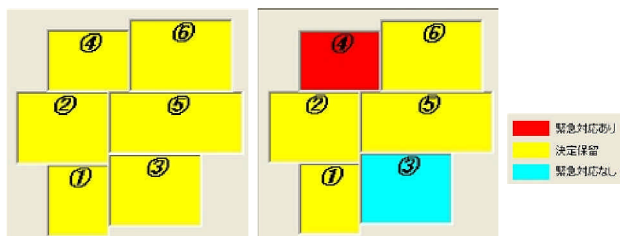
ここではまず各地区における基本情報である全建物棟数，計測震度が図 5 の画面上に表示される．計測震度については，先に推定した震度分布からの情報を利用する．また地区における建物の脆弱性ランクに応じ，適用するフラジリティ関数が決定される．それら基本情報により全壊・半壊・無被害棟数の初期被害推定数の平均値 $\mu'_{N_{T_k}}$ および標準偏差 $\sigma'_{N_{T_k}}$ がディリクレ分布により与えられ(左図)，実被害情報の入手に従い逐次更新される(右図)．市町村全域での集計値も同様にして図 6 のように表示され，広域的な被害の概略をつかむことができる．

またここでは，各地区に対して緊急対応の有無を逐次決定する．図 4 における実被害情報入手前の段階(左図)では全地区で「決定保留」となっている．その後の実被害情報入手に伴い，意思決定結果が逐次更新され，地区では「緊急対応あり」となった(右図)．これは図 5 に示されるように，耐震性に劣った建物が主体となる地区であることに加え，特に全壊棟数の報告が多かったことによる．

なおこれらの表示例では，被災ランク数 K ，フラジリティ関数のばらつきを表わす指標に関する変動係数 δ ，緊急対応の判断基準となる全壊確率 p_s と p_f ，および許容誤り確率 α と β 等についてはそれぞれ， $K=3$ ， $\delta=60$ ， $p_f=0.2$ ， $p_s=0.1$ ， $\alpha=0.05$ ， $\beta=0.05$ とした．これらのパラメータに関しては従来研究¹⁾に基づき決定したものである．

3.5 意思決定支援システムの「地区表示画面」

「地区表示画面」は先の「市町村表示画面」における任意の一地区を選択することにより，被害数の逐次推定過程および緊急対応の逐次決定過程等を詳細に表示するものである．



(a) 更新前 (b) 更新後

図 4 意思決定結果一覧図

④地区					
総棟数	150				
計測震度	6.2				
建物の脆弱性	高い				
被害情報	被害箇所数	平均・標準偏差			
全壊数	0	52	32		
半壊数	0	52	32		
無被害数	0	46	31		

(a) 更新前 (b) 更新後

図 5 地区での被害推定結果

全域					
総棟数	1,400				
推定全壊・標準偏差	328	95			
推定半壊・標準偏差	370	101			
推定無被害・標準偏差	702	105			

(a) 更新前 (b) 更新後

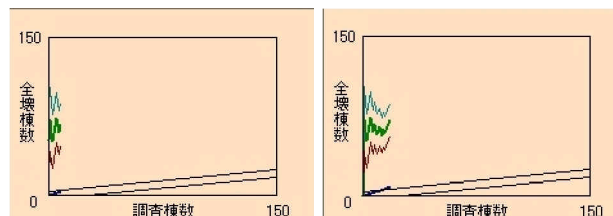
図 6 全域での被害推定結果

図 7 はその一部であり、先に「緊急対応あり」とされた地区の逐次推定・決定過程等を表示したものである。横軸は調査済み棟数、縦軸は全壊棟数を示す。緑色の線は、式 (4) で求められる推定全壊被害数の平均値 $\mu'_{N_{T_1}}$ の逐次推定過程を示し、これを挟む 2 本の水色および赤色の線は標準偏差 $\sigma'_{N_{T_1}}$ による推定値の変動を見込んだものである。これらにより、被害の概略を把握することができる。図中の青色の線は全壊棟数情報の入手過程である。平行する 2 本の黒色の線は、条件式 (6) で求められる逐次確率比検定¹⁾に基づく上・下限値を表している。

全壊の被害報告数が上・下限値内にある場合(左図)、意思決定は保留される。そしてその後の時間経過に伴う全壊棟数の報告により、青線が上限値を破った場合(右図)は「緊急対応あり」の意思決定が下される。

4. おわりに

意思決定に関するプロトタイプ作成にあたっては仮想的な市町村域を設定してきたが、今後は実務利用を念頭に置きシステム開発を進める。そこで本研究では岐阜市を対象としたシミュレーションを行う。その際には市内の 49 小学校区区分(図 8)を用いる。地震発生後、上述の手法により岐阜市内における震度分布(図 9)が推定される。それと建物の主体構造ごとに構築したフラジリテ



決定保留状態 緊急対応決定後

図 7 「地区表示画面」の表示例



図 8 岐阜市内における小学校区区分

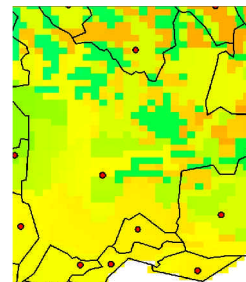


図 9 岐阜市域での震度分布推定

ィ関数および実被害情報による推定被害数を図 8 の小学校区を基本単位として逐次集計し、同時に各域内での震後対応を逐次決定する。

また、人工衛星や航空機などによるリモートセンシング情報を、早期に収集可能な実被害情報収集手段の一つとして活用する事に関しても検討を行う予定である。

さらにこれらとあわせ、実用システムとしての操作性を考慮して、入力仕様の改善も実施する予定である。

謝辞：本研究の一部には文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の補助金を使用したことを付記する。

参考文献

- 1) 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/ -62，pp.187-200，2003 年 1 月。
- 2) 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を利用したリアルタイム震度曝露人口推計，第 22 回日本自然学会学術講演概要集，pp209-210，2003 年 9 月。
- 3) Torregosa,F.R. , Sugito,M. , and , Nojima,N. : Assesment of Seismic Hazard and Microzoning in the Philippines, Structural Eng. / Earthquake Eng.,JSCE,Vol.19,No.2,81s-98s,July 2002.

(2003.10.10 受付)