

# 地震時緊急対応における被害情報の逐次処理手法

能島 暢呂<sup>1</sup>・杉戸 真太<sup>2</sup>・金澤 伸治<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>2</sup> 正会員 工学博士 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>3</sup> 学生員 岐阜大学大学院博士前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

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る。従って、被害の全貌の概略を即時推定して初動体制を確立するとともに、確認情報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である。本研究は、この問題にベイズ確率の方法が有用であることに着目し、部分的な実被害情報を用いて全体の被害箇所数を逐次推定する方法を示すとともに、被害発生率の逐次確率比検定に基づく逐次決定過程のモデル化を行うものである。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、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した。

**Key Words:** *Post-earthquake emergency, Bayesian estimation, Damage rate, Damage information, Sequential probability ratio test, Monte Carlo simulation*

## 1. はじめに

わが国では、災害や事故が発生するたびに緊急対応が遅れ、批判の声があがる。その原因としては、情報伝達網の不備や、危機管理意識の欠如といった問題点が指摘されることが多いが、これに加えて、わが国では確認情報が偏重される傾向にあることが、事態をいっそう悪化させる要因となっている。被災規模が大きいほど被害情報が集まりにくくなるにもかかわらず、正確さを重んずるあまり、確認情報の蓄積を待機する「連絡待ち」の状態が続き、一刻を争う状況の中で緊急対応の時機を逸してしまうのである。

その教訓から近年、迅速・正確な被害把握と緊急対応を目的としたリアルタイム地震防災システムに関する取り組みが活発化している<sup>1),2)</sup>。このようなシステムは、その迅速性から、地震直後からの被害軽減対策の一つとして有望であるものの、情報が量的・質的に不十分なために状況把握の精度が悪い場合や、何らかの原因で誤った情報が発せられた場合には、誤判断のために災害の拡大を助長してしまう恐れがある。つまり「迅速性と正確性」は、本来、相容れない要求であるといえ、緊急を要する判断には「巧遅・拙速」のジレンマ<sup>3)</sup>が付きものである。

一方、地震災害は稀少現象であるから、災害対応の経験やノウハウを積み重ねることが容易ではなく、必然的に熟練者が育成されにくい。にもかかわらず現実

の災害対応においては、時々刻々と変化する状況の中で、種々の判断ヒューリスティックス<sup>4)</sup>を駆使して経験や直感に頼りつつ意思決定を行わざるを得ないのが実情である。このような判断ヒューリスティックスの利点と限界を十分に理解した上で、緊急対応における合理的・系統的な手続きを定式化し、意思決定プロセスの理論的枠組みを構築すれば、リアルタイム情報を意思決定支援に積極的に活用することが可能となろう。

以上のことから、適切な意思決定を行うには、所要時間と要求精度のバランスを考えながら、被害の全貌を概略的に推定して迅速に初動体制を確立することと、時間の推移とともに蓄積される確認情報を逐次的に組み込むことによって、推定結果を更新し精度を向上することが重要であるといえる。この両者を、被害の概略推定と観測データによる更新過程として捉えると、ベイズ確率の方法に基づく統計的推論<sup>5)</sup>を有効に適用することができる。

こうした観点から筆者らはこれまで、部分的な実被害情報を用いて全体の被害箇所数を逐次推定する方法を示すとともに、被害発生率の逐次確率比検定に基づく逐次決定過程のモデル化を行った<sup>6)</sup>。文献6)のモデルでは、事前もしくは即時的な被害推定結果や、経験的判断を反映した被害発生率の事前分布を出発点として、実被害情報のデータを組み合わせながら、統計的根拠に基づいて意思決定することが可能である。さらに文献7)においては、このモデルを用いて、被害発生

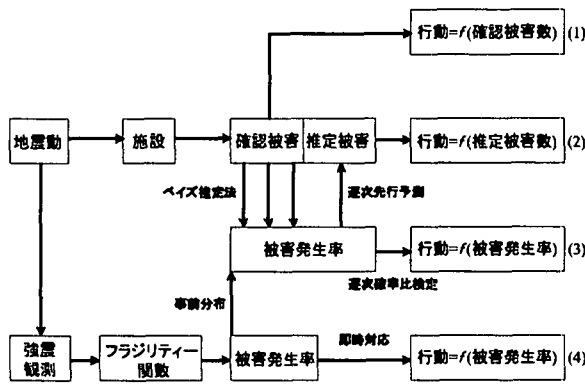


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

率が全体に一樣と見なせる小規模システムを対象として、逐次決定過程のシミュレーション事例を示した。

本研究では、文献6)のモデルを現実規模のシステムに適用することを目的としている。実際のシステムでは、地盤条件や構造物特性の空間的変動のために、被害発生率を一樣と見なすことはできない。そこで、システム全体を、被害率が一樣と見なせるエリアに細分化したうえで、それぞれのエリアにおける被害予測および被害調査の推移に基づいて、意思決定を個別に行うという前提条件を設け、逐次推定過程のシミュレーションを行う。

まず2.においては、被害情報の逐次処理の概念について概説し、3.および4.では、それぞれの定式化を示す。5.では、ケーススタディーの対象として岐阜市の上水道・ガス供給システムをとりあげ、その被害想定について概説し、シミュレーションの前提条件について説明する。6.では、逐次推定過程のシミュレーションの結果と考察を示す。

## 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り、以下の4つの流れがあることを示している。

- (1) 施設に生じた被害の確認情報のみに基づいて行動をおこす。
- (2) 地震動強度情報や経験的判断に基づく被害発生率の即時推定を、施設に生じた被害の確認情報によって更新し、被害箇所数を推定した結果により行動をおこす。
- (3) 地震動強度情報や経験的判断に基づく被害発生率の即時推定を、施設に生じた被害の確認情報によって更新した結果により行動をおこす。
- (4) 地震動強度情報や経験的判断に基づく被害発生率

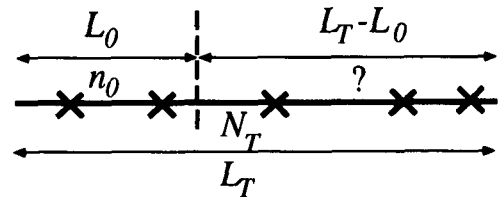


図2 確認情報に基づく被害の逐次先行予測

の即時推定のみに基づいて行動をおこす。

これらのうち、(1)は正確さを重視した基準であるが、情報収集に時間がかかるため緊急対応が遅れてしまう。一方、(4)は迅速性を重視した基準であるが、被害の即時推定結果のみに基づいたリアルタイム対応であるため、推定精度が十分に高くない場合には、判断を誤る危険性が高い。

そこで、両者の長をうまく取り入れた基準が(2)と(3)である。これらの基準は、地震動強度情報と脆弱性関数や経験的判断に基づいて被害発生率が即時推定され、その確率分布が得られることを前提としている。しかし即座にこれを利用するのではなく、ベイズ確率の方法における事前分布として扱うところに特徴がある。つまり、時々刻々と入手される被害の確認情報を用いて、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。ここで、(2)では、推定された被害箇所数の大きさを緊急対応の意思決定の材料とするのに対し、(3)では、被害発生率の大きさを緊急対応の意思決定の材料としている。言い換えると、(2)は「絶対数」、(3)は「相対比率」に基づいた基準である。以下、3.と4.においては、それぞれ(2)と(3)に関する定式化を示す。

## 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して、単位長さあたりの期待被害箇所数（以下、被害発生率という） $\lambda$  を推定する問題を考える。被害箇所数  $n$  はポアソン分布に従うので、 $\lambda$  の最尤推定量は

$$\hat{\lambda} = \frac{n_0}{L_0} \quad (1)$$

で与えられるが、ベイズ推定法を適用する場合には、

$$P(n|L_0, \lambda) = \frac{(\lambda L_0)^n e^{-\lambda L_0}}{n!} \quad (2)$$

が尤度関数となる。まず、被害発生率に関して何の手がかりもない状態では、 $\lambda$  の事前分布は一様分布と仮

定できるので、 $n_0$  箇所の被害情報が得られた後の  $\lambda$  の事後分布は、ガンマ分布

$$f_{\Lambda}(\lambda|L_0, n_0) = \frac{L_0(\lambda L_0)^{n_0} e^{-\lambda L_0}}{n_0!} \quad (3)$$

となる。一方、地震動強度情報や経験的判断に基づいて、被害発生率の即時推定が行われる場合を考える。このとき、 $\lambda$  の自然共役事前分布としてガンマ分布を仮定すれば、その平均値  $\mu_{\lambda}$  と標準偏差  $\sigma_{\lambda}$  もしくは変動係数  $\delta_{\lambda}$  などの代表値により次式で  $L'_0$  および  $n'_0$  を推定し、式 (3) に代入して事前分布を求める。

$$n'_0 = \frac{1}{\delta_{\lambda}^2} - 1 = \frac{\mu_{\lambda}^2}{\sigma_{\lambda}^2} - 1 \quad (4)$$

$$L'_0 = \frac{n'_0 + 1}{\mu_{\lambda}} = \frac{1}{\mu_{\lambda} \delta_{\lambda}^2} = \frac{\mu_{\lambda}}{\sigma_{\lambda}^2} \quad (5)$$

この場合、 $n'_0$  および  $L'_0$  は一般に非整数となるが、即時推定による被害発生率の事前分布は、「長さ  $L'_0$  あたり  $n'_0$  箇所の被害が確認された」という情報を得たことと等価であると解釈される。以上より、 $\lambda$  の事後分布は次式で与えられる。

$$f_{\Lambda}(\lambda|L'_0, n'_0, L_0, n_0) = \frac{(L_0 + L'_0) \{\lambda(L_0 + L'_0)\}^{n_0 + n'_0} e^{-\lambda(L_0 + L'_0)}}{\Gamma(n_0 + n'_0 + 1)} \quad (6)$$

長さ  $L$  の構造物の被害箇所数が  $n$  となる確率の予測分布<sup>5)</sup> は、ポアソン分布と式 (6) の複合分布より負の二項分布で与えられる。

$$\begin{aligned} P(n, L) &= \int_0^{\infty} \frac{(\lambda L)^n e^{-\lambda L}}{n!} f_{\Lambda}(\lambda|L'_0, n'_0, L_0, n_0) d\lambda \\ &= \frac{\Gamma(n + n_0 + n'_0 + 1)}{n! \Gamma(n_0 + n'_0 + 1)} \left( \frac{L}{L + L_0 + L'_0} \right)^n \\ &\quad \left( \frac{L_0 + L'_0}{L + L_0 + L'_0} \right)^{n_0 + n'_0 + 1} \quad (7) \end{aligned}$$

以上の結果を用いて、 $L_T$  のうち  $L_0$  だけ調査が済んで  $n_0$  箇所の被害が確認された段階で、残る  $L = L_T - L_0$  における被害数を推定し、総被害箇所数  $N_T$  を逐次推定する。被害発生率の最尤推定量を用いると、総被害箇所数は

$$\widetilde{N}_T(L_0) = \frac{n_0 L_T}{L_0} \quad (8)$$

で推定されるが、ベイズ推定法を用いると、確認済みの被害箇所数  $n_0$  と式 (7) の平均  $\mu_N$  および標準偏差  $\sigma_N$  を用いて変動を見込んだ推定式

$$\widehat{N}_T(L_0) = \mu_N \pm \sigma_N \quad (9)$$

を得ることができる。ここに、 $\mu_N$ 、 $\sigma_N$  は次式で与えられる。

$$\mu_N = n_0 + \frac{L_T - L_0}{L_0 + L'_0} (n_0 + n'_0 + 1) \quad (10)$$

$$\sigma_N = \frac{\sqrt{(L_T - L_0)(L_T + L'_0)(n_0 + n'_0 + 1)}}{L_0 + L'_0} \quad (11)$$

#### 4. 被害発生率の逐次確率比検定による逐次決定過程のモデル化

いま「被害発生率が  $\lambda_0$  (帰無仮説  $H_0$ ) 以下であれば緊急対応を行わず、 $\lambda_1$  (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)<sup>8)</sup> を導入する。SPRT を、ここで扱う問題に適用する場合には、式 (6) を用いて表される被害発生率の尤度比  $R$

$$R = \frac{f_{\Lambda}(\lambda_1|L'_0, n'_0, L_0, n_0)}{f_{\Lambda}(\lambda_0|L'_0, n'_0, L_0, n_0)} \quad (12)$$

が次の不等式 (13) を満たす間は決定を保留し、尤度比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。

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < R < \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (13)$$

ここで、 $\alpha$  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)、 $\beta$  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。式 (12)(13) を整理すると、調査済み長さ  $L_0$  に対する被害確認数  $n_0$  の条件式が得られる。

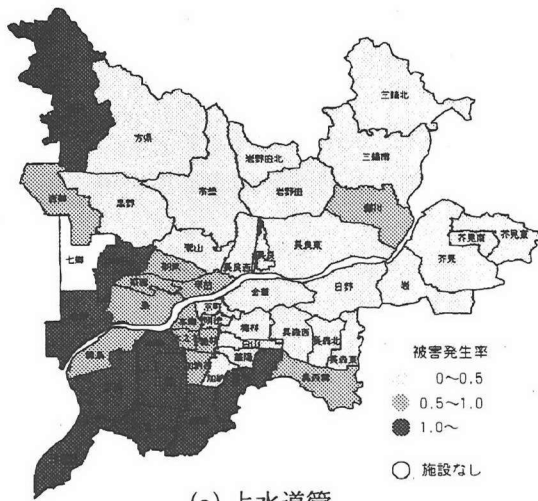
$$\frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 < n_0 < \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 \quad (14)$$

生産者危険  $\alpha$  および消費者危険  $\beta$  に大きな値を設定するほど上下限の間隔は狭まり、迅速に結論に達するが誤りの危険性が高い。逆に小さな値を設定するほど上下限の間隔は広がり、結論に達するのは遅いが誤りの危険性は低くなる。事前分布を規定する  $L'_0$  と  $n'_0$  は、式 (14) の上下限値を

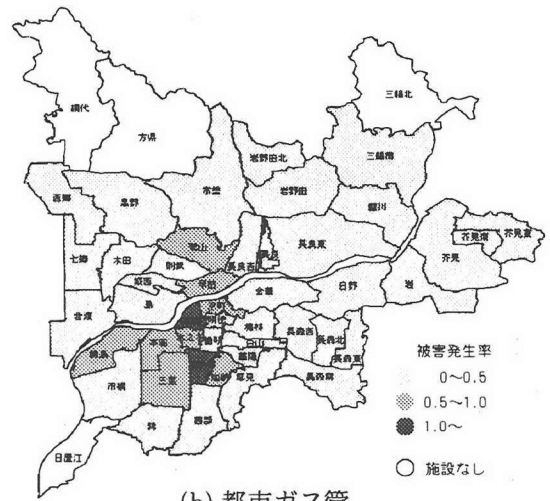
$$n^* = n'_0 - \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} L'_0 \quad (15)$$

だけ下方にシフトさせる<sup>6)</sup>。

調査開始前  $L_0$  の時点で既に式 (14) 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。その条件を  $L'_0$  に対する  $n'_0$  の条件式で表わすと、緊急対応を

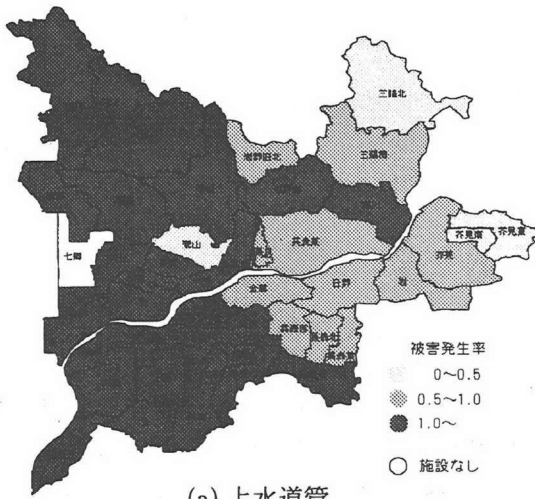


(a) 上水道管

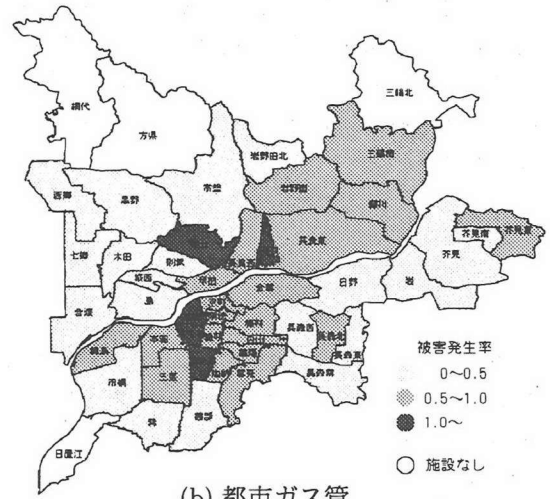


(b) 都市ガス管

図3 関ヶ原—養老断層系を想定した場合の被害発生率分布



(a) 上水道管



(b) 都市ガス管

図4 岐阜—宮線を想定した場合の被害発生率分布

行う、行わないという意思決定に対してそれぞれ以下のようになる。

$$n'_0 > \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)L'_0 + \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \quad (16)$$

$$n'_0 < \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)L'_0 + \log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \quad (17)$$

## 5. 岐阜市における緊急対応のケーススタディー

### (1) 岐阜市におけるライフライン施設の被害予測

岐阜市は、阿寺断層系 (M=7.9)、関ヶ原—養老断層系 (M=7.7)、岐阜—宮線 (M=7.3) の各断層を震源として 49 小学校区別に被害予測を行っている<sup>9)</sup>。このうち、阿寺断層系は岐阜市からの距離が十分に遠く、ほぼ無被害と予測されていることから、関ヶ原—養老断層系および岐阜—宮線のみを対象とした。表

1 は、上水道管および都市ガス管の管路延長および被害箇所数を、校区別にまとめたものである。管路延長が 1km 未満の校区については除外し、上水道 48 校区、ガス 45 校区を検討対象とした。図 3 および図 4 は、被害発生率の分布を示したものである。震源の近い岐阜—宮線を想定した場合の方が、全体的に被害発生率が高い。校区別に見ると、上水道管は岐阜市西部において、都市ガス管は長良川沿いの岐阜市中央部において、それぞれ高い被害発生率が集中している。

### (2) シミュレーションの前提条件

岐阜市の上水道・ガス供給システムのそれぞれについて、校区別の被害想定結果と同一の被害発生率を母数とする指数乱数により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を行う。被害想定結果と同一の被害発生率を被災パターンの生成に用いることは、想定結果と大きく異なる事態が発生することを前提とするものであり、緊急対応にとってはかなり有利な条件を設定してい

表1 校区別の被害推定結果<sup>9)</sup>と事前分布のパラメータ ( $n'_0, L'_0$ )

No.	校区	上水道管					都市ガス管					$n'_0$
		管路総延長 $L_T$	関ヶ原-養老断層系		岐阜-一宮線		管路総延長 $L_T$	関ヶ原-養老断層系		岐阜-一宮線		
			$\lambda$	$L'_0$	$\lambda$	$L'_0$		$\lambda$	$L'_0$			
1	金華	25.97	0.26	42.7	0.71	15.6	25.34	0.38	29.2	0.76	14.6	10.1
2	京町	23.64	0.44	25.3	1.19	9.3	17.17	0.50	22.2	0.92	12.1	10.1
3	明德	17.77	0.39	28.5	1.07	10.4	24.11	0.31	35.8	0.58	19.2	10.1
4	徹明	25.16	0.52	21.4	1.43	7.8	20.93	0.36	30.9	0.64	17.4	10.1
5	梅林	36.84	0.43	25.8	1.17	9.5	41.31	0.39	28.5	0.82	13.6	10.1
6	白山	29.92	0.48	23.1	1.31	8.5	11.12	0.46	24.2	0.90	12.3	10.1
7	華陽	27.42	0.41	27.1	1.12	9.9	24.38	0.45	24.7	0.92	12.1	10.1
8	本郷	25.05	0.56	19.8	1.50	7.4	33.19	1.06	10.5	1.53	7.3	10.1
9	木之本	25.63	0.58	19.2	1.55	7.2	20.70	0.64	17.4	1.09	10.2	10.1
10	本荘	45.96	1.11	10.0	2.27	4.9	37.88	0.64	17.4	0.87	12.8	10.1
11	日野	54.77	0.26	42.7	0.66	16.8	41.00	0.11	101.0	0.28	39.7	10.1
12	長良	26.40	0.36	30.9	0.94	11.8	15.03	0.49	22.7	1.09	10.2	10.1
13	長良西	58.88	0.47	23.6	1.23	9.0	47.31	0.37	30.0	0.71	15.6	10.1
14	長良東	54.89	0.36	30.9	0.95	11.7	51.75	0.25	44.4	0.63	17.6	10.1
15	島	47.18	0.61	18.2	1.49	7.5	45.67	0.25	44.4	0.37	30.0	10.1
16	早田	37.67	0.67	16.6	1.73	6.4	29.67	0.51	21.8	0.92	12.1	10.1
17	城西	35.21	0.63	17.6	1.55	7.2	23.39	0.25	44.4	0.41	27.1	10.1
18	三里	41.81	1.50	7.4	2.76	4.0	22.60	0.68	16.3	0.70	15.9	10.1
19	鷺山	50.20	0.05	222.2	0.15	74.1	37.08	0.92	12.1	1.38	8.1	10.1
20	加納	40.31	0.39	28.5	1.04	10.7	30.83	0.56	19.8	0.99	11.2	10.1
21	加納西	27.23	0.77	14.4	1.97	5.6	28.84	1.60	6.9	1.62	6.9	10.1
22	則武	41.39	0.64	17.4	1.60	6.9	33.05	0.21	52.9	0.37	30.0	10.1
23	常盤	48.74	0.38	29.2	1.04	10.7	10.97	0.14	79.4	0.36	30.9	10.1
24	長森南	55.79	0.66	16.8	1.64	6.8	28.88	0.22	50.5	0.46	24.2	10.1
25	長森北	34.68	0.30	37.0	0.80	13.9	22.83	0.23	48.3	0.58	19.2	10.1
26	長森西	44.19	0.28	39.7	0.74	15.0	22.78	0.13	85.5	0.31	35.8	10.1
27	長森東	33.51	0.30	37.0	0.76	14.6	11.29	0.14	79.4	0.35	31.7	10.1
28	木田	9.27	1.07	10.4	2.39	4.6	5.77	0.20	55.6	0.36	30.9	10.1
29	岩野田	38.02	0.41	27.1	1.06	10.5	23.88	0.29	38.3	0.74	15.0	10.1
30	岩野田北	34.95	0.33	33.7	0.86	12.9	13.13	0.01	1111.1	0.03	370.4	10.1
31	黒野	93.85	0.45	24.7	1.20	9.3	11.25	0.01	1111.1	0.03	370.4	10.1
32	方県	35.16	0.39	28.5	1.02	10.9	0.00	-	-	-	-	-
33	茜部	52.10	1.94	5.7	3.60	3.1	21.54	0.45	24.7	0.47	23.6	10.1
34	鶯	32.64	2.39	4.6	3.97	2.8	14.93	0.08	138.9	0.08	138.9	10.1
35	西郷	34.65	0.79	14.1	1.86	6.0	3.62	0.02	555.6	0.03	370.4	10.1
36	七郷	0.26	-	-	-	-	17.21	0.06	185.2	0.08	138.9	10.1
37	市橋	51.30	1.88	5.9	2.97	3.7	47.04	0.39	28.5	0.39	28.5	10.1
38	岩	40.36	0.26	42.7	0.61	18.2	11.52	0.20	55.6	0.48	23.1	10.1
39	鏡島	37.86	0.92	12.1	1.69	6.6	35.93	0.63	17.6	0.92	12.1	10.1
40	厚見	50.73	1.22	9.1	2.66	4.2	40.04	0.49	22.7	0.84	13.2	10.1
41	日置江	1.35	2.54	4.4	3.54	3.1	0.07	-	-	-	-	-
42	芥見	50.41	0.23	48.3	0.52	21.4	17.88	0.21	52.9	0.48	23.1	10.1
43	藍川	44.85	0.53	21.0	1.16	9.6	22.06	0.26	42.7	0.55	20.2	10.1
44	芥見東	30.20	0.23	48.3	0.48	23.1	25.87	0.33	33.7	0.69	16.1	10.1
45	芥見南	17.76	0.20	55.6	0.44	25.3	16.61	0.19	58.5	0.41	27.1	10.1
46	合渡	12.51	1.81	6.1	3.03	3.7	6.61	0.07	158.7	0.07	158.7	10.1
47	三輪南	56.34	0.32	34.7	0.74	15.0	1.48	0.22	50.5	0.52	21.4	10.1
48	三輪北	42.16	0.17	65.4	0.39	28.5	0.00	-	-	-	-	-
49	網代	27.11	1.83	6.1	2.60	4.3	0.00	-	-	-	-	-

ることになる。ただし、各校区での被害箇所数はポアソン分布に従うので、被害想定に対して多少のばらつきが付加されることになる。また本研究では、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様と仮定したが、その妥当性の確認についてはさらに詳細な検討を必要とするため、今後の課題とした。

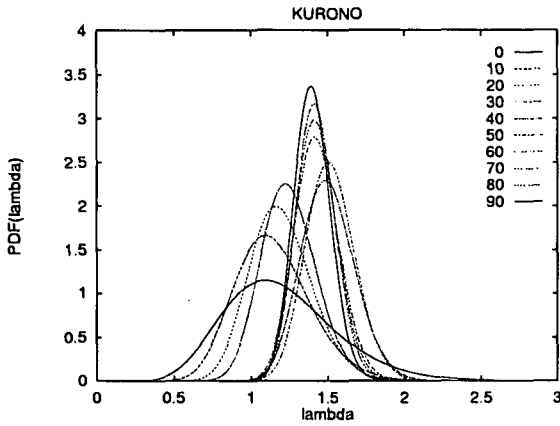
(3) 被害発生率と被害箇所数の逐次推定に用いるパラメータ

岐阜市が行った被害推定結果における被害発生率を  $\mu_\lambda$  とし、式 (4) および式 (5) を用いて事前情報

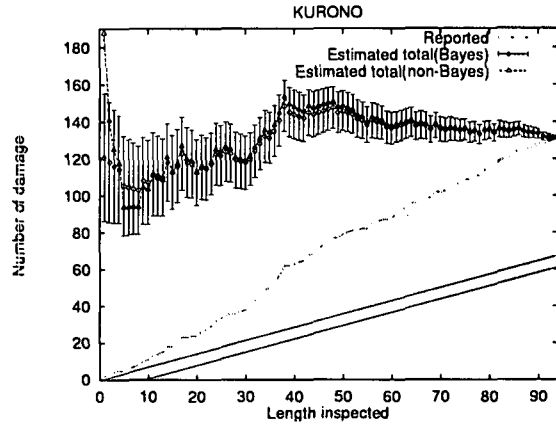
$n'_0, L'_0$  を得る。ただし変動係数  $\delta_\lambda$  については、すべての校区における被害推定の精度を一様とみなして、全校区で一定と仮定し、過去の震害データを参考にして 30% とする。表 1 に、このようにして算出した  $n'_0, L'_0$  を示す。

(4) 被害発生率の逐次確率比検定に用いるパラメータ

4. で説明したパラメータ  $\lambda_0, \lambda_1, \alpha, \beta$  の決定法について述べる。水道管の場合は、被害発生率と断水率の関係から  $\lambda_0=0.50, \lambda_1=1.0$  とし、ガス供給システムの場合は、被害発生率と SI 値の関係から、 $\lambda_0=0.50, \lambda_1=1.0$  とした。次に、誤り確率  $\alpha, \beta$  の値

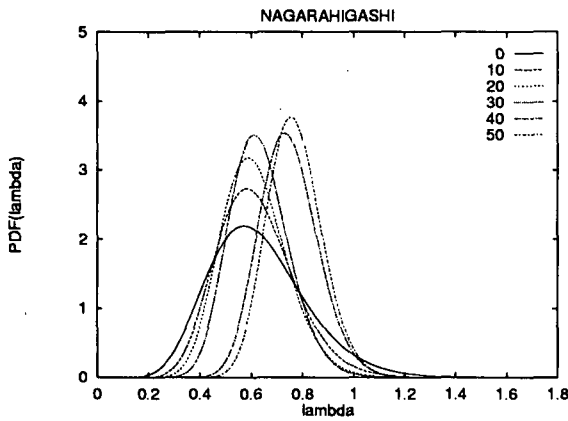


(a) 被害発生率の逐次推定

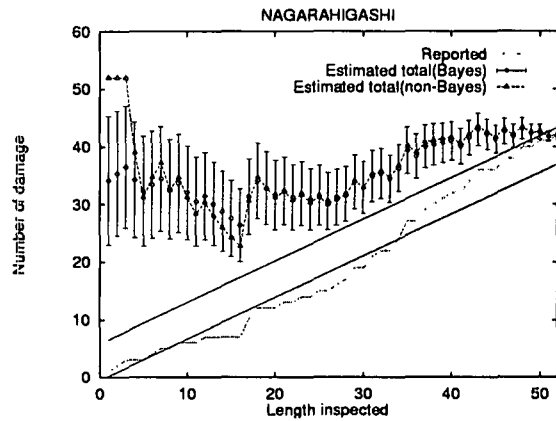


(b) 被害箇所数の逐次推定および確認過程

図5 岐阜—一宮線を想定した場合の上水道管被害の逐次推定過程 (黒野校区)



(a) 被害発生率の逐次推定



(b) 被害箇所数の逐次推定および確認過程

図6 岐阜—一宮線を想定した場合の都市ガス管被害の逐次推定結果 (長良東校区)

としては  $\alpha=\beta=0.05$  および  $\alpha=\beta=0.10$  の2ケースで予備検討を行った結果を踏まえて、後者を採用した。

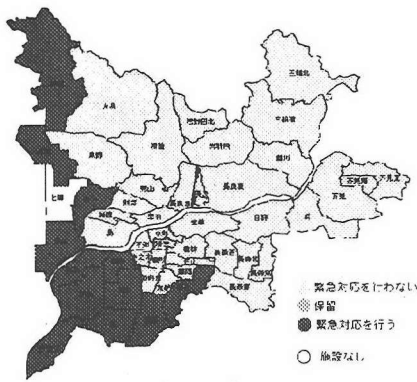
## 6. 結果と考察

被害の逐次推定過程の一例として、岐阜—一宮線を想定した場合の、黒野校区の上水道管と長良東校区の都市ガス管をとりあげて説明する。黒野校区でのパラメータは、 $L_T=94$ ,  $L'_0=9.3$ ,  $n'_0=10.1$ ,  $\lambda_0=0.5$ ,  $\lambda_0=1.0$ ,  $\alpha=\beta=0.10$  であり、長良東校区でのパラメータは、 $L_T=52$ ,  $L'_0=17.6$ ,  $n'_0=10.1$ ,  $\lambda_0=0.5$ ,  $\lambda_0=1.0$ ,  $\alpha=\beta=0.10$  である。モンテカルロ法を用いて、黒野校区では被害発生率  $\lambda=1.20$ 、長良東校区では被害発生率  $\lambda=0.63$  を母数とする指数乱数により被害間隔を与えて被害パターンを生成した結果、実際の被害箇所数  $N_T$  はそれぞれ 132, 42 となった。

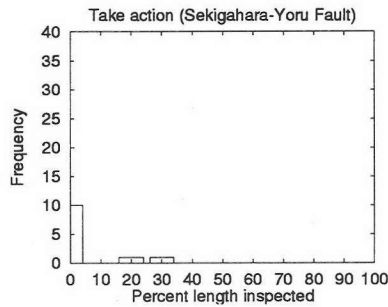
図5(a)と図6(a)は、被害発生率の逐次推定の様子を表したものである。実線は調査開始前の事前分布を表し、その他の線は時間の経過に伴って蓄積される確認被害数を取り入れて逐次更新した事後分布である。

黒野校区では  $L_0=10 \sim 90$ 、長良東校区では  $L_0=10 \sim 50$  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事後分布の分散が減少し、真値に近づく様子が確認できる。

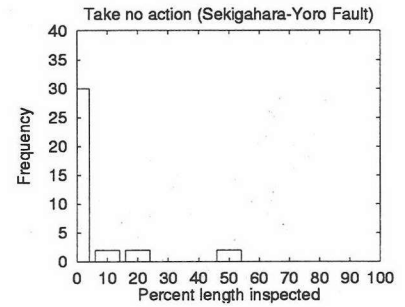
図5(b)と図6(b)は、被害箇所数の逐次推定および確認過程を示したものである。横軸は調査済みの距離  $L_0$ 、縦軸は被害箇所数を表し、点線はモンテカルロ法を用いて生成した被災パターンを用いた各段階での確認被害数  $n_0$ 、 $\Delta$  は式(8)で求められる単純推定値  $\tilde{N}_T(L_0)$  を表す。式(9)で得られる逐次推定結果  $\hat{N}_T(L_0)$  は、 $\mu_N \pm \sigma_N$  をエラーバー付きで示している。また図中の2直線は、不等式(14)の上下限値を表している。単純推定法による推定被害箇所数  $\tilde{N}_T(L_0)$  は、初期段階において実被害数と大きくかけ離れ、被害の確認情報の入手に伴って大きく変動している。これに対して、ベイズ推定法による推定被害箇所数  $\hat{N}_T(L_0)$  は、初期段階では事前分布の影響を受けているものの、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。黒野校区では「緊急対応を行わない」という決定が調査開始前に決定されており、地震



(a) 意思決定結果

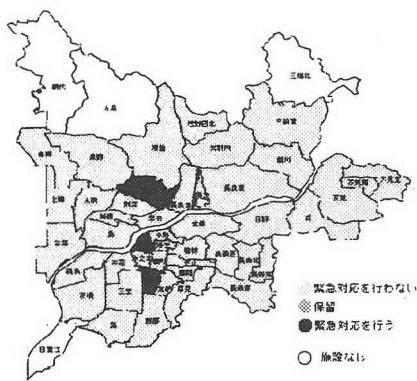


(b) 緊急対応を行う場合の調査長さ (%) の頻度分布

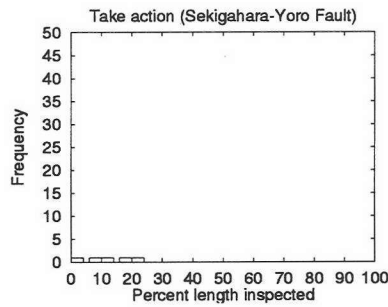


(c) 緊急対応を行わない場合の調査長さ (%) の頻度分布

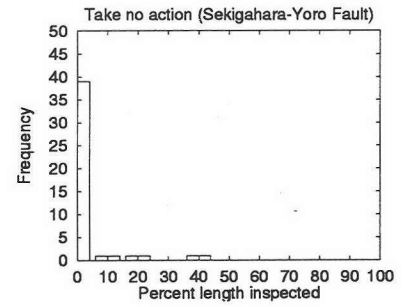
図7 関ヶ原-養老断層系を想定した場合の上水道管に関する意思決定



(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8 関ヶ原-養老断層系を想定した場合の都市ガス管に関する意思決定

表2 意思決定内容ごとに分類した校区数の集計

想定地震/システム	対応なし	決定保留	対応あり
関-養/上水道管	36	0	12
岐-一/上水道管	10	2	36
関-養/都市ガス管	42	0	3
岐-一/都市ガス管	30	1	14

動強度のみから緊急対応の有無を決定することができるケースであることを示している。長良東校区では、 $L_0=5$  という比較的初期の段階で「緊急対応を行わない」という決定がされており、意思決定が迅速に行われている。

最後に、全校区における意思決定内容をまとめた結果を示す。表2は、意思決定内容ごとに分類した校区数の集計を示す。また図7と図9は上水道管、図8と図10は都市ガス管で、(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。

関ヶ原-養老断層系を想定した場合は、図7および

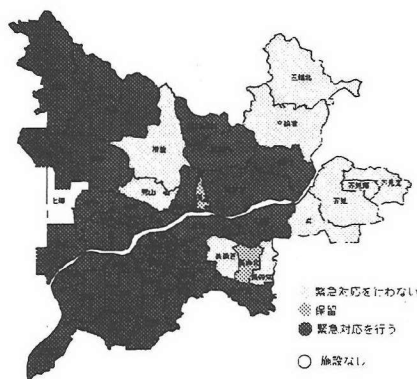
図8に示すように、「緊急対応を行う」という決定がされている校区が、上水道管では12校区、都市ガス管では3校区存在するものの、ほとんどの校区で「緊急対応を行わない」という決定が調査開始前に下されている。岐-一宮線を想定した場合は、図9および図10に示すように、「緊急対応を行う」という決定がされている校区が、上水道管では36校区、都市ガス管では14校区となっている。また、上水道管では27校区が調査開始前に「緊急対応を行う」、都市ガス管では23校区が調査開始前に「緊急対応を行わない」と決定する即時対応が可能であることを示している。

## 7. おわりに

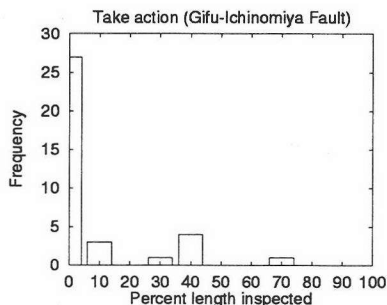
様々なリアルタイム地震防災システムが開発され稼働している現在においても、被害の即時推定における不確定性を完全に無くすことが不可能である以上、即時対応はある種の「賭け」である。一方、確認被害に基づく従来型の対応では、意思決定に至るまでの時間がかかり過ぎ、緊急対応が遅れる原因となる。

こうしたギャップを埋めることを目的として、本研

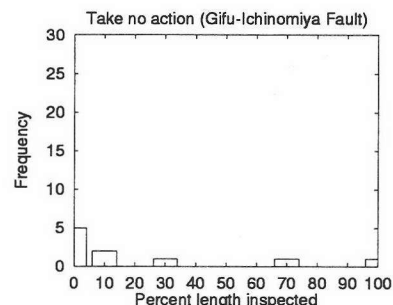




(a) 意思決定結果

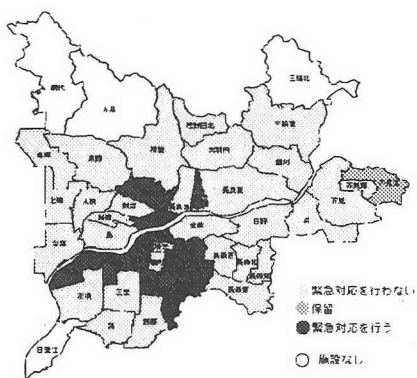


(b) 緊急対応を行う場合の調査長さ (%) の頻度分布

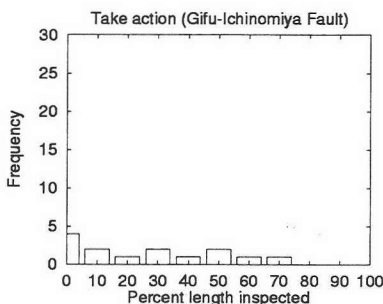


(c) 緊急対応を行わない場合の調査長さ (%) の頻度分布

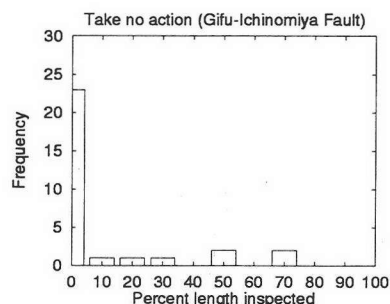
図9 岐阜—宮線を想定した場合の上水道管に関する意思決定



(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10 岐阜—宮線を想定した場合の都市ガス管に関する意思決定

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、被害の全体像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の方法論を提案した。関ヶ原—養老断層系と岐阜—宮線の2ケースを想定して、岐阜市内の上水道管および都市ガス管の意思決定過程のシミュレーションを行った結果、調査に着手することなく即時的に緊急対応を行う場合と行わない場合、ある程度の被害調査を経て緊急対応を行う場合と行わない場合、全調査が終了してもなお意思決定が保留される場合、といったあらゆる状況が網羅的にシミュレートされていることを確認した。

本研究で提案した基礎的モデルをより実用的なモデルに発展させるには、被害発生率を一様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。

【参考文献】

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577，pp.1-16，1997.10.
- 2) 土木学会地震工学委員会リアルタイム地震防災研究小委員会：第1回リアルタイム地震防災シンポジウム—リアルタイム地震防災の現状と今後—，1999.1.
- 3) 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，pp.15-180，1991.11.
- 4) 上田泰：個人と集団の意思決定—人間の情報処理と判断ヒューリスティック—，文真堂，1997.9.
- 5) 繁榊算男：ベイズ統計入門，東京大学出版会，1985.4.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 三根久・河合一：信頼性・安全性の数理，朝倉書店，pp.70-89，1982.
- 9) 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.