

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

Simulation of Post-Earthquake Decision Making Process Based on Sequential Data Processing of Damage Information

○能島 暢呂¹, 杉戸 真太¹

Nobuoto NOJIMA¹ and Masata SUGITO¹

¹ 岐阜大学工学部土木工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

In earthquake disaster, decision makers in emergency response are involved in a dilemma between accuracy of damage estimation and promptness of decision making. In such a situation, both rapid estimation of the outline of damage and its sequential update based on the actual damage information are essentially important. In this study, a Bayesian model describing the sequential process of damage estimation and decision making thereby is presented for the purpose of developing a real-time decision support system. On this basis, post-earthquake decision making process has been simulated.

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

1. はじめに

地震後、早期に被害状況を把握することは、緊急対応を迅速かつ正確に行うための要件である。しかし、正確さを重んずるあまり確認情報の蓄積を待つのみでは、一刻を争う状況の中で緊急対応の時機を逸しかねない。逆に、状況把握が不十分なままに意思決定が行われた場合、誤った判断が災害の拡大を助長する恐れがある。緊急を要する判断には「巧遅・拙速」のジレンマ¹⁾が付きものであるが、わが国では災害に限らず危機対応全般において、緊急対応が後手に回るパターンが繰り返されており、なかでも阪神・淡路大震災は、危機管理体制の不具合が最悪の形で表われた災害であるといえる。その教訓から近年わが国では、迅速・正確な被害把握と緊急対応を目的とした取り組みが活発化している。地震動モニタリングに基づく各種の早期被害推定システム²⁾やリモートセンシング画像による被害把握技術の開発³⁾は、地震被害に関わる直接・間接の情報源の多様化と高度化によって、被害推定および被害把握の迅速化・高精度化を目指したものである。また供給系・交通系ライフラインにおける各種の実時間制御システム²⁾は、対応の迅速化のため人間の判断を排除し、システム制御を自動処理化したものである。

こうしたリアルタイム地震防災システムは、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、情報の受け手である意思決定者の判断のあり方に関しては、かなり問題視されながら十分に研究がなされていない。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⁴⁾(時としてバイアスとして作用する)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。

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て、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。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、ベイズ推定法に基づく統計的推論⁵⁾を有効に適用することができる。以上

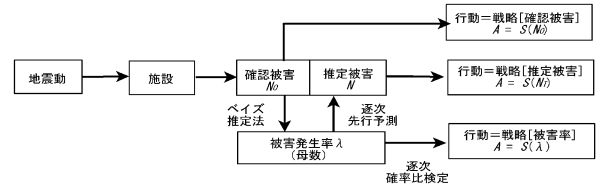


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

のことに着目して筆者らはこれまで、地震動強度情報に応じて被害推定の確率分布を逐次更新し、ベイズ決定方式により期待被害を最小化する意思決定モデル^{6),7)}を提案し、情報入手に伴って不確実性が低減されるプロセスを定量化した。さらに、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⁸⁾。文献8)のモデルでは、経験的判断を反映した被害発生率の事前分布を付与し、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り、図1に示すように、ベイズ推定法による被害発生率に基づいた推定被害と、被害発生率の逐次確率比検定の結果を意思決定の材料とするところに特徴がある。

本研究では2.と3.において、文献8)で提案した逐次推定法と逐次決定過程について概説する。4.では仮想的な2つの被災パターンを用いて、被害発生率と被害箇所数の逐次推定の数値計算例を示す。さらに5.においては、モデルパラメータが意思決定に及ぼす影響について比較・考察するため、モンテカルロ・シミュレーションにより多数の被災パターンを生成し、モデル挙動について考察を行う。

2. 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、単位長さあたりの被害発生率 λ 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、 λ の最尤推定量は $\hat{\lambda} = \frac{n_0}{L_0}$ で与えられるが、ベイズ推定法を適用する場合には、 $P(n|L_0, \lambda) = \frac{(\lambda L_0)^n e^{-\lambda L_0}}{n!}$ が尤度関数となる。被害発生率に関して何の手がかりもない状態では、 λ の事前分布は一様分布と仮定できるので、 n_0

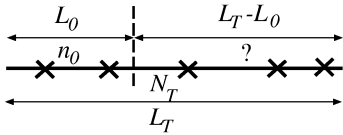


図2 確認情報に基づく被害の逐次先行予測

箇所の被害情報が得られた後の λ の事後分布は、ガンマ分布 $f_{\Lambda}(\lambda|L_0, n_0) = \frac{L_0(\lambda L_0)^{n_0} e^{-\lambda L_0}}{n_0!}$ となる。一方、被害調査とは独立に地震動強度情報に基づいて「長さ L'_0 あたり n'_0 箇所の被害が予想される」というおおよその経験的判断を下すことができる場合、 λ の共役事前分布としてガンマ分布を用いれば、 λ の事後分布は次式で与えられる。

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

この場合、長さ L の構造物の被害箇所数が n となる確率は、ポアソン分布と式(1)の複合分布より負の二項分布で与えられる。

$$P(n, L) = \frac{(n + n_0 + n'_0)!}{n!(n_0 + n'_0)!} \left(\frac{L}{L + L_0 + L'_0} \right)^n \left(\frac{L_0 + L'_0}{L + L_0 + L'_0} \right)^{n_0 + n'_0 + 1} \quad (2)$$

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 $\hat{N}_T(L_0) = n_0 L_T / L_0$ 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(2)の平均 μ_N および標準偏差 σ_N を用いて変動を見込んだ推定式 $\hat{N}_T(L_0) = \mu_N \pm \sigma_N$ を得ることができる。ここに、 μ_N, σ_N は次式で与えられる。

$$\mu_N = n_0 + \frac{L_T - L_0}{L_0 + L'_0} (n_0 + n'_0 + 1) \quad (3)$$

$$\sigma_N = \frac{\sqrt{(L_T - L_0)(L_T + L'_0)(n_0 + n'_0 + 1)}}{L_0 + L'_0} \quad (4)$$

3. 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

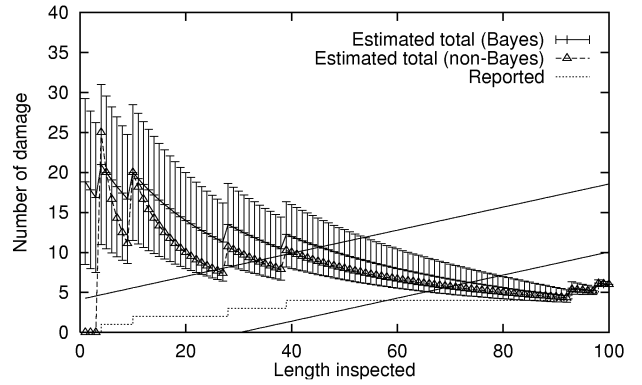
いま「被害発生率が λ_0 (帰無仮説 H_0) 以下であれば緊急対応を行わず、 λ_1 (対立仮説 H_1) 以上であれば緊急対応を行う ($\lambda_0 < \lambda_1$)」という行動のルールを想定して、被害情報が蓄積されるプロセスにおける意思決定のタイミングについて考察するため、Wald による逐次確率比検定 (SPRT) ⁹⁾ を導入する。まず、微小区間 ΔL ごとに被害の有無を調べる逐次検査を行い、尤度比に基づく仮説検定を行うことを考える。逐次確率比検定の方法では、区間 $m\Delta L$ を調査した段階での被害箇所数を k として、尤度比 R_m が

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < R_m < \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (5)$$

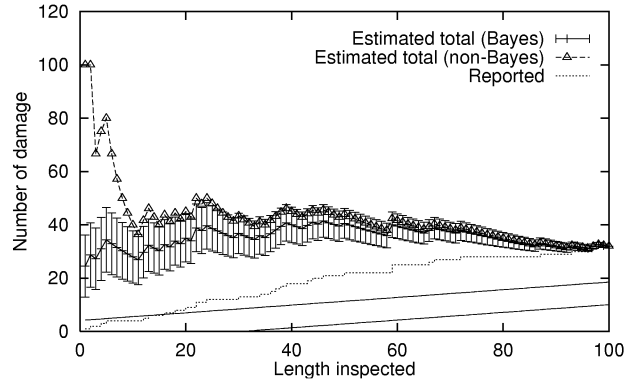
を満たす間は決定を保留し、尤度比が上限を破れば仮説 H_1 を採用、下限を破れば仮説 H_0 を採用する。ここで、

$$R_m = \frac{f_{\Lambda}(\lambda_1|L'_0, n'_0)}{f_{\Lambda}(\lambda_0|L'_0, n'_0)} \cdot \frac{\theta_1^k (1 - \theta_1)^{m-k}}{\theta_0^k (1 - \theta_0)^{m-k}} \quad (6)$$

であり、 $\theta_0 = 1 - e^{-\lambda_0 \Delta L}$ および $\theta_1 = 1 - e^{-\lambda_1 \Delta L}$ は、それぞれ仮説 H_0 、仮説 H_1 のもとでの区間 ΔL の被害発生確率である。また 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



(a) Case 1 ($\lambda = 0.05$)



(b) Case 2 ($\lambda = 0.40$)

図3 被害の逐次推定

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(5)を整理すると、 m に対する k の条件式が得られる。さらに $\Delta L \rightarrow 0$ の極限をとると二項分布がポアソン分布に収束することから、式(1)を用いて尤度比を算出した場合と同じ結果となり、 L_0 に対する n_0 の条件式が得られる。

$$\frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 < n_0 < \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)(L_0 + L'_0) + \log \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} - n'_0 \quad (7)$$

α (生産者危険) および β (消費者危険) 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(7)の上下限値を $n^* = n'_0 - \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} L'_0$ だけ下方にシフトさせる⁸⁾。

4. 仮想的被災パターンによる逐次推定の数値計算例

以上の逐次推定手法を用いた数値計算例を示す。パラメータは、 $L_T = 100$, $L'_0 = 20$, $n'_0 = 3$, $\lambda_0 = 0.1$, $\lambda_1 = 0.2$, $\alpha = \beta = 0.05$, とした。モンテカルロ法を用いて、 $\lambda = 0.05$ (Case 1) および $\lambda = 0.4$ (Case 2) を母数とする指数乱数により被害間隔を与えて仮想的な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 6, 32 となった。

図3に被害の逐次推定の結果を示す。横軸は調査済みの距離 L_0 、縦軸は被害箇所数で、点線は各段階で確認済みの被害箇所数 n_0 、 Δ は単純推定値 $\hat{N}_T(L_0)$ を表わす。逐次推定結果 $\hat{N}_T(L_0) = \mu_N \pm \sigma_N$ はエラーバー付きで示している。調査開始後の初期段階では経験的判断に基づく事前分布の影響を受け、推定結果と実際の被害箇所数との差はやや開いているものの、実被害を概略的に捉えている。特に、

表 1 モンテカルロ・シミュレーションのパラメータ

	L_T	L'_0	n'_0	λ_0	λ_1	α	β
Case A	100	20	3	0.1	0.2	0.05	0.05
Case B	100	20	5	0.1	0.2	0.05	0.05
Case C	100	20	1	0.1	0.2	0.05	0.05
Case D	100	20	3	0.1	0.2	0.02	0.02
Case E	100	20	3	0.1	0.2	0.10	0.10

$\widetilde{N}_T(L_0)$ は初期段階において推定値が大きく変動するのに対し、 $\bar{N}_T(L_0)$ は比較的安定した傾向を示す。図中の二本の直線は条件式 (7) の上下限値を表す。逐次確率比検定の結果、Case 1 では $L_0 = 58$ まで「緊急対応を行わない」という決定が保留され、警戒体制の解除まで慎重な態度が持続されている。一方、Case 2 では $L_0 = 16$ で「緊急対応を行う」ことが決定され、重大な意思決定が迅速に行われている。

5. モンテカルロ法による数値計算例

4. では、特定の 2 種類の被災パターンについての数値計算例を示した。ここでは、パラメータの組み合わせを 5 種類考え、モンテカルロ・シミュレーションにより多数の被災パターンを発生させ、逐次確率比検定により意思決定を行った結果について考察する。

まず、被害発生率 λ を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 のように変化させて 1000 回ずつモンテカルロ・シミュレーションを試行し、6000 通りの被災パターンを得た。これらの被災パターンに対して、表 1 に示す 5 種類の条件を与えた場合の意思決定過程の相違について比較を行う。Case A ~ E に共通のパラメータは、 $L_T = 100$, $L'_0 = 20$, $\lambda_0 = 0.1$, $\lambda_1 = 0.2$ であり、Case A は基本ケースとして 4. と同じく $n'_0 = 3$, $\alpha = \beta = 0.05$ とした。Case B と Case C は、意思決定者の事前分布の相違が及ぼす影響をみるため、 $n'_0 = 5$, $n'_0 = 1$ としたもので、Case A と比較してそれぞれ、大きめ、および小さめの初期推定から被害推定を開始することを想定している。Case D と Case E は、生産者危険 α および消費者危険 β の設定の相違が及ぼす影響をみるため、 $\alpha = \beta = 0.02$, $\alpha = \beta = 0.10$ としたもので、Case A と比較してそれぞれ、「判断的的確さ」および「判断の迅速さ」を重視した意思決定が行われることを想定している。

表 2 は意思決定の結論の内訳、すなわち、「緊急対応を行わない ($\lambda < \lambda_0$)」「決定保留 ($\lambda_0 < \lambda < \lambda_1$)」、「緊急対応を行う ($\lambda > \lambda_1$)」、という結果となった回数を示す。Case A と比較すると、「緊急対応を行う」回数が、Case B では約 18% 増加しているのに対し、Case C では約 14% 減少している。また、判断的的確さを重視した Case D では、「決定保留」が case A と比べて約 67% 増加しているのに対し、判断の迅速さを重視した Case E では約 51% 減少している。

図 4(a)-(e) は、表 2 の傾向をより詳しく調べるため、各シミュレーション試行における被害箇所数の実現値 N_T を横軸にとり、「緊急対応を行わない」、「決定保留」、「緊急対応を行う」と判断された回数の頻度分布を表示したものである。Case A では、被害箇所数 N_T が 11 から 18 の間にある場合に、「決定保留」となる可能性が高く、被害が多発すれば緊急対応が行われ、被害が少なければ緊急対応が行われない、というように合理的な意思決定が下されている。これに対して Case B では、被害箇所数が少ない場合にも「緊急対応を行う」と判断される場合も多く、「悲観的=安全側」態度となっている。逆に Case C では、被害箇所数が多い場合にも「緊急対応を行わない」と判断される場合があり、「楽観的=危険側」態度となっている。Case D では、「決定保留」となる可能性が高いものの、「緊急対応を行う」、「行わない」の判断は明確に分離されている。一方 Case E では、「決定保留」となる可能性は低いものの、「緊急対応を行う」、「行わない」の判断の境界はあいまいである。Case D は「巧遅型」およ

表 2 意思決定の結果の分類 (各ケース 6000 回)

	緊急対応なし	決定保留	緊急対応あり
Case A	1913	1010	3077
Case B	1402	980	3618
Case C	2510	853	2637
Case D	1516	1686	2798
Case E	2195	502	3303

び Case E は「拙速型」ということもできる。

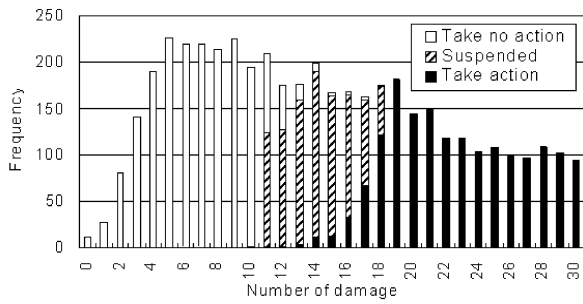
図 5(a)-(e) は、各シミュレーション試行における被害箇所数の実現値 N_T を横軸にとり、意思決定が行われた時点での調査長さ L_0 を縦軸にプロットしたものである。3 種類のプロットの記号 (\diamond , \triangle , $+$) はそれぞれ、「緊急対応を行わない」、「決定保留」、「緊急対応を行う」に対応している。Case A において意思決定が下されるタイミングは、 $N_T = 10, 20$ 前後を頂点とする錐状の範囲に分布しており、 $N_T = 10$ および 20 付近では「決定保留」となるか、さもなくば意思決定が遅れる傾向にある。被害箇所数が極端に多くなると、「緊急対応を行う」意思決定が早い段階で下されている。それに対し、被害箇所数が極端に少ない場合においては、少なくとも $L_0 = 31$ の調査で被害がないことを確認しない限り、「緊急対応を行わない」意思決定が下されない。その後も離散的なタイミングでのみ意思決定が下されることがわかる。Case B ~ E でも Case A とほぼ同様の傾向が認められるが、意思決定者の事前分布や生産者危険・消費者危険の相違によって、錘の形状や重なり具合が異なっていることがわかる。「緊急対応を行わない」意思決定までに要する最小調査距離は、それぞれ $L_0 = 45, 17, 40, 23$ となっている。

6. おわりに

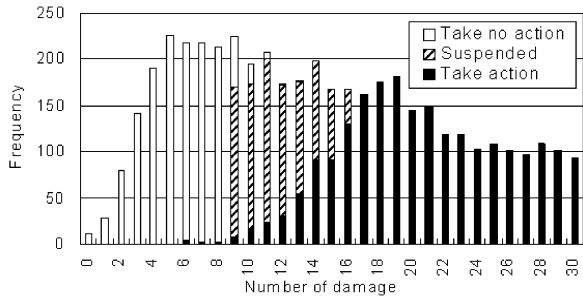
本研究では、被害発生率に関する経験的判断と確認情報の蓄積に応じて、被害の全体像を逐次推定する方法について基礎的な検討を行い、シミュレーション事例を示した。今後、ベイズ決定方式による意思決定モデル^{6),7)}とあわせて、地震災害時の「情報~被害推定~行動」に関する数理モデルを構築し、即時対応への有効活用を目指して行きたい。

【参考文献】

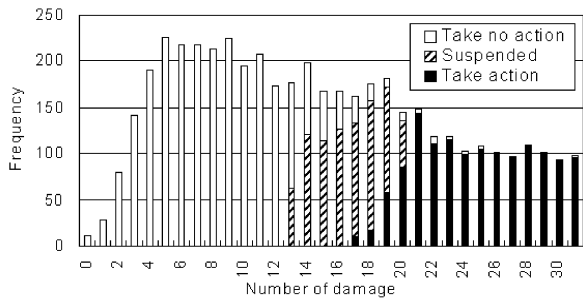
- 1) 佐々淳行: 完本 危機管理のノウハウ, PART 1 信頼されるリーダーの条件, 文藝春秋, pp.15-180.
- 2) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577, pp.1-16, 1997.10.
- 3) 山崎文雄・松岡昌志・小川直樹・長谷川弘忠・青木久: 上空および人工衛星からのリモートセンシング被害把握技術, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.221-226, 1998.11.
- 4) 上田泰: 個人と集団の意思決定 一人間の情報処理と判断ヒューリスティックス, 文眞堂, 1997.9.
- 5) Ang, A. 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.
- 6) 能島暢呂・杉戸真太: 地震時緊急対応における意思決定プロセスのモデル化とその最適化, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, 1999.7, pp.1025-1028.
- 7) Nojima, N. and Sugito, M.: Bayes Decision Procedure Model for Post-Earthquake Emergency Response, Proc. of the 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE/ASCE Monograph No.16, Seattle, WA, USA, August, 1999, pp.217-226.
- 8) 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, 1999.10.
- 9) 三根久・河合一: 信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, 1982, pp.70-89.



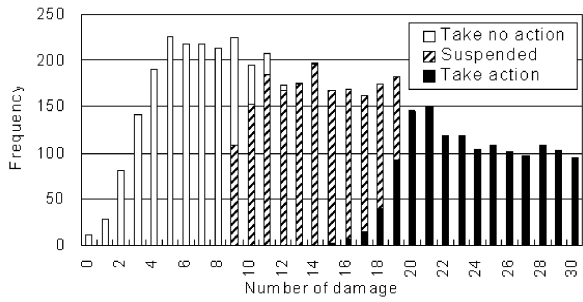
(a) Case A



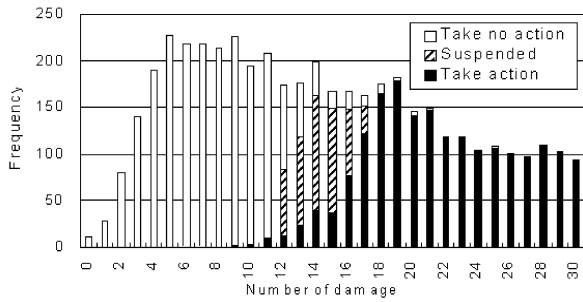
(b) Case B



(c) Case C

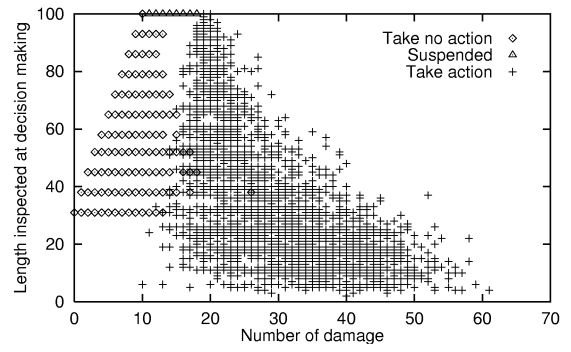


(d) Case D

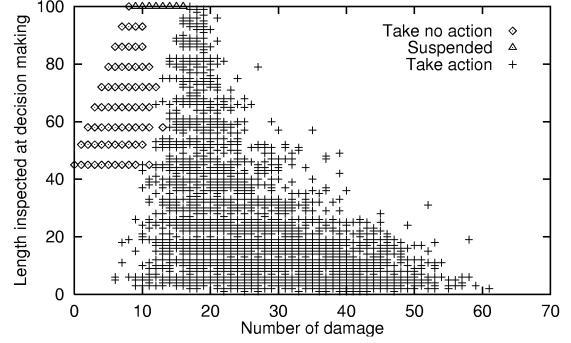


(e) Case E

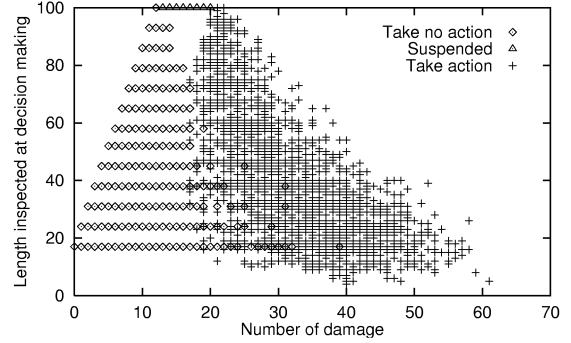
図4 被害箇所数 N_T と緊急対応の判断の関係



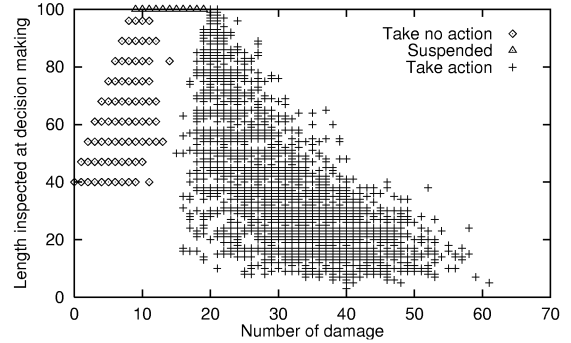
(a) Case A



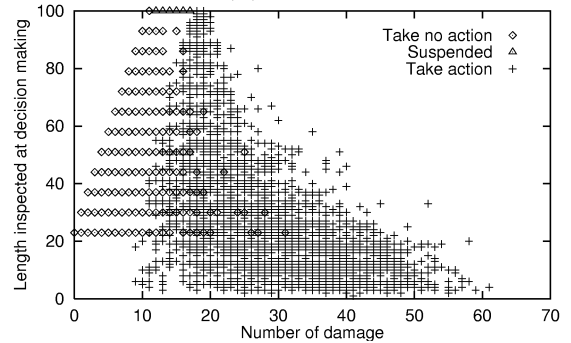
(b) Case B



(c) Case C



(d) Case D



(e) Case E

図5 被害箇所数 N_T と意思決定時の調査長さ L_0 の関係