

1 研究の背景と目的

応急危険度判定は 1995 年兵庫県南部地震を契機に全国的に判定士組織が整備され、近年の地震災害においても一定の成果が挙げられている。しかし、その目的が余震などによる二次被害を防止することにあるため余震活動が活発な数日間のうちに判定を完了させることが望まれるのに対し、活動開始までの情報収集・伝達等に時間を要し地震発生の 2、3 日後から本格化しているというのが現状¹⁾である。特に被災者が収容される避難所や病院、警察・消防などの防災拠点施設は早急に使用の可否を判断し、被災した施設は速やかに復旧を行う必要があるが、これらの施設の中には判定が行われなまま使用されている事例もあり問題となっている。現在宮城県では、宮城県沖地震の発生が危ぶまれる中で、産官学連携による宮城県地震対策推進協議会において、被災建築物の応急危険度判定および復旧支援に関する新しい制度の構築に向けた検討が行われている。ここでは、判定活動の組織化の中心となる行政と判定士を派遣する民間組織の間で、地震発生直後の情報伝達を効率化して速やかな判定士の召集や派遣を実現し、応急危険度判定を迅速化すること、その後の被災度区分判定に基づく復旧支援制度の確立を目指している。

こうした一連の活動の中で、本研究ではこれらの仕組みを効率的に機能させるような情報収集、分析、管理、伝達の機能を持つシステムを構築し、迅速な建築物の判定とその後の復旧活動を支援することを目的とする。このうち、特に研究的課題のある建築物の即時被害推定について、その手法の提案と検討を行った。さらに、システム全体の使用時を想定したシミュレーションにより、システム導入による効果や問題点の検証を行った。

2 建築物震災復旧支援システムの構成

建築物震災復旧支援システムは、予めデータベース化した建物情報(所在地、構造、建築年、 I_s 値等)と地震直後に得られる情報を合わせることでその被害程度を推定し、その推定結果や地震情報、実際の被害情報などを集約・発信することを通して、被害調査およびその後の復旧活動の効率化を支援する。以下にその機能を示す。

(1) データベースによる情報管理

建築物データベースとして、施設名、所在地(住所、緯度・経度)、構造種別(RC、S、W)、階数、建設年、耐震性能(I_s 値、 $C_T S_D$ 値)、耐震補強実施の有無、発災時の用途(避難所、医療施設、災害対策本部等)、応急危険度判定・被災度区分判定の結果等を集約する。また、判定士データベースとして、判定士氏名、連絡先、勤務地、資格(応急危険度判定、被災度区分判定)を登録し、地域情報のデータベースには地区毎の地盤情報、建物の棟数や建設年代の構成割合などを登録する。

(2) 地震情報の収集・分析

震源、マグニチュード、計測震度、観測波形(K-NET、KiK-net)などを収集し、観測点以外の地点の補間計算や応答スペクトル計算といった分析を行う。

(3) 建築物の被害推定

被害率曲線を用いた推定(計測震度、建物の I_s 値を

使用)と、限界耐力計算による被害推定(応答スペクトル、 I_s 値、 $C_T S_D$ 値を使用)を行う。

(4) 判定士への情報伝達

登録判定士に対しメールで震災復旧支援システム Web ページの URL を配信し、Web ページを通して応急危険度判定活動への出欠確認を行うとともに被害推定状況などの情報発信を行う。

(5) 判定結果の集計・発信

Web 上で応急危険度判定結果および被災度区分判定結果の入力を受け付け、判定結果の集計と GIS マップへの即時表示を行う。



図 1 建築物震災復旧支援システムの動作フロー

3 地震情報を用いた建築物の被害推定

被害推定は以下の二段階に分けて行うものとする。

3.1 一次推定：被害率曲線による推定

一次推定は、地震発生直後に発表される計測震度を使った被害率曲線による推定で、可能な限り早く被害を推定することを目的としている。推定にあたり必要となる建物の地点における震度は、表層地盤の増幅率²⁾を考慮して観測点の震度から補間(図 2)して求める。続いて推定した震度を用い被害率曲線による被害推定を行う。その手法を RC 造と木造それぞれについて提案する。

RC 造公共建築物の被害推定

RC 造の被害推定は図 3 に示す既往の研究³⁾で提案されている I_s 値ごとの被害率曲線(被災度別)を用い、被害確率を算定する。算定された各被災度の被害確率を、被災度区分判定基準および復旧技術指針⁴⁾の耐震性能残存率 R を参考に加重平均することで被災度を推定する。

木造建築物群の被害推定

木造建築物群については、500m メッシュ毎の推定震度から図 4 の被害率曲線⁵⁾により建築年代(1971 年以前、1972 年から 1981 年、1982 年以降)ごとに被害確率をもとめる。各年代の被害確率をメッシュ毎の年代別棟数に掛け合わせることで被害棟数を推定する。

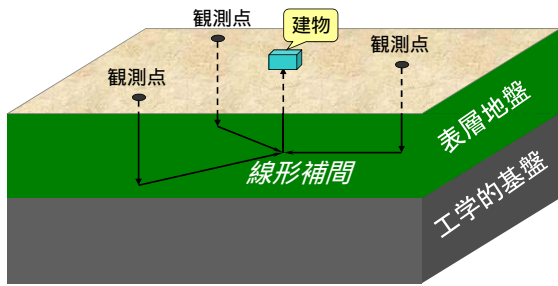


図2 震度補間の概要

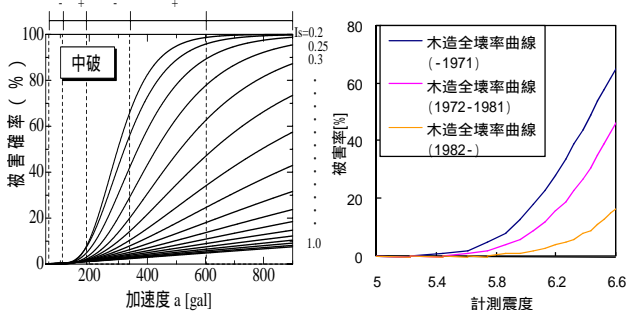


図3 RC造被害率曲線

図4 木造被害率曲線

3.2 二次推定：限界耐力計算による被害推定

加速度記録や応答スペクトルが得られ次第、二次推定として限界耐力計算法⁶⁾による詳細な被害推定を行う。これにより、一次推定では評価できない応答スペクトル性状や建物の復元力特性の考慮が可能となる。ここでは、RC造建物の耐震診断データを用いた限界耐力計算による被害推定手法を提案する。推定にあたり必要となる建物の応答スペクトルは、東北大学災害制御研究センターの地震動分布推定システム⁷⁾による500mメッシュ毎の分布データを用いた。建物の復元力特性は、最小 I_s 値と $C_T S_D$ 値から靱性破壊型($I_s/C_T S_D > 1.27$)と脆性破壊型($I_s/C_T S_D \leq 1.27$)に分け、図5のようにモデル化する。

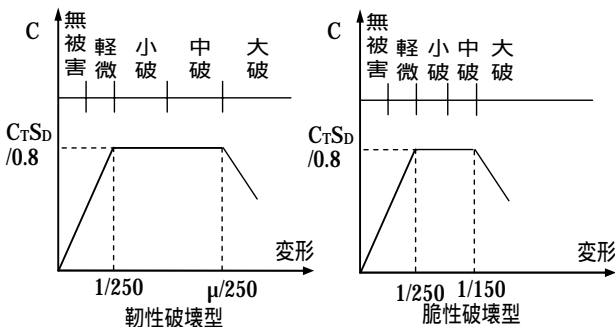


図5 耐力曲線モデル

このとき、塑性率に対応する被災度は被災度区分判定基準⁴⁾などを参考に図5のように設定した。なお、強度指標 C は限界耐力計算における一次モードの等価質量と建物重量の比が概ね0.8であると仮定して $C_T S_D$ を0.8で除した値とし、変形は第一折点の変形角が1/250となるように揃える。また終局点の変形角は、脆性破壊型では1/150、靱性破壊型では1/150を下限値に $\mu/250$ とする。このとき μ は耐震診断基準⁸⁾の定める式(1)の変形によりもとめる。

$$F_u = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{0.75(1 + 0.05\mu)} \quad (1)$$

ここで F_u は $I_s/C_T S_D$ とする。また、一層あたりの高さは360cmと仮定し、等価一質点系に集約したときの代表

高さを「地上階数×360cm×0.8」としてもとめる。

以下、 S_a - S_d スペクトルと復元力特性から現行の限界耐力計算法に従って応答推定を行い、応答変形に対応する被災度を図5により推定する。

3.3 過去の地震による検討

過去の地震を想定したシミュレーションにより、推定手法の妥当性および精度の検証を行った。

一次推定の検証

2003年7月26日宮城県北部の地震、2007年3月25日能登半島地震、2007年7月16日中越沖地震を想定しシミュレーションを行った。震度分布の推定結果を図6に示す。

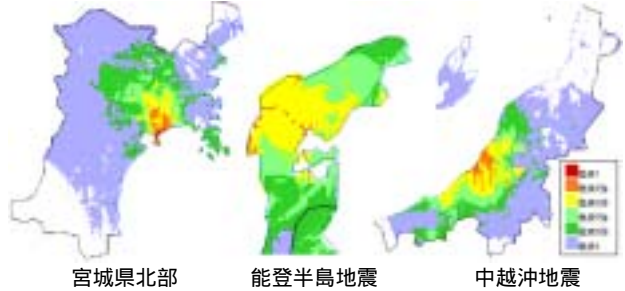


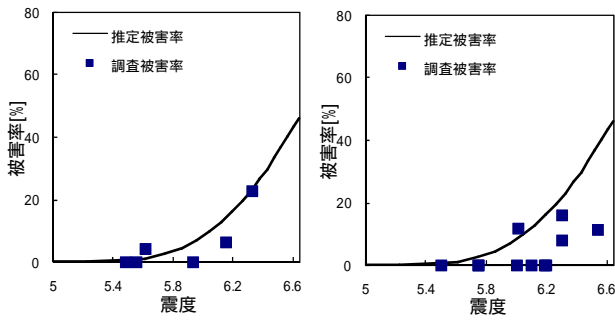
図6 推定震度分布

震度の推定後、宮城県北部の地震については前述の方法によりRC造500棟および木造建築物群の被害推定を行い、能登半島地震と中越沖地震については500mメッシュ毎の建物棟数データが無い時代別棟数を各年代で同じと仮定して木造住宅の被害率推定を行った。推定結果と実際の被害⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を比較し表1および図7に示す。

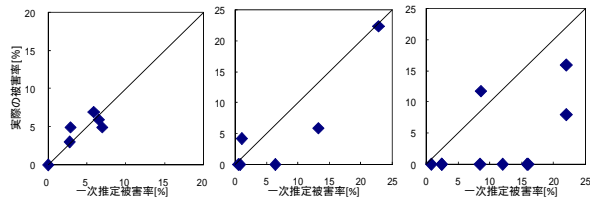
震度分布の推定結果は、いずれの地震も実際の被災地区と比較して概ね調和的である。宮城県北部の地震を想定したRC造の一次推定では、北村小など I_s 値が比較的高い建物が実際には大破しているなど必ずしも一致しない部分も見られたが、全体としては概ね良好に推定された。木造の一次推定について、三地震で精度を比較したものを図8に示す。これによると、宮城県北部の地震や能登半島地震では推定と実被害の対応は良好だが、新潟中越沖地震では推定がやや過大となる傾向が見られた。これについては、新潟中越沖ではデータの都合から建物の耐力を考慮していない点やスペクトル性状の影響が考えられ、こうしたことから二次推定の手法が有効となると考えられる。ただ、図7に示した震度と被害率の関係では推定が実被害の上限を捉えており、地震直後の即時被害推定という観点からは、判定活動を支援する情報として有効に機能していると考えられる。

表1 RC造の一次推定結果と実被害(宮城県北部)

建物名	最小 I_s 値	推定震度	推定被災度	実際の被害
矢本高等学校	0.29	6.20	中破	中破
大曲小	0.24	5.98	小破	軽微
小野小	0.25	5.91	小破	小破
矢本第一中	0.38	6.19	小破	小破
鹿島台小(東)	0.27	5.86	小破	小破
浜市小	0.49	6.34	小破	軽微
宮戸小	0.42	6.00	小破	軽微
北村小	0.45	5.97	軽微	大破
浜市小	0.71	6.34	軽微	軽微
大塩小	0.61	6.14	軽微	軽微
矢本東小	0.64	6.19	軽微	軽微
鹿島台小(西)	0.48	5.86	軽微	小破
赤井小	0.63	6.10	軽微	軽微
赤井南小	0.74	6.09	軽微	軽微
矢本第二中	0.75	6.06	軽微	軽微
鳴瀬第一中	0.61	5.89	軽微	軽微
涌谷中	0.43	5.59	軽微	被害報告なし
南郷高等学校	0.98	5.93	軽微	被害報告なし
野蒜小	0.32	4.85	無被害	軽微
...			以下、無被害で推定被害と実被害が一致	



能登半島地震 中越沖地震
図7 震度と推定被害率および実被害率の関係



宮城県北部 能登半島地震 中越沖地震
図8 木造の一次推定と実被害の比較

二次推定の検証

RC造公共建築物500棟について2003年7月26日宮城県北部の地震を想定し、二次推定手法のシミュレーションを行った。推定結果と実際の被害を合わせ表2に示す。

二次推定では一次推定に比べ鹿島台小や北村小については実際の被害に近くなったが、その他の建物については推定と実際の被害に乖離が広がる結果となった。ここで、一次推定と二次推定の実被害に対する精度を耐震性能残存率Rに換算して比較したものを図9に示す。

表2 RC造の二次推定結果と実被害（宮城県北部）

建物名	二次推定	補正後	実際の被害
矢本高等学校	大破	大破	中破
大曲小	大破	軽微	軽微
小野小	無被害	無被害	小破
矢本第一中	中破	中破	小破
鹿島台小(東)	小破	小破	小破
浜市小	無被害	無被害	軽微
宮戸小	無被害	無被害	軽微
北村小	小破	小破	大破
浜市小	無被害	無被害	軽微
大塩小	軽微	軽微	軽微
矢本東小	軽微	軽微	軽微
鹿島台小(西)	小破	小破	小破
赤井小	軽微	軽微	軽微
赤井南小	小破	軽微	軽微
矢本第二中	無被害	無被害	軽微
鳴瀬第一中	小破	中破	軽微
涌谷中	中破	中破	被害報告なし
南郷高等学校	小破	中破	被害報告なし
野蒜小	無被害	無被害	軽微
その他被害報告は無いが 軽微と推定された建物数	15棟	11棟	

以下、無被害で推定被害と実被害が一致

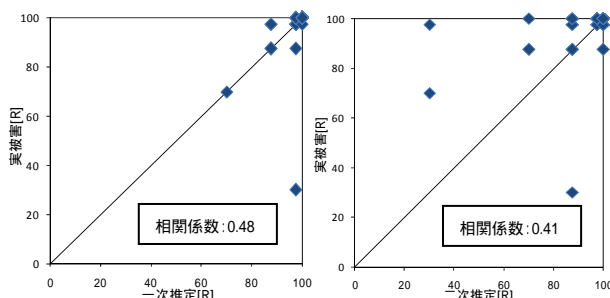


図9 RC造の一次推定と二次推定の精度比較

図9から、二次推定では被害が過大に推定される傾向が見てとれる。また、推定と実被害の相関係数を計算してみると、一次推定では0.48、二次推定では0.41となり一次推定の方が若干上回った。この結果について、二次推定は手法としては精密であるが、 I_s 値と $C_T S_D$ 値による建物の復元力特性のモデル化(代表高さや強度の設定など)における精度の問題や、使用している応答スペクトルが500mメッシュ単位の推定データであること、また地震動が建物に対して実際にどの程度入力されるか等の問題が挙げられる。

そこで、それらの補正を考えて建物の代表高さや応答スペクトルの倍率を変えて検討を行った。その一例として、代表高さや応答スペクトルにそれぞれ0.86、0.93の係数を掛けて補正した場合の推定結果を、補正前と併せて表2に示す。この結果、補正により大曲小や赤井南小の推定結果が実被害と一致するようになり、全体として過大評価となる傾向が修正された。また、被害のあった建物について補正前に比べ過小評価となることも無かった。以上より、あくまで一例ではあるが、応答スペクトルや耐力モデルの補正により二次推定の精度を高められる可能性が確認された。

4 実被害情報に基づく被害推定の逐次更新

ここでは、一次推定や二次推定で合わない部分を補う手法として、被害調査が進むにつれ少しずつ入ってくる実被害データを用いて未調査建物の推定結果を逐次更新する手法を提案し、その検討を行った。

4.1 逐次更新の手法：

被害推定の逐次更新を行う手法としてニューラルネットワーク¹²⁾による手法を提案する。ニューラルネットワークは人間の神経細胞を模した数学モデルで、定式化が困難な問題への適用が容易であり、逐次更新の手法として有効と考えられる。ここでは入力層、中間層、出力層の3層構造をもつ階層型ネットワークを用いることとする。図10に、本手法における学習モデルを示す。

逐次更新の手順は、まず実際の被害が分かった建物についてその I_s 値や推定震度などを入力要素として実際の被害(教師値)を再現できる結合荷重を学習させる。学習の繰り返しにより学習値と教師値の誤差が収束し次第、まだ実被害が分からない建物の I_s 値や推定震度などを学習済みの結合荷重に入力する。このときの出力値が修正された推定被害となる。

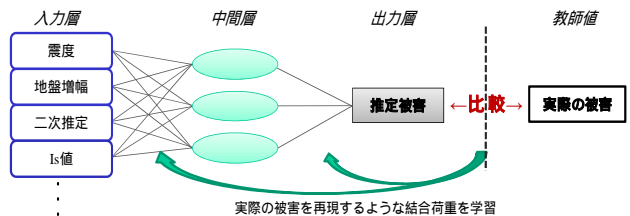


図10 ニューラルネットワークによる逐次更新の概要

4.2 逐次更新手法の検証：

ここでは、2003年7月26日宮城県北部の地震を想定し検討を行った。教師値とする実被害データは、修正精度に偏りが出ないように無被害、軽微、小破、中破、大破を全て含む5棟からスタートし、25棟まで増やした。なお、入力要素は表3に示す10項目を基準に、最大SAと最大SVを除く8項目、さらに建築年・階数・延べ床を

除く5項目とした場合それぞれについて、更新を行わない場合(二次推定結果)との修正精度の比較を行った。このとき、精度の比較は教師値用の25棟以外の28棟について推定被害と実被害の統計量を計算し比較した。は二つの評定結果がどの程度一致しているかを表す指標で、値が1に近いほど一致していることを指し、0に近いほど一致度が低いことを指す。図11に結果を示す。

図11より、逐次更新による修正を行わない場合と比較して、教師値が少ない状態での更新はかえって一致度を下げるが、少なくとも10棟ないし15棟程度の教師値数が得られれば安定した逐次更新ができることが示された。ここで、入力項目数ごとに修正精度の安定する15棟以上の範囲における一致度の平均と分散を計算し、表4に示す。これより、要素数が多いと精度は安定するが過学習となり易いため一致度は低く、入力要素を「二次推定結果」「推定震度」「Is値」「CtSD値」「速度増幅率」の比較的建築物被害と関わりが深いと思われる5項目に絞った場合の方がより高い精度での修正が可能であることが分かった。

表3 学習用の入力要素

番号	入力要素	建物被害との関係
	二次推定結果	スペクトル性状と耐力曲線が関係
	推定震度	入力地震動に關係(一次推定)
	Is値	建物の耐震性に關係(一次推定)
	CtSD値	建物の強度に關係
	速度増幅率	入力地震動の関連要素
	地上階	建物の高さ 固有周期に關係
	建築年	建物の経年劣化、設計強度に關係
	延床	建物重量に關係
	最大SA	加速度応答スペクトルの最大値
	最大SV	速度応答スペクトルの最大値

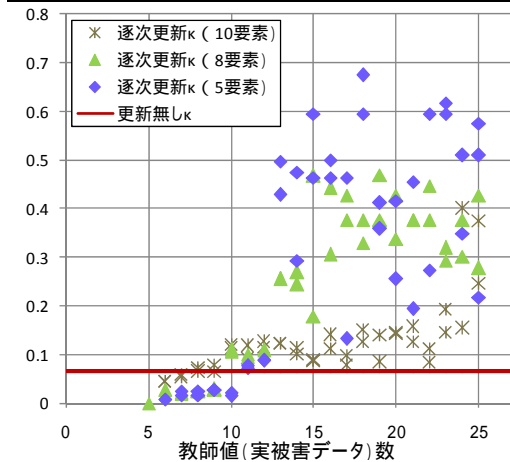


図11 実被害数による推定の一貫度の変化

表4 入力要素数毎の一貫度の平均と分散値

	10要素	8要素	5要素
平均	0.153	0.367	0.437
分散	0.007	0.005	0.022

5 実運用シミュレーション

建築物震災復旧支援システムの導入による効果と問題点の検証、およびシステムの円滑な使用の実現を目的とした、実運用シミュレーション(運用訓練)を実施した。第一回の訓練は2007年1月25日に行い、参加した判定士ユーザーは9名であった。

訓練では「判定依頼メールの確認」「GISマップの参照」「応急危険度判定への出欠表明」「応急危険度判定と被災度区分判定の入力」の順で実際にシステムを使用してもらい、その後アンケートを行った。

その結果、ユーザーによる実際の使用を通してシステム全体のデバックを行うことができ、システムの目的や

その使用法について一定の理解を得る機会となった他、アンケートではシステムの改善すべき点としてGISマップの使用性やシステムのメンテナンス性などについて指摘された。あくまで訓練の範囲ではあるが、当システムにより対策本部担当者が判定活動状況をリアルタイムに集計・把握することができ、判定活動の運営を支援するための情報として機能することが確認された。

6 結論

建築物の迅速な判定活動および復旧活動の支援を目的とした情報収集・分析・管理・伝達の機能を持つシステムを構築し、建築物の即時被害推定の手法については実際の地震時を想定した検討を行った。

過去の地震を想定したシミュレーションにより、一次推定については、概ね良好に推定が可能であることが示された。同時に、応急危険度判定の実施に係る情報支援という当システムの基本要件についても満足される結果が得られた。二次推定については補正の検討により有用な推定手法となる可能性が確認された。

実被害情報に基づく被害推定の逐次更新手法として、ニューラルネットワークによる手法を提案し検討を行った。その結果、ある程度の実被害データ数が得られれば本手法により効果的な修正が可能で、一次推定および二次推定で合わない部分を補えることが確認された。

また、システムの実運用シミュレーションによりシステム全体のデバックを行うことで、当システムの機能により判定活動の運営を支援できることが示された。また、判定士ユーザーに対してはシステムの目的やその使用法について理解を得る機会となった他、システムの改善すべき点が指摘された。今後、判定技術者の方に協力を仰ぎ、より多人数での運用訓練実施を予定しており、こうした幾度かの訓練を経ることで、当システムの円滑な使用の実現に近づくことができると考えられる。当システムの真の実用性が示されるのは実際の地震発生時となるが、定期的な訓練の実施を経て当システムによる震災復旧支援が実現されることを期待する。

謝辞

本論での検討にあたり、東北大学大野晋准教授から応答スペクトル分布のデータを提供して頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 建築防災2004年2月号「特集 宮城県北部連続地震における応急危険度判定」
- 2) 翠川三郎、松岡昌志: 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価(物理探査, Vol.48, No.6, pp.519-529, 1995)
- 3) 四十万智博: 宮城県公共施設における耐震改修と地震リスクの評価(平成十六年度東北大学修士論文)
- 4) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針(2001)
- 5) 内閣府: 地震被害想定支援マニュアル(<http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>)
- 6) 日本建築センター: 2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説
- 7) 大野晋、遠藤卓、柴山明寛: 宮城県における準即時地震動スペクトル分布推定(東北地域災害科学研究, Vol.43, pp. 29-32, 2007)
- 8) (財)日本建築防災協会: 「2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説」
- 9) 日本建築学会: 2003年5月26日宮城県北部の地震災害報告 2003年7月26日宮城県北部の地震災害報告
- 10) 前田匡樹、三辻和弥、菅原裕太、中村匠、五十嵐さやか: 2007年3月25日能登半島地震による建築物の被害調査報告(建築防災2007年8月号)
- 11) 松川和人、三辻和弥、菅原裕太、前田匡樹: 2007年新潟県中越沖地震における木造建物の地震被害調査 その2 調査概要と建物被害の特徴(日本地震工学会大会-2007 梗概集 pp.476-477)
- 12) 熊沢逸夫: 学習とニューラルネットワーク(森北出版, 1998)