

強震観測記録と消防庁被害報告を用いた 広域の地震被害推定と被害の及ぶ範囲の同定の手法 —2001年芸予地震への適用—

Predicting the Threshold of Earthquake Damage Using K-NET and KiK-NET data and
Damage Reports by Fire and Disaster Management Agency
-An Application for the 2001 Geiyo Earthquake-

村上則男¹, 川方裕則², 林春男², 高島正典³

Norio MURAKAMI¹, Hironori KAWAKATA², Haruo HAYASHI²,
and Masasuke TAKASHIMA³

¹ 京都大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

² 京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

³ 京都大学大学院情報学研究科

Graduate School of Information, Kyoto University

The present study intended to improve estimation by adopting “threshold” concept. Earthquake damage threshold in the shaking intensity (measured in terms of JMA Scale) produces either building damage or casualties. Based on the data on strong shaking intensity and damage obtained at the 2001 Geiyo Earthquake, it was found that the threshold for minor building damage is 3.1 JMA Scale, half building damage 4.1, minor injury 3.7, and severe injury 4.3.

Key Words: threshold, shaking intensity, damaged area estimation

1. 序論

(1) 研究の目的

地震発生直後の被害推定, すなわち地震規模と震源位置から即座に被害の状況を判断することは, 初動災害対応において重要である。初動災害対応において, 被害を集約する立場の防災担当者は, 災害対応のための限られた人的・物的資源を, 被害の大きい地域にうまく配分する必要に迫られる。そのため, どの地域でどのような被害が発生しうるのかを示すことが必要である。しかし, 地震発生直後には情報空白期が存在し, どの程度の被害がどこで発生しているのかを現状のシステムでは知り得ない。現在, 各地方自治体には最低1台の計測震度計または計測震度を算出できる機器が設置されている。そもそも計測震度はある程度被害との対応を考慮して提案されたものであるが, 具体的にどの程度の震度から人的・建物被害が発生するかは, 2000年鳥取県西部地震でも明らかとなっており, 必ずしも明確にできていない。以上から, 計測震度の情報をもとにして, 被害の有無を判断する手法の開発が求められている。

これまでも地震被害想定の研究は数多くなされている。しかし, 表1に示したように, 既存の研究の多くが阪神・淡路大震災のデータを基に行われており, 広域地震災害の被害を推定する場合に, 被害を過大視する傾向があること

が危惧される。その理由として, 被害想定を実施するに足る精度での被害調査の実施には膨大な人的・経済的なコストを要する。そのため, 被害調査範囲が被害が集中した地域の近傍に限定されがちであった。その結果, 従来の被害予測は外力の影響が及んだ範囲全体から見ると, 断層近傍の一部の範囲の情報を偏重した結果になる危険性がある。そこで, 本研究では地震動の及んだ全領域を対象とし, 地震動強さと被害との関係を地震の大小にかかわらず分析することにより地震被害予測の改善に資する。

(2) 研究の背景

本研究の背景には, 近年の地震動および被害のデータ収集環境の整備があげられる。一方で防災技術の進展があり, その1つとして強震観測ネットワークの高密度化が行われている。未曾有の大災害をもたらした兵庫県南部地震において, 「震災の帯」と呼ばれる震度7と判定される地域に, 強震計がほとんどなかったという猛省から, 以降現在に至るまで, 地震動の観測ネットワークの整備は着実に進んでいる。観測点の数は増え始め, 現在はさまざまな団体のものを総計すると6,600点を超える。その観測点が近年全国にほぼ余すところなく均等に整備された。阪神・淡路大震災前と比べると観測点の数が10倍に増え, 解像度が飛躍的に向上した。さらにインターネット技術の普及が

表1 被害想定に関する既往の研究

著者	分析単位	地震動強さ指標		被害
童・山崎 ¹⁾ (1994)	近畿地方の37 の観測点	PGA, SI	各市区町村で得られ た実測値を代表値	家屋全壊、半 壊
長谷川・翠川・ 松岡 ²⁾ (1998)	神戸市内の町 丁目	PGV	国土数値情報を用い た推定値	年代別木造建 築物群の被害
長谷川・翠川 ³⁾ (1999)	神戸市内の町 丁目	PGV	国土数値情報を用い た推定値など	年代別非木造 建築物群の被害
村尾・山崎 ⁴⁾ (2000)	灘区の町丁目	PGV	神戸市の3万棟の建 物データからの推定	構造別年代別 建物被害率
山口・山崎 ⁵⁾ (1999)	阪神地区の町 丁目	PGA, PGV, SI, 計 測震度	17の強震記録と建 築研究所のデータか らの推定値	建物全壊、半 壊、一損
林ら ⁶⁾ (1997)		PGV	FEM解析による再現 地震動と建築研究所 のデータ	用途別低層お よび中高層建 物被害率
宮腰ら ⁷⁾ (1997)		PGV	林ら(1997)の研究よ り	構造別年代別 建物被害率
				神戸市の建物被災 度調査結果

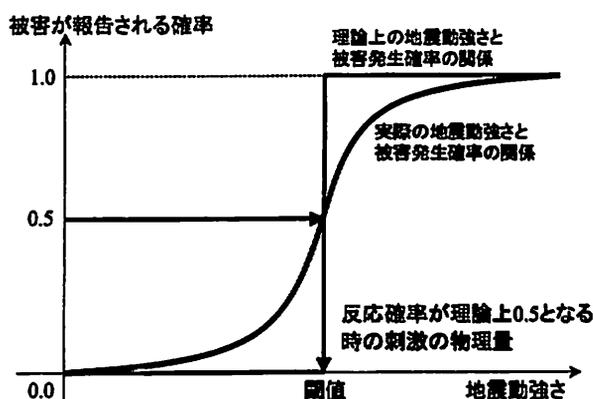


図1 閾値の概念

芸予地震(2001.3)を事例に

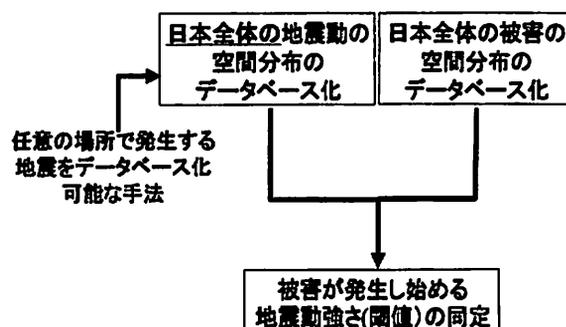


図2 本研究の概要

あり、強震観測結果の WEB 配信や消防庁および各自治体の被害報告の WEB 配信がおこなわれるようになった。その結果、容易かつ低コストで、地震動の及んだ全領域について地震動強さおよび被害のデータを得ることができるようになった。

(3) 研究の意義

目指すべき被害予測は、広域にわたる面的地震動のデータベースをもとに、広域の揺れの分布と被害との関係を調べ、被害の有無の判断基準をつくることと、外力による被害の及ぶ範囲を特定することにある。

従来の研究では、死者数や全壊数の被害推定に主眼が置かれていたが、本研究では、災害対応者にとって重要な軽傷、一部損壊を含めた人的・建物被害に主眼を置く。本手法を用いることにより、地震動が小さいとき被害を過大評価するという問題の解決を試みる。この方法は、既往の地震被害想定を抱えるもう 1 つの問題点の解決にも貢献しうる。各自治体の行う被害予測は、自治体ごとに策定する地域防災計画の基礎資料とすることに主眼が置かれており、各自治体に最も大きな被害をもたらすと考えられる地震外力の発生を想定し、当該自治体が独自の推定手法に基づいて被害の発生を予測しているが、そうした被害が当該自治体の行政界をこえて、どの範囲にまで及ぶものであるかは考慮されていない。しかし、将来発生が確実視され

る南海トラフ沿いのプレート間地震が発生した場合には、都府県の行政界をこえて広域に地震被害が展開することが予想されるため、既存の被害予測では対応できない。広域の揺れと被害の関係を調べることによりこの点も検討できる。

(4) 閾値

本研究では、被害の有無の判断をおこなう地震動強さの指標の値を、心理学や統計学で多く用いられる「閾値」の概念を用いて定義する。

図1は閾値の概念を示したものである。心理学では、特定の条件下において、刺激の量的あるいは質的変化が漸進的に起こったとき、それに対応して反応の不連続な変化が起こるが、この点を境にして反応が特定の反応とその他の反応とに二分される場合、このような転換点に対応する刺激量を閾値と定義している。この考え方を地震にあてはめると、地震動の大きさが漸進的に変化したときに、被害の発生しはじめる地震動の値を閾値とすることができる。

現時点では、防災担当者は震度の大きさもしくは被害の状況を見て災害対策本部を設置し、災害対応にあたる。しかし、被害の把握それ自体に時間がかかり、対応が遅れがちである。そこで被害発生の際には防災担当者が行動をはじめなければならない地震動強さを示すことになり、迅速な初動対応に寄与しうる。これを全国を網羅する地震観測

ネットワークによって観測される地震動分布と組み合わせることによって、被害の発生しうる範囲を地震発生後即座に同定することを可能にすると期待される。

(5) 研究の概要

本研究の概要を図2に示した。まず、2001年3月に発生した芸予地震を例にして、地震動強さの指標と被害をデータベース化する。次にこれらのデータベースを利用して地震広域被害推定をおこなうための方法を示す。2.ではK-NET, KiK-NETのデータを用いて地表面最大加速度、地表面最大速度、計測震度の各地震地震動の空間分布をデータベース化する手法を示す。3.では、消防庁の災害報告より、市区町村ごとの被害の状況を報告にあるすべての指標について整理した。4.では、2., 3.で作成したデータベースに基づき、市区町村単位の地震動強さの指標と被害との関係を分析し、被害発生の有無に対応する地震動強さの閾値を導く。5.では、本研究における成果を整理すると共に、その防災上の利用方法、今後の課題について述べる。

2. 地震動のデータベース作成

地震によって発生する地震動は空間的広がりを持つ。これに対し、実際に得られる地震動の観測記録は、地震計のある地点における「点」の情報である。よって、地震動の全体像を把握するためには、点情報として与えられる観測記録から地震動を面的に推定する作業が必要となる。本研究では、日本国内で発生する、地震による地表面地震動の空間分布と、その地震動に起因する被害全体の空間分布をデータベース化することをめざす。2.(1)では、日本における強震観測ネットワークの現状を整理する。2.(2)ではそれらの観測ネットワークによって得られたデータに基づいて、ある地震によって生じた地表面の強震動の空間分布をデータベース化する手法について述べる。

(1) 日本の強震観測ネットワークの現状

日本では、様々な機関・組織が強震計のネットワークを持ち、地震動の観測を行っている。特に、兵庫県南部地震(1995)では、「震災の帯」と呼ばれる震度Ⅶと判定された地域にほとんど地震計が無かったことなどの反省から、高密度に強震計を配備しようとする動きが活発である。山崎¹⁾は、近年の日本の代表的な地震計ネットワークとして、次の5つを挙げている。

- 1) 気象庁の強震観測ネットワーク
- 2) 防災科学技術研究所の全国強震ネットワーク
- 3) 消防庁の震度情報ネットワーク
- 4) 自治体の地震計ネットワーク
- 5) 道路関係の地震計ネットワーク

気象庁では、震度の計測化を導入するに際し、1988年より加速度型地震計の配備を開始した。当初の観測点数は全国76箇所であった。その後、1993年北海道南西沖地震などをきっかけとして、津波警報を迅速化するため、観測点増設の進められてきた。兵庫県南部地震(1995)を契機として、被害の甚大な地域を見落とさないための、より高密度な観測体制の必要性から、1995年末までに計測震度観測点が574箇所まで拡大された。観測記録に基づく震源位置、震度などの地震情報が、様々な媒体を通じて配信されている。

防災科学技術研究所では、研究利用のための強震記録の収集・公開を目的として、全国強震ネットワーク(K-

NET)の構築を行い、1996年6月より運用を開始した。K-NETは全国をほぼ25kmメッシュでカバーする様に配置された1000箇所の地表面観測点からなる。防災科学技術研究所は表層地盤による増幅特性を分析するための、地中及び地表面観測点からなる基盤強震ネットワーク(KiK-NET)も所有している。これらK-NET, KiK-NETで観測された強震波形は数時間でインターネット上で一般に無償で公開されている。

消防庁では、兵庫県南部地震を契機に全国全ての市区町村および東京23区の計3,255自治体に最低1台の計測震度計を整備するという「都道府県震度ネットワーク」構築の補助事業を行っている。この事業により、気象庁の震度計またはK-NETの強震計が設置されていない約3,000の自治体に震度計が設置された。この震度計ネットワークでは、震度4以上の地震動が観測されると、各市町村からの震度情報が都道府県を経由して、概ね15分程度で消防庁に集められる。消防庁では、これを24時間体制で監視して、広域な被害情報の把握や初動体制の確立に利用している。

いくつかの自治体は、独自の強震計ネットワークを所有し、地震時緊急対応に利用している。横浜市は、市内に150箇所の観測点からなる高密度強震計ネットワークを1997年3月に完成させた。この強震計ネットワークは、市内を2km間隔でカバーしており、地震発生後3分以内に、最大加速度などの情報を専用回線で収集している。東京都では、東京都災害対策本部と東京消防庁が分担して都内に100台の地震計を配備している。名古屋市は、市の保有する16の地震計と、愛知県、名古屋大学、東邦ガスの保有する地震計とを合わせた40台あまりの地震計で地震動を監視している。また、京都市では、1997年より消防局と京都大学防災研究所の保有する14箇所の地震計によって市内の地震動を観測している。

道路を管理する様々な組織が、道路沿いに地震計を設置し、道路施設の被害予測に利用している。国土交通省は、関東地方建設局管内の1都8県内の、国道などの管理施設沿いに20~40km間隔で配置された約100箇所の地震計からなる地震計ネットワークを保有している。日本道路公団でも1997年に高速道路沿いに40km間隔で設置された、311箇所の観測点からなる地震計ネットワークを構築した。北海道開発局でも、121箇所の観測点からなる地震計ネットワークを保有している。

このように様々な強震観測ネットワークが存在するが、本研究では次の2点から、K-NET, KiK-NETのデータを用いて地震動のデータベース化を行うことにした。1つは、K-NET, KiK-NETが全国を観測対象地域としている点、もう一つは、観測強震波形をインターネットを介して無償で公開している点である。K-NET, KiK-NETで公開されるデータの詳細に関しては補注に示す。

(2) K-NET, KiK-NETを用いた地表面地震動のデータベース化

自治体による地震被害想定における建物被害予測では、過去の地震災害における、評価空間単位毎の建物被害率とその区域の地震動強さとの関係に基づく経験式がよく利用される。地震動強さの指標としては、主に観測波形データから得られる地表面最大加速度、地表面最大速度、計測震度などが採用されている。本研究では、K-NET, KiK-NETによって観測される強震波形を用いて、地表面最大加速度、地表面最大速度、計測震度の空間分布をデータベース化することにした。

多くの地震動評価において、震源断層から放出された地震波が地表面に到達するまでの過程は、1) 震源断層からの地震波の放出過程、2) 放出された地震動の伝搬過程、3) 表層地盤による増幅過程、の3つに分けられモデル化される。3) 表層地盤による増幅過程が、2) 放出された地震動の伝搬過程とあえて別に考慮されるのは、地表面付近の地盤(表層地盤)が、地表面において観測される地震動に大きな影響を与えていることが明らかになっているためである。この表層地盤の下の地盤は、工学的基盤と呼ばれ、表層地盤と工学的基盤の境界面は工学的基盤面と呼ばれる。KiK-NETの地中の観測点は、この工学的基盤上に存在するものである。

K-NET, KiK-NETの観測記録を用いて、各種地震動強さの指標の空間分布を推定するにはいくつかの方法が考えられる。1つ目はK-NET,あるいはKiK-NETの地表面観測点の観測波形から、各地表面観測点における地震動強さの指標を求め、それを単純に空間的に補間する方法である。この手法の問題点は、補間点において推定される地震動強さには、その地点における表層地盤の特性が反映されない点である。例えば、比較的表層地盤の条件が良い2つの観測点の間の補間点では、たとえ地盤条件が悪かったとしても、地震動強さが小さく評価される。以下、この推定方法を手法1とする。

2つ目の手法は、KiK-NETの地中観測点における観測波形を用いて、表層地盤の増幅特性を考慮して、地表面における地震動強さの指標の空間分布を求めるものである。具体的には、まず各工学的基盤面上の観測波形から、各観測点における地震動強さ指標を求め、これを空間的に補間することにより工学的基盤面上における地震動強さ指標の空間分布を求める。得られた各地点の地震動強さ指標に、表層地盤の増幅特性を掛け合わせることで、地表面における地震動強さ指標の空間分布を求めることができる。表層地盤の増幅特性に関しては、松岡・翠川²⁾³⁾、西阪他⁴⁾⁵⁾、小椋山他⁶⁾、大西・山崎・若松⁷⁾が、国土数値情報の地形・地質情報、標高等から、第3次標準地域メッシュ(1kmメッシュ)毎に各種地震動強さの指標に関する表層地盤の増幅率を推定する手法を開発している。松岡・翠川、西阪・福和は、地表面最大速度、小椋山他は、地表面最大加速度に関する表層地盤の増幅率を提案している。大西・山崎では、地表面最大加速度、地表面最大速度、計測震度の増幅率を推定する手法を提案している。これらの手法は、ボーリングデータや地盤探査データを用いずに、日本全国の任意の1kmメッシュに関する表層地盤の増幅率を決定できるという点で、本研究の目的にかなっている。この2つ目の手法では、表層地盤特性を考慮して補間ができるという利点があるものの、推定が2段階になるという意味で、推定誤差が大きくなる恐れがある。以下、この推定手法を手法2とする。

本研究では、推定精度と計算の簡便性から上記2つの手法を用いて、実際に、芸予地震に関して、地表面最大加速度、地表面最大速度、計測震度の空間分布を1kmメッシュ単位でデータベース化した。これらのデータベース作成の具体的な作業手順は補注に示す。最後に、気象庁から発表された芸予地震における各地の計測震度と、K-NET, KiK-NETの観測点の空間分布を重ね合わせた。結果、K-NET, KiK-NETの観測点がある市区町村と気象庁から計測震度が発表される市区町村とは、ほとんど一致しなかった。今回は、利用可能性の点からK-NET, KiK-NETの観測地震動のみを地震動データベースの作成に利用したが、他の強震観測ネットワークから得られる観測地震動も利用できれば、より充実した地震動データベースを作成できること

は言うまでもない。

3. 被害のデータベース

(1) 方法

データには消防庁がインターネット上で公開している被害報告を用いて、市区町村単位の被害のデータベースを構築する。地震動のように、1kmメッシュ単位でデータベースを構築することは、現状ではデータ不足のため困難である。災害報告は気象庁のもつ計測震度計において1観測点以上で震度4以上を観測した場合、または被害の報告があったすべての地震について出される。被害が報告されなかった地震については最終報、被害が出てその被害が確定した地震については確定報、大きな地震などで被害が確定されてない場合は第xx報の形で出される。災害報告には、発生日時、マグニチュード、震央地名、各地の震度など地震の概要と、人的・物的被害、避難の状況などの被害、災害救助法の適用状況、地方公共団体や消防庁・消防機関の対応が記載されている。

人的被害・建物被害を地震別に整理する。消防庁の災害報告では、都道府県単位の被害のみが記載されており、市区町村単位でのデータは入手できない。消防庁震災対策課によれば、災害報告は各都道府県からの報告をまとめたにすぎず、消防庁ではそれ以上の詳細な被害は把握していない。消防庁の提供する都道府県単位ではあまりに範囲が広すぎ、地震動と被害のより具体的な関係をつかむという本研究の目的に合致しない。そこで、インターネット上の各都道府県のホームページや、各市区町村に直接問い合わせるなどして、市区町村単位での人的被害、建物被害、その他の被害を整理した。芸予地震の被害に関しては、岡山県、香川県についてはホームページ上に被害状況があったが、他の府県については直接府庁・県庁に電話で問い合わせた。

被害情報の収集を通じて、以下の2点の問題の存在が明らかになった。一つには、消防庁と各都道府県の間で把握されている被害の内容が異なる場合がある。たとえば、福岡県では当初の消防庁発表では負傷者1名となっていたが、最終的には被害なしと判断された。これは、負傷に遭った時間が地震と同時であり、一時的に地震による被害として報告したものの、後に警察と消防署などの協議により、地震による被害と認められなかったためである。

2点目として、都道府県の間で被害報告のフォーマットが統一されておらず、様々な被害カテゴリーが混在するという問題がある。そこで、特に、対応関係が明確でない限り、各都道府県の被害報告におけるカテゴリーを尊重して、データベース化した。例えば、都道府県によっては、非住家建物被害に関して、非住家公共建物・非住家その他という建物種別の分類や非住家全壊・非住家半壊という被害程度別の分類があったが、それぞれ別の被害カテゴリーとして、そのまま残した。一方、人的被害は多くの都道府県において、死者・重傷者・軽傷者の3カテゴリーに分類しているが、広島県においては、それに加え、中傷者というカテゴリーを設けていた。県に問い合わせたところ、中傷者は負傷の度合いが重傷まで至らない程度であり、本来軽傷者に分類される負傷者であるとわかったため、広島県における中傷者数は軽傷者のカテゴリーに再分類した。

なお、被害なしの取り扱い、属する都道府県でその被害の指標が扱われている場合には0を入力し、扱われていない場合は空欄とする。また、市区町村単位の被害の数だ

けでなく、全数に対する被害数の割合、いわゆる被害率も算出した。なお各市区町村の1995年の人口⁸⁾を用いた。しかしながら、住宅統計などの全建物棟数は推計値であり、市区町村単位での全建物棟数は入手できなかった。よって本研究では、人的被害は被害者率、建物被害は被害棟数で分析することにする。

(2) 結果と考察

芸予地震の被害を整理した結果、すべての市区町村で共通して得られる情報は死者数、重傷者数、軽傷者数、家屋全壊棟数、半壊棟数、一部損壊棟数であった。本研究では、これらの被害項目と地震動との関係を見ていくこととする。ここで、本研究においては被害発生の閾値を求めることを目的としているので、指標は被害率とはせず、被害棟数とした。収集した芸予地震における各市区町村別の被害を実際に図示した。これらの図から被害は都市部特に呉市に集中していることがわかる。また、2章で得た地震動データベースと見比べることにより、視覚的に被害と地震動強さの関係をみることができ、4章では両者の関係の定量的な分析をおこなう。

地震動強さ、被害それぞれをデータベース化したものを図3-a~3-cに示す。

4. 地震動と被害の関係の分析

本章では、2章、3章で構築したデータベースをもとに地震動と被害の関係を分析する。2章の地震動強さのデータベースは1kmメッシュで面的に作成したが、3章の被害のデータベースは市区町村単位である。防災業務での利用を目的とする本研究では、以降の分析は市区町村単位とした。市区町村内において地震動強さは必ずしも一様ではないため、各市区町村における地震動強さの代表値を求め、その値と被害との関係を検討した。

(1) 各市区町村の地震動強さの代表値

本論文では、市区町村単位の地震動強さの代表値として、各市区町村界内に中心点が含まれる1kmメッシュの地震動強さの平均値と最大値を採用した。

(2) 分析の方法と結果

a) 地震動強さと被害数の関係の分析

図4に示すように、地表面最大加速度では手法1および、手法2に基づき大西・山崎らの増幅率と、小檜山らの増幅率を用いたもの、地表面最大速度では手法1および、手法2に基づき大西・山崎・若松の増幅率と松岡・翠川の増幅率、西阪・福和の増幅率を用いたもの、計測震度では手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いたものについて、それぞれ平均値および最大値で集計し、以上16個を地震動強さの指標として用いた。

芸予地震において地震動強さのデータがあるすべての市町村について、地震動強さの代表値と、各種被害との関係(死者数・重傷者数・軽傷者数・家屋全壊数・家屋半壊数・家屋一部損壊数・死亡率・重傷率・軽傷率)を検討した。図4に人口密度別の各市区町村における地表面最大加速度と建物一部損壊棟数の関係を示す。

その結果、地震動強さがある一定の値までは被害は無いが、その値以降は被害が急激に増加する傾向が全般的に見られた。しかし特に地震動強さの値が大きなエリアにおいて、同程度の地震動強さをもつ市区町村であっても人口密度の高い市区町村では被害が大きいこと、また、他と比べて

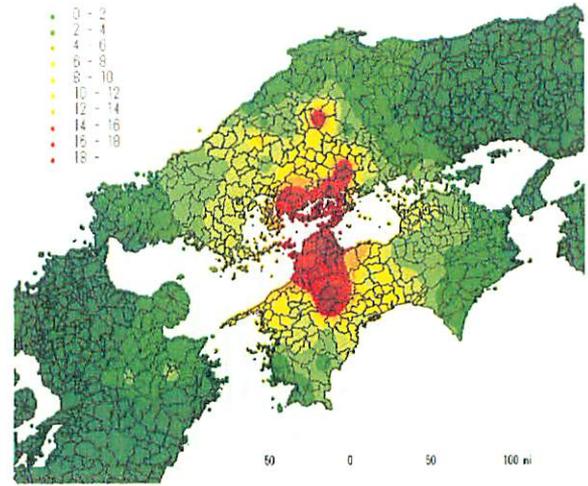


図 3-a K-NET の観測記録を用いた地表面最大速度の1kmメッシュの空間分布

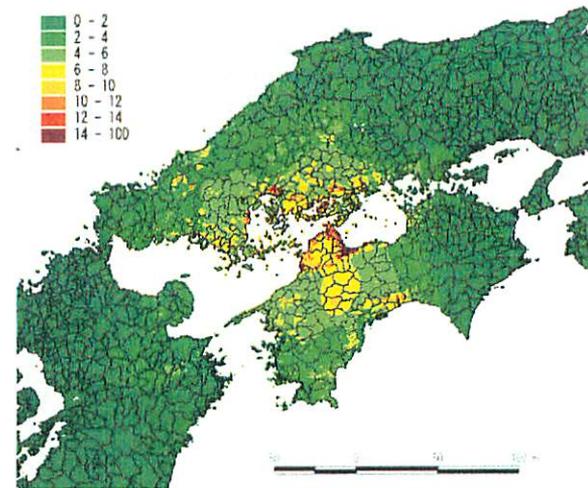


図 3-b KiK-NET の観測記録を用いた地表面最大速度の1kmメッシュの空間分布 (大西の増幅率)

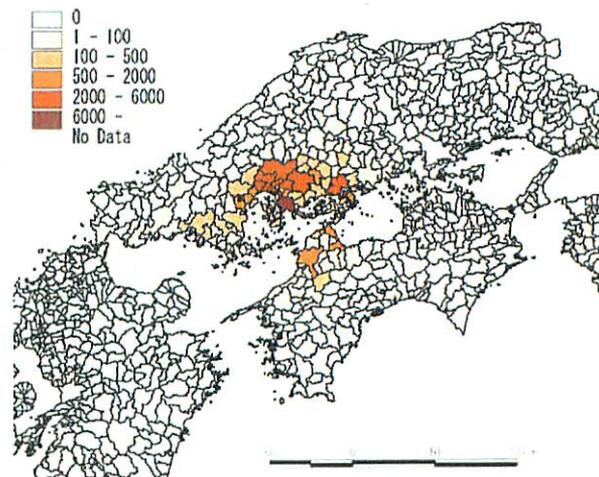


図 3-c 被害報告をもとにした各市区町村の実際の建物一部損壊棟数

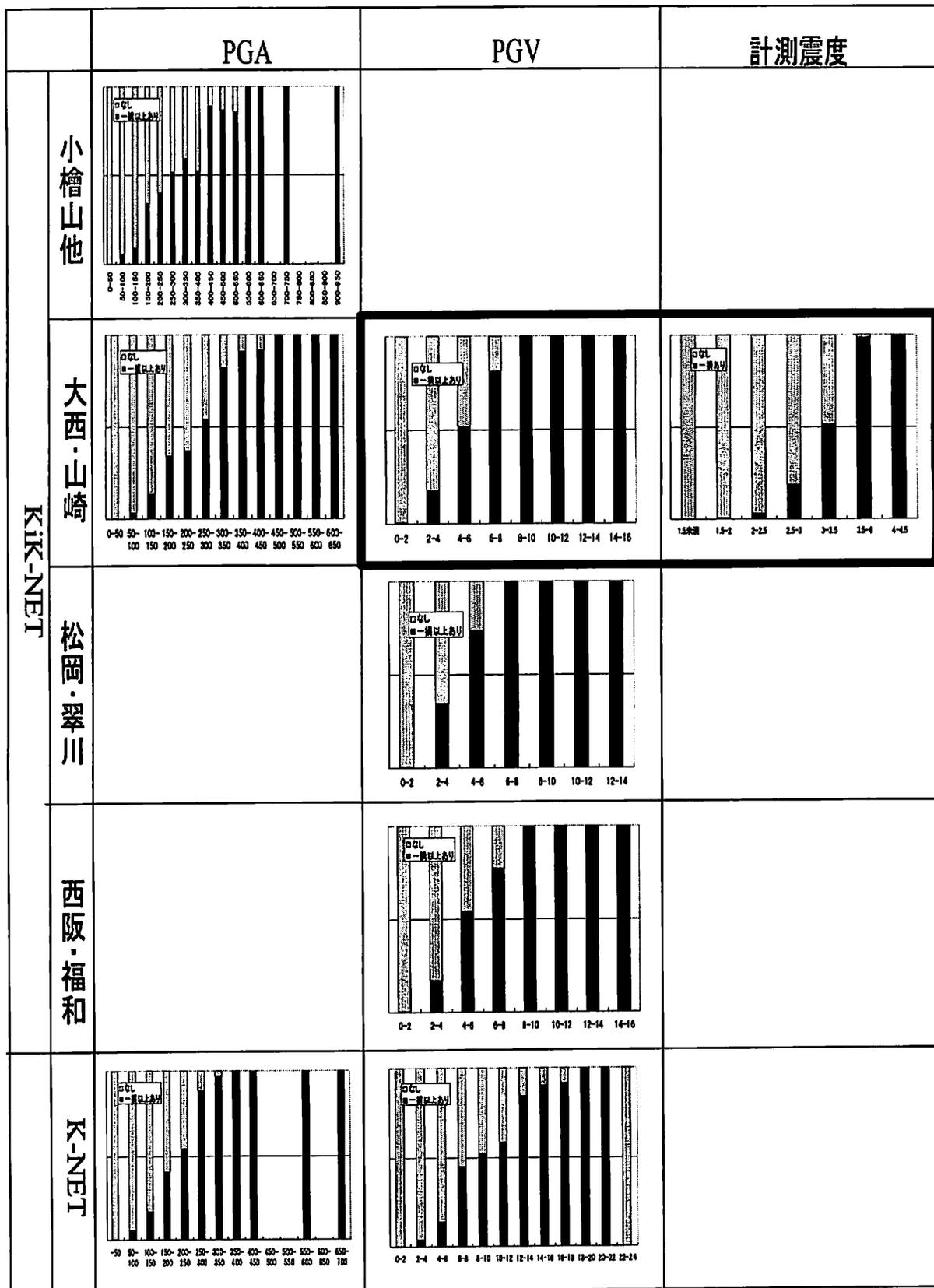


図5 各地震動指標と一部損壊以上の建物被害の発生割合の関係

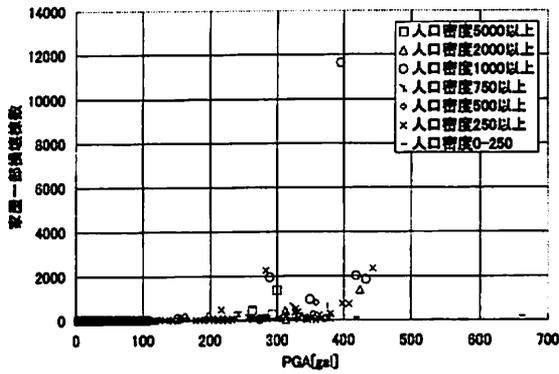


図4 人口密度別の各市区町村における地表面最大加速度と建物一部損壊棟数の関係

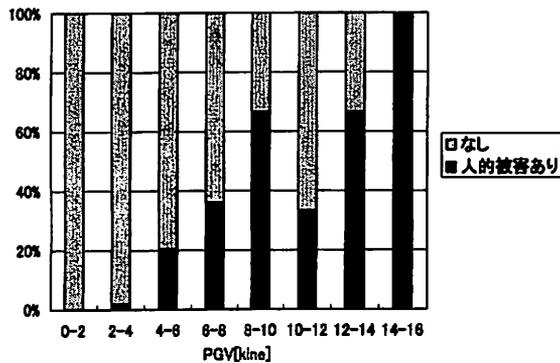


図6 手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた地表面最大速度と軽傷以上の人的被害の出た市区町村の割合

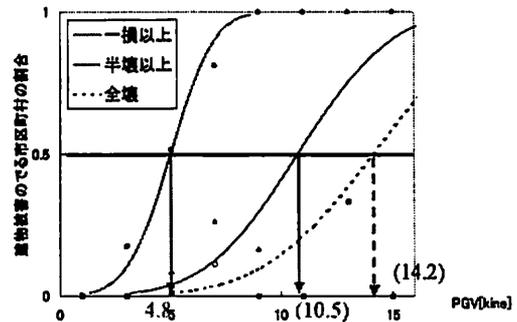


図7 手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた地表面最大速度と被害発生割合をプロビットモデルにフィッティングした図

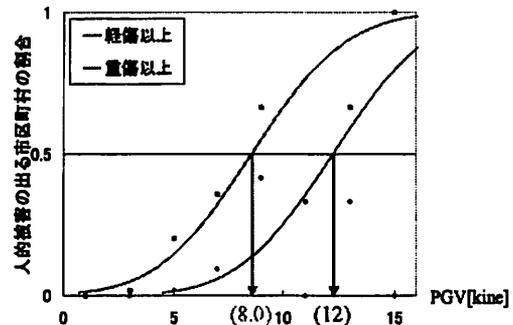


図8 手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた地表面最大速度と人的被害発生割合をプロビットモデルにフィッティングした図

非常に大きな被害を出した市区町村は都市部であることが明らかになった。今後さらに検討すべき課題である。

b) 閾値の同定

閾値を同定するために、地震動強さの値をカテゴリズし、各カテゴリーに属する市区町村の総数と、そのうち1件以上被害がでた市区町村数をまとめた。カテゴリズは地表面最大加速度は50gal、地表面最大速度は2kine、計測震度は0.5ごとにおこなった。それをもとに各地震動強さの指標と軽傷以上の人的被害、重傷以上の人的被害、一部損壊以上の建物被害、半壊以上の建物被害、全壊棟数の報告された割合の関係を検討した。

各地震動強さと一部損壊以上の建物被害の発生の有無の関係を図5に示す。図5より、一部損壊以上の建物被害については、いずれの地震動強さにおいても地震動強さが大きくなるにつれて被害発生確率が大きくなる傾向が見られ、かつ単調に増加しているため閾値は同定可能である。ここでは特に良好であると思われる手法2に基づく地表面最大速度および計測震度をもって閾値を同定することとした。

一方、人的被害については、手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた計測震度および地表面最大速度以外では、地震動強さが大きくなるほど、被害が発生した市区町村の割合が増加するという傾向が見られなかった。手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた計測震度および地表

面最大速度についても、建物被害における関係ほど良好な関係は得られなかった。図6は、手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた地表面最大速度と軽傷以上の人的被害が発生した市区町村の割合の関係を示したものである。10-12kineで人的被害の発生する市区町村の割合が一旦低下するという結果となった。今後検討が必要と思われる。以上のような検討から、閾値を設定する地震動強さの指標として、手法2に基づく地表面最大速度および計測震度を用いることとした。

地震動強さと被害の出る割合の関係を、プロビットモデルにフィッティングすることにより、被害の発生する割合が50%にあたる地震動強さの値を読みとり、閾値を求めた。図7、図8に手法2に基づき大西・山崎の増幅率を用いた地表面最大速度と建物被害および人的被害が発生した市区町村の割合の関係をプロビットモデルでモデル化したものを示す。地表面最大速度では、一部損壊の閾値は山崎の増幅率・平均値集計、西阪の増幅率・平均値集計では4.8kine、松岡の増幅率・平均値集計では3.8kineとわかった。計測震度においては、比較的高精度の結果が各種被害について得られ、平均値集計ではそれぞれ一部損壊3.1、軽傷3.7、半壊4.1、重傷4.3となり、最大値集計ではそれぞれ一部損壊3.7、軽傷4.2、半壊4.5、重傷4.8となった。よって計測震度によるそれぞれの被害の閾値は、一部損壊3.1-3.7、半壊4.1-4.5、軽傷3.7-4.2、重傷4.3-

表2 得られた各被害の閾値

	一損	半壊	軽傷	重傷
手法2・PGV・山崎の増幅率・平均値集計	4.8	10.5	8	12
手法2・PGV・山崎の増幅率・最大値集計	7.8	17.7	12.8	20.6
手法2・計測震度・平均値集計	3.1	4.1	3.7	4.3
手法2・計測震度・最大値集計	3.7	4.5	4.2	4.8

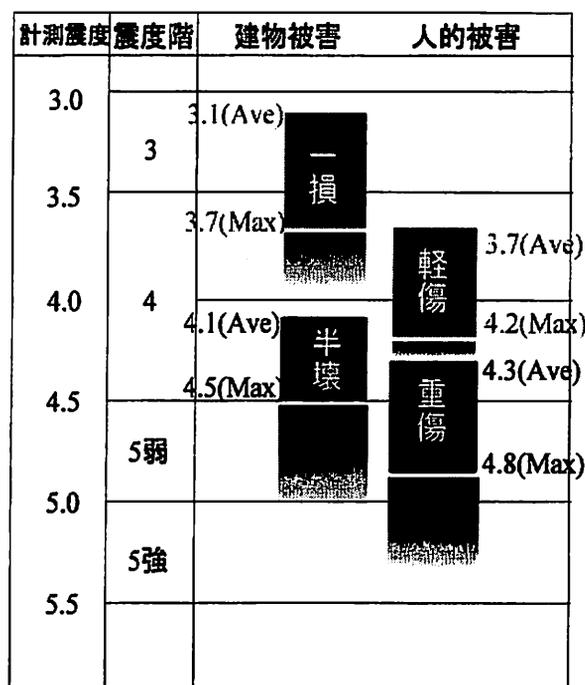


図9 計測震度による各種被害の閾値

4.8と同定された。ただし半壊、全壊、重傷についてはデータ数が少ないことを明記しておく。このようにそれぞれの地震動強さの各種被害に対する閾値が同定された。得られた閾値を表2にまとめる。また、図9に各種被害に対する計測震度ベースの閾値の相互関係を示す。

ここで、この平均値集計による閾値と最大値集計による閾値の扱い方について説明しておく。各自治体が初動対応に用いる場合、最大値集計は各市区町村において最大の地震動強さが推定される1kmメッシュでの、つまり自治体内で最も弱い地盤における閾値であり、平均値集計は各市区町村の平均的な地盤における閾値であるため、各市区町村の計測震度計の設置されている地点の地盤状態と自治体全域の地盤状態を考慮して用いればよい。必ずしも各自治体において、境界内全体の詳細な地盤条件が把握されているとは限らないが、少なくとも土地分類基本調査による表層地質図および地形分類図をもとに計測震度計の設置地点の地盤状態をある程度推測することは可能である。例えば、設置地点が自治体内で最も地盤の悪い地域であれば最大値集計の閾値を用いればよく、平均的な地盤であれば平均値集計の閾値を用いればよい。各自治体の事情を考慮して柔軟にこの値を用いるべきと考え、閾値にある幅を持たせた。

c) 閾値の有意性の検定

b)において求めた各被害についての閾値から推定される各市区町村における被害発生の有無と被害報告に基づく実際の被害の有無の関係について、カイ二乗値および相対係数による評価をおこなった結果を表3に示す。なおここでは、地震動強さの空間分布を補間によって求めた範囲、すなわち、芸予地震の地震動を記録したK-net, KiK-netの強震計設置点を内包する矩形範囲に入る2483市区町村を母集団とした。

表3から明らかなように、建物の一部損壊被害については係数も高く、被害発生との閾値として利用できる可能性が高い。中でも計測震度の平均値を用いた場合がもっとも有望である。残念ながら、建物の半壊については、信頼に足る結果は得られていない。人的被害については、図6に示すように、人々の受傷が地震動強さに一義的に規定されているとは言い難い傾向が示されていることもあり、高い推定精度は得られなかった。

5. 結論と今後の課題

本研究で用いた方法では、KiK-NETの強震データから、どの地域において被害が発生するかを推定できることがわかった。被害と地震動強さとの関係を分析した結果、計測震度と地表面最大速度の一部損壊以上の建物被害、軽傷以上の人的被害に対する閾値を得ることができた。特に計測震度に関しては良好な結果が得られた。この閾値を用いて、各自治体は災害発生直後に計測震度計の値から対応が必要か否かを判断する一つの基準を持つことができる。また、KiK-NETの強震記録からその閾値の地表面最大速度あるいは計測震度のカウンターを作成することにより、どの範囲で一部損壊以上の建物被害と軽傷以上の人的被害が起こるかを予測することも可能となる。

人的被害については、よい結果が得られなかった。データの少なさという制約があるものの、これらの結果から考察すると、人的被害に関しては単純に地震動強さの関数では表現できないのではないと思われる。図6で示されるように軽傷被害が発生する市区町村の割合は、地表面最大速10-12kineで被害で一旦減少している。これは12-14kineのデータが少ないことのほかに、怪我の原因に2つのモードが存在していることも考えられる。2つのモードとは、10kine前後では立って動くことができる程度の揺れであるため不安定になり転倒して怪我をし、15kineを超えると揺れが強く、ものが倒れることにより、身動きができずにうずくまっている人が怪我をするということである。今後データベースを充実して、この事も考慮に入れながら人的被害と地震動強さの関係を分析していきたい。

表 3 閾値の有意性の検定

			閾値に基づき被害発生あり/なしと推定された市区町村数															
			一部損壊				半壊				軽傷者				重傷者			
			あり	なし	計	χ^2, ϕ	あり	なし	計	χ^2, ϕ	あり	なし	計	χ^2, ϕ	あり	なし	計	χ^2, ϕ
実際に被害報告が あった/なかった市区町村数	手法2・PGV・山崎の 増幅率・平均値集計	あり	95	58	153	1090.6	1	25	26	11.87	10	32	42	255.65	1	12	13	48.09
		なし	32	2298	2330	0.663	6	2451	2457	0.069	12	2429	2441	0.321	3	2425	2428	0.136
		計	127	2356	2483		7	2476	2483		22	2461	2483		4	2437	2441	
	手法2・PGV・山崎の 増幅率・最大値集計	あり	81	72	153	976.26	4	22	26	213.19	15	27	42	331.28	0	13	13	0.02
		なし	22	2308	2330	0.627	3	2454	2457	0.293	23	2418	2441	0.365	3	2425	2428	-0.003
		計	103	2380	2483		7	2476	2483		38	2445	2483		3	2438	2441	
	手法2・計測震度・ 平均値集計	あり	123	37	160	1359.7	0	26	26	/	12	47	59	288.61	0	14	14	/
		なし	42	2281	2323	0.740	0	2457	2457	/	8	2416	2424	0.341	0	2469	2469	/
		計	165	2318	2483		0	2483	2483		20	2463	2483		0	2483	2483	
	手法2・計測震度・ 最大値集計	あり	100	60	160	1170.80	3	23	26	168.05	21	38	59	465.32	0	14	14	/
		なし	26	2297	2323	0.687	2	2455	2457	0.260	17	2407	2424	0.433	0	2469	2469	/
		計	126	2357	2483		5	2478	2483		38	2445	2483		0	2483	2483	

注: 「 χ^2, ϕ 」列は、上段が χ^2 値、下段が相対 ϕ 値を表す。

本研究の中で求めることができた閾値は、芸予地震のデータに基づいて導かれたものである。したがって、今回求めた閾値を鳥取県西部地震などの他の地震に対しても応用可能であるのか現段階では未知である。本論文で提案したデータベースの作成手法により、鳥取県西部地震などさまざまな地震に関するデータをデータベースに追加していくことによって、今後外的妥当性を高めていく必要がある。

補注

補間の方法

本研究においては、最大加速度を K-NET あるいは KiK-NET から得られる 3 成分の強震波形をベクトル合成することによって求めた。最大速度は、3 成分の強震波形をそれぞれ数値積分した後、ベクトル合成することによって求めた。計測震度の算出方法に関しては、気象庁⁹⁾に基づいて算出した。

GIS を用いることで、観測点における離散的な地震動強さの指標から面的な地震動強さの指標の空間分布を推定できる。この作業は補間と呼ばれる。補間の方法には、Inverse Distance Weighted (IDW) や Spline など、いくつかの方法がある。IDW とは、ある観測点から距離が離れているほど観測点からの影響が少なくなるという想定に基づいて、処理中の観測点に近い観測点に対してより大きい重みを割り付ける方法である。各補間点の値は、指定半径内の全ポイントを使って計算される。他方、スプラインとは、汎用の補間法の中で、曲率が最小にするように各補間点における推定値をつなぐ方法である。本研究では、前者の IDW を用いた。補間の範囲は地震動が計測されたすべての観測点を含む長方形とした。補間点は、緯度経度方向に 30 秒毎に生成させた。1km メッシュ毎の地震動強さの指標は、各メッシュに含まれる補間点における地震動強さの指標の推定値の平均値を用いた。

謝辞

地震動データベースの作成に際して、防災科学技術研究所の強震観測ネットワーク、基盤強震ネットワークによる強震観測記録を使わせていただいた。

消防庁の方々には、被害のデータベースの作成に際して、さまざまなアドバイスをいただいた。

消防庁の WEB 上に公開されている災害報告を使わせていただいた。

市区町村ごとの被害のデータベースを作成するにあたっては、年末の忙しいところ下記の自治体の方々の協力を得た。

- 大分県
- 高知県
- 島根県
- 広島県
- 広島県広島市
- 福岡県
- 山口県 (アイウエオ順)

ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 山崎文雄：日本の地震学と地震工学 地震災害予測研究会編、損保保険料率算定会、pp. 77-87, 1998. 10.
- 2) 松岡昌志・翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 443 号, pp. 65-71, 1993. 1.
- 3) 松岡昌志・翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 447 号, pp. 51-56, 1993. 5.
- 4) 西阪理永・福和伸夫・荒川政知・鉄傑：国土数値情報を活用した地盤増幅度と地震動の予測, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 341-344, 1997.
- 5) 福和伸夫・荒川政知・西阪理永：国土数値情報を活用した

地震時の地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, Vol144B, pp. 77-84, 1998.

- 6) 小檜山雅之・水越 薫・石田 寛・永田 茂・金子弘幸・松本 優・矢代晴実・大金義明: GIS を活用した地震損害評価システムの構築, 日本建築学会技術報告集, 第 7 号, pp. 187-191, 1999. 2.
- 7) 大西淳一・山崎文雄・若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 79-91, 1997. 7.
- 8) 総務庁統計局編: 統計でみる市区町村のすがた, 日本統計協会, 2000. 1.
- 9) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその応用, ぎょうせい, pp.49-55, 1997.
- 10) 池田央: 社会科学・行動科学のための数学入門 2-統計的手法 I 基礎, 新曜社, pp.146-149, 1976

(原稿受付 2002. 6. 2)