

震度情報ネットワークによる震度曝露人口のリアルタイム推計

Realtime Evaluation of Population Exposure to Seismic Intensity
Using Seismic Intensity Information Network能島 暢呂¹, 杉戸 真太², 久世 益充³, 濱本 剛紀⁴Nobuoto NOJIMA¹, Masata SUGITO², Masumitsu KUSE³ and Goki HAMAMOTO⁴¹ 岐阜大学工学部社会基盤工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

^{2,3} 岐阜大学流域圏科学研究センター

River Basin Research Center, Gifu University

⁴ (株) 帝国建設コンサルタント

Teikoku Engineering Consultants, Inc.

A realtime evaluation system of population exposure to seismic intensity (PEX) has been proposed. On the basis of the JMA intensities reported via prefectural seismic intensity information network, the proposed system processes site corrections and spatial interpolations to estimate intensity distribution on uniform grid cells with spacing of 500m. The derived intensity distribution is immediately overlaid with the population distribution of the concerned area to aggregate population exposed to a certain level of seismic intensity. Thus the PEX information is issued for emergency response personnel to intuitively understand the social impact in a real time manner. Numerical examples have been shown for realtime PEX evaluation in Gifu prefecture using past and hypothetical earthquake events.

Key Words : population exposure, seismic intensity, real-time evaluation, social impact, emergency response

1. はじめに

地震がもたらすインパクトを最も直接的に表現するのは、人的・物的・機能的・社会経済的な被害数量である。その被害数量は概念的に、「揺れの強さ」(誘因)が「被害主体の脆弱性」および「被害主体の規模」(素因)で規定されるシステムに入力された結果の出力として捉えることができる。これら3要素をそれぞれ「地震動強度 I 」, 「被害関数 V 」, 「施設数量(社会経済活動量) N 」としてデータで記述して被害数量 D を集計することによって、次式のように被害推定が行われる。

$$\text{被害数量 } D = \sum I N(I) V(I) \quad [1]$$

一方、能島ら¹⁾は上記3要素のうち、「地震動強度=震度」, 「施設数量=人口」として、揺れの揺がりと地域の集積度合いとの重ね合わせ効果を考慮したマクロ的な震災ポテンシャル指標「震度曝露人口(PEX; population exposure to seismic intensity)」を提案した。この指標は、対象地震による震度と人口の空間分布を重ね合わせて、震度 I の揺れを記録した地域の居住地人口 $N(I)$ を集計して求められるもので、次式のように震度 I の関数となる。

$$\text{震度曝露人口 } PEX(I) = N(I) \quad [2]$$

居住地人口分布は、施設分布や社会経済活動量の分布と高い相関関係にあると考えられる。無論、非居住地域

にも施設は多数存在するし、都心部では昼夜間人口の日変動が大きいという問題もあるが、居住地人口は1次近似的な意味において社会経済的活動を代表する指標と見てよいであろう。震度曝露人口 PEX の評価は特別の手間を要するものではなく、被害推定の過程でいわば副産物的に求められる。また被害関数を介さずに求められることから、不確定要因が入り込む余地が少ない震災ポテンシャル指標と位置付けられる。

類似の視点に基づく震災ポテンシャルの解釈は、米国の先行研究にもみることができる。Jones et al.²⁾ は、1987年Whittier-Narrows地震、1989年Loma Prieta地震および1994年Northridge地震を対象として、MMI(修正メルカリ震度階) VII以上の等震度線内に含まれる面積、人口、建物数などの指標を集計し、社会経済的インパクトの相互比較を行っている。Nishenko³⁾ は、1994年Northridge地震と1999年Hector Mine地震の震度分布と人口分布を重ね合わせて示し、両者の被害数量の違いは、震度曝露人口の違いによるところが大きいことを示している。また米国地質調査所⁴⁾ (USGS) は、既往地震やシナリオ地震による震度マップや確率論的地震ハザードマップを示す場合に、人口分布との関係について言及することが多く、震度曝露人口によるインパクト評価の意義を示唆している。

これまで筆者らは、(1)大被害をもたらした既往地震の推定震度分布¹⁾, (2)海溝型巨大地震の地震動シミュレーションによる予測震度分布¹⁾, (3)2000~2003年に

震度6弱以上を記録した地震の観測震度分布⁵⁾、(4) 30年超過確率1~79%に相当する地震ハザードマップ⁶⁾に基づいて震度曝露人口を評価し、震災ポテンシャルの比較を行った。

本研究はこうした適用事例を背景として、即時推定と即時活用という方向性において、震度曝露人口の適用範囲を拡げることを狙いとしたものである。本研究では、各市町村につき1箇所程度の震度情報をもとにして、その面的補間によってほぼリアルタイムに詳細震度分布を推定する。これに基づいて震度曝露人口を推計し、即時的な情報提供を行うことを目的とした「リアルタイム震度曝露人口推計システム」を提案する。その成果は、揺れによるインパクトの概略的な把握に役立つと考えられ、震度マップの補助的情報となることを想定している。

以下、2. では、本研究で提案するシステムの重要な要素である震度分布の面的推定方法について、国内外の関連システムの現状と既往研究を概説するとともに、本研究の位置づけを明らかにする。3. では、岐阜県を対象としたリアルタイム震度曝露人口の推計の流れについて述べる。4. では、提案するシステムにおける震度分布の面的推定方法について説明する。5. では、岐阜県震度情報ネットワークを用いたリアルタイム震度曝露人口推計システムによる評価例について示す。最後に6. では、本研究のまとめと今後の課題を示す。

2. 面的な震度分布推定に関する現状と既往研究

わが国では1995年兵庫県南部地震以降、強震観測網の整備が全国的に進められてきた。ここ約10年の間に政府関係機関によって展開されたものに限っても、気象庁⁷⁾の地震観測点の拡充(約610点)、防災科学技術研究所による強震観測ネットワーク⁸⁾(K-NET、約1030点)および基盤強震観測網⁹⁾(KiK-net、約660点)の開設、消防庁による震度情報ネットワーク¹⁰⁾(約2800点)の整備が挙げられる。同時に、地震後の震度発表の速報化と高密度化が進められ、災害対応の初動体制の確立に有用な情報として活用されている。

このように全国展開された観測網における地震計の設置密度は、平均的には各市区町村に1箇所程度である。しかし地震の揺れは、地盤構造の影響で局所的に大きく増幅されるなど、市区町村内でも複雑な分布を示すことが多い。この場合、観測地点固有の揺れがその周辺領域における全体的な傾向を正しく表現せず、領域全体の代表値としては不適切となる¹¹⁾。また地震計の設置箇所あるいは設置条件によっては観測震度が過小あるいは過大に偏った値となる恐れもある。地方自治体や公益企業によって高密度な観測網が構築されている地域もあるが、その全国展開は現実的ではない。そこで観測情報の面的補間によって、詳細な震度分布図を作成する方法が現実的な選択肢となる。

例えば2004年3月には、内閣府と気象庁によって「推計震度分布図」の公表が開始された¹²⁾。全国いずれかの観測地点で震度5弱以上が観測されると、表層地盤の増幅度を考慮して基準地域メッシュ(約1km四方)の間隔で震度分布が面的に推計され、地震後1時間を目途に震度4以上の震度分布図が発表されることになっている。

米国カリフォルニア州においては、TriNET(計画では約670点)による地震観測情報をもとに、最大加速度、

最大速度、MMI(修正メルカリ震度階)、応答スペクトル(周期0.3, 1, 3秒)の分布図がほぼリアルタイムに作成され、「ShakeMap」として公表されている¹³⁾。地盤増幅特性の評価においては、地質年代、地震動の卓越振動数および最大加速度に依存した増幅度係数が導入されている。震度分布推定における空間解像度は0.025°(約2.8km四方)である。

また久保ら¹⁴⁾は、防災科学技術研究所によるリアルタイム地震情報伝達システムROSEにおける地震動推定を目的として、2分の1地域メッシュ(約500m四方)での地盤増幅特性マップを整備するとともに、K-NETで観測された地震動強度を補間することにより、面的な地震動推定を行う方法を検討している。

清野ら¹⁵⁾は、地盤の卓越振動数を利用したCokrigingによる震度補間推定手法を開発し、震度計の最適配置について考察した。さらに、市町村レベルの領域内における震度分布を的確に示すため、観測震度と推定震度のヒストグラム表示とを併記した表現方法を提案している。

本研究では、これらのシステムの現状や既往研究を参考にしながら、震度分布と人口分布との関連付けを重視して「リアルタイム震度曝露人口推計システム」の開発にあたった。

なお筆者らの研究グループでは、文部科学省「大都市大震災軽減化プロジェクト」の一環として「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開発」に取り組んでいる^{15), 16)}。地震動分布推定により即時的に被害推定を行う既存システム¹⁷⁾に類似した機能に加えて、多様な災害情報(具体的には人工衛星リモートセンシング画像、空撮画像、実被害情報など)を効率的に統合処理して推定結果を逐次更新する機能を備えるとともに、緊急対応の意思決定を支援することが可能なGISの開発を行うものである。

本研究で開発するシステムはその前段部の一部を構成するものであり、揺れによるインパクトの概略的な把握により地震対応の初動体制を迅速に確立するために役立つと考えられる。

3. 岐阜県を対象としたリアルタイム震度曝露人口推計の流れ

本研究では、各都道府県によって運用されている震度情報ネットワーク¹⁰⁾を通じて通報される震度を利用して、地震発生後にほぼリアルタイムに震度曝露人口を推計し、即時的な情報提供を行うことを目的とした「リアルタイム震度曝露人口推計システム」の開発を提案する。このシステムは、都道府県レベルの地震被害想定で用いられるメッシュ地盤データと、地域メッシュ統計による人口データを利用することを前提として、2分の1地域メッシュ(約500m四方)の面的な震度分布を推定して震度曝露人口を推計するものである。気象庁が配信する「推計震度分布図¹²⁾」は、2. で述べたように基準地域メッシュ(約1km四方)を推定単位としているのに対して、都道府県レベルではさらに詳細なデータが利用可能であり、その利点を活かすことを狙いとしている。以下ではその一例として、岐阜県震度情報ネットワークを用いたリアルタイム震度曝露人口推計システムによる推計手順(1)~(6)について説明する。

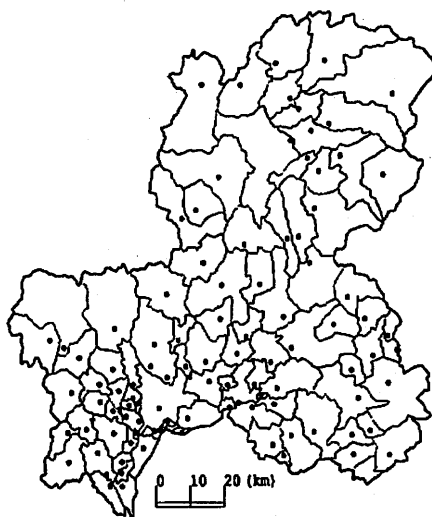


図1 岐阜県における99箇所の震度観測点
(市町村界は2002年3月末時点の旧境界)

(1) 震度情報ネットワークからの震度情報の受信

岐阜県震度情報ネットワークは、岐阜県内99市町村で観測された計測震度が伝達される体制で、2000年1月に震度発表を開始した。2002年4月以降に市町村合併が進行し、2004年8月現在では市町村数が80(20市39町21村)まで減少している。しかし震度観測体制についてはこれまでのところ変更は加えられておらず、今後当面、99箇所からの震度通報が得られる見込みである。これは、震度分布の推定精度を維持するために望ましいことと考えられる。本研究で開発するシステムでは、岐阜県震度情報ネットワークより震度情報を取得することを前提とした。図1は震度観測点の分布である。また各種の集計単位については、合併開始前の2002年3月末時点における99の旧市町村区分とした。

(2) 各観測点における工学的基盤レベルでの震度推定

上記の計測震度値は、表層地盤の増幅特性の影響を受けたものであるから、次の(3)で述べる補間推定を行う前に、工学的基盤レベル相当の計測震度に引き戻す必要がある。本研究においては、表層地盤の揺れやすさをあらかじめ基盤面震度に対する震度増分値として評価し、基盤面震度と地表面震度の「震度変換テーブル」を作成することとした。これを参照することにより、計測震度が通報されると直ちに基盤面震度を求めることができる。岐阜県における地盤モデルについては4.(1)で、「震度変換テーブル」については4.(2)で詳しく述べることにする。

(3) 各メッシュの工学的基盤面での震度の補間推定

震度観測地点における基盤面震度を面的に補間することにより、工学的基盤レベルにおける震度分布を求める。空間的な補間方法としては、未観測地点の近傍に位置する観測点を選定し、2点間距離と負相関を持つ重み係数を用いた加重平均を採用する方法をとった。補間推定手法については4.(3)で詳しく述べることにする。

(4) 各メッシュにおける表層地盤での震度推定

任意の未観測地点における基盤面震度が求められると、

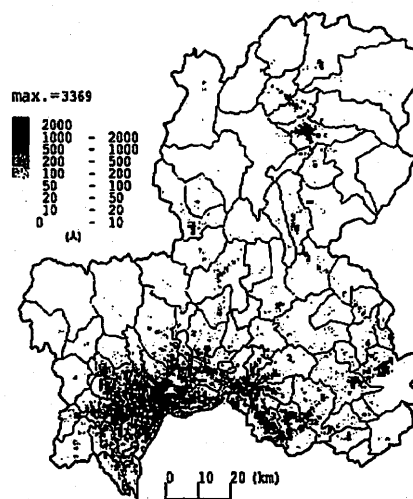


図2 地域メッシュ統計による岐阜県の人口分布
(平成7年国勢調査)

「震度変換テーブル」の当該地点の地盤モデルの欄を参照することによって、当該地点における地表面震度が算出される。この手続きを県内の全メッシュについて適用して、面的震度分布の即時推定を行う。

(5) 市町村レベルでの震度曝露人口の分割集計

人口データとしては、平成7年国勢調査に基づく地域メッシュ統計データの居住人口(ほぼ夜間人口に対応)を用いた。これは基準地域メッシュ(約1km四方)と2分の1地域メッシュ(約500m四方)が混在したデータであるが、本研究では震度の推定単位にあわせて、1kmメッシュのデータについては4分割して500mメッシュに再編成して利用した。図2にその人口分布を示す。市町村レベルにおける震度曝露人口は、対象市町村内に含まれるすべてのメッシュについて、人口と地表面震度を集計することにより求められる。

(6) 県レベルでの震度曝露人口の集計

県内の全市町村の震度曝露人口を集計することにより、県レベルにおける震度曝露人口が求められる。

4. 本研究における面的な震度分布の推定手法

ここでは、3.で述べた推計手順のうち、面的な震度分布推定を行う手順(2)～(4)に関連する事項について、詳しく説明する。

(1) 岐阜県におけるメッシュ地盤データ

岐阜県では地震被害想定を目的として、2分の1地域メッシュ(約500m四方)単位のメッシュ地盤データが整備されている¹⁸⁾。

まず地形区分については表1に示す9区分を用いており、濃尾平野では濃尾第一礫層を、他の地域では第三紀鮮新世以前の地層もしくは火山岩類を地震基盤としている。表層地盤に関しては、この地形区分をさらに細分化して計49種類の地盤モデルに分類している。各地盤モデルは、モデル柱状図の形で表されており、地盤震動解

析に必要な物性値（S波速度および密度）が地層各層に与えられている。

岐阜県メッシュ地盤データは、2分の1地域メッシュ（約500m四方）を基本単位として、ボーリング柱状図、地形区分、表層地質図および地質断面図をもとにして、上記49種類の地盤モデルの1つを県内の全メッシュに割り当てたもので、県全域でのメッシュ数は約41,000である。

(2) 岐阜県における震度変換テーブル

岐阜県震度情報ネットワークは観測された強震記録を伝送しないシステムとなっている。従って、基盤-表層間での震度変換を行う際に、時刻歴波形や応答スペクトルを用いた分析を適用することができない。また即時利用のためには、処理に要する時間はできるだけ短いことが望ましい。そこで、基盤面震度と地表面震度の関係をあらかじめ評価しておくこととした。ただし地盤の非線形増幅特性の影響を考慮するために、地盤モデルごとに単一の震度増分値を定めるのではなく、震度レベルごとの震度増分値を列挙した「震度変換テーブル」を作成する方法をとった。

まず、各地盤モデルへの入力とする加速度時刻歴を作成するため、地震動予測コードEMPR¹⁹⁾を用いて地震動シミュレーションを行った。基準とする地震の断層パラメータは、地震モーメント $M_0 = 1.1 \times 10^{28}$ dyne·cm（マグニチュード8相当）、断層長さ $L = 120$ km、断層幅 $W = 60$ kmと設定し、震央距離100kmの地点における工学的基盤（S波速度600~700m/sec程度）の加速度波形として求めた。得られた加速度時刻歴波形とそのフーリエスペクトルを図3に示す。スペクトル特性が比較的なだらかに変化しているのは、入力波形の卓越周期が鋭いピークを持たないように断層パラメータを設定したためであり、こうすることにより一部の地盤モデルに特殊な増幅パターンが現れることを回避した。この加速度波形を、計測震度0.1~6.5の範囲において刻み幅0.1で振幅調整し、49種類の各地盤モデルの工学的基盤に相当する層への入力波形とした。

次に、地盤震動解析コードFDEL²⁰⁾により各地盤モデルの表層面における応答波形を求め、各々の震度レベルに対する計測震度を算出した。ここでFDEL (Frequency Dependent Equi-Linearized Technique) とは、周波数依存性を考慮した等価ひずみを用いた等価線形化手法である。周波数にかかわらず一律に等価ひずみ（最大ひずみの65%）を与える従来法（SHAKE²¹⁾）では、軟弱地盤における増幅率を過小評価する傾向にあった。FDELでは周波数特性に応じた等価ひずみによりせん断剛性と減衰定数を規定することから、SHAKEと比較して高周波数領域におけるせん断剛性を高く、減衰定数を低く評価することによって増幅率を適正に評価し、観測記録とよく一致する結果が得られることが知られている。等価ひずみから土のせん断剛性および減衰定数を求める $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係についてはHardin-Drnevichモデル²²⁾を採用しており、大振幅領域におけるFDELの適用限界は、ひずみレベルでおおむね 10^{-3} 程度である。

以上の手続きによって、各地盤モデルの震度増分値を数値化した「震度変換テーブル」を作成した。図4は、3種類の地盤モデルについて例を示したものである。谷底平野（地盤モデル420）では、工学的基盤面震度レベルにかかわらず震度増分値が約0.7であり、丘陵地（地盤モデル350）では、同様に増分値は0.2である。一方、

濃尾平野（地盤モデル117）では、非線形増幅特性が現れており、震度増分値は低震度領域で約0.6、高震度領域で約0.2となっている。

なお気象庁計測震度は、本来3成分（水平2成分+上下1成分）の加速度波形を用いて算出される¹⁰⁾。一方この「震度変換テーブル」は、水平1成分の加速度波形に基づいて（残る水平1成分と上下1成分を0とみなして）算出したものである。このため、3成分による計測震度と1成分による計測震度の差が概ね0.25と評価されている²³⁾。ことに基いて、震度情報ネットワークにより通報される気象庁計測震度から、いったん0.25を差し引いて水平1成分相当の値としたうえで「震度変換テーブル」を参照して震度を変換し、再度0.25を加えて3成分相当の値に戻すこととした。

表1 地形区分と地盤モデル

地形区分	地盤モデル数
平野（濃尾平野）	12
沖積低地	9
谷底平野	8
崖錐	4
段丘	8
扇状地	2
丘陵地	2
人工地盤	1
山地（地震基盤）	3
合計	49

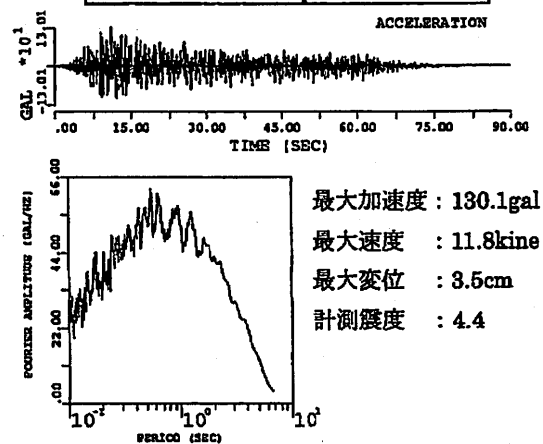


図3 工学的基盤面への入力地震動の一例（加速度波形およびフーリエスペクトル）

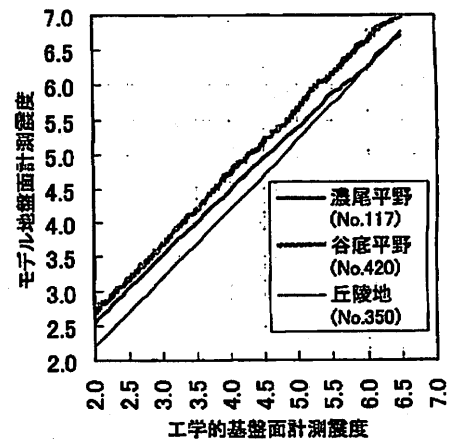


図4 震度変換テーブルの図示例

(3) 工学的基盤における震度の補間手法

震度観測点以外のメッシュにおいて工学的基盤の震度については、基本的に久保ら¹⁴⁾による検討例を参考にし、対象地点近傍の観測震度の加重平均により補間推定することとした。

- まず対象地点から半径 r (km) 以内における観測点を抽出し、距離の短い順に最大 m 点の観測点を選定する。
- 対象地点から各震度観測点までの距離を d_k ($k=1, \dots, m$) とする。
- 各震度観測点の工学的基盤面レベルにおける震度を 3.(2) により求めて I_{bk} とする。
- 各震度観測点の重み係数を d_k^{-n} (n はパラメータ) として、対象地点の推定基盤面震度を加重平均値で評価する。

$$I_s = \sum_{k=1}^m I_{bk} d_k^{-n} / \sum_{k=1}^m d_k^{-n} \quad [3]$$

本研究では、県内の震度観測点の設置状況等を考慮して $r=25$ km, $m=5$, $n=2$ としたが、このパラメータ設定については、再検討の余地を残している。

なお、震源情報としてマグニチュードと震源を利用できる場合には、手順 d) を下記の d-1) ~ d-4) に置き換え、式[4]に従って、距離減衰を伴った傾向変動を考慮することにより補間精度向上を図ることができる。

- マグニチュード M と震源距離 R により、抽出された震度観測点の基盤面推定震度 I_{bk} および対象地点の基盤面推定震度 I_a を求める²⁹⁾。
- I_{bk} と 3.(2) による推定値 I_{sk} との差 e_k を求める。
- e_k に対して、式[3]と同様に加重平均する。
- 得られた加重平均値に I_a に加えて I_s を得る。

$$\left. \begin{aligned} I_{sk} &= 0.892M - 2.42 \log_{10} R_k + 2.86 \\ e_k &= I_{bk} - I_{sk} \\ \hat{e} &= \sum_{k=1}^m e_k d_k^{-n} / \sum_{k=1}^m d_k^{-n} \\ I_s &= I_a + \hat{e} \end{aligned} \right\} \quad [4]$$

以上のように震源情報の入手の可否に応じて式[3]または式[4]の手続きを、県内の全メッシュについて適用して、工学的基盤レベルにおける震度分布を推定する。

岐阜県震度情報ネットワークが気象庁震度発表に利用されるようになった 2000 年 1 月から 2004 年 7 月までの間に、計 170 回の地震で延べ 1991 箇所計測震度が記録された²⁹⁾。しかしその間の最大震度は 4 であり、震度 4 記録は 6 回の地震で延べ 6 箇所の観測地点に限られる。このため現時点では、基盤-地表の震度変換および震度補間の妥当性を検証するには至っていない。当該ネットワークに含まれない地震観測点の観測記録と、その地点における推定震度とを比較検討することなどによって、推定精度を確認することを今後の課題としている。

5. リアルタイム震度曝露人口の推計事例

ここでは、3. および 4. で説明したリアルタイム震度曝露人口推計システムの仮想的な稼働イメージと、補助的な機能について述べる。

(1) 実際の小規模地震による評価事例

まず、2001 年 1 月 6 日に発生した岐阜県美濃東部を震源とする地震 ($M_j=4.6$) の際に、岐阜県内で実際に観測された計測震度を利用した結果を示す。この地震の震源は、可児市内の多治見市寄りの地点 (東経 137 度 05.9 分、北緯 35 度 22.5 分) であり、笠原町で最大震度 4 (計測震度 3.8) を記録したほか、県内の 30 市町村で震度 3 を記録した。この地震による被害はなかったものの、震度情報ネットワークが整備されて以来、岐阜県内で観測された揺れとしては大きい部類に属する。計測震度のデータについては「2001 年 1 月地震火山月報 (防災編)²⁹⁾」に基づいて設定した。

図 5 は観測震度を受信した際のシステムのイメージ画面であり、図 6 はこれに基づく市町村ごとの震度分布である。震源近傍でも、可児市、土岐市、恵那市、美濃市などでデータ欠損 (白抜きで表示) が生じていることと、各市町村につき一つの震度であることから、詳細な分布を知ることは困難である。図 7 は 3.(2) ~ (3) の処理により求められた工学的基盤面の推定震度分布であり、震源から遠方で揺れの弱い一部地域を除いて、震度を面的に推定できている。震度レベルが低いこともあって、距離減衰特性に反する傾向を示す部分もみられる。また図 8 は、地表面の推定震度分布であり、表層地盤の影響による各市町村内での揺れの相違が反映されている。

図 9 は図 8 と図 2 をもとにして推計した震度曝露人口であり、岐阜県全域と 5 市 (岐阜市、多治見市、可児市、土岐市、高山市) について震度 2.0 以上の結果を表示している。岐阜県全域の人口は約 210 万人、5 市の人口は、岐阜市約 41 万人、多治見市約 9.5 万人、可児市約 8.8 万人、土岐市約 6.6 万人、高山市約 6.6 万人である。岐阜県全体では震度 2.5 ~ 3.0 の曝露人口が最も多いことがわかる。岐阜市で観測された計測震度は 2.9 であったが、面的推定震度分布を用いた震度曝露人口によると、同市内で震度 3.4 程度の揺れとなった地域もあることがわかる。震源に近い多治見市では、観測震度 3.0 に対して最大推定震度は 3.5 となっている。これは空間補間の際に、隣接する笠原町の観測震度 3.8 の影響を反映したものである。いずれにしても、発表される震度階が市町村全体の傾向を代表しておらず、部分的には 1 階級上位の震度階となっていることを想定する必要があることを示唆している。また可児市および土岐市では震度が観測されなかったが、一部では震度 3.5 を超えていた可能性があることがわかる。高山市は震源からかなり距離があったために、震度 2.0 以上の震度曝露人口はゼロという結果となっている。このように、各市内における震度のばらつき具合や、市相互の関係、さらには県全体の中で占める各市の位置付けなどをみてとることができ、多面的な考察が可能である。

(2) シナリオ地震による評価事例

次に、シナリオ地震の推定震度分布を利用した結果として、想定東南海地震を対象とした例を示す。ここでは、東海 4 県を対象として実施された地震動シミュレーションによって予測された計測震度分布²⁹⁾の中から、99 箇所の震度観測点の観測値のみを仮想的な観測震度 (ここでは仮想震度という) として用いることとした。図 10 はその市町村震度である。震度観測点以外のメッシュについては計測震度を未知量として扱い、3.(2) ~ (4) に示した空間的補間処理を行うことによって面的震度分布

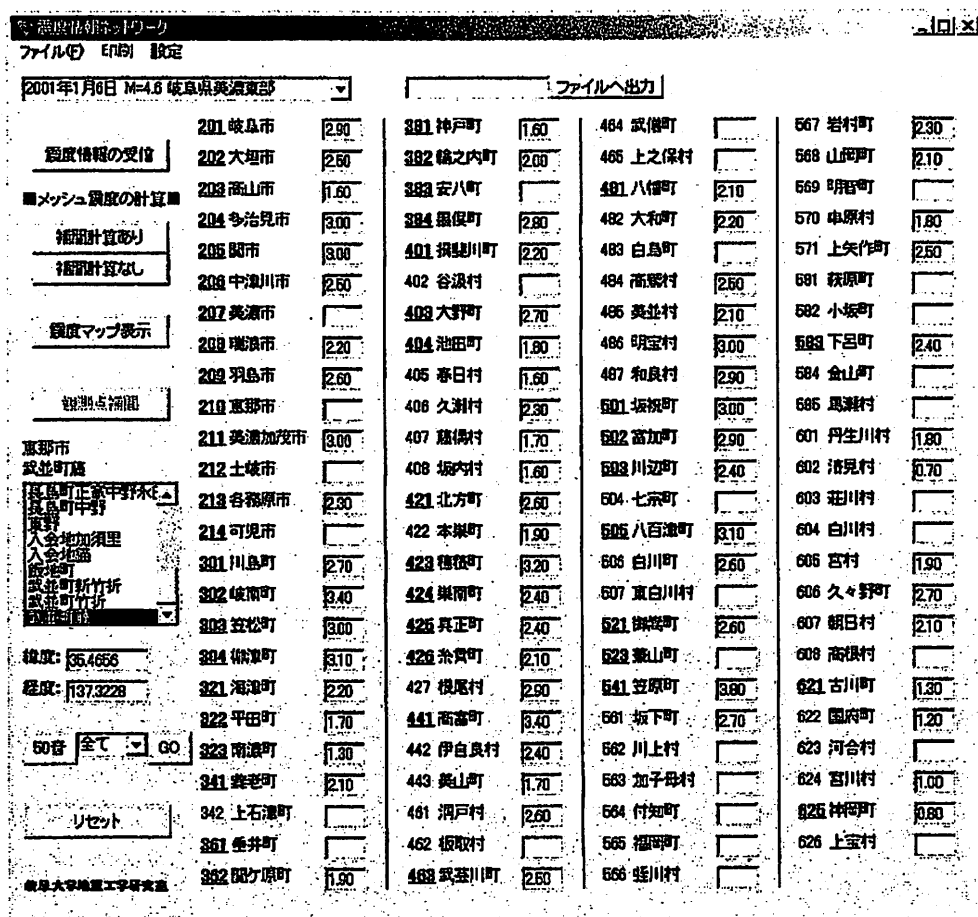


図5 県内市町村からの震度情報の受信画面（2001年1月6日岐阜県美濃東部の地震（Mj=4.6））

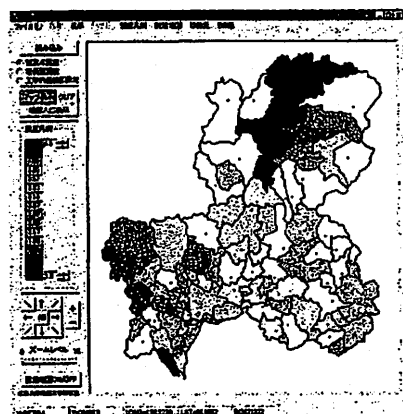


図6 各市町村の観測点震度

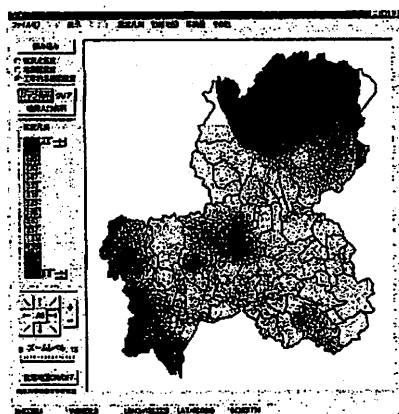


図7 基盤面推定震度分布

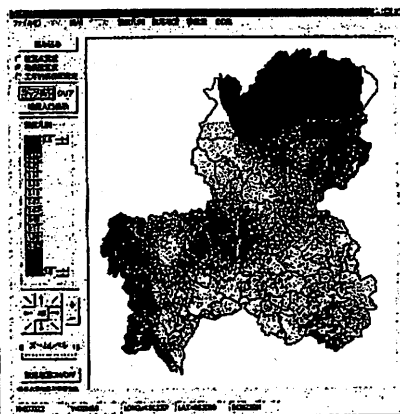


図8 地表面推定震度分布

を推定した。工学的基盤面および地表面での推定震度分布を、それぞれ図11および図12に示す。これをもとに推計した震度曝露人口の結果を図13に示す。岐阜県全体の震度曝露人口を見ると、震度のレンジは4.1～5.5の範囲にあり、5.2前後にピークを持つ分布となっている。

先と同じ5市において設定した仮想震度は、岐阜市5.2、多治見市5.4、可児市5.1、土岐市5.5、高山市4.9であった。震度のレンジは市によって異なるが概ね1.0前後の値となっており、地盤条件を考慮した空間補間によって各市内の震度に大きな幅があることが明確に現れている。各市の仮想震度と震度曝露人口のばらつきを比

較すると、仮想震度が市全体の揺れの傾向を適切に表現しているかどうか判断することができる。土岐市、多治見市および高山市では、仮想震度が推定震度分布のほぼ上限近くの値となっている。反面、岐阜市と可児市では、仮想震度を上回る震度の曝露人口がかなり多く、公表される震度情報の解釈に注意が必要であることを示唆している。

比較のため図14に、等震度面積を集計した震度曝露面積(km²)を示した。岐阜県全体を例にとると、震度曝露面積の分布は震度曝露人口と比較して、全般的に低い震度に偏っていることがわかる。市ごとに見ると、岐阜

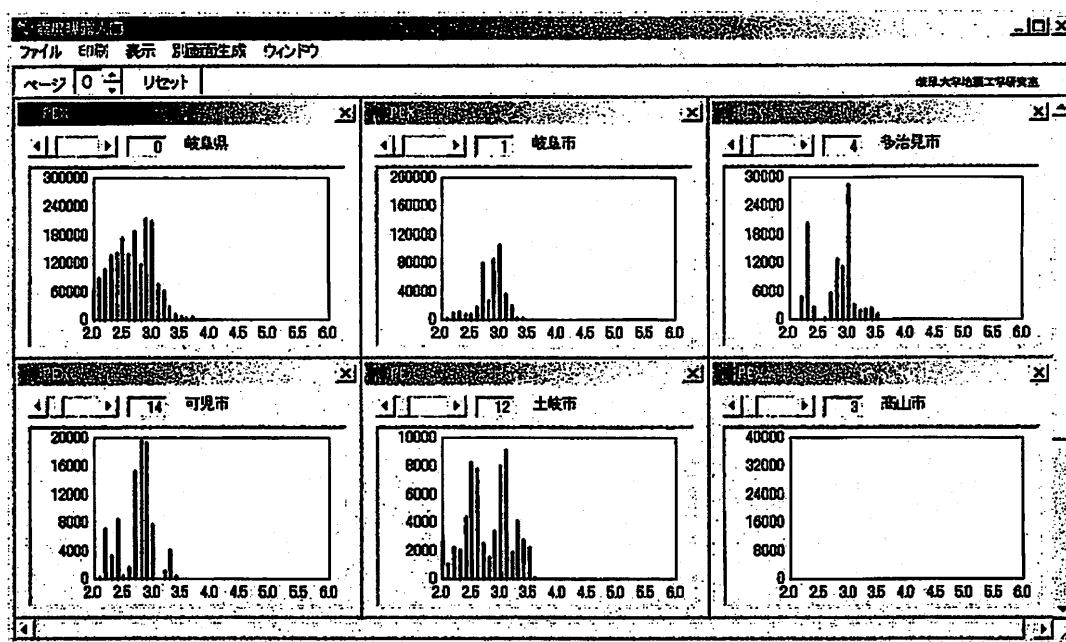


図9 2001年1月6日岐阜県美濃東部の地震による岐阜県全域と5市における震度曝露人口(単位:人)

市、土岐市、高山市でその傾向が強い。これは震度の増幅が小さい山地や丘陵地の影響が現れたものである。その多くは非居住地域である。このことから、揺れの拡がり社会に与えるインパクトや震災ポテンシャルを考える場合には、図14のような面積表現は必ずしも適切ではないといえる。

(3) 補助的機能

上記のように画面表示された震度分布を地震後の対応に活用するため、「リアルタイム震度曝露人口推計システム」にいくつかの補助的な機能を付け加えた。まず、「街区レベル位置参照情報²⁶⁾」を利用して「町丁目検索によるアドレスマッチング機能」を付加した。これは、町丁目名からの位置検索によって表示位置を移動し、拡大表示することによって詳細な震度の読み取りを可能としたものである。図15は町丁目検索に使用するパネルの部分である。また郵便番号入力によって該当メッシュコードを検索する機能も有している。図16は郵便番号検索に使用するウィンドウを示している。図17は「瑞浪市明世町」を検索キーとして入力し、図11の想定東海地震の震度分布を拡大表示したものである。着目地点周辺が拡大表示され、視認性が向上している様子を見取することができる。

また、着目地点周辺の地理的・地形的条件の目視判断を支援することを狙いとして、「地図画像のオーバーレイ機能」を付加した。国土地理院発行20万分の1地勢図の「数値地図200000」(図18)、「中部地方土木地質図²⁷⁾」(図19)、および国土地理院発行2万5千分の1地形図の「数値地図25000」(図20)の3種類のラスター画像から選択することができ、表示地域の中心部を含む画像を自動検索して、図郭単位で自動表示するようになっている。2分の1地域メッシュ(約500m四方)の詳細さをもってしても、谷筋などの微地形を的確にとらえられない場合がある。よって、地図とのオーバーレイ機能を用いることによって、臨機応変な判断を支援できるものと考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた成果と今後の課題について、以下にまとめる。

- (1) 各市町村について1箇所程度の震度情報をもとに、ほぼリアルタイムに詳細震度分布を推定し、震度曝露人口を推計するシステムを提案した。基盤一地表の震度変換については、非線形増幅特性を考慮した「震度変換テーブル」を組み込み、震度補間については加重平均法を採用している。
- (2) 実際の地震における観測震度を用いて、システムの仮想的な稼働イメージを示した。データ欠損が多少あった場合においても、ほぼ網羅的な震度推定が可能であることを確認した。また各市内の震度のばらつきを人口単位で表現し、単一の観測震度の背景にある震度分布を理解するために有益な情報となることを示した。市町村相互の比較や県全体における相対的な関係の理解にも有用である。
- (3) シナリオ地震を用いた事例では、各市の仮想震度と震度曝露人口のばらつきを比較し、市町村の観測震度が代表震度として不適切な場合があることを示した。また震度曝露面積の算出例もあわせて示し、地震の揺れが施設や社会経済活動に与えるインパクトを考察するには、震度曝露人口の方が適切であることを示した。
- (4) 震度曝露人口は、揺れの拡がり性を示した震度マップの補助的情報として役立つと考えられる。また既往地震による震度曝露人口¹⁾をベンチマークとして比較すれば、被災イメージを直感的につかむことも可能となろう。
- (5) 基盤一地表の震度変換と震度補間に関しては、精度の検証が必要である。同時に、観測震度の異常値への対処法の検討も必要である。また今後、居住地人口に換わる曝露指標に発展させることも検討したい。以上については、今後の課題である。

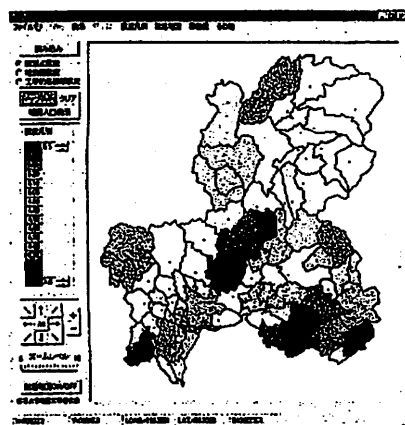


図 10 各市町村の観測点震度

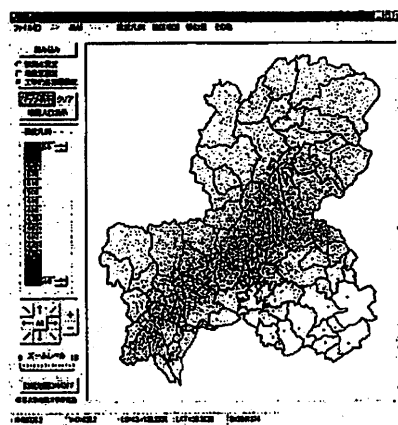


図 11 基盤面推定震度分布

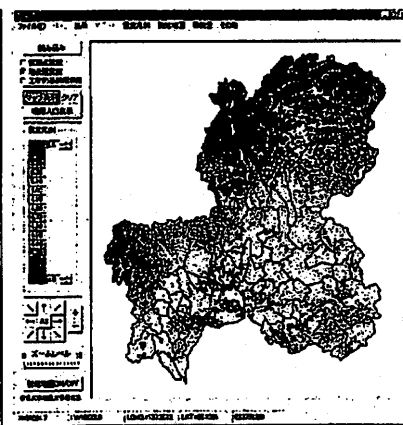


図 12 地表面推定震度分布

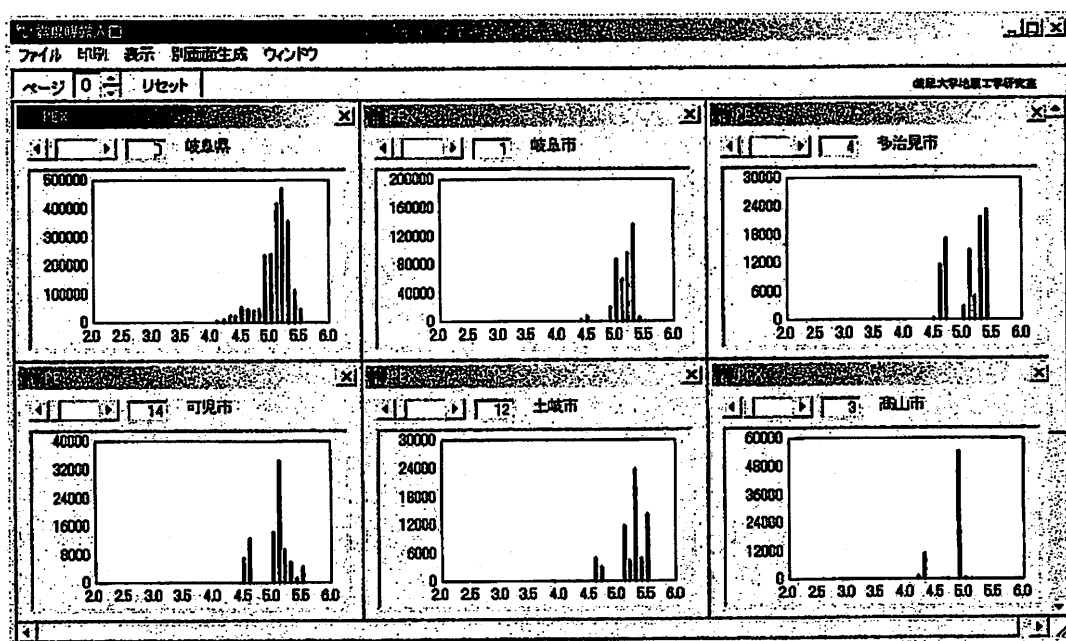


図 13 想定東南海地震による岐阜県全域と5市における震度曝露人口 (単位: 人)

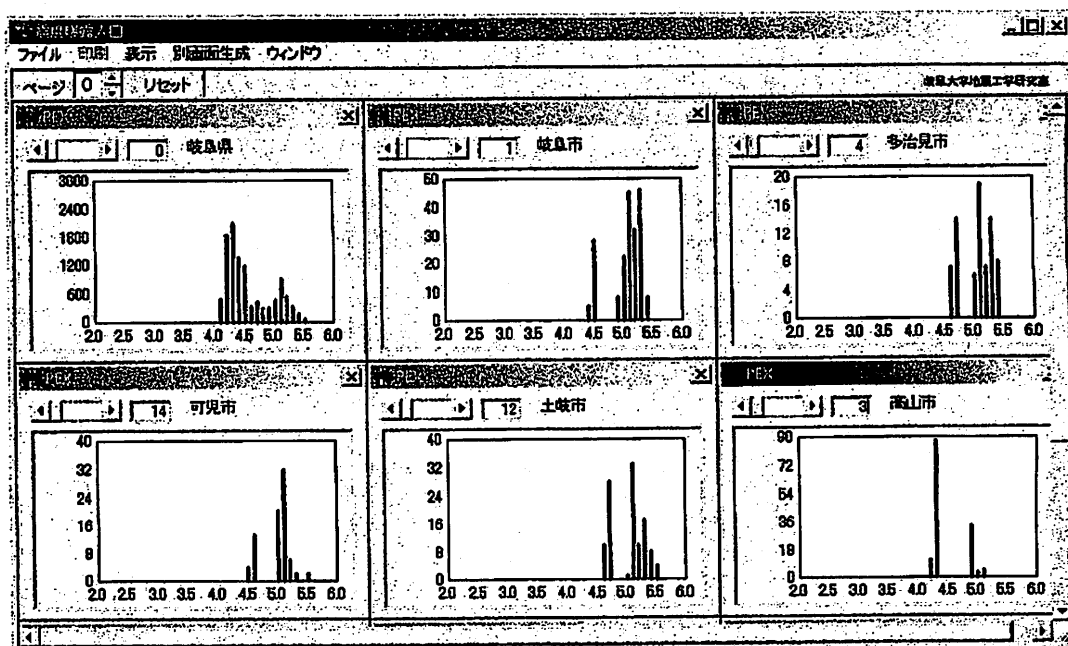


図 14 想定東南海地震による岐阜県全域と5市における震度曝露面積 (単位: km²)

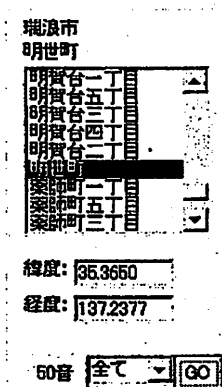


図 15 住所による「瑞浪市明世町」の検索

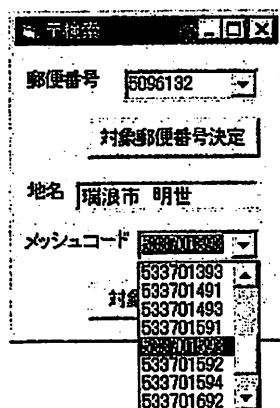


図 16 郵便番号による「瑞浪市明世町 (5096132)」の検索

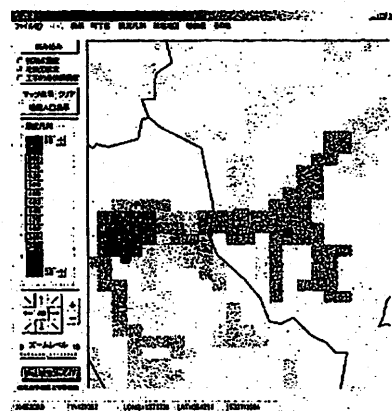


図 17 「瑞浪市明世町」の検索結果

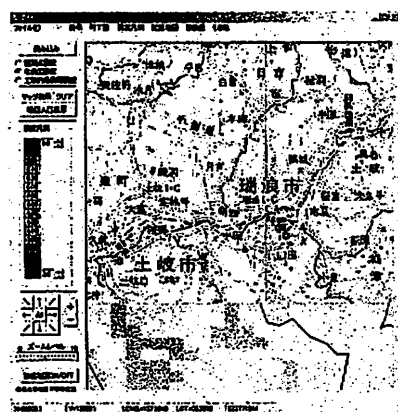


図 18 20 万分の 1 地勢図の重合せ

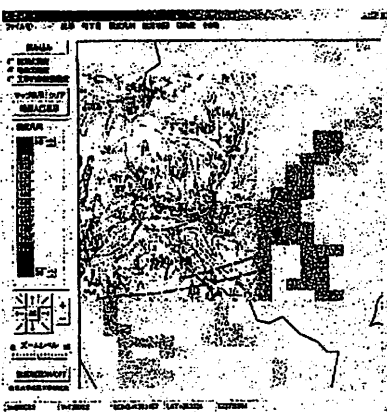


図 19 中部土木地質図の重合せ



図 20 25000 分の 1 地形図の重合せ

謝辞：本研究の一部に文部科学省「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。愛知淑徳大学現代社会学研究科 太田裕教授には、本研究に関連して有益な議論をいただいた。岐阜県地域県民部の関係者からはメッシュ地盤データの提供を受けた。また岐建(株)竹野進司氏(研究当時、岐阜大学工学部学生)からは、数値計算の面で協力を得た。記して謝意を表する。また国土地理院発行の数値地図 200000 および数値地図 25000 を利用したことを付記する。

参考文献

- 1) 能島暢呂・久世益充・杉戸真太・鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み，自然災害科学，Vol.23，(印刷中)。
- 2) Jones, B. G., Westendorff, D. G. and Catechi, S. G., : Comparative Losses: Whittier-Narrows, Loma Prieta, and Northridge Earthquakes, Proc. of the 5th U.S./Japan Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction, Pasadena, CA, EERI/ISSS, pp.117-121, 1997.
- 3) Nishenko, S.: HAZUS Capabilities as a Near-Real Time Rapid Damage Assessment Tool, Proc. of the 1st U.S.-Japan Workshop on Seismic Information System, PWRI, Tsukuba, Japan, pp.109-115, 1999.
- 4) USGS: Is a Powerful Quake Likely to Strike in the Next 30 Years?, USGS Fact Sheet 039-03, 2003.
- 5) Nojima, N., Sugito, M. and Kuse, M.: Macroscopic Assessment of Seismic Disaster Potential in Terms of Population Exposure to Seismic Intensity, The Third Taiwan-Japan Workshop on Lifeline Performance and Disaster Mitigation, Taipei, Taiwan, pp.251-258, May 2004.
- 6) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一：地震動予測マップの活用 ―その 2：震度曝露人口の試算―，第 27 回地震工学研究発表会，土木学会，論文番号 58(報告)，(CD-ROM)，2003.12.
- 7) 気象庁：震度情報のページ，
URL <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/seismo.html>, 2004.
- 8) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET ホームページ，
URL http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/index_en.shtml, 2004.
- 9) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 KiK-net ホームページ，
URL http://www.kik.bosai.go.jp/kik/index_en.shtml, 2004.
- 10) 気象庁監修：震度を知る ―基礎知識とその活用―，ぎょうせい，238p，1996.
- 11) 清野純史・木村広行：計測震度計の最適配置に基づく震度分布の推定，自然災害科学，Vol.22, No.4, pp.441-453, 2004.
- 12) 内閣府・気象庁：推計震度分布図の提供開始について，報道発表資料，2004.2.
- 13) Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W., and Worden, C. B.: TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for

- Earthquakes in Southern California, *Earthquake Spectra*, Vol.15, No.3, pp.537-555, 1999.
- 14) 久保智弘・久田嘉章・柴山明寛・大井昌弘・石田瑞穂・藤原広行・中山圭子：全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化，および，面的な早期地震動推定への適用，*地震Ⅱ*，第56巻，pp.21-37，2003.
 - 15) 能島暢呂：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開発－その基本構想とモジュール構築について－，第5回地震災害マネジメントセミナー「GISを利用した地震防災情報管理の最前線」，土木学会地震工学委員会，地震防災技術普及小委員会，pp.37-43，2004.
 - 16) Nojima, N. and Sugito, M.: Development of a Decision Support System for Post-earthquake Emergency Management Using Synthetic Data Processing Technique, *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.401, 2004 (on CD-ROM).
 - 17) 例えば，内閣府：地震防災情報システム（DIS）の整備，URL <http://www.cao.go.jp/kanbou/dis-s.html>
 - 18) 岐阜県：岐阜県地震被害想定調査報告書，1998.
 - 19) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.2111, 2000 (on CD-ROM).
 - 20) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994.
 - 21) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *EERC*, 72-12, 1972.
 - 22) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equation and Curves, *Proc. of ASCE*, Vol.98, SM7, pp.667-692, 1972.
 - 23) 久世益充・杉戸真太・能島暢呂：南海トラフの巨大地震を想定した広域震度予測，*自然災害科学*，Vol.22，No.1，pp.87-99，2003.
 - 24) Torregosa, R. F., Sugito, M. and Nojima, N.: Assessment of Seismic Hazard and Microzoning in the Philippines, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, No.710, I-602, pp.25-42 (81s-98s), July 2000.
 - 25) 気象庁：地震・火山月報（防災編），2000.1～2004.7.
 - 26) 国土交通省：街区レベル位置参照情報ダウンロードサービス，URL <http://nlftp.mlit.go.jp/lsj/>，2003.
 - 27) 中部地方土木地質図編纂委員会・（財）国土開発技術研究センター：中部地方土木地質図1，1992.

(原稿受付 2004. 5. 21)