

3.3.5 プレート間地震モデル化の研究（史料・震度）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：プレート間地震モデル化の研究（史料・震度）

(b) 担当者

東京大学地震研究所	助教授	都司嘉宣	tsuji@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	瀨瀬一起	koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学工学系研究科	大学院生	行谷祐一	namegaya@eri.u-tokyo.ac.jp
鹿島小堀研究室	次長	武村雅之	takemurm@kajima.com
鹿島小堀研究室	部次長	神田克久	kandak@kajima.com
筑波大学システム情報工学研究科	助教授	境 有紀	sakai@kz.tsukuba.ac.jp

(c) 業務の目的

地震は低頻度の自然現象であり、比較的頻繁なプレート間地震でもその繰り返し周期は数十年以上になっている。そのため、ある震源域の特性を調べるために過去の地震を遡ろうとしても、地震計の記録がまったく得られないか、得られても遡れるのは直近の一地震だけという場合がほとんどである。直近を越えてさらに過去の地震へ遡るとなると、震度の情報が唯一のデータとならざるを得ない。その震度データも明治・大正時代ならば中央气象台などから発表されたものが存在する可能性があるが、それ以前では古文書などから被害の情報を抽出し、それを震度データに変換することになる。

こうした過去の地震を解析するには、唯一のデータである震度データを活用する道しか残されていない。本研究ではその活用方法を開発して、地震計記録のない時代の地震、特に相模トラフおよびその延長上で発生した元禄地震から震源の情報を引き出し、強震動予測における震源モデル化の精度向上を図ることを目的とする。

(d) 5カ年の年次実施計画

平成 14 年度：検証用被害データ収集、解析手法の開発、高度被害の震度変換法

平成 15 年度：元禄地震の被害データ収集、解析手法の検証、中低度被害の震度変換法

平成 16 年度：元禄地震の解析、建物耐震性能等の時代変遷の検討

平成 17 年度：元禄地震の津波データ収集、社会的状況の被害への影響評価

平成 18 年度：震度データ・津波データの同時解析、時代変遷・社会的状況の考慮

(e) 平成 16 年度業務目的

古文書等の解読により元禄地震の被害データを収集し震度への変換を行う。また、平成 14 年度に収集・変換した宮城県沖地震群の震度データに、同じく 14 年度に開発した解析手法を適用し、その手法の妥当性を検証する。被害データの震度変換に関しては、特に中低度被害の再検討を行う。

(2) 平成16年度の成果

(2-1) 元禄地震の神奈川県内の詳細震度分布

都司嘉宣（東京大学地震研究所）

行谷祐一（東京大学地震研究所）

(a) 業務の要約

元禄地震(元禄十六年十一月二十三日、1703年12月31日)の被害データを収集してデータベースを作成するとともに、神奈川県内についての被害データを震度に変換してその分布図作成を行った。

(b) 業務の実施方法

元禄地震（1703）などの江戸時代に起きた地震の状況は、当時の日記や覚書などの、いわゆる古文書（こもんじょ）を読むことでそのおおよそを把握することができる。元禄地震に関しては、武者(1941)¹⁾、および地震研究所から刊行されている「新収・日本地震史料」(1982,1990,1994)^{2),3),4)}に古文書文献が紹介されており、それらの文献の記述から、元禄地震によって物理的に何が起きたのかという情報を抜き出すことができる。たとえば、「新収・日本地震史料」（第2巻別巻、1982）の124ページに収録されている「鶏肋編 上」には、「戸塚の宿家壱軒も無之人馬共式百廿八人死ス」とあり、戸塚宿では元禄地震により家がすべて倒壊したことがわかる。そこで本研究では、この情報のように1地点の1事象を基本単位として、データベース化を行った。データベースでは、次の情報が必ず書き込まれることとした。

- (1) 原文献上での地名記載
- (2) その地点の現在の市町村、集落名、小字名
- (3) 事象の内容、すなわち何が起きたのか？
- (4) 原文献名
- (5) 原文献を載せる地震史料集名と、掲載ページ数

古文書に出てくる地名と現在地との対応には、角川書店(1984)⁵⁾および平凡社(1984)⁶⁾を用いた。これらを用いると、江戸時代の村名の現代地図上の位置がおおよそ判明するが、その下位単位である小字地名となると困難な場合が多い。不明の地名のプロットは将来の課題として、本研究では見送った地点がある。また、現代地図へのプロットには、マッピングツールを使うので、集落の中心位置の北緯東経を秒単位で読み取った。

ところで、地震によって、家屋、建造物、石灯籠などの被害、地割れ、崖崩れなどの事象が記載されていると、震度を推定することができる。昨年度は元禄地震の千葉県内の詳細震度分布を求めたことから、本年度は神奈川県内の震度分布を求めることにした。

現代の気象庁震度階級関連解説表では、木造家屋の全壊を生ずるとき震度6かそれ以上と判断し、耐震性が高い家屋も全壊が生じたときを震度7としている。この尺度をそのまま江戸時代の家屋に当てはめるとすると、2種類の問題が生じてしまう。すなわち、

- (1) 気象庁震度階級関連解説表で想定している現代の日本式の伝統的な木造家屋と、江戸時代の標準的な庶民や武士の家屋との間には地震に対する強度に差がある。つまり、江戸時代の家屋のほうが現代の家屋より地震に弱く、地震動によって

壊れやすいのである。

- (2) 現代の気象庁震度階級関連解説表に言う「家屋全壊」は、「家屋が完全に壊れる」の意味ではない。支柱が数度傾いただけで、屋根、壁はいちおう無事で当面は住み続けることができても、その家屋を原状に復するには一度全部壊さなければならぬとき、その家屋を「全壊」としている。いっぽう、古文書にあらわれる「潰」の字は家が「伏屋(ふしや)」の状態となったものを言う。すなわち、天井、屋根が地面に接触するまでに壊れた家のことであり、現代の「全壊」より江戸時代の「全潰」のほうが被害の程度が重い。現代の「全壊」にあたる状態は、古文書の世界では「半潰」とも記されないばかりか、場合によっては「無事」と書かれるかも知れない。

このように相反する2つの問題はあるものの、本研究では、次のように判断することにした。すなわち、その集落の「潰家」が全戸数の1%以上10%以下なら6弱(図では「6-」と表記する)、10%以上50%以下では6強(6+と表記する)、50%以上であるならば震度7、とした。寺院の建物単独の倒壊記事などから、震度6程度の揺れであることはわかるが、その集落全体の潰家率が計算できない場合は、単に震度6として評価した。

なお、全潰率を求めるためには、地震時のその集落全体の戸数が必要になる。これについては、平凡社(1984)の地名辞典を参考とした。この辞典には、かならずしも元禄地震の発生日に近い年代での戸数が記載されているわけではないが、なるべく近い年代の戸数を採用した。

(c) 業務の成果

元禄地震の神奈川県内の被害データベースの一部を図1に示す。また、図2は神奈川県内各集落での気象庁震度を推定した結果である。これによると、茅ヶ崎市南湖や二宮町山西で震度5と判断されたものの、震度7の領域が、横浜から小田原にかけての東海道上に現れていることがわかる。また、震度6の領域が、伊勢原市や箱根町などの若干内陸部や、横浜市に存在していることもわかった。川崎から戸塚、平塚、小田原と、震度分布が線状分布しているのは、この線が東海道にあたり、宿場町として形成され、史料が書かれる文化町であったことが理由の一つとして挙げられよう。

いっぽう、都司(1986)⁸⁾から元禄地震の神奈川県内陸部の様子を知ることができる。都司(1986)は、寺の過去帳(死者の戒名と死亡年月日が書かれたもの)に着目し、神奈川県内の寺院1635軒に対して元禄地震時にその寺の檀家中何人死亡したと書いてあるのかアンケートを行った(回収445件)。その結果が図3である。図3で、●は元禄地震時に死者が過去帳内に記録されていなかった寺院をあらわす。また△は元禄一六年十一月二十二日の、○は二十三日の、□はこのどちらかの日の檀家中の死者記録がある寺院をあらわし、各記号横の数字は死者数をあらわす。これによると、今回の研究結果を裏付けるように、横浜戸塚から東海道を通り小田原までの各地域で死者が記録されていることがわかる。とくに小田原での死者が著しい。さらに内陸地域に目を移すと、海老名や秦野で死者が記録されており、内陸地域でも震度6以上の揺れがあったことが言える。これは今回の研究結果と相補うかたちになっており、注目に値する。

ところで、最近武村⁷⁾は、木造家屋倒壊率から推定した大正関東地震(1923年)の詳細震

度分布図を発表した。それによると、神奈川県の場合、逗子市から小田原市にかけての相模湾沿岸で木造家屋倒壊率が30%を超える震度7の領域が現れた。また、元禄地震で伊勢原市や箱根町および横浜市に見られる震度6の分布は、大正関東地震でも同様の傾向が得られている。このことから、神奈川県に関しては元禄地震の震度分布と大正関東地震の震度分布がよく似ていることがわかった。

都道府県	現在区	現在地	史料地名	記事	震度	新収	ページ	出典
神奈川県	足柄下郡	箱根町仙石原	仙石原関所	仙石原関所番所西の方へ1尺余倒れ所々損、木戸の内一方の柱1本おれ倒れ、両木戸際石垣崩れ柵倒れ、構えの柵残らず半倒れ。関所への道筋所々崩れ、馬の通行できず	6	新収2-別	2	[楽只堂年録]
神奈川県	足柄下郡	箱根町底倉	底倉村	底倉村温泉湯坪24の内無事2、破損22(4坪は堂ヶ島のうち)	6	新収2-別	2	[楽只堂年録]、[甘露叢、史料2-47]
神奈川県	足柄下郡	箱根町塔ノ沢	塔ノ沢村	塔ノ沢村温泉湯坪113の内無事5、破損3、5坪湯道崩	6	新収2-別	2	[楽只堂年録]、[甘露叢、史料2-47]
神奈川県	足柄下郡	箱根町湯本・須雲川	湯本茶屋村より須雲川まで	湯本茶屋村より須雲川まで道に欠け所あり、馬通行できず、落石あり、馬通行できず人がやっと通れる	6	新収2-別	3	[楽只堂年録]
神奈川県	足柄下郡	箱根町畑	畑村	畑村は6、7軒倒れ、死者4人	6	新収2-別	249	[祐之地震道記]
神奈川県	足柄下郡	箱根町木賀	木賀	木賀温泉湯坪5の内無事1、破損4	6	新収2-別	2	[楽只堂年録]、[甘露叢、史料2-47]
神奈川県	足柄下郡	風祭、山崎から湯本村に至る道	風祭、山崎から湯本村に至る道	風祭、山崎から湯本村に至る道、山崩れ大きな岩石街道に横たわり、山の木倒れて道ふさぐ	6	新収2-別	248	[祐之地震道記]
神奈川県	足柄上郡	山北町谷峨	谷ヶ村関所	谷ヶ村関所番所半潰、東の方木戸倒、惣構之残らず倒れ	6	新収2-別	2	[楽只堂年録]
神奈川県	藤沢市	村岡東	貝から坂の大切通り	貝から坂の大切通りは山崩れ道ふさが、	6	新収2-別	245	[祐之地震道記]
神奈川県	横浜市	磯子区森の南部	武州今井九右衛門代官所久良岐郡本牧領森雑色村(ぞうしき)	潰家30、半壊家7、死5、傷あり	7	新収2-別	16	[楽只堂年録]
神奈川県	横浜市	磯子区竜頭	武州今井九右衛門代官所久良岐郡本牧領竜頭	潰家38、半壊家あり、潰家1軒焼失、寺潰1、傷4、傷馬1	7	新収2-別	15	[楽只堂年録]
神奈川県	横浜市	戸塚区	妙秀寺	吉田橋という所の鎌倉道辺に妙性寺(妙秀寺の誤りと思われる)という寺あり、見るが内に転倒して住職の坊主圧で死す。	7	新収2-別	242	[祐之地震道記]
神奈川県	横浜市	戸塚区戸塚町	戸塚宿	宿中の人家悉く転倒して死人多し	7	新収23-別	242	[祐之地震道記]
神奈川県	横浜市	戸塚区戸塚町	戸塚宿	戸塚宿残らず家潰れ、人馬大勢死	7	新収2-別	3	[楽只堂年録]

図1 元禄地震(1703年)の被害データベースの一例

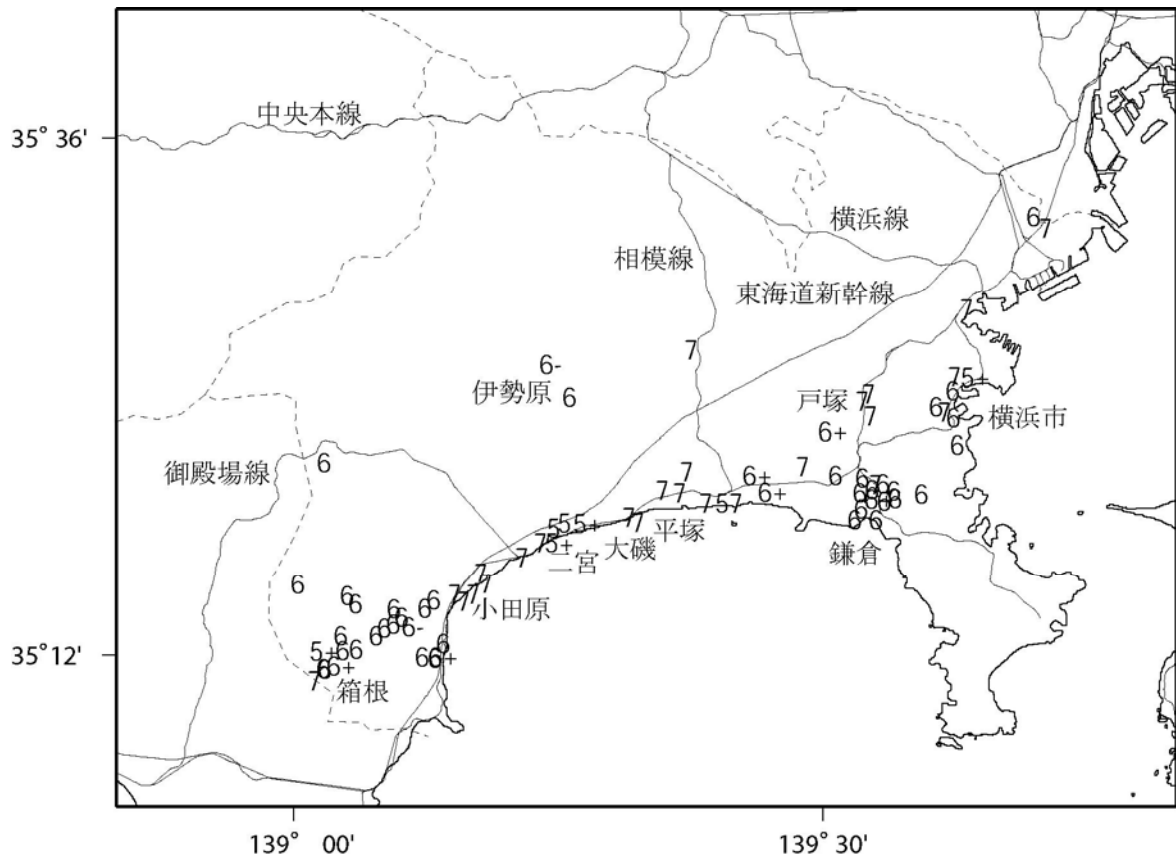


図 2 元禄地震(1703年)による神奈川県内の集落別震度

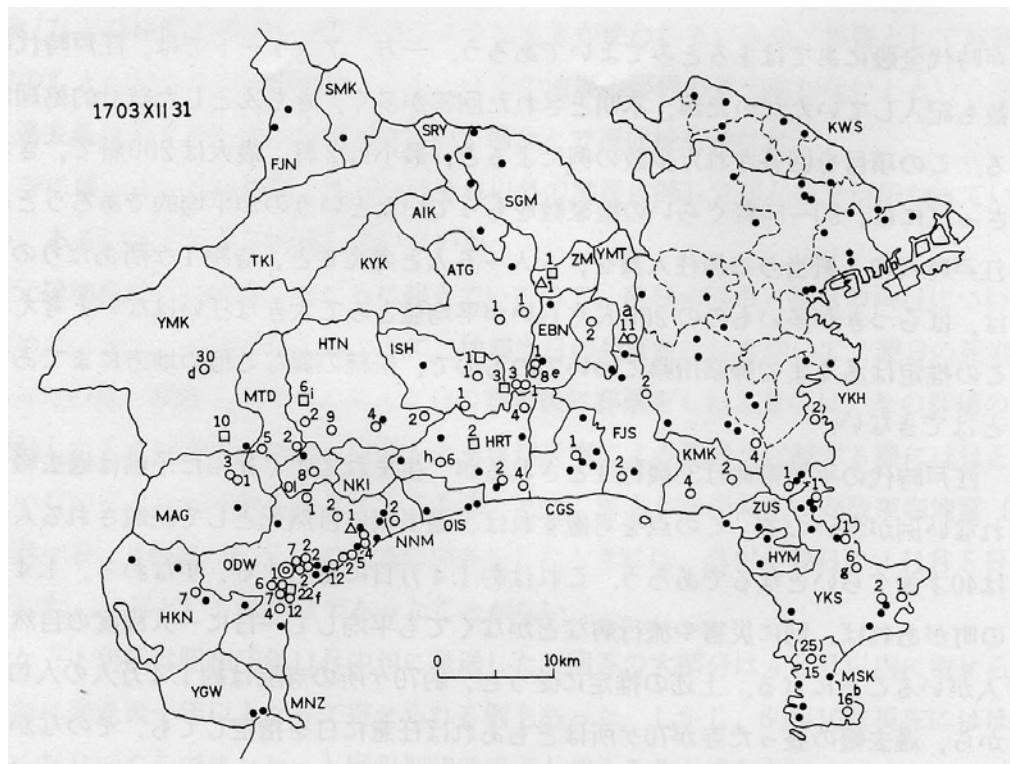


図 3 元禄地震の起きた日の死者が記録された過去帳を持つ寺院の分布(都司、1986)

(e) 引用文献

- 1) 武者金吉：「増訂大日本地震史料・第2巻」，文部省震災予防評議会，pp.754，1941.
- 2) 地震研究所：「新収・日本地震史料・第二巻 別巻」，pp.290，1982.
- 3) 地震研究所：「新収・日本地震史料・補遺 別巻」，pp.1222，1990.
- 4) 地震研究所：「新収・日本地震史料・続補遺 別巻」，pp.1043，1994.
- 5) 角川書店：「角川日本地名大辞典・14・神奈川県」，pp.1517，1984.
- 6) 平凡社：「神奈川県の地名・日本歴史地名大系14」，pp.857.
- 7) 武村雅之：関東大震災：様々な被害とその教訓，地震ジャーナル，Vol.36，pp.26-39，2003.
- 8) 都司嘉宣：神奈川県寺院過去帳アンケート調査結果でみた歴史地震被害，36，95-112，1986.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
都司嘉宣・上田和枝・伊藤純一	領主別被害合計資料から被害が起きた個々の集落を推定する手法－元禄地震(1703)の詳細震度分布推定研究への応用－	第21回歴史地震研究会	2004年9月18日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-2) 震度インバージョン解析による大正関東地震、元禄地震の検討

神田 克久（鹿島建設小堀研究室）

武村 雅之（鹿島建設小堀研究室）

(a) 業務の要約

1923年大正関東地震および1703年元禄地震は、ともに南関東を襲った歴史上最大規模の被害地震で、首都圏での建物の設計用入力地震動の設定や防災上の被害想定において重要な地震である。震度インバージョン解析は、短周期地震動に関係した震源特性を評価する手法¹⁾で、被害から推定した震度分布を用いることができるため強震動の計測記録のない歴史地震に対して極めて有効な方法である。既に、本手法を用いて東海・東南海・南海の歴史地震に適用して有益な情報を得ている²⁾。ここでは、大正関東地震および元禄地震についても、本手法を適用して得られた結果について考察する。

(b) 業務の実施方法

本業務は、地震の被害から推定した震度分布を用いてインバージョン解析を行い、震源の特性を推定するものである。検討項目を図1のフロー図に示す。まず、想定される震源断層近傍で最近発生した中小地震の計測震度データを収集分析し、震度の距離減衰式および局所地盤の揺れやすさを表す指標である相対震度を評価する。次に、震源断層面を仮定し、相対震度でサイト増幅特性を補正した評価対象地震の震度分布を用いてインバージョン解析を行い、短周期地震波のエネルギー放出分布を求める。エネルギー放出の大きい領域を短周期発生域として評価し、波形インバージョン解析から得られたすべり分布などと比較する。

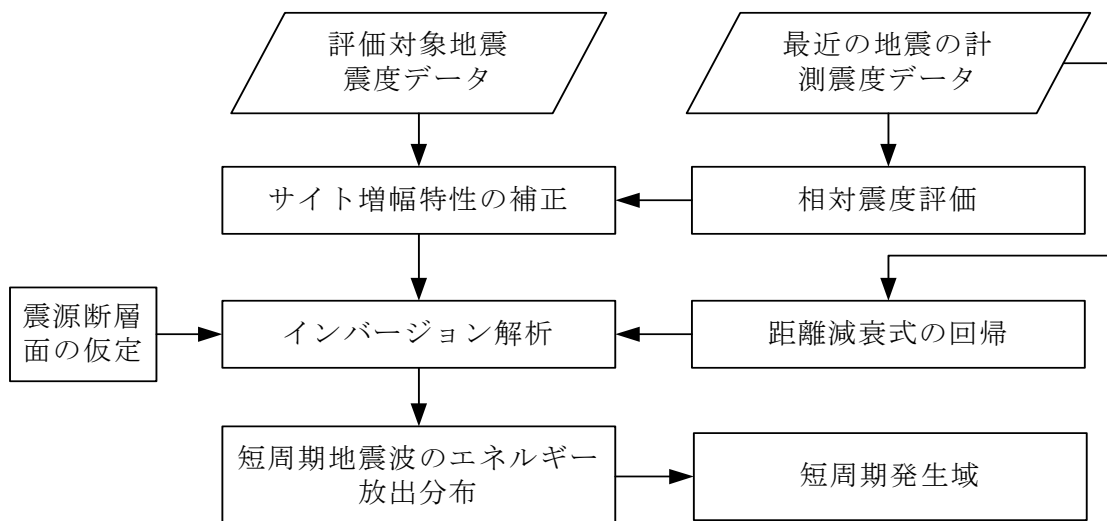


図1 検討フロー

本業務で用いる震度インバージョン解析とは、設定した震源モデルから各地の震度を評価する解析の逆解析、すなわち震度分布から震源を推定する手法である。震度と震源の関係としては、等価震源距離 X_{eq} ³⁾とマグニチュード M_I に関する震度 I の距離減衰式(1)を用

いる¹⁾²⁾。用いる震度 I は、観測された震度から各地点における地盤による揺れやすさの影響を示す相対震度を除いた値である。相対震度は、最近の中小地震の計測震度を分析して評価する。

$$I = -a \log(X_{eq}) + bM + c \quad (1)$$

ここで、

$$X_{eq,k}^{-2} = \sum_i (E_{li} / X_{i,k}^2) / \sum_i E_{li} \quad (2)$$

等価震源距離 X_{eq} は、(2)式で示すように震源断層の i 番目の小断層の短周期エネルギー E_{li} の関数となる。ここで、下付文字 I は短周期地震波に関係したパラメータであることを示す。(2)式に(1)式を代入して、(3)式の J を最小になるように最小自乗法で E_{li} を同定する。

$$\begin{aligned} J = & \sum_k \left(X_{eq,k}^{-2} - \sum_i (E_{li} / X_{i,k}^2) / \sum_i E_{li} \right)^2 + \left(\sum_n E_{ln} - N \right)^2 \\ & + v^2 \sum_p (2E_{lp} - E_{lp+1} - E_{lp+2})^2 + v^2 \sum_q (3E_{lq} - E_{lq+1} - E_{lq+2} - E_{lq+3})^2 \\ & + v^2 \sum_r (4E_{lr} - E_{lr+1} - E_{lr+2} - E_{lr+3} - E_{lr+4})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、右辺 2 項は N 個の小断層の場合エネルギー値の平均を 1 になるように規準化するためである、右辺 3 項～5 項は、エネルギー分布を滑らかにするために、順番に 2 つから 4 つの小断層と接している小断層に関する拘束条件である。ここで、 \square は超パラメータと呼ばれ、(4)式で示す赤池-ベイズの情報基準（以下 ABIC と呼ぶ）⁴⁾ を最小にするように \square を定める。

$$\begin{aligned} ABIC = & (N + K) \log \frac{J}{N + K} + P \log \frac{1 + 6v^2}{v^2} \\ & + Q \log \frac{1 + 12v^2}{v^2} + R \log \frac{1 + 20v^2}{v^2} + C \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 P, Q, R は 2～4 つの小断層と接しているそれぞれの小断層の個数で、 $N = P + Q + R$ である。 K は震度の観測点の数、 C は定数項を示す。

(c) 業務の成果

1) 最近の地震の分析

0.1 刻みの計測震度が発表されるようになった 1997 年以降の地震の分析を行った。M5.0 未満の小規模の地震や伊豆方面の浅発地震は狭帯域の周波数特性をしているため⁵⁾除外した。ただし、震源域の関東南部では M5 クラス以上の地震があまり発生していないので、M4.5 までの地震を含める。図 2 に分析に用いた地震の震央を示す。

これらの地震の震度分布を用いて震源距離 X とマグニチュード M に関する震度の距離減衰特性を回帰分析し、(1)式のパラメータを求め、(5)式を得た。

$$I = -4.7 \log(X) + 1.1M + 5.7 \quad (5)$$

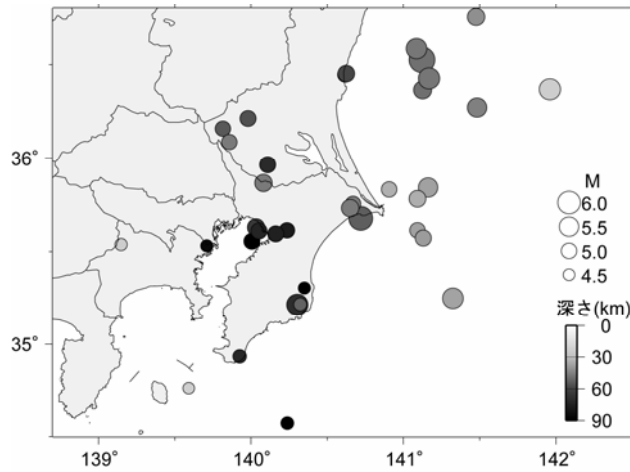


図2 分析に用いた最近の地震の震央

次に、地震ごとに各地の震度と(1)式との差である相対震度を求める。図3に示す例のように、相対震度は地点によってはマグニチュード依存性が見られる。そこで、サイトの増幅特性の補正に用いる相対震度は、各地震の相対震度を M に対して直線回帰し、 $M7.9$ における外挿値とする。図3の直線は回帰式で、■は解析に用いる相対震度である。図4に求めた相対震度分布のコンター図と、比較のため表層の地質年代図を示す。相対震度は、完新世の低地である埼玉県から茨城県の河川沿いの地域で大きく、古い地盤の千葉県や神奈川県西部の山地や丘陵地の地域で小さくなる傾向が見られ、表層地質と関係していることが分かる。

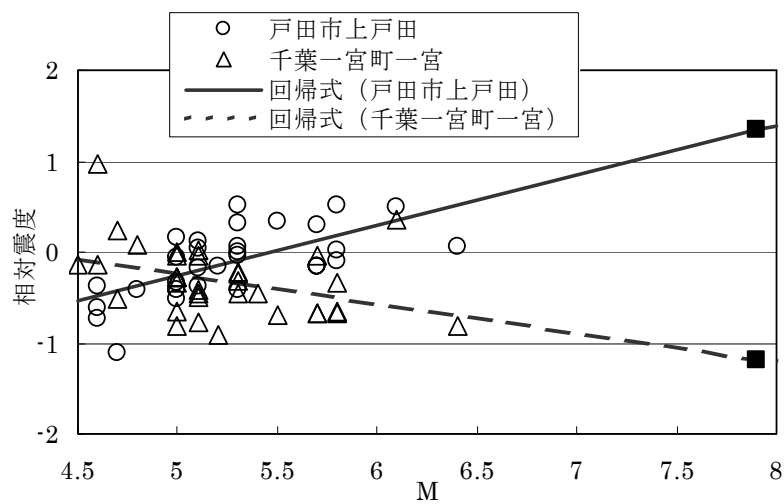


図3 マグニチュードと相対震度例

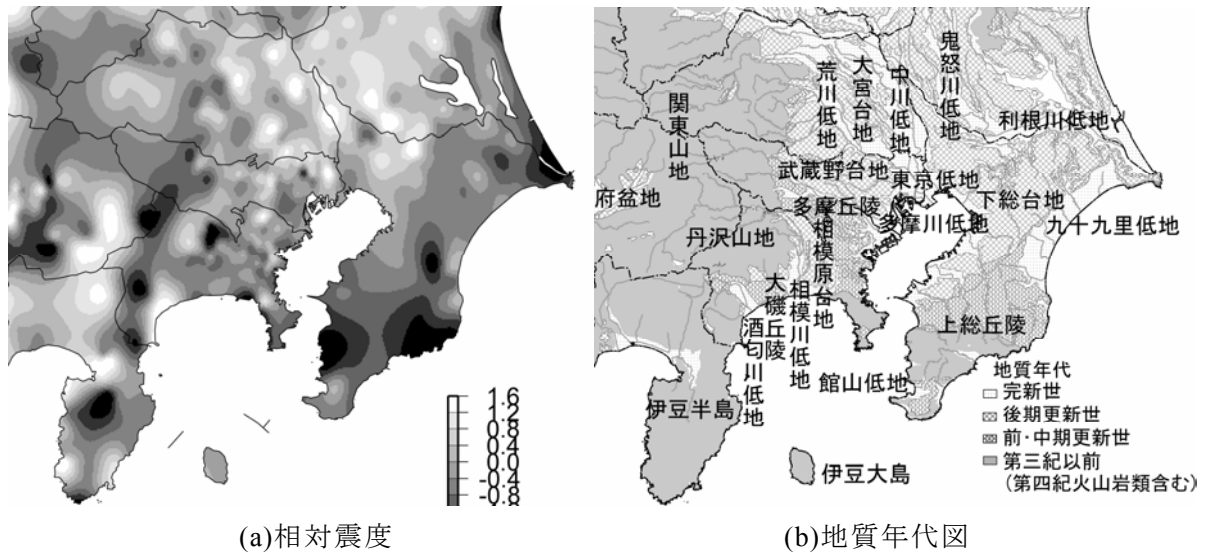


図 4 相対震度と地質

2) インバージョン解析

震度インバージョン解析に用いる断層モデルとしては、図 5 に示すフィリピン海プレート⁶⁾の深さを反映したモデルで、10km 四方の小断層 132 個からなる。大正関東地震と元禄地震の震度は、地震被害から推定したものをを用いる。用いた震度分布を図 6 に示す。大正関東地震については、被害資料から求めた住宅全潰率に基づいて、全潰率 30% で震度 6.5、10% で震度 6.0、1% で震度 5.5、0.1% で震度 5.0 とし、全潰率の対数軸で内挿して市区町村ごとの震度を評価した⁷⁾。元禄地震は、宇佐美の震度分布⁸⁾を用いた。インバージョン解析で得られた放出エネルギー E は平均で規準化した無次元量とし、エネルギー値の大きい領域を短周期発生域と呼ぶ。

図 7 (a) に大正関東地震の放出エネルギー分布を示す。三浦半島を挟んで神奈川県南部と房総半島南部に短周期発生域が 2 つに分離して見える。Wald & Somerville(1995) が地殻変動データを用いてインバージョン解析により求めた断層のすべり分布のコンターを放出エネルギー分布に重ねて図 7 (b) に示すと、すべりの大きい領域は、短周期発生域と同じように 2 箇所見られるが、若干ずれて短周期発生域の西側に隣接している。

図 8 に同様に元禄地震のインバージョン結果を示す。★印で示した大正関東地震の震央の西の小領域と東から房総半島東方沖かけての広い領域で短周期発生域が見られる。特に、大正関東地震に比べ房総半島東方沖に広がっている点異なる。震度の地点数は大正関東地震 818 点に対して元禄地震 159 点で、かなり異なる。このような震度地点の違いによる影響をみるために、大正関東地震の震度データを元禄地震の震度地点のみに地点数を減らした場合の結果を図 9 に示す。短周期発生域は、2 箇所に分離していた部分は連続し、元禄地震の房総半島東方沖の部分を除いた領域はよく似ている。従って、元禄地震の短周期発生域については、分離せず連続して広がっているように評価されたのは震度地点が少ないため、大正関東地震と同じように神奈川県南部と房総半島南部に 2 箇所あった可能性が高く、さらに房総半島東方沖にもう 1 箇所短周期発生域があったと考えることができる。次に、元禄地震の短周期発生域を、震源モデル¹⁰⁾、想定震源域¹¹⁾および 1996 年非地震性すべ

り¹²⁾と比較して図10に示す。短周期発生域は、地殻変動から推定された宍倉¹⁰⁾の断層モデルとは大部分が重なっており、特に房総半島南東沿岸の断層面で短周期の発生が多くなっている。推本の想定震源域は房総半島南東のはるか沖まで広がっているが、短周期発生域は1996年に非地震性すべりが大きかった領域の手前で止まっている。非地震性すべりが発生する領域は短周期地震波が発生し難い領域ではないかと考えられる。

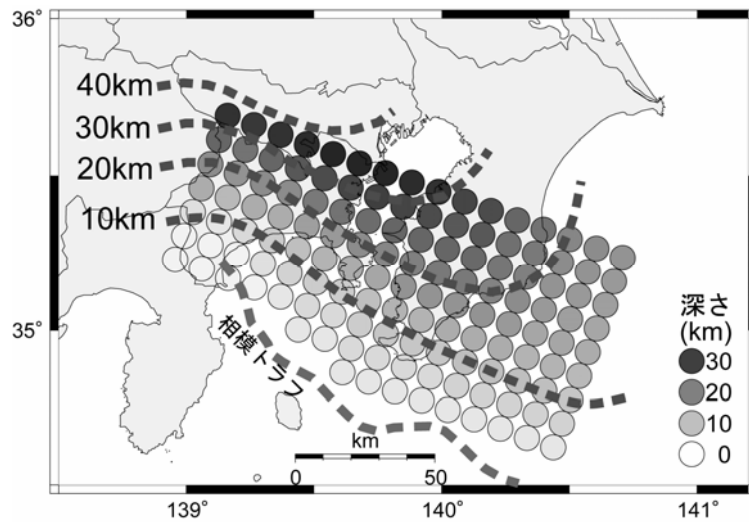


図5 断層モデル⁶⁾

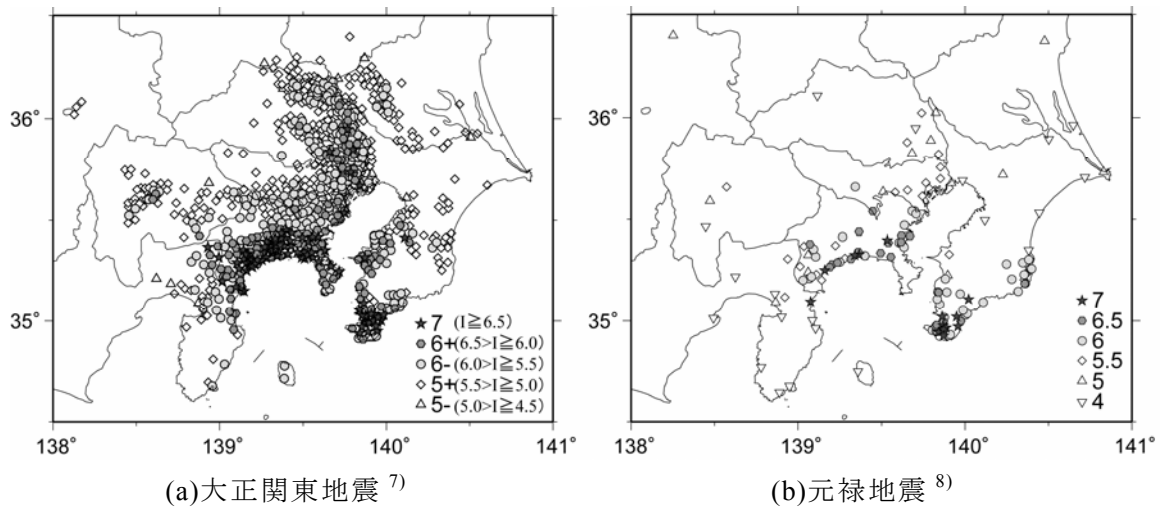
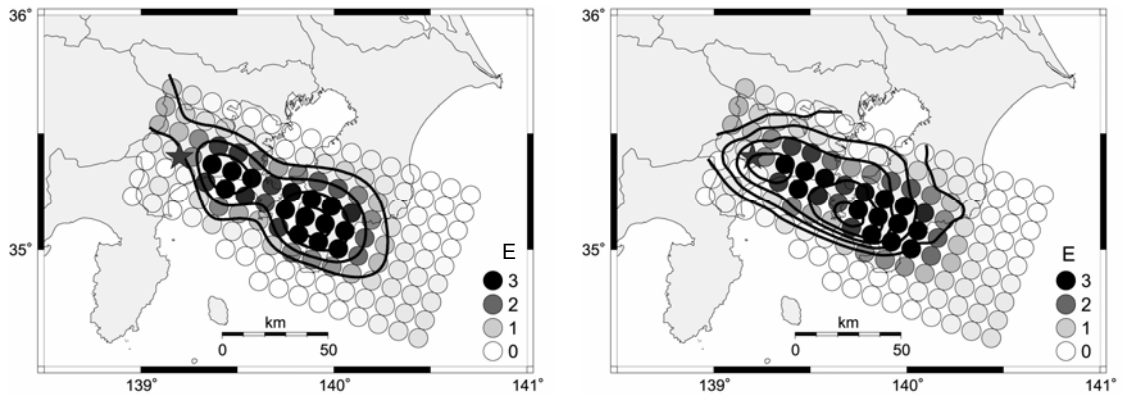


図6 震度分布



(a)エネルギー放出分布

(b)すべり分布⁹⁾との比較

図7 大正関東地震の震度インバージョン結果(全地点震度)

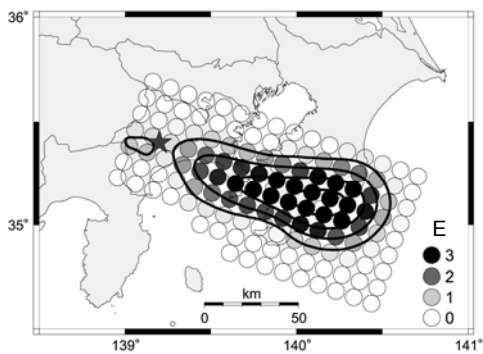


図8 1703年元禄地震

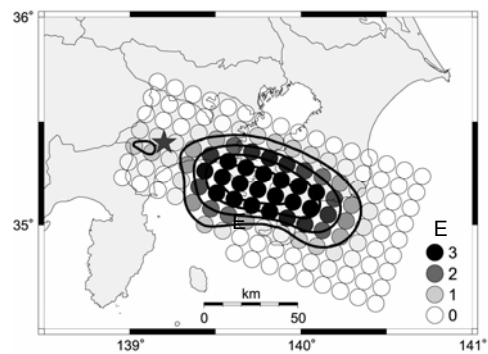


図9 大正関東地震(元禄地震の震度地点)

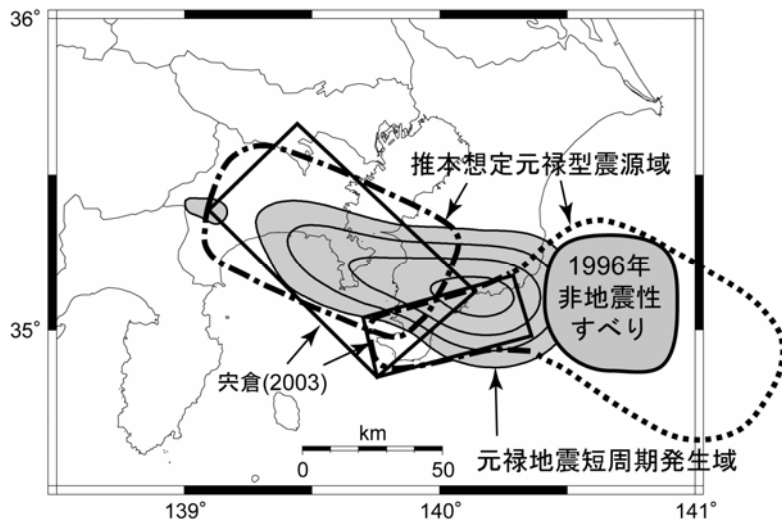


図10 震源モデル¹⁰⁾、想定震源域¹¹⁾および1996年非地震性すべり¹²⁾と元禄地震の短周期発生域の比較

(d) 結論ならびに今後の課題

1923年大正関東大地震および1703年元禄地震を対象に震度インバージョン解析を行った。震度データに含まれるサイトの増幅特性を補正する相対震度については、マグニチュード依存性がみられ線形回帰式によって評価した。大正関東大地震の震度インバージョン結果によると、神奈川県南部と房総半島南部の2箇所に短周期地震波発生域がみられ、す

べりの大きい地域の破壊伝播方向の背後に位置していることが分かった。元禄地震の短周期発生域を大正関東地震と比べると、神奈川県南部と房総半島南部の領域は良く似ているが、房総半島南東沖に広がっている領域が異なる。この領域は、1996年の非地震性すべりの大きい領域までは進んでなく、地殻変動から推定された断層モデル¹⁰⁾とほぼ対応している。今後の課題としては、特に元禄地震は震度データを充実し、震度インバージョンの精度を向上していきたいと考えている。

(e) 引用文献

- 1) 神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫, 震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析, 地震 2, 第 56 巻, 第 1 号, pp.39-58, 2003
- 2) 神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫, 震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域, 地震 2, 第 57 巻, 第 2 号, pp.153-170, 2004
- 3) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura and M. Takemura: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics. Vol.218, pp.69-81, 1993
- 4) 赤池弘次, 北川源四郎(編集): 時系列解析の実際(2), 統計科学選書, 朝倉書店, 1995
- 5) 神田克久, 宮村正光, 宇佐美龍夫, 地震被害推定のための詳細震度分布データの分析、日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, pp.77-84, 2002 年 5 月
- 6) Ishida: Geometry and relative motion of the Philippine Sea Plate and Pacific Plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, J. Geophys. Res., Vol.97, No.B1, pp.489-513, 1992.
- 7) 諸井孝文, 武村雅之: 関東地震(1923 年 9 月 1 日)による木造住家被害データの整理と震度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第 2 巻, 第 3 号, pp.35-71, 2002
- 8) 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震被害総覧 [416-2001], 東大出版会, 605pp., 2003.
- 9) Wald, J.W. and Somerville, P.G.: Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, No.1, pp.159-177, Feb. 1995.
- 10) 宍倉正展: 変動地形からみた相模トラフにおけるプレート間地震サイクル, 地震研究所彙報, Vol.78, pp.245-254, 2003
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>, 2004
- 12) 鷺谷威: GPS によるゆっくり地震の解析, 科学, Vol.73, No.9, pp.1006-1011, 2003

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Kanda, K., Takemura, M.	Inversion analysis of historical interplate earthquake using seismic intensity data	International Workshop on Strong Ground Motion Prediction and Earthquake Tectonics in Urban Areas	平成 16 年 6 月 21 日

神田克久, 武村雅之, 諸井孝文	1923年関東大地震の震度インバージョン解析	日本建築学会 2004年度大会	平成16年8月29日
神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫	震度インバージョン解析による1923年関東地震と1703年元禄地震の短周期発生域の比較	日本地震学会 2004年度秋季大会	平成16年10月9日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-3) 震度・史料データと対応する震度算定法の検討

境 有紀（筑波大学システム情報工学研究科）

額 瀨 一起（東京大学地震研究所）

(a) 業務の要約

歴史地震史料における震度に対応するように、震度の高低により対象、即ち、地震動の周期帯を変化させた震度算定法を用いて、地震被害予測プログラムの開発を行った。そして、開発したプログラムを用いて過去の地震被害予測を行い、実際の地震被害との対応性から、提案する震度算定法の妥当性を検証した。

(b) 業務の実施方法

地震被害の大きさは、地震動の強さのみではなく、社会的状況、例えば人口密集度や建物密集度にも依存する。人が住んでいないところで地震が発生しても被害が生じないのは当然であり、逆に人口が密集した大都会で同じ強さの地震動が発生すれば、甚大な被害をもたらす。そこで、提案する震度算定方法に人口、建物などのデータを加味して被害状況を予測するプログラムを開発した。具体的には、波形データから提案する算定法により震度と建物被害率を算出する。そして、人口・建物メッシュデータと建物全壊率－死亡率関係から、建物全壊数、死亡者数を算出する。比較のため提案する震度算定法とともに現在用いられている計測震度を用いた場合も計算する。そして、開発したプログラムを用いて過去の地震被害予測を行い、実際の地震被害との対応性から、提案する震度算定法の妥当性を検証した。

(c) 業務の成果

プログラムのフローチャートを図1に示す。はじめに、強震波形データから震度を計算し、補間を行った後にメッシュ（1km四方）ごとの震度を決定する。そして、震度－全壊率関係・全壊率－死亡率関係を介して全壊率・死亡率を算出し、メッシュごとの人口・建物数データとあわせてメッシュごとの被害数を求める。そして最後に、全メッシュの被害数を合計し総被害数を求める。予測プログラムで求める建物被害は人命の損失につながる全壊・大破（以下、全壊）、被害率は全壊・大破の割合（以下、全壊率）とした。

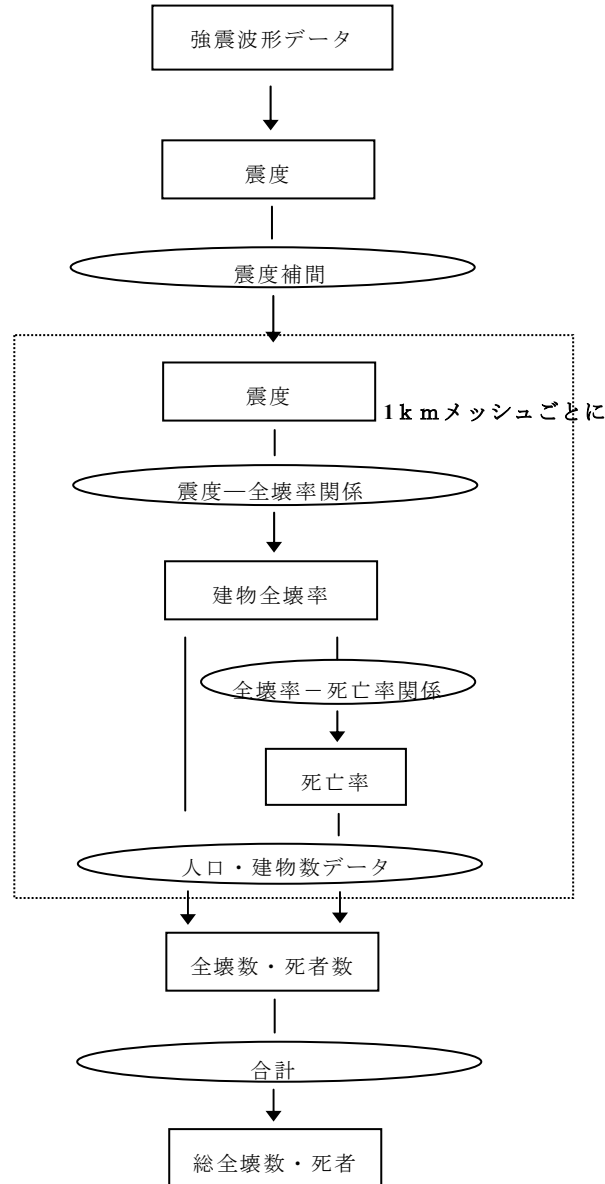


図1 地震被害早期予測プログラムのフローチャート

強震波形データは、防災科学技術研究所の強震ネット（K-NET）、基盤強震観測網（KiK-net）のデータを用いて、提案する算定法による1-2秒震度（式(1)）と計測震度を求めた。1-2秒震度とは、建物の塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期に基づき、建物被害と対応するようにした算定法による震度である。

$$I_{1-2} = 2.171 * \log(V_{1-2}) + 1.002 \quad (1)$$

ここで、 I_{1-2} : 1-2秒震度、 V_{1-2} : 1~2秒の平均弾性速度応答（減衰定数5%、水平2成分ベクトル和, cm/s）である。

強震観測点は一様間隔ではないので、地震データから求めた震度を平面補間し、メッシュデータにする必要がある。メッシュ間隔は人口・建物データのメッシュ間隔と同じ1km四方とした。補間方法として本研究では三角線形補間法²⁾を用いる。これは、三角形に

囲まれた任意点を（図 2）近似するものであり、連立方程式を使用して解く方法である。一つの要素（三角形）の頂点を図のように反時計回りに接点番号を i, j, k と置き、震度を u_i, u_j, u_k とする。要素の一次式で近似できるとすれば、式(2)で表すことができ、これを 3 つの要素で連立方程式にすると式(3)になる。この連立方程式から式(2)の係数が求まり、任意点での震度を求めてメッシュごとの震度が求まる。

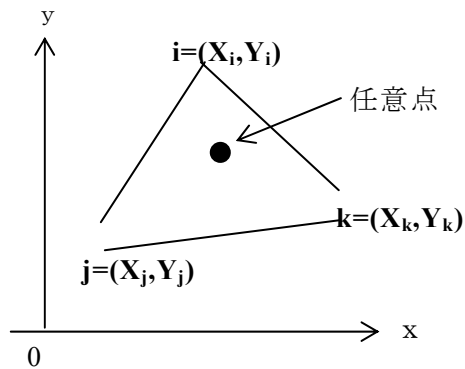


図 2 三角線形補間法の概念図

$$u(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i \\ u_j = \alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 y_j \\ u_k = \alpha_0 + \alpha_1 x_k + \alpha_2 y_k \end{cases} \quad (3)$$

メッシュごとの全壊率を求めるために、各震度と全壊率の関係が必要になる。そこで、表 1 のデータ¹⁾を用い、震度—全壊率関係の定式化を行った。

表 1 の 23 記録の中から全壊率 0%を除いた 11 点のデータを基に震度—全壊率関係（被害関数）を求めた。被害関数は、計測震度は地動最大加速度、震度は 1-2 秒平均速度応答に対して対数の関係があるので標準正規分布の累積確率（以下、正規分布）を用いた。全壊率 0%の点を除いたのは正規分布には理論上 0 点が存在しないからである。求めた各震度と全壊率の関係を図 3 に、計測震度と全壊率の関係式を式(4)、1-2 秒震度と全壊率の関係を式(5)に示す。

$$D_{1-2} = \Phi(-9.488 + 1.317 * I_{1-2}) \quad (4)$$

$$D_j = \Phi(-9.747 + 1.325 * I_j) \quad (5)$$

ここで、 D_{1-2} : 1-2 秒震度による全壊率(%), D_j : 計測震度による全壊率(%), I_{1-2} : 1-2 秒震度, I_j : 計測震度, $\Phi(x)$: 標準正規分布の累積確率である。

なお、震度 5 強以下（5.5 未満）では大きな建物被害は発生しないと考え、全壊率は 0%とした。求めた被害関数と表 1 の 23 記録の関係を図 4 に示す。計測震度は実際の被害と相関が低いのに対して 1-2 秒震度は被害とよく対応していることがわかる。

表1 用いた強震記録と周辺の建物被害率¹⁾

発生年	地震名	地点	I _j	I ₁₋₂	d (%)	s軸 (d)
1995	兵庫県南部	葺合	*6.49	6.39	15.3	-1.025
1995	兵庫県南部	JR鷹取	*6.48	6.63	34.9	-0.389
1995	兵庫県南部	神戸JMA	6.43	6.09	2.5	-1.961
1995	兵庫県南部	JR宝塚	6.15	5.92	6.2	-1.539
1995	兵庫県南部	本山第一小	6.12	5.73	5.3	-1.617
2000	鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.92	1.4	-2.198
1995	兵庫県南部	関電総合技研	5.95	5.54	0.7	-2.458
1995	兵庫県南部	NTT神戸	5.83	5.94	6.1	-1.547
1994	三陸はるか沖	八戸市庁舎	5.82	5.37	3.1	-1.867
1995	兵庫県南部	尼崎竹谷小	5.70	5.57	1.2	-2.258
1995	兵庫県南部	尼崎高架橋	5.69	5.84	2.2	-2.015
1995	兵庫県南部	尼崎港	5.74	5.70	0.0	
1995	兵庫県南部	六甲アイランド	5.70	5.72	0.0	
1995	兵庫県南部	JR新大阪	5.42	5.01	0.0	
1995	兵庫県南部	大阪JMA	4.54	4.49	0.0	
2000	鳥取県西部	K-NET 米子	5.82	5.76	0.0	
1993	釧路沖	釧路JMA	*5.95	5.35	0.0	
1993	北海道南西沖余震	乙部小	6.15	4.93	0.0	
2001	芸予	K-NET 大野	5.63	4.82	0.0	
2001	芸予	K-NET 東予	5.57	4.74	0.0	
2001	芸予	K-NET 三原	4.98	3.92	0.0	
1997	鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	5.53	4.72	0.0	
1997	鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	5.92	4.94	0.0	

I_j: 現行の計測震度 (*がついているものは水平2成分による値)
 I₁₋₂: 1-2秒震度, d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の建物の割合

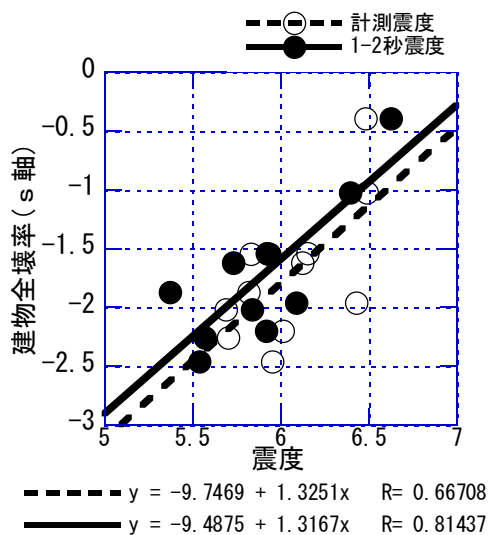


図3 震度と全壊率の関係

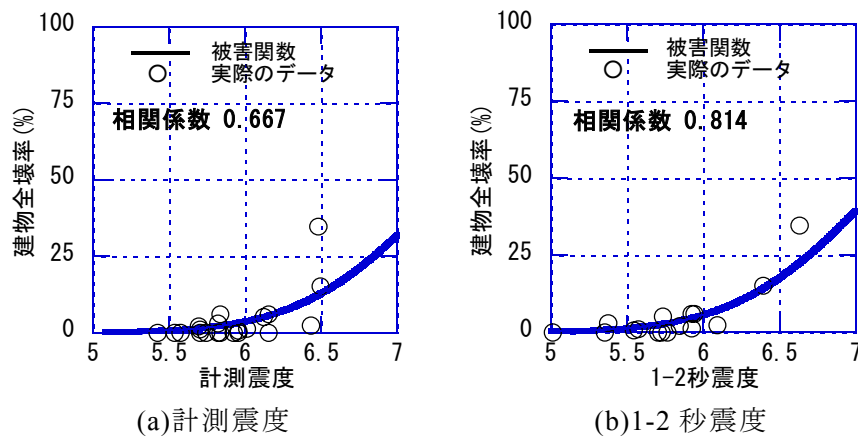


図4 被害関数と実際のデータとの対応

死亡率は建物全壊率と関係があると考え、建物全壊率と死亡率の関係を糸魚川³⁾による兵庫県南部地震の市区別建物全壊率—死亡率関係(図5)から式(6)のように求めた。

$$F = 0.0175 * D \quad (6)$$

ここで、F：死亡者率(%), D：全壊率(%)である。

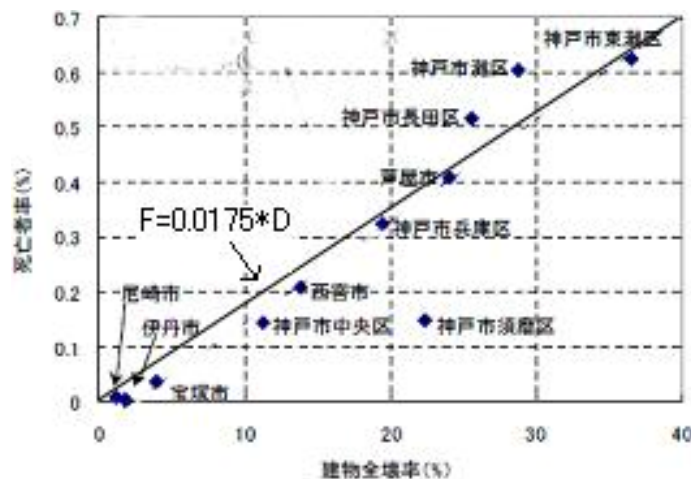


図5 建物全壊率と死亡率の関係³⁾

人口・建物データとしては、「平成12年国勢調査 地域メッシュ統計第1次地域区画別人口及び一般世帯数(財団法人統計情報研究開発センター)」の3次メッシュデータ(約1km四方)⁴⁾を使用した。人口はそのまま使用し、建物棟数は世帯数と同じであると仮定した。メッシュごとに求めた全壊率・死亡率を建物棟数・人口とかけあわせて被害数を算出し、全メッシュの被害を合計して被害予測値とする。

開発したプログラムを使用して過去に起こった地震で1-2秒震度、計測震度を用いた場合の被害予測を行い、両者を実際の値と比較して、1-2秒震度を地震動の強さ指標とした地震被害早期予測プログラムの妥当性を検証する。

対象としたのは、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年三陸南地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震の6つである。ただし、兵庫県

南部地震は K-NET、KiK-net が設置される前に発生したものであるため公開されている強震波形データを使用する。他の地震では K-NET、KiK-net の地震データを使用した。十勝沖地震では、観測点の位置関係により三角形線形補間が出来なかったため、無限遠点を震度 0 と仮定して三角形線形補間を行った。ただし、無限遠点を利用して補間された点は全て海上であるため被害予測には影響しない。

2000 年鳥取県西部地震を例として、求めた全壊棟数・死者数分布を震度・世帯・人口分布とともにを図 6 に、各地震の被害予測結果と実被害を表 2 に、予測値と実被害値の対応関係を図 7, 8 に示す。なお、図 6 中の黒丸は使用した強震観測点の位置を表す。

実際の被害について、全壊棟数は兵庫県南部・鳥取県西部・十勝沖地震は消防庁の被害報告^{5) 6) 7)}、芸予・三陸南地震はそれぞれ参考文献 8)9) のデータに基づいている。新潟県中越地震については、全壊の中には地盤の崩壊、雪の重み、余震による全壊数も含まれており、本研究では地震の揺れによる建物全壊を対象としているため、11/10 での全壊数 808 棟¹⁰⁾ を用いた。死者数について、兵庫県南部地震では 6433 人である⁶⁾ が、そのうちの約 90% が建物倒壊による被害であり¹¹⁾、本研究では建物倒壊による被害を対象としているので、実死者数を 5790 人とした。十勝沖地震では津波によると思われる行方不明者が 2 人いる⁷⁾ が、建物被害による死者ではないため除いた。新潟県中越地震の死者 40 人の中にも心的要因・エコノミークラス症候群による死者 24 人が含まれている¹⁰⁾ ので死者数を 16 人とした。他の地震の死者数については全壊棟数と同じ参考文献に基づいている。

まず、全壊棟数の予測値と実際の値の比較から、兵庫県南部地震以外は計測震度による予測よりも 1-2 秒震度による予測の方が実際の被害に近い結果が得られたことがわかる。死者数についても同様のことが言える。よって 1-2 秒震度と実際の被害の相関性がここでも確認されたことになる。

しかし、兵庫県南部地震では計測震度、1-2 秒震度ともに予測値が実際の値と比べて小さい。この原因を探るため、藤本らによる推定震度分布¹²⁾ (図 9) と、被害予測に用いた強震波形データからの震度分布(図 10) とを比較した。その結果、強震波形データを基にした分布では両震度とも震度 7 の震災の帯が再現されておらず、特に計測震度では震度 7 のメッシュは一点もない。震度 6 強・6 弱の範囲は計測震度では実際よりも広く、1-2 秒震度では実際よりも狭くなっていた。兵庫県南部地震では強い地震動が局所的に発生したため、得られた強震波形データの分布密度では震度分布を正確に再現できず、被害予測の値が実際の被害と合わないといえる。震度 7 の震災の帯は南北 1 km 程度であり、正確な震度分布を推定するには 1 km ごとの強震観測点が必要になるため、現在の強震観測点の密度ではこのように局所的に大きな被害が生じる場合には正確な被害予測は難しい。

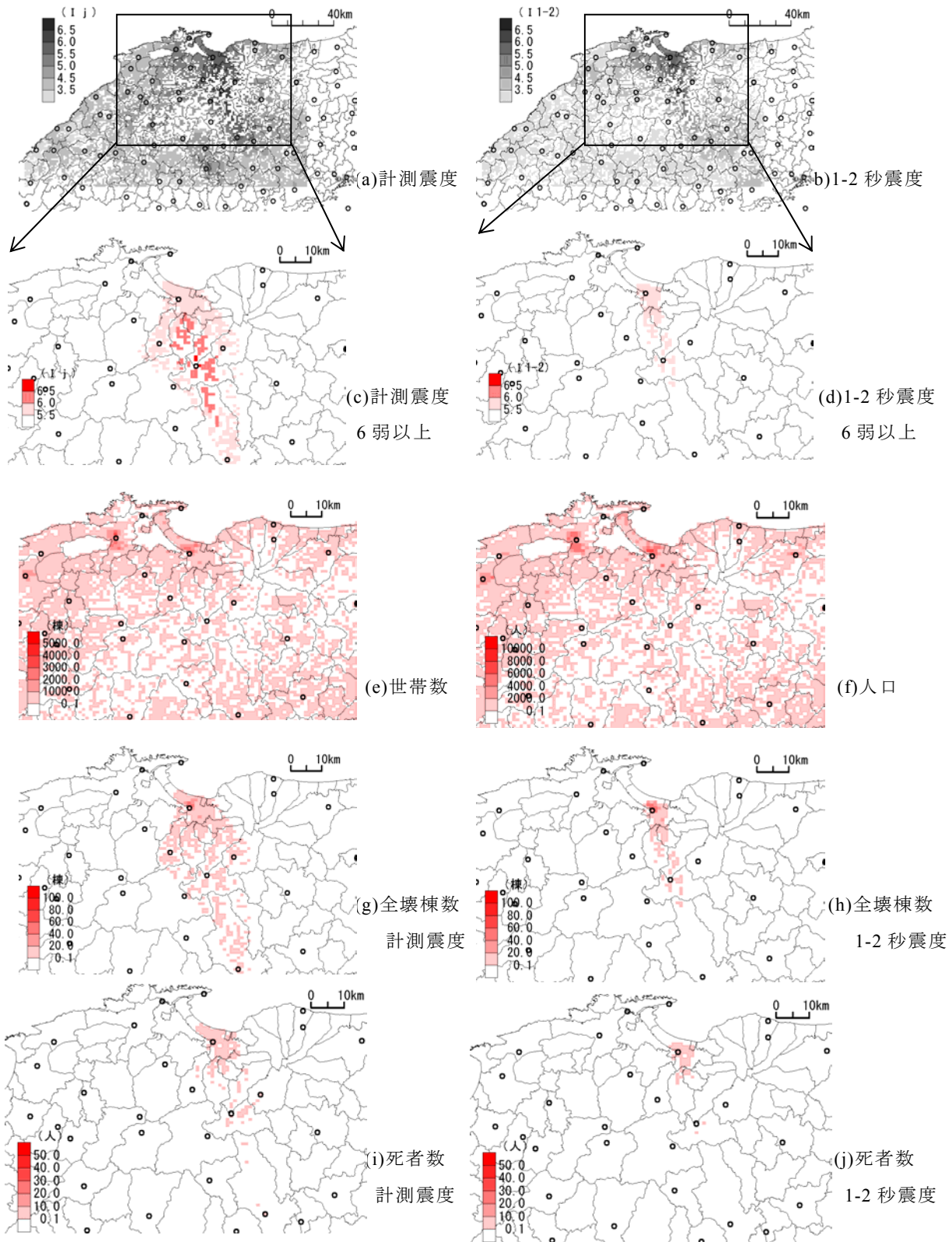


図6 被害分布図 (鳥取県西部地震(2000.10.6))

表2 被害予測結果と実被害

	計測震度		1-2秒震度		実被害	
	全壊棟数(棟)	死者数(人)	全壊棟数(棟)	死者数(人)	全壊棟数(棟)	死者数(人)
兵庫県南部地震	52413	2235	43557	1784	104906	5790
鳥取県西部地震	1155	61	654	31	435	0
芸予地震	375	19	0	0	2	2
三陸南地震	240	12	0	0	0	0
十勝沖地震	1530	68	640	30	116	0
新潟県中越地震	2322	140	583	37	808	16

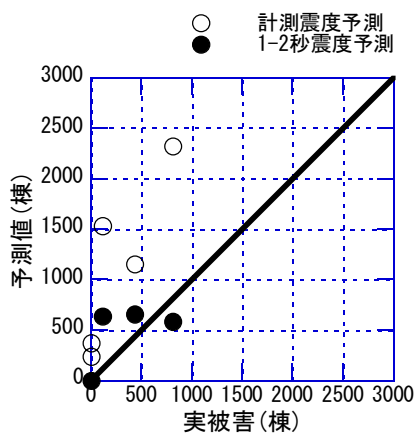


図7 全壊数の実被害と予測値の関係
(兵庫県南部地震以外)

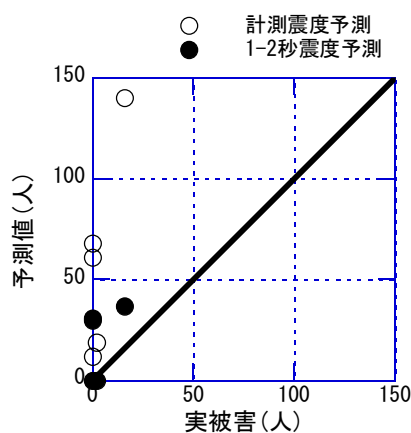


図8 死者数の実被害と予測値の関係
(兵庫県南部地震以外)

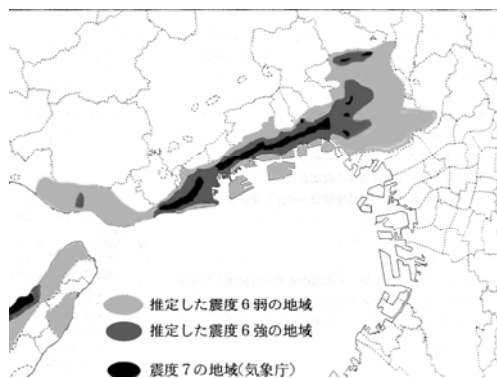
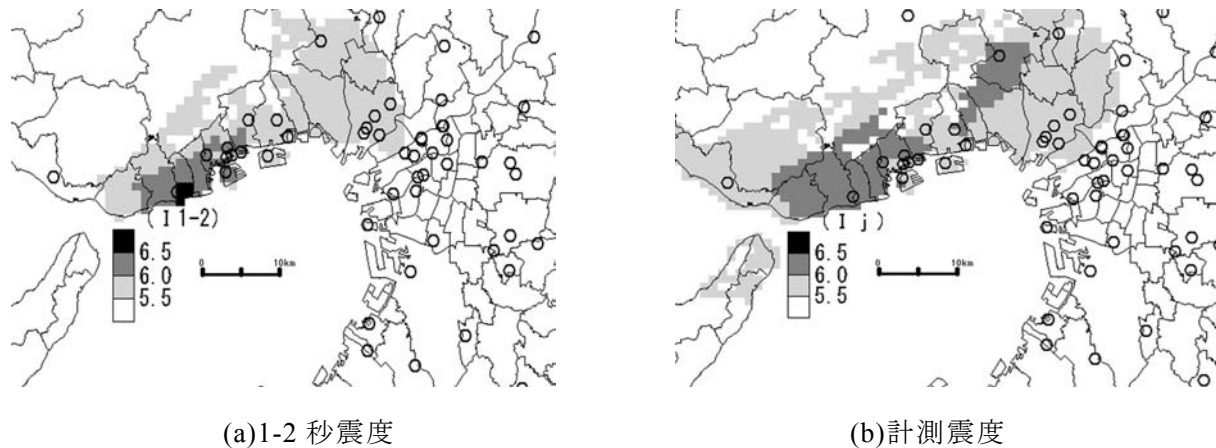


図9 被害分布から推定した兵庫県南部地震での震度分布⁵⁾



(a)1-2秒震度

(b)計測震度

図10 強震波形データから求めた震度分布

(d) 結論ならびに今後の課題

大きな建物被害と相関がある、建物の塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期である1~2秒の弾性速度応答の平均から求めた1-2秒震度を地震動の強さ指標とした地震被害被害予測プログラムの開発を行った。このプログラムを使用して過去の地震での被害予測を行った結果、従来の計測震度を用いた場合に比べ、実被害に近い予測を出すことができた。よって提案する算定法による震度(1-2秒震度)が被害と相関を持つことが証明された。ただし、被害予測の精度は、被害の範囲が広範囲に及ぶ地震には有効であったが、被害範囲が非常に狭い地震については、震度分布予測に非常に高密度な強震波形観測を必要とするため、被害予測が正確にできないことがわかった。

(e) 引用文献

- 1) 境有紀,神野達夫,瀨瀬一起: 震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第585号, 71-76, 2004.
- 2) 川名清三,今北統夫,柴山明寛,佐久間景子,久田嘉章: 広域な面的震度情報を対象とした関東におけるリアルタイム地震情報システムに関する研究(その1)理論(その2)解析結果,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),65-68.
- 3) 糸魚川栄一: 建物被害状況からみた人的被害のマクロ分析,東濃地震化学研究所報告, Sep.No2 地震時の人的被害に関する総合研究,(財)地震予知総合研究振興会, 1999.
- 4) 平成12年国勢調査地域メッシュ統計第1次地域区画人口及び一般世帯数, 財団法人統計情報研究センター
- 5) 消防庁HP 災害情報詳報 阪神・淡路大震災について(第107報), <http://www.fdma.go.jp/data/07117HanshinJishin107.pdf>
- 6) 消防庁HP 災害情報詳報 平成12(2000年)鳥取県西部地震(確定報), <http://www.fdma.go.jp/html/infor/121006tbessi.PDF>
- 7) 消防庁HP 災害情報詳報 平成15(2003年)十勝沖地震(確定報), <http://www.fdma.go.jp/data/H160331TokachiJishin.pdf>
- 8) 境有紀, 藤井賢志: 2001年芸予地震による建物被害と強震記録の性質,建築防災, No.284, 24-36, 2001.
- 9) 境有紀, 瀨瀬一起, 神野達夫, 中村友紀子: 2003年宮城県沖・宮城県北部の地震による建物被害と強震記録の性質, 日本地震工学会大会-2003梗概集, 特118-119, 2003.
- 10) 新潟県: 新潟県中越大震災に関する情報, http://saigai.pref.niigata.jp/content/jishin/rireki_higai.html
- 11) 清野純史, 古川愛子: リスク認識のための木造骨組建物の地震時挙動とその人的被害について, 社会技術研究論文集 Vol2,425-434, Oct.2004.
- 12) 藤本一雄,翠川三郎: 被害分布から推定した1995年兵庫県南部地震の震度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, 71-78, 1999.9.
- 13) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
境有紀, 中村友紀子, 瀬瀬一起, 小杉慎司, 大月俊典	2003年十勝沖地震における強震観測点周辺の建物被害と地震動との対応性	近年の地震被害におけるコンクリート建造物の耐震性能の評価に関する研究委員会 報告書・論文集, 日本コンクリート工学協会	平成16年7月
境有紀, 中村友紀子	1994年ノースリッジ地震の建物被害データと強震記録を用いた地震動の破壊力指標の検討,	日本建築学会構造系論文集, 第584号, 59-63	平成16年10月
境有紀, 神野達夫, 瀬瀬一起	震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案	日本建築学会構造系論文集, 第585号, 71-76	平成16年11月
境有紀	2004年新潟県中越地震で発生した地震動と観測点周辺の被害	記念シンポジウム「日本の強震観測50年」—歴史と展望—	平成16年11月9日
境有紀, 小杉慎司, 大月俊典, 中村友紀子	強震動と建物被害	平成16年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集	平成16年12月21日
境有紀	強震観測点近傍の建物被害	平成16年新潟県中越地震第一次調査団調査速報, 土木学会	平成17年1月11日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
地震被害予測プログラム	高震度で大きな建物被害と対応する震度算定法を用いて、地震動波形データと人口・建物メッシュデータから建物全壊数を算出する

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成17年度業務計画案

今年度得られた震度データ、および解析手法を用いて1703年元禄地震の本格的な解析を行う予定である。また、被害データを震度データに変換するに際し、建物耐震性能等の時代変遷を考慮する方法を検討する予定である。