

論文

2000～2005年の主な地震による 震度曝露人口と住家・人的被害 との相関に関する考察

能島 暢呂*・久世 益充**・杉戸 真太**

Population Exposure to Seismic Intensity by Recent Earth- quakes (2000-2005) in Japan and Its Correlation with Building Damage and Human Casualty

Nobuoto NOJIMA*, Masumitsu KUSE**
and Masata SUGITO**

Abstract

Recent development of nation-wide networks of seismometers in Japan has enhanced high-density observation of earthquake strong motions. Accordingly, seismic intensity distribution has become available approximately on municipal or denser level. In this study, recent earthquakes in Japan have been compared in terms of the simple measure, PEX (population exposure to seismic intensity), which is evaluated as an aggregation of spatially distributed population exposed to a certain level of seismic intensity. Estimated are 15 events in eight major earthquakes which hit the records of JMA seismic intensity 5.5 or stronger during the period of the year 2000 through 2005. The results clearly demonstrate the combined effects of strong motion distributions and population distributions in each earthquake. Macroscopic assessment models have been statistically developed for estimation of building damage and human casualties. Gross damage over the affected area can be approximately estimated on the basis of PEX and HEX (household exposure to seismic intensity) and related model functions characterizing the controversial nature of the JMA seismic intensity.

キーワード：計測震度，曝露人口，建物被害，人的被害

Key Words：JMA seismic intensity, population exposure, building damage, human casualty

* 岐阜大学工学部
Department of Civil Engineering, Gifu University

** 岐阜大学流域圏科学研究センター
River Basin Research Center, Gifu University

1. はじめに

器械計測による計測震度の導入と震度観測網の充実によって、気象庁発表の震度情報はその質と量との両面で大きく変化を遂げつつある。現行の計測震度の算出方法は、従来の気象庁震度階級との整合性・連続性に配慮して定義されたものである（気象庁、1996；翠川ら、1999）。しかし近年、震度観測網の拡充に呼応するかのようになり、最大震度が6弱以上となるような地震が頻発するようになり、高い震度から推定されるほどには大きな被害が生じないことも多い。このことから、震度と被害の実態との乖離が指摘されつつある。長期的観点に立った場合、乖離度合いがあまりに大きければ、被害との相関が高く、より適切な震度指標を再定義する必要がある（清野ら、1999；境ら、2004）。

その一方で、現行の計測震度のもとに震度観測が続けられ、そのデータが日々蓄積されつつある。また、耐震診断値・建物損傷度・震度の3者間に成り立つ関係を関数モデルで表し、震度情報の高度利用を図ろうとする動きもあり（岡田・高井、2004）、震度情報の確実かつ有効な活用に向けて、「次世代震度情報ネットワーク」のあり方に関する検討も進められている（消防庁、2005a）。

このような事情を鑑みると、当面の間は、計測震度データに基づいて各種の被害関数を継続的に検証し、防災情報としての理解を深め、活用を促進することが重要といえる（太田、1998-2000）。関連研究としては、例えば、近年の被害地震で観測された計測震度と観測点近傍の住家被害率のデータに基づいて、従来の被害関数（岡田・鏡味、1991；山口・山崎、2000）との関係を検討した研究（翠川・藤本、2002；藤本ら、2005）が挙げられる。ちなみに「気象庁震度階級関連解説表」は「今後、事例の蓄積に応じて内容を変更すべきものである」とされており（気象庁、1996）、将来の改訂の際には、こうした一連の研究結果が参考になると思われる。

計測震度と被害との関係を説明するには、従来とは異なったアプローチも考えられる。すなわち、地震による被害総量（住家被害や人的被害な

ど）を計測震度に基づいて概略推定するモデルを構築してそれらの入出力関係を精査する方法である。2003年鳥取県西部地震の直後、国土庁（現内閣府）地震被害早期評価システム（EES）により全壊戸数8000戸、死者数200人と推定され、大幅に過大評価となったことから、評価システムの見直しが検討されている（内閣府、2004）ことは、被害総量の推定精度向上の重要性を示唆している。

以上の背景のもとで本研究では、近年の地震で観測された計測震度に基づいて「震度曝露人口（PEX; population exposure to seismic intensity）」を算出し、住家被害ならびに人的被害との関係を定量的に分析するとともに、震度曝露指標と被害総量との関数関係をモデル化することによって、計測震度の特性に関する理解を深めようとするものである。

ここで震度曝露人口とは「所定の震度レベルに曝される人数」と定義されたものであり（能島ら、2004a）、震度分布と人口分布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である。特定の被害指標と直結するものではないが、揺れの面的広がりを人口規模で表現したものととして、地震間・時代間・地域間での相互比較が可能な包括的尺度である。筆者らはこれまでに（1）濃尾地震など既往被害地震による推定震度分布、（2）想定東海地震などシミュレーション地震動による推定震度分布、（3）地震動予測モデルの条件設定の相違による複数の震度分布、（4）岐阜県内の即時的な面的補間推定震度、（5）地震ハザードステーション（防災科学技術研究所、2005a）の確率論的地震動予測地図、などを対象として震度曝露人口の評価を行ってきた（能島ら、2003、2004a、2004b、2005）。

以下、2.では、わが国の震度観測網の整備状況と、観測された震度データの概況をまとめておく。3.では、2000～2005年に発生した主な地震による計測震度データを用いて震度曝露人口を推計し、各地震の特徴を考察する。4.では、求めた震度曝露人口と住家被害・人的被害との巨視的な相関について考察する。5.では、震度曝露人口および世帯数に基づく住家・人的被害の被害総量推定モデルの

構築方法について述べ、6.では計測震度と被害との入出力関係について定量的な考察を行う。

なお震度の表記法については、小数点以下まで表示した場合（例えば「震度6.0」）には計測震度を表わし、整数表示した場合（例えば「震度6」）には震度階を表わすものとする。

2. 近年の強震観測網の整備と震度発表の状況

2.1 強震観測網の整備

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代表的なものに限っても、気象庁の地震観測点の拡充（約610点）、防災科学技術研究所（2005b, 2005c）による強震観測ネットワーク（K-NET, 約1030点）および基盤強震観測網（KiK-net, 約660点）の開設、消防庁による震度情報ネットワーク（約2840点）の整備が挙げられる。観測網の充実とともに、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。気象庁の震度発表に用いられる震度観測点数（図1）も急速に増加し、1994年では約150点であったが1996年には約600点まで増加した。その後、地方公共団体の震度情報ネットワークおよびK-NETとの接続が進められた結

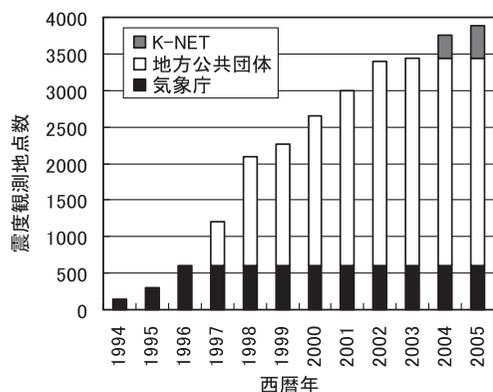


図1 気象庁震度発表に用いられる震度観測点（地震・火山月報（気象庁）などにより作成）

果、2005年には約3580点に達している。

2.2 気象庁発表の震度

以上に示したような地震観測体制の変遷と計測震度の導入によって、気象庁発表の震度は大きな変化を遂げた。図2は、気象庁発表で震度6以上（1996年10月以降は震度6弱以上）を記録した地震の回数を年代別に示したものである。1920~1989年での通算回数はわずか11回であったが、1990年代に入ってから観測回数が増加している。特に2000年以降においては群発地震や前震・余震でも震度6弱が繰り返し観測され、2005年までの6年間で21回と、全期間合計38回の55%を占めている。

3. 震度曝露人口の評価とその比較

3.1 評価対象とした地震

図1に示した震度観測網の発展と近年の被害地震の発生履歴をあわせて考えると、震度発表が市町村単位で網羅的に行われるようになったのは2000年以降であると判断される。例えば1997年5月13日に発生した鹿児島県薩摩地方の地震（鹿児島県西部地震）では最大震度6弱を観測したが、この時点で鹿児島県の震度情報ネットワークが気象庁に未接続であったため市町村単位の震度発表はされていない。1998年9月3日の岩手県内陸北

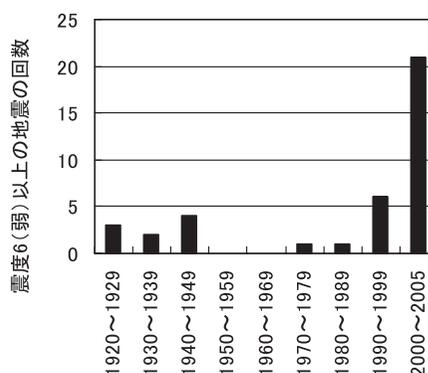


図2 気象庁観測による震度6（弱）以上の地震の回数

部の地震（最大震度6弱）でも同様に岩手県で未接続であった。一方、2000年以降の主な被害地震においては、ほぼ全都道府県で市町村単位の震度発表が行われている。

そこで本研究では、2000～2005年の6年間に発生した地震のうち、気象庁による震度発表が震度6弱以上の観測点を含む主要な地震を対象とする。具体的には、表1に示す8地震（2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城県沖の地震、2003年宮城県北部の地震の前震・本震・最大余震、2003年十勝沖地震の本震および最大余

震、2004年新潟県中越地震およびその余震4回、2005年福岡県西方沖の地震、2005年宮城県沖の地震）における15回の地震を評価対象とした。このほか2000年には、新島・神津島近海地震（5回）および三宅島近海地震（1回）において震度6弱を記録しているが、島嶼部の地震であることから、ここでは除外した。

表1には、対象とした地震の諸元（気象庁、2000-2005）の一覧を掲載した。気象庁による命名地震は、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震の

表1 対象とした地震の主な諸元と被害統計

地震名 ¹	地震発生日時 (24時間表示)	M ² 震源深さ ²	気象庁 最大計測 震度 [震度階]	他機関 最大計測 震度	人的被害 ³ (人)			住家被害 ³ (上段：棟、下段：世帯)		
					死者	重傷	軽傷	全壊	半壊	一部破損
2000年鳥取県西部地震	10月6日 13:30	M 7.3 9 km	6.3* [6強]	6.6 ^s	0	39	143	435 439	3101 3085	18544 17891
2001年芸予地震	3月24日 15:27	M 6.7 46 km	5.9* [6弱]	5.7 [#]	2	43	245	70 86	774 865	49223 53492
2003年宮城県沖の地震 (三陸南地震)	5月26日 18:24	M 7.1 72 km	5.8 [6弱]	6.2 [#]	0	25	149	2 2	21 19	2404 2208
2003年宮城県北部 (の)地震(前震)	7月26日 0:13	M 5.6 12 km	5.9* [6弱]	4.6 [#]	-	-	-	-	-	-
2003年宮城県北部 (の)地震(本震)	7月26日 7:13	M 6.4 12 km	6.2* [6強]	5.2 [#]	0	51	626	1276 1046	3809 3200	10976 8822
2003年宮城県北部 (の)地震(余震)	7月26日 16:56	M 5.5 12 km	5.7* [6弱]	3.8 [#]	-	-	-	-	-	-
2003年十勝沖地震 (本震)	9月26日 4:50	M 8.0 45 km	5.8* [6弱]	6.0 [#]	2 ^{&}	69	780	116 134	368 419	1580 2007
2003年十勝沖地震 (余震)	9月26日 6:08	M 7.1 21 km	5.8* [6弱]	5.9 [#]	-	-	-	-	-	-
2004年新潟県中越 地震(本震)	10月23日 17:56	M 6.8 13 km	6.5* [7]	6.7 [#]	51	636	4169	3185 3138	13715 14005	104560 111898
2004年新潟県中越 地震(余震1)	10月23日 18:11	M 6.0 12 km	6.0 [6強]	4.8 [#]	-	-	-	-	-	-
2004年新潟県中越 地震(余震2)	10月23日 18:34	M 6.5 14 km	6.2* [6強]	6.1 [#]	-	-	-	-	-	-
2004年新潟県中越 地震(余震3)	10月23日 19:45	M 5.7 12 km	5.7 [6弱]	5.4 [#]	-	-	-	-	-	-
2004年新潟県中越 地震(余震4)	10月27日 10:40	M 6.1 12 km	5.6* [6弱]	5.6 ^s	-	-	-	-	-	-
2005年福岡県西方 沖(の)地震	3月20日 10:53	M 7.0 9 km	5.7* [6弱]	5.5 [#]	1	76	1011	133 -	244 -	8620 -
2005年宮城県沖 (の)地震	8月16日 11:46	M 7.2 42 km	5.6* [6弱]	5.2 [#]	0	12	79	1 -	0 -	856 -

注：地震諸元は主として「地震・火山月報（防災編）」に基づく（気象庁、2000-2005）。

注1：本文中、気象庁による命名地震以外については通称名を使用。

注2：「気象庁マグニチュード算出方法の改訂について（気象庁、2003）」により改訂済み。

注3：消防庁まとめによる。十勝沖地震までは確定報、新潟県中越地震は第69報（2005/10/14付）、福岡県西方沖地震は第34報（2005/5/12付）、宮城県沖地震は第12報（2005/8/22付）を使用。

注*：地方自治体強震計、注#：K-NET強震計、注\$：KiK-net強震計、注&：2名とも津波による行方不明者。

みである。これらの地震以外については、相互の区別を容易にするため、地震発生時に一般的に用いられた通称（2003年三陸南地震、2003年宮城県北部地震、2005年福岡県西方沖地震、2005年宮城県沖地震）を用いることとした。

3.2 用いたデータと集計方法

上述の15回の地震を対象として、震度5弱以上の計測震度をデータ化した。利用した地震観測網は、2.1で述べた気象庁震度観測網、防災科学技術研究所の強震観測ネットワーク（K-NET）、基盤強震観測網（KiK-net）および消防庁の震度情報ネットワークに、広島市地震情報ネットワークを加えた。

気象庁および震度情報ネットワークの記録については、「地震・火山月報（防災編）」に掲載された計測震度を用いた（気象庁、2000-2005）。これらの中には、震度計の設置環境の問題（消防庁・気象庁、2004）により、利用に適さないデータが含まれている可能性を否定できないが、それらの特定が困難であることから、ここでは除外していない。K-NET および KiK-net の記録については、

加速度記録を用いて気象庁の算出方法（気象庁、1996）に従って求めた計測震度相当値を用いた。なお、十勝沖地震において、液状化による影響を受けた2記録（HKD086, 直別）は除外した。広島市地震情報ネットワークについては、文献（広島市地震情報ネットワークシステム検討委員会、2001）に掲載された計測震度相当値を用いた。これらの複数機関の計測震度データを統合的に利用して、延べ829市区町村における1049個の計測震度のデータセットを作成した。図3に地震ごとの計測震度データ個数の内訳を示す。

この計測震度と重ね合わせるデータとしては、2000年10月実施の国勢調査による市区町村単位の人口および世帯数を用いる（図4）。近年、全国で大規模な市町村合併が進められているが、本研究では集計条件の連続性と推定精度を保つことを目的として、すべての対象地震について合併前の旧市区町村（計3368）を震度曝露人口の集計単位とした。ただし、同一市区町村において複数地点で震度データが得られている場合には、各地点の震度データに人口および世帯数を均等配分することとした。1市区町村あたりのデータ個数は、全15

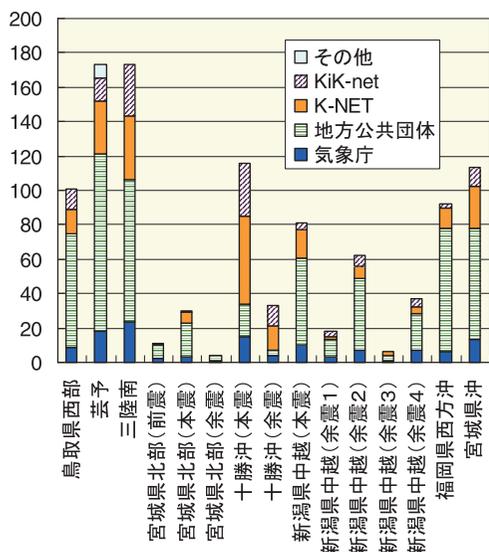


図3 震度5弱以上を記録した地震観測点数の内訳

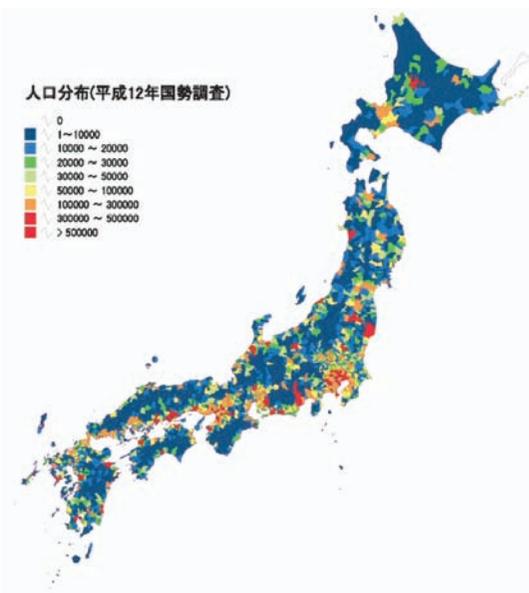


図4 平成12年国勢調査による人口分布（市区町村単位）

地震平均で1.27個（最小は宮城県北部地震余震の1.00個，最大は十勝沖地震本震の1.78個）であった。

地震の揺れは，地盤構造の影響で局所的に増幅され市区町村内でも複雑な分布を示すことがあり，観測データを領域全体の代表値とすることは適切とはいえない。観測情報の面的補間による詳細震度分布（清野ら，2004）や気象庁による「推計震度分布図（内閣府・気象庁，2004）」を利用すれば，精度の向上が可能と考えられる。筆者らも，岐阜県内を対象とした面的震度補間による震度曝露人口の即時推計システムを構築した（能島ら，2004b）。しかし本研究では，対象地震すべての詳細震度分布を求めることは困難と判断し，近似的措置として市区町村ごとの取りまとめを行うこととした。

震度曝露指標と地震被害の関係を高精度化する方向性においては，震度分布のみならず人口分布の解像度向上が必要である。両者のバランスを考慮すると，人口データについても今後の検討の余地がある。国勢調査の人口データは常住人口（夜間人口）である。本研究では計測震度データを市町村単位としていることから，各市町村内における人口流動が評価値に影響を及ぼすことはないが，市町村を超えた人口流動の影響については考慮していない。火災予防審議会・東京消防庁（2005）では，人口密集地における人的被害推定のため平日・休日・時間帯別の屋内人口および路上歩行者数の推定を行っており，今後，地震発生時刻における人口の流動状況を考慮した評価を行う場合に参考になると考えられる。

3.3 評価結果と考察

まず，計測震度を震度階で集計した震度曝露人口の概略的な評価結果について示す。図5(a)は，震度5弱以上で示した推計結果である。芸予，福岡県西方沖，三陸南，宮城県沖，鳥取県西部，新潟県中越本震，十勝沖本震の順に多い。芸予地震では広島・愛媛・山口の3県を中心に約484万人，福岡県西方沖地震では福岡県を中心に約376万人，三陸南地震では岩手・宮城の2県を中心

に約361万人，宮城県沖地震では宮城・岩手・福島の3県を中心に約318万人，鳥取県西部では鳥取・島根・岡山の3県を中心に約256万人，新潟県中越本震では，新潟県を中心に約152万人，十勝沖本震では北海道で約139万人となっている。

図5(a)において震度5強以上の震度曝露人口を見ると，上位の順位は震度5弱以上と類似しており，芸予で約242万人，福岡県西方沖で約146万人，三陸南で約126万人，宮城県沖で約65万人，新潟県中越本震で約63万人，十勝沖本震で約62万人，新潟県中越余震2（最大余震）で約52万人，の順に多い。これらのレベルでは，広島・福岡・仙台の各都市圏への影響が強くと出ているといえる。

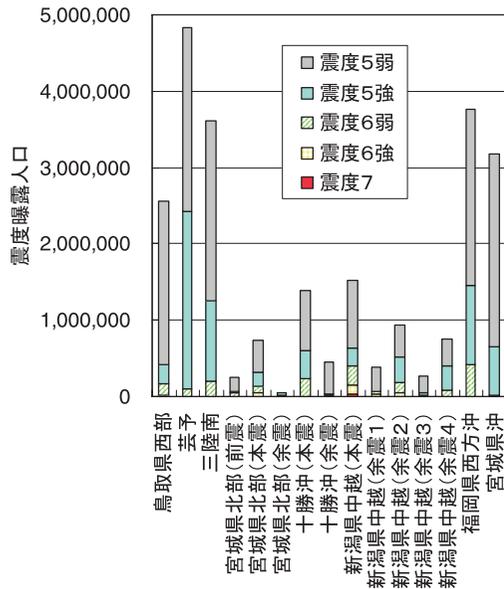
しかし，震度6弱以上の震度曝露人口を示した図5(b)では，一変して異なった様相を呈している。福岡県西方沖で約42万人，新潟県中越本震で約40万人，十勝沖本震で約24万人，三陸南で約20万人，新潟県中越余震2（最大余震）で約18万人，鳥取県西部で約17万人，宮城県北部で約13万人の順となっている。

図5(b)において震度6強以上をみると，さらに順位は大きく入れ替わり，新潟県中越本震で約14万人，新潟県中越余震2（最大余震）で約5.6万人，宮城県北部本震で約5万人，新潟県中越余震1で約4.2万人，鳥取県西部で約2.3万人，三陸南で約5千人，十勝沖本震で約4千人，の順となっており，その他では0である。最後に，同図において震度7の震度曝露人口をみると，新潟県中越本震で約2.7万人，鳥取県西部で約2千人であり，その他では0である。

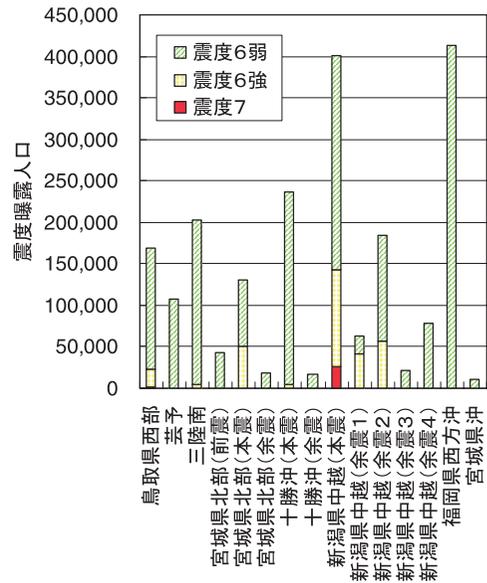
以上のように，地震間で震度曝露人口を比較すると，着目する震度レベルに応じて，地域への影響度合いが異なることが理解できる。これは最大震度のみではイメージできないことである。

4. 震度曝露人口と住家被害・人的被害の巨視的な関係

3.で推計した震度曝露人口と，各地震による住家被害および人的被害との関係を巨視的に観察することによって，定性的な考察を行う。



(a) 震度5弱以上での表示



(b) 震度6弱以上での表示

図5 震度曝露人口の比較

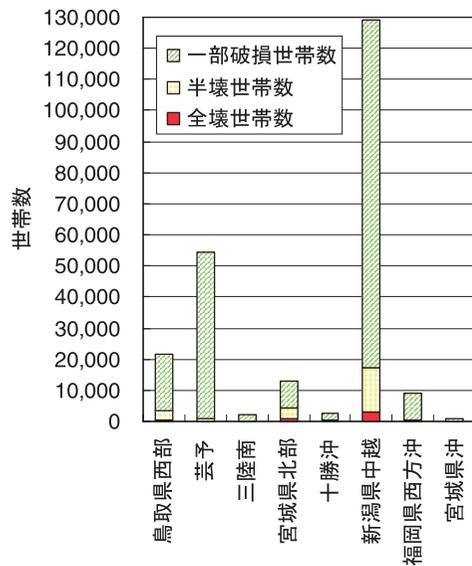


図6 住家被害(世帯数)の比較

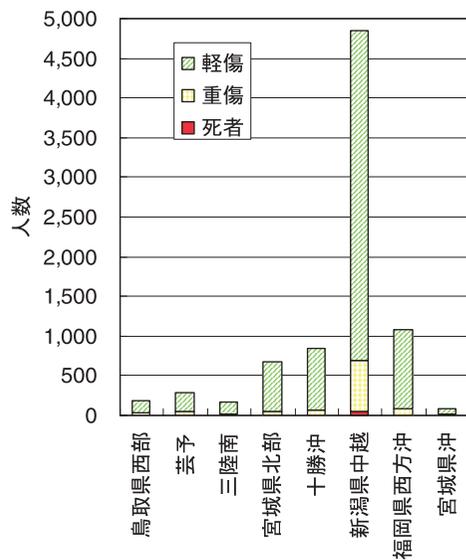


図7 人的被害の比較

表1には、消防庁による被害状況調査(消防庁, 2005b)に基づいて、住家被害および人的被害をあわせてまとめた。図6に各地震による住家被害数を比較した。次章以降における定量的検討のため、世帯単位の数値で比較している(福岡県西方沖地震と宮城県沖地震については世帯単位の記載がないため棟数で代用)。ここでは前震・余震に伴う被害を本震のそれとを分離することは困難であるため、8回の地震にまとめている。まず全壊世帯数に着目すると、新潟県中越、宮城県北部、鳥取県西部の順に被害が大きく、震度6強以上の震度曝露人口(図5(b))と整合していることがわかる。全半壊世帯数についても同様のことがいえるが、芸予、十勝沖、福岡県西方沖でも半壊が発生していることは、震度6弱が影響しているとも考えられる。一方、一部破損を含めた場合には、芸予や福岡県西方沖の被害もかなり大きく、震度5強ないし6弱の影響が現れていることが予想される。しかし、三陸南と宮城県沖における住家被害は小さく、対応が明確とはいえない。

次に、図7に各地震による人的被害数の比較を示す。死者数は新潟県中越で突出して多いほかは、概して少ない。震度7が支配的といえるが、震度6強の影響については明確なことはいえない。負傷者については、重傷以上、軽傷以上ともに、新潟県中越に次いで、福岡県西方沖、十勝沖、宮城県北部、芸予、鳥取県西部、三陸南、宮城県沖の順となっている。この順序でみた場合には震度6弱以上の震度曝露人口(図5(b))との整合が良い傾向がみとれるものの、定量的対応は明確ではない。

なお人的被害データの扱いについては、その発生原因(建物倒壊、室内散乱、路上事故など)を吟味する(例えば、村上, 2006)とともに、揺れに直接起因しない被害(災害関連死や被災後の後片付け中の受傷)を区別したうえで検討することが望ましい。しかし海外の文献(Seligson and Shoaf, 2002)にもあるように、震度と人的被害総量の関連付けは基礎情報として重要である。また発災後の医療サービスへの負荷を評価する際には発生原因によらず被害総量を把握する必要性があ

る。このことから本研究では、表1のデータを特に分類せずに以降の分析を行うこととした。

5. 震度曝露指標による住家・人的被害総量推定モデルの構築方法

4. でみた巨視的関係を詳細に検討するため、震度曝露指標と被害総量の間に、被害関数に準じた関数関係が成立すると仮定してそのモデル化を行う。5.1ではその構築方法について述べる。人的被害に関しては震度曝露人口を用いる一方、住家被害に関しては、人口に代えて世帯数で震度曝露を評価した「震度曝露世帯数(HEX: household exposure to seismic intensity)」を用いることとする。震度曝露指標とは両者の総称であり、5.2においてそれらの詳細評価の結果を示す。

5.1 被害総量推定モデルの構築方法

まず地震 j において、刻み幅を $\Delta x=0.1$ として震度 x_i (ただし i は離散化された震度を識別する添字)の震度曝露人口を $PEX_j(x_i)$ 、震度曝露世帯数を $HEX_j(x_i)$ とする。パラメータを μ および σ として、震度 x_i を説明変数とする値域 $[0, 1]$ の単調増加関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ を導入し、被害推定量 $\hat{D}_j(\mu, \sigma)$ を次式により求める。

$$\hat{D}_j(\mu, \sigma) = \begin{cases} \sum_i F(x_i; \mu, \sigma) HEX_j(x_i) & : \text{住家被害の場合} \\ \sum_i F(x_i; \mu, \sigma) PEX_j(x_i) & : \text{人的被害の場合} \end{cases} \quad (1)$$

関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ としては、従来の被害関数の例にならって基本的に正規分布の累積分布関数を採用する。それに加えて、ロジスティック分布についても比較・検討する。

$$F(x_i; \mu, \sigma) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^{x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s - \mu}{\sigma}\right)^2\right] ds & : \text{正規分布関数} \\ \frac{1}{1 + \exp\left\{-\frac{\pi(x_i - \mu)}{\sqrt{3}\sigma}\right\}} & : \text{ロジスティック分布関数} \end{cases} \quad (2)$$

両分布は大略的に類似した形状を示すが、正規分布の確率密度関数は尖度3であるのに対して、ロジスティック分布は尖度4.2で正規分布より鋭いピークと広い裾野を持つ。縦軸の被害率を対数軸とした片対数プロットで比較すると、左側の裾野部の形状に特に顕著な相違が現れ、正規分布では凸形状、ロジスティック分布では直線形状となる。計測震度に対する関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ の常用対数の勾配は次式で表される（ただしロジスティック分布については、低被害率における近似式）。

$$\frac{d \log_{10} F(x_i; \mu, \sigma)}{dx} \begin{cases} = \frac{1}{\ln 10 \cdot \Phi(-k) \sqrt{2\pi e^{k^2}}} \cdot \frac{1}{\sigma} : \text{正規分布関数} \left(\text{ただし } k = \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \\ \cong \frac{\pi}{\ln 10 \sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sigma} : \text{ロジスティック分布関数} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、パラメータ μ および σ は、実被害量 D_j と被害推定量 $\hat{D}_j(\mu, \sigma)$ との誤差の二乗和平方根 E （誤差指標と呼ぶ）の最小化を条件として求める。

$$E = \sqrt{\sum_j \{D_j - \hat{D}_j(\mu, \sigma)\}^2} \rightarrow \min \quad (4)$$

被害関数は通常、地震動強度指標と観測点近傍の被害率指標の一对データをプロットし、それらを関数で直接的にフィッティングして導かれる。このため地震ごとの特性や構造主体の脆弱性を反映した被害関数を求めることが可能である。その一方で、被害総量を用いたキャリブレーションが行われることはないため、1.で述べたように、被害総量の推定精度向上が課題となっている。

これに対して本研究では、対象地震を通じて被害総量に最も良く適合する関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ を同定するという点で、式(4)の導出過程に特徴がある。地震ごとにプロットが1つしかなく、被害主体の属性を細分化しない震度曝露指標を用いるため、地震ごとあるいは構造主体ごとに関数を求めることはできない。しかし、式(4)を基準としたフィッティングを行うことで、被害総量の誤差最小化を

図ることができる。また、対象地震を網羅的に扱うこととシンプルな震度曝露指標を用いることで、現行の計測震度と被害との入出力関係を包括的に検討することが可能となり、その漠然としたイメージを定量表現することを狙いとしている。

5.2 震度曝露指標の詳細表現

式(1)に用いる震度曝露人口と震度曝露世帯数を図8に示す。図5では前震・余震を区別して表示したが、ここでは図6や図7と同様に8回の地震にまとめて表示した。その際には余震の影響を考慮している。2003年十勝沖地震および2004年新潟県中越地震では、余震の震度が本震の震度を上回るケースがあるため、観測点ごとに本震・余震を通じて記録された最大値を採用している。震度階単位で集計した図5よりも、計測震度の相対的な分布状況が詳細に表現されていることがわかる。また、矢印で示した最大計測震度が孤立している場合（例えば三陸南地震）よりも、その付近に震度曝露人口が多い場合（例えば宮城県北部地震）には、最大震度が同一であっても影響が大きくなることは容易に想像できよう。

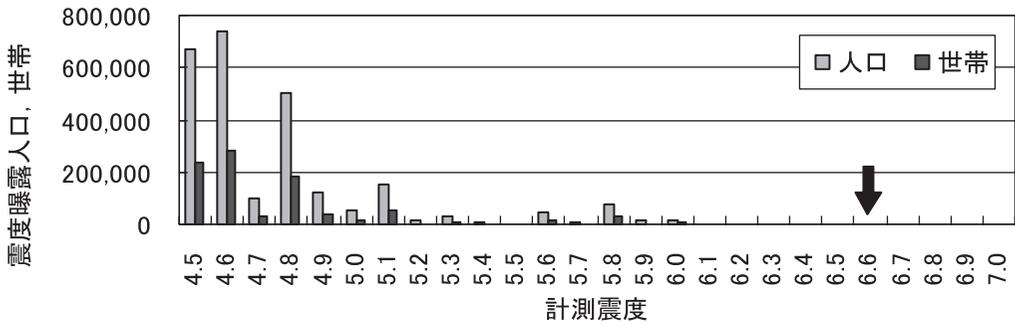
6. 住家・人的被害総量推定モデルの同定結果と考察

6.1 住家被害の被害総量推定モデル

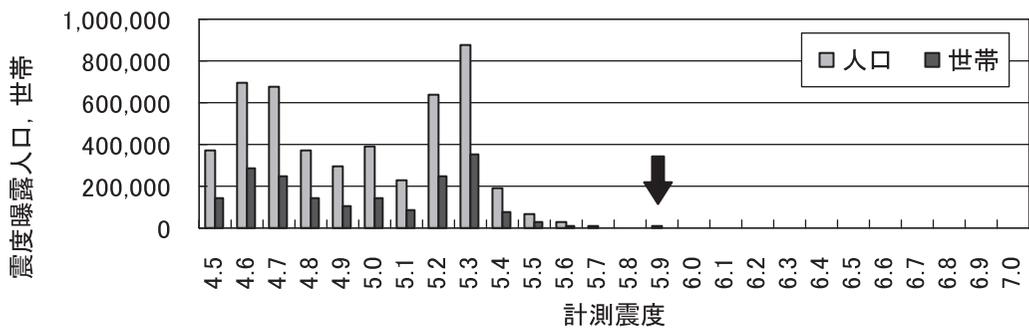
震度曝露世帯数（図8）と世帯単位の住家被害データ（表1）に基づいて、関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ を求めた。表2中段にパラメータ μ, σ および誤差指標 E を示す。図9は推定モデルを図示したものであり、(a)では被害率を算術軸表示、(b)では対数軸表示している。比較のため、「東京都防災会議震度階解説表」に基づいて定量化された被害関数（岡田・鏡味, 1991）のうち、平均的な木造住家を対象としたものを記入した。図10(a)-(c)は被害総量の観測値と推定値（正規分布のケース）を比較したものである（表2上段の図化）。

(1) 全壊

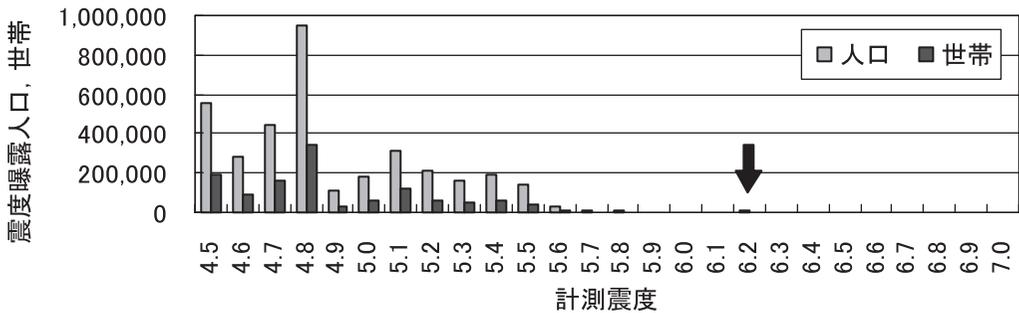
全壊率10%以下の領域では、従来の被害関数 ($\mu = 6.92, \sigma = 0.57$) と計測震度で0.4程度の相



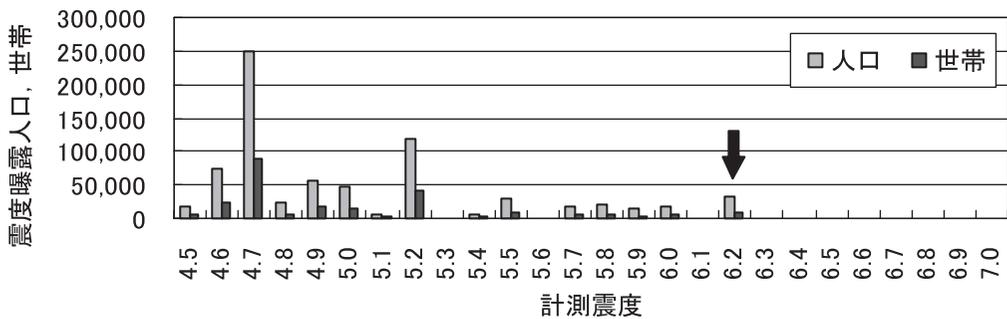
(a) 2000年鳥取県西部地震



(b) 2001年茨予地震

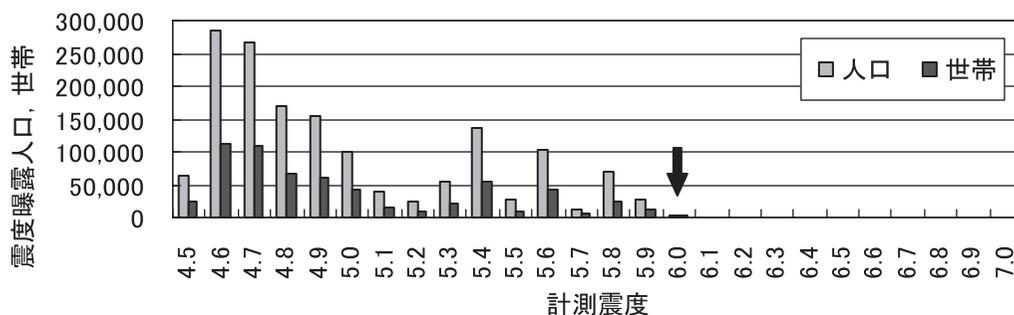


(c) 2003年三陸南地震

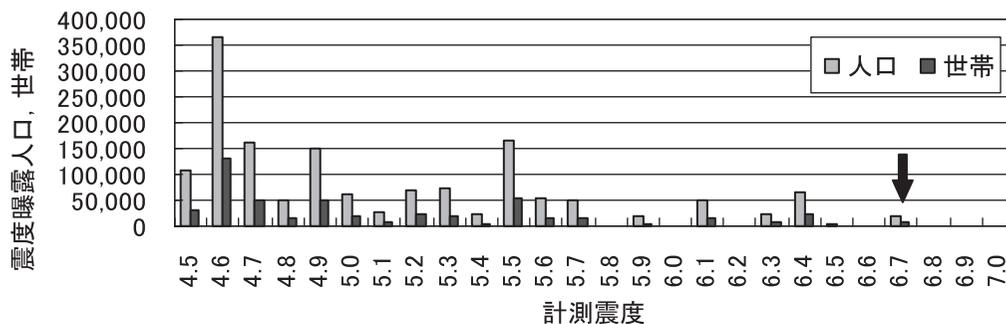


(d) 2003年宮城県北部地震

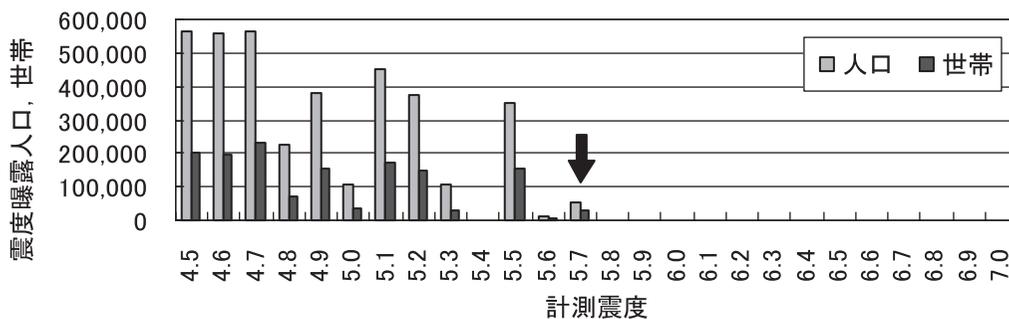
図8 2000～2005年の主な地震による震度曝露人口および震度曝露世帯数（続く）
 (矢印は計測震度の最大値を示す)



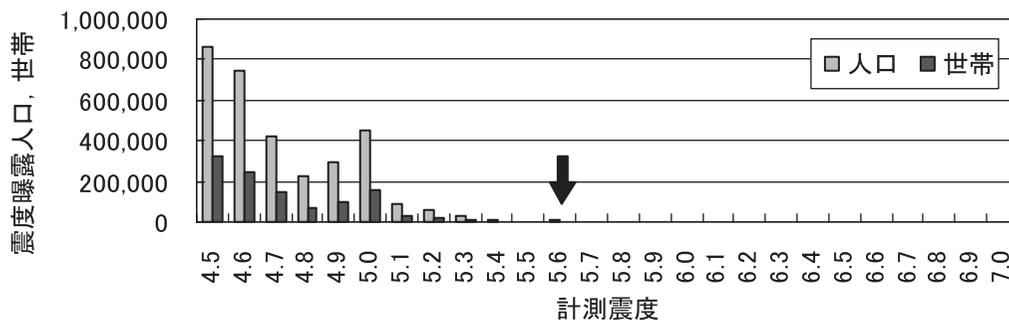
(e) 2003年十勝沖地震 (観測点ごとに本震・余震の最大値を採用)



(f) 2004年新潟県中越地震 (観測点ごとに本震・余震の最大値を採用)



(g) 2005年福岡県西方沖地震



(h) 2005年宮城県沖地震

図8 2000～2005年の主な地震による震度曝露人口および震度曝露世帯数 (続き)
(矢印は計測震度の最大値を示す)

表2 推定モデルのパラメータと被害推定値（住家被害）

地震	全壊世帯数	推定モデル		全半壊世帯数	推定モデル		一部破損以上世帯数	推定モデル	
		正規分布	ロジスティック分布		正規分布	ロジスティック分布		正規分布	ロジスティック分布
鳥取県西部	439	364	318	3524	2074	1777	21415	25154	25250
芸予	86	167	212	951	543	888	54443	30251	29300
三陸南	2	167	167	21	809	859	2229	20488	19678
宮城県北部	1046	399	301	4246	2569	2079	13068	20261	20488
十勝沖	134	294	234	553	1637	1313	2560	35651	33837
新潟県中越	3138	3214	3236	17143	17257	17466	129041	67196	65950
福岡県西方沖	133	201	206	377	829	952	8997	34457	31636
宮城県沖	1	13	28	1	31	93	857	2061	2997
μ	-	7.23	6.96	-	6.53	6.49	-	5.84	5.84
σ	-	0.54	0.36	-	0.37	0.31	-	0.30	0.29
E	-	702.7	798.5	-	2664.0	3078.4	-	80955.6	80512.8
0.1%相当値	-	5.6	5.6	-	5.4	5.3	-	4.9	4.7
1%相当値	-	6.0	6.0	-	5.7	5.7	-	5.1	5.1
10%相当値	-	6.5	6.5	-	6.1	6.1	-	5.5	5.5

注：■はファクター2範囲外、■はファクター3範囲外であることを示す。

違がみられる。特に震度6弱においては全壊率がほぼ1オーダー異なっている。震度が高いほどこの相違は狭まる傾向にあるものの、旧震度階と計測震度のイメージの乖離を示すものといえる。正規分布とロジスティック分布の間には大きな相違は認められない。震度6.8以上での開きが大きいが、用いたデータの上限が震度6.7であるため、適用限界外である。全壊率 10^{-4} 以下の領域でも分布特性に起因する相違が目立つものの実用上の違いは小さいとみてよい。0.1%、1%、10%相当値は、両分布共通で、5.6、6.0、6.5となっており、計測震度幅0.4で全壊率がほぼ一桁上がっている。1%相当値が6.0であることは、4.でみた巨視的な相関関係（震度6強以上の影響大）を裏付けている。

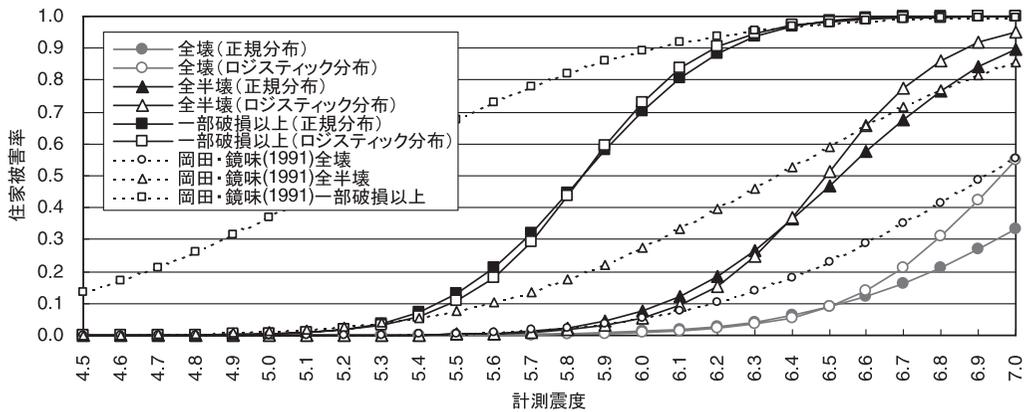
誤差指標 E で比較すると、正規分布の方が良い適合度を示している。図10(a)の観測値と推定値の比較では、一部の例外（三陸南と宮城県沖）を除くと1:3線と3:1線に入っており、おおむねファクター3程度の推定モデルである。

(2) 全半壊（全壊+半壊）

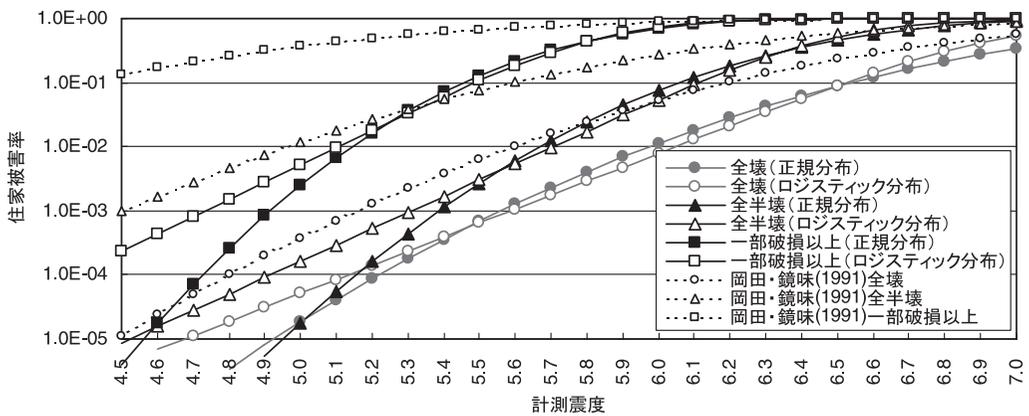
従来被害関数（ $\mu = 6.36$, $\sigma = 0.60$ ）との関

係に関しては、全壊のケースと類似の傾向をみる事ができるが、震度5強以下での乖離はさらに大きく、2オーダー近くになっている。正規分布とロジスティック分布は、計測震度5.3以下で開きが大きく、正規分布の方が急勾配である。0.1%、1%、10%相当値は、正規分布で5.4、5.7、6.1、ロジスティック分布で5.3、5.7、6.1となっており、全壊のケースと同様に計測震度幅0.4で全半壊率がほぼ一桁上がっている。1%相当値が5.7であることは、4.でみた巨視的な相関関係（震度6弱の影響あり）を裏付けている。

誤差指標 E で比較すると正規分布の適合度が高く、震度5強以下での全半壊率をあまり高く見積もらない方がよいことを示唆している。閾値設定により一定震度以下を0にする必要性も指摘されており（翠川・藤本，2002）、被害想定の実務でも検討されている（内閣府，2004）。いずれにせよ、被害率が0に近い分布の裾野に関しては、震度曝露が高い部分であり被害推定に多大な影響を及ぼすため、対数軸表示での比較検討を通じて注意深く扱う必要がある。なお、図10(b)より、被害総量の推定精度は全壊の場合と同様にファクター3程度である。

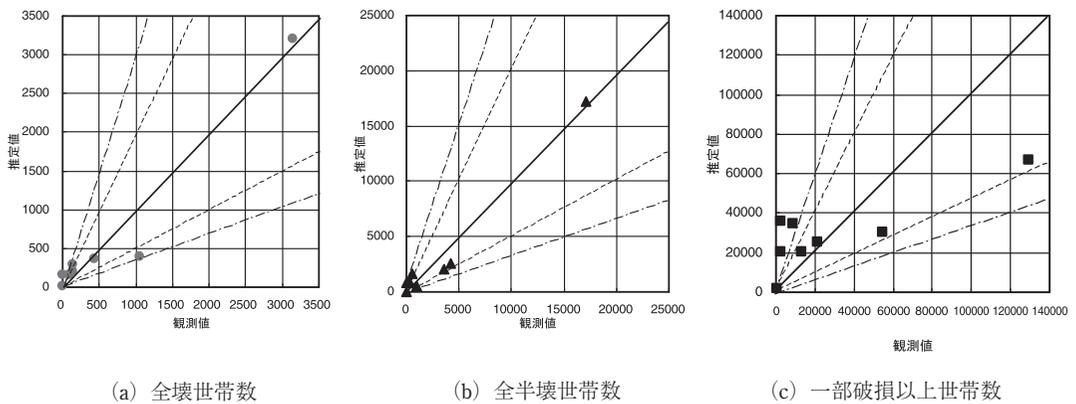


(a) 算術軸表示



(b) 対数軸表示

図9 震度曝露世帯数の利用を前提とした住家被害(世帯数)の被害総量推定モデル



(a) 全壊世帯数

(b) 全半壊世帯数

(c) 一部破損以上世帯数

図10 住家被害(世帯数)の被害総量推定モデル(正規分布)による推定値と観測値の相関(実線は1:1線, 破線は1:2線および2:1線, 一点鎖線は1:3線および3:1線)

(3) 一部破損以上 (全壊+半壊+一部破損)

一部破損以上に関しては、震度5弱から6弱にかけての広い範囲で従来の被害関数 ($\mu = 5.21$, $\sigma = 0.64$) との乖離が大きい結果となっている。震度5弱で正規分布とロジスティック分布の開きが生じている。0.1%, 1%, 10%相当値は、正規分布で4.9, 5.1, 5.5, ロジスティック分布で4.7, 5.1, 5.5となっている。1%相当値が5.1であることは、4.でみた巨視的な相関関係(震度5強の影響あり)を裏付けている。

誤差指標Eで比較するとロジスティック分布の適合度がやや高い。正規分布について示した図10(c)より、ファクター3に収まらないプロットが3点(三陸南・宮城県沖・福岡県西部)あり、少数被害を過大評価する傾向にある。一方、多数被害の2点(新潟県中越, 芸予)はファクター2に収まるものの過小評価の傾向にある。一部破損の高精度な被害推定は容易でないことを示唆している。

6.2 人的被害の被害総量推定モデル

震度曝露人口(図8)と人的被害データ(表1)に基づいて、関数 $F(x_i; \mu, \sigma)$ を求めた。表3中

段にパラメータ μ, σ および誤差指標Eを示す。図11に推定モデルを図示し、図12(a)-(b)に被害総量の観測値と推定値(正規分布のケース)を比較した(表3上段の図化)。

(1) 死者数

対象地震における死者数は、新潟県中越地震とその他の地震で極端に数値が異なっている(表1)。パラメータは $\mu = 7$ 程度で $\sigma = 0.1$ 程度となったが、非常に偏っており、適切なモデルとはいえない。被害総量の推定値は、表3上段に示すように観測値と見掛け上の相関は高いが、本研究ではこのモデルを棄却することとした。

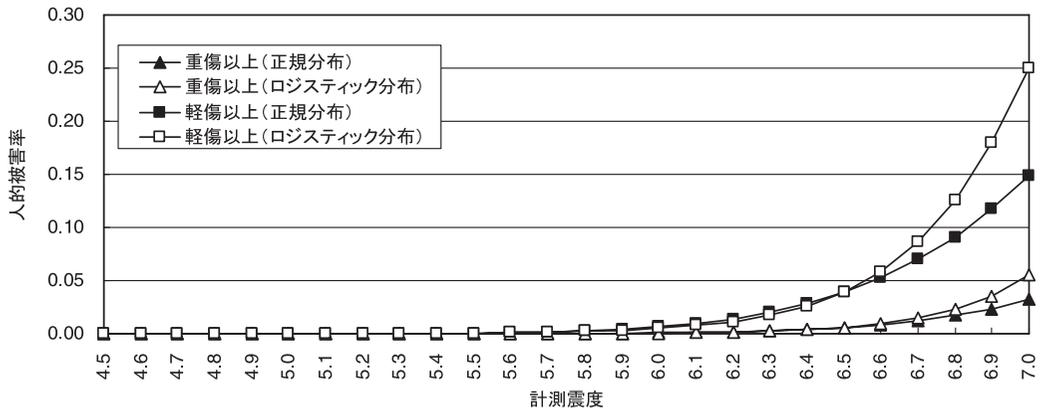
(2) 重傷以上 (死者+重傷者)

発生率は全体的に低く、図11(a)では特性を識別できないため、(b)の対数プロットで比較する。0.01%, 0.1%, 1%相当値は、両分布共通で、5.6, 6.0, 6.5となった。計測震度幅0.4ないし0.5で発生率が10倍となる勾配は、住家被害よりわずかに緩勾配である。4.では巨視的關係が明確ではなかったが、1%相当値が6.0であることは、震度6強の影響が大きいことを示唆している。

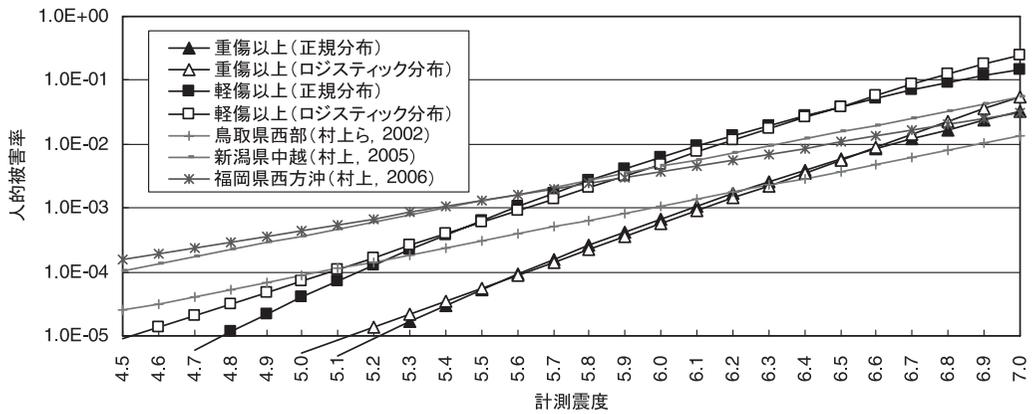
表3 推定モデルのパラメータと被害推定値(人的被害)

地震	死者	推定モデル			推定モデル			推定モデル	
		正規分布	ロジスティック分布	重傷以上	正規分布	ロジスティック分布	軽傷以上	正規分布	ロジスティック分布
鳥取県西部	0	0	1	39	71	68	182	642	591
芸予	2	0	0	45	39	51	290	518	609
三陸南	0	0	0	25	38	43	174	445	473
宮城県北部	0	0	0	51	83	71	677	738	613
十勝沖	2	0	0	71	52	48	851	564	491
新潟県中越	51	50	52	687	680	691	4856	4475	4798
福岡県西方沖	1	0	0	77	36	42	1088	453	488
宮城県沖	0	0	0	12	5	9	91	69	120
μ	-	(7.01)	(7.10)	-	8.37	7.61	-	7.72	7.26
σ	-	(0.11)	(0.12)	-	0.74	0.39	-	0.69	0.43
E	-	(3.1)	(3.3)	-	66.2	57.8	-	912.8	925.8
0.01%相当値	-	-	-	-	5.6	5.6	-	5.2	5.1
0.1%相当値	-	-	-	-	6.1	6.1	-	5.6	5.6
1%相当値	-	-	-	-	6.6	6.6	-	6.1	6.2

注：■はファクター2範囲外、■はファクター3範囲外であることを示す。死者数に関するモデルは棄却した。

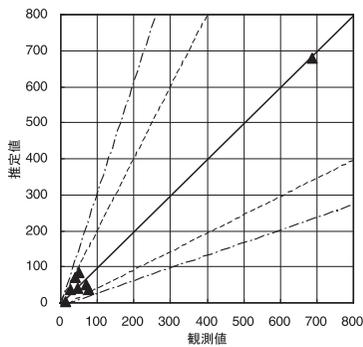


(a) 算術軸表示

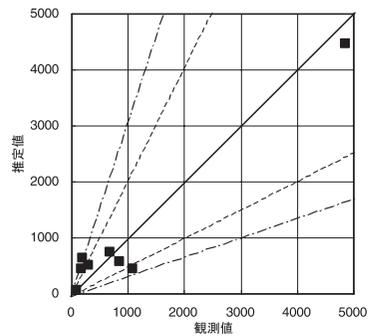


(b) 対数軸表示

図11 震度曝露人口の利用を前提とした人的被害の被害総量推定モデル



(a) 重傷以上人数



(b) 軽傷以上人数

図12 人的被害の被害総量推定モデル(正規分布)による推定値と観測値の相関
(実線は1:1線, 破線は1:2線および2:1線, 一点鎖線は1:3線および3:1線)

ロジスティック分布の適合度が良くファクター2にすべて収まっている。正規分布ではファクター2に収まらない点が2点(福岡県西方沖と宮城県沖)あったが、ファクター3にはすべて収まった。図12(a)のようにプロットは両極端に分離しているものの、死者数のケースほどではない。

(3) 軽傷以上(死者+重傷者+軽傷者)

図11(b)をみると重傷以上のケースと類似の形状を示しており、計測震度でほぼ0.5の差、被害率でほぼ1オーダーの比となっている。0.01%、0.1%、1%相当値は、正規分布で5.2、5.6、6.1、ロジスティック分布で5.1、5.6、6.2となっており、勾配は重傷以上のケースと同程度である。4.では明確な巨視的関係が認められなかったが、1%相当値が5.6であることは、震度6弱の影響が大きいことを示唆している。

正規分布の適合度が良く、図12(b)のようにファクター3に収まらないプロットは鳥取県西部の1点であった。ロジスティック分布でも大きな相違は見られない。

既往研究(村上ら、2002;村上、2005、2006)では、鳥取県西部地震、新潟県中越地震および福岡県西方沖地震を対象として、市区町村ごとの死傷者(本研究における軽傷以上に相当)発生率と計測震度の関係から回帰式が導かれている。計測震度に対する勾配は、計測震度幅1.0に対して約10倍であり、本研究と比較してかなりの緩勾配となっている。この原因としては、死傷率0%の市町村データを含まないデータセットを用いた片対数の回帰式であり、「人的被害が生じたという条件付の被害発生率」が表示されているため、低震度領域での発生率が高く評価されていることが挙げられる。吉村ら(2005)によると、市町村単位での軽傷者発生割合は、計測震度4.5で約15%、5.0で約45%、5.5で約70%となっており、この影響を加味すると、本研究による推定式の勾配に近い結果となる。鳥取県西部では他地震より死傷率が1オーダー近く低いことが指摘されており(村上ら、2002)、本研究による推定式と比較しても同様のことがいえる。

以上より、計測震度と被害総量の入出力関係の平均的傾向が定量化されていると判断すれば、提案モデルは、現行の「気象庁震度階関連解説表」を改訂する際の参考情報となると考えられる。さらには、地震直後の被害概略推定を目的とした利用も可能と思われる。

7. むすび

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- 1) 2000~2005年に発生した15回の地震で観測された計測震度5.5以上のデータを用いて震度曝露人口を推計し、震度階別の相互比較によりその特徴を明らかにした。また、計測震度0.1単位で集計した震度曝露人口・世帯数を示し、相対的な分布特性を明らかにした。
- 2) 震度曝露人口と住家被害・人的被害とを比較し、巨視的な相関関係について考察した。住家全壊には震度6強が支配的である一方、全半壊には震度6弱の影響がみられ、一部破損以上には震度5強ないし6弱の影響がみられた。死者数については震度7が支配的であり、負傷者については震度6弱の影響を示唆するデータが得られたが、関連は不明確であった。
- 3) 震度曝露世帯数と住家被害データに基づいて、住家被害の被害総量推定モデルを構築した。1%相当の計測震度は全壊で6.0、全半壊で5.7、一部破損以上で5.1となった。10%相当値は同順で6.5、6.1、5.5となった。旧震度階に基づく従来モデルと比較すると、計測震度で0.4あるいはそれ以上の乖離が広いレンジでみられた。
- 4) 震度曝露人口と人的被害データに基づいて、人的被害の被害総量推定モデルを構築した。死者数については適切なモデルとはならず棄却した。0.1%相当の計測震度は重傷以上で6.1、軽傷以上で5.6、1%相当値は重傷以上で6.6、軽傷以上で6.1~6.2となった。
- 5) 被害総量推定モデルの関数形状として、正規分布とロジスティック分布を比較した。被害率0に近い部分(分布形状の左側の裾野)ほど両者の相違は大きい。モデル選択が被害推定に及ぼ

す影響は大きく、今後さらに検討が必要である。

6) 住家被害と人的被害の総量推定モデルを用いて、対象地震の被害総量の推定値と観測値の相関を検討した結果、おおむねファクター3の推定精度であることがわかった。

本研究で提案したモデルの妥当性を確認するには、今後の地震による検証が必要である。

またモデルの高度化のためには様々な面で補正を行う余地がある。震度データの面では、市区町村内での詳細震度分布の考慮、被害との相関の良い改良震度指標の導入、余震の影響を考慮した等価な震度指標の導入(大中ら, 2005)などにより精緻化を図ることができよう。また人口データについては、地震発生時刻における人口の流動状況や年齢構成を考慮した評価が望ましい。

建物被害の面では、建物の構造種別、築年、地域特性などを考慮してデータを層別化し、高精度化を図る余地がある。さらに人的被害については、その発生原因別の分類、および、揺れに直接起因しない被害を除外した検討も必要である。

謝 辞

本研究では計測震度の算出のため、K-NET および KiK-net の強震記録を利用した。記して謝意を表する。

参考文献

- (独) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション (J-SHIS) ホームページ, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2005 a.
- (独) 防災科学技術研究所: 強震観測ネットワーク (K-NET) ホームページ, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>, 2005 b.
- (独) 防災科学技術研究所: 基盤強震観測網 (KiK-net) ホームページ, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>, 2005 c.
- 藤本一雄・翠川三郎・柴野篤志: 2003年の宮城県沖、宮城県北部、十勝沖地震における住家被害率と計測震度の関係, 日本地震工学会-2004梗概集, pp.308-309, 2005.
- 広島市地震情報ネットワークシステム検討委員会: 平成13年芸予地震と広島市地震情報ネットワークシステム ～地震の概要と被害の分析ならびにシステムの検証～ 概要版報告書, 2001.
- 火災予防審議会・東京消防庁: 地震時における人口密集地域の災害危険要因の解明と消防対策について, 火災予防審議会答申, 2005.
- 気象庁: 地震・火山月報 (防災編), 平成12年1月～平成17年12月, 2000-2005.
- 気象庁: 気象庁マグニチュード算出方法の改訂について (2003年9月17日報道発表資料), 2003.
- 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.
- 清野純史・藤江恵悟・太田裕: 組合せ震度の提案・定式化とその応用について, 土木学会論文集 Vol. 612/I-46, pp.143-151, 1999.
- 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.
- 翠川三郎・藤本一雄: 計測震度と住家被害率 - 罹災調査結果を用いた検討 -, 日本地震工学論文集, 第2巻, 第2号, pp.15-22, 2002.
- 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol. 1, pp.51-56, 1999.
- 村上ひとみ・伊藤英二・森伸一郎・重松尚久: 震度と人的被害発生率の関係 - 2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震の特徴 -, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, paper No.444, pp.2405-2410 (on CD-ROM), 2002.
- 村上ひとみ: 福岡県西方沖地震における人的被害と集合住宅室内被害の要因分析, 「福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害に関する調査研究」科学研究費補助金 (特別研究促進費, 代表: 川瀬博) 研究成果報告書, 2005.
- 村上ひとみ: 2004年新潟県中越地震における人間被害と救急・救助活動の実態, 「地震時救命ライフラインの機能維持と人的被害軽減に関する研究」科学研究費補助金 (基盤研究 (B)), 代表: 高田至郎, 研究課題番号: 15360242) 研究成果報告書, 2006.
- 内閣府: 地震被害早期評価システム (EES) の見直しについて, 地震被害に関する検討委員会 (第4回) 資料, 2004.
- 内閣府・気象庁: 推計震度分布図の提供開始について (2004年2月26日報道発表資料), 2004.
- 能島暢呂・石川裕・奥村俊彦・宮腰淳一: 確率論的地震ハザードの全国統計 (その2) 地震ハザード曝露人口, 日本地震工学会大会-2005梗概

- 集, pp. 328-329, 2005.
- 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, No. 3, pp. 363-380, 2004a.
- 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・濱本剛紀：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, 地域安全学会論文集, No. 6, pp. 181-190, 2004b.
- 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) (on CD-ROM), 2003.
- 太田裕：震度情報の理解と活用 (1)~(10), 月刊SEISMO, 1998. 8~2000. 3, 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, 1998-2000.
- 岡田成幸・鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成, 地震II, 第44巻, pp. 93-108, 1991.
- 岡田成幸・高井伸雄：木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用 - 地震動入力を確定的に扱う場合 -, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp. 31-38, 2004.
- 大中太郎・三浦弘之・翠川三郎・藤本一雄：住家被害率に及ぼす余震の影響, 日本地震工学会2005年大会, pp. 274-275, 2005.
- 境有紀・神野達夫・額額一起：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, pp. 71-76, 2004.
- Seligson, H.A. and Shoaf, K.I.: Human Impacts of Earthquakes, *Earthquake Engineering Handbook* (Eds: Chen, W.-F. and Scawthorn, C.), CRC Press, 2002.
- 消防庁：次世代震度情報ネットワークのあり方検討委員会中間報告書, 2005a.
- 消防庁：災害情報一覧, <http://www.fdma.go.jp/>, 2005b.
- 消防庁・気象庁：自治体が設置した震度計の設置環境調査結果について (2004年12月22日報道発表資料), 2004.
- 総務省統計局：国勢調査ホームページ, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/>, 2005.
- 山口直也・山崎文雄：西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 129-138, 2000.
- 吉村昌宏・藤原賢也・岩橋平和：近年の地震における地震動強さと人的被害に関する検討, 日本地震工学会 - 2005梗概集, pp. 528-529, 2005.
- (投稿受理：平成18年1月30日
訂正稿受理：平成18年4月13日)