

地震時の木造建築物倒壊に伴う死者数推定に向けた棟死亡率関数の提案

SEISMIC DEATH RISK FUNCTION FOR CASUALTIES PER HOUSE

田畑直樹*, 岡田成幸**
Naoki TABATA and Shigeyuki OKADA

In Japan, almost all the earthquake casualty occurs inside wooden houses damaged. For decreasing the casualties due to damaged wooden houses, the precise estimation method is indispensable. Combining the data on damaged buildings surveyed in the field of earthquake engineering and the data on death bodies inspected in the field of disaster medicine in the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, we found that earthquake casualties have close relation not only to the damage degree of their houses but also to the building damage ratio around the dwelling area. We proposed the death rate function with the parameters of them in order to precisely estimate casualties per house. Proposed functions are also applicable for the effective seismic reinforcement plan for the house to decrease the casualties in the municipality or governmental unit.

Keywords: 1995Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Damage Index, Seismic Death Rate Function,
Lower Wooden House, Human Casualty, Inhabitant's Existence Ratio

1995年兵庫県南部地震, 損傷度, 棟死亡率関数, 木造低層建物, 人的被害, 在宅率

1. 既往推定式の問題点と本研究の目的

1995年の兵庫県南部地震は、我が国で初めて震度7を記録した都市直下地震であり、神戸市を中心として数多くの建築物とりわけ木造住家が多数損壊し、深刻な人命損失をもたらした。震災後、既存不適格建築物の問題が広く認知され、旧建設省住宅局監修の耐震精密診断¹⁾の受診数が年々増加傾向にあること、また、法整備として耐震改修促進法が施行されるなど住家の安全性向上が急がれているが、行政を主体とする地震防災対策の基本となる、住家の倒壊に伴う死者数の予測に関する研究は、構造物の被害評価のそれと比較すると甚だ少なく、旧来からの推定式を未だ援用している状況にある。

地震時の木造住家破壊に伴う死者数推定の端緒は以下の1950年代のKawasumi²⁾に遡る。ここに D は死者数、 H は木造全壊数である。

$$D=0.01 \times H^{1.3} \quad (1)$$

1970年代には、東京都³⁾が被害想定のために、木造全壊数 H (但し、全壊数+0.2×半壊数として計算)に加え家屋焼失数 F を説明要因とした以下の関数を用いている。

$$\log_{10} D = 0.95987 \times \log_{10}(H+F) - 1.02912 \quad (2)$$

1980年代には、太田・他⁴⁾が建物被害・火災数・地震規模等を多要因とした重回帰モデルに言及している。

1990年代には、Coburn et al⁵⁾が組積造及び鉄筋コンクリート造建物被害から、死者数を崩壊建物数とそれに伴う閉じ込め及び建物内人口

などを要因としたモデル化を試みている。最近では内閣府⁶⁾が地方公共団体における地震被害想定を支援する目的で、以下の評価式(D_r は死者率、 H_r は全壊率)を使ってWeb上で支援ツールを公開している。

$$D_r = 0.0359 \times H_r \quad (3)$$

その他、福島・他⁷⁾は兵庫県南部地震被害記録を利用し探求的データ解析の手法を用いて木造住家の全壊率と死亡率の関係を議論している。また、近年懸念される東海地震被害想定においても、過去に発生した被害地震における全壊数と死亡者数を1次式で回帰した以下の関数(P は屋内人口)が用いられており⁸⁾、現在多くの自治体で行われる地震時人的被害予測も類似の関数を採用している。

$$D = 0.0629 \times H_r / 100 \times P \quad (4)$$

既往式は基本的に地域に発生する人的被害の概数をマクロ的に推定するためのものであり、被害建物数からの1次式回帰のため個々の建物の損傷程度と死亡危険性との関係が不明であり、推定精度が低い。特に、大規模被害地震においては死者数は過小評価され、小規模被害地震においては過大評価の傾向が目立つ。さらに問題なのは、建物耐震化等の減災対策による人的被害軽減化効果が評価できないことである。加えて近年、建物被害評価の分野において、減災に向けたミクロ対策の必要性から、個別建物の損傷評価関数が提案⁹⁾されてきている。人的被害評価においても地域主体から個別世帯評価へと推定精度向上そしてミクロ対策への利用可能性を狙った新しい評価式が切望

* 北海道大学大学院工学研究科 修士(工学)
(現 東京海上日動リスクコンサルティング㈱)

** 名古屋工業大学大学院工学研究科 教授・工博

Graduate Student, Grad. School of Engineering, Hokkaido University, M. Eng.
Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.
Prof., Grad. School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

される。さらに、式の利便性を高めるには、説明変数として入手容易な資料によっていることが条件として加わる。

本研究は以上の目的意識の基、既往式よりも推定精度が高く、特に大規模地震に対する過小評価・小規模地震に対する過大評価の原因に踏み込みつつ、個別の建物損傷から棟別に死者推定が可能なマイクロレベルの棟死亡率関数を提案する。提案式の防災工学的意義は、一つには、防災行政にとって対策の基本となる地域内死者数がより高精度に推定可能になるということ。例えば、本提案式をシナリオ地震に適用し甚大な死者数が発生する地域を推定することで、特定地域への耐震補強促進を進める意思決定の材料と成り得る。また個別の損傷程度に着目するので、個々の建物内での死亡リスクを評価することが可能になり、例えば死亡危険性を目標値まで下げるのに必要な建物損傷の許容値を測り知ることが可能となったり、地域をより細分化しても推定精度が低下しないなど、よりきめ細かな地域防災対策へ貢献できると考える。

2. 研究方法

建物の損傷状態とその建物内での死亡率との関係を求めるのが本研究の主題である。研究の流れは大まかに、建物倒壊に伴う死者を多く発生した1995年兵庫県南部地震の建物被害・人的被害を基本資料とし関係を構築する。そして提案式の有用性を検討するため既往式との推定精度比較を行う。

本研究で必要とした基本資料は、建物の属性(木造/非木造、階数、独立/集合、建築年、被害状態等)及び住人属性(建物内居住者数、死亡者数、死亡状況等)である。また、地域の地震動の大きさの違いも考慮する必要がある。建物被害については、航空写真を立体視(屋根と壁面の破壊状態を同時考慮)する写真判読法により行った。比較的短時間で被害判定が可能でかつ精度が高い理由からである。小川・山崎¹⁰⁾によれば、航空写真の立体視を用いた被害判読の精度は、倒壊LEVELで特に高く、後段D5・D6 LEVELでは凡そ90%の割合で地上調査結果と一致する。兵庫県南部地震の被害については、震災復興まちづくり特別委員会(以下、震特委員会)の建物被害判定¹¹⁾(全壊または大破、中程度の損傷、軽微な損傷、無被害の4段階区分)が広く用いられているが、本論では、より詳細な建物の損傷程度と人的被害

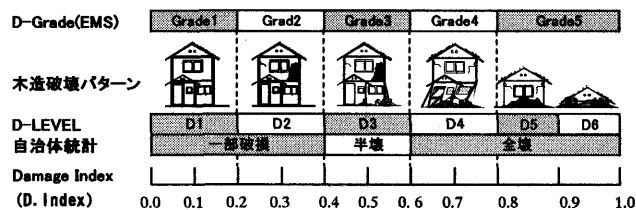


図1 各種の被害尺度の関係⁹⁾

表1 本論で用いる被害尺度

被災度判定定義	被害状況
	D6(全壊): 完全崩壊
	D5(全壊): 1・2階どちらかの層破壊
	D4(全壊): 柱・梁の破壊による内部空間の欠損
	D3(半壊): 柱・梁・壁の一部が構造的に破壊されているが内部空間を欠損するような被害は生じていない
	D2(一部破壊): 屋根瓦・壁面のモルタル等の大幅な剥落
	D1(一部破壊): 壁面の亀裂及び外装材の若干の剥落
D0: 無被害	
火災	

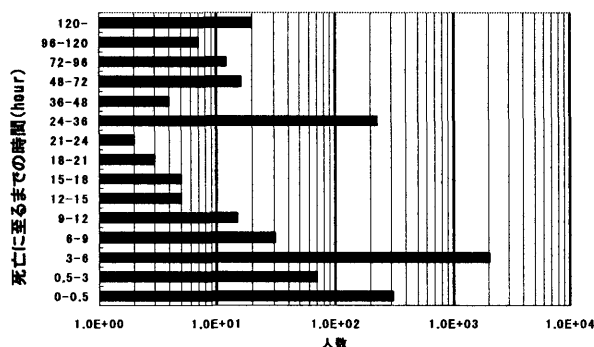


図3 死亡に至るまでの時間の内訳(火災による死亡を除く)

表2 対象とした木造低層建物被害数の集計

住宅形式	D-LEVEL	D.Index	東灘	灘	中央	兵庫	長田	須磨	計
木造独立	D6	0.9-1.0	139	22	31	60	65	51	368
	D5	0.8-0.9	308	14	96	195	79	78	770
	D4	0.6-0.8	255	65	101	236	132	110	899
	D3	0.4-0.6	104	25	90	143	61	181	584
	D2	0.2-0.4	187	87	535	238	128	470	1623
	D1	0.0-0.2	150	333	688	418	268	920	2771
	D0	0.0	106	335	875	277	282	643	2518
	計		1229	881	2414	1565	1011	2433	9533
木造集合(長屋・共同建)	D6	0.9-1.0	34	17	14	36	23	2	126
	D5	0.8-0.9	121	34	48	120	52	9	384
	D4	0.6-0.8	43	105	71	113	60	16	408
	D3	0.4-0.6	12	49	67	76	59	22	285
	D2	0.2-0.4	11	79	317	80	125	43	655
	D1	0.0-0.2	13	185	317	142	169	64	890
	D0	0.0	20	127	405	60	175	61	848
	計		254	596	1239	627	663	217	3596



図2 被害調査を行った神戸市内の木造低層建物群(黒塗りの部分)

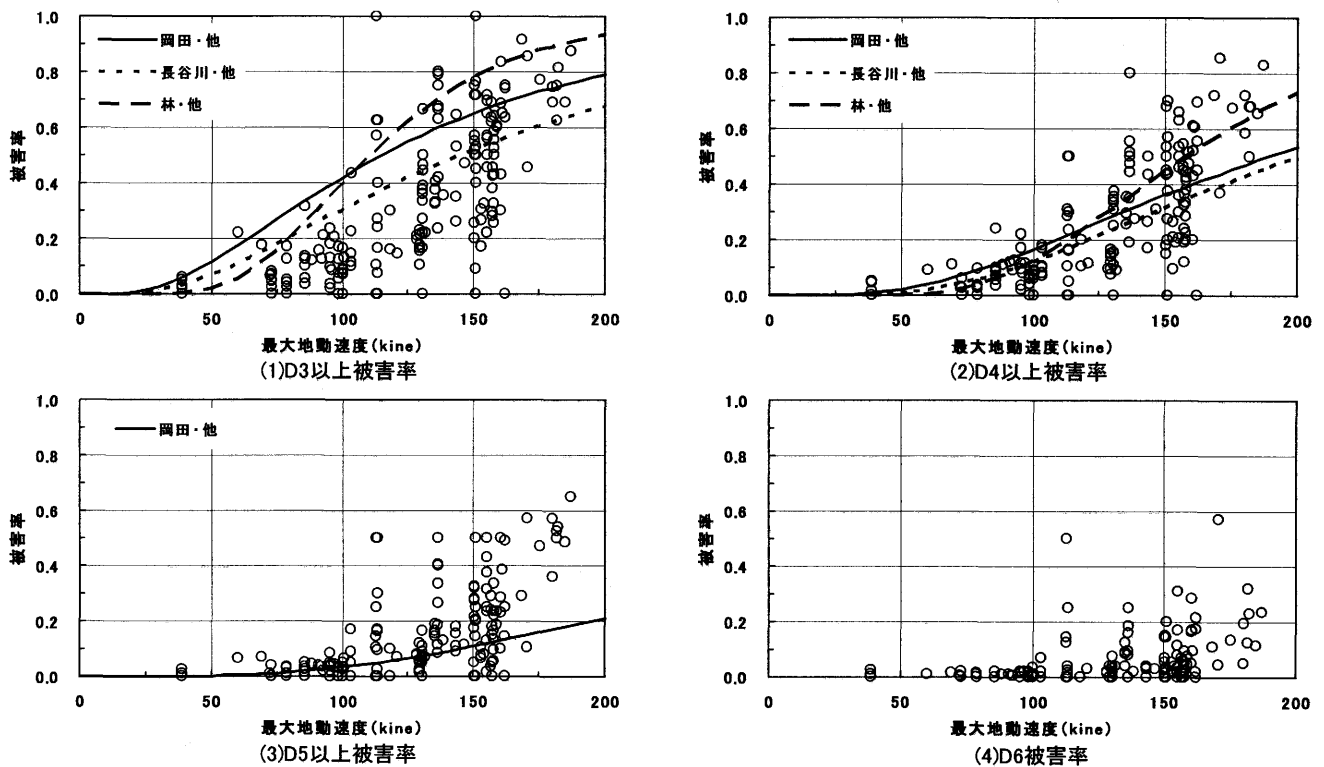


図4 推定最大地動速度(林・他¹⁴⁾¹⁵⁾と木造低層建物被害率

害の関係を明らかにする目的と、被害尺度自体の曖昧さを取り除くために、被害判定精度が調査主体に殆ど依存せず、外観目視（本研究では航空写真の立体視）で容易に判定可能でかつ、損傷程度が細かく区分された岡田・高井¹²⁾の破壊パターン（図1）を用い、7段階のDamage LEVEL（以降、D-LEVELと略称（表1））で判定した。判定は総計5名で行ったが、個人の被害判定基準の癖を補正するために予め数十件の同一建物でキャリブレーションを行い、判定基準の相互確認を行っている。航空写真は火災煙の掛かっていない鮮明なもので、かつ被災直後に撮影されたものの中から建物倒壊が主被害の地域で一般木造の多い地域のものを選択した（撮影縮尺1:4000、拡大時1:500）。図2に被害判読を行った地域を示す。凡そ“震災の帯”に位置する。また、複数の区域に跨って地区を選定することで、人口密度・被害率の影響が考慮可能となる。対象地域内に立地している全建物の内、非木造建物と工場及び業務建物を除き被害判読した建物総計は13,129棟である。建物に関するその他の情報として、震特委員会がまとめた建物属性（構造、住宅形式、用途）を用いた。

人的被害データとして用いたのは、神戸市内の監察医が記録した死体検案書を西村¹³⁾が編集したものである。総データ数は5,411名、そのうち判読建物内死亡者数は507名（東灘区207名、灘区39名、中央区47名、兵庫区128名、長田区42名、須磨区44名）である。本論は建物の損傷による死者発生に限定して考えているので直接死因が建物損傷と関係の薄いもの（焼死、ショック死等）については解析対象から除外した。図3は、上記資料より死亡までの時間内訳を示したものである。多くが6時間以内に死亡しており、要救助時間を考えると建物倒壊による重傷者の救助は極めて厳しいことが分かる。耐震補強等の事前対策が人的被害軽減の基本であることが改めて知らされる。

以上の基本資料に、地域の地震動分布として林・他¹⁴⁾¹⁵⁾が町丁目ごとに推定した最大地動速度分布を加え、地理情報システム（GIS）を用いてデータ統合を行った。統合にあたり、国交省建築研究所が作成したGIS建物ポリゴン¹¹⁾（図2）を利用した。

3. 木造低層建物損傷度と死亡危険度の関係

3.1 木造低層建物被害の概要

被害判定を行った木造低層建物の内、破壊パターンが判明したものについてD-LEVEL（図1,表1参照）で集計し表2に示す。建物数は中央区が最も多い。全壊数・全壊率（D4 LEVEL以上に相当、図1参照）ともに最も高かったのは東灘区であり、同区で人的被害が多く発生したことに対応している。建物被害を町丁目ごとにD-LEVELで集計し被害率に換算し、推定最大地動速度との関係を既往の被害率関数^{12,15,16)}と共に図4に示す。被害率関数は多くの研究者により種々提案されているが、多くは全壊・半壊・一部破損・無被害の4区分である。しかし後段（図6）で示すとおり、死者発生は建物の全壊の尺度をより高分解することにより説明される。現状でそれに対応している関数は筆者らによるもののみである²⁾。同図より、既往の被害率関数と今回の判読データとは概ね一致しており、今回判読対象とした建物の被害発生状況は一般性が保証されていると言えよう。ただし、D3（半壊）は、判読被害の方が被害率関数に比べてやや小さい傾向にある。航空写真を用いた被害判定では建物傾斜を伴わないD3 LEVEL以下の被害を正確に判読することが難しく実態よりも被害を過小評価している可能性はあるが、後述（図6）のように、人的被害は大多数がD4 LEVEL以上とりわけD5・D6 LEVELで発生するので、以降の解析への影響はない。D5 LEVELでは筆者らによる関数しか提案されたも

のではないが、判読被害の方が被害率関数に比べてかなり高いように見える。しかしこれは、筆者らによる関数がD5 LEVELとD6 LEVELの区別は提案当時していなかったためD5以上LEVEL関数と呼ぶべきである。同図によればほぼ本論D6 LEVELの判読被害率の上限を与えているのが分かる。

3.2 木造低層建物内の棟人口の推定

木造低層建物の損傷度と死亡危険度の関係を明らかにするためには、地震発生時の1棟ごとの在宅人口を正確に知る必要がある。しかしそのようなデータは入手困難なため、各種統計資料から推定することとする。木造低層建物には、一般に、住宅形式として一戸建・長屋建・共同建があり、1棟当たりの世帯数がそれぞれ異なる。また、核家族化が進んだ大都市・市区と郡・町村部では世帯構成人員も大きく異なることが予想される。本研究では、総務省住宅統計¹⁷⁾(平成5年版都道府県編)の市区統計表を用い、区別の棟当たり居住人口を以下に推定する。

(1) 木造独立(一戸建)住宅

住宅土地統計の中から、持ち家(ほぼ一戸建てに等しい)の1住宅当りの居住人数 Rn_m 及び持ち家1室当りの人員 Pn_m に着目し、木造独立(一戸建)住宅の世帯人員 Fw を以下で表されるとする。

$$Fw = Rn_m \cdot Pn_m \quad (5)$$

一般的に、一戸建住宅1棟当りの世帯数は1.0に近いと考えられるので、 Fw は木造独立住宅の棟当たり居住人口に等しいと見做せる。

(2) 木造集合(長屋建・共同建)住宅

1棟の中に複数の世帯が存在する住宅形式であるので、1世帯人員に1棟当りの世帯数を乗じることで近似する。平成5年住宅統計¹⁸⁾(全国編)より、木造集合(長屋建・共同建)住宅における両形式(長屋建:2.76,共同建:5.63)の1棟当たり住宅数の平均値(4.2)を用いる。

結局、木造集合(長屋建・共同建)住宅の1棟人口は、次のように表せる。

表3 推定した木造独立及び集合住宅の棟人口

住宅形式	東灘	灘	中央	兵庫	長田	須磨
木造独立 Fw	3.03	2.92	2.79	2.83	2.9	3.31
木造集合 Gw	12.7	12.2	11.7	11.9	12.2	13.9

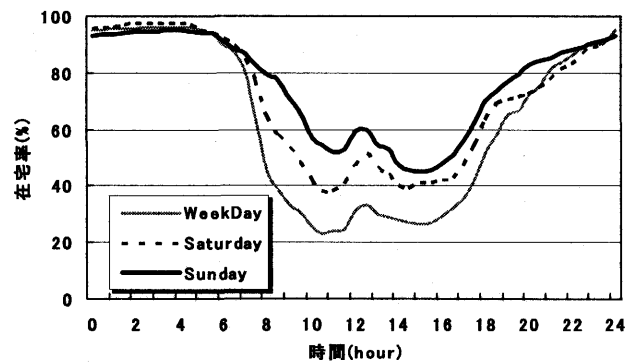


図5 時系列在宅率(2000年兵庫県)¹⁹⁾

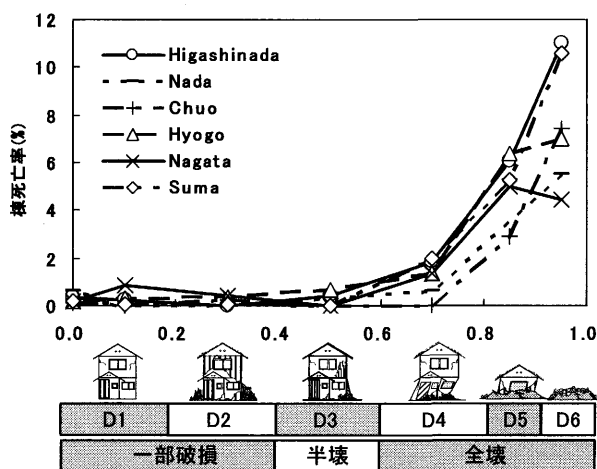
$$Gw = Fw \cdot Se_m \quad (6)$$

ここに、 Gw は木造集合住宅1棟人口、 Fw は木造独立住宅1棟人口、 Se_m は木造集合住宅1棟当りの世帯数である。

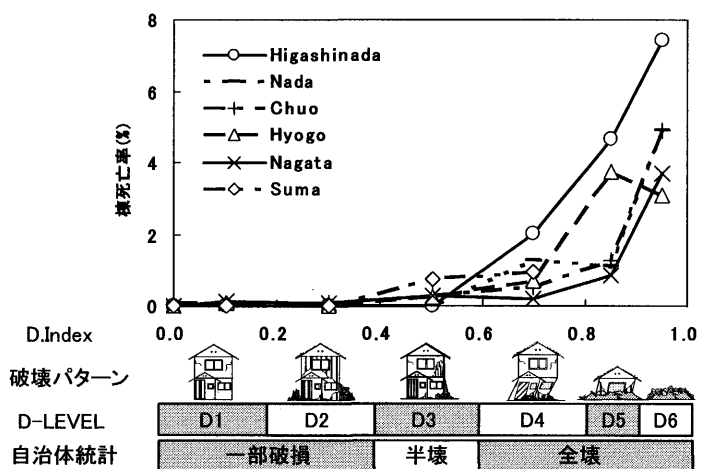
このようにして求めた Fw 及び Gw を表3に示す。平成5年住宅統計によれば、全国の1世帯当りの人員は2.97名であり、今回求めた独立住宅の値に概ね一致しており、妥当であると言えよう。

(3) 地震発生時の在宅率による棟人口の補正

上記の1棟当たりの居住人口を用い、地震時発生時の在宅人口を推定する。在宅人口は、住人の1日の行動に影響され、曜日・時間によって変動するものであるので、在宅率を考慮する必要がある。容易に入手可能なデータとして、NHK放送文化研究所による国民生活時間調査¹⁹⁾がある。これは5年ごとに実施されており、県別と全国(都市規模別)にまとめられている。調査内容は、24時間の中で15分ごとの行動について記載されている。図5は、2000年度調査における兵庫県民全体の在宅率を示したものである。在宅率は、いずれの時間帯においても、概ね平日よりも土日曜日が低い。また、同一曜日内で見ると、夜から朝が高く、日中は低い傾向が見られ、その日較差は、とりわけ平日昼夜で大きく、最大で3倍程度もあり、被害推定において無視することはできない。地震発生時の曜日・時間帯別在宅率を前述の住宅形式・地域別の棟人口(Fw, Gw)に乗じることで、各地域ごとの木造低層建物棟別在宅人口を推定することができる。



(1)木造独立(一戸建)



(2)木造集合(長屋建・共同建)

図6 木造低層建物損傷度と棟死亡率(%)

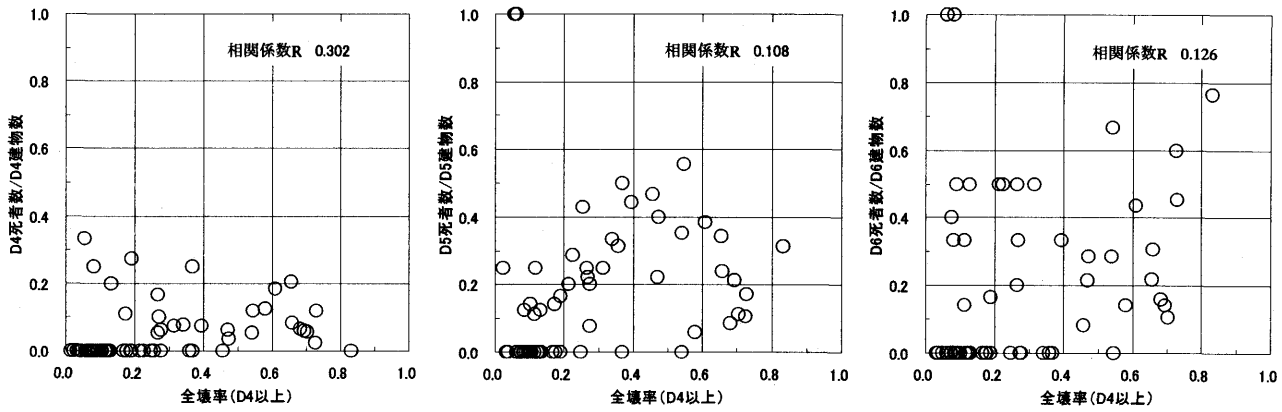


図7 周辺全壊率と損傷度別棟死亡数の関係(町丁目集計)

3.3 木造低層建物の損傷度別死亡率

前節で求めた木造低層建物被害データ及び建物棟別推定在宅人口を用いて、木造低層建物1棟に対応する死亡率を被害との関係について議論する。建物1棟ごとの被害(損傷度)は死者発生との関係を議論する際、詳細尺度で記述されるのが望ましく、また、次節の関数化においては連続量として扱えるのが望ましい。筆者らはそのための被害尺度として既往研究⁹⁾においてDamage Index (以降、D.Indexと略称)を定義しており(定義域 [0,1.0], (図1))、地震動強さと建物1棟ごとの被害との関係を損傷度関数として提案している。本研究でもこれに準拠し、1棟ごとの在宅居住者人口に対する木造低層建物死亡率を棟死亡率と呼び、建物損傷度(D.Index)をパラメータに以下に定義する(式(7)(8))。

$$Dr(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} Dn(x)_i}{\sum_{i=1}^{N_m} Pn(x)_i} \cdot 100 \quad (7)$$

$$Pn(x) = Pw \cdot Er \quad (8)$$

ここに、 $Dr(x)$ はD.Index別棟死亡率(%), N_m はD.Index別の棟数、 x はD.Index、 $Dn(x)_i$ はD.Index別i番目の棟死者数、 $Pn(x)_i$ は地震発生時におけるD.Index別i番目の棟人口、 Pw は住宅形式(独立/集合)別棟人口、 Er は地震発生時(曜日,時間)における当該地域の在宅率(図5)である。行政区を集計単位とし地域内建物棟数でサメーションし、木造独立住宅と木造集合(長屋建+共同建)に関して算出したのが図6である。損傷度と棟死亡率との関係は極めて明快でありD.Indexが0.6を超える被害を被ると死者が発生し始め、以後、棟死亡率は急増する。その勾配は急峻であり、住宅形式に無関係に一般に“全壊”と定義されている建物被害(D.Index: 0.6~1.0)において、建物が傾斜した程

度(D4 LEVEL、D.Index=0.6-0.8)と完全崩壊(D6 LEVEL、D.Index=0.9-1.0)とでは、棟死亡率は著しく異なり、木造独立住宅では最大で10倍以上の差がある。人命損失を考える際には、既往の建物被害尺度では十分な精度が保証されないことを強調しておく。加えて、木造独立住宅に比べて、集合住宅の死亡危険度のばらつきが大きい傾向にあることが確認できる。

(1) 全壊率が棟死亡率に与える影響について

建物の損傷度で棟死亡率をある程度説明することができたが、図6において地域差を認めることができる。その理由を、地域の全壊率の違いから考察する。図7に町丁目ごとの全壊率と、D-LEVEL別の棟数当たりの死者数を示す。D4・D5・D6 LEVELはともに、相関係数Rは高くはないものの、概ね周辺の全壊率が高くなると、建物が同一損傷であっても死亡危険度が高くなる傾向が認められる。図3において死者の多くが6時間以内に死亡している事実を示した。それ以前に救助を行わなければ死亡率が上がることを意味している。すなわち、地震時に負傷した者は、倒壊した建物からの救助時間に反比例して、生存率が下がる。全壊率の高い地域は、低い地域に比べ混乱状況が酷烈であり、発災から救助時間が長くなり、同じ建物損傷下でも死亡率が高くなるのが容易に推測できる。

実はこの周辺全壊率の違いが、大規模被害地震と小規模被害地震における死者数発生割合の不一致を説明する一つの理由ではないかと推測する次第である。既往式(1)~(4)においては、建物被害数と死者とは線形回帰が基本であり地域被害の大小は考慮に入っていないため、大規模被害地震では死者数を過小評価し小規模被害地震では過大評価となってしまう。死者数予測式に周辺全壊率を取り込んだもう一つの理由として防災対策的観点がある。周辺全壊率はSAR(Search And Rescue)等のその後の死者低減応急対策の難易性など、対策に関わるファクターでもある。相関性は高くはないとはいえ、死者発生に関与することは疑いのないところであり、死者低減のための対策効果評価が可能になるなど、式の有用性を高める意味において導入を企図した。

(2) 全壊率を考慮する周辺範囲について

個別の建物損傷による死亡に影響を与える周辺の範囲(規模)について検討しておく。集計する地域の規模により被害率や死亡率は大きく影響を受けるからである。本研究で建物被害調査を行った町丁目の面積をGISポリゴンの町丁目面積から概算した上で、行政区で集約し正方形であると見做した時の辺長(km)で代表させる(図8)。多少、地域により大小が認められるものの、全地域を平均すると0.93km、す

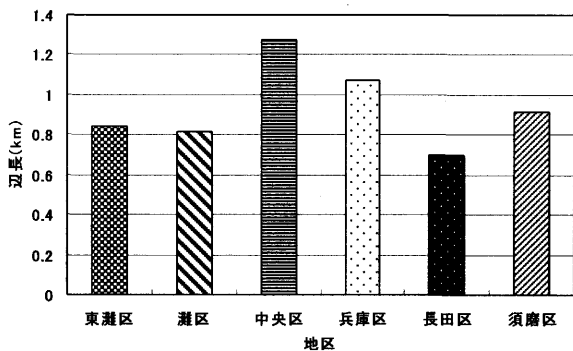


図8 建物被害判定地区を正方と仮定した際の辺長

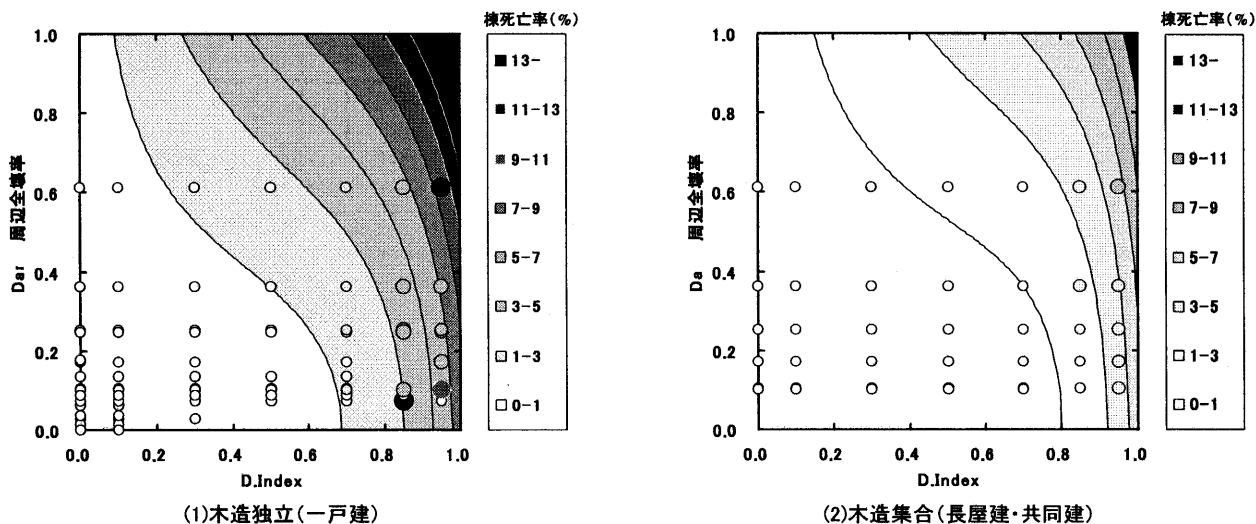


図9 棟死亡率関数2次元表示と地域ごとの棟死亡率 (%)

なわち、概ね1km四方であると見做すことができる。この大きさは、国土数値情報3次メッシュ統計²⁰⁾に一致し、利用の便が高いので、以後この値を用いることを提案する。

4. 木造低層建物棟死亡率関数の作成

4.1 木造低層建物棟死亡率関数

本研究の目的である建物1棟ごとの死亡率推定式(棟死亡率関数)を次に求める。前節の考察より棟死亡率はその建物の損傷度(D. Index表記)及び周辺地域(約1km四方)の全壊率に影響されると考えられるので、2変数で関数を構成する。図6及び図7より、両変数と棟死亡率との関係をそれぞれ指数関数及び二次関数で単純化し、かつ周辺地域の全壊率が高くても当該建物損傷が半壊以下の場合には死亡者の発生はみないことを考慮し、以下の関数型(式(9))を仮定する。データに最尤法的に関数を回帰しそれぞれの係数を求める。用いたデータは、本来全建物13,129棟に対して{建物損傷度、周辺全壊率、棟死亡率}のデータセットを作成し回帰すべきであるが、計算効率を上げるため周辺全壊率(D. Indexが0.6~1.0で全壊と判定されたものの割合を定義域[0,1.0]で計算)を区単位で集計し、区ごとに各D-LEVEL(D0~D6)に相当する建物の死亡率平均を求め回帰用の2次データを作成し回帰した。6区×7D.Index(各D-LEVELの中央値で代表)=42(棟平均死亡率)データの内、極端に建物数が少ないものを除いて式(9)を回帰した。木造独立住宅に関しては、2004年新潟県中越地震における被害²¹⁾を追加することで、より全壊率が低い場合にも配慮した。

$$Dr(x, y) = ae^{bx} + cxy^2 \quad (9)$$

ここに、 $Dr(x, y)$ は棟死亡率(%)を表す。定義域は0~100%である。 x は損傷度(D.Index、定義域[0,1];但し、0.6未満の半壊以下では死者は発生しないものとシカウントしない)、 y は周辺全壊率(定義域[0,1])、 a, b, c は木造住宅形式(独立/集合)別の係数であり、表4のとおりに求められた。係数 c が周辺全壊率の影響を表す値であり、木造独立で発生する死者の方が周辺全壊率の影響を大きく受けるのが分かる。図9に、回帰に用いた2次データ(濃淡および○の大きさで棟死亡率を表記)と回帰した関数(濃淡で死亡率を表記)を2次元平面上に図示する。重相関係数は独立住宅(図9(1))が0.818、集合住宅(図9(2))

が0.945で、良く適合していると言えよう。図10が、得られた木造独立住宅の棟死亡率関数であり、Z軸に目的変数の棟死亡率(Death Ratio(%))を、X-及びY-軸に説明変数の建物損傷度(D. Index)と周辺全壊率(Damage Ratio)をとり、3次元で示す。周辺全壊率の影響は建物損傷度が大きいほど大きくなる。たとえば、周辺全壊率が高くても当該建物の損傷度が小さければ死亡率は低いものの、建物損傷度が0.6程度であれば周辺全壊率が0.6(60%)を超えると、棟死亡率の増加傾向が急になるのが読み取れ、死亡被災現象の表現として受容できるであろう。

4.2 棟死亡率関数の検証

棟死亡率関数の評価精度を検証するために兵庫県南部地震の町丁目単位における死者数を推定する。その際、当該地震における実際の建物被害を既知数として与え、代表的な既存式との推定精度比較を行う。既存式として、河角式(1)と東京都の式(2)を採用した。図11が推定結果である。提案式による推定値は、比較のために、全壊率を考慮しない場合と併記した(同図(a)(b)(c))。明らかに、全壊率を考慮した効果が認められる。本提案式の推定精度の高さに比較し、河角式・

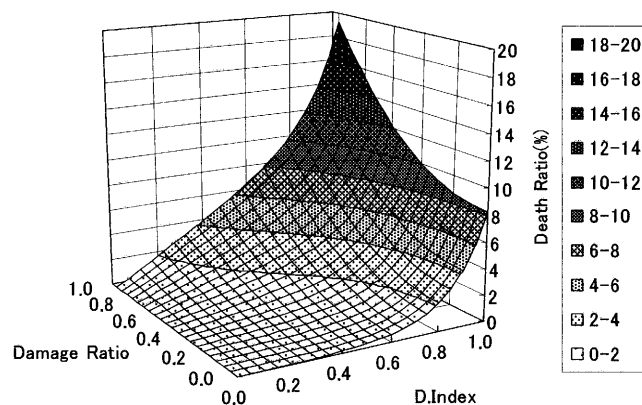


図10 木造低層建物棟死亡率関数3次元表示(木造独立)

表4 木造低層建物棟死亡率関数/パラメータ

住宅形式	木造独立	木造集合(長屋・共同建)
a	0.0104	0.000580
b	6.68	9.32
c	11.0	6.69
重相関係数	0.818	0.945

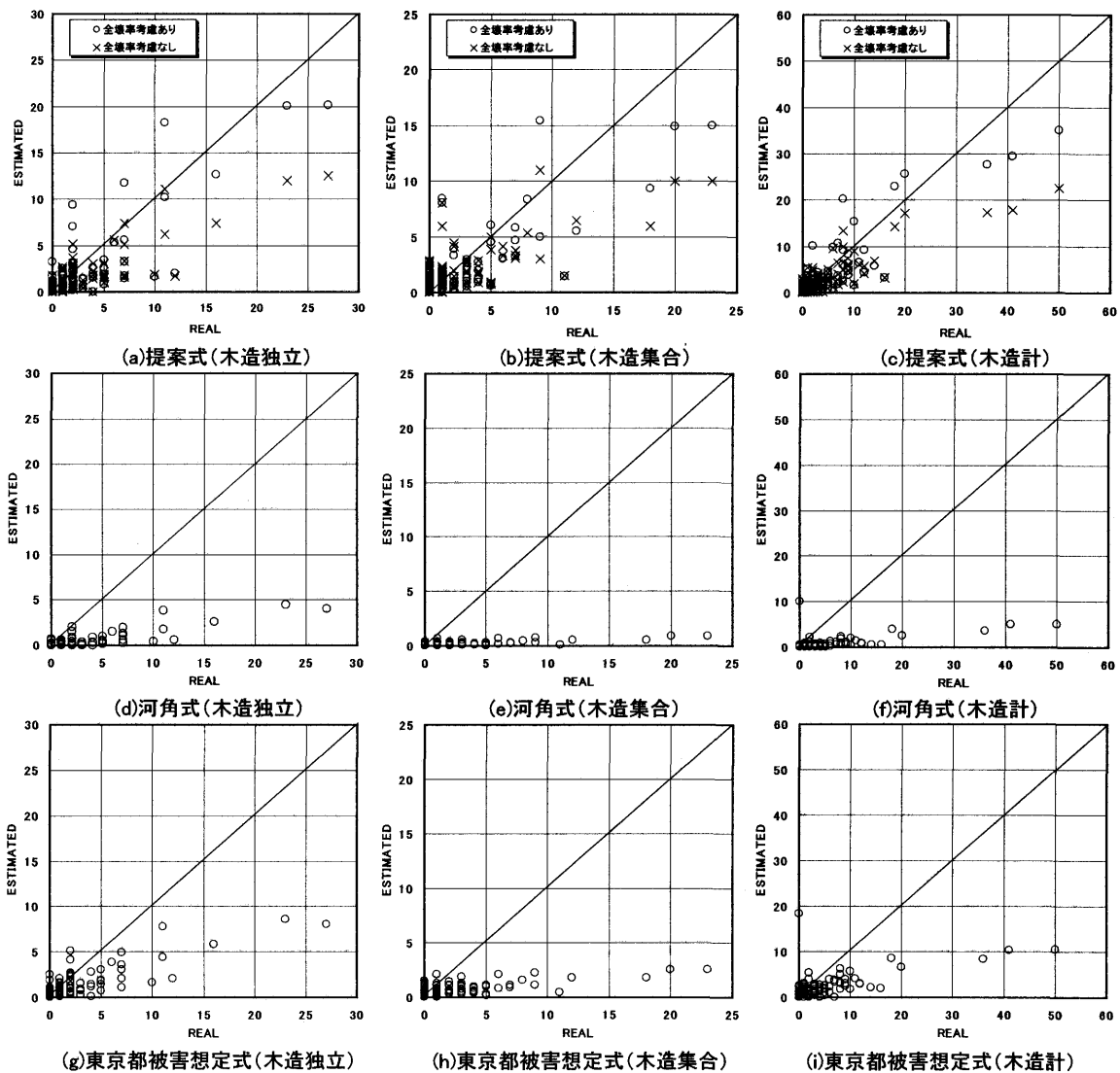


図11 実際の木造低層建物被害から推定した死者数と実数との比較

東京都式共に大幅な過小評価となっている。特に河角式にその傾向が強い。兵庫県南部地震では東灘区のように住家の完全崩壊（D5あるいはD6 LEVELの損傷）が多くかつ周辺地域の全壊率が高く多くの死者を発生した区がある。D4を含め全壊を一括りで扱う従来式では、東灘区の被害状況を評価できず過小評価となってしまう。建物被害尺度をD. Indexで詳細に扱う必要性が確認できる。

5. 広域震害予測へ向けた木造低層建物棟死亡率関数の汎用性の検討
作成した棟死亡率関数の他地震への適用可能性について検討する。手順は以下のとおりとなる。

- ① 既往地震における実際の建物被害を入手
- ② 周辺地域の全壊率を①より求める。
- ③ 本提案の棟死亡率関数（式(9)）に①と②を代入し、棟死亡率を得る。
- ④ 当該建物の居住者人口または当該地域の平均居住者人口に、該当時間の滞在率（NHK国民生活時間調査結果）を乗じ在宅人口を得③に乗じることで死亡者数を得る。

兵庫県南部地震発生後、幸いなことに大規模被害地震は発生しておら

ず、建物倒壊に伴う死者発生は2004年新潟県中越地震のみであるので、この地震について死者数の評価比較を河角式(1)および東京都の式(2)で行う。地震発生は、2004年10月23日（土）17時56分、最大震度は7（K-NET小千谷,JMA川口）である。図12にK-NET加速度記録から算出した計測震度をスムージングして市町村単位に割り付けた震度分布を示す。小千谷市を中心として震度6弱から6強の分布が見られる。消防庁発表による被害集計（第69報）によれば、新潟県全体における人的被害は、死者51名・重傷者635名・軽傷4,160名であるが、死者のうち建物の倒壊が直接的原因となったものは10名である。表5に建築学会初動調査²²⁾が行われた10市町村の建物被害と死亡実数および推定死者数の関係を示す。先の図11とは逆に、既存式が大幅な過大評価となっている。提案式は若干過大評価ではあるが既存式よりも精度良く推定できている。長岡市や堀之内町において、比較的全壊数が多いにも関わらず死者が発生していないのは、地震発生時に住人がいない建物が被災したか、或いは救助・医療機関への搬送が迅速に行われた等の可能性が考えられる。今後のデータ拡充を待って推定精度のさらなる改善を試みる予定である。

表5 建築学会初動調査²¹⁾による2004年新潟県中越地震の市町村別被害と推定死亡者数

市町村	木造建物被害								全壊率	死亡 実数	推定死亡者数			
	D-LEVEL										総計	(1)式	(2)式	提案式
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6							
小国町	36	31	1	3	1				72	0.014	0	0.01	0.15	0.02
小千谷市	1109	639	222	103	130	17	13		2233	0.072	5	7.33	13.7	5.25
柏崎市	13	1			3				17	0.176	0	0.04	0.27	0.08
川口町	161	199	48	63	113	28	13		625	0.246	4	6.98	12.7	6.84
川西町	82	32	6	9	3	2			134	0.037	0	0.08	0.59	0.18
越路町	19	59	12	9	3				102	0.029	0	0.04	0.42	0.06
十日町市	58	43	9	9	8				127	0.063	1	0.15	0.84	0.17
栃尾市	24	19							43	0.000	0	0.00	0.00	0.00
長岡市	343	444	132	64	83	11			1077	0.087	0	3.67	8.28	2.47
堀之内町	176	103	25	26	48	1	2		381	0.134	0	1.66	4.47	1.42
総計	2021	1570	455	286	392	59	28		4811		10	20.0	41.4	16.5

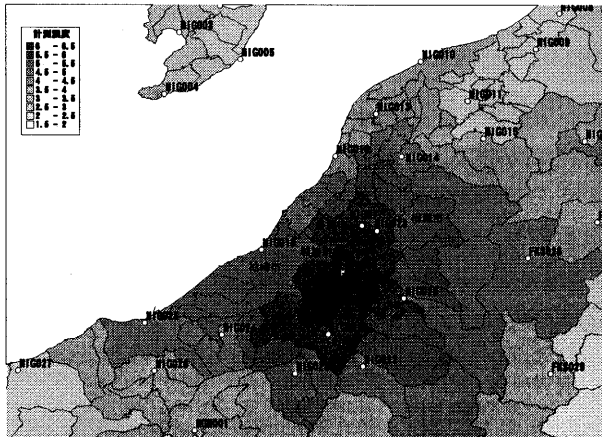


図12 2004年新潟県中越地震の計測震度分布(K-NETより算定)

6. おわりに

本研究では、兵庫県南部地震の木造低層建物被害を航空写真から調査し、建物個別の損傷度と周辺全壊率、死亡率との関係を明らかにし、木造建物の1棟当たりの死亡率関数(棟死亡率関数)を構成した。以下に成果をまとめる。

- (1) 木造建物内における死者発生が、建物個別の損傷度および周辺の全壊率と深い関係にあることを示した。損傷度および全壊率が高くなることで、建物内から救助される時間をより要し、死亡率が高まるためと推察される。
- (2) 建物損傷尺度を細分化することで死者数推定精度が改善された。
- (3) 地震発生時の在宅率(NHK国民生活時間調査結果)を明示的に用いることにより、死亡率評価精度が向上した。
- (4) 周辺全壊率を考慮することにより兵庫県南部地震のような甚大被害のみならず、人的被害が比較的軽微な地震についても既往式より高い精度で推定可能である。

本提案の棟死亡率関数は、既往地震のみならず将来的に想定された地震に対しても地域の耐震診断値データ²²⁾、建物損傷度関数⁹⁾や地震調査研究推進本部地震調査委員会(推本)並びに自治体が独自に公開している地震ハザードマップ等を併用し、地震動を既知情報として死者推定に用いることができる。既往式に比べ推定精度の向上が見込まれるのみならず、住民に対して個々のケースごとに耐震補強効果を死亡危険度を指標として提供することも可能になるなど個人の防災意識啓発を含め防災的応用例は広い。具体的な利用法は別報で報告する予定である。

本研究を進めるにあたり、建物・行政区界等GISデジタル記録、人的被害記録、推定地震動等に関する統計データを使用させて頂きまし

た。人的被害に関しては、横浜国立大学の西村明儒氏、京都大学の林康裕氏には、兵庫県南部地震の推定最大地動速度を提供して頂きました。防災科学技術研究所には、K-NETの強震記録を利用させて頂きました。また、本論文の作成にあたっては、米テキサス大学の青木則明氏には、法医学の見地から貴重なご助言賜りました。また、航空写真の読み取りには北海道大学の名知典之・三輪田吾郎両氏の協力を得、同高井伸雄氏には有益な意見を多く頂戴しました。記して深く御礼申し上げます。

注) 筆者らによる被害率関数も全壊をD4とD5以上の2分類するに留まっている。さらに高分解関数を別稿で準備中である。

参考文献

- 1) 建設省住宅局監修：増強版 木造住宅の耐震精密診断と補強方法，(財)日本建築防災協会，1-94，1995。
- 2) Kawasumi H：Intensity and Magnitude of shallow Earthquakes,Bereau Central Seism. Intern. Ser. A, Trav. Sci.,19,99-114,1954。
- 3) 東京都防災会議，1978。
- 4) 太田裕・後藤典俊・大橋ひとみ：地震時の死者発生数予測に関する実験式の一構成，地震2, 36, 463-466,1983。
- 5) A.W.Coburn, R.J.S.Spence & A.Pomonis：Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse, 10th World Conference on Earthquake Engineering,10,5989-5994,1992。
- 6) 内閣府防災担当ホームページ <http://www.bousai.go.jp/manual/manual.html>
- 7) 福島誠志・河田恵昭・西村明儒・林春男・田中聡：EDAを用いた人的被害の推定法の開発,地域安全学会,52-55,1997。
- 8) 静岡県防災資料,東海地震第3次地震被害想定結果 <http://www.e-quake.pref.shizuoka.jp/data/pref/higai/houkoku/index.html>
- 9) 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,582,31-38, 2004。
- 10) 小川直樹・山崎文雄：航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読,地域安全学会論文集,2,119-128,2000。
- 11) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書 第I編 中間報告書以降の調査分析結果,1-303,1996。
- 12) 岡田成幸・高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造系論文集,524,65-72,1999。
- 13) 生田英輔・宮野道雄・糸魚川栄一・西村明儒・田中裕・梶原浩一・熊谷良雄：統合データベースに基づく兵庫県南部地震による人的被害の発生機構に関する分析,日本建築学会計画系論文集,590,117-123,2005。
- 14) 林康裕・宮腰淳一・田村和夫・川瀬博：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定,日本建築学会構造系論文集,494,59-66, 1997。
- 15) 林康裕・宮腰淳一・田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察,日本建築学会構造系論文集,502,61-68, 1997。
- 16) 長谷川浩一・翠川三郎・松岡昌志：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測—その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例—,日本建築学会構造系論文集,505,53-59,1998。
- 17) 総務省統計局：平成5年住宅統計調査報告,第3巻,都道府県編
- 18) 総務省統計局：平成5年住宅統計調査報告,第1巻,全国編
- 19) NHK放送文化研究所：データブック国民生活時間調査2000(県別),2001。
- 20) 国土交通省国土計画局ホームページ <http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/kokudokeikaku.html> (2005年10月現在)
- 21) 日本建築学会：2004年新潟県中越地震災害調査報告,2006(印刷中)
- 22) 高井伸雄・岡田成幸：木造損傷度関数作成のための精密耐震診断値の地域特性及び年代特性の把握,日本建築学会北海道支部研究報告集,76,37-40, 2003。

(2005年10月10日原稿受理, 2006年3月23日採用決定)