

# 確率モデルによる被震下室内負傷発生事象の考察と 負傷危険度簡易評価指標の提案

## PROBABILISTIC SEISMIC CASUALTY MODELS AND SIMPLIFIED METHOD TO EVALUATE SEISMIC CASUALTY RISK

名知典之\*, 岡田成幸\*\*  
Noriyuki NACHI and Shigeyuki OKADA

This paper discusses seismic casualty from the point of view of a probability model based on binomial distribution compared with the actual data of hearing investigation into the 2003 Tokachi-oki earthquake and the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake. The parameters of the model are the decrease rate of floor space by furniture falling and the number of people in that space. It is possible to estimate the occurrence probability of casualty using the model. Moreover, we propose a simplified method of evaluation of a casualty potential by furniture density as an application of the model. The furniture density is the number of furniture per the floor space. This index is extremely easy so that anyone can calculate the casualty risk of their bedroom, living room, and even their house.

**Keywords:** *probability of seismic casualty, decrease rate of floor space by furniture falling, binomial distribution, casualty potential, furniture density*  
負傷確率, 家具転倒落下領域率, 二項分布, 被災ポテンシャル, 家具密度

### 1. 本研究の目的

地震で室内が散乱することに伴う居住者の負傷発生事象を説明する確率モデルを構築し、それに基づき室内危険度定量化のための診断指標の提案と負傷軽減を実現するための室内安全化規準を明らかにすることを、本研究の目的とする。

### 2. 負傷発生問題に関する立脚点

地震による死者並びに負傷者の発生を抑制させることの是非について異論は無いであろう。この問題に着手するに当たり筆者らは、人的被害を死者・負傷者という状態区分ではなく、対策別に区分する立場を主張する。建物被害に伴う人的被害のうち建物倒壊が直接因の場合、建物の耐震性向上等の物理的空間保存対策が死者および負傷者軽減対策に直結する。しかし、建物が倒壊せずとも室内散乱やライフライン機能停止等の住環境劣化による死者（関連死）や負傷者の軽減には上記とは別の質的空間保存対策を考える必要がある。有効な人的被害軽減対策は、死者や負傷者を一括りで扱うのではなく、因果を含めた対策ごとに対象を絞り込んだ統計的扱いそして評価する姿勢が重要と考える。

しかしながら、現状として負傷に関する対策・取り組みは決して十分とはいえない。平成 17 年度国土交通白書<sup>1)</sup>では、安全・安心の確保に向けた地震災害への対策として、住家耐震化（すなわち物理的空間保存対策）の推進を謳っており、10 年後の目標を耐震化率 9 割に設定している。目標値が達成されれば建物損壊による死者および負傷者は大幅に減少するであろう。しかしながら、当政策から室内被害による負傷回避は期待できず、負傷者軽減が新たな課題と

なることは必至である。加えて、少子高齢化の進行と世帯構成の変化が課題を拡大させることも懸念される。すなわち、将来的な独居世帯や高齢者のみの世帯増に加え少子高齢化が災害弱者の増加と災害時救助要員の減少をオーバーラップさせ、負傷発生は被災直後のみならず復旧・復興過程における世帯や地域の負担を過重にする大きなファクターとなろう。このような状況に鑑みるならば、対策の基本理念として建物倒壊に伴う死者・負傷者軽減に止まることなく、建物が倒壊せずとも発生する室内散乱による負傷問題は別途考慮に入れるべきであり、負傷軽減のための自助能力向上を目標とした住環境整備（すなわち質的空間保存対策）の研究と推進が不可欠といえよう。以上より、本研究は被災下における室内散乱に伴う負傷者発生事象を扱う。

### 3. 既往研究との位置づけ

個々の世帯における対策の端緒は現状認識である。すなわち、死を防ぐために建物耐震性診断が用意されていると同様に、負傷を防ぐための室内危険性についての自身の住環境を把握するための診断法が準備される必要がある。

その方途として耐震性に関しては、精密診断から簡易診断まで用途に応じた耐震診断法が確立されており<sup>2)</sup>、耐震診断値という具体的な数値によって建物の倒壊危険性が評価可能となっている。また、耐震性に関連した既往研究としては建物損傷度を用いた建物 1 棟当りの死亡率の推定<sup>3)</sup>も試みられている。一方、室内被害に関しては、耐震診断法のような具体的診断方法は確立されていない。既往研究の大半が家具転倒に代表される家具被害単体の調査・実験に終始し

\* 北海道大学大学院工学研究科 修士（工学）

\*\* 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.  
Prof., Grad. School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

ているのに対し、居住者の負傷危険性にまで踏み込んだ研究としては、マイクロゾーニングによる居住空間の危険度評価を試みた岡田（1993）<sup>4)</sup> やオフィスビルにおける負傷発生予測を対象とした翠川・佐伯（1995）<sup>5)</sup> を挙げることができる。両者とも地震動入力に対する室内被害量と人間行動能力との関係から負傷発生事象をモデル化し負傷危険性を評価するものであり、翠川らは家具転倒による室内閉塞率から負傷率を確定的に定量化しているのに対し、岡田は単位空間における家具被害の有無と居住者の存在を確率的に扱い、そこでの居住者1人の受傷可能性を負傷程度も含めて評価している。また、室内危険度を視覚的に認知するツールとしては、岡田・他（2004）による室内危険度診断システム<sup>6)</sup> や同システムの簡易版<sup>7)</sup> がWeb上で操作可能な状態で公開されており、今後の普及が期待される。このように、室内被害がもたらす負傷危険度に関してはシミュレーションシステムが整備されつつある。しかしながら、そのベースとなる人的被害の因果モデルについて、実被害データおよび理論的裏付けを伴った負傷発生事象の議論は殆どされていない。また、ユーザ側の視点として、当該世帯が有する潜在的な負傷危険性（被災ポテンシャル）を具体的に把握する方法も確立されていない。その主たる原因は、被災地において被害の定量化に耐えうる精度での詳細な実態データの入手困難性にあるといえる。

筆者らは、2003年十勝沖地震（以下、十勝沖地震と略称）と2004年新潟県中越地震（以下、中越地震と略称）の主要被災地において、室内被害と負傷の詳細な実態調査を行ってきた<sup>8) 9)</sup>。本稿では、その調査資料を基として、被震下住居内における負傷発生事象を考察するとともに、個々の住家あるいは室内に有する負傷危険度を定量評価する簡便な指標（簡易耐震診断に相当）の提案を試みる。

#### 4. 被震下住居内における負傷発生要因

既往の被害地震における室内被害調査や筆者らの実態調査<sup>8) 9)</sup> から、被震下住居内での負傷発生には室内変容と居住者の行為の密接な関係が見取れる。そこで、まず被震下で選択される行為について、その発生頻度を十勝沖地震<sup>8)</sup>、中越地震<sup>9)</sup> および東京大学社会情報研究所による1993年釧路沖地震<sup>10)</sup>、1995年兵庫県南部地震<sup>11)</sup>、2003年7月宮城県北部の地震<sup>12)</sup> について見てみる（表1）。被震下での行動の類型化は近江・他（1981）<sup>13)</sup> による1978年宮城県沖地震での調査研究に詳しく、本稿もそれを参照した。大別すると静止と行動に別れ、行動は更に作業と移動に細分できる。同表より、被震下で選択される行為は地震により異なり、兵庫県南部地震ではじっとしている等の状態保持が67%、宮城県北部の地震では揺れに翻弄され行動不能が46%、十勝沖地震、中越地震でも静止がそれぞれ72%、62%となっている。釧路沖地震は初期微動継続時間が30秒以上続いたため他の地震に比較し行動が多いもの<sup>14)</sup>、多くの地震では揺れ最中は殆どの居住者が静止あるいは動けないことが分かる。

次に、室内変容に関連して直接的な負傷要因について見てみる。ここでは、負傷要因を物的要因と人的要因に分類し、更に物的要因を構造部材、建具、家具、散乱物（特定不明）と調理物に細分した（表2）。室内での負傷に特定した調査として1994年北海道東方沖地震<sup>15)</sup>、1995年兵庫県南部地震<sup>16)</sup>、2000年鳥取県西部地震<sup>17)</sup> と十勝沖地震<sup>8)</sup>、中越地震<sup>9)</sup> における傾向を見ると、調査方法により分類精度は異なるものの、家具による負傷割合が高く、兵庫県南部地

震で46%、鳥取県西部地震で33%、中越地震で29%と負傷の約3割は家具の転倒落下が占めている（表2）。また、散乱物による負傷も高い割合を示しているが、こちらは揺れの終息後にも発生する可能性があり、それが加わっていることも考えられる。また、総務省消防庁が岩手県と宮城県において実施した2003年5月宮城県沖の地震による負傷者調査にも、家具の転倒落下による負傷が重傷の25%を占めていることが示されており<sup>18)</sup>、揺れている最中の家具転倒落下の危険性が一般性をもって際立っていると言える（図1）。

表1 揺れている最中の行動割合 [%]

主体の行為	詳細	釧路沖地震	兵庫県南部地震	宮城県北部の地震	十勝沖地震	新潟県中越地震
静止	状態保持	24.1	67.0	16.3		
	身体保持	6.6	12.7	14.8	71.7	62.0
	行動不能	17.5	30.0	46.1		
行動・作業	火気始末等		3.8	30.9		11.3
	弱者保護等	16.7	23.3	15.5	3.3	4.2
	家具等支持	23.6	2.5	9.5	11.4	8.5
	避難路確保	32.0	3.7	28.9		
行動・移動	避難移動	28.4	11.8	18.3	5.4	5.6
	目的移動		4.9		4.3	15.5
その他		23.9	19.9	35.5	3.8	5.6
	調査母数	873	2195	550	186	71
	調査方法	アンケート	アンケート	アンケート	ヒアリング	ヒアリング

表2 負傷要因別割合 [%]

負傷要因	北海道東方沖地震	兵庫県南部地震	鳥取県西部地震	十勝沖地震	新潟県中越地震	
物的要因	構造部材		3.1			
	建具			11.1		
	設備	4.0				
	家具	24.0	46.2	33.3	18.2	29.0
	散乱物	60.0	29.2	11.1	50.0	43.0
	調理物					14.0
人的要因	本人転倒	11.0		44.4	18.2	14.0
その他・不明		1.0	21.5		13.6	
調査母数(負傷)	3452(271)	1032(130)	252(9)	186(22)	71(7)	
	調査方法	アンケート	ヒアリング	アンケート	ヒアリング	ヒアリング

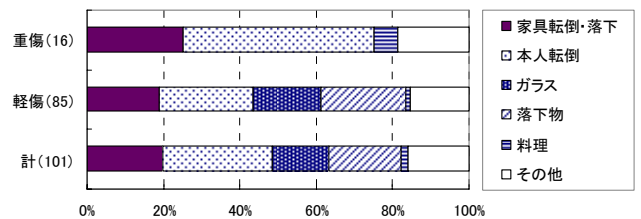


図1 2003年5月宮城県沖の地震における岩手県および宮城県の負傷者の負傷程度別負傷原因（括弧内は負傷者数）

（文献18、表1.2.10および表1.2.11より作成）

#### 5. 負傷危険ポテンシャル定量化指標

以上に見られるとおり、被震下における居住者の受傷の一般的条件は、居住者が静止状態にある時の家具の転倒落下である。実際に負傷するか否かは家具の転倒落下の有無（すなわち、素因としての室内空間の持つ危険ポテンシャルと誘因としての外力・揺れの大きさ一との確率積）に居住者の条件付き任意性としての避難行動の適否が関わる。対策の観点から議論するならば、外力を制御する免震・制振装置を除けば、上記で事前対策が可能なのは素因としての危険ポテンシャルである。すなわち、静止状態下における家具転倒落下等の室内変容による負傷発生確率を評価し対策に生かすことが負傷回避事前対策の鍵となる。この空間が持つ危険ポテンシャルは以下のように定義されよう。ある閉空間に1人の居住者が静止していたとし、そこに家具が転倒または落下した時に負傷すると仮定するならば、閉空間の床面積に対する家具転倒落下面積割合は、居住者の負傷危険面積割合に一致する。これはその閉空間が持つ居住者への負

傷危険度を表しているの、これを閉空間が持つ負傷危険ポテンシャルと称することにし、厳密に以下に定義する。

(1) 家具単体に関する指標

家具を図2のように直方体でモデル化し、その寸法を幅  $W$  [m]、奥行き  $D$  [m]、高さ  $H$  [m] としたとき、家具の底面面積を居住者が立ち入れないという意味で家具占有面積  $Sf$  [m<sup>2</sup>] とし、以下の式で与える。

$$Sf = P \cdot W \cdot D \quad (1)$$

ここで、 $P$  は床面直置き家具 ( $P=1$ ) か否 ( $P=0$ ) かを示すブール関数であり、図2右のような場合は上段・下段家具の大小に関わらず便宜的に下段家具の底面面積を家具占有面積とする。ただし、ベッドやソファ等に関しては地震時に居住者がその上に存在する可能性があるため家具占有面積は考慮せず床上と同等と見なす。

家具の転倒に関しては、その範囲を家具転倒面積  $St$  [m<sup>2</sup>] とし、以下の式で与える (図2左)。

$$St = P \cdot T \cdot W \cdot H \quad (2)$$

ここで、 $T$  は家具の転倒確率 ( $0 \leq T \leq 1.0$ ) であり、揺れの大きさ、家具形状 (アスペクト比) や固定の有無等に依存する。ポテンシャルを求めるときは  $T=1.0$  (ただし、食卓や調理台等のアスペクト比が1に近い置き家具<sup>19)</sup> は転倒しないものとし  $T=0$ ) とする。

家具の落下に関しては、その範囲を家具落下面積  $Sr$  [m<sup>2</sup>] とし、以下の式で与える (図2右)。

$$Sr = (1-P) \cdot T \cdot \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

ここに、

$$r = \sqrt{(W/2)^2 + (H/2)^2}$$

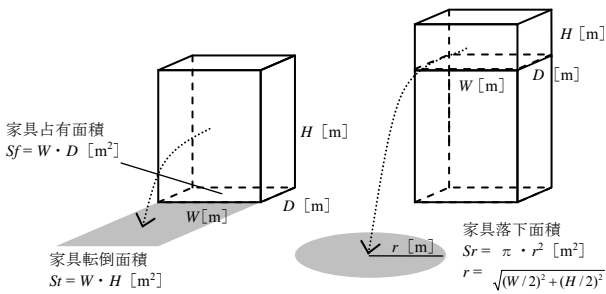


図2 家具寸法と家具占有、家具転倒、および家具落下面積

(2) 閉空間に関する指標

床面積  $S$  [m<sup>2</sup>] の閉空間に  $m$  個の家具が存在するとき、居住者が存在可能な領域を有効床面積  $Se$  [m<sup>2</sup>] とし、以下の式で定義する。

$$Se = S - \sum_{i=1}^m Sf_i \quad (4)$$

上記平面 (有効床面積  $Se$ ) での家具の転倒落下による床面積の被災割合を家具転倒落下領域率  $Rtr$  とし、以下の式で与える。

$$Rtr = \frac{\sum_{i=1}^m (St_i + Sr_i)}{Se} \quad (5)$$

すなわち、家具転倒落下領域率とは、居住者が存在可能な床面積 (有効床面積) の家具転倒落下による減少率を示したものである。ただし、転倒落下による家具の重なりは発生しないと仮定する。

6. 負傷発生の理論確率モデル

前章の指標に従い、家具の転倒落下と負傷発生の関係を一般化して議論するためのモデル構築を試みる。なお、ここでの負傷発生とは家具転倒落下領域に居住者が存在していた場合を指す。

有効床面積  $Se$  [m<sup>2</sup>] を1人の居住者が占める面積を単位に  $N$  個の微小平面に分割すると、家具転倒落下領域の分割数は  $N \times Rtr$  個と表される。居住者1人が平面内でランダムに分布していると仮定した場合、負傷が発生する確率  $p$  は  $N$  個の微小平面から家具転倒落下領域  $N \times Rtr$  個の微小平面を1つ選ぶ確率と等しく以下の式で表される。

$$p = {}_{N \times Rtr} C_1 / {}_N C_1 = Rtr \quad (6)$$

ここに、

$${}_n C_k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

すなわち、居住者1人の負傷確率は家具転倒落下領域率  $Rtr$  に等しい。更に、その平面に  $n$  人が存在している場合、狭小空間に多人数が居留する場合を除き、各人における負傷発生確率  $p$  はほぼ独立とみなせるので、 $x$  人が負傷する確率  $P[X=x]$  は家具転倒落下領域率  $Rtr$  を負傷確率とした以下の二項分布で近似できる。

$$P[X=x] = {}_n C_x Rtr^x (1-Rtr)^{n-x} \quad x=0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

以上の関係より、ある閉空間における平面内人数  $n$  (在室、あるいは在宅人数) とその平面での家具転倒落下領域率  $Rtr$  が求まれば、負傷人数  $x$  の発生確率  $P$  を求めることができる。一例として、式(7)において  $n=4$  のとき、 $Rtr$  を0.1~0.9まで0.1刻みで変化させた場合の負傷発生確率  $P$  の変化を図3に示す。

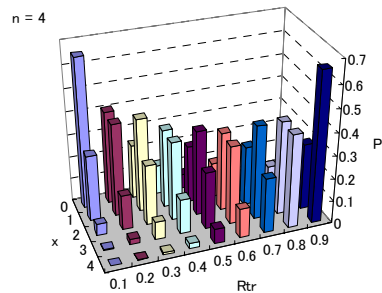


図3 平面内人数4人 ( $n=4$ ) の場合の家具転倒落下領域率 ( $Rtr$ )、負傷者数 ( $x$ ) とその発生確率 ( $P[X=x]$ ) の関係

一方、居住者にとっては当該世帯での負傷発生の有無を把握することが要請事項として具体的である。すなわち、負傷者が1人以上となる確率が0.5を超える ( $P[X \geq 1] \geq 0.5$ ) とき、その境界値となる家具転倒落下領域率  $Rtr$  と平面内人数  $n$  との関係を図示すると図4 ( $n=1 \sim 7$  の場合) となる。家具転倒落下領域率が図中の折れ線よりも高い範囲では、負傷が発生しない確率よりも発生する確率の方が高くなることを示している。図より、家具転倒落下領域率が低

い場合であっても、その平面内に存在する人数の増加に伴い負傷者発生の可能性が高くなることを見て取れ、平面内に3人いた場合、家具転倒落下領域率  $Rtr$  が 0.2 程度でも負傷者が発生する確率は約 50%となることから分かる。

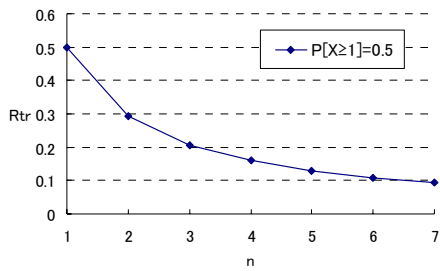


図4 平面内人数 (n) に対する 1 人以上負傷する確率が 0.5 ( $P[X \geq 1] = 0.5$ ) となる家具転倒落下領域率 ( $Rtr$ )

### 7. 実態との検証

十勝沖地震および中越地震における室内被害実態調査で得られた資料を基に前章の理論確率モデルの妥当性を検証する。当調査は主要被災地の被災世帯を対象に室内・家具の実測を行い、居住者の行動および室内変容を詳細に聞き取った調査である。なお、調査の詳細については文献 8), 9) を参照されたい。

#### (1) 解析資料

はじめに、4 章で示した負傷危険ポテンシャルの定義に従い、地震時に静止し家具転倒落下による負傷を前提条件とし、調査資料を整理する。負傷発生には居室用途や建物平面計画等の地域性も影響しようが、負傷発生危険ポテンシャルは式(7)より分かるとおり平面内居住人数と家具転倒落下領域率のみが説明変数となるので、上記の地域性は無視できる。解析資料の概要を表3に示す。これは、先の前提条件を基に十勝沖地震と中越地震において調査対象者が地震発生時に居た場所を居室単位で集計し、在室人数および負傷者数別に分類したものである。表3上段は地震時に行動した者を除き、終始静止していた人数を在室人数として集計している。揺れの最中に静止という行為を選択し、家具の転倒落下により負傷した者は3名と少なかった。そこで、解析対象を増やすべく、居住者全員が地震発生から揺れが終息するまでに動かなかったと仮定し、その位置(地震発生直前の所在位置)に家具の転倒落下が重なった場合、その居住者を負傷者とみなして資料を再整理したのが表3下段である。前提条件より、表3上段と下段は同義とみなせるので、以下、対象人数のより多い表3下段の資料を基に理論確率モデルとの比較を行う。

表3 解析資料 (家具転倒落下による負傷者数 (x) 別居室数)

揺れの最中に在室者が静止していた居室数[室]					
在室人数:n	負傷者:x=0	負傷者:x=1	負傷者:x=2	負傷者:x=3	計
1人	74	2			76
2人	9	1	0		10
3人	5	0	0	0	5
計	88	3	0	0	91

地震発生直前の所在位置で在室者が静止したと仮定した場合の居室数[室]							
在室人数:n	負傷者:x=0	負傷者:x=1	負傷者:x=2	負傷者:x=3	負傷者:x=4	負傷者:x=5	計
1人	104	11					115
2人	34	5	1				40
3人	7	0	0	1			8
4人	4	0	0	0	0		4
5人	1	0	0	0	0	0	1
計	150	16	1	1	0	0	168

なお、実態調査で計測対象とした家具は本棚、仏壇、テレビ、ステレオ、鏡台、靴箱、タンス、食器棚、棚、洗濯機、冷蔵庫、ストーブ、机、テーブル、調理台等の耐久消費財である。

#### (2) 理論確率モデルと実態との比較

表3下段の資料について、家具転倒落下領域率別に実測度数と式(7)による二項分布を用いた理論度数との関係を表4にまとめる。この表は理論確率モデルに従い、在室人数と家具転倒落下領域率を階級幅0.1で分類したものであり、理論度数とは式(7)のnに在室人数、xに負傷者数、 $Rtr$ には家具転倒落下領域率の階級平均値を代入して二項確率を求め、それに階級度数(それぞれの階級に属する実測居室数)を乗じて負傷者数別の居室数として求められる。階級度数が2以下の場合を除き、実測度数と理論度数は概ね一致している。なお、表3下段の在室人数が4人と5人の居室は家具転倒落下領域率が0であったため掲載を省略した。また、同表より階級ごとに在室総人数と負傷総数との比より負傷率を求め、実測値(相対度数)と理論値(二項確率)との関係(階級度数が2以下の場合を除く)でグラフ化したものを図5に示す。図より二項分布を用いた理論確率モデルは実態とよく整合していることが見て取れる。なお表3上段の場合においても、ほぼ同様の傾向が得られることを確認している。

表4 在室人数 (n)、家具転倒落下領域率 ( $Rtr$ ) と負傷者数 (x) 別の実測度数と理論度数 [室]

在室人数:n=1						
家具転倒落下領域率:Rtr	階級	階級平均	階級	階級	階級	階級
階級	階級平均	階級平均	階級	階級	階級	階級
0.0-0.1	0.01	0.01	76	76	75.0	0
0.1-0.2	0.15	0.15	18	14	15.3	4
0.2-0.3	0.26	0.26	8	6	5.9	2
0.3-0.4	0.35	0.35	7	5	4.6	2
0.4-0.5	0.44	0.44	3	2	1.7	1
0.5-0.6	0.53	0.53	1	1	0.5	0
0.6-0.7	0.60	0.60	1	0	0.4	1
0.7-0.8			0			
0.8-0.9	0.85	0.85	1	0	0.1	1

在室人数:n=2							
家具転倒落下領域率:Rtr	階級	階級平均	階級	階級	階級	階級	階級
階級	階級平均	階級平均	階級	階級	階級	階級	階級
0.0-0.1	0.01	0.01	26	25	25.3	1	0.7
0.1-0.2	0.16	0.16	7	4	5.0	3	1.9
0.2-0.3	0.26	0.26	4	2	2.2	1	1.5
0.3-0.4	0.37	0.37	2	2	0.8	0	0.9
0.4-0.5	0.40	0.40	1	1	0.4	0	0.5

在室人数:n=3								
家具転倒落下領域率:Rtr	階級	階級平均	階級	階級	階級	階級	階級	階級
階級	階級平均	階級平均	階級	階級	階級	階級	階級	階級
0.0-0.1	0.03	0.03	6	6	5.5	0	0.4	0.0
0.1-0.2	0.20	0.20	1	1	0.5	0	0.4	0.1
0.2-0.3	0.24	0.24	1	0	0.4	0	0.4	0.1

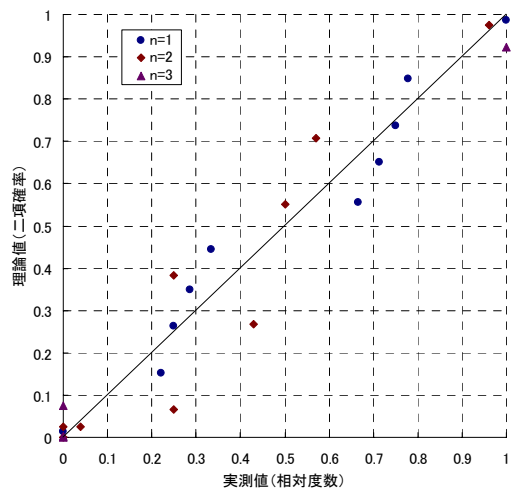


図5 実測値(相対度数)と理論値(二項確率)の比較



以上より、ある居室における負傷者発生確率は、在室人数と家具転倒落下領域率から二項分布を用いて説明できることが示された。

### 8. 負傷危険ポテンシャルと簡易負傷危険度評価手法

負傷要因となる家具の転倒条件は、建物への入力に対する床応答の最大速度・最大加速度と家具形状、および家具と床との摩擦係数によって確率的に推定できる<sup>20)</sup>。しかしながら、これらのパラメータの決定には当該地域で想定される地震の不確定性や建物構造・階数による床応答の違い、さらに家具が積層された場合の挙動解析等々の考察が要求され、容易ではない。個人レベルの対策においては、専門知識を要しないより簡便な危険度定量化手法の開発が望まれる。本章において、ここまで議論してきた負傷発生危険ポテンシャルを応用した診断法を提案する。

4章で既述のとおり負傷発生危険ポテンシャルは、室内空間が持つ潜在的負傷発生確率を意味する。すなわち、空間内にある全ての家具が転倒したとすると(家具転倒落下領域率算定式(2)および式(3)において転倒確率  $T = 1.0$  とする)の負傷発生確率に一致する。空間の危険度認知という点に斟酌するならば、負傷危険ポテンシャルは防災の本質的思想である最悪状況を想定した対策(フォールトトレランス)に通じる概念である。なお、入力を考慮する場合は、家具転倒落下領域率算定式(2)および式(3)において転倒確率  $T$  を考慮すればよい。 $T$  については、入力震度と転倒確率の関係が文献(20)21)等に与えられている。

#### (1) 負傷発生危険ポテンシャルの簡易指標

算出過程に家具の寸法計測等、煩雑な作業を要する家具転倒落下領域率に代わり、一般居住者が容易に算出可能な負傷危険ポテンシャルの簡易指標として家具密度  $Fd$  [個/m<sup>2</sup>] を提案する。家具密度とは床面積当りの家具数であり、床面積  $S$  [m<sup>2</sup>] の閉空間に  $m$  個の家具が存在するとき、次式で表される。

$$Fd = \frac{m}{S} \quad (8)$$

ここでの家具とは7章に示した耐久消費財(ベッド、ソファ等を除く)である。式(8)より、例えば建物全体の家具密度は延べ床面積と全所有家具数から、部屋の場合は部屋の床面積と室内の所有家具数から容易に算出できる。図6は十勝沖地震と中越地震の調査住家における家具が存在する部屋(風呂、便所、押入れ等の収納は除く)全てについて、潜在的家具転倒落下領域率  $Rtr_{room-potential}$  と部屋家具密度  $Fd_{room}$  の関係を示したものである。ここで、潜在的家具転倒落下領域率とは転倒・落下の可能性のある家具(食卓、調理台等アスペクト比が1に近い置き家具<sup>19)</sup>を除く耐久消費財)が全て転倒・落下した場合の領域率を表す。図より、分布には幅があるものの家具密度と潜在的家具転倒落下領域率にはある程度の相関性(相関係数0.55)が認められ、以下の式が得られる。

$$Rtr_{room-potential} \approx 0.890 \cdot Fd_{room} \quad (9)$$

したがって、家具密度  $fd$  の部屋に  $n$  人が存在するとき、負傷者数が  $x$  人となる確率は式(9)を式(7)に代入し、対象とする家具全てが転倒落下した場合の式(7)の近似式として次式で表せ、家具密度および在室人数から負傷発生確率を算定することができる。

$$P_{room-potential}[X=x] \approx {}_n C_x (0.890 \cdot Fd_{room})^x (1 - 0.890 \cdot Fd_{room})^{n-x} \quad (10)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, n$$

式(10)を用い、図7に在室人数  $n = 1 \sim 7$  における部屋家具密度と1人以上負傷者が発生する確率の関係を示す。これは、部屋での家具密度を算出し、その空間における在室者数との交点から、その空間での負傷発生確率を把握する早見グラフとして利用できる。また、負傷発生確率が0.5を超える空間は危険空間であると判断できることから、図7において負傷確率が0.5となる家具密度を負傷顕在化家具密度と称し表5に示すとともに、その家具密度を縦軸にとり、在室人数を横軸とした場合の関係を図8に示す。同図には調査世帯における在室人数別の(地震時に動かなかったと仮定した場合の)負傷の有無をプロットしてある。図より、負傷発生は大凡負傷顕在化家具密度の曲線付近かそれ以上の範囲に見られ、家具密度を用いることでもある程度の負傷危険度評価が可能であると言える。

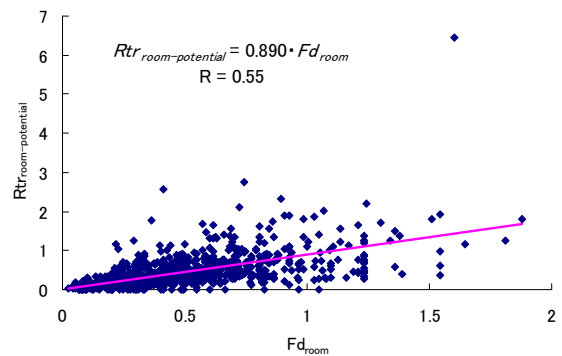


図6 部屋家具密度 ( $Fd_{room}$ ) と潜在的家具転倒落下領域率 ( $Rtr_{room-potential}$ ) の関係

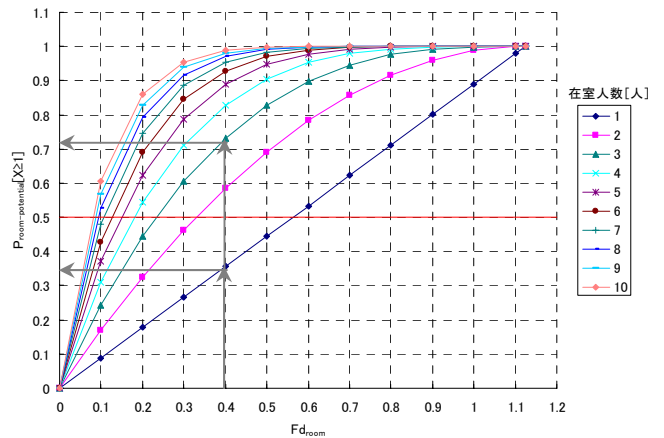


図7 在室人数 ( $n$ ) 別の部屋家具密度 ( $Fd_{room}$ ) と1人以上負傷者が発生する確率 ( $P_{room-potential}[X \geq 1]$ )

表5 在室人数 ( $n$ ) と負傷顕在化家具密度 ( $Fd_{room}$ )

在室人数: $n$	1	2	3	4	5	6	7
負傷顕在化家具密度: $Fd_{room}$	0.56	0.33	0.23	0.18	0.15	0.12	0.11

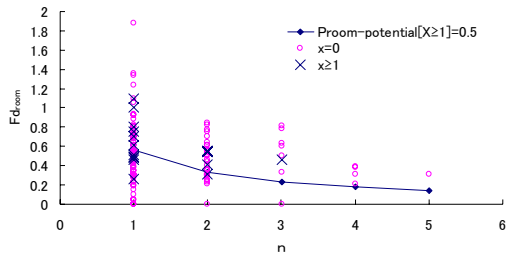


図8 在室人数(n)別の負傷頭在化家具密度( $Fd_{room}$ )と負傷者(x)の有無

(2) 評価事例

実態調査における事例を潜在的危険性の観点から評価する。図9は中越地震における調査事例(在宅3名)である。家具寸法、家具が直置きか否かをP(直置)で、転倒しない置き家具の区別をT(転倒)で与え、式(5)から諸室の負傷危険度(家具転倒落下領域率)を評価すると表6(同表中の諸室ポテンシャル欄Rtr)のようになる。同表には家具密度を用いた簡便法による結果(同欄Rtr(0.890・Fd))も併記してある。寸法計測から求めた家具転倒落下領域率に対して簡便法による評価は若干危険側での過大評価となっているものの概ね一致していることが確認できる。また、玄関のように室面積に対して単一家具が極端に大きい場合は過小評価となることも推察される。

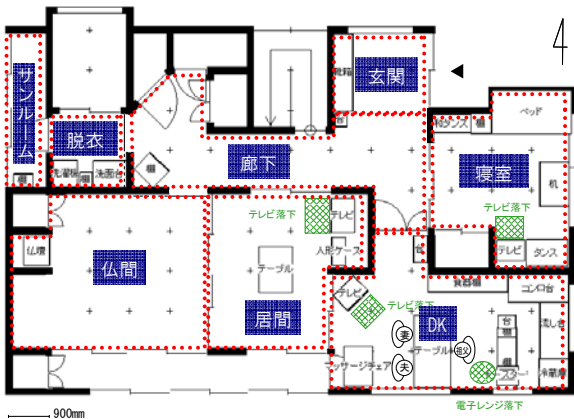


図9 中越地震での調査事例(網掛け部は実際の家具転倒落下領域)

表6 諸室の設置家具および家具転倒落下領域率(Rtr)

居間	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]	
	テーブル	1040	750	330	1	0	0.78	0.00	0.00	
	テレビ台	640	440	400	1	1	0.28	0.26	0.00	
	テレビ	760	520	580	0	1	0.00	0.00	0.72	
	人形ケース	630	290	550	1	1	0.18	0.35	0.00	
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	11.6	10.3	0.13	簡便法	m[個]	4	0.35	0.31	
	仏間	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		仏壇	660	600	1700	1	1	0.40	1.12	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	15.7	15.3	0.07	簡便法	1	0.06		0.06	
	DK	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		電話台	600	300	800	1	1	0.18	0.48	0.00
		テレビ台	650	480	450	1	1	0.31	0.29	0.00
		テレビ	640	460	500	0	1	0.00	0.00	0.52
		マッサージチェア	650	900	400	1	0	0.59	0.00	0.00
		テーブル	1630	840	700	1	0	1.37	0.00	0.00
		食器棚	1800	400	1800	1	1	0.72	3.24	0.00
		棚	1200	450	850	1	1	0.54	1.02	0.00
		棚	220	430	850	1	0	0.09	0.00	0.00
		ウゴン	300	400	700	1	1	0.12	0.21	0.00
		電子レンジ	500	420	330	0	1	0.00	0.00	0.28
		冷蔵庫	650	650	1800	1	1	0.42	1.17	0.00
		流し台	1610	640	860	1	0	1.03	0.00	0.00
		コンロ台	1350	640	860	1	0	0.86	0.00	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	15.9	9.7	0.74	簡便法	13	0.82		0.73	
	寝室(祖父)	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		和ダンス	880	420	1630	1	1	0.37	1.43	0.00
		棚	450	450	1000	1	1	0.20	0.45	0.00
		机	1000	650	730	1	0	0.65	0.00	0.00
		洋ダンス	940	600	1800	1	1	0.56	1.69	0.00
		テレビ台	620	450	400	1	1	0.28	0.25	0.00
		テレビ	640	460	500	0	1	0.00	0.00	0.52
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	11.4	9.3	0.47	簡便法	6	0.53		0.47	
	脱衣室	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		洗面台	750	600	1900	1	0	0.45	0.00	0.00
		棚	270	310	1800	1	0	0.08	0.00	0.00
		洗濯機	540	600	1850	1	1	0.32	1.00	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	3.7	2.9	0.35	簡便法	3	0.81		0.72	
	玄関	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		靴箱	1750	450	970	1	1	0.79	1.70	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	3.7	2.9	0.58	簡便法	1	0.27		0.24	
	廊下	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		棚	750	400	650	1	1	0.30	0.49	0.00
		電話台	280	310	800	1	1	0.09	0.22	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	10.6	10.2	0.07	簡便法	2	0.19		0.17	
	サンルーム	家具	W[mm]	D[mm]	H[mm]	P(直置)	T(転倒)	Sf[m <sup>2</sup> ]	St[m <sup>2</sup> ]	Sr[m <sup>2</sup> ]
		棚	440	280	870	1	1	0.12	0.38	0.00
	部屋	Sf[m <sup>2</sup> ]	Sel[m <sup>2</sup> ]	Rtr		Fd[個/m <sup>2</sup> ]	Rtr(0.890・Fd)			
	ポテンシャル	3.3	3.2	0.12	簡便法	1	0.30		0.27	

表7 諸室の在室人数別負傷発生確率と負傷頭在化確率

(括弧内は簡便法による確率)

居間				仏間				脱衣室				玄関			
在室人数	負傷者	発生確率	頭在化確率	在室人数	負傷者	発生確率	頭在化確率	在室人数	負傷者	発生確率	頭在化確率	在室人数	負傷者	発生確率	頭在化確率
1	0	0.87(0.69)	0.87(0.69)	1	0	0.93(0.94)	0.93(0.94)	1	0	0.65(0.28)	0.65(0.28)	1	0	0.42(0.76)	0.42(0.76)
	1	0.13(0.31)	<b>0.13(0.31)</b>		1	0.07(0.06)	<b>0.07(0.06)</b>		1	0.35(0.72)	<b>0.35(0.72)</b>		1	0.58(0.24)	<b>0.58(0.24)</b>
	2	0.02(0.09)			2	0.86(0.89)	0.86(0.89)		2	0.42(0.08)	0.42(0.08)		2	0.18(0.58)	0.18(0.58)
2	0	0.76(0.48)	0.76(0.48)	2	1	0.14(0.11)	<b>0.14(0.11)</b>	2	1	0.45(0.41)	<b>0.58(0.92)</b>	2	1	0.49(0.36)	<b>0.82(0.42)</b>
	1	0.22(0.43)	<b>0.24(0.52)</b>		2	0.01(0.00)			2	0.12(0.51)	0.33(0.06)		2	0.33(0.06)	
	3	0.02(0.09)			3	0.80(0.15)	0.80(0.15)		3	0.28(0.02)	0.28(0.02)		3	0.08(0.44)	0.08(0.44)
3	0	0.66(0.33)	0.66(0.33)	3	1	0.19(0.40)	<b>0.20(0.85)</b>	3	1	0.44(0.17)	<b>0.72(0.98)</b>	3	1	0.31(0.42)	<b>0.92(0.56)</b>
	1	0.29(0.44)	<b>0.34(0.67)</b>		2	0.01(0.35)			2	0.24(0.44)			2	0.42(0.13)	
	2	0.04(0.20)			3	0.00(0.10)			3	0.04(0.37)			3	0.19(0.01)	
DK	0	0.26(0.27)	0.26(0.27)	寝室(祖父)				廊下				サンルーム			
	1	0.74(0.73)	<b>0.74(0.73)</b>	1	0	0.53(0.53)	0.53(0.53)	1	0	0.93(0.83)	0.93(0.83)	1	0	0.88(0.73)	0.88(0.73)
	2	0.07(0.08)	0.07(0.08)	2	1	0.47(0.47)	<b>0.47(0.47)</b>	2	1	0.07(0.17)	<b>0.07(0.17)</b>	2	1	0.12(0.27)	<b>0.12(0.27)</b>
2	0	0.38(0.40)	<b>0.93(0.92)</b>	2	0	0.29(0.28)	0.29(0.28)	2	0	0.86(0.69)	0.86(0.69)	2	0	0.77(0.53)	0.77(0.53)
	1	0.07(0.08)			1	0.50(0.50)	<b>0.71(0.72)</b>		1	0.13(0.28)	<b>0.14(0.31)</b>		1	0.21(0.39)	<b>0.23(0.47)</b>
	2	0.55(0.53)			2	0.22(0.22)			2	0.00(0.03)			2	0.01(0.07)	
3	0	0.02(0.02)	0.02(0.02)	3	0	0.15(0.15)	0.15(0.15)	3	0	0.80(0.57)	0.80(0.57)	3	0	0.68(0.39)	0.68(0.39)
	1	0.15(0.16)	<b>0.98(0.98)</b>		1	0.40(0.40)	<b>0.85(0.85)</b>		1	0.18(0.35)	<b>0.20(0.43)</b>		1	0.28(0.43)	<b>0.32(0.61)</b>
	2	0.43(0.43)			2	0.35(0.35)			2	0.01(0.07)			2	0.31(0.42)	
3	0	0.41(0.38)		3	0	0.10(0.10)		3	0	0.00(0.00)		3	0	0.00(0.02)	
	1	0.00(0.03)			1	0.00(0.00)			1	0.00(0.00)			1	0.00(0.00)	
	2	0.00(0.03)			2	0.00(0.00)			2	0.00(0.00)			2	0.00(0.00)	

表7は諸室における在室人数別の負傷発生確率および顕在化確率（負傷発生の確率総和であり、1人以上の負傷者が発生する確率を意味する）を示したものである。地震発生時、3名はDKで食事中であったが、実際の家具転倒落下は2個のみ（領域率0.08程度）に止まったため、負傷顕在化確率は0.23と低く、負傷者は発生しなかった。しかし、負傷発生危険ポテンシャルでみると負傷顕在化確率は0.98と極めて高く危険空間であることが分かる。当該世帯にとり負傷が発生しなかったのは揺れが小さいことによる幸運な事象であったことを認識することが重要であり、このような情報の獲得が対策の第一歩となり得る。また、対策効果の検討には、仮にDKの食器棚を固定した場合( $T=0$ )を想定すると、負傷顕在化確率は0.79となり、家具固定の効果を具体的な数値により理解できる。

### 9. 安全化対策に向けた室内安全化規準

従前より、筆者らは実態調査を通じて建物・部屋ともに家具密度0.3 [個/m<sup>2</sup>] が負傷発生を左右する大凡の閾値となっていることを感覚的に捉えてきた (図10)<sup>9)</sup>。同図は十勝沖地震と中越地震における調査世帯について部屋および建物の家具密度と負傷発生の有無（家具転倒・落下、散乱物および本人転倒による負傷を含む）を全ての部屋についてプロットしたものである。ここでは負傷発生の閾値について再検証し室内安全化規準として提示する。

前述までは主に居室を基本単位とし扱っていたが、ここでは建物全体を対象とした解析を行う。はじめに、図6と同様にして、調査住家における建物全体の潜在的家具転倒落下領域率  $Rtr_{dwelling-potential}$  と建物家具密度  $Fd_{dwelling}$  の関係を図11に示す。図6の部屋における分布に比較してばらつきは小さく相関性も高い（相関係数0.75）。この関係より、式(9)、式(10)と同様に以下の2式が導出される。

$$Rtr_{dwelling-potential} \approx 0.956 \cdot Fd_{dwelling} \quad (11)$$

$$P_{dwelling-potential} [X=x] \approx {}_n C_x (0.956 \cdot Fd_{dwelling})^x (1 - 0.956 \cdot Fd_{dwelling})^{n-x} \quad (12)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, n$$

次に、表5と同様にして建物全体の負傷顕在化家具密度を求めると表8のとおりとなる。居室単位に比較して、建物単位の負傷顕在化家具密度はやや低い値となっている。表5および表8から縦軸に負傷顕在化家具密度、横軸に在宅・在室人数をとり、建物と部屋それぞれの関係を図示すると図12となる。ここで、式(10)および(12)における二項分布は離散型の確率関数なので、べき乗関数により連続関数で近似すると、次式ようになる。

$$\text{建物の負傷顕在化家具密度: } Fd_{dwelling} \approx 0.541 \cdot n^{-0.862} \quad (13)$$

$$\text{部屋の負傷顕在化家具密度: } Fd_{room} \approx 0.581 \cdot n^{-0.862} \quad (14)$$

上式を用いて負傷発生の閾値を求める。平成12年国勢調査<sup>22)</sup>によると、全国における平均世帯人数は2.70人である。また、平成13年社会生活基本調査<sup>23)</sup>および平成12年国勢調査<sup>22)</sup>より平均居室人数を求めると1.47人となり、これらを用いて式(13)、式(14)より日本平均での負傷顕在化家具密度を求めると、建物で0.25 [個/m<sup>2</sup>]、部屋で0.42 [個/m<sup>2</sup>] となる。図10におけるプロットを地震時に静止したと仮定した場合について図示したのが図13である。同図には

先に求めた日本平均の負傷顕在化家具密度、および例として図9 (建物家具密度0.29 [個/m<sup>2</sup>]) における諸室の分布も併記してある。図より、地震時に静止していた場合、建物・部屋ともに負傷顕在化家具密度周辺、またはそれ以上の範囲で負傷が発生しており、従来の感覚的な閾値を本手法により理論的に示すことができた。また、図9の事例の分布を見ると、建物全体としてはやや危険であるが、居間や仏間等は安全空間となっている。しかし、在室時間が長い寝室やDKは危険空間となっており、家具の固定や設置家具数を見直す等の対策を講じる必要があることが分かる。

ここに示した値、すなわち家具密度【建物:0.25 [個/m<sup>2</sup>]、部屋:0.42 [個/m<sup>2</sup>】は、本邦の平均的世帯の家具密度を示すものでもあり、これを超えたところで負傷発生危険は極めて高くなることより、室内安全化規準の適正家具密度上限値として提案する。

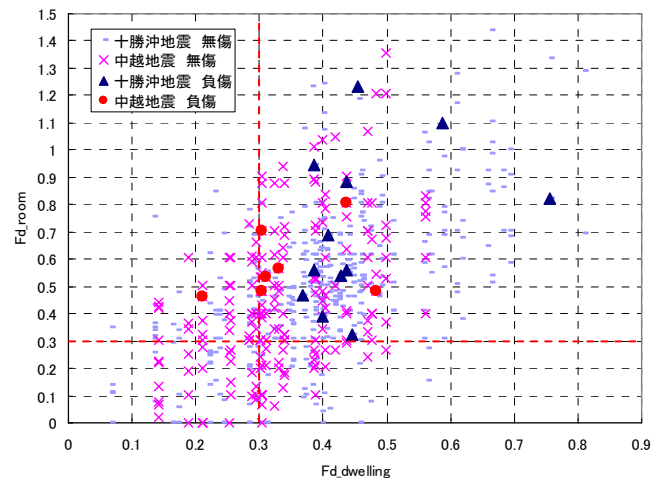


図10 十勝沖地震・中越地震における負傷発生と家具密度（横軸：建物全体としての家具密度、縦軸：各部屋の家具密度）の関係

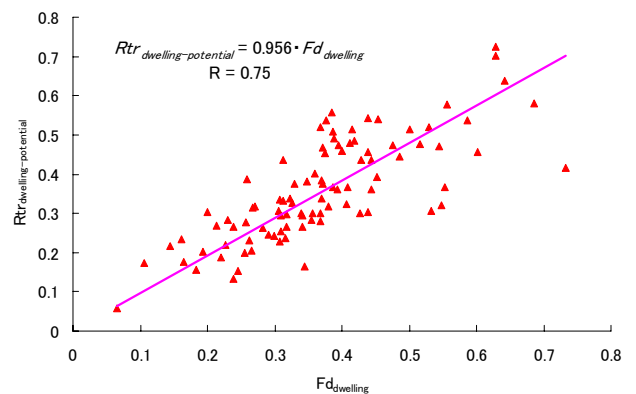


図11 建物家具密度 ( $Fd_{dwelling}$ ) と潜在的家具転倒落下領域率 ( $Rtr_{dwelling-potential}$ ) の関係

表8 在宅人数 ( $n$ ) と負傷顕在化家具密度 ( $Fd_{dwelling}$ )

在宅人数: $n$	1	2	3	4	5	6	7
負傷顕在化家具密度: $Fd_{dwelling}$	0.52	0.31	0.22	0.17	0.14	0.11	0.10

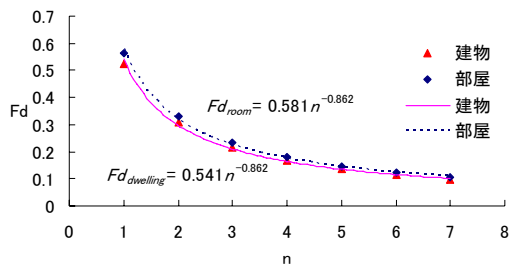


図 12 在宅・在室人数 (n) と負傷頭在化家具密度 (Fd) の関係

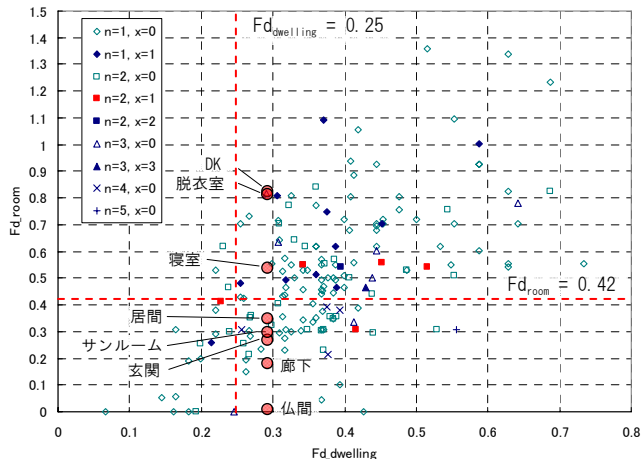


図 13 図 10 において地震時に静止したと仮定した場合の家具転倒落下による負傷者 (x) と家具密度 (Fd) との関係と図 9 の諸室の分布

## 10. まとめ

まとめとして、①家具転倒落下領域率を用いた負傷発生事象の理論モデルと二項分布による負傷発生確率は、実態調査で得られた結果をよく説明しており、その妥当性が示された。②潜在的室内負傷危険度の簡易評価指標として家具密度を提案し、その有効性を示すとともに、室内安全化規準としての適正家具密度を提示した。

室内安全化対策が遅々として進まない理由には、現状危険度の認識不足と対策効果の不透明さが少なからず影響していると推察される。現状理解は適切な対策への第一歩であり、本研究がその一助となれば幸いである。本研究から導ける負傷発生軽減化対策は在室人数の多い空間については家具転倒落下領域率の拡大を抑制することにある。すなわち、発生原因となる家具を床面積に対して適正数以下に減らす予防型対策を第一に考え負傷発生危険ポテンシャルを抑えた上で、家具の転倒落下防止および配置等で危険領域を最小限にする発災対応型対策を次に考えるのが効果的対策となる。

最後に、本研究は居室単位、建物単位に留まらず地域や県単位での負傷発生予測にも有効であると考えられ、今後はより広域での応用方法について提示する予定である。また、本研究は被震下室内で静止した場合の負傷に限定したが、これが負傷発生事象の全てではなく居住者行動を伴う場合についてもモデル化していく必要がある。

## 謝辞

本研究の基となった十勝沖地震、中越地震の実態調査では浦河町、釧路市、静内町、そして小千谷市の被災者の方々および役場の方々にご多大なるご協力をいただいた。また、調査では北海道立北方建築総合研究所の南 慎一・戸松 誠・高橋章弘・松岡佳秀の各氏、(財)

市民防災センターの青野文江氏、秋田県立大学の渡辺千明氏、信州大学の田守伸一郎氏、長岡造形大学の澤田雅浩・石塚直樹・筑波匡介の各氏の他、北海道大学・名古屋工業大学・信州大学・長岡造形大学・筑波大学の学生諸氏に実働いただいた。記して深謝申し上げる次第である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省編：国土交通白書 2006，ぎょうせい，2006。
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課監修：木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版），財団法人 日本建築防災協会，2005。
- 3) 田畑直樹・岡田成幸：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，日本建築学会構造系論文集，605，71-78，2006。
- 4) 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 — その 1 居住空間危険度マイクロゾーニングの提案 —，日本建築学会構造系論文報告集，454，39-49，1993。
- 5) 翠川三郎・佐伯琢磨：オフィスビル群における地震時の室内負傷者発生予測，日本建築学会構造系論文集，476，49-56，1995。
- 6) 岡田成幸・黒田誠宏・菅正史：室内ゾーニング法と避難路ネットワーク法による地震時居住空間危険度診断システムの開発，日本建築学会技術報告集，19，55-60，2004。
- 7) 株式会社日立東日本ソリューションズ：室内危険度診断システム，入手先（<http://www.hitachi-to.co.jp/products/sindan/index.html>），（参照 2006-10-01）。
- 8) 岡田成幸・田村 篤：被震下建物内で発生する人的被害の軽減化対策規範構築を目的とした被災事例マイクロ解析，東濃地震科学研究所報告，15，88-120，2005。
- 9) 岡田成幸・名知典之・田守伸一郎・渡辺千明・澤田雅浩：2004 年新潟県中越地震における室内人的被害調査，東濃地震科学研究所報告，18，65-157，2006。
- 10) 東京大学社会情報研究所「災害と情報」研究会：平成 5 年釧路沖地震における住民の対応と災害情報の伝達，東京大学社会情報研究所報告書，1993。
- 11) 東京大学社会情報研究所「災害と情報」研究会：「阪神・淡路大震災」における住民の対応と災害情報の伝達に関する調査，東京大学社会情報研究所調査研究紀要，6，85-110，1995。
- 12) 中村 功・中村信郎・中森広道・廣井 脩：2003 年 7 月「宮城県北部を震源とする地震」における住民の対応と災害情報の伝達，東京大学社会情報研究所調査研究紀要，21，139-198，2004。
- 13) 近江 隆・中村昭夫・志田正男・阿部賢一：'78 宮城県沖地震における被震時人間行動の研究（I） — 課題と方法及び数値化 II 類による行動分析 —，日本建築学会論文報告集，307，122-134，1981。
- 14) 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 — その 2 1993 年釧路沖地震にみる揺れている最中の災害回避行動 —，日本建築学会構造系論文集，481，27-36，1996。
- 15) 中井幸子・村上ひとみ・岡田成幸：1994 年北海道東方沖地震の世帯別対応アンケート調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，69，197-200，1996。
- 16) 日本建築学会建築計画委員会 兵庫県南部地震調査研究部会 建築内部空間における被害 WG：阪神淡路大震災 住宅内部被害調査報告書，1996。
- 17) 西田佳未・岡田成幸・高井伸雄・和藤幸弘：2000 年鳥取県西部地震における被害と行動に関するアンケート調査，第 20 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，11-12，2001。
- 18) 田中 淳・中村 功・宇田川真之・関谷直也・馬越直子・廣井 脩：2003 年 5 月宮城県沖の地震等における住民の行動に関する調査，東京大学社会情報研究所調査研究紀要，21，1-138，2004。
- 19) 荒木真也・岡田成幸・湊 寛子：地震時安全性と平常時居住性を考えたすまい方，日本建築学会北海道支部研究報告集，71，85-88，1998。
- 20) 金子美香：地震時における家具の転倒率推定方法，日本建築学会構造系論文集，551，61-68，2002。
- 21) 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パルナラビリティ関数群の構成，地震 II，44(2)，93-108，1991。
- 22) 総務省統計局：平成 12 年国勢調査，2000。
- 23) 総務省統計局：平成 13 年社会生活基本調査，2001。