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—

STUDY ON THE EVALUATION OF SEISMIC CASUALTY RISK
POTENTIAL IN DWELLINGS

Part 1 Indoor-zoning map on dwelling space safety

岡田 成幸*

Shigeyuki OKADA

This research provides the method of "indoor-zoning" of a dwelling by which the probability potential of suffering injuries or death due to an earthquake can be evaluated. As a case study several apartment buildings damaged in the Miyagi-ken-oki earthquake of 1978 was estimated. From this analysis it is shown that the level of probability potential of suffering injuries differs from one space to another even in the same room and the spatial distribution of its potentiality can be visually understood. Such a method as proposed here should give us available information on floor planning and furnishings arrangement planning in order to maintain indoor security against earthquake.

Keywords : seismic disaster, casualty, earthquake damage assessment, microzoning, indoor-space safety, furniture

地震災害, 人的被害, 地震被害評価, マイクロゾーニング, 室内空間安全性, 家具

1. はじめに

地震時の人的被害軽減の重要性に鑑み, 死傷者発生予測式が国内・外を問わずこれまでに数多く提案されている。なかでも Kawasumi¹⁾の研究はよく知られており, 死者数 D , 全壊家屋数 H の間に以下の関係式

$$D=10^{-2} \times H^{1.3} \dots \dots \dots (1)$$

を提案している。多くの研究はこれに準拠したものとなっている。これから分かるとおり, 死者発生の主たる説明変数として住家倒壊数(または率)を採用する場合が多い。すなわち, 地震時の家屋破壊発生が大前提であり, その付随的な結果として人的被害の発生を扱っている。確かに世界的にみると, 1900年代に発生した地震に伴う死者の75%近くが建物倒壊が直接的原因である²⁾。

しかし, とくにわが国においては, 家屋が無傷でも家具転倒などにより室内が散乱することに起因する負傷者が極めて多い事実を見逃すわけにはいかない。1993年釧路沖地震では電灯器具落下による死亡事故も発生している。1968年十勝沖地震以降の構造耐震規定の改訂は構造物の変形能確保に重点がおかれるようになり, 地震

時に瞬時に破壊する脆性的建物(すなわち, 地震時の家屋外への避難脱出に猶予時間のない危険な建物)の建設は減る方向にあり, 家屋倒壊による人的被害の発生低減に向け改善の途にあるといえよう。一方, 家具は地震時には剛体として挙動し, その転倒は瞬時の出来事である。家具転倒を含む2次部材破壊に伴う人的被害のその抑制手法も積極的に考究していく必要がある。

その重要性に鑑み, 地震時の家具転倒に関する研究は増えてきている。家具(剛体)の転倒条件を考察したものとして Ishiyama³⁾, 振動台を使った家具の転倒実験を行ったものとして田代・坪田⁴⁾, 野口⁵⁾らがある。地震後の転倒の実態を調査したものとして1978年宮城県沖地震の高層集合住宅における建築学会東北支部⁶⁾, 1987年千葉県東方沖地震の高層集合住宅における岡田⁷⁾の調査がある。また志賀ほか^{8)~11)}はその一連の研究で, 高層集合住宅における地震時の家具転倒の予測に関する研究を, 初道・鈴木¹²⁾は家具転倒に伴う室内散乱の計量法について提案している。しかし, 住居内の死傷者予測は「家具の問題」の議論のみでは不十分である。その環境下人間がいてなんらかの行動の結果として死傷者が発生す

* 北海道大学工学部建築工学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

るのであり、「人間の問題」を外したアプローチでは真の対策への接近は難しい。筆者は、地震時の室内変容に伴う死傷者発生を単純に家具転倒問題のみに帰着させるのではなく、人間行動との絡みで議論する。ここで留意すべきことは、住居とは居間・台所・寝室など機能・広さの全く異なる空間の集合であり、またそこに起居している人間の災害回避能力も個々に異なることである。したがって、場所ごと・人ごと・時間ごとに地震時の人的被害発生の危険度は当然異なる。その違いを積極的に評価していくことが、人的被害軽減への直接的アプローチとなる。そのためには、既存の被害統計資料にもとづいた従来のマクロプロセスの死傷者発生予測式では、この種の問題にはもはや無力である。住居空間個別の評価法を開発する必要がある。筆者は、予測される室内の危険度をマイクロゾーネーションの手法で評価することを本稿で提案する。

2. 潜在危険度の時代変遷と地域間隔差

わが国で室内の危険性を論じる重要性についてその時代変遷を概観することでもう少し触れておきたい。日本の室内住環境は地震防災の観点からは安全側・危険側のどちらの方向へ向かっているのであろうか。これはわが国の住環境問題・住環境政策と密接な関係にあり、マクロ的問題認識として理解しておくべきことであろう。

家具転倒による人的被害発生の危険性を、一住家の延べ床面積に対する保有大型家具の転倒面積比として以下のとおりに表現する。(2)式は家具転倒に伴う危険度をマクロレベルで概観するものであり、地震動入力は考慮していない。また、人間の存否を無視しており空間自体がもつ危険度という意味で(マクロ的)潜在危険度と称する。

$$\text{マクロ的潜在危険度} = \sum_j \text{大型家具転倒面積} / \text{室内延べ床面積} \quad (j: \text{家具の種類}) \quad (2)$$

計数方法は家具に関する渡辺・江口¹³⁾の研究を参考にする。すなわち、一住宅当たり延べ床面積を総理府統計局の住宅統計調査報告¹⁴⁾より、大型家具の一世帯当たり所有数量に関しては同じく全国消費実態調査報告—耐久消費財編¹⁵⁾より調べた。大型家具は、和ダンス、整理ダンス、洋服ダンス、鏡台、食器棚、本棚、冷蔵庫、洗濯機、白黒テレビ、カラーテレビとし、それらの平均的家具スケールを建築設計資料集成¹⁶⁾より定めた。ただし、家具の大きさは時代とともに変化するので、渡辺・江口¹³⁾にない、1978年以前と以降で値を変えている。転倒面積はそれぞれの家具の高さと幅の積で与えられる。

危険度の時代変遷をまず見てみる。潜在危険度を1964年から1989年までについて全国および県単位で求め、図—1に示す。図には大都市圏を抱える代表として東京都と大阪府を、都市圏を含む県として愛知県・福岡

図—1 住宅のマクロ的潜在危険度の時代変遷

図—2(a) 全国平均にみる室内延べ床面積・家具転倒面積の増加傾向

図—2(b) 地域別にみる「安全空間」「危険空間」の増加傾向

県、都市圏を含まない県として秋田県・島根県を示してある。一般的に、危険度は1969年まで急上昇し、その後は微増傾向をたどっている。図—2(a)は全国平均について延べ床面積と家具転倒面積を1964年を基準にそれぞれ示したものである。わが国は1958年頃からの高度経済成長期に核家族化が進み、大規模団地・マンションの建設を促した¹⁷⁾。生活意識の変革が住宅規模拡大に作用し住環境は改善が進む一方で、生活スタイルの変化が耐久消費財(大型家具)の導入を活発化させ住宅の地震時危険性も押し上げていたといえる。同図をみると、

1980年頃までは1世帯当たりの家具量の増加が住宅規模増加を上回っていたが、耐久消費財にはある量以上には増えない漸近値があるので、1979年頃に住宅面積の増加が家具量の増加により追いついたといえる。しかし、これ以後わが国の住宅は安全化の方向へ向けて歩み始めたといえるのであろうか。

同図(b)は地域別にみたものであり、その差は顕著である。地方(秋田県・島根県)は室内面積の増加が急で、いわゆる「安全空間」が増加しているといえるのに対し、大都市圏(東京都・大阪府)では室内面積は微増の状況にあり、安全空間の飛躍的拡大は期待しにくい。しかも図—1に示されているように大都市圏は地方に比較し約2倍危険度が高い(全室の約25%が転倒面積となる)ことに注目する必要がある。室内面積を広げることが無理ならば、室内のどこが安全で危険なのかを判断する室内マイクロゾーニングの重要性がクローズアップされてくる。

3. 住居空間危険度マイクロゾーニングの方法

3.1 死傷者発生基幹モデル

地震時の室内における家具の転倒・散乱による人的被害発生概念モデルとして、当面図—3の関係を想定する。地震動は建物を揺り動かす。その床応答振動の大きさは入力地震動の強さのみならず、建物の構造種別・階数の影響を受ける。床振動が大きくなると2次部材破壊・落下等の室内被害、家具転倒・散乱は避け得ない。家具の転倒はそのプロポーションや転倒防止措置の有無等によって制御されている。そのような状況下にあって、居住者が転倒家具によって負傷するか否かは、転倒散乱の激しさに加えて個人の災害回避行動能力が関与する。転倒散乱の激しさは、居室面積・所有家具数・家具配置計画等が影響するであろうし、行動能力は性別・年齢・病気等の個人の属性の他に地震発生時間や直前の行動(役割)等がかかわりあっているに違いない¹⁸⁾。さらに、実際にけがをするかどうかは地震発生時に室内のどこに

いたかという偶然性も無視することはできない。このように極めて多くの要因が複雑にかかわった結果として死傷者が発生する。その因果関係の複雑さの故に、同一家屋内といえども負傷危険性は空間的にかなり不均質に分布しているものと思われる。

このモデルに従い、室内の人的被害発生危険度に関する空間的不均質性を確率的に表現することを試みる。ある住居空間 A 中の場所 x におけるけが発生危険度を $D_l(x)$ (ここに、 l は人的被害レベルを指し、 $l=1$ を軽傷、 $l=2$ を重傷とする) とすると、住居空間 A の危険度は

$$D_l(A) = \int_A D_l(x) dx \quad (3)$$

となる。住居空間 A は連続空間であるが、空間状態の把握を容易にするために住居空間 A を n 分割し、単位空間に区画すると、

$$D_l(A) \doteq \tilde{D}_l = \sum_{i=1}^n D_l(x_i) \quad (4)$$

ここに x_i は区画番号となる。図—3のモデルに従い、住居内の単位区画 x_i におけるある一人の人間のけが発生危険度 $D_l(x_i)$ を以下のように記載する。

$$D_l(x_i) = \text{Prob}[Be|x_i] \sum_j \{V_j(I)S_j(x_i) \cdot (1-H(I, \text{time}; \text{age}, \text{sex}, \text{morbidity}, \text{role}))\} \quad (5)$$

ここに、 $\text{Prob}[\]$ (以下、パラメータを省略した簡略記載 $[\]$ とする) は算定対象となる人間が地震時に単位空間 x_i に存在する確率(所在確率)を表し、室内の家具配置計画・動線・時間・人間属性等が関与する確率分布として与える。

$V_j(I)$ は家具の転倒散乱確率で、家具 j が散乱状態 $S_j(x_i)$ になる確率、すなわち想起される床振動(震度 I)に対する一種の被害関数(Vulnerability Function)として与えられる。

$S_j(x_i)$ は家具 j が散乱することにより区画 x_i にその家具が倒れてくるかどうかを示す関数である。数値的には1(その区画が散乱する)または0(散乱しない)のみをとる単位ステップ関数である。なお、 j は家具の種類を意味し、算定時にはその家具の転倒散乱による人的被害レベル l を考慮する。たとえば同一家具でも家具そのものの転倒は重傷を惹起するであろうし、家具の内容物のみが落下してくる場合は軽傷にとどまるであろう。すなわち、 j は l の関数であり、正確には $j(l)$ となるが、簡略表現 j とする。

H は人間の災害回避行動能力で床振動の関数である。これに、年齢・性別・病気の有無・家庭内での役割(地震の最中の行動に影響する)および時間による補正関数を考慮する。

I は室内の床の揺れの強さであり、家屋への地震動入力(震度)に建物応答特性・階数等を考慮し求められる。

図—3 室内における人的被害発生概念モデル

ここでは気象庁震度階相当値で表現する。以後の解析では震度は、小数点以下を四捨五入すると気象庁震度相当となる有効数字2桁で表す。両者を区別するため気象庁震度はローマ数字記載とする。震度は元来地面の揺れの強さの指標であり、ここでは床の揺れを相当値で表すので床応答震度と仮に称することにする。このように床応答を震度で表すことにより家具転倒・人間行動を同一尺度で議論することができる。

このように定義した場合、一人の人間の人的被害発生危険度 $D_i(x_i)$ の定義域は、地震時にその人が居た単位空間 x_i へ倒れていくと思われる対象家具が m 個の場合 $0 \leq D_i(x_i) \leq m$ となる。たとえば、ある場所 x_i に転倒すると思われる家具が2つある場合は、 $0 \leq D_i(x_i) \leq 2$ である。数値が大きいほど人的被害発生危険度は高くなる。対象家具が1つの場合 $D_i(x_i)$ の値は確率と同等の意味をもつ。 $D_i(x_i)$ は人的被害レベル l (軽傷・重傷) ごとに算定されるが、関連する転倒散乱事象が複数かかわってくると予想される場合、定義式より $D_i(x_i)$ は1以上となる。この場合、複数の事象が発生する可能性が高いことを示しており、値が大きくなれば被害レベルが上がる(軽傷は重傷へ、重傷は死へ)と考えれば良い。その閾値の議論は後述する。

3.2 パラメータの定義

(5) 式の $D_i(x_i)$ は以下のように書き換えられる。

$$D_i(x_i) = \text{Prob}[Be|x_i] \text{Pot}[x_i] \text{Hmn}[...] \dots (6)$$

ここに、 $\text{Pot}[x_i] = \sum_j V_j(I) S_j(x_i) \dots (7)$

$$\text{Hmn}[...] = 1 - H(I, \text{time}; \text{age}, \text{sex}, \text{mobility}, \text{role}) \dots (8)$$

$\text{Pot}[x_i]$ には人は関与しない。区画 x_i にもものが倒れてくるかどうかという空間自体が持つ危険度、すなわち潜在危険度である。従来、家具転倒にかかわる室内被害問題は人間を考察の外にすることが多く、いわばここでいう $\text{Pot}[...]$ と同等の議論に終始していたといえよう。けが発生が実際に顕在化するかどうかはこれに人間行動を

図—4(a) 家具上の置物の落下確率 $V_j(I)$ (文献19) による)

図—4(b) 家具の転倒確率 $V_j(I)$ (文献19) による)

考慮する(5)(6)式のモデルによってはじめて扱い得る。

$\text{Pot}[...]$ を構成する家具の転倒確率 $V_j(I)$ は家具に関する被害関数である。岡田・鏡味¹⁹⁾は57種の被災対象について東京都の震度階解説表を定量化することにより求めており、 $V_j(I)$ はそれを用いる(図—4)。その関数型は以下の正規分布関数で与えられる。

$$V_j(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^I \exp[-(I' - I_0)^2 / (2\sigma^2)] dI' \dots (9)$$

I_0 は家具 j が転倒する平均震度、 σ はそのばらつき(標準偏差)である。詳しくは文献を参照されたい。

家具の転倒	置物落下	内容物散乱	家具転倒及び内容物散乱

$a = W \cdot H$	$a = \pi r^2, r = \sqrt{(W/2)^2 + (H/2)^2}, H = (H1+H2)/2$	$a = (W+2r) \cdot H/4 + \pi r^2/2$	$a = [\pi(H^2+W^2) + 6H(W + \sqrt{2(H^2+W^2)})]/8, H = H1/2$

図—5 家具転倒散乱状態算定式(文献12)に補筆)

図-6 人間の災害回避行動能力 H_{mn} [] (文献19) より

図-7 人間属性による災害回避行動能力補正関数

図-8 時間による災害回避行動能力補正関数

家具散乱状態 $S_j(x_i)$ の算定方法は初道・鈴木¹²⁾を参考に図-5とした。散乱のパターンを 1) 直方体の家具が倒れる場合、2) 家具の上の置物が落下する場合、3) 家具の内容物だけが散乱する場合、4) 家具が倒れ内容物も散乱する場合に 4 分類し、人的被害に影響する転倒・散乱面積が示されている。実際の散乱面積はより広いと思われるが、けがに直結することを考えているので初道・鈴木が与えた散乱域よりも狭い範囲を与えている。

(8) 式の H_{mn} [] は人間にかかわる項である。人間の災害回避行動能力 $H[I, \text{time}; \text{age}, \text{sex}, \text{morbidity}, \text{role}]$ は健康な成人男子について求められている¹⁹⁾。図-6には被害回避ができない累積確率 (H_{mn} []) が震度の関数として示されている¹⁹⁾。関数型は家具転倒の場合と同様、正規分布関数である。災害回避能力は性別・年齢等の人間属性によって異なる。それを補正する関数として図-7を用意する。これは直井・宇野²⁰⁾による日常災害における年齢構成別負傷者頻度から求めたものである。図では日常災害による年齢別死傷率を、65歳以上を基準にし逆数表示してある。すなわち、日常時の死

図-9 一人の人間の受傷可能性 (文献19) より

図-10 震度と負傷率の関係 (文献18) より

傷率の低い年代ほど災害回避行動能力は高いとした。地震時における女性の負傷率が男性よりも高いのはよく見られる現象であり¹⁸⁾、これは地震時の女性に課せられた役割(弱者の保護等)の多さによるものなのかもしれない。また図-8は地震発生時間による行動能力低下を模式化したものであるが、日本人平均の起床時間²¹⁾から導いたものである。熟睡時の行動能力を0、昼間の行動能力を1として与えた。

(6) 式から所在関数 Prob [] を除いたものは、一人の人が区画 x_i に居たとしたときの家具転倒によるその人のけがが発生危険度である。これを図示すると図-9のようになる¹⁹⁾。すなわち、家具が転倒する確率 $V_j(I)$ (家具の被害関数) にその人の災害回避能力関数 (H_{mn} []) を掛け合わせることで評価できる(同図下段)。図-10は震度と負傷率(人口に対する負傷者発生率)の関係をいくつかの地震について調べたものである¹⁸⁾。図-9は一人の人間のけがが発生危険度であり、図-10は対

図—11 床応答震度と受傷（無傷，軽傷，重傷）可能性 $D_i(x_i)$ の関係

象となる人間母集団に対するけがの顕在化度（発生率）であるので，数値的に同一のものとするには，図—9にさらに人間母集団の特性（たとえば $\text{Prob}[\]$ の偶然性等）も考慮しなくてはならないが，内容的にはほぼ同一のものと理解できよう。両者を比較すると震度に対する負傷確率の上昇傾向は極めてよく似ている。図—10より負傷は震度 V の中程度（震度 4.9）くらいから始まり震度とともに増加するのが分かる。この関係より，図—9で等震度にはば対応する受傷可能性 0.8 をけが発生の閾値と当面しておく。同図によれば成人男子健常者の軽傷の発生は震度 5.1（ V 中程度）から，重傷は震度 6.2（ VI 中程度）からとなる。

以上述べてきた

$$D_i(x_i) = \text{Pot}[\] \text{Hmn}[\] \dots \dots \dots (10)$$

は，（５）（６）式からかなり偶然性の高い $\text{Prob}[\]$ を切り離したものであり，この値を仮のけが発生危険度（ $\text{Prob}[\]$ も考慮した（５）（６）式の $D_i(x_i)$ と区別するために受傷可能性と称する）とみなすこともできる。すなわち，その空間に対するその人のもつ危険度であり，これを単位区画ごとに評価することにより，重傷または軽傷の受傷可能性を個人属性をパラメータとする震度の関数として求めることができる。これはまた図—11に示すような床応答震度—受傷可能性の相関図として表すことができる。受傷の可能性は同図に示されるように，重傷と軽傷の和事象（OR 事象）として計算する。

最後に，地震時の所在に関する確率関数 $\text{Prob}[Be|x_i]$ であるが，これは社会習慣・個人の生活スタイルに加えて極めて偶然性に左右される部分が多く，一概に決め難い側面がある。場合に応じて判断する必要がある（後述する算定例において一例を示す）。

単位区画ごとの危険度のちがいに着目するのが室内の人的被害発生に関するマイクロゾーニングであるが，区画値を以下のように合計することにより，全居室空間 A （室内ごとあるいは住戸ごと）の危険度特性値に指標化することができ，様々な条件における居室の比較考察が可能となる（下式は（４）式と同等である）。

$$\tilde{D}_i = \sum_{i=1}^n \{ \text{Prob}[\] \text{Pot}[\] \text{Hmn}[\] \} \dots \dots \dots (11)$$

図—12 鶴ヶ谷団地の住戸平面図

4. 室内危険度ゾーニングの算定例

4.1 鶴ヶ谷団地の概要

筆者らは宮城県沖地震（1978年6月12日午後5時， $M7.4$ ）の直後に，仙台市北東部の丘陵地帯にある鶴ヶ谷団地（5階建て公団アパート）で面接による「地震時の人間行動調査」を行っている²²⁾。この資料をもとにここに提案の室内の人的被害危険度評価を試みる。

図—12は住戸の平面図である。日本住宅公団が供給しているもので，一戸当たりの専有面積はベランダを含め 41.6 m^2 で，2居室（6畳と4.5畳）に食堂と台所が一室となったいわゆる2DKの住戸プランである。1978年現在の日本の平均居室面積（ 80.28 m^2 ）の約半分であり狭い¹⁴⁾。利用形態は，食堂と6畳の部屋との境を取り去り1室の居間として利用し，4.5畳の部屋を寝室としているのが一般的であった。震度調査によれば，地震時このアパートの床応答震度は1階で5.3（震度 V の中程度相当），5階で5.8（震度 VI の低相当）の揺れであった。

地震の発生時間を午後5時とし，健常な30歳代主婦についての人的被害発生危険度を算定する。

図—13 家具配置例（住戸 [A] の場合）

図-14 全家具の転倒散乱状況 (住戸 [A] の場合)

(c) 床応答震度 5.4 の場合

(a) 床応答震度 4.8 の場合

(d) 床応答震度 5.8 の場合

(b) 床応答震度 5.0 の場合

(e) 床応答震度 6.2 の場合

図-15 受傷可能性 $D_i(x_i)$ のゾーニングマップ (住戸 [A] の場合)

4.2 室内危険度ゾーニング

図一13に評価例として取り上げた住戸[A]の家具配置を示す。この世帯は地震発生時、30歳代の主婦と5歳以下の子供2名の家族構成で、所有している大型家具は洋服ダンス、整理ダンス、食器棚、冷蔵庫、洗濯機、仏壇、鏡台、テレビ各1、本棚3でこの団地内においては所有家具が比較的多い例である。しかし、当時の全国平均では和ダンス(1.3)、洋服ダンス(1.5)、整理ダンス(2.0)、鏡台(1.1)、食器棚(1.9)、本棚(1.5)、冷蔵庫(1.1)、洗濯機(1.1)、テレビ(1.7)となっており(括弧内は平均所有数¹⁵⁾)、決して多い方ではない。住宅床面積による制限のため、むしろ必要最低限のものしか持ち込んでいないというべきかもしれない。これらの家具が全部倒れ、内容物が散乱したと仮定した場合の状況が図一14に示されている。家具の大きさがこれから推察できよう。

室内を70cmの単位区画に分割し、その区画ごとに(10)式より算定した受傷可能性が図一15中の数値である。床応答震度は4.8から6.2(人間の災害回避能力0となる震度)で計算している。同図では先の考察より $D(x_i)=0.8$ をけが発生顕在化の閾値とし、コンターを引いてある。震度が大きくなるに伴い危険空間が広がっていくのがよく分かる。30代の主婦にとり、この住戸では震度4.8程度ですでに居間に危険空間が発生しているのが分かる。また図より、危険度に相当の空間的偏りがあることが分かる。風呂・トイレが地震時に安全な空間を保持しているのに対し、生活の中心となる居間・寝室が危険である。さらに、外界への唯一の脱出口である玄関も散乱が激しいことが分かる。

この住戸は宮城県沖地震の時は床応答震度は5.8相当の揺れであった。この図から、宮城県沖地震では居間として使用している空間が特に危険であったことが分かる。事実、この地震の時、この住戸の主婦は居間の本棚

図一16 住戸[A]の避難脱出経路(■:確保, □:寸断)

の前にいて、その転倒によりけがをしている。

この住戸の場合問題なのは、就寝中で行動回避能力が0となる寝室に家具が多く配置されていることである。加えて重傷に結びつく重量家具も寝室に配置されている。災害回避のできない状況下での危険度が高いのは極めて問題である。

脱出路の観点から見てみよう(図一16)。この団地の平面計画から脱出路は寝室→玄関ホール→玄関→外と寝室→居間→台所→玄関ホール→玄関→外の2本のルートがある。しかしこの住戸では寝室→玄関ホールのルートは家具により平常時より閉鎖されている。またもう一つのルートも生活場が避難経路となっており家具散乱で3箇所が寸断されている。住み慣れた家であってもこのような状況は、夜間停電時には特に問題となろう。家具配置計画を見直す必要性が高いと言えよう。

図一17は同室の区画ごとにみた床応答震度と受傷可能性の関係である。図中にプロットした点は1区画ごとの危険度 $D(x_i)$ であり、同一住戸でも場所による危険度のばらつき具合が見て取れる。すなわち、震度が小さくても居場所によってはけがをする可能性が0とは言えない場合があるし、他方、震度が大きくても幸運にもけがをしない場合もあることが極めてよく分かる。そのばらつき具合は震度が大きくなればなるほど顕著になる。このことを同図中、網のかかっている部分に着目し

図一17 床応答震度と受傷可能性の関係(住戸[A]の場合)

て説明してみよう。これは1個以下の家具が転倒対象となる区画に相当する。震度が大きくなると家具の転倒確率は高くなる。そして震度6.2を越えると災害回避能力は0でかつ転倒率は100%となるため、家具が倒れてくる区画は危険度が1に、家具が倒れてこない区画は危険度0を保持する。すなわち、居住区画は震度が大きくなるにつれ絶対的に危険か、安全かのいずれかとなる。同様に、震度の増加に伴い危険度2に収斂している区画は転倒家具が2個の場合、危険度3に収斂していく区画は転倒家具が3個の場合と理解できる。その結果として、震度増加に伴い危険度のばらつきが大きくなっていく。このことは震度増加に伴い居住空間は全体的に危険空間へと変貌していくが一方で安全な空間も保持されていることを示しており、この安全空間を積極的に広げ確保していくことが計画の観点から極めて重要な災害対策のアプローチであることを示唆している。

図—18 宮城県沖地震の時の主婦の所在確率 Prob [] [%]

図—19 家具配置別例とその受傷可能性 $D(x)$
(住戸 [B] の場合、床応答震度 5.8)

4.3 住戸の危険度特性値

図—17 を住戸の危険度特性値に指標化するためには、地震時の所在すなわち (11) 式中の $\text{Prob}[Be|x]$ の考慮が必要である。このアパートに住む主婦達の地震直前の分布が調べられている²¹⁾ので、これをもとにこの時間の主婦の所在に関する確率密度分布 $\text{Prob}[]$ (%) を求め、図—18 に示す。この時間、団地内の主婦は確率的にみて住居内のどこにいるかを示したものである。宮城県沖地震発生は午後5時前後であったため主婦の多くは台所で食事の準備をしていたようである。(11) 式においてこの確率密度分布を考慮し、全区画の危険度の総和をとったのが図—17における実線である。これがこの住居に住む主婦の午後5時におけるけが発生危険度 $\bar{D}_i$ である。ここに地震が襲来したとすると、けが発生顕在化の閾値を 0.8 とするならば、同図中、実線が 0.8 を越える震度 5.5 (震度 VI の下限) 以上で床が揺れた場合にけがが発生する状態にあったといえる。すでに述べたとおり、この住居は震度 5.8 で揺れ、主婦は負傷している。

この団地は、住居プランから台所は居間の片隅に位置しており、食器棚等の不安定な家具は台所から離れて配置されている場合が多い。その結果、台所の流し台の前は比較的安全な空間となっている (図—15)。図—17 において、受傷可能性を示す各点のばらつきに比べ、実線が比較的低い (安全) 値を示しているのはこのためである。主婦の多くがこの団地では比較的安全な流し台の前に居たときに地震が発生したのが幸いしたといえる。た

図—20 住戸のけが発生危険度 $\bar{D}_i$ の比較 (宮城県沖地震を想定した場合)

だしこれは一般に言えることではなく、わが国の場合、台所は狭く危険空間となる可能性が高い²³⁾。この住宅の場合、地震が食事中に発生したと仮定すると状況はかなり悪くなる。この家で最も危険な居間に居るときに地震が襲来したとして(11)式より危険度を算定したのが図一17の点線である。危険度は前者の2~3倍程度に高まる。2本の線の違いは地震の発生時間帯により危険度が大きく異なることを示したものである。この世帯の場合、けが回避のためのなんらかの対策をとる必要があろう。家具転倒から身を守るための事前対策として「家具の壁面への固定」が推奨されているが^{4), 24)}、これですべてが解決するとは思われない。その有効性がいわれているにもかかわらず、実施率は極めて低い(東京消防庁の調査²⁵⁾では実施率は東京都23.8%, 釧路市10.9%である)。その理由として、①固定は技術的にかなり難しい。②家具に傷をつけることもあり、心理的に実施したくない。③防止措置は日常生活に不便あるいはなじまない細工となってしまうことがある。④配置場所に固定すべき有効な構造体がない。間仕切り壁に固定したならば、壁ごと倒れてくることも考えられかえって危ない。家具は壁に固定しておけば良いと断言できるほど事柄は単純ではない。

図一19は同じ団地内の別住居[B]である。家族構成は夫(30代)妻(20代)子供(5歳以下3名)である。同様の家族構成にもかかわらず前世帯に比べ所有家具が少なく、したがって安全空間が保存されているのが分かる(震度5.8の場合)。図一20は宮城県沖地震を想定し前世帯と比較した床応答震度-けが発生危険度の相関図であるが、世帯[B]の場合、気象庁震度Ⅵを越えてもけが発生危険度は0.8を越えない極めて安全性の高い住居ということが出来る。ただし、寝室の中央に危険ゾーンが存在するなど問題がないわけではない。

前世帯[A]の場合、所有家具の数は全国平均では決して多い方ではなく、むしろ必要最低限に近いといえよう。しかしながら、地震安全性の観点からは住居面積に比し適正量を越えているといわざるを得ない。後者の例にみられるように生活スタイルを見直し、適正家具の選択・家具配置計画・動線・転倒防止策の施行等の総合的かつきめ細かな防災対策が重要視されるべきである。

わが家の防災を考える場合、まずどこが危険な場所であるのかを把握することが大切である。本方法によるゾーニングにより危険箇所を具体的にランキングすることができる。また、各室に少なくとも1箇所は何も転倒してこない安全空間を確保しておくべきであろう。そしてその場所を各人が認識しておくべきであろう。本方法はその安全空間を見つけだすのに役立つ。

ところで、このシミュレーションモデルは地震動強さを震度で表現することにより家具転倒・人間行動を統一

的に扱い得た結果による。本方法は震度利用の有用性を示すものである。

5. おわりに

地震国でありながら狭い住宅に住まわざるを得ないわが国にあって、室内における人的被害予測は極めて重要な問題である。本論文は関連研究の出発点を与えることを目的に、室内のけが発生危険度をミクロ的にシミュレーションして評価する方法を提案した。防災は現状認識がその第一歩である。本方法は地震時のわが家の危険空間・安全空間を視覚的にしっかりと把握できる点で有効と考える。本論ではけがの発生を家具転倒のみに押しつけたが、1993年釧路沖地震では寒冷地における冬季発生の地震ということもあり熱傷も多くみられた。日本の場合、火事の問題も避けて通るわけにはいかない。これらの問題も基本的には本論で展開した震度利用による被害関数を用いた方法で議論できよう。また、本モデルでは室内散乱および人間行動に関して時間関係を考慮しない静的扱いをしている。これらは本来、動的に扱うものであり、それにより受傷・災害回避がより実態に近い形でシミュレーションできるであろう。引き続き行っていく予定である。

本研究遂行に当たり、当研究室の鏡味洋史教授、村上ひとみ助手、坂井 忍助手には多くの議論を頂戴した。記して感謝いたします。本研究は平成2年度文部省科学研究費奨励研究(A)「地震時の人的被害発生危険性に関する居住空間マイクロゾーニングの提案」(課題番号: 02855144, 代表者: 岡田成幸)の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) Kawasumi H.: Intensity and Magnitude of Shallow Earthquakes, Bureau Central Seism. Intern. Ser. A, Trav. Sci., 19, pp.99~114, 1954.
- 2) Coburn, A.W.: Factors Determining Human Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse, 10th W.C.E.E., pp.5989~5994, 1992.
- 3) Ishiyama, Y.: Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations, 日本建築学会論文報告集, 317, pp.1~13, 1982.
- 4) 田代元弘, 坪田張二: 地震でも倒れない家具の留め方, 鹿島出版会, pp.1-161, 1981.
- 5) 野口義憲: 地震時におけるオフィス家具の転倒実験について, 第29回研究発表会概要集, 東京消防庁消防科学研究所, pp.1~9, 1991.
- 6) 日本建築学会東北支部: '78宮城県沖地震災害の実態, 1979.
- 7) 岡田成幸: 地震に伴う室内環境変容と人的被害の発生危険性との関係—1987年千葉県東方沖地震の高層建物の震度調査にもとづく—, 日本建築学会大会学術講演梗概集,

- B, pp.679~680, 1989.
- 8) 志賀敏男, 渋谷純一, 湯田善郎, 高橋純一: 高層集合住宅における居住空間の耐震化に関する研究 その1 研究課題と調査方法, 東北地域災害科学研究報告, 24, pp. 54~57, 1988.
- 9) 志賀敏男, 渋谷純一, 湯田善郎, 高橋純一: 高層集合住宅における居住空間の耐震化に関する研究 その2 地震対策の現状について, 東北地域災害科学研究報告, 24, pp. 58~61, 1988.
- 10) 志賀敏男, 渋谷純一, 湯田善郎: 高層集合住宅における居住空間の耐震化に関する研究 その3 家具類の数量・占有面積比, 東北地域災害科学研究報告, 25, pp. 67~70, 1989.
- 11) 志賀敏男, 渋谷純一, 湯田善郎: 高層集合住宅における地震時家具転倒被害の予測と防止に関する研究, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 1, pp. 61~66, 1990.
- 12) 初道鉄介, 鈴木 有: 居住空間の地震被害を測る 尺度の提案と計量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 711~712, 1989.
- 13) 渡辺光雄, 江口敦子: 住空間における家具占有面積の分析 (その1) —昭和30年代以降の家具量の増加と居住面積—, 日本建築学会計画系論文報告集, 352, pp. 48~58, 1985.
- 14) 総理府統計局: 住宅統計調査報告, 1963, 1968, 1973, 1978, 1983, 1988.
- 15) 総理府統計局: 全国消費実態調査報告, 耐久消費財編, 1969, 1974, 1979, 1984, 1989.
- 16) 日本建築学会: 建築設計資料集成, 1, 1960, 1978.
- 17) 玉置伸吾: 戦後35年の住宅事情の変遷, 建築雑誌, 95, pp. 48~54, 1980.
- 18) 太田 裕, 村上ひとみ: 地震時の人間行動と死傷発生に関する研究, 地学雑誌, 97, pp. 68~80, 1988.
- 19) 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2, 44, pp. 93~108, 1991.
- 20) 直井英雄, 宇野英隆: 日常災害の被害量調査のための前提事項に関する検討および住宅における被害量の調査・推定 日常災害による人的被害の定量的把握のための調査研究(1), 日本建築学会計画系論文報告集, 429, pp. 33~41, 1991.
- 21) 日本放送出版協会: 図説 日本人の生活時間1990, pp. 1~373, 1990.
- 22) 大橋ひとみ, 太田 裕: 地震に伴う人間行動の実態調査(2), 面接による資料の収集と整理, 地震2, 33, pp. 199~214, 1980.
- 23) 岡田成幸, 鏡味洋史, 村上ひとみ: 地震時の室内変容に伴う人的被害の発生危険性評価 その1. 手法開発へ向けて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 187~188, 1990.
- 24) Yanev, P.: Peace of Mind in Earthquake Country, Chronicle Books, 1974.
- 25) 東京消防庁: 平成5年釧路沖地震等に伴う都民指導の推進について(通知), 1993.

(1993年4月30日原稿受理, 1993年9月28日採用決定)