

## 居住空間の構造的・機能的な地震被害の推定

北原 昭男・藤原 悌三

### ESTIMATION OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL DAMAGE OF LIVING SPACE

By *Akio KITAHARA* and *Teizo FUJIWARA*

#### Synopsis

The estimation method for structural damage of building structures has been developed before now. In addition to that estimation, however, it is necessary to estimate the functional damage of living space in building to make clear the influence of building damage on other urban components. Especially, it is also necessary to estimate economical poverty and inconvenience of life to make anti-seismic urban design.

In this study, the state of occurrence of functional damages in living space was put in order. And, occurrence of injury, possibility of evacuation to outside of the space and outbreak of fire were estimated using event tree analysis, fault tree analysis and the results of response estimation method which has been developed in recent study.

#### 1. はじめに

建築構造物は都市における重要な構成要素のひとつであり、その地震被害は直接人命に係わると共に、火災の発生などの2次被害に波及していく<sup>1),2)</sup>。そのため、都市における建築構造物群の地震被害を予測していくことは、都市の地震防災の上で非常に重要であると考えられる。しかし、都市域に存在する建築物の種類は多岐に渡り、そのすべての建物について個々の耐震性を評価し詳細な解析手法を用いて地震被害を推定していくことは多くの労力を要するため、建物を群としてとらえ、その群の耐震性能を支配するパラメータを用いて構造物をモデル化し、簡便な手法によって地震時応答、さらには地震被害を評価する手法を構築することが必要となる。筆者らは、これまでに構造物の地震被害推定手法を構築するため、都市域における建築物の中で多数を占める木造住宅および低層鉄筋コンクリート構造物（以下単にRC構造物と呼ぶ）を対象として動特性のモデル化を行い、既往の地震動シミュレーション手法を用いて、入力地震動・構造物の要因のうちの幾つかをパラメータとして地震応答解析を行い、その応答性状について定性的・定量的な分析を行ってきた<sup>3),4)</sup>。その結果、構造物の最大応答については、(1)建築構造物と地震入力との振動特性は相互に微妙に影響しあっており、構造物の耐力と最大変形の関係は複雑な関係を示すこと、(2)木造構造物の最大応答変位は種々の地盤条件下においても構造物が破壊に至るまで入力地震動の最大速度とかなり明快な線形関係を示すのに対し、低層RC構造物の最大応答変位は入力の最大加速度に相関を持つこと、などが明らかとなった。さらに、木造住宅に関しては地盤の液状化による被害を、RC構造物に関しては、構造物のねじれ応答や各層の耐力分布のばらつきによる応答量の変動を考慮し、最終的に以上の結果を総合して都市における建築構造物群の構造的な地震被害の推定手法を構築し、京都市域を対象として構造物群の地震被害推定を

行ってきた<sup>5),6)</sup>。

しかしながら、これらの成果を踏まえて都市建築物群の耐震対策や都市耐震計画を策定していくためには、これまで扱われてきた構造被害や人的被害などの直接被害だけではなく、構造物の地震被害が都市の他要素へ与える影響を考慮しつつ、生活困窮度や経済的困窮度などの間接的な被害を定性的・定量的に推定していくことが重要である。そのためには構造物が破壊するかどうかという被害の評価だけでは不十分であり、より低いレベルの入力によって引き起こされる被害の様相をも明らかにしていくことが第一歩となる。言い替えば、居住空間としての構造物の機能が地震によってどれだけ損なわれていくかを定性的・定量的に評価する必要がある。本研究では、これらの構造物の機能に関する被害を、これまでの構造的な被害の推定に用いた手法と同様の考え方を用いて推定し、低い入力レベルから高いレベルまでの被害を統一された場において評価することを目的としている。まず初めに、これまでの議論に基づいて居住空間における地震被害の発生の形態を整理し、そのうちの室内火災、人的被害の発生および室外への避難については Event Tree や Fault Tree を構築し、その発生形態を明らかにした。さらにこれまでの地震応答計算に基づく応答推定手法を用いて構造物などの直接被害や室内の散乱状況などを明らかにし、この推定結果をもとに、Even Tree Analysis (ETA) や Fault Tree analysis (FTA) などの手法を用いて上記3つの空間機能に関する被害の推定を試みた。

## 2. 居住空間における地震被害の発生形態

これまでに都市における地震被害波及に関する議論は度々行われ、その結果は文献1) にまとめられている。ここではその内、建築構造物、特に居住空間における地震被害に関するものを抽出し、その被害の発生形態の概要を Fig. 1 に示した。図の左には居住空間内にある種々の要素を示し、右にはそれらから発生する被害および被害の波及を示している。構造体自体や非構造部材の直接的な被害は一次的な人的被害につながると共に、復旧や修復を必要とし、これらが経済的な負担につながる。直接的な構造被害とは別に、非構造部材の破壊や家具などの転倒によって室内は散乱し、これによっても一次的な人的被害が発生する。さらには火災の発生や避難不可能な事態の発生の原因となることが考えられ、これによって2次的な人的被害を引き起こされる。これらの被害の流れも最終的には経済的な困窮につながっていく。一方、居住空間にお

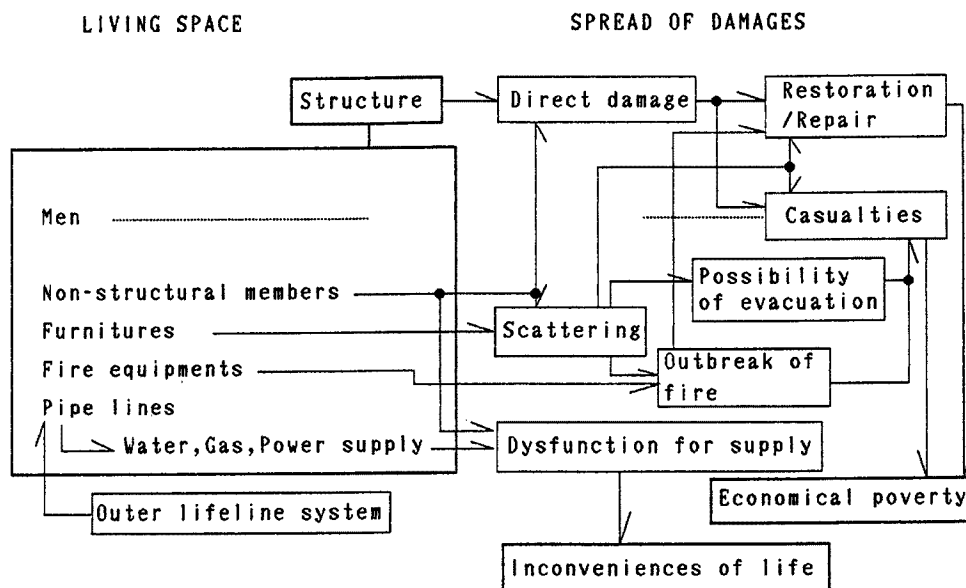


Fig. 1. Aspect of earthquake damage in living space.

る日常生活の不便は、主に供給・処理系のライフラインの機能が室内・屋外の原因によって低下することによって引き起こされるものと考えられる。

Fig. 2には室内における一次的な負傷の発生に関する Event Tree (ET) を示す。宮城県沖地震における怪我の原因に関するアンケート調査の結果<sup>7)</sup>によれば、怪我のうちの60%が室内で発生しており、その原因の上位3つは、転倒した家具などの下敷きになった、天井や棚の上からの落下物に当たった、室内で転んだ、であった。ここでは、上記の結果に基づき、建造物の倒壊した場合・転倒した家具の下敷きとなった場合・落下物やガラスに当たった場合に着目して、重い負傷・中程度の負傷・軽い負傷・負傷なしの4段階の程度毎に確率が求められるように ET を構成した。ここで、建造物の倒壊やガラスの飛散は主に建造物の変位応答に依存し、家具の転倒や棚上の物の落下は建造物の速度・加速度応答に依存する。また、点線で示した家具の重さ・落下物の危険度についてはパラメータとし、これにより負傷の程度を変化させた。

次に Fig. 3には室内からの避難の可能性を求める ET を示す。避難についてはいろいろなケースが考えられ、そのすべてを考慮して ET を作るのは非常に困難であるので、ここでは手始めとして、ある部屋から

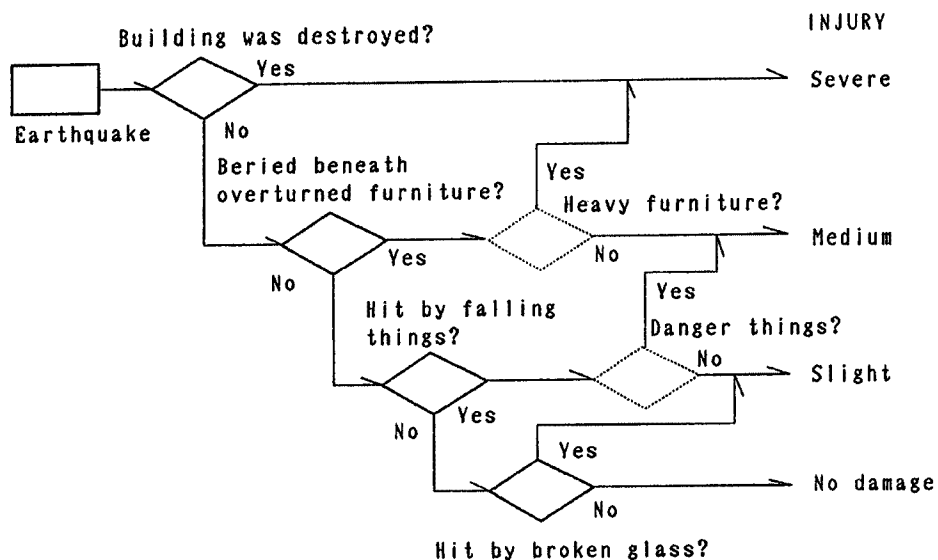


Fig. 2. Event tree for occurrence of injury in living space.

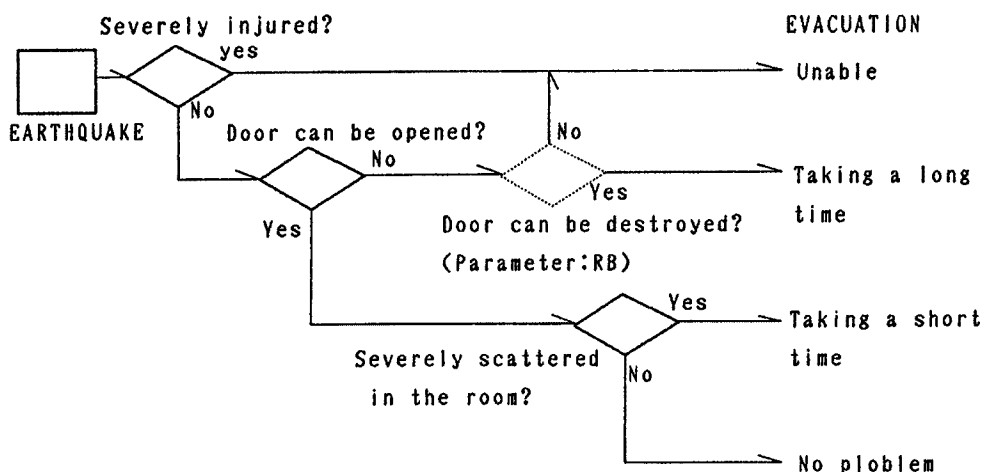


Fig. 3. Event tree for possibility of evacuation to outside of the room.

玄関のドアを通過して屋外に出られる可能性について考慮した。また、避難時における人間の心理状態についてもここでは考慮していない。ET は、負傷を負ったか・開口部が開くか・室内は散乱しているか、を判定の項目として構成され、これにより避難不能・時間がかなりかかる・時間がややかかる・支障無しの4段階の程度毎に割合が求められる。このうち、負傷の割合は Fig. 2 の ET より求められ、開口部の開閉は構造物の変位応答より、室内の散乱は構造物の速度・加速度応答よりそれぞれ求められる。点線で示したドアの破壊のしやすさ (RB) はパラメータとして扱った。

室内における火災の発生に関しては、Fault Tree Analysis を用いてその確率を求める。Fig. 4 には室内火災の発生を頂上事象とした Fault Tree (FT) を示す。室内火災の原因としては、火器などからの出火・薬品による出火・ガス爆発・電線などのショート等が挙げられるが、ここでは、これまでの地震火災の主な発生原因である、火器によるものと薬品によるものについて示している。また、火災発生の原因となる火器としてはストーブなどの暖房器具、台所のコンロ、ローソクやランプ等多くのものが挙げられるが、ストーブとコンロからの火災発生率が非常に高いものと考えられる。ここで挙げた基本事象のうち、点線で示した転倒や落下に関する事象は、これまでも述べてきたように、既往の推定手法を用いてその確率を求めること

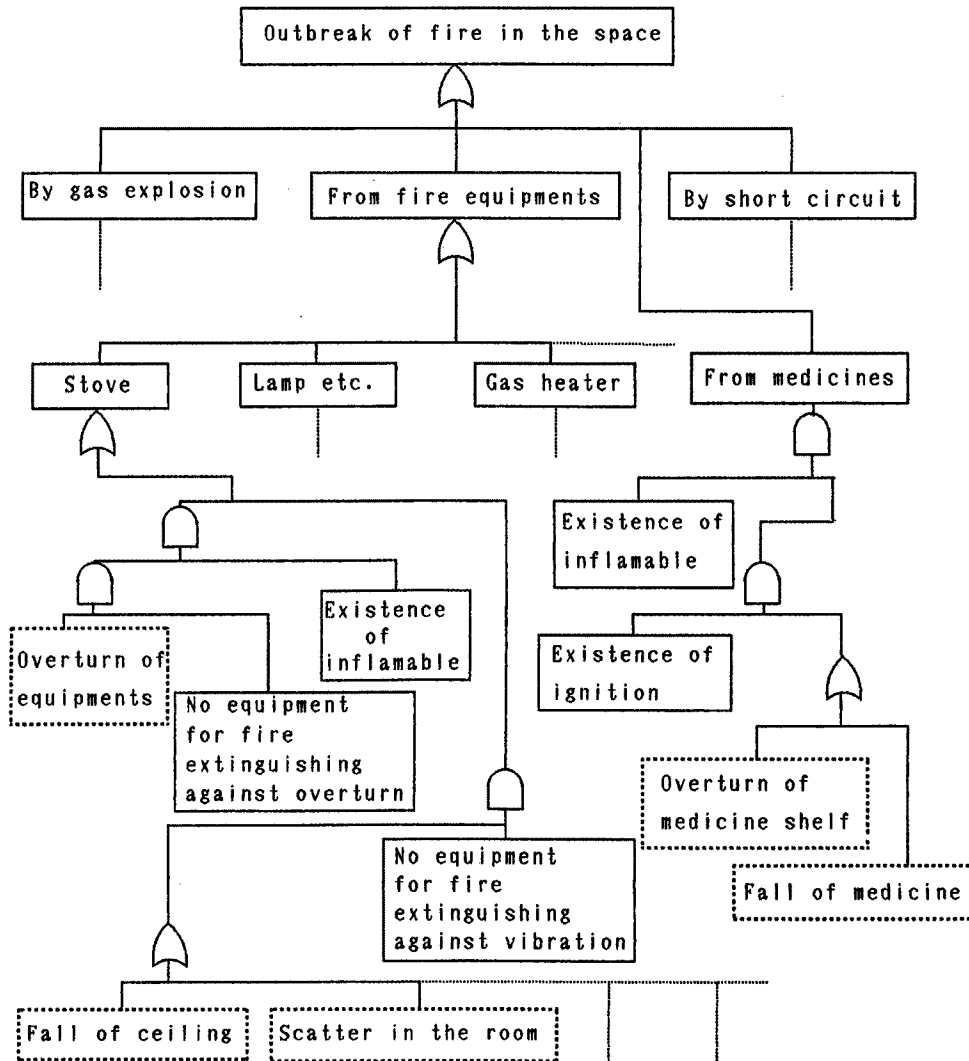


Fig. 4. Fault tree for outbreak of fire in living space.

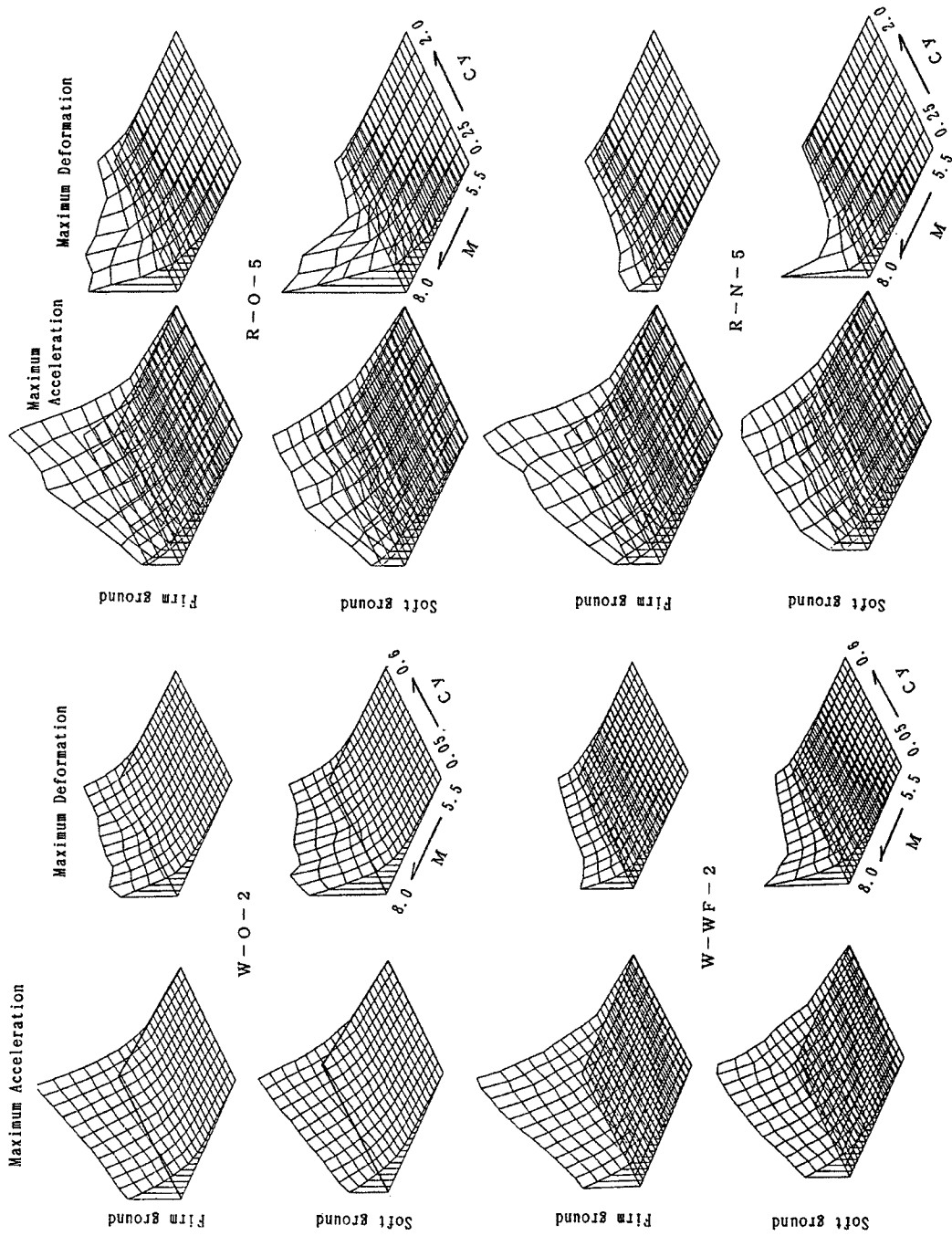


Fig. 5. Characteristics of maximum acceleration and deformation of structures.

が可能である。しかし、その他の事象については、データの乏しい現状ではその率を求めることは非常に困難であるので、ここではパラメータとして取扱うこととした。

これまで述べてきたように、室内の機能被害を推定するのに必要な事項のうちの多くが構造物の変位応答、あるいは加速度（速度）応答に依存しており、これまでに開発してきた構造物の応答推定の手法を用いて推定が可能である。この手法によって得られた構造物の最大変位応答 ( $U_{max}$ ) 及び最大加速度応答 ( $A_{max}$ ) について、地震のマグニチュード ( $M$ ) と構造物の強度（せん断耐力係数  $C_y$ ）をパラメータにとり、その応答量の変化の一例を Fig. 5 に示した。対象としたのは在来軸組工法による2階建て住宅 (W-O-2)、枠組壁工法による2階建て住宅 (W-WF-2)、旧基準による5階建てRC構造物 (R-O-5) および新基準による5階建てRC構造物 (R-N-5) である。入力は全てのケースで同じ条件とし、震央距離 50 km の場合についてマグニチュードのみを変化させて模擬地震動を作成し用いた。建物の建つサイトは軟らかい地盤、硬い地盤の2種を考慮した。

RC構造物では、最大変位はこれまでも示してきた様にマグニチュードが大きく、 $C_y$  が小さい場合に2次曲線的に急激に大きくなる傾向を示す。一方、最大加速度については逆に  $C_y$  が大きい場合に大きくなる傾向を示しており、その傾向は、硬い地盤の場合、新しい構造物の場合において、より顕著である。木造住宅の最大応答については、 $C_y$  の変化に対してそれほど敏感ではなく、複雑な応答性状を示すのに対し、最大加速度はRC構造物と同様に、 $C_y$  の大きな場合に大きくなる傾向を示している。この様に、構造物の変位応答と加速度応答は、種々の条件のもとで、かなり異なった応答の性状を示すことが明らかである。特に加速度応答については、これまで建物の構造的被害を評価するために用いてきた変位応答の特性とは異なり、硬い地盤上の強い建物において応答量が大きくなる特性を持つことには注意が必要であると考えられる。

構造物の機能被害はこれらの各々に関与するため、その影響の度合に依って被害の特性は複雑に変化するものと考えられる。本研究では、これら機能被害の特性を明らかにするために、まず3章で構造物の加速度・速度応答による室内の散乱状況の推定をこれまでに開発した応答推定の手法に基づいて行い、さらには4章ではこれらの結果を用いて、一次的な負傷者の発生、室外への避難、室内火災の発生について概略的な推定を試みる。

### 3. 室内散乱率の推定

2章でも述べたように、家具の転倒や収納物の落下による室内の散乱は、負傷者の発生、室内火災の発生の原因となったり、室外への避難を困難にする。ここでは、地震時における室内の散乱率の推定を試みる。

#### 3.1 家具の転倒率・収納物の落下率の算定

家具の転倒は、地震時におけるフロアの加速度、速度に依存する。加速度に関しては、家具の端が浮き上がる時の重心でのモーメントの釣合より、以下のように加速度の下限値を示す尺度  $a_0$  が求められる。

$$a_0 = (B/H) \times g \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $B, H$  : 家具の奥行きと高さ、 $g$  : 重力加速度である。速度に関しては、家具の重心が鉛直線を越えるとき（重心が元に戻らずさらに回転してしまう場合）のエネルギーの釣合より、以下のように速度の下限値を示す尺度  $v_0$  が求められる<sup>8)</sup>。

$$v_0 \approx 0.4 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (\gamma^2 + i^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\gamma$  : 家具の重心から回転端までの距離、 $i$  : 家具の回転半径、 $\alpha$  : 家具の回転角度を示す。

ここでは、家具の転倒率を、この値を下限値とする正規分布で仮定する。変動係数は0.1と仮定し、 $a_0, v_0$  を平均から標準偏差の3倍を引いた値とすれば、正規分布の平均と標準偏差が求められ、これより得ら

れる分布曲線は家具の転倒率を表すこととなる。

Table 1 には標準的な家庭や事務室に存在する家具について、その標準寸法と、それより求められた  $a_0$ ,  $v_0$  および正規分布の平均値  $\mu_a$ ,  $\mu_v$  を示している。また、Fig. 6 にはこれらの家具について上記の方法で求めた転倒率を示す。上段が加速度の尺度、下段が速度の尺度より求めたもので、図中の数字は Table 1 中の家具の番号を示している。本棚などの細長いものは 150 gal, 20 kine 程度の入力で転倒を始めるのに対し、テーブルなどはほぼ転倒しないことがわかる。家具が転倒し始めるのは、気象庁震度階では V (加速度 80~250 gal), 修正メルカリ震度階では Ⅷ (加速度 94~202 gal) に相当するが、Fig. 6 によれば細い本棚, 食器棚, ロッカーなど転倒しやすい家具の転倒範囲とほぼ一致しており、上記の方法による家具の転倒率の評価はほぼ妥当であるものと考えられる。

ただし、既往の振動台実験などでは、速度の尺度の方が家具の転倒を良く表現しているという結果が得られている<sup>8)</sup>ので、ここでは速度による評価を主、加速度による評価を従として、8:2の割合で重み付け平均をとって家具の転倒率とした。また、加速度による評価は家具の端が浮き上がり始める状態、すなわち家具がロッキングを始め、それに伴い収納物が落下を始める状態を示すものと考えられる。そこで、ここで

Table 1. Criteria for overturn of furnitures

No.	Furniture	B×H×W (cm)	$a_0$ (gal)	$v_0$ (kine)	$\mu_a$ (gal)	$\mu_v$ (kine)
1	Table	70×70×120	980	84.0	1225	105.0
2	Bookshelf (1)	25×180×90	140	18.6	175	23.3
3	Bookshelf (2)	40×180×90	220	30.0	275	37.5
4	Wardrobe (1)	45×180×90	245	33.5	306	41.9
5	Wardrobe (2)	60×180×90	330	44.7	413	55.9
6	Sideboard	45×210×180	210	31.1	263	38.9
7	Wardrobe (3)	40×180×60	220	29.8	275	37.3
8	Cabinet	38×150×60	248	31.0	310	38.8
9	Stove	50×38×33	630	48.0	788	60.0

Ratio of overturn

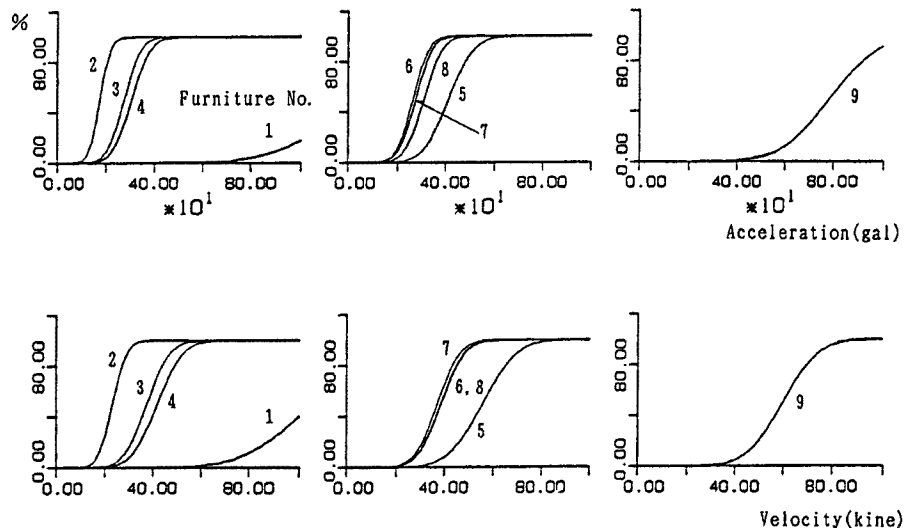


Fig. 6. Damage function of furnitures.

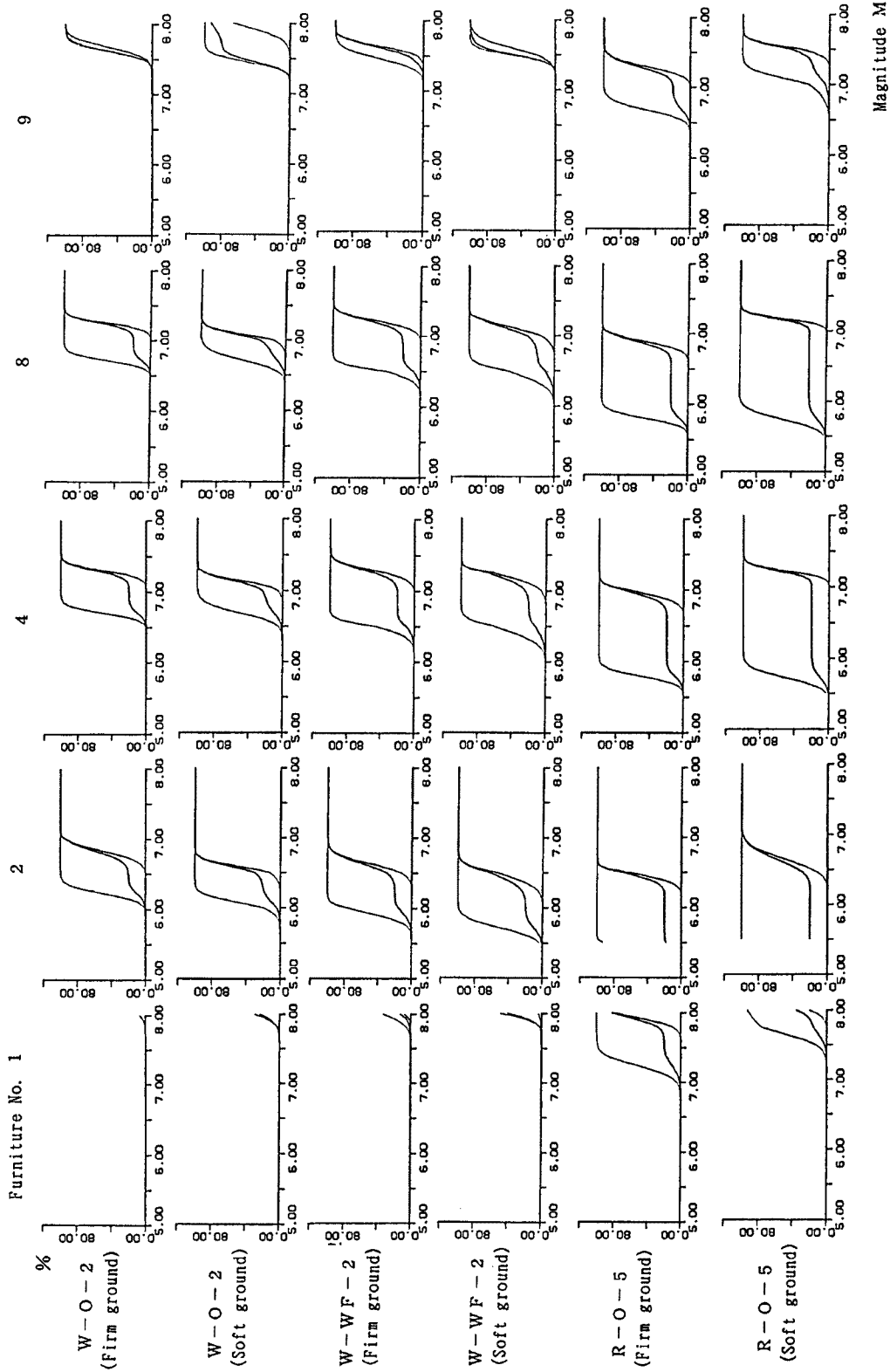


Fig. 7. Relation between magnitude of input earthquake and damage of furnitures. (Left line: for falling of contents, Center line: for overturn of furniture).



は加速度の尺度を用いた正規分布を収納物の落下率を表すものとした。Fig. 7 には、在来軸組工法2階建て木造住宅(W-O-2)、枠組壁工法2階建て木造住宅(W-WF-2)および旧基準による5階建てRC構造物(R-O-5)について、既往の応答推定手法によって得られたフロアレスポンス(入力地震動の震央距離50 kmの場合)を用いて上記の手法により求めた家具の転倒率(図中中央の線)、収納物の落下率(左側の線)を示す。木造住宅では、細長い家具はマグニチュード6程度より散乱・転倒が始まるのに対し、RC造ではかなり低い入力レベルから散乱・転倒が始まることがわかる。また、同じ構造物では地盤の状況(硬い地盤および軟らかい地盤)によってかなり散乱・転倒の程度が異なる。

### 3.2 室内の散乱率の算定

室内の散乱面積は前節で求めた家具の転倒率に転倒によって占められる面積を掛け合わせたものと、収納物の落下率に落下物の散乱する面積を掛け合わせたものの和で得られる。転倒によって占められる面積は家具の高さ×幅とし、落下物の散乱する面積は、家具が転倒していない場合と転倒した場合の2通りに分け、それぞれ家具から放射状に散乱するものとして面積を仮定した。得られた散乱面積を室内の可住面積(部屋面積から家具などによって占められる面積を差し引いたもの)で割ることによって散乱率を定義する。Fig. 8は硬い地盤上、軟らかい地盤上にある在来軸組工法2階建て木造住宅(W-O-2)と旧基準による5階建てRC構造物(R-O-5)最上階の8畳の居間に細い本棚とタンスがある場合の、震央距離50 kmで地震が発生した時の室内の散乱面積と散乱率を求めた一例である。木造住宅ではせん断耐力係数 $C_y$ が大きい方が散乱面積、散乱率共に大きくなる傾向を示すのに対し、RC造構造物ではその逆の傾向が見られる。また、一般にRC造の方がマグニチュードの小さい場合より散乱が引き起こされることが読み取れる。

## 4. 室内の2次被害の推定

### 4.1 構造物の変形による被害

負傷率、避難可能性を求めるためにはFig. 2, 3で示したように構造物の破壊、開口部やガラス窓の破壊など、変形による被害を求めておく必要がある。

#### a) 構造躯体の被害

構造体の被害についてはこれまでに開発してきた手法によって求めることができる。被害の判定については、これまで行ってきた通り、RC造の壁部分は大破する規準おして層間変形角で $5.0 \times 10^{-3}$  rad、フレーム部分は $7.5 \times 10^{-3}$  rad、木造住宅の場合は全壊する規準として層間変位で10 cmを平均とする正規分布の形状を持った被害関数を定め、シミュレーション解析の結果と併せて被害率を算定する。Fig. 9の左図には新旧の5階建てRC構造物(R-O-5, R-N-5)について震央距離50 kmの地震が発生した場合の被害率と地震の規模との関係を示す。古い建物では壁部分はマグニチュード7、フレーム部分は7.3程度から破壊を始めるのに対し、新しい建物では壁部分でも7.7程度までは大破しないことが読み取れる。

#### b) ガラス窓の被害

ガラス窓については、文献<sup>8)</sup>を参照して、以下の式でガラス窓の許容変形角を求めた。

$$\frac{\Delta}{h} = F \cdot \frac{2c}{h} \left( 1 + \frac{h}{w} \cdot \frac{d}{c} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\Delta/h$ :許容変形角、 $w, h$ :ガラスの見附寸法(幅, 高さ)、 $c, d$ :ガラスのエッジとサッシとの間のクリアランスである。また、 $F$ はガラスのはめ込み材による係数で0(硬化したパテ)~1(軟らかいシーラント)の間で変化する。ここでは、(3)式で求めた許容変形角を平均値とし、変動係数を0.1とした正規分布を考え、これを被害評価関数として用いることとした。応答計算によって各層の最大層間変形角が求められるが、これまでの研究成果ではガラス窓部分の層間変形はほとんど窓に集中することが明らかになっているので、この最大層間変形と上記被害関数とにより被害率を求める。Fig. 9の中央には $F=0.1$ の場合と

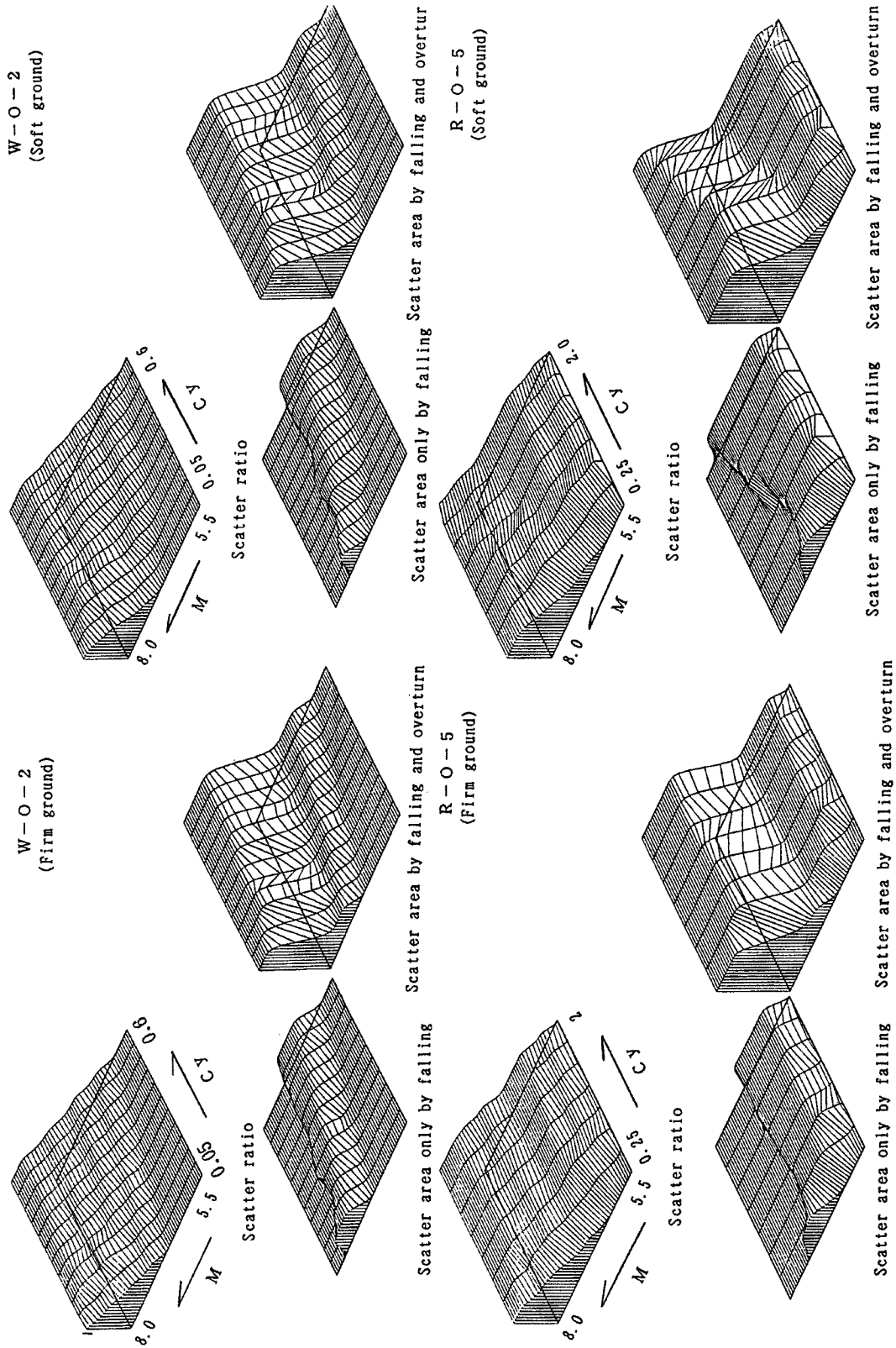


Fig. 8. Scatter area and ratio.

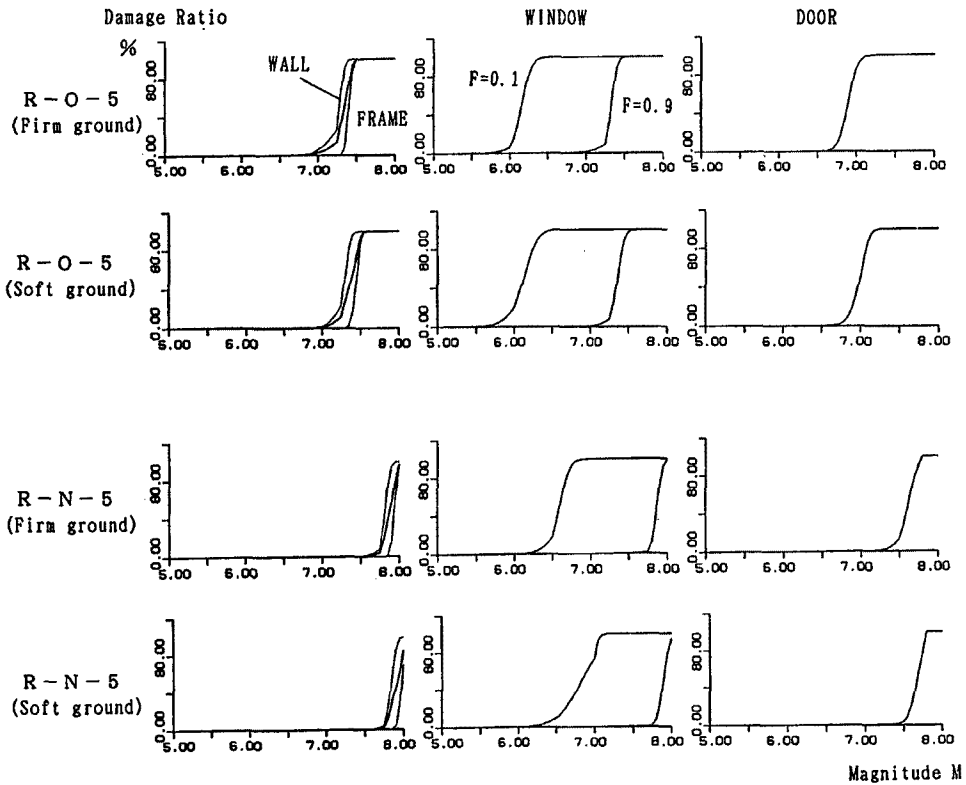


Fig. 9. Damage of structural and non-structural member by deformation.

0.9 の場合について求めた被害率を示した。パテが硬い場合はマグニチュード 6 程度から被害が現れるのに対し、パテが軟らかいとマグニチュード 7 から 7.7 程度まで被害が発生しない。また、全般的に硬い地盤上での被害の方が大きくなる傾向を示している。

c) ドアの被害

ドアの被害についても同様に以下の式によって許容変形角を求めた。

$$\theta = a/W \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $a$  はドア上のクリアランス (通常は 3 mm から 6 mm)、 $W$  はドアの幅を表す。ここでは、(4) 式で求めた許容変形角を平均値とし、変動係数を 0.1 とした正規分布を考え、これを被害評価関数として用いることとした。ただし、これまでの研究により、周囲の壁が破壊し始めると、ドアの水平変位は層間変位の 1.3~2.0 倍になることが確認されているので、変形の程度に応じて層間変位に 1.3 から 2.0 をかけてドアの変位を算出し、これにより被害を求めることとした。Fig. 9 右にはクリアランスが 3 mm の場合のドア (鋼製ドアの様な隙間の小さいドア) の被害率を示す。古い建物ではマグニチュード 6.7 程度、新しいものでは 7.3 程度から被害が発生し始める。

4.2 負傷率の推定

Fig. 2 の Event Tree に従って、これまでに求めた散乱率や被害率を用いて負傷率の推定を行った。Fig. 10 には震央距離 50 km の地震発生時の木造住宅 (在来軸組工法：W-O-2、枠組壁工法：W-WF-2) における負傷率を負傷レベルに分けて示した。ただし、対象とした部屋は細い本棚とタンスのある 8 畳間とした。重い負傷を負う率は建造物の強度  $C_y$  が小さく、また、地震のマグニチュードが大きくなるほど急激に高くなる。一方、中・軽度の負傷は、強度が大きな建造物においても比較的小さなレベルの入力で発生し

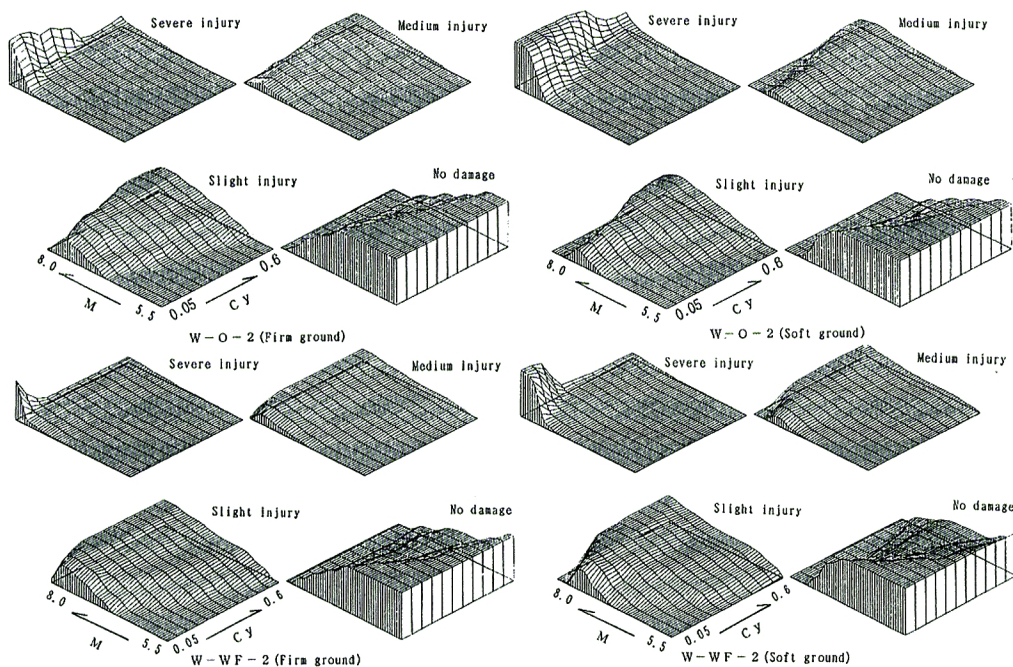


Fig. 10. Injury ratio in living space of wooden houses.

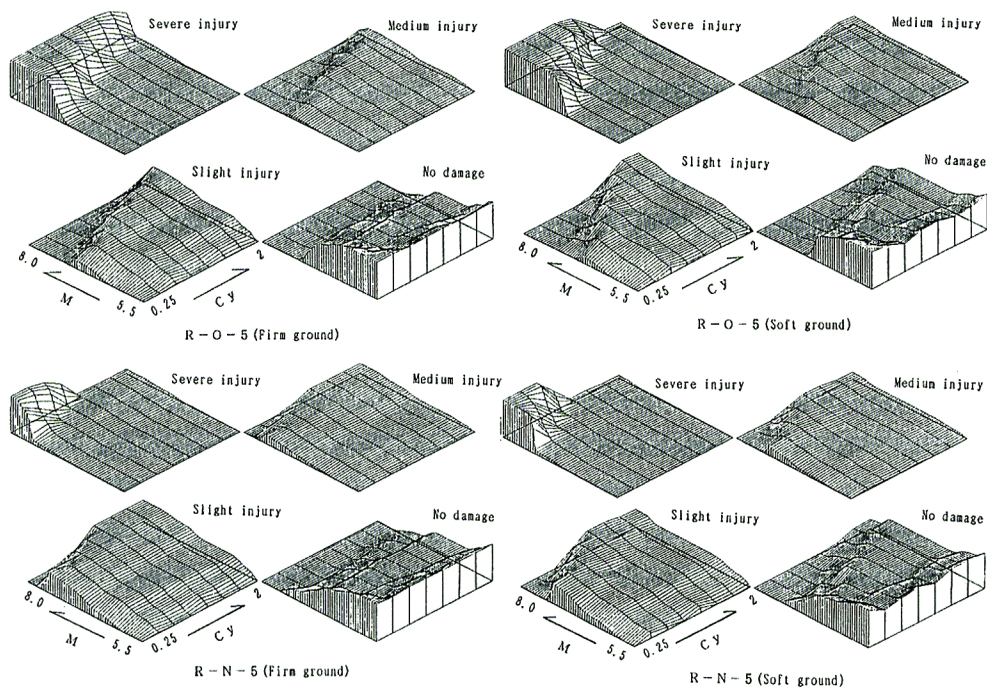


Fig. 11. Injury ratio in living space of RC structures.

ている。また、在来軸組工法に比べて枠組壁工法による住宅では重い負傷は発生しにくい、中・軽度の負傷はかなり発生することが明らかである。さらには、中・軽度の負傷は硬い地盤でもかなり発生していることが読み取れる。

Fig. 11 には同様に5階建てRC構造物(旧規準によるもの:R-O-5, 新規準によるもの:R-N-5)の最上階における負傷率を示した。基本的な傾向は木造住宅の場合と同様であるが、全般的に負傷率は高く

なっている。特に、低レベルの負傷はかなり小さな入力より発生していることが明らかである。

### 4.3 避難可能性の推定

ここでは、戸外への避難の可能性を、ある特定の部屋から戸外へ直接避難できる確率として定義し、Fig. 3 で示した Event Tree を用いて算出した。Fig. 12 には震央距離 50 km の地震が発生した場合の、新・旧の 5 階建て RC 構造物の 5 階の部屋（8 畳間）からの避難可能性を示した。各図の左は家具が転倒しやすい場合 (Table 1 中の家具 2 と 4)、右は転倒しにくい場合 (家具 3, 5) の結果を、また、各図上段の図は玄関のドアの隙間は小さいが壊し易い場合、中段は隙間が大きく壊し易い場合、下段は隙間が小さくかつ壊

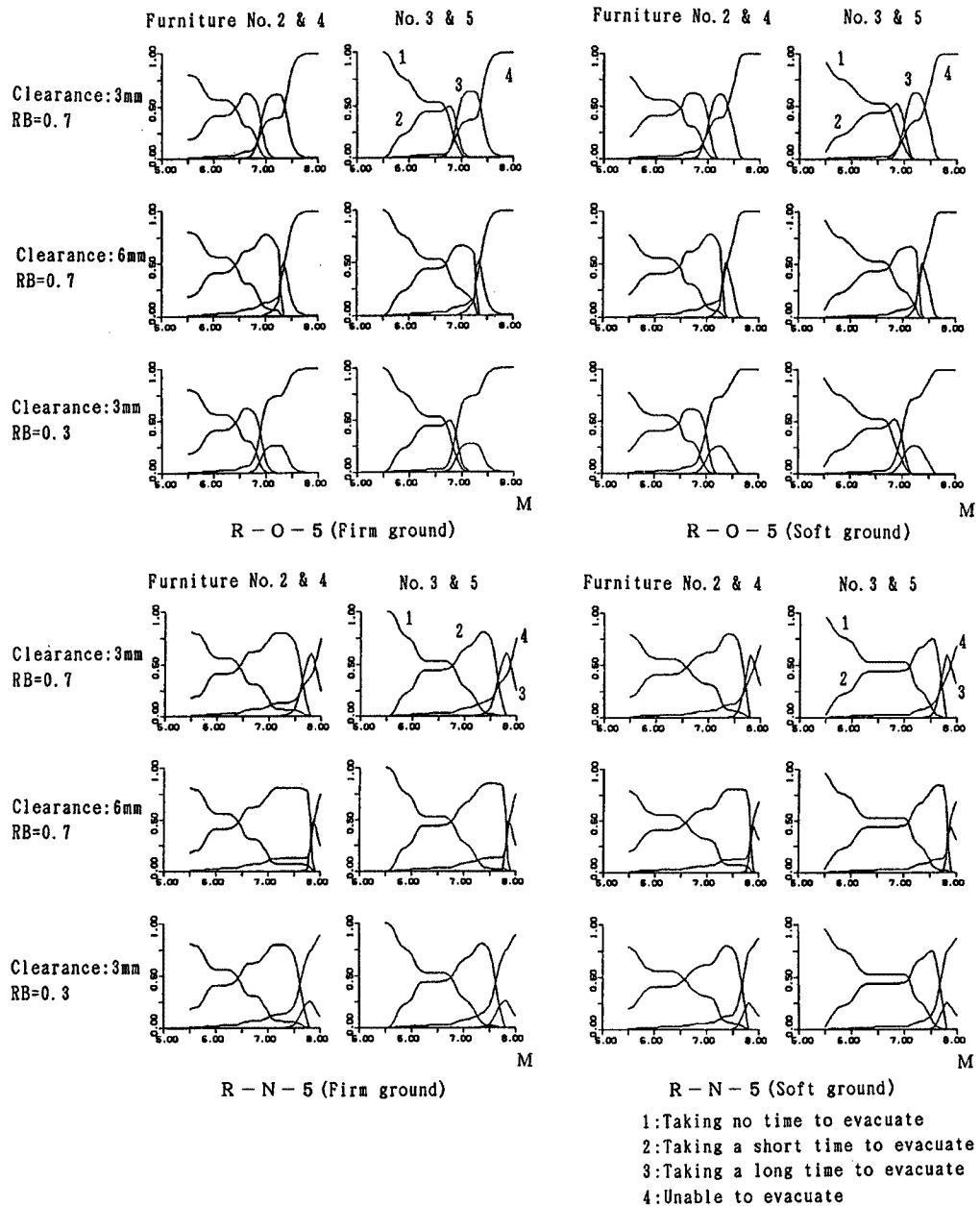


Fig. 12. Possibility of evacuation to outside of the home.

し難い場合の結果をそれぞれ示す。古い建物では、マグニチュード6.5程度から避難できないケースが生じているが、新しい建物では避難不能の確率はかなり低く、マグニチュード7.5程度まではやや時間がかかる程度である。また、ドアの隙間が小さい場合、大きい場合に比べてマグニチュードの大きな領域で避難の時間は急激にかかるようになる。加えて、ドアが壊せない場合には避難できない可能性が非常に高くなってくることが読み取れる。

#### 4.4 室内火災の発生率の推定

室内火災発生率の確率を Fig. 4 に示した Fault Tree に基づいて算出した。ただし、室内火災の原因の大部分が火器からの出火であるので、ここでは簡単のために火器（ストーブおよびコンロ）からの出火に限定した。基本事象のうち、器具の転倒、室内の散乱、天井の落下などは3章の手法を用いて算出できる。算出の条件は以下の通りである。

- 対象とした火器は、食器だなどキャビネットがある6畳の台所にあるコンロ（Hで表す）、および標準の本棚とタンスがある8畳の居間にあるストーブ（S）とする。
- 時刻は火災発生率が一番高い冬場の夕刻とし、その時点での火器の使用率は既往の調査を参照して、コンロ90%、ストーブ55%とする。

しかしながら、火器の周りに可燃物が存在する率  $P_k$  やストーブの耐震自動消火装置、転倒自動消火装置の装備率  $P_s$  などは、その値を設定することは非常に困難であるので、ここではパラメータとして扱い、考えられる範囲で変化させた。

Fig. 13 に上記の条件のもとで算出した震央距離を50kmの地震によるやや硬い地盤上での室内火災の発生率を示す。上図は在来軸組工法による2階建て木造住宅における出火率、下図は旧基準による5階建てRC構造物における出火率を表している。また、各図の横の列はストーブの耐震自動消火装置、転倒自動消火装置の装備率  $P_s$  を変化させた場合、縦の列は火器の周りに可燃物が存在する率  $P_k$  を変化させた場合を示し、図中のSはストーブ、Hはコンロからの出火を示し、Tは全出火率を示している。

木造住宅の場合、マグニチュード6.5程度から出火の可能性が生まれるのに対し、RC構造物ではマグニチュード5.5程度から可能性は生じており、出火の確率は木造住宅よりも高くなる傾向を示している。本解析の地震・地盤条件を用いて筆者らの手法を用いて家屋倒壊率を求め、関東地震の際の出火率と家屋全壊率との関係より経験的に求められた河角式によって出火率を推定すると、マグニチュード7までは出火率0%、マグニチュード7.2で4%、マグニチュード7.5で15%となり、全般的に本手法による出火率は入力小さいレベルで過大評価をする傾向にあると考えられる。自動消火装置装備率  $P_s$  を0から1.0まで変化させた場合、ストーブからの出火率は急激に減少し、 $P_s=1.0$ では当然ながら0となる。一方、可燃物が存在する率  $P_k$  を0.1から0.5まで変化させると、木造住宅ではストーブからの出火率は大きく変化するのに対し、コンロからの出火はあまり変化しない。しかし、RC構造物では、コンロからの出火も大きく変じている。このようにパラメータの変化によって出火率は大きく変動するため、実際の出火率を精度良く推定することは現状では困難である。しかし、より多くのデータを集めれば評価に必要な諸変数の精度も向上し、さらに感度解析などを用いれば本手法の精度自体も改善されて行くものと考えられる。

## 5. ま と め

居住空間における地震被害は単に構造物の被害という尺度だけでは評価できず、居住空間の持つ生活機能の面からも生活困窮度や経済的困窮度などの指標を用いて評価していくことが重要である。本研究ではその第一歩として、居住空間としての構造物の機能が地震によってどれだけ損なわれていくかを、低い入力レベルから高いレベルまで統一された手法・統一された尺度を用いて評価することを試みた。本研究によって得られた成果を以下に列記する。

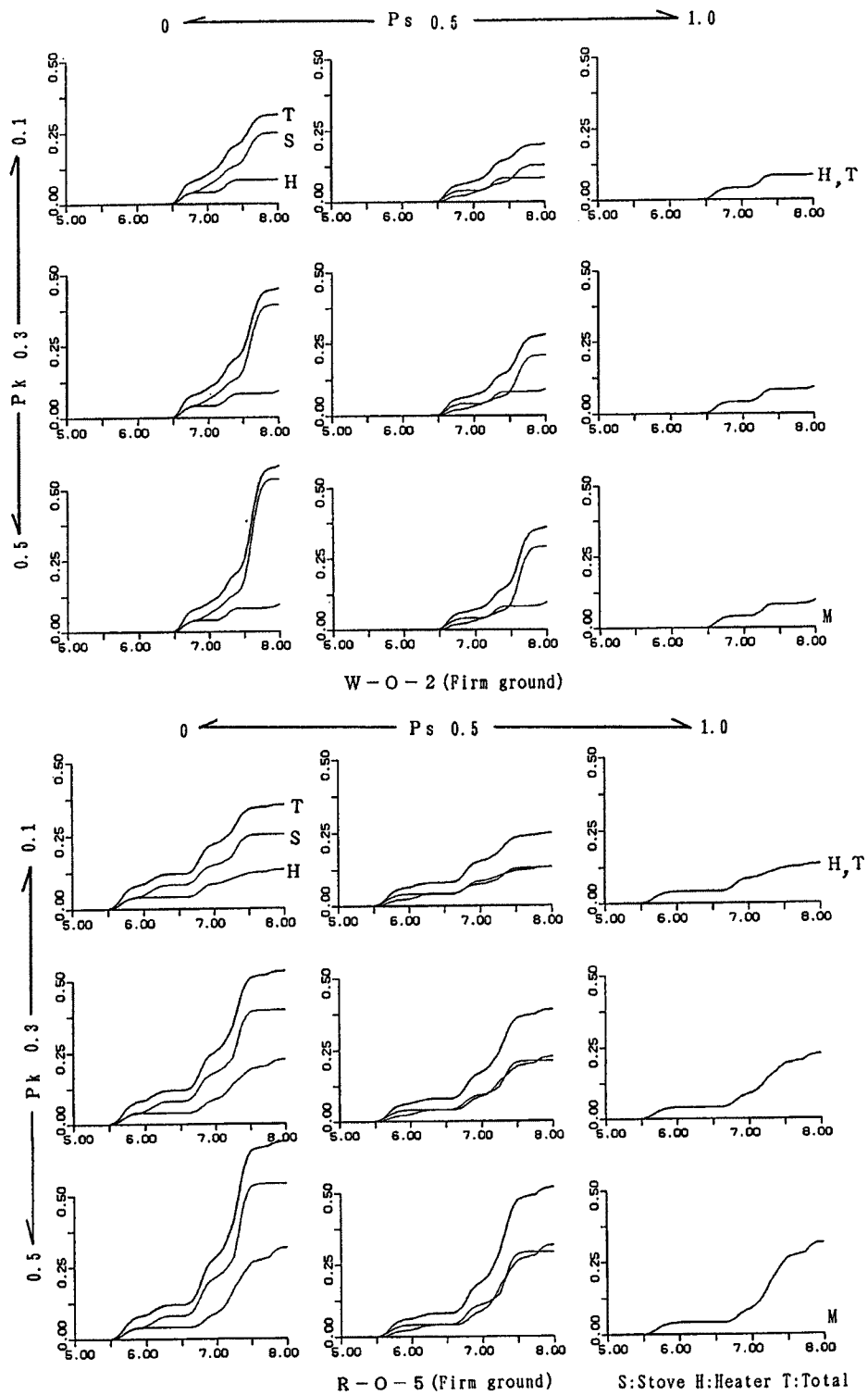


Fig. 13. Possibility of outbreak of fire in the room.

1) 居住空間における地震被害の発生の形態を整理し、そのうちの室内火災、人的被害の発生および室外への避難について Event Tree や Fault Tree を構築し、その発生形態を明らかにした。

2) これまでの地震応答計算に基づく応答推定手法を用いて非構造部材などに関する直接被害や室内の散乱状況などを明らかにした。

3) これらの推定結果をもとに、Event Tree Analysis の手法を用いて室内空間における負傷率、避難可能性の被害の推定を試みた。その結果、これらの機能被害は、構造的な被害の場合とは異なった複雑な性状を示すことが明らかとなった。特に、構造的な被害は小さいと考えられる条件下でも、中程度の機能的被害はかなりの割合で発生し得ることが示された。

4) 室内火災の発生率を Fault Tree Analysis をもとに算出し、定性的な性状を明らかにした。しかし、現状では基本事象の中に不確定な要素が多く推定精度は十分ではないものと考えられる。

今後は、実証的なデータを蓄積することによって、より精度の高い推定を行うと共に、居住空間の持つ機能を生活困窮度や経済的困窮度などの指標を用いて評価していくことを試みる予定である。最後に本研究における数値計算には京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センターの MELCOM 70 MX/3000 および NEWS NWS-3860 を使用したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 亀田弘行・岩井 哲・北原昭男・能島暢呂：都市耐震のための研究領域の分析，土木学会関西支部都市防災シンポジウム講演集，1987，pp. 207-216.
- 2) 亀田弘行・岩井 哲・北原昭男・能島暢呂：都市震害のシステム分析序論，京大防災研年報，第31号B-2，1988，pp. 67-91.
- 3) 北原昭男・藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究（その1）——木造構造物の地震応答推定——，京都大学防災研年報，第31号B-1，1988，pp. 105-126.
- 4) 北原昭男・藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究（その2）——低層鉄筋コンクリート構造物の地震応答推定——，京都大学防災研年報，第32号B-1，1989，pp. 149-163.
- 5) 北原昭男・藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究（その3）——木造構造物群の地震被害推定——，京都大学防災研年報，第33号B-1，1990，pp. 163-177.
- 6) 北原昭男・藤原悌三：建築構造物群の震害予測に関する研究，京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告，第5号，1991，pp. 11-39.
- 7) 仙台市消防局・東北工業大学工学部佐賀研究室編：宮城県沖地震——市民の対応と教訓——，全国加除法令出版，1980.
- 8) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領，1985.