

## 地震の揺れによる人間の行動能力への影響と室内環境の変容に関する 既往研究の成果

### 1. 地震の揺れによる室内環境の変容

#### 1.1 地震の揺れによる物品の挙動についてのこれまでの研究

室内における人的被害に関する研究としては、(1)「室内および家財等の被災の実態把握」、(2)「建物被害の実態把握」、(3)「室内および家財等の被害状況の定量的把握に関する研究」、(4)「家財等の振動台実験に関する研究」に大別される。これらは、現在推奨されている退避行動の整理図の「危険因子」と「人が体験する困難な状況」の部分に該当するが、(1)は「危険因子」の要素について、(2)は屋外の「危険因子」や整理図には含まれていない建物被害等に関係する要素について、(3)は「危険因子」がどのように「人が体験する困難な状況」になるのか定量的に把握する手法について、(4)は(1)～(3)を実験により明らかにする研究として位置づけられる。

#### (1) 地震時の家財等室内被害状況に関する研究

##### ① 1978 年宮城県沖地震

志賀ほか<sup>1)</sup>は、1978 年宮城県沖地震の際、東北大学工学部において家具の転倒被害についての調査を行った。その結果、7～9 階の単体の家具の転倒率は 35～38%であり、1～3 階では、移動した家具はあったが転倒した家具はなかったとしている。

金子・田村<sup>2)</sup>は、1978 年宮城県沖地震の実態調査（志賀ほか<sup>1)</sup>）を活用して、設置状況が家具の転倒に及ぼす影響について検討している。その結果は以下のとおりである。

- ・「独立」の家具では、家具の B/H（奥行／高さ）が床との摩擦係数を下回る場合に転倒しており、床の滑りやすさと転倒しやすさには相関がある。
- ・「壁際」の家具の転倒しやすさは、「独立」の家具と同程度である。これは、床が滑りやすく、初期の揺れで家具が滑って壁から離れるためと考えられる。
- ・「背中合わせ」の家具の場合には、互いに衝突することにより、「独立」の家具より転倒しやすい傾向がある。

##### ② 1987 年千葉県東方沖地震

岡田<sup>3)</sup>は、1987 年千葉県東方沖地震について、千葉市内の 14 階建て高層住宅の全世帯に対するアンケートにより、ガラス食器類の被害、家具の移動・転倒、地震時の行動の調査を実施している。その結果、階数が高いほど被害が大きく、震度が高いほど、階数が高いほど行動に支障が生じる人が増えている。また、ガラス食器類の落下・破損は 3 階（震度 4.5 程度）以上で発生し、大きな家具の落下・転倒は 9 階（震度 5 程度）以上で発生しているとしている。

##### ③ 1993 年釧路沖地震

清水・岡田ほか<sup>4)</sup>は、釧路沖地震後に釧路市内の集合住宅において実施した戸別被害調査により、室内被害散乱状況に関するデータベースを作成し、これをもとに、散乱促進・抑制要因を抽出し、重回帰分析によりその影響の大きさを分析した。その結果、震度・家具数は危険度促進要因として、面積、開口率は危険度抑制要因として働いているが、特に強いものではなく、それぞれが複雑に影響しあっているものと考えられるとしている。

また、ある住戸の家具の配置をもとにマイクロゾーンネーション手法（岡田<sup>24)</sup>）による推計を行った結果、実際の被害の結果と概ね一致しており、この手法の有用性にも言及している。

翠川・佐藤ほか<sup>5)</sup>は、1993年釧路沖地震で震度6が観測された釧路市内にある釧路市役所と釧路地方気象台を対象としたヒアリング調査及び現地調査により、事務室内の家具の設置状況と転倒率の関係を調査し、以下の結果を得ている。

- ・「単体」の家具より「二段積み」の家具の方が転倒しやすい。
- ・「二段積み」の家具は上段のみが転倒するケースが多いが、建物上階では、下段から転倒する例が見られる。
- ・「単体」の家具の場合、「背中合せ」は「壁際」より転倒しやすい。
- ・「二段積み」の場合、「背中合せ」と「壁際」の転倒のしやすさに明瞭な違いは見られない。

この結果から、家具の積み重ね方や背後の状況など、家具の設置状況は防災対策として考慮すべき重要な要素であるとしている。

また、翠川・佐藤ほか<sup>6)</sup>は、1993年釧路沖地震で震度6が観測された釧路市内にある釧路市役所と釧路地方気象台での家具の転倒調査に基づき、事務室内の家具の転倒率と床応答の最大速度値との関係を検討している。その結果、東京都防災会議による震度階の解説表に基づいて設定された岡田・鏡味<sup>22)</sup>の家具転倒率の式は、住宅内の家具の転倒危険度は評価できるであろうが、本調査結果のような事務室内の家具の転倒危険度を説明せず、家具の転倒限界速度はその設置条件で大きく異なることを指摘した。具体的には、多段積みの家具を上下に連結するだけでも高い効果が得られること、家具を背中合わせに配置する場合には、さらに背後の家具を連結することが望ましいことが指摘されるとしている。

さらに、村上・岡田<sup>7)</sup>は、釧路支庁管内の全小学校の児童の保護者を対象にアンケート調査を実施し、震度と室内の散乱程度との関係を調査している。調査結果をもとに数量化I類で室内の被害関数を算定した結果、台所、居間、子供室等の散乱被害が大きく、浴室・トイレ、玄関・階段等のユーティリティ・通路空間の被害が小さいとしている。

#### ④ 1995年兵庫県南部地震

日本建築学会近畿支部<sup>8)</sup>は、1995年兵庫県南部地震において、建物被害や室内被害等について、アンケート調査を行い、居室の散乱について検討を行っている。その結果は

以下の通りである。

1) 震度による差異

震度 7 の地域では約 6 割の居室が大きく散乱し、散乱を免れた居室は 2 割弱だった。

2) 住宅形式・構造による差異

室内の散乱被害は、高層の住宅ほど、より広い地域に被害が及んでいた。

3) 建物の高さによる差異

高層の建物の散乱は低層の建物の 2 倍に及んでいる。

4) 建築年数による差異

震度 7 の地域以外の災害救助法適用地域（震度 7 の周辺部）では、築 15 年以上の住宅に被害がやや大きくなっていったが、震度 7 地域では大きな差はなかった。

5) 床材料の違いによる差異

震度 7 地域では有意な差はなかったが、その周辺部では、床の摩擦係数の大きいもののほど散乱が大きかった。

6) 建物の被害との関係

居室の被害の大きいものは建物被害も大きい。建物被害がなくても散乱被害があったものが 1.5 割あった。一方で、建物被害があっても散乱のない居室もあり、物の置き方等住まい方も散乱の要因になっている。

また、山本・佐伯<sup>9)</sup>は、阪神地区の金融機関従業員へのアンケート調査により、兵庫県南部地震における阪神地区の家財被害の様相について報告している。その結果はサンプルの代表性の検討が必要としながらも以下のとおりであるとしている。

1) 建物被害の少ない地域でも家財被害が発生している。

2) 被害率の高い品目は、転倒しやすい食器戸棚 (50.3%)、本棚 (38.7%) 等と、転落しやすい仏壇 (37.2%) や電子レンジ (30.2%) である。

3) 建物被害が大きくなると家財被害は大きくなるが、負傷率はそんなに際だって大きくなることはなかった。

4) 建物タイプ毎の家財の被害状況としては、以下のとおりである。

・木造構造の場合、在来型と 2×4 などでは被害率に大きな差がある。

・鉄筋コンクリート造では、在来木造と同じ程度の被害率であるが、中高層建物が多いことから床応答の増幅が原因と考えられる。

⑤ 2003 年十勝沖地震

名知・岡田ほか<sup>10)</sup>、岡田・田村<sup>11)</sup>は、2003 年十勝沖地震の主要被災地で行った実態調査を基に、人的被害発生事象を室内変容と人間行動の集積・連鎖として解析を行っている。その結果、転倒率 10%以下が約半数を占めており、震度 6 弱で重量家具の約 50%が転倒するという全国平均に比べ、計測震度が 6 弱の地域としては転倒率がやや低いとしている。また、全ての家具が転倒したとしても安全空間が確保される閾値として、床面積に対する家具数 0.3 個/m<sup>2</sup>、壁長に対する家具数 0.5 個/mを示している。さらに、負

傷率は、家具転倒率や室内散乱率、建物被害程度とは比例関係にはなく、震度とは概ね正の相関がある。この理由として、震度の増加は行動随意性を低下させるもので、震度は被害率と行動困難性を総合的に評価し得る指標であるからとしている。

#### ⑥ 2004年新潟県中越地震

名知・岡田ほか<sup>12)</sup>は、2004年新潟県中越地震の被災事例における室内人的被害を把握し、室内変容・人間行動と負傷の関係を明らかにするとともに、当該地震の被災特徴を抽出することを目的として、個別聞き取り調査を行った。その結果、他の地震より負傷率が低い傾向があるのは、床面積あたりの家具数が少なく、各部屋が中廊下につながっているというこの地域特有の間取りが多く退避が容易であったためとしている。また、地震発生時刻が夕食時であり、台所は家具密度が高い(0.8個/m<sup>2</sup>)という用途特性から、女性の負傷率が高くなっていると推測している。

結論として、2004年新潟県中越地震による負傷者が少なかった理由は、地震時の安全空間のみならず、避難・救助経路として、廊下の存在は有効であるなど、間取りと家具配置が関係しているとしている。

#### ⑦ 2003年十勝沖地震と2004年新潟県中越地震との比較

名知・岡田ほか<sup>13)</sup>は、2003年十勝沖地震と2004年新潟県中越地震との比較により、負傷発生の一般的要因と地域的要因の抽出を行った。両地域ともに最大の建物被害は建物が傾く程度で構造的内部空間損失はほぼ見られなかったが、中越地震が建物被害率に比較して負傷率が低いのは、建物家具密度が地域平均で、十勝0.41個/m<sup>2</sup>に比して中越0.35個/m<sup>2</sup>と低かったこと、また、中越地域は中廊下という特徴的な間取りが多く、諸室が中廊下(安全空間)と直結しており、安全な避難経路が常時確保されており、地震時に安全空間への移動や屋外避難がより容易であったことによるもので、さらに、北海道は熱効率のため廊下のない居室隣接型の間取りのため散乱室内を通過して避難せざるを得なく、その結果避難時負傷率が高くなっていると考察している。すなわち、室内環境の変化と人間行動の連鎖によるものであり、結論として、低い家具密度や広い中廊下という地域特性が負傷発生抑制に大きく寄与したとしている。

#### ⑧ 福岡県西方沖地震

花井<sup>14)</sup>は、福岡市で被害の大きかったとされる、玄界島、志賀島勝馬、西区宮浦地区を対象に聞き取り調査を行い、主に木造住宅における平地やミニ開発された斜面など地形の異なる所および造成の有無での建物内部の揺れの違い等について考察している。その結果は以下の通りであるとしている。

- ・本調査では公表されている震度より1段低い震度5強が6割近くと多い。
- ・盛土、切土盛土混在の敷地にある住宅は揺れが大きくなり、被害が甚大である。
- ・束石基礎の場合、布基礎に比べて揺れは大きくなる。

## ⑨ 2007年能登半島地震

岡田・名知<sup>15)</sup>は、能登半島地震における被害の概要を被害統計資料等から把握し、主要被災地である輪島市および穴水町でのアンケート調査により詳細を分析している。結果として、被害統計から当該地域の住家耐震性は日本平均的かやや低いと推察され、調査により耐震性は全国平均より低く、筋交いや一階壁量の不足に起因していることが見てとれたとしている。室内については、統計資料により床面積が広いため相対的に負傷危険領域率が低く負傷率も低かったと推察されたとしている。また、石川県は周囲を廊下に囲まれた田の字型の間取りが特徴で、中越と十勝の中間の危険度であると考察されている。

## ⑩2005年兵庫県南部地震・2003年十勝沖地震・2004年新潟県中越地震・2007年能登半島地震の各地震における安全領域および危険領域と負傷危険性の関係

青木<sup>16)</sup>は、2005年兵庫県南部地震・2003年十勝沖地震・2004年新潟県中越地震・2007年能登半島地震の被災世帯への聞き取り調査の結果に基づき、家具の転倒等による空間損失等を考慮して負傷の発生の検討を行っている。その結果、危険領域での保持（静止）が最も負傷率が高く、次いで危険領域での作業となっている。危険領域での作業の割合が低くなっているのは、家具保持や弱者介護がプラスに働いたためとしている。逆に、負傷割合が低いのは安全領域での作業と保持であり、この2つの負傷割合は5%未満であり、また、その負傷原因は本人の転倒や柱に衝突等であり、地震時に無理な行動をしなければ負傷割合は限りなくゼロに近づくことが予想されるとしている。このことから、安全領域と危険領域を居住者が把握し、安全領域内での落ち着いた行動が地震時の負傷を防ぐために重要であるとしている。

## (2) 地震時の建物被害状況等に関する研究

### ①2005年兵庫県南部地震

早坂・石田ほか<sup>17)</sup>、嘉嶋・高田ほか<sup>18)</sup>は、神戸市内の9地域を選定し、兵庫県南部地震による地域内の建物属性と建物被害との関係および地表最大加速度との関係について調査・分析を行っており、結果は以下の通りであるとしている。

- ・各築年代において、木造の被害率がS（鉄骨造）、RC（鉄筋コンクリート造）、SRC（鉄骨鉄筋コンクリート造）より高い。
- ・構造形式によらず年代の古い建物の方が全壊率が高い。
- ・木造建物全体で比較すると、瓦葺の全壊率が瓦葺以外より高い。ただし、昭和56年以降の建物だと瓦葺とそれ以外では無被害の比率には差があるが全壊率には大差はない。
- ・S、RC、SRC造の階数別では、8～16階建かつ年代の古い建物に全壊が集中している。
- ・400gal強で被害が発生し始め、500gal程度で全壊が発生し始める。600galを越える

- と急激に被害率が上昇し、600gal で 50%の被災対象建物が何らかの被害を受けている。
- ・同一の被害率に対する加速度は、木造の方が S、RC、SRC 造より 100gal 程度低い。
  - ・古い木造だと 400gal 程度で全壊が認められるが、1972 年以降の建物では 650gal 程度まで全壊が発生しない。

## ②2005 年福岡県西方沖地震

山口<sup>19)</sup> は、福岡市中心部の建築物について、窓ガラス、外壁の表面に張られている仕上げ材、外部の天井材などを中心とする非構造部材について目視及び聞き取りによる被害調査を行い、以下の結果を得たとしている。

- ・福岡市中央区の建物 A（昭和 36 年竣工、RC10 階建て）は、構造体の破損はほとんどないが、全 1608 枚のガラスのうち 444 枚が破損した。また、この建物の可動窓の破損率は 1%未満で、はめ殺し窓ガラスの被害が大きく、これは各階の層間変形によるものであるとしている。
- ・この窓ガラスの破損率は中間階（4～6 階）が比較的高く、方向的な特性は見られない。網入りガラスは破損しても落下しておらず、熱対策フィルムのガラス飛散抑制効果は見られなかった。
- ・ショーウィンドウのガラス被害について、ガラスの対角以外の箇所から起こっており、どの位置で層間変形角が最大となるか等ガラスとサッシの間のクリアランス（隙間）について検討する必要がある。
- ・薄い大判の石材をセメント系団子や樹脂のみで接着する構法の部分の被害が大きい。
- ・躯体が破損している場合は表面に張られているタイルにも破損や剥落が見られた。
- ・タイルが水平打継ぎ部を跨ぐように張られている場合のタイルの破損率が高く、垂直方向の伸縮調整目地の位置を検討すべきである。
- ・外壁が湿式表面仕上げされた建物の老朽化が進行しており、被害率も大きい。
- ・空中連絡通路の仕上げ材など、都市の中心部の公道上空に設けられる建築部分の被害も大きい。

また、寺西・菊池<sup>20)</sup> は、福岡県中心市街地におけるブロック塀の悉皆調査を行い、伊藤・菊池<sup>21)</sup> は、その調査結果等に基づき塀の構造と被害の関係について検討し、以下の結果を得たとしている。

- ・金属製フェンスを有するものも含めたブロック塀の倒壊率は 4%であった。
- ・無補強のれんが塀の倒壊率は 36%と非常に高い。
- ・倒壊した塀は警固断層上またはその東側に多く分布し、南北方向に倒壊した塀が多い。
- ・倒壊したブロック塀はいずれも基礎や縦筋などに関して構造欠陥が見られた。
- ・いずれの調査地域でも、ブロックを半分から 1 段程度地中に埋め込んで基礎代わりとしたブロック塀が非常に多いのが特徴である。このタイプの塀は壁体脚部やブロック 2 段目下部から転倒しているケースが多く、地中に根入れされたブロックが上部壁

体と一体となって転倒しているケースは少なかった。これは、壁体の曲げ応力が著しく低いためであり、縦筋が入っていないまたは縦筋の配筋密度が低い等の理由が考えられる。

- ・鉄筋の腐食やそれに伴うブロックのひび割れなどが多く見られるなど、倒壊した塀は古い物が多い。

### (3) 室内および家財等の被害状況の定量的把握に関する研究

#### ① バルナラビリティ関数（正規分布に基づく統計的被害関数）

岡田・鏡味<sup>22)</sup>は、東京都防災会議（1980）の「地震の震度階解説表」に記載されている震度階ごとの定性的な被害内容を定量化し、建物被害、屋内被害、人間行動能力についての正規分布の累積密度関数に基づく被害関数（バルナラビリティ関数）を提示している。これと実被害データ（1978年宮城県沖地震、1982年浦河沖地震、1983年日本海中部地震、1987年千葉県東方沖地震）から算出した結果との整合性が確認され、被災対象の耐震性に関する平均像としてのバルナラビリティ関数の有効性が示されたとしている。また、各種の屋内収容物についての関数も提示されている。さらに、屋内被害だけではなく、人間行動能力の低下についての関数も示され、両者の積によりケガ等の人的被害の評価が可能となるとしている。

今後は、実際の被害例に基づく各種の詳細なバルナラビリティ関数を早急に整備していくべきであるとしている。

#### ② アンケートに基づく被害関数の導出

村上・岡田<sup>7)</sup>は、1993年釧路沖地震について、アンケート調査により、震度と部屋の散乱状況の関係を調査した。アンケートでは、震度に関する質問と、部屋毎の室内被害の状況、家具固定の状況、使用火気と出火危険、家族の負傷状況、地震時の行動についての質問を実施した。結果として、台所、居間、子供室などの居室系が散乱被害が大きく、浴室・トイレ、玄関・階段などのユーティリティ・通路系の空間が被害が小さいことが示されている。また、岡田・鏡味<sup>22)</sup>のバルナラビリティ関数を用いて被害関数を求め、部屋毎に家具の散乱率と震度との関係が系統的に説明されたとしている。

また、村上・竹内ほか<sup>23)</sup>は、1995年兵庫県南部地震のアンケート調査（既存）に基づき、家具の被害率を集計した結果、部屋別散乱しやすさの順序や負傷率の変化は1993年釧路沖地震の結果（村上・岡田<sup>7)</sup>）と共通する傾向が見られたとしている。さらに、震度を独立変数として正規分布関数をあてはめ、回帰分析及び数量化Ⅰ類により家具被害関数を求めている。

#### ③ （室内の）マイクロゾーニング手法

岡田<sup>24)</sup>は、従来の室内被害の研究は、過去の地震の被害事例に基づく統計的推測式についてのものが多かったが、場所、人、時間で地震時の人的被害発生の危険度は異なる

ため、既存の被害統計資料に基づく統計的被害予測では詳細な検討は困難であり、ミクロな視点から発生事象を捉え、影響要因の抽出とそれらの関係性をモデル化して評価する住居空間個別の評価法（マイクロゾーネーション手法）開発の必要があるとしている。

具体的には、空間を $n$ 分割し、それぞれの空間におけるバルナラビリティ関数（岡田・鏡味<sup>22)</sup>）である「家具散乱等による危険度」と「人間の災害回避能力」及び、家具や人間がそこに存在する確率等の積によりその空間における人のもつ危険度を算出している。これを面的にプロットすると、様々な条件下における居室の安全性の比較考察が可能となるとしている。

しかし、要因の関係性、特に被災者の人間特性との関係において被震下の行動を精査するには、個々の事例をヒアリングし実態を詳細に書き留め、整理していく必要があるとしている。

また、翠川・佐伯<sup>25)</sup>は、このマイクロゾーニング手法（岡田<sup>24)</sup>）を簡略化した手法を提案している。これは、室内を $n$ 分割せずに、建物各階の床応答速度から、転倒時の家具占有面積、地震時室内閉塞率を求め、バルナラビリティ関数（岡田・鏡味<sup>22)</sup>）から人間の災害回避行動能力を求め、その両者から負傷率を求めるというものである。併せて、この手法について、米国のオフィスビルの事例でその妥当性を検証している。さらに、川崎市中心部のオフィスビル群に対し、この手法を適用し、直下地震を想定して室内の負傷者数を予測している。調査した全部屋の傾向として、倒れやすい家具は古い建物に集中的に存在するなど事務室の属性により家具の設置状況が大きく異なることを把握している。この状況の下、家具の設置状況に影響を及ぼす因子として「建物用途」、「利用形態」、「建築年代」、「部屋面積」、「業務形態」を検討しており、その結果として、広い部屋ほど家具類が占める割合が低下しており、また、建築年代が古いものでは家具量が多く、またそれらを積み上げる傾向があるとしている。その理由として、古い建物は竣工当時に比べ業務量が増大し収納部分が不足していると考察している。この他、「建物用途」では、民間より官公庁の方が多くの家具類に囲まれて仕事をしていることが分かるとしている。このような結果を踏まえ、倒れやすい家具を固定する等して倒れない家具にするなどの対策を講じると室内の被害が大きく削減できるとしている。

#### ④ 論理的に導出した被害関数及びシミュレーション

金子<sup>26)</sup>は、地震時における家具転倒率を、家具の寸法（ $B/H$ ）、床仕上げ、床応答、剛体の転倒率曲線を用いて簡便に推定する方法を提案し、その方法を用いて各種地震・建物内の家具転倒率を推定した。床の滑りやすさを考慮できることが利点としている。

さらに、初岡・翠川<sup>27)</sup>は、高層住宅の上階で生じる長周期・大振幅の揺れに対するキッチンでの家具類の挙動について検討を行った。振動実験でキッチン家具単体での挙動を把握し、その結果に基づき、想定東海・東南海地震時（ $M8.3$ ）の名古屋三の丸における計算波形を用いて、キッチン空間を想定してシミュレーションを行った。その結果、食器棚は30秒後にロッキングを始め、40秒後に転倒し食卓に衝突した。同様に40秒後



にシステムキッチンの扉が開閉した。80 秒後には家具全体が大きく移動し、冷蔵庫は 40 秒後にロックを始め、50 秒後に転倒して食卓に衝突した。70 秒後頃に食卓にもたれかかっていた食器棚と冷蔵庫が落下した。また、システムキッチンの引出しは開閉し食卓や椅子と繰り返し衝突し、家具類の移動や扉等の開閉は約 100 秒続いたとしている。このように、震動中に家具は大きく移動、転倒し、扉・引出しも大きく開閉し、危険な状態になることを定量的に示したとしている。

#### ⑤ 統計的モデルによる被害関数

名知・岡田<sup>28)</sup>は、1993 年釧路沖地震、1995 年兵庫県南部地震、2003 年 7 月宮城県北部の地震、2003 年十勝沖地震および 2004 年新潟県中越地震の調査結果に基づき、兵庫県南部地震では保持状態が 67%、宮城県北部の地震では行動不能が 46%など、多くの地震では、揺れている最中は静止あるいは動けなかったとしている。また、負傷要因については、家具の転倒落下が、兵庫県南部地震で 46%、鳥取県西部地震で 33%、新潟県中越沖地震で 29%と、負傷の約 3 割を占めているとしている。このようなことから、揺れている最中の居住者の負傷の一般的要因は、居住者が静止状態にあるときの家具の転倒落下であるとしている。

そこで、2003 年十勝沖地震および 2004 年新潟県中越地震の被災世帯への聞き取り実態調査（岡田・田村<sup>11)</sup>等）に基づく解析により、建物が倒壊しないという前提で、揺れの最中の室内で居住者が静止していた場合の家具転倒落下に伴う負傷確率は、ある閉区間で負傷者数  $k$  となる確率  $P[X=k]$  として、その空間内人数  $n$  および家具転倒落下領域  $R_{tr}$  をパラメータとした二項分布で近似できるとしている。この意味は、居住者 1 人の負傷確率は家具転倒落下領域率  $R_{tr}$  に等しく、ある閉空間に  $n$  人が存在している場合、各人における負傷発生確率を独立と見なし、ベルヌーイ試行でモデル化できると仮定したものである。

実態調査を基に、この式から、負傷顕在化家具密度（負傷発生確率が 50%）を求めると、建物で 0.25 個/ $m^2$ 、部屋で 0.42 個/ $m^2$ となり、この値を日本の室内安全化基準の適正家具密度上限値として提案している。

また、名知・岡田<sup>29)</sup>は、既往の負傷評価式を概観した上で、2003 年十勝沖地震と 2004 年新潟県中越地震の被災事例との比較から、上記の二項分布による確率モデルは、被害実態を記述するのに十分な精度をもっており、室空間がもつ負傷確率および危険ポテンシャルの評価は可能であることを実証したとしている。

#### ⑥ 負傷危険度診断法

名知・岡田<sup>30)</sup>は、負傷危険度の確率モデル（名知・岡田<sup>29)</sup>を用いて、負傷危険度診断法を検討し、現状危険度や家具固定対策による効果の評価が可能であることを示した。このような定量評価可能な室内危険度診断法は建物耐震診断と同様、安全化対策推進への重要なインセンティブとなり得るとしている。

#### (4) 家財等の振動台実験に関する研究

##### ① 家具等の挙動への壁による影響

北原ほか<sup>31)</sup>は、実際の住宅の部材（壁、床、天井など）を用いて室内空間を再現し、振動台実験により家具の最大応答変位に関する考察を行った。その結果は以下の通りである。

- ・洋服タンスと本棚との比較では、洋服タンスの方が滑りやすくロッキング振動が起こりにくい。
- ・「壁際」と「独立」の比較では、0.5Hzの振動では「壁際」の方が転倒しにくい、2Hzの振動に対しては違いが見られなかった。
- ・壁の剛性の影響では、0.5Hzの振動では違いが見られなかったが、2Hzの振動では壁の剛性が高い方が転倒しやすかった。

結論として、家具の応答は、家具のプロポーシオンだけではなく、家具と地震動の振動数の関係、壁の剛性、入力の多方向性などに影響を受けることが明らかとなったとしている。

##### ② 家具等の挙動に対する家具配置の影響

金子・田村ほか<sup>32)</sup>は、カーペット床上に設置されたオフィス家具を対象に、家具配置の違い（「独立」「壁際」「背中合せ」「二段重ね」）が転倒挙動および転倒限界に及ぼす影響を振動台実験により調査を行った。結果は以下の通りであるとしている。

- ・カーペット床上では、静的な転倒限界加速度以下でも家具が転倒する可能性がある。
- ・「壁際」の家具は、境界振動数以下の場合に、壁と衝突することにより「独立」の家具より転倒しにくくなった。ただし、境界振動数以上では、逆の傾向も見られた。
- ・「背中合せ」の家具は「独立」の家具とほぼ同じ加速度で転倒し、互いの家具の影響は小さい。
- ・「二段重ね」の家具は、入力波の振動数が2Hz以下の場合には上下一体で挙動し、2.5Hz以上の場合には上下別々にロッキング振動し、上段のみが落下・転倒した。このときの上段の転倒限界加速度は「独立」の場合より小さかった。

また、金子・田村ほか<sup>33)</sup>は、上記で行った実験結果が数値解析で再現できることを確認し、ランダム波入力による解析を行い、家具配置の違いが転倒挙動および転倒限界に及ぼす影響について以下の知見を得たとしている。

- ・「壁際」の家具の転倒限界加速度は、「独立」の家具よりも大きかった。正弦波入力の場合には、「壁際」の家具の方が転倒しやすいケースも見られたが、ランダム波入力ではそのようなケースは見られなかった。
- ・「背中合せ」の家具の転倒限界加速度は、正弦波入力の場合と同様、「独立」の家具と同程度だった。
- ・「二段重ね」の家具の転倒限界加速度は、一体で転倒する場合も上段のみが転倒・落

下する場合も、「独立」の場合と同程度だった。

- ・「独立」「背中合せ」「二段重ね」の家具の転倒限界加速度は、独立剛体の転倒率関数の中央値のまわりに、「壁際」の家具の転倒限界加速度は、中央値の約2倍の加速度のまわりにばらついていた。

### ③ 家具転倒防止器具の効果

金子・中村<sup>34)</sup>は、食器戸棚を対象とし、家具転倒防止器具（5種類：L字金具、ベルト式、ポール式、ストッパー式、マット式）の効果を振動台実験により確認している。床材はフローリングと塩ビシートの種類である。

L字金具やベルト式は効果が高く、次いでポール式、ストッパー式の順に効果が高い。床材の違いにより、転倒防止器具の効果が異なる場合があるとしている。

### ④ 家具等の挙動への家具の形状や各種転倒防止器具の影響

目黒ほか<sup>35)</sup>は、特別な技術がなくても簡単に家具を固定できるシステムを提案し、振動台による固定効果の検証実験を行っている。この結果、ハニカムボード、チェーン式、ポール式、L字金具式等がどの程度の地震動まで効果を発揮するのか、地震動の加速度と周波数で示した。また、Web上で部屋の大きさや家具の配置等を設定でき、地震時の部屋の家具等の挙動がイメージとして分かるように表示するシミュレーターの開発を行っている。これにより、地震で揺れている最中および避難時における安全空間と危険空間を居住者に事前に認知させ、安全空間確保のための室内診断および改善のための室内利用計画支援として利用できるとしている。

酒入・福和ほか<sup>36)</sup>は、高さや重量が異なる3種類の本棚形状家具と11種類の転倒防止器具を用いて戸建て住宅の室内を再現した振動台実験を行い、家具転倒の有無、損傷する部分などの実験結果を得た。また、既往の実験とあわせて、戸建て住宅における強震時（震度6強）の転倒防止器具の有効性を以下の通りまとめている。

器具タイプ	器具例	有効性
足元固定	マット式 ストッパー式	・ 単独使用では有効ではない
家具上部固定	L型金具 プレート式 ベルト式(上方固定)	・ 家具は側面に固定する方が有効 ・ カーベット床の場合有効 ・ フローリング床では足元ストッパー併用で有効 ・ 緩みがなければ有効 ・ 器具にも強度が必要
	ベルト式(下方固定)	・ 緩みがなければ有効 ・ 器具にも強度が必要
	ポール式	・ ストッパーを併用しても天井面、家具天面の剛性が不足すると有効ではない ・ 器具にも強度が必要
	隙間収納	・ 隙間収納を家具及び天井面と密着させることができれば有効 ・ フローリング床では足元ストッパー併用で有効 ・ 天井面の剛性、強度が不足すると有効ではない
家具背面固定 家具側面固定	階高レール式 背面レール式 背面固定式 側面固定式	・ カーベット床の場合有効 ・ フローリング床の場合は足元ストッパー併用で有効 ・ 家具の重心に近い位置で固定するため有効

また、耐震性以外にも、経済性、意匠性、家具傷リスク、下地対応性、設置難易度の

評価を行い、レーダーチャートで表現している。これを参考に、転倒防止器具を使い分けることが可能になるとしている。

#### ⑤ 高層建物でのキッチン家具の挙動

初岡・翠川<sup>27)</sup>は、高層建物上階で生じる長周期・大振幅の揺れによるキッチン家具（冷蔵庫、システムキッチン、食卓、椅子、食器棚）を対象として、周期2～4秒、加速度50gal～450galの正弦波で振動実験を行っている。実験結果は、食卓と椅子は400galで、冷蔵庫は300galから大きく変位し、食器棚は250galでロッキング、300galで転倒した。システムキッチンの扉は300gal、引出しは350galで開閉し、冷蔵庫、食器棚の扉・引出しでは、収納物が無い場合は開閉しないが、収納物がある場合は350galから開閉が見られた。地震動の加速度と周期で整理されている。

### 1.2 地震の揺れによる室内環境の変容についてのまとめ

#### (1) 実態調査による地震時の室内被害状況把握についての調査・研究のまとめ

##### ①揺れの大きさと室内環境の関係

震度が大きいほど、上階でゆれが大きいほど室内被害は大きくなる傾向があり、加速度が大きくなれば家具の移動等の室内環境の変化が拡大する。

各転倒防止器具は家具の転倒防止に効果があるが、転倒防止器具ごとに効果には限界がある。

##### ②床の摩擦係数との関係

床の摩擦係数が大きいと家具等の転倒が発生しやすいことが、実態調査、振動台実験で明らかにされており、「独立」の家具では、家具のB/H（奥行／高さ）が床との摩擦係数を下回る場合に転倒しており、床の滑りやすさと転倒しやすさには相関がある。

##### ③家具の密度との関係

家具が多いほど室内の被害が大きく、浴室、トイレ、玄関、階段等のユーティリティ・通路空間の被害が小さい。全ての家具が転倒した場合に安全空間が確保される閾値を示した研究がある。

##### ④家具の配置・間取りとの関係

家具の積み重ね方や背後の状況など、家具の設置状況により家具の転倒率が異なるが、床の滑りやすさ、地震動によっても転倒率が異なるため、壁際、独立、背中合わせなど家具の配置方法について一概にどれが良いかは言えない。二段重ねについては、振動数により上下一体で挙動する場合もあるが、上段のみ転倒する場合もあり、この場合、転倒限界加速度は独立よりも小さい。

地震時の安全空間のみならず、避難・救助経路として廊下の存在は有効であるなど、間取りが負傷の軽減に関係している。

##### ⑤家具転倒防止器具の効果

家具転倒防止器具の効果は、L字金具やベルト式は効果が高く、次いでポール式、スト

ツパー式の順に効果が高い。

## (2) 地震時の建物被害状況等に関する研究のまとめ

建物被害については、木造と鉄骨造、鉄筋コンクリート造等との比較では、木造の被害率が高い、構造形式によらず古い建物の全壊率が高い、昭和 56 年以前の建物では瓦葺きの全壊率が高いなどの調査結果が得られているが、倒壊した建物の空隙の状況等についての知見は入手できていない。

また、ガラス被害については、はめ殺し窓ガラスの被害が大きい、中間階の窓ガラスの破損率が高い等の調査結果があるが、その原因等に関する知見は入手できていない。

建物の外壁の被害については、タイルの破損状況は外壁の施工方法と被害率に関する知見を得るにとどまり、ブロック塀についても倒壊率の高いブロック塀（古い、無補強、構造欠陥）に関する知見を得たにとどまった。

## (3) 室内被害の定量的把について

家具や人の行動等室内の各要素の危険率の把握手法については、

- ・ 震度と建物被害率、屋内被害率、人間行動能力の低下率等との関係を示した正規分布の累積密度関数に基づく被害関数（バルナラビリティ関数）
- ・ 家具の寸法（B/H）、床仕上げ、床応答等から、家具の転倒率を簡便に推定する方法が提案されている。

また、室内の面的な危険度把握手法については、

- ・ 空間を  $n$  分割し、それぞれの空間におけるバルナラビリティ関数を用いて算出される「家具散乱等による危険度」と「人間の災害回避能力」の積によりその空間における人のもつ危険度を算出する手法（マイクロゾーニング法）
  - ・ 建物が倒壊しないという前提で、揺れの最中の室内で居住者が静止していた場合の家具転倒落下に伴う負傷確率をその空間内人数および家具転倒落下領域をパラメータとした二項分布で近似する手法
  - ・ 負傷危険度の確率モデルを用いた負傷危険度診断法
- が提案されている。

さらに、既存研究を踏まえた総合的な評価ツールとして、Web 上で部屋の大きさや家具の配置等を設定でき、地震時の部屋の家具等の挙動がイメージとして分かるように表示するシミュレータが開発されている。

## <参考文献>

- 1) 志賀敏男：地震による家具の転倒に関する調査と解析（日本建築学会東北支部研究発表会, pp97-100, 1979. 3)
- 2) 金子美香・田村和夫：大地震時における家具の転倒被害の分布（日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）；2000. 9)
- 3) 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（九州）；1989. 10)
- 4) 清水浩史・岡田成幸ほか：1993年釧路沖地震による室内変容に関する戸別調査解析（日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 67, 1994. 3)
- 5) 翠川三郎・佐藤俊明ほか：1993年釧路沖地震での釧路市役所および釧路気象台での家具の転倒調査 -家具転倒率と設置状態の関係-（日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp11-17, 1994. 7)
- 6) 翠川三郎・佐藤俊明：1993年釧路沖地震での釧路市役所および釧路気象台での家具の転倒調査 -家具転倒率と床応答の関係-（日本建築学会構造系論文集, 第469号, pp53-60, 1995. 3)
- 7) 村上ひとみ、岡田成幸：1993年釧路沖地震による住宅室内被害の評価-アンケート資料にもとづく被害関数-（日本建築学会構造系論文集, 第512号, pp99-104, 1998)
- 8) 日本建築学会近畿支部：兵庫県南部地震に関する日本建築学会近畿支部所属会員アンケート調査（日本建築学会近畿支部, 1996. 8)
- 9) 山本晃司・佐伯琢磨：家財の地震被害に関する調査研究-第1報：兵庫県南部地震の被害調査報告-（日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）, 1996. 9)
- 10) 名知典之・岡田成幸ほか：被震下建物内の負傷危険性及び家族構成の影響-2003年十勝沖地震の被災事例ミクロ解析-（日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005. 9)
- 11) 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ミクロ解析（東濃地震科学研究所報告, No. 15, pp88-120, 2005. 4)
- 12) 名知典之・岡田成幸ほか：2004年新潟県中越地震における室内人的被害の地域的解釈（日本建築学会東海支部研究報告集, 第44号, 2006. 2)
- 13) 名知典之・岡田成幸ほか：2004年新潟県中越地震における室内人的被害要因の考察-実態調査に基づく被害の地域性-（日本建築学会大会学術講演梗概集, 2006. 9)
- 14) 花井徳寶：2005年福岡県西方沖地震における住宅地の被害について（日本建築学会九州支部研究報告, 第45号, 2006. 3)
- 15) 岡田成幸・名知典之：2007年能登半島地震における建物・室内・人的被害に関する調査（東濃地震科学研究所報告, No22, pp89-124, 2008)
- 16) 青木俊典：解剖学的外傷重傷度指標の導入による地震時人体損傷評価と行動確率モデル（名古屋工業大学卒業論文, 2008)
- 17) 早坂浩・石田寛ほか：兵庫県南部地震による建物被害の分布 その1：建物属性と建物被害の分析（日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）, 1996. 9)
- 18) 嘉嶋崇志・高田至郎ほか：兵庫県南部地震による建物被害の分布 その2：建物フラジリティ曲線の

- 評価（日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），1996. 9）
- 19) 山口謙太郎：2005 年福岡県西方沖地震による窓ガラス・外壁仕上げ材・外部天井材の被害（日本建築学会九州支部研究報告，第 45 号，2006. 3）
  - 20) 寺西優子・菊池健児ほか：2005 年福岡県西方沖地震によるブロック塀被害の調査研究（その 1）（日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），2006. 9）
  - 21) 伊藤麻衣子・菊池健児ほか：2005 年福岡県西方沖地震によるブロック塀被害の調査研究（その 2）（日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），2006. 9）
  - 22) 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，第 2 輯，第 44 巻，pp93-108，1991）
  - 23) 村上ひとみ・竹内吉弘・尾崎昌弘：兵庫県南部地震アンケートデータに基づく家具被害関数の提案（日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），2000. 9）
  - 24) 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-（日本建築学会大会構造系論文報告集，第 454 号，1993. 12）
  - 25) 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，第 476 号，pp49-56，1995. 10）
  - 26) 金子美香：地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案（日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），2003. 9）
  - 27) 初岡徹朗・翠川三郎ほか：高層住宅におけるキッチン家具の地震時挙動に関する研究（日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），2009. 8）
  - 28) 名知典之・岡田成幸：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（日本建築学会構造系論文集，No616，pp97-104，2007）
  - 29) 名知典之・岡田成幸：被震下室内負傷発生危険度評価のための確率モデルの適用範囲に関する研究（日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 623 号，pp71-78，2008. 1）
  - 30) 名知典之・岡田成幸：被震下室内での負傷に関する研究（その 3）負傷危険度診断法（日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），2008. 9）
  - 31) 北原昭男ほか：3 次元地震動の作用する家具の振動性状に関する研究（日本建築学会近畿支部研究報告集，1998）
  - 32) 金子美香・田村和夫ほか：配置の違いが家具の転倒挙動に及ぼす影響（その 1）振動台実験による検討（日本建築学会関東支部研究報告集，2003a）
  - 33) 金子美香・田村和夫ほか：配置の違いが家具の転倒挙動に及ぼす影響（その 2）シミュレーション解析による検討（日本建築学会関東支部研究報告集，2003b）
  - 34) 金子美香・中村豊：家具転倒防止器具の振動台実験（日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），2005. 9）
  - 35) 目黒公郎ほか：2. 室内の安全性向上の実現に関する研究（大都市大震災軽減化特別プロジェクト 総括成果報告書（文部科学省），2007. 3）
  - 36) 酒入行男、福和伸夫ほか：家具転倒防止対策促進のための振動実験・シミュレータウェブの作成（日本建築学会技術報告集，第 13 巻，第 26 号，pp463-468，2007. 12）