

### 3.1.3 室内の安全性向上の実現に関する研究

#### 3.1.3.1 地震時の家具の動的挙動シミュレーターの開発

## 目次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成17年度業務目的

### (2) 平成17年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 1) 木製ブロックを用いた振動台実験とその結果
  - 2) 実物家具を用いた振動台実験とその結果
  - 3) 生活空間の安全性評価
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

### (3) 平成18年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 地震時の家具の動的挙動シミュレーターの開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学生産技術研究所	教授	目黒公郎	meguro@iis.u-tokyo.ac.jp
東京大学工学系研究科	大学院生	伊東大輔	
中央大学理工学部	大学生	佐藤芳仁	

(c) 業務の目的

家具や什器の転倒防止対策の実情調査、これが徹底されていない理由の調査を行うとともに、家具や什器メーカーと住宅メーカー等と協力のもと、特別な・室内安全性を確保するための技術開発技術がなくても(素人でも)対処できる簡易な家具を固定するシステム(試案)を提案する。家具や什器の地震時の動的挙動解析ツールの開発を開始する。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

家具や什器の転倒防止対策の実情調査、これが徹底されていない理由の調査を行うとともに、家具や什器メーカーと住宅メーカー等と協力のもと、特別な技術がなくても(素人でも)対処できる簡易な家具を固定するシステム(試案)を提案する。

2) 平成15年度：

特に専門的な知識のない一般の人々を対象として、地震時の室内の安全性を自己評価できるシミュレータや評価システムの開発を開始する。また、これらの基本データとなる家具や什器の転倒防止対策の実情調査も引き続き実施し、これが徹底されていない理由を調査する。前年度同様、簡易な家具を固定するシステムの検討も継続する。

3) 平成16年度：

これまでに検討を進めてきた簡易な家具を固定するシステムについての検証実験(開発したシミュレータによる数値実験を含む)を行う。新築の建物、耐震補強済み建物、既存不適格建物における家具の動的挙動の差を理解するために、地震時の建物の動的挙動シミュレータもあわせて開発する。これらの研究成果に基づいて、対策法の適用マニュアル(試作)を整備する。

4) 平成17年度：

平成16年に引き続き、簡易な家具を固定するシステムについての検証実験(開発したシミュレータによる数値実験を含む)を行う。検証実験と数値実験を照らし合わせるにより、数値解析手法の高精度化を図る。試作した適用マニュアルに対する、家具・什器メーカーや住宅メーカーの意見調査を行い、その分析結果を反映した技術

の検証を行う。

5) 平成18年度：

平成17年度に実施した実験結果を踏まえ、地震時の建物の動的挙動シミュレータの高精度化を図る。またユーザにとって使いやすいインターフェースの改良も図る。実験と数値シミュレータの結果から把握できた家具固定器具の性能と、より効果的な使用方法を踏まえて、これらの設置マニュアルを整備する。

(e) 平成17年度業務目的

これまでに検討を進めてきた簡易な家具を固定するシステムに関して、木製ブロックと実大家具を用いた振動台実験を行う。市販されている転倒防止器具を使った振動台実験により、地震動の特性に応じた各製品の転倒防止効果を検証する。得られた結果を元に、より転倒防止効果の高い器具の設置方法を記載したマニュアルの作成を開始する。また、実験時の家具や転倒防止器具の動的挙動に関するデータを蓄積することにより、動的挙動シミュレータの精度向上も図る。実験結果を踏まえて動的挙動シミュレータの修正を行い、モデルルームを対象として生活空間の安全性評価も行う。

(2) 平成17年度の成果

(a) 業務の要約

現在、日本は地震学的に活動度の高い時期を迎えている。今後想定される地震に対する被害軽減のためには、建物の耐震性を向上させる、家具の転倒防止措置を行うなど、市民1人1人の自発的な被害軽減行動が最も効果的かつ不可欠であると言える。しかし、兵庫県南部地震以後、居住施設の耐震化や居住空間の安全性確保が謳われるようになったが、実態としてはほとんど進んでいないとの報告<sup>1)</sup>がある。これらの大きな原因の1つに、多くの人々が地震災害に対する防災意識、防災能力に乏しいことが挙げられる。

そこで本研究では、この災害イメージング能力を向上し、具体的な防災対策を講じてもらうために、まず、木製ブロックと実物家具を用いた振動台実験により、転倒防止器具がどの程度の地震動まで効果を発揮するのか、またそれらの地震時の挙動と破壊メカニズムを分析する。そしてそれらの結果に基づいて転倒防止器具の効果の詳細な検証と、効果的な使用方法を検討する。次に、利用者の生活空間を対象とし、地震時の家具の挙動をアニメーションしてその転倒率を示すことにより「危険・リスクの認知」を促進する。さらに、転倒防止器具を設置した場合の転倒率の低減効果を示すことで、「防災対策効果の認知」を促進させる。

## (b) 業務の成果

### 1) 木製ブロックを用いた振動台実験とその結果

まずは、内部まで木材で充たされている木製ブロックを用いた振動台実験を行った(図1)。使用した振動台のサイズは1.5×1.5[m]である。用いた供試体の諸元は表1に示す通りであり、供試体 no.1 は単体で使用し、供試体 no.2 は2段重ねとして使用した。入力加振波には加速度100~1400Gal、周波数0.5~3.5Hzの計38種類の正弦波を用いた。転倒防止器具には市販されているチェーン式、L字金具式、ストッパー式、マット式、ポール式、ハニカムボードを使用した。チェーン式、L字金具式については器具に付属されている木ネジより小さいサイズのものを使用し、そのサイズは実スケール家具との重量比を考慮して定めた。ストッパー式、マット式、ポール式についてはスケール比を考慮し、縮小サイズのものを作成して用いた。実験は供試体は背面を壁に接する状態で設置して行った。

図2, 図3, 図4, 図5の中の実線は周波数と振幅の異なる各正弦波を入力した際、転倒防止器具を取り付けた木製ブロックが転倒した境界である。この線より上側が、転倒してしまう地震動の範囲を示している。図中の横軸は、それぞれの周波数と加速度の入力振動を気象庁震度階に変換した値である。少数第2位を四捨五入しているために、見かけ上同じ数値が異なる震度階に区分される場合が生じている。



図1 木製ブロックを用いた振動台実験の様子

表1 木製ブロックの諸元

block	size			V [cm <sup>3</sup> ]	m [kg]	d/h
	h [cm]	b [cm]	d [cm]			
no.1	75	37.5	22.5	63,281	41.55	0.3
no.2	50	25	15	18,750	11.20	0.3

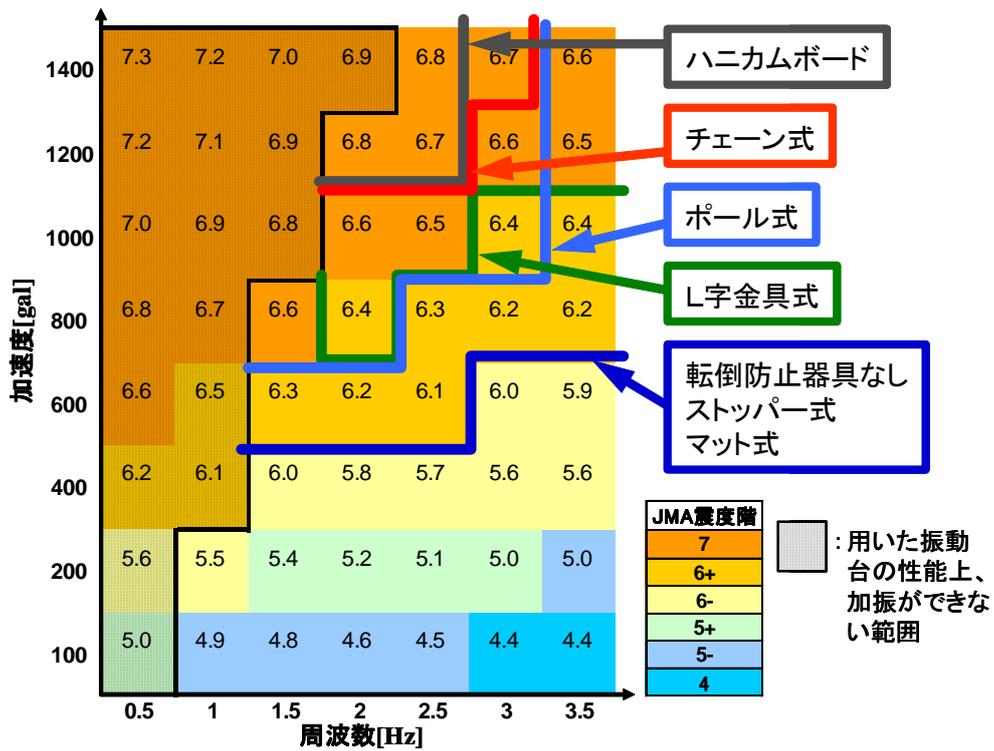


図2 床面：フローリング，壁面：合板材，供試体：1段における転倒レベル

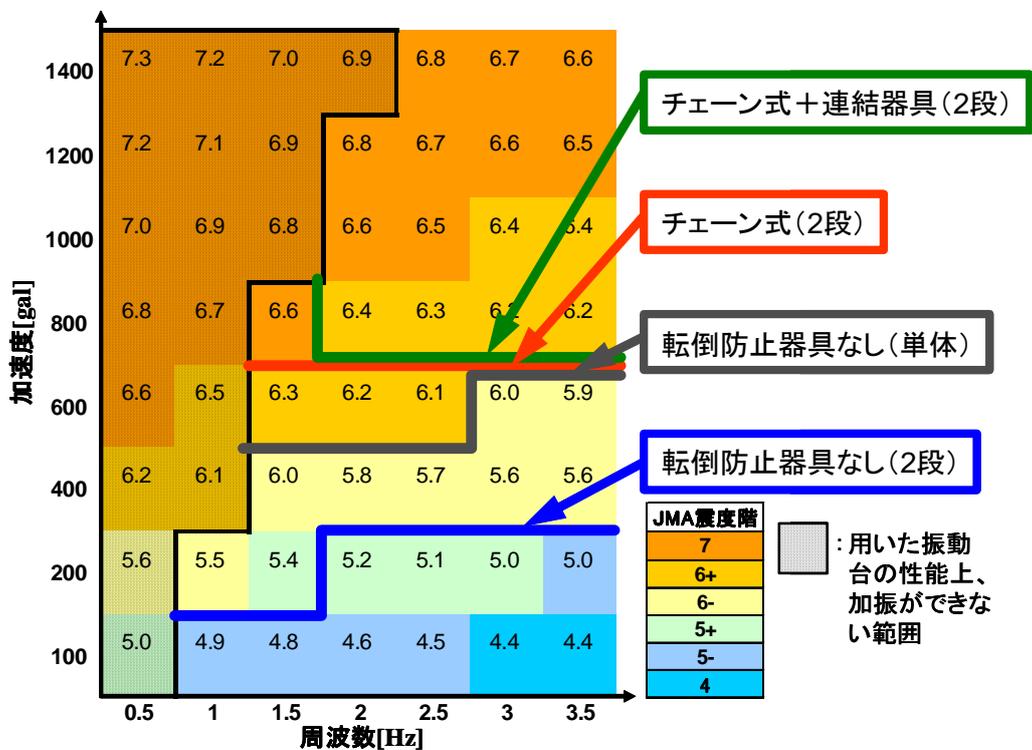


図3 床面：フローリング，壁面：合板材，供試体：2段における転倒レベル

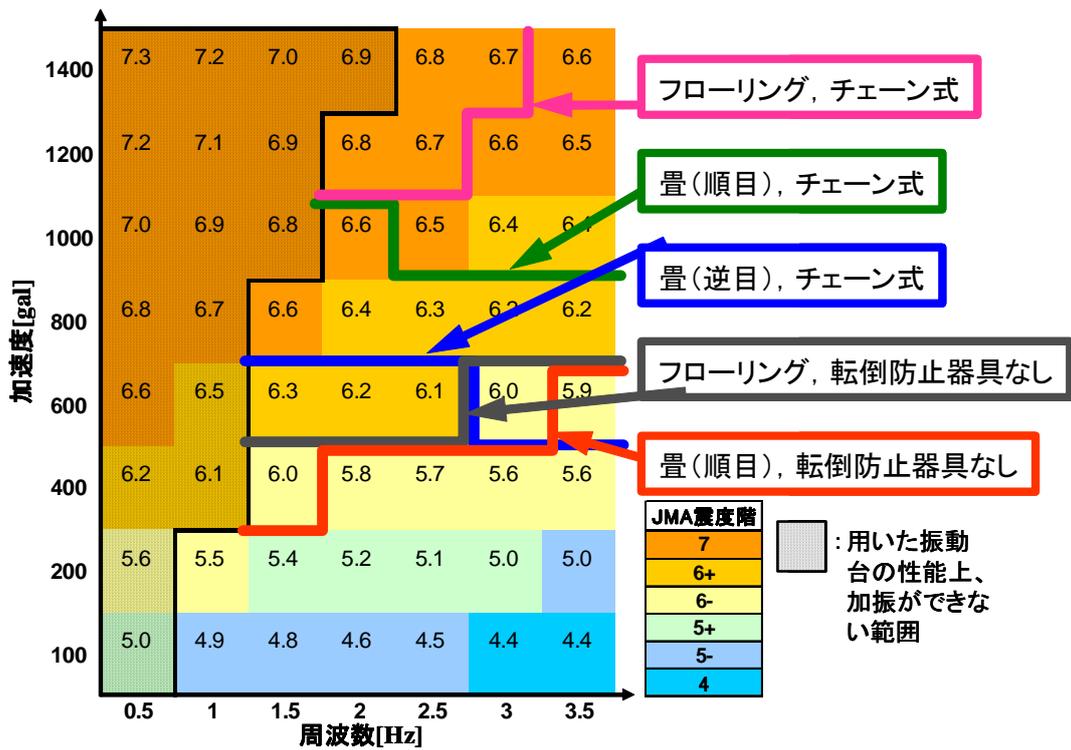


図4 床面：畳，壁面：合板材，供試体：1段における転倒レベル

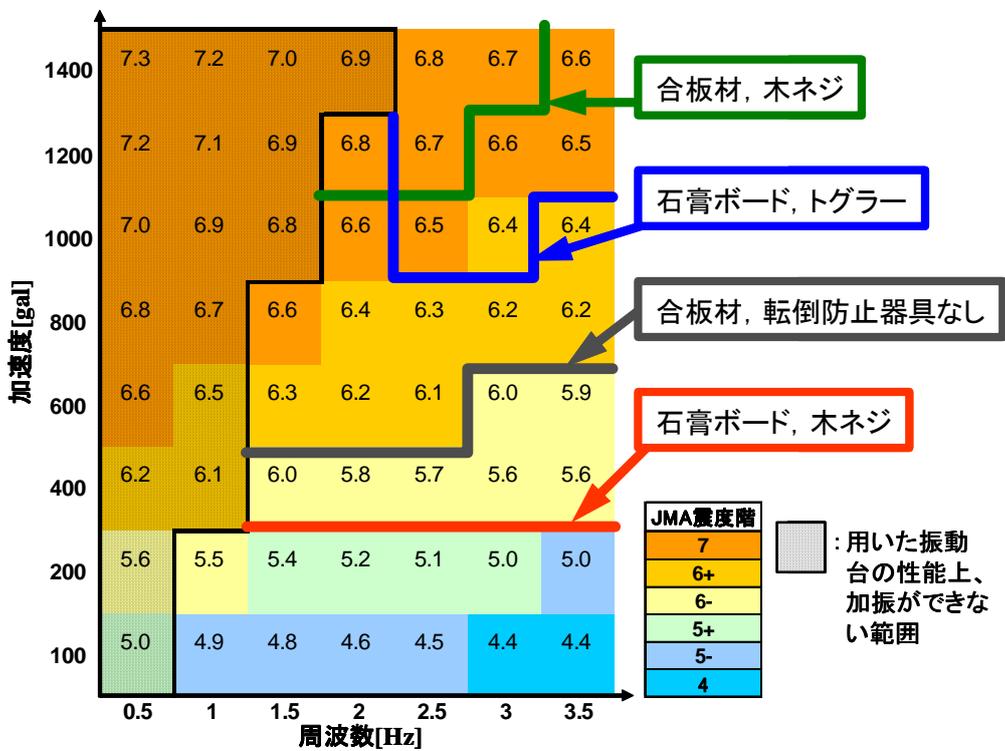


図5 床面：フローリング，壁面：石膏ボード，供試体：1段における転倒レベル

## 2) 実物家具を用いた振動台実験とその結果

次に、木製ブロックの実験結果の実物家具への適応性を検証するため、また本研究で提案するより効果的な転倒防止器具の設置方法の効果を確認するため、市販されている家具（実物家具）を用いた振動台実験を行った（図6）。使用した振動台のサイズは4.0×4.0[m]である。供試体には市販されている組み立て式の食器棚を用いた。サイズは高さ180[cm]、幅59[cm]、奥行き39[cm]で、重量は24.5[kg]であり、さらに一般的な利用状況を踏まえて60.2[kg]の錘を設置した。入力地震動としては表2のように兵庫県南部地震（神戸海洋気象台）と新潟県中越地震（K-NET小千谷）<sup>2)</sup>を用い、前者については最大振幅を調整することで用意した震度5強，6弱，6強（オリジナル）のものを用いた。床面はフローリングと畳の2ケースとし、転倒防止器具は木製ブロックの実験において効果を発揮したチェーン式と同じタイプのベルト式とポール式を使用した。実験は、供試体は背面を壁に接する状態で行った。



図6 実スケール家具を用いた振動台実験の様子

表2 使用した地震動の最大加速度と JMA 震度階

地震名称	観測地	最大加速度 [gal]			JMA震度階
		X方向	Y方向	Z方向	
兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	818	617	332	6強
		491	370	119	6弱
		276	208	112	5強
新潟県中越地震	K-NET小千谷	1310	1110	781	7

より効果的な転倒防止器具の設置方法を検討するため、ベルト式に関しては、ベルト式器具を家具上部との角度を変えながら設置した場合(図7)と、ポール式器具の上部に合板材を設置した場合の実験を行った。ポール式では、図8のようにポールの上部に合板材を両面テープにより固定し、板と天井、ポールと家具上面の固定は行っていない。



図7 ベルト式 (30° 下取り付け)



図8 ポール式+板

各ケースでの家具の挙動を表3に示す。ベルト式は一般的には斜め上方向(30°～60°程度)に設置するが、斜め下方向に取り付けることで、家具を下方に押さえることができる。これにより、家具下部が前方向に滑り出して大きく変位したり、倒れたりする挙動を抑えることができた。ただし、図9に示すように斜め下方向に取り付ける際の角度を大きくすると、家具上部が前方への加速度を受け、それがベルト式転倒防止器具へ作用する力が大きくなるため、ベルトを60°下に取り付けた場合では器具が損傷した。ベルトへの負担を考慮すると30°程度下方への設置が高い効果を得られる設置方法と考えられる。ポール式では、家具上面の両端に設置したポールが別々の挙動をして、器具が落下することが原因で転倒に至った。ポールの上部に合板材を取り付けることにより、両方のポールが一体となった挙動をすること、また天井を面で支えることでハニカムボードのような役割を示し、新潟県中越地震の地震動を入力した場合には家具を転倒させずに、微小なロッキング運動のみに抑えることができた。

表3 各加振，設置状況による家具の挙動

		兵庫県南部地震			新潟県中越地震
		5強	6弱	6強	7
器具なし	フローリング	●	●	—	—
	畳	●	●	—	—
ベルト式	30°上	●	●	●	—
	30°下	○	○	●	●
	60°上	—	—	●	—
ポール式	板なし	○	○	○	●
	板あり	—	—	—	●

● : 転倒  
 ● : 器具の損傷  
 ● : ロッキング  
 ○ : 変位なし

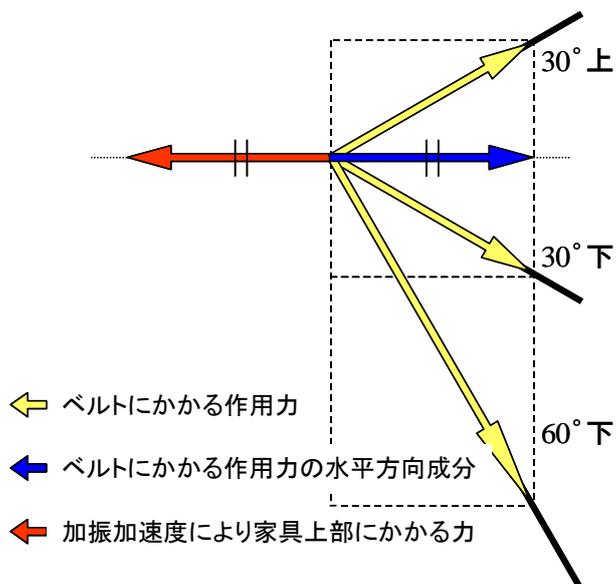


図9 ベルトに作用する力の関係

3) 生活空間の安全性評価

i) 評価の対象とする生活空間

対象とする家具は表 4 に示す 3 種類 (No. 1~3) とした。サイズと材料特性は表 11 に示す通りである。対象とする生活空間は図 10 のようなモデルルームとし、空間内には、3 種類の家具をそれぞれ 7 個ずつ。他にテーブルやイス等も設置した。

表 4 解析対象とした家具のサイズと材料特性

	h [cm]	d [cm]	b [cm]	d/h	m [kg]	$\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]
No.1	180	54	90	0.3	200	2.29E-04
No.2	180	36	90	0.2	133.3	2.29E-04
No.3	135	54	90	0.4	150	2.29E-04

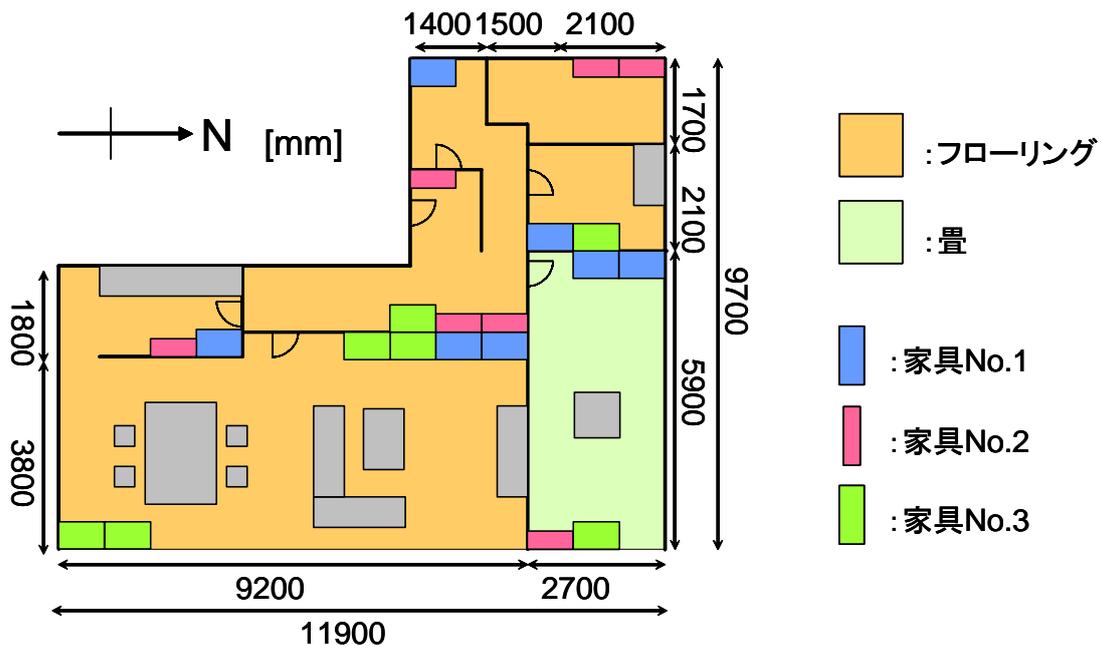


図 10 モデルルーム内家具の設置状況

ii) 多質点系バネ-モデルによる床入力データ作成

表 5 に示すK-NET<sup>2)</sup>より取得した卓越周期が異なる 11 地震動(N-S, E-W, U-D方向)記録を入力とし、鉄筋コンクリート造 20 階建ての建物を多質点系バネ - モデルにおいてモデル化した時刻歴応答解析し、各階の床の応答を求めた。今回の検討では、これらの中から5フロア (1, 5, 10, 15, 20 階) の応答を床応答データとして用いることとした。

図 11 は、5つのフロアでの床応答と計測震度の関係を示す。なお、現行の気象庁による震度階では計測震度 6.5 以上を全て震度 7 としているが、本研究では 7- (計測震度 6.5~6.9)、7+ (計測震度 7.0~7.4)、7++ (計測震度 7.5~7.9) と定義した。以上のように作成した計 55 の床応答データを、対象とする生活空間への変位入力として用いることとする。

表 5 床入力データ作成に用いた実地震動

発生日	地震名	観測地	マグニチュード [M]	震源深さ [km]	計測震度	卓越周期 [sec]
1995/1/17	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	7.3	16	6.40	0.71
2000/10/6	鳥取県西部	油木	7.3	11	5.06	0.29
2001/3/24	芸予	湯来	6.4	51	5.71	0.46
2001/12/2	岩手県内陸南部	大東	6.4	122	4.49	0.11
2003/5/26	宮城県北部	牡鹿	7.0	71	6.20	0.37
2003/9/26	十勝沖	広尾	8.0	42	6.07	0.27
2003/9/26	十勝沖	苫小牧	6.8	18	4.49	4.50
2004/9/5	紀伊半島南東沖	白山	6.8	18	4.69	0.18
2004/9/5	紀伊半島南東沖	堺	7.4	44	3.76	6.40
2004/10/23	新潟県中越	小千谷	6.8	13	6.73	0.60
2005/3/20	福岡県西方沖	平戸	7.0	9	5.09	0.46

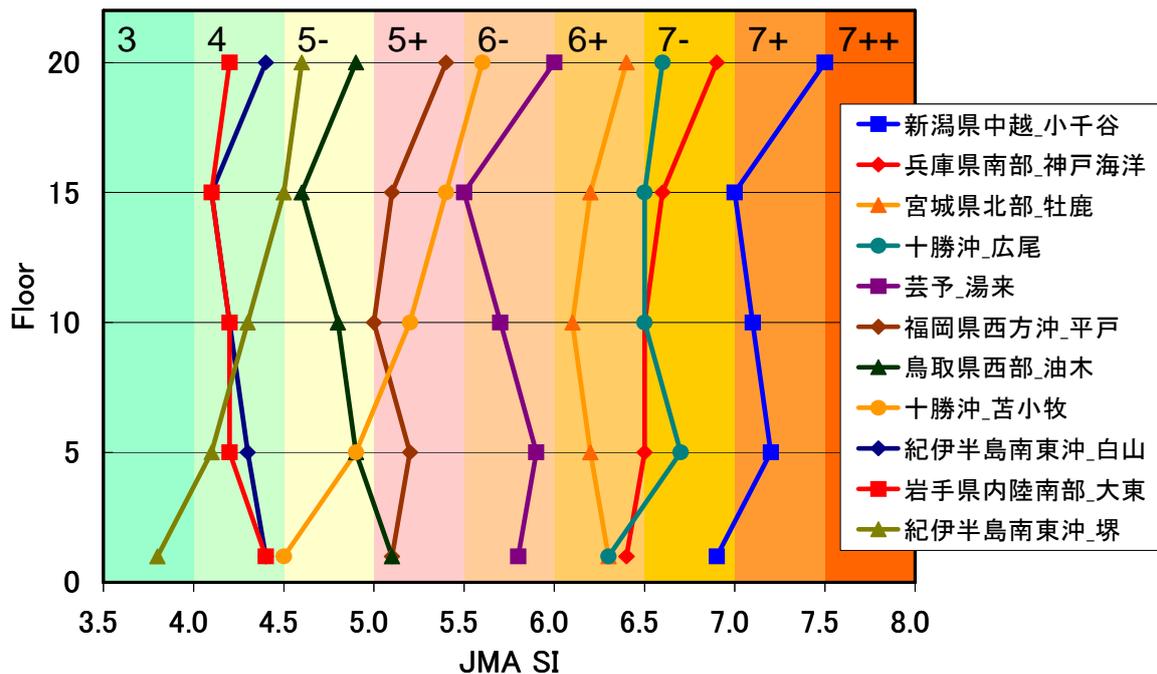
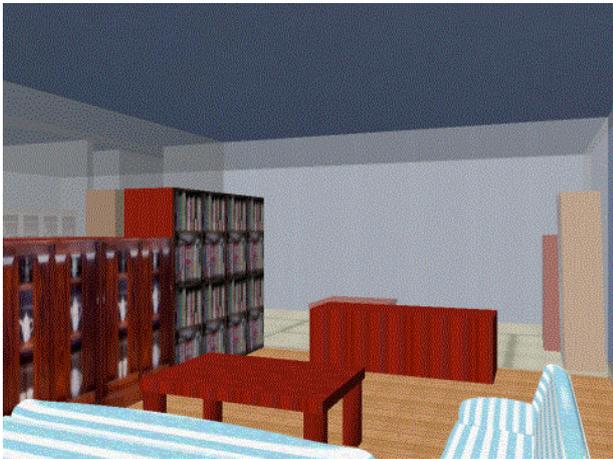


図 11 床応答データのフロアと計測震度の関係

### iii) 家具の転倒率の算出

解析は対象とした家具に、(a)転倒防止器具を設置しない、(b)全ての家具にベルト式転倒防止器具を設置する、(c)家具No. 1, No. 2 にハニカムボードを、背の低い家具No. 3 にベルト式を設置する、という3ケースについて行った。室内の家具の挙動を3次元拡張個別要素法(3D-EDEM)<sup>3)</sup>によりシミュレーションした結果を図12に示す。用いた3D-EDEMは、解析結果と実験値との比較から十分に高い精度が得られていることが確認されている。図12の画像はバーチャルリアリティ技術(VR)を用いて作成しているが、VRを用いることでユーザーは、仮想空間内を自由に動きまわることができる。ここでは、ベルト式の転倒防止器具は壁面と家具上面を繋ぐバネによってモデル化している。ハニカムボードは家具の上面と天井とを充填することにより転倒防止効果を得る間隙材であり、ダンボールを敷き詰めるのと同様の剛性と密度を持つ剛体によりモデル化した。



(a-1) 3 秒後



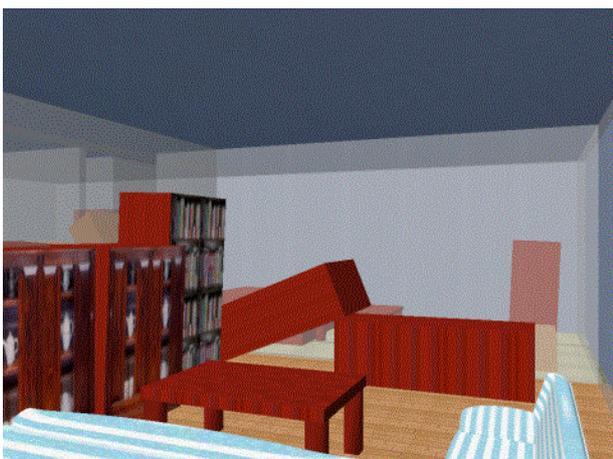
(c-1) 3 秒後



(a-2) 6 秒後



(c-2) 6 秒後



(a-3) 9 秒後



(c-3) 9 秒後

図 12 新潟県中越地震(小千谷波)でのシミュレーション結果 (1F)

図 13 に室内全体での転倒率と各ケースでのフロアの計測震度との関係を示す。(a)においては、計測震度 6+を超えると急激に転倒の危険性が高まった。(b)では全ての家具にベルト式転倒防止器具を設置しているものの、器具が破断してしまい効果が得られていない。(c)では高い計測震度の場合にも転倒率を大きく下げることができ、効果が高いことが示された。

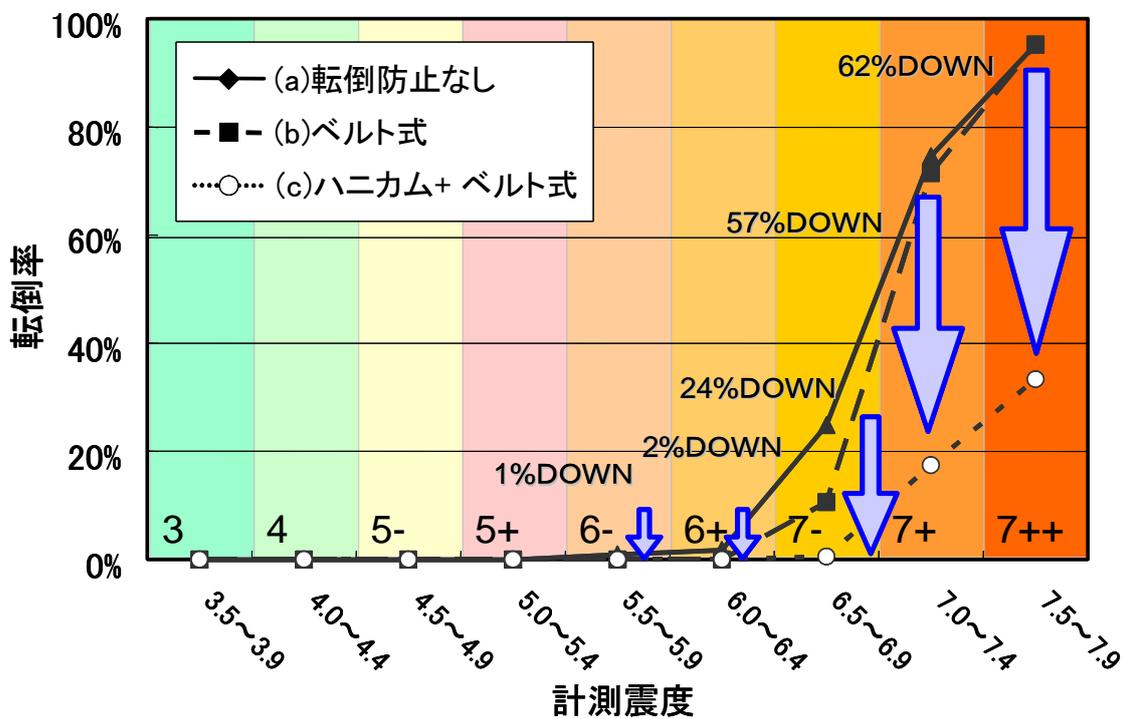


図 13 各ケースの計測震度と転倒率の関係

iv) 家具の転倒率による生活空間の安全性評価

生活空間内では、どのような計測震度の床入力においても、家具の転倒率を0%にすることが理想であり、悪くとも10%以下に抑えることが望ましい。今回は、最も効果の高かった(c)の措置でも震度7+, 7++の床入力における転倒率がそれぞれ17.5%, 33.3%と安全とは言い難い。

ここで、震度7+, 7++のような烈震においても家具の転倒率を可能な限り0%に近づけ、生活空間の安全性を確保するためには次のような方法が考えられる。(i)何らかのより効果的な転倒防止装置を開発する。(ii)建物に免震、又は制震装置を取り付け、生活空間の床入力(計測震度)を低減する。今回のケースでは、図14のように、免震・制震装置により、震度7++の入力を震度7-まで下げることができれば、(c)の措置によって家具の転倒率を0%に近づけることができる。

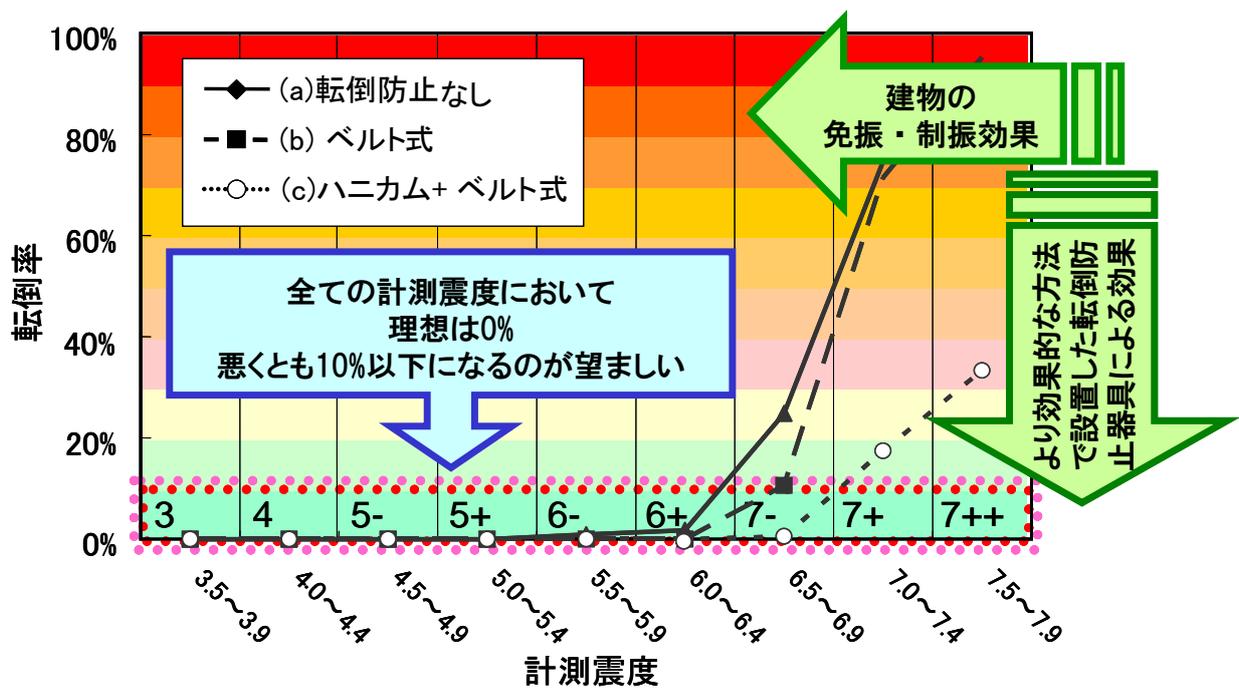


図14 安全性考慮のための計測震度と転倒率の関係

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、まずは、家具の転倒防止器具の効果を検証するために、木製ブロックと実物家具を用いた振動台実験を行った。後者の実物家具の実験においては、より効果的な転倒防止器具の設置方法の検証を行った。次に、3次元拡張個別要素法による家具の動的挙動シミュレーションとVR技術を用いて生活空間の安全性評価を行った。本研究成果には、地震に関する専門知識のない一般市民の「危険・リスクの認知」と「対処・効果の認知」を高めると思われる。結果として、市民の防災意識の向上と具体的な防災対策が促進され、地震時の人的被害を軽減させることが期待される。

本年度の研究成果を地震時の家具の転倒問題に詳しい専門家や、転倒防止装置の開発/販売者に説明して意見を求めたが、回答はおおむね良好であった。特に同じ転倒防止器具でも設置法を変えることで効果が大きく変化する現象の指摘や、建物応答を考慮したうえでの考察に関して高い評価を受けた。

(d) 引用文献

- 1) 内閣府：住宅における地震被害軽減に関する指針，p. 1，2004. 8
- 2) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク (K-NET)，  
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 3) 伊東大輔，目黒公郎：地震時の家具転倒に関する安全性評価手法の開発，日本地震学会大会 2005 梗概集，p60-61，2005. 11.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
柳田充康・ 目黒公郎	地震時の木造軸組住宅の動的挙動シミュレータの構築	土木学会第 60 回年次学術講演会	2005. 9
伊東大輔・ 目黒公郎	地震時の家具転倒に関する安全性評価手法の開発	日本地震学会大会 2005 梗概集	2005. 11

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願  
なし
- 2) ソフトウェア開発  
なし
- 3) 仕様・標準等の策定  
なし

(3) 平成 18 年度業務計画案

平成 17 年度に実施した実験結果を踏まえ、地震時の建物の動的挙動シミュレータの高精度化を図る。またユーザにとって使いやすいインターフェースの改良も図る。実験と数値シミュレータの結果から把握できた家具固定器具の性能と、より効果的な使用方法を踏まえて、これらの設置マニュアルを整備する。