

3.2.4 高層建物に付随する非構造部材の機能保持と避難性に関する考察

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたらす被害を国民に明らかにする。また、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に関する研究成果を建築関連団体と連携し指針を取りまとめるとともに、各種業界と本研究成果を共有し、安心・安全な高層建物の広い普及を最終目標とする。

本年度は、既存高層建物の安全性確保、高機能性確保の観点から、長周期地震動を受ける超高層建物の地震時応答の効率的な低減技術に関わる検討・検証を行うため、応答低減に関わるE-ディフェンス実験を実施する等、架構の損傷軽減効果の定量的評価、損傷評価・応答低減技術および機能保持・避難性に関わる研究開発を進め、安心・安全な高層建物の広い普及のための基礎データを得る。

(b) 平成 20 年度業務目的

地震時に想定される被害シナリオのうち、非構造部材の損傷に起因する機能被害や室内の家具の移動・転倒等による人的被害を検討するとともに、対策技術について検討する。また、本年度実施するE-ディフェンスによる震動実験においては、機能回復や室内安全性に重点を置き、制振機構の効果を考察する。さらに、家具の固定方法、キャスター付き家具に対する対策、効果的な避難計画等について検討する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人建築研究所	上席研究員	斉藤大樹

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

室内の家具の移動・転倒等による人的被害を検討するために、首都直下型地震である東京湾北部地震（M7.3）における新宿に建つ 29 階建て超高層建築物の揺れを建築研究所の「大ストローク振動台」で再現し、居住者の安全性に及ぼす影響について検討した。実験では、振動台に人を乗せることは安全面で困難であることから、実験ではダミー人形を用いて、家具等が衝突する様子を検証し、キャスター付きのコピー機のラック等の人体への衝突危険性を明らかにし、対策技術について検討した。

また、E-ディフェンス震動実験で得られた最上階の床応答値から、制震機構の効果を避難計画の観点から検討した。

さらに、家具の固定方法、キャスター付き家具に対する対策など、効果的な避難計画等の策定に関しては、居住者自らが対策を取ることが重要であるという認識から、個別要素法を用いた家具の挙動のシミュレーション結果をWeb上で見せる啓発ツールの開発を行った。

(b) 業務の成果

1) 室内の家具の移動・転倒等による人的被害の検討

a) はじめに

超高層建築物の安全性については、これまで長周期地震動による影響が注目されてきたが、首都圏については、M7 クラスの直下型地震（東京湾北部地震、M7.3）の発生が内閣府により想定されている。首都直下型地震による超高層建築物の挙動と室内安全性については、これまでほとんど研究事例がなく、その対策が遅れている。

久田ら¹⁾は、首都圏直下地震による新宿での強震動予測手法を行い、29階建て超高層建築物の地震応答解析によって、補強が必要な程度の損傷が発生することを明らかにした。本研究では、解析によって得られた高層階の揺れを建築研究所の「大ストローク振動台」において再現し、室内の家具・什器の揺れとそれが居住者に及ぼす人的被害の可能性について検討した。

b) 首都直下型地震による超高層建築物の応答^{1), 2)}

東京湾北部地震による新宿における強震動予測は、長周期側には波数積分法による理論的手法を、短周期側には経験的手法(統計的グリーン関数法を改良した手法)によるハイブリット手法が用いられている。図1に久田ら¹⁾による東京湾北部地震の断層面と観測点(新宿)を示す。断層面は内閣府モデルと同じ長さ63.6km、幅31.2km、走行296°傾斜角23°で、潜り込むフィリピン海プレート上面に位置している。但し、断層深さは内閣府モデルより10km程度浅い震源モデルとしている。図2に新宿で想定された地震動波形を、図3に加速度応答スペクトルを示す。1秒以下に強い成分があることがわかる。

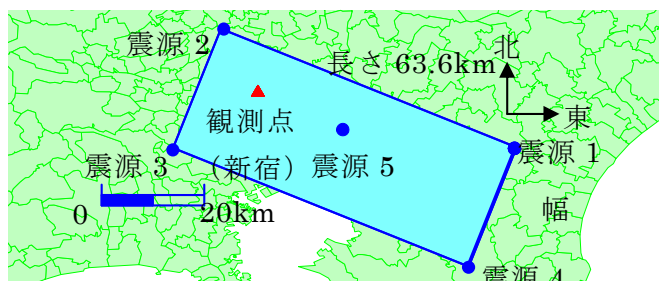


図1 断層面の投影図及び震源観測点配置図¹⁾

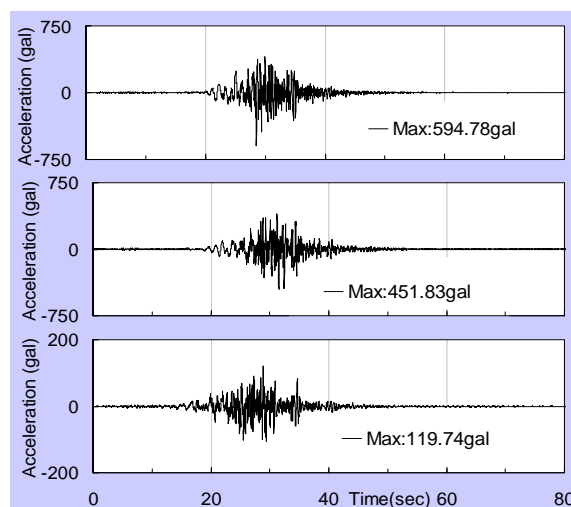


図2 新宿で想定された地震動波形¹⁾

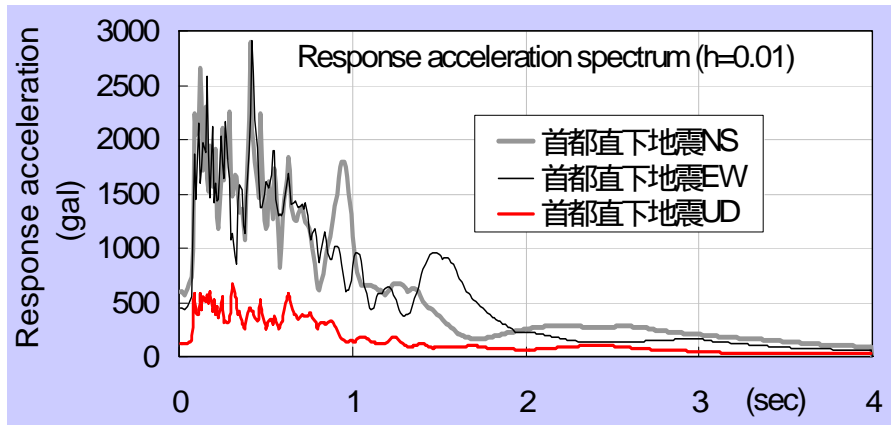


図3 加速度応答スペクトル¹⁾

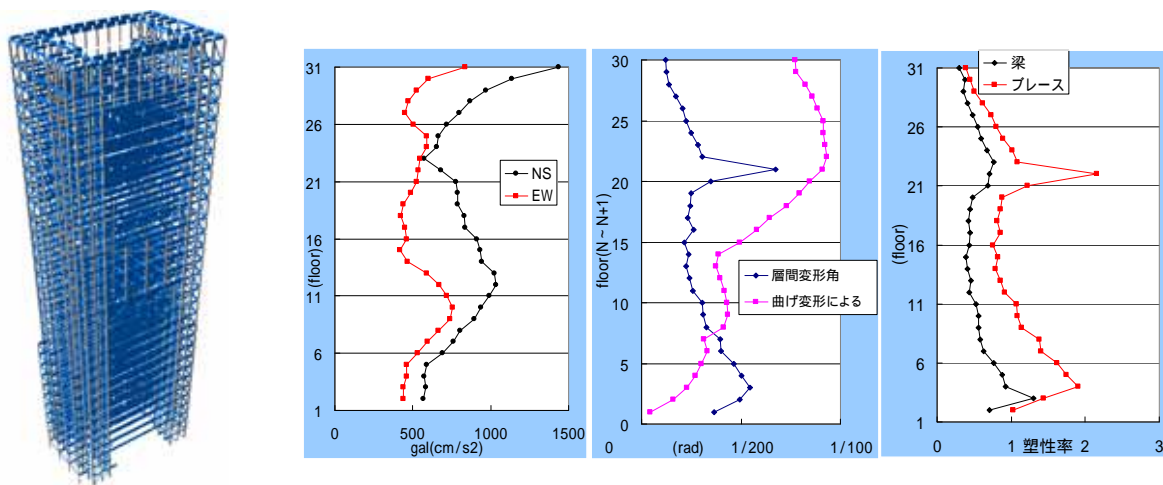


図4 NS方向解析結果：左から最大加速度応答値、最大変形角、各階平均塑性率²⁾

図4に、久田ら²⁾が行ったNS方向の地震動に対する29建て超高層建築物の最大応答値の分布を示す。建物は、地上29階、地下6階、塔屋1階であり、地上部はS造のブレース付きラーメン架構である。構造的な特徴として東西端部にあるコアを結ぶ25.6mの大スパン梁が配置されている。また、長辺方向であるEW方向の16階、21階の階高が5mを超える中間階には、スーパーフレームが配置されている。NS方向の1次固有周期は2.7秒、2次固有周期は0.84秒である。最大加速度は、NS方向で1000galを超える値が確認された。層間変形角は21階が周辺階に比べ大きく、下層階のブレースの塑性率が1を超えている。とくに21階のみ塑性率が突出して大きく周辺階の約2倍であり、補強の必要があることが指摘されている。

c) 大ストローク振動台による室内安全性実験

首都直下型地震による超高層建築物の高層階の揺れを独立行政法人建築研究所の「大ストローク振動台」で再現し、室内の家具・什器等の移動・転倒とそれが居住者に与える影響を検討した。ここでは、損傷の大きい21階を選択した。図5に室内再現の様子を示す。室内は一般的な事務所空間を想定し、机、書棚、ラック、コピー機等を配置した。また、居住者への影響を見るために椅子に成人男性を想定したダミー人形2体を座らせた。

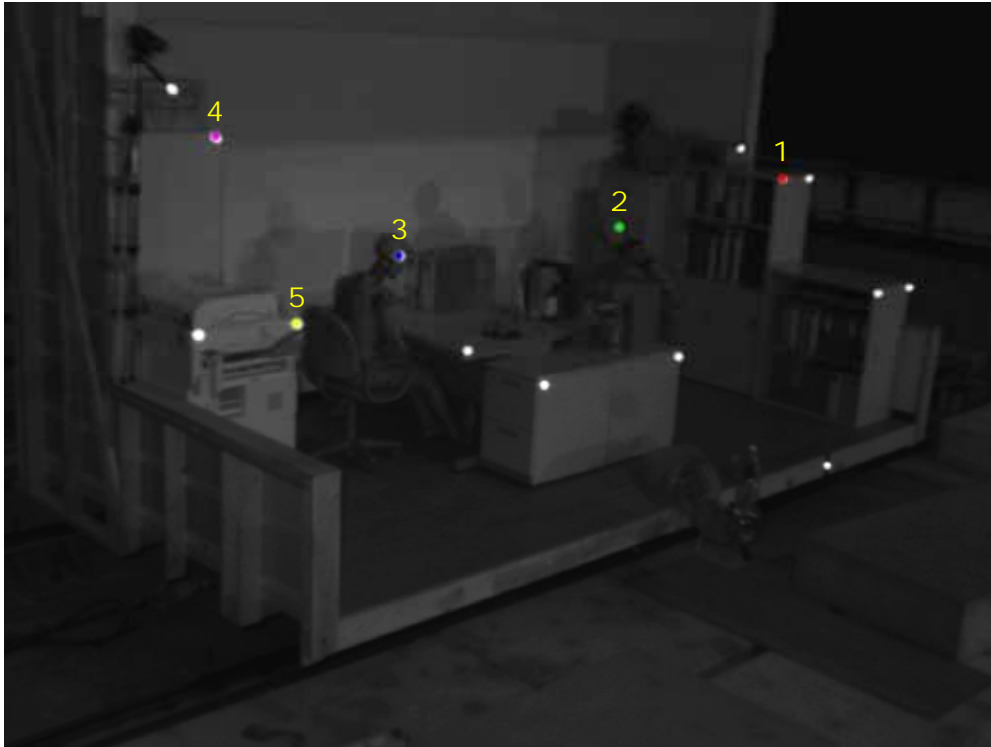


図5 大ストローク振動台における室内再現

ダミー人形の頭部や家具には反射マーカを貼り付けて、その動きをモーションキャプチャー・システムにより計測した。揺れ始めから約5秒で家具・コピー機が激しく移動・転倒し、マーカ追跡が不可能になった。最終状況を図6に示す。棚は全て転送し、コピー機が振動台から落下した。

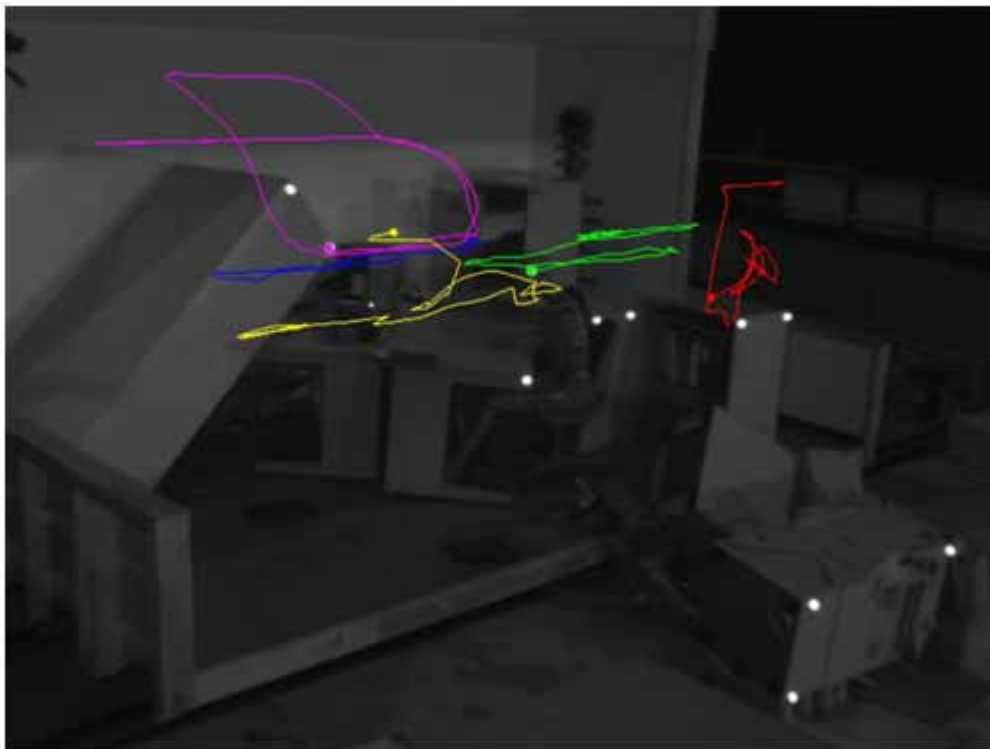


図6 実験後の状況

人的被害について検討するために、家具・コピー機の移動とダミー人形への衝突の状況を時間経過で図7に示す。

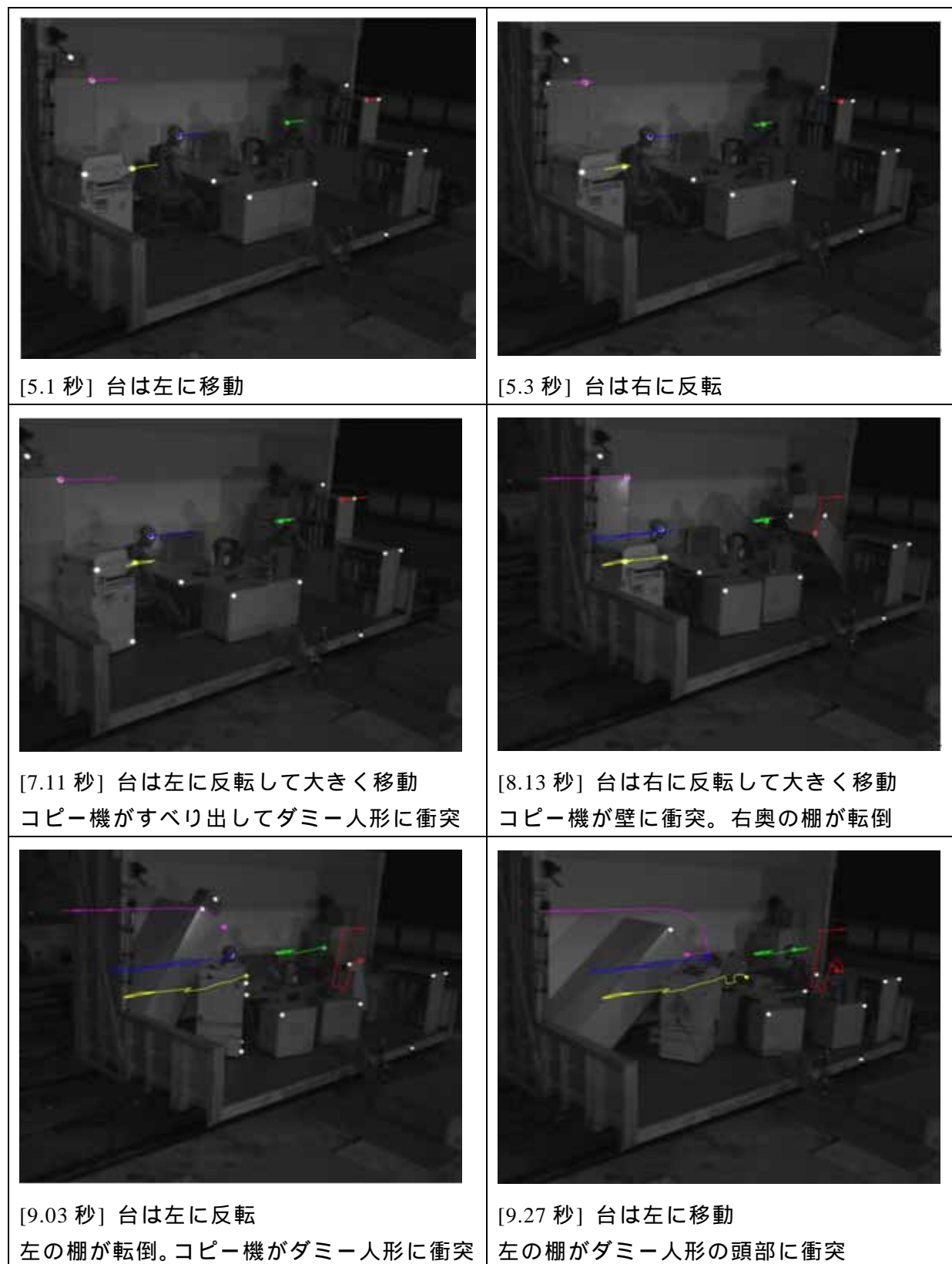


図7 時間の経過と家具・コピー機の移動の状況

d) 人的被害の検討

人的被害の観点から、ロッカー棚とコピー機の動きに着目し、ダミー人形に衝突するときの衝撃力を考察する。

・衝撃力の計算方法

重量 m の物体が速度 v で衝突する場合、衝突時間 t 、衝突後の速度をゼロとすると、衝撃力 F による力積は、

$$F t = m v \quad (1-1)$$

従って、衝撃力は

$$F = (m v) / t \quad (1-2)$$

で求められる。例えば、人が高さ h から落下して床に衝突する場合を考える。仮に

人の質量 $m = 60\text{kg}$

衝突時間 $t = 0.5$ 秒

とする。高さ h からの落下速度は、位置エネルギー mgh と運動エネルギー $0.5mv^2$ が等価になる条件から、

$$\text{落下速度 } v = \sqrt{2gh}$$

となる。衝突後の速度をゼロとすると、衝撃力は(1-2)式から

$$\text{落下による衝撃力 } F = (m v) / t = 60 \sqrt{2gh} / 0.5 = 120\sqrt{2gh} \quad (1-3)$$

となる。

・棚の衝突

図7の振動台実験において、画面左側のロッカー棚（ピンク色のマーカー）がダミー人形の頭部（青色のマーカー）に衝突する動きに着目し、どの程度の相対速度で衝突しているかを分析したのが図8である。



図8 ロッカー棚とダミー人形頭部の速度計測

その結果、衝突直前のロッカー棚の絶対速度は約 150cm/秒、ダミー人形頭部の絶対速度は約 50cm/秒であることから、相対速度は約 100cm/秒であった。

ロッカー棚の質量 $m = 30\text{kg}$

衝突時間 $t = 0.5$ 秒

とすると、ロッカー棚の衝突による衝撃力は(1-2)式より

$$F = 30 \cdot 1 / 0.5 = 60(\text{kgm/sec}^2) = 60(\text{N})$$

落下による衝撃力(1-3)式と等価におくと、

$$60 = 120\sqrt{(2gh)}$$

$$h = 0.013(\text{m}) = 1.3(\text{cm})$$

従って、ロッカー棚の衝突による衝撃力は高さ 1.3 cm からの落下の衝撃力と等価であり、衝撃による人的被害の程度は軽微と考えられる。

・コピー機の衝突

同様に、コピー機とダミー人形の頭部の絶対速度を比較したのが図9である。両者にそれほど大きな違いはない。これは、映像からも、コピー機がダミー人形を押しつけながら同じ方向に動いているためであると考えられる。

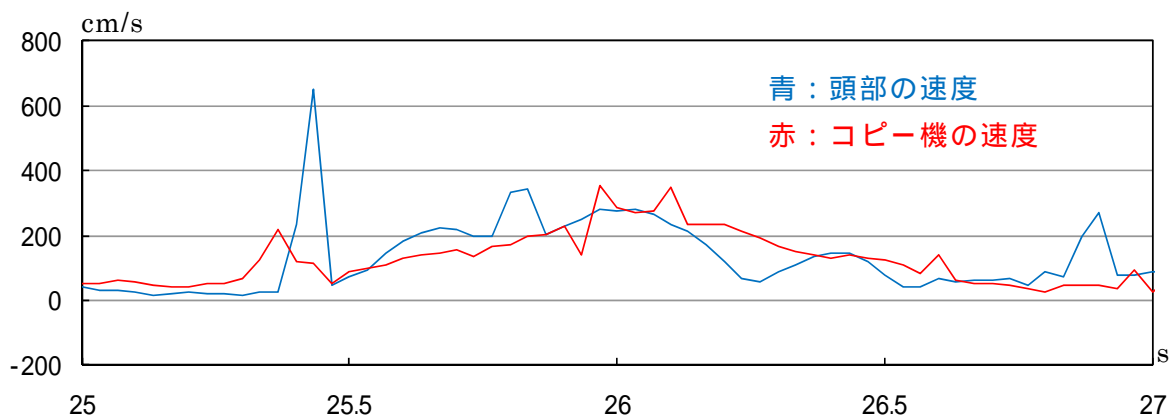


図9 ロッカー棚とダミー人形頭部の速度計測

一方、コピー機は振動台の壁面に対して約 300cm/秒の速度で衝突していることから、その衝撃力を算定してみる。

コピー機の質量 $m = 90\text{kg}$

衝突時間 $t = 0.5$ 秒

とすると、衝撃力は(1-2)式より

$$F = 90 \cdot 3 / 0.5 = 540(\text{kgm/sec}^2) = 540(\text{N})$$

落下による衝撃力(1-3)式と等価におくと、

$$540 = 120\sqrt{(2gh)}$$

$$h = 1.0(\text{m}) = 100(\text{cm})$$

となり、コピー機の壁面への衝突は、高さ 1m からの落下の衝撃力と等価であり、仮に壁際に人がいた場合には、打撲等の人的被害が発生する可能性が高いと考えられる。

2) 避難計画や人的被害の観点からみた制震機構の効果

2009年9月にE-ディフェンスにおいて、鉄骨造超高層建物の試験体にダンパーを組み込んだ耐震補強の震動台実験が行われた（図10）。

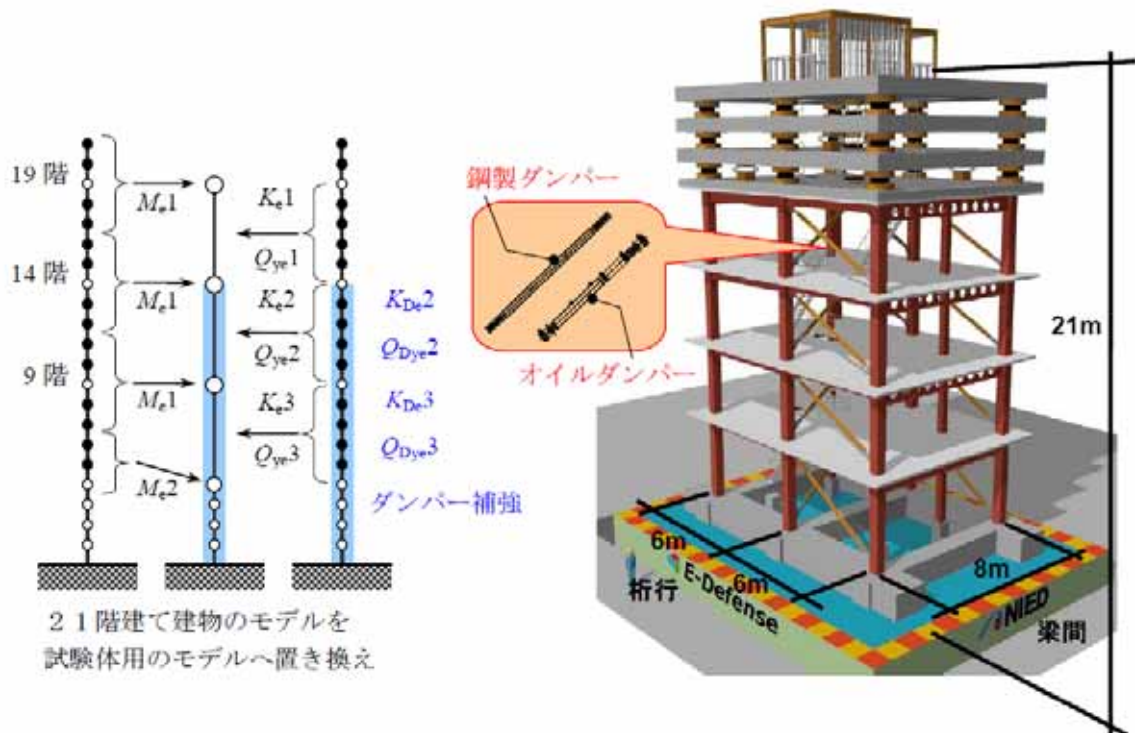


図10 超高層建物実験の試験体（E-ディフェンスホームページ資料³⁾より抜粋）

一連の実験では、制振ダンパーの配置を以下のように変えて、その効果を検討している。

シリーズ① 想定建物全階数のうち、2/3の範囲の階に鋼製ダンパーを組み込んだ場合
 シリーズ② 想定建物全階数のうち、1/5の範囲の階に鋼製ダンパーを組み込んだ場合
 シリーズ③ 想定建物全階数のうち、1/5の範囲の階にオイルダンパーを組み込んだ場合
 シリーズ④ 制振ダンパーの無い場合

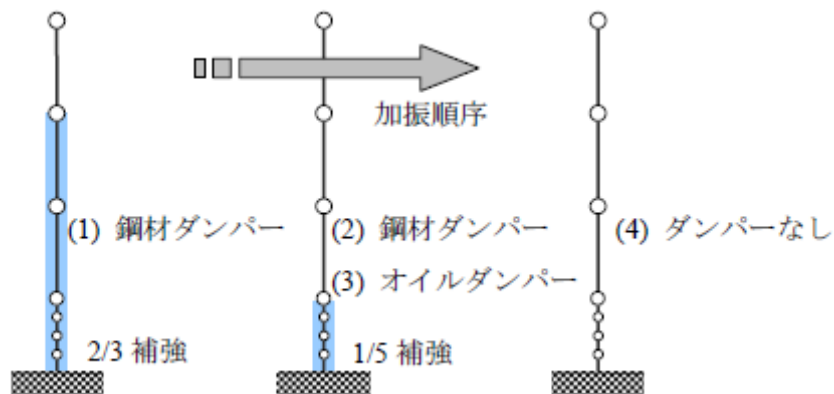


図11 制震ダンパーの配置（E-ディフェンスホームページ資料³⁾より抜粋）

このときの試験体屋上のペントハウスの応答波形から、揺れの大きさと室内の住民の避難行動の難易度の関係を検証する。

三の丸波を入力したときの、シリーズ①～③における屋上ペントハウスのY方向速度波形および加速度波形の最大値を表1に示す。これらの最大値を図12に示す行動難度の評価曲線⁴⁾にプロットする。これより、制震ダンパーのないシリーズ④では住民が「行動できない」レベルを超える揺れに達しており、室内で被害に会う可能性が高い。一方、制震ダンパーを多く配置した①では、「かなり乱れ、滞りなく行動できない」と「乱れるが、滞りなく行動できる」の境界線に近い応答になり、揺れの最中に避難行動を取ることができる可能性がある。

表1 屋上ペントハウスのY方向最大速度および最大加速度

シリーズ	Y方向最大速度(cm/s)	Y方向最大加速度(cm/s ²)
①	111	316
②	190	447
③	163	403
④	250*	580*

*④については、デジタルデータではなく文献3)から値を推定した。

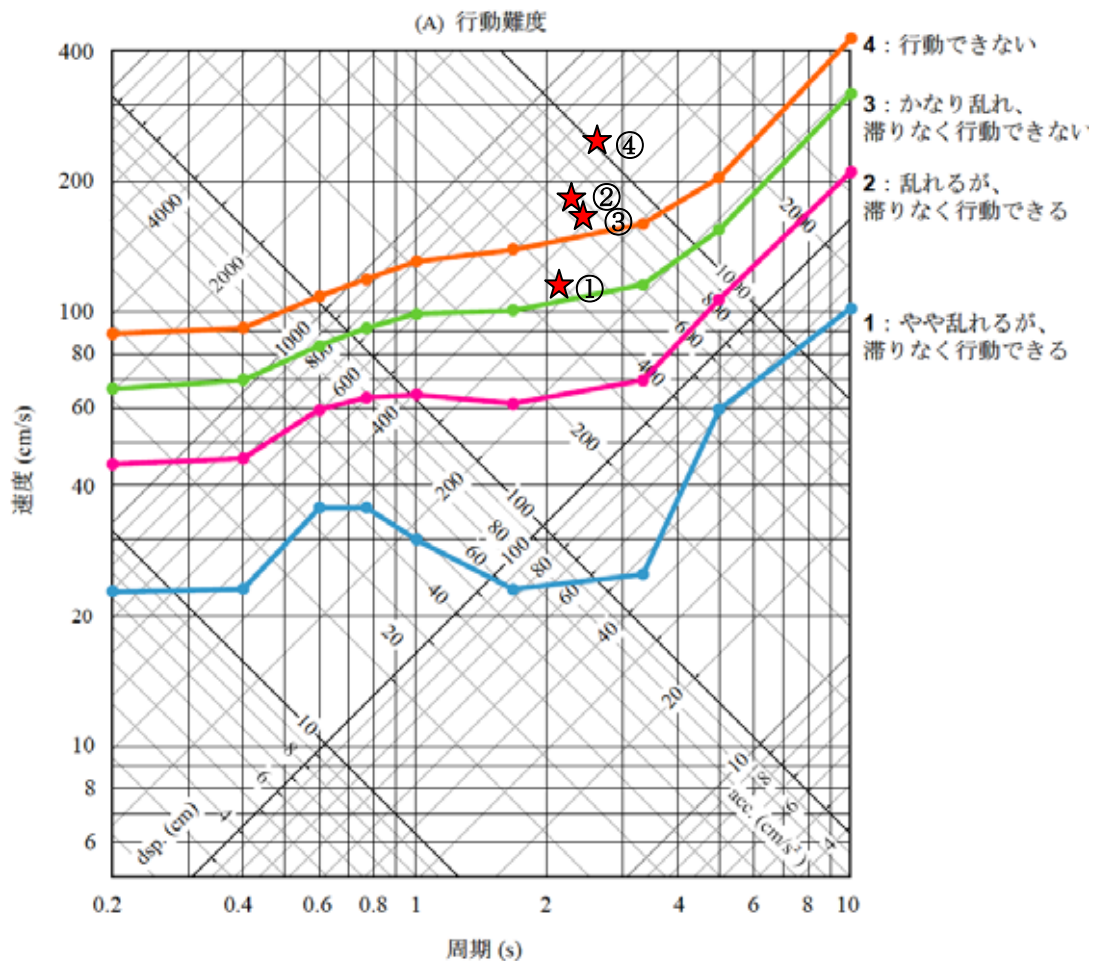


図12 単調加振の対する行動難度の評価曲線⁴⁾

3) 家具の固定方法、キャスター付き家具に対する対策、効果的な避難計画等に関する検討

a) はじめに

家具の固定方法、キャスター付き家具に対する対策など、効果的な避難計画等の策定に関しては、居住者自らが対策を取ることが重要であるという認識から、個別要素法を用いた家具の挙動のシミュレーション結果をWeb上で見せる啓発ツールの開発を行った。

b) 個別要素法による家具の挙動のシミュレーション

剛体の物理シミュレーションプログラムのベースはいくつかあるが、精密な動摩擦力、静止摩擦力が計算できるものとして springhead⁵⁾がある。springheadは東京工業大学精密工学研究所の長谷川晶一が作り始め、ロボット技術研究会の有志と電気通信大学長谷川研、長谷川の以前の所属の東京工業大学佐藤誠研などで開発している、物理シミュレータを含むバーチャルリアリティ開発環境である。物理エンジンに体積ベースペナルティ法と Featherstone 法による関節エンジンを搭載していて、従来の物理シミュレーションソフトよりも非常に高精度な接触モデリングをリアルタイム(100-1000Hz)に実現することができる。

ペナルティ法は物体同士が接触した際、拘束を犯した分だけ罰（ペナルティ）をして力を加える。物体間の侵入量を d 、相対速度を v として力 $f(=Kd+Cv)$ を求める。力が直接決まるので計算量が少なくすむ。接触部にバネとダンパを入れることに相当する。計算が高速、かつ跳ね返り係数を考慮できる利点がある。一方、欠点として解析結果を映像化したときに、物体同士が多少侵入してしまうところが視覚的にわかる点がある。この改善法としてバネ係数を大きくする、解析の時間刻みを細かくするなどが挙げられる。

Featherstone 法は関節などの接続（ジョイント）部に用いる解析法である。従来の解析法では、ジョイント部が増えるほど構成方程式のマトリクス部が大きくなり、計算量が増えるが、Featherstone 法では、端部の剛体から順次関節部に働く力を求めていく。たとえば図14のモデルの場合、

全体をひとつの剛体だと考え加速度を求める。

- 剛体 A の加速度を求める。
- A と B から先の 2 つの剛体と考え、関節 1 に働く力を求める。
- 剛体 B の加速度を求める
- B と C から先の 2 つの剛体と考え、関節 2 に働く力を求める。
- 以下同様に繰り返し計算を行っていく。

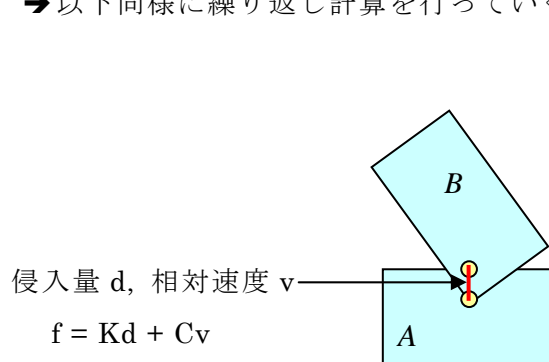


図13 ペナルティ法による接触力の評価

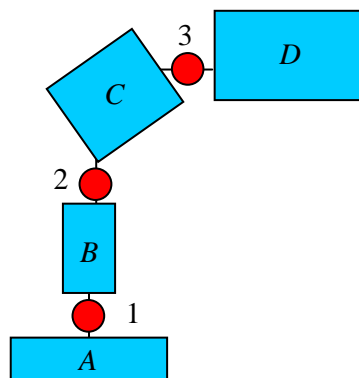
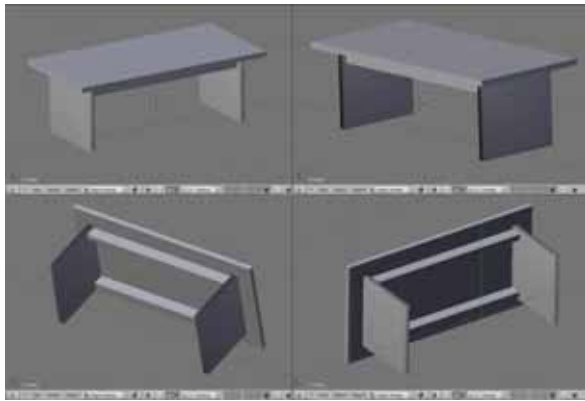
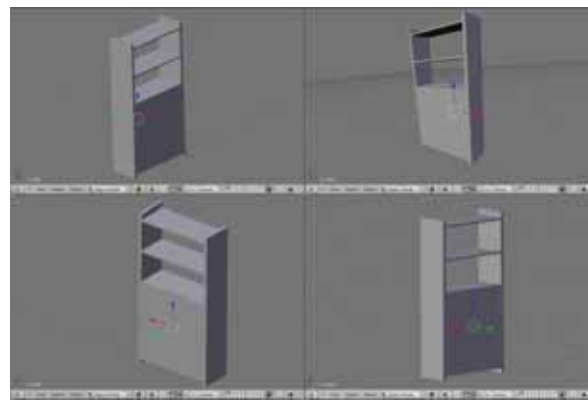


図14 Featherstone 法の概念図

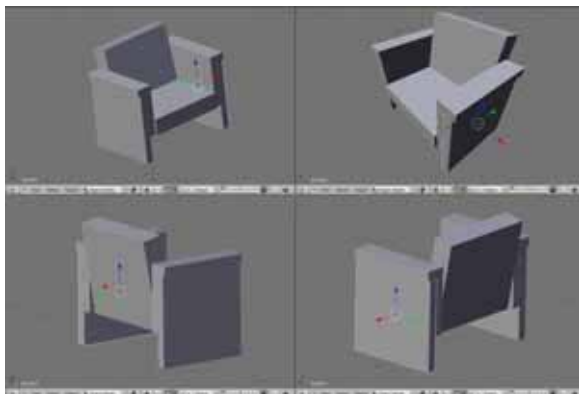
個別要素法による解析結果を視覚化するためにフリーソフトの blender を用いた。blender は、「モデリング」(形状の形成)、「レンダリング」(画像の計算)、「物理シミュレーション」、「コンポジット」(画像・動画の合成)の機能を有している。今回、建築研究所の大ストローク振動台実験で使用した家具を、blender を用いてモデリングしたものを図 15 に示す。



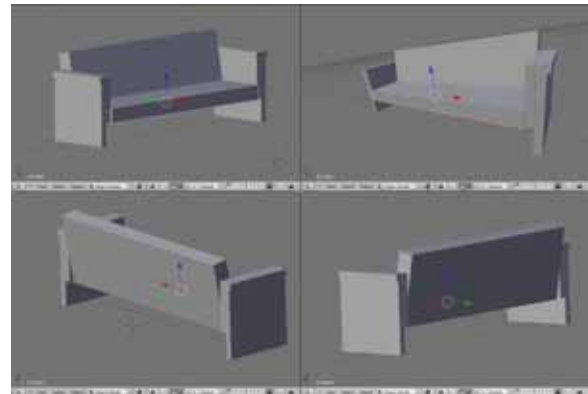
a) 応接テーブル



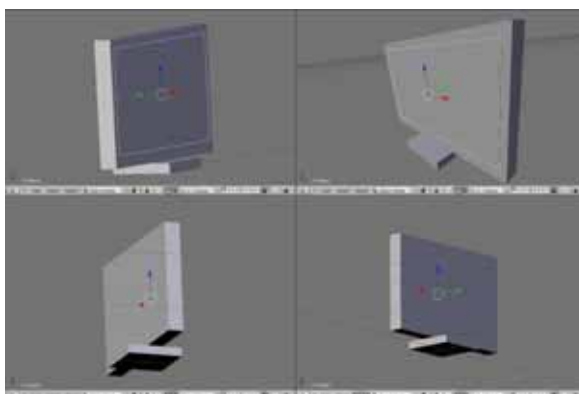
b) 本棚



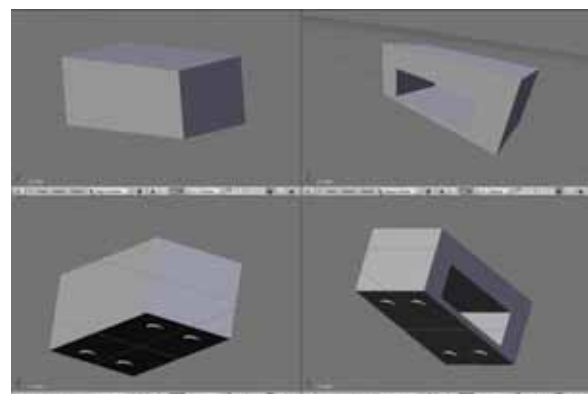
c) 1人掛けソファ



d) 3人掛けソファ



e) 液晶テレビ



f) テレビ台

図 15 blender による家具のモデリン

モデリングは解析における慣性テンソルの計算を簡略化するために、ほぼ全ての部品を直方体のメッシュで構成した。唯一直方体でないのは、テレビ台の4つの足である。本来は円柱で作成するのが一番正確であるが、エクスポートした座標データが数千行の膨大なものになってしまうので、力の計算において殆ど円柱と変わらないといわれている八角柱を使った。

シミュレーションに必要な物体の物性値は、質量、慣性テンソル、重心位置、垂直バネ・ダンパ係数、水平バネ・ダンパ係数、静止摩擦係数、動摩擦係数である。以降、垂直バネ・ダンパ係数、水平バネ・ダンパ係数、静止摩擦係数、動摩擦係数を合わせて表面物性値と呼び、これらをパラメータスタディすることで実験の挙動(すべり、転倒など)をあわせるようにする。また本解析では回転部分は存在しないので、P値、I値は設定しない。なお、表面物性値は試験体(家具)と床材の両方に設定する必要があり、接触力の計算には両者の平均値が用いられる。以下の表2で計算とパラメータスタディで得られた物性値の値を示す。ただし、重心は各家具の底面を原点とする相対座標系における値である。

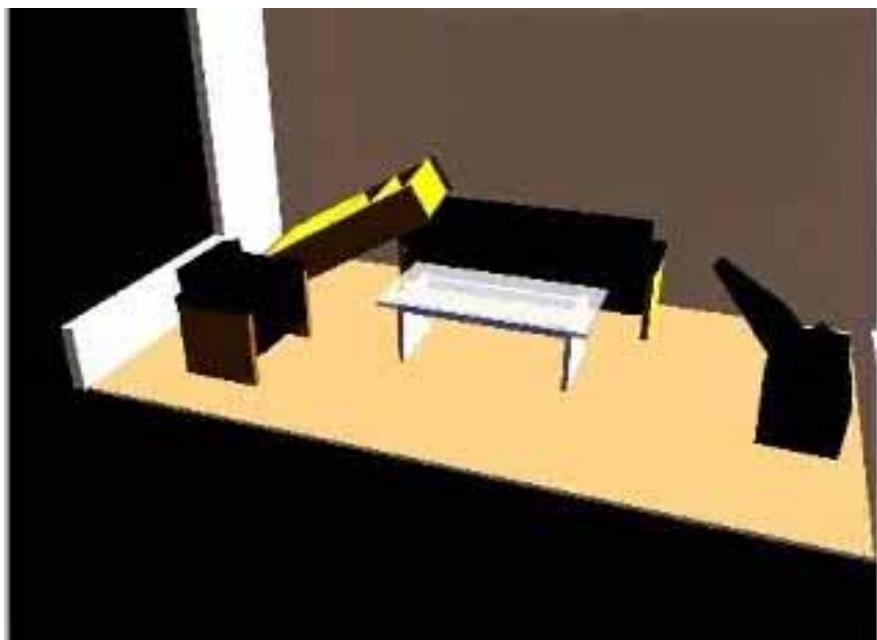
表2 計算とパラメータスタディによって求められた物性値

	床	本棚	テレビ	テレビ台
質量[kg]	—	24.4	31.6	43.2
慣性テンソル [kgm ²]	—	4.543 -2.262 -0.318 -2.262 6.402 -1.732 -0.318 -1.732 2.355	1.170 -0.257 -0.005 -0.257 3.143 -0.004 -0.005 -0.004 2.049	1.626 -0.971 -0.757 -0.971 4.312 -1.925 -0.757 -1.925 4.488
重心 (x,y,z) [m]	—	(0.0,0.0,0.755)	(0.0,0.001,0.323)	(0.0,0.053,0.221)
垂直バネ [N/m]	1.6×10^5	0.0	0.0	1.6×10^5
垂直ダンパ [Ns/m]	3200	3200	0.0	3200
水平バネ [N/m]	27.6×10^3	2.8×10^5	2.8×10^5	27.6×10^3
水平ダンパ [Ns/m]	2800	2800	2800	2800
静止摩擦係数	0.33	0.01	11.0	1.1
動摩擦係数	0.31	0.0	10.0	1.0

図16に、大ストローク振動台の実験において家具が移動・転倒したときの様子と、個別要素法によるシミュレーション結果の一例を示す。適切にパラメータを調整することにより、家具の移動・転倒状況を再現することができた。ただし、重心位置と慣性テンソルについては、家具を構成する部品の種類(鉄、プラスチック、木など)やその密度などを考慮してより正確に求める必要がある。



a) 大ストローク振動台による実験



b) 個別要素法による再現シミュレーション

図 1 6 超高層建物の室内家具の移動・転倒の実験とシミュレーションの比較

c) 効果的な避難計画等に関する検討

個別要素法を用いた家具の挙動のシミュレーション結果を Web 上で見せる啓発ツールの試作版を開発した。この啓発ツールは、Web サイトにおいて居住者が地震後の部屋の状態を再現することで、家具の固定の実施や地震後の避難計画等を居住者が自発的に行うようになることを目的としている。

試作版では、地盤条件、建物が戸建てか中低層か超高層か、また何階に住んでいるか、家具のレイアウトなどを選択する画面に続き、地震の規模に応じた室内の被害状況をシミュレーションした画像を表示する構成になっている。



図 1 7 室内の家具の固定や避難のための啓発ツールのイメージ

(c) 結論ならびに今後の課題

室内の家具の移動・転倒等による人的被害を検討するために、東京湾北部地震（M7.3）における超高層建築物の揺れを建築研究所の「大ストローク振動台」で再現し、室内のコピー機やロッカー棚等の移動・転倒が居住者の安全性に及ぼす影響について検討した。実験ではダミー人形を用いて人的被害の程度を衝突時の衝撃力の値によって考察した。衝撃力と人的被害の関係は必ずしも明確ではないため、今後、よりの確に人的被害を評価する方法の検討が必要である。

次に、E-ディフェンス震動実験で得られた最上階の床応答値から、制震機構の効果を避難計画の観点から検討した。実験結果を行動難度の評価曲線にプロットしたところ、制震機構の採用により、居住者の危険回避行動が可能になる結果が得られた。

さらに、家具の固定など、居住者自らが地震時安全対策を行うことを支援する目的で、個別要素法を用いた家具の挙動のシミュレーション結果をWeb上で見せる啓発ツールの開発を行った。開発された啓発ツールは、まだ試行段階であり、コンテンツの充実、使用性の向上等、実用化に向けて更なる検討が必要である。

(d) 引用文献

- 1) 久田嘉章、田中良一、吉村智昭、山本優：首都圏直下地震と海溝型巨大地震により新宿で想定される地震動、工学院大学総合研究所・地震防災・環境研究センターEEC 研究成果報告書、2009年5月、pp.177-180.
- 2) 山下哲郎、久田嘉章、鱒沢曜、星幸男、島村賢太：工学院大学新宿校舎の地震応答解析と制震補強、工学院大学総合研究所・地震防災・環境研究センターEEC 研究成果報告書、2009年5月、pp.181-184.
- 3) E-ディフェンスホームページ「長周期地震動を受ける高層建物のダンパー補強と室内対策に関する震動台実験(2009年9月)」
http://www.bosai.go.jp/hyogo/syuto-pj/movie_kousou09.html
- 4) 高橋徹、貞弘雅晴、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也、箕輪親宏；長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, p497～p498, 2007年
- 5) Springhead Web Page: <http://springhead.info/>

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国内・国際 の別
回転ダンパー付きキャストによる地震時の機器等の移動制御	斉藤大樹、森田高市、野口和也	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内
キャスト付き家具の滑り量推定式	高橋徹、長谷川亮、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内
大ストローク振動台実験における等価定常振動波の評価－東海・東南海・南海地震の想定床応答との比較－	鈴木典子、高橋徹、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内
避難行動限界の周波数特性に関する研究	鈴木稔子、鈴木典子、高橋徹、斉藤大樹、森田高市、野口和也、小豆畑達哉、箕輪親宏	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内
試設計された超高層建物上層階の室内安全性評価	小川和宏、高橋徹、斉藤大樹、小豆畑達哉、森田高市、野口和也	2009年度日本建築学会大会（東北）	2009年8月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(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 22 年度業務計画案

高層建物における非構造部材や家具類の地震時の挙動や応答特性および人間の避難に関する安全性の視点に立ち、長周期地震動の長時間の揺れによる家具等と人体との衝突等がどのように影響するかを検討するための振動台実験を実施する。また、人体ダミーを設置し、組み込まれた計測機器から得られる加速度データ等から衝撃力等を分析し、ダメージの程度について評価を行う。

