

3.2.6 超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とともに、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・共有し指針を取りまとめ、安心・安全な高層建物の広い普及を目指すことは重要な課題である。

本研究では、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を行い、居住者への安全性の高い居住空間提供を目指す。

(b) 平成 23 年度業務目的

・平成 23 年度の E-ディフェンス実規模実験から、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の被害の様相を以下の内容により評価し取りまとめる。

- ① 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分析を行う。
- ② 震動台実験の結果をもとに、室内の家具と人体の数値モデルを構築し、シミュレーション解析により人的被害を推定する方法を検証する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人建築研究所	上席研究員	斉藤大樹	tsaito@kenken.go.jp

備考：業務協力者として千葉大学大学院・高橋徹教、授および研究補助者として千葉大学学生 7 名参加

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 23 年度の E-ディフェンス実規模実験から、以下の成果を取りまとめた。

- ① 人体ダミーに組み込まれた計測機器から得られた加速度データ、家具の移動距離や転倒状況に関わるデータを整理し、人体へのダメージの程度や室内の被災状況について考察した。
- ② 個別要素法を用いたシミュレーション解析のための家具のモデル化を行い、実験結果の再現を試み、人的被害の程度について考察した。

(b) 業務の成果

1) E-ディフェンス実規模実験による家具の移動・転倒データの整理・分析

a) はじめに

平成 23 年 10 月 4 日、7 日、12 日に、E-ディフェンスにおいて地震時の室内の安全性や建物の機能維持に関する震動台実験が行われた。表 1 に入力波形リストを、図 2 に試験体のモデル図を示す。1 階（図 1 の実験室 1）、4 階（実験室 2）および P1 階（実験室 3）に家具が配置されている。試験体は、免震層を間に挟むことで超高層の揺れを再現する超高層タイプの実験が行われ、その後、免震層を固定した低層タイプの実験が行われた。

表 1 入力波形リスト

実験日	入力波形名称	備考
10 月 4 日	1_1 JMA-Kobe25%	超高層タイプ
	1_2 西新宿本震 50%	同上
	1_3 西新宿本震 100%	同上
	1_4 西新宿余震 150%	同上
10 月 7 日	2_1 西新宿余震 75%	同上
	2_2 西新宿余震 330%	同上
10 月 12 日	3_1 西新宿余震 330%	低層タイプ
	3_2 JMA 神戸波 25%	同上
	3_3 JMA 神戸波 50%	同上
	3_4 JMA 神戸波 75%	同上

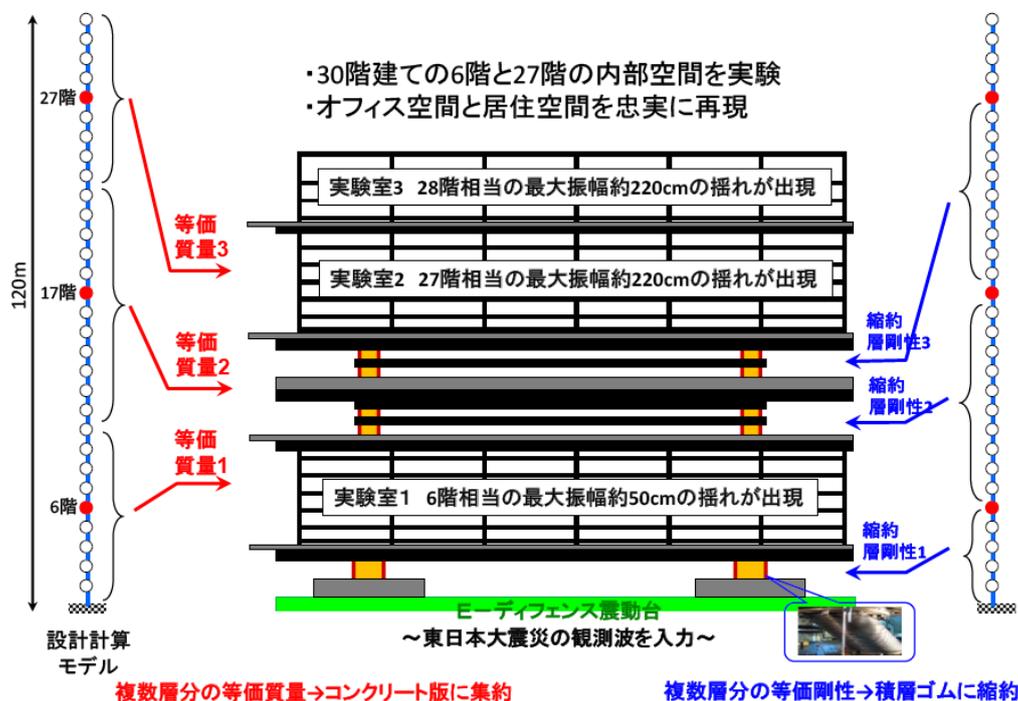


図 1 高層建物の設計計算モデルを用いた試験体のモデル化と実験概要 (E-ディフェンス公開実験説明資料より抜粋)

b) 家具の配置

図 2 から図 4 に家具の配置を示す。図に緑で示された家具は、壁に固定したり接着シートで止めたりするなどの何らかの地震対策を施しているものである。

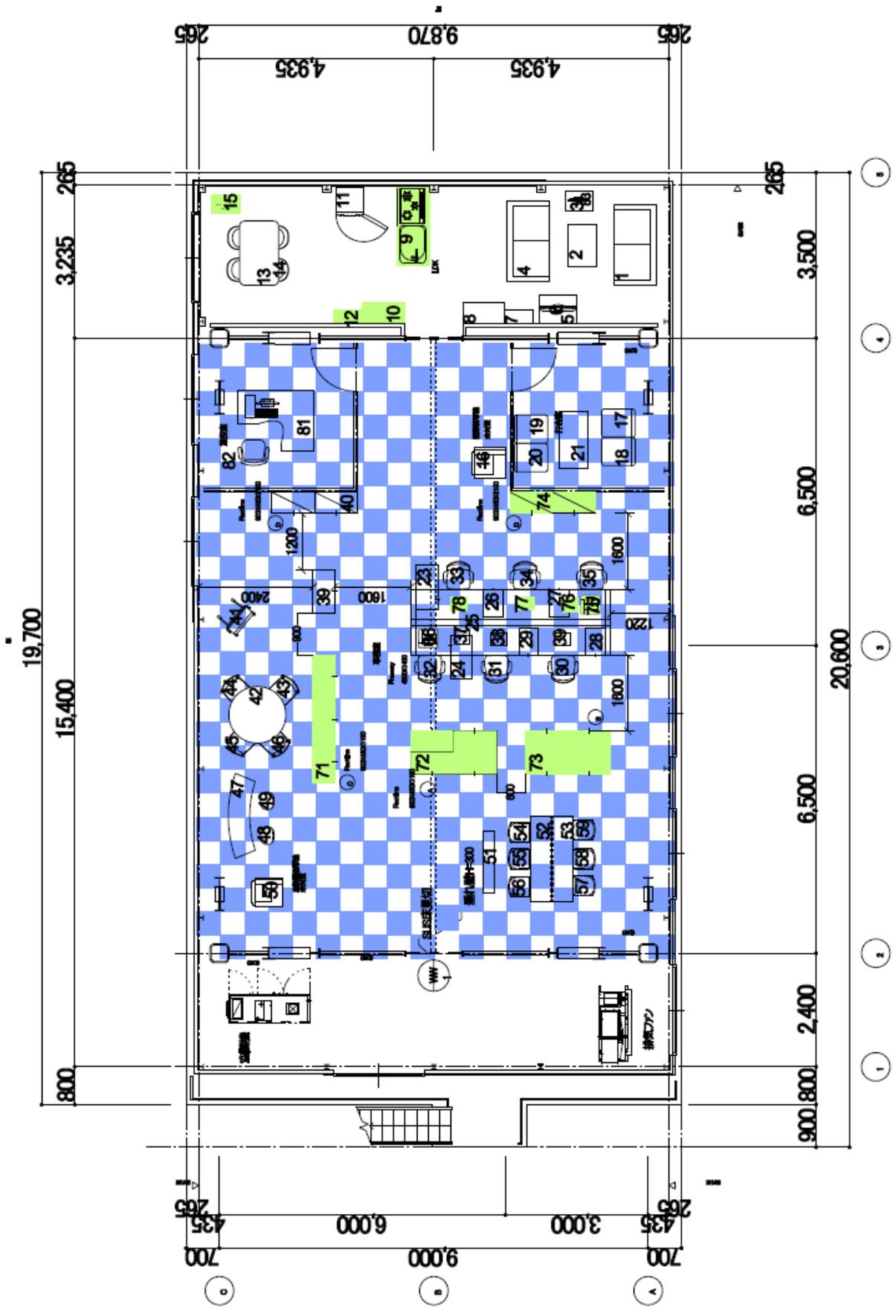


図2 1階の家具配置と家具番

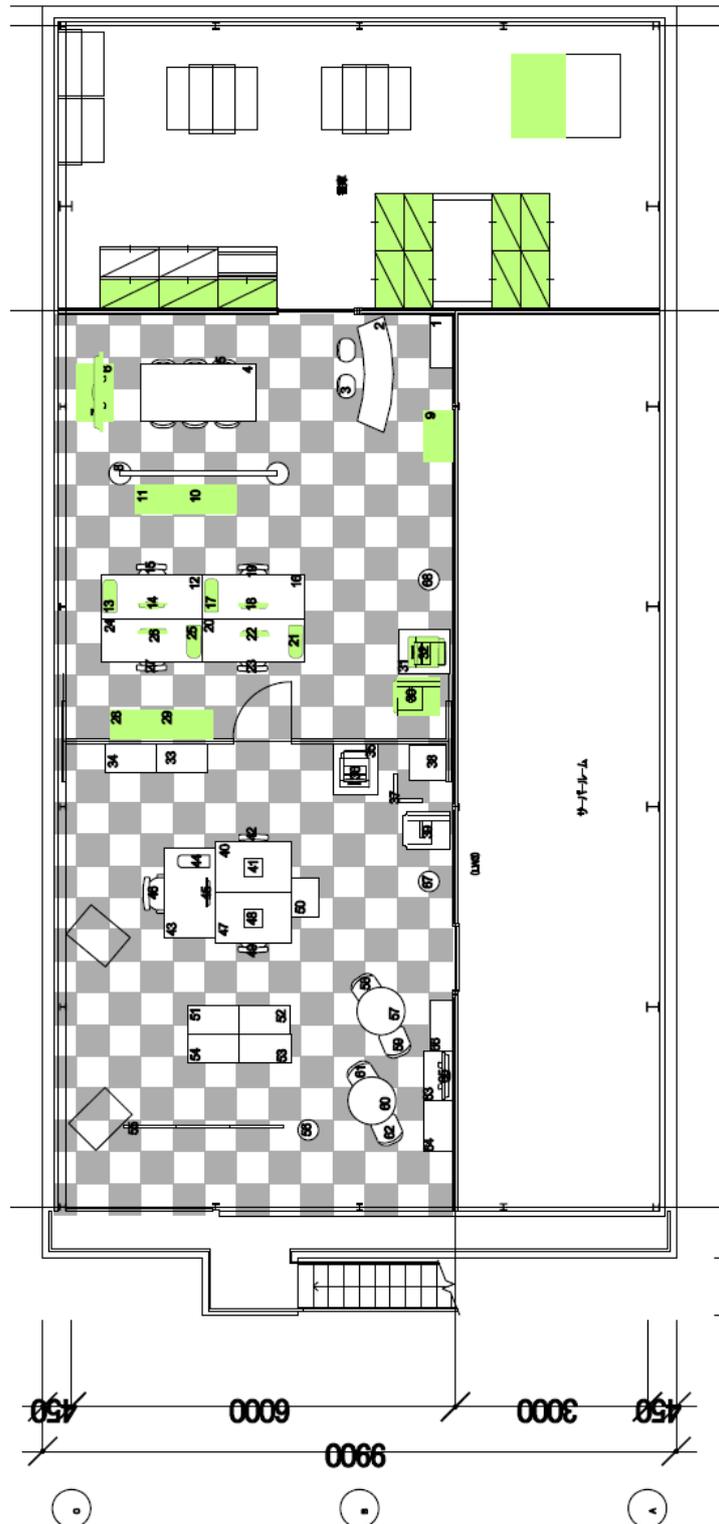


図 4 P1 階の家具配置と家具番号

c) 家具の転倒可能性の検討

地震時の家具の転倒の発生の可能性は、建物床応答の水平方向最大加速度 A_f と最大速度 V_f を用いて、以下の略算式から判定することができる。

転倒限界加速度 A_0 は、床応答の見かけの卓越振動数 F_e （等価振動数）に応じて、(1)式または(2)式で表される。 F_e が小さいゆっくりとした揺れの場合には、家具に準静的に地震力が作用するため、(1)式のように家具の片端が浮き上がり始める静的加速度が転倒限界となる。しかし、 F_e が大きい細かな揺れの場合には、家具の片端が浮き上がってもロッキング振動が生じるだけで転倒に至るとは限らなくなる。このような領域では、エネルギー的な考え方を取り入れて、転倒限界加速度は速度に比例する(2)式で表現される。

$$F_b > F_e \text{ のとき、 } A_0 = \frac{b}{h} g \quad (1)$$

$$F_b \leq F_e \text{ のとき、 } A_0 = 2\pi F_e V_o = \frac{F_e}{F_b} \cdot \frac{b}{h} g \quad (2)$$

ここに、

$$F_e = A_f / (2\pi V_f) \quad (3)$$

$$F_b = 11 / \sqrt{h} \quad (h \text{ は cm}) \quad (4)$$

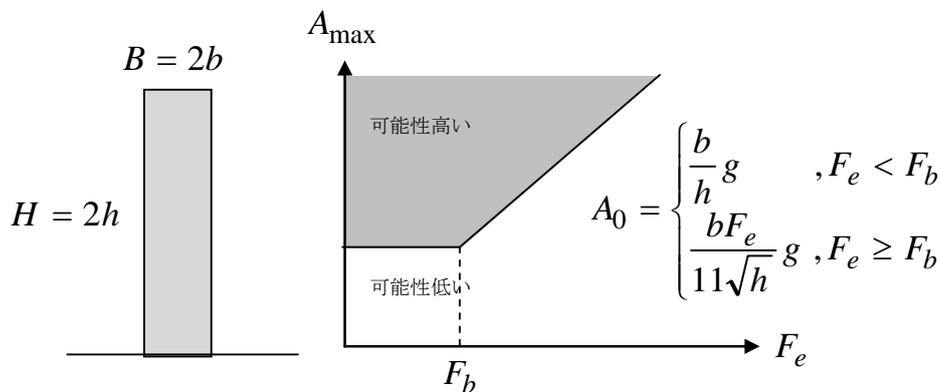


図5 家具の寸法と転倒可能性判定図

ここでは、実験に用いられた家具の中から代表的な以下の3つの家具について、実験で得られた床応答から略算式に基づいて転倒可能性を求める。

表2 代表的な家具の寸法

	H(cm)	B(cm)	Fb
食器棚	181	45	1.156294
冷蔵庫	160	59	1.229837
本棚	120.7	45	1.41597

例として、入力波形(1_1 JMA-Kobe_25%)のときの1階床中央の加速度計（センサー番号03）の加速度波形とそれを積分して得られた速度波形を図6に示す。そこから得られた最大応答値を表3に、その結果を家具の転倒可能性判定図にプロットした結果を図7に示す。プロットした点はグラフの線を下回っており、家具の転倒可能性は低いことが分かる。

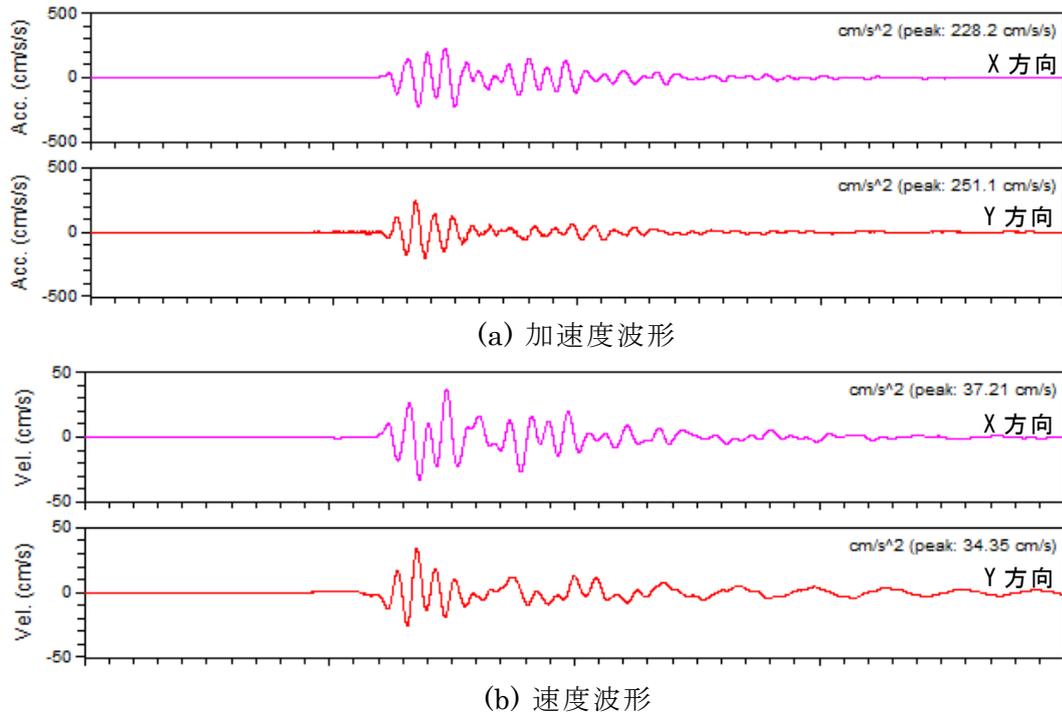


図6 1階中央の加速度計（センサー番号03）の加速度波形および速度波形

表3 入力波形(1_1 JMA-Kobe_25%)の1階の最大応答値

階		最大加速度 A_f	最大速度 V_f	等価振動数 F_e	等価周期 T_e
		(cm/s^2)	(cm/s)	F_e	T_e (s)
1階	x	228.20	37.21	0.98	1.02
	y	251.10	34.35	1.16	0.86

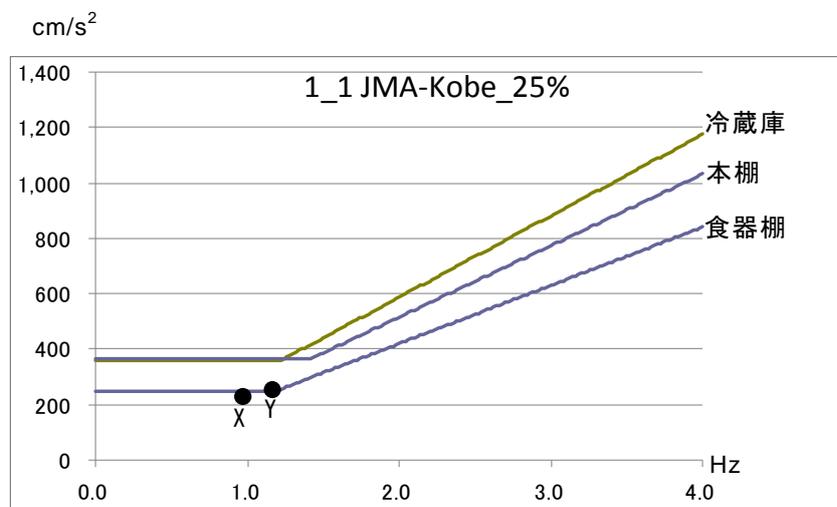


図7 家具の転倒可能性判定図

同様に、全ての加振について応答値をプロットした結果を図8、図9に示す。

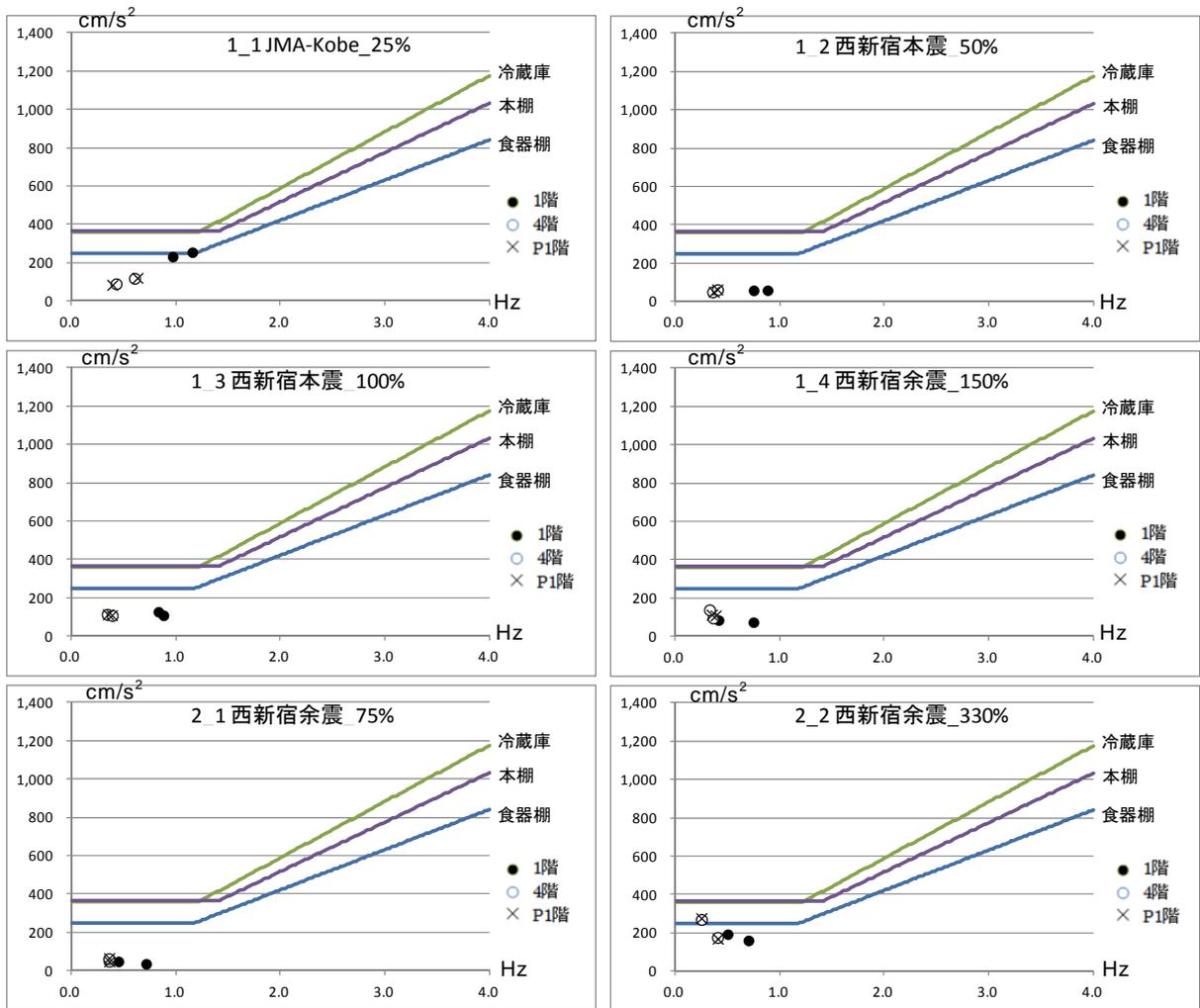


図8 超高層タイプの床応答加速度と家具の転倒可能性

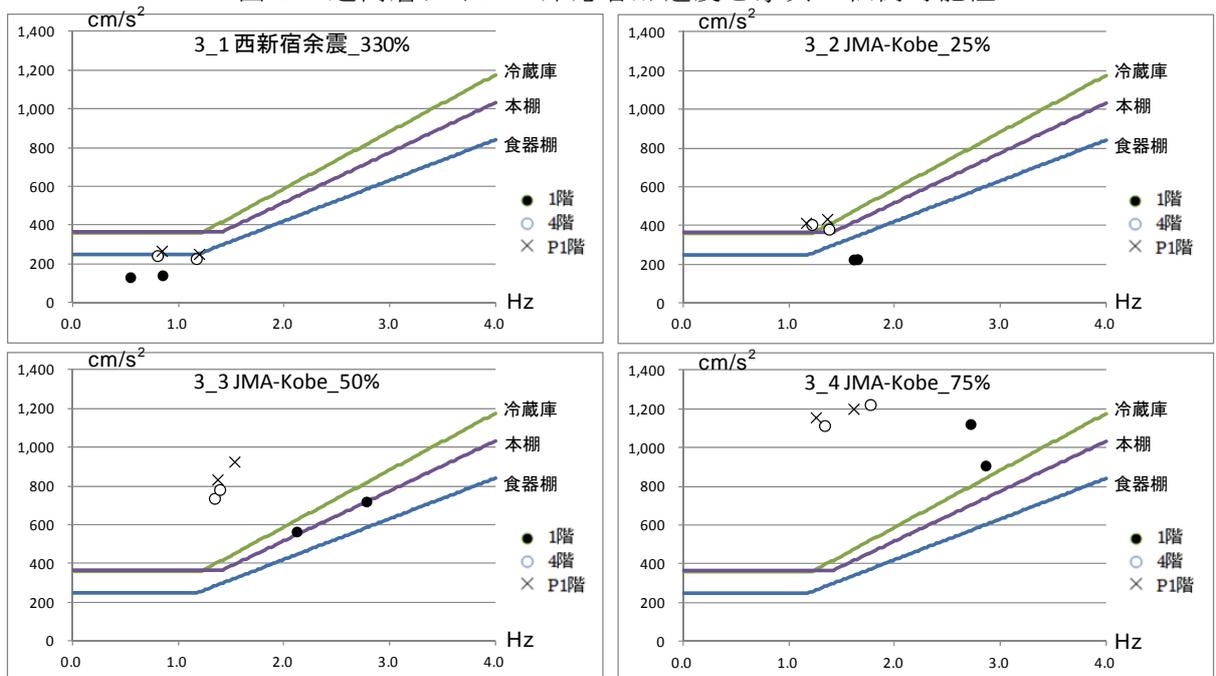


図9 低層タイプの床応答加速度と家具の転倒可能性

これより、超高層タイプの試験体では、2_2 西新宿余震_330%のときに4階およびP1階で食器棚の転倒可能性がやや高いものの、その他のケースでは転倒可能性は低いと判定される。一方、免震層を固定した低層タイプの試験体では、とくにJMA_Kobeの入力波形において、25%、50%、75%と入力倍率を上げるに従い転倒可能性が高くなり、50%では4階およびP1階で、75%では全ての階でほとんどの家具が転倒する可能性があることが分かる。

d) 震動台実験における家具の移動・転倒状況

震動台実験において、それぞれの入力波による加振の後の家具の移動・転倒状況を実際に観察し、移動量を計測した。以下の表に、移動した家具の番号、名称、移動量などを示す。計測点が複数ある場合にはX、Y方向の移動距離をそれぞれ①、②として記録している。

表4は第1日目（10月4日）の加振による家具の移動・転倒状況をまとめている。これより、1_3 西新宿本震 100%および1_4 西新宿余震 150%でP1階のパーティションが転倒した他はそれほど大きな家具の移動はないことが分かる。

表4 10月4日の入力波による家具の移動・転倒状況

1_1 JMA-Kobe25%							
	家具番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	1	ソファ	0	-3	0	-3	
	2	ローテーブル	-3	-3	-2	-2	
	3	PC台(キャスター付き)	-4	4	-4	7	
	5	TV台(キャスター付き)	-19	11	-	-	
	8	食器棚	-3	0	-	-	
	11	冷蔵庫	0	3	-	-	
4F	15	PC台(キャスター付き)	6	10	-	-	
	3	PC台(キャスター付き)	0	1	-	-	
	5	TV台(キャスター付き)	5	0	-	-	移動
P1F	15	PC台(キャスター付き)	0	3	-	-	移動
P1F	-	-	-	-	-	-	

1_2 西新宿本震50%							
	家具番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	-	-	-	-	-	-	
4F	-	-	-	-	-	-	
P1F	50	台	1.5	-1.6	-	-	

1_3 西新宿本震100%							
	家具番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	4	ソファ	-1	0	-	-	
	5	TV台(キャスター付き)	-16	9	-	-	
4F	3	PC台(キャスター付き)	0	1	-	-	
	5	TV台(キャスター付き)	3	0	-	-	
P1F	35	机	24	3	33	-21	移動
	37	パーティション	7	-11	33	-32	転倒
	58	椅子	-12	-4	-9	5	動かした可能性有
	65	TV	-1.3	0	-0.7	0	

1_4 西新宿余震150%							
	家具番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	5	TV台(キャスター付き)	-6	0	-	-	
4F	2	ローテーブル	-1	0	-	-	
	3	PC台(キャスター付き)	0	3	0	6	
P1F	8	パーティション	0	3	-	-	転倒
	37	パーティション	4.2	-1.5	-	-	転倒
	58	椅子	-2.5	5	-	-	動かした可能性有



1_4 西新宿余震 150%の加振後のP1F (パーティションの転倒)

表5 10月7日の入力波による家具の移動・転倒状況

2.1 西新宿余震75%							
	家具番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	3	PC台(キャスター付き)	0	2	-	-	
	43	椅子(キャスター付)	0	2	-	-	
	47	机	-3	1	-	-	
	49	椅子	-3	-2	-	-	
	51	ホワイトボード(キャスター付き)	0	-1	-	-	
4F	52	机(キャスター解除)	0	-1	-	-	
	1	ソファ	-1.5	0	-	-	
	3	PC台(キャスター付き)	0	2	-	-	
P1F	66	椅子(キャスター付)	3	-1	-	-	
	68	椅子	1	1	-	-	



2.1 西新宿余震 75%の加振後の 1F

2.2 西新宿余震330%								
	家具番号	名称	変位(cm)				備考	
			①X	①Y	②X	②Y		
1F	1	ソファ	-1	1	-1.5	1.5		
	2	ローテーブル	-17	42	-12	42		
	3	PC台(キャスター付き)	-8	3	-4	7.5		
	4	ソファ	0	4	0	2		
	5	TV台(キャスター付き)	1	138	61	85	回転	
	6	TV	0	0			転落	
	11	冷蔵庫	0	1				
	13	ダイニングテーブル	1	0				
	14	椅子	-4	7	-1.5	7		
	15	PC台(キャスター付き)	3.5	2	3	3		
	4F	1	ソファ	-22	16.5	-21	18	
		2	ローテーブル	28	66	20	61	
		3	PC台(キャスター付き)	-10	8	3	18	
		4	ソファ	13	29	11	29	
		5	TV台(キャスター付き)	-41	90	31	11	回転
6		TV	0	0			転落	
7		棚	0	0			転倒	
8		食器棚	0	0			転倒	
11		冷蔵庫	-5	2	-5	6		
12		棚	0	0			本が崩れる	
P1F		3	椅子	0	0			転倒
				0	-19	-18	-15	移動
	8	パーティション	0	0			転倒	
	12	机	0	0			引き出しが出る	
	15	椅子	-7	12	-8	10	移動	
	16	机	0	0			引き出しが出る	
	19	椅子	-15	66			移動	
	27	椅子	-66	-45			移動	
	31	机	76	42	13	0	移動	
	36	プリンター	0	0			転落、破損	
	37	パーティション	48	-31			転倒	
	38	金庫	0	4				
	39	コピー機	22	-140			移動	
	40	机	0	-5			移動	
	42	椅子	-54	126			移動	
	46	椅子	75	-95			移動	
	47	机	0	-5			移動	
	49	椅子	141	-155			移動	
	50	台	-115	-133	-132	-128	移動	
	51	棚3	0	-3				
55	パーティション	0	0			転倒、破損		
56	観葉植物	0	0			転倒		
57	テーブル	37	-76			移動		
58	椅子	0	-32	-20	-51	移動		
59	椅子	-30	-37	39	43	移動		
60	テーブル	-5	-20			移動		
61	椅子	-11	-4	-6	7	移動		
62	椅子	15	16	11	20	移動		
67	観葉植物	0	-13			転倒		
68	観葉植物	0	40			転倒		



2.2 西新宿余震 330%の加振後の 1F
(TV 台移動、TV 落下)



2.2 西新宿余震 330%の加振後の 4F
(本棚の転倒)



2.2 西新宿余震 330%の加振後の P1F
(パーティションの転倒・破損)

表5は第2日目（10月7日）の加振による家具の移動・転倒状況をまとめている。これより、2_2 西新宿余震 330%で4階の本棚が転倒した。図8の転倒可能性の検討では食器棚の転倒可能性が高い結果となったが、ほぼそれに対応する結果が得られている。最上階のP1階ではキャスター付きの椅子が大きく移動しており、長周期の揺れの影響を受けたものと考えられる。

表6には、最終日（10月12日）の最初の加振（3_1 西新宿余震 330%）による家具の移動・転倒状況をまとめている。免震層を固定した低層タイプの試験体のため、長周期の揺れの影響を受けにくく、とくに上層のP1階の家具の移動量は、同じ入力の超高層タイプのP1階（表5）に比べるとかなり小さいことが分かる。

表6 10月12日の入力波による家具の移動・転倒状況（3_1 西新宿余震 330%）

3_1 西新宿余震330%							
	家具 番号	名称	変位(cm)				備考
			①X	①Y	②X	②Y	
1F	2	ローテーブル	1	0			
	16	コピー機	-2	0			
	21	テーブル	0	-1			
4F	3	PC台(キャスター付き)	2	3			
	4	ソファ	1	0			
	5	TV台(キャスター付き)	5	0			
	6	TV	-1	0			
	11	冷蔵庫	-2	0			
	15	PC台(キャスター付き)	5	1			
	16	コピー機	-8	-7			
	18	台	1	1			
	19	ソファ	-1	0			
	20	ソファ	-1	1			
P1F	82	椅子(キャスター付)	-20	-2			
	6	TV台	0	0			
	23	椅子	-2	-10			
	27	椅子	0	-15			
	35	机	-10	-25			
	36	プリンター	-10	10			
	37	パーテーション	0	0			
	39	コピー機	10	-35			
	42	椅子	5	5			
	46	椅子	-5	0			
	47	机	-10	0			
	48	ノートPC	1	1			
	49	椅子	-10	-5			
	50	台	0	-5			
	51	棚3	0	1			
	53	棚4	0	1			
	55	パーテーション	2	0			
	57	テーブル	0	3			
	58	椅子	0	0	3		
	59	椅子	3	3			
	60	テーブル	5	0			
	62	椅子	-2	0			
	65	TV	3	5	1.5	-3.5	



3_1 西新宿余震 330%の加振後の P1F
(コピー機の移動)

表7には、最終日（10月12日）の2番目の加振（3_2 JMA-Kobe 25%）による家具の移動・転倒状況をまとめている。P1階で多くの家具が移動し、パソコンのモニターやタワーが転倒したが、移動量は小さく、室内に家具が散乱するような状況ではない。

表7 10月12日の入力波による家具の移動・転倒状況（3_2 JMA-Kobe 25%）

3_2 JMA-Kobe25%				
家具番号	家具名称	変位(cm)		備考
		①X	①Y	
1F	2 ローテーブル	-2.5	0	
	3 PC台(キャスター付き)	0	1.5	
	4 ソファ	1	0	
	5 TV台(キャスター付き)	-5	0	
	11 冷蔵庫	2	0	
	12 棚	0	0	トースター開く
	13 ダイニングテーブル	1.5	-0.5	
	15 PC台(キャスター付き)	2	0	
	16 コピー機	-3	-4	
	21 テーブル	1.6	0	
	41 ホワイトボード(キャスター付き)	-6	-5	
	42 テーブル(キャスター付き)	-7	-4.5	
	43 椅子(キャスター付)	2.7	-3.5	
	4F	1 ソファ	1	0
2 ローテーブル		-2.5	-2.5	
3 PC台(キャスター付き)		-3.5	4.5	
4 ソファ		1	1	
5 TV台(キャスター付き)		-2.6	3.3	
6 TV		-1.6	-1.6	
11 冷蔵庫		-2	-1.2	
12 棚		0	0	本が崩れた
13 ダイニングテーブル		0	1.3	
14 椅子		-5.5	3.3	
15 PC台(キャスター付き)		21	0	
16 コピー機		-17	-19	
18 台		5.5	0	
20 ソファ		1.6	0	
80 TV台		-13	-20	
81 机		0	-1	
82 椅子(キャスター付)		-19	-7.4	

家具番号	家具名称	変位(cm)		備考
		①X	①Y	
P1F				
	1 オープン棚	0	0	
	2 机	-3	-1.5	
	3 椅子	1.2	1.6	
			1.4	0.5
	4 机	-1	-2	
	5 椅子	2	4	
	6 TV台	0	0	扉開く
	12 机	0	0	引き出しが出る
	15 椅子	-10	13	
	19 椅子	-14	11	
	20 机	2	2	
	24 机	0	2	
	25 タワー	0	0	
	26 モニター	0	0	
	27 椅子	-3	6	
	31 机	-4	39	
	33 棚5	-1	1	
	34 棚3	-1	-11	
	35 机	40	30	
	36 プリンター	-2	1	
	37 パーテーション	0	-15	転倒
	38 金庫	-2	1	
	39 コピー機	16	-50	
	40 机	-10	0	
	42 椅子	-34	36	
	43 机	-2	2	
	44 タワー	0	0	転倒
	45 モニター	0	0	転倒
	46 椅子	40	50	
	47 机	-6	0	
	48 ノートPC	2	7	
	49 椅子	8	-20	
	50 台	-29	-16	
	51 棚3	0	8	
	52 棚2	-1	2	引き出しが出る
	53 棚4	2	2	
	54 棚4	3	1	
	55 パーテーション	2	-1	
	57 テーブル	-18	0	
	58 椅子	-6	10	
	59 椅子	-1	-3	
	60 テーブル	12	2	
	61 椅子	5	2	
	62 椅子	-3	2	
	63 棚1	0	-2	
	64 棚1	13	0	
	65 TV	0	0	転落
	66 オープン棚	0	4	
	67 観葉植物	0	1	
	68 観葉植物	0	0	転倒



3_2 JMA-Kobe 25%の加振後の P1F
(机の上の PC タワーが転倒)

表8には、最終日（10月12日）の3番目の加振（3_3 JMA-Kobe 50%）による家具の移動・転倒状況をまとめている。いずれの階も25%の入力よりは家具の移動量は大きく、4階では本棚が初めて転倒したほか、P1階でも多くの家具が転倒し、室内に散乱する状況が見られた。図9に示した転倒可能性でも、JMA-Kobe 50%では4階とP1階の転倒可能性が高いとされており、それを裏付ける結果となった。

表8 10月12日の入力波による家具の移動・転倒状況（3_3 JMA-Kobe 50%）

3_3 JMA-Kobe50%					
	家具名称 番号	変位(cm)		備考	
		①X	①Y		
1F	1 ソファ	7	-2		
	2 ローテーブル	-10	-5		
	3 PC台(キャスター付き)	5	5		
	4 ソファ	-5	0		
	5 TV台(キャスター付き)	-30	20		
	6 TV	1	0		
	7 棚	0	0	転倒	
	8 食器棚	2	0	内部食器散乱	
	11 冷蔵庫	-10	0		
	13 ダイニングテーブル	-5	-3		
	14 椅子	-10	-10		
	15 PC台(キャスター付き)	-5	-10		
	16 コピー機	-10	-10		
	20 ソファ	-1	0		
	4F	1 ソファ	-5	-5	
		2 ローテーブル	-10	-10	
3 PC台(キャスター付き)		-30	0		
4 ソファ		-10	-10		
5 TV台(キャスター付き)		-10	-5		
6 TV		0	-10		
8 食器棚		-10	10	食器類散乱	
10 食器棚		-10	0		
11 冷蔵庫		-15	-25		
12 棚				転倒	
13 ダイニングテーブル		-30	-20		
14 椅子		-40	-20		
15 PC台(キャスター付き)		15	10		
16 コピー機		-10	-10		
17 役員室棚		5	0		
18 台		10	-10		
19 ソファ		-10	-10		
20 ソファ		10	5		
21 ソファ		-10	-10		
22 ガラステーブル		-10	-10		
81 机		-10	-10		
82 椅子(キャスター付)		-20	-20		

	家具名称 番号	変位(cm)		備考
		①X	①Y	
P1F	1 オープン棚			転倒
	2 机			転倒
	3 椅子			転倒
				転倒
	4 机	-5	-5	
	5 椅子	15	10	
	6 TV台	0	0	扉開く
	7 TV	-10	0	
	8 パーテーション			転倒
	9 棚1	15	-15	
	机	-5	-5	
	机	-10	0	
	机	0	-10	
	23 椅子	10	-15	
	机	-15	0	
	27 椅子	5	-15	
	28 棚2	0	5	
	29 棚1			転倒
	30 コピー機			引き出し出る
	机	100	50	
	33 棚5			転倒
	34 棚3	-10	-50	
	35 机	-135	-10	
	36 プリンター	10	10	
	37 パーテーション			転倒
	38 金庫	5	-30	
	39 コピー機	0	-40	
	40 机	-40	-30	
	41 ノートPC	0	-3	
	42 椅子	5	25	
	43 机	25	-40	
	44 タワー			転倒
	45 モニター			転倒
	46 椅子	25	30	
	47 机	10	-30	
	48 ノートPC	-2	0	
	49 椅子	-50	-50	
	50 台	-15	15	
	51 棚3	-15	10	
	52 棚2	-10	3	
	53 棚4	-3	0	
	54 棚4	-3	0	
	55 パーテーション	-5	2	
	56 観葉植物	0	0	転倒
	57 テーブル	-5	20	
	61 椅子	-5	-5	
	62 椅子	0	0	
	63 棚1	2	-15	引き出し出る
	64 棚1	10	0	
	65 TV			転倒
	66 オープン棚			転倒
	67 観葉植物			転倒
	68 観葉植物			転倒



3_3 JMA-Kobe 50%の加振後の4F
(本棚が倒れダミー人形が下敷になる)

表9には、最終日（10月12日）の最後の加振（3_4 JMA-Kobe 75%）による家具の移動・転倒状況をまとめている。P1階では家具が飛散し、計測が困難であった。

表9 10月12日の入力波による家具の移動・転倒状況（3_4 JMA-Kobe 75%）

3_4 JMA-Kobe75%					
	家具番号	名称	変位(cm)		備考
			①X	①Y	
1F	1	ソファ	-13	-13	
	2	ローテーブル	-23	-15	
	3	PC台(キャスター付き)	-10	0	
	4	ソファ	-13	0	
	5	TV台(キャスター付き)	-40	14	
	6	TV	0	-6	
	7	棚	0	0	本飛び出し
	8	食器棚	5	0	食器散乱
	9	キッチン	0	0	引き出しが開く
	10	食器棚	0	0	中で物が乱れる
	11	冷蔵庫	-22	-12	
	12	棚	0	0	扉があく
	13	ダイニングテーブル	-18	-10	
	14	椅子	-14	-19	
	15	PC台(キャスター付き)	-17	27	
	16	コピー機	-1	-15	
	17	ソファ	19	0	
	18	ソファ	26	13	
	19	ソファ	-31	-12	
	20	ソファ	-21	-8	
	21	テーブル	-7	-7	天板がずれる
4F	1	ソファ	-23	-12	
	2	ローテーブル	-27	24	
	3	PC台(キャスター付き)	-40	-7	
	4	ソファ	-21	9	
	5	TV台(キャスター付き)	5	64	
	6	TV			転倒
	7	棚			転倒・本散乱
	8	食器棚	40	37	食器散乱
	9	キッチン	0	0	
	10	食器棚	0	0	
	11	冷蔵庫	-43	-10	
	12	棚			転倒
	13	ダイニングテーブル	-45	-37	
	14	椅子	-31	-7	
	15	PC台(キャスター付き)	50	-13	
	16	コピー機	27	22	
	17	役員室棚			転倒
	18	台			転倒
	19	ソファ	12	7	
	20	ソファ	10	8	
	21	ソファ	-14	-6	
22	ガラステーブル	5	20	天板が破損	
80	TV台	-51	-81		
81	机	-16	26		
82	椅子(キャスター付)	27	-26		



P1階では多くの家具が転倒した

	家具番号	名称	変位(cm)		備考
			①X	①Y	
P1F	1	オープン棚	60	-50	転倒
	2	机			転倒
	3	椅子			転倒
	4	机	33	-10	
	5	椅子	-9	-4	
	6	TV台	0	0	
	7	TV	0	0	
	8	パーティション	36	3	転倒
	9	棚1	49	12	転倒
	10	棚2	0	0	内容物散乱
	11	棚3	0	0	内容物散乱
	12	机	5	-5	
	13	タワー	0	0	
	15	椅子			不明
	16	机	2	-4	
	19	椅子	25	52	
	20	机			不明
	22	モニター	0	0	脚から曲がる
	23	椅子	-15	-2	
	25	タワー			埋もれたため測れず
	26	モニター	0	0	脚から曲がる
	27	椅子	10	-18	
	28	棚2			転倒
	29	棚1			転倒
	30	コピー機	0	0	用紙のBOXが開く
	31	机	65	104	
	32	プリンター	0	0	全面ボックスが開く
	33	棚5			転倒
	34	棚3	0	-22	
	35	机	170	-35	
	36	プリンター			落下
	37	パーティション			転倒
	38	金庫	0	-21	
	39	コピー機	47	-43	
	40	机	-34	-13	
	41	ノートPC	-5	-7	
	42	椅子	0	25	
	43	机	-15	-35	
	44	タワー			転倒
	45	モニター			転倒
	46	椅子	53	0	
	47	机	24	0	
	48	ノートPC			
	49	椅子	27	-9	
	50	台			初期位置不明
	51	棚3			画像データなし
	52	棚2			抽斗が開く
	53	棚4	5	8	
	54	棚4	4	-8	
	55	パーティション			転倒
	56	観葉植物			転倒
	57	テーブル	25	-40	初期位置不明
	58	椅子			画像データなし
	59	椅子	11	30	
	60	テーブル	60	10	初期位置不明
	61	椅子			転倒
	62	椅子			初期位置不明
	63	棚1			転倒
	64	棚1			転倒
	65	TV			落下
	66	オープン棚			転倒
	67	観葉植物			転倒
	68	観葉植物			転倒

2) E-ディフェンス実規模実験に基づく室内の居住者の安全性の分析

人体ダミーに設置された加速度計の値や、高速カメラによる家具との衝突映像などから、居住者の安全性について分析した。

a) P1 階における人体ダミー（座位）の分析（加振波：JMA-Kobe_75%）

人体ダミーを椅子に座らせ、机に向かう状態で設置した（写真1）。手足は拘束することなく、自由に動く状態にしてある。人体ダミーの頭部と胸部にはそれぞれ3成分の加速度計が設置されている。家具の配置としては、背中側に引出式の棚が設置されている。四段ある引出の中には、一段につきコンクリートブロック4つ(8kg×4)が錘として入っている。2方向から高速度カメラ（125フレーム/秒）でも撮影して分析に用いた。



写真1 P1階の人体ダミー

図10の高速度カメラの映像から、ファイルキャビネットの引出が倒れ込んできて、机との間に挟まれることにより、胸部が圧迫されているのがわかる。ただし、今回の実験では胸部の変形量は測定していない。

次に、頭部の3成分の合成加速度の記録を図11に示す。とくに、家具が衝突した瞬間に加速度は 4445cm/s^2 (4.5G)に達している。自動車事故の分野では、死亡の危険のある頭部加速度として200Gが用いられている³⁾ことから、今回のケースでは死亡にまでは至らないと推定される。

これより、椅子の上の人体ダミーは、頭に生じる加速度は小さいものの家具の挙動次第では、家具と机に挟まれ、胸が圧迫される危険性があることがわかった。

b) 4階における人体ダミー（立位）の分析（加振波：JMA-Kobe_75%）

人体ダミーを立たせたままで、棚に寄りかかった状態で設置した（写真2）。背中側には本棚が設置されている。本棚は固定されていないため、加振により転倒する可能性がある。本棚の中は六段に分けられていて、一段につき90kgの本が並べられている。

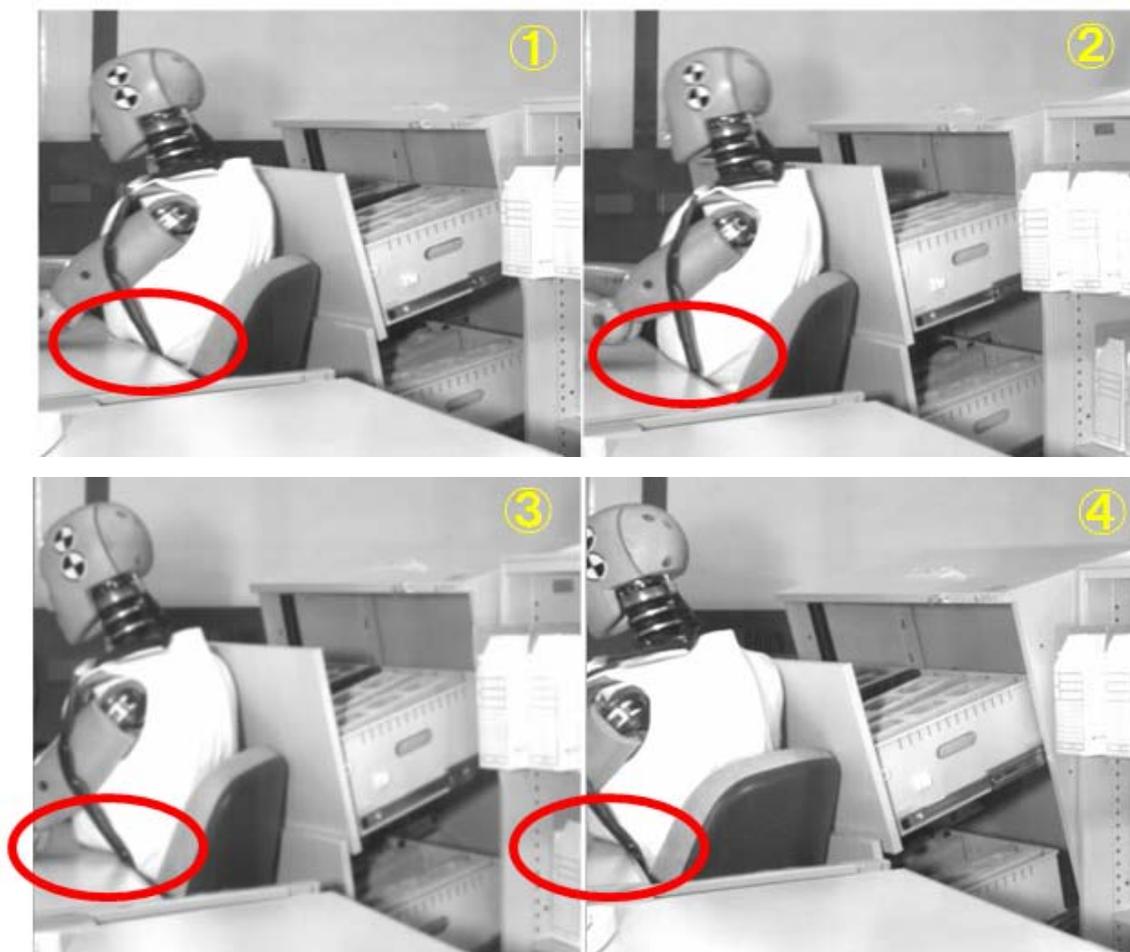


図 1 0 人体ダミーの胸部圧迫の様子（高速度カメラの映像、JMA-Kobe_75%）

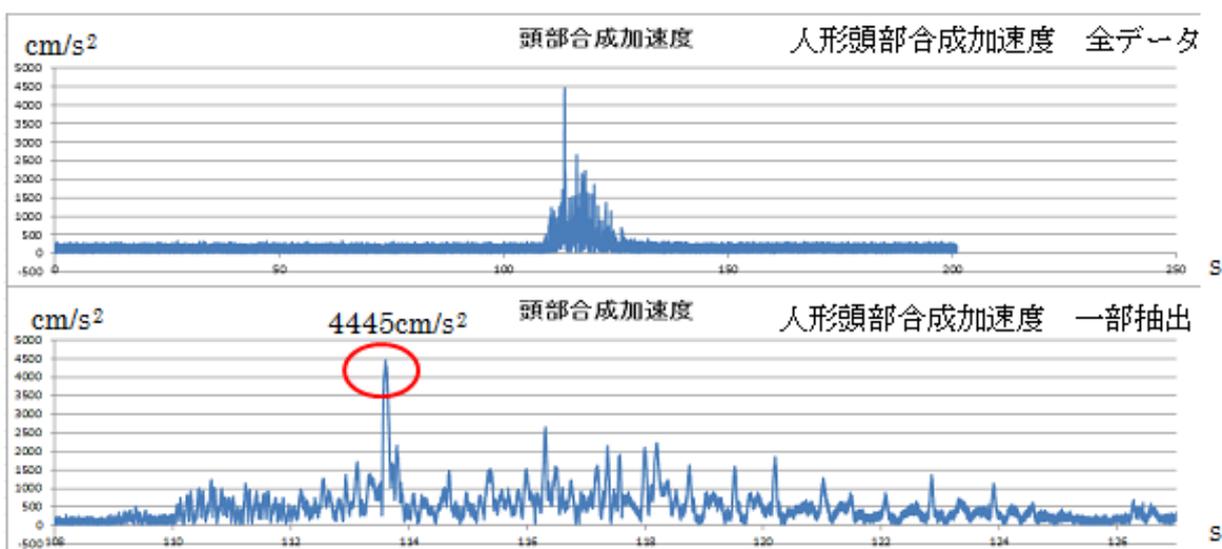


図 1 1 頭部の合成加速度記録（JMA-Kobe_75%）



写真2 4階の人体ダミー

4階には高速度カメラは設置していないため、通常のビデオ映像から分析する。図1.2から、加振によって倒れた本棚が人体ダミー頭部を直撃しているのがわかる。



図1.2 家具転倒の瞬間の様子

次に、頭部の3成分の合成加速度の記録を図13に示す。頭部合成加速度の値は、最大で85175cm/s² (86.9G)であった。やはり死亡の危険があるとされる200Gには至らないものの、頭部を直撃していない座位のケース(図11)に比べると約20倍の加速度が生じている。なお、頭部に生じた加速度波形に2つの山があるのは、①家具が衝突したとき、②その勢いで頭が前の家具と衝突したときのそれぞれの加速度に相当すると考えられる。

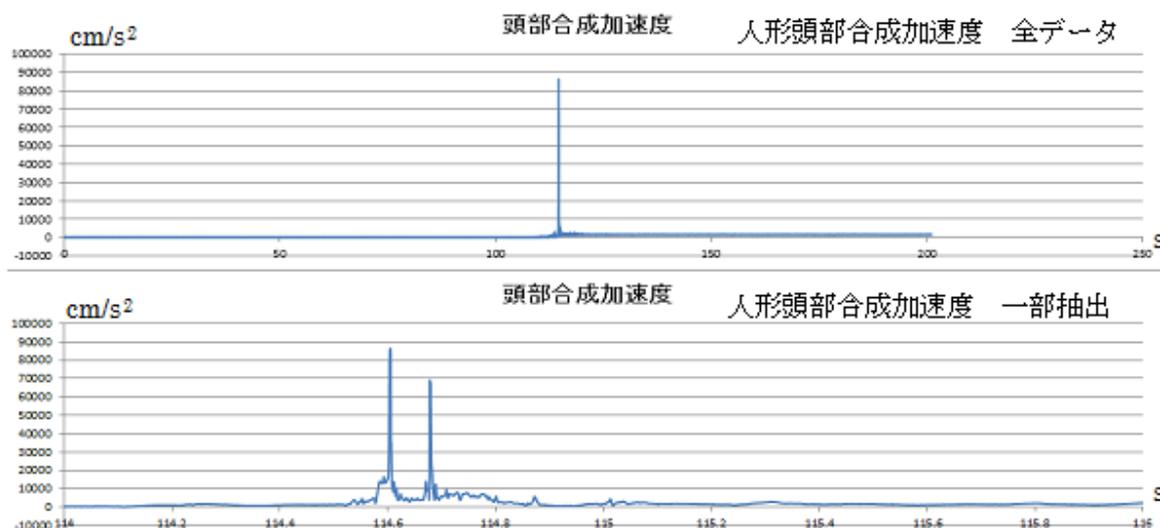


図13 頭部の合成加速度記録 (JMA-Kobe_75%)

3) 個別要素法による家具のモデル化と震動台実験のシミュレーション

a) はじめに

物体の移動、衝突等の現象を効率よくシミュレーションする手法として個別要素法がある。ここでは、個別要素法を用いた家具の地震時挙動のシミュレーションを行い、震動台実験を再現することを目指す。

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東京工業大学で開発された「springhead」⁴⁾を用いる。Springheadは、物理エンジンに体積ベースパナルティ法と Featherstone 法による関節エンジンを搭載し、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プログラムである。

震動台実験に用いられた家具の寸法、重量、摩擦係数などを実験の前に計測し、シミュレーションに必要な物性値である質量、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、動摩擦係数を定めた。シミュレーション解析に使用した家具はソファ(2人掛け)、テレビ、テレビ台、テーブル、食器棚、冷蔵庫などである(写真3)。表10に代表的な家具の寸法を示す。

b) 超高層タイプの室内被害のシミュレーション結果

震動台実験のうち、超高層タイプで家具の転倒が観測された10月7日の「2_2 西新宿余震330%」における1階および4階の室内被害をシミュレーションした結果を図14に示す。1階では家具の移動は見られたものの転倒はしていない。一方、4階では背の高い食器棚と本棚が転倒しており、実験結果と対応している。また、固定した家具は移動も転倒もし

ていない。



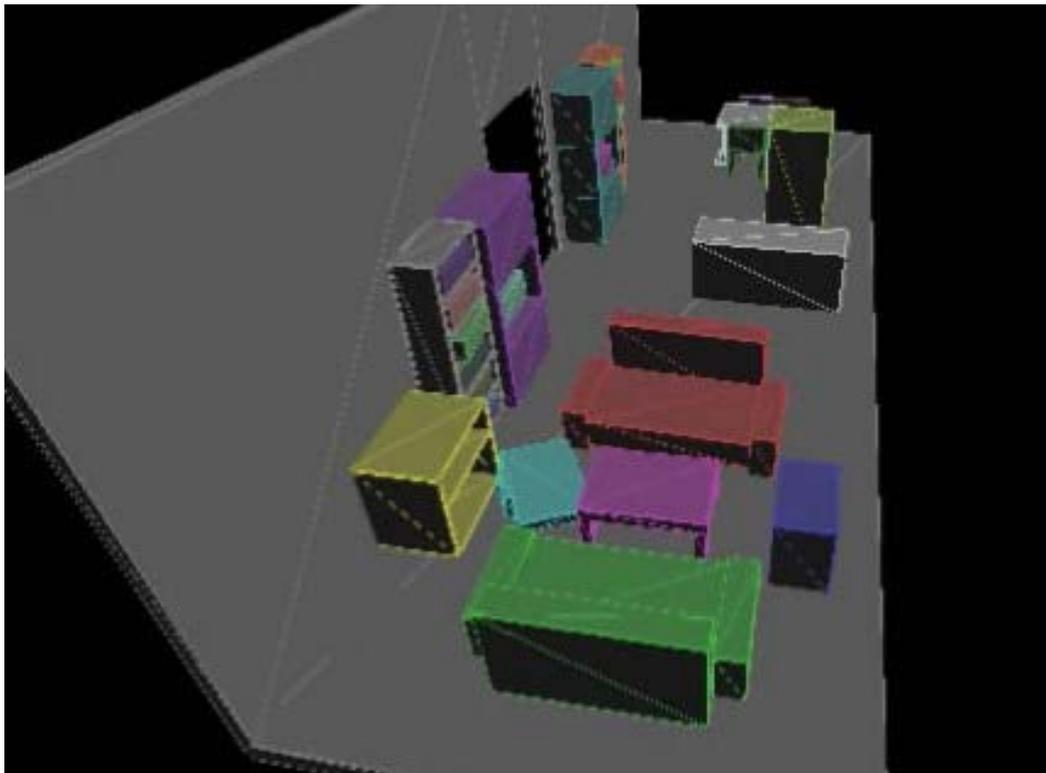
写真3 シミュレーション解析に使用した家具

表10 代表的な家具の寸法

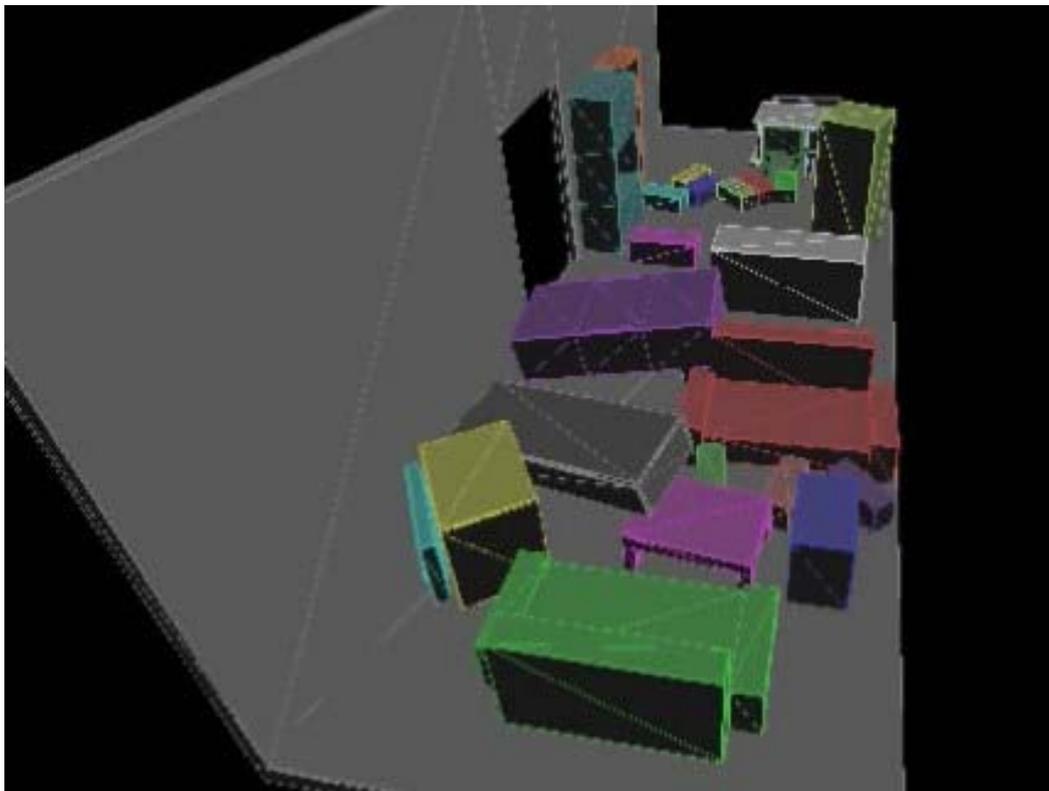
名称	A(mm)	B(mm)	H(mm)
ソファ	1700	400	800
ローテーブル	900	600	335
TV	770	90	540
TV台	600	800	750
本棚	600	300	1750
食器棚	900	450	1810
冷蔵庫	590	610	1600
椅子	480	405	720

c) 低層タイプの室内被害のシミュレーション結果

低層タイプでJMA神戸波75%における1階および4階の室内被害をシミュレーションした結果を図15に示す。震動台実験では、1階は本が散乱し食器棚の扉が開いたものの家具は転倒していないが4階では多くの家具が転倒した。シミュレーション解析結果も同様である。とくに、固定した本棚も移動してから転倒した状況が再現されている。このような状況の下では、人は立ってられず、恐怖感が大きいため避難することは困難になることから、移動・転倒した家具によって怪我をする可能性が高くなるものと推察される。



(a) 1階の室内被害状況



(b) 4階の室内被害状況

図 1 4 超高層タイプで家具の転倒シミュレーション (2_2 西新宿余震 330%)

(c) 結論ならびに今後の課題

Eーディフェンスで行われた震動台実験において、それぞれの入力波による加振の後の家具の移動・転倒状況を実際に観察し、移動量を計測した。その結果から、室内の被災状況は、略算式を用いた家具の転倒可能性と概ね対応する結果が得られた。また、キャスター付きの椅子などは、長周期の揺れの影響により移動量が大きくなることが確認された。

また、人体ダミーに設置された加速度計の値や、高速度カメラによる家具との衝突映像などから、居住者の安全性について分析を行った。その結果、座位の人体ダミーが家具の間に挟まれることで胸部が圧迫される様子が確認された。また、立位の人体ダミーには家具が頭部に衝突し、頭部には20Gもの加速度が生じたが死亡の危険性は少ないという結果が得られた。

さらに、超高層タイプと低層タイプの室内について、個別要素法を用いた家具の地震時挙動のシミュレーション解析を行い、震動台実験を再現することを試みた。解析結果は実験における室内の被害状況とよく対応した。

以上より、室内の家具の移動・転倒については略算式によりおおまかな状況が評価可能であること、また個別要素法により個々の家具の詳細な挙動がシミュレーション可能であることが示された。人的被害については、家具の形状や重量、衝突のパターンなど多くの要因が関係するため、さらに多くの実験を行い、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。

(d) 引用文献

- 1) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、2003年
- 2) 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
- 3) 社団法人自動車技術会：工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス～交通事故で人はどのようにして怪我するのか？～，社団法人自動車技術会, 2007.
- 4) 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・外の別
なし				

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

