

防災教材、振動論教材としての 卓上2軸振動台とその模型の開 発

DEVELOPMENT OF NOTE SHAKER AND STRUCTURAL MODELS FOR EDUCATION

花井 勉——* 1 石井 渉——* 2
押田光弘——* 3 村尾秀己——* 4
福和伸夫——* 5

キーワード：
防災教材、振動教材、卓上振動台、2軸加振、建物振動模型、室内・家具模型

Keywords：
Disaster prevention products (Education), Building vibration products (Education), Note shaker, 2-axis shaking, Structural vibration model, Room and furnitures model

Tsutomu HANAI ——* 1 Wataru ISHII ——* 2
Mitsuhiko OSHIDA ——* 3 Hidemi MURAO —* 4
Nobuo FUKUWA ——* 5

We have been developing disaster prevention products for education and enlightenment. We developed the small 2-axis shaker, structural vibration models and room and furnitures models. This 2-axis shaker is small, lightweight and easy to carry. Structural vibration models are available in a variety of experiments, and can return from the collapse immediately. Room and furnitures models reproduce the situation of a room on earthquake. These products are easy to experiment, and possible to reproduce the collapse of a building and a furniture.

1. はじめに

筆者らはこれまで木造建物倒壊模型など防災啓発を目的とした動きのある地震防災教材を色々と開発してきているが¹⁾、地震の揺れを手動で模すため実験の再現が難しく、誰もが容易に地震動の特徴と建物模型の応答の関係を説明できる教材とはいえたなかった。

そこで、様々な防災啓発の場面で誰もが地震動を再現できる、小型で軽量の卓上の2軸振動台、及びこれに乗せる建物模型、室内模型を開発したのでここに紹介する。地震の動きと模型の動きを関係づけて見せることで防災教材として説得力が増すとともに、再現が可能のこと、地震動のレベルや模型の質量・剛性を変化させた比較実験が可能となるなど、振動論の教材としても有効となった。

2. 卓上2軸振動台

卓上振動台の構成と形状を写真1に、仕様を表1にそれぞれ示す。本装置は、文献2)を基にして開発されたものであり、2軸振動台と、その制御を行う制御BOX及び制御用PCから構成されている。振動台の大きさは250×250mm、最大振幅は50mmで0.7Gの加速度まで加振可能となっている。制御方法は、振動データフォーマットをサンプリング100Hzの変位データの配列とし、10msec毎の絶対位置データを連続的に直線補間して加振を行う方法を採用了した。また、ノートPCでの制御を想定し、モーションコントローラをUSB対応のものとした。

駆動源のモータとしては、ステッピングモータを採用了した。サーボモータも検討した結果、ステッピングモータに比べて、動きのスムーズさ、トルク等面では優れているが、コストやモータドライバのサイズなどの問題から採用了には至らなかった。

制御ソフトはオリジナルのものを使用し、振幅と振動数の指定に

よる正弦波加振のほか、地震動波形などを読み込んだ100Hzの変位データに対して、振幅の倍率と、再生振動数を変化させた加振を行うことができ、同一周期下での振幅変化、同一振幅での速度や加速度の変化の実験などにも対応可能である。また、マウスの動きに連動させて振動台を動作させる機能も追加し、手動での2軸の動きがどのような応答につながるかを体感できる教材となっている。

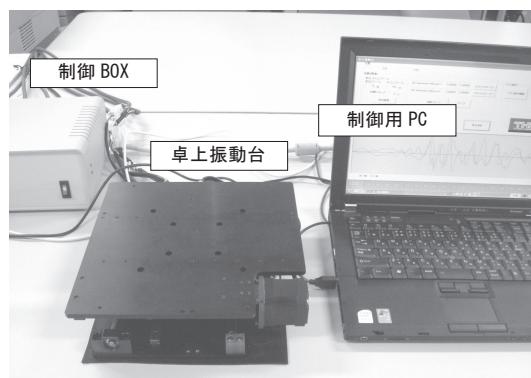


写真1 卓上振動台の構成と形状

表1 振動台の仕様

テーブル寸法	250×250×70mm	可能動作パターン		
		短周期動作	変位	±5.0 mm
動作ストローク	X,Y共に±50mm		最大加速度	±0.7 G (700 gal)
			最大速度	±260 mm/sec (26 kine)
テーブル重量	5.0 kgf	長周期動作	変位	±50 mm
			最大加速度	±0.1 G (100 gal)
最大積載重量	2.0 kgf		最大速度	±300 mm/sec (30 kine)
			マウス連動動作	マウスの動きに連動してテーブルを動かす

なお、本報の一部は既に発表³⁾されている。

*¹ (株)えびす建築研究所 代表取締役・工博
(〒135-0024 東京都江東区清澄2-14-8 2F)

*² (株)日本システム設計

*³ (株)えびす建築研究所 博士(工学)

*⁴ THK(株)

*⁵ 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*¹ President, Ebisu Building Laboratory Co., Dr. Eng.

*² Nihon System Sekkei Co., Ltd.

*³ Ebisu Building Laboratory Co., Dr. Eng.

*⁴ THK Co., Ltd.

*⁵ Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

3. 建物模型

3. 1 模型の特徴

建物模型は、比較する 2 棟を併設して、卓上振動台で 2 軸で繰り返し加振し、建物骨組の振動性状や倒壊現象を視覚的に観察することを目的に開発したものである。

建物模型の仕様を表 2 に、形状及び実験風景を写真 2 にそれぞれ示す。この模型の特徴として、(1)任意の階数を簡単に組み立てられ、(2)振動性状や倒壊現象を再現可能かつ容易に復元可能で、(3)耐力壁や免震装置を挿入できることが挙げられる。

建物模型の詳細を図 1 に示す。模型の縮尺はおよそ 1/100 を想定して寸法を決定している。縮尺 1/100 の模型を実物と同一の素材で製作すると固有周期は 1/10（固有振動数が 10 倍）になるが、これを実際の建物の周期に近づけるように、素材や接合部を選定した。

床材は、剛床となるようアクリルの単板を用い、柱材には中空の

塩ビ製丸パイプを使用し、柱頭及び柱脚に曲げ変形を模すスポンジを挿入している。また柱材の中心には、床材を貫通させてゴムを通して、最上階と最下階で固定しており、これにプレストレスを与えて、柱軸力と復元力をもたらせている。写真 3 には建物が倒壊した実験写真を示すが、このゴムにより瞬時に次の実験に向けて建て直す事ができるようになっている。

模型は写真 4 に示すようなキット状になっており、組立マニュアルにより希望する階数の建物を容易に作成できるようになっている。

この他の付属部品として、おもり、スチレンペーパー製の耐力壁、直動転がり支承による復元力を加えた免震装置（写真 5）を開発している。

3. 2 模型の固有振動性状

建物模型の性能確認のため正弦波を入力し、8 階建と 4 階建の模型短辺方向の固有振動数を測定したところ、表 2 に示すように、8 階建で 2.8Hz、4 階建で 6.5Hz であった。一般的な RC 造建物の固有振動数が、8 階建で 1.5Hz 程度、4 階建で 3.0Hz 程度と考えれば、本建物模型は実物の 2 倍の固有振動数を持っていると言える。したがって、再生振動数を 2 倍（時間軸を 1/2）にした地震動を入力し、その様子を 1/2 の速度で映像再生することで、実物により近い挙動を観察できることになる。

3. 3 地震動加振実験

地震動に対する挙動を確認するために、この建物模型に 1995 JMA Kobe 波及び 1968 Hachinohe 波の南北または東西方向の地動の

表 2 建物模型の仕様

縮尺	1/100	規模	8階建	4階建
階高(mm)	53	寸法(mm)	150×90×440	150×90×230
柱スパン (mm)	長辺 125 短辺 65	重量(kgf)	0.70	0.38
		固有振動数(Hz)	2.8	6.5
部位	仕様材料	個数(8階建)	個数(4階建)	
床	アクリル 単板	9枚	5枚	
	ガイドレール	長短 各32本	長短 各16本	
柱	塩ビパイプ	32本	16本	
	スポンジ	64個	32個	
	ゴム	4本	4本	
耐力壁	スチレンペーパー	長短 各16枚	長短 各8枚	
免震装置	直動転がり支承	—	—	
	アクリル 単板	—	—	
	ゴム	—	—	



写真 2 建物模型の形状

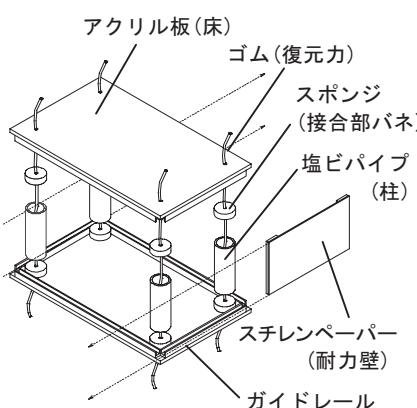


図 1 建物模型の詳細



写真 4 模型キット

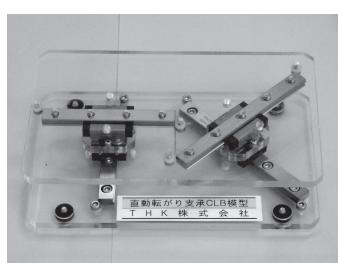


写真 5 免震層部品

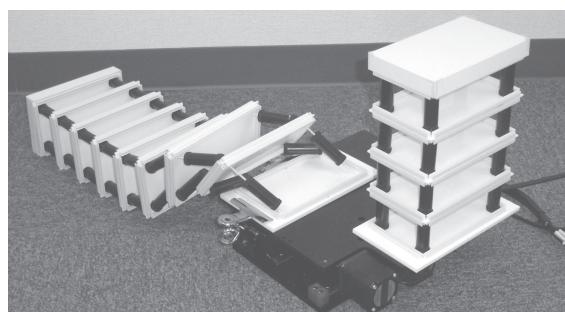


写真 3 8 階建て模型の倒壊

表 3 建物模型の地震動入力実験結果の代表例

階数	4階建				8階建				
	振幅	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍
100Hz	—	—	—	—	—	1	2	2	4
150Hz	—	—	—	—	3	2	4	5	/
200Hz	1	3	3	5	—	2	4	5	/
250Hz	1	4	4	5	—	2	4	5	/
300Hz	2	4	4	5	—	3	4	5	/

1995 JMA Kobe 波

階数	4階建				8階建				
	振幅	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍
100Hz	—	—	—	—	—	—	—	—	1
150Hz	—	—	—	—	—	—	—	—	1
200Hz	—	—	—	—	1	—	—	2	2
250Hz	—	1	1	1	1	1	2	3	5
300Hz	1	1	2	—	1	2	4	—	/

1968 Hachinohe 波

階数	4階建				8階建				凡例	
	振幅	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍	1.0倍	2.0倍	3.0倍	4.0倍	
100Hz	—	—	—	—	—	—	—	—	1	- : 動き無
150Hz	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1 (小)
200Hz	—	—	—	—	1	—	—	2	2	↓ 振動
250Hz	—	1	1	1	1	1	2	3	5	4 (大)
300Hz	1	1	2	—	1	2	4	—	/	5 : 倒壊

/ : 実験無

最大位変を1cmに基準化したサンプリング振動数100Hzの地震波を入力し、それぞれ振幅を0.5倍刻みで1.0~4.0倍、再生振動数を50Hz刻みで100~300Hzまで変化させ、建物模型の振動、倒壊性状に着目した振動実験を行った。実験結果の代表例を表3に示す。

表3より、4階建てに比べて8階建ての方が同一条件の地震波に対して揺れが大きく、入力地震動の振幅及び再生振動数の増大による影響をより大きく受ける傾向が見られる。また、2つの入力波のうち振動数が建物模型の固有周期に近く、最大加速度の大きいJMA Kobe波の方で建物模型が大きく振動する傾向が見られる。さらに、JMA Kobe波の振幅3.0倍、再生振動数150Hz以上で8階建てが倒壊し、振幅4.0倍、再生振動数200Hzで4階建てが倒壊する状況が見られた(写真3)。以上より、入力波の振動数を2倍して加振することの有効性が確認された。

これらより、本建物模型はさまざまな地震動に対する建物の定性的な傾向を模すことができるものと考えられる。

3.4 実験バリエーション

本建物模型が対応する実験バリエーションを表4に、その実験の様子の一部を写真6に示す。建物模型の階数や加振方向で2棟の振動性状を比較するだけでなく、写真6(a)のように2棟を直交に配置して建物頂部での衝突を再現する実験や、同図(b)のように高層と低

層の模型を連結し、セットバック建物における中間階への変形集中を再現することも可能である。また、床材の四辺に取り付けてあるガイドレールにスチレンバー製の耐力壁を挿入して、同図(c)に示すような耐力壁の偏在、すなわち偏心による建物のねじれを観察することや、ピロティを有する建物の振動性状を再現することも可能である。

さらに、写真5に示す免震層の有無による比較実験や、おもりを使った実験など、本建物模型は、非常に多種多様な建物の振動性状を模すことができる。振動の授業に用いる際には、基本的な比較実験の他に生徒側に自由に建物模型を組み立てさせ、その応答を予想してもらうことで、より学習効果を高めることができるであろう。

4. 室内・家具模型

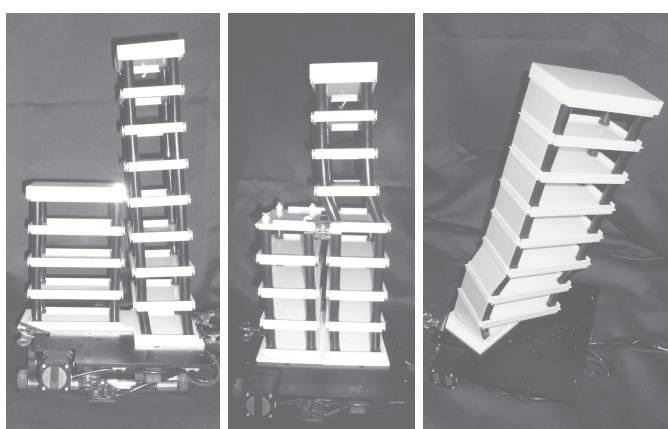
4.1 模型の特徴

室内・家具模型は、地震時の室内の状況を視覚的に把握、観察することを目的に開発したものである。加振波は地表面地震動の他、想定する建物の各階の床応答波も有効である。

室内・家具模型の仕様を表5に、模型の形状と家具の配置例を写真7にそれぞれ示す。模型の縮尺を1/20とし、和室、洋室、台所・食事室を想定した3種類を製作した。各部屋とも、公開実験で多くの人が直接見られるよう、前面の仕切りは無く、壁の1面と天井は透明なアクリル板で構成している。外形寸法は250×250×150mmである。同一材料であれば固有周期はおよそ1/4.5(固有振動数が4.5倍)となるところを、床面の剛性や家具の重心を試行錯誤で調整す

表4 建物模型の実験バリエーション

使用部品	パラメータ	実験の具体例
模型のみ	階数(建物高さ)	低層・高層 比較
	配置方向	長辺・短辺 比較
	2棟の隣接距離	頂部衝突・エキスパンションジョイント挙動
	振動数	共振現象(固有周期)
耐力壁	壁の有無	ロッキング挙動・固有周期比較
	剛性分布(鉛直)	ピロティ挙動
	剛性分布(平面)	偏心(剛心の偏在)挙動
おもり	重量分布(鉛直)	層せん断力増大挙動
	重量分布(平面)	偏心(重心の偏在)挙動
連結部品	平面形状変化	セットバック建物挙動
免震装置	免震の有無	免震の効果
	免震層の復元力	免震周期の変化による応答挙動
	地震波の違い	免震応答変位の変化



(a) 頂部の衝突 (b) 剛性率の変化 (c) 偏心による揺れ

写真6 実験バリエーション例

表5 室内・家具模型の仕様

部位/室名	和室	洋室(子供部屋)	台所・食事室
床	畳10畳 印刷	フローリング 印刷	フローリング 印刷
壁	真壁仕様 ジュラル壁風	大壁仕様 クロス貼り	大壁仕様 クロス貼り
天井	透明アクリル板	透明アクリル板	透明アクリル板
家具類	和洋服タンス	洋服タンス	食器棚 食器皿付き
	二段和タンス	本棚 2コ 本付き	冷蔵庫
	布団2セット	物入 2コ	テーブル 1コ
	額、楯	ベッド 布団セット付き	椅子 4コ
		机、額、楯	キッチンセット

表6 室内模型の実験結果代表例

◆寝室 左:和箪笥、右:洋服とタンス												
Kobe	1.0倍	2.0倍		3.0倍		4.0倍						
100Hz	-			-		-	1	-			2	
200Hz	4	4	5	5	/	/						
300Hz	4	4	5	5	/	/						
◆台所 左:冷蔵庫、右:食器棚												
Kobe	1.0倍	2.0倍		3.0倍		4.0倍						
100Hz	-			-		-	1	-			2	
200Hz	4	4	5	5	/	/						
300Hz	4	4	5	5	/	/						
◆子供部屋 左:本棚、中:洋服タンス、右:棚												
Kobe	1.0倍	2.0倍		3.0倍		4.0倍						
100Hz	1	-	-	3	1	1	5	2	1	5	3	1
200Hz	5	2	3	5	5	3	5	5	5	/		
300Hz	5	4	3	5	4	5	/			/		

凡例
- : 動き無
↓ : 振動
4 : 大
5 : 転倒
/ : 実験無

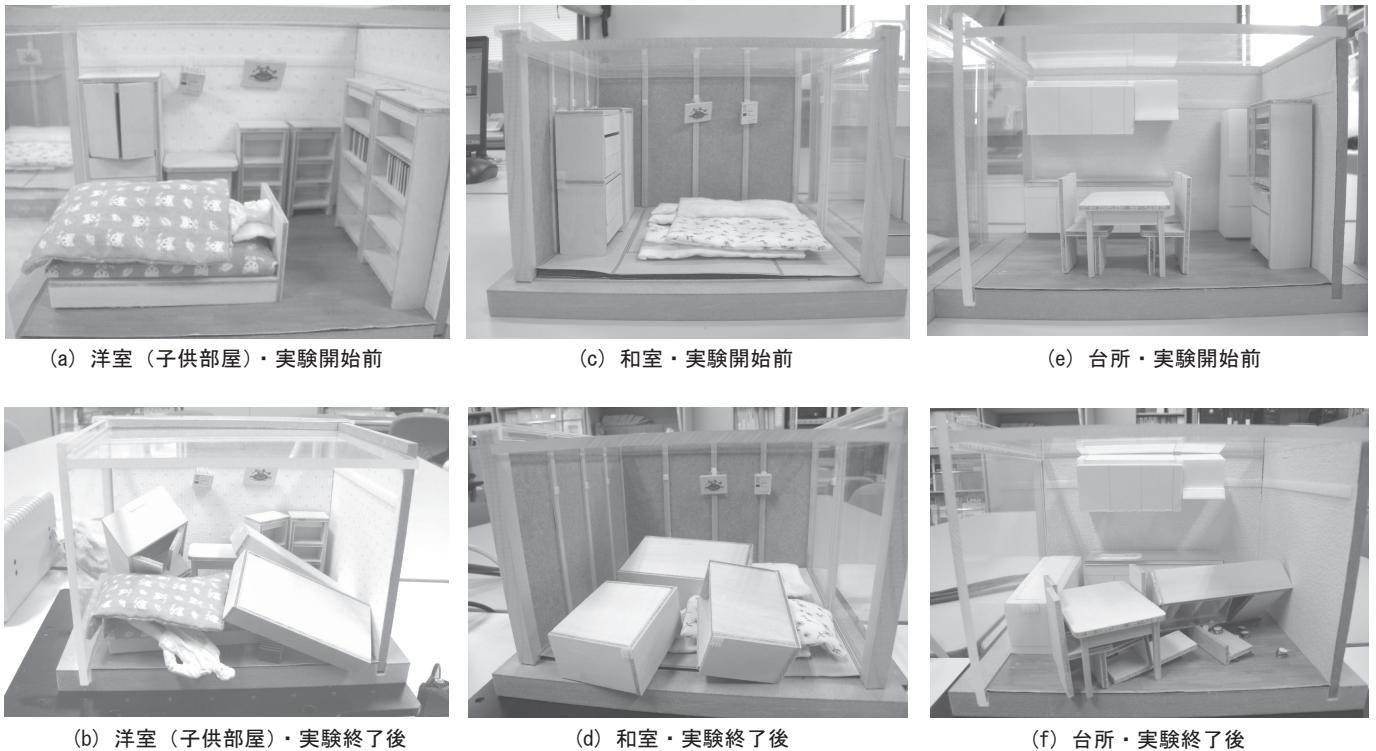


写真 7 実験前後の室内家具模型の状況

ることで、実物の周期に近づけている。また、家具の固定治具も用意して、家具固定の有無の比較も行えるようにしてある。

4. 2 地震動加振実験

室内挙動を確認するために、この室内・家具模型に建物模型と同様の地震動加振実験を行った。結果の代表例を表 6 に示す。

実験より、相対的に卓越周期が短く、最大加速度の大きい JMA Kobe 波の方で家具が大きく振動する傾向や、振幅や再生振動数の増大に対して早期に家具が転倒する傾向が見られた。また、JMA Kobe 波の振幅 2 倍、再生振動数 200Hz ではほぼ全ての家具が転倒する状況が見られた（写真 7(b)、(d)、(f)）。この実験は、振動台を最大約 400gal で加振したことになり、この加振レベルで家具が転倒する実大実験結果⁴⁾にも概ね合致している。以上より、室内家具実験でも建物模型と同様、振動数を 2 倍して加振することを推奨される。

またこの実験では、全体の挙動のほかに、小型カメラを枕位置などの室内に配して家具が倒れてくる映像を再生することで、家具固定の促進に大いに役立つものと考えられる。

この模型を振動の授業に用いる際には、どの家具が倒れやすいか、倒れなくても家具がすべる現象でも十分に危険なため、どこを固定すると良いかなど、生徒側に試行錯誤してもらうことでより学習効果を高めることが出来るであろう。

5. まとめ

小型軽量でどこででも実験ができ、リアルな 2 次元の地震時挙動を模擬できる卓上 2 軸振動台及びその建物模型、室内模型を紹介した。この模型を用いることで、地震動の特性と関連づけて建物及び室内家具のさまざまな挙動を説明することや、模型の挙動を録画し

てその場でスロー再生することにより、防災啓発に説得力が増すことが期待される。また、シンプルな模型仕様のため、独自に実験バリエーションを変化、進展させることができることで、振動論教材としての学習効果も高まるものと思われる。今後は実験のバリエーションを増やすと共に、実験映像をストックして振動論教材として体系付けたいと考えている。

謝辞

本教材の開発にあたり、飛田潤氏（名古屋大学大学院環境学研究科准教授）、護雅史氏（名古屋大学大学院環境学研究科准教授）、佐武直紀氏（応用地震計測（株）地震防災部）に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 名古屋大学福和研究室「ぶるる」ホームページ,
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/labofT/bururu/>
- 2) 小出栄治、佐武直紀、太田賢治、飯沼博幸、福和伸夫：耐震教育・啓発用の小型二軸振動台の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 633～634, 2007. 8
- 3) 石井涉、花井勉、押田光弘、村尾秀己、福和伸夫：防災教材・振動論教材としての卓上 2 軸振動台とその模型の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 845～846, 2008. 9
- 4) 島野幸弘、浜口弘樹、椿英顯、東野雅彦、北原昭男、鈴木祥之：建物内什器類の地震時損傷レベル評価手法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 97～98, 2001. 9

[2008年 6月19日原稿受理 2008年 9月 1日採用決定]