

減災行動を誘導するための統合型地震応答体感環境の構築

INTEGRATED ENVIRONMENT TO EXPERIENCE REALISTIC EARTHQUAKE SHAKING FOR PROMOTION OF DISASTER MITIGATION ACTIVITY

護 雅史 —— *1 福和伸夫 —— *2
飛田 潤 —— *3

Masafumi MORI Nobuo FUKUWA
Jun TOBITA

キーワード：
振動台、揺れの経験、振動風景、部屋の縮小モデル、ウェブGIS、床応答
Keywords:
Shaking table, Shaking experience, Shaking scenery, Scale-down model, WebGIS, Floor response

Two dimensional long stroke shaking table is developed, which is available for a person to experience realistic earthquake shaking and building response. Indoor and outdoor shaking scene is projected in front of the cage and is synchronized with the shaking table. Input waves are simulated ground motions and building responses which are easily selected on the WebGIS maps. Small-sized shaking table is also developed, and observed responses and video images are available in the large shaking table experience. Such a series of devices and systems provides realistic shaking experience and is effective for promotion of disaster mitigation activities.

1. はじめに

首都直下地震や東海・東南海地震、南海地震等、近い将来必ず大都市圏を襲うであろう大地震による広域で大規模な災害を少しでも軽減するためには、住民自らが建物の耐震化や室内の安全性向上などの備えを行うとともに、地震時の状況を想定して、避難・対処行動を確認しておくことが必須となる。自宅や職場などの身近な環境が将来の大地震でどのような揺れになり、どのようなことが起きるのかを仮想空間の中で現実性を持って実体験することは、地震の危険を我がこととして実感し、それを防ぐための減災対策の重要性を正しく認識して、納得した上で行動するように誘導するために非常に有効であると考える。

このような目的のために、著者らはこれまでに、住民一人ひとりのすまい状況を反映した地震ハザードや被災リスクをわかりやすく伝える「地域防災力向上シミュレータ¹⁾」、耐震化の重要性を易しく理解するための各種の振動実験教材²⁾、実際の地震の揺れを再現できる小型2軸振動台³⁾、さらには人が搭乗できる1軸ロングストローク振動台⁴⁾などを開発してきた。なお、1軸ロングストローク振動台は、建築研究所でも開発されている⁵⁾。

今回、これらの技術を統合し、新たに開発した乗用2軸ロングストローク振動台を中心とした、地震応答が現実性を持って体感できる環境を構築した。今回はこれまでの報告^{6), 7)}に加えて、その後の開発と性能試験に関する詳細な検討について述べる。乗用2軸ロングストローク振動台は3m×1mのストロークを持ち、長周期大振幅の建物応答も再現可能で、人が乗ってその揺れを体験できる。振動台の入力波形としては、主要な被害地震等の観測記録の他に、地域

防災力向上シミュレータを用いて特定した地点の地盤・建物の揺れが準備される。振動台の背景に設置されたスクリーンには、振動台の揺れと同期して左右前後に動く地震時の室内や屋外の映像が投影される。さらに卓上小型2軸振動台により建物や室内模型（寝室、ダイニング等、縮尺：1/10, 1/20）の振動実験ができ、揺れを手軽に体感できると同時に、その応答・映像を観測・収録して、大型振動台の入力波や背景映像として利用することも可能である。このような振動実験・体感に関する統合システムにより、各自の自宅等の揺れを体感することで、減災行動につなげることを意図している。

2. 統合型地震応答体感環境の要素技術

(1) 乗用水平2軸ロングストローク振動台

大人1人が乗って地震動・地震応答を体験できる水平2軸振動台である。全景を写真1に、主要な機能・性能等を表1に示す。

写真1からわかるように、振動台は上軸（長軸）の加振機構全体を下軸（短軸）上に載せた形になっており、2軸を独立で加振できる。表1に示すように、上軸では最大変位・速度・加速度で1.5m・4m/s (400kine)・20m/s² (2000gal, 2G)を発揮し、下軸では最大変位・速度が約1/3となる。さらに人が乗る際には、安全を考慮して、速度・加速度は、両軸とも1m/s・10 m/s²に制限される。

以上の加振上限値から、地盤の観測記録の多くは2軸ともに100%振幅で再現可能であるが、建物上階の応答に関しては、下軸の変位あるいは両軸の速度・加速度が不足することがある。特に、長周期地震動による高層建物の応答では、最大変位2m以上（高さ300mで平均層間変形角1/150に相当）が必要となる場合もあり得る。先に

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授 博士（工学）
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 工学博士

*3 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授 工学博士

*1 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Assoc. Prof., Dr. Eng.

*2 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Professor, Dr. Eng.

*3 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Assoc. Prof., Dr. Eng.

開発した1軸ロングストローク振動台⁴⁾では±3mが可能であったが、一方で1軸から2軸加振に発展したことによる搭乗者・見学者の体感上の差はきわめて大きく、揺れの危険性を体感するためには2軸であることが重要である。上下動も体感上の影響が大きいことが想像されるが、これについては後述する。

加振上限値の制約を極力緩和するために、制御ソフトウェア上で両軸の変位・速度・加速度の最大値を表示してオーバー状況を明示し、振幅倍率を独立に変更できるようにしたほか、入力した水平2方向の波形の最大方向を求めて、入力を水平面内で任意に回転させる機能も備えている。また、地表面の地震動に対する任意の建物応答をその場で計算し、振動台で再現する機能も備えている。

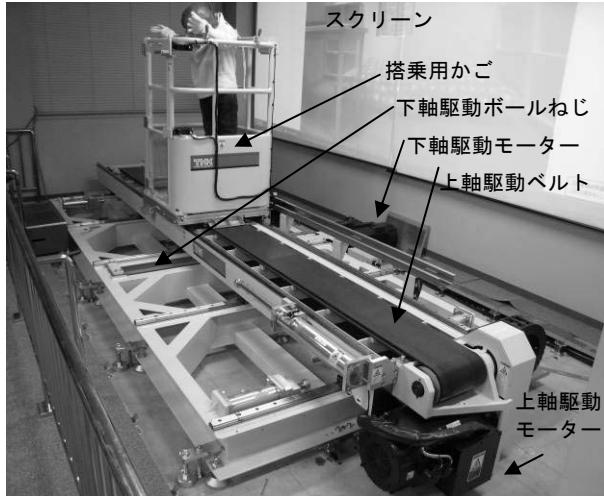


写真1 振動台と背景スクリーンの全景

表1 乗用水平2軸ロングストローク振動台の概要

ストroke	上軸±1.5m 下軸±0.5m,
可動部重量	上軸全体 1,050kg テーブル 70kg
積載重量	100kg
支持機構	直動転がり支承 (LMガイド)
モーター	AC サーボモーター, 200V
駆動方式	上軸駆動用 22kW 下軸駆動用 30kW
制御方式	上軸シンクロベルト 下軸ボールねじ
最大変位	モーションコントローラ (PCによる)
最大速度	上軸 4m/s 下軸 1.5m/s (搭乗時 1m/s)
最大加速度	2G (搭乗時 1G)
安全装置	搭乗カゴ・柵入口のロックセンサー ストローク限界超過時のストップバー 緊急停止ボタンなど

(2) 乗用水平2軸ロングストローク振動台の再現性

乗用水平2軸ロングストローク振動台の再現性を確認するために、写真2に示すように、地震計 (Kinematic 社製 ETNA) を設置し、振動数 f や振幅レベルを変えた複数の正弦波と観測地震波、模擬地震波を用いて加振試験を実施した。図1は、正弦波加振時の入力 (In) と応答 (Out) の変位波形の比較結果である。ここで、(c) $f=0.2\text{Hz}$ (周

期5秒)については、両軸の最大変位を変えた結果を示している。どの場合も、ほぼ忠実に入力波を再現していることが分かる。図2、3は、それぞれ、1995年兵庫県南部地震での葺合における観測記録、2008年岩手・宮城内陸地震におけるKik-net一関西(IWTH25)⁸⁾の地表の観測記録を用いた場合の比較で、波形とフーリエスペクトルについて示している。波形は、図2では速度 (振幅の大きい20秒間)、図3では加速度 (振幅の大きい10秒間)を示している。速度波形は、10Hzのハイカットフィルターを施して積分して算定した。まず、フーリエスペクトルを比較すると、おおよそ10Hzよりも低振動数側では、ほぼ忠実に入力が再現されていることが分かる。これよりも高振動数側では、入力波には含まれていないピークが認められ、搭乗かご周辺のがたや地震計の設置条件などの影響があると考えられる。

一方、波形を比較すると、両者はほとんど重なってしまっており、10Hz以下の振動数成分はほぼ忠実に再現されていることが分かる。



写真2 地震計を用いた計測の様子

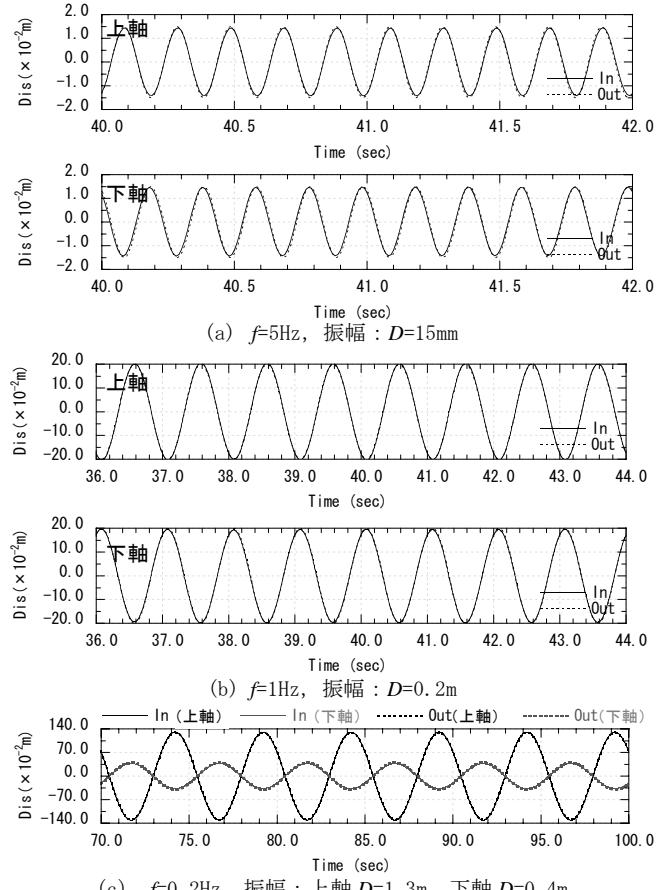
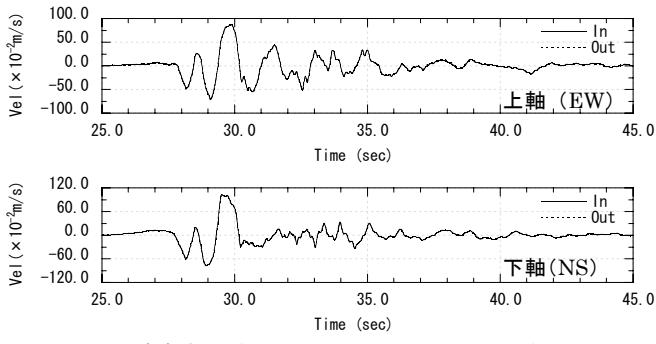
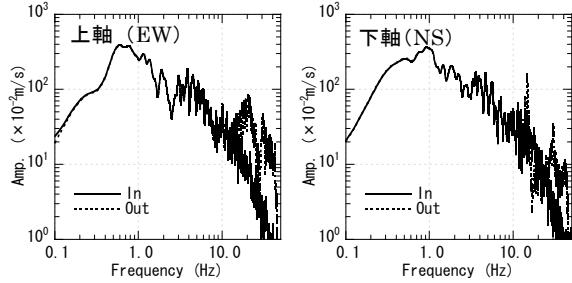


図1 正弦波加振時の入力波 (In) と応答波 (Out) の比較



(a) 速度波形 (10Hz のハイカットフィルター)

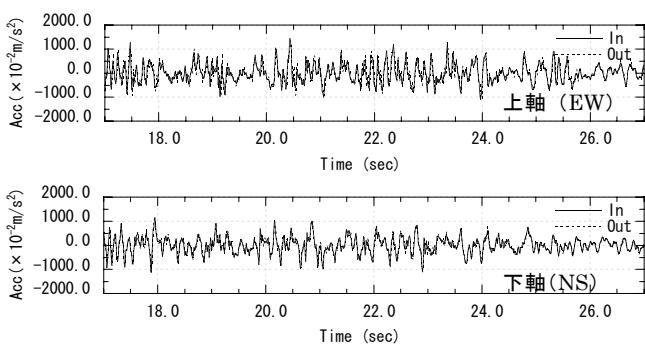


(i) 上軸

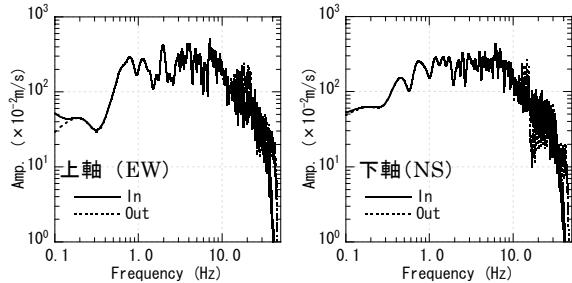
(ii) 下軸

(b) フーリエスペクトル

図2 観測地震波加振時の入力波(In)と応答波(Out)の比較(1995年兵庫県南部地震の叠加における地表の観測記録)



(a) 加速度波形 (10Hz のハイカットフィルター)

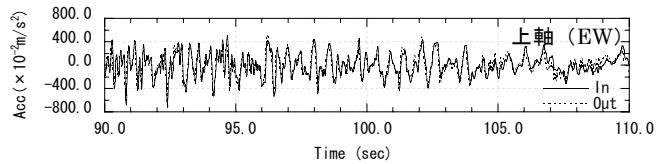


(i) 上軸

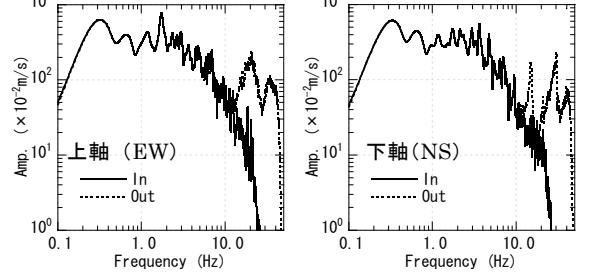
(ii) 下軸

(b) フーリエスペクトル

図3 観測地震波加振時の入力波(In)と応答波(Out)の比較(2008年岩手・宮城内陸地震のKik-net一関西(IWTH25)における地表の観測記録)⁸⁾



(a) 加速度波形 (10Hz のハイカットフィルター)



(i) 上軸

(ii) 下軸

(b) フーリエスペクトル

図4 模擬地震波加振時の入力波(In)と応答波(Out)の比較(想定東海・東南海地震における愛知県内のある地点での推定波)

表2 最大加速度の入力波(In)と応答波(Out)の比較
(10Hzのハイカットフィルター)

	最大加速度 (cm/s^2)	
	In	Out
模擬地震波 (想定東海・東南海地震)	下軸	681.6
	上軸	724.4
1995年兵庫県南部地震 (叠加波)	下軸	657.5
	上軸	571.7
2008年岩手・宮城内陸地震 (IWTH25波)	下軸	1065.1
	上軸	1325.2
		662.1
		640.3
		657.5
		624.9
		1105.8
		1222.5

図4に示した、経験的グリーン関数法によって推定した、想定東海・東南海地震の模擬地震波についても、これらと同様の結果が得られていることが分かる。

また、表2には、入力波と応答波の最大加速度をまとめて示している。上述の高振動数側の違いが影響し、1割程度値が異なるケースもあるが、おおよそ入力波を再現できている。

以上の結果から、振動実験を行う場合には、高振動数側での再現性が不十分であることに注意が必要であるが、本振動台の主たる目的である減災行動の誘導、防災啓発という観点からは十分な性能を有していると言えよう。

(3) 振動台背景スクリーンの映像の制御

写真1のように、振動台の背面（搭乗者からみて正面）には幅の大きいスクリーンを設置し、2台のプロジェクタにより左右に長い画面をPCから投影している。画面上の映像（動画ウィンドウ）は、振動台の動きに同期して左右前後に動く。これにより、たとえば高層階の床応答波形に対する相対応答による室内の揺れや家具転倒の映像をウィンドウに表示し、そのウィンドウと振動台の動きを同期

させれば、搭乗者にとってリアリティのある振動体験が可能になる。なお、ウィンドウ内の室内の揺れや家具転倒の映像は、CGなどによることも考えられるが¹⁾、次項で述べるように、小型振動台による縮小室内模型の実験映像を用いることが有効である。さらに、緊急地震速報や地鳴り、ガラスの破損や家具の転倒などの音声を動画に連動させる機能も備えている。

PCは横2画面連続のデスクトップを利用できる高性能のグラフィックスボードを備え、動画ウィンドウの制御にはMatrix Engineを使っている。プロジェクトは天井設置であり、振動台の搭乗かごの影がスクリーンに落ちないように設置位置に配慮が必要である。

(4) 頂上水平2軸振動台

乗用大型振動台に近い機構を持つもので、小型で容易に運搬でき、卓上で手軽に2次元模型振動実験を行うことができる。外観を写真3、主要な機能・性能等を表3に示す。写真の振動台本体の他に、制御用PCとソフトウェア、USB接続の制御ボックスからなる。



写真3 頂上水平2軸振動台の外観

表3 頂上水平2軸振動台の概要

ストローク	±5cm
寸法・重量	テーブルサイズ 25cm 角、総重量 5kg
積載重量	2kg
支持機構	直動転がり支承 (LMガイド)
モーター	ステッピングモーター (各軸)
電源部	AC100V
駆動方式	ボールねじ
最大変位	±5cm (長周期) ±0.5cm (短周期)
最大速度	3.0cm/s (長周期) 2.6cm/s (短周期)
最大加速度	0.1G (長周期) 0.7G (短周期)

制御ソフトウェアやデータフォーマットは大型振動台とほぼ共通であるが、追加機能として、マウスの動きによりリアルタイムで加振できること、後述のように縮小模型実験を考慮して入力波形の伸縮が可能などとの特徴がある。

テーブル上に建物や室内の縮小模型を設置し、同じくテーブル上に設置した小型カメラで動画を撮影すれば、相対系での実験映像が得られる。プロジェクトを用いて拡大投影し、また相似則に基づいて模型の縮尺比に応じた時間スケールの伸縮を行えば、リアルな実験映像を表示できる。さらにこの動画は、同時に得られた模型の応

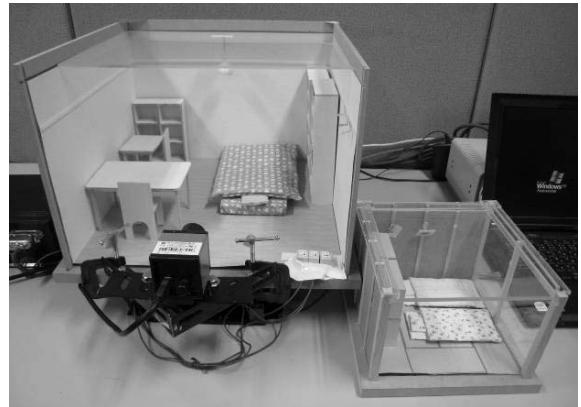


写真4 室内模型 (左: 1/10洋室, 右: 1/20和室)

答加速度観測記録(次項(5))とともに、(1)・(3)の大型振動台の背景映像に用いることができる。

写真4に示すように1/10と1/20の模型を試みており⁹⁾、映像のリアリティに関してはいずれも良好である。家具固定など細部では1/10模型が有利であるが、ストロークや模型重量などによる必要加振能力から、地震波により1/10では十分な加振ができない場合もある。

写真5は、卓上振動台用の建物模型の例である。各層のせん断変形を表現するため、柱の中にゴムを通してテンションをかけてあり、ある程度の水平力で柱頭と柱脚がヒンジになるようにしてある。特定の階、面に壁を入れることもでき、剛性率や偏心率の大小による応答の違いを実験でわかりやすく示すことができる。

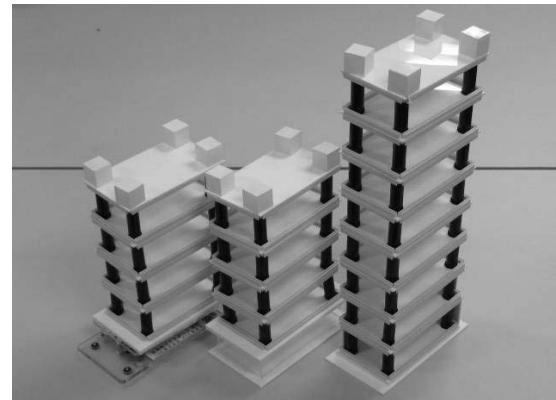


写真5 建物模型 (左: 免震, 中: 低層, 右: 中層)

(5) 振動観測・映像収録システム

主に(4)の卓上振動台の実験に関して、4台の2軸加速度センサーと2台の動画カメラの記録を、ノートPCの画面上でリアルタイムで確認しながら収録することができる。写真6に室内模型の実験の様子を、図5に映像と振動の同時収録中の表示画面例を示す。

用いた加速度センサーは、模型に取り付けられる小型軽量の半導体型であり、感度や周波数特性などは本システムに対して十分な性能である。カメラはIEEE1394接続で、一般的なビデオと同様の30fps(毎秒30コマ)の映像が記録される。コマ落ちを避けるために、収録するPCではRAMディスクに映像ファイルを書き込むなどの工夫を行っている。また模型の全体を写すには、広角系の追加レンズが必要であった。



写真 6 小型振動台による室内模型の加振と
映像・波形収録の状況



図 5 映像・振動の記録ソフトウェアの画面例

(6) 入力地震動・建物応答・家具転倒状況の評価

地域防災力向上シミュレータ¹⁾と連携して、(1)～(5)のシステムで用いる入力地震動や床応答を推定する機能を持つ。入力地震動については、ウェブ GIS により地図上で地点を指定して、地震動を推定する。具体的に名古屋市内については、多数のボーリングデータなどを元に任意の地点の表層地盤モデルを推定し、統計的グリーン関数法で予測した工学的基盤における東海・東南海地震の揺れを入力として、表層地盤の非線形応答解析を行っている(図 6 上)。

さらに、各々の住宅や室内家具に関するデータを入力することで、当該地点の地震動を用いて建物応答を評価し、任意階の床応答を求めて乗用 2 軸振動台を加振できる。これにより、自分の家が被害を受ける際の 2 階の揺れと家具転倒といったリアリティのある体験が可能になる(図 6 中・下)。また卓上 2 軸振動台で室内模型による家具転倒の撮影をしたり、あるいは建物応答解析と家具転倒解析の結果をアニメーション化して、振動台背景映像として用いることもできる。

以上のような地域防災力向上シミュレータと連携した揺れの他に、これまでの被害地震による主要な観測波、各種地震動予測結果、E ディフェンス実験の応答観測波など、様々な波形をデータベース化している。

3. 統合型地震応答体感環境の全体構成と利用例

前章で述べた要素技術を統合して利用する際の流れを図 7 に示す。たとえば、自宅 2 階の状況を体験する場合は、まず(6)で自宅の地点を指定して地震動を作成し、建物の概要を入力して 2 階の床応答を評価する。この結果を用いて家具転倒のシミュレーションを行ってアニメーションを作成するか、(4)卓上振動台に(5)室内模型を乗せて床応答で加振し、映像を撮影する。最後に、床応答と室内映像を用いて(1)乗用 2 軸振動台を駆動し、(3)背景映像も同期してスクリーンに投影する。なお、画像処理により背景映像に窓を開けて遠景の静止画を入れると、窓の外の様子が見えるようになる。

このような各自の家の状況把握の他に、異なる条件で揺れがどのように異なるかを比較することも効果的である。東海・東南海地震でも、愛知県内の場所により揺れの性質や大きさがかなり異なる。

あるいは最近の被害地震における揺れの性質の相違を明確に理解することができる。兵庫県南部地震のパルス波、岩手・宮城内陸地震の短周期が卓越した地震動などが、東海・東南海地震と比べて周期特性や継続時間がかなり異なることが一目瞭然である。さらに同一敷地で階数の異なる建物の応答の違い、同一建物の一階と上階の違いなども明確である。一般住民だけでなく、建築設計者にとって

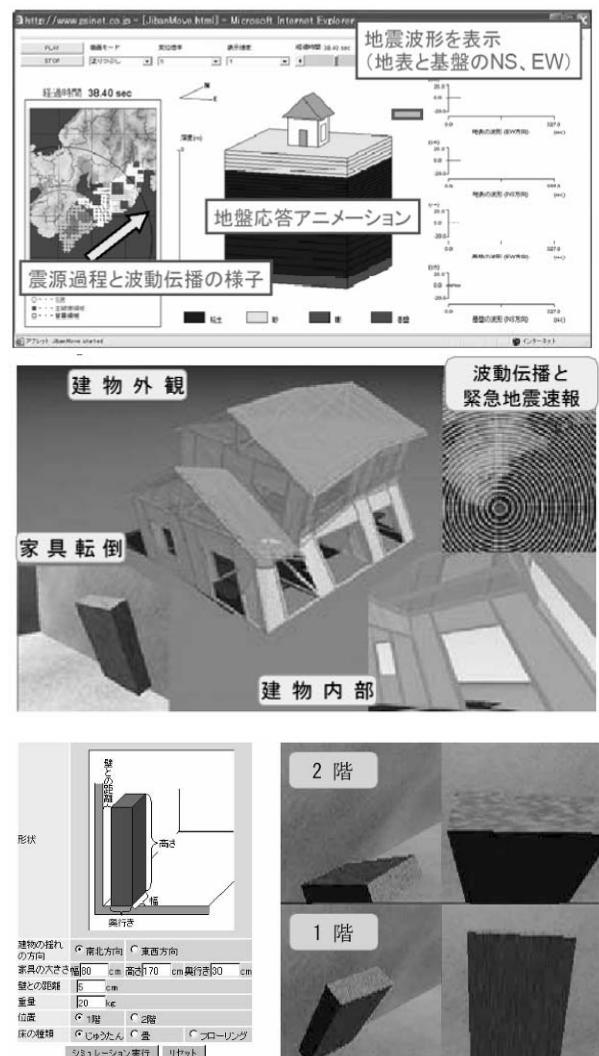


図 6 地震動・建物応答・家具転倒の評価

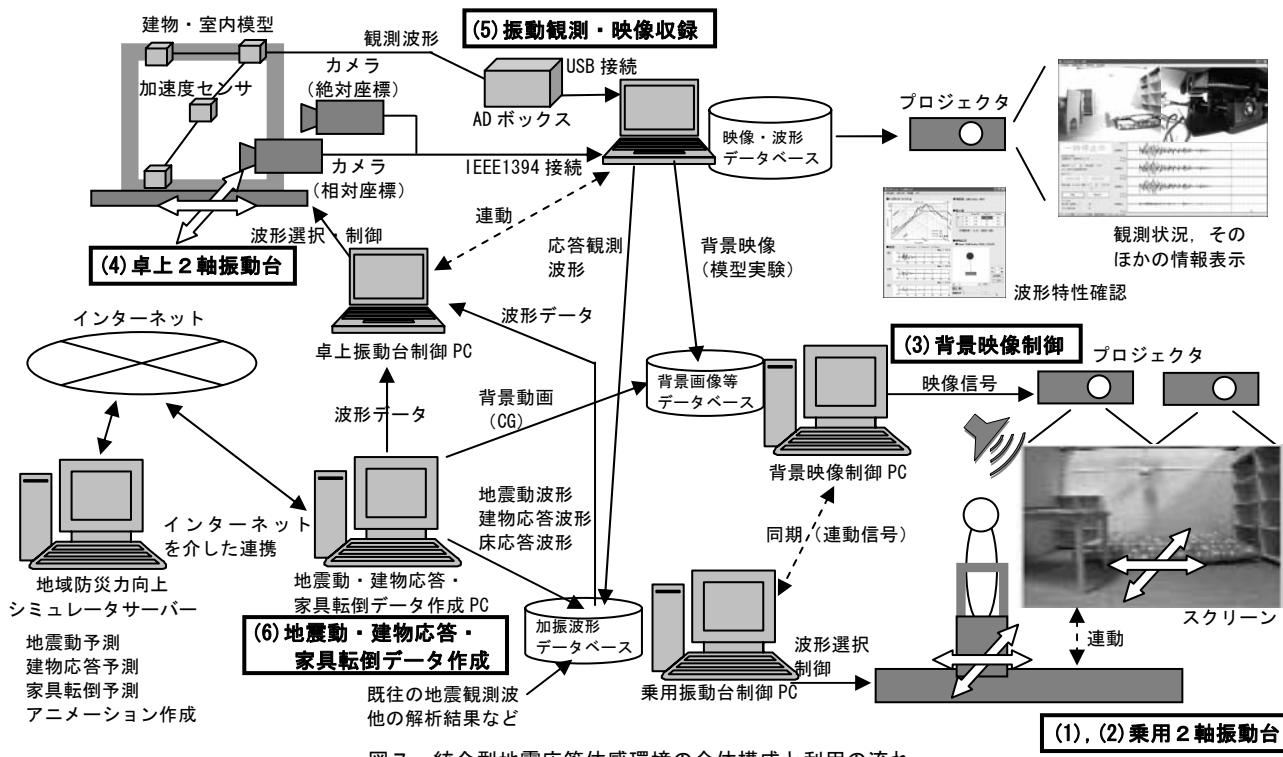


図7 統合型地震応答体感環境の全体構成と利用の流れ

今までに将来起きる地震の揺れを想像できていましたか？

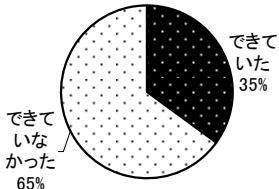
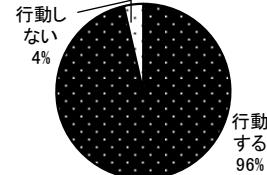


図8 体験者に対するアンケート調査結果

今回の体験を通じて今後何か防災行動をとりますか？



も、自らが設計している建物の応答について、構造だけでなく室内に及ぼす影響の大きさが直感的に理解できる意味は大きい。

ボランティア団体やライフライン系企業、ゼネコン等、延べ数百名の方々が、これまでにこのシステムを体験している。その中には、非常時対応が重要となるオペレータや、超高層建物の設計者も多く含まれる。また、先日実施した体験者に対するアンケート調査（調査数：約60名、年齢：10代～70代、性別：男性75%、女性25%）では、対象者の65%から「自分自身が遭遇するかもしれない揺れを想像できていなかった」、95%以上から「今回の体験を通じて今後何らか防災行動をとる」との回答が得られ、行動内容として、家具固定（25名）や耐震診断等（10名）等が挙げられた（図8参照）。また、在名ほぼ全ての放送局と新聞社により報道され、その後、全国各地のメディアから取材を受けている。以上のように、統合型地震応答体感環境の効果が着実に実証されつつある。

4. まとめと今後の展開

振動実験・計測、振動解析、映像・画像処理、ウェブGISやシミュレーションなどに関する基礎技術の開発と統合により、従来ないリアリティを持つ振動体験を行いうる一連の装置・システムを構

築できた。今後は、システム間の動作の同期やデータの共有化などをいっそう進めること、そして上下動の導入が課題である。上下動については、振動台テーブル（かご）の上に載せる形の簡易な装置で、実現可能性を検討中である。

謝辞

本報告で述べた一連のシステムの研究開発に当たって、THK（株）の村尾秀己氏ほか、（株）ファルコンの古瀬勇一氏ほか、えびす建築研究所の花井勉氏ほか、（株）日本システム設計の石井涉氏、応用地震計測（株）の原徹夫氏ほか、大東製機（株）、佐藤商事（株）ほかの皆様のご協力を得た。振動試験では独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網（KiK-net）や大阪ガスが設置・収録した大阪ガス葺合供給所の地震観測記録を使用させていただいた。また本研究の主要部は、科学研究費補助金（基盤（A）19206059、代表：福和伸夫）により行った。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福和伸夫他：耐震化を促進するための地域防災力向上シミュレータ、日本地震工学会論文集 第7卷、第4号、pp.5～22、2007.7
- 2) 福和伸夫、原徹夫、小出栄治、倉田和己、鶴田庸介：建物耐震化促進のための振動実験教材の開発、地域安全学会論文集 No.7、pp.23～34、2005.11
- 3) 小出栄治他：耐震教育・啓発用の小型二軸振動台の開発、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.631～632、2006.8
- 4) 福和伸夫他：長周期構造物の応答を再現するロングストローク簡易振動台の開発、日本建築学会技術報告集、第25号、pp.55～58、2007.6
- 5) 斎藤大樹他：長周期地震動に対する超高層建物の室内安全性、構造工学論文集 Vol.54B、pp.507～512、2008.3
- 6) 福和伸夫他：減災行動誘導のための統合型地震応答体感環境の構築、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.841～842、2008.9
- 7) 飛田潤、福和伸夫、護雅史：2軸ロングストローク振動台を中心とした統合型地震応答体感環境、2008年地域安全学会梗概集、2008.11
- 8) 独立行政法人防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET,KiK-net）
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>、2008.8
- 9) 花井勉、石井涉、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、日本建築学会技術報告集、第15卷、第29号、pp.57-60、2009.2