

### 3.2.4 地震時室内状況・床応答体感技術の開発

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

長周期地震動による高層建物の耐震性能評価と被害軽減を目指し、本課題では特に、修復性・室内安全性の観点から、実大実験等で明らかにされた大振幅の揺れの中での内装材・家具・什器等の転倒・飛散現象に対する転倒防止、飛散防止等への対策を提示するため、建物床応答や室内被害様相等を再現・体験できる地震時室内状況・床応答シミュレータの構築にむけた技術検討と基本設計を行う。

##### (b) 平成 23 年度業務目的

修復性、室内安全性の観点から、実規模実験等で明らかにされた大振幅の揺れの中での内装材・家具・什器等の転倒・飛散現象に対する転倒防止・飛散防止等への対策案を提示するために、建物床応答や室内被害様相等を表現・体験できる技術を開発する。また今年度を実施する E ディフェンス実規模実験から地震時室内の映像、音響、床応答などのデータを取得・分析し、技術の効果を取りまとめる。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名
名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻	教授	福和伸夫
名古屋大学 災害対策室	教授	飛田 潤
名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻	准教授	護 雅史

#### (2) 平成 23 年度の成果

##### (a) 業務の要約

「地震時室内状況・床応答シミュレータ」(以下本システム)について、昨年度までの検討結果を受けて、建物床応答や室内被害様相等を表現・体験できる技術の開発を行った。具体的には、主に以下の諸点について検討を行っている。

- 1) 床応答シミュレータ(搭乗型 2 軸振動台)の新たな方式の検討、建物内に設置した振動台による建物制御への活用の検討。
- 2) 3D カメラ、360 度カメラなど新たな映像機材の導入による振動体感映像撮影・活用技術の検討。
- 3) 室内状況シミュレーションとの連携による振動映像体感インターフェイスの高度化。

さらに本システムの開発テストの一環として、E ディフェンスにおける実大室内被災実験において床応答と映像・音響の同時計測を行い、その効果を検討するとともに、今後の運用に活用しうるリアルな室内被害映像と床応答データ、およびシステム動作状況に関する知見を得た。

以上により、本システムの主要な開発を終え、具体的な製作を行いうる目処が得られた。

## (b) 業務の成果

### 1) 新たな方式による搭乗型 2 軸振動台の検討

本業務で開発を行う「地震時室内状況・床応答シミュレータ」(以下本システム)は、長周期地震動に対する高層建物等の実規模実験で明らかにされた大振幅の揺れの中での内装材・家具・什器等の転倒・飛散現象に対して、転倒防止、飛散防止、機能回復等への具体的な対応策を提示するため、建物床応答や室内被害様相等を再現・体験することを目的とする装置である。

そのうち、体験者が搭乗して長周期大振幅の揺れを体験しうる 2 軸振動台については、昨年度までに目標仕様と実現方式を検討し、具体的な設計例と費用の算定なども行っている。今年度は新たな方式の検討を行った。

#### a) 全方向移動機構による大重量積載振動台

ロボット分野で開発された全方向移動機構を用いて、500kg の重量物を積載しながら被害地震で想定される加速度、速度領域で 2 次元震動を再現する振動台を検討した。自走式を採用すればストロークに制限がないため、長周期地震動による高層建物の応答を再現するのに有効である。全方向移動機構として VUTON クローラ<sup>1)</sup>の使用を想定する。この機構は複数のローラーで荷重を分散して支持することで大きな負荷荷重を生成でき、大加速度を必要とする振動台に適した駆動系である。

図 1(a)に示すように、振動台全体として 3m 四方(保護ロープの内側)の搭乗部分に 500kg の積載重量を想定している。駆動部分は図 1(b)に示す VUTON クローラである。モータ①によって 2 列のチェーン③⑤がプーリー②およびベルト④を介して連動して駆動される。2 列のチェーンの間にはゴム製ホイールを格納したフレーム⑥が多数連結され、チェーンの回転によって接地しているゴムホイールは各々地面をグリップしながら、チェーンの移動する方向に対して地面と機構の間に推進力を発生させる。一方チェーンの運動と垂直な方向に対しては個々のゴムホイールは自由に回転でき、上方向からの荷重のみを受ける。ここでは 15kW のブラシレスモータを用いたクローラを図 1(c)のように 4 台配置し、それぞれを制御する事で地震動に合わせた推進力を発生させるようにしている。

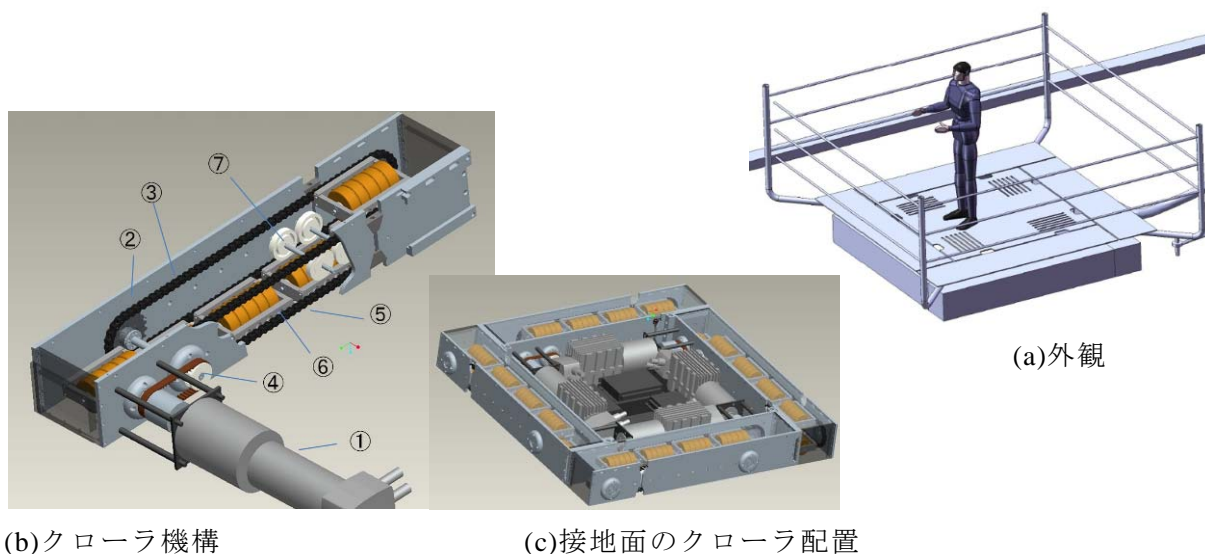


図 1 全方向移動機構による大重量積載振動台とクローラ機構

この場合の仕様・性能等を表 1 に、この場合の出力可能な加速度・速度・変位の範囲を図 2 に示す。減速比を変更することによりさらに大きな積載重量や大加速度に対応することも可能である。

表 1 振動台の諸元

最大加速度	400 cm/s <sup>2</sup>
最大速度	300 cm/s
想定走行範囲	3 (前後) × 2 (左右) m
許容積載重量	500 kg
積載部寸法	3×3m (外周保護ロープ)、2.5×2.5m (積載床面寸法)
本体重量	500 kg
本体駆動源	DC ブラシレスモータまたは AC モータ×4 基 (出力 15kW 以下を想定)
本体給電方法	外部制御盤からのケーブル給電
想定設置寸法	13.5 (前後) × 10 (左右) × 3.6 (高さ) m 以上

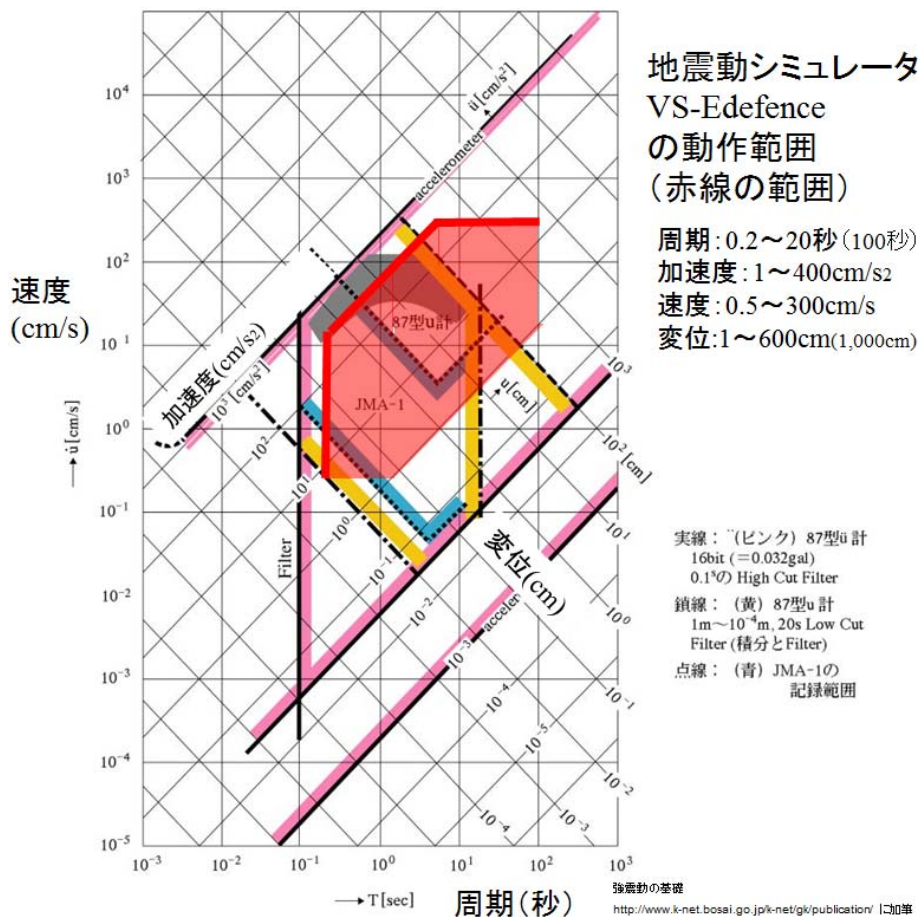


図 2 15kW 直流モータ 4 基による駆動性能 (計算値)。積載重量 500kg。

次に、小出力のモータ (400W) を 4 基用いて同様の機構により中型クローラを構成し、積載面の四隅に配置して協調動作制御することを検討する。要素となる中型クローラは実際に製作されており、体重 70kg の人を乗せて 1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の水平 2 方向成分を再現できることが確認されている<sup>2)</sup>。これを図 3 のように 4 台使用することにより、表 2 と図 4 に示す性能が期待できる。

表 2 振動台の諸元

最大加速度	1,000 $\text{cm/s}^2$
最大速度	120 $\text{cm/s}$
想定走行範囲	3 (前後) $\times$ 3 (左右) m
許容積載重量	280 kg (70kg $\times$ 4 台)
積載部寸法	3 $\times$ 3m (外周保護ロープ)、2.5 $\times$ 2.5m (積載床面寸法)
本体重量	350 kg
本体駆動源	DC ブラシレスモータ 400W $\times$ 4 基 $\times$ 4 組
本体給電方法	外部制御盤からのケーブル給電
想定設置寸法	13.5 (前後) $\times$ 10 (左右) $\times$ 3.6 (高さ) m 以上

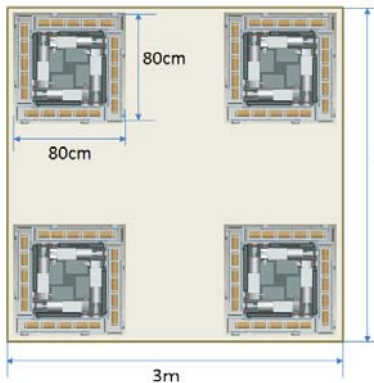


図 3 中型クローラ 4 台の配置

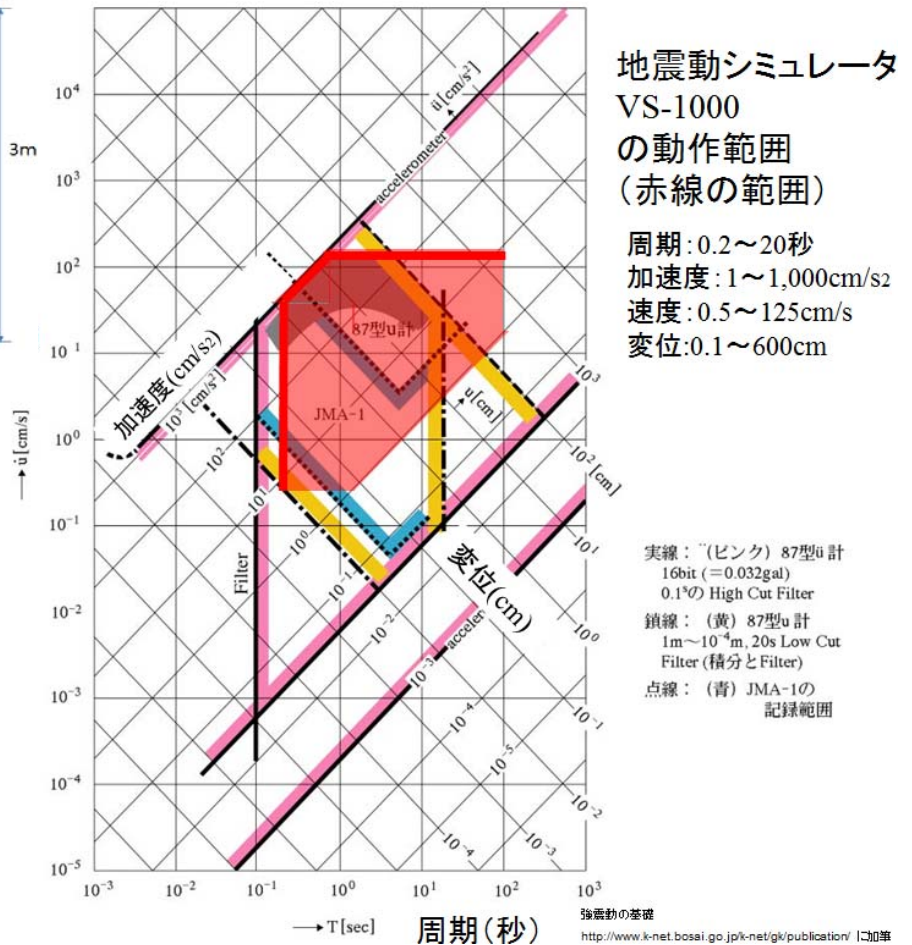


図 4 400W モータ 4 基 $\times$ 4 組による駆動性能の例。積載重量 280kg。

最大加速度・速度は減速比に依存するため、表 1 の性能を目標に加速度を抑えて最大速度を増し、同時に最大積載量も増加させる設計も可能である。このタイプのメリットは、多数のクローラで積載重量を受けることにより大重量に対して安定して動作すること、動作確認済みのユニットの使用により全体の開発コストを抑えられることなどがあげられる。

油圧シリンダ方式などの他の方式と比較して、以上検討したクローラ型振動台は、機構部分の総重量が大幅に小さく、使用電力も少ないため、設置場所の制約が少ない点ですぐれている。また機構部分の高さが低いため、積載物も含めた全体の重心位置を低く抑えることが可能になり、動作の安全性、安定性および性能の向上につながる。

## b) 建物内に設置した大型振動台の活用

検討してきた振動台は、大きな積載重量で大振幅・大加速度加振した場合には、建物床などに大きな振動が伝わるため、設置・運用に当たって建物等に障害とならないよう注意が必要である。一方で、この加振力を有効に活用する方法として、建物そのものに加振する目的を含めて、図5に示すシステムを新たに考案して検討した。

この方法では、免震建物の基礎と上部構造の間に大型振動台を設置し、大きなマスを振動台上に設置できるようにしてある。図中の  $K_t$  と  $K_s$  の大小 (ON/OFF) を変更することにより図6の3通りの動作が期待できる。(a)の一般の振動台として用いる場合には、振動台は基礎と連結し、振動台上のマスは設置しない。(b)では、マスを振動台上に設置し、大振幅で加振することにより、建物全体を振動させ、振動体験を行いうる。(c)で、さらに振動台を基礎から切り離して積層ゴムやダンパーを介することで、適切な制御により建物の振動を制御することが出来る。これらの動作について、図5のモデルにより検討を行った。

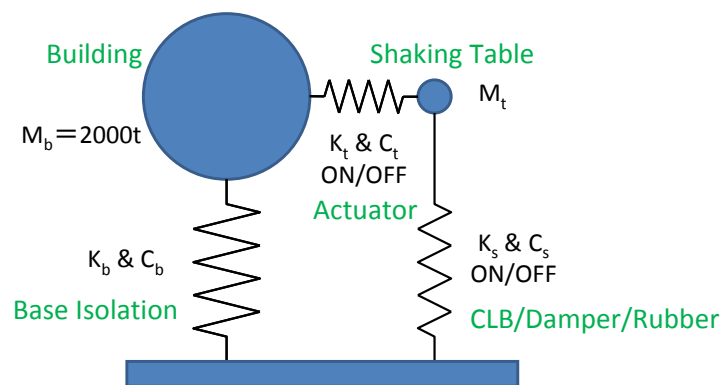


図5 大型振動台を活用した振動台、建物加振体験、絶対制御の振動モデル

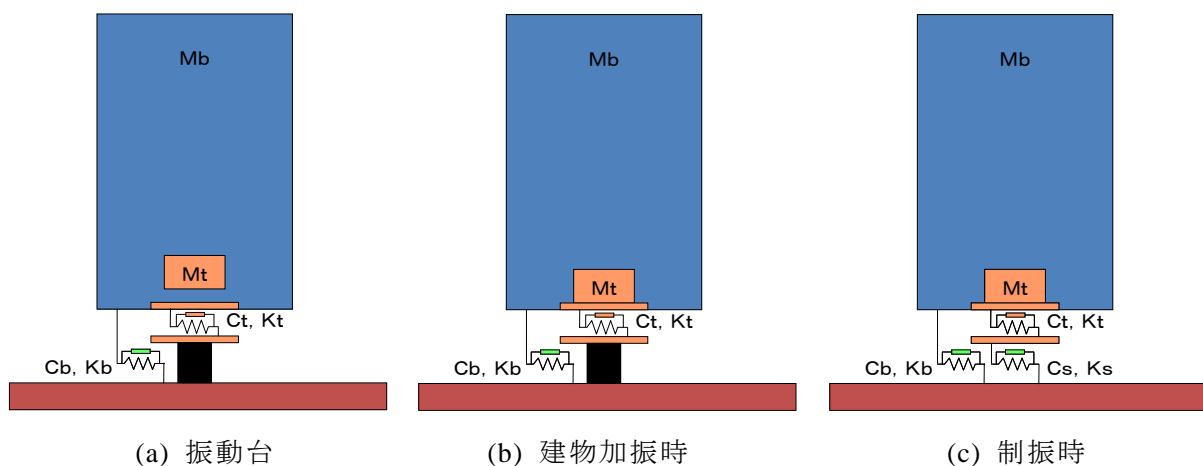


図6 免震建物内に設置した振動体感用大型振動台の活用

## 2) 新たな映像収録機器等の導入による振動体感映像活用の検討

前年度までの検討で振動記録と連動した映像収録のシステムを開発しており、機材は一般的なネットワークカメラを主に用いていた。一方で、ヘッドマウントディスプレイや複数のプロジェクタ・スクリーンにより、人間が周囲を見回しても映像が切れないような広角の映像表示の開発も進めつつある。この場合に、室内のように狭い場所の映像は視野が限定されることが問題となるため、Eディフェンス室内被災実験にむけて、360度全周をカバーするカメラなど新たな機材によるリアリティの高い振動映像の収録を検討した。

### a) 360度カメラによる室内映像の収録

図7に360度カメラとその設置状況例を示す。レンズは半球に近い形状で、上方に向けて設置される。カメラは一般のデジタル一眼レフを用いており、PCと接続してビデオ収録とネットワーク経由でのカメラコントロールを行っている。

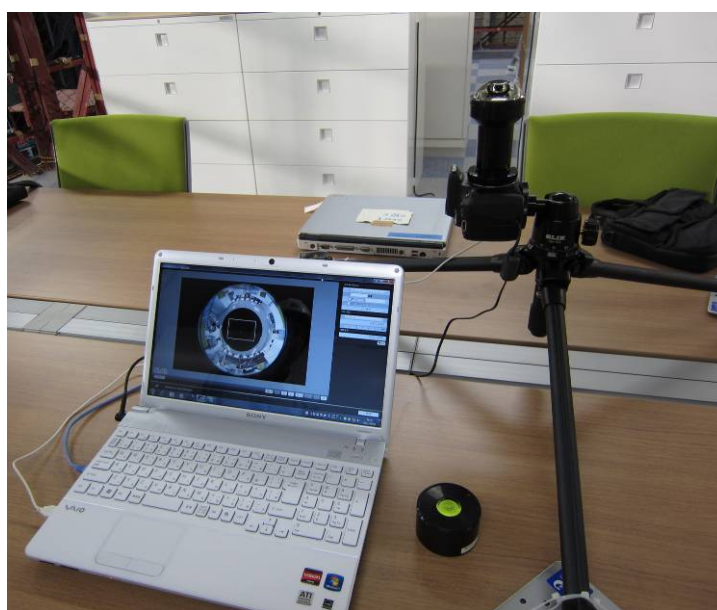
得られた生の映像と、全周に変換した映像のスナップショット例を図8に示す。記録された状態では(a)のように全周の映像がドーナツ状に表示されている。これを新たに開発したソフトウェアで変換することで、(b)のパノラマ写真のような全周映像に変換することができる。なお、ここで例とした映像は、後に述べるEディフェンス室内被災実験で得られたものであり、図8では家具転倒後の瞬間のスナップショットを示している。

この結果より、人間の視野を越える広角の映像から室内の状況が一目で分かることが確認された。さらにヘッドマウントディスプレイで表示する場合は、視線を動かすことにより自分の周囲を見回すことも可能になる。

このように、360度カメラはきわめて効果的な映像が得られることが確認できたが、そのためのレンズはかなり高価で、取り扱いも容易ではない。そこでなるべく容易に全周のビデオ撮影を行ううる機材として、図9のカメラもテストを行った。解像度は高くはないものの、有効な映像が得られることを確認した。

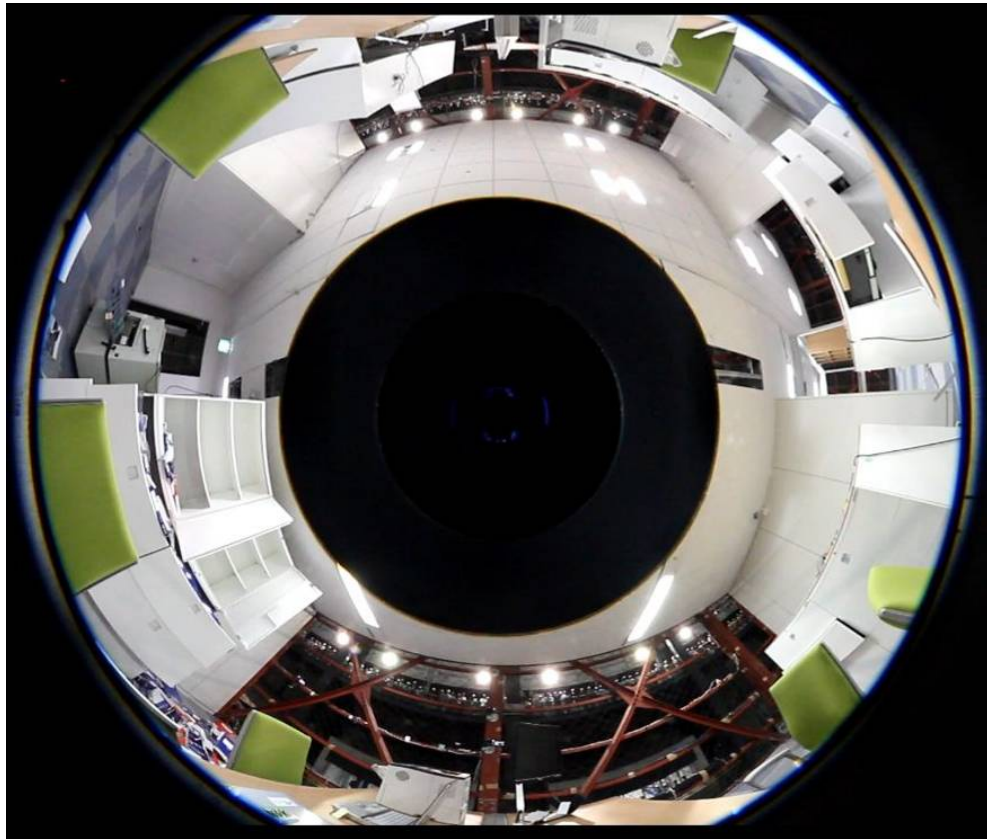


(a) カメラとレンズ

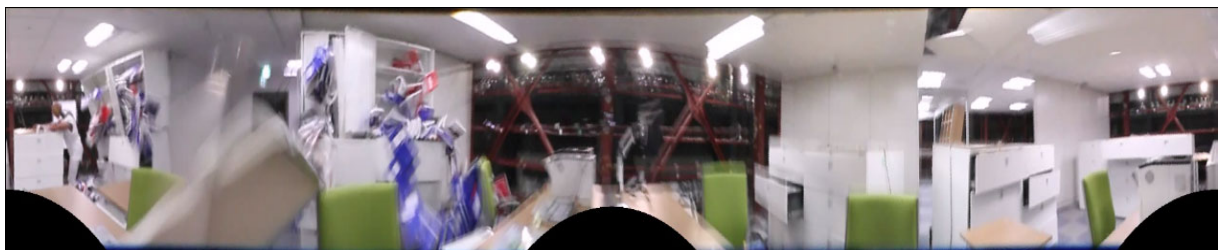


(b) 収録用PC、カメラ固定用三脚などの状況

図7 360度全周をカバーするレンズによる室内映像の収録状況



(a) 収録された 360 度レンズによる収録映像



(b) 上記映像を変換し、360 度全周のパノラマ映像とした例（加振中）

図 8 360 度レンズによる室内映像のスナップショット

図 9 安価な 360 度レンズつきデジタルカメラの例  
上部に突出した部分が 360 度レンズ。  
この写真のように縦に設置する。



## b) 3D ビデオカメラによる室内映像の収録

家庭用のビデオカメラであっても、3D の収録・再生が可能な機材が一般的となってきた。図 10 に機材の例と E ディフェンス試験体への設置状況、図 11 に加振により家具が転倒する瞬間のスナップショットを、ステレオ画像により示している。図 11 では手前のテレビ・テレビ台がキャストにより右へ動き、その奥の背の高い書棚が傾いて転倒しようとしているところである。このように、狭い室内で家具が大きく移動・転倒するような映像は、3D で効果的に表示されることが確認された。



図 10 3D 撮影に対応した家庭用ビデオカメラ (E ディフェンス試験体への設置状況)



図 11 室内の 3D 映像の例 (3D 変換前のステレオ映像。E ディフェンス実験で家具が転倒する瞬間のスナップショット)



### 3) シミュレーション技術との連携による映像・音声体感インターフェイスの高度化

#### a) 室内状況シミュレーションとの連携による振動映像体感技術

本システムにより E ディフェンス実験で床応答と室内映像が得られるため、家具転倒シミュレーションの開発、その結果を用いた体感映像の作成への発展を試みた。

床応答による室内家具の挙動のシミュレーションのために、一部の家具の形状、重量、摩擦係数などを大まかに測った。図 12 に摩擦力の計測に用いた機器と計測風景を示す。これらのデータを使用することを前提として、図 13 のように室内家具の挙動シミュレーションを実施している。

この結果と実際の映像との関係による転倒予測の検証、シミュレーション結果を用いたヘッドマウントディスプレイ表示などのインターフェイス高度化について検討している。図 14 にヘッドマウントディスプレイの使用状況を示す。シミュレーションの場合は体験者の全周に室内が広がっており、周囲を見回すことができる。また実験時の映像でも、前節で示した 360 度レンズによる映像であれば同様に表示できる。



図 12 室内家具の摩擦力測定



図 13 床応答入力による室内家具の挙動シミュレーション



図 14 ヘッドマウントディスプレイによる 360 度映像の体験

#### b) 地震の揺れから作成した音による振動音響体感技術

振動実験時の音声データは映像とともに収録され、実際の構造損傷や室内被災に伴う音が得られるため、振動体験のために貴重なデータとなる。一方で、シミュレーションにより振動時の音響を合成するには困難が多い。ここでは地震動、あるいは床応答の時刻暦波形から、地震動に対応する音を生成する手法を検討した。

作成される音声は、地震動・床応答の振動記録と同じ継続時間を持ち、振動数が高いときは高い音、振幅が大きいときは強い音となるものとする。振動記録は音としてはごく低振動数であるため、対称的フーリエ解析手法に基づいて、時間領域の母関数に何らかの操作を行って時刻暦波形に高振動数を付与する。同時に音の強さ、高さ、音色に影響する振幅、基本振動数、高調波成分についても検討している。

構造損傷や家具転倒、衝突などによる音は再現できないが、揺れの状況に対応してリアリティのある音声データが得られている。

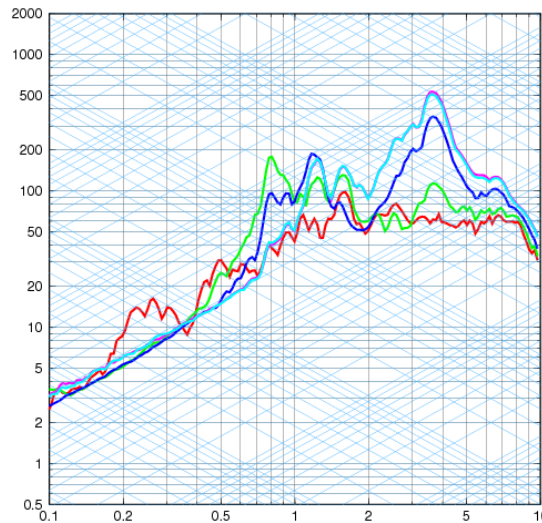
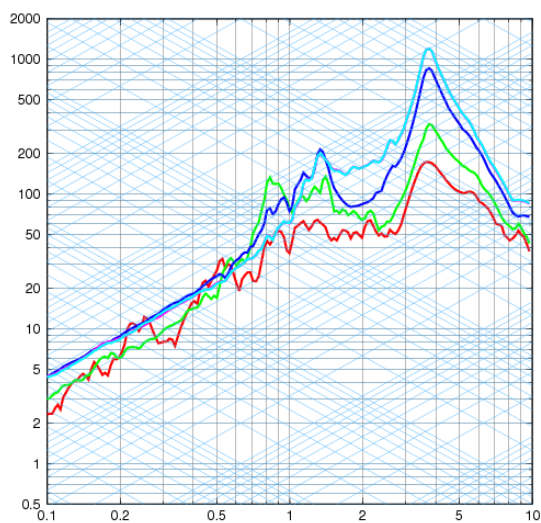
#### 4) E ディフェンスにおける室内被災実験における振動・映像計測

23年度に実施されたEディフェンス実験において、前項までに述べたカメラ等も含めて、振動・映像計測システムを用いて計測を行った。この際に計測された床応答記録と室内状況、ビデオカメラによる映像収録位置などを図 15・16 に示す。これらの計測結果は、本業務で構築した体感システムのコンテンツとなるとともに、前項で述べた家具転倒の検証、シミュレーションモデルの構築なども行うことの出来る基礎データとなる。

-地表面 -6F -17F -27F -28F

Acc(cm/s<sup>2</sup>)

Acc(cm/s<sup>2</sup>)



Period (s)

Period (s)

EW (長辺) 方向

NS (短辺) 方向

図 15(a) 床応答スペクトル (高層モデル、西新宿余震 330%入力)

28 階相当

- ・ 植木、パーティションなどは転倒
- ・ 机上未固定のパソコン等が転倒
- ・ キャスターの事務いすが大きく移動
- ・ 本の落下は見られず

5F

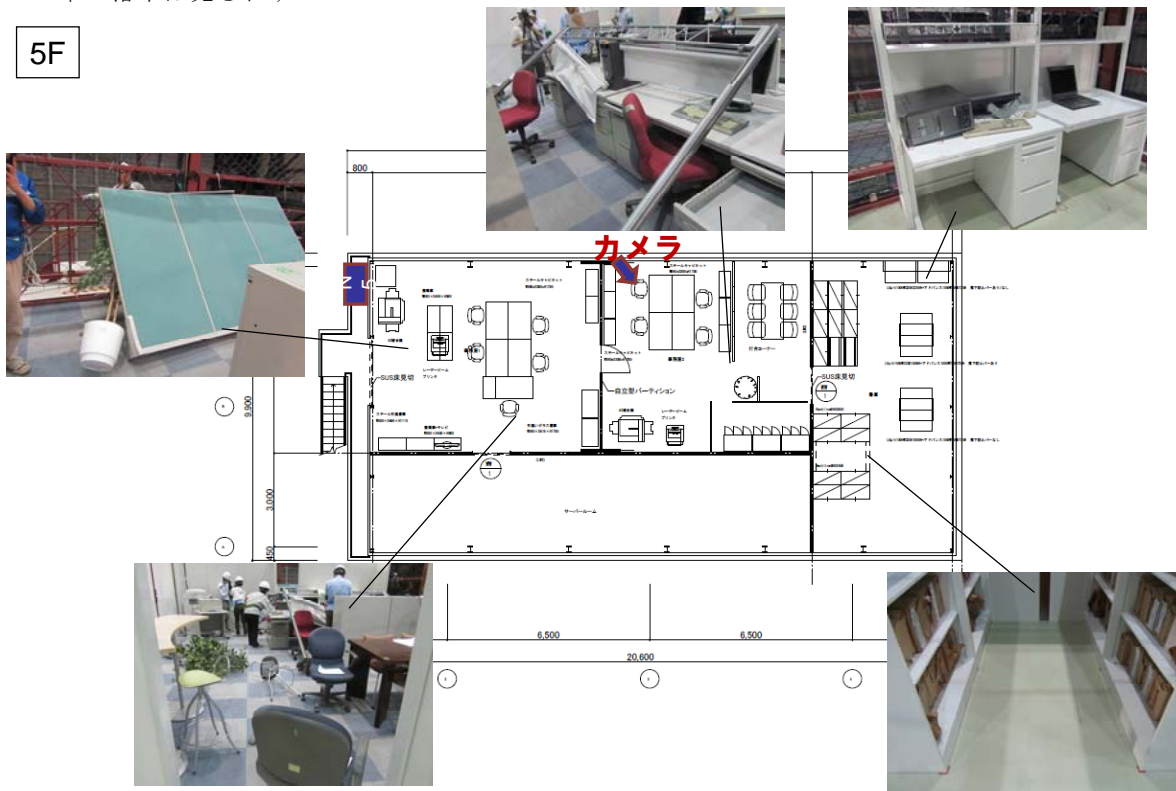


図 15(b) 加振後の室内状況とカメラ位置 (高層モデル 28 階相当、西新宿余震 330%入力)

## 27 階相当

- ・ 未固定の本棚が転倒
- ・ 背の低いキャビネットが移動
- ・ キャスターの机が大きく移動
- ・ ベルト固定のコピー機が大きく移

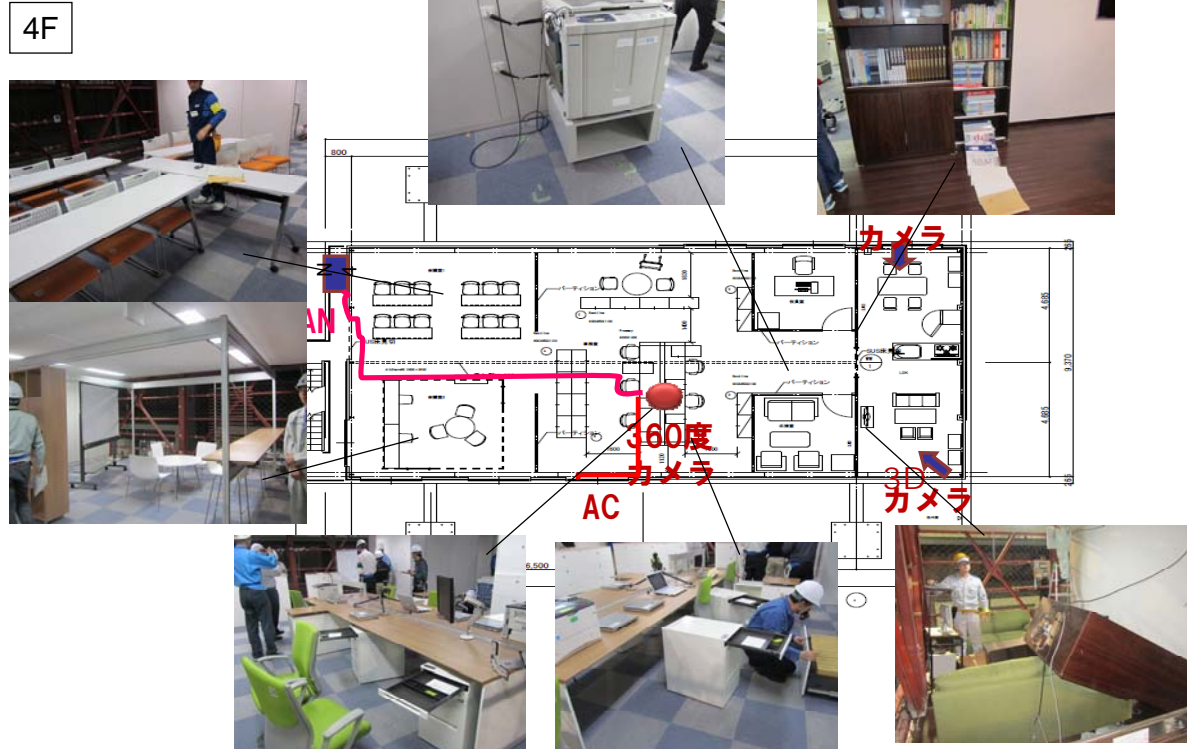


図 15(c) 加振後の室内状況とカメラ位置 (高層モデル 27 階相当、西新宿余震 330%入力)

## 6 階相当

- ・ 未固定の液晶テレビが転倒
- ・ キャスターの机が少し移動

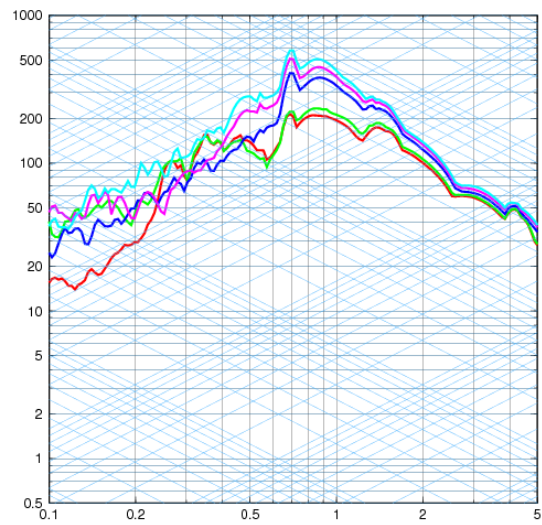
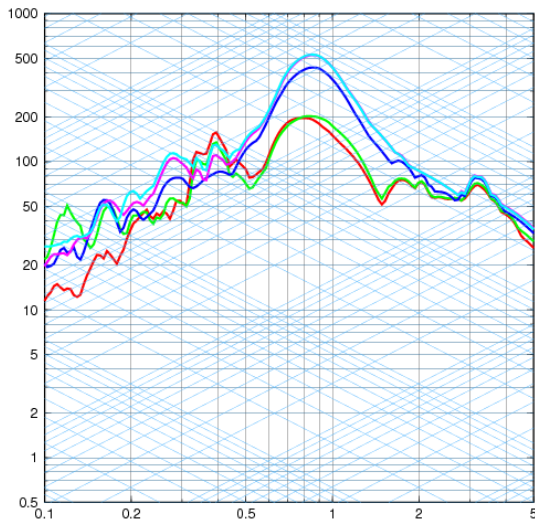


図 15(d) 加振後の室内状況とカメラ位置 (高層モデル 6 階相当、西新宿余震 330%入力)

-地表面 --1F --3F --4F --5F

Acc(cm/s<sup>2</sup>)

Acc(cm/s<sup>2</sup>)



Period (s)

Period (s)

EW (長辺) 方向

NS (短辺) 方向

図 16(a) 床応答スペクトル (低層モデル、JMA 神戸 75%入力)

### 5 階

- ・ 書棚の本がほとんど落下
- ・ スライド書棚が大きく変形
- ・ 床にネジ固定のコピー機は移動せず
- ・ ゲルマットで机に固定したプリンタは落下せず

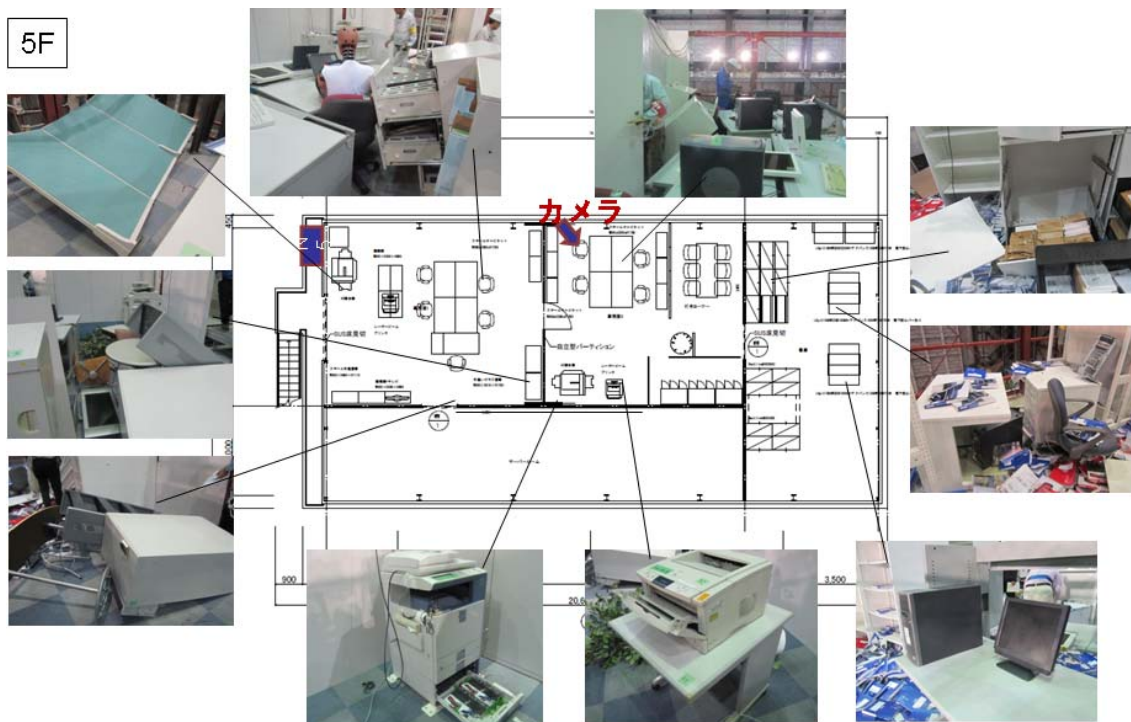


図 16(b) 加振後の室内状況 (低層モデル、5 階、JMA 神戸 75%入力)

## 4 階

- ・ 天井落下
- ・ OAフロアとキャビネットを固定していたネジが引き抜き
- ・ コピー機を固定していたベルト破断、PCラックのベルトは破断せず
- ・ 背の高いキャビネット等を固定した粘着テープの剥離

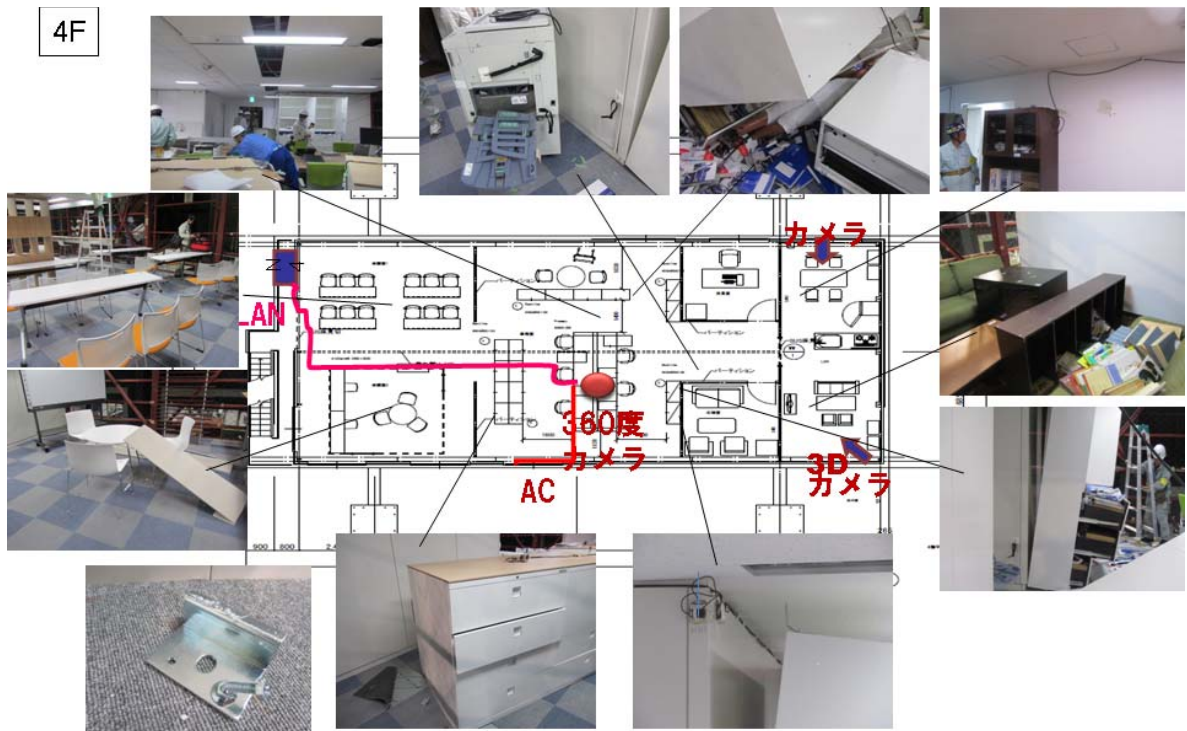


図 16(c) 加振後の室内状況（低層モデル、4階、JMA神戸75%入力）

## 1F

### 1階

- ・ キャスターロック固定、未固定のコピー機が移動
- ・ キャスターでない本棚が転倒

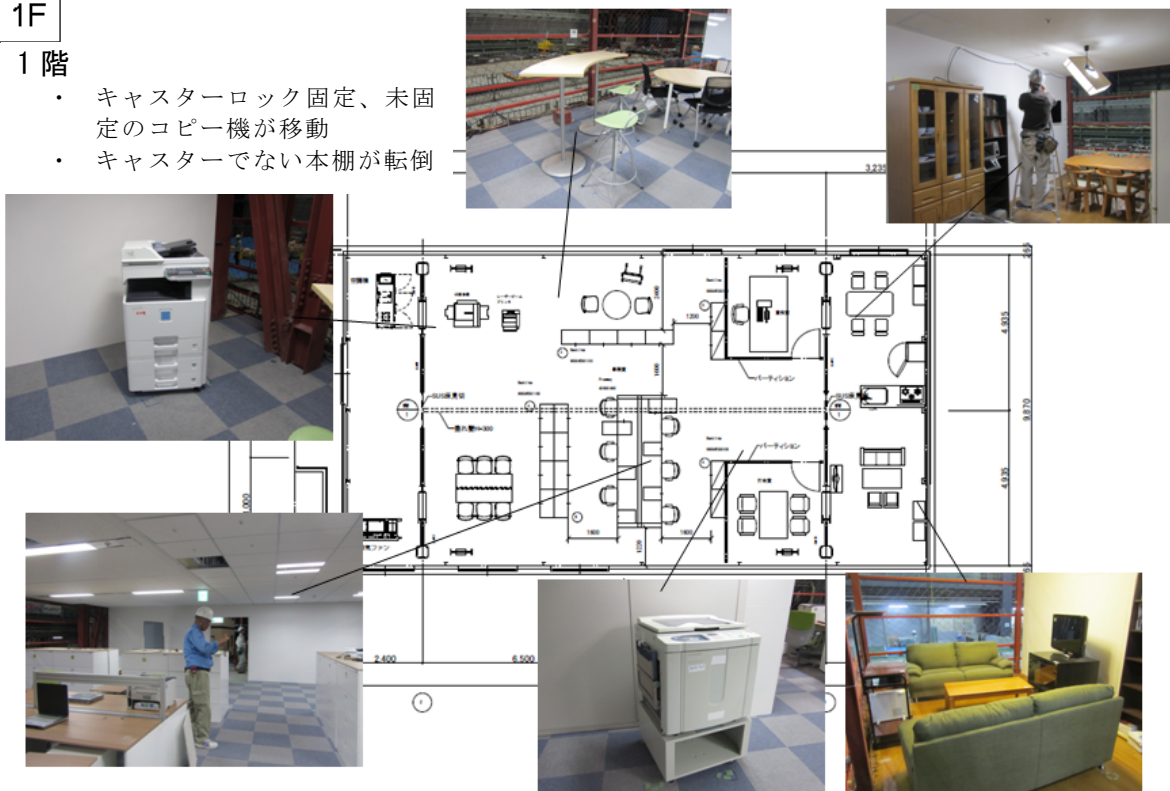


図 16(d) 加振後の室内状況（低層モデル、1階、JMA神戸75%入力）

### (c) 結論ならびに今後の課題

以上により、「地震時室内状況・床応答シミュレータ」を用いて建物床応答や室内被害の様相を体感できる技術の開発を行うとともに、主に E ディフェンスにおける室内被災実験においてデータ収集を行った。

床応答を再現する搭乗型 2 軸振動台に関しては、新たな駆動方式の検討を行い、実現性を検討した。また、建物内に大型振動台を設置する際に、建物レベルでの振動体感や、逆に建物振動制御にも活用しうる案を提示し、本システムの普及を図る際の可能性を検討した。

室内状況の映像を収集する方法に関して、人間の視野に近い広角の映像を収集する手法として、360 度レンズや 3D カメラを導入し、E ディフェンス実験において多数の室内被災映像を収録した。これに基づいて、ヘッドマウントディスプレイなどによる視野の広い映像体感装置の可能性を検討し、実用化の目処を得た。

さらに、家具の形状、重量および床との摩擦係数などを計測し、それを用いて室内状況シミュレーションを試みた。必ずしも十分に実現象を再現できてはいないが、このような資料を基にシミュレーション技術との連携による振動映像体感インターフェイスの高度化を図る可能性を検討することができた。

### (d) 引用文献

- 1) S.Hirose and S.Amano, The VUTON: High Payload High Efficiency Holonomic Omnidirectional Vehicle, Proc. ISRR, Hidden Valley, USA, pp.253-260, 1993.
- 2) 平山義治, 山口龍介, 松平昌之, 王猛, 吉田稔, 翠川三郎, 広瀬茂男:激震動および長周期地震動を再現する地震動シミュレータ”Jishin The VUTON”の開発, 2009 年日本地震工学会大会予稿集,2009,p.116

### (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	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
ヘッドマウントディスプレイを活用した地震の揺れ体験による減災行動の誘導、口頭発表	倉田和己 護 雅史 福和伸夫 飛田 潤	日本建築学会学術講演梗概集、pp.979-980	2011.8	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
地震記録と同じ継続時間を有する音の作成法	平井敬 福和伸夫	地震、第 2 輯、第 63 巻、pp.153-163	2011.2	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