

建物耐震化促進のための振動実験教材の開発

Development of Vibration Experiment Education Materials to Promote Seismic Retrofit

福和 伸夫¹, 原 徹夫², 小出 栄治², 倉田 和己¹, 鶴田 庸介¹

Nobuo FUKUWA¹, Tetsuo HARA², Eiji KOIDE²
Kazumi KURATA¹, and Yousuke TSURUTA¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

²応用地震計測株式会社

Oyo Seismic Instrumentation Corp.

The paper demonstrates a series of vibration experiment education materials called 'BURURU' which have been developed for the enlightenment of disaster prevention consciousness in the society and for the education of structural dynamics in University. These are composed of hand rotating type which is a handy shaking table box, the electric powered version electric powered type, the small shaker type used for the harmonic excitation on the model, the hand cart type which uses a hand cart as shaking table, the electric hand cart type controlled by arbitrary input waves, the wooden house collapse model showing the difference of collapse due to seismic retrofit, and the paper house model which is a paper craft.

Key Words : *education, enlightenment, seismic retrofit, structural dynamics, vibration experiment, shaking table, hand cart, paper-craft, collapse*

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、被害地震が相次ぐ中、東海・東南海・南海地震、宮城県沖地震、首都圏直下地震などの発生が懸念され、既存家屋の耐震化が喫緊の課題になっている。中央防災会議も、平成17年3月に、東海地震、東南海・南海地震での地震被害を半減しようとする「地震防災戦略」を発表し、家屋の耐震化を最優先課題として位置付けた。しかし、多くの自治体で耐震診断や耐震改修に補助制度を導入しているものの、その進捗状況は決して芳しい状況ではない。その理由の一つに、耐震化の必要性を伝える適切な啓発用教材の不足が考えられる。

一方、最近では、免震や制震など、建物の振動性状を能動的に制御する建築物が急増し、建築設計においても、建物の振動性状の理解が不可欠になってきており、建築教育用の振動実験教材のニーズが高まってきている。

筆者らは、地域での様々な防災活動^{1),2)}の中で、多くの人たちから、耐震化の啓発に使える道具作りへの寄与を期待された。そこで、活動の担い手の人たちのニーズを聞き取りながら、試行錯誤の上、教材作りに取り組んできた。啓発の場や目的に応じて、望まれる教材の姿も異なるため、大きさや作動原理が異なる様々な教材作りに取り組んできた。また、これらを利用したビデオ教材やeラーニング教材を作ってきた。

本論では、試作した実験教材の全体概要を示すとともに、個々の教材の具体的中身と活用方法を示すことにする。また、教材の活用状況やその効果についても、可能な範囲で分析を試みることにする。

2. 振動実験教材の全体構成と概要

ここで紹介する一連の振動実験教材は、総称して「ぶるる」と呼んでいる。開発のきっかけは、2000年に実施した手回し型の携帯型振動台の開発に遡る。これは、ジュラルミン製のアタッシュケースに、振動台と様々な実験教材を一体収納したものである。振動台には、ハンドルを手回しすることで台を並進運動させる原理を用いている。馴染みやすい名前が大事であると考え、揺れをイメージでき、「運ぶ、回る、揺れる」の語呂合わせから、「ぶるる」と名付けた³⁾。

従来、この種の教材が無かったこともあり、開発の反響は大きく、この教材を用いた啓発活動の依頼が多方面から寄せられた。特に、手回しで動くという素朴な作動原理が、初等教育の場で親しまれ、2002年に静岡県で行われた「親子防災スクール」⁴⁾や、2003年から2004年にかけて実施された愛知県の「親子参加型地震防災教育」⁵⁾では中心的役割を果たした。

その後、この教材は、多くの方々からの利用希望の要望を受けて、広く普及することを目的に市販され、現在では、図1に示すように、全国の大学、官公庁の防災・建築部局、博物館・科学館、防災ボランティア、建設会社・住宅メーカーなどで、百台程度が使われている。大学では耐震工学などでの講義の教材として、博物館や科学館では建物の揺れのデモンストレーション教材として、官公庁の防災・建築部局では耐震化の啓発教材として使われている。また、防災ボランティアは地域での防災意

各教材について、具体的に解説することにする。

(1) 各種模型を内在した手回し型携帯振動台³⁾

最初に開発した振動模型実験教材であり、ユニバーサルジョイントを用いて、回転運動を並進運動に変換する機構を利用している。手回しによって振動周期の体感ができるのが特徴である。倒立振り子と2階建てフレーム模型を用意しており、耐震に加え、免震、制震など、様々な実験が可能である。このため、大学の講義での振動教育から小学生の体感学習まで幅広く使うことができる。この実験装置向けには、液状化実験模型、成層地盤のせん断震動模型や、室内の家具の転倒実験模型も準備している。

(2) 電動型の携帯振動台

手回し型の携帯振動台の作動原理を利用し、駆動部を電動にしたものである。充電可能なバッテリーで駆動するので、どこでも利用できる。免震と耐震の違い、筋交いや壁のバランスによる揺れ方の違いを見せることが容易にできる。小型なので教室での利用や、ビデオを介してプロジェクターで投影して利用するのに向いている。

(3) 台車型の振動台

「親子参加型地震防災教育」での利用のために開発した大型の教材である。体育館で多人数を相手に実施する機会が多かったので、市販の台車を改造して手押し型振動台を作った。子供を載せて地震動を体感させたり、木造建物模型を載せて筋交いのバランスや屋根の重さの影響、家具の転倒などを実感させることができる。木造建物模型は、非倒壊型で、当初は1階建てのみであったが、現在は2階建ても用意している。大型なので、体育館や野外での防災訓練などでの利用に向いている。

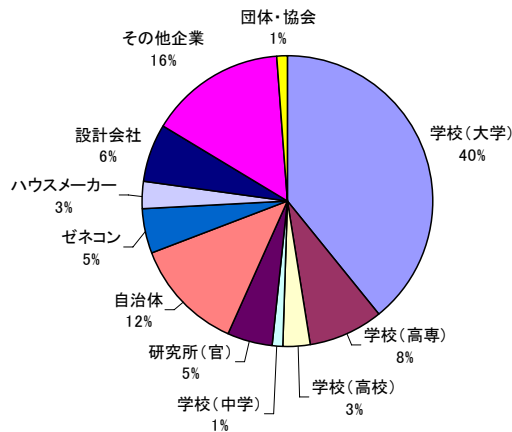


図1 手回し型の携帯振動台の利用状況(79機関)

識啓発用に、建設会社・住宅メーカーは免震技術や制震技術の説明用に利用しているようである。

これらの利用者からは、様々な要望が直接・間接的に寄せられている。要約すると、より携帯性の優れた軽量で小型のもの、安価なもの、電動のもの、体育館などで啓発できる大型のもの、建物模型上部に乗せて揺する起振機、家屋の倒壊まで分かるものなど、様々である。その後、利用実態を把握するためにアンケート調査を実施したところ、同様の意見が多数記入されていた。

そこで、手回しの携帯振動台の考え方を基本にして、様々な振動実験教材を開発することになった⁶⁾。現在までに、開発を行ってきた振動実験教材を表1に一覧する。以下では、各実験教材の概要を簡単に記し、次節以降に

表1 振動現象を体感させる一連の振動実験教材シリーズ

名称	写真	操作方法	特徴	用途
手回し型携帯振動台		手回しハンドル回転運動を並進運動に変換し台を振動させる	アタッシュケースに収まるので持ち運びに便利。実際に手でハンドルを回すことで、周期特性を実感しやすい。様々な模型がケースに内蔵されている。	講義、イベントなど広い用途に対応できる。振動現象を視覚的に説明することで、振動論の学習効果向上が期待できる。
電動型携帯振動台		内蔵バッテリーによるモーター駆動。ダイヤルにより振動数を変化させて台を振動させる。ACで駆動可(アダプタ付)	振動周期を機械制御できるため、一定かつ再現性のある揺れを起こすことができる。軽量なので、持ち運びが容易。	振動数の連続的な変化や、手回しでは再現しにくい短周期・長周期の揺れを簡単に再現できる。
台車型振動台		荷物運搬用台車に取り付けたハンドルを前後に動かすことにより、台車を揺する。	実際の木造建物に近いモデルで実験できるため、耐震補強の効果が実感しやすく、偏心によるねじれといった3次元的な動きも見ることができる。また、子供を乗せて揺れを実感させることもできる。	木造建物の耐震補強効果について、一般の方にも理解しやすい説明ができる。
木造倒壊実験模型		台車型振動台と同様の台車の上に2つの建物を載せて倒壊性状の違いを見る。	筋交いや構造用合板の有無、壁配置のバランス、接合金物の有無、屋根重量、地盤の硬軟、家具転倒防止、ブロック塀などを実演できる。	在来軸組み構造の1/10縮小模型で、構造の違いによる倒壊の仕方の違いを見ることが出来、耐震化の啓発に最適
自走式台車振動台		内蔵バッテリーによりサーボモータを駆動し、入力した地震動波形を再現する。ACで駆動可(チャージャ付)	従来の振動台では再現できなかった長周期でロングストロークの地震動を再現する。台に乗って揺れを体感することができる。	高層建物の居住者や関係者に揺れを体感してもらうことで、意識の向上を図ることができる。
紙製建物模型		紙で組み立てた家模型を手で左右に揺する	自分で作り、自分の手で揺ることによって固有周期の違い、すじかきの効果などを実感することができる。	参加型のワークショップでの利用、耐震化の講演のお土産に有用。子供たちに建物の揺れ方について興味を持たせる時にも活用できる。
小型起振機		内蔵電池によって2個の偏心荷重を有する回転体を駆動し水平方向の起振を行う。ダイヤルにより振動数を変化させることが可能。	小型の模型に乗せて建物を揺ることができる。共振曲線を理解するのに有効。	建築物の振動実験で良く用いられる起振実験の原理を説明するのに利用できる。

(4) 木造倒壊実験模型⁷⁾

倒壊実験により木造建物の耐震化のポイントを解説するために開発した教材である。台車型の振動台を改良し、精巧な1/10縮尺の2階建て木造模型を同時に2棟加振することで、筋交いのバランス、屋根の重さ、接合金物の有無、地盤の良否、土台の基礎へのアンカーの有無などによる建物の倒壊性状の違いを見せることができる。倒壊させた模型は再組み立てが可能だが、組み立てに手間がかかることから、倒壊状況を録画したビデオを併用することを想定している。行政が開催する住宅フェアでの耐震化の啓発や、住宅耐震化の啓発用テレビ番組などで多

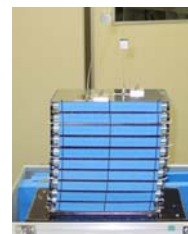
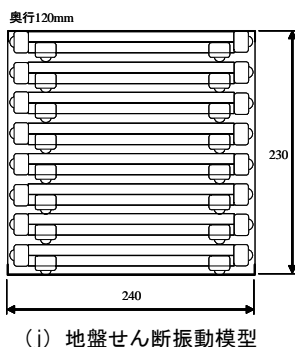
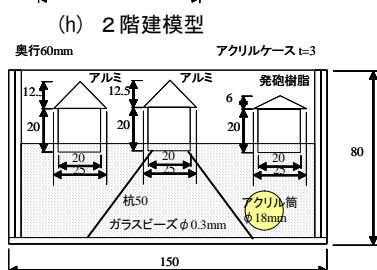
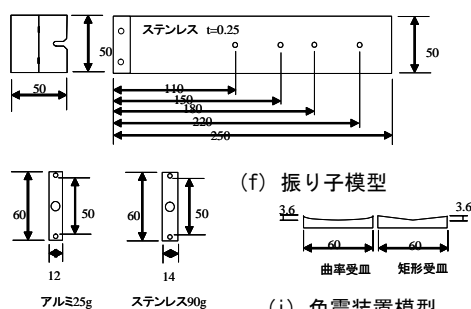
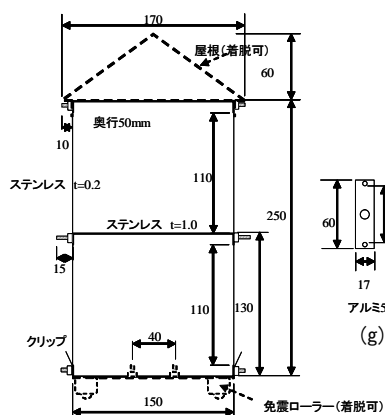
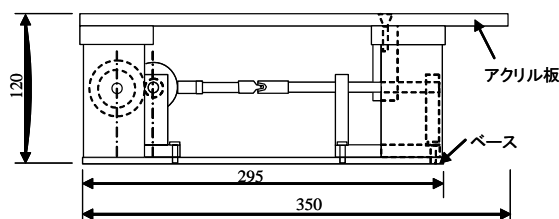
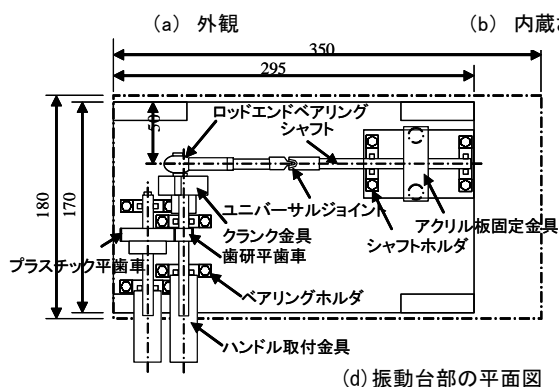
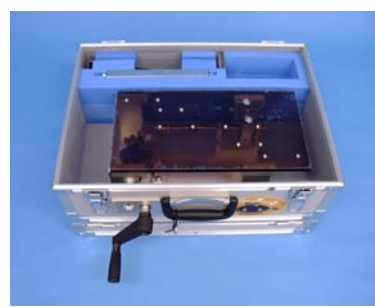
用されている。

(5) 自走式台車振動台⁸⁾

電動台車を改造した制御可能な自走式の振動台である。長周期建築物の室内の揺れを再現することを意図して開発した。一般の振動台では再現不可能な長周期ロングストロークの揺れを再現できる。電動台車の架台を利用し、ファンクションジェネレータとサーボモータを設置して、任意の波形を再現する。

(6) 紙製建物模型キット⁸⁾

住宅の耐震化のキーポイントを簡単に実感できるよう



(l) 地盤模型



(m) 液状化模型



(n) 家具転倒模型

図2 「手回し型携帯振動台」の振動台と模型の概要

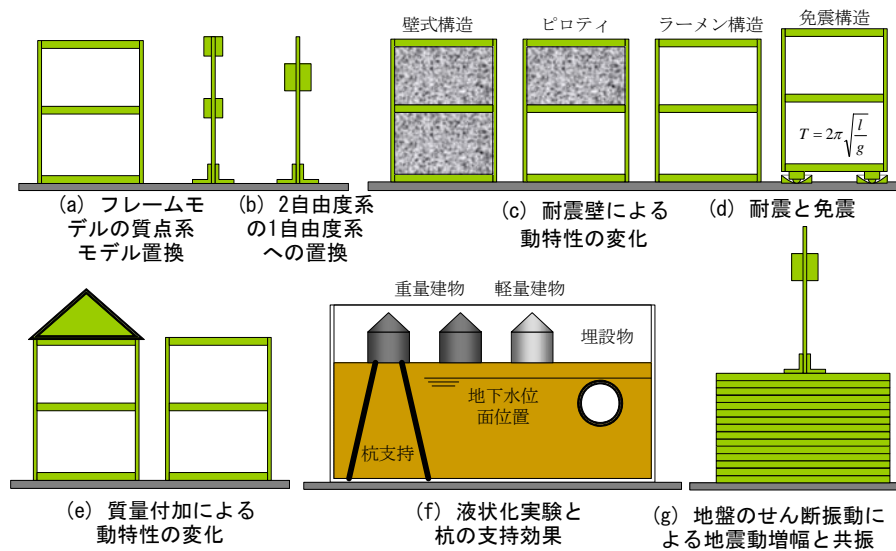


図3 手回し型携帯振動台による振動実験例

にした紙製の住宅模型キットであり、子供たちが自分で住宅模型を作って耐震化の必要性を理解できる。ミシン目入りの厚紙で用意しており、両面テープがあれば、子供でも10分程度で組み立て可能である。屋根の重さや筋交いのバランスの大事さを実感でき、自分で作りながら、住宅の揺れを体感できるため、耐震化のイベントや小中学校の授業で特に効果が大きい。既に5万枚以上が利用されている。

(7) 小型起振機

超小型の偏心マスによる起振機である。手回し型携帯振動台の模型上に設置して起振機実験を行い、共振曲線を実感させることができる。開発の発端は、原子力発電施設での起振機実験の理屈を一般住民に解説するためであり、手回し型振動台と組み合わせて、地動による共振と、起振機による共振の共通点を示すことを目的とした。振動数が可変であり、振動論の講義での共振曲線や振動モード形の説明に適している。

携帯型の振動台である。ジュラルミンケースの中には、(b)に示すように数多くの実験用模型と、(c)に示す手動の振動台が内蔵されており、大きさは約470×320×200 mm、重量は約10kgである。

振動台部の構造は、(d)～(e)に示すとおりであり、ユニバーサルジョイントを介して、回転運動を並進運動に変換する原理を用いている。ケース前面に取り付けたハンドルを回転させることにより振動台を水平1方向に正弦加振する。回転数は、ギアを介することにより、1倍速と3倍速に変えることができる。振動台寸法は、約360×190mmであり、振動振幅は約±0.5cmもしくは±1.5cmである。1倍速で利用した場合には、ハンドルの回転数が地動の振動数に相当するため、振動数を実感することができる。

内蔵されている模型の多くはステンレス製であり、(f)質点位置が可変の倒立振り子3個、(g)3種類の重さの振り用の錘6個、(h)2階建て建物模型のフレームと脱着可能な屋根・耐震壁各2個、(i)2種類の免震装置と建物基礎に設置するローラー各2個である。

以上の建物模型に加え、地盤や室内の模型も準備している。(j)(l)地盤のせん断振動を再現する地盤模型、(k)(m)ガラスビーズを利用した液状化実験模型、(n)室内の家具転倒実験模型などである。なお、家具転倒実験模型は、

3. 手回し型携帯振動台

手回し型携帯振動台は、図2(a)のような外観を有する

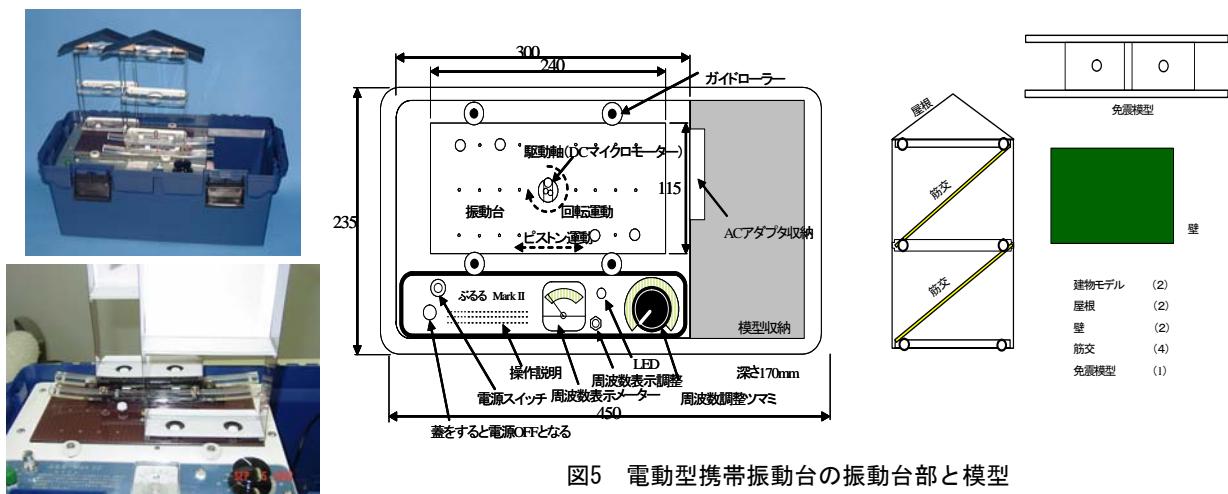


図5 電動型携帯振動台の振動台部と模型

図4 電動型携帯振動台の外観と免震部拡大

1/10室内再現モデルであり、名古屋市消防学校で開発された「グラグラ君」を参考にした⁹⁾。

(a)のように、複数の模型を振動台上に設置して揺ることにより、揺れの違いを比較実験することができる。これらの模型を用いた実験例を図3に示す。建物の固有振動数・固有モード・共振の理解、フレームモデルから質点系モデルへの置換、耐震壁の設置の仕方や屋根重量による振動性状の変化、様々な免震・制震の原理、液状化の原理と杭基礎の役割、地盤のせん断振動・地盤増幅と地盤・建物の共振、などの各種実験が可能である。

大学における建築・土木での振動工学・耐震工学などの講義、建設会社・住宅メーカーでの免震・制震・液状化の解説、自治体での耐震診断・改修の啓発と改修ポイントの解説、小中学校での防災の授業など、様々な用途が考えられる。

自らの操作で振動現象を体験でき、手に触れられることで振動現象に興味を持つことができることに特徴があり、図1に示したように多方面で活用されている。特に、学校現場や博物館・科学館での利用が多い。利用アンケートによれば、重い、価格が高い、設置が面倒、液状化実験の片づけが面倒、などの意見が寄せられており、今後、改良を行っていく予定である。

4. 電動型携帯振動台

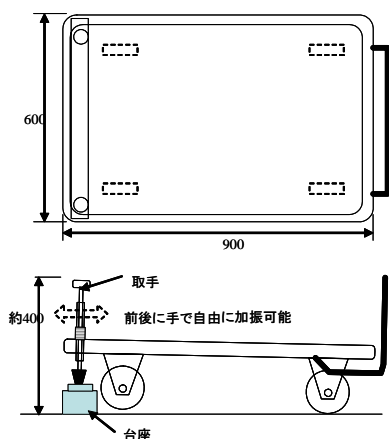
電動型携帯振動台は、手回し型携帯振動台を電動式に

したものである。より軽量化し、簡単に利用できるようにすることで、各地で行われる啓発活動に持ち運ぶことを容易にしたものである。外観は図4に示す通りであり、ケースや模型はプラスチック製にしたため、重量は約3.5kgと軽量である。寸法は、約485×250×230mmであり、肩にかけて楽に持ち運ぶことができる。

振動台の作動原理は手回し型携帯振動台と同様に、回転運動を水平運動に変換する方式を採用している。AC電源が無くても、内蔵バッテリーで長時間駆動可能であり、フィールドでの利用にも向いている。振動台の寸法は、約295×170mm、変位ストロークは±5mm以下であり、振動数は1～8Hzで可変である。振動台部は、図5のようになっており、右下のダイヤルにより振動数を任意に変化させることができる。

機構部は、DCマイクロモータの回転軸に固定された円盤に、中心から r 離れた位置にピンを立て、ピンには微小なボールベアリングを取り付けている。一方、振動台の中心に、ベアリングの外周寸法にあうようにスリットを切り、すべり摩擦による抵抗を生じないように回転を横方向の並進運動に変えている。これにより、変位± r の正弦波振動が実現している。DCマイクロモーターには、出力12W、定格電圧6V、最大回転数7000rpm、最大トルク16mN・mのものを選定した。小型・低消費電力ながら、トルクの大きいのが特徴である。

模型には、プラスチック製の振子と2階建て建物模型、ブレース・耐震壁、免震装置を用意している。これにより、共振、屋根の重さ、上下階の壁のバランス、免震の



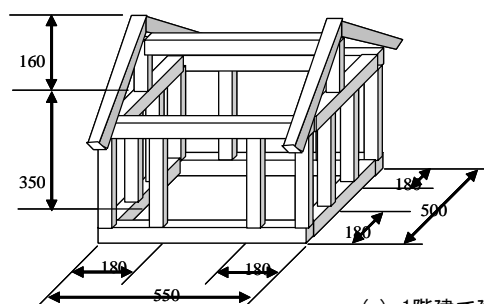
(a) 台車部 模式図



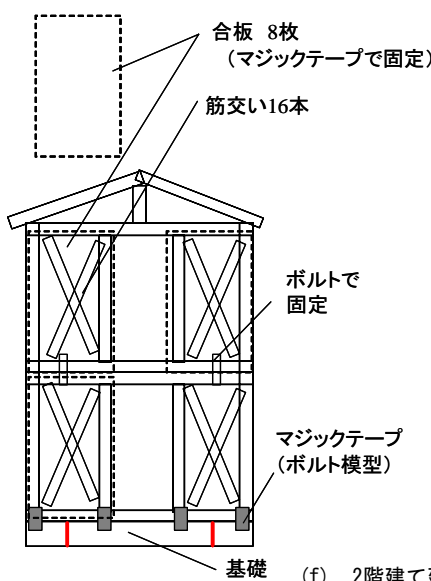
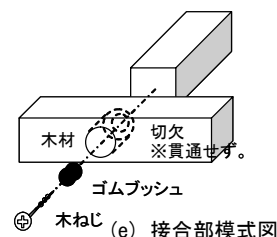
(b) 振動の体感実験



(d) 模型の収納状況



(c) 1階建て建物模型



(f) 2階建て建物模型



図6 台車型振動台の振動台部と模型

原理などを容易に理解できるようにしている。

なお、電動型携帯振動台は、愛知県で地域防災活動を実践している「あいち防災リーダー」の啓発活動を支える道具作りとして開発したものである。愛知県では、2002年から「あいち防災カレッジ」を開講し、毎年250名の防災リーダーを養成している。カレッジの卒業生は、あいち防災リーダーの称号を授与され、「あいち防災リーダーの会」の一員として、各地域の自主防災組織などと協力して、地域での防災活動を主導している。筆者らは、愛知県防災局啓発育成グループやあいち防災リーダーの会と協力して、電動型携帯振動台を利用した耐震化啓発用の紙芝居・マニュアルを作成したり、防災リーダーの方々へ電動型携帯振動台の利用講習会を実施することにより、防災リーダーの方々が地域での啓発を行う際の手伝いをしている。

5. 台車型振動台

台車型振動台は、小学校の体育館での講演のように、大人数を対象にして、振動実験を行うために開発した教材である。第1著者は手回し型携帯振動台の開発が契機となって、静岡県での「親子防災スクール」(2002年)⁴⁾や、愛知県での「親子参加型地震防災教育」(2003年～2004年)⁵⁾に主体的に関わるようになり、小学生向けの大型の体感教材の必要性を感じ、この教材の作成に至った。

振動台は、図6(a)に示すように、市販の台車を改造したものであり、台車の端部に遊びのある駆動軸を設置し、それを台座の上に載せ、取手を前後に移動させることにより、台車を水平に往復運動させるようにしている。

台車振動台には、大型の木造建物模型を載せるだけでなく、(b)のように子供を載せて揺れを体感させることもできる。人間の手で揺ることができるため、起震車よりも、実際に近い揺れを再現でき、子供の体の固有周期に合わせて揺すって、共振の怖さを教えるなど、臨機応変な利用ができる。

当初は、模型は1階建ての木製模型のみを用意していた。これは(c)に示すように、建物を単純化した概ね1/10の縮尺模型になっている。柱・梁・屋根から構成した木製模型とし、筋かいは建物周囲の4面に、マジックテープで着脱できるようにしている。建物重量に比べ柱剛性が大きいので、(e)に示すように柱・梁接合部の仕口を柔軟にして、接合部で変形をさせるように工夫している。模型はキット化しており、(d)のようにケースに収納可能で、子供たちが建物の部材の役割を学びながら建物を作ることができるようにしている。

その後、2階建て模型のニーズが多く寄せられたため、新たに(f)のような木造2階建て模型も新たに開発した。また、家具の転倒実験を行うために、玩具用のミニチュア家具も用意している。

これらの模型を利用することにより、耐震化における、屋根の軽量化、上下階の筋交いや壁のバランス、平面内の壁のバランス、基礎のアンカー・補強の重要性や、家具の転倒防止などの大事さを具体的に示すようにしている。

実験を行う際には、木造家屋の被害写真や、手回し型携帯振動台・電動型携帯振動台での実験、紙製建物模型キットを使った模型作り、木造倒壊実験模型のビデオ映像などを併用して、教育効果を高めるようにしている。

この教材は、小学校や防災イベントでの防災教育に効

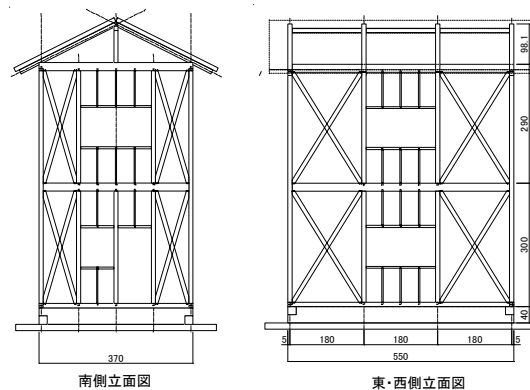


図7 木造倒壊実験模型用2階建て木造模型

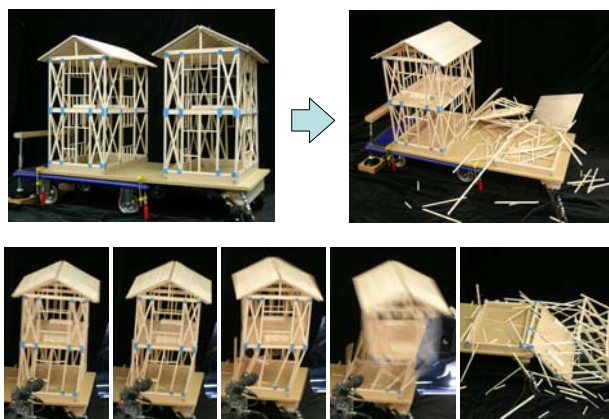


図8 木造倒壊実験模型の倒壊状況



図9 木造倒壊実験模型を用いた実験メニュー

果的である。ワゴン車に積み込むことができる大きさなので、筆者の一人は、既に40校を超える小学校で、防災教育を実践した。また、防災リーダーや防災ボランティアからの貸与依頼も数多く寄せられている。

6. 木造倒壊実験模型

台車型振動台を用いた模型実験を通して、台車振動台の有効性が確認されたが、自治体の利用者を中心に、耐震補強の有無による家屋の倒壊状況の違いを示すことが、木造家屋の耐震化を促進するとの意見を頂いた。そこで、台車型振動台での実験の考え方を基本に、1) 木造住宅の代表的な地震被害をなるべく正確に再現でき、2) 様々な構造的要因による揺れ方・壊れ方を簡単に比較・説明でき、3) 持ち運び可能で1回に数パターンの実演が可能な、一連の木造倒壊実験模型を作成することにした。

間口2間、奥行き3間の2階建て在来軸組み構法の建物を想定して、縮尺比1/10の木製模型とした。過去の木造家屋の被害を参考に、壊れる部位を接合部に特定した模型としている。また、構造特性の異なる2棟を台車振動台の上に併設する形での実験を想定した。

図7に、模型の概要を示す。柱・梁・筋かい・間柱・まぐさなどの基本部材はヒノキとし、基礎にはタモを採用した。ただし、柱の破断を模擬する隅角部4本の通し柱と木摺りはパルサ製としている。柱のほぞはプラスチック棒で、柱・梁の接合金物はマジックテープで代用している。床は剛床を模擬する合板とし積載荷重として鉛製の重りを付加している。屋根には桐板製とスチレンペーパー製の重さの異なる2種類の板を用意した。地盤に関しては、軟弱地盤用に介護用の床ずれ防止用ウレタン樹脂を利用している。また、制震補強の一例として仕口部に設置するタイプのダンパーも作ってある。

なお、相似則に従うと模型の固有周期は実物の約1/3になるが、壊れ方を実感しやすくするために、接合部の剛性を調整して実物の周期に近づけている。

建物模型に加え、転倒防止金具が着脱可能な家具（内部に重り設置）、鉄筋及び控え壁を着脱可能にしたブロック塀も準備している。

木造倒壊実験模型を用いた実験の様子を図8に示す。補強の有無による差を示すために、2棟の建物を同時に揺ることにより倒壊性状の差を見せる。倒壊状況はビデオ収録し、スロー再生などで、倒壊原因を解説できるようにしている。

主な実験メニューを図9に一覧する。図に示すように、(a)筋かいの有無、(b)接合金物の有無、(c)平面バランスの良し悪し、(d)上下バランスの良し悪し、(e)制震補強の有無、(f)屋根の軽重、(g)基礎の良し悪し、(h)地盤の良し悪し、などの実験が可能である。

木造倒壊実験模型を用いた実験では、それぞれの補強項目ごとの揺れ方の違い、壊れ方の違いを明確に示すことができ、臨場感あふれる破壊音と共に、極めて高い啓発効果を得ることができた。また、加振振幅や加振周期による応答の違いも説明できる。このため、耐震化の啓発用のテレビ番組や住宅フェアなどで、数多く利用されてきた¹⁰⁾。

また、実験を補足するために、実験映像をナレーション付きのビデオ映像にまとめ、「模型実験による木造住宅耐震化対策のポイント」と題した防災教材ビデオを同時に作成している。ビデオ映像によるクローズアップ映像やスロー再生映像を併用することで学習効果を高める

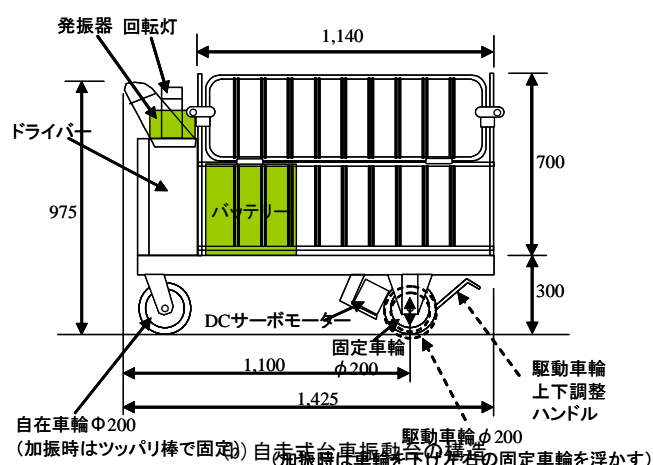


図 10 自走式台車振動台の外観と構造

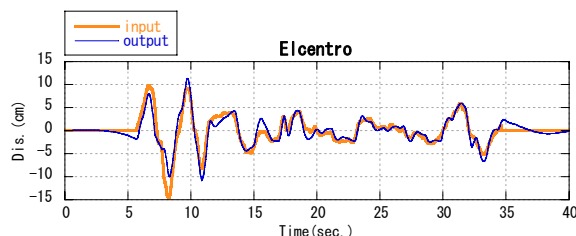


図 11 自走式台車振動台による再現波形の一例

ことができる。さらに、本教材を活用するためのパワーポイント説明ファイルや、カード形式の紙芝居も作成している。

7. 自走式台車振動台

台車型振動台の発想を利用して、入力波形による制御が可能な自走式の台車を開発した。開発のきっかけは、巨大地震時のように長周期の揺れが長時間続く場合の、超高層建物などの長周期構造物の室内における揺れの再現にあった。長周期建築物の耐震改修や室内対策を進めるには、建築物のオーナーや利用者が揺れを実感できる装置が不可欠である。従来から利用されているアクチュエータ方式の固定振動台は、装置が大がかりであり、ストロークにも限界があった。そこで、入力波形による制御可能な自走式の台車振動台を新たに開発することにした。図10(a)のように、台車の上に人を乗せ、内蔵バッテリーによって駆動させることで、場所を問わずに長周期

地震動の体験をしてもらうことができる。

自走式台車振動台の主たる構造を図10(b)に示す。電動式の貨物台車をベースにモータ・制御部分を改造している。同図中ドライバーと記された箱には、サーボアンプ、モータドライバ回路、電源回路が含まれており、DCサーボモータはギアヘッド、サーボモータ、エンコーダからなる。

サーボモータは定格出力250W、パルス幅変調方式のDCモータであり、エンコーダは回転角をデジタル量に変換するセンサーであり、モータドライバ回路は、サーボアンプの微弱な信号を増幅し、モータを駆動するための駆動回路である。モータの回転は、減速比51:1、断続最大トルク180N・mのギアヘッドを介して車輪を駆動する。

自走式台車振動台の動作原理は、下記の通りである。発振器により、目的とする波形を生成し、サーボアンプに入力する。サーボアンプでは、入力された波形をパルス幅変調して、モータドライバ回路を介してモータを駆動する一方、モータの回転角をエンコーダによって捉えてサーボアンプにフィードバックし、最終的にモータの回転を修正し、入力波形に忠実な動きを実現している。

DC駆動小型ファンクションジェネレータにより、4096個のデジタル値を入力することができ、任意の地震波形を入力することができる。図11に、エルセントロ波入力時の結果を示すが、概ね入力波形を再現できている。

現在の試作機は、重量とサイズがやや大きいので、ワゴン車などでの運搬は困難であるが、貨物便での運搬は可能である。また、バッテリー及び充電器を搭載しているので、AC電源の有無に関わらず使用できる。現状はサーボモータ1台で駆動しているため、加振力が不足気味であり、能力特性試験を行ったところ、周期が5秒以上であれば、片振幅1m以上の揺れを再現できるが、最大速度約100cm/s、最大加速度約200cm/s²が限界になっている。

本振動台は、居室内で手軽に利用できる安価な振動台であり、100Vの電源さえあれば、水平1軸の振動台実験を手軽に実施できる。さらに、自走故に、移動・運搬が容易なので、啓発用の振動体験装置としての利用も可能である。また、様々な揺れを再現することができるので、パソコンと連動させれば、体験者の居住地の揺れを地盤条件を考慮して計算し、さらに、建物の階数などを考慮して建物の地震応答を求めた上で、揺れを再現し、想定地震の揺れを体験できるようになる。

8. 紙製建物模型キット

ここまで示してきた振動実験教材は、講演会・講義や展示会などでの利用を前提としているものが多く、受講者・生徒や参加者が自ら体験する機会が不十分であった。そこで、自ら建物模型を作って、住宅の耐震化のポイントを学習できる、ペーパークラフト教材を開発した。

紙製建物模型キットは、厚紙に両面印刷したものである。図12に表側の印刷面を示す。2階建ての戸建て木造住宅の構造を模しており、柱・床・基礎・筋かい・屋根から構成されている。各所に、親しみやすい「遊び心」を埋め込むように配慮している。また、切れ込みを工夫して、屋根や各階の筋かいを容易に着脱することができるようにしている。これにより、屋根の重さを変えたり、上下階の筋かいを着脱して揺れの変化を体感してもらうことができ、屋根の軽量化や筋かいの重要性を理解できるようにしている。

この紙製建物模型キットはホームページにPDF形式で

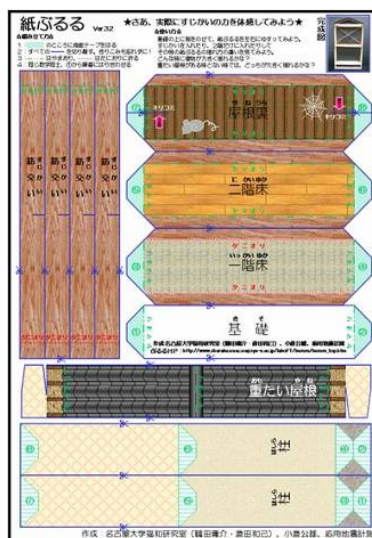


図 12 紙製建物模型キット



図 13 紙製建物模型キットの作成法ガイド

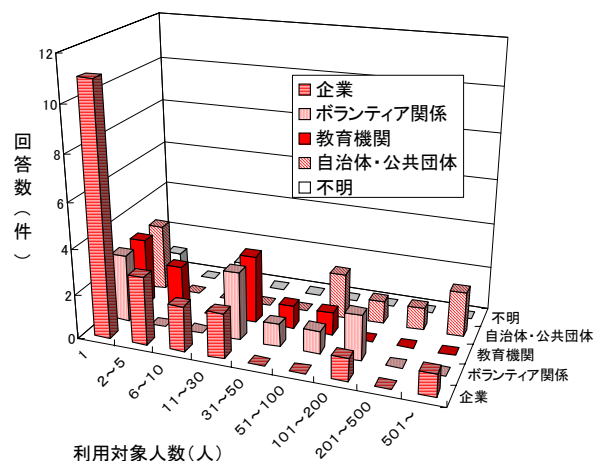


図 14 紙製建物模型キットダウンロードユーザーの使途

公開しており（http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/laboFT/bururu/paper_bururu/kamibururu.html），自由にダウンロードができる．ホームページ上には，図13に示す作り方マニュアルや，使い方マニュアルも用意しており，活用のための支援も整えている．完成した模型は，図12右下のように手を左右に動かすことで地震の揺れを再現でき，子供でも簡単に作成・体験が可能である．

紙製建物模型キットの作成に当たっては，試作版を様々な防災イベントで使ってもらい，そこで出た問題点を元にさらに改良を重ねた．現在は，ホームページでの無料ダウンロード版に加え，ミシン目を入れた厚紙印刷版も準備し，イベントなどでの大量利用にも対応できるようにしている．

現在までに色々な場面で活用してきたが，ペーパークラフトであることが子供の興味を引くようで，小学生以下の子供でも喜んで作っていた．また，利用を通して，小学生低学年でも筋交いの効果を理解できることが実証された．啓発側とのファーストコンタクトにも効果が高く，啓発のきっかけ作りにも役立った．

現時点での利用数は5万枚を超えており，行政や企業，ボランティア団体などで幅広く使われている．ホームページ上では，今後の改良のためにユーザーの意見を吸い上げるべく，PDF版のダウンロード時に利用目的アンケートに答えてもらう仕組みを作っている．その結果を図14に示す．

企業の場合1人での利用が多いのは，本人が試しに作っている場合のようである．複数の人数で利用する場合は，目的が社員向け教育や啓発であり，社内での防災教育に使われたようである．また，教育機関では利用対象者がすべて小・中・高校の学生であったことから，授業等で使用されたと考えられる．これに対して，自治体や公共団体は，防災イベントで大量に利用しているようである．

学校教育や防災イベントでの直接に聞いた意見やアンケートを通して，「上下階の剛性のバランスの大切さが良くわかった」，「模型がかわいくて，楽しく勉強できる」，「ずっと欲しいと思っていたものが見つかりました」と言った好意的なコメントを多数頂いている．また，自治体・公共団体の利用者からは，大々的なイベントで使用し大変好評だったとの報告も受けている．

この種の教材の有効性が明らかになったので，今後，改良を進めると共に，プレハブ版や高層ビル版，家具の転倒版など，新しい教材も作っていきたいと考えている．

9. 小型起振機

小型起振機は，建物模型内に設置して，建物を振動させるために開発した．開発のきっかけは，原子力発電施設の起振機実験の仕組みを，実験見学者に分かりやすく解説したいとの要望を受けたこと，振動論の講義において，共振曲線の説明を行う良い素材が必要であると考えていたことにある．

この起振機は，図15左の写真にあるように，起振機部と，コントローラボックスとから構成されており，図15右にあるように，手回し型携帯振動台の模型に設置して利用することを想定している．

ここでは，一般に利用されている起振機と同様に，2つの偏心マス付き回転体を逆方向に回転させ，水平起振力を得る機構を利用している．DCマイクロモータの回転軸に歯車を取り付け，1つの偏心マス付き回転体をこの軸上に固定し，他方の回転体は歯車とかみ合わせて反転同期

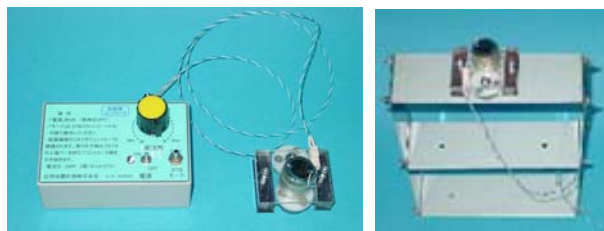


図 15 小型起振機の外観

して回転するようにさせている．この結果，2個の回転体と直交する方向に起振力を生じさせることができる．

開発に当たって留意したのは，極めて微妙な質量の調整と，小型軽量でありながら，低速～高速に到る幅広い範囲で滑らかな回転が出来るようなDCマイクロモータの選定にあった．ここでは，出力1.5W，定格電圧12V，最大回転数12000rpm，最大トルク1.2mN・mのものを選定した．

この起振機は，コントローラボックスに内蔵されている電池によって駆動され，ダイヤルにより振動数を変化させることができる．振動数を変化させることにより，建物の共振振動数を実感させることができる．

小型起振機は，手回し型携帯振動台と組み合わせて利用することにより，建物内の加振による共振曲線と，地動入力による伝達関数との共通性を明快に示すことができる．一般に，建物に地動を与えて共振させることに比べ，建物上部を加振して共振させることは困難である．振動論の講義で利用してみたところ，学生からは，「小型起振機を用いることにより，地動入力と上部加振の両者が，同一振動数で共振することを目の当たりにし，初めて振動方程式の意味を理解することができた」，との意見が多数寄せられている．

10. 各種振動実験教材を用いた教育・啓発活動

本論で示した一連の振動実験教材は，目的に応じて使い分けができるように様々なタイプの振動教材を提供しており，多面的な利用が可能である．

利用形態としては，建築・土木分野での大学教育の一つの柱である耐震工学での講義用教材，建築技術者向けの耐震・制震・免震などの再教育のための教材，建設会社や住宅メーカーの開発技術の一般向け説明用ツール，自治体が推進する耐震診断・耐震改修促進用の啓発材料，科学館などでの手に触れられる実験教材，防災リーダーや防災ボランティアの防災活動の補助教材，高等学校での物理教育教材，小中学校での防災教育教材などが考えられる．先にも述べたように，既に多方面で利用されており利用者からの反響も大きい．その概要は下記の通りである．

シリーズの元祖ともいべき手回し型携帯振動台の一連の模型セットは，建物の振動問題を扱う場合に必要となる基本的な機能が網羅されているところから，大学等での教育教材としての評価が高い．すでに，全国50の大学・高専・高校などで使用されており，振動論や地震防災に関する講義に利用されている．従来から大学の講義などでは，アルミ製の模型を使った講義も行われていたが，振動台がセットになっていること，免震・制震・液状化などまで含む教材の豊富さなどから，多くの教育・研究者が受け入れたものと考えられる．また，振動数を

体感でき、手回しで左右に揺するという機構の面白さから、子供向けや市民向け教材としても多方面で活用されている。ただし、先にも述べたように、利用者アンケートからは、やや重いことや模型設置の面倒さが難点になっており、今後、改良の余地がある。

これに対して、電動式振動台は、軽量で、利用が容易であり、振動数を連続的に変化させることができ、その振動数をタコメータによって容易に読み取ることができる。利用者アンケートでは、2階建て模型を使って、建物の1次モード、2次モードでの共振を容易に捉えることができ、振動論の教材として適している、との意見が寄せられている。また、愛知県では、第一著者も協力してこの装置を使用した独自の地震防災マニュアルを作成し、装置と共にマニュアルをボアランテア団体に貸し出すことで、市民向けの耐震知識提供と意識啓発に役立てている。

台車型の振動台では、柱・梁の接合部で変形させるよう独自の工夫を凝らした大型の木造建物模型を利用して、これによって、建物のゆれをビジュアルに見せることができている。ある自治体では、1台の台車上に2台の住宅模型を載せる装置を独自に制作して、ボランティア団体に実験装置を貸し出し、一般市民向け防災教材として活用している。また、各地の「親子防災教育」では小型震度計を搭載した台車に児童を乗せて、簡易に震度〇の地震動を体験させるなどの取り組みも行われている。

また、台車型の振動台を用いて、木造2階建て模型を倒

壊実験したDVD教材は、建物の改修の有無による倒壊性状の差を実感することができることから、自治体の耐震改修啓発用ビデオや、テレビ各局の防災啓発番組などで多用されている。また、DVD教材も頒布後、2ヶ月で150セット程度が利用されている。なお、DVD教材を頒布したことによって得た利益は、教材の開発費と災害ボランティア基金等に充て、防災活動の支援に役立てている。

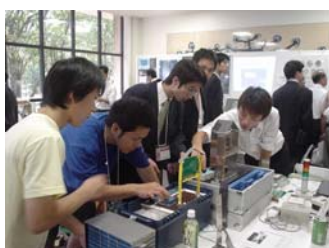
自走式台車の当初の開発目的は、超高層建物などの長周期構造物の室内の揺れの再現にあり、周期5秒で±2m程度の変位を出すことを目標として、駆動力の高い新たなバージョンの開発を進めている。高層ビルのオーナーや構造設計者、メディアの記者などから、試乗依頼が多く寄せられている。

紙製建物模型については、学校教育では、中学の家庭科や理科の授業で安全な住まい方について研究材料に取り上げられたりしている。また、自治体やボランティアが各種防災イベントで、参加者が自ら組み立てる体験によって、屋根の重さや、筋交いの働きを理解することができ、住宅の耐震化に向けての啓発に役立つものとなっている。既に5万枚を超えて利用されている。

これらの教材の普及状況は、著者らの開発時の想像を遙かに超えるものであり、問い合わせもきわめて多い。活用目的に応じて楽しい教材を作ることの有用性が、改めて理解できる。また、以下に示すように、開発者自らが、これらの教材を用いて各地で防災教育を実践していることも、教材の普及を促していると考えられる。教材



(a) 2002年静岡・親子防災スクール
袋井西小学校



(b) 2003年建築学会大会・展示会
「見て触って感じる構造教育」



(c) 2003年愛知県親子参加型地震
防災教育・新城市立八名小学校



(d) 2003年愛知県総合防災訓練
刈谷市総合運動場



(e) 静岡県袋井市三川公民館
防災講座



(f) 2004年愛知県親子参加型地震
防災教育・豊田市立畝部小学校



(g) 2005年愛知県主催の
ハウジング&リフォームあいち2005



(h) 2005年国連防災世界会議
建築研究所ブース

図 16 振動実験教材を活用した防災教育・啓発活動

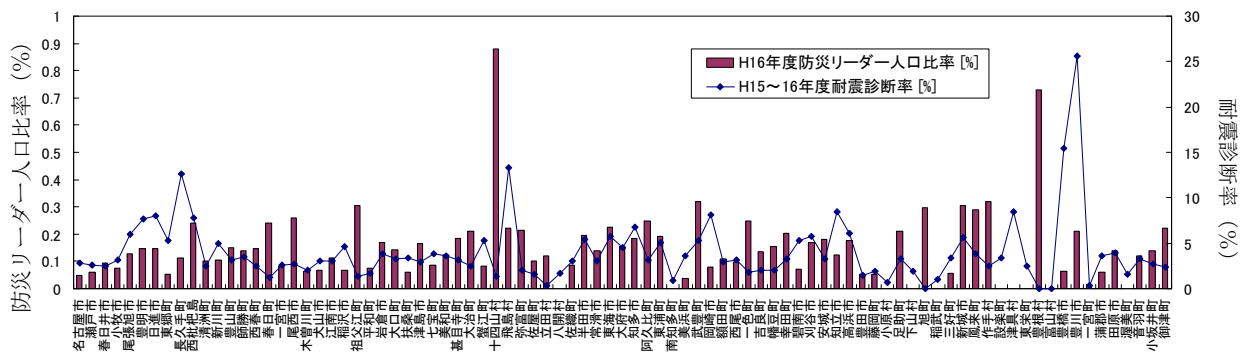


図 17 愛知県における市町村別のあいち防災リーダーの人口比率（％）と木造家屋のH15～H17 耐震診断率（％）

の開発と教育活動が相互に作用することが、教育効果を高めていると考えている。

教材の活用状況の一端を示すために、参考として、図 16 に、筆者らが主体的に実施してきた活用事例の一部を示す。これらから、小学校での防災教育、県の総合防災訓練や公民館レベルでの自主防災活動での利用、学会、住宅フェア、防災展示会などでの利用など、様々な利用の様子が窺えると思う。

教材作成と耐震化促進との直接的関係を把握することは難しいが、愛知県下の木造耐震診断率との関係を参考までに示しておく。図 17 に、本論で開発した教材を積極的に利用して啓発活動を実施している「あいち防災リーダー」の市町村別人口比率と、各市町村での平成 15・16 年度木造建物の無料耐震診断実施率との関係を示しておく。両者の相関はきわめて高く、良い教材の作成と、教材を使って活動する防災リーダーの養成が、住民の耐震化意識の啓発を進め、その結果が耐震診断の実施率に結びついている。

また、本論に示した教材の耐震化促進効果の高さを裏付ける最も明快な指標は、教材の普及数である。本文中にも示したように、多くの教材が全国各地で利用されている。今後、教材の利用状況を把握することにより、耐震化促進効果も定量的に把握できるかもしれない。また、最近では、米国やルーマニア国等からも、これらの教材の導入や、当該国内での教育・啓発活動の依頼が来ており、教材の英語化も進めつつある。

現在、振動実験教材の開発と合わせて、これらを有効に活用するための紙教材やホームページも作りつつある¹¹⁾。「ぶるるホームページ（<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/laboFT/bururu/index.htm>）」の一部を図 18 に示す。ここでは、本論に示した各種の実験教材の紹介に加え、実験教材を利用した実験映像や、教材の利用マニュアルを示したりしている。

将来的には、このホームページをさらに充実させて、振動論や耐震工学、防災教育などのための e ラーニング教材に進化させていきたいと考えている。その試みの一つとして、現在は木造倒壊実験模型を利用して作成した耐震化の啓発ビデオ「模型実験に木造住宅の耐震化対策のポイント」を解説付きで見ることができるようになっている。

1.1. まとめ

本論では、大学における耐震教育や、地域における防



(a) 振動実験教材ホームページの入り口



(b) 振動実験教材の家族を紹介したページ

図 18 振動実験教材を活用した教育用ホームページ

災活動に活用することのできる一連の振動実験教材の開発事例を紹介した。ここに紹介した数多くの振動実験教材は、筆者らが様々な活動の中で利用し、欠点を克服しながら改良を重ねてきたものである。また、学校教育や防災活動に携わる数多くの人たちとの人的交流の中で、活動の担い手のニーズを汲み取る形で、試行錯誤して作り込んできたものである。

それぞれの教材は、異なるユーザーのニーズに応じて開発してきたものであり、結果として、様々な用途に利用できる教材のラインナップを揃えることができた。読者の方々からこれらの教材についての忌憚りの無い意見を頂戴できれば、それをもとに改良を加えていきたいと考

えている。今後は、より効果的な実験教材の開発を進めると共に、ここに示した実験教材と相互補完できる耐震教育・防災教育のためのeラーニング教材を整えていきたい。

謝辞

一連の振動実験教材の開発は、小倉公雄氏の独創的なアイデアに負うところが大きい。また、手回型携帯振動台の開発に当たっては名古屋大学の生田領野氏とベル工業の鈴木勝久氏の協力を、木造倒壊実験模型の開発に当たっては、日本システム設計の花井勉氏と石井渉氏の協力を得た。さらに、名古屋大学福和・飛田研究室、震災ガーディアンズ、愛知県防災局、同建設部、あいち防災リーダーの会、の諸氏を始め、多くの利用者の方々に、有益な助言を頂いた。各位に、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福和伸夫, 飛田潤, 鈴木康弘: 中京圏における地震防災力向上のための大学研究者による実践研究, 地域安全学会論文集, No.6, pp.223-232, 2004.11
- 2) 福和伸夫: 減災は防災教育から, 特集・防災のためのまちづくり, 都市問題研究, 第57巻第1号, pp.72-85, 通算649号, 2005.1
- 3) 福和伸夫, 原徹夫, 小出栄治, 生田領野: 携帯手回し振動台「ぶるる」の開発, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp.83-86, 2003.6
- 4) 例えば <http://www3.shizushin.com/jisin/mihiraki020429.html>
- 5) 愛知県教育委員会: 平成15年度親子で学ぶ参加体験型防災教育実践事例集, 愛知県教育委員会健康学習課, 2004
- 6) 福和伸夫他: 振動模型実験教材による耐震教育・防災意識啓発の試み(その1) 実験教材の概要と活用, 日本建築学会学術講演梗概集, 2005.9
- 7) 花井 勉他: 振動模型実験教材による耐震教育・防災意識啓発の試み(その3), 日本建築学会学術講演梗概集, 2005.9
- 8) 鶴田庸介他: 振動模型実験教材による耐震教育・防災意識啓発の試み(その2) 長周期地震動の体感教材とペーパークラフト教材, 日本建築学会学術講演梗概集, 2005.9
- 9) 野村岳雄, 近藤守: 地震対策用「市民啓発展示モデル」の試作, 消防研究室年報, No.33, pp.1-13, 名古屋市消防局, 2003
- 10) 例えば, NHK名古屋放送局の地震防災一口メモ, http://www.nhk.or.jp/nagoya/bousai/hitokuchi/oct2004_march2005.html, 2005年1月17日, 31日, 2月7日, 14日放送分
- 11) 倉田和己他: 振動模型実験教材による耐震教育・防災意識啓発の試み(その4) 実験教材を活用したEラーニングの開発, 日本建築学会学術講演梗概集, 2005.9

(原稿受付 2005. 5.20)