

# 耐震・振動論学習のための能動型振動シミュレーション教材の開発

# DEVELOPMENT OF TEACHING MATERIALS TO SIMULATE DYNAMIC RESPONSE OF BUILDING MODEL FOR LEARNING SEISMIC RETROFIT AND STRUCTURAL DYNAMICS

鶴田庸介-----\*1

福和伸夫-----\*2

Yousuke TSURUTA-----\*1

Nobuo FUKUWA-----\*2

キーワード：

E ラーニング、アクションスクリプト、教材、振動実験、耐震化

Keywords:

E-learning, Action script, Teaching materials, Vibration test, Promotion of seismic retrofit

Web based e-learning system is developed for the education of structural dynamics for University students and for the dissemination of disaster prevention for the society people. This system shows the dynamic response of the 2-dofs lumped mass system. It is possible to easily make a virtual experiment on a web browser. User can produce the seismic ground motion by dragging the ground with the mouse right and left on the browser. The ground can also be shaken by the observed earthquake wave in the database. User can freely make an experiment using various variables. The students easily understand the dynamic phenomena of structure through the combination of formulation, graph, and the experiments using this software.

## 1. はじめに

中央防災会議では、東海・東南海・南海地震、首都圏直下地震などでの地震被害を半減させるための「地震防災戦略」を発表し、家屋の耐震化を我が国の防災対策の最優先課題として位置づけた。また、様々な自治体で戸建て住宅の耐震診断や耐震補強への補助が行われている。しかしこれらの進捗状況は決して芳しい状況ではない。その原因の一つとして、建物が振動し崩壊するという現象、そしてそれを防ぐための耐震化の効果やそのメカニズムが周知されていないことが考えられる。一方、最近では免震、制震技術の普及に加え、長周期地震動の問題等建築設計において振動性状の理解が不可欠になってきており、大学生や建築技術者に対する分かりやすい振動教育のニーズが高まっている。しかし、振動現象は日々刻々と変化する動的な現象のため、従来の教科書学習だけでは感覚的な理解が難しい。式数やグラフを見て実際の揺れをイメージできるレベルへ促すための教材が必要である。

そこで、筆者らはこれまでに数多くの振動実験教材やビデオ教材の開発・公開ならびにそれを活用した防災意識啓発活動を行ってきた<sup>1)</sup>。こうした啓発の一例として、防災白書<sup>2)</sup>では筆者らが開発した「紙ぶるる」<sup>3)</sup>や「木造倒壊ぶるる」<sup>4)</sup>を使った啓発活動が紹介されている。最近では、子供達が安価な紙模型を組み立てて、手を動かして筋交いの耐震効果を体感する啓発活動が日本中で行われており、防災活動の国民運動につながりはじめている。また、これらの教材は高等学校の物理教育や大学での振動論教育の場でも使われており、「固有周期の差異は目視よりも実際に手で揺するほうがはるかにわかりやすい」等の多数の好意的なコメントをいただいている。

このように、物理現象を理解するために様々な実験と観測を繰り

返し行なうことは効果的だが、実際の教育・啓発の現場では時間的、経済的な制約や安全性の問題により限られた実験と観測しかできないのが現状である。こうした問題を解決するため、筆者らはIT技術の発展により実現可能になった計算機シミュレーションに注目した。実験を安価に手軽に行えるだけでなく、実験に関わる様々な変数の設定も容易に行え、極限状態の再現も可能である。何度も繰り返し可能であるし、観測が難しい現象の可視化も可能である。

このような背景から「Web上で自由に揺らせる振動教材」を開発した。本教材はWebサイトにアクセスするだけでブラウザ上にて非常に滑らかでグラフィカルに振動実験を行えるが、このような振動シミュレーターは今まで実現されていなかった。本研究は、新しく開発した教材の具体的なコンテンツと活用法に加え、コンピュータ一負荷の高いプログラムをWeb上で実現可能にするための新たな手法の提案という点でも意義があると考えている。

## 2. 本教材の特徴

本教材はWebブラウザ上で振動実験を動的に行なうことを実現する教材である<sup>5)</sup>。わかりやすく体験学習ができる教材を構築するため、以降に述べる特徴を持った教材を作成した。なお、本論で紹介する教材（ニックネームは「マウスぶるる」）はWebサイト「ぶるるくんのじこしょうかい」<sup>6)</sup>にて公開している。

### 2.1 開発のねらい

学生・技術者と一般市民の2種類の利用者を想定しているため、開発教材も大きく分けて2種類を用意している。それぞれの教材の学習目的は以下のとおりである。

① 振動論を教科書・講義等で学んだ（学んでいる）学生や技術

\*1 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生  
(〒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・工博

\*1 Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.,

\*2 Prof., Graduate, School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

者がこのプログラムを利用し、各種変数を変更して揺れの変化を体感学習する。また、構造設計者は、振動現象を意匠設計者や設計依頼主に解説する際に利用する。

- ② 耐震化に対し、あまり知識を持たない一般のユーザーが、重さや壁のバランスによる振動性状の違い、耐震・免震・制震といった地震対策の違いと効果を体感する。

どちらの利用者に対してもまずは使いたいという気持ちを想起させることが大切なため、親しみやすいデザインを目指した。わかりやすく簡単なインターフェースを採用し、ユーザーが行うべき初期設定を最小限にし、対象とする模擬実験を明快にすることで直感的に操作できるソフトウェアを目指した。

## 2.2 手動加振と自動加振

建物上部質量の違いによる揺れ方の相違など、主として固有周期の違いを理解してもらう場合、模型を揺らす実験を目で見ただけでは体感効果が少ない。一方、その模型を手で揺らすと微妙な違いでも非常によくわかる。このため本教材では画面上の地盤を図2のようにマウスで左右にドラッグすることで地盤を時刻歴に強制変位させ、マウスの動きで周期を体感できるようにした。(手動加振モード)

また、設定したモデルの地震時挙動を理解するために、著名な観測地震波も登録しており、これを用いた加振もできるようになっている(自動加振モード)。



図2 マウスでぶるる使用風景

## 2.3 時刻歴応答計算

このプログラムでは、Nigam-Jennings 法を用いて質点の時刻歴応答を求めており、2質点のモデルではモード合成法を採用している。サンプリングレートは処理速度とスムーズな動きを勘案し、25Hz としている。

## 2.4 ActionScript を使った開発

インタラクティブなシミュレーターを実現するには、プログラムには解析実行中逐次計算を強いることになる。こういったコンピューター負荷の高いプログラムの場合、一般的には、Web から各自の

コンピューターにソフトウェアをダウンロードしてインストールするのが一般的である。しかし、これでは手軽さが失われてしまう。そこで、本研究では教材開発に Flash (Macromedia 社) 付属のスクリプト言語である ActionScript を用いた。これを用いることで、Web サイトにアクセスするだけでブラウザ上にて手軽に実験が行えるようになる。また、ファイルサイズが小さいこと、デザインとプログラムが同じ開発環境で行えること、アニメーションとマウスを用いた操作性の高い教材を容易に作成できること、ほとんどの Web ブラウザで利用可能であること等の利点も挙げられる。

## 3. 各教材の詳細

現在、本教材のプログラムは5種類である。対象ユーザー、実験概要、変更可能変数を表1にまとめた。以下ではそれぞれのプログラムの詳細について説明する。

### 3.1 1質点系自由振動実験

図3のように、1質点系を対象に、減衰自由運動を決定付ける変数を任意に変化させ、振動の様子を時刻歴にシミュレートする。以下に機能と特徴をまとめる。

- 4つの変数(初期変位、初期速度、固有周期、減衰定数)をスライドバーもしくは直接値を入力し任意に決定する。入力された初期変位に対応して質点のグラフィックが移動する。
- START ボタンを押すと振動が20秒間表示され、経過時間、振動のアニメーション、変位波形がリアルタイムに描画される。減衰自由振動を教科書等で学習した学生が本プログラムを利用することで、静止画である波形と実際の振動のイメージを結びつけて考えることができるようになる。

### 3.2 1質点系強制振動実験

図4のように、1質点系の強制振動実験ができる。地動の時刻歴変位の入力方法には、手動入力と自動入力がある。以下に基本的な機能と特徴をまとめる。

- 固有周期と減衰定数をスライドバーもしくは直接値を入力し任意に決定する。START ボタンを押すことで手動加振モード、神戸ボタンを押すことでJMA 神戸の波形を用いた自動加振モードがそれぞれ20秒間表示される。
- 手動加振モードではマウスで地盤を左右にドラッグして揺することで逐次に地動変位を入力する。経過時間、応答のアニメ

表1 振動シミュレーション教材の構成一覧

プログラム名	対象ユーザー	実験概要	変更可能変数
①1質点系自由振動実験	振動論学習者(学生・技術者)	各種変数を変えて1自由度系の自由振動を実験できる。さらに変位の時刻歴波形もリアルタイムに表示する。	初期変位、初期速度、固有周期、減衰定数
②1質点系強制振動実験	振動論学習者(学生・技術者)	地盤を揺する(マウスで左右にドラッグ)ことで1自由度系の強制振動を手動加振で実験できる。また、観測地震波で自動加振することもできる。加速度・速度・変位の時刻歴波形(入力・応答)をリアルタイムに表示する。	固有周期、減衰定数
③2質点系強制振動実験	振動論学習者(学生・技術者)	②の実験が2質点になったもの。入力可能な観測地震波が大幅に増えた。また、固有周期を設定せず、質量と剛性を設定する。	1階質量、2階質量、1階剛性、2階剛性、1次減衰、2次減衰
④2質点系強制振動実験(比較実験)	振動論学習者(学生・技術者)	構造の異なる2つの建物を同時に揺らし比較実験ができる。③のモデルを建物的なグラフィカル表示で行うことで実現象との対応がわかりやすい。グラフィカル表示・倒立振り子表示を切り替え可能にした。	水平方向の変位倍率左右の建物それぞれの変数(1階質量、2階質量、1階剛性、2階剛性、1次減衰、2次減衰)
⑤2質点系強制振動実験(比較実験)一般向け	一般	④の実験で初期変数の変更機能を無くした。また、グラフィカル表示のみを採用した。	水平方向の変位倍率

- ーション、入力波形・応答波形（それぞれ加速度・速度・変位）がリアルタイムに描画される。
- 3) 自動加振モードではJMA神戸（NS方向）の観測地震波で地盤が自動的に揺れる。
- 1 自由度系の線形過渡振動問題を教科書等で学習した学生が本プログラムを利用することで、減衰や周期による共振現象の育ち方の学習が可能である。波形描画により、加速度・速度・変位それぞれの位相差や減衰付与の重要性、ステップ外力等種々の過渡応答に対する応答を入力・応答波形を見比べながら学習することができる。

### 3.3 2質点系強制振動実験

図5のように、2質点系の強制振動実験ができる。地動の時刻歴変位の入力方法として、手動入力と自動入力がある。以下に機能と特徴をまとめる。

- 1階、2階の質量・剛性や1次2次の減衰をスライドバーもしくは直接値を入力し任意に決定する。質量は質点の大きさに、剛性は柱の太さに対応しグラフィックが変化する。これら6つの変数から固有周期とモード形を計算し、描画する。
- 2) 加振モードを選択しSTARTボタンを押すことで実験が始まる。加振モードは手動と自動の2種類に大別される。
- 3) 手動加振モードではマウスで地盤を左右にドラッグして揺することで時刻歴に地動の変位を入力する。
- 4) 自動加振モードでは兵庫県南部地震（JMA神戸・NS方向）、十勝沖地震（八戸・NS方向）、想定新東海地震（名古屋三の丸地区・NS方向）、コジャエリ地震（Sakarya・EW方向）、ElCentro地震動（NS方向）、Taft地震動（NS方向）、Sin波（1Hz）が再現できる。

ここでは、2自由度系の固有値問題やモード合成法を教科書等で学習した学生が本プログラムを利用することで、固有周期と固有モードを学習すると共に、高次モードの振動の体感や、2質点系の1自由度モデルへの置換の妥当性を学べ、モデリングの考え方やモード合成法についての理解が深められる。また、各種変数を設定することで、免震建物やTMDを設置した制振建物などのモデリングも可能である。

### 3.4 学生・技術者向けの比較実験

1つの地盤に2質点系モデルを2つ並べることで、異なる特性の構造物の振動特性を比較実験できる。手動・自動加振機能に加え、質点モデル表示、建物をイメージしたグラフィック表示の切り替え機能を持たせた。以下に機能と特徴をまとめる。

- 1) 図6の実験選択画面にて5種類の実験（屋根重量の違い、上下階の剛性バランス、免震装置の有無、高さの違い、制震装置の有無）から実験項目を選択する（図7-1,2,3,4,5）。変数のデフォルト値を与えることで、定数設定の煩わしさを減らし、利用者をシミュレーターにナビゲートすることを意図している。
- 2) 加振モード（手動・自動）を選択し、STARTボタンを押すことで実験が始まる。また、コントロールパネルを表示させることで（図8）、各モデルに設定されている各種変数を参照・変更することができる。質点モデル、グラフィック表示をボタンで切り替えることができる（図7-1'）。

- 3) 手動モードでは地中にいる「なますアイコン」を左右にドラッグすることで連動して地盤が揺れる。マウスで地盤を直接ドラッグすると簡単に大きな変位が出来てしまい、かといってドラッグ可能範囲（地盤の最大変位）を建物のグラフィック対し相応な大きさにすると、ドラッグ可能範囲が非常に狭くなり振動体感の良さが生かせない。そこで、本プログラムでは、マウスで入力される変位を「なますアイコン」と地盤の間で縮小して揺らす機構を採用した。現在は、2階建て建物を7mと想定し、

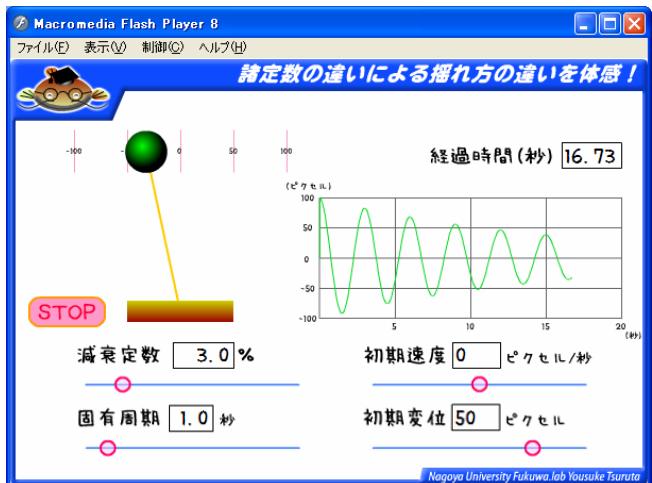


図3 1質点系自由振動

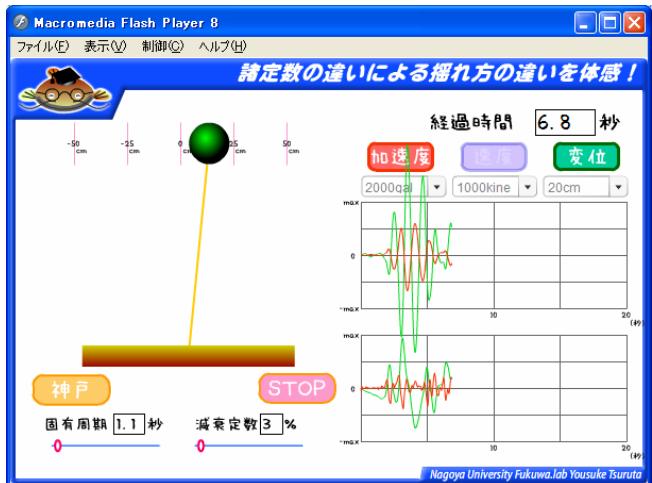


図4 1質点系強制振動

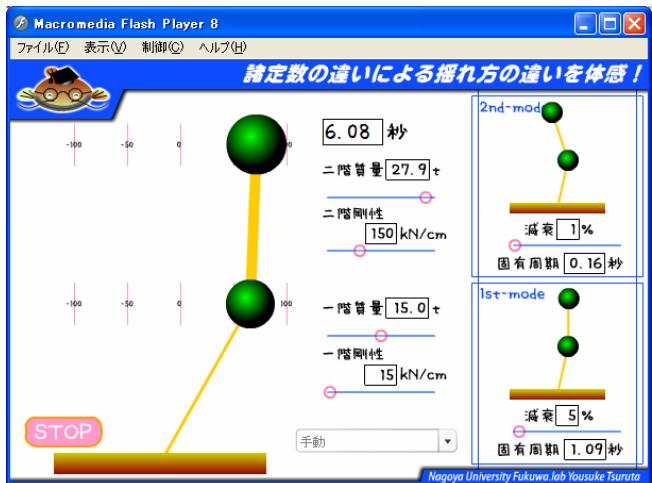


図5 2質点強制振動

- それに対し地盤の最大入力可能変位を片振幅 20cm×（横方向の倍率）に設定してある。
- 4) 自動モードで入力可能な地震動は前節の2質点強制振動実験と同様である。ただし、高層建物の実験では地盤の最大入力可能変位を片振幅 20cm×（横方向の倍率）に設定し、長周期のゆれを入力しやすくしてある。なお、横方向の倍率のデフォルト値は2階建て住宅同士の比較では1倍、高層建物の比較では縮尺が小さくなるため横方向の変化を見やすくするため3倍としている。

ここでは、2自由度系の線形応答を通して、異なる構造の建物の振動特性の違いを比較実験することにより、構造物のバランスや重さ、高さが与える影響を、体感的に学習することを目指している。

### 3.5 一般向けの比較実験

前節の学生・技術者向けの比較実験（以下、学生向け）を一般向けにしたものである。複雑な機能を省くことで使いやすくわかりやすいものにしている。以下に学生向けとの相違点をまとめる。

- 1) 行える実験種類は学生向けと同じく5種類である。
- 2) 質点モデル表示を廃止しグラフィック表示のみにした。
- 3) コントロールパネルの表示機能を省いた。

振動論の知識を持たない一般の方を利用対象としているため、各種変数を設定することなく各種構造物を模擬した実験を行うことができるようとした。屋根の重さ、壁のバランスの違いを通して耐震化の重要性を理解したり、免震・制震の原理を学んだりすることで、耐震化の啓発に役立てることを意図している。

### 4. おわりに

建物の地震時挙動を学習し耐震化の必要性を理解するための教材として開発したeラーニング教材を紹介した。この教材はWebを介した個人利用だけでなく講演会や講義の場などでも使ってきました。今までの利用の中で、「免震装置や制震装置の効果がよくわかった」、「自分で揺するから共振現象を楽しく学べる」、「地動と応答の波形が出るので、固有周期の影響がよくわかる」といった意見をいただいており、教育効果は高いように感じられる。今後は弾塑性を考慮したモデルや、地盤との動的相互作用、表層地盤の増幅を考慮するなど、リアルティーの高い教材を目指すとともに、この教材を活用した教育カリキュラムを作っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 内閣府：防災白書, pp.547-548, 2006.6
- 3) 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、第2号、pp.549-550、2005.9
- 4) 福和伸夫、花井勉、石井涉、鶴田庸介、倉田和己、小出栄治：耐震化促進のための木造建物倒壊実験教材の開発、日本建築学会技術報告集、第22号、pp.99-102、2005.12
- 5) 鶴田庸介、福和伸夫：耐震・防災教育のためのEラーニング教材の開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.653-654、2006.9
- 6) <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/labofT/bururu>



図6 比較実験の実験選択画面

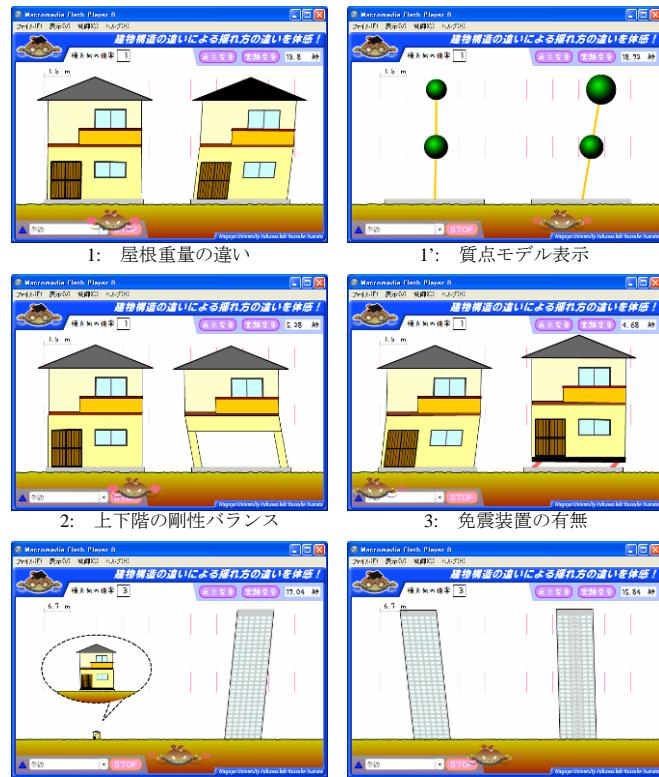


図7 比較実験での質点系モデル表示画面と5種類の実験画面

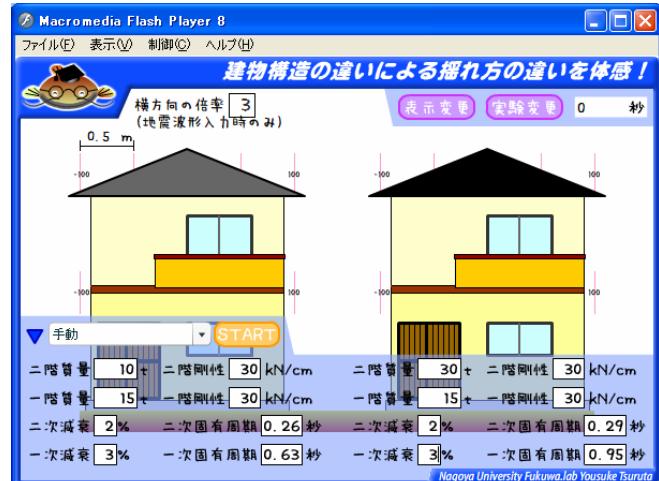


図8 コントロールパネル表示画面