

強震動データの活用と説明力向上により地震時建物応答に関する 想像力を喚起するためのシミュレーションソフトウェア開発

Development of Simulation Software Visualizing Seismic Wave Data
to Extend Imagination for Building Response.

倉田 和己¹, 福和 伸夫¹, 護 雅史¹, 飛田 潤²

Kazumi KURATA¹, Nobuo FUKUWA¹,
Masafumi MORI¹, and Jun TOBITA²

¹名古屋大学減災連携研究センター

Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ.

²名古屋大学災害対策室

Disaster Management Office, Nagoya Univ.

We developed building response simulation software visualizing seismic wave data. The system can support various types of earthquake, and handle the data on GIS interface. It is running on web browser, application of smartphone, head mounted display, and multi screen projector. The purpose of this system is making user imaginative about earthquake disaster to practice mitigation activity.

Keywords: seismic wave data, simulation software, building response, 3d modeling, explainability, imagenation

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、巨大津波による圧倒的な破壊のインパクトと共に、現代社会の抱える数々の問題が顕在化し、専門家や研究者のみならず一般市民の地震に対する関心が今までにないほど高まった。一方、内閣府中央防災会議では新たな被害想定を実施すると共に、防災基本計画を修正するなど、国全体で防災対策の大幅な見直しが予定されている。これらは南海トラフの連動地震や首都直下地震など、東日本大震災を更に上回る被害が予想される地震災害に対し、一刻も早く、被害を減ずるための対策を取らねばならないという差し迫った状況を表している。

このような状況の中で、人々の地震防災に対する意識と対策は、決して十分といえない。例えば巨大地震発生時に大きな問題となる長周期地震動について、筆者周辺の比較的防災に関心の高い市民（ボランティア関係者など）であっても、3月11日の揺れは予想を超えたものであったとの声が多く聞かれた。巨大地震時の建物内における揺れについて、自分なりの具体的なイメージを持っている人はまだまだ少数であると推測される。被害軽減のためには「構造物が倒壊しないこと」が最も重要であり、中でも一般の既存不適格建築物の耐震化は喫緊の課題であるが、これが十分に進まない理由として目黒¹⁾は「災害に関する想像力の不足」が決定的な要因であると指摘している。筆者らも東海地域を中心とした10年以上にわ

たる啓発の取り組みの中で、想像力を喚起することが住民一人一人の行動を推し進める事を実感している。

一方、備えを推し進めるための国の研究的取り組みとしては、地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図の作成や、防災科学技術研究所による地震動予測地図公開システム「J-SHIS」、強震観測記録配信システム「K-NET」などがある。藤本・戸塚²⁾による調査では、地震動予測地図のリスク認知に関して確率50%を超えると危険性をより強く感じる傾向があるとの結果が得られている。また防災科学技術研究所の調査³⁾では、確率評価の期間として10年間の希望する意見が多く挙げられている。地震動予測地図は学術的には優れた表現方法であるものの、評価機関が30年から、確率の最大値は26%以上までとなっているため、一般市民にとっては現実感を得にくいものとなっている可能性があると考えられる。K-NETについては、実際の強震観測記録が誰でも入手できることで、揺れの詳細を様々な角度から確認する機会を提供している。これにより地震発生当日から、様々な研究機関において地震波形グラフやスペクトルを用いた分析結果が公開され、専門家によるいち早い現象の理解に効果を上げている。しかしながら一般市民がこのようにデータを加工したり、グラフやスペクトルを読み解いたりするのは現実的に不可能である。また専門家であっても、グラフやスペクトルから具体的な揺れの様相をイメージし、一般市民の想像力を掻き立てるような具体的説明を行うことは極めて困難である。

本論では、既存のものに加え今後さらなる観測体制の充実と強震動予測技術の発展によって、ますます利用価値の高まる強震動データを活用した地震時建物応答シミュレーションソフトウェアの開発について述べる。最終的には耐震化の促進に資することを目的としつつ、本システムでは利用者の地震の揺れに対する想像力を喚起することをテーマとし、検討と改善を行った。

2. ソフトウェア及びシステム全体の概念設計

(1) システムの目的設定と要件の整理

地震時の様子を表示する先行的なソフトウェアとして、Web で公開されているものについて特徴を検討した。地震時の自宅安全性を表示するシステムとしては愛知県防災学習システム⁴⁾がある。これは自宅の建築年や構造的な特徴から東海東南海地震において倒壊の危険性があるか否かを動画で表示するものである。倒壊する or しないで結果が表示されるためわかりやすいが、再生される動画はあらかじめ決まった数パターンから選択されるだけで利用者によってそれ以上の差異はない。そのため自宅の具体的な揺れの様子を確認できるものではない。また地震時の室内状況を説明するものとして震度 6 強体験シミュレーション⁵⁾がある。これは家庭における地震発生時の正しい対応を細かく確認できるものであるが、地震の揺れの現象について理解できるようなコンテンツは含まれていない。

以上を踏まえシステムの目的を、自宅や職場など普段自分の生活する建物が地震時に「どのように揺れるか」を、住んでいる場所や建物種類など利用者ごとの個別条件を反映したうえで表示することに設定した。発生する地震（震源）や自宅の位置、建物種別など個別の条件を反映させることにより、利用者は再現された映像を当事者感を持って受け止め、地震時の揺れの具体的イメージとして印象付け想像力を喚起させることができると考えた。安全 or 危険といった揺れの結果よりも、揺れの周期や継続時間、スケール感などの「揺れの過程」そのものを可視化することで、地震時にはどのような危険が起こりうるかを想像できるようになることを狙っている。揺れの条件を自在に設定できるため、良い地盤と悪い地盤の対比を行うなど利用者の興味を引き出せばより高度な啓発にも利用できる。

技術的には、近年その有効性が認められつつあるシミュレーション映像技術^{例えば 6)}を活用するほか、急激な普及を見せているバーチャルリアリティ（以下 VR）再現

デバイスを組み合わせることを想定した。また、誰にでも強震動データを容易に加工し、自宅の揺れへと視覚化できる事が重要となるため、建物の応答計算からアニメーション映像表示までをバックグラウンドで自動化し、入出力は極力シンプルにすることとした。さらにオリジナルデータである強震動データは、提供元機関毎にフォーマットやファイル命名規則が異なる上、メッシュ毎の強震動予測データの場合はファイル数、ファイル容量とも膨大であることから、なるべく統一的にデータを取り扱えるよう編集を加えた上で、一台のマシンに全データを集約し検索可能なデータベースを構築することとした。これらの要件から、システムのデータや計算処理など中核機能はサーバマシンに置き、基本的にネットワークを介して利用する仕組みとすることで機能を具体化していった。

さらに、サーバ・ネットワークによるシステムを前提した事で、一般市民向けの防災情報として代表的な地震ハザードマップと連携した操作画面を設計した。各自治体でハザードマップの整備が進んでいるものの、『震度〇』といった文言から具体的な揺れの様子を想像することは困難である。そこでハザードマップの閲覧中にシームレスに「揺れそのもの」の閲覧に移行できるように、「動くハザードマップ」という開発テーマを設定した。

(2) 必要となる具体的な要素の洗い出しと対応方法の設計

これまでにこなってきた啓発教材および啓発ソフトウェアの開発を踏まえ、実現すべき要素とその具体的内容を整理した（図 1）。

a) 利用にあたっての敷居の低さ

一般市民を主な利用者とするため、高度で洗練されたインターフェースよりも、分かりやすさを優先する。特に、市民啓発活動の主な担い手である地域活動の中心人物は、年齢的に PC 操作に精通していない可能性がある。具体的には Ajax（非同期通信）を用いた画面遷移を伴わない事と、操作メニューをコンパクト化し一画面に収まる事を優先した画面設計を行った。強震動データの選択も地震名をプルダウンで選択し、基本画面の地図をスクロールすることで可能とした。なお、トップ画面には簡易操作マニュアルを配することにした。

b) 没入感の演出

リアリティのある映像を再生しても、例えば小さな画面では現実感が十分ではない。そのため、次に示すような VR デバイスを用いて、まるで自分が実際の揺れの最中に居るような感覚を再現できるようにした。図 2 はヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）と呼ばれるメガ

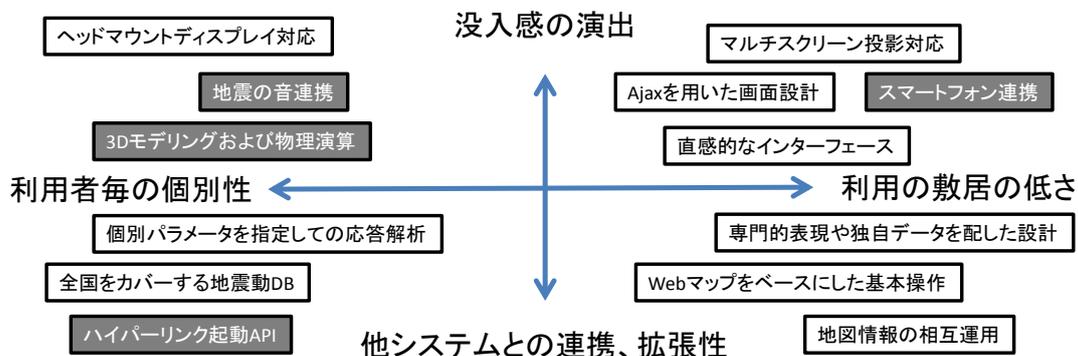


図 1 ソフトウェアが備えるべき機能（白地はプロトタイプで実現、黒地は改善版で実現）

ネ型のディスプレイで、PCの映像出力端子に接続して利用する。これに加速度センサーとwebカメラを組み合わせて、自分が見ている方向のリアルタイム映像をシミュレーションに用いる事が可能となる。図3は床面投影型プロジェクタ、近接投影プロジェクタを組み合わせたマルチスクリーン環境である。次章で説明するシミュレーション映像の各視点を同時に投影することで、揺れている室内を視覚的に再現することができる。

c) 利用者毎の個別性の担保

緻密なシミュレーションであっても、それが限られたパターンのものであっては、それぞれ異なった環境に置かれた一般市民が十分な現実感を得ることはできない。利用者一人ひとりの状況にマッチしたシミュレーション結果が表示できることが必要である。そのため強震動データはほぼ日本全国をカバーできる範囲で整備し、メッシュごとに対応する波形ファイルを読み出すことができるようにする。また応答計算は毎回異なったパラメータ（主に建物固有周期、減衰定数）で実行することで、自分が居る建物の特性を踏まえたシミュレーションが可能である。

d) 他システムとの連携と将来の拡張性

後日強震動データや表示用地図データが追加で利用可能となった場合、サーバマシンを拡張せず、ネットワーク経由で新たなリソースを利用できる事が望ましい。同種のシステムが複数連携して稼働することで、強震動データの相互運用が促進される事が期待される。また、システムの外部アプリケーション（例えば一般的なGISソフトウェアなど）からもシミュレーション結果を取得できるようにすれば、より多くの利用機会を提供することが可能となる。これは、システムの連携部分を標準的なWebの仕様に従って実装することで実現できる。

3. プロトタイプの開発

ここまでの設計に従い、プロトタイプシステムの開発を行った。このプロトタイプは実際にインターネットを通じて一般に公開し、またイベント等でも直接利用してもらい意見をフィードバックするためのものである。

システム全体構成を図4に示す。強震動データのDB及び応答計算機能、その他計算モジュールはサーバマシン上にあるため、利用者は動作環境を満たしたパソコンとインターネット接続があれば時間や場所を問わずに利用可能である。具体的には、プロトタイプの実作環境はInternet Explorerのプラグインを必要とするためWindowsマシンが前提であることと、起動時に数MB程度のファイルを読み込むため相応の回線速度が求められる。

システム基本画面を図5に示す。操作の基本となる地図インターフェースはGoogle Maps APIをベースにJavascriptで記述されており、Ajaxで画面遷移無しにサーバとやり取りすることで随時波形データを検索・取得し、応答計算結果を読み込むことができる。利用者はまず地図を操作して自宅の位置を設定する。続いてブルダウンから使用する地震名を選択し、予測震度ハザードマップを表示して地表の震度を確認する。ここでは地表加速度波形グラフが表示され、揺れの開始時刻や継続時間を確認・調整できる。専門家向けのリンクとして、擬似速度応答スペクトル画像（図6）を生成するボタンも設定している。続いて自宅の建物条件を入力となるが、基本的には建物種別（例：木造2階建、コンクリート10階



図2 ヘッドマウントディスプレイ



図3 マルチスクリーン再生環境

建てなど)を選択するだけで、建物形状・減衰定数・固有周期など各種パラメータが設定される。専門家向けにはパラメータをマニュアルで入力することも可能となっている。設定に従いサーバ側で1質点系の線形応答解析が実行され、建物最上部の変位応答波形が自動的に生成される。さらに手元の波形データをアップロードして同様に応答計算させ、後述のシミュレーション映像で利用することも可能となっている。具体的には、K-NETフォーマットで収録された波形(gzip圧縮形式)に対応している。このように、利用者に応じて最適なデータ設定方法を用意している。なお、リクエストに応じて都度応答計算を実行するレスポンス速度を確保するため、シミュレーション表示において要求されるPCのハードウェアスペックを抑えるために1質点系の線形応答解析を用いているが、システムの目的としては揺れの周期特性や継続時間、振幅を再現できれば十分であると考えた。

応答波形及びシミュレーション用データのロードが完了すると、図7から図10に示すような揺れのシミュレー

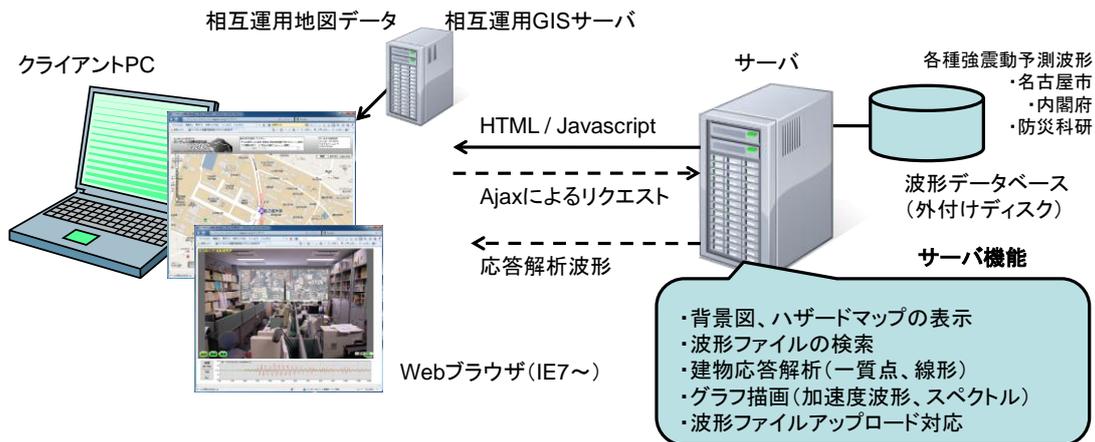


図 4 システム全体構成

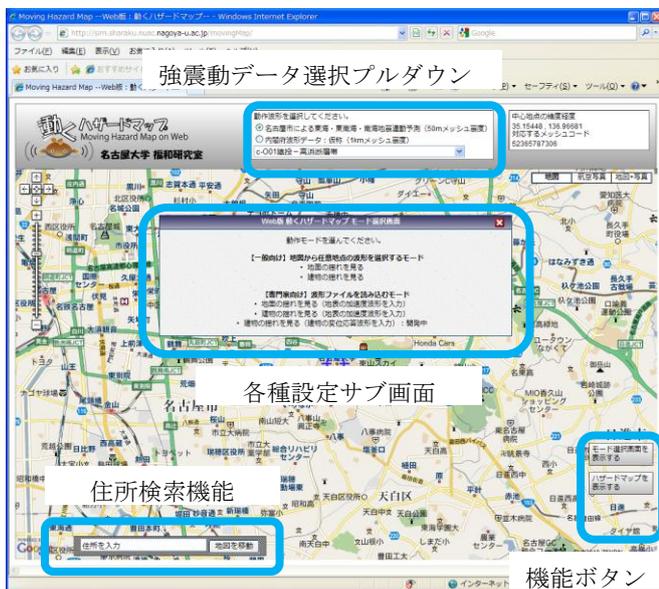


図 5 システム基本画面

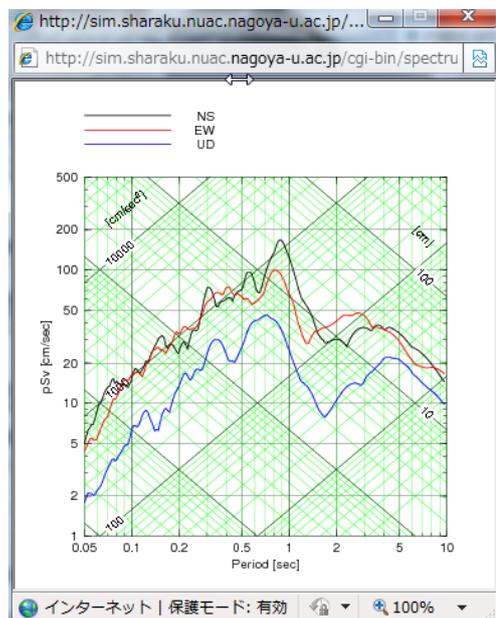


図 6 生成される速度応答スペクトル画像

シミュレーションが開始する。背景となる画像と屋外の風景が映る窓は標準で複数のパターンを用意しているが、利用者が手持ちの画像ファイルを設定することも可能である。画面下部には時刻歴変位応答波形がグラフ表示され、赤が建物最上部、緑が地表を表している。図 8 では建物最上部と地表の揺れの比較を見ることで、建物による揺れの増幅の様子がわかる。図 9 は標高データを元に立体表示した地表と建物モデルが表示され、建物の揺れのスケールを確認することができる。図 10 は室内を天井から鉛直に見下ろした風景であり、床面が水平方向にどう動くかを確認できる。なお、利用する PC の画面サイズや、背景画像によって、シミュレーション時の振幅スケールを調整しなければならない。これについては、設定画面で簡単に変更できるような機能を付加している。

4. テスト利用を踏まえた工夫と改善

前章のプロトタイプシステムを、インターネットを通じて約 2 年間一般公開した。地域の防災イベントや展示ホールなどに設置して直接ユーザの反応聞いたり、運用

経験を元にしたたりして実用へ向けた改善を行なっている。なお 2 年間でのシミュレーション実行回数はおよそ 3000 回であった。以下の各項目について改善を行い、いずれも技術的な検討を終え、概ね実装済みである。

(1) 映像面での改善

ユーザから直接の改善要望として多かった、シミュレーション映像のリアリティ向上があった。プロトタイプでは任意の静止画像を応答波形に従って駆動することで揺れを表現していたが、新たに 3D モデリングエンジン⁷⁾を採用し、建物及び家具のモデルオブジェクトをリアルタイムで駆動することにした。このエンジンはオンラインゲームなどで動作実績があり、利用のためのプラグインが無料で入手でき、別途開発ツールも提供されている。3D モデリングエンジンを採用した画面を図 11 に示す。新たに家具をはじめとする一つ一つのオブジェクトが振動するようになり、陰影やテクスチャの処理と合わせて非常にリアリティが増している。さらに、3D モデル内で自由に視点を移動させる事が可能なため、より没入感を高めている。なお各オブジェクトの振動はモデリングエンジンに内蔵されている物理演算機能を用いており、計

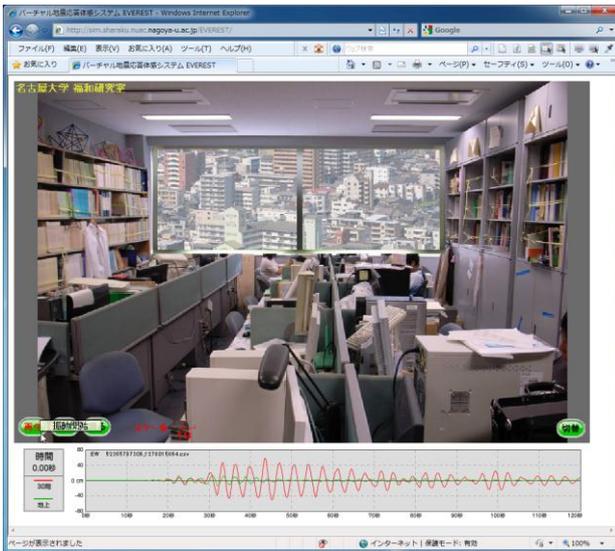


図7 揺れシミュレーション初期画面

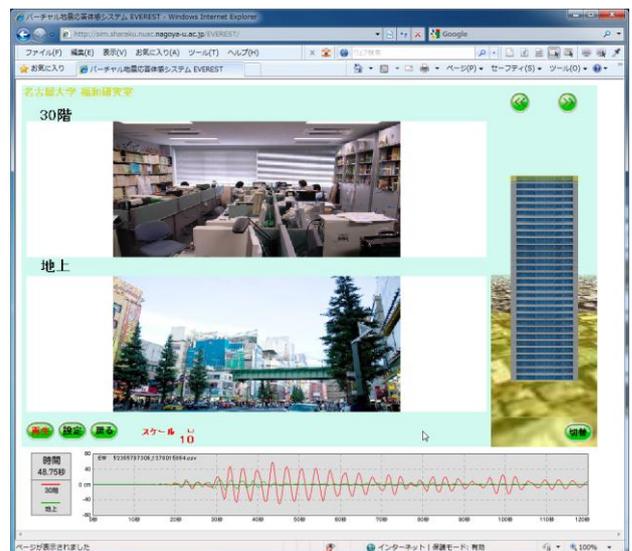


図8 地表と建物最上部の応答比較

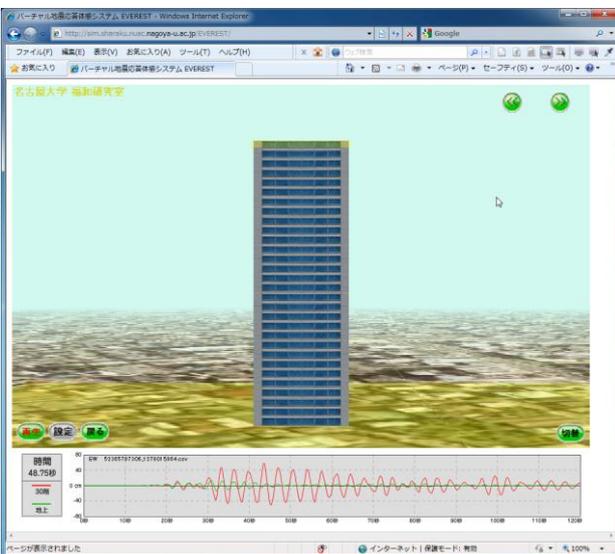


図9 建物・地形の立体表示

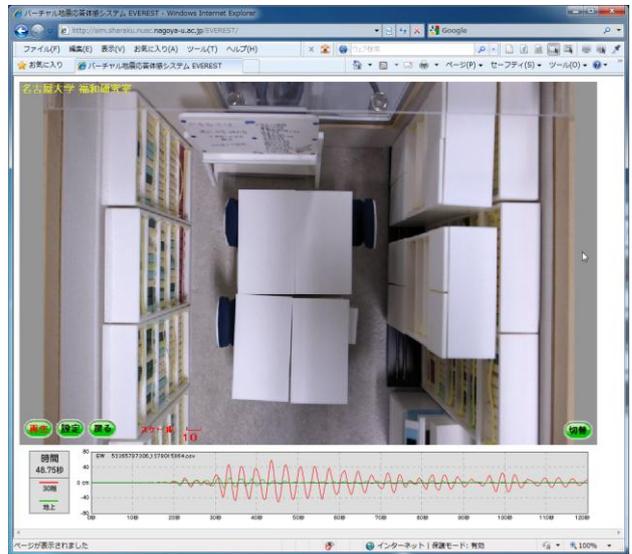


図10 室内の平面表示

算の妥当性については実大振動実験の家具転倒結果との対比を行うことで現在検証しており、摩擦や重心などのパラメータを調整することで改善が可能でシステムの目的には十分な結果を得ることができると考えている。

(2) 外部システムとの連携

様々な場面で試用するにつれ、別の情報システムとの連携の必要性が生じてきた。プロトタイプでは、シミュレーション画面はシステムの内部関数によってのみ呼び出される設計であったが、ハイパーリンクの URL 中に強震動データやパラメータの情報を埋め込み、直接シミュレーション画面を呼び出せるよう処理を変更した。これにより GoogleEarth を始めとした一般的に普及している GIS ソフトウェアや、Web ページやメールのハイパーリンクからも利用できるようになった。今後様々な外部システムとの連携が可能となり、例えば地震観測システムや速報システム等と組み合わせることで揺れの情報をいち早く視覚化する事が可能になる。またシステム全体の処理を見なおした副次的効果として、初期ロード時のデータ転送量やプログラムの処理ステップを削減することができ、体感的な動作速度が大幅に改善された。



図11 3Dモデリングによる室内応答

(3) マルチプラットフォーム、モバイル対応

これまでのシミュレーションはプラグインソフトウェアの関係で Windows マシンのみが動作対象であったが、実際の運用ではそれ以外のプラットフォーム、特にモバイル環境での利用が望まれるシーンが多かった。前々項

のモデリングエンジン更新により様々なプラットフォーム上でシミュレーションが実行可能となり現在は Firefox や Safari, Chrome などの W3C 基準に沿った主要なブラウザで動作可能なため MacOS や Linux にも対応した。Android 端末用のソフトウェアも試験中であり、スマートフォンやタブレット端末の GPS 機能と連携して現在地点に対応したデータの揺れを再現したり、カメラ機能と連携して現在見えている風景を揺らしたりと、この場合利用者の操作がほとんど不要となる。二次元バーコード等の形でハザードマップ等の配布物にスマートフォン用リンクを貼りつければ、圧倒的に多くの市民に自宅の揺れシミュレーションを提供することが可能になる。

(4) 地震の音の追加

強震動データから地震時の「地鳴り音」を擬似的に再現する理論⁸⁾を組み合わせ、シミュレーションの揺れに同期して音を再生する機能を付加した。この理論では対称的フーリエ解析を基礎理論として地震動記録そのものと同じ継続時間を有し、地震動の周波数が高い時は高い音が、地震動の振幅が大きい時は大きな音が再生されるような音声波形を生成するものである。2章で検討し作成した HMD 及びマルチスクリーンは没入感を高めるために非常に有効であるが、一般に普及している装置とは言い難く、利用の機会に限られる点が問題であった。その点音による没入感の演出は低音再生能力のあるスピーカーさえあれば容易に利用でき、例えば長周期地震動のゆったりとした揺れと活断層による短周期の揺れの違いを、視覚に加えて聴覚でも印象づける事ができる。

5. まとめ

既存の資産であり今後更に活用が求められる強震動データを用いた、地震時の建物応答シミュレーションソフトウェアの検討および試作、改善を行った。本システムの最終的な目的は耐震化の促進を少しでも後押しすることにあるが、シミュレーションによる想像力の喚起がどれだけ耐震化の促進に寄与するかを厳密に測定するためには「最終的に耐震化を行ったか否か」という個別の追跡調査が必要であり、現状ではそこまでの検討に至っていない。ただしアンケート等を用いた評価の仕組みはシステム中に容易に組み込むことが可能であるため、利用者の意識や属性、対策の実情などを含めた調査の実施を検討している。また実際の啓発活動においては、地震

学、建築学、地理学、地域活動など様々なテーマがあり、本システムはその一部として位置づけられ、その他の教材や啓発プログラムとの連携が最も重要となる。これらは今後の課題として認識している。

巨大地震に伴う大被害の発生にはもはや猶予がなく、あらゆる手段を用いて早急に耐震化を推し進めなければならない。このような状況の中で、今後新たに得られた強震動データに対する対応が容易であり、最新のソフトウェア技術や VR ハードウェア、関連する情報システムを柔軟に組み合わせることで拡張が可能な本システムには、一定の意義があると考えられる。

謝辞

シミュレーションソフトウェアの開発に当たっては有限会社アシストコム の宇田氏に技術的協力を頂いた。また、システムの試験運用と改善においては多くのユーザから貴重な意見を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 21 年度 広報ぼうさい、
http://www.bousai.go.jp/kouhou/h21/03/special_04.html.
- 2) 藤本一雄・戸塚唯氏：確率論的地震動予測地図のリスク認知に関するアンケート調査、地域安全学会梗概集、No.21、pp.71-74、2007.11.
- 3) 防災科学技術研究所：J-SHIS アンケート最終報告書、
http://www.j-map.bosai.go.jp/j-shis/text/enquete_f.html、2006
- 4) 三重県：インターネット放送局 暮らしの情報 安全・安心、
<http://www.pref.mie.lg.jp/MOVIE/list.asp?cate1=1&cate2=16>、2010
- 5) 愛知県：防災学習システム、
<http://www.quake-learning.pref.aichi.jp/>
- 6) 内閣府：震度 6 強体験シミュレーション、
<http://www.bousai.go.jp/simulator/index.html>
- 7) Unity Technologies、<http://unity3d.com/japan/>、2010
- 8) 平井敬、福和伸夫：地震の音を作る―地震動と同じ継続時間を有する音の作成法―、地震 第 2 輯、第 63 巻、3 号、pp.153-163、2011.2

(原稿受付 2012.1.6)

(登載決定 2012.7.9)