



強震動データの有効活用へ向けた可視化統合プラットフォームの構築

倉田和己¹⁾、福井優太²⁾、平井敬³⁾、福和伸夫⁴⁾

1) 正会員 名古屋大学減災連携研究センター、特任准教授 博士（工学）

e-mail : kurata@nagoya-u.jp

2) 名古屋大学大学院環境学研究科

e-mail : fukui.y@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

3) 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科、助教 博士（工学）

e-mail : hirai.takashi@nagoya-u.jp

4) 正会員 名古屋大学減災連携研究センター、センター長 教授 工博

e-mail : fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

要 約

高度化の進む強震動予測データの有効活用として、揺れの可視化による教育・啓発手法が考えられる。筆者らはこれまで、常設型、可搬型など様々な「揺れ可視化」システムを開発し、その成果は地域実装されつつあるなど一定の評価を得ている。しかしながら、全国的に見れば、可視化技術による強震動予測データの活用が進みつつあるとは言えない。その理由には、応答計算実装の問題、可視化プログラム実装の問題、データベース実装の問題の3点が挙げられる。これらの課題を解決する、強震動可視化統合プラットフォームを開発中である。

キーワード： 強震動データ、可視化、耐震教育・啓発、システムインテグレーション

1. はじめに

国や地方自治体の地震被害想定が実施される際には、その根拠となる強震動予測が行われる。また、大規模建築物の設計においても、設計用地震動の作成が行われている。これらのデータは通常、本来の目的に用いた後、別の用途に展開されることはない。被害想定を例に取れば、最終的なアウトプットとしての被害量（数値）やハザードマップ（画像）のような、静的な情報としてのみ、世の中に提供される。しかし、距離減衰式等による簡便法を別にすれば、強震動予測においては時刻歴波形データが得られており、現代の表現技術を駆使すれば、そこから教育・啓発や様々な検証に活かせる情報を提供することも可能であると考えられる。強震動予測の精度向上へ向けた様々な研究が行われる中、その活用方法についても、現代の技術に即した新たな手法を確立したい、というのが本論の主旨である。そこで本論では、強震動予測データの活用に関するこれまでの検討を踏まえ、筆者らが行っている「揺れの可視化」システムの地域実装事例に触れると共に、このような取り組みが今後普及する上での課題を整理する。さらに、強震動データ活用の課題解決へ向けた提案として、開発中の可視化統合プラットフォームについて述べる。

2. 強震動予測データの活用に関する経緯と現状

1995年阪神・淡路大震災を契機に地震防災対策特別措置法が制定され、それまで個別に行われていた理学分野の地震予知研究と、工学分野の地震防災研究を一元的に推進するために、地震調査研究推進本部が設置された。その結果、観測網の整備や調査観測計画が策定され、強震動観測データに基づく地震発生可能性の長期評価や、震源断層の破壊による強震動の評価が重点的に研究された。これを踏まえ、阪神・淡路大震災後10年の研究成果として強震動予測を地震防災に活かすために、「全国を概観する地震動予測地図」が発表された。入倉¹⁾は2種類の地震動予測地図について、「確率論的地震動予測地図」は地域間の地震危険度が定量比較できるので防災対策の優先順位を決めるのに適し、「震源断層を特定した地震動予測地図」は特定の地震が起こった際の災害対応に必要となる、としている。その上で、地図の有効活用には精度の向上とともに利用者たる国民の理解向上が必要であるとし、また、（強震動予測研究の分野と）耐震工学や都市防災の研究者との連携について必要性を説いている。

福和²⁾は、地震動予測地図を地域防災に活用する上で、対象を明確にし、アウトプットの内容や表現方法を考慮すべきであるとしている。研究者を対象とした場合、時刻歴波形としてのアウトプットや、計算過程で用いられた震源断層モデル及び地盤データを活用したいと考える場合もある。地方自治体の場合、地域ごとに得られた調査結果や観測記録を用いて、震源・地盤モデルを改定し、より高精度な強震動予測を行うことも期待される。耐震設計を行う技術者の場合、設計用の入力地震動を計算する上で、震源のパラメータや地盤モデルの設定によって結果が大きく異なるため、こうした各種の変数と設定根拠を示す必要がある。市民への提供の場合、予測手法やモデルが有する精度の限界と、そこから得られる結果には変動が有ることを正確に伝え、地図の見方の解釈を添付する必要がある。

藤原³⁾も同様に、「多様なニーズに応えられるような開示情報項目の多様性が要求されるとともに、最終的な評価結果だけでなく、不確定性の評価プロセスで用いた手法や判断、用いた情報など階層的な構造を持つ情報群について広く公開される事が望ましい」としている。こうした強震動予測の共通情報基盤としての位置づけで、地震ハザードステーションJ-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>) が防災科学技術研究所によって平成17年5月に開設された。J-SHISは前述のような、どちらかと言うと研究者・技術者向けの情報基盤として運用されているため、市民が自分に関わるリスクを把握するための分かりやすいコンテンツは含まれていない。東⁴⁾はJ-SHISが提供するデータを活用したiOSアプリケーション「もしゆれ」を開発し、スマートフォンから得られる位置情報を元に、確率論的地震動予測地図や微地形区分、表層地盤増幅率を参照することで、その場所の地震危険度を定性的に表現する仕組みを提供している。しかしながら、強震動データそのものを活用して、利用者一人ひとりにリスク情報を提供する仕組みは、筆者らの知る限り普及していない。

3. 摆可視化システムの開発と地域実装

上記のような現状を踏まえ、筆者らは強震動予測データと観測記録データの両方を可視化し、教育・啓発を行うための「揃可視化」に関する各種の情報システムを開発してきた。図1は、直交リニアガイドとサーボモーターを用いた、長周期・ロングストロークの振動台である。長辺（図中の左右）方向で往復3mの加振能力が有り、長周期地震動の再現に適している。この振動台の動きに同期する形で、図中奥と左右のプロジェクター映像（室内被害映像）が振動するようになっている。このシステムは予め用意した強震動データを振動台制御PCに入力し動作させるが、別体の映像制御PCがそれに同期する点が技術的な工夫である。また加振に用いるデータは2台のPCで共通であり、追加の手間をかけずに、振動台での体验に映像を加えられる。なお、投影する映像は室内被害の静止画のほか、模型実験により予め撮影した動画を、スケーリング則に従ってスロー再生し用いている。

図2は、プロジェクターと3Dモデリングソフトを用いた、地震時室内状況のシミュレートシステムである。実験室の壁面3面に大型プロジェクターで映像を投影しており、没入感のある地震時の体验が可能となっている。3Dモデリングには汎用的な開発環境としてUnity3Dを採用し、室内モデルの編集・加工が容易である。さらに、簡易ではあるもののリアルタイムの物理演算が可能なため、強震動データ（この場合は建物の地震応答計算を行ったもの）を入力することで、室内の揃だけでなく、家具の移動や

衝突・転倒が再現できる。Unity3Dの物理演算精度は専門的なソフトウェアに比べて低いため、精緻な検証には不向きであるが、任意の入力データ・任意の室内状況に応じた揺れを多人数で体感できる環境は、2014年の開発当時において新規的であったと言える。なお、物理演算の妥当性をある程度確保するため、実際の家具の振動実験のデータを元に、家具3Dオブジェクトの摩擦や質量を調整してキャリブレーションを行っている。図3には実験室の外観を示す。実験室は名古屋大学減災館の屋上に位置しており、設計荷重400tの鉄筋コンクリート構造物が、直交リニアガイドと積層ゴムからなる免震層（設計周期5.3s）に支持されている。実験室外部のサーボモーターによって、共振現象を利用することにより往復140cmの加振が可能であり、長周期の揺れに限られるものの、映像と振動の同期も可能である。

図4、図5は、HMD（Head Mounted Display）を用いた、没入型の揺れ映像体感装置である。近年のHMDおよびVR（Virtual Reality）技術の進歩はめざましく、個人向けに市販されている安価な機材を用いて、極めて没入感の高い3D映像が再現できる。ここに、図3で示した3D室内映像ソフトを組み込み、HMDのヘッドトラッキング機能（利用者の頭部の向きを検出し、映像の向きを変更する機能）を活用して、利用者がまさに地震時の室内に居るような体験を提供するものである。このシステムは映像+音声¹のみでの体感であるが、利用者に地震時の室内危険性を気づかせる効果は高いと考えられ、その証左として複数の施設（市役所の防災展示や、防災啓発施設）に導入済みであり、今後も導入が予定されている。



図1 長周期ロングストローク振動台+背景画像同期システム



図2 地震時室内3Dモデル投影システム



図3 実験室外観



図4 HMDを用いた没入型体感システム 図5 没入型システムに表示される映像例



¹ 3Dモデルの転倒・衝突をトリガーとした効果音再生と、平井（参考文献5）の手法による「地鳴りの音」を再生している。

4. 強震動予測データ可視化統合プラットフォームの構築

本章では、強震動予測データのさらなる有効活用へ向けて、課題の整理を行うとともに、筆者らが検討を進めている可視化統合プラットフォームについて述べる。

4.1 強震動予測データ活用へ向けた課題の整理

3章で示したように、筆者らの取り組みでは既存の強震動予測データを活用し、任意の揺れを簡便に可視化する仕組みは実現できている。また、それらの一部は地域実装も進みつつある。しかし、全国的に見ればそのような地域実装は普及しているとは言えず、こうした技術を耐震教育・啓発のために広く展開していく上では課題があると考えられる。筆者らの指摘する課題は次の3点である。

第一に、計算実装の課題がある。任意の震源パラメータを設定した強震動データを得ようと思えば、膨大な計算資源を必要とする。さらに、任意建物（の任意階）の揺れを得ようと思えば、建物の地震応答計算も必要となる。地震被害想定や建物設計時であれば、高速計算機を用いた上で十分な時間をかけて計算する事ができるが、耐震教育・啓発目的では、汎用PCで実用的な計算速度を確保せねばならないという制約もある。筆者らの既存システムでは、地動データは既存の強震動予測結果から工学的基盤の波形を引用し、表層地盤による增幅効果を計算して、さらに建物については1質点系に置換し弹性応答計算を行っている。この場合、特に固有周期の長い建物において、応答が過小評価となる傾向が確認されている。従って、今後は高速かつ高精度な強震動予測計算と、建物応答計算が求められる。

第二に、揺れの可視化に関する課題がある。前述の通り、昨今の3D映像装置やVRソフトウェア技術の進歩はめざましく、エンタテインメントとして社会に普及しつつある。従って一般市民は今やそれらの感覚に慣れ親しんでおり、従来技術を用いた揺れ可視化（質点系モデルやフレームモデル）による映像表現だけでは、耐震教育・啓発の面でインパクトを与えることが難しくなりつつあると考えられる。しかしながら、地震工学分野の専門家がこうした可視化技術を習得することは、技術的な難易度は別として、必ずしも効率的とはいえない。そのため、様々な環境で動作する汎用的なビューワソフトが求められる。

第三に、強震動データベース実装の課題が挙げられる。現状、強震動データとしての標準的なフォーマットは決まっておらず、計算を実施した機関によって様々な形式のデータが存在している。例えば、都道府県単位の地震被害想定では、県ごとに震源・地盤・時刻歴波形などの各種フォーマットが異なるため、広域のデータベースを整備する際に問題となることがある。またこれらのデータは本来、公共的な共有資産であると考えられ、誰もが自由に活用できるべきである。国や自治体は開示要求に基づいてデータの提供を行っているが、手続きの煩雑さや、データ量の膨大さから、手軽に利用できるとは言い難い。そこで昨今のオープンデータ活用の考え方も踏まえた、オンラインデータベースと利活用APIの整備が求められる。

4.2 可視化統合プラットフォームの概念

前節のような課題を解決するための方法として、強震動データの可視化統合プラットフォームについて検討し、構築を進めている。プラットフォームの全体像を図6に示す。なおプラットフォームを構成する要素技術については、次節以降について述べる。プラットフォームは複数のサーバ連携により構成され、強震動生成サーバ、建物応答計算サーバ、可視化&APIサーバに加え、データベース・サーバが接続される。強震動生成サーバは、任意の震源パラメータにより強震動を計算し、結果を建物応答計算サーバに提供する。建物応答計算サーバは、指定した建物条件に応じて応答計算を行い、任意建物・任意階の床応答波形を提供する。可視化&APIサーバは、得られた応答波形を用いて、任意の室内3Dモデルを加振した際の映像を出力する。また、クライアント側から強震動生成サーバ、建物応答計算サーバへとパラメータを引き渡すためのWeb-APIを提供する。映像の出力はWebブラウザ上での3Dグラフィック標準仕様であるWebGLに基づいているため、現行のブラウザであればOSを問わずに表示が可能である。また、床応答波形や応答スペクトル等の計算結果データをJSON等のWeb標準形式で出力することも可能とし、様々な外部アプリケーションと連携できるものとする。

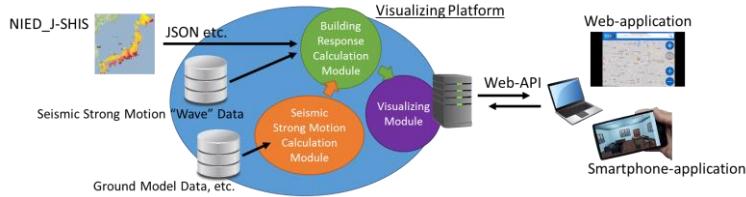


図6 強震動データ可視化統合プラットフォームの概念

4.3 任意震源による強震動の生成

任意の震源による強震動波形の作成にあたっては、長周期成分を有限差分法⁶⁾、短周期成分を統計的グリーン関数法⁷⁾によりそれぞれ生成し、接続周期 2 s で合成するハイブリッド法を用いた。有限差分法の計算においては、地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図の作成に用いられた地下構造モデル⁸⁾を使用した。ただし、一般に有限差分法による地震動の作成には多大な計算機資源と計算時間を要する。本研究では、平井・福和によるグリーン関数データベースを用いる方法⁹⁾を採用し、任意の震源による地震動の計算を効率化した。以下にその概要を説明する。

地震による地動変位は以下のように表される。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \int_{-\infty}^t \int_V \frac{\partial G_{ip}(\mathbf{x}, t-\tau; \xi, 0)}{\partial \xi_q} m_{pq}(\xi, \tau) dV d\tau \quad (1)$$

上記は、震源域 V での地震によって生じる観測点 \mathbf{x} における時刻 t での変位の i 成分を表している。 ξ は震源域内での座標、 m_{pq} はモーメントテンソル密度の累積解放量である。グリーン関数には以下の相反性が成立する。

$$G_{ip}(\mathbf{x}, t-\tau; \xi, 0) = G_{pi}(\xi, t-\tau; \mathbf{x}, 0) \quad (2)$$

これを式 1 へ代入し、震源域を N_e 個の点震源の集合として近似すると、次式のようになる。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{j=1}^{N_e} \int_{-\infty}^t \frac{\partial G_{pi}(\xi_j, t-\tau; \mathbf{x}, 0)}{\partial \xi_q} M_{jpq}(\tau) d\tau \quad (3)$$

観測点においてインパルス力を加えたときの震源位置での変位勾配テンソル（これはすぐに歪みテンソルに変換できる）が、震源位置でのモーメントテンソルの解放による観測点での変位に等しいことが分かる。有限差分法では、震源は 1 種類のものしか想定できないものの、それによる変位は媒質内のすべての点で計算することができる。しかし、グリーン関数の相反性を利用すると、ひとつの観測点に対する媒質内のあらゆる位置の震源による地震動のグリーン関数を一度に得ることができる。このことを利用して、いくつかの観測点について、あらかじめ媒質内の多数の位置に対してグリーン関数を計算し、データベース化しておくことで、式 3 に従って直ちに地震動波形を算出することが可能である。

以上の方法による地震動の計算を任意の断層震源に対して実行するシステムを構築した。図 7 に処理の流れを、図 8 に Web-API を通じた試作インターフェイスの外観をそれぞれ示す。

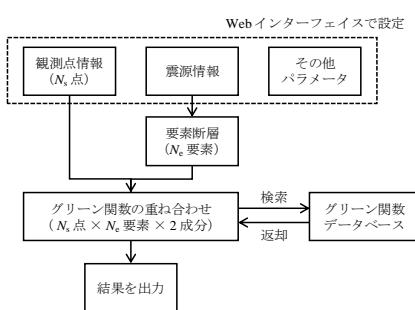


図7 強震動生成システムの流れ図

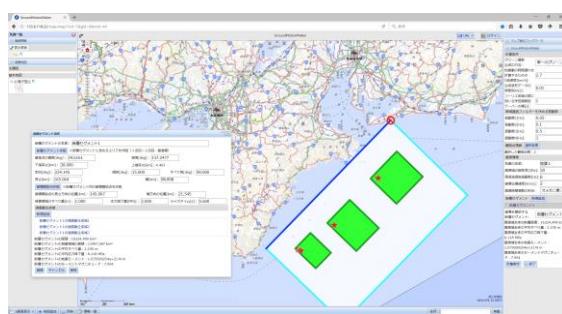


図8 強震動生成システムの試作インターフェイス

4.4 応答計算の高度化

本節では多質点系モデルを用いた任意建物の地震応答計算方法について述べる。多質点での計算では、様々なパラメータを設定する必要があり、手法によっては計算時間も長くなる。システムに組み込むにあたり、入力するパラメータの種類を減らしつつ、高速かつ高精度な計算を行うことが求められる。これらを考慮し、以下に建物パラメータの設定方法、地震応答計算の手法を概説する。

ここで用いる建物モデルは図9に示すような逆三角形の1次モードをもつせん断質点系モデルであり、第*i*層の質量を m_i 、剛性率を k_i 、減衰を c_i する。このとき、層数を N 、1次モードの固有角振動数を ω 、減衰定数を h とし、階高を一定とすると、剛性率 k_i は、

$$k_i = \left(\sum_{t=i}^N t \cdot m_t \right) \cdot \omega^2 \quad (4)$$

と表せる。また、減衰係数 c_i は剛性比例型を採用すると、次のように表せる。

$$c_i = \frac{2h}{\omega} k_i \quad (5)$$

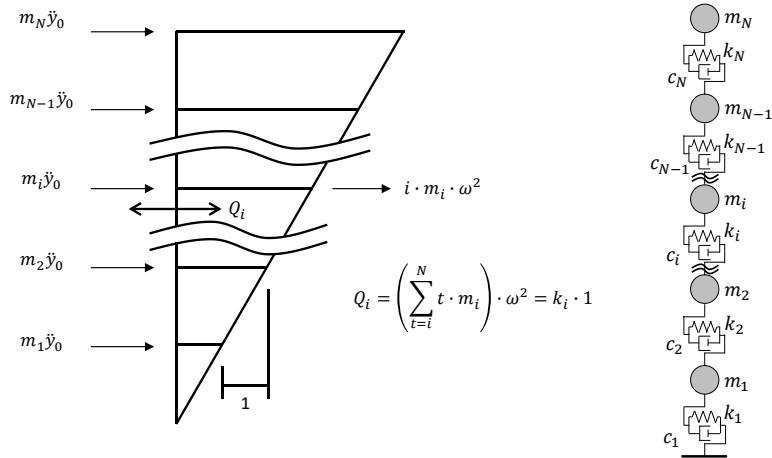


図9 逆三角形1次モードのせん断質点系モデル

これらのパラメータを用いて多質点での応答計算を行う。地震動による建物の動的応答を計算するために、ここでは地震応答解析で最もよく用いられているNewmarkの β 法を用いる。Newmarkの β 法は β の値により加速度変化の仮定を変えることができるが、ここでは解の発散を考慮し、 $\beta=1/4$ の平均加速度法を採用する。質量は実際の建物から求められた一般的な値を用いることとする。システムから入力するパラメータは建物階数(質点数)、出力階(可視化や振動台に出力する階数)、1次モードの固有周期、減衰定数のみでよく、多質点での応答計算を行うことで任意の階の地震応答が出来可能になった。固有周期や減衰定数についてはある程度建築の知識を要するが、建物階数から固有周期を概算し、鉄骨造や鉄筋コンクリート造を選択させることにより減衰定数を推定することで、一般の利用者も利用可能になる。

4.5 外部連携の高度化

可視化統合プラットフォームは、外部の様々なシステムと連携してこそ有用性が発揮させる。現状では、愛知・静岡・三重の各県および、内閣府（の一部）の強震動予測結果について、計算結果と地盤モデル等のデータ提供を受け、それらをデータベース・サーバに格納し連携させている。強震動生成を行う際にこれらのデータを参照したり、あるいは既存の強震動データから建物応答を行ったりすることが可能となっている。また、前述の地震ハザードステーションJ-SHISとの連携も構築中であり、J-SHISから専用のWeb-APIを通じて、JSON等のWeb標準形式で任意地点・任意震源断層の予測結果を取得し、建物応答計算に受け渡す処理を実装することで、地震動予測地図の成果を活用するための環境整備にもなる。現在筆者らは、可視化統合プラットフォームのWeb-API（プロトタイプ）を用いたスマートフォン

アプリケーションの開発¹⁰⁾（図10）や、既存振動台へのHMD映像連動システム実装（図11）についても取り組んでおり、今後はプラットフォームを用いた強震動データ活用の仕組みを社会実装するための、事例を提示する事を予定している。



図 10 Web-API を利用したスマートフォンアプリ



図 11 既存振動台と映像の連動

5.まとめ

強震動データの活用に関するこれまでの経緯と、筆者らの実践事例から得た知見を踏まえ、強震動データ可視化を行うための統合プラットフォームを構築中である。単一のシステムとするのではなく、入出力とも外部システムと連携することを前提としたデザインになっており、このプラットフォームを核に、強震動予測にまつわるデータの統合化と利活用の推進を目指している。最終的な目的は、日本中の強震動データを最大限に利活用することにより、地震災害を軽減することにある。従って、本プラットフォームのような仕組みは、国の事業として安定的に運営される事が望ましいと考える。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎：「強震動予測」を防災に活かす、日本地震学会秋季大会特別セッション、2006年11月1日
- 2) 福和伸夫：地震動予測地図の地域防災への活用、地震動予測地図ワークショップ－地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携、2002年3月29日
- 3) 藤原広行：地震動予測地図、日本地震工学会誌、No.4（特集：強震動予測）、2006.7、pp.7-8.
- 4) もしゆれの判定方法について、<http://ifeathquake.bosaiapp.com/use.html>（参照日時：2017年9月10日）
- 5) 平井敬、福和伸夫：地震動記録と同じ継続時間を有する音の作成法、地震第2輯、第63巻第3号、2011.2、pp.153-163
- 6) Graves, R. W. : Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-grid Finite Differences, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.86, 1996, pp.1091-1106.
- 7) 釜江克弘、入倉孝次郎、福地保長：地震のスケーリング側に基づいた大地震時の強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第430号、1991年、pp.1-9.
- 8) 地震調査研究推進本部：「長周期地震動予測地図」2012年試作版 付録2 全国1次地下構造モデル（暫定版）、2012年.
- 9) 平井敬、福和伸夫：グリーン関数の相反性を利用した長周期地震動作成システムの構築、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2分冊、2017年、pp.405-406.
- 10) 倉田和己、福和伸夫：仮想現実ソフトウェアと震動体感環境の融合による効果的な減災啓発ツールの開発、災害情報、No.14、2016.7、pp.83-96