

長周期地震動対策を促す 名古屋大学減災館での取り組み

名古屋大学 減災連携研究センター
センター長・教授 福和 伸夫

1. はじめに

南海トラフ地震が切迫する中、長周期地震動に対する高層建築物や免震建築物の対策が、喫緊の課題となっている。名古屋大学減災館には、長周期地震動対策を促すため様々な工夫を施している。何故、減災館で長周期地震動啓発を行うようになったのか、筆者と長周期地震動との関りを通して、解説してみる。

長周期地震動の問題は古くて新しい。筆者が長周期地震動を実際に体験したのは、1983年日本海中部地震(M7.7)、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2004年東海道沖地震(M7.4)、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の4度である。

日本海中部地震の揺れは、日比谷公園の脇に建つ28階建ての高層ビルの27階で体験した。徐々に揺れが増え、ブラインドが大きく揺れ続けた。遠く離れた青森沖の地震で東京のビルが大きく揺れることにひどく驚いた。当時は、新宿副都心の高層ビルが一通り建設を終えた時期である。地震動は短周期が卓越すると考えられ、長周期構造物である高層ビルは、地震に対して柳に風と振る舞うので安全だ、という考え方が主流だった。

当時、筆者は、短周期の揺れが問題となる原子力発電施設の耐震研究に従事していたため、長周期地震動への関心は低かった。しかし、地盤震動研究者を中心に関東平野の8秒前後のやや長周期地震動の問題が指摘されていた。1985年にはメキシコ・ミチョアカン地震で、震源から離れたメキシコシティで、堆積盆地による長周期地震動の増幅・伸長により高層建物が倒壊した。今にして思うと、長周期地震動について無関心だったことが、恥ずかしい。

長周期地震動に関心を持つようになったのは、1995年兵庫県南部地震である。建築物の減衰に関心を持っていた時期で、高層建物の低減衰が気になっていた。大阪の高層ビルが地震動の長周期の後揺れで共振した事実を知った。この地震では、深部地盤構造による震災の帯の生成や、断層直近のパルスの地震動が話題となり、強震動研究が大きく進展した。震災後、免震建物が急増し、構造評定に携わる中、多くの設計者が長周期地震動や、深部地盤の卓越周期を軽視している実態を知った。そこで、濃尾平野を対象に微動を測りまくり、深部地盤と長周期地震動の関係を明確にし、名古屋地域の強震動の評価を始めた。長周期の卓越した設計入力地震動として知られる三の丸地震動を策定したのもその一環である。

2000年鳥取県西部地震で2度目の長周期地震動を体験した。名古屋市内の8階建て建物の最上階で行っていた「建築物の減衰」の講習会(日本建築学会主催)の最中に、建物が大きく揺れた。ラーメン構造物の減衰の小ささを実感した。この地震では、震源から遠く離れた東京都内の高層ビルで、多くの人が屋外避難した。これをきっかけに、名古屋市内の地盤や建物に多数の地震計を設置し、揺れの観測を始めた。その中で、地盤と共振する純ラーメンの建物を見つけ共振の怖さを感じた。

この時期、筆者も参加した中央防災会議東海地震対策専門調査会で、大地震に対する長周期地震動問題が提起された。2003年十勝沖地震では、苫小牧の石油タンクでスロッシング火災が発生した。長周期地震動に関する多数のテレビ番組制作の手伝いなどをする中で、長周期地震動問題の啓発の必要性を感じ、「ぶるる」と称する振動実験教材や、長周期地震動の再現振動台などを開発した。これが名古屋大学減災館にある長周期地震動教材で

ある。

2004年東海道沖地震で、3度目の長周期地震動を自宅で体感した。深夜の地震だったので、高層ビルで揺れを体感したのはホテル宿泊客とタワーマンション住民だけだったが、体験証言から対策の必要性を再認識した。

こういった中、国の長周期地震動に関する研究プロジェクトや建築学会の長周期地震動対策などに携わった。東日本大震災の1週間前には、日本建築学会が「長周期地震動対策に関する日本建築学会の取り組み」と題した記者発表を行い、高層ビルの長周期地震動対策の必要性が訴えられた。

4度目の長周期地震動は、2011年東日本大震災のときに東京・青山にある23階建ての高層ビルの15階で体験した。当日は、日本建築センター主催の講習会を終日行っていた。午前中に長周期地震動について説明を終え、午後高層ビルの制振対策の必要性などを説明していた最中の揺れだった。高層ビル内で帰宅困難者となり、大都市の災害脆弱度を実感することになった。

震災後、取り組んだのが大阪府咲洲庁舎と戸建免震住宅の長周期地震動対策である。前者は、震源から770キロ離れた高層ビルが片振幅137cmで揺れた。地盤の卓越周期と建物の固有周期が近接した共振が原因だった。筆者も検討委員会のメンバーとして検討に加わった。後者は、震源から離れた小田原市内で大きく揺れた免震住宅の原因を検討した。ここでも地盤との共振が疑われた。

その後、中央防災会議での南海トラフ地震に対する長周期地震動の検討に加わった。国土交通省からは、長周期地震動を考慮した設計用入力地震動の考え方が公表された。まだ経験していない地震に対して、被害を受ける前に対策を講じた画期的な事である。同時期、大振幅の長周期・長時間地震動が予測される愛知県半田市庁舎の免震設計において、過大变位に対応するストップダンパーを設計者の方々と開発する機会を持った。

最後に記さなければならないのは、2016年熊本地震で、西原村役場の地震計で観測された大变位応答である。断層変位に伴う大振幅永久変位が含まれた記録で、長周期パルス地震動への対応が新たな課題となった。

長周期長時間地震動は、大規模地震の時に盆地状の大規模堆積平野で生成されやすい。規模の大きな地震は、周期の長い地震波を長時間にわたって放出する。長周期

の揺れは波長が長く、揺れが衰えにくいので遠くまで伝わる。とくに減衰の小さい表面波の影響が大きい。大都市が立地する大規模な堆積平野は盆地構造をしており、平野固有の長周期の揺れを増幅させ、盆地内に地震波を留め、揺れの継続時間を伸長させる。まさに、南海トラフ地震は、長周期長時間地震動が三大都市圏の高層建物や免震建物を直撃する。

それぞれの平野は、堆積層の厚さに応じた揺れやすい周期を持っている。一般に、関東平野では7～10秒、濃尾平野では3～4秒、大阪平野では4～6秒で揺れやすいと言われている。長周期パルスに対してもこれらの周期は重要となる。長周期地震動への対策は、地震動の卓越周期から建物の固有周期を隔離し、建物の減衰を大きくすることに尽きる。震源の破壊過程で定まる周期の特定は困難だが、地盤の周期は測定できるので、建物の周期を一致させないようにすることはできる。減衰の付加も制振装置により可能だ。

強い揺れを検知すると、高層ビルのエレベータは停止し、上下の移動が困難になる。停電すれば、エレベータの停止に加え、ライフラインが途絶し、事業継続や生活維持が困難となり、高層難民化する。非常用発電設備の設置や、上層階の家具・什器の固定は必須であり、食糧・水・携帯トイレや、階段を座って降ろすることができるイーバックチェアの準備などが必要である。また、災害対応部署や事業継続上重要な組織は下階に置くのが基本である。過去の地震では、高層階の揺れがトラウマになった人も多いと聞く。できれば、役員室も下階が望ましい。

災害後には、建物の継続使用の判断が必要となるが、高度技術者の不足で現地調査は困難になる。建物の継続使用の判断のために地震計を設置したい。

高層建物は、低減衰なので揺れが育つのに時間がかかる。このため、緊急地震速報や長周期地震動に関する情報が役に立つ。気象庁が新たに始めた長周期地震動階級の情報が有用である。今後、長周期地震動の緊急地震速報の導入が早期に行われることを期待する。

昨年、南海トラフ地震に対する直前予知は困難との見解が国から示され、昨年11月から、南海トラフ地震に関連する情報（臨時）の運用が始まった。今、中央防災会議の作業部会で臨時情報発令時の対応の在り方が議論さ

れている。三大都市圏には高層ビルが林立する。臨時情報が発せられたとき、高層ビルでは、いつ起きるか分からない地震を前に、エレベータの緊急停止による閉じ込めを回避する対応策を考える必要がある。高層ビルが林立する首都圏での対応が注目される。

2. 名古屋大学減災館

減災館は、名古屋大学における防災・減災研究と災害対策の推進、中部圏の防災・減災力の向上などを目的に、2014年3月に建設された。

減災館には、2002年に発足した大学の災害対策を担う「災害対策室」、2010年に発足した社会と連携して防災・減災研究を推進する「減災連携研究センター」、2017年に発足した中部圏の産官学民が連携した「あいち・なごや強靱化共創センター」が入居している。

1～2階は、社会の防災・減災活動を進めるため、展示・学習施設を備え一般に開放している。また、屋上には災害時の各種設備を備え、2階には全学の災害対策本部室もある。すなわち、減災館は、研究の拠点、備えの拠点、災害対応の拠点の3つの役割を担っている。

減災館は、名古屋大学東山キャンパスを縦断する四谷通りに面した地上4階＋屋上実験室1階のRC造基礎免震建物である。地盤改良の上、直接基礎を採用している。敷地の制約条件から平面形状は三角形に近く、ショートケーキ状の特徴的な外観となっている。

建築面積は731㎡、延床面積は2,898㎡である。建物屋上には、円形屋根の塔屋状実験室を、免震装置を介して設置しており、基礎免震層と合わせて上下2段の免震層

を持っている。敷地は北側が1層分低くなっており、免震層は北を除く3面を擁壁に囲まれている。北側の道路からは、免震層を直接見ることができ、免震・制振・耐震技術に関する展示ギャラリーになっている。

3. 減災館の免震システムと振動実験環境

減災館は、5600トンの建物を、3種類の免震装置で支えており、新たな免震・制振技術を導入しやすくするため、積層ゴム、直動転がり支承、オイルダンパーからなる弾性免震システムを採用した。免震周期は5.2秒とし、3秒弱の地盤卓越周期から隔離して、地盤との共振を避けている。等価減衰は30%程度、免震クリアランスは90cmで、通常の1.5倍の地震動や最大クラスの南海トラフ巨大地震に対しても無損傷となるように設計した。

建物屋上にある減災・体感実験室は重量410トンで、ゴム支承と直動転がり支承で支持している。通常はシヤキーで免震装置を固定しているが、実験時には解除する。ゴム支承の剛性を倍半分にすることで、周期を5秒強と4秒弱に変えられ、オンオフ切り替え型のオイルダンパーも設置している。これにより剛性や減衰を可変にした実験ができる。さらに、フィードバック制御可能なアクチュエータを設備しており、実験室を共振加力することができる(図-3)。

実験室内では、様々な長周期地震動用の啓発教材を開発中である。画像・音声とを揺れと同期して再現するバーチャルリアリティシステム(VR)、室内には、

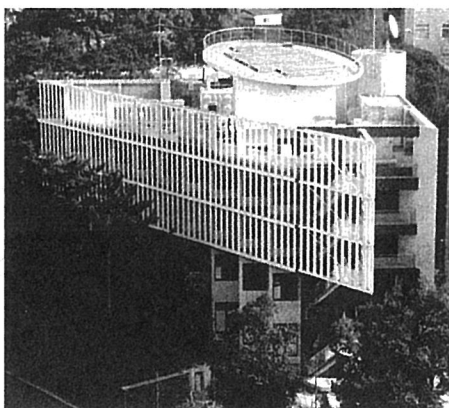


図-1 減災館南面の外観

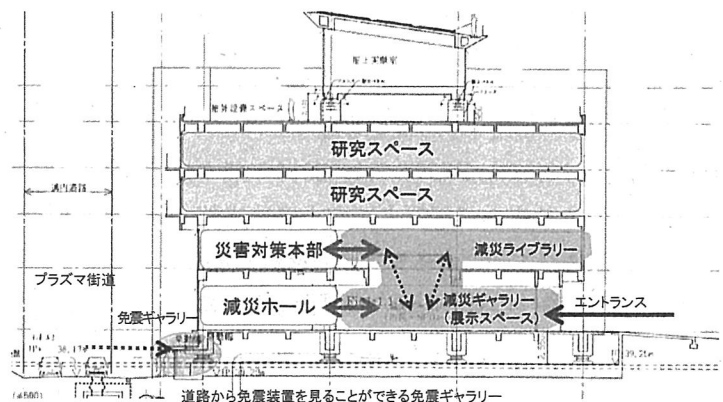


図-2 減災館の断面

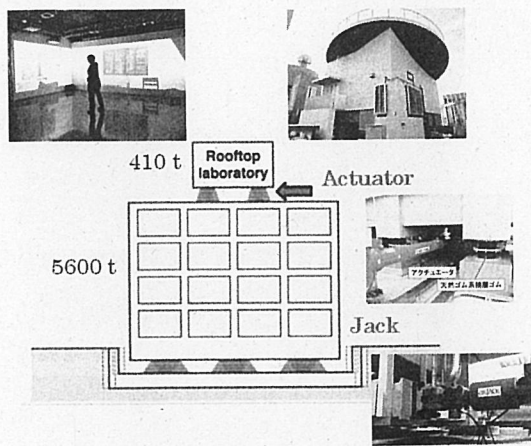


図-3 減災館の耐震実験環境とVR環境

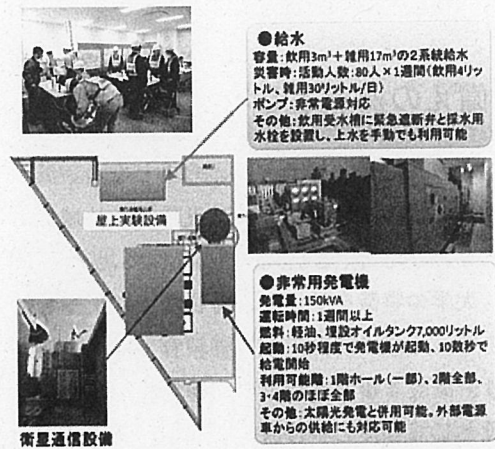


図-4 様々な災害対応設備と全学防災訓練

VUTONクローラで駆動する長周期大変位揺れ体感装置「パレットぶるる」、装置運動に同期した室内家具転倒画像をヘッドマウントディスプレイで揺れ・音声と共に体感する装置などである。地震時の心理実験や災害対応訓練も可能である。

屋上実験室の揺れを建物への起振力として利用すると、100Gal程度の加振で40トン程度の慣性力を生み出すことができる。弾性免震で初期剛性が小さいことから、この加振力で、5600トンの建物本体を5cm程度の振幅で揺らす強制加振実験ができる。

地下の免震層には、建物をグリップして15cm程度牽引できる引張ジャッキを3基設置してある。ジャッキを解放することで15cm程度の初期変位を与えた建物全体の自由振動実験ができる。

これらの加振装置に加え、建物には、様々な種類の地震計や、土圧計、変位計を設置しており、強震観測や微動観測、各種の振動実験の計測も可能な体制を整えている。このように、減災館は、建物そのものが多様な耐震実験フィールドを提供しており、下記のような利用を想定することができる。

- ① 通常時は弾性免震システムを有する免震建物
- ② TMD機能を有する免震建物（ダンパーオン）
- ③ AMD機能を有する免震建物（振動制御オン）
- ④ ジャッキ牽引による建物・屋上実験室を地盤・建物と見立てた自由振動実験
- ⑤ 屋上実験室を振動台として利用した振動実験
- ⑥ 実験室を起振機にした建物の強制加振実験

この環境を利用して、建物の振動挙動、建物や免震システムの経年変化、地震時土圧の分担性状、安価な振動

モニタリング手法、新たな免震・制振システム、災害時対応心理実験などの開発研究を進めている。

4. 災害時対応拠点としての減災館

減災館は、名古屋大学及び中部圏の災害対応の拠点としての機能も備えており、2階には名古屋大学の災害対策本部がある。大規模地震等の災害発生時には、災害対策本部を設置し、地震観測情報を始め種々の災害情報を収集しつつ、全学放送設備などを利用して的確な情報提供できるようにする。

災害対応拠点の機能を果たすため、高性能免震構造の採用に加え、図-4に示すように、1週間連続稼働できるディーゼル発電機や太陽光発電装置を屋上に設置しており、停電時にも十分な電力を確保できるようにしている。また、3m³の飲用水タンク、17m³の雑用水タンク、自治体衛星通信用パラボラアンテナや中部地方整備局と結ぶ長距離無線LANなども設備している。

さらに、排水槽、都市ガス・プロパンガス切換え型のガス空調、電源車と接続可能な電源盤などにも災害用の工夫を凝らしており、食料、寝具、各種装備品、医薬品なども十分に備蓄している。毎年、この環境を利用して、減災館を中心に全学防災訓練を実施している。

災害時には、1階の減災ホール・減災ギャラリーは地域の行政機関やメディアに、また、3～4階は全国から集まる研究者に開放し、災害対応に活用してもらう予定である。また、他地域で災害が発生した時には、被害情報の情報集約拠点としてのクリアリングハウスMeDICを減災館内に開設する予定である。

5. 備えの拠点としての減災館

平時の減災館は、備えのための場となる。減災館の1～2階には、手作りの防災・減災教材や地域資料が展示してあり、防災・減災を多面的に学べる場となっている。また、大学の特徴を活かし、多様なセミナーを毎日開催している。地域の防災・減災の教育・啓発の拠点になっており、開設4年で6万人の来館者を迎えた。大学の研究施設としては珍しい社会に開放された場であり、本年には、インバウンドの一環として、環境庁の観光ビジョン実現プログラム2018の施策「更なる公開・開放に向けた重点施設・インフラ」の対象施設に指定された。

また、建物各所に最新のGISや、BIM、VR、AR、MR、屋内測位技術、モニタリングシステムなどの様々なIT技術が組み込まれており、免震・制振技術の実物展示を含め、先端的建築技術を学ぶ場にもなっている。

(1) 屋外の展示

建物の周辺を歩くと、免震の原理を学ぶことができる。正面玄関から建物の東側を歩くと、免震建物ならではの建物と地盤がぶつからないようにする様々な工夫をみることができる。建物北側は、道路から免震装置を直接見ることができる免震ギャラリーで、夜はライトアップしている。天然ゴム系積層ゴム、直動転がり支承、オイルダンパー、基礎梁、変形に追従する配管の工夫や、地震計、変位計などの計測機器もみることができる。市民が道すがらオブジェのように見える免震装置を見学してくれている。ガラス面には、世界と日本の建築の歴史、世界の建物高さ比べ、耐震・免震・制振技術の変遷などの展示をしている。

また、建物周辺では、地中熱と熱交換して空調するアースチューブ、停電時に電源車が接続する電源盤、都市ガス途絶時の備蓄用LPガスボンベ、屋上の自治体衛星通信網のパラボラアンテナなどを見ることができ、災害対応拠点建物の実物展示の役割も果たしている。

前述のように、免震ギャラリーには、免震層をジャッキでけん引することで、実物の構造物を初期変位15cmの自由振動実験することができ、数百人の人が同時に長周期の揺れを体感できる。名古屋大学の建築・土木・機械系の学生は、講義の中で実際に長周期の揺れを体感する。

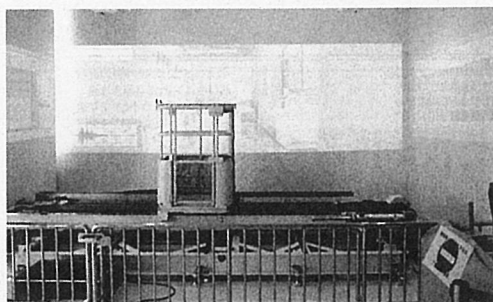
(2) 1階の展示

1階の減災ギャラリーや減災ホールには、防災・減災について学べる様々な展示がある。長周期地震動や高層建物・免震建物の揺れに関わるものだけでも、①振動装置と映像を組み合わせる長周期大変位地震動を体感するBiCURI、②3次元地形模型上に揺れの伝播を再現するプロジェクションマッピング、③地震発生や地震波伝播の仕組みを伝える模型、④名古屋都市圏を一望できる床面大型空中写真上に揺れの伝播を示し実振幅で地盤及び建物上の揺れの軌跡を投影するプロジェクションマッピング、⑤長周期の揺れを体感するのぼり綱、⑥堆積地盤や建物内での長周期の揺れの増幅を体感するせん断振動体感装置、⑦複数の周期の多連逆さ振子、⑧磁石とベアリングで作った高層ビルのせん断立体振動模型、⑨異なる地盤剛性と建物高さで共振を実感する地盤—建物模型、⑩2段振り子を用いた地盤—建物の共振メカニズムを学ぶ逆さ模型、⑪減災館の揺れ実験環境の再現模型、⑫建物の常時微動の立体的モニタリング画面、⑬気象庁の長周期地震動ビデオ、など様々な「ぶるる」教材がある(図-5)。また、建物そのものが揺れる減災館は、「実大ぶるる」とも言えるものである。このように、様々な年齢や専門性に応じて長周期地震動を体感しその発生メカニズムや対策法を伝える工夫をしており、これらを利用して、長周期地震動対策の報道番組が多数作られてきた。

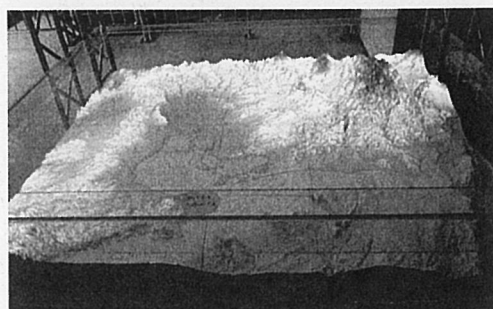
さらに、津波の高さが実感できる垂れ幕、建物や地盤が揺れ壊れる耐震実験模型「ピノキオぶるる」、液状化の発生仕組みが分かる模型、子供が工作をしながら耐震を学べるキッズコーナー、3.11の被災地の標識や壁新聞、歴史地震の年表と地域の地震遺跡、江戸時代の尾張国絵図、なまず絵などの浮世絵、南海トラフと活断層の3D地形図、天正地震のときの清洲城の液状化痕跡の剥ぎ取り地盤、最新の地震活動や活断層、液状化の再現計算、災害時に備えるための備蓄品など、基礎的なことから最先端の研究成果まで、様々な展示物が広く紹介されている。

振動実験教材「ぶるる」シリーズは日々開発・進化しており、防災イベント用に貸し出しも行っている。素朴な実験教材だが、地盤や建物の揺れや建物倒壊の仕方などを体感しながら学べることから多用されている。

また、濃尾地震、関東大震災、東南海地震、三河地震、



長周期振動台 BiCURI



3D地形模型のプロジェクトンマッピング



床面空中写真と津波垂れ幕、のぼり綱

図-5 減災館1階の展示物

伊勢湾台風、阪神淡路大震災、東日本大震災など、過去の災害の特別企画展も定期的に開催している。

減災ギャラリーは、毎週火曜日～土曜日（休日および不定期の休館日を除く）の午後1時から4時まで一般公開しており、センター所属の研究者が日替わりで話をするギャラリートークを行っている。ギャラリーでは、毎月1回、サイエンスカフェ方式の「げんさいカフェ」も開催している。減災ホールは、講義に加え、市民向けの「防災アカデミー」、学内向けの「減災学び舎」や防災訓練、産官学民連携による「あいち防災・減災カレッジ」、防災・減災に関する様々なシンポジウムなど、日々様々な講演・シンポジウムに利用されている。

(3) 2階の展示

2階には、地震などの災害資料や地域資料を閲覧でき

る「減災ライブラリー」がある。新聞記事や雑誌、ビデオのアーカイブ、東日本大震災や阪神淡路大震災に関する書籍、東海4県の自治体の市町村史やハザードマップ、地域防災計画、地盤データ、古地図、災害に関する書籍・報告書など、様々な資料が収集・展示されている。

大型のディスプレイで表示される「今昔マップ」では、昔の地図や標高図、空中写真、被害想定、今と昔の写真などを合わせて表示でき、自ら操作することで任意の場所の成り立ちや災害の危険性について知ることができる。また、過去の防災アカデミーの講演ビデオも視聴することができる。展示物の中には、高層建物内で起きることを絵本にした「高居家のものがたり」もある。

(4) 屋上の長周期地震動の体感

建物屋上の免震装置で支持された減災・体感実験室では、最大150cmの大振幅の揺れを室内で体感できる。周期5秒強もしくは4秒弱でアクチュエータを共振加力することで実験室を増幅加振する。実験室内では、立体的な映像・音響設備が震災時の状況を揺れと同期するバーチャルリアリティシステムがある。また、長周期大変位揺れ体感装置「パレットぶるる」も設備しており、装置運動に同期した室内家具転倒画像をヘッドマウントディスプレイで揺れ・音声と共に体感できる。気象庁の長周期地震動説明ビデオ (https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/choshuki_eq5.html) は、この環境を利用して作られた。他にも様々な訓練に使われている。

6. おわりに

減災館は、来館者が様々な展示や資料に触れることで、自然災害が発生することについて理解し、身近なところから防災・減災を考えてもらう「学び」や「気付き」の場であり、研究者、行政、企業、一般市民といった防災・減災に関わる様々な人をつなげる連携の場でもある。南海トラフ巨大地震を目前に控え、災害被害を少しでも減らすため、「災害被害を軽減する国民運動」の聖地としての役割を果たしていきたいと思っている。

減災館の最新情報については、ホームページをご覧ください (<http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>)。