

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防災・減災啓発ツールの開発

倉田和己¹・福和伸夫¹

¹名古屋大学 減災連携研究センター
(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

和文要約

個人の防災・減災対策において、住宅の耐震化および室内の安全性確保は極めて重要である。個人が様々な心理的ハードルを乗り越えてこれらを実行するために、耐震・安全化対策の必要性に関する多様な防災・減災啓発の取り組みが行われている。その代表的な方策は、地震の揺れの体感による意識啓発であるが、そこには「啓発効果を高めるために揺れのリアリティを向上させると、体感する行為自体が危険になり利用できなくなる」というジレンマが存在する。

本研究は、このような課題に対して新たなソフトウェア技術と既存のハードウェア技術の組み合わせでアプローチするものである。任意地点・任意建物の揺れを地震応答計算により算出しネットワーク配信することのできる分散相互運用サーバ技術を核に、三次元バーチャルリアリティの「揺れの可視化」映像と、震動体感ハードウェア環境を組み合わせた防災・減災啓発ツールを開発した。本研究の特色として、ソフトウェアとハードウェアの連携による揺れ体感の「安全性と現実感・対策の必要性に対する納得感の、高い次元での両立」があげられる。さらに仮想現実ソフトウェアを汎用的に構築しているため、既存の震動体感環境に容易に後付（アドオン）することが可能であり、全国に存在する啓発拠点の有効性向上のための技術として活用できる。

キーワード：震動体感環境、バーチャルリアリティ、地震応答計算、防災・減災行動

1. はじめに

個人の防災・減災行動において、住宅の耐震化および家具固定等の室内安全化は極めて重要な対策項目である。しかし、住宅の所有者（権利者）がこれらの対策の実践を決断する際に、様々な心理的ハードルが存在する。その例として、工事にまつわる信頼感や費用、実施を具体的に検討するための手間、施工後の見た目や利便性などの「対策そのものに関するコスト認知」や、いつどのような地震が起き、それにより果たして本当に被害が生ずるのかといった「リスク認知」が挙げられる。筆者らは、対策の主体である個人がこれらのハードルを一つ一つ超えるために、耐震化の重要性に関する「気づき」「理解」「学び」「納得」の各プロセスを促す耐震化教材群を開発してきた¹⁾。さらに防災・減災啓発の実践活動を通じ、地震時の揺れやそれに伴う被害の疑似体験が災害状況の具体的イメージを喚起させ、身体的・感覚的理解に基づく直感や納得感を与えると考え、震動体感環境の開発も行ってきた²⁾。

しかし、震動体感環境の開発を行う中で「矛盾」も明らかになってきた。既存の震動体感環境あるいは震動体感装置では、前述の心理的ハードルを超えるための心理的なインパクト、すなわち啓発者側から見た場合の啓発効果を高めるために、震動現象をリアルに再現することを目指す。ここで言うリアルとは、過去の被害地震における実在建物の強震観測記録、あるいは強震動予測に基づく応答計算結果を、できるだけ正確に再生する事である。しかし、防災・減災啓発ツールの適用対象を一般市民として考えた場合、リアリティを単純に追求することは、安全面で現実的ではない。極めて大振幅・大加速度な揺れを再現した場合、被験者に身体的危険性が及ぶことは避けられない。さらに、そのような揺れを再現する装置は大規模となり、設置や維持管理の面からも普及展開が難しい。次章で整理するように、より効果的な震動体感環境の開発と普及は、啓発の現場から必要とされているものの、啓発効果を追求することが啓発実施を妨げる方向に作用するという、根本的な矛盾を抱えている。

本研究は、このような課題に対して、近年急速に発展しているバーチャルリアリティ分野のソフトウェア技術を活用し、既存の震動体感環境の安全性を保ったまま、啓発効果を向上させるアプローチを提案するものである。

2. 研究計画

(1) 現状整理と本研究の課題設定

表-1に、既存の震動体感環境・体感装置の分類と特徴を整理する。大別すると、①起震車と呼ばれる車両と震動発生機構が一体化したもの、②大手ゼネコンや研究機関等が保有する大型震動実験設備、③各組織や施設で独自に開発した特定用途向けの特化型装置、の3種に分類できる。それぞれに長所短所があり、①は車両と一体型のため自走可能であり、運用性が高く自治体の防災・減災啓発活動を中心に最も普及しているが、加振機構が簡素なため揺れを正確に再現することは難しい。特に近年、啓発テーマとして重要視されている長周期地震動の再現はほぼ不可能である。②は強震動の再現性に優れ様々な対象を加振することができるものの、設置および維持管理のコストが高く、運用できる機関が限られる（例えば③）。従って啓発効果は高いと考えられるものの利用機会が限定される。また、安全面から製造物責任の観点で人の搭乗が制約されている場合が多い。③は近年開発が進んでおり、低コストなもの、可搬型のもの、長周期地震動や環境振動の再現を目的としたもの、など何らかの機能に特化している（例えば②や④、⑤）。これらの多くは特徴的な機構を有する上、特定用途に特化して設計されているため、基本的に生産数が極めて少ないと、啓発ツールとしての汎用性では①に劣ること等が普及面の課題として指摘できる。

以上の整理において、現状普及している①の起震車やそれに類する簡易な震動体感環境では、強震動の再現性が低いため、体感によって対策行動を取るような被験者は多くはないと考えられる。山極・竹村（1988）による小学生を対象とした調査結果では、起震車体験は防災意識・防災行動に長期的な効果が見られなかったとし^⑥、その原因について被験者が「模擬体験」であることを認識していたからであるとしている。すなわち、①は防災・減災効果について不十分な面があるといえる。その一方で、②の大型振動台を体験可能にしたり、③の特化型装置を汎用的に活用したりするために、機能を付加・強化する汎用的な開発はなされていない。

筆者らは、このような課題に対して、バーチャルリアリティのソフトウェア技術を活用した解決方法の提示が有効であると考えた。具体的には、ソフトウェアによって仮想現実の揺れを再現し、既存設備と連携した①の起震車の震動再現能力を補完する事と、②の大型振動台や③の特化型装置の利用機会を増やす事を目指す。すなわち本研究は既存の震動体感環境を最大限有効活用することを目指すものである。そのためには、開発するソフト

表-1 既存の震動体感環境（装置）の分類と特徴

	①起震車	②大型振動台	③特化型装置
特徴	自治体等で保有。多くの防災・減災啓発イベントで既に利用されている。	研究機関が保有。耐震実験や建築技術開発に利用されている。	各組織（施設）で独自に開発され一般的ではない物を指す。長周期型、可搬型等。
長所	多くの台数が世の中で活用されている実績があり、利用のハードルが低い。	強震動の再現能力に優れ、様々な対象を加振する事が可能。	特定の種類の強震動について、規模やコストの割に再現性が高い。
短所	正確な強震動の再現性に欠ける。特に長周期地震動。	本来実験用であり、設置費・維持管理費・操作の問題で一般的には啓発用途に使えない。	特徴的な機構を有し、特定用途に特化しているため、汎用性では起震車に劣る。

ウェアが既存の震動体感環境に容易に後付（アドオン）できる事が重要となる。

(2) 揺れ体感に基づく啓発効果に関する考察

前節で述べた本研究の目的を達成することで、どのような効果が期待されるかを整理する。すなわち、搖れ体感が及ぼす心理的なインパクトとそれに基づく防災・減災啓発効果について、既存研究を引用しながらまとめると共に、本研究の成果がどのように啓発に反映されるかを明らかにする。

元吉（2004）は、災害に関する心理学的研究について概括する中で、防災行動の規定因を説明する各種の行動モデルについて整理した。ここでは、専門家の研究成果に基づいたリスクコミュニケーションが重要であるとともに、リスクの認知や理解だけによって防災行動を促進することは困難であるとしている。搖れ体感を用いた啓発に関する心理学的概念としては「脅威アピール」がある。これは、深田（1988）の定義によれば、ある特定の説得話題について受け手を説得しようとする時に、脅威の危険性を強調して受け手を脅かすことによって、その脅威に対処するための対処行動の勧告に対する受け手の需要を促進させようと意図された、説得的コミュニケーションであるとされる。さらに、脅威アピールによる説得効果と媒介過程を説明する理論として、Rogers（1975, 1983）による「防衛動機理論」がある。元吉（2004）によれば、この理論は「認知的要素が多く複雑で、相互作用的な影響過程も明確になっていない」としてさらなる研究が必要であるものの、重要な行動モデルであるとしている。防衛動機理論における認知的媒介過程のモデルを図-1に示す。対処行動への動機付けは、適切な対処行動を取らない場合（以下、不適応反応）の認知的評価である「脅威評価」と、適切な対処行動を取る場合（以下、適応反応）の認知的評価である「対処評価」の比較

（以下、適応反応）の認知的評価である「対処評価」の比較

によって行われる。図中の①は不適応反応を後押しする要因で、内的報酬は耐震化を行わないことで得られる精神的報酬（面倒さからの開放）の認知が、外的報酬は費用や時間の節約、建物の外観や利便性の維持に関する認知が該当する。図中②は不適応反応を妨げる要因で、地震被害の深刻さやその発生可能性のリスク認知が該当する。一方、図中③は適応反応を後押しする要因で、反応効果性は耐震化や家具固定の有効性に関する認知が、自己効力は自分には耐震化を行う能力があるという認知が該当する。図中④は適応反応を妨げる要因で、対策を行う際の手間や費用が該当する。以上、①から④に含まれる7つの要因によって防衛動機が形成される。

以上より明らかなように、揺れ体感による脅威アピールは図中②に作用し、不適応反応を妨げることで、相対的に適応反応に対する動機が高まるようになるものである。ここで本研究における達成すべき目標を整理すると、地震被害の深刻さをより直感的に伝え、認知を高めるように揺れ体感に視覚・聴覚の感覚を加える事が考えられる（次節の達成目標①に該当）。また、通常代表的な地震における代表地点の揺れ、あるいは全くの模擬的な揺れで行われる体感を、自分が将来体験する可能性のある揺れの体感に置き換えることで、発生可能性に関する認知を高める効果があると考えられる（次節の達成目標②に該当）。

一方、防衛動機理論における各要因の相互作用効果を考慮することで、筆者らが啓発の実践を行う中で感じた揺れ体感に関する課題の考察を行うことが可能である。例えば、揺れの体感だけで本当に具体的な対策実践に繋がるのかという疑問がある。木村（1997）によれば、防衛動機理論において反応効果性や自己効力の認知が高いほど、深刻さや脆弱性の認知が防衛動機につながりやすいとされており、啓発にあたっては被験者にとって実行可能な耐震化対策行動を同時に提示することにより、揺れ体感は効果的な啓発ツールにもなりうると解釈する事ができる。また、揺れ体感のリアリティを高めることができ、「脅しすぎ」を引き起こし、かえって被験者の動機を失わせるのではないかという懸念もありうる。木村（1997）によれば、反応効果性や自己効力の認知が低い場合は、深刻さや脆弱性の認知が防衛動機を低下させる方向に作用するブーメラン効果をもたらすと考えられており、実行可能な対策行動の提示を伴わない揺れ体感において過度に心理的インパクトを高める事は、啓発においてマイナスの効果となりうると考えるべきである。

（3）ソフトウェアによって達成する目標の設定

前節までで検討した内容から、本研究で開発するソフトウェアが具備すべき機能を次の3点の達成目標として整理する。

a) 達成目標①：揺れに伴う周辺状況の可視化

揺れの体感に加えて視覚・聴覚の活用を目指し、室内

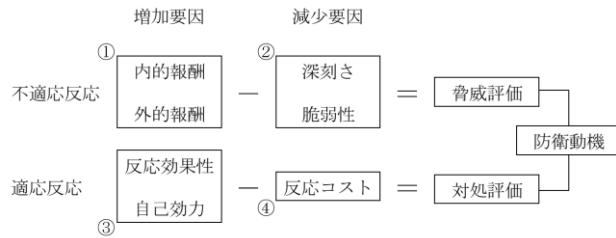


図-1 防衛動機理論における認知的媒介過程モデル
(Rogers (1983) に一部加筆)

家具の挙動や破壊現象の視覚化、およびそれらの転倒や破損に伴う音の再現を行う。身体に加え目と耳で揺れを感じることにより、具体的対策の必要性をイメージしやすくなる。既存の震動体感環境において、大規模な物は揺れに同期した映像の再生機能を有しているものもある。しかし、実写またはシミュレーション映像のいずれにおいても、事前に作成された動画を揺れに同期して再生するにとどまっている。本研究では、入力データに応じて都度リアルタイムの室内オブジェクト物理演算を行う。これにより、次の達成目標②と組み合わせて任意の揺れに対して周辺状況可視化が可能となる。

b) 達成目標②：個人の状況に応じた具体的揺れの再現

利用者個人の属性として、任意の地点（建物所在地）、建物種別（構造と高さ）、および想定する地震を設定し、条件に応じた揺れの再生を可能にする。自分が将来見舞われる揺れとして、当事者意識を得やすくなる。またバーチャル映像ならば、特に長周期地震動の大振幅を安全に実寸で再現することが出来る。利用者レベルにおいてパラメータを設定し、入力データを毎回生成した上で、達成目標①のような映像再生までを一貫してできるシステムはこれまでにない。

c) 達成目標③：地震の揺れ体感の利用機会拡大

目標①と②で実現した内容をノートパソコンやスマートフォンに実装すれば、いつでもどこでも利用可能な可搬型震動擬似体感環境となる。さらにそれを既存の震動体感環境と連動させることで、体感環境の利用機会拡大や、多人数・遠隔地における揺れ体感を実現することが出来る。仮想現実を提供するソフトウェアは近年多数開発されているが、揺れを体感させるものについてはまだ実用化されておらず、既存の震動体感環境にアドオンし連動できる汎用的なソフトウェアが開発されれば、多くの環境に適用し活用される可能性がある。

3. 地震応答計算を行う分散相互運用サーバ技術の開発

【本研究の達成目標②】を達成するためには、任意地点における、任意建物の揺れの応答計算を実行できる事が不可欠である。この計算プロセスに於いては、自治体等が実施する被害想定で整備されるメッシュごとの工学的基盤波形データと、表層地盤の増幅率を算出するための表層地盤モデルデータを用いる。これらのデータの取

扱いは、被害想定の計算メッシュサイズが細分化する中、データ容量・ファイル数および更新の観点からサーバサイドでデータベース化する事が合理的である。そこで図-2に示すようなサーバサイドシステムを構築した。バックエンドサーバとアプリケーションの間のやり取りは、位置情報を伴う通信であるため、地理空間情報の分散相互運用プロトコルである OGC-WMS (OGC : Open Geospatial Consortium) (WMS : Web Map Service) や OGC-WPS (WPS : Web Processing Service) を採用している。このため、同規格に対応する様々なアプリケーションでこの環境を利用できる。

アプリケーション側から見た計算のフローは次のとおりである。まず、計算実行地点の位置を決定するため、住所入力または地図表示を行う。この際、参考とするための地図情報（例として、揺れのハザードマップや地盤増幅率マップ）をバックエンドサーバで保持しており、アプリケーションからのリクエストに応じ画像形式で配信し、地図レイヤとして表示することが可能である。なお、GPS や WiFi 等の位置情報を利用して現在地を自動入力することも可能である。続いてアプリケーション側では、計算に必要な諸条件を入力する。具体的には、計算に用いる地震（被害想定種別）の選択、波形データのうち計算に用いるデータの区間（開始時間および終了時間）、建物の固有周期および減衰定数である。なお、固有周期や減衰定数は建築の専門家でなければ適切な数値が入力できないため、一般利用者向けには建物種別（木造 or 非木造）と階数（2、5、10、20、30、50 階）を選択すれば大まかなパラメータが設定されるようになっている。これらのパラメータを HTTP リクエストによってサーバサイドに送信すると、サーバサイドでは位置情報から該当するメッシュを検索し、工学的基盤波形と表層地盤モデルから地盤の重複反射解析を行って地表の応答加速度波形を得る⁷⁾。なお、この際の工学的基盤波形および表層地盤モデルは、今回の試作においてデータ提供の協力を得られた愛知県、静岡県、三重県の被害想定結果^{8)、9) および10)}を元に、データフォーマットを変換して統一的な取扱いが可能なようにしている。データ提供が得られれば、範囲を全国に拡大することは容易である。続いて、建物パラメータを元に一質点一自由度系地震応答解析により建物応答変位波形を得る。このデータを HTTP レスポンスとしてアプリケーションに返却し、アプリケーション側では得られたデータを用いて、家具応答シミュレーションである 3D オブジェクトモデルの加振が可能である。この仕組みの特徴としては、データ保持および応答計算ロジック部分（サーバサイド）と、可視化部分（アプリケーションサイド）を完全に分け、その間のやり取りを世界標準である OCG の仕様に基づいて実装している点にある。このため、次章以降述べる様々な環境においてサーバサイドの環境を共有することができ、結果的に低コスト、すなわち普及可能な形で目標②を達成するための準備を整える事が出来た。

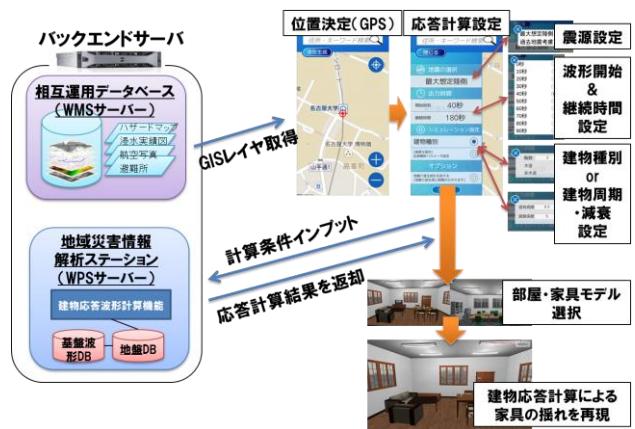


図-2 任意地点・任意建物の揺れデータ生成サーバシステム

4. 環境と目的に応じた防災・減災啓発ツールの構築

前章で整備した環境を活用した防災・減災啓発ツールの開発事例において、【本研究の達成目標①】および【目標③】を実現するための工夫を述べる。なお、以降で示す3種類のツールについては、利用場面が異なるものの入力データや表示媒体、ソフトウェア部分で共通点があり、それらを整理したものを表-2に示す。それぞれのツールの詳細については以降の各節で述べる。

表-3 本研究で試作する3種類のツールの整理

	適用先施設	入力データ	表示媒体・必要機材	ソフトウェア
4章 (1) 大規模震動実験設備	名古屋大学減災 館屋上実験室 (図-3)	・揺れデータ生成 サーバシステム (3章図-2) または ・システム内の任意 波形ファイル	・実験室内的壁面3面 ・プロジェクタ4台 ・専用PC（実験室震動制御システムと接続） ・ヘッドマウントディスプレイ ・高性能PC ・簡易型ヘッドマウントディスプレイ ・スマートフォン	高精細3D家具オブジェクトモデル (実際の振動実験を元にモデルをキャリブレート)
4章 (2) 可搬型震動体感システム	どこでも 利用可能	・振動台の上から撮 影した360度全方位 動画	・簡易型ヘッドマウントディスプレイ ・スマートフォン ・無線LANによって既存震動体感 環境からトリガーを受信	上記を簡略・軽量 化した3D家具オブ ジェクトモデル
4章 (3) 既存の震動体感環境にア ドオンする映像可視化シ ステム	既存の体感環境 ※ここでは名古 屋大学の振動台 (図-7)			360度全方位映像 再生ソフトウェア

(1) 大規模震動実験設備におけるソフトウェア実装

大規模震動実験設備における仮想現実ソフトウェアの実装事例として、名古屋大学減災館の屋上に位置する震動実験室を活用する。同実験室は設計重量約400トン、約10m×7mの長方形平面形状を有する鉄筋コンクリート造の構造物である(図-3)。2段積層ゴムと直動転がり支承からなる弾性免震で支持されており、南北・東西の2方向にそれぞれ設置されたアクチュエーターを用いて共振周期(5.2秒)で加力することにより、部屋全体を最大70cm、100gal程度の長周期地震動で加振することができる。この実験室内に、図-4に示すようなバーチャル室内家具応答シミュレーション3D映像環境を構築した。高輝度プロジェクターを用いて、実験室内の壁面3面に映像を投影し、それぞれが実験室の揺れに同期するものである。

この映像シミュレーション内において、リアルタイム物理演算によって家具の移動・転倒挙動を再現しており、任意の揺れと家具配置に対して映像を再生することが出来る。ここに、平井・福和(2011)の方法に基づく「地震の地鳴り」の音と、家具の転倒・衝突・破損判定に基づく効果音が自動再生され、映像と音声、揺れによるリアルな地震の揺れ体験が可能となっている。

この震動実験室は、利用にあたって数名の技術者と管理責任者が必要であり、加振時は建物全体に騒音と振動が発生するため、震動体感環境として利用するには事前準備が必要である。さらに機構の特性上、共振現象を利用して大振幅を得るため、共振周期以外の周期(特に短周期)の揺れに関しては振幅の面で再現に制約がある。実装した映像シミュレーションソフトウェアを活用することにより、映像による揺れと音によって加振機構の限界をカバーすることが可能になったほか、映像・音声のみの再生でも十分な心理的インパクトを有することが確認できた。例えば、長周期地震動の揺れ映像を体感した被験者の多くは、船酔いのような状態に陥る事が確認されている。

(2) 普及可能な可搬型震動体感システムの開発

前節で開発した室内映像シミュレーションソフトウェアにおいて、映像単体での利用による効果が予想以上に大きかったため、映像部分のみを取り出したソフトウェアと可搬型震動体感システムの開発を行った。

表示デバイス別に2種類を整備しており、1つはノートパソコンとヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)を用いた高精度版である(図-5)。近年の表示デバイスの進化により、HMDは広視野角かつ、高精度なヘッドトラッキングが可能となり、自然な立体映像を安価に視聴出来るものが市販されている。これをノートPCに内蔵したシミュレーションソフトウェアの映像出力先に指定することで、強い心理的インパクトを有する没入型の震動体感環境として利用可能であると考えられる。具体的



図-3 名古屋大学減災館屋上実験室の外観



図-4 屋上実験室室内の3Dバーチャル家具応答映像



図-5 HMDを用いた高精度仮想現実震動体感ソフトウェア

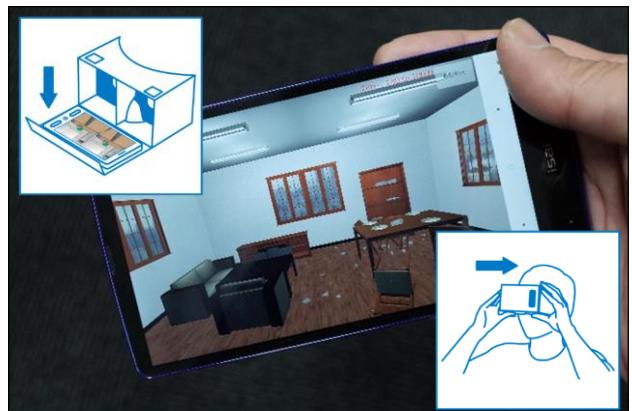


図-6 スマートフォンによる簡易震動体感ソフトウェア

(左上および右下は簡易HMDへの装着イメージ)

には、任意の揺れで部屋が動き家具が飛び回る中を、立体視で周囲を自由に見回す事が出来るものである。もう1つは、スマートフォンアプリケーションと組み立て式の簡易ペーパークラフト HMD¹¹⁾を組み合わせた普及版の仕組みである(図-6)。基本ソフトウェアをノートPC型タイプと共有しつつ、ソフトウェアおよび3Dモデル描画を軽量化することによってスマートフォンでの動作を可能にした。総務省による調査¹²⁾によれば、スマートフォンの利用率は20代で最も高く9割以上、全年代でも6割を超えており、このような急速に普及しているデバイスを表示装置として用いることで、ハードウェアの制約によらず多人数同時の利用が可能な発展性・普及可能性のある防災・減災啓発ツールである。

(3) 既存の震動体感環境にアドオンする仮想現実ソフトウェアの開発

前節で開発した可搬型震動体感システムを応用することによって、振動台に同期するバーチャル映像を、既存振動台に極力手を加えること無くアドオンし、仮想現実の揺れによって震動体感環境が有する機能の拡張・改善を行う。

このような着想に基づくバーチャル映像システムの実装先として、名古屋大学減災館が有する長周期・ロングストローク2軸振動台¹³⁾を活用した(図-7)。この振動台は、直交リニアガイドレール上を動く一人乗りのカゴに乗って様々な地震体感をすることが出来るものである。乗車定員は1名に限られるものの、独自機構によって長辺方向往復3m、最大化速度の2Gの揺れが再現できる高性能な振動台である。この振動台は、減災館の一般公開日¹³⁾に搭乗なしのデモンストレーションで利用されている。搭乗しての震動体感を行っていない理由は、第一に大振幅・大加速度の揺れを体感することの身体的危険性があり、第二に一日あたり平均50名以上の来館者が搭乗を希望した場合のオペレーションに耐えられないという運営上の制約にある。まさに、本研究の問題意識である「揺れのリアリティを向上させたが故に、体感の機会を失ったジレンマ」の事例であるといえる。また、デモンストレーションを見学する来館者が多数いるため、開発するソフトウェアの検証にも適している。

この課題を解決するために開発した試作ソフトウェアの動作画面を図-8に示す。振動台利用者へのヒアリングから得られた「実際に乗ってみたい」との要望を反映するために、これまでの3D家具モデリングによる映像シミュレーションだけでなく、振動台の搭乗スペースに360度全方位カメラを設置して記録し、搭乗者視点の映像をスマートフォンと簡易HMDにより仮想現実として立体視出来るようにした。利用時の様子を図-9に示す。利用者は振動台の揺れを見学しつつ、簡易HMDを装着すると振動台の揺れに同期した搭乗者視点の仮想現実動画映像を視聴することができる。ヘッドトラッキングに



図-7 長周期・ロングストロークの2軸振動台

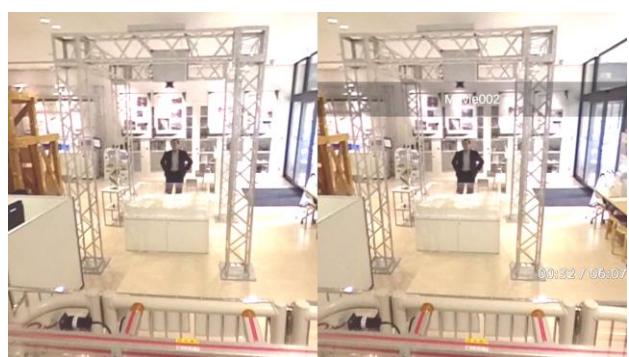


図-8 仮想現実ソフトウェアの画面表示内容
(振動台上から見た風景の仮想現実、立体視用の左右分割画像)



図-9 仮想現実ソフトウェア体感の様子

より顔の向きを変更すると動画もそれに応じてスムーズに切り替わり、360度全方位を自由に見回すことが出来る。なお図-9の写真中では左側に2軸振動台がある。このソフトウェアを用いることにより、次の3点において【達成目標③】の実現が期待される。

a) 揺れスケールの拡張

実際に体感する事が危険な大振幅の揺れについて、例えば振幅を半分にした上で、映像を100%スケールで再

現する事により、安全に体感することが可能である。また、性能面の限界で大振幅の揺れが再現できない場合には、映像でそれを補う事も可能である。問題点としては、視覚で感じる揺れと身体で感じる揺れの位相にずれがあると大きな違和感に繋がるため、両者の時刻合わせを正確に行う必要がある。この影響は、長周期の揺れよりも短周期の揺れで顕著に現れる。振動台の制御ソフトウェアに手を加えず高精度の同期を行うには、加速度センサーや変位センサーを振動台に設置し、そのデータを元に映像側をフィードバック制御することが考えられる。このフィードバック制御システムは現在開発中である。

b) 揺れ体験の多人数化

乗車人数の制限から揺れ体験者の人数を増やせない問題について一定の解決が見込まれる。具体的には、揺れている振動台を周辺から見る人々に対して一台ずつHMD（この場合は前節の簡易 HMD を想定）を配布し、肉眼で振動台の動きを観察するとともに、HMD で揺れの様子を疑似体験するものである。任意に2つの視点を切り替えることが可能になるため、単純に揺れを体感するよりも科学的な理解が促進することも期待される。なお、複数の HMD 間の同期は無線 LAN を利用すれば容易に可能であるため、同時利用台数の制限はソフトウェア上では特に無い。

c) 揺れ体験の遠隔化

複数HMD間の揺れ同期をLAN経由で行う技術は既に実現できたため、これを WAN に拡張すれば遠隔地に於いて揺れの同時疑似体験が可能になる。この機能の用途としては、振動台の揺れを用いた地震工学・建築工学の遠隔講義や、震動実験における遠隔地からの共同研究等が考えられる。ネットワークカメラによる映像配信と組み合わせれば、大型震動実験施設の活用機会拡大にも繋がる。

（4）開発したツールの有効性に関する検証

前節の仮想現実ソフトウェアの有効性について検証するため、減災館の来館者¹⁴⁾に対して3種類のツールを順に用いて長周期地震動の解説を行い、アンケートによって来館者の認知の変化を測定した。

比較に用いた3種類のツールの概要を示す。ツール①は図-3の減災館屋上実験室において、オフィス空間を模した長机やキャスター椅子、ホワイトボード等の配置を行い、周期5秒、最大片振幅70cmのサイン波で加振した際の様子をビデオで撮影したものである。ツール②は図-7の長周期・ロングストローク2軸振動台において、南海トラフ巨大地震における名古屋市中心部の仮想的な30階建て鉄骨造建物頂部の揺れ¹⁵⁾を入力データとし、人間が搭乗しない状態でデモンストレーションするものである。ツール③は、前節の仮想現実ソフトウェアをツール②にアドオンし、振動台に乗った視点からの映像を擬似体験できるものである。

アンケート内容は、長周期地震動の特徴が理解できたか、身の危険を感じるか、対策が必要と感じるか、対策を実施する意向があるか、の4項目からなる。ツール①を用いた解説の後、4項目それぞれを5段階評価（5：非常にそう思う～3：どちらでもない～1：全く思わない）で質問した。その後、同じ被験者に対してツール②を用いた解説を行い、4項目それぞれについて認知が改善¹⁶⁾したか否かを質問した。ツール③についても同様に、ツール②との相対比較において認知の改善を質問した。この他、基本属性として自宅が持ち家か賃貸か、自宅または職場が10階以上か否か、年齢を質問した。

表-3 アンケート結果概要 (N=99)

	ツール① 実験映像 (1~5の5段階) 平均値	ツール② 振動実演 (①との比較) 改善率	ツール③ 仮想現実 (②との比較) 改善率
揺れの特徴がよくわかった	3.62	92.6%	74.1%
身の危険があると思う	4.47	95.8%	73.1%
対策が必要だと思う	4.57	92.2%	71.6%
対策を実施したいと思う	3.60	85.7%	68.1%

表-3はアンケート結果の概要である。有効回答数は99で、回答者の約7割が60歳以上である。これは、減災館の来館者全体の傾向と一致する割合である。10階以上の建物に入居している回答者は約1割で、そのうち持ち家なのは1名のみであった。ツール①においては、身の危険性と対策の必要性に関して強く認識されているが、他の2項目については強い認識に至っていない。ツール①の映像ではキャスター付きの家具が大きく移動・衝突を繰り返しており、危険性については視覚的に表現されているものの、揺れの特徴を実感するには至らないと言える。また、結果的にあまり対策意向が喚起されていない事もわかる。ツール②の振動台実演では4項目全てにわたって9割前後の割合で認知が改善しており、例え振動台に搭乗しての実体験が出来なくとも、実際の揺れを再現することの意義が大きい事が確認される。その上でツール③を利用した場合の効果を考察すると、7割前後の割合で更に認知が改善しており、本研究で開発したツール③は一定の効果を有していると結論付けることが可能であろう。ただしこの結果には2通りの解釈が可能であり、一つはツール②の有効性が極めて高いために、それと組み合わせたツール③の有効性がより高くなったとする見方である。もう一つは、ツール②のような長周期地震動の再現性能を有する振動台は少数であり、一般的な起震車等の相対的に低性能な振動台と組み合わせた方が、ツール③の改善幅がより大きい可能性があるとする見方である。これについては、今後様々な環境に仮想現実ソフトウェアを導入し検証する必要がある。

続いて、被験者の基本属性別に分析を行い、有意差の

表-4 ツールの効果における年齢別の有意差の検定 (60歳未満N=27, 60歳以上N=65)

	ツール①震動実験映像 (1-5の5段階)				ツール②振動台実演 (①と比べて認知が改善したか)				ツール③仮想現実 (②と比べて認知が改善したか)					
	60歳未満		60歳以上		p値	60歳未満		60歳以上		p値	60歳未満		60歳以上	
	平均値	平均値	改善率	改善率		改善率	改善率	改善率	改善率		改善率	改善率	p値	
揺れの特徴がよくわかった	3.74	3.57	0.4828	88.9%		93.4%	0.5156	64.0%	77.4%		0.2475			
身の危険が有ると思う	4.63	4.39	0.1531	92.6%		96.8%	0.4545	61.5%	76.6%		0.1993			
対策が必要だと思う	4.44	4.59	0.4942	77.8%		98.3%	0.0203	57.7%	77.3%		0.1030			
対策を実施したいと思う	3.46	3.69	0.3727	74.1%		91.5%	0.0699	61.5%	71.4%		0.4145			

表-5 ツールの効果における入居建物階数別の有意差の検定 (10階以上N=9, 10階未満N=83)

	ツール①震動実験映像 (1-5の5段階)				ツール②振動台実演 (①と比べて認知が改善したか)				ツール③仮想現実 (②と比べて認知が改善したか)					
	10階以上		10階未満		p値	10階以上		10階未満		p値	10階以上		10階未満	
	平均値	平均値	改善率	改善率		改善率	改善率	改善率	改善率		改善率	改善率	p値	
揺れの特徴がよくわかった	3.33	3.65	0.4376	100.0%		91.3%	0.0073	62.5%	74.3%		0.5527			
身の危険が有ると思う	4.13	4.49	0.2649	100.0%		95.1%	0.0448	83.3%	70.1%		0.4811			
対策が必要だと思う	4.75	4.53	0.2742	100.0%		91.0%	0.0073	83.3%	68.8%		0.4391			
対策を実施したいと思う	3.78	3.60	0.6164	100.0%		84.6%	0.0004	66.7%	67.7%		0.9625			

表-6 ツールの効果における住宅所有形態別の有意差の検定 (持ち家N=80, 賃貸N=12)

	ツール①震動実験映像 (1-5の5段階)				ツール②振動台実演 (①と比べて認知が改善したか)				ツール③仮想現実 (②と比べて認知が改善したか)					
	持ち家		賃貸		p値	持ち家		賃貸		p値	持ち家		賃貸	
	平均値	平均値	改善率	改善率		改善率	改善率	改善率	改善率		改善率	改善率	p値	
揺れの特徴がよくわかった	3.74	3.17	0.1799	90.9%		100.0%	0.0073	75.4%	60.0%		0.3896			
身の危険が有ると思う	4.47	4.75	0.0870	94.9%		100.0%	0.0448	71.9%	70.0%		0.9103			
対策が必要だと思う	4.62	4.08	0.1924	94.6%		72.7%	0.1560	72.1%	60.0%		0.4979			
対策を実施したいと思う	3.66	3.25	0.2038	90.7%		54.5%	0.0466	71.2%	50.0%		0.2555			

検定を行った。基本属性の分類は60歳以上であるか否か、住まいまたは自宅が10階以上であるか否か、住まいが持ち家であるか否かの3項目である。**表-4**以降に結果を示す。なお、表中の網掛けがt検定による5%水準の有意差を示している。**表-4**からは、ツール②を用いた際の対策の必要性に関する認知について、年齢別で有意差を認めることが出来る。60歳以上においてなぜツール②の効果が高いかは、より詳細な調査を実施しなければ分からぬが、後述する建物階数と住宅所有形態においては年齢による偏りがなかったため、その他の要因を検討する必要がある。本研究で開発したツール③については新技術である仮想現実ソフトウェアの特性上、60歳以上に受け入れられにくいのではないかという懸念が有ったが、分析からはそのような結果は認められなかった。**表-5**からは、ツール②において入居建物が10階以上か否かで全項目の有意差が見られた一方、ツール③については有意差が無かった事が確認される。この理由にはツール②の利用を経て2群間の差が埋まってしまった可能性があり、ツール③単独で追加の検証が必要である。**表-6**においてもツール②における有意差が見られるものの、揺れの特徴と危険性については住宅所有形態が賃貸の群の改善率が大きく、対策の実施意向については持ち家の群の改善

率が大きいというように傾向がばらついた。揺れの特徴については、賃貸の群の被験者の方がツール①利用後の理解度がより低く、その後の改善の余地が大きかったことも一因として考えられる。対策の実施意向については、賃貸であることによる家具固定等の困難さや設備投資のインセンティブの無さが、阻害要因として働いている事が推測できる。またここでもツール③では有意差が生じなかつたため、その理由を明らかにするには**表-5**の結果と同様に追加の検証が必要である。

5.まとめと今後の課題

本研究の成果として、第2章で示した達成目標①～③のそれぞれについてまとめる。

【達成目標①：揺れに伴う周辺状況の可視化】については、3Dモデリングによるバーチャルリアリティソフトウェア技術を核に、家具の挙動やそれに伴う効果音を再生する技術を構築した。さらにその技術を、大型実験設備における壁面投影や、没入型の映像デバイス等様々な環境に実装し、それぞれの環境における仮想現実映像活用の利点について整理した。【達成目標②：個人状況に応じた具体的な揺れの再現】については、分散相互運用サーバ技術を基にした、任意地点・任意建物の応答波形生成

フレームワークを構築した。サーバサイド技術と、前述のバーチャルリアリティソフトウェア技術が対になることによって、データベース&演算部分と映像処理&表示部分を切り分けることができ、様々なデバイスへ向けた柔軟な開発や将来の高度化が可能になっている。【達成目標③：揺れ体感の利用機会拡大】は、開発したソフトウェア環境を可搬型の震動体感環境として利用したり、既存の振動台に組み合わせたりする実践と評価を行った。揺れ体感に関する安全性や利用に関する手間を改善するとともに、視点を切り替えることでより効果的な学びに繋がる可能性を指摘した。

今後の課題の一つは、防災・減災啓発ツールとしての効果のさらなる検証である。本研究では4章(4)において、4章(3)の仮想現実ソフトウェアを導入した場合の効果の比較を行ったが、ツールの有効性に関する絶対評価は行えていない。また、4章(1)および(2)のツールについても定量的な評価が未実施である。検証においては被験者の確保をはじめとした困難な点もあるが、例えばシステム動作ログの解析やオンラインアンケート機能の組み込みなど、デジタルツールであることの強みを活かした評価方法を検討している。

もう一つの課題は安全性の検証である。仮想現実における映像や音響が長期的にもたらす心理的・身体的影響の評価が、一般への普及にあたっては欠かせない。バーチャルリアリティ分野はコンテンツ、デバイスとも新しい技術であるため、これらはほぼ未検証である。今後の生理学等の分野における早急な検証が望まれる。

補注

- 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) 護雅史、福和伸夫、飛田潤：減災行動を誘導するための統合型地震応答体感環境の構築、日本建築学会技術報告集、第15巻、第30号、pp.605-610、2009.6
- 3) ゼネコンが有する体型型の振動台としては、清水建設の「E-Spider」等がある。(参照年月日：2016.0301)
http://www.shimz.co.jp/news_release/2015/2014053.html
- 4) 環境振動体感システムとしては、竹中工務店の「どこでも震動体感システム」や大林組の「ゆれジャッジ」がある。
- 5) 可搬型の地震動体感システムとしては、白山工業の「地震ザブトン」が代表的であり、製品化もされている。
- 6) 山極・竹村（1988）の考察において、起震車体験の啓発結果を完全に否定しているわけではない。地域の啓発実践における調査であるため厳密な実験条件の設定が行えず、全般的な否定はできないとしている。
- 7) 予め全地点の地表応答加速度波形を算出しておかなければ、データ容量の問題と、工学的基盤波形および表層地盤モデルのそれぞれを個別に更新することが可能であるようになるためである。
- 8) 愛知県：東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査（平成26年5月）
- 9) 静岡県：第4次地震被害想定・第二次報告（平成25年11月）
- 10) 三重県：地震被害想定調査結果（平成26年3月）
- 11) Google Cardboard (<https://www.google.com/get/cardboard/>) 等、複数種類の物が流通している。
- 12) 平成26年情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書
(http://www.soumu.go.jp/main_content/000357570.pdf)
- 13) 名古屋大学減災館は週5日、一日あたり3時間の無料一般公開を行っており、そこには市民、行政、民間企業、研究者など様々な属性の来館者が年間1万人ペースで訪れる。
- 14) 补足13の通り減災館の来館者は多様であるものの、防災減災に一定以上の関心があることは共通している。今回の検証はそのような母集団を対象としている点に留意が必要であるが、それを踏まえても既存ツールとの相対比較を行うことには意義がある。
- 15) 愛知県設計用入力地震動研究協議会による結果を用いた。
- 16) 解説に用いている長周期地震動の揺れはいずれも甚大な被害を伴うスケールである。そのため、より危険性や切迫感を感じるような認知の変化を「改善」として扱っている。

参考文献

- 木村堅一 (1997), 脅威アピールにおける防護動機理論研究の検討 : 実験社会心理学研究, Vol.37, No.1, pp85-96
- 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, pp.153-163, 2011.2
- 深田博己 (1988), 説得と態度変容 : 恐怖喚起コミュニケーション研究, 北大路書房
- 元吉 忠寛 (2004), 災害に関する心理学的研究の展望 : 防災行動の規定因を中心として, 名古屋大学大学院教育発達科学研究科紀要. 心理発達科学 51, 9-33
- 山極勇一郎・竹村研一 (1988), 起震車による地震の模擬体験が児童の防災意識・防災行動に及ぼす影響, 筑波大学心理学研究 10, 103-117.
- Ronald W. Rogers (1975), *A protection motivation theory of fear appeals and attitude change.*, Journal of Psychology, Volume 91, 93-114
- Ronald W. Rogers (1983), *Protection motivation and self-efficacy: A revised theory of fear appeals and attitude change*, Journal of Experimental Social Psychology, Volume 19, 469-479
- OGC Web Map Service (参照年月日 : 2015.11.17) ,
<http://www.opengeospatial.org/standards/wms/>.
- OGC Web Processing Service (参照年月日 : 2015.11.17) ,
<http://www.opengeospatial.org/standards/wps/>.

(原稿受付 2015.12.30)
(登載決定 2016.3.27)

Development of disaster reduction awareness-raising tool by combining virtual reality software with seismic experience environment

Kazumi KURATA¹ • Nobuo FUKUWA¹

¹Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ.
(〒464-8601 Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-City Aichi, Japan)

ABSTRACT

In the disaster prevention and mitigation measures of individuals, seismic reinforcement and safety of the room are very important. In order to make the individuals overcome various psychological hurdles to perform these measures, various efforts for the necessity of the measures are carried out. Their typical framework is a conscious awareness by the experience of shaking of an earthquake; however, there is a fundamental dilemma that the more enhancing the reality of the shaking to enhance the "awareness effect," the more dangerous the conduct itself to experience the shaking of the earthquake.

The present study approaches such a problem by combining the development of software technology with the existing hardware technology. We have developed a disaster reduction awareness-raising tool by combining the "visualized shaking" 3D images of virtual reality with seismic experience hardware environment by making a distributed interoperation server capable of calculating the seismic response at any point of any building and delivering it via network as a key technology. As a feature of the present study, it can accomplish both "shaking experience with safety and reality/persuasiveness at a higher level" by the combination of software and hardware. Furthermore, because the virtual reality software is constructed for general purposes, it can be easily add-on into the existing seismic sensory environment, enabling to utilize it as an effective technology for improving the effectiveness of disaster mitigation centers across the country.

Keywords : Seismic Experience Environment, Virtual Reality, Earthquake Response Calculation, Disaster Mitigation Activities