

地震ゆれ体感システムによる顧客との合意形成手法の開発

株式会社竹中工務店 米田春美、浜辺千佐子、北野信吾、大石潤
池田周英、濱口弘樹、吉澤睦博、山本雅史

1. はじめに

2011年東日本大震災では広範囲に亘って強い揺れが発生し、首都圏でも最大震度6強を観測した。首都圏の建物においては、構造被害は概ね軽微であり、建築構造の専門家は構造体の安全性は確保されたと判断した。一方、天井の落下をはじめとする非構造部材の損傷、家具・什器の転倒・大移動、高層建物における長時間の揺れに対する恐怖感などにより、社会一般の人々は建物内を不安だと感じた。このように、専門家の考える建物の耐震「安全性」と一般の人々の望む地震時の建物の「安心感」に大きな乖離があることが改めて浮き彫りとなった。そこで、地震の揺れによる家具挙動のシミュレーションをCG動画で可視化し、地震時の室内挙動を含めた建物の耐震性能を建築主に提示するツール「TAFT® (Takenaka Furniture Teller)」(図1)を2014年に開発した。TAFT®は建物や地震の条件を入力・選択する簡単な操作で、構造の専門知識が無くても耐震性能による室内の揺れ方の違いが一目瞭然で理解できるものである。近年のVR(Virtual Reality; 仮想現実)映像技術の飛躍的な向上、現業での3DCG活用に対応すべく、TAFT®にVR技術を取り入れて大幅な機能拡張を行い、さらにはVR映像と振動体感装置を組み合わせることで、より没入感のあるゆれ体感システムを実現した。これらの一連の開発について報告する。

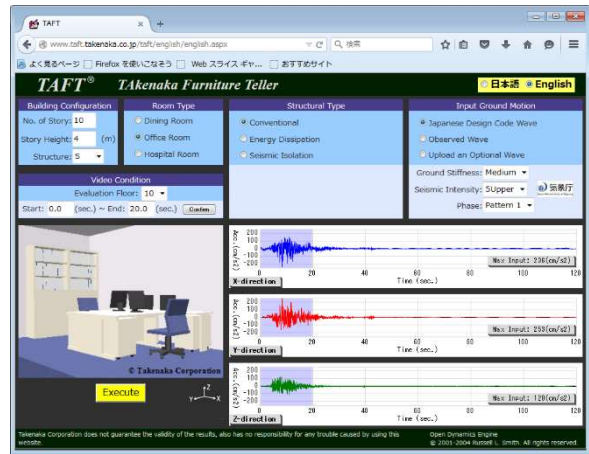


図1 TAFT®web アプリ

2. 耐震性能の合意形成における課題

建築主と構造設計者が建物の耐震性能について相互理解を図り、合意を得るために、図2に示すような耐震性能グレードの概念図を用いることがある。このような図に加えて、設計者は建物モデルの地震応答解析による応答加速度や最大層間変形角、保有水平耐力比などの専門的な指標を用い、過去の被害事例の写真や振動台実験の映像(図3)を示す等で、建築主に建物の耐震性能を説明してきた。しかし、これらの説明は実感に結び付きづらいものであり、建築主が地震時の建物内部の状況を具体的に把握するのは困難である。

建物の耐震性能の違いを体感する取り組みとしては、これまで振動台や地震体験車等による体験施設の事例(例えば 2),3)がある。これらは実際の地震と同等の体験ができる一方で、施設の整備とその運

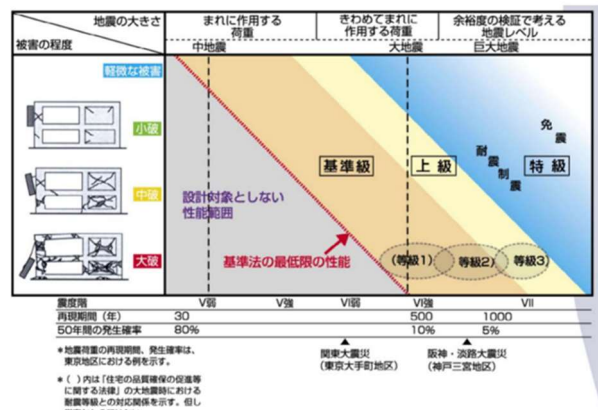


図2 建物の耐震性能グレード概念図¹⁾



図3 振動台実験の映像

用コストが高額になる上、体感者および周辺環境に対する厳しい安全管理が必要となること、さらに施設のある場所への移動が必要等の制限が発生することも課題であった。

3. TAFT®の開発

3.1 TAFT®web ツールの概要と課題

この状況を改善するため、地震の揺れによる家具挙動のシミュレーションを CG 動画で可視化し、一般の人々がより分かりやすく地震の揺れのイメージを共有するツール TAFT®を 2014 年に構築した。家具類の形状、重量、重心位置、摩擦係数や反発係数などの物性値を設定し、過去に実施した居室の振動台実験結果⁴⁾と比較した(図 4)。家具転倒のタイミング等が概ね再現され、シミュレーション精度を検証している。任意の地震波でシミュレーション可能であり、例えば設計中の建物について、耐震、制振、免震といった構造形式の違いによる地震時の室内状況の比較を容易に PC 上で確認し、建築主に示すことも可能である(図 5)。同様のことを、振動台施設等で行うことと比較して、労力や費用面などのメリットは大きい。建物の耐震性能に関する社会への啓発活動の面から、web アプリとして一般に公開しており、国内外の大学での免震建物の講義にも利用されてきた。

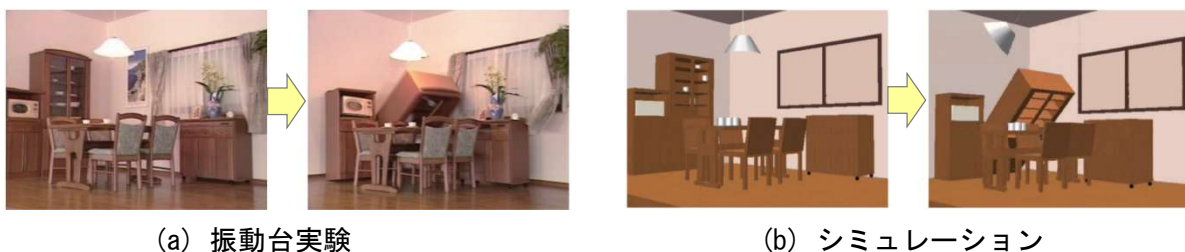


図 4 過去の実験動画による検証



図 5 耐震、制振、免震の比較動画

TAFT®はユーザーが設定した建物や地震の条件で計算できるリアルタイム演算方式を採用しており、体験者のニーズに応じた動画作成が可能である。しかしそのために計算・動画作成に要する時間の関係から、部屋の大きさや家具の種類や個数が限定されていた。大地震時にも医療活動の継続の求められる病院施設の、特に手術室のような特殊な機器のモデル化への対応が難しかった。また、動画を見る視点が固定されており、利用者が視点を移動して動画を見るができないなど、機能に制限があった。

近年、BIM (Building Information Modeling) や VR 等のリアルな 3 次元 CG が設計や生産の現場でも活用されるようになり、建築主との合意形成の場においてもよりリアルで没入感のあるプレゼンテーションの需要が高まってきた。TAFT®においても、動画作成機能の強化が課題として上がってきた。

3.2 TAFT®のシミュレーション動画の VR 映像化

TAFT®で利用していた物理エンジン ODE (Open Dynamics Engine)⁵⁾および付属の描画ソフトでは、高画質な映像の作成と映像システムへの投影に対応していないため、開発環境を変更する必要がある

た。物理計算、VR 可視化が一体となったゲーム開発プラットフォームの導入を検討し、いくつかのゲーム開発プラットフォームの中から、開発技術者が多く、アプリへの展開が容易な Unity⁶⁾を採用した。まずは、TAFT[®]のシミュレーションで得られた家具挙動を Unity により VR 映像化し、作成した VR アニメーションをドーム型シミュレータに表示した(図 6,7)。地震時の室内に居る人間の視点を考慮した映像⁷⁾とすることで体感を向上させ、没入感の高い地震体感ツールとして活用した。2011 年の東日本大震災時の東京都内の免震建物の地震観測記録を基に、免震建物と耐震建物のそれぞれの室内状況をシミュレーションし、同じ地震が来た想定での室内状況の違いを表現した(図 8)。本開発において、BIM モデルから自由な家具形状の取り込みや、空間内の自由な視点移動を実現した。

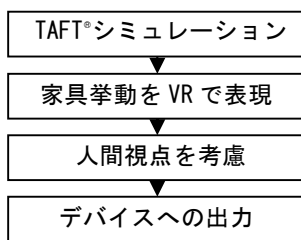
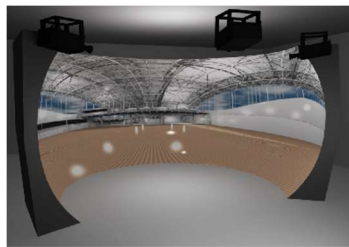
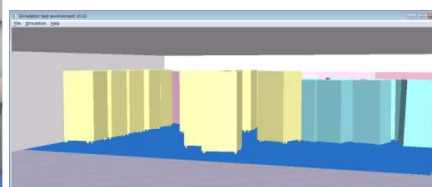


図 6 ドーム型シミュレータ 図 7 VR 映像作成手順 図 8 マンション VR アニメーション

3.3 家具挙動のリアルタイムシミュレーション

次に、Unity に搭載されている物理エンジン PhysX⁸⁾を利用し、VR 空間内でリアルタイムシミュレーションが可能なコンテンツを作成した。従来利用していた ODE と同様、各家具類に形状、重量および重心位置などの物性値を設定するが、PhysX では摩擦係数、反発係数は要素間ではなく、各要素で与えられるため、組み合わせ関数を設定する必要がある⁹⁾。PhysX は汎用の商業エンジンで詳細は公開されていない部分もあるため、医薬系研究施設のラックを対象に、PhysX と ODE で同様のモデル化を行い、特性の違いについて比較検証を行った(図 9)。その結果、ラック類の転倒状況が同程度であることを確認した。同様にリアルタイムシミュレーションの可能な手術室コンテンツを増強し、无影灯のような複雑な形状の機器類のモデル化も実現した(図 10)。



(a) PhysX (b) ODE

図 9 物理エンジンの比較検証



図 10 手術室コンテンツ

3.4 振動体感ツールの開発

さらなる体感向上を目指し、振動デバイスと VR 映像を組み合わせた 2 種類の体感向上システムを開発した。ひとつは可搬性のある直径 3m の円筒型スクリーンとその映像に連動して振動する振動体感椅子から構成される(図 11)。振動体感椅子としては本体の移動量が $\pm 4.5\text{cm}$ の並進 3 軸と、 $\pm 8.5\sim 10^\circ$ の回転 3 軸からなる 6 軸モーションベースを用いた。椅子の回転と重力加速度を利用し¹⁰⁾、体験者には数十 cm 動いているような体感が得られるものである。Unity で開発可能な汎用性の高いゲーム用のモーションベースを採用したことで開発コストを大幅に抑えて実現した。円筒型スクリーンは折りたたんで持

ち運ぶことができ、椅子も宅配便で運搬可能である。もうひとつは、さらに可搬性を高めた HMD (ヘッドマウントディスプレイ) と手で振動を感じるハンドデバイスによる体感システムである (図 12)。手は振動感覚の感度が高いことで知られており¹¹⁾、手から伝わる振動により、体全体が揺れている感覚が得られ、HMD の視覚遮断の利用により体感を向上させている。これにより、全身に振動被ばくを与えずに安全に体感が可能である。また、設営が容易で、よりコンパクトであるため、どこでも体感が可能となった。これら 2 つの体感向上システムは、没入感の高い VR 映像に加え、可搬性があり場所を限定しない点、大きな設置スペースを必要としない点、安全管理やメンテナンスが容易な点、を特徴としている。



図 11 体感向上システム 1



図 12 体感向上システム 2

3.5. 高画質化した VR 版新 TAFT®アプリ

これまで作成してきた VR コンテンツを活用し、VR 版の新 TAFT®web アプリを開発した (図 13)。通常 VR 映像を提供するためには GPU を搭載した PC が必要であるが、webGL (web 上でグラフィックを高速に描画する手法) を採用したことにより、GPU を搭載していない通常のサーバーで稼働することが可能である。従来と比較して、画質が格段に向上し、空間内の移動も可能で、表示する部屋の範囲は広く、家具類の数も増えたにも拘わらず、OA 用のノート PC でも、計算・表示のスピードは従来と同等で VR 空間を再現可能である。また、web アプリ以上に動作が速く、オフラインで利用可能なインハウスの iPad アプリへの拡張も容易に行うことができた。これらのアプリの利用により、建築主との打合せの場で免震や制振技術の適用効果を提示することが可能である。部屋はオフィス、マンション、手術室の 3 種類から選択可能であり、従来と同様に、同時に 3 つまでの条件を一覧して比較して表示できる。

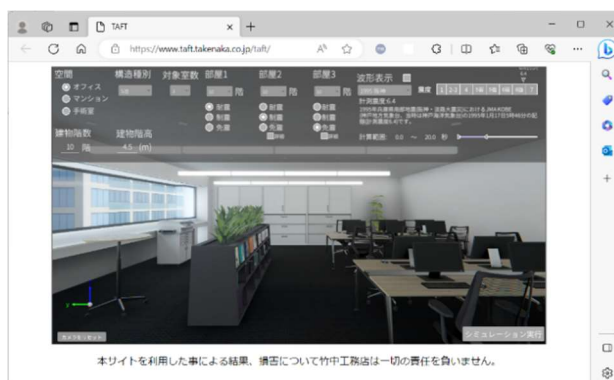
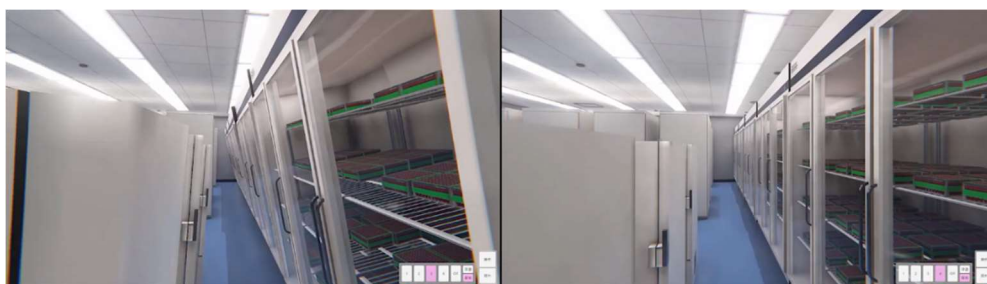


図 13 VR 版新 TAFT® web アプリ

4. 適用例および展開

前述した医薬系研究施設において免震性能の提示に適用した事例を示す (図 14)。設計段階において、施工後の室内環境をモデル化し、シミュレーションを行った。非免震と比較して、免震技術による機器転倒の低減効果を確認することができた。さらに、大地震時と比較すると、中小地震時は顕著には免震効果が実感できないことも事前に了承を得て、合意形成に至った。



(a) 非免震 (b) 免震

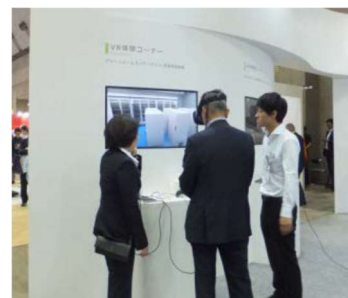
図 14 ツールを用いた非免震と免震の比較



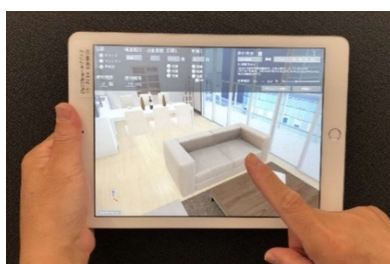
(a) web アプリ



(a) 防災フェア



(b) 展示会



(b) iPad アプリ



(c) 作業所見学会



(d) 常設展示

図 15 アプリ稼働状況

図 16 社外デモ事例

開発した新 TAFT®web アプリおよび社内用 iPad アプリは当社の構造設計者を中心に提案資料および建築主との合意形成の場で活用されている(図 15)。また、建築主の要望に応じ、家具の転倒防止対策の有無の違い等のシミュレーションの対応等も行っている。なお、新 TAFT®web アプリは下記のサイトで公開しており、誰でも無料で利用可能である。

新 TAFT®HP:<https://www.takenaka.co.jp/solution/needs/earthquake/service49/index.html>

新 TAFT®web アプリ:<https://www.taft.takenaka.co.jp/taft>

VR 映像による地震体感および振動デバイスと組み合わせた地震体感については、様々な展示会や防災イベントで実施してきた(図 16)。また、VR 映像と振動デバイスによる体感向上システムは技術研究所の見学コースに常設展示されており、見学者の振動体験に活用されている。

5. おわりに

地震の揺れによる家具挙動のシミュレーションを CG 動画で可視化するツール TAFT®に VR 技術を取り入れ、様々な地震時のゆれ体感システムによる耐震性能の合意形成手法を開発した。リアルで没入感の高い地震体感ツール、VR 映像と振動デバイスを組み合わせた体感向上システムを構築し、VR 映像を活用した web アプリの高画質化、アプリの web 公開、社内用 iPad アプリの作成により、複数手段

への本ツールへのアクセスを可能にした。建物の耐震性能を分かりやすく説明するための補助ツールとして、当社設計者を中心に、高画質化して新しくなった「TAFT®」を設計の初期段階で活用している。今後は、個別の建物へのカスタマイズ化を視野にさらなる BIM 連携や、地震後の機能維持の性能を評価する設計ツールとしての展開活用を目指す。

【参考文献】

- 1) 一般社団法人 日本建築構造技術者協会:JSCA 性能メニュー 2007 年
- 2) 太田雅己他:ウェアラブルバイタルセンサを用いた地震動に対する安心の定量化,その 1 耐震・免震における人々の心拍測定方法,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.923-924, 2018 年
- 3) 畠山祐季他:ヴァーチャルリアリティ(VR)を用いた地震体験システムにおける地震動体感の予備的評価,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.173-174, 2018 年
- 4) 島野幸弘, 浜口弘樹, 椿英顯, 田中利幸, 北原昭男, 鈴木祥之:建物内什器類の地震時挙動に関する実験的研究:(その 1)地震波加振に対する免震建物内什器類の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.133-134, 2000 年
- 5) ODE:Open Dynamics Engine 公式 HP, <http://ode.org/> (2023.9.1 アクセス)
- 6) Unity:Unity 公式 HP, <https://unity.com/ja> (2023.9.1 アクセス)
- 7) 米田春美他:人の視点を考慮した地震揺れ感覚に関する検討,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.567-568, 2018 年
- 8) Unity: Unity User Manual 2022.3 (LTS)/ Physics/ Built-in 3D Physics/ Collision/ Physic Material component reference, <https://docs.unity3d.com/Manual/class-PhysicMaterial.html> (2023.9.1 アクセス)
- 9) NVIDIA: NVIDIA PhysX System Software, <https://www.nvidia.com/ja-jp/drivers/physx/physx-9-21-0713-driver/> (2023.9.1 アクセス)
- 10) 三木一生:ドライビングシミュレータにおける加速度感覚模擬技術, 日本ロボット学会誌, Vol.10 , No.7, pp.878-884, 1992 年
- 11) 伊藤謙治, 桑野園子, 小松原明哲:人間工学ハンドブック, 2012 年, 朝倉書店