

振動台実験と3D表現ソフトウェアに基づく地震時室内被害状況シミュレーションのリアリティ向上 Improvement of the Reality of the Simulation of Damage Situation Room During an Earthquake Based on Shaking Table Test and 3D Representation Software

2. 構造 -2. 振動

Virtual Reality
シミュレーション

家具
剛体

振動実験
室内安全化

正会員	○ 松下 卓矢*1	MATSUSHITA Takuya
正会員	倉田 和己*2	KURATA Kazumi
正会員	飛田 潤 *3	TOBITA Jun
正会員	護 雅史*4	MORI Masafumi
正会員	福和 伸夫*5	FUKUWA Nobuo

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、長周期成分を多く含んだ継続時間の長い揺れを受けた高層建物の上層部は非常に大きな揺れとなり、滑りやすい家具は大きく移動し、背の高い家具が転倒するなどの被害が見られた。南海トラフ巨大地震¹⁾においても同じような地震が発生することは予想されており、高層建物における室内安全化は負傷防止というだけでなく、救急対応力確保のためにも重要であると考えられる。

その一方で、家具固定を実施している家庭、企業などは年々増加傾向にあるものの、全体で見ると1/4程度に留まっている²⁾。図1の東京都消防庁による「家具類の転倒・落下に係るアンケート調査結果」³⁾によると、家具転倒対策を実施しない主な理由としては、家具転倒による被害リスクを軽視しているということが明らかになっている。そのため、室内安全化を推進するためには、市民一人ひとりの意識を高め、行動を促す必要があり、視覚に訴えることで対策の必要性を実感できるような仕組みの開発が必要であるといえる。

2. 既往の研究と本研究の目的

これまで倉田⁴⁾や鶴田⁵⁾によってE-learningやぶるるシリーズのような防災アプリケーションや家具転倒実験の映像がWeb上に公開されている⁶⁾。本研究では先行研究に習い、一般の人が地震時の家具転倒のリスクを分かりやすく理解できるツールの作成を目指す。

被験者一人ひとりの状況を反映し、なおかつ対策後の安全性を視覚化するためには、シミュレーション技術を用いたVirtual Realityによる可視化が効果的であると考えられる。そこで、本研究では、実大振動台実験⁷⁾で得られた家具や建物の観測データを元に、剛体の動的挙動解析を組み合

わせたシミュレーション技術による地震時の室内状況の可視化を行う。本手法のフローチャートを図2に示す。

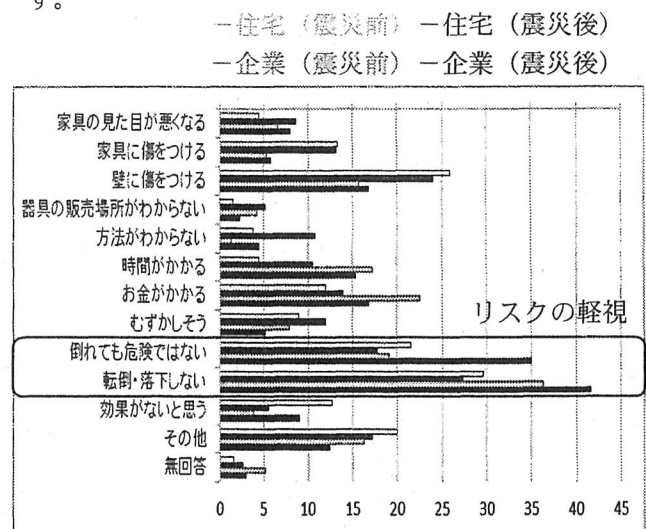


図1 家具転倒策を実施しない理由³⁾

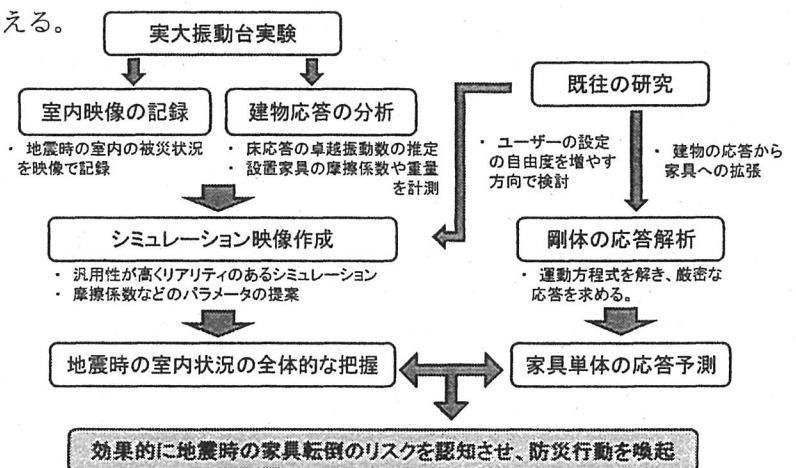


図2 本手法のフローチャート

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生
*2 名古屋大学減災連携研究センター 助教
*3 名古屋大学災害対策室 教授・工博
*4 名古屋大学減災連携研究センター 准教授・博士(工学)
*5 名古屋大学減災連携研究センター 教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ.
Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

3. 汎用性の大きいシミュレーションツールの作成

3.1 シミュレーション技術の現状

現在の家具転倒のシミュレーションでは、Springhead⁸⁾が多く用いられており、正月ら⁹⁾や孫ら⁷⁾がこれを用いて研究を行なっている。Springhead は精密な動摩擦係数、静摩擦係数の計算ができるものの、物体の物性値として、慣性テンソルや垂直と水平のバネ・ダンパ係数など、専門家にとってもやや難解なパラメータの設定を行わなければならない。また、シミュレーション映像も淡白な剛体モデルが表示されるのみなので、啓発用に普及させていくためにはリアリティに欠け、扱いづらい。

3.2 新たなシミュレーション手法の概要

本研究では、よりリアリティのあるシミュレーションを行うため、ゲーム開発などでよく用いられる「Unity」¹⁰⁾というソフトを使用した。Unity は「PhysX」という物理演算エンジンを搭載しており、質量、寸法、静止摩擦係数、動摩擦係数、反発係数をパラメータとして設定してシミュレーションを行っている。

3.3 Unity を用いることの利点

本研究において Unity を用いることの主な利点として、

- ① 任意の家具の設置や移動、視点操作が容易に行え、任意の入力波を用いてシミュレーションが行える。
- ② 多様なプラットフォーム上で動作する。

の二点が挙げられる。

①より、利用者が普段生活している部屋のレイアウトで利用者の目線でシミュレーションを行うことができ、よりリアリティの高いシミュレーションを行うことが可能になると考えられる。実大振動台実験の様子を、本手法を用いてシミュレーション映像に再現したものを図3に示す。また、Unity では視点の回転や前後の操作はマウスで簡単に行うことができ、視点操作は加振中でも行えるため、避難経路に存在する危険因子や障害物などを確認することもできる。図4に視点の回転と移動の様子を、図5に今回得られたシミュレーション映像をキャプチャーしたものを示す。

また、②より先行研究のように Web アプリケーションとして公開する他に、将来的にはスマートフォンなどのアプリケーションとしても実用化できるため、より多種多様なユーザーに向けて発信していくことが可能であり、普及啓発へと繋げていくことが容易であるとともに、ネットワークを介して、フィードバックを得ることができるという利点もある。

3.4 シミュレーションを行う上の問題点とその対策

Unity はゲーム開発用のソフトウェアとして開発されているため、リアリティのある表現に特徴がある。しかし一方で、例えば重心位置がオブジェクトの図心に設定されるなどの制約がある。このため、例えば上段に重い本が入っているキャビネットなどはモデル化に工夫が必要である。本研究では、あるオブジェクトに対して、設定したい重心位置を持つような別のオブジェクトを重ねあわせるという方法を用いて検討を行った。その概念図を図6に示す。

また、質量や摩擦係数といった物理パラメータについては、必ずしも実際の値と同じ値を用いることはできず、現時点ではある程度の調整が必要である。本論では加振波として、図7に示すような実験時に一番被害が見られた JMA 神戸を用いて、室内実験の映像と比較しながら、家具と床材の素材の組み合わせによって、現実に近い挙動を示すパラメータの選択を行った。この知見を蓄積することで、シミュレーションの予測精度の向上も図ることができると考えられる。

3.5 シミュレーションでの目標と成果

シミュレーションを行う際には摩擦係数などの各種パラメータの設定は非常に重要である。しかし、一般の人ではこのようなパラメータはイメージがつかみにくく、適当でない値を設定してしまう可能性があることが問題点としてあげられる。そこで、実際にシミュレーションを行う際には、その時の家具と床材の組み合わせによって、予め用意された摩擦係数を用いることで、パラメータ設定の簡便化を図るとともに、即時的にリアリティのあるシミュレーションを行うことができると考えられる。

Unity においては、摩擦係数は実際に測定した値よりも少し大きめの値を、質量は実際とほぼ同じ値を設定することで、実際と同じような挙動を示すことが確認できた。実験時に測定した値と、Unity で設定した値を表1に示す。

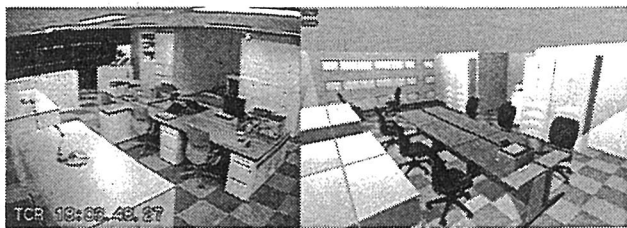


図3 実際の実験室とシミュレーション映像の比較

表1 各種パラメータの実測の値と適切な挙動を示すよう検討を行った値

	椅子		机		背の低いキャビネット		背の高いキャビネット		複写機	
	実測	設定値	実測	設定値	実測	設定値	実測	設定値	実測	設定値
質量(kg)	14	15	40	40	72	120	-	200	140	140
静止摩擦係数	0.1	0.1	0.55	0.8	0.55	0.8	0.5	0.8	0.15	0.2
動摩擦係数	-	0.05	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.2

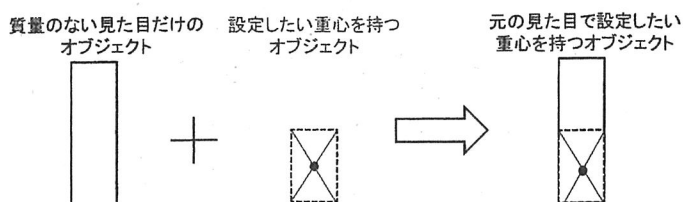


図6 重心の設定方法の概念図

4. 剛体の応答解析プログラムの作成

3章ではシミュレーション映像のリアリティを求めてUnityを用いて検討を行ったが、剛体の動的挙動を更に詳しく確認するため、剛体の運動方程式を解くプログラムを作成する。プログラムは現在作成中ではあるが、各種パラメータと入力地震動を設定して、数値解析に基づいた地震時の剛体の挙動を表示するアニメーションとしてアプリケーション化すれば、学生や専門家に対しては摩擦係数などの各パラメータが家具の応答にどのような影響を及ぼすのかを検討するツールとして使用することが可能であると考えられる。また、バネ係数やダッシュポットの値設定を手助けするようなシステムを構築すれば、一般の人にも地震時の家具転倒の様子を分かりやすく伝えることができるツールとなることも期待できる。さらには、本研究で取り組むようなシミュレーション映像と併用して用いることで、シミュレーション映像で室内被害の全体像を掴み、家具単体の応答解析で、一つ一つの家具の詳細な挙動を把握するなど、より高い効果を発揮できると考えられる。

剛体は図8に示すように、家具の滑り及び転倒を同時に考慮できるよう、床との節点に、ばね、ダッシュポット、スライダーを取り付けて、二次元でモデル化した。¹¹⁾これを重心について集約し、(1)式のように運動方程式を立て、Newmark β 法を用いて時刻歴で収斂計算をしながら応答解析を行う。

$$\begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_g \\ \ddot{v}_g + g \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum F_x \\ \sum F_y \\ \sum M \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 m 、 I は剛体の質量及び重心回りの回転慣性、 $\ddot{u}$ 、 $\ddot{v}$ 、 $\ddot{\theta}$ は重心の水平、上下及び回転の加速度、 $\ddot{u}_g$ 、 $\ddot{v}_g$ は水平及び上下の入力加速度、 g は重力加速度、 F_x 、 F_y 、 M は節点から受ける床の反力及び重心回りのモーメントである。支持点でのモデル化は、図7のb)、c)のように表される。 F_x 、 F_y は(2)、(3)式に示すように、ばねによる復元力と減衰力との足しあわせであり、 M は(4)式に示すように、それぞれの反力に有効長さを掛けあわせたとのである。

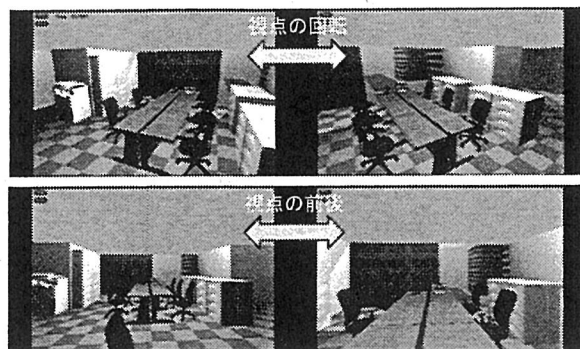


図4 視点操作の様子

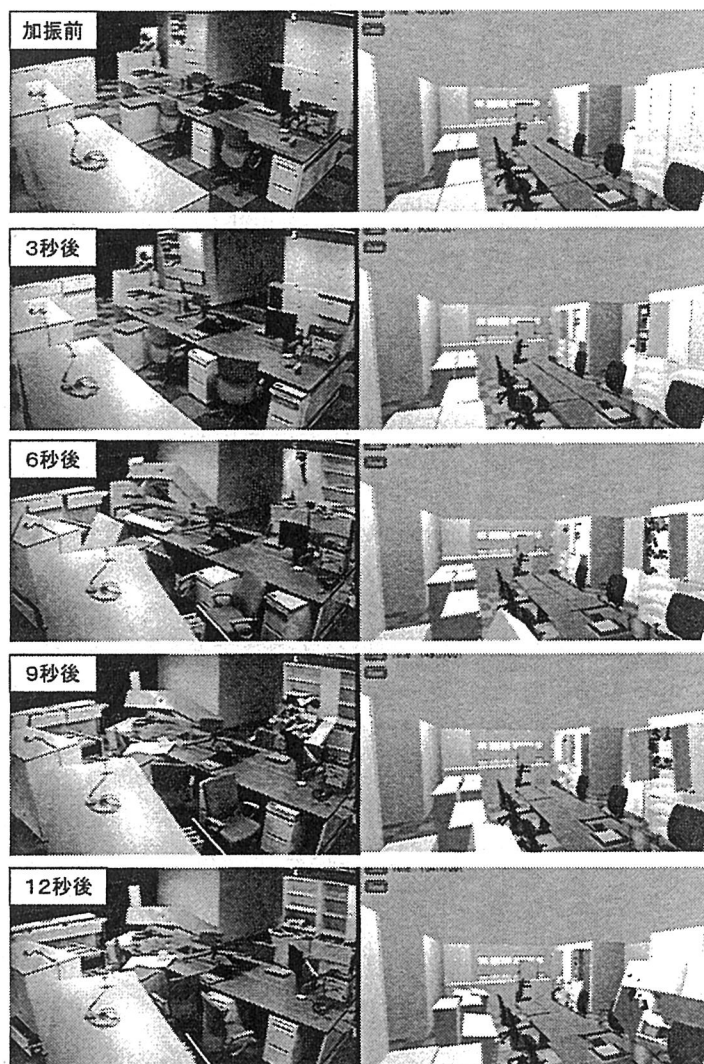


図5 加振中の様子

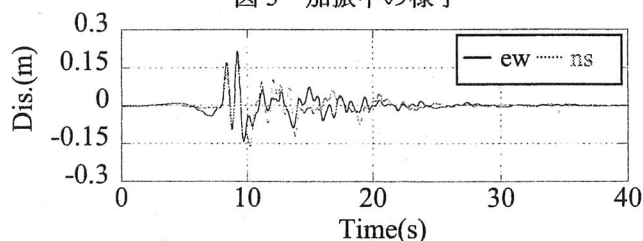


図7 加振波(JMA 神戸)

$$\sum F_x = k_1^H u_1 + k_2^H u_2 + c_1^H \dot{u}_1 + c_2^H \dot{u}_2 \quad (2)$$

$$\sum F_y = k_1^V v_1 + k_2^V v_2 + c_1^V \dot{v}_1 + c_2^V \dot{v}_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum M = & -(k_1^H u_1 + c_1^H \dot{u}_1) R \cos(\varphi - \theta) \\ & - (k_2^H u_2 + c_2^H \dot{u}_2) R \cos(\varphi + \theta) \\ & - (k_1^V v_1 + c_1^V \dot{v}_1) R \sin(\varphi - \theta) \\ & + (k_2^V v_2 + c_2^V \dot{v}_2) R \sin(\varphi + \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

k^H 、 k^V 、 c^H 、 c^V は水平及び上下方向のばね剛性と減衰定数、 u 、 v は各接点の水平及び上下方向のばねの変位である。尚、接触点では $F_y = 0$ の時 (剛体が床と接していないとき) は $F_x = 0$ となる。

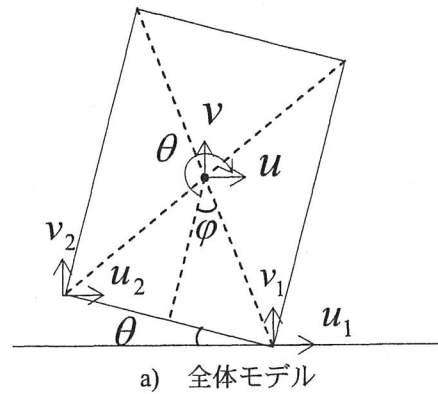
5. まとめと今後の展望

本論では、実大振動第実験の結果を基に、リアリティのあるシミュレーション映像の作成のため、ゲーム開発用のソフトである「Unity」を用いて、その有用性と実用化に向けた検討課題の確認を行った。また、剛体の挙動をさらに詳しく分析しうる手法の構築と、リアリティのあるシミュレーションと併せて用いることで、啓発活動に有効なソフトウェアや表現への展開が可能であることを示した。

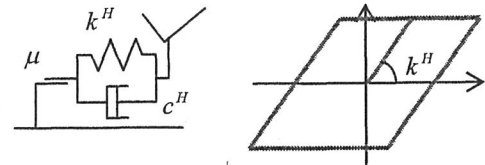
今後の展望としては Unity で実際と近い挙動を示すパラメータの検討を行ったものを先行研究に習って Web 上にアプリケーション化して公開する。その後ユーザーがパラメータを入力して、簡単にシミュレーションを行えるよう環境を整えていく。一方、剛体の応答解析プログラムを用いて家具転倒シミュレーションを作成し、家具の形状、寸法、質量および接地面ばね係数などを自由に与えて詳細な挙動を確認できる環境の構築も目指している。両者を用いれば、様々な利用者に対して、リアリティや納得間を与えることが可能であると考えられる。これらを通じて室内安全性に関する意識を向上させ、家具固定などの防災行動を喚起することを目標に研究を進めていきたい。

参考文献

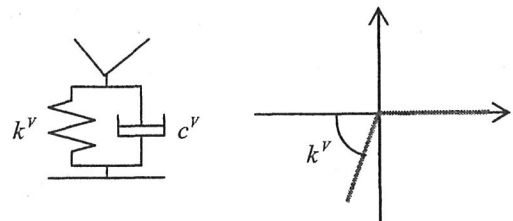
- 1) 内閣府 防災情報のページ
http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html
- 2) 内閣府「防災に関する特別世論調査」「地震防災対策に関する特別世論調査」
- 3) 東京消防庁「家具類の転倒・落下に係るアンケート調査結果」
- 4) 倉田和己:耐震化促進eラーニングのための自然言語インターフェース開発、日本建築学会技術報告集、第 25 号、pp.331-336、2007.6



a) 全体モデル



b) 水平節点ばねのモデル



c) 上下節点ばねのモデル

図 8 剛体のモデル

- 5) 鶴田庸介:耐震・振動論学習のための能動型振動シミュレーション教材の開発、日本建築学会技術報告集、第 25 号、pp.327-330、2007.6
- 6) 福和研究室ホームページ
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/laboFT/bururu>
- 7) 吉澤睦博ほか:地震時の室内被害による建物機能損失に関する実験的研究(その 1~その 10)、日本建築学会大会学術公園梗概集、pp.1039-1058、2012.9
- 8) Springhead web page
<http://springhead.info/wiki/>
- 9) 正月俊行:超高層建物におけるオフィス内の家具類の地震時挙動に関する検討、日本建築学会大会学術公園梗概集、pp.643-644、2007.8
- 10) Unity web page
<http://japan.unity3d.com/>
- 11) 金子美香、林康裕:剛体の転倒限界に関する基礎的検討、日本建築学会構造系論文集 第 479 号、pp.41-49、1996.1