

# 地震時の建物一棟解析とVRシミュレータの開発

Analysis of an Entire Building during an Earthquake and Development of a VR Simulator

楊全宜<sup>1)</sup>, Yan Meng<sup>2)</sup>, 磯部 大吾郎<sup>3)</sup>

Quanyi Yang, Meng Yan and Daigoro Isobe

- 1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s2220898@s.tsukuba.ac.jp)
- 2) 修(工) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: yan.meng.xm@alumni.tsukuba.ac.jp)
- 3) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

As a part of disaster prevention education, a Virtual-Reality (VR) simulator that could directly experience indoor conditions during an earthquake was developed. The Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code, which can stably perform non-linear phenomenon, was used as a numerical code to simulate and investigate seismic motions. By this numerical code, it is possible to simulate the motion of the interior of a 10-story building during an earthquake. Based on the numerical results, a VR simulator capable of reproducing the results in a 3D environment was developed.

**Key Words** : ASI-Gauss code, Seismic motion analysis, VR simulator

## 1. はじめに

1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災では、甚大な被害があった。建物が無事であっても家具が転倒してその下敷きとなったり、室内が散乱することで避難が遅れてしまうなど、居住者に対する被害が大きくなった。阪神淡路大震災住宅内部被害調査報告書[1]によると、図1に示すように家具の種類や寸法、重量によって被害状況が異なったことが確認できる。また、先行研究[2]では、同じ種類の単一家具でも、階数によってその挙動が異なることも確認された。この状況を踏まえ、防災教育のコンテンツとして、地震発生時の建物各階層の室内挙動を体験できるVRシミュレータの開発は重要である。

本研究では、建物モデル内に家具モデルを設置した統合モデルを用いて地震応答解析を実施し、解析によって得られた結果を投影し、室内の様子を体験できるVRシミュレータを開発することを目的とする。Eディフェンスで行われた10階建て鉄筋コンクリート建造物の3次元震動台実験[3]の情報に基づき、建物モデルと家具モデルを作成し、ペナルティ接触理論に基づいた接触アルゴリズム

とRC構成則を導入した有限要素解析プログラム[4]を用いて地震応答解析を実施する。そして、VR用の3Dモデルを作成し、3D環境の中に解析結果を再現することで地震発生時の室内を仮想的に体験できるVRシミュレータを開発する。有限要素解析手法には、はり要素による有限要素法の一種で、最小限の要素分割で骨組構造物の挙動を解くことができるASI-Gauss法[4]を用いる。

## 2. 解析モデル

### 2.1 建物モデル

実験[3]で用いられた10層RC造建物の設計図に基づき、図2に示す解析モデルを作成した。全高25.75 m、幅12 m、奥行8 mであり、1階から7階まで耐震壁が設置されている。モデルの節点数は718、要素数は1320である。解析モデルの材料・断面情報については、設計図に記載された情報を元に必要なデータを算出し使用した。

### 2.2 家具モデル

図3に示すような、実験で用いられた3種類の家具の解

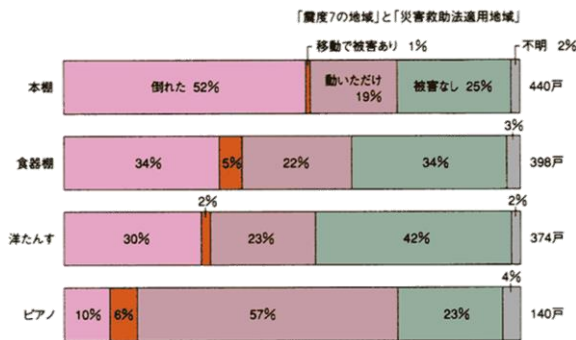


図-1 家具の被害状況[1]

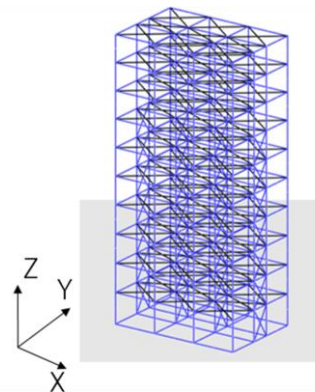


図-2 建物モデル

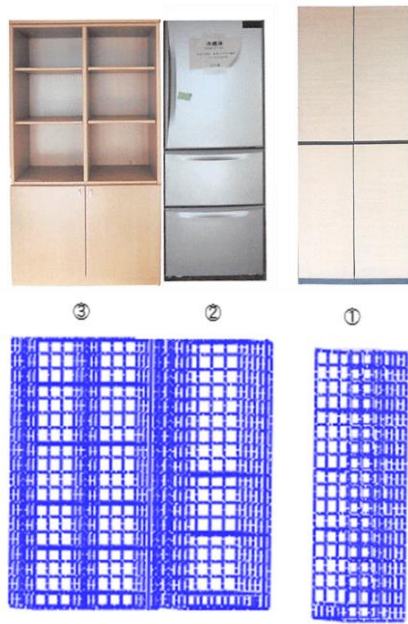


図-3 実際の家具と家具モデル

表-1 家具モデルの情報

対象物	節点数	要素数	幅 (mm)	奥行 (mm)	高さ (mm)
①棚	1353	1796	600	417	1800
②冷蔵庫	1467	1942	590	645	1790
③多目的棚	2267	3028	900	440	1800

析モデルを作成した。それぞれの節点数、要素数、寸法を表1に示す。全ての家具を線形Timoshenkoはり要素でモデル化した。また、本研究で用いるペナルティ接触アルゴリズムでは、家具の要素を粗く分割すると家具間で接触判定されず、通り抜けてしまう可能性があるため、家具の接触面は細かく分割した。家具の重心と内容物の重量については、部材密度を調整することにより表現した。

### 3. 解析条件

入力地震波には実験[3]と同じ、1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸波100%を用いた。解析における時間増分は0.001 s、実時間は41.94sである。

家具の接触は、前節に記したようにペナルティ接触理論に基づきペナルティ力と動摩擦力を接触要素の各節点に与えることで表現している。図4に要素に接触力が作用する際の概念図を示す。部材幅 $L_1$ を持つ接触要素は部材幅 $L_2$ を持つ被接触要素に対し、相対速度ベクトル $\mathbf{v}$ で移動しているものとする。この場合、要素に対して2種類の接触力が作用する。

$$\mathbf{F}_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} \quad (1)$$

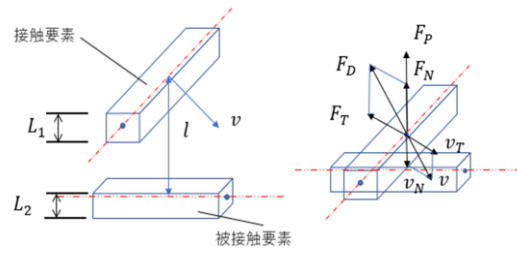


図-4 ペナルティ接触理論の概念図

表-2 接触パラメータ

対象物	$\alpha$ [kgf]	$q$	$D_c$	$\mu$	
				短辺 方向	長辺 方向
①棚	157.0	1	188.4	0.39	0.39
②冷蔵庫	70.0		84	0.18	0.40
③多目的棚	107.0		128.4	0.34	0.42

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_T}{\|\mathbf{v}\|} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_N = -D_c \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_N}{\|\mathbf{v}\|} \quad (4)$$

1つ目の接触力は式(1)に示すペナルティ力 $\mathbf{F}_P$ であり、接触面の法線方向のみに作用する。2つ目の接触力は式(2)に示す動摩擦力 $\mathbf{F}_D$ であり、接触面の接線方向と法線方向に作用する。ここで $\mathbf{F}_T$ 、 $\mathbf{F}_N$ はそれぞれ $\mathbf{F}_D$ の接線方向成分および法線方向成分であり、式(3)、式(4)で表現される。

接触パラメータは、先行研究[5]で示された有効な値を使用している。ペナルティ係数 $\alpha$ は対象物の重量[kgf]、ペナルティ指数 $q$ は1.0、動摩擦係数 $\mu$ は最大静止摩擦係数の0.8倍、減衰に関する定数 $D_c$ はペナルティ係数 $\alpha$ の1.2倍とした。それぞれの家具モデルにおける接触パラメータを表2に示す。

地震発生時には、特に建物の高層階では床面が大きく傾くことが予想される。そして、家具の転倒挙動に対しては床面の傾きが大きく影響を及ぼすことが考えられる。そこで本研究では、家具の動きに対する床面の傾きの影響を考慮するため、床面の法線ベクトルと、床を構成する特定の1点と接触要素の節点を結ぶベクトルを用いて接触判定を行っている。図5に示すように、家具が設置された階層の要素から3つの節点を選択し、それらの節点座標からベクトル $\mathbf{a}$ とベクトル $\mathbf{b}$ を計算し、両ベクトルにより床平面を定義する。そして、両ベクトルの外積によって床平面の単位法線ベクトルを算出する。次に、家具節点座標と建物節点座標からベクトル $\mathbf{c}$ を算出し、家具要素と床平面との間の距離をベクトル $\mathbf{c}$ と単位法線ベクトルの内積

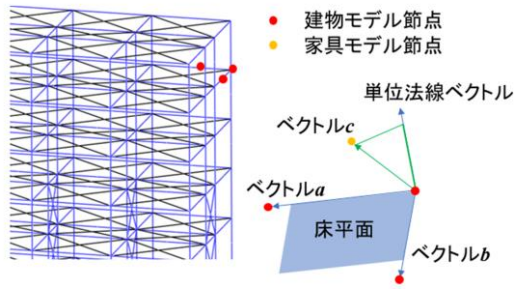
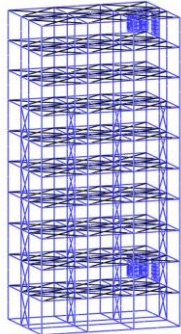
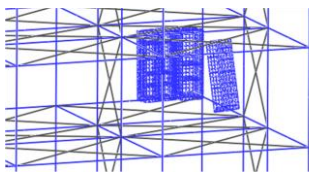


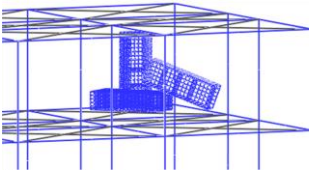
図-5 床平面の計算



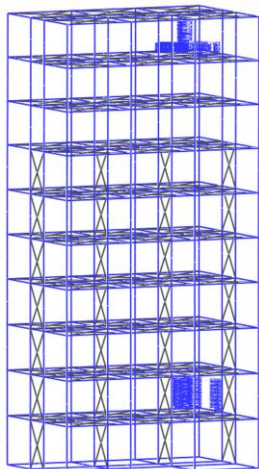
a) 解析開始時の様子



b) 2階の家具が揺れる様子



c) 10階の家具どうしが衝突する様子



d) 解析終了時の様子

図-6 解析結果

によって算出する。この接触判定方法を用いることにより、床面が傾く際の接触力をより正確に計算することが可能となった。

#### 4. 解析結果

家具モデルを2階、10階に設置し、地震応答解析を実施した。図6に示す解析結果から、2階の家具は移動する様子が確認できたが、転倒には至らなかった。一方で、10階に配置された家具は大きく移動し、棚と多目的棚が衝突し、転倒に至った。

#### 5. VR環境の構築

本研究では、BlenderとUnityソフトウェアを使用してVR環境を構築した。Blenderは、一般的に3Dモデリングによく用いられるソフトウェアである。Blenderを使用することで、複雑な形状やデザインを簡単かつ迅速に作成することができる。Unityは、高品質のグラフィックスをサポートしており、VR環境においてもリアルな映像表現が可能である。

実験[3]の情報に基づき、図7に示すようにBlenderを使用して実物と同じサイズの3Dモデルを作成し、モデルにテクスチャを貼り付けることで、実物に近い視覚効果を得ることを試みた。全ての3DモデルをUnityにインポートし、対応するVR環境を構築した。

室内家具の動きを体験できるVRシミュレータを開発するために、VR環境下で3Dモデルのアニメーションを制作する必要がある。アニメーションとは、1秒間に連続する24以上のフレームの中で、各フレームで異なる位置にあるモデルを連続して表示し、人の視覚でモデルが動いているように認識されるものである。つまり、VR環境中に解析結果を再現するため、各フレームにおける各3Dモデルの位置を、解析結果の同時刻における各モデルの位置と一致させる必要がある。

UnityのVR環境では、3Dモデルの位置は、3Dモデル自体が持つ座標系の原点の空間座標X、Y、Zの座標値と3軸回りの回転角度の計6つの自由度で決定される。3Dモデルと解析モデルの位置を一致させるために、UnityのC#スクリプトで、図7の概念図に示された計算を行った。40ミリ秒（25フレーム/秒）ごとに、解析結果から出力した同時刻の解析モデルの3つの節点の座標値を読み取り、それらの座標値から3Dモデルの位置を決める6つの自由度を計算する。これを連続的に行うことで、VR環境の中に解析結果を再現することができる。図8および図9は、解析結果を再現したVR環境における、2階と10階の室内視点からの様子である。

#### 6. おわりに

本研究では、ASI-Gauss法に基づいた有限要素解析プログラムに建物内床面の傾きを考慮した接触アルゴリズムを導入することで、地震時における建物内の2階と10階の

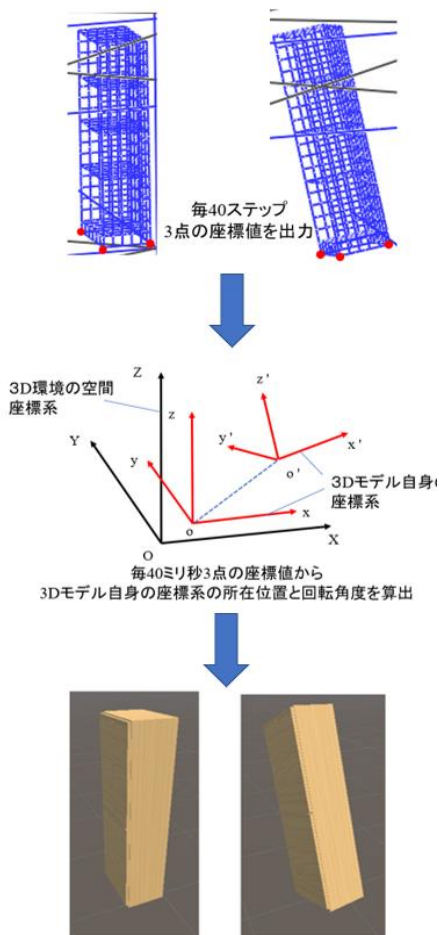
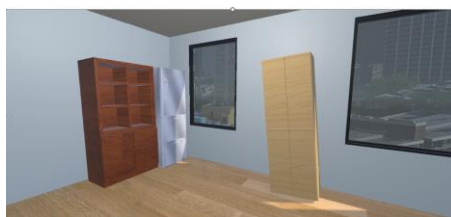


図-7 解析結果のVR空間での可視化



a) 開始時の様子



b) 家具が揺れる様子



c) 終了時の様子

図-8 2階室内視点からの様子



a) 開始時の様子



b) 家具が転倒する様子



c) 終了時の様子

図-9 10階室内視点からの様子

室内挙動を解析した。また、室内挙動の解析結果をVR空間に可視化するシステムの構築も行った。

#### 参考文献

- [1] 日本建築学会, 「阪神淡路大震災 住宅内部被害調査報告書」, 1996.
- [2] 三浦 他, RC造建物内に配置した耐震家具の地震時挙動解析, 日本計算工学会論文集, 2018巻, 2号, p. 20182005, 2018.
- [3] 福山 他, E-ディフェンスを用いた10階建て鉄筋コンクリート造建物(2015)の三次元振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, p.865, 2016.
- [4] 磯部大吾郎, はり要素で解く構造動力学: 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで Fortran90・C++ソースコード付, 丸善出版, ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.
- [5] 磯部 他, 有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第718号, pp. 1891-1900, 2015.