

# Open Dynamics Engineを利用した 家具の地震時応答解析

竿本 英貴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター  
(〒305-8567 茨城県つくば市 東1-1-1 中央第7)  
E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

家具の地震時応答をあらかじめ見積っておくことは、人体への地震時傷害を軽減するための重要な検討事項の一つである。本研究では、オープンソースの剛体シミュレーションライブラリであるOpen Dynamics Engine(ODE)を利用して家具の地震時応答解析を行う。まずは単純な例題を通じてODEの精度検証をエネルギー収支の観点から行い、ODEが十分な精度を有していることを確認した。次いで、CADを援用して家具の形状モデリングを行い、ODE上でいくつかの家具モデルを配置することにより実際の部屋の環境を構築した。実地震の加速度波形を構築した部屋環境に入力して一連の地震時応答解析を行い、家具の摩擦係数と転倒について議論した。

**Key Words : Furniture, Open Dynamics Engine, Seismic behavior, CAD**

## 1. はじめに

家具の地震時応答を予測することは、人的被害を低減するための重要な検討項目として、研究され続けている。実験的な研究として、地震時の床応答および家具と床の摩擦係数を実測し、転倒率を推定した事例<sup>1)</sup>や、E-Defenseにおいて超高層建物を模擬した大規模振動実験により、家屋内家具の地震時応答を多数のビデオカメラにより観察・記録した事例<sup>2)</sup>がある。

他方、コンピュータシミュレーションを用いた研究では、家具を剛体としてモデル化し、想定する地震波を入力して剛体シミュレーションを行うことがなされている<sup>3)4)</sup>。

本研究では、オープンソースライブラリの一つであるOpen Dynamics Engine(後述、以下ODE)に着目し、家具の地震時応答シミュレータを実装する。この理由は、任意形状を有するオブジェクトの接触判定や、ボールジョイントやユニバーサルジョイント等の接触箇所における種々の拘束条件、剛体回転を記述するためのオイラー角やクォータニオンといった主要なプログラミング箇所に対する組み込み関数が存在しているため、効率的に家具の地震時応答シミュレータが構築できると考えたからである。

まずはエネルギー収支の観点からODEの精度検証

を行った後、任意形状を有する家具のモデリング方法を述べる。最後に、実地震の加速度を入力し、一連の応答解析を行う。

## 2. Open Dynamics Engineの精度検証

Open Dynamics Engine(cite)は、Russell Smithらによって2001年から開発されているオープンソースのライブラリである。剛体に対する3次元動力学シミュレータを効率的に実装することを目的としており、物体間の接触判定や複雑な形状を有する物体の取扱いなどが、あらかじめ組み込み関数として実装されている。開発が2001年から続いているため、マニュアルが充実していることやユーザが多いことも特長として挙げられる。ODEを利用してプログラムを開発する場合、プログラミング言語としてC言語が用いられるが、C言語の他に、軽量言語のPythonやRubyからODEを呼び出すことが可能であり、ユーザが慣れた言語で実装できるように配慮されている。なお、本研究ではPythonを用いてプログラムを作成した。

ODEはロボット工学の分野で広く利用されており、ODEにより4脚歩行ロボットのシミュレーションを行い、実機との比較・検討を行った例<sup>5)</sup>や商用の汎用ロボット・シミュレータWEBOTS内に

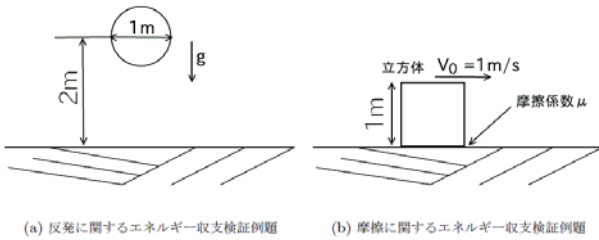


図-1 ODE の精度検証のための例題

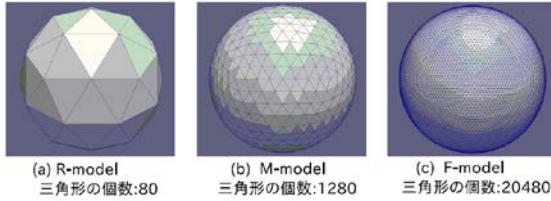


図-2 バウンシングの精度検証のための球モデル

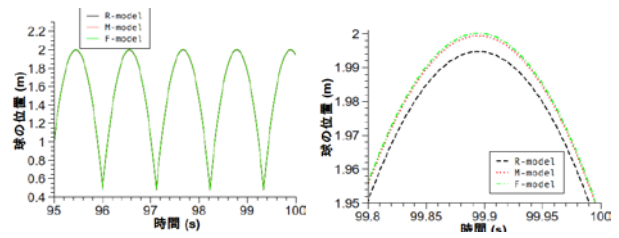
おける動力学計算部としての使用<sup>6)</sup>など、多くの利用事例がある。しかし、ODEの精度についての報告はほとんどなく<sup>7)</sup>、ODEがどの程度正確なのかを調べておく必要がある。

ODE の精度を検討するための例題を示したのが図である。直径1mの球を高さ2mの位置から水平面に自由落下させた場合のバウンシング応答を検討する例題(図-1(a))と、摩擦係数を有する水平面上で1辺が1mの立方体を初速1m/sで水平方向に発射し、摩擦により静止させる例題(図-1(b))について検討した。

バウンシングに関する検討では、球を3角形メッシュの集合(表面データのみ)として表した後にODEに取り込んでおり、メッシュの解像度を変化させることでバウンシング応答がどのように変化するかも併せて調べている。なお、ODEでは球についての組み込み関数が用意されており、球オブジェクトを用いる場合は通常、メッシュを用意する必要はない。

検証に用いた解像度の違う3種類の球モデルを図-2に示す。解像度の小さい順に、R-model(三角形の個数:80)、M-model(三角形の個数:1280)、F-model(三角形の個数:20480)、と呼ぶことにする。

シミュレーションを行う際に設定するODEのパラメータは、ERP (Error Reduction Parameter) と CFM(Constraint Force Mixing)、そして反発係数と摩擦係数の4つである(cite)。ERPは、物体の接触部において外力や計算誤差により接触の中心部がずれるのを修正するパラメータであり、0.0から1.0の間の実数をとる。次のステップでの誤差を全く修正しない場合には0.0、誤差を完全に修正する場合には1.0と設定する。なお、ERPのデフォルト値は0.2である。CFMは物体衝突時の貫入をどの程度許容するかを表すパラメータであり、0から1の間の実数をとる。デフォルト値は、 $10^{-10}$ であり、物体接触時に剛体的に振る舞うように設定されている。なお、これらのパラメータは、バネ定数 $k$ と減衰定数 $h$ によって次のように表される<sup>8)</sup>。



(a) 100秒付近の反発状況 (b) 最高到達点の拡大図  
図-3 バウンシングの精度検証のための球モデル

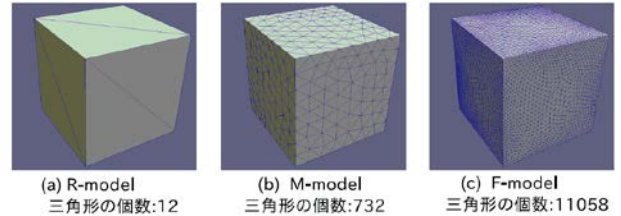


図-4 スライディングの精度検証のための立方体モデル

$$ERP = k\Delta t / (k\Delta t + h) \quad (1)$$

$$CFM = 1 / (k\Delta t + h) \quad (2)$$

ここでは、時間刻み $\Delta t$ を0.01秒、ERPを0.2、CFMを $10^{-10}$ と設定した。なお、CFMが零の場合にはバネ定数が無限大となるため、物体同士の接触時に貫入がほとんど生じず、剛体的な挙動を示す。一方、ERPが零の場合にはバネ定数が零となるため、物体同士が衝突した場合には貫入が生じる。反発係数と摩擦係数は、それぞれ1.0、0.0と設定した。したがって、エネルギー保存則が満たされているならば、球は初期位置の高さ2mまで跳ね返ってくることになる。

図-3は、メッシュ解像度の異なる3種類の球(図-2)を高さ2mの位置から自由落下させた場合の重心位置の経時変化を示している。計算終了時近く(90回反発後)の球の最高到達地点(図-3(b))から、解像度が高いモデルの方が、より厳密解(2m)に近い傾向が確認できる。3つのモデルのうち最も精度が低いR-modelにおいても相対誤差が0.3%程度であった。以上の結果より、ODE内における運動方程式の数値積分の精度は高く、球と平面のバウンシングに関してはメッシュの解像度依存性はほとんど無視できるものと考えられる。

次いで、摩擦に関するエネルギー収支の検討を行った。図-4は、シミュレーションに用いた立方体のモデルであり、球モデルと同様に解像度の異なる3種類の立方体モデルを用意した。検証問題として、水平面上に立方体を静止させた後、速度1m/sで水平方向にスライドさせるシミュレーション(図-1(b))を行った。立方体と水平面間には摩擦係数 $\mu$ (クーロン摩擦モデル)を設定しているため、ある程度の距離まで滑動して静止することになる。ブロックの初速を $V_0$ 、重力加速度を $g$ 、滑動した距離を $L$ とすると、エネルギー収支の観点から、初速

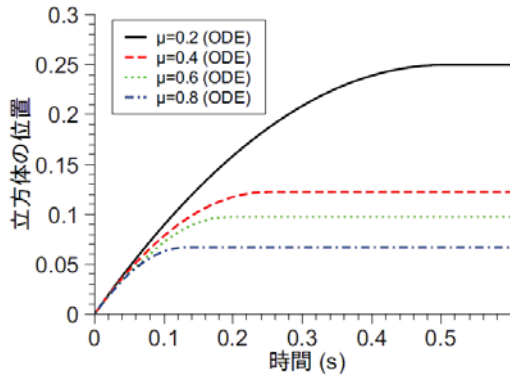


図-5 スライディング挙動の一例(M-model)

表-1 各モデルの摩擦係数についての相対誤差

立方体のモデル名	ODEでの設定値	活動距離から求めた値	相対誤差(%)
R-model	0.2	0.204	2.13
R-model	0.4	0.416	3.89
R-model	0.6	0.638	5.88
R-model	0.8	0.867	7.74
M-model	0.2	0.204	1.95
M-model	0.4	0.416	3.86
M-model	0.6	0.591	1.45
M-model	0.8	0.760	5.27
F-model	0.2	0.204	2.01
F-model	0.4	0.416	3.89
F-model	0.6	0.589	1.83
F-model	0.8	0.809	1.16

による運動エネルギーと摩擦によって消散したエネルギーがつり合う必要があるため、以下の関係が成り立つ。

$$\mu = V_0^2 / (2gL) \quad (3)$$

ここでは、ODEにセットした摩擦係数と式(3)により活動距離から得られる摩擦係数を比較することで、摩擦に関する精度検証とした。用いたパラメータは、球のバウンス検証時と同じであるが、反発係数のみを変更し、0.0とした。

図-5 は、M-model を用いた場合の立方体重心位置の経時変化を示したものである。初速1m/s の立方体がクーロン摩擦(μ=0.2, 0.4, 0.6, 0.8)によって静止する様子が分かる。図中で、各摩擦係数に対してグラフがフラットとなった位置が、静止位置である(式(3)中の L)。

表-1 に、ODE 内で設定した摩擦係数と式(3)から得られる摩擦係数の厳密値の一覧を示す。解像度の大きいモデルの方が相対誤差は小さくなる傾向が認められるが、メッシュ解像度の変化幅に比べて相対誤差の変化幅は十分小さく、メッシュ依存性は強く出していない。摩擦係数が0.4 以下となるケースに限れば相対誤差は4% 以下であり、ODE は十分な精度

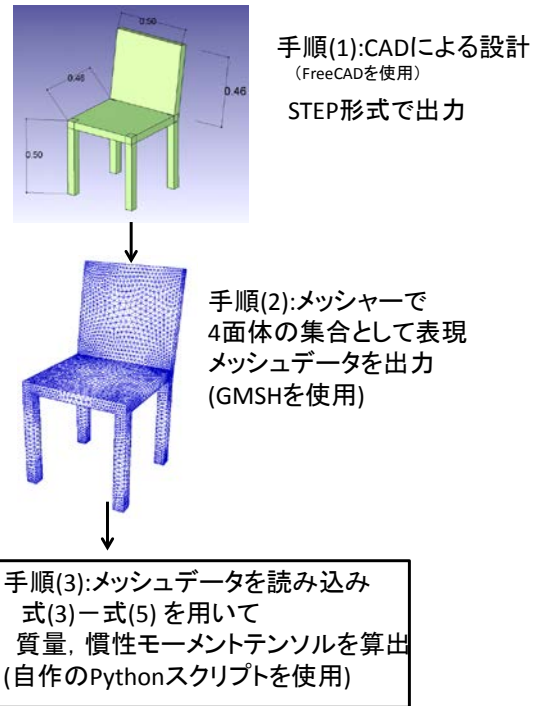


図-6 CAD を利用した家具の形状モデリング

を有していることがわかる。金子の研究結果<sup>1)</sup>によれば、家具の摩擦係数の実測値は多少のバラつきがあるものの、0.4 程度となっている。このことから、ODE を用いることで、家具の地震時応答解析を十分な精度で実行できることが期待できる。

### 3. 家具の形状モデリング

現実的な家具の地震時応答解析を行うためには、まずは家具の形状を正確にモデリングする必要がある。ここでは、CADを通じて家具の形状を設計し、ODEにオブジェクトとして取り込むことを行った。ODE上に任意形状を有する家具をオブジェクトとして取り込むために必要な情報は、家具の質量および重心まわりの慣性モーメントテンソルである。

作業は図-6のフローチャートのとおりであり、3つの手順からなっている。手順(1)はCADを用いた形状設計であり、ここでは、オープンソースソフトのFreeCAD<sup>9)</sup>を用いた。FreeCADが出力するSTEP形式のファイルを、オープンソースソフトのGmsh<sup>10)</sup>に読み込ませ、四面体分割する(手順(2))。次いで、Gmshが出力するメッシュデータを用いて質量および慣性モーメントテンソルを算出する(手順(3))。

家具の質量は、個々の四面体の情報を用いて次の式により求めることができる。

$$M = \sum_i m_i = \sum_i \rho V_i \quad (3)$$

$m_i$  は個々の四面体の質量、 $\rho$  は家具の密度(一定)、 $V_i$  は個々の四面体の体積である。個々の四面体の体積は、四面体を構成する4つの頂点の座標値から以下の式により求まる。

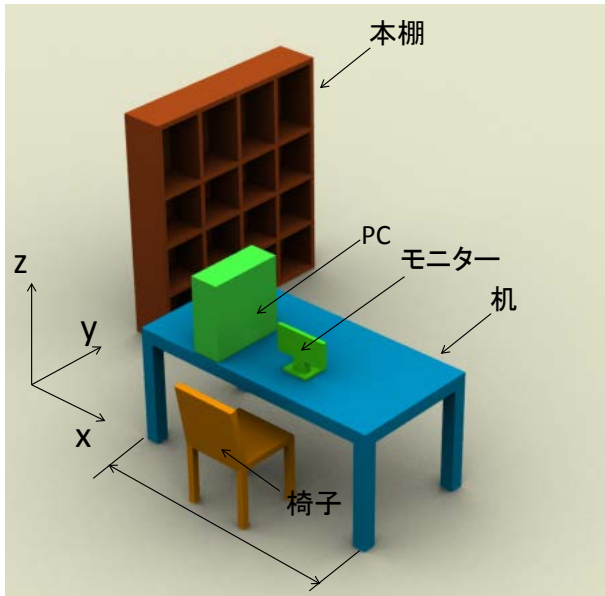


図-7 家具を ODE 上で配置し、レンダリングしたもの

$$V_i = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4)$$

また、慣性モーメントテンソルは、次の近似式により求めることができる。

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \sum_k m_k (y_k^2 + z_k^2), & I_{yy} &= \sum_k m_k (x_k^2 + z_k^2) \\ I_{zz} &= \sum_k m_k (x_k^2 + y_k^2), & I_{xy} &= -\sum_k m_k x_k y_k \\ I_{xz} &= -\sum_k m_k x_k z_k, & I_{yz} &= -\sum_k m_k y_k z_k \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、式(5)中の  $x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$  は四面体の重心の座標値を表している。

以上の手順を経てさまざまな家具を設計・生成した後にODE上で配置し、レンダリングしたものが図-7である。また、各家具の質量と慣性モーメントテンソルを表-2に示す。

#### 4. 家具の地震時応答解析

図-7で示したモデルに地震波を入力し、地震時応答解析を行う。入力として、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の際に、茨城県つくば市にて観測された加速度記録の加速度振幅を3倍したものをを用いた(図-8)。ここでは、図-7のx,y,zの各方向にNS,EW,UDをそれぞれ対応させた。ODEのパラメータである、ERPとCFMは、それぞれ0.2,  $10^{-10}$ と設

表-2 各家具モデルの質量(kg)と慣性モーメント( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

	椅子	机	モニタ	PC	本棚
質量	5.0	40.0	7.0	12.5	60.0
$I_{xx}$	0.38	5.28	0.07	0.68	18.66
$I_{yy}$	0.33	17.76	0.13	0.39	33.19
$I_{zz}$	0.30	20.47	0.07	0.39	15.90
$I_{xy}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{xz}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$I_{yz}$	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00

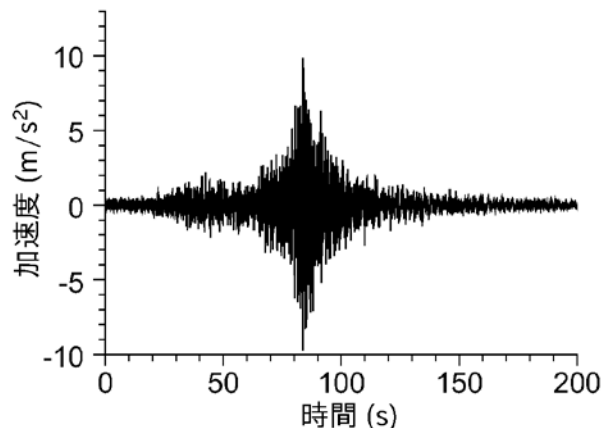


図-8 地震時応答解析に用いた入力地震波(x方向)

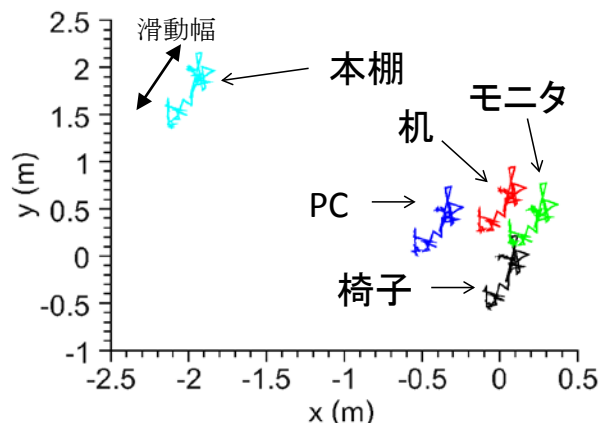


図-9 各家具の軌跡(摩擦係数:0.1)

定した。また、時間刻みは $1.0 \times 10^{-3} \text{s}$ とした。家具同士の接触箇所および家具と床の接触箇所における摩擦係数を変化させ、摩擦係数の違いに起因する地震時応答の違いを系統的に調べた。以下に解析結果を述べる。

##### (1) 接触箇所の摩擦係数が0.1の場合

すべての接触箇所の摩擦係数を0.1とした場合の家具の重心の軌跡(x-y平面内)をプロットしたものが図-9である。どの家具も転倒することなく、ほぼ同じ軌跡で滑動していることが認められる。また、軌跡から求めた活動幅(軌跡の長軸)は、およそ50cmであった。

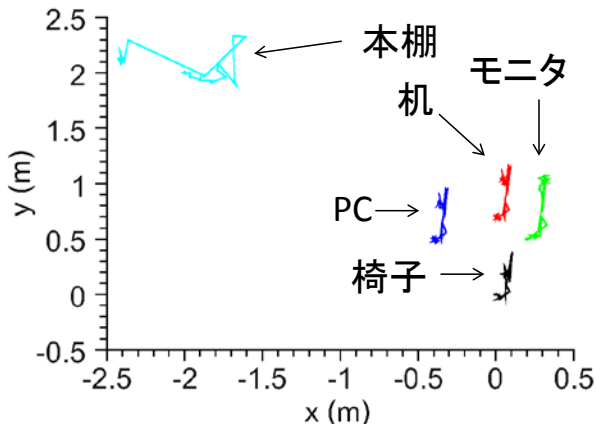


図-10 各家具の軌跡(摩擦係数:0.2)

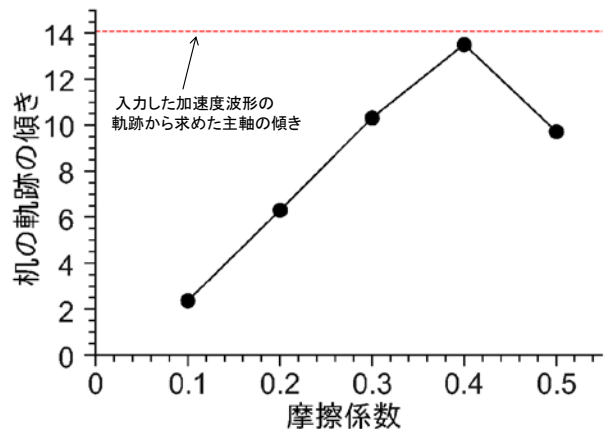


図-12 各摩擦係数に対する机の軌跡の傾き

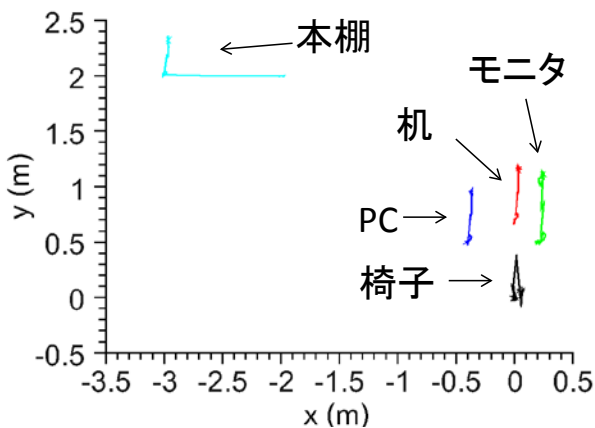


図-11 各家具の軌跡(摩擦係数:0.4)

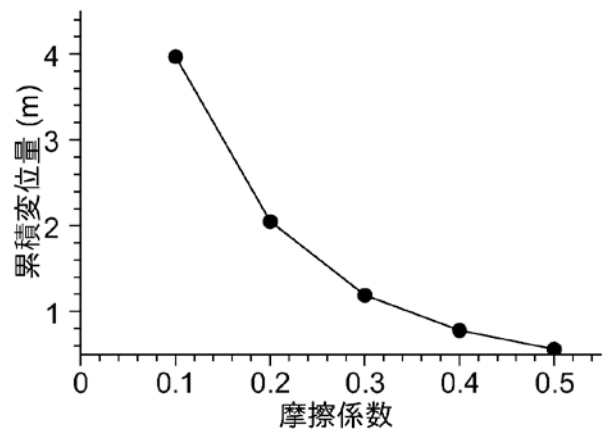


図-13 各摩擦係数に対する累積変位量 (机)

### (2) 接触箇所の摩擦係数が0.2の場合

すべての接触箇所の摩擦係数が0.2の場合は、図-10に示す軌跡を描く。本棚の軌跡は他の家具の軌跡と大きく異なっているが、これは本棚が転倒したためであり、地震入力開始から約90秒後に転倒している。摩擦係数が0.2より大きい場合の解析では本棚は常に転倒した。本棚を除く各家具の滑動幅は、約48cmであった。

### (3) 接触箇所の摩擦係数が0.4の場合

図-11は、すべての接触箇所の摩擦係数を0.4と設定した場合の軌跡を示している。このケースでは、本棚の転倒(加振後約50秒)に加え、椅子も転倒した(加振後約88秒後)。

図-9から図-11の結果より、摩擦係数が増加するにつれて、本棚を除く各家具の重心の軌跡は、拡散的なものから条線的なものに変化することがわかる。各摩擦係数に対し、机の条線的な軌跡を直線近似した際の傾きをグラフに描いたものが図-12である。ここでは、入力した加速度波形の軌跡から求めた主軸も比較のために併せて示してある。摩擦係数が0.2を下回る場合には、加速度波形の主軸との相関は低い、摩擦係数が0.4程度の場合には加速度波

形の主軸方向と概ね一致することがわかる。この傾向が一般的な現象なのかどうかについては、今後の検討課題としたい。

条線の傾きについては、摩擦係数の変化に応じて変化する様子が見て取れたが、条線の長さ(滑動幅)に関しては、摩擦係数依存性が強くは出ていないように見える。摩擦係数の増大にもなって家具は滑動しにくくなるはずであるが、見かけはそのようになっていない。この問題を検討するために、地震時応答解析中における机の変位量の累積値を縦軸に、摩擦係数を横軸にとったものが図-13である。この図より、滑動距離の累積値は明らかに摩擦係数が高いほど小さくなっており、摩擦に関する経験と一致する。みかけの滑動幅の摩擦係数依存性が小さいことが現実に起こりうるのかどうかは、実験によって今後検証していく必要があるが、変位の累積値という観点からは妥当な結果を得た。

図-13は、摩擦係数が0.4の場合の解析終了時の状態を示している。机上のPCとモニターは転倒しなかったが、椅子と本棚は転倒してしまった。なお、レンダリングには、オープンソースのレンダリングソフトの一つであるPixie<sup>11)</sup>を利用しているが、PythonとODEの組み合わせにより、Pixie用のファイ

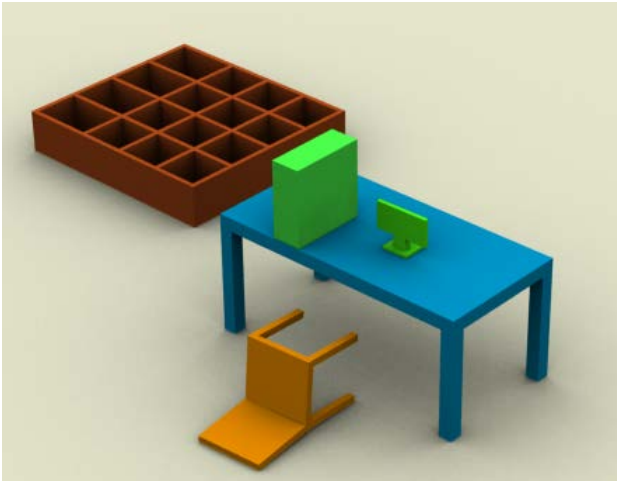


図-14 地震応答解析終了時の状態(摩擦係数:0.4)

ルを容易に生成できるなど、本シミュレータは結果の可視化に関しても利点を有している。

## 5. まとめと今後の展望

ODEは、オブジェクトの接触箇所での摩擦係数が0.4程度以下の場合では、十分な精度を有していることを確認した。また、メッシュ依存性も今回の検討では強くは出ていなかった。CADを援用して家具の形状を設計し、ODE内に取り込むことで現実的なモデルを構築することができた。

地震時応答解析により、家具の重心の軌跡から主方向を求め、入力波形の主軸方向と比較した。今回のケースでは、摩擦係数が0.2より小さい場合には相関が小さいことがわかった。また、見かけの条線の摩擦係数依存性が小さい場合でも、滑動量の累積値を検討することで摩擦の経験則と調和的な結果が得られることを示した。

今後は、構造物を有限要素によりモデル化し、地震時応答解析を行って構造物内の各地点における地震時応答を求め、これを家具の地震時シミュレータに入力することで室内における地震時の状況を模擬できるようにする。また、並行して実験との比較・検討を行いたい。

謝辞：本論文では、防災科学技術研究所の強震動観測データ(K-net)を利用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 金子美香: 地震時における家具の転倒率推定方法, 日本建築学会構造系論文集, No.551, pp.61-68, 2002.
- 2) 長江, 梶原, 福山, 井上, 中島: E-Defenseにおける超高層建物実験, E-Defense研究資料, <http://www.bosai.go.jp/hyogo/research/project/pdf/aij-draft.pdf> (2011年10月3日アクセス)
- 3) 榎本美咲, 目黒公郎: 三次元拡張個別要素法を用いた地震時の家具の動的シミュレーション, 土木学会第57回年次学術講演会, I-747, 2002.
- 4) 正月, 翠川, 大堀, 三浦: 超高層建物におけるオフィス内の家具群の地震時挙動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 620号, pp.43-49, 2007.
- 5) 遠藤, 有川, 広瀬: 研究ツールとしてのOpen Dynamics Engineの定量評価-4 脚歩行機械TITAN-VIII 実機歩行との比較-, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol28, 3D3-4, 2010.
- 6) Michel, O.: Webots: Professional Mobile Robot Simulation, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.1, No.1, pp.39-42, 2004.
- 7) 河原慎弥: ODEを用いたロボットの運動シミュレーションに関する研究, 東京工科大学卒業論文, 2008.
- 8) 出村公成: 簡単!実践!ロボットシミュレーション - Open Dynamics Engineによるロボットプログラミング, 森北出版, 2007.
- 9) FreeCADのウェブサイト: [http://sourceforge.net/apps/mediawiki/freecad/index.php?title=Main\\_Page](http://sourceforge.net/apps/mediawiki/freecad/index.php?title=Main_Page) (2011年10月3日アクセス)
- 10) GMSHのウェブサイト: <http://geuz.org/gmsh/> (2011年10月3日アクセス)
- 11) Pixiのウェブサイト: <http://www.renderpixie.com/> (2011年10月3日アクセス)

## Numerical Prediction for Seismic Response of Furniture by Open Dynamics Engine

Hidetaka SAOMOTO

Although seismic response of furniture plays an important role in terms of injury due to an earthquake, there are only a few techniques to predict the seismic behavior. This paper presents a seamless procedure for the numerical seismic simulation of furniture from an accurate shape modeling to the seismic response analysis based on the Open Dynamics Engine(ODE). Firstly, we validated the accuracy of the ODE through benchmark examples relating to bouncing motion and frictional sliding. To discuss the relationship between the frictional coefficient and the trajectories during an earthquake, a series of simulation were performed with some pieces of furniture such as chair, table, and book shelf.