

有限要素法を用いた家具・什器の地震時挙動解析

Finite Element Motion Analysis of Furniture under Seismic Excitation

三浦利季¹⁾, 山下拓三²⁾, 磯部大吾郎³⁾

Toshiki Miura, Takuzo Yamashita 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: s1211184@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 防災科学技術研究所 (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀谷1501-21, E-mail: tyamashi@bosai.go.jp)

3) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In big earthquakes, tumbled furniture such as chairs and desks in schools may become fatal obstacles that obstruct children from evacuating. It is important to understand the overturning behaviors of furniture under seismic excitations, as well as the behaviors and damages of the building itself. In this study, some shake-table tests of a chair and a desk used in schools were performed. The motion behaviors were analyzed using the ASI (Adaptively Shifted Integration) -Gauss code including frictional contact algorithm based on the sophisticated penalty method. The numerical results were validated by comparing with the experimental results. The numerical code is also applied to a motion analysis of a furniture which is assumed to be placed in a upper-floor room of a medium-rise building.

Key Words : Furniture, Seismic Excitation, Shake-Table Test, Finite Element Method

1. はじめに

大規模な地震では、建物自体の被害が少なくても、非構造部材である机やロッカーの転倒、天井落下などによる人々のケガや避難の遅れに繋がる可能性がある[1]。これらの対策を検証するための加振実験も行われてきている[2]が、コストや時間がかかり様々な条件で繰り返して実施することは困難である。そのため、これらの非構造部材の挙動を容易に検証可能とする数値解析手法の確立が期待されている。

本研究では、有限要素法を用いて開発された家具・什器の地震時挙動解析コードの精度検証を行う。什器の挙動解析には、ペナルティ接触理論に基づく接触アルゴリズムをASI-Gauss法[3]に導入した転倒挙動解析コード[4][5]を用いる。はじめに小学校用の机と椅子の挙動解析

を行い、その振動台実験結果と比較し、解析コードの有効性とその適用範囲について検討する。さらに、中層建物の上層階を想定して、より重量の重い家具の転倒挙動解析を実施し、その結果について考察を行う。

2. 机と椅子の振動台実験および挙動解析

(1) 振動台実験の概要

小学校用の机と椅子をそれぞれ振動台上に配置し、入力波の種類を変化させて振動台実験を行った。実験には加振方向が水平1軸で最大加速度2G、振動数0.1-100 Hzの振動を与えることができる小型振動台(サンエス株式会社,STPD-10K-75L-20T)を用いた。振動台の寸法は1m×1mである。

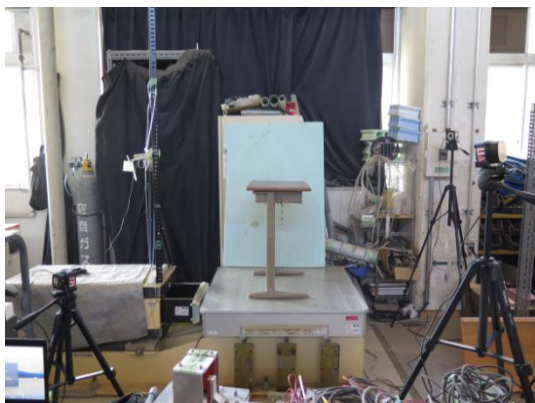


図-1 カメラと什器の配置状況

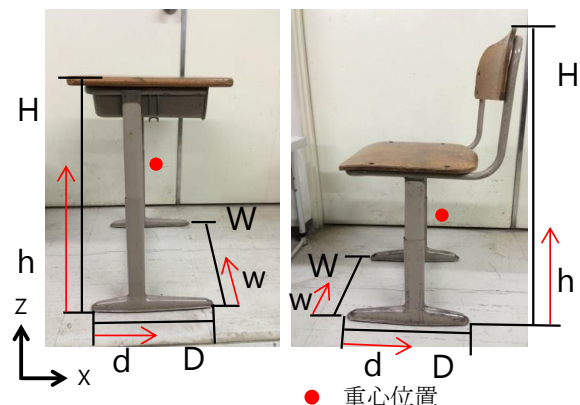


図-2 什器の概観

表-1 什器の諸元と静止摩擦係数

什器の種類	寸法[mm]			重量[kg]	重心位置[mm]			静止摩擦係数	
	W	D	H		w	d	h	X軸方向	Y軸方向
机	570	450	700	8.0	285	180	495	0.438	0.500
椅子	305	360	730	4.5	152.5	230	325	0.533	0.600

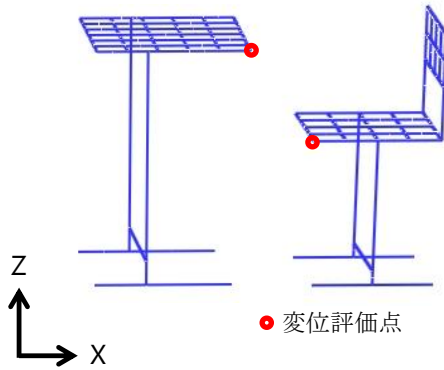


図-3 脚部簡略化モデルの概観

什器および床の 3 次元計測には(株)ノビテック社製のモーションキャプチャシステム(型式:VENUS3D-250N, 以下 MCS と記す)を用いた。カメラは 69 万画素で、サンプリング周波数は 100Hz である。MCS は多数の計測点を同時かつ非接触で計測し、3 軸方向の変位や速度等を解析することが可能である。さらに、相対座標算出機能を用いることで、空間全体の振動や傾きを差分し、什器の挙動のみを解析することが可能である。カメラは図-1 に示すように什器を囲んで配置し、全方向から什器の挙動を捉えられるようにした。

対象とした 2 種類の什器の概観を図-2 に示す。什器の重心位置を赤い点として示し、表-1 に什器の寸法・重量・重心位置および測定した静止摩擦係数を示す。重心位置は什器を糸で吊るした際、重心が糸の延長線上にあることを利用して求めた。振動台上にはコルクマットを敷き、その静止摩擦係数は、什器の底部をベルト等で巻いて中央をバネばかりで引張り、動き出した際の荷重を重量で除した値とした。

(2) 解析モデル

什器は全て線形チモシェンコはり要素を用いてモデル化した。什器の脚部を簡略化してモデル化した解析モデルを図-3 に示す。このモデルでは、図-4 に示すような床と接する突起を表現しておらず、水平部材全体が床と接触する。次に、什器脚部の突起を細かく要素分割したモデルを図-5 に示す。このモデルでは、突起の部分でのみ床と接触する。これらの什器の重心については、次式に基づいて構成部材毎に密度を調整して表現した。

$$\mathbf{x}_G = \frac{m_1 \mathbf{x}_1 + m_2 \mathbf{x}_2 + \dots + m_n \mathbf{x}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は重心ベクトル、 m が質量、下付き添え字の数字は部材番号、 G は什器を表す。

本研究では、計算コスト削減のために床は要素分割せず、床が什器から受けるペナルティ力と摩擦力を無視し、剛床であると仮定した。什器の節点座標値と床の座標値の差を用いて、数値的に接触を判定した。接触が判定された要素に対しては、2 種類の接触力を作用させた。1 つ目は次式に示すペナルティ力 \mathbf{F}_P として、要素間で構成される接触面の法線方向のみに作用する。

$$\mathbf{F}_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (2)$$

ここで、 α はペナルティ定数、 q はペナルティ指数である。 \mathbf{n} は接触面の法線ベクトルであり、常に一定の方向を向いている。また、 l は要素軸間の最短距離、 L は 2 つの要素

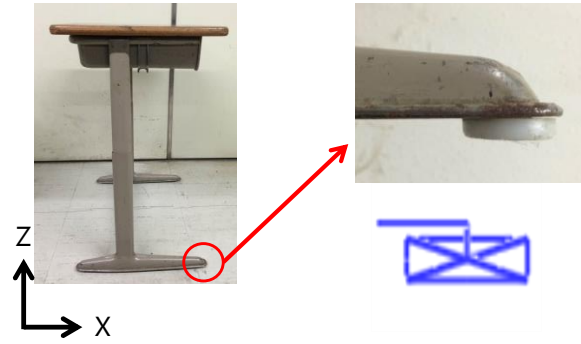


図-4 什器脚部の突起の概観とそのモデル化

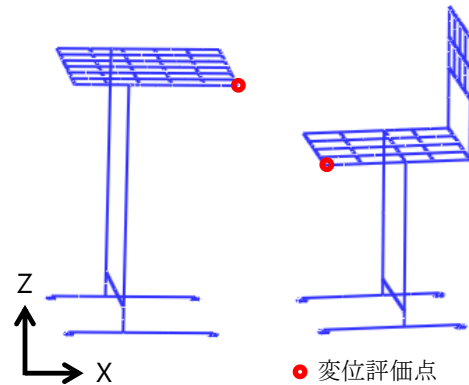


図-5 脚部詳細化モデルの概観

の部材幅の平均値である。2 つ目の力は次式に示す動摩擦係数 \mathbf{F}_D であり、接触面の接線方向と法線方向に作用する。

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N, \quad \text{if } l \leq L \quad (3)$$

下付き添え字 T 、 N は、それぞれ接触面に対する接線方向成分および法線方向成分であることを表す。次式に示すように、 \mathbf{F}_T 、 \mathbf{F}_N は \mathbf{v} のそれぞれの成分 v_T 、 v_N に対して逆方向に作用する。

$$\mathbf{F}_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_T}{\|v_T\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_N = -D_C \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_N}{\|v_N\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (5)$$

次に、接触パラメータを表-2、動摩擦係数を表-3 に示す。本研究では先行研究[4][5]で有効な値として示されている、ペナルティ定数 α は対象物の重量と同値、ペナルティ指数 q は 1.0、減衰に関する係数 D_C は α の 120% と設定し、動摩擦係数は実験で計測された静止摩擦係数の 80% とした。

モデルの要素数および節点数は、脚部簡略化モデルの机が 168 と 138、椅子が 150 と 125、脚部詳細化モデルの机が 240 と 196、椅子が 222 と 181 である。このように ASI-Gauss 法では少ない要素数で什器をモデル化できるが、接触アルゴリズムの特性上、要素分割が粗いと要素同士が接触判定されない可能性があるため、机の天板、椅子の座面と背もたれは分割した要素間の距離が 50 mm 以下となるように設定した。

表-2 接触パラメータ

什器の種類	a [kgf]	q	Dc [kgf]
机	8.0	1.0	9.6
椅子	4.5		5.4

a : ペナルティ定数, q : ペナルティ指数
 Dc : 減衰に関する係数 ($=a \times 1.2$)

表-3 動摩擦係数

什器の種類	X 軸方向	Y 軸方向
机	0.35	0.40
椅子	0.43	0.48

※静止摩擦係数の 80% の値

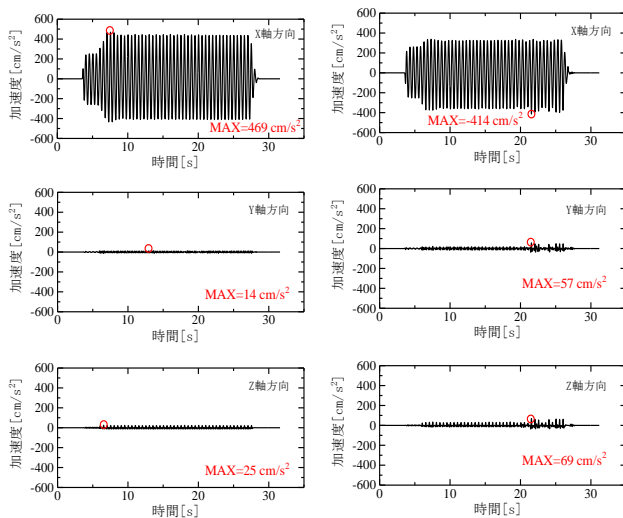


図-6 加速度 0.5G 周波数 2Hz 正弦波を入力した際の 台上加速度波形

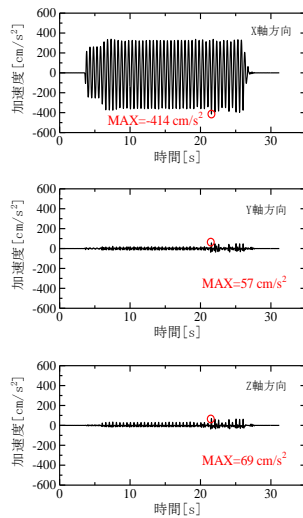


図-7 加速度 0.4G 周波数 2Hz 正弦波を入力した際の 台上加速度波形

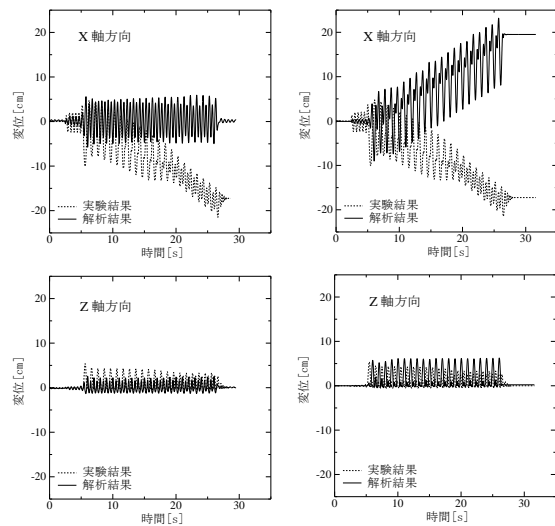
(3) 解析条件

実験は 1 軸方向加振で行ったが、解析の入力波には計測された 3 軸方向の台上加速度を用いた。加速度 0.5G 周波数 2Hz と加速度 0.4G 周波数 2Hz の正弦波を入力した際の台上加速度波形をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。解析の時間増分は 1 ms とした。解析に要した時間は CPU が 3.0GHz, RAM が 4GB の PC を用いて全ての場合とも約 20 分であった。

(4) 結果と考察

加速度 0.5G 周波数 2Hz の正弦波を用いた実験では、机はロッキングすることにより片足が大きく跳ねた後、小さく跳ねる特徴的な挙動を示した。また、初期位置から時計回りに回転する挙動も確認された。一方、椅子は特徴的な挙動を起こさず、転倒した。そこで、入力波として加速度 0.4G 周波数 2Hz の正弦波を用い、椅子の加振実験を再度行った。この条件では、椅子はロッキングすることにより片足が大きく跳ねた後、小さく跳ねる特徴的な挙動を示した。さらに、少しの間ではあるが後方に傾いた姿勢を保つ挙動も確認された。

図-8 に加速度 0.5G 周波数 2Hz の正弦波を入力した場合の評価点での机の変位を示す。実験で見られたロッキング振動は、脚部簡略化モデル、脚部詳細化モデルとも



(a) 脚部簡略化モデル (b) 脚部詳細化モデル

図-8 机の変位(加速度 0.5G 周波数 2Hz 正弦波)

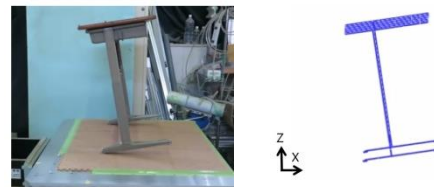
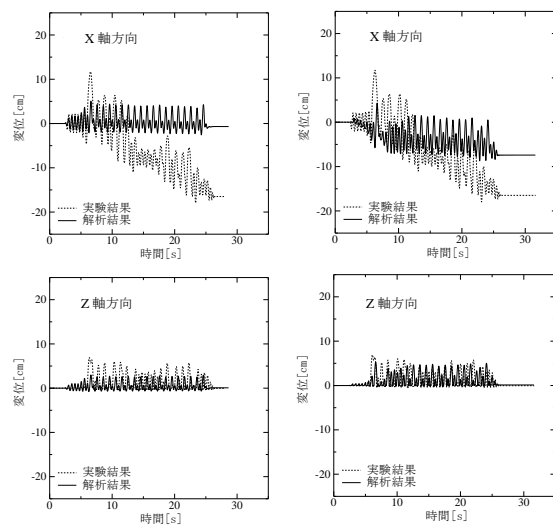


図-9 机のロッキングする様子



(a) 脚部簡略化モデル (b) 脚部詳細化モデル

図-10 椅子の変位(加速度 0.4G 周波数 2Hz 正弦波)



図-11 椅子のロッキングする様子

表-4 什器(内容物込み)の諸元

寸法[mm]			質量(kg)	重心位置[mm]			静止摩擦係数	
W	D	H		w	d	h	X軸方向	Y軸方向
600	417	1800	157	300	278.9	888.9	0.230	0.290

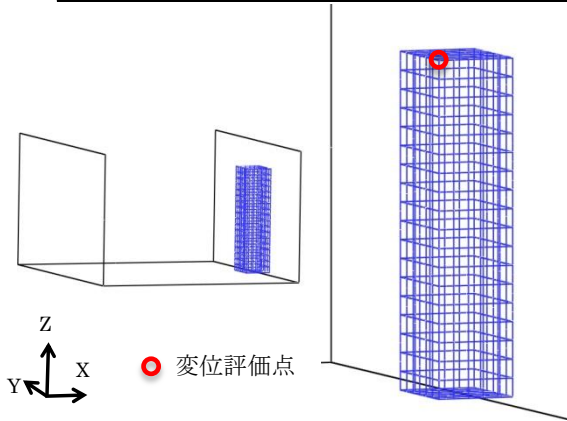


図-12 什器モデルの概観

表-5 接触パラメータ

什器の種類	α [kgf]	q	D_c [kgf]
本棚	157	1.0	188.4

α : ペナルティ定数, q : ペナルティ指数
 D_c : 減衰に関する係数 ($=\alpha \times 1.2$)

表-6 動摩擦係数

什器の種類	X軸方向	Y軸方向
本棚	0.188	0.234

※静止摩擦係数の80%の値

再現できているが、脚部詳細化モデルの方が振幅、振動数とも実験と対応が良い結果となっている。実験で見られたX方向の残留変位(X方向の移動)は、脚部詳細化モデルでのみ再現できている。しかし、実験と逆方向の移動になっている。これは実験では机が回転したためである。また、図-9に示すように、片足が大きく跳ねた後に小さく跳ねるような、実験で見られた特徴的な挙動が解析でも再現できた。

次に、図-10に加速度0.4G周波数2Hzの正弦波を入力した場合の評価点での椅子の変位を示す。この場合も図-11に示すように、実験で見られた特徴的な挙動が解析で再現できたが、変位の振幅と周期は机の場合ほど良好ではない。これは、解析モデルでは試験体に存在したガタや組付き誤差等を考慮していないことに加え、椅子の重量が机よりもさらに軽く、試験体に作用する抗力や慣性力よりも摩擦力の影響が顕著になったためと思われる。

地震時の什器の挙動は、什器の質量と床の加速度により生じる慣性力と、摩擦係数と床からの抗力により生じる摩擦力の2つの力に大きく依存する。今回の解析では、対象とする什器が二つとも軽く、台上加速度も小さかったため、什器に生じる慣性力が小さかった。そのため、相対的に摩擦力が什器の挙動に与える影響が大きくなった。他方、実験では、什器と床の接触状態が時々刻々と変化し、摩擦係数も変動していくことが考えられる。そのため、動摩擦係数を一意に与えた解析との間には差異が生じる。この差が今回の解析と実験結果の差異につながったものと考えられる。

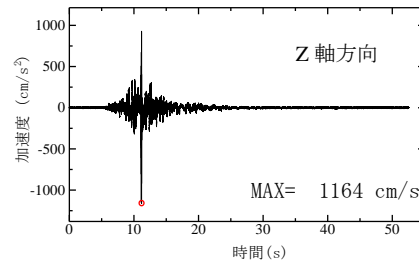
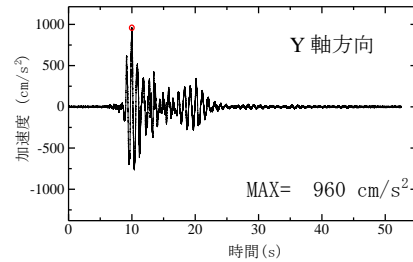
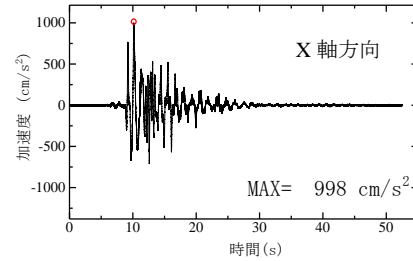


図-13 解析に用いた床応答加速度

3. 本棚の地震時挙動解析

地震の際に大きな危険が生じる現象として、質量が大きく、重心位置が高い什器の移動や転倒が考えられる。そこで、質量が大きい什器として本棚の挙動解析を行った。解析モデルの諸元を表-4に、概観と評価点位置を図-12に示す。このモデルは、一般的な本棚を想定して作成した。また、本棚の中には内容物が入っていると仮定し、質量を大きめに設定した。モデル化や接触のパラメータの設定は2節の机と椅子と同様に行った。接触パラメータを表-5、動摩擦係数を表-6に示す。壁との接触は、床との接触と同様に考慮し、その摩擦係数は床と接触する際のY軸方向と同じ値に設定した。モデルの要素数と節点数は1,848と1,392である。解析の入力波には、図-13に示す中層建物の上層階における床応答加速度を用い、解析の時間増分は1msとした。また、解析所要時間は、CPUが3.0GHz、RAMが4GBのPCを用いて約8時間であった。

図-14に什器に生じる変位を示す。什器は壁との接触により跳ね返り、滑りながら移動した後、ロックインして反時計回りに約45°回転した。その後、最終的に転倒した。このように質量が大きい什器において転倒が見られたことから、地震対策の重要性が再認識される。一方、特に図の約15秒時に不自然に滑っている箇所があるため、今後はこのような質量の大きい什器においても実験との比較が必要である。

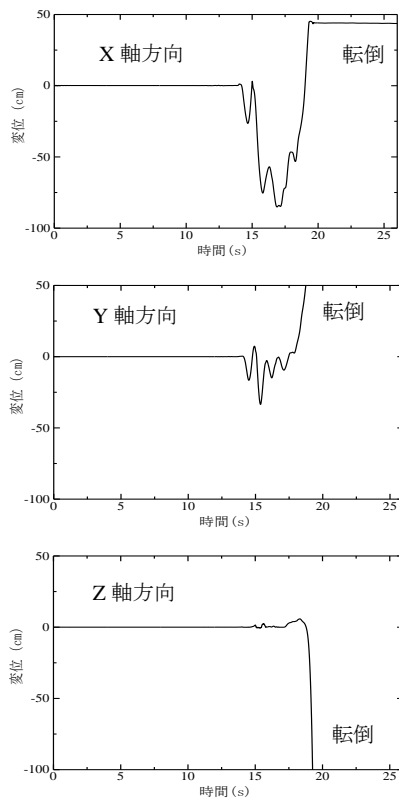


図-14 評価点位置での変位

4. おわりに

本研究では、小学生用の机と椅子を対象とした小型振動台による加振実験を行い、また、それらを数値モデル化し、実験の再現解析を行った。正弦波を入力した実験

では、ロックングすることにより片足が大きく跳ねた後、小さく跳ねる特徴的な挙動を示した。解析では、床と接触する突起を詳細にモデル化することで、什器の挙動が概ね再現された。また、中層建物の上層階における本棚の地震時挙動解析を行った結果、本棚の転倒が見られ、地震対策の重要性が示唆された。

今後は、より大きな加速度を持つ地震波を用いて教室内的複数の什器を対象とした挙動解析を行う予定である。本稿では詳細を記さなかったが、本研究で用いた解析コードは什器に生じる変形や応力変化を把握できるため、転倒時の詳細な被害評価を実施可能となることが期待できる。また、地震対策の有無による被害評価にも貢献できるものと思われる。

参考文献

- [1] 東京都教育委員会補助教材「災害の発生と安全・健康～3.11を忘れない～」, (2011), <http://www.kyoiku.metro.tokyo.jp/press/pr111110b.htm>.
- [2] 梶原 浩一, 岡崎 太一郎, 清水 秀丸, 荒木 康弘, 難波 尚, 松森 泰造, 藤谷 秀雄: 既存木造校舎に関するE-ディフェンス実験: その6 地震時の教室空間(振動台実験(1),構造III), 日本建築学会学術講演梗概集, (2011), pp. 523-524.
- [3] 磯部 大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, (2004), pp. 39-46.
- [4] 荻野 弘明, 山下 拓三, 金子 美香, 磯部 大吾郎: 家具・什器の地震時挙動を再現する有限要素解析手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第718号, (2015), pp. 1687-1697.
- [5] 磯部 大吾郎, 山下 拓三, 田川 浩之, 金子 美香, 高橋 徹, 元結 正次郎: 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, (2015), pp. 1891-1900.