

医療施設内の什器を対象とした地震時挙動解析

Motion Analysis on Seismic Behavior of Furniture in Medical Facilities

荻野弘明¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Hiroaki Ogino 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: cherbou92@gmail.com)

2) 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, it is assumed that medical facilities will not be able to preserve its original function due to damage and trouble of furniture. To achieve the preservation of function, the behaviors of furniture with casters need to be considered because there is much furniture in medical facilities. To improve the seismic performance of medical facilities, shaking tests for a specimen assuming a hospital including real furniture and equipment were conducted at NIED. In this study, the motion behaviors of furniture with casters in medical facilities under seismic excitations based on the data of shaking tests were analyzed. To realize various contact phenomena during seismic excitations, the ASI-Gauss code including frictional contact algorithm based on the penalty method was adopted. As a result, it was confirmed that a fixed condition of casters had a great effect on the motion behaviors of furniture in medical facilities.

Key Words : Furniture, ASI-Gauss technique, Penalty method, Motion analysis, E-Defense

1. 序論

今後、想定される首都直下地震などの大地震が発生した際、医療施設は什器の破損や故障、薬品棚の転倒などにより本来の機能を保持できず、医療活動に大きな支障が出るのが懸念されている。過去には医療施設が大地震の被害を受けて診療不能となり、患者の治療に大きな影響を及ぼしたという事例が存在している。したがって、震災後の生命維持の拠点となる医療施設に対する地震対策が早急に求められている。しかし、過去の震災において耐震構造の医療施設は甚大な被害を受けたにも関わらず、現在でも有効な対策方法や指針は示されていない。また、対策の1つとして建物の揺れを軽減できることから、免震構造の医療施設が近年増加している。免震構造の医療施設は、共振現象が懸念される長周期地震動を受けた経験がなく、その被害予測の研究が現在なされている。

震災後の医療施設の機能保持を検討する上で、キャスター付什器の地震時の移動や転倒を考慮する必要がある。医療施設内には利便性の観点からキャスター付什器が多数存在するためである。しかし、これまでに医療施設内のキャスター付什器の大きな移動や転倒が起こったという報告が数多くされている。例えば、1995年に起こった兵庫県南部地震の際にはキャスターをロックした場合には重心の高い機器が転倒し、フリーにした場合には機器が動き回り、他の機器や壁に衝突したという被害があった[1]。このことから、地震時におけるキャスターの固定状態は、震災後の医療施設の機能保持に大きな影響を及ぼす可能性が高いと考えられる。

以上の背景から、防災科学技術研究所では医療施設を模擬した実大の建物に対して加振実験を行い、キャスタ

ー付什器の挙動を示す定量的なデータを取得している[2]。しかし、固定状態の異なるキャスター付什器の挙動を検証するために、固定状態を変えながら加振実験を繰り返すことは困難である。解析においても、固定状態を考慮した地震時の什器の挙動解析に関する報告は少ない。

そこで本研究では、防災科学技術研究所で得られた実験データを基に、数値解析を用いて異なる地震動下における医療施設内のキャスター付什器の挙動を明らかにすることを目的とする。さらに、キャスター付什器の固定状態の違いが挙動にどのような影響を及ぼすのかを調べることを目的とする。

解析手順として、初めに実験データを基に什器と手術室を対象としてモデル化を行う。次に、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]を用いて、什器の挙動解析を行う。なお、この解析コードにはキャスター付什器の固定状態を再現する手法を導入している。

2. 解析手法

物体同士の接触現象を再現するために、本研究ではペナルティ接触理論に基づく接触アルゴリズムを用いた。本章では、そのアルゴリズムについて述べる。

ある部材幅を持つ要素1と要素2の接触を考える。ここで、要素1は要素2に対して相対速度 \boldsymbol{v} のベクトルを持っているとする。本接触アルゴリズムでは、要素軸間の最短距離が2つの要素の部材幅の平均値より小さくなった場合、要素に対して2つの接触力が働くこととする。その様子を図-1に示す。

1つ目の接触力は、式(1)に示すペナルティ力 \boldsymbol{F}_p であり、接触面の法線方向のみに作用する。

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

ここで、 α はペナルティ定数、 q はペナルティ指数、 \mathbf{n} は接触面の法線ベクトルである。

2つ目の接触力は、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。したがって、動摩擦力 \mathbf{F}_D は式(2)で表される。

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N, \text{ where } (l \leq L) \quad (2)$$

\mathbf{F}_T , \mathbf{F}_N はそれぞれ動摩擦力 \mathbf{F}_D の接線方向成分および法線方向成分であり、次式で表される。

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

$$\mathbf{F}_N = -\mu_N \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_N}{\|\mathbf{v}_N\|}, \text{ where } (l \leq L) \quad (4)$$

ここで、 μ_T と μ_N はそれぞれ接触面の接線方向および法線方向の動摩擦係数である。動摩擦力 \mathbf{F}_D の法線方向成分 \mathbf{F}_N は減衰力として働き、数値安定性の向上に寄与する。その動摩擦係数は、接線方向の動摩擦係数と必ずしも同じ値にはしていない。また、 \mathbf{v}_T と \mathbf{v}_N はそれぞれ要素間相対速度ベクトル \mathbf{v} の接触面の接線方向成分および法線方向成分を表している。動摩擦係数は測定結果を参考に、他のパラメータは試行錯誤的に調整しながら決定した。

3. 解析モデル

(1) 什器

表-1に示す諸元のもと重くて動きにくい什器として手術台、軽くて動きやすい什器として電気メスをモデル化した。それぞれの解析モデルを図-2に示す。手術台は高さを変えられることから、表-1に示すように最低位520[mm]、中位760[mm]および最高位1000[mm]（以下、H520、H760、H1000と表記）の3通りで解析を行った。テーブルトップとコラムの重量は高さに依らず等しくした。重量は部材の密度を変化させることによって調整したが、重心の正確な位置を把握できなかったため、密度は各構成要素内で一様にした。また、各什器モデルの下部には

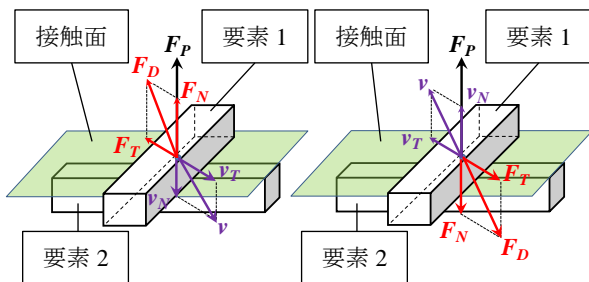


図-1 要素に接触力が作用する様子

キャスターを図-2に示すように4ヶ所設置した。各什器ともに正方形の平面でキャスターを表現し、キャスターの重量は手術台の場合はコラムに、電気メスの場合は架台にそれぞれ含めた。

(2) 手術室

手術室として図-3に示す壁なしと壁ありの2種類の解析モデルを作成した。ここで、各什器の初期位置は両モデルとも同じである。床と壁の変形が什器の挙動に影響を及ぼすことを防ぐために、床と壁は高剛性の弾性体であるはり要素でモデル化し、はり要素の色を灰色で表現した。

表-1 各什器の諸元

		手術台	電気メス
寸法 [mm]	H	520 (H520) 760 (H760) 1000 (H1000)	880
	W	1950	450
	D	500	390
重量 [kg]	M	テーブルトップ:73 コラム:250	本体:14.5 架台:15

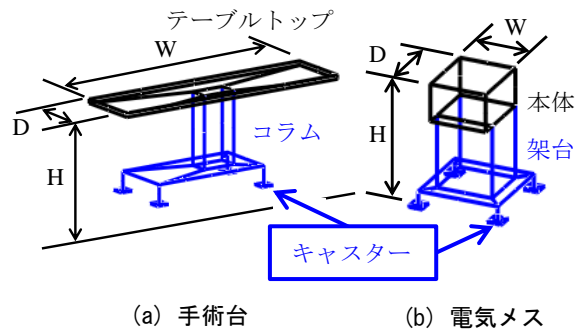
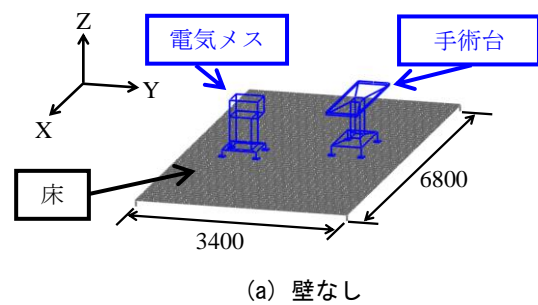
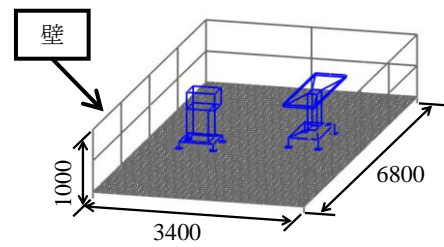


図-2 什器の解析モデルの概観図



(a) 壁なし



(b) 壁あり

図-3 手術室の解析モデル（単位：[mm]）

4. 解析条件

(1) 入力加振波

本研究では、実験で什器の激しい移動や転倒の危険性が確認された2種類の加振波を用いた。1つ目に、実験において耐震構造に短周期地震動であるJMA神戸波80%を3軸方向に入力した際に手術室で観測された床応答加速度（以下、耐震-短周期と表記）を利用した。この加振波は図-3(a)に示す壁なしモデルに入力した。2つ目に、実験において免震構造に長周期地震動である三の丸波100%を水平2軸方向に入力した際に手術室で観測された床応答加速度（以下、免震-長周期と表記）を利用した。この加振波の場合、共振現象によって什器の大きな移動が予想されるため、図-3(b)に示す壁ありモデルに入力した。解析内の時間増分は1[ms]、解析ステップ数は加振波によって異なり、耐震-短周期の場合は20,000[step]、免震-長周期の場合は60,000[step]で行った。

(2) キャスターの固定条件

本研究では、図-4に示すキャスターの車輪回転部と首振り部の固定状態を変化させ、挙動解析を行う。

車輪回転部の固定状態は、車輪が回転する状態（以下、回転フリーと表記）とロックにより回転しない状態（以下、回転ロックと表記）を検討した。これらの固定状態は動摩擦係数の大小によって表現した。

首振り部の固定状態は、首振り部が自由に回る状態（以下、首振り自由と表記）と固定により回らない状態（以下、首振り固定と表記）を検討した。これらの固定状態を表現する上で、キャスターの方向を考慮する必要があると考えたため、図-5に示す什器に固定された座標系（以下、什器座標系と表記）を導入した。首振り部の固定状態は什器座標系に対する動摩擦係数の指向性の有無で表現した。

以上に述べた車輪回転部と首振り部の固定状態を考慮し、表-2に示す計7通りの固定条件で解析を行った。完全回転フリー（ARF）は4ヶ所すべてのキャスターを回転フリーにした状態、完全回転ロック（ARL）は4ヶ所すべてのキャスターを回転ロックにした状態とする。そして、

対角回転ロック（2PRL）は対角に位置する2ヶ所のキャスターを回転ロックにした状態とする。首振り部の固定状態に関しては首振り自由の場合、キャスターの方向を考慮することが困難であるため、動摩擦係数の指向性を持たせないこととした。首振り固定の場合、動摩擦係数の指向性を持たせ、什器座標系X'方向またはY'方向に滑りにくい状態の2つの条件を設定した。なお、キャスターの動摩擦係数は文献[5][6]の中で述べられている静止摩擦係数の値を参考にし、本研究では動摩擦係数を利用していることから、それらの値を超えないように設定した。

5. 解析結果

ここでは、解析結果より得られた、各固定条件における水平方向への移動量の最大値および鉛直方向への変位量の最大値に関する考察を述べる。図-6に電気メスの解析結果、図-7に手術台の解析結果を示す。図中の黒色のプロットは耐震-短周期の結果、赤色のプロットは免震-長周期



図-4 キャスターの構造
(引用：ハンマーキャスター(株)HP)

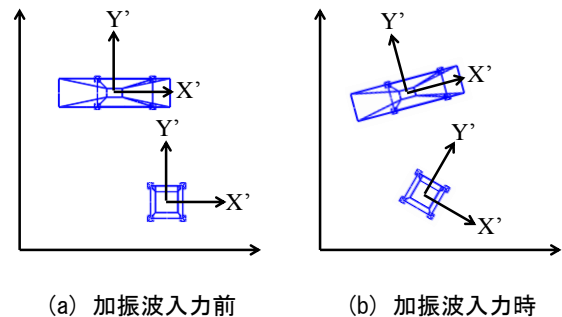


図-5 什器座標系の概念図

表-2 キャスターの固定条件

	手術台		電気メス		
	$\mu_{X'}$	$\mu_{Y'}$	$\mu_{X'}$	$\mu_{Y'}$	
ARF - YF 完全回転フリー - 首振り自由	0.40	0.40	0.015	0.015	
ARL - YF 完全回転ロック - 首振り自由	0.65	0.65	0.25	0.25	
ARL - YLX' 完全回転ロック - 首振り固定 - X'方向に滑りにくい	0.65	0.50	0.25	0.10	
ARL - YLY' 完全回転ロック - 首振り固定 - Y'方向に滑りにくい	0.50	0.65	0.10	0.25	
2PRL - YF 対角回転ロック - 首振り自由	Free	0.40	0.40	0.015	0.015
	Lock	0.65	0.65	0.25	0.25
2PRL - YLX' 対角回転ロック - 首振り固定 - X'方向に滑りにくい	Free	0.40	0.40	0.015	0.015
	Lock	0.65	0.50	0.25	0.10
2PRL - YLY' 対角回転ロック - 首振り固定 - Y'方向に滑りにくい	Free	0.40	0.40	0.015	0.015
	Lock	0.50	0.65	0.10	0.25

ARF = All rotation free
 ARL = All rotation rock
 2PRL = 2-place rotation rock
 YF = Yawing free
 YLX' = Yawing lock and directivity to X' axis
 YLY' = Yawing lock and directivity to Y' axis
 $\mu_{X'}$: 什器座標系 X'方向の動摩擦係数
 $\mu_{Y'}$: 什器座標系 Y'方向の動摩擦係数
 Free: 回転フリーのキャスター
 Lock: 回転ロックのキャスター

の結果を表しており、鉛直方向への変位量は転倒の可能性を示すデータとなっている。

初めに、電気メスの結果について述べる。図-6(a)より完全回転フリー (ARF) の場合、免震-長周期において極端に大きく移動しているが、完全回転ロック (ARL) の場合には移動量を抑制できることが確認された。そして、対角回転ロック (2PRL) の場合、完全回転ロックに比べ大きく移動する傾向がみられた。また、図-6(b)よりどの固定条件においても、ロッキングは生じにくいことが確認された。したがって、電気メスのような軽くて動きやすい什器に関しては、車輪の回転をロックすることが地震対策として有効であることが確認された。

次に、手術台の耐震-短周期の結果について述べる。図-7(a)より、水平方向への移動量の最大値の結果に関しては電気メスと同様の傾向がみられた。ロッキングに関しては、図7-(b)より完全回転フリーの場合、他の固定条件に比べ抑制できることが確認された。これは、キャスターが滑ることによって転倒モーメントの低減につながったと考えられる。しかし、手術台の高さが最も高いとき、つまり重心の位置が高いとき、完全回転ロックの場合において大きくロッキングする可能性があることを確認した。また、同じ首振り固定でもX'方向に滑りにくい状態とY'方向に滑りにくい状態では鉛直方向への変位量の最大値が大きく異なる結果となった。したがって、手術台のような重くて動きにくい什器に関しては、特に重心の位置が高い場合において車輪の回転をロックするだけでは地震対策として不十分であると考えられる。また、免震-長周期の場合は図7-(a)より、どの固定条件においても移動量は極めて少ない結果となった。

6. 結論

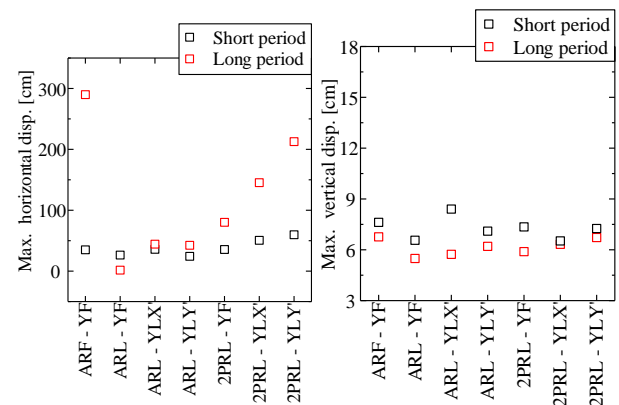
本研究では、防災科学技術研究所で行われた医療施設を対象とした実規模振動実験のデータを基に什器と手術室のモデル化を行った。什器のキャスターの車輪回転部と首振り部の固定状態は動摩擦係数の値を変化させることで表現した。そして、それらの固定状態の異なるキャスター付什器に対し、異なる地震動下における医療施設内の什器の挙動解析を行った。その結果、地震動の種類と建物の構造の種類が地震時の什器の挙動に大きく影響することが実験と同様に確認された。さらに、キャスターの固定状態や什器の重心の高さが地震時の什器の移動量や転倒のしやすさに大きく影響することがわかった。今後、医療施設に対し、キャスター付什器の固定状態を考慮した地震対策について明確に示す必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 中山 茂樹:病院建築・設備と医療機器等の耐震性, 臨床外科, vol.51, No.13, 1996, pp.1545-1549.
- [2] 独立行政法人防災科学技術研究所「ASEBI」:重要

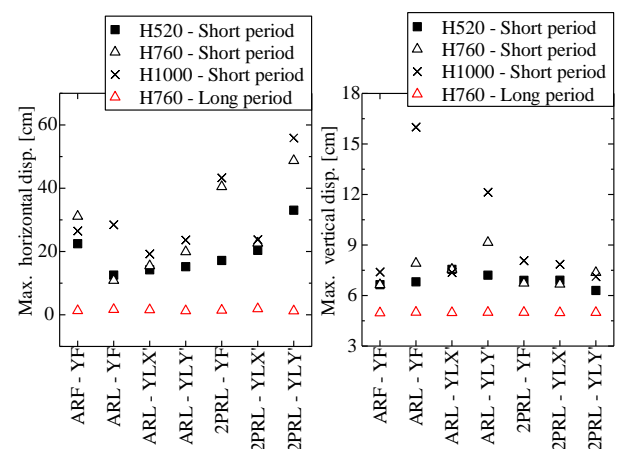
施設の耐震実験, <https://www.edgrid.jp/datas>

- [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] 賀 鐘輝, 磯部 大吾郎, 金子 美香, 堀 宗朗: ASI-Gauss法を用いた家具の転倒挙動解析, 計算工学講演会論文集, Vol.17, 2012.
- [5] 佐藤 栄児, 酒井 久伸, 福山 國夫, 古川 幸, 鎌田 崇義, 寛 淳夫, 小林 健一, 井上 貴仁, 中島 正愛:医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験 震災時における都市施設の安全性・機能性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第650号, 2010, pp.771-780.
- [6] 金子 美香, 丑場 英温, 西谷 隆之, 小倉 賢人, 西谷 章, 松井 智沙, 川崎 志保理:透析室および手術室内の医療機器の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, pp.669-670.



(a) 水平方向への移動量の最大値 (b) 鉛直方向への変位量の最大値

図-6 電気メスの解析結果



(a) 水平方向への移動量の最大値 (b) 鉛直方向への変位量の最大値

図-7 手術台の解析結果