

陳列文化財の地震時転倒安全性 簡易評価システムの開発

野澤 亮太¹・尾崎 潤²・長嶋 文雄³

¹首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市システム科学域 大学院生
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:nozawa-ryouta@ed.tmu.ac.jp

²東京電力(株) 神奈川工事センター (〒241-0833 神奈川県横浜市旭区南本宿2-1)

E-mail:ozaki.jun@tepcoco.jp

³首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:fumio-n@ecom.metro-u.ac.jp

兵庫県南部地震(1995)での文化財被害の教訓から,博物館などの展示物の転倒安全性を高めるために二次元免震装置が急速に普及した。しかし,新潟県中越地震(2004)では,この免震台上に置かれていた国宝の火焰土器が転倒・破損する被害を受けた。以後,免震台と他の転倒防止具との併用をするなど転倒に対する対策がとられているが,複雑な形状をしている文化財の転倒防止対策を施す必要の有無の判断やどのような対策をどの程度とすべきかなどの検討は地震工学の専門家にとっても難しい問題である。本研究は,文化財の地震時転倒安全性評価を支援するシステムの開発を目的としており,専門知識を持たない学芸員や一般の人を対象にし,できるだけ操作が簡易なシステムを目指したものである。

Key Words : Cultural Properties, Seismic Safety, Computer Support System, Java3D

1. はじめに

博物館や美術館では,国民の宝である文化財をなるべくあるがままの形で展示・陳列するように気を配り,さらに配置を考え,また照明や周囲との調和が保てるようになど細かい気遣いをしている。一方,文化財は大切に保存してできるだけ長く後世へ継承して行かなくてはならず,盗難,汚損,劣化などを防ぐ目的でガラスケースの中に置かれ,また,ごく稀に発生する大きな地震動によって転倒・破損しないようにジグを用いて固定・支持される場合がある。この「展示」と「保存」は,したがってトレード・オフの関係にあるとも言え,当事者にとっては切実で悩ましい問題である。

兵庫県南部地震(1995年)での文化財被害の教訓から,このトレード・オフの関係を解消するような二次元免震装置が開発されたが,新潟県中越地震(2004年)では,十日町博物館において,免震台上に置かれていたにもかかわらず国宝の火焰土器が転倒し,破損するという被害を受けた。以降,免震台と他の転倒防止具との併用をするなど転倒に対する対策が工夫されているが,複雑な形状をしている器物などの転倒安全性の検討は,地震工学の専門家でも

簡単なことではない。

本研究は,地震工学やコンピュータなどの専門知識を持たない学芸員や一般の人を対象とした文化財の地震時転倒安全性評価システムの開発を目的としたものである。このために情報処理の先端技術であるJava3Dを用いて,立体画像を見ながらモデル作成,転倒安全性評価,転倒防止具の効果の検討など殆どどの操作をマウスのみで行うことができるように工夫している。転倒安全性評価のためのロジックとしては,墓石の転倒問題の基礎理論を,任意形状を有する立体へ拡張したものを新たに組み立てて用いている。

2. 陳列文化財の転倒防止対策

陳列文化財の転倒・破損防止のために,(a) 重心を下げる,(b) 固定する,(c) 治具を用いて支持する,(d) 免震する,などの対策がとられている。写真1の左側の土器は内部に比重の重い鉛粒を入れて重心を下げており,また右側の土器は五徳状の支持具を用いて支持している。写真2は,長岡市立科学博物館での転倒防止対策の例を示したもので,免震



写真1 鉛粒による転倒防止対策（左）と五徳状支持具（右）



写真2 免震台と天蚕糸による支持

台と天蚕糸（てぐす）による固定を併用している。

文献1)では、300gal程度以上の転倒限界加速度を有する器物は、免震台上に設置されていれば、天蚕糸などの転倒防止対策を施さなくとも激震に対して転倒しにくいことなどが報告されている。したがって、転倒防止策を講じるためには、まず器物そのものの転倒安全性を評価し、次に何らかの対策をする必要がある場合には錘や転倒防止ジグを含めた全体系の安全性評価をする必要がある。

3. 転倒安全性の評価手法

(1) 三次元モデルの転倒限界加速度概算法

まずは簡単のために図1に示すような剛体（ $2h \times 2\ell \times 2d$ 、ただし $d > \ell$ ）の転倒問題を考える。剛体の全質量 m を重心位置 G に置き、転倒モーメント mah と抵抗モーメント $mg\ell'$ を、床とのすべりが生じないと仮定して求める。ここで ℓ' は重心 G を底面に投影した点 G' から回転軸までの垂直距離であるが、地震の入力方向は任意として考えなければならないので、転倒限界加速度 α_{lim} の値を求めるためには、最小の ℓ'_{min} を求めなければならない。

底面の角と短辺の midpoint および長辺の midpoint をそれぞれ A, B, C とする。点 G' -点 A 間の距離を s とすると長さの関係は $s > d > \ell$ であるから、抵抗モーメントが最小となるのは、長辺を回転軸とした場合であ

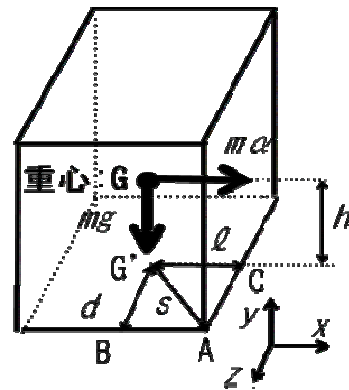


図1 三次元モデルにおける転倒問題

ることが分かる。したがって、3次元の転倒問題には底面形状が転倒安全性に大きく影響し、重心を底面に投影した点 G' からの垂直距離が最も短い回転軸に関する抵抗モーメントを求める必要があることが分かる。

(2) 転倒時の回転軸探索理論

図2に示すような多角形 $ABCDEF$ で底面が構成される場合を例として、より一般的な底面形状における転倒限界加速度値の評価手法について考える。

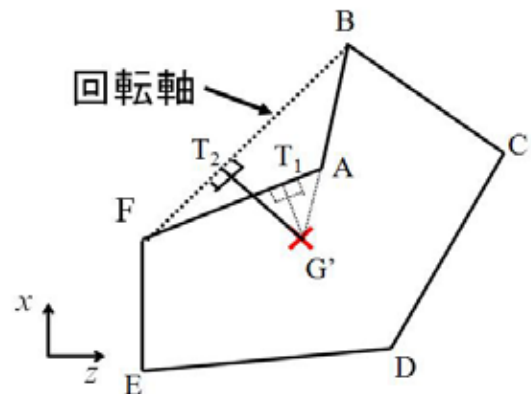


図2 任意底面形状における重心の位置と回転軸との関係

G' から各辺に引いた垂線と各辺との交点を $T_i (i=1, 2, \dots)$ とし、回転軸の抵抗モーメントは、単に G' から各辺までの垂直距離が短いほど小さくすると考える。すると、垂線の長さが最も短い辺 $G'T_1$ を構成する辺 AF 、ないしは頂点 A が抵抗モーメントを最小にする回転軸または回転中心となることになる。しかし、多角形の凹状を構成する辺や角は他の凸状の角の影響で回転軸の一部になり得ないため、このような転倒は起こり得ない。

したがって、回転軸の候補としては、点 F と点 B を結んだ多角形 $BCDEF$ を構成する各辺となり、この中で G' からの垂線の長さが最も短い辺 $G'T_2$ を構成する辺 FB が回転軸となる。以上の考察から、回転軸を求めるためには、底面形状を全ての角が凸状になるように変形する必要があることが分かる。

次にさらに一般化した、複数の多角形で構成され

る底面形状の場合を考える。図 3 に 3 個の矩形によって構成される底面形状を示した。頂点の座標データのみ取り出し、この中から外輪郭を形成する点のみを抽出する。外輪郭を形成する点列の抽出手順は以下に示す手順により行うことができる。

1) x 座標の最小値 $x_{\min}$ と最大値 $x_{\max}$ を検索する。

最小値, 最大値が複数存在するときは, その中のどれかの点を選ぶ。

2) $x_{\min}$ の点から他の全ての点に線分を引く。この時, 線分の傾きが最大になる点を検索し, 点 P1 とする。線分の傾きは x 軸から反時計回りに正, 時計回りに負をとる。この P1 は多角形を構成する一つの頂点となる。

3) P1 からこの点よりも x 座標値が等しいか大きい点に線分を引く。これらの線分の中で傾きが最大になるものを選択して P2 とする。

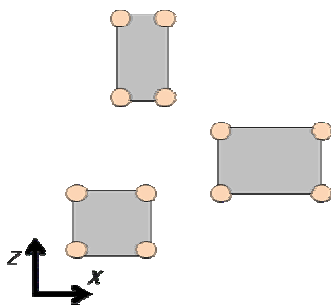


図 3 複数の多角形で構成される底面形状

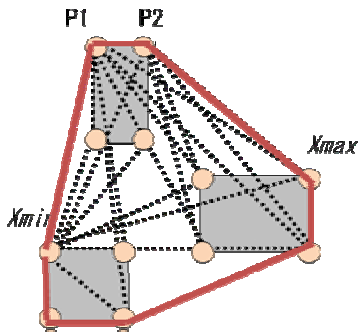


図 4 多角形の外輪郭

4) この操作を $x_{\max}$ になるまで繰り返す。

5) $x_{\max}$ に達した後は, x 座標値が等しい, もしくは小さい点に線分を引き, その中で傾きが最大になる点を選択する。

6) この操作を $x_{\min}$ になるまで繰り返す。

以上の操作により, 底面に置かれた複数の多角形の頂点から, 外輪郭を構成する点列が検索される (図 4)。この外輪郭の点列を結ぶ線分の内, G' までの垂直距離が最も短いものが求める回転軸となる。

(3) 文化財の重心位置の算出方法

体積素片 $dv = dx dy dz$ の座標を (x, y, z) とすると, 重心 G の座標 (x_G, y_G, z_G) は材質によって異なる質量密度を ρ_i とすると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_G &= \iiint_V x \rho_i dx dy dz / m \\ y_G &= \iiint_V y \rho_i dx dy dz / m \\ z_G &= \iiint_V z \rho_i dx dy dz / m \end{aligned} \quad (1)$$

ここで, m は全質量であり, 次式で計算される。

$$m = \iiint_V \rho_i dx dy dz \quad (2)$$

式(1), (2)における体積素片 $dv = dx dy dz$ を拡張解釈して, 器物を構成する部分 (パーツ) あるいは要素 (エレメント), 小さい場合は, 体積素片と同様の扱いをして近似計算をすることができる。

(4) 転倒限界加速度の算出方法

以上より, 立体の転倒は底面の外輪郭を形成する多角形の辺の内, G' 点からの垂直距離が最短の辺を回転軸にして起きることが分かった。G' 点から外輪郭への垂直距離はベクトルの直交条件式などを用いて計算することができ, このとき, G' が外輪郭で構成される多角形の外にあるときは自立せず, 不安定な器物となる。この場合には $\alpha_{\lim}$ の算定時に "unstable" と表記することになっている。最短の垂線の長さを $l_{\min}$ 重心の高さを y_G とすると, 転倒限界加速度 $\alpha_{\lim}$ は,

$$\alpha_{\lim} = \left(\frac{l_{\min}}{y_G} \right) g \quad (3)$$

と求めることができる。尚, 一連の回転軸探索ロジックについては文献 2) で詳細に述べている。

4. 転倒限界加速度評価支援システム

図 5 に本研究で開発した転倒限界加速度評価支援システムの初期画面 (入力モード) と, 作業メニューの一覧を示した。文化財保存の実務において行われるであろう作業を想定して, 図 6 に示すような PDCA サイクルを試作した。なるべく難しい手続きは踏まずに, この PDCA サイクルの各工程を処理しやすい環境を提供することを念頭に置いてプログラムを組んだ。その一つとして, キーボードからの入力を極力減らし, プルダウン・メニューなどを用意してマウス操作のみでほとんどの処理を可能にするなど, 日常的にコンピュータを使用している人だけでなく, コンピュータ操作に不慣れな人などでも操作がしやすいように GUI (グラフィカルユーザインターフェイス) を駆使した。開発には GUI 環境でのプログラミングに優れ, コンピュータの OS (オペレーティングシステム) に依存せず, オブジェクト指向型プログラム言語である Java 言語を用いた。



図 5 初期画面（入力モード）と処理内容

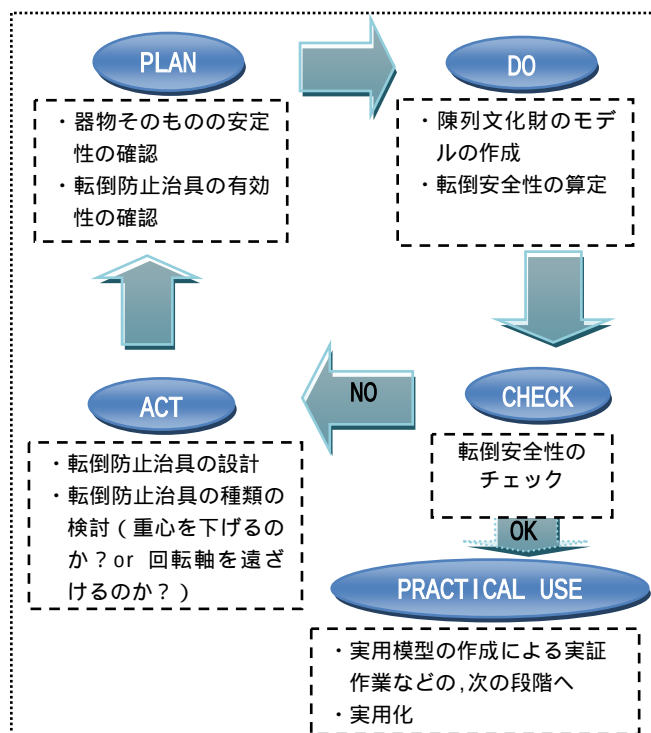


図 6 転倒防止対策における PDCA サイクル

(1) Java 言語を用いたプログラミング

Java 言語を用いたプログラミングについて簡単にまとめる。Java 言語では関数に代わり、処理を実行するデータ（フィールド）と、手続き（メソッド）を一まとめにした「クラス」を用いてプログラムを組み立てる。Java 言語等のオブジェクト指向型プログラム言語ではサブルーチンとして「メソッド」という仕組みを用いている。

また、Java 言語向けの三次元グラフィックスの拡張 API (Application Programming Interface) である Java3D を用いることで、本システムにおけるグラフ

ィック処理を可能とした。次に、本システムの操作モードの詳細について述べる。

(2) 入力モード

入力モードでは陳列文化財の幾何形状や質量密度データをパーツ毎に入力していく。右側のウィンドウが作業領域であり、400 mm 角の台が用意されている。各パーツをこの平面上に配置することになるが、形状が大きくなってしまっ、この平面をはみ出しても構わない。ただし、この $x-z$ 平面レベルより下にパーツを作成することはできない。

画面の左側には 10 個のボタンと、重心の座標値・転倒限界加速度値を表示する領域がある。基本的な幾何形状を 7 種類用意し、これらをボタン登録している。

入力モードで行われる処理の流れを図 7 に示す。作成したいパーツの形状に合わせてボタンを選択すると、寸法と材質を入力するサブ・ウィンドウが現われるので、これを使って寸法を mm 単位で入力する。

円筒や中空円錐のように厚さの入力がある場合には、円形の半径は外径の半径の値を入力する。円形は基本的に円周を 20 等分し、その間を直線補間して表しているの、補間部は実際の外径よりもやや短くなっている。そのため、底面の外輪郭が円形の場合には、これが理由で若干転倒限界加速度値が小さ目（安全側）に評価される。

材料の質量密度の入力は、理科年表などで調べる手間を省けるように材質のプルダウン・メニューの中から近いものを選択することで与えられるようにした。材料は、磁器、ガラス（普通・クラウン・フリント・パイレックス）、レンガ、大理石、土、象牙、乾燥木材（桐、樺、栗、榿）、鉄、銅、鉛、金、銀など全部で 20 種類用意している。

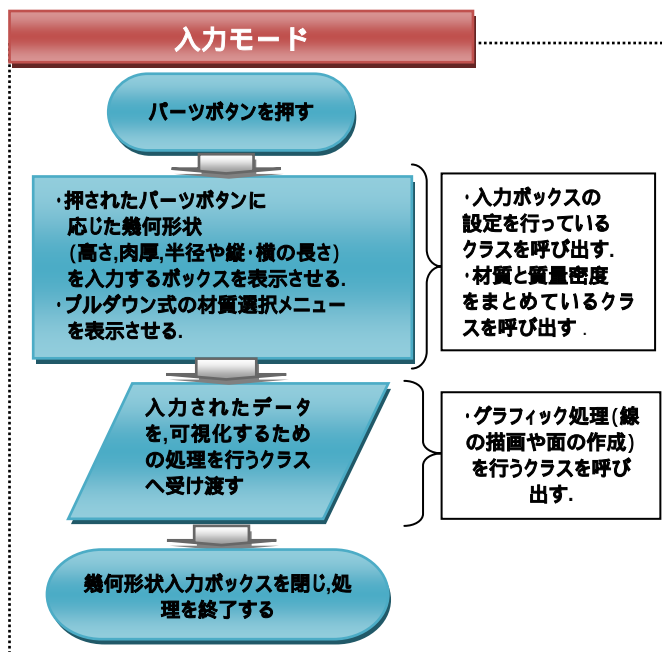


図 7 入力モードにおける処理の流れ

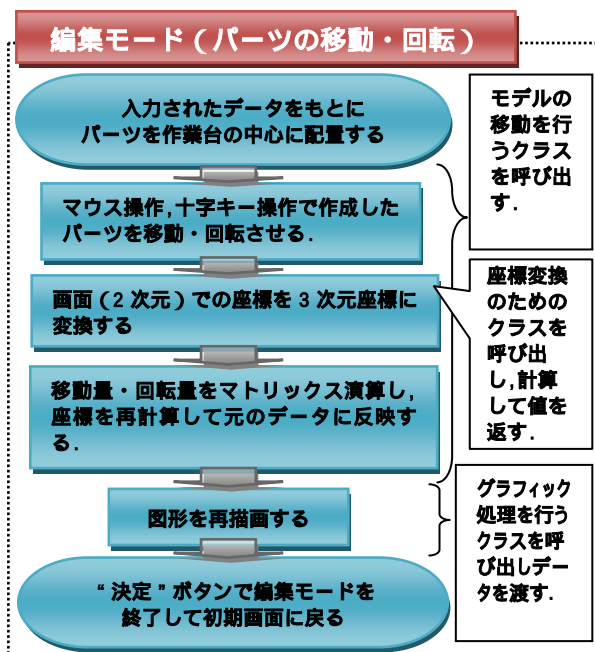


図 8 編集モードにおける処理の流れ

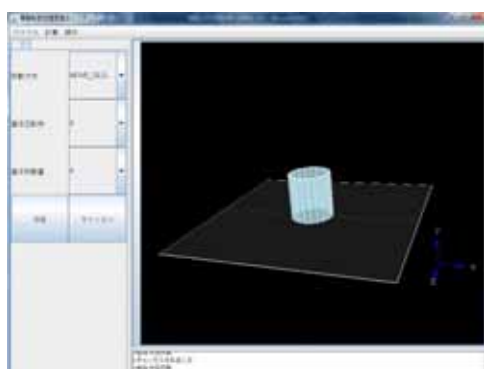


図 9 移動・回転の編集モードのボタン

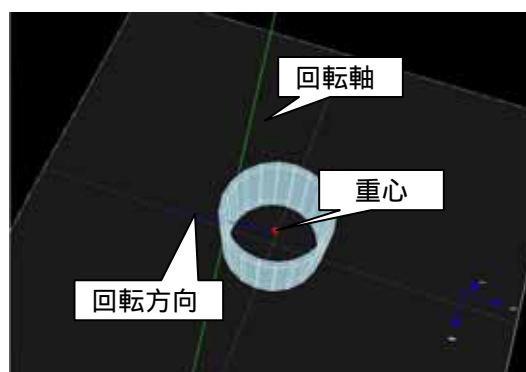


図 11 転倒限界加速度算定結果



図 10 幾何形状入力ボックス(左)と,回転・編集用のボタン(右)

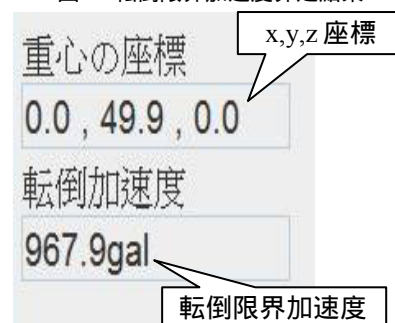


図 12 重心の座標と転倒限界加速度値の結果表示

(3) パーツの移動・回転の編集モード

この操作モードでの処理の流れを図 8 に示した。入力モードでパーツを作成するとこのモードに移る(図 9)。このモードでは,入力モードで形状と質量密度を指定したパーツが座標原点を円の中心にするように置かれているので,これを平行移動や回転移動し,位置の微調整などを行う。平行移動や回転は区切りのよい数値毎にデジタルに変化量を指定

することもできる(図 10)。この時には,マウスを前後することによって指定した座標方向のみの移動,または座標周りのみの回転移動が可能となる。この操作は方向キーを使っても同様に行うことが出来る。マウスのホイールを押し下げながら前後に動かすと作業領域画面がズームイン,ズームアウトする。左ボタンを押し下げながらマウスを移動すれば 3D 画面が回転し,右ボタンでは平行移動する。ボタン画面左下の「決定」ボタンを押すとパーツが作成された状態で初期画面に戻る。

この入力モード、パーツの移動・回転モードを繰り返すことで、複数のパーツからなるモデルを作成することができる。パーツは必ずしも相互に接触している必要がなく、パーツが離れていたとしても、重心の座標値・転倒限界加速度値は算定できる。また、このような処理を行う度に作業領域ウィンドウの下のコソール画面に処理内容が表示される。パーツの表示色は複雑なモデルであっても内部構造が分かるように半透明なものを用い、材質毎に色を変えている。

(4) 転倒限界加速度算定結果

図11は重心位置と転倒限界加速度の算定結果を例示したものである。作成したモデルは中空円筒で、高さ100mm、半径50mm、厚み5mm、ガラス材質の場合である。転倒限界加速度算出ボタンが押されると、計算された重心位置に赤い球が表示され、これから転倒限界加速度を算定した方向へ青い線を引くようにしてある。回転軸は緑色で表示され、計算された重心、転倒限界加速度値が画面左下に表示される(図12)。

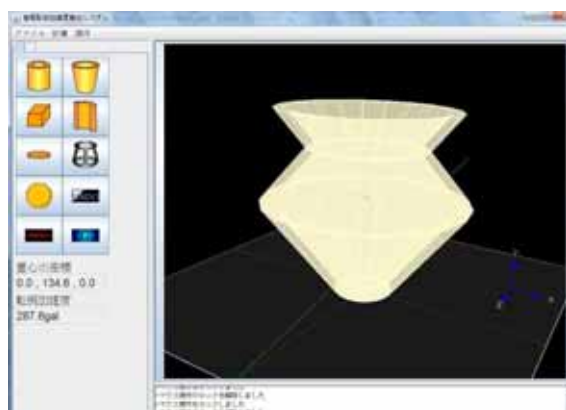


図 13 瓶壺を想定したモデルの作成

5. システムを用いた転倒防止具の効果の検討

本システムを用いて文化財を想定した数種類のモデルを作成し、おののちに有効だと思われる転倒防止対策を施し、その効果の検討を行った。

(1) 鉛を用いた転倒防止対策の効果の検討

土器などでも良く見られる形状である、瓶壺を想定したモデル(図13)を作成し(底面半径40mm、高さ250mm)、これに「2. 展示物の転倒被害例と対策」で述べた鉛を用いた転倒防止対策を施した。システム上で高さが10mmの円盤のモデルを作成し、それぞれのパーツを瓶壺を想定したモデルの中に置いていくことで、システム上での転倒防止対策を施した。円盤の上面・下面は瓶壺の半径に対応するように作成し、各高さごとに鉛で満たされていく形にしている。深さが10,30,60mmとなる時の、重心の

表 1 鉛を用いた転倒防止具の効果

条件	重心のy座標 (高さ方向)	転倒限界 加速度値(gal)
対策なし	134.6	287.6
深さ 10 mm	114.5	337.9
深さ30 mm	91.0	425.0
深さ60 mm	69.1	560.1

深さは使用する鉛粒の量(高さ)

座標値の変化と、転倒限界加速度値の変化を表1に示す。

60mmの深さまで鉛で満たすと、転倒限界加速度値はおおよそ2倍となり、モデルの高さの4分の1にも満たない高さの鉛粒でも、その効果が非常に大きいことが数値から確認できる。また深さが10mmの場合においても、§2で述べた「激震に対して転倒しにくい転倒限界加速度」である300galを上回っており、鉛円盤を用いた転倒防止具の有効性を確認することができる。

このモデルにおいては、回転軸となる位置は変わらずに、物体そのものの重心を下げることで、転倒限界加速度を増加させたことになる。このような口径が広く、底面形状が比較的安定している器物には、この対策が有効であることが分かる。

(2) プラスチック支持具の転倒抑止効果

次に図14に示すような、陶磁器を想定した文化財に対しての転倒防止対策について考える。転倒防止具を用いない状態での重心位置と、転倒限界加速度値はそれぞれ(0,187.4,0)、258.1galであった。

このような下部が上部よりも比較的小さい文化財に対しては、重心位置を下げることも、重心の底面投影点から回転軸までの距離を長くすることの方が有効であると考えられる。

底板の大きさが異なる2種類(250×250×10 mm、300×300×10 mm)のプラスチック製の支持具を用いた転倒防止具を作成し(図15)、その効果に対策をしない場合と比較して検討してみる。作成したプラスチック製支持具にモデルを載せ、重心の座標値、転倒限界加速度値を算定したものをまとめたものが表2になる。

この算定結果では底面のプラスチック板により重心の底面投影点から回転軸までの距離が稼げたことが、転倒限界加速度値の増加につながったと考えられる。

この例のような、重心位置が高い陳列文化財に対しては、このような支持具を用いることが有効であると考えられる。

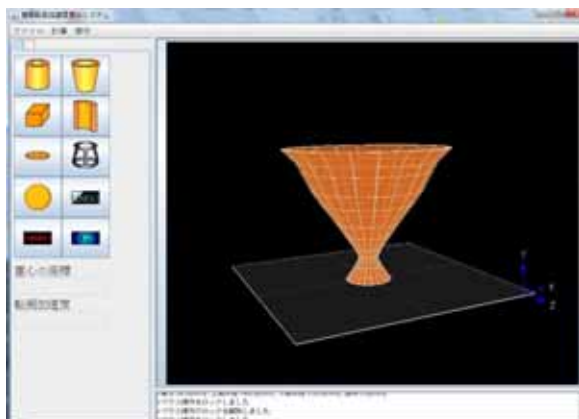


図 14 陶磁器を想定した文化財モデル

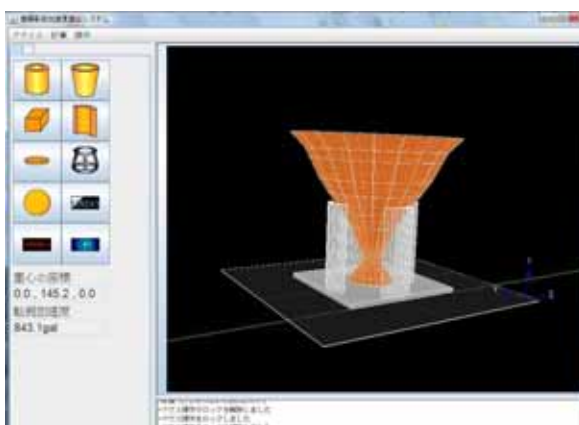


図 15 プラスチック支持具による転倒防止対策

表 2 プラスチック支持具を用いた
転倒防止具の効果の比較

条件	重心の y 座標値 (高さ方向)	転倒限界 加速度値 (gal)
対策なし	187.4	258.1
底板が 250×250×10(mm)	145.2	843.1
底板が 300×300×10(mm)	133	1105.0

(3) 五徳を用いた転倒防止対策の検討

最後に、新潟県中越地震で実際に被災した縄文土器のモデルを作成し、システム上で転倒防止対策（五徳）を施したモデルとの転倒限界加速度の比較を行うことで、転倒防止具の有効性の検討を行った。

作成した火焰土器のモデルは、新潟県津南町大字下船渡道尻手遺跡出土の火焰型土器の寸法（器高 33.3cm、口径 32.8cm、底径 10.1cm）を参考にした³⁾。作成した 2 つのモデル（転倒防止対策を施したものと、施していないもの）を図 16 に示す。なお、五徳の材質は鉄としている。

これら 2 つのモデルの重心位置、転倒限界加速度値を求めものが表 3 になる。表に示すように、転倒限

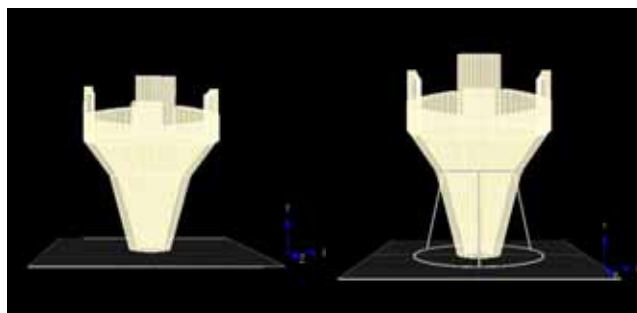


図 16 火焰土器を想定したモデル(左)と、五徳状支持具による転倒防止対策を施した例(右)

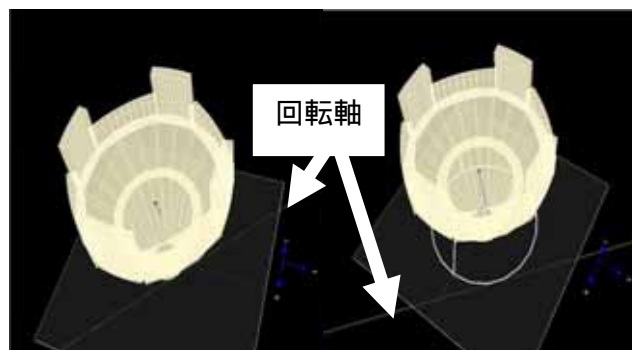


図 17 五徳状支持具による転倒軸位置変化

表 3 五徳状支持具による転倒安全性の比較

条件	重心の y 座標値 (高さ方向)	転倒限界加 速度値(gal)
対策なし	183.4	262.8
支持（五徳）あり	183.4	756.1

界加速度値が五徳を使用することにより、およそ 500gal 増加するという結果が数値から確認できる。

また、重心位置・転倒の回転軸を表示したものの図 17 に示した。五徳を用いることで、重心位置は変わらないものの、プラスチック製支持具と同様に、回転軸（緑色）が重心の底面投影点から遠ざかったことにより転倒限界加速度の値が増加し、五徳の有効性が確認できた。

以上、転倒限界加速度評価の支援システムの操作方法、そしてシステムを用いた転倒防止具の有効性について検討したものをまとめた。本システムはまだプロトタイプの段階であり、今後さらに完成度を増して行きたいと思っている。

6. まとめ

文化財が地震時に転倒・落下して破損する被害は、火事などで消失する場合とは違って、文化財自体はその場に存在し、補修は可能であろう。しかし、補修には多くの時間と膨大な費用が必要である。転倒安

全性の問題は、「開かれた展示」と「確実な保存」という、言わばトレード・オフの関係を考えながら解決しなければならない重要な課題である。

本研究は、地震工学やコンピュータなどの専門知識を持たない人を対象とした、簡易な文化財の地震時転倒安全性評価システムの開発を目的としたものである。このために情報処理の先端的技術であるJava言語を用いて、視覚的に確認しながら、モデル作成、転倒安全性評価、転倒防止具の効果の検討など一連の操作をマウスのみで行うことができるように工夫した。これにより、器物自体の転倒安全性はもちろん、転倒防止ジグを用いた対策の立案を支援する機能を有するコンピュータ・システムのフレームを完成することができた。

ただし、本研究で確立した任意形状物体の転倒安全性評価のためのロジックは、墓石の転倒問題における静的な扱いをする基礎理論を応用しただけである。すなわち、正弦波状の地震波が繰り返し作用するような単純な場合を想定したものであり、また水平方向の地震力のみを静的に考慮したものである。さらに文化財と床面とのすべりなどの挙動は無視しているため、実際の挙動とは異なる。

今後は、土器などの模型を用いた振動台実験を行い、実際の挙動と本システムで得られる安全性評価とのギャップを埋めるための技術について検討してみたいと思っている。

また、本支援システム応用として、地震のたびに繰り返されるコンビニエンス・ストアや酒屋のビン類の転倒・落下事故に対する安全性の検討を考えている。これも、「お客さんのための解放された商品の展示」と「減災のための管理」というトレード・オフ

の関係で決まる問題であるが、僅かな備えで被害が相当減ると思われる。

さらに、文化財は国際的に貸し出しなどが行われており、飛行機やトラックなどでの移動中の破損事故が起きている。この問題を予防するためのツールなどにも応用できるものと思われ、今後は地震時のみでなく、そういった常時に起こる問題についても検討していきたい。

謝辞：東京国立博物館文化財部保存修復課の神庭信幸氏には本研究で開発した支援システムを実際に使って頂き、本論文で展開した新システムに関する貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 文化財保存修復学会編：私たちの文化財を救え！！（災害と向き合う）、(株)クバプロ、2007。
- 2) 長嶋文雄、尾崎潤、池田典史：文化財の転倒限界加速度評価システム、歴史都市防災論文集Vol.1, pp.111-116, 2007。
- 3) 九州国立博物館・新潟県津南町教育委員会監修：よみがえる被災火炎型土器（新潟県中越地震で被災した津南町所蔵の縄文土器の修復記録）、(株)クバプロ、2005。
- 4) 文化財保存修復学会編：文化財は守れるのか？「阪神・淡路大震災の検証」、(株)クバプロ、1999。

DEVELOPMENT OF SEISMIC SAFETY EVALUATION SYSTEM FOR EXHIBITED CULTURAL PROPERTIES

Ryota Nozawa, Jun Ozaki and Fumio Nagashima

Seismic isolation method using two-dimensional device has been spreaded as a lesson of the cultural properties damaged by Great Hanshin-Awaji Earthquake of January, 1995. However, The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, cultural properties (ex. national treasures, important cultural properties) were damaged in an overturn, though they were located on a seismically isolated tables. After the earthquake, seismic isolation devices are becoming a combination of other equipments to prevent an overturn. This paper describes about a computer system to evaluate the safety of cultural properties during an earthquake. And explains the results of the overturn safety evaluating logic considered in the development stage and the results of the study on effective jigs to prevent overturning of exhibited cultural properties using this system.