

## 3次元データを利用した文化財の地震対策

### Earthquake countermeasures for cultural properties using 3D data

和田 浩

Hiroshi WADA

Key words: museum, earthquake, art objects, cultural properties, 3D data, support

Today, we have an environment where we can easily build 3D models of objects using familiar devices and applications. There are also many cultural properties 3D data that can be downloaded on the Internet. This research is about the simulation of earthquake behavior using such easily available 3D data. In this paper, I will discuss and verify a case of vibration simulation using a real earthenware model processed by CAD with a coarse mesh density, and also consider the significance of mutual use of simulation and experiment.

The behavior was checked while changing the amplitude of the sine wave acceleration, and simulations were performed up to the excitation conditions, including before and after the tipping condition. After confirming that the model tipped over at high acceleration, the acceleration was gradually decreased to confirm the boundary between tipping and non-tipping. As a result, it was found that the tumbling phenomenon appeared when the acceleration was up to  $0.38 \text{ [m/s}^2\text{]}$  in the present model. At accelerations below  $0.38 \text{ [m/s}^2\text{]}$ , the tipping phenomenon was not observed for a while. However, when the acceleration reached a very small value of  $0.1 \text{ [m/s}^2\text{]}$ , the tipping phenomenon appeared again.

The basic specifications of the seismic isolation system used in the museum facilities are designed based on the acceleration waveform (maximum  $8.18 \text{ [m/s}^2\text{]}$ ) measured in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake in Japan. The general specifications are designed to reduce it to approximately  $1.0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ . I believe that this verification clearly shows that no cultural properties can be avoided from falling over if they are loaded on such a general seismic isolation system.

#### 1. はじめに

現在では身近なデバイスとアプリケーションによって簡単に物体の3Dモデルを構築できる環境が整っている。ネット上でダウンロードできる文化財3Dデータも多い。本研究はこのように入手が容易な3Dデータを利用した地震発生時の挙動シミュレーションに関するものである。本稿では、実在する土器の形状をCADで加工し、メッシュ密度を粗くしたものをを用いて、加振シミュレーションを実施した事例を取り上げ、検証するとともに、シミュレーションと実験との相互活用の意義についても考える。

#### 2. シミュレーションの仕様

##### (1) 3Dモデル

3Dモデルの元データは縄文オープンソースプロジェクト<sup>1)</sup>で公開された火焰土器のデータをダウンロードし、シミュレーション上での計算負荷を下げるため、3DCADソフトを用いてメッシュをやや粗目に再加工したものを準備した(図1)。その際に、土器底面は平面で切断し、平滑な面で床面と接地する形状とし、密度は $2,000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ に設定した。

その結果、モデルは、体積 $1.44 \times 10^{-2} \text{ [m}^3\text{]}$ 、全高

0.588[m]、全幅 0.530[m]、重量 28.8[kg]、となった。  
 なお、重心はほぼ中心線上の高さ 0.319[m]に位置し、  
 慣性モーメントについては割愛するが、CAD で計算され  
 た数値を用いることとした。

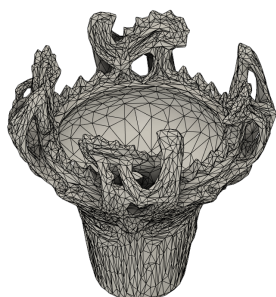


図1 加工後の 3D モデル

### (2) 入力波

実際の地震波はランダムで複雑な動きを持つため、現象を簡潔に捉える目的でシミュレーションは規則性を持つ正弦波を入力波として実施することとした(図2)。

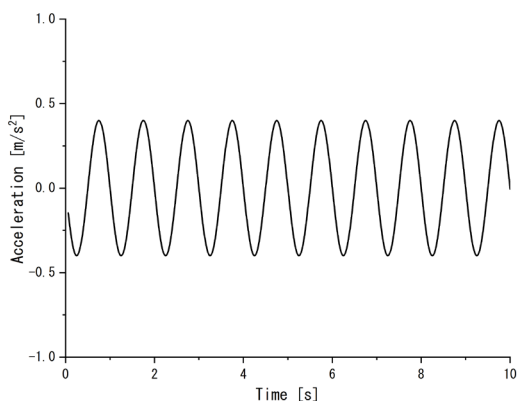


図2 正弦波の一例(1[Hz], 0.4[m/s<sup>2</sup>])

今回は、正弦波の周波数は1[Hz]に固定し、加速度振幅を徐々に変化させながら水平1方向(X軸)で加振した。加振時間は10[s]とした。

### (3) 接触条件

3Dモデルが床面に設置された状態(図3)では、床面との間で生じる摩擦力の設定がシミュレーション結果に影響する。モデルの底面形状と床面の材質と形状によってこの前提は異なるため、展示状況を再現した際にこれらの物理係数を計測するのが現実的であり、望ましい。今回はシミュレーションの有効性に関する検証が主目的

であるため、接触条件としては、動摩擦係数 0.8、静止摩擦係数 1.0 に固定した。

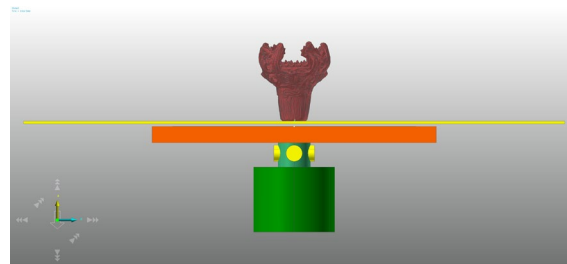


図3 シミュレーション時の初期状態

## 3. 結果と考察

加振時の様子はアニメーションで再現されるため挙動は目視で確認可能である。数値解析としては、3Dモデルの重心座標にマーカーを設置し、主にその変位データをプロットしたものをを用いて、評価と検証を行った。上述の通り、正弦波の加速度振幅を変えながら挙動を確認し、転倒する条件の前後を含む加振条件までシミュレーションを実施した。まず大きい加速度で転倒することを確認した後に、徐々に加速度を下げていき、転倒と非転倒の境界を確認した。その結果、今回のモデルでは、加速度が 0.38[m/s<sup>2</sup>]までは転倒する現象が現れることがまず判明した。それ以下の加速度ではしばらく転倒現象が確認されなかった。しかし、0.1[m/s<sup>2</sup>]という非常に小さい加速度に到達した際に再び転倒現象が現れた(図4)。この現象を整理して検証するために、3Dモデルの重心の基準座標に対する傾きをオイラー角の一つで代表させて、その変位をプロットし比較したのが図5である。同図の横軸(X軸)は加振時間[s]を、縦軸(Y軸)は正弦波の加速度[m/s<sup>2</sup>]を、垂直軸(Z軸)はオイラー角の変位[deg]を表している。手前から奥に向かうにつれて加速度が大きく、垂直方向に沿って揺れが激しくなったものと簡単に説明することができる。これを見ると、加速度が 0.38[m/s<sup>2</sup>]以上となると、7[s]付近のオイラー角が急上昇していることが良く分かる。その後オイラー角が一定になっているのは、転倒した状態を維持していることを示している。同様に、加速度 0.1[m/s<sup>2</sup>]の加振時にも、9[s]を経過した辺りでオイラー角が急上昇し、転倒したことが数値としても現れている(図4)。一方、加速度 0.05[m/s<sup>2</sup>]の加振時でも 8[s]から 8.5[s]にやや大きなオイラー角変化が生じている。この時のモデルの状態は外見的には転倒寸前の傾いた状態であった(図6)。

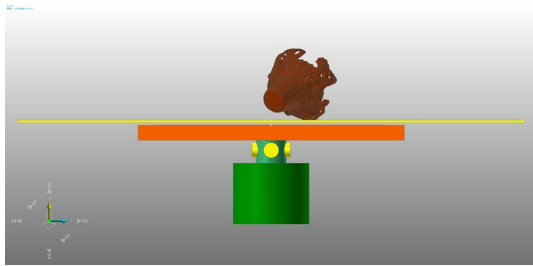


図4 加速度  $0.1[m/s^2]$  で生じた転倒

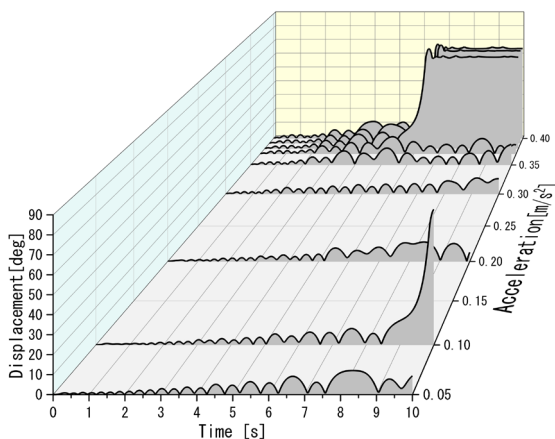


図5 加速度変化に伴う3Dモデル重心座標のオイラー角変化

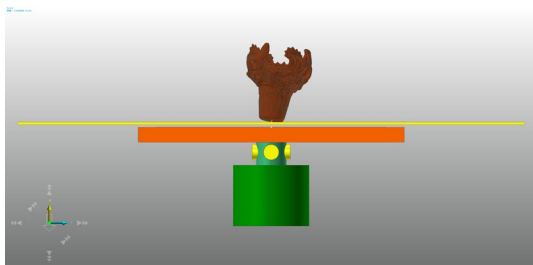


図6 加速度  $0.05[m/s^2]$  で生じた傾き

この検証からは、重心が高く、設置底面積が小さいような非常に不安定な形状のモデルは加振波の加速度が小さくても、周波数との兼ね合いで転倒する方向への力が増幅することで一気に転倒してしまう危険性を持っていることが示唆されたものと考えている。

#### 今後の展開

地震波のより精緻な計測が進むにつれて、様々な場所における計測値が得られるようになった。博物館施設で

採用している免震装置の基本仕様は1995年発生の兵庫県南部地震で計測された加速度波形(最大  $8.18[m/s^2]$ )を基に設計されている。一般的な仕様としては、それを概ね  $1.0[m/s^2]$  程度に軽減するように製作されている。今回の検証では、こうした一般的な免震装置に積載すれば、どのような文化財であっても転倒を免れるわけではないということが明確に現れたと考えている。

実は、この論点は従来から発信されているものである。特に、近年発生した地震時の計測値からは兵庫県南部地震で計測された加速度を大きく上回るものが多数出現している。こうした状況下において、筆者は手放しで免震装置を利用するという作業に改めて警鐘を鳴らす必要があると考え、今回のシミュレーション実施に至った。この点は本稿のもう一つの目的として位置付けている。

一方、あらゆる規模の災害にゼロリスクで考える理想とは別に、現実的にどのレベルのリスクにどれだけの対策を見込むのかは大きな課題である。シミュレーションであれば、現状の対策レベルを超えた際にどのような状況となるのかを把握することができ、それを減災に繋げられる発想があれば、そこにシミュレーションの価値を見出せるのではないだろうか。

当然ながら、展示の状況を正確に再現しての実験には説得力があり、必要なものである。しかし、その結果に汎用性を持たせるためには膨大な実験回数が必要となるのも事実である。そこに要するコストと時間は実験の検討に際して考慮すべき大きな要素となる。したがって、実験の実施前にシミュレーションによって適切な実験条件に絞り込むといった使い方も有効であると考えられる。3Dモデルの作成と入手が比較的容易な環境が整った今であれば、文化財の分野においても、より一層シミュレーションによる防災研究を進められると感じている。今後も継続して、代表的な文化財の形態についての耐震性評価に関する研究を進めたいと考えている。

#### 謝辞

3Dモデルの元データは縄文オープンソースプロジェクトで公開されたものを利用しました。本研究はJSPS科研費20H00021およびJSPS科研費20H01383の助成を受けたものです。

#### 引用文献

1) <https://jomon-supporters.jp/open-source/>