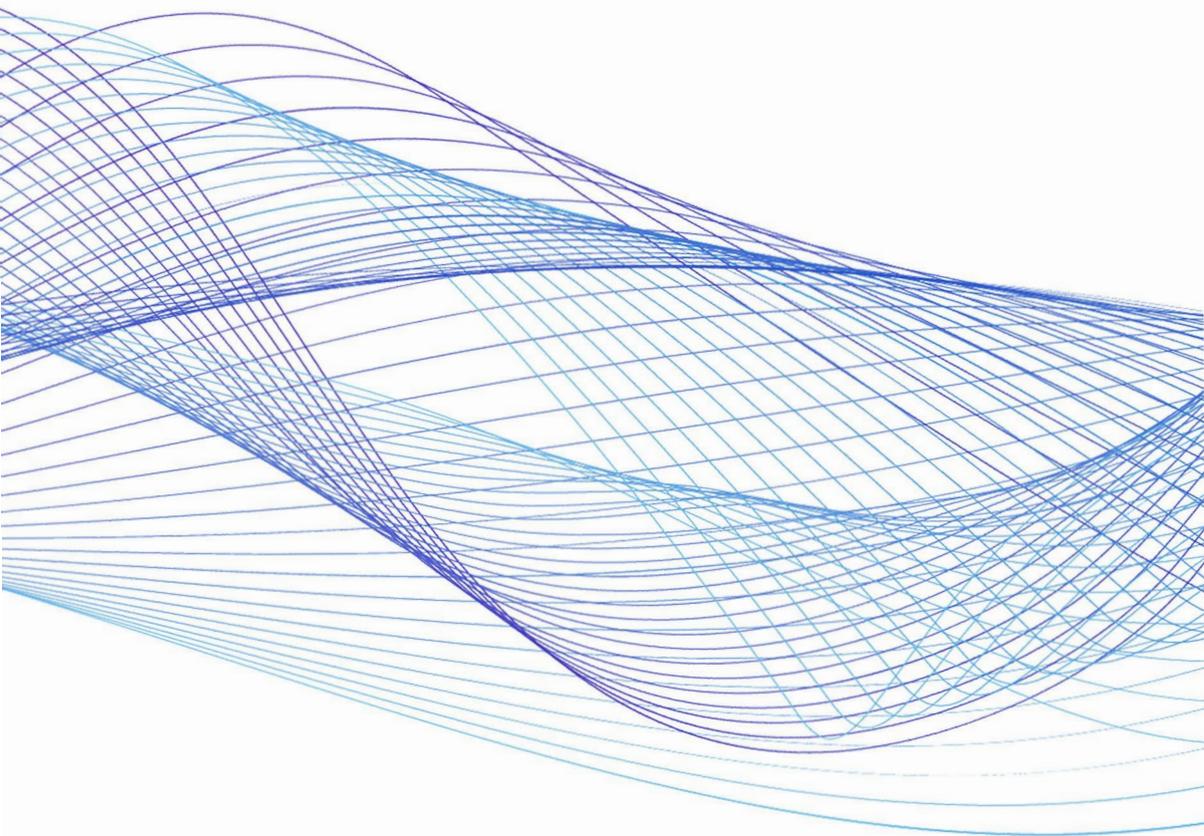


文化財防災センター事業
社寺等における文化財の安全対策に関する研究
調査結果報告書



文化財防災センター事業
「社寺等における文化財の安全対策に関する研究」
調査結果報告書

京都国立博物館

凡例

- 本書は、文化財防災ネットワーク推進事業および文化財防災センター事業の一環として、京都国立博物館が取り組んできた「社寺等における文化財の安全対策に関する研究」の調査結果報告書である。
- 本書の作成に当たり、朝賀浩、浅湫毅、伊藤旭人、岡田愛、尾野善裕、小林茂宜、近藤無滴、竹下蘭子、西川秀敏、東野鈴奈、日比野和雅、山田修（敬称略、五十音順）、京都市消防局、株式会社 地層科学研究所、株式会社 構造計画研究所、公益財団法人 美術院国宝修理所にご助言、ご協力を賜った。
- 本書の編集は降幡順子（京都国立博物館）と中屋菜緒（文化財防災センター/京都国立博物館）の協議の上、中屋がおこなった。

目 次

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第1章 文化財を対象とした転倒シミュレーション解析の作成

1.1 シミュレーションを利用した文化財の転倒実験

1.1.1 起震車による転倒実験・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

1.1.2 転倒シミュレーション解析の作成・・・・・・・・ 7

1.1.3 シミュレーションを用いた転倒防止対策・・・・ 10

1.1.4 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13

1.2 摩擦係数の検証実験・・・・・・・・・・・・・・・・ 14

第2章 転倒シミュレーション解析の活用

－社寺等における文化財の転倒防止対策－

2.1 事例1) 京都・法蔵禅寺所蔵観音立像の転倒シミュレーション・・ 16

2.2 事例2) 滋賀・浄土寺所蔵天部形立像の転倒シミュレーション・・ 22

2.3 事例3) 京都・念佛寺所蔵十一面千手観音菩薩像の
転倒シミュレーション・・ 28

2.4 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34

第3章 転倒シミュレーション解析の活用

－仏像の修理時における転倒防止対策－

3.1 事例4) 京都国立博物館所蔵神像2 軀の転倒シミュレーション	35
3.2 まとめ	42
総括	43

はじめに

本研究は、国立文化財機構が文化庁の補助金の交付を受け2014年度から実施していた、文化財防災ネットワーク推進事業の一環として、2018年度から京都国立博物館が主体となって取り組んできたものである。2020年10月に発足した文化財防災センターに文化財防災ネットワーク推進事業の役割が引き継がれたのちも研究を継続し、研究期間としては約6年間である。

本研究は、社寺等が所蔵する仏像や供養具などが地震によって落下・転倒し破損することをいかに防ぐか、減災できるかを検討し、文化財の安全対策に資することを目的としている。文化財の「地震対策」というと、建造物自体への対策、耐震補強や免震装置などが一般的には思い浮かぶ。博物館などでは建造物への対策に加えて、文化財自体の転倒防止対策として、「テグス」や「支持具」、「免震台」といったさまざまな対策が用いられる。いっぽう、社寺で保管・公開される文化財は、特に仏像などについては、それ自体が信仰の対象であることや、社寺という空間自体が特殊環境であり、文化財を保管・展示することを目的として作られた建物等ではないことから、博物館などで実施されている転倒防止対策をそのまま応用することには困難が多い。また、社寺等の建造物自体への対策についても、費用面を考えると実現困難な場合がほとんどであり、すべての文化財の防災対策に潤沢な予算が用意できていないことが現実である。そこで、もう少しハードルを下げた「地震対策」として、社寺等においても実施可能な簡易的な手法

による文化財の防災・減災方法を検討するべく、本研究を開始する運びとなった。

まず、社寺等における文化財の「地震対策」について検討するにあたり、過去の被災事例などから、特に転倒による破損リスクの高い立像について調査することとした。立像のような高さのある資料は、重心が高く転倒しやすい特徴がある。社寺でできる簡易な対策としては、例えば仏像が倒れやすい方向を事前に把握しそれに応じた対策を検討すること、仏像が修理をする機会があれば、転倒リスクを軽減できる新規台座の追加などが検討されるが、これらを検討するには実際に仏像を揺らしてみないことにはわからない。振動台などを用いた振動実験を実施すれば確認できるが、本物の文化財を用いて振動実験をおこなうことは、文化財の破損につながることを考えると現実的ではない。そこで本研究では、振動実験と同等の調査結果を得られる方法として、シミュレーション上で文化財の転倒実験を再現することとした。シミュレーションでは、何度も振動条件を変更して転倒実験を実施することができるため、本研究に有効であると考えた。本書では、文化財の転倒シミュレーションの条件設定から、実際に文化財を用いたシミュレーション解析結果を通じ転倒防止対策を検討するまでの調査結果について報告する。

第1章 文化財を対象とした転倒シミュレーション解析の作成

1.1 シミュレーションを利用した文化財の転倒実験

1.1.1 起震車を用いた転倒実験

はじめに、シミュレーション解析に必要な基礎データの取得を目的として、起震車を用いた文化財の転倒実験を実施した。本研究ではまず仏像彫刻を事例とするため、木造摸刻（複製像）の制作をおこなった。複製像は、京都国立博物館所蔵の十大弟子立像のひとつ、阿難像（図1）をもととし、東京藝術大学山田修特任教授に制作を依頼した。この複製像を解析対象として、京都市消防局にご協力をいただき、起震車を用いた転倒実験をおこなった（図2）。



図1 十大弟子立像（阿難像）

出典：ColBase (<https://colbase.nich.go.jp/>)



図2 起震車による転倒実験

起震車実験では、兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）、震度2から震度5強の地震波を入力し、複製像の頭部・免震台の床・起震車の床にそれぞれ加速度センサーGeo-stick Professional（株式会社地層科学研究所）を設置し（図3）、加速度の測定をおこなった（図4）。実験では、高さの異なる台座を設置した場合、像を免震台の上に置いた場合と床に直接置いた場合、おもりを用いて像の重心を変化させた場合など様々な条件で振動実験をおこなった。起震車実験の入力波と結果は表1のとおりである。



図3 加速度センサー

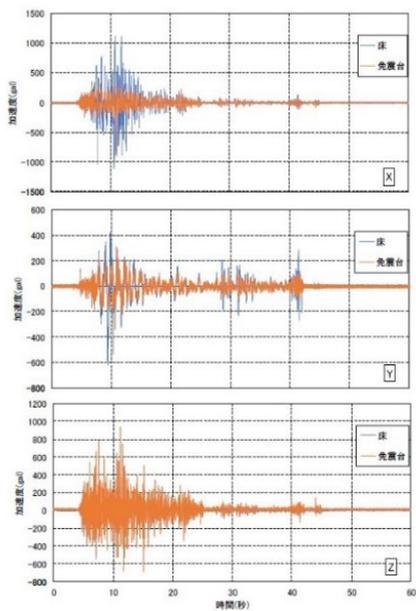


図4 加速度センサーによる計測結果一例
(上：X方向、中：Y方向、下：Z方向)

表 1 起震車実験の入力波と結果

No	入力波	免震台	その他	結果（転倒方向）
1	兵庫県南部地震	あり	台座 1（高さ 7 cm）	転倒（左後ろ）
2	兵庫県南部地震	あり	台座 2（高さ 5 cm）	転倒（左後ろ）
3	震度 4	あり	以下、台座 2	転倒せず
4	震度 5 弱	あり		転倒せず
5	震度 5 強	あり		転倒（左後ろ）
6	震度 5 強	あり	シリコンシート設置	転倒（左後ろ）
7	震度 5 弱	なし		転倒せず
8	震度 5 強	なし		転倒（左後ろ）
9	震度 5 強	なし	複製像下部に重り	転倒せず
10	震度 5 強	なし	複製像上部に重り	転倒（左後ろ）

起震車実験の結果、複製像は、震度 5 強以上の揺れで、免震台の有無にかかわらず転倒することがわかった。複製像の下部に重りを追加すると、震度 5 強でも転倒しなくなることから、重心位置が高いため転倒しやすい像であることが確かめられた。また、複製像の転倒方向に着目すると、像が転倒したすべての実験結果において転倒方向が左後ろに共通していることから、複製像は左後ろに転倒しやすい傾向があることが明らかとなった。

1.1.2 転倒シミュレーション解析の作成

次に、起震車の転倒実験から得られたデータをもとに、複製像の転倒シミュレーション解析を作成した。シミュレーション制作は、株式会社構造計画研究所に依頼した。シミュレーション解析には、入力する地震波、摩擦係数などの諸条件について検討を行う必要があるが、まずは起震車実験で取得した加速度センサーの測定結果、動画などをもとに実際の起震車上での複製像の挙動を再現できるよう解析数値の調整をおこなった。解析に使用したデータの概要を表2に示す。なお、シミュレーション解析に使用した地震波は、起震車実験で計測した床、もしくは免震台における加速度を入力波として使用し、この加速度から速度と変位の値を求めた。解析には、X Y Z軸方向の揺れを同時に入力した。また、解析に使用する複製像の三次元データは、非接触三次元デジタイザ Range7（コニカミノルタ）を用いて取得した。取得したデータの処理は、Geomagic Design X (3D Systems Corporation) を用いた。取得した三次元データはデータ量が大きく、シミュレーション解析に向かないため、実際の解析には、凸包形状とよばれる三次元データを簡略化したものを使用し（図5）、質量については凸包形状に一様に分布していると仮定した。また、重心位置は三次元データの点群座標情報から簡易的に求めた。

表2 解析データ概要（複製像）

外寸	幅 149mm 奥行 156mm 高さ 542mm
質量	1.23kg
慣性テンソル	凸包形状
重心高さ	底面より 219mm
静止摩擦係数	0.33
動摩擦係数	0.30

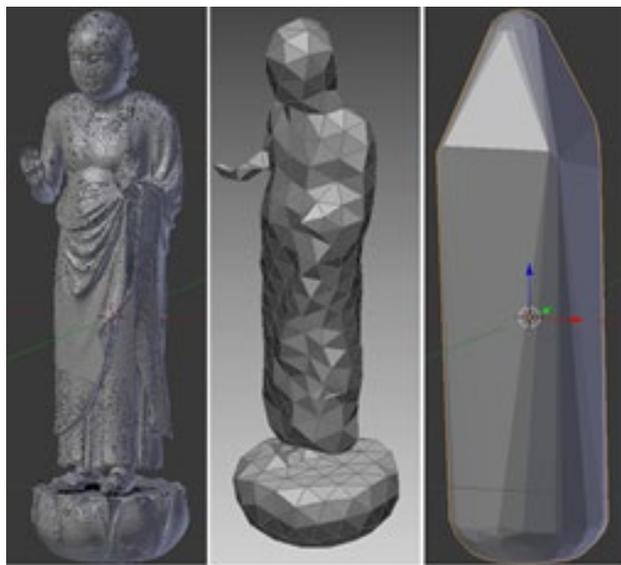


図5 3Dデータの凸包形状

起震車実験の結果と作成したシミュレーションの結果は表3のとおりである。それぞれのデータを比較すると、No.1の阪神淡路大震災の事例のみ転倒方向が異なっているが、すべての事例において転倒の有無は一致した。また、シミュレーション上での複製像の転倒と起震車実験の動画を比較したところ、複製像の挙動についてほとんど差異なく再現できることが確かめられた（図6）。

表3 起震車実験結果とシミュレーション解析の比較

No	入力波	免振台	起震車実験		シミュレーション	
			転倒	方向	転倒	方向
1	兵庫県南部地震	有	有	左後ろ	有	右手前
2	震度5弱	有	無	—	無	—
3	震度5強	有	有	左後ろ	有	左後ろ
4	震度5弱	無	無	—	無	—
5	震度5強	無	有	左後ろ	有	左後ろ



図6 起震車上の再現シミュレーション
（左：シミュレーション、右：起震車実験）

1.1.3 シミュレーションを用いた転倒防止対策の検討

起震車実験とシミュレーション解析の比較から、シミュレーションが文化財の転倒防止対策に応用できると判断した。そこで、このシミュレーションを応用し、複製像の転倒パターンなどから転倒を防止する方法を検討し、2つの対策についてシミュレーション上で検証を実施した。ひとつは、複製像の下に木製の円形台座を追加し、底面積を大きくすることで安定性をもたせる方法（図7）、もうひとつは複製像底面の空いた隙間に木製の転倒防止ストッパーを挿入する方法である（図8）。ここでは、対策なしのシミュレーションで転倒のみられた震度5強の揺れをそれぞれ入力した。転倒防止対策をおこなったシミュレーションの解析結果は表4のとおりである。挙動タイプは、転倒、滑動、ロッキングの3パターンであった。転倒は転倒角度が70度以上、ロッキングは転倒角度が3度以上、滑動は転倒角度3度未満で重心最大移動距離が1cm以上の場合である。

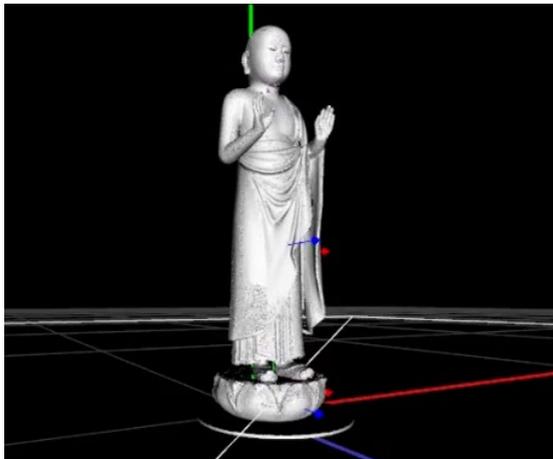


図7 円形台座追加

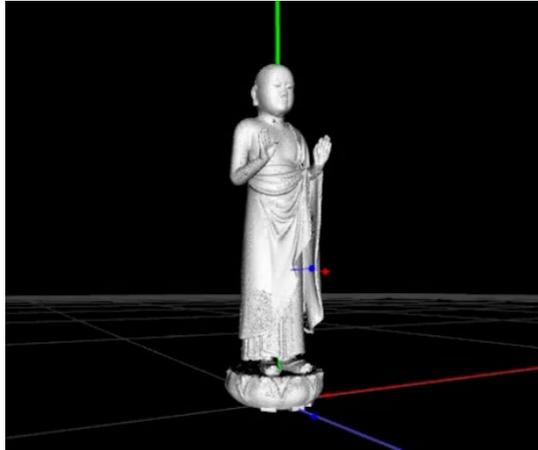


図8 ストッパー追加

表4 転倒防止対策をおこなったシミュレーション解析結果

仏像	対策	入力方向	挙動タイプ
仏像 (台座高さ5cm)	なし	0度	左に転倒
		90度	右に転倒
	円形台座追加 (摩擦考慮なし)	0度	左後ろに転倒
	円形台座追加 (摩擦考慮あり)	90度	滑動
	ストッパー追加 (仏像前面)	0度	左に転倒
		90度	ロッキング

円形台座を追加したシミュレーションでは、円形台座は底面が平らなことから、通常よりも滑りやすくなると考えられる。しかし、実際には、物体が動くとき摩擦が生じるため、摩擦係数の考慮が必要である。そこで、より実際の転倒条件を考慮した、摩擦係数を高めた条件を追加してシミュレーションをおこなった。シミュレーション結果は、摩擦係数が大きく滑りにくい条件では、転倒した。いっぽう、摩擦係数が小さく滑りやすい条件では、転倒せず、滑動する結果となった。転倒はしなかったものの、滑動距離は約 35 cm となった。

転倒防止ストッパーを設置したシミュレーションでは、ストッパーは物体が倒れる方向に配置していれば、その転倒を防ぐ可能性がある。そこで、転倒方向の検討結果をより分かりやすくするため、複製像正面に向かって左右に大きな揺れが来た場合（入力方向 0 度）、前後に大きな揺れが来た場合（入力方向 90 度）の 2 方向の入力波に着目してシミュレーションをおこなった。まず、転倒防止対策なしの複製像に前後の揺れが来た場合、複製像は前に転倒し、左右の揺れが来た場合は左に転倒した。この結果から、揺れの方向によって転倒の向きに方向性がみられることから、複製像の前面にストッパーを配置したところ、前後方向の揺れが来た場合はロッキングした。しかし、左右方向の揺れが来た場合はストッパーが転倒方向に設置されていないため転倒した。

1.1.4 まとめ

以上の調査結果から、文化財の転倒実験をシミュレーション解析で再現できること、シミュレーションを用いて文化財の転倒防止対策の効果を検証できることが確かめられた。いっぽうで、起震車実験とシミュレーションで転倒方向が異なる事例があるなど、転倒時の挙動の再現性に課題が残る部分もあった。また、シミュレーション上で摩擦係数を考慮した場合には、解析結果に違いがあったことなどから、摩擦係数の設定がシミュレーション結果に影響することが確かめられた。そこで、シミュレーションの精度向上をはかるため、摩擦係数等の設定条件の検討や、データの蓄積を目的とし、様々な立体文化財のシミュレーション解析の実施、あらゆる条件での転倒防止対策を想定したシミュレーション解析をおこなうこととした。

1.2 摩擦係数の検証実験

複製像の転倒実験の結果から、シミュレーション解析において、資料の底面と床面の摩擦係数の設定が、資料の転倒有無に関係することが確かめられた。そこで、さまざまな材質表面の摩擦係数の計測実験をおこなった（図9）。測定は、ポータブル摩擦計3D ミューズ（新東科学）を使用し、展示台クロス、板材、シリコンシートなどの文化財が接触する可能性の高い素材を対象とした。測定資料および摩擦係数の測定結果は表5のとおりである。



図9 摩擦係数実験の測定

表5 摩擦係数実験の計測資料と結果

測定資料	摩擦係数
ナラ材板目	0.25
ヒノキ材板目	0.33
ブナ材板目	0.28
フローリング床	0.31
桐材柾目	0.34
漆塗表面	0.42
免振台（ミュージアム用クロス貼）	0.29
シリコンシート	0.89
漆喰	0.65

摩擦係数測定の結果から、木材やフローリングなどの板材については摩擦係数 0.3 前後で、木の種類や表面の状態などによってほとんど差異がないという結果となった。漆塗表面、漆喰、シリコンシートなどは木材よりも摩擦係数が高い結果が得られたほか、博物館等の展示台に使用されることの多いクロス貼表面では摩擦係数 0.29 と木材とほとんど変わらない結果となった。

第2章 転倒シミュレーション解析の活用

—社寺等における文化財の転倒防止対策—

第1章では、文化財のなかでもとりわけ地震などによって転倒し破損するリスクの高い立体文化財の防災・減災を目的として実施した、文化財を対象とした転倒シミュレーションの作成に関して述べた。第2章では、シミュレーションの精度向上をはかるため、実際に社寺等に保管されている文化財の転倒シミュレーション解析を実施し、転倒防止対策について検討をおこなった3つの事例を報告する。

2.1 事例1) 京都・法蔵禅寺所蔵観音立像の転倒シミュレーション

○ 調査資料

事例1では、法蔵禅寺（京都市右京区）所蔵の聖観音立像（図10）を調査対象資料とした。観音像は一木造の立像である。像底に丸柄1本を差し込んで蓮華座上に立つ。左肘先、右手首先、天衣遊離部、両足先、丸柄、金属製宝冠、胸飾、持物、光背は後補である。近年修理がおこなわれたことから、全体的に痛みは少なく、台座には十分な強度がある。今回の調査では、光背を除いたデータを用いてシミュレーション解析を実施した。観音像は現在、法蔵禅寺本堂内の高さ約1mの須弥壇に安置されており、仏像の周囲には脇侍等が置かれた状態である（図11）。



図 10 法蔵禅寺聖観音立像



図 11 観音立像の安置状況

○ 解析手法

まず調査対象となる聖観音立像の三次元形状情報を SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM/MVS) によって取得するため、法蔵禅寺において調査を実施した (図 12)。使用した解析ソフトは Metashape professional (Agisoft) である。三次元データ処理には Geomagic Design X (3D Systems Corporation) を用いた。シミュレーション解析には三次元データをもとにした凸包形状を使用し、この凸包形状に様に質量が分布していると仮定した。静止摩擦係数 0.33、動摩擦係数 0.30、重心の高さ 27.3 cm としてシミュレーションを作成した (表 6)。重心位置については三次元データの点群座標情報から簡易的に求めた (図 13)。シミュレーション解析に使用した地震波は、JMA 神戸波振幅 0.25 倍 (震度 5 強)、0.5 倍 (震度 6 弱)、1.0 倍 (震度 6 強) の 3 波を入力方向 0 度 (左右方向に強い揺れ) と 90 度 (前後方向に強い揺れ) でそれぞれ実施した。



図 12 法蔵禅寺における聖観音立像の調査

表6 解析データ概要（聖観音立像）

外寸	幅約 480mm 奥行約 346mm 高さ約 937mm
質量	6.2kg
慣性テンソル	凸包形状
重心高さ	底面より 273mm
静止摩擦係数	0.33
動摩擦係数	0.30



図 13 聖観音立像の重心位置

○ 結果と考察

観音像のシミュレーション結果は表7のとおりである。シミュレーションでは、仏像は転倒することなく、床面を滑動することがわかった。転倒が起こらなかった理由としては、仏像の底面積が 850 cm²と広く、重心位置が低かったため比較的安定していたことが要因であると考えられる。シミュレーション結果から、観音像は震度5強～6強の揺れでは転倒する可能性が非常に低いことが明らかとなったが、震度6弱以上の揺れが発生した場合、仏像は滑動し、震度6強の揺れでは最大30 cm以上滑動するという結果が得られた。

解析結果から、観音像は転倒による破損等のリスクは低いが、滑動によって展示台などから落下することにより破損するリスクが示唆される。そこで、対策方法として、下記の対策を提案した。転倒防止対策は仏像の鑑賞を妨げないことを前提として検討をおこなった。

<法蔵禅寺聖観音立像の転倒防止対策>

- ・ぶつかる危険性のある場所に緩衝材を取り付ける。
- ・仏像の周囲になるべくものを置かないようにする。
- ・テグスで台座を固定する。
- ・台座が動かないよう台座部分に囲いを設置する。

表7 法蔵禅寺聖観音立像転倒シミュレーション解析結果一覧

入力地震波	入力方向	挙動タイプ	重心最大移動量 (cm)
JMA 神戸波振幅 0.25 倍 (震度 5 強)	0 度	動きなし	0.0
	90 度	動きなし	0.0
JMA 神戸波振幅 0.5 倍 (震度 6 弱)	0 度	滑動	4.5
	90 度	滑動	4.4
JMA 神戸波振幅 1.0 倍 (震度 6 強)	0 度	滑動	34.9
	90 度	滑動	36.2

2.2 事例2) 滋賀・浄土寺所蔵天部形立像の転倒シミュレーション

○調査資料

事例2では、浄土寺（滋賀県大津市）所蔵の天部形立像（図14）を対象資料とした。天部形立像は一木造の立像である。内割りには施さず、像底に差し込まれた丸柄1本（後補、径3.8 cm、長5.0 cm）により蓮華座上に立つ。浄土寺本堂内、高さ60 cmの木造脇壇上に安置されており、像の周囲には脇侍、仏具等が置かれている（図15）。本体の保存状態は大きな干割れ等も認められず良好である。



図14 浄土寺天部形立像
画像提供：京都国立博物館



図 15 天部形立像の安置状況

○解析手法

天部形立像の三次元形状情報については、事例 1 と同様、SfM/MVS によって取得するため、浄土寺において仏像の調査を実施し（図 16）、データ処理についても事例 1 と同様の手法でおこなった。シミュレーション解析には事例 1 同様、三次元データをもとにした凸包形状を使用し、この凸包形状に様に質量が分布すると仮定してシミュレーションを作成した。シミュレーションの諸条件については、表 8 のとおりであり、重心位置は点群座標情報から簡易的に求めた（図 17）。シミュレーション解析に使用した地震波は、JMA 神戸波振幅 0.25 倍（震度 5 強）、0.5 倍（震度 6 弱）、1.0 倍（震度 6 強）の 3 波を入力方向 0 度（前後方向）と 90 度（左右方向）でそれぞれ実施した。立像の挙動パターンは、①転倒：転倒角が 70 度以上、②ロッキング：転倒角が 3 度以上、③滑動：転倒角が 3 度未満で、重心最大移動量が 1 cm 以上の 3 タイプに分けられた。



図 16 浄土寺における天部形立像の調査

表 8 解析データ概要（天部形立像）

外寸	幅約 452mm 奥行約 385mm 高さ約 1347mm
質量	23.7kg
慣性テンソル	凸包形状
重心高さ	底面より 595mm
静止摩擦係数	0.33
動摩擦係数	0.30



図 17 天部形立像の重心位置

○結果と考察

天部形立像のシミュレーション結果は表 9 のとおりである。シミュレーション結果から、立像は震度 6 弱以上の揺れで転倒する可能性が高いことが明らかとなった。そこで、簡便な固定具を用いた転倒防止対策として表 10 に挙げた A～E 案を検討し、それぞれの対策案についてシミュレーション上で転倒防止効果の検証をおこなった。なお、固定具の材質は金属製と仮定し、地震発生時以外は立像に接触しない設定でシミュレーションを実施した（図 18）。

転倒防止対策のシミュレーション解析結果から、A・B 案の背面のみ固定具を設置した場合は転倒防止効果が低く、C・D・E 案の背面に加

えて側面もしくは正面に固定具を設置した場合は転倒防止効果が高いことが明らかとなった。立像は転倒シミュレーションの結果から前方向に転倒しやすい性質であると推測されることから、正面を支持することで転倒防止効果が高まったと考えられる。

表 9 天部形立像の転倒シミュレーション結果一覧

入力地震波	入力方向	挙動タイプ	転倒方向	重心最大移動量 (cm)
JMA 神戸波振幅 0.25 倍 (震度 5 強)	0 度	動きなし	—	0.3
	90 度	滑動	—	2.1
JMA 神戸波振幅 0.5 倍 (震度 6 弱)	0 度	ロッキング	—	23.8
	90 度	転倒	前	78.4
JMA 神戸波振幅 1.0 倍 (震度 6 強)	0 度	転倒	前	55.0
	90 度	転倒	前	36.6

表 10 転倒防止対策の効果検証結果一覧

	対策案	転倒防止の効果
A	台座背面に固定具を 1 個設置	効果なし
B	台座背面に固定具を 2 個設置	転倒は防げるが固定具から外れる
C	Bの固定具 2 個を前に伸ばす	効果あり
D	B+ 台座正面に小さい固定具を 4 個設置	効果あり
E	B+ 台座の形状に合わせて掘り込み作成	効果あり

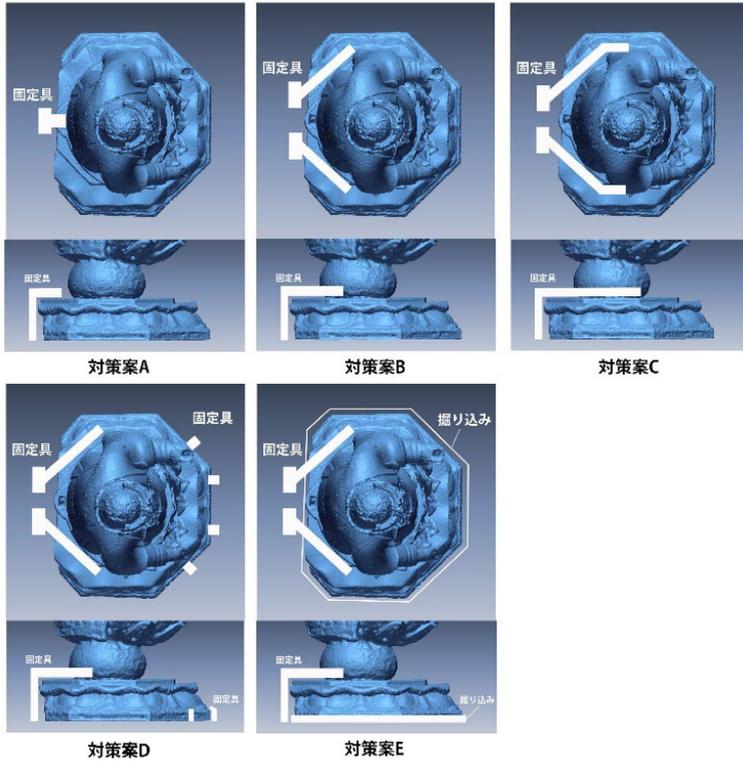


図 18 天部形立像の転倒防止対策案一覧

以上の結果から、転倒防止効果の得られた C・D・E 案のうち、E 案については現在の立像の安置場所が既存の脇壇上であることから、脇壇に掘り込みを作成することは困難であると判断された。C・D 案については、固定具が立像の鑑賞を妨げる可能性があるため、固定具の設置場所を調整する必要があるが、導入に検討の余地があると結論付けられた。

2.3 事例 3) 京都・念佛寺所蔵十一面千手観音菩薩像の転倒シミュレーション

○調査資料

事例 3 では、念佛寺（京都市右京区）所蔵の十一面千手観音菩薩像（図 19）を対象資料とした。菩薩像は岩座上に坐す。岩座から光背がつき、長方形の框と接合されている。菩薩像の形状に合わせた厨子内に安置されており（図 20）、厨子は高さ約 1 m の脇壇上にあり、厨子の周囲には仏具等が置かれている。厨子の扉は閉じられた状態で保管されている。

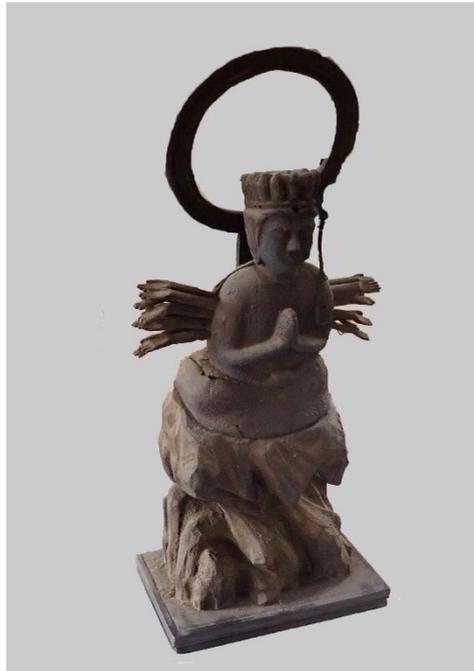


図 19 念佛寺千手観音菩薩像



図 20 千手観音菩薩像の安置状況

○解析手法

十一面千手観音菩薩像の三次元形状情報については、これまでの事例と同様、SfM/MVS の手法で取得するため、念佛寺において観音菩薩像の調査を実施し（図 21）、データ処理についてもこれまでと同様の手法でおこなった。シミュレーション解析にはこれまでの事例同様、三次元データをもとにした凸包形状を使用し、この凸包形状に一樣に質量が分布すると仮定してシミュレーションを作成した。シミュレーションの諸条件については、表 11 のとおりであり、重心位置は点群座標情報から簡易的に求めた（図 22）。菩薩像のシミュレーションでは、「1.2 摩擦係数の検証実験」の結果を考慮し、仏像底部の摩擦について、摩擦が小さい場合（像が滑りやすい条件）の摩擦係数を 0.33、摩擦が大きい場合（像が滑りにくい条件）の摩擦係数を 0.6 と設定した。

シミュレーション解析に使用した地震波は、JMA 神戸波振幅 0.5 倍（震度 6 弱）、1.0 倍（震度 6 強）の 2 波を入力方向 0 度（前後方向）と 90 度（左右方向）でそれぞれ実施した。挙動パターンは事例 2 同様、①転倒、②ロッキング、③滑動の 3 パターンに分けられた。



図 21 念佛寺における観音菩薩像の調査

表 11 解析データ概要（千手観音菩薩像）

外寸	幅約 226mm 奥行約 146mm 高さ約 497mm
質量	2.15kg
慣性テンソル	凸包形状
重心高さ	底面より 144mm
静止摩擦係数	0.33 または 0.60
動摩擦係数	0.30

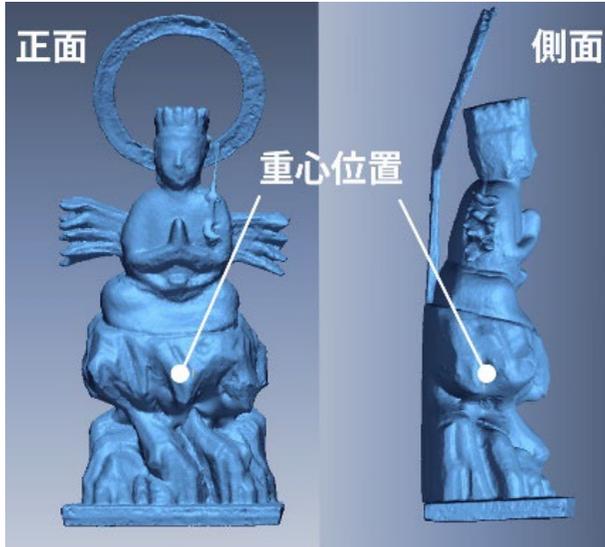


図 22 千手観音菩薩像の重心位置

○結果と考察

十一面千手観音菩薩像のシミュレーション結果は表 12 のとおりである。シミュレーション結果から、観音菩薩像は震度 6 強以上の揺れで転倒する可能性が高いことが明らかとなった。また、摩擦係数が小さい場合は、震度 6 強でも転倒せず、0 度方向の揺れで滑動、90 度方向の揺れでロッキングする結果が得られたことから、床面が滑りにくい材質の場合、転倒する可能性が高くなることがわかった。なお、床面が滑りやすい材質の場合でも、震度 6 強、0 度方向の揺れでは 60cm 以上の滑動がみられることから、展示台等からの落下による破損の危険性が示唆される。

表 12 念佛寺千手観音菩薩像の転倒シミュレーション結果一覧

入力地震波	摩擦係数	入力方向	挙動タイプ	転倒方向	最大重心移動量 (cm)
JMA 神戸波振幅 0.5 倍 (震度 6 弱)	0.33	0 度	滑動	—	19.1
		90 度	滑動	—	10.1
	0.60	0 度	滑動	—	14.7
		90 度	ロッキング	—	22.4
JMA 神戸波振幅 1.0 倍 (震度 6 強)	0.33	0 度	滑動	—	63.7
		90 度	ロッキング	—	29.6
	0.60	0 度	転倒	前	14.5
		90 度	転倒	後ろ	25.0

転倒がみられたシミュレーション結果では、観音菩薩像は前後いずれかに転倒していたため、前後方向に転倒しやすい形状であると推測される。そこで、框の幅を前後方向に大きくして再度シミュレーション解析をおこなった。その結果、前後幅を 6 cm 大きくすることで震度 6 強でも転倒しない可能性があることが確かめられた（表 13）。

以上の結果から、十一面千手観音菩薩像の転倒防止対策は、像とほぼ同サイズの厨子内に納められ、滑動による落下の危険性がないことから、前後方向への転倒防止対策として、框を大きくする、厨子内で前後に倒れた際に保護できる対策をおこなうなどの方法が効果的であると結論付けられた。

表 13 念佛寺千手観音菩薩像の転倒防止対策結果

対策	入力地震波	摩擦係数	挙動タイプ
対策なし	JMA 神戸波振幅 0.5 倍 (震度 6 弱)	0.60	転倒可能性高い
前後幅 + 4cm			転倒可能性低い
前後幅 + 5cm			転倒可能性低い
前後幅 + 6cm			滑らない
対策なし	JMA 神戸波振幅 1.0 倍 (震度 6 強)		転倒可能性非常に高い
前後幅 + 4cm			転倒可能性高い
前後幅 + 5cm			転倒可能性高い
前後幅 + 6cm			滑動

2.4 まとめ

第2章で報告した仏像3躯における転倒シミュレーション解析の調査結果から、対象資料がどのくらいの震度で転倒もしくは滑動、ロッキングする可能性があるのか、転倒する場合、転倒方向の規則性など仏像の挙動パターンについてシミュレーション上で確かめられることが明らかとなった。事例3では、摩擦係数の異なる場合を検証した結果、床面との摩擦条件の違いによって対象資料の挙動に変化が生じることをシミュレーション上で確かめることができた。さらに、事例2では、さまざまな条件での転倒防止対策をシミュレーション上で再現し、より転倒防止効果の高い対策方法について検討できることが確かめられた。

また、仏像の三次元データを取得する手法として用いた SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM/MVS) は、現場での調査方法としてはデジタルカメラ1台で対象を撮影するだけであり、処理されたデータはシミュレーション解析に利用できる精度の三次元情報であることから、社寺等の特殊な環境における調査方法として適当であることが今回の調査を通じて確かめられた。

以上から、社寺のような文化財の転倒防止対策にさまざまな制約のある場所では、転倒シミュレーション解析が文化財の転倒リスク対策におおいに役立つものと考えられる。

第3章 転倒シミュレーション解析の活用

—仏像の修理時における転倒防止対策—

第2章では、実際に社寺等で所蔵している仏像の転倒シミュレーション解析を実施し、立体文化財の転倒防止対策について検討をおこなった。立体文化財のなかでもとりわけ彫刻作品については、修理時に框を新しく作り変える、台座に工夫を施すことなどで作品の安定性を高めることがしばしばおこなわれる。第3章では、仏像の修理時の転倒防止対策に焦点をあてたシミュレーション解析の事例について報告する。

3.1 事例4) 京都国立博物館所蔵神像2軀の転倒シミュレーション

○対象資料

事例4では、京都国立博物館所蔵の宇賀御霊神像(図23)、猿田彦男神像(図24)の神像2軀を調査対象とした。像の特徴を以下に示す。

【宇賀御霊神像】 神像が像底に差し込まれた柄により狐像の上に立つ。修理に伴い、幅53.9cm、奥行80.3cm、高さ5.5cm、質量11.2kgの新補框を製作。像と框は框上につくられた柄によって固定される。

【猿田彦男神像】 立ち姿の神像。修理に伴い幅63.6cm、奥行48.3cm、高さ6.5cm、質量5.5kgの新補框を製作。像と框は框上につくられた柄によって固定される。猿田彦男神像は、修理前の段階では、自立が困難であったため、三次元形状の取得時には、仮設框(幅52.5cm、奥行40.8cm、高さ4.9cm)に固定された状態であった。



图 23 宇賀御靈神像

出典：ColBase (<https://colbase.nich.go.jp/>)



图 24 猿田彦男神像

出典：ColBase (<https://colbase.nich.go.jp/>)

○解析手法

神像 2 軀の三次元形状情報については、これまでの事例と同様、SfM/MVS の手法で取得し（図 25）、データ処理についてもこれまでと同様の手法でおこなった。シミュレーション解析にはこれまでの事例同様、三次元データをもとにした凸包形状を使用し、この凸包形状に一樣に質量が分布すると仮定してシミュレーションを作成した。シミュレーションの諸条件は表 14、神像の重心位置は図 26、図 27 のとおりである。今回のシミュレーションで使用した入力地震波は、JMA 神戸波震度 6 強で、入力方向を 0 度と 90 度としている。挙動タイプもこれまでの事例と同様であった。



図 25 宇賀御霊神像の調査

表 14 解析データ概要

宇賀御霊神像（像のみ）		猿田彦男神像（像+仮設框）	
外寸	幅約 529mm 奥行約 803mm 高さ約 1258mm	外寸	幅約 525mm 奥行約 402mm 高さ約 1040mm
質量	25.3kg	質量	18.5kg※
慣性テンソル	凸包形状	慣性テンソル	凸包形状
重心高さ	底面より 434mm	重心高さ	底面より 365mm
静止摩擦係数	0.33 または 0.60	静止摩擦係数	0.33 または 0.60
動摩擦係数	0.30	動摩擦係数	0.30

※仮設框の質量が不明であったため、新補框の質量を代用

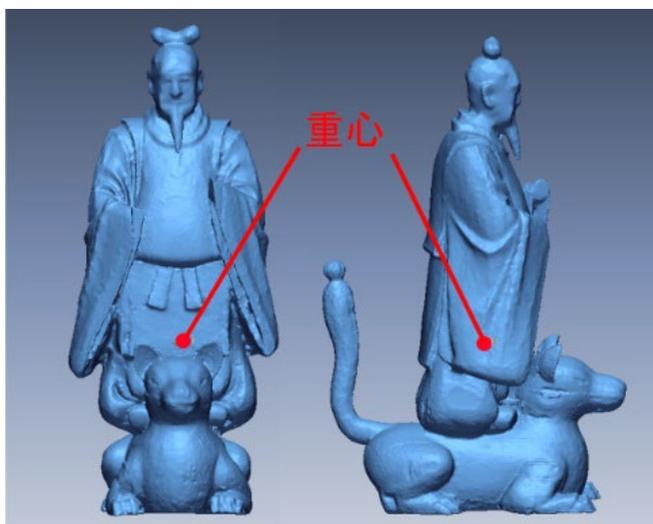


図 26 宇賀御霊神像重心位置

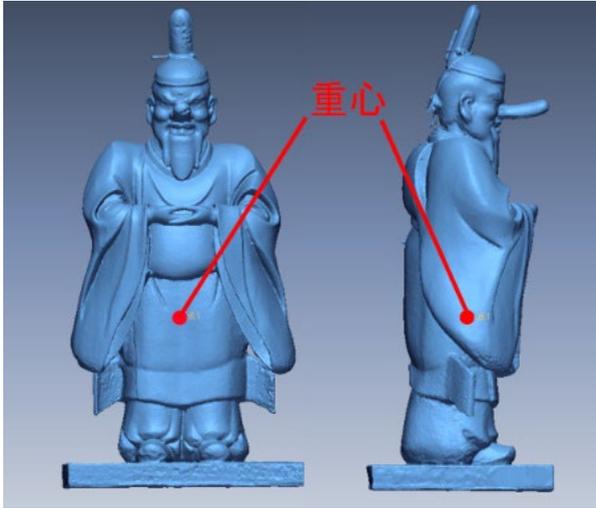


図 27 猿田彦男神像重心位置

○結果と考察

1) 宇賀御霊神像の調査結果

宇賀御霊神像は、修理によって新たに框が作成された。そこで、框がない場合、新補框がある場合で転倒シミュレーションの作成をおこなった。結果は表 15 のとおりである。シミュレーション結果から、框がない場合、震度 6 強以上、床面との摩擦が強く滑りにくい条件で転倒することがわかった。いっぽう新補框がある場合では、震度 6 強では転倒しないが滑動することがわかった。新補框の設置により神像が転倒しなくなったのは、框の質量が 11.2kg であったことから、神像全体の重心が大幅に低くなり安定したことが要因として考えられる。

表 15 宇賀御霊神像の転倒シミュレーション解析結果

框	摩擦係数	入力地震波	入力方向	挙動タイプ	転倒方向	重心最大移動量 (cm)
なし	0.33	JMA 神戸波振幅 1.0 倍(震度 6 強)	0 度	ロッキング	—	34.9
			90 度	滑動	—	31.9
	0.6		0 度	転倒	右	51.3
			90 度	転倒	左後ろ	53.7
新補框	0.33		0 度	滑動	—	35.3
			90 度	滑動	—	34.0
	0.6		0 度	滑動	—	14.4
			90 度	滑動	—	12.1

2) 猿田彦男神像の調査結果

猿田彦男神像は、修理によって新補框が作られる間、仮設框に固定されていた。そこで、男神像が仮設框に固定された状態の転倒シミュレーションを作成した。結果は表 16 のとおりである。シミュレーション結果から、仮設框では、震度 6 強 90 度方向の揺れで床面との摩擦が強く滑りにくい条件で転倒することが確かめられた。

そこで、男神像の転倒防止対策として、框の形状について検討をおこなった。男神像の転倒がみられたシミュレーション結果では、90 度方向の揺れに対して前方向に転倒していたことから、前後方向に倒れやすい形状であることが推測される。そのため、框の奥行を大きくすることで、安定性が高まると考えられることから、框の奥行を何 cm 大きくすれば転倒しなくなるかシミュレーション上で検討をおこなった。その結果、8cm より大きくすることで、転倒しないことが確かめられ

た。また、框の質量を重くすることでも、安定性が高まると考えられることから、框の質量を何 kg 重くすれば転倒しなくなるかシミュレーション上で検討したところ、7kg 以上で転倒しなくなることが確かめられた。

表 16 猿田彦男神の転倒シミュレーション解析結果

框	摩擦係数	入力地震波	入力方向	挙動タイプ	転倒方向	重心最大移動量 (cm)
仮設框	0.33	JMA 神戸波振幅 1.0 倍(震度 6 強)	0 度	滑動	—	34.5
			90 度	滑動	—	36.3
	0.6		0 度	ロッキング	—	20.7
			90 度	転倒	前	52.6
仮設框 + 奥行 8cm	0.33		0 度	滑動	—	35.3
			90 度	滑動	—	33.8
	0.6		0 度	滑動	—	14.2
			90 度	ロッキング	—	14.0
仮設框 + 質量 7 kg	0.33	0 度	滑動	—	34.0	
		90 度	滑動	—	34.4	
	0.6	0 度	滑動	—	13.0	
		90 度	ロッキング	—	13.4	

3.2 まとめ

仏像の修理時におこなわれる転倒防止対策は、事例4でも実施されたような框を新しく制作する方法などがとられることが多い。本研究のシミュレーション解析結果でも示されたように框を追加する、あるいは框の大きさ、質量を変化させることで、資料全体の重心位置が下がり（表17）、安定性の向上につながる事が確かめられた。框の新規作成には、材料や費用面で制約のあることも多い。そのため、転倒シミュレーションを利用して、転倒する可能性の低い新補框の形状の下限值を確かめられることは、文化財の転倒防止対策に大いに役立つと考えられる。

表17 神像2 軀の框による重心高さの変化

宇賀御霊神像	框なし	新補框	
重心の高さ (cm)	43.4	34.7	
猿田彦男神像	仮設框	仮設框+奥行 8cm 追加	仮設框+質量 7kg 追加
重心の高さ (cm)	36.5	34.6	27.2

総 括

本研究では、社寺等において所蔵されている仏像などの立体文化財が地震などにより落下・転倒し、破損するリスクを低減するための転倒防止対策の検討方法として、シミュレーション解析を用いた文化財の転倒実験を実施した。今回調査した4つの事例を通じ、シミュレーション解析を文化財の転倒防止対策に利用する3点のメリットを確かめることができた。

ひとつは、文化財の転倒実験を何度も繰り返し実施できる点である。文化財の場合、起震車や加振機などの振動実験は破損の恐れがあり、実施は困難である。転倒シミュレーションは、仮想空間上でさまざまな条件の地震波を用いた振動実験を実施できること、同様の資料に対し繰り返し振動実験を実施できることから、文化財の転倒実験にとって大きなメリットである。

次に、シミュレーションの転倒実験を通じて、さまざまな転倒防止対策を検討することができる点である。社寺等が所蔵する文化財は、博物館等が所蔵する文化財と異なり、転倒防止対策の実施にさまざまな制約がかかる。転倒シミュレーションでは、どのくらいの地震で転倒する可能性があるのか、視覚的にどのような転倒をするのか確認できることから、文化財の所有者と転倒防止対策を検討するための有用な手段となる。また、シミュレーション上でさまざまな条件の転倒防止対策を検討できることから、制約がある中でもっとも効果的な対策

を選択することにつながり、社寺等における文化財の転倒防止対策の検討手法として大きなメリットである。

最後に、修理時に文化財の安定性を高め、転倒を防止する手法として、シミュレーション解析が応用できる点である。仏像の修理時には、転倒防止対策として、新たに框を作成し安定性を高める手法がとられることが多い。転倒シミュレーションでは、框の形状を繰り返し変更して転倒実験を実施することで、転倒防止効果の高い框の検討が可能となることが確かめられた。

いっぽう、文化財の転倒シミュレーションを活用するうえでの課題も残っている。まず、摩擦係数など解析モデルに用いる諸数値の設定は、シミュレーションの精度に影響するため、引き続きさまざまな条件での解析を検証していく必要がある。また、今回の調査では、資料の凸包形状に一様に質量が分布していると仮定し、重心も簡易な手法で求めた。しかし実際の文化財は、質量分布には偏りがあり、形状もより複雑である。これらの条件は、シミュレーションの精度に影響すると考えられることから、質量分布と重心位置の設定にはより詳細な検討が必要である。

以上の課題を検証、検討しながら、シミュレーションの精度向上をはかり、さまざまな文化財の転倒防止対策に役立てることで防災・減災につなげていきたい。

文化財防災センター事業

社寺等における文化財の安全対策に関する研究 調査結果報告書

令和6年3月28日 発行

編集：京都国立博物館

〒605-0931 京都市東山区茶屋町 527

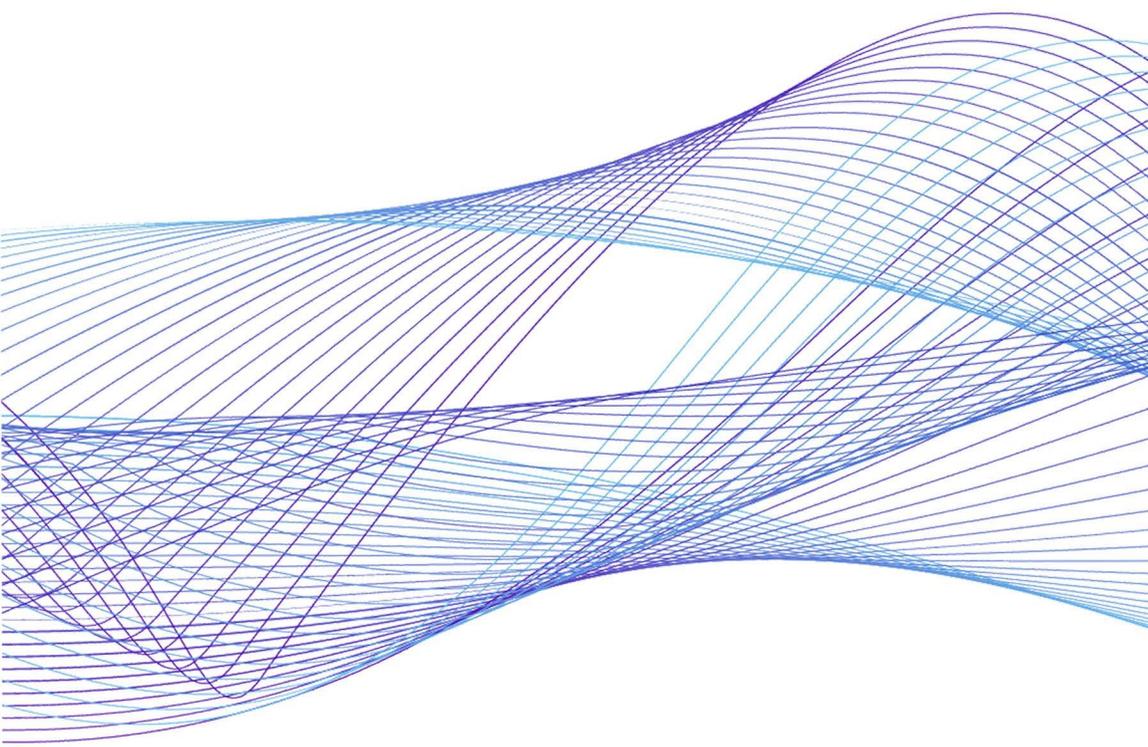
TEL：075-330-0002

発行：文化財防災センター

〒630-8577 奈良市二条町 2-9-1

TEL：0742-31-9056

印刷：大平印刷株式会社



独立行政法人国立文化財機構
National Institutes for Cultural Heritage