

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	3次元点群データを活用した鎌倉大仏の耐震安全性能評価
研究者名※	白井 佑樹
所属組織※	神奈川大学 建築学部 助教
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 神奈川大学

申請者氏名 白井佑樹

研究課題	3次元点群データを活用した鎌倉大仏の耐震安全性能評価
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>国宝銅造阿弥陀如来像（鎌倉大仏）の保存修復計画立案を進めていく上で、耐震対策としてその耐震安全性能を把握・評価することは重要である。具体的なリスクとして、昭和の大改修で補強が行われた、尊像本体と頭部を接続する頸部の損傷を想定している。本研究では、常時地震観測と 3 次元有限要素解析を並行して行った。地震観測で、頭部、尊像胴体部および基礎部免震層の振動性状の把握を行い、微小地震時の振動特性を把握し、免震層でのずれはないことを確認した。解析では、SfM/MVS を利用して、写真画像データから 3 次元点群、そこから解析モデルへと変換することを試みた。さらに、解析モデルと常時微動測定、および地震観測を比較検討した。固有値解析ではモデルシェル要素の板厚分布を調整することで、既往の常時微動測定結果とモード同定した。地震応答解析での応答性状の比較では、モデル精度に課題はあるものの、スペクトル解析により、頸部損傷のリスクが高いことを確認した。</p>	

1. 研究の目的

本研究の目的は、鎌倉大仏として知られる国宝銅像阿弥陀如来坐像（以降、鎌倉大仏）の保存修復計画立案に重要な耐震安全性能を評価・把握することである。鎌倉大仏は鑄造されており、材質は鉛を多く含む青銅製¹⁾であることは分かっているが、その精確な形状、寸法ならびに鑄物や鑄継ぎ部の厚さは必ずしもよくわかっていない。そこで本研究では、写真画像データから 3 次元点群を抽出し、この点群データから 3 次元有限要素解析モデルを構築し、数値解析する手法をとる。解析モデルに対してこれまでの観測結果^{2,3)}と常時地震動応答観測結果の比較検討を行い、解析モデルとの整合性の確認、板厚の推定および頸部周辺の損傷リスクの有無について検討を行う。観測は数値解析を補完することに加えて観測結果の変化から尊像の耐震安全性能の経時的な変化を把握する方法を模索する目的もある。

鎌倉大仏は国宝であり、その耐震安全性能を把握することの意義はたいへん大きいと考える一方で、鎌倉大仏はいわゆる美術工芸品である。しかしその規模やこれまでの修理で施されてきた構法、さらに建築を専門とする委員が修理委員会委員を務めてきたことから、建築の構造力学として引き続き取り組むべき研究対象であると考え。大正の修理（関東大震災の被害を受け、1924～1925 で実施）では剛とするべく尊像を基壇に固定したのに対し、昭和の修理では当時最新の建築構造技術であった免震構造が採用されている背景がある。また尊像の経時的変化を把握できる、現時点での写真画像データによるモデル化と観測は、保存修復計画立案において意義があるものだと考える。

2. 研究の経過

図 1 に、本研究課題の研究手法について示す。

本研究の目的は、1. に示したように、鎌倉大仏の耐震安全性能を評価・把握することである。そのための研究手法として、本研究課題では鎌倉大仏の地震応答性状に着目して、実現象とシミュレーションの双方から評価・把握することを試みる。実現象の把握として、常時微動計測は既往研究³⁾での結果を引用した。地震動計測は本研究課題で開始した。一方、シミュレーションは3次元有限要素法解析を用いたが、研究対象の鎌倉大仏は鋳造されており製作時の図面等はなく、解析モデル作成が困難である。そこで、はじめに既往研究²⁾での写真撮影における画像データからSfM/MVSを用いてメッシュモデルを作成した。得られたメッシュモデルによって、固有値解析および地震応答解析を実施した。なお本研究課題での解析モデルは免震を考慮できていない。モード同定については検討中であるため、本報告書内では記述しない。

計測と解析から、常時微動、微小地震を対象として、鎌倉大仏の地震応答性状を検討した。なお、本研究課題期間内において、小地震以上の地震動は計測されなかった。

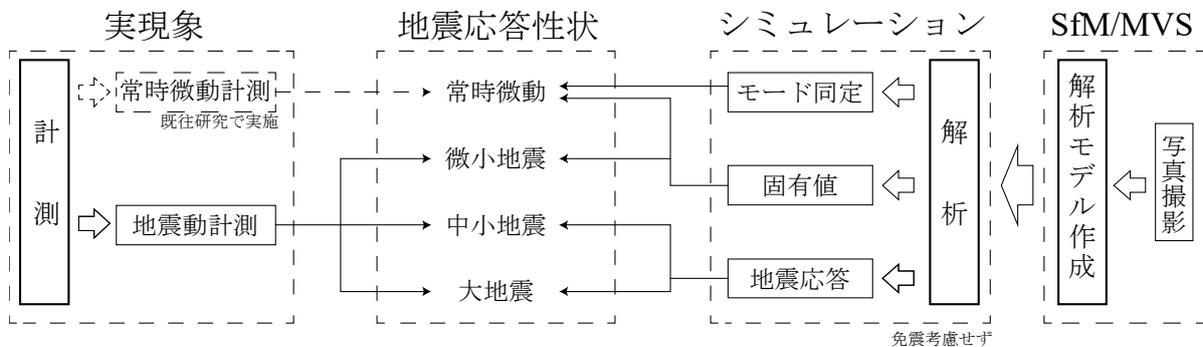


図 1 本研究での手法

2. 1 地震動計測

地震動計測の目的の一つは、地震時の頭部の振動特性を把握することである。ただ最も重要な頭部の計測を 2024 年 1 月に開始することができたが、データ回収には鎌倉大仏胎内でのタワー設置が必要で容易ではなく、本報告書提出時にデータ回収はできていない。1 月 28 日の東京湾を震央とする地震での地震動を計測できており、2024 年 6 月（予定）のデータ回収後検討する。

図 2 に加速度計設置位置を示す。加速度計は 4 箇所計 5 台で、免震層下部、免震層上部、背面開口部内部および頭部内顎部（以下、それぞれ G, B, M, T）に設置した。加速度計の固定には尊像表面を傷めないよう慎重に行った。免震層下部と免震層上部は昭和の改修事業¹⁾でのコンクリート盤であり、両面テープにより固定している。背面開口部内部には図 2 に示すように突起があり、そこにケーブルタイにより加速度を固定している。頭部内部については記録写真もなく、胎内でのタワー設置時に状況を確認・当日中の加速度センサー設置となった。作業は鎌倉大仏の拝観後から深夜にわたり実施し、頭部内部には胎内仏が安置されていた。背面開口部内部のような突起はなく、所有者に許可をとり、胎内仏木製台座への両面テープにより固定および事前に準備していた加速度計を両面テープにより固定したレンガを錘とした計測治具（3 点支持）を据え置いた。いずれも大きな地震動によって動いてしまう可能性が考えられるため、2 台設置した。加速度のサンプリングは 200 Hz、3 軸方向で計測している。加速度計の時刻同期はできておらず、以降の検討では、地震動初期における鉛直方向（Z 方向）の加速度波形で時刻を合わせた。

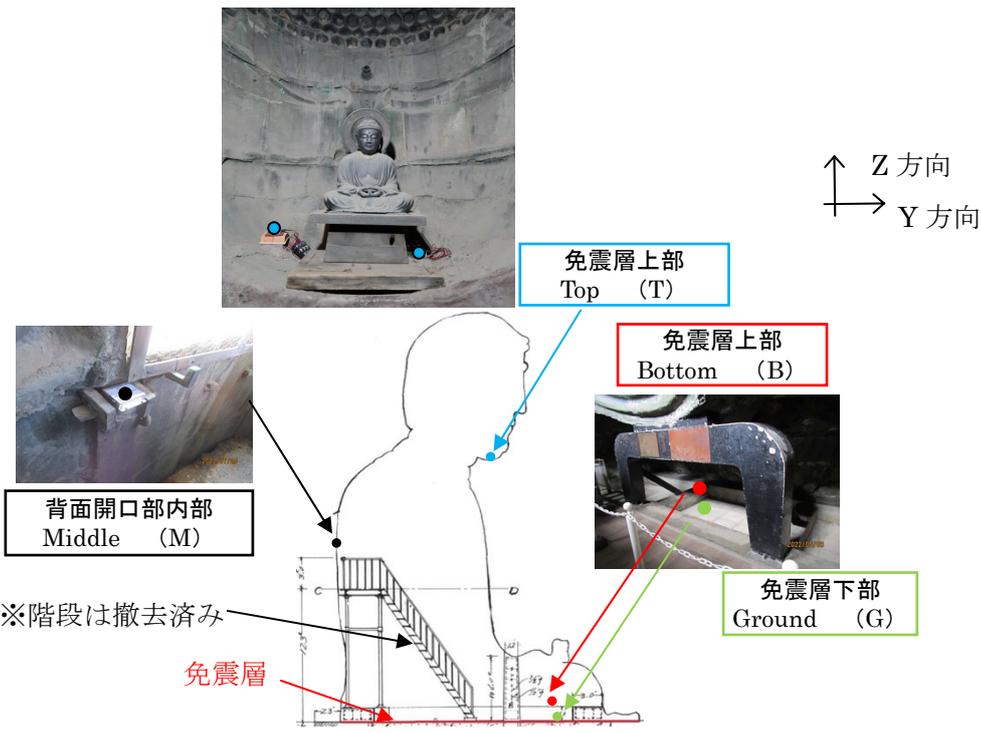


図2 加速度計設置位置とその方向 (文献¹⁾の図に加筆)

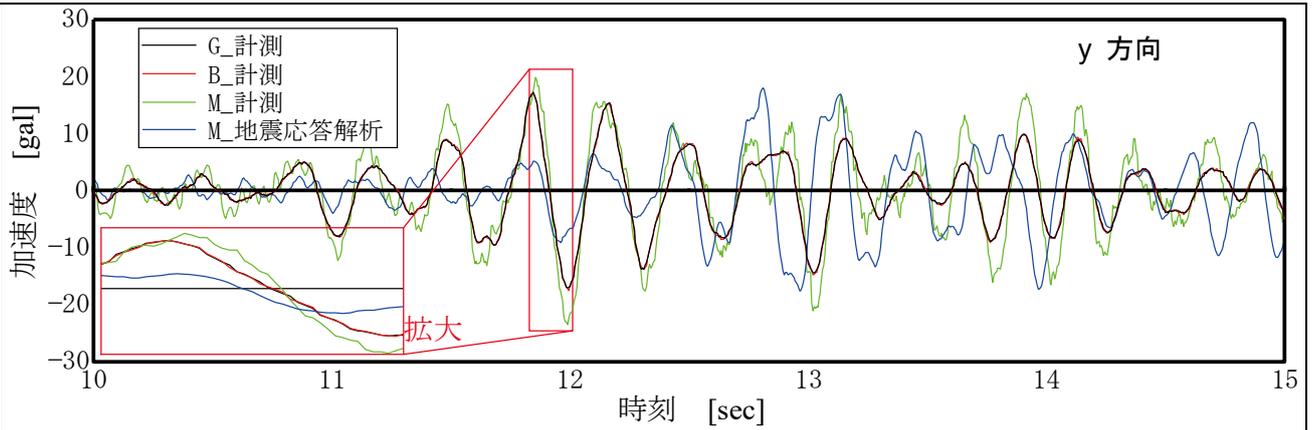
表1にこれまで観測された地震の中で付近震度が大きかったものを示す。これまで回収したデータのうち特に大きかったものは17セットである。付近震度は鎌倉市役所の地震計によるものである。表1にはそれぞれの地震における免震層下部(G)での最大加速度および免震層下部(G)に対する背面開口部内部(M)の伝達関数から求めた卓越周波数を示す。

表1 地震記録

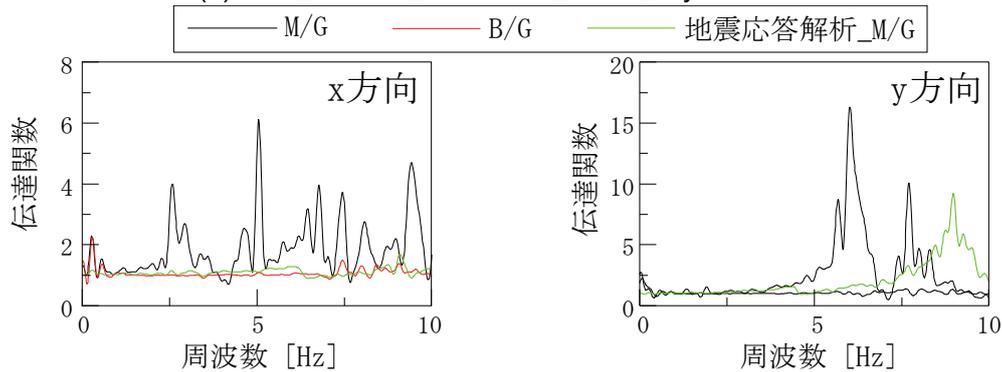
地震発生日時	震央	M _j	付近震度 ^{*1}	免震層下部(G)での最大加速度 [cm/s ²]			振幅比伝達関数 M/G ^{*2} 卓越周波数 [Hz]		
				X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
2022年11月14日	三重県南東沖	6.4	1	6.5	7.9	4.2	5.1	6.1	4.9
2022年12月16日	千葉県北西部	4.3	1	6.2	9.2	4.6	6.5	6.3	4.1
2023年5月11日	千葉県南部	5.2	2	24	31	17	6.6	5.9	3.7
2023年5月26日	千葉県東部	6.2	2	6.8	10	5.2	6.6	6.4	5.8
2024年1月28日	東京湾	4.7	2	11	17	7.4	5.0	6.0	6.2

*1 鎌倉市役所での地震観測データより, *2: 免震層下部(G)に対する背面開口部内部(M)

図3に、表1に示した2024年1月28日の地震動について、加速度時刻歴と振幅比の伝達関数を示す。加速度時刻歴は最大加速度付近を、伝達関数は5HzでのFFTフィルタでの平滑化を行っている。まず免震層下部に対する免震層上部の伝達関数(B/G)において免震層での振動特性を確認する。8Hz付近にピークが見られる場合もあるが、そのときの振幅スペクトルは小さく、また時刻歴で確認しても加速度は一致しており、これまでの地震観測の範囲では免震層での滑動はないと考える。次に免震層下部に対する背面開口部内部の伝達関数(M/G)を確認する。Y方向に対しては6Hz程度と安定している。一方、X方向に対しては、5~6Hz程度とY方向に比べ幅がある。時刻歴において、免震層下部(G)と背面開口部内部(M)を比べると、加速度が増幅していること、位相はほとんど一致していることがわかる。なお常時微動調査での、頭部の卓越周波数は、X方向で6.4Hz、Y方向で6.8Hzであった。



(b) 加速度時刻歴 最大加速度付近 y 方向



(b) 伝達関数

図3 2024年1月28日の地震動について

2. 2 常時微動と固有値解析

表2に既往研究¹³⁾での常時微動測定の結果を示す。6.4Hzで左右方向(Y方向)が長軸となる楕円運動, 6.8Hzでは頭部の前後運動, 7.4Hzでは頭部の上下運動が卓越していた。一方でここでの解析では実固有値解析となっており, 位相を考慮する必要がある楕円運動を再現できない。そこで表2では常時微動測定での左右楕円運動を左右運動として示した。

表3に解析パラメータを示す。ここでは既往の常時微動調査での卓越周波数, およびそのときモードと整合するように, 銅板厚・質量の分布をパラメータとして検討した。板厚について, γ 線透視による調査¹⁾によって部分により差が大きいことが指摘されているが, 平均して胴体4.5cm, 頭部3.5cmとある。なお, 表3での頭部および全体質量の誤差は, それぞれ文献4), 1)に対するものである。また比重は既往研究における8.8と統一し, 鋳継ぎ部は無視した。

以上の3ケースについて, 全体をMindlinシェル要素でモデル化して実固有値解析を実施した。

表2 常時微動卓越周波数と固有値解析の振動モードの比較

固有振動数 [Hz]	左右運動	前後運動	上下運動
常時微動結果 ³⁾	6.4	6.8	7.1
ケース1	9.3	6.2	8.3
ケース2	7.4	5.2	8.3
ケース3	8.3	6.2	9.4

表3 解析パラメータ

	ケース1	ケース2	ケース3	地震応答用
頭部の板厚	4.5 cm	3.5 cm	3.5 cm	4.0cm
胴体の板厚	4.5 cm	4.5 cm	5.6 cm	5.7cm
首回りの板厚	4.5cm	4.5cm	5.6cm	3.0cm
螺髪質量考慮係数*	1.0	2.228	2.228	2.23
頭部質量 (誤差)	15.9 t (-24.9%)	21.2 t (-0.0%)	21.2 t (-0.0%)	24.2 t (14.3%)
全体質量 (誤差)	96.2 t (-20.5%)	101.4 t (-16.2%)	121.1 t (0.1%)	121.0 t (0.0%)

*螺髪質量を考慮して螺髪が分布する頭部の比重に乗じる係数

解析モデルを図4に、解析諸元を表4に、解析条件を表5に示す。解析ケース3で得られた主要な振動モードを図5に示す。

各ケースの1次から3次までの振動モードを表1のようにまとめ、常時微動結果と比較し以下の3点が考察された。なお、本解析は実固有値解析のため、常時微動結果で見られた楕円運動は確認できなかった。比較では位相差を考慮せず、楕円運動を左右方向と前後方向の連成振動とみなす。

- (1) 常時微動結果で見られた主要なモード3つに近いモードが全ケースで得られ、固有振動数も5~9 Hzの狭い範囲に収まった。解析モデルの信頼性が高いことを示していると考えられる。
- (2) ケース1に対してケース2,3で頭部の左右運動のモードが上下運動のモードの次数と入れ替わり、固有振動数が常時微動結果に近づいた。頭部質量を考慮したためと考えられる。
- (3) ケース2に対してケース3で固有振動数が増大傾向にある。板厚を増したことによる全体質量の増加より、剛性が増した影響が大きかったためと考えられる。

以上の結果と考察から、本解析で得られた振動モードは常時微動観測結果に概ね整合し、板厚によって質量と剛性の分布を制御することで、さらに高い精度で固有振動数を整合させられる可能性が示唆された。

表4 解析諸元

	ヤング率	ポアソン比	比重
シェル要素	80.8 GPa	0.358	8.8

表5 解析条件

固定拘束	基壇に接するモデル最下端節点
実固有値解析手法	ランチョス法
求める固有値数	50

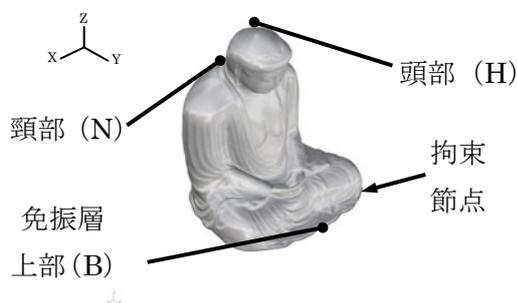


図4 解析モデルと境界条件

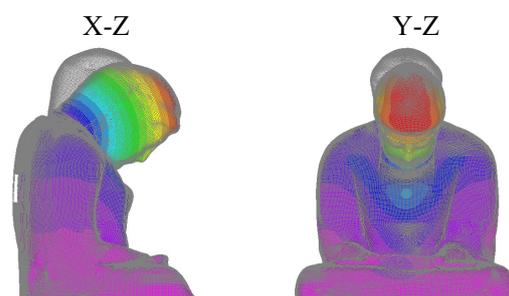


図5 ケース3の振動モード 1次モード

2.3 地震応答解析

表3に地震応答解析での解析パラメータを示す。地震応答解析では、基礎部に対して、2024年1月28日の地震で計測した免震層下部(B)の3方向の入力加速度データを入力した。解析の時間積分法はNewmark- β 法(平均加速度法)、減衰は剛性比例減衰(減衰定数4.0%、基準振動数6.0Hz)、解析の時間刻みは観測刻みと同様の0.005sとして、60秒間の計算を行った。また今回得られた地震動は小さいため弾性解析とし、基礎の回転入力再現できていないため基礎固定とした。

図3に地震応答解析で得られた背面開口部内部(M)の加速度時刻歴および免震層下部に対する伝達関数(M/G)を併せて示す。最大加速度は計測記録と同程度であるが、位相がずれていることがわかる。伝達関数から左右方向(x方向)に対しては、明確な卓越振動数を確認することはできなかった。一方で、前後方向は9Hz程度にピークが見られた。図2より左右方向の解析結果は計測結果に比べて小さい一方で、前後方向では最大応答加速度は概ね捉えていることがわかる。よって、方向によって解析モデルの再現性に課題があることが確認できた。

参考文献

- 1) 高德院国宝銅像阿弥陀如来坐像修理工事委員会（委員長 関野克）：高德院国宝銅像阿弥陀如来坐像修理工事報告書，1961.07
- 2) 国宝銅造阿弥陀如来坐像保存修理委員会（委員長 清水眞澄）：高德院国宝銅造阿弥陀如来坐像 平成 27 年度保存修理報告書，2018.03
- 3) 安井佑佳，森井順之，佐藤成，花里利一：国宝銅造阿弥陀如来坐像の地震対策評価 その 2 常時微動調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016.08
- 4) 齋田淳，中村豊，佐藤勉，立花三裕：常時微動を用いた鎌倉大仏の地震応答特性の調査，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.7，pp.261-274，2015

3. 研究の成果

鎌倉大仏の保存修復計画立案に重要な耐震安全性能を把握・評価することを目的として，地震動観測と 3 次元有限要素解析，およびこれらの比較検討を行った。得られたまとめを以下に示す。

- 1) 免震層の上下と背面開口部での地震動加速度の計測を開始し，最大 30 cm/s^2 程度の入力による応答を観測することができた。背面開口部での卓越周波数は，5~6Hz 程度であった。頭部での計測も始めている。
- 2) 3 次元有限要素モデルにより実固有値解析を行い，既往研究での常時微動観測の固有周波数との比較を行った。振動モードは常時微動観測結果に概ね整合し，板厚によって質量と剛性の分布を制御することで，さらに高い精度で固有振動数を整合させられる可能性を確認した。
- 3) 地震応答解析を行い，地震動計測と時刻歴と伝達関数において比較を行った。方向によって解析モデルの再現性に課題があることがわかった。

4. 今後の課題

以下に箇条書きで示す。

- ・地震動観測において，頭部頸部での地震応答データの回収を 2024 年 6 月に予定しており，得られたデータの解析が至急の課題である。特に，表 3 に示した頭部質量については文献 4) が唯一の検討事例であり，質量とともに応答性状の評価は，鎌倉大仏の耐震安全性能を評価において，大変重要である。
- ・関東大震災では基壇破壊が起こり，鎌倉大仏が迂り出る被害が確認されている。そのため，本研究課題で仮定していた基礎固定について，検討する必要がある。その手法として，図 1 に示した常時微動に対するモード同定を開始しており，基礎回転の可能性の示唆する結果が得られている。モード同定の結果を固有値解析および地震応答解析に反映させていく予定である。あわせて，基壇には免震を期待したステンレス板が敷設されており，極大地震ではステンレス板の滑りが生じる可能性がある。
- ・本研究課題の目的は鎌倉大仏の耐震安全性能を把握・評価であるが，これらが達成された先には，鎌倉大仏の保存・活用という課題がある。国宝として，また観光資源としての保存・活用計画の立案が必要である。