

# 縮小模型を用いた祇園祭の山鉾の構造特性に関する基礎的研究 —真木の振動性状について—

Basic Study on Structural Characteristics of Yamaboko in Gion Festival Using a Small Scale Model about Vibrational Properties of Shingi

野村直樹<sup>1</sup>・中嶋裕典<sup>1</sup>

Naoki Nomura and Yusuke Nakajima

<sup>1</sup>関西大学大学院博士課程後期課程 理工学研究科総合理工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Doctoral Program, Graduate School of Kansai University, Science and Engineering, Integrated Science and Engineering Major

Yamaboko of the Gion-Festival in Kyoto has the wheels, turns around the city. It has a large aspect ratio and an unstable structure, but has been able to travel safely in recent years. Looking back on the past, an accident has occurred in which a member called Shingi, which rises in the center, is broken. There is a need to prevent such accidents in Kyoto where many tourists visit, for the succession of Kyoto-culture. Therefore, it is an object to confirm the vibration characteristics of Yamaboko using a small scale model. From the experimental results, it was found that the bending moment is concentrated at the position where Kamurobashira attached, and the swaying of Shingi is suppressed by using several elements.

**Keywords:** Gion Festival, Yamaboko, Vibration characteristic, Scale model experiment

## 1. はじめに

京都の祇園祭では毎年7月中旬、山や鉾と呼ばれる多数の曳山が市内を巡行する。山鉾（長刀鉾）が巡行状況を写真1に、実測図を図1<sup>1)</sup>に示す。図のように、山鉾の特徴は長刀や月などの御神体を高さ20～25mに達する真木の頂上に掲げたきわめてアスペクト比（車幅方向： $21.67/2.36=9.18$ 、車輪間方向： $21.67/4.5=4.82$ ）の大きいプロポーションとなっていることで、その結果、真木や屋根、囃子方の舞台は鉾巡行時に前後左右に激しく揺動する。また山鉾は交差点を直角に曲がるために、車輪を取り付けた台車（石持）を梃と人力で急激に方向転換する所謂「辻回し」のほか、加速と停止を繰り返すため、重さ約10トン（長刀鉾：11.1トン<sup>2)</sup>）を上回る山鉾は長時間にわたり過酷な荷重状況に晒される。

山鉾は毎年解体して倉庫に保管され、巡行前に職人の手により組み上げられるので、部材はほぞ組みなどによって組まれ、各継手・仕口は「縄がらみ」と呼ばれるわら縄を巻きつける手法によって補強される。また山鉾は長大なために、「鉾建て」と呼ばれる組み上げ作業が道路を占有して行われており、これも祇園祭の見所となっている。中でも「真木建て」は、胴組を組み立ててから長い真木を取り付けるため一度横倒しの状態にし、真木とカムロ柱を取り付け後に再度元の状態に戻すために引き起こす作業であり、祇園祭の一つの見せ場にもなっている。この作業後に胴組上部に舞台・屋根が造られ、最後に懸装品が取り付けられる。

山鉾の真木の先端には「鉾頭」（真木の頂きにつける鉾を代表するもの、長刀鉾の長刀）が設置され、胴組は絨毯や緞通などの「懸装品」で華麗に装飾される。巡行時には舞台に囃子方が40人、屋根にも屋根方が4人ほど乗り込む。

車輪の直径は約1.9mでありアカガシなどの木材で作られ一つあたりの重量は約500kg<sup>2)</sup>とされている。

前後の車軸は「石持」と呼ばれる部材によってつながれる。地面から高さ 2m までに位置するこれらの車輪、車軸、石持部分で全体重量の 1/4～1/3 を占めている。

記録<sup>3)</sup>には 1377 年に鉾が転倒し老尼がなくなるとか、囃子方の子供が落ち車に引かれるなどの死亡事故がいくつかある。記録の中で最も多い事故が真木が途中で折れたというものであり、1737 年以降に 10 回程度様々な山鉾の真木が折れており、昭和に入ってから 2 度ほど起こったという。

祇園祭は国内外から多くの観光客が訪れる京都の一大イベントで、写真 1 のように歩道は観光客で溢れ返る。このため、京都の伝統文化を維持するためにも、山鉾の巡行時の強度や振動特性を把握することは、重要な研究課題と考えられる。

本研究は、縮小模型を用いた動的実験によって京都の祇園祭の山鉾の構造特性を確認し、今後も安全に巡行が行えるようにすることを目的とする。本報においてまずは山鉾の真木の振動特性について述べる。



写真 1 実際の巡行

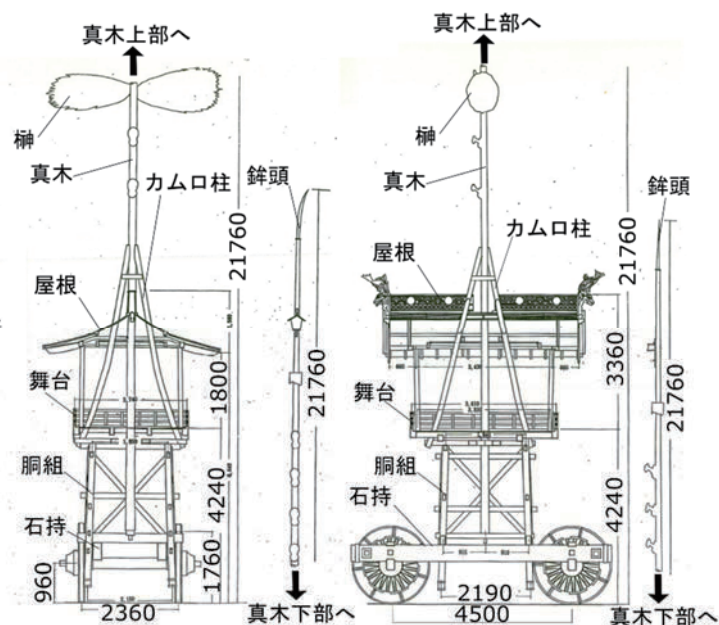


図 1 長刀鉾図面 1) (単位: mm)

## 2. 試験体

試験体のモデルは長刀鉾で、実物の約 1/4<sup>註 1)</sup> で設計製作しており、長刀鉾の先端（鉾頭）をつけない状態で全高約 5 mとした。車輪の左右の間隔<sup>註 2)</sup>は 845mm、前後の間隔は 1455mmであり、実物同様に車輪はステアリング機能が付いていない。車輪および「石持」と呼ばれる台車部分を除く試験体上部構造の重量は 49 kg、台車部分は 136 kg<sup>註 2)</sup>の基本構成である。試験体各部には実際のもの同様に縄がらみで補強を施し、台車部分と上部構造も縄がらみによって固定している。実物の縄がらみを写真 2 に、試験体のものを写真 3 に、全体写真を写真 4 に、部分の名称や寸法を図 1 に示す。



写真 2 実物の縄がらみ



写真 3 試験体の縄がらみ





写真4 試験体完成

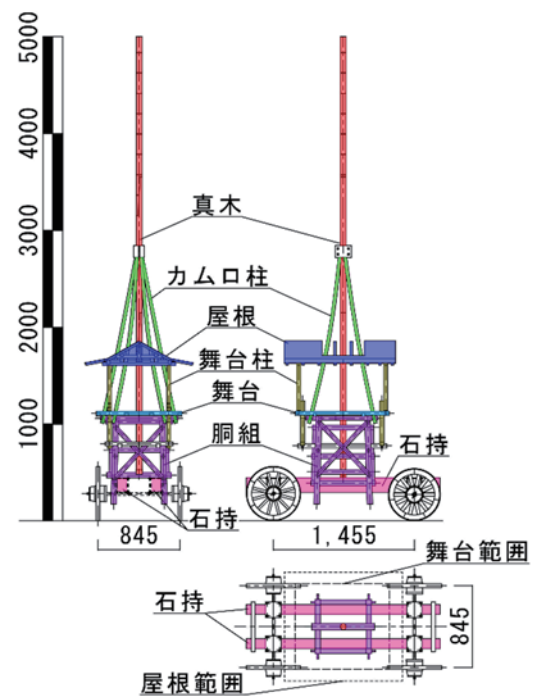


図2 試験体寸法・名称

### 3. 実験方法

上述の試験体に「櫓 (4.2kg)」「先端(1.1kg)」「錘(189kg)」「懸装品(11.7kg)」の各要素<sup>註3)</sup>を取り付ける。実験パターンとして要素をそれぞれ単体で取り付けたもの(4種)、全て取り付けたもの(1種)、すべて外したもの(1種)の計6種とした。錘は舞台や屋根に乗る人の重量を想定している。実験パターンと重心について表1に、各要素について図3に示す。表1の試験体の重量については胴組より下にある石持・車輪(台車)部を抜いた値である。

表1より全部ありでは試験体重量が全部なしより5倍程度増加するが重心位置は若干低くなる程度ではある。櫓のみと先端のみでは試験体重量として全部なしとあまり変わらないが、全部なしの重心位置より高い部分に取り付いていることから重心位置が高くなる。錘のみと懸装品のみでは、要素が低い位置に取り付くことから重心位置が低くなっている。これらの要素の取り付けにより山鉾の重心位置を変化させることができる。

試験体各点に半導体加速度センサ(センサ重量: 1.7g)を取り付け各種の実験を行った。計測した点の位置を図4に示す。計測点は5箇所設定し各点2方向(前後・左右)、計10点のデータを収集した。以降○の付く数字は計測点番号を示す。静止状態での基本的な振動特性を確認する「常時微動観測」、減衰特性を確認する「打突実験」の計2種の実験を行い、両実験について同条件で10回程度繰り返し、平均をとる。

表1 実験パターンと重心位置

| パターン  | 要素質量<br>[kg] | 試験体重量<br>[kg] | 要素の重量比<br>[%] | 重心高さ<br>[mm] | 備考     |
|-------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------|
| 全部あり  | 206          | 255.1         | 80.8          | 1272         |        |
| 全部なし  | 0            | 49.1          | 0.0           | 1286         |        |
| 櫓のみ   | 4.2          | 53.3          | 7.9           | 1471         | 実験前計測時 |
| 先端のみ  | 1.1          | 50.2          | 2.2           | 1396         |        |
| 錘のみ   | 189          | 238.1         | 79.4          | 1227         | 人間44人分 |
| 懸装品のみ | 11.7         | 60.8          | 19.3          | 1202         | 4面の合計  |

※台車を含まない

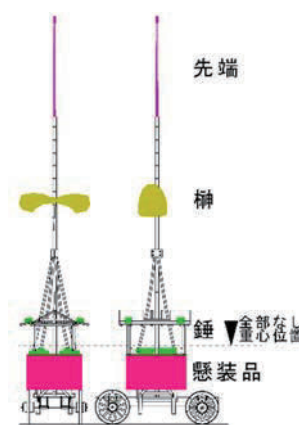


図3 要素について

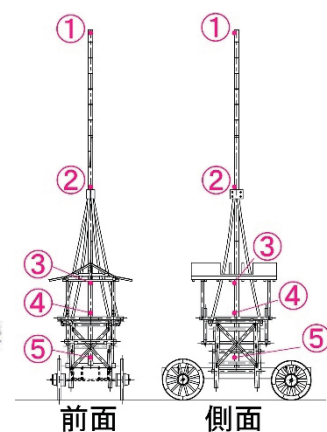


図4 センサ位置



## 4. 常時微動

### (1) 計測と解析方法

試験体を静止させた状態で外乱を与えずに各点の加速度を計測する。サンプリング周波数200Hzで5分間計測する。収集した加速度時刻歴波形を4096点(約20秒)に分割してFFT解析し、結果から位相角やパワースペクトルを算出。スペクトルを分割回数分平均し、ピークの振動数を調べる。各点の振動数応答倍率を求める際には平均化したパワースペクトルを用いる。

### (2) 解析結果

パワースペクトルの一例を図5に、真木上端部①の卓越振動数についてまとめたものを表2に示す。図5より各パラメータにおいて進行方向（前後）とそれに直行する方向（左右）で卓越振動数に著しい違いはない。表2より全部なしでの卓越振動数は5.1 Hz程度であった。鍾のみ櫓のみでは卓越振動数が0.5 Hz程度低下し、先端のみ懸装品のみでは卓越振動数が0.5 Hz程度上昇した。

真木下端部⑤に対する各点の振動数応答倍率を図6に、真木各点のスペクトルから表2の卓越振動数のスペクトル比を図7に示す。図6の両図ともに①が最も大きく、その次に②（緑色）であるが、①と比べ小さい値となりカムロ柱より下部は①と比べ振動していないことがわかる。図7のスペクトル比は各点の位相角とパワースペクトルの値を①点で正規化したものである。図7より、真木の振動はカムロ柱が取りつく位置（②）から上部で応答が大きくなる傾向がある。真木上部が最も振動し、ムチ振り現象（ホイッピング）を起こしている。これからカムロ柱が取りつく付近で曲げモーメントが大きくなり損傷しやすい。この結果より過去の記録にみられる真木の折損はカムロ柱が取りつく位置で起きていたと推測される。

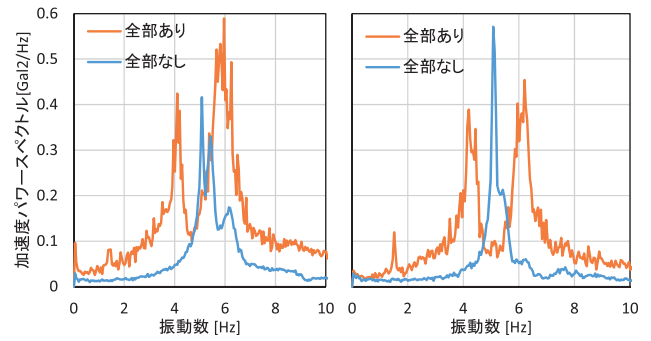


図5 ①FFT結果（左：前後、右：左右）

表2 ①常時微動振動数[Hz]

|    | 全部あり | 全部なし | 櫓のみ  | 先端のみ | 鍾のみ  | 懸装品のみ |
|----|------|------|------|------|------|-------|
| 前後 | 4.10 | 5.08 | 4.84 | 5.76 | 4.10 | 5.42  |
| 左右 | 4.44 | 5.08 | 4.40 | 5.76 | 4.54 | 5.08  |

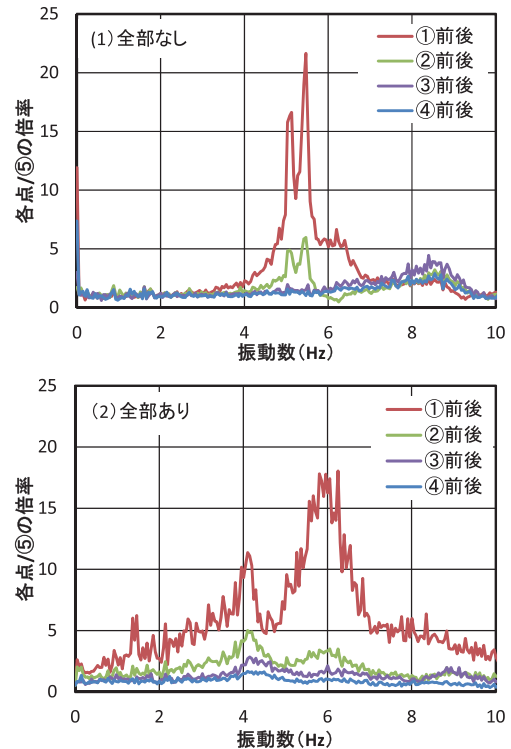


図6 振動数応答倍率（前後方向）

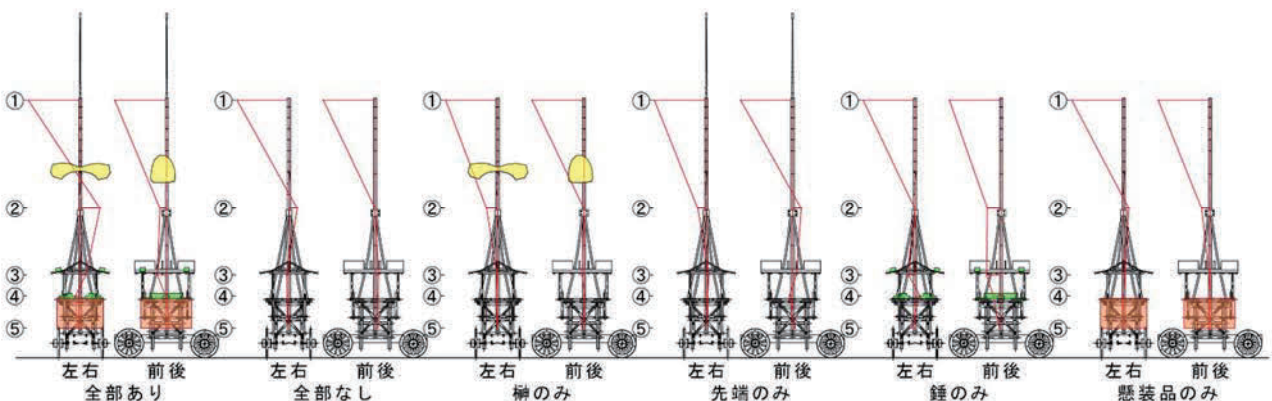


図7 スペクトル比

## 5. 打突実験

### (1) 計測と解析方法

試験体が水平移動しないように車輪下部を固定材で止め、振り上げ高さHを一定とした振り子を台車部分の石持に打突<sup>註4)</sup>させる。サンプリング周波数は2kHzで収集している。打突実験のセットアップ図を図8に示す。図9の減衰自由振動波形一例の各ピーク点の振幅の減少率から減衰定数 $h$ を式1及び2<sup>4)</sup>を用い算出した。

### (2) 解析結果

各パラメータの①点の時刻歴応答変位を図10に、各点について減衰定数をまとめたものを表3に示す。なお表3に示す減衰定数は初期の10波分の平均値である。

図より真木先端の①点の振動の継続時間は全部なしと比較して、各要素を取り付けることで短くなる傾向があり、中でも桷や先端を取り付けることが大きく影響している。また、振り上げ高さをそろえたために入力エネルギーはほぼ一定であるが、試験体に錘を設置することで振幅が減少している。これより舞台部分に錘を設置することで試験体の剛性が上昇し振幅が抑制され、その他の桷・先端や懸装品は制振効果の働きが認められた。全部ありは打突してから1秒後にはほとんど振動が収まっていることより各要素が干渉しあい減衰性能が向上した。

表より各実験パターンではほぼ同様の傾向で、真木の減衰定数は上部から下部に向かい大きくなる。これは上部（真木先端）には拘束する部分が無く自由に振動できるが、下部に向かうにつれカムロ柱・屋根や舞台等の接合部分が互いに干渉し振動が抑制されるためと考える。また、全部なし・錘のみや懸装品のみでは①点の減衰定数は、全部あり・桷のみや先端のみの半分程度の値となっている。真木の減衰性能に大きく影響するのは

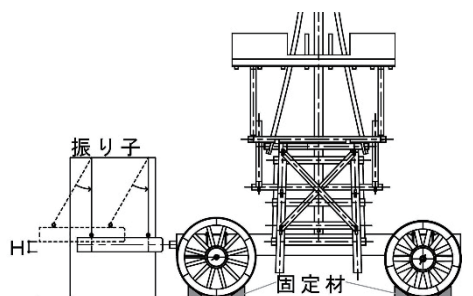


図8 打突実験セットアップ図

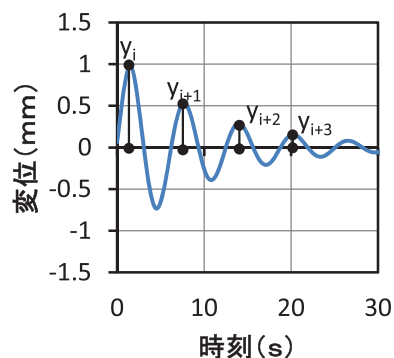
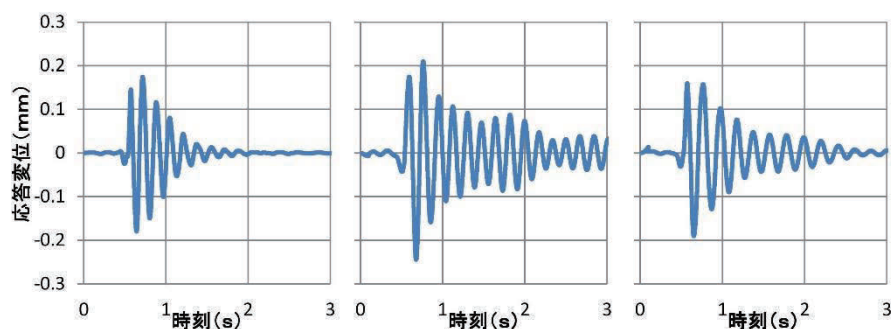


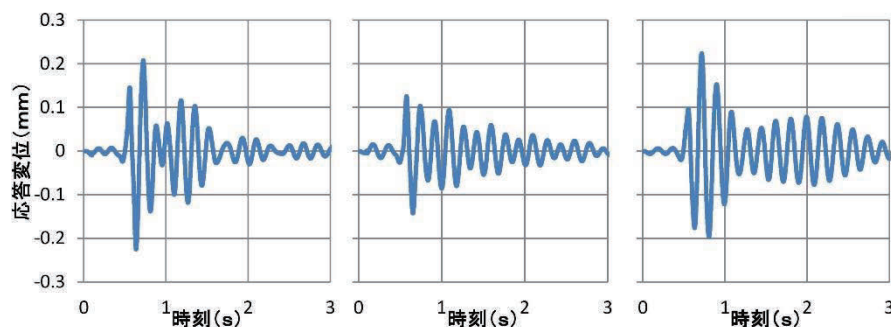
図9 減衰定数算出概要図



(1) 全部あり

(2) 全部なし

(3) 桷のみ



(4) 先端のみ

(5) 錘のみ

(6) 懸装品のみ<sup>註5)</sup>

図10 ①時刻歴変位応答（前後方向）

$$d = y_i / y_{i+1} \quad \text{式 1}$$

$$h = \left( \frac{\ln d}{2\pi} \right) / \sqrt{1 + \left( \frac{\ln d}{2\pi} \right)^2} \quad \text{式 2}$$

表3 各点の減衰定数 (%)

|       | ①   | ②   | ③   | ④   | ⑤   |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 全部あり  | 6.5 | 6.3 | 7.0 | 7.0 | 7.6 |
| 全部なし  | 3.0 | 4.8 | 5.0 | 6.3 | 7.5 |
| 桷のみ   | 5.2 | 6.0 | 6.3 | 7.0 | 7.9 |
| 先端のみ  | 4.3 | 5.1 | 6.2 | 6.9 | 7.9 |
| 錘のみ   | 3.4 | 5.9 | 5.7 | 6.4 | 7.8 |
| 懸装品のみ | 2.6 | 4.0 | 5.3 | 6.2 | 7.7 |

先端や櫛のように真木に取り付けるものである。つまり各要素の有無により真木の振動特性が変化し、それらは単なる装飾品ではなく構造的に効果のあるものである。

## 6. まとめ

以上のような実験により以下の知見が得られた。

- 1) 櫛・先端・錘・懸装品の要素を取り付けない場合と全て取り付けた場合では重心位置に変化がほとんど見られなかった。
- 2) 常時微動の結果を見ると各要素を取り付けることで卓越振動数のピークの数が増え、カムロ柱より上部が最も振動し、ムチ振り現象が生じた。
- 3) 打突実験の結果を見ると舞台部分に荷重がかかることで真木の振幅を抑えることができた。
- 4) 真木の減衰定数は上部から下部に向かい大きくなり、先端や櫛のように真木に取り付けるものは真木先端の減衰定数に大きく影響した。
- 5) 櫛・先端・錘・懸装品の要素は山鉦を彩る装飾品というだけでなく、錘には山鉦の剛性が向上する効果があり、櫛・先端や懸装品には制振効果が認められた。

今後は山鉦が受ける静止状態からの加速、巡行状態からの静止や進行方向を変更する辻回しのようなを巡行を想定した外乱を入力し、山鉦の構造について明確にしたいと考える。

**謝辞：**本研究を行うにあたり関西大学大学院理工学研究科高度化研究費の助成を得た。本実験は当時関西大学大学院の橋本樹氏の修士論文として実施し、多くの学生諸氏にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 註

- 1) 試験体の縮尺は石持より上部を対象としている。
- 2) 車輪部は既製の車輪等を使用しているため1/4の縮尺とは異なり、約1/3である。これより台車部分の重量は実物のスケールと整合していない。今回の実験では車輪を固定した状態で実験し、山鉦を転倒させるような外力を加えないことから車輪部の影響は少ないと考える。
- 3) 試験体で使用した櫛は文献1の実物の櫛の体積を模型サイズにし、藁製で、実物同様に縄で縛り付けた。先端は竹製で実物同様に真木先端に差し込む形で固定した。錘は鋼製で、試験体の舞台部分にボルトで固定した。懸装品は舞台の四隅にボルトで止め付け、絨毯の単位面積当たりの重量（5.0kg/m<sup>2</sup>）と仮定し布を縫い合わせて重量を調整した。
- 4) 巡行時の複数の衝撃が加わり多様な振動し、車輪から石持、次に胴組に伝達される。複数の衝撃を再現して繰り返すことは難しいため、今回まず振り上げ高さHを一定として入力エネルギーをそろえる単発の打突実験を行った。打突実験は、直線的な山鉦巡行時の振動を想定し、石持より上部の振動状況を把握するために石持を前後方向（進行方向）に打突する。
- 5) 図9（6）懸装品について1～3秒間の紡錘型の振動は、前後方向に懸装品が揺れたことで、試験体の舞台の下部や胴組付近に接触し、新たな振動が入力された可能性がある。または懸装品が振り子のような状態であるため、減衰しにくい長周期振動が懸装品から真木に伝達されていると考えられる。

## 参考文献

- 1) 京都市文化観光局文化観光部文化財保護課：祇園祭－山鉦実測，p.72～76，1987.
- 2) 長刀鉦保存会：長刀鉦 財団法人五十年史，2016.10
- 3) 祇園祭山鉦連合会：近世祇園祭山鉦巡行志，1968.
- 4) 柴田明德：最新耐震構造解析第2版、森北出版、2003
- 5) 樋口博美：祇園祭の山鉦祭礼をめぐる祭縁としての社会関係 祭を支える人々，専修人間科学論集，社会学篇（2），pp.113-125，専修大学人間科学学会，2012.03
- 6) 崔 雄，他5名：祇園祭バーチャル山鉦巡行体験のための巡行時加速度変化の計測と可視化，じんもんこん2010論文集，15号，pp.233-238，2010.12
- 7) 祇園祭編纂委員会、祇園祭山鉦連合会 編：祇園祭、p.100～115、筑摩書房、1976