重要文化財「鳥居」詳細調査（第二次調査）

石﨑武志 ISHIZAKI, Takeshi／文化財保存修復研究センター研究員・教授

１．調査の概要

平成29年度に山形市より、重要文化財「鳥居」詳細調査（第二次調査）に関する受託を受けた。調査目的としては、重要文化財「鳥居」の保存修理方針検討のため、鳥居本体及び周辺環境の詳細調査である。調査項目は、次の８点からなる。①定点観測…鳥居周辺の微気象を測定する装置を設置し、観測を行い、データ解析を行う。測定項目として、鳥居周辺の温湿度、鳥居の笠木部分と柱部分の石材表面温度の測定を行う。また、石材の間の動きを調べるために、変位測定用ゲージを設置し、計測を行う。②針貫入試験…石材表面の強度に関して、針貫入試験を行い、一軸圧縮強度を数値によりデータ化する。③微小振動特性による鳥居の構造調査常時微動に関する測定を行い、構造の特性を把握し、地震時の動きを数値によりデータ化する。④音響トモグラフィーによる鳥居の構造調査…石材中に音波を伝搬させ、その伝搬速度を調べることにより、内部の構造を調査する。⑤鳥居を構成する部材の物性調査委託者が準備した鳥居と同等の石材を用いて、水分特性、透水係数などの測定を行う。また、この試験部材を用いて針貫入試験と一軸圧縮強度等の関係を求める。⑥鳥居の３Ｄデータの解析と保存修理に向けた検討…鳥居の３Ｄデータの解析と保存修理に向けた検討を行う。⑦石材強化処理実験結果の提供…委託者が準備した鳥居と同等の石材を用いて、薬剤による石材強化処理実験を行い、その結果を提供する。⑧貫のくさびの年代測定…鳥居の南側貫の仕口穴にある木のくさびについて、年代測定を行う。これらの項目の内、②、④、⑦に関しては、紀要の部分で報告するので、その他の項目に関して、下記に説明する。

２．定点観測

図１に示すように、鳥居周辺の微気象を観測する装置を５月８日（月）に設置し、鳥居周辺の温湿度、降水量、日射、風向、風速を30分おきに測定した。また、図２に示す様に、石材間の動きを調べるために、変位測定ゲージを設置した。

図１．気象観測ステーションの様子

図２．変位測定ゲージの拡大図

３．微小振動特性による鳥居の構造調査

計測は、速度計を図３及び図５に示すように、鳥居の両柱部と基礎部及び地盤（Ａタイプ）と左右の貫と鳥居の両柱部及び地盤（Ｂタイプ）に設置し、かけやによる加振時に対して、発生する振動を測定した。速度計を用いた理由は、微小振動に対する感度が加速度計よりも高いことによる。

図３．Ａタイプの振動測定位置図

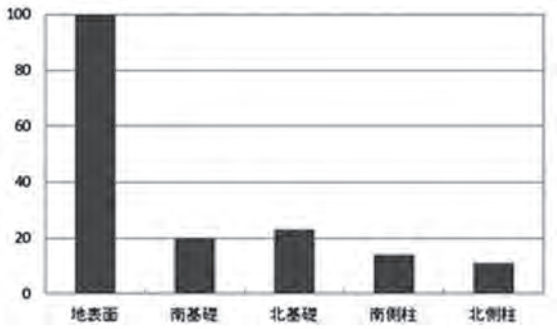

図４．水平-縦断成分における地表面・基礎部及び柱部での最大振幅の減衰率

加振は、かけやによる板たたき法により、鳥居に対して直交（水平－縦断）方向へ実施した。加振回数は10回実施し、それぞれの加振で測定された速度波形の最大振幅の平均値により、地盤から鳥居への振動の伝播状況を評価した。加振時における最大振幅は数10mkineであり、非加振時における振幅の10～20倍程度の振動が発生していることが判明した。加振時においては、発生した最大振幅を用いて地盤から鳥居部への振動伝播の減衰状態を算出し、沓石の有する免振効果についての評価を実施した。加振は水平－縦断方向であるので、振動計の水平－縦断成分における地表面・基礎部及び柱部での最大振幅の減衰率を図４に示す。

図５．Bタイプの振動測定位置図

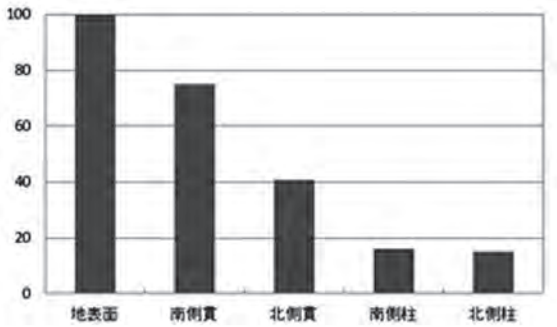

図６．水平-縦断成分における地表面・貫部及び柱部での最大振幅の減衰率

図６から、加振時における各測定位置での水平－縦断方向の減衰率は、地表面を100％とした場合に、柱部ではＡタイプと同じ程度の15％まで減衰するが、貫部におい地表面部に対する減衰率は、右側貫部：75％・左側貫部：41％まで増加していることがわかる。非加振では認められなかった沓石の免震効果が、加振時において柱部に対して大きく作用しているが、貫部では柱部ほど大きく作用していないことが判明した。さらに、左右の貫部において、減衰率が大きく異なることから、貫における振動は左右で整合的でなくねじれが発生しているものと考えられる。

４．鳥居の３Dデータの解析と保存修理に向けた検討

重要文化財「鳥居」の計測に、今回は SfM（Structure from Motion）を用いて三次元形状を生成した。これは、デジタルカメラで撮影した画像からコンピュータ解析により、三次元モデルを生成する方法である。

SfMについて

SfM（Structure from Motion）は、コンピュータビジョンの分野で開発された技術で、カメラの視点を変えながら撮影した画像から撮影位置を推定する手法である。撮影された各画像から特徴点を抽出し、各画像間でマッチングすることで各カメラの位置を推定する技術である。Tomasi-Kanade の因子分析法を基礎とし、SIFT（Scale-Invariant Feature Trans form）やSURF（Speeded Up Robust Features）による処理を用いることで、撮影方向や大きさが異なっても特徴点と推定位置が得られるようになった。

使用機材

撮影には、ニコンD5000一眼レフカメラ（23.6 × 15.8 mm CMOS、1290万画素）、SONY DSC-RX100M4コンパクトカメラ（13.2mm×8.8mm CMOS 2100万画素）を使用し、位置推定と三次元モデル生成ソフトには、Agisoft PhotoScanを用いた。

作業手順

デジタルカメラを用い、おおよそ60～70%程度重なる画像撮影を鳥居全体で行った（図７）。さらに、距離を確定するための標定スケールの入った撮影も行った（図８）。Agisoft PhotoScan にて、カメラ撮影位置の推定処理、高密度点群データの生成、ポリゴンモデルの生成、標高データ・長さ

データの修正を行った後、ポリゴンデータから必要箇所を切り取り、鳥居展開図の作成（テクスチャー画像、陰影図）を行っている。

図７. 三次元解析のための鳥居の写真を取っている様子

図８. 三次元解析のための鳥居の写真を取っている様子

対象の撮影および三次元処理

SfMの処理が行いやすいように、連続性のある画像を約1300枚撮影した。Agisoft PhotoScanで撮影画像を読み込み、Exifデータからレンズキャリブレーションを考慮した計算と特徴点を自動的に計算し撮影推定位置を算出する。撮影位置の推定処理を行い、特徴点から生成された疎な点群データを生成した。疎な点群では、十分な形状を生成できないため、MVS（Multi-View Stereo）による形状復元手法を用い、撮影対象の同一点に対する視差を計算し、高密度の点群データを再構成する処理を行った。この点群を用いてポリゴンモデルを作成することによって三次元のモデルが作成された。

５．貫のくさびの年代測定

試料は、鳥居の貫の部分押さえで採取された木材である。最終形成年輪は残存しておらず、部位不明であった。また、剃刀を用いて切片を採取し、光学顕微鏡で観察したところ、樹種はクリ－コナラ節であった。

試料は調製後、加速器質量分析計（パレオ・ラボ、コンパクトAMS：NEC製 1.5SDH）を用いて測定した。得られた^{14}C濃度について同位体分別効果の補正を行った後、^{14}C年代、暦年代を算出した。

元木の鳥居において貫の部分押さえで採取された木材（PLD-35521）は、2σ暦年代範囲（確率95.4%）に着目すると、1456-1524 cal AD（52.2%）および1558-1632 cal AD（43.2%）であった。これは15世紀中頃～17世紀前半で、室町時代～江戸時代前期に相当する。

木材は最終形成年輪部分を測定すると枯死もしくは伐採年代が得られるが、内側の年輪を測定すると内側であるほど古い年代が得られる（古木効果）。今回の試料は終形成年輪が残存しておらず、残存している最外年輪のさらに外側にも年輪が存在していたはずである。したがって、木材が実際に枯死もしくは伐採されたのは、測定結果の年代よりもやや新しい時期であったと考えられる。