

## 〔報告〕 ガンマ線および穿孔抵抗を用いた 木製柱の内部劣化の診断

藤井 義久\*・藤原 裕子\*・木川 りか・永石 憲道\*<sup>2</sup>・中嶋 啓二\*<sup>2</sup>

### 1. はじめに

文化財建造物の多くは、伝統的構法による木造建築であり、その保存修理では、構造補強などの他に、腐朽や虫害などによって劣化した部材の交換や補修が行われる。劣化部位の修理方法は、現場の技術者の視診や打診などによるいわゆる一次診断の結果に基づいて決定されるが、大断面の柱などの構造部材や大壁内部の劣化の有無、種類、程度や範囲については、外観の一次診断の結果のみから正確に推定することは困難である。

筆者らはこれまで、小型で可搬型の測定機器類を用いた診断（二次診断）手法のうち、寺院などにみられる大断面の構造部材の内部に発生する虫害や腐朽部位を非破壊的に診断する手法として、穿孔抵抗測定法の適用性とその実施例を報告し<sup>1)2)</sup>、さらにガンマ線を用いた木製円柱の内部空洞の可視化技術の適用事例を報告してきた<sup>3)</sup>。両手法にはそれぞれ検出原理や性能に特徴があり、実際の修理実務への適用性などについて利点や欠点がある。その一方で、これらの手法を併用し、結果を総合的に判定することで、より高い精度と信頼性をもって、木部内部の非破壊診断を行うことができると考えられる。本報告では、寺院の大断面柱の保存修復において、一次診断の結果にもとづいて、上記の2種類の手法を併用した二次診断によって内部劣化を非破壊的に評価する手法の可能性を検証した。

### 2. 調査対象と調査方法

#### 2-1. 調査対象

本研究の調査対象として、京都市内の寺院本堂を選定した。この本堂は斜面の上に建ち、本堂の前部は斜面を利用した掛け造り様式の舞台によって支持されている。舞台を支持する下部の木造は、134本のケヤキ製の八角柱（相対する側面間の距離で測定した平均径は約630mm）および貫によって構成されている。柱は階段状に開削した斜面の地盤に設置した礎石の上に石場建て状態で立っている。

これまでの調査で、柱下端付近を中心に、腐朽あるいは虫害といった生物劣化によると考えられる空洞が発生していることが、一部確認され、また推定されてきた。しかし空洞化の程度や範囲の詳細については不明であった。今後、本堂の檜皮屋根の葺き替え工事を実施するにあたり、現在本堂の構造や安全性なども調査中であり、舞台柱下部の内部劣化についても、柱ごとに内部空洞の有無や範囲を明らかにし、修理方針決定のための基礎的資料とする必要があった。修理方法に関しては、例えば断面欠損の大きな空洞部分を柱下端から切除し、根継材を挿入することが想定されるが、この手法を適用するためには空洞が最下段の貫まで達していないことが望まれる。このような観点から本調査では、柱内部の空洞が、下端からどの高さまで及んでいるかを明らかにすることを重要な目的として実施した。

\*京都大学大学院農学研究科

\*<sup>2</sup>東邦レオ株式会社土壌樹木コンサルタント室

## 2-2. 調査方法

一次診断としてまず柱表面の目視調査を全ての柱について行った。調査の範囲は、柱の下端から最下段の貫の上部までの範囲（約2mまでの高さの範囲）とし、この範囲において外周面に現れた生物劣化と関連付けられる症状を抽出し、写真撮影するとともに症状の種類、範囲や程度などを記録した。ここで抽出した症状としては、腐朽菌によると推定される表面の変色（主に褐色化や灰白色化）、腐朽による収縮割れ、ささくれや欠損、甲虫類による虫孔、シロアリによる蟻道や食痕、水分浸潤による水シミの痕跡、礎石と柱下端の隙間などとした。写真撮影に際しては、症状の確認された領域をチョークでマーキングした上で撮影した。また過去の修理において柱の下端部に根継ぎが施されている場合には、元の材料に残された劣化の痕跡の他、新規に挿入された根継ぎ材の劣化状態も評価した。さらに一部の柱では、過去に斜面の崩落によって柱の足元が土砂によって埋もれていた時期があることが柱表面の性状から推定できたので、土砂に覆われていたと思われる範囲も記録した。

一次診断の結果に基づいて、内部に空洞が存在すると思われる柱を抽出し、穿孔抵抗測定およびガンマ線による評価からなる二次診断を実施した。抽出の根拠としては、材の表面に土砂体積および腐朽の痕跡がある場合や、蟻道の痕跡がある場合とした。これらの症状が認められ、かつその症状から、柱内部にまでおよぶ劣化と、その結果として生じる内部の空洞化が懸念されるものを二次診断の対象とした。シバンムシなどの甲虫類による食害は、多くの場合柱外周部に残っている辺材に留まるため抽出の根拠とはしなかった。さらに一部の柱については、下端部の劣化により礎石上面と柱下端との間に隙間が発生し、柱内部の空洞化が確認できる状態にあった。これらは無条件で二次診断の対象とした。

二次診断では、柱の高さ方向の2ヶ所（下端付近および最下段の貫の直下）においてガンマ線による非破壊診断を行い、各高さにおける柱横断面での内部空洞化の範囲を確認した。続いてその空洞化部位が今後の修理によって切除されると判断される部分について、穿孔抵抗測定により、局所的かつ精密に内部空洞化の状態を把握し、ガンマ線による評価の妥当性を確認した。またガンマ線計測機器の設置が困難な柱のうち、柱下端の劣化の状態から今後根継ぎ修理を行うものと予測される柱については、下端から最下段貫までの高さの範囲で適宜穿孔抵抗を行い、空洞化の範囲を評価した。

穿孔抵抗測定およびガンマ線による計測に用いた装置は、既報<sup>1-3)</sup>で用いたものと同じで、測定方法や条件もこれらに準じた。なお穿孔抵抗測定は、外周の標点から柱の直径方向に柱中心



図1 ガンマ線走査装置の設置状況  
左：貫の上方での計測時、右：礎石の上方での計測時

に向かって実施した。またガンマ線計測では、所定の高さで $\gamma$ 線の線源セシウム(137Cs, 3.7 MBq, 半減期30.3年, 662keV)と検出器, レーザ変位計が位置するように装置のガイドレールを設置した(図1)。この状態で柱直径より少し大きい範囲を東西あるいは南北方向に走査した後, 試料を90度回転させ, 同様の走査を行った。測定の際, サンプル時間を6秒に, 木材の密度を0.6から0.7に設定した。

### 3. 調査結果と考察

調査対象となる134本の柱のうち, 17本の柱について二次診断が必要と判定された。この他に, 空洞化が懸念される症状が認められるものが9本あった。またこの17本には, 本研究の実施前から空洞化が懸念されてきた柱12本が含まれている。今回の研究では, 17本のうち, 4本についてガンマ線による診断を行い, これらを含む12本について穿孔抵抗測定を行った。穿孔抵抗の測定は, 礎石から300mmの位置においてまず東北, 南東, 南西および北西の4方向のいずれか一方から柱中心に向かって穿孔し(最大深さ300mm), 内部の空洞化が確認できた段階でこの高さでの穿孔はそれ以上実施せず, 礎石から600mmの高さにおいて同様の穿孔を行った。さらに同様の手順で高さ900mmの位置で穿孔を行った。ガンマ線計測によって得られる柱横断面での空洞分布と穿孔抵抗との対応をより完全に行うためには, 全ての高さで4方向からの穿孔抵抗測定を行うことが望ましかったが, 穿孔抵抗測定法は完全な非破壊検査手法ではなく, 材に穿孔が残る。そのため可能な限り穿孔箇所数を制限しながら, かつ修理時に除去すると想定される部位を優先的に穿孔するなどの工夫をしながら, 冒頭でも述べたように内部空洞が及んでいる最大高さを見極めるように穿孔手順を決定した。

図2から4にガンマ線と穿孔抵抗測定の両方を行った4本の柱(柱1から4)のうち, 柱1から3の測定結果を示す。図は柱下部の南東および南西面の写真の他, ガンマ線によって得た断層画像およびこれらに対応する高さにおける穿孔抵抗測定の結果を示す。

柱1(図2)については, 礎石から300mmの高さの位置の断層画像には中心より北よりの位置に長径150mm, 短径80mm程度の楕円状の空洞部分(空洞面積率約4%)が認められ, これに対応するように高さ300mmの位置における北西方向からの穿孔抵抗には中心部分の空洞化を示す変化(穿孔抵抗の急激な低下)が認められる。

柱2(図3)については, 礎石から300mmの高さの位置の断層画像には中心より南よりの位置に長径130mm, 短径110mm程度の楕円状の空洞部分(空洞面積率約13%)が認められるが, 高さ850mmの断層画像には空洞部分は認められない。これにはほぼ対応するように高さ300mmの位置における北西方向からの穿孔抵抗には表層から約50mmの深さから髓に向かって空洞化部分が存在することを示す変化が認められるものの, 高さ800mmの位置の同方向の穿孔抵抗には空洞化を示す変化は認められない。

柱3(図4)については, 礎石から350mmの高さの位置の断層画像には中心より北よりの位置に長径350mm, 短径120mm程度の楕円状で密度が極めて低いと判定される部分(面積率約21%)が認められ, 高さ800mmおよび1050mmの断層画像においてもわずかながら空洞部分の存在が確認できる。高さ350mmでの低密度領域は, シロアリ被害などによって完全に内部が空洞化しているものではなく, 腐朽によって生じた密度低下領域であると推定される。一次診断の結果からもこの柱については, 蟻害ではなく, 柱足元への土砂の堆積によって生じた腐朽が主な劣化要因であることが示されている。一方, ガンマ線による断層画像に対応するように高さ300mmの位置において北方向からの穿孔抵抗には表層から約70mmの深さから髓に向かって空洞化部分が存在することを示す変化が認められる。しかし, 高さ900mmの位置の穿孔抵抗

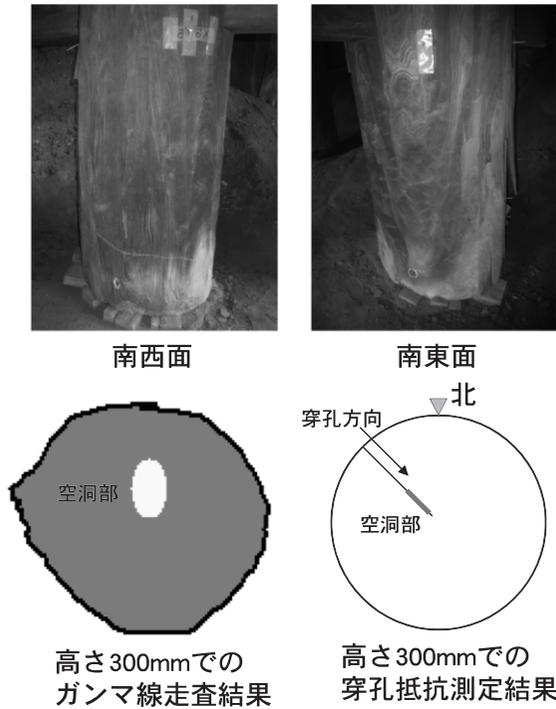


図2 ガンマ線による走査結果と穿孔抵抗測定結果との比較（柱1）

ガンマ線の走査結果は礎石上面から測定した当該の各高さにおける柱横断面とそこにおける空洞の分布（白抜き）を示し、穿孔抵抗測定結果は、当該の高さにおいて柱の外周から中心に向かって穿孔した場合の穿孔抵抗から評価した空洞部の領域を示す。

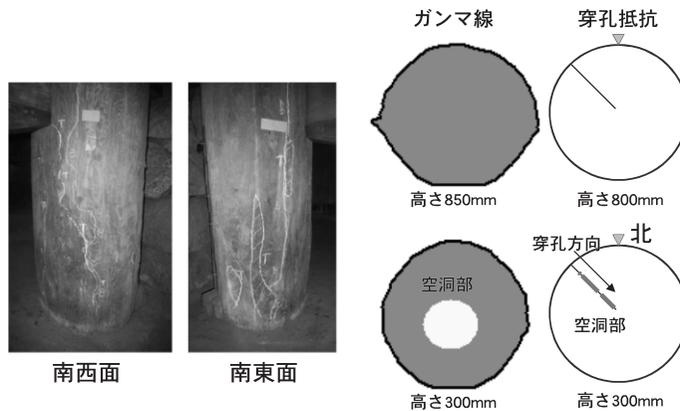


図3 ガンマ線による走査結果と穿孔抵抗測定結果との比較（柱2）  
説明は図2と同様

の結果には断層画像で認められるような空洞を想像させる変化が認められない。これは空洞化領域が小さく分散している場合や、蟻害による完全な空洞ではなく腐朽による密度低下の場合には、ガンマ線による検出では劣化部位の検出性能が低下することが原因と考えられる。また図3および4では、ガンマ線による測定と穿孔抵抗測定の高さが若干異なることが測定結果の不一致の一因となっていると考えられる。

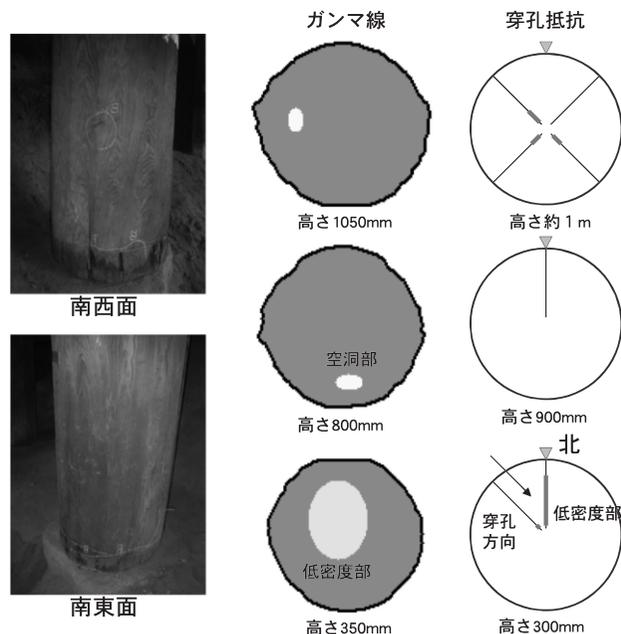


図4 ガンマ線による走査結果と穿孔抵抗測定結果との比較（柱3）  
説明は図2と同様

その他、柱4は下端部に明らかで広範囲におよぶ空洞化の兆候が認められ、さらに最下段の貫と貫穴との間隙部分の観察から最下段の貫よりも高い位置にまで内部の空洞化が発生されていることが示唆された。このためこの空洞が2段目の貫にまで及んでいるかどうかを判定することを目的として調査を進めた。その結果、礎石から1800mmの高さにおいてガンマ線の断層画像でも、穿孔抵抗でも内部空洞を示すデータが得られた。しかしこの空洞は2段目の貫にまでは及んでいないことが明らかになった。

さらに上記の4本を含め穿孔抵抗計測を行った12本の柱のうち10本については、程度の差はあるものの、穿孔抵抗の測定結果に内部空洞を示す変化が認められた。本調査では一次診断において内部空洞が発生していると推定される柱17本を選抜し、さらにそのうちの12本について診断機器を用いた調査を行った。その結果、推定結果の妥当性を確認できたが、今後は外観上健全と判定されながらも内部に空洞が存在するようなケースについての検討も必要と思われる。

#### 4. おわりに

本調査ではガンマ線を用いた診断装置によって得た木製の断面柱における内部空洞の可視化の結果の妥当性を、穿孔抵抗の変化から確認することができた。また文化財建造物などの保存修復の作業において、外観からは判断できない内部劣化の状態を非破壊的に正確に評価するために、両手法を組み合わせることで適用することによって修理部位や方法をより合理的に決定することも示された。その一方で、現状ではこれらの二次診断的手法による計測には一定の時間を要するため、あらかじめ視診などの一次診断によって二次診断の対象となる部材を抽出し、診断の効率化を図ることも必要と考えられる。また穿孔抵抗測定法は完全な非破壊検査とはいえないので、実際に際しては可能な限り穿孔回数を制限しながらも目的に応じたデータを得る

ための手順を検討しておく必要がある。

#### 謝辞

本調査を実施するに当たり、京都府教育庁文化財保護課および同課の鶴岡典慶氏および小宮睦氏には多大なご協力を賜りました。ここに深甚な感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 藤井義久, 藤原裕子, 原田正彦, 木川りか, 小峰幸夫, 川野辺渉: 穿孔抵抗測定法を用いた文化財建造物の構造部材の虫害評価に関する一考察 日光輪王寺における虫害を事例として, 保存科学, 48, 215-222 (2009)
- 2) 藤井義久, 藤原裕子, 原田正彦, 木川りか, 小峰幸夫, 川野辺渉: 穿孔抵抗測定法を用いた文化財建造物の構造部材の虫害評価に関する一考察(第2報) 日光輪王寺における虫害を事例として, 保存科学, 49, 183-189 (2010)
- 3) 藤井義久, 藤原裕子, 木川りか, 川野邊渉, 永石憲道, 中嶋啓二: ガンマ線を用いた木製円柱の内部劣化の検出, 保存科学, 50, 185-190 (2011)

キーワード: 歴史的木造建築 (historic wooden architecture); 生物劣化 (bio-degradation); 非破壊検査 (non-destructive inspection); 穿孔抵抗 (drill resistance); レジストグラフ (Resistograph);  $\gamma$ 線 (Gamma ray); 内部空洞 (inner cavity)

## Detection of Inner Deterioration of Wooden Columns by Drill Resistance and by Gamma-ray

Yoshihisa FUJII\*, Yuko FUJIWARA\*, Rika KIGAWA,  
Norimichi NAGAISHI\*<sup>2</sup> and Keiji NAKAJIMA\*<sup>2</sup>

The feasibility of the combination of two inspection methods, drill resistance method using Resistgraph apparatus and two-dimensional scanning method using gamma-ray transmission, to detect inner cavity of a column generated by insect and fungal attack in historic wooden buildings was investigated. Based on the results of former studies that evaluated the basic performance of the methods, the two methods were applied to octagon columns of zelkova wood about 630mm in diameter in a hall of a temple in Kyoto city. Seventeen columns showing symptoms of bio-degradation were selected out of all the 134 columns by visual inspection. Twelve columns out of the selected 17 were inspected by Resistgraph and 4 of them were inspected also by a gamma-ray scanner. The distribution of inner cavity in the cross section at two heights of the columns estimated by the gamma-ray scanner was confirmed by the change in drill resistance at the corresponding heights. It was clarified that by the combination of two methods a nondestructive evaluation of inner defects of wooden columns can be realized at higher accuracy. Some improvements of the apparatus and procedures are still required for practical application.

---

\*Kyoto University

\*\*TOHO-LEO Co.