

〔報告〕 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—

藤井 義久*・藤原 裕子*・原田 正彦*²・木川 りか・
小峰 幸夫*³・川野邊 渉

1. はじめに

木造の文化財建造物の保存修理に際しては、腐朽や虫害といった木部の生物劣化の評価が重要である。構造材に生じた腐朽や虫害の種類、範囲や程度、さらには劣化による強度評価を解体前や解体中に非破壊的に評価することが求められる。さらに評価に際しては、修理作業との連携、限られた時間や経費などの制約条件のもとでの迅速かつ信頼性の高い評価が求められる。しかし実際には木部の生物劣化の評価手法は十分整備されているとはいえない状況にある。

劣化の評価においてとりわけ技術的に難しいのは非破壊での劣化部位の検出や強度評価である。現状では非破壊で直接的に強度を評価する手法はなく、強度と関連の深い密度や弾性諸定数を音波、超音波、電磁波やX線を用いて非破壊的に評価するにとどまる。その一方で材料の一部をわずかに破壊するとき要する力学的エネルギーや力を測定して強度を評価する手法が開発されている。鋼製ピンを衝撃的に木部に打ち込み、その深さで強度を評価する手法や、細長い錐で穿孔した時の穿孔抵抗（トルク）を測定する手法がこれにあたる。本報告では後者について既往の研究成果^{1~4)}を参照しながら市販の装置を用いて木部の虫害検出性能を検討した上で、輪王寺本堂（栃木県日光市）の構造部材の劣化診断を行った結果を報告する。

2. レジストグラフを用いた穿孔抵抗測定

2-1. 装置と測定原理

今回の調査ではレジストグラフ（型式 IML-RESI F300, IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH 製）（写真1）を用いて穿孔抵抗を測定した（写真2：口絵参照）。この装置は先端径3mmのネズミ歯錐を回転させながら一定の送り速度で前進させ、これによって木材を穿孔した時の穿孔抵抗（トルク）を測定する。最大送り量（最大穿孔深さ）は300mmである。錐の先端部は、直径1.5mmの円柱状のシャフト部の先端を平刃状に押し広げたような形状となっており、その先端のセンター（回転中心）と両縁にけづめが付いている。錐の先端形状がこのようになっているため、穿孔中のトルクは主に平刃の先端両縁のけづめによる木材繊維の切断や、平刃での穿孔最奥部の木部の掻き取りによって生じることとなる。

発生した穿孔抵抗のデータは、本体に取り付けた記録紙にグラフ化されて記録されるとともに、本体のメモリにも蓄積されるので、パソコンによる後処理も可能である。記録される穿孔抵抗値は計測可能な最大値に対する相対値として表示されるため、力やトルクなどの物理量としての単位を持たないが、材内や材間での穿孔抵抗の相対比較は可能である。また内部の空洞の検出を目的とする場合には、空洞部では穿孔抵抗値が0になることを利用してデータを評価する。

*京都大学大学院農学研究科

*²財団法人日光社寺文化財保存会

*³財団法人文化財虫害研究所

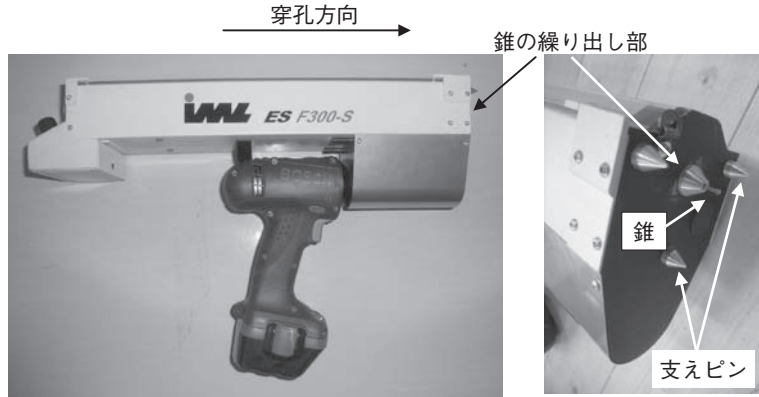


写真1 レジストグラフ (IML 社製 F300-S 型)

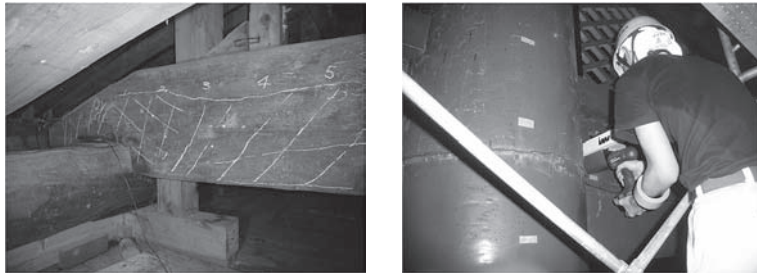


写真2 輪王寺における穿孔抵抗測定状況

左：小屋裏，牛梁の端部

右：内陣柱における穿孔抵抗測定状況

2-2. 装置の基本性能

2-2-1. 穿孔抵抗の変動に及ぼす因子

図1に厚さ約22cmで健全な芯持ちのアカマツ材を穿孔した時の結果を示す。図では木口面の写真と穿孔抵抗のグラフを対応付けて配置している。実際の穿孔は木口面から約30mmの位置で行なっているが、繊維走行の通直な部位を用いているので図から穿孔位置での年輪の状態と穿孔抵抗との関係をほぼ理解できる。

図から健全材の穿孔結果でも穿孔位置によって穿孔抵抗は特徴的に変化することがわかる。すなわち③のように、髄(芯)を通して、丸太の直径方向に穿孔する場合には、穿孔抵抗の周期的な変動が顕著に見られる。変動の周期は、早材と晩材の層状構造にほぼ対応しており、密度の高い晩材部では穿孔抵抗は大きく、早材部では小さくなっている。また変動の幅は心材部よりも辺材部で大きい。これは同じ晩材部でも成熟期に形成された辺材部の晩材は密度も高く、強度も高いためと考えられる。

一方、穿孔位置が③よりも上方にずれた②や①では、③でみられたような穿孔抵抗の周期的な変動は小さくなる。これらの位置での早材と晩材の層状構造は③におけるそれと本質的に同じであるが、年輪構造と穿孔方向の関係が③の場合と異なるため、穿孔抵抗の変動に差が生じたと考えられる。これを理解するために、図1の右に年輪構造と錐の先端部との相対関係を模式的に示す。③のような穿孔は、右図のBのような状況にあたり、錐先端の両けづめがほぼ同時に密度の高い晩材を穿孔したり、密度の低い早材部を穿孔する。その結果、穿孔抵抗の周期

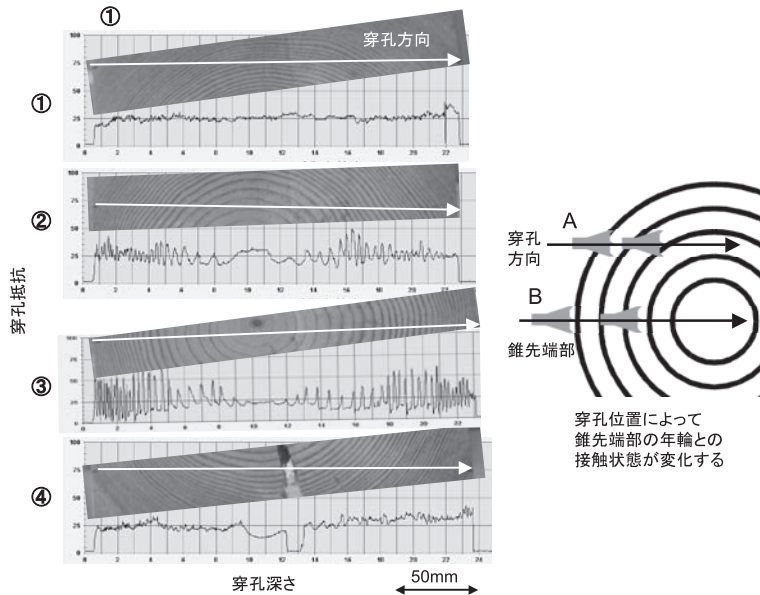


図1 穿孔抵抗の測定結果と年輪構造との対応（アカマツ材）

的な変動が非常に大きくなる。一方、左図の①や②の穿孔は、右図のAの状態にあたり、錐の進行方向が、年輪接線方向に近くなる。その結果、先端の両けづめが同時に早材あるいは晩材を穿孔する確率は低くなり、Bで見られたような穿孔抵抗の激しい変動は発生しにくくなる。

穿孔位置が③よりも下方にずれた④の位置でも、上記と同様の変化が見られる。ただし、この穿孔位置では材の中央付近の割れを通過することになり、これに対応して穿孔抵抗は0になっている部分がある。

このようにレジストグラフで測定した穿孔抵抗は、材内部の状態をよく反映しているといえる。特に微妙な年輪構造の変化に応じて穿孔抵抗が変動することが明らかとなったが、これはこの方式では錐の先端でのみ発生するトルク変動を計測しているためである。しかしその一方で図1の結果は、レジストグラフをもちいた強度や劣化の判定においては、同じ健全材でも穿孔方向と年輪構造との関係で穿孔抵抗の変化傾向が大きく異なることに注意が必要であることを示している。本報告では穿孔抵抗に及ぼす木材の年輪構造や虫害部位の影響を検討するが、穿孔抵抗値に影響を及ぼす機械側の因子には錐の送り速度（本体は電動ドリルの動力を利用しており、駆動モータの回転速度が2段階に切り替えられる）や、設定感度（広葉樹用と針葉樹用で異なる）がある。また穿孔抵抗値は錐の摩耗度や材の含水率によっても変化するので注意が必要である。

2-2-2. 穿孔方向のずれ

前述のアカマツ材の穿孔実験では、図2のように試料の左側から右側に向かって表面に対して鉛直方向に穿孔した。レジストグラフの前面には3本の支持ピンがついており、これを穿孔する面に設置することによって錐は表面に対して自動的に鉛直方向に穿孔を始める（図2左図の破線）。しかし実際には図2左図の実線が示すように錐は上下にずれながら穿孔する。これは穿孔位置によって錐の先端のけづめにかかる荷重に不均衡が生じるために生じる。これを理解するために図2右図に模式的に錐の先端と年輪との関係を示す。先行方向が半径方向に近い

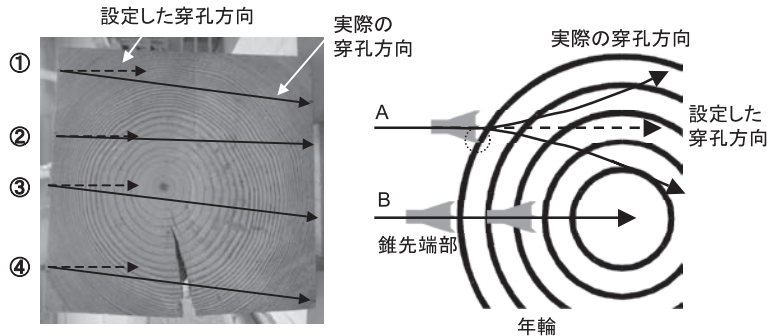


図2 錐の穿孔方向のずれの発生原因

左：アカマツ材での穿孔事例

右：錐先端の食い付き状態と年輪との関係

場合には（図2右図のB），前節で検討したように錐先端の両けづめは同時に早材あるいは晩材を穿孔するため，穿孔抵抗の変動が大きくても両けづめに発生する力に不均衡は発生せず，先行方向はそれにくい。しかし先行方向が直径方向からずれると，左右のけづめの早晩材との接触状態が異なり，刃先に発生する抵抗に差が生じ，穿孔方向が逸れはじめる。錐はたわみやすいので一旦逸れはじめると元の方向にもどることなくずれたまま穿孔を続けることになる。錐が逸れる方向は，年輪構造と穿孔位置によって概ね系統的に決まり，右図Aのような状況では，錐の先端が外側（図の上方）に逸れる場合が多いと考えられる。しかし穿孔中のけづめに生じる抵抗の不均衡によって偶発的に逸れる方向が決まることもある。図2左において，穿孔方向が設定方向とずれたのは上述の機構が原因と考えられる。

2-2-3. 空洞の検出性能

レジストグラフを用いて木材内部の虫害を検出する場合には，木材加害昆虫によってあけられた空洞による穿孔抵抗の低下を検出することになる。空洞の大きさや分布状況，空洞内部の充填状況は昆虫の種類によって異なるので，予め種々の虫害材を用いた穿孔実験を行い，穿孔抵抗の変化の特徴を把握しておく必要がある。

またレジストグラフの空洞検出能力を把握しておくことも重要である。図3はトウヒ材の表面から約20mmの位置に直径6，5，4および3mmの先穴をドリルであけておき，これを通過するようにレジストグラフで穿孔した結果を示す。いずれの大きさにおいても先穴の位置で穿孔抵抗の低下がみられ，その幅は先穴の直径に応じて大きくなる傾向が見られた。この実験の結果からレジストグラフによって最低3mm程度の内部空洞を検出できることがわかる。

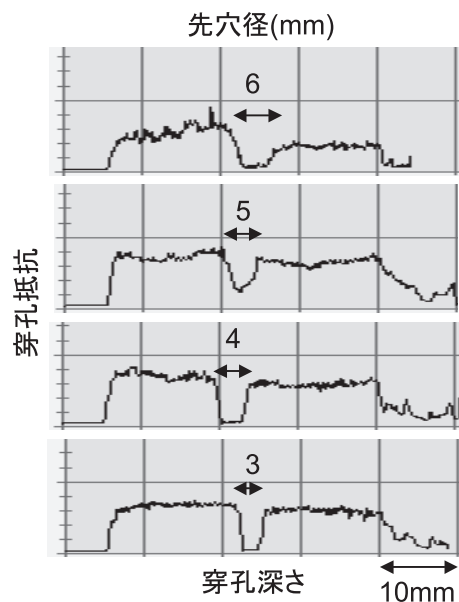


図3 先穴のある材料の穿孔抵抗測定例
厚さ約40mmのトウヒ材の所定の直径の先穴をあけておき，これを通過するように穿孔し，検出可能な先穴の最小径を調べた

2-2-4. 虫害部位の検出性能

上述のような基礎的検討に加えて、本報告ではケブカシバンムシに加害されたアカマツの梁材を用いて穿孔抵抗測定を行い、穿孔抵抗の変化と食害との関連を検討した。図4左は食害材の木口写真を示す。黒線で囲まれた領域が食害部である。実験では木口面から約30mmの位置で、図の左から右に向かって4ヵ所で穿孔した（実際の専攻方向を矢印で示す）。同右図は、左図にレジストグラフのチャートを重ねたものである。食害部位では材の表面から内部に広がっているが、昆虫による穿孔は表面付近に集中しており、残存している材そのものも脆弱化している。これに対応して③や④の位置では穿孔抵抗は表面近くで低くなっている。②の位置では昆虫による穿孔による穿孔抵抗の低下と早晚材による変動とが重畳して食害部の存在をレジストグラフのチャートから評価することは困難である。

図4に示した結果によってレジストグラフによって材内部の木材加害昆虫による穿孔が、抵抗値の変化からある程度認識できるといえる。しかし虫害による穿孔抵抗の低下は必ずしも顕著に現れないことにも注意が必要である。

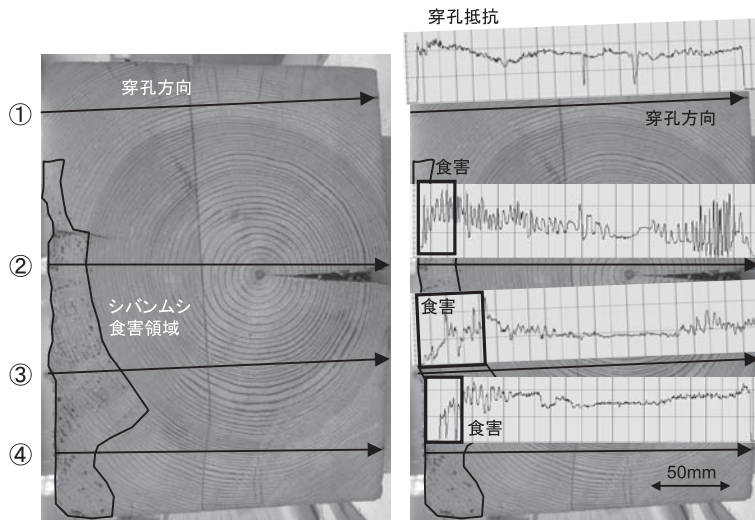


図4 シバンムシによる食害があるアカマツ材の穿孔抵抗測定結果と食害部位や年輪構造との比較

3. 輪王寺における穿孔抵抗測定

図5に輪王寺の本堂において測定した穿孔抵抗の測定結果の例を示す。今回の調査では予め視診、触診、打診および木工ドリル（ギムネ）による穿孔によって材内部にオオナガシバンムシの食害があると思われる部材を選定し、穿孔抵抗を測定した。

図から穿孔抵抗の変化によって内部が空洞化していると思われる部位が認められる（長押、牛梁や大虹梁）。これらの部位は、長年の間に材内部で食害が進行したために、比較的大きな領域で空洞化が進んでいるものと推定された。食害部には虫糞が詰まっていることが多いが、穿孔抵抗値への虫糞の影響は認められなかった。

レジストグラフによる材内部の探査は、細い錐で穿孔するというこの方法の特徴のゆえに極めて局所的な内部探査の手法といえる。従って虫害領域は広い範囲に分散している可能性があ

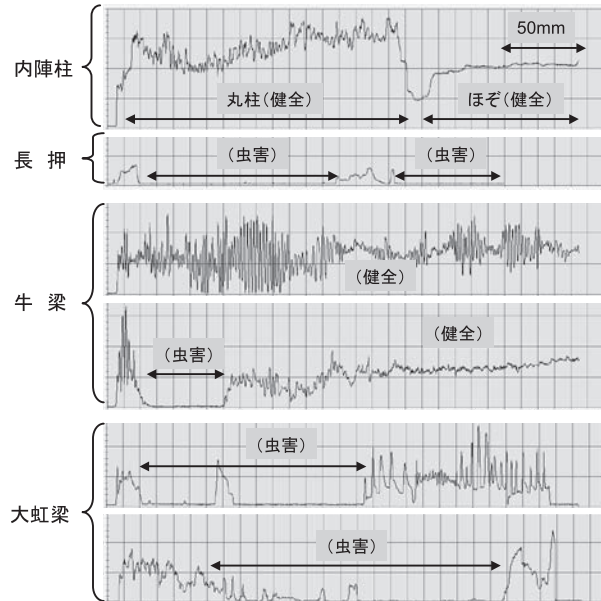


図5 輪王寺における穿孔抵抗測定結果例

る場合には多数回の穿孔が必要となる。大型の構造部材ではレジストグラフによる穿孔による強度低下が問題になることはないが、建物全体の食害状況を把握するには手間がかかることは避けられない。

4. おわりに

本報告ではレジストグラフを用いた穿孔抵抗測定によって木部の生物劣化評価の可能性を基礎的実験および実際の構造物を用いて検討した。穿孔抵抗によってシバンムシなどによって生じる木部内部の空洞を検出できることが明らかとなった。本方法は完全な非破壊手法ではないが、穿孔径が3mm程度であり、建造物の強度性能に影響を与えるほどのものではないと思われる。文化財建造物の調査や診断は非破壊が原則であるので、本手法を一般化することについては問題や課題もあると思われるが、床下や小屋裏などにおける構造部材の生物劣化診断に適用することによってより適切な建造物の保存修理が可能になるとと思われる。その一方でレジストグラフによる穿孔抵抗の変動は年輪構造などの影響を受けるため、測定結果の解釈に際しては対象材の表面に現れた木理の走行などへの考慮が必要となる。今後より適切な手法の開発が期待される。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、公表を快くご許可いただきました日光山輪王寺の関係者の方々に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) D. Eckstein, U. Sas: Bohrwiderstandsmessungen an Laubbaumen und ihre holzanatomische Interpretation, Holz als Roh- und Werkstoff, 52, 279-286 (1994)

- 2) F. Rinn, F.-H. Schweingruber, E. Schar: RESISTGRAPH and X-Ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, *Holzforschung*, 50, 303-311 (1996)
- 3) Cheng-Jung Lin, Song-Yung Wang, Far-Ching Lin, Chih-Ming Chiu: Effect of moisture content on the dreill resistance value taiwania plantation wood, *Wood and Fiber Science*, 35, 234-238 (2003)
- 4) P. M. Winistorfer, Wei Xu, R. Wimmer: Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels, *Forest Products Journal*, 45, 90-93 (1995).

キーワード：歴史的木造建築 (historic wooden architecture)；生物劣化 (biodeterioration)；非破壊検査 (non-destructive inspection)；穿孔抵抗 (drill resistance)；レジストグラフ (resistograph)

Evaluation of Insect Attack in Wooden Historic Buildings Using Drill Resistance Method -A case study on Sanbutsu-do of Rinnohji Temple-

Yoshihisa FUJII^{*}, Yuko FUJIWARA^{*}, Masahiko HARADA^{*2},
Rika KIGAWA, Yukio KOMINE^{*3} and Wataru KAWANOBE

The feasibility of drill resistance method using Resistgraph F-300S (IML-Instrumenta Mechanik Labor System GmbH) apparatus to evaluate the insect attack in wooden structural members of historic buildings was investigated. It was revealed that the drill resistance changed characteristically at the position of the holes bored by insects. However the resistance is influenced also by annual ring structure of wood and the resistance changed drastically by the drill direction to annual ring structure. The method is not completely non-destructive, however the hole made by the drill is about 3mm in diameter and has no influence on the strength of the structural members of the buildings in ordinal cases.

^{*}Kyoto University ^{*2}Nikko Cultural Assets Association for the Preservation of Shrines and Temples
^{*3}Japan Institute for Insect Damage to Cultural Properties