

# 放射光 X 線 CT による木材のイメージング評価

高橋由美子

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

平野馨一

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

蛇石貴宏

住友林業株式会社 〒300-2646 茨城県つくば市緑ヶ原 3-2 つくばテクノパーク豊里内

小椋健二

住友林業株式会社 〒300-2646 茨城県つくば市緑ヶ原 3-2 つくばテクノパーク豊里内

## 要旨

炭化・腐朽・蟻害による木材内部の断面欠損を可視化するために放射光を用いた木材片の単色 X 線 CT 測定を行い、3 次元再構成データから木材内部の密度変化を立体的にとらえることができた。また、照射 X 線の単色性を生かし早材・晩材の密度差、腐朽に伴う密度低下を定量的に確認することができた。放射光実験では苦手とする大型試料についても分割測定+合成処理により測定する方法を確立し、105 mm×105 mm の角材の CT 測定に成功した。

## 1. はじめに

X 線コンピュータ断層撮影 (computed tomography; CT) は医療分野での利用が先行していたが、近年、X 線顕微鏡などラボ機の高性能化に伴い産業分野での応用も広まりつつある。その中で放射光を光源とする CT 測定は高輝度・エネルギー可変性・単色/白色 X 線の使い分けなどラボ機には無い性能を有し、材料分野における幅広い応用の可能性を秘めている。しかし放射光施設を利用すること自体が放射光実験に慣れていない企業の研究者にとって障壁となっている場合もある。そこで高エネルギー加速器機構の放射光科学研究施設 (PF) では企業研究者を対象とするトライアルユースを行い、放射光の産業利用の促進を図っている<sup>1)</sup>。ここではその一例として放射光 X 線 CT を用いた木材の評価<sup>2)</sup>について報告する。

従来木造建築は住宅等小規模な建築物が代表的なものとなっていたが、建築基準法の改正や行政による木材の積極的な利用促進によって近年は中・大規模な木造建築が増加してきている。中・大規模建築への木材利用にあたり、木材を構造躯体として意匠的に現しながら防火性能を高めたり、高い耐久性が必要となる屋外での化粧材として用いる等々木材の新しい利用法が増えており、使用する木材についてもこれまでとは異なる劣化対策が必要となってきている。今後の木造建築の発展にはこれらの課題に対して技術的な改善を図る必要がある、そのためにはより詳細な木材特性の把握が必要である。木材特性評価の 1 つとして木材試験片の観察は通常その切断面によって行われることが多く、切断面の擾乱の影響により内部状況を確認するのは

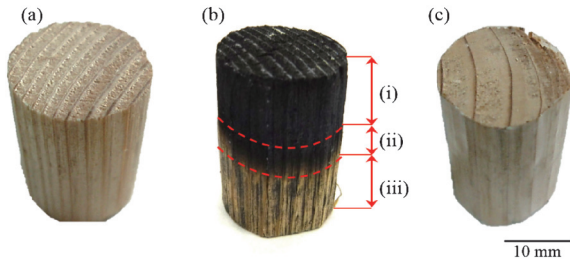
容易ではなかった<sup>2)</sup>。

一方木材自体は不均一材料であることを考慮すると外部・内部状況の把握には X 線 CT 法は有望な手法といえる。しかし市販の X 線 CT 装置は比較的小さい部品・材料を対象としているものが多く、木材等の大規模構造材料の評価は苦手であった。また市販装置では連続 X 線を用いている場合が多いので、X 線が物質を透過する際に低エネルギーの X 線がより多く吸収されて X 線の実効エネルギーが高くなるビームハードニング効果の影響を避けられない。ビームハードニングが無視できない場合同じ物質でも大きさや観測位置によって CT 値が変化し、CT 値の定量性が損なわれるという問題が生じる<sup>3)</sup>。そこで今回ビームハードニングがほとんどない単色 X 線 CT により木材の密度分布の定量評価を検討した。また部分画像のつなぎ合わせによる再構成法を大型試料に適用することにより高い空間分解能を維持しながら大面積の CT 像の測定に成功した。本報告では、今回開発した大面積単色 X 線 CT 法を含め、木材の炭化・腐朽・蟻害に起因する内部割れ・断面欠損度合いを評価した結果について述べる。

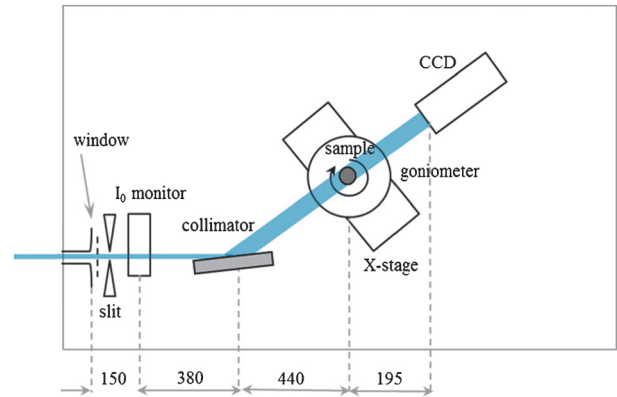
## 2. 実験方法

### 2.1 試料

単色 X 線 CT 測定にはスギの未処理材 (密度 0.46 g/cm<sup>3</sup>) と炭化材 (密度 0.40 g/cm<sup>3</sup>) および腐朽材 (密度 0.40 g/cm<sup>3</sup>) を用いた (Fig. 1)。小型試料のサイズは  $\phi 20$  mm×30 mm,  $\phi 6$  mm×30 mm の二種類で後者は高分解能測定 (密度測定) 用である。大型試料測定には蟻害処理を



**Fig. 1** (Color online) Samples of (a) untreated, (b) carbonized, and (c) decayed Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*). The carbonized sample (1b) consists of (i) carbonized layer, (ii) pyrolytically decomposed layer, and (iii) undecomposed layer.



**Fig. 2** Schematic of experimental set-up.

行ったベイツガ105 mm×105 mm×300 mmを用いた。

木材の炭化処理は、発熱性試験(ISO5660)に用いるコーンカロリメーターを用いて木材片の一面を50 kW/m<sup>2</sup>の輻射熱で4分間加熱することにより行った。また、腐朽処理は、JIS K 1571:2010(木材保存剤-性能基準及びその試験方法)に準拠して行った。供試菌にはオオウズラタケ(*Fomitopsis palustris* (Berk. et Curt) Gilbn. & Ryv. FFPRI 0507)を用いた。蟻害処理は、沖縄県中頭郡のシロアリ活性の高い屋外試験地にて、105角1 mの木材を半分地中に埋めて6ヶ月設置することにより行った。

## 2.2 実験

実験はPF BL-14Bで行った。初めに測定条件を最適化するためX線波長を変化させて透過像を撮影し、透過像の形状から波長領域を0.96~1.4 Åとした。光学系の概略をFig. 2に示す。二結晶モノクロメータで単色化されたX線をスリットで10 mm(H)×10 mm(V)に整形しコリメータ結晶に入射した。コリメータにはSi 220非対称反射( $\alpha = 14, 16, 20$  deg)を用い、試料位置でのビームサイズを40~60 mm(H)×10 mm(V)とした。コリメータで反射したX線を回転・並進・傾き可能なゴニオメータにセットされた試料に入射しX線検出器で透過像を観察した。検出器にはX線CCDカメラ(XFDI, Photonic Science)を用いた。通常の測定では有効ピクセルサイズ23×23  $\mu\text{m}^2$ 、空間分解能約50  $\mu\text{m}$ のものを用い、特に高分解能が必要な測定では有効ピクセルサイズ6.4×6.4  $\mu\text{m}^2$ 、空間分解能約15  $\mu\text{m}$ のものを使用した。得られた画像は一般的なフィルタ補正逆投影法(filtered back-projection; FBP)によって再構成した<sup>4,5)</sup>。

以下にFBP法について簡単に述べる。試料回転軸に垂直な方向から照射されたX線は試料によってその一部が吸収され検出器に到達するので、試料各部位のX線透過率に依存した透過像が得られる。この透過像を試料のあらゆる方向について収集し、入射X線強度の比の対数を取った画像(投影データ)を作成した後、逆投影(投影データを投影方向に沿って戻し、これを各方向の投影データに

ついて重ね合わせる処理)を行う。このとき光学系の点広がり関数(Point Spread Function)に起因するボケを除去するフィルタをかけることによってノイズの少ない断層像(CT像)を得ることができる。この手法をFBP法と呼び、測定条件により最適なフィルタを使用する。今回の逆投影処理ではShepp-Loganフィルタを用いた。FBP法により異なる高さに対するCT像を求め、各CT像を積み上げることにより最終的な3次元再構成像を得ることが可能となる。

FBP法によって得られたCT像は原理的には線吸収係数の2次元分布を与えるが、逆変換時の誤差<sup>5)</sup>や諧調変換の影響があるので、密度分布を得るために以下の変換式を用いた。

$$\rho_{xyz} = \frac{a + b \times I_{xyz}}{\mu/\rho}$$

ここで $\rho_{xyz}$ は位置(x, y, z)における密度[g/cm<sup>3</sup>]、 $I_{xyz}$ は位置(x, y, z)における画素の強度(画素値)、 $\mu/\rho$ は試料の質量吸収係数[cm<sup>2</sup>/g]である。密度が既知であるプラスチックボールのCT像から変換式の係数を最小二乗法により求めたところ $a = -0.14 \pm 0.12$ 、 $b = 0.28 \pm 0.01$ を得た。変換式の切片 $a$ は本来0となるはずであるが、ほぼ誤差範囲とはいえ有限な値になっているのはプラスチックボールのCT像画素値のばらつきなどが影響しているものと考えられる。次に測定した木材のCT像の画素ごとに上式から密度を求め、CT像を密度分布図に変換した。ここで、未処理試料の全体に渡って平均した画素値と平均密度から求めた質量吸収係数をその材質の試料全ての質量吸収係数(6.58 cm<sup>2</sup>/g@9 keV)とした。この変換式は木材の処理によって化学組成が大きく変化しないことを前提としているので、化学的な変化の大きい炭化材には適用できない。

通常、X線CT測定で観察可能な試料サイズは検出器の受光面積以下に限られる。そのため、大面積のX線CCDを使用する場合でも、試料サイズは33×25 mm<sup>2</sup>程度以下

に制限される。しかし木材の試験材を評価する場合、標準的な試験体である断面積105 mm×105 mmの試料をそのまま観察できることが望ましい。そこで標準試験体サイズである大型試料に関しては試料を水平方向に並進移動して各位置で試料の部分透過像を7枚撮影し、得られた透過像を継ぎ合わせた合成像に対して逆投影を行ってCT像を得た。なお一つの試料を測定するのに要した時間は約2時間20分である。本手法を試みた当初は光学系の設置精度や画像継ぎ合わせの不完全性により生じたアーチファクトにより、実用に耐えうる画像を得ることができなかった。アーチファクトの発生要因を詳細に検討したところ、主要因は試料の並進移動時における並進ステージのたわみおよび回転軸のぶれであることが判明した。そこで、並進ステージの下に厚さ10 mmのアルミ板を設置し測定系の剛性を向上させることにより、アーチファクトの発生を抑制することに成功した。

### 3. 結果と検討

スギの未処理材・炭化材・腐朽材の3次元再構成像をFig. 3に示す。明るい色から暗い色へと線吸収係数は小さく(X線透過率は高く)なる。未処理材(Fig. 3(a))と比べ炭化材(Fig. 3(b))・腐朽材(Fig. 3(c))で暗色部分が目立っており、処理による木材質の密度の低下が示唆される。なお炭化材では、試料上部(Fig. 1(b)(i))の完全に黒化した部分は視野から外して測定しており、図中の暗色部分は炭化処理によって生じた熱分解領域を示していると考えられる。暗色部分は試料の中心から外周に進むにつれて試料下部に延伸しており、試料中心部では外周部と比較すると熱分解が遅れて生じている様子が窺える。また未処理材と炭化材の平均的な密度差は0.06 g/cm<sup>3</sup>であり、炭化材において熱分解領域とそれ以外の領域の密度変化が明確に観測できていることから、単色X線CTによりこのような微小な密度差も十分可視化できることが分かった。また、CT像より熱分解領域で微小な割れが発生しているこ

とも分かった(Fig. 4)。木材は乾燥に伴い割れが発生するが、燃焼中の熱分解領域においても同様の現象が発生していることが確認された。

一方腐朽材でも炭化材と同様に腐朽した部分が粗になっている様子が強度分布等から窺えるものの炭化材ほど明確な違いは見受けられなかった。そこでピクセルサイズ6.4 μmのCCDを用いた高分解能CT画像から密度分布を求めた。結果をFig. 5(b)に示す。比較のため未処理材の密度分布(Fig. 5(a))も併記する。未処理材では晩材(年輪の色の濃い部分)と早材(年輪の色の薄い部分)で3倍程度密度に差があり、年輪の外側から内側に向かい早材部から晩材部への立ち上がりが急峻であるのに対し晩材部から早材部へはゆるやかに密度が変化している様子が分かる。一方、腐朽材では未処理材に比べて晩材、早材間の密度変化がほぼ同一であり未処理材に見られるような急峻な変化が少ないことが判る。今回腐朽処理に用いたオオウズラタケは褐色腐朽菌に分類されるが、褐色腐朽菌に腐朽された木材は曲げ強度が初期の腐朽段階から大きく劣化することが知られている<sup>6)</sup>。木材の曲げ強度は材料の矩形断面における一辺の長さである断面高さの2乗に比例すること、褐色腐朽菌は木材の強度に大きく影響する成分であるセル

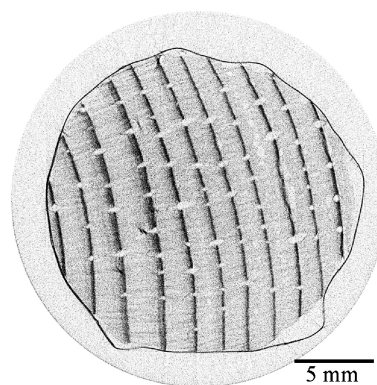


Fig. 4 The CT image of the carbonized sample. Micro cracks across the late wood are observed.

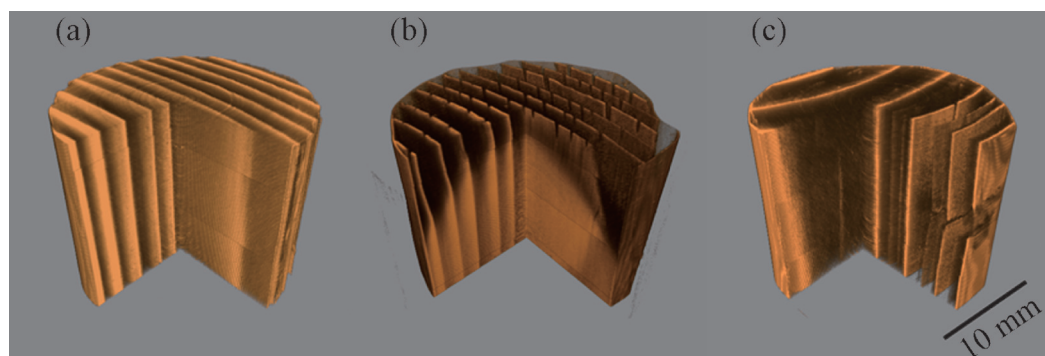


Fig. 3 (Color online) 3D reconstructed images of the measured Japanese cedars (Fig. 1(a-c)). Dark color parts are observed in (b) carbonized, and (c) decayed samples, which are not shown in (a) untreated sample, indicating the decrease of density.

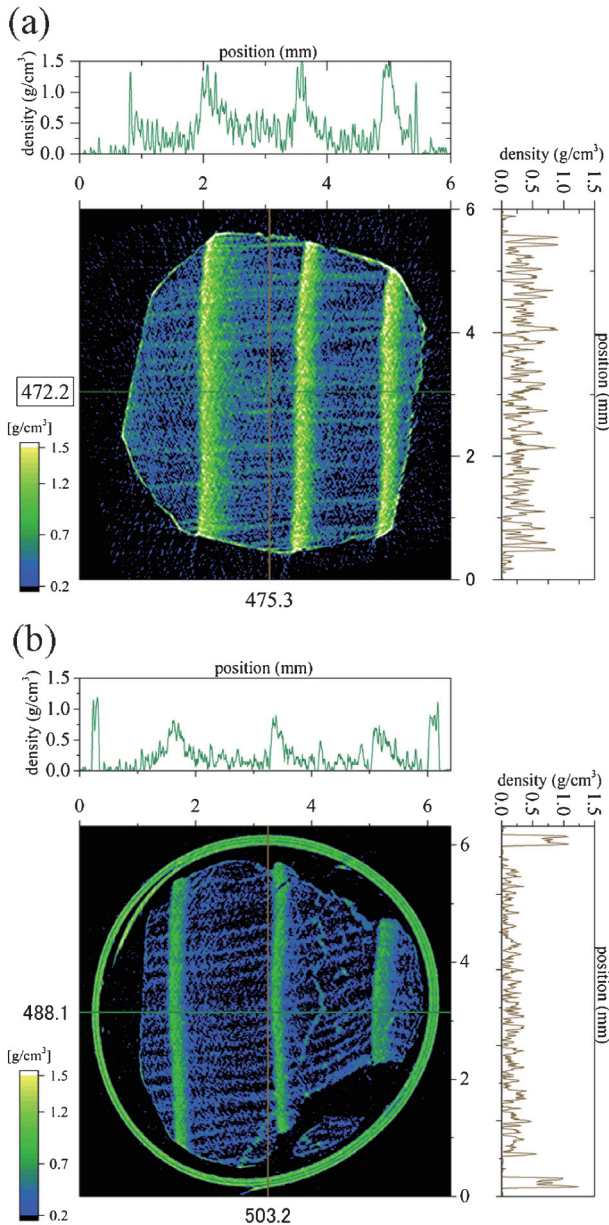


Fig. 5 (Color online) Density distributions of (a) untreated and (b) decayed sample with contour maps and line profiles. Outer ring in the decayed sample is protective film of the sample.

ローズを主に分解することを考慮すると、今回の結果は腐朽材で生じる曲げ強度の減少が(1)腐朽菌による木材全領域でのセルロース分解・強度低下、および(2)強度低下に伴う有効な断面高さの減少に起因するという強度低下機構の妥当性を示している。

次に大面積 CT 測定例として蟻害処理を行ったベイツガ (断面積105 mm×105 mm) の3次元再構成像を Fig. 6 に示す。試料全域に迷路のように穿たれたシロアリの摂食跡が明瞭に観察できる。CT 像を二値化した画像から求めた空隙率は約20%で深さ方向 (32 mm) の変動はほとんどなかった。本手法では試料サイズに制限が無く、今回は水

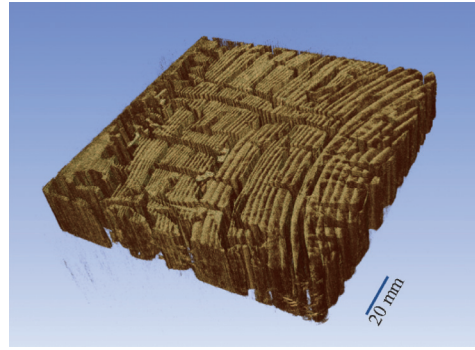


Fig. 6 (Color online) The 3D reconstructed image of termite damaged western hemlock which size is 105 mm times 105 mm, as the example of large size CT observation.

平方方向のピニングを5として画像処理を行っているため空間分解能は250  $\mu\text{m}$  程度になっているが、ピニングをかけずに画像処理を行えば高分解能の画像再構成も可能である。このように放射光 CT は大面積試験材の非破壊検査方法としても有効であることが示された。

これらの結果から木材の炭化・腐朽・蟻害などによる劣化状態を試験材のまま直接観察することで劣化を誘う環境条件等と材料強度の関係を明らかにすることが可能になることが分かった。一方マイクロレベルでは木材の劣化は細胞の分解や組織の破壊によって引き起こされるので、より詳細な木材劣化機構の解明のためには数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  の細胞～組織レベルの観察と材料性能の関係を評価することが望ましい。現在 PF では倍率可変 X 線ブラッグ光学系の開発が進められており<sup>7,8)</sup>、近い将来にはサブマイクロオーダーから数100 mm の領域までをカバーする X 線 CT 技術も期待され、木材の細胞レベルから構造全体を統一的に評価可能なシステムの構築が期待される。

#### 4. おわりに

炭化・腐朽・蟻害による木材内部の断面欠損を可視化するために放射光を用いた木材片の単色 X 線 CT 測定を行った。放射光の特徴である単色性・エネルギー可変性を生かして測定条件を最適化し木材内部の密度変化を立体的にとらえることができた。また、腐朽に伴う密度低下を定量的に確認することもできた。放射光実験では苦手とする大型試料についても新たな測定方法を確立し、105 mm×105 mm の角材の CT 測定に成功した。

近年の中・大規模木造建築の増加に伴い、高い防火性・耐久性の実現、点検・補修技術のさらなる向上が求められているなかで本研究結果は木材のより高度な技術構築の一助になると期待される。

#### 謝辞

本研究は文部科学省先端研究基盤共用・プラットフォーム

ム形成事業「フォトンファクトリーの産業利用」トライアルユース（課題番号：2012I004）によって実施されました。

### 参考文献

- 1) <http://pfwww.kek.jp/innovationPF/index.html>.
- 2) 蛇石貴宏, 小椋健二: 先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業フォトンファクトリーにおける産業利用促進利用報告書2012I004.
- 3) 豊福不可依, 徳森謙二: 日本放射線技術学会雑誌 **56**, 792 (2000).
- 4) Avinash C. Kak and Malcolm Slaney: Principles of Computerized Tomographic Imaging, Classics in Applied Mathematics, 33 (Society for Industrial Mathematics, Philadelphia, 2001) ch 3.
- 5) 橋本雄幸, 篠原広行: C 原語による画像再構成の基礎 (医療科学社, 2006) p. 245.
- 6) 公益社団法人日本木材保存協会編: 木材保存学入門 改訂3版, (公益社団法人日本木材保存協会, 2012) p. 56.
- 7) K. Hirano, Y. Takahashi and H. Sugiyama: Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 040302 (2014).
- 8) K. Hirano, Y. Takahashi and H. Sugiyama: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **741**, 78 (2014).

### 著者紹介



#### 高橋由美子

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 研究員

E-mail: yumikot@post.kek.jp

専門: X線イメージング

#### 【略歴】

2001年3月総合研究大学院大学数物科学研究科修了。博士(理学)。日本大学理工学部物理学科助手, 同理工学研究所上席研究員を経て2011年4月より現職。



#### 平野馨一

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 准教授

E-mail: keiichi.hirano@kek.jp

専門: X線光学, X線イメージング

#### 【略歴】

1989年3月東京大学大学院工学系研究科物理学博士課程中退。工学博士。東京大学工学部助手, 高エネルギー物理学研究所助手, 高エネルギー加速器研究機構講師を経て2009年3月より現職。

#### 蛇石貴宏

住友林業株式会社・筑波研究所

E-mail: HEBIISHI\_takahiro@star.sfc.co.jp

専門: 木造耐火, 避難安全

#### 【略歴】

2009年3月早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻修士課程修了  
2009年4月より現職。

#### 小椋健二

住友林業株式会社・筑波研究所

E-mail: OGURA\_kenji@star.sfc.co.jp

専門: 木質材料

#### 【略歴】

2002年3月京都府立大学大学院農学研究科修士課程修了  
2002年4月より現職。

## Synchrotron X-ray CT measurement of wood

**Yumiko TAKAHASHI** Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

**Keiichi HIRANO** Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

**Takahiro HEBIISHI** Sumitomo Forestry Co., Ltd. No. 3-2, Midorigahara, Tsukuba, Ibaraki 300-2646, Japan

**Kenji OGURA** Sumitomo Forestry Co., Ltd. No. 3-2, Midorigahara, Tsukuba, Ibaraki 300-2646, Japan

**Abstract** In order to visualize the cross-sectional deficit inside the wood caused by carbonization, decay, and termite damage, synchrotron X-ray computed tomography (CT) was applied to the wood piece. By analyzing the three-dimensional reconstruction data, the difference in the density of early wood (bright color part) and late wood (dark color part) of annual rings were observed and the density loss caused by decay was detected quantitatively.

The CT method for the large-scale samples which are not suitable for synchrotron radiation CT was settled by the division measurement and synthesis processing. The CT image of a timber of 105 mm × 105 mm was obtained successfully by this method.