

# 九州シンクロトン光研究センター 県有ビームライン利用報告書

課題番号：2001001R

BL番号：07

(様式第5号)

マイクロ X 線イメージングによる木材組織観察と樹種同定:文化財への適応その2  
Study on micro CT technique to wood identification with morphological features:  
Application to cultural property No.2

百島則幸、芦川信雄、田籠久也  
Momoshima Noriyuki, Ashikawa Nobuo, Tagomori Hisaya

九州環境管理協会  
Kyushu Environmental Evaluation Association

- ※1 先端創生利用(長期タイプ)課題は、実施課題名の末尾に期を表す(I)、(II)、(III)を追記してください。
- ※2 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後2年以内に研究成果公開(論文(査読付)の発表又は研究センターの研究成果公報で公表)が必要です(トライアル利用を除く)。
- ※3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※4 共著者には実験参加者をご記載ください(各実験参加機関より1人以上)。

## 1. 概要 (注:結論を含めて下さい)

神社仏閣などの木造建造物や木彫仏像などの文化財の基本情報の一つとして使用されている木材の種類がある。しかし、樹種を調べようとするとき、文化財保護の観点から入手できる試料の量は制約を受けることが多く、少量の試料で樹木組織の観察ができるマイクロ X 線イメージングは樹種同定の有力な手段となる。

これまでトライアルを含めて2回実験を実施したが、いずれの実験においても試料は0.36度毎に回転させ、8-9keVのエネルギーで各角度10秒程度の測定時間でデータを得てきた。そのため一試料は4時間程度の測定時間となりデータの数を増やすことが難しかった。ビームが強い白色光を利用すると測定時間の短縮が期待されるが、これまで白色光を用いた樹木のマイクロCTの実験の経験はなく、今回の目的の一つは、白色光で樹木のマイクロCTがうまく取れるかどうかを確認することである。そして樹種のマイクロCT画像を増やしてデータベース化を図ることである。

今回利用した白色光は20-30keVにピーク強度があり、360度を2000枚で撮影した(0.18度毎の撮影となる)。各角度の測定時間は0.15-0.3秒に設定したことから、一試料当りの測定時間は5~10分となり、これまでと比べると大幅な測定時間の短縮となっている。これまで8-9keVのX線で得られている画像と比較しても、遜色のない分解能で画像が得られることが判った。強いビームの場合、木材など耐熱性が低い試料では、測定中に熱による変性や劣化が生じることが危惧されたが、今回の測定ではすべての樹種試料において変色などの劣化は確認されなかった。

マイクロCTでは測定中に試料位置がずれると低解像度の画像となってしまふ。いわゆる軸のずれによるブレが画像に含まれてくる。今回は、試料の固定方法に改良を加え測定中に軸が動かないように工夫した。その結果、これまでと比較すると高い解像度のマイクロCT画像を安定して得ることができるようになった。

マイクロCT画像を樹種同定に利用するためには、できるだけたくさんの樹種を測定してデータベースを充実させておくことが必要であるが、今回は考古学的利用を目的としていることから、過去に行われた文化財建造物の解体修理に合わせて実施された調査で、西日本地域で建築材料として使用が確認されている樹種を対象に選定した。クス、ヒノキ、ケヤキ、クロマツ、カラマツ、スギ、シイ、クリ、ツガ、エノキ、ヒバの11種類である。いずれの樹種について高い解像度のマイクロCT画像が得られた。

今回、白色光を利用して樹木組織のマイクロCTを高解像度で撮影できることが確認

できた。また、改良した試料固定方法により鮮明な画像を得ることが可能となった。そして11種類の樹種についてマイクロCT画像のデータベース化を図ることができた。

### (English)

When evaluating the cultural property value of shrines and temples and wooden statues, the type of wood used is one of the important basic information. However, the pieces of wood collectable from cultural properties to identify tree species is often severely restricted from the viewpoint of protection of cultural properties. The micro X-ray imaging is a useful method to identify tree species using a very small amount of wood chip samples.

We have carried out two experiments before which used 8-9keV X-ray, rotating the sample every 0.36 degrees and 10 seconds measurement time at each angle, requiring 4 h measurement time per sample. In this experiment we tried to use the white X-ray, 20-30keV peak energy, expecting shorter measurement time. The purpose of this experiment is to confirm availability of white X-ray for micro CT of wood and to obtain micro CTs of several tree species to make data base.

In the experiment using white X-ray, every 0.18 degrees and 0.1-0.3 second measurement time at each angle was applied, enabled us to complete the measurement with 5-10min for a sample. No change in color and other morphology of the sample occurred during measurement and high-resolution micro CT was obtained with the improved sample fixing method, suggesting the usefulness of the white X-ray for micro CT measurement of wood samples.

Eleven tree species were measured, which are the representative woods used as construction materials of historical shrines, confirmed during repairments of these shrines. All images obtained for different wood species by the present method are satisfactory. The high resolution of images is useable as data base for identification of tree species.

In conclusion the use of white X-ray makes short the measurement time and also gives high resolution micro-CT-3D images. We obtained 11 tree species images as a member of the data base.

## 2. 背景と目的

樹種を同定することは様々な場面で求められることがあるが、すでに板や棒に加工されている場合は簡単ではない。加工された木材の樹種同定は、簡便な方法としては色、木目、材質などの観察があるが、ある程度の大きさや新鮮な表面がないと難しく、かつ熟練者の経験に基づく目視で行われることが一般的である。一方、顕微鏡による木材組織の観察による形態学的な同定は信頼性が高い方法ではあるが、そのためには木材の一部を入手して顕微鏡観察のための組織切片試料(3軸方向)の作製が必要となる。文化財的価値の高い建物、仏像などから組織切片試料の作製に必要な量の木片を得ることは一般的に困難であり、歴史的、地域文化的、芸術的観点から樹種同定の要望が高いにも関わらず実施できないことが多い。

放射光のマイクロX線イメージングを用いれば微小な物体の3D断層画像の作成が可能であることは、既知の樹種試料を用いた予備実験(課題番号:1902009T)及び福岡県内にある神社に置かれている摂社、末社の社から入手した建材の一部を用いたマイクロX線イメージング測定(課題番号1909070R)で報告した。これらの測定は、8-9keVのX線を0.36度毎に10秒程度の測定時間であったことから一試料の測定に4時間程度が必要であり、測定数を増やすことが難しかった。今回の目的は、エネルギーピークが20-30keVにある白色光で高い解像度のイメージング画像が短時間測定で得ることができるかを確認することである。また、これまでの経験から高い解像度の画像を得るための重要なポイントの一つは試料軸のぶれを抑えることと考えられたことから、改良した試料固定方法の有効性を確認することである。そして、考古学的利用の観点から、本手法のデータベース化を進めるためいくつかの代表的な樹種について測定を行うことである。

## 3. 実験内容(試料、実験方法、解析方法の説明)

### 3.1 試料固定方法の改良

X線マイクロCT測定に供する樹木片の大きさは2x2x2mm程度である。測定中に試料が動かないようにアクリルパイプ(外形3mm、内径2mm)中に木片試料をきっちりと差し込む方法とした。図1に測定装置にセットした様子を示す。CCDカメラの前面の試料台のテフロン

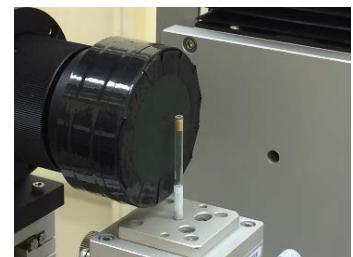


図1 木片試料の固定方法

チューブにアクリルパイプが固定されている。木片はアクリルパイプの上部に差し込まれている。木片の化学組成は、炭素、酸素、水素、窒素等であり、そしてアクリルパイプの化学組成も似たようなものであることから、1mm程度のアクリル材によるX線の吸収は測定には支障がないと考えられた。

### 3. 2 白色光による測定

今回用いた白色光は20-30keVにピーク強度がありエネルギー領域も8-9keVに調整したX線と比較するとブロードである。測定手順はこれまでと同様であるが360度を2000枚で撮影したことから、0.18度毎の撮影となり、これまでより高い解像度が期待された。各角度の測定時間は0.15-0.3秒に設定したことから、一試料当りの測定時間は5～10分となり、これまでと比べると大幅な測定時間の短縮となっている。

### 3. 3 ベータベース化

今回は考古学的利用を目的としていることから、過去に行われた文化財建造物の解体修理に合わせて実施された調査で、西日本地域で建築材料として使用が確認されている11樹種について測定を行った。表1に試料と測定条件を示す。

表1 測定試料の一覧

	種 Species	測定時間	画素数	科 Family	属 Genus
1	アスナロ (ヒバ) Thujopsis dolabrata)	0.3 s /point	1280 x 1280	ヒノキ科 Cupressaceae	アスナロ属 Thujopsis
2	ヒノキ Chamaecyparis obtusa	0.15 s /point	1280 x 1280	〃	ヒノキ属 Chamaecyparis
3	スギ Cryptomeria japonica	0.25 s /point	1280 x 1280	〃	スギ属 Cryptomeria
4	クロマツ Pinus thunbergii	0.2 s /point	1280 x 1280	マツ科 Pinaceae	マツ属 Pinus
5	カラマツ Larix kaempferi	0.2 s /point	1280 x 1280	〃	カラマツ属 Larix
6	ツガ Tsuga sieboldii	0.25 s /point	1280 x 1280	〃	ツガ属 Tsuga
7	ケヤキ Zelkova serrata	0.15 s /point	1280 x 1280	ニレ科 Ulmaceae	ケヤキ属 Zelkova
8	エノキ Celtis sinensis	0.25 s /point	1280 x 1280	アサ科 Cannabaceae	エノキ属 Celtis
9	クスノキ Cinnamomum Camphora	0.15 s /point	1280 x 1280	クスノキ科 Lauraceae	ニッケイ属 Cinnamomum
10	クリ Castanea crenata	0.25 s /point	1280 x 1280	ブナ科 Fagaceae	クリ属 Castanea
11	スダシイ Castanopsis sieboldii	0.25 s /point	1280 x 1280	〃	シイ属 Castanopsis

#### 4. 実験結果と考察

今回利用した白色光はビームが強いことから、耐熱性が低い木材試料は測定中に熱による変性や劣化が生じることが危惧されたが、5-10分間の測定時間ではいずれの樹種においても変色など画像に影響が与えるような組織劣化は確認されなかった。

図2に示すように改良した試料固定法で得られたイメージング画像の解像度は、トライアル測定の場合と比べるとよくなっていることがわかる。

同一の木曽ヒノキ材について今回の白色光で得られた画像と比較的鮮明な画像が得られているトライアル(9keVX線)画像を比較したが解像度に差はないように見える。両者の試料固定方法は異なるが、画像の解像度に関しては、白色光と9keVのX線エネルギーの違いは解像度に影響していないと考えられる。

表1の11種類の樹木の内#1-6は針葉樹で、#7-11は広葉樹である。樹木は科⇒属⇒種の順に分類されるが、マイクロCT画像からは属までは判別できると期待される。今回得られたマイクロCT画像で確認することができた針葉樹の特徴を少し紹介する。図3は針葉樹のアスナロ(ヒバ)木口面(幹の軸方向断面)であるが、アクリルパイプの内側に木片の木口面が見えている。図の下部に示すスケールは500 $\mu\text{m}$ である。2年分程度の年輪が見えており、1年分の年輪は早材と晩材からなるが、上下に白い帯状に繋がって見える部分が厚い細胞壁をもつ晩材部分である。早材と晩材の様子からおそらく図の右側が幹の中央側と思われる。仮道管は中身が抜け落ちた細胞であり、根から樹冠への水の通り道である。仮道管を形成している細胞壁の厚さの違いが晩材と早材の区別を可能にしている。木口面に仮道管がふさがれたような白っぽい箇所が散らばっている。これらは仮道管ではなく幹の軸方向に伸びている柔細胞で、でんぷん等の貯蔵の役割を担う生きている細胞である。また、左右方向に一直線に伸びる白っぽい線状の層が確認できるが、この部分は幹の中心から樹皮方向に伸びる放射組織であり、放射組織は放射仮道管と放射柔組織からなる。

図4にカラマツの板目面の画像を示す。板目面は放射方向に垂直な断面である。図4で縦方向に幅が広い黒い線として見えているのが軸

方向の仮道管である。仮道管の長さは1000-5000 $\mu\text{m}$ なので、図では一本の縦の黒い線として見えている。また、縦に並ぶ黒い点は放射組織の放射仮道管の断面と推定される。マツ類は樹脂道を有することが特徴的であるが、放射方向の樹脂道は放射組織の中に組み込まれており、図4にも存在が確認される。樹脂道は幹の縦方向にも必ず存在しているが、縦方向の樹脂道はこのカラマツの木口面では見られなかった。もっと広い範囲の木口面を観察すると必ず見つかるはずである。マイクロCTの測定倍率を抑えるとより広い範囲を見ることができ、細かい部分は見えなくなる。画素数が決まっているので測定範囲と倍率の設定がマイクロCT法のポイントである

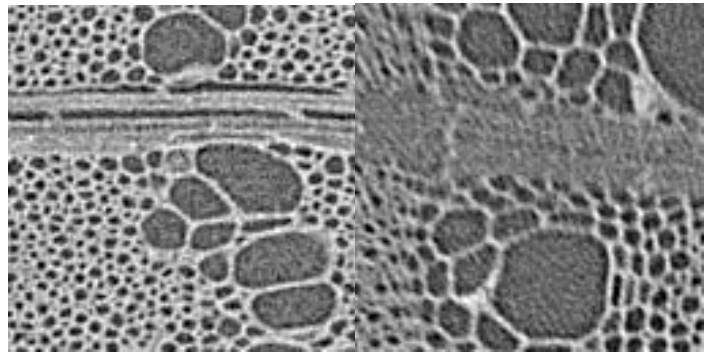


図2 試料固定方法の違いによる解像度の比較  
(ケヤキ：左今回、右トライアル)

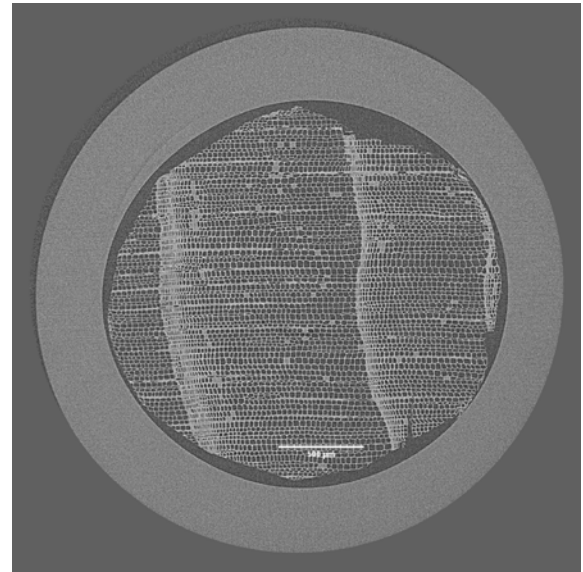


図3 アスナロ(ヒバ)の木口面

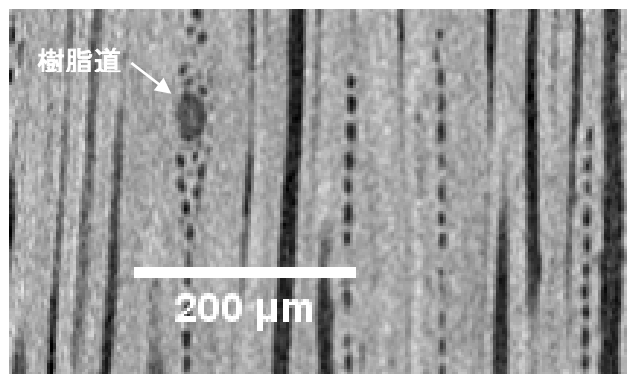


図4 カラマツの板目面

図5にスギの柾目面画像を示す。画像上部で横方向に積み重なって並んでいるのは放射組織であり、画像の右側部分には幅50 $\mu$ m程度の仮道管が縦に並んでいる。中央部分の白っぽい縦線の集まりは細胞壁が厚い晩材部分の仮道管である。各仮道管の放射壁（放射方向の面、この画像では見えている面に相当する）には隣の仮道管と水のやり取りをする壁孔が一行に縦方向に並んでいる。晩材部分では壁孔が黒い点として確認されるが、早材部分では見えていない。早材部分の細胞壁は薄く、また壁孔部分のX線吸収率も低いことが見えない原因と考えられる。晩材部分は細胞壁が厚いので壁孔が見えていると考えられる。放射組織は10層が積み重なって並んでいるが、これらは放射柔組織と考えられる。柔組織は末端壁（図では横方向の柔組織を区切る縦の線として見えている）を有しているのが特徴である。末端壁の形状は樹種を判別する一つの目安として利用できるが、現状の分解能では末端壁の形状を確認することは難しい。

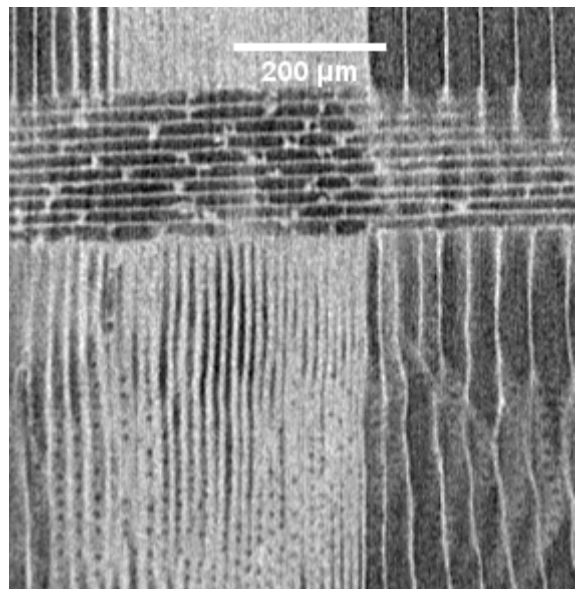


図5 スギの柾目面

一般的に針葉樹は組織が似ている。樹種判別には細かい差異まで画像で確認できることが好ましいが、現状ではマイクロCT画像から読み取れる特徴を組合わせて評価することになる。一方、広葉樹の組織は樹種でかなり違いがあることから、樹種判別に利用できる特徴は多いと期待される。

## 5. 今後の課題

今回得られた画像を利用してAIによる樹種判別を試みた。CNNで学習させるとほぼ100%の確率で画像を区別するが、樹種の判別はうまくいかないことが判った。AIが学習したのは画像の特徴であり、必ずしも樹種の特徴ではないことに原因があると考えている。AIで樹種判別をするには別のアプローチから画像を取り扱うことが必要と考えられる。

樹木組織のマイクロCT画像を利用する樹種判別法は、少量の試料で行えることから考古学や文化財の調査等においては大変魅力的な手法である。一般的な樹種判別法としての本法の利用価値を高めるには、樹種を増やしてデータベースをより充実させることが必要となる。また、同じ樹種についても異なる部位（心材、辺材）や異なる産地の画像を加えることがデータベースの信頼度を高めることになる。このようなデータベースの充実化は、研究的視点よりも「放射光利用の新しい展開」と位置付ける方が適切と考える。

## 6. 参考文献

## 7. 論文発表・特許（注：本課題に関連するこれまでの代表的な成果）

## 8. キーワード（注：試料及び実験方法を特定する用語を2～3）

樹木組織、マイクロX線イメージング

## 9. 研究成果公開について（注：※2に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文（査読付）発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください。提出期限は利用年度終了後2年以内です。例えば2018年度実施課題であれば、2020年度末（2021年3月31日）となります。）

長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

- ② 論文（査読付）発表の報告（報告時期： 年 月）  
 ② 研究成果公報の原稿提出（提出時期： 2022年 3月）