

# X線コンピュータ断層撮影の文化財への 応用—木心乾漆像の調査

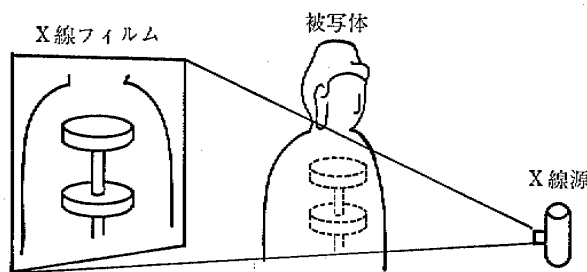
三 浦 定 俊

## 1. はじめに

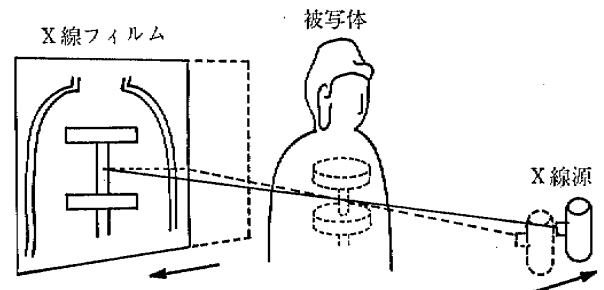
1973年に英国 EMI 社によって開発された医療用 X線コンピュータ断層撮影装置（以下 XCT 装置と略す）の最近の進歩には目ざましいものがある。解像力の向上、被曝 X線量の低減、操作時間の短縮などの改良の他、超音波 CT、ガンマ線など他の放射線を使った CT 等次々と新しい装置が開発され<sup>1)</sup>、昨年のノーベル医学・生理学賞には、XCT 装置の開発者がその栄誉を受けた。XCT 装置は医療用に開発されたものであるが、物体の断面をはっきりと見られるし、定量的取り扱いもできることから、文化財の分野でも有効な手段になると考えられた。ここでは XCT のおおまかな原理と、それによる仏像の調査結果を報告する。

## 2. XCT の原理

一般に用いられている X線透視撮影は、X線源からでた X線が被写体の内部を通り抜け、反対側にあるフィルムを感光させ像をつくる。その結果、フィルム上の像には被写体の全部の内部構造が重なって写っているのので、複雑な構造を持つ被写体の場合読み取りが難しい。



図—1 一般の X線透視撮影



図—2 従来の X線断層撮影

従来用いられて来た X線断層写真は、露出時間中に X線源を一方向へ動かし、同時にフィルムを反対方向へ動かして撮影される。ルーブル博物館研究所の装置では、撮影したい面にフィルムを密着固定して X線源のみを移動させているが、いずれの場合にしても、フィルムに相対的に動かない投影像を持つ、被写体の断面がただ一つだけ存在する。その面だけがフィルム上ではっきりとした像を結び、他の面はぼやけて写る。この撮影法では撮影時の X線源、被写体、フィルムの機械的位置関係に精度を必要とする。またフィルムからの読み取りもボケた像が重なっていて難しい。

X線コンピュータ断層写真は X線フィルムの代わりに X線検出器を用い、広がりのある X線ではなくコリメートされたビームを用いる。X線源と X線検出器は枠に取り付けられ、まず被写体を横切るように動かされる。次に少し枠を回転させ、また同じように X線源と X線検出器を動かす。こうして枠を被写体の周りに 180° 以上回し、X線検出器によって記録されたデータを接続したコンピュータで処理して、モニターテレビ上に画像として表わす。得られる画像は、今までの 2つが透過する X線に直交する面の像であったのに対し、X線ビームに平行な断層像、

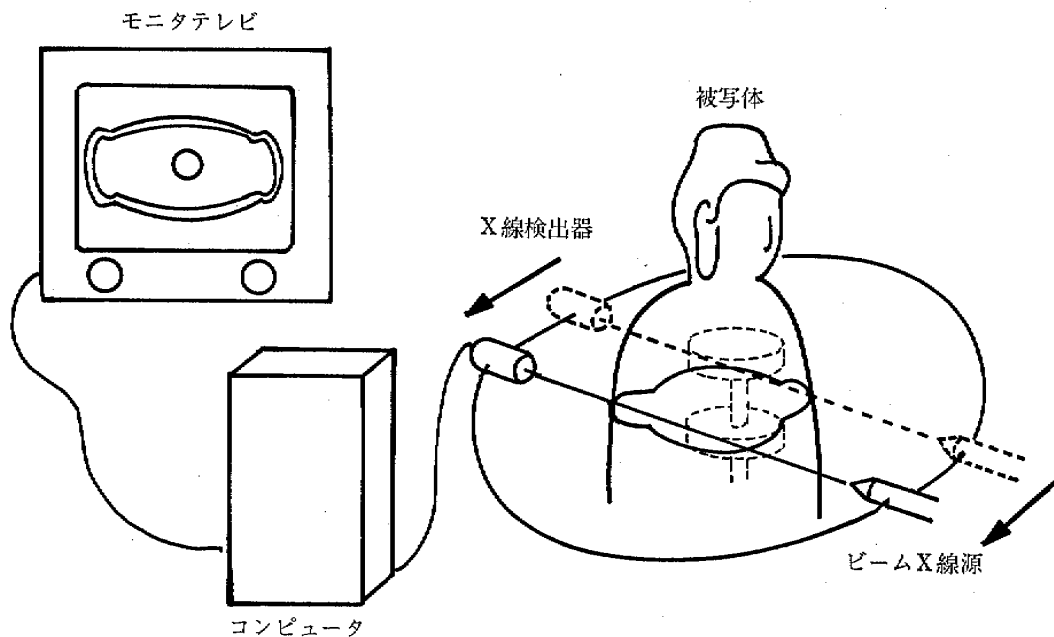


図-3 X線コンピュータ断層撮影

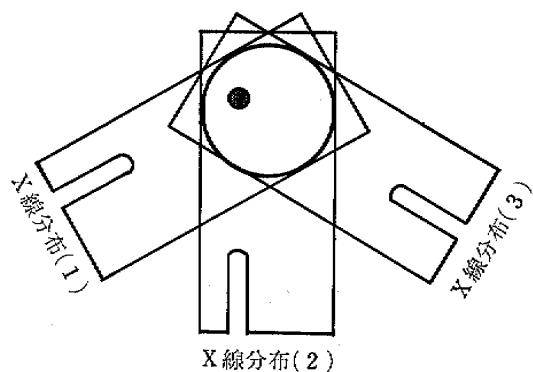


図-4 密度の不均一な物体の透過X線の一次元分布

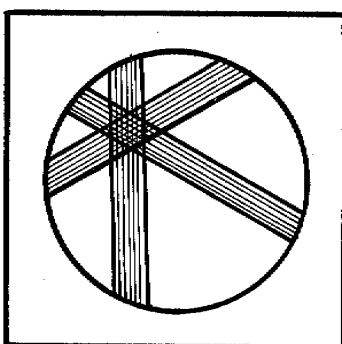


図-5 総和法による図-4のX線一次元分布からの像の再生

このように方法で何故断層像が再生できるのか、簡単な例で述べてみよう。図-4のように、一様な物体の中に1点だけ密度の大きい部分があったとする。この物体に3方向からX線を透過させると、図のような透過X線の一次元分布が得られる。それぞれの分布に対応した、平行な濃淡の縞模様を持ったフィルムをつくり重ね合わせると図-5のようになる。3本の線の重なった所が最も濃くなって、物体中の密度の大きい部分を示している。これをもっと数多くの方向から行えばはっきり点として認識されるようになるし、密度の高い部分が他にもあっても同じように検出できるようになる。この方法は総和法とよばれる。実際には、像はコンピュータの中で二次元の数列として記憶され(次章で用いたJXA-3Aでは256×256の数列)、特別のアルゴリズムによって像の重ね合わせが行われている<sup>2)</sup>。

### 3. XCTによる木心乾漆像の調査

使用したXCT装置は千葉大学病院のJXA-3A(日本電子)である。135kVのX線ビームを左右に走査しながら、1°ごとに230°回転して撮影する。1回の撮像時間は80秒、画像再構成のためのコンピュータの計算時間は6分である。仏像は図-6で示すように、移動架台の上に乗せて撮影した。

実験の対象にした仏像は、神奈川県二宮町の浄源寺に伝わる木造阿弥陀如来立像である。像高約1m、材質はヒノキ、寄木作りで漆箔仕上げである。X線透視写真を見ると、後世に右半

身を修理したらしく、幾つもの部材が重なり合っている。左足大腿部付近に胎内仏らしきものがある。

図-8は大腿部で撮ったXCT像である。胎内仏がはっきり写っていて、断面の形がよくわかる。撮影位置を下げて膝の付近でXCT像を撮った所、大変興味ある結果が得られた。ほとんど空気に近い小さい密度に合わせてXCT像を観察してみると、胎内仏以外にもう一つ中空の巻物様の像があらわれた(図-9)。これは普通のX線透視写真では発見できなかったもの

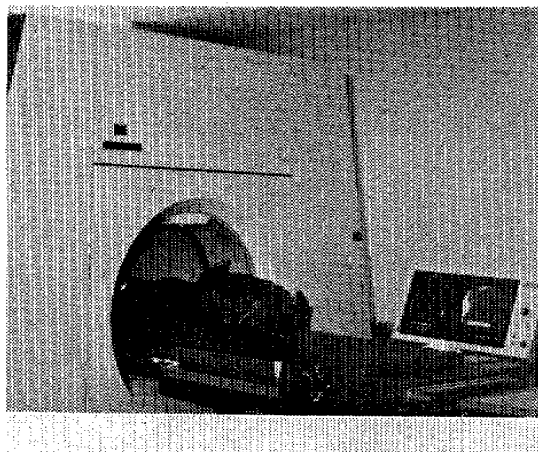


図-6 仏像の断層撮影の様子



図-8 仏像の大腿部で撮ったXCT像

で、おそらく紙でできた修理銘文・願文ではないかと予想された。調査後の解体修理の際にそれが確認された(図-10)。

図-11は仏像の肩で撮られたXCT像である。左肩部は虫に食われていたる所穴だらけになっている。首は後半分さしこまれていて、右半身にはX線の透過の違いから後補と思われる3個の部材がある。部材の合わせ目に白く明るく見えるものは、混ぜ物の入った接着用の漆であろう。図-12に図解して示す。

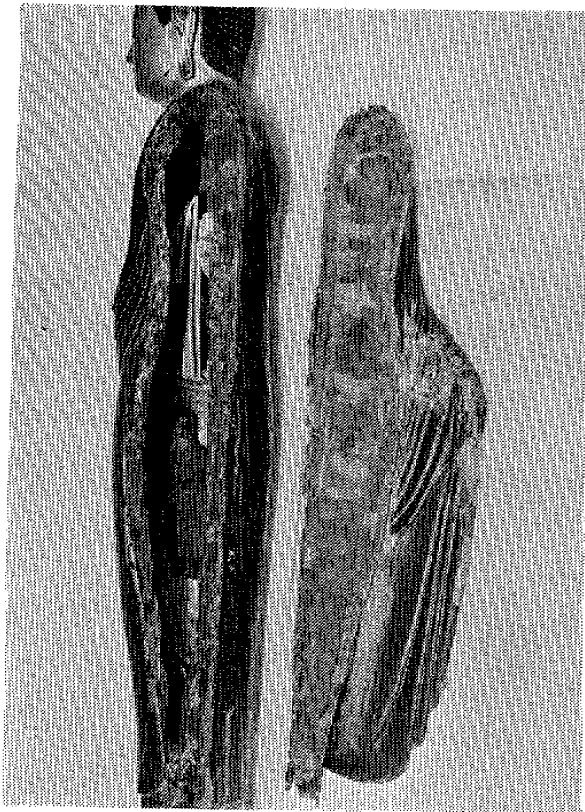
このようにXCT像はX線透視写真に比べて、虫食いの位置、深さ、部材の組み方、接着の状態など明瞭に表し、X線透視写真と併用すればかなり正確に形を推定することができる。推定した木取りを図-13に、解体修理してわかった実際の木取りを図-14に示す。細かな点で違いはあるものの、基本的な構造は完全に一致していて、当初材か後補材かという推定も当たっていた。胎内にあった修理銘文によれば、寛永、正徳、文化(いずれも江戸時代)3度の修



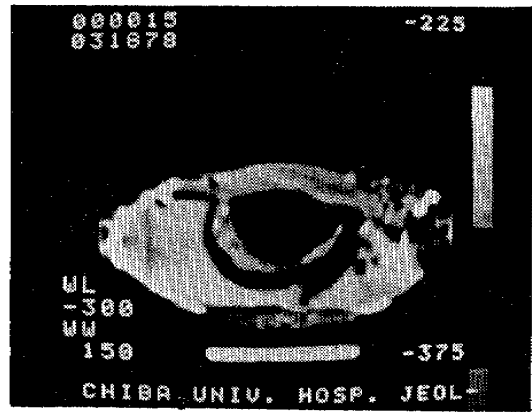
図-7 実験の対象にした仏像の普通写真とX線透視写真



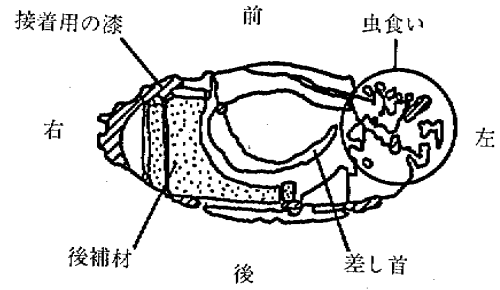
図-9 仏像の膝で撮ったXCT像



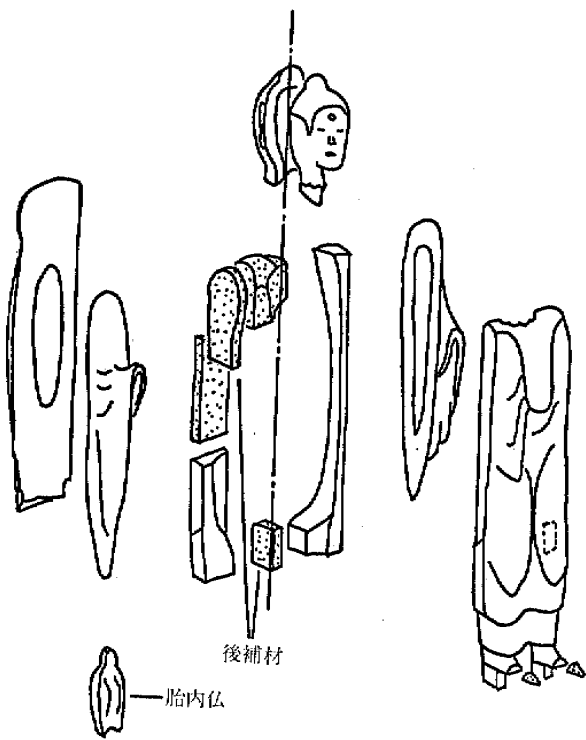
図一〇 解体時に確認された胎内仏と修理銘文・願文



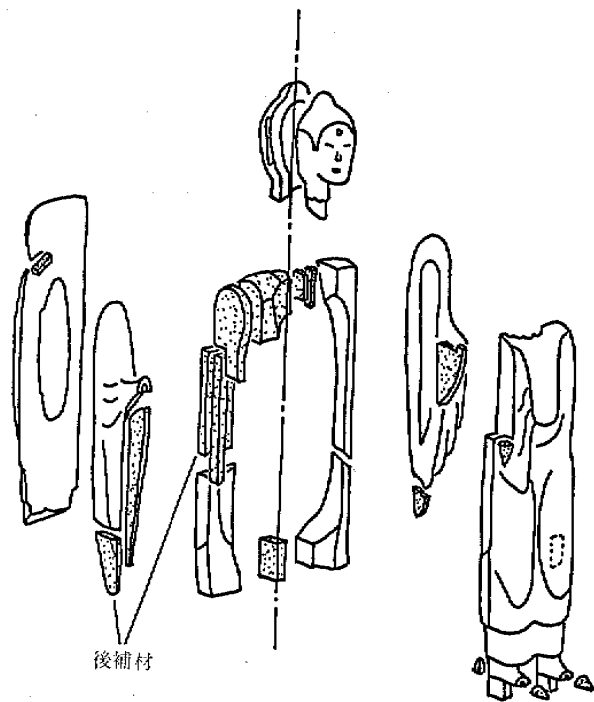
図一〇 仏像の肩で撮った XCT 像



図一〇 同 XCT 像の図解



図一三 XCT 像と X 線透視写真から推定された構造



図一四 解体によってわかった実際の構造

理が行われている。部材の数は全部で20個以上にも達し、X線透視写真だけでは大変判読しにくい複雑な構造になっていた。

この他 XCT では画面右に、明暗のスケールで CT 数とよばれるものが表示されている。CT 数は次の式で与えられる。

$$\text{CT 数} = 500 (\mu - \mu_w) / \mu_w$$

ここで  $\mu$  は対象物の X 線吸収係数、 $\mu_w$  は水の X 線吸収係数である。水の CT 数は 0 で、空気のようにほとんど X 線を吸収しないものは CT 数が -500 である。人間の組織は、骨が 500、頭部組織は 12~18、軟部組織は 15、血液は 6、脂肪は -50 というようになる。CT 数は X 線の吸収の程度に比例していて、木材の場合老化していくほど X 線が透過しやすく CT 数は低くなる。そこで CT 数に着目すれば、木材の老化の程度を定量的に判断できる可能性がある。ただし虫食いによっても CT 数は低くなるから、その区別が必要である。XCT 画像を見れば、図-11のように虫食いの時には虫食いの穴があるから、区別できるのではないかと考えている。

このような、木材の老化の定量化は、どのくらいのエネルギーの X 線を使えば最もうまくいくかということが問題になるが、10kV 前後の X 線を用いるのが一番良いだろうと考えられた<sup>3)</sup>。ただしこれは単色 X 線の場合であって、一般に用いている白色 X 線なら、そのエネルギー分布から考えてもっと高いエネルギーの X 線が最適であろう。木彫仏の X 線透視写真撮影に、従来 30kV 程度の X 線を使って十分な結果を得てきているのは、その白色 X 線中に含まれる 10kV 前後の X 線によって良好なコントラストを得ているためと考えられた。

#### 4. ま と め

XCT の原理を、従来の X 線透視撮影や断層撮影と比較しながら簡単に述べ、木心乾漆像調査においてあげた成果についてしるした。XCT は内部構造の調査だけでなく、従来の透視撮影ではできなかった、木材の劣化を非破壊で定量的に評価することも可能にするかもしれないということを指摘した。その時使用する X 線の、最適なエネルギーは 10kV 前後と推定されるが、これは従来の経験に一致する。

XCT 装置は一台が数億円と高価であり、保守も容易でなく、今までの X 線発生装置のようにどこでも簡単に使用するわけにはいかない。にもかかわらず、文化財研究にとっても大変魅力ある装置であり、木彫仏以外にどんな物にどこまで使えるか、その適切な利用を今後十分考えていく必要があるだろう。

最後に、XCT 装置の利用に関し親身の御協力をいただいた千葉大学病院放射線科の内山先生、桂井先生、仏像の調査に終始御協力下さった東京芸術大学保存修復技術研究室の本間先生に感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 飯沼 武, 遠藤真広: コンピュータ断層撮影の最近の進歩, 計測と制御, 18-10, 835~847 (1979)
- 2) R. ゴードン, G. T. ハーマン, S. A. ジョンソン: 医療用 X 線像の立体的再生, サイエンス, 5-12, 54~63 (1975)
- 3) 三浦定俊, 本間紀男, 馬淵久夫: X 線断層撮影による仏像の調査, 計測自動制御学会論文集, 16-2, 235~240 (1980)

## XCT Survey of Cultural Properties (Investigation of a Wooden Sculpture of Buddha)

Sadatoshi MIURA

In recent years X-ray Computed Tomography (XCT) has greatly progressed in the field of the clinical medicine. It is an excellent and promising technique of surveying the inner part of a human body. The author thinks it will be also very useful for the survey of cultural properties. He tried to apply XCT to the investigation of a sculpture of Buddha and obtained a satisfactory result.

The technique of image reconstruction is explained first through compared with the other techniques; the conventional X-ray photography and the conventional tomography.

The sculpture of Buddha in question is about 1 meter high and made of wood (Japanese cypress). It is an artifact of the 12th century. Since its structure is much complicated, X-ray radiography, the most popular method of the scientific examination of art objects, could not reveal the details. By using XCT apparatus we could not only guess the structure of the statue easily and correctly, but also could reveal a miniature Buddha and several pieces of paper confined in its body.

XCT is also suited for the estimation of wood deterioration. An optimum X-ray energy level for the detection of deteriorated part is estimated at 10 keV.