## 高分解能X線CTについて

新日本製鐵(株)エレクトロニクス研究所 林 一雄、川島 捷宏

High Resolution X – ray Computed Tomograpy by Kazuo Hayashi and Katsuhiro Kawashima

## 1 はじめに

X線検査においてX線CTは断層面が非破壊で観察できることから画期的な発明であった。 1970年代に医療診断装置として開発されて以来、医療分野のみならず産業分野へも普及し つつある。さらに、最近では、微細加工技術の進歩により、微小な構造をもった物の非破 壊検査技術が求められており、X線CT画像の分解能の向上についての研究開発がなされて いる[1,2]。ここでは、空間分解能の向上を目指したX線CTについて紹介する。

2 高分解能X線CT

## 2-1方法

X線CT画像の空間分解能は、X線管の焦点サイズ(X線発生領域)、X線管と被検体と 検出器と各々の距離、X線の線量、被検体の材質、検出器の分解能、投影像の測定回数、再 構成計算誤差などによって定まる。これらの中で大きな影響を与えるものは、X線の焦点サ イズと検出器の分解能である。X線管の焦点サイズはできるだけ小さいほうが断層面の投影 像の半影が少なく、また、当然の事ながら検出器の分解能は高いほど良い。空間分解能の 向上は、基本的には断層面の投影像の検出時の空間分解能を向上させれば良いわけである。

検出時の空間分解能を向上させる方法としては、単純には高分解能な検出器を用いれば 良く、半導体型の検出器を用いることによって数十μm分解能を持つX線検出器が得られ ている。μm程度の検出器を得ることは検出器の感度やクロストークなどの問題があり、ま

た、開発コストが高いなどの課題があり、容易には 得られない。そこで、検出器は、現状のものを用 い、投影像を拡大することによって、相対的に検出 時の分解能を向上させることが行われている。

投影像の拡大方法としては二通りあり、一つは図 1に示すようにX線の自然発散を利用して投影像の 拡大をはかるものである。拡大率Mは、次式で決 定される。

> M = a/b (a:X線管と検出器との距離、 b:X線管と被検体との距離)

このとき、半影の少ないシャープな投影像を得るためにX線の発生領域(X線管の焦点)の小さなX線 密接学会全国大会講演概要 第51集(92-10)



Fig.1 Enlargement of radiographic image.

管が必要である。そのためマイクロフォーカ スX線管が利用されている。このX線管は、 従来の工業用X線管の焦点サイズよりも1~ 2桁小さく数十μm以下である。したがっ て、拡大率を100倍程度まで設定することが 可能であり、性能の良いものでは200倍程度 までの拡大が可能とも言われている。

もう一つは、シンクロトロン放射光のよう に指向性の良いX線を利用し、シリコンやゲ ルマニウムなどの結晶のブラッグ反射によっ





て投影像を拡大するものである。原理図を図2に示す。これは非対称反射と呼ばれるもので、 結晶表面に対して格子面がαだけ傾いているために結晶表面に対する入射角と反射角が異 なり、入射ビーム幅の拡大が可能となる。このとき拡大率Mは、次式で決定される。

 $M = do/di = sin(\theta + \alpha) / sin(\theta - \alpha)$  (do:反射ビーム幅、di:入射ビーム幅、  $\theta$ :ブラッグ角、 $\alpha$ :結晶表面に対する格子面の傾き角)

2-2装置構成

ここでは、上記で示した2つの方法で筆者らが開発した装置について紹介する [3,4]。 (1) マイクロフォーカスX線管を利用したX線CT

マイクロフォーカスX線を用いた高分解能X線CTの装置例を図3に示す。本装置は、お



Fig.3 Schematic illustration of high resolution X - ray CT using microfocus X - ray tube.

もにマイクロフォーカスX線管、被検体支持台、2種類のX線検出器、画像処理装置、装置の制御とCT画像再構成計算を行うマイクロコンピュータ、X線シールドボックスからなる。X線管は、シールドボックス内で固定されているが、被検体支持台と2つのX線検出器はX線管からの距離を独立して変えられるように移動ステージにそれぞれのせられている。これによって、被検体の拡大率を自由に設定でき、被検体サイズに応じた拡大率を設定することを可能にしている。

2種類のX線検出器の一つは、透視像検出用のX線イメージング・インテンシィファイ ア(X線I.I.)であり、もう一つは、CT画像用の投影像収集用のリニアX線検出器であ る。X線I.I.で被検体の透視像を観察しているときには、リニアX線検出器はX軸ステー ジを利用してX線I.I.を遮らないように退避している。このとき、X線I.I.は、画像のデ ジタル化や画像積算などの処理が可能な画像処理装置を経由してモニタTV上に透視像を表 示し、通常のリアルタイムX線透視検査が可能である。これによって、CT撮影を行いたい 断層面の決定や位置合わせが可能となる。

リニアアレイX線検出器は、断層面厚さを設定するためのコリメータを備えており、512 個のフォトダイオードアレイが50 µmピッチで並んでいる。このとき、計算上の投影像の 検出空間分解能は、その拡大率で50 µmを割った値となり、CT画像の画素サイズも同様 の値となる。実際には、X線を可視光に変換するシンチレータの厚みや散乱X線の影響な どによりその値よりも空間分解能は低い値を示す。なお、CT画像再構成は、専用プロセッ サによって256 × 256の画像を約1分でなされる。

(2) 放射光を利用したX線CT

シンクロトロン放射光を利用したX線CT (SR – CT)の装置例を図4に示す。基本構成 は、モノクロメータ、被検体支持台、検出器、コンピュータである。



Fig.4 Schimatic illustration of SR - CT.

- 5 -

この装置のモノクロメータは、2結晶系のモノクロメータを構成しており、最初の結晶からの反射X線で被検体の断層面の投影を行い、その投影像を第二の結晶で反射させることによって完全な単色化と像の拡大を行っている。したがって、CT画像の画素サイズは、上記の(1)と同様に第二結晶での投影像の拡大率と検出器の開口サイズによって定まる。

検出器は、(1)と同様の1次元検出器か、あるいはCCDを利用した2次元検出器を用いている。2次元検出器を利用した場合、放射光は、指向性が良く、かなり平行ビームに近いため、それによって一度に多断層面の投影像が収集でき、3次元CT画像を比較的容易に得ることができる。

コンピュータは、モノクロメータ系の結晶の姿勢制御、被検体の微小回転と検出器の投 影像読み取りの同期制御、CT画像再構成計算処理をおこなっている。上記(1)と同様に 画像再構成は、専用プロセッサによってなされている。

3 撮影例

上記で示した装置を利用して撮影したCT画像 を紹介する。まず、マイクロフォーカスX線CT で撮影した例を図5、6に示す。図5は、アルミ ナの多孔パイプを撮影した例である。外径1. 5mm に内径0.1mmの微小孔が約100個程設け られているものである。このとき拡大率約7倍で 撮影しており、計算上での画素サイズは約8μm と高分解能なCT画像が得られている。

図6は断面サイズ2×1mmのSiC/Alの複合 材料の破断面近傍を撮影した例を示す。この時 の計算上の画素サイズは8 µ m である。これは Alの母材に強化繊維としてSiC コーティングの

炭素繊維が用いられている試験片 である。炭素繊維の直径は約35 μ mで、SiCを含めた直径は140 μ m である。図からわかるように繊維 の引き抜け、繊維の縦割れ、繊維と 母材の剥離が、明瞭に観察されて いる。このように材料の破壊状況 を詳細に観察可能であり、破壊解 析の評価装置として有効であると 考えられる。



Fig.5 CT image of a pipe ( $\phi$  1.5mm) made of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with small orifices ( $\phi$  100  $\mu$  m).



Fig.6 CT image obtained after fracture of SiC/Al composite.

SR – CTでの撮影例を図7に示す。SR – CTは、単色X線を利用できる事から高分解能なCT画像が得られるだけでなく、特定元素のCT画像が得られるという特徴がある。ここ

- 6 -

ではヨウ素のみのCT画像を観察し た例を示している。被検体は、ヨウ 素、タングステン、白金の各溶液を 外径1.6mm、内径0.9mmのガラス 細管に入れ、3本束ねたものであり、 その断面形状を図7(a)に示す。図 7 (b)、(c) はヨウ素のK吸収端の前 後のエネルギーでCT 撮影を行った 画像である。ヨウ素のK吸収端は33. 17KeVであり、図7 (b) はそれより も40eV高いエネルギーで、図7 (c) はそれよりも 40eV 低いエネルギー で、それぞれ撮影したものである。 図7 (d) は、(b) と (c) の画像の 画素間差分を行った結果である。 80eV程度の変化では、タングステン と白金のX線吸収係数はほとんど変 化しないが、ヨウ素のそれは5.  $13 \text{ cm}^2 / g \text{ から} 36 \text{ cm}^2 / g \text{ と大き}$ く変化するために差分画像では、ヨ ウ素のみが明瞭に観察されている。

## 4 おわりに

高分解能X線CTとしてマイクロフォーカスX線管とシンクロトロン放射光を用いた装置について、それらによる撮影例を示しながら紹介した。ここで、紹介した撮影例はほんの一部であるが、いずれもミクロンオーダの画素サイズを達成しており、様々な微小構造物の非破壊評価に有効と考えられる。さらに、今後とも製造技術の進歩とともに高精度なX線CTの必要性はますます増えていくと考えられ、より一層の研究開発が期待される。

(c)

(参考文献)

- L.A. Feldkamp and G. Jesion, in Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 5A, p555, (1986)
- 2. L. Grodzins, Nucl. Instrum. Method, 206, p541 (1983)
- 3. 山地 他, 第7回産業における画像センシング技術シンポジウム, p17, (1992)
- Y. Nagata, H. Yamaji, K.Hayashi, K. Kawashima, K. Hyodo, H. Kawata, and M. Ando, Rev. Sci. Instrum. 63, 1, p615 (1992)



Fig.7 (a) Cross - sectional drawing of the sample. Three glass capillaries are filled with iodine, tungsten, and platinum solution.
(b) CT image at 33.21 keV above the iodine absorption edge. (c) CT image at 33.13 keV below the iodine absorption edge. (d) CT image obtained by subtracting (c) from (b).

(d)