

X線CT X-Ray Computed Tomography

新居浜工業高等専門学校 数理科 教授 高度技術教育研究センター長 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科 准教授

川崎宏一 Koichi Kawasaki 平野雅嗣 Masatsugu Hirano

# し まえがき

X線による3次元可視化の観察手法である「X線CT」は「X 線による断層撮影法」のことで、英文ではX-ray computed tomographyと表わされる。「X線CT」にふれる前に、既に 実用化されている2次元イメージングを考えてみよう。「放射 光によるイメージング はイメージングの世界で最高レベル で、解像度(空間分解能)、感度、高速観察の各々の面で向 上してきた<sup>1-3)</sup>。解像度は空間的に識別できる最小寸法をいう (文献2)の図3参照)。感度は信号がノイズに埋もれずに識 別できる限界のことである。信号SのノイズNに対する比、 S/N比が0.1程度であれば検出回路による電子的ノイズカッ トと画像強調により明瞭なコントラストが得られる。「解像度 と感度の両立」は今後の課題であるが、その場観察として は、凝固、粒成長、高温極点図、引張り破断、圧壊等の多様 な観察が行われている。材料についても重金属の他、軽元素 材料、複合材料、セラミックス、生体材料など広く取り組ま れてきた。2次元イメージングは薄い試料の平面的観察や試 料表面の観察には適しているが、厚い試料ではイメージの重 なりが生じるため、3次元でのイメージ観察が必要となる。

3次元の像観察法としてのX線CTでは、測定の最小単位 の立方体をボクセルというが、小さいほど解像度が良い。立 方体の一辺の長さをボクセルサイズという。X線CTでも、 やはり「解像度と感度の両立」、「高速観察」の課題を抱えつ つ発展してきている。既に実用化されている技術には、ラボ ラトリー(実験室)でのX線管による産業用の「ラボX線 CT」と、放射光をX線源として利用する「放射光CT」があ る。ラボX線CTは解像度向上を目指してX線焦点が1µm 前後まで小さくなってきており、「マイクロフォーカスX線 CT」と称されている。放射光CTはX線波長が単一の単色X 線CTとなることが特徴で定量性に優れている。放射光CT は「放射光コンピュータトモグラフイ」<sup>3)</sup>、あるいは「放射光ト モグラフィ」<sup>4)</sup>とも呼ばれている。さらに、放射光では解像度 が1µmオーダーも可能で「放射マイクロCT」<sup>5)</sup>とも称されて いる。さらに、実用化に近い放射光 CTの研究や先端的な動 的観察のチャレンジも見られる。トモシンセシスという断層 撮影法の提案もある。以下にわかりやすく概括する。

## 2 X線CTの原理

## 2.1 ハード

## 2.1.1 ラボX線CT

X線源としては開放管または密封管のX線管が用いられる が、焦点サイズは1~10 $\mu$ m程度で焦点が小さいほど像のボ ケが少なくなる。像のボケBの算出式はB=F(M-1)、F:焦 点サイズ、M:拡大倍率であるが、解像度は像のボケによっ て低下する。通常、解像度は10~100 $\mu$ mが普通であるが、 10 $\mu$ m未満のハイレベルの装置も開発されている。

図1に光学配置模式図を示す。X線焦点~試料の距離をd、 X線焦点~検出面の距離をLとすれば、M=L/dが幾何学的 な拡大倍率となる。試料サイズが10mm程度で、d=50mm、 L=500mmとすればM=10倍となる。得られる像は吸収イメー ジング像である。鉄のような重金属では吸収のため、X線の 透過が困難であるが、ラボX線CTではX線管電圧は100kV 以上と高く、X線管電圧を最高電圧とする連続波長のX線が



放射されて透過力は高い。例えば、管電圧を200kVとすれ ば、最大強度付近の100kVでの鉄の半価層は2.4mmである。 半価層とはX線強度が半分になる試料の厚みのことで、この 厚みであれば十分観察が可能である。ラボ装置のため、実験 室において手軽に利用できることが特徴であり、リチウム電 池やコンデンサーの非破壊観察のニーズにより普及が進展し ている。また、試料を光軸と直交した軸周りに回転させた 後、その軸方向にステップ移動させる方式であったが、検出 面を大きくして軸方向のステップ移動を省略すれば、例えば 1°毎に投影し、180投影で180°回転させるとしても、15分く らいで測定・データ処理が終わり、高速化されており簡便で ある。投影の回数が多いほど、角度のステップが細かいほど 解像度が向上する。

#### 2.1.2 放射光を利用した CT

「放射光 CT」は、SPring-8の産業用ビームライン BL19B2 等において実用的測定が可能となっている。使用される放射 光のエネルギーは20~40keVで透過力は高いとは言えない。 例えば、40kV での鉄の半価層は 0.24mm である。放射光の 強度が強いため半価層の 2~3 倍まで許容するとしても、直 径 1mm 以下の針状、または、一辺が 1mm 以下の正方形断 面に加工する必要がある。放射光ビームはほぼ平行ビームで 幾何学的な拡大は小さく、広い視野での観察には工夫を要す る。例えば、ビームラインを長くすれば広い視野での観察が 可能となる<sup>5)</sup>。放射光は平行ビームなので強度が強くX線源 ~試料間距離を大きくすることが可能となり、吸収イメージ ング像とともに屈折イメージング像の観察が可能となること が特徴となる<sup>2:3)</sup>。図 2 に放射光 CT 装置のレイアウトの一例 を示す<sup>5)</sup>。投影の回数が分解能に影響することは、ラボX線 CT と同様である。

#### 2.2 3次元像の再構成

3次元像の再構成の方式についてはほぼ確立されている<sup>6,7)</sup>。コンピューターの進歩により、データ処理の面では高速化され、かつ充実してきている。



図2 放射光 CT 装置 5)

#### 2.2.1 投影と再構成

図3に、ボクセル4個×4個、計16個から成るモデル試料 を示す。X線吸収係数はボクセルによって異なりf(x,y)とす る。(x,y)は試料軸である。黒いボクセルはf(x,y)が大きく X線を吸収する。白いボクセルはf(x,y)が小さくX線を通過 させる。灰色のボクセルは中間である。この試料にs軸の方 向からX線平行ビームを照射する。s軸と直交したr軸を考 える。実際はX線源は固定されているので、X線軸は固定さ れていて試料が回転する。今、回転を止めて考える。X線の 入射強度をIo、試料を通り抜けた位置rにおける強度をI(r) とすると、次の通りとなる。

> I (r) =Io-S {f (x,y) ×X線通過長さ} (Sは (x,y) についての足し合わせ)

例えば、吸収係数が0、48、24、0 [cm<sup>-1</sup>] で各々のX線通過 長さが1cmであればS=72となる。

また、x軸に対するr軸の回転角 $\theta$ を用いれば、(x,y)と(r,s)の関係は次の通りである。

 $r = x\cos\theta + y\sin\theta$ ,  $s = -x\sin\theta + y\cos\theta$ 

図3に示すように、検出器上にX線吸収量分布が得られる が、これは「投影」と呼ばれる。様々な角度から投影を測定 し、元の試料のX線吸収量分布f(x,y)を求めることを「再構 成」と呼ぶ。



図3 X線CTにおける投影原理

## 2.2.2 投影と逆投影

図4(a)のように中央のボクセルだけが「1」の単純な分布 を考える。このとき、f(x,y)を推定する最も単純な分布は投 影方向に沿ったボクセルを皆「1」にする(b)の分布である。 このような操作を「逆投影」と呼ぶ。(c)に示すように4方向 からの逆投影を加算する分布b(x,y)は、「単純逆投影」と呼 ばれ、元の分布f(x,y)と点拡がり関数p(x,y)の積となる。

$$b(\mathbf{x},\mathbf{y}) = f(\mathbf{x},\mathbf{y}) \times p(\mathbf{x},\mathbf{y})$$

4方向でなく、すべての方向で加算すると次式のようになる ことが推定される。

$$\beta$$
 (x,y) =1/(x<sup>2</sup>+y<sup>2</sup>) <sup>1/2</sup>

これは、単純な分布の投影を逆投影したときの2次元分布で あるから、逆投影の点拡がり関数 p (x,y) と考えることができ る。よって

b (x,y) =f (x,y) × p (x,y) =f (x,y) ×  $\beta$  (x,y)

そこで、b(x,y)に対し、p(x,y)をキャンセルするフィルタ をかければ、元の分布f(x,y)を再構成できる。ところが二次 元でのフィルタリングは計算の負荷が大きいため、実際は図 5のように、同等の処理を一次元での投影の段階で一次元 フィルタリングを行い、それを逆投影する方法が用いられて いる。

#### 2.2.3 重畳積分法

これまで述べてきた画像再構成法を重畳積分法と呼び、また、たたみ込み積分、convolution法とも呼ばれる。一次元フィルタにはShepp&Loganのフィルタ<sup>8)</sup>等が提案されている。図6(a)に示した単純なフィルタを用いて、(b)のボクセル分布をもとに計算した再構成分布を(c)に示す。ただし、結果がマイナスになった部分は0にしている。4方向からの投影データを使った再構成であるが良好な再現性が得られた。



## 3.1 ラボラトリーでの実用化技術

筆者らはマイクロフォーカスのラボX線CTを利用して測定 を実施した。まず、最小焦点サイズ0.4µmの島津製作所製 SMX-160LTを用いて、管電圧80kV、ボクセルサイズ1µm





(a)単純な分布の投影

0	1	0

	b	Χ,	y)	
0	0	2	0	0
1	2	4	2	1
0	0	2	0	0



図4 投影と逆投影



図5 投影時に一次元フィルタリングを行う再構成



図6 単純なフィルタを用いた再構成

の条件で、片状黒鉛鋳鉄の測定にトライした。直径を0.6mm と針状に加工した試料を測定したが、図7に示すように、厚 みが最小で3~5µm程度の薄片状の黒鉛が観察できた。 また、最小焦点サイズ4µmの島津製作所製SMX-225CT

3章の図は背景を暗くした図(図7、8、11など)が多いが、これは見やすいように白黒反転したためである。

37

を用いて、板厚4mm程度の軟鋼熱延板の溶接ビードを2× 2.5mmに切り出した試料を200kV、ボクセルサイズ10µm で観察したところ、図8に示すように、厚い試料にもかかわ らず、溶接ビード~母材の境界付近にできた50µm程度のブ ローホールが確認できた。

同じ装置で直径20mmの円柱状に切り出したコークスの気 孔構造が安楽らにより測定されている<sup>9)</sup>。X線管電圧は 200kV、ボクセルサイズは40µmである。図9にデータ処理 した3次元像を示す。灰色の塊状または網目状の炭素基質部





縦断面 左右0.6mm

図7

立体図 縦断面を2カ所表示 片状黒鉛鋳鉄の観察 直径は 0.6mm



ビードに垂直な断面 横2mm、縦2.5mm 下部が溶接の開先



左図の矢印断面 上下2.5mm

図8 軟鋼熱延板の溶接ビードの観察

図 9 コークスの気孔構造立方体の一辺は 14mm

の中に小さな鉱物質の白い領域が観察される。黒い領域は気 孔である。また、3次元の測定データモデルに外力を計算上 附加して表示した応力分布を図10に示す。円状のマーク内 に、気孔との境界近傍で炭素基質部の黒さが増している応力 集中領域が見受けられる。炭素基質部の内部は応力集中が少 ない白色領域が多くなっている。

また、同じ装置で、生体材料としてねずみの足の骨(およそ幅3mm、長さ10mm、厚さ1mm)を120kVで観察したが、 図 11 に示すように、骨と軟組織の識別が可能であった。また、骨の中の骨梁の約50  $\mu$ mのすきまが確認できた。



図 10 外力を計算上附加したコークスの応力分布 正方形の一辺は 14mm



縱断面 左右4mm



横断面 左右幅3mm



立体図 縦断面を表示 左右幅3mm

図 11 ねずみの足の骨の観察 灰色領域は軟組織

## 3.2 放射光での実用化技術

鉄鋼関連の応用として塩澤、中井らにより快削鋼の介在物 の SPring-8 での測定例を示す<sup>10,12)</sup>。図 12 は屈折イメージン グ像を示しているが、横断面で見られる黒い円は延伸した MnS介在物の断面である。屈折イメージングの効果により相 境界に白いラインが観察される。右側の3次元像では延伸し たMnS介在物が立体的に表示されている。放射光エネル ギーは25keVで試料直径は100μmである。また、塩澤、中 井らによる高強度鋼のねじり疲労き裂の観察結果を図13に 示す<sup>11,12)</sup>。断面が300×300μmで長さが5mmの試料で 35keVで観察されている。深さが10µmオーダーのき裂が観 察されている。

SPring-8において原子力発電プラントに使用されるニッケ ル合金の溶接金属を約直径0.7mmの丸棒の試料に加工して SPring-8にて測定された応力腐食割れの中東らによる観察 結果を図14に示す<sup>13)</sup>。き裂の枝分かれ状況など3次元的に 複雑な形態が観察されている。

## 3.3 放射光での実用化に近い研究

SPring-8の212mと長いビームラインでの広い視野での観 察を紹介する。放射光の平行性により高解像度が期待でき る。梅谷らは図15に示したウサギの耳たぶの腫瘍の血管を バリウム造影してから、動脈を20kev単色X線で8時間CT 撮影を行った<sup>5)</sup>。測定のレイアウトは図2に示す。検出器と





図 15 ウサギの耳たぶの腫瘍の X 線フィルムによる撮影 5) 中央の黒く見える領域が腫瘍である。



横断面



図 12 快削鋼の介在物の観察<sup>10,12)</sup>





50 µm 深さ 5µm

深さ 10µm 図13 高強度鋼のねじり疲労き裂の観察<sup>11,12)</sup>



深さ 20 µ m

して1000万画素 CCD で画素サイズ 6µm で蛍光体層厚み 10µmのX線カメラを開発した。X線を直接電子に変換する サチコンカメラ<sup>2)</sup>と同等の高解像度となっている。図 16に示 すように 20µmの細動脈が観察された。血管のつながり等 3 次元構築が明らかにされている。実用化に近い生体観察で、 cmオーダーのサイズの試料の像観察においては、トップクラ スの高解像度を達成した研究である。

CTではなく「トモシンセシス」と呼ばれる断層撮影法があ る。回転角が10°程度と小さい角度範囲での投影像からでも 任意の断層像が再構成されるので、X線被曝を低いレベルに 抑えられ、また、放射光の場合は光源の回転は不可能なため 臨床での人の回転角が10°程度と小さく抑えられる。つくば のフォトン・ファクトリーにおいて、このトモシンセシスに暗 視野法屈折イメージングを組み合わせた「屈折強調トモシン セシス」によって、島雄、安藤らは図17に示すように、1°毎 に投影した11投影で人の指関節の屈折強調による断層像を 得ている<sup>14)</sup>。従来の吸収イメージングでは不可視である関節 軟骨が、投影像だけでなく断層像としても観察できるように なった。



図16 ウサギの耳たぶの腫瘍の微小血管の像 5)



屈折強調トモシンセシス(断層像) 矢印;関節軟骨



従来の暗視野像(投影像)

矢印: 関節軟骨

#### 3.4 放射光での先端的研究

SPring-8の高輝度のビームラインにおいて1秒以下での高 速X線CTへチャレンジする研究がなされている。高野、篭 島らは図18に示すように1mm程度のサイズの高分子吸収剤 の吸水膨張過程を観察している<sup>15)</sup>。試料は毎秒3回転し1秒 以下の観察が可能となっている。解像度は35µmである。ま た、高野、篭島らは図19に示すように卵白内で発生した気 泡成長の時系列3次元像も観察されており、3次元空間に時 間軸を加えて、4次元CTと名付けられている<sup>16)</sup>。

## 4 おわりに

X線CTは「解像度と感度の両立」、「高速観察」の課題を抱 えつつ発展してきたし、今後も進展していくものと思われ る。データ処理の高速化、充実は著しく、さらに、大きな進 展が予想される。実験手法について以下に述べる。

ラボラトリーについては、産業用X線CTについて述べた が、医療用X線CTについては、巨額な費用を投入した開発 が進展している。医療の分野では体の動きが避けられないた め高速測定の必要性が高い。検出器を320列並べて、0.35秒 での高速測定が可能となっている。また、検出素子の高感度



図18 高分子吸収剤の吸水膨張過程<sup>15)</sup>



図19 卵白内で発生した気泡成長の時系列三次元像16)

化の努力も続けられている<sup>17)</sup>。このような医療用X線CTで 開発された技術が、産業用X線CTへトランスファーされて いくことが見込まれる。100kVでの鉄の半価層は2.4mmな ので、ラボラトリーでの鉄鋼試料の測定の実用性は高い。解 像度が現状ではまだ、10~100μmのレベルで検出素子の高 感度化による改善が期待される。コークスやねずみの骨の例 を掲載したが、鉄鋼に関連した様々な研究へ応用が広がって

放射光を利用した CT では、鉄の 40kV での X線の半価層 は 0.24mm であり、試料断面を 1mm 以下に加工する必要が ある。これまで紹介したように、「解像度と感度の両立」、「高 速観察」の課題への先進的研究は鉄鋼材料のような重い金属 を避けて、生体材料、高分子材料等軽い材料でチャレンジさ れている。このような軽い材料で得られた成果を鉄鋼材料の ような重い金属の観察へトランスファーすることが課題であ る。また、放射光は高輝度、高平行、及び屈折イメージング に強みがあり、3章で述べた研究の他に先端的研究が多数取 り組まれている。特に、その場・動的観察への適用も楽しみ である。

本稿作成にあたり,ご協力いただいた(株)神戸製鋼所中 山武典氏、(株)日鐵テクノリサーチ高木康夫氏、今福宗行 氏、新日本製鐵(株)宮崎康信氏、JASRI梅谷啓二氏、梶原 堅太郎氏、(株)島津製作所亀川正之氏、夏原正仁氏に謝意 を表す。

## 参考文献

いくと考えられる。

- 1) 川崎宏一:ふぇらむ,9(2004),613.
- 2) 川崎宏一:まてりあ,44,(2005),580.
- 3) 岩崎博, 川崎宏一:金属, アグネ, 76 (2006), 425.
- 4) 平野辰巳: RADIOISOTOPES, 47 (1998), 446.

- 5) 梅谷啓二, 上杉健太朗, 小畠牧人, 山本亮, 山下武則, 今井茂樹, 梶原康正:映像情報メディア学会誌, 59 (2005), 1673.
- 8)奥富正敏編:ディジタル画像処理,CG-ARTS協会, (2006)
- 7) 斎藤恒雄: 画像処理アルゴリズム, 近代科学社, (1993)
- 8) L.A. Shepp, and B.F. Logan : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-21 (1974), 21-43.
- 9) 安楽太介,尾花秀俊,原田靖之,小宅勝,高橋勇一:材 料とプロセス,21 (2008),131.
- 10) 塩澤大輝,中井善一,森影康,田中拓,尾角英毅,宮下 卓也:日本機械学会論文集(A編),72 (2006),1846.
- 11) 塩澤大輝,中井善一,栗村隆之,森影康,田中拓,尾角 英毅,宮下卓也,梶原堅太郎:材料,56 (2007),951.
- 12) 中井善一: SPring-8 利用者情報, 12 (2007), 409.
- 13) S. Nakahigashi, M. Terasawa, A. Yamamoto and K. Kajiwara : SPring-8 Research Frontiers 2007, (2007) 158.
- 14) D. SHIMAO, T. KUNISADA, H. SUGIYAMA and M. ANDO : Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 25, L608-L610.
- 15) 吉田圭佑, 辻卓也, 小山貴久, 高野秀和, 津坂佳幸, 篭 島靖:第21回日本放射光学会年会・放射光科学合同シン ポジウム予稿集, (2008), 90:2A003.
- 16) 吉田圭佑,小山貴久,辻卓也,高野秀和,津坂佳幸,篭 島靖:2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会予稿 集,716,発表番号5p-V-/II-6.
- 17) 日経ビジネス 2008 年 4 月 28 日・5 月 5 日号, 114.

(2008年10月3日受付)

41