

TED Plaza

放射光 X 線マイクロイメージング



星野 真人

公益財団法人高輝度光科学研究センター
利用研究促進部門 研究員
hoshino@spring8.or.jp



上杉 健太郎

公益財団法人高輝度光科学研究センター
利用研究促進部門 主席研究員
ueken@spring8.or.jp

1. はじめに

X 線を用いた画像計測、いわゆる X 線イメージングは、医療の現場をはじめとして、手荷物検査など我々の比較的身近な場所で利用されている計測技術である。X 線画像計測と聞くと、複雑な測定系などを連想しがちであるが、基本となるのはいわゆるレントゲン撮影である。例えば、我々の体のレントゲン撮影では、骨のような比較的密度が高い物質と、皮膚や筋肉といった軟組織との間における X 線の吸収率（あるいは透過率）の差を画像コントラストとして可視化している。一般的に X 線は、密度が高い物質では吸収され、逆に密度が低い物質に対しては高い透過率が得られる。もちろん、X 線の透過能力には、X 線のエネルギー（波長）も関係してくる。エネルギーの高い=波長の短い X 線（硬 X 線とも呼ばれる）では、その高い透過能力から、比較的大きな物体に対しても適用可能である。一方で、エネルギーの低い=波長の長い X 線（軟 X 線とも呼ばれる。ここでは波長数 nm を想定している）では、透過能力が低いため、用途は限定的となるが、微小な細胞レベルの X 線顕微イメージングに用いられることもある。ちなみに、硬 X 線および軟 X 線の定義は、計測分野によってかなり異なるので、一概に線引きをすることはできない。

上記のように、レントゲン撮影では、透過率の差を画像化しているが、その基本となるのが以下の関係式である（菊田，1992）。

$$I = I_0 \times \exp(-\mu \cdot t) \quad (1)$$

ここで、 I_0 および I は、それぞれ入射 X 線強度、透過 X 線強度である。 μ は、線吸収係数と呼ばれるパラメータで、測定対象の組成や X 線エネルギーに依存した物理量である。また、 t は X 線が透過する物体の厚みである。X 線画像計測では、式(1)をもとにして、物体の組成に応じた線

吸収係数と、その厚みによって決定される強度分布、あるいは I 像を I_0 像で除算することにより、規格化された透過率分布を求めることが可能である。これが、X線画像計測の基本となる。

X線イメージングを行う上で、必要不可欠なものがX線源（光源）であり、X線イメージングの特性を大きく左右する。一般的なX線発生装置（X線管）では、電子銃から放出された電子を金属ターゲットに衝突させることで、電子が制動を受け、いわゆる連続X線スペクトル（白色X線）が生成される。一方で、本稿で触れる放射光と呼ばれるX線源は、円形加速器内において、高エネルギー電子が偏向電磁石により磁場を受けて進行方向を曲げられたときに、それまでの進行方向に沿った方向に放射される電磁波である。電子がなんらかの制動を受けてX線を発生するという点ではラボ用X線発生装置と同じであるが、放射光X線とX線管光源の大きな違いは、単位面積あたりのX線ビーム強度である。放射光は、X線管に比べて $10^6 \sim 10^9$ 倍の輝度（明るさ）をもち、なおかつ放射方向に対して指向性が高いというのも大きな特徴である。また、上記のような偏向電磁石から得られる放射光のほかに、アンジュレータと呼ばれる挿入光源も標準的に利用されており、この場合さらに3桁以上高い高輝度のX線ビームを利用することが可能である。放射光X線実験施設では、X線ビームの取り出しポートからその放射方向に沿って、ビームラインと呼ばれる実験ステーション（光学ハッチおよび実験ハッチ）が構成され、そこで高輝度X線ビームを利用した実験を行うことが可能である。

本稿では、大型放射光施設 SPring-8 におけるX線イメージングの現状や応用利用について紹介したい。SPring-8は、世界に数ある放射光施設の中でも最大の電子エネルギー（8 GeV）を有しており、蓄積リングの周長は1,436 mである。稼働中のビームラインは、共用・専用ビームライン合わせて56本に及ぶ（2017年4月時点）。各ビームラインでは、それぞれ光源の特性に合わせた実験が行われており、そのうちの共用ビームライン（26本）では、年2回の利用実験課題の公募を実施し、課題が採択されれば誰でも利用することが可能である。SPring-8に関する詳細、およびユーザー利用実験に関する詳細は文献に記載した web ページを参照していただきたい（SPring-8 Home, SPring-8 User Information）。以下では、放射光X線画像計測に馴染みのない読者のために、放射光X線マイクロイメージング、および多くのユーザー実験で利用されているX線マイクロトモグラフィとその現状について紹介する。

2. 放射光 X線マイクロイメージング

放射光X線は、上記のように、従来のラボ用X線発生装置に比べて輝度の高いX線ビームが利用できるのが大きな特徴である。ここでは、SPring-8の偏向電磁石ビームラインであり、数多くのX線イメージング実験が行われているBL20B2を例に、放射光X線マイクロイメージングの現状について紹介する。

2.1 ビームラインについて

BL20B2は、SPring-8の中でも唯一の中尺の偏向電磁石ビームラインである（Goto, et al., 2001）。ビームラインレイアウトの概略図を図1に示す。ビームライン上流部に位置しているのが光学ハッチであり、ここでは偏向電磁石から発生した白色X線ビームを四象限スリットで成形し、分光器を用いて単色X線ビームを生成する。分光器は、SPring-8標準型の二結晶分光器であり、シリコンの単結晶を分光結晶として用いている。シリコン結晶では、ブラッグ反射を利用しており、Si(111), Si(311), Si(511)といった結晶方位を使い分けることにより、7keV~113keVまでのエネルギー領域をカバーすることができる。多くのユーザー実験では、Si(111)結晶を利用しており、光学ハッチの下流側に隣接している実験ハッチ1（光源から42 m）における単色X線ビームのフラックス密度（単位面積あたりのX線光子数として表したX線強度の指標）は、 10^9 (photons/sec/mm²)オーダーである。実験ハッチ1におけるX線ビームサイズは、おおよそ50 mm(H)×5 mm(V)であるが、多くの実験では横幅5 mm~25 mm程度になるようにTC Slit1でビームサイズを調整する。これには、撮像視野サイズにビームサイズを合わせるという目的のほかに、分光器結晶への不要な熱負荷を避けるという目的も含んでいる。なお、分光器結晶は間接水冷により常時冷却されている。また、中尺ビームラインと呼ばれる所以として、光源から200 m以上離れた場所（実験ハッチ2, 3）でもX線ビームを利用することが可能である。この場合、偏向電磁石光源から放射されたX線ビームは、特に水平方向において1.5 mrad程度の発散角を持っているので、最大横幅300 mmの単色X線ビームを利用することも可能である。なお、実験ハッチ2, 3にお

けるビーム縦幅は 30 mm 程度であり，縦横方向の X 線ビーム発散角の違いは，放射光偏向電磁石光源特有のものである。

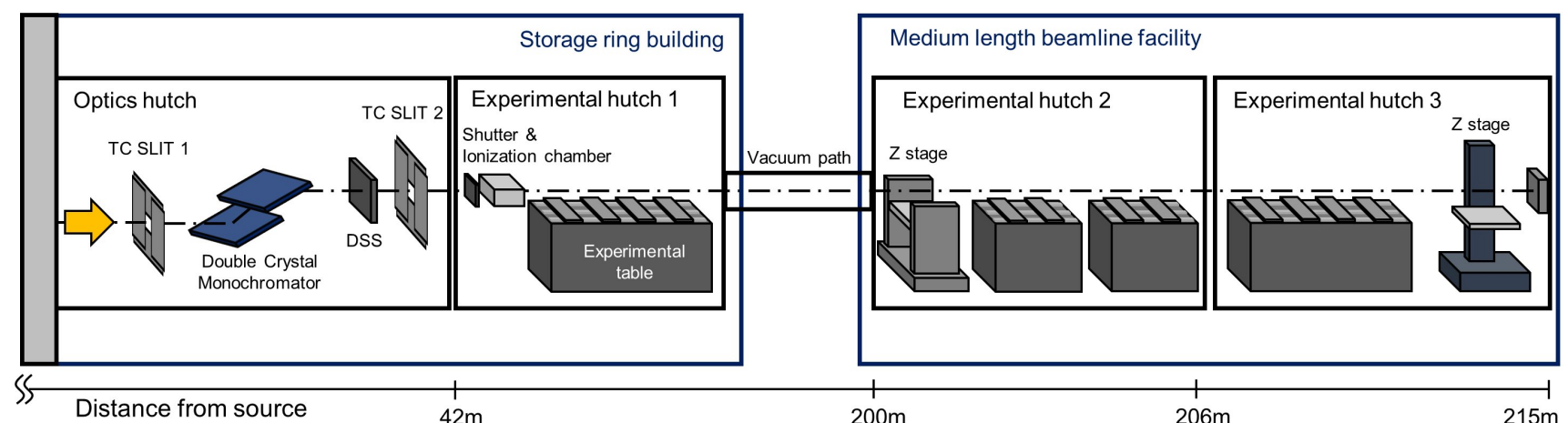


Fig. 1 Schematic drawing of bending magnet beamline BL20B2 in SPring-8

2・2 X 線画像検出器について

放射光 X 線では，分光器により特定のエネルギーを切り出した単色光でも高いフラックス密度が得られている。X 線マイクロイメージングを行う上で，「X 線画像を得る」ためには X 線用の画像検出器が必要となる。以下では，放射光 X 線マイクロイメージングで用いている画像検出器について簡単に紹介するとともに，高分解能イメージングとフラックス密度との関係についても言及する。

通常，放射光 X 線のような大強度の X 線ビームを検出する場合，間接型の画像検出器が用いられる (Uesugi, et al., 2011)。ここでの間接型とは，X 線ビームを直接 CCD あるいは CMOS 素子に入射させるのではなく，シンチレータにより X 線から可視光へ変換し，可視光像をデジタルカメラで検出する，いわゆる可視光変換型の画像検出器のことを指す。可視光変換型 X 線画像検出器の概要を図 2 に示す。デジタルカメラの撮像素子は，一般的には画素が 2 次元で配列されたものであり，この画素 (pixel と呼ぶ) という概念がデジタル画像の最小単位となる。シンチレータとカメラ撮像素子の間には，可視光光学系が構成されており，拡大光学系あるいは縮小光学系により X 線デジタル画像の実効画素サイズを決定する。可視光光学系の倍率を M ，カメラ撮像素子の画素サイズを P とすると，実効的な画素サイズは P/M となる。X 線画像計測では，この実効画素サイズが，得られる X 線画像の空間分解能および撮像視野に大きく影響する。現状，BL20B2 を含め SPring-8 のイメージングビームラインで利用されている X 線画像検出器の実効画素サイズは， $0.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ から $25 \mu\text{m}/\text{pixel}$ までと幅広い。可視光変換部および可視光光学系を適宜調整することにより，単一のデジタルカメラで対応することが可能である。ここで，高分解能画像検出器を用いた画像計測で重要となるのが，X 線ビームのフラックス密度である。X 線強度は単位面積あたりの X 線フォトン数で定義されているため，実効画素サイズが小さくなると，単位画素あたりに入射する X 線フォトン数が少なくなり，これに伴い画像形成に寄与する信号量も減少する。この点で，一般的に用いられている実験室系の X 線管は，放射光に比べてフラックス密度が低いいため，高分解能画像計測には向いていない。時間をかけて積算することである程度の信号量を得ることはできるが，長時間の計測に伴う試料のドリフトや変形による影響を考慮しなければならない。一方で，放射光 X 線は，試料と画像検出器間ではほぼ平行光とみなせるため，この点においても高分解能画像計測に向いているといえる。しかし，放射光 X 線といえども，サブミクロンの実効画素サイズでの測定を行うには，偏向電磁石光源のフラックス密度では不十分であり，その場合は，前述のようにアンジュレータ挿入光源を用いたビームラインで計測を行う必要がある。

有限数の画素で構成されるデジタルカメラでは，実効画素サイズが決まると，撮像視野の大きさも決定される。SPring-8 で利用されている浜松ホトニクス社製の科学計測用 CMOS カメラ ORCA Flash4.0 を例に出すと，素子の画素数は 2048 画素 \times 2048 画素であり， $0.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ の場合，視野サイズは約 1 mm 四方， $25 \mu\text{m}/\text{pixel}$ の場合，視野サイズは約 50 mm 四方となる。これは，空間分解能と撮像視野の大きさはトレードオフの関係にあることを意味しており，画素サイズを小さくすればそれだけ細かい構造を計測することができるが，撮像視野は限定的となる。撮像視野と試料サイズの関係は，次で述べる X 線マイクロトモグラフィ計測において重要となる。BL20B2 では，実験ハッチ 1 では画素サイズ $2.7 \mu\text{m}$ ，視野サイズ $5.5 \text{ mm(H)} \times 5.5 \text{ mm(V)}$ の検出器構成，光源

から 200 m 離れた実験ハッチ 2, 3 では画素サイズ 15 μm , 視野サイズ 30 mm(H) \times 30 mm(V)の検出器構成が比較的多く利用される. 一方で, 同じフラックス密度の X 線ビームで比較した場合, 実効画素サイズを大きく設定することにより, 空間分解能は低下するが, より短い露光時間で画像計測・解析に必要な信号量を得ることができる. 実際の例としては, BL20B2 の実験ハッチ 1 において, 画素サイズ 13 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ という条件では, 5 ミリ秒以下の露光時間でも画像計測が可能であり, 時分割・高速イメージングへ展開することも可能である.

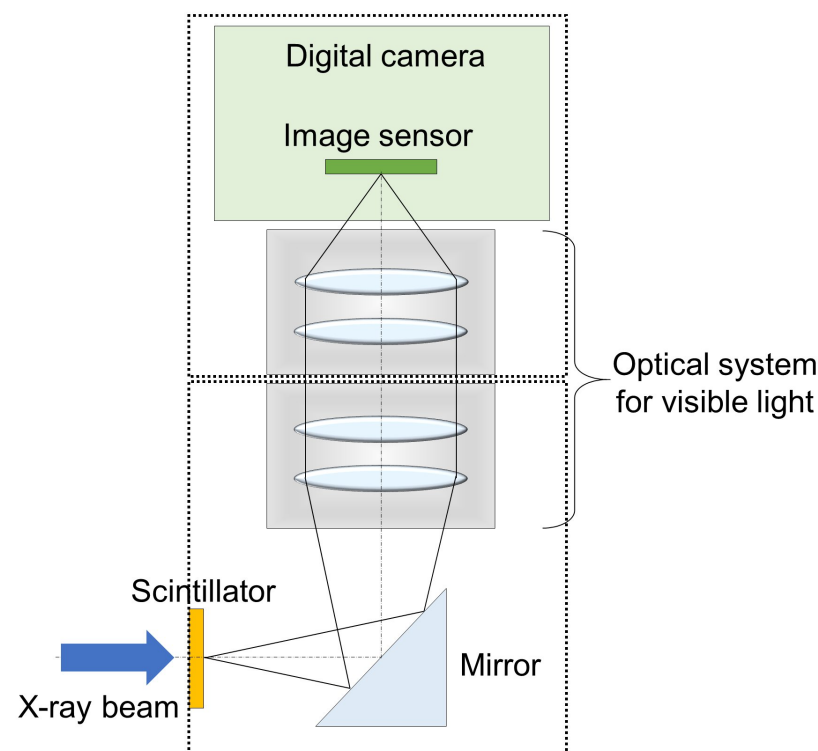


Fig. 2 Schematic drawing of a visible-light conversion type X-ray imaging detector

3. X線マイクロトモグラフィ

本稿の導入部分で, X 線画像計測の基本はレントゲンの原理と同じであるということを紹介した. しかし, レントゲンの場合, ある一方向から測定対象を投影したときの透過率強度分布である. このような透過投影像では, X 線ビームの投影方向に沿った構造情報は積算されてしまうことにより (試料の構造を線吸収係数の分布として定義すると, 式(1)において単位長さ Δt あたりの線吸収係数値の積算), 試料の 3 次元的な構造情報は失われてしまう. 測定対象の透過投影像から, その 3 次元構造情報 (線吸収係数値分布) を計算機によって再構築する方法が X 線 Computed Tomography(CT)である. X 線 CT についても, 病院などで標準的に利用されている計測技術であり, 人体の断面像あるいは 3 次元再構築した画像を見る機会もあるのではないかとと思われる. X 線光源に放射光を用いることにより, 一般的な X 線 CT 装置よりも高い空間分解能で試料の断層像, あるいは 3 次元画像を取得することが可能となる. 特にこの場合は, より高分解能な測定に対応した X 線 CT として, X 線マイクロトモグラフィ (マイクロ CT) と呼ばれる. また, 単色 X 線ビームを用いた放射光 X 線マイクロ CT では, 白色 X 線を利用した従来の X 線 CT 装置で見られるビームハードニングといった再構築画像におけるアーチファクトも無視することができる.

X 線 CT の再構成原理については, 本稿では省略するが, 一般的な X 線 CT 装置と同様に, 測定対象に対して異なる複数の方向から透過投影像を取得し, 計算機演算処理により断層像を再構築する (斎藤, 1993). 一般的な CT 装置では, X 線源と画像検出器が被検体のまわりを回転して透過投影像を取得するのに対して, 放射光 X 線マイクロ CT では, X 線光源と画像検出器は固定した状態で試料を回転させることにより, 異なる方向からの透過投影像を取得することが可能となる. BL20B2 における一般的な放射光 X 線マイクロ CT 装置の外観写真を図 3 に示す. 測定対象を設置する試料ステージは, 鉛直および水平方向の並進ステージ, X 線ビームに対する回転軸の傾きを調整するためのスイベルステージ 1, 画像検出器の画素配列に対して回転軸の傾きを調整するためのスイベルステージ 2, 試料を高い精度で回転させるための回転ステージによって構成される. 必要に応じて, 回転ステージ上に小型の並進ステージを設けることにより, 撮像視野内における試料の位置合わせを行うことが可能である. ここで, X 線マイクロ CT と撮像視野の関係について述べると, トモグラフィーの計算原理上, 透過投影像において, 回転軸と直交する方向の試料サイズは, すべて撮像視野内に収まっていることが望ましい. 試料サイズが撮像視

野からはみ出しているも、測定・画像再構成を行うことは可能であるが、再構築画像にアーチファクトが生じる要因となり、定量性も担保されない。つまり、前述の撮像視野と試料サイズの関係は、特に X 線マイクロ CT 計測において重要となり、必要な空間分解能、あるいは必要な撮像視野に応じて適切な計測条件を検討する必要がある。

なお、投影型の X 線マイクロ CT における到達可能な空間分解能は、X 線の波動光学的な性質により、およそ $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、より高い空間分解能で測定したい場合は、X 線顕微鏡と組み合わせた結像型の X 線マイクロ・ナノ CT を用いる必要がある (Takeuchi, et al., 2002)。結像型 X 線 CT については本稿では触れない。

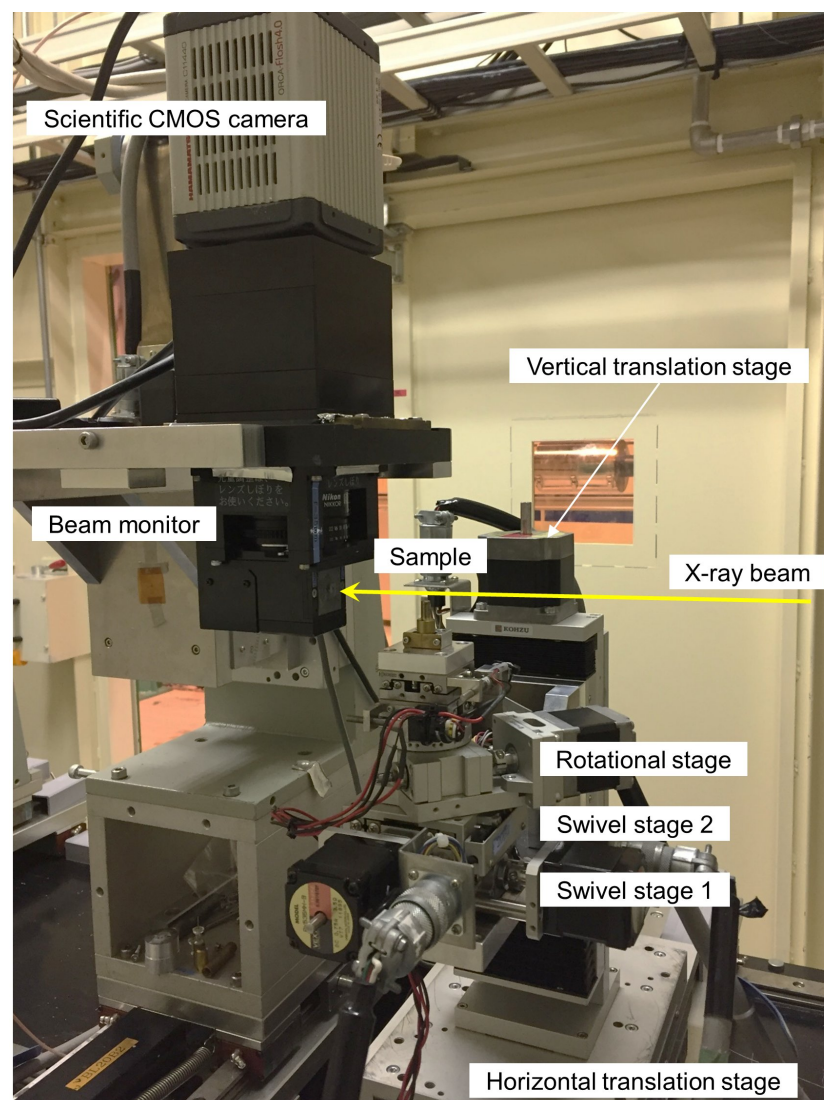


Fig. 3 X-ray microtomography system at experimental hutch 1 of BL20B2

BL20B2 の実験ハッチ 1 における X 線マイクロ CT 計測として、測定時間の観点から 2 つの計測条件を紹介する。まずパターン 1 として、画像検出器の画素サイズを $2.75\ \mu\text{m}$ に設定、投影像 1 枚あたりの露光時間を 200 msec に設定 (16bit の AD 分解能 = full-well:65535 counts を持つカメラにおいて、37000 counts 程度の I_0 強度@15keV)、 0.1 度間隔で 1800 枚の投影像を取得した場合、測定時間は 7 分程度となる。一方、パターン 2 では、画素サイズを同じく $2.7\ \mu\text{m}$ に設定、露光時間をパターン 1 の $1/10$ となる 20 msec に設定 (同カメラにおいて、3700 counts 程度の I_0 強度@15 keV)、 0.3 度間隔で 600 枚の透過投影像を取得した場合、測定時間は 20 秒程度となる。一般的には、パターン 1 のように、露光時間を長く設定することにより、カメラの full-well に対して信号をより多くため込んだ方が、ノイズの少ない画像を得ることができる。また、投影数についても、サンプリングの観点から再構成像の像質に影響を与える。しかしながら、動的現象を伴う試料や、経時変化が生じるような試料の場合、それらのモーションアーチファクトを無視するためには、変化が生じる前に CT 計測を終わらせる必要がある。この場合、パターン 2 の条件のように、露光時間を短く設定、あるいは投影数を少なく設定することにより、短時間のうちに計測を終えることが可能となる。これらの計測条件は、実際の試料の性質に応じて、どのような情報を得たいか、またそれに必要な空間分解能や時間分解能、あるいは撮像視野はどの程度かを検討し、適宜最適化していくことにより決定される。

BL20B2 における X 線マイクロ CT の測定例として、木材 (爪楊枝) の測定結果を紹介する。測定条件は上記で示した 2 パターンの条件である。パターン 1 による X 線マイクロ CT 像を図 4(a)、パターン 2 による X 線マイクロ CT 像を図 4(b)にそれぞれ示す。図は、爪楊枝の断面を示してお

り、木材の微細構造ネットワークを観察することができる。パターン2による計測結果では、統計的に優れたパターン1による計測結果に比べて、再構成値のばらつき（バックグラウンドの標準偏差値）が大きいことがわかる。このようなバックグラウンドのばらつきは、デジタル画像においてノイズとして認識され、試料像（シグナル部分）と対比することにより、画像のSN比として評価することができる。SN比に優れた画像の方が、容易に信号部分とノイズ部分を分離できるため、その後の解析においては有利であるが、ノイズの多い画像でも、フィルタリング等の画像処理技術により、見かけ上のSN比を向上させることは可能である。

X線マイクロCTでは、上記のようなX線の透過率検出をもとにした計測の他に、X線の波としての性質を利用した計測に展開することも可能である。基本的には、X線も可視光と同じ電磁波であり、本稿では触れなかったが、振幅（強度）のほかに、位相の概念を取り込んだ計測を行うことも可能である。

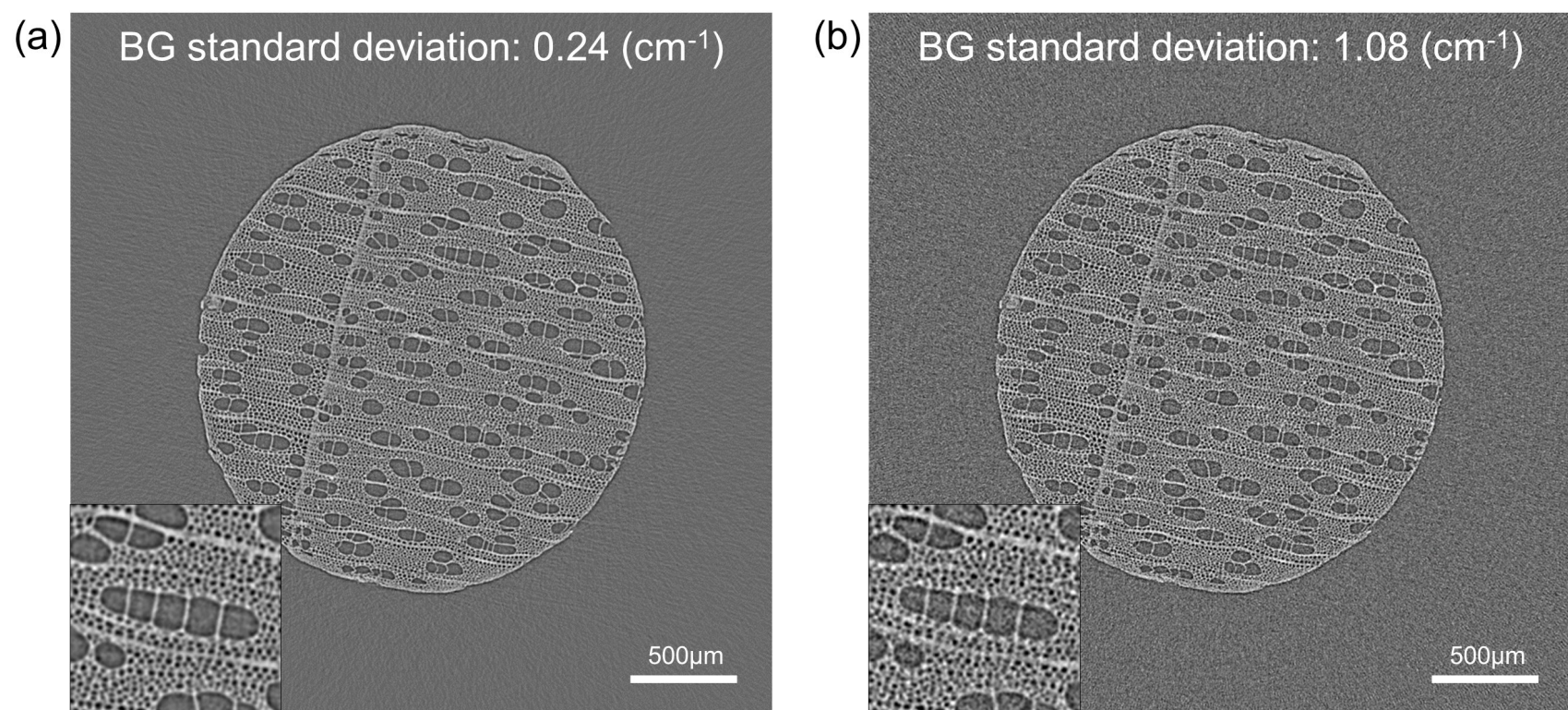


Fig. 4 X-ray microtomographic images of a toothpick. X-ray energy: 15 keV. Pixel size: 2.75 μm . (a) Exposure time: 200 msec, No. of projections: 1800. (b) Exposure time: 20 ms, No. of projections: 600. Inset shows magnified image

4. 放射光 X 線マイクロ CT の応用

BL20B2 における X 線マイクロ CT 計測は、生体試料から鉱物、化石試料に至るまで、幅広い研究分野、研究対象に対して応用されている。本稿の締めくくりとして、放射光 X 線マイクロ CT のユーザー利用実験への応用事例を紹介する。

まずは、固体高分子形燃料電池におけるガルバニ電池式酸素吸収体へのガス拡散層の酸素透過量変化の観察を行った事例について示す（是澤他，2011）。この測定は、ガルバニ電池式酸素吸収体の酸素吸収による、大気側酸素濃度と吸収体側の酸素濃度差を駆動力とした酸素拡散の様子を可視化を目的としたものである。ガス拡散層の酸素透過量変化と時系列の X 線マイクロ CT 像との関係を図 5 に示す。CT 像から、撥水处理部と未処理部の境界部分から空孔が形成されていることなどがわかる。また、酸素拡散パスの形成や空隙の増加といった X 線マイクロ CT 像による視覚的および定量的な情報により、ガス拡散層の酸素透過量の変化を議論することが可能となっている。

次に紹介するのは、着霜対策における霜層の微細構造可視化への応用事例である。霜層の微細構造については、表層部は光学顕微鏡観察を行うことができるが、内部の構造を外側から観察することは不可能である。関西大学の松本教授らは、着霜現象の基礎研究として、冷却面上に霜層を形成し、その 3 次元微細構造を、X 線マイクロ CT を用いて観察した（松本，2017）。実験では、微細溝加工を施した冷却面に着霜させたのちに、その霜層の微細構造を測定した。図 6 に着霜後 10 分における冷却面での着霜写真、冷却面から 100 μm の位置における霜層の断層像、および白枠内の霜層の 3 次元構造を示す。X 線マイクロ CT を用いることで、外観からだけでは知ることができない霜層内部の微細構造を非破壊で可視化し、霜発生のコアとなる水滴構造の存在確認や、結晶構造の違いから霜層構造の分類ができることなどが示されている。

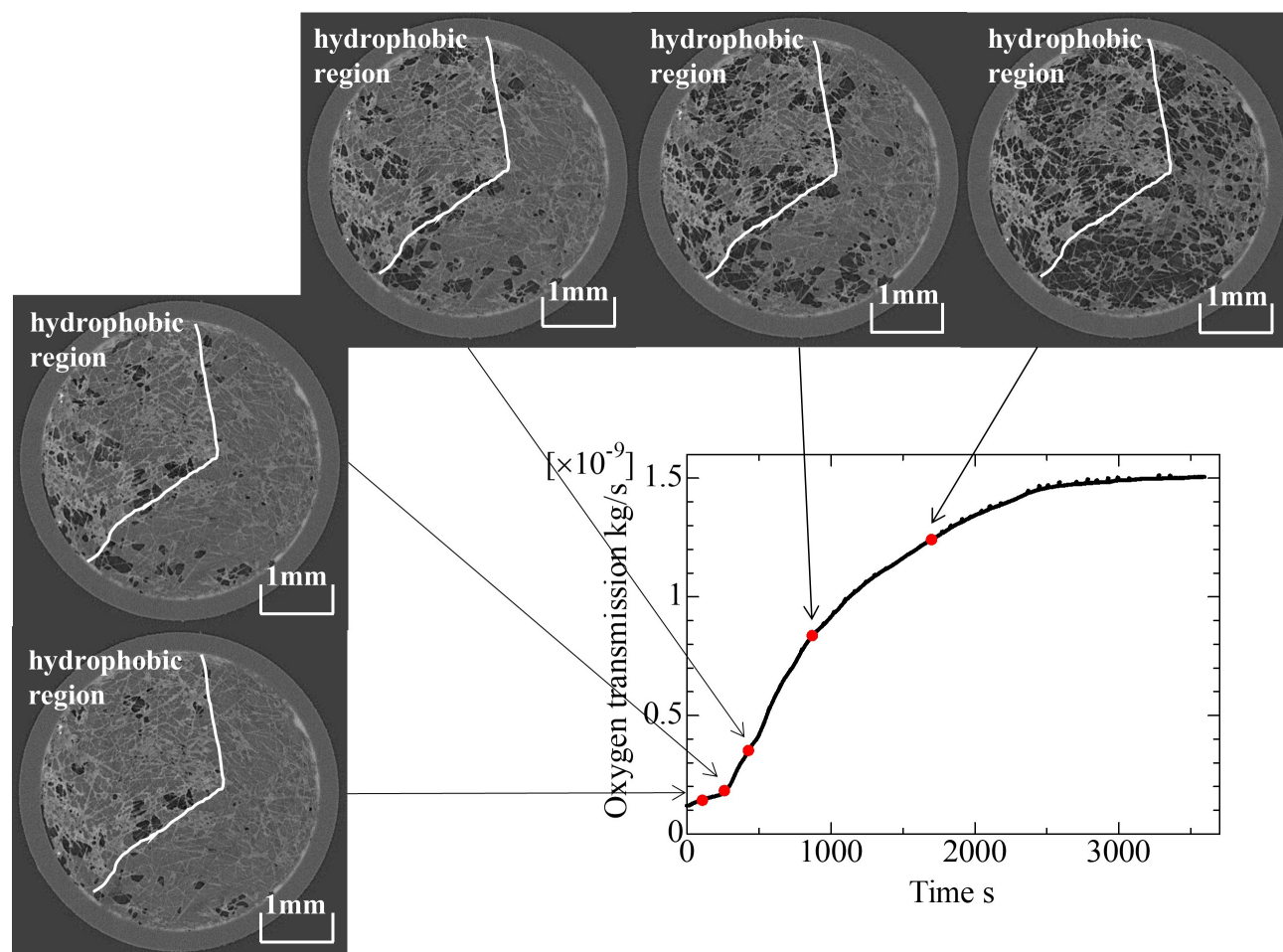


Fig. 5 Relation between oxygen transmission in gas diffusion layer and X-ray tomographic images

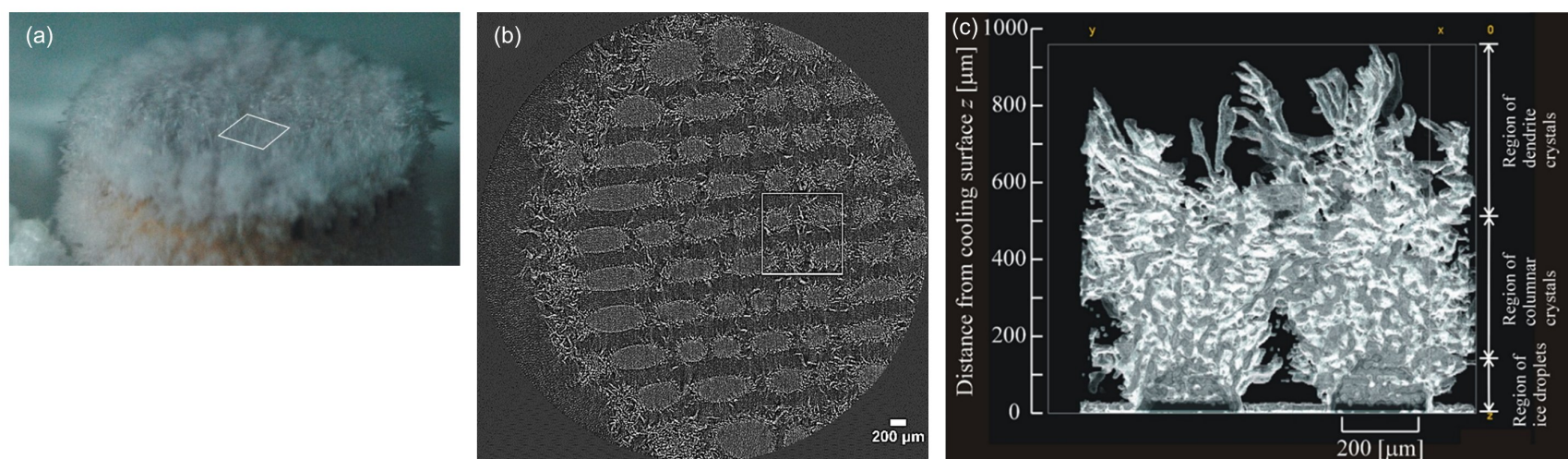


Fig. 6 (a) Photograph of frost formation on cooling surface. (b) X-ray tomographic image of frost layer. (c) Three-dimensional view of frost layer

5. おわりに

SPring-8における放射光 X 線マイクロイメージングおよびマイクロ CT について、簡素ではあるが現状と応用事例について解説した。本稿の読者は、熱工学をご専門にしている方々と推察するが、残念ながら X 線では、サーモグラフィカメラのように温度分布を直接測定することはできない。しかしながら、測定対象の温度変化によって生じる密度変化、あるいは構造変化を定量的に可視化することは可能である。また、測定条件にも依存するが、X 線マイクロ CT 計測における試料まわりの自由度は比較的高いため、試料に温度変化を与えたり、圧力を加えたりしながら X 線マイクロ CT 計測を行うことも可能である。

X 線画像計測技術は、日々進化を続けており、数年前では実施することが困難であった計測も、画像検出器や計測システム等の改良により実施できるようになったケースも増えてきている。本稿で紹介したような、放射光 X 線の特徴を活かした画像計測により、課題解決へつながるような研究が今後とも展開されていくことを期待する。

謝辞

ユーザー利用実験の実例を紹介するにあたり、快く資料をご提供いただいた、秋田県立大学の 大徳博士、関西大学の松本教授に感謝の意を表す。

文献

- (1) Goto, S., Takeshita, K., Suzuki, Y., Ohashi, H., Asano, Y., Kimura, H., Matsushita, T., Yagi, N., Isshiki, M., Yamazaki, H., Yoneda, Y., Umetani, K. and Ishikawa, T., Construction and commissioning of a 215-m-long beamline at SPring-8, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.467-468, Part.1 (2001), pp.682-685.
- (2) 菊田惺志, X線回折・散乱技術(上), 東京大学出版会 (1992), p.66.
- (3) 是澤亮, 大徳忠史, 宇高義郎, 上杉健太郎, むれ性分布を利用した固体高分子形燃料電池用ガス拡散層における液水分布の可視化と酸素拡散係数の同時計測, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.77, No.782 (2011), pp.2019-2027.
- (4) 松本亮介, 中性子ラジオグラフィを用いたフィンチューブ熱交換器への着霜の可視化 -放射線ラジオグラフィを用いた霜研究の新展開-, 冷凍, Vol. 92, No. 1080 (2017), pp.686-690.
- (5) 斎藤恒雄, 画像処理アルゴリズム, 近代科学社 (1993), p.103.
- (6) SPring-8 に関すること, SPring-8 Home (online), available from <<http://www.spring8.or.jp/ja/>>, (参照日 2018 年 1 月 18 日).
- (7) SPring-8 におけるユーザー実験に関すること, SPring-8 User Information (online), available from <<https://user.spring8.or.jp/>>, (参照日 2018 年 1 月 18 日).
- (8) Takeuchi, A., Uesugi, K., Takano, H. and Suzuki, Y., Submicrometer-resolution three-dimensional imaging with hard x-ray imaging microtomography, Review of Scientific Instruments, Vol.73, No.12 (2002), pp.4246-4249.
- (9) Uesugi, K., Hoshino, M. and Yagi, N., Comparison of lens- and fiber-coupled CCD detectors for X-ray computed tomography, Journal of Synchrotron Radiation, Vol.18, Part2 (2011), pp.217-223.