

時間分解能 0.5 ミリ秒 — 4次元 X線 CT で原理実証



矢代 航
Yashiro Wataru

1 はじめに

筆者らは最近、世界最高である 0.5 ms 時間分解能（空間分解能 10 μm 程度）で、試料を回転せずに 4D（3次元+時間）X線 CT を実現することに成功した¹⁾。この時空間領域を 4D 観察できる手法は他になく、学術研究から産業応用にわたる広い分野にわたって将来有望な技術と期待される。本稿では、どのように本技術が実現されたか、その原理や光学系の構成等について解説する。

2 要素技術

X線 CT では、多くの方向（通常は数 100 方向）から試料の投影像を撮影する。投影像から物理量の積分に対応する画像を求め、CT 再構成アルゴリズムによって試料内部の任意の断面像を取得する（試料内部を 3 次元的に可視化する）。

前人未踏の高い時間分解能を実現するには、十分に大強度の X 線がまずは必須であり、筆者らは第 3 世代シンクロトロン放射光施設である SPring-8 の偏向電磁石光源を用いた。この光源を用いると、水平方向約 50 mm \times 鉛直方向約 5 mm の、エネルギーバンド幅の広い X 線ビーム（白色放射光）が利用できる。この白色放射光により、空間分解能 10 μm 程度の場合、15 μs 程度で 1 枚の投影像が撮影できる。

多くの方向からの投影像を取得する方法の 1 つと

して、試料を高速で回転する方法（以下、「試料回転法」と呼ぶ）がある²⁻⁷⁾。しかしながら、例えば 1 ms の時間分解能を実現するのに、試料を 30000 rpm で回転する必要があるが、試料が遠心力で変形してしまったり、生きた生物への適用が難しかったり、といった問題があった。また、流動性のある試料や、ドリル等試料そのものが回転している場合への適用は原理的に不可能である。更には、試料まわりが重量物の場合にも、試料まわりごと回転することは困難である。そのため、試料回転法については、時間分解能 10 ms 前後までは既に応用フェーズに入っているが⁵⁻⁷⁾、時間分解能数 ms を超える 4DX 線 CT はこれまで世界的に誰も実現できなかった。

筆者らは、この問題を解決するため、放射光をマルチビーム化する技術を開発した^{1,8-12)}。病院にある CT スキャナの場合には、静止した人体のまわりを X 線源と X 線画像検出器が回転することで、多くの方向からの投影像を撮影している。しかしながら、放射光源のような大型装置を試料まわりに回転することは不可能であるため、X 線ビーム自身の伝播方向を変化させる必要がある。X 線の伝播方向を変化させる方法は、回折を利用するもの、屈折を利用するもの、全反射を利用するものがある。後二者については、X 線に対する物質の屈折率が主に寄与する。X 線に対する物質の複素屈折率は一般に $1 - \delta + i\beta$ で与えられる。複素屈折率の実部 $1 - \delta$ は、まさに屈折現象に対応し、虚部 β は X 線の吸収に

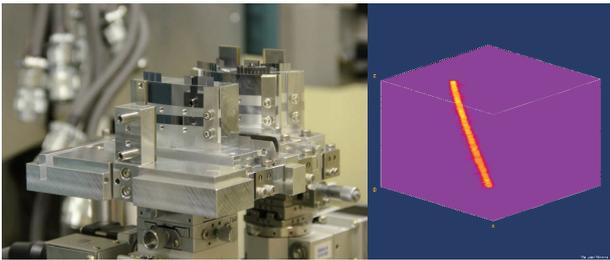
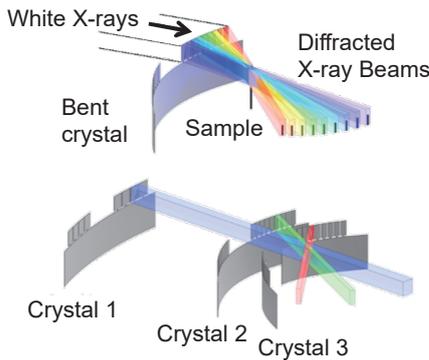


図1 (上) 放射光マルチビーム化法の概略図, (下左) 三段型マルチビーム光学素子の写真, 及び (下右) この光学素子で1 msの撮影時間で取得されたCT再構成像(試料: 直径50 μm タングステンワイヤー)⁸⁾

対応している。 δ は常に正の値を持つ(すなわち, $1-\delta$ は常に1より小さい)ことが知られており, そのため, 平坦な表面すれすれにX線を入射するといわゆる全反射が起こるが, $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 程度の非常に小さい値であるため, 全反射の臨界角はmradのオーダーである。また屈折率 $1-\delta$ はほぼ1であり, このことがX線の高い直進性, ひいてはX線CTが容易に実現できる所以であるが, 全反射を利用するにしても, 屈折を利用するにしても, X線の伝播方向はほとんど変化させることができない。

そのため筆者らは, 回折を利用することにした。図1上図にその原理を示す。この光学素子は, 単結晶の回折(Bragg反射)を利用したもので, 左側から横長の白色放射光を入射し, Bragg条件を満たしたビームが試料に照射されるようになっている。単結晶には, 厚さ100 μm 程度のSiが用いられている。Si単結晶の上部に長方形の板(以下では「ブレード」と呼ぶ)が並んでおり, 下部とは幅200 μm 程度の細いネックを介してつながっている¹²⁾。下部を双曲柱に沿って湾曲することで, 表面に垂直な格子面に対してBragg条件を満たしたX線(以下では「ビームレット」と呼ぶ)が試料に照射される仕組みである。入射X線はほとんど平面波であるため, プレー

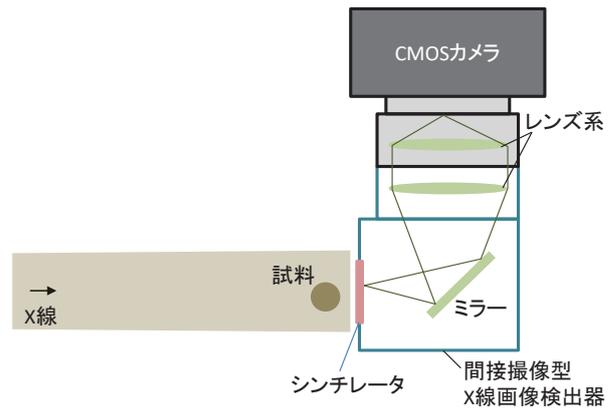


図2 放射光用間接撮像型X線画像検出器の例

ドに対する入射X線の入射角度によってビームレットのエネルギーが決まる。そのため, 各ブレードによって生成されるビームレットのエネルギーが異なることがこの光学系の欠点と当初は考えていたが, 最近のCT再構成技術の進歩によって, 各エネルギーに対応するCT再構成像も得られるようになってきている。

図1下左図は, このような湾曲Si単結晶光学素子を, 図1上図のように三段にタンデムに並べたマルチビーム光学素子の写真である。このマルチビーム光学素子によって, 1 msの撮影時間でCT再構成ができることも実証された(図1下右図)⁸⁾。

各ビームレットによって得られる投影像を同時に取得できるX線画像検出器も, 試料回転なし4DX線CTには必須になる。画素サイズ10 μm をターゲットとしたため, 直接撮像型(X線フォトンカウンティング型)のX線画像検出器では画素サイズ(通常50 μm 以上)が大きすぎた。そのため, X線をシンチレータにより可視光に変換した後に, 可視光用のレンズで拡大し, 可視光用の画像検出器で画像を取得する間接撮像型X線画像検出器を用いた。図2に放射光による高フレームレート撮影用の間接撮像型X線画像検出器の例を示す。放射光用の場合には, 可視光用の画像検出器の放射光直接照射によるダメージを避けるため, ミラーが挿入されている。高フレームレートのCMOSカメラのセンサー上にシンチレータの像を結像すれば, 高速X線イメージングが実現できる。1 msよりも高い時間分解能を実現するには, フレームレートが1 kHzよりも高い画像検出器が必要であるが, 高フレームレートかつ高感度のCMOSカメラは一般に高額であるため,

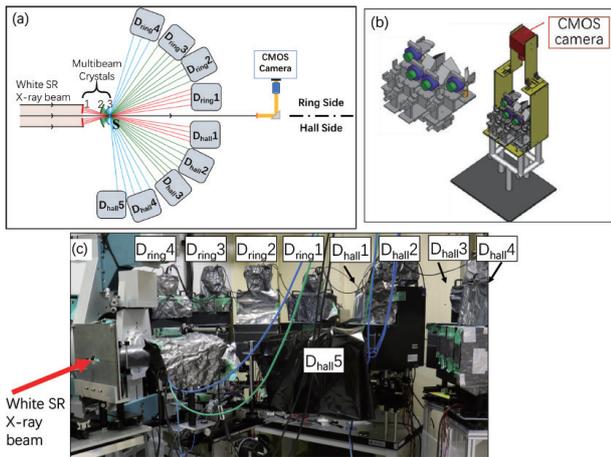


図3 マルチビーム法の光学系と、そのために開発したマルチビーム X 線画像検出器¹⁾

(a) 白色放射光マルチビーム化素子に対して8台のマルチビーム X 線画像検出器を配置した光学系の模式図(上面図)。(b)1台の高フレームレート CMOS カメラで4枚の投影像を同時に取得できるマルチビーム X 線画像検出器。(c) (a) の光学系を SPring-8 BL28B2 に配置した写真

1台の CMOS カメラで最大4つの投影像が取得できる間接撮像型 X 線画像検出器(「マルチビーム X 線画像検出器」と呼ぶ)を独自に開発した(図3(b))^{1,13)}。

3 マルチビーム光学系

図3(a)に放射光マルチビーム化技術に基づく4DX線CTの光学系(以下では「マルチビーム法の光学系」と呼ぶ)の上面図を示す。左から入射した横長の白色放射光がマルチビーム化されて、生成されたビームレットが試料を照射する。各ビームレットによる試料の投影像を、計8台のマルチビーム X 線画像検出器(図3(b))で同時に取得する配置になっている(図3(c)の写真)。これらのビームレットによる投影像とは別に、白色放射光をダイレクトに照射して得た投影像も CT 再構成に活用している。

4 CT 再構成

マルチビーム法の光学系で取得した投影像により CT 再構成を行うには、まず試料上の座標系と、画像検出器上の座標系との関係を求める必要がある。試料回転法ではその必要はなく、回転軸の位置と方向だけ特定できればよいが、マルチビーム法の

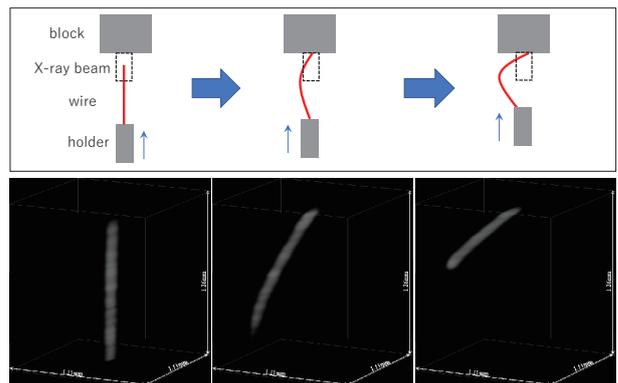


図4 マルチビーム法による時間分解能 0.5 ms の4DX線CTの原理実証¹⁾

試料は直径 50 μ m のタングステンワイヤー。(上) タングステンワイヤーを曲げている様子を模式的に示した図。(下) 4DCT 再構成の結果

場合には、実験的な校正が必要である。そのため、十分に細いワイヤーの先端を縦横高さ方向に動かして、各座標系の校正を行った。

更に、投影数が数10程度と、通常のCTの10分の1程度であるという問題もある。この問題は、いわゆる圧縮センシングに基づくCT再構成アルゴリズムで解決した¹⁴⁾¹⁹⁾。圧縮センシングは、原データに内在する疎性(スパース性)を利用して、非常に少ない測定データから高次元情報を復元するデータサイエンスの手法であり¹⁹⁾、今世紀に入って大きな発展を遂げた。例えば、写真画像を Wavelet 変換して、上から数%程度の成分のみを残して逆 Wavelet 変換しても、現画像と見た目がほとんど同じ画像が得られる¹⁸⁾。これはデータ圧縮にも利用されているが、圧縮センシングは、計測と解析をうまく工夫することで、計測(センシング)そのものを圧縮するという概念である。

圧縮センシングを利用すると、わずか数10の投影方向でもCT再構成が可能である。実際、図4下図は0.5 ms 時間分解能4DX線CTの再構成結果であり、原理実証レベルながら、正確に再構成できているのが分かる。

5 まとめと今後の展望

本稿では、放射光を用いたミリ秒オーダー時間分解能4DX線CTについて、マルチビーム法について紹介し、要素技術と光学系全体の構成について解説した。試料回転法については10 ms 前後の時間分

解能（空間分解能 $5\mu\text{m}$ ）が応用フェーズに入っているが、マルチビーム法については 0.5 ms 時間分解能の原理実証まで成功しているのが現状である。今後、更なる高時間分解能化に向けては、マルチビーム法が主流になっていくと考えられ、一期一会の非繰り返し現象を 4D 可視化できる強力なツールに発展するであろう。学術研究から産業応用に至る広い分野で様々な応用研究展開が期待されている。

筆者らの研究が契機となって、欧州でもマルチビーム法の開発に関する新たな国際共同プロジェクトが始まった²⁰⁾（筆者も参画）。欧州 X 線自由電子レーザーを用いれば、マルチビーム法で $1\mu\text{s}$ 時間分解能の実現も可能である。これまでの放射光実験は、必要な狭いエネルギーバンド幅の単色ビームを、撮像視野に合ったビームサイズに切り出して、良質なデータを取得する流れが一般的であったが、マルチビーム法は、放射光のエネルギーバンド幅を有効利用でき、かつ、大面積ビームを有効利用する方法にもなっている。今日の地球環境問題を考えると、本稿で紹介したマルチビーム法のように、放射光源から生じる X 線のエネルギーを可能な限り利用する計測法の開発が、今後のトレンドになってほしいと期待している。

謝辞

本研究は JST CREST (JPMJCR1765 及び JPMJCR2335)、住友ゴム工業(株)、科学研究費補助金 (15H03590, 21H04530) 等の支援により実施された。実験は SPring-8 BL28B2, Photon Factory BL14C で行われた。特に、筑波大学の工藤博幸教授、東京学芸大学の Wolfgang Voegeli 准教授、(公財)高輝度光科学研究センターの梶原堅太郎博士、住友

ゴム工業(株)の間下亮博士ら、東北大学の梁暁宇助教をはじめ、JST CREST 参画メンバーの方々には多大なご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) X. Liang, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **16**, 072001 (2023)
- 2) W. Yashiro, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **10**, 052501 (2017)
- 3) W. Yashiro, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 112503 (2017)
- 4) W. Yashiro, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **11**, 122501 (2018)
- 5) R. Mashita, *et al.*, *J. Synchrotron Rad.*, **28**, 322-326 (2021)
- 6) <https://youtu.be/4D2RLSmY0kg>
- 7) T. Kawanishi, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 108002 (2023)
- 8) W. Voegeli, *et al.*, *Optica*, **7**, 514-517 (2020)
- 9) W. Yashiro, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2380**, 012121 (2022)
- 10) W. Voegeli, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2380**, 012063 (2022)
- 11) W. Voegeli, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **16**, 072007 (2023)
- 12) W. Yashiro, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 092001 (2020)
- 13) T. Shirasawa, *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **13**, 077002 (2020)
- 14) M. Li, *et al.*, *Phys. Med. Biol.*, **47**, 2599 (2002)
- 15) D. L. Donoho, *IEEE Trans. Inf. Theory*, **52**, 1289-1306 (2006)
- 16) H. Kudo, *Proc. SPIE*, **11113**, Developments in X-Ray Tomography XII, 111130U (2019)
- 17) T. Wang, *et al.*, *Phys. Med. Biol.*, **64**, 145006 (2019)
- 18) 矢代航, 他, 光アライアンス, **30**, 23-30 (2019)
- 19) 竹田晃人, 日本物理学会誌, **69**, 522-530 (2014)
- 20) <https://tomoscopy.eu/>

(東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター)