

X線結像光学ニューズレター

No.26 2007年9月発行

高分解能放射光 X線マイクロトモグラフィ

財団法人高輝度光科学研究センター / SPring-8 上杉健太郎、竹内晃久、鈴木芳生

1. はじめに

X線トモグラフィ (Computed tomography, CT) は、X線の物質に対する高い透過力を利用することにより、試料の前処理を必要としないで非破壊に物体内部の3次元的な空間構造の観察を可能とする測定手法である。X線CTの空間分解能は、一般に医療用に用いられているもので数百 μm ~1mm程度であるが、これを高分解能化(数 μm もしくはそれ以下)したものを特にマイクロトモグラフィと呼ぶ。大型放射光施設 SPring-8 等の第三代放射光施設の出現により、高輝度で指向性の高い単色 X線の利用が可能になったことで、マイクロトモグラフィの性能は飛躍的な向上を遂げた。システムとしては、精密回転ステージ上に置いた試料に放射光からの準平行単色 X線を照射し、透過像をその直後においた画像検出器で撮影する(図1)という、極めてシンプルなものでありながら、現在では1 μm 程度の空間分解能が日常的に得られるようになった[1]。その利用分野は、医学利用の他にも、生物、有機材料、金属、半導体、セラミックス、岩石・鉱物、隕石、と様々な方面に広がりがつつある。

しかしながら、このシステムでの空間分解能は、X線画像検出器の限界や、X線の屈折や回折の効果により、大幅な向上は理論的に望めない段階に達している。一方で、放射光マイクロトモグラフィのユーザーからは、空間分解能1 μm よりも更に高い分解能への要求が多い。SPring-8では、この要求に応えるべく、空間分解能100nm若しくはそれを超える分解能を目標として、X線結像顕微鏡光学系を取り入れた新たなマイクロトモグラフィの開発を行っている。現時点ではまだ開発途上であるが、このシステムを用いた利用実験も幾つか行われており、現在、空間分解能約300nmを

達成している[2]。本稿では、このシステムを結像型マイクロトモグラフィと呼び、逆に、これに対する前述のシステムを投影型マイクロトモグラフィと呼んで区別する。

次節以降で、SPring-8の共同利用課題で使用できる投影型マイクロトモグラフィ並びに開発中の結像型マイクロトモグラフィについて簡単に紹介する。詳細は原論文を参照して頂きたい

2. 投影型マイクロトモグラフィ

図1に光学系を示す。本装置はアンジュレータビームライン BL20XU, BL47XU に設置されている(また、これよりも広視野・低分解能型のシステムが BL20B2 に設置されている)。利用できる X線のエネルギーは、ビームラインにより異なるが、大体6-100 keVの広い範囲から選ぶことができる。ビーム強度の時間的・空間的なムラやスペckルノイズを低減するために、拡散板を導入している。試料の回転には軸ブレ精度140nmの超精密回転ステージを使っている。画像検出器には薄膜蛍光面と可視光光学系からなる可視光変換ユニット付き冷却 CCDカメラを用いている。この検出器の空間分解能は、10keV前後のエネルギー領域で約1 μm [3]、ピクセル数は最大4000 \times 2624である。可視光光学系を交換することにより、視野は1mmから数十mmまで可変であるが、空間分解能1 μm の条件で測定する場合、試料の大きさは、直径1mm以下に制限される。通常のCT測定では、試料が180度回転する間に0.1度毎に1800枚の透過像が撮影される。この場合の測定時間は約30分である(この測定時間は主に CCDの読み出しデータ転送で制限されており、将来さらに高速化できる可能性はある)。

3. 結像型マイクロトモグラフィ

この装置はアンジュレータビームライン BL47XU において、測定の度に構築/解体される。光学系を図 2 に示す。大きく分けて、光源、コンデンサ照明系、試料、対物素子、画像検出器により構成される。利用できる X 線エネルギーは、6-12 keV である。

対物素子には、フレネルゾーンプレート (Fresnel zone plate, FZP) を用いる。素子の最外線幅は 100nm、材質はタンタルでパターンの厚さは $1\mu\text{m}$ である。試料の照明には、コンデンサプレート (condenser plate, CP) と呼ばれる、同心円状の等間隔回折格子を用いている。FZP と似た構造を持つ素子であるが、一定の回折格子ピッチを持っている点が FZP と異なる。これにより、試料にはコーン状に収束された X 線が照射され、擬似的なケラー照明となっている。コンデンサの開口数は、対物の半分となるよう設計されている。また、コンデンサの直前には投影型 CT の場合と同様にスペckルノイズを低減するためのビームディフューザーを設置している。試料の回転ステージ、画像検出器は投影型と同様の物を用いているが、可視光変換ユニット部分には高感度/低空間分解能のものを使用している。

試料の X 線像は、X 線光学系により画像検出器上に拡大投影される。画像検出器の実効ピクセルサイズは、使用するエネルギーにもよるが、大体 45-90 nm である。ここで、X 線光学系の倍率は 40-80 倍程度である。視野(CT 測定が可能な試料の大きさ)は、直径約 $100\mu\text{m}$ 以下である。CT の測定に要する時間は、30 分 (1800 投影)程度である。

上記の条件での X 線光学系の空間分解能は、実測値で 160nm であった。これは、照明系を含めた結像系の分解能の理論値に、倍率、検出器の解像力を考慮に入れて導かれた計算値と非常に一致を示している[2]。しかし、CT 撮影をした際の、3 次元の空間分解能の実測値は 300nm 以上であるものの、顕微鏡像の分解能 160nm には到達していない。X 線結像顕微鏡像の空間分解能に対する CT 像の空間分解能の低下は、試料の回転ステージの軸ぶれ精度が大きく影響していると考えられる。

3 次元電子顕微鏡(TEM トモグラフィ)では投影像毎に試料の移動などを補正することにより、ナノメートルオーダーでの 3 次元観察が可能となっている。結像型トモグラフィでも将来的には同様

の手法を利用することにより、X 線光学系の空間分解能を維持した CT 像を得ることが可能になるだろう。

また、現在問題となっているのは放射線損傷による試料の変形あるいは変質である。試料が無機材料だけで構成されていれば、あまり問題にはならないが、実際のユーザー利用実験では、毛髪・高分子材料なども測定対象となる。これら有機物は X 線照射により比較的容易に破壊されることがある。タンパク質結晶構造解析の実験のように、低温ガス吹きつけ装置を導入しなければならないかもしれない。

4. 利用実験例

利用実験の例として、結像型トモグラフィで得られたデータを一つだけ紹介する(データ提供は SRI 研究開発の岸本氏)。図 3(a)は結像 CT で得られたシリカ球配合ゴムの CT 像。シリカ球の直径は $1\mu\text{m}$ 程度で十分な吸収が得られないため、試料を焦点位置から少しずらした defocus 条件での屈折コントラストで撮影した。(b)は、CT 像を重ね合わせて作成した 3D 像。画像処理により、シリカのみ表示している。実際のシリカは球形だが、測定系の最適化が不十分(回転ステージの軸ブレが主要な要因)なため、不定形になってしまっている。しかし、シリカ球の位置情報は間違っていないと考えられるので、この情報を基に 3 軸不等楕円体近似を行い、(c)のようなモデルを作成した。立方体の 1 辺は $10\mu\text{m}$ 程度である。

このようなデータを基にイメージベースシミュレーションを行えば、新技術の開発につながることも可能かもしれない。

5. おわりに

著者らの感覚では、投影型トモグラフィ観察では「3 次元で見るだけ」という時代はすでに終わっている。少なくとも 3 次元情報から統計データを抽出し、何らかの解析を行うことは普通である。今後は、材料の変形や動物の呼吸時の変形などを追うような「4 次元観察」が主流になってくるに違いない。一方で結像型トモグラフィは依然として発展途上である。光学素子の分解能は 100nm では収まらず数 10nm にまで迫っているが、回転軸のブレや撮影シーケンスの最適化などが出来ておらず、撮影をルーチンとしてこなすにはもう少し時間がかかるであろう。

最近では、市販の X 線 CT 装置も普及し始め、「3

次元解析ソフト」と称するソフトウェアも販売されるようになった。なにより、X線CTで出来ることを多くの人が理解するようになったことで、CTとその他の手法がリンクするようになった。今後の発展が楽しみである。

- [1] K. Uesugi, Y. Suzuki, et al, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **467-468** (2001) 853.
- [2] K. Uesugi, A. Takeuchi, et al. *Proc. SPIE* **6318** (2006) 63181F.
- [3] H. Takano, Y. Suzuki, et al, *Proc. SPIE*, **4499** (2001) 126-133.

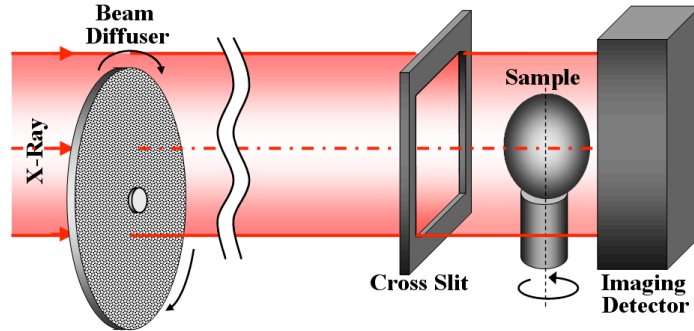


図1. 投影型X線マイクロモグラフィーのセットアップ (SPring-8, BL20XU / BL47XU)

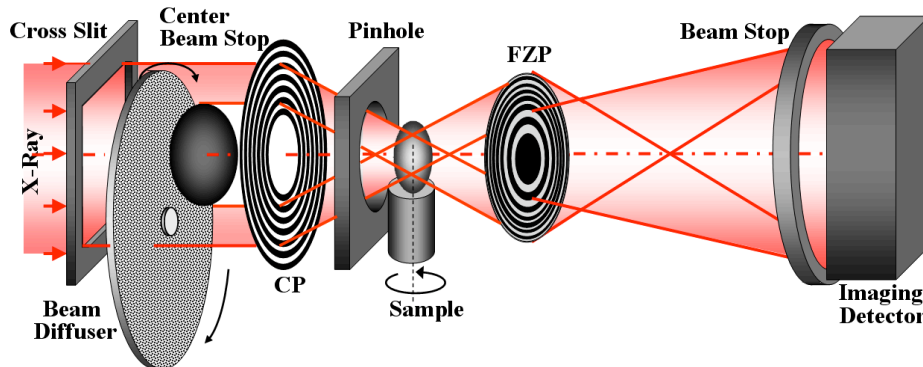


図2. 結像型X線マイクロモグラフィーのセットアップ (SPring-8, BL47XU)

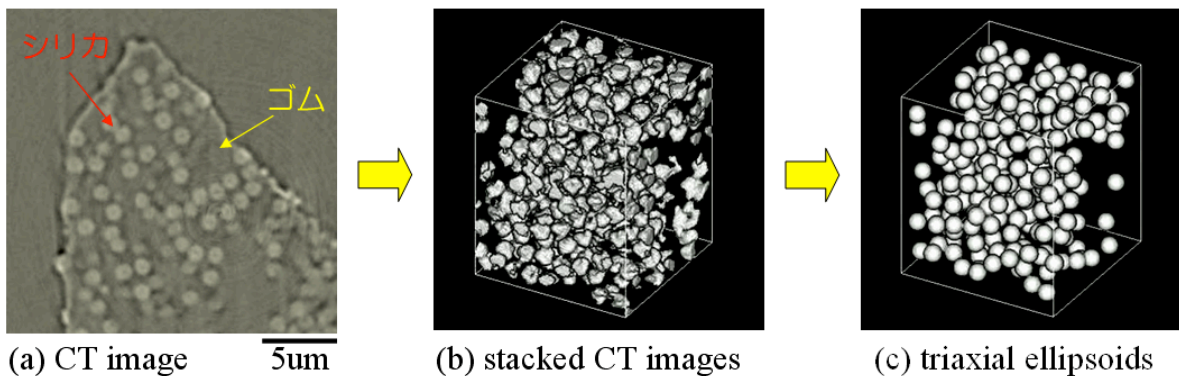


図3. (a) 結像型トモグラフィにより得られたシリカ配合ゴムのCT像。シリカ球の直径は $1\mu\text{m}$ 。(b) CT像を重ねて3次元像を作成。(c) CT像を基に3軸不等楕円体近似。



各種報告

【第9回X線結像光学シンポジウム】開催と講演募集のご案内

2007年9月27日

X線結像光学研究会 代表 筑波大学 青木 貞雄
シンポジウム世話人 中部大学 難波 義治

- 開催日時：2007年11月2日(金)午前10時30分～3日(土)午後5時まで
- 会場：中部大学 名古屋キャンパス（三浦会館）6階大ホールおよび講義室
（愛知県名古屋市中区千代田5-14-22/電話(052)251-8551）
- 会場案内：JR東海・中央線「鶴舞」駅 名大病院口(北口)下車すぐ。もしくは地下鉄鶴舞線鶴舞駅下車2番出口より徒歩4分
- 開催趣旨：昭和64年度文部省科学研究費補助金重点領域研究『X線結像光学』が採択され、それを契機に1990年1月29日と30日の両日、学習院大学で第1回X線結像光学シンポジウムが開催され、2005年12月13日・14日の両日、神戸市産業振興センターで第8回X線結像光学シンポジウムが開催されました。X線結像光学は理学と工学あるいは科学と技術の接点に位置し、宇宙科学、生体科学、物質・材料科学、放射光科学、プラズマ・核融合科学、医療技術、精密工学等の分野における研究の進展に大きな役割を果たしています。本シンポジウムでは、広いX線エネルギー領域における光学・計測技術とそれによる科学研究、およびX線結像光学を支える基盤技術に関する最近の研究成果の発表と将来の展望を議論したいと思います。奮ってご参加戴きますようお願い申し上げます。
- 招待講演リスト：(2007年9月26日現在(抜粋))

Recent activities of soft X-ray and EUV microscopy and EUV lithography UC Berkeley David T. Attwood	UC Berkeley David T. Attwood
Compact X-Ray Microscopy and Nano-CT for Biomedical Research Wonkwang University Kwon-Ha Yoon	Wonkwang University Kwon-Ha Yoon
大型ヘリカル装置における10-500Å波長領域EUV分光の為に1200及び2400本/mm機械切りとホログラフィック回折格子の比較研究 核融合科学研究所 森田繁	核融合科学研究所 森田繁
レーザー高速点火核融合プラズマ診断用単色X線サンプリングストリーク画像法の開発 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 田辺稔	大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 田辺稔
硬X線Sub-10nmビーム形成と顕微鏡システムの構築 大阪大学工学研究科 山内和人	大阪大学工学研究科 山内和人
軟X線多層膜光学と結像光学への展望 東北大学多元物質科学研究所 山本 正樹, 柳原美広	東北大学多元物質科学研究所 山本 正樹, 柳原美広
レーザープラズマ軟X線マイクロモグラフィー 筑波大学数理物質科学研究科 星野真人, 青木貞雄	筑波大学数理物質科学研究科 星野真人, 青木貞雄
結像型3次元蛍光X線マイクロモグラフィー 筑波大学数理物質科学研究科 渡辺紀生, 星野真人, 青木貞雄	筑波大学数理物質科学研究科 渡辺紀生, 星野真人, 青木貞雄
太古の宇宙の大爆発 ガンマ線バースト：観測の現状と将来 東京工業大学理工学研究科 河合誠之	東京工業大学理工学研究科 河合誠之
次期衛星を目指したX線CCD素子の開発の現状 大阪大学理学研究科 常深博	大阪大学理学研究科 常深博
X線Talbot干渉計による位相イメージング 東京大学新領域創成科学研究科 百生敦	東京大学新領域創成科学研究科 百生敦
X線フレネルゾーンプレートの開発 NTT-AT 竹中久貴	NTT-AT 竹中久貴
極端紫外線領域での研究開発－最近の成果－ 兵庫県立大学高度産業技術研究所 木下博雄	兵庫県立大学高度産業技術研究所 木下博雄
結像マイクロモグラフィー 高輝度光科学センター 鈴木芳生	高輝度光科学センター 鈴木芳生
SPring-8兵庫県IDビームラインにおけるマイクロイメージング 兵庫県立大学大学院物質理学研究科 高野秀和	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 高野秀和
すざく衛星の見た熱い宇宙 名古屋大学理学研究科 國枝秀世	名古屋大学理学研究科 國枝秀世
熱い宇宙から極限の宇宙へ：スーパーミラーX線望遠鏡の開発 名古屋大学理学研究科 小賀坂康志	名古屋大学理学研究科 小賀坂康志
ダークマター探査用X線顕微鏡の開発 名古屋大学エコトピア科学研究所 田原謙	名古屋大学エコトピア科学研究所 田原謙
補償光学を使ったX線望遠鏡の開発 立教大学理学部 北本俊二	立教大学理学部 北本俊二
全反射集光鏡による高エネルギーマイクロビーム 高輝度光科学センター 寺田靖子	高輝度光科学センター 寺田靖子
透過型X線反射多層膜顕微鏡TXM ³ 用精密多層膜鏡の開発 東北大学多元物質科学研究所 羽多野忠, 原田哲男, 山本正樹	東北大学多元物質科学研究所 羽多野忠, 原田哲男, 山本正樹

6. **講演発表募集**：ポスター発表を募集します。奮ってご応募下さい。
- 発表申込：著者・所属・講演題名・連絡先をご記入の上、cdamt@isc.chubu.ac.jp 宛もしくは下記の世話人(中部大学 難波義治)宛お送り下さい。
 - 発表申込締切：**2007年10月5日(金)**
 - 予稿集原稿：A4版2枚、上下の余白は25mm、左右の余白は20mm、講演題目は14ポイント太字、本文は10.5ポイントでお書き下さい。なお、印刷は白黒ですので、カラー図面は白黒に変換して下さい。原稿は、著者の方でpdf化してcdamt@isc.chubu.ac.jpまでお送り下さい。
 - 予稿集原稿締切：**2007年10月18日(木)**
7. **交流会**：11月2日夕刻、参加者相互の技術交流を図り、今後のX線結像光学分野の発展を期して懇親会を開催します。
8. **展示会**：X線結像光学に関連する企業の展示を2日間、会場で行ないます。
展示費用：50,000円/1ブース、申込みは下記の世話人(中部大学 難波義治)までご連絡下さい。
9. **参加費**：一般：5,000円、学生：2,000円
10. **振込先**：三菱東京UFJ銀行 高蔵寺支店(店番：757) 口座番号：普通預金口座 4691445
名称：X線結像光学シンポジウム 世話人 難波義治(略称：エックスセンケツゾウ)
11. **参加申込方法**：シンポジウムのホームページ上からお申し込み下さい。または、氏名・勤務先・所在地・電話番号・FAX番号・メールアドレスを明記の上、下記の世話人(中部大学 難波義治)宛お送り下さい。
12. **シンポジウムのホームページ**：最新の情報は随時ホームページ上に掲載します。
http://www-mech.chubu.ac.jp/Mech_Labs/namba/symposium2/index.htm
13. **幹事**：青木貞雄(筑波大物工)、伊藤敦(東海大工)、太田俊明(東大院理)、加藤義章(原研)、木下博雄(兵庫県立大)、國枝秀世(名大院理)、鈴木芳生(JASRI)、田原譲(名大エコトピア科研)、常深博(阪大院理)、難波義治(中部大工)、西村博明(阪大レーザー研)、森田繁(核融合研)、兵藤一行(高エネ・物構研)、柳原美広(東北大多元研)、山本正樹(東北大多元研)、渡辺紀生(筑波大物工)
14. **共催**：X線結像光学研究会(代表：筑波大学教授 青木貞雄)・中部大学先進計測研究センター(センター長：難波義治)・特別推進研究「レーザープラズマ軟X線光源を用いた超高分解能多元物質顕微鏡の開発」(研究代表者：東北大学教授 山本正樹)
15. **世話人**：名古屋大学 國枝 秀世 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町
TEL:052-789-2920, FAX:052-789-2919, e-mail: kunieda@u.phys.nagoya-u.ac.jp
中部大学 難波 義治 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200
TEL:0568-51-9412, FAX:0568-51-1194, e-mail: namba@isc.chubu.ac.jp



編集部より

ようやく秋の気配が感じられる今日この頃にですが、ニュースレター第26号をお送りします。今回は寄稿文1つとあとはX線結像光学シンポジウムの案内だけとなってしまいました。ホームページの体裁もなかなか整わず申し訳ありません。シンポジウムまでには少し充実させたいと考えております。(YT)

X線結像光学ニュースレター
No.26 (2007年9月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 筑波大学物理工学系 青木貞雄)
編集部 名古屋大学エコトピア科学研究所 田原 譲
(協力研究室：大学院理学研究科物理学教室U研)
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
TEL/FAX : 052-789-5490
E-mail: tawara@u.phys.nagoya-u.ac.jp