

X線結像光学ニューズレター

No.33 2011年4月発行

放射光 STM による新たなナノスケール観察： 元素分析と原子移動

大阪大学大学院工学研究科 齋藤彰

今日、原子レベルの構造評価法はその重要性を増す一方である。しかしごく限られた環境や系を除き、化学分析で原子分解能をもつ一般的な手法は「無い」と言わざるを得ない。この点、すでに原子分解能で実空間情報が得られ、汎用性も高い STM への期待は大きい。しかし、半導体をベースとするナノ科学および技術に大きく貢献してきた STM も、特に元素分析を考えると、もとより観察対象となる「電子準位の浅さ」ゆえ、元素分析を苦手とする原理的困難がある。他方、強力な微量分析手段である放射光を用いた場合、空間分解能は現在数十 nm に達し（主に近年のトレンド・XPEEM による）、コヒーレント回折顕微鏡など有力な手法も出てきているが、分解能 1 nm 以下に踏み込むにはブレークスルーが必要である。

原子分解能の元素分析は広範囲で切望されているだけに、さまざまな試みがなされており、過去に成功例がいくつか報告されている。たとえば TEM-EELS の場合[1]、カーボンナノチューブ内の単一原子分析で複数の成功を収めており（一方、試料環境の制限は否めない）、AFM による元素識別・原子操作[2]も顕著な成功例である（一方、原理的に検出対象が最表面原子-探針間の原子間力であり、内殻に依拠する通常の分光や、STM のような電子状態とは情報が異なる）。STM での成功例は、非弾性トンネル分光による有機分子の識別と反応制御である（振動準位の利用）[3]。そこでやはり、試料・環境の制限や、得られる物理量の違いを考えると、

やはり元素固有の明瞭な「内殻」に基づく一般的な分光的手法、つまり広範かつ標準的な「X線による分光」はきわめて重要であり、手法開発の意義は深い。

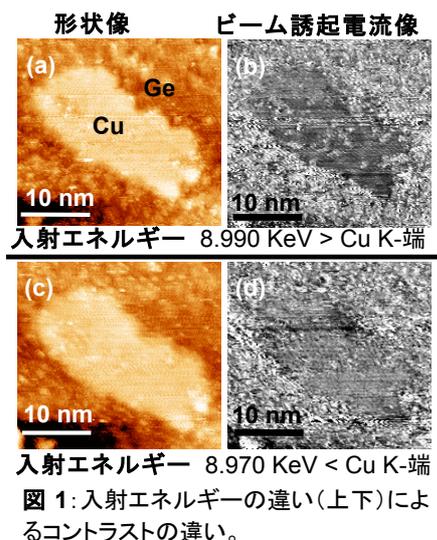
そこで筆者らは STM に内殻情報を付与することを目指し、放射光 STM の開発を 2000 年から行ってきた。具体的には特定波長の単色・高輝度 X 線を STM 観察点に入射し、観察原子の内殻を励起し、トンネル電流変化から表面の組成・電子状態分析を原子分解能で実現する試みである。さらに分析のみならず、高輝度 X 線による励起作用を STM 探針の局所刺激と組み合わせ、局所的な原子レベル反応制御に応用することも目的である。

ただし重要なのは、STM 探針で放出電子を集めるのではない、という点である（それでは広範囲からの放出電子のために空間分解能を失う）。本手法の要諦は、内殻励起に続くフェルミ準位近傍の状態変化を、（空間分解能の肝である）「トンネル電流の変調」として捉えることにある。高輝度 X 線による内殻励起と STM を組み合わせた例は、文献だけでもわれわれ以外に国内、欧（EU、スイス）、米、台湾にも存在する。しかし手法は筆者らと異なり、全て STM 探針を光電子・2 次電子コレクタに用いている。これら電子電流により、入射 X 線エネルギーに応じたスペクトルは得られるが、上記の理由で空間分解能には限界がある。最近国内で分解能 14nm の報告もあるが[4]、電子放出に有利な 20 nm 厚の試料に依っている（この点、表面感性の問題が残る）。

こうした原理的困難は国外でも同様である。

一方、筆者らは単原子層で分解能 1 nm を得ているが、高分解能を得るには「低い励起効率、短い励起寿命」を克服しつつ、光電子や熱ドリフト等の大きな擾乱を防ぐ必要がある。このため高輝度の硬 X 線（リング光源の最高輝度をもつ SPring-8 の 27m アンジュレータ BL19LXU）を K-B 鏡で 2 次元集光しつつ、一方、余計な励起を極力減らして S/N 比を得るために、入射ビームを軸合わせ可能なぎりぎりのサイズ（ $\phi 10 \mu\text{m}$ ）に絞り、チョッパーによるロックイン計測系を用いている。高精度の正確かつ高速な軸合わせには、STM ステージ全体の駆動機構のみならず、モニタ系自体にも工夫が要る [5, 6]。本手法は原理的に、波長可変の X 線で元素の選択励起が可能のため多くの系に敷衍でき、従来と異なるナノスケール実空間での化学情報が得られる（現在、半導体-金属界面、半導体ヘテロ界面という異なる系で元素識別データを得ている [5-9]）。加えて反応制御への応用も考えられる。以下、装置の詳細は文献に譲り、主に具体的な結果を中心に紹介する。

1) 元素識別： 本手法では、通常の STM 形状像（定電流を保つよう基板に対する探針の高さをフィードバック制御し、探針を走査して得る）と同時に、上記の工夫されたシステムを用いて内殻励起に起因するトンネル電流変化を記録する（ビーム誘起電流像と呼ぶ。以下、両者を左（形状像）と右に並べる）。図 1 は全て Ge(111) 清浄面上の単原子層 Cu ナノドメインであり、上下は Cu-K 吸収端上下での違いを示す。左側の形状像に入射エネルギー依存性はないが、右側の (b) と (d) ではコントラストに差異が見られる（吸収端下の (d) でも若干コントラストが見えるのは、恐らく L 殻励起効果である）。かつ、Cu 島上で選択的に電流が減少する（像が暗い）ことから、コントラストの原因は光電子の集積でなく表面電子状態の変化と考えられる。特記すべきは、図 1 を含む複数の希薄吸着系（他に Si(111) 面上の Ge ナノアイランド：Ge は約 0.3 原子層）で、元素識別を示すナノスケール実空間像が得られることである。



5 年前には左右 1 組の像取得に約 30 分かかり、かつ高輝度光照射下での安定測定は困難を極め、データ取得効率はマシンタイム 4 日間で数枚であった。しかし探針（絶縁皮膜・FIB 等による加工 [7]）・入射光・信号系に改良を加え、30 分は現在 8 分に短縮されている。この効果は時間比以上に大きく、画像取得効率は約 2 桁向上し、当初は不可能だった「探針・試料とも安定下」かつ「同一場所」で「5~8 組」程度の連続測定が可能になった。その結果、物理的パラメータに応じた元素コントラストの依存性など、系統立てたデータ取得が可能になりつつある。図 2, 3 は光子密度依存性の一例であり、元素コントラスト（電流）の線形性が見て取れる（図 3）。ここからコントラスト原理としてキャリヤトラップやチャージアップによる「局所的電位変化」は否定され（なぜならトンネル電流は電位に対して指数関数を描くため）、当初の目的「局所電子状態密度」の可能性が支持でき、当初は定性的考察の域を出なかった元素コントラスト原理について理解が深まりつつある。さらに安定化の効果は分解能向上にも寄与し、分解能 1 nm を得られた（図 2）。この値は近年のトレンド XPEEM をはじめとして他の放射光 STM の結果を大きく凌駕する。

こうした性能向上により「従来の形状像で見えない構造が、元素コントラストで初めて観察される」ケースも多く得られるようになってきた。図

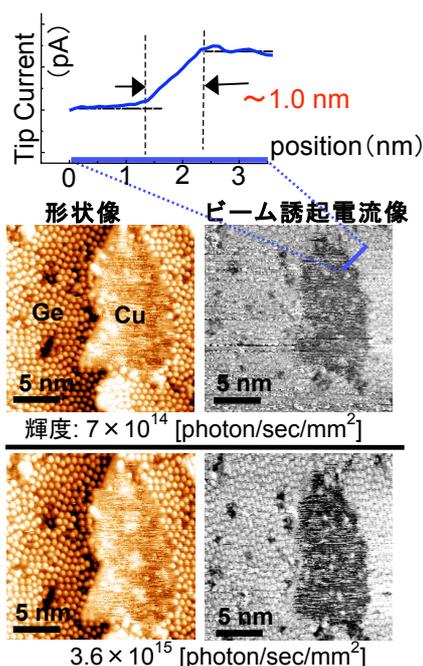
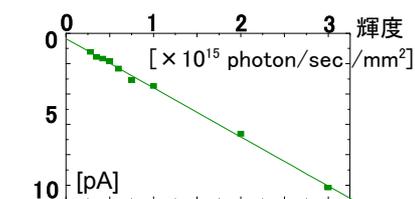


図2 : 元素コントラストの輝度依存性と、空間分解能。



Cu-Ge間の電流差 (元素間コントラスト)
図3 : 元素間コントラストの輝度依存性

4 (a) では同一テラス上に Ge と Cu ドメイン両者が存在するが、表面が荒く境界は殆ど判別できない。しかし右図 (b) では鮮明に判別できる。また下図では、形状像 (c) に見える島の上 (テラス 1 段下) に実は Cu ドメインがあることが (d) で判り、さらにその内部の微細構造まで判別できる。このように通常の STM 像で判別困難な組成の違いが鮮明なコントラストで明示される例が増えており、本手法が実用的に機能することが再現性ととも確認されつつある [8]。さらに、擾乱による不安定さで測定困難だった X 線照射下の走査トンネル分光 (STS) 測定も最近、可能になってきた。これにより、より直接的な電子準位の情報が得られることが期待される。

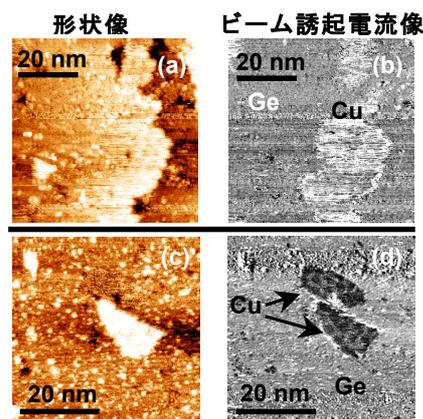


図4 : 形状像 (左) で不明だった元素コントラストが得られる例。上下は試料が異なる。上: $V_s = 3 \text{ V}$, 下: $V_s = -2 \text{ V}$ 。

2) 原子移動 : 化学分析のみならず、その研究過程において、筆者らは入射光子密度の増加にともなう表面原子の移動を見出し (図 5) [9]、その条件について調べてきた。その結果、X 線照射のみで原子移動が生じることがわかった。さらに、その移動が原子の脱離でなく拡散であること、かつ STM 像を用いてその原子拡散の軌跡が直接、画像として描けること (図 5)、が分かった。移動の過程は熱効果が主体であり、熱量計算から見積もられた局所的な表面温度上昇を考慮した結果、原子移動レートは妥当であるが、通常の (X 線照射によらない) 昇温過程による原子移動とは挙動が異なること (移動の局所性、異方性など) がわかっている。

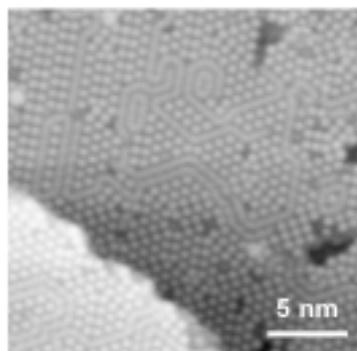


図5: Ge (111) 清浄面で観察された X 線照射による原子移動の軌跡 (図中の連続した線状の構造)。

クーロン爆発による構造破壊の可能性はつとに知られているが、遥かに小さなピーク輝度でも（ただし蓄積リング光源で現在得られる最高輝度をK-B鏡による2次元集光後）、硬X線領域ですでにこうした現象が見える事は、多くの示唆を含む。例えば微小域や表面・低次元系など希薄系の構造解析において高輝度X線は強力な武器であるが、連続照射測定は物質や使用波長によっては早々に困難が生じる可能性がある。しかし逆に、応用の可能性も秘めている（ナノビームを用いた選択励起によるナノ加工など）。さらに直近の現実応用として、XFELを代表とする新世代の高輝度光源の開始にあたり、ミラーや分光器など光学素子の損傷について、初期過程の研究手段として本手法は役立つであろう。照射損傷は現在、重要な課題であり、半年前に開催されたXRM（2010年8月シカゴ）[10]でも半数以上の登壇者がこの問題に触れていたことは記憶に新しい。こうした原子レベルの直接観察は放射光施設のその場観察STMならではの成果である。

本システムでは高輝度X線と表面原子の相互作用について、「高空間分解」「その場観察」という他にない情報が得られるため、今後さらに独自の長所を生かした様々な手段への展開・応用が可能であり、実際に試みてゆく予定である。本研究は、理化学研究所播磨研究所の石川哲也所長・田中義人博士・香村芳樹博士、物質材料研究機構の青野正和WPIセンター長、大阪大学大学院工学研究科の桑原裕司教授

のグループ、分子研の高木康多助教との共同研究によるものである。また本研究は、JST さきがけプロジェクト、科研費「若手研究A」、理化学研究所「連携研究」の支援の下、遂行された。

参考文献

- [1] K. Suenaga et al., *Science* 290 (2000) 2280.
- [2] Y. Sugimoto, S. Morita et al., *Nature* 446 (2007) 64.
- [3] S. Katano, M. Kawai et al., *Science* 316 (2007) 1883.
- [4] T. Okuda, T. Eguchi, Y. Hasegawa, T. Kinoshita et al., *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 105503.
- [5] A. Saito et al., *J. Synchrotron Rad.* 13 (2006) 216.
- [6] A. Saito et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 45, 3B (2006) 1913.
- [7] A. Saito et al., *Surf. Sci.* 601 (2007) 5294 ; *Surf. Interface Anal.* 40 (2008) 1033.
- [8] 齋藤彰 他, “表面物性工学ハンドブック第2版” (丸善, 2007) 27.1 節 pp. 961-965.
- [9] A. Saito et al., *J. Nanosc. Nanotechnol.* 11 (2011) 2873.
- [10] 青木貞雄, 本誌 No. 32 (2010) 1.

山本正樹先生の研究の歩み

東北大学多元物質科学研究所 柳原美廣

本レターをご覧になる皆様は既にご存知かと思いますが、山本正樹東北大学名誉教授が昨年12月15日に、癌による病氣療養中のところ亡くなられました。享年63歳でした。昨年3月に定年で退職され、

名誉教授になられたばかりでした。誠に残念でなりません。ここで改めて山本先生のご経歴や業績を振り返り、共に故人を偲ぶよすがにしたいと思います。山本先生は、昭和22年に長野県にお生まれにな

りました。昭和44年3月学習院大学理学部を卒業後、昭和46年3月学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻修士課程を修了し、昭和49年3月学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻博士課程を修了され、同年10月に理学博士を取得されました。昭和49年4月より昭和50年7月まで学習院大学理学部助手として研究を続けられた後、同年8月より昭和54年3月まで英国ヨーク大学理学部のリサーチフェローとして研究されました。同年4月より昭和56年8月まで再び学習院大学理学部助手として研究を続けられた後、同年9月に東北大学科学計測研究所助手に着任されました。平成3年1月に同研究所助教授に昇任され、同附属光学超薄膜研究施設を担当されました。平成10年4月に同研究所教授に昇任され、同時期に改組により発足した附属超顕微計測光学研究センターのセンター長に就任されました。平成13年4月には、組織改組によって多元物質科学研究所教授となり、平成19年3月まで同附属超顕微計測光学研究センター長を務められました。その後、センターの改組により平成19年4月に附属先端計測開発センター軟X線顕微計測研究部担当となり、平成22年3月に定年により退職され、名誉教授になられました。約29年間にわたる東北大学在籍中は、工学研究科応用物理学専攻の協力講座として、学生を熱心にご指導されることで多くの優れた人材を育てられました。



学外活動としては、日本光学会の文献抄録委員（昭和45年～昭和50年）、幹事（平成3年度～平成4年度）、応用物理学会における会誌編集委員（平成8年度～平成10年度）、評議員（平成18年～）、東北支部幹事（平成4年～）のほか、平成16年から17年には東北支部長を歴任されました。また、国際学術誌Optical ReviewのEditorial Board（平成10年～）やX線多層膜の国際会議Physics of X-ray Multilayer Structuresの常任国際組織委員日本委員（平成12年～）として国際的にも大いに活躍されました。さらに財団法人科学計測振興会の理事として計測法開発研究の振興に貢献されるとともに、全国規模の偏光計測研究会を組織して軌道に乗せるなど、長年携わった計測法開発研究の推進に大きく貢献されたことは特筆に値します。

続いて、山本先生のご研究を振り返ってみたいと思います。山本先生は、応用光学、とりわけ偏光解析の分野において世界的に独創的、先駆的な研究を推進され、高精度偏光解析法の開発と薄膜成長過程への応用を研究されました。また、その蓄積を軟X線多層膜素子の開発に生かし、当時普及しつつあった放射光と、ちょうど開発の始まったレーザー生成プラズマ軟X線への実用化を目指し、多層膜に基づいた軟X線光工学の要素技術を開発されました。それによって軟X線を利用した精密偏光解析法を確立し、また、実用的な軟X線顕微鏡を開発されました。以下では、研究の業績を大きく3つの項目、すなわち、精密偏光解析法の基礎と応用、高機能軟X線多層膜の開発と偏光解析への応用、広視野高解像度軟X線顕微鏡開発、に分けてご紹介します。

1. 精密偏光解析法の基礎と応用に関する研究

東北大学科学計測研究所助手に着任されると、多入射角偏光解析装置用の入射角－出射角連動装置を作製されました。偏光解析法では入射角の測定に高い精度が要求されるため全長が2.5 mの大型装置です。使用する機械構成要素を高精度化するとともに、偏光解析法で大きな誤差要因となる波長板の不

完全性をreturn-path配置で生成した完全円偏光で精密計測し、従来の計測誤差を1/100にできることを見出しました。その後、開発した装置を用いてナノメートル膜厚の薄膜の膜厚と膜質を定量的にその場偏光解析し、島状膜から連続膜への初期形成過程を明らかにしました。これら一連の研究を原動力として軟X線多層膜の精密作製法の開発を目指されました。その場偏光解析装置は後に自動化され、ピコメートルの膜厚感度を有する成膜モニターとして実用化されました。

また、従来法では計測が困難であった融点近傍の雪結晶表面の計測に偏光解析法を導入されました。低温グリース仕様にした装置を北海道大学低温研の低温室に持ち込み、防寒具を纏い、故黒田登志雄先生、古川義純先生と3人で手動測定されたと楽しそうにお話されていました。これらの研究で雪結晶表面の擬似液体層の存在と微視的構造変化を明らかにし、雪結晶の結晶成長をはじめとする物理現象の解明への途を拓かれました。この功績によって、結晶成長学会賞を受賞されました。

2. 高機能軟X線多層膜の開発と偏光解析への応用に関する研究

軟X線も光であるという考えに基づいて光学薄膜理論を軟X線の波長に適用し、軟X線多層膜素子開発の研究を進められました。多層膜反射鏡の設計において、高反射率を得るための膜材料の選択基準および最適膜厚構造の決定法を新規に提案され、軟X線多層膜光学素子の世界的発展の原動力となりました。「layer by layer法」による複素反射率面上の渦巻き曲線は皆さんもよくご存じのことと思います。

また、軟X線多層膜鏡を擬ブリュースター角で設計して反射型偏光子を作製し、さらに擬ブリュースター角付近で基板のない自立多層膜を透過型移相子として利用する軟X線偏光解析法の研究に進まれたことは、山本先生にとってごく自然なことでした。この功績によって、平成6年に応用物理学会賞論文賞、平成7年に科学計測振興会賞を受賞されま

した。一方で、実験室軟X線源としてのレーザー生成プラズマに早くから注目されており、それを光源とする軟X線反射率計、汎用軟X線実験装置、軟X線顕微鏡などの実用軟X線装置を熱心に開発されたことも特記に値します。

3. 広視野高解像度軟X線顕微鏡開発に関する研究

多層膜ミラーを用いた結像型軟X線顕微鏡の開発は、山本先生の研究の集大成となりました。この顕微鏡の成果については、本レターの多元研の研究紹介で述べていますので、そちらをご覧ください。顕微鏡の開発には、要素技術として、実験室用軟X線光源、超平滑ミラー基板、精密多層膜ミラー作製法、反射波面評価、組み上げ調整等、多様な技術開発が必要でした。この中で、ミラー基板の開発においては研究所附属の光器械工場を積極的に活用されました。それは、基板から開発してこそ独創的な研究が可能という山本先生の強い信念に基づいたものでした。また、多層膜ミラーの作製では、場所ごとに入射角の異なる曲面鏡で波長マッチングをとるために、シャッターの開閉速度をコンピュータ制御して膜厚分布を制御する成膜法を開発されました。その技術を用いて、照明系と結像系で合計4枚の曲面鏡で構成される透過型軟X線顕微鏡で、鏡面全面において反射波長を13.4 nmに完全に一致させることに成功しました。それによって明るい実験室型軟X線顕微鏡を実現し、文科省科研費特別推進研究においてAの評価を得られました。

このように、山本先生は応用光学の分野において素晴らしい成果を挙げられましたが、ふだんは極めて温厚で、近付きやすく、また、酒をこよなく愛し、多くの学生に慕われました。そのような方を早々に失ったのは、返す返すも残念でなりません。ここで、山本先生の生前のお姿を偲びつつ、追悼の辞とさせていただきます。

最後に、本稿を草するに当たり、山本先生ご自身がお書きになったご経歴と、羽多野忠、津留俊英両氏の原稿を参考にさせて頂きましたことに、改めてお礼申し上げます。

軟X線顕微鏡とその基盤技術の開発

東北大学多元物質科学研究所 江島丈雄, 羽多野忠, 津留俊英, 豊田光紀, 柳原美廣

東北大学多元研では、軟X線を自由に操るため、多層膜素子を基盤とした軟X線光学技術の開発を行っており、現在は高分解能軟X線顕微鏡の開発を研究目標としている。顕微鏡の開発には、要素技術として、光源、超平滑基板、精密多層膜作製法、波面評価、新規対物鏡系等、多様な技術開発が必要である。本稿では、我々が開発した多層膜ミラーによる結像型軟X線顕微鏡と、その一層の高分解能化推進のための多層膜ミラーの波面補正と干渉計測技術開発の現状について紹介する。なお、これらの研究には、故山本正樹名誉教授が深く関わっている。

1. 広視野・高分解能軟X線顕微鏡の開発と生体試料への応用

顕微鏡の空間分解能 δ は、対物レンズの開口数 NA と観察波長 λ を用いて

$$\delta = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

と表される。従って、多層膜ミラーを用いた結像型軟X線顕微鏡では、例えば $\lambda = 13 \text{ nm}$, $NA = 0.25$ とすると、 $\delta = 32 \text{ nm}$ となり、可視光を用いる光学顕微鏡より1桁高い空間分解能が得られる。また、軽元素の透過率の違いによるコントラストが得られるので、生体試料の観察に有望である。その上、広視野観察が可能なので、小は細胞小器官から、大は生体組織に至るまで階層を越える撮像ツールとして期待できる。さらに、パルス幅 10 nsec のレーザーで得られるレーザー生成プラズマ (LPP) を光源としているので、ブラウン運動から要請される 1 msec より十分短い撮像が可能であり、生きた生体試料の観察を可能にする。このように、結像型軟X線顕微鏡は今までにない機

能を持つ顕微鏡として期待される。

我々が開発し、Transmission X-ray Multilayer Mirror Microscope (TXM³) と名付けた顕微鏡は、図1に示すように、LPP光源、照明光学系、可視光遮断フィルタ、Schwarzschild対物ミラー(S0)、撮像用CCDカメラから成っている¹⁾。ここで、S0は凹面と凸面ミラーからなる2面系であり、その表面は照明光学系とともに、入射角に応じて膜厚周期を精密制御する成膜法でMo/Si多層膜がコートされている²⁾。中心波長は13.4 nmである。試料位置調整のために、落射照明用の可視光源、可視/軟X線切り替えミラー、可視用CCDカメラが併設され、S0を軟X線と可視光で共有している。装置全体は光学除振台の上に設置し、軟X線光学系はすべて真空槽内に設置されている。

まず、TXM³の光学的性能を評価するために、透過型電子顕微鏡用のマイクログリッドを標準試料として撮影した。それから見積もられた空間分解能は140 nmであった。可視干渉計測から波面収差を求めて空間分解能を推定した値は107 nmとなり、両者はおよそ一致した。一方、視野はCCDの撮像面積によって制限され、その大きさは250 × 250 μm^2 であった。

TXM³を用いて撮影した厚さ500 nmのマウスの大脳皮質を図2に示す¹⁾。励起レーザー30パルス(3秒)の露光条件で撮像した。得られた像には、大脳の内側から伸びた軸索が細胞体を通して樹状突起を伸ばし、複数の細胞体から伸びた樹状突起が複雑に絡み合っている様子が明瞭に写っている。また、細胞体内部にも核や核小体などの微細構造が明瞭に写っていた。同定した大脳皮質構造を図中に示した。光学顕微鏡用に染色した同じ部位の組織を、ほぼ同じ倍率の光学顕微鏡を用

いて撮影した像と比較したところ、可視像よりもコントラストが強く、樹状突起の部分が明瞭に写っていることが分かった。以上から、開発した軟X線顕微鏡は、光学顕微鏡より空間分解能が高く、他の軟X線顕微鏡よりはるかに広い視野を持ち、短時間の露光で生体試料を撮像できることを実証した。

2. 軟X線多層膜ミラーの波面補正技術と干渉計測技術の開発

前述の軟X線顕微鏡で回折限界の分解能による広視野観察を実現するには、反射波面位相を精密に制御することが不可欠である。少なくとも2枚のミラーで構成する対物ミラーの1枚の多層膜には、マレシャル条件から1 nmを切る形状精度が要求される。我々は確実にこの波面精度を得るために、多層膜ミラーの表面多層膜を周期毎にミリング除去して、0.1 nm精度で波面補正する物理光学的補正法³⁾を考案し、イオンミリング法を用いて最大径100 mmの多層膜全面を一括で補正できる波面補正装置を開発した^{4, 5)}。補正原理に従うと、Mo/Si多層膜最表面1周期7 nmのミリングで基板の形状を0.1 nm凹にしたことに相当する効果が得られる。近年、多元研附属光器械工場の協力で1 nm程度の形状精度の球面基板研磨技術を開発した。軟X線多層膜ミラーで満たすべき0.1 nm波面精度の実現には1周期単位でミリングすれば良く、最大でも10周期で所望の波面精度が実現できる。

多層膜ミリングによる反射位相変化を実測するため、ヤングの干渉計を応用した軟X線干渉計測を行った。2つのスリットを通る光路に相対的に位相のずれが生じると、干渉縞に横ずれが生じる。ダブルスリットと多層膜ミラーを近接させて配置したダブルスリットを用い、多層膜の反射位相の変化を干渉縞の変位として観測できる構成である。図3(a)に反射型ヤング干渉計の概念図を示す。1つのMo/Si多層膜平面ミラー上にミリング領域と非ミリング領域を作製し、両者を含むよ

うにダブルスリットを設けて試料とした。位相変化は、非ミリング領域同士の干渉縞を参照し、ミリング領域と非ミリング領域による干渉縞のずれ量で計測できる。縞の飛びを防ぐため、ミリング深さがなだらかに変化する領域を設けた(図3(b))。ダブルスリットは、フォトレジストの軟X線反射率が十分に低いことを利用し、フォトレジストを塗布した部分ミリング多層膜に幅30 μm で間隔80 μm のスリットパターンをパターンニングした。ミリングした多層膜は周期長7.40 nmの40周期Mo/Si多層膜で、入射角 5° における反射ピーク波長は14.15 nmである。部分ミリング量は10周期74 nmで、膜厚変化量のみを考えると干渉縞10本分のずれ量に相当するが、波面補正原理に従うと縞1本にも満たない計算となる。物構研Photon Factory BL-12Aで実測した波長14.15 nmの干渉縞を図3(c)に示す。左側が非ミリング領域同士の干渉縞で、右側がミリング領域-非ミリング領域の干渉縞である。中央部のなだらかな傾斜領域に相当する部分で両者の縞は接続されており、縞のずれは1本分もないことが明らかであり、多層膜の表面1周期毎のミリングでサブnmの波面補正が軟X線実波長で可能なことが示された⁶⁾。

[参考文献]

- 1) T. Ejima, F. Ishida, H. Murata, M. Toyoda, T. Harada, T. Tsuru, T. Hatano, M. Yanagihara, M. Yamamoto, and H. Mizutani: *Opt. Express* **18** (2010) 7203.
- 2) T. Hatano, H. Umetsu, and M. Yamamoto: *Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, JSPE Publication Series No. 3* (JSPE, Tokyo, 1999) 292.
- 3) M. Yamamoto: *Nucl. Instrum. Methods* **A467-468** (2001) 1282.
- 4) T. Tsuru, A. Tosaka, Y. Sakai, and M. Yamamoto: *J. Phys: Conf. Ser.* **186** (2009) 012077.
- 5) T. Tsuru, Y. Sakai, T. Hatano, and M. Yamamoto: *AIP Conf. Proc.* **1234** (2010) 772.
- 6) T. Tsuru, T. Hatano, M. Toyoda, T. Ejima, M. Yanagihara, and M. Yamamoto: *Kogaku* **39** (2010) 219 [in Japanese].

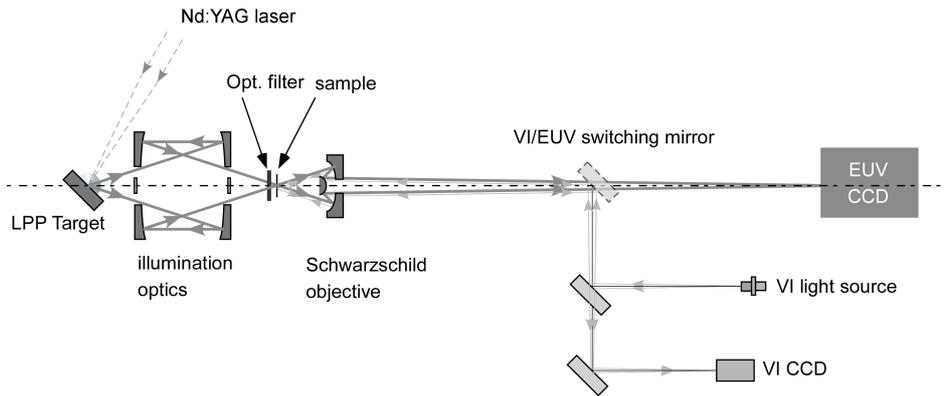


図1 TXM³の光学系の配置.

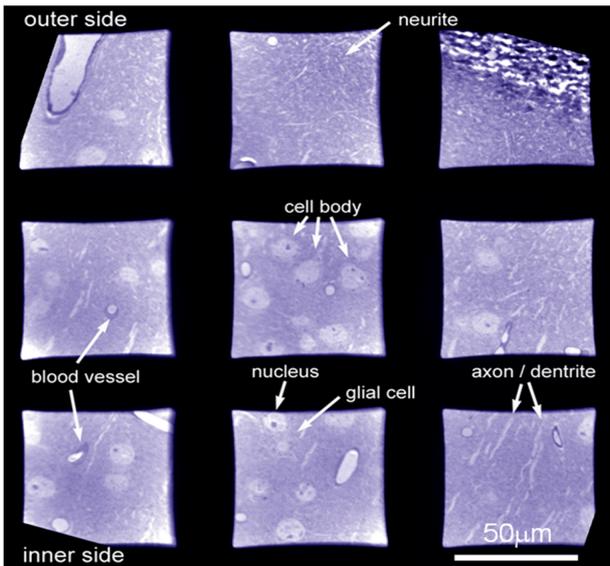


図2 TXM³で撮影したマウスの大脳皮質の軟X線透過像.

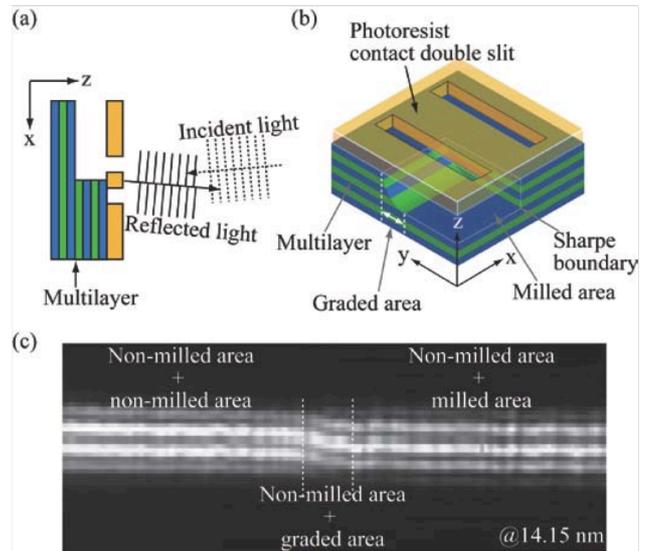


図3 (a) フォトレジスト密着ダブルスリットによるヤングの干渉計の概念図. (b) ミリング領域となだらかなミリング傾斜領域がある多層膜上にダブルスリットパターンをフォトレジストに形成した試料の模式図. (c) 計測した波長14.15 nmの軟X線によるヤングの干渉縞.



X-RAY
IMAGING OPTICS



編集部より

【お知らせ】

『X線結像光学シンポジウムは11月4日、5日、仙台で開催予定ですが、震災の影響もあり、開催の可否等につきましては後日、メーリングリストおよびHPでお知らせ致します』

X線結像光学ニューズレター
No.33 (2011年4月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 筑波大学 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