

X線結像光学ニューズレター

No. 36 2012年10月発行

放射光蛍光 X 線 CT による生体イメージング

山形大学大学院工学研究科

湯浅哲也

蛍光 X 線 CT (Fluorescent X-ray CT: FXCT) は、高い定量性を有する高感度な物理分析法である蛍光 X 線分析技術と、ある物理量の空間的な分布像を得るための画像情報処理技術とを組み合わせたハイブリッド技術である。FXCT の特色として、高感度、高空間分解能、高コントラスト分解能、高い定量性、非放射性造影剤による撮像、機能情報と形態情報の同時取得、が挙げられる。本研究グループでは、これらの特色を生かし、生体内の極微量な標識物質を描出するための高空間分解能イメージング技術としての FXCT の可能性を追求してきた[1-12]。

厚みのある試料内における特定元素の空間分布を知るためには、試料から薄膜切片を作製し、薄膜切片に垂直に入射した細く絞ったビームを、切片に沿ってラスタ走査することで実現できる。しかし、試料は、物理的に破壊され、薄膜切片も作製する際の手技により歪むことを余儀なくされる。厚みのある試料内に分布する標識元素を非破壊・低侵襲的に描画するためには、CT 技術の援用が不可欠である。

まず、通常の X 線 CT について概観する。X 線 CT では、さまざまな方向から投影を取得する。このとき、各データ点における計測値は、Beer の法則 $I_t = I_0 \exp(-\int \mu dl)$ により記述される。 I_t は透過強度、 I_0 は入射強度、 μ は線吸収係数分布であり、指数関数内は X 線の通過するパスに沿った μ の線積分である。ここで、投影から吸収係数分布を再構成するために必要な量は、決して計測される透過強度で

はなく、Beer の法則の両辺の対数を取って得られる、吸収分布 μ の線積分であることに注意する。すなわち、CT 計測とは、着目する物理量の線積分をさまざまな方向から系統的に収集する計測法である。

さて、FXCT に話を戻す。図 1 のような、細く絞ったペンシル状の単色 X 線が被射体に入射し、被射体内にある標識物質を励起する状況を考えよう。入射 X 線上の励起された元素は、脱励起の際に固有のエネルギーの蛍光 X 線を、入射 X 線上の各点での元素濃度に比例する強度で等方向に放射する。したがって、この蛍光 X 線を収集できれば、入射 X 線に沿った線分 PS 上の元素濃度に関する線積分を取得できる。これは、エネルギー弁別可能で大きな検出面を持つ検出器を被射体外に配置することで実現されよう。この際、検出器をどこに配置するべきかという問題が残る。ここで、放射光の偏光特性を積極的に活用する[2]。入射ビームに対して偏光面内 90 度方向へコンプトン散乱される X 線光子は存在しないという物理的な事実、すなわち 90 度方向ではコンプトン散乱が 0 となる事が知られている。われわれの扱うエネルギー領域 (数 10 keV 領域) での X 線と物質の相互作用においては、コンプトン散乱が最も支配的である。したがって、蛍光 X 線を高 S/N で収集するためには、検出器は偏光面内に入射ビームに対して 90 度の位置に設置することが、最適となる[2]。入射 X 線を、通常の CT と同様に並進・回転走査することで、CT 再構成に必要な線積分としての投影データを取得することが可能である。このデータ収集方

式は、CT 装置開発の黎明期に採用された第一世代方式の走査プロトコルに相当する。

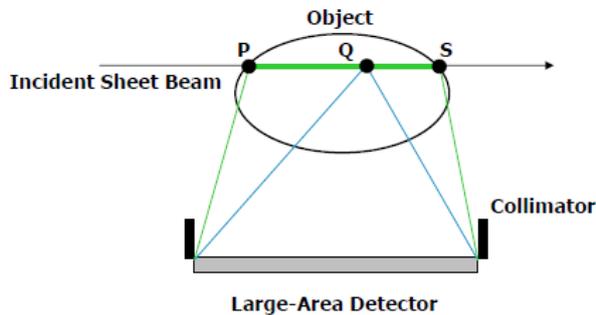


図1：ペンシルビームによるデータ取得

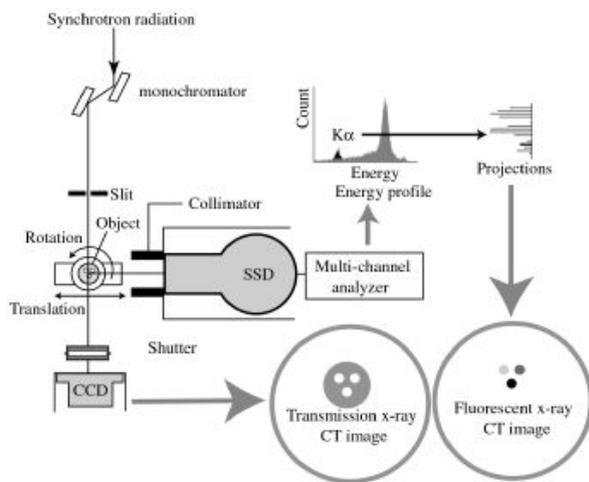


図2：ペンシルビームによるFXCTシステム

放射光 FXCT システムの概略図を図2に示す[2, 3]。Si 製モノクロメータで 37keV に単色化された X 線は、スリットによりペンシル状のビームに成形され、被射体内の標識物質（ここではヨウ素）を励起する。このとき、入射 X 線上に存在する標識物質の脱励起過程により、蛍光 X 線が発生する。発生した蛍光 X 線は、高いエネルギー分解能を持つ、大面積検出面の高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器 SSD (Solid State Detector) を用いて、光子計数モードで収集する。このとき検出器は、ノイズとなるコンプトン散乱を低減するために入射 X 線に対して 90 度方向に設置されている。得られたエネルギー・プロファイルに、標識物質の蛍光 X 線スペクトル・ピークが中心となるようなエネルギー窓を設定し

(ヨウ素 $K_{\alpha 2}$ 線の場合、28.3 keV)、その内の光子数を求める。観測された蛍光 X 線光子数は、入射ビーム上に存在する造影物質の量に比例するので、観測量はビーム上に分布する造影物質分布の線積分として解釈できる。さらに、観測量は、被射体上流に設置してある PIN ダイオードの測定値により、一定の入射 X 線強度下での量に補正される。以上のようなジオメトリで、被射体を並進・回転移動させながらデータ取得を行うことによって、CT 再構成するための投影データを得る。得られた一連のデータセットに対して、吸収補正を考慮した画像再構成アルゴリズムを適用することで CT 画像を得る[2]。物理ファントムや生体組織を用い、これまでに幾多の画像化実験を行うことで、 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ の空間分解能で 25 pg の極微量の標識物質を描出できることを実証してきた[4]。さらに、被射体下流に検出器を設置することで通常の吸収コントラスト透過 CT 像を同時に取得することが可能である。すなわち、本システムによれば、FXCT による機能情報と透過吸収 CT による形態情報を同時に取得できる。これは、現在臨床で用いられている PET/CT や SPECT/CT と同じ目的を、より高い精度で実現するものである[5]。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のビームライン ARNE-5A に構築したシステムを用いて、脳血流製剤 I-127 IMP を投与 5 分後に摘出し、ホルマリン固定したマウス脳を *ex vivo* で撮像した[6]。入射ビームエネルギーは 37 keV、ビーム断面積は $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ とした。1 点あたりの計測時間は 5 秒で、180 度にわたり 1.5 度の角度ステップで 120 投影取得した。全投影に要した時間は 8.5 時間であった。図3に FXCT 画像を示す。図は、0 から 60 $\mu\text{g/ml}$ を 8 bit グレースケールで表示している。得られた axial 画像は解剖学的知見と極めて良く一致する。また、この実験に先立ち得られた検量線により、左右大脳に含まれるヨウ素濃度は、①51.3 $\mu\text{g/ml}$ 、②49.3 $\mu\text{g/ml}$ 、左右基底核に含まれるヨウ素濃度は、③59.3 $\mu\text{g/ml}$ 、④57.9 $\mu\text{g/ml}$ と推定できる。ここで紹介した脳画像以外にも、ラット・マウス・ハムスターの心臓における脂肪酸代謝について、医学的に重要な知見を提

供する in vitro 画像が得られている[7, 9]。

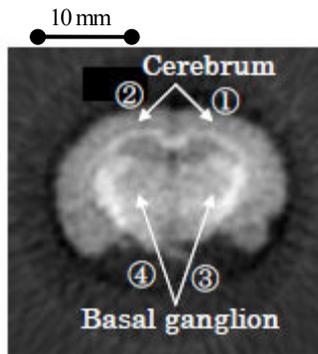


図3：マウス脳の ex vivo FXCT 画像

投影データ数を十分に収集することで高精細な再構成画像が得られることがわかったので、次にマウス頭部を in vivo で撮像した[8]。ただし、麻酔の有効時間内に測定しなくてはならないため、ビーム断面積は $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ と広くした。また、1点あたりの計測時間は5秒で、180度にわたり6度の角度ステップで40投影取得した。全投影取得に要した時間は1.5時間であった。図4にFXCT画像を示す。図は、0から60 $\mu\text{g/ml}$ を8bitグレースケールで表示している。図3に比べて、ビーム断面積が大きいことと、投影数が少ないことにより、画像が全体的にぼけてはいるが、脳内の部位が識別できる程度には描出されている。

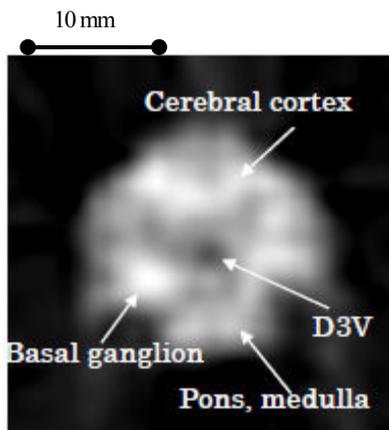


図4：マウス脳の in vivo FXCT 画像

近年、遺伝子工学の進歩により、ヒトの疾病をモデル化した種々の疾患モデル動物が作成されている。疾病の克服にむけて、これらの疾患モデル動物を用

い、疾患の進展過程の究明、診断、治療法の開発が活発に行われようとしている。疾病の機序を解明するためには、機能情報を評価することが不可欠であり、機能情報を高空間分解能で可視化できる分子イメージング技術の確立が重要になる。非放射性ヨウ素 (^{127}I) で標識した化合物を投与したマウスやラットなどの小動物の機能情報を得る in vivo FXCT は、新しい分子イメージングモダリティとしての可能性を有する。しかしながら、上で見たように、第一世代型 CT 方式、すなわち、ペンシルビームによるデータ取得を採用しているため、膨大な計測時間を要した。投影数を減らし、なんとか in vivo 画像を得たとしても、それは単一の2次元断層像にしかならず、競合するであろう SPECT や PET に対しては、著しく不利である。

高速撮像の実現には、従来のシーケンシャルなデータ収集からパラレルなデータ収集への移行が不可欠である。そこで、シートビームを入射ビームとして、多素子検出器アレイを用いる撮像方式を提案した[11]。図5のように、シートビームを被射体の断面全体を覆うように照射する。これにより、断面内の全標識物質から蛍光 X 線が等方向へ放射される。また、入射ビームに対して90度方向に多素子検出器アレイを設置する。各素子はコリメータにより、蛍光 X 線の入射してくる方向を制限する。理想的にコリメートされた場合、ビーム方向に対して垂直方向からの蛍光 X 線だけを捕らえることになる。よって、各素子で得られるカウントデータは、素子からビームへおろした垂線上に存在するヨウ素から発生する蛍光 X 線の総量に比例する。すなわち、描出すべき断層面内に2次元状に分布するヨウ素に関して、素子からビーム方向に下ろした垂線RSに沿った、ヨウ素量の線積分を取得できる(厳密には、吸収補正を要する[11, 12])。提案した方式では、1投影を1回の照射により取得することができるため、従来のペンシルビームによるデータの取得では、不可欠であった被射体の並進走査が不要になり、計測時間を著しく短縮することが可能となる。

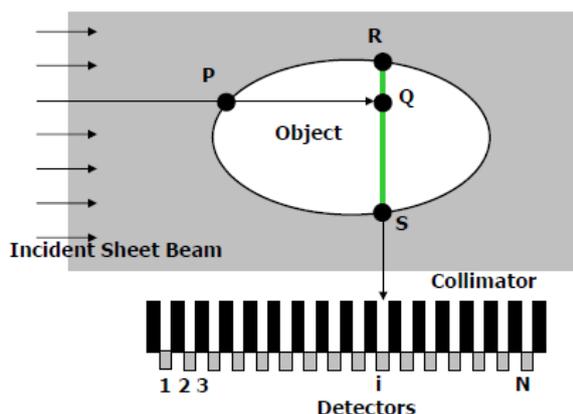


図5：シートビームによるデータ取得

本撮像方式の実現可能性を確認するために、予備的なシステムをKEKのビームラインARNE-5Aに構築し、画像化実験をした。コリメータの長さは50 mm、検出器の幅は0.25 mmとした。被射体として、直径10 mm アクリル製物理ファントムを用いた。この物理ファントムには、直径3 mmの穴が三つあり、その中のそれぞれに50、100、200 $\mu\text{g/ml}$ ヨウ素溶液を満たしてある。再構成画像を図6に示す。図は、0 から200 $\mu\text{g/ml}$ を8 bit グレースケールで表示している。これにより、本提案手法が実現可能であることが示された。また、ここでは1次元検出器アレイについて検証したが、ビームに対して平行な2次元検出器アレイを用いることにより、3次元再構成画像を取得することができる。試算によれば、図4と同等の空間分解能の3次元再構成画像を約10分で撮像できることが期待される。

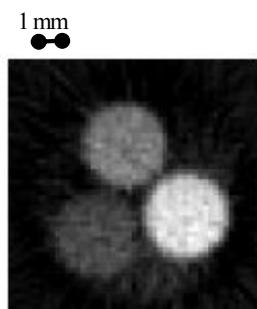


図6：シートビームによる物理ファントムFXCT画像

本稿では、本研究グループが10数年来続けてきた取組みを紹介した。この間、コンピュータを始め、検出器周りのエレクトロニクスに至るまで、技術の進歩には目を見張るものがあった。この恩恵を受け、

医学的にも重要な結果を提供できるようになってきた。さらに、研究開始当初は、到底不可能であろうと考えていた *in vivo* 計測も射程圏内に入ってきた。しかし、今後FXCTのさらなる発展を期して、分子イメージング技術への展開を目指すためには、高速撮像、すなわち平行なデータ収集が不可欠となる。本稿で述べたように、平行データ収集には、エネルギー弁別可能な半導体検出器アレイが必要となるが、現在のところ、需要がないために特注となり非常に高価である。本稿が、半導体検出器アレイ開発促進への嚆矢になることを切望する。

本研究は、山形大学の赤塚孝雄先生、北里大学の武田徹先生、Thet-Thet-Lwin 先生、KEKの兵藤一行先生、千葉大学の呉勁先生との共同研究によるものである。本研究は、一部、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）17390326、19390313、基盤研究（C）09780789、20500385）の補助を、また、高エネルギー加速器研究機構共同利用実験課題（2005G308、2007G643）の承諾を得て行われた。

参考文献

- [1] T. Takeda, et al., Proc SPIE 2708 (1996) 685.
- [2] T. Yuasa, et al., IEEE Trans Nucl Sci 44 (1997) 54.
- [3] T. Takeda, et al., Cell Mol Biol 46 (2000) 1077.
- [4] T. Takeda, et al., NIM A 467-468 (2001) 1318.
- [5] T. Zeniya, et al., NIM A 467-468 (2001) 1326.
- [6] T. Takeda, et al., Proc IEEE ICIP (2005) III-593.
- [7] J. Wu, et al., AIP CP879 (2007) 1956.
- [8] T. Takeda, et al., AIP CP879 (2007) 1944.
- [9] Thet-Thet-Lwin, et al., J Synchrotron Rad 15 (2008) 528.
- [10] T. Takeda, et al., J Synchrotron Rad 16 (2009) 57.
- [11] Q. Huo, et al., Opt. Lett. 33 (2008) 2494.
- [12] Q. Huo, et al., X-ray Spectroscopy 38 (2009) 439.

X線 CTR 散乱ホログラフィによる表面・界面原子イメージング

東京大学物性研究所 白澤徹郎、高橋敏男

材料・素子の微細化が進み、表面・界面構造を原子レベルで評価する重要性が増している。X線 CTR(Crystal truncation rod) 散乱法は、表面回折・散乱法の1種であり、表面・界面構造を原子スケールで決定できる方法である[1]。X線 CTR 散乱とは、結晶表面で電子密度が切断されることで生じるX線散乱であり、表面に垂直な方向にロッド状の散乱強度分布を与える。CTR 散乱波の複素振幅は、基板結晶からの散乱波と、基板上の表面超構造や薄膜などの擬2次元物質からの散乱波との干渉によって与えられるため、擬2次元物質の原子配列と、基板に対する位置関係、すなわち界面構造を知ることができる。CTR 散乱強度は結晶からの Bragg 反射強度に比べて6-10桁程度小さいため、放射光施設での実験が必要であるが、埋もれた界面構造を非破壊的に原子レベルで決定できるというは、他の方法では得難い利点である。

物質中の電子密度は散乱X線の複素振幅とフーリエ変換で結ばれるが、一般にX線回折実験で測定されるのは回折強度(複素振幅の絶対値の2乗)であり、位相を直接記録することはできない。CTR 散乱の場合も、この位相問題が不可避である。位相問題を解く方法は、バルク結晶の場合には結晶学的直接法が確立しており、タンパク質のような多原子から成る複雑な構造でなければ、回折強度データから直接的に構造解を得ることができる。しかし、この伝統的な直接法を CTR 散乱法に適用するのは極めて困難である。なぜなら、CTR 散乱には表面・界面だけでなく基板からの散乱も含まれることや、表面・界面に特有な問題(原子数が未定、分域の存在など)が結晶学的直接法における前提条件を満たしていないためである。このため一般的には、測定した CTR 散乱強度を再現する構造モデルを、試行錯誤的あるいは Patterson 法を用いて見つけ出し、最小二乗

法によって精密化することで、表面・界面構造を決定する。ただしこの方法は、正しい初期構造モデルからスタートしないと、間違った構造解に辿り着く危険性をはらんでいるため、実験データから直接的に構造モデルを導出できる方法があると安全である。

こうした背景から、結晶学的直接法ではなく、CTR 散乱に特化した直接的構造解法の開発が進められてきた。最近よく用いられているのは、反復解法を用いた位相回復法である。位相回復のアルゴリズムが似て非なるいくつかの方法があるが[2, 3]、これらの方法に共通しているのは、結晶学的直接法の適用では枷となった、CTR 散乱に既知構造である基板からの散乱が含まれる、ということを経験的に利用する点である。これに加え、更新された電子密度に制約(非負性、原子性、真空部でゼロなど)を与えて、繰り返し演算によって未知部分の原子像を再生する。

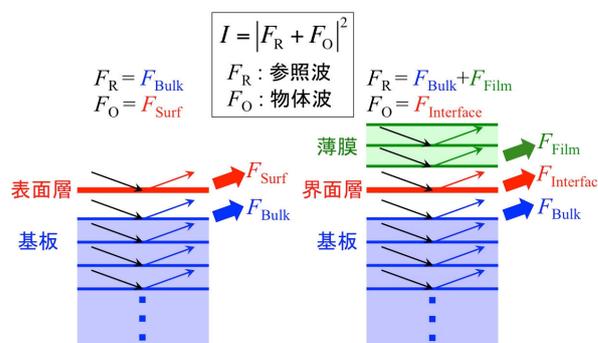


図1. CTR 散乱ホログラフィの概念図。(左図) 表面層に適用する場合。(右図) 界面層に適用する場合。

我々のグループでは、ホログラフィの原理に基づいて、繰り返し演算を行わずに一回のフーリエ変換で表面・界面原子像を再生する方法を開発している。CTR 散乱ホログラフィと呼んでいるこの方法でも、基板からの散乱波を積極的に利用する。一般にホログラフィでは、振幅と位相が既知である参照波と被写体からの散乱波(物体波)との干渉パターンから被写体の像を再生する。この原理に倣って、CTR 散

乱ホログラフィでは、基板などの既知構造からの散乱波を参照波 F_R 、表面・界面などの未知構造からの散乱波を物体波 F_0 と見なす。散乱ベクトル \mathbf{q} において観測される散乱強度を $I(\mathbf{q}) = |F_R(\mathbf{q}) + F_0(\mathbf{q})|^2$ として、次のようなホログラム関数を定義する[4]。

$$\chi(\mathbf{q}) = \frac{I(\mathbf{q}) - I_R(\mathbf{q})}{F_R^*(\mathbf{q})} = F_0 + \frac{F_R}{F_R^*} F_0^* + \frac{|F_0|^2}{F_R^*} \quad (1)$$

ここで、 $I_R(\mathbf{q})$ は既知構造からの散乱強度 $= |F_R(\mathbf{q})|^2$ である。右辺第3項は $|F_R| \gg |F_0|$ という条件のもとでは無視できる。第1項は未知構造からの散乱波であり、フーリエ変換によって未知構造の原子像を与える。第2項は共役像を与えるが、この影響はホログラムの実部をとることで低減される[4]。基板上の表面構造を再生するときには、図1左側のように、参照波として基板からの散乱波を用いる。薄膜/基板界面を再生するときには、薄膜の構造が既知、あるいは容易に解析できる場合には、図1右側のように参照波として基板からの散乱波と薄膜からの散乱波の合成波を用いるとよい[5]。一般には、第2項と第3項が完全に無視できないこと、フーリエ級数の打ち切り誤差、既知構造が完全に正しくない（薄膜等の場合）、などの影響で、正確な電子密度を再生することは難しいが、初期構造モデルを推定するのに十分な情報が得られる。

ここでは、CTR 散乱ホログラフィを界面構造に適用した例として、Bi 薄膜/Si (111) 界面を紹介する[6]。この Bi 薄膜は、Si (111)- 7×7 清浄表面上に Bi を室温で蒸着するだけで、[001] 配向でエピタキシャル成長する結晶性薄膜であり [7]、最近では表面電子状態におけるスピン分裂である Rashba 効果や、トポロジカル絶縁体の母物質として注目されている。Rashba 効果は表面・界面構造が密接に関連した現象であるが、界面構造が未解決であったため、観察された電子状態が完全に説明されていなかった。

界面構造の解析は、次の3つのステップで行った。まず、測定した CTR 散乱プロファイルに見られた、Bi 薄膜からのラウエ振動のピーク間隔と位置から、Bi 薄膜の厚さ（ ~ 5 nm）と平均的な格子定数（バル

ク値に比べて (001) 面内方向に 0.9% 小さく、面直方向に 0.8% 大きい）を得た。次に、この Bi 薄膜の平均構造を既知構造として CTR 散乱ホログラフィを用いると、Si 基板と Bi 薄膜の間に一原子層厚の界面層が再生された。上述したように、再生したホログラムの電子密度は定量性に欠けるため、最後のステップとして構造モデルの最適化を行い、正しい電子密度分布を得た。ここでは、従来の最小二乗法ではなく位相回復法[2, 3]を用いて構造最適化を行った。最小二乗法では、薄膜及び界面に含まれるたくさんの原子の構造変数（位置、振動振幅、占有率）を局所解に陥ることなく最適化するのが困難なためである。ここで強調しておきたいのは、CTR 散乱ホログラフィを行わずに、界面原子層が無い初期構造モデルで位相回復を行っても、実験データを再現する正しい電子密度分布が得られなかったということである。原理的には、位相回復法によってモデルフリーに構造解が得られるが、実際には、位相を一意に決定するのに必要十分な CTR 散乱データを全て測定するのが困難なことや測定精度のために、初期構造モデルが真の構造に十分に近くないと、正しい構造解に辿り着けないことが度々ある。Bi 薄膜/Si (111) 界面もこれに該当すると思われ、CTR 散乱ホログラフィで求めた界面原子層モデルを用いることで初めて、正しい電子密度分布を得ることができた。

このようにして求めた電子密度分布をもとに、図2左側に示す構造を得た。図2右側に示すのは、これ以前に報告されていた断面 TEM 像である[8]。この TEM 像における界面領域の解釈は与えられていなかったが、我々の構造モデルによって良く再現されており、界面構造の理解が初めて得られた。この構造モデルは、界面層の存在によって Si と Bi 薄膜の相互作用が非常に弱くなり、Bi 薄膜がほとんど free-standing な状態にあることを示唆しており、観察されていた電子状態を良く説明する。

位相回復法に対する CTR 散乱ホログラフィの利点は、 $|F_R| \gg |F_0|$ を満たす \mathbf{q} における散乱強度データのみを用いればよいという点である。一般に位相推定のためには広範囲の CTR 散乱プロファイルデー

タが必要になるが、ホログラムを得るためには、参照構造からの寄与が大きい、散乱強度の強い領域のデータがあればよい。比較的簡便な測定によって構造情報を得ることができる[9]。また、本稿で紹介したBi 薄膜の例のように、位相回復法と併用することで、単独で用いるよりも、正しい構造解にたどり着く可能性がだいぶ高まると期待される。

本稿で紹介した例は比較的単純な系であるが、非常に複雑な表面構造においても、CTR 散乱ホログラフィによって初期構造モデルの構築に有用な情報が得られている[10]。最近では、測定技術、試料作製技術、光源の高度化などによって、CTR 散乱法の適用先は、遷移金属酸化物、有機半導体薄膜、固液界面などますます多様化している。様々な先端材料の表面・界面構造評価に、CTR 散乱ホログラフィが大いに役立つことを期待する。

[3] Y. Yacoby *et al.*: *Nature Mater.* 1 (2002) 99.
 [4] T. Takahashi, K. Sumitani, S. Kusano: *Surf. Sci.* 493 (2001) 36.
 [5] T. Takahashi, T. Shirasawa, K. Sekiguchi, W. Voegeli: *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 7 (2009) 525.
 [6] T. Shirasawa, M. Ohyama, W. Voegeli, T. Takahashi: *Phys. Rev. B* 84 (2011) 075411.
 [7] T. Nagao *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 105501.
 [8] T. Nagao *et al.*: *Surf. Sci.* 590 (2005) L247.
 [9] K. Sumitani *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 (2003) L189.
 [10] W. Voegeli *et al.*: *Phys. Rev. B* 82 (2010) 075426.

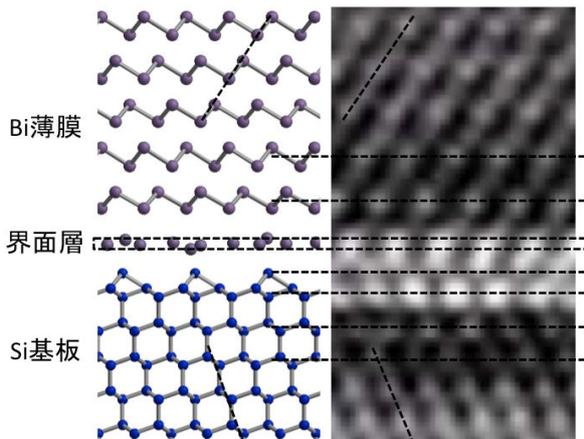


図2. (左図) CTR 散乱ホログラフィによって得られたBi 薄膜/Si (111)界面構造模型と、(右図)断面 TEM 像[8]。

参考文献

[1] I. K. Robinson: *Handbook on Synchrotron Radiation*, Vol. 3, ed. G. Brown and D. Moncton (Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1991), chap. 7.
 [2] D. K. Saldin *et al.*: *J. Phys. : Condens. Matter* 13 (2001) 10689.

XRM2012印象記

筑波大学名誉教授 青木貞雄

第11回X線顕微鏡国際会議が8月5日から10日まで上海で開かれました。この会議は1983年に第1回がドイツゲッチンゲンで開催され、2回目の1987年以降3年毎に開催され、2005年には姫路で第8回の国際会議を開きました。その後、研究分野の進展の速さを考慮して、2008年以降は2年毎に開催することになりました。開催初期の参加国は主に米国、イギリス、ドイツ、フランス、日本、ロシアと限られていましたが、最近では放射光施設のある中国、スイス、スウェーデン、オーストラリア、韓国などからの参加者が増えてきました。

今回は中国外から148名、中国国内から132名、総計280名の参加者がありました。最近の参加者数は300名前後で推移して来ていましたので、関係者の努力が実ったものと思われる。

会議は上海市街南西部肇嘉浜路 (Zhaojiabang Road) 駅近くの好望角大飯店 (Hope Hotel) で開かれました。学術講演は招待講演が21件、一般口頭講演が60件、ポスター講演が151件でした。「施設、装置、光学系」関係の講演は大会議室の1セッションで行われ、各論に近い「物理、物質系」と「バイオ、環境系」は2部屋の平行セッションでした。X線顕微鏡をキーワードとしての会議ですので、どちらの分野も興味深い話が続き、平行セッションでは会場の行き来が目立ちました。また、ポスターは会期中毎日夕方開かれましたが、初日は会場の狭さから満員電車のような混み方で、大汗をかいてしまいました。

今回の会議では、光源としてはXFELが話題の中心となりました。日本で稼動し始めたSP-8のSACLAの紹介を初め、いくつかの先行する施設や開発中のものを含めて、その強度やパルス性に重

点をおいた計画が披露されました。本格的な利用研究の成果は次回以降に期待されます。XFEL以外の新しい光源の開発は、イギリスのDiamond、中国の上海放射光施設(SSRF)、米国ブルックヘブンNSLS II号機など第3世代が主力になっています。各施設では、どこも複数のX線マイクロプロブと結像型X線顕微鏡のビームラインの設置、あるいは計画をしています。加えて、ほぼすべての装置にCTが可能なシステムを備えています。

光学素子では、透過型ラウエゾーンプレートの開発競争が加速しています。前回の会議では1次元でしたが、今回はほぼすべて2次元的なシステムを紹介していました。透過屈折レンズも微細加工技術を駆使して様々な提案と製作結果が披露されました。それぞれの素子は10nmの空間分解能を目指した計画が実現しつつあります。

一方で、K-Bミラーの発展型として、4枚ミラーの新しいタイプの光学系が初めて紹介されました。これまでのK-Bミラーではアッペの正弦条件が満たされていなかったため、広い視野を要求する結像型には使えませんでした。2枚のミラーを加えることによってその条件をクリアしました。結像型で100nm近い空間分解能が紹介されました。

軟X線用のゾーンプレートの開発は地味ながら着実な研究が進められています。製作方法は様々ですが、分解能を決める最小輪帯幅は10nm以下のものが数多く作られています。実際のイメージング結果では10nmを超えるものはありませんでしたが、10nmを超えるのも時間の問題と思われる。

コヒーレントなX線が実用化されつつある中で、今回はタイコグラフィ (Ptychography) の

研究紹介が目につきました。この手法は、小さく絞ったビームをビームサイズ以下の走査間隔で空間分解能を上げる方法で、10nm 前後の結果がいくつか披露されました。コヒーレントディフラクションイメージング (CDI) の発展と相まって今後の有力な手段として期待されています。

画像取得技術では位相コントラストイメージングが主力になって来ています。特に今回は、定量的な議論が盛んに行われ、本格的な利用の兆しを感じられました。

個別のテーマでは、リチウムイオン電池電極やニッケル酸素電池構造の観察が目を引きました。今回の会議では電池関連の研究発表が急増し、世界的なエネルギー問題への関心の高さを感じました。バイオ・環境関係の研究では蛍光X線の利用が盛んですが、今回もそれぞれの専門家が適切な利用を試みている印象がしました。研究対象は多岐にわたっており、X線顕微鏡も研究開発から実用化研究の段階に入って来たような感じがします。

今回の会議で特徴的な点が2点ありました。第一はこれまでに比べ女性の研究者が大幅に増えたことです。これまでは10名に満たない参加者でしたが、今回は数倍に増えている感じでした。これはX線顕微鏡の利用が広い分野に展開され始めて来た現れではないかと想像しています。2点目は、中国外で活躍している中国人参加者数の多さでした。2005年の姫路での開催の際、アジアの開催を意識して中国人を国際プログラム委員に加えました。当時はX線顕微鏡の研究者がほとんどいない状況でしたので、プログラム委員は医学診断の研究者にお願いしました。その後、X線顕微鏡に関する関心が急速に高まり、今では桁違いの人数の研究者が育ちつつあります。

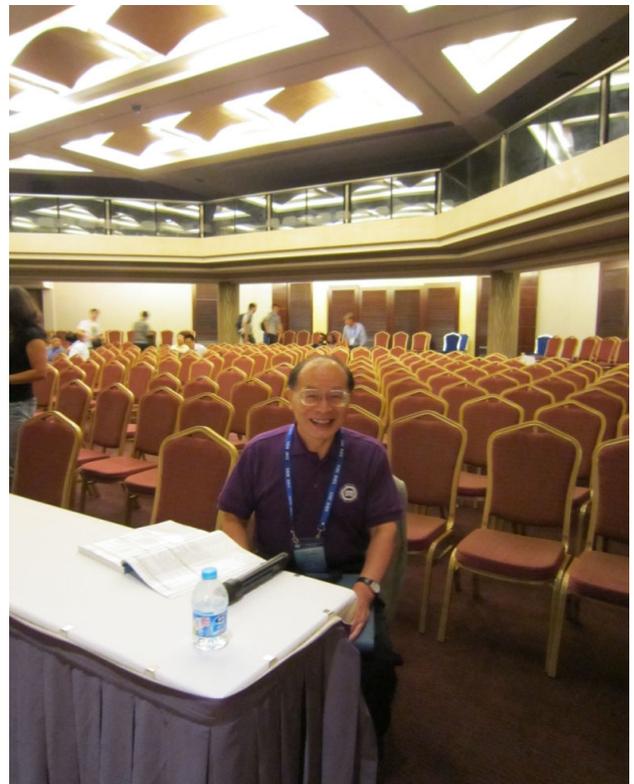
尚、次回の会議に向けて、国際プログラム委員

の交替がありましたのでお知らせします。今後6年間（会議3回分）は、青木に代わって、JASRIの鈴木芳生氏が務めることになりました。

本会議のプロシーディングは **Open Access Journal of Physics: Conference Series** ([IOP Conference Series](#)) で発行され、2013年半年に刊行予定です。

尚、次回のXRM2014はオーストラリア、メルボルンで開催されます。ホームページも既に開設されています (<http://www.xrm2014.com/>)。開催日程は2014年10月26日から31日までです。南半球の比較的高い緯度の開催ですので、8月は避ける日程になっています。過ごし易い季節ですので大勢の参加を期待しております。また、XRM2016は英国で開催されることも決まりました。

最後に、現地スタッフ用ユニフォームを着て司会をした筆者と会場の様子を掲載しておきます。



(編集部案で以下、XRM2012 関連の写真 2 枚を掲載します)



XRM2012 参加者集合写真

XRM2012 会議風景
(JASRI/SPring-8 竹内晃久 様
ご提供)



X-RAY
IMAGING OPTICS



編集部より

2012年4月より編集部の役を仰せつかり、今回の#36が新体制で初の発行となります。不慣れでいろいろ至らぬこともあるかと存じますが、誠心誠意努力してまいりますので、何卒ご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。なお編集部では、矢代委員が7月1日付で東大から東北大に異動となりました(末尾に、今年度からの新体制をご参考までに再掲いたします)。

現在、配信は原則としてメール配信になっております。メールアドレス変更等の際には、お手数ですが、編集部(巻末にメールアドレスを掲載)まで、お早目のご連絡をいただければ幸いです。また本会のウェブページに関しては会員の皆さまの財産である魅力的な最新X線画像の発信など、課題を引き継いでおります。ほかに過去のシンポジウム(2年に1度、過去11回開催)についても

開催情報をまとめるなど、長い歴史を持つ本会の特長を生かすデータ整理の案もございます。これらについても随時、少しずつではありますが新しくしてゆく予定です。当研究会の発展につながる編集部の活動を目指して努力いたしますので、よろしくお願いいたします。（文責・齋藤彰）

X線結像光学ニューズレター
No. 36 (2012年10月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 東北大学 柳原美廣)
編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成24年度新組織』（前号No.35のデータを再掲／一部修正）

- ・ 代表者 : 柳原美廣 (東北大)
- ・ 副代表者 : 籠島靖 (兵庫県立大)
- ・ 事務局担当者 : 豊田光紀 (東北大)
- ・ 編集局責任者 : 山内和人 (大阪大)
- ・ 編集局委員 : 齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、柳原美廣、籠島靖、豊田光紀
- ・ 幹事 :

伊藤 敦 (東海大)	太田 俊明 (立命館大)	籠島 靖 (兵庫県立大)、
木下 博雄 (兵庫県立大)	國枝 秀世 (名古屋大)	鈴木 芳生 (JASRI)、
田原 譲 (名古屋大)	常深 博 (大阪大)	難波 義治 (中部大)、
西村 博明 (大阪大)	羽多野 忠 (東北大)	兵藤 一行 (KEK)、
牧村 哲也 (筑波大)	百生 敦 (東北大)	森田 繁 (核融合研)、
山内 和人 (大阪大)	柳原 美廣 (東北大)	渡辺 紀生 (筑波大)
- * 新任 :
 - 加道雅孝 (原研)
- ・ 特別顧問 :
 - 波岡武 (東北大名誉教授) 山下広順 (大阪大名誉教授) 青木貞雄 (筑波大名誉教授)