

○平成18年度奨励研究

「放射光によるX線暗視野法のための高精度アナライザの開発」

放射線技術科学科 助手 島雄 大介

1. 研究目的

これまで、我々は放射光を利用したX線暗視野法¹⁾を開発し利用研究をしてきた。当手法は被写体中で屈折したX線のみをシリコン単結晶で作製した厚さ1mm程度の角度分解アナライザで分離して画像コントラストとするイメージング手法である。屈折X線を検出する他の手法と異なるのは、背景照明となる非屈折X線を排除することで微弱な屈折X線をも検出可能としている点である。当手法では、屈折角0.1arcsec程度の屈折X線による画像の取得が可能であり、特にX線吸収差の小さい軟部組織を高いコントラストで描出できる。これまでに人体から摘出した関節や乳がんの試料の画像化に応用し、従来法であるX線吸収コントラスト法では描出されない構造物が描出可能であることを示してきた²⁻⁵⁾。

このように当手法は既に応用研究の段階に入ったかのように思われるが、当システムに関する基礎的な研究が完了しているとは言えないのが現状である。その原因の1つにアナライザ結晶厚の不均一が挙げられる。当手法はアナライザ結晶厚に敏感なシステムであるため、厚さ斑を排除するのが困難な手研磨で仕上げるアナライザ結晶では、当手法の画像形成のメカニズムや空間分解能に関する議論が困難であった。

そこで本研究では、これらの基礎研究を可能とする高精度アナライザの開発を目的とする。従来は結晶の歪みの影響を排除するために、土台と一体となるようにアナライザのブレードを削り出していた。このため精度の低い手研磨でアナライザを仕上げざるを得なく、厚さ斑の原因となっていた。本研究ではアナライザのブレードとして、高精度なメカノケミカル鏡面研磨が可能な1枚板を導入したシステムを開発し、その動作試験を行う。

2. 研究方法

[シリコン1枚板アナライザの設計と作製]

単色36.0keV X線のシリコン(220)回折面によるラウエケースのX線回折の利用を想定し、また仕上がりサイズで50 mm角、厚さ1mmの1枚板アナライザを設計した。エッチング処理による0.2mm程度の腐食を考慮してシリコンインゴットからの切削時は厚さ1.2mmとした。X線回折を利用してシリコン(220)面を同定し、粒度#400のダイヤモンドホイール(東京ダイヤモンド工具製作所製)により1枚板アナライザを切削した。

次に、結晶歪の除去のため切削した1枚板アナライザのエッチング処理を10分間行った。ここで処理薬品はフッ化水素酸と硝酸が1:6となるように調合したものを使用した。これにより得られた1枚板アナライザをメカノケミカル鏡面研磨(日本エクシード株式会社)して完成品とした。

また、高精度ゴニオメータへの1枚板アナライザの設置のためのアルミ製アナライザホルダの設計と作製も行った。

[Photon Factoryでのアナライザの動作試験]

高エネルギー加速器研究機構のPhoton Factoryにて、1枚板アナライザの動作試験を行った。垂直ウィグラーを光源とするビームラインBL14B(精密X線回折実験ステーション)のハッチ内にX線暗視野用の光学系を設置した。このビームラインに設置されているシリコン(111)回折面によるダブルクリスタルモノクロメータを利用して、3次高調波として単色36.0keVのX線(縦20mm×横2mm)を取り出し入射X線とした。これをハッチ内に設置したコリメータ(非対称度:b=0.025)でX線ビームを水平方向に拡大して、縦20mm×横30mmの有効視野を得た。試験用試料は、これまで従来の一体型アナライザでも利用してきた人体摘出の近位指節間関節(PIPJ)とした。試料の後方に設置した1枚板アナライザで屈折X線を分離してX線暗視野像を得た。また、比較用に吸収コントラスト像とアナライザに低角側へオフセットを与えた像も取得した。検出器としては乳房撮影用フィルムMIN-R2000(Kodak)を用い、高解像度画像取得のためノンスクリーンとした。

3. 研究結果

メカノケミカル鏡面研磨後の1枚板アナライザの厚さは、中心部の1点と周辺の4点の測定から $1071.6 \pm 2.3 \mu\text{m}$ (平均±SD)であった。手研磨では数10 μm 以上の厚さ斑が残っていたが、この手法により厚さ斑を1桁程下げることができた。従来の一体型アナライザと本研究で作製した1枚板アナライザの全体像をそれぞれ図1(a)と1(b)に示した。いずれもアナライザ厚がX線暗視野法の条件を満たすように前傾させて実効的な厚さを調整している。

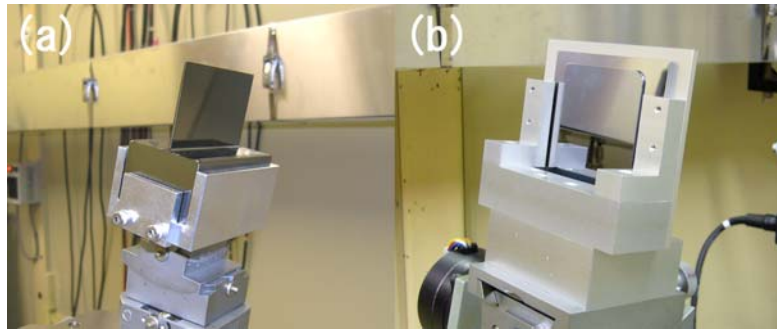


図1. (a)従来型アナライザと(b)1枚板アナライザ

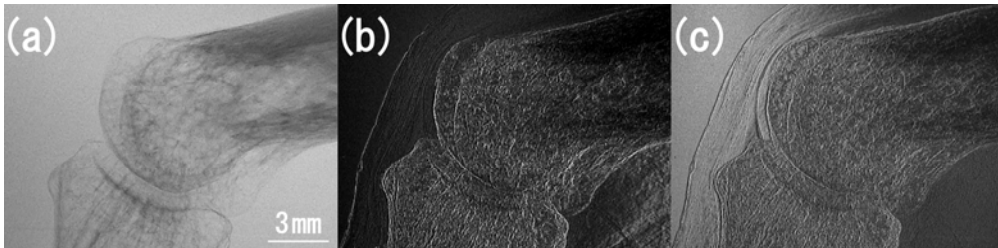


図2. PIPJの(a)吸収コントラスト像、(b)X線暗視野像と(c)低角側へオフセットを与えた像

また、図2(a)-(c)にはそれぞれ吸収コントラスト像、1枚板アナライザで撮影したX線暗視野像とアナライザに低角側へオフセットを与えた時の像を示した。(a)では骨構造のみが描出されているが、(b)、(c)では均一な背景のもと骨構造に加え軟部組織、特に関節軟骨が描出されている。関節軟骨の描写に関しては、(b)よりも(c)の方が鮮明であり、(c)が関節軟骨観察に適している。これらの結果は、従来型アナライザで得られる画質に優るものであり、本研究で開発した高精度1枚板アナライザが正常に動作することが確認された。

4. 考察(結論)

これまで、ラウエケースのX線回折をイメージングに利用するには、結晶の歪を回避するためにアナライザのブレードが土台と一体となっている必要があるというのが通説であった。このためアナライザのブレード厚や利用する回折面の組み合わせの違いが画質に与える影響を系統的に調べるには、それぞれの条件に合わせて個別に土台と一体のアナライザを切削する必要があった。また、ブレードの厚さ斑は切削装置の精度に依存しており、さらにブレードの研磨が必要になったとしても土台と一体となっている構造上、手研磨で対応せざるを得なかった。このような過程で作製される土台と一体型のアナライザのブレードの厚さ斑は経験的に数 $10\mu\text{m}$ 程度以上となる。ラウエケースのX線回折はブレードの厚さ斑に敏感で、X線暗視野法では背景を均一にするためにはこの斑を $10\mu\text{m}$ 以下に抑える必要があると見積もられる。本研究で開発した1枚板アナライザはメカノケミカル鏡面研磨が可能であるため、厚さ斑を要求される値以下に抑えることが容易である。さらに、厚さや回折面の異なる1枚板の切削が容易で各種の1枚板を量産することが可能となり、各種の1枚板をアナライザホルダに載せかえるだけで実験条件を変更することができる。

本研究で開発した高精度1枚板アナライザの正常動作が確認されたことで、今後、均一視野のもとX線暗視野法の画像形成のメカニズムの解明、空間分解能測定、さらには画像描写能のアナライザ厚や回折面に対する依存性に関する研究が飛躍的に前進することが期待される。

5. 成果の発表(学会・論文等, 予定を含む)

- 1) Shimao D., et al. The 5th International Workshop on Medical Applications of Synchrotron Radiation (Saskatoon, Canada) Aug. 2007 (発表予定)

6. 参考文献

- 1) Ando M., Sugiyama H., Maksimenko A., et al. Jpn. J. Appl. Phys. 40, L844-L846, 2001
- 2) Ando M., Sugiyama H., Kunisada T., et al. Jpn. J. Appl. Phys. 43, L1175-L1177, 2004
- 3) Ando M., Yamasaki K., Toyofuku F., et al. Jpn. J. Appl. Phys. 44, L528-L531, 2005
- 4) Shimao D., Sugiyama H., Hyodo K., et al. Nucl. Instrum. Meth. A. 548, 129-134, 2005
- 5) Shimao D., Sugiyama H., Kunisada T., et al. Appl. Radiat. Isot. 64, 868-874, 2006