

ミリ秒時間分解能 X 線トモグラフィのための
 σ 偏光型マルチビーム光学系の開発
Development of σ -polarization-type multi-beam imaging system
for millisecond X-ray tomography

VOEGELI Wolfgang¹, 梁晓宇², 白澤徹郎³, 荒川悦雄¹, 兵藤一行⁴, 矢代航^{2,5,6}

¹東京学芸大学 自然科学系 物理科学分野

〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1

²東北大学 多元物質科学研究所

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

³産業技術総合研究所 計量標準総合センター

〒305-8565 つくば市東 1-1-1 つくば中央第 5 5-2-3605

⁴高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

⁵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

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

⁶東京大学工学部物理工学科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

Wolfgang VOEGELI¹, Xiaoyu LIANG², Tetsuro SHIRASAWA³, Etsuo ARAKAWA¹,
Kazuyuki HYODO⁴ and Wataru YASHIRO^{2,5,6,*}

¹Department of Physics, Tokyo Gakugei University,

4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei, Tokyo 184-8501, Japan,

²Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University,

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

³National Metrology Institute of Japan (NMIJ),

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

5-2-2107 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan

⁴Photon Factory, Institute of Materials Structure Science,

High Energy Accelerator Research Organization,

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

⁵International Center for Synchrotron Radiation Innovation Smart (SRIS), Tohoku University,

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

⁶Department of Applied Physics, School of Engineering, The University of Tokyo,

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

1 はじめに

近年、材料科学や生命科学等の研究分野で動的現象の重要性が増しており、その解明のため時分割観察手法の開発が広く行われている。試料の内部構造を可視化できる X 線トモグラフィについても時間分解能の向上を目指す研究が進められている。試料を高速回転しながら多くの方向から試料を撮影する従来の放射光を用いたトモグラフィはミリ秒オーダー時間分解能が報告されている[1-3]。流動性のある試料への適用や試料環境の導入が困難等、従来法の高速度回転によって生じる問題を解決するため、最近

我々のグループは試料回転なしで X 線トモグラフィデータを取得できるマルチビーム光学系を開発した[4]。この光学系は、微細加工によって特殊な形状に加工された単結晶シリコン[5]を湾曲することで±70°の投影方向をカバーできるが、 π 偏光の回折配置を利用しているため、90°に近い投影方向では偏光因子によって X 線の強度が非常に弱くなり、角度欠損が発生してしまう。

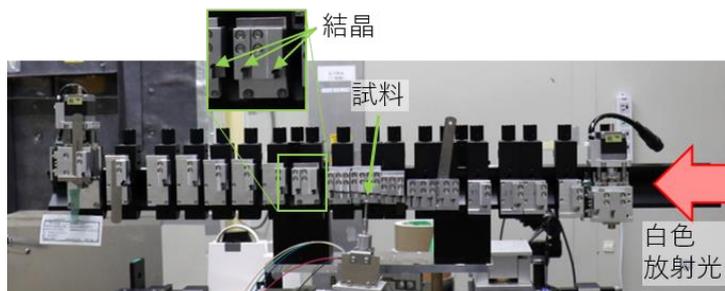


図1: σ 偏光型マルチビーム光学系の評価実験の様子 (Photon Factory の BL14C にて) [6]

ここでは、 90° 付近においても角度欠損が生じない σ 偏光配置の光学系について報告する。評価実験でトモグラフィに十分な数の投影像を1 ms の録画時間かつ試料回転なしで観察できた[6]。

2 実験

実験は縦型ウイグラーから発生する白色放射光を利用できる高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 Photon Factory の BL14C で行った。図1のマルチビーム光学系は、薄いシリコン単結晶をビーム方向に並んでいるホルダーに取り付けたものである。各結晶からの回折ビームが試料位置で交叉するように結晶の位置および向きを設計した。高い散乱角度ほど結晶の位置はビーム垂直方向（鉛直方向）にずらすことで、広いビームを効率的に使用し、光学素子による吸収を最低限に抑えられるが、それに合わせて検出系と試料位置制御系が水平から 4° 傾いている。

評価実験では、Gadox シンチレーターと Photron 社の高速 CMOS カメラ FASTCAM Mini AX100 からなる検出器を動かしながら $8^\circ \sim 172^\circ$ の角度範囲で 29 ビームを録画時間 1 ms で観察した。

3 結果および考察

図2 にテスト試料（直径 $50\mu\text{m}$ のタングステンワイヤー）の透過率像の例を示す。高散乱角はノイズが大きいのが、改善方法として、結晶を厚くすることでビーム強度を増やすことや入射ビームの遮蔽によるバックグラウンド減少が考えられる。前者に関しては、厚い結晶を用いることで高散乱角の強度を 2 倍に上げられることを確認した。高度な圧縮センシングの再構成アルゴリズム[7, 8]を用いれば、今回取得したデータのトモグラフィ再構成を期待できる。

π 偏光型マルチビーム光学系[2]と比べて、欠損角が半分程度であるため、再構成の質の向上が期待できる。また、試料まわりに直径 70 mm 程度の空間が開いていることにより試料の環境制御装置等の導入がしやすくなることに加えて、ビームサイズが大きい、ビームの安定性が高いなどの利点もある。

今回テストした光学系とすべての投影像を同時に観察できるマルチビーム画像検出器系[9]を組合せれば、ミリ秒時間分解能 X 線トモグラフィの新しい展開が期待できる。

4 まとめ

同時に 29 方向で試料の投影像を観察できる光学系の評価実験を行い、トモグラフィ再構成用データの取得に成功した。

参考文献

- [1] W. Yashiro, D. Noda, and K. Kajiwara, Appl. Phys. Express **10**, 052501 (2017).
- [2] W. Yashiro, R. Ueda, K. Kajiwara, and D. Noda, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 112503 (2017).
- [3] W. Yashiro, C. Kamezawa, D. Noda, and K. Kajiwara, Appl. Phys. Express **11**, 122501 (2018).
- [4] W. Voegeli, K. Kajiwara, H. Kudo, T. Shirasawa, X. Liang and W. Yashiro, Optica **7**, 514 (2020).
- [5] W. Yashiro, X. Liang, W. Voegeli, T. Wada, H. Kato, and K. Kajiwara, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 092001 (2020).
- [6] W. Voegeli, X. Liang, T. Shirasawa, E. Arakawa, K. Hyodo, H. Kudo, and W. Yashiro, submitted.
- [7] H. Kudo, F. Yamazaki, T. Nemoto, and K. Takaki, Proc. SPIE **9967**, 996711 (2016).
- [8] T. Wang, H. Kudo, F. Yamazaki, and H. Liu, Phys. Med. Biol. **64**, 145006 (2019).
- [9] T. Shirasawa, X. Liang, W. Voegeli, E. Arakawa, K. Kajiwara, and W. Yashiro, Appl. Phys. Express **13**, 077002 (2020).

*wyashiro@tohoku.ac.jp

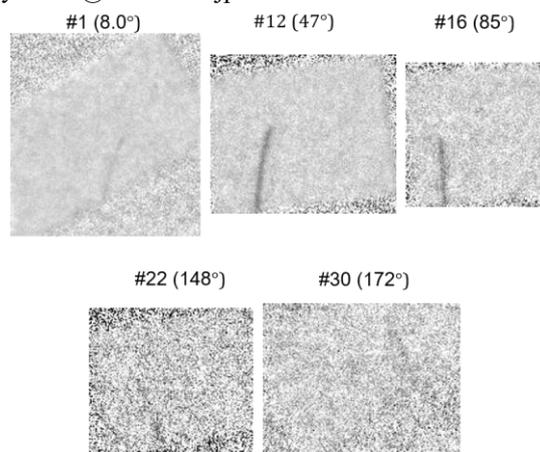


図2: 白色放射光用 σ 偏光型マルチビーム光学系で撮影した直径 $50\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーの透過率像。撮影時間は 1 ms、有効画素サイズ $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ である。(grey scale 0-1.2)