



先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 フォトンファクトリーの産業利用促進 利用報告書

課題番号: 2014I004

研究責任者: 次田 友暁, 株式会社 ASICON

利用施設: 高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 BL-14C

利用期間: 2014年12月~2015年6月

放射光施設におけるタルボ干渉計用回折格子の性能評価手法の研究 Evaluation of X-ray Gratings for Talbot Interferometry at BL-14C of Photon Factory

次田 友暁

Tomoaki TSUGITA

株式会社 ASICON

ASICON Tokyo Ltd.

アブストラクト:

回折格子を用いたタルボ干渉計の性能を把握して評価するために、格子間の距離、エネルギー、格子間のチルトに変化を与えて、その様子を観察した。試料の撮像実験を通じて、吸収像では取得できない情報を微分位相像や小角散乱像で取得することができた。撮像実験を通じてビジビリティが20%程度であったことから、この値をタルボ干渉計の性能の評価基準の目安として得た。

To evaluate a Talbot interferometer set-up using X-ray gratings, visibility changes were observed by varying parameters such as the distance between two gratings, photon energy and tilting angle between the two gratings. Also some differential phase and ultra-small-angle scattering images of some samples were taken and they showed information that cannot be obtained with a traditional absorption imaging method. Through the experiments, visibility values of roughly 20% were obtained and are regarded as a criterion of the performance quality of the Talbot interferometer.

キーワード: タルボ干渉計, 位相格子, 吸収格子, 微分位相像, 小角散乱像

1. はじめに:

1.1 研究の背景

X線タルボ干渉法は、2枚の回折格子を用いて被写体によって生じた位相シフトを可視化する撮像法であり、多色かつ発散X線でも利用できることから実験室系への展開が期待されている。このため、近年国内外の多くの研究機関で盛んに研究・開発されている。通常のX線発生装置を線源として実用化することができれば、医療診断における大幅な被曝の低減や、製品の不良検査における感度の向上などが可能になり、社会的なインパクトは非常に大きいと考えられる。

弊社は早くから本撮像法の有用性に着目し、ドイツのカールスルーエ技術研究所(KIT)並びにそのスピンオフ企業であるmicroworks GmbHと協力して、本撮像法の評価及び普及に努めてきている。しかし、新しい撮像法であるが故に未解明な部分が多く、特に回折格子の各パラメータや使用環境が撮像の安定性に与える影響など、実用化に向けてより詳細な評価が必要であると考えてきた。

1.2 研究の目的

本課題では上記タルボ干渉法について、放射光の単色かつ平行ビームであるという理想的なX線を利用して、2枚の回折格子間の距離やチルト等の各パラメータや、撮像性能に関する評価を行うこととした。また、放射光を用いた回折格子の製品評価に向けた基礎的な検討も行うこととした。

2. 実験:

タルボ干渉法の評価用撮像システムを、鉛直方向に偏光した放射光を得られるフォトンファクトリーのビームラインBL-14Cに構築し、パラメータや加工精度の異なる複数の回折格子を用いて、干渉縞の形成を行い試料の撮像を行った。第1回目の実験で回折格子間の距離、照射X線エネルギー、チルトへの依存性をそれぞれ評価し、第2回目の実験で試料の撮像を実施した。

図1に示すようなタルボ干渉法の撮像システムをビームラインに構築した。本システムは、

非対称結晶Si(220), 試料を保持・位置決めするステージ, 回折格子(位相格子G1と吸収格子G2)と位置決めステージ, 及びX線カメラから構成される。撮像系に入射したX線は, 非対称結晶で水平方向に数倍から10倍程度拡大され, 試料に照射される。試料を透過したX線は, 更に2枚の回折格子を経た後にX線カメラで検出される。

試料と回折格子を位置決めするステージ群は, 同一のレール上に構成し容易に間隔を調整できるようにした。また, 回折格子はピンで固定する方式を採用し, 複数の格子を効率よく順次交換できるようにして短時間で多数のパラメータを変更できるようにした。

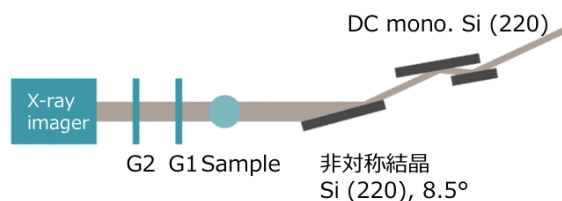


図 1 BL-14C に構築したタルボ干渉法の撮像システム模式図

表 1 主に用いた回折格子と, X線カメラ

X線回折格子
G1 周期: 2.4 μm, 材質: Ni
G2 周期: 2.4 μm, 材質: Au
π/2 位相シフト
製造: microworks GmbH
X線カメラ
Optical fiber coupled CCD
Pixel size: 12.5 μm
Number of pixels: 4,008 x 2,650
Scintillator: GOS (30 μm)

3. 結果および考察:

3.1 ビジビリティの測定

モアレ縞の鮮明さを評価する指標として, 試料無し状態でビジビリティ(visibility)を計測した。ビジビリティ V は,

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$$
 で表される。ここで, I_{max} , I_{min} はそれぞれ強度の最大値と最小値である。なおビジビリティの計算時には, オフセット信号 100 カウントを強度から除去した。

複数のエネルギーで G1-G2 間の距離を変更し

ながら, 図 2, 図 3 に示すようなモアレ縞を撮像した。

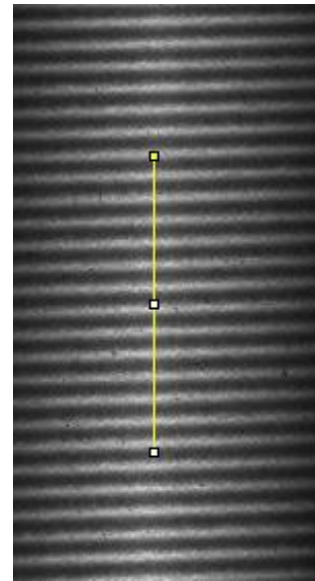


図 2 干渉縞(試料無し)の例 (25 keV, ビジビリティ 44%)

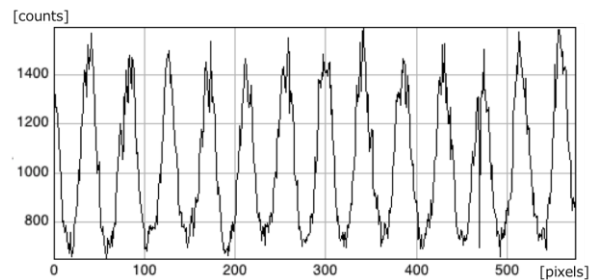


図 3 ピクセル間距離と相対強度 (25 keV, ビジビリティ 44%)

3.1(a) 格子間距離の依存性評価

ここで得られたモアレ縞の撮像結果から, 各エネルギーにおけるビジビリティの G1-G2 間の距離への依存の周期性が確認された(図 4)。この例($E = 25 \text{ keV}$)では, 理想的なタルボ距離は 41 mm であり, その偶数倍ごとに 0 次点, 奇数倍ごとに極大点が現れる。実験結果と理論との比較は以下の表 2 の通りである。

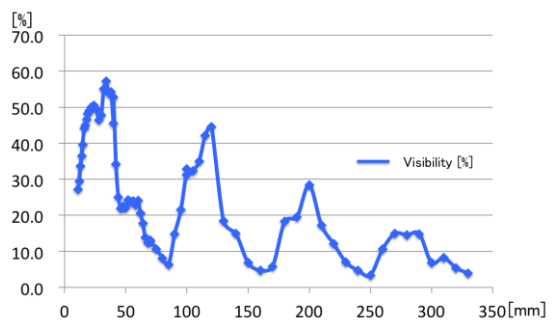


図 4 ビジビリティの G1-G2 間距離への依存性 (G1 周期 2.4 μm, G2 周期 2.4 μm, $E = 17.8 \text{ keV}$)

表 2 計算によるタルボ距離と実験時の比較
(G1 周期 2.4 μm , G2 周期 2.4 μm , $E = 17.8 \text{ keV}$)

タルボ距離	計算値	実験時
1 次	41 mm	32 mm
3 次	124 mm	120 mm
5 次	207 mm	200 mm
7 次	289 mm	270 mm

3.1(b) エネルギー依存性評価

上述の通り、15 keV から 70 keV までの異なるエネルギーにおいて、G1-G2 間の距離を徐々に変えていき、ビジビリティの変化を観察した。図 5 は、各エネルギーの実験において最も大きなビジビリティをプロットしたものである(右縦軸)。また、その際の G1-G2 距離(G1-G2 best)と、理論上のタルボ距離(G1-G2 calc)を示した(左縦軸)。

この実験環境において最大のビジビリティを得たのは、 $E = 25 \text{ keV}$ であった。このとき位相格子 G1 が持つべき理論上の吸収体の高さは 4.5 μm である。一方、この回折格子の製造者によると、当該位相格子の高さは 4.4 μm 以上とされる。これらのことから、この実験で用いた回折格子のビジビリティが $E = 25 \text{ keV}$ で最大値を与えることは、使用した回折格子がその性能を発揮していると理解できる。

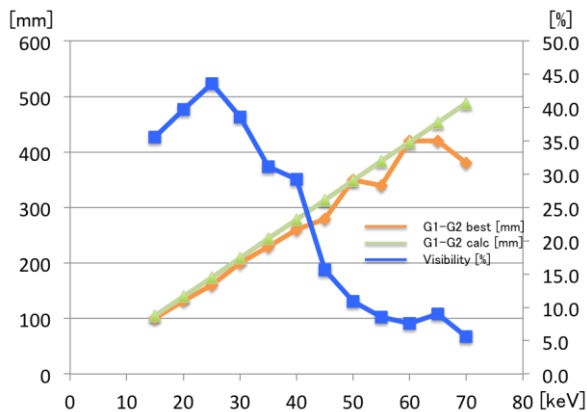


図 5 タルボ干渉計のエネルギー依存性評価
(G1 周期 2.4 μm , G2 周期 2.4 μm)

3.1(c) チルト依存性評価

位相格子 G1 側のステージを光軸周りに回転させ、回折格子間のチルト角度によるビジビリティの変化を観察した。各エネルギーとも、3.1(a)章の実験で最も大きなビジビリティの得られた G1-G2 間距離にて実施した。

25 keV の X 線を用い、 $1.73 \times 10^{-3} [^\circ/100 \text{ パルス}]$ のステップで回転させていったところ、図 6 のようななだらかな変化をする結果を得て、最大

のビジビリティから段階的に低下する様子が観察された。

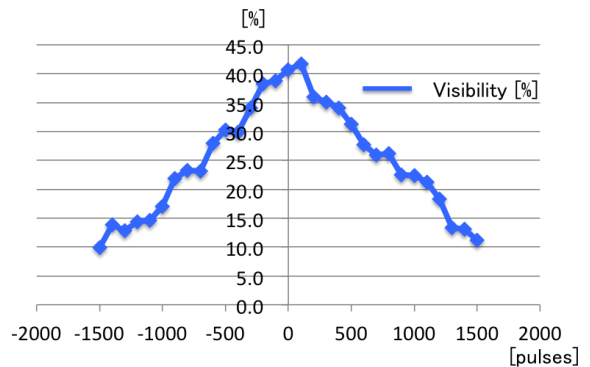


図 6 タルボ干渉計のチルト依存性評価、 $E = 25 \text{ keV}$ の例

図 6 の実験において、ビジビリティが 20% 以上を持つ範囲は、 $\pm 1.9^\circ$ であった。同様に、15 keV ($V_{\text{max}} = 36\%$) と 35 keV ($V_{\text{max}} = 33\%$) にてそれぞれチルトを掛けながらモアレ縞を観察したところ、それぞれ $\pm 1.0^\circ$, $\pm 1.4^\circ$ の範囲内でビジビリティが 20% 以上を保った。

後述する通り、試料撮像の実験を実施した際のビジビリティは、約 20% であった。回折格子を用いた当システムは、チルトに対して上記の範囲で柔軟性を持つことがわかった。

3.2 試料の撮像

将来の工業製品の非破壊検査や、生体試料撮像での応用を視野に入れ、複数の試料撮像を行った。以下に 2 つを例示する。

3.2(a) テーブルグレープ

市販のぶどう(テーブルグレープ)を撮像した結果を、図 7 に示す。従来の吸収像では内部の構造が全く描出できていないが、微分位相像では形状や大きな構造が、タルボ干渉縞におけるビジビリティの変化から算出した小角散乱像(主に波面の乱れ具合を可視化)では内部の繊維が鮮明に可視化できていることがわかる。

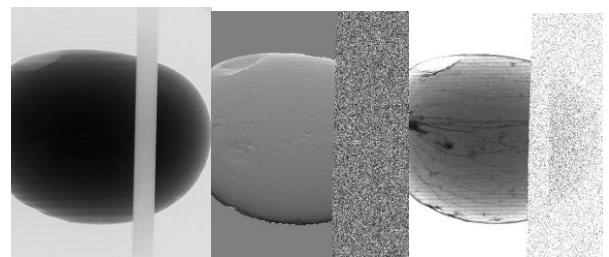


図 7 テーブルグレープの撮像結果
吸収像(左), 微分位相像(中), 小角散乱像(右)
(17.8 keV, Al フィルタ(2 mm)使用, 照射時間 5 s x 5 フリンジ。各画像の視野は 9.3 mm x 11.7 mm)

3.2(b) SD カード

市販の SD カードにセンタポンチでクラックを付け、その様子を観察した。

図 8 では吸収像でもクラックが入っていることが確認できたが、微分位相像ではくぼみや亀裂がより鮮明に把握できた。一方、微分位相像では確認できない電極線等が吸収像では視認可能である。これらのことから、タルボ干渉計で得られる画像は互いに相補的に用いるべきものであることがわかる。

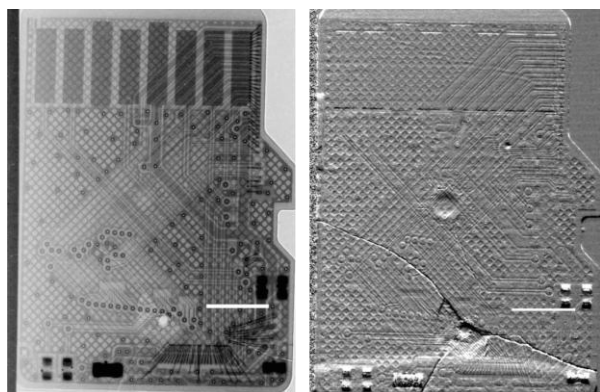


図 8 SD カード(クラックあり)の撮像結果
吸収像(左)と微分位相像(右)。図中の白棒は 2.5 mm (35 keV, 照射時間 1 s x 48 フリンジ)

この他に、異物検査における応用を視野に入れて水中のプラスチック片等を観察し、吸収像では確認できないコントラストを微分位相像で取得できた。また、ゴムや樹脂材料の表面にある亀裂も、同様に観察することができた。

なおこれらの撮像実験を通して、試料を置かない場合のビジビリティは 20~23%で推移した。

4. まとめ:

放射光という理想的な光源を用いた実験環境下にて、回折格子を用いたタルボ干渉計システムの様々なパラメータを変え、画像性能の依存性を評価した。また撮像実験においては、様々な試料の吸収像と位相像、小角散乱像を取得してそれらを比較した。

3.2 章における試料の撮像実験を通して、試料が無い状態でのビジビリティは 20~23%であり、これは今回用いた試料を撮像するには十分な値であった。今回使用したシステムにおいては、ビジビリティが 20%以上の範囲は、G1-G2 間の距離、チルト、エネルギーのいずれのパラメータを変更しても広く得られ、タルボ干渉計の柔軟性を実証することができた。

また、今回構築した観察系を利用することで、製品としての回折格子の評価が十分に可能であることがわかった。

5. 謝辞:

本研究は、文部科学省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業の補助をいただき実施いたしました。

* microtech@asicon-tokyo.com