

2011年3月

Talbot 効果と Lau 効果を組み合わせた新規硬 X 線位相イメージングの研究

物質系専攻 096020 桑原 宏萌

指導教員：百生 敦（准教授）

キーワード：X 線、イメージング、顕微鏡、位相、Talbot 効果、Lau 効果

【序論】

X 線の位相イメージングは、従来の X 線の吸収を利用するイメージングが苦手とする軽元素から成る物体に対して高感度なイメージングを実現する手法である。様々な X 線位相イメージング手法の中で、近年発展してきた回折格子を用いた位相イメージング手法[1]は、光学系の簡便さや比較的広い視野、発散ビームや連続 X 線が使えることといった利点を持つことから注目されている。中でも Talbot 効果と Lau 効果に基づく X 線 Talbot-Lau 干渉計[2]は X 線管からのインコヒーレントな発散ビームで機能することから、これまで放射光利用が主だった X 線位相イメージングを実験室で可能とした。このことは X 線位相イメージングの医療、非破壊検査等への応用可能性を飛躍的に高めると期待されている。一方、回折格子を用いた位相イメージング手法は X 線顕微鏡にも応用されている[3]。この手法は放射光を利用するが、感度の高さや簡便さから現在 X 線顕微鏡の主流となっている Zernike 型 X 線位相顕微鏡では難しかった、強位相物体の定量計測が可能という特徴を持っている。

本研究では、Talbot 効果と Lau 効果によって生じる像が球面波光学系によって拡大される点に注目し、従来必要とされてきたアナライザとしての吸収格子が不要な光学系を提案する。これにより Talbot-Lau 干渉計では吸収格子の大きさ（既存のもので 100 mm 角）以下に制限されていた視野を広げることが可能と考えられる。また、これを顕微鏡に応用することで、回折格子を用いた X 線位相顕微鏡を、X 線管からのインコヒーレントな X 線で使用可能にする。

【実験配置】

実験の光学系を図 1, 図 2 に示す。まず、投影型(図 1)では光源に 0.71 Å の特性線を持つ Mo 回転陽極型 X 線管を管電圧 40 kV 管電流 135 mA で使用した。光源のできるだけ近くに周期 5.3 μm の振幅型格子 G0、その下流に周期 5.15 μm の位相型格子 G1 を配置、さらに長い距離を離してピクセルサイズ 18 μm の CCD カメラを検出器として配置した。Talbot 効果と Lau 効果で検出面上に G1 の自己像と呼ばれる強度分布が生じるよう G0 と G1 の周期と G0-G1, G1-検出器間の距離を設定した。この自己像が試料の位相情報を反映して変化する。自己像の周期は G1 の周期を (G1-検出器間距離) / (G0-G1 間距離) 倍に拡大したものになるので、自己像が検出器で十分に解像できる大きさまで拡大されるようにパラメータを選んでいる。

次に、結像顕微鏡(図 2)であるが、こちらは光源に 1.54 Å の特性線を持つ Cu 回転陽極型 X 線管を管電圧 40 kV 管電流 135 mA で使用し、定量性を確保するため PG 結晶で連続 X 線成分を除外した。試料、FZP（結像素子、 $f=208$ mm）、検出器（(a)と同じもの）は通常の結像顕微鏡の配置である。試料の上流に周期 6.0 μm の振幅型格子 G0 を置き、FZP の下流に G0 の像 G0' を結像させ、その下流に周期 1.0 μm の位相型格子 G1 を置いた。この G0' と G1 が投影型における G0 と G1 として働き、検出面上に G1 の自己像を生じさせる。

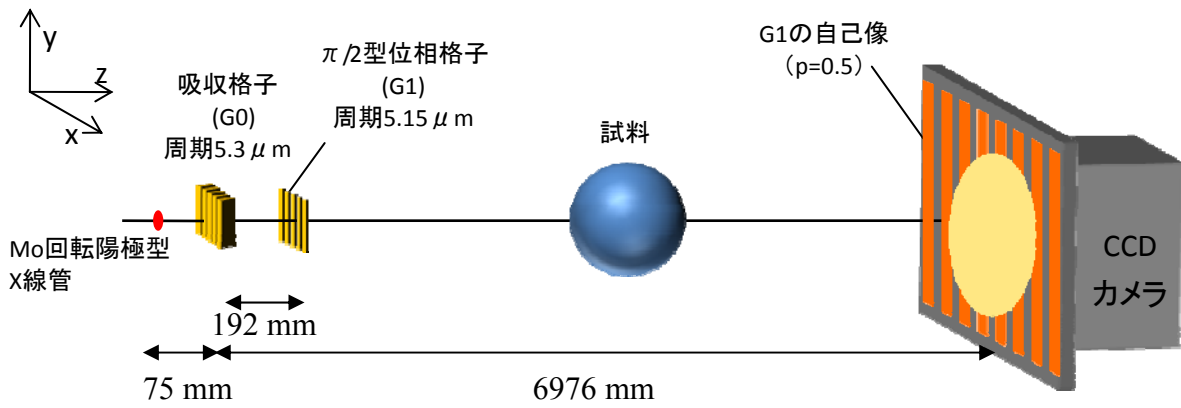


図1 単純投影の光学系の模式図

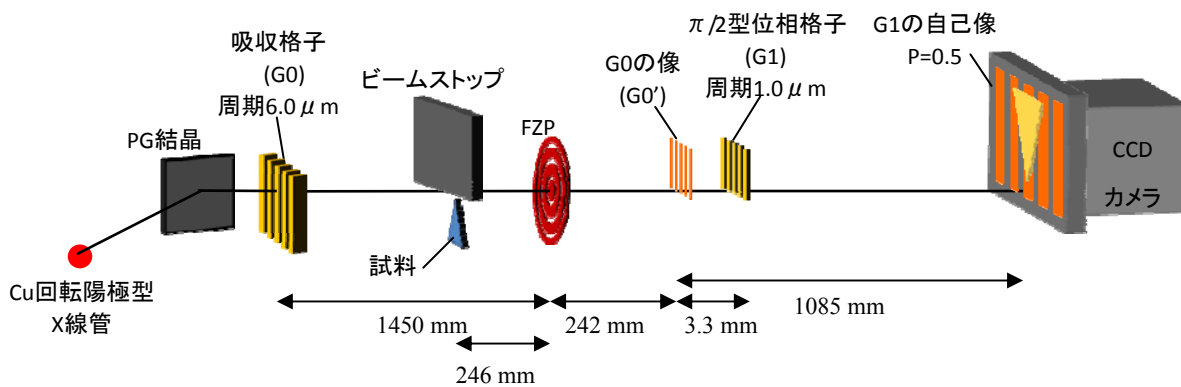


図2 結像顕微鏡の光学系の模式図

【結果】

図3(a)~(c)は投影型のイメージングにおけるG1の自己像である。これが観測される範囲が位相コントラストイメージングが可能な視野となる。光軸から400 mm離れた位置でも自己像が見えており、大面積の検出器があれば像面で800 mm角の視野が得られことが確認できた。ただし、縞の鮮明度が70%ほどに落ちている分S/N比は落ちる。この視野を得るのに必要な格子の大きさは振幅型格子が2.5 mm角、位相型格子が9 mm角であり、視野に比べ非常に小さい。ポリマー球試料を検出器から3200 mmの位置に挿入し、自己像に対して5ステップの縞操作法[1]を行って得た位相コントラスト(微分位相)像が図3(d)である。従来手法ではアナライザ格子を用いて作ったモアレ縞に対して縞走査を行っていたが、自己

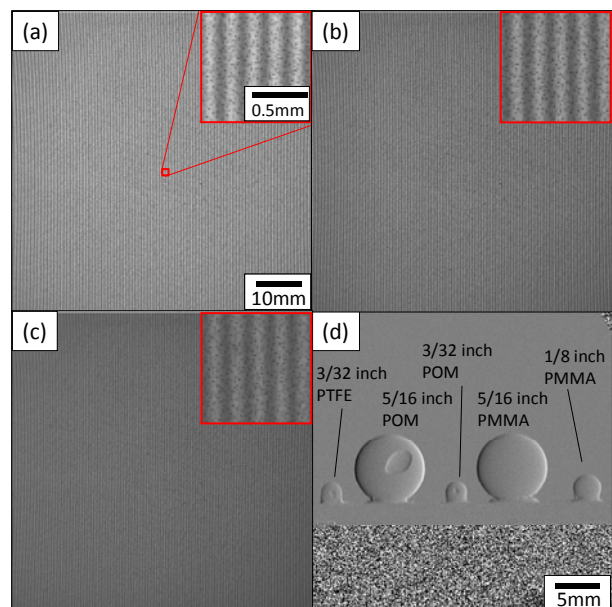


図3 (a)~(c):光軸上、光軸からx方向に200 mm、同400 mmの位置のG1の自己像。(d):(a)の視野での微分位相像(グレースケール $0.3\pi \sim 0.3\pi$)

像を直接解像して縞走査を行っても微分位相像が得られることが示された。また、この配置での先ほどの視野は物面で 440 mm 角となり、一边の長さが既存手法の 4 倍以上となっている。空間分解能は光源の半影によって制限され、この試料位置では $150 \mu\text{m}$ である。これは試料と検出器の間の距離を大きくとるこの光学系の欠点といえる。

図 4 (a) は結像顕微鏡における G1 の自己像である。振幅型格子の代わりに FZP により結像した G0 の像 G0' を用いても自己像を生じさせられることが確認できた。(b) は試料に $8.8 \mu\text{m}$ 厚のポリイミドフィルムの切片を用い、5 ステップの縞走査法を用いて取得した位相コントラスト(差分位相)像である。

(a) の自己像の周期分離れた逆コントラストの試料の位相像が取得できていることが確認できる。この 2 つの像の距離は物面で $63 \mu\text{m}$ であり、これ以下の大きさの試料であれば今回の結果のように 2 つの像が重ならず、差分位相ではなく直接位相像が取得できる。また、この大きさはより小さい周期の格子を使うことで拡大可能である。(c) は (b) の破線部のプロファイルと、検出器の LSF を畳み込んだ計算値との比較である。実験値と計算値が良く一致しており、定量性のある測定ができていることが分かる。空間分解能は図 4(c) から分かるように画像検出器に LSF によって決まっており、 $13 \mu\text{m}$ である。この空間分解能は、より高分解能の画像検出器を用いるか、もしくは顕微鏡の拡大率を上げることで改善可能であると考えられる。

【まとめ】

Talbot 効果と Lau 効果の組み合わせによって生じる自己像を拡大し直接解像することによって試料の位相情報を取得する、実験室光源が使用可能な新しいイメージングの光学系を提案した。投影型のイメージングにおいては既存手法より大面積の視野が得られることを示した。結像顕微鏡への応用では差分位相像を実験室光源で取得でき、定量性のある位相コントラストイメージングが可能であることが示された。

【参考文献】

- [1] A. Momose, S. Kawamoto, I. Koyama, Y. Hamaishi, K. Takai and Y. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L866 (2003)
- [2] F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk and C. David, Nat. Phys. **2**, 258 (2006)
- [3] W. Yashiro, Y. Takeda, A. Takeuchi, Y. Suzuki, and A. Momose, Phys. Rev. Lett. **103**, 180801 (2009).

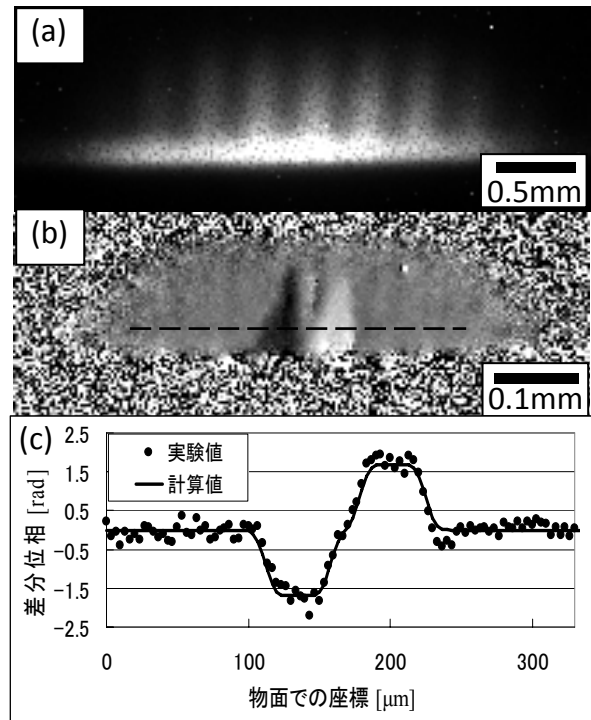


図 4 (a):顕微鏡における G1 の自己像 (b):差分位相像(グレースケール- $0.8\pi \sim 0.8\pi$)、スケールは物面でのもの (c):(b)破線部のプロファイルと検出器の LSF を畳み込んだ計算値