

# BL20B2 医学・イメージング I

## 1. 概要

BL20B2は偏向電磁石を光源とした中尺ビームラインであり、最大で横30 cm縦5 cmの安定したX線ビームが得られるため、生物試料、工業材料、文化財など広範な試料のイメージングを主体とした実験が行われている。アンジュレータを光源とした中尺イメージング用ビームラインBL20XUと比較して、X線フラックスは低めであるが広い視野が得られるため、比較的分解能での大きな試料のイメージングに適している。

## 2. タルボ干渉計を用いた位相差イメージング装置の開発

BL20B2では医学・生物学的試料を中心としたイメージング実験が数多く行われている。生物試料は一般に軽元素からなり、X線の吸収が弱く、そのままではコントラストが得られないことが多い。そのような試料を対象として高コントラスト（高密度分解能）での撮影を行う手法として、位相差イメージング法の開発にここ数年力を入れてきた。その中で、本年度は特にタルボ干渉計位相イメージング装置の開発を行った。本手法はgrating interferometerを用いた位相イメージング法で、図1に示すように二枚の回折格子によって波面の傾き（位相像の空間微分）を計測する手法である<sup>[1]</sup>。周期長 $d$ の回折格子に平面波が照射される場合の回折格子から下流に $z$ 進んだところの波動場は近軸近似で以下のように書き表される。

$$E(x, z) = (i\lambda z)^{-1/2} \int T_1(x') \exp[i\pi(x-x')^2/(\lambda z)] dx' \\ = \sum a_n \exp(-i\pi n^2 z/\lambda d^2) \exp(2i\pi n x/d)$$

ここで、 $a_n$  は回折格子直後の透過波動場 $T_1(x)$ のフーリエ級数展開係数であり、

$$T_1(x) = \sum a_n \exp(2i\pi n x/d)$$

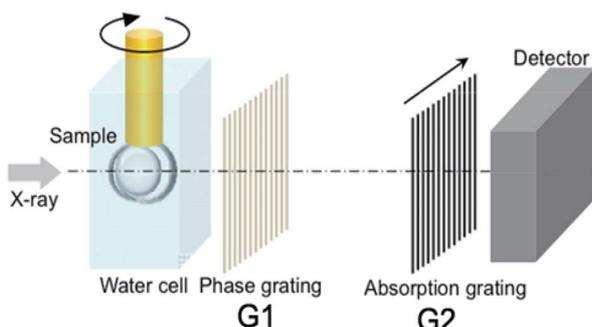


図1 タルボ干渉計による位相イメージングの装置構成

で定義される。このとき式から明らかなように、 $z_0\lambda/d^2 = 2m$  ( $m$ は任意整数) の条件を満たす距離 $z_0$ の位置には元の回折格子像と同じ波動場が形成される。すなわち、 $E(x, z_0) = T_1(x)$ となる。また、 $z_0\lambda/d^2 = 2m + 1$ の条件では元の格子が半周期ずれた波動場になり、 $E(x, z_0) = T_1(x + d/2)$ である。この最初の回折格子G1の自己像の位置に第二の回折格子G2を重ねると、透過ビーム強度 $T(x, x_0)$ は

$$T(x, x_0) = T_1(x) * T_2(x + x_0)$$

である。ここで単純化して個々の回折格子の透過波動場の振幅が周期 $d$ の正弦波であって、画像検出器の空間分解能が格子周期 $d$ より低い条件を考えると、第二回折格子直下流のビーム強度は、回折格子の周期に関する平均化を行うことで、

$$\langle T(x) \rangle = 1 + 1/2 \sin(2\pi x_0/d)$$

となり、第二の回折格子G2の変位 $x_0$ に対して回折格子周期長 $d$ と同じ周期を持つ正弦波関数になる。

このときに被写体透過光波面が屈折により角度 $\Delta\theta$ だけ偏向しているとすると、試料が無い場合に比較して、第一回折格子の自己像が $\Delta\theta$   $z_0$ だけ変位する。従って、G1とG2の相対位置を走査してG2直下流での画像を計測することにより試料透過波面の傾き $\Delta\theta$ を求めることが出来る（いわゆる縞走査法である）。これがgrating interferometerによる微分位相計測の原理である。なお、回折格子の走査で求められる $\Delta\theta$   $z_0$ には格子周期 $d$ の整数倍の任意性があるので、これを推定するための位相unwrap演算が必要となる。

実際の干渉計ではG1を位相回折格子とすることにより半整数の位置、 $z_0\lambda/d^2 = m + 1/2$ 、に位相差が振幅像に変換された自己像が生成される条件を用いている。これは振幅格子に比較して位相格子では吸収による損失が無いことと共に、硬X線領域で100%振幅変調になる厚さの透過回折格子を作製することが非常に困難な為である。位相差 $\Phi$ の純粋位相変調格子の場合、半整数次の距離での振幅変調は $\sin(\Phi)$ になり、1/4波長の位相シフトで最大の振幅変調100%が得られる。これに対して、下流側の回折格子G2は常に振幅変調型でなければならない。

図2にマウス眼球のタルボ干渉計による位相CT像を示す。光学素子はNTT-ATで電子線リソグラフィと反応性イオンエッチングにより作製した周期長5  $\mu\text{m}$ のTa回折

格子であり、G1に厚さ0.96  $\mu\text{m}$ 、G2に厚さ4.75  $\mu\text{m}$ のものを用いている（G2は60度傾斜させることで実効的に9.5  $\mu\text{m}$ 厚さとしている）。X線エネルギー15 keV、回折格子間距離は最初の半整数次タルボ距離である150 mmとして計測した。また、試料表面での強い屈折による干渉縞の飛びを避けるために、試料を水中に置いて計測している。

### 3. 展望

本干渉計は既に眼球や脳のイメージング実験に使用されている。その撮影例を図2に示す。ここで明瞭に観察されている網膜、水晶体、角膜などは一般の吸収イメージング法ではコントラストが得られないものであり、密度分解能の点で位相差イメージング法の優位性は明らかである。今後は多くの生体組織やソフトマテリアルへの応用が期待される。

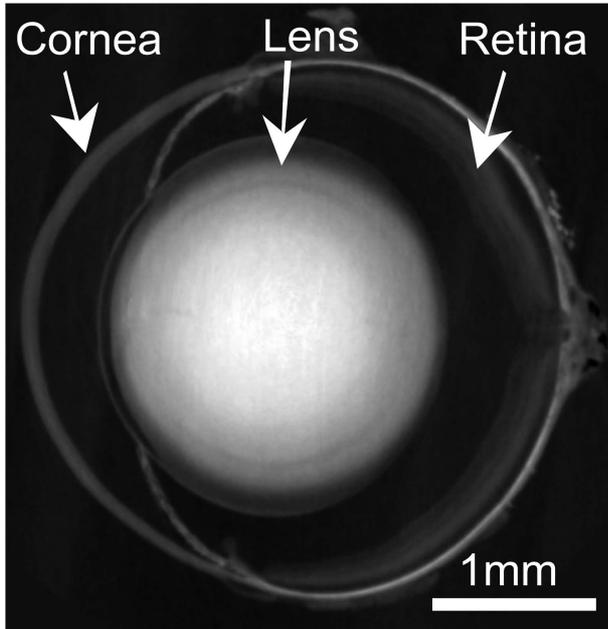


図2 タルボ干渉計イメージングによるマウス眼球の位相CT像。X線エネルギー：15 keV。G1回折格子：Ta 0.96  $\mu\text{m}$ 厚、周期長5  $\mu\text{m}$ 。G2回折格子：Ta 4.75  $\mu\text{m}$ 厚、5  $\mu\text{m}$ 周期。G1-G2間距離：150 mm。画像検出器：蛍光体スクリーンP43+リレーレンズ+C4880-41S。画素サイズ：5.5  $\mu\text{m}$ （4×4binning）。位相CT測定条件：5ステップ縞走査、0.2秒露光/画像、600投影/180度。吸収コントラストでは測定困難な眼球の密度分布が三次元で得られている。試料提供、川崎医科大学 毛利聡教授

### 参考文献

- [1] A. Momose, S. Kawamoto, I. Koyama, Y. Hamaishi, K. Takai and Y. Suzuki : Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L866-868.

### 執筆者

利用研究促進部門 バイオ・ソフトマテリアルグループ  
上杉 健太朗、星野 真人  
鈴木 芳生、八木 直人