

X線位相イメージング法により得られる 散乱像の分解能評価

岡本 博之, 藤森 茜¹⁾, 森川 公彦²⁾, 水野 薫²⁾

KEY WORDS

Phase contrast imaging, Scatter image, Synchrotron radiation, Resolution, Phantom

はじめに

これまで医療応用を含むX線イメージング分野では主に減弱差, すなわち「X線波」の振幅の変化を検出し, 利用してきた。一方で, 数十年前から始まった, 物質を透過する際に生じる位相変化を捉え, 画像化する方法の研究にも進展がみられる¹⁻⁴⁾。位相変化により観測される現象としては, 主に外形の変化による屈折や, 内部の微細構造による小角散乱が知られている。これらの現象は, 物体による減弱が小さい場合でも生じる。しかしながら, 例えば通常の物体による屈折角や散乱角は数 μrad よりも小さいため, 直接観察することは困難である。そこで, 特殊な光学素子を使うことで屈折や散乱の情報を検出することが可能になる。これらの手法として, 拡張型DEI法 (Multiple-Image Radiography), タルボ干渉計を利用する方法, スリットを利用する方法などがあり, 使用する光学素子が異なる²⁻⁵⁾。そしてそれぞれの手法の特徴を生かし, 産業や医療分野への応用に向けて開発が進んでいる⁶⁻⁹⁾。これらの手法の中でもタルボ干渉計を利用する方法と, スリットを利用する方法は, シンクロトロンのような特殊な光源でなく, 通常の管球タイプ光源を用いても撮影が可能であることから, 早期の実用化が期待されている。実用化にあたっては, いかに小さい屈折, 散乱という位相情報まで検出できるか, すなわち, コントラストをつけて画像の違いとして観察できるかという分解能が重要である。撮像対象ごとに位相変化は異なるため, 分解能が判明していなければ, 適切なイメージング法を選択することができない。屈折角の分解能に関しては, 既に岡本やMizunoらにより評価方法が提案されている^{10,11)}。しかしながら, 散乱についての

分解能評価方法に関する報告は未だ行われていない。そこで, 我々は散乱に関する分解能評価のためのファントムを考案し, スリットを利用する方法についての分解能を評価した。

方法

前述したように, 位相イメージング法にはいくつかの手法が存在する。本研究では, その中でも最も光学系が単純であり, 定量的な解析も行いやすい, スリットを利用する方法を使用した。実験は, 高エネルギー加速器研究機構の放射光科学研究施設 (KEK-PF) の垂直ウイグラービームライン BL-14B で行った。図1に鉛直上方から観察した実験配置図を示す。まず, シンクロトロンから放射された白色X線を, モノクロメータで20.7 keVに単色化した。なお, 後述するように散乱の主原因である屈折現象はエネルギーにより異なるため, 特に定量性を重視する本実験では単色X線を使

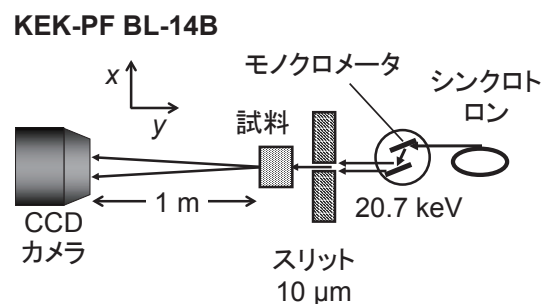


図1. 実験に使用した装置の配置

実験に使用した装置を鉛直上方から観察した配置図。シンクロトロンから放射された白色X線は, モノクロメータで20.7 keVに単色化される。その後, 厚さ1mmのタンガステン製スリット (水平幅10 μm , 鉛直幅10 mm) で線状に成形され, 試料 (ファントム) を通過して CCD カメラで撮影される。スリットと試料間の距離は約50 mmである。

金沢大学医薬保健研究域保健学系

1) つくば国際大学医療保健学部

2) 島根大学総合理工学部物理・材料科学科

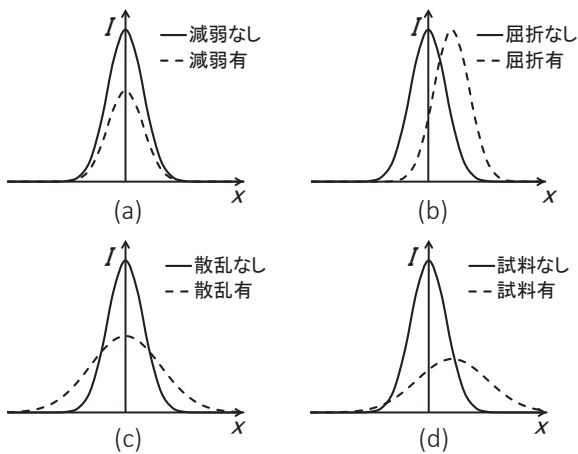


図 2. 試料との相互作用により強度分布に生じる変化
スリットを通過した X 線は CCD カメラ上でスリット幅よりも広がり、図 1 の x 方向にそって (a) ~ (d) の実線のような強度分布が記録される。破線はそれぞれ、(a) 減弱のみが生じた場合、(b) 屈折のみが生じた場合、(c) 散乱のみが生じた場合の強度分布の変化である。現実の試料では、3 つの現象が同時に生じるため、分布は (d) の破線ようになる。

用した。その後、10 μ m のスリットで水平方向のビーム幅を絞って線状に成形し、作製したファントムに照射した。X 線がファントムを透過すると相互作用により減弱、屈折、散乱が生じる。この情報を持った X 線を、CCD カメラで撮影した。その際、CCD カメラで観察される線状の像は、各々の現象により異なる変化をする²⁾。図 2 に各現象が像に与える影響を示す。まず、試料が置かれていない場合でもスリットを通過した X 線は、X 線発光点の広がり、CCD カメラのシンチレータ上でのボケ、などによりスリット幅よりも広がる。このとき、CCD カメラ上で図 1 の x 方向にそって観測される強度分布を図 2(a) ~ (d) 中に実線で示す。仮に、減弱のみが生じた場合には図 2(a) の破線のように積分強度が変化する。また、屈折のみが生じた場合には図 2(b) の破線のように分布中心 (期待値) が変化する。さらに、散乱のみが生じた場合には図 2(c) の破線のように分布幅 (標準偏差) が変化する。しかしながら、現実の試料ではそれらの現象が同時に生じるので、強度分布は図 2(d) の破線のように変化する。そこで、これらの情報を個別に検出するため、以下のような統計的計算を行う。

$$I_{int} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1)$$

$$x_{ex} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_{int}} x_i \quad (2)$$

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_{int}} (x_{ex} - x_i)^2} \quad (3)$$

ここで、 i 番目のピクセル位置 x_i における強度を I_i 、計算に使用するピクセル数を n 、強度分布の積分強度を I_{int} 、期待値を x_{ex} 、標準偏差を s_x とする。これらの計算値を画像化したものが、減弱像、屈折像、散乱像になる。なお、今回分解能評価を行う散乱像は試料が存在しない時の標準偏差 s_{x0} と、存在する時の s_x の比 s_x/s_{x0} をピクセル値として割り当て、作成した。また、スリットを利用する方法では、X 線ビームはスリットにより絞られるため、一度の撮影では試料の一部 (水平 10 μ m, 鉛直 6.4 mm) の情報しか得られない。そこで、試料を図 1 の x 方向にスキャンしつつ全体を撮影した。試料のスキャン間隔は、スリット幅を考慮し、10 μ m とした。本実験で使用した CCD カメラの視野は水平方向 8.5 mm, 鉛直方向 6.4 mm, ピクセルサイズは 6.35 \times 6.35 μ m² である。

次に、本研究において作製したファントムの概要を述べる。小角散乱は、物体中に存在する微細構造により X 線がわずかに屈折され、それを繰り返すことで発散が起こる現象である¹²⁾。通常の撮影では、検出器の空間分解能より小さい微細構造はその存在を確認できないが、散乱像では確認可能である。したがって、物体中に散乱源となる微細構造が多いほど、また物質の屈折率が 1 からずれるほど、より散乱が生じる。そこで散乱像用のファントムの材料として、比較的減弱が少なく微細構造を持ち、加工もしやすい、市販メラミンスポンジを使用した。メラミンスポンジの材質であるメラミンフォームは、メラミン樹脂を数 μ m の大きさで発泡させた硬い骨格構造をもっており、X 線の散乱が期待できる。このメラミンスポンジを図 3 のような形状に加工し、ファントムとした。そして、このファントムの y 方向から X 線を照射し、図 3(a) のステップ型試料で厚さと s_x/s_{x0} の関係、および図 3(b) クサビ型試料で散乱像についての分解能をもとめた。

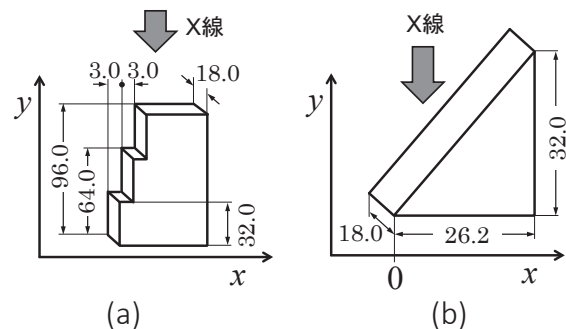


図 3. 作製したファントムの概形
市販メラミンスポンジを (a) ステップ型と (b) クサビ型に加工しファントムとした。ステップ型は y 方向についての厚みが 32.0, 64.0, 96.0 mm である。クサビ型は x 方向 26.2 mm, y 方向 32.0 mm, 幅 18.0 mm である。図 1 中に示す x, y 方向に合わせて設置し、灰色矢印の方向から X 線を照射した。

結果

まず、物体の厚みと散乱にどのような関係があるかを調べるため、図3(a)のステップ状に厚さが変化するメラミンスポンジを撮影した。図4に得られた散乱像を示す。スポンジの厚み d [mm] とともに散乱の強さ s_x/s_{x0} が増加していることが分かった。この結果から、 d と s_x/s_{x0} の関係を調べたところ、図5のような関係が得られた。 d と $\ln(s_x/s_{x0})$ の間に直線関係がみられることから、

$$\frac{s_x}{s_{x0}} = e^{\mu_s d} \quad (4)$$

のように、 s_x/s_{x0} は d とともに指数関数的に変化することが分かった。図の近似直線より得た μ_s は $1.89 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ であった。このことから、散乱に関する分解能を調べるためには、同じ材質の散乱体を使い、どの程度の薄さまで存在を検出できるかを調べれば良いことが確認できた。そこで、図3(b)のクサビ型ファントムを x 方向にスキャンしながら散乱像を得た。得られた像を図6に示す。また、図6の x 方向にそって s_x/s_{x0} の変化を調べた結果を、図7に示す。なお本研究では、試料の加

工精度、 x と d の関係の厳密な計測が出来ない、分解能をもとめる際の変数は本質的に評価に関係しない等の理由により、 x と s_x/s_{x0} の関係を使って分解能を評価した。

得られた結果から、メラミンスポンジの存在が確認できる限界の x の値をもとめるため、次のような判断を行った。まず、得られた結果を多項式近似し、近似関数 $f(x)$ をもとめる。次に、その周囲で標準偏差 \sqrt{V} をもとめる。その後、

$$f(x) = 1 + \sqrt{V} \quad (5)$$

を満足する位置を、メラミンスポンジの存在が確認できる限界の x とした。本実験で得られた限界の x は 3.5 mm であり、その値を多項式に代入してもとめた s_x/s_{x0} の値は 1.0046 であった。

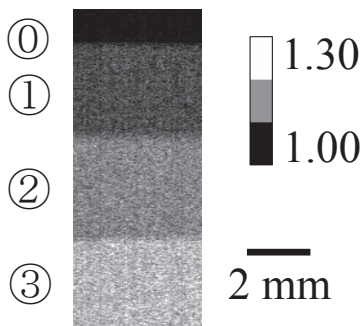


図4. ステップ状のメラミンスポンジで得られた散乱像
X線透過方向へ沿ったスポンジの厚さ d [mm] は① 32.0, ② 64.0, ③ 96.0である。④部分には何も置かれていない。 $s_x/s_{x0}=1.00$ を黒, 1.30を白に割り当てて画像を作成した。

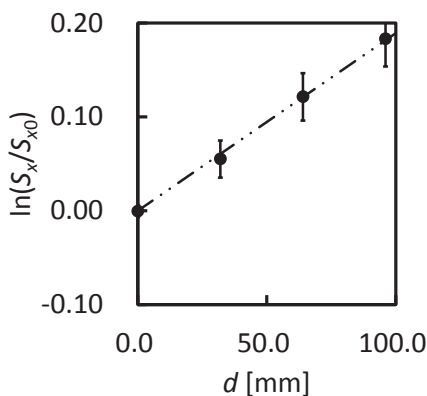


図5. d と s_x/s_{x0} について得られた関係
 d と $\ln(s_x/s_{x0})$ の間には直線関係がみられた。

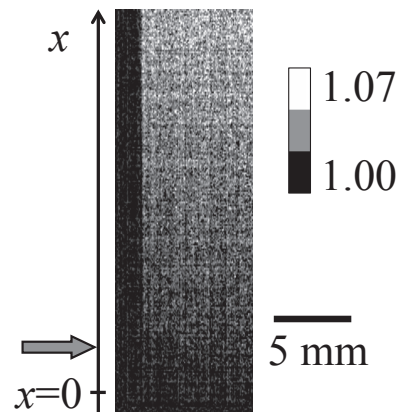


図6. 作製したクサビ型ファントムで得られた散乱像
左側の黒い部分はファントムが存在しないバックグラウンドである。およそ、灰色矢印 ($x=3.5$ mm) のあたりまでメラミンスポンジの存在が確認できた。 $s_x/s_{x0}=1.00$ を黒, 1.07を白に割り当てて画像を作成した。

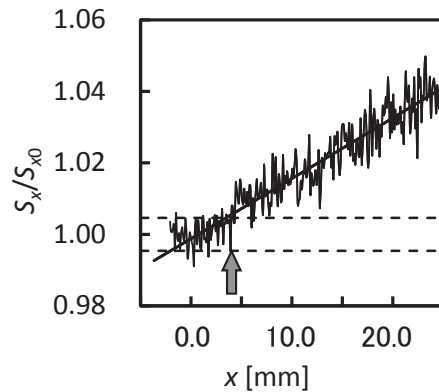


図7. ファントムの散乱像から得られた x と s_x/s_{x0} の関係
図6の散乱像について、 x 方向にそって s_x/s_{x0} の値を計測した結果。二点鎖線は、得られたデータについて多項式近似で得られた曲線 ($f(x)=6.76 \times 10^{-7}x^2+1.68 \times 10^{-3}x+0.999$), 破線は $s_x/s_{x0}=1$ を中心とした標準偏差 $\sqrt{V}=2.3 \times 10^{-3}$ の範囲である。灰色矢印の位置 ($x=3.5$ mm) が、もとめた s_x/s_{x0} の分解能 1.0046 に相当する。

考察

本研究でファントムを作製するために使用したメラミンスポンジは、微細構造であるメラミンフォームによりX線の散乱を生じることが分かった。また、散乱の強さは試料の厚みとともに指数関数的に増加することが確認できた。つまり、メラミンスポンジの厚さを変化させたファントムを作製することで、散乱の強さをコントロールできることが確認できた。それを元に、メラミンスポンジをクサビ型に加工し分解能評価用ファントムを作製した。作製したファントムにより、KEK-PFのビームラインBL-14Bに設置された、スリットを利用する位相イメージング法の散乱に関する分解能を評価したところ、観測できる限界の s_x/s_{x0} の値は1.0046であることがわかった。なお、本研究では定量性を重視し単色光を利用したが、白色X線を利用して評価は可能と考える。その際は、X線のエネルギー

ごとに異なる物質の屈折率および散乱能が、エネルギースペクトルの分布に従い加重平均されるため、加速電圧だけでなく、フィルター条件等様々な要因により分解能が変化すると考える。本評価法を使用することで、異なる光学系に設置された位相イメージング法において得られる散乱像について、分解能を定量的に評価、比較することが可能であると考え。

謝辞

本研究を行うにあたり、光学系の設置などにおいて技術的支援をいただいた高エネルギー加速器研究機構の平野馨一氏に謹んで感謝の意を表します。

本研究は、Photon Factory Program Advisory Committeeの承認を得て実施されました（課題番号：2012G134, 2014G101, 2016G189, 2018G055）。また、本研究はJSPS 科研費JP18K12027の助成を受けたものです。

文献

- 1) K. M. Podurets, V. A. Somenkov, and S. Sh. Shilstein (1989): Refraction-contrast radiography, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 34, 654-657
- 2) M. N. Wernick, O. Wirjadi, D. Chapman, et al. (2004): Multiple-image radiography, *Phys. Med. Biol.* 48, 3875-3895
- 3) Momose A, Yashiro W, S. Harasse, et al. (2010): Four-dimensional x-ray phase tomography with Talbot interferometer and white synchrotron light. *SPIE proceedings* 7804, 780405
- 4) A. Bravin, P. Coan, and P. Suortti (2013): X-ray phase-contrast imaging: from pre-clinical applications towards clinics, *Phys. Med. Biol.* 58(1), R1-35
- 5) F. A. Vittoria, Gibril K. N. Kallon, Dario Basta, et al. (2015): Beam tracking approach for single-shot retrieval of absorption, refraction, and dark-field signals with laboratory x-ray sources, *Appl. Phys. Lett.* 106, 224102-1-5
- 6) 森浩一, 関根紀夫, 佐藤斉, 他 (2002): 放射光X線を用いた屈折コントラストによる骨画像, *医学物理* 22(1), 13-20
- 7) 木戸一博, 卷渕千穂, 米山努, 他 (2011): タルボ・ロー干渉計によるX線画像技術, *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT* 8, 82-85
- 8) Mizuno K, Okamoto H, Kajiwara K, et al. (2006): Visualization of Hydride in Titanium and Titanium-Aluminide by Refraction-Enhanced X-ray Imaging Technique, *Materials transactions* 47(5), 1299-1302
- 9) 岡本博之, 水野薫 (2013): X線屈折コントラスト法による輪島塗の観察, *金沢大学つま保健学会誌* 37(2), 51-56
- 10) Mizuno K, Fujimori A, Okamoto H, et al. (2017): Determination of minimum detectable refraction angle in X-ray diffraction-enhanced imaging via standard test piece, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 066601-1-4
- 11) 岡本博之, 藤森茜, 水野薫, 他 (2017): X線屈折コントラスト法における屈折角分解能の回折条件依存性, *Journal of wellness and health care* 41(1), 167-170
- 12) 菊田星志: X線散乱と放射光科学 基礎編 (2011), 50-60, 東京大学出版会