

X線結像光学ニューズレター

No.23 2006年3月発行

X線タルボ干渉計と位相イメージング

東京大学大学院新領域創成科学研究科 百生 敦

1990年代以降、X線イメージング分野において、位相コントラストが一つの重要なキーワードになってきている[1]。X線源、X線光学素子、X線画像検出器などの進歩により、十分なフラックス下での干渉性の利用が可能となってきていることがその理由である。これまで、ZernikeタイプのX線位相差顕微鏡、二光束X線干渉計、フレネル回折（エッチコントラスト）、あるいは、アラナイザ結晶による屈折X線の選別法などが、位相コントラスト生成法として研究されている。ここで紹介するX線タルボ干渉計は、簡便な構成による新奇な位相イメージング手法として提案しているものであり、後で述べるように、他の手法では得られない特徴が期待される。

その前に、X線位相コントラストの利点を手短におさらいしよう。X線はその高い透過能により物体内部の貴重な透視プローブとなっている。しかし、そのコントラストは物質の吸収率の違いに起因するため、軽元素からなる弱吸収物体には原理的に十分な感度が期待できない。一方、X線の位相シフトは、硬X線領域で、吸収よりも約千倍の効果で発生する。その結果、位相シフトを検出して画像化すれば、弱吸収物体であってもコントラスト生成が可能となってくる。この利点が今日のX線位相コントラスト利用の共通の動機となっている。

発生した位相コントラストを単純に写真記録するだけではなく、今日のデジタル画像技術を活用し、位相シフトの定量計測、さらにはそれに基づくトモグラフィ（位相トモグラフィ）も実現されている。筆者は、それらも含む一連の技術を位相イメージングと称している。

さて、ここで紹介するX線タルボ干渉計[2,3]は透過型回折格子を使用することが特徴となっている。まず、回折格子によるタルボ効果を説明しよう。

周期的物体が空間的に可干渉な光で照明されると、波長と回折格子周期で決まる特定距離において、その透過光に回折格子の透過関数に対応したパターンが現れる。これは、回折格子によるフレネル回折による効果であると理解されており、(分数)タルボ効果と呼ばれている。そのようなパターンをここでは自己像と呼ぶことにする。今、回折格子の前面に位相物体があるとする。ここでは、微小ながら、X線の屈折が起こる。それを反映して、自己像が歪むことに注目したい。歪み量は回折格子からの距離に比例する。この歪んだ自己像を解析すれば、位相物体に関する情報が得られるはずである。ただ、回折格子の周期は、X線の空間的可干渉距離と同等かそれ以下である必要があるので、自己像を解像する際には、高い空間分解能の検出器が要求される。タルボ干渉計は、それに代わり、第二回折格子を歪んだ自己像の位置に配置する（図1）。この回折格子の周期と自己像の平均周期がほぼ同じになるようにすれば、両者の重ねあわせによってモアレ図形が観察される。このモアレ図形に位相物体の情報が含まれており、特別に高い空間分解能を要求しなくても、十分に解像できる。

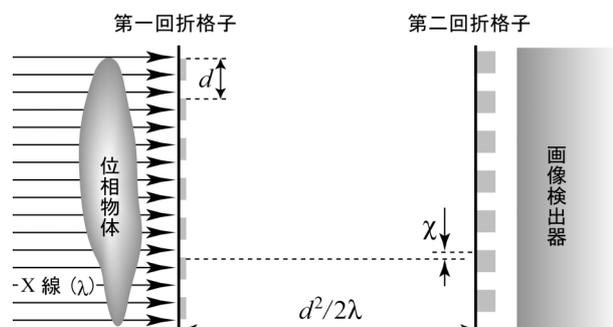


図1 二枚の回折格子を用いるX線タルボ干渉計の構成

縞走査法の原理を使えば、微分位相（屈折の大きさ）を定量的に調べることができる。すなわち、第二回折格子を周期方向に並進（すなわち図1中の χ をスキャン）させたときに見られるモアレ図形の変化を利用する。これに基づく位相トモグラフィも達成されている。

以下に、SPring-8のBL20XUで、周期 $8\mu\text{m}$ の回折格子を用いて行った実験を紹介しよう。図2には、プラスチック球をテスト試料として、X線タルボ干渉計

渉計で得られる画像と処理過程を位相トモグラム構成までについて示したものである。詳細は参考文献を参照されたい[3]。位相トモグラフィによる生体試料の観察例として図3、4を示した。図3はアリの頭部（冠状断面）である。両眼を含む頭部内構造が描出できている。図4はホルマリン固定したラット腎臓組織片を水中で観察し、3Dレンダリングしたものである。腎臓の管構造が描出されている。

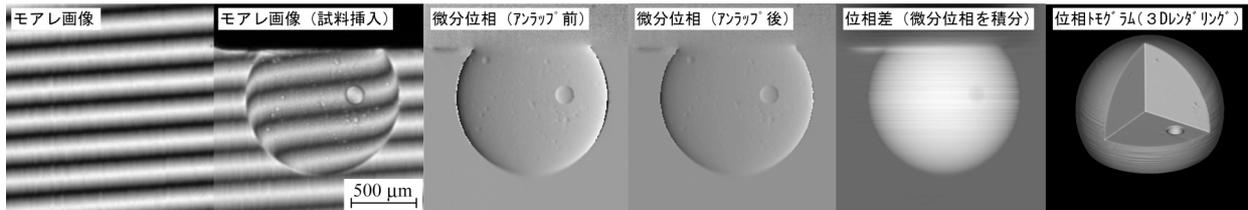


図2 X線タルボ干渉計による位相トモグラフィにおける画像の流れ（左から右）。

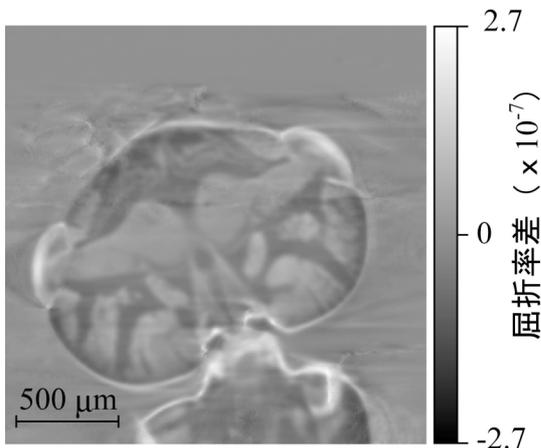


図3 アリ頭部の位相CT像（冠状断面）

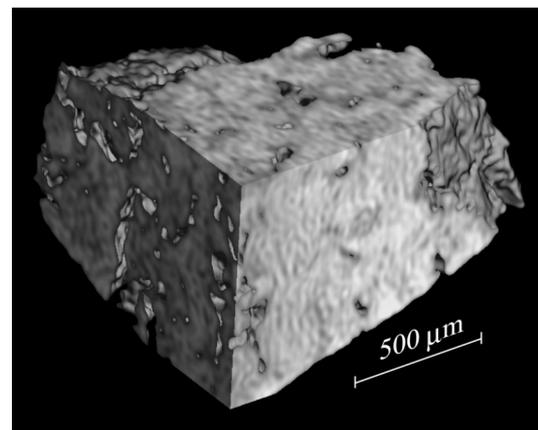


図4 ラット腎臓組織の位相CT像（3Dレンダリング）

この実験は、UVリソグラフィで製作した金回折格子を使用したか、必ずしも十分な性能とはいえなかった。より高いアスペクト比を持つ回折格子が望まれ、我々は、X線リソグラフィと金メッキによる回折格子の製作を進めている。これを用いれば、より高エネルギーのX線も使用できるようになる。

X線タルボ干渉計は、結晶ではなく回折格子を使用しているゆえ、広いエネルギーバンド幅 ($\Delta E/E \sim 0.1$) のコーンビーム（球面波）で機能するという特徴がある。従って、スルーブットの高い光学系を持つといえ、シンクロトロン放射光以外の小型X線源との組み合わせが期待される。広い面積のX線回折格子が製作されれば、実用の観点からも魅力的な方法であると言える。

X線タルボ干渉計による画像の空間分解能は、回折格子の周期に依存する。しかし、拡大光学系と組

み合わせれば、実効的な分解能を向上させることができる。2枚の回折格子と検出器をまとめて考えれば、位相敏感X線画像検出器であると捉えることができるので、X線顕微鏡と位相敏感X線画像検出器（すなわちX線タルボ干渉計）の融合は自然な発想である。このアプローチによる位相敏感X線顕微鏡およびマイクロ位相トモグラフィの開発も進めている。

- [1]A. Momose, Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 6355.
- [2]A. Momose et al., Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L866.
- [3]A. Momose et al., SPIE Proc. 5535 (2004) 352.

高回折効率多層膜ラミナー型ホログラフィック回折格子の開発

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 小池雅人

1~8keV領域の軟X線は磁性体、超伝導材料研究や結晶構造解析、生体試料のイメージング等の生命科学の発展等に不可欠なツールとなりつつある。こうした研究の多くは、1000以上の高波長分解能($\lambda/\Delta\lambda\sim 1000$)での分光計測若しくは同等の波長純度を持つ単色光を利用することが必要とされている。数百MeV~数GeVの放射光源はほぼこのエネルギー領域に強度ピークを持つ。一方この領域を通して利用できる分光素子は比較的分解能の透過型回折格子を除き見当たらない。結晶分光器は1~2keV領域で、回折格子分光器は2~5keV領域で様々な問題を抱えており、現状では要求を満たす性能が期待できない。例えば、ベリルと水晶は熱負荷に対して脆弱であり、エネルギー走査範囲も狭い。最近開発されたYB₆₆結晶は比較的高い耐熱性を持つが、約2~4keV近辺でスペクトルに異常が生じる。また、SiCやSi基板に直接刻線した回折格子は熱耐性に優れ、高輝度放射光光源に設置されている斜入射回折格子分光器に用いることで~2keV領域までの分光測定が可能になった。この場合でも、入射光・回折光の一部が格子溝の側面で遮られるシャドウ効果のため回折効率が極めて低く、分解能も結晶分光器に及ばない。

一方多層膜回折格子が1980年代から精力的に研究されたが、性能、生産性の問題から放射光用の分光器で用いられるなどの実用には至っていない。そこで本研究では、数keV領域における高効率多層膜回折格子の開発を目的とし、その手始めとしてこれまでに研究例の多いCu-K α 線(8.05 keV, 0.154nm)に最適化された多層膜回折格子の製作と評価を行った。

多層膜回折格子の製作に際し、研磨面の良好な表面粗さを保って散乱光を軽減し、格子溝の凸部と凹部からの回折光が強め合うように溝形状を制御する必要がある。これらの条件を満たすため、ホログラフィック法による溝パターン形成と反応性イオンビームエッチング法によるラミナー型溝形成を行った。製作した回折格子上にマグネトロン・スパッタリング法によりタングステンと炭素からなる多層膜を形成した(図1参照)。回折格子の有効面積は30mm角、刻線密度($1/\sigma$)は1200本/mm、溝深

さ(h)は3nm、デューティ比(a/σ)は0.45、多層膜の膜周期(d)は6.66nm、総層数は100層(50対)である。

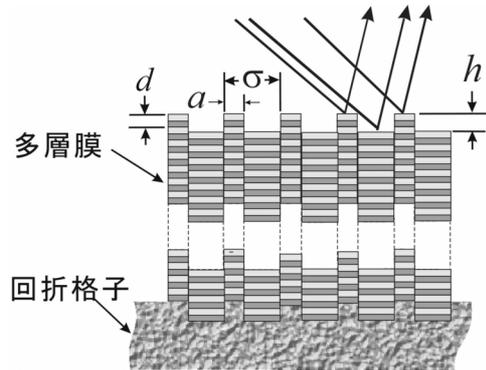


図1.ラミナー型多層膜回折格子の模式図

回折効率の測定は約0.6keV~8keVの広いエネルギー領域において実施した。0.6~1.5keV領域における測定は立命館大学SRセンターBL-11及び米国 Lawrence Berkeley 国立研究所 (LBNL) Advanced Light Source(ALS) BL-6.3.2(双方とも回折格子分光ビームライン)で、2.5~8keV領域はALS BL-5.3.1(Si結晶分光ビームライン)において行った。さらに、X線回折装置でCu-K α 線源を用い8.05keVでの評価を行った。これらの測定値のうち+1次回折光の回折効率の実測値と微分法による数値計算で得た理論回折効率に種々の面粗さによる効率低下を掛けた回折効率の計算値とを図2に示す。ここで、面粗さのほか、多層膜物質の相互拡散等による不完全性の影響は全てDebye-Waller因子で表せるものと仮定した。8.05keVにおいては、入射角89.585度、回折角88.815度で36.7%の回折効率を示した(図3参照)。図3中 m 、 p はそれぞれ回折格子、多層膜としての回折次数を示す。このエネルギーにおいてこれまでに報告されている最も高い回折効率は多層膜鏡をエッチングして作成されたラミナー型多層膜回折格子で得られた34%[1]であった。また、実験値と理論回折効率55.8%の比較から導出した面粗さは1.0nmRMSとなった(図2参照)。

8.0keVでは測定値中最も高い回折効率である38.1%を示した。さらに8keV域より低下するものの1keVまでの殆どのエネルギー領域で10%以上

の実用的に十分な回折効率を示した。なお、この領域でも回折効率の実験値もほぼ粗さを0.8nmRMS～1.0nmRMSとした計算値に相当している。

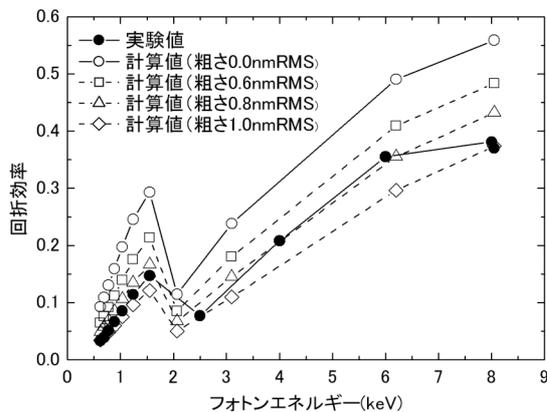


図2. 1次光回折効率の測定値と計算値の比較

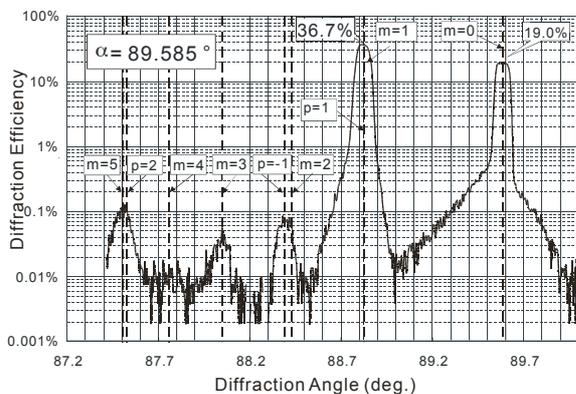


図3. Cu-Kα線(λ=0.154nm)、入射角89.585度における回折光強度の角度依存性

今回多層膜回折格子を製作した方法によれば、現在放射光施設で使用されている100mm以上のサイズの回折格子を、たとえ不等間隔溝回折格子であっても、製作することに特別な困難は伴わないと考えられる。ただし、エネルギー走査を行う場合には回折格子と多層膜としての回折条件を同時に満たす入射角、回折角を連続的に実現できる可変偏角分光器を製作する必要がある。この点についての詳細及び設計例は文献2を参照されたい。今回用いたW/C多層膜のみならず、新しい多層膜材料を用いた高性能多層膜回折格子の開発が放射光を筆頭とする幅広い軟X線光源の今後の利用研究に大いに貢献することを願ってやまない。

本研究は竹中久貴、畑山雅俊 (NTT-AT)、笹井浩行 (島津製作所)、佐野一雄 (島津エミット)、Phil H. Heimann, Eric M. Gullikson (ローレンスバークレー国立研)、石野雅彦 (原子力機構) の各氏のご協力により実施された。ここに感謝の意を表します。

参考文献：

1. V. V. Martynov et al., Proc. SPIE **3150**, 2-8 (1997).
2. M. Koike, M. Ishino, and H. Sasai, Rev. Sci Instrum. **77**, 023101 (2006).



X-RAY
IMAGING OPTICS



各種報告

【第8回X線結像光学シンポジュームの開催報告】

兵庫県立大学 木下博雄、渡邊健夫

平成17年12月13-14日にかけて、神戸市産業振興センターにて「第8回X線結像光学シンポジューム」が開催された。参加者は103名ほどで、夏のX線顕微鏡学会の後には多くの人の参加が得られた。13日はH17年の7月に打ち上げられた、観測衛星すざくの報告など、各機関の報告がなされた。また、16時から18時にかけて37件のポスター報告がなされた。14日は光源、X線光学部品、極端紫外線

リソグラフィ、などのテーマごとに、16 件のオーラル報告がなされた。全体的に基礎から応用に力点が移り、17 年前に波岡先生らが文部省科学研究費重点領域研究として立ち上げた X 線結像光学が、その性能も予想以上に向上し、実用化の段階に至ったとの印象であった。懇親会は 13 日 18 時から、青木幹事長の挨拶、神戸に主キャンパスをもつ兵庫県立大学の鈴木副学長からの歓迎挨拶、山下広順名古屋大学副総長の挨拶を戴き、盛会に行われた。次回は 2007 年に名古屋にて、名古屋大・中部大の関係者のお世話で開催されることになった。今回の開催に当り、青木代表幹事を初め、幹事の皆様、協賛企業関係者の多大な協力が得られたことに、厚く感謝し、開催報告とさせていただきます。



編集部より

昨年 11 月の X 線結像光学シンポジウムにおいて幹事会が開かれ、本研究会のホームページの立ち上げと本ニュースレターの配信方法が検討されました。時代の要請もあり HP の立ち上げはこの場で決められ、またニュースレターの配信方法については、その後の幹事間のメールによる検討で、原則 HP からのダウンロードによることにいたしました。ただし諸事情により郵送を希望される方には、これを継続いたします。従って会員の皆様には、ニュースレターの発行案内用に皆様の電子メールアドレスを編集部宛お送り頂きますようお願いいたします。

現在の HP は以下の URL となっています。

<http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/XIO/XIO-index.html>

これはとりあえずニュースレター配信用となっています。本研究会の HP としては、当然設立の趣旨・会員登録・運営方針といった案内を整えなければなりません。これに関しては、しばらく時間をいただきたいと思えます。またセキュリティの問題は予測できないことが起こりえますが、当面全面的に一般に公開し、またニュースレターのバックナンバーなどもフリーアクセスの方針でスタートいたします。

幹事の方からのご指摘にもありましたが、HP の開設は単に関連専門研究者間の情報交換みならず、一般学生や他分野の研究者をふくめ、ひろく一般に我々の活動を紹介し、かつ有益な情報、あるいは情報ソース、学生の進学判断材料、研究者の就職関連情報などを提供する場にも発展が可能です。関連研究会案内や関連図書紹介なども含め今後徐々に内容を充実させていこうと考えておりますので、お気づきの点がありましたら、編集部宛ご連絡、よろしく願いたします。

X 線結像光学ニュースレター
No.23 (2006 年 3 月)

発行 X 線結像光学研究会
(代表 筑波大学物理工学系 青木貞雄)
編集部 名古屋大学エコトピア科学研究所 田原 譲
(協力研究室：大学院理学研究科物理学教室 U 研)
〒464-8602 名古屋市千種区不老町
TEL: 052-789-2917, FAX: 052-789-2919
E-mail: tawara@u.phys.nagoya-u.ac.jp
