

埋め込み X 線ターゲットを用いた小型タルボ・ロー干渉計による X 線位相イメージング



研究ノート

志村 考功*

X-ray Phase Contrast Imaging by a Table-top Talbot-Lau Interferometer with Embedded X-ray Targets

Key Words : X-ray Phase Contrast Imaging, Talbot-Lau Interferometer

1. はじめに

透過型 X 線撮像装置は物質の内部を非破壊で観察できることから様々な分野で活用されている。近年、医療分野では核磁気共鳴や超音波等による非破壊診断法の格段の進歩があったが、依然としてレントゲン検査に代表される X 線診断は、健康診断から精密検査の各レベルの診断で重要な役割を果たしている。また、最近では製品の安全、安心、信頼性への関心が非常に高まっており、製造者、販売者に対する責任も以前にも増して問われるようになってきた。そのため、透過型 X 線撮像装置の生産現場や納入、出荷時における非破壊検査用機器としての需要が増している。特に食品や飲料品、乳幼児向け製品は抜き取り検査から全数検査へと進展すると考えられ、今後のさらなる需要の増加が予想される。医療用としては低被曝線量と高精度診断の両立、非破壊検査装置としてはコストを抑制したまま検査精度を向上し、多様な要求に答えていく必要がある。

2. タルボ・ロー干渉計による X 線位相イメージング

通常、透過型 X 線撮像装置により得られる像は吸収コントラストに基づいており、被写体の内部を通過する X 線の吸収の差を像形成に用いている。そのため、食品や医薬品、生体組織等の原子番号の

小さい軽元素からなる密度の小さい被写体では、高エネルギーの硬 X 線はほとんど透過してしまうため、その密度分布を得ることが難しい。

X 線位相イメージングはこの欠点を克服し得る技術として各方面からその発展が期待されている [1]。X 線が被写体を通過する際には、X 線の吸収だけでなく位相シフトも生じる。軽元素材料中において位相シフトの相互作用は吸収よりもはるかに大きいことが知られており、X 線の位相シフトをコントラスト形成に利用した場合、弱吸収物質に対して高感度な X 線撮像が可能となる。しかし、実験室系の X 線源で実現するためには多くの問題がある。X 線位相イメージングには高い空間コヒーレンスの X 線が求められ、マイクロフォーカスの X 線源が必要である。さらに、被写体からの位相差情報を可視化するためには、被写体と検出器の間に結晶を配置するか、被写体-検出器間距離を離さなければならない。その結果、実用的な時間での測定が困難なものとなっている。

ところが 2006 年に 3 つのグレーティング (格子) を用いる X 線タルボ・ロー干渉計による位相イメージングが報告され注目を集めている [2] (図 1)。この手法は空間的可干渉性の乏しい、光源サイズの大きい X 線源を用いても位相イメージングを可能にし、また、被写体-検出器間距離を短くできるという特徴を持っている。光源のすぐ下流に光源格子を配置することで、多数の仮想的なマルチライン状光源を実現している。それぞれの開口幅が十分狭い場合、開口を通過する X 線は位相格子を通過する際に干渉し、下流のある特定距離で位相格子と同様な干渉パターン (自己像) を形成する (タルボ効果)。各開口からの X 線の自己像が重なるように格子間距離や格子の周期を設計することにより、大きな光源でも X 線の干渉像を形成することができる。通常、



* Takayoshi SHIMURA

1964年12月生
名古屋大学大学院工学研究科 応用物理学専攻 博士後期課程 卒業 (1992年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 生命先端工学専攻 物質生命工学講座
准教授 博士 (工学) 結晶工学、X 線結晶学、表面工学
TEL : 06-6879-7281
FAX : 06-6879-7281
E-mail : shimura@mls.eng.osaka-u.ac.jp

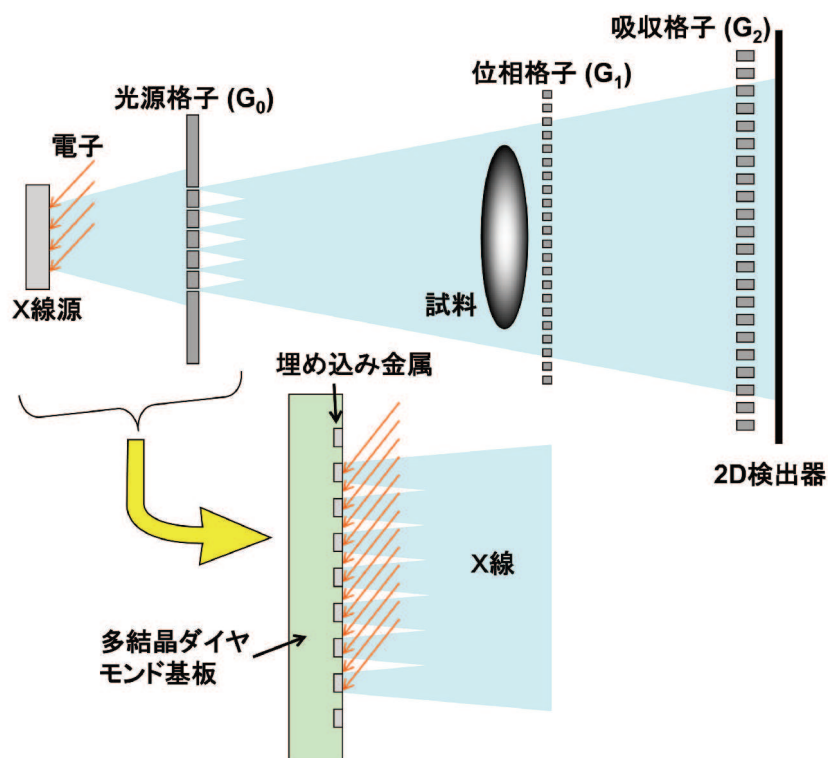


図1 X線タルボ・ロー干渉計と埋め込みターゲットによるX線源と光源格子の置換

自己像の周期は2次元検出器のピクセルサイズよりも小さいため、自己像を直接検出することはできない。そこで、自己像の位置に吸収格子を配置して下流の検出器で自己像と吸収格子のモアレ像を測定する。吸収格子を走査しながら複数の画像を取得することにより自己像の情報を得ることができる。被写体をX線の光路上に配置した場合、被写体を通過する際に生じるX線の吸収、位相シフト、小角散乱の影響を受けて自己像が変化する。これらを抽出することで吸収像、位相微分像（位相シフト）、暗視野像（小角散乱）[3]といった異なる情報を持つ像を同時に取得することができる。

3. タルボ・ロー干渉計の課題と埋め込みX線ターゲット

タルボ・ロー干渉計は実験室系のX線源による位相イメージングに格段の進歩をもたらしたがその実用化のためには全長をさらに短縮する必要がある。光源格子は非開口部ではX線を遮蔽する必要があるため、X線の吸収係数の大きい金属を用いたとしても100 μm 程度の厚さが必要である。そのため、

開口部の幅を数 μm にすることは困難であり、通常は数十 μm 程度である。その結果、位相格子上で十分な可干渉性を確保するためには光源格子から位相格子を十分離さなければならない。参考文献[2]ではその距離は1.8mもあり、実効X線強度の低下を招いている。

我々はタルボ・ロー干渉計のX線源と光源格子の部分埋め込みターゲットを用いたX線源に置き換えることによりこの問題の解決を図った[4]。埋め込みX線ターゲットは、軽元素材料中にターゲット金属を埋め込んだ構造を持つ。このターゲットに電子線を照射した場合、X線は両材料から発生するが、金属部分からのX線が圧倒的に強い。そのため、金属部分が実効的な光源になり、金属部分の形状を変えることにより任意の光源形状を実現できる。さらに、電子線の金属への侵入長は数 μm であり、金属部分の厚さは同程度で十分なため、容易に1 μm 程度の微細構造を持つ光源形状を実現できる。我々は、多数の金属細線をダイヤモンド基板上に埋め込んだターゲットを用いることにより、タルボ・ロー干渉計の光学系の短縮を行った。

4. 埋め込みX線ターゲットの作製とX線位相イメージング

埋め込みターゲットは、モリブデンまたは銅を多結晶ダイヤモンド基板中にライン幅 $5\ \mu\text{m}$ でマルチライン状に埋め込むことにより作製した。大阪大学内の設備を用い通常の写真リソグラフィ、反応性イオンエッチング、リフトオフプロセス等により作製した。作製したターゲットのSEM像を図2に示す。パターン全域に多数の金属ラインを確認することができる。

表1に埋め込みX線ターゲットを用いた小型タルボ・ロー干渉計の設計寸法を示す。参考文献の値と比較するとターゲットと位相格子 (G_1) 間距離が大幅に短縮されていることがわかる。図3にこの光学系により取得したテフロンとアクリル球の吸収像と位相微分像を示す。鮮明な位相微分像を取得できおり、埋め込みターゲットがマルチライン状光源として機能していることがわかる。この時の投入電力はMoとCuターゲットでそれぞれ4と1.2Wであり、参照論文 [2] の1%以下の値となっている。検出器

や位相格子の差を考慮したとしても埋め込みターゲットを用いた干渉計が非常に高効率であることを示している。

投入電力を64Wまで上げると露出時間1秒での撮影も可能である。図4に銅ターゲットを用いて露出時間1秒で撮影したポリエチレン球と米粒の吸収像、位相微分像、暗視野像を示す。吸収像ではわかりづらい内部の空洞や傷が微分位相像や暗視野像で鮮明に観測されていることがわかる。

5. おわりに

埋め込みターゲットを用いることによりX線タルボ・ロー干渉計を小型化し、従来法に比べ非常に高効率なX線位相撮像光学系を構築できることを示した。光源から検出器までわずか45cmという長さでの硬X線による定量的位相イメージングを実現した。現在は、3次元位相CT像の取得や高分解能化に取り組むとともに医療や産業分野への応用展開を進めている。

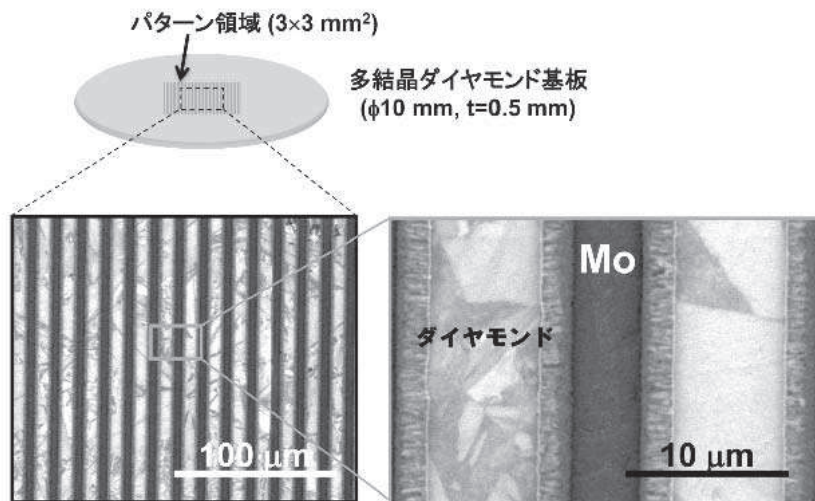


図2 作製したMoマルチライン状埋め込みX線ターゲットのSEM像

表1 タルボ・ロー干渉計の設計寸法 (Pは各格子の周期)

Target	P_0 (μm)	Line width (μm)	targets- G_1 (mm)	P_1 (μm)	G_1 - G_2 (mm)	P_2 (μm)	targets- G_2 (ratio)	
Cu	15	5	254	5.2	135	8	0.22	本研究
Mo	15	5	551	5.2	294	8	0.47	本研究
Mo	127	25-50	1765	3.9	27.8	2	1.00	Ref. [2]

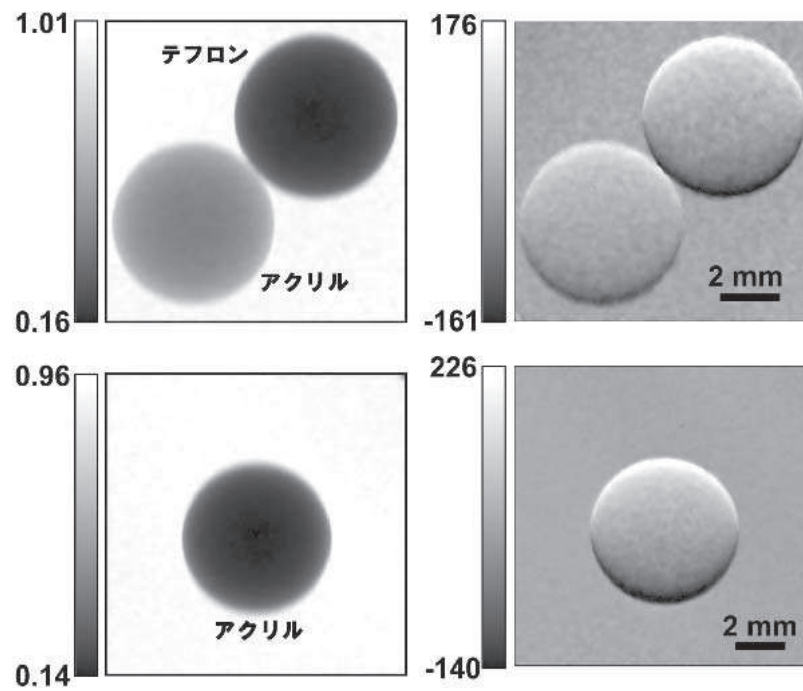


図3 テフロンとアクリル球のX線吸収像(左)と位相微分像(右). Mo(上)とCu(下)のマルチライン埋め込みターゲットを用いて撮影. 位相微分($d\phi/dx$)像のスケールの単位は π/mm . 露出時間は60秒/枚.

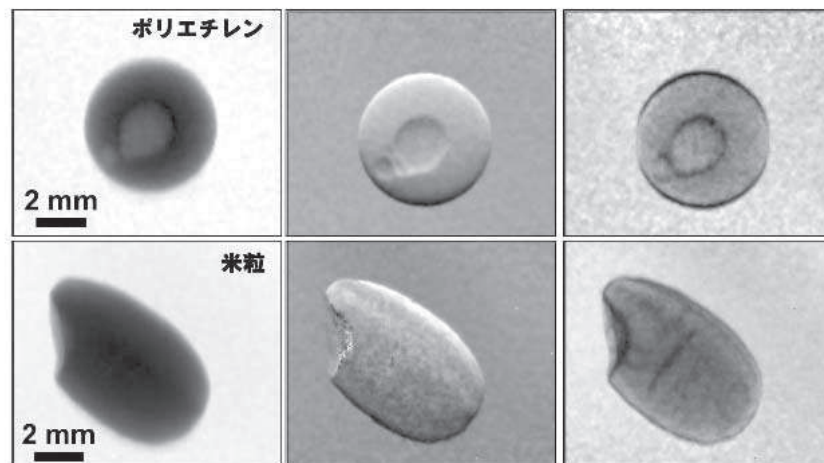


図4 ポリエチレン球と米粒の吸収像(左)、位相微分像(中央)、暗視野像(右). ポリエチレン球の中には空洞がある。

参考文献

- [1] A. Momose, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 6355-6367 (2005).
- [2] F. Pfeiffer *et al.*, Nat. Phys. **2**, 258-261 (2006).
- [3] F. Pfeiffer *et al.*, Nat. Mater. **7**, 134-137 (2008).
- [4] T. Shimura *et al.*, Opt. Lett. **38**, 157-159 (2013).