

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18752

研究課題名（和文）構造化X線光源による高感度・高分解能透過型X線撮像法の実証

研究課題名（英文）Demonstration of high sensitivity and high resolution X-ray imaging with structured X-ray light source

研究代表者

志村 考功（Shimura, Takayoshi）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90252600

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：埋め込みX線ターゲットによる冷却効率の向上、空間コヒーレンスの変調をマルチライン状のランタン埋め込みX線ターゲットについてシミュレーションで確認した。さらに、ターゲットを作製し、X線位相イメージングに適用することにより検証を行った。また、複合ターゲットにすることによりX線エネルギーを変調し、従来法では識別が困難な元素番号の近い鉄と銅、イットリウムとモリブデンの元素識別を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。医療分野では依然としてX線診断は、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いる。安全・安心な社会の実現のためには、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検査精度の向上と低コスト化を両立し、多様な要求に答えていく必要がある。

本研究では申請者が提案する独自の構造化X線光源を用いた新たな透過型X線撮像法の実証を目的とする。従来光源と比べ様々な点で優位性があるため、従来光源を置き換えていく破壊的技術になると考えている。

研究成果の概要（英文）：The improvement of the cooling efficiency and the modulation of the spatial coherence by the embedded X-ray target were confirmed by the simulation for the multi-line lanthanum embedded X-ray target. Further, we examined them by producing the target and applying it to X-ray phase-contrast imaging. In addition, we modulated the X-ray energy spectra by using a composite target, and demonstrated the element identification of iron and copper, yttrium and molybdenum having similar element numbers, which are difficult to identify by the conventional method.

研究分野：応用表面科学

キーワード：X線 イメージング 光源技術 位相イメージング 元素識別

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

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ている。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る。さらに、空港での携行品のセキュリティチェック、税関での麻薬などの違法物検査などもその精度の向上が求められている。安全・安心な社会の実現のためには、医療用としては低被爆線量と高精度診断の両立、非破壊検査装置としては検査精度の向上と低コスト化を両立し、多様な要求に答えていく必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では申請者が提案する独自の構造化 X 線光源を用いた新たな透過型 X 線撮像法の実証を目的とする。構造化 X 線光源は従来光源と比べ様々な点で優位性があるため、従来の実験室系 X 線光源を置き換えていく破壊的技術になると考えている。

### 3. 研究の方法

実験室系 X 線装置の光源はターゲット金属に電子線を照射することにより X 線を発生する。ターゲット金属の熱負荷を低減するためにターゲット金属を回転したり、光源サイズを小さくするために照射する電子線を集光するなどの技術開発はあったもののその様態は数十年以上ほとんど変わっていない。一方、申請者等はダイヤモンド基板にターゲット金属を埋め込んだ構造化 X 線ターゲットを検討している（図 1）。このターゲットを用いた場合、実効的な光源形状は照射する電子線の集光サイズによらず、埋め込んだターゲット金属形状で済む。通常電子線のターゲット金属への侵入長は数  $\mu\text{m}$  であるため、高アスペクト比の構造を用いないでターゲット金属の形状をサブ  $\mu\text{m}$  のスケールで自由にデザインできる。光源形状のフーリエ変換はその光源から放射される光の空間コヒーレンスに相当するため（van Cittert-Zernike theorem）、光の空間コヒーレンスを自由にデザインできることになる。さらに、ダイヤモンドは通常、ターゲット金属として用いられる銅、モリブデン、タンゲステン等と比べて、融点では同等、熱伝導率は遥かに高い値を示す（表 1）。電子線照射によるターゲット材の昇華を防ぐことができ、熱負荷で制限されていた励起電子線パワーを従来以上に増加させることができることを意味する。一方、希土類金属（ランタノイド）のような熱伝導率が低く、従来ターゲット材として用いることができなかった材料もダイヤモンド基板に埋め込むことによりターゲットとして用いることが可能になる。さまざまなターゲット金属をダイヤモンド基板上に空間的に配置することにより、特性 X 線のエネルギー毎に空間コヒーレンスをデザインした X 線を透過型 X 線撮像装置の照明光として用いることができる。

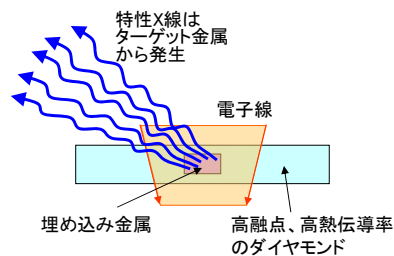


図 1 埋め込み X 線ターゲット

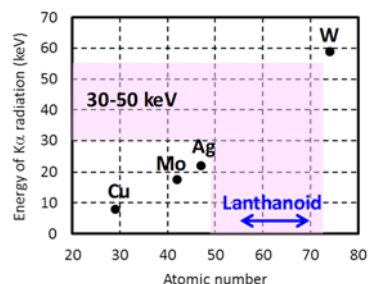


図 2 ターゲット金属の原子数と特性 X 線のエネルギー

ターゲット材	銅	モリブデン	タンゲステン	ランタン	ダイヤモンド
融点(°C)	1084	2623	3422	920	>3000
熱伝導率(W/mK)	398	138	173	13.4	1000-2000
特性 X 線(keV)	8	17.5	59	33.4	0.3

表 1 各材料特性

### 4. 研究成果

#### (1) 希土類金属埋め込み X 線ターゲットの作製と X 線位相イメージング

上述したように希土類金属はその熱伝導率が極端に低いことから X 線ターゲット材料として用いられることはなかった。一方、その特性 X 線のエネルギーは 30-50 keV 程度にあり、様々な分野でこのエネルギー帯の X 線が必要とされている。そのひとつが乳癌検診に利用される乳房 X 線検査（マンモグラフィ）である。通常のマンモグラフィでは軟組織である乳房中の腫瘍を検出するため、一般的なレントゲン撮影のエネルギー（40-80 keV）と比べて低いエネルギー（15-20 keV）の X 線を用いて撮影を行っている。しかし X 線の透過率が低く、ほとんどの X 線が吸収

されるため被曝線量の増加が問題となっている。我々は高感度かつ低被曝でのマンモグラフィを実現するため、ダイヤモンド基板中へランタン (La) をマルチライン状に埋め込んだX線ターゲットを用いた X 線位相イメージングを検討している。La の 33.4 keV の特性 X 線 (LaK $\alpha$  線) を利用することにより、乳房組織の X 線吸収率は 20 keV の場合の約 1/4 となり被曝線量の低減が期待でき、同時に X 線位相イメージングによる診断精度の向上が見込まれる。

有限要素法による熱解析を行い、埋め込み構造の冷却効率を検討した結果を図 1 に示す。投入電力に対する基板表面の中心温度を示している。La 基板と比較して、La 薄膜、La 埋め込みターゲットは温度上昇が顕著に抑えられている。特に La 埋め込みターゲットではダイヤモンド基板と同程度まで温度が低下しており、埋め込み構造による La ターゲットの冷却効率の向上が確認できた。

本研究では、多結晶ダイヤモンド基板表面に反応性イオンエッチングにより周期 15  $\mu\text{m}$ 、深さ 5  $\mu\text{m}$  のマルチライン状の溝構造を形成した。スパッタ成膜と研磨を繰り返すことにより La を溝構造に埋め込んだ後、保護膜として厚さ 1  $\mu\text{m}$  のアルミニウム (Al) キャップ層を堆積した。図 1 (a), 1 (b) に作製したマルチライン La ターゲットの光学顕微鏡像と La ターゲットからの X 線スペクトルを示す。管電圧が増加するにつれて LaK $\alpha$  線の強度が高くなっていることがわかる。100 keV の電子線は厚さ 3  $\mu\text{m}$  程度の La 層を透過するため、溝構造に La が十分埋め込まれていることを示唆している。また、33.4 keV の X 線用の  $\pi/2$  位相格子は Si 基板を用いて深掘り反応性イオンエッチングにより作製した。図 1 (c) に作製した位相格子の断面 SEM 像を示す。周期 3.6  $\mu\text{m}$  の高アスペクトの微細構造を確認することができる。

これらの埋め込みターゲットと位相格子を用いて Talbot-Lau 干渉計による X 線位相イメージングを行いその有効性の検討を行った。

## (2) 複合ターゲットによる X 線エネルギー変調と元素識別イメージング

光源の形状を制御することで X 線の空間コヒーレンスを変調することができる。一方、異なる材料を組み合わせることで、X 線エネルギーを変調することが可能となる。ここでは、モリブデン (Mo) と銅 (Cu) の複合ターゲットを用いて X 線のエネルギー変調を行い、原子番号の近い鉄 (Fe, Z=26) と Cu (Z=29)、イットリウム (Y, Z=39) と Mo (Z=42) を識別した結果を示す。

本研究では Mo と Cu を積層構造にした複合ターゲットを検討した。図 3 に Mo/Cu 多層構造に電子線を入射した場合のシミュレーション結果の一例を示す。入射電子線のエネルギー、Mo と Cu の各層の厚さを変えることにより発生する X 線のスペクトルを調整できる。

Cu と Mo の特性 X 線の強度が同程度になるように調整した際の X 線スペクトルを図 4 (a) に示す。また、識別対象の Fe、Cu、Y、Mo の透過スペクトルを図 4 (b) に示す。Cu と Mo の特性 X 線が識別対象の元素の吸収端の間にあることがわかる。特性 X 線がない場合の画像と特性 X 線がある場合の画像の差分をとることにより Fe と Cu、Y と Mo を識別することが可能となる。

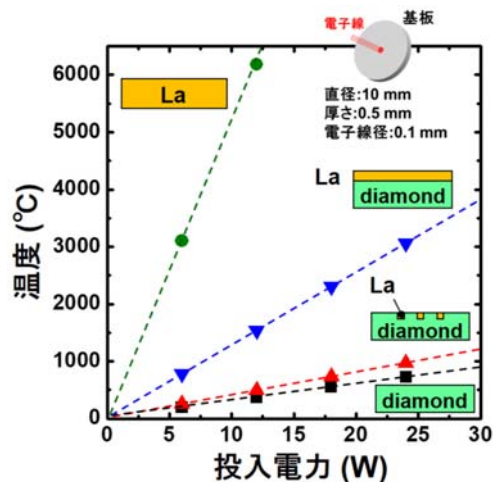


図 1 有限要素法による熱解析。

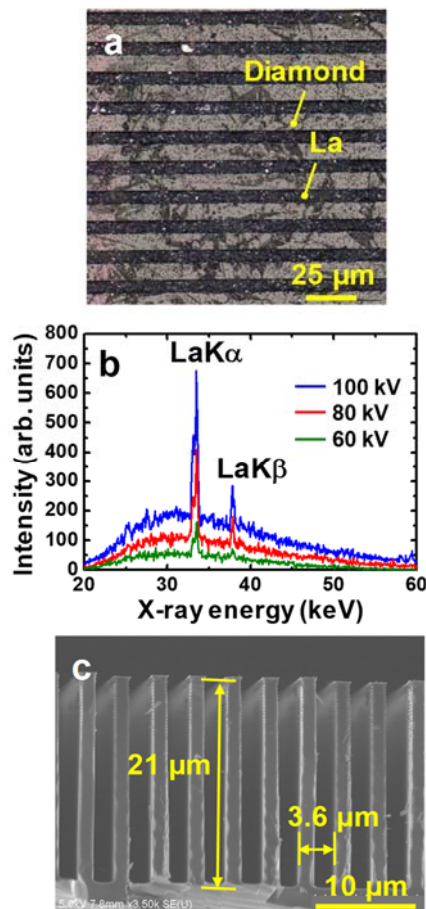


図 2 (a) La 埋め込み X 線ターゲットの光学顕微鏡像. (b) La 埋め込み X 線ターゲットからの X 線スペクトル. (c) Si  $\pi/2$  位相格子の断面 SEM 像。

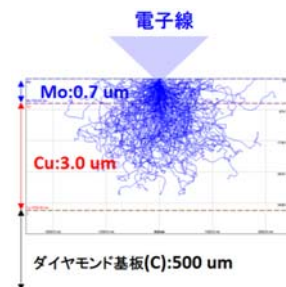


図 3 複合ターゲットに電子線が入射した際の電子線の飛程のシミュレーション結果。



図5に差分前の像と共に差分像を示す。差分前は元素の X 線吸収量の差に対応したコントラストが確認できる。差分像では背景よりも明るい暗いかで鮮明に元素識別されていることがわかる。

最後にフッ素樹脂(PVDF)、Cu、Co 細線の吸収像、位相微分像、差分像を図6に示す。位相微分像では吸収像で非常にコントラストが低いPVDFが鮮明に確認でき、軽元素に対して感度が高いことがわかる。さらに差分像ではCuとCoの明暗が背景に対して反転しており、元素識別が可能であることを示している。

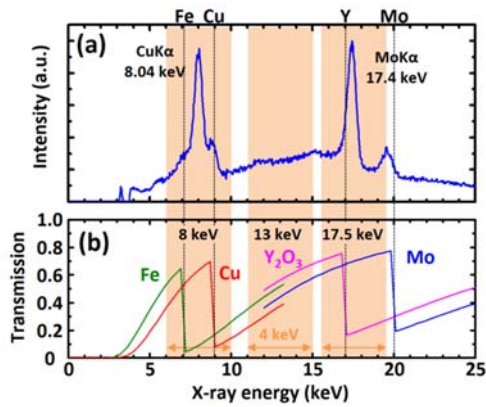


図4 (a)複合ターゲットからの X 線スペクトル. (b) Fe, Cu, Y, Mo の透過スペクトル.

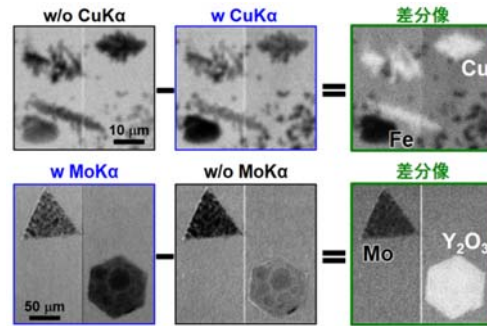


図5 特性 X 線を利用した元素識別.

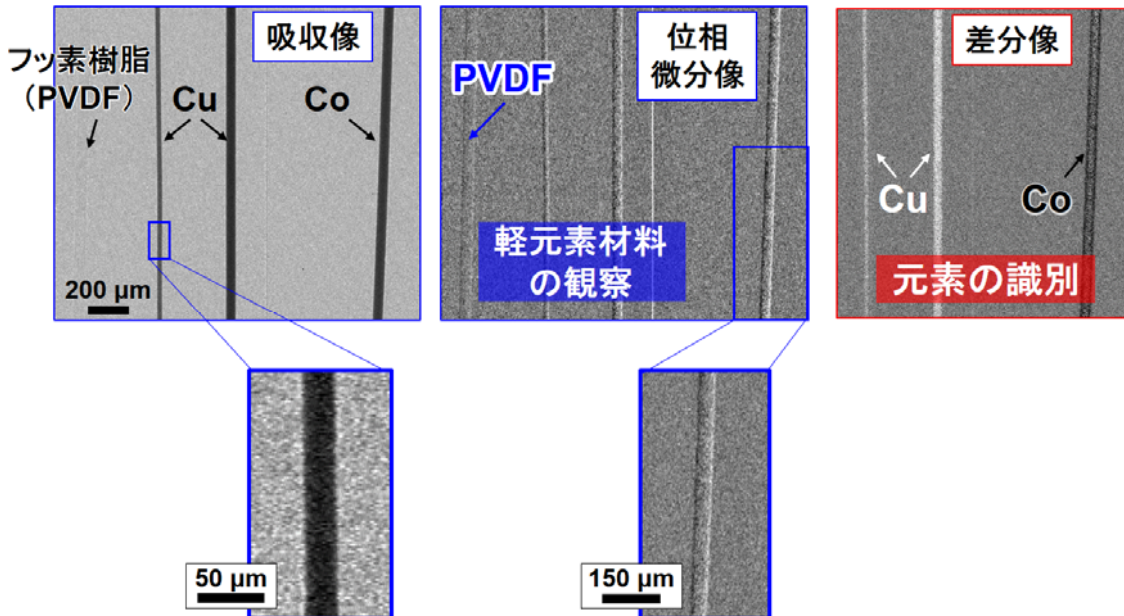


図6 フッ素樹脂(PVDF)、Cu、Co 細線の吸収像、位相微分像、差分像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Hosono, T. Kawabata, K. Hayashida, T. Kudo, K. Ozaki, N. Teranishi, T. Hatsui, T. Hosoi, H. Watanabe, and T. Shimura	4. 巻 26
2. 論文標題 Advancement of X-ray radiography using microfocus X-ray source in conjunction with amplitude grating and SOI pixel detector, SOPHIA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 21044-21053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.26.021044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 R. Hosono, T. Kawabata, K. Hayashida, T. Kudo, K. Ozaki, T. Hatsui, N. Teranishi, T. Hosoi, H. Watanabe, and T. Shimura
2. 発表標題 Grating-based X-ray Phase Contrast Imaging with a Microfocus X-ray Source by a SOI Pixel Detector, SOPHIAS
3. 学会等名 The 1st Workshop on Quantum Beam Imaging
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田 椋南子, 塚本 大裕, 細井 卓治, 渡部 平司, 志村 考功
2. 発表標題 マルチラインLa埋め込みX線源を用いたX線位相イメージング
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Fukuda, A. Yamazaki, D. Tsukamoto, T. Hosoi, H. Watanabe, and T. Shimura
2. 発表標題 X-ray phase-contrast imaging using Talbot-Lau interferometer with lanthanum targets embedded in diamond substrates
3. 学会等名 X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings (XNPiG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Hosono, K. Hayashida, T. Kudo, K. Ozaki, N. Teranishi, T. Hatsui, T. Hosoi, H. Watanabe, and T. Shimura
2. 発表標題 Multi-energy x-ray phase contrast imaging using subpixel analysis and multilayer x-ray target in optical system of microfocus x-ray source and SOI pixel detector, SOPHIAS
3. 学会等名 X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings (XNPIG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	渡部 平司 (Watanabe Heiji)  (90379115)	大阪大学・大学院工学研究科・教授  (14401)	
連携研究者	細井 卓治 (Hosoi Takuji)  (90452466)	大阪大学・大学院工学研究科・助教  (14401)	