

X線タルボ・ロー干渉計による非破壊検査

Non-Destructive Inspection System Using Talbot-Lau Interferometry

巻 瀧 千 穂* 北 村 光 晴* 萩 原 清 志*
Chiho MAKIFUCHI Mitsuharu KITAMURA Kiyoshi HAGIWARA

要旨

現在、地球温暖化の緩和を目的とした低炭素社会の実現が世界的な課題となっている。このため自動車や航空機の製造業が中心となって、軽量化、駆動効率化のため革新的新素材の開発を進めているが、開発の効率化、信頼性向上のため新たな検査方法の確立が求められている。

X線タルボ・ロー干渉計による位相コントラスト技術は、従来の吸収コントラスト技術では描写困難な軽元素で構成される物質の描写性に優れ、マイクロメートルオーダーの微小構造体を画像化できるため、新たな非破壊検査手法として近年注目を浴びている。一方で、非破壊検査では大きく厚い対象の検査が求められ、そのためにはX線の管電圧を高め、高エネルギーの透過力の高いX線を使用する必要がある。しかしながら、タルボ・ロー干渉計では、画像形成に欠かせないX線格子の遮蔽性能が不足するため、一般的にX線の管電圧は40kV程度に制限されるという課題があった。

我々は医療用診断装置で培ったX線タルボ・ロー干渉計の技術を用いて、革新的新素材を対象とした非破壊検査装置を試作した。本装置は、管電圧100kVのX線に対して十分な性能を有す新規開発の積層型G0格子を搭載したことで、干渉に寄与する中心エネルギーをこれまでの28keVから42keVへと高エネルギー化を達成し、X線吸収の小さい高分子材から、これまで困難であったアルミニウム材の厚さ50mmまでの撮影を可能とした。

開発した試作機を用いて、リチウムイオンバッテリー内に生じたガスの他、複合材料の繊維配向性やクラック、アルミダイキャストの微小ポイド群などのマイクロメートルオーダーの微小構造体を明瞭に描写できることを確認した。同様のマイクロメートルオーダーの微小構造の非破壊検査はX線マイクロCTを用いて実現できるが、わずか数mm³の検査に数十分から数時間を要するという課題がある。本装置では、100mm角の領域を10秒程度の短時間でのX線照射時間で検査可能であり、非破壊検査装置として新たな価値を提供できる可能性がある。

Abstract

In recent years, the phase contrast imaging technique using the X-ray Talbot-Lau interferometry has been attracting much attention as a new non-destructive inspection method because of its ability of imaging substances of light elements, which are difficult to image by the conventional X-ray absorption imaging technology, and ability of imaging a micrometer-order cluster. In the non-destructive inspection, a large and thick object has to be inspected, and an X-ray tube voltage needs to be increased for higher X-ray permeability. However, in the conventional Talbot-Lau interferometer, the X-ray grating does not block X-ray sufficiently, and the X-ray tube voltage is therefore typically limited to about 40 kV.

We have developed a prototype non-destructive inspection system for innovative new materials such as those used for vehicles and aircrafts. This prototype system employs a newly developed laminated G0 grating, which can function well for 100 kV tube voltage X-ray, so that available X-ray energy has been increased from 28 keV to 42 keV and the prototype system can image 50 mm thick aluminum.

The prototype system was used to confirm that the prototype system could clearly image micrometer-order microstructures such as gas bubbles in lithium-ion battery, fiber orientation and cracks in composite materials, and a microvoid cluster in die-cast aluminum. While such micrometer-order structures can be inspected non-destructively with an X-ray micro CT, it takes several tens of minutes to several hours for only a few square millimeters area. In contrast, this prototype system can be used to inspect 100 square meter area with about 10 second X-ray irradiation, and a system using Talbot-Lau interferometry therefore has a possibility of providing new value as a non-destructive inspection system.

* 開発統括本部システム技術開発室

1 はじめに

X線が物質を透過する際、物質によるX線の吸収によってX線が減衰する。このX線の減衰を画像化したものは一般に吸収コントラストと呼ばれ、X線の発見以来、医療用の画像診断、産業用の非破壊検査で広く利用されてきた。しかし、軽元素で構成される物質はX線の吸収が小さいため、コントラストがつきにくいという課題があった。一方、X線は電磁波の一種であることから、X線が物質を透過するときX線の位相シフトも同時に起こる。このX線の位相シフトによりX線が屈折するが、これを捉えて画像化したものは位相コントラストと呼ばれ、従来の吸収コントラストに比べて軽元素に対する感度が高いことが知られている¹⁾。2000年代に入ると、特殊なX線源と特殊なX線検出器を必要としないX線タルボ・ロー干渉計²⁾を用いた位相コントラスト技術が盛んに議論されるようになり、生体軟部組織の診断や、軽元素で構成される高分子材などの非破壊検査への応用が期待されている。

現在、我々はタルボ・ロー干渉計を用いた医療用の四肢診断装置を開発し臨床研究を進めているが、低炭素社会の実現に向けて、今後更なる市場拡大が見込まれる電気自動車、航空機の軽量化、駆動効率化などに寄与する革新的新素材を対象とした非破壊検査装置の試作機を開発し、産業用の非破壊検査への適用可能性を検討したので、その成果を報告する。

2 原理

2.1 タルボ・ロー干渉計

タルボ・ロー干渉計の概念図をFig. 1に示す。X線管とFlat Panel Detector (FPD) の間に3枚のX線格子が配置される。X線管の直後に振幅格子G0 (G0格子と呼ぶ) が配置され、G0格子の開口が複数の微小な幅をもつ線状の光源として作用し、これにより焦点径が数百 μm 以上の汎用X線源においても空間的可干渉性が得られる³⁾。G0格子を用いず、マイクロフォーカスX線源を使用するタルボ干渉計⁴⁾に比べて、空間分解能は劣るが、高出力なX線源を用いることができるため、撮影時間を大幅に短縮可能である。可干渉性の高いX線の光路上に位相格子G1 (G1格子と呼ぶ) を配置すると、G1格子から特定の位置にG1格子と同じパターンを生じる。この現象はタルボ効果と呼ばれ、その像は自己像と呼ばれる⁵⁾。このとき光路上に被写体が存在すると、被写体とX線の相互作用によりX線の位相がシフトし、X線が屈折することで自己像が歪む。しかし自己像の歪みは微小であり、一般的な検出器で検出することができない。そのため、自己像と同程度の周期を持つ振幅格子G2 (G2格子と呼ぶ) を自己像が出現する位置に配置することで、より周期の大きいモアレ縞に変換し、モアレ縞の歪みとして位相シフト量を検出できる。

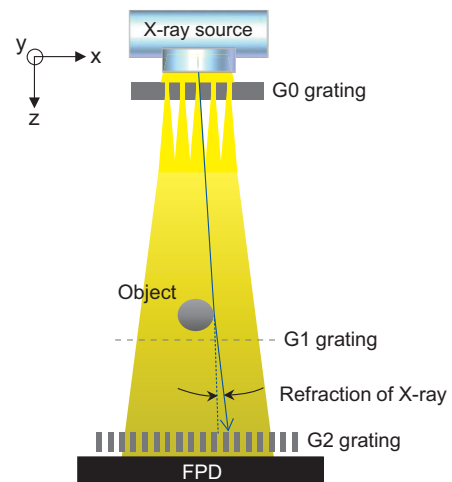


Fig. 1 Schematic diagram of Talbot-Lau interferometer.

2.2 得られる画像の特徴

3枚のX線格子のうち1枚を移動させながら、複数枚のモアレ縞画像を撮影し、演算処理を行うことで、従来の吸収コントラストに相当する吸収画像、位相コントラストである10000分の1程度僅かなX線の屈折角を画像化した微分位相画像、さらにX線の小角散乱を画像化した小角散乱画像⁶⁾の3種類の画像が得られる。我々の装置では、Fig. 4に示すように1方向にX線透過部と遮蔽部を交互に繰り返す、すだれ状格子を使用しているため、微分位相画像と小角散乱画像は異方性を持つ。この異方性を利用し、被写体の角度を変えて撮影した画像から繊維などの配向性を検出することも可能である。

3種類の画像はそれぞれ特徴が異なり、吸収画像はX線吸収が大きい金属系の描写性に優れ、微分位相画像は軽元素で構成される高分子材などの描写性に優れる。小角散乱画像は画素サイズよりも小さいマイクロメートルオーダーの微小構造体の分布を検出でき、繊維、微小なボイド群、クラックなどの描写性に優れる。タルボ・ロー干渉計は1度の撮影でこれら3種類の画像を取得できるため、位置合わせすることなく3種類の画像を使用して複合的な検査が可能である。

3 高エネルギー化技術開発

3.1 干渉計設計

産業用の検査対象は多岐に渡り、X線吸収の小さい高分子材から、X線吸収の大きい金属部品まで幅広く検査できることが求められる。金属などX線吸収の大きい物質は、低いX線エネルギーでは十分に透過しないため、高いX線エネルギーを使用して被写体での透過力を高め、画像ノイズを抑制する必要があるが、微分位相画像と小角散乱画像のノイズは、モアレ縞の鮮明度 (Visibilityと呼ぶ) にも依存し、振幅格子の遮蔽構造のX線遮蔽能力が、高エネルギー化で十分な画質を得られるかの鍵となる。また信号値はX線のエネルギーが高いほど、低下する傾向があるため、信号のエネルギー依存性も考慮し、

装置の各種制約条件の中で信号雑音比(S/N)を最大化する干渉計仕様を矢代らの手法⁷⁾により導出した。Fig. 2にX線エネルギーに対する金の遮蔽率, Fig. 3に干渉計とG0格子の遮蔽厚違いによるVisibilityの計算結果を示す。

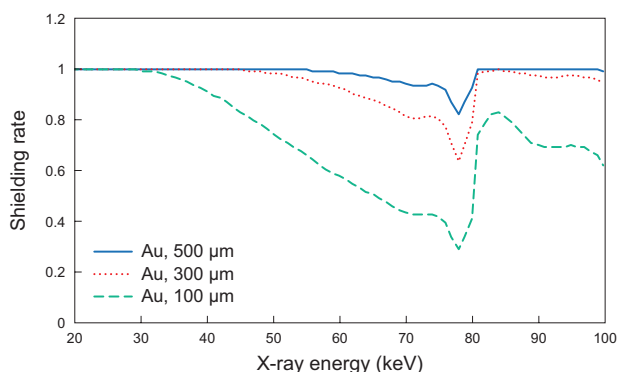


Fig. 2 X-ray shielding rate with respect to X-ray energy for Au having thickness of 100 μm , 300 μm , and 500 μm .

Regarding the conventional 100 μm thick Au, nearly half of X-ray passes through when the X-ray energy is 50 keV or higher. Regarding 300 μm thick Au and 500 μm thick Au, the shielding rate does not largely decrease.

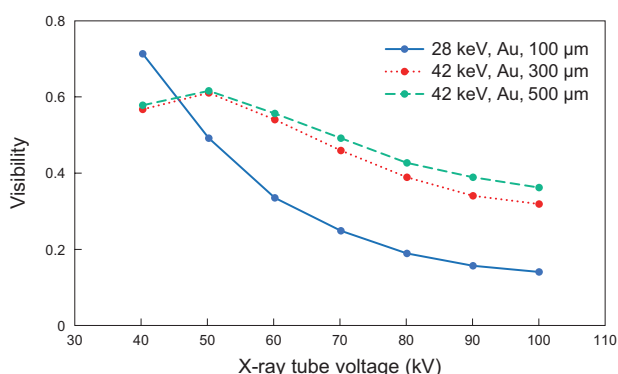


Fig. 3 Calculated visibility for different X-ray energies and shielding thicknesses.

Solid line: Interference energy is 28 keV, and gold equivalent shielding thickness of G0 is 100 μm ;
Dotted line: Interference energy is 42 keV, and gold equivalent shielding thickness of G0 is 300 μm ; and
Broken line: Interference energy is 42 keV, and gold equivalent shielding thickness of G0 is 500 μm .

Regarding the conventional shielding thickness 100 μm , nearly half of X-ray of 50 keV or higher passes through as shown in Fig. 2, and as a result, in the case of imaging by a tube voltage of 100 kV, there is a large decrease in visibility, which is an index of image quality of the differential phase image and the small angle scattering image. When the gold equivalent shielding thickness of the G0 grating is 300 μm to 500 μm , the visibility does not largely decrease, and even when the tube voltage is 100 kV, a sufficiently high-quality image is achieved. As a result, the development target was set to 300 μm or thicker.

従来の振幅格子の遮蔽部は金で形成され, 遮蔽厚は約100 μm であった。そのため, Fig. 2に示すように, 50keV以上のX線エネルギーでは半分近くが透過し, Fig. 3に示すように100kVの撮影では微分位相画像と小角散乱画像の画質性能の指標であるVisibilityは大きく低下し

てしまう。しかし, G0格子の遮蔽厚が金300~500 μm 相当であれば, Visibilityの低下を軽減し, 管電圧100kVにおいても十分な画質性能が得られると推定した。そこでG0格子の遮蔽厚は金換算300 μm 以上を目標として, X線吸収の小さい部品から, アルミニウムの厚さ50mm, アクリルの厚さ200mmまでをバランスよく撮影できるように, 干渉に寄与する中心エネルギーを, これまでの28keVから42keVへと高エネルギー化し, X線の管電圧はこれまでの40~50kVから50~100kVに高めた。これにより, アルミニウムの厚さ30mm以上の撮影において, 微分位相画像のS/Nは2~3倍の改善が期待された。

3.2 積層型G0格子の開発

従来のG0格子は, X線透過部を形成するシリコン基板に, エッチング加工により溝を形成し, その溝にX線遮蔽材である金を充填することでX線格子を形成する。しかしながら, エッチング加工で10マイクロメートルオーダーの溝を精密に深く掘り, かつ溝に金を充填することは技術的難易度が高く, 遮蔽厚は100 μm 程度が限界であった。

本課題を解決するために作製法を大きく転換した。遮蔽厚以上の幅でシート状に加工したX線遮蔽材, およびX線透過材を交互に積層したのち, 研磨することで厚みを制御することで, 従来よりも厚い遮蔽厚を実現した。

積層後の圧着性を付与するため, X線遮蔽材にはX線吸収が大きい粒子と接着性樹脂の混合物を使用した。また, 積層方式では周期構造が乱れやすいという課題があるが, 各層の厚さ, 圧着時の平行度を精密に制御することで, 均一な周期構造を作製する技術を開発し, 金300 μm の厚さに相当するX線遮蔽能力を実現させた。Fig. 4に開発した積層型G0格子の光学顕微鏡による表面観察写真を示す。

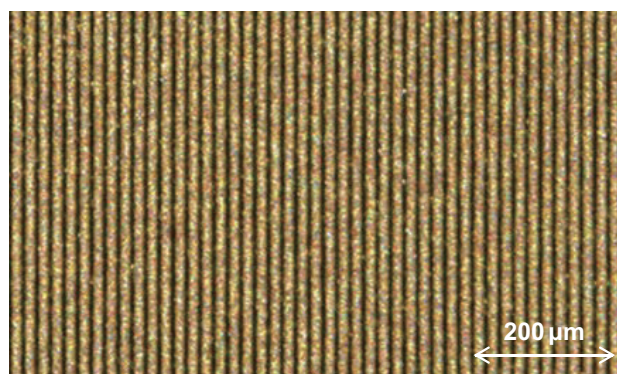


Fig. 4 Optical-microscopic image of laminated G0 grating surface.

3.3 非破壊検査装置の試作機仕様

産業用の非破壊検査装置としての必要要件を満たすため, 装置の主要スペックを下記のように設定し, 試作機を製作した (Fig. 5)。

X線照射時間は任意に設定可能で, 標準X線照射時間は10秒とした。撮影領域はX線格子を大型化することで, 従来の80mm角から100mm角に拡大した。また, より大き

い被写体を任意の角度で撮影するため、被写体を移動・回転可能なステージを搭載し、複数枚の画像を連結することで、最大約200mm角の範囲を撮影可能とした。外装はX線防壁構造とし、X線管理区域の設定が不要で、一般的なラボ環境に設置可能とした。装置の外形サイズは、幅約1000mm、奥行き約1400mm、高さ約2250mmである。



Fig. 5 Outer appearance of prototype non-destructive inspection system.

Fig. 6 に非破壊検査装置の試作機と従来の装置で撮影した結果を示す。被写体は厚さ30mmのアルミニウム板にφ3mmの亚克力円柱を重ねたものを使用した。X線の照射時間は10秒、非破壊検査装置の試作機は管電圧100kV、管電流100mA、従来の装置は管電圧50kV、200mAである。Fig. 6 に示すように、非破壊検査装置の試作機の亚克力円柱の視認性は従来の装置に比べて大幅に改善しており、想定通りのS/Nが得られることを確認した。

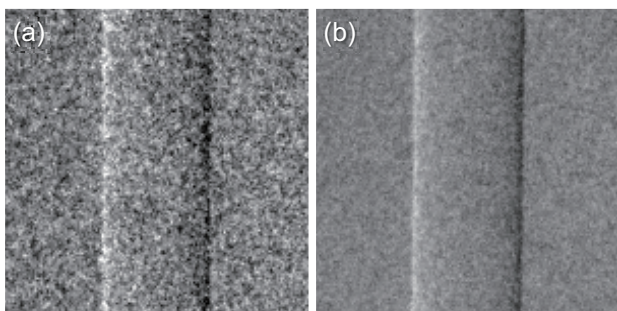


Fig. 6 Differential phase images of 3 mm diameter acrylic cylinder on 30 mm thickness aluminum plate taken by non-destructive inspection with (a) conventional system and (b) prototype system.

4 非破壊検査への適用

今後、航空機、自動車の軽量化、高性能化のため更なる市場拡大が予測されるアルミダイキャスト、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP)、リチウムイオンバッテリー、および航空エンジンの高温部用材料として期待される炭化ケイ素複合材料の撮影結果を示す。

4.1 アルミダイキャストの微小ボイド群

アルミダイキャストは製法上ボイドが内部に発生し、その大きさはミリメートルオーダーからマイクロメートルオーダーまで様々であることが知られている。Fig. 7 に示すように、吸収画像では描写困難なマイクロメートルオーダーのボイド群が、小角散乱画像で雲がかかったように白く描写されることを確認した。現在、マイクロメートルオーダーのボイドは、X線マイクロCTでボイドの形状や個数、体積まで精密に検査できるが、数mm³の検査に数十分から数時間を要する。それに対して、本装置では約100mm角の領域を、10秒程度のX線照射時間で撮影可能であり、ボイド群の分布を特定することが可能である。

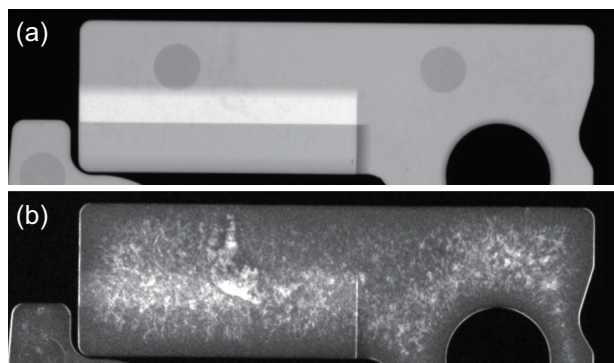


Fig. 7 Radiographic images of die-cast aluminum part, (a) absorption image and (b) small angle scattering image.

A cluster of voids on the order of micrometers, which is not viewed on the absorption image, can be viewed whitish like a cloud on the small angle scattering image.

4.2 CFRTP板の繊維配向性

炭素繊維と樹脂からなるCFRTP板を撮影した結果をFig. 8 に示す。

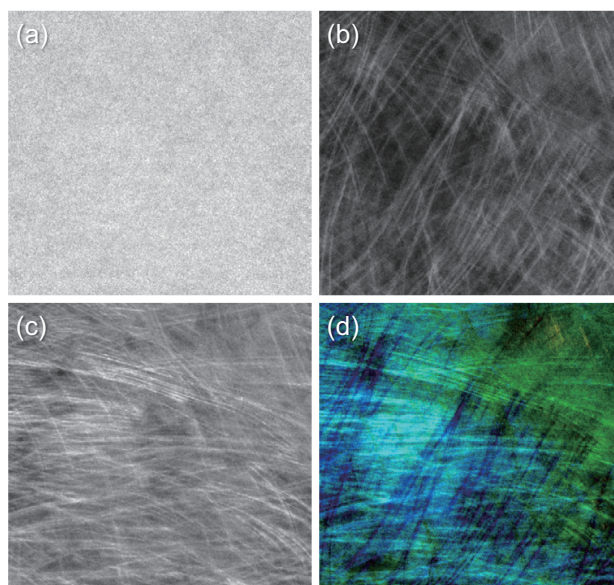


Fig. 8 Radiographic images of carbon fiber reinforced thermo plastic (CFRTP) plate, (a) absorption image, (b) small angle scattering image, (c) small angle scattering image with 60° rotation, and (d) color-mapped image of fiber orientation.

Fig. 8 の(a)と(b)に示すように、吸収画像ではコントラストがつきにくい炭素繊維を小角散乱画像で明瞭に描写できることを確認した。またFig. 8 (c)は、同じCFRTP板を光軸周りに60度回転させて撮影した小角散乱画像である。本装置ではすだれ状格子を用いているため、繊維配向に応じて小角散乱画像の信号が変化する。これを利用して、3方向以上から撮影した画像を用いて繊維の配向を計算することが可能である。一例として、繊維配向に応じて色づけし、配向度（指向性の強さ）に応じて濃度を変えたカラーマップ画像をFig. 8 (d)に示す。

4.3 炭化ケイ素複合材料のクラック

炭化ケイ素複合材料は高温環境下でも耐えられる軽量高強度の革新的新素材である。炭化ケイ素複合材料は、微小なクラックを多数含んでいるが、大きなクラックは強度などの品質に影響するため、クラックの大きさや分布を検査する必要がある。Fig. 9 に示すように、吸収画像では描写困難なクラックを小角散乱画像で明瞭に描写できることを確認した。

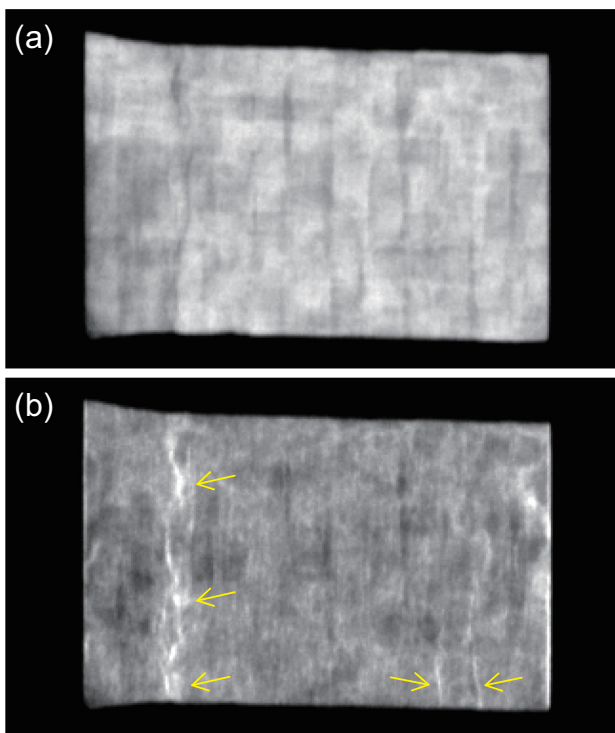


Fig. 9 Radiographic image of SiC composite material⁹⁾, (a) absorption image and (b) small angle scattering image.

Cracks, which are not viewed on the absorption image, are clearly viewed as denoted by arrows in the small angle scattering image.

4.4 リチウムイオンバッテリーの気泡

リチウムイオンバッテリーは充放電を繰り返して劣化が進むと、電解液が分解されてガスが発生する。そのため、非破壊で電池内の気泡を検出できれば、電池の劣化具合の評価につながる可能性がある。Fig. 10 に示すように、吸収画像ではコントラストがつきにくい小さい気泡を、微分位相画像では明瞭に描写できることを確認した。

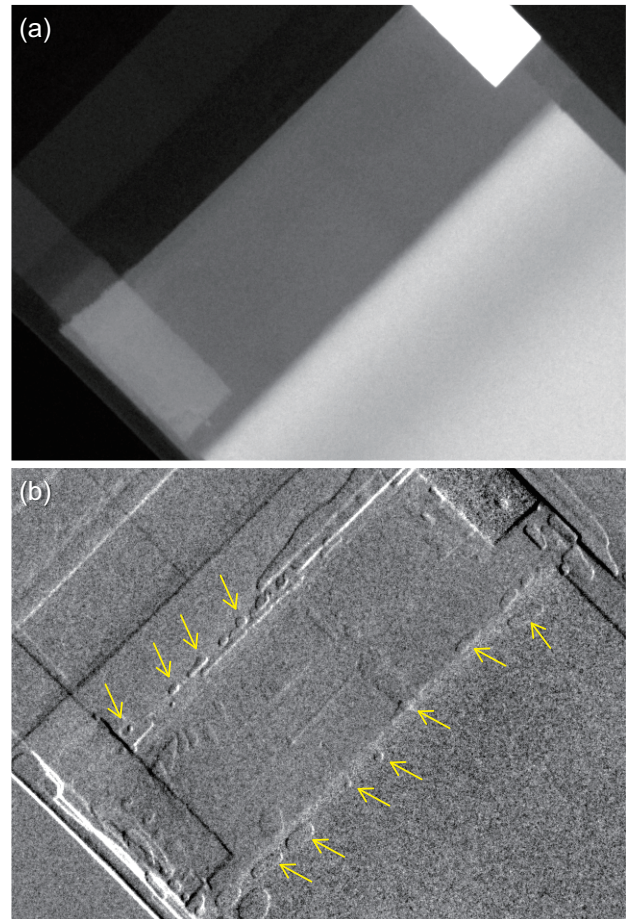


Fig. 10 Radiographic images of lithium-ion battery, (a) absorption image and (b) differential phase image.

Bubbles, which are not viewed on the absorption image, are viewed on the differential phase image.

5 まとめ

従来、製作が困難であった管電圧100kVのX線に対して十分な遮蔽能力を持つ積層型G0格子を開発し、産業用の非破壊検査に最適化した干渉計と組み合わせることで、X線吸収の小さい部品から、アルミニウムの厚さ50mmまで幅広く検査可能な非破壊検査装置の試作機を製作することに成功した。本装置は、既存の非破壊検査装置では成しえなかった大視野かつ高速で、リチウムイオンバッテリー内に生じたガスの他、複合材料の繊維配向性やクラック、アルミダイキャストの微小ボイド群などの検査・分析を可能とした。本装置を用いることで、低炭素社会の実現に向けた電気自動車、航空機の革新的新素材の検査・分析能力の向上、加えて分析結果から特徴量を抽出し、開発上流にフィードバックすることで、開発の効率化にも大きく寄与できると考えている。

6 謝辞

本研究で様々な技術のご教示とご協力をいただいた東北大学の百生敦教授および矢代航准教授、東京工科大学の香川豊教授および佐藤光彦特別研究教授に感謝します。

●参考文献

- 1) 百生敦, 光学, 29, 287 (2000)
- 2) P. Pfeiffer, Nature Physics 2, 258 (2006)
- 3) E. Lau, Ann. Phys. (Leipzig), 6, 417 (1948)
- 4) A. Momose, Jpn. J. Appl. Phys., 42, L866 (2003)
- 5) H. F. Talbot, Philos. Mag., 9, 401 (1836)
- 6) P. Pfeiffer, Nature Materials 7, 134 (2008)
- 7) W. Yashiro, Opt. Soc. Am., 25, 2025 (2008)

●引用

- 8) 第3回 [関西] 高機能セラミック展・ポスター (東京工科大学)
(2018年5月9日～11日インテックス大阪)