

産業用X線CT撮像における金属アーチファクトの除去

坪井 瑞輝*¹鴨井 督*²小山 洋太*²水上 莉沙*³

[要 旨]

当センターではX線CTによる非破壊検査を利用できる。金属材料のX線CT撮像においては、ビームハードニングによる金属アーチファクトが発生する。金属アーチファクト除去に必要なX線減衰率の値について、金属ファントムから取得した場合と、ファントムを使用せずにX線のスペクトルと金属のX線遮蔽特性から求めた値を使用した場合について結果を比較し、どちらも金属アーチファクトの除去に有効であることを確認した。

1 はじめに

当センターでは産業用マイクロフォーカスX線CTを設置している^{1,2)}。本装置は管電圧最大230kV、管電流最大600 μ Aの出力に対応している。これにより、プラスチックなどの樹脂からアルミ等の軽金属、さらにはX線遮蔽性能の高い鉄や銅でもX線透過像を得ることができ、これらを用いた製品の内部を非破壊で観察することができる。X線CTを用いた非破壊検査では、撮像対象を任意の断面で切断した断面図を、実際には切断せずに取得することができる。本装置の外観を図1に示す。

X線CT撮像では、対象のX線透過像を撮像しながら、対象を回転させることで透過像を360度にわたって取得し、その情報をコンピュータで再構成することで内部の断面画を得ている。

これらの撮像・再構成の過程では様々なノイズが発生する。X線CTの断面画像に発生するノイズをアーチファクトと呼ぶ。アーチファクトは発生原因や見た目により分類されるが、撮像対象が



図1 X線CTシステム TOSCANER-32300 μ FD;
東芝ITコントロールシステム株式会社

金属であることを原因として生じるアーチファクトを金属アーチファクトと呼ぶ。

金属アーチファクトは主に、金属をX線が透過した時に起こるビームハードニングという現象により生じる。ビームハードニングとは、金属を透過するときにX線のスペクトルから長波長成分が除去され短波長成分が多く残ることで、スペクトル全体の波長が短く(硬く)なる現象である。

X線CTの再構成プロセスでは、原理的に対象に照射したX線が材料に固有の減衰率で指数関数的に減衰することを前提として再構成を行っている。スペクトルの変化はこのような前提から外れ

*1 応用技術課 副主査

*2 応用技術課 主任研究員

*3 応用技術課 技師

るため、再構成の際に実際とは異なる像を生じさせ、金属アーチファクトが生じる。

金属アーチファクトの対策としては主に二つの方法があり、これらを併用する。一つはフィルタの使用である。あらかじめ金属フィルタを用いて長波長成分を除去しておくことで、ビームハードニングの発生を抑制できる。もう一つの手法は、再構成の際にビームハードニングの影響を見込んで再構成する手法である。

当センターで導入している装置では、サイズが既知の参照用試料（ファントム）によるX線の減衰率を測定することで参照データとし、再構成の際、参照データによる補正を行うことで金属アーチファクトの発生を軽減する機能（ビームハードニング補正機能）が実装されている。補正に必要なファントムは撮像対象と同じ材料でできた直径が既知の金属円柱である。ファントムを撮像対象と同じ条件（管電圧・フィルタなど）で撮像して参照データを作成し、補正を行うことができる。

しかしこの補正を実行するためには撮像対象と同じ素材のファントムを用意する必要があり、測定条件を変更するたびにファントムの撮像も行う必要があるため、撮像対象が多種類の場合など本機能を使用しづらい場合も多かった。

計算により求めた値によりビームハードニング補正が可能であれば、補正の手間を大きく軽減できることが期待される。そこで今回、ファントムの撮像に代えて、X線のスペクトルと金属のX線遮蔽特性から計算によりX線の減衰率を求めることを試みた。また、金属ファントムから得られたX線減衰率によりビームハードニング補正をした場合と、計算により求めた値からビームハードニング補正をした場合について、撮像結果及び補正の効果を比較した。

2 補正用X線減衰率データの取得

金属ファントムの撮像と、X線スペクトル及び金属のX線遮蔽特性から計算することの二通りの手法により参照データの取得を行った。金属ファントムについて、本研究ではアルミ製と鉄製のファントムを使用した。

本研究に使用した金属ファントムを図2に示す。

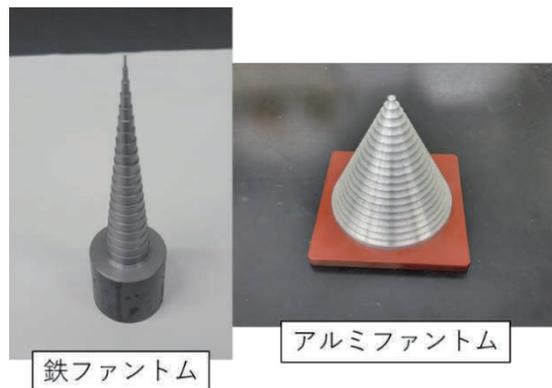


図2 金属ファントム（鉄・アルミ）

アルミファントムはX線CT装置に付属していたものである。鉄ファントムについてはアルミファントムの形状を参考に、センター内の設備を使用して旋盤加工により作製されたものである。金属ファントムは円柱を階段状に並べた形状をしており、1サンプルから様々な直径の金属円柱の減衰率を取得できる。金属ファントムの最大直径はそれぞれ、アルミが100 mm(5 mm×20段)、鉄が20 mm(1 mm×20段)であり、X線の透過強度が3%程度になる厚みに対応している。

金属ファントムのX線減衰率の測定は、X線CT装置に付随している機能を使用した。測定に使用する管電圧を設定し、ファントムを試料台に設置することで各段ごとのX線減衰率を自動で取得することができる。

それぞれの金属の撮像における、X線出力条件は表1のとおりである。

表1 ファントムの金属種と、X線減衰率の測定条件

金属	管電圧	管電流	フィルタ
アルミ	150 kV	500 μ A	Al:0.5 mm Cu:0.4 mm
鉄	200 kV	500 μ A	Al:0.5 mm Cu:0.8 mm

ファントムを用いて取得したアルミと鉄のX線減衰率の値を図3に示す。

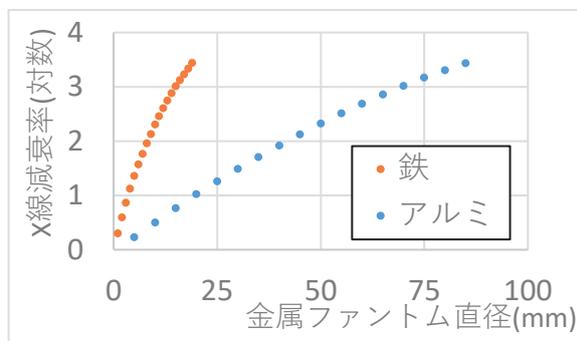


図3 金属ファントムのX線減衰率

直径に対してX線減衰率の対数は、ビームハードニングのため直線にならず、曲線になっていることが確認できた。

もう一つの手法として、金属のX線減衰率を計算により求めた。

X線のスペクトルと、金属の光子エネルギーごとのX線遮蔽特性から、任意の厚みの金属を透過した時の、X線の減衰率を計算できる。今回、X線スペクトルは SPekPy³⁾を用いて取得した。SPekPy は、任意の管電圧を印加したX線管から発生するX線のスペクトルを計算できるコードであり、Python で記述されている。また、web 上⁴⁾で利用できる形式でも公開されており、ブラウザから任意の管電圧と他のパラメータを入力することにより、X線スペクトルの値を得ることができる。

金属のX線遮蔽特性についてはアメリカ国立標

準技術研究所 (NIST) が公開している値⁵⁾を使用した。こちらも web サイト上で公開されており、原子番号1の水素から原子番号92のウランまで任意の元素について、光子エネルギー範囲 0.001 keV から 433 keV までの遮蔽特性を入手できる。

入手したX線スペクトルと金属のX線遮蔽特性の値より、表1のフィルタを透過したX線のスペクトルを求め、そこから金属を任意の厚み透過した時のスペクトル及び減衰率を求めた。

鉄材料について厚さ0 mm ~ 9 mmの鉄板を透過した場合のX線スペクトルを計算した結果を図4に示す。X線スペクトルの初期条件(0 mmの値)は、管電圧200 kVで発生させたX線が金属フィルタ(アルミフィルタ0.5 mm、銅フィルタ0.8 mm)を透過したスペクトルである。

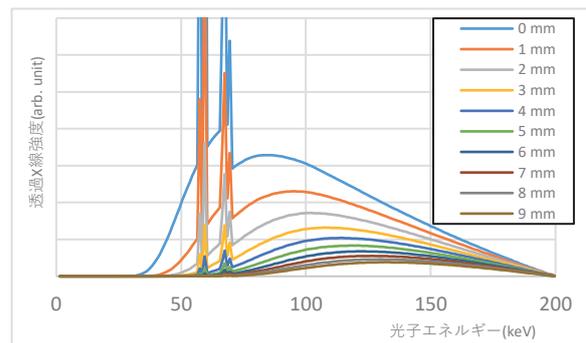


図4 鉄板透過後のX線スペクトル (計算値)

得られたスペクトルを光子エネルギーについて積分することでX線の強度が得られ、各X線強度を比較することでX線の減衰率を求めることができる。鉄とアルミ材料について、X線減衰率の測定値・計算値を図5に示す。

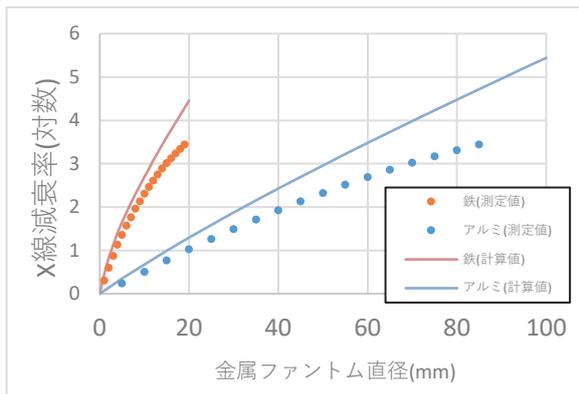


図5 鉄・アルミのX線減衰率（測定値・計算値）

どちらの金属についてもX線減衰率の測定値と計算値は、測定値の方が減衰率が小さくなる傾向が見られた。金属ファントムの測定値は、対応する直径の金属円柱のX線減衰率より得ているが、測定の際、中心を透過するX線以外に、周辺部分を通じたX線が散乱光となり、減衰率が小さくなっていったと考えられる。

X線CT装置の検出器であるフラットパネルディテクタの、光子エネルギーごとの感度特性も結果に影響を与えるが、今回の検討からは省略した。

3 撮像結果

ファントムの測定や計算により得られたX線減衰率の値をX線CT装置に付属のソフトに入力することでビームハードニングを補正した再構成が行われる。

鉄円柱のX線CT撮像について、ビームハードニングの補正を行わない場合と、ファントムの測定値を用いて補正した場合、計算値を用いて補正した場合のそれぞれの撮像結果を図6に示す。下部は円柱の中心を通る線に沿って、グレイバリューの数値を表したグラフである。

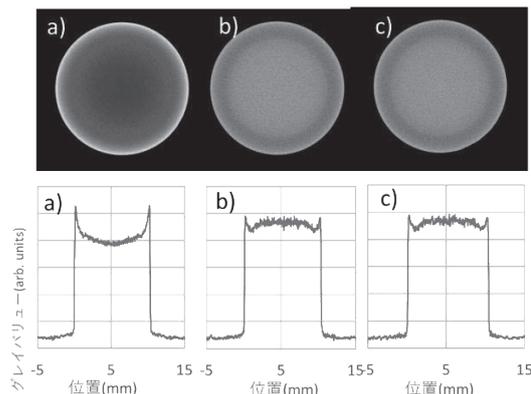


図6 上：鉄円柱(直径 10 mm)のX線CT画像。下：画像のグレイバリュー。それぞれ、a)補正なし。b)鉄ファントム測定値を用いて補正。c)計算値を用いて補正

補正を行っていない場合は、単一の材料で構成されているにも関わらず、鉄円柱の表面が白く（X線遮蔽性能が高く）表示され、反対に中央は黒く（遮蔽性能が小さく）表示された。金属ファントムを用いて補正した場合は、色ムラは残るがより均一に表示された。グレイバリューで比較すると、補正なしの場合は表面部分の値が高く、内側も一定値でなく、お椀型のプロファイルとなった。鉄ファントムで補正を行った方は表面と内側のグレイバリュー数値のギャップが改善されており、内側の値もより一定になった。

計算値により補正を行った場合でも、ファントムを用いて補正を行った場合とほぼ同等の補正効果が得られた。図5に示したとおりX線減衰率は計算値と測定値で一致しなかったが、どちらの値を使用しても同程度の補正の効果が得られた。

次に、アルミ円柱のX線CT撮像について、同様に補正を行った結果を図7に示す。管電圧は150kV、フィルタはアルミ0.5 mm、銅0.4 mmを使用した。

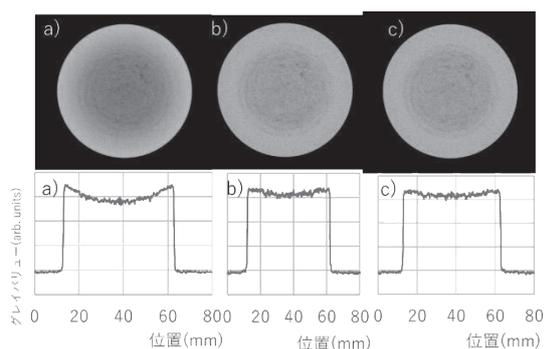


図7 上：アルミ円柱(直径 50 mm)のX線CT画像。下：画像のグレイバリュー。それぞれ、a) 補正なし。b) アルミファントムを用いて補正。c) 計算値を用いて補正

アルミ材料についても、補正を行うことで出力される画像が改善されており、グレイバリューの数値も値がより均一になった。

また、ファントムを用いずに計算値で補正を行った場合も、同程度の補正の効果が得られた。

4 まとめ

X線CT撮像のビームハードニング補正による金属アーチファクトの除去について、ファントムの測定による補正と、X線のスペクトルと金属の透過特性から計算した減衰率の値を用いた補正を行い、計算値を用いた補正でも金属アーチファクト除去の効果が得られることが確認できた。これにより、より柔軟に対象金属や管電圧の変更に対応できることが期待できる。

(謝辞)

本研究の実施にあたり京都府中小企業技術センター機器活用インストラクター杉浦弘忠氏に、研究で使用した鉄ファントムを作成していただきました。本ファントムは研究終了後もX線CT撮像の業務においてビームハードニング補正に活用されています。お礼申し上げます。

当センターのX線CTシステムは、経済産業省平成25年度補正予算事業「地域オープンイノベーション促進事業」により導入しました。

(参考文献)

- 1) クリエイティブ京都M&T, 2016年2月号, p13
“マイクロフォーカスX線CTシステムによる非破壊検査”
- 2) 京都府中小企業技術センター ホームページ 機器紹介 “マイクロフォーカスX線CTシステム” <https://www.kptc.jp/kiki/509/>
- 3) G Poludniowski, A Omar, R Bujila and P Andreo, Technical Note: SpekPy v2.0—a software toolkit for modeling x-ray tube spectra. Med Phys. (2021)
- 4) <https://spekpy.smile.ki.se/>
- 5) Chantler, C. T., Olsen, K., Dragoset, R. A., Chang, J., Kishore, A. R., Kotochigova, S. A., and Zucker, D. S. (2005), X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering Tables (version 2.1). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/ffast> [2024, 2 28]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Originally published as Chantler, C. T., J. Phys. Chem. Ref. Data 29(4), 597-1048 (2000); and Chantler, C. T., J. Phys. Chem. Ref. Data 24, 71-643 (1995).