メタルアーチファクトの低減効果に関する研究

松木　翔二郎 [1)]
[1)] 熊本大学技術部自然科学系第一技術室

１．はじめに

熊本大学では、大学を地域と世界に開放し、地域や社会並びに世界の様々なステークホルダー、他大学、研究機関等と共創する一環として、2023 年 4 月にオープンイノベーションセンターが設置された[1]。これにより、学内の多様な研究機器装置が学内外に開放され、多様な分野に利用されるようになっている。中でも、産業用 X 線 CT（以下、X 線 CT）は、非破壊で物質の内部構造を検査できる装置であることから、電子部品、植物、医療、遺跡、土木等幅広い分野での需要が高まっている。

X 線 CT は、多方向からレントゲン写真を撮影し、撮影画像の解析を行って立体的な画像に変換することで物質の内部構造を断面画像で表現する。つまり、断面画像は画像データの集合体となる。そのため、画像データの良し悪しが品質の良し悪しに関わるが、画像は撮影対象物の形状や厚み、物質の比重差、撮影条件など各種条件で変化するため、何らかのノイズを含むのが通常であり、X 線 CT でより高品質な画像を取得するには、いかにこれらノイズ成分を低減できるかが鍵となる。

このノイズは、アーチファクトと呼ばれ、代表的なアーチファクトには、リングアーチファクト、ビームハードニング、メタルアーチファクトがある。前者 2 つは X 線 CT の装置側で低減可能なノイズのため、各メーカーの装置毎に低減機能が備わっている。一方、メタルアーチファクトは、撮影対象物に起因して発生するノイズで、各撮影者によって対応が必要である。つまり、メタルアーチファクトを低減する技術力が必要不可欠となる。しかしながら、撮影段階でよく使用されるフィルターと呼ばれる金属板を用いた低減方法は、どういった撮影対象物で実施すべきか、どういったフィルターを選択すべきかについて、詳細なルールや検証を行った報告事例もない。

そこで、本研究ではフィルターの選択精度を向上させ、より効果的にメタルアーチファクトを低減させるため、フィルターの材質、厚み、また撮影対象物を構成する物質の比重差に着目した基礎的な検証を実施した。

より多くの読者に本研究の内容を理解頂くため、本報告書は、**第２章**および**第３章**で X 線 CT およびメタルアーチファクトを概説し、**第４章**以降で検証方法や結果を記載する構成とした。

なお、本研究はまだ発展途上にあり、数例の検証を実施した段階である。そのため、「なぜメタルアーチファクトが低減できたのか」に関して考察の域には至っていないため、本報告書では検証結果までを報告する。

２．X 線 CT とは

図１に X 線 CT の概念図を示す。

まず、X 線は X 線管という真空のガラス管内で生成される。ガラス管内にはフィラメント（主にタングステンを使用）があり、フィラメントを加熱すると熱電子が飛び出し、それらが電圧で加速され、陽極の金属ターゲットに衝突し、その際に X 線が発生する。発生した X 線は撮影対象物を透過し、透過した X 線は X 線検出器（フラットパネルディテクター, FPD）で画像に変換される。変換された画像は、ピクセル（pixel）という四角いマスで構成されており、このピクセルは階調と呼ばれる色の濃淡（以下、グレーバリュー）で表現される。グレーバリューは撮影対象物を構成する物質の吸収率の違いで識別され、金属のような吸収率が高い（透過しにくい）物質ほど黒色、空気のような吸収率が低い（透過しやすい）物質ほど白色で表現される。つまり、物質の吸収率の違いをグレーバリューで表現したピクセルの集合体が画像になっている。この画像を”投影像”と呼び、医療界で扱うレントゲン写真に該当する。

X 線 CT では、この投影像を多方向から取得し、全投影像の解析を行って立体的な画像（以下、再構

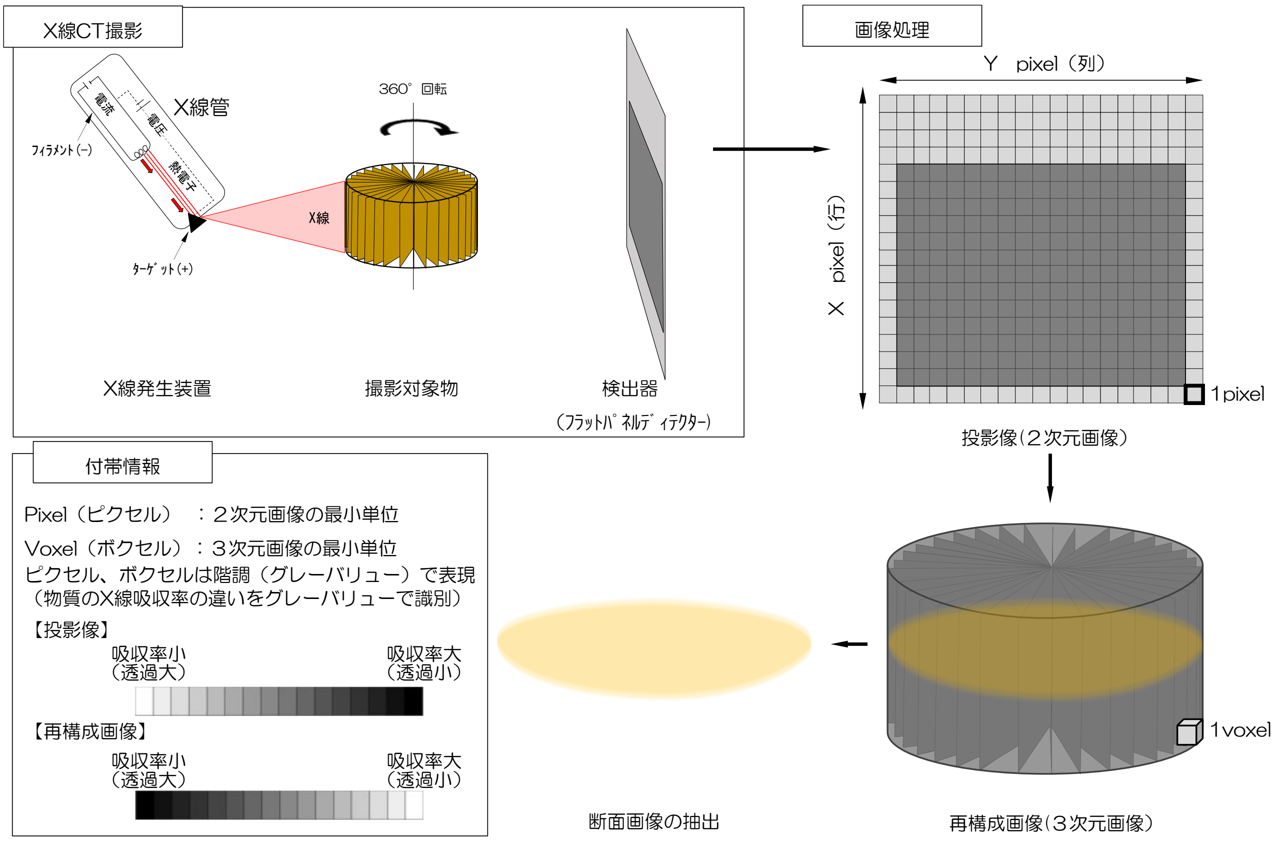


図１　X 線 CT の概念図

成画像）に変換することで、断面画像を取得する装置である。なお、再構成画像はボクセル（Volume Pixel）という 2 次元画像の最小単位ピクセルに奥行（高さ）の情報を付加した単位で構成される。また、再構成画像の各ボクセルもグレーバリューで表現されるが、投影像と反対に吸収率が高い（透過しにくい）ほど白色で表現されるので留意する必要がある。

３．メタルアーチファクトとは

前述した X 線は、波長が非常に短く、大きなエネルギーを持っているため、物質を構成する原子間を通りぬけることが可能（透過作用）である。ゆえに、X 線 CT で投影像が得られる。一方で、X 線は全て透過されるわけではなく、一部の X 線は吸収され、前述したように吸収率の違いが投影像や再構成画像の色の濃淡で表現される。この時、撮影対象物を構成する物質に、吸収率の高い物質が存在した場合、その周辺の吸収率が低い物質の構造が不鮮明となってしまうことがある。これが、メタルアーチファクトと呼ばれるノイズである。一例として、図 2 には *φ*20*mm* のアクリル樹脂の中心に

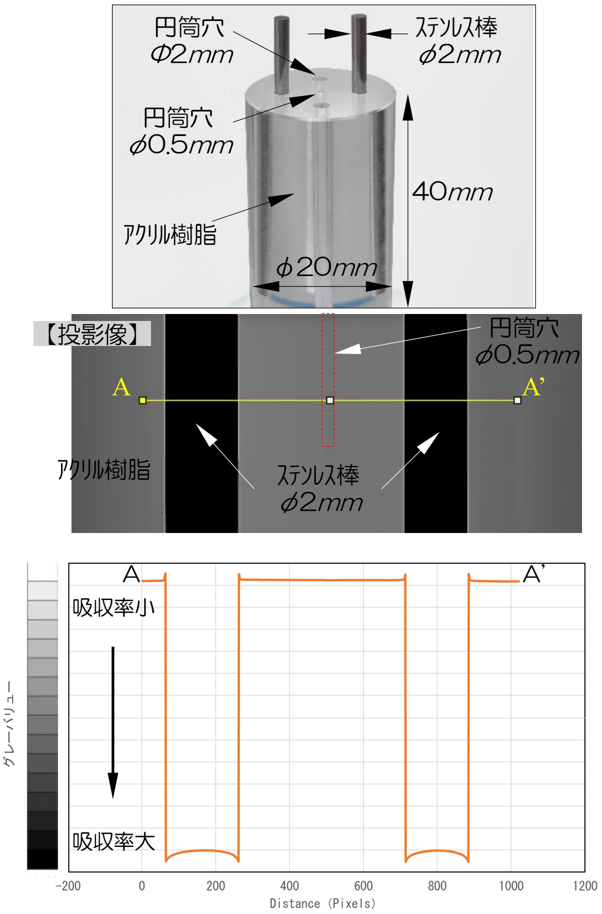


図２　メタルアーチファクト時の投影データ（例）

*φ*0.5*mm* の円筒をあけ、その周辺に 2 本のステンレス棒（*φ*2*mm*）を挿入した試料の投影像を示す。投影像中の A-A'断面のグレーバリューをみると、吸収率の高い物質が存在すると、低比重な物質とのグレーバリュー差が大きくなり、低比重な円筒穴とその周辺のアクリル樹脂のグレーバリュー範囲が概ね同一値となっている（コントラストがなくなる）。**図 3** には、この投影像を基に解析した再構成画像から抽出した断面画像を示す。これをみると、吸収率の高いステンレス棒の影響で、ステンレス棒間にノイズが発生し、*φ*0.5*mm* の円筒穴が捉えきれていない。これが前述したメタルアーチファクトによる影響である。

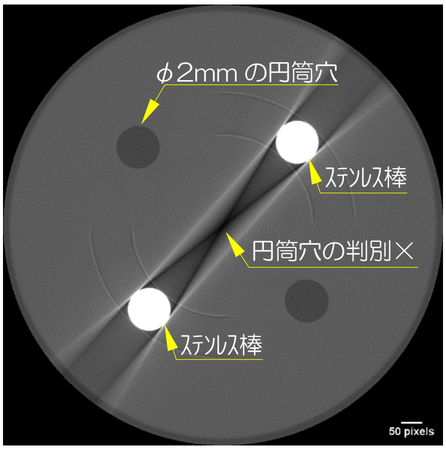


図 3　メタルアーチファクト時の再構成画像(例)

このメタルアーチファクトを低減する手法には主に 2 つあり、1 つは撮影段階で金属製のフィルターを入れる方法、もう 1 つは再構成画像に対して画像処理で低減する方法である。後者は前者による低減効果が不十分だった場合に活用されることが多いため、まずは撮影段階のフィルターでメタルアーチファクトを低減することが必要不可欠である。ただ、撮影段階で金属製のフィルターを入れる方法は、**図 4** に示すようにフィルターを「X 線が照射されるターゲット」と「撮影対象物」の間に介すことで一部の X 線を遮断する方法であるが、

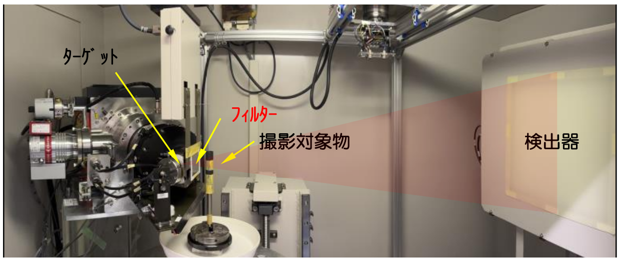


図 4　X 線 CT 撮影時のフィルター設置例

撮影対象物に応じてどういったフィルターが最適なのか具体的に検証した既往事例はなく、フィルター選択は各技術者に委ねられているのが現状である。よって、メタルアーチファクトが発生し得る撮影対象物で最適な再構成画像を取得するには、フィルター選択の精度向上が必要不可欠であると言える。

そこで本研究では、フィルターの材質、厚み、また撮影対象物を構成する物質の比重差に着目した基礎的な検証を実施することとした。

4．実験方法

4.1　撮影対象

図 5 に撮影対象試料を示す。比重 1.3*g/cm3* の硬質ゴムに比重 7.9*g/cm3* のステンレス棒を挿入した試料を準備した。また、比重差によるメタルアーチファクトの低減効果も把握するため、比重 2.7*g/cm3* のアルミ棒も準備した。

硬質ゴムには、赤枠内に 2 箇所の数 10*μm*～数 100*μm* の人工クラックを入れており、本研究では本クラックが検出できるかの検証を実施した。

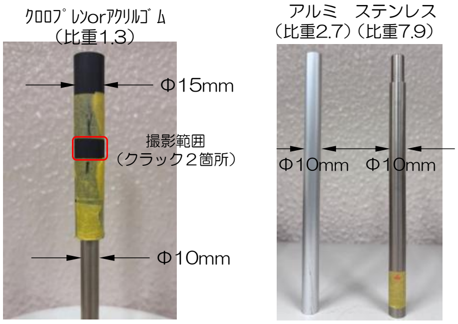


図 5　撮影対象試料

4.2　使用機器

撮影に使用した機器の仕様を**表 1**、外観を**図 6** に

表 1　X 線 CT 機器仕様

	東芝製マイクロフォーカスX線CT
	Toshiba Toscaner-32300FPD
最大出力	230kV/608μA
	140W
X線源	230kV反射型
最小スポットサイズ	4μm
検出器	Flat Panel Detector
画角サイズ	2048×2048 pixel(single) 1024×1024 pixel(corn)
最大ピクセル分解能	4 μm
マニピュレータ	6軸(X,Y,Z,R,微調X,Y)
最大サンプル重量	25kg(微調テーブル5kg)

示す。本学には出力や分解能が異なる 3 台の機器を配備している。今回は数 10μm～数 100μm のクラックを検出するため、数 μm の分解能を有する東芝製マイクロフォーカス X 線 CT を採用した。

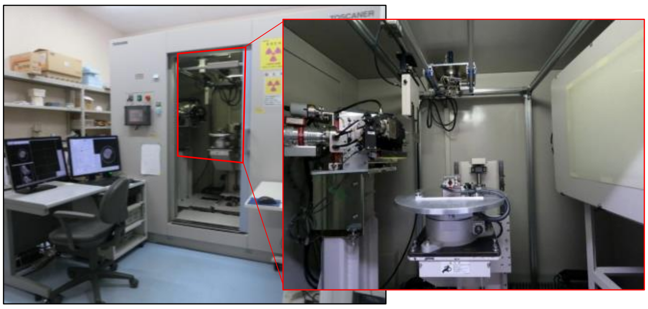


図 6　X 線 CT 機器　外観写真

４.３　フィルターの種類

アメリカ国立標準技術研究所;National Institute of Standards and Technology では、軟 X 線(eV=10^{-3} *Mev*, λ=10^{-9}*m*)～硬 X 線(eV=10^{0}*Mev*, λ=10^{-12}*m*)に対する各元素の質量減弱係数、つまり X 線の吸収しやすさを示す係数が公開されている。その一部を**図 7** に示す。

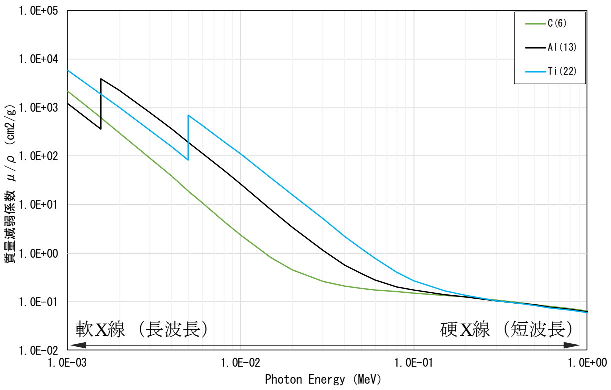


図 7　元素毎の質量減弱係数

ここで、ある物質の X 線エネルギーの透過量は以下式で定義される。

$$D_1=D_0(1+\mu t)e^{(-\mu t)} \qquad (1)$$

D_1:撮影対象物を透過した後のエネルギー(*MeV*)

D_0:軟 X 線～硬 X 線のエネルギー(*MeV*)

μ:線減弱係数(m^{-1})

t:材料の厚み(*cm*)

e:ネイピア数(2.72)

また、線減弱係数 μ は以下式で定義される。

$$\mu=\rho\mu_m \qquad (2)$$

ρ : 比重(g/cm^3), μ_m : 質量減弱係数(cm^2/g)

よって、式(2)を用いて、**図 7** で示す軟 X 線～硬 X 線のエネルギーに対する線減弱係数 μ を算出することができる。加えて、材料の厚み t=0.01*cm* とすると、式(2)の値および**図 7** 中の軟 X 線～硬 X 線のエネルギーを式(1)に代入することで D_1 が算出される。この計算結果をグラフにしたものを**図 8** に示す。

これによると、元素番号が大きいほど軟 X 線のエネルギー側の減衰が指数関数的に大きくなることが分かる。また、炭素以外の元素(Al、Ti)では、特定のエネルギー帯では特異的なエネルギーの減衰がみられる。つまり、フィルターを「X 線が照射されるターゲット」と「撮影対象物」の間に介することで一部の X 線を遮断してメタルアーチファクトを低減させることができるのは、軟 X 線側のエネルギーや、この特異的なエネルギーを遮断していたからであると考えられる。

以上より、検証に用いるフィルターは、この減衰するエネルギー帯が異なる元素で実施するのがよいと考えられ、**表 2** に示す計 7 種類のフィルター材を準備した。なお、**図 9** に示すようにフィルター厚が厚いほどフィルターの X 線吸収率が大きくなるため、フィルターの厚みは 0.1*mm* に統一した。

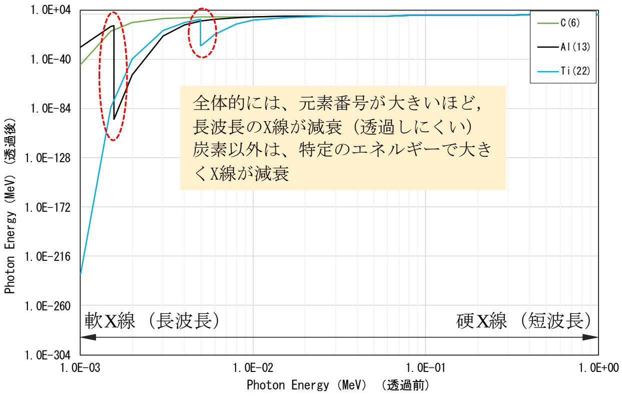


図 8　図 7 中の元素を透過する X 線エネルギー量

表 2　使用フィルターの仕様

材質		比重 (g/cm3)	厚み (mm)
炭素	(C)	2.3	0.1
アルミ	(Al)	2.7	〃
チタン	(Ti)	4.5	〃
銅	(Cu)	8.9	〃
亜鉛	(Zn)	7.1	〃
モリブデン	(Mo)	10.3	〃
タングステン	(W)	19.3	〃

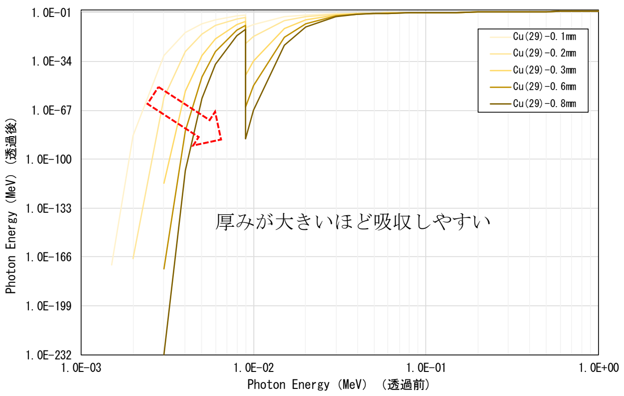


図 9 厚みが異なる銅元素を透過するエネルギー量

４.４　実験条件

実験条件を表 3 に示す。実験は CASE-1～CASE-5 の 5 ケース実施した。

まず CASE-1 では､硬質ゴム単体の撮影を行い、人工クラック形成の確認を行った。次に、CASE-2 では硬質ゴムにステンレス棒を挿入した試料の撮影を行い、メタルアーチファクトの影響を確認した。CASE-3 では、ステンレス棒を比重が低いアルミ棒に変えた場合のメタルアーチファクトの低減効果を確認した。CASE-4 では、硬質ゴムにステンレス棒を挿入した試料に対して、第４．３節に記載した 7 種類のフィルターで撮影を行い、フィルターによるメタルアーチファクトの低減効果を確認した。最後に、CASE-5 では硬質ゴムにステンレス棒を挿入した試料に対して、フィルターの厚みを変更して撮影を行い、フィルター厚の変化によるメタルアーチファクトの低減効果を確認した。なお、今回は銅フィルターで、厚みが 0.6*mm*、1.0*mm* のもので検証した。

表 3　実験条件

Case	管電圧（kV）	管電流（μA）	フィルター	備考
Case-1	150	100	なし	ステンレス棒なし
Case-2	150（230）	100（69）	なし	ステンレス棒あり
Case-3	150	100	なし	アルミ　　棒あり
Case-4	230	69	7種類（C～W）	ステンレス棒あり
Case-5	230	69	2種類（Cu0.6,1.0）	ステンレス棒あり

５．実験結果

５.１　比重差の違いによる検証結果

図 10 の左図に Case-1､中央図に Case-2 の再構成画像から抽出した断面画像を示す。これによると、硬質ゴム単体では人工クラック 2 箇所が明瞭に確認されたが、比重が大きいステンレス棒を入れた Case-2 では、人工クラックが不明瞭となっており、メタルアーチファクトの影響と考えられる。

次に､図 10 の右図に Case-3 の再構成画像から抽出した断面画像を示す。これによると､ステンレス棒と比較して比重の小さいアルミ棒にして硬質ゴムとの比重差を小さくすることで､人工クラック 2 箇所が明瞭に確認された。これより、ある一定の比重差以下ではメタルアーチファクトは発生しないことが言える。なお､どの程度の比重差でメタルアーチファクトが発生するのか､また､その発生傾向に対する最適なフィルター材やフィルター厚との関係性については、引き続きケーススタディを増やして検証が必要である。

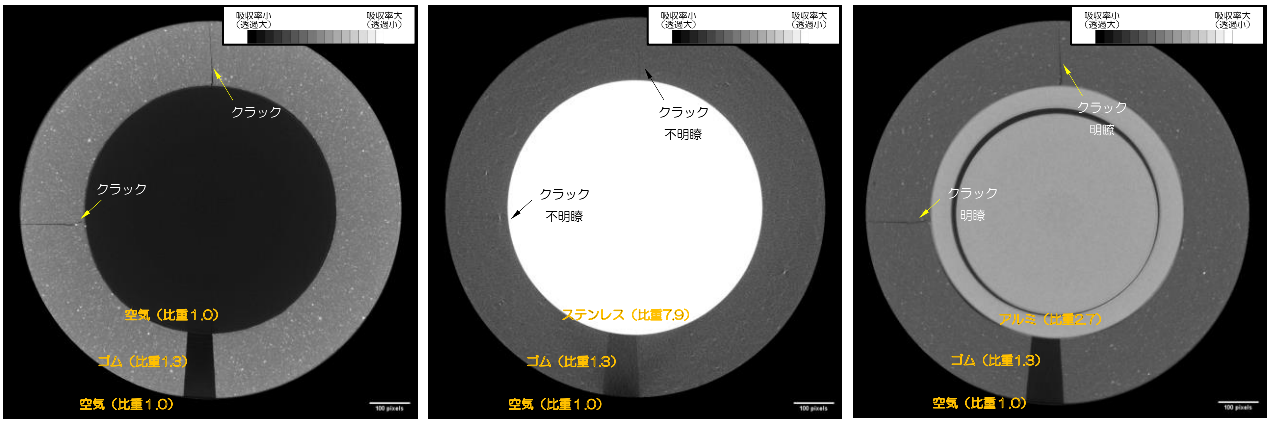
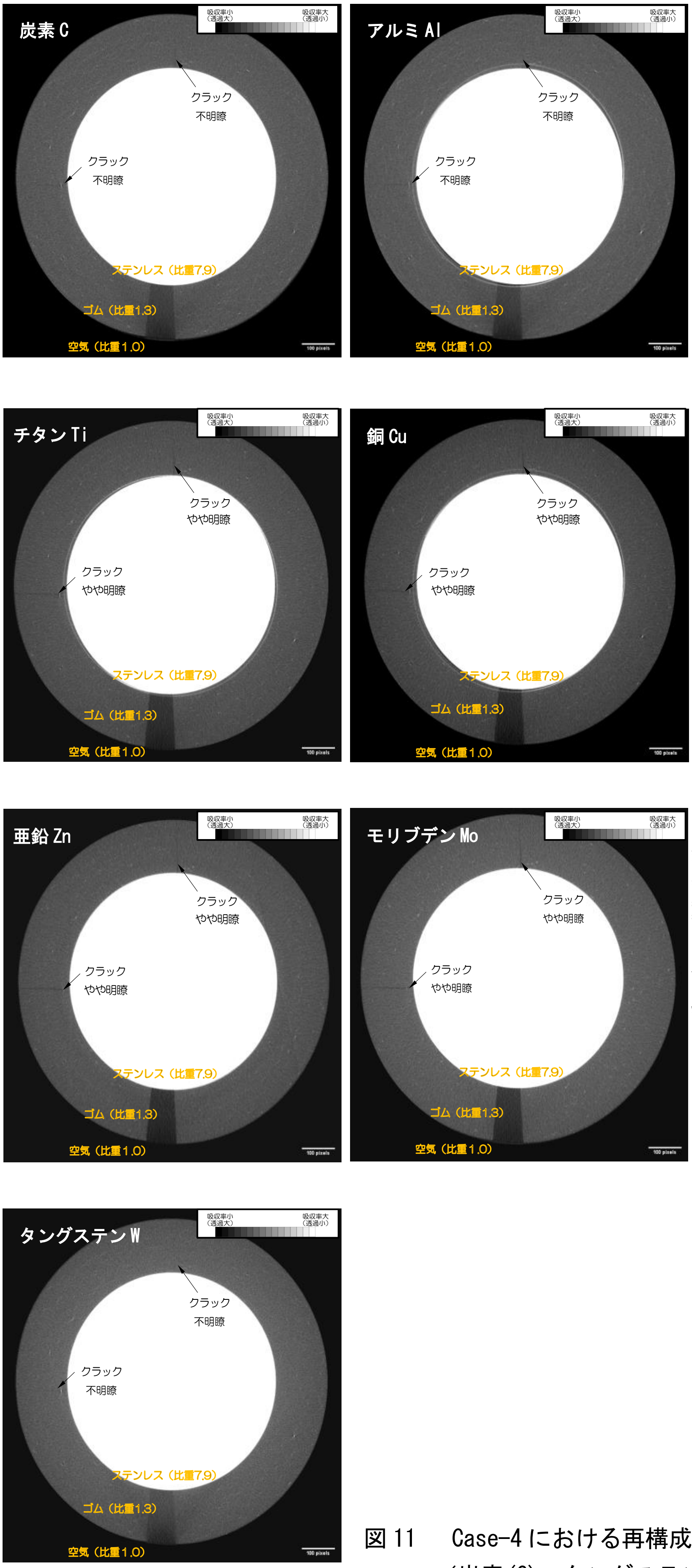


図 10　再構成画像から抽出した断面画像（左図：Case-1、中央図：Case-2、右図：Case-3）



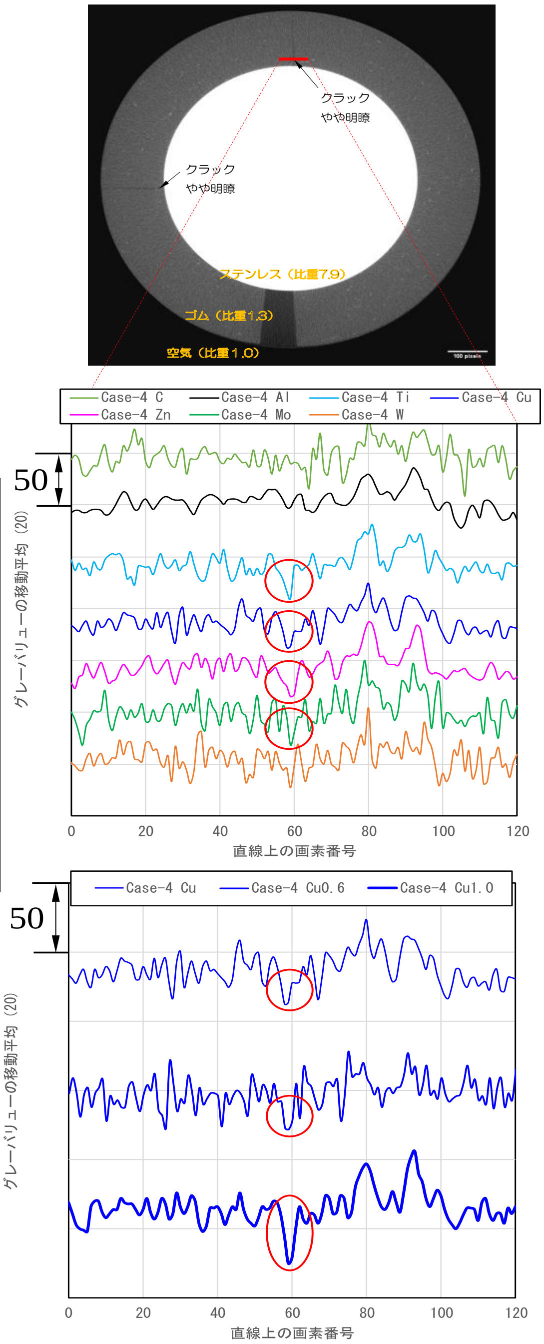


図 12　直線上のグレーバリュー

図 11　Case-4 における再構成画像から抽出した断面画像
（炭素(C)～タングステン（W）のフィルター使用）

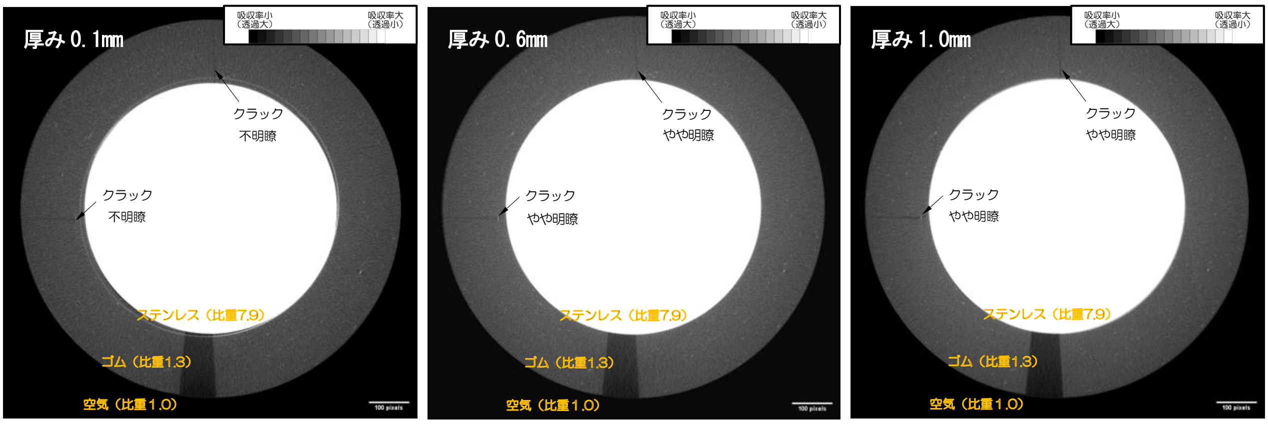


図 13　再構成画像から抽出した断面画像（左図：厚み 0. 1mm、中央図：厚み 0. 6mm、右図：厚み 1. 0mm）

５.２　フィルターの材質、厚みの違いによる検証

図 11 にフィルターの材質を変えた Case-4 における再構成画像から抽出した断面画像を示す。これによると、チタン（Ti）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）、モリブデン（Mo）のフィルターを用いた場合は、フィルターなしと比較して人工クラック 2 箇所がやや明瞭に確認された。**図 12** には、上部側クラックの横断線上のグレーバリュー値を比較した結果を示しており、この図からも上記 4 つのフィルターではクラック箇所でグレーバリューが周囲より低くなっている。つまり、上記 4 つのフィルター材ではメタルアーチファクトが低減され、硬質ゴムとクラック（空気）のコントラストがやや明瞭となったと考えられる。

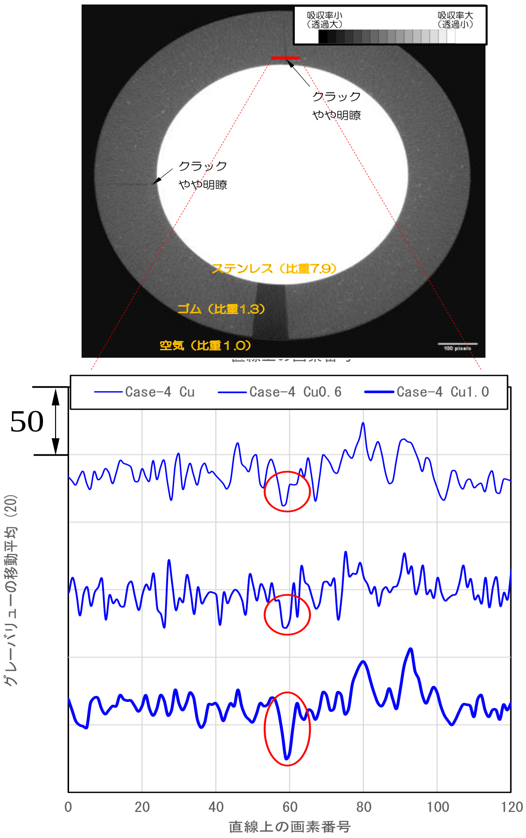


図 14　直線上のグレーバリュー

次に、フィルターの厚みを変えた Case-5 における再構成画像から抽出した断面画像を**図 13** に示す。これによると、銅フィルターの厚みが増すとメタルアーチファクトの低減がみられ、特に、1.0*mm* の場合は、フィルター0.1*mm* と比較して人工クラック 2 箇所がより明瞭に検出された。**図 14** には、上部側クラックの横断線上のグレーバリューを比較した結果を示しており、この図からもフィルター厚が厚いほど、周囲のグレーバリューと差が大きくなっている。つまり、フィルターの厚みを厚くすることでメタルアーチファクト低減され、硬質ゴムとクラック（空気）のコントラストがより明瞭となったと考えられる。

以上より、硬質ゴムとステンレス棒の比重差の場合では、チタン（Ti）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）、モリブデン（Mo）の材質によるフィルターが、メタルアーチファクトの低減に有効で、その効果はフィルターの厚みを厚くすることで、より高まることが確認された。

６．今後の方針

メタルアーチファクトの低減効果について 3 つの検証を行った結果、以下のことが確認された。

<u>①　フィルターの材質による検証</u>

フィルターの材質による検証を行った結果、ゴム（比重 1.3*g/cm3*）とステンレス棒（比重 7.9*g/cm3*）の比重差に対しては、チタン（Ti）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）、モリブデン（Mo）のフィルターを使用すると、メタルアーチファクトが低減され、クラックの検

出精度が向上することが確認された。

② フィルターの厚みによる検証

銅（Cu）を用いて、フィルターの厚みによる検証をした結果、フィルターの厚みを厚くすることで、メタルアーチファクトが低減され，クラックの検出精度が向上することが確認された。

③ 被写体を構成する物質の比重差による検証

ステンレス棒（比重 7.9*g/cm3*）をアルミ棒（比重 2.7*g/cm3*）に変え、ゴムとの比重差を小さくする検証を行った結果、メタルアーチファクトが低減され，クラックの検出精度が向上することが確認された。

この成果を基に、今後は以下 3 つの内容を検証したいと考える。

【検証①】

どの程度の比重差でメタルアーチファクトが発生するのか、また、その発生傾向に対する最適なフィルター材やフィルター厚との関係性の検証。

【検証②】

高比重材の幾何形状、幾何サイズ、幾何配置によるメタルアーチファクトの発生傾向の検証。また、その条件に基づく最適なフィルター材やフィルター厚との関係性の検証。

【検証③】

比重差によってメタルアーチファクトの低減した観点に基づき、比重差を画像処理で軽減してメタルアーチファクトを低減する処理方法の検討。これについては、小関ら[2)3)]によって報告されているX 線 CT 画像からメタルアーチファクトを低減する手法を参考に検討する予定である。

第１章でも記述したとおり、当研究はまだ発展途上にあり、検証①②③等のケーススタディを引き続き実施することで、メタルアーチファクトの発生傾向や発生要因を整理したいと考えている。なお、今回実施したフィルターの材質を変えた Case-4 の成果は、メタルアーチファクトの発生要因の手掛かりになると考えている。

第４.３節中の**図 8** の縦軸を変更した図を**図 15** に示す。まず、フィルターがない場合を考えると、X 線は撮影対象物に直接照射されるため縦軸と横軸は同じ値となり、**図 15** 中の破線がこれに該当する。次に、フィルターがある場合、X 線は撮影対象物に照射される前にフィルターを通過するため、縦軸つまりフィルター通過後のエネルギーはこの破線を下回る結果となる。また、元素番号が大きいほど軟 X 線のエネルギー側に指数関数的に減衰が大きくなる。これが元素毎のフィルター効果である。ただ、ここで注目すべきは、特定のエネルギー帯では特異的なエネルギーの減衰があることである。また、その減衰が大きいエネルギー帯および減衰割合は各フィルターで異なっている。例えば、アルミ（Al）であれば黒色のハッチング付近、チタン（Ti）であれば水色のハッチング付近のエネルギーの減衰が極端に大きい。つまり、今回検証した Case-4 ではアルミ（Al）でクラックの識別が困難であったが、これを**図 15** のグラフを交えて考えると、硬質ゴムとステンレス棒の比重差に対するメタルアーチファクトの低減には、特異的なエネルギーの減衰がチタン（Ti）以上のエネルギー帯で必要であったと推察される。

このようにメタルアーチファクトの低減効果にはこのエネルギー帯と一定の関係性があると推察され、この効果の程度を、撮影対象物を構成する物質の比重差や高比重材の幾何形状、幾何サイズ、幾何配置といったパラメータで見出せないか引き続き検討していきたいと考える。

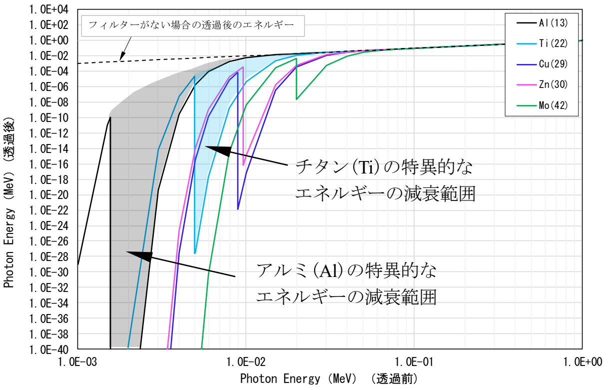


図 15 Ti～Mo の透過エネルギー量

参考文献

[1] 熊本大学オープンイノベーションセンターHP, https://www.oic.kumamoto-u.ac.jp/.

[2] 小関道彦, 橋本修平, 佐藤慎平, 木村仁, 伊能教夫：X 線 CT 画像におけるメタルアーチファクトの低減

アルゴリズム，日本機械学会論文集（A 編），72 巻 724 号，2006.

[3] 木村仁，小関道彦，伊能教夫 : X 線 CT の精度向上のためのアーチファクト低減手法，精密工学会誌，Vol.82，No.6，2016.

謝辞

本論文を執筆するにあたり、産業用 X 線 CT の装置概要や操作方法、撮影結果に対する解釈について、懇切丁寧にご指導・ご鞭撻授かりました吉永技術専門員、橋本技術主任には深く感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。また、当研究を行うための事務支援を頂いた山室技術専門員、松永事務補佐員、材料の加工にご協力頂いた白川技術専門職員初め、工作機器センター所属の技術職員の皆さまにも厚く御礼申し上げます。今後も種々の検討を行い、X 線 CT の発展、技術基盤の向上を形成していきたいと思いますので、変わらぬご指導・ご鞭撻を頂けますとご幸甚です。