

論文

X線CT画像計測技術による上流技術支援システムの構築

紋川 亮*¹⁾ 中川 朋恵*¹⁾ 金城 康人*¹⁾ 桜井 昇*¹⁾ 永川 栄泰*¹⁾
 藤井 恭子*¹⁾ 横山 幸雄*²⁾

Construction of Support System on Upstream Technology with X-ray Computed Tomography

Akira Monkawa*¹⁾, Tomoe Nakagawa*¹⁾, Yasuhito Kinjyo*¹⁾, Noboru Sakurai*¹⁾, Yoshiyasu Nagakawa*¹⁾,
 Kyoko Fujii*¹⁾, Yukio Yokoyama*²⁾

The X-ray computed tomography (XCT) systems have been developed for digital engineering that support processes such as internal dimension measurement, density analysis, actual and designed shape comparison, and reverse engineering. However, it is difficult to acquire a CT image of an industrial product because the XCT image includes some errors. The cause of these errors is beam hardening, ring artifacts, quantum noise and dependency on the condition of accelerating voltage and current. The problem can be reduced by using the best imaging conditions. In this study, we investigated the best conditions of the nano-focus, micro-focus, and high energy XCTs by noting the difference of accelerating voltage and current at the surface of the samples. Also, we changed conditions for the newly introduced nano-focus x-ray CT device and hard x-ray CT device.

キーワード：X線CT，三次元形状計測，デジタルエンジニアリング，STL，CAD，データベース

Keywords：X-ray CT，Three-dimensional shape measurement，Digital engineering，STL，CAD，Database

1. まえがき

X線CT装置は、物体を様々な方向からX線で撮影した画像を再構成処理することで、物体の内部構造を含む3次元画像を得ることができる。これまで、このような特徴を利用して、金属部品や樹脂部品などの微細な内部欠陥（ボイドやクラック）の観察、電子部品の複雑な内部形状の計測や故障原因の解析に利用されてきた。最近、デジタル技術の進歩に伴い、X線CT装置をデジタルエンジニアリングシステムの核として利用する試みが始まっている。デジタルエンジニアリングシステムは、高機能CAD/CAMシステム、3次元造形システム、3次元計測システムを融合し、開発から製造までの効率化と高品質化を実現する技術である。これらの技術を組み合わせることにより、金型を作ることなく、試作・設計を繰り返し、短時間かつ低コストで商品を市場に送り出すことが可能である。本システムの導入により、正確かつ完全な生産・技術データを共有することが可能であり、開発のリスクを軽減することが期待される。

3次元計測システムとしては、デジタイザや、光切断法等が提案されている。これらの方法は、表面形状を正確に測定することが可能であるが、測定物の内部形状を測定することは極めて困難である。これらの測定法に対し、内部空間の有無を判別することができる超音波診断法も提案さ

れているが、この方法も内部形状を正確に把握することは難しい。X線CT装置は、内部構造まで把握できる唯一の3次元計測システムとして期待されている。得られたCT画像データは、STL形式に変換することによりCAD、CAE、3次元プリンターへ出力することができる。図1にCADデータとCTデータの差異を評価(CAT)したデジタルエンジニアリングの一例を示す。CADデータから造形装置で実像にした試料から、投影データ(CTデータ)を取得し、STLデータ化した。これらのデータをCATソフトにより立体的に照合することで、設計に対する製作誤差の解析に利用することができる。



図1.X線CTを利用したデジタルエンジニアリングの例

事業名 平成23年度 基盤研究

*¹⁾ バイオ応用技術グループ

*²⁾ システムデザインセクター

X線CT装置を3次元計測システムとして利用する場合、CTデータの測定精度をいかに向上させるかが鍵となる。CT画像は、測定条件や再構成過程においてアーチファクト(実際の画像とは異なる疑似画像)、ノイズ、ボケなどが発生するため、実際の試料と得られた画像に間に寸法上の差異がみられる。本研究では、それらのCT画像劣化因子を取り除くための測定条件と画像処理法をマイクロフォーカスX線CT装置により検討した。また、今後のデジタルエンジニアリングシステムの構築に向け、新規導入したナノフォーカスX線CT装置、高エネルギーX線CT装置において性能を比較した。

2. 実験方法

2.1 測定条件による画像劣化要因の低減 測定条件及び測定試料の材質・形状とCT画像の関係を観察するために、テストピースを作製した(図2)。テストピースにはアーチファクトが発生しやすいよう、X線吸収率が異なる素材を組み合わせた。(金属等のX線吸収率が非常に高い物質と、樹脂等のX線吸収率が低い物質が混在する場合、撮影方向によってX線通過距離が大幅に異なり、アーチファクトが発生し易い。)テストピース1は0.3mmのアルミと塩ビを交互に積層させたもの、テストピース2は0.3mmの銅と塩ビを交互に積層させたものを用いた。

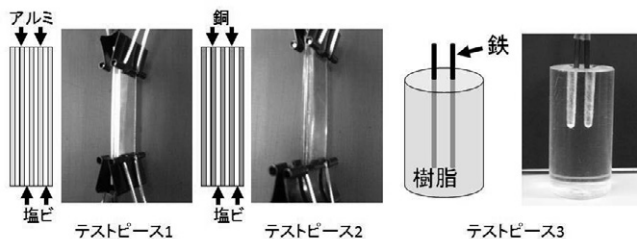


図2. テストピース1, 2, 3の写真と構造

CT画像は、X線の管電圧・電流、及び放出されるX線の線質調整用の金属フィルタをパラメータとし、評価した。管電圧60~160kV、管電流30~100 μ A、金属フィルタは1mm, 2mmを用い、各テストピースでCT画像を取得した。

2.2 画像処理による画質向上 測定条件の最適化だけでは改善が難しい画像劣化の問題を解決するために、画像処理方法を検討した。画像処理は、アメリカ国立衛生研究所(NIH)で開発されたオープンソースである「Image J」を用いた。測定サンプルは、樹脂の中に鉄の棒を2本挿入したテストピース3を用いた(図2)。

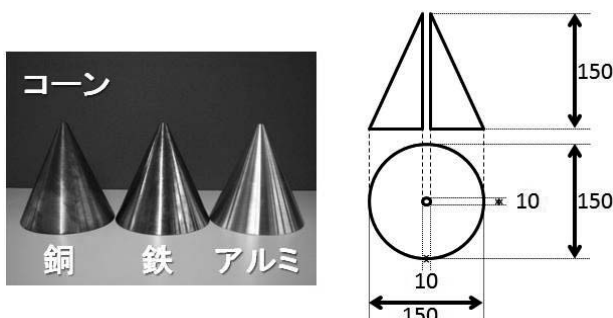


図3. テストピース4の写真と構造

2.3 各種X線CT装置の性能評価 高エネルギーX線CT装置における材料ごとの測定精度を評価するために、異なる材質の標準試料を作製した。銅、鉄、アルミの無垢金属を三角錐に加工し、中心部に直径10mmの穴を開けたものをテストピース4とした(図3)。大型X線CTの管電圧・管電流を430kV, 1.6 μ Aの条件でコーン撮影及びブスライズ撮影を銅、鉄、アルミのテストピースに対して行った。また、高エネルギーX線CT装置(東芝ITコントロールシステム社製TOSCANER-32251 μ hd)、マイクロフォーカスX線CT装置(東芝ITコントロールシステム社製TOSCANER-34500fd)、ナノフォーカスX線CT(ユニハイトシステム社製XVA-160 α)について、分解能を評価するため目の粗さが異なる4種のステンレスメッシュを作製し、テストピース5とした(図4)。

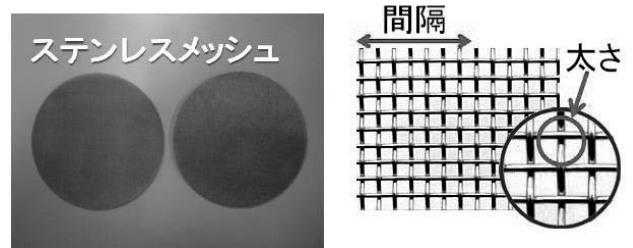


図4. テストピース5の写真と構造

3. 結果と考察

3.1 測定条件による画像劣化要因の低減 図5にテストピース1及び2における測定条件とCT画像の関係を示す。テストピース1の結果は、管電圧・管電流が100kV 30 μ Aの条件で、アーチファクトの発生を抑制し、アルミと塩ビの区別が可能であることを示している。管電圧を下げた場合(70kV 30 μ A)は、アルミと塩ビの区別がはっきりしなかった。一方、管電流を上げた場合と管電圧を上げた場合では、アルミと塩ビを明確に区別することはできるが、リング状の模様が発生した。これは、リングアーチファクトと呼ばれ、回転軸のずれや検出器の感度の不均一性に起因する。

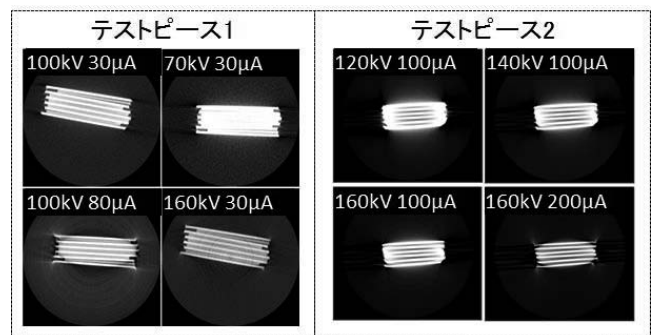


図5. テストピース1, 2における測定条件とCT画像の関係

テストピース2の結果は、いずれの条件においても、銅と塩ビを明確に区別することができないことを示している。さらに、試料とは関係ない部分に線状の模様が観察される。これは、メタルアーチファクトと呼ばれ、低X線吸

収率物質中に、高 X 線吸収率物質（金属）が点在する場合、撮影方向により X 線通過距離が大幅に異なる場合に発生する。テストピース 2 は、銅と塩ビ間の X 線吸収率の差が大きいためメタルアーチファクトが発生したものと考えられる。メタルアーチファクトは、X 線 CT における画像の再構成方法が、X 線吸収係数を一定と仮定しているため発生したと考えられる。

図 6 にテストピース 2 における金属フィルタの厚さと CT 画像の関係を示す。フィルタの厚さが 1 mm の場合、フィルタを用いないで撮影した画像（図 5）と比較して、リングアーチファクトとメタルアーチファクトの発生を軽減できた。しかしながら、銅と塩ビを明確に区別するには至らなかった。フィルタの厚さが 2 mm の場合では、リングアーチファクトの発生を 1mm の場合よりも抑制することができたが、メタルアーチファクトに関しては、1mm の場合とほとんど変化がなかった。これらの結果から、リングアーチファクトとメタルアーチファクトは、金属フィルタを X 線と試料の間に挟むことで軽減することが可能であることがわかった。これは、X 線の低エネルギー成分を除去することで、X 線の強度が弱まり、銅と塩ビ間の X 線吸収係数差が小さくなるためであると考えられる。

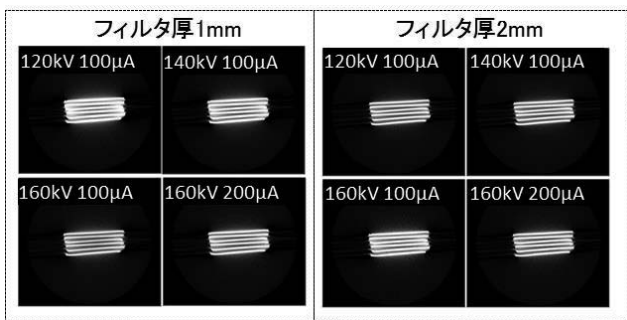


図 6. 金属フィルタの厚さと CT 画像の関係（テストピース 2）

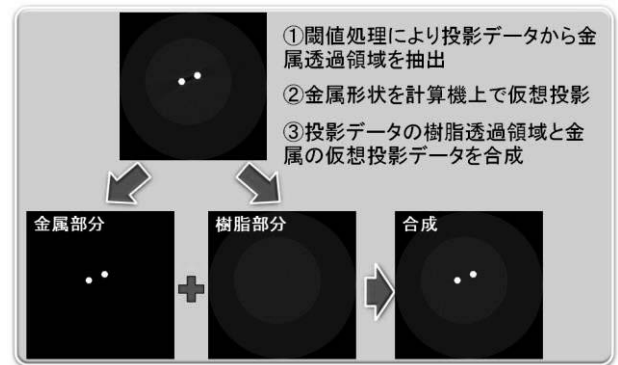
3. 2 画像処理による画質向上 メタルアーチファクトは、CT 撮影条件等のハードの条件改善だけでは回避できないことがわかった。特に樹脂などの X 線を透過しやすい物質の中に銅や鉄が異物として含まれているような試料の場合、メタルアーチファクトの発生により、異物の形状を正確に画像化することは難しい。そこで、この問題を改善するために、3 種類の画像処理法によるメタルアーチファクトの低減を試みた。

図 7 にそれぞれの処理方法と得られた画像を示す。1 つ目は、金属と樹脂の閾値の違いを利用した方法である。まず、閾値処理により投影データから金属透過領域を抽出し、得られた金属形状のみを仮想投影した。そして、投影データの樹脂透過領域と金属の仮想投影データを合成した。その結果、処理前の画像と比較して、金属間に観察された穴を除去することができた。

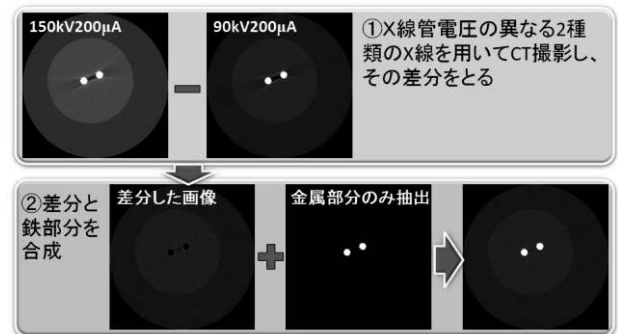
2 つ目は、異なる管電圧で測定した画像の差を利用した方法である。まず、150 kV, 200 µA, 及び 90 kV, 200 µA の異なる管電圧条件で CT 撮影をし、2 種類の投影データを得

た。次に、それらの投影データから差分画像を作成した。そして、差分画像に、閾値処理で得られた金属部分を合成し投影データを得た。この方法は、異なる管電圧で CT 撮影し、その差分から矛盾の少ない投影データを算出することができ、金属間に観察された穴を除去することができた。

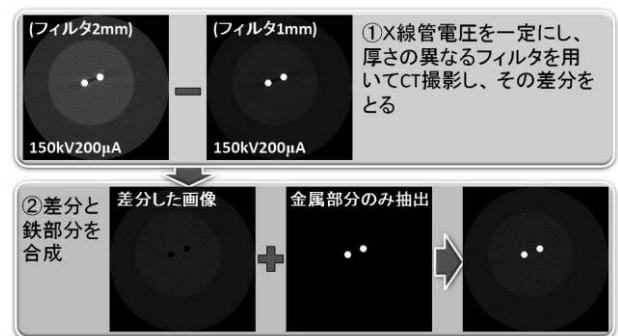
3 つ目は、異なるフィルタで測定した画像の差を利用し、その差分から矛盾の少ない投影データを算出する方法である。まず、150 kV, 200 µA の管電圧条件において、X 線の線質調整を行う金属フィルタを 1 mm 及び 2 mm で CT 撮影をし、2 種類の投影データを得た。次に、それらの投影データから差分画像を得た。そして、差分画像に域値処理で得られた金属部分を合成し、投影データを得た。この方法も、他の方法と同様、アーチファクトを除去することができた。このように、投影データを得た後に材料成分を分けることで、ハード面で改善できない画像劣化要因をソフト面で改善することが可能である。



(1) 閾値処理を用いた合成結果



(2) 異なる管電圧で測定した画像の差を利用した合成結果



(3) 異なるフィルタ厚で測定した画像の差を利用した合成結果

図 7. 画像処理による画質の向上過程

3.3 X線CT装置の性能比較 図8に高エネルギーCT装置によるコーンビーム撮影で得られたテストピース4のX線CT画像を示す。この結果は、鉄が厚さ5cm程度、アルミは厚さ15cm程度まで透過できることがわかった。銅はほとんど透過せず三角錐の上から2cm程度までしか透過できなかった。図9に、高エネルギーCT装置によるスライス撮影で得られたテストピース4(鉄)のX線CT画像を示す。1断面ずつ撮影するスキャン撮影では、撮影領域の上下にコリメータを線源側に設置した。これは、迷光などの余分なX線を除去し、アーチファクトの発生を低減するためである。スキャン撮影では、鉄の場合で約8cmまで透過できることがわかった。これは、コーンビーム撮影より1.6倍ほど透過能力が向上したことを示している。銅に関して、鉄の場合と同様、透過能力の向上が観察された。これらの結果から、スキャン撮影は、コーンビーム撮影と比べ撮影時間は要するが、透過能力を上げる方法として有効であることが明らかになった。

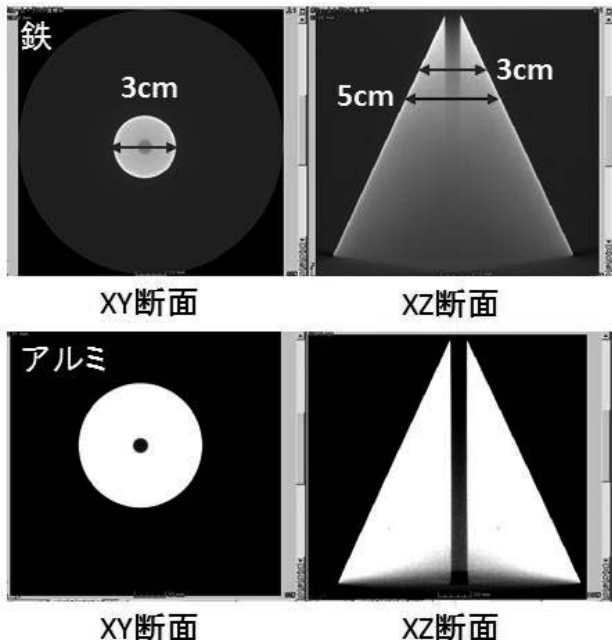


図8. テストピース4のX線CT画像(コーンビーム撮影)

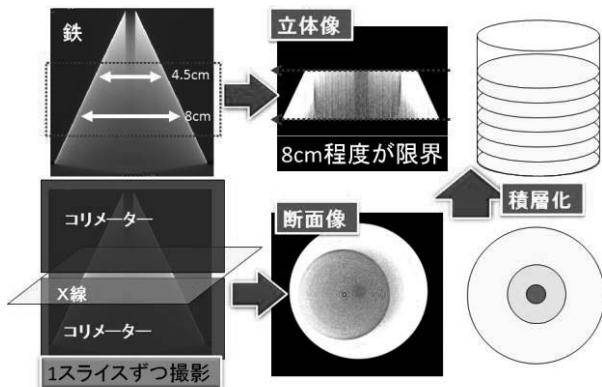


図9. テストピース5のX線CT画像(スライス撮影)

図10は、ワイヤの太さと格子間隔が異なる4種のステンレスメッシュを用い、高エネルギーX線CT装置、マイクロ

フォーカスX線CT装置及びナノフォーカスX線CT装置3機種でそれぞれ撮影したCT画像を示す。ナノフォーカスX線CTは、いずれのメッシュにおいてもCT画像を得ることができた。マイクロフォーカスX線CTでは、一番細かいメッシュにおいてCT画像を得ることができなかった。高エネルギーX線CTは、4種類すべてのメッシュにおいて、正確なCT画像を得ることができなかった。これらの結果から、それぞれの装置において、実際に測定可能な分解能を示すことができた。

	ナノフォーカス	マイクロフォーカス	高エネルギー
間隔=53μm 線幅=63μm		×	×
間隔=125μm 線幅=90μm			×
間隔=500μm 線幅=315μm			
間隔=1mm 線幅=560μm			

図10. テストピース5のX線CT画像

4. まとめ

本研究は、X線CT装置を3次元計測器として利用する際の問題となる測定精度を向上させるため、アーチファクトの発生を抑制する方法と除去する方法を示した。また、昨年、都産技研で導入したX線CT装置の性能を評価した。画像計測には良好なCT画像データを得る必要がある。そのためには、より精度の高いCTデータの取得が欠かせない。装置の性能限界を認識しつつ、ハード面での撮影条件の改善、ソフト面での改善を引き続き行い、円滑な依頼試験、機器利用に活かすことが重要である。また、CTと同様にデジタルエンジニアリング計測に有用なデジタルライザと組み合わせ、より高い精度を有したデジタルデータの取得方法の確立に取り組む。中小企業が製品化の際、手軽に設計・試作に取り組めるシステムを確立することで、製品化にかかる期間やコストの削減が期待される。

(平成24年5月18日受付, 平成24年7月6日再受付)

文 献

- (1)青野宏, 三和田靖彦, 岡田貴弘, 石井博行:「X線CTを活用した三次元形状計測とシミュレーション」, シミュレーション, 第23巻4号, pp.21-27(1994)
- (2)大滝誠, 伊澤昌俊, 森重功一, 浅川直紀, 竹内芳美:「X線CTスキャナを用いた3次元CADデータに基づく内部形状評価」, 精密工学会誌 Vol. 65, No.11(1999)
- (3)廣野哲郎, 西村征洋, 多田井修, 林為人:「マイクロフォーカスX線CT装置における階調値の精度の検証およびCT値への規格化について」, JAMSTEC Rep. Res. Dev., Vol 8, Nov., pp.29-36(2008)