

光源の違いに着眼したエックス線CTに関する比較研究

Comparative research on X-ray CT focusing on differences in light sources

材料技術部 分析・化学科 杉原輝俊

電子機械技術部 機械・加工科 坂内駿平

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 穴澤大樹

当所の保有する3台のX線CT装置による見え方の違いを比較検討した。種々の試料を撮像することにより、それぞれの装置の特性や像質等を明らかにした。また、空間分解能及びコントラスト分解能を評価するための基準試料を作製し、これを用いて各装置の実際的な分解能を確認した。

Key words: X線CT、分解能、吸収コントラスト

1. 緒言

X線が物体に入射すると、様々な要因によって吸収、透過、散乱、その他相互作用が起こる。X線CT(Computed Tomography)は、主にこのX線吸収を利用して、物体の内部構造情報を得ることができる手法である。特に、工業用途等が想定されたX線CT装置(以下、産業用X線CT装置)ではコーンビーム法を採用しているものが多い^[1]。これはX線をコーン状に照射し、対象試料を光軸内で回転させながら、多方向で取得した拡大投影像(X線透過像)をコンピュータ上で画像再構成処理を行うことで多断面再構成像を得るというものである。産業用X線CT装置は、製品開発や検査等の様々なシーンで活用されており、当所を含めた多くの公的試験研究機関でも内部構造の観察や物体内外の形状計測のために用いられている。当所においては、郡山本部に2台、南相馬技術支援センターに1台、計3台のそれぞれ異なるX線CT装置を保有している。主に県内企業の不良解析や製品開発に際し、使用目的や試料により、各装置を使い分けている。しかしながら、同一の試料等を用い、統一的な観点から各装置を評価した例はなかった。更に有効活用するためには、県内企業等にそれぞれの装置の特徴や有用性をアピールするとともに、所内での認知度を向上させる必要がある。

本研究では、通常の吸収コントラストトモグラフィーによる内部観察に着目し、製品開発や不良解析での利活用促進を目的に、X線CTに関する基礎的な検討を行った。

2. 実験

2. 1. 当所保有のX線CT装置について

当所が所有するX線CT装置を図1に示す。

まず、TOSCANER-31300 μ C3(東芝ITコントロールシステムズ(株)以下、「130kV CT」)の主な仕様を表1に示す。この装置では、主に軽元素で構成される(X線吸収の小さい)対象物のマイクロフォーカスX線CT

事業名「「そだてる研究室」事業」

撮像が想定されており、具体的な観察対象は小型電子部品や樹脂・ゴム製品等である^{[2][3]}。この装置はコーンビームCTで、X線管の最高設定管電圧は130kV、検出器はX線イメージインテンシファイア(X線I.I.)である。X線管から発生するX線エネルギーのピーク値は管電圧の1/2から1/3になる^[4]ため、ピークのX線エネルギーは更に低いと考えられる。

表1 TOSCANER-31300 μ C3の主な仕様(抜粋)^{[2][3][5]}

管電圧設定範囲[kV]	40~130
公称最小焦点寸法[μ m]	5(出力4[W])
検出器	4inchデュアルBe I.I.
最大撮像範囲	直径 100[mm] 高さ 150[mm]



左上 TOSCANER-31300 μ C3
右上 TXS-CT300
左下 TOSCANER-24500AVFD

図1 当所のX線CT装置^{[3][6][8]}

次に、TXS-CT300(テスコ(株)以下、「300kV CT」)の主な仕様を表2に示す。300kV CTでは、幅広い材料を対象としたマイクロフォーカスX線CT撮像が想定されている。具体的な観察対象は、アルミ鋳物

や各種複合材料等である^{[6][7]}。この装置もコーンビーム CT で、X 線管の最高設定管電圧は 300kV、検出器はフラットパネルディテクタ (FPD) である。装置本体は標準の遮蔽筐体内ではなく、遮蔽室に設置している。したがって、通常の遮蔽筐体内に設置できないような背の高い試料でも、固定できれば撮像範囲内で観察可能である。

表 2 TXS-CT300 の主な仕様 (抜粋) ^{[5][6][7]}

管電圧設定範囲 [kV]	20~300
公称最小焦点寸法 [μm]	4
検出器	16 インチ FPD
最大撮像範囲	直径 400 [mm] 高さ 500 [mm]

続いて、TOSCANER-24500AVFD (東芝 IT コントロールシステムズ (株) 以下、「450kV CT」) の主な仕様を表 3 に示す。この装置では、主に大型部品や高吸収な物体の撮像が想定されており、具体的な観察対象は大型アルミ鋳物、鉄鋳物、タイヤ、エンジブロック等である^{[8][9]}。現在上市されている産業用 X 線 CT 装置の中では、最も高い管電圧 (X 線エネルギー) での撮像を可能とする。なお、検出器により、管電圧設定可能範囲や CT スキャン方式が異なる。試料や目的に応じて、検出器はフラットパネルディテクタ (FPD) とラインセンサ (LDA) を切り替えて使用する。また、撮像範囲が広く、比較的大型の試料を撮像できる。

表 3 TOSCANER-24500AVFD の主な仕様 (抜粋) ^{[8][9]}

管電圧設定範囲 [kV]	100~430 (FPD 使用時) ※ 400、430 (LDA 使用時)
公称最小焦点寸法 [mm]	0.4 (小焦点モード) 1.0 (大焦点モード)
検出器	16 インチ FPD または LDA
最大撮像範囲	直径 600 [mm] 高さ 1,000 [mm]
CT スキャン方式	ローテートオンリー方式 (FPD 使用時) トランスレート/ローテート方式 (LDA 使用時)

2. 2. 各装置での CT 撮像

各装置で様々な試料の X 線 CT 撮像を行い、それぞれの特徴を確認した。本報ではこの中から代表的な CT 像を掲載した。これらの撮像に際し、管電圧、電流値、フィルター (金属板)、投影数及び積算回数等の撮影条件は、何度か試行する中で決定した。各試料のステージへの固定は、装置特性や試料寸法を考慮し、主に粘着テープや三つ爪チャックを使用した。また、断層像

への再構成はフィルター補正逆投影法で行い、各装置の解析作業で標準的に用いるソフトウェア及びその設定を用いた。データ解析では、再構成後にフィルタリング等を一切行っていない画像を用いた。CT の画像はグレースケールで表現されるが、今回は再構成後の断層像を 16 [bit] の TIFF ファイルに出力し、この画素値を元のグレー値 (CT 値) と同等に扱った。画素値の取得やウィンドウ幅・レベルの調整には、オープンソースの画像処理ソフトウェアである ImageJ を使用した。

一部の試料では、各装置共通とし、同じ試料を用いた装置間の比較を行った。300kV CT を基準に、特に使用目的や装置構成の異なる 130kV CT と 450kV CT に着目して検討した。比較試料は、バクテリアセルロース混練ポリスチレン樹脂^[10] (以下、BC 混練 PS 樹脂)、乾燥かまぼこ、油回転真空ポンプ、除草ロボット^[11]、CFRP とした。なお、内部微小構造の高解像度及び高拡大率な画像取得を検討した試料 (樹脂等) では、厚さ 1 [mm] 程度の幅に加工して供試した。

また、参考として宮城県産業技術総合センターの高分解能 3DX 線顕微鏡 nano3DX ((株) リガク 以下、XRM) による CT 撮像も行った。この XRM は疑似平行ビーム方式の装置で、X 線像は蛍光板で可視光に変換、光学レンズ系で拡大された画像は CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) カメラで撮像される^{[12][13]}。特に 130kV CT と比較するため、BC 混練 PS 樹脂と米麴を観察した。試料は専用のロッド上に紫外線硬化樹脂で固定して撮像に供した。線源には ²⁹Cu ターゲットを用い、Cu K 線及び連続 X 線による撮像となった。この線源を用いた撮像条件は、電圧 40 [kV] と電流 30 [mA] で固定だった。線質による比較を優先し、レンズ及びビニングの選択等により、空間分解能は全てボクセルサイズの計算値 1.300 [$\mu\text{m}/\text{pixel}$] となる条件で撮像した。

2. 3. 空間分解能評価の試行

日本産業規格 (以下、JIS) によると、産業用 X 線 CT 装置の空間分解能は、位置的に近接した 2 点を独立した 2 点として識別できるかという判定にかかわる指標で、識別できる最小の間隔をもって規定される^[14]。X 線透視及び CT における空間分解能評価では、(一社) 日本検査機器工業会 (以下、JIMA) の X 線用解像度チャート試験片が用いられることが多い。また、実際には X 線管の公称最小焦点寸法が X 線 CT 装置の空間分解能の指標として扱われているが、これも装置の空間分解能を規定する要因の一つに過ぎない^[15]。

本研究では、表 4 に示す空間分解能評価試料を作製し、撮像実験に供した。JIMA 標準チャートのスリットは X 線吸収の大きい金めっきだが、今回作製した評価試料は比較的 X 線吸収の小さいアルミニウム箔と樹脂シートを用いた。アルミニウム箔と樹脂シートを交互

に重ね合わせ、アルミニウム箔の間（樹脂シートの厚み）が確認できることを空間分解能の指標とした。今回使用した樹脂シートの厚みは、当所装置の最小焦点寸法に近いものを用いた。樹脂シートには、ポリエチレン（以下、PE）、ポリエチレンテレフタレート（以下、PET）、ナイロン（以下、PA）を用いて作製した。130kV CT と 300kV CT は試料 A を、撮像領域や最小焦点寸法が大きく異なる 450kV CT には試料 B の 6 種を用いた。

表 4 空間分解能評価用試料の構成

A	アルミニウム箔 10[μm] / PE 6[μm]
B-1	アルミニウム箔 320[μm] / PET 750[μm]
B-2	アルミニウム箔 160[μm] / PET 500 [μm]
B-3	アルミニウム箔 80[μm] / PET 500 [μm]
B-4	アルミニウム箔 80[μm] / PET 250 [μm]
B-5	アルミニウム箔 80[μm] / PET 125 [μm]
B-6	アルミニウム箔 80[μm] / PA 50 [μm]

2. 4. コントラスト分解能評価の試行

物体の X 線透過像及び CT 像の明暗のコントラストは、各部位の線吸収係数 μ に対応する。線吸収係数は、X 線の波長及び物質の密度と原子番号に依存する^[15]。本研究で用いたコントラスト分解能評価用試料を図 2 に示す。これらの試料は、市販の合成樹脂棒材から作製した。同様な軽元素で構成される樹脂の線吸収係数は、主に密度の大小に依存し、わずかな密度差でも吸収コントラストに差が生じると考えた。加えて、金属に比べてアーティファクト（像に表れる歪み及びエラー）や X 線透過率不足で撮像が阻害されることも少ない。そこで、本研究では複数種類の樹脂をコントラスト分解能評価に使用した。各装置の取り得る視野を考慮した上で、各樹脂棒材は適切な寸法に加工し、撮像時の設置数や配置を調整した。樹脂の材質は、PE、PA、ポリプロピレン（以下、PP）、アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合体樹脂（以下、ABS）、ポリオキシメチレン（以下、POM）、ポリビニルクロリド（以下、PVC）、ポリテトラフルオロエチレン（以下、PTFE）、ポリメチルメタクリレート（以下、PMMA）とした。

撮像実験は以下のように行った。130kV CT では、直径 5[mm]程度に調整した樹脂棒を複数種類並べて実験に供した。設定管電圧は 60[kV]、80[kV]、100[kV]で撮像した。300kV CT では、直径 20[mm]、高さ 100[mm]に調整した樹脂棒を複数種類並べて実験に供した。設定管電圧は 100[kV]、200[kV]で撮像した。450kV CT では、300kV CT と同一形状の試料を用いた。撮像可能視野が広いこの装置ではステージへの試料設置数を増やして実験した。撮像は FPD と LDA の 2 種類の検出器で行い、FPD は設定管電圧 250[kV]及び 430[kV]の 2 パターンとした。LDA は管電圧 430[kV]のみとした。一部の

樹脂棒には長手方向に貫通孔を開けて観察視野内の目印とした。また、異材を内包した際のコントラストを比較するため、この孔に PTFE や PMMA を挿入した試料も設置した。



図 2 コントラスト分解能評価試料

（左 棒材を加工している様子、右 450kV CT の供試材）

2. 5. メタルアーティファクトの確認

X 線 CT において、「アーティファクト」は避けられない問題である。アーティファクトには、ビームハードニング（試料表面付近で画素値が大きくなる現象）、散乱・屈折といった X 線と物体の相互作用によるもの、リングアーティファクト（回転中心の周りに表れる輪状の偽像）、装置や試料自体のドリフトに起因するもの等がある。その中でも、X 線と金属の相互作用等により発生するメタルアーティファクトは、特に複合材料の撮像時に問題となる。

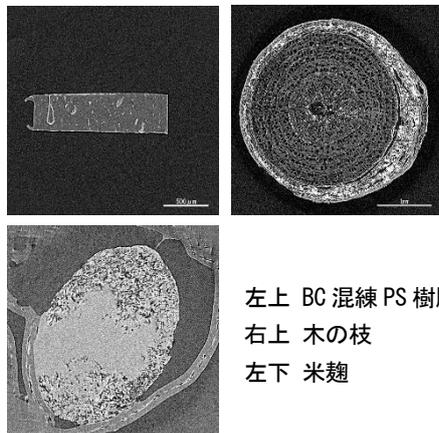
本検討では、コントラスト分解能評価用試料を用い、300kV CT と 450kV CT で撮像実験を行った。一部の樹脂棒に隣接して金属を配置することで、各樹脂にメタルアーティファクトの影響が生じた断層像の撮像を試みた。金属の供試材は、直径 2[mm]程度のタングステン、黄銅、アルミニウムを用いた。300kV CT の撮像条件は、管電圧 200[kV]、管電流 50[μA]とした。450kV CT の撮像条件は、検出器に FPD を使用した場合、管電圧 430[kV]、管電流 1.6[mA]とし、LDA を使用した場合、管電圧 430[kV]、管電流 3.4[mA]とした。

3. 結果及び考察

3. 1. 各装置の CT 像

130kV CT の撮像結果を図 3 に示す。図 3 左上の BC 混練 PS 樹脂では、PS に混練された BC の塊及びスターチの粒^[10]が明瞭に区別できた。また、図 3 左下の米麴では、クラックや微細なスポンジ状の部位が観察された。これらは麹菌に消化分解されて形成した間隙、又は菌糸自体の塊と推定された。なお、この詳細は今後確認する。以上の結果より、この装置では X 線吸収の小さい物体について鮮明な断層像が得られることが分かった。空隙や凝集具合等の微小構造をマイクロメートルオーダーで観察できるほか、わずかな密度差や組成差による吸収コントラストイメージングが得られる

ことを確認した。一方で、電子基板の配線等を除き、鉄や銅等の物体は基本的に撮像できなかった。図に示していないが、実用的な最大撮像範囲としては、300kV CT の 4 分の 1 以下と考えられた。また、本装置では、試測定や時間短縮を目的とした 1 断層のみのスキャンが可能だった。



左上 BC 混練 PS 樹脂
右上 木の枝
左下 米麩

図3 130kV CT の CT 像

次に、300kV CT の撮像結果を図 4 に示す。アルミニウム製や鉄製の機械部品、CFRP 部材、電子基板等の X 線透過像及び CT 像を取得した。本装置では、幅広い材料及び寸法の工業製品の撮像が可能と分かった。工業製品への適用例として、透視像や CT 像による電子基板の接点不具合箇所の特長、鋳物や樹脂中に発生したボイド分布等の確認等、様々な工業製品の撮像に対応できるものと考えられた。また、画像解析用ソフトウェアを用いて、サーフェイス又はボリュームレンダリング、形状計測に近いことも可能であった。一方、この装置周辺の空間的自由度は高いが、撮像領域の直径を超過する試料はフレームと干渉するために設置できなかった。また、小型試料の高倍率観察は一部撮像条件の設定という点で困難と分かった。

続いて、450kV CT の撮像結果を図 5 に示す。この装置では、直径 600[mm]までの大型試料や X 線が透過し難い物体等、一般的な産業用 X 線 CT では困難な製品等の CT 撮像ができることを確認した。130kV CT と同様、こちらでも 1 断層のみのスキャンが可能だった。また、目的に応じ、FPD と LDA を使い分けて撮像することができた。特に LDA では、高 X 線エネルギーでもコントラスト差が大きく、シグナル-ノイズ比 (以下、S/N 比) の良好な像を取得できた。ただし、一度に視野全体をスキャンできる FPD と異なり、1 断面ずつ撮像する LDA は時間を要するため、三次元データは FPD のみ取得した。また、130kV CT や 300kV CT とはスキャン方式が異なり、光源とサンプル間の距離 (Focus-object distance 以下、FOD) を変えて拡大投影する

ことはできなかった。本装置は、試料サイズや観察目的に応じ、最高管電圧 225kV 又は 300kV の装置で検討した後に利用すべきと考えられる。

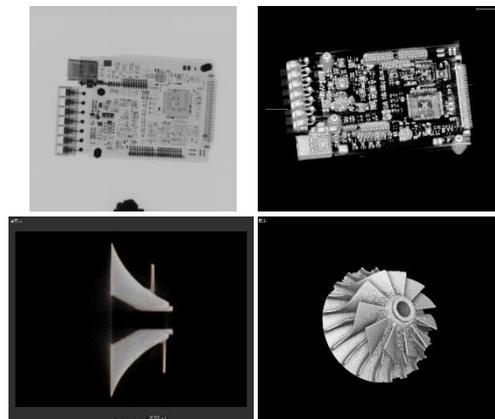


図4 300kV CT での撮像

左上 X 線透過像、右上 電子基板の 3D 構成像
左下 断層像の画像解析、右下 インペラの 3D 構成像

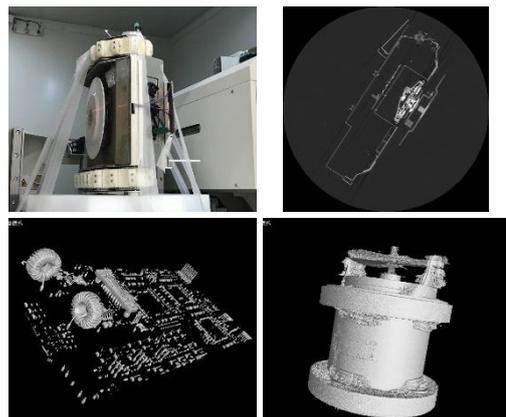


図5 450kV CT での撮像

左上 CT 撮像の様子
右上 除草ロボットの断層像
左下 基板の 3D 構成像
右下 ポールミルの 3D 構成像

3. 2. 各装置間の比較

まず、X 線吸収が小さく内部に微小構造をもつ試料を用いて、130kV CT と 300kV CT と比較した。

BC 混練 PS 樹脂の断層像を図 6 に示す。130kV CT では、密度差の小さい PS 樹脂、BC の塊、スターチの粒を明瞭に確認できた。一方、300kV CT でも粗大な BC は確認できたが、より分散した BC やスターチはノイズと区別することが難しかった。

乾燥かまぼこの断層像を図 7 に示す。130kV CT により、かまぼこ表面から内部にかけて多くの空隙が存在していた。乾燥時の熱風により、かまぼこの原料であ

るすり身肉から水分が抜け、直径 100[μm]程度の粒状物が残ったと推定された。また、像の一部には CT 値の大きな部分が存在しているが、アーティファクトではなく塩分の分布や偏りを示す吸収コントラストの可能性が示唆された。一方、300kV CT でも、ウィンドウ幅やレベルを調整することで、乾燥かまぼこの内の空隙を確認できた。ただし、130kV CT 像と比較すると不鮮明であった。

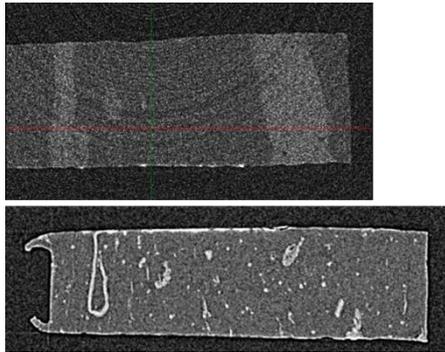


図6 バクテリアセルロース混練樹脂
(上 : 300kV CT、下 : 130kV CT)

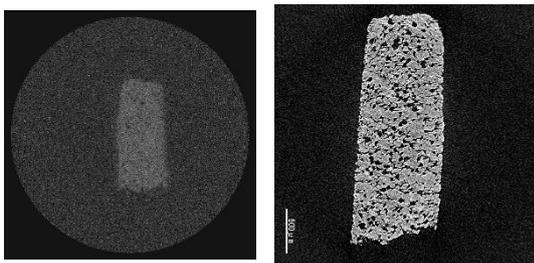


図7 乾燥かまぼこ
(左 : 300kV CT、右 : 130kV CT)

続いて、450kV CT に着目して比較検討を行った。こちらも 300kV CT を対照として、設定できる管電圧 (X 線エネルギー)、ステージサイズ及び撮像領域の観点で比較した。

小型の真空ポンプを撮像した結果を図 8 に示す。この試料は、X 線吸収の大きなロータを内蔵していた。450kV CT では、高 X 線エネルギーの照射、かつ検出器に LDA を使用することで内部構造が明瞭な CT 像が得られた。一方、300kV CT では、設定管電圧を最大 300[kV] まで印加しても X 線は十分に透過せず、内部構造が判別できなかった。

大型試料の撮像検討では、当所で過去に試作した除草ロボット (幅 450[mm]、奥行 500[mm]、高さ 200[mm])^[11]を用いた。各装置のステージに除草ロボットを設置した様子を図 9 に示す。450kV CT では、全長 500[mm] 以上の試料を固定して撮像が可能であった。(断層像は図 5 右上) 一方、300kV CT では、ステージ回転中に周

辺のフレームに衝突する危険があった。したがって、撮像範囲内での透過観察のみ可能で、CT 撮像は困難だった。

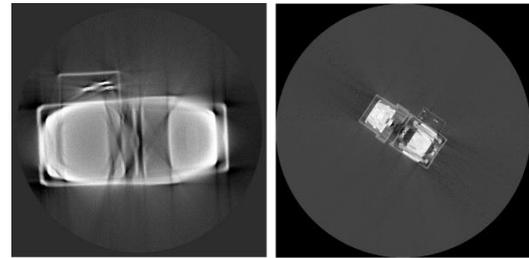


図8 ポンプの断層像
左上 300kV CT 管電圧 300[kV] FPD 使用
右上 450kV CT 管電圧 300[kV] LDA 使用

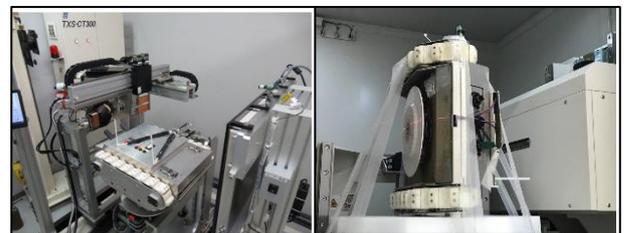


図9 ステージへ設置した様子
(左 300kV CT、右 450kV CT)

最後に、参考として XRM と当所 130kV CT の比較を行った。XRM 及び 130kV CT で撮像した結果を図 10 に示す。BC 混練 PS 樹脂では、どちらの撮像でも密度差の小さい PS 樹脂、BC の塊、スターチの粒を明瞭に確認できた。XRM と 130kV CT では、像質に大きな差があった。XRM では、その線質や光学系により、S/N 比の優れた画像が得られ、アーティファクトも低減されたものと考えられた。なお、今回はこの XRM の最高分解能が得られるような条件で撮像しなかったため、今後機会があれば検討したい。

米麴では、130kV CT でも確認された微細な空隙やスポンジ状の表面構造がより鮮明に観察された。しかしながら、像に一方向のブレが生じており、詳細な検討はできなかった。これは温度変化による固定治具の膨張・収縮のほか、解凍された米麴の水分量の変動等が要因となり、撮像中に試料がわずかに動いてしまったためと推定された。

今回の検討により、XRM は主に低吸収な材質で構成される小さな試料を対象に、微小範囲の高倍率 CT 観察に適した装置だと分かった。30 分から一晩程度で良好な像質が得られ、放射光 X 線イメージングの事前検討等にも利用できる。したがって、条件に合うものでないと観察は難しいが、高度な研究開発に有用な装置と考えられる。

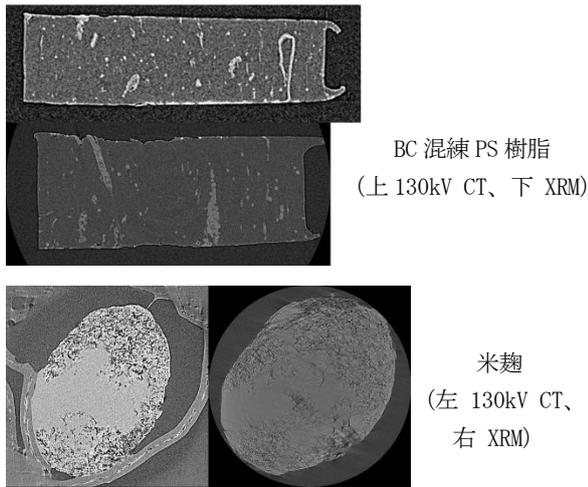


図 10 XRM と 130kV CT の比較

3. 3. 空間分解能の評価

130kV CT で空間分解能評価用試料 (表 4 試料 A) を測定した結果を図 1 1 に示す。空気、PE、アルミニウムをそれぞれ区別でき、試料の多層構造になっている部分も明瞭に観察できた。全周にわたってアルミニウム箔の間 (PE シート 6[μm]) が判別できたことは、ラインプロファイルを見ても明らかであった。

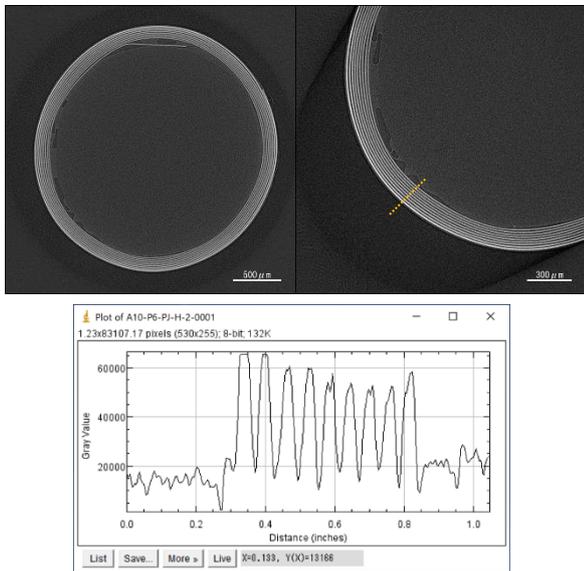


図 1 1 空間分解能評価用試料の撮像 1

左 試料全体の断層像、右 より高倍率での撮影
下 黄色線のラインプロファイル

続いて、300kV CT で分解能評価用試料 (試料 A) を測定した結果を図 1 2 に示す。全周は判別できなかったが、一部ではアルミニウム箔の層間を見分けることができた。なお、通常に本装置で対象とする試料よりもやや小さく、撮像には特に注意を要した。今回の撮

像では、制御ソフトウェアの計算値で画素サイズ 9[μm]だった。したがって、同じ構成で数倍の直径をもつ試料を作製し、積算回数の増加によって S/N 比を向上させれば、断層像は更に明瞭に確認できるものと推定された。

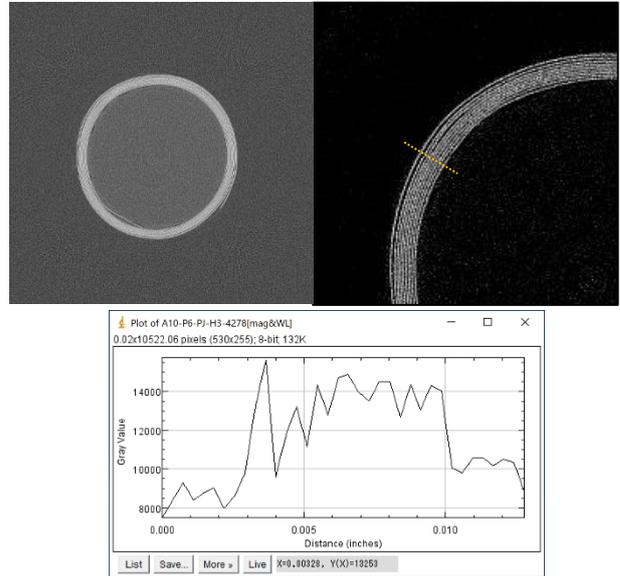


図 1 2 空間分解能評価用試料の撮像 2

左 試料全体の断層像、右 左図の一部を拡大
下 黄色線のラインプロファイル

450kV CT で分解能評価用試料 (表 4 試料 B) を測定した結果を図 1 3、1 4 に示す。どの撮像条件でも、アルミニウム層間に 500[μm]厚の PET シートが挿入された試料までは判別可能であった。

検出器に FPD を使用した場合 (図 1 3)、管電圧 250[kV]及び 430[kV]の何れも、B-3 まではアルミニウム層間が確認できた。ただし、250[kV]の方が鮮明に見えており、これは今回のサンプルに対して管電圧 430[kV]では X 線の透過力が大きすぎたためと考えられる。なお、X 線源と FPD 検出器を試料中心からオフセットさせ、何回かに分けて広範囲を撮像する手法であるオフセットスキャンでも撮像を試行したところ、わずかに画像が粗くなることを確認した。(図は割愛)

LDA を使用した場合、FPD に比べてコントラストは向上したものの、層間を確認できたのは B-2 までだった。

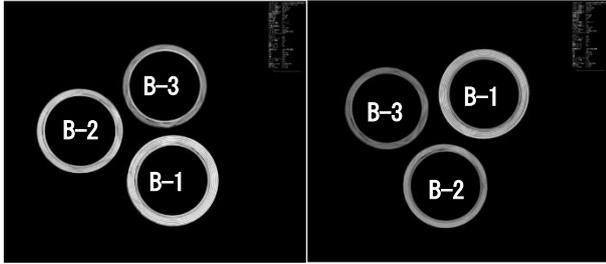


図 13 空間分解能評価用試料の撮像 3-1
(FPD 使用 左：管電圧 250kV 右：管電圧 430kV)

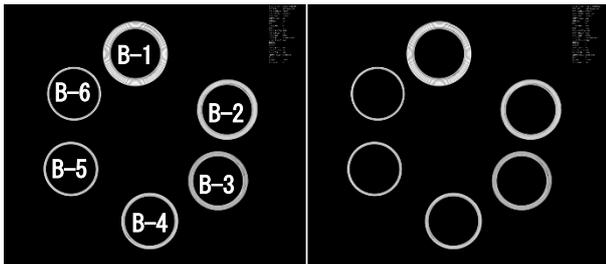


図 14 空間分解能評価用試料の撮像 3-2
(LDA 使用 左：管電圧 400kV 右：管電圧 430kV)

3. 4. コントラスト分解能

130kV CT (管電圧 60[kV])、及び 300kV CT (管電圧 200[kV]) でコントラスト分解能評価用試料を撮像した結果を図 15 に示す。また、130kV CT において、各樹脂の密度と得られた画素値の関係を図 16 に、管電圧による各樹脂の画素値の変化を図 17 に示す。像のコントラストは各樹脂の密度差を反映し、密度の増大とともに画素値が上昇すると分かった。特に密度差の小さい PE と PP の間では、モニター及び印刷紙面上ではコントラストの差異を視認できなかったが、画素値を取得するとわずかに差が確認できた。線吸収係数 μ [cm^{-1}] と密度 ρ [g/cm^3] には、以下のような関係がある。

$$\mu = \rho \mu_m$$

μ_m [cm^2/g] は質量吸収係数と呼ばれ、原子番号の増加と共に単調に増加する。また、吸収係数は、高エネルギーほど小さくなると知られている。本実験により、質量吸収係数が近い物質では、主に密度が線吸収係数 (像の濃淡) を支配し、X 線エネルギーが大きいほど、線吸収係数は小さくなることを確認した。

続いて、450kV CT (管電圧 430[kV]) でコントラスト分解能評価用試料を撮像した結果を図 18 に示す。この装置でも材質間でコントラスト差が見られた。特に LDA を使用した撮像では、FPD に比べて全体的にコントラストや輪郭が明瞭な CT 像が得られた。一般的に、高い X 線エネルギーでは、前方散乱の傾向が強まることから S/N 比が低下し、空間分解能や線吸収係数の計測に影響する^[15]。しかしながら、LDA を用いた撮

像では、検出器の構造及びファンビームの X 線により、散乱 X 線の影響が低減されるため^[1]、鮮明な画像が得られたものと考えられた。

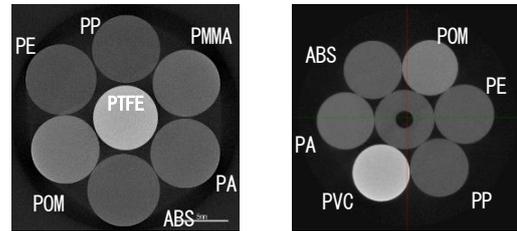


図 15 コントラスト分解能評価用試料の撮像結果
(左 130kV CT、右 300kV CT)

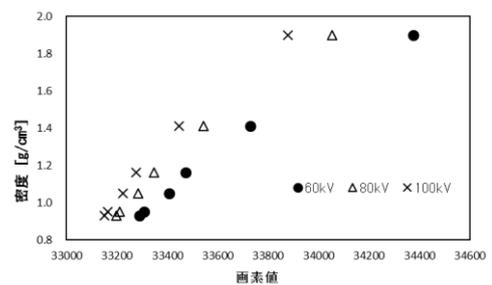


図 16 樹脂の密度と画素値の関係 (130kV CT)

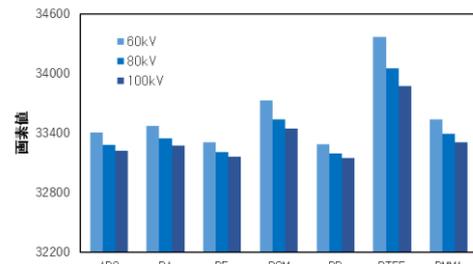


図 17 管電圧による画素値の変化
(130kV CT)

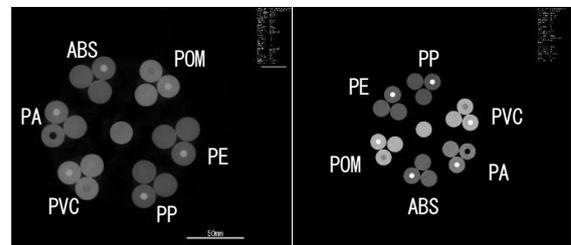


図 18 コントラスト分解能評価用試料の撮像
(450kV CT)
左 FPD、右 LDA

3. 5. メタルアーティファクト

メタルアーティファクトの影響を受けた撮像結果を図19、図20に示す。タンゲステンのようなX線吸収の大きい金属の周囲では、放射状に広がるストリーク（輝線）が確認された。また、各金属棒間の空間では画素値に大きな影響が出ており、樹脂及び金属棒自身の輪郭も一部歪んだ様子が見られた。撮像時に高エネルギーのX線を照射した450kV CTでは、300kV CTと比べて像影響が僅かに低減されていた。加えて、特に検出器にLDAを使用した場合、FPDよりも鮮明な断層像が得られた。これは図8や図18でも示したように、LDAの特性によるものと推定された。メタルアーティファクトを完全に避けるのは困難であるが、使用する装置及び撮像条件の選択、撮像後の像調整等により低減できるものと考えられる。

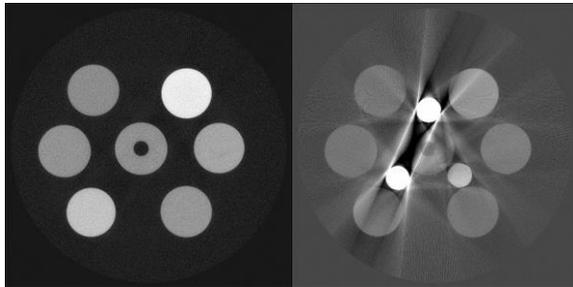


図19 メタルアーティファクトの影響（300kV CT）
左 金属棒設置前、右 金属棒設置後

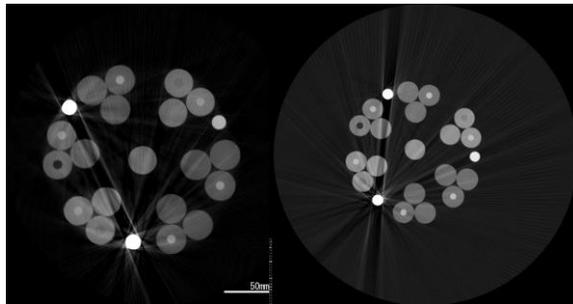


図20 メタルアーティファクトの影響（450kV CT）
左 FPD、右 LDA

5. 結言

当所の保有する3台のX線CT装置の違いを比較検討した。その結果、各装置の特徴や像質の違いを明らかにすることができた。また、空間分解能及びコントラスト分解能を評価するための基準試料を作製し、これを用いて各装置の実際的な分解能を確認した。今後はこれらの特徴を技術相談等に活かしていく。

参考文献

- 1) 田中俊敬, 久我瑞樹, 他. 産業用 X 線 CT の理解と活用. 軽金属, 2021, 第 71 巻, 第 9 号, pp.417-424.
- 2) “機器一覧 非破壊構造解析装置 (TOSCANER-31302 μ C3)”. 福島県ハイテクプラザ. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/556395.pdf>, (参照 2024-02)
- 3) “X 線製品情報 (非破壊検査システム) マイクロ CT スキャナ TOSCANER-30900 μ C3 /TOSCANER-31300 μ C3”. 東芝 IT コントロールシステムズ. <https://www.toshiba-itc.com/hihakai/toscaner-30900/>, (参照 2024-02)
- 4) 三好元介. 工業用 X 線 CT 技術の現状と将来の展開. REAJ, 2016, Vol.38, No.3, 通巻 229 号, pp.150-155.
- 5) “製品情報 マイクロフォーカス X 線源”. 浜松ホトニクス. <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/light-and-radiation-sources/microfocus-x-ray-source.html>, (参照 2024-02)
- 6) “機器一覧 非破壊構造解析装置 (TXS-CT300)”. 福島県ハイテクプラザ. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/556397.pdf>, (参照 2024-02)
- 7) “高出力マイクロフォーカス X 線 CT システム”. テスコ. <https://www.tesco-ndt.co.jp/products/microfocus.html>, (参照 2024-02)
- 8) “施設・附属設備 図面・写真・手引きなど”. 福島ロボットテストフィールド. (仕様) https://www.fipo.or.jp/robot/wp-content/uploads/2021/04/21_%EF%B8%B8%E7%B7%9A%EF%BC%A3%EF%BC%B4%E8%A3%85%E7%BD%AE.pdf, (写真) <https://www.fipo.or.jp/robot/wp-content/uploads/2021/04/21.jpg>, (参照 2024-02)
- 9) “X 線製品情報 (非破壊検査システム) 高エネルギー CT スキャナ TOSCANER-24500twin/AV TOSCANER-34500FD”. 東芝 IT コントロールシステムズ. <https://www.toshiba-itc.com/hihakai/toscaner-20000/>, (参照 2024-02)
- 10) 菊地時雄, 高木智博, 他. セルロースナノファイバー複合材料の開発 (第 2 報) - バクテリアセルロースを用いた摺動材料の開発 -. 令和 2 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2021, pp.74-78
- 11) 高樋昌, 三浦勝吏 他. 電気防獣柵漏電検出・通報装置と自走式電気防獣柵除草ロボットの開発. 平成 28 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2017, pp.46-49.
- 12) 高分解能 3DX 線頭微鏡パンフレット. リガク. 16p.
- 13) 田邊栄司. サブミクロン領域 X 線 CT 断層像

への線質の影響. 広島県立総合技術研究所西部工業
技術センター研究報告, 2020, No.63, 12.

1 4) 日本産業規格「産業用 X 線 CT用語」, JIS B7442,
2013.

1 5) 戸田裕之. X 線 CT—産業・理工学でのトモグラ
フィー—実践活用—. 共立出版, 2019, 449p.