

# X線断層撮影（CT）装置を用いた寸法測定における誤差の低減\*

菊池 貴\*\*、和合 健\*\*、池 浩之\*\*

X線断層撮影（CT）装置を用いた寸法測定は、内部構造も測定できるので、期待が高まっている。しかし、X線の入射角度のずれやX線の減衰といった特有の誤差要因があり、測定精度の向上が求められている。本研究では、測定物の取り付け角度による寸法測定誤差への影響を実験により明らかにし、測定誤差を最大81%低減出来ることを示す。

キーワード：X線CT装置、寸法測定、コーンビームアーチファクト

## Error reduction in dimensional measurement using x-ray computed tomography system

Takashi Kikuchi, Takeshi Wago, Hiroyuki Ike

Dimensional measurements using X-ray computed tomography (CT) systems are expected to increase in popularity because we can additionally measure the internal configurations. However, an X-ray CT system contains specific error factors such as deviations of the incident angle and attenuations of the X-ray strength. Therefore, an improvement in measurement accuracy is required to enhance the utility of the system. In this study, we have experimentally clarified the influence of mounting angle of measured objects on dimensional measurement errors. Finally, we observe that the measurement errors have been reduced by up to 81%.

**Keywords:** x-ray CT system, dimensional measurement, corn beam artifact

### 1 緒言

X線断層撮影装置（以下、X線CT装置）は製品内部の非破壊観察に用いられているが、最近では寸法測定への応用が期待されている。X線CT（Computed Tomography）装置は非破壊で内部の形状を取得できるため、三次元測定器では測定できない内部構造の測定が可能である。そのため、外観形状と内部構造の同時計測が可能な装置として期待されている<sup>1)2)3)</sup>。しかし、X線CT装置による測定では形状の歪みや、アーチファクトと呼ばれる実在しない画像が発生するなど特有の誤差があり、その解消が課題となっている。

岩手県工業技術センターでは平成28年7月に次世代ものづくりラボを開所し、デジタルデータを活用した三次元ものづくりの支援を進めている。X線CT装置は測定データから3Dの形状データを自動生成することが可能であることから、3Dプリンタが得意とする複雑な内部構造をもつ製品の評価やリバースエンジニアリングへの活用が期待されている。そのため、X線CT装置におけ

る誤差要因の解明と測定精度の向上が求められている。

本研究ではX線CT装置を用いた寸法計測における誤差要因の調査と誤差の低減手法について検討した。

### 2 実験方法

#### 2-1 使用機器

使用したマイクロフォーカスX線CT装置の主な仕様を表1、外観を図1、CT撮影用テーブルを図2に示す。本装置は経済産業省平成25年度成長産業・企業立地促進等施設整備費補助金により導入されたものである。本装置のX線CT撮影では、測定サンプルの高さ位置は固定し、X線管及び検知器の高さ位置は任意に変えられる。そして、縦方向にX線を照射し、図2の赤枠に示す回転部が測定サンプルを横軸周りに回転させ撮影する。CT再構成、3D形状データへの変換、座標計測、設計値/測定値比較にはVG Studio Max2.2<sup>4)</sup>を利用した。

\* H28年度 技術シーズ創生研究事業 プロジェクトステージ

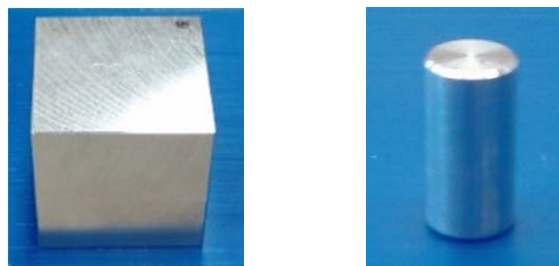
\*\* 電子情報技術部

\*\*\* 素形材技術部

表1 マイクロフォーカスX線CT装置の主な仕様

型式	Y.Cheetah uHD
メーカー	エクスロン・インターナショナル
出力管電圧	25-160kV
出力管電流	0.01-1.0mA
最大X線管出力	64W
最大ターゲット出力	15W
認識解像度	0.5 $\mu$ m
センサー斜角	$\pm 70^\circ$ (140 $^\circ$ )
最大サンプルエリア	800 $\times$ 500mm
最大検査エリア	460 $\times$ 410mm
最大幾何学倍率	3,000倍
CTスキャン時間	(最短) 60秒

(40 $\times$ 40 $\times$ 40mm) 及び円柱 (径 10mm、長さ 20mm) のサンプルを用いた。また、撮影の際に固定用の治具が写り、治具の像とサンプルの像とが一体化することを防ぐため、固定用の治具の素材はアクリル樹脂、サンプル素材はアルミ合金 (A5052) とした。



(a)測定サンプル1 (40 $\times$ 40 $\times$ 40mm) (b)測定サンプル2 ( $\phi$ 10mm $\times$ 20mm)

図3 測定サンプル



図1 マイクロフォーカスX線CT装置の外観

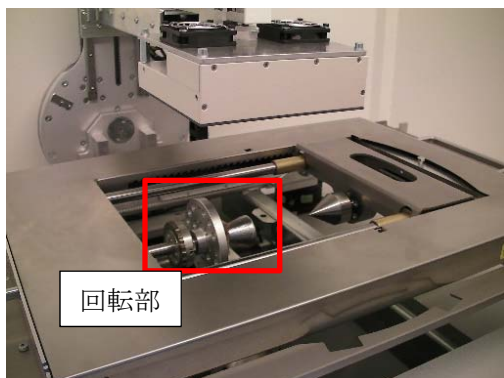


図2 CT撮影用テーブル

## 2-2 測定サンプル

使用した測定サンプルを図3に示す。本研究では、外観形状の評価を容易にするために、立方体

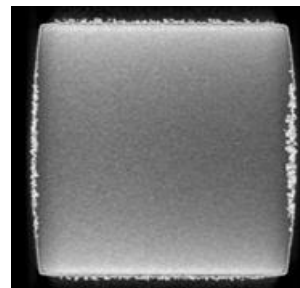
## 3 実験結果および考察

### 3-1 CT撮影におけるノイズの例

サンプル1を測定した際の条件を表2、結果を図4に示す。同図より本来は平面であるはずの面が、回転軸方向(z方向)に膨らんでいることが分かる。この部分を拡大したものを図5に示す。本来は平面であるはずの面に、実際には粒状のノイズが発生し細かな凹凸が形成されている。

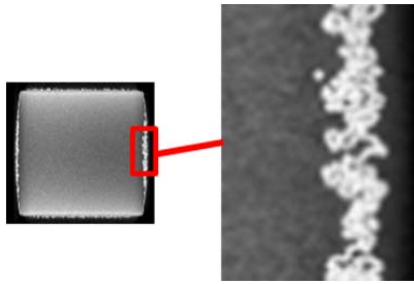
表2 測定条件

設定項目	数値
出力管電圧	70kV
出力管電流	0.1mA
X線管高さ	-199.8mm
検知器高さ	90.0mm
撮影画像枚数	720
回転角度	360 $^\circ$
解像度	1,024



※本来は平面であるはずが膨らんでいる

図4 サンプル1の測定結果



※サンプル表面に微小な凹凸が発生している  
図5 測定結果の拡大図

X線CTの撮影結果は白黒濃淡値のVoxelデータである。この濃淡値に対して閾値を設定し、面を定義することで3次元形状データを作成する。しかし、測定対象物と背景との境界が曖昧な場合、適切な閾値が設定できず、ノイズを含む形状データが作成される。そのため、平面が形成されなかったと考えられる。

### 3-2 測定誤差の要因

X線CTにおける測定誤差の主な要因として、コーンビームアーチファクト<sup>5)</sup>とビームハードニングアーチファクト<sup>6)</sup>の2つが挙げられる。

コーンビームアーチファクトは、現在主流であるコーンビーム型のX線源とフラットパネル方式の検知器を組み合わせたX線CT装置特有の課題である。図6に示すようにX線源から照射されたX線が測定対象を通過し検知器に到達する際に、検知器に垂直に入射するのが理想である。しかしコーンビーム型の場合、X線は放射状に照射されるため、検知器には斜めに入射し、検出位置にずれが生じる。このずれが生じたX線画像を元にCT画像を再構成されるため表面形状が正確に取得できず、図4に示したようにサンプルの形状の歪みが発生した。

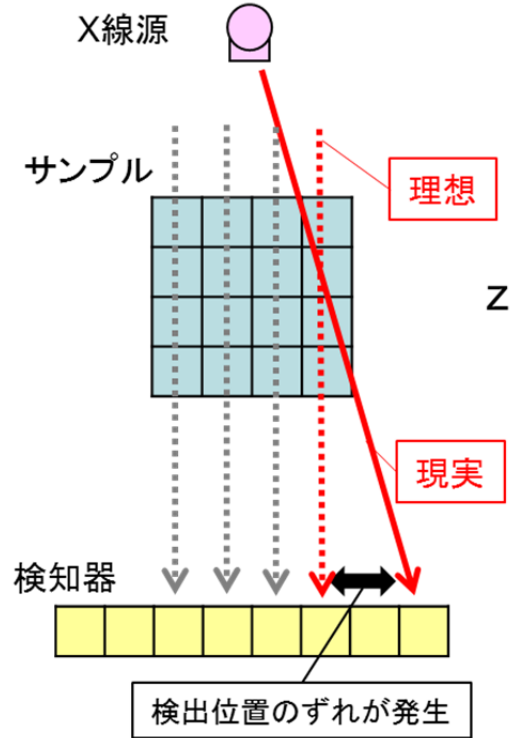
ビームハードニングアーチファクトはX線の吸収量が測定対象物の厚みに比例しないために発生する。X線源から照射されたX線にはさまざまな波長のものが含まれているが、波長の長いものは吸収されやすく、短いものは吸収されにくい。そのためX線が測定対象物を通過していく際に徐々に波長の短いものだけになっていき、図7に示すように減衰しにくくなる。X線が物質を通過する際の、吸収による強度の低下は(1)式で表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (1)$$

ここで、 $I_0$ は物質に入射したX線の強度、 $\mu$ は吸収係数、 $t$ は物質の厚さ、 $I$ は物質を透過したX

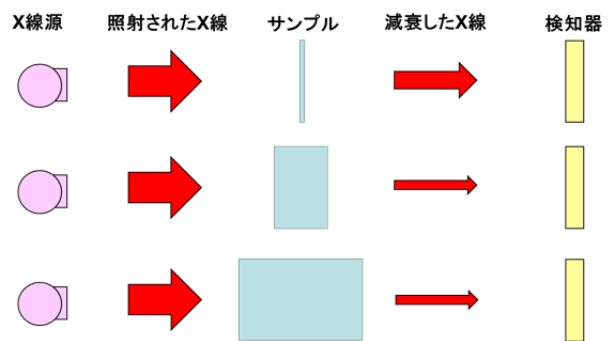
線の強度である。

このように物質の厚みと吸収されるX線の関係が線形ではないため、検知器が検出したX線強度と測定対象物の実際の厚みとの間にずれが生じ、それが測定誤差となる。



※X線が検知器に垂直に入射するのが理想だが、実際は斜めに入射するため検出位置にずれが生じる

図6 検出位置のずれの模式図



※X線には複数の波長が含まれ、波長の長いものは吸収され易く、短いものは吸収され難い。そのためX線の吸収量とサンプルの厚みが比例しない。

図7 X線がサンプルを通過する際の模式図

4 測定方法の改善

4-1 測定対象物の取り付け角度の改善

本研究では前述の2つの誤差要因のうち、形状の歪みに対して影響が大きいと考えられるコーンビームアーチファクトに注目し、この影響を調べるために、測定対象物の取り付け角度を変えながらX線CT測定を行った。

コーンビームアーチファクトは、X線が測定対象物に対して斜めに入射することによって発生するため、検知器に直交する面において顕著に発生する。そのため、測定対象物自体を傾け、検知器と直交する面をつくらずに撮影することで、アーチファクトの発生を低減できる。そこで、測定対象物の取り付け角度を変化させて測定を行い、測定誤差について比較した。取り付け角度は回転部の回転軸に直交する面について、0度（従来）、15度、30度、45度と傾けたものについて比較した。測定対象物の取り付け状態を図8、9に示す。

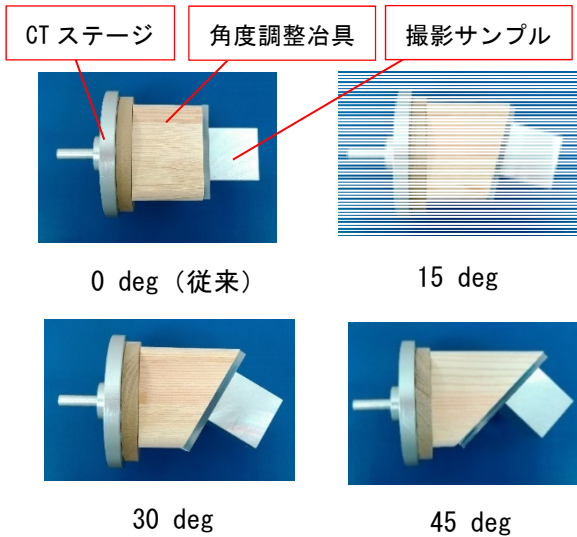


図8 サンプル1（立方体）の取り付け状態

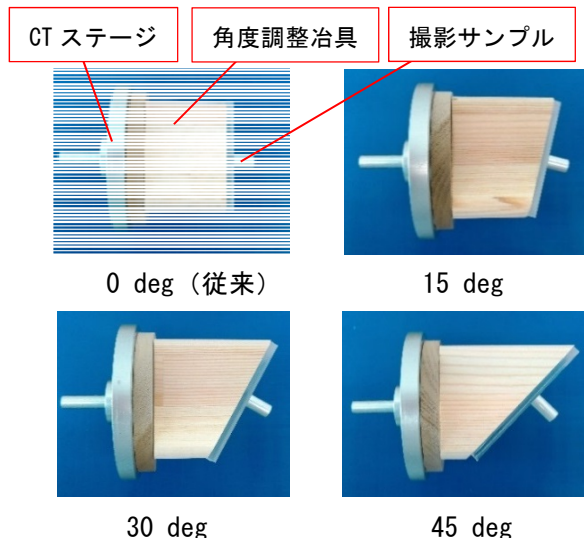


図9 サンプル2（円柱）の取り付け状態

4-2 3次元測定器との比較結果

次に3次元測定器 Crysta-Apex C776(ミットヨ)を用いた測定結果との比較を表3、4及び図10、11に示す。サンプル1については、図12に示すX、Y、Zの各方向の長さを比較し、サンプル2については、径φと長さZを比較した。X線CT装置の寸法測定は、VG Studio Max<sup>4</sup>の寸法測定機能を用いた。差の計算を(2)式に示す。

$$\text{差} = C - X \tag{2}$$

ここで、CはCrysta-Apexの測定値、XはX線CT装置の測定値である。

表3 3次元測定器との比較結果（サンプル1）

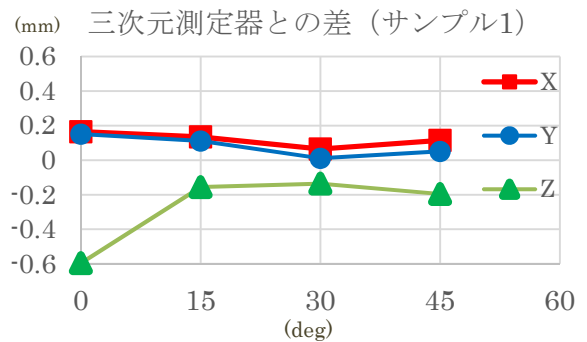
角度 (deg)	3次元測定器との差 (mm)			
	X	Y	Z	合計 (絶対値)  X + Y + Z
0	0.16	0.15	-0.59	0.9
15	0.13	0.11	-0.15	0.39
30	0.06	0.01	-0.13	0.2
45	0.11	0.05	-0.19	0.35

※サンプル1の場合、30 deg傾けて測定することで差が最小となる。

表4 3次元測定器との比較結果（サンプル2）

角度 (deg)	3次元測定器との差 (mm)		
	径φ	長さZ	合計 (絶対値)  φ + Z
0	-0.4	0.21	0.61
15	0.34	0.12	0.46
30	0.32	0.09	0.41
45	0.06	0.05	0.11

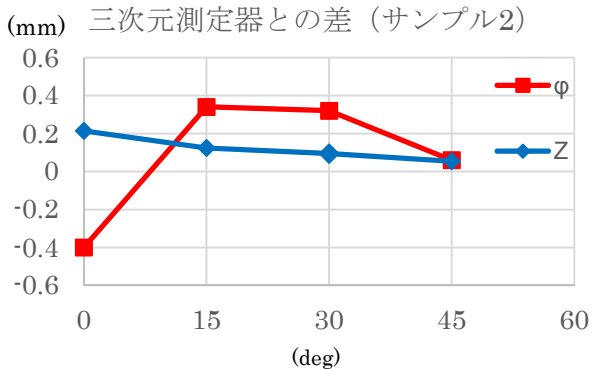
※サンプル2の場合、45 deg傾けて測定することで差が最小となる。



※0 degの場合の差が最大となり、30 degの場合が最小。X、Y方向に比べてZ方向の差が大きい。

図10 3次元測定器との比較結果（サンプル1）

図 10、11 からサンプル 1 については、X、Y、Z の全てについて 0 度の場合の差が最大であり、30 度傾けた場合の差が最小であった。いずれの角度においても X と Y 方向と比べて Z 方向の差が大きいが、サンプルを傾けることによる改善効果も大きいことを確認した。サンプル 2 については 45 度傾けた場合が最も誤差が小さかった。また、サンプル 1 の場合、回転軸方向である Z 方向は差が大きかったが、サンプル 2 の場合は径方向に比べて Z 方向の差が小さいことを確認した。



※0 deg の場合の差が最大となり、45 deg の場合が最小。径と比較して長さ方向の差が小さい。

図 11 三次元測定器との比較結果 (サンプル 2)

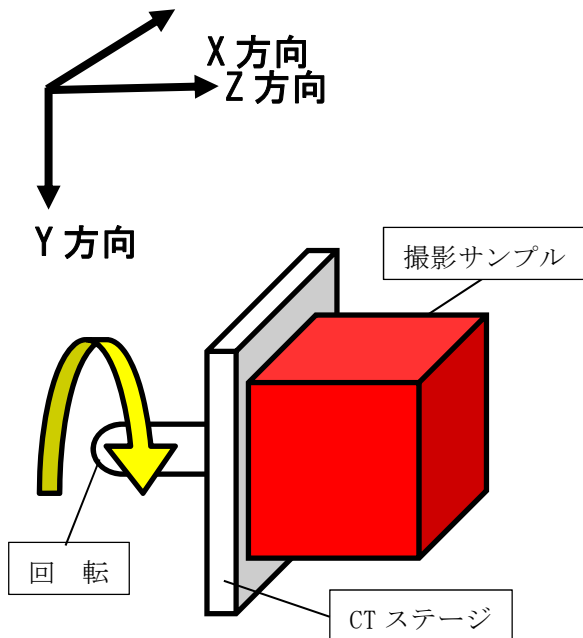


図 12 サンプル 1 の測定方向と取り付け状態

本実験においてサンプル 1 とサンプル 2 では最適な角度が異なった原因として、検知器の有効範囲の違いが考えられる。コーンビームアーチファクトの発生は検知器の中央付近は小さく、端は大

きい。そのため、サンプルの大きさや形状によってコーンビームアーチファクトの傾向が変化する。このことから、X線CT装置を用いた寸法測定では、サンプルの形状や大きさによって誤差の傾向が変化するため、サンプル毎に最適な取り付け角度を明らかにする必要がある。

## 5 結 言

本報告では、X線CT装置を用いた寸法測定における誤差の要因調査及び誤差の軽減方法について検討した。

実験では、コーンビームアーチファクトに注目し、測定対象物の取り付け角度を変化させながら寸法測定を行った。その結果、サンプル 1 については最大で 77%、サンプル 2 については最大で 81% 誤差を低減した。また、誤差が最小になる取り付け角度はそれぞれ 30 度、45 度と異なることから、サンプルの形状、大きさによってコーンビームアーチファクトの傾向が変化する事を明らかにした。

今後は、測定対象物毎に異なる最適な取り付け角度についてのデータを蓄積していく。また、もう 1 つの主要な誤差要因であるビームハードニングアーチファクトに起因する誤差の軽減手法を検討し、X線CT装置を用いた測定技術の改善に取り組む。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、国立研究開発法人産業技術総合研究所工学計測標準研究部門幾何標準研究グループの藤本弘之様、佐藤理様から貴重な助言を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 藤本弘之・佐藤理・佐藤真・岸武人：X線CT装置の精度評価法標準化と高度化、精密工学会誌、Vol. 82、No. 6、pp502-505 (2016)
- 2) 三和田靖彦：X線CTによる形状計測とボリュームモデリングの現状と課題、精密工学会誌、Vol. 82、No. 6、pp497-501 (2016)
- 3) 紋川亮・千葉浩行・富山真一・谷口昌平：X線CT装置の運用事例、精密工学会誌、Vol. 82、No. 6、pp518-522 (2016)
- 4) VG Studio MAX2.2 マニュアル、ポリュームグラフィクス株式会社
- 5) Richard Mather：コーンビームへの取り組み、INNERVISION(21・2)別冊付録、pp10-16(2006)
- 6) 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、pp523-528 (2016)