

## 計測機器の連携

### ～デジタルデータに対するX線CTデータの合成法の基礎的検討～

小宅智史・林和\*・黒崎紘史・増田直也・狩野幹大\*\*・高橋勇一

Measuring instruments cooperation

～A fundamental study on integrating X-ray CT data with digitizer data～

OYAKE Satoshi, HAYASHI Yawara, KUROSAKI Hirofumi, MASUDA Naoya,  
KANO Motohiro and TAKAHASHI Yuichi

X線CTでは材質や形状に起因するアーチファクトにより高精度な寸法測定・形状評価が困難である。そこで外側形体はデジタルデータ、内側形体はX線CTデータを用いて両者を重ね合わせることでデジタルの高精度を活かしつつ、X線CTによる内側形体情報を統合した形体データの構築が期待される。

本研究では、デジタルおよびX線CTデータから高精度な形体データを作成し内側形体の誤差を評価することで、形体データの構築可能範囲の確立を目的とする。その結果直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲で約0.01mmの精度でデータ統合可能なことが示唆された。

キーワード：X線CT、デジタル、データ統合

X-ray CT struggles with high-precision measurements due to artifacts from material properties and geometry. To improve accuracy, this study integrates external shape data from a digitizer with internal shape data from X-ray CT. By evaluating internal shape errors, we established a feasible range for data integration, achieving approximately 0.01 mm accuracy within  $\phi 25$  mm and an evaluation range of 15 mm.

Keywords: X-ray CT, Digitizers, Data integration

#### 1 はじめに

企業の製品開発において、製品の寸法測定・形状評価のための形体データ取得の要望は高い。形状測定装置として、デジタル（光学式3Dスキャナ）およびX線CTが広く用いられている。デジタルは外側形体（以下、外形とする）を高精度に取得出来る一方で、内側形体（以下、内形とする）の測定は不向きである。これに対してX線CTはX線の透過が可能な試料であれば外形

および内形の同時取得が可能である。

しかしながら、X線CTでは材料固有のX線減衰係数の違いや試料の幾何学形状に起因するビームハードニングやストリークなどのアーチファクトにより、断面画像に歪みが生じる。これにより形状の膨張や収縮といった計測誤差が発生し、高精度な寸法測定・形状評価が困難になっている。金属や樹脂といった材質の違いに依ってもアーチファクトの影響は前者の方が大きくなるなど、寸法値や外形への影響の程度は異なる。

このような技術的課題を解決するため、外形はデジタルの測定データを用い、内形についてはX線CTの測定データを用いて両者を重ね合わせることで、デジタルの高い測定精度を活かしつつ、X線CTで取得した内形情報を統合した形体データの構築が期待される。

本研究の目的は、デジタルにより取得した外形データとX線CTにより得られた内形データを統合した形体データを構築し、その際に生じる内形の誤差を定量的に評価することで、提案手法によるデータ構築可能範囲を確立することである。

## 2 実験方法

### 2.1 実験概要

本研究では、デジタルとX線CTデータを統合した形体データの構築可能範囲の確立を目的として、X線CT、デジタルおよび三次元測定機を用いて試験片の計測を行った。

試験片はサイズの異なる5種類の部品と各サイズに対して材質が異なる2種類（アルミニウム合金A5056およびMCナイロン）の合計10サンプルである。試験片は形状の合成の影響を評価するサンプルを3種類（No. A1, A2, A3）、アルミ片の厚みの影響および形状の影響も考慮した評価を行うためのサンプルを2種類（No. B1, C1）作成した。

測定方法として、デジタルとX線CTを用いて試験片の外形を測定した。また、X線CTにより試験片の内形も測定し、得られた形状データを三次元測定機で取得したデータと比較評価を行った。さらに内形においては、三次元測定機で取得した内形データとデジタルとX線CTを統合したデータでの外形を基準にした際の同一位置における内形を比較することで、データを統合した場合の誤差の評価を行った。

以下に実験装置、測定条件、測定手順および形状データ照合評価手法の詳細を述べる。

### 2.2 実験装置およびソフトウェア

#### 2.2.1 実験装置

外形の高精度な三次元データを取得するためにデジタル（ATOS Core、GOM社）を使用した。点間距離0.03mm、スキャン範囲は80mm×60mmであり、投影した光が当たり受光部に反射する範囲しかデータの取得が出来ないため、複数回角度を変更して測定を行い、形状全体の結合データを取得した。外形および内形データの取得には産業用X線CT（Phoenix v|tome|x m 240/180、日本ベーカーヒューズ株式会社）を用いた。

また、寸法測定には三次元測定機（LEGEX9106、ミットヨ株式会社）を使用した。本装置は、ポイント測定および微い測定が可能で測定精度は $(0.28+L/1000)\mu\text{m}$ （L=任意測定長（単位：mm））である。測定範囲はX軸900mm、Y軸1000mm、Z軸600mmである。実験装置外観を図1に示す。

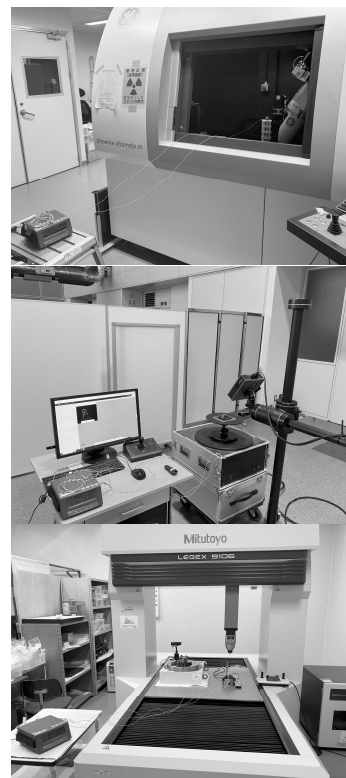


図1 実験装置（上からX線CT、デジタル、三次元測定機）

#### 2.2.2 ソフトウェア

断面画像の再構成およびSTL形式への変換にはVG Studio MAX3.2（ポリュームグラフィックス株式会社）を使用した。また、デジタルで取得したデータの処理および形状データの照合評価にはGOMInspect2017（GOM社）を用いて評価を行った。

## 2. 3 試験片

製作した試験片を図2に、詳細を図3に示す。No. A2、A3の試験片に関しては、No. A1の直径25mm部分を各20mm、15mmとしている。

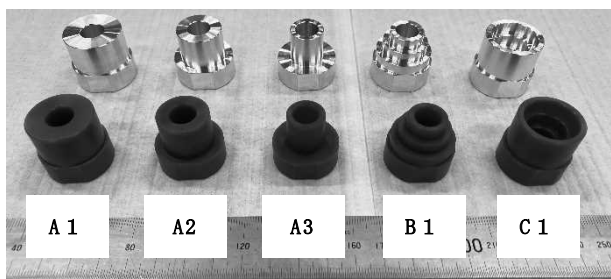


図2 製作した試験片

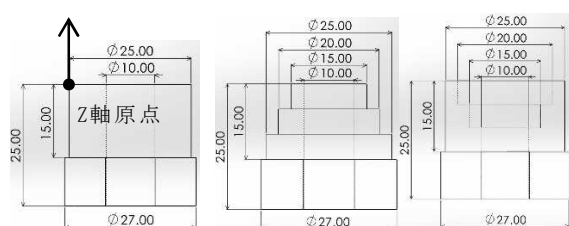


図3 試験片詳細（左からNo. A1, B1, C1）

試験片はX線CTとデジタイザで取得した各データに対して位置合わせの際に、位相が一意に決まるようDカットを付している。

## 2. 4 評価断面

外形および内形に対する評価は断面で行いZ軸原点からZ=-15mmの評価範囲において、各円筒の中央部とした。内形評価部はφ10mmにおける断面でありデータ合成時の評価断面も同様である。図4に評価断面を示す。なお、サンプルB1およびC1については、評価対象の円筒部分が各3か所となるため、以後のグラフではサンプルの評価箇所を識別するために便宜上、Z軸+側からup、middle、downの識別記号を割り当てている。

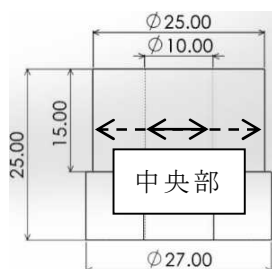


図4 評価断面について（内形評価断面：実線、外形評価断面：破線）

## 2. 5 測定条件

X線CTの測定条件は、管電圧100kV、管電流100uA、FODは100mmとした。その際のボクセルサイズは約20um/voxelである。デジタイザの測定では、反射防止用のスプレーを塗布した。また、三次元測定機での測定は直径4mm、長さ50mmのスタイラスを使用した。

## 2. 6 測定手順

### 2. 6. 1 X線CTによる測定

X線CTによる測定では、各試験片を回転台に配置し固定した後、フルスキャン（360°回転）を実施した（図5参照）。取得した断面画像をVG Studio MAX3.2に入力し三次元モデルを生成、STLデータを出力した。

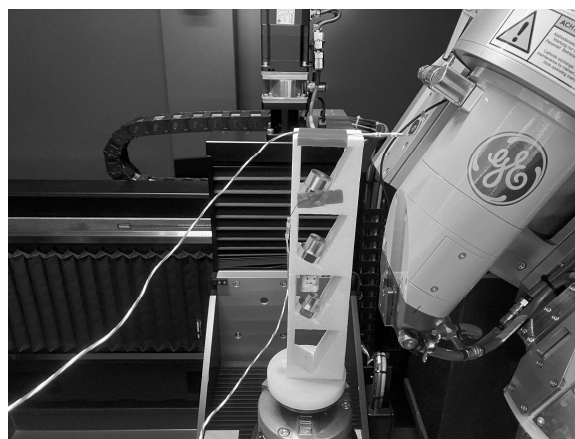


図5 X線CTによる測定

### 2. 6. 2 デジタイザによる測定

デジタイザによる測定では、各試験片を回転テーブルに配置し、試験片全体をスキャンした（図6参照）。そして外形の三次元点群データを取得し解析ソフトウェアGOMInspect2017を用いて、三次元モデルに再構成した。なお、光沢除去のため測定対象の試験片に反射防止スプレーを使用している。

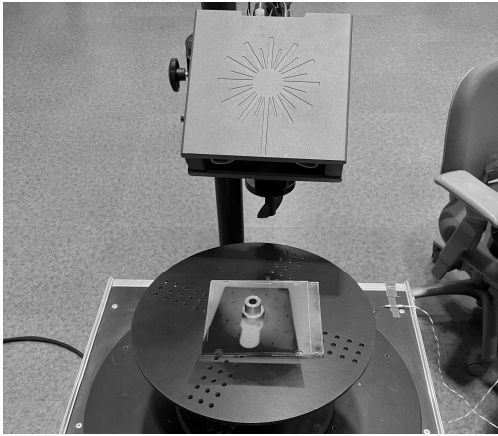


図6 デジタイザによる測定

### 2. 6. 3 三次元測定機による測定

三次元測定機での測定では、試験片を図7のように固定した。その後、評価対象である試験片の直径10mmの内形部分のZ軸原点からZ=-15mmまでの範囲において、各円筒の中央部について倣い測定を行い、形状データを取得した。

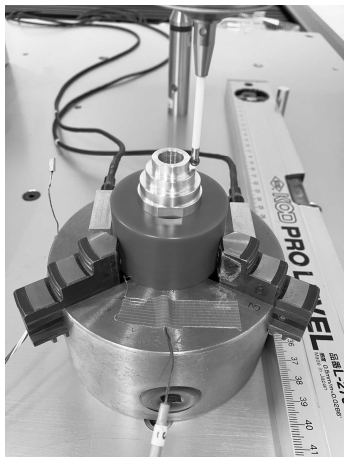


図7 三次元測定機による測定

### 2. 7 形状データの照合評価

三次元測定機で測定した内形および外形の点群データに対して内形はX線CT、外形はデジタイザおよびX線CTのデータとの差を材質および大きさの異なる試験片に対して求めた。その後同様に、デジタイザによる外形データを基準として用いてX線CT外形データとベストフィットした際のX線CT内形データとの差の評価を行った。

各種形状データとの照合および評価は、3次元CADソフトウェア (Rhino7、McNeel&Associates) を用いて行った。

## 3 結果および考察

### 3. 1 各実験装置の測定結果

各実験装置による測定結果を図8に示す。

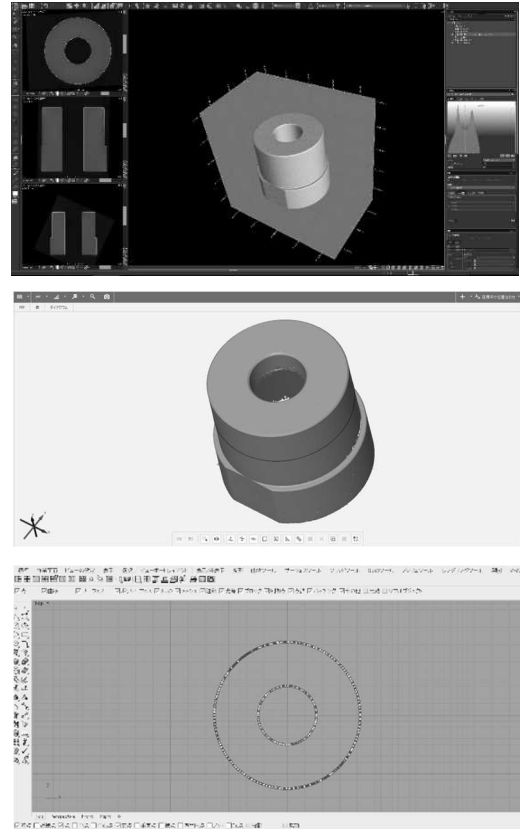


図8 各実験装置による測定結果(上からX線CT、デジタイザ、三次元測定機)

X線CTでは試験片の内形および外形データを取得することが出来、STLデータで出力した。デジタイザでは、一部の谷形状を除き外形データを取得した。また、三次元測定機では試験片の断面形状を点群データとして取得した。各種形状データとの照合および評価の様子を図9に示す。

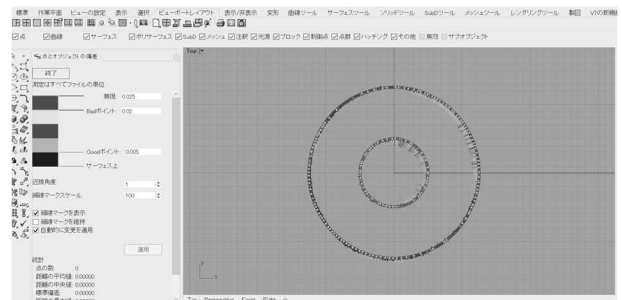


図9 三次元測定機測定データと各種形状データとの照合および評価の様子

### 3. 2 材質および大きさによる影響

各試験片に対して、三次元測定機による内形データに対するX線CTによる内形データの差を図10に示す。

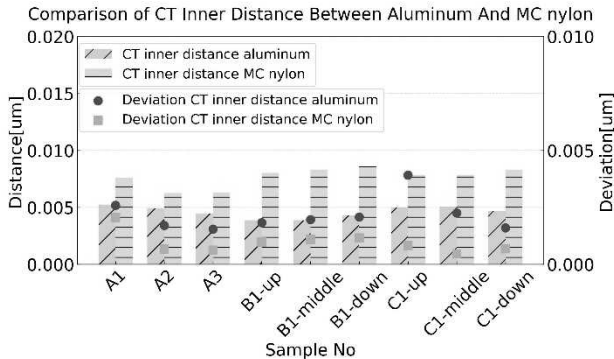


図 10 X線CTによる内形データと三次元測定機による内形データとの比較

棒グラフが三次元測定機で測定した内形の断面形状に対して、X線CTおよびデジタイザで取得したデータの半径方向の距離の差の平均値である。散布図が距離の差の標準偏差を表している。X線CTで測定した形状データについては、内形において材質や試験片の大きさに依らず0.01mm程の距離の差に収まることが明らかになった。

この結果から内形において、直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲では、2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）で三次元測定機の内形データと大きな差は見られないことが分かった。

また、標準偏差はアルミニウム製よりMCナイロン製の方が小さい結果となった。これは、材料のX線減衰特性に起因していると考えられる。MCナイロンはアルミニウムと比較して原子番号が小さく、X線の吸収係数が低いため、X線CTによる測定時にビームハードニング等のアーチファクトが生じにくい。その結果、測定値のばらつきが小さくより安定した形状データが得られたと推測される。一方、アルミニウムはX線の減衰が比較的大きいため、位置や厚みによって画像コントラストの変動が生じこれが標準偏差の増加に繋がったと考えられる。

また各試験片に対して、三次元測定機に

よる外形データに対するX線CTおよびデジタイザによる外形データの差を図11に示す。

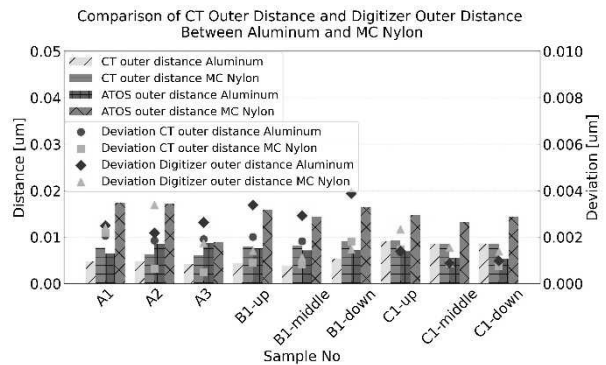


図 11 X線CTおよびデジタイザによる外形データと三次元測定機による外形データとの比較

外形については、アルミニウム製においてもMCナイロン製においても大きさや形状によらず、距離の差の平均値が約0.02mm以内に収まっていることが明らかになった。

このため外形においても直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲では、2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）で三次元測定機の外形データと大きな差は見られないことが分かった。また標準偏差も0.004mmと非常に小さい値を示した。

### 3. 3 データ合成による内形の変化

最後にデジタイザで取得した外形データとX線CTで取得した形状データを、デジタイザによる外形データを基準として用いてX線CTデータとベストフィットを行い合成した形状データの内形と、三次元測定機での内形データとの差を評価した。データ合成の様子を図12に、比較結果を図13に示す。

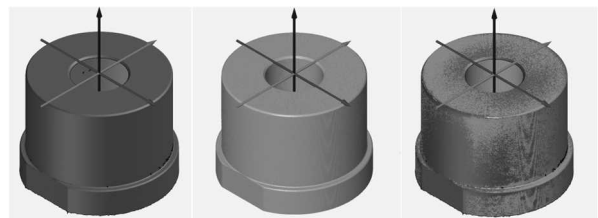


図 12 内形データ合成状況(左からデジタイザデータ、X線CTデータ、デジタイザおよびX線CTのデータ合成後のデータ)

## 4 まとめ

本研究により明らかになったのは以下の2点である。

- ・直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲において2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）でデジタルおよびX線CTによる内形および外形データの誤差の程度を明らかにした。その結果、材質や大きさに依らずデジタルでは外形、X線CTでは外形および内形において、三次元測定機で取得したデータとの差は0.02mm以下であり、大きな差は見られなかった。

- ・本研究で扱った試験片の評価範囲に対してデータ合成時の内形データ同士の誤差は約0.01mmであり、X線CTおよびデジタルのデータ合成が可能なが示唆された。

本研究により、アルミニウムやMCナイロンなどX線の減衰が小さいワークに対する形状評価において、誤差の程度を把握できるようになると考えられる。これにより、試験の可否判断が容易になり、測定データの信頼性が向上して、実用的な品質評価が可能になることが期待される。

今後は、X線の減衰が大きい大型のワークや重金属（原子番号の大きい）製のワークを対象として、材質や形状およびアーチファクトの影響等を把握することで、どの範囲までデータ合成が可能か調査研究を行う予定である。

## 参考文献

1) 戸田裕之 (2019) . X線CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用-(第1版). 共立出版

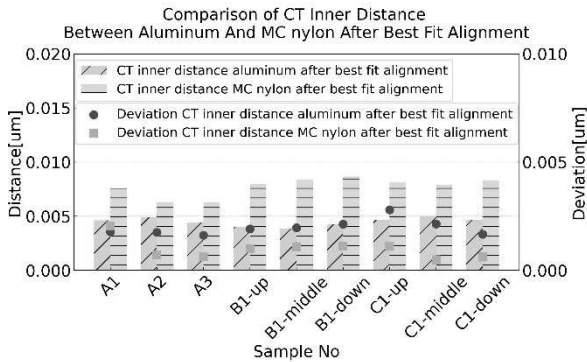


図 1 3 デジタルによる外形データを基準として用いてX線CTデータとベストフィットした際のX線CT内形データと三次元測定機内形データとの比較

デジタルによる外形データによりベストフィットさせた時のX線CTの内形について、材質や大きさに依らず0.01mm程の距離の差に収まることが分かった。そして両者の差分を取った結果を図14に示す。

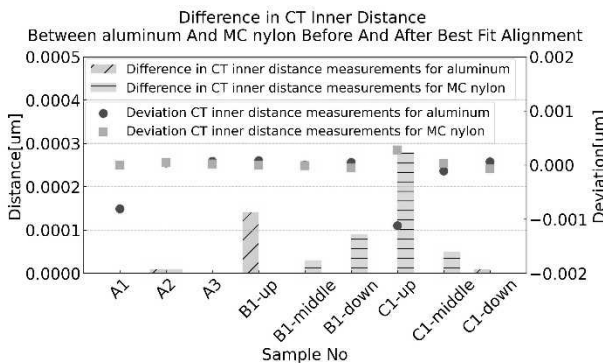


図 1 4 X線CTによる内形データとデジタルによる外形データでベストフィットしたX線CTの内形データとの差

この結果から、データ合成時における内形の差はほとんど認められない。その理由としては、デジタルで取得した外形データとX線CTで測定した外形データに大きな違いがなかったことで、外形を基準としたベストフィットによる位置合わせを行っても内形データに大きな誤差は生じなかったと考えられる。

よって、本研究で対象とした試験片の評価範囲における内形の誤差は約0.01mmであり、X線CTとデジタルによるデータ合成が可能であることが示唆された。