

薄板プレス加工品のX線CTによる3次元形状データ取得手法の構築

瀬戸口正和*

Construction to Technique of 3D Shape for a Thin Board Press Parts with X-ray CT

Masakazu SETOGUCHI

薄板プレス加工品のX線CT撮影を行い、供試材形状に対する良好画像が得られる撮影条件を検討し、得られた断面像の外・内表面近傍の濃度値分布から境界部を推定するとともに断面形状の濃度値プロファイルから濃度変化の検討を行い、寸法精度へ影響することを確認した。

また、取得したX線CT 3次元画像（以下、3次元画像）の実測値とX線CT 3次元画像のCT計測値との寸法比較で誤差レベルを確認して、X線CT 3次元画像からSTLデータへ出力することで3次元形状データの取得手法を構築した。

Keyword : 薄板プレス加工品, X線CT, 境界部, 3次元形状データ, 寸法誤差

1. 緒言

現在のものづくりにおいては、電子関連機器の高性能化・高速処理及び情報処理技術の革新により、デジタル化の進展が著しく、製造された部品から形状データを取得する手法¹⁾にも利用されている。

物の形状データの取得手法には、それぞれ一長一短ある中で、3次元測定機等による点座標や3次元スキャナ等による点群データからの形状取得法では、狭い部分形状や内部形状に対して、データ取得が困難であるが、X線CT (Computed Tomography : コンピュータ断層撮影) は、X線が十分に透過する対象物であれば、内部形状を含む3次元形状データの取得が可能である。

また、X線CTも高性能化・高速化及び高精度化した装置となってきている。そのため、X線CTで取得した3次元形状データからのデジタルエンジニアリングへの適用が試みられている¹⁾。

薄板プレス加工は、低コストで大量生産に適した加工法で、成形された加工品からX線CTを利用して、3次元形状や寸法をデータ化することで、成形加工品の品質チェックや改良及び3次元CAD化等へデータを有効活用したり、デジタルエンジニアリングへの適用が考えられる。

しかし、薄板プレス加工品をX線CTで撮影する際、下記のような要因が形状寸法の測定誤差に大きく影響する。

- ・被写体形状
- ・X線検出器の階調や分解能
- ・散乱線 (X線が物体を透過する際、その方向が変化したX線)

- ・線質硬化 (均一な材質でも厚みにより、透過エネルギー成分が高い方へ偏る現象)
- ・アーチファクト (断面画像上に現れる存在しない偽像)
- ・ノイズ

このため、高精度な装置化や対象物に対する適切な撮影条件の設定及び取得画像の画像処理法や画像解析法等の研究^{1) 2)}が行われてきた。

その中で、寸法精度を向上させる手法として、X線CTデータから作成された再構成画像の濃度値 (X線検出器の階調に応じた濃淡値) が寸法計測に及ぼす影響や表面境界位置を決定する研究^{1), 3), 4)}等がある。

本研究では、マイクロフォーカス線源のX線CTを使って、底板や平板等を有する薄板プレス加工品の良好な3次元形状データを取得する撮影条件と、実測値と3次元画像計測値との誤差が空間分解能=画素寸法 (再構成画像の解像度) 以下になることを目指して、3次元形状データの取得手法について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 3次元形状データ取得方法の手順と基準寸法

3次元形状データ取得方法の手順を図1に示す。

基準寸法となる実測値の測定は、汎用的に寸法計測に利用されているノギス及びハイトゲージを用いて測定した。

また、目標とする誤差は再構成画像の空間分解能である63.5 μm (以下、目標値) とした。



図1 3次元形状データ取得方法の手順

* 生産技術部

2. 2 撮影条件

X線CT撮影は、側方照射型軟X線装置（コムスキャンテクノ(株)社製 ScanXmate-D130SS105Dual）の直交型（コーンビーム型）X線CT機能により、3次元画像の取得を行った。実験に使用した装置外観を図2に示す。



図2 装置外観

X線撮影における画像の品質は、検出器に入射した総X線量で決まり、下式で表される。

$$\text{入射総X線量} = \text{管電圧} \times \text{管電流} \times \text{照射時間} \dots (1)$$

管電圧は高くなると短い波長のX線が多くなり、透過力が強くなる。管電流は高くなるとX線量は増加し、透過力は変わらないものの、画像の明るさやコントラストに影響を及ぼす⁵⁾。

X線撮影では、撮影対象物の材質、形状、寸法等に対して、取得画像を確認しながらX線出力を調整する必要があり、良好な画像は、狭い範囲のX線出力条件から試行錯誤的に画像の取得を試みた。

今回の実験では、画像取得時間の短縮を図るために、検出器の積算レート（照射時間）を一定として管電圧及び管電流で調整を行った。

X線CTの撮影条件の中で、X線CT3次元画像の良好さや、寸法計測の精度に大きく影響する撮影条件を表1に、装置の仕様上、変更不可の条件を表2に、変更しても寸法計測に影響が少なかった良好な項目を同一条件としてその他の共通条件で表3に示す。

2. 3 供試材

実験に使用した供試材1は底板を有する円筒状のSUS304製薄板プレス加工品（小物ビーカー）で、外観写真を図3、実測寸法を図4に示す。供試材2は段階状の平板を有するSUS304製複雑形状品で、外観写真を図5、実測寸法を図6に示す。

表1 撮影条件

供試材 1	円筒状のSUS304製薄板プレス加工品（小物ビーカー）
供試材 2	段階状の平板を有するSUS304製複雑形状品
管電圧	80~130kVp
管電流	30~120μA
照射角度	供試材垂直（傾斜角度0度）～ 供試材水平（傾斜角度90度）

表2 変更不可の条件

管球-検出器間距離	700mm
検出器	フラットパネル (125mm×125mm)
検出器有効画素数	992×992

表3 その他の共通条件

線質	軟X線
焦点寸法	20×20μm
拡大率	2倍
空間分解能=画素寸法 (再構成画像の解像度)	63.5μm
画像積算回数（平均）	128回
画像積算回数（加算）	1回
積算レート	2フレーム/秒
ビニングモード	1×1
スキャン	フルスキャン
プロジェクション数	1,500
再構成画像の階調	16bit
再構成時のアーチ ファクト低減フィルター	av-3 (平均化フィルター弱)
再構成時のノイズ 除去フィルター	av-1 (平均化フィルター弱)
ビームハードニング補正	1.3



図3 供試材1（小物ビーカー）

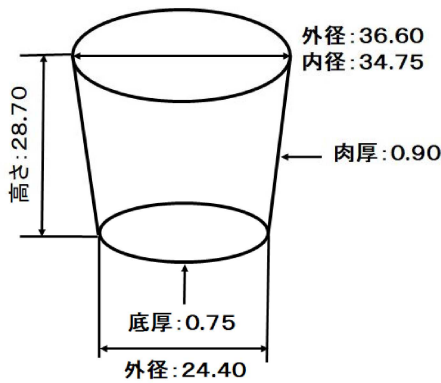


図4 供試材1（小物ビーカー）の実測寸法



図5 供試材2（SUS304製複雑形状品）

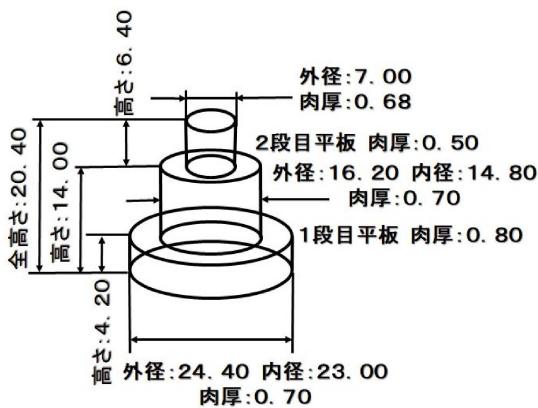


図6 供試材2（SUS304製複雑形状品）の実測寸法

2.4 再構成画像のデータ処理方法

2.4.1 ImageJによる境界位置の推定方法

再構成画像の各画素は、16bitの濃度階調の濃度値を有している。画像処理ソフト「ImageJ Ver 1.49」を用いて下記の手順で濃度値プロファイルを算出した。

- ① 供試材の表面境界近傍の濃度値分布を計測
- ② 外径や内径寸法計測のための基準位置を推定
- ③ 供試材断面の濃度値プロファイル算出

供試材の計測したい位置での再構成画像のYZ断面像における境界部のXY座標の推定及びその近辺のXY座標値と濃度値を対比しながら、同部位の表面境界付近の濃度値

分布（被写体と空気の境界間の濃度値の違い）や画素数から外径や内径の基準位置を推定した。

また、肉厚の推定は、外径基準位置と内径基準位置の基準位置間の画素数から推定した。

さらに、外径基準位置や内径基準位置の基準位置間に対する再構成画像のYZ断面像の濃度値プロファイルから濃度変化の検討を行い、濃度値の違いで計算寸法（画素数×画素寸法）が、寸法精度へ及ぼす影響を確認した。

2.4.2 3Dビューワによる寸法計測方法

再構成画像を側方照射型軟X線装置に付属している3Dビューワソフト「MolcerPlusVer. 1.34.4」で、X線CT 3次元画像化し、寸法計測機能により寸法測定を行い、実測値とX線CT 3次元画像のCT計測値との寸法を比較した。また、得られた3次元画像から、ポリゴンデータとして編集・評価が可能なSTLデータへの変換を行った。

3. 実験結果及び考察

X線CT 3次元画像からの寸法測定誤差の要因として、1スライス分のボクセルデータが、実物と再構成画像の対応における下記要因の累積があげられる。

- ①幾何学的誤差（ワークの回転における位置の誤差）
- ②階調的な誤差（濃度値の分解能の誤差）
- ③測定箇所との誤差（実測値とCT計測値の測定箇所の違い）

また、表面境界部は、空気層と対象物が接している部分であり、それぞれX線透過率は大きく異なるため、両者の混合したX線透過量となる。このために、再構成画像の濃度値は、空気層と対象物にかけてグラディーション的に変化し表面境界部の位置特定が寸法精度に大きく影響する。

3.1 X線CTによる撮影条件の結果

3.1.1 管電圧と管電流の変化と取得画像

X線CTによる供試材の撮影の様子を図7に示す。X線CT撮影を行う際は、透過力とX線強度を考慮しながら、管電圧と管電流の組合せを決める。

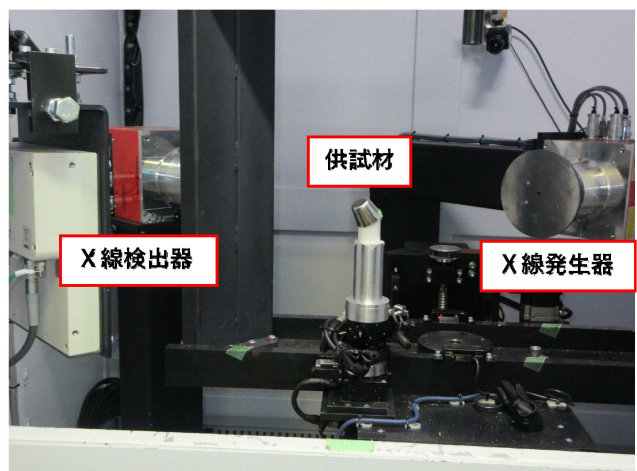


図7 供試材1の撮影状況

供試材 1 の場合、良好な X 線出力は 4.7W 程度で、X 線出力が強すぎる（管電圧：124kVp、管電流：120μA）とノイズ等が多くなり（図 8）、X 線出力が弱い（管電圧：80kVp、管電流：90μA）と透過不足となり、画像が得られなかった。

さらに、同程度の出力でも多くのノイズや透過力不足で画像が得られない条件があることから、良好な画像を得るためには、管電圧（透過力）と管電流（画像のコントラスト）のバランスが重要である。

実験の結果、供試材 1 では管電圧：130kVp、管電流：36μA の組合せ、供試材 2 では管電圧：120Vp、管電流：30μA の組合せで良好な画像を取得することができた。

しかし、供試材 1、2 とも垂直にセットして撮影すると、底板の透過データが取得できなくなり、3次元画像化した際に、データが欠落してしまった（図 9、図11）。

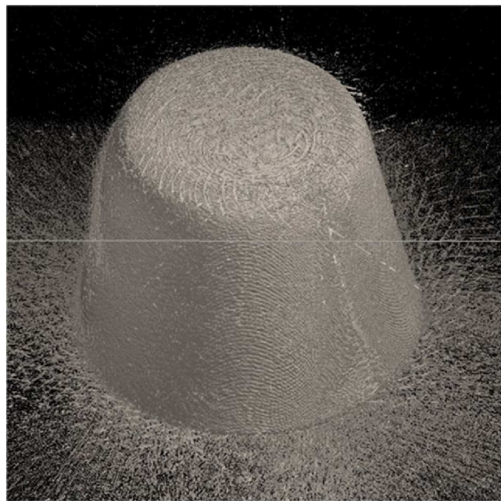


図 8 供試材 1 のノイズの多い画像の例
(管電圧：124kVp、管電流：120μA)

3. 1. 2 撮影時の供試材の角度変化と取得画像

そこで、底板や平板の影響が少なくなるように、供試材を垂直（傾斜角度 0 度）から水平（傾斜角度 90 度）まで、傾斜させて撮影した。

その結果を表 4、表 5 に示す。供試材 1 を 30 度傾斜させて撮影した結果、底板のデータ欠落もなく、ノイズ等のない良好な X 線 CT 3 次元画像を取得できた（図10）。

供試材 1 では、その形状・サイズから傾斜が小さいと底板の影響でデータ欠落が生じ、傾斜が大きくても底板と側板の影響からデータ欠落が生じる傾向が見られた。

供試材 2 では、10 度傾斜して撮影した結果、平板のデータ欠落もなく、ノイズ等のない良好な X 線 CT 3 次元画像が取得できた（図15）。

供試材 2 では、その形状サイズから傾斜が小さいと平板

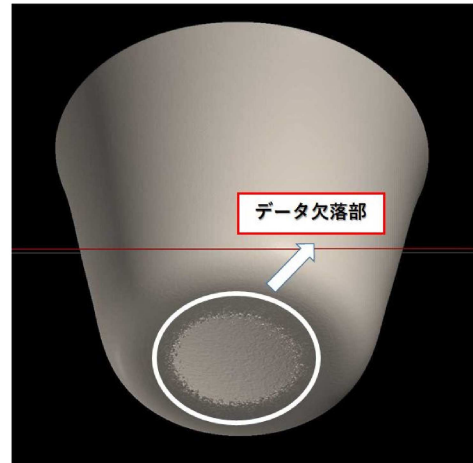


図 9 供試材 1 のデータが欠落した画像

表 4 供試材 1 の傾斜角度の影響

管電圧 (kVp)	管電流 (μA)	出力 (W)	傾斜角度 (度)	撮影結果
130	36	4.7	0	データ欠落
130	36	4.7	3	データ欠落
130	36	4.7	5	データ欠落
130	36	4.7	8	データ欠落
130	36	4.7	10	データ欠落
130	36	4.7	30	○
130	36	4.7	90	データ欠落



図10 供試材 1 の鮮明な X 線 CT 3 次元画像

の影響でデータ欠落が生じ、傾斜が大きくても平板と側板の影響からデータ欠落が生じる傾向が見られた。

3. 2 再構成画像のデータ処理結果

3. 2. 1 ImageJによる境界位置の推定結果

ImageJを用いて、再構成画像の Y Z 断面像における外径および内径の基準位置を推定し、肉厚を計算した。

断面画像の縦方向を Y 座標、横方向を X 座標とし、計測したい位置での境界部の X Y 座標の推定及びその近辺の X Y 座標値と濃度値を対比しながら、同部位の表面境界付近の濃度値分布（被写体と空気の境界間の濃度値の違い）や



図11 供試材2のデータが欠落した画像

表5 供試材2の傾斜角度の影響

管電圧 (kVp)	管電流 (μA)	出力 (W)	傾斜角度 (度)	撮影結果
120	30	3.6	0	データ欠落
120	30	3.6	3	データ欠落
120	30	3.6	5	データ欠落
120	30	3.6	8	データ欠落
120	30	3.6	10	○
120	30	3.6	90	データ欠落



図12 供試材2の鮮明なX線CT3次元画像

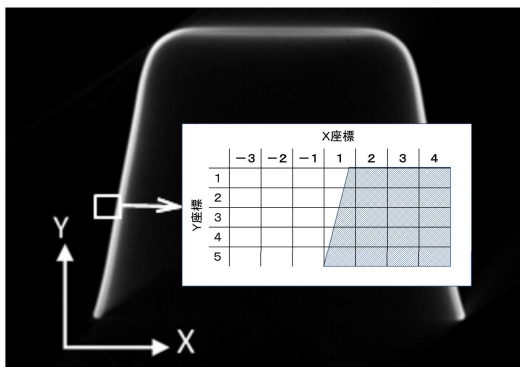


図13 供試材1の再構成断面像

表6. 1 外径基準位置を推定するための
外表面近傍の濃度分布 (左側)

外径基準 推定位置	幅方向画素番号 (X座標)							左側最大濃度値
	-3	-2	-1	1	2	3	4	
高さ方向 画素番号 (Y座標)								
1	5033	12767	25973	39813	49324	50534	49470	
2	6070	14598	29399	42217	49758	50728	49284	
3	6594	15937	30274	43704	48823	50823	49139	
4	5731	15058	28998	42011	46103	49015	48360	
5	5682	12943	25069	38432	41406	46049	46084	

外表面推定位置

表6. 2 外径基準位置を推定するための
外表面近傍の濃度分布側 (右側)

外径基準 推定位置	幅方向画素番号 (X座標)							右側最大濃度値
	574	575	576	577	578	579	580	
高さ方向 画素番号 (Y座標)								
1	58864	58328	52695	39731	24572	13908	8828	
2	59106	59197	54197	42607	27069	14594	9025	
3	59177	59976	55208	43641	28220	15608	8799	
4	59403	59424	53902	42947	27015	14515	8193	
5	59315	57985	51110	38400	23618	12007	6606	

外表面推定位置

表6. 3 外径寸法を推定するための計算法

外径基準位置		実測値 : 36.6mm		
画素寸法 (μm)	画素数	計算寸法 (mm)	濃度値 (左)	濃度値 (右)
63.5	577	36.64	43704	43641

画素数から、規準位置を推定した。

例えば、図13に示すように、被写体左側の外表面近傍の領域におけるX方向とY方向の画素番号を定義し、それぞれの画素における濃度分布を表6. 1に示す。

Y方向画素番号3における最大濃度値は、X方向の画素番号3の50,823となる。その最大濃度値から外側(左側)に行くに従い濃度値漸減するがX方向画素番号-1で急激に変化した。そこで、そのひとつ手前のX方向画素番号1を外径基準位置とした。

右側外表面近傍も同様に濃度分布を測定した結果を表6. 2に示す。

右側の最大濃度値は、X方向画素番号575、Y方向画素番号3において59,976である。X方向画素番号578において濃度値が急激に下がるので、その一つ前のX方向画素番号577を右側の外径基準位置とした。

その結果、供試材1の推定した外径基準位置の濃度値は、43,700程度であった。

外形寸法を推定するための計算法を表6. 3に示す。上記で推定した外径基準位置からのX方向総画素数 : 577画

素と画素寸法：63.5 μ mの積が計算寸法である。計算の結果36.64mmで、外径実測値：36.6mmに近い値となり、寸法誤差も目標値以下であった。

内径基準位置も同様の方法で推定し、内径基準位置の濃度値は、17,000程度で、X方向の総画素数は548画素となり、内径実測値：34.75mmに対し、計算寸法：34.798mmとなった。寸法誤差も目標値以下であった。

肉厚は、外径基準位置と内径基準位置の間のX方向画素画素数を算定した。その結果、左側：13画素、右側：18画素であり、肉厚実測値：0.87mmに対し、計算寸法は左側：0.8255mm、右側：1.143mmとなった。実測値に対しての寸法誤差は左側は目標値以下であったが、右側で誤差が大きかった。

これは、透過するX線量が供試材1の形状（曲率）の影響で物体の厚みと空気の混合割合が違うため、内径側の濃度値の変化が緩やかなことや画素寸法よりも幾何学的誤差及び測定箇所の影響等の影響が大きくなり、内径基準位置では実測値に近い値となっても肉厚では誤差が大きくなったと考えられる。

ImageJで得られた供試材1の外径及び内径の基準位置と肉厚（高さ方向の画素番号3での幅方向の画素番号-3～580の濃度値）に対する再構成画像のYZ断面像の濃度値プロファイルを図14に示す。

グラフ内の縦軸が濃度値で横軸が計算寸法、縦線と横線がクロスする部分が、前述した外径や内径基準位置及び肉厚を推定した濃度値である。

この図から、外側の空気層（濃度値が低い部分）から外表面及び供試材の内部になるにつれて濃度値が高くなり、最大濃度値を過ぎると、内表面から容器内に向けて濃度値が低くなるプロファイルを示す（左右とも同様の傾向）。

濃度値で計算寸法（画素数×画素寸法）に違いが生じることから、寸法精度へ影響することが確認でき、外径より内径が、濃度勾配が緩やかであった。

これも前述の境界位置の推定同様に、透過するX線量が供試材1の形状（曲率）の影響で物体の厚みと空気の混合割合が違うため、濃度勾配に違いが生じたと考えられる。

3. 2. 2 3Dビューワによる寸法計測結果

①供試材1の計測結果

3Dビューワで、供試材1のX線CT断面像から3次元画像化し、その3次元断面像（図15）を寸法計測機能により寸法測定を行い、実測値とCT計測値の誤差比較を行った。

その結果を表7に示す。目標値に対して、外径及び肉厚は、実測値に近い値となった。

外径は、前述のImageJで得られた外径基準位置と一致しており、画素間の濃度差が大きく、基準位置推定の精度が

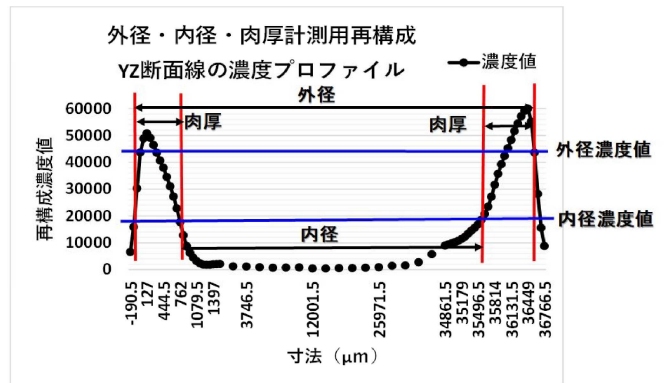


図14 供試材1の再構成YZ断面像の断面濃度値プロファイル



図15 供試材1の3次元断面像

表7 供試材1の実測値とCT計測値の寸法比較結果

供試材1	小物ピーカー		
	計測部位	実測値	CT計測値
外径 (上部) (mm)	36.60	36.67	0.07
内径 (上部) (mm)	34.75	34.91	0.16
肉厚 (中央部) (mm)	0.87	0.87	0.00
底厚 (中央部) (mm)	0.75	0.93	0.18
高さ (mm)	28.70	28.66	-0.04

高くなったと考えられる。

しかし、内径と肉厚は、前述のImageJの結果と逆になり、内径の誤差が大きく、目標値よりも大きかったが、肉厚は、目標値以下で誤差がなかった。

底厚の誤差も大きく、目標値よりも大きかった。これは、傾斜させて像的には鮮明になったが、X線透過量が側面に比べ少なく底板の濃度値が低く、濃度差から境界を特定する際の誤差が大きくなったと推測される。

また、得られた3次元画像から、ポリゴンデータ（表面の形を表現するデータ）として編集・評価が可能なSTL

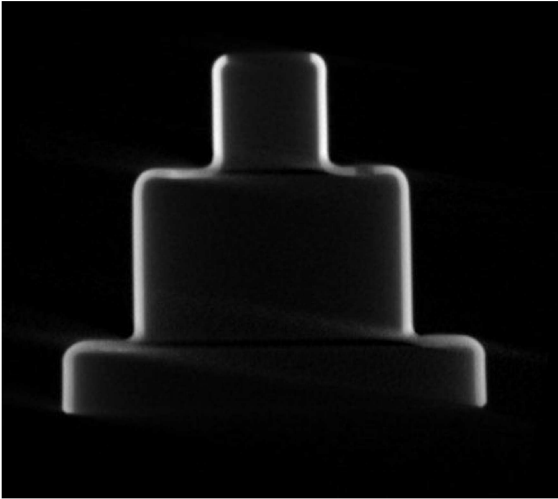


図16 供試材2のX線CT再構成YZ断面像

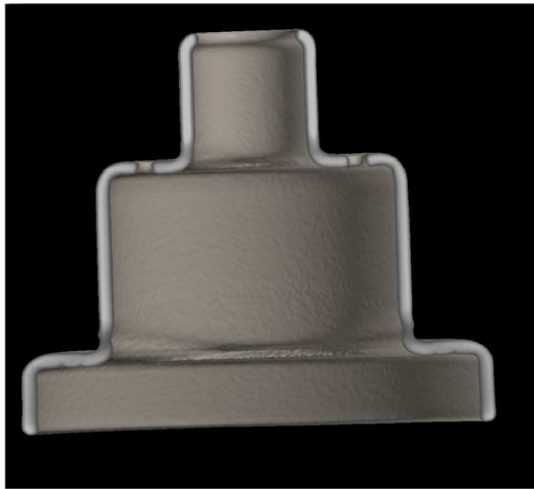


図17 供試材2の3次元断面像

表8 供試材2の実測値とCT計測値の寸法比較

供試材2		SUS304製複雑形状品		
計測部位		実測値	CT計測値	誤差
外径 (mm)	1段目	24.40	24.37	-0.03
	2段目	16.20	16.15	-0.05
	3段目	7.00	7.09	0.09
内径 (mm)	1段目	23.00	22.93	-0.07
	2段目	14.80	14.78	-0.02
	3段目	—	—	—
側板肉厚 (中央部) (mm)	1段目	0.70	0.70	0.00
	2段目	0.70	0.63	-0.07
	3段目	0.68	0.65	-0.03
高さ(mm)	1段目	4.20	4.23	0.03
	2段目	9.80	9.74	-0.06
	1+2 段目	14.00	14.01	0.01
	3段目	6.40	6.44	0.04
平板部 肉厚 (mm)	1段目	0.80	0.79	-0.01
	2段目	0.50	0.55	0.05
	3段目	—	—	—
全高さ(mm)		20.40	20.41	0.01

データへの変換を行った。

②供試材2の計測結果

供試材2の再構成画像のYZ断面像を図16、供試材2の3次元断面像を図17、実測値とCT計測値の誤差比較を表8に示す。3段目の外径、1段目の内径、2段目の側板肉厚は、目標値よりもわずかに大きな誤差となったが、ほとんどの項目で実測値に近い値となった。

供試材1同様に、供試材2の3次元画像をSTLデータへ変換出力を行った。

4. 結 言

今回の実験では、3次元形状データの取得手法の構築を目指して、底板のある円筒状のSUS304製薄板プレス加工品（小物ビーカー）及び段階状の平板を有するSUS304製複雑形状品について、X線CTの撮影条件の検討及び取得した再構成画像の断面像から外表面位置及び内表面位置の推定及び寸法実測値と3次元画像からの寸法計測値との比較を行い、以下の結果を得た。

- (1) X線CTで底板や平板を有する薄板プレス加工品に対する撮影条件の検討を行い、供試材を透過する管電圧と取得画像の明るさや鮮明さが得られる管電流の適切なX線出力の選定及び供試材の形状サイズに応じた適度な傾斜角度で底板や平板と側板の影響が少なくなるように撮影することで、データ欠落やノイズ等のない良好なX線CT3次元画像が取得できた。
- (2) 再構成画像の断面像の外・内表面近傍の濃度分布及び断面部の濃度値プロファイルから、外径近傍は画素間の濃度変化が大きく、境界部の推定位置が特定しやすかったが、外径より内径・肉厚及び底厚や平板は、形状（曲率）の影響で物体の厚みと空気の混合割合が異なるため、濃度勾配が緩やかで寸法精度に影響することが確認できた。
- (3) 供試材の寸法実測値とX線CT3次元画像のCT計測値との寸法比較を行った。目標値以下の誤差となったのは、供試材1で5項目中2項目、供試材2では15項目中3項目であった。
- (4) 取得した再構成画像からSTLデータへの変換出力を行い、3次元形状データを取得した。
- (5) 形状や寸法が違っても3次元形状データの取得手法として適用できると考える。

以上のことから、薄板プレス加工品のX線CTによる3次元形状データの取得手法の構築ができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、SUS304製複雑形状品のサンプル

ルをご提供いただいたミヤマ精工株式会社に、感謝の意を表します。

論文への引用

X線CT再構成断面像から濃度分布（各画素における濃度値）の取得に、ImageJを使って解析を行った。

Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". *Nature Methods* 9, 671-675, 2012. [2]

参考文献

- 1) 鈴木宏正：日本安全保障貿易学会第19回研究大会, 1-61(2015)
- 2) 富沢雅美, 原拓生：非破壊検査, 68(5), 190-199(2019)
- 3) 佐藤充男：非破壊検査, 68(5), 224-230(2019)
- 4) 竹田和博：非破壊検査, 68(5), 214-218(2019)
- 5) X線 松定プレジジョン
<https://www.matsusada.co.jp/support/terms/xray.html>



本研究は財団法人JK Aの「機械工業振興補助事業」により整備した機器を活用して実施しました。