

## X線CTシステムを用いた三次元形状評価

相山 英明, 田中 大之, 万城目 聡, 片山 直樹, 宮腰 康樹, 高橋 英徳, 中嶋 快雄  
金井 理\*, 伊達 宏昭\*, 溝口 知広\*\*, 北原 総一郎\*\*\*, 根本 英希\*\*\*\*

## Evaluation of Three-dimensional Shape using X-ray CT System

Hideaki AIYAMA, Hiroyuki TANAKA, Akira MANJOME, Naoki KATAYAMA  
Yasuki MIYAKOSHI, Hidenori TAKAHASHI, Yoshio NAKAJIMA  
Satoshi KANAI\*, Hiroaki DATE\*, Tomohiro MIZOGUCHI\*\*  
Souichirou KITAHARA\*\*\*, Hideki NEMOTO\*\*\*\*

### 抄 録

デジタル家電や自動車部品を中心とした製品開発において、IT技術を活用した仮想試作システムの構築が進められている。一方、CADデータと実際の加工品との間にかい離があり、実際の試作段階で多くの修正が発生することが課題となっている。

本研究では内部構造を有する試作品の三次元形状を図面の三次元CADデータと比較照合する目的で、マイクロフォーカスX線CTシステムを用いて対象物を計測する研究開発を行った。三次元形状に関しては、ほぼ±0.1mmの誤差範囲で評価できた。また内部空隙率に関しては10%以下の誤差範囲で評価できた。

**キーワード**：X線CT, 三次元形状評価, 非接触形状評価

### Abstract

In the product development consisting mainly of digital consumer electronics and automotive parts, construction of virtual prototyping system using IT has been developed. On the other hand, there is a gap between the actual workpieces and CAD data, and many modifications occur in the actual prototype stage. Therefore, it has become an issue.

On the purpose of matching the three-dimensional shape having an internal structure of the prototype and the three-dimensional CAD data, this study has been investigated using micro focus X-ray system. It could be evaluated within an error of nearly  $\pm 0.1\text{mm}$  for three-dimensional shape. In addition, it could be evaluated within an error of less than 10% for internal porosity.

**KEY-WORDS** : X-ray CT , Evaluation of three-dimensional shape , Non-contact evaluation of shape

### 1. はじめに

デジタル家電や自動車の開発は、世界的な競争の激化、ユーザーの多様化により、製品開発期間の短縮化が強く求められている。各メーカーはIT技術に基づく三次元CAD化、大規模なCAE解析による解析結果の高精度化、部品組み立てをPC上で検証できる仮想試作を積極的に導入し、数度の試作で製

品開発を完了できるデジタルエンジニアリングシステムの構築を進めている。しかしCAD上の図面データと実際の加工品である現物との間に加工形状のかい離が有り、実際の試作段階で多くの修正が発生することが大きな課題となっている。この課題を解決するために、三次元形状計測技術を用いて現物の情報をデジタル化しその情報をデジタルエンジニアリングシステムで活用する、現物融合型デジタルエンジニアリン

\* 北海道大学 \* Hokkaido Univ. \*\* 日本大学 \*\* Nippon Univ. \*\*\* ホクダイ \*\*\* Hokudai Co.LTD.

\*\*\*\* (株)ISS北海道 \*\*\*\* ISS Hokkaido Inc.

事業名：重点研究

課題名：マイクロフォーカスX線CTシステムを用いた現物融合型CAD/CAE解析技術の開発（平成22～23年度）

グ技術の研究開発が活発に行われている<sup>1)</sup>。

試作品の三次元形状は各種光学的手法によって短時間に高精度で計測する技術が実用化されているが、内部構造に関しては必要部位を切断により実測し、多大な労力と時間を要しているのが現状である。一方、産業用X線CTシステムは線源のマイクロフォーカス化、検出器の高精度化、データ処理の高速化等に伴い、非破壊で短時間に内部構造を含めた三次元形状データを取得できつつある。また画像処理を活用した光学的測定装置は、大型部品を対象に高精細な表面形状を短時間に測定できるシステムが実用化されている。

本研究では、内部構造を有する各種試作品の三次元形状を図面の三次元CADデータと比較照合する目的で、マイクロフォーカスX線CTシステムを用いて、対象物を非破壊で迅速に計測する研究開発を行った。

- ・線源・カメラ間距離：400,600,800,1000mm
- ・フィルター：Cu及びAl 0.5,1.0,2.0mm
- ・ソフトウェア：VGStudio Max2.1 (Volume Graphics社製) PointMaster5.0 (Wenzel社製)



図1 X線CTシステムの外観

## 2. 試験方法

X線CTシステムを用いて対象物を観察・計測する場合、誤差要因として以下のような影響因子が考えられる<sup>2)</sup>。

### 1) 装置や撮影条件による因子

- ・X線の電流、電圧、フィルターの種類
- ・X線の焦点サイズ、検出器の画素サイズ
- ・検出器の特性、分解能
- ・ステージ等のメカの位置決め精度
- ・各種アーチファクトの影響

### 2) 対象物による因子

- ・材質
- ・厚み、形状

### 3) ソフトウェア技術

- ・材料と背景を分離するしきい値の設定
- ・最終データ形式、変換処理プロセス
- ・再構成アルゴリズム方式

本研究では、上記の影響因子の中で、特に2)の因子として材料による影響を中心に検討を行った。

### 2.1 X線CTシステム

図1にX線CTシステムの外観を示す。

装置仕様は以下のとおりである。

- ・X線管電圧：30～225kV
- ・X線管電流：0～1000 $\mu$ A
- ・最大出力：135W
- ・X線焦点寸法：5 $\mu$ m
- ・検出器：イメージインテンシファイア (I・Iカメラ) 9/7.5 /6/4.5インチ 4段可変視野
- ・搭載可能サンプル：直径300×高さ300mm, 重量9kg
- ・CT撮像視野 (FOV)：直径5～200mm

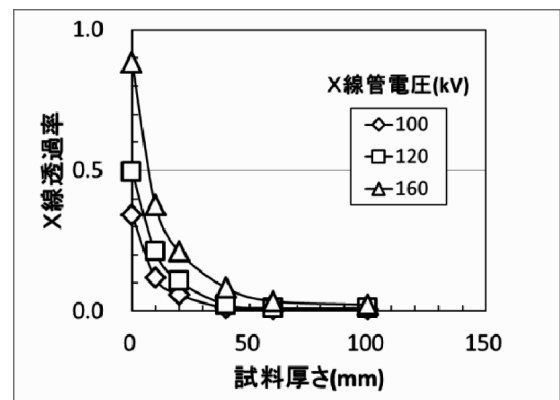


図2 試料厚さとX線透過率の関係  
(アルミニウム合金：フィルター無し)

### 2.2 X線CTシステムの撮影条件の決定

図2にX線管電圧を変えた時のアルミニウム合金の試料厚さとX線透過率の関係を示す。ここで、試料のないところのX線透過率はI・Iカメラの最高輝度を超えないように管電圧を設定した。X線透過率はI・Iカメラの最高輝度を100%とし、その比率で表した。

管電圧が160kVを越えると、I・Iカメラの輝度がオーバーフローするので、Cuのフィルター (0.5mm厚さ) を挿入した。その結果を図3に示す。

適正なX線CT像を撮影するためには、検出感度としてX線透過率は5～10%以上必要である。試料厚さのX線透過率が約8%となる場合のアルミニウム合金の試料厚さとX線管電圧の関係を図4に示す。

X線管電圧等の撮影条件が決まった後に、エアオフセット校正を行う。これが正しく校正されない場合には、図5に示すアーチファクト (実際の物体ではない二次的に発生した疑似画像で、この場合リング状のノイズ) が現れ計測誤差の要因の一つとなる。

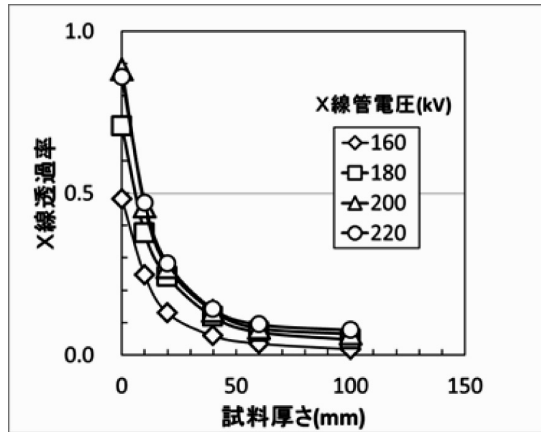


図3 試料厚さとX線透過率の関係  
(アルミニウム合金：Cuフィルター（0.5mm厚）有り）

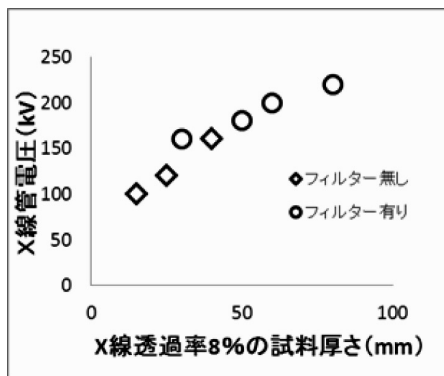


図4 試料厚さとX線管電圧の関係  
(アルミニウム合金：X線透過率8%)

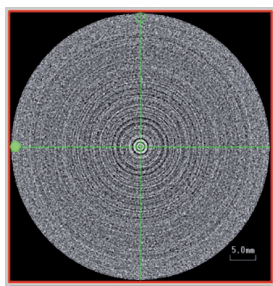


図5 リング状ノイズ

その他、以下の条件で撮影を行った。

- ビュー数（一回転の分割数）：600
- 解像度：512×512
- スライス厚：最小分解能厚さ  
(カメラサイズ、線源とカメラ間距離及び線源と試料間距離により決定される。)

### 2.3 試験体

X線CTシステムを用いて内部構造を有する試料を計測す

る場合、外部とつながっている開放系と内部で閉じている閉鎖系が考えられる。そこで2種類の試料を考案し評価を行った。また材料の違いによる差異を検討するために、アルミニウム合金（ADC12）とアクリル樹脂の2種類で同一形状の試料を作製し比較検討した。

#### 2.3.1 寸法測定用試験体

開放系の内部構造を有する試料において、アーチファクトの影響も併せて評価するために、外径50mm、高さ50mmの円柱に、直径8mmの貫通内孔9個を同心円状に配置した試料を作製した。図6に寸法測定に用いた試験体の形状を示す。それぞれの試験体の外径、高さ、内孔径を三次元形状測定機（ミットヨ製、総合精度1μm）で測定し、X線CTシステムによる同一箇所の測定値と比較した。

X線CTシステムの測定条件は、以下のとおりである。

- X線管電圧：アクリル樹脂110kV、アルミニウム合金200kV
- X線管電流：アクリル樹脂とアルミニウム合金共に40μA
- I・Iカメラサイズ：9インチ
- 線源とI・Iカメラ間距離：800mm

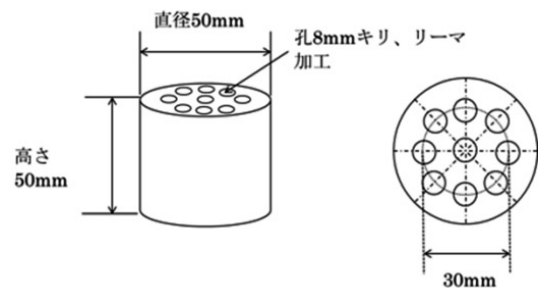


図6 寸法測定用試験体

#### 2.3.2 空隙率測定用試験体

完全に閉鎖した内部構造を有する試料を高精度に作製することは非常に困難である。また、作製した試料を別の手法で計測し、両者を比較する必要もある。そこで、球体の積層による擬似的な閉鎖空間を利用した評価方法を考案した。

球体の積層方法として単純立方構造と体心正方構造の2種類を用いた。この構造体は各々の理論的な空隙率が算出でき、体積測定法として知られているアルキメデス法により実測できる利点がある。

図7に空隙率測定に用いた試験体の一例を示す。内寸40×40×40mmの立方体（アクリル樹脂製）の中に、直径10mmの球を単純立方構造で並べたものである。球の材質はアクリル樹脂である。

空隙率の測定は、アルキメデス法により立方体に球を積層し、そこに水を注入し、注入前後の重量差から水の密度を1g/cm<sup>3</sup>として空隙部分の体積を求めた。



図7 空隙率測定用試験体  
(アクリル樹脂, 単純立方構造)

### 2.3.3 引張強さ測定用試験体

実際の製品において内部空隙に相当するボイドやクラック等の欠陥は引張強度に大きな影響を及ぼす。一方、内部空隙に相当するボイドの大きさやその量、金属中の位置を作製時に制御することは非常に困難である。そこで内部空隙形状と引張強度との関係を調べるために、インゴット作製時に欠陥を人為的に導入し、図8に示す引張強さ測定用試験体に加工した。試験体の平行部分を対象にX線CT撮影により欠陥抽出を行い、実際に生成した欠陥の大きさとその量から欠陥率を算出し欠陥率に応じて3水準の試験体に分けた。

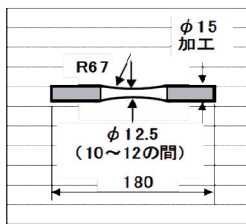
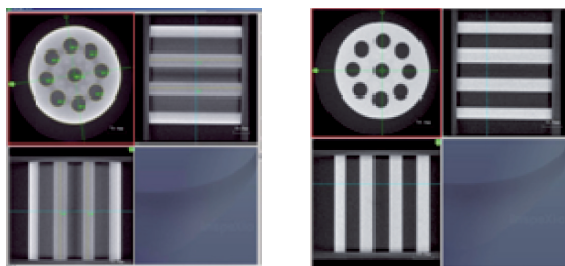


図8 引張強さ測定用試験体

## 3. 結果及び考察

### 3.1 外形形状の評価

図6に示した円柱状試験体のX線CTシステムによるアルミニウム合金の測定結果を図9(a)に、アクリル樹脂の測定結果を図9(b)に示す。平面、正面及び側面各々任意の面の断面像が観察できる。左上が平面図、左下が正面図、右上が側面図である。



(a) アルミニウム合金 (b) アクリル樹脂  
図9 円柱状試験体のX線CT断面像

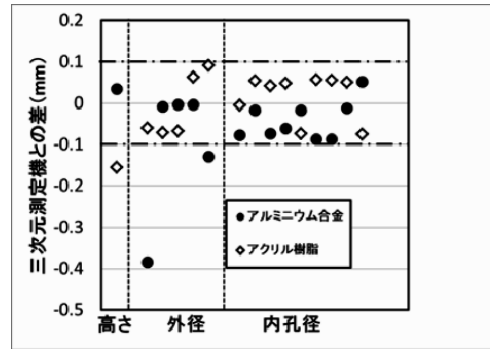


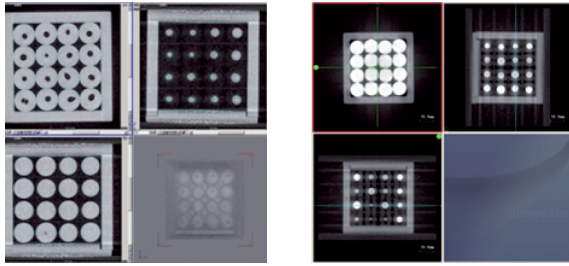
図10 X線CTと次元測定機との測定結果の差

形状測定において、距離はX線CT像の二点間の画素あるいは二直線を選択すると、その間の距離が表示される。また、円形は、円弧上の三点以上の画素を選択することにより、その円の径と中心座標が表示される。測定値の比較を行うために用いた三次元測定機は標準試験片を用いて総合精度1  $\mu\text{m}$ に校正されている。この測定値を基準としてX線CTシステムによる計測値と比較した。図10に各箇所におけるX線CTシステムによる測定結果と三次元測定機の測定結果との差を示す。一部の外径の測定値において大きな差がみられるが、ほぼ $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の範囲で測定可能であることが分かった。測定精度は、前述の通り装置や撮影条件、対象物、ソフトウェア技術による各因子の測定誤差の総和で決定され、これらの因子の低減が重要となる。ここでは50mmの試料を $512 \times 512$ の画素数で撮像したので、1ラインの1画素は $50\text{mm}/512 \approx 97 \mu\text{m}$ となり、今回の測定では、この画像誤差が測定精度の大半を占めていると考えられる。このため測定精度を向上させるためにはX線CT撮像時の画素数を増加させる必要がある。一方、16bit階調で $2048 \times 2048$ の画素数で500枚のX線CTを撮像した場合データ容量は4GB以上となり、現行の32bitOSでは対応できないため、64bitOSによる大容量の画像データ処理が必要になる<sup>2)</sup>。

また、アルミニウム合金よりアクリル樹脂の方が比較的精度が良いことも分かった。これはアルミニウムなどX線吸収率が高い物質を計測した場合にX線の透過方向に複数の内孔が部分的に重なりX線が透過する試料の厚みが異なるために再構成画像にノイズを生じるメタルアーチファクトを完全に除去できていないことに起因すると考えられる<sup>3)</sup>。一方、アクリル樹脂は軽元素の水素、炭素、酸素から構成されており、X線吸収率が低くメタルアーチファクトの発生は少ない。

### 3.2 空隙率の評価

図11(a)に空隙率測定用試験体(アクリル樹脂)のX線CT断面像を、図11(b)にアルミニウム合金の断面像を示す。アルミニウム合金の場合、前述のメタルアーチファクトが現れ、球の境界面を正確に決定することが難しいことが分かった。



(a) アクリル樹脂 (b) アルミニウム合金  
図11 空隙率測定用試験体のX線CT断面像

図12に各々の試料について、X線CT断面像から空隙の領域を積算した結果とアルキメデス法で求めた測定結果との差を示す。何れの場合も10%の誤差範囲で内部空隙率を計測できることが分かった。積層方法では体心正方構造の方が比較的精度が良いことも分かった。これは、体心正方構造の場合、単純立方構造よりも高さ方向に伸長した空隙の多い状態であり、X線透過方向の球の重なり部分が少なくメタルアーチファクトが少なくなったためと考えられる。材料ではアルミニウム合金よりアクリル樹脂の方が比較的精度が良いことも分かった。これは、アルミニウム合金の場合前述のメタルアーチファクトが現れ、球の境界面を正確に決定することが難しいためと考えられる。

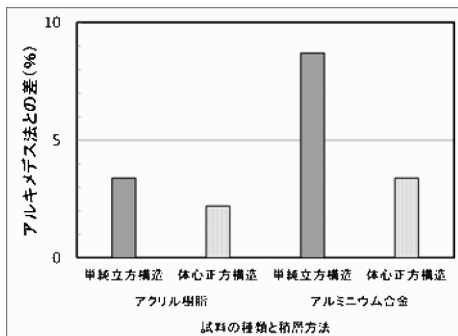


図12 空隙率におけるX線CTシステムの結果とアルキメデス法との差

### 3.3 欠陥率と引張強さ

図13に引張強さ用試験体平行部のX線CT撮像結果を示す。

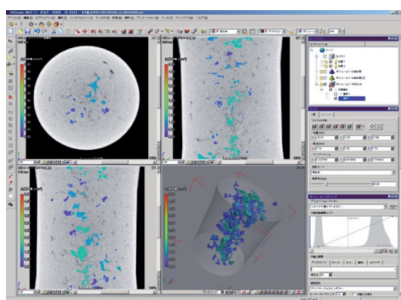
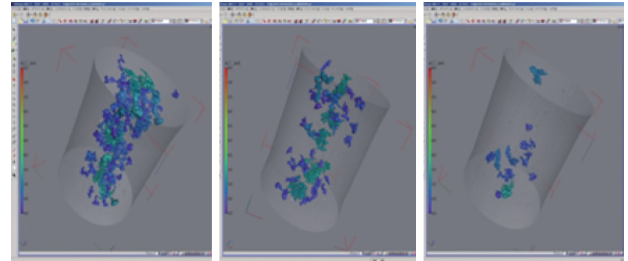


図13 引張強さ用試験体のX線CT撮像結果

左上が平断面図、左下が正面断面図、右上が側断面図である。右下は試験体の各断面像を三次元像に再構成し、欠陥抽出したものである。

欠陥率の3水準について欠陥抽出した例を、図14(a)~(c)に示す。



(a)欠陥率：2.0% (b)欠陥率：1.1% (c)欠陥率：0.3%  
図14 欠陥抽出 (X線CT三次元像)

これらの試験体について、引張試験を行い、その時の引張強さと欠陥率の関係について調べた。試料は各欠陥率においてそれぞれ3本ずつ評価した。図15にその結果を示す。各欠陥率における引張強さのばらつきが大きいものの、欠陥率が大きいほど引張り強さが小さくなる傾向にあった。しかしながら、引張強さとポイド等の欠陥の間には、欠陥率ばかりではなくポイドの位置や分布も大きな影響を及ぼすため、破断位置や破断面の観察なども詳細に検討する必要があることが分かった。

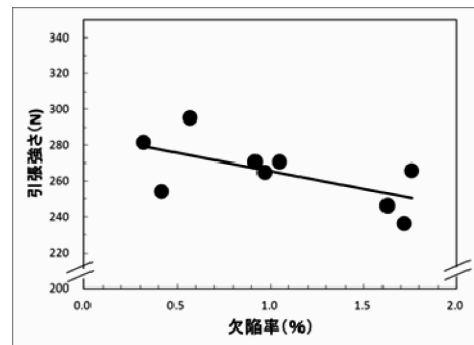


図15 欠陥率と引張強さ

## 4. まとめ

マイクロフォーカスX線CTシステムを用いて、対象物を非破壊で迅速に計測する研究開発に取り組み以下のような結果が得られた。

- 1) 三次元形状評価に関して、ほぼ±0.1mmの誤差範囲で評価できる。
- 2) 空隙率評価に関して、10%以下の誤差範囲で評価できる。

X線CTシステムによる計測では試料表面でのX線の反射、散乱等の影響で表面形状データにノイズを多く含んでおり、0.1mm以下の微細な表面形状の再現には向いていないことが課題となった。一方、本報告では触れていないが、光学式の非接触三次元測定機で計測した表面データは微細な表面形状の再現が可能であることから、今後X線CTシステムによる内部構造データとの合理的な合成方法の開発が課題となる。

さらにX線CTシステムによる計測に関してはISO規格の国際標準化が進められており<sup>4)</sup>、産総研、関連する企業、大学等から情報収集に務めながら対応できるよう検討していく。

## 引用文献

- 1) 鈴木宏正：三次元計測とデジタルエンジニアリングの融合，精密工学会誌，vol.71，No.10，1205-1208，2005.
- 2) 金子奨，青木義満，滝 克彦：産業用X線CT画像の形状精度追求に関する考察，映像情報メディア学会技術報告，31，14，17-20，2007.
- 3) 小関道彦，佐藤慎平，木村仁，伊能教夫：X線CT画像におけるメタルアーチファクト低減手法，日本機械学会第6回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集，191-192，2006.
- 4) 大澤尊光，藤本弘之，三澤雅樹，高辻利之：幾何形状測定する産業用X線CT装置の動向，日本非破壊検査協会誌，vol.61，No.4，135-140，2012