

X線CTスキャナを用いた3Dデジタルものづくりの取り組み

四宮徳章^{*}，吉川忠作^{*}，柳田大祐^{*}，足立和俊^{*}

X線CTスキャナは内部の構造を非破壊で観察できる装置である。プラスチック製品や鋳造品の内部欠陥やクラックの観察，アセンブリした製品内部の構造観察等に用いられている。近年の3D技術の普及により，3Dスキャナとしての利用が検討されており，非接触のデジタイザでは測定不能な複雑形状や内部構造のスキャニングも行われている。本報では，一般的なX線CT撮影の事例紹介に加えて，X線CTスキャナを3Dスキャナとして利用した事例を報告するもので，CADで利用可能なデータ形式への変換や3Dプリンタでの造形対応といったデジタルものづくりへの応用例を紹介する。

Keywords : X線CTスキャナ，3Dプリンタ，三次元データ。

1. 緒言

X線CTスキャナは医療用X線CTの産業用版の装置である。リチウムイオン電池などの二次電池，電子部品，鋳造品，その他さまざまな製品にX線を照射し，X線の透過から得られるX線画像を再構成して，非接触，非破壊で製品の二次元断面画像を得ることができる。さらに近年の画像処理技術の進歩により，二次元断面画像を複数枚組み合わせることで三次元表示することが可能になり，内部欠陥（鋳造品等の巣，介在物等の異物，クラックなど）の検出，製品寸法の計測，三次元設計図面との比較照合などを行えるようになった。

一方，近年，3Dプリンタが広く普及しつつあり，家電量販店などでも販売される時代になった。3Dプリンタで造形する場合，3D-CADで立体形状を作図するか，あるいは，造形対象（試料）を非接触の3Dスキャナ等で計測し，三次元データを作成する必要がある。（地独）大阪府立産業技術総合研究所（以下，産技研と称す）では，X線CTスキャナを3Dスキャナとして用い，得られたデータから3Dプリンタで造形するといった3Dデジタルものづくりに力を入れている。本報では，X線CTスキャナの概要，ならびに，3Dデジタルものづくりの取り組みについて紹介する[1]。

2. 装置の概要 [2]

2.1 仕様および撮影方法 X線CTスキャナの外觀を図1に，また主な仕様を表1に示す。本装置の主要部はX線管，試料テーブル，検出器からなる。X線管は最大管電圧230kV，焦点寸法4 μ m（最小の場合）と高出力・高分解能のものを使用している。最大管電圧230kVでは，鉄系材料では10～15mm程度，アルミニウム系材料では100～150mm程度，また，樹脂材料では250～300mm程度の厚みまでX線を透過できる。検出器はフラットパネルデテクタ（以下，FPDと称す）を使用しており，従来の検出器（イメージインテンシファイア+CCDカメラ）と比較して，歪の小さい鮮明な断面画像を得ることができる。

撮影は，装置内の試料テーブルに試料を載せ，X線を照射しながら試料テーブルを360°回転させて行う。



図1 装置外觀

表1 主な仕様

X線発生装置	管電圧	最大 230kV
	管電流	最大 1mA
	出力	最大 140W
	焦点寸法	4 μ m
X線検出器	形式	フラットパネルデテクタ
	有効エリア	200×200mm
	画素ピッチ	0.2×0.2mm
試料テーブル (微調整機能付)	搭載可能寸法	最大 ϕ 170×h250mm
	搭載可能重量	最大 10kgf

次に，画像再構成と呼ばれる数学的な逆解析手法を用いてそれぞれの角度で撮影したX線画像を複数の断面画像に変換することにより，試料の三次元立体構造（任意断面）を表示する。

2.2 撮影の分解能について 評価したい欠陥などのサイズが，撮影の分解能より小さい場合にはその欠陥が写らず，欠陥がないと評価される場合がある。したがって，撮影の分解能を把握することは非常に重要である。撮影の分解能を決める上で重要な項目は，X線焦点寸法と拡大倍率である。

X線焦点寸法は概ねX線の出力（管電圧×管電流）に比例しており，出力が高いほど透過能力は上がるが，X線焦点寸法も大きくなる。最小の焦点寸法は4 μ mで

^{*}1 (地独)大阪府立産業技術総合研究所加工成形科

あるが、最大出力では 200 μ m 程度にもなる。X 線焦点寸法が次に述べる空間分解能より大きいと撮影した画像は不鮮明なものになる。

拡大倍率としては、FPD が約 1024 $\times$ 1024 の画素により X 線画像を撮影するので、空間分解能は撮影視野が 100mm であればその 1/1000 の 100 μ m 程度、視野が 10mm であれば 10 μ m 程度になる。つまり拡大倍率が高いほど空間分解能は高くなる。

これらの理由により、評価したい欠陥などのサイズによっては、試料を切断して低出力や高倍率で撮影する必要が生じる。

3. 撮影事例

3.1 撮影事例 1（コンデンサ） 直径 5mm、高さ 12mm のコンデンサを撮影した例を図 2 に示す。断面画像から、内部の微細な構造や空隙を確認することができる。ここに示したものは円筒形状の任意高さにおける断面であるが、縦（高さ方向）に切った縦断面や任意の角度で切った斜め断面など、さまざまな断面画像を一度の撮影で得ることができる。

3.2 撮影事例 2（鋳造品） 鋳造により作られたファスナー（12 $\times$ 11 $\times$ 8mm）を撮影し、三次元画像解析により内部の欠陥（巣）を解析した例を図 3 に示す。撮影した画像において面を定義することで欠陥を自動抽出することができる。また、欠陥の体積ごとに色付けされた分布図を表示することや、欠陥の一覧を csv 形式（Excel ファイル）で出力することも可能である。

3.3 撮影事例 3（異種材料により作られた製品） 樹脂、金属など異種材料で構成された製品を三次元表示した例を図 4 に示す。X 線の透過は物質の比重に深く関係しているため、X 線の透過量をしきい値とすることで異なる材種を分離することができる。ここでは、比較的密度の低い樹脂、密度の高い樹脂、金属等に分離したものを示している。

4. 3D デジタルものづくり [3]

4.1 三次元計測に用いる装置 3D プリンタで造形する場合、3D-CAD で立体形状を作図するか、あるいは、造形対象（試料）を非接触の 3D スキャナ等で計測し、三次元データを作成する必要がある。昆虫や化石、（デザイン重視の）クレイモデルなど 3D-CAD では作図困難な試料の場合、産技研では、対象物の大きさ・形状・材質、また、計測に必要な解像度に応じて表 2 に示す三つの装置を使い分け、三次元計測を実施している。

同一の試料（貝殻）に対して、三つの装置それぞれで計測した事例を図 5 に示す。まず、全体形状の計測であるが、貝殻のような内部に形状を含めた試料に対しては X 線 CT スキャナが有効である。X 線 CT では 3D スキャナでは計測できない内部の形状が取得できるが、外側の微細な凹凸は X 線 CT スキャナでは分解能が低く計測できない。そこで 3D スキャナを活用して貝殻の外形状を取得する。また、部分的にはさらに微細な凹凸が存在し、この凹凸形状を計測するためには 3D 測定マクロスコープが有効である。これらのデータを貼り合わせることで、データの欠落のない高精度の三次元データを作成できる。

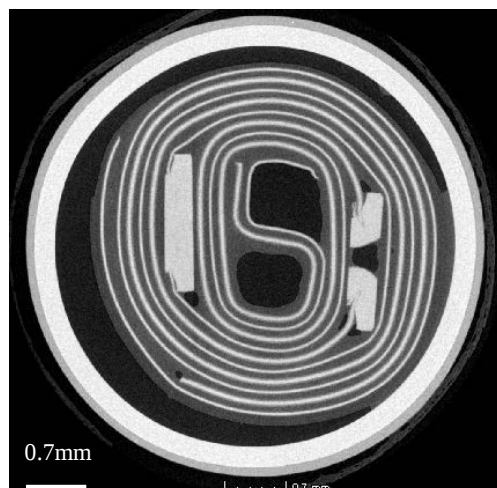


図 2 コンデンサの断面画像

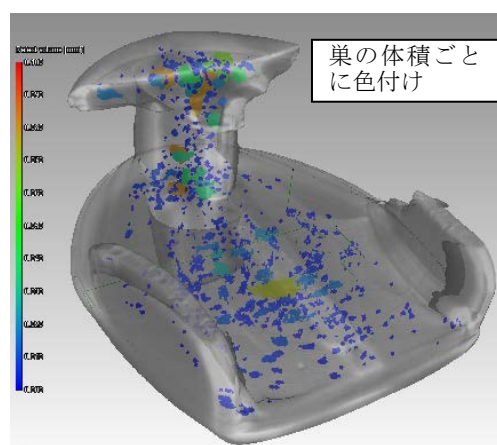


図 3 鋳造品の欠陥解析

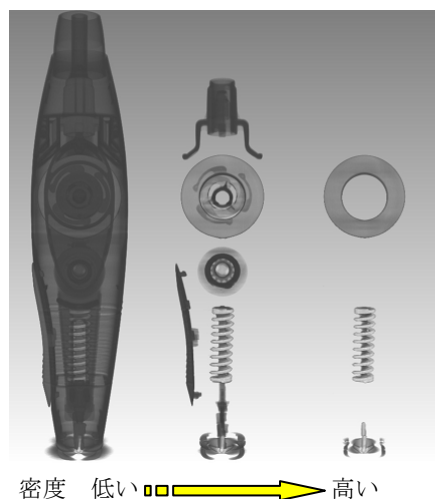


図 4 密度差を利用した部品の分解例

4.2 X 線 CT スキャナと 3D プリンタを用いたデジタルものづくりの一例 ここでは、保健所等で注意喚起されているセアカゴケグモ（図 6）のレプリカ作りを事例として、X 線 CT スキャナと 3D プリンタを用いたデジタルものづくりについて紹介する。

3D プリンタとしては、プラスチック粉末積層造形装置（ドイツ）イオス社 FORMIGA P110）を用いた。本装置は、粉末状のプラスチック材料（ナイロン 12）を装

表2 産技研において三次元計測に用いる装置の一例

装置名	X線CTスキャナ	3Dスキャナ	3D測定マクロスコープ
外観			
メーカー名 (型番)	東芝 IT コントロールシステム (TOSCANER32300 μ FD)	GOM (ATOS Core 80, 200, 300)	キーエンス (VR-3200)
主な仕様	管電圧：230kV 最小焦点寸法：4 μ m 再構成画素：1024×1024 (視野の1024分の1が画素値)	点間距離： 30 μ m (ATOS Core80) 80 μ m (ATOS Core200) 120 μ m (ATOS Core300)	繰り返し精度： 高さ方向 0.5 μ m 幅方向 0.5～1 μ m (倍率により異なる)
特徴	X線の透過を利用した断層画像からの三次元データ化。複雑形状、あるいは、内部まで含めた形状データが取得できる。	プロジェクタによる縞模様照射と三角測量等による計測。大きな試料でも高分解能で計測できる。	プロジェクタによる縞模様照射と三角測量等による計測。小さな試料を極めて高い分解能で計測できる。

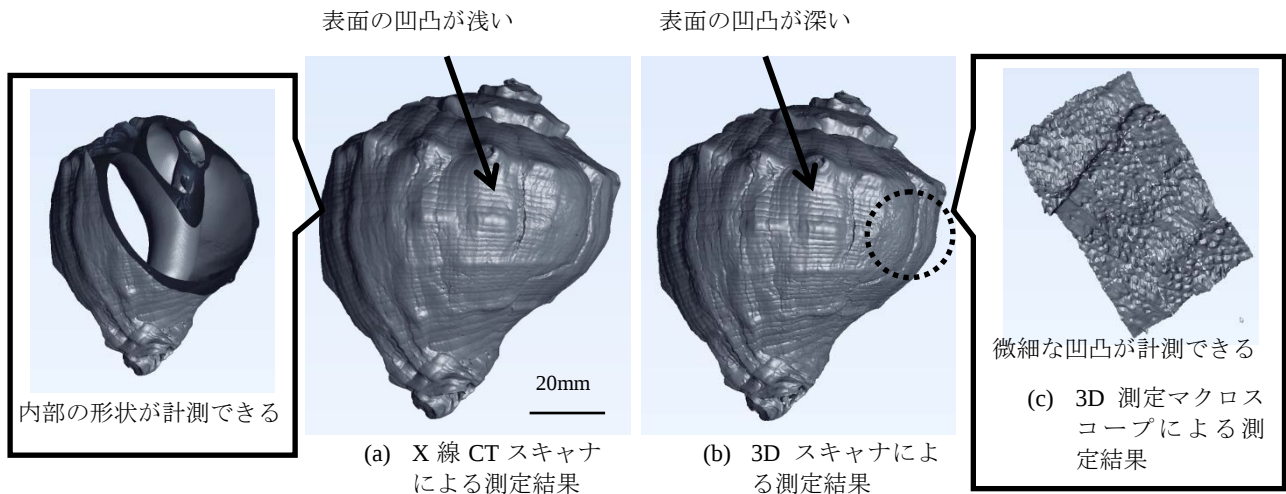


図5 三次元計測の一例

置内の造形領域に敷きならし、あらかじめ作られた断面データに従ってレーザを照射し、選択的に溶融・凝固を行う（粉末床溶融結合法）。凝固後に、上層に粉末材料を再度敷きならし、レーザ照射による溶融・凝固を繰り返すことで、三次元形状を造形する。多くの3Dプリンタでは、図7(a)に示すように、角度の浅いオーバーハング部分にサポートと呼ばれる柱を造形して造形部分を支持する。これに対して、プラスチック粉末床溶融結合法(図7(b))の3Dプリンタでは、未凝固の粉末材料がサポートの役割をするため、形状に制限が無く、昆虫のような複雑な形状でも製作が可能である。詳しい装置仕様については文献[4]を参照いただきたい。

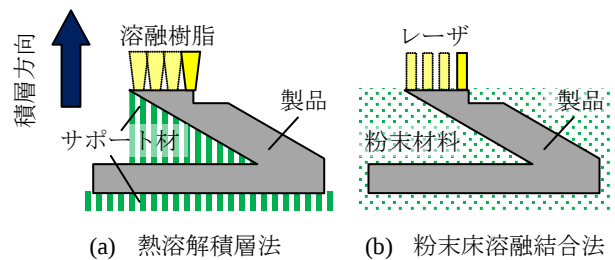


図7 積層方式の違いによるサポートの有無

X線CTスキャナによる撮影画像の明度の差（コントラスト）は、X線が透過した物質の比重に概ね相関がある。昆虫類やクモ類といった比重の小さい生物試料の撮影では、空気層とのコントラストが小さく、両者の境界を判別できないことがある。また、試料の固定のために使用した両面テープなどとのコントラストが小さい場合も、同様に境界判別が難しい原因となる。高いコントラストを得るためには、X線照射条件の選定が非常に重要である。今回の撮影では、X線照射条

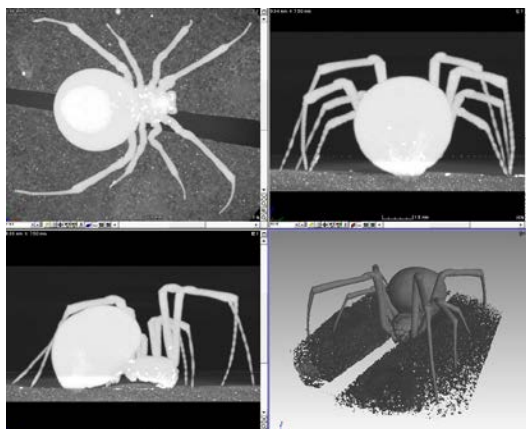


図 8 X 線 CT 撮影画像

件として、管電圧 45kV、管電流 $250\mu\text{A}$ と低い管電圧かつ高い管電流を設定することで高いコントラストが得られた。図 8 に、X 線 CT 撮影画像を示す。

X 線 CT 撮影画像から三次元データを取得するためには、試料表面と空気層との境界を濃淡値（しきい値）で指定する必要がある。図 9 にデータ処理と完成したデータを示す。しきい値の大きさによっては、両面テープなどの固定治具や、試料表面に付着する埃や異物なども、三次元データとして出力される場合がある。これらのデータ除去や、それによる面欠落の修復は、三次元データの編集可能なソフトウェアを用いて人の目で確認しながら行う。

図 10 に造形品の外観を示す。今回は、実寸大と 5 倍に拡大したものを各 8 体、一度に造形した。この場合、造形高さは 35mm になり、造形時間は、造形開始までの材料の昇温（ 170°C ）に 150 分、積層ピッチ 0.1mm の条件で造形に 210 分、造形後の徐冷（ 70°C 以下）に半日～1 日を要した。材料の昇温は、造形時のレーザーパワーの低減に寄与し、造形後の徐冷は、材料のアニーリングとして、変形や残留応力の低減に効果がある。実寸大については、足の太さはビームスポット径（0.5 mm）以下であるため、寸法上の再現はできなかったが、注意喚起用のレプリカとしては十分利用できるレベルであった。

5. 結言

X 線 CT スキャナや 3D プリンタを用いた 3D デジタ

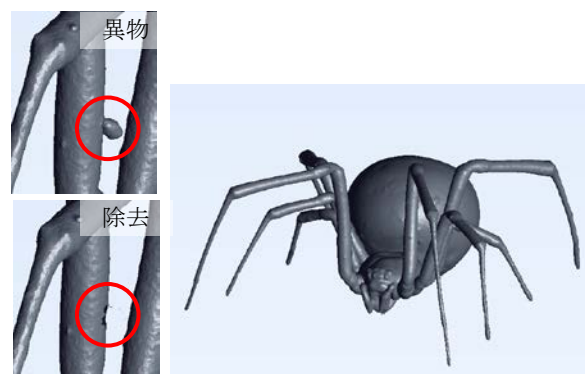


図 9 三次元データ処理と完成したデータ



図 10 造形品の外観

ルものづくりは、これからも発展を続け、多くの業界での活用が期待されている。産技研では、ここで紹介した機器に加えて、金属材料を対象とした 3D プリンタ[1]や製品の強度や成形挙動を予測するコンピュータシミュレーション装置（CAE）を用いた 3D デジタルものづくりにも力を入れている。興味を持たれた方は、ぜひ、ご相談ならびにご利用いただければ幸いである。

文献

- [1] 中本貴之・ほか 2 名：機械技術，vol.63，No.12，pp.96-101，日刊工業新聞社，2015.
- [2] <http://tri-osaka.jp/technicalsheet/11009.PDF>
- [3] <http://tri-osaka.jp/technicalsheet/14003.PDF>
- [4] http://tri-osaka.jp/fields/kakouseikei/kiki_sheet/RP2_C T.pdf

(2016 年 06 月 10 日提出)