

# X線CT装置の精度評価法標準化と高度化\*

Development of X-Ray CT System for Dimensional Metrology and Standardization of Accuracy Evaluation Method

藤本弘之\*\* 佐藤 理\*\*\* 佐藤 真† 岸 武人††

Hiroyuki FUJIMOTO, Osamu SATO, Makoto SATO and Taketo KISHI

## Key words

industrial X-ray computed tomography, coordinate measurement, dimensional metrology, traceability, industrial standard

## 1. Dimensional X線CT装置の概要

医療用の断層撮影装置として1970年代に実用化されたX線CT装置は、人体のみならず物体の内部を非破壊で観察できるという特長から、現在では工業製品の非破壊検査に広く応用されている。さらに、内部形状などを克明に抽出できる能力から、物体内部の幾何学的な測定への応用が開始されてきている。一方、測定技術の側面から見ると、三次元測定技術は、接触式プローブを使った接触式・離散点測定から光を使った非接触式・面測定へと進んできた。そして、X線CT装置を使った測定が新たな内外同時計測を可能とする測定手段として、受け入れられつつある。X線CT装置が万能の測定装置として使えるのではないかという期待もあり、近年、X線CT装置による幾何学測定が注目を浴びつつある。既にいくつかのメーカーは、測定精度を保証することができるDimensional X線CT装置(DXCT)と呼ばれる製品を販売している<sup>1)</sup>。DXCTが従来の観察用のX線CT装置と区別される点は、測定値が長さの国家標準にトレーサブルであり、かつ精度が保証された測定を可能としている点である。

DXCTを検定された測定機として利用できるようにするため、ドイツでは2007年頃から官民が一体となり、DXCTの寸法測定精度評価法に関するVDI/VDEガイドラインを作成してきた<sup>2)</sup>。日本でも、2009年頃から産総研がDXCTに関する研究に着手し、トレーサビリティを確保するための技術的な研究を手がけるかたわら、国内公設試験所を中心に持ち回り試験を実施すると同時に、産業用X線CT装置の用語規格(JIS B 7442:2013)を制定するといった活動を行ってきた。

## 2. DXCTの精度評価法標準化

DXCTを物体内外の幾何学測定ができる座標測定機(Coordinate Measuring Machine:CMM)として扱うための検査規格の審議が進んでいる<sup>3)</sup>。参考までにISO/TC 213/WG10でのCMMの精度評価法規格(ISO 10360シリーズ。対応する国内規格はJIS B 7440シリーズ)の整備状況を図1に示す。

従来のCMMの製品仕様は、プロービング性能評価と材質の影響を受けない長さ測定誤差評価によって特徴づけられていたが、DXCTでは、物体内部の幾何学的要素の測定に対応するための性能評価法をどのように検査項目に盛り込むかが検討されている。

以下に協議中のDXCTの精度評価法案を紹介する。なお、各評価法の名称(Pテストなど)は、規格中の正式名称ではなく審議における仮の呼称である。

(1) Pテスト(プロービング性能評価)

図2に示すような、凹凸が十分小さいことが分かっている標準球をCTスキャンする。CTスキャン中にX線焦点が移動すると、球表面に実際には存在しない偽の凹凸が生じる。凹凸量が少ないほど、焦点移動量が小さい、または移動量を正確に検出し補正できているといえる。

(2) Eテスト(材質の影響を受けない長さ測定誤差評

経過	規格の適用対象
1994	2: パート No.: 特徴 直交+接触
2006	7: 直交+画像
2008	8: 直交+光変位
	9: (直交) マルチセンサ
2009	10: (非直交) レーザトラック
2016	12: (非直交) 回転関節型
	11: (非直交) 計測用X線CT
	13: (非直交) 光学式エリアスキャン

図1 ISO 10360シリーズの拡張と適用対象の拡大

\*原稿受付 平成28年3月18日

\*\*国立研究開発法人産業技術研究所(茨城県つくば市梅園1-1-1つくば中央第3)

\*\*\*正会員 国立研究開発法人産業技術研究所(茨城県つくば市梅園1-1-1つくば中央第3)

†(株)島津製作所基盤技術研究所データ処理ユニット(京都府相楽郡精華町光台3-9-4)

††(株)島津製作所分析計測事業部技術部(京都市中京区西ノ京桑原町1)



図2 Pテスト用SiN製標準球



図3 Eテスト用ルビー製長さ評価ゲージ

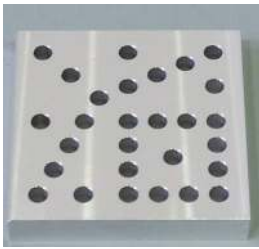


図6 EMテスト用Al製穴空き平板ゲージ

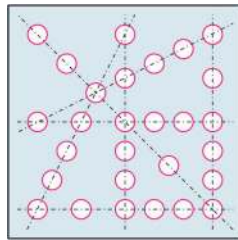


図7 測定方向

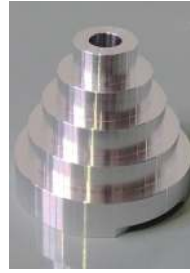


図4 Mテスト用Al製段付き円筒ゲージ

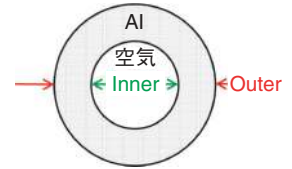


図5 段付き円筒ゲージ各段での測定位置

価)

図3にカールツァイス社製のEテスト用評価ゲージを示す。あらかじめ接触式CMMで球間距離を測定しておく、CTで測定された球間距離がどのくらいずれているかを評価する。空間のひずみを効率良く評価するために、選択された限られた組み合わせを用いる。横軸に接触式CMMによる測定値(mm)を、縦軸に接触式CMMとDXCTとの誤差( $\mu\text{m}$ )をプロットする。そうすることによって、測定する長さに対する誤差の変遷を見ることが出来る。誤差が少ないほど、X線源-ワーク回転軸-X線受光部の三次元幾何配置系が設計どおり正確に配置されている、または、三次元幾何配置系の組み付け誤差を正確に検出し、補正できているといえる。

(3) Mテスト(材質の影響による長さ測定誤差評価)

図4に示す段付き円筒ゲージをCTスキャンする。外径は5種類だが、内径は単一である。あらかじめ接触式CMMで各段の円筒内外直径を測定しておく、CTスキャン結果と比較する。具体的には、図5に示すように各段の内径と外径を測定する。透過長さが増えた場合に測定値の誤差がどのように変化するかを見ることにより、物体内外の構造の測定が、物体透過の影響をどう受けるかを評価する。誤差が少ないほど、X線透過パス長とX線減衰量の関係が理論どおりである、またはその関係を正確に検出し補正できているといえる。

(4) EMテスト(材質の影響を含む長さ測定誤差評価)

図6に示す複数の円筒状穴空き平板ゲージをCTスキャンする。あらかじめ接触式CMMで各穴の軸間および穴側面間距離を測定しておく、横軸に接触式CMMによる測定値(mm)を、縦軸に接触式CMMとDXCTとの誤差( $\mu\text{m}$ )をプロットする。具体的には図7に示す複数の方向について、図8に示す軸間距離(Uni)、双方向距離

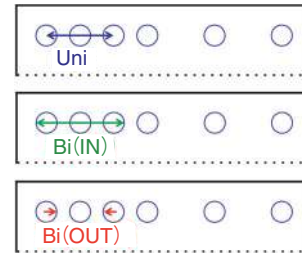


図8 測定距離

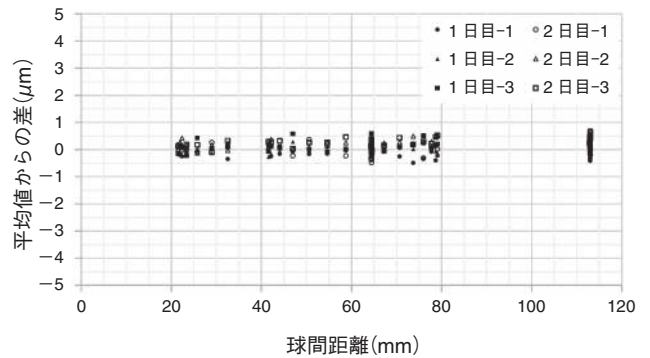


図9 産総研DXCTの繰り返し測定再現性( $\pm 1\mu\text{m}$ )

(Bi)を測定する。中実の母材の中に多数の円筒状穴が並べて作り込まれていることから、測定空間中での方向、長さに依存したEテストの役割ももたせた、EテストとMテストを同時に実行できるゲージとして、ドイツが強く推している。

DXCTの精度評価法を協議するワーキンググループでは、これらのテストがDXCTの性能を評価するのに十分かどうかを注意深く考察するために、前記のテスト法をどのように組み合わせれば効率的にDXCTの性能評価が実施できるかという論点に加え、新たなテスト手法も排除せずに、協議が続いており、規格制定までにはさらに数年かかる見込みである。

### 3. X線CT装置の高度化

#### 3.1 DXCTプロトタイプ機の開発

産総研は、DXCTの実用化に向け、国産初のDXCTプロトタイプ機の開発を計画した。島津製作所は、産総研の依頼で、従来の観察用のX線CT装置より高精度の回転

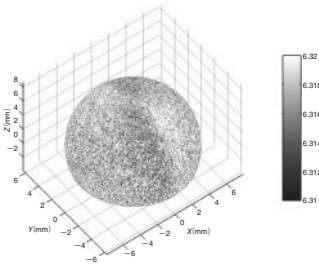


図 10 (a) P テスト結果 (開発手法適用前) 最大凹凸量  $2.72 \mu\text{m}$

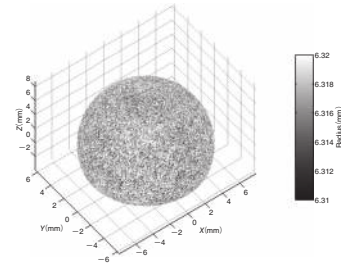


図 10 (b) P テスト結果 (開発手法適用後) 最大凹凸量  $0.84 \mu\text{m}$

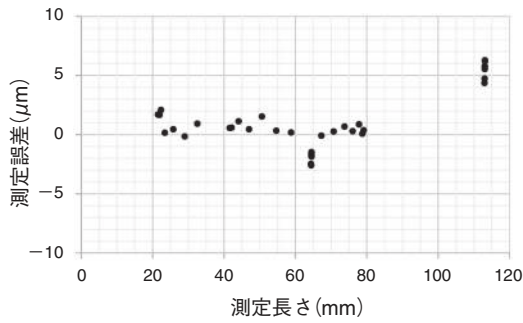


図 11 (a) E テスト結果 (開発手法適用前)

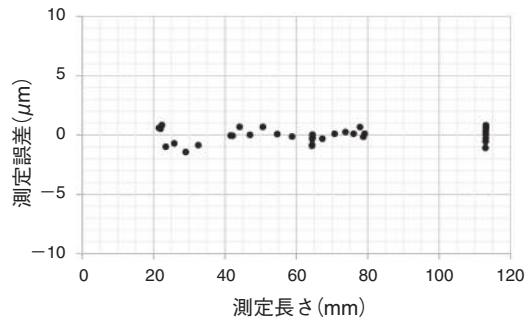


図 11 (b) E テスト結果 (開発手法適用後)

ステージや、装置内部を一定温度に調整する温調装置を搭載した DXCT プロトタイプ機を製作した。

### 3.2 産総研 DXCT プロトタイプ機の高度化

産総研は装置受け入れ後、ISO 評価法案に基づく測定精度評価を繰り返し実施してきた。2章で説明した4種の精度評価法案のうち、複数の球を配置した評価ゲージによるEテスト(材質の影響を受けない長さ測定誤差評価)を実施した結果、測定誤差は大きいときは  $\pm 10 \mu\text{m}$  であったが、繰り返し測定再現性は  $\pm 1 \mu\text{m}$  を確認した。図9に同一ゲージを繰り返し測定した際のばらつきを示す。縦軸は、6回の測定の平均値からの差を球間距離に対しプロットしたものである。この精度は、接触式プローブのCMMには劣るが、非接触式のCMMと遜色ないレベルである。

島津製作所はさらに測定誤差を低減するため、X線源とワーク回転軸、X線受光部の三次元幾何配置系を数値モデル化し、X線画像から幾何パラメータを推定する手法を開発した。また、X線焦点位置の経時変化に対応するための焦点位置のリアルタイム検出・補正手法と、線質の非単色性を補正するためのX線減衰曲線検出・補正手法を開発した。開発した手法による測定精度向上効果については、次章で述べる。

## 4. ISO 評価法案に基づく精度評価結果

### (1) P テスト (プロービング性能評価) 結果

Pテストを実施した結果、開発手法を適用する前は図10(a)のように球表面に実際にはない偽凹凸が生じているが、焦点移動量検出手法を適用した後は、図10(b)のように球表面の偽凹凸が消えた。Pテストにより、X線焦点の安定性やX線焦点移動補正精度の評価を高精度に行うことができている。また、開発手法により、X線焦点

移動に起因する誤差を高精度に補正できている。

### (2) E テスト (材質の影響を受けない長さ測定誤差評価) 結果

Eテストを実施した結果、開発手法を適用する前(図11(a))では  $\pm 7 \mu\text{m}$  程度だった誤差が、開発手法を適用した後(図11(b))では  $\pm 2 \mu\text{m}$  以下に低減した。Eテストにより、装置の三次元幾何配置系の設計値との誤差やその補正精度の評価を高精度で行うことができている。また、開発手法により、装置の三次元幾何配置系に起因する誤差を高精度に補正できている。

### (3) M テスト (材質の影響による長さ測定誤差評価) 結果

Mテストを実施した結果、開発手法を適用する前(図12(a))では、 $\pm 40 \mu\text{m}$  程度の誤差が生じた。特に外径(Outer)と内径(Inner)の偏差の相違が大きいが、これは主に線質の非単色性に起因する。開発手法を適用した後(図12(b))では、内外径寸法測定誤差の相違は顕著に低減し、誤差は  $\pm 20 \mu\text{m}$  程度に低減した。Mテストにより、線質の単色性やX線減衰曲線の推定精度の評価を高精度で行うことができている。また、開発手法により、線質の非単色性に起因する誤差を高精度に補正できている。

### (4) EM テスト (材質の影響を含む長さ測定誤差評価) 結果

EMテストを実施した結果、開発手法を適用する前(図13(a))では、 $\pm 100 \mu\text{m}$  程度だった誤差が、開発手法を適用した後(図13(b))では  $\pm 40 \mu\text{m}$  程度に低減した。物質境界と測定方向の位置関係による誤差の相違(dBi(OUT)とdBi(IN)の差)は、主に線質の非単色性に起因すると考えられるが、4.3節のMテストの結果と同様に開発手法適用により顕著な改善が見られる。装置性能を同

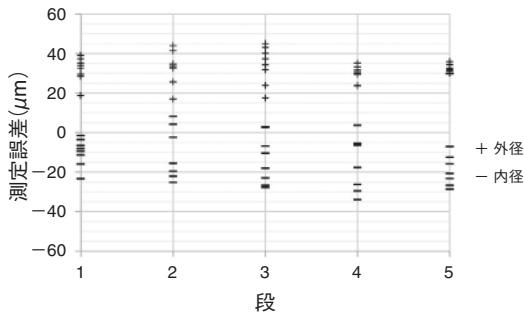


図 12 (a) M テスト結果 (開発手法適用前)

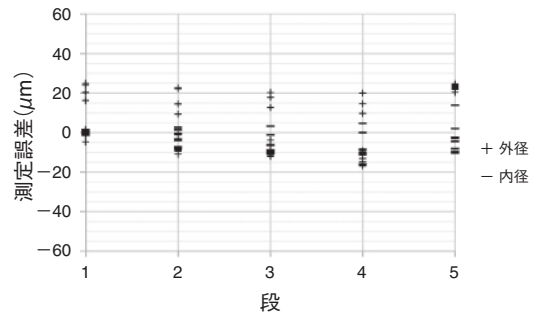


図 12 (b) M テスト結果 (開発手法適用後)

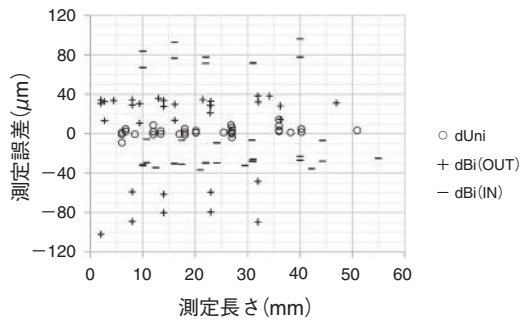


図 13 (a) EM テスト結果 (開発手法適用前)

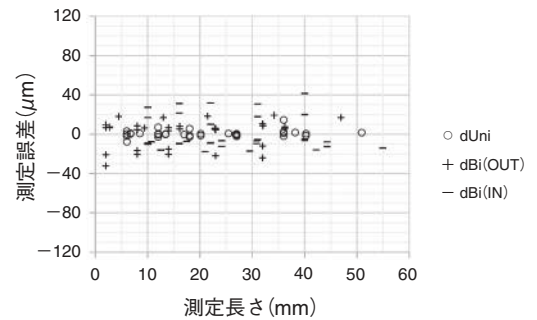


図 13 (b) EM テスト結果 (開発手法適用後)

時に多面的に評価するという観点では、個々の誤差のレベルを慎重に考察する必要があると思われる。

## 5. おわりに

DXCTは高機能な計測分析ツールであり、そこから得られる画像は、克明な描写力による見えない部分の開示により、驚きをもたらす万能の測定機という期待をユーザにもたせている。しかしながら、信頼できる測定機能を備えたDXCTはまだ多くない。DXCTの開発と利用はヨーロッパが先行している状況であるが、日本でも数社が製品開発に取り組んでいる。世界中での競争と協力を通じて、DXCTの性能はさらに向上し続けると考える。

なお、達成される精度は専用のDXCTには及ばないものの、従来の観察用X線CTにおいても、国家標準にトレーサブルな校正済みの寸法既知ゲージを用いて、規格に沿った評価法を実施することで、測定精度保証付きの測定を実施することは可能である。内外計測ができる新たな測定手段が普及し、ものづくりのサイクルを大幅に加速させることを期待する。

## 参考文献

- 1) W. Sun, S.B. Brown and R.K. Leach: An overview of industrial X-ray computed tomography, NPL Report ENG 32 (2012) ISSN 1754-2987.
- 2) VDI/VDE 2630 and VDI/VDE 2617 series: [https://www.vdi.de/uploads/tx\\_vdirili/pdf/1804694.pdf](https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1804694.pdf)
- 3) 阿部誠, 藤本弘之, 高辻利之, 権太聡, 大澤尊光: 寸法・形状測定に使用するX線CT装置の精度評価法に関するガイドラインの紹介とISO化の動向, 非破壊検査第62(2013)1.

---



**藤本弘之**  
1990年6月東北大学大学院理学研究科物理学第二専攻博士課程後期3年の課程修了。同年7月工業技術院計量研究所入所、改組により2001年4月から産業技術総合研究所、以来X線を用いた精密計測、幾何計測と角度標準に従事、理学博士。



**佐藤 理**  
2004年3月東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。同年4月産業技術総合研究所入所、入所以来各種測定機による三次元計測の高度化と精度評価法標準化に従事。博士(工学)、技術士(機械部門)。



**佐藤 真**  
2013年3月大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年4月(株)鳥津製作所入社。入社以来、非破壊X線CT装置の高度化に関する研究開発に従事。工学博士。



**岸 武人**  
1995年3月京都大学工学部電子工学科卒業。同年4月(株)鳥津製作所入社。1998年よりマイクロフォーカスX線CT装置の製品開発に従事。

---