

FCRによるトヨタコレクションの調査

三浦 定俊・松島 朝秀*

1. はじめに

日本は江戸時代の17世紀初めから19世紀半ばまで約250年間、外国との貿易を原則的に禁止したが、鎖国を解くと西洋文明を積極的に導入して、わずか1世紀余りで近代化を達成した。このような急速な外来文化の導入が可能だったのも、長い平和の続いた江戸時代に国内で様々な技術が培われていたからだと考えられる。その技術の表れが、時計、からくり、天文や測量のための器具である。しかしこれらの科学技術資料はこれまでそれほど重要視されなかったために、散逸して失われてしまうことが多く、再評価とそのため調査が急がれていた。

2001年に、国立科学博物館はトヨタ自動車(株)より約1,300点の科学技術資料(トヨタコレクション)の預託を受け、東京文化財研究所がそれらの資料を保管して調査に当たることとなった。この資料は、からくり、測量・天文器具、銃・大砲、医療器具、書画・絵画、生活用品(時計、ランプなど)など広い分野にわたる質の高い科学技術資料が集まったもので、我が国の科学技術の歴史を知るために欠かせない一級の博物館資料である¹⁾。また同年からは、文部科学省の科学研究費補助金(特定領域研究「江戸のモノづくり」)を受けて、江戸から明治にかけての科学技術資料の材料、構造、技法、歴史などに関する調査が、文献と器物の両面から多くの研究者の参加の下に進められている。われわれはこの調査に当たり、医療分野を中心に使われていたFCR(Fuji Computed Radiography)を利用した。その結果について報告する²⁾。

2. FCRの撮影方法

FCR装置(写真1)は、X線イメージングプレート(IP)の読み込み処理を行うAC-5装置と、読み込んだ画像を処理するVF-C1装置で構成されている。X線撮影そのものは、透過X線撮影と同じ手順で、X線フィルムの代わりに、イメージングプレートを読み取り専用のカセットもしくは遮光袋に収め、撮影を行う。

イメージングプレートはBaFBr(またはBaFI):Euからなる輝尽性蛍光体をプラスチック支持体上に塗布し、その表面に汚れや傷を防止するための保護膜をつけた、厚さ0.6mmほどの白色のプレートである。輝尽性蛍光体はX線を照射されると蛍光を発生し、その強度は照射を止めると低下していくが、再び680nmの励起光を照射すると、減衰していた発光(400nm前後)が一時的に強くなる性質を持つ。X線を照射したイメージングプレートには、X線量に応じた蛍光



写真1 FCR装置

*東京芸術大学大学院美術研究科文化財保存学専攻システム保存学

エネルギーが蓄積されているので、半導体レーザーで細いビームにした光(680nm)を当て、二次励起光をスキャナーで読みとっていけば、被写体のX線透過画像を得ることができる。読み込んだ画像はデジタル画像であるから様々な画像処理が自由にできるが、濃度の階調分布はこの読み込みの時に決まってしまうので、もっともよい階調分布が得られるように、資料の形状や密度に応じた読みとり条件を設定する必要がある³⁾。使用したイメージングプレートは画像を消去して、再使用が可能である。

3. イメージングプレートの特性

FCRはもっぱら医療や工業分野で使用されてきたので、博物館資料に応用するにはまずそれがどのような特性を持っているか明らかにすることが必要であり、そのための実験を行った。

3-1. 実験1 照射線量と濃度の相関

イメージングプレートのダイナミックレンジとその直線性について実験を行った。使用したX線管球、試料およびイメージングプレートは表1の通りである。

表1 実験1の撮影条件

| | |
|-------|--|
| X線管球: | MCN322 (最大管電圧320kV, フィリップス) |
| 感光体 : | イメージングプレート (STタイプ, 富士写真フィルム) |
| 試料 : | アクリル製くさび (5cm × 19cm, 5mmごとに45mm厚さまで) 純銅製くさび (2mmごとに40mm厚さまで) |

初めにアクリルくさびを管電圧40kV, 管電流10mA, 照射時間1分, 照射距離150cmで撮影した⁴⁾。結果を図1に示す。低エネルギーX線ではアクリル厚みと濃度の間により直線関係が得られている。

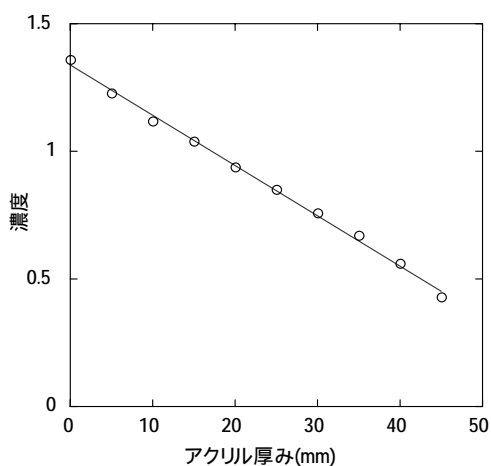


図1 アクリルの厚みに対する濃度変化
(管電圧40kV, 管電流10mA, 照射時間1分, 照射距離150cm)

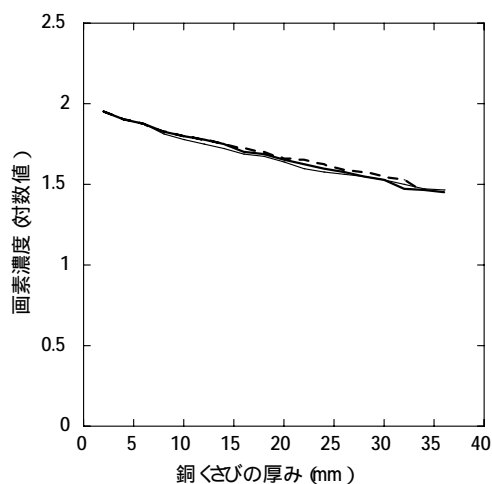


図2 銅くさびの厚みに対する濃度変化
(管電圧320kV, 管電流3mA, 照射時間1分, 照射距離150cm)
細実線: 0.3mm厚の鉛増感紙を使用
太実線: 0.5mm厚の鉛増感紙を使用
太破線: 切り抜いた鉛板の中にくさびを収め0.5mm厚の鉛増感紙を使用

次に撮影条件を管電圧320kV、管電流3mAに変えたときに得られた結果を図2に示す⁵⁾。太実線は散乱線の影響を防ぐために0.5mm厚の鉛増感紙を使用し、太破線はさらに切り抜いた鉛板の中にくさびを収めて撮影して、周囲からの散乱線を防いだものである。

入射するX線の強度を I_0 、透過したX線強度を I_1 、くさびの厚みを x 、銅の減弱係数を μ とし、散乱線を見捨ると次の式が得られる。

$$\log(I_1/I_0) = -\mu x$$

この式から、もし得られたイメージングプレート上の画素濃度 D が、照射線量 I_1 に比例する($D=kI_1$)なら、画素濃度 D の対数値もくさびの厚さ x と比例関係にあるはずである。図2を見ると、0.5mm厚の鉛増感紙を使用し、切り抜いた鉛板の中にくさびを収めて撮影した場合(太破線)には散乱線の影響が他に比べてより小さくなり、対数値で表した画素濃度が銅くさび全体の厚みに対して直線的に変化している。

以上の実験から、イメージングプレートは広い範囲にわたってX線量と濃度との間に直線性を保っていることがわかり、得られた濃度データから半定量的な議論が可能であることがわかった。ただしイメージングプレートを読み取る段階で、データの諧調は決まってしまうので、もし半定量的な検討を行おうとする場合には、資料の形や性質に応じた読み取り条件の設定があらかじめ必要である。

3 - 2 . 実験2 硬X線領域におけるダイナミックレンジ

科学技術資料には様々な材質の材料が用いられているだけでなく、厚みのある金属の上に、木や布などの柔らかい材料を被せているものがある。このような資料のX線撮影では、金属を透過しながらなおかつ、それを覆っている柔らかい材料の内部構造を解明しなければならない。そこで厚みのある金属と柔らかい材料を重ねた場合について検討した⁴⁾。

使用したX線管球、試料およびイメージングプレートは表2の通りである。

表2 実験2の撮影条件

| | |
|------|-----------------------------|
| X線管球 | MCN322 (最大管電圧320kV, フィリップス) |
| 感光体 | イメージングプレート(STタイプ, 富士写真フィルム) |
| 試料 | アクリル製くさび(実験1と同じ), 銅板(厚さ5mm) |

厚さ5mmの銅板にアクリルくさびを重ねて、管電圧250kV、管電流5mA、照射時間3分、照射距離150cmで、散乱線除去用の鉛増感紙(0.1mm厚み)を用いて撮影した。さらに、厚さ10mmの銅板(厚さ5mmの銅板を2枚重ねたもの)にアクリルくさびを重ねて、管電圧320kV、管電流5mA、照射時間3分、照射距離150cmで、散乱線除去用の鉛増感紙(0.1mm厚み)を用いて撮影した。これらの結果を図3に示す。低電圧で撮影したときにくらべて高電圧で撮影したときにはX線の透過力が大きくなるので、アクリル

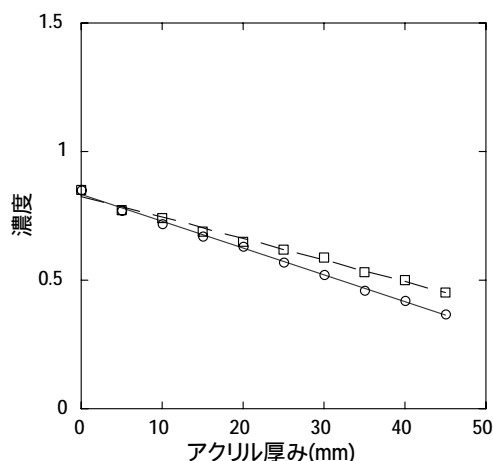


図3 アクリルの厚みに対する濃度変化
(□ : 10mm厚銅板に重ねて管電圧320kVで撮影, ○ : 5mm厚銅板に重ねて管電圧250kVで撮影)

の厚みの違いによる濃度変化は小さくなっているが、それでも充分識別できる濃度差であり、厚みと濃度の間には直線関係が保たれていることがわかる。

3-3. 実験3 軟X線領域におけるダイナミックレンジ

実験2はエネルギーの大きなX線の場合について実験を行ったが、エネルギーの低いX線でも、屏風や襖絵に貼った金箔のように極端に薄いものを調査する場合、金箔の種類や厚みに応じてどこまで検出できるか、あらかじめ知っておきたい。そのための実験を行った⁶⁾。

実験はイメージングプレート上に置いたヒノキ材に、金属箔を重ねて撮影した。表3のようにヒノキ材の厚みと金属箔の種類や厚さを変化させ、いろいろな組み合わせで撮影を行った。ヒノキ材の厚みが増すにつれて電圧の大きなX線だけが木材を透過するので、薄い箔を識別しにくくなる。この点について検討した。

表3 実験3に用いた金属箔と木材

| 種類 | 厚み | 成分 ^{注)} |
|------|--------------------|------------------------------------|
| 金箔A | 3.50 μm | Au:94.79 Ag:4.90 Cu:0.66 |
| 金箔B | 0.13 μm | Au:98.91 Ag:0.49 Cu:0.59 |
| 金箔C | 0.09 μm | Au:75.53 Ag:24.46 Cu:0 |
| 銀箔 | 0.36 μm | Ag > 99.90 |
| 銅箔 | 0.42 μm | Cu > 99.90 |
| 錫箔 | 1.30 μm | Sn > 99.90 |
| ヒノキ材 | 25mm | (柀目: 気乾密度0.45(g/cm ³)) |
| | 50mm | (同上) |
| | 75mm | (同上) |
| | 100mm | (同上) |

(注) 金属箔の成分分析は早川泰弘氏による

表4 実験3の撮影条件等

| | |
|--------|--|
| X線管球 | : フィリップス MCN165(最大定格100kV) |
| X線管電圧 | : 30kV |
| X線管電流 | : 10mA |
| 照射時間 | : 15秒 |
| 照射距離 | : 150cm |
| 感光体 | : イメージングプレート(ST-VI Type, 富士フィルム, 20cm \times 25cm) |
| 読み取り条件 | : AC-5(オートモード) |
| 濃度測定条件 | : VF-C1(画素値測定) |

表4の撮影条件は日本画などの調査で使われる条件とほぼ同等である。結果を図4に示す。ここで示した金属箔の濃度は試料とバックグラウンドとの濃度差を表している。ヒノキ厚みが100mmになっても金箔A、金箔B、錫箔は、撮影した画像上で判別できた。特に金箔Aは厚いので、ヒノキ厚みが100mmでも濃度差が充分あり、容易に判別できた。金箔Bの濃度差は微小だが、画面上で違いを判別できた。金箔Cは背景との濃度差が無くなり判別ができない。銀箔はヒノキ厚みが25mm、銅箔は75mmで判別不能になった。以上の結果から、厚みのある金箔ならば、比較的厚い木材の上に用いられていても、容易に判別ができることがわかった。なお同じ試料についてX線フィルムで撮影を行ったが、ヒノキ材上の金属箔は識別できなかった。

以上の実験結果から、X線フィルムに対するイメージングプレートの長所として次の点が上げられる。

- (1) ダイナミックレンジが広いので厚い金属から薄い箔まで厚みや密度が大きく変わる被写体も撮影できる。
- (2) 照射線量と画素濃度の間に良い直線性があるので半定量的な評価ができる。

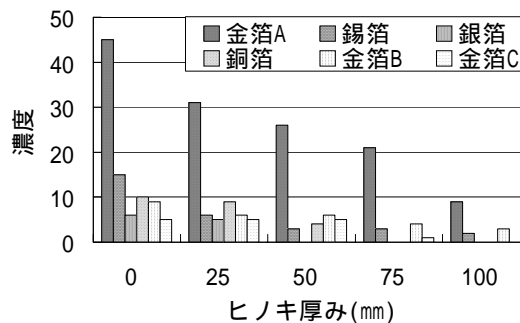


図4 木材の厚みと金属箔の濃度との関係

- (3) 得られるデータがデジタルなので画像処理が容易である。
- (4) 撮影から画像の読み出しまで短時間でできるので、現場で関係者が結果を検討しながら調査を進めることができる。
- (5) デジタル画像として複製が簡単にできる。

今回のトヨタコレクションのように、多くの研究者が関わっている場合には、得られた画像を現場で全員が検討しながら調査を進められることは大変大きな利点である。また画像の複製が簡単にできることは、資料の共有化という点でも便利である。注意点として次のことがあげられる。FCRは、X線画像情報をイメージングプレートが受けたX線量に比例する発光として読み取り、量子化し、ヒストグラム（頻度曲線）をつくり画像データとして形成する（IP読み取り処理）。このため多少照射X線量が変化しても、ほぼ一定の濃度の画像が得られるが、逆にそのために濃度をX線フィルムと単純に比較することはできない⁷⁾。また読み取りの際の画像データ濃度の判定は、イメージングプレートと被写体の相対的な大きさの差に影響される。使用するイメージングプレートよりも大きい資料の場合は、X線量判定領域のすべてを被写体が占めているために、FCRの特長が最大限発揮できるが、小さな資料の場合、被写体以外の部分が多くなって相対的に最適なX線量判定ができず、最良の画質は得られない。そのため撮影時から被写体に対して、適当なX線量だけでなく適切な大きさのイメージングプレートも選択しなければならない。

4．トヨタコレクションの調査

4 - 1．源内焼自動噴水器

次に示す自動噴水器の一種であるが、他の自動噴水器が金属製なのに対して、これは陶器である。安永年間(1772～1780)に発明家として有名な平賀源内が考案したもので、高さ17.5cm、直径14.3cmの三彩の陶器である。噴水器の仕組みは、器の上面に水を張ると噴水がでて、酒席などで杯を洗うのに用いられた。

撮影結果を見ると、厚手の陶器であるにもかかわらず、上下に分かれた内部の構造が明確に写っていて、上面に注いだ水が下室に入り、上下をつないだパイプを通して空気が上室に動き、上室の圧力を高めて中の水を中央のパイプから噴水として押し出す構造になっていることがよ



写真2 源内焼自動噴水器

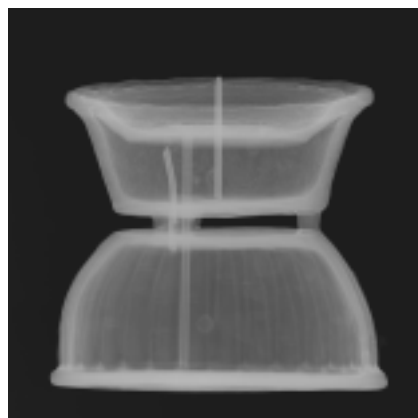


写真3 同 X線画像
(管電圧100kV, 管電流5mA, 照射時間30秒, 照射距離220cm)

くわかる。従来のX線では、厚みのある資料について細かな構造を調べることは難しかったが、イメージングプレートを用いることにより、詳細な調査が可能になった⁵⁾。

4 - 2 . からくり噴水器

もともと自動噴水器は西洋から伝わったものであるが、このからくり噴水器は奥村菅次(1788-1840)が制作したもので、ピストンで空気の圧力を高めて水を噴き上げるようになっている。X線画像を見ると器の上面にそそいだ水が、二重になった下部の器の外側と内側の間に流れ込み、左側のポンプを動かすと吸い上げられて内側の器の中に入る。またポンプには逆流防止弁が付いているからポンプを押して行くにつれ、水が外に戻ることはなく内部の圧力は増加する。そして右側の花のバルブをゆるめれば、内部の水が管を通過して上昇して、中央のノズルから吹き上がる構造になっている。このからくり噴水器のように厚さのまちまちな資料のX線透過撮影は、X線フィルムでは大変難しく、イメージングプレートならではのものである。

作者の奥村菅次は現在の滋賀県に生まれた職人で、同じ地域に居て鉄砲職人であった国友一貫斎(1778-1840)と交友があったと考えられている。国友一貫斎はオランダから輸入された空気銃を見て、日本で初めて空気銃を製作した職人である。奥村菅次がこのからくり噴水器を製作するに当たっては、彼から何らかのヒントを得たことが予想される⁸⁾。



写真4 からくり噴水器

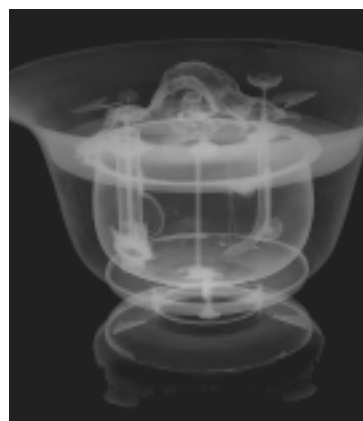


写真5 同 X線透過画像
(管電圧200kV, 管電流3mA, 照射時間1分, 照射距離150cm)

4 - 3 . エレキテル

一般には平賀源内が安永5年(1776)に日本で初めて製作したエレキテルが有名であるが、このエレキテルは佐久間象山が万延元年(1860)に製作したもの(高さ36cm)である。源内の摩擦起電機による静電気式のエレキテルとは違い、右側の円筒状の電池で発電した電気を、左側の変圧器で数百ボルト程度に電圧を上げる仕組みになっている。

X線透過画像(写真7)は見やすくするために濃淡を反転させているが、変圧器の内部にあるコイルが見える。中央に鉄の棒を何本も束ねて巻心とし、その周囲に一次コイルと二次コイルを重ねて巻いてある様子が良く分かる。また高エネルギーのX線で撮影したにもかかわらず、コイルの入った箱や脚部の木目もはっきりと観察できる⁹⁾。同型のエレキテルの分解調査結果(表5)と比較すると⁹⁾、よく似た構造になっていることが推定される。



写真6 佐久間象山のエレキテル

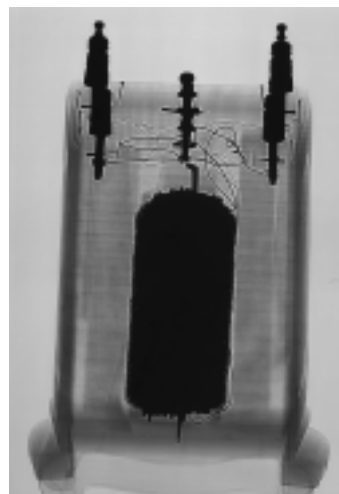
写真7 同 変圧部のX線透過画像
(濃淡を反転させた画像)
(管電圧100kV, 管電流5mA,
照射時間1分, 照射距離150cm)

表5 同型のエレキテルの分解調査結果

竹筒の寸法：内径3.3-3.5cm, 外径4.3-4.5cm, 長さ11.5cm
 竹筒内の鉄芯：直径約2mmが126本, 束ねて挿入
 コイルの巻き数：一次コイル 514回, 二次コイル 647回
 コイルに巻かれた銅線：一次線(0.68mm)と二次線(0.3mm)を和紙で丁寧な被覆し, 各層の間にも和紙が絶縁のために巻かれている。

5. まとめ

トヨタコレクションへのFCRの応用について述べた。この方法を用いる利点としては、従来のX線フィルムに比べてダイナミックレンジが広いので、厚みや密度が違う素材で作られた資料でも失敗することなくきれいに撮影できること、時間のかかる従来の現像・定着処理が不要なので、直ちに撮影結果を見ることができ、その場で結果を検討しながら調査が進められることなどを挙げることができる。またデジタル画像なので画像処理や複製が簡単にできて、画像を資料の所有者や共同研究者に必要な数だけ、その場で配布することができる。機器は持ち運んで使用することも可能で、われわれにとって資料の調査に欠かせない機器の一つとなっている。

本研究は平成16年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「江戸のモノづくり」によるものである。

参考文献

- 1) 産業技術記念館：『トヨタコレクション展』（展覧会目録），(2001)
- 2) 三浦定俊，松島朝秀：FCRによる博物館資料の調査，博物館と新技術（国際学術研究討論文集），国立台南芸術大学，118-147 (2004)
- 3) 松島朝秀，三浦定俊：IPを利用した透過X線撮影の画像処理パラメータの検討，文化財修復学会

- 第25回大会研究発表要旨集, 240-241(2003)
- 4) 三浦定俊: X線イメージングプレートを用いた近世科学技術資料の調査(2), 第24回大会研究発表要旨集, 38-39(2002)
 - 5) 三浦定俊: X線イメージングプレートを用いた近世科学技術資料の調査(1), 文化財修復学会第23回大会研究発表要旨集, 52-53 (2001)
 - 6) 松島朝秀, 三浦定俊: IPを利用した透過X線撮影のダイナミックレンジの検討, 文化財修復学会第26回大会研究発表要旨集, 130-131 (2004)
 - 7) 松島朝秀, 三浦定俊: 透過X線撮影におけるFCRとフィルムの濃度特性の比較, 保存科学, 43, 17-23 (2004)
 - 8) 市立長浜城歴史博物館: 『江戸時代の科学技術』, サンライズ出版, (2003)
 - 9) 東徹: 『佐久間象山と科学技術』, 思文閣出版, 204-207 (2002)

キーワード: トヨタコレクション(Toyota collection) 科学技術資料(historical materials relating to science and technology), 江戸時代(Edo period), X線透視撮影(X-ray radiography), イメージングプレート(imaging plate)

Application of Fuji Computed Radiography (FCR) to Museum Objects

Sadatoshi MIURA and Tomohide MATSUSHIMA*

Fuji Computed Radiography (FCR) is a kind of digital X-ray radiography. It uses an imaging plate coated with fluorescent material instead of an X-ray film. The authors did some experiments in order to apply this technique to cultural material. They proved that this technique gives a fine and clear image for an object with various thickness because of a wide dynamic range of the imaging plate. The authors also conducted a research on the Toyota collection that contains many technical and scientific objects such as optics, medical tools, metrical tools, toys, guns, etc., from the 17th to the 19th centuries (Edo period) in Japan. In this paper some objects are shown with the results of FCR examination: two vessels each with a mechanical fountain and an electrostatic medical tool. The FCR revealed their structures and mechanisms very clearly.

*Graduate School of Conservation for Cultural Property, Tokyo National University of Fine Arts and Music

