

透過X線撮影におけるフィルムとIPの特性曲線の比較

松島 朝秀*・三浦 定俊

1. はじめに

筆者らはこれまでに、透過X線撮影におけるFCR(Fuji Computed Radiography)を用いたイメージングプレート(Imaging Plate: IP)とX線フィルムの濃度特性の比較¹⁾を行った。その結果、アクリル樹脂の階段くさびを試料として比較した場合、フィルムは低い照射電圧によってコントラストの高い画像が得られることに対して、IPは高い照射電圧でも短時間の照射を利用すれば観察に適したコントラストの高い画像が得られた。この結果は、IPを用いた実際の調査で被写体に対する最適なX線量が予測できない場合、フィルム使用時の撮影条件を参考に、高い電圧と短時間の照射を選択すると良いことを示した。

本研究では、FCRの画像は従来のX線フィルムの判読結果と比較されることになるので、日本画や油画などの撮影条件におけるIPとフィルムの濃度特性を検討することを目的に特性曲線の比較を行った。

2. 特性曲線について

特性曲線は、フィルムに関する露光量の対数値と写真濃度の関係を表わすものである。特性曲線から比感度、平均階調度が求められる。通常、感光体の特性評価は特性曲線の作成と特性値の算出^{2,3)}で行うのが一般的で、これらの方法は白黒ネガティブフィルムの写真感度の求め方についてJISが規定されていたが、国際的な統一化の方針のもとに廃止され、現在はISO規格に統一されている^{4,5)}。X線フィルムについてはスクリーン/フィルム系として1996年のISO9236-1(写真-医療用スクリーン/フィルムシステムのセンシトメトリー 第一部 特性曲線の形状、スピードおよび平均階調度の求め方)に規定されているが、実用的でないためにあまり普及していません。その規定によるJISは、X線露光についてはX線発生装置や増感紙の規定ができていないこと、X線の線質が電圧によって異なる、絶対露光量の表示が難しいなどの理由により規格化はまだされていない。本実験では、特性曲線の作成に強度目盛法の一つであるブーツストラップ法^{6,7,8)}を用いた。ブーツストラップ法は医用放射線分野で一般的に用いられる簡便な測定方法で、管電圧を変化させて比較する本実験条件では測定誤差が少なく曲線を作成できる。

3. FCRの撮影条件

FCRは、X線画像をIPが受けたX線量に比例する発光としてヒストグラムをつくり画像データとして形成する。このため多少照射X線量に変化しても、ほぼ一定の濃度の画像が得られることが特長である。よって濃度の違いだけでX線フィルムと比較することはできない。このFCRの特長は、IPと被写体の相対的なサイズの差から生じるX線量判定領域の変化に影響される。今回、FCRの特長が最大限発揮できるように、使用するIPのX線量判定領域を考慮して被写体の大きさを設定した。IPの読み込み処理は、ダイナミックレンジの設定を最大の4.0桁で行うようにFIXモード⁹⁾で行った。

*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

4. 実験方法

ブーツストラップ法(bootstrap)とは、金属の階段くさびの厚さに対する特性曲線を作図する方法である。2回(2倍)の露光を与えることにより、相対露光量軸上(対数值)では $\log 2 \approx 0.3$ ずつ増すときの濃度変化を利用する。医用放射線分野ではX線の線質(管電圧60kV~90kV、管電流30mA~200mA)に合わせ、被写体としてアルミニウム製の階段くさびが用いられる。しかし、本実験では文化財分野の中でも比較的透過率の高い資料、日本画、油画などを対象とした線質での比較を目的とするため、従来の研究^{10,11)}で用いてきた比重の小さいアクリル樹脂を用いた(図1)。これによって、実験に使用したX線の電圧や電流の範囲では、線減弱係数の高い金属の階段くさびよりも文化財材料との比較が容易になる。

実験で使用するIPはST-VI typeを、X線フィルムにはRX-Uフィルムを用いた¹²⁾。アクリル樹脂くさびに対してのX線エネルギーは、これまでに日本画、油画の撮影に用いてきた条件である管球電圧30kV、管球電流3mA、照射時間60秒を基準とし、管球電圧を20kV、40kVに変えて撮影を行った。濃度測定は、各管電圧での撮影を3回ずつ行い、くさびの各厚み部分で測定した。IPの濃度測定はVF-C1で行い、X線透過濃度をROI測定で平均画像値として測定し、フィルムの濃度測定は、白黒透過濃度を5回測定した平均値を示した。



図1 アクリル階段くさび

試料

階段くさび：アクリル樹脂(日東樹脂工業製)

(15×33cm²、厚み1mmごとに30mm、以降5mmごとに150mm)

撮影条件

X線装置：フィリップス MG165

X線管球：フィリップス MCN165(最大定格100kV)

X線管電圧：30kV, 40kV, 50kV

X線管電流：3mA

照射距離：150cm

照射時間：60秒(一回露光)、120秒(二回露光)

感光体

イメージングプレート：(ST-VI Type, 富士フィルム)

X線フィルム：(RX-U, 富士フィルム)

現像条件

イメージングプレート・・・AC-5

X線フィルム・・・・・・現像液：X線フィルム用現像液レンドール(20℃)5分

定着液：富士フィックス 10分

濃度測定条件

イメージングプレート・・・・VF-C1(画素値測定)

X線フィルム・・・・・・X-Rite331(白黒透過濃度測定) 測定スポット径：直径2mmφ

階段くさびに用いたアクリル樹脂(C₅H₈O₂)の厚みについて

各管電圧において持つ線減弱係数から計算して求めた、透過X線に対する金属とアクリル樹脂の等価厚みを表1に示す。

減弱係数については、National Institute of Standards and Technology の「Note on NIST X-ray Attenuation Databases」¹³⁾を参考にし、X線減弱の指数関数則(exponential law)¹⁴⁾を用いて算出した。アクリル樹脂に対する各金属の等価厚みは管電圧で異なり、原子量に比例しない。アクリル厚み1mmに注目して各金属の等価厚みを比較してみると、管電圧20kVでは金は7.2μm、銀は31μm、銅は17μm厚みに相当する。

表1 X線管電圧を変化させたときの透過X線に対する等価厚み

管電圧	アクリル厚み	単位:m						
		1.0E-03	5.0E-03	1.0E-02	3.0E-02	5.0E-02	1.0E-01	1.5E-01
20kV	金	7.2E-06	3.6E-05	7.2E-05	2.2E-04	3.6E-04	7.2E-04	1.1E-03
	銀	3.1E-05	1.6E-04	3.1E-04	9.3E-04	1.6E-03	3.1E-03	4.7E-03
	銅	1.7E-05	8.4E-05	1.7E-04	5.1E-04	8.4E-04	1.7E-03	2.5E-03
30kV	金	1.1E-05	5.5E-05	1.1E-04	3.3E-04	5.5E-04	1.1E-03	1.7E-03
	銀	8.3E-06	4.1E-05	8.3E-05	2.5E-04	4.1E-04	8.3E-04	1.2E-03
	銅	2.8E-05	1.4E-04	2.8E-04	8.3E-04	1.4E-03	2.8E-03	4.2E-03
40kV	金	1.8E-05	9.1E-05	1.8E-04	5.4E-04	9.1E-04	1.8E-03	2.7E-03
	銀	1.4E-05	6.8E-05	1.4E-04	4.1E-04	6.8E-04	1.4E-03	2.0E-03
	銅	4.8E-05	2.4E-04	4.8E-04	1.5E-03	2.4E-03	4.8E-03	7.3E-03

5. 結果と考察

特性曲線を求めるにあたり、各電圧で管電流3mA、照射距離1.5mで照射時間1分、2分(2倍の露光)の撮影を行った。つづいて、被写体であるくさびから得られた各照射時間に対する濃度を用いて、ブーツストラップ法で特性曲線を作成した¹⁵⁾。

図2,3に、X線フィルムとIPの特性曲線について、X線の管電圧を20kV、30kV、40kVと変化させた結果を示す。各感光体ともに、特性曲線は右上がり総露光量が増えるにつれ濃度も大きくなった。フィルムは、電圧が高くなると曲線全体の濃度分布が高くなった。これは高いX線管電圧に対してフィルムの比感度が上昇するためである。

図2から、20kVでは相対露光量0.3で濃度が最小値の0.58、相対露光量1.8では最大値1.78になった。なお、最小値の0.58の値はくさびの27mm厚さに、最大値の1.78は1mmに相当する。このことは、対数値で表わした全露光域1.5桁(0.3~1.8)の範囲で、くさび厚み1mmから27mmの範囲を濃度差1.20で画像化したことを示している。

30kVでは相対露光量0.3で濃度が最小値の0.59、相対露光量2.1では最大値2.16になった。濃度0.59はくさび厚み70mm、濃度2.16は1mmである。20kVでの特性曲線と比較して、全露光域1.8桁の範囲で、20kVよりも広い範囲の43mm(69mm-26mm)のくさび厚み差を、濃度差0.25で画像化できる。

しかし、40kVでは相対露光量0.3で濃度が最小値の0.69、相対露光量2.4では最大値2.27になり、

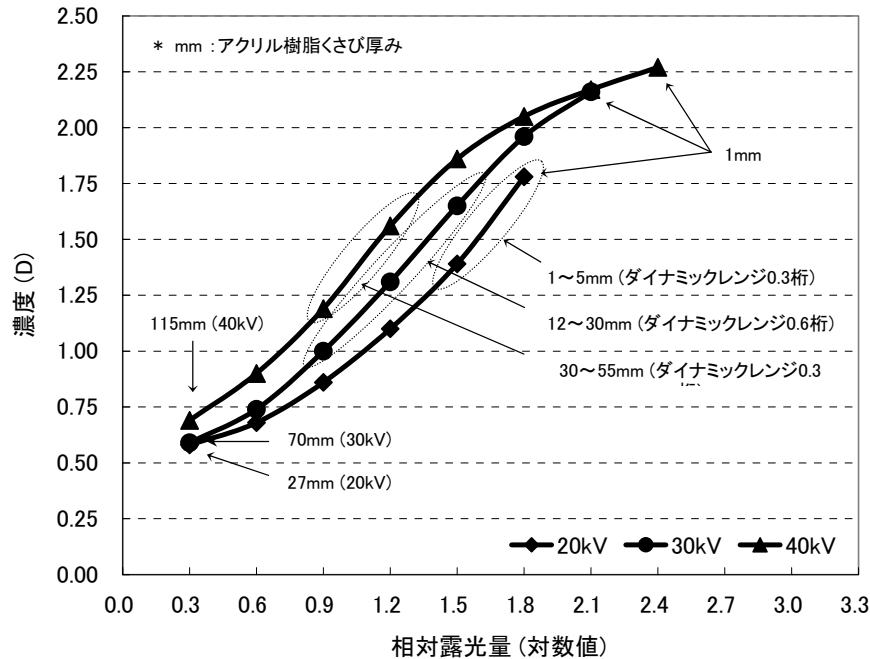


図2 管電圧の違いにおけるX線フィルムの特性曲線の比較

全露光域2.1桁でくさび厚み115mmまで画像化できる結果が得られ、一見して20kV、30kVと比較すると広範囲の撮影が可能であると思われるが、特性曲線の直線部分である平均階調度 G ($G = \tan \theta$)の相対露光域を比較すると、20kVでは0.3(相対露光量: 1.5~1.8)、30kVでは0.6(0.9~1.5)、40kVでは0.3(0.9~1.2)になり、30kVの照射が他よりも平均階調度の範囲(ダイナミックレンジ)が広いことがわかる。直線の勾配である平均階調度 G は各電圧において値はほぼ同じであった。

ダイナミックレンジの領域とくさび厚みの関係は、20kVの照射の場合、厚み範囲で1~5mmになり、30kVでは12~30mm、40kVでは30~55mmになった。表1の各金属厚みと比較すると、20kVでは金厚み $7.2 \mu\text{m}$ ~ $36 \mu\text{m}$ 、30kVでは銀厚み $83 \mu\text{m}$ ~ 0.25mm 、40kVでは銅厚み 1.5mm ~ 2.4mm の範囲に相当する。

この結果は、管電圧の違いで、物質の種類や厚みによって目視に適したコントラストが変化することを示している。この管電圧と例にあげた金属厚みとの関係は、経験的なこれまでの文化財資料の撮影で用いてきた管電圧の選定と一致している。

なお、X線フィルムのダイナミックレンジは種類によって異なるが普通1.0桁までの範囲である。実験に使用したRX-Uは、レギュラーフィルムの標準コントラスト特性であり、今回の撮影条件とアクリル樹脂製くさびの減弱特性の関係から高いコントラストが得られない点を考慮すると、30kVの照射でダイナミックレンジ0.6桁という値は妥当な数値である。

図3からIPの特性曲線は各管電圧ともに、相対露光量が大きくなるにつれ濃度(pixel Value)は直線的に大きくなった。フィルムの濃度変化量とは測定方法が異なるので平均階調度 G は比較できないが、相対露光量軸の値に着目すると、特性曲線の平均階調度の範囲は最小でも管電

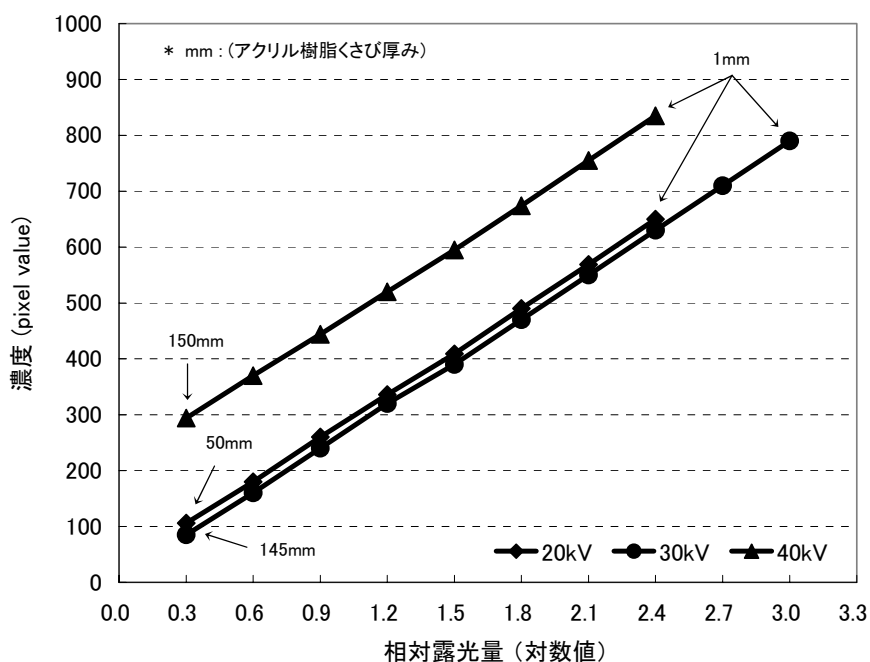


図3 管電圧の違いにおけるIPの特性曲線の比較

圧20kVと40kVで2.1(0.3~2.4)になり、IPはフィルムよりも広いダイナミックレンジを持つことがわかる。特に、管電圧30kVでは20kV、40kVよりも広いダイナミックレンジで、くさび厚みにして1mmから145mmを濃度差705で画像にできることがわかった。

この結果は、くさび厚みを例に示した各金属厚みにすると、30kVの照射で一度に金の厚み11 μ m~1.7mm、銀の厚み8.3 μ m~1.2mm、銅の厚みにすれば28 μ m~4.2mmまでの範囲を撮影できることを示す。

6. まとめ

透過X線撮影法によるフィルムとIPの特性曲線について、X線の管電圧を変化させて比較した。実験の結果、フィルムは管電圧20kVでくさび厚み1~5mmに適したダイナミックレンジ0.3桁が得られ、30kVでは厚み12~30mmに適した最大のダイナミックレンジ0.6桁が得られた。

IPは、管電圧が変化してもフィルムよりも広いダイナミックレンジが得られたことは従来の研究の結果と一致したが、本実験で用いたアクリル樹脂製のくさび厚みの範囲では、30kVで厚み1mm~145mmに渡り、フィルムより大きい2.7桁の広いダイナミックレンジが得られた。

本研究の結果から、日本画に用いられる金属箔などの非常に薄い材料の撮影を試みた場合、箔が単体であれば管電圧20kVでフィルムを用いると撮影はできるが、実際の日本画資料は様々な技法や材料が用いられているので、広いダイナミックレンジを持つIPを管電圧30kVで使うことが撮影には適していることがわかった。

本研究は平成17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。

謝辞

本研究を行うにあたり、FCRの操作技術の助言をいただいた富士写真フィルムの石井清一氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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, pp.17-23 (2003)
- 2) 日本写真学会写真用語委員会編: 写真用語辞典, p.225, pp.278-279, p.365, 写真工業出版(1988)
- 3) 荒川哲(他): 放射線写真学, pp.163-172, 富士フィルムメディカル(株)(2003)
- 4) ISO9236-1: 1996, photography-Sensitometry of screen/film systems for medical radiography Part1: Determination of sensitometric curve shape, speed and average gradient
- 5) 日本規格協会: <http://www.webstore.jsa.or.jp/webstore/top/index.jsp>
- 6) 田中仁(他): 新・医用放射線技術実験-基礎編, pp.183, pp.184-187, 共立出版株式会社(2004)
- 7) 田中仁(他): 医用放射線技術実験-基礎編 第3版, pp.152-155 共立出版株式会社(2003)
- 8) 内田勝監修: 放射線画像工学, pp.73-79 オーム社(1986)
- 9) 富士写真フィルム(株)産業材料部: FCRシステム技術資料
- 10) 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)
- 11) 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), 文化財修復学会第24回大会研究発表要旨集, 38-39(2002)
- 12) 呉屋充庸, 三浦定俊, 大崎展靖, 金子忠夫: X線フィルムの青銅と檜材に対する濃度特性, 古文化財の科学, 28, 28-37(1983)
- 13) National Institute of Standards and Technology: <http://physics.nist.gov/physrefdata/Xraymasscoef/elemtab>
- 14) 日本エム・イー学会編 飯沼武・館野之男 編著: X線イメージング, pp.25-26 コロナ社(2001)
- 15) 長瀬産業(株)コダック製品事業部(訳): エックス線フィルムのセンチメトリー, p.27, 日本コダック(株)(1965)

キーワード: X線(X-ray); FCR (Fuji Computed Radiography); X線フィルム(X-ray film); イメージングプレート(imaging plate)

Comparison of the Characteristic Curve of Imaging Plate and X-ray Film in Radiography

Tomohide MATSUSHIMA* and Sadatoshi MIURA

Fuji Computed Radiography uses Imaging Plate (IP) instead of a film for radiography. In this study the characteristic curves of the Imaging Plate and X-ray film are compared.

The characteristic curve is the graph that represents the relation of light quantity irradiated to the film. Determination of the characteristic curve is essential for a quantitative evaluation of computed radiography as is X-ray film radiographic imaging process. Plotting the density measured against the log of exposure given makes a typical X-ray film characteristic curve. The shape of the curve represents the contrast response of the X-ray film to a wide range of exposures. When it is not practical to generate the entire curve through a variation of a single exposure parameter, bootstrap methods can be used. For the bootstrap method used here, a two-exposure parameter (X-ray radiation time: 60sec, 120sec) generates curve segments.

Thus, Imaging Plate should be used when X-ray energy suitable to a subject cannot be decided beforehand.

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

