

〔報文〕 文化財の透過X線撮影における マンモグラフィ用フィルムの特性

松島 朝秀*・三浦 定俊

1. はじめに

近年、透過X線撮影を取り扱う医療、工業分野では、コンピューテッドラジオグラフィなどのデジタル化に伴う技術革新が飛躍的に進んでいる。しかし、医療分野のマンモグラフィにおいては、乳腺内の腫瘤陰影を鮮明にとらえる必要があり、それを実現するものとして、安価で解像度の高いX線フィルムによる撮影が推奨されている¹⁾。マンモグラフィとは透過X線撮影による乳がん検診の総称であり、こうした背景をもとに、富士フィルム、コダックなどの機材メーカーではマンモグラフィ専用のフィルムシステムの開発に力を注いでいる^{2,3)}。

我々の透過X線撮影を用いた調査にも、コンピューテッドラジオグラフィが利用されるようになったが^{4~10)}、調査の規模、条件によってはX線フィルムを用いて撮影しなければならないことも多い。しかし、フィルムを用いた撮影では、十分なコントラストを得るためにコンピューテッドラジオグラフィよりもX線の照射時間が長くなってしまう場合がある^{6,7)}。文化財の透過X線撮影では、X線が物質と相互作用して引き起こされる影響は報告されていないが、資料へ及ぼす影響が最小限に抑えられるよう、なるべく短時間での撮影が好ましいと考えられる。そのため、これまで使用してきたフィルムを、短時間の照射で良好なコントラストが得られるフィルムへ代替することができればより安全性が高まる。

マンモグラフィでは、X線による人体の軟部組織と乳腺疾患の初期状態(微小な石灰化や腫瘤)の透過率の差が小さいため被写体コントラストが非常に低く、使用されるフィルムには、わずかなコントラストを認識できる特性が要求される。フィルムの感光剤は、被検者の健康への影響を軽減するために撮影時間を短くし、尚且つ診断に良好なコントラストが得られるように開発されているが、フィルムの詳細な技術情報はそのままメーカーの収益を左右することが懸念されるために、一般には公開はされていない。

本研究では、文化財の透過X線撮影において、短い照射時間で人体の疾患を鮮明に描出できるマンモグラフィ用フィルムの特性を、これまで我々が使用してきたフィルムと比較することで、従来よりも短い照射時間で視認性の高い画像が得られるのか検討することを目的とした。今回、文化財資料の中でも透過率の高い日本画を対象とした撮影条件で特性曲線を求め、さらに日本画資料の撮影を行い比較検討した。

2. 実験方法

2-1. X線フィルムについて

医療用のX線フィルムは、低線量率かつ短時間の照射で画像を得ることが要求されるため、わずかなX線量で蛍光する増感スクリーンをフィルム上部に装着して使用する。よって透過X線ではなく、主に増感スクリーンからの可視光によりフィルムは感光される。通常、増感スクリーンを使用すると解像度が若干低下してしまうが、医療分野では被検者の安全性が最優先されるため使用される。一方、工業分野では医療分野に比べて、照射時間をそれほど短縮しなくてもよく、逆に高い解像度が要求されるため、鉛箔増感スクリーンを用いる特殊な場合を除い

*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教育研究助手

て、十分な透過X線量を直接フィルムに感光させて撮影する。そのために、医療用のフィルムに比べて工業用のフィルムはハロゲン化銀の添加量が多く、その塗布もフィルムの両面に施されている製品が多い。

本実験で使用するフィルムは、我々がこれまで日本画資料の撮影に使用してきたフィルムが、富士フィルム製の工業用X線フィルムIX-FRなので、マンモグラフィ用フィルムは同じ富士フィルム製のUM-MA HC, AD-Mの2種類²⁾を使用した。今回、この2種類のマンモグラフィ用フィルムへの蛍光増感スクリーンの使用に関して検討した結果、工業用のフィルムに比べハロゲン化銀の塗布量が少ないため、X線では十分なコントラストが得られない可能性があったが、本実験では解像度をなるべく低下させないように使用しなかった。

また、主な医療用フィルムは蛍光増感スクリーンを使用する感光材の特性上、暗室灯の波長の選択や、油脂等との反応に非常に敏感であるため取り扱いに注意しなければならないが、医療用、工業用と前述したフィルムの用途によるハロゲン化銀の塗布量の違いが、そのまま価格に反映されていると思われる、総じて医療用フィルムの価格は工業用フィルムよりも安価で、2006年6月現在、UM-MA HC, AD-Mらフィルムの価格は1枚あたりIX-FR(シートフィルムタイプ:四つ切)の約1/4である。

2-2. 特性曲線について

特性曲線は、写真フィルムに対する可視光やX線による露光量の対数値と、その露光によるフィルム濃度の関係を表わすものである。これまで、感光体の特性評価は特性曲線の作成と特性値の算出についてJISが規定されていたが、その内容は、X線の露光についてX線発生装置や増感スクリーンの規定ができにくいこと、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されておらず、現在、X線フィルムの写真感度の求め方についてはISO規格が用いられている¹¹⁾。しかし、実用的でないために普及していないので^{12, 13)}、本実験では、特性曲線の作成に医用放射線分野で一般的に用いられる強度目盛法のブーツストラップ法(bootstrap)^{12, 13, 14, 15)}を使った。

ブーツストラップ法とは、照射時間の変化によってX線のフィルムに対する露光量を変化させ、階段くさびの厚さに対する透過濃度の変化を利用して曲線を作図する方法である。医用放射線分野では用いるX線の出力(管電圧30kV～90kV)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、本実験では透過率の高い日本画を対象とした低出力のX線を用いるため、比重の小さいアクリル樹脂を用いた⁴⁾。これによって透過率の低い金属製の階段くさびよりも、透過率の高い文化財材料との比較が容易になると考えられる。

2-3. 実験条件

特性曲線や日本画資料の撮影で用いたX線の管電圧、管電流、照射時間、照射距離の設定は、我々が日本画の撮影に用いてきた条件で行った。

実際の絵画撮影では、作品を移動させて起こるリスクを避けるために、低出力のポータブルX線発生装置を現場で使用する事が多い。本実験の照射条件について、X線の全強度は管電流に比例して増加するため、管電流を高めれば照射時間をさらに短くすることもできるが、現在、我々が使用している低出力ポータブルX線発生装置の最大の管電流値は5mAで、撮影時間を短縮させるために電流値を高く設定して撮影を行うと、空冷式であるX線管球が蓄熱してしまい撮影の続行が困難になる場合がある。よって、本実験では特性曲線や日本画資料の撮影に管電流を3mAに設定して行った。特性曲線の作成には、階段くさびの一段の厚みを1mmにして

使用した。つづいて同じ条件で、模写で制作された日本画資料を用いて撮影した。模写で制作された作品は、制作者から使用した顔料や制作技法等を詳細に知ることができるので、X線画像を視認する際に誤解がない。

試料

特性曲線を求めた階段くさび：アクリル樹脂

(メタクリル酸エステル：日東樹脂工業製，15×33cm，厚み1mm刻みで30mm厚さまで)

日本画資料の撮影：模写作品「黒谷上人絵伝断簡」

撮影条件

X線発生装置：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：20kV

X線管電流：3mA

照射距離：150cm

照射時間：1分，2分，3分

X線フィルム

マンモグラフィ用フィルム：UM-MA HC，AD-Mの2種類(富士フィルム)

工業用フィルム：IX-FR(富士フィルム)

※フィルムの大きさは3種類とも四つ切(24×30cm)で，増感スクリーンを用いずに紙製の遮光袋で使用

現像条件

現像液：富士レンドール(20℃)・・・現像時間5分間(富士フィルム)

定着液：富士フィックス・・・定着時間10分間(富士フィルム)

濃度測定条件

透過濃度測定：X-Rite331(測定スポット直径2mmφ，エックスライト社)

3. 結果と考察

特性曲線の横軸は，X線の各照射時間において階段くさびを透過してきたX線がフィルムに与えた露光量を示している。縦軸の濃度(D)はフィルムの黒化度の値で，測定に用いた濃度測定器X-Rite331の標準試料を図1に示す。使用した濃度測定器は，写真フィルムの透過濃度を測定するISO規格に^{16,17)}従った白黒透過濃度計で，観察者の視覚に即した視覚拡散透過濃度を数値で示す測定器である。図1中に記入されている数値が濃度の値である。標準校正値である濃度2.92は真黒に見えるが，X線フィルムの観察に用いるシャウカステン(ライトボックス)を使用すると光が透過して視認できる濃度であり，濃度3.68はシャウカステンの使用でも光の透過が少なく視認が困難である。濃度の値はフィルム上を任意に5箇所選び，測定した平均値より求めた。測定の誤差は最大で0.04であった。

図2に，1分の照射で求めたマンモグラフィ用フィルムのUM-MA HC，AD-Mと，工業用フィルムのIX-FRの特性曲線を比較した結果を示す。UM-MA HCとAD-Mの特性曲線を比較すると，UM-MA

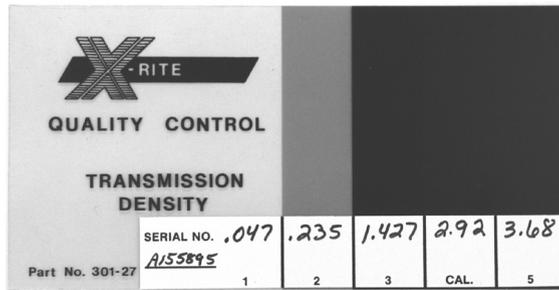


図 1 白黒透過濃度測定器X-Rite331の標準試料

HCは曲線の傾きがAD-Mよりも大きく、実験に用いた階段くさびに対してはコントラストが高く撮影できることがわかる。露光量1.2での濃度DはUM-MA HCは1.22、AD-Mは0.75であることから、同じ被写体を同じ条件で撮影をしても透過率の高い部分では画像の濃度に0.47の差が生じる。露光量0.3では、UM-MA HCは濃度0.3、AD-Mは濃度0.29が得られた。よってUM-MA HCは濃度差0.92、AD-Mは濃度差0.46のコントラストが得られ、両フィルムには倍ほどのコントラスト差があることから、今回の実験条件ではUM-MA HCが撮影に適していることがわかる。この結果は、AD-Mの特性が透過X線よりも蛍光増感スクリーンに感光を依存していることを示していると考えられる。

IX-FRは、露光量0.3での濃度は0.25となり、また露光量1.2では濃度が0.93になった。よって濃度差0.68のコントラストが得られている。

以上の結果から、各フィルムのコントラストを比較すると、実験で用いたアクリル樹脂製の階段くさびを1分の照射で撮影した場合、UM-MA HCは濃度差0.92、AD-Mは濃度差0.46、IX-FRは濃度差0.68になり、よってUM-MA HCが最もコントラストが高く得られることがわかった。

図3に、UM-MA HCとIX-FRの特性曲線を2分の照射で求めた結果を示す。AD-Mは、1分の照射の結果、同じマンモグラフィ用フィルムのUM-MA HCよりもコントラストが低く、本実験の目的であるX線の照射時間の短縮には該当しないと考え除外した。

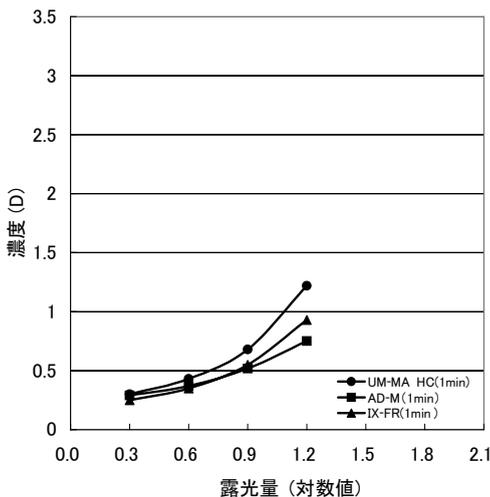


図 2 1 分の照射で求めたUM-MA HC, AD-MとIX-FRの特性曲線の比較

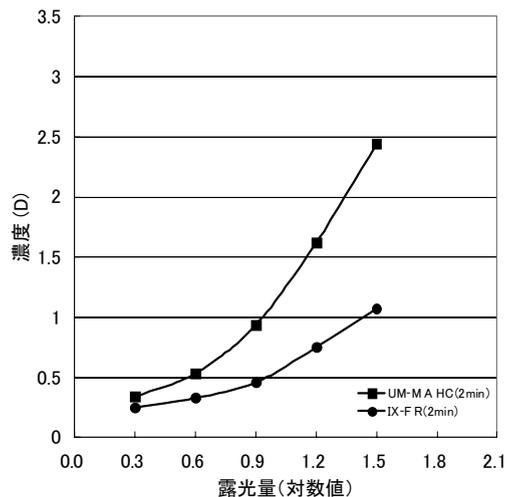


図 3 2 分の照射で求めたUM-MA HCとIX-FRの特性曲線の比較

露光量0.3から1.5までのUM-MA HCとIX-FRの濃度差を求めると、UM-MA HCは濃度差2.10、IX-FRは濃度差0.82になった。よってUM-MA HCはIX-FRより濃度差1.28の高いコントラストが得られることがわかった。

図4に、UM-MA HCとIX-FRの特性曲線を3分の照射で求めた結果を示す。露光量0.3から1.8までの濃度の変化について、UM-MA HCとIX-FRの曲線はほぼ同じ形になった。露光量0.3から1.8までのコントラストは、UM-MA HCとIX-FRは1分、2分の照射よりも非常に高く、濃度差が約2.5もあった。この結果は、本来、両フィルムとも本実験で用いたX線の照射条件よりも高い条件で撮影を行うフィルムなので、3分の照射によって十分な露光を与えられた両フィルムのハロゲン化銀（感光剤の一つ）の特性が、同じように現れたと考えられる。

つづいて、UM-MA HCとIX-FRを使用して日本画資料を撮影した結果を示す。

資料は図5に示す「黒谷上人絵伝断簡」の模写作品である。本断簡は、鎌倉時代以降数多く制作された高僧絵伝の中の一つと考えられ、当初の形は掛幅装であったと思われる。場面は上人が土佐へ配流になったときを描くものと思われ、人物の表情は丁寧に描かれており、金泥を使った模様は精密になされている。模写作品は当時の彩色技法、基底材の構成などを十分に考慮して制作された。表1と図6に使用した顔料と基底材の構成を示す。

図7、図8に、1分の照射によるUM-MA HCとIX-FRの透過X線画像を示す。両フィルムとも重い元素が含まれている朱や辰砂、金泥、緑青、群青で描かれている箇所（表1を参照）が画像上で白く抜けている。しかし、図8のIX-FRは、緑青と金泥で厚く描かれている僧衣と、同じく緑青や金泥で薄く描かれている背景や地面とのコントラストの差が小さく、図7のUM-MA HCと比較して画像全体の視認性が低い。

また、奥部分をみると、UM-MA HCは裏彩色部分に多く用いられた辰砂による筆跡がわかることに対して、IX-FRはコントラストが低く判別が難しい。UM-MA HCは、胡粉が使用されている従者の衣、衣の縁や刀の鞘尻を描いている少量の金泥も判別できた。UM-MA HCの画像では、朱、朱土、辰砂、金泥を使用している奥部分の濃度と、緑青、金泥で薄く描かれている地面のコントラストは濃度差にして約0.45になった。

同じくIX-FRは、奥部分の濃度と地面のコントラストは濃度差にして約0.19になり、UM-MA

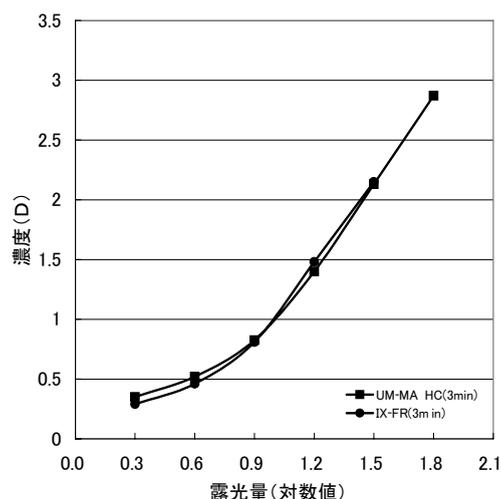


図4 3分の照射で求めたUM-MA HCとIX-FRの特性曲線の比較



図5 模写作品「黒谷上人絵伝断簡」の写真

表 1 「黒谷上人絵伝断簡」模写に使用した顔料と箇所，基底材について

	使用顔料	使用箇所
緑青	放光堂 焼白緑 No. 3	僧衣（薄い所，袖・裾の濃い所）
	放光堂 焼白緑 No. 3 をさらに焼いたもの	奥の黒い部分，従者の刀の裏彩色
	放光堂 緑青 13 番・白緑を混ぜ，焼いたもの	背景および剥落部分
	放光堂 緑青 11 番を焼いたもの	剥落部分，古色がけ
	緑青（13～11番）を焼いたもの	室内の草花 地面 金（截金部分）の裏彩色
群青	群青（11～9番ぐらい）を焼いたもの	右上雲
	白群を焼いたもの	室内の地 奥の補絹してあるところ 従者のすね当て
黄土・胡粉	放光堂 日本黄土特製	人物の顔，手足
	放光堂 舶来黄土	建物
	中川 胡粉	従者の衣
		人物の顔，手足，衣，建物の裏彩色 僧衣
朱・辰砂	喜屋 黄口朱	奥
	得応軒 黒朱	奥の裏彩色
	放光堂 古代朱茶口	従者の刀の紐，奥の紐
	古代朱	数珠
	放光堂 辰砂 14 番	人物顔，手足 地塗り，茶色古色
朱土	放光堂 朱土	奥の裏彩色
金茶	金開堂 金茶白を自分で焼いたもの	奥の赤み
藤黄	三吉 藤黄	地面
		僧衣
		黄味の必要と思われるところ
金泥	金沢 純金泥	上下，右上の截金
	京都 純金泥	室内
	青金泥	奥の模様
		従者の衣，鞆 地面

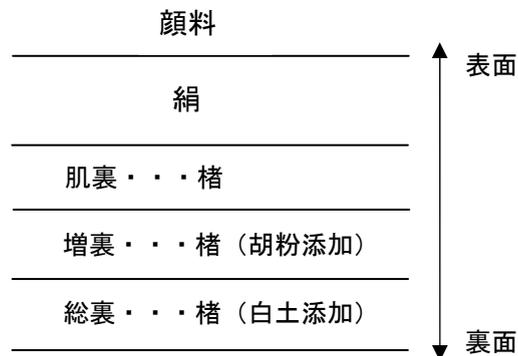


図 6 基底材の構成



図7 1分の照射によるUN-MA HCの透過X線画像



図8 1分の照射によるIX-FRの透過X線画像

HCがIX-FRよりコントラストが濃度差にして0.26大きい。

つづいて、図4の3分の照射で求めたUM-MA HCとIX-FRの特性曲線がほぼ同じ形になったことから、3分の照射で資料を撮影すると、図9、図10に示すようにUM-MA HCとIX-FRの透過X線画像でも同じようなコントラストになった。よって、特性曲線と資料撮影の結果から、両フィルムとも3分の照射であればコントラスト特性に大きな違いがないことがわかった。今回、3分以上の照射は行っていないが、一般的にUM-MA HCのような短い時間で高いコントラストが得られるフィルムは、被写体に対して適切な照射条件と現像条件を十分に考慮することが必要で、過度の照射や現像液の温度管理を怠ってしまうと、画像全体のコントラストが上がってしまい視認が困難になる。

また、UM-MA HCの1分と3分の照射による画像に視認性の差はなく、1分でも3分と同じようなコントラストの高い良好な画像が得られることがわかった。しかし、これらの画像に、図2と図4の特性曲線の差は現れなかったことから、実験で用いた日本画資料は、露光量0.3から1.2まで、階段くさびにして1mmから16mm厚みと同じような透過率を持っていると考えられる。

4. まとめ

本研究は、日本画を対象とした透過X線撮影において、マンモグラフィ用フィルムの特性をこれまで使用してきたフィルムと比較することで、従来よりも短い照射時間で視認性の高い画像が得られるのか検討することを目的とした。

実験では、マンモグラフィ用フィルムであるUM-MA HC、AD-Mと、これまで使用してきた工業用フィルムのIX-FRを、特性曲線と日本画資料を撮影した画像で比較した。

X線の照射時間を1分から3分と変化させて求めた特性曲線の比較から、1分の照射では3種類のフィルムのなかでUM-MA HCが最も高いコントラスト特性を持つことがわかった。つづいて、UM-MA HCとIX-FRを同じく1分の照射で日本画資料を撮影した結果、画像でもUM-MA HCがIX-FRよりも視認性が高いことが確認できた。また、3分の照射ではUM-MA HCとIX-FRの特性曲



図9 3分の照射時間によるUM-MA HCの透過X線画像



図10 3分の照射時間によるIX-FRの透過X線画像

線がほぼ一致し、同じく3分で撮影すると両フィルムとも同じようなコントラストの画像になった。この結果は、UM-MA HCとIX-FRは3分の照射では共に画像の視認性が高いことを示している。また、UM-MA HCは、1分と3分の画像に視認性の差はほとんどなく、1分の照射で3分の照射と変わらないコントラストの高い良好な画像が得られることがわかった。

以上の結果から、実験に用いた日本画資料、またはこの資料のような日本画の撮影には、マンモグラフィ用フィルムのUM-MA HCは、IX-FRを使用した3分の照射よりも短い1分の照射で調査に適した撮影が可能になり、X線が文化財資料へ及ぼす影響をこれまでよりも抑えられることが期待できる。

しかし、X線の照射時間をさらに短縮できる蛍光増感スクリーンの使用に関しては、今後、文化財の透過X線撮影において解像度の低下がもたらす視認性への影響を調査し、検討する予定である。

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、X線フィルムの特性について助言をいただいた富士フィルム(株)の窪田聡氏、石井清一氏、模写資料を提供して頂いた東京芸術大学大学院の大河原典子氏に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本医学放射線学会/(社)日本放射線技術学会 マンモグラフィガイドライン委員会編：マンモグラフィガイドライン，33-40，医学書院(1999)
- 2) 富士フィルムメディカル(株)：マンモグラフィシステム技術資料

- 3) コダック(株)ヘルスイメージング事業部：マンモグラフィシステム技術資料
- 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(1), 文化財保存修復学会第23回大会研究発表要旨集, 52-53(2001)
- 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(2), 文化財保存修復学会第24回大会研究発表要旨集, 38-39(2002)
- 6) 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(2003)
- 7) 松島朝秀, 三浦定俊：透過X線撮影におけるフィルムとIPの特性曲線の比較, 保存科学, 45, 133-140(2005)
- 8) 三浦定俊, 松島朝秀：FCRによるトヨタコレクションの調査, 保存科学, 44, 25-34(2005)
- 9) 三浦定俊：トヨタコレクションの材料・技法の分析と保存に関する研究, 特定領域研究(2)平成16年度年次成果報告書, 111-190(2006)
- 10) 早川泰弘, 松島朝秀, 三浦定俊：根津美術館所蔵燕子花図屏風のX線分析, 保存科学, 45, 157-166(2006)
- 11) IS09236-1: Photography-sensitometry of screen/film systems for medical radiography Part1: Determination of sensitometric curve shape, speed and average gradient(2004)
- 12) 田中仁(他)：医用放射線技術実験-基礎編 第3版, 152-155 共立出版株式会社(2003)
- 13) 田中仁(他)：新・医用放射線技術実験-基礎編, 183, 184-187, 共立出版株式会社(2004)
- 14) 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シトメトリー, p. 27, 日本コダック(株)(1965)
- 15) 内田勝監修：放射線画像工学, 73-79 オーム社(1986)
- 16) IS05-3: Photography-Density measurements-Part3: Spectral conditions(1995)
- 17) IS05-2: Photography-Density measurements-Part2: Geometric conditions for transmission density(2001)

キーワード：透過X線撮影(Radiography)；X線フィルム(X-ray film)；
マンモグラフィ(Mammography)；特性曲線(Characteristic Curve)

Comparison of the Characteristic Curves of a Mammography Film and an IX-FR Film in Radiography

Tomohide MATSUSHIMA* and Sadatoshi MIURA

A characteristic curve is the graph that represents the relation of light quantity irradiated to a film. Determination of the characteristic curve is essential for a quantitative evaluation of 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 three-exposure parameter (X-ray radiation time: 1min, 2min, 3min) generates curve segments.

In this study the characteristic curves of a mammography film (UM-MA HC, AD-M) and IX-FR film are compared. As a result, fine density was obtained for UM-MA HC in irradiation time of 1 min and for IX-FR in irradiation time of 3 min. The authors conclude that UN-MA HC provides a wide range of characteristics in a short time. However, it is known that the density of the image increases with the energy of radiation and IX-FR usually has more density than UM-MA HC. Therefore, the subject and the type of investigation should influence the choice of film.

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