原 著

イメージングプレートを用いたX線管焦点測定

阿部慎司・根岸 徹¹⁾・深谷理人・秋山俊一・野口真矢²⁾
藤崎達也・門間正彦・齋藤秀敏¹⁾

論文受付
2004年3月1日

論文受理
2004年6月14日

Code No. 921

茨城県立医療大学放射線技術科学科
1) 東京都立保健科学大学放射線学科
2) 東京医科大学霞ヶ浦病院放射線部

緒 言

X線管焦点と画質は密接な関係があり、半陰影、幾何学的不鋭等、放射線写真像の鮮鋭度に影響を与える重要な因子の一つである^{1), 2)}。よって、診断価値の高い画像を提供するうえで、焦点測定は重要なQCの一つである³⁾。日本工業規格(JIS)Z4102-1994による焦点測定では、増感紙を用いずに微粒子X線フィルム(例えば、歯科用X線フィルム)を使用して撮影するように定めている(以下、直接照射フィルム法)⁴⁾。しかし、直接照射フィルム法による測定はX線管の負荷が大きい、負荷軽減の方法として増感紙-フィルム系(以下、S/F系)を用いた測定(以下、S/F法)の試みがなされており、ピンホールカメラ法やスリットカメラ

法では、直接照射フィルム法と比較して多少過小評価となることが報告されている^{5), 6)}。

今日の急速なcomputed radiography(以下、CR)システムなどのデジタルイメージングシステムの普及により、明室化が進んでいる。さらに、排水・廃液設備を必要としない利点から、現像方式もウェット方式からドライ方式に移行している。このため、すべての施設でウェット方式の現像設備を設置しているとは限らない。そのような施設においては必ずしもウェット処理を必要とする直接照射フィルム法による焦点測定が行えるとは限らない。これらのことからイメージングプレート(以下、IP)を用いた焦点測定法(以下、IP法)を検討することは有用であると考えられる。これまで

Measurement of Focal Spot in X-ray Tube Using Imaging Plate

SHINJI ABE, TORU NEGISHI,¹⁾ MASATO FUKAYA, TOSHIKAZU AKIYAMA,
MASAYA NOGUCHI,²⁾ TATSUYA FUJISAKI, MASAHICO MONMA,
and HIDETOSHI SAITO¹⁾

Department of Radiological Sciences, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences

1) School of Radiologic Sciences, Tokyo Metropolitan University of Health Sciences

2) Department of Radiology, Tokyo Medical University Kasumigaura Hospital

Received March 1, 2004; Revision accepted June 14, 2004; Code No. 921

Summary

Comparisons of focal-spot size measurements with a direct-exposure X-ray film, screen-film(S/F) system, and imaging plate(IP) were carried out for slit and star resolution pattern camera techniques. The focal-spot measurements of X-ray units with the nominal size of 0.1-1 mm were performed, and measurement using the computed radiography(CR) system was investigated. Compared with the direct-exposure X-ray film method, the measurements of focal-spot size by the S/F system were slightly small for all focal spots. The measurements obtained with IP were slightly large for large and small focal spots, although the measurement of micro focal-spot size was overestimated, extending the tolerance level owing to the sampling. With the star pattern camera technique, differences between the three kinds of detectors were minimal. Therefore, it was thought that measurement of focal-spot size using the CR system would be practical for both large and small focal spots if this method were used for quality control in medical facilities.

Key words: Imaging plate, Focal spot, Slit camera technique, Star pattern camera technique

別刷資料請求先: 〒300-0394

茨城県稲敷郡阿見町阿見4669-2

茨城県立医療大学・放射線技術科学科 阿部慎司 宛

に、大焦点についてIPを用いたピンホールカメラ法による焦点寸法測定とスリットカメラ法による変調伝達関数の測定を行い、その有用性が報告されている⁷⁾。

本研究では、IP、S/F系および微粒子X線フィルムを用いて、スリットカメラ法(以下、スリット法)とスターパターンカメラ法(以下、スターパターン法)によりさまざまなX線管焦点(公称値0.1~1.0mm)の寸法を測定し、IP法を直接照射フィルム法およびS/F法とを比較検討する。

1. 方法

1-1 使用機器

焦点測定の対象としたX線発生装置はいずれも日立メディコ社製の、単相全波DR-150-I(X線管装置UH-6GE-31T、焦点の呼び：大焦点1.0mm、小焦点0.6mm)、単相インバータDHF-155H(X線管装置UH-6GB-11T、焦点の呼び：大焦点1.0mm、微小焦点0.1mm)、三相12パルスDH-158HM(X線管装置UH-6GC-410T、焦点の呼び：大焦点1.0mm、小焦点0.65mm)、三相インバータDHF-155H(X線管装置UH-6GE-31T、焦点の呼び：大焦点1.0mm、小焦点0.6mm)である。直接照射フィルム法では、歯科用X線フィルムDIK-10((株)阪神技術研究所製)、S/F法では、マンモグラフィ用S/F系EC-MA/UM-MA HC(富士写真フィルム社製)を使用した。IP法では、マンモグラフィ用IP HR-V(富士フィルムメディカル社製)を使用し、CRシステムFCR9000HQ(富士フィルムメディカル社製)を用いて読み取りとフィルム出力を行った。

1-2 スリット法

X線管負荷条件は、JISに従い管電圧75kV、管電流は管電圧75kVにおいて撮影時間0.1secとしたときの最大許容管電流の50%、撮影時間はスリット像の濃度が正味濃度で0.8~1.2になるような時間を選択した。Fig. 1に測定系の幾何学的配置図(2倍拡大撮影)を示す。拡大率は、焦点の呼びが0.4mmより大きく1.0mm以下のものに対しては2倍(スリットーフィルム間距離62cm、焦点ースリット間距離31cm)、焦点の呼びが0.4mm以下のものに対しては3倍(スリットーフィルム間距離78cm、焦点ースリット間距離26cm)とした。

焦点寸法の測定は、スリットカメラModel07-624(10 μ m幅; Gammex社製)を用いて以下の手順で行った。スリットの方向がX線管の管軸に垂直な方向(焦点の長さを測定するとき)および管軸に平行な方向(焦点の幅を測定するとき)の2種類について3枚ずつ撮影した。撮影したフィルムの現像処理は、歯科用X線フィルムについては現像液にレンドール(富士写真フ

イルム社製)、定着液にレンフィックス(富士写真フィルム社製)を用い、現像温度24°C、現像30秒、定着5分で、マンモグラフィ用X線フィルムについては自動現像機Konica SRX-101を用いて現像した。現像条件は現像温度30°C、170秒処理で行った。また、撮影したIPの処理はリニア階調、S値200で読み取り、焦点像をフィルムに出力した。フィルム上のスリット像を、管軸方向に平行方向(長さ)と垂直方向(幅)について拡大鏡(0.1mm目盛、10倍)を用いて肉眼的に読み取り、拡大率で除して焦点寸法を求めた。

さらに、IPを用いた焦点寸法の測定値の線量による影響を検討するため、三相12パルスDH-158HMについて、先に述べた読み取り条件でスリット像の濃度がJISで定める濃度に達するmAs値を基準とし、その1/8倍から8倍までmAs値を変化させ3枚ずつ撮影し焦点寸法を求めた。

1-3 スターパターン法

X線フィルム、S/F、IPの3種類の検出器を用いて、スターパターンチャートを2倍拡大(スターパターンチャートーフィルム間距離45cm、焦点ースターパターンチャート間距離45cm)で撮影した。ただし、2倍拡大撮影ではスターパターン像が歯科用X線フィルムより大きくなるため、直接照射フィルムとしてマンモグラフィ用フィルムUM-MA HCを使用した。大焦点(1.0mm)にはTYPE6(扇角2°; 極光株式会社製)、小焦点(0.6mm、0.65mm)にはModel07-543(扇角1°; VICTOREEN社製)、微小焦点(0.1mm)にはModel 07-503(扇角0.5°; VICTOREEN社製)のスターパターンチャートを用いて試料を作成した。各装置における撮影条件はJISに基づき、管電圧は75kV、管電流は試験管電圧における0.1秒の最大許容管電流の50%、撮影時間は像の最も濃い部分が、露光されない部分の濃度に対して、0.8~1.2大きい濃度になるように設定し、それぞれ試料を3枚作成した。JISに基づき、撮影した焦点スターパターン写真についてX線管焦点の幅方向と長さ方向について第一解像限界間の直径 D を肉眼により測定し、焦点寸法 F を次式から求めた。

$$F = \frac{\pi D \theta}{180^\circ (M-1)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ は扇角(°)、 M は拡大率を表す。

2. 結果

直接照射フィルム法、S/F法、IP法で撮影したスリット像およびスターパターン像をそれぞれFig. 2, 3に示す。スリット法およびスターパターン法により得られた結果をTable 1に示す。また、直接フィルムを横

Fig. 1 Experimental setup of slit method (magnification factor 2).

Fig. 2 Slit images [three-phase generator unit (12-pulse: large focus)] parallel to the anode-cathode axis obtained by (a) direct-exposure film, (b) screen-film system, and (c) CR system.

a | b | c

Fig. 3 Star pattern images (three-phase inverter unit: large focus) obtained by (a) direct-exposure, (b) screen-film system, and (c) CR system.

a | b | c

Table 1 Comparison of slit and star focal-spot measurements using direct-exposure film, screen-film system, and CR system.

X-ray unit	Nominal size [mm]	Direction	Tolerance level [mm]	Direct film [mm]		S/F system [mm]		CR system [mm]	
				Slit	Star	Slit	Star	Slit	Star
DR-150-1/ UH-6GE-31T	1	width	1.0~1.4	1.6	1.3	1.4	1.3	1.6	1.3
		length	1.4~2.0	1.9	1.7	1.8	1.6	2	1.6
	0.6	width	0.6~0.9	0.7	0.79	0.7	0.79	0.88	0.81
		length	0.9~1.3	1.2	0.96	1.1	0.96	1.3	0.96
DHF-155H/ UH-6GB-11T	1	width	1.0~1.4	1.4	1.3	1.35	1.3	1.45	1.3
		length	1.4~2.0	1.85	1.6	1.75	1.6	1.92	1.5
	0.1	width	0.1~0.15	0.11	—	0.07	—	0.22	—
		length	0.1~0.15	0.27	—	0.23	—	0.4	—
DH-158HM/ UH-6GC-410T	1	width	1.0~1.4	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2
		length	1.4~2.0	1.6	1.3	1.5	1.3	1.6	1.3
	0.65	width	0.65~1.0	0.9	0.9	0.82	0.9	0.98	0.92
		length	0.95~1.4	1.1	0.96	1	0.96	1.2	0.96
DHF-155H/ UH-6GE-31T	1	width	1.0~1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3
		length	1.4~2.0	1.9	1.7	1.8	1.7	1.9	1.6
	0.6	width	0.6~0.9	0.7	0.63	0.7	0.65	0.93	0.64
		length	0.9~1.3	1.1	0.89	1.1	0.9	1.2	0.9

軸, CRとS/Fを縦軸にとり表した結果をFig. 4に示す。スリット法の場合, 直接フィルムを基準とすれば, S/Fでは焦点サイズに関係なく小さくなる傾向を示し, IPでは小焦点が大きくなる傾向をわずかに示す程度であるが, 微小焦点ではその傾向が顕著であった。スターパターン法では, 3種類の検出器での違いはわずかであった。ただし, 微小焦点に関しては, ゼロコントラストとなるはずの部分で測定できなかったため焦点サイズを求めることができなかった。

三相12パルスDH-158HMについて, IPを用いたスリット法により求めた焦点寸法の直接照射フィルム法で求めた結果(Table 1)に対する相対誤差の線量依存性をFig. 5に示す。ただし, 横軸のmAs値は, JISで定める濃度に達する撮影条件を基準値にとり, 大焦点については12.8mAs, 小焦点については10mAsに対する相対値で表した。線量が多くなるとより過大評価となり, 線量が少なくなるとより過小評価となる傾向となった。

3. 考 察

一般に, フィルム上に記録される画像の視覚的形状は特性曲線や線量に依存する。スリット法では, フィルム上の焦点像の大きさを計測するためにその測定値も特性曲線や線量に依存すると考えられる。直接照射フィルムの特性曲線に比べS/F系の特性曲線はラチチュードが小さく階調度が大きいために, 直接照射フィルムの場合より焦点像の辺縁部が短くなることが過小評価の原因と思われる。しかし, JISに規定されている焦点寸法測定の許容範囲を考慮するとこの過小評価は問題ないと思われる。逆に, IPの読み取りに用いたリニア階調は, S/F系の特性曲線に比べ直接照射X線フィルムの特性曲線に近い特性を示すために, スリット像辺縁部に裾を同程度に生じ, 直接照射フィルム法とIP法で測定した焦点寸法とが近い値になると考えられる。ただし, IPは直接照射フィルムやS/F系に比べ解像力が悪く, また本実験で使用したCRシステムにおける読み取りのサンプリング間隔が $100\mu\text{m}$ であるため, 微小焦点(0.1mm)での大きな過大評価になったと考えられる。

Fig. 5に示されているように, 焦点寸法の測定値は線量が多くなるとより大きく, 少なくなるとより小さく評価される。これは, 読み取り条件がS値一定($S=200$)であるから, 線量が多いと裾が伸び, 少ないと裾がカットされるためであると考えられる。Table 2に, 直接照射フィルム法で求めた焦点寸法と同じ寸法を与えるIP法での対応するピクセル値との関係を示す。ただし, 各焦点像での最大値に対する割合で表した。そこで, 三相12パルスDH-158HMについて, 1/8

倍から8倍までmAs値を変化させ撮影した焦点像のピクセル値分布から, 最大値に対し直接照射フィルム法と同じ寸法を与える平均のピクセルの相対値71.5%となる範囲を求めた結果をFig. 6に示す。Fig. 5, 6から肉眼的な測定に比べ, 線量に対する依存性が小さいことが分かる。また, スリット像の濃度がJISで定める濃度範囲に入る線量の1/2倍から2倍程度であれば誤差が少ないと考えられる。以上のことから, 今回の読み取り条件では最大値に対して約70%程度であるが, 微小焦点の場合を除き, 焦点像の端の決定に, 撮影条件と読み取り条件に応じて適切な値を設定することにより自動計測化も可能になると考えられる。

スターパターン法では, Table 1から分かるように3種類の検出器で得られた結果に大きな違いはみられなかった。このことから, IPを用いたスターパターン法は標本化に起因するエリアシングの影響⁸⁾が測定結果に影響せず, この測定法は有用であるといえる。ただし, 微小焦点では3種類の検出器ではずんだ部分が検出されなかった。一般に, スターパターン法は, 焦点の強度分布を矩形と考えて, 位相の反転で生じる第一解像限界間の直径 D を測定し, 幾何学的に決まる D と焦点寸法 F の関係から導かれる(1)式を用いて計算する⁶⁾。そこで, スリット法で撮影した単相全波整流方式X線装置の小焦点, 単相インバータ整流方式X線装置の大焦点と微小焦点における管軸方向の焦点像の濃度分布をFig. 7に示す。Fig. 7から大焦点と小焦点は矩形に近いことに対し, 微小焦点ではどちらかといえばガウス分布型に近いことが分かる。厳密には濃度分布を露光量変化した強度分布で議論すべきではあるが, ガウス関数のフーリエ変換は漸近的にゼロに近づいていき位相の反転に伴うゼロコントラストが現れないために, 焦点スターパターン像で第一解像限界が現れない。

今回使用したレーザーイメージャはウェット方式である。ドライ方式の画質はウェット方式に比べ安定性や保存性ではやや劣るとの報告⁹⁾もあるが, 画質に関しては, ウェット方式とドライ方式はほぼ同等であると報告されている¹⁰⁾。したがって, ドライ方式でも同様の結果が得られると考えられる。

4. 結 語

検出器として直接照射X線フィルム, 増感紙-フィルム系およびイメージングプレートを用いて, スリットカメラ法およびスターパターンカメラ法によるX線管焦点の測定を行い, 比較検討した。その結果, 微小焦点を除いては, ほぼ同程度の結果が得られた。よって, 診療施設における品質管理を目的とするならばCRシステムによる焦点寸法測定は実用的な手法になりうると考えられる。また, 微小焦点の場合を除き, 焦

Fig. 4 Comparison of the measured values of focal size according to the difference in image detector in the slit method and star pattern method. Solid lines represent regression lines.

- (a) Width of focal spot with the slit method.
 (b) Length of focal spot with the slit method.
 (c) Width of focal spot with the star pattern method.
 (d) Length of focal spot with the star pattern method.

Fig. 5 Relation between the exposure and focal-spot size of the three-phase generator unit measured by the slit camera technique using the IP. Focal-spot measurements, which are expressed as the relative error to focal-spot size measured by the slit camera technique using the direct-exposure film, are given in Table 1 (in %).

Table 2 Pixel values relative to the maximum in images (in %) at the edges of the focal-spot images in the IP method, which gave the same focal-spot size as the direct-exposure film method.

X-ray Unit	large Focus		Small (Micro) Focus		Average
	Perpendicular	Parallel	Perpendicular	Parallel	
DE-150-1/UH-6GE-31T	62.3	66.2	84	72.2	71.5
DHF-155H/UH-6GB-11T	60.8	58.3	89.8	79.5	
DH-158M/UH-6GC-410T	82.4	51.9	71	68.4	
DHF-155H/UH-6GE-31T	78.5	65.5	80.2	72.5

Fig. 6 Relation between the exposure and focal-spot size of the three-phase generator unit determined from the distribution of pixel values of slit images by the slit camera technique using the IP. Edges of focal-spot images, which were determined by pixels that are 71.5% of the maximum of pixel value, and focal-spot measurements, which are expressed as the relative difference to focal-spot size measured by the slit camera technique using the direct-exposure film, are given in Table 1 (in %).

点像の端の決定に、撮影条件と読み取り条件に応じて適切な値を設定することにより自動計測化が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究(C)の援助を受けて行ったものです。ここに記して厚く御礼申し上げます。

本論文の要旨は日本放射線技術学会第31回秋季学術大会(2003年10月, 秋田)にて発表した。

Fig. 7 Density distributions of slit images parallel to the anode-cathode axis.

参考文献

- 1) Doi K: Field characteristics of geometric unsharpness due to the x-ray tube focal spot. *Med Phys*, 4(1), 15-20, (1977).
- 2) Nickoloff EL, Donnelly E, Eve L, et al.: Mammographic resolution: Influence of focal spot intensity distribution and geometry. *Med Phys*, 17(3), 436-447, (1990).
- 3) 日本放射線技術学会専門委員会放射線技術品質保証班・編: 放射線技術QCプログラム 改定・増補版. 日本放射線技術学会, 京都, (1992).
- 4) 日本規格協会: JISハンドブック39放射線(能). 財団法人日本規格協会, 東京, (2003).
- 5) Everson JD, and Gray JE: Focal-Spot Measurement: Comparison of Slit, Pinhole, and Star Resolution Pattern Techniques. *Radiology*. 165, 261-264, (1987).
- 6) Barns GT: "Tube potential, focal spot, radiation output and HVL measurements on screen mammography units" in *Screen Film Mammography: Imaging Considerations and Medical Physics Responsibilities*, edited by Barns GT and Frey GD, Medical Physics Publishing, Madison, WI, (1991).
- 7) Noguchi M, Abe S, Negishi T, et al.: Application of imaging plate to focal-spot measurement. *Jap J MP*, 23(suppl.2), 31-34, (2003).
- 8) 杜下淳次: 画素からエリアシングまで. *日放技学誌*, 60(1), 34-42, (2004).
- 9) 園部富美恵, 豊岡佳代子, 阿部慎司, 他: ドライイメージャシステムDRYPRO 722/SD-Pの安定性に関する基礎的検討. *医学物理*, 22(3), 173-182, (2002).
- 10) 吉野良雄, 速水昭雄, 矢野昌男, 他: 乾式現像方式レーザー・イメージャ(Dry View)の臨床評価. *日放技学誌*, 53(4), 443-447, (1997).

図表の説明

- Fig. 1 スリット法(拡大率2倍)の実験配置図
- Fig. 2 スリットの方向が管軸に垂直であるときのスリット像(三相12パルス整流方式X線装置, 大焦点)
(a)直接照射X線フィルム, (b)増感紙-フィルム系, (c)CRシステム
- Fig. 3 スターパターンカメラ法で得られた焦点スターパターン写真(三相インバータ整流方式X線装置)
(a)直接照射X線フィルム, (b)増感紙-フィルム系, (c)CRシステム
- Fig. 4 スリット法およびスターパターン法での画像検出器の違いによる焦点サイズの測定値の比較. 実線は回帰直線を表す.
(a)スリット法での幅方向の焦点サイズ
(b)スリット法での長さ方向の焦点サイズ
(c)スターパターン法での幅方向の焦点サイズ
(d)スターパターン法での長さ方向の焦点サイズ
- Fig. 5 IPを用いたスリット法により得られた三相12パルス整流方式X線装置における焦点寸法の測定値の相対誤差と線量の関係
Table 1における直接照射フィルム法により求めた値に対する相対誤差[%]で表した.
- Fig. 6 ピクセル値の最大値に対し71.5%となるピクセルを焦点像の端として求めた三相12パルス整流方式X線装置における焦点寸法の相対誤差と線量の関係
Table 1における直接照射フィルム法により求めた値に対する相対誤差[%]で表した.
- Fig. 7 スリットカメラ法の管軸方向における焦点像の濃度分布
- Table 1 直接照射X線フィルム, S/F系およびCRシステムを用いたスリット法およびスターパターン法による焦点サイズの測定結果
- Table 2 IP法で求めた各焦点像のピクセル値分布でのフィルム法で求めた結果と同じ寸法を与えるピクセル値の最大値に対する相対値([%]).