

原 著

Computed Radiography システムの入出力特性を取得するための改良型マルチスリット装置の製作—ヒール効果の影響の補正と高電圧実験への適用—

前畑伊採^{1,2} 林 裕晃³ 竹上和希⁴ 氏田将平^{1,2}
紀本夏実^{1,2} 小西有貴¹ 福田郁磨¹

論文受付
2013 年 11 月 14 日

論文受理
2014 年 7 月 4 日

Code Nos. 144
254, 522, 734

¹ 徳島大学医学部保健学科

² 徳島大学医学部 Student Lab.

³ 徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部

⁴ 徳島大学大学院保健科学教育部

緒 言

X 線検出器に対する入出力特性は、取得した医用画像を解析するうえで欠かせない。X 線の強度を変化させて、対応する検出器の応答を調べる実験を行うことで、入出力特性を明らかにすることができる。X 線の強度を変化させる手法は、X 線撮影装置に内蔵されているタイマを使用するタイムスケール法や、X 線管と

検出器の間の距離 (source to image-receptor distance: SID) を変化させる距離法が知られている^{1~5)}。増感紙-フィルム系では、相反則不軌の影響を受けないように、距離法の使用が推奨されている⁴⁾。一方、相反則が成立する輝尽性蛍光体プレートを検出器とした computed radiography (CR) システムが使用されるようになってからは、実験の簡便さやインバータ式 X 線装

Fabrication of Improved Multi-slit Equipment to Obtain the Input-output Characteristics of Computed Radiography Systems: Correction of the Heel Effect, and Application to High Tube-voltage Experiments

Itsumi Maehata,^{1,2} Hiroaki Hayashi,^{3*} Kazuki Takegami,⁴ Syohei Ujita,^{1,2} Natsumi Kimoto,^{1,2} Yuki Konishi,¹ and Ikuma Fukuda¹

¹School of Health Sciences, The University of Tokushima

²Student Lab, The University of Tokushima Faculty of Medicine

³Institute of Health Biosciences, The University of Tokushima Graduate School

⁴Graduate School of Health Sciences, The University of Tokushima

Received November 14, 2013; Revision accepted July 4, 2014

Code Nos. 144, 254, 522, 734

Summary

Multi-slit equipment is a new experimental apparatus that can measure the input-output characteristics of a CR (computed radiography) system with limited influence of the fading effect. Kimoto et al. recently proposed a new type of multi-slit apparatus in which the multi-slit setup, the insertion region of the phosphor plate, and plate shielding are integrated to create a single handy-type item (an all-in-one type multi-slit apparatus). However, some problems remained unsolved. The aims of this study were to devise a setup for application to high tube voltage conditions, and to improve the all-in-one type multi-slit equipment so as to correct the heel effect. We examined the capabilities of our improved multi-slit equipment using diagnostic X-ray apparatus and found that it can obtain input-output characteristics with 5% accuracy for tube voltages of 40–140 kV and SID (source to image receptor distances) of 50–200 cm.

Key words: multi-slit method, input-output characteristics, computed radiography system, time scale method

*Proceeding author

置の性能の向上もあり⁶⁾、距離法¹⁻³⁾に加えて、タイムスケール法⁵⁾も用いられている。

CR システムの入出力特性を取得する実験では、効率的に実験および解析を行うために、X 線強度が異なる複数のデータ点を 1 枚の画像中にまとめることがある。すなわち、遮蔽板の一部に貫通孔をあけて X 線を数センチ程度の大きさまで絞り、輝尽性蛍光体プレートの異なる場所に強度の異なる X 線を複数回に分けて照射する⁷⁾。この場合、各々のデータ点は X 線の照射時刻が異なるため、フェーディングが影響する⁷⁻⁹⁾。フェーディングとは、輝尽性蛍光体プレートに X 線が照射されてから時間が経つにつれて、輝尽性発光量が徐々に失われていく現象である。林らは、フェーディングを補正できる実験方法を提案し、入出力特性を取得する実験では補正の有無で 30% 程度のずれが生じる可能性があることを報告しているが、彼らの方法は、数十分の実験時間が必要で解析手法も複雑であることが難点である⁷⁾。

竹上らはフェーディングの影響を受けずに入出力特性を取得する新しい方法として、マルチスリット法を提案した(以下、竹上らの装置)¹⁰⁾。この方法では、X 線管と輝尽性蛍光体プレートの間に、縦方向のスリットを設置し、その前方に長さの異なる横方向のスリットを有する遮蔽体(マルチスリット)を配置する。そして、X 線を照射しながらマルチスリットを移動させる。輝尽性蛍光体プレートには、横方向のスリットと縦方向のスリットが一致した時間に比例して X 線が照射されるため、マルチスリットのスリットの長さに応じた X 線量のデータ点を取得できる。この方法は、1 度の X 線照射で複数のデータ点を取得できるため、すべてのデータ点に対して同一のフェーディングが起ころが、X 線照射から輝尽性蛍光体プレートを読み取るまでの時間も短縮できるため、結果的にフェーディングの影響をほとんど受けずに入出力特性を取得できる。一方で、実験に必要な装置が大掛かりであることが改善点であった。

最近、紀本らは竹上らの装置を改良した一体型マルチスリット装置(以下、紀本らの装置)を製作し、速報論文で報告した¹¹⁾。紀本らの装置は、マルチスリットと縦方向のスリット、さらに輝尽性蛍光体プレートの挿入部が一体型となっており、スリットの移動速度を 2 段階に可変させることで小型化されている。しかし、紀本らの装置は、X 線を二次元的に広がる面検出器に照射し線束中心以外の X 線も利用するため、装置の配置方向や SID によっては、ヒール効果^{12, 13)}の影響を受けることが想定される。また、X 線を長時間照射

するため、管電圧を高く設定した実験条件では散乱 X 線および透過 X 線の影響を強く受ける問題点があることが報告されている¹¹⁾。

本論文の目的は、紀本らの装置を改良し、装置の適用範囲を実験的に明らかにすることである。具体的には、①マルチスリット装置で得られる入出力特性の精度、②ヒール効果の影響の補正、③高電圧実験に対する適用について検討した。

1. 方 法

1-1 マルチスリット装置

1-1-1 装置の概略

本論文で新たに提案するマルチスリット装置(以下、改良型マルチスリット装置)の概念図を Fig. 1 に示す。改良型マルチスリット装置の大きさは、縦 350 mm×横 300 mm×奥行き 240 mm、重量は 8 kg である。改良型マルチスリット装置の背面には、輝尽性蛍光体プレートの挿入部がある。その前方には、輝尽性蛍光体プレートの前面を覆う大きさの遮蔽体が設置されている。この遮蔽体は、縦 350 mm×横 300 mm×厚み 2 mm の鉛で構成されており、中央に幅 10 mm×長さ 190 mm の縦長のスリットがあいている(Fig. 1 の右上挿入図)。さらにその前方には、アクチュエータ(株式会社 IAI, RCP3-SA5R シリーズ, ストローク 200 mm)で制御されたマルチスリットが配置されている。アクチュエータは、前半部が 400 mm/s、後半部が 20 mm/s で可動するようにプログラムされている。マルチスリットは、縦 250 mm×横 140 mm×厚み 2 mm の鉛を、同サイズのアリウム板 2 枚で挟み込んだ構造であり、縦幅 0.8 cm で長さの異なる複数のスリット(No.1~No.9)があいている。前半の可動部に対応するスリットの長さは、0.25 cm(No.1), 0.5 cm(No.2), 1 cm(No.3), 2 cm(No.4), 4 cm(No.5)であり、後半の可動部に対応するスリットの長さは、0.5 cm(No.6), 1 cm(No.7), 2 cm(No.8), 4 cm(No.9)である。照射時間はスリットの長さを移動速度で除すことで求められ、前半部が 6.25 ms(No.1), 12.5 ms(No.2), 25 ms(No.3), 50 ms(No.4), 100 ms(No.5)、後半部が 0.25 s(No.6), 0.5 s(No.7), 1 s(No.8), 2 s(No.9)となり、相対 X 線量は 1 倍から 320 倍である(Fig. 1 の下側挿入図)。

1-1-2 マルチスリット装置の改良

本研究に用いた改良型マルチスリット装置は、紀本らの装置¹¹⁾のスリット部を部分的に改良している。Fig. 2 の上段の写真はマルチスリット部の比較写真であり、紀本らの装置が左側、改良型マルチスリット装置が右側である。改良点は画像中に(i)から(iv)で示

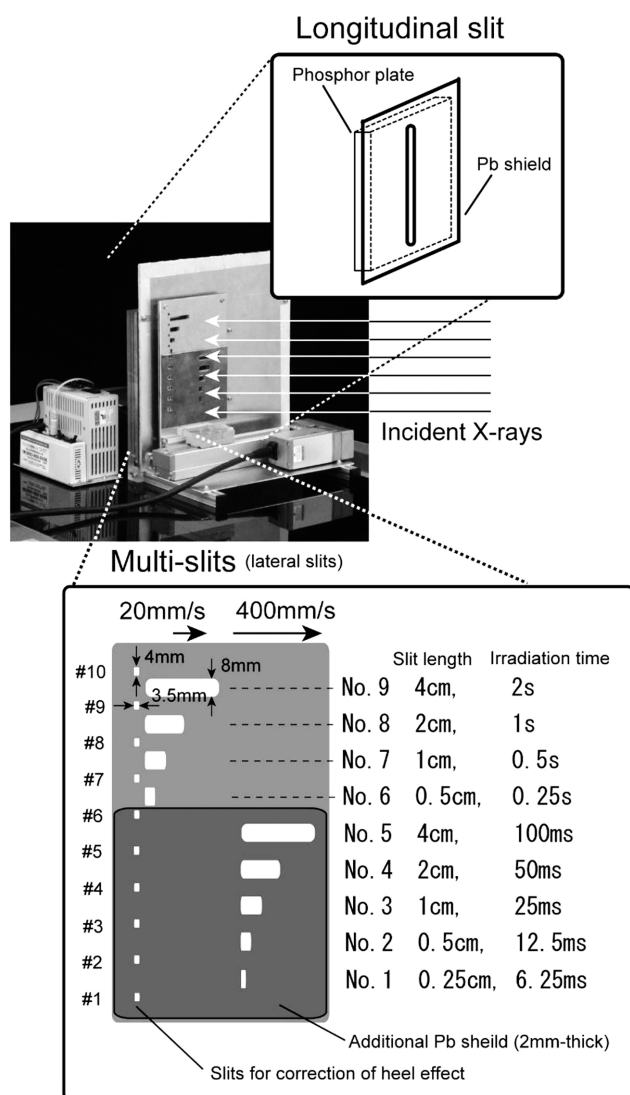


Fig. 1 Schematic drawing of the improved-type multi-slit equipment.

した部分である。(i)は縦方向に並ぶ10個のスリット (Fig. 1, #1~#10)である。マルチスリット装置では、輝尽性蛍光体プレートにNo.1~No.9のスリットに対応したデータが得られるが、中心のデータであるNo.5を基準とすると、No.1~4およびNo.6~9のデータはX線管の配置によってはヒール効果の影響を受ける。そこで、輝尽性蛍光体プレートの垂直軸方向のX線量の依存性を#1~#10のデータを用いて実測し、ヒール効果の補正を行う(補正手法は後述する)。(ii)は、新たに追加した厚み2mmの遮蔽用の鉛板である。透過X線の影響を強く受けることが懸念される低照射領域に厚み2mmの鉛を追加し、遮蔽能力を向上させた。Fig. 2の中段の写真は、マルチスリット装置の背面の比較写真である。(iv)に示すように、本論文で提案する装置は、照射野の範囲の遮蔽を追加してある。鉛にX線が入射し光電効果を起こすと、鉛の特性X線が発

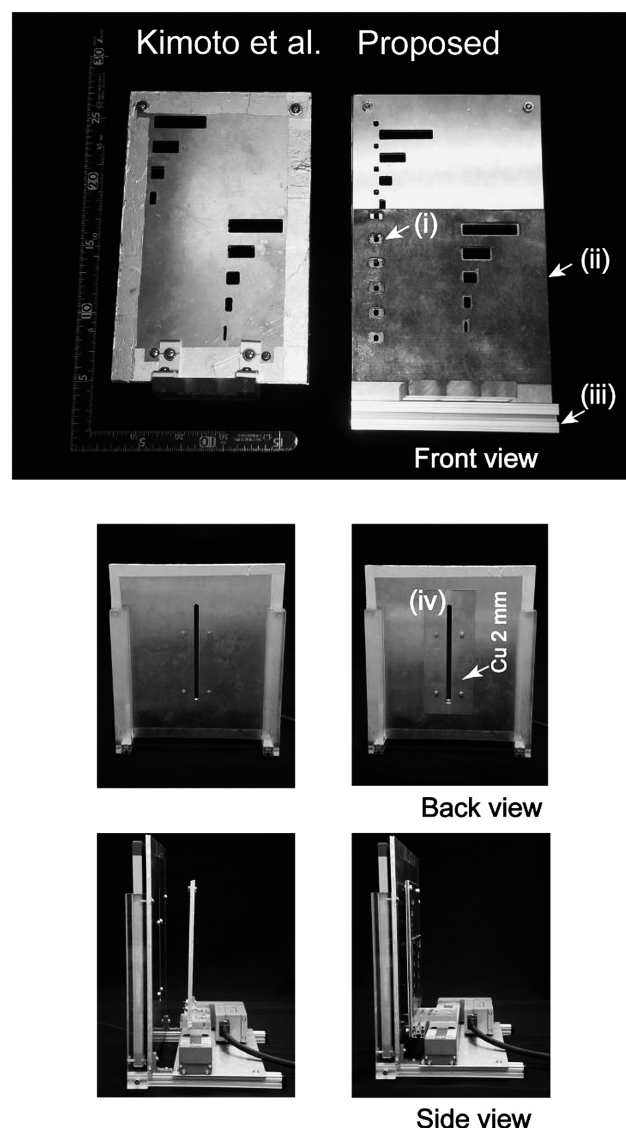


Fig. 2 Comparison of multi-slit performance between the equipment proposed by Kimoto et al. and the equipment used in the present study. Marks (i) to (iv) show improved points (see text).

生し、得られる画像のバックグラウンドとなることが想定されたため、最背面の遮蔽は厚み2mmの銅板とした。下段に示した写真は、マルチスリット装置を側面から見た比較写真である。紀本らの装置ではアクチュエータに配置されているマルチスリットと輝尽性蛍光体プレートとの間に6.5cmの間隔が空いているため、散乱X線が入り込む可能性が懸念された。そこで、改良型マルチスリット装置ではマルチスリットと輝尽性蛍光体プレート表面までの距離を2.5cmまで近づけた。(iii)に示した取り付け部の変更を行ったことで、このような配置の変更が可能となった。改良型マルチスリット装置では、(iii)に示すように2cm角のアルミフレームを用いてマルチスリットをアクチュエータに固定している。

1-1-3 ヒール効果の影響の補正手法

以下に、No.1～No.9 のデータを、#1～#10 のデータを用いてヒール効果の影響を補正する手法を示す。No. i ($i=1,2,\dots,9$) のデータはピクセル値 PV_i として得られ、X 線量を D_i とすると

$$D_i = \exp(a PV_i + b) = c \exp(a PV_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係があり、この関係は CR システムの入出力特性として一般的に知られている^{7, 10, 11)}。 a , b , c は定数である。測定された D_i はヒール効果の影響を受けるため、ヒール効果の影響を補正した D'_i (ヒール効果を補正したピクセル値を PV'_i) を次式で求める。

$$D'_i = D_i \times F_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_i は補正係数である。

Fig. 1 において #1 と #2 の平均的なピクセル値 $\overline{pv_{1,2}}$ は、No.1 の場所におけるヒール効果の影響を補正するためのデータになる。一般的に拡張して考え、No. i のデータ点の補正を行うための平均的なピクセル値 $\overline{pv_{i,i+1}}$ を、以下のように定義する。

$$\overline{pv_{i,i+1}} = \frac{pv_i + pv_{i+1}}{2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 pv_i および pv_{i+1} は、それぞれ # i および #($i+1$) に対するピクセル値である。

(3) 式で計算された $\overline{pv_{i,i+1}}$ を (1) 式に代入して得られる X 線量を d_i として、補正係数 F_i は以下の式で求められる。

$$F_i = \frac{d_5}{d_i} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この式は、No. i のデータを、照射野の中心位置で測定した No.5 のデータに補正することを意味する。(2) 式および (4) 式を用いると、次式が得られる。

$$\frac{D'_i}{D_i} = \frac{d_5}{d_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、(5) 式に (1) 式を代入し、 PV'_i について解くと、

$$PV'_i = PV_i + \{\overline{pv_{5,6}} - \overline{pv_{i,i+1}}\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。(6) 式は (1) 式に示したような線量変換を含まず、単純なピクセル値の加減算である。すなわち、マルチスリット装置を用いて測定した No. i のデータに対してヒール効果の影響を補正するためには、ヒール効果補正用のデータを解析して得たピクセル値の差 $\{\overline{pv_{5,6}} - \overline{pv_{i,i+1}}\}$ を No. i のデータを解析して得られたピクセル値 PV_i に加える必要がある。

1-2 実験

1-2-1 実験配置

本実験では、一般撮影用の X 線撮影装置 (東芝メディカルシステムズ社, MRAD-A50S) を使用し、X 線検出器には四切サイズの輝尽性蛍光体プレート (コニカミノルタ社, RP-4S) を用いた。輝尽性蛍光体プレートは、読取装置 (コニカミノルタ社, RIGIUS170) で画像化し、感度が固定されるモード (QR250) で読み取った。Fig. 3 に実験の配置図を示す。Fig. 3a はヒール効果の影響が生じないように X 線管の長軸と輝尽性蛍光体プレートの長軸が直交する向きに配置している。今回使用した天井走行タイプの X 線撮影装置では、寝台の上にマルチスリット装置を寝かせて配置することで、ヒール効果の影響が生じない向きのデータ点を取得できる。Fig. 3b は X 線管の長軸と輝尽性蛍光体プレートの長軸が平行で、X 線管の陽極側が輝尽性蛍光体プレートの上方、すなわち長時間照射側に一致するように配置した様子、Fig. 3c は陽極側が輝尽性蛍光体プレートの下方、すなわち短時間照射側に一致するように配置した様子である。Fig. 3b および Fig. 3c では、寝台の上に改良型マルチスリット装置を正立させて実験を行っている。以下、Fig. 3a の配置を Direction 0、Fig. 3b の配置を Direction +、Fig. 3c の配置を Direction - と呼ぶ。

1-2-2 タイムスケール法との比較

改良型マルチスリット装置が、設計どおりであることを確認するために、以下の実験を行った。

まず、改良型マルチスリット装置を用いて、管電圧 40 kV、管電流 50 mA、SID 2 m の条件で入出力特性を取得した。このときの X 線照射時間は 4.5 s であり、配置を Direction + とした。次に、同様の管電圧および実験配置で、タイムスケール法を用いて入出力特性を取得した。管電流は 10 mA、20 mA、50 mA、100 mA、160 mA、200 mA、250 mA、320 mA に設定し、各々の管電流につき、照射時間を 0.05 s、0.1 s、0.2 s、0.4 s、0.8 s と変化させた。これらの実験では、フェーディングの影響を最小限に抑えるために、X 線の照射から 30 s 以内に輝尽性蛍光体プレートを読み取った。最後に、改良型マルチスリット装置を用いて取得した実験データとタイムスケール法を用いて取得した実験データを同一のグラフ上にプロットし、両者のデータを比較した。横軸は管電流時間積 (mAs 値) とした。

1-2-3 管電圧依存性と追加した鉛遮蔽体の効果の検証

改良型マルチスリット装置での散乱 X 線および透過 X 線の影響を評価するために、管電圧を変化させて入出力特性を取得した。設定した管電圧は 40 kV、60

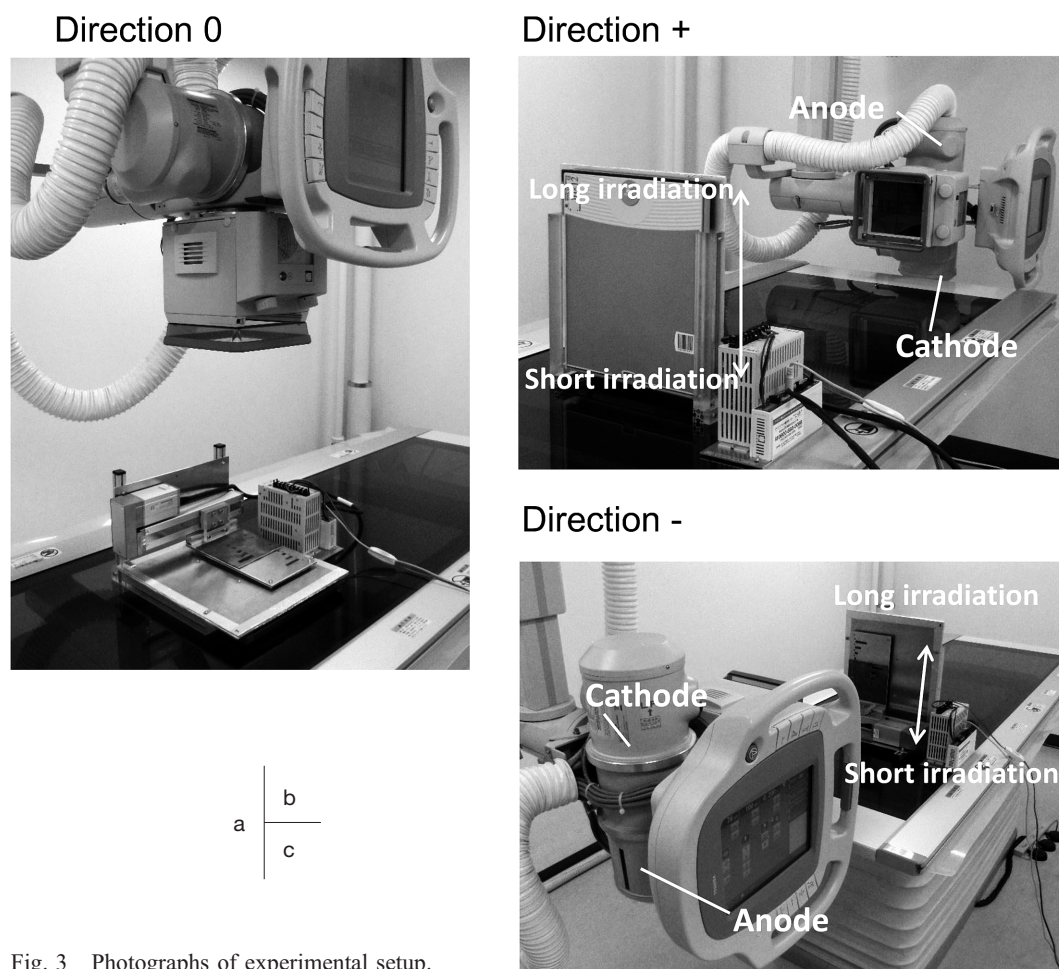


Fig. 3 Photographs of experimental setup.

kV, 80 kV, 100 kV, 120 kV, 140 kV である。さらに、International Electrotechnical Commission (IEC) 61267 で定義されている線質 RQA5¹⁴⁾ で測定を行った。本実験で使用した X 線撮影装置では、21 mm アルミニウムフィルタを追加した管電圧 72 kV の条件で RQA5 の線質が得られた。撮影条件は、管電流を 50 mA, SID を 200 cm, 撮影時間を 4.5 s, そして、配置を Direction + とした。各条件に対して 3 回の測定を行った。また、改良型マルチスリット装置の有用性を検証するために、紀本らの装置¹¹⁾ を用いた実験も行い、結果を比較した。

1-2-4 SID 依存性とヒール効果補正の検証

改良型マルチスリット装置でのヒール効果の影響を評価し、本手法を用いてヒール効果の影響を補正できることを実証するために、X 線撮影装置の配置方向を Direction 0, Direction +, Direction - と変化させて入出力特性を取得した。ヒール効果の影響は SID によって異なるため、各配置において、SID を 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm と変化させた。Direction 0 では撮影装置の可動範囲に制限があるため、SID を 50 cm,

100 cm, 150 cm として撮影した。撮影条件は、管電圧を 40 kV, 管電流を 50 mA, 撮影時間を 4 s とし、各条件に対して 3 回の測定を行った。

1-2-5 取得した画像と入出力特性の解析

読み取り装置で得られた画像情報は、digital imaging and communications in medicine (DICOM) 画像として personal computer (PC) に転送し、ImageJ^{15, 16)} を用いて画像を表示した。取得した画像における関心領域 [region of interest (ROI)] を決定するために、40 kV, 50 mA, SID 2 m のデータ点のプロファイルカーブを作成した。まず、得られたデータ点の中心を原点とし、水平方向 (X 軸と定義する) に沿ったピクセル値のプロファイルを取得した。次に、1-2-2 節で測定した入出力特性を用いてピクセル値を相対 X 線量に変換し、さらに、原点位置における相対 X 線量が 1 となるように全体を規格化した。そして、相対 X 線量が 1 となった領域を ROI と定義した。同様の解析を垂直軸方向にも行い、適切な ROI を設定した。

上述した方法で決定した ROI をすべてのデータ点に当てはめ、DICOM 画像を解析した。そして、ROI

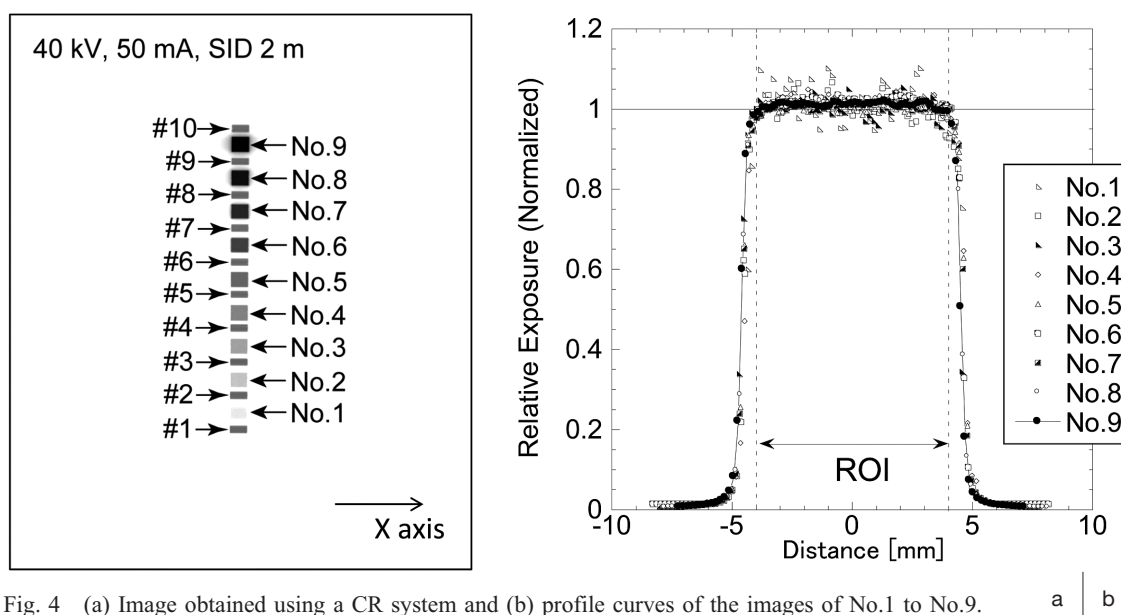


Fig. 4 (a) Image obtained using a CR system and (b) profile curves of the images of No.1 to No.9.

で得られたピクセル値(PV)の平均値を縦軸に、相対 X 線量(RE)を横軸にとり、入出力特性のグラフを作成した。最後に、これらの入出力特性を定量的に評価するために、最小二乗法を用いて次式をフィッティングした。

$$PV = a \times \ln(RE) + b \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 a と b は係数(フィッティングパラメータ)である。

2. 結果

2-1 取得画像

改良型マルチスリット装置を用いて得られた画像の例を Fig. 4a に示す。No.1 から No.9 までは正方形の画像が得られており、#1 から #10 までは長方形の画像が得られている。Fig. 4a に示した画像の横方向を X 軸としたときの、No.1 から No.9 までの画像の X 軸方向のプロファイルを Fig. 4b に示す。横軸の中心($X=0$ mm)は、画像中心と一致させた。縦軸はピクセル値を後に示す入出力特性を用いて X 線量に変換し、さらに $X=0$ mm の値で規格化した相対 X 線量である。No.1 から No.9 の画像のプロファイルは一致していた。No.1 から No.9 の画像の横幅は、縦方向のスリット長である 10 mm (Fig. 1 参照) となるが画像辺縁部では線像強度分布の影響を受けるため、画像の両側に 1 mm の余裕を設け、その内側である 8 mm の範囲を ROI とした(矢印の範囲: -4 mm $\sim$ $+4$ mm)。Fig. 4b より、ROI の領域では、プロファイル曲線が 1 を示しており平坦であることがわかる。

2-2 タイムスケール法との比較

改良型マルチスリット装置およびタイムスケール法を用いて取得した CR システムの入出力特性を Fig. 5 に示す。Fig. 5a の縦軸はピクセル値であり、横軸は管電流時間積(mAs)を対数表示している。改良型マルチスリット装置で得られたデータに対する管電流時間積は、実験条件である管電流 50 mA に各々のスリットに対する照射時間を乗じて算出している。管電圧 40 kV, SID 2 m の改良型マルチスリット装置で取得された入出力特性のフィッティング結果は、

$$PV = 448.9 \times \ln(mAs) + 811 \quad \dots\dots\dots (8)$$

であった。Fig. 5b は、各データ点の管電流時間積を、(8)式のフィッティング関数によって求めた管電流時間積の計算値[mAs(fit)]で除した値を示した図である。●で示した改良型マルチスリット装置のすべてのデータは、 $\pm 2\%$ の範囲(0.98 $\sim$ 1.02)に収まっており、○で示したタイムスケール法の約 90% データは、 $\pm 5\%$ の範囲(0.95 $\sim$ 1.05)に収まっていた。

2-3 管電圧依存性と追加した鉛遮蔽体の効果

改良型マルチスリット装置を用いて取得される入出力特性の管電圧依存性の結果を Fig. 6 に示す。横軸は相対 X 線量(No.1 のデータを 1 とした)であり、縦軸はピクセル値である。また、(7)式をフィッティングして得られた入出力特性の傾き a の管電圧に対する依存性を Fig. 7 に示す。Fig. 7 の縦軸は管電圧 40 kV の実験で得られた傾き $a(40$ kV) で規格化した。管電圧が 80 kV までは入出力特性の傾きに変化がみられな

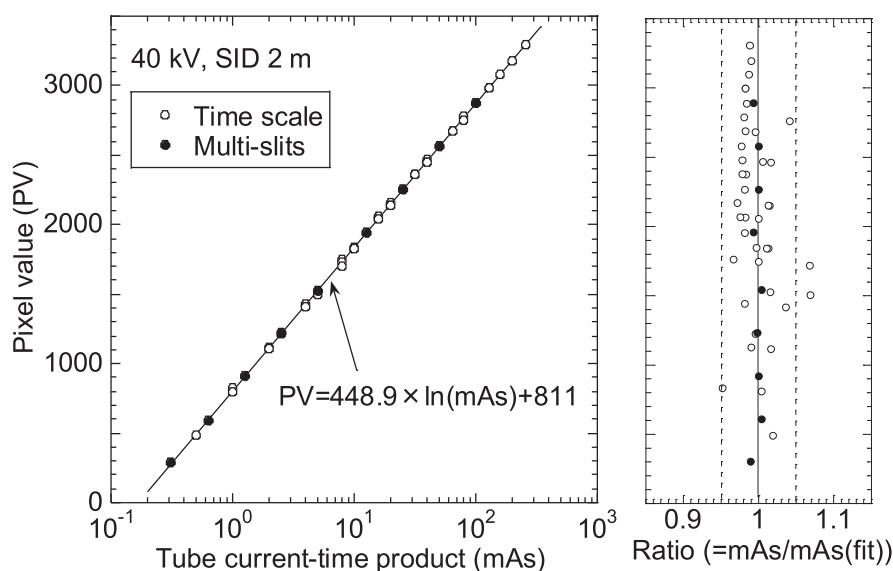


Fig. 5 Input-output characteristics of the CR system measured using the improved-type multi-slit apparatus and the time-scale method. Figure (a) represents the relationship between the experimental data and fitting line. Figure (b) shows departures of the experimental data from the fitting line.

a | b

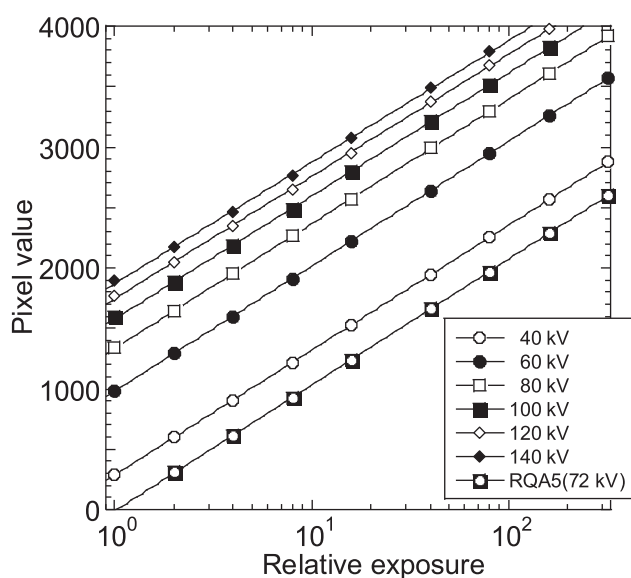


Fig. 6 Tube voltage dependence of the input-output characteristics of the CR system.

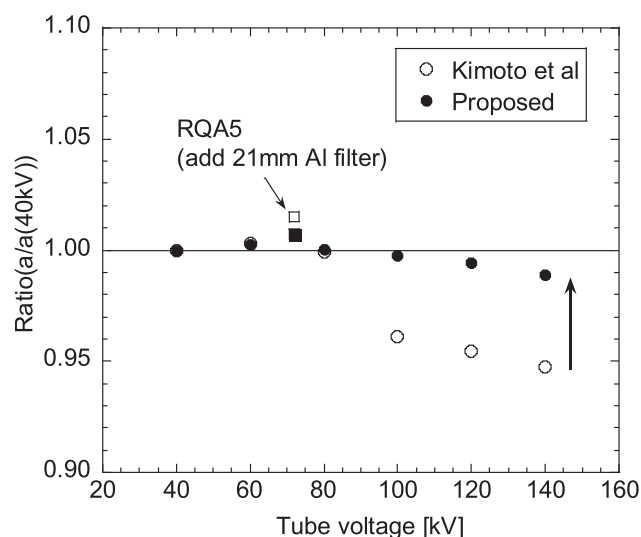


Fig. 7 Dependence of gradient “a” on the fitting lines of the tube voltages.

かった。一方、管電圧が 100 kV 以上のデータでは系統的に入出力特性の傾きが小さくなったが、変化の割合は最大で 1% 程度であった。紀本らの装置を用いて取得した結果では、100 kV から系統的に変化が大きくなり、最大で 5% 程度のずれが生じた。

2-4 SID 依存性とヒール効果の影響の補正

Fig. 8 に #1 から #10 までのデータを解析して得られたピクセル値 pv_i の各スリットに対する依存性を示

す。SID の異なるデータ (ピクセル値が大きく異なるデータ) を同時に表示するために、各々のピクセル値 pv_i から、#5 のピクセル値 pv_5 を差し引いた相対値でプロットしてある。これらの値を (3) 式に代入し、得られた値を (6) 式に再び代入することで、補正係数 $\{pv_{5,6} - pv_{i,i+1}\}$ を求めることができる。Fig. 8a に示すようにヒール効果の影響が生じない配置である Direction 0 では、 pv_i の相対値は pv_5 に比べて 50 以下の変動であり、補正係数も小さくなることがわかる。

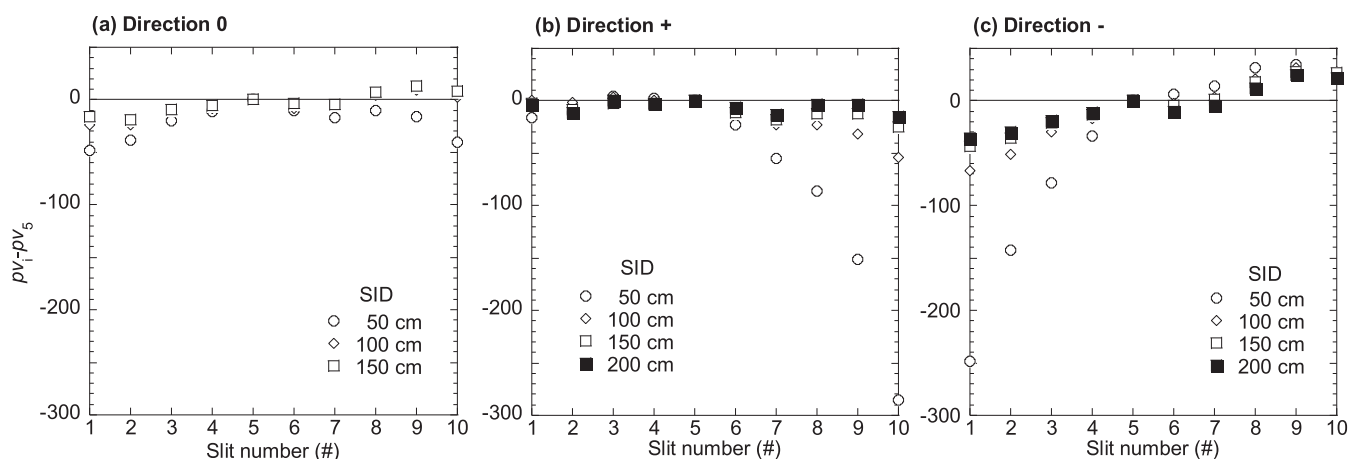


Fig. 8 Dependences of pixel values pv_i for different conditions of (a) direction 0, (b) direction + and (c) direction -. a | b | c

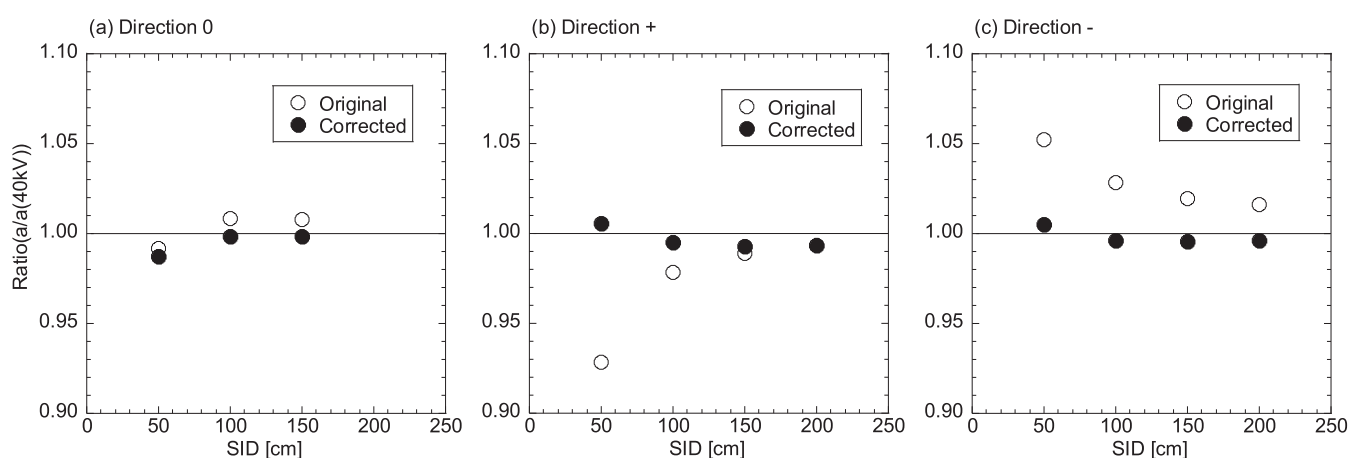


Fig. 9 Dependence of gradient "a" of the fitting lines for the three different conditions. The open and closed circles represent the original data and the data corrected for the heel effect, respectively. a | b | c

一方, Fig. 8b および Fig. 8c に示すように, ヒール効果の影響が生じる向きである Direction + および Direction - の配置では, SID が 50 cm のデータでは pv_i の相対値が -100 を超えるような大きな値をとり, 算出される補正係数も大きくなる場合があるが, SID が 150 cm を超えるデータではほとんど補正が必要ないことがわかる.

Fig. 9 に, SID 依存性の実験において(7)式をフィッティングして得られた入出力特性の傾き a を(8)式で得られた値 $a(40\text{ kV})$ で除した値を示す. Fig. 9a, b および c は, それぞれ Direction 0, Direction + および Direction - の結果である. 白丸(○)はヒール効果の補正を行わなかったデータであり, 黒丸(●)は(6)式の補正を行ったデータである. Direction + および Direction - の結果において, 補正の効果が顕著に表れている.

3. 考 察

3-1 本装置の適用可能性

本論文で示したように, 改良型マルチスリット装置を用いれば CR システムの入出力特性を簡便に取得することができる. Fig. 5 に示したように, タイムスケール法と改良型マルチスリット装置で同一の入出力特性が得られている事実からは, マルチスリット装置のスリットの製作が正しく行われ, 産業用ロボットの移動速度が設計どおりであることがわかる. われわれの装置は, Fig. 6 に示したように, 診断用 X 線撮影装置で発生することができる範囲の管電圧(40~140 kV)や, RQA5 のような付加フィルタが加わった条件での線質に対しても十分に適用可能である. また, ヒール効果の影響の補正手法を新たに考案したことにより, Fig. 9 に示したように, X 線管の方向によらず, $a(40\text{ kV})$ とほぼ同じ傾きの入出力特性を取得できた. 入出力特性を 1 回の X 線照射によって取得する手法とし

てブートストラップ法^{17~19)}も古くから用いられているが、この手法ではヒール効果の影響を除去することが困難であった。マルチスリット装置では、本論文で行った改良によって、このような問題点を克服することができた。

タイムスケール法で入出力特性を取得した場合は、タイマの精度や管電流の再現性が誤差要因になると考えられるが、これらの効果が合算されて Fig. 5 の変動の範囲である 5% 程度となることが予想される。この結果は、インバタ式の X 線撮影装置の管電流の再現性が 5% 程度であるという浅野らの報告と矛盾しない⁶⁾。浅野らの報告は、全国調査に基づいた実測値であるため、5% という精度を普遍的なタイムスケール法の精度と考えて以下の議論を行う。

3-2 装置の改良とヒール効果の補正

本論文で公表した改良型マルチスリット装置は、紀本らの装置のマルチスリット部を改良し、高い管電圧に対しての適用とヒール効果の影響の補正が行えるように工夫されている。

まず、Fig. 2 の(ii)～(iv)で示した改良点の効果について検証する。これらの改良の効果は、以下に考察するように明らかである。Fig. 7 に示したように、紀本らの装置では 100 kV 以上の管電圧において入出力特性の傾きに 5% 程度の系統的なずれが生じるが、改良型マルチスリット装置では最大でも -1% のずれである。入出力特性を取得した際に、この -1% の入出力特性の傾きのずれが、X 線量としてどの程度ずれに相当するのかを以下のように試算した。Fig. 5 に示した入出力特性の傾きが -1% ずれるということは、(8)式で表される入出力特性が、次式のように変換されることを意味している。すなわち、

$$PV_{\text{assume}} = 448.9 \times (1 - 0.01) \times \ln(mAs_{\text{assume}}) + 811$$

..... (9)

となる。ここで、 PV_{assume} および mAs_{assume} は今回の考察のために仮想的に設定するピクセル値および管電流時間積である。Fig. 5 に示す改良型マルチスリット装置のダイナミックレンジの範囲において、入出力特性の傾きに誤差が含まれていた際に最もずれるデータ点は、管電流時間積が最も大きなデータであり、今回の実測データでは $\{mAs, PV\} = \{100, 2880\}$ に対応する。ここで、(9)式に $PV_{\text{assume}} = 2880$ を代入して mAs_{assume} を求めると 105 となり、想定値の 100 からのずれは 5% となる。このずれはタイムスケール法の精度である 5% と同程度である。すなわち、改良型マルチス

リット装置で取得した入出力特性の傾きが、40 kV のデータ (Fig. 5 に示したとおり、タイムスケール法等しい) と比べて $\pm 1\%$ 以内のずれであれば、入出力特性の精度は 5% 程度となることを意味している。Fig. 7 において RQA5 の入出力特性の傾き a が +1% のずれなので、改良型マルチスリット装置を用いて RQA5 に対する入出力特性を取得できると考える。

次に、Fig. 2 の(i)で示したヒール効果の影響の補正用のスリットについて検証する。Fig. 8b および c に示したように、ヒール効果の影響の補正係数は、Direction +, Direction - については、SID 50 cm では非常に大きな値になるが、SID が 100 cm を超えると小さな値となる。しかし、Fig. 9b および c に示したように、ヒール効果の補正を行わなかった場合は SID を 100 cm 以上離れた場合でも入出力特性の傾き a が $\pm 1\%$ 以上ずれることがあり、逆に、ヒール効果の影響の補正を行った場合はどの SID においても入出力特性の傾き a は $\pm 1\%$ 以内のずれに収まっていることがわかる。また、Direction + のデータと Direction - のデータは、幾何学的に X 線管の向きが逆になるだけなので、Fig. 8 においては横軸 (slit number) に対して対称的な振る舞いを示し、Fig. 9 においても縦軸に対して対称的な振る舞いを示すことが予想される。しかし、実測されたデータでは完全には対称になっていない。この理由は、X 線撮影装置のアライメントのずれや輝尽性蛍光体プレート位置による効率の違いなどの複合的な要因が考えられる。これらの要因とヒール効果の影響を分離して議論することは困難であるため、本論文ではこれらの影響に起因するすべてのずれの要因を、ヒール効果の影響に含めている。Direction 0 ではヒール効果の影響の補正が小さくなり、データだけから判断するとこの撮影条件がよいと考えられる。しかし、SID が 150 cm よりも大きい条件での実験は臨床用の X 線撮影装置では実現不可能であることや、改良型マルチスリット装置を床近傍に配置した際には床からの散乱 X 線が入射しないように注意しなければならず、さらに長時間の使用によって改良型マルチスリット装置のスリット部が自重によって変形してしまうという問題点がある。このようなさまざまな問題点があるため、改良型マルチスリット装置は Direction 0 の配置で使用することはあまり望ましくないと考える。

4. 結 論

輝尽性蛍光体プレートの入出力特性を取得するために開発された紀本らの装置を改良し、高い管電圧に対しての適応や、ヒール効果の影響の補正を行えるよう

に工夫した。改良型マルチスリット装置のマルチスリット部の設計や産業用ロボットの設定は、紀本らの装置の設定を踏襲した。高い管電圧に対して装置を適用するために、マルチスリットに遮蔽用の鉛を追加した。また、ヒール効果の影響を補正するために、追加で10個のスリットを設け、解析手法も新たに提案した。天井走行タイプの診断用X線撮影装置を用いて

実証実験を行い、精度5%以内で入出力特性を取得できることを示した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、徳島大学医学部保健学科4年生の中川滉平氏および沖野啓樹氏に協力していただきました。お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤田広志, 大西義隆, 坂本 清, 他. デジタルラジオグラフィの画像評価 1. 特性曲線. 日放技学誌 1990; 46(9): 1579-1592.
- 2) 坂本 清. 第18回秋季学術大会シンポジウムーデジタルラジオグラフィの画像評価ー 2. 入出力特性. 日放技学誌 1991; 47(6): 835-840.
- 3) 上田克彦, 杜下淳次, 藤田津義, 他. コンピューテッドラジオグラフィの特性曲線の測定 (I). 医用画像情報会誌 1988; 5(2): 52-59.
- 4) 岸本健治. 入出力特性. 日放技学誌 2009; 65(7): 985-991.
- 5) 杜下淳次, 藤田広志, 坂本 清, 他. コンピューテッドラジオグラフィの特性曲線の測定 (II). 医用画像情報会誌 1989; 6(1): 25-33.
- 6) 浅野 宏, 三宅博之, 山本桂一, 他. インバータ式X線装置のX線出力比較. 日放技学誌 2000; 56(5): 715-724.
- 7) 林 裕晃, 神谷尚武, 谷内 翔, 他. 輝尽性蛍光体プレートを用いた多数点取得実験におけるフェーディング補正手法の提案. 医用画像情報会誌 2012; 29(1): 1-6.
- 8) Saze T, Etoh M, Mori C, et al. Automatic activity measurement and data processing system using imaging analyzer. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2000; 443(2-3): 578-585.
- 9) Thoms M. The quantum efficiency of radiographic imaging with image plates. Nucl Instrum Methods Phys Res A 1996; 378(3): 598-611.
- 10) 竹上和希, 林 裕晃, 紀本夏実, 他. 動的マルチスリットを用いたコンピューテッドラジオグラフィシステムの特性曲線の取得. 医用画像情報会誌 2013; 30(3): 53-56.
- 11) 紀本夏実, 林 裕晃, 前畑伊採, 他. 輝尽性蛍光体プレートに対する入出力特性の測定のための一体型マルチスリット装置の製作. 日放技学誌 2013; 69(10): 1165-1171.
- 12) Fritz SL, Livingston WH. A comparison of computed and measured heel effect for various target angles. Med Phys 1982; 9(2): 216-219.
- 13) 林 裕晃, 谷内 翔, 神谷尚武, 他. 輝尽性蛍光体プレートを用いたピンホールカメラの開発と散乱X線分布および可視光画像の撮影. 日放技学誌 2012; 68(3): 307-311.
- 14) IEC 61267. Medical diagnostic X-ray equipment - Radiation conditions for use in the determination of characteristics. International Electrotechnical Commission, 1994.
- 15) Rasband WS. ImageJ. US National Institutes of Health. Bethesda, Maryland, USA, 1997-2009.
- 16) Abramoff MD, Magelhaes PJ, Ram SJ. Image Processing with ImageJ. Biophotonics International 2004; 11(7): 36-42.
- 17) 吉田 彰, 小林利美, 大川義弘, 他. プートストラップセンシトメトリー用ステップウェッジの開発. 岡山大学紀要 1990; 1: 19-27.
- 18) 吉田 彰. Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による増感紙/フィルムシステムのX線センシトメトリー. 日放技学誌 1988; 44(5): 535-541.
- 19) 小倉明夫, 仁井田秀治, 小川憲一, 他. Bootstrap 法によるセンシトメトリーの測定精度と誤差要因について. 日放技学誌 1991; 47(6): 811-817.

問合せ先

〒770-8503 徳島市蔵本町3丁目18番地の15
徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部 林 裕晃