

原 著

Digital Radiography システムで発生した黒点の放射能の推定 —輝尽性蛍光体板表面に直接付着した 低濃度放射性同位元素起源の黒点の解析—

林 裕晃¹ 西原貞光¹ 高志 智² 花光宏樹³ 森美智子³ 三好弘一⁴ 小沼洋治⁵

論文受付
2012年2月29日

論文受理
2012年9月7日

Code No. 890

¹ 徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部

² 徳島大学病院放射線部

³ 徳島大学医学部保健学科

⁴ 徳島大学アイソトープ総合センター

⁵ 鹿島労災病院放射線科

緒 言

2011年3月に起こった東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性同位元素 (radioisotopes: RI) が環境中に放出された。その結果、診療の現場で用いられている輝尽性蛍光体板 (imaging plate: IP) に、RI を起因とする黒点が生じた。この黒点は、診療行為の行われない間 (夜間など) に RI から放出

された放射線が IP に輝尽性発光を生じさせることで発生する。このような IP を診療に用いると黒点と医療画像が多重に写り込み、診療行為の妨げになるので、一刻も早い除染や発生メカニズムの解明が必要である。

日本放射線技術学会では、「computed radiography (CR) を用いた環境モニタリング調査研究班」¹⁾ が発足し、IP を用いた RI の飛散状況を調査する試みが行わ

Estimation of Activities Caused by Black Spots for Digital Radiography System: Analysis of Black Spots by the Low Concentrate Radioisotopes Adhered Directly to the Surface of the Phosphor Plate

Hiroaki Hayashi,^{1*} Sadamitsu Nishihara,¹ Satoru Takashi,² Hiroki Hanamitsu,³ Michiko Mori,³ Hirokazu Miyoshi,⁴ and Yoji Onuma⁵

¹Institute of Health Bioscience, The University of Tokushima Graduate School

²Department of Radiology, Tokushima University Hospital

³Faculty of Medicine, The University of Tokushima

⁴Radioisotope Research Center, The University of Tokushima

⁵Department of Radiology, Kashima Rosai Hospital

Received February 29, 2012; Revision accepted September 7, 2012

Code No. 890

Summary

Because of an accident of the nuclear power plants in the Fukushima, many radioisotopes (RI) have been diffused to the environment. As a result, black spots were appearing on the medical images which were taken by the phosphor plate. The aim of this study is to evaluate the activity (Bq) of radioactive contaminated IP based on the experiment using RI. The radioactive material (¹³⁴Cs and/or ¹³⁷Cs) in the form of liquid was dropped on filter paper (25 mm²), and radioactive sources having 40–240 Bq activities were made. These sources were closely attached to the IP with irradiation times of 2–22 h. Then, we obtained the relationship between pixel values and products of activities and irradiation times. Using these relationships, we evaluated the activity in the contaminated IP. The evaluated value of approximately 7 Bq was in good agreement with a value which was inherited in a chemical wiper used for the decontamination of the IP. Based on the results, we summarized that almost all black spots were created by the RI adhered directly to the IP.

Key words: imaging plate, black spots, radioisotopes

*Proceeding author

れている。われわれは研究班の活動に参加し、RIの除染方法の提案²⁾を行った。そして、鹿島労災病院(茨城県)で黒点の発生が認められたIPを分析し、このIPに数百個の黒点が生じていることを報告³⁾した。さらに、このIPの表面部に付着していたRIを除染し、除染に用いた化学雑巾中のRIの分析から10 Bq程度の¹³⁴Csおよび¹³⁷Csが黒点発生の一因となっていることを報告した⁴⁾。しかし、この除染報告では直接付着していないRI(=除染した化学雑巾に含まれないRI)が黒点に寄与する割合が不明なので、分析された¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs⁴⁾と発生した黒点³⁾との因果関係は明らかになっていない。そこでわれわれは、定量された非密封RIを用いてRIの露光量(放射能時間積)とピクセル値の関係を明らかにして、黒点が現れた画像を解析することで、画像上に現れた黒点の放射能を推定することを試みた。

本研究の目的は、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csを用いて放射能時間積とピクセル値の関係を明らかにし、実験の観点から汚染されたIPの放射能(Bq)を見積ることである。

1. 実験および使用機器

1-1 相対的な輝尽性発光量とピクセル値との関係

Fuji computed radiography (FCR)で使用しているIPにおける輝尽性発光量(線量)とピクセル値の関係⁵⁾を明らかにするために、X線撮影装置(株式会社東芝、MRAD-A50S)を用いて、実験を行った。使用したIP(富士フィルムメディカル株式会社、ST-VI)は、四つ切りサイズである。IPの画像処理モードは、S値:200、L値:4.0に固定した。本論文で示すすべてのデータはこのFix処理を行っており、この処理は環境モニタリング調査研究班¹⁾が示した処理と同じものである。

1-2 RIの露光実験

1-2-1 線源の準備とIPの露光実験

定量された液体状の¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs線源(JRIA社、化学形CsCl)を日本アイソトープ協会から購入し、IPを露光するための線源を以下の手順で作成した。

まず、液体線源の濃度をそれぞれ10 Bq/μlとなるように調整した。次に、マイクロピペットを用いて、4 μlの液体線源を5×5 mm(25 mm²)のろ紙(セルロース系、5.1 mg/cm³)に滴下し、水分を蒸発させて、RIをろ紙上に保持した。この操作を多数回繰り返して、正味4~24 μlの液体線源を滴下することで、実験開始時における放射能を40、80、120、240 Bqとした。それぞれの放射能の線源を4セット作成し、台紙に50 mm間隔で配置した。線源はIPの汚染を防ぐために厚さ0.03 mmのビニール袋に封入した。

IPの露光は、四つ切りカセット(富士フィルムメディカル株式会社、IP cassette typeC)を用いた。台紙に張り付けた線源をカセットに挿入し、線源とIPを密着させた状態で、2、5、7、9、21.5、22 hの露光を行った。最後に、暗室中で台紙(線源)を取り出し、画像処理をした。読み取り装置は、FCR Speedia CS(富士フィルムメディカル株式会社)である。

1-2-2 ピクセル値の算出

FCRで読み取った画像は、digital imaging and communication in medicine (DICOM)画像として出力した。このDICOM画像は画像処理ソフトウェア(National Institutes of Health: NIH, ImageJ, ver.1.45b)⁶⁾で読み取り、関心領域(region of interest: ROI)の部位を切り出してテキスト出力し、このデータをMathematica(Wolfram Research, Inc., ver.8.0)で解析した。ROIは25 mm²の領域を十分に囲うように9×9 mm(81 mm²)の範囲を設定した。

作成した25 mm²の線源は、水分が蒸発する際に不均一なRIの分布になっているので、輝尽性発光量と対数の関係にあるピクセル値の単純平均は真の平均値ではない。そこでピクセル値を1-1で求めた関係式を用いて輝尽性発光量に変換し、ガウス関数をフィッティングすることで、黒点内のピクセル値の平均値を算出した。

そして、同じ放射能を付着させた4カ所の位置のピクセル値分布に対して上記の解析を行い、四つの平均値を得た。さらに、得られた平均値を算術平均して、最終的な平均値(ピクセル値)を求めた。不確かさは、これらのデータの標準偏差を採用した。

1-2-3 ピクセルあたりの放射能時間積とデジタル値の関係

FCRで用いられているIPの1ピクセルは0.1×0.1 mm(0.01 mm²)の大きさであり、RIは作成した線源の大きさ(25 mm²)に広がっている。そこで、作成した線源の放射能をピクセル数(=2500)で除すことで、1ピクセルあたりの放射能を求めた。

横軸に1ピクセルあたりの放射能(Bq)と露光時間(s)の積をとり、縦軸に1-2-2で求めたピクセル値(平均値)をプロットすることで、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csに対する両者の関係式を求めた。

1-3 黒点画像の解析

1-3-1 解析に用いた画像データと黒点を発生させていた放射能

黒点が現れた画像データは、鹿島労災病院(茨城県)で取得した⁴⁾。FCRは立位型のシステム(富士フィルムメディカル株式会社、FCR5501plus)であり、17 inch

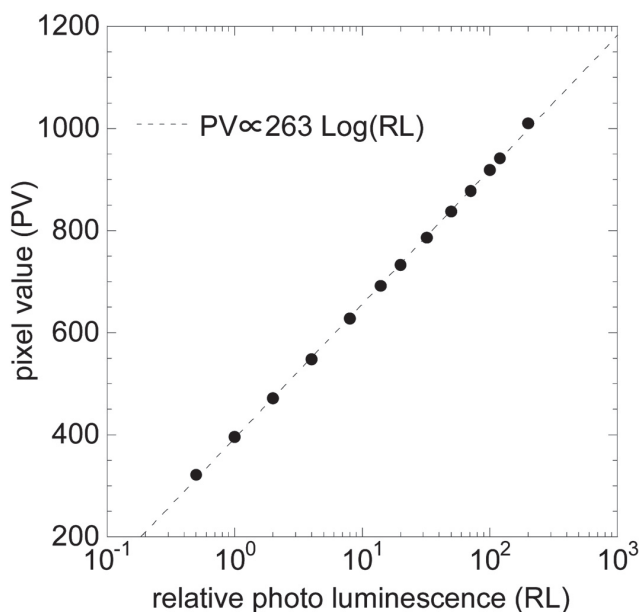


Fig. 1 Relationship between relative photo luminescence and pixel value of the FCR system.

(=432 mm)×17 inch の IP(富士フイルムメディカル株式会社, ST-55-H1M)を内蔵するタイプである。2011年4月21日の夕方から22日の朝方までの約12時間の間, RIによる露光で黒点が発生していた。このIPの表面に付着していたRIは,¹³⁴Csおよび¹³⁷Csに関しては分析されており, それぞれ4.3 Bqおよび5.2 Bqであった⁴⁾。¹³⁴Csと¹³⁷Csの割合は0.45:0.55である。そこで, 1-2-3で求めた関係式を利用して,¹³⁴Csおよび¹³⁷Csが上記の割合で混合された場合のピクセル値に対する放射能時間積の関係式を求めた。今回対象としているRIは長半減期核種なので, 放射能時間積は崩壊数(=ベクレルを時間に対して積分した値)に等しい。

1-3-2 ヒストグラムの解析と放射能の推定

黒点が現れていた画像を解析し, ピクセル値の頻度分布(ヒストグラム)を作成した。次に, 1-3-1で求めた関係式を用いて, 各ピクセル値に対する放射能時間積を求めた。頻度分布と放射能時間積の積を計算し, さらにピクセル値全域にわたって積分を行うことで, この画像全体の放射能時間積を求めた。最後に, この放射能時間積を12時間(=43200(s))で除すことでRIの総量を推定した。

2. 結果

2-1 相対的な輝尽性発光量とピクセル値との関係

Fig. 1は, 相対的な輝尽性発光量に対するピクセル値の関係を示すグラフである。今回用いた読み取り条件では, 下記の関係式にあった。

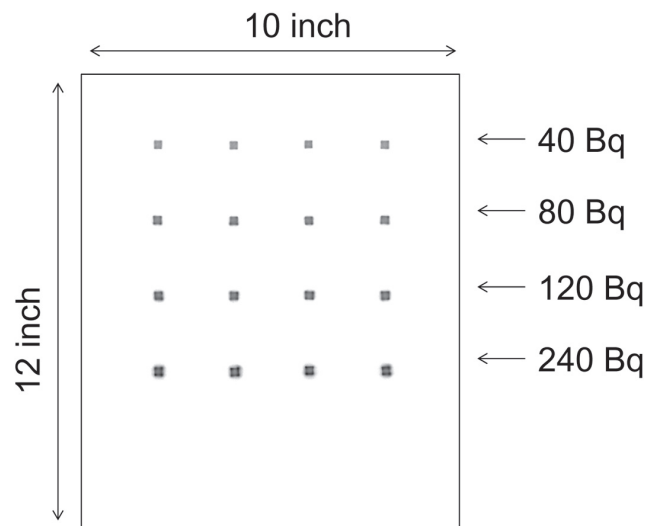


Fig. 2 Image of experimentally produced RI sources. This image was obtained from 2 h irradiation using ¹³⁴Cs.

$$PV=393+263 \log(RL) \dots\dots\dots(1)$$

ここで, *PV*はピクセル値(pixel value), *RL*は相対的な輝尽性発光量(relative photo luminescence)である。

2-2 露光結果とピクセル値の算術平均値の算出

Fig. 2は, 露光実験の結果であり,¹³⁴Csの2時間露光時のデータを例示した。同一の放射能をもったデータが横に四つ並んでおり, 縦方向には異なる放射能のデータが上段から40, 80, 120, 240 Bqの順に並んでいる。これらのデータの一つにROIを設定し, ヒストグラムを作成したものをFig. 3に示す。横軸はピクセル値である。縦軸は頻度と相対的な輝尽性発光量[(1)式を*RL*について解いて計算した]の積であり, あるピクセル値をとった放射線エネルギーの総量を意味する。波線はガウス関数を用いてフィッティングを行った結果で, この関数の中心値(ピーク値)から, 黒点内のピクセル値の算術平均値を求めた。

2-3 放射能時間積とピクセル値の関係

Fig. 4は, ピクセルあたりの放射能時間積とピクセル値の関係である。関係式は下記に示すように, 放射能時間積の対数がピクセル値に比例していた。

$$^{134}\text{Cs}: PV_1=-244+225 \log(X_1) \dots\dots\dots(2)$$

$$^{137}\text{Cs}: PV_2=-181+225 \log(X_2) \dots\dots\dots(3)$$

ここで, *X*は単位ピクセルあたりの放射能(Bq)と露光時間(s)の積であり, 添え字は*i=1*が¹³⁴Cs, *i=2*が¹³⁷Csを表す。対数の底は10である。これら二つのデータ

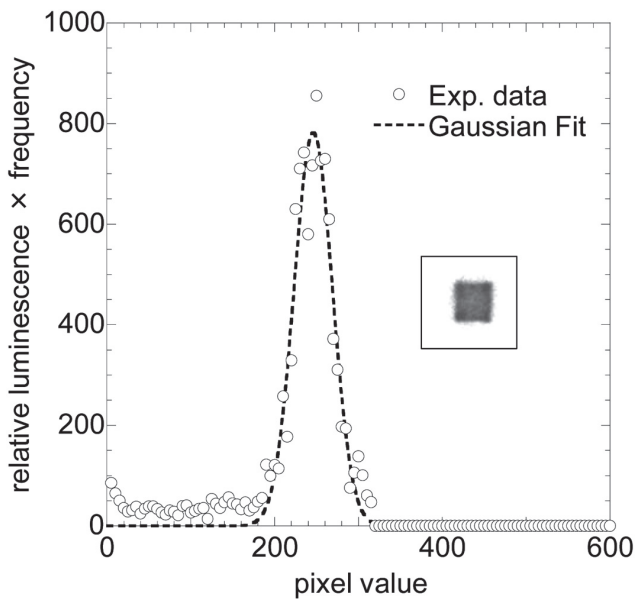


Fig. 3 Histogram of pixel value. The inset shows analyzed image. The mean pixel value is derived from Gaussian fitting to a histogram in which Y axis is represented by the product of relative luminescence and frequency.

は、放射線の放出率やエネルギーが違うが、露光条件(環境)は同じである。(1)式および(2)式の X の適用範囲は、 $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^7$ の範囲である。

2-4 黒点が現れていた IP におけるピクセル値に対する放射能時間積の関係式

実際の IP では、 ^{134}Cs および ^{137}Cs が寄与して、黒点を生じさせており、その比率は、0.45 : 0.55 の割合である。そこで、全体の放射能を A(Bq)、時間を T(s) とし、(2)式および(3)式を用いると、それぞれの RI がピクセル値に寄与する割合は以下ようになる。

$$^{134}\text{Cs}: PV_1 = -244 + 225 \log(0.45AT) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$^{137}\text{Cs}: PV_2 = -181 + 225 \log(0.55AT) \quad \dots\dots\dots(5)$$

(4), (5)式を用いれば、ある A(Bq) が T(s) 付着した時のピクセル値が得られる。現実には、それぞれの RI が寄与を行い、それぞれのピクセル値の和が画像情報として得られる。すなわち、この計算で得られたピクセル値の和を計算する必要がある。

(4), (5)式から、線量(Dose \propto 輝尽性発光量)とピクセル値の比例関係⁵⁾は $PV \propto 225 \log(Dose)$ であることがわかる。そこで、線量とピクセル値の変換を、次式を用いて行う。

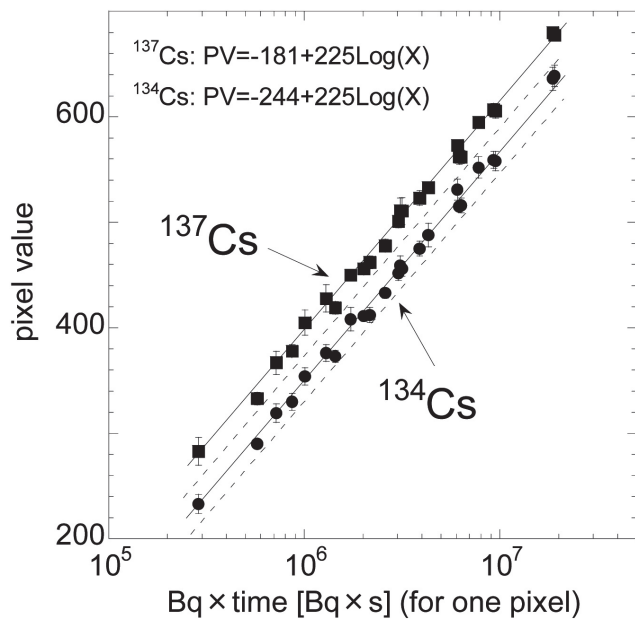


Fig. 4 Relationship between the pixel value and the product of activities (Bq) and irradiation times (s) for one pixel. The error bar means standard deviation of the data. Because all data were included between the dashed lines and the solid line, this region was defined as uncertainty of the solid line.

$$PV = 225 \log(Dose) \quad \dots\dots\dots(6)$$

結局のところ、ピクセル値和 PV_{sum} は以下の式で計算できる。

$$PV_{sum} = 225 \log(Dose_1 + Dose_2) = 255 \log(10^{PV_1/225} + 10^{PV_2/225}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

(7)式に(4), (5)式を代入して整理すると次式が得られる。

$$PV_{sum} = -205 + 225 \log(AT) \quad \dots\dots\dots(8)$$

この式は、ある放射能時間積 AT を与えた時に、 ^{134}Cs および ^{137}Cs が 0.45 : 0.55 の割合で混合された条件で、期待されるピクセル値を計算するものである。

2-5 放射能の推定精度

Fig. 4 の ^{134}Cs のデータと ^{137}Cs のデータのフィッティング直線からのばらつき具合は同程度であるので、 ^{134}Cs を用いて放射能の推定精度を見積った。Fig. 4 の破線のラインは、 ^{134}Cs のフィッティング直線と同じ傾きの直線で、すべてのデータ点およびその誤差棒(不確かさの範囲)を含むように設定してある。すべての実験データに付してある誤差棒は 1σ (= 統計的な変動をもつデータのうち 68% が含まれる) となるような範囲(統計誤差)なので、この破線の範囲も同様に考える。一方、プロットさ

れている 20 個のデータ点は予測される振る舞い(実線)に対して、ガウス分布的な広がりを示さないことが予測される。なぜならば、ばらつきの原因には、統計的な変動とフェーディングの影響の両方が含まれるが、後者の影響は平均値に対してランダムな変動を与えるわけではないからである。

破線の範囲はピクセル値で ± 25 の範囲である。この値を横軸の放射能時間積に変換することで、放射能時間積の不確かさを求めた。 δ_{AT} を AT の不確かさとする、

$$PV \pm 50 = -205 + 225 \log(AT \pm \delta_{AT}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

なので、(8)式および(9)式から、 $\delta_{AT}/AT = \pm 0.25$ を得た。すなわち、本手法を用いて推定できる放射能時間積は不確かさ 25% である。

2-6 黒点を発生させていた放射能(Bq)の推定

Fig. 5 は、黒点を発生させていた画像のヒストグラムである。横軸がピクセル値、縦軸が頻度である。本画像において、ピクセル値が 90~100 よりも大きいデータは黒点によって生じている(ピクセル値 90~100 近傍がバックグラウンドとの境界である)³⁾。そこで、ピクセル値が 90 以上の各ピクセル値に対して放射能時間積 AT を計算し[(8)式を AT について解く]、Fig. 5 で示した頻度を掛けて足し合わせることで、IP 全体の放射能時間積を求めた。この計算を行った結果、放射能時間積の和は 3.0×10^5 (Bq·s) であった。そして、これらの値を露光時間(12 時間)で除し、放射能の推定値 7.0 ± 1.8 Bq を得た。不確かさは前節で述べた方法で評価した。

3. 考 察

3-1 放射能の推定値について

2-6 で推定した 7 Bq という放射能は、IP が設置されていた状態で黒点に寄与した放射能を示している。すなわち、直接付着した RI および装置などに付着している RI の影響を含んでいる。一方、1-3-1 で示したように、解析に用いた IP は化学雑巾を用いて除染しており、化学雑巾中の RI (^{134}Cs および ^{137}Cs) の分析結果から、放射能が 9.5 ± 1.0 Bq (^{134}Cs : 4.3 Bq, ^{137}Cs : 5.2 Bq) であることがわかっている⁴⁾。本論文で推定した 7.0 ± 1.8 Bq と分析結果の 9.5 ± 1.0 Bq は不確かさの範囲で一致している。このことは、黒点を発生させていた RI は IP に直接付着した RI であり、 ^{134}Cs および ^{137}Cs が黒点発生の主因となっていることを意味している。われわれはモンテカルロシミュレーションを用いて他核種の影響も考慮しており、この研究でも ^{134}Cs および ^{137}Cs が黒点の主因となっていると推定している⁷⁾。すなわち、今回の分析結

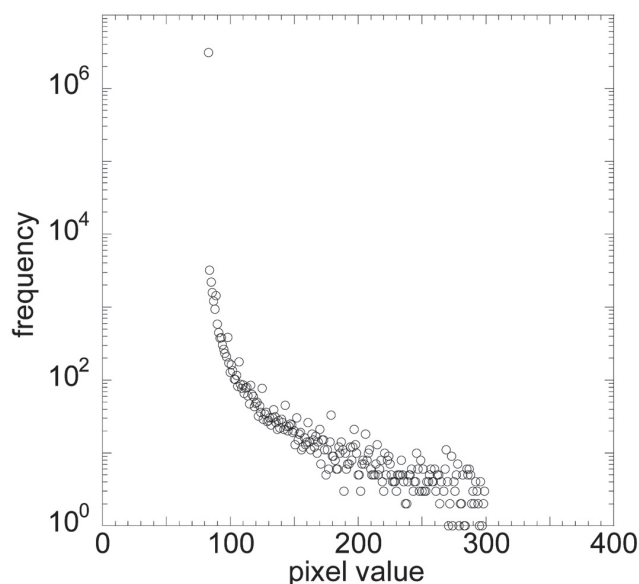


Fig. 5 Histogram of pixel values for IP, which had black spots (see text).

果はこれらの推定結果とも矛盾しない。

この IP には 200~800 個の黒点が観測されているので³⁾、1 個あたりの放射能は 0.009~0.04 Bq 程度である。小沼らが考察しているように⁴⁾、このような低濃度の RI は塵などに付着して浮遊し、装置の吸気口からの侵入によって、IP の表面に付着することが考えられる。現時点でも黒点が発生している施設は、西原ら²⁾が提案した方法に従って除染することを推奨する。

3-2 実験および解析手法について

本実験では、X 線撮影装置を用いて輝尽性発光量とピクセル値の関係を導いた。しかしながら、この関係性は連続 X 線スペクトルによるものであり、 β 線と γ 線を放出する RI に対してそのまま使用できるという保証はない⁸⁾。実際に、Fig. 1 では輝尽性発光量の対数に対して 263 という傾きでピクセル値を得るが、Fig. 4 では放射能時間積(\propto 輝尽性発光量)の対数に対して 225 という傾きでピクセル値を得る。この傾きの違いが結果に与える影響を下記のように見積った。Fig. 3 における中心値の解析は、傾き 263 を使って解析しており、ピクセル値の算術平均値は 246.1 となる。仮に、傾き 225 を用いて解析をするとピクセル値の平均値は 246.7 となる。このように、傾きの違いが解析結果に与える影響は本研究の実験においては無視できるほど小さい。

黒点が起こる現象は、RI の長時間露光での現象なので、IP が記録した輝尽性発光量が時間とともに減少するフェーディングの影響がある。IP のフェーディングの曲線はさまざまな研究によって調べられている⁹⁻¹¹⁾が、

それらの曲線を見ると常温条件では20分程度で20%ほどが急激にフェーディングによって情報を失い、その後、フェーディングの落ち方は緩やかになり、20時間程度までは70%ほどの輝尽性発光量が保たれることがわかっている。このことは、5時間露光でも22時間露光でも、フェーディングによる差が現れるのは最後の20分程度の寄与であることを意味している。すなわち、全体の輝尽性発光量に対する最後の20分の寄与が小さくなるような実験を設計すれば(放射能強度を下げ、時間を長くする)、Fig. 4で示した通り、露光時間の違うデータでも放射能時間積に対してピクセル値は同一の曲線を再現する。逆に言うと、Fig. 4で示したデータは数時間から一日程度の長時間露光で発生する黒点の解析に用いることができる。

Fig. 4に示した実験データを解析した結果、(2)式および(3)式は、同じ傾きであることがわかった。(2)式および(3)式の傾きが、放射能時間積とピクセル値の相反則からずれる要因はフェーディングであるが、現状のデータだけではどれだけのフェーディングを起こしているかはわからない。しかし、(2)式および(3)式の傾きが一致しているという事実は、エネルギーや線種の違いがフェーディングの起こり方に影響を与えていないことを意味している。さまざまなX線のエネルギーに対してフェーディングの起こり方が同程度であることは林らによって報告されており⁵⁾、この事実と実験結果は矛盾しない。一方、(2)式および(3)式の切片は¹³⁴Csと¹³⁷Csにおける単位崩壊あたりの放射線エネルギーの違いを反映している⁷⁾。X線を用いて異なる管電圧で特性曲線

を取得した場合、入射X線量が多い(=管電圧が高い)データは切片(ピクセル値)が大きくなる⁵⁾。本論文ではIPに直接RIが付着する状況を想定しているが、この条件で支配的な要因となるのはβ線(電子線)であり、¹³⁴Csよりも¹³⁷Csの影響力が大きいことがモンテカルロシミュレーションコードを用いた計算で予測されている⁷⁾。このことと本論文の結果は矛盾しない。

4. 結論

黒点が発生したIPを解析し、どの程度の放射能が原因となって黒点を生じさせているかを定量的に評価するために、非密封RI(¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs)を用いた実験を行った。5×5 mmのろ紙に40~240 BqのRIを含む線源を作成し、露光時間2~22時間のデータを取得した。得られた画像から平均的なピクセル値を算出し、ピクセルごとの放射能時間積とピクセル値の関係式を明らかにした。これらの関係式を用いて、実際に黒点が生じていたIPのデータを解析し、放射能が7 Bq程度であることを突き止めた。この値は、このIPの除染に用いた化学雑巾中のRIの総量と一致していた。このことから、黒点はほぼ直接付着したRIに起因していることがわかった。

謝辞

本研究は、徳島大学アイソトープ総合センターおよび名古屋大学アイソトープ総合センターの協力によって行われました。関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 平野浩志, 柏木 力, 齋 政博, 他. CRを用いた環境モニタリング調査研究班の紹介. 画像通信 2011; 10: 73-76.
- 2) 西原貞光, 林 裕晃. X線検出器(イメージングプレート)の放射能汚染に対する効果的な除染方法の提案. 日放技学誌 2011; 67(8): 912-915.
- 3) 林 裕晃, 西原貞光, 小沼洋治. イメージングプレートの放射能汚染による黒点計数法の開発. 日放技学誌 2012; 68(5): 545-553.
- 4) 小沼洋治, 林美智子, 林 裕晃, 他. X線検出器(イメージングプレート: IP)に付着した放射性同位元素の除染. 日放技学誌 2012; 68(3): 277-282.
- 5) 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. 医用画像情報誌 2012; 29(1): 1-6.
- 6) Abramoff MD, Magalhães PJ, Ram SJ. Image processing with ImageJ. Biophotonics Int 2004; 11(7): 36-42.
- 7) 林 裕晃, 西原貞光, 神谷尚武, 他. 輝尽性蛍光体プレートを用いて取得したX線画像上の黒点発生への解明に向けたモンテカルロシミュレーション. 医用画像情報誌 2012; 29(1): 7-11.
- 8) 小田啓二, 塚原一孝, 多田英哲, 他. イメージングプレートにおけるPSL強度分布に着目した線種識別法の提案. 日本放射線安全管理学会誌 2006; 5(1): 32-38.
- 9) Saze T, Etoh M, Mori C, et al. Automatic activity measurement and data processing system using imaging analyzer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2000; 443: 578-585.
- 10) Ohuchi H, Yamadera A. Dependence of fading patterns of photo-stimulated luminescence from imaging plates on radiation, energy, and image reader. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2002; 490: 573-582.
- 11) 佐々木喬, 平塚芳和, 浅野茂夫. CRシステムにおけるIPのフェーディングによるノイズ特性. 日放技学誌 2002; 58(11): 1497-1501.

図表の説明

- Fig. 1 FCR における相対的な輝尽性発光量とピクセル値の関係
- Fig. 2 実験的に作成した RI 線源の画像
134Cs を 2 時間露光して得られた画像である。
- Fig. 3 ピクセル値のヒストグラム
挿入図は解析した画像。ピクセル値の算術平均値は、縦軸に相対的な輝尽性発光量と頻度を取ったヒストグラムにガウス関数をフィッティングすることで求められる。
- Fig. 4 ピクセル値と 1 ピクセルあたりの放射能(Bq)と露光時間(s)の積の関係
エラーバーはデータ点の標準偏差。破線と実線の間にすべてのデータ点が含まれることから、破線の範囲を実線の不確かさの範囲と定義した。
- Fig. 5 黒点が発生していた IP のピクセル値のヒストグラム(本文参照のこと)

問合せ先

〒 770-8509 徳島市蔵本町 3-18-15

徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部 林 裕晃