資 料

医療施設におけるさまざまな X 線撮影室条件での散乱線分布可視化と表示ツール開発

清水 翔太^{*1, †, #}, 荒川 弘之^{*2}, 本田 城二^{*3}, 徳森 謙二^{*3}, 藤淵 俊王^{*4}

(2021 年 5 月 11 日受付)

(2021 年 9 月 15 日採択)

Visualization of Scattered Radiation Distribution under Various X-ray Room Conditions in Medical Facilities and Development of Its Display Tool

Shota SHIMIZU,^{*1, †, #} Hiroyuki ARAKAWA,^{*2} Joji HONDA,^{*3} Kenji TOKUMORI^{*3} and Toshioh FUJIBUCHI^{*4}

Clear radiation protection training and explanation tools for medical staff, patients, and caregivers during radiography are required. In this study, we developed visualization tool of scattered radiation distribution image of each X-ray room conditions. The 400 cases of X-ray room conditions were simulated using a Monte Carlo simulation code, Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS). The simulation conditions were (i) width and depth of the X-ray room (200 cm, 250 cm, 300 cm, 400 cm and 500 cm), (ii) opening or closing of the sliding door, (iii) direction of the X-ray table, (iv) X-ray posture, and (v) with or without protective clothing/shield. The scattered radiation distribution images were published on the Internet. The images are easily accessible on the Internet with selecting each radiography room condition. In radiation protection education, our tool can be used to (a) reduce radiation dose by keeping away from X-ray sources and scattered radiation sources, (b) shield scattered radiation by protective clothing and protective screens, and (c) prevent leakage of scattered radiation outside the room by closing the door of the radiography room. Our tool would improve the efficiency of radiation protection training for medical staff and alerting to patients and caregivers.

KEY WORDS: radiation protection, Monte Carlo simulation, radiography, X-ray room, scattered radiation distribution, PHITS, teaching tool, online visualization.

I 緒 論

X 線撮影装置はその有用性から一般の医療施設において広く普及している。しかし、限られた人員・時間の中

では、放射線業務を伴う医療従事者や患者・介助者へ十分な放射線防護教育や説明の時間が十分に行えていないと考えられる。たとえば、診療放射線技師や医師以外で最も放射線業務が多い看護師においても放射線防護教育

^{*1} 島根大学自然科学研究科理工学専攻；島根県松江市西川津町 1060 (〒 690-8504)

Major in Science and Engineering, Graduate School of Natural Science and Technology, Shimane University; 1060 Nishikawatsu, Matsue-shi, Shimane 690-8504, Japan.

^{*2} 島根大学学術研究院理工学系；島根県松江市西川津町 1060 (〒 690-8504)

Institute of Science and Engineering, Academic Assembly, Shimane University; 1060 Nishikawatsu, Matsue-shi, Shimane 690-8504, Japan.

^{*3} 帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科；福岡県大牟田市岬町 6-22 (〒 836-8505)

Department of Radiological Technology, Faculty of Fukuoka Medical Technology, Teikyo University; 6-22 Misakimachi, Omuta-shi,

Fukuoka 836-8505, Japan.

^{*4} 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野；福岡県福岡市東区馬出 3-1-1 (〒 812-8582)

Medical Quantum Science, Department of Health Sciences, Faculty of Medical Sciences, Kyushu University; 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 812-8582, Japan.

[†] 現所属：(公財)放射線影響研究所広島研究所；広島県広島市南区比治山公園 5-2 (〒 732-0815)

Present Address: Hiroshima Laboratory, Radiation Effects Research Foundation; 5-2 Hijiyama Park, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 732-0815, Japan.

[#] Corresponding author; E-mail: sshimizu@rerf.or.jp

が十分でないことが指摘¹⁻³⁾されている。放射線防護に対する理解の欠如は、医療従事者と患者の不必要な被ばく⁴⁾のリスクを高めるおそれがある⁴⁾。また、教育を行った場合も、教育方法によって放射線防護の理解度に違いが現れてしまう可能性がある⁵⁾。教育効果を高めるためには、単なる知識の説明よりも、可視化や体験する（デモンストレーション、自分で実験する）が望ましいとされる⁶⁾。一方で、放射線は、直接触ることや、見る、嗅ぐこともできないため、体験することは困難である。よって、教育効果を高めるツールとしては、放射線の挙動をより具体的で想像しやすい可視化を行うことが有用である。

以上を踏まえ、近年、放射線防護教育を目的とした散乱線分布の可視化の研究が進んでいる⁷⁻¹⁰⁾。特にモンテカルロシミュレーションを用いることで、さまざまなX線撮影室条件をコンピュータ上に構築し、X線撮影時の散乱線分布を模擬することで、被ばく線量を定量的に評価することができる^{11,12)}。これを踏まえ、荒川ら⁷⁾は、X線撮影室の2次元散乱線分布を簡易的なシミュレーション条件で放射線防護教育へ適用する可視化手法の提案を行った。藤淵ら⁸⁾は、仮想現実・拡張現実を利用した、検査時の3次元・4次元の散乱線分布の可視化による放射線防護教育への活用について提案を行った。しかし、いずれの先行研究における散乱線分布の可視化においても、一例または数例の撮影条件下においてのみ散乱線分布が示されている。このため、教育を受ける者は、可視化図の条件と実際の撮影条件が異なる場合、その条件における散乱線分布を想像しなければならないが、放射線に関する物理についての理解を十分身につけていないまま、実際の撮影条件の散乱線分布を想像するのは困難である。以上により、放射線防護教育を行う際に、実際の撮影条件に近いさまざまな散乱線分布の可視化図及びその表示ツールがあれば、有用な教育資料になると考えられる。

そこで、本研究では、荒川らの散乱線分布可視化手法⁷⁾を踏まえ、X線撮影時のさまざまな状況を想定して撮影室を模擬し、モンテカルロシミュレーションコード Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)¹³⁾を用いた散乱線分布の可視化及び表示ツール開発を行うこととした。X線撮影室の大きさ、扉の開閉、撮影台の位置、撮影時の姿勢、防護衣・防護衝立の有無を考慮し、400種類の撮影条件における散乱線分布の作成を行うことで、幅広いX線撮影室の条件に対応させた。さらに、X線撮影室の条件選択により散乱線分布の表示を行うツ

ルを開発し、インターネット上へ公開した。

II 方 法

1. X線撮影室の条件

X線撮影は撮影を行う部屋の条件や検査方法によってさまざまな状況が考えられる。撮影を行う部屋は、X線撮影室に加えて手術室や病室での撮影も考えられるが、本論文ではこれらをまとめて「X線撮影室」と呼ぶ。本研究では、X線撮影室の大きさに加え、扉の開閉、撮影台の位置、撮影時の姿勢、防護衣・防護衝立の有無を考慮し、さまざまな条件に従って複数の撮影条件を模擬した。X線撮影室の平面図の一例をFig. 1に示す。撮影室の天井高は250 cmとし、壁の厚さと材質は、外壁は10 cmのコンクリート、内壁は0.3 cmの鉛とした。撮影室の前方には奥行100 cmの移動用の空間を作成した。これらの条件はすべての計算において同一とした。その他の条件の選択について次項に示す。

2. 条件の選択

選択可能な撮影条件をTable 1に示す。

Fig. 1 Typical X-ray room with a room width of 250 cm, a room depth of 250 cm, a closed door, a horizontal bed direction, a lying posture and with radiation shield. The ceiling height of the room is 250 cm, and the thickness and material of the walls are 10 cm of concrete for the outer wall and 0.3 cm of lead for the inner wall. In front of the room, a space for movement is provided with a depth of 100 cm.

Table 1 Selectable simulation conditions. (1) X-ray room width, (2) X-ray room depth, (3) door opening/closing, (4) X-ray table orientation, (5) posture during radiography and (6) with or without X-ray protection shield.

(1) Width [cm]	200	250	300	400	500
(2) Depth [cm]	200	250	300	400	500
(3) Door	open	closed			
(4) Bed	vertical	horizontal			
(5) Posture	standing	lying			
(6) Shield	with	without			

個々の条件について以下、説明を行う。

(1) 撮影室の横幅

X線撮影室の横幅は、200, 250, 300, 400, 500 cmとした。ここで **Fig. 1** における撮影室は、横幅 250 cmである。

(2) 撮影室の奥行

X線撮影室の奥行は、200, 250, 300, 400, 500 cmとした。ここで **Fig. 1** における撮影室は、奥行 250 cmである。

(3) 扉

X線撮影室の扉の開閉による散乱線の漏洩について理解するため、扉が開いた状態、閉まった状態の2種類についてシミュレーションを行った。また扉の大きさは幅 70 cm, 厚さ 0.3 cm とし、材質は鉛とした。ここで **Fig. 1** における扉の状態は、閉じた状態である。

(4) 撮影台

医療現場において撮影台の向きは異なるため、縦方向、横方向の2種類についてシミュレーションを行った。撮影台の大きさは横幅 50 cm, 縦幅 190 cm, 厚さ 10 cm で、材質はアクリルとした。ここで、**Fig. 1** における撮影台は横方向である。

(5) 撮影時の姿勢

人体ファントムを作成し、立位、臥位の2種類についてシミュレーションを行った。人体ファントムの大きさは幅 30 cm, 高さ 170 cm, 厚さ 20 cm の直方体とし、材質は水とした。ここで **Fig. 1** における撮影時の姿勢は、臥位の状態である。

(6) 防護板

X線撮影室内での作業を要する時に防護衣の着用や防護衝立を設置する場合がある。防護衣・防護衝立の有効性を評価するために、防護用の板を設置した場合、設置していない場合の2種類についてシミュレーションを行った。防護板の大きさは幅 70 cm, 高さ 195 cm, 厚さ 0.025 cm, とし、材質は鉛とした。**Fig. 1** では、防護板を設置した場合を示す。

3. 散乱線シミュレーション

モンテカルロシミュレーションコード PHITS (Version 3.13) を用いた放射線散乱分布解析により、X線撮影時の放射線可視化シミュレーションを行った。PHITS によるX線散乱分布評価はいくつかの先行研究^{8,9,11)}でも行われ、実測とよく一致することが示されている。本研究のX線発生条件は荒川らの手法⁷⁾を踏まえて行った。計算条件の詳細について以下に示す。

X線発生源は、管電圧 80 kV の実効エネルギーを簡易的に模擬した 40 keV の単一エネルギー光子とし、拡がり角 20 度をもつ円錐型とした。ここで単一エネルギー光子とすることで、連続エネルギー分布と比較してシミュレーションの設定が容易になり、かつ、計算時間の短縮が見込まれる。また、円錐照射とすることで、矩形波により得られる結果より過大評価となり、安全側での評価となる。なお、管電圧 80 kV の連続エネルギーを模擬した場合や、X線のエネルギーを変更した場合を比較した結果については、付録に示す。

撮影は、腹部臥位撮影及び腹部立位撮影を想定した。腹部臥位撮影におけるX線照射は、撮影台の中心部で撮影台から 120 cm の位置から床方向に垂直とした。腹部立位撮影におけるX線照射はファントムの中心部で撮影台から 85 cm の位置から床に平行とし、上記拡がり角内にランダムに照射した。これにより、撮影台の位置においておおよそ大角サイズ (14 inch × 14 inch) の照射範囲となる。散乱線分布解析により得られた直接線・散乱線のフルエンスに、線量換算係数を乗じて 1 cm 線量当量 ($H^*(10)$) を求めた¹⁴⁾。線量は、臥位では人体ファントムの高さ方向 (60–80 cm)、立位では人体ファントムの高さ方向 (75–95 cm) に平均化し、線量の高い部分を 1 として規格化した。ここで、照射するX線光子数は 10^7 個とし、規格化後の線量値が 10^{-3} 以上の位置において計算結果の相対誤差 (PHITS により出力)¹⁵⁾ が 10% 未満になるように設定した。

4. 散乱線の可視化

散乱線分布図は、高さ 20 cm 分の 1 cm 線量当量を平均化し、線量の高くなる部分で規格化した値を平面図で示した。散乱線分布図は、EPS (Enhanced PostScript) ファイルを作成するための言語である ANGEL (version 4.36)³⁾ を用いた。散乱線分布図の配色は、初期設定では、線量の多い部分を赤、少ない部分を青とし、赤から青の虹色で段階的に表示する。しかし、1 型 2 色覚、2 型 2 色覚を持つ人には、緑から青の弁別には支障がない一方、赤

から緑の色は黄緑を対称として弁別が困難である¹⁶⁾。本研究の目的は散乱線の可視化に重点を置くため、幅広い人が視覚的に散乱線分布を確認できることが望ましい。このため、線量の多い部分の色を黄緑と設定し、規格化後の線量値が1の部分の黄緑、 10^{-3} の部分の青とし、黄緑から青の虹色により対数スケールで表示させた。また、人の平面の移動を考えるため、高さ方向の図は除外した。

加えて図中には1日の自然放射線による被ばく線量相当を目安として黒線で示すこととした。まず一般撮影における入射表面線量を2 mGy、1 cm 線量当量換算係数(Sv/Gy)を1として2 mSvの領域を相対線量1とした。次に、年間の自然放射線被ばく線量を約2.1 mSv¹⁷⁾とすると、1日あたりの自然放射線被ばく線量は約 $5.7 \mu\text{Sv}$ になる。1日の自然放射線の被ばく線量未満まで散乱線源から遠ざかることを想定し、相対線量 10^{-3} ($2 \mu\text{Sv}$ に相当)の境界を黒線で示した。

5. シミュレーションの精度検証

本研究で行ったシミュレーションの精度検証は、X線撮影を用いた散乱線分布を測定した文献¹⁸⁻²¹⁾との比較から行うこととした。それぞれCase 1¹⁸⁾、Case 2¹⁹⁾、Case 3²⁰⁾、Case 4²¹⁾とした。比較は、シミュレーションによる散乱線分布と実際の測定で得られた腹部臥位撮影時の散乱線分布の相対評価により行った。頭部・下肢方向の散乱線分布は、いずれの撮影条件も胸部のみのファントムを用いており、本計算条件と条件が大きく異なるため除外した。よって、散乱線分布の実測値は、ファントム側面方向の散乱線分布の結果を用いた。比較は、ファントムと各文献での測定点の違いを考慮し、Case 1-3では100 cm、Case 4では86 cmにおける線量値でそれぞれ規格化した。その後、シミュレーションで得た線量と実測値との相対的な違いを求めた。

6. 表示ツール開発とインターネット上への公開

表示ツールの作成にあたり、HTML (Hyper Text Markup Language)、CSS (Cascading Style Sheets)を用いてユーザインターフェイスの部分を作成し、インタラクティブな部分はJavaScript言語を用いて作成した。表示

させたいX線撮影室の体系-撮影室の横幅、奥行、扉の開閉、撮影台の向き、人体の姿勢、防護板の有無-の6項目に関する条件をそれぞれドロップダウンメニューにより選択可能とした。表示ツールは、実際の放射線防護教育で広く使用できるように、X線撮影室における散乱線分布の結果をインターネット上でアクセス可能な形とした。X線撮影室の説明図は、MIT ライセンスのライブラリであるLightbox²²⁾を使用し、別ページに表示するようにした。ウェブサーバー構築においては、nginx²³⁾を用いた。

ウェブページは公開により誰でもアクセス可能になると同時に、意図した受け取られ方をしない可能性がある。このため、注意事項として可視化図の目的を明文化し、『本資料は、放射線の散乱線イメージを持つための教育用資料であり、労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則に基づく作業環境測定の代替となるものではありません。』とウェブページ上に追記した。

III 結 果

Table 2にCase 1-4における撮影条件と、腹部臥位撮影時のファントム側面方向における線量分布の差の最大値 [%]を示す。実験とシミュレーション条件に違いがあるものの、両者の線量は30%以内の差でよく一致した。

表示ツール開発とインターネット上への公開を行った。撮影室の横幅、奥行、扉の開閉、撮影台の向き、人体の姿勢、防護板の有無に関する項目選択により、計400種類の散乱線分布シミュレーション結果を表示可能とした。本研究で作成したウェブサイトのURLは次のとおりである (<http://yui.ecs.shimane-u.ac.jp/phits/>)。

Fig. 2にシミュレーションしたX線撮影室における散乱線分布結果を示す。Fig. 2は、ウェブページの条件の選択において、横幅:300 cm、奥行:300 cm、扉の開閉:閉、撮影台の向き:横、人の姿勢:寝ている状態、防護板:なし、を選択した場合に得られる結果である。1日の自然放射線被ばく線量に相当する部分の境界(相対値で 10^{-3})を黒線で示した。Fig. 2では、照射位置から約2 mの位置で、1日の自然放射線の被ばく線量レベル未

Table 2 Difference between experimental data and simulation results of scattered radiation distribution.

	Tube Voltage [kV]	Focal-film distance [cm]	Distance from Phantom [cm]	Maximum difference [%]
Case 1 ¹⁸⁾	76	110	(50, 100, 200)	28.8
Case 2 ¹⁹⁾	80	—	(100, 200, 300)	24.1
Case 3 ²⁰⁾	90	—	(50, 100, 150, 200)	26.6
Case 4 ²¹⁾	80	100	(65, 86, 132, 177, 252, 361, 150, 300)	20.9

満である青色部分まで低減するという結果となった。

Fig. 3 に、条件の選択において、横幅：300 cm，奥行：300 cm，扉の開閉：閉，撮影台の向き：横，人の姿勢：立っている状態，防護板：あり，を選択した場合に得られる結果を示す。**Fig. 3** から，X線照射中の人体ファントムに対して，防護板の裏側の線量レベルは散乱線源側

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 2 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 300 cm, a room depth of 300 cm, a closed door, a horizontal bed direction, a lying posture, and no radiation shield.

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 3 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 300 cm, a room depth of 300 cm, a closed door, a horizontal bed direction, a lying posture, and a radiation shield.

と比較して10分の1以下になり，更に1日の自然放射線による被ばく線量レベル未満まで低減するという結果となった。このことから，介助等により，撮影される人以外がX線撮影室内にいる必要がある場合は，防護衣・防護衝立の利用が被ばく線量の低減において効果的であることがわかる。

Fig. 4 に、条件の選択において，横幅：200 cm，奥行：200 cm，扉の開閉：開，撮影台の向き：横，人の姿勢：寝ている状態，防護板：なし，を選択した場合に得られる結果を示す。横幅200 cm，奥行200 cmの撮影室において，扉が開いている状態では，1日の自然放射線被ばく線量以上に相当する散乱線が部屋の外に放出された。また，X線発生源が直接見えない場所においても散乱している。このことから，X線照射時は扉を閉めておくことが望ましいことがわかる。加えて，散乱線源である人体ファントムが扉に近いほど室外への漏洩が大きくなる結果が得られた。

Fig. 5 に，比較的大きな部屋におけるシミュレーション結果を示す。条件の選択は，横幅：500 cm，奥行：500 cm，扉の開閉：閉，撮影台の向き：縦，人の姿勢：寝ている状態，防護板：なし，を選択した場合である。**Fig. 2**の撮影台の向きが横の場合と比較し，縦の場合は散乱線の拡がり方が反対向きになっているのがわかる。

Fig. 6 に，腹部立位撮影を想定したシミュレーション結果を示す。条件の選択において，横幅：300 cm，奥行：

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 4 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 200 cm, a room depth of 200 cm, an open door, a horizontal bed direction, a lying posture, and no radiation shield.

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 5 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 500 cm, a room depth of 500 cm, a closed door, a vertical bed direction, a lying posture, and no radiation shield.

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 7 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 300 cm, a room depth of 300 cm, an open door, a vertical bed direction, a standing posture, and a radiation shield.

X線撮影室における散乱線分布

Fig. 6 A screenshot showing the scattered X-ray distribution with a room width of 300 cm, a room depth of 300 cm, a closed door, a horizontal bed direction, a standing posture, and no radiation shield.

300 cm, 扉の開閉: 閉, 撮影台の向き: 横, 人の姿勢: 立っている状態, 防護板: なし, を選択した。腹部臥位撮影の場合と散乱線分布が大きく異なっていることが分かる。

Fig. 7 に、腹部立位撮影を想定して **Fig. 6** の条件を変更したシミュレーション結果を示す。条件の選択におい

て、横幅: 300 cm, 奥行: 300 cm, 扉の開閉: 開, 撮影台の向き: 縦, 人の姿勢: 立っている状態, 防護板: あり, を選択した。腹部臥位撮影のシミュレーションと同様、撮影室の大きさ、扉の開閉、人の姿勢、防護板の条件を変更することでさまざまな撮影室を想定した結果を得た。

IV 考 察

本研究で得られた X 線発生装置は、単一エネルギーでかつ均一に照射しているが、実際の撮影においては、連続エネルギーを持ち、更に照射強度に不均一性がある。しかし、シミュレーションと実測との散乱線分布の違いは 30% 以内と大きな変化はなかった。このため、放射線防護教育を行う上での (i) X 線発生源・散乱線源から遠ざかることによる線量の低減, (ii) 防護衣・防護衝立による散乱線の遮蔽, (iii) 撮影室の扉を閉じることによる散乱線の室外への漏洩の防止の判別は十分可能であると考えられる。

本研究では、インターネット上で X 線の散乱線分布を観覧することができるウェブページを作成した。このため、資料の表示はタブレットやスマートフォンのようなモバイル端末を用いて放射線防護教育を効率化することが容易であり、また、遠隔での教育も可能であると考えられる。ウェブページでは、部屋の大きさや撮影台の向き、撮影時の姿勢の条件を変更することでさまざまな

X線撮影条件に応じた選択が可能である。更に、放射線防護教育の観点から防護衣・防護衝立の有無、扉の開閉についてのシミュレーションを行い、計400種類の散乱線分布を表示することができる。これにより、各々の医療施設のX線撮影室や手術室、病室やX線発生源を扱う施設の実験室に沿った結果を確認でき、状況に応じた散乱線分布を示し、比較することで端的に説明することできると考えられる。

関連して、本ツールは、医療従事者の教育を行う施設、たとえば診療放射線技師学校や看護学校などの学生教育にも適用の可能性がある。教育施設ごとのX線撮影室に合わせた散乱線分布の表示が可能であるほか、当該施設にX線撮影室がない場合においても事前学習としてさまざまな形状の散乱線分布を見ることができる。このため、基本となる放射線物理や放射線管理を学習した後でも、実際の散乱線分布に近い可視化により、効果的な教育ツールになる可能性がある。

一方で、指摘⁷⁾があるように、本研究で得られた図を単に見るだけでは必ずしも放射線防護教育に有用であるとは限らないと考えられる。たとえば、放射線の挙動を可視化することで医療従事者や患者・介助者、教育施設の学生が必要以上に放射線被ばくを恐れ、適切な検査を実施することが困難になることも想定される。また、反対に放射線は安全なものであるという誤解を招く可能性もある。目的にそぐわない図は示さない等、放射線防護教育を行う者が状況に応じた図の表示及び説明が必要である。加えて本研究では、計算条件数の削減のために条件の簡略化を行っているため教育効果が十分でない可能性がある。たとえば、防護衣・防護衝立の位置や向きは固定であり、その有無のみ指定可能としているため、より効果的な教育のためには位置や向きに関する変更を必要とする可能性がある。その他、より進んだ理解のために、各位置での線量値や繰り返し撮影による積算線量を表示することが考えられる。よって、今後の研究で、本ツールを用いた教育効果の確認を医療施設や医療従事者の教育を行う施設において別途行い、有用性の確認が必要と考えられる。

V 結 論

本研究では、モンテカルロシミュレーションコードPHITSを用いて、X線撮影時の放射線散乱分布の可視化と表示ツール開発を行った。撮影室の大きさは幅・奥行きでそれぞれ200 cm, 250 cm, 300 cm, 400 cm, 500 cmに選択可能とした。また、撮影台の向き(縦、横)、

撮影時の姿勢(立位、臥位)、扉の開閉、防護板の有無を選択可能とし、計400種類のさまざまな撮影室条件を模擬した。可視化図は、インターネット上で閲覧できる形とし、条件選択により容易に目的の散乱分布の表示が可能とした。本研究により、医療従事者への放射線防護教育や患者・介助者への注意喚起を効率的に行うことができると期待される。医療施設や医療従事者の教育を行う施設において本ツールを用いた教育効果の確認が望まれる。

利益相反の開示

投稿の手引きの付録に示した利益相反に関する基準に基づいて、開示すべき利益相反状態はない。

付 録

本研究では、X線発生源を40 keVの単一エネルギーとして可視化シミュレーションを行ったが、実際の撮影においては、X線発生源はさまざまなX線強度を持つ連続エネルギーである。このため、X線発生源を単一エネルギー(30, 40, 50 keV)、連続エネルギーとした場合のシミュレーション結果について示す。

X線発生源として管電圧80 kVの連続エネルギーを模擬した結果をFig. 8に示す。連続エネルギーは、Tuckerの近似式でX線の連続エネルギーを模擬したソフトウェアを用いた²⁴⁾。また、30, 40, 50 keVの単一エネルギー

Fig. 8 The scattered X-ray distribution with using continuous energy spectrum at the 80 kV X-ray tube voltage. Other simulation conditions were a room width of 300 cm, a room depth of 250 cm, an open door, horizontal bed direction, a lying posture and radiation shield.

を模擬した結果を **Fig. 9 (a)–(c)** に示す。X 線源以外の撮影条件は同条件であり、横幅：300 cm、奥行：300 cm、扉の開閉：閉、撮影台の向き：横、人の姿勢：寝ている

Fig. 9 The scattered X-ray distribution using a single X-ray energy of (a) 30 keV, (b) 40 keV and (c) 50 keV. Other simulation conditions are the same as in **Fig. 8**.

状態、防護板：あり、を条件とした結果である。**Fig. 8**の連続エネルギーを模擬した結果と **Fig. 9 (a)–(c)**の単一エネルギーを模擬した結果のどちらにおいても、(i) 散乱線源からの距離による線量レベルの低減、(ii) 防護衣・防護板の裏側の線量レベルの低減、(iii) 部屋の外への散乱線の放出、が確認できる。特に **Fig. 9 (b)**の40 keVの単一エネルギーによる模擬結果においては、**Fig. 8**の連続エネルギーを模擬した結果と値は異なっているが、散乱線マップとしての定性的な変化は同じである。このように、連続エネルギーを模擬した結果と近い結果が得られ、さらに上記 (i) ~ (iii) について示すことができることから、放射線防護教育では40 keVの単一エネルギーによるシミュレーションで十分であると考えられる。

参考文献

- 1) Y. MORISHIMA, K. CHIDA, K. SHIGEIZUMI, Y. KATAHIRA, H. SETO and H. CHIBA; Importance of radiation education for nurses. *Jpn. J. Radiol. Technol.*, **68**, 1373–1378 (2012) (in Japanese).
- 2) A. WATANABE, A. TERASAKI, M. KAMADA, S. TAKEDA and M. KAYUMI; The relevance of nurses' current state of knowledge and anxiety concerning radiation. *J. Radiol. Nurs. Soc. Jpn.*, **3**, 54–64 (2015) (in Japanese).
- 3) M. NAGATOMI, T. YAMAGUCHI, T. SHINKAWA, H. URATA, T. IDE, K. OISHI, N. SATO, M. ORITA and N. TAKAMURA; Knowledge on radiation among nurses working at middle-sized hospitals in Nagasaki prefecture, *J. Radiol. Nurs. Soc. Jpn.*, **8**, 91–99 (2020) (in Japanese).
- 4) ICRP; Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures (ICRP Publication 113), *Ann. ICRP*, **39**, 1–68 (2009).
- 5) N. MATSUDA, M. YOSHIDA, H. TAKAO, M. KANEKO, Y. YAMAGUCHI, M. HORIKAWA, Y. OKUMURA, H. KOBAYASHI, S. GOTO, M. OCHI and K. HAYASHI; A collaborative effort of medical and educational facilities for radiation safety training of nurses, *Jpn. J. Radiat. Saf.*, **3**, 79–84 (2020) (in Japanese).
- 6) E. J. WOOD; Problem-based learning: exploiting knowledge of how people learn to promote effective learning, *Biosci. Educ.*, **3**, 1–12 (2004).
- 7) H. ARAKAWA, K. TOKUMORI, H. KAMEZAWA and T. FUJIBUCHI; Visualization of radiation scattering

- in an X-ray room for teaching radiation protection, *Radioisotopes*, **67**, 11–15 (2018) (in Japanese).
- 8) T. FUJIBUCHI, K. UEDA, S. KADOYANAGI, D. UENO and C. NAKAMURA; Examination of application to radiation protection education by four-dimensional visualization of scatter distribution in radiological examination using virtual reality, *Jpn. J. Radiol. Technol.*, **75**, 1297–1307 (2019) (in Japanese).
 - 9) K. NISHI, T. FUJIBUCHI and T. YOSHINAGA; Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality, *J. Radiol. Prot.*, **40**, 1299–1310 (2020).
 - 10) T. DAIOKU1 and M. KOBAYASHI; Using projection mapping for nurses' radiation protection education, *J. Radiol. Nurs. Soc. Jpn.*, **8**, 3–10 (2020) (in Japanese).
 - 11) N. SATO, T. FUJIBUCHI, T. TOYODA, T. ISHIDA, H. OHURA, R. MIYAJIMA, S. ORITA and T. SUEYOSHI; Consideration of the protection curtain's shielding ability after identifying the source of scattered radiation in the angiography, *Radiat. Prot. Dosim.*, **175**, 238–245 (2017).
 - 12) H. SATO, K. MORI and K. FUJISAKU; Development of EGS5 Monte Carlo toolkit for estimation of dose distribution in X-ray diagnostic room, *Jpn. J. Med. Phys.*, **30**, 25–38 (2010) (in Japanese).
 - 13) T. SATO, Y. IWAMOTO, S. HASHIMOTO, T. OGAWA, T. FURUTA, S. ABE, T. KAI, P. TSAI, N. MATSUDA, H. IWASE, N. SHIGYO, L. SIHVER and K. NIITA; Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684–690 (2018).
 - 14) ICRP; Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation (ICRP Publication 74), *Ann. ICRP*, **26**, (3–4), 1–205 (1996).
 - 15) K. NIITA, T. SATO, Y. IWAMOTO, S. HASHIMOTO, T. OGAWA, et al.; PHITS Ver. 3.13 User's Manual, p. 43 (2019).
 - 16) M. OKABE and K. ITO; Shiki-kaku no Tayousei to Shikaku Bariafurēna Purezentēsyon Dai-san-kai Subete no Hito ni Miyasuku Suruniha, Donoyou ni Hairyo Sureba Yoi ka [Diversity of color vision and color-blindness barrier-free presentation Part 3: How can we make it easier for all people to see?], *Cell Technol.*, **21**, 1080–1104 (2002) (in Japanese).
 - 17) Nuclear Safety Research Association; “Shinban seikatsu kankyou houshasen (kokumin no senryou santei)” [Radiation at living environment calculation of doseage of radio-activity affecting Japanese peoples], p. 157 (2011), Nuclear Safety Research Association (in Japanese).
 - 18) E. SANESHIGE, L. IKUTA and S. ISHIHARA, Idou-gata X-sen Souchi ni yoru Satsuei-ji no Sanransen Sokutei [Measurement of scattered radiation during imaging with a mobile X-ray system], *Med. J. Matsue City Hospital*, **6**, 37–40 (2002) (in Japanese).
 - 19) H. WADA, M. AOKI and C. TAMIYA; Least irradiation by portable X-ray camera— 2m away from X-ray diffraction tube—, *J. Showa Hosp.*, **2**, 57–60 (2005) (in Japanese).
 - 20) K. YASUMA, M. ITOH, T. SAIKOU, N. ISHIZUKA, H. ISHIKAWA, et al.; Pōtaburu X-sen Satsuei de-no Kuukann Senryou [Air dose in portable radiography], *J. Jpn. Hosp. Assoc.*, **46**, 83–86 (1999) (in Japanese).
 - 21) I. OGURA, S. ABE, T. AOYAGI, Y. KATOH, H. SAITOH and M. FUKUSHI; A study of the room scattered radiation on the bedside X-ray examinations, *Bull. Tokyo Metrop. Coll. Allied Med. Sci.*, **2**, 21–29 (1989) (in Japanese).
 - 22) H. DUAN, C. WANG, X. YUAN, Y. ZHOU, Q. WANG and K. REN; Lightbox: Full-stack protected stateful middlebox at lightning speed, 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, proceedings (2019).
 - 23) D. De JONGHE; “The Complete NGINX Cookbook 2019 Edition”, pp. 1–8, 115–119 (2019), O'Reilly Media Inc., Sebastopol.
 - 24) H. KATO; Introduction of home-made software related to radiation technology *Jpn. J. Radiol. Technol.*, **75**, 104–110 (2019) (in Japanese).