

労災疾病臨床研究事業費補助金

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の
被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証

令和6年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 藤淵 俊王

令和7（2025）年3月

目 次

I. 総括研究報告

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証	1
---	---

II. 分担研究報告

1. 放射線防護教材およびアクションチェックリストの有効性の評価と改善	19
(資料) 部門別アクションチェックリスト	
2. IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査	35
3. Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算	41
4. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討	47
5. 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発	57
6. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価	67
7. 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化	83
8. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング	93

III. 研究成果の刊行に関する一覧表	101
---------------------	-----

労災疾病臨床研究事業費補助金 総括研究報告書

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの 開発と有効性の検証

研究代表者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

研究の目的：医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。そこでこれまでの知見とデジタルトランスフォーメーションの技術を活用して実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策プログラムを開発し、被ばくの低減を図ることを目的とする。

研究結果の概要：3年目の成果を、項目別に報告する。

1. 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

3年目は、構築したサイトとアクションチェックリストについて、使用前後の被ばく量の変化から有効性を評価と改善を実施した。全体の被ばく量は、使用前の令和4年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和5年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、令和6年度版は防護具や線量計の種類等具体的に80項目、7部門（小線源治療追加）に追加した。放射線診療を実施する各診療科医師への放射線防護教育へのアンケートの結果からは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

また医療従事者へのIT技術を活用した効率的かつ効果的な放射線防護教育手法として、ジャストインタイム・トレーニング、マイクロラーニング、アダプティブラーニングについて文献調査を実施した。

2. VR/AR 放射線可視化教材

3年目は、VR/ARを活用した放射線防護教材として、Ray Tracingという計算技術を活用してX線透視場における放射線防護板や医療従事者の移動による散乱線分布の変化をリアルタイムに推定する手法、モンテカルロシミュレーションによる散乱ベクトル情報を基にした放射線防護板の移動に伴う散乱線分布の簡易計算手法を考案した。

計算に時間をかけた精密なシミュレーションに比べれば計算精度は劣るものの、数秒で放射線防護板等の位置の影響をインタラクティブに反映できる教材としての活用が期待できる。また、放射線防護教育の目的で散乱線の広がり方の視覚的な理解を深めるために VR ゴーグルによる散乱線可視化教材の開発を実施した。さらに昨年度作成した血管造影検査における AR 放射線防護教材の有効性を理解度や教材の充実度等から評価し、本教材は放射線防護教育を実施する上でモチベーションの高めることに有効であることを実証した。

3. リアルタイム被ばく警告システム

3 年目は放射線 2 種類の放射線可視化カメラを使用し、X 線撮影における患者ファントムへの照射時の散乱線源の検出方法やカメラの設定を最適化し、散乱線源をリアルタイムにイメージングする手法を開発した。1 台は軽量で可搬型であるが低感度のもの、もう一台は高感度のカメラであるが重量があり可搬には適していないもので、これらのカメラを利用することで X 線検査での照射のタイミングだけでなく、散乱線源の位置やその強度を X 線診療中に確認することが出来、散乱線源の近くで作業する際の医療従事者の被ばく警告に使用できる可能性がある。また昨年度開発した 3 次元散乱線分布と医療従事者のボディトラッキングシステムと組み合わせることで、臨床現場での詳細な医療従事者の被ばく推定に役立てられる可能性がある。

研究分担者

石神 康生	九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 教授
小川 佳宏	九州大学大学院医学研究院 病態制御内科学 教授
馬場 眞吾	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 教授
磯田 拓郎	九州大学病院 放射線部 講師
坂本 和生	九州大学病院 冠動脈疾患治療部 助教
岡崎 龍史	産業医科大学 産業生態科学研究所 教授
富澤 登志子	弘前大学大学院 保健学研究科 教授

研究協力者

牛島 泰宏	九州大学病院 放射線科 講師
藤森 尚	九州大学病院 肝臓・膵臓・胆道内科 助教
Han Donghee	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 助教
檜作 響子	九州大学大学院医学系学府 保健学専攻医用量子線科学分野
Lee Hyojin	九州大学大学院医学系学府 保健学専攻医用量子線科学分野
境 真由	九州大学大学院医学系学府 保健学専攻医用量子線科学分野
野口 昂生	九州大学大学院医学系学府 保健学専攻医用量子線科学分野
田淵 麻央	九州大学大学院医学系学府 保健学専攻医用量子線科学分野

A. 目的

2011 年に国際放射線防護委員会（International Commission of Radiological Protection: ICRP）で水晶体等価線量限度引下げの勧告が出て以降、国内では法令取入に向けた実態調査や被ばく低減対策の検討が進められてきた。放射線診療従事者の中でも業務内容と被ばくの関係进行调查すると、X 線管に接近して操作が必要な透視下手技に携わる医師や看護師の被ばくが特に高いことが明らかになっている。法令改正後も線量限度を超過する可能性のある放射線診療従事者が存在し、その要因として以下のことが考えられる。

1. 医療現場の実務に即した放射線防護教材の不足

放射線防護教材は多く用意されているが、被ばくに関する概念・法令・理論に関するものがほとんどで、放射線診療従事者の実務に反映することが難しいように感じる。より理解しやすくするために、放射線診療従事者に対して事前に放射線被ばくの軽減の重要性を説明するとともに臨床現場のスタッフの視点で、様々な理解度や業務内容、さらに所持している防護具に応じた教材が求められる。

2. 放射線は五感に感じないこと

放射線は五感に感じないことから、危険を察知しづらい。放射線の広がりや危険な場所を可視化、可聴化することで危険を予知することが可能になると考えられる。

3. 放射線防護具の適正な使用法をはじめとした放射線防護法の理解不足

被ばく低減対策として放射線防護眼鏡や防護板の有効性が報告され活用されているが、現場で所持しているだけでなく適切に使用

しないと防護効果を発揮できない。手技によっては装置や患者と緩衝してしまうことから、全ての放射線診療で利用できるわけではない。防護具だけでなく、照射条件や人員配置等から総合的に対策をする必要がある。

医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。そこで本労災疾病臨床研究では、これまでの知見と“放射線の可視化”をキーワードとして、デジタルトランスフォーメーション（DX：digital transformation）の技術を活用した放射線診療従事者の被ばく低減対策プログラムを開発し、被ばくの低減を図ることを目的とする。

1 年目は放射線防護教育 Web サイトの構築と仮想現実（virtual reality：VR）、拡張現実（augmented reality：AR）を利用した放射線防護教材の開発、リアルタイム被ばく警告システムの開発を実施した。2 年目には作成した放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストのアンケート調査による有効性の評価および、VR/AR を利用した新たなモダリティでの放射線可視化教材の開発、リアルタイム被ばく警告システムの性能評価を実施した。

3 年目は、これまでに作成した放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの有効性の評価と改善、VR/AR 放射線可視化教材として放射線防護板等室内の状況に応じた散乱線分布推定的高速化と教材の有効性の評価、リアルタイム被ばく警告システムとして、放射線可視化カメラを X 線診療現場での散乱線源検出用に設定を最適化

し、散乱線源をリアルタイムにイメージングする手法を開発した。

B. 方法

B-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

B-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材の有効性の検証方法として、教材使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院に所属する放射線資料従事者の内、放射線科医師 5 名、肝臓・膵臓・胆道内科医師 8 名、循環器内科医師 14 名、放射線部診療放射線技師 37 名の計 65 名である。九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け（課題番号 22013）、研究に対する同意を得た対象者に令和 5 年 3 月に教材を使用いただき、令和 4 年 4 月から令和 5 年 3 月と、令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月までの 1 年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。

B-1.2 放射線を使用する各診療科医師への職業被ばくに関するアンケート

放射線診療に従事する放射線科、肝臓・膵臓・胆道内科、循環器内科、整形外科計 24 名に対し、職業被ばくに関するアンケート調査を実施した。

質問内容として下記の 4 項目について自由記載方式で回答を収集した。

B-1.3 放射線防護教材、アクションチェックリストの改善

令和 4、5 年に作成したアクションチェックリストに対して、放射線診療従事者に対して実施したアンケート結果を踏まえアクションチェックリストの改善を実施した。

B-1.4 IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

文献検索を基に、近年企業の社員教育や教育現場で取入れられている情報を収集した。その中で、ジャストインタイム・トレーニング（Just In Time : JIT）、マイクロラーニング（Micro-Learning : ML）、アダプティブラーニング（Adaptive Learning : AL）というキーワードが注目されている教育手法として浮かび上がってきた。これらの教育手法についてその概要や医療従事者への適応について検討した。

B-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

B-2.1 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

最初にシミュレーションにより X 線検査室について先行研究のデータを基としてオーバーキューブテーブル型 X 線装置で患者を仰臥位に寝かして天井床方向に照射した場を再現し、基準データとした。Ray tracing を利用したアプリケーションの開発について、Unity(2020.3.20f1)を利用した。並列計算の効率化のために、Unity DOTS(Data-Oriented Technology Stack)を利用したプログラムを含めた。X 線撮影において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は室内の空気で散乱することなく直線的に進行するという仮定とした。仮想 X 線室において、仰臥位での透視における患者の体表面から体外に広がる散乱放射線の方向ベクトル、エネルギー情報を取り込んだ。

仮想 X 線診療室内には 3 人の医療スタッフと放射線防護板を配置した。医療スタッフを室内に配置し散乱放射線と衝突した際、

散乱放射線の進行方向と防護板の位置に応じて室内の散乱放射線分布が瞬時に変化するようにした。X 線診療室には複数の線量評価点を含む医療スタッフ 3D モデルを配置し、マウス操作で室内を移動できるようにした。また医療スタッフモデルの両眼、甲状腺、胸部中心、腹部中心、腰部中心、右指先、左指先に評価点を置くことで、その位置における各評価点を算出できるようにした。

シミュレーション精度を検証するため、室内 36 点でモンテカルロシミュレーションと本シミュレーションによる比較をした。

B-2.2. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)を使って X 線透視装置で患者を模したファントムを照射したときの透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。簡易線量分布計算で使用する透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布を主要な 3 つの散乱線源ごとに分けてシミュレーションした。主要な 3 つの散乱線源は、ファントムからの散乱、X 線管からの散乱、その他とした。簡易線量分布計算法に使用する方向ベクトルデータを PHITS シミュレーションの計算結果を利用して作成した。

簡易線量分布計算法では、PHITS シミュレーションで得た周辺線量当量分布と作成した方向ベクトルのデータを用いた。方向ベクトルの情報から放射線防護板で遮蔽される光子を推定し、その光子の線量値に線量低減係数をかけた。ここで、前回の研究で防護板による線量の低減率は最も良い条件で 99%であったため、線量低減係数は 0.01

とした。

サーベイメータによるファントム周囲および放射線防護板裏の周辺線量当量率の測定結果と、モンテカルロシミュレーション、簡易計算法による線量率を比較し計算精度を検証した。

B-2.3. 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発

モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) C アーム式 X 線透視装置（以下、C アーム装置）で照射したときの患者を模したファントムからの X 線透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。放射線防護用教材の開発を目的としており、被写体からの後方散乱による医療従事者への影響が大きいことからオーバーテーブル X 線管の配置とした。X 線を照射した場合、散乱線に比べ直接線の成分は桁違いに多い。今回は検査室内にいる医療従事者の放射線防護教育の観点から全体に広がる散乱線を観察することが目的であるため X 線を照射した際の直接線の成分を除き、患者からの散乱線のみを表示させた。方向ベクトル分布の作成には、透視室における PHITS による光子フルエンスの 3 次元分布データの計算結果を利用した。周辺線量分布の作成には、3 次元のフルエンス分布から、PHITS に含まれるフルエンス-周辺線量当量換算係数を用いて変換した。

三次元可視化ソフト ParaView ver. 5.13.0 (Kitware, Inc., NY, USA) を使用して散乱線の方向ベクトルを赤色の矢印として表示した。ParaView VR 機能を利用して VR 空間

に方向ベクトル分布を表示した。VR ヘッドセット (Meta Quest 3; Meta Platforms, Inc., CA, USA) を使用した。

B-2.4. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

モンテカルロシミュレーションにより、心臓の血管造影時の散乱線分布のデータを C アームの角度別に PA (Posterior-Anterior), LAO (Left Anterior Oblique) 60°, RAO (Right Anterior Oblique) 30°, Cranial 30°, Caudal 25° の 5 種類、防護板の有無で 2 種類の計 10 種類を計算した。ゲーム開発エンジンである Unity ver.2022.2.181 に取り込み、メニュー画面で C アームの角度 変更や防護板の有無の変更、カラースケールの変更、二次元断面はアキシャル方向、サジタル方向、コロナル方向に動かすことが可能で、3 方向から任意の断面を選択し散乱線分布を確認することができるようにした。

今回は 5 種類の C アームの角度を用意したことを考え、放射線防護の三原則をもとに、C アームの角度変化による散乱線分布の変化、防護板使用による散乱線分布の変化、患者からの距離による被ばくの変化の 4 つのシナリオを作成した。また、それぞれのシナリオにおいて理解度を測るための○×問題を作成した。

九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け (課題番号 20793)、診療放射線技師養成校に所属する 3 年生、29 名に実際に作成したアプリケーションを用いて、シナリオに沿って演習を行い、ARCS モデルを用いた教材の評価、○×問題、自由記載による教材の評価を実施した。

B-3. リアルタイム被ばく警告システム

B-3.1. 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

散乱線源をシンチレータにより可視光に変換してイメージングするため、CMOS カメラ (ORCA-Quest、浜松ホトニクス)、ヨウ化セシウム (CsI) シンチレータ (Great Performance X-ray CsI Scintillator J13113、浜松ホトニクス)、RGB カメラ (Intel RealSense Depth Camera D435、Intel Corporation、米国)、ピンホールコリメータ、を使用した。ピンホールコリメータとシンチレータの距離は 2 cm、シンチレータとカメラの距離は 9 cm に設定した。

X 線照射は X 線管装置 (UD150L-30、島津製作所) を用い腹部 X 線撮影の条件 (74 kV、250 mA、0.14 s) で、ファントムから 150 cm の位置にカメラを配置し、カメラの露光時間を 2 から 200 ms に設定し撮影した。散乱線画像と背景の RGB 画像を合成ソフトにより重ね合わせ表示した。取得した画像の画質を評価するために、S/N 比 (SNR) とコントラストを用いて解析した。またモンテカルロシミュレーションにより照射およびカメラへの散乱線の入射の状況を再現し、画像の整合性やコリメータサイズの最適化を検討した。

B-3.2. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

本研究では、放射線可視化カメラ MiniPIX EDU KIT (ADVACAM 社) を X 線透視 C アーム装置には DR CALNEO CROSS (富士フ

フィルム) 使用した。半導体検出器の前 1.7 cm に直径 1 mm の鉛ピンホールを配置し、ファントムから 100 cm の位置にカメラを配置して散乱線源をイメージングした。さらに、可搬型の放射線防護板を X 線管付近に配置し、X 線管からの散乱線の遮蔽効果をイメージングした。

(倫理面への配慮)

本研究は B-1.1.、B-2.4.において、参加者に web サイトやアクションチェックリストを使用し、その後アンケートを実施することから、各研究施設での倫理審査委員会で承認を得た後、参加者から同意書を得て研究を実施した。それ以外の研究に関しては、人を対象とする研究ではない。X 線を使用する研究では、研究者が被ばくする恐れのある可能性があるため、放射線防護対策をした上で研究実施した。

C. 結果

C-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

C-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

全体の被ばく量は、使用前の令和 4 年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和 5 年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。診療科別では循環器内科医師が使用前平均 1.46 mSv と比較的高く使用後では被ばく量が半減したのに対し、他の診療科、部では使用前から 1 mSv 未満で同等か若干上昇した。ただし統計的有意差は認められなかった。

C-1.2 放射線を使用する各診療科医師へ

の職業被ばくに関するアンケート

放射線診療を実施する各診療科医師への放射線防護教育へのアンケートの結果からは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれていることが明らかとなった。

C-1.3 放射線防護教材、アクションチェックリストの改善

アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、令和 6 年度版は防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門 (小線源治療追加) に追加した。

C-1.4 IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

調査の結果、JIT は必要な知識やスキルを即座に学習できる方式で、適時性・関連性・効率性・柔軟性を備えたトレーニング手法である。医療分野においても、JIT トレーニングは限られた時間内での学習機会の提供に有効であり、特に周術期看護師のスキル向上に貢献できる。さらに、個々の学習者の特性に応じたマイクロラーニング (ML) やアダプティブラーニング (AL) が適応性の高い学習法として挙げられていた。ML は短時間で学習できるモジュール型教育、AL は AI を活用し学習者に最適な教材を提供する方式である。生成 AI の進化により、学習内容の個別最適化も可能になり、精度向上に向けた技術開発が進んでいることが明らかになった。

C-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

C-2.1 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

この情報を基に X 線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。モンテカルロシミュレーションに対する本手法で散乱放射線量の算出値の比は、X 線装置の裏側などを除き、ほとんどが 0.7 から 1.8 倍の範囲内だった。防護板を移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。

C-2.2. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

実測と PHITS シミュレーションの低減率の差は 6%以内であった。一方で、実測と PHITS シミュレーション、簡易線量分布計算法の低減率の差は、防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10%以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、実簡易線量分布計算法は他より、低減率が非常に低かった。簡易線量分布計算とシミュレーションの計算時間を比較した結果、簡易線量分布計算は平均 13 秒、PHITS シミュレーションは平均 20 時間 39 分 46 秒かかった。簡易線量分布計算は PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

ファントムからの距離 35 cm の位置を術者の位置として線量プロファイルを作成し、PHITS シミュレーションと簡易線量分布計算を比較した。線量プロファイルから防護板の後方の領域の境界周囲では差が大きくなった。

C-2.3. 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発

作成したデータにより、VR 空間にて C アーム X 線透視装置での照射時における散乱線の進行方向を三次元的に矢印で可視化するとともに、任意の方向から確認できた。また、2 次元および 3 次元の線量分布と重ね合わせることで防護板による遮蔽効果を視覚的に確認できた。

C-2.4. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

○×問題の正答率は C アームの角度変化による散乱線分布の変化の問題は 65.5%、72.4%となり、その他の問題は 100%となった。C アームの角度変化は血管造影検査特有の変化であり、他に比べて理解が難しいことがわかった。ARCS モデル教材の学習意欲向上度の評価では、平均点は Attention が 4.15、Relevance が 3.91、Confidence が 3.93、Satisfaction が 4.28 だった今回の教材はモチベーションの向上に有効であることが明らかになった。自由記載にはアプリケーションの操作性の改善点が挙げられ、特にアプリケーションの操作が難しいことがわかった。

C-3. リアルタイム被ばく警告システム

C-3.1. 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

散乱線源をイメージングした結果、ピンホールサイズ 2 mm では、散乱線源の形状や分布が比較的鮮明に観測され、より高い空間分解能を実現した。対照的に、3 mm のピンホールサイズでは、2 mm のピンホールと比較して分布が広くなり、空間の

詳細解像度が著しく低下した。これは、ピンホールサイズが散乱線源の視覚化に大きく影響することを示している。また、ピンホールコリメータに到達する線量率は 10.71 $\mu\text{Sv/s}$ 、総線量は 2.10 μSv であった。

SNR とコントラストはどちらも、カメラの露光時間が長くなるにつれて全体的に増加する傾向を示した。ピンホールサイズが 2 mm と 3 mm の場合、露光時間が長くなると SNR とコントラストが向上したが、2 つのピンホールサイズ間で間隔が異なった。

シミュレーションデータと測定データの両方に、水ファントムと X 線管からの散乱放射に対応する 2 つの顕著なピークが見られた。ピンホールサイズに関しては、ピンホールの直径が 2 mm の場合、ピーク分離と空間分解能が向上するのに対し、ピンホールの直径が 3 mm の場合、ピークが近接する代わりにシグナル強度が高くなった。

これらの知見は、リアルタイムイメージングシステムが散乱放射を効果的に可視化し、PHITS シミュレーションがシステムのパフォーマンスを最適化および評価するための信頼性の高いフレームワークを提供することを裏付けている。

C-3.2. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

本カメラにより散乱線源をイメージングした結果、焦点側から寝台側に向かってコリメータ、射出口、ファントム表面、の 3 カ所が主な散乱線源を確認することが出来た。

防護板を X 線射出口と同じ位置に配置した場合はコリメータにおける散乱が遮蔽さ

れ、防護板をさらに 5 cm 下方に配置した場合はコリメータだけでなく射出口における散乱も遮蔽することを視覚的に確認できた。

ファントムが無い場合、コリメータと射出口からの散乱の様子に目立った変化は見られず、わずかながら寝台において散乱線が発生した。散乱線のおよそ半分がファントムから発生していること、そしてファントムの有無で X 線管内の散乱線は変わらないことが分かった。

D. 考察

D-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

D-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

今回の放射線防護教材の有効性の調査結果から明らかになったこととして、全体の平均線量は使用後で 70%程度低下したが、統計的有意差は認められなかった。高被ばく者について、2 年間での大きな違いはなく、放射線診療に従事する業務量の問題が大きく聞いている可能性がある。また放射線防護対策が不足しているかは本調査からは不明であり、高被ばくとなることの原因究明には、直接的な介入が必要である。

放射線防護教材の有効性の評価を実施する上で考えられる課題を下記に挙げる。対象者について、今回多くの対象者は 2 mSv 未満の被ばく(6 割近くは 0)で、変化が確認しづらかった。これは、放射線防護教材を使用する前から十分な対策が出来ている可能性があり、調査する際の施設のバックグラウンドにより教材の効果が異なることを示唆する。

今回は教材の使用前後での被ばく量の比較から評価をしたが、他の放射線教育、講習

の機会により被ばく低減効果があっても判別が出来ない。これは今回の有効性の評価法のデザインでの問題点である。2021年の電離放射線障害防止規則等での水晶体等価線量限度の引き下げに伴い、労働基準局からの案内の他、関係学会等でも特集の記事を組んだり学会シンポジウムとして企画したりするなど放射線診療従事者の自分自身の被ばくに対する関心が高まっている。これらの他の放射線防護意識の向上に対するバイアスは排除できず、被ばく量だけからでは教材の真の有効性を図ることに限界があった。

D-1.2 放射線を使用する各診療科医師への職業被ばくに関するアンケート

職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。医療現場での職業被ばくによる放射線影響の事例を紹介することは、自身の被ばくを他人事とすることなく、対策をした上で放射線を扱わないと自分が被害を受ける可能性があることとして主体的に防護対策に取り組む契機となる可能性がある。また他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

D-1.3 放射線防護教材、アクションチェックリストの改善

教材の運用方法について、教材やアクシ

ョンチェックリストを作成するだけでなく、これらをいつどのように使用するかが、効果な活用に重要である。また放射線診療を実施する場合も幅広く、モダリティや職種により放射線防護方法が大きく異なる。そのため、基礎的な項目として一般的な放射線防護方法の説明をする教材も必要ではあるが、現場の状況に応じた放射線防護対策の教材作成が求められる。これは厳密にはモダリティ別に作成するだけでなく、個々の医療機関によっても備えられている放射線防護具や部屋の大きさ、機種、業務量や担当する職種などが異なり、細かな状況に応じた放射線防護教育の最適化ができればよいが、現状では放射線防護教材や E-learning では一般的なことしか示すことが出来ず、一方通行の説明となり、ここが大きな限界となっている。そのため教材作成だけでなく、対象者とのコミュニケーションを取りやすい環境を構築することが細かな放射線防護対策には重要となる。

D-1.4 IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

限られた業務時間の中でできるだけ短くわかりやすい情報を好み、全般的に人の注意力は年々低下し、デジタル化のライフスタイルが長時間の集中を妨げている。それ故、医療人材については、JIT を実施し、効率的かつ適切な教育を行い、またこうした人材育成については正確性、関連性のある教育に対して適時性を考慮して行えるように整備していくことが求められる。放射線に関する教育もその専門性のレベルにより提供の仕方も AI によって調整は可能となるが、系統的な教育ではなく、個別のレデ

ィネスと経験によって提供内容を変更する方向に進んでいくと考えられる。

D-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

D-2.1 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

本システムは、計算精度に問題があり改善の余地があるものの、直感的な放射線防護板の移動による散乱線分布の変化のリアルタイムな把握が可能であり、配置の自由度の高い防護板の使用において、都度散乱放射線分布を測定することは現実的でなく、簡易的に散乱放射線分布やスタッフの線量の変化を確認することで、防護板の適切な配置方法の直感的な理解につながる。

D-2.2. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

簡易線量分布計算法では、モンテカルロシミュレーションと比べて計算時間は非常に短くなったことから、防護板の位置による線量分布の変化を簡単に多くの結果を示すことができると考える。簡易線量分布計算では、防護板後方の領域の領域は大部分の線量値が過小評価になる。しかし、防護板後方の領域の境界では、線量値が過大評価になる。また、実測や PHITS シミュレーションとの差が大きくなる傾向がある。簡易線量分布計算法では、防護板の遮蔽の影響を受けるおおよその領域を知ることができる。しかし、空間の線量値は実測や PHITS シミュレーションとの差が大きい場合もあるため、線量値の確認に用いることは難しい。

D-2.3. 仮想現実技術を利用した X 線透視時

の散乱線の方角ベクトルの可視化教材の開発

今回開発した VR 教材により、VR 空間にて方向ベクトル分布を矢印として表示することで、透視装置、患者、防護板、自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を確認することができる。そのため、患者の傍に立ったときに散乱線がどこから自分の方に向かってくるかがモニタ画面を見るよりも容易に視覚的に理解しやすい。VR 教材での視線の変更は、ボリュームレンダリング等の 3 次元画像を表示するソフトウェアのようなマウスによる操作でなく、VR ゴーグルを装着している頭を動かすことで微妙な視線を容易に変化させることが出来る。また VR ゴーグルを装着することで現実世界が完全に遮断され、余計な物のない没入感のある仮想空間で見たいものだけを表示させることが出来る。これらのことから、VR 空間で学習する教育教材では、より主体性をもって学習できると考える。一方、本研究の限界として、方向ベクトルの表示方法、照射条件や防護板の位置が限定されている点、医療従事者等の使用による本教材の客観的な評価が行えていない点が今後の課題として挙げられる。本教材は、防護板の有無や複数の線量分布、ベクトル表示方法から散乱線の進行方向や適切な防護板の配置場所を理解できるよう設計したものであるが、理解度の確認のために確認テストを実施や、目的達成のためのシナリオが適切だったか、使い勝手などのアンケートから教材の質を上げていく必要がある。

D-2.4. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性

の評価

○×問題の結果より、C アームの角度による散乱線分布の変化は C アームを使った血管造影検査における特有の現象であり、今後シナリオを改善する際により詳細にすることが望ましいと考える。今回の演習は対象者を診療放射線技養成校の学生を対象としたため、基本的な放射線に関する知識を持っていたことが正答率に表れたと考える。演習について理解は進んでいるため今後は演習内容の調節を行い、より多くの知識を提供することで、成長できたという自信を提供することができるのではないかと考えている。平均値を見ると **Attention**、**Satisfaction** の値は 4 を上回り、**Relevance**、**Confidence** の値も 4 に近い値となった。このことより今回の演習シナリオは教材としては良いものであると考える。

自由記載についてアプリケーションの複数の改善点が挙げられたため、テキストマイニングの結果においてアプリケーション内のオブジェクトおよび操作面についての単語が多く挙げられたと考えられる。

今後は他の医療従事者を目指す学生に向けた学習教材を作成する際は、より放射線について基礎的なシナリオを作成する必要がある。アプリケーションについては、操作性に改善の余地がある。また、C アームの角度や防護板の位置、照射条件などが固定となっているため、条件の自由度が低く、その点が実際の医療現場と異なる点に留意が必要である。さらには、今回の散乱線分布の表示方法では、散乱線の進む方向までを示すことができていない。今後は、アニメーションや矢印により、放射線の広がり方を示すことが期待される。

D-3. リアルタイム被ばく警告システム

D-3.1. 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

本研究では、高感度 CMOS カメラを用いて散乱光のリアルタイム可視化を実施し、ピンホールサイズや露光時間の影響を評価した。最適な露光時間は 50 ms であり、短すぎる場合はノイズが増加することが判明した。また、線量率は 10.71 $\mu\text{Sv/s}$ であり、一般 X 線撮影に適用可能と示された。システムのセットアップエラーを抑えるためには標準化が必要であり、ピンホールサイズ 2 mm が最も鮮明な画像を提供することが確認された。シミュレーションと実測データの比較では、一部差異があり、精度向上が今後の課題となる。本技術は放射線安全管理に貢献し、不必要な被ばくを減らす可能性を示した。

D-3.2. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

本研究では、防護板の高さが X 線管内からの散乱線低減に効果的であることを確認した。射出口より低く設置すると遮蔽効果が高まるため、手技の妨げにならない範囲での低い設置が推奨される。照射野を小さくするとファントムからの散乱線が減少したが、コリメータからの散乱線は増加した。ファントムの有無にかかわらず散乱線源の画像化が可能であり、寝台が散乱線源になり得ることが示された。課題として、再現性向上のためのピンホール固定法の見直し、カメラ視野の一致精度向上が挙げられ、3D

プリンタを活用した土台設計が有効と考えられる。今後、防護板の高さやコリメータの種類を検討を進める必要がある。

E. 結論

E-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

本研究において、放射線診療中従事者の被ばく量から放射線防護教材の有効性を検証した。平均被ばく量は資料使用後に低下したが、統計的有意差は確認できなかった。放射線診療を実施する医師へのアンケート調査からは、放射線業務での放射線影響や対策に関する事例の情報の共有が望まれていること、様々な放射線診療の現場に応じた防護対策とそのサポートが望まれる。

医療人材の育成において、JIT、ML、ALの活用は有効であり、特にAIの進化に伴いさらに高度な学習環境が整えられる。今後、医療放射線防護教育などの専門教育にも適用され、個々の学習ニーズに応じた調整が進むと考えられる。

E-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

Ray tracing 技術や簡易計算法を活用することで、X 線診療室内の散乱放射線分布をリアルタイムに計算、表示させるアプリケーションを作成した。これらのシステムにより診療時の被ばく低減を意識した医療スタッフの位置や適切な放射線防護板の使用方法を理解するために有効な教育ツールになることが示唆された。一方で計算精度は十分でないことから、今後はシミュレーション精度の向上と多くの照射条件、モデルティへの対応を目指す必要がある。

放射線防護教育でのVRの活用は、透視

装置、患者、防護板と使用者の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用であると示唆される。

AR 放射線防護教材の評価結果から、学習意欲の向上についてこの教材は有効であることがわかった。一方で教材によって得ることのできる知識は、医療従事者でも職種により大きく異なることから、職種に応じたシナリオの改善や細分化が必要である。

E-3. リアルタイム被ばく警告システム

本研究では、ピンホールコリメータを用いて複数の半導体式画像検出器(カメラ)により、臨床現場の照射条件で、リアルタイムに散乱線源を特定する能力を有することを実証した。このシステムをボディトラッキングと組み合わせ、また3次元散乱線源分布を取得することで、放射線診療中に医療従事者の詳細な被ばく量の推定や術者の散乱線防護方法の検討に利用できると考える。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1.論文発表

1. Fujibuchi, T. Study on Radiation Protection Educational Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method with Ray Tracing Technology, Information, 16, 266, 2025.
2. Noguchi K, Fujibuchi T, Han D, Effectiveness of radiation protection educational material during angiography

- using visualization of scattered radiation by augmented reality technique. Radiological Physics and Technology, 2025.
3. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa, Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator, Health and Technology, 2025.
 4. Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, Arakawa H, Furuta T, Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), Radiological Physics and Technology, 18, 196-208, 2025.
 5. Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D, Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera, Radiological Physics and Technology, 18, 308 – 315, 2025.
 6. Fujibuchi, T.; Arakawa, H.; Anam, C. Development of a Real-Time Radiation Exposure Estimation Method Using a Depth Camera for Radiation Protection Education. Radiation, 4, 261-275, 2024.
 7. Fujibuchi T, Nakashima M, Arakawa H, Miyazaki H, Anam C. Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution. J Radiol Prot., 44, 031510, 2024
 8. Arakawa H, Fujibuchi T, Kaneko K, Okada Y, Tomisawa T, Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment, Nuclear Engineering and Technology, 56, 2428-2435, 2024.
 9. Han Donghee, Toshioh Fujibuchi. Human phantom applicability of 3D-printed polylactic acid for X-ray dose analysis: simulation and measurement studies Radiological Physics and Technology, 2025 (accepted).
 10. 矢野 祐二, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, 含鉛および無鉛素材の放射線防護衣における透過 X 線スペクトルや鉛当量, 均一度の評価, 日本放射線技術学会雑誌, 80, 944-954, 2024
 11. 檜 作 響 子, 藤 淵 俊 王, Han Donghee, 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線方向ベクトルの可視化, 日本放射線技術学会雑誌, 2025 (accepted)
 12. 藤淵俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, 日本放射線技術学会 放射線防護部会誌, 24, 14-31, 2024
 13. 藤淵俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, インナービジョン, 40, 22-23, 2025.
- ## 2.学会発表
1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. A study of a simplified dose calculation method using directional vectors when placing radiation protective plates. The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 2. Mayu Sakai, Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of realtime imaging of

- scattered radiation sources in X ray fluoroscopy using a semiconductor camera, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
3. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 4. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Development of real-time scattered radiation distribution display application according to the position of radiation protection plate, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 5. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation and implementation of educational scenarios aimed at understanding optimization of radiation protection in fluoroscopy using Extended Realty, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 6. 藤淵 俊王, 医療被ばくにおける実効線量の正しい使い方, 日本放射線技術学会 第6回 放射線影響と防護量の考え方を学ぶWebセミナー, 2024.7.31
 7. Toshioh Fujibuchi Radiation protection using digital transformation in the medical field, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.
 8. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.
 9. 藤淵 俊王, XRの医療放射線分野への活用, 日本医学物理学会 市民公開講座, 福岡, 2024.8.16.
 10. 藤淵俊王, 富澤登志子, Extended reality を利用した放射線診療従事者向け医療放射線防護教育教材の開発と実践, 第67回日本放射線影響学会, 北九州, 2024.9.25-28.
 11. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of real-time scattering ray imaging using a high-sensitivity CMOS camera, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
 12. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
 13. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Simplified Dose Distribution Calculation Method for Placing Radiation Protective Plate Using Directional Vectors, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
 14. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han.

- Development of simplified dose distribution calculation program for radiation protective plate placement using directional vectors. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
15. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Consideration of real-time visualization of scattered rays using a high-sensitivity CMOS camera. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 16. Education on optimizing radiation protection in X-ray fluoroscopy using extended reality, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 17. Donghee Han, Toshioh Fujibuchi, An evaluation of human phantom applicability of 3D-printed filaments by dose measurement of Monte Carlo simulations and radiophotoluminescence glass dosimeters, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 18. 境 真由、Lee Hyojin、藤淵 俊王、荒川 弘之、Han Donghee、可搬型半導体式放射線可視化カメラによるX線透視での散乱線源のイメージングの検討. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 19. 檜作 響子、藤淵 俊王、荒川 弘之、Han Donghee. Virtual reality技術を利用したX線透視時の散乱線方向ベクトルの可視化. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 20. 野口 昂生、藤淵 俊王、AR技術を利用したモバイルCアーム透視装置およびCT装置の散乱線可視化による放射線防護アプリケーションの作成. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 21. 田淵 麻央、檜作 響子、藤淵 俊王、Ray tracingを利用したX線透視室内の散乱線分布可視化システムの開発と精度検証. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 22. Lee Hyojin, 藤淵 俊王, Han Donghee. 高感度CMOSカメラを用いたX線CT検査時の散乱線源の可視化による放射線防護対策の検討. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 23. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに係る近年の動向. 第1回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024) 情報提供講座③, 沖縄, 2024年11月1日.
 24. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, Kyushu University Asia week, Fukuoka, 2024.11.5-9.
 25. 藤淵 俊王, 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに係る近年の動向. 日本医学物理学会2024年度ベーシックセミナー, 2024年12月6-26日.

- | | |
|---|--|
| <p>26. Lee Hyojin, 藤淵俊王, Han Donghee.
高感度CMOSカメラとデプスカメラ
を用いた散乱線源の3次元イメージ
ングに関する検討. 第19回九州放射
線医療技術学術大会, 宮崎, 2024年12月
21日-12月22日</p> <p>27. 田渕 麻央, Lee Hyojin, 藤淵俊王. 診
療用X線管におけるターゲット内の
相互作用を再現した散乱線分布のモ
ンテカルロシミュレーションの検討.
第19回九州放射線医療技術学術大会,
宮崎, 2024年12月21日-12月22日</p> <p>28. Toshioh Fujibuchi, Donghee Han,
Education on optimizing radiation
protection in X-ray fluoroscopy-guided
procedures using extended reality, PHITS
Workshop and Intermediate Course at
Japan Atomic Energy Agency in Tokai,
Japan 2025, February 18-21, 2025</p> <p>29. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Han</p> | <p>Donghee, Development of Directional
vector-based Quick evaluation method for
Protective plate Effects in X-ray
fluoroscopy (DQPEX), PHITS Workshop
and Intermediate Course at Japan Atomic
Energy Agency in Tokai, Japan 2025,
February 18-21, 2025</p> |
|---|--|
-
- | |
|---|
| <p>H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)</p> <p>1. 特許取得
なし</p> <p>2. 実用新案登録
なし</p> <p>3. その他
なし</p> |
|---|

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

放射線防護教材およびアクションチェックリストの有効性の評価と改善

研究代表者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

令和4年度に構築した放射線防護教育教材 web サイトとアクションチェックリストについて、使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院の放射線科、循環器内科、肝臓・膵臓・胆道内科、放射線部の放射線診療従事者65名である。同意を得た対象者に、令和5年3月に教材を使用していただき、令和4年4月から令和5年3月と、令和5年4月から令和6年3月までの1年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。また各診療科の医師に職業被ばくに関するアンケート調査を実施した。

全体の被ばく量は、使用前の令和4年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和5年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。診療科別では循環器内科医師が使用前平均 1.46 mSv と比較的高く使用後は被ばく量が半減したのに対し、他の診療科、部では使用前から 1 mSv 未満で同等か若干上昇した。ただし統計的有意差は認められなかった。アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、令和6年度版は防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門（小線源治療追加）に追加した。

放射線診療を実施する各診療科医師への放射線防護教育へのアンケートの結果からは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

今後の課題として、教材やアクションチェックリストをいつどのようなタイミングで使用すべきか、現場の状況に応じた防護対策教材の開発、対象者とのコミュニケーションの取りやすい環境での使用といった教材の運用方法についての検討が求められる。

研究分担者

石神 康生	九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 教授
小川 佳宏	九州大学大学院医学研究院 病態制御内科学 教授
馬場 眞吾	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 教授
坂本 和生	九州大学病院 肝動脈治療部 助教
磯田 拓郎	九州大学病院 放射線部 講師
岡崎 龍史	産業医科大学 産業生態科学研究所 教授
富澤 登志子	弘前大学大学院 保健学研究科 教授

研究協力者

牛島 泰宏	九州大学病院放射線科 講師
藤森 尚	九州大学病院肝臓・膵臓・胆道内科 助教

A. 研究目的

医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。多くの分野で利用される放射線防護教材は多く用意されているが、被ばくに関する概念・法令・理論に関するものがほとんどで、放射線診療従事者の実務に反映できないものもある。より理解しやすくするために、放射線診療従事者に対して事前に放射線被ばくの軽減の重要性を説明するとともに臨床現場のスタッフの視点で、様々な理解度や業務内容、さらに所持している放射線防護具に応じた教材が求められる。そこで本研究では、これまでの知見を活用し、また画像や動画等のコンテンツを充実させわかりやすく実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策を取りまとめたポータルサイト（以下、放射線防護教材）およびアクションチェックリストを作成した。本研究の目的は、放射線防護教材の有効性を検証することである。

B. 研究方法

B-1 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材の有効性の検証方法として、教材使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院に所属する放射線資料従事者の内、放射線科医師 5 名、肝臓・膵臓・胆道内科医師 8 名、循環器内科医師 14 名、放射線部診療放射線技師 37 名の計 65 名である。研究に対する同意を得た対象者に令和 5 年 3 月に教材を使用していただき、令和 4 年 4 月から令和 5 年 3 月と、令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月までの 1 年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。

B-2 放射線を使用する各診療科医師への職業被ばくに関するアンケート

放射線診療に従事する放射線科、肝臓・膵臓・胆道内科、循環器内科、整形外科計 24 名に対し、職業被ばくに関するアンケート調査を実施した。質問内容として下記の 4 項目について自由記載方式で回答を収集した。

質問 1. 透視業務に係る医師の被ばく低減に対する意識・関心を高めるにはどのような情報が有効ですか？

質問 2. 被ばく対策の情報を提供・周知するアプローチとしてどのようなものが有効ですか？（診療の現場、院内講習、学会、厚生労働省（労働基準局））

質問 3. 何か被ばく低減対策の良い事例を伺われたことはありますか？

質問 4. 近年、透視手技中の被ばくをリアルタイムに画面表示する無線式線量計も市販されています。手技中に自身の被ばくを知ること、被ばくに対する意識を高められますか？

（倫理面への配慮）

本研究は参加者に web サイトやアクションチェックリストを使用することから、九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け（課題番号 22013）、研究に対する同意を得た対象者にその後アンケートを実施することから、各研究施設での倫理審査委員会で承認を得た後、参加者から同意書を得て研究を実施した。

B-3 放射線防護教材、アクションチェックリストの改善

令和 4、5 年に作成したアクションチェックリストに対して、放射線診療従事者に対して実施したアンケート結果を踏まえアクションチェックリストの改善を実施した。

C. 結果

C-1 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材前後の対象者の年間実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量を表 1 および図 1 に示す。使用前は令和 4 年 4 月から令和 5 年 3

月、使用後は令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月である。

表 1 放射線防護教材使用前後の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量

(mSv/y)	使用前			使用后		
	実効線量	水晶体線量	皮膚線量	実効線量	水晶体線量	皮膚線量
全体	0.49	1.41	1.47	0.37	0.94	1.02
肝臓・脾臓・胆道	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03
循環器	1.46	3.81	4.12	0.69	1.38	1.84
放射線科	0.72	4.14	4.00	1.25	5.58	5.50
放射線部	0.23	0.48	0.48	0.25	0.48	0.51

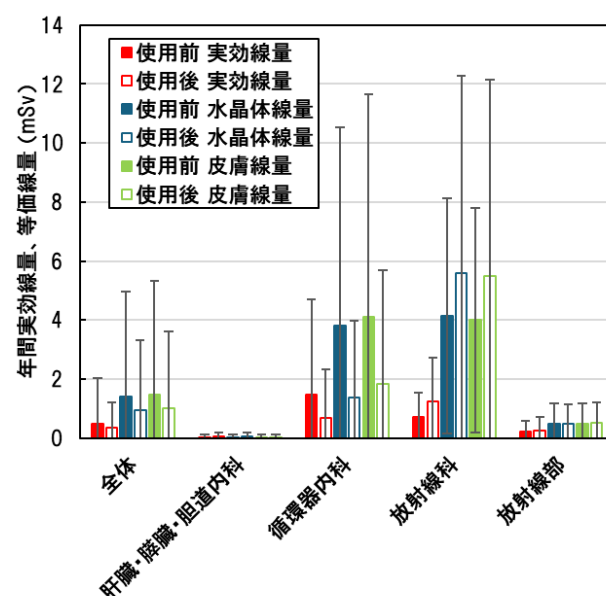


図 1 放射線防護教材使用前後の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量

放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の変化を図 2 から 4 に示す。多くの対象者は減少もしくは同等の傾向がみられる。

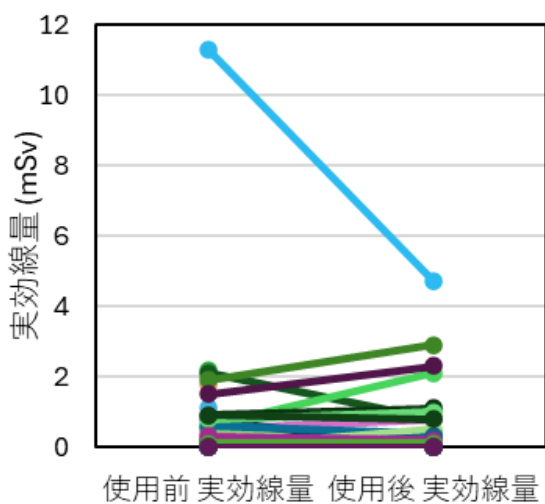


図 2 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

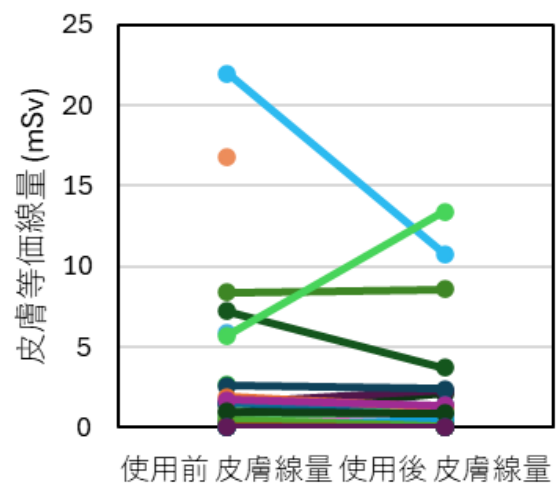


図 4 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

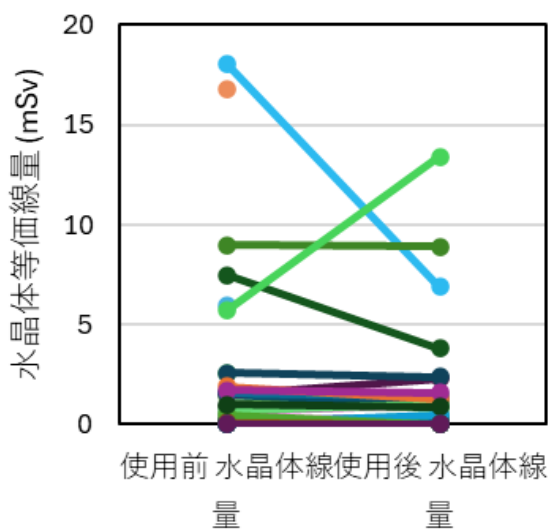


図 3 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

放射線防護教材使用前後の実効線量および等価線量の頻度の分布を図 5 に示す。対象者の 6 割近くが被ばく無しで、年間 1 mSv を超える対象者は 1 割程度であった。

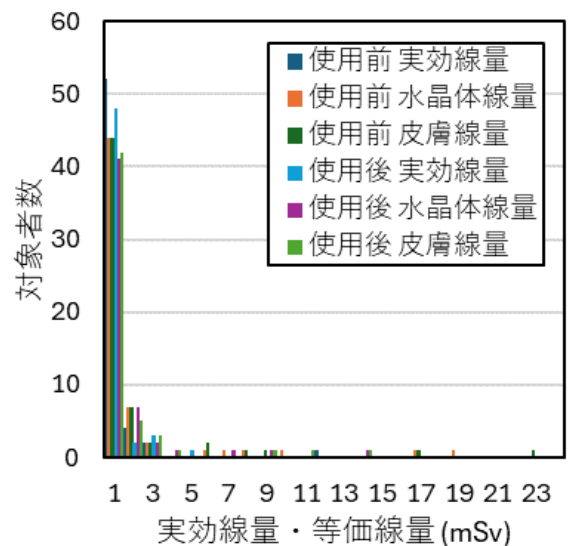


図 5 放射線防護教材使用前後の実効線量および等価線量の頻度の分布

C-2 放射線を使用する各診療科医師への職業被ばくに関するアンケート

各質問に対する回答を示す。

質問 1. 透視業務に係る医師の被ばく低減に対する意識・関心を高めるにはどのような情報が有効ですか？

(内容について)

- ・ 被ばくによる影響と具体的な事例 (11 名)
- ・ 現場での被ばくによる影響 (確率的影響のリスク、組織反応) と事例の周知。
- ・ 被ばくの影響などはすでにかなり周知されていると思います。
- ・ 他施設の良い対策例 (4 名)
- ・ リアルタイムに被曝量を認識できる状況 (数字や視覚的に) (4 名)
- ・ 10 年前と比較して現在は最小限の被ばくに抑えていると思うが、それでもある一定以上の被ばくが生じるのは医療を行う上でやむをえないのかもしれない。
- ・ 増え続ける医療費の議論にも似るが、医療者あたりの患者自体の数を減らせない限りは医療者の身体がある程度の被ばくの犠牲になるのはやむをえない。

質問 2. 被ばく対策の情報を提供・周知するアプローチとしてどのようなものが有効ですか？ (診療の現場、院内講習、学会、厚生労働省 (労働基準局))

(時期について)

- ・ 年度はじめに周知すること。
- ・ 入職時に提供。

- ・ 診療科のカンファレンスや透視処置の前後。
- ・ 業務従事当初に周知すること。
- ・ 消化器内科で言えば、卒後 3 年目以降 (消化器内科 1 年目) で、透視下処置 (ERCP やイレウスチューブなど) に従事し始めるため、専門家としての意識づけとしても、早いタイミングが良い。

(開催方式)

- ・ 診療の現場 (12 名)
 - ✓ 小グループがよい
 - ✓ 手技をする場所 (手術室や透視室) に被ばく低減策を示したポスターを掲示。
 - ✓ 術者と助手でどれくらい被ばく量に差があるか、それぞれ 1 年でどれくらい被ばく量が蓄積されるかなど知りたい。
 - ✓ 個人での対策は限界があるので、他の処置などと同じように科全体として上級医から指導を受けるのが良い。
 - ✓ 被ばく対策を体験するようなワークショップ。
- ・ 院内講習 (12 名) E-learning (3 名)
- ・ 学会 (3 名)
 - ✓ 学会や論文などでの発表が良い。
 - ✓ 学会に合わせて、各々の透視業務で被ばくが高い動作や位置などを個々の事例の情報があると有用

質問 3. 何か被ばく低減対策の良い事例を伺われたことはありますか？

- ・ 特になし (9 名)
- ・ 組織的な対応は学会などで聞いたことがある (2 名)
- ・ 論文を拝見した記憶があるが、詳細は覚えていない。

- ・ 放射線防護具の活用（手袋、眼鏡、防護衣）（6名）
- ・ ERCP 領域では透視線源自体を覆うことでかなり被ばくを抑えられ、さらに遮蔽板を置く、不必要には透視室へ入らないなど対策（2名）
- ・ ロボット PCI、アンギオ装置の改良、画像検出器の高感度化
- ・ 診療放射線技師からのアドバイスをもらったことはある。
- ・ 先輩医師の体験談

質問 4. 近年、透視手技中の被ばくをリアルタイムに画面表示する無線式線量計も市販されています。手技中に自身の被ばくを知ること、被ばくに対する意識を高められますか？

- ・ 有効と思われる（20名）
- ・ 被ばくを低減しようと意識する機会が高まると思います。
- ・ 有用だが、手技への集中を邪魔しない工夫が必要。
- ・ 少なくとも意識は高まるが、実際に被ばくが減るかは別問題かも。
- ・ 被ばく量だけでは意識は変わらない（被曝量がある一定量に達しても手技を止められない）。（2名）
- ・ それより、遮蔽板の各部屋への購入（1枚以上あってもいいと思います）やプロテクタを全面保護（前面だけの保護でない）に当たった方が、実際に被曝量を抑えられる。

C-3 放射線防護教材、アクションチェックリストの改善

令和 5、6 年度の放射線診療従事者へのアンケートの結果から、放射線防護具の正しい使用

方法を知りたい声が複数あった。そのため、教材には十分放射線防護具が配備されているか、使用しているかを分けてアクションチェックリストに詳細に記載した。自身の被ばく量の把握を十分に理解できていないとの意見もあり、アクションチェックリストに着用する可能性のある個人線量計の種類を追加した。また、診療の現場の散乱線分布の理解の促進の要望に対して、具体的な散乱線分布の詳細は web サイトや 3 次元放射線可視化教材で紹介する教材を追加した。

アクションチェックリストは、令和 4 年度版は 27 項目であったが、令和 5 年度版は 40 項目 6 部門（一般撮影、透視、血管造影、CT、核医学、放射線治療）に、令和 6 年度版は防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門（小線源治療追加）に追加した。アクションチェックリストを本資料の補足資料として章末に添付する。

D. 考察

今回の放射線防護教材の有効性の調査結果から明らかになったこととして、全体の平均線量は使用後で 70%程度低下したが、統計的有意差は認められなかった。高被ばく者について、2 年間での大きな違いはなく、放射線診療に従事する業務量の問題が大きく聞いている可能性がある。また放射線防護対策が不足しているかは本調査からは不明であり、高被ばくとなることの原因究明には、直接的な介入が必要である。

放射線防護教材の有効性の評価を実施する上で考えられる課題を下記に挙げる。対象者について、今回多くの対象者は 2 mSv 未満の被ばく（6 割近くは 0）で、変化が確認しづらかった。これは、放射線防護教材を使用する前から十分な対策が出来ている可能性があり、調査する際の

施設のバックグラウンドにより教材の効果が異なることを示唆する。

教材の運用方法について、教材やアクションチェックリストを作成するだけでなく、これらをいつどのように使用するかが、効果な活用に重要である。また放射線診療を実施する場合も幅広く、モダリティや職種により放射線防護方法が大きく異なる。そのため、基礎的な項目として一般的な放射線防護方法の説明をする教材も必要ではあるが、現場の状況に応じた放射線防護対策の教材作成が求められる。これは厳密にはモダリティ別に作成するだけでなく、個々の医療機関によっても備えられている放射線防護具や部屋の大きさ、機種、業務量や担当する職種などが異なり、細かな状況に応じた放射線防護教育の最適化ができればよいが、現状では放射線防護教材や E-learning では一般的なことしか示すことが出来ず、一方通行の説明となり、ここが大きな限界となっている。そのため教材作成だけでなく、対象者とのコミュニケーションを取りやすい環境を構築することが細かな放射線防護対策には重要となる。

また放射線防護教材の有効性について、今回は教材の使用前後での被ばく量の比較から評価をしたが、他の放射線教育、講習の機会により被ばく低減効果があっても判別が出来ない。これは今回の有効性の評価法のデザインでの問題点である。2021 年の電離放射線障害防止規則等での水晶体等価線量限度の引き下げに伴い、労働基準局からの案内の他、関係学会等でも特集の記事を組んだり学会シンポジウムとして企画したりするなど放射線診療従事者の自分自身の被ばくに対する関心が高まっている。これらの他の放射線防護意識の向上に対するバイアスは排除できず、被ばく量だけからでは教材の真の有効性を図ることに限界があった。

各診療科の医師に対するアンケートからは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。医療現場での職業被ばくによる放射線影響の事例を紹介することは、自身の被ばくを他人事とすることなく、対策をした上で放射線を扱わないと自分が被害を受ける可能性があることとして主体的に防護対策に取り組む契機となる可能性がある。また他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

放射線診療を実施する上で患者の医療安全を優先しつつ、自分自身の労働衛生環境も適切なものとすることは身体的、精神的にも負担のかかることであるが、多くの医療従事者やデジタル技術によってサポートしながら、患者や医療従事者にとってより安全な放射線診療の場を構築することが求められる。

E. 結論

本研究において、放射線診療中従事者の被ばく量から放射線防護教材の有効性を検証した。平均被ばく量は資料使用後に低下したが、統計的有意差は確認できなかった。放射線診療を実施する医師へのアンケート調査からは、放射線業務での放射線影響や対策に関する事例の情報の共有が望まれていること、様々な放射線診療の現場に応じた防護対策とそのサポートが望まれる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, 日本放射線技術学会 放射線防護部会誌, 24, 14-31, 2024
2. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, インナービジョン, 40, 22-23, 2025.
3. Han Donghee, Toshioh Fujibuchi. Human phantom applicability of 3D-printed polylactic acid for X-ray dose analysis: simulation and measurement studies Radiological Physics and Technology, 2025 (accepted).

2. 学会発表

1. 藤淵 俊王, 医療被ばくにおける実効線量の正しい使い方, 日本放射線技術学会 第6回 放射線影響と防護量の考え方を学ぶWebセミナー, 2024.7.31
2. 藤淵 俊王, XRの医療放射線分野への活用, 日本医学物理学会 市民公開講座 講演3, 2024.8.16
3. Toshioh Fujibuchi Radiation protection using digital transformation in the medical field, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.藤淵 俊王、水晶体被ばくに係る

近年の動向、第1回日本放射線医療技術学術大会 2024.11.1

4. 藤淵 俊王、医療従事者の職業被ばくと放射線防護教育 日本医学物理士会 2024年度ベークシクセミナー④「放射線安全教育」 2024.12.6
5. Donghee Han, Toshioh Fujibuchi, An evaluation of human phantom applicability of 3D-printed filaments by dose measurement of Monte Carlo simulations and radiophotoluminescence glass dosimeters, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

(資料) 令和 6 年度に改良したモダリティ別アクションチェックリスト

各部署別の対象装置を以下に示す。

一般撮影：一般撮影装置、ポータブル撮影装置、歯科撮影装置

X 線透視：透視装置、小線源用透視装置

血管造影：血管造影装置

CT 検査：診断用 X 線 CT 装置、治療計画用 CT、PET-CT、SPECT-CT

核医学診療：非密封放射性同位元素

外部放射線治療：高エネルギー放射線発生装置

小線源治療：密封放射性同位元素

A:放射線診療従事者、M：放射線管理者

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト (令和 6 年版)											
診療前の準備、関連機器・器具の配備					一般撮 影	X 線 透視	血 管 造 影	CT 検 査	核 医 学 診 療	外部 放射 線治 療	小線 源治 療
放射線 防護具 (個人 着用 型) の 配備	1	放射線防護衣（エプロン タイプ）を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	2	放射線防護衣（コートタ イプ）を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	3	放射線防護衣（ベストタ イプ）を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	4	放射線防護衣（スカート タイプ）を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	5	防護衣着用時の肩や腰の 負担軽減用ベルトやサポ ーターを配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	6	放射線防護用ゴーグルを 配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A

	7	放射線防護用甲状腺防護具を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
	8	放射線防護用手袋を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
	9	放射線防護用帽子を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
放射線防護具 (非着用型) の配備	10	放射線防護板（天吊り、移動式）を配備	Yes	No		A	A	A	A		A
	11	放射線防護衝立（移動式）を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	12	放射線防護カーテンを配備	Yes	No		A	A	A			
	13	放射線防護ドレープを配備	Yes	No		A	A	A			A
個人線量計の 配備	14	体幹部（胸部または腹部）用個人線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	15	（防護衣を着用する場合） 頸部用個人線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	16	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の個人線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	17	水晶体線量測定用線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	18	（外部放射線治療、PETサイクロトロン担当の場合） 中性子線測定用の個人線量計の配布	Yes	No						A	
	19	電子式個人線量計を配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
サーベイメータ	20	（汚染検査用）GMサーベイメータを配備	Yes	No					M		M
	21	（空間線量測定用）サーベイメータを配備	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	22	エリアモニタを設置	Yes	No					M		M

補助具 の配備	23	患者、患児用の固定具を 配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	24	照射野、線源への近接を 防ぐ鉗子等補助具を配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
核医学 用関連 機器	25	RI 投与時の自動投与装置 を配備	Yes	No					A		
	26	手動による投与時、シリ ンジシールドを配備	Yes	No					A		
	27	β線源等、線種に適した 遮蔽体を配備	Yes	No					A		
装置の 品質管 理	28	放射線装置の始業点検、 品質管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	29	放射線装置の照射条件の 管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	30	放射線防護具の品質管理 を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	31	線量計の品質管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
放射線 分布の 理解	32	放射線業務時の室内の放 射線分布をイメージでき ている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	33	室内の放射線分布図を掲 示	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M

診療中の防護					一般撮 影	X線 透視	血 管 造 影	CT 検 査	核 医 学 診 療	外部 放射 線治 療	小線 源治 療
個人線 量計の 使用	1	体幹部（胸部または腹 部）用個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	2	（防護衣を着用する場 合） 体幹部用の個人線量計を 防護衣の内側に着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A

	3	(防護衣を着用する場合) 防護衣の外側に個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	4	(指先が照射野に近い場所で作業する場合) 指輪型の個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	5	水晶体線量測定用線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	6	(外部放射線治療、PETサイクロترون担当の場合) 中性子線測定用の個人線量計を使用	Yes	No						A	
	7	電子式個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
放射線防護具 (個人着用型)の使用	8	放射線防護衣(エプロンタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	9	放射線防護衣(コートタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	10	放射線防護衣(ベストタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	11	放射線防護衣(スカートタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	12	肩や腰の負担軽減ベルトやサポーターを使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	13	放射線防護用ゴーグルを使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	14	放射線防護用甲状腺防護具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	15	放射線防護用手袋を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
放射線防護具 (非着用型)	16	放射線防護用帽子を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	17	放射線防護板(天吊り、移動式)を使用	Yes	No		A	A	A		A	A
	18	放射線防護衝立を使用	Yes	No	A	A	A	A		A	A

用型) の使用	19	放射線防護カーテンを使用	Yes	No		A	A	A			
	20	放射線防護ドレープを使用	Yes	No		A	A	A			
放射線 防護具 (遮蔽 による 防護)	21	放射線防護板の後方での作業	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	22	放射線防護衝立の後方での作業、監視	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	23	その他の放射線防護具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	24	照射時は操作卓側出入口の扉を閉めている	Yes	No	A	A	A	A	A		A
手技中 の位置 (距離 による 防護)	25	X線管、線源にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	26	患者からの散乱線の広がりを意識し、可能な範囲で近づかないようにしている	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	27	照射野に手を入れない	Yes	No	A	A	A	A			
	28	小児の固定時、固定具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
照射、 画像処 理条件	29	診断参考レベルを参考に、照射条件を最適化している	Yes	No	M	M	M	M			M
	30	可能な範囲で照射野を絞る	Yes	No	A	A	A	A			A
	31	患者と画像検出器をできるだけ近づける	Yes	No	A	A	A	A			A
	32	グリッドを外す、付加フィルタや線源-検出器間距離を変更する	Yes	No	A	A	A	A			
	33	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No	A	A	A	A			

	34	被ばく低減（ノイズ低減）処理の入った画像処理アルゴリズムを使用	Yes	No	M	M	M	M			
	35	患者に静止の必要性について説明し、協力してもらう	Yes	No	A	A	A	A			
	36	医療スタッフ間でのコミュニケーションを取る	Yes	No	A	A	A	A			
	37	透視のフレームレートを出来るだけ下げる	Yes	No		A	A				
核医学 関連	38	RI 投与時、自動投与装置を使用	Yes	No					A		
	39	手動による投与時、シリンジシールドを使用	Yes	No					A		
	40	β線源等、核種に適した遮蔽体を使用	Yes	No					A		
	41	放射性医薬品投与量の最適化	Yes	No					A		
	42	RI 調剤時はドラフト内での作業	Yes	No					A		

放射線影響の理解					一般撮影	X 線透視	血管造影	CT 検査	核医学診療	外部放射線治療	小線源治療
被ばく のリスク	1	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	2	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	3	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A

	4	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	5	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A

労災疾病臨床研究事業費補助金 分担研究報告書

IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

研究分担者 富澤 登志子 弘前大学・大学院 保健学研究科 看護学領域 教授

研究要旨

医療従事者の継続的な専門能力開発は、技術の進歩や社会的ニーズの高まりに伴い、職業的義務であると同時に権利でもある。これにより、患者の安全性向上や医療の質改善が図れるだけでなく、専門職のモチベーションや定着率向上にも寄与する。しかしながら、研修への参加は人員確保の困難さや不規則な勤務形態などが障害となり、十分な継続教育が受けられない現実がある。

この課題の解決策として、ジャストインタイム・トレーニング (JIT) が注目される。JIT は、必要な知識やスキルを即座に学習できる方式で、適時性・関連性・効率性・柔軟性を備える。医療分野においても、JIT トレーニングは限られた時間内での学習機会の提供に有効であり、特に周術期看護師のスキル向上に貢献する。

さらに、個々の学習者の特性に応じたマイクロラーニング (ML) やアダプティブラーニング (AL) が適応性の高い学習法として挙げられる。ML は短時間で学習できるモジュール型教育、AL は AI を活用し学習者に最適な教材を提供する方式である。生成 AI の進化により、学習内容の個別最適化も可能になり、精度向上に向けた技術開発が進んでいる。

現代社会では情報の選択が重要であり、集中力の低下も課題となっている。医療人材育成には、JIT や AI 技術を活用した適切な教育提供が求められている。今後、放射線医療教育なども個人の学習ニーズに応じた調整が進むと考えられる。

A. 目的

科学技術の進歩や、社会的な要求やニーズの高まり、法律を含む社会システムの変化の環境において、看護師など医療従事者の継続的な専門能力開発は、権利であり職業上の義務といえる¹⁾患者の死亡率や救命に失敗する確率を減らすなどケアの質や健康アウトカムの改善に貢献するだけでなく²⁾³⁾、専門職のモチベーション、コミットメント、満足感を促進し⁴⁾、その結果、専門職の定着とパフォーマンスを向上させる⁵⁾。これらの要素はすべて、影響を与える患者の安全性を高め、医療費の削減に寄与するだけでな

く、専門職者である医療職自身のモチベーションを高め、組織の質向上につなげることができる⁶⁾。しかし実際に専門力向上のための研修会などに参加することで人員を確保することが困難になっていること、勤務時間が短い、夜間や週末のみ勤務している、あるいは退職間近であることなども専門能力の向上を阻害する要因であるという⁷⁾⁸⁾。このように医療職は継続的な学習を要するものの、研修会や e-learning に時間を割くことは、人材不足や不規則な勤務交代、など様々な理由により継続教育の機会がうまく取れない現実がある。

医療における放射線の利用は欠かせないものであるものの、多くの医療従事者にとって放射線機器は道具の一つでしかない。患者や医療従事者の安全を守りながら適切な診療を実施するには非常に多くの知識が求められ、また医療技術の発達が進む中、それぞれの分野での最新の知識のアップデートが求められる。

このような医療業界の背景の中、近年目覚ましい発展を遂げている人工知能（Artificial Indigence：AI）技術を始めた情報技術（Information Technology：IT）、デジタル技術等を活用した教育手法を取り入れることで、学習する場所や時間に縛られることなく効率的に、かつ個々の対象者の知識や現場の状況に応じて効果的な教育につなげられる可能性がある。そこで近年注目されているIT技術を活用した教育手法に関して文献調査により情報を収集し、医療従事者への教育の可能性に関して検討した。

B. 方法

文献検索を基に、近年企業の社員教育や教育現場で取入れられている情報を収集した。その中で、ジャストインタイム・トレーニング（Just In Time：JIT）、マイクロラーニング（Micro-Learning：ML）、アダプティブラーニング（Adaptive Learning：AL）というキーワードが注目されている教育手法として浮かび上がってきた。これらの教育手法についてその概要や医療従事者への適応について検討した。本研究は

（倫理面への配慮）

本研究は、人を対象とする研究ではない。

C. 結果

C-1 ジャストインタイム・トレーニング

限られた時間で効果的な人材育成を行う方略

として、企業などではジャストインタイム・トレーニング（JIT）がある。JITとは、従業員が必要な時に必要な知識やスキルを習得できる学習戦略であり、不必要な事前トレーニングを最小限に抑え、実務での応用を最大限に高めるものである。必要な時に必要な学習をする（適時性）、現在関与している課題に関して学習を行う（関連性）、必要な知識だけに絞り、不必要なトレーニングは最小限にする（効率性）、個々の学習のレディネスや経験、パーソナリティに合わせた学習やオンデマンドのコースなどを行う（柔軟性）を内包する。医療分野でのJITについてもこれまでいくつかの研究があるが、患者の安全を維持し、医療の進歩に遅れずについていくために有益といえる。周術期の看護師は、JITトレーニングによってスキルを最新のものに更新し、時間とリソースが限られているという課題に対処することが可能となるこのようなアプローチにより、医療職は質の高い医療実践を提供する能力を損なうことなく、必要な知識にアクセスできる。

C-2 マイクロラーニング

個人に合わせるとともに少ない時間で学習機会を提供する方法として、マイクロラーニング（Micro-Learning：ML）やアダプティブラーニング（Adaptive Learning：AL）の概念が、親和性が高いといえる。MLとは、短い教材からなる教育プログラムを指し、1章の教育が細かく一口サイズのレッスンに分割され⁹⁾¹⁰⁾、多様な形式（ゲーム、ビデオ、クイズなど）を含み、学習者に即座にフィードバックすることができる¹¹⁾。MLは1950年代：スキナーのプログラム学習が、マイクロラーニングの原型と言われ、1990年代に入り、eラーニングの普及とともに、MLの概念が生み出された。初期のeラーニングは、長時

間の講義ビデオやテキストベースの教材が中心であったが、学習者の集中力維持や学習時間の確保が課題だった。そこで、学習内容を細分化し、短時間で学習できる ML が登場した。2000 年代に入り、携帯端末の普及により、モバイルラーニングとマイクロラーニングが融合し、場所や時間にとらわれない学習が可能になってきた¹²⁾。さらに 2010 年代以降は動画共有プラットフォームや SNS の普及により、マイクロラーニングコンテンツの制作・共有が容易になり、企業研修、学校教育、医学領域でも導入が進んできた¹³⁾¹⁴⁾。ML の利点は、各モジュールで 1 つの問題・課題に対して答えを出していくため、何が大事であるのか容易に理解でき効率の良い学びができる点にある¹⁵⁾。

C-3 アダプティブラーニング

一方、アダプティブラーニングは、AI や学習データを活用し、学習者一人ひとりの進捗や理解度に合わせて最適な教材や指導を提供する教育手法である。アダプティブラーニングシステムは、学習者の解答履歴や理解度を分析し、次に提示する問題や教材を自動的に調整できる。そのため、AL は、学習者の得意分野を伸ばし、苦手分野を克服するための個別最適化された学習プランを提供できる。AL は、EdTech（教育テクノロジー）分野で注目されており、教育機関や企業での導入が進んでいる。学習者の回答結果に合わせ動画やクイズ、様々なコンテンツを提供するためには、昨今目まぐるしく発展している生成 AI を活用し、回答に応じた学習者の特徴に沿ったものを提供できるシステムが提供され始めている。生成 AI とは、人間のような理解と創造性を模倣した新しいコンテンツ（テキスト、画像、あるいは複雑なシミュレーション）を生成できる人工知能技術のサブセットである

¹⁶⁾。あらかじめ定義されたアルゴリズムと設定されたパターンで動作する従来の AI とは異なり、生成 AI は大規模言語モデル（LLM）として知られるものを使用してコンテンツを処理し生成する¹⁷⁾。OpenAI によって開発された ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer) を含むこれらのモデルは、人間が生成したテキストの広範なデータセットで訓練され、文脈に関連した、驚くほど首尾一貫した言語を理解し、生成する¹⁸⁾。

これらの新しい生成 AI モデルは、出力を生成する前にテキストのすべての部分を計量する変換器アーキテクチャに依存している。これにより、より長い会話や文書でも文脈を維持できるようになり、以前のモデルから大きく飛躍した¹⁹⁾。データ学習は時間差が生じており、最新の情報を有していないことや、AI による推論から事実ではないハルシネーションが発生することもあり、正確性を伴う必要がある場合には注意が必要である。しかしこれらも AI への指示を行うプロンプトの作成スキル、判断基準などを学習させるグラウンディング、確実にその情報だけを繋げる RAG などの技術により、より精度の高い AI アシスト型の AL がノーコードでも開発可能とされてきている。

D. 考察

我々の今いる世界は情報にあふれており、どの情報を受け取るのか個人がそれぞれの立場で情報を選択していく。できるだけ短くわかりやすい情報を好み、全般的に人の注意力は年々低下し、デジタル化のライフスタイルが長時間の集中を妨げている²⁰⁾。それ故、医療人材については、JIT を実施し、効率的かつ適切な教育を行い、またこうした人材育成については正確性、関連性のある教育に対して適時性を考慮して行

えるように整備していくことが求められる。
放射線に関する教育もその専門性のレベルにより提供の仕方も AI によって調整は可能となるが、体系的な教育ではなく、個別のレディネスと経験によって提供内容を変更する方向に進んでいくと考えられる。

E. 結論

医療人材の育成において、JIT、ML、AL の活用は有効であり、特に AI の進化に伴いさらに高度な学習環境が整えられる。今後、医療放射線防護教育などの専門教育にも適用され、個々の学習ニーズに応じた調整が進むと考えられる。

引用文献

1. Koff SZ. Nursing in the European Union: Anatomy of a Profession. Transaction Publishers; 2016.
2. Aiken LH, Clarke SP, Cheung RB, Sloane DM, Silber JH. Educational levels of hospital nurses and surgical patient mortality. JAMA. 2003;290(12):1617-1623.
3. Levett-Jones TL. Self-directed learning: implications and limitations for undergraduate nursing education. Nurse Educ Today. 2005;25(5):363-368. doi:10.1016/j.nedt.2005.03.003
4. Hariyatia RTS, Safril S. The relationship between nurses' job satisfaction and continuing professional development. Enferm Clin. 2018;28(suppl 1 Part A):144-148. doi:10.1016/S1130-8621(18)30028-0
5. Carlisle J, Bhanugopan R, Fish A. Training needs of nurses in public hospitals in Australia: review of current practices and future research agenda. J Eur Ind Train. 2011;35(7):687-701. doi:10.1108/03090591111157085
6. Gibbs V. An investigation into the challenges facing the future provision of continuing professional development for allied health professionals in a changing healthcare environment. Radiography. 2011;17(2):152-157. doi:10.1016/j.radi.2011.01.005
7. Gould D, Drey N, Berridge EJ. Nurses' experiences of continuing professional development. Nurse Educ Today. 2007;27(6):602-609. doi:10.1016/j.nedt.2006.08.021
8. Jaradeh M, Hamdeh HA. Nurses' experiences of continuous professional development. Jordan Med J. 2010;44(3):313-322.
9. Díaz-Redondo RP, Renedo-Morales FJ, Sánchez-Prieto JC. Microlearning as a tool to increase learning performance in university students. Comput Human Behav. 2021;115:106573. doi:10.1016/j.chb.2020.106573
10. Jahnke I, Liebscher J. Microlearning in higher education: How to foster self-regulated learning. E-Learn Digit Media. 2020;17(6):469-488. doi:10.1177/2042753020944684
11. Gill AS, Irwin DS, Ng RYK, Towey D, Wang T, Zhang Y. The Future of Teaching Post-COVID-19: Microlearning in Product Design Education. In: 2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE). IEEE; 2020. doi:10.1109/TALE48869.2020.9368322
12. Benson V, ঢ়েঢ়ঢ়ঢ় D, eds. Mobile Learning: Towards a Research Agenda. IADIS Press; 2007.
13. Lindner M. Microlearning: Snack-sized knowledge bites for today's learner. Learn Trends. 2014;2014:1-9.
14. Ruiz JG, Mintzer MJ, Leipzig RM. The impact of E-learning in medical education. Acad Med.

2006;81(3):207-212.

15. Castro Alonso JC, Casaló Ariño LV, Rúas Araújo J. The use of microlearning pills to increase motivation and knowledge retention in an online course. IEEE Rev Iberoam Tecnol Aprendizaje. 2019;14(4):241-248.

16. Dale R. GPT-3: what's it good for? Nat Lang Eng. 2021;27(1):113-118.
doi:10.1017/S1351324920000601

17. Brown TB, Mann B, Ryder N, et al. Language models are few-shot learners. arXiv. 2020.
doi:10.48550/arxiv.2005.14165

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

本研究では、Ray tracing 技術を用いて透視時の散乱放射線分布をリアルタイムに計算するアプリケーションを開発した。X線透視において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は直線的に進行すると仮定した。仮想X線透視室において、患者の体表面から体外に広がる散乱放射線の方角ベクトル、エネルギー情報をシミュレーションにより取得した。この情報を基にX線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。モンテカルロシミュレーションに対する本手法で散乱放射線量の算出値の比は、X線装置の裏側などを除き、ほとんどが0.7から1.8倍の範囲内だった。防護板を移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。配置の自由度の高い防護板の使用において、都度散乱放射線分布を測定することは現実的でなく、簡易的に散乱放射線分布やスタッフの線量の変化を確認することで、防護板の適切な配置方法の直感的な理解につながった。

研究協力者

田淵 麻央

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X線診療は現在の医療において欠かせないものになっている。X線透視下手技(FGI)は、X線透視をしながらカテーテルの留置や治療を行う手法である。ERCPやPTCD等様々な症例においてX線透視ガイド下手技が実施可能となりX線透視装置の臨床上的有用性が向上している。FGIでは患者を開腹しなくてよいことから侵襲度が低いという利点がある。

その一方、手技をする医師や看護師などの医療

スタッフの職業被ばくが多くなることが問題となり、適切な被ばく低減対策が求められる[1-5]。FGI時の主な散乱放射線源は患者である。特にERCPでは術者の水晶体の被ばくが多いことが問題となっている。外部放射線防護の3原則として距離、時間、遮蔽がある。距離に関しては手技をする上で術者は主な散乱放射線源である患者に近づかざるを得ない。そのため、遮蔽による放射線防護が有効である。

体幹部の遮蔽として、放射線防護衣が使用されている。また眼の水晶体の放射線防護には放射線防護眼鏡が使用されている[6]。これらの放射線防護具で遮蔽が不十分な場合に、放射線防護板が有効である。放射線防護板は自由に配置することが出来るが、自由度が高いことから適切な配置方法の直感的な理解やその効果を把握することが難しい。

X 線照射時の散乱放射線分布を検証する方法として、モンテカルロシミュレーションを利用した可視化技術がある[7-11]。正確に場の散乱放射線量分布をシミュレーションすることが出来るが、通常の PC を使用した場合、計算時間がかかるという問題がある。近年、3DCG を利用したゲームや映画等の映像表現において、光の挙動や散乱を正確に再現してリアリティをだすために、Ray tracing という手法が使用されている[12]。我々は、ray tracing 技術を利用して、主な散乱放射線源である患者を光源、散乱放射線を光と見立て、X 線診療室内の散乱放射線分布を簡易的かつ高速にシミュレーションすることが出来ないかと考えた。

そこで本研究では、Ray tracing 技術を用いて患者への X 線照射時に医療スタッフの位置に応じて室内の散乱放射線分布の変化をリアルタイムに計算するアプリケーションを開発することを目的とする。

B 方法

B.1 X 線検査室の再現と散乱放射線分布情報の算出

散乱放射線分布を X 線診療室の構造は、先行研究で作成したものを使用した[13]。30 cm×30 cm×15 cm の実在する水ファントムに X 線を照射した際のファントム周囲の散乱放射線の周辺線量当量をサーベイメータによる測定とシミュ

レーションにより比較した。その結果、この室内の測定値とシミュレーション値の差は±10%以内であることを確認した。

シミュレーションの精度を確認した上で、患者のモデルとして ICRP 110 男性ボクセルファントムを使用した[16]。ファントムは仰臥位とし、上腹部に照射した。ファントムから室内の空気中に放出される光子の散乱放射線の方向ベクトル、エネルギー情報を 16000 本、csv 形式で保存した。

B.2 Building a real-time calculation model

Ray tracing を利用したアプリケーションの開発について、Unity(2020.3.20f1)を利用した。並列計算の効率化のために、Unity DOTS(Data-Oriented Technology Stack)を利用したプログラムを含めた。X 線撮影において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は室内の空気中で散乱することなく直線的に進行するという仮定とした。仮想 X 線室において、仰臥位での透視における患者の体表面から体外に広がる散乱放射線の方向ベクトル、エネルギー情報を取り込んだ。この情報を基に Fig 1 に示す 50 cm 間隔の評価点を設置し、この点を通過する光子数から X 線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。ここで仮想 X 線診療室の座標は、X 線照射野中心で撮影寝台を原点とし、+X 方向を患者頭側方向、-X 方向を患者足側方向、+Y 軸を天井方向、-Y 軸を床方向、+Z 軸を患者右方向、-Z 軸を患者左方向と定義した。

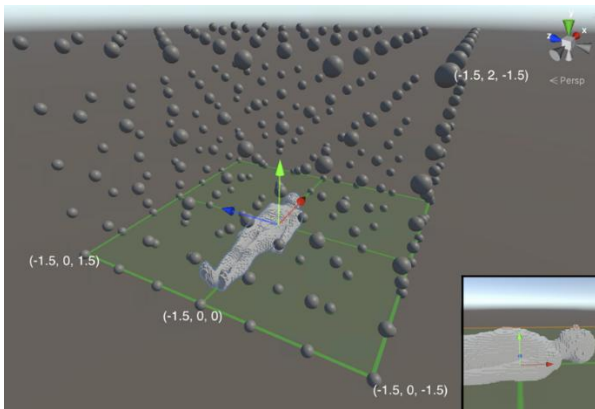


Figure 1 仮想 X 線診療室内の散乱放射線量評価点

散乱線量分布は相対値であり、アプリケーション上で換算係数を入力すること全体の値を変更できるようにした。

仮想 X 線診療室内には 3 人の医療スタッフと放射線防護板を配置した。医療スタッフを室内に配置し散乱放射線と衝突した際、散乱放射線の進行方向と防護板の位置に応じて室内の散乱放射線分布が瞬時に変化するようにした。X 線診療室には複数の線量評価点を含む医療スタッフ 3D モデルを配置し、マウス操作で室内を移動できるようにした。また医療スタッフモデルの両眼、甲状腺、胸部中心、腹部中心、腰部中心、右指先、左指先に評価点を置くことで、その位置における各評価点を算出できるようにした。

B.3 Ray tracing 計算と Monte Carlo 計算の比較

シミュレーション精度を検証するため、X 線撮影において医療従事者が手技のために配置される患者左側 X 軸を -1.5, -0.5, 0.5, 1.5 m、Z 軸を -0.5, 0.5, 1.5 m とし、床から 1, 1.5 および 2 m の高さ計 36 点でモンテカルロシミュレーションと本シミュレーションによる比較をした。

(倫理面への配慮)

本研究は、人を対象とする研究ではない。X 線を使用する研究では、研究者が被ばくする恐れがあるため、放射線防護対策をした上で研究実施した。

C. 結果

C.1. 患者からの散乱放射線方向ベクトル

モンテカルロシミュレーションで取得した患者からの散乱放射線方向ベクトル情報を Fig. 2 に示す。取得した散乱放射線の方向ベクトル情報は、16,000 である。

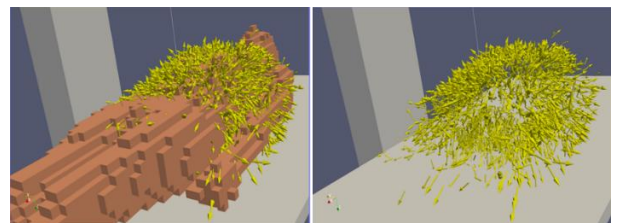


Fig. 2 散乱放射線の方向ベクトル情報の可視化

C.2 Ray tracing 計算と Monte Carlo 計算の比較

Monte Carlo 計算に対する Ray tracing 計算の比を Figure 3 に示す。X 線装置の裏側などを除き、床から 1 m の高さで、評価点においては 0.8 から 1.8 の間に収まった。それ以外の高さにおいて 0.7 から 1.4 倍の範囲内だった。1 m の高さで Ray tracing による計算結果が比較的高くなった。

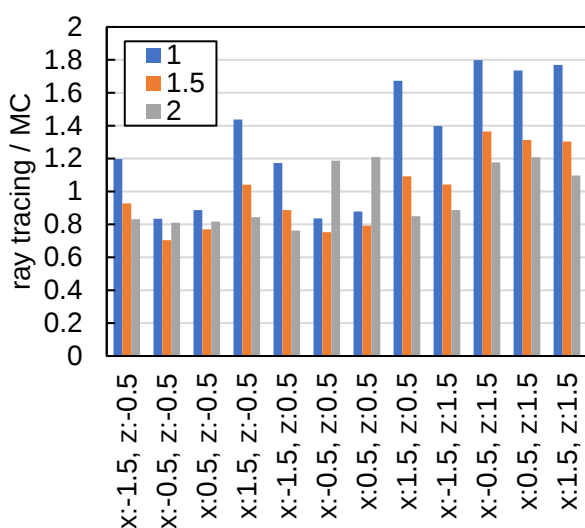


Fig. 3 Monte Carlo 計算に対する Ray tracing 計算の比。横軸は x, z 軸の座標を示す。縦軸は MC による線量に対する Ray tracing 計算線量の比である。

Figure 4 にアプリケーションの外観を示す。アプリケーションは 4 つの画面で校正されている。左側の画面は仮想 X 線診療室をマウス操作により任意の方向から表示できる。医療スタッフは、下のスライダーにより移動する。画面上部で、各評価点の線量を表示できる。散乱放射線量分布のカラーマップは、下限値と上限値を数値入力できる。さらに、リニアスケールとログスケールでカラーの変化を切り替えできる。室内全体の拡大と縮小表示と平行移動がマウス操作により可能である。

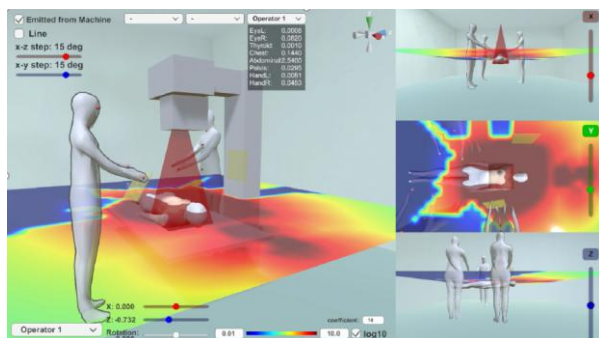


Fig. 4 Ray tracing 散乱放射線分布表示アプリケーションの外観

Figure 5 に、医療スタッフの位置を変更した際の散乱放射線分布のシミュレーション結果を示す。医療スタッフの後方で散乱放射線が低下していることが確認できる。散乱放射線ベクトルは患者から同心円状に広がっており、散乱放射線の減少部分が医療スタッフ後方の斜め上方向に向かって広がっている。また X 線装置の後方も、装置による遮蔽により散乱放射線量が減弱していることが確認できる。医療スタッフの移動に伴う散乱放射線分布の変化は 1 秒以内にできた。

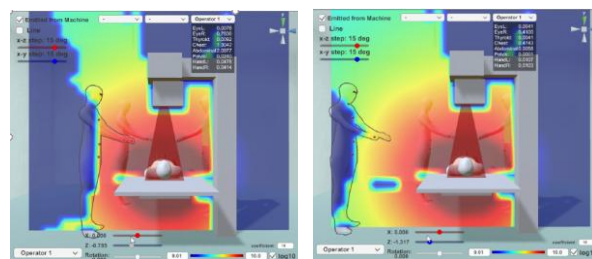


Figure 5. 患者横断面における本システムにより計算した散乱放射線分布。左は患者中心から左側に 80 cm の位置、右は 160cm の位置に医療スタッフを配置した。医療スタッフの後方で線量が低減している。

画面の右側は、患者の頭足方向、天井床方向、患者の左右方向で散乱放射線の断面を表示している。右側のスライダーで断面の位置をスライドできる。同時に 1 断面のみである。放射線防護板を左上では床から 150 cm、右上では 80 cm、下は 100 cm に配置している。さらに下の図では防護板を床に対して左側は垂直に、右側は 30 度傾けて配置した。放射線防護板の配置に位置より、散乱放射線量の減少する範囲が異なることが確認できた。

Figure 6 に放射線防護板の位置による散乱放射線分布の違いを示す。

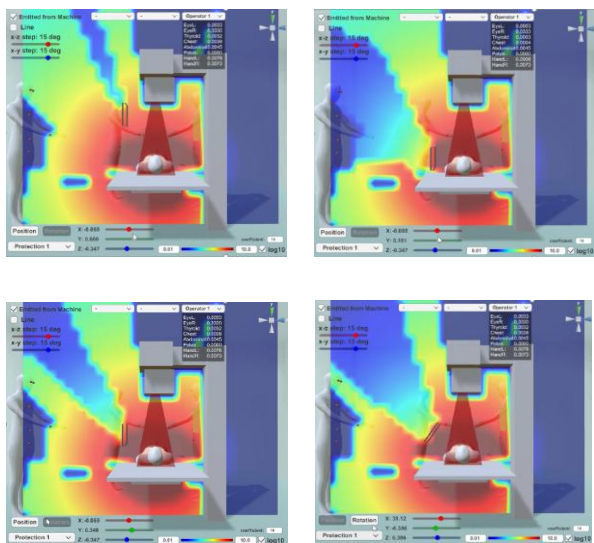


Figure 6. 放射線防護板の位置や傾きによる散乱放射線分布。3次元散乱放射線計算をしているため、任意の断面を任意の角度から表示できる。

Figure 7に、患者矢状断面での散乱放射線分布を示す。患者から離れるに従い散乱放射線量が減弱していることが確認できる。

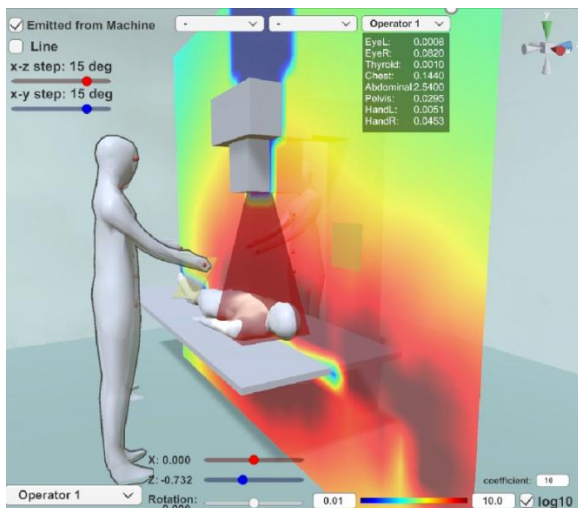


Fig. 7 患者矢状断面における本システムにより計算した散乱放射線分布。3次元散乱放射線計算をしているため、任意の断面を任意の角度から表示できる。

D. 議論

本研究の主要な点は、ray tracing 技術を使うことで、X線透視時の散乱放射線分布をリアルタイムにシミュレーションすることである。X線透視において放射線防護板の有効性が多くの論文等で述べられているが、放射線防護板の配置は自由度が高いことから、適切な使用方法をトレーニングすることは困難である。本研究で開発したアプリケーションは簡易計算であるが、医療スタッフや室内の物体の移動による直感的に散乱放射線分布や線量の変化を表示できる画期的なシステムであり、新規性の高いものと言える。

本システムでは、医療スタッフの移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。配置の自由度の高い医療スタッフの使用において、都度散乱放射線分布を測定、モンテカルロ計算することは現実的でない。本システムではリアルタイムに医療スタッフの被ばく量と簡易的に散乱放射線分布やスタッフや放射線防護板の位置による線量の変化を確認することが出来る。血管造影において放射線防護板は天井から吊るされていることが多く、配置の自由度が高い。放射線は目に見えないことから医療スタッフにとって散乱放射線の広がり認識することは困難である。本システムは、計算精度は高くないものの、医療スタッフの診療上支障のない安全な位置の確認や放射線防護板の適切な配置方法の直感的な理解につなげることが出来、放射線防護教育に有用である。

一方で、本システムの線量計算精度には複数の限界がある。本計算では散乱放射線が物体に衝突した際の2次散乱に対して考慮していない。実際には物体に衝突することでさらに散乱放射

線が発生する。散乱放射線源は患者のみの情報を使用している。また減弱の計数は一律の値を使用している。実際には物体により減弱係数が異なることから、正確な計算にはことを考慮させる必要がある。実際には X 線管や寝台などからも散乱放射線が発生するため、より正確には全ての構造体からの散乱放射線源の情報を取得してシステムに取り込む必要がある。

今回は ray tracing による散乱放射線分布のリアルタイムシミュレーションができるかの予備的検討であり、今後の検討として、上記課題の解決と、様々な照射条件、また他の X 線装置への対応を目指す。

E. 結論

本研究において、ray tracing 技術により X 線診療室内の散乱放射線分布をリアルタイムに計算、表示させるアプリケーションを作成した。このシステムにより診療時の被ばく低減を意識した医療スタッフの位置や適切な放射線防護板の使用方法を理解するために有効な教育ツールになることが示唆された。一方で計算精度は十分でないことから、今後はシミュレーション精度の向上と多くの照射条件、モダリティへの対応を目指す。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Fujibuchi, T. Study on Radiation Protection Educational Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method

with Ray Tracing Technology, Information, 16, 266, 2025.

2. 学会発表

1. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Development of real-time scattered radiation distribution display application according to the position of radiation protection plate, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
2. 田渕 麻央, 檜作 響子, 藤淵 俊王, Ray tracing を利用した X 線透視室内の散乱線分布可視化システムの開発と精度検証. 第 1 回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
3. 田渕 麻央, Lee Hyojin, 藤淵俊王. 診療用 X 線管におけるターゲット内の相互作用を再現した散乱線分布のモンテカルロシミュレーションの検討. 第 19 回九州放射線医療技術学会大会, 宮崎, 2024 年 12 月 21 日-12 月 22 日
- 4.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

X 線透視業務に携わる医療従事者の放射線防護対策一つとして放射線防護板の使用がある。これまでの研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた放射線防護板を配置した際の線量分布の可視化が行われている。しかし、モンテカルロシミュレーションは計算に時間がかかるという短所がある。そこで、方向ベクトルを利用して、防護板配置時の線量分布を短時間で簡易的に計算できるようにした。

モンテカルロコードである PHITS (ver3.31) を用いて、C アーム型 X 線透視撮影装置による X 線透視時の透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布をシミュレーションした。透視室内のフルエンス分布の計算結果をもとに、室内の空間を 5cm の間隔で平均した光子の方向ベクトルを得た。このとき、ファントムからの散乱、X 線管からの散乱、その他に分けて計算した。方向ベクトルを利用して、線源や防護板の位置により、周辺線量当量分布から防護板配置時の周辺線量当量分布を簡易的に計算するプログラムを作成した。このプログラムを使用した簡易的な線量分布を三次元可視化ソフトである ParaView 上で表示した。同様の条件で実測と PHITS シミュレーションを行い、簡易線量分布計算の精度を検証した。

簡易線量分布計算では、防護板による遮蔽が再現できていることが確認できた。簡易線量分布計算とシミュレーションの計算時間を比較した。簡易線量分布計算は平均 13 秒、PHITS シミュレーションは平均 20 時間 39 分 46 秒かかった。簡易線量分布計算は PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

簡易線量分布計算では、防護板を任意の位置に配置した時の線量分布を短時間で計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示すことができた。

研究協力者

檜作 響子

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X 線透視業務に携わる医療従事者は被ばくが多く、業務量の多い医師や看護師は水晶体の等価線量が線量限度を超える可能性がある。そのため、積極的な放射線防護対策が必要である。散乱線による被ばくの低減するための方法の 1 つとして放射線防護板の使用がある。防護板は防護したい部位に対して使用者が動かして使用するため、使用者が適切な使用方法を理解しておく必要がある。そのためには、防護板の位置による線量分布の変化を視覚的に理解することが有効であると考えられる。

先行研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた放射線防護板を配置した際の線量分布の可視化は行われている。しかし、モンテカルロシミュレーションは計算に時間がかかるという短所があり、防護板の位置を動かすたびにモンテカルロシミュレーションを行うとすぐに結果を確認することができない。そこで、モンテカルロシミュレーションを行わずに、防護板を配置した際の線量分布を短時間で簡易的に計算できるようにした。

本研究では、透視時の散乱線の方向ベクトルを利用して防護板を任意の位置に配置した際の線量分布を短時間で簡易的に計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示す手法を検討した。

B 方法

B-1. X 線透視室のシミュレーション

本研究では、モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System(PHITS)¹⁾を使って X 線透視装置で患者を模したファントムを照射したときの透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。X 線照射は、X 線透視診断装置 CALNEO CROSS (富士フィルムメディカル株式会社, 東京, 日本) を用いた。シミュレーシ

ョンの精度は前回の研究で確認した。X 線管はポリカーボネート (密度 1.2 gcm^{-3})、C アームはアルミニウム (密度 2.7 gcm^{-3})、寝台はアクリル樹脂 (密度 1.18 gcm^{-3})、クッションはウレタン (密度 0.02 gcm^{-3}) である。X 線管の内部は鉄 (7.87 gcm^{-3}) で遮蔽し、コリメータは鉛 (密度 11.34 gcm^{-3}) である。放射線源は、診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト X-ray-Spectrum を用いて算出した。条件は、管電圧 66 kV、ターゲット角度 9 度、固有濾過 2.5 mmAl の Tucker による近似式を用いて 0.5 keV ごとの診断 X 線スペクトルとした²⁾。線源表面間距離 65 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ $46 \times 46 \text{ cm}^2$ 、透視室内の空間 $315 \times 285 \times 235 \text{ cm}^3$ とした。また、C アームの角度は、AP とした。被写体には、 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の水ファントムを用いて、水ファントムの中心を照射野の中心に合わせて照射した。ICRP Publication 74 のフルエンスから周辺線量当量への換算係数を用いて、周辺線量当量を算出した³⁾。シミュレーションにおけるヒストリー数は 1×10^8 、光子と電子のカットオフエネルギーは 10 keV とした。

簡易線量分布計算で使用する透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布を主要な 3 つの散乱線源ごとに分けてシミュレーションした。主要な 3 つの散乱線源は、ファントムからの散乱、X 線管からの散乱、その他とした(Figure 1)。

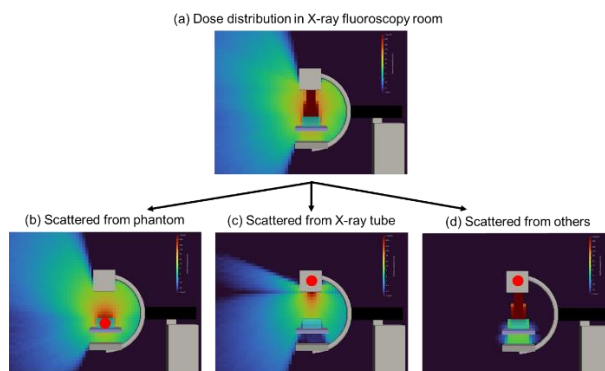


Figure 1. 散乱線源ごとのシミュレーション

(a) X 線透視室内の散乱線を、(b) ファントムからの散乱、(c) X 線管からの散乱、(d) その他に分けて計算した。赤色の点は散乱線源を示す。

B-2. 方向ベクトルデータの作成

簡易線量分布計算法に使用する方向ベクトルデータを PHITS シミュレーションの計算結果を利用して作成した。方向ベクトルは光子の進行方向を示すため、放射線防護板に到達する光子を推測することができる。

まず、透視室内の空間を $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ のボクセルで分割した。PHITS の T-Cross のタリーで、各ボクセルの面を通過する光子数を、面に囲まれた領域に流入する方向と流出する方向を別々にカウントした。1 つのボクセルに対して、12 個の光子数データを取得した。

次に、PHITS シミュレーションで取得したデータを用いて、さらに計算を行った。面に囲まれた領域に流入する方向と流出する方向にカウントした光子数の差をとり、座標軸 xyz 方向を正とした光子数としてベクトル表示した。また、1 つのボクセルは 6 面あるため、向かい合う面の光子数を平均した。それにより、1 つのボクセルに対して、3 個の光子数データを得て、それぞれの座標軸 xyz 方向の方向ベクトルの成分 v_x , v_y , v_z とした。

このように、方向ベクトルの成分 v_x , v_y , v_z とボクセルの中心座標 x_0 , y_0 , z_0 を用いて、ボクセルの中心を原点とした方向ベクトルデータを作成した。

B-3. 簡易線量分布計算法

簡易線量分布計算法では、PHITS シミュレーションで得た周辺線量当量分布と作成した方向ベクトルのデータを用いた。方向ベクトルの情

報から放射線防護板で遮蔽される光子を推定し、その光子の線量値に線量低減係数をかけた。ここで、前回の研究で防護板による線量の低減率は最も良い条件で 99%であったため、線量低減係数は 0.01 とした。

II-3-a. 放射線防護板で遮蔽される光子の推定

放射線防護板で遮蔽される光子の推定では、主要な 3 つの散乱線源ごとに分けたシミュレーションの結果を用いることで、散乱線源を点とし、点から放射状に散乱線が広がることを前提とした。

任意のボクセルについて推定方法を説明する。あるボクセルについて、中心座標 (x_0, y_0, z_0) 、方向ベクトル (v_x, v_y, v_z) とした。光子の飛跡上の任意の点を媒介変数表示で示す。

$$\begin{cases} x_t = x_0 + v_x t \\ y_t = y_0 + v_y t \\ z_t = z_0 + v_z t \end{cases}$$

また、放射線防護板は厚さを無視し平面とし、防護板の上辺の中心、左辺の中心、右辺の中心をそれぞれ、点 $p_1(p_{1x}, p_{1y}, p_{1z})$, $p_2(p_{2x}, p_{2y}, p_{2z})$, $p_3(p_{3x}, p_{3y}, p_{3z})$ とした(Figure3(a))。ここで、点 p_1 - p_3 を通る平面の方程式 $ax + by + cz + d = 0$ を求める。このとき、法線ベクトル $\mathbf{v}_{123}$ を用いた。

$$\mathbf{v}_{12} = p_2 - p_1$$

$$\mathbf{v}_{13} = p_3 - p_1$$

$$\mathbf{v}_{123} = \mathbf{v}_{12} \times \mathbf{v}_{13}$$

平面の方程式は次のように求められる。

$$v_{123x}(x - p_{1x}) + v_{123y}(y - p_{1y}) + v_{123z}(z - p_{1z}) = 0$$

$$\begin{aligned} &v_{123x}x + v_{123y}y + v_{123z}z \\ &\quad - (v_{123x}p_{1x} + v_{123y}p_{1y} + v_{123z}p_{1z}) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= v_{123x}, b_1 = v_{123y}, c_1 = v_{123z}, d_1 \\ &= -(v_{123x}p_{1x} + v_{123y}p_{1y} + v_{123z}p_{1z}) \end{aligned}$$

(1) 式に $x_{t1} = x_0 + v_x t_1, y_{t1} = y_0 + v_y t_1, z_{t1} = z_0 + v_z t_1$ を代入する。

$$t_1 = -\frac{a_1 x_0 + b_1 y_0 + c_1 z_0 + d_1}{a_1 v_x + b_1 v_y + c_1 v_z}$$

$t_1 \leq 0$ のとき、方向ベクトルのバックトレースと点 p_1 - p_3 を通る平面が交点 $q(x_{t1}, y_{t1}, z_{t1})$ をもつ。

次に、交点 q が防護板内に存在するかを調べた。防護板の頂点をそれぞれ p_a, p_b, p_c, p_d とし、Figure3(b)(c) のようにベクトルの外積を用いた。交点 q が防護板内画外どちらに存在するかで、外積の符号が異なる。すべての頂点においてベクトルの外積を求めて、隣り合う頂点における外積の内積を求めると、交点 q が防護板内にあるとき 0 より大きくなる。

そして、方向ベクトルと散乱線源の間に防護板があるかどうかを調べた。散乱線源は (s_x, s_y, s_z) とした。散乱線源を通り、(1) 式に平行な平面を求める。

$$v_{123x}(x - o_x) + v_{123y}(y - o_y) + v_{123z}(z - o_z) = 0$$

$$\begin{aligned} & v_{123x}x + v_{123y}y + v_{123z}z \\ & - (v_{123x}o_x + v_{123y}o_y + v_{123z}o_z) \\ & = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= v_{123x}, b_2 = v_{123y}, c_2 = v_{123z}, d_2 \\ &= -(v_{123x}o_x + v_{123y}o_y \\ &+ v_{123z}o_z) \end{aligned}$$

(1) 式に $x_{t2} = x_0 + v_x t_2, y_{t2} = y_0 + v_y t_2, z_{t2} = z_0 + v_z t_2$ を代入する。

$$t_2 = -\frac{a_2 x_0 + b_2 y_0 + c_2 z_0 + d_2}{a_2 v_x + b_2 v_y + c_2 v_z}$$

$t_2 \leq t_1 \leq 0$ のとき、方向ベクトルのバックトレースと散乱線源を通る防護板と平行な平面が交点 $r(x_{t2}, y_{t2}, z_{t2})$ をもつ。

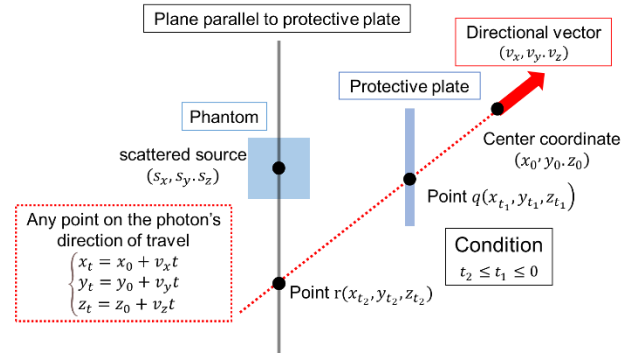
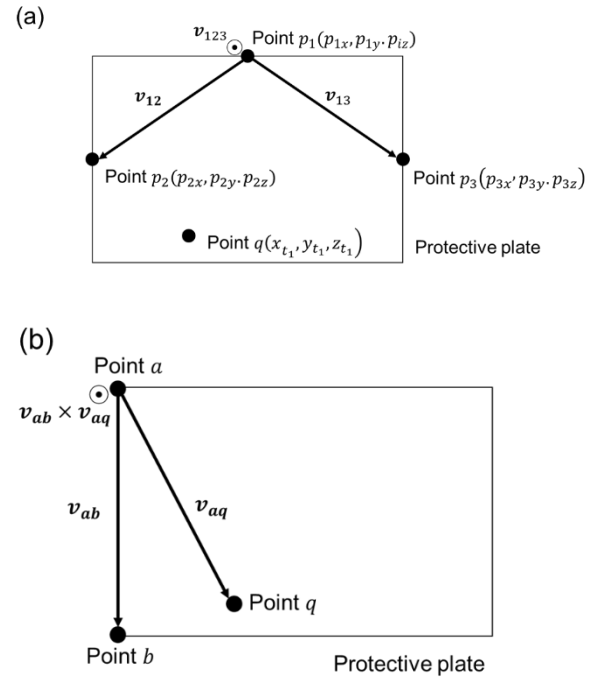


Figure 2 放射線防護板で遮蔽される光子の推定方向ベクトルのバックトレースと防護板が交点を持ち、方向ベクトルと散乱線源の間に防護板が存在する位置関係のとき、防護板で遮蔽される光子だと推定できる。



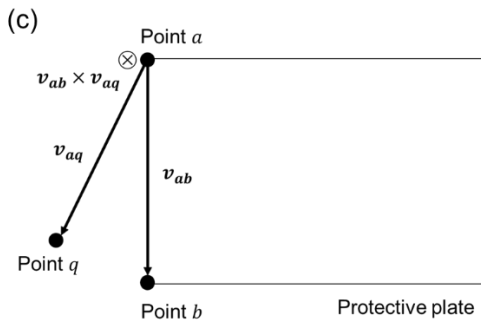


Figure 3 放射線防護板上の点とベクトルの位置関係

(a)は平面の方程式を求めるための法線ベクトル v_{123} を示す。(b)では平面と方向ベクトルのバックトレースの交点が防護板内にあり、(c)では平面と方向ベクトルのバックトレースの交点が防護板外にある。このとき、外積 $v_{ab} \times v_{aq}$ の符号が異なる。

B-4. 簡易線量分布計算法の精度の検証

B-4-a 実測

X線照射は、X線透視診断装置 CALNEO CROSS（富士フィルムメディカル株式会社、東京、日本）を用いた。周辺線量当量の測定にはX線測定器 RaySafe X2 (Unfors RaySafe, Uggledalsvägen, Sweden)を用いた。照射条件は、管電圧 66 kV、管電流時間積 10 mAs、線源表面間距離 65 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ $46 \times 46 \text{ cm}^2$ とした。被写体には、 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の水ファントムを用いて、水ファントムの中心を照射野の中心に合わせて照射した。移動型防護装置 ML（クラレレーディング株式会社、大阪、日本）を水ファントムの中心から 35 cm の距離に配置し、防護板の配置の高さを変えて、測定した。実測は、各条件で 3 回行い、その平均値を測定値とした。周辺線量当量は、床からの高さ 160 cm のとき、水ファントムの中心から 35 cm の距離で、防護板の床からの高さを 110 cm、120 cm、

130 cm、140 cm で測定した。

B-4-b PHITS シミュレーション

実測時と同様の幾何学的配置を再現し、放射線防護板を配置時の透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。移動型防護装置 ML（クラレレーディング株式会社、大阪、日本）を用いて、鉛当量 0.80 mmPb、サイズ $37 \times 57 \text{ cm}^2$ 、厚さ 2 cm で再現した。防護板の配置について、Figure 4 に示すように、C アームの角度は AP 方向で、床からの高さ とファントムからの距離を変えた。防護板がファントムから 25 cm の距離のとき、床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm、140 cm で配置した。そして、術者の頭部の位置で線量を評価するために、ファントムからの距離 35 cm の位置に術者を表示した。術者は ICRP Publication145 標準男性メッシュファントムの表面を用いて再現し、術者の目安とした。

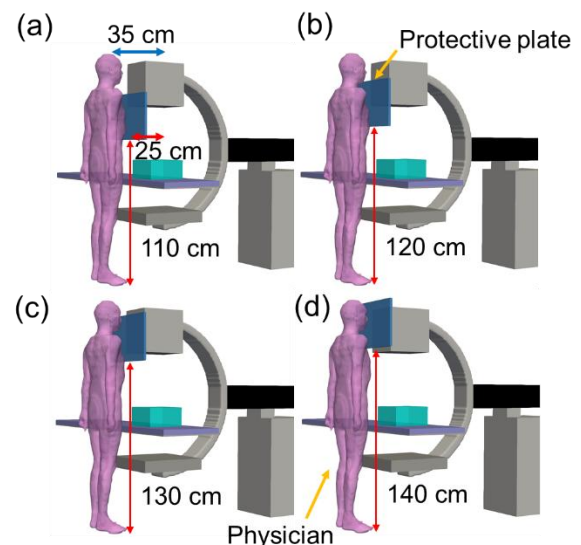


Figure 4. 放射線防護板と術者の配置

術者はファントム中心から 35 cm の位置とした。それに合わせて、放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ(a)110 cm、(b)120 cm、(c)130 cm、(d)140 cm に配置した。

(倫理面への配慮)

本研究は、人を対象とする研究ではない。X線を使用する研究では、研究者が被ばくする恐れがあるため、放射線防護対策をした上で研究実施した。

C. 結果

C-1. 簡易線量分布計算法を利用した線量分布の表示

簡易線量分布計算法を利用した線量分布を Figure 5 と Figure 6 に示した。ここから、防護板で散乱線が遮蔽されていることが確認できた。また、防護板を配置する位置によって線量分布が変化していることが確認できた。

PHITS シミュレーションにかかった時間は平均 20 時間 39 分 46 秒、簡易線量分布計算法にかかった時間は平均 13 秒だった。簡易線量分布計算法では PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

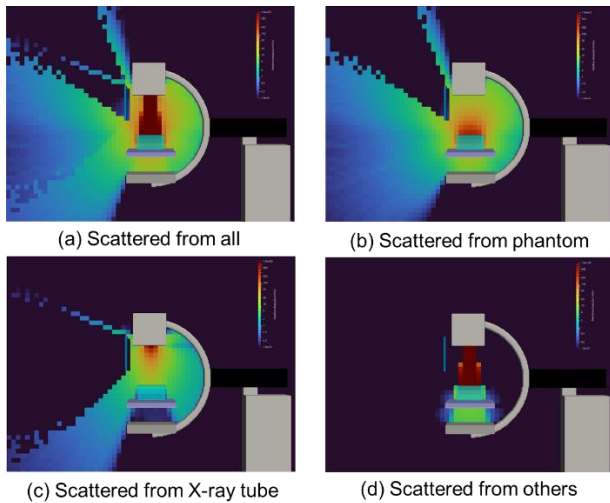


Figure 5 簡易線量分布計算法を利用した線量分布の断面図 (照射野中心 ($y = 0$))

放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ 130 cm に配置時の簡易線量分布計算法を用いて計算した線量分布を示す。(b) ファントムからの散乱、(c) X線管からの散乱、

(d) その他であり、(a)は(b)-(d)を足し合わせたものである。

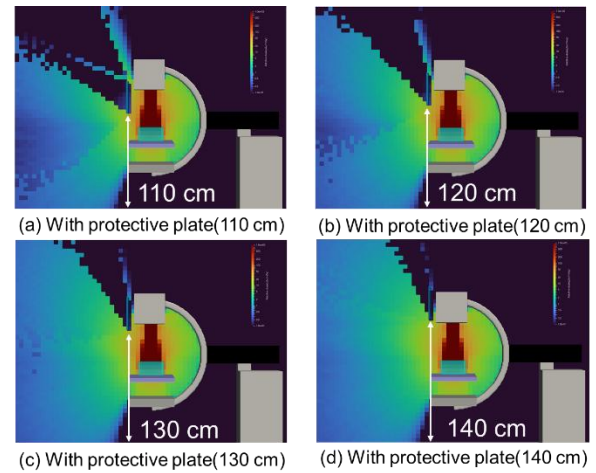


Figure 6. 防護板配置条件を変えた時の簡易線量分布計算法を利用した線量分布の断面図 (照射野中心 ($y = 0$))

放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ(a)110 cm、(b)120 cm、(c)130 cm、(d)140 cm に配置した時の簡易線量分布計算法を用いた線量分布を示す。

C-2. 簡易線量分布計算法の検証

C-2-a. 評価点

術者の頭部の位置の周辺線量当量と防護板による低減率を Table 1 に示す。周辺線量当量のシミュレーション値と測定値はそれぞれ単位が異なり、そのまま比較することができない。そのため、防護板による低減率を算出した。実測と PHITS シミュレーションの低減率の差は 6%以内であった。一方で、実測と PHITS シミュレーション、簡易線量分布計算法の低減率の差は、防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10%以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、実簡易線量分布計算法は他より、低減率が非常に低かった。

Table 1 術者の頭部の位置における線量評価

Height from floor(cm)	Dosimetry		PHITS simulation		Caluculation method	
	Dose(μ Sv)	Reduction(%)	Dose(μ Sv/mGy)	Reduction(%)	Dose(μ Sv/mGy)	Reduction(%)
Without	6.94		5.20			
110	0.533	92.3	0.287	94.5	0.0520	99.0
120	0.231	96.7	0.0612	98.8	0.0520	99.0
130	0.336	95.2	0.104	98.0	0.0500	99.0
140	1.55	77.6	1.47	71.8	4.97	4.41

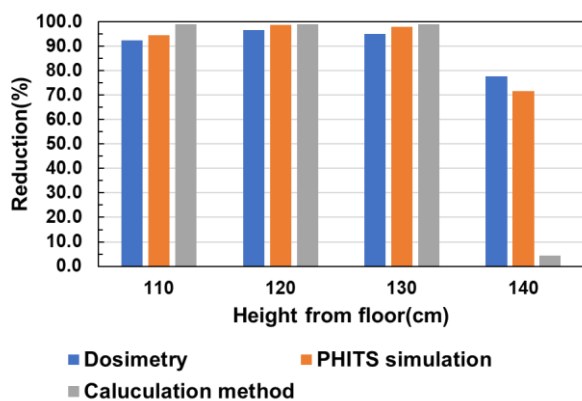


Figure 7 防護板による低減率の比較

実測、PHITS シミュレーション、簡易線量分布計算法それぞれの防護板による低減率を比較した。防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10%以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、実測と PHITS シミュレーションの差は 10%以内であったが、簡易線量分布計算法は他より、低減率

が非常に低かった。

C-2-b. 線量分布

簡易計算の精度を検証するために、防護板後方の簡易計算と PHITS シミュレーションの線量値の差と比の分布を表示した(Figure 8)。防護板後方の領域は、計算値がシミュレーション値を下回ったところが多く、領域の境界付近では、計算値がシミュレーション値を上回ったところが見られた。簡易線量分布計算では、防護板で遮蔽される光子の線量値を 0.01 倍しているため、防護板後方への散乱線の回りこみを考慮することができない。また、簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の差では、最小値は-14.6、最大値は 8.37 であった。簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の比では、最小値は 0.0115、最大値は 6.48 であった。

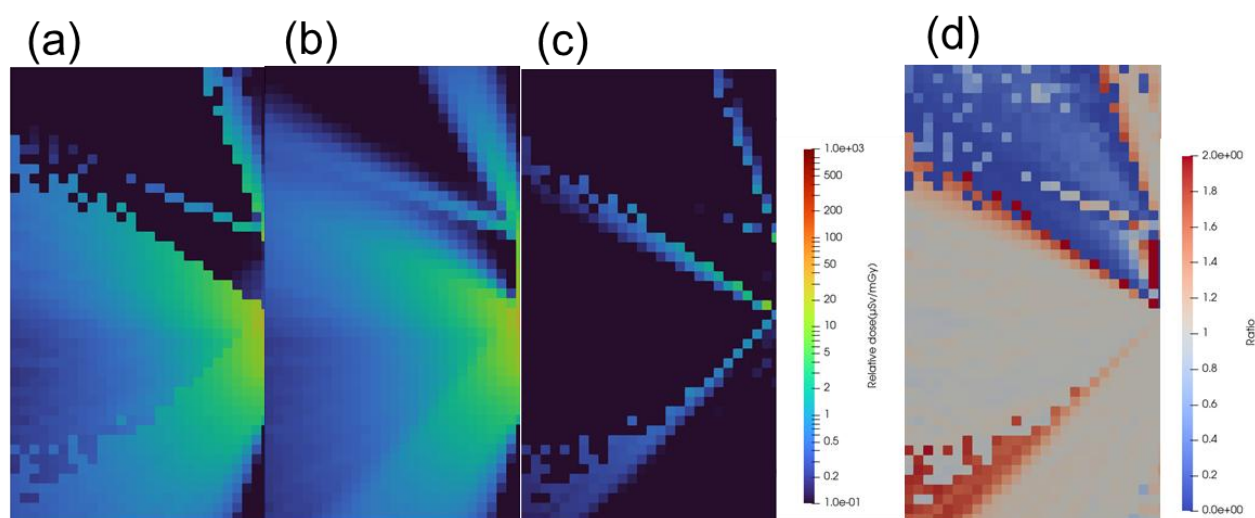


Figure 8 防護板後方の簡易計算と PHITS シミュレーションの線量値の差と比の分布の断面図（照射野中心 ($y = 0$))

防護板後方の(a)簡易線量分布計算法と(b)PHITS シミュレーションの線量値の(c)差と(d)比を求め、それぞれ分布を示した。(d)では、計算値がシミュレーション値を下回るときが青色、上回るときが赤色、同等のときは灰色で表示される。

Table 2 簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の差

Height from floor (cm)	Min	Max	Mean
110	-14.6	8.37	-0.0119
120	-12.7	4.95	0.00699
130	-10.1	7.01	0.0196
140	-7.82	5.02	0.0194

Table 3 簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の比

Height from floor (cm)	Min	Max	Mean
110	0.0115	5.65	0.921
120	0.0117	4.17	0.992
130	0.0126	6.00	1.02
140	0.0121	6.48	1.01

C-2-c. 線量プロファイル

ファントムからの距離 35 cm の位置を術者の位置として線量プロファイルを作成し、PHITS シミュレーションと簡易線量分布計算を比較した。線量プロファイルから防護板の後方の領域の境界周囲では差が大きくなった。

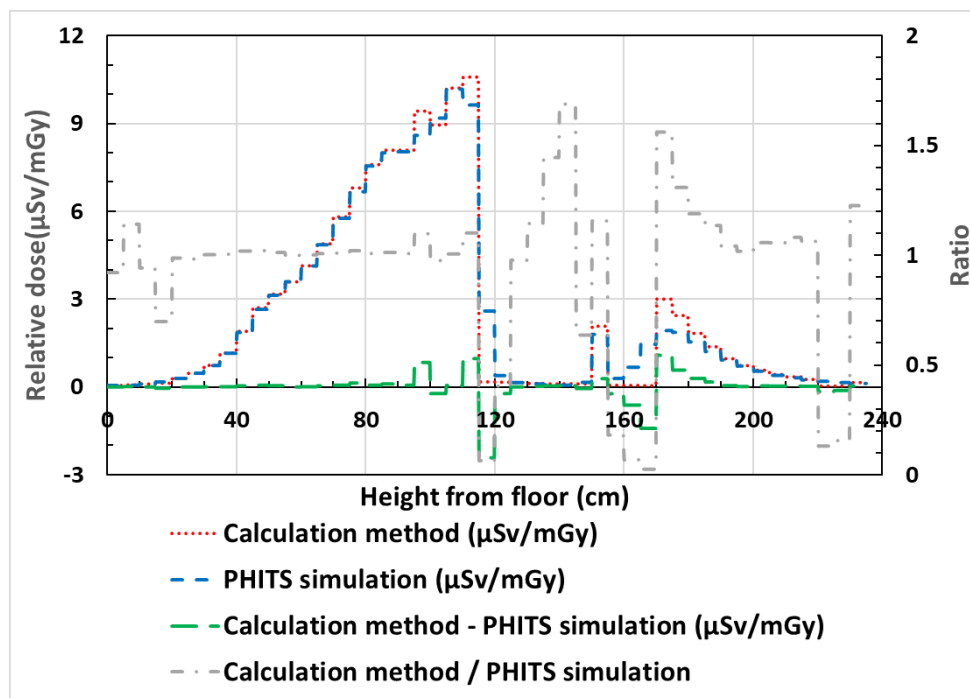


Figure 9 術者（ファントムからの距離 35 cm の位置）の位置の線量プロファイル。簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの相対線量とその差と比をグラフ上に示した。

D. 考察

D-1. 簡易線量分布計算法を利用した線量分布の表示

簡易線量分布計算法では、モンテカルロシミュレーションと比べて計算時間は非常に短くなった。防護板の位置による線量分布の変化を簡単に多くの結果を示すことができると考える。

D-2. 簡易線量分布計算法の検証

簡易線量分布計算では、防護板後方の領域の領域は大部分の線量値が過小評価になる。しかし、防護板後方の領域の境界では、線量値が過大評価になる。また、実測や PHITS シミュレーションとの差が大きくなる傾向がある。簡易線量分布計算法では、防護板の遮蔽の影響を受けるおおよその領域を知ることができる。しかし、空間の線量値は実測や PHITS シミュレーションとの差が大きい場合もあるため、線量値の確認

に用いることは難しい。

E. 結論

簡易計算では、防護板を任意の位置に配置した時の線量分布を短時間で計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示すことができた。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, Arakawa H, Furuta T, Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects

in X-ray fluoroscopy (DQPEX), Radiological Physics and Technology, 18, 196-208, 2025.

2. 学会発表

5. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. A study of a simplified dose calculation method using directional vectors when placing radiation protective plates. The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
6. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Simplified Dose Distribution Calculation Method for Placing Radiation Protective Plate Using Directional Vectors, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
7. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Development of simplified dose distribution calculation program for radiation protective plate placement using directional vectors. The 24th Asia-Oceania

Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.

8. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Han Donghee, Development of Directional vector-based Quick evaluation method for Protective plate Effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025

9.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金 分担研究報告書

仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

【目的】本研究では仮想現実（virtual reality : VR）空間にて X 線透視時の患者からの散乱線の進行方向を方向ベクトルとして可視化する教材を作成することを目的とした。【方法】モンテカルロコード Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) にて、X 線透視時の散乱線の方向ベクトル分布を作成した。三次元可視化ソフト ParaView にて、散乱線の方向ベクトル分布を赤色の矢印として可視化した。VR ヘッドセットである Meta Quest 3 を用い、散乱線の方向ベクトル分布を確認した。【結果】VR 空間にて散乱線の進行方向を三次元的に可視化し、任意の方向から確認できた。また、2 次元および三次元線量分布と重ね合わせることで放射線防護板の遮蔽効果を視覚的に確認できた。【結語】VR 空間では、透視装置、患者ファントム、防護板と自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用であると示唆される。

研究協力者

檜作 響子 九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

放射線診療において X 線透視は消化管や泌尿器の造影検査だけでなく、ステント留置や血管形成術、脱臼整復、生検や人工関節置換術など幅広い診療科で検査や治療に使用されている。非侵襲的に患者の体内をリアルタイムに観察できる一方、X 線透視業務に携わる医療従事者は患者などからの散乱線により多く被ばくする可能性がある¹⁻⁵⁾。特に患者付近での透視業務量の多い医師や看護師においては、眼の水晶体の被ばくが等価線量限度を超える可能性が指摘され

ている⁶⁻⁹⁾。外部被ばくの放射線防護の基本原則は、距離、時間、遮蔽である¹⁰⁾。通常医療従事者は、散乱線源である X 線管や患者と手技や診療業務に支障のない範囲で距離を取ることで不必要な被ばくを回避することができる¹⁾。しかし、X 線透視ガイド下の手技では、患者や X 線管と距離を取ることが困難であり、積極的な遮蔽による防護対策をする必要がある。

遮蔽の手段には、放射線防護衣、放射線防護眼鏡、放射線防護板、放射線防護ドレープなどが

挙げられる¹¹⁻¹⁵⁾。これらの中で術者用の防護板として、天井吊り下げ式のものが使われるが、患者付近での手技への邪魔にならないような配置と重量の関係から大きなものが用意できず、術者の頭部等特定の部位の防護が必要な箇所に移動させて使用する。そのため、他の遮蔽手段とは異なり、防護効果を考慮した適切な使用方法を理解することが求められる。防護板の効果的な使用には、散乱線の広がりや進行方向を正確に把握することが重要である。先行研究では X 線透視における散乱線の分布を可視化する試みが報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾が、進行方向の情報を加えることで散乱線源の場所や散乱線の挙動をより具体的に視覚化でき、防護板の効果的な使用方法の理解に有用であると考えられる。

散乱線は X 線焦点から発生する直接線が絞りや患者、寝台等様々な物体との相互作用により発生し 3 次元に広がることから、その進行方向を理解する上で X 線管、患者、医療従事者の位置関係が重要である。医療従事者に向かってくる散乱線を、医療従事者の様々な位置や視点から容易に観察するためには、仮想現実 (virtual reality : VR) 技術を活用することが有効と考えられる。VR 技術は、現実の環境を仮想空間で再現し、映像や音響などのデジタル情報を組み合わせることで、仮想世界における没入感のある情報提供と体験型学習を同時に可能にする利点を持つ。そのため、近年では医学教育をはじめ様々な教育現場で活用されている^{19, 20)}。この技術を X 線透視に応用し、防護板の使用方法を VR 空間内で再現することで、効果的な学習環境を提供できると考えられる。

本研究の目的は、医療従事者が効率的に防護板の適切な使用方法を学習するために、散乱線の線量分布と共に進行方向を方向ベクトルとして VR 空間に可視化する教育教材を開発するこ

とである。本研究では、VR 教材を活用し、医療従事者への散乱線の進行方向と防護板の設置位置や角度による被ばく低減効果を直感的に理解できる学習方法を提供することを目指している。この新しい教育手法は、防護板の適切な使用を促進し、医療現場における医療従事者の放射線被ばくリスクの低減に寄与することが期待される。

B. 方 法

B-1 方向ベクトル分布と周辺線量当量分布の作成

本研究では、モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.34 を使用して、C アーム式 X 線透視装置 (CALNEO CROSS; 富士フィルム株式会社, 東京) (以下、C アーム装置) で照射したときの患者を模したファントムからの X 線透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした²¹⁾。PHITS では、患者頭側方向 310 cm, 左右方向 270 cm, 床天井方向 230 cm の仮想 X 線透視室内に、X 線管、コリメータ、C アーム装置、寝台を再現し、3 次元の光子フルエンス分布を 10 cm 間隔で計算した。本 C アーム装置はオーバーテーブル X 線管方向、アンダーテーブル X 線管の両方に X 線管の位置を設定することが可能である。手術ではアンダーテーブル X 線管の配置で透視をすることが多いが、被写体にできるだけ画像検出器を近づける目的からオーバーテーブル X 線管で照射することもある。今回は放射線防護用教材の開発を目的としており、被写体からの後方散乱による医療従事者への影響が大きいことからオーバーテーブル X 線管の配置とした。X 線管のターゲットから発生する X 線源は、管電圧 66 kV, ターゲット角 9 度、総濾過 2.5 mmAl で、診断領域 X 線スペクトル近似

計算ソフト X-ray-Spectrum (Hideki Kato, <https://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology>) を用いて 0.5 keV ごとの診断 X 線エネルギースペクトルを算出し、焦点からコーンビームとして照射されるようシミュレーションに組み込んだ。66 kV は実際の C アーム装置において人体ファントム (PBU-60, 株式会社京都科学, 京都) の腹部に照射した際の自動露出機構で設定された値である。先行研究において、寝台周囲 1.5 m の範囲におけるシミュレーションの周辺線量当量の計算精度は X 線照射野中心から周囲 2 m の評価点 12 点において平均 10% である²²⁾。また、寸法 $37 \times 57 \text{ cm}^2$ 、厚さ 2 cm、鉛当量 0.8 mmPb の防護板 (ML-II 型, クラレトレディング株式会社, 大阪) を使用し、防護板後方の周辺線量当量率のシミュレーションによる計算値とサーベイメータによる測定値の差が 7% 以内であることを確認した²³⁾。本研究ではシミュレーションにより検査室内の相対的放射線の分布を評価しており、管電流によって相対的な分布は変化しないことから、シミュレーション上では管電流の情報は考慮させていない。シミュレーション上の患者のモデルには、International Committee of Radiological Protection (ICRP) Publication 145 で公開されている標準男性メッシュファントムを使用した²⁴⁾。C アームの角度は床に対して垂直とし、X 線照射方向は天井から床へ方向で患者は仰臥位とし、照射野中心は腹部、焦点患者表面間距離は 65 cm、焦点検出器間距離は 106 cm、照射野は画像検出器の位置において $46 \text{ cm} \times 46 \text{ cm}$ とした。光子、電子のカットオフエネルギーは 10 keV、シミュレーションのヒストリー数は 1×10^8 とした。

X 線を照射した場合、散乱線に比べ直接線の成分は桁違いに多い。今回は検査室内にいる医療従事者の放射線防護教育の観点から全体に広

がる散乱線を観察することが目的であるため X 線を照射した際の直接線の成分を除き、患者からの散乱線のみを表示させた。

方向ベクトル分布の作成には、透視室における PHITS による光子フルエンスの 3 次元分布データの計算結果を利用した。 $310 \times 270 \times 230 \text{ cm}^3$ の室内の空間を $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ のボクセルに分割し、ボクセルの各面を通過する光子数を方向別に記録して、ボクセルごとに平均化した²³⁾。座標軸の正方向に対してベクトル表示し、データベース化した。周辺線量分布の作成には、3 次元のフルエンス分布から、PHITS に含まれるフルエンス-周辺線量当量換算係数を用いて変換した。

B-2 VR 空間での方向ベクトル分布の表示

三次元可視化ソフト ParaView ver. 5.13.0 (Kitware, Inc., NY, USA) を使用して散乱線の方向ベクトルを赤色の矢印として表示した。ParaView VR 機能を利用して VR 空間に方向ベクトル分布を表示した。VR ヘッドセット (Meta Quest 3; Meta Platforms, Inc., CA, USA) を使用した。PC と VR ヘッドセットの外観を Fig. 1 に示す。VR ヘッドセットの動作環境を Table 1 に示す。



Fig. 1 PC と VR ヘッドセットの外観

Table 1 VR ヘッドセットの動作環境

OS	Windows 11 Education
CPU	AMD Ryzen 9 5900HS
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080 (Laptop)
Software	Steam VR 2.8.8 Meta Quest Link ParaView 5.13.0

(倫理面への配慮)

本研究は、人を対象とする研究ではない。VRを使用する研究では、研究者が VR 酔いする可能性があるため、体調に十分配慮した上で研究実施した。

C. 結果

C-1 VR 空間での方向ベクトル分布の表示

防護板のない状態での患者からの散乱線の方
向ベクトル分布を VR 空間に表示したものを Fig.
2 に示す。VR ゴーグル装着者は、現実空間を歩
き回することで、VR 空間上の散乱線の進行方向を
矢印として任意の方向から確認できた。矢印の
形状や色、間隔は、ParaView 上で調整すること
が可能である。本動作環境では画像の遅延はな
くスムーズに VR ゴーグル上に表示できた。

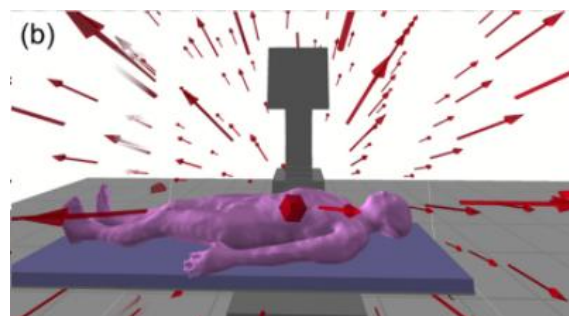
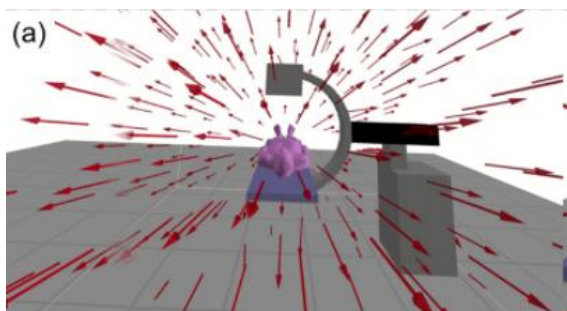
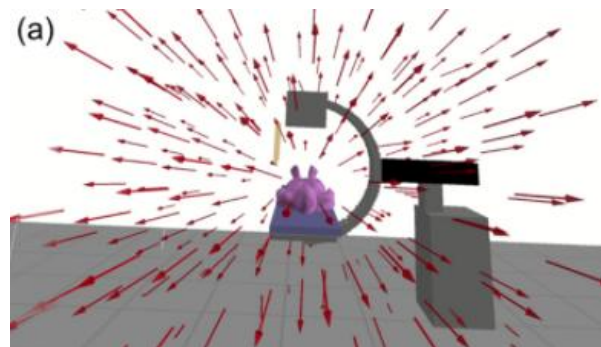


Fig. 2 VR 空間における患者からの方向ベクトル分布の表示。赤色の矢印は方向ベクトルを示す。ピンク色の物体は患者モデルのファントムを示す。(a)患者ファントムの頭部方向から見た図を示す。(b)患者ファントムの側面方向から見た図を示す。

C-2 放射線防護板がある場合のベクトル表示

散乱線の方向の情報から防護板による散乱線の遮蔽効果を視覚的に理解できるよう、患者からの散乱線の方向ベクトル分布に防護板を配置して VR 空間に表示したものを Fig.3 に示す。X 線管の近くに配置した半透明の黄色で示しているものが防護板である。Figure 3(a)に示すように、患者からの距離 25 cm，床からの高さ 120 cm の位置に防護板を配置した。Figure 3(b)では、患者の傍の位置を医療従事者の視点として示すと、矢印により散乱線が医療従事者に向かってきていることを視覚的に確認できる。



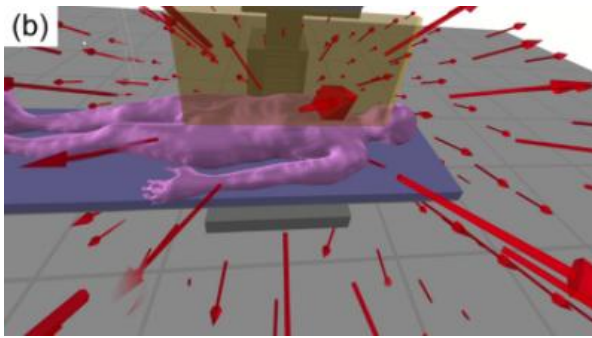


Fig. 3 防護板を配置した時の VR 空間における患者からの方向ベクトル分布の表示. 半透明の黄色の物体が防護板を示す. (a)患者から 25 cm の距離, 床から 120 cm の高さに防護板を配置した. (b)床から 120 cm の高さに防護板を配置した場合の医師の視点を示す.

C-3 2 次元周辺線量当量分布との重ね合わせ表示

2-2 の防護板を配置した状態での方向ベクトル分布に周辺線量当量の二次元断面を重ね合わせたものを Fig. 4 および Fig. 5 に示す. Figure 4 では患者横断面に平行な周辺線量当量分布, Fig. 5 では患者の冠状断面に平行な周辺線量当量分布を示している. 周辺線量当量の断面は, ParaView 上で任意の位置に変更可能である. また分布の透明度を調整し, 断面の後方にある X 線装置や患者も確認することが出来る. 方向ベクトル分布と周辺線量当量の断面を重ね合わせることで, 散乱線がどのように進行しているかだけでなく, 防護板による散乱線の遮蔽効果と線量の低減を視覚的に確認できる. 周辺線量当量分布を表示することで線量が高く比較的危険な位置や, 低く安全な位置を視覚的に認識することが出来る.

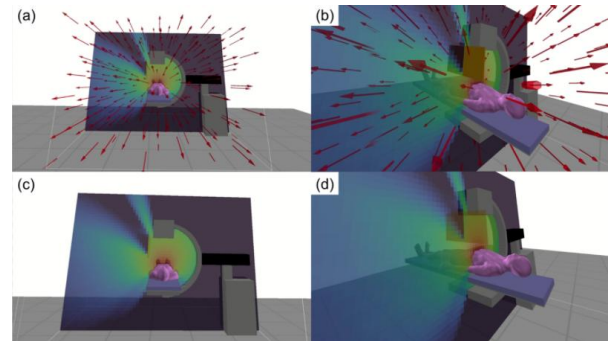


Fig. 4 防護板配置時の VR 空間における患者からの 2 次元線量分布と方向ベクトル分布の表示. 照射野中心における患者の軸断面を示す. 防護板は患者から 25 cm の距離, 床から 120 cm の高さに配置した. (a)2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の頭部方向から見た図を示す. (b)2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す. (c)2 次元線量分布を表示した患者の頭部方向から見た図を示す. (d)2 次元線量分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す.

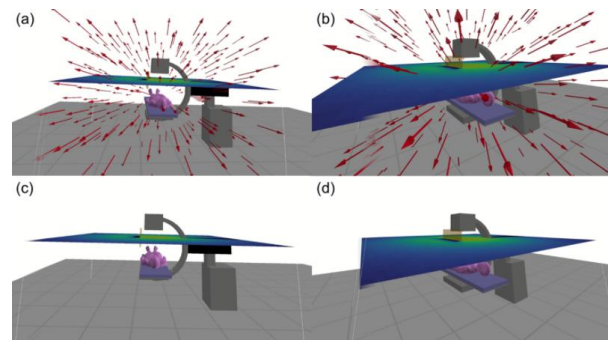


Fig. 5 防護板配置時の VR 空間における患者からの 2 次元線量分布と方向ベクトル分布の表示. 照射野中心における患者の冠状断面を示す. 防護板は患者から 25 cm の距離, 床から 120 cm の高さに配置した. (a)2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の頭部方向から見た図を示す. (b)2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す. (c)2 次元線量分布を表示した患者の頭部

方向から見た図を示す。(d)2次元線量分布を表示した。患者の側面方向から見た図を示す。

C-4 3次元周辺線量当量分布との重ね合わせ表示

2-2の方向ベクトル分布に周辺線量当量分布の3次元等線量曲面を重ね合わせたものをFig. 6に示す。3次元等線量曲面のへこみにより防護板による散乱線の遮蔽効果を確認できる。また防護板による散乱線の遮蔽効果による防護板後方の線量の違いを2次元線量分布により確認できる。3次元等線量曲面は、3次元の線量ボリュームデータからParaView上でしきい値設定により指定した値のボクセルのみを3次元空間上に表示させることで可視化しており、このしきい値は自由に設定することが可能である。

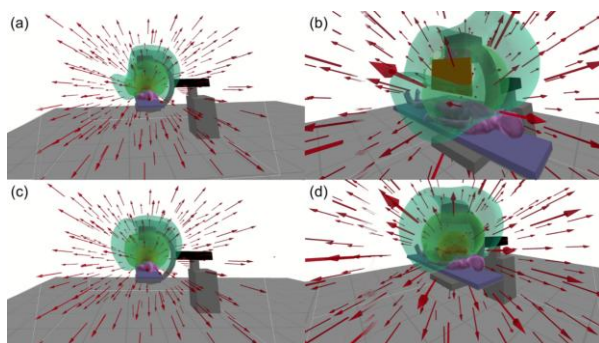


Fig. 6 VR空間における患者からの3次元線量分布と方向ベクトル分布の表示。(a)患者から25 cm, 床から120 cmの高さに防護板を配置した場合の3次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の頭部方向から見た図を示す。(b)防護板を配置した場合の3次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の側面方向から見た図を示す。(c)3次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の頭部方向から見た図を示す。(d)3次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の側面方向から見た図を示す。

D. 考 察

今回開発したVR教材により、VR空間にて方向ベクトル分布を矢印として表示することで、透視装置、患者、防護板、自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を確認することができる。そのため、患者の傍に立ったときに散乱線がどこから自分の方に向かってくるかがモニタ画面を見るよりも容易に視覚的に理解しやすい。VR教材での視線の変更は、ボリュームレンダリング等の3次元画像を表示するソフトウェアのようなマウスによる操作でなく、VRゴーグルを装着している頭を動かすことで微妙な視線を容易に変化させることが出来る。またVRゴーグルを装着することで現実世界が完全に遮断され、余計な物のない没入感のある仮想空間で見たいものだけを表示させることが出来る。これらのことから、VR空間で学習する教育教材では、より主体性をもって学習できると考える。

本VR教材では、使用者の任意の立ち位置や移動に合わせてリアルタイムに確認出来ることから、放射線の相互作用や挙動に関する深い知識を持っていない医療従事者に対しても散乱線の広がりや直感的な理解が可能であり、散乱線がどこから自分に飛んでくるかのイメージを容易にすることが出来る。散乱線源をイメージできれば、診療に支障のない範囲で近づかないようにする、線源と自身間に遮蔽体を配置することで効果的な放射線防護対策ができ、本教材による散乱線の挙動の理解は医療現場における医療従事者の放射線被ばくリスクの低減に寄与すると考えられる。

本教材では、オーバーテーブルX線管方向での照射の散乱線の挙動を再現した。アンダーテーブルX線管方向の場合や側面方向、他の装置や放射線防護具に関してもシミュレーションす

れば表示可能であり、様々な手技や検査での VR 放射線防護教材に拡張させることが可能である。

本 VR 教材を使用時の注意点として下記のことが挙げられる。一点は VR ヘッドセットを被ると現実空間が見えなくなることである。本教材では VR ヘッドセット装着者が周囲を歩くことにより仮想的な検査室にいるような疑似体験をすることが出来るが、そのためには装着者が机や物と衝突することが無いよう、少なくとも 2 m 四方の広い空間を用意する必要がある。また VR 教材の使用に関して、個人差はあるものの酔いやすいという指摘もある。そのため、使用時には体調に注意して無理に長時間使用しないようにする必要がある。

今回開発した VR 教材において、方向ベクトルは散乱線の進行方向を示すが、線量の大小を示すことはできなかった。そのため、防護板の効果を理解するためには線量分布を重ね合わせる必要がある。方向ベクトル分布単独で防護板の効果を視覚的に示すためには、線量の大きさによって、色または大きさを変えることで実現できると考えられる。また、矢印をより見やすくするための改善策として重複を避けるために表示本数を調整したり、現時点での ParaView の機能には搭載されていないが、カラードップラーのように近づいてくる矢印は赤く、遠ざかる矢印は青く表示することによって色覚的に散乱線の方向をより認識しやすくできる可能性もある。

本研究の限界として以下の 3 点が挙げられる。1 点目は、方向ベクトルの表示方法である。今回は VR 空間で表示したが、実際の透視装置に方向ベクトルを重ね合わせるなど、任意の背景に対して表示する場合、拡張現実表示の方がよりリアリティがあり効果的であると考えられる。近年は、VR ゴーグルに備え付けられているカメラに

よるビデオパススルーの解像度が良くなり、大きな違和感なく VR ゴーグル越しから現実空間のカメラ映像を観察することが出来る。また現実空間をカメラ越しに確認できると周囲のものと衝突することなく安全に教材を扱うことが出来る。2 点目は、照射条件や防護板の位置が限定されている点である。1 回のモンテカルロシミュレーションで数時間を要することから、リアルタイムに照射条件を変えながら VR 上に方向ベクトルなどを表示させることは現実的ではない。この点に関しては、照射条件を変えたものの 3 次元線量分布や方向ベクトルデータを取得しておき、都度目的のデータをインポートして表示することで解決することができる。3 点目は、医療従事者等の使用による本教材の客観的な評価が行えていない点である。本教材は、防護板の有無や複数の線量分布、ベクトル表示方法から散乱線の進行方向や適切な防護板の配置場所を理解できるよう設計したものであるが、理解度の確認のために確認テストを実施したり、目的達成のためのシナリオが適切だったか、使い勝手などのアンケートから教材の質を上げていく必要がある。

E. 結 語

今回、モンテカルロシミュレーションにより算出した散乱線の方向ベクトルや周辺線量当量の分布を VR ゴーグルを用いて VR 空間に表示し、任意の方向から確認できた。また、方向ベクトル分布と線量分布を重ね合わせることで、防護板の放射線防護効果を示すことができた。VR 空間では、透視装置、患者、防護板と使用者の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用であると示唆される。

参考文献

- 1) Rehani MM, Ciraj-Bjelac O, Vañó E, et al. ICRP Publication 117. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. *Ann ICRP* 2010;40:1–102.
- 2) Cha H, Lee K, Park MS, et al. Shielding effect of radiation dose reduction filter during the use of C-arm fluoroscopy: a phantom study. *J Radiat Res* 2020;61:705–711.
- 3) Shoaib A, Rethnam U, Bansal R et al. A comparison of radiation exposure with the conventional versus mini C arm in orthopedic extremity surgery. *Foot Ankle Int* 2008;29:58–61.
- 4) Mesbahi A, Rouhani A. A study on the radiation dose of the orthopaedic surgeon and staff from a mini C-arm fluoroscopy unit. *Radiat Prot Dosimetry* 2008;132:98–101.
- 5) Tuohy CJ, Weikert DR, Watson JT, et al. Hand and body radiation exposure with the use of mini C-arm fluoroscopy. *J Hand Surg Am* 2011;36:632–638.
- 6) Yamada A, Haga Y, Sota M, et al. Eye Lens Radiation Dose to Nurses during Cardiac Interventional Radiology: An Initial Study. *Diagnostics (Basel)* 2023;13:3003.
- 7) Valentin J. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. *Ann ICRP*. 2000;30:7–67.
- 8) Haga Y, Chida K, Kaga Y, et al. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Sci Rep* 2017;7:569.
- 9) Chida K, Kaga Y, Haga Y, et al. Occupational dose in interventional radiology procedures. *AJR Am J Roentgenol* 2013;200:138–141.
- 10) Takenaka M, Hosono M, Hayashi S, et al. How should radiation exposure be handled in fluoroscopy-guided endoscopic procedures in the field of gastroenterology?. *Dig Endosc* 2022;34:890–900.
- 11) García Balcaza V, Camp A, Badal A, et al. Fast Monte Carlo codes for occupational dosimetry in interventional radiology. *Phys Med* 2021;85:166–174.
- 12) López PO, Dauer LT, Loose R, et al. ICRP Publication 139: Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures *Ann ICRP* 2018;47:1-118.
- 13) Meisinger QC, Stahl CM, Andre MP, Kinney TB, Newton IG. Radiation protection for the fluoroscopy operator and staff. *Am J Roentgenol* 2016;207:745–54.
- 14) Santos WS, Belinato W, Perini AP, et al. Occupational exposures during abdominal fluoroscopically guided interventional procedures for different patient sizes - A Monte Carlo approach. *Phys Med* 2018;45:35–43.
- 15) Hirata Y, Fujibuchi T, Fujita K, et al. Angular dependence of shielding effect of radiation protective eyewear for radiation protection of crystalline lens. *Radiol Phys Technol* 2019;12:401–408.
- 16) Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualize the behavior of scattered radiation, *J Radiol Prot* 2022;42:011506.
- 17) Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using

augmented reality. J Radiol Prot 2020;40:1299–1310.

- 18) Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, J Radiol Prot 2021;41:S317.
- 19) Haowen J, Vimalasvaran S, Myint Kyaw B, et al. Virtual reality in medical students' education: a scoping review protocol. BMJ Open 2021;8:e34860.
- 20) Tudor Car L, Kyaw BM, Teo A, et al. Outcomes, Measurement Instruments, and Their Validity Evidence in Randomized Controlled Trials on Virtual, Augmented, and Mixed Reality in Undergraduate Medical Education: Systematic Mapping Review. JMIR Serious Games 2022;10:. e29594.
- 21) Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol 2024;61:127-135.
- 22) Hizukuri K, Fujibuchi T, Arakawa H, Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy, Radiol Phys Technol 2024;17:288-296.
- 23) Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, et al. Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX). Radiol Phys Technol 2024;18:196-208.
- 24) Kim CH, Yeom YS, Petoussi-Henss N, et al. ICRP Publication 145: Adult Mesh-Type

Reference Computational Phantoms. Ann ICRP. 2020;49:13-201.

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. 檜作 響子, 藤淵 俊王, Han Donghee, 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線方向ベクトルの可視化, 日本放射線技術学会雑誌, 2025 (accepted)

2. 学会発表

1. 檜作 響子, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, Han Donghee. Virtual reality 技術を利用した X 線透視時の散乱線方向ベクトルの可視化. 第1回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日–11 月 3 日.

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金 分担研究報告書

AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

医療現場では、放射線業務従事者の被ばくは問題であり、放射線防護の知識を持つことは重要である。本研究では、**Augmented Reality (AR)** 技術を用いた散乱線可視化アプリケーションによる放射線防護教材を作成し、その有効性を評価した。教材の評価には、○×問題、**ARCS** モデルをもとにしたアンケート、自由記載を用いた。○×問題の正答率は **C** アームの角度変化による散乱線分布の変化の問題は **65.5%、72.4%** となり、その他の問題は **100%** となった。**C** アームの角度変化は血管造影検査特有の変化であり、他に比べて理解が難しいことがわかった。**ARCS** モデル教材の学習意欲向上度の評価では、平均点は **Attention** が **4.15**、**Relevance** が **3.91**、**Confidence** が **3.93**、**Satisfaction** が **4.28** だった今回の教材はモチベーションの向上に有効である。自由記載にはアプリケーションの操作性の改善点が挙げられた。特にアプリケーションの操作が難しいことがわかった。本教材はモチベーションの向上に有効であるが、今後はシナリオやアプリケーションの改善が必要である。

研究協力者

野口 昂生 九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

近年、血管造影の需要が増加しており、技術の難易度が高く手技が煩雑なため、長時間の透視や頻回する確認撮影により被曝線量の増大が懸念される。これは、放射線業務従事者の電離放射線による確定的影響や確率的影響の発生確率を高める危険性がある。また、術者における主な被ばく源は患者からの散乱線であるため、放射線防護において散乱線の挙動の理解が必要である。しかし、散乱線は目に見えないため、散乱線挙動の理解を行うことが難しい。

血管造影検査において、医師、看護師、臨床工学技士、診療放射線技師といった様々な職種が従事しているが、職種によって放射線についての基礎知識には差があるため、診療放射線技師が中心となって放射線防護教育を行うべきである。しかし、治療などの時間で放射線防護教育に十分な時間を取ることが難しく、放射線防護について理解が不十分である従事者も多い。

ここで、**WebVR** とは、ウェブブラウザ上で **VR(Virtual Reality)** 体験を行うことができる技術

である。WebVR 技術は、地学教材の開発、疑似津波訓練システムへの開発の他、オンラインイベントにて利用されている。WebVR 技術は、仮想空間を利用するための端末と場所を選ばずに利用できる上に、多局面を再現することができ、現実での訓練では用意しなければならない時間や空間などの制限を無視することができると考える。放射線診療が普及した医療現場において放射線業務従事者の被ばくはがんのリスクや放射線障害の発生につながるため大きな問題である[1, 2]。そのため放射線防護の知識を持つことは重要と言える。しかし多くの先行研究より、医療従事者間においても放射線に対する知識の差があることがわかる[3, 4]。昨今広がるチーム医療において診療放射線技師は放射線分野に関する専門家として他の放射線業務従事者に対して正しい知識と防護の必要性を伝えることが大切である。しかし、ICRP Publication 117 では診療放射線技師においても、放射線防護についての技術、知識、認識に偏りがあることが示唆されている [5]。そのため放射線医療に従事する者は放射線防護の訓練が必要である。

医療従事者の被ばくが問題となる中で被ばく量を低減するためには、散乱線の挙動を理解することが重要と言える[6]。しかし、大きな問題点として散乱線は視界で捉えることができず、挙動をイメージすることは容易ではない。また、放射線は三次元に拡散することから、二次元分布では散乱線の広がりを認識、理解するのに限界がある。そのため、現実世界にデジタル情報を付加することで実際の大きさをよりリアルに体感することができ、また表示デバイスを動かすことで多角的に観察することのできる拡張現実(Augmented Reality: AR)技術を用いて、散乱線を可視化することで目に見えないものをイメージしやすくなり、放射線防護の重要性を認識し

やすくなると考えられる[7, 8]。

先行研究において、特に被ばく量の多い C アームを用いた心臓カテーテルにおける血管造影時の散乱線分布についての教育は重要であり[9]、AR 技術を用いた散乱線の可視化が検討されている[8, 9]。しかし、Lima らの研究[10] では特別なヘッドセットを使用しており、演習に対して多くのコストがかかることが考えられる。また、Takata らの研究[11]では実測結果をもとに散乱線分布を可視化するアプリケーションの作成し、評価している。しかし放射線の防護教材を作成しておらず、アプリケーションの活用として不十分であると考ええる。

上記の背景をもとに今回の研究では、AR 技術を用いて C アームを使用した血管造影時の散乱線の分布を三次元に可視化するアプリケーションを作成した。アプリケーションは iPad によって使用することを想定した。また、作成したアプリケーションをもとに、散乱線分布についての理解を深め、放射線の防護方法についての知識を高めるシナリオを作成した。作成したシナリオをもとに診療放射線技師を目指す学生に向けて、知識を高める防護教材を作成し、有効性を検討した。

本研究では、WebVR を用いて散乱線分布を三次元的に可視化し、散乱線の挙動の理解および有効な放射線防護についての教材を作成することで、PCI(Percutaneous Coronary Intervention; 経皮的冠動脈インターベンション)に携わる従事者の散乱線の挙動および防護についての教材の作成を目的とした。

B. 研究方法

B-1. AR 技術を用いたアプリケーションの作成

B-1-1. 使用した血管造影室の情報

今回の研究では Fujibuchi らの研究[12]を参考

に、Sato らの研究[13]によって作成された心臓の血管造影時の散乱線分布のボリュームデータを使用した。ボリュームデータは PHITS コードによるシミュレーションで作成された。今回使用したシミュレーション結果と実際に測定した値の間には、平均 20%の差異が見られた。この差異は、防護板がある場合とない場合の両方で、16箇所データのデータポイントを基に計算されたものである。X線スペクトルには、Tucker の計算式計算式 Version 4 (X-Tucker-4)[14]を使用し、フォトンと電子のカットオフエネルギーは 10keV とした。透視条件は放射線源を 1 辺 0.7mm の正方形とし、3.4mmAl の固有濾過と 0.9mm 厚の銅フィルタを考慮することで再現した。シミュレーションされた血管造影検査室の床面積は 300×300 cm² で、床から天井までの高さは 230 cm とした。検査室内では X 線装置とファントムを使用してシミュレーションした。室内は 80%の窒素と 20%の酸素を主成分とする密度 0.001293 g/cm³ の空気で満たされた。X 線管は厚さ 5mm の鉄製の箱(密度 7.874 g/cm³)内にあり、内部は真空である。検査台は炭素(密度 1.6 g/cm³)で構成され、画像取得部の背後にはアルミニウム板(密度 2.7 g/cm³)にてフラットパネル検出器を再現した。画像受像器までの距離は 105 cm、線源アイソセンタ間の距離は 70 cm、床から検査台までの距離は 83 cm、照射野は 20 × 20 cm²に設定された。患者ファントムは ICRP 110 の男性ボクセルファントムを使用した [15]。照射した X 線フォtons のヒストリー数は 1×10¹⁰ と設定した。フォtons のエネルギーは、使用される管電圧に応じて 1 keV から最大エネルギーまでの範囲で、X-tucker ソフトウェアを用いて 0.5 keV のビンサイズで決定され、相対強度として表された。部屋全体のフォトンフルエンスは、2 cm 各辺の立方体の 3D 分布として出力され、合計 150 × 150 ×

115 ボクセルで表された。

散乱線分布のデータは C アームの角度別に PA(Posterior-Anterior), LAO(Left Anterior Oblique)60°, RAO(Right Anterior Oblique)30°, Cranial30°, Caudal25°の 5 種類、防護板の有無で 2 種類の計 10 種類を使用した。天井から吊り下げられた防護板は 0.5mmPb の鉛ガラスとし、ベッド下に設置された防護カーテンは 0.5mmPb の遮蔽能力を持つ鉛含有シートで構成された。ともに厚さは 0.5mm である。

B-1-2. Unity への取り込みおよびアプリケーションの作成

B-1-1 で述べた 10 種類の散乱線分布のボリュームデータを、ゲーム開発エンジンである Unity ver.2022.2.181 に取り込んだ。Nishi らの研究[16]によって作成されたアプリケーションをもとに、C アーム装置やそれに伴う散乱線分布のボリュームデータを配置し、アプリケーションを作成した。基本的にはそれぞれのアーム角度における装置の 3D オブジェクトを使用した。一部のオブジェクト作成時に歪な凹凸が見られたため 3DCG(Three Dimensions Computer Graphics)モデリングソフトである Blender ver.3.6 により平滑化した他の角度の 3D オブジェクトを使用した。他の角度のオブジェクトを Unity 上でアーム角度に合うように傾けた。術者の 3D オブジェクトは散乱線分布では使用していない桃色に色付けを行い、目立たせた。また、実際の装置や防護板の色彩をもとに寝台オブジェクトを黒、天吊り防護板オブジェクトを透明度の高い茶色、足元の防護カーテンオブジェクトを紺色にした。

B-1-3.AR アプリケーションの機能

今回作成したアプリケーションの表示端末として iPad Pro(11-inch, 4th generation) iOS16.0 を

使用した。メニュー画面でCアームの角度 変更や防護板の有無の変更、二次元断面の変更、カラースケールの変更を行う。二次元断面はアキシャル方向、サジタル方向、コロナル方向に動かすことが可能で、3方向から任意の断面を選択し散乱線分布を確認することができる。

今回のアプリケーションは起動時に仰臥位である患者の胸部から起動する。このことにより、実際にベッドなどを用いてシミュレーションする際には、患者の胸部にあたる場所から起動することで、より位置合わせを簡易化することができる。

Position ボタンを押しながら iPad 本体を動かすことでCアームや患者、術者のオブジェクトを移動させることができる。Rot-Right, Rot-Left を押している間はCアームや患者、術者のオブジェクトが回転する。Scale バーの変更によりCアームや患者、術者のオブジェクトのサイズを変更することができる。

B-2. 放射線防護教材シナリオ

今回は5種類のCアームの角度を用意したことを考え、放射線防護の三原則をもとに、4つのシナリオを作成した。また、それぞれのシナリオにおいて理解度を測るための○×問題を作成した。作成した問題は結果にて、正答率とともに示す。実際の演習では、シナリオに沿って演習を行う前に、今回の演習を行う上での背景および今回のアプリケーションで対象とした心臓の血管造影検査の概要、アプリケーションの操作方法を説明した。演習中は2台のモニタを使用

した。モニタには、自分が操作するiPadの画面と演習テキストを表示した。演習テキストには目的、演習手順、観察ポイントがある。観察ポイントは演習後の○×問題に対応して、各シナリオにおいて特に注意して欲しい点を示した。Table Iに実際の演習の流れを示す。

Table I 実際の演習の流れ

実習の流れ
1. 演習の背景、血管造影検査の概要説明
2. アプリケーションの操作説明
3. シナリオに沿った演習
3-1. Cアームの角度変化による散乱線分布の変化
3-2. 防護板使用による散乱線分布の変化
3-3. 防護具(ゴーグル・エプロン)使用による被ばく量の変化
3-4. 距離による被ばく量の変化
4. true or fouls問題の回答

各シナリオの目的、演習手順、観察ポイントをTable IIに示す。Cアームの角度変化による散乱線分布の変化、防護板使用による散乱線分布の変化の演習は、教室を移動し、ライフサイズで演習した。各自に配布したiPadを用いて、演習者自身で散乱線分布の変化を確認した。重要な点においてはモニタの画面を使って説明を行なった。一方で防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化、アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化については縮小サイズで行った。説明に使用した部屋に戻り、卓上で演習した。今回の演習では、防護ゴーグルを装着した際の透過率を50%、防護エプロンを着用した際の透過率を10%とした[17-21]。

Table II 演習シナリオの目的、演習手順、観察ポイント

シナリオの目的、手順、観察ポイント	
Cアームの角度変化による散乱線分布の変化	
目的	複数のCアーム角度における散乱線分布を確認することで、それぞれの特徴を捉える。
演習手順	1. iPadを手に持ち、PA方向、防護板なし(アプリケーション開始時)の散乱線分布を部屋の中を動きながら確認する 2. LAO60° 防護板なし、RAO30° 防護板なしについて好きな断面で同様に分布を確認する (迷った時は頭尾方向に断面を変更することを推奨) 3. Cau25° 防護板なし、Cra30° 防護板なしについて好きな断面で同様に分布を確認する (迷った時は左右方向に断面を変更することを推奨)
観察ポイント	血管造影検査での術者の被ばくには頭と足元でどのような差があるか Cアームの角度を術者側に傾けると術者に対する被ばく量はどのように変化するか
防護板使用による散乱線分布の変化	
目的	防護板や防護カーテンを使用した際の散乱線分布を確認することで、有用性を確認する。
演習手順	1. iPadを手に持ち、好きなCアームの角度、防護板なしの散乱線分布を部屋の中を動きながら確認する 2. 同じCアーム角度の防護板ありに変更して同様に散乱線分布を確認する 3. 他の角度でも同様に防護板の有無による散乱線分布の変化を確認する
観察ポイント	散乱線の防護において防護板により被ばく量はどのくらい低減しているか 足元の防護カーテンにより被ばく量はどのくらい低減しているか
防護具(ゴーグル, エプロン)使用による被ばく量の変化について	
目的	防護ゴーグルや防護エプロンのような防護具を使用した際の散乱線による被ばく量の変化を確認することで、有用性を確かめる。
演習手順	1. Scaleを変更して、3Dモデルが机の上に乗るように移動させる 2. goggle, protectorの数字を0.5, 0.1に変更する(今回はゴーグルの透過率を50%、エプロンの透過率を10%とする) 3. 術者の被ばく量が変化したのを確認する
観察ポイント	防護メガネをつけることで被ばく量がどれくらい低減されているか 防護エプロンをつけることで被ばく量がどれくらい低減されているか
アイソセンターと術者間の距離による被ばく量の変化	
目的	術者の移動による被ばく量の変化を確認することで、照射中心から離れることの有用性を確かめる。
演習手順	1. 好きな方向に術者を移動して、被ばく量の変化を確認する 2. 左右方向に動かして、被ばく量の変化を確認する 3. 頭尾方向に動かして、被ばく量の変化を確認する
観察ポイント	距離を二倍にすると被ばく量はどのように減少するか

B-3.教材の評価

B-3-1. 対象者

今回は診療放射線技師養成校に所属する 3 年生、29 名に実際に作成したアプリケーションを用いて、シナリオに沿って演習を行った。演習一回あたり 7~8 名の学生を対象として、計 4 回行った。各回では作成したアプリケーションをダウンロードした iPad を人数分用意し、演習開始前に貸し出した。

B-3-2. ARCS モデルを用いた教材の評価

ARCS モデルとは、学習意欲について注意(Attention)、関連性(Relevance)、自信(Confidence)、満足度(Satisfaction)の 4 つの要素で評価するものである。各質問に対して 1 から 5 の 5 段階にて

評価を行う[22]。医療以外にも多くの分野において、教材の動機づけ評価として用いられている[23-27]。今回の研究では Nishi らの研究[16]を参考に質問項目を Attention12 問、Relevance9 問、Confidence9 問、Satisfaction6 問とし、各問の平均値をもとに評価する。また、それぞれの項目の評価を比較するために、t 検定:分散が等しいと仮定した 2 標本による Welch の t 検定を行い、有意差を確認した。P 値が 0.05 以下で有意差ありと判断した。

B-3-3.自由記載による教材の評価

今回の演習において自由記載を実施した。自由記載については疑問に思ったことや良かったこと、難しかったことなど、思ったことを自由に

書いて良い旨を口頭で伝えた。また、テキストマイニングを KH coder を用いることで、自由記載を解析した。

(倫理面への配慮)

本研究は参加者へのアンケートを実施することから、九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け(課題番号 20793)、参加者から同意書を得て研究を実施した。

C. 結果

C-1. 演習中のアプリケーション

C アームの角度変化による散乱線分布の変化を確認するシナリオでは Fig.1 のように変化を確認した。

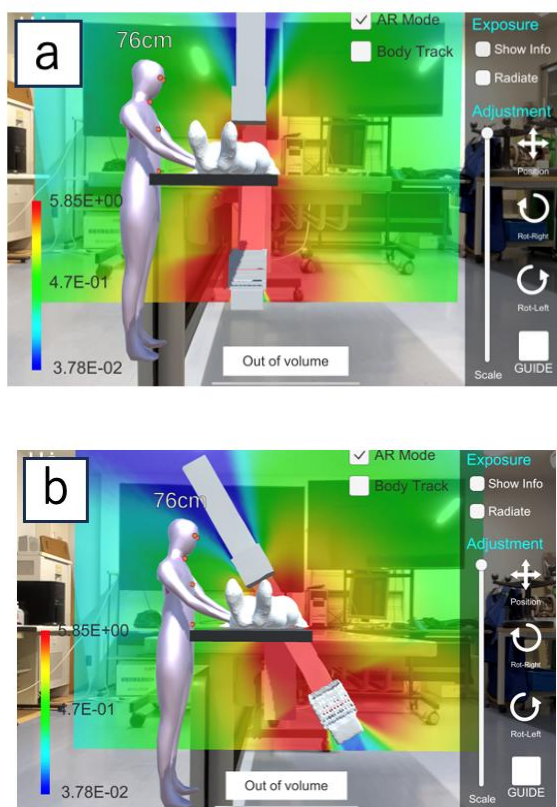


Fig. 1 アプリケーション使用時の分布変化の確認画像。PA 方向(a)と RAO30°方向(b)を比較する

と C アームの角度を変えることで散乱線分布が変化していることがわかる。

天吊り防護板および足元の防護カーテンの使用による散乱線分布の変化を確認するシナリオでは Fig. 2 のように防護板による散乱線のカットを確認できた。

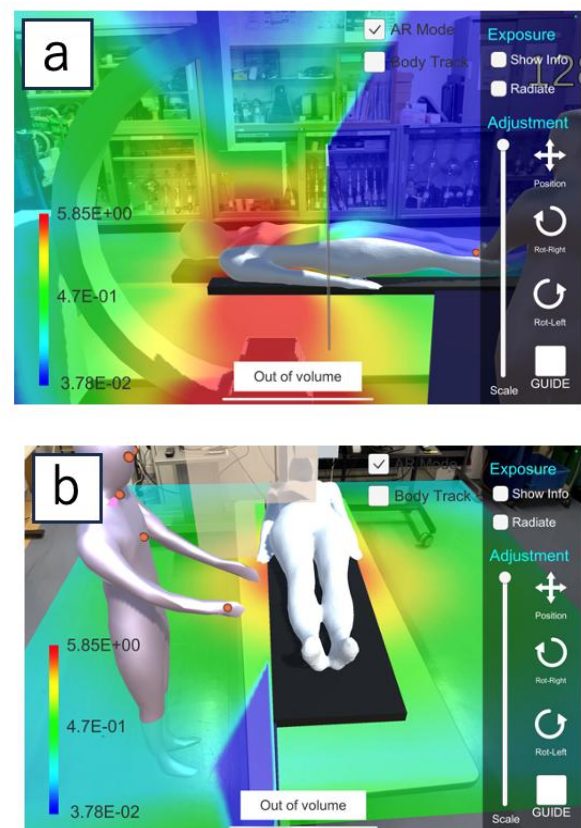


Fig. 2 アプリケーション使用時の防護板による分布変化の確認画像。天吊り防護板による散乱線の画像(c)と足元の防護カーテンによる散乱線の画像(d)から防護板の後ろで散乱線がカットされていることがわかる。

縮小サイズで行った防護具使用による被ばく量の変化およびアイソセンタと術者の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオでは、Fig. 3 のように変化を確認した。術者オブジェクト

の立ち位置における各点(水晶体、甲状腺、胸部、腹部、手)の被ばく量は画面左下に示される。アイソセンタからの距離は術者オブジェクトの頭

上に表示される。

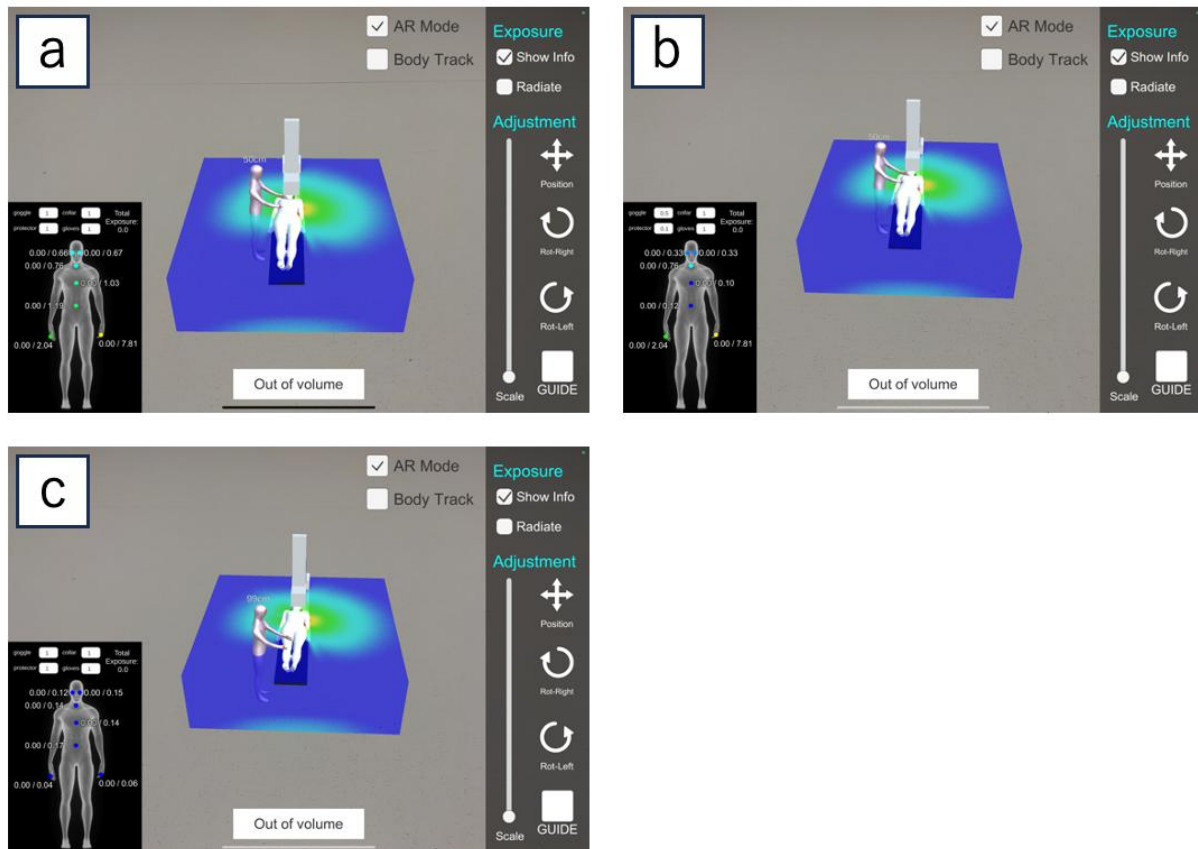


Fig.3 アプリケーション使用時の卓上演習の画面。ゴーグル、エプロン無し(e)と有り(f)を比較すると、胸部、水晶体の被ばく量がそれぞれ 0.1 倍、0.5 倍になることが確認できる。アイソセンタからの距離が 50cm(e)と 99cm(g)を比較すると全ての測定点で被ばく量が減少していることがわかる。

C-2. ○×問題の正答率

Table IIIに各問と正答率を示す。これらの結果より、C アームの角度変化による散乱線分布の

変化についての問題の正答率が他の問題に比べて低く、他の問題は正答率が 100%となった。

Table III True or false 問題と正答率

問題	正誤	正答率
Cアームの角度変化による散乱線分布の変化		
血管造影検査では頭部に比べて足元での被ばく線量が多い	○	65.5%
Cアームの角度を術者側に傾けると術者に対する被ばく線量は増加する	○	72.4%
防護板使用による散乱線分布の変化		
散乱線の防護において防護板を用いる必要はない	×	100%
足元の防護カーテンは被ばく低減において効果がない	×	100%
防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化		
防護ゴーグルをつけることで被ばく量を大きく低減することができる	○	100%
防護エプロンでは被ばく量の低減は期待できない	×	100%
アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化		
距離を2倍にすると被ばく量は2分の1になる	×	100%

C-3. 教材の評価

C-3-1. ARCS モデルによる教材の評価

Fig. 4, Table IV に注意 (Attention)、関連性 (Relevance)、自信 (Confidence)、満足度 (Satisfaction) の要素ごとの平均値と各問の内容を示す。ARCS モデルにおいては各問に 1 から 5 の 5 段階で評価を行う。否定的な質問に対し

ては 1 を 5、2 を 4 のように修正したのちに、平均値を算出した。Attention、Satisfaction の値は 4 を上回り、Relevance、Confidence の値も 4 に近い値となった。また、t 検定より Satisfaction は Relevance、Confidence と比較して有意差があり、Attention は Relevance と比較して有意差があることが確認できた。

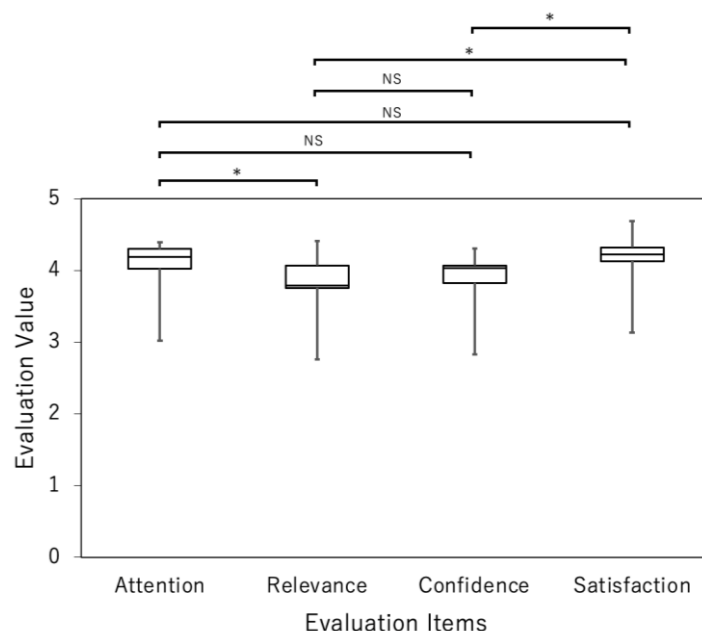


Fig. 4 ARCS モデルに基づいたアンケート結果。各項目ごとに平均値と標準偏差を示す。平均点と標準偏差は Attention が 4.15 ± 0.22 、Relevance が 3.91 ± 0.27 、Confidence が 3.93 ± 0.29 、Satisfaction が 4.28 ± 0.22

となった。また項目ごとに有意差検定を行い、比較した。 $*P < 0.05$ NS not significant

Table IV アンケート内容と各問の平均点

Content of the questionnaire	Evaluate Value
A1. この教育コンテンツを最初に見た時、私は簡単に操作できる印象を受けた。	3.69
A2. この教育コンテンツの冒頭に私の注意を引く興味深い内容があった。	4.14
A3. この教育コンテンツは、私が考えていたよりも理解しやすいものだった。	4.00
A4. この教育コンテンツの指示スライドを読んで、私はこの講義で何を学ぶべきか理解した。	4.24
A5. この教育コンテンツで実習を終えた時、満足のいく達成感が得られた。	4.34
A6. この教育コンテンツにより、すでに知っていた内容とのつながりが持てた。	4.38
A7. この教育コンテンツは、情報量が多すぎて、重要なポイントを拾い上げて覚えることが難しかった。	4.03
A8. この教育コンテンツは目を引くものだった。	4.14
A9. この教育コンテンツが誰にとって重要なのかを示す写真または事例があった。	3.83
A10. この教育コンテンツを目的通りに終えることは、私にとって重要と感じた。	4.29
A11. この教育システムの内容は、私に放射線防護の注意を引きつける助けになった。	4.39
A12. この教育コンテンツはとても抽象的で、私の注意を引きつけるのは難しかった。	4.28
R1. この教育コンテンツを使用して、放射線防護方法の内容を学ぶことができたと確信した。	3.97
R2. 私はこの教育コンテンツをとても楽しめたので、放射線防護方法についてもっと知りたいと思った。	3.76
R3. この教育コンテンツは退屈で、魅力的ではなかった。	4.41
R4. この教育コンテンツの内容は、私の興味に関係していた。	3.61
R5. このシステムの情報の提示方法は、私の注意を引きつけるのを助けた。	3.79
R6. この教育コンテンツで、医療スタッフがどのように放射線防護の知識を活用するかの説明や例があった。	4.07
R7. この教育コンテンツの演習は難しかった。	4.14
R8. この教育コンテンツでは、私の好奇心を刺激したことがあった。	3.69
R9. 私はこの教育コンテンツを本当に楽しんでいて。	3.79
C1. この教育コンテンツの内容の繰り返しは、時々退屈になった。	3.83
C2. この教育コンテンツの内容とスタイルは、その内容を知る価値があるという印象を伝えた。	4.07
C3. この教育コンテンツを通じて驚くべきことや、予想外のことを学んだ。	3.28
C4. 教育コンテンツでトレーニングした後、しばらくの間、私は放射線防護対策を実施できるだろうと思った。	4.03
C5. 私が既に大部分を知っていたため、教育コンテンツは私のニーズに関係なかった。	3.83
C6. 講習中の質疑は、教育効果を向上させるよう感じる手助けをしていた。	4.03
C7. この教育コンテンツにおける実習、図などの様々な資料が私の注意を引くに役立った。	3.86
C8. この教育コンテンツの形式が退屈だった。	4.14
C9. この教育コンテンツの内容は、これまで自分が見たこと、したこと、あるいは考えたことに関連付けることができた。	4.31
S1. この教育コンテンツには、非常に多くの説明があり、いらいらした。	4.34
S2. この教育コンテンツを上手く完了できたことが良かったと感じた。	4.21
S3. この教育コンテンツの内容は私にとって役に立つと考えられる。	4.25
S4. この講義で、私はこの教育コンテンツの大部分を理解できなかった。	4.69
S5. この教育コンテンツの構成は、放射線防護対策の内容を学習できたという自信をつけるのに役立った。	4.11
S6. このように設計された教育コンテンツに取り組むのは楽しいことだった。	4.07

C-3-2. 自由記載による教材の評価

今回の自由記載で複数回登場した単語をテキ

ストマイニングで解析し、得られた共起ネットワーク図を Fig. 5 に示す。アプリケーション内

に登場するオブジェクトや、アプリケーションの操作に関する単語が多く見られた。良いという単語も記載されたことがわかる。また自由記

載には、Table Vに示すようなアプリケーションの改善点が挙げられた。

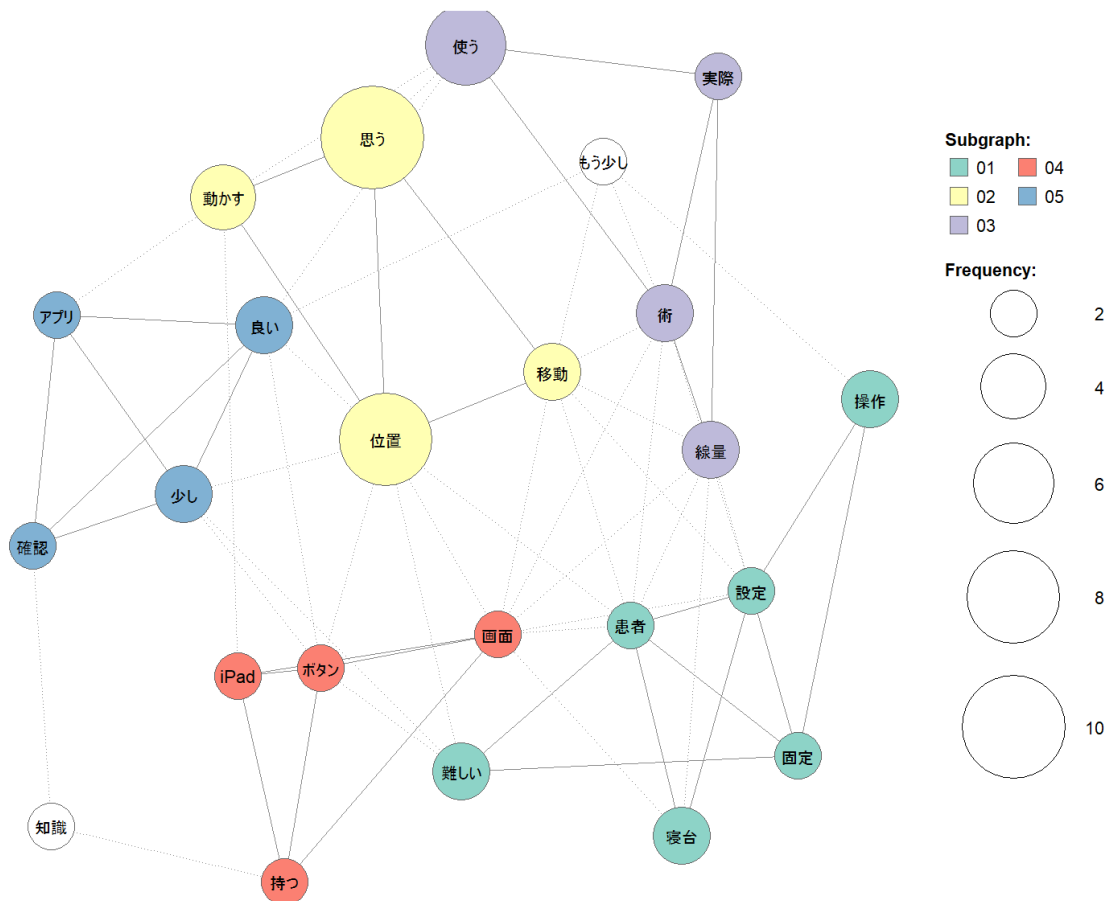


Fig. 5 自由記載より得られた共起ネットワーク図。各単語の出現数、つながりが視覚的にわかる。

Table V 自由記載で挙げられた改善点一覧

改善点
Bed moves too slowly
Difficult position adjustment
Simplify 3D model position movement
Complicated position alignment
Fix the close (X) button in the menu
Allow intuitive cross-section changes
Add a pause function
Enable setting of operator height and shield position
Adjust C-arm angle incrementally
Positions misalign when reopening the app

D. 考察

True or false quiz の結果より C アームの角度変化による散乱線分布の変化についての正答率が他に比べて低いことがわかった。一方でその他の問題については正答率が 100%となった。この結果より、C アームの角度による散乱線分布の変化は C アームを使った血管造影検査における特有の現象であり、今後シナリオを改善する際により詳細にすることが望ましいと考える。一方で、その他の問題については C アーム特有のものではなく、学生の放射線に対する知識がある程度あることを示していると考えられる。今回の演習は対象者を診療放射線技養成校の学生を対象としたため、基本的な放射線に関する知識を持っていたことが正答率に表れたと考える。今回の結果をもとに、今後は診療放射線技師を目指す学生のように放射線についての学習を行っている学生については問題の難易度を調節することが望ましい。

ARCS モデルのアンケート結果より、他と比べて Satisfaction の値が高く、Relevance、Confidence の値が低い結果となった。特に Satisfaction の 4 番目の項目(この講義で、私はこの教育コンテンツの大部分を理解できなかった)の評価が最も高く、4.69 であり、Confidence3(この教育コンテンツを通じて驚くべきことや、予想外のことを学んだ)の評価が最も低く、3.28 である。また、t 検定によって Satisfaction は Relevance、Confidence と比較して値が高いことがわかった。これらの原因として、演習内に既知の知識が含まれていたことが原因であると考ええる。シナリオ内の情報について、すでに知っている情報が入っていた場合に、その評価は低くなると考える。今回の結果より演習について理解は進んでいるため今後は演習内容の調節を行い、より多

くの知識を提供することで、成長できたという自信を提供することができるのではないかと考えている。平均値を見ると Attention、Satisfaction の値は 4 を上回り、Relevance、Confidence の値も 4 に近い値となった。このことより今回の演習シナリオは教材としては良いものであると考える。

自由記載についてアプリケーションの複数の改善点が挙げられたため、テキストマイニングの結果においてアプリケーション内のオブジェクトおよび操作面についての単語が多く挙げられたと考えられる。解析による共起ネットワーク図の結果よりアプリおよび確認と良いが結びついており、アプリケーションをもとに分布の確認ができたことが良い評価に繋がったと考える。また iPad や画面が知識や持つと関連しているため、散乱線分布を画面で確認することで、すでに持っている知識を再確認することができたのではないかと考える。一方でアプリケーションの操作、設定に関する単語は難しいと関連生があり、アプリケーションの操作性の問題が浮き彫りとなった。しかし、今回の対象は 29 名のみであり、さらに自由記載については全ての学生が回答したわけではないため、偏った意見になっている可能性がある。

研究限界と今後の課題について、今回の演習は学生のみを対象に行ったため、診療放射線技師として実際に働いている人を対象に演習を行い、今回のシナリオが実際に必要な知識を提供できているかなどの意見をもらうことが必要である。また、今後は他の医療従事者を目指す学生に向けた学習教材を作成する際は、より放射線について基礎的なシナリオを作成する必要がある。アプリケーションについては、操作性に改善の余地がある。また、C アームの角度や防護板の

位置、照射条件などが固定となっているため、条件の自由度が低く、その点が実際の医療現場と異なる点に留意が必要である。さらには、今回の散乱線分布の表示方法では、散乱線の進む方向までを示すことができていない。今後は、アニメーションや矢印により、放射線の広がり方を示すことが必要となる。

E. 結論

本研究では散乱線を可視化することで散乱線分布や距離、防護具による被ばく量の低下について直感的に理解することができるアプリケーションが作成できた。また作成したアプリケーションをもとに放射線防護教材を作成した。

今回作成したシナリオを用いて実際に演習を行い、教材として評価した。今回の結果からアプリケーションの改善点、シナリオの変更すべき点が明らかになった。特に、○×問題の難易度の設定について、診療放射線技師の養成校に通う学生には多くの問題で正答率が 100%となることがわかったため、今後はより詳細な問題を作成する。また ARCS モデルによる教材の評価より、平均値は 4 に近い値となり、学習意欲の向上についてこの教材は有効であることがわかった。一方で教材によって得ることのできる知識にすでに既知の知識が多く含まれている可能性が示唆された。今後のシナリオ改善においてはより多くの知識を示すことのできるものを作成する。自由記載から、アプリケーションの操作が難しいことがわかった。

参考文献

1. Picano E, Vano E, Domenici L, Bottai M, Thierry-Chef I. Cancer and non-cancer brain and eye effects of chronic low-dose ionizing radiation exposure. *BMC Cancer*. 2012; <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
2. Roguin A, Goldstein J, Bar O, Goldstein J. A. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am J Cardiol*. 2013; <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
3. Hayashi S, Takenaka M, Kogure H, et al. A questionnaire survey on radiation protection among 282 medical staff from 26 endoscopy-fluoroscopy departments in Japan. *DEN Open*. 2021; <https://doi.org/10.1002/deo2.5>
4. Fataftah J, Tayyem R, Al-Dwairy S, et al. Awareness of radiation hazards and knowledge of radioprotective measures among radiologists and non-radiology staff: a cross-sectional survey. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; <https://doi.org/10.1186/s43055-024-01300-4>
5. ICRP. Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department. ICRP Publication 117. *Ann. ICRP*. 2020; 40(6): 1-102.
6. Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, *J Radiol Prot* 2021;41(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac16b1>.
7. Dhar P, Rocks T, Samarasinghe RM, Stephenson G, Smith C. Augmented reality in medical education: students' experiences and learning outcomes. *Medical Education Online*. 2021; <https://doi.org/10.1080/10872981.2021.1953953>
8. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses

- augmented reality and virtual reality to visualize the behavior of scattered radiation, *J Radiol Prot* 2022;42(1) <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac3e0a>.
9. Kato M, Chida K, Munehisa M, et al. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings. *Diagnostics (Basel)*. 2021; <https://doi.org/10.3390/diagnostics11091613>
10. Lima TV, Simões RFP, Heinrich M, Kreienbühl T, Wetzel R, Roos JE. Usefulness of augmented reality in radiological protection education and training for interventional radiologists. *Br J Radiol*. 2023; <https://doi.org/10.1259/bjr.20221075>
- 11.9) Matsuzaki S, Moritake T, Morota K, et al. Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. *Eur J Radiol*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109925>
12. Fujibuchi T, Nakashima M, Arakawa H, Miyazaki H, Anam C. Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution. *J Radiol Prot*. 2021; <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad6d75>
13. Sato N, Fujibuchi T, Toyoda T, et al. Consideration of the protection curtain's shielding ability after identifying the source of scattered radiation in the angiography. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017; <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw291>
14. Kato H X-ray-spectrum-2 , (available at: <https://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology>) (Accessed 17 January 2022)
15. ICRP. Adult reference computational phantoms. ICRP publication 110. *Ann ICRP*. 2009; 39(2): 1-164.
16. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. *J Radiol Prot*. 2020; <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abc14b>
17. Livingstone RS, Varghese A. A simple quality control tool for assessing integrity of lead equivalent aprons. *Indian J Radiol Imaging*. 2018; https://doi.org/10.4103/ijri.ijri_374_17
18. König AM, Zoum JV, Fiebich M, Abissi PW, Mahnken AH. Comparison of the radiation protection effect of different radiation protection aprons made of different materials. *Eur J Radiol*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110862>
19. Endo M, Haga Y, Sota M, et al. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. *Journal of Radiation Research*. 2021; <https://doi.org/10.1093/jrr/rrab014>
20. Haga Y, Chida K, Kaga Y, Sota M, Meguro T, Zuguchi M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Scientific Reports*. 2017; <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00556-3>
21. Cheon BK, Kim CL, Kim KR, et al. Radiation safety: a focus on lead aprons and thyroid shields in interventional pain management. *Korean J Pain*. 2018; <https://doi.org/10.3344/kjp.2018.31.4.244>
22. Keller JM. Motivation, Learning, and

Technology: Applying the ARCS-V motivation model. *Participatory Educational Research*. 2016; <http://dx.doi.org/10.17275/per.16.06.3.2>

23. Son D, Kawamura K, Utsumi M, Nakashima M, Suzuki K, Watanabe N. The development and evaluation of the interprofessional education facilitation program for health professionals using the Attention, Relevance, Confidence, and Satisfaction (ARCS) model of instructional design. *Cureus*. 2023; <https://doi.org/10.7759/cureus.37496>
24. Li D. Psychological emotion and behavior analysis in music teaching based on the Attention, Relevance, Confidence, and Satisfaction motivation model. *Front Psychol*. 2022; <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.917476>
25. Laurens-Arredondo L. Mobile augmented reality adapted to the ARCS model of motivation: a case study during the COVID-19 pandemic. *Education and Information Technologies*. 2022; <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10933-9>
26. Cai X, Li Z, Zhang J, et al. Effects of ARCS model-based motivational teaching strategies in community nursing: a mixed-methods intervention study. *Nurse Educ Today*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2022.105583>
27. Maiti M, Priyaadharshini M, Harini S. Design and evaluation of a revised ARCS motivational model for online classes in higher education. *Heliyon*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22729>

F. 健康危険情報
なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Noguchi K, Fujibuchi T, Han D, Effectiveness of radiation protection educational material during angiography using visualization of scattered radiation by augmented reality technique. *Radiological physics and technology*, 2025.

2. 学会発表

1. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation and implementation of educational scenarios aimed at understanding optimization of radiation protection in fluoroscopy using Extended Realty, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
2. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
3. 12. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
4. 藤淵 俊王, 富澤 登志子, Extended reality を利用した放射線診療従事者向け医療放射線防護教育教材の開発と実践, 第 67 回日本放射線影響学会, 北九州, 2024.9.25-28.
5. 野口 昂生, 藤淵 俊王, AR 技術を利用したモバイル C アーム透視装置および CT 装置の散乱線可視化による放射線防護アプリケ

ーションの作成. 第 1 回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.

6. Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Education on optimizing radiation protection in X-ray fluoroscopy-guided procedures using extended reality, PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金 分担研究報告書

診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

本研究では、ピンホールコリメータを搭載した高感度 CMOS カメラを用いて、画像診断に関連するエネルギー範囲内で散乱放射線をリアルタイムに可視化する方法を提案する。また、モンテカルロシミュレーションを使用して、測定データが実際の散乱放射線を正確に表しているかどうかを検証する。CMOS カメラ、CsI シンチレータ、ピンホールコリメータを用いてリアルタイム散乱放射線イメージングシステムを開発した。ピンホールの直径や露光時間など、さまざまなパラメータを評価し、最適な構成を特定した。さらに、モンテカルロシミュレーションを使用し、測定データをシミュレートされた散乱放射分布と比較した。本システムは、高い空間分解能で散乱放射線源の可視化に成功した。最適なパラメータは、ピンホールの直径 2mm、露光時間 50 ミリ秒であり、画像の鮮明さと効率のバランスが取れている。測定データはシミュレーション結果とほぼ一致し、システムの精度を確認した。提案したシステムは、散乱放射線のリアルタイム可視化を可能にし、臨床現場での放射線防護を強化する大きな可能性を提供する。診断手順におけるより安全な作業環境と効果的な放射線安全管理の実現に貢献すると期待される。

研究協力者

Lee Hyojin

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

医療現場における放射線の使用は拡大しており、X 線は診断目的で広く活用されている。正確な画像診断には、高齢者や子供、頸椎の固定が必要な外傷患者、呼吸補助が必要な重篤な患者など、じっとしていることができない患者の診療において、介護者や医療スタッフの支援が

不可欠である。しかし、散乱放射線は、患者の被ばく中に発生し、介護者や医療スタッフに潜在的なリスクをもたらす。これらの散乱放射線源は肉眼では感知できないため、視覚化することで、高線量の危険ゾーンと低線量の安全ゾーンを特定する重要な情報を提供できる。この視覚

化は、介護者と医療従事者が処置中に適切な保護措置を実施するうえで有用である。

散乱放射線の可視化に関する研究には、モンテカルロシミュレーションやイメージングプレート(IP)を利用する方法が含まれる。モンテカルロシミュレーションでは、散乱放射分布の解析が可能であるものの、計算時間が長く、デバイスの構造や条件を正確に再現する必要があるため、実用化には制限がある。一方、IPを用いた手法は、散乱放射線の分布を直接捉えることができるが、読み取り装置が必要であり、記録画像へのアクセスに時間がかかるため、リアルタイムな観測には適していない。

これらの課題を踏まえ、本研究では、シンチレータとデジタルカメラを用いて散乱放射線をリアルタイムに可視化する方法を提案する。これまでの研究では、シンチレータとデジタルカメラを組み合わせた構成で一次ビームの可視化が行われてきたが、散乱放射線への応用については十分に検討されていなかった。本研究では、この手法を特に散乱放射線の観測に適応させ、実践する。

本研究の目的は、ピンホールコリメータを搭載した高感度CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)カメラを用いて、X線イメージング診断に関連するエネルギー範囲内で散乱放射線をリアルタイムに可視化することである。また、モンテカルロシミュレーションを採用し、測定データが実際の散乱放射を正確に表しているかどうかを検証する。さらに、ピンホールのサイズとカメラの露光時間を変化させ、効果的な視覚化に必要な最適なピンホールサイズと最小露光時間を特定することを試みる。

B 方法

B-1 リアルタイム散乱放射イメージングのための実験セットアップ

B.1.1 散乱線リアルタイムイメージングシステム

本研究では、散乱光をリアルタイムに可視化するために、散乱線リアルタイムイメージングシステムを開発した。このシステムは、相補型金属酸化膜半導体(CMOS)カメラ(ORCA-Quest、浜松ホトニクス株式会社、静岡)、ヨウ化セシウム(CsI)シンチレータ(Great Performance X-ray CsI Scintillator J13113、浜松ホトニクス株式会社、静岡市)、RGBカメラ(Intel RealSense Depth Camera D435、Intel Corporation、米国)、ピンホールコリメータ、およびサポートデバイスで構成されている。構築したシステムを図1に示す。

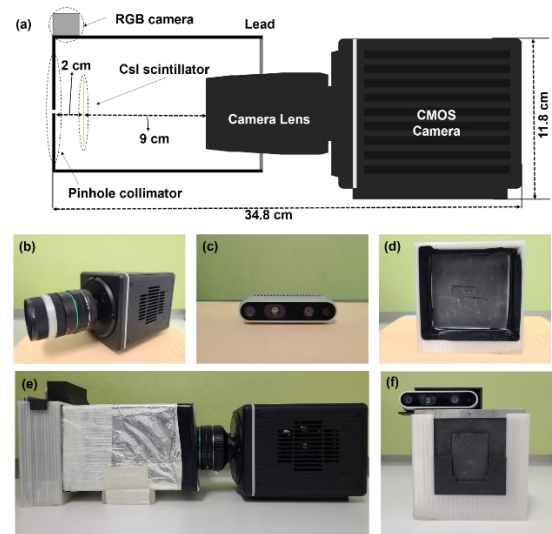


図1 ピンホールコリメータを用いた散乱放射可視化システムの構成。(a)システムの概略図、(b)CMOSカメラ、(c)RGBカメラ、(d)ピンホールコリメータとリードケース、(e)システムの側面図、(f)システムの正面図。

CMOSカメラは、高い量子効率と低ノイズ性

能を提供し、弱い光信号を正確に検出することができる[17]。短い露光時間でも信号品質を維持できるため、高速イメージングが容易になる。画像データは、CMOS カメラ専用アプリケーションである High-Speed Recording Software(浜松ホトニクス株式会社)で処理した。集光を最適化するために、カメラには F2.4 レンズ(SMC Pentax-Da 35 mm、ペンタックスコーポレーション)を使用した。

CsI シンチレータとして、CsI(Tl) (タリウム活性化ヨウ化セシウム)を柱状構造にした高性能 X 線シンチレータを使用した。この構造により、光の散乱を防ぎ、高い空間分解能での出力が可能である[18]。CsI シンチレータの外形寸法は $50 \times 50 \text{ mm}^2$ で、有効検出領域は $45 \times 45 \text{ mm}^2$ である。シンチレータ層の厚さは $400 \mu\text{m}$ 、基板の厚さは 0.5 mm である。

X 線装置、ファントム、その他の物体の可視光像は、RGB カメラを使用した。カメラはピンホールから 7.1 cm 上に配置され、最適な画像取得を確保した。

ピンホールコリメータは、直径 2 mm と 3 mm のものを利用した。これは、 $12.0 \times 12.0 \times 0.3 \text{ cm}^3$ の寸法のリード プレートで構成されており、散乱放射を特定方向に制限してイメージング精度を向上させるように設計されている。

ピンホール、シンチレータ、カメラレンズは、厚さ 2 mm のリード線で作られた $10.2 \times 15.5 \times 10.5 \text{ cm}^3$ のハウジングに封入され、ピンホールを通さない場合を除いて、散乱放射線と外部光の侵入を防ぎ、遮蔽した。さらに、3D プリンター (Flash Forge Finder、Flashforge Corporation、中国) を使用してカスタムフィクスチャを製作し、ピンホールコリメータとシンチレータの正確な垂直方向の位置合わせを確保した。

ピンホールコリメータとシンチレータの距離

は 2 cm 、シンチレータとカメラの距離は 9 cm に設定した。ピンホールコリメータとシンチレータの距離を 2 cm とすることで、ピンホールを通過する散乱放射がシンチレータ全体に効率よく投影され、観測エリア全体をカバーできるようにした。この構成は、シンチレータから 9 cm の位置に配置されたカメラによってキャプチャされた視野(2.7 cm)に基づいて決定した。

また、シンチレータとカメラの距離は、カメラの光学特性がブレなくクリアでピントの合った撮像を可能にする最小距離と判断したため、 9 cm に設定した。これらの距離パラメータは、散乱放射のリアルタイムな可視化を容易にするために最適化された。

B.1.2 実験条件と配置

X 線照射は X 線管装置 (UD150L-30、島津製作所)を用いた。詳細な実験条件を表 1 に示す。照射条件は、腹部イメージングパラメータの例に基づき実施した[19]。

表 1 X 線照射実験条件

管電圧 [kV]	74
管電流 [mA]	250
露光時間 [秒]	0.14
線源－画像検出器間距離 [cm]	101
照射野 [cm^2]	30×30

散乱放射線イメージングシステムの実験配置を図 2 に示す。 $30 \text{ cm} \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の寸法のウォーターファントムを、患者を模擬した散乱物

体として利用した。ファントムを患者テーブルに置き、X線ビームは天井から床方向とした。ピンホールカメラはウォーターファントムの中心から 150 cm の位置に配置し、ファントムと X 線管の両方がカメラの視野内に収まるように高さを調整した。ピンホールの中心から床までの距離は 94.2 cm として測定した。

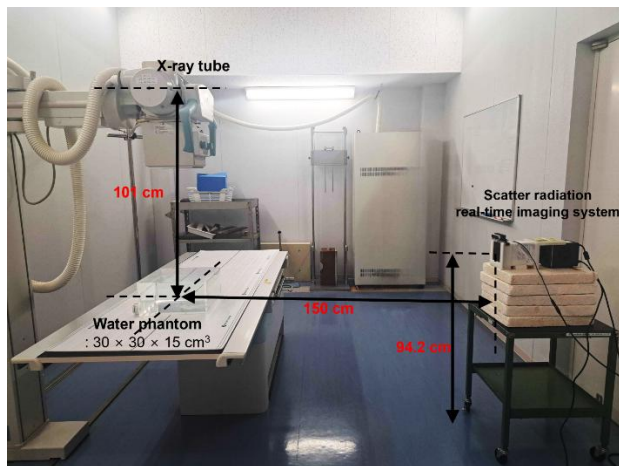


図 2 散乱放射可視化のための配置

CMOS カメラによる画像取得では、解像度を 1024×576 ピクセルに設定し、 4×4 ビニング、ビット数を 16 ビットに設定した。2、5、50、および 200 ミリ秒の露光時間を比較して、最適なイメージング条件を決定した。また、散乱放射線画像の線量率を評価するために、半導体ベースのサーベイメータ (Raysafe X2、Unfors Raysafe、Billdal、Sweden) を使用した。この測定により、指定された線量率が現在の散乱放射線の可視化レベルを可能にすることが検証され、線量率と可視化品質との関係を理解するためのベースとした。ピンホールコリメータの位置にサーベイメータを配置し、コリメータに到達する線量率を測定した。

B.1.3 散乱線のリアルタイム可視化

介護者や医療スタッフに適切な防護対策のた

めのデータを提供するためには、散乱線の発生源を特定することが不可欠である。この目的のためには、散乱放射の可視化画像と背景画像を重ね合わせる事が非常に効果的です。これらの画像を組み合わせるために、カスタムアプリケーションを使用した。

散乱線画像と背景画像の撮影には、それぞれ CMOS カメラと RGB カメラを使用したため、2 台のカメラの視野と設置位置の違いによる位置ずれを補正した。散乱線可視化画像と背景画像を組み合わせる方法を図 3 に示す。図 3(a)に示すように、コリメータとファントムの頂点には、青色の発光ダイオード(LED)電球が 8 個取り付けられた。次に、LED を含む画像を RGB カメラによりキャプチャし、背景画像を作成した。続いて、図 3(b)に示すように、トレーシングペーパーをシンチレータの内部の位置に配置し、図 3(a)の各 LED ライトの中心を図 3(b)の各 LED 視覚化画像の中心に揃えるように平行移動した。

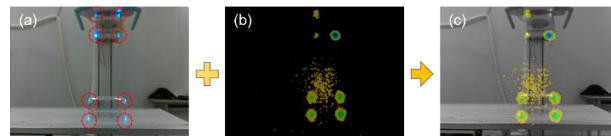


図 3 散乱放射画像と背景画像を組み合わせる方法。(a)RGB カメラでキャプチャした LED 電球の位置(赤い破線の円の領域)、(b)散乱放射画像、(c)最終的な包括的な画像。

B.2 画像評価指標

画質を評価するために、S/N 比(SNR)とコントラストを用いて解析した。SNR の計算では、画像内に 2 つの関心領域(ROI)が定義され、1 つは信号領域を表し、もう 1 つは背景領域を表す。信号領域は X 線管とファントムを含み、信号の識別の可能性は、背景領域の平均強度に基づいて評価した。

コントラストの分析には、関心領域内の最大

強度と最小強度の差に基づいて、画像内の信号強度変動から評価し。この手法は、画像解析で広く使用されている指標であり、画像の背景からの信号の識別能に対する画質の影響を評価するのに特に役立つ。

これらの解析は、ImageJ(バージョン 1.54g、米国国立衛生研究所、米国)を用いた。このソフトウェアを利用して、定義された ROI 内の統計値を抽出し、さまざまなイメージング条件で SNR とコントラストを定量的に評価した。このアプローチにより、ピンホールのサイズとカメラの露光時間が画質に与える影響が明らかになり、最終的に最適なイメージング条件を特定した。

B.3 モンテカルロシミュレーションで得られた画像の検証

ピンホールを通過してシンチレータに到達する放射線が散乱放射線構成されているかどうかを検証するために、モンテカルロシミュレーションを実施した。この目的のために、粒子・重イオン輸送コードシステム (PHITS) バージョン 3.341 を利用し、測定データとシミュレーション結果との比較した[20]。シミュレーションでは、シンチレータ上の磁束分布を計算し、測定データとシミュレーション結果の両方から、ファントムの垂直軸からファントムの中心を通るデータをプロファイルとして抽出した。

図 4 に示すように、シミュレーションのジオメトリは、散乱線リアルタイムイメージングシステムの構成と、実験で使用されたシンチレータの配置を再現するように設計されている。ピンホールの直径は 2 mm と 3 mm に設定し、ピンホールからシンチレータまでの距離(2 cm)とシンチレータからカメラまでの距離(9 cm)は実験条件と同一にした。

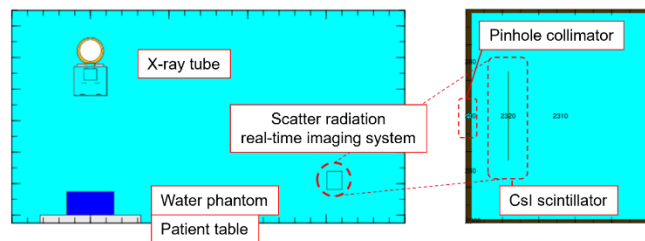


図 4 モンテカルロシミュレーションで使
用したシステム構成

SpekPy Web という web アプリケーションにより X 線スペクトルを決定し、連続スペクトルを持つ光子源が放射線源として構成され、エネルギー範囲は 0 keV から 74 keV とした[21]。

PHITS の機能である T-Point タリーを、シンチレータ表面の散乱放射プロファイル計算に利用した。得られたプロファイルを、測定データおよびシミュレーション結果と比較した。比較のために、最大値を 1 に設定して正規化した。

(倫理面への配慮)

本研究は、人を対象とする研究ではない。X 線を使用する研究では、研究者が被ばくする恐れがあるため、放射線防護対策をした上で研究実施した。

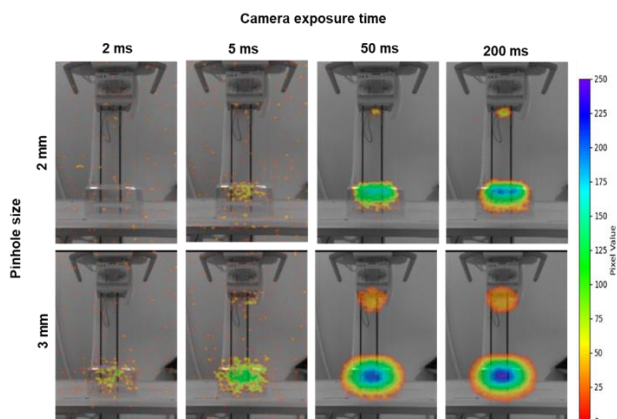
C. 結果

C.1 実験からの散乱放射線源分布

図 5 に、複合 RGB 画像と散乱放射画像のリアルタイム可視化を示す。視覚化は、さまざまなカメラの露光時間とピンホールサイズを使用した。散乱線源は、X 線管と水ファントムの 2 つの場所で特定された。カメラの露光時間を長くすると、散乱放射分布の鮮明さが向上することが観察された。画像では、色は放射強度を表し、青は高強度、赤は低強度を示し、ピクセル値に対応している。

ピンホールサイズ 2 mm では、散乱線源の形状や分布が比較的鮮明に観測され、より高い空間分解能を実現した。対照的に、3 mm のピンホールサイズでは、2 mm のピンホールと比較して分布が広くなり、空間の詳細解像度が著しく低下した。これは、ピンホールのサイズが散乱線源の視覚化に大きく影響することを示している。また、ピンホールコリメータに到達する線量率は $10.71 \mu\text{Sv/s}$ 、総線量は $2.10 \mu\text{Sv}$ であった。

図 5 ピンホールとカメラ露光時間の比較散乱放射線画像。



C.2 画像解析

SNR とコントラストはどちらも、カメラの露光時間が長くなるにつれて全体的に増加する傾向を示した。ピンホールサイズが 2 mm と 3 mm の場合、露光時間が長くなると SNR とコントラストが向上したが、2 つのピンホールサイズ間で間隔が異なった。

ピンホールサイズの影響については、3mm ピンホールは 2 mm ピンホールと比較して一貫して高い SNR 値を示した。この違いは、ピンホールが大きいと、より多くの信号を収集できるためと考えられる。逆に、2 つのピンホールサイズ間でコントラストに大きな差は見られず、コ

ントラストの変化は主に露光時間の変動の影響を受けた。

C.3 モンテカルロシミュレーションと実験測定 の比較

測定データがウォーターファントムと X 線管からの散乱放射分布を正確に表しているかどうかを判断するために、モンテカルロシミュレーションを使用して比較した。具体的には、リアルタイム散乱放射線イメージングシステムから得られた測定データと、PHITS で生成された散乱放射線分布プロファイルと比較した。

図 6 に、実験測定とシミュレーションの両方から得られた散乱放射の空間分布プロファイルを示す。図 6(a)は測定データを示し、図 6(b)はシミュレーションから生成された対応するプロファイルを示す。縦軸は正規化された強度値を表し、横軸は視野 (FOV) 内の空間位置をセンチメートル単位で表す。

実験設定では、散乱放射を 2.7 cm の FOV で視覚化し、対応するピクセル位置をイメージングシステムの光学特性に基づいて物理的な距離にマッピングした。直接比較を可能にするために、PHITS シミュレーションでは、実験設定との一貫性を維持しながら、同じ空間範囲でフルエンス値を抽出した。

その結果、シミュレーションデータと測定データの両方に、水ファントムと X 線管からの散乱放射に対応する 2 つの顕著なピークが見られた。ピンホールのサイズに関しては、ピンホールの直径が 2 mm の場合、ピーク分離と空間分解能が向上するのに対し、ピンホールの直径が 3 mm の場合、ピークが近接する代わりにシグナル強度が高くなった。

これらの知見は、リアルタイムイメージングシステムが散乱放射を効果的に可視化し、

PHITS シミュレーションがシステムのパフォーマンスを最適化および評価するための信頼性の高いフレームワークを提供することを裏付けている。

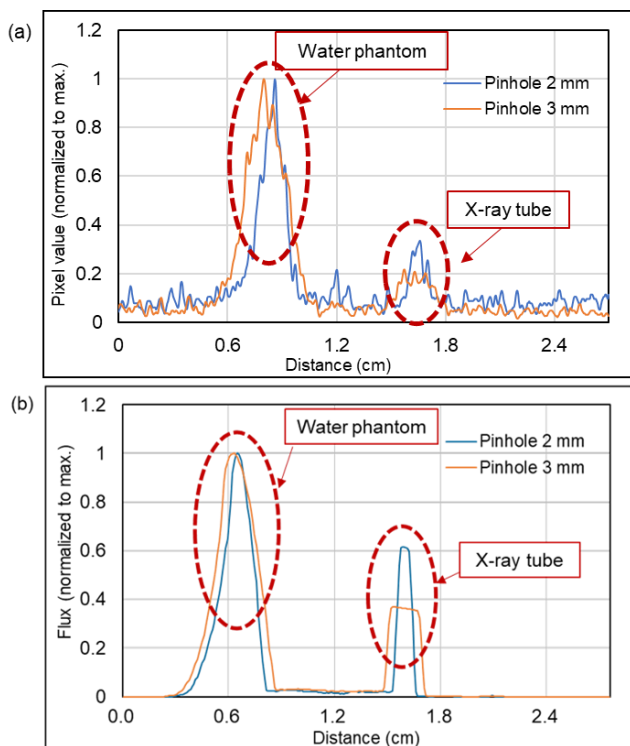


図 6 モンテカルロシミュレーションと実験測定の散乱放射分布の比較 (a) 測定プロットプロファイル (b) シミュレーションプロットプロファイル

D 考察

本研究では、高感度 CMOS カメラを用いて散乱光のリアルタイム可視化を行い、ピンホールサイズとカメラの露光時間が散乱光の観測に及ぼす影響を評価した。露光時間が 2 ms、5 ms、50 ms、200 ms であることから、露光時間が短いことと画質のバランスがとれた状態が 50 ms であることが分かった。その結果、長時間の露光は不要であることが判明し、リアルタイム観察のための効率的な条件を決定することが可能になった。露光時間が短い(2 ms と 5 ms)と、ノイ

ズによる画質の低下が見られた。また、本試験の結果、ピンホールに到達する線量率は 10.71 $\mu\text{Sv/s}$ であることが確認され、一般 X 線撮影におけるリアルタイム観察に十分な適用性が示された。この線量率から、散乱線源メーキングが可能な環境線量率条件を推定することができる。この推定により、ポータブルイメージングやより遠方の観測へのシステムの応用についての議論が可能になる。

本研究で開発した散乱放射線イメージングシステムは、3D プリントされた構造物の使用や手作業による組み立てから生じるセットアップエラーの影響を受ける可能性がある。ピンホールコリメータとシンチレータの位置合わせ、部品間の距離、機器の配置にわずかなばらつきがあると、画質や散乱放射分布の再現性に影響を与える可能性がある。これらのばらつきを最小限に抑えるためには、実験装置の位置合わせや位置を固定する治具の設計や、段取りの標準化が必要である。さらに、実験を繰り返してセットアップエラーの影響を定量的に分析し、許容誤差の範囲を定義することで、システムの再現性と信頼性が向上する。

次に、ピンホールサイズの違いが画像の空間分解能に与える影響を評価した。ピンホールサイズ 2 mm で散乱線分布が鮮明に観測され、詳細な評価に適していることが示された。これらの結果から、対物レンズに基づいて適切なピンホールサイズを選択することで、画像解析の精度が向上することが示唆される。

さらに、シミュレーションのプロファイルと測定データの比較により、2つのピークの存在が確認された。ピーク形状の一貫性は、シミュレーションをカメラシステムの最適化に利用できることを示唆している。しかし、強度分布とピーク位置にわずかな違いが見られ、これはシミ

ュレーションにおける X 線装置の内部構造の再現性や実験環境の影響によるものと考えられる。シミュレーションの精度を向上させることは、今後の課題である。

シミュレーションの精度を向上させることは、今後の課題である。散乱線をリアルタイムで視覚化する機能により、医療スタッフや介護者に潜在的な高被ばく領域に関するフィードバックを即座に提供でき、それに応じて適切な位置と防護対策を提供できる。このシステムを透視法や病棟 X 線撮影などの臨床ワークフローに統合することで、放射線安全管理の改善に貢献し、不必要な被ばくを減らすことができると期待できる。

この研究は、リアルタイムの散乱放射線可視化の実現可能性を実証したが、放射線被ばく低減への直接的な影響を評価するには、さらなる研究が必要である。将来の研究では、システムの実装の有無にかかわらず、スタッフと介護者の用量レベルを比較するための臨床試験または対照実験が含まれる可能性がある。さらに、さまざまなイメージングモダリティや操作環境への適用性を調査することで、その臨床的有用性をさらに高めることができる。

E 結論

本研究では、ピンホールコリメータを用いた高感度 CMOS を用いたリアルタイム散乱放射可視化システムの開発と評価した。提案システムは、リアルタイム観測能力を維持しながら、高い空間分解能で散乱放射線源を特定する能力を実証した。体系的な評価を通じて、画像の鮮明さと効率のバランスを達成するための最適なパラメータとして、ピンホールの直径 2 mm と露光時間 50 ms が特定された。このシステムは、医療スタッフが散乱放射線の分布を視覚的に評

価できるようにすることで、臨床現場での放射線防護を強化する大きな可能性を提供する。本技術の応用により、より安全な作業環境や診断時の放射線安全管理の効率化に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) Cosette M Stahl, Quinn C Meisinger, Michael P Andre, et al: Radiation Risk to the Fluoroscopy Operator and Staff. AJR Am J Roentgenol 2016; 207: 737-744
- 2) G Bratschitsch, L Leitner, G Stüklische, et al: Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. Scientific Reports 9 2019; Article number: 17652
- 3) Alexandre Fogaça Cristante, Fábio Barbieri, Almy Anacleto Rodrigues da Silva, et al: RADIATION EXPOSURE DURING SPINE SURGERY USING C-ARM FLUOROSCOPY. Acta Ortop Bras. 2019 Jan-Feb; 27(1): 46-49
- 4) Hajime Ito, Ikuo Kobayashi, Kazutoshi Watanabe, et al; Evaluation of scattered radiation from fluoroscopy using small OSL dosimeters. Radiol Phys Technol. 2019; 12: 393-400
- 5) Okasana Lesyuk, Patrick Emmanuel Sousa, Sónia Isabel do Espirito Santo Rodrigues, et al: Study of scattered radiation during fluoroscopy in hip surgery. Radiol Bras. 2016; 49: 234-240
- 6) Chuanpeng Wu, Liang Li, Senior Member IEEE: First Demonstration of Compton Camera Used for X-Ray Fluorescence Imaging. IEEE Trans Med Imaging 2023; 42: 1314 -1324
- 7) Akihisa Omata, Miho Masubuchi, Nanase Koshikawa, et al: Multi-modal 3D imaging of

- radionuclides using multiple hybrid Compton cameras. Scientific Reports 12 2022; Article number: 2546
- 8) Koichi Chida, Takeshi Takahashi, Daisuke Ito, et al.: Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. AJR Am J Roentgenol 2011; 197: W900-3
 - 9) Benjamin Fahimian, Andrew Ceballos, Silvan Türkcan, et al.: Seeing the invisible: Direct visualization of therapeutic radiation beams using air scintillation. Medical Physics 2013; 41: 010702
 - 10) Akihisa Omuta, Jun Kataoka, Kazuya Fujieda, et al.: Performance demonstration of a hybrid Compton camera with an active pinhole for wide-band X-ray and gamma-ray imaging. Nature Scientific Reports 2020; 10: 14064
 - 11) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nishiyama, et al.: Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2013; 732: 403-407
 - 12) Laura Antonia Cerbone, Luigi Cimmino, Antonio Sarno, et al: Monte Carlo and experimental evaluation of Timepix4 compact gamma camera for coded aperture nuclear medicine imaging with depth resolution. Physica Medica; 113 (2023): 102663
 - 13) Nicholas Stoffle, Lawrence Pinsky, Martin Kroupa, et al.: HERA: Timepix-based radiation environment measurements aboard the International Space Station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2015; 782: 143-148
 - 14) Kroupa M, Campbell-Ricketts T, George SP, et al: Particle showers detected on ISS in Timepix detectors. Life Sci Space Res 2023; 39: 52-58
 - 15) S. Procz, C. Avil, J. Fey, et al.: X-ray and gamma imaging with Medipix and Timepix detectors in medical research. Radiation Measurements 2019; 127: 106104
 - 16) Polad M Shikhaliev, Shannon G Fritz, John W Chapman: Photon counting multienergy x-ray imaging: effect of the characteristic x rays on detector performance: Med Phys. 2009; 36: 5107-19
 - 17) Anton S Tremsin, John V Vallerger, Oswald H W Siegmund, et al: Photon-counting MCP/Timepix detectors for soft X-ray imaging and spectroscopic applications. J Synchrotron Radiat. 2021; 28: 1069-1080
 - 18) R. J. Proctor, G. K. Skinner, A. P. Willmore: The design of optimum coded mask X-ray telescopes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1979; 187: 633-643
- F. 健康危険情報
なし
- G. 研究発表
1. 論文発表
 1. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa, Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator, Health and Technology, 2025.
 2. 学会発表
 10. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa,

Donghee Han. Consideration of real-time visualization of scattered rays using a high-sensitivity CMOS camera. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.

19回九州放射線医療技術学術大会,宮崎, 2024年12月21日-12月22日

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

- 11.Lee Hyojin, 藤淵俊王, Han Donghee. 高感度 CMOSカメラを用いたX線CT検査時の散乱線源の可視化による放射線防護対策の検討. 第1回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
- 12.Lee Hyojin, 藤淵俊王, Han Donghee. 高感度 CMOSカメラとデプスカメラを用いた散乱線源の3次元イメージングに関する検討. 第

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
- 3.その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金 分担研究報告書

可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

研究分担者 藤淵 俊王 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 教授

研究要旨

本研究の目的は、半導体式放射線可視化カメラによる X 線撮影での散乱線源のイメージングの最適な取得条件と画像処理方法を明らかにし、それを特性評価することである。可搬型の放射線可視化カメラを用いて、C アーム X 線透視装置での X 線撮影を測定した。撮影条件のうち、放射線防護板の高さ、照射野の大きさ、ファントムの有無、以上の 3 条件を変えて透視を行った。放射線可視化カメラから得たデータを基に散乱線の強弱をカラー表示した出力画像と光学カメラで撮影した画像とを重ね合わせた。ファントムで生じた散乱線と X 線管内で生じた散乱線を確認できた。出力結果からこの放射線可視化カメラを用いたイメージングが可能であると示された。リアルタイムイメージングを実現するには感度を上げる必要があり、今後はその適切な方法を検討する必要がある。

研究協力者

境 真由 九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X 線透視手技において、術者は X 線管や患者に近づいて手技をする必要がある。その際、術者はこれらから発生する散乱線により多く被ばくする可能性がある 1-5)。従って散乱線からの術者の被ばくの低減対策が求められる。散乱線源がイメージングできれば、医療従事者はその様子に基づいて放射線防護具を設置する、散乱線源と距離を取るなど、適切な放射線防護対策を検討できる。

これまで、ガンマ線源や散乱線源イメージングについての研究 6-9)が進められてきた。福島

第一原発事故の際には環境中の放射線イメージングに可搬型のガンマカメラが開発された。それらの研究で用いられた検出器の一つにコンプトンカメラ 10, 11)がある。それはコリメータを必要としないという利点がある。しかしコンプトンカメラは、低エネルギー光子ではコンプトン散乱の発生量が少ない、十分な空間分解能を得られないという問題点がある 6)。

また、リアルタイムイメージングの先行研究 11,12)においては Cs -137 といった線源に対して行われ、ほぼリアルタイム表示が実現した。イ

イメージングプレートを用いた先行研究 6)においては、可視光画像と散乱線源の画像が重ね合わされている。この研究ではファントム表面における散乱線と可動絞り装置における散乱線の可視化に成功している。同実験においては線量率についても術者の水晶体の被ばくを無視できないことが示唆された。しかし撮影時間には 10 分、露光時間には 30 分を要しており、X 線透視における散乱線源をリアルタイムで検出する方法は確立されていないといえる。

近年、欧州原子核研究機構 Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) で半導体式の放射線可視化カメラが開発され、物理学の分野で宇宙放射線の計測に用いられている 13, 14)。シリコンセンサを搭載したこの半導体式カメラの特徴は、入射光子のエネルギーとその飛跡をリアルタイム表示できる点である。更に高空間分解能を有しており、これまで多くの医用画像において課題であった空間分解能についての解決が期待できる 15)。

そこで本研究では、小型で軽量の半導体性放射線可視化カメラを用いて X 線照射時の散乱線分布データをピンホールコリメータにより収集し、散乱線をリアルタイムにイメージングすることを目的とした。

B. 方法

本研究では、放射線可視化カメラ MiniPIX EDU KIT (ADVACAM 社)を使用した (図 1)。このカメラは直接変換式シングルフォトンカウンティング検出器で検出した放射線の飛跡を 2 次元画像としてリアルタイムに表示することができる。専用ソフトウェアにて飛跡の形状から、 α 線・ β 線・ミューオン・光子線を識別子、種類ごとにエネルギースペクトルを表示することができる。寸法は 88.9 mm×21 mm×10 mm、重量は

30 g である。検出器には 14 mm×14 mm で 300 μ m 厚のシリコンセンサと TimePIX 17) (55 μ m ピッチ、256 × 256 ピクセル)が用いられている。TimePIX とは CERN で開発された技術であり、入射放射線がセンサと相互作用を起こした時間 ToA (Time of Arrival)もしくは各ピクセルの電荷蓄積時間 ToT (Time over Threshold)を得ることができる。各ピクセルに入射する放射線を 1 つずつ検出しそのエネルギーを測定することができる Tracking モードで撮影を行った。この機器の注意点として、教育用としてセンサの性能仕様を一部緩和されている点がある。具体的にはチップの性能評価は全有効面積の 50 %でのみ行われていること、性能評価が行われたエリア内で不良ピクセルの列が 1 列含まれる場合があること、20 ピクセルまでの不良ピクセルクラスターが含まれる場合があること、等である。

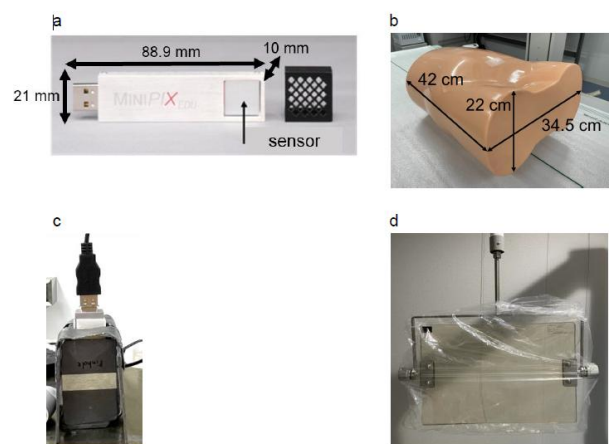


図 1 a) 本研究で使用した MiniPIX EDU 放射線可視化カメラセット。b) 本図は本研究で使用した骨盤ファントムを示す。軟部組織はポリウレタン樹脂、骨はエポキシ樹脂である。c) 鉛板を用いて、放射線可視化カメラは上下左右の全方向から遮蔽された。d) 透視検査で一般的に使用される放射線防護板。この板の主成分はアクリルで、鉛を含むアクリルが使用されている。

X 線透視 C アーム装置には DR CALNEO CROSS (Fuji Film) を用いた。図 2 は鉛遮蔽の様子を示しており、コリメータの前方に上下左右 4 枚取り付けた。その他には骨盤部ファントム(41926-080 京都科学)、画像処理には ImageJ ver.153k を使用した。

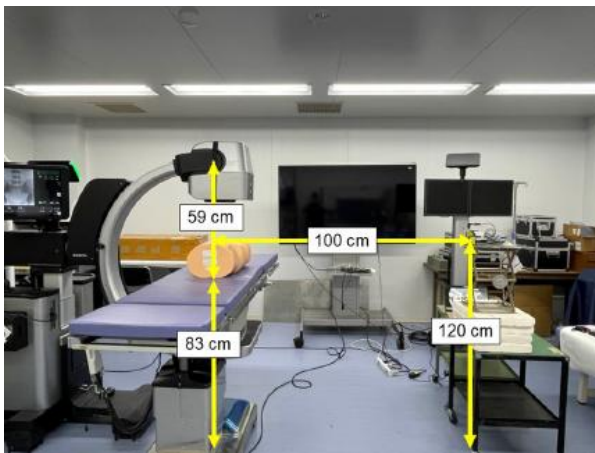


図 2 各装置の幾何学的配置を示す。この図では、C アーム装置と骨盤ファントムが左側に、半導体カメラが右側に設置されている。カメラは床から 120 cm の位置に設置されている。カメラと照射野中心との距離は 100 cm である。床からベッド面までの距離は 83 cm である。X 線焦点からベッド面までの距離は 59 cm である。

照射条件について、放射線可視化カメラを用いたイメージングにおいて適切な照射条件を知る目的で、次の 3 つの条件を変化させて実験を行った。

Table 1 Irradiation factor

Parameter	Unit
Tube voltage	70 kV
Tube current	25 mA
Irradiation time	1 s
Number of exposure	10 times
Diameter of pinhole	1 mm
Depth of pinhole	2 mm
Sensor to pinhole	1.7 cm
Viewing angle	61 °
Irradiation field size (focus to FPD: 105 cm)	Max: 53 cm×52 cm
Direction	AP
X-ray tube to couch	59 cm
Couch to phantom	83 cm
Couch to sensor	100 cm
Sensor to floor	120 cm

Abbreviations: FPD, flat panel detector, AP, anterior-posterior.

まず、図 3 の含鉛アクリル製の放射線防護板の高さを変えて設置した。射出口と防護板の下端の高さが同じ場合(0 cm)と防護板が射出口よりも 5 cm 長く覆っている場合を測定した。

次に照射野の大きさによる違いを評価する目的で X 線撮影の照射野範囲を変えて結果を評価した。この X 線 C アーム装置における最大の範囲 53 cm×52 cm と 10 cm×10 cm の場合 (いずれも焦点から 105 cm 離れた面での面積) で撮影し評価した。

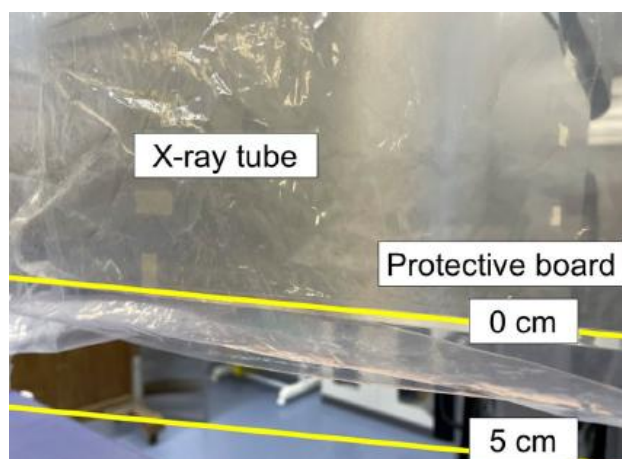


図3 放射線防護板の配置。この状態で、窓の下端と防護板の下端が揃っている状態を 0 cm、防護板が窓の下端から 5 cm 下まで伸びている状態を 5 cm とした。

3 つ目にファントムの有無による違いとして寝台にファントムを置いた場合と置かない場合で結果を評価した。

ここで 画像処理についてであるが、実験から得られたデータは 256×256 のデータであるが、II-1.で述べた不良ピクセルの列が確認されたため不良ピクセルの 1 列はデータとして採用せずに 256×255 のデータを画像化している。ピクセルごとに得られたテキストデータを強弱に合わせてグレースケール画像化し、それをカラー表示した。この 2 回のそれぞれの処理後に Median フィルタを用いて画像を平滑化した。平滑する値は 10 ピクセルとした。次章のIII.結果で示す画像は検出器と同じ位置からスマホで撮影した写真と出力画像とを重ね合わせたものである。

(倫理面への配慮)

本研究は、人を対象とする研究ではない。X 線を使用する研究では、研究者が被ばくする恐れがあるため、放射線防護対策をした上で研究実施した。

C. 結果

C-1 基本的な条件における画像

RGB カメラで撮影した画像と半導体カメラで得られたテキストデータから作成した画像を重ね合わせた。最大を 200 カウント、最小を 0 カウントとしてカラー出力した。図 4 を見て分かるように、焦点側から寝台側に向かってコリメータ、射出口、ファントム表面、の 3 カ所が主な散乱線源であった。図 5 は図 4 のプロファイルである。プロットしたのは画像上の白色点線上 256 ピクセルである。グラフにおいて縦軸はピクセル値、横軸はコリメータ側を 0 としたピクセル番号を示している。出力の最大値と最小値は図 5 と同様である。この図 6 においてコリメータ、射出口、ファントムに対応するピークが見られた。

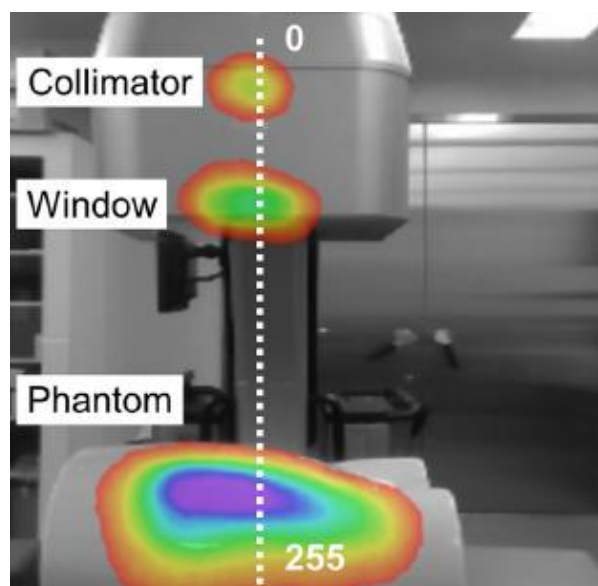


図4 放射線可視化カメラから得られたデータと可視光カメラからの画像を重ね合わせた画像。散乱線の主な発生源は、焦点側からコリメータ、窓、そしてファントム表面である。

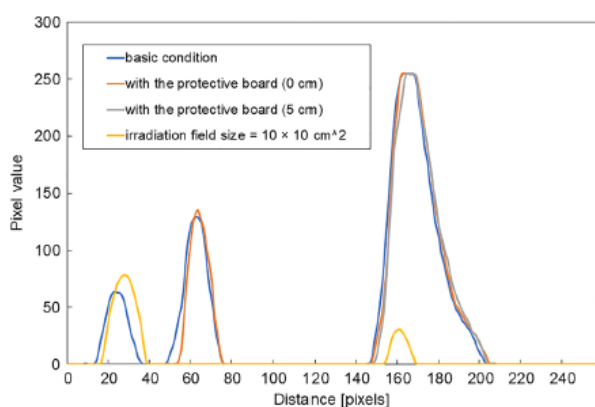


図 5 ビーム軸上の散乱線源画像のプロファイル。

プロファイル中の線は、図 4 の白い点線に沿って 256 ピクセルをプロットした結果である。グラフの縦軸はピクセル値、横軸はコリメータ側を 0 としたピクセル番号を表している。縦軸のピクセル値は散乱線のカウント数の相対値である。この図では、放射線データは最小値が 0 カウント、最大値が 591 カウントだった。最大ピクセル値を 256 に換算することで、256 段階のピクセル値となった。この画像には、コリメータ、窓、ファントムに対応するピークが見られる。同様に、オレンジ、灰色、黄色の線は、各条件における出力結果の比較を示す。

C-2 防護板の変化

防護板が 0 cm の場合はコリメータにおける散乱が遮蔽され、5 cm の場合はコリメータに加えて射出口における散乱も遮蔽することができた。X 線管の高さに防護板を設置することで、コリメータと射出口からの散乱線を低減できた。

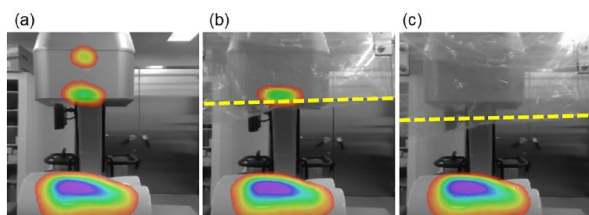


図 6 防護板の位置による散乱線源の違い。防護板を下げると (a 防護板なし b 0 cm c 5 cm)、散乱放射線源からの散乱放射線をより効果的に遮蔽できるようになった。

C-3 照射野の大きさ

照射野の大きさによる違いを計測した場合、画像において射出口とファントムからの散乱線は減少したものの、コリメータからの散乱線は増加した。このことから、より小さい照射野で散乱線からの線量を低減できるため、診療に支障をきたさない範囲で照射野を絞ることの重要性を確認できた。

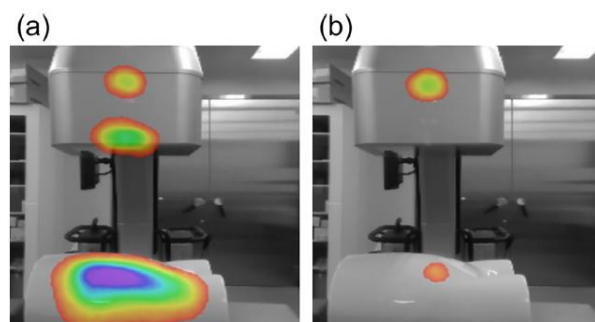


図 7 照射野の大きさによる散乱線源の違い
照射野が狭くなると、発生する一次放射線は減少した。その結果、散乱線の主な発生源であるファントムからの散乱線も減少した。

a 53 cm × 52 cm (2,756 cm²)

b 10 cm × 10 cm (100 cm²)

C-4 ファントムの有無

ファントムが無い場合、コリメータと射出口からの散乱の様子に目立った変化は見られず、わずかながら寝台において散乱線が発生した。散乱線のおよそ半分がファントムから発生していること、そしてファントムの有無で X 線管内の散乱線は変わらないことが分かった。

D. 考察

防護板設置の高さによる違いについて、防護板が X 線管内からの散乱線の低減に効果的であることが分かった。今回の実験ではコリメータと射出口を散乱線源とする散乱線において遮蔽効果が確認できた。防護板の下端を射出口に合わせる場合と余分に長く出して低い高さで設置した場合とを比較すると、後者の方がより有用であった。そのため、手技の妨げにならない範囲で防護板を低く設置することが望まれる。臨床の間では、防護カーテンは患者に触れる高さまで降ろしていることがある。そのことを考慮して、今後は防護板をよりファントムに近づけて患者からの散乱線の低減を検討したい。

に照射野の大きさによる違いについて、照射野を小さくするとファントムからの散乱線低減が確認できた。コリメータからの散乱線は増加した。この原因としては照射野を絞ったときに、内向きに移動する照射野絞りと一次 X 線との散乱の増加によるものと考えられる。

最後の実験はファントム設置の有無に関する比較であった。ファントム設置の有無どちらでも散乱線源の画像化を実現できた。それらを比較すると、どちらの場合でも X 線管内からの散乱線は一定であることが画像から分かった。散乱源画像から寝台が散乱線源になり得ることも示された。

現状の課題として、再現性の向上が挙げられる。そのためにピンホール固定法の見直し、半導体カメラと RGB カメラの視野の一致の精度向上を目指す。これは 3D プリンタで土台を作成することにより解決を図る。1 つの土台にピンホール、半導体カメラ、RGB カメラの 3 つを同時に設置することが望ましい。

また、RGB カメラに関しては、視野が広いカメラを用いることを検討する。これは視野が広

いと、臨床の間で広範囲の散乱線防護に利用できるからである。

先ほど述べた防護板の高さも今後の実験で検討する必要がある。一般的な透視手技で使われる X 線管に付け外し可能なタイプの防護カーテンの高さを参考に、文献を基に複数の高さを検討する必要がある。カーテンとは異なり、本研究で用いているのはキャスター付きの防護板である。キャスターの部分が 5 つに枝分かれして術者の足元で場所を取る欠点がある。その点では X 線管とファントムからの術者の散乱線防護の他の方法も検討すべきである。

コリメータについても今回用いたピンホールコリメータ以外にも試すべきである。例えば、1 つのコリメータ内に複数のピンホールが空いているものや、コーデッドマスク方式¹⁸⁾も有用であると考えられる。

E. 結論

一連の実験を通して、X 線撮影においてピンホールを用いた半導体カメラで散乱線源の位置と散乱線分布をイメージングできた。照射条件の変化によって散乱線マップも変化し、術者の散乱線防護方法の検討に利用できると考える。

参考文献

- 19) Cosette M Stahl, Quinn C Meisinger, Michael P Andre, et al: Radiation Risk to the Fluoroscopy Operator and Staff. AJR Am J Roentgenol 2016; 207: 737-744
- 20) G Bratschitsch, L Leitner, G Stüklischweiger, et al: Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. Scientific Reports 9 2019; Article number: 17652

- 21) Alexandre Fogaça Cristante, Fábio Barbieri, Almy Anacleto Rodrigues da Sliva, et al: RADIATION EXPOSURE DURING SPINE SURGERY USING C-ARM FLUOROSCOPY. Acta Ortop Bras. 2019 Jan-Feb; 27(1): 46-49
- 22) Hajime Ito, Ikuo Kobayashi, Kazutoshi Watanabe, et al; Evaluation of scattered radiation from fluoroscopy using small OSL dosimeters. Radiol Phys Technol. 2019; 12: 393-400
- 23) Okasana Lesyuk, Patrick Emmanuel Sousa, Sônia Isabel do Espirito Santo Rodrigues, et al: Study of scattered radiation during fluoroscopy in hip surgery. Radiol Bras. 2016; 49: 234-240
- 24) Chuanpeng Wu, Liang Li, Senior Member IEEE: First Demonstration of Compton Camera Used for X-Ray Fluorescence Imaging. IEEE Trans Med Imaging 2023; 42: 1314 -1324
- 25) Akihisa Omata, Miho Masubuchi, Nanase Koshikawa, et al: Multi-modal 3D imaging of radionuclides using multiple hybrid Compton cameras. Scientific Reports 12 2022; Article number: 2546
- 26) Koichi Chida, Takeshi Takahashi, Daisuke Ito, et al: Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. AJR Am J Roentgenol 2011; 197: W900-3
- 27) Benjamin Fahimian, Andrew Ceballos, Silvan Türkcan, et al.: Seeing the invisible: Direct visualization of therapeutic radiation beams using air scintillation. Medical Physics 2013; 41: 010702
- 28) Akihisa Omuta, Jun Kataoka, Kazuya Fujieda, et al.: Performance demonstration of a hybrid Compton camera with an active pinhole for wide-band X-ray and gamma-ray imaging. Nature Scientific Reports 2020; 10: 14064
- 29) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nishiyama, et al.: Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2013; 732: 403-407
- 30) Laura Antonia Cerbone, Luigi Cimmino, Antonio Sarno, et al: Monte Carlo and experimental evaluation of Timepix4 compact gamma camera for coded aperture nuclear medicine imaging with depth resolution. Physica Medica; 113 (2023): 102663
- 31) Nicholas Stoffle, Lawrence Pinsky, Martin Kroupa, et al.: HERA: Timepix-based radiation environment measurements aboard the International Space Station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2015; 782: 143-148
- 32) Kroupa M, Campbell-Ricketts T, George SP, et al: Particle showers detected on ISS in Timepix detectors. Life Sci Space Res 2023; 39: 52-58
- 33) S. Procz, C. Avil, J. Fey, et al.: X-ray and gamma imaging with Medipix and Timepix detectors in medical research. Radiation Measurements 2019; 127: 106104
- 34) Polad M Shikhaliev, Shannon G Fritz, John W Chapman: Photon counting multienergy x-ray imaging: effect of the characteristic x rays on detector performance: Med Phys. 2009; 36: 5107-19
- 35) Anton S Tremsin, John V Vallerger, Oswald H W Siegmund, et al: Photon-counting MCP/Timepix detectors for soft X-ray imaging and

spectroscopic applications. J Synchrotron Radiat. 2021; 28: 1069-1080

- 36) R. J. Proctor, G. K. Skinner, A. P. Willmore: The design of optimum coded mask X-ray telescopes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1979; 187: 633-643

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D, Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera, Radiological Physics and Technology, 18, 308 – 315, 2025.

2. 学会発表

1. Mayu Sakai, Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of realtime imaging of scattered radiation sources in X ray fluoroscopy using a semiconductor camera, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
2. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration

of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.

3. 境 真由、Lee Hyojin、藤淵 俊王、荒川 弘之、Han Donghee、可搬型半導体式放射線可視化カメラによるX線透視での散乱線源のイメージングの検討. 第1回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日–11月3日.

4. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, Kyushu University Asia week, Fukuoka, 2024.11.5-9.

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

該当なし

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Toshioh Fujibuchi	Study on Radiation Protection Educational Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method with Ray Tracing Technology	Information	16	266	2025
Noguchi K, Fujibuchi T, Han D	Effectiveness of radiation protection educational material during angiography using visualization of scattered radiation by augmented reality technique	Radiological physics and technology			2025
Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa	Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator	Health and Technology			2025
Hizukuri, K; Fujibuchi, T; Han, DH; Arakawa, H; Furuta, T	Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX)	Radiological physics and technology	18	196－208	2024
Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D	Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera	Radiological physics and technology	18	308－315	2024

Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Choirul Anam	Development of a Real-Time Radiation Exposure Estimation Method Using a Depth Camera for Radiation Protection Education	Radiation	4	261—275	2024
Toshioh Fujibuchi, Misaki Nakashima, Hiroyuki Arakawa, Hitoshi Miyazaki, Choirul Anam	Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution.	Journal of radiological protection	44	031510	2024
Arakawa H, Fujibuchi T, Kaneko K, Okada Y, Tomisawa T	Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment	Nuclear Engineering and Technology,	56	2428-2435	2024
Han Donghee, Toshioh Fujibuchi	Human phantom applicability of 3D-printed polylactic acid for X-ray dose analysis: simulation and measurement studies	Radiological physics and technology			2025
矢野 祐二, 藤淵 俊王, 荒川 弘之	含鉛および無鉛素材の放射線防護衣における透過X線スペクトルや鉛当量,均一度の評価	日本放射線技術学会雑誌	80	944—954	2024
檜 作 響子, 藤淵 俊王, Han Donghee	仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化	日本放射線技術学会雑誌			2025
藤淵 俊王	水晶体被ばくに関わる近年の動向	日本放射線技術学会 放射線防護部会誌	24	14-31	2024
藤淵 俊王	水晶体被ばくに関わる近年の動向	インナービジョン	40	22-23	2025