

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5年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 藤淵 俊王

令和6（2024）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 研究代表者 藤淵俊王

----- 1

II. 分担研究報告

1. 放射線防護教育 web サイトの構築とアンケート調査 ----- 9
(資料) 部門別アクションチェックリスト

2. 放射線防護衣の特性評価 ----- 23

3. WebVR による血管造影での放射線防護教育教材の開発 ----- 33

4. 血管造影での散乱線分布を AR 表示する iPad アプリの開発 ----- 39

5. X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化 ----- 49

6. 複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発 ----- 61

7. リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価 ----- 67

8. 半導体式散乱線可視化カメラの基本特性評価 ----- 79

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 87

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。本年度は、1年目に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改善、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。

1. 放射線防護教育教材 web サイトの改善

2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アンケート調査を、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名に実施した。アンケートの結果、医療従事者の多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供が望まれていること、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。そのため、モダリティ別のアクションチェックリストを作成した。また web サイトの内容の充実のため、複数の放射線防護衣の基本特性を評価した。

2. VR/AR 放射線可視化教材

2年目は、WebVR による血管造影での放射線防護教育教材、② 血管造影での散乱線分布を AR 表示する iPad アプリ、X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化、複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発について、VR や AR 技術を取り入れた放射線可視化教材の作成と評価を実施した。

3. リアルタイム被ばく警告システム

1年目に作成したプロトタイプの線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した。また、リアルタイム被ばく警告システムと合わせ、照射中の散乱線源を直接可視化し、その出力や防護対策を検討するカメラを作成し、その特性を C アーム透視装置により検証した。

今年度の研究成果として、アンケート調査によりアクションチェックリストの更新内容と職業被ばく低減のための課題を抽出することができた。またデジタル技術を活用し様々なモダリティにおける放射線可視化放射線防護教材の機能拡張を進めることが出来た。

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
荒川 弘之	九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 准教授
本井傳 健太	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
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
李 孝眞	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
宇都宮 史子	九州大学医学部保健学科 放射線技術科学専攻
境 真由	九州大学医学部保健学科 放射線技術科学専攻
野口 昂生	九州大学医学部保健学科 放射線技術科学専攻
矢野 祐二	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

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性を調査すると、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。

本年度は、1年目に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。

B. 方法

B-1 放射線防護教材 web サイトの改善

B-1-1 放射線防護教材 web サイトの更新とアンケート調査

1年目に教材を web サイトにまとめ、電子教材として活用しやすいようまとめた。2年目は、構築したサイトとアクションチェックリストに

ついてアンケート調査を実施した。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、産業医科大学病院の整形外科、放射線部（看護師含）、弘前大学病院の放射線部所属の看護師で、職種別の回答数として、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名である。

B-1-2 放射線防護衣の特性評価

透視業務に欠かせない放射線防護衣について、様々なメーカーから販売されておりその特性や使用・管理上の注意点についての説明資料が欲しいという意見を受け、web サイトの内容の充実のため、6 種類の放射線防護衣を用意し、その特性を評価した。

B-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

2年目は、VR や AR 技術を取り入れた放射線可視化教材の作成と評価に関して、WebVR による血管造影での放射線防護教育教材の開発、血管造影での散乱線分布を AR 表示する iPad アプリの開発、X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化、複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発を実施した。

B-3 リアルタイム被ばく警告システムの開発

B-3-1 リアルタイム被ばく警告システム

リアルタイム被ばく警告システムについて、1年目にプロトタイプを完成させ、2年目にその線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した。

B-3-2 半導体式散乱線可視化カメラ

リアルタイム被ばく警告システムと合わせ、照射中の散乱線源を直接可視化し、その出力や防護対策を検討するためのカメラを作成し、その特性をモバイル C アーム透視装置により検証した。

(倫理面への配慮)

本研究は B-1-1 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 放射線防護教材 web サイトの改善

C-1-1 放射線防護教材 web サイトの更新とアンケート調査

アンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的に効率よく効果的な学習の機会の提供 (web サイトやEラーニング)が望まれていることが明らかになった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求められ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。この結果を受け、部門別に調整したアクションチェックリストを作成した。

C-1-2 放射線防護衣の特性評価

6 種類の放射線防護衣の特性を評価した結果、重量と遮蔽能力の関係は相関があったが、海外製のものでは防護素材にムラがあり鉛当量の公称値と一致しないものがあった。

C-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

C-2-1 WebVR による血管造影での放射線防護教育教材

この教材は PC やタブレットなど web ブラウ

ザ上で動作するもので、①心臓カテーテル検査での複数 C アーム角度における防護板の有無での散乱線分布の観察、②3D 散乱線分布の時間的变化、③防護板の位置による術者への散乱線量変化をゲーム感覚で数値化する構成としている。また最後に確認問題を作成し、放射線防護についての理解度を確認する教材とした。

C-2-2 血管造影での散乱線分布を AR 表示する iPad アプリ

C アーム 5 方向からの心臓カテーテル検査における散乱線分布を 2 次元および 3 次元で AR 表示する iPad アプリを開発した。実寸大で装置と重ね合わせての表示や、モデルを縮小し机上での演習が可能である。これも最後に確認問題を作成し、理解度の確認を計れる仕様とした。

C-2-3 X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化

X 線透視において発生する散乱線の方向ベクトルの分布をシミュレーションで解析して可視化することにより、医療スタッフにどこから散乱線が飛んでくるか、防護板の適切な配置方法を検討するための教材として活用するためのシステムを開発した。

C-2-4 複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発

MR を利用して仮想的な放射線源と模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムを構築した。このシステムにより、距離の逆二乗則や遮蔽体による放射線遮蔽効果、線量計の時定数の特性について理解を深める教育が可能となった。

C-3 リアルタイム被ばく警告システム

C-3-1 リアルタイム被ばく警告システムの性能評価

線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した結果、床から 100 cm の点で計算値が過小評価となっていた。医療スタッフのトラッキング

については、カメラからの距離と、死角の有無に応じて検出精度が異なるが、 $\pm 5\text{cm}$ 程度であった。

C-3-2 半導体式散乱線可視化カメラの開発

今回作成したカメラシステムにおいて、1 分の透視で散乱線を確認することができた。主な散乱線源は X 線管のコリメータと射出口、患者を模擬したファントムであることを視覚的に確認できた。ファントムを無くした場合、照射野を小さくした場合に散乱線の検出量が低下した。

D 考察

D-1 放射線防護教材 web サイトの改善

D-1-1 放射線防護教材 web サイトの更新とアンケート調査

被ばく低減に直接効果があったかの評価は、プログラム実施前(令和 4 年度)と実施後(令和 5 年度)の調査対象者の年間被ばく量を比較評価して、プログラムの有効性を検証する。令和 5 年度のデータが医療機関に集まるのが令和 6 年 5 月頃であり、そのタイミングでまとめてデータを取得する。(アンケート回答者からデータ取得の同意は取得済)

D-1-2 放射線防護衣の特性評価

複数の放射線防護衣の特性評価をした結果、現場での防護衣の品質の確認の重要性が示唆された。

D-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

D-2-1 WebVR による血管造影での放射線防護教育教材

本教材はインストール不要で OS を問わず実施可能である。一方使用する端末のスペックにより動作が遅くなることがあり、快適な操作の実施にはプログラムを出来るだけ軽くする必要がある。

D-2-2 血管造影での散乱線分布を AR 表示する

iPad アプリ

演習問題を実施した結果、放射線防護の 3 原則についての理解度は高かったものの、C アームの角度によって散乱線分布がどう変化するかの認識をできているものは少なかった。放射線の挙動をイメージできるようになればこの点の理解度が上がることが考えられる。この機能追加が今後の課題である。

D-2-3 X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化

X 線透視時の散乱線方向ベクトルの可視化により、放射線防護板の適切な配置位置のイメージが可能となった。ただしモンテカルロシミュレーションの計算時間がかかることから、照射角度や防護板の位置による散乱線分布、方向ベクトルの表示はリアルタイムに行えず、あらかじめ計算した結果を例示するのみであるということが本研究での課題である。

D-2-4 複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発

本システムは線源を使わず実施できることから被ばくの恐れがなく安全にトレーニングを実施できる。また理論式に基づいた放射線の挙動とサーベイメータの応答の理解につながり、初学者に対して有効な教材であるといえる。

D-3 リアルタイム被ばく警告システム

D-3-1 リアルタイム被ばく警告システムの性能評価

線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した結果、寝台からの散乱線の考慮が不十分であることが考えられ、より精密な寝台情報を登録したシミュレーションが必要である。

D-3-2 半導体式散乱線可視化カメラ

今回散乱線の可視化には成功したが X 線透視場において、1 秒間隔程度でのイメージングをするにはさらなる高感度化が求められる。より高感度なカメラにするために Coded Aperture 式へ

のコーリメータの変更や半導体をより密度の高いテルル化カドミウムにすることが考えられる。これらの改善により透視時のリアルタイム散乱線画像を取得し、臨床現場で実用可能なカメラとすることを3年目の目標とする。

E. 結論

今年度の研究成果として、アンケート調査によりアクションチェックリストの更新と職業被ばく低減のための課題を抽出することができた。またデジタル技術を活用し様々なモダリティにおける放射線可視化放射線防護教材の機能拡張を進めることが出来た。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy, Radiological Physics and Technology,17(1), 288-296, 2024
2. 藤淵 俊王、IVR における放射線防護教育について、九州循環器撮影研究会誌、34、30-33、2024
3. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Kosuke Kaneko, Yoshihiro Okada, Toshiko Tomisawa, Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment, Nuclear Engineering and Technology, in press.
4. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Takashi Yoshinaga Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display, The

42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Conference Proceedings, 284-287, 2023

5. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Kosuke Kaneko, Yoshihiro Okada, Toshiko Tomisawa, Investigation of patient release examination training in nuclear medicine using Mixed Reality, The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Conference Proceedings, 288-291, 2023

2. 学会発表

1. 厚生労働省労災疾病臨床研究の取り組み、放射線安全フォーラム 第79回放射線防護研究会 2023.6.17
2. 医療従事者の職業被ばく低減を目的とした放射線防護教育webサイトの構築、第9回福岡線診療放射線技師会学術大会 2023.6.24
3. IVRにおける放射線防護教育について、第81回九州循環器撮影研究会 2023.7.8
4. Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display, The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology (2023.8.31)
5. 放射線診療従事者の被ばく低減対策用リアルタイム被ばく推定ARアプリの開発、日本放射線技術学会秋季学術大会 2023.10.29
6. X線透視業務での術者線量推定と放射線防護の最適化の検討手法の提案、第18回九州放射線医療技術学術大会 2023.11.3
7. 労災疾病臨床研究事業「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」の紹介、第12回九州モニタ研究会 2023.12.2

8. 攻めの放射線防護 - 医療従事者への放射線防護教育の実践と課題 - 、愛夢の会 2024.1.13
9. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Consideration of appropriate barrier placement methods using visualization of scattered radiation in X-ray fluoroscopy. The 79th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 13-16, 2023.
10. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Proposal of Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for the Purpose of Appropriate Use of Radiation Protection Plates. The 7th International Symposium on The System of Radiological Protection (ICRP 2023), Pre-recorded video, November 6-9, 2023.
11. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for fluoroscopy by PHITS. Joint Symposium on Nuclear Data and PHITS in 2023, Ibaraki, November 15-17, 2023.
12. 檜作響子, 藤淵俊王, 荒川弘之. X線透視に

おける散乱線の方向ベクトル分布の可視化. 医用画像情報学会 令和5年度春季(第198回)大会, 福岡, 2024 年 2 月 3 日.

13. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Yoshihiro Okada, Kosuke Kaneko, Toshiko Tomisawa, Investigation of patient release examination training in nuclear medicine using Mixed Reality, JSST2024, 2024.8, (Niigata)
14. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Takashi Yoshinaga, Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display, JSST2024, 2024.8, (Niigata)

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

放射線防護教育 web サイトの構築とアンケート調査

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

2 年目は、昨年度構築した放射線防護教育教材 web サイトの更新とアクションチェックリストについてアンケート調査を実施した。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、産業医科大学病院の整形外科、放射線部（看護師含）、弘前大学病院の放射線部所属の看護師で、職種別の回答数として、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名である。

アンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供（web サイトや E ラーニング）が望まれていることが分かった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求められ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。この結果を受け、部門別に調整したアクションチェックリストを作成した。

今後は「職種や個人による知識の差、部署による防護方法の違い」の課題について、AI を活用した個別化学習の取入れを図る。「放射線の危険な場所、正しい防護方法、放射線の影響について知りたい」という意見に対して、コンテンツの充実（動画、インタラクティブな教材）、VR/AR による放射線の可視化、活用と普及、ゲーム性を持たせる、半導体検出器による散乱線の可視化を含めた教材の開発を進める。

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教材を取りまとめたポータルサイトおよびアクションチェックリストを作成した。本研究の目的はアンケート調査とインタビューにより、本サイトや資料の改善点を洗い出し、資料の充実を図ることである。

B. 研究方法

B-1 放射線防護教育 web サイトに関するアンケート

昨年度構築した放射線防護教育サイトとアクションチェックリストについてアンケート調査を実施した。対象は研究分担者の所属する医師、診療放射線技師、看護師である。

アンケート項目を以下に示す。

Q1 医療機関名

Q2 所属部署

Q3 職種

Q4 主な担当業務

Q5 氏名

Q6 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解できたか？

Q7 上の質問で「いいえ」の場合、わかりづらい項目や不明な内容

Q8 今回の放射線防護のためのアクションチェックリストに加えたほうが良い、または除いたほうが良いと思うこと

Q9 アクションチェックリスト以外に行っている被ばく低減対策

Q10 放射線業務について、身体的影響の不安があるか

Q11 上の質問で「はい」の場合、何に不安があるか（複数回答可）

Q12 被ばく対策について、不安なことや知りたいこと、その他自由記載

B-2 放射線看護専門看護師へのインタビュー

さらに放射線看護専門看護師 6 名に web 上でインタビューを行い、教材の提示方法や医療現場での放射線教育の在り方、教材加えるべき内容、現場での課題について討論会を実施した。

（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。

C. 結果

C-1 放射線防護教育 web サイトに関するアンケート

アンケートへの職種別の回答数として、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名である。

C-1-1 アクションチェックリストに対する回答

アクションチェックリスト項目との診療科別の yes の回答を以下に示す。

表 1 アクションチェックリスト 診療前の準備の項目

診療前の準備	
1	放射線防護エプロンを着用している
2	放射線防護メガネを着用している
3	ネックガードを着用している
4	体幹部(胸部または腹部)に線量計をつけている
5	(防護エプロンを着用する場合)体幹部の線量計をエプロンの内部に着用する
6	(防護エプロンを着用する場合)頸部の防護具の外側に線量計をつけている
7	(指先が照射野に近い場所で作業する場合)指輪型の線量計をつけている
8	電子式線量計をつけている

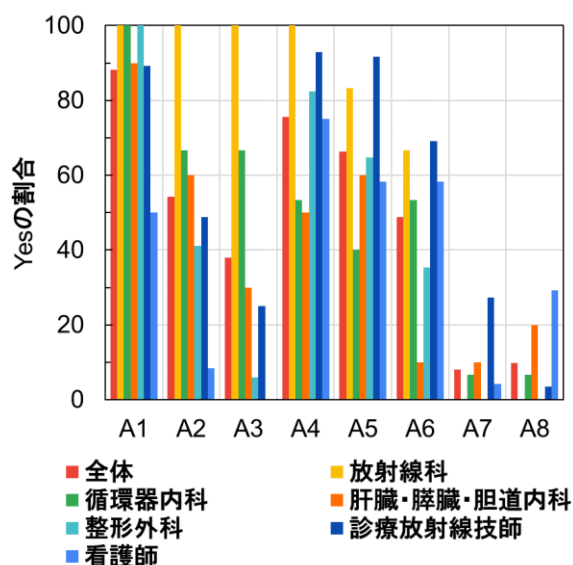


図 1 職種、診療科別アクションチェックリスト 診療前の準備 Yes の割合

表 2 アクションチェックリスト 診療中の項目

診療中の防護	
9	天吊りの放射線防護板を使用している
10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置する
11	放射線防護衝立を使用している
12	その他の放射線防護具を使用する
13	RI線源に接近する時間を最小限にする
14	透視画面を見ない際はX線を出さない
15	総透視時間を意識している
16	X線管にできるだけ近づかない
17	患者からの散乱線の広がりを意識し、できるだけ近づかない
18	可能な範囲で照射野を絞っている
19	患者と画像検出器をできるだけ近づける
20	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくする
21	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている
22	照射野に手を入れない

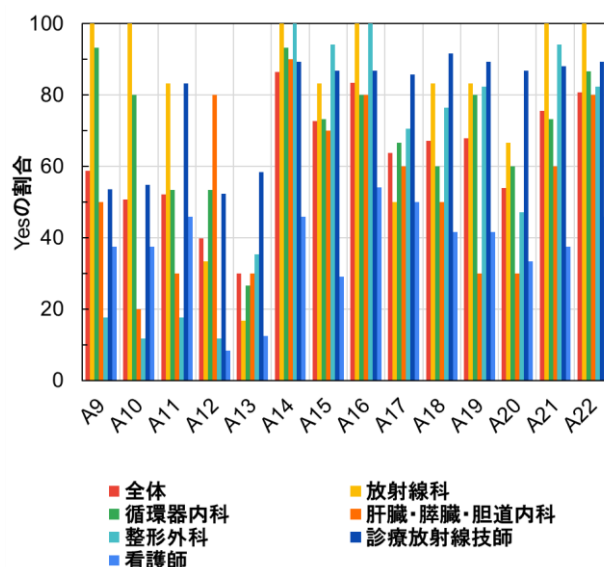


図 2 職種、診療科別アクションチェックリスト 診療中 Yes の割合

表 3 アクションチェックリスト 放射線影響

の理解の項目

放射線影響の理解	
23	自身の毎月の被ばく量を把握している
24	法令で定められた線量限度を知っている
25	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
26	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている
27	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている

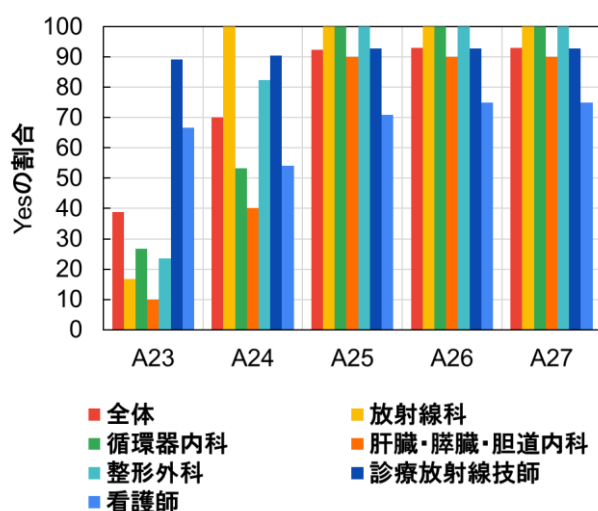


図3 職種、診療科別アクションチェックリスト放射線影響の理解 Yes の割合

次に Q6 以降の回答を以下に示す。

Q6 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解できたか？

「はい」との回答 93.0%、「いいえ」が 2.6%、無回答が 4.6%だった。

診療科別の「はい」の回答率を図4に示す。

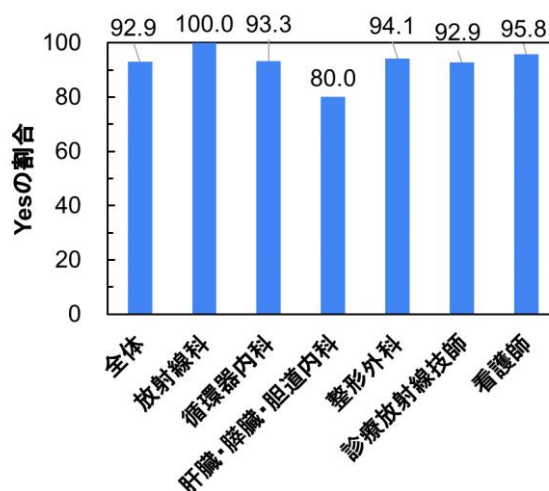


図4 職種別診療科別 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解 Yes の割合

Q7 上の質問で「いいえ」の場合、わかりづらい項目や不明な内容

- ・ 画像検出器の説明があった方がより正確な回答が得られる（線源と間違えるかも）
- ・ 照射条件は、看護師の立場では判断できない
- ・ どのモダリティとして回答して良いかわからず、CT の立場として回答すると常に放射線防護は行なっていないような回答をしなくてはならず、選択に困った。
- ・ 調査対象の状況が分からない。（ポータブル撮影のみ、OP 室かなど）
- ・ パルスレートを小さくしても被ばくが減るとは限らない

Q8 今回の放射線防護のためのアクションチェックリストに加えたほうが良い、または除いたほうが良いと思うこと

- ・ モダリティにより放射線防護具や防護対策が異なるため、モダリティ別にアクション

チェックリストを作成すべきである（9件）

- ・ 照射条件で、管電圧、管電流その他の項目を追加したほうが良い。
- ・ 照射野に手が入る場合に防護手袋を着用する。
- ・ 放射線防護3原則は理解できるが、患者にできるだけ近づかないように気をつけているという設問は医療従事者からすると避けられない部分である。一般の方や患者家族の方々の場合の設問では加えてもよい。

Q9 アクションチェックリスト以外に行っている被ばく低減対策

- ・ DRL の活用
- ・ グリッドを外す、付加フィルタやSID を変更する
- ・ 被ばく低減アルゴリズムを使用する。ノイズ低減処理の入った画像処理を実施する
- ・ 検査の介助につく看護師は必要時以外は室外で待機する
- ・ PET 患者の遠隔案内
- ・ 骨シンチ投与後の超音波検査時に、骨盤上に鉛を置いて検査していたことがあった
- ・ 患者さんへの協力をお願い
- ・ 医師との円滑なコミュニケーション

Q10 放射線業務について、身体的影響の不安があるか

「はい」との回答 50.9%だった。診療科別の結果を図5に示す。

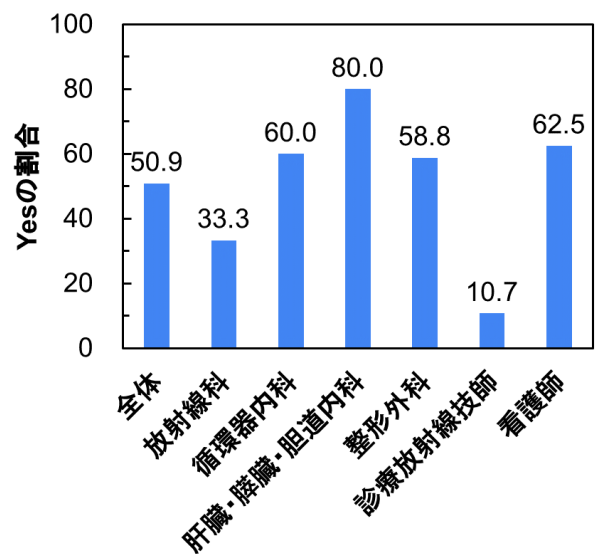


図5 職種別診療科別 被ばくに対する不安 Yes の割合

Q11 上の質問で「はい」の場合、何に不安あるか

職種別、診療科別の不安の要因について図6に示す。

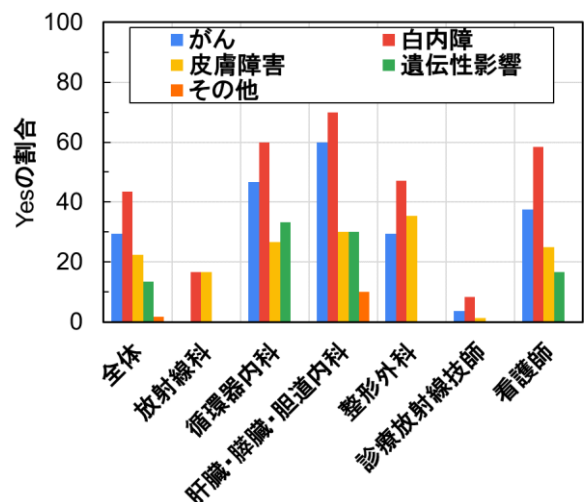


図6 職種別診療科別 被ばくに対する不安の要因

Q12 被ばく対策について、不安なことや知りたいこと、その他自由記載

(正しい防護方法)

- ・ 知識が乏しいまま規定の防護をしているだけなので、正しく行えているかわからない。
- ・ 照射時間が長い検査の介助をするときに患者の近くにやむなく介助として付く場合、不安になることがある。
- ・ 透視下で X 線管付近での被ばくの少ないところを知りたい。
- ・ 従事しているとどうしても被ばくありと判定される月がある。ただ、具体的にどのような作業内容が該当するのかよく分からない場合も少なくない。この原因が分かれば日ごろの業務において職業被ばくを低減できる可能性はある。

(被ばく対策教育の時期)

- ・ 放射線業務に携わることになったとき (3 名)。学習しても実際に放射線部に関わる部署でなければ忘れてしまう。
- ・ E ラーニングや自己学習で学べる教材があるとよい。

(被ばく対策教育の内容)

- ・ 基礎教育からしっかり学ぶ機会があるとよい。
- ・ 放射線に関わることによるリスク、被ばくによる体の影響
- ・ 防護の正しい方法
- ・ 個人線量計の正しい装着位置や、どこから放射線が出ていて散乱線などのことも含め被ばくしやすい場所を教えてほしい。

アンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供 (web サイトや E ラーニング) が望まれていることが分かった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求め

られ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。この結果を受け、部門別に調整したアクションチェックリストを作成した (報告書末に掲載)。

C-2 放射線看護専門看護師へのインタビュー

インタビューの結果を以下に示す。

(教材の提示方法について)

1. 紙媒体

- ・ 紙媒体が検査室等に置いてあると、すぐに手に取ることが出来て良い。

2. Web 教材

- ・ Web 教材は、出来るだけ文字を減らした方が見やすい。

3. AR 教材

- ・ C アーム等装置の状況に応じた散乱線の画像がリアルタイムに表示されると良い。透視画面の横に示せると良い。
- ・ 教育、トレーニングの場で AR 教材が使えると良い。臨床の場で患者が映ると個人情報、倫理上の問題がある。教育において振り返り学習が重要である。

(臨床現場での教育)

- ・ ナーシングスキル (看護師向け E ラーニングツール) のみでは理解が深められない。新人教育を 1 か月、後は飛び飛びの被ばく教育で、メインは OJT となっている。
- ・ 現場では業務がルーチンとなっている。間違ったことも気づかず実施している可能性もある。患者第一となり、自身の被ばく防護が後回しにされる。
- ・ 教育は教材、資料等利用できるが、現場に入ると一人なので、シミュレーション教育が求められる。
- ・ 業務中にどうすればよいか、具体的な動作についての対策、実体験が学びになり行動変容につながる。

- ・ IVRにおいて、手技中に患者が手や体を動かすことがあり、透視中でも体を押さえないといけない。危険な位置に近づくと視覚・聴覚・触覚に訴えたアラーム等で知らせてくれる機能があると良い。

(加えるべき内容について)

- ・ 核医学治療で α 核種が使用され始めているが、患者の一般病棟への移動基準が施設により異なっている。今後適用腫瘍の拡大により使用量も増えることが予測され、適切な管理方法の周知と普及が求められる。
- ・ 核種による管理、防護方法の違いを知りたい。

(現場での課題について)

- ・ 看護管理者にも放射線防護の必要性を十分理解していただく必要がある。看護師の放射線防護物品の配給、整備に関わる。
- ・ 教育、研修の実施に非学会員はしきいが高い。
- ・ 看護師ラダーに放射線防護は含まれていない。多職種連携の中で話をしている状況。

D. 考察

アンケートの結果、Yesの回答率の低いものを重点的に対策する必要があるが、部署によっては、元々所持していない、必要のない防護具の情報も含まれている。そのため100%になる事を求めるわけではない。照射条件など、職種によっては直接関係のない情報も含まれている。

また現在解析中であるが、診療放射線技師は他の職種に比べYesの回答率が有意に高かった。今後診療科別や担当装置別の評価などの解析を進める。被ばく低減に直接効果があったかの評価は、プログラム実施前(令和4年度)と実施後(令和5年度)の調査対象者の年間被ばく量を比較評価して、プログラムの有効性を検証する。令和5年度のデータが医療機関に集まるのが令和6年5月頃であり、そのタイミングでまとめてデータを取

得する。(アンケート回答者からデータ取得の同意は取得済)

アンケート結果を踏まえての放射線防護教育教材の開発として、下記のことを今後の課題であり検討する。

「好きな時間に自己学習できる教材が欲しい」という意見に対して、Webサイト、Eラーニングの活用、モバイルラーニング(スマートフォンアプリ等)を作成する。

「職種や個人による知識の差、部署による防護方法の違い」の課題について、AIを活用した個別化学習の取入れを図る。

「放射線の危険な場所、正しい防護方法、放射線の影響について知りたい」という意見に対して、コンテンツの充実(動画、インタラクティブな教材)、VR/ARによる放射線の可視化、活用と普及、ゲーム性を持たせる、半導体検出器による散乱線の可視化を含めた教材の開発を進める。

E. 結論

本研究において、放射線診療従事者の職業被ばくに関する情報を取りまとめたwebサイトを更新し、アンケート結果を基にモダリティ別のアクションチェックリストに改善した。次年度は、さらに閲覧者の感想や要望を調査し有効性を評価しながら、継続してコンテンツの充実を図る。

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

1. 厚生労働省労災疾病臨床研究の取り組み、放射線安全フォーラム 第79回放射線防護研

究会 2023. 6. 17

2. 藤淵俊王、岡崎龍史、富澤登志子、医療従事者の職業被ばく低減を目的とした放射線防護教育webサイトの構築、第9回福岡線診療放射線技師会学術大会 2023.6.24

なし

2. 実用新案登録

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

3. その他

なし

1. 特許取得

(付録) 令和5年度に改良した部門別アクションチェックリスト

- ・ 一般撮影、X線透視、血管造影、CT検査、核医学診療、放射線治療の6項目を作成
- ・ Webサイト上では、不明な項目があれば解説ページ飛ぶにLinkを設定。
- ・ <https://arp.kyushu-u.ac.jp/dxrpp/checklist/>

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（一般撮影）				
* X線撮影室の他、病棟や手術室での撮影を想定				
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	Yes	No
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	8	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	9	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
	10	照射時は操作卓側出入口の扉を閉めている	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	11	X線管にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	12	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	13	小児の固定時、固定具を使用している	Yes	No
照射条件	14	照射条件を最適化している	Yes	No
	15	可能な範囲で照射野を絞っている	Yes	No
	16	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	Yes	No
	17	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくのリスク	19	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	20	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	21	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
	22	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
	23	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

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（X線透視）				
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護衣を着用する場合） 体幹部用の線量計を防護衣の内側に着用している	Yes	No
	6	（防護衣を着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	Yes	No
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置している	Yes	No
	11	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	12	放射線防護カーテンを使用している	Yes	No
	13	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
照射時間 （時間による防護）	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	Yes	No
	15	総透視時間を意識している	Yes	No
	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	18	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
照射条件	19	可能な範囲で照射野を絞っている	Yes	No
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	Yes	No
	21	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	Yes	No
	22	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No
	23	照射野に手を入れない	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくリスク	24	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	25	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	26	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
	27	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
	28	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

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（血管造影）				
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護衣を着用する場合） 体幹部用の線量計を防護衣の内側に着用している	Yes	No
	6	（防護衣を着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	Yes	No
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置している	Yes	No
	11	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	12	放射線防護カーテンを使用している	Yes	No
	13	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
照射時間 （時間による防護）	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	Yes	No
	15	総透視時間を意識している	Yes	No
	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	18	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
照射条件	19	可能な範囲で照射野を絞っている	Yes	No
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	Yes	No
	21	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	Yes	No
	22	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No
	23	照射野に手を入れない	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくリスク	24	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	25	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	26	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
	27	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
	28	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

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（CT検査）				
			*CT透視を含む	
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護衣を着用する場合） 体幹部用の線量計を防護衣の内側に着用している	Yes	No
	6	（防護衣を着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	Yes	No
	10	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	11		Yes	No
	12	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
照射時間 （時間による防護）	13		Yes	No
	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	Yes	No
	15	総透視時間を意識している	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
照射条件	18	照射条件を最適化している	Yes	No
	19	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	Yes	No
	21	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	Yes	No
	22	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No
	23	照射野に手を入れない	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくリスク	24	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	25	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	26	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
	27	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
	28	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

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（核医学診療）				
		*PET-CT、SPECT-CTのCTを含む		
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護衣を着用する場合） 体幹部用の線量計を防護衣の内側に着用している	Yes	No
	6	（防護衣を着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	Yes	No
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置している	Yes	No
	11	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	12	RI投与時、自動投与装置を使用している	Yes	No
	13	手動による投与時、シリンジシールドを使用している	Yes	No
	14	β 線源等、線種に適した遮蔽体を使用している	Yes	No
	15	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
照射時間 （時間による防護）	16	RI線源に接近する時間を最小限にしている	Yes	No
	17	RI投与後の患者に接近する時間を最小限にしている	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	18	RI投与後の患者に必要な以上に接近しないようにしている	Yes	No
	19	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
照射条件、その他	20	投与量、CT時の照射条件を最適化している	Yes	No
	21	RI調剤時は、ドラフト内で作業している	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくのリスク	22	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	23	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	24	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
	25	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
	26	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

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト（放射線治療）				
		* 外部放射線治療、小線源治療を含む		
診療前の準備				
放射線防護具	1	放射線防護衣を着用している	Yes	No
	2	放射線防護メガネを着用している	Yes	No
	3	ネックガードを着用している	Yes	No
個人線量計	4	高エネルギーX線を使用する際、中性子線に対応した線量計を使用している	Yes	No
		体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	Yes	No
	5	（防護衣を着用する場合） 体幹部用の線量計を防護衣の内側に着用している	Yes	No
	6	（防護衣を着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	Yes	No
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	Yes	No
	8	電子式個人線量計をつけている	Yes	No
診療中の防護				
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	Yes	No
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置している	Yes	No
	11	放射線防護衝立を使用している	Yes	No
	12	その他の放射線防護具を使用している	Yes	No
照射時間 （時間による防護）	13	RI線源に接近する時間を最小限にしている	Yes	No
	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	Yes	No
	15	総透視時間を意識している	Yes	No
手技中の位置 （距離による防護）	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
照射条件	18	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	Yes	No
	19	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	Yes	No
	20	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	Yes	No
	21	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No
	22	照射野に手を入れない	Yes	No
放射線影響の理解				
被ばくリスク	23	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No
	24	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No
	25	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
	26	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
	27	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

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

放射線防護衣の特性評価

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

本研究では複数の新しい放射線防護衣の鉛当量や均一度といった性能を評価し、品質管理における課題を明らかにすることを目的とした。

防護素材による透過 X 線のエネルギースペクトルを測定し評価した。さらに、日本産業規格 (Japanese industrial standard: JIS) に従い透過 X 線量から鉛当量、均一度を評価した。均一度については従来の手法に加え防護衣ごとの透過 X 線画像からも評価した。

多元素防護素材は鉛の他にビスマスやタングステン、錫などを併用していることが確認できた。多層構造の防護素材の方が高電圧でも高い遮蔽能力を維持した。また、防護衣の X 線画像から濃度のムラや点状斑がみられ、均一度の測定法による測定結果の差異が生じた。

現状の JIS の均一度評価では防護衣のムラや点状斑が正確に評価できない、X 線画像上での視覚評価が重要となる。各施設が行う品質管理について、標準化された基準を設ける必要がある。

研究協力者

矢野 祐二

九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

荒川 弘之

九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 准教授

A. 研究目的

近年、透視ガイド下手技の多様化や複雑化に伴い医療従事者の職業被ばくが問題となっている。その中でもインターベンショナルラジオロジー (interventional radiology: IVR) は非侵襲的かつ多くの病気に対して治療が可能で、その活用が拡大されることが期待されており、IVR の治療件数は年々増加している。また、内視鏡的逆行性胆膵管造影 (endoscopic retrograde cholangiopancreatography: ERCP) においても、治

療用 ERCP の開発とその処置の更なる複雑化に伴い、医療従事者の職業被ばくが多くなることが問題となっている。これらのような透視手技において、医師を含め医療従事者は放射線防護具 (以下、防護具) を着用することで職業被ばくを低減することが重要である。防護具の中でも放射線防護衣 (以下、防護衣) は、これまで含鉛素材を使用したものが主流であり、鉛自体の放射線遮蔽能力は高いものの、鉛自体の毒性に

よる健康的な問題や環境的な問題、重量による身体的な負担などの問題があった。近年では鉛を用いない素材の防護衣が開発され、より軽量化しつつ防護性能を維持した多様な製品が販売されている。

無鉛素材には様々な元素が用いられており、素材によって構成元素の吸収端の違いから透過するエネルギースペクトルなどの遮蔽特性は異なる。防護衣の構造についても多様化が進んでおり、構成元素をゴム等の素材に溶かしたり重ね合わせたりして製造するものや、更なる柔軟性や軽量性を目指して多層構造をとっているものもある。製造企業は企業秘密の観点からこれらの情報や遮蔽特性を詳細には公表していないものもあり、我々が防護衣を購入する際に詳細な遮蔽能力を知ることは難しい。そのような中、Christodoulou らの研究によると、一部の防護衣にはカタログの公称値と実測値の遮蔽能力が一致しないものもあるという報告があり、カタログの公称値のみを信用し防護具を購入、使用することは必ずしも安心とはいえない場合もある。そのため、防護衣の購入後は適切な条件下で防護衣の減衰特性を評価し、遮蔽能力の品質管理を行うことが重要となる。また、防護衣については、経年劣化による亀裂発生の報告もあるため、定期的な品質管理も重要となる。防護衣の導入後、品質管理をしている施設もあるが、この際に用いる品質管理方法はまだ学会等で明確には定められておらず、各施設が独自に設定しているものや主観的な判断によるものが多く、標準化にはいたっていない。

本研究の目的は、複数の新しい防護衣について防護衣を透過した X 線の線量やエネルギースペクトル、鉛当量、均一度などの観点から遮蔽特性の比較を行い、防護衣の特徴を解析することとした。また、本研究で行った測定方法と測定結果をもとに防護具の防護性能評価や防護衣

の品質管理・評価基準の課題を明らかにすることとした。

B. 研究方法

B-1 使用した放射線防護衣

本研究では 6 種類の放射線防護衣を使用した。各防護衣の鉛当量の公称値や構成元素などの情報を Table 1. に示す。DMA (株式会社マエダ製) のみ購入後 10 年経過したものであるが、その他の 5 つの製品は購入後 1 年程度もしくは新品のものを用意した。構成元素については公表されているものが少なく、製造メーカーが公開している製品のカタログや web サイトでは情報が得られなかったため、蛍光 X 線分析装置 DELTA Professional/GeoChem (オリンパス株式会社製) を用いて組成分析を行い、その結果を構成元素欄の括弧内に記載した。これらの情報から鉛が含まれているものを LC (lead contains)、鉛が含まれていないものを LF (lead free) と分類した。LC-3 は繊維状に加工された素材であり、LF-1 は多層構造を採用しているという特徴がある。

Table 1 使用した放射線防護衣

Product	Manufacturer	Lead equivalent [mmPb]	Characteristic (Shielding elements)	Classification
SSA	Maeda	0.25	Leaded Vinyl (Pb)	LC-1
DMA	Maeda	0.25	Multi-element composite leaded vinyl (Pb,Sn,W)	LC-2
ZIEG	ADEGG	0.25	Special fiber lead processed material (Pb)	LC-3
FA07	Longyue Medical	0.35	Leaded rubber (Pb)	LC-4
KRYPTOLiTE	Uniray	0.25	Lead-free multilayer material (Sb,Ti,Bi)	LF-1
PAW	Hoshina	0.35	Multi-element composite lead-free sheet (Sn,Sb,Ti)	LF-2

B-2 透過 X 線の線量測定

遮蔽能力の測定配置について、診療用 X 線に対する防護具における材料の減弱特性の決定方法を規定する日本産業規格 (Japanese industrial standard: JIS) T 61331-11 に準じブロードビーム条件を設定した。JIS に規定される線質条件を再現するため、付加フィルタとして 0.2 mm の銅フィルタを用いた。X 線発生装置はインバータ式 X 線高電圧装置 UD150-30 (株式会社島津製作所製)、線量測定器は RaySafe X2 (Unfors RaySafe AB 製) を使用した。X 線照射条件を管電流 100 mA、照射時間 0.1 s とし、管電圧を 50, 70, 90, 110 kV と変化させながらそれぞれの防護衣を透過した X 線の線量を測定した。測定された X 線量を用いて、以下の式 (1) のもと減弱比 FN を算出した。

$$(F_N=(K_0-K_B)/(K_1-K_B)) \quad \cdots (1)$$

ここで、防護衣を設置しない状態で測定した一次 X 線の X 線量を K0、防護衣を設置し測定した減弱 X 線の X 線量を K1、バックグラウンドの線量を KB である。この値より防護衣ごとの遮蔽能力の評価と比較した。

B-3 透過 X 線のエネルギースペクトル測定

防護衣を透過するエネルギースペクトルについて、測定器としてテルル化カドミウム (CdTe) 検出器 EMF123 (EMF ジャパン株式会社製) を用いて測定した。照射条件は、透視モードで管電圧 120 kV、管電流 0.5 mA の連続透視で、300 s 照射した。EMF123 によって測定したデータを、EMF123-3 型レスポンス補正ソフト (EMF ジャパン株式会社製) により、CdTe 検出器の応答から直接 X 線へのスペクトルに変換した。

各防護衣に対して得られた透過 X 線のスペクトルについて、構成元素の K 吸収端と比較し、遮蔽効果の差について考察した。

B-4 鉛当量の測定

鉛当量の測定は、JIS T 61331-1 に記載されている X 線防護用品類の鉛当量試験方法に準じ、1-2 と同様の配置や線質条件を設定した。照射条件は管電圧 100 kV、管電流 200 mA、照射時間 0.1 s とした。それぞれ 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 mm 厚の鉛板に対して透過 X 線の線量を測定し、鉛板を配置しないときの線量に対する線量の比から透過率を算出した。各鉛厚の透過率より鉛の減弱曲線の近似曲線を作成した。同照射条件での各防護衣における減弱比から近似曲線の値に代入し鉛当量を求め、公称値の鉛当量と比較することで実際の遮蔽能力を評価した。

B-5 防護衣の均一度評価

均一度の評価は、JIS T 61331-1:2016 に準じ測定配置を設定し、照射条件は管電圧 100 kV、管電流 100 mA、照射時間 0.1 s とした。JIS T 61331-1:2016 では防護素材の均一度を試験品の面上における 5 点から 10 点の任意の点における減弱比から求めると規定されており、本実験ではこれに準じて、各防護衣に対し 10 点の透過 X 線を測定し、計測値の平均値や減弱比、変動係数 (coefficient of variation: C.V.) を算出し評価した。

また、防護衣をフラットパネルディテクタ (Flat Panel Detector: FPD) である CALNEO Smart (富士フイルムメディカル株式会社製) を用いて撮影し、得られた X 線画像について画像編集ソフト ImageJ (ver. 1.53t) を用いて関心領域 (region of interest: ROI) を取り、その範囲内の信号値の平均と標準偏差から C.V. を求めて評価した。用いた FPD は半切サイズ (356 mm × 432 mm) のものを用意し、寝台の上に FPD を設置し、その上に防護衣をシワの無いように引き伸ばして被せて撮影した。ROI の設定は、直径 2 cm の円状を 10 点設置する方法と、画像全体を囲む 1 つの長方形の ROI (322 mm × 378 mm) を設置する 2 種類の方法を用いた。作成した ROI は画像上のシワと考えられる部分が影響しない部分を選択・保存し、どの画像においても同様の座標の ROI を設置した。また、X 線管の陽極陰極方向にヒール効果による X 線画像の濃度変化が見られるため、10 点の ROI を取る際にはヒール効果の影響を及ぼさない X 線管の陽極陰極方向に垂直の方向に ROI を設置した。画像を用いた評価方法について、X 線画像上ではピクセル値が表示される。これを JIS に規定される線量値と比較するため、ピクセル値から線量値へ補正する必要がある。そこで、同測定配置において管電圧 60 kV、管電流 100 mA、照射時間を 5, 7.1, 10, 16, 20, 40, 80, 180, 250 ms と変化させ、その時

の取得した画像のピクセル値と線量計による FPD 表面での線量の値を測定することで、両者の関係を示す指数関数の近似曲線を作成した。この近似曲線の式を用いて、ピクセル値から線量値へ補正した。

(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あることから、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を実施した。

C. 結果

C-1 管電圧による減弱比の変化

各管電圧における算出された減弱比の変化を示すグラフを Fig. 1 に示す。防護衣の鉛当量が 0.25 mmPb のものは実線で、0.35 mmPb のものは点線で示している。どの防護衣についても管電圧が高くなるにつれて減弱比は低下したが、鉛当量が 0.35 mmPb の 2 つは減弱比の変化率が小さく高い遮蔽能力を維持した。同じ 0.25 mmPb の鉛当量のもので素材ごとに比較すると、管電圧が大きくなるにつれて LC 素材は減弱比が比較的小さく、LF 素材は大きくなった。鉛当量が 0.35 mmPb 同士のもので比較すると、LC 素材の方が、減弱比の変化は小さかった。

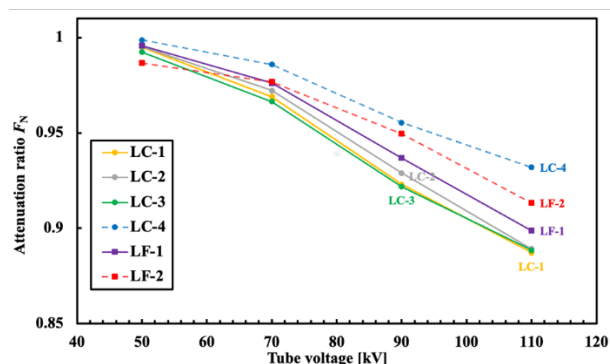


Fig.1 管電圧による減弱率の変化

0.25 mmPb のものは実線で、0.35 mmPb のものは点線で示す。含鉛素材のものは丸でマークし、無鉛素材のものは四角でマークした。

C-2 各放射線防護衣における透過 X 線のエネルギースペクトル

EMF123 により得られたエネルギースペクトルを Fig. 2, 3 に示す。Fig. 3 は縦軸に得られた総カウント数、横軸に光子エネルギーを示しており、Fig. 4 ではそれぞれのスペクトルにおける 60 keV 付近の特性 X 線のカウント数で各エネルギーに対応するカウント数を割ることでノーマライズしたものである。

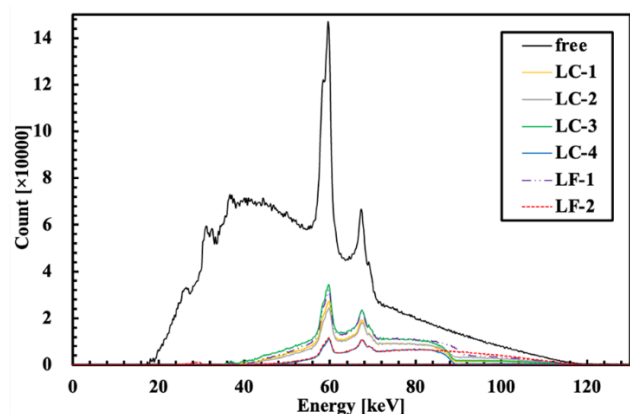


Fig. 2 測定したエネルギースペクトル
縦軸は測定値の絶対値を表し、横軸は各チャンネルに対応するエネルギー値を示す。

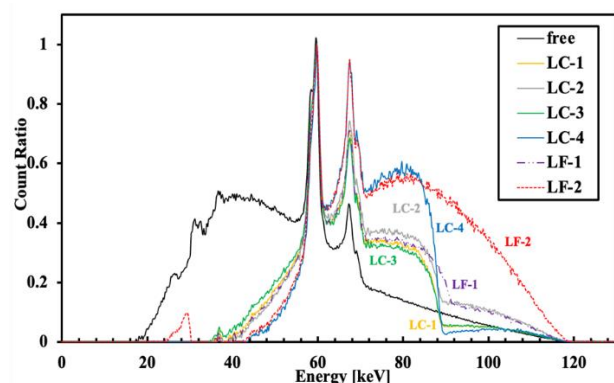


Fig. 3 正規化したエネルギースペクトル
各カウント数を 60 keV 付近の特性 X 線のカウン

ト数で割ることで正規化した。

Fig. 4 にそれぞれの防護衣に用いられている構成元素の質量減弱係数曲線を示した。Fig. 2, 3 では、各放射線防護衣の遮蔽能力によるカウント数の差異や K 吸収端によるスペクトルの形状変化が見られた。LC 素材のものは鉛の K 吸収端 (88.00 keV) により高エネルギー領域を効果的に遮蔽できていることがわかるが、LF-2 のような LF 素材のものではこの領域のエネルギーがそのまま透過していた。LF-1 では鉛の代わりにビスマスを用いることで、ビスマスの K 吸収端により同領域の遮蔽を実現していた。

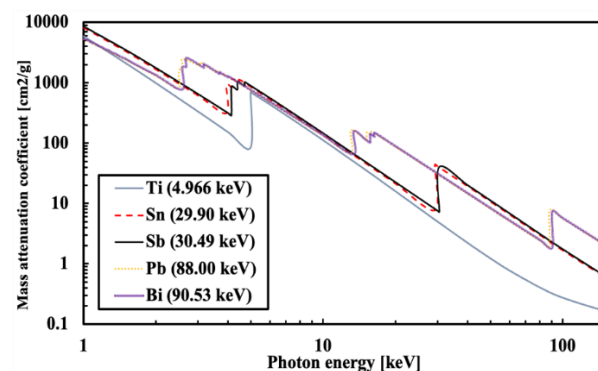


Fig. 4 使用されていた防護素材の質量減弱係数曲線

(NIST, 国立標準技術研究所より引用、データ項目の括弧内に吸収端を記載)

C-3 鉛当量の実測と公称値との比較

得られた鉛の減弱曲線を Fig. 5 に示す。減弱曲線の近似式 $y = 0.8436e^{-4.989x}$ より、同線質条件で得られた各防護衣に対する透過率を y の値に代入し、鉛当量を算出した。横軸に対する各値からの垂線について、鉛当量が 0.25 mmPb のものは実線で、0.35 mmPb のものは点線で示している。算出された鉛当量の値は Fig. 5 内に記載した。どの防

護衣についても公称値の鉛当量より実測値の鉛当量の方が大きく、鉛当量の過大評価していなかった。

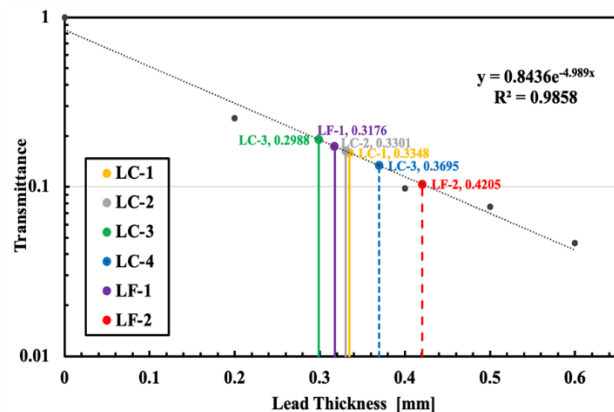


Fig. 5 鉛当量の測定値と公称値

計算された各鉛当量を色分けして示した。鉛当量が 0.25 mmPb のものは実線で、0.35 mmPb のものは点線で垂線を引いた。

C-4 均一度の評価

それぞれ 3 つの方法で得られた C.V.について、6 つの防護衣の C.V.の平均値で割ることでノーマライズし、得られた C.V.の比で比較したものを Fig. 6 に示す。LC-4 のように明らかに C.V.が大きいものは、どの方法でも正確にばらつきが評価されていた。しかし、そのほかのものでは測定法による違いが生じていた。LC-3 では線量計で 10 点を測定する方法もしくは画像上で 10 点の ROI を設置して測定する方法ではそれほどばらつきは評価されていないが、画像全体に ROI を設置する方法ではばらつきが大きかった。LF-2 では線量計で 10 点測定する方法ではばらつきが小さく評価されているが、画像上で ROI を設置する 2 つの方法ではばらつきが大きかった。

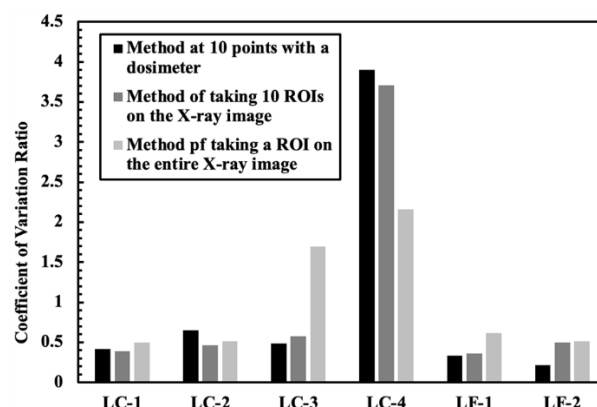


Fig. 6 評価方法別における均一度評価の変化

それぞれの方法によって算出された C.V.の値をその測定法における平均値で割ることで正規化を行った。X 線画像の 픽셀値を線量値に変換して評価した。

画像解析で用いたそれぞれの防護衣を撮影した実際の X 線画像を Fig. 7 に示す。LC-3 では 1 mm 程度の粒状の遮蔽素材と思われる点状斑や、1 mm から 2 mm 程度のピンホール、亀裂、凹みのようなものも見られた。LC-4 では Fig. 6 の結果でもわかるように、水たまりのような吸収率の違う大きなばらつきが見られた。LF-2 では縦縞状に吸収効果の違うばらつきが見られた。これらの画像上の特徴的な部分を拡大したものを Fig. 8 に示す。Fig. 8 における LC-3 の拡大率は 25 % であり、87 mm × 106 mm となる。LC-4 と LF-2 は拡大率 50 % であり、175 mm × 213 mm となる。

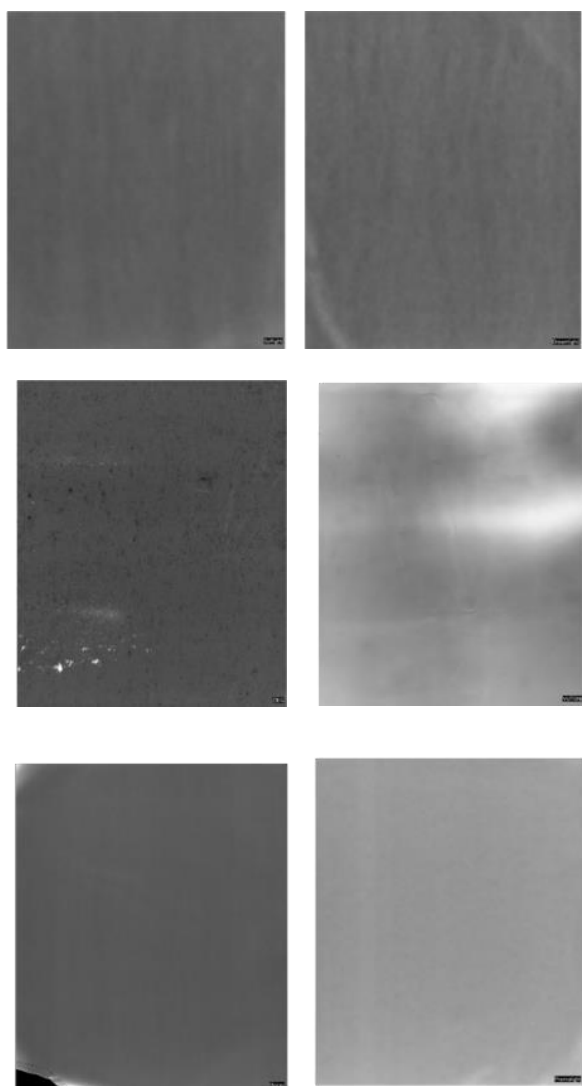


Fig. 8 放射線防護衣を撮影した X 線画像
 (左上: LC-1, 右上: LC-2, 左中段: LC-3, 右中段: LC-4, 左下: LF-1, 右下: LF-2) FPD は半切サイズ (356 mm×432 mm) のものを使用した.



Fig. 9 一部の画像に見られた特徴的なばらつき
 LC-3 は拡大率 25%(106mm×87mm), LC-4 と LF-2 は 50%(213mm×175mm)とした. LF-2 はコン

トラストを調整した。LC-3 には 1mm 程度の点状斑や亀裂が見られる。LC-4 には大きな不均一部分が見られる。LF-2 には線状の不均一部分が見られる。

D. 考察

透過 X 線の減弱比の測定では、本来 LC 素材の防護衣の方が遮蔽効果が高く、減弱比の変化の小さいとされているにもかかわらず、LF 素材の方が変化率は小さいという結果だった。一般的に、放射線の遮蔽能力は物質の線減弱係数に影響し、原子番号の大きなものほど遮蔽能力が高いとされているが、鉛よりも原子番号が小さく軽い素材を用いているにも関わらず遮蔽効果を維持できているのは、防護衣の構成金属による影響ではなく、LF-1 の多層構造による影響であると考えられる。

エネルギースペクトルの測定結果について、120 keV のエネルギー領域を低、中、高エネルギー領域に分類したとき、低エネルギー領域にはチタニウムを、中エネルギー領域には錫やアンチモンを、高エネルギー領域にはビスマスを用いることで、エネルギー領域ごとに各元素がもつ K 吸収端を組み合わせ、鉛を用いず遮蔽能力の向上を図っていることが考えられる。

鉛当量の測定ではどの防護衣についても遮蔽能力は過大評価していなかったが、防護衣によっては均一度が悪く、測定箇所によっては必要とされる遮蔽能力を満たさない可能性がある。LC-4 などでは、高い遮蔽能力を示す部分もあるが、測定箇所によっては JIS に規定される必要遮蔽能力を下回る可能性がある。

現在 JIS では、防護材料の均一度決定する際には試験品の面上における 5 点から 10 点の点について、減弱比およびそれに対する平均値や標準偏差から評価をすると規定がある。均一度の測定では、LC-4 のように明らかな広範囲のばら

つきが見られる場合には、このような JIS に記載されている方法やその他の ROI を設置する画像解析の方法でも正確に評価することができていた。しかし、LC-3 のような 1 mm から 2 mm ほどのピンホールがあった際、JIS で規定される直径 2 cm の照射野を用いる方法では、照射野の範囲内で線量値が平坦化され、正確に判断できなくなる。これによって、線量を 10 点測定する方法や ROI を 10 点設置する方法では、C.V. が小さく評価されていると考えられる。また、LF-2 のように、縦縞模様に吸収効果の違いが見られるものでは、線量を測定する方向や ROI を設置する方向に依存して得られる線量値・C.V. の結果に差が出てばらつきが正確に評価できなくなると考えられる。これらのばらつきについて、LC-4 に見られたばらつきは製造段階における防護素材を引き延ばすローラーの軸の歪みによるもの、LF-2 に見られた線状のばらつきは、ローラーに傷があったため生じたものと考えられる。LC-3 は繊維素材に鉛を電氣的に付着して製造されており¹¹⁾、その製造方法から粒状のムラしやすいものと考えられる。

上記した均一度試験では、均一度が担保された試験品に対しての複数点の測定条件が規定されており、本実験で用意した防護衣のように、素材の均一度に差がある場合には、評価の正確性が劣る可能性がある。このような素材を測定する際には、試験品の不均一度を考慮して、JIS に規定される複数箇所の線量測定における評価法において、減弱比の標準偏差で評価するのではなく最小値で評価すべきだと考える。

また、JIS に規定される線量計での測定では、局所的な防護素材のムラや亀裂、ピンホールを見逃す可能性があることから、X 線透過画像を用いて防護衣全体を評価することが有効と考える。X 線撮影装置や X 線透視装置を用いて確認しながら品質管理を行うべきであるが、近年の防護

衣には着心地や着脱のしやすさを考慮して防護衣自体が立体構造を持つものがあり、撮影を行う際、シワなく引き延ばして撮影し正確に評価することが困難であるという課題がある。

本研究で用意した新品の防護衣においても防護素材のばらつきが見られたように、防護素材のばらつきが防護衣の購入当初からある可能性がある。そのため、各施設は防護衣の購入後や一定の期間ごとに、防護衣の品質管理を行う必要がある。しかしながら、この時に用いる基準は統一されておらず、各施設が独自に設定しているものである。本実験で測定した防護衣のように、製品の製造段階からピンホールや亀裂がある場合の評価においては、主観的に評価すると正確性に劣る可能性がある。したがって、防護衣をはじめとした防護具の品質管理について定量的な保守基準が必要であると考える。

E. 結論

今回使用した無鉛の防護衣について、ビスマス等で高エネルギー領域を、他素材で中低エネルギーを遮蔽し、遮蔽能力の維持をしていたことを確認した。

防護衣の種類によっては均一度に問題があり、鉛当量の測定にも影響をもたらす可能性がある。均一度評価について、現在の線量を10点測定するJISの均一度評価に加え、X線透過画像を用いて防護衣全体を評価する新しい規格・方法が

必要である。鉛当量の試験方法についても、不均一度を考慮し、複数箇所を測定しその最小値の鉛当量で評価するなどの規定を設けるべきである。

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

1. 矢野 祐二、藤淵 俊王、荒川 弘之、放線防護具の防護性能の比較と適切な防護材質の検討、第18回九州放射線医療技術学術大会、2023.11（大分）

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

WebVR による血管造影での放射線防護教育教材の開発

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

近年、血管造影検査の需要が増加しているが、技術の難易度が高く、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、医療従事者への放射線防護強化の必要性が高まっている。そこで、本研究の目的を、WebVR を用いた散乱線の可視化及び有効な放射線防護についての教材の作成とした。C アームの角度毎の散乱線分布の三次元的可視化、防護板と術者の位置関係による被ばく線量の変化、X 線曝射時の時間経過を示した 3D アニメーションの WebVR と、放射線防護教材として問題を作成した。WebVR の有用性として、条件の違いによる散乱線分布の変化を任意の視点から観察することができる点、PC のみでの VR 体験が可能である点などが挙げられる。今後、放射線防護教育教材としての有用性を検証する必要がある。

研究協力者

宇都宮 史子 九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
荒川 弘之 九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 准教授

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思われる。

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 Paraview による散乱線データの取得

まず、先行研究によって得られた、モンテカルロ計算コード PHITS で計算させた血管造影検査時における散乱線分布データを Paraview 5.11.1 によって 3D データ(obj 形式)で出力した。Paraview 5.11.1 は、三次元可視化ソフトウェアの一種であり、非常に大規模なデータセットの分析と可視化を可能にする⁷⁾。散乱線分布データは、Caudal 25°、Cranial 30°、LAO(Left Anterior Oblique) 60°、PA(Posterior-Anterior)、RAO(Right Anterior Oblique) 30° の 5 種類の C アームの角度で、防護具ありとなしの場合、それぞれ 10, 2, 1, 0.2 $\mu\text{Sv/mGy}$ の 4 種類の 3D データを使用した。

B-2 3D オブジェクトの作成

Paraview 5.11.1 によって出力した 3D オブジェクトは、表面の凹凸が目立ち、頂点数が多く、データ容量が大きい。データ容量が多い場合、WebVR 上の読み込み速度が遅くなり、動作が重くなる。そのため、Blender 3.6.111)を用いて、頂点数の削減及びスムージングを行うことで表面を平滑化し、データ容量を削減した。変化の大きいもので、6,549 キロバイトから 1,164 キ

ロバイトと約 82 %の削減を行うことができた。また、色付け処理では、10 $\mu\text{Sv/mGy}$ を赤色、2 $\mu\text{Sv/mGy}$ を黄色、1 $\mu\text{Sv/mGy}$ を緑色、0.2 $\mu\text{Sv/mGy}$ は青色とし、3D アニメーションで表示する 3D オブジェクトは赤色とした。線量分布の 3D データには透明度をつけた。

B-3 WebVR 環境の開発

作成したシステムは、HTML および JavaScript によって構築され、平滑処理した 3D オブジェクト(glb 形式)を Web フレームワークである A-Frame を利用して Index.html に挿入することで WebVR を作成した。作成した WebVR については、XAMPP を用いてローカル環境に仮想サーバーを構築することで動作確認を行った。作成した WebVR は、角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR、防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR、血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR である。各 WebVR について、ボタンを配置することで主要な 3D オブジェクトの表示と非表示を切り替えることが可能になった。また、簡単な操作説明画像(jpg 形式)を作成し、表示と非表示を切り替えられるようにした。また、WebVR を操作するために使用した機器は、Windows10 (8th Gen intel(R) Core(TM)i7-8550U @1.80GHz) の PC で、ブラウザは Google Chrome および Microsoft Edge を使用した。

B-4 放射線防護教材の作成

開発した WebVR を基に、放射線防護教材を作成した。教材の内容は、遮蔽や防護板の使用方法についての問題とした。また、対象は血管造影検査に携わる医療従事者および診療放射線技師を目指す学生とした。作成した問題は 7 問で、角度毎の防護具がある場合とない場合の散

乱線分布についての問題を2問、防護具移動と術者の被ばく量の変化についての問題を3問、血管造影検査中のX線照射時の3Dアニメーションについての問題を2問作成した。また、演習の流れは、対象者に各WebVRおよび確認テストにアクセスできるページのリンクを配布し、WebVRを自由に操作し、最後に定着の確認のためにテストという形で問題を解くことを想定している。

(倫理面への配慮)

本研究は、放射線の挙動を再現するソフトウェア開発に関する研究であり、人を対象とする研究ではない。そのため倫理面での問題はない。

C. 結果

C-1. 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関するWebVR

Fig. 1にCアームの角度がLAO 60°の場合の画面を示す。最初は何も表示されず、②のシステム表示ボタンを押すことでボタンに示された3Dオブジェクトの表示と非表示の切り替えを行う。角度が表示されたボタンではその角度の血管造影検査装置、「術者」と表示されたボタンでは術者、「防護板」と表示されたボタンでは防護板が表示される。③の3D線量表示ボタンでは、ボタンに示された線量の散乱線分布の三次元的に表示される。ここで、表示している散乱線の単位[$\mu\text{Sv}/\text{mGy}$]は、周辺線量当量($H^*(10)$ [μSv])を、1検査当たりの入射表面線量[mGy]で除したものである。また、①のメニュー内から任意の角度を選ぶことで角度の変更を行うことができる。WebVRの表示物は、PCのマウスの左クリックで回転、右クリックで移動、ホイールで拡大縮小が可能である。

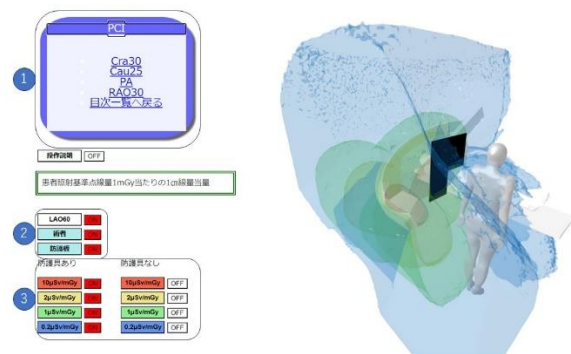


Fig. 1: 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関するWebVRの表示画面(Cra30°)

C-2. 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関するWebVR

Fig. 2に実際の画面を示す。最初は血管造影検査装置と患者ファントムと術者、防護板が表示されている。患者の胸元からランダムな方向に直方体が発射されている。これは、散乱線はX線が患者の体に当たって広がることを表している。④には、それぞれ散乱線を模した直方体が10秒間に防護板と患者の胸部に当たった数を10で除した値を示しており、1秒間あたりに当たった直方体の数とした。⑤のボタンでは、10 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ の散乱線分布、術者、患者胸部の直方体が出ている地点を示す球の表示と非表示を切り替えることが可能である。⑥の防護板について、画面をダブルクリックすると、防護板がカーソルに従って移動するようになり、もう一度ダブルクリックすることで位置を固定することが可能である。防護板は現在の視点に対して垂直に上下左右に移動させることが可能であり、奥行き方向に動かす際には視点の移動が必要である。

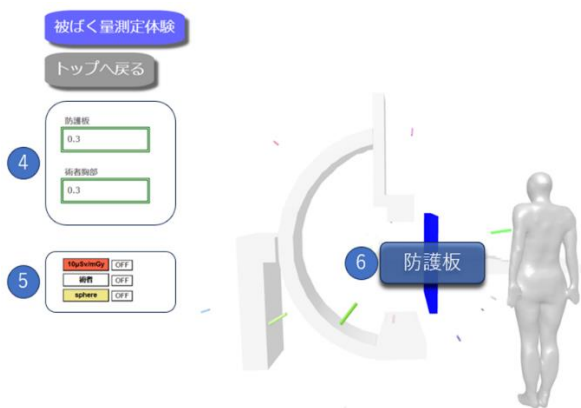


Fig. 2 : 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR の表示画面

C-3. 血管造影検査中の X 線照射時の 3D アニメーション

Fig. 3 に実際の画面を示す。最初は血管造影検査装置と患者ファントム、術者が表示されている。⑦の Play ボタンを押すことで X 線が曝射された場合のアニメーションがループ再生される。ループ再生が始まった後にもう一度押すことで最初からループ再生される。⑧の Pause ボタンでは、一時停止の切り替えを行うことが可能である。

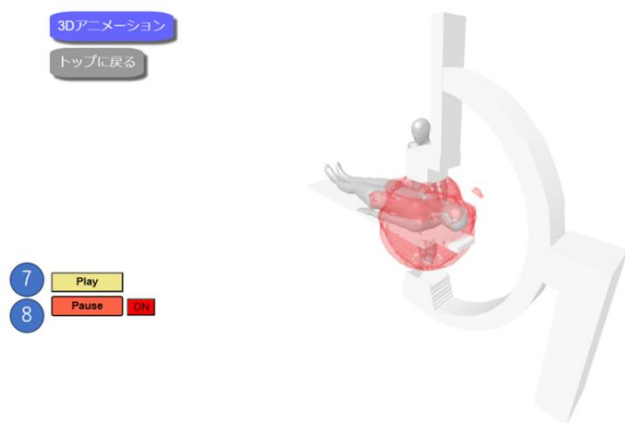


Fig. 3 : 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR の表示画面

C-4. 放射線防護教材の作成

操作方法スライドについては Fig. 4 から Fig. 6 に示す。

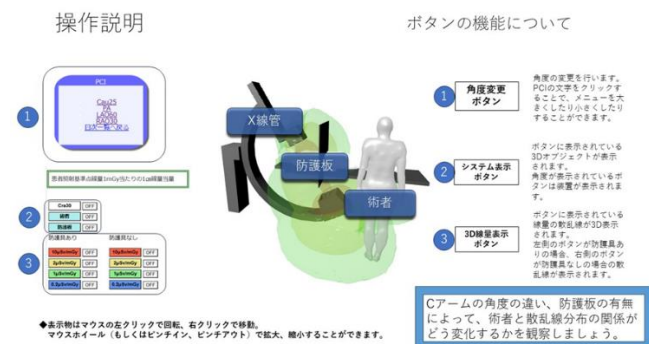


Fig. 4 : 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR の操作説明

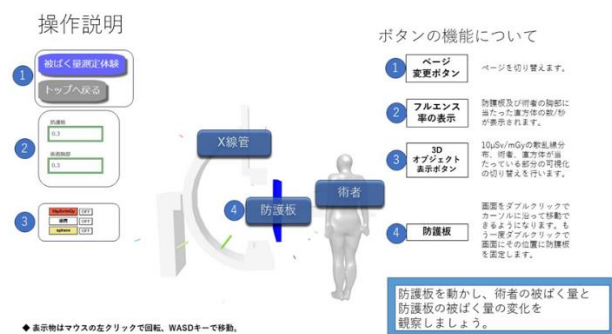


Fig. 5 : 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR の操作説明

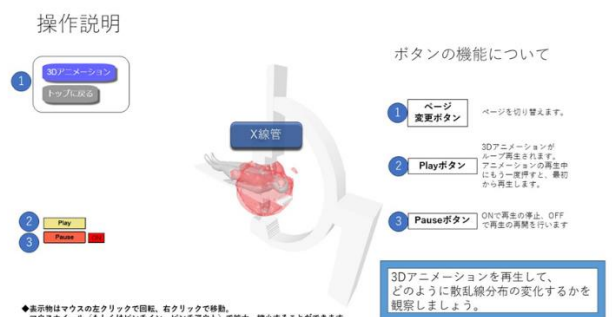


Fig. 6 : 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR の操作説明

作成した問題は下記の通りである。

1. 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する問題
 - ・ 防護板の後方の線量が減少し、散乱線の広がりも変化している(答えは○)
 - ・ Cアームを術者側に傾けると、術者の被ばく量は少なくなる(答えは×)
2. 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する問題
 - ・ 防護板とX線管の距離が近いほど、術者の被ばく量は多くなる(答えは○)
 - ・ X線管と術者の間に防護板がない場合、術者の胸部に当たる線量は少なくなる(答えは×)
 - ・ 防護板はX線管と術者の間に置くべきである(答えは○)
3. 血管造影検査中のX線曝射時の3Dアニメーションに関する問題
 - ・ 散乱線は患者に当たって球状に広がる(答えは○)
 - ・ 術者の足元に当たる線量は少ない(答えは×)

確認テストは、選択肢を選び、正解もしくは不正解が表示された後、1秒後に次の問題に切り替わる。すべての問題の解答が終わったあとに正答数が表示される。



Fig. 7 : 確認テストの画面

D. 考察

WebVRの有用性として、条件の違いによる散乱線の広がりの変化を視覚的に理解しやすい点、任意の視点から散乱線の広がりを観察できる点、PCがありインターネット環境が整っていれば利用できる点が挙げられる。

本研究で作成したWebVRの課題点として、術者の目線に立つことができず実際の医療現場との比較が難しい点、広範囲の線量分布などのデータ容量が大きいオブジェクトでは動作に支障が出る可能性がある点、防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関するWebVRでは数値のブレがある点、本研究で作成したWebVRでは一部の機能がPC以外では使用できない点が挙げられる。

実際の医療現場との比較について、術者と同じ目線に立つことで、術者の部位別の被ばく量が視覚的に理解しやすいと考える。しかし、本研究で作成したWebVRでは、術者と同じ目線に立つことができず、第三者視点での観察しかできない。学習中にカメラを移動させて術者と同じ目線に立つことも可能であるが、調整が難しく、学習者によって視点の位置のブレが起こればと考える。これは、AR (augmented reality : 拡張現実) 技術の併用や、ヘッドマウントディスプレイを用いたVR技術などで、術者の目線に立ったり、実際に手術室内を動いたりすることで解消できると考えられる。

WebVRの読み込み速度について、用いるデバイスのスペックによって異なると考えられる。本研究において用いたPCでは遅延が発生することはなく、スペックの低いPCでの動作については別途の検証が必要であると考えられる。

防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関するWebVRでは数値のブレについて、移動した直後に数値にブレがある場合と防護板がX線管

と術者の間にないときに術者の胸部の数値が防護板の数値よりも低くなる場合がある。移動した直後の数値のブレは 20 秒から 30 秒ほど放置すれば安定するが、学習者にとって理解の妨げになる恐れがあると考える。防護板が術者から離れている際に術者の数値が低くなる場合について、防護板を移動する際に防護板の中心にカーソルを合わせなければならず、移動しやすくするためにある程度の厚みを持たせてあるため、直方体が当たってカウントされてしまい、数値のブレが起こると考える。また、散乱線に模した直方体は乱数を生成する関数により、四方に発生しているが、防護板と術者の胸部に向かう直方体にムラがある場合があり、数値のブレになっていると考える。プログラムの改善が必要である。また、防護板の移動は PC 以外では利用できないため、プログラムの改善が必要であると考える。

放射線防護教材としての課題点として、具体的な指示を行わないため、学習目標が何を目的に観察をするべきかが不明瞭であると考える。操作説明スライドを増やすなどが必要であると考える。また、放射線防護教材としての有用性の検証が必要である。

E. 結論

WebVR を用いて血管造影検査時の散乱線の広がりを可視化し、その VR を基にした放射線

防護教材を開発した。WebVR は、条件の違いによる散乱線の広がりの変化が分かりやすく、任意の視点から観察でき、インターネット環境を整えれば利用が可能である。しかし、データ容量による動作環境の制限などの課題点も存在する。今後、課題点を改善した上で放射線防護教材としての有用性を検討する必要がある。

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

血管造影での散乱線分布を AR 表示する iPad アプリの開発

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

血管造影に携わる診療放射線技師にとって、医療従事者の放射線防護方法を理解し説明することは重要である。本研究では augmented reality (AR) 技術を用いて血管造影時の散乱線分布を可視化し、理解することで放射線の防護方法についての知識を高める教材を作成することを目的に定め、先行研究で作成された血管造影時の散乱線分布シミュレーションデータを使用し、ゲームエンジンを用いて AR 表示での散乱線可視化アプリケーションを作成した。また散乱線の分布から放射線防護の方法について考える教材シナリオを作成した。その結果 C アームの角度や防護板の有無による散乱線分布の変化を確認することができた。また、線源からの距離や防護具の使用による被ばく量の低下について確認することができた。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知ることができ、放射線防護の方法について知識を得ることができた。

研究協力者

野口 昂生	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
矢野 祐二	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
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
荒川 弘之	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

A. 研究目的

今日の医療現場において、放射線医療従事者の被ばくは大きな問題であり、特に C アームによる心臓カテーテルを用いた血管造影時の被ばくは多い。その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。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ないため、挙動をイメージすることが容易ではない。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することが重要であると考え。

さらに、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おり、

放射線診療に従事する者は放射線防護の訓練が必要である。

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医療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と考えられる。

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。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検討することで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た。

B. 研究方法

B-1 使用機器

本研究で AR アプリケーション作成に使用したソフトウェアを以下に示す。3DCG(Three Dimensions Computer Graphics)モデリングソフトとして Blender ver.3.6、ゲーム開発エンジンとして Unity ver.2022.2.18f を使用した。また、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。

B-2. 先行研究データの取り込み

先行研究において PHITS コード 9)によるシミュレーションによって試作された血管造影時の散乱線分布のボリュームデータと血管造影に用いる C アーム装置、患者、術者、天吊り防護板、足元の防護カーテンのオブジェクトを取り込んだ。

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°, Cranial 30°, Caudal 25°の 5 種類、防護板の有無で

2 種類の計 10 種類のデータを使用した。

B-3. Unity への取り込み

B-2 で述べた 10 種類の散乱線分布のボリュームデータと各オブジェクトデータを、ゲーム開発エンジンである Unity 上に取り込んだ。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。一部オブジェクト作成時の歪な凹凸が見られたため、Blender により適宜他角度での平滑化された 3D オブジェクトを Unity 上でアーム角度に合うように傾けることで代用した。術者の 3D オブジェクトには散乱線分布では使用していない桃色に色付けを行うことで、目立つようにした。また、実際の装置や防護板の色彩をもとに寝台を黒、天吊り防護板を透明度の高い茶色、足元の防護カーテンを紺色に色付けした。

B-4. AR アプリケーションの作成

先行研究で設定されていた X 線透視装置の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た。元のアプリケーションでは防護具の有無による 2 通りの散乱線分布であったのに対して、今回は 10 通りの散乱線分布を使い分ける必要があったため、それぞれを選ぶことのできるメニューを追加した。

B-5. 散乱線防護教材としてのシナリオの作成

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①C アームの角度変化による散乱線分布の変化、②防護板使用による散乱線分布の変化、③防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化、④アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化の 4 つを作成した。

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。作成した問題に関しては結果にて提示する。

B-6.シナリオに従った指示スライドの作成とアプリケーションでの表示

パワーポイントを使用してシナリオに従った指示スライドを作成した。指示スライドの中では主にアプリケーションの操作方法、シナリオをもとにした演習内容の指示、確認問題を表示した。作成した指示スライドはページごとにイメージ画像として Unity に取り込んだ。アプリケーション上で表示するために画面右下に GUIDE ボタンを追加し、そのボタンによって表示、非表示を変更することができるようにした。また、指示スライドを表示した場合には指示スライドと共に NEXT と BACK のボタンも表示され、それぞれをタップすることで指示スライドを進めたり戻したりすることができるようにプログラミングを組んだ。

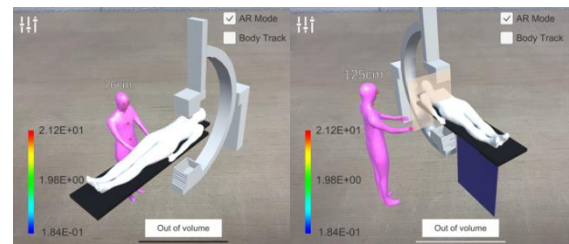
(倫理面への配慮)

本研究は、放射線の挙動を再現するソフトウェア開発に関する研究であり、人を対象とする研究ではない。そのため倫理面での問題はない。

C.結果

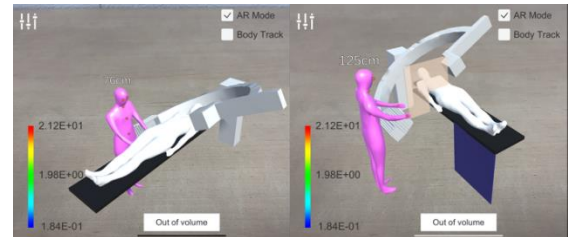
C-1. C アームの角度変化と防護板の表示

5 種類 (PA, LAO 60°, RAO 30°, Cranial 30°, Caudal 25°) の角度を実際にアプリケーション上で表示したもの及び、それぞれの角度で防護板を表示した際の画像を以下に示す。今回は計 10 種類をメニューから選択する。Fig4 の画像のように散乱線分布の切り替え時の名前は (C アームの角度) + (Pb の有無) で表示している。例えば LAO 60 は LAO 60°防護板なし、RAO 30Pb は RAO 30°防護板ありのことである。



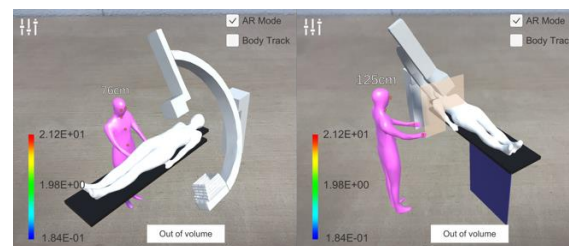
(a)

(b)



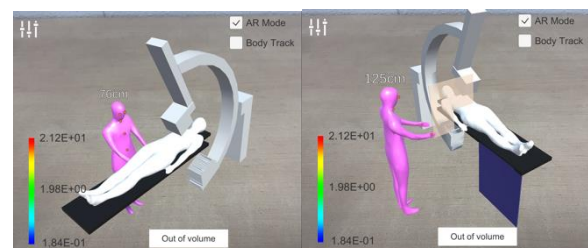
(c)

(d)



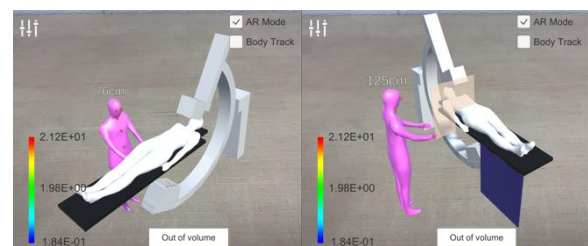
(e)

(f)



(g)

(h)



(i)

(j)

Fig. 1. 5 方向のオブジェクトと防護板の有無

- (a)PA 方向防護板なし (b)PA 方向防護板あり
(c)LAO 60°方向防護板なし (d) LAO 60°方向防護板あり
(e)RAO 30°方向防護板なし (f) RAO 30°方向防護板あり
(g) Caudal 25°方向防護板なし
(h) Caudal 25°方向防護板あり (i) Cranial30°方向防護板なし (j) Cranial30°方向防護板あり

C-2. 指示スライドの表示

全 21 ページの指示スライドを作成した。具体的には、P3~4 がアプリケーションの操作説明、P5~8 が C アームの角度変化による散乱線分布の変化、P9~12 が防護板使用による散乱線分布の変化、P13~16 が防護具(ゴーグル・エプロン)使用による被ばく量の変化、P17~21 が距離による被ばく量の変化を表示した。以下に C アーム角度変化による散乱線分布の変化に対する指示スライドを示す。

Cアームの角度変化による散乱線分布の変化

・実寸大で行う演習です。
なるべく広い空間を用意してください(5m×5m以上を推奨)。

5

(a)

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

1:

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iPadに手に持ち、部屋の中を動きながら確認してください

2:

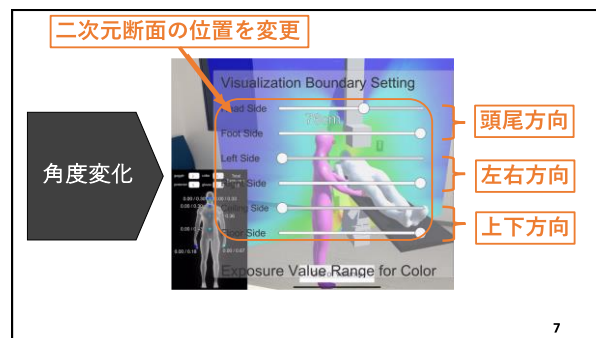
LAO60° 防護板なし、RAO30° 防護板なしについて好きな断面で同様に分布を確認してください(迷った時はアキシャル断面を変更してください)

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してください(迷った時はサジタル断面を変更してください)

6

(b)



7

(c)

問題 (マルかバツか答えよ)

- ・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
- ・Cアームの角度を術者側傾けると術者に対する被ばく量は増加する

8

(d)

Fig. 2. (a),(b),(c),(d)指示の例 (C アーム角度変化による散乱線分布の変化)

C-3. 血管造影時の散乱線分布を AR 技術により表示するアプリケーション

右側の Position ボタンを押すと Fig.2 のような表示が出て、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 を上下させることで 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。

GUIDE を押すことで指示スライドの表示、非表示を切り替えることができる。指示スライドを表示にすると Fig3 のような NEXT, BACK ボタンが表示され、押すことでスライドを進めたり、戻したりすることができる。

左上のメニューを押すと Fig4,5 のようなメニ

ユー画面が表示される。メニュー画面では主に 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、カラスケールの変更を行う。一本指での画面長押しで、任意の位置に術者を移動させることができ、二本指で術者をその場で回転させることができる。

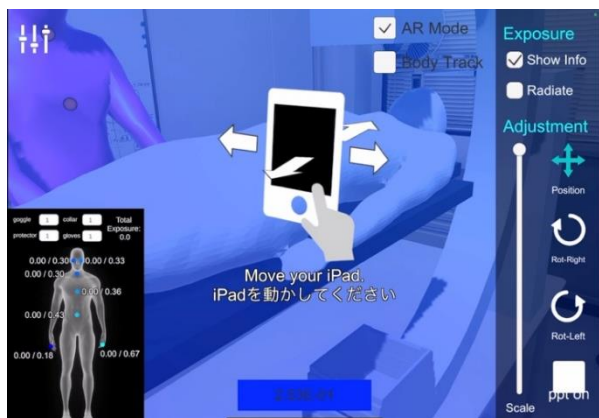


Fig. 3. Position を押した際の画面

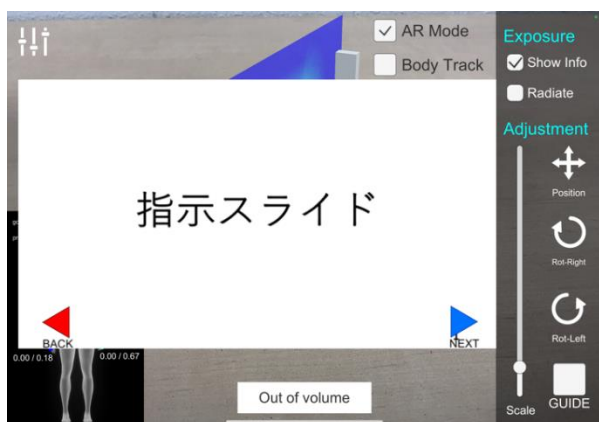


Fig. 4. 指示スライドの表示画面

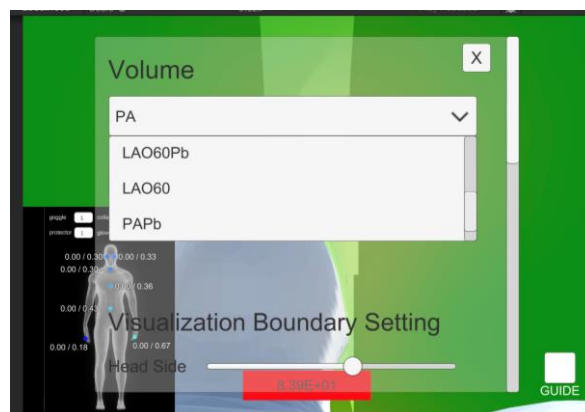


Fig. 5. メニュー表示の例 1

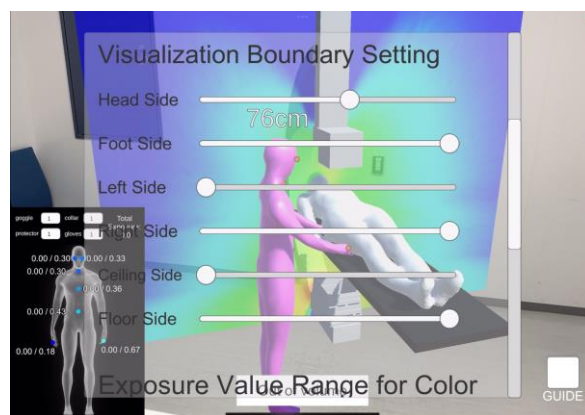


Fig. 6. メニュー表示の例 2

C-4. 実物大での散乱線分布の観察

作成した AR アプリケーションによって実寸大で学習している風景の一例を以下に示す。今回は C アームの角度変化による散乱線分布の変化および天吊り防護板、足元の防護カーテンを使用した場合の散乱線分布の変化を確認するシナリオにおいて実物大での演習を想定した。

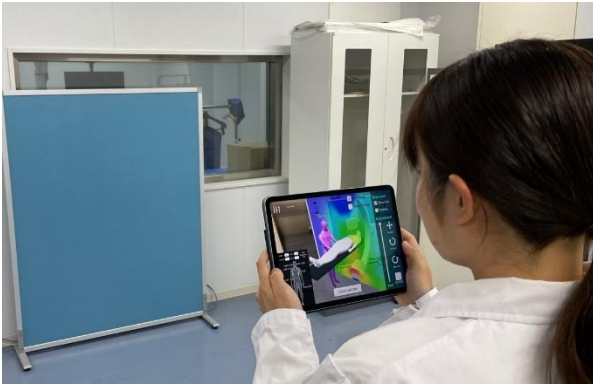


Fig. 7. AR アプリケーションを用いて実寸大で演習を行う様子

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、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ことを目的とし、以下の手順での演習とした。

PA 方向、防護板なし(アプリケーション開始時)の散乱線分布について、iPad を手に持ち、部屋の中を動きながら確認する。

LAO60°防護板なし、RAO30°防護板なしの散乱線分布において、任意の断面で 1 と同様に分布を確認する。

(どの断面を変更するか迷った場合はアキシャル断面を変更することを推奨する)

カウダール 25°防護板なし、クラニアル 30°防護板なしの散乱線分布において、任意の断面で 1 と同様に分布を確認する。

(どの断面を変更するか迷った場合はサジタル断面を変更することを推奨する)

防護板使用による散乱線分布の変化を確認するシナリオでは、天吊り防護板や足元の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、防護板の有用性を確認することを目的とし、以下の手順での演習とした。

任意の C アーム角度における防護板なしの散乱線分布について iPad を手に持ち、部屋の中を

動きながら任意の断面で確認する。

1 と同じ C アーム角度の防護板ありに変更し、同様の断面を用いて散乱線分布の変化を確認する。

他の角度でも同様に防護板の有無による散乱線分布の違いを確認する。

C-5. 縮小スケールでの散乱線分布の観察

作成した AR アプリケーションによってスケールを小さくして卓上で学習している風景の一例を以下に示す。今回は防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化およびアイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオにおいて縮小スケールでの演習を想定した。



Fig. 8. AR アプリケーションを用いて縮小サイズで演習を行う様子

防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化を確認するシナリオでは、防護ゴーグルや防護エプロン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、防護具の有用性を確かめることを目的とし、以下の手順での演習とした。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 10)、goggle, protector の値を 0.5, 0.1 に変更する。

- ・ Scale を変更して、オブジェクトが机の上に乗るように移動させる。
- ・ Fig8, 9 に示すように左下の goggle, protector の値を 0.5, 0.1 に変更する。
- ・ 術者の被ばく量の変化を確認する

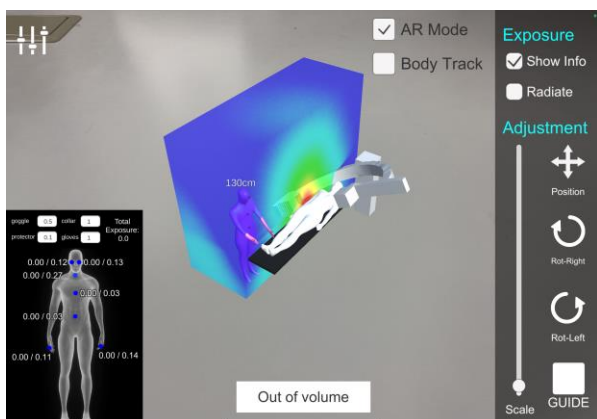


Fig. 9. goggle, protector の値を変更した際の画面

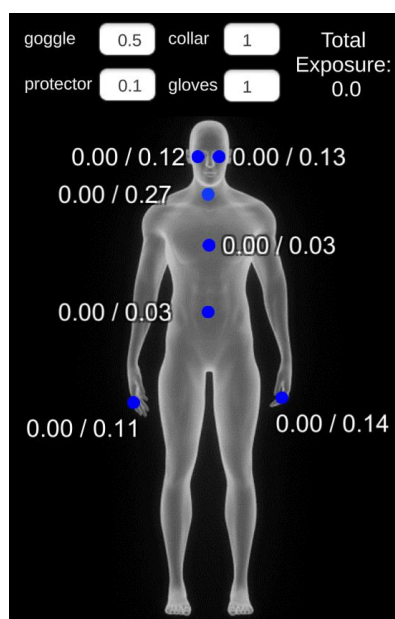


Fig. 10. 画面右下の一瞥線量表示の拡大図

アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオでは、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ことを目

的とし、以下の手順での演習とした。

- ・ 任意の場所に術者を移動し、被ばく量の変化を確認する。
- ・ 左右方向に動かして、被ばく量の変化を確認する
- ・ 頭尾方向に動かして、被ばく量の変化を確認する

C-6. 理解度を測るための問題

それぞれのシナリオごとに理解度を測る○×問題を作成した。Table 1 にシナリオごとの問題一覧を示す。

Table 1.シナリオごとの問題一覧

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に関する問題	
1.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	○
2.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	○
防護板使用による散乱線分布の変化を確認するシナリオに関する問題	
1.散乱線の防護において防護板を用いる必要はない	×
2.足元の防護カーテンは被ばく低減において効果がない	×
防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化を確認するシナリオに関する問題	
1.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	○
2.防護エプロンでは被ばく量の低減は期待できない	×
アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオ	

1.距離を2倍にすると被ばく量は2分の1になる

D. 考察

D-1. 今回作成したアプリケーションの利点

今回のアプリケーションは5つの利点がある。1つ目に任意の2次元断面を確認することができる点である。今回作成したアプリケーションでは散乱線分布の2D表示を患者からみて頭尾方向、左右方向、腹背方向の3方向において任意の断面で確認することができる。2つ目に術者の複数箇所の被ばく線量を同時に確認することができる点である。今回作成したアプリケーションでは、左下に術者オブジェクトの右目、左目、頸部、胸部、腹部、右手、左手の被ばく線量を表示しており、術者オブジェクトを移動させることで7点の被ばく線量の変化を同時に確認することができる。3つ目に5種類のCアーム角度を選択することができる点である。今回作成したアプリケーションでは5方向のCアーム角度において散乱線分布の確認を行うことができる。また、それぞれの角度を切り替える際にはオブジェクトの位置や二次元散乱線分布の座標情報は保持されるため、円滑に角度変化による分布の変化を確認することができる。4つ目に任意の角度から散乱線分布を確認することができる点である。今回作成したアプリケーションはAR技術により自分自身が動き回ることによって任意の位置からの散乱線分布の確認を行える。5つ目に指示スライドを用いることで他のデバイスが必要としない点である。今回の演習では指示スライドをアプリケーション上で表示できるようにしたため、指示画面を表示する他のPCや用紙を必要としないiPad一つで完結する演習を目指した。

D-2. 術者の移動による被ばく量の変化について

の課題

アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオにおいて、術者頭上に表示されるアイソセンタからの距離をもとに離しても、一部の測定点において被ばく量が増加することがある。これは頭上の距離はアイソセンタをもとに円状に離れていくのに対して散乱線の分布は必ずしも円状に広がるものではないためであると考えられる。今後は演習時に移動ガイドを表示することで演習者が一様な結果を得られるように努める。

D-3. 防護の三原則である時間に関するシナリオについて

今回作成したシナリオでは防護の三原則の時間に関するシナリオがない。アプリケーションとしては単縦な積算値を出す機能はあるため、今後は不均等被ばくの計算値を表示する機能を追加することで、積算値を用いた時間に関するシナリオを検討する。

D-4. 現在のシナリオにおける術者の被ばくについて

今回作成したシナリオでは術者が自由に動くことのできるシナリオがない。今後は画面下方に表示されたiPadの位置における被ばく線量をもとにしたシナリオを検討する。また、今回の術者オブジェクトは手を前に出した状態で固定されているため自由な動きに対応することができない。今後はボディトラッキングを用いて、自身が術者として自由に動くことのできるシナリオも検討する。

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防護教材を作成した。

影時の放射線防護教材の作成、第 18 回九州放射線医療技術学会大会、2023.11（大分）

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

1. 野口 昂生、藤淵 俊王、荒川 弘之、AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造

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

X線透視における散乱線方向ベクトルの可視化

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

目的：X線透視における医療スタッフの放射線防護対策について、これまでの研究では、シミュレーションを使って防護板の使い方と遮蔽効果が調べられているが、どの方向から散乱線が来るかを示すことは困難であった。そこで、本研究では、散乱線の方角ベクトルを可視化することを提案する。

方法：モンテカルロコードである PHITS を用いて、C アーム型 X 線透視撮影装置を再現し、X 線透視時の X 線室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。散乱線の挙動の計算結果より、ファントムから散乱した光子のベクトルを矢印として三次元可視化した。周辺線量当量分布と方向ベクトルを比較するために重ね合わせて表示し、C アームの角度を変えて同様の表示をした。防護板を配置し、床からの高さを変えて計算した。方向ベクトルと周辺線量当量分布の表示に術者のモデルを配置して、防護板を配置したときの術者に向かう散乱線の方角を確かめた。また、術者の位置における線量プロファイルを作成し、防護板による遮蔽を定量的に確認した。また、術者の視点においての散乱線源からの方向ベクトルを表示した。

結果：シミュレーションの精度は、周辺線量当量を実測し、測定値と計算値を比較し、10%以内で一致した。散乱線の方角ベクトルは、ファントムを中心に放射状に広がり、後方散乱が多いことが確認できた。周辺線量当量分布との比較では、どの角度でもファントムから X 線管に向かう方向ベクトルの密度が高く、その領域は比較的線量が高かった。防護板を配置すると、防護板に到達する方向ベクトルの延長線上の領域が遮蔽されることを可視化した。術者の視点からの飛跡では、術者の視点に向かってくる飛跡が防護板で遮蔽されることを可視化した。患者と術者の防護したい領域の間に防護板を配置し、より術者に近づけると、防護板による遮蔽効果が高くなり、術者の放射線防護として有効であることを可視化した。

結論：本手法による、周辺線量当量分布と合わせて方向ベクトルを示すことが、適切な放射線防護板の使用方をより明確にすることが可能である。

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

荒川 弘之

九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野

A. 研究目的

放射線作業における外部放射線からの防護方法として、距離、時間、遮蔽の3つの原則がある。X線透視を扱う医療スタッフは、照射中にX線装置や患者の近くにいないかならないため、放射線源から遠ざかることが困難である。その結果、X線透視業務に係る医療スタッフは放射線被ばく量が大きくなりやすい。特に多くの時間をX線業務に費やす医師や看護師は、眼の水晶体が放射線によって線量限度を超えて被曝する可能性がある。

この問題を緩和するためには、放射線防護衣、放射線防護眼鏡、放射線防護板、X線装置に取り付けられる防護クロスなどの防護具を用いることが一般的である。これらの装備は確かに放射線被曝を低減するが、特に防護性能の高いものは重く、長時間の使用は集中力を落としたり、腰痛を引き起こしたりする可能性がある。そのため、これらの装備は複数組み合わせることが推奨されている。中でも、防護板の使用についての先行研究では、防護効果を理解するためには、見えない放射線がどのように散乱しているかを視覚化することが有効であることが示されている。しかし、これまでの研究では、シミュレーションを使って防護板の使い方と遮蔽効果が調べられているが、どの方向から散乱線が来るかを示すことは困難であった。方向の情報を追加することで、防護板の設置方法を利用者がより明確に明らかにすることができると考えられる。

そこで、本研究では、散乱線がどの方向から来ているかを視覚化することを提案する。ベクトル情報の視覚化により、最も効果的な防護板の配置方法が利用者にとって明瞭になることが期待される。

B. 研究方法

B-1. シミュレーションの精度の確認

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) を使って X 線透視装置で照射したときの患者を模したファントムからの散乱線の挙動をシミュレーションした。そこで、シミュレーションの精度を確認するために、周辺線量当量を実測し、測定値と計算値を比較した。実測において、X 線照射は、X 線透視診断装置 CALNEO CROSS（富士フイ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, Sweden) を用いた。照射条件は、管電圧 80 kV、管電流時間積 2 mAs、線源表面間距離 80 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。実測は、各測定点で 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 100 cm のとき、水ファントムの中心から 50 cm、100 cm の距離で、角度 0 度、45 度、90 度の方向で、計 6 点測定した。同様に、床からの高さ 175 cm のとき、水ファントムの中心から 50 cm、100 cm の距離で、角度 0 度、45 度、90 度の方向で、計 6 点測定した。測定点は、Figure 1 に示すように、1 から 12 までの番号を割り振った。

PHITS によるシミュレーションでは、実測時と同様の幾何学的配置を再現し、周辺線量当量を計算した。X 線管はポリカーボネート（密度 1.2 g cm^{-3} ）、C アームはアルミニウム（密度 2.7 g cm^{-3} ）、寝台はアクリル樹脂（密度 1.18 g cm^{-3} ）である。X 線管の内部は鉄（ 7.87 g cm^{-3} ）で遮蔽し、コリメータは鉛（密度 11.34 g cm^{-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 80

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。測定点に $10 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$ の直方体を配置し、直方体を通過する光子をカウントして、ICRP Publ. 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。シミュレーションにおけるヒストリー数は 5.3×10^9 、光子と電子のカットオフエネルギーは 10 keV とした。

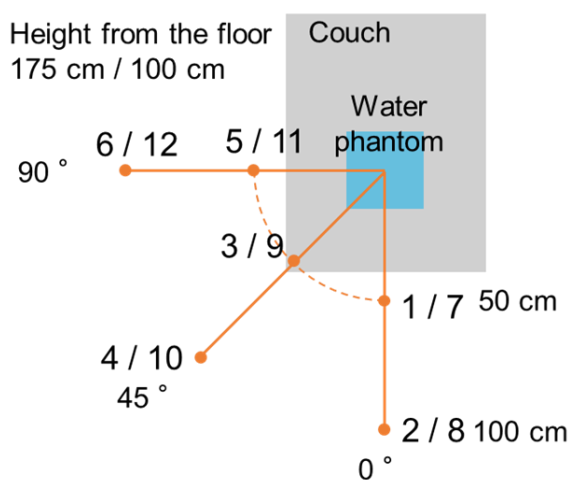


Figure 1 周辺線量当量の測定点の配置

寝台の上に水ファントムを置き、その周囲の 12 点について、周辺線量当量を測定した。周辺線量当量は、床からの高さ 100 cm 及び 170 cm のとき、水ファントムの中心から 50 cm、100 cm の距離で、角度 0 度、45 度、90 度の方向で、計 12 点測定した。

B-2. 散乱線の方角ベクトルの表示

PHITS を使用して X 線透視装置で照射したときの患者を模したファントムからの散乱線の挙動をシミュレーションした。そして、散乱線の方角ベクトルの表示のため、PHITS にて dump データを取得した。dump データとは、特定領域を通過した粒子の種類、座標、運動量の単位ベクトル、エネルギーなどの粒子の情報をファイルに出力したもので

ある。

PHITS によるシミュレーションの照射条件は、管電圧 66-78 kV、線源表面間距離 55-66 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ $35 \times 43 \text{ cm}^2$ とした。患者には、ICRP Publ.110 標準男性ボクセルファントムを用いた。また、C アームの角度は、AP、RAO30°、RAO90°、PA、LPO30° 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けた違いに多い。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るために、計算を 2 段階に分けた。散乱線の方角ベクトルの表示の手順について、まず、1 段階目の計算で、X 線管の焦点から放出された光子のうちファントムに入射した光子の位置・方向ベクトル・エネルギー情報を出力した。次に、2 段階目の計算では、出力データを放射線源として、患者からの散乱線を計算した。このとき、ファントムの中心を原点とした球を設定し、領域から外側に移動する光子の位置・方向ベクトル・エネルギー情報をファイルに出力した。球の半径は 10 cm から 150 cm まで、半径 10 cm ごとに位置・方向ベクトル・エネルギーを取得した。取得したデータは、三次元可視化ソフトウェア ParaView version 5.10.1 (Kitware, Inc., New York) に取り込んだ。エネルギーから矢印の大きさを指定して、散乱線の方角ベクトルとした。ParaView では、X 線透視診断装置のアイソセンタを原点とし、寝台短軸方向を X 軸、寝台長軸方向を Y 軸、X 線照射の方向を Z 軸とした。

B-2-a. 周辺線量当量分布との比較

方向ベクトルは向きを示すが、線量分布は強さや量を示す。そこで、散乱線の方角ベクトルと線量分布の関係を比較するために、PHITS にて散乱線の周辺線量当量の分布をシミュレーションした。放射線源は、II-2 で示した患者を模擬したファントムに入射した光子データを用いて、周辺線量当

量を計算した。 $Y = 0.00$ （照射野の中心）の断面、 $X = 0.00$ （照射野の中心）の断面、 $Z = -21.65$ cm（患者中心の高さ）の断面について、周辺線量当量の分布と散乱線方向ベクトルを重ね合わせて表示した。

B-2-b. C アームの角度での比較

C アーム型 X 線透視は手技により C アームの角度が変わる。そこで、C アームの角度を変えたときの散乱線方向ベクトルを示すため、 $Y = 0.00$ （照射野の中心）の断面について、周辺線量当量の分布と散乱線方向ベクトルを重ね合わせて表示した。

B-2-c. 防護板に到達する散乱線方向ベクトルの評価

PHITS によるシミュレーションにて、防護板を配置したときの散乱線方向ベクトルと周辺線量当量の分布を計算した。防護板は、移動型防護装置 ML（クラレト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 37×57 cm²、厚さ 2 cm で再現した。防護板の配置について、Figure 2 に示すように、C アームの角度は AP 方向で、床からの高さとして患者からの距離を変えた。防護板が患者から 25 cm の距離のとき、床からの高さ 110 cm、 130 cm、 150 cm で配置した。そして、散乱線源の近くに立つ術者に対して散乱線がどのような方向から来るのかということを明らかにするために、患者からの距離 35 cm の位置に術者を表示した。術者は ICRP Publ.110 標準男性ボクセルファントムの表面を用いて再現し、ボクセルファントムを術者の目安として、散乱線方向ベクトルを重ね合わせて表示した。また、術者の位置における線量プロファイルを作成し、防護板による遮蔽を定量的に確認した。

方向ベクトルは光子の位置ごとに方向を示すため、散乱線源からの光子の挙動を連続的に表示で

きない。そこで、術者に向かう散乱線が防護板の位置によって変わることを直感的に把握できるように、術者の視点においての散乱線源からの方向ベクトルを表示した。

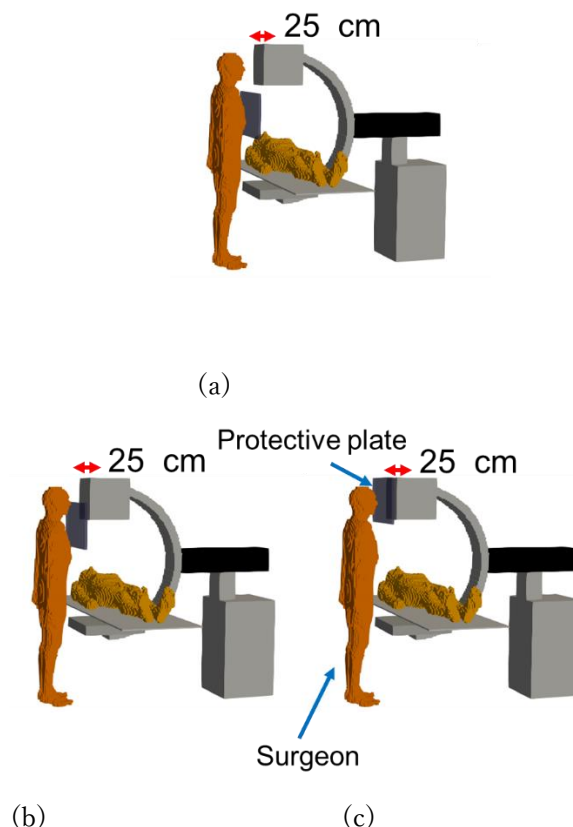


Figure 2 防護板と術者の配置

(a-c)について、防護板と術者はそれぞれ患者からの距離 25 cm、 35 cm である。防護板の床からの高さは、(a) 110 cm、(b) 130 cm、(c) 150 cm 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あることから、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を実施した。

C. 結果

C-1. シミュレーションの精度の確認

周辺線量当量の計算結果と測定結果を Table 1 に示した。周辺線量当量の計算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、入射表面線量を用い、相対線量を

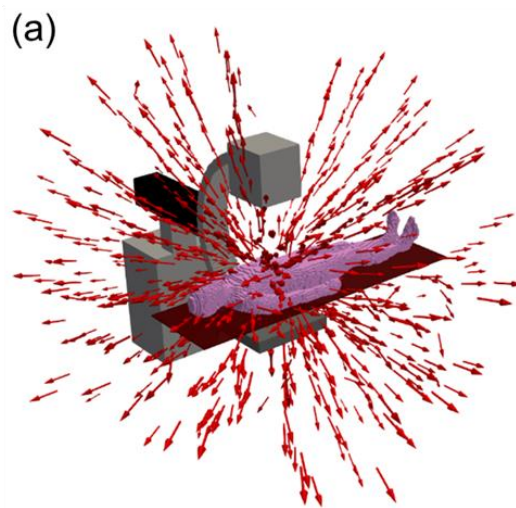
算出した。相対線量の計算値と測定値の比の平均値は 0.93、標準偏差は 0.12 となった。

Table 1 各評価点における周辺線量当量の計算値と測定値の比較

Points	Calculated dose($\mu\text{Sv/mGy}$)	Measured dose($\mu\text{Sv/mGy}$)	Calculated dose/Measured dose
1	8.64	7.32	1.18
2	3.30	3.71	0.89
3	7.22	7.03	1.03
4	3.28	3.79	0.87
5	7.66	6.81	1.13
6	3.26	3.51	0.93
7	11.94	14.28	0.84
8	2.70	3.45	0.78
9	11.37	14.20	0.80
10	2.69	3.13	0.86
11	12.08	12.73	0.95
12	2.71	2.82	0.96

C-2. 散乱線方向ベクトルの表示

散乱線方向ベクトルを Figure 3 に示した。赤色の矢印の向きは進行方向、大きさはエネルギーに設定した。方向ベクトルの特徴として、患者から広がることや後方散乱が多いことを確認できた。



(b)

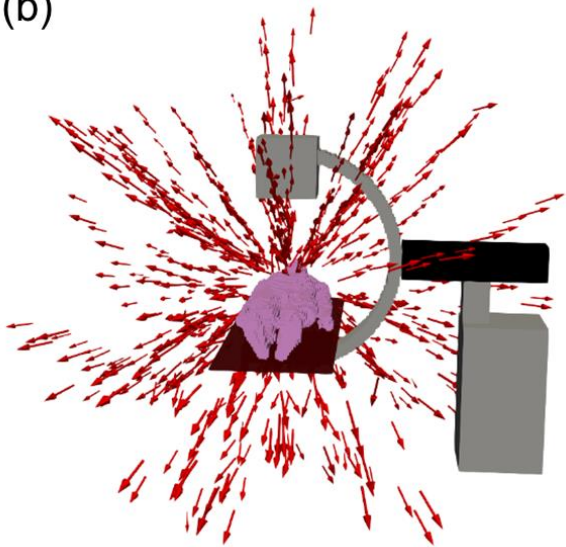
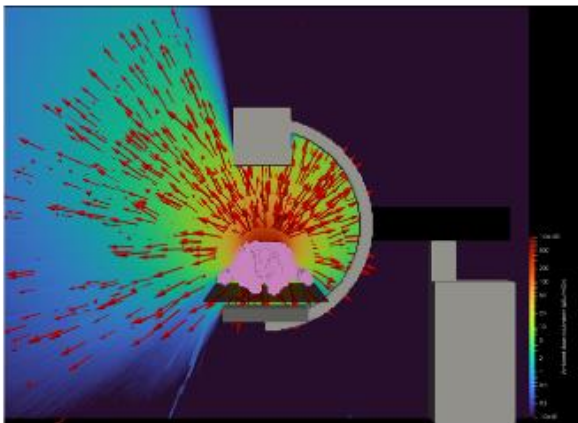


Figure 3 散乱線方向ベクトルの三次元表示
(a)患者の頭側からの表示 (b)患者の足側からの表示

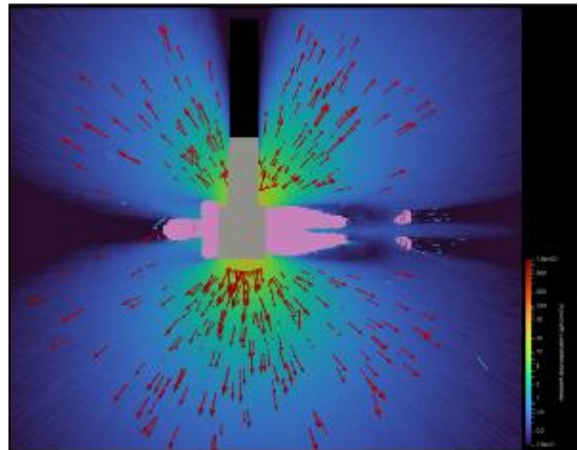
C-2-a. 周辺線量当量分布との比較

患者からの散乱線方向ベクトルと周辺線量当量分布の断面図を Figure 4 に示した。線量の勾配が緩やかなところでは、方向ベクトルの矢印の重なりが多いところは線量が高いことを確認できた。また、周辺線量当量はピクセル毎に表示されるが、方向ベクトルは一定の間隔ではなくランダムに表示されることが確認できた。

(a)



(b)



(c)

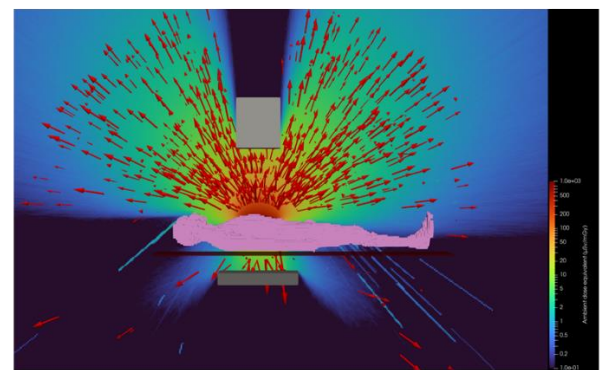


Figure 4 方向ベクトルと周辺線量当量分布を重ね合わせた断面図

(a) Y = 0 (照射野中心) の断面図 (b) Z = -21.65 (患者中心の高さ) の断面図 (c) X = 0 (照射野中心) の断面図

C-2-b. C アームの角度での比較

C アームの角度を変えた同様の表示を Figure 5 に示した。線量分布では、いずれの C アーム角度でも、患者と X 線管の間で線量が高くなることが確認できた。ここで、方向ベクトルを表示することで、線量が高いところは患者から X 線管側への方散乱であることが分かった。また、周辺線量当量はピクセル毎に表示されるが、方向ベクトルは一定の間隔ではなくランダムに表示されることが確認できた。

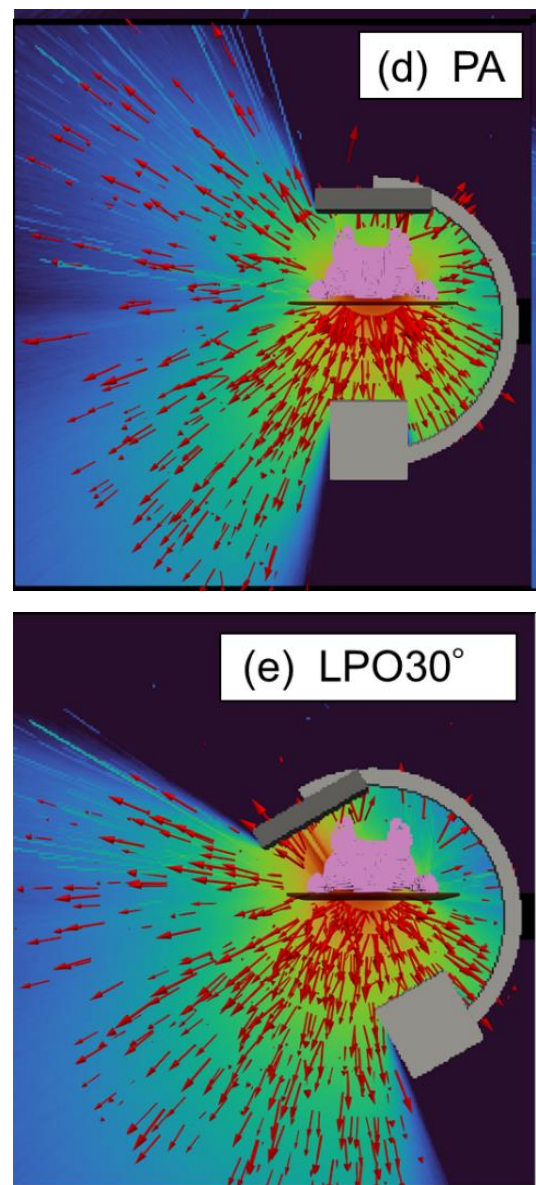
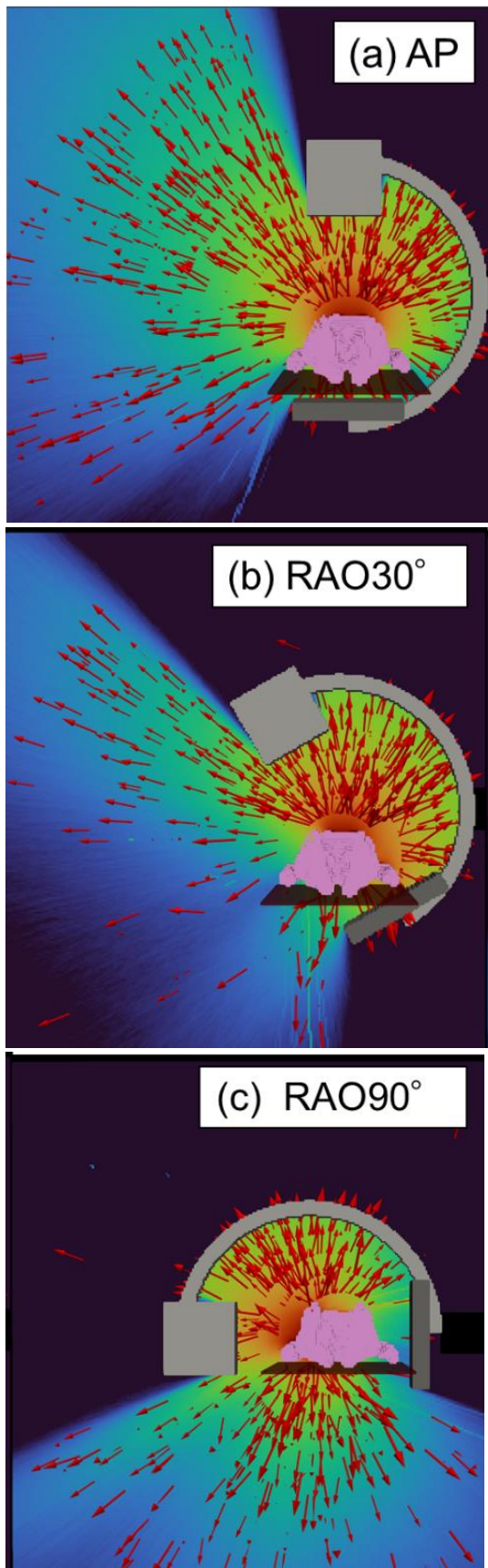


Figure 5 方向ベクトルと周辺線量当量分布を重ね合わせた $Y = 0$ (照射野中心) 断面図
(a) AP (b) RAO30 (c) RAO90 (d) PA (e) LPO30

C-2-c. 防護板に到達する散乱線の方角ベクトルの評価

患者からの散乱線の方角ベクトルと周辺線量当量分布の断面図を表示して、防護板の高さで比較した。断面図は、Figure 5 に示す。防護板を配置した高さによって、防護板に到達する方向ベクトルの向きが異なるため、方向ベクトルがほとんど

表示されない延長線上の領域も異なることを断面図から確認できた。

また、防護板を床からの 130 cm の高さに配置したとき、防護板に到達する方向ベクトルの延長線上の領域に術者の頭部があることが確認できた。ここで、術者の位置における線量プロファイルを作成して、防護板による遮蔽を定量的に確認した (Fig.7)。防護板による線量の低減率は、防護板を床からの高さ 110 cm、130 cm、150 cm に配置したとき、それぞれ、80.0%、99.1%、16.2%であった。

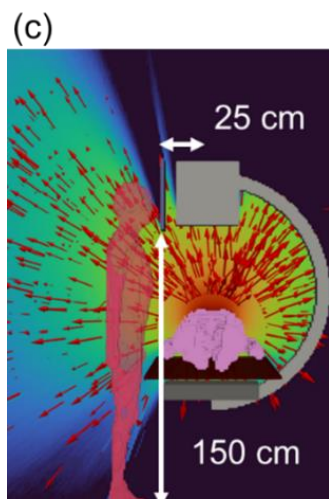
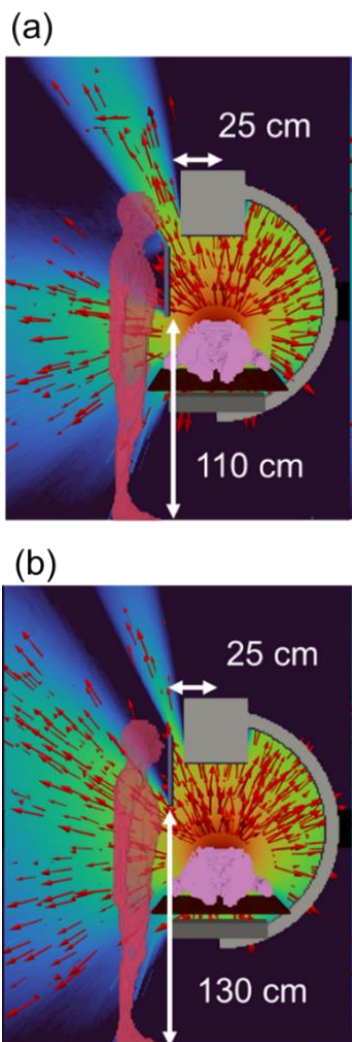


Figure 6 患者からの散乱線の方方向ベクトルと周辺線量当量分布の断面図

(a) (b) (c)について、防護板はそれぞれ患者からの距離 25 cm である。防護板の床からの高さは、(a)110 cm、(b)130 cm、(c) 150 cm

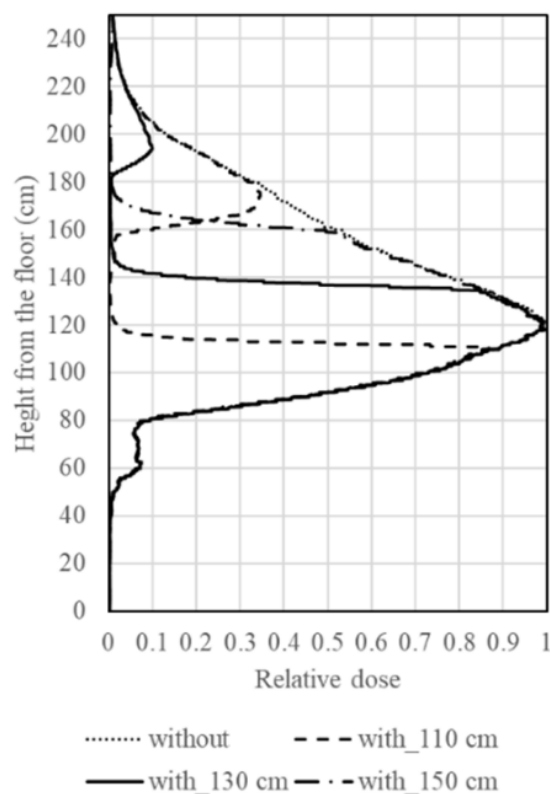


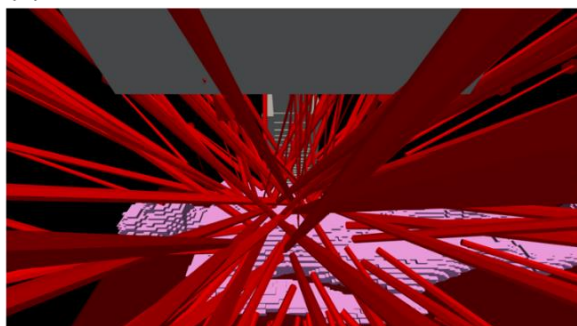
Figure 7 術者の位置 (患者から 35 cm) 線量プロファイル

患者から 35 cm の位置を術者の位置として、周辺

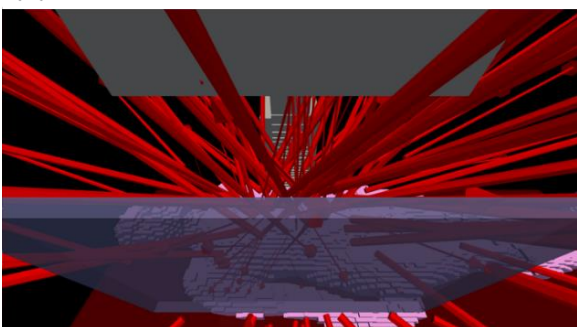
線量当量の相対線量を示す。

術者の視点においての散乱線源からの方向ベクトルを Figure 8 に示す。この表示では、患者からの散乱線が術者に向かってくる様子を確認できた。また、防護板により、ベクトルを示す矢印が止まっていることが確認できた。

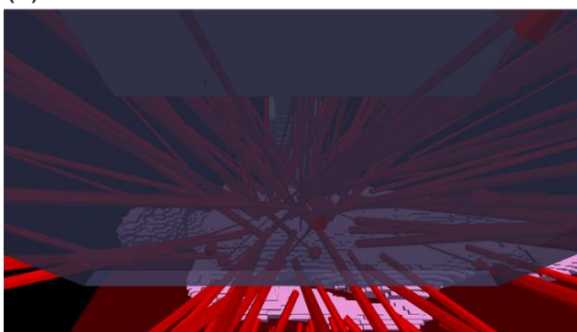
(a)



(b)



(c)



(d)

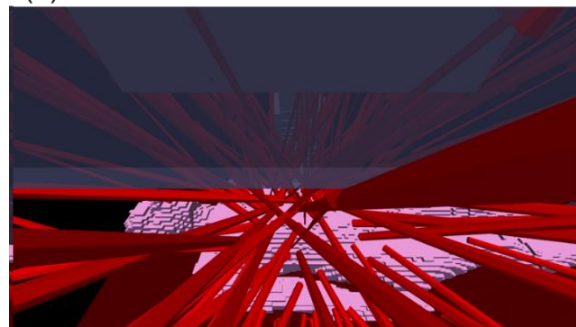


Figure 8 術者の視点からの飛跡

赤い線は、放射線の飛跡を示す。(a)は防護板を配置していない。(b) (c) (d)について、防護板はそれぞれ患者からの距離 25cm である。防護板の床からの高さは、(b)110 cm、(c)130 cm、(d) 150 cm である。

D. 考察

周辺線量当量の計算値と測定値の比較について、計算値と測定値の差は、平均約 7%であった。しかし、差は最大 22 %だった。シミュレーションによる計算値について、X 線管からの距離 50 cm の測定点では線量が過大評価され、その他の測定点では線量が過小評価されていた。原因として、X 線管の内部構造のデータが公開されていないため、X 線管の再現が不十分であったと考えられる。JIS Z 4333「X線及びγ線用線量当量率サーバイメータ」より、相対誤差の許容範囲は±20 %であるため、X 線管の再現をより正確にする必要があると考える。

方向ベクトルと周辺線量当量との比較について、周辺線量当量分布で線量の勾配を知ることができるが、方向ベクトルを表示することで、散乱線源からの散乱線の進行方向を知ることができる。C アームの角度を変えると、いずれの角度も X 線管側への散乱線が多かった。そのため、術者は X 線管側に立つことを避けることで被ばくを低減できる

と考えられる。

水晶体の放射線防護における防護板の配置について、散乱線は患者から放射状に広がるため、患者から同じ距離離れたとき、高さによって散乱線の進む方向は異なり、防護板に到達した散乱線の進む方向の延長線上の領域は遮蔽効果が高かった。そのため、患者と術者の頭部の間に防護板を配置すると、患者から術者の頭部に向かう散乱線に対して防護板を配置できるため、遮蔽効果が高くなると考えられる。しかし、防護板をより低い位置に配置すると防護板の上を散乱線が通過し、防護板をより高い位置に配置すると防護板の下から散乱線が入り込むため遮蔽効果は低くなると考えられる。

このように、散乱線源からどのような方向で散乱線が飛んでくるのかという散乱線の方角ベクトルの可視化によってどこに放射線防護板を配置すると、医療スタッフの被ばくを効率的に低減できるかがイメージでき、防護板の適切な使用法を検討できると考える。

E. 結論

散乱線の方角ベクトルと飛跡を三次元的に可視化して、散乱線が患者からどのように飛んで来るのか、また、放射線防護板によりどのように散乱線が遮蔽されているのかについて視覚的に示すことができた。そして、患者と医療スタッフの頭部の間の高さに防護板を配置すると水晶体を含めた被ばくの放射線防護に有効であるかを視覚的に示すことができた。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy, Radiological Physics and Technology,17(1), 288-296, 2024

2. 学会発表

1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Consideration of appropriate barrier placement methods using visualization of scattered radiation in X-ray fluoroscopy. The 79th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 13-16, 2023.
2. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Proposal of Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for the Purpose of Appropriate Use of Radiation Protection Plates. The 7th International Symposium on The System of Radiological Protection (ICRP 2023), Pre-recorded video, November 6-9, 2023.
3. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for fluoroscopy by PHITS. Joint Symposium on Nuclear Data and PHITS in 2023, Ibaraki, November 15-17, 2023.
4. 檜作 響子, 藤淵 俊王, 荒川 弘之. X線透視における散乱線の方角ベクトル分布の可視化. 医用画像情報学会 令和5年度春季(第198回)大会, 福岡, 2024年2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

複合現実を利用した模擬サーベイメータによる放射線計測トレーニングシステムの開発

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

放射線防護・管理のトレーニングにおいて、ヒトの感覚では認識できない放射線を視覚的に理解する必要がある。また、測定器の効果的な使い方も習熟しなければならない。従来、このようなトレーニングは放射線源を利用して実施されてきた。本研究では、サーベイメータと呼ばれる放射線測定器の安全で被ばくを伴わない取り扱いを可能にする、新しいトレーニングシステムを開発した。この複合現実型放射線トレーニングシステムは、物理的な世界とデジタルな世界を融合させたものである。このシステムは、複合現実感ヘッドセット（HoloLens 2）と連携し、実世界空間にサーベイメータのモックアップを構築する。HoloLens 2はブラウザベースのアプリケーションを採用し、放射線を可視化し、物理的な動きを含むサーベイメータの使用をシミュレートする。ダイナミックな学習体験を提供するため、システムは操作者の動き、放射線源からの距離、サーベイメータの応答時間、遮蔽レベルに応じて、サーベイメータの模擬測定値を調整する。このアプローチにより、トレーニング受講生がサーベイメータの測定値を解釈する実践的な技術を習得し、実環境における放射線を視覚的に理解できるようになることをされる。

研究協力者

荒川 弘之

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

A. 研究目的

電離放射線は日常生活において不可欠な役割を果たすが、取り扱いを誤ると人体や環境に深刻なリスクをもたらす。医師、診療放射線技師、医学物理士など、放射線を継続的に扱う専門家にとって、放射線の適切な取り扱いは特に重要である。放射線は、見たり、聞いたり、感じたり、味わったり、嗅いだりといった人間の感覚では検出できないため、管理が難しく専用の検出器（サーベイメータや個人線量計）で検出しなければならない。放射線についての教育者は、放射線被ばくを最小限に抑えるために、基本的な

ALARA（As Low As Reasonably Achievable）原則を採用しています。ALARAの原則は、放射線源の近くで過ごす時間を減らす、放射線源からの距離を長くする、防護のための物理的な障壁を設けるという3つの原則に基づいている。これらの対策を実施するためには、専門家は放射線の取り扱いと防護の理論的概念と実践的技術の両方を徹底的に理解しなければならない。

従来、放射線教育は、教科書による理論的な学習と、実際の放射線源を使った実践的な訓練に頼ってきた。しかし、体の動きやスキャンの速

度、放射線源からの距離、遮蔽物の有無などによって数値が変化するため、実技訓練には時間がかかる。さらに、放射線被ばくのリスクは、学習時間と共に増大する。

近年では、被ばくのリスクを排除しつつ、放射線を具体的に表現する代替学習法が提供されている。仮想現実 (virtual reality: VR) 手法は没入感のある模擬環境を作り出し、拡張現実 (augmented reality: AR) 手法は仮想要素を現実環境に重ね合わせ、複合現実 (mixed reality: MR) 手法は仮想要素と現実要素を組み合わせてフィードバックを提供する。これら 3 種類の手法は、VR/MR ヘッドセットによって拡張された効果的な教育ツールとして登場し、広く採用され、没入体験へのアクセスを可能にしている。また、WebXR 技術を利用したブラウザベースのアプリケーションは、VR、AR、MR ユーザー間のネットワーク共有を容易にし、ユーザーのアクセシビリティを向上させ、簡単なアップデートやリモートコントロールによって没入体験を豊かにしている。さらに、Web Bluetooth 技術は、ブラウザと物理デバイスをリンクするプロセスを合理化し、ネットワークとデバイスを接続するアプリケーションの開発を簡素化している。これらの技術により、学習者は、関連するリスクを伴うことなく、安全で管理された環境の中で、放射線関連の概念に取り組み、視覚化し、対話することができる。したがって、これらの技術は教育経験を向上させると考えられる。

本研究では、MR、WebXR、Web Bluetooth 技術を用いた放射線サーベイメータを解釈するための新しいトレーニングシステムを開発した。このシステムの利用者は、仮想的な放射線源を視覚化し、測定することができ、ネットワーク上でトレーニング条件を共有することができる。このシステムには、特注のサーベイメータのモックアップが含まれており、HoloLens 2 ヘッド

セット (Microsoft, Redmond, Washington, United States) とワイヤレスで通信する。MR を組み込むことで、このシステムは研修生が実世界の放射線に関する空間的・時間的理解を深めることを目的としている。外部放射線防護の基本原則に関する理論的な知識と、サーベイメータの使用方法に関する実践的な技術トレーニングが組み合わされ、理論と実践のギャップを効果的に埋める。MR は、放射線挙動を包括的に理解し、サーベイメータの取り扱いに関する実践的な技術を習得することを容易にする、模擬環境において放射線を視覚化し、放射線と相互作用するユニークな機会を提供する。

B. 研究方法

サーベイメータのモックアップは、Bluetooth で通信する ESP32-DevKitC マイクロコントローラ (Espressif Systems、中国)、キー入力装置、液晶ディスプレイ (Xiamen Zettler Electronics Co, Ltd., 中国)、ブザー (Magnetic Buzzer, PB04-SE12HPR, SPL Limited、香港) で構成されている。キー入力部には、電源オン/オフスイッチ、時定数 TC=1、3、10、30 秒、リセットボタンがある。ディスプレイには、電源オン/オフの状態、時定数[s]、模擬放射線測定値 (単位: cpm)、経過時間[s]が表示される。

MR ヘッドセット HoloLens 2 は、放射線の可視化、計算、ネットワーク接続をすべて web ベースのシステム内で行うように構成した。システムは、WebXR フレームワーク内の A-Frame と Three.js JavaScript ライブラリを使用して構築された。Web ブラウザに読み込まれると、アプリケーションはローカル環境で実行され、ネットワーク上で状態のみが共有される。MR ヘッドセットは、Bluetooth 接続を可能にする Web Bluetooth API を介して、サーベイメータのモックアップと通信します。結果のネットワーク共有中、音源までの距離、遮蔽厚

さ、測定結果は、Web Socket を介してモニタされる。これらの技術を利用して、以下のシステムコンポーネントを構築した。

可視化： 模擬放射線源は、サーベイメータのトレーニングでよく使用されるセシウム 137 である。線源（赤い球で表現）は等方的に 662 keV のガンマ線を放出する。放射線（長方形の立方体で表される）は、設定された放射線源から 20 Hz で動的にランダムに生成される。放射線は遮蔽物に当たったときのみ減衰し、一定時間（3 秒）後または放射線源から一定距離（10 m）離れたところで消滅すると仮定している。簡単のため、物質との相互作用による散乱は無視する。放射線は実際の放射線のように不可視化することができる。

時間と反応： システムは、アプリケーションの起動時、サーベイメータのモックアップからリセット信号を受信した時、時定数を選択した時の 3 つの起点から経過時間を秒単位でカウントする。選択した時定数に対するシステムの応答をシミュレートするために、指数移動平均フィルタを採用している。フィルタリングされたデータのみがモックアップに表示される。ネットワーク共有データ（フィルタリングされていないデータと検出部の移動速度）も含まれ、グラフ化さる。

遮蔽検出： 遮蔽体は、右手のジェスチャーで組み立てられる立方体として設計されている。リアルさを確保するため、遮蔽体の構造は実際のスタッキングボードを模倣している。計算を簡単にするため、積み重ねは A-Frame で定義された x、y、z 平面に平行な平面に制限されており、これらはウェブアプリケーション実行中のブラウザインターフェースに関連している。検出点が放射線源から遮蔽されている場合、計算されたフラックス ξ' [rays/min] は係数 f によって調整され、これは遮蔽物の厚みが増すにつれて減少する。セシウム 137 の半減期(h)が 4.9 cm のコンクリート遮蔽体と仮定すると、 $f=(1/2)^{(x/h)}$ を計算する。

サーベイメータモックアップのフローコンポーネントは青い背景で強調表示されており、残りのコンポーネントは HoloLens 2 で実装されている。放射線の可視化、手の位置の検出、値の計算は、HoloLens 2 内で並行して実行される。秒単位の時間変化はデータとしてネットワーク共有され、ブラウザ上で表示したりダウンロードしたりできる。

（倫理面への配慮）

本研究は、放射線の挙動を再現するソフトウェア開発に関する研究であり、人を対象とする研究ではない。そのため倫理面での問題はない。

C. 結果

HoloLens 2 ヘッドセットと製作したサーベイメータのモックアップを図 1(a)に示す。モックアップの検出ヘッドは直径 2.9 cm、長さ 21.5 cm の円筒形である。ディスプレイと解析・通信部は (10×17.5×7 cm³) の箱に収納され、ケーブルで検出ヘッドに接続されている。図 1 (b)はモックアップの表示内容例で、電源状態（オン/オフ）、時定数、カウントレート[cpm]、経過時間[s]を示す。

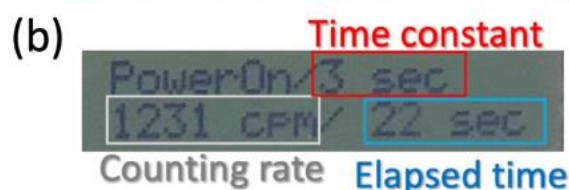


図1 開発した MR サーベイメータトレーニングシステム

(a) HoloLens2 と模擬サーベイメータ。(b)模擬サーベイメータの画面表示例。

C-1 放射線の可視化と距離の変化

図2は、線源までの距離を変えた場合の放射線の可視化を示している。図2(a)と(b)は、それぞれ HoloLens 2 のオペレータの側面図と、HoloLens 2 を線源から遠ざけたときの画面キャプチャである。

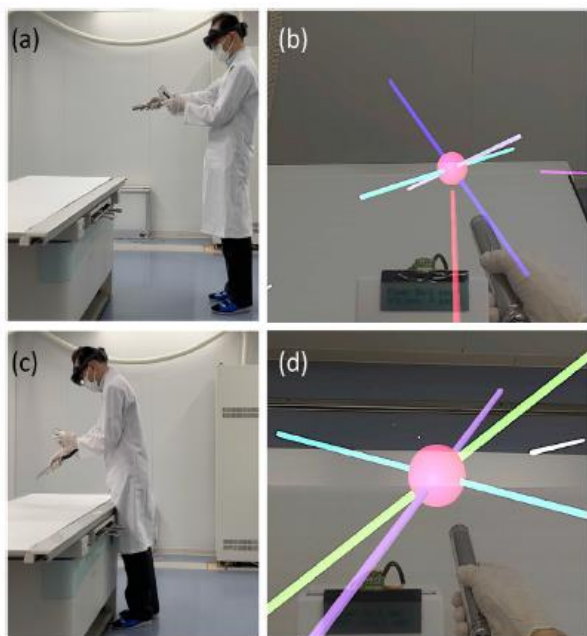


図2 放射線の可視化と距離の変化

C-2 放射線の可視化と遮蔽

遮蔽の効果は、一定の TC(3 秒)で評価された。図3は、遮蔽による放射線可視化を示している。図3(a)と図3(b)は、線源と検出点の間に遮蔽物がない場合の、HoloLens 2 と対話する操作者の側面図と HoloLens 2 の画面キャプチャをそれぞれ示している。図3(c)および図3(d)は、遮蔽がある場合の対応する画像である。

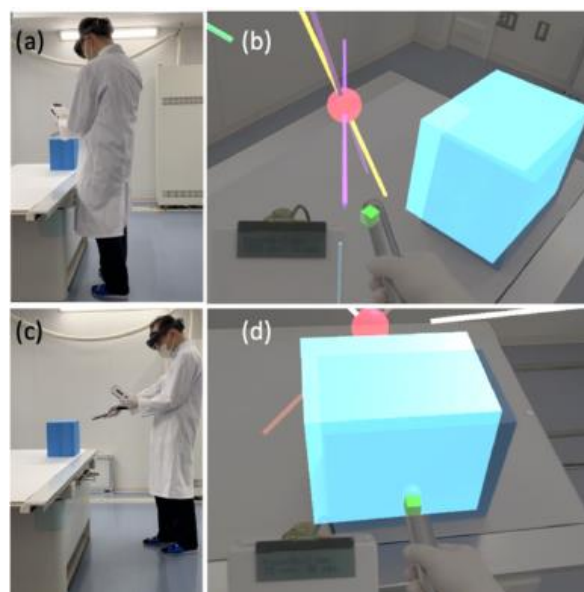


図3 放射線の可視化と遮蔽

D. 考察

本誌システムにより、放射線源を使用することなくサーベイメータの取扱い方法や特性についてトレーニングすることが可能である。線源を使用しないため被ばくすることなく、理論式に基づき距離の逆二乗則や遮蔽物による放射線の遮蔽効果、時定数の意味や使い分けについて学習することが可能である。放射線は目に見えないことから MR による放射線の可視化は、放射線の広がりイメージをつけやすくすることが出来る。

本システムの課題としては、使用した MR デバイスである HoloLens 2 が高性能である一方高額であるため、多くの受講生に対して同時使用することが難しい点が挙げられる。今後、点線源だけでなく面線源での測定や、アルファ線、ベータ線、といった他の核種による挙動の違いに対応した機能の拡張をすることで、より効果的なシステムになることが期待できる。

E. 結論

本研究では、特注の測量機モックアップを用

いた新しい測量機トレーニング法を提案した。モックアップは HoloLens 2 と呼ばれる MR デバイスと通信する。HoloLens2 で放射線を可視化し、学習者の動きを検出するために、ブラウザベースのアプリケーションを開発した。サーベイメータの応答はモックアップにフィードバックされ、ネットワークを通じて 1 秒間隔でリアルタイムにデータが共有される。時間変化する応答を確保するため、サーベイメータ入力の時定数を 1、3、10、30 秒と変化させた。模擬遮蔽により放射線量が減少し、遮蔽なしで観測された応答と変化した。HoloLens 2 は放射線のみを可視化し、放射線の値はサーベイメータのモックアップにのみ表示され、値に対応するモックアップにブザーで通知される。さらに、放射線を不可視化することで、モックアップの表示のみで、よりリアルなトレーニングを行うことができる。

本ツールによるトレーニングは、実際のサーベイメータ測定によるトレーニングに近似している。したがって、このツールは放射線防護の学習者にとって価値がある。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Kosuke Kaneko, Yoshihiro Okada, Toshiko Tomisawa, Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment, Nuclear Engineering and Technology, in press.

2. 学会発表

1. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Yoshihiro Okada, Kosuke Kaneko, Toshiko Tomisawa, Investigation of patient release examination training in nuclear medicine using Mixed Reality, JSST2024, 2024.8, (Niigata)

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

リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価

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

IVR などの医師をはじめとする放射線診療従事者や患者に比較的高い被ばくを生じさせる手技は近年増加傾向にある。本研究では X 線透視検査や非血管系 IVR における放射線診療従事者の職業被ばく低減を目的とした。そこで、深度カメラを利用した術者位置モニタリングによる X 線透視時の被ばく推定システムを開発した。初めに、検査室内の散乱線の線量分布をモンテカルロコードにより計算した。そのデータについて AR マーカーを用いて表示し、ボディトラッキングにより各関節点の位置の線量を推定した。追加で、任意の二次元断面の表示と職業被ばくの推定などの機能を作成した。その後、システムの精度の検証を行った。システムの距離の精度はカメラから遠いほど標準偏差が大きく、推定線量は実測の 0.6-1.2 倍だった。

研究協力者

本井 傳 健太 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

内視鏡的逆行性胆管膵管造影や経皮経肝胆道ドレナージなどの X 線透視検査や非血管系 IVR (Interventional Radiology) は医師をはじめとする放射線診療従事者や患者に比較的高い被ばくを生じさせる可能性がある。これは X 線透視室で働くには、通常、医療従事者が X 線管自体と主な散乱線 X 線源となる患者の両方の近くに立つ必要があるためである。また、放射線防護の観点において 2011 年に ICRP (International Commission on Radiological Protection) ソウル声明で白内障のしきい線量の変更と水晶体の等価線量限度の引き下げが勧告された。これに伴い、各国で水晶体の等価線量限度の引き下げが法令に取り込まれつつある。以上より今後はさらに放射線診療従事者の被ばく管理、放射線被

ばく防護が重要となる。しかし、臨床現場で用いられる線量計を用いた個人線量管理は全身の被ばくを測定できない、測定結果を得るのに時間がかかるなどの問題がある

また、近年モンテカルロ法によるシミュレーションを用いた X 線透視検査や非血管系 IVR の術者の被ばく線量推定に関する研究も行われている。先行研究ではモンテカルロ法で計算した三次元散乱線分布とボディトラッキング技術によりリアルタイムでの線量率や累積線量を推定している。しかし、三次元散乱線分布を利用して線量予測をしているが、天井から見た二次元の線量分布しか可視化されていない。そこで AR 技術を用いてカメラの撮影する現実空間上に散乱線分布の任意の二次元断面を可視化する

ことで散乱線の広がりにより詳細にわかり、職業被ばくの低減につながると思った。また、知識や自覚を欠いている場合人はリスクを過大または過少評価してしまう傾向にあるため、術者の線量率を表示することで術者の放射線被ばくの危険性に対する自覚が強くなり、放射線被ばくの低減に有効であると考えた。そこで、深度カメラを用いたボディトラッキング技術を利用し、散乱線分布を任意の二次元断面を可視化し、リアルタイムで職業被ばくを推定するシステムを作成することでさらに医療従事者の散乱線被ばくの防護につながる。

本研究では1年目に作成した深度カメラを利用した術者位置モニタリングによる職業被ばく推定システムの基本特性を評価した。

B. 研究方法

B-1. システムの作成

散乱線分布のシミュレーションにはモンテカルロコードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) を使用した。カメラには Azure Kinectを使用した。Azure Kinect (型番,Microsoft, America) はTOF(Time of Flight)式の深度センサが搭載されたカメラで、通常のカメラのようにRGB(Red-Green-Blue color model)画像の取得に加え、深度情報の取得や骨格認識を可能にする(Figure 1)。システム開発にはゲーム開発プラットフォームのUnityと画像処理ライブラシシステムの配置図をFig. 3に示す。



Fig.1 深度センサを内蔵するカメラ Azure Kinect Azure (Microsoft社)

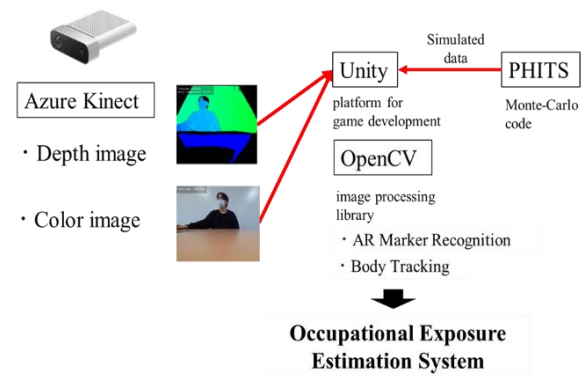


Fig 2. システムの要素と概要

Azure Kinectにより取得したX線室内の情報、PHITSによるシミュレーションデータをUnityに取り込みOpenCVを用いて処理した

Table 1. システムの開発環境

OS	Windows 10 64bit Education 16GB
CPU	Intel Core i9-9980
GPU	GeForce RTX 2080
	Unity 2020.3.8.f1
	Azure Kinect Sensor SDK 1.4.1
Software	Azure Kinect Body Tracking SDK 1.1.0
	OpenCV for Unity

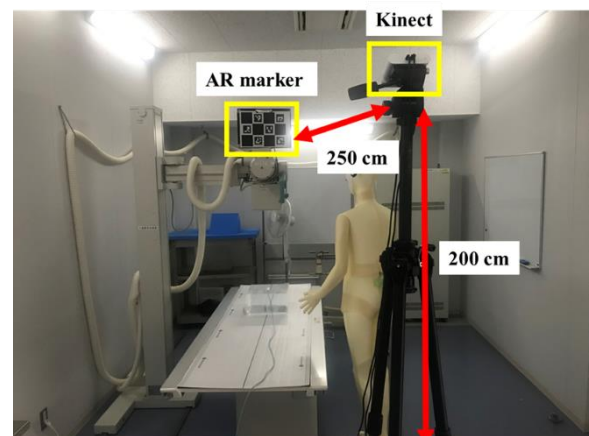


Fig 3. システムを使用するときの機器の配置
カメラの高さは200 cm、カメラとARマー

の距離は250 cm、カメラは下向きに20°

B-1-1 X線透視室内の散乱線分布計算

散乱線の挙動は MC シミュレーションコード PHITS version 3.28 を用いてシミュレーションした。光子は PHITS 内のコードシステム EGS5 (Electron-Gamma Shower version 5)を用いて輸送計算した。EGS5 は PHOTX ライブラリの最新の光子断面積を使用している。

窒素 80%、酸素 20%からなる密度 $0.001293 \text{ g cm}^{-3}$ の空気で満たした X 線検査室に X 線管、X 線源、寝台（床からの高さ 80 cm、長さ 235 cm、幅 85 cm）などから構成される X 線装置を準備した。X 線管は密度 7.874 g cm^{-3} 、厚さ 5 mm の鉄製ボックスで内部は真空である。X 線管の照射側のコリメータは密度 11.34 g cm^{-3} 、厚さ 2 mm の鉛製である。寝台は密度 1.6 g cm^{-3} のカーボン製である。さらに、フラットパネル検出器 (FPD: flat panel detector)を模した密度 2.7 g cm^{-3} のアルミニウム板を撮影部位の後方に配置した。X 線装置は鉄製である。被写体は $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の水ファントムである。照射条件は管電圧 87 kV、固有ろ過 2.5 mmAl、焦点-検出器間距離 120 cm、照射野サイズ $15 \times 15 \text{ cm}^2$ である。焦点と水ファントム表面の距離は 92.5 cm であった。

診断領域の X 線スペクトル計算ソフトウェアである Tucker's formula Version 4 (X-Tucker-4) を用いて、管電圧 87 kV、固有ろ過 2.5 mmAl の連続エネルギースペクトルを 0.5 keV 間隔で計算した。得られたデータを線源として用いた。MC シミュレーションのヒストリー数は 10^9 とした。カットオフエネルギーは、光子は 10 keV、電子は 100 keV とした。

シミュレーションでは仮想の X 線室内に一辺 5 cm の立方体を作り、その立方体を通過する光子数をカウントした。フルエンスから入射表面線量を基準とした個人線量当量への変換は、

ICRP Publ. 74 の「光子フルエンスから個人線量当量への換算係数」を用いて 1 線源あたりのフルエンスを個人線量当量に変換し、水ファントムの入射表面線量で除すことで算出した。

B.1.2 X 線検査室内の術者のボディトラッキング

Microsoft 社製の Azure Kinect を使用してボディトラッキングを行った。Azure Kinect は 32 個の体の部位を認識しボディトラッキングを行っている。このボディトラッキングした結果をソフトウェア開発プロジェクトのためのソースコード管理サービスである GitHub 上の Microsoft の Azure-Kinect-Samples を参考にゲーム開発プラットフォームである Unity 上に表示した。

B.1.3 散乱線分布の AR マーカーによる表示

Unity の VR 上に X 線装置、ファントム、散乱線分布のボリュームデータを表示した。これらのデータの表示には大きさは縦 24 cm×横 32 cm の AR マーカーを使用した。AR マーカーには様々な種類があるが、本システムでは ArUco マーカーという種類の AR マーカーを採用した。ArUco マーカーとは黒枠と識別子を決定する内側のバイナリマトリクスで構成される合成正方形マーカーである。ArUco マーカーの主な利点として検出が正確で、迅速かつ容易であることが挙げられる。AR マーカーは実際の X 線管の焦点とシミュレーションしたボリュームデータの焦点を一致させやすいように Fig. 4 のように X 線管上部に配置した。その後、AR マーカーの左下を基準として二つの焦点が一致するように座標を調整した。

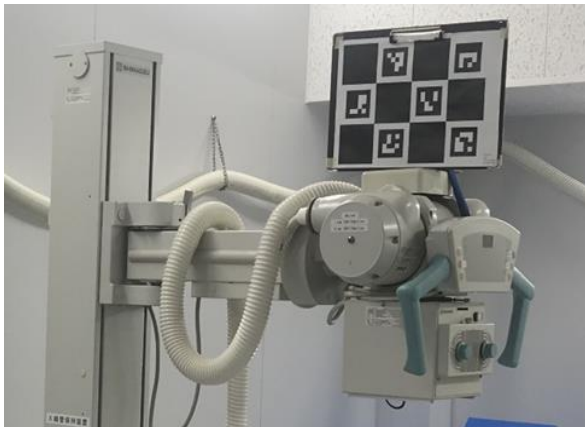


Fig 4. ArUco マーカーによる散乱線分布の表示

B.1.4 機能の作成

術者の被ばく線量を推定するために Unity の衝突判定の関数を使用した。ボディトラッキングした関節点の位置におけるシミュレーションのボリュームデータの値を表示した。また、任意の二次元断面の線量分布を表示できる機能を作成した。線量分布の表示する断面を選択する機能とカラースケールを調節する機能を作成した。さらに線量分布を滑らかに表示するためにスムージング機能を追加した。

B.2 モンテカルロシミュレーションの精度評価

PHITS により得られた散乱線分布のシミュレーションデータについて可視化ソフトウェア ParaView を用いて入射表面線量 1 mGy あたりの個人線量当量を取得した。測定位置を Fig.5 に示す。

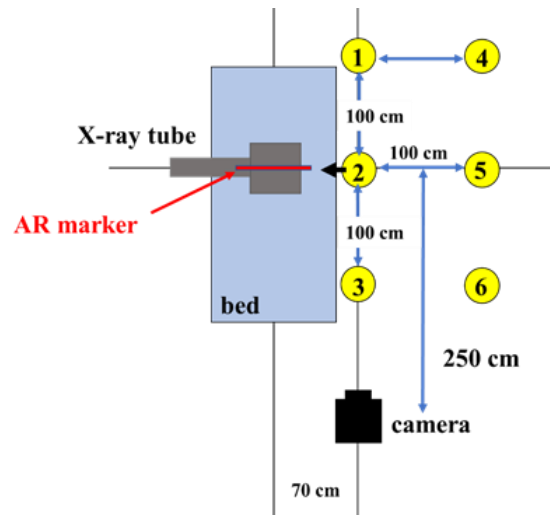


Fig 5. 使用機器の配置と測定位置

寝台の短辺方向のカメラから照射野中心の距離は 250 cm、寝台の短辺方向のカメラから照射野中心の距離は 70 cm、各測定位置の間隔は 100 cm とした。

次にインバータ式 X 線高電圧装置 UD150L-30 (島津製作所、京都府、日本) を用いて照射を行った。シミュレーションと同じ撮影条件 (Table 2) で照射した際に、RaySafe X2 (Unfors RaySafe AB, Billdal, Sweden) を用いて入射表面線量を、RaySafe i3 (Unfors RaySafe AB, Billdal, Sweden) を用いて X 線室内のシミュレーションで取得した同じ位置における個人線量当量を測定した。RaySafe X2 は照射野中心に検出部の中心が一致するように配置した。測定は測定位置ごとに 3 回行い、シミュレーション値と測定値の比較解析を行った。

Table 2. 実験における透視条件

Tube voltage	87 kV
Tube current	50 mA
Irradiation time	4 s
Irradiation field	15 × 15 cm ² (at 92.5 cm from the focus)

Source-bed	
distance	107.5 cm
phantom	water

B.3 関節点検出の精度評価

術者のボディトラッキングの精度を評価するためにマネキン SD206RE (株式会社サンクリエイト、日本) を使用した。マネキンの身長は 180 cm、表面色はアイボリーである。ボディトラッキングを正確に行うためマネキンの顔に仮面を被せた。仮面による鼻などの凹凸があることでマネキンが向いている方向が検出されやすくなる。AR マーカー右下から各関節点までの距離をシステムから取得し、レーザー距離計 GEANEE MK-LAK (株式会社 JENESIS HOLDING、東京都、日本) を用いて測定した。その後、システムから取得した距離と実際に測定した距離を比較した (Fig. 6)。測定は Fig.5 の 1、2、3、5 の位置で行った。

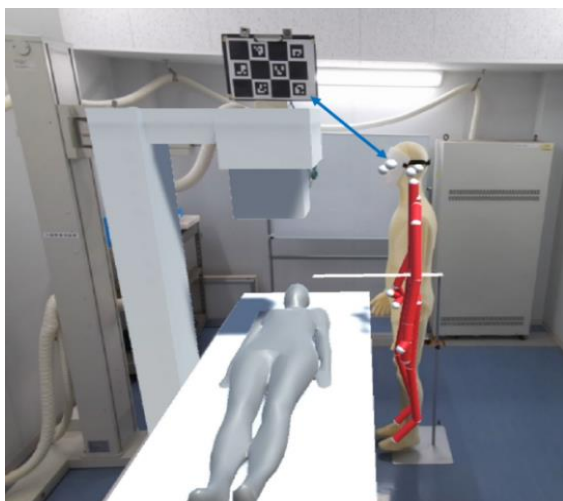


Fig 6. 測定した 2 点間の距離

図上に示す青い矢印の距離を測定した (図上では左眼)

B.4 リアルタイム性能の評価

システムがスムーズに作動するか評価するため、Unity の Stats 機能により 1 秒あたりのフレームレート (fps: frame per second) を測定し、システムのリアルタイム性能を評価した。フレームレートの測定は、術者が 25 cm/s で動く場合と動かない場合、防護エプロンの有無という 4 つの術者の条件にわたって行われた。防護エプロン SLB-25M (株式会社マエダ、東京都、日本) は前面のみを保護するもので、オレンジ色をしていた (Fig. 7)。測定結果は、Excel を用いてウェルチの T 検定をして術者の状態の違いによるフレームレートの差があるか評価した。

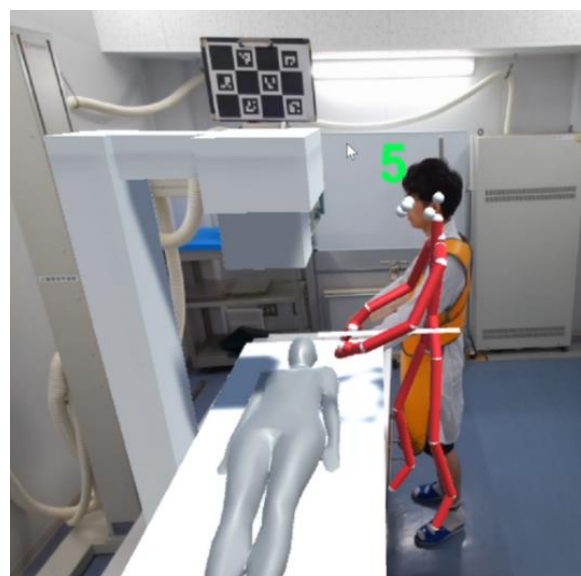


Fig 7. 防護エプロンを着てフレームレートを測定している様子

B.5 線量推定の精度評価

本システムによる線量の推定精度を評価するためにマネキンを使用した。システムが線量を取得できる 7 つの関節点 (右眼、左眼、首、胸、骨盤、右手、左手) に RaySafe i3 を取り付け、個人線量当量を測定した。RaySafe i3 は角度依存性

を示すため、主な散乱線源である水ファントムを向けてマネキンに取り付けた。このとき RaySafe i3 の計測と同時に開発したシステムを用いて個人線量当量を取得した(Fig. 8)。マネキンは Fig.5 の 1、2、3 の 3 つの測定位置で線量を測定した。各測定位置 3 回の測定を行った。その後、測定値とシステムによる推定値を比較した。



Fig 8. システムによる線量推定精度の検証における実験の配置

マネキンの関節点（右眼、左眼、首、胸、骨盤、右手、左手）に線量計を装着したマネキン、マネキンに装着した線量計ともに照射野中心を向くように配置した

（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あることから、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を実施した。

C 結果

3.1 システムの概要

開発したシステムのユーザーインターフェースを Fig. 9 に示す。左側は散乱線のシミュレーションデータが X 線室の点群データと重なって表示されている。この表示により、任意の二次元断面内の散乱線分布を観察することができる。また、散乱放射線の二次元断面を選択して表示することができ、色のスケールも調整可能である。さらに、線量分布の視覚的に観察しやすくするために、スムージング機能が組み込まれている。インターフェースの右側には、線量推定機能があり、各関節点の線量を色と数値で表示している。この値は各関節点の個人線量当量を水ファントムの入射表面線量で除した値である。

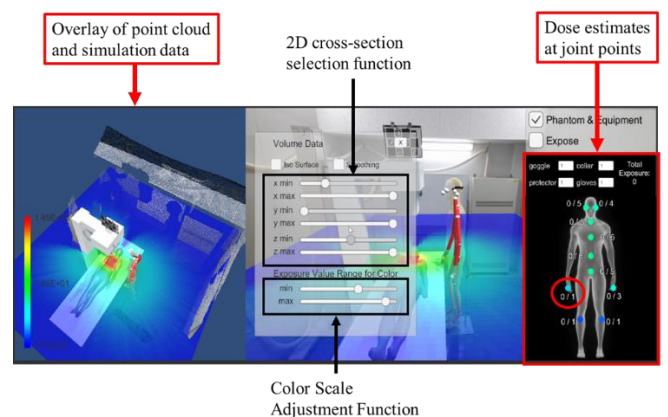
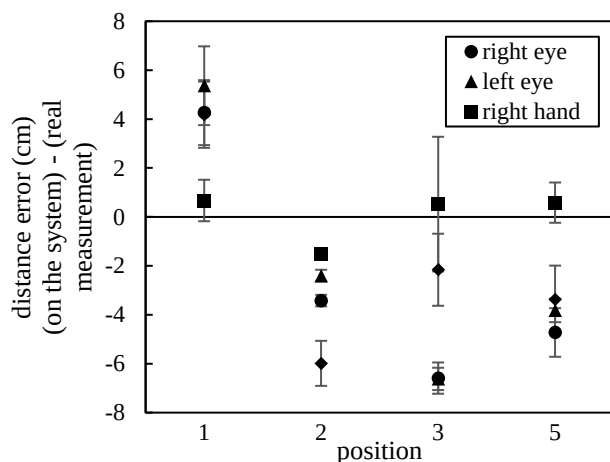


Fig 9. システムのユーザーインターフェース
左側：散乱線のシミュレーションデータと X 線室の点群データの表示。中央：色のスケール、断面選択、スムージング機能。右側：線量推定機能



C.2 モンテカルロシミュレーションの精度評価

測定位置 6 カ所、高さ 3 点における個人線量当量の実測値とシミュレーション値の比を Fig. 10 に示す。エラーバーは線量計の測定値のばらつきに起因する標準偏差を示している。実測値と推定値の比は 80% から 120% の間に収まっていた。

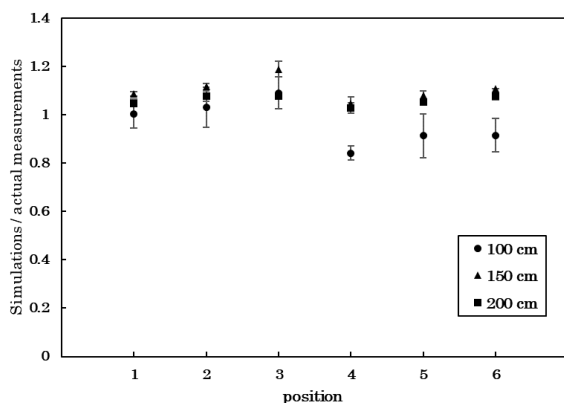


Fig 10. 各測定位置と各高さにおけるシミュレーション値と実測値の比較

C.3 関節点検出の精度評価

システムが推定した値から実測した値を引いた差を Fig. 11 に示す。カメラからの距離が遠いと推定値より実測値のほうが大きい値になる傾向がある。また、眼よりも手のほうが比較的ボ

ディトラッキングの誤差が小さい結果になった。カメラから最も遠い位置では大きい標準偏差を示している。

Fig 11. システムが推定した距離から実測した距離を差分した距離

C.4 リアルタイム性能の評価

Table 3 に術者が秒速 25 cm で動いているとき動いていないとき、防護エプロンを装着したときしてないときの平均フレームレートを計測した結果を Table 3 に示す。術者の各状態の違いによるフレームレートに有意差があるか有意水準 5% でウェルチの T 検定を行ったところ防護エプロンなしで動き有と無しの間には有意差はなかったものの他の状態の間には有意差があった。

Table 3. real-time performance evaluation

apron	motion	average flame rate (fps)
-	-	10.9±0.7
-	+	11.0±0.7
+	-	9.0±0.5
+	+	9.8±0.4

+ ... 防護エプロン有り、動き有り

- ... 防護エプロン無し、動き無し

有意差あり...SSD (statically significant difference)

有意差なし...NS (not significant)

C.5 線量推定の精度評価

線量の測定結果を Fig.12 に示す。縦軸は入射面線量 1 mGy あたりの個人線量当量を示している。線量計で測定した線量はマネキンの体表面における個人線量当量を示し、推定線量はボディトラッキングした関節点における個人線量当量を示している。Position2 は 1、3 に比べて散乱

線源である水ファントムに近いので線量が大きくなった。マネキンは手を前方に出していたため水ファントムに近く他の関節点に比べ手の線量が大きくなった。Table 4 は本システムによる推定線量を線量計で測定した線量で除した比を示したものである。線量比は各関節点で 0.60 倍から 1.21 倍であった。胸部と骨盤を除くすべての関節点で線量比は 0.93 倍から 1.21 倍であった。胸部と骨盤の 2 つの関節点では推定線量は実測値よりも著しく低く、最も低い場合の線量比はそれぞれ 0.72 倍と 0.60 倍であった。

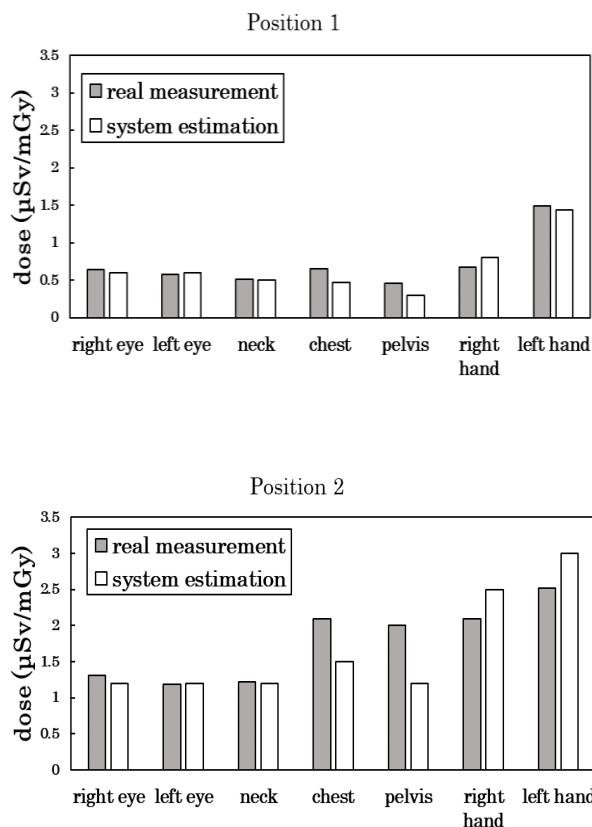


Fig 12. 各測定位置における関節点の測定線量と推定線量

Position2 は 1、3 に比べて散乱線源である水ファントムに近いので線量が大きくなった。マネキンは手を前方に出していたため水ファントムに近く他の関節点に比べ手の線量が大きくなった。

Table 7. 各測定位置におけるシステムで取得した線量を実測の線量で除した線量比

	①	②	③
right eye	0.94	0.93	0.98
left eye	1.04	1.01	1.00
neck	0.98	0.99	0.98
chest	0.72	0.72	0.78
pelvis	0.67	0.60	0.94
right hand	1.19	1.21	1.08
left hand	1.00	1.19	1.14

本システムで使用した散乱線分布の術者の胸の高さ (130 cm) の照射野中心から術者の体厚方向の線量分布を Fig. 13 に示す。マネキンの体表面は照射野の中心から約 80 cm の位置にあり、体厚は 20 cm であった。この条件下での位置の相違による線量の差はシミュレーションによると約 20% であった。

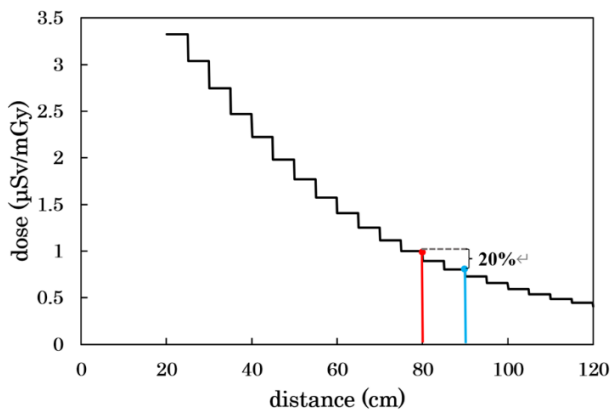


Fig 13. 術者の胸の高さにおける照射野中心から術者の体厚方向の散乱線分布

D 考察

D.1 モンテカルロシミュレーションの精度評価

理想的には実測値とシミュレーション値の比はすべての場所で 100%に保たれるべきである。しかし、測定位置のばらつき、線量計の角度依存性、シミュレーションデータの分解能などの要因により、誤差が生じることが予想される。先行研究では、80 kV で CRA (cranial) 角度を 5°、トップダウン視点で測定したアイソセンタの左側に 5 cm の患者テーブルを移動させた場合の散乱線分布の差分パーセントを評価したところ、約 20%以内に収まった報告がある。X 線室内で再現した散乱線分布の精度は、先行研究で観察された誤差と同様に差分パーセント約 20%以内であった。

D.2 関節点検出の精度評価

ボディトラッキングの標準偏差は眼よりも手の方が比較的小さい。これはマネキンがカメラに対して横を向いているため、眼のボディトラッキングが困難であるためと考える。カメラから最も遠い位置の測定値が大きい標準偏差を示

している。これは Azure Kinect の WFOV unbind モードを利用しているためと考える。WFOV unbind モードは、広視野での高解像度撮影を可能にする。WFOV unbind モードの公称測定距離は 0.25 m から 2.88 m であるが、カメラから最も遠い Position1 ではカメラとマネキンの距離が 3.5 m である。これは WFOV unbind モードの公称測定距離を大幅に超えている。その結果、大きな標準偏差となったと考えられる。これらの結果からシステムを作動させる場合には、公称測定距離を考慮しなければならない。

D.3 リアルタイム性能の評価

J. Troville らによると防護エプロンを装着した場合でも腰、首、頭のボディトラッキングが失敗することはないとされている。本研究では防護エプロンなしで動き有と無しの間には有意差はなし、他の状態の間には有意差があるという結果になったものの、作成したシステムでも同様にボディトラッキングは正しくおこなわれていた。今回検証した条件ではシステムのリアルタイム性を著しく低下させるものはなかった。

D.4 線量推定の精度評価

胸部と骨盤の 2 つの関節点では推定線量は実測値よりも著しく低かった。この差は胸部と骨盤の体厚が他の測定された関節点に比べて厚いことが原因であると考えられる。Fig.13 に示すように 10 cm の測定位置のずれで約 20% の線量の誤差が発生する。本システムが体幹部をボディトラッキングするのに対し、実際の測定は体表面の線量を測定するという測定位置の相違が線量比に大きく影響したと考えられる。

D.5 本システムの有用性と課題

本研究で開発したシステムはボディトラッキングと散乱線の可視化技術を活用し、散乱線と

術者の位置との関係を、VR 内でリアルタイムに把握することができる。その結果、本システムは安全上のリスクとなる高線量被ばくの可能性がある場所を直感的に把握できる貴重なツールである。さらに、従来の個人線量計は体の特定の部位に基づいて被ばく線量を測定していた。しかし、本研究の衝突判定を用いたアプローチにより、線量計の位置に関係なく術者の指先や頭部などの被ばく線量をリアルタイムで推定することが可能となる。これらの機能により X 線検査室内における散乱線の理解が深まるため、放射線防護教育に有用であると考えられる。

本研究では 1 種類の装置と特定の照射条件を使用した。多様な臨床現場の条件に対応するためには、他の装置と照射条件を含む追加のシミュレーションが必要である。さらに、臨床現場では防護板が広く使用されていることを考慮すると、これらの防護板を組み込んだシミュレーションが必要である。このシミュレーションには膨大な時間がかかるため、多様な臨床現場の条件に対応するために事前にデータをシミュレーションする必要がある。さらに、手技中の照射条件が変化した際にシミュレーションしたデータを差し替える方法を検討する必要がある。

本研究のシステムでは、散乱線分布の事前にシミュレーションしたデータを利用している。これは事前に術者のいない X 線検査室内の散乱線をシミュレーションしたデータであるため、術者の位置に対応した散乱線分布の変化は考慮されていない。術者の位置による散乱線の乱れを推定するために、アプリケーション(X-Scatter-STK-3)を使用した。アプリケーションによると本システムで使用した条件において散乱体から 50 cm 離れた位置では最大 0.2%の散乱線が増加する可能性がある。距離の逆 2 乗則に従い 10 cm 離れた位置では散乱線が最大 5%増加させる可能性があると予想される。本研究で使用した線

量計は角度依存性を示し、マネキンからの後方散乱の測定には限界がある。本研究においてはマネキン表面の線量を線量計で測定している。そのため、マネキンにからの後方散乱の影響は本研究において推定線量と測定した線量ともに考慮されていない。しかし、実際には術者の位置により散乱線分布は変化するため、推定システムの改善、線量の評価方法の検討が必要である。

また、現在の線量推定システムの精度は満足できるものではないと考えられ、特に胸部と骨盤部における線量推定精度を向上させる必要性がある。線量率の推定精度を向上させる方法についてさらなる検討が必要である。

E 結論

開発したシステムは深度カメラを用いたボデイトラッキングにより、散乱線分布の任意の 2 次元断面を点群データ上に表示することができ、リアルタイムでの線量推定が可能となった。線量推定に使用した散乱線分布のシミュレーションデータは、実測値と比較して 20%の誤差を示した。システムのフレームレートは約 10 fps であり、リアルタイム性能を示した。本システムは複数の関節点の線量を線量計で測定した線量の 0.6 倍から 1.2 倍で推定することに成功した。本システムはリアルタイムでの線量推定が可能となったため、放射線防護教育で重要な散乱線の挙動の理解に役立つと考えられる。

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

1. Kenta Honiden, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Development of an Occupational Exposure Estimation System during X-ray Fluoroscopy by Body Tracking Using a Depth Camera. 7th International Symposium on the System of Radiological Protection, Tokyo, November 6-9, 2023

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

半導体式散乱線可視化カメラの基本特性評価

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

本研究の目的は、半導体式放射線可視化カメラによる透視手技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、その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線透視を撮影した。撮影条件のうち、ピンホールコリメータ径、ファントムの有無、照射野の大きさ、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の際の最適な照射条件を知ることができた。また、撮影と同時に検出器の位置での線量率も測定して同様に比較した。散乱線の大小の変化とともに、線量率も大小の変化を生じていることも確認した。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	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
李 孝眞	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
荒川 弘之	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

A. 研究目的

透視手技においては散乱線による術者の被ばくが多く、その低減対策が求められる。リアルタイムで散乱線源が分かれば適切な防護具の配置を検討できるため、これまでも放射線イメージングについての研究が進められてきた。これまで用いられた検出器の一つにコリメータを必要としないコンプトンカメラがある。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った。リアルタイムイメージ

ングの先行研究においてはCs-137といった線源に対して行われればリアルタイム表示が実現した。イメージングプレートをを用いた先行研究2)においては、可視光画像との重ね合わせによりファントム表面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 CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)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。シリコンセンサを搭載したこのカメラの特徴は、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。

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 線透視の撮影を行い、撮影条件を変化させ出力画像を比較し、散乱線のイメージングに適切な条件を明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

B-1. 使用機器

本研究で使用するのは、図 1 に示す ADVACAM 社製の放射線可視化カメラセット MiniPIX EDU KIT であり、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。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 (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 (Time of Arrival) もしくは各ピクセルの電荷蓄積時間 (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. 放射線可視化カメラ MiniPIX Edu

X 線透視 C アーム装置には FUJIFILM 社製の DR CALNEO CROSS を用いた。ピンホールコリメータは図 2 に示す EMF ジャパン社製の純タングステン EMF123-1 型コリメータセットのうち直径 0.4 mm、0.8 mm、1.6 mm 径のものを使用した。カメラの位置における周辺線量当量率の測定に、半導体式サーベイメータ Unfors RaySafe 社製 RaySafe X2 を用いた。このサーベイメータは空間線量測定における性能が従来の電離箱式サーベイメータと比較して再現性、エネルギー依存性、線量率依存性、線量直線性について同等であると報告されている。図 3 のようにサーベイメータはスタンドに固定して検出器の隣に設置し、検出器とほぼ同じ位置での線量率を測定した。図 4 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 枚取り付け付けた。その他には京都科学社製の骨盤部ファントム(41926-080)、画像処理には ImageJ ver.153k を使用した。





図 2. タングステン製ピンホールコリメータ

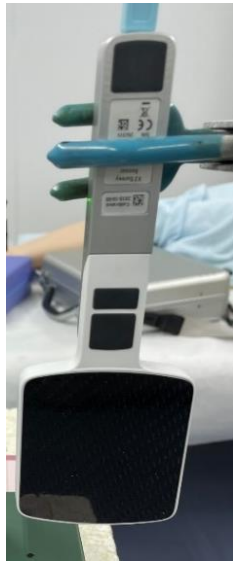


図 3. 線量率測定の様子



図 4. 鉛板による遮蔽の様子

B-2. 照射条件

照射条件は、管電圧 70 kV、管電流 6.0 mA、パルスレート 8 fps とし、これらは一般的な透視手

技に用いられている条件に合わせた。照射時間 60 s、検出器-ピンホール間距離 1.0 cm、ピンホール径 1.6 mm、照射野半切、照射方向 AP とした。各機器の配置は図 5 に示す通りであり、それぞれの距離は X 線管-寝台間 80 cm、寝台-検出器間 200 cm、検出器-床間 80 cm とした。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。

B-3. ピンホールコリメータ径の違いによる評価

図 4 のようにカメラ前方に設置するピンホールコリメータの直径を 3 通り (0.4 mm、0.8 mm、1.6 mm) 変化させて評価した。

B-4. ファントムの有無による評価

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。この評価法と次の評価法においては結果の見やすさのために出力を大きくし、照射条件を管電流 10 mA、パルスレート 15 fps とした。またこれら 2 つの実験においては検出器と同じ位置における線量率も測定した。

B-5. 照射野範囲の違いによる評価

透視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も大きい範囲 (半切 35.6 cm × 43.2 cm) と最も小さい範囲 (15 cm × 15 cm) に設定して撮影を行った。



図 5. 各機器の配置

B-6.画像処理

実験から得られたデータは 256×256 のデータであるが、B-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 (File/ Import/ Text Image)、それをカラー表示した (Image/ Lookup Tables/ 16 colors)。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 (Process/ Filters/ Median)。平滑する値は2.0ピクセルとした。結果のうち、上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 (Process/ Image Calculator/ Add)ものである。一方で下はデータに対して先述の2度の平滑化処理を行わずに画像化したものである。

(倫理面への配慮)

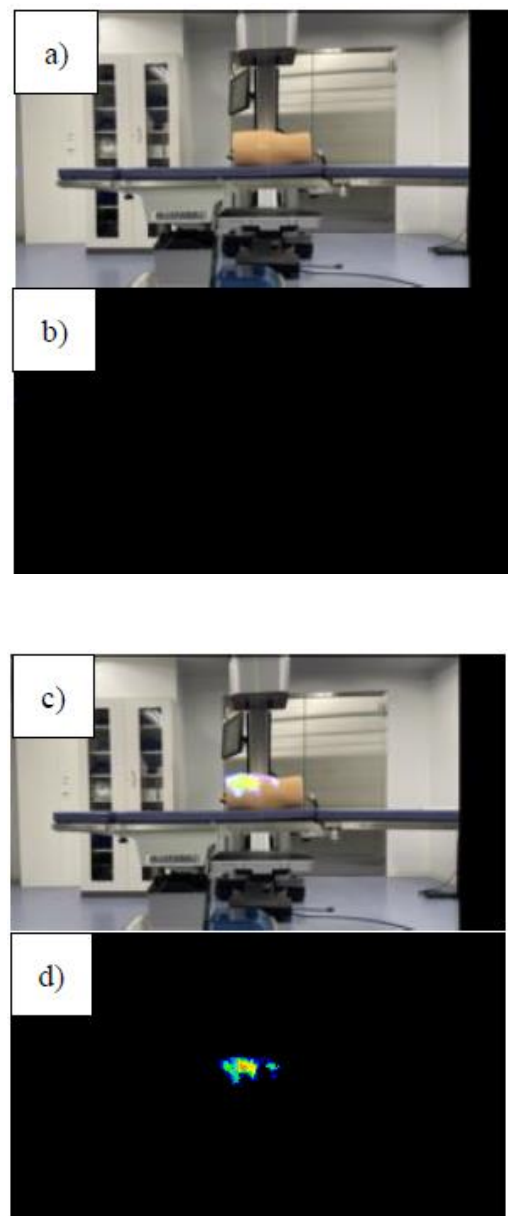
本研究は、人を対象とする研究ではない。X線を使用する研究であることから、研究者が被ばくする恐れのある可能性があるため、放射線防護対策をした上で研究を実施した。

C. 結果

C-1.ピンホール径による違い

ピンホール径を 0.4 mm、0.8 mm、1.6 mm と2倍ずつ大きくしてその結果を比較した結果を図6に

示す。0.4 mm の場合において視野内で散乱線は確認されなかった。0.8 mm の場合にはファントム表面での散乱が確認できた。さらに径を2倍した 1.6 mm においては 0.8 mm の場合に比べてファントムにおける散乱線がより多く確認された。また、他の2つの条件では確認できなかったX線管内の散乱も確認できた。このように 1.6 mm が最も感度がいいことが確認されたため、B-4. と B-5. では 1.6 mm 径のピンホールコリメータを用いて実験を進めた。



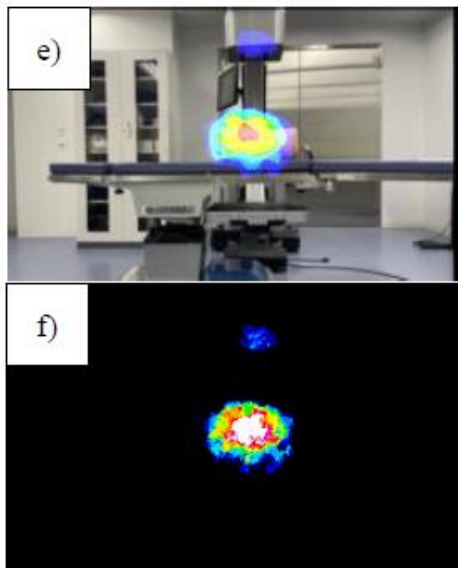


図 6. コリメータ径による違い a, b) 0.4mm, c, d) 0.8mm, e, f) 1.6mm

(上段は光学カメラ画像との重ね合わせ、下段は放射線可視化カメラの画像。)

C-2.ファントムの有無による違い

ファントム有りとはファントム無しの結果を比較すると、ファントムをなくすと X 線が寝台を透過して FPD と相互作用を起こして散乱線が発生していることを観察できた。また、ファントムの有無で X 線管内の散乱の様子に大きな変化は見られなかった。線量率に注目するとファントム有りが $155 \mu\text{Sv/h}$ 、ファントム無しが $74 \mu\text{Sv/h}$ とおよそ 2.1 倍の差が生じた。

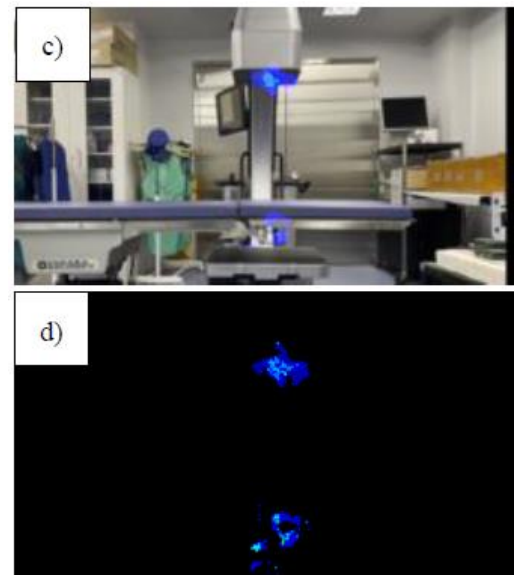
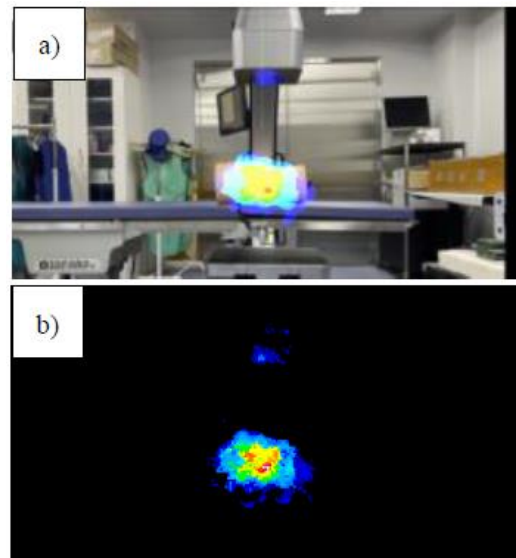


図 7. ファントムの有無による違い a) b) ファントム有り、 c) d) ファントム無し
(a), c) は光学カメラ画像との重ね合わせ、b), d) は放射線可視化カメラの画像。)

C-3. 照射野の大きさによる違い

照射野が $35.6 \text{ cm} \times 43.2 \text{ cm}$ (半切サイズ)の場合と $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ の場合で実験を行った。ファントム表面では散乱線が減少するが、X 線管内の散乱線は増加した。線量率に注目すると前者では $155 \mu\text{Sv/h}$ 、後者では $65 \mu\text{Sv/h}$ であり、2.3 倍の差があった。照射野の面積を比較すると $35.6 \text{ cm} \times$

43.2 cm (半切サイズ)の場合は $1.54 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 、15 cm $\times$ 15 cm の場合は 225 cm^2 であり 6.8 倍の差があった。

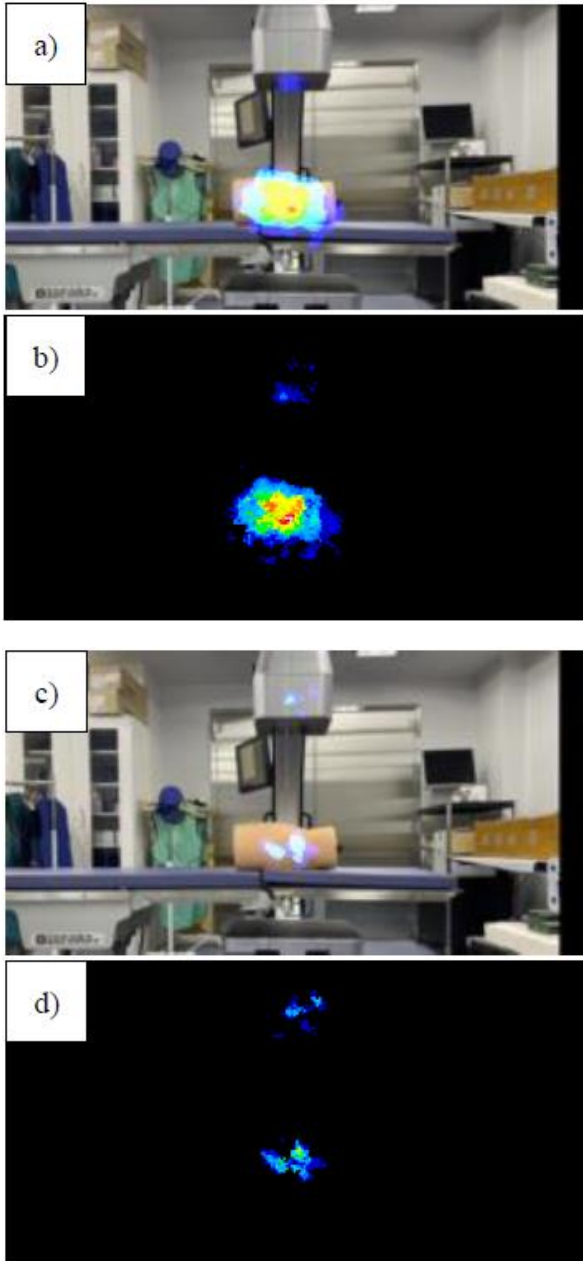


図 8. 照射野の大きさによる違い a) b) 35.6 cm $\times$ 43.2 cm (半切サイズ) c) d) 15 cm $\times$ 15 cm
(a), c) は光学カメラ画像との重ね合わせ、b), d) は放射線可視化カメラの画像。)

D. 考察

D-1. 結果の考察

i) ピンホール径による違い

ピンホール径を大きくすると、ピンホールコリメータを通過する散乱線量が増加するため検出器が検出する散乱線量も増加する。従って径以外を同じ条件で撮影した場合、大きな径のピンホールコリメータを使用するほど感度が上昇し散乱線源がはっきりと見やすくなる。今回用いたピンホールコリメータセットでは最も大きいものが 1.6 mm 径であったためこの条件で実験を行ったが、他のコリメータを検討する必要がある。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¹¹⁾も有用であると考ええる。

ii) ファントムの有無による違い

ファントム有り無しの場合を比較して、透視手技における主な散乱線源はファントムであることが確認できた。X 線が物質中の電子と衝突して散乱 X 線が発生する、というコンプトン散乱の原理を物質 (ここではファントム)の有無で示されたと言える。また X 線は寝台を透過しやすく、FPD との相互作用によっても散乱線が発生していることも確認できた。

また、サーベイメータでの測定値の差は 2.1 倍であるが出力画像を比較するとそれ以上の差があるように見受けられる。これは検出器に対しては前方に鉛遮蔽を施している一方で、サーベイメータは遮蔽を施さずに計測したことが原因であると考えられる。そのためサーベイメータにはファントムや X 線管以外からの散乱線、例えば室内の空気との相互作用による散乱線³⁾、床や壁、実験台からの散乱線が入射し、実際よりも大きな線量率が得られた可能性がある。

iii) 照射野の大きさによる違い

照射野を小さくした場合にファントムにおける散乱線が減少するのは、ファントムに当たる X 線量自体が減るためである。一方で X 線管内の散乱線の増加については、内向きに移動する照射野絞りとの散乱が原因であると考えられる。35.6 cm × 43.2 cm (半切サイズ)の場合では全開である照射野絞りが、15 cm × 15 cm の場合では縦横方向ともに照射野中心に向かってスライドして出てくる。そのため照射野絞りと散乱を起こす X 線量が増加して、X 線管内の散乱が増加したように見えると考えられる。

また、この実験では線量率と照射野面積の変化量において差が見られる。線量率の差は 2.3 倍、照射野面積の差は 6.8 倍である。X 線管から出た放射線は放射状に広がり、そのすべてがファントムに当たり散乱するわけではない。従って線量率と照射野面積の変化量の差が開くと考えられる。

iv) その他の考察

図 6.f)と図 7.b)を比較すると、管電流とパルスレートも大きくした図 7.b)のほうが散乱線が多く発生しているはずであるが出力画像を見ると逆の結果であった。ファントムで生じた散乱線において、図 6.e)ではファントム上部 (腹部表面)において散乱線量が多い表示であった。しかし図 7.a)ではファントム下部 (寝台に近い部分)において散乱線量が多い結果であった。この差が生じた理由としてピンホールやカメラがずれたためであると考えられる。再現性を高めるためにピンホールとカメラを一体化して固定できる土台が必要である。

また、光学カメラの画像との重ね合わせの精度も課題である。今回は寝台の高さを変えて撮影し (60 cm と 80 cm)、実際の 20 cm のずれと画像上でのピクセル値でのずれをもとに中心と拡大率を合わせた。しかし図 7.c)を見ると下部の散乱は空

気で生じているように見える。実際は FPD で生じている散乱線であり、画像において 12 ピクセルほどのずれが生じている。各機器は墨出し器を用いて高さ合わせをしているため、機器自体の高さに違いはなく、機器の高さ以外の位置合わせに問題があるだろう。今回は放射線可視化カメラの撮影が終わるごとに、同じ位置にスマートフォンを設置し撮影してこれを条件ごとに繰り返した。この入れ替えの際にずれが生じたと考えられるため、今後は検出器の横における小型カメラを用いて撮影を行い、移動に伴うずれをなくした方法を実施するべきである。

D-2.今後の進展

散乱線源の可視化をよりリアルタイムに近づけるには、感度を上げる必要がある。具体的には 1.6 mm 径よりも大きいピンホールコリメータを用いること、検出器の側方や上方にも鉛遮蔽を施すこと、ファントム-検出器間距離を近づけること、Median フィルタ以外の他の平滑化フィルタを用いること、などが挙げられる。Median フィルタは出力画像の鮮鋭度が低下する欠点¹²⁾があり、それを補う方策を検討すべきである。また、出力画像と線量率の差も小さくしなければならない。サーベイメータにも検出器同様の遮蔽を施して、ファントムや X 線管内における散乱線のみを検出できる方法を検討する必要がある。

E.結論

一連の実験を通して、放射線可視化カメラを用いて透視手技における散乱線源の位置とその強弱分布を確認することができた。コリメータ径、ファントムの有無、照射野範囲の各条件の違いにより、散乱線分布の変化を画像と線量率の両方の結果から確認することができた。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工夫が必要であると言える。

射線医療技術学術大会、2023. 11（大分）

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

1. 境 真由、李 孝眞、藤淵 俊王、荒川 弘之、コンプトンカメラと半導体カメラによる X 線透視での散乱線源のリアルタイムイメージングの検討、第 18 回九州放

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

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
藤淵 俊王	3章 従事者の管理	長畑 智政	医療領域の放射線管理マニュアル - Q&A・医療関係法令 - (2023年版)	医療放射線防護連絡協議会	名古屋	2023	63-76
藤淵 俊王	被ばく管理	富士政広、五十嵐 博	診療放射線技師 スリム・ベータシックス 医療安全管理学	メジカルビュー	東京	2023	65-77

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
Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa	Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy	Radiological Physics and Technology	17	288-296	2024
藤淵 俊王	九州循環器撮影研究会誌	IVRにおける放射線防護教育について	34	30-33	2024
Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Kosuke Kaneko, Yoshihiro Okada, Toshiko Tomisawa	Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment	Nuclear Engineering and Technology	In press	10.1016/j.net.2024.01.057	2024
Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Takashi Yoshinaga	Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display	The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Conference Proceedings		284-287	2023

Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Kosuke Kaneko, Yoshihiro Okada, Toshiko Tomisawa	Investigation of patient release examination training in nuclear medicine using Mixed Reality	The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Conference Proceedings		288-291	2023
---	---	--	--	---------	------