

NICU ポータブル X 線撮影における 散乱 X 線源の特定と防護策の検討

**Discussion of radiation protection measures through identification
of scattered X-ray sources during portable radiography in an NICU**

鉢呂 七海¹ 小山内 暁^{2,†} 畠山 蒼舞^{1,*}
細川 翔太² 対馬 恵² 山口 一郎³
細田 正洋² 工藤 幸清²

Nanami HACHIRO¹ Minoru OSANAI^{2,†} Aoi HATAKEYAMA^{1,*}
Shota HOSOKAWA² Megumi TSUSHIMA² Ichiro YAMAGUCHI³
Masahiro HOSODA² Kohsei KUDO²

キーワード：散乱 X 線、ピンホールカメラ、NICU、保育器、職業被ばく

Key words : scattered X-ray, pinhole camera, NICU, incubator, occupational radiation exposure

要旨：新生児集中治療室（neonatal intensive care unit: NICU）でのポータブル X 線撮影では、保育器（以下「クベース」とする）のカバー越しに患児に X 線を照射するため、複雑な散乱 X 線分布を呈すると予想される。防護策の検討には、各散乱 X 線源を特定する必要があるが、線量測定のみでは評価困難である。本研究では、自作の鉛製ピンホールカメラを用いたファントム実験にて、NICU でのポータブル X 線撮影時の散乱 X 線源を可視化し、職業被ばく管理の適正化に資することを目的とした。患児ファントムに一次 X 線を照射し、介助者位置での散乱 X 線によるピンホール像を得た。患児ファントム以外に、クベースや X 線管の面積線量計からも無視できない散乱 X 線が発生していることが確認された。また、線量測定により、クベース表面の高さ付近で散乱 X 線量が多いことが明らかとなったため、防護の最適化の観点で、介助者は当該位置に顔を近づけない、X 線管の射出窓部へ防護カーテンを装着するといった対策が望まれる。

Mobile radiography in a neonatal intensive care unit (NICU) is expected to show a more complex distribution of scattered X-rays because the child patient is exposed to X-rays through an incubator cover. To discuss appropriate protective measures, it is necessary to identify each source of the scattered X-rays; however, this is difficult using only dose measurements. The study purpose was to use a self-made lead pinhole camera in a phantom study to visualize the scattered X-ray sources during portable radiography in an NICU with the goal of contributing to the optimization of occupational exposure management. The patient phantom was irradiated with primary X-rays and

1 弘前大学医学部保健学科 Hirosaki University School of Health Sciences

2 弘前大学大学院保健学研究科 Hirosaki University Graduate School of Health Sciences

3 国立保健医療科学院生活環境研究部 Department of Environmental Health, National Institute of Public Health

* 現所属：青森県総合健診センター Aomori General Health Examination Center

† 連絡先：小山内暁 (ominoru@hirosaki-u.ac.jp)

a pinhole image was obtained from scattered X-rays at the medical staff position. We observed that non-negligible scattered X-rays were generated not only from the patient phantom but also from the incubator cover and the dose-area product meter attached to the exit part of the X-ray equipment. The dose measurements also revealed that scattered X-ray doses were higher at the level of the incubator surface. Thus, for optimization of protection, it is desirable to take precautions such as preventing medical staff from approaching the aforementioned high-exposure positions and attaching protective curtains to the collimator cover of the X-ray tube.

I. はじめに

2011 年の国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) による勧告を踏まえ^{1,2)}、我が国でも 2021 年度に水晶体の等価線量限度が大幅に引き下げられたことから^{3,4)}、現在、職業被ばく管理がますます重要視されている。個人モニタリングサービスを提供している 2 社のデータ⁵⁻¹⁰⁾をもとに、年間 20 mSv (現行の水晶体等価線量限度である 100 mSv/5 年を平均化した値に相当) を超える医療従事者数を集計すると、2021 年度 1,466 人、2022 年度 909 人、2023 年度 688 人であった。その数は年々減少傾向にはあるが、2023 年度においても依然として線量限度超過者が多くみられる。放射線防護の基本原則にある「防護の最適化」¹¹⁾の考えに基づき、合理的に達成可能な限り被ばく線量を低くするべきであり、医療スタッフに対する防護措置の適正化が求められる。新生児集中治療室 (neonatal intensive care unit: NICU) では、酸素管理や感染対策等の目的で多くの患児に対して保育器（以下「クベース」とする）が使用されるため、X 線検査はポータブル X 線装置を用いて行われるが、長期入院の場合にその頻度が高くなることがある¹²⁻¹⁴⁾。患児の動きを抑制するために医療スタッフの介助が必須であるが、医療スタッフからは X 線検査時の放射線に対する不安の声が挙げられている¹³⁾。閉鎖型のクベースでは、クベース越しに患児に X 線を照射するため、散乱 X 線分布が複雑になると予想される。ポータブル X 線装置の X 線管容器に防護カーテンを吊り下げるによって被ばく低減を検討した報告があるが^{15, 16)}、散乱 X 線を完全に遮へいすることは難しいため、散乱 X 線の発生源を意識した対策を講じる必要がある。放射線測定器による線量評価では、散乱 X 線の発生源別の寄与を詳細に評価することが困難であることから、散乱 X 線の発生源を把握するにはその可視化が有用である。これにより、散乱 X 線に対して、より効果的な防護策を取ることがきるようになるだけ

なく、介助者の不安軽減にもつながるものと考える。

鉛製のピンホールカメラによって散乱 X 線源の可視化が可能であることが知られている¹⁷⁻²⁰⁾。これは、ピンホールを通過した散乱 X 線をイメージングプレート等の受像器上に結像させることによって散乱 X 線源の像を得るものである。我々の知る限り、NICU でのポータブル撮影を対象としたピンホールカメラによる散乱 X 線源の特定に関する報告はない。

II. 目的

本研究では自作の鉛製ピンホールカメラを用いて、NICU でのポータブル X 線撮影時の散乱 X 線源を特定し、医療スタッフの職業被ばく管理の適正化に資することを目的とした。

III. 研究方法

患児を模擬した自作水ファントムをクベース内部に配置し、ファントムに一次 X 線を照射して、医療スタッフの介助位置に配置したピンホールカメラにより散乱 X 線によるピンホール像を取得した。また、防護カーテンや面積線量計の有無それでも検討を行った。さらに、電離箱式サーベイメータを用い、各高さにおける線量評価も行った。

1. 鉛製ピンホールカメラの作製

木製の箱 (幅 300 mm × 奥行 240 mm × 高さ 325 mm) の内面に 2 mm 厚の鉛板を貼付し、箱の前面中心部を円形の空洞として、ピンホール (3 mmΦ) を開けた 1 mm 厚の鉛板を設けた。その内部でピンホールから 50 mm の位置に、六切サイズのカセット入りのイメージングプレート (以下「IP」とする) を挿入して撮影する構造とした。ピンホールカメラの模式図を図 1 に示す。

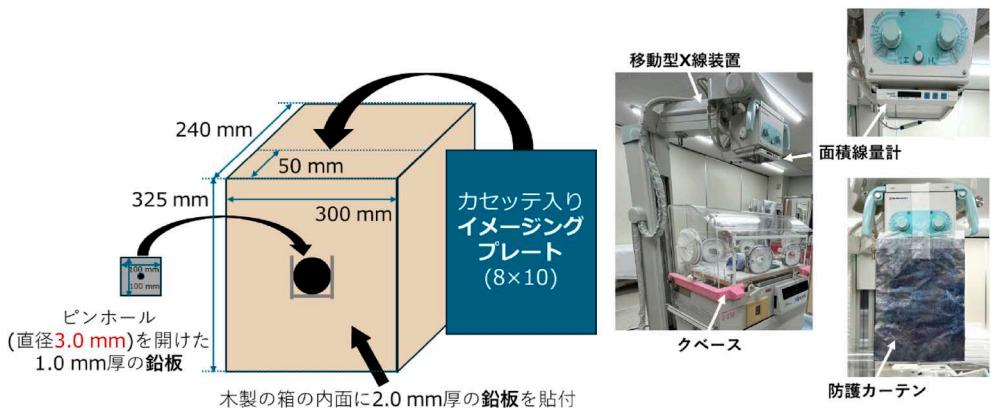


図1. 作製したピンホールカメラの模式図と面積線量計・作製したカーテンの拡大図

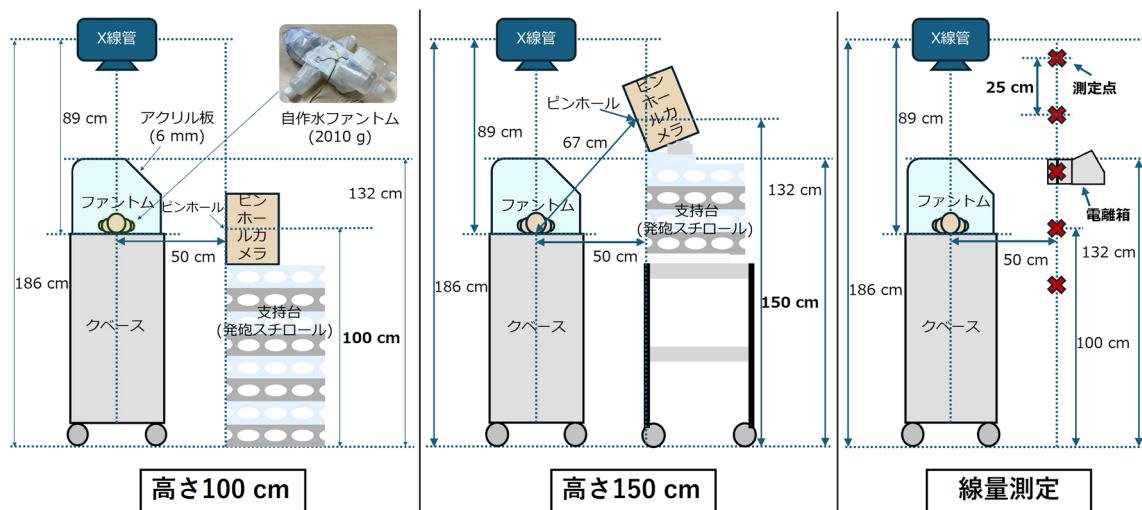


図2. ピンホール像取得及び線量測定時の配置

2. 使用機器及び装置

1) クベース

閉鎖型保育器はアクリル厚が6mmであるV-850(アトムメディカル)を使用した。

2) 移動型X線装置・面積線量計

移動型X線装置はMOBILEART eco(総ろ過:3.0mmAl、株式会社島津製作所)、面積線量計はVacuDAP compact(Jpiジャパン株式会社)を用いた。なお、面積線量計は、X線の出口に取り付けられ、X線出力のモニタのために使用されるものである。

3) 患児ファントム

水を満たした樹脂製容器やゴム風船で四肢、体幹部、頭部を模し、それらを組み合わせて自作水ファントム(2,010g)とした(図2参照)。

4) 防護カーテン

0.5mm厚の鉛板を縦340mm×横250mmにカットし、X線装置の可動絞りカバー部に装着可能な防

護カーテンとした。サイズは先行研究^{15,16)}を参考にし、クベース天井部に到達する長さとした。

5) 電離箱式サーベイメータ

LUCREST ICS-1323(アロカ株式会社)を使用した。なお、エネルギー特性は、¹³⁷Csに対し±15%以内(30keV~1.5MeV)と示されている。

6) CR装置

ピンホール像の読み取りに必要なCRシステムはFCR CAPSULA-2/C@RNACORE station(富士フィルムメディカル株式会社)を使用した。

3. ピンホール像の取得

ピンホールカメラの配置は、介助者位置を想定し、照射野中心軸からピンホールカメラの支持台前面までの距離を50cmとした。床からピンホールまでの高さは100cm(一般的な空間線量の測定位置であり、生殖腺や腹部臓器に近い)または150cm(水

晶体の高さを想定)とした(図2左および中央)。照射条件は管電圧60kV、管電流時間積63mA・s、照射野 $20.1 \times 25.2\text{ cm}^2$ とした。移動型X線装置を用いて患児ファントムに一次X線を20回照射し、ピンホールカメラでIPに散乱X線成分を積算した。その後、CR装置を用いてIPを読み取りピンホール像を取得した(S値:4093、L値:3.42)。取得したピンホール像をImageJでカラー表示し、色相によって散乱X線強度を相対的に評価した。

4. 線量測定

電離箱式サーベイメータを用いて、防護カーテンの有無それぞれで撮影1回当たりの散乱X線量($H^*(10)$)を測定した。照射条件は管電圧60kV、管電流時間積1mA・sとした。測定点は床から高さ75~175cm(25cm間隔)の計5点とし、図2右に×印で示した。

5. 散乱X線源部分の画素値解析

ピンホール像の散乱X線源部分の画素値(最大値)を計測し、背景の画素値に対する相対値(比率)を求め、散乱X線の寄与の程度を推定した。

6. 光学ピンホール像の撮影

散乱X線源の位置を特定するために、先行研究を参照し²⁰⁾、IPの光によるフェーディング現象(形成された画像情報が退行する現象)²¹⁾を利用することにより、散乱X線像と同じ画角の全景像(光学ピンホール像)を撮影し、散乱X線像と合成した。配置は散乱X線像の取得時と同様とし(図2左)、ピンホールカメラ内に一次X線照射済み(40kV、0.5mA・sで1度照射した後にX線管長軸方向の向きを反転させて再度照射)のIP(カセッテなし)をセットした。室内照明下でピンホールを通過した可視光を3時間露光することで、フェーディング現象により光のコントラストが付いた光学ピンホール像を得た¹⁹⁾。その後、透明度80%とした散乱X線によるピンホール像を光学ピンホール像上に重ねて合成した。なお、散乱X線像と光学ピンホール像の照合精度を上げるため、光学ピンホール像取得時のIP(カセッテなし)位置は、散乱X線像を取得した際のカセッテ内のIP位置と同じになるよう調整を行った。

IV. 結果

1. 散乱X線によるピンホール像

1) 高さによる違い

高さ100cmおよび150cmで得られたピンホール像(面積線量計あり、カーテンなし)を図3に示す。図3には、全景写真として、スマートフォンで撮影した光学レンズ写真と光学ピンホール像を併せて示している。高さ100cm、150cmのそれぞれで、射出窓部、クベース、ファントム、空気からの散乱X線が観察された。高さ100cmではクベースの2層のアクリルそれぞれから散乱X線が発生している様子が観察された。また、ピンホール像上で、クベースとファントムの散乱X線源部分のカラースケール上の色相(画素値に紐づく)や範囲はおおよそ同等であった。高さ150cmではファントムよりもクベースや射出窓部分が赤色寄りの色相を呈しており、画素値が高い(散乱X線強度が大きい)ことを示した。また、高さ150cmでは、高さ100cmよりも射出窓部、クベースの散乱X線源部分は赤色寄りの色相を呈しており、強度が大きい散乱X線が観察された。ファントムの色相に着目すると、ファントム表面が、より赤色寄りの色相を呈しており、表面からの散乱X線が多く認められた。

2) 面積線量計、カーテンの有無による違い

面積線量計またはカーテンの有無それぞれで得られたピンホール像を図4に示す。高さ100cmでカーテンありの場合、射出窓部からの散乱X線は観察されなかったが、クベースやファントムからの散乱X線は、カーテンなしの場合と同じく観察された。高さ150cmでカーテンありの場合、射出窓部からの散乱X線が観察されなかっただけでなく、クベースからの散乱X線も大幅に認められなくなつたが、一部、観察された。

高さ100cm、150cmとともに、面積線量計なし(カーテンなし)の場合、面積線量計ありの場合よりも、射出窓部からの散乱X線による露光範囲は縮小した。さらに、高さ100cmでは、面積線量計なしの場合は、ありの場合よりも青色寄りの色相を呈し画素値の低下もみられた。

2. 介助位置での各高さの散乱X線量

線量測定で得られた結果を図5に示す。カーテンなしの場合では、125cm、150cmで散乱X線量が高く、ともに $0.22\mu\text{Sv}$ であった。カーテンありの

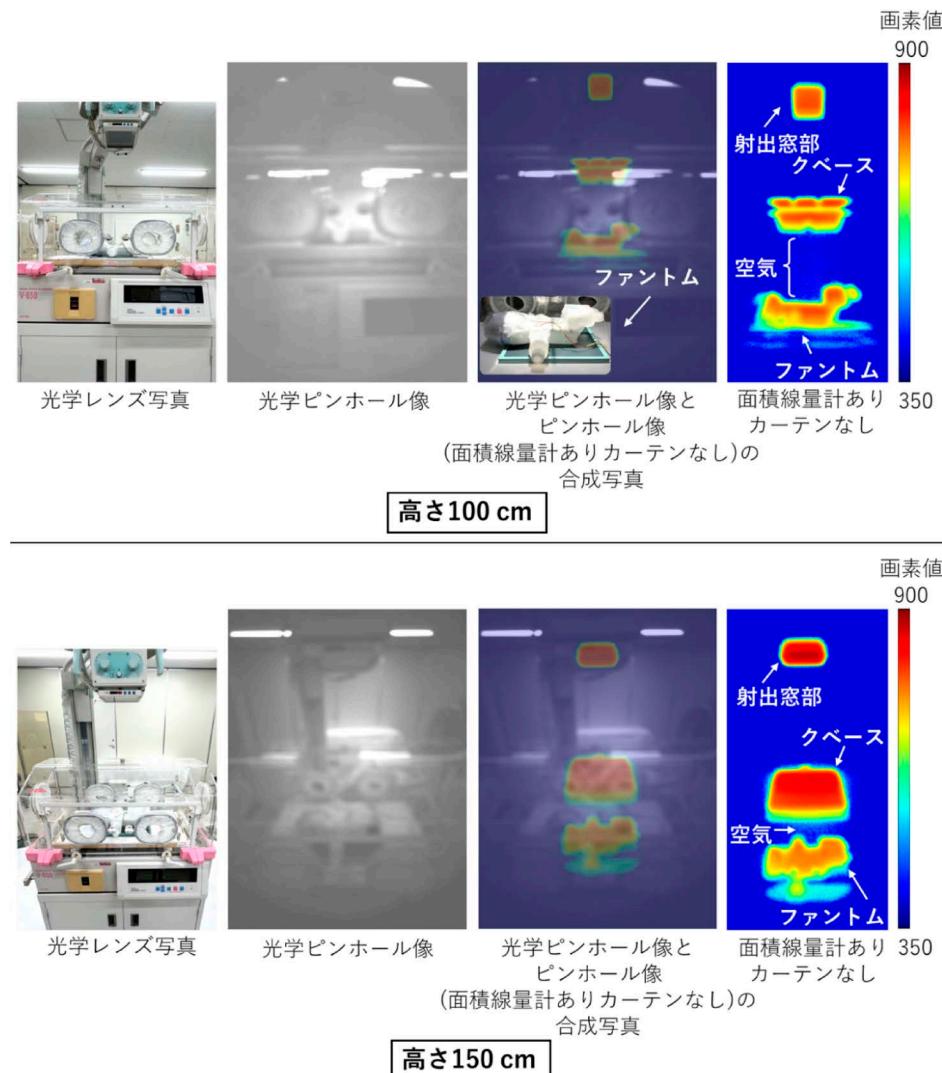


図3. 高さ 100cm と 150cm での各ピンホール像と全景（面積線量計あり・カーテンなし）

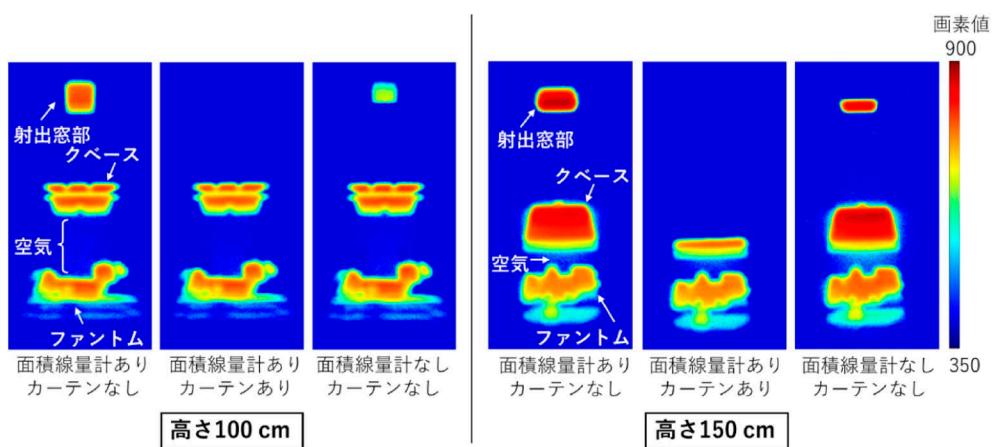


図4. 面積線量計やカーテンの有無による散乱 X 線源の違い

場合では、測定点 5 点の全てでカーテンなしよりも線量が減少し、最も散乱 X 線量が高かったのは高さ 125cm の $0.15 \mu\text{Sv}$ であった。遮へい率でみると、

150cm、175cm の遮へい率が順に高く、75~125cm の遮へい率は 3 割程度であった。

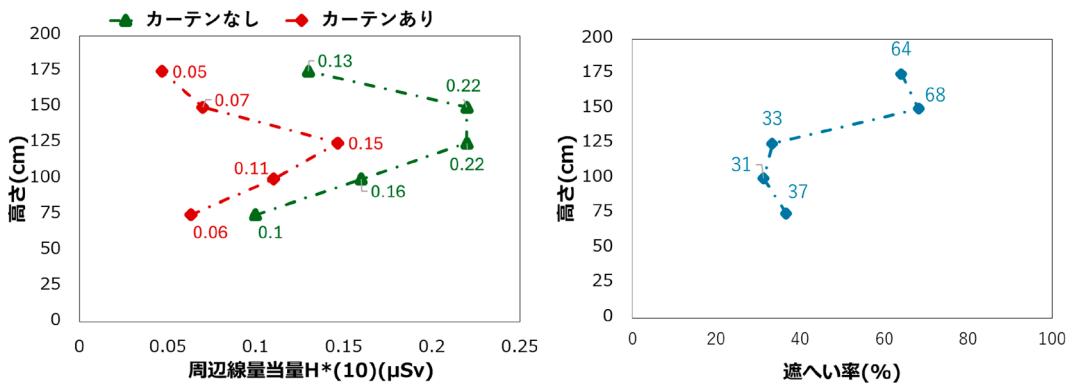


図5. カーテンの有無による各高さの散乱X線量とカーテンの遮へい率

3. 散乱X線源部分の画素値

射出窓部、クベース、ファントムの背景に対する画素値の比率（面積線量計あり・カーテンなしの場合）は、高さ100cmでは2.01、2.02、2.01で、いずれも同等の画素値であった。また、高さ150cmでは、同じくそれぞれの比率が2.21、2.16、1.95で、射出窓部、クベースの比率がファントムよりも高値を示し、かつ、100cmよりも高値を示した。

V. 考察

NICUでのポータブルX線撮影では、患児の体格の小ささゆえに、成人に対するX線検査よりも低い線量で検査が行われる²²⁾。そのため、撮影時の散乱X線量もさほど多くはないものと考えられるが、X線管や患児に近い位置での医療スタッフの介助が必要であることに加え、撮影の頻度も高いことから、防護の最適化の余地がある。職業被ばく管理の充実化が求められるなか²³⁾、医療スタッフに対する放射線防護教育の重要性が増している^{24,25)}。放射線に馴染みの少ない人に対する教育では、視覚的な情報を用いることで理解が深まることが示唆されている^{26,27)}。医療スタッフに対する放射線教育では、可視化された放射線防護に関するデータを提示することで、より適切な防護策の検討が可能になったり、いたずらな不安を軽減できたりする可能性があることから、本研究では、ピンホールカメラを用いて、NICUでのポータブルX線撮影時の散乱X線源の可視化を行った。

今回の検討で得られたピンホール像から、ファンтомだけでなく射出窓部やクベース、空気からも散乱X線が発生していることが明らかとなった。線量と画素値に相関はある（IPへの入射線量の増加

に伴い画素値が上昇する）ものの比例関係にはないため、ピンホール像から散乱X線の寄与を定量的に評価することは困難であるが、防護カーテンなしの場合（高さ100cm）、クベースの散乱X線源部分はファントムと同等の画素値や範囲を示したことから、クベースからファントムと同等の強度の散乱X線が発生していることが示唆された。高さ150cmでは、クベースや射出窓部の散乱X線源部分がファントムよりも赤色寄りの色相を呈した。さらに、高さ100cmと比べると、クベースや射出窓部は100cmよりも赤色寄りの色相を呈しており、この高さでは、クベースや射出窓部からの散乱X線の寄与が大きいものと考えられた。このことは、クベースや射出窓部の画素値の比率の結果を見ても矛盾しない。

防護カーテンを装着した場合、高さ150cmでは、射出窓部だけでなくクベースからの散乱X線も大きく遮へいされたが、高さ100cmではクベースからの散乱X線は遮へいされなかった。線量測定において、撮影1回当たりの散乱X線量（カーテンなしの場合）は、高さ125cm、150cm（クベース表面付近に相当）で最大の0.22μSvを示しており、これはクベース、X線管の射出窓部、患児ファントム等からの散乱X線によるものと考えられた。一般的な胸部ポータブル撮影時の2m位置（散乱X線量は無視できるほどに小さいと言われている距離）での散乱X線量が、撮影1回当たり0.07～0.30μSv²⁸⁾であることを踏まえると、今回の最大線量の0.22μSvは絶対値としては決して高くはない。しかし、繰り返し介助を行うことを考慮すると、最適化の観点から、合理的に達成可能な限り被ばく線量を低減させる対策を取るべきであると考える。カ-

テンありでは、高さ 150 cm、175 cm で散乱 X 線が 6・7 割程度遮へいされたが、高さ 75～125 cm での遮へい率は 3 割程度であった。ピンホール像の結果からも、高さ 100 cm ではクベースからの散乱 X 線はカーテンによって遮へいされておらず、高さ 75～125 cm における遮へい率の低さは、ファントムだけではなく、クベース由来の散乱 X 線にもよるものと考えられた。カーテンをより長くしたり位置調整をしたりすることにより、クベースからの散乱 X 線をさらに低減できる可能性がある。

面積線量計の有無による違いとしては、面積線量計なしの場合、散乱 X 線源部分の範囲が縮小した（高さ 100 cm では画素値も低下した）ことから、面積線量計も有意な散乱体であることが確認された。一方で、面積線量計は患者の線量管理の面で重要な役割を果たすことから、装着しないという選択肢は現実的ではなく、防護カーテンによる対策が望ましいと考える。また、面積線量計を用いない別の線量評価方法を検討する意義もある。

得られたピンホール像の画質について考察する。本研究で得られたピンホール像は、野呂ら²⁹⁾による透視装置を対象としたものよりも画質が低く、輪郭が不明瞭であった。野呂らのピンホール像は管電圧 80 kV、管電流 100 mA、照射時間 1.0 sec、撮影回数 15 回であるのに対して、本研究では管電圧 60 kV、管電流時間積 63 mAs、撮影回数 20 回であり、管電圧と管電流時間積（mAs 値）が小さいため、発生する散乱 X 線量が少なく、画質に影響を与えたものと考えられた。撮影回数を 20 回よりも増やすことで画質は良くなると予想されるが、移動型 X 線装置の X 線管の負荷を考慮し、今回は照射回数を 20 回とした。最良の画質ではないものの、散乱 X 線の発生源を評価するには問題なく、今回のピンホール像の撮影条件は十分に適切な範囲にあったと考える。

次に、以上の本研究で得られた所見を踏まえ、看護的視点で介助を行う際に取るべき防護策を検討する。介助者の被ばく低減のためには、撮影条件の最適化、個人防護具や遮へい体の利用、介助者に対する適切な補助のための指導、放射線教育などが重要である。本研究では介助者への指導や教育に効果的であると考えられる散乱 X 線源の可視化・特定を行うとともに、散乱 X 線測定を行い、遮へい体としてカーテンの有用性を評価した。NICU でのポー

タブル撮影時の散乱 X 線量は高くはないものの、頻度の高い介助を想定した場合には、放射線防護衣（いわゆる鉛エプロン）や放射線防護メガネといった個人防護具着用を基本とすることが望ましい。クベース表面の高さ付近（高さ 125 cm、150 cm）ではクベース表面や患児、X 線管射出窓等からの散乱 X 線によって空間線量が高いため、介助の際は、状況に応じて、クベース表面の高さ付近に顔を近づけない（腕を伸ばしてできるだけ顔を離すことなどが効果的であるかもしれない）ように心掛けるべきであろう。さらに、ファントムについては、表面からの散乱 X 線が優位であることから、介助の際は、可能な範囲で患児の表面や照射野から手指を遠ざけることも介助者の皮膚被ばく低減策のひとつである。また、先行研究^{15, 16)}や今回の検討のように、防護カーテンの使用も防護策のひとつとして挙げられる。その際には、介助時に患児の観察の妨げにならないような工夫をするといった実用性とのバランスを考慮することも重要である。また、介助者の被ばく低減には、介助者の教育も極めて重要であり、本研究で示したピンホール像は視覚的な情報として放射線防護教育にも有用である可能性が高いため、教材等としての活用も望まれる。今後、NICU の看護師等を対象として、ピンホール像の有用性や不安軽減効果に関する検証を行いたい。

VI. 本研究の限界

今回使用したクベースは最新型のタイプではない。最新型のクベース³⁰⁾と比べるとアクリル壁の形状が異なるため、散乱 X 線の動態が異なると考えられる。最新型のクベースであっても、X 線の特性を踏まえると、アクリル壁が有意な散乱体となることに変わりはなく、今回の結果の一般化に大きな問題はないと考えられるものの、アクリル厚の違いや最適化に関する検討も今後の課題である。また、線量測定においては、実効線量に関連のある $H^*(10)$ による評価を行ったため、低エネルギーの散乱 X 線による水晶体や皮膚への影響を詳細に評価することは困難である。

VII. 結論

ファントム以外にクベースや射出窓部等からも無視できない散乱 X 線が発生していることが視覚的に確認できた。また、散乱 X 線量はクベース表面

付近で高かった。これらの知見をもとに、介助時の姿勢や個人防護具、防護カーテンの使用方法を検討することが望まれる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、NICUでのポータブルX線撮影について御助言くださった、弘前大学医学部附属病院医療技術部放射線部門の成田将崇様、小原秀樹様、鈴木将志様、寺島智子様ならびにピンホールカメラの作製に尽力くださった、弘前大学医学部保健学科放射線技術科学専攻卒業生の田村梨菜様（現社会医療法人医仁会中村記念病院）、田中智妃路様（現岩手県立大船渡病院）、三上葉月様（現青森市民病院）に心より感謝申し上げます。

研究助成

本研究は令和5年度・令和6年度弘前大学若手研究者支援事業、JSPS科研費JP22K10435の助成を受けたものです。

利益相反

本研究における開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) International Commission on Radiological Protection. Statement on Tissue Reactions. ICRP ref 4825-3093-1464. 2011.
- 2) International Commission on Radiological Protection. ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissue and organs Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context, Publication 118. Annals of the ICRP. 2012, 41(1-2). 1-322.
- 3) 放射線審議会. 眼の水晶体の放射線防護検討部会. 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について. 2018年. <https://www.nra.go.jp/data/000226076.pdf> (検索日: 2025年1月30日).
- 4) 厚生労働省. 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会. 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書. 2019年9月. <https://www.mhlw.go.jp/content/11303000/000549964.pdf> (検索日: 2025年1月30日).
- 5) 千代田テクノル. 令和3年度個人線量の実態. FBNews No.549. 2022年9月1日. https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/FBN549_202209web2.pdf (検索日: 2025年4月7日).
- 6) 千代田テクノル. 令和4年度個人線量の実態. FBNews No.561. 2023年9月1日. <https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2023/08/FBN561.pdf> (検索日: 2025年4月7日).
- 7) 千代田テクノル. 令和5年度個人線量の実態. FBNews No.573. 2024年9月1日. <https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2024/08/FBN573.pdf> (検索日: 2025年4月7日).
- 8) 長瀬ランダウア. 2021年度眼の水晶体の等価線量の集計／頭頸部用ルミネスパッジ着用者数推移. NLだより No.539. 2022年11月. https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/2022/no539.pdf (検索日: 2025年4月7日).
- 9) 長瀬ランダウア. 2022年度眼の水晶体の等価線量の集計・頭頸部用ルミネスパッジ着用者数推移. NLだより No.551. 2023年11月. https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/2023/no551.pdf (検索日: 2025年4月7日).
- 10) 長瀬ランダウア. 2023年度眼の水晶体の等価線量の集計／頭頸部用ルミネスパッジ着用者数推移. NLだより No.563. 2024年11月. https://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/pdf/2024/no563.pdf (検索日: 2025年4月7日).
- 11) International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103. Annals of the ICRP. 2007, 37(2-4). 1-332.
- 12) Ono K, Akahane K, Aota T, et al. Neonatal doses from X ray examinations by birth weight in a neonatal intensive care unit. Radiation Protection Dosimetry. 2003, 103(2). 155-162.
- 13) 瑞木恵一, 小野孝二, 羽田道彦, 他. NICUにおける移動型X線装置撮影時の散乱線測定と医療スタッフの放射線に関するアンケート調査. 大分県立病院医学雑誌. 2000, 29. 71-80.
- 14) Kim TH, Ryu JH, Jeong CW, et al. Reduced radiation dose and improved image quality using a mini mobile digital imaging system in a neonatal intensive care unit. Clinical Imaging. 2017, 42. 165-171.
- 15) 竹谷 明, 高木 玲, 石田 悟, 他. NICUポータブル撮影における防護具の作成. 日本放射線技術学会雑誌. 2023, 79(4). 321-330.
- 16) 竹谷 明, 高木 玲, 山本彰規, 他. NICUポータブル撮影における防護具の改良. 日本放射線技術学会雑誌. 2023, 80(2). 166-174.
- 17) 田原義弘, 川井恵一, 下新原茂, 他. 散乱X線・可視光同時撮像ピンホールカメラの開発と透視中散乱線の撮像. RADIOISOTOPES. 2006, 55. 247-252.
- 18) 宮村聖也, 浦橋信吾, 加村鉄郎, 他. ピンホールカメラとCR装置を利用した診断域X線における散乱線像の作成. 日本放射線技術学会雑誌. 1995, 51(6). 702-709.
- 19) 小山内暢, 田村梨菜, 田中智妃路, 他. ピンホールカメラによる単純X線撮影・CT検査・IVR時の散乱X線発生源の可視化. 日本放射線看護学会誌. 2024, 12(2). 44-53.

- 20) 林 裕晃, 谷内 翔, 神谷尚武, 他. 輝尽性蛍光体プレートを用いたピンホールカメラの開発と散乱X線分布および可視光画像の撮影. 日本放射線技術学会雑誌. 2012, 68(3). 307–311.
- 21) 大内浩子. イメージングプレートのフェーディングについて. 保健物理. 1999, 34(1). 52–55.
- 22) 医療被ばく情報研究情報ネットワーク (J-RIME). 日本の診断参考レベル (2020年版). 令和2年7月3日. https://j-rime.qst.go.jp/report/JapanDRL2020_jp.pdf(検索日: 2025年4月3日).
- 23) 医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン—水晶体の被ばく管理を中心に—. 2020年. https://www.kyoto-msc.jp/book_suishoutai2020/book/#target/page_no=1(検索日: 2025年4月3日).
- 24) 藤淵俊王. 医療分野における職業被ばくと放射線防護—放射線診療従事者の不均等被ばく管理—. 保健物理. 2018, 53(4). 247–254.
- 25) 増島ゆかり, 野戸結花. IVRに従事する看護師の職業被ばくに対する認識と放射線教育に関する調査. 日本放射線看護学会誌. 2018, 6(1). 12–21.
- 26) 荒川弘之, 徳森謙二, 亀澤秀美, 他. 放射線防護教育を目的としたX線撮影室における散乱線の可視化. RADIOISOTOPES. 2018, 67. 11–15.
- 27) 小山内暢, 細川洋一郎, 対馬 恵, 他. 新たな「放射線被ばくの早見図」の提案—対数表示から面積表示へ—. 保健科学研究. 2017, 8(1). 9–15.
- 28) 日本アイソトープ協会. 改訂版 看護と放射線. 丸善出版, 東京, 2021.
- 29) Noro T, Osanai M, Hosokawa S, et al. Assessment of air dose distribution in the vertical plane for better occupational exposure management. Radiation Protection Dosimetry. 2024, 200(16–18). 1542–1546.
- 30) アトムメディカル株式会社. 保育器インキュ ia. https://www.atommed.co.jp/product/cat_neonatology/031.html(検索日: 2025年4月4日).