

外科用X線撮影装置における軟線除去フィルタを使用した術者被ばく線量の検討

Investigation of Surgeon Exposure Dose Using a low energy X-ray removal filter in Surgical X-Ray Imaging System

松下 英史^{1)*}, 荘司 学¹⁾, 布施 智也¹⁾, 藤井 智希²⁾, 平野 高望^{3),4)}, 本寺 哲一^{3),4)},
安田 光慶^{4),5)}, 佐藤 久弥^{4),6)}

- 1) 昭和大病院 (現 昭和大医科大学病院) 放射線技術部 診療放射線技師
2) 博士 (保健医療学) 昭和大病院 (現 昭和大医科大学病院) 放射線技術部 診療放射線技師
3) 修士 (保健医療学) 昭和大病院 (現 昭和大医科大学病院) 放射線技術部 診療放射線技師
4) 昭和大 (現 昭和大医科大学) 保健医療学部 大学院保健医療学研究所
5) 博士 (保健衛生学) 昭和大藤が丘病院 (現 昭和大医科大学藤が丘病院) 放射線技術部 診療放射線技師
6) 博士 (保健衛生学) 昭和大病院 (現 昭和大医科大学病院) 放射線技術部 診療放射線技師

Key words: spine surgery, fluoroscopy, metal filter, exposure measurement, surgeon exposure dose

【Abstract】

In this study, we investigated the effect of a retrofitted low energy X-ray removal filter on patient and surgeon radiation doses in a surgical X-Ray imaging system used in minimally invasive spine surgery for the treatment of spinal diseases. Fluoroscopy was performed with and without a low energy X-ray removal filter (8 mm and 11 mm), and the operator and patient surface doses were measured at heights of 1500 mm, 1300 mm, and 500 mm from the floor. The use of a low energy X-ray removal filter reduced the patient surface dose by up to 40%, while the surgeon's dose decreased by 12.4% on the tube side and increased by 91.6% on the detector side. The estimated annual surgeon's dose with the increased dose was within the occupational dose limit.

【要旨】

本研究では、脊椎疾患治療における低侵襲脊椎手術で使用される外科用X線撮影装置に後付けの軟線除去フィルタを適用し、患者および術者の被ばく線量の影響を検討した。軟線除去フィルタ (8 mm・11 mm) 未使用時、使用時で透視を行い、床面から1500 mm、1300 mm、500 mmの高さにおける術者被ばく線量および患者表面線量を測定した。軟線除去フィルタの使用により患者表面線量は最大40%減少したが、術者被ばく線量はX線管側では12.4%減少、検出器側で91.6%増加した。線量が増加した場合の術者の年間推定被ばく線量は、職業被ばく線量限度を超えない範囲であった。

MATSUSHITA Eishi^{1)*}, SHOJI Manabu¹⁾,
FUSE Tomoya¹⁾, FUJII Tomoki, PH.D.²⁾,
HIRANO Takaho, MS^{3),4)},
HONDERA Tetsuichi, MS^{3),4)},
YASUDA Mitsuyoshi, PH.D.^{4),5)}, SATO Hisaya, PH.D.^{4),6)}

- 1) Department of Radiological Technology, Showa University Hospital (Currently Showa Medical University Hospital), Radiological Technologist
2) Department of Radiological Technology, Showa University Hospital (Currently Showa Medical University Hospital), Radiological Technologist
3) Department of Radiological Technology, Showa University Hospital (Currently Showa Medical University Hospital), Radiological Technologist
4) Graduate School of Health Sciences, Showa University (Currently Showa Medical University)
5) Department of Radiological Technology, Showa University Fujigaoka Hospital (Currently Showa Medical University Fujigaoka Hospital), Radiological Technologist
6) Department of Radiological Technology, Showa University Hospital (Currently Showa Medical University Hospital), Radiological Technologist
* E-mail: eishi.m@cmed.showa-u.ac.jp

Received January 8, 2025; accepted May 16, 2025

緒 言

わが国において、脊椎疾患は年々患者数が増加している疾患の一つであり、脊柱管狭窄症・腰椎変性すべり症・椎体骨折などの疾患は脊椎固定術による治療の適応となる¹⁾。従来の脊椎固定術では、後方より皮膚を大きく切開し筋組織を椎弓から剝離させ、椎弓を削ることで椎体固定および椎弓根スクリュー挿入をする術式が標準的であった²⁾。しかし、この従来の術式は皮膚や筋組織に対して侵襲的であり術後の生活予後に与える影響が大きいことから、近年では低侵襲脊椎固定術である経皮的椎弓根スクリュー (percutaneous pedicle screw: PPS) 固定術が多く施行されるようになってきた²⁾。PPS固定術では、X線透視下で挿入するPPSの使用により、皮膚の切開や筋組織の剝離を最小限にとどめることで侵襲性の低い手技を行うことが可能である²⁾。

このような低侵襲脊椎手術の精度を向上させるには、外科用X線撮影装置によるX線透視の頻回な使用が必要となり、患者と術者双方への放射線被ばくを増

加させる可能性がある^{3),4)}。X線透視においては、従来、後付けの金属フィルタ（軟線除去フィルタ）の使用により低エネルギー側の軟線成分を選択的に除去することで、画質を維持しながら患者への放射線被ばくを低減させる方法が用いられてきた^{5),6),7),8)}。一方、外科用X線撮影装置からの一次放射線が可動絞りの軟線除去フィルタに照射されることで、フィルタからの散乱線の発生や、一次放射線の実効エネルギー上昇による術者被ばく線量の増加が懸念される。特に脊椎手術においては術中における術者の立ち位置が外科用X線撮影装置のX線管に近いことから、軟線除去フィルタによる術者被ばく線量増加の影響を大きく受けることが予想される。脊椎手術における術者被ばく線量に関する報告はなされているが、軟線除去フィルタを使用した際の術者被ばく線量に関しては検討されていない^{3),9),10)}。

そこで本研究では、低侵襲脊椎固定術を想定し、外科用X線撮影装置における軟線除去フィルタの有無による術者被ばく線量および患者表面線量への影響を検討した。

1. 方法

1-1 測定方法

1-1-1 ジオメトリーおよびX線透視条件

手術室内での低侵襲腰椎後方固定術環境下を想定し、正面・側面透視における患者表面線量および術者被ばく線量の測定を行った。外科用X線撮影装置（OEC9900 Elite, GEヘルスケア・ジャパン, 東京）を使用し、高さ800 mmの手術台上に患者を模擬したアクリルファントム（以下、ファントム, 京都科学, 京都）を設置した。実際の患者の体厚を考慮し、ファン

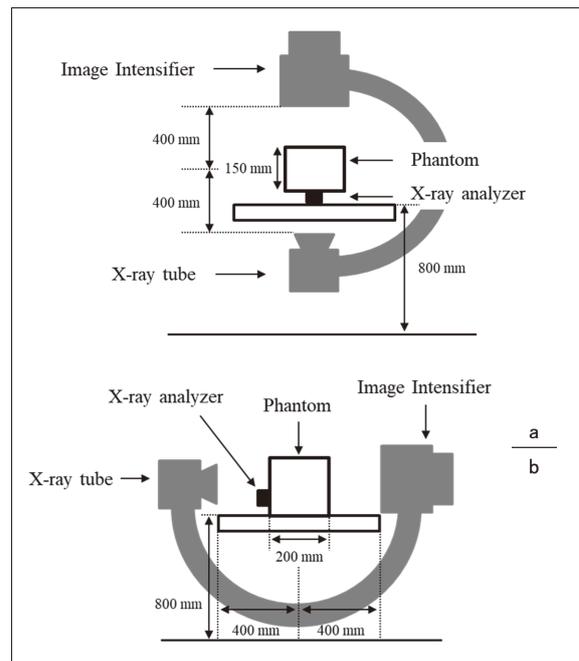


Fig.1 Geometric placement of a surgical X-Ray imaging systems and phantom and dosimeter
(a) Frontal fluoroscopy (b) Lateral fluoroscopy

トムの厚さは正面150 mm, 側面200 mmとし、ファントム中心とX線管および検出器との距離をそれぞれ400 mmになるように調整した (Fig.1)。

X線透視条件は管電圧・管電流共にAutoモードに設定し、照射時間に関しては、2021年1月1日から2022年12月31日までに外科用X線撮影装置を使用して、当院で実施された脊椎後方固定術13症例57椎体から1椎体当たりの照射時間の中央値を算出し、適用した (Table 1)。Autoモードの透視条件は、透視の方向と軟線除去フィルタ8 mm (MJP 95-1, メディカルインダストリアル, 福岡) および軟線除去フィルタ11 mm

Table 1 Exposure conditions

	Frontal		
	Without Filter	Filter 8 mm	Filter 11 mm
Tube voltage (kV)	80	85	87
Tube current (mA)	2.97	3.46	3.70
Exposure time (sec)	73	73	73
	Lateral		
	Without Filter	Filter 8 mm	Filter 11 mm
Tube voltage (kV)	92	99	103
Tube current (mA)	4.09	4.43	4.63
Exposure time (sec)	293	293	293

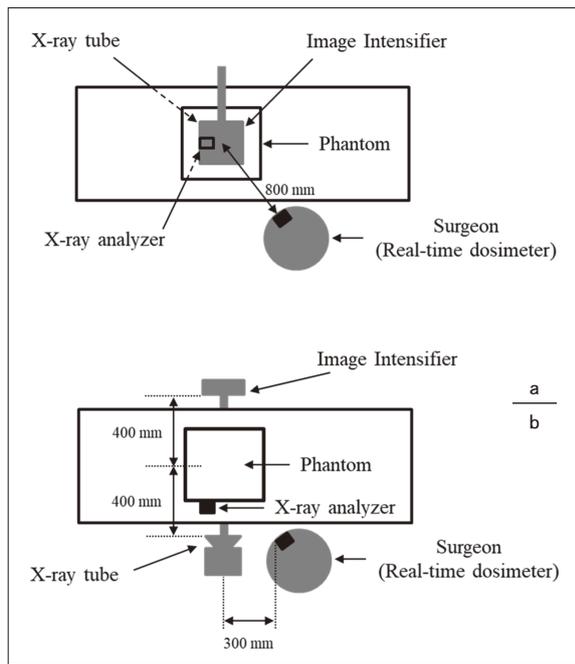


Fig.2 Location of the surgeon in dosimetry
(a) Frontal fluoroscopy (b) Lateral fluoroscopy

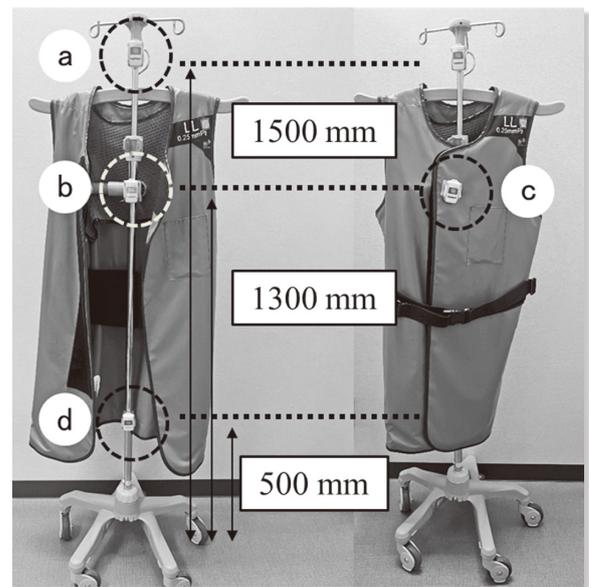


Fig.3 Measurement points of real-time dosimeter
(a) 1500 mm high point for the neck (b) 1300 mm high point for the chest (inside the protective apron) (c) a point 1300 mm high for the chest (outside of the protective apron) (d) a point 500 mm high for the knees

(MJP 95-2, メディカルイングス)の厚さによって変化した (Table 1). また透視の出力方式は連続透視とし、照射野は9 inchとした。なお、本研究は当院倫理委員会の審査を受け、承認を得ている (承認番号:22-281-A)。

1-1-2 患者表面線量の測定

患者表面線量は、X線入射側のファントム表面に設置したX線出力アナライザー (Piranha, RTI Electronics, Mölndal, Sweden) によって測定した (Fig.1, 2)。X線出力アナライザーには半導体検出器が使用され、1.3 nGyから650 Gyまで測定可能であり、金属シールドによって遮蔽されているため後方散乱の影響を受けない。後方散乱遮蔽の金属シールドが自動露出機構 (Automatic Exposure Control: AEC) へ影響を与えないように、X線出力アナライザーのプロローブを照射野の中心から外した位置に設置し、指向性を考慮して正面・側面共にプロローブ前面がX線入射側へ向くように固定した。

1-1-3 術者被ばく線量の測定

術者被ばく線量は、術者を想定した点滴棒にリアルタイム線量計 (RaySafe i3, Unfors RaySafe, Billdal, Sweden) を設置して測定を行った。リアルタイム線量計には半導体検出器を使用し、1 μSv

から10 Svまで測定可能であり、得られる測定値は1 cm線量当量である。感度補正は電離箱線量計電位計 (Model 9015, Radcal, Monrovia, CA, USA)、電離箱線量計検出器 (Model 10X5-6, Radcal) との相互校正で行った。術者の立ち位置はファントム中心から800 mmとした。側面においてはX線管および検出器から300 mm離れた位置とした (Fig.2)。測定点は術者の頸部・胸部・下肢を想定し、床面からの高さ1500 mm, 1300 mm (X線防護エプロン内・外)、500 mmの4カ所にリアルタイム線量計を設置した (Fig.3)。脊椎後方固定術における実際の手技では、術者が患者の左右に一人ずつ立っているため、側面透視の測定は、X線管側と検出器側に立ち位置を変えて行った。

1-2 軟線除去フィルタ未使用時と使用時における患者表面線量および術者被ばく線量の比較

軟線除去フィルタ使用時の測定を行った。フィルタの厚さは8 mm, 11 mmである。軟線除去フィルタ未使用時と使用時の影響を評価するため、ジオメトリーおよびX線透視条件については方法1-1と同様の条件で軟線除去フィルタ使用時の測定を行った。正面透視・側面透視 (X線管側・検出器側) の患者表面線量および術者被ばく線量をそれぞれ軟線除去フィルタ未使用時と使用時 (厚さ8 mm, 11 mm) で比較を行った。統計

解析は統計解析ソフト (JMP Pro 16, SAS Institute, Cary, NC, USA) を用いた. Bonferroni法を用いた多重比較検定によって3群間に差があることを確認した後, それぞれの2群間においてWilcoxon検定を行い, 各統計解析の棄却域は5%とした.

2. 結 果

2-1 患者表面線量

透視の方向の違いによる, 軟線除去フィルタ未使用時と使用時の患者表面線量を Table 2 に示す. 測定結果は5回測定の実値とした. 軟線除去フィルタ未使用時と使用時を比較すると, 全ての透視の方向で有意差が認められた ($p < 0.05$). フィルタ未使用時と比較し

て, フィルタ 8 mm, 11 mm では全ての透視の方向において患者表面線量が低くなった. フィルタ 11 mm においては最大40%低減した.

2-2 術者被ばく線量

透視の方向の違いによる, 軟線除去フィルタ未使用時と使用時の術者被ばく線量を示す (Fig.4, 5, 6). Fig.4, 5, 6の (a), (b), (c), (d) は, それぞれ Fig.3の (a), (b), (c), (d) に対応している. 正面透視では, 高さ 1500 mm, 1300 mm (防護エプロン外側), 500 mm においてフィルタの使用により術者被ばく線量が増加し, 1300 mm (防護エプロン外側) においてフィルタ 11 mm 使用時に最大65.2%増加した (Fig.4). 側面透視のX線管側では, 高さ 1300 mm

Table 2 Comparison of patient surface dose with and without filter

	Without Filter (mGy)	Filter 8 mm (mGy)	Filter 11 mm (mGy)	p-value
Anterior-posterior	20.8 ± 0.1	13.9 ± 0.3	12.5 ± 0.1	<0.05
Lateral (X-ray tube)	219.0 ± 2.5	145.9 ± 1.9	132.1 ± 1.9	<0.05
Lateral (Imageintensifier)	221.8 ± 2.3	146.8 ± 0.8	135.4 ± 0.2	<0.05

Value are Mean ± SD, SD: standard deviation.

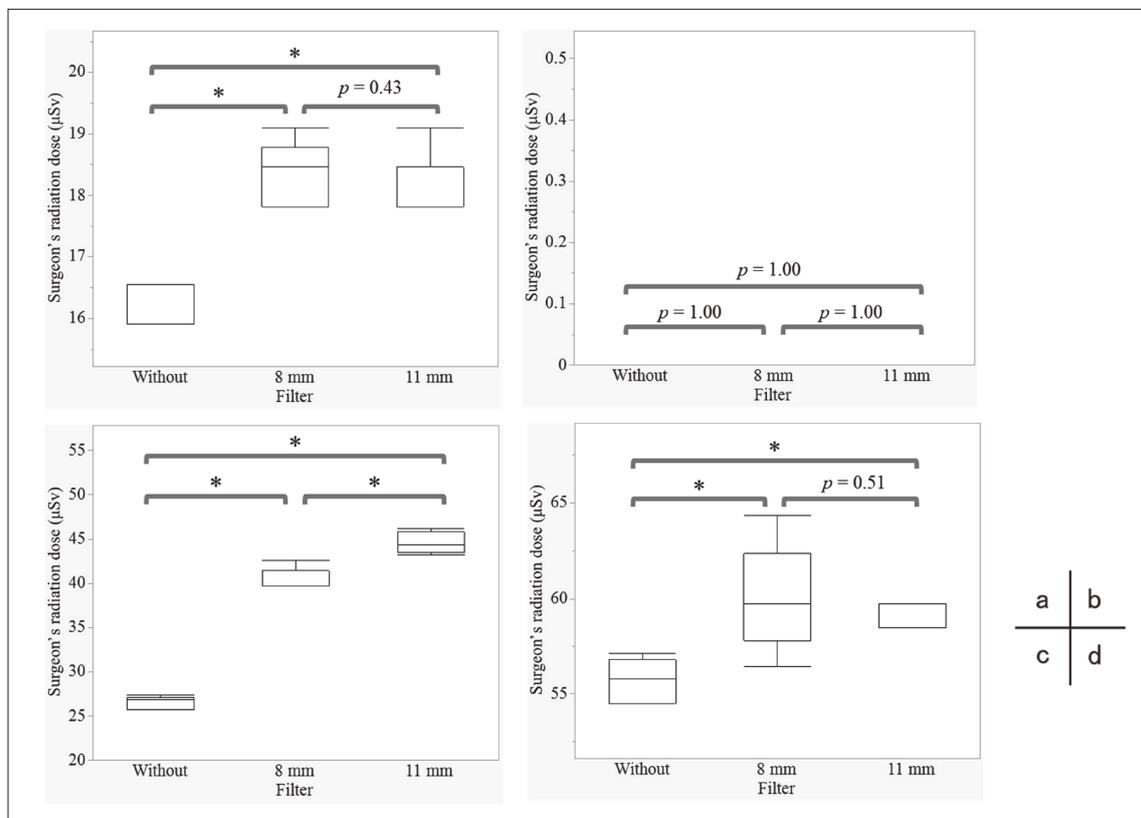


Fig.4 Comparison of Operator Exposure Doses in Front Fluoroscopy

(a) 1500 mm high point for the neck (b) 1300 mm high point for the chest (inside the protective apron)
 (c) a point 1300 mm high for the chest (outside of the protective apron) (d) a point 500 mm high for the knees

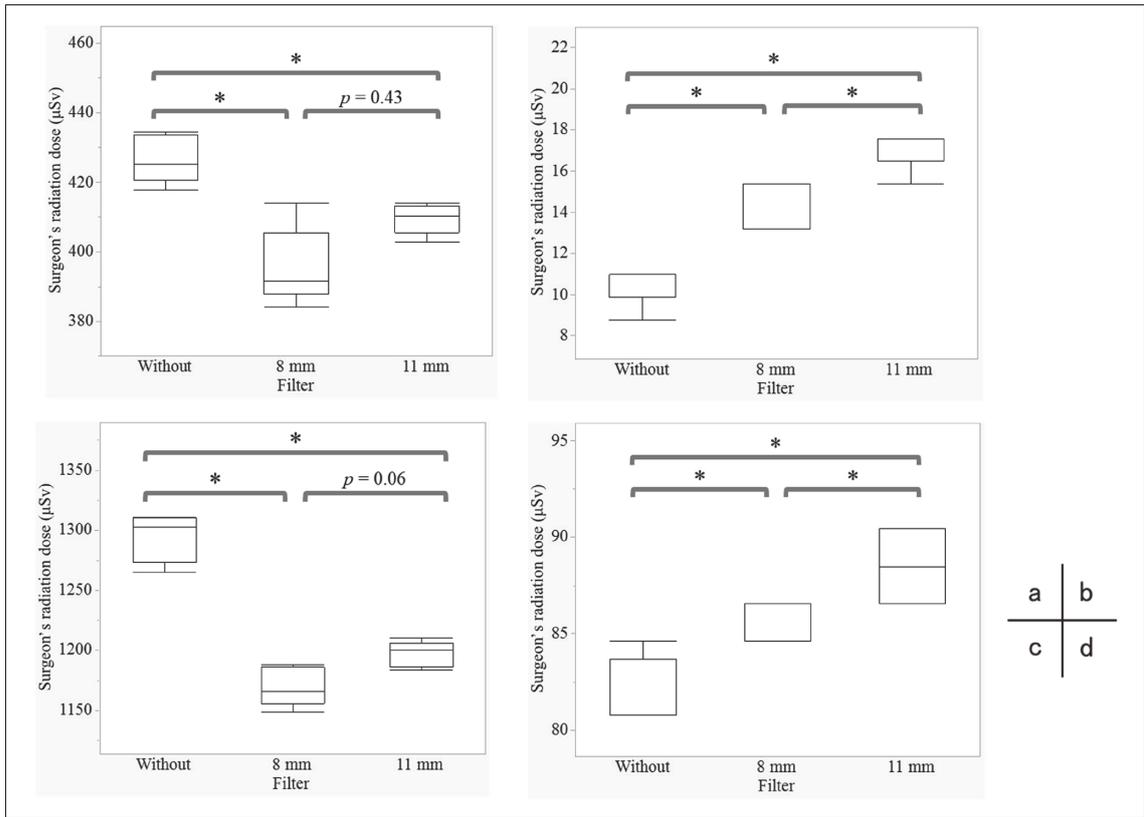


Fig.5 Comparison of Operator Exposure Doses in Lateral Fluoroscopy (X-ray tube side)

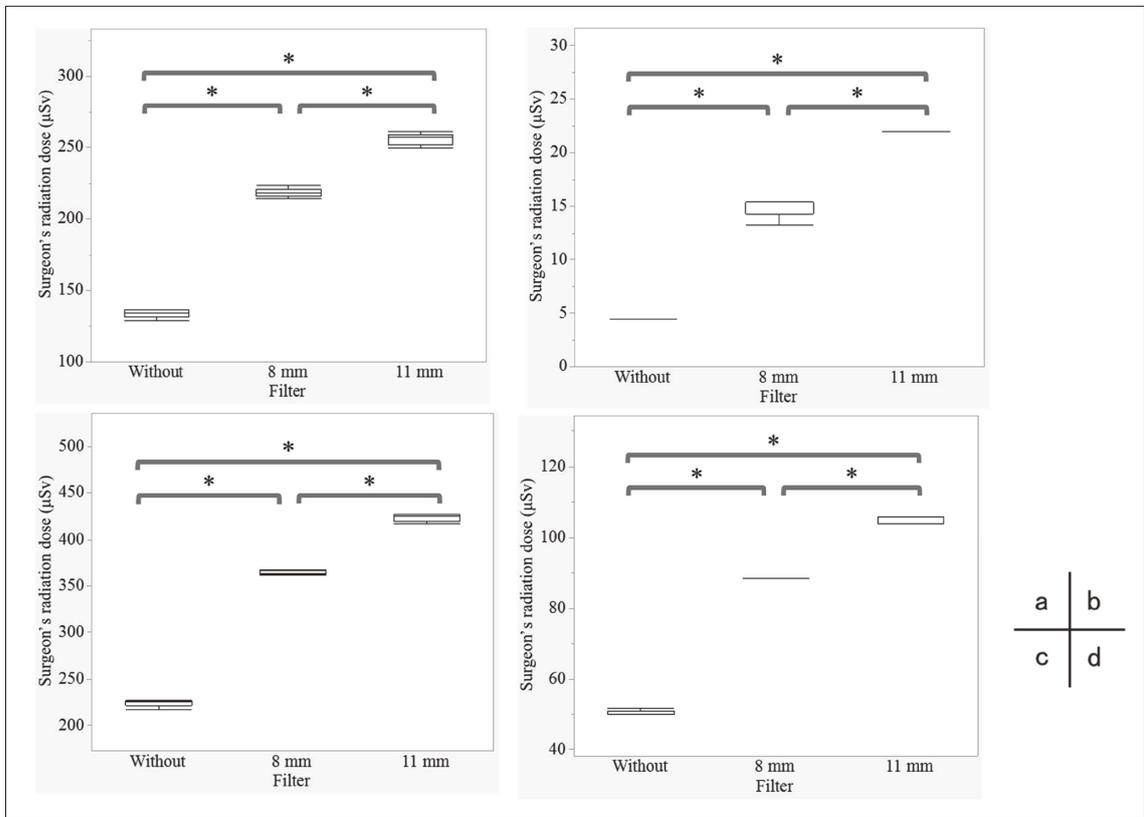


Fig.6 Comparison of Operator Exposure Doses in Lateral Fluoroscopy (detector side)

(防護エプロン内側), 500 mmにおいてフィルタの使用により術者被ばく線量が増加し, 1300 mm (防護エプロン内側) においてフィルタ11 mm使用時に最大9.5%増加した (Fig.5). 側面透視の検出器側では, 全ての測定点においてフィルタの使用により術者被ばく線量が増加し, 1500 mmにおいてフィルタ11 mm使用時に最大91.6%増加した (Fig.6).

3. 考 察

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiation Protection : ICRP) が定める職業被ばくの実効線量限度は「100 mSv/5年かつ, 50 mSv/年」と定められている. そのため軟線除去フィルタ未使用時と使用時の術者被ばく線量について検討する必要があった.

初めに, ファントムとX線出力アナライザーを用い患者表面線量を測定した. 軟線除去フィルタの使用により, 全ての透視の方向において患者表面線量が低下した ($p < 0.05$). 金属フィルタを使用することで, 連続X線の低エネルギー成分を除去し, 実効エネルギーを上昇させることで患者表面線量を低減させることはすでに報告されている^{5), 6), 7), 8)}. また複数の元素によって構成される合金フィルタは, アルミニウムや銅などの単一素材によって構成された金属フィルタに比べて患者被ばく低減に有用であることも報告されている¹¹⁾. 本研究で使用した軟線除去フィルタは, 金属フィルタと同様の効果をもたらし, 患者表面線量を低減させたと考えられる. さらにこの軟線除去フィルタは, 数種類の金属成分を含有したガラスにより構成されている. そのためアルミニウムや銅などの単一素材によって構成された金属フィルタよりも患者被ばく低減に有用であると考えられる.

次に, ファントムとリアルタイム線量計を用い4カ所の術者被ばく線量を測定した. 本研究において, フィルタの有無による術者被ばく線量の変化が大きかったのは, 側面透視時の高さ1300 mm (防護エプロン外側) であった. 術者被ばく線量が最も低下したのはX線管側であり, 中央値で1302.8 μ Svから1166.0 μ Svとなり, 136.8 μ Sv低下した. 術者被ばく線量が最も増加したのは検出器側であり, 中央値で217.1 μ Svから427.4 μ Svとなり, 210.3 μ Sv増加した. X線管側で線量が低下し, 検出器側で線量が増加した要因として, 前述した実効エネルギーの変化が影響したと考えられる. ファントムに入射したX線は, コンプトン散

乱により角度 θ 方向に散乱する. 散乱したX線のエネルギー E' と散乱角度 θ の関係¹²⁾は,

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表し, E は入射X線のエネルギー, $m_e c^2$ は電子の静止質量エネルギーを表している. この式より, 入射X線のエネルギーの上昇に伴い, 散乱したX線のエネルギーは上昇し, 散乱角度は小さくなる. 従ってファントムからの散乱線エネルギーも上昇し, 検出器側に立つ術者へ到達する散乱線が増加したと考えられる. また軟線除去フィルタの使用により入射するX線の実効エネルギーが上昇し, ファントムとの相互作用を起こす確率が低下したことでX線管側に立つ術者へ到達する散乱線が相対的に低下したと考えられる.

さらに当院における治療実績を基に年間30症例, 1症例当たり5椎体に対する手技を行ったと仮定し, 本研究における術者被ばく線量の測定値から, 年間当たりの不均等被ばく実効線量を推定した. 川辺らの報告¹³⁾と同様の方法で推定したところ, X線管側における術者被ばく線量は, フィルタなしで年間8.7 mSv, フィルタ11 mmで年間9.7 mSvであった. フィルタを使用しても術者被ばく線量はほぼ同等であり, ICRPの実効線量限度を下回る値となった.

本研究により, 軟線除去フィルタを使用すると患者表面線量は低下し, 術者被ばく線量は透視の方向および術者の立ち位置により変化することが分かった.

研究限界

本研究で使用した散乱体はアクリルファントムであり, 使用できるファントムの厚さに限りがあるため, 人体の内部構造や体厚を再現しきれていない. また術者を模擬するために点滴棒を使用し防護エプロンを装着したため, 点滴棒と防護エプロンに隙間が生じており, 人体での実測値が本検討の測定値と異なる点が挙げられる. 精度を高めるためには, アクリルファントムや点滴棒を人体ファントムに変更し, 実際の患者や術者を正確に模擬した状態で検討を行う必要がある. さらに測定した術者被ばく線量の中に, 軟線除去フィルタ本体からの散乱線がどの程度含まれているか実測できていないため, フィルタ自体からの散乱線の影響を完全に排除しきれていない.

結語

外科用X線撮影装置を使用した低侵襲脊椎固定術において、軟線除去フィルタを使用することで患者表面線量は低減された。術者被ばく線量は立ち位置によって変化するが実効線量限度内であった。本検討は、術者が手術中に軟線除去フィルタを使用する判断の一助となる。

利益相反

本研究に関して開示すべき利益相反事項はない。

発表学会

本研究の要旨は、2023年9月29日に開催された第39回日本診療放射線技師学術大会で発表した。

表の説明

- Table 1 照射条件
Table 2 軟線除去フィルタの有無による患者表面線量の比較

図の説明

- Fig.1 外科用X線撮影装置およびファントム、線量計の配置図
(a) 正面透視 (b) 側面透視
Fig.2 線量測定における術者の配置図
(a) 正面透視 (b) 側面透視
Fig.3 リアルタイム線量計の測定点
(a) 頸部を想定した高さ1500 mmの点 (b) 胸部 (防護エプロン内側) を想定した高さ1300 mmの点 (c) 胸部 (防護エプロン外側) を想定した高さ1300 mmの点 (d) 膝を想定した高さ500 mmの点
Fig.4 正面透視における術者被ばく線量の比較
(a) 頸部を想定した高さ1500 mmの点 (b) 胸部 (防護エプロン内側) を想定した高さ1300 mmの点 (c) 胸部 (防護エプロン外側) を想定した高さ1300 mmの点 (d) 膝を想定した高さ500 mmの点
Fig.5 側面透視 (X線管側) における術者被ばく線量の比較
Fig.6 側面透視 (検出器側) における術者被ばく線量の比較

参考文献

- 1) 水野正喜, 他: 腰椎固定術の基礎と低侵襲手技の発展, 脳神経外科ジャーナル, 26(5), 353-361, 2017.
- 2) 村上秀樹: 脊椎手術の変遷とトレンド, 岩手医学雑誌, 74(6), 207-213, 2023.
- 3) Chiang, H.W., et al.: Occupational radiation exposure of orthopedists at different locations during pedicle screw insertion: An anthropomorphic phantom study. Technol Health Care, 29(S1), 211-219, 2021.
- 4) Bindal, R.K., et al.: Surgeon and patient radiation exposure in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. Journal of Neurosurgery: Spine, 9(6), 570-573, 2008.
- 5) 人見 剛, 他: Transcatheter Hepatic Arterial Embolization (TAE) における付加フィルタの検討, 日放技学誌, 66(10), 1297-1302, 2010.
- 6) 坂本 肇, 他: 透視被曝線量の低減: 付加フィルタの形状についての検討, 日放技学誌, 53(5), 578-584, 1997.
- 7) 大石誉奈, 他: 重金属フィルタによる患者被曝線量の低減と画質 (コントラスト) の改善, 日放技学誌, 58(1), 109-114, 2002.
- 8) 安田光慶, 他: 金属フィルタを用いた循環器専用撮影装置における放射線被ばく低減の検討, 日放技学誌, 68(3), 247-253, 2012.
- 9) 松本博樹, 他: 股関節観血的整復固定術における放射線業務従事者の水晶体放射線防護の必要性, 日放技学誌, 80(3), 287-295, 2024.
- 10) 福永正明, 他: 移動型整形外科用イメージング装置を用いた腰椎後方固定術時における室内散乱線量分布の測定, 日放技学誌, 76(6), 572-578, 2020.
- 11) Gonçalves, A., et al.: Effects of aluminum-copper alloy filtration on photon spectra, air kerma rate and image contrast. Braz Dent J, 15(3), 214-219, 2004.
- 12) 岡島俊三: 医学放射線物理学, 1980.
- 13) 川辺 睦, 他: 論述 X線透視を使用する整形外科手術時における術者の被ばく測定と低減に関する諸検討, 臨床整形外科, 40(5), 531-536, 2005.