

【原著】

ファントムの厚さ及び材質による後方散乱係数への影響

工藤真也^{*1} 工藤幸清^{*2} 小宮睦弘^{*1} 小山内暢^{*2} 對馬恵^{*2} 廣田淳一^{*2}
 檜木聡^{*3} 成田将崇^{*3} 船戸陽平^{*3} 須崎勝正^{*3} 松谷秀哉^{*4} 青木昌彦^{*3,4}
 細川洋一郎^{*2}

(2018年11月27日受付, 2018年2月22日受理)

要旨 : 医療放射線防護の指標である診断参考レベル (DRLs) は被ばく線量の最適化を目的に設定されており, 入射表面線量で規定されている。しかし, 臨床において入射表面線量の測定は困難であるため, 入射線量に後方散乱係数 (BSF) をかけることで算出される。後方散乱係数は照射条件や被写体に影響されるため, BSF は変化する。そこで, ファントム実験とシミュレーションにより被写体厚, 管電圧, 照射野, 線量計の位置, 被写体材質の違いによる BSF の変化を調べた。その結果, 被写体厚 10 cm 以上では BSF が飽和し, 管電圧, 照射野に依存して BSF は増加した。また, 線量計-ファントム間距離に依存し BSF は低下した。材質の違いによる比較では Acryl ファントムの BSF が最も高く, 次の軟部組織, Tough Water ファントムとなった。このことから過小評価を避けるためには, Acryl ファントムによる BSF の算出が適していると示唆された。特に Tough Water ファントムの使用は入射表面線量を過小評価する可能性が示唆された。

キーワード : 後方散乱係数, DRLs, 診断用 X 線

I. はじめに

我が国では 2015 年 6 月に医療放射線防護の指標として診断参考レベル (DRLs) ¹⁾ が設定された。X 線一般撮影の DRL は入射表面線量で規定されており, 入射表面線量は被写体表面での入射線量に被写体からの後方散乱線が付加された空気吸収線量 (mGy) で定義される。直接入射表面線量を測定するには, 線量計を被写体表面に設置することになるが, 臨床の場合において全ての患者体表面に線量計を設置することは一般的ではない。一方, 入射線量は後方散乱線を含まず, 測定や推定が容易であることから, 入射線量に後方散乱係数 (BSF) を掛けることで入射表面線量を算出する方法が現実的である。

現在, 胸部撮影の DRL は基準体格として体厚 20 cm を用いており ¹⁾, Grosswendt ²⁾, Klevenhagen ³⁾, British Journal of Radiology Supplement 10 ⁴⁾ などの先行研究の BSF データを用いて入射表面線量が算出可能である。しか

し, 水ファントムを用いているため, 体厚および組成の変化に対する BSF については明らかでない。また, 今後は個人単位での被ばく線量管理が望まれるため ⁵⁾, 被写体厚, 体内組成に応じた BSF が必要になると考えられる。そこで, 本稿では被写体厚及び被写体材質を変化させた場合の BSF を算出するとともに, X 線の線質, 照射野サイズが BSF に与える影響についても確認した。さらに, モンテカルロシミュレーションにより BSF を求め, 測定値から求めた値と比較検討した。

II. 方法

1. 装置

BSF の実測には X 線発生装置 (UD150B-40/P364DK-85/R-300, Shimadzu, Kyoto, Japan) を使用した。本装置の総濾過は 2.6 mmAl である。被写体には Acryl ファントム, Tough Water ファントムを使用した。また, 線量測定にはファーマ型電離箱線量計 (Farmer Chamber Type 30013, PTW, Freiburg, Germany) を使用した。一方, BSF のモンテカルロシミュレーションには Phits (Particles and Heavy Ion Transport code System) ver.3.02 ⁶⁾ を用いた。

2. 被写体厚による BSF の算出

弘前大学医学部附属病院の胸部撮影を参考にして, 管電圧 130 kV, 管電流 200 mA, 照射時間 10 msec, 照射野サイズは線源-表面間距離 (SSD) 140 cm の位置で 20 × 20 cm² とした。被写体厚を 0-30 cm の範囲で 5 cm ずつ変化させ, SSD 140 cm となるように配置した。各被写体厚における入射表面線量と入射線量をファーマ型電離箱線量計

*1 弘前大学大学院保健学研究科博士前期課程
 Master's Course in Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
 〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
 66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*2 弘前大学大学院保健学研究科
 Hirosaki University Graduate School of Health Sciences
 〒036-8564 青森県弘前市本町 66-1 TEL:0172-33-5111
 66-1, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*3 弘前大学医学部附属病院
 Hirosaki University Hospital
 〒036-8564 青森県弘前市本町 53 TEL:0172-33-5111
 53, Honcho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

*4 弘前大学大学院医学研究科
 Hirosaki University Graduate School of Medicine
 〒036-8562 青森県弘前市在府町 5 TEL:0172-33-5111
 5, Zaifucho, Hirosaki-shi, Aomori, 036-8564, Japan

Correspondence Author h18gg203@hirosaki-u.ac.jp

にて 3 回測定したのち、下式により BSF を算出し、平均値、標準偏差を求めた。

$$BSF = \frac{D}{D_{air}}$$

ここで D は被写体表面における一次線と後方散乱線を含む空気吸収線量 (入射表面線量), D_{air} は同様の測定位置で被写体がない一次線のみ空気吸収線量 (入射線量) である。

3. 照射条件の違いによる BSF の算出

まず、管電圧変化による BSF を算出した。管電圧は 40-140 kV まで 10 kV 間隔で変化させた。管電流 200 mA, 照射時間 10 msec, 照射野サイズは線源-検出器間距離 (SID) 160 cm の位置で $30 \times 30 \text{ cm}^2$ とした。被写体厚は 20 cm, SSD 140 cm となるように配置し、各管電圧において D, D_{air} を 3 回測定し、BSF の平均値、標準偏差を求めた。

次に、照射野サイズの違いによる BSF を算出した。管電圧 130 kV, 管電流 200 mA, 照射時間 10 msec とした。照射野サイズは SID 160 cm の位置で $10 \times 10 \text{ cm}^2 - 30 \times 30 \text{ cm}^2$ まで 5 cm 間隔で変化させた。被写体厚は 20 cm, SSD 140 cm となるように配置し、各照射野サイズにおいて D, D_{air} を 3 回測定し、BSF の平均値、標準偏差を求めた。

4. モンテカルロシミュレーションによる BSF の推定

モンテカルロシミュレーション Phits ver.3.02 を用いて、方法 2, 3 の条件で BSF を求めた。シミュレーションに用いた X 線源は管電圧、総濾過 (2.6 mmAl) から診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト (X-Tucker-31 for Windows) ⁷⁾ により求めた。また被写体として Acryl ファントム (1.190 g/cm^3) ⁸⁾, および Tough Water ファントム (1.017 g/cm^3) ⁸⁾ を設定し BSF を計算した。結果は統計誤差が 0.01 以下となるようにシミュレーションを行った。また、被写体の材質の違いによる BSF の違いを明らかにするため軟部組織 (1.0 g/cm^3) ⁹⁾ の BSF についてもシミュレーションを行った。

5. 線量計-被写体間距離による BSF の推定

実測では線量計の位置により測定値が変化することが考えられるため、シミュレーションによる検証を行った。管電圧 130 kV, 管電流 200 mA, 照射時間 10 msec, 照射野サイズは SID 160 cm の位置で $30 \times 30 \text{ cm}^2$, 被写体は体厚 20 cm の Acryl ファントム, SSD 140 cm とした。線量計と被写体表面の距離を 0-10 mm まで 1 mm 間隔で遠ざけたときの BSF をシミュレーションにより求めた。結果は統計誤差が 0.01 以下となるようにシミュレーションを行った。

III. 結果

1. 被写体厚による BSF の変化

Fig. 1 に被写体厚を変化させたときの BSF を示した。被写体厚が大きくなるに従い BSF は高値を示し、被写体厚 10 cm 程度で BSF は飽和した。そこで、被写体厚 10 cm 以上での BSF の平均値、標準偏差を Tab. 1 に示した。BSF は Tough Water ファントム より Acryl ファントムで高値を示し、いずれの被写体厚においても BSF は実測から算出された値よりシミュレーションでの値の方が大きくなった。

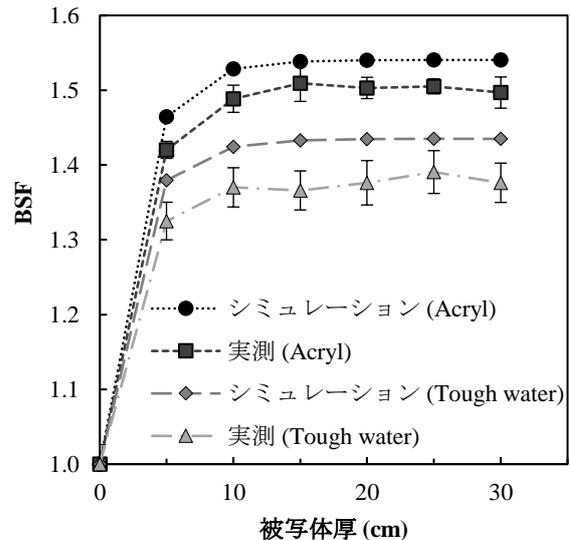


図 1 Acryl, Tough water ファントム使用時の被写体厚変化による BSF の違い

表 1 被写体厚 10 cm 以上での BSF の平均値

| | 実測 | | シミュレーション | |
|------|-------|-------------|----------|-------------|
| | Acryl | Tough Water | Acryl | Tough Water |
| BSF | 1.50 | 1.38 | 1.54 | 1.43 |
| 標準偏差 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |

2. 照射条件の違いによる BSF の変化

管電圧を変化させた場合の BSF を Fig. 2 に示した。BSF は管電圧の増加に伴い高値を示した。管電圧 130 kV の BSF は実測の場合、Acryl ファントムで 1.56, Tough Water ファントムで 1.38 となった。シミュレーションでは、Acryl ファントムで 1.60, Tough Water ファントムで 1.47 であった。

照射野サイズを変化させた場合の BSF を Fig. 3, ならびに Tab. 2 に示した。BSF は照射野が大きくなるに伴い高値を示し、実測とシミュレーションでは同程度かシミュレーションで高値を示した。

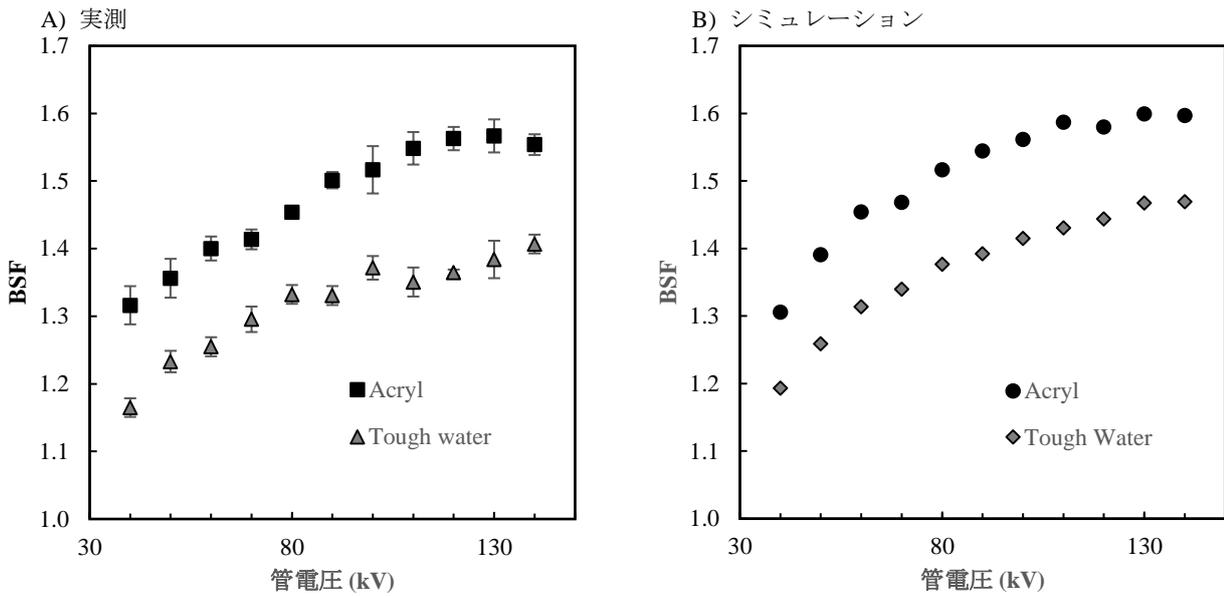


図 2 Acryl, Tough water ファントム使用時の管電圧変化による BSF の違い

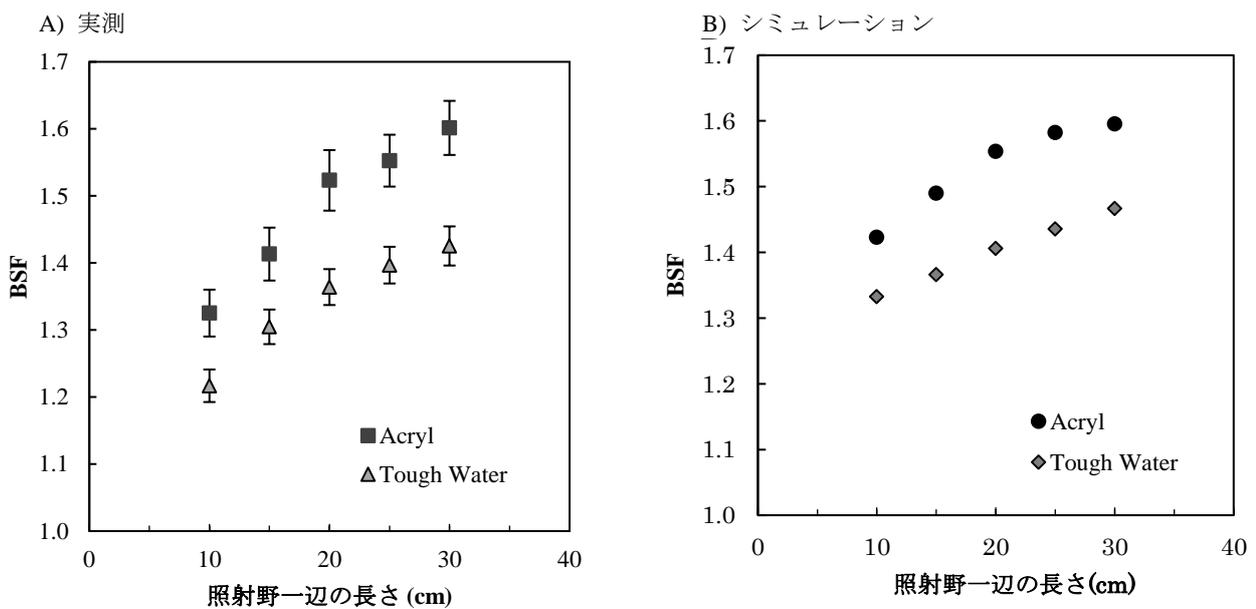


図 3 Acryl, Tough water ファントム使用時の照射野サイズによる BSF の違い

表 2 照射野サイズによる BSF

| | 実測 | | シミュレーション | |
|--------------------------|-------|-------------|----------|-------------|
| | Acryl | Tough Water | Acryl | Tough Water |
| 20×20 (cm ²) | 1.52 | 1.36 | 1.55 | 1.41 |
| 30×30 (cm ²) | 1.60 | 1.43 | 1.60 | 1.47 |

3. 被写体材質による BSF の変化

被写体材質の違いによる BSF の変化を Fig. 4 に示した。シミュレーションの結果、軟部組織での BSF は管電圧 130 kV で 1.49 となった。また、軟部組織の BSF は Acryl ファントムより低く、Tough Water ファントムより高値を示した。

4. 線量計-被写体間距離による BSF の変化

シミュレーションにより線量計-被写体間距離を変化させた場合の BSF の計算結果を Fig. 5 に示した。BSF は線

量計-被写体間距離 0 mm で 1.60, 5 mm で 1.57, 10 mm で 1.54 となった。

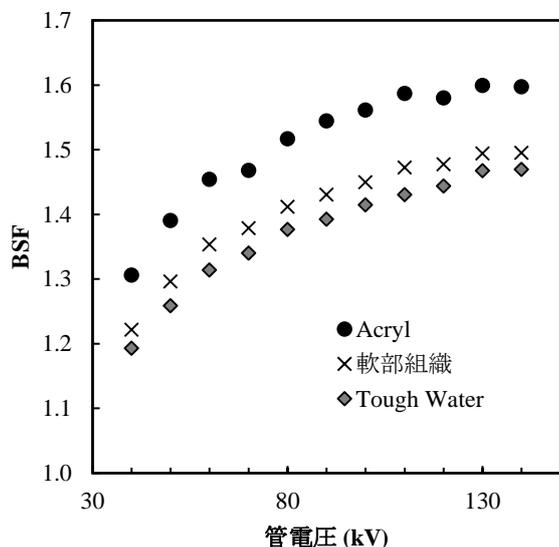


図 4 被写体材質による BSF の違い

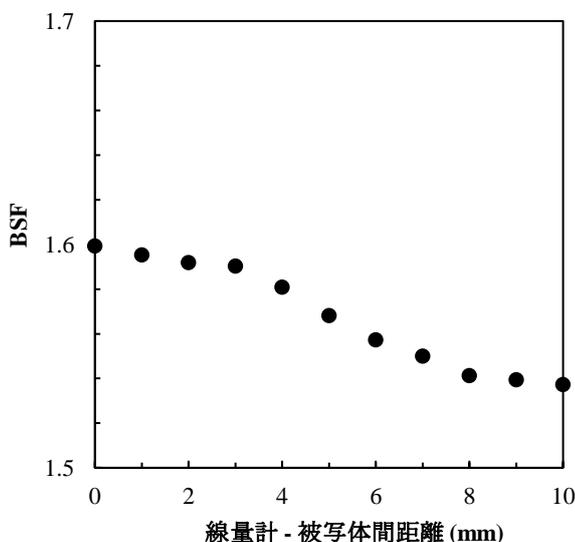


図 3 線量計-被写体間距離による BSF シミュレーション

IV. 考察

我々は入射表面線量の算出に必要な BSF を明らかにするため、被写体厚、被写体材質、X 線の線質 (管電圧)、ならびに照射野サイズの差異について実測とシミュレーションを行った。

まず、被写体厚変化による BSF を算出した。その結果、BSF の値は被写体厚 10 cm で飽和することが明らかとなった。(Fig. 1, Tab. 1) 患者の体厚について、市川らの報告で

は 17.7-32.5 cm の範囲にあることから¹⁰⁾、BSF は飽和していると考えられ、胸部撮影において患者個人の入射表面線量を算出する際に患者体厚を考慮する必要はないと考えられた。つまり、入射線量が得られれば体厚を考慮せず入射表面線量が算出可能であることが示唆された。ただし、体厚により入射線量が増加するため、入射線量を知るために体厚もしくは SSD を考慮する必要がある。

次に、管電圧、照射野サイズ変化による Acryl ファントム、および Tough Water ファントムの BSF を算出した。いずれの条件においても Acryl ファントムの BSF は Tough Water ファントム より高値を示した。(Fig. 2, 3, Tab. 2) DRL は皮膚吸収線量の指標であるため、被写体として軟部組織を用いることが適当である。¹¹⁾ そこで被写体を Acryl ファントム、Tough Water ファントム、軟部組織としてシミュレーションを行い、BSF を比較した。その結果、BSF は Acryl ファントムを用いた場合に最も高値を示し、次いで軟部組織、Tough Water ファントムの順となった。(Fig. 4) このことから Tough Water ファントムによる BSF の算出は入射表面線量の過小評価につながる可能性が示唆された。

本研究では、実測から算出された BSF よりシミュレーションの BSF が高値を示した。これは実測の際、線量計-被写体間距離のため、後方散乱線の影響が低下する可能性が考えられた。そのため、線量計-被写体間距離による BSF の変化をシミュレーションにより確認した結果 (Fig.5)、線量計-被写体間距離 0 mm と比較して、5 mm では BSF が約 2% 低下し、10 mm では 4% 低下した。実測に用いた指頭型電離箱の直径は 6 mm であり、線量計-被写体間距離は最低 3mm となる。そのため、実測から算出された BSF はシミュレーションの値に比べ数%低値を示したと考えられた。

V. 結語

被写体厚、管電圧、照射野、被写体材質、線量計-被写体間距離の変化による BSF の算出を行った。BSF は体厚 10 cm 以上で飽和することが明らかになり、患者体厚には依存しないことが示唆された。また、管電圧、照射野の変化による BSF を確認し、被写体材質による BSF の変化も明らかにした。このことから、実測により BSF を求める場合は Acryl ファントムが適しており、Tough Water ファントムでは過小評価となることが示唆された。

利益相反

開示すべき利益相反はありません。

謝辞

本研究にあたり、弘前大学医学部保健学科学士の蛭名健

斗さん, 木村秀呂さん, 小林亮太さん, 平田唯人さんらのご協力に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) <http://www.radher.jp/J-RIME>: 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定. 医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME), pp.17-18, 2015. (2018-11-26)
- 2) Grosswendt B: Dependence of the photon backscatter factor for water on source to phantom distance and irradiation field size. *Phys Med Biol*, 35 (9): 1233-1245, 1990.
- 3) Klevenhagen SC: Experimentally determined backscatter factors for x-rays generated at voltages between 16 and 140 kV. *Phys Med Biol*, 34 (12): 1871-1882, 1989.
- 4) *The British Journal of Radiology: Supplement 17 CentralAxis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy*. 4, London, 1983.
- 5) 神田玲子 : J-RIME の活動と今後の DRL. *日本放射線技術学会雑誌*, 74(6): 593-598, 2018.
- 6) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, et al: Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55, 684-690, 2018.
- 7) <http://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology/free-software> (2018-11-26)
- 8) 西臺武弘 : 放射線治療物理学. 第 2 版. 193, 文光堂, 東京, 2009.
- 9) <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir5632.pdf> (2018-11-26): Hubbell JH, Seltzer SM. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to92 and 48 additional substances of dosimetric interest.
- 10) 市川卓磨, 大野晃治 : 臨床画像を用いた胸部撮影における入射表面線量の評価 -2 方向撮影画像を用いた被写体厚の推定-. *日本放射線技術学会雑誌*, 74(7): 661-666, 2018.
- 11) 加藤秀起, 阪井啓太, 内山瑞樹, 鈴木健太郎 : 被照射体の材質および対象とする線量の違いによる診断 X 線の後方散乱係数の違い. *日本放射線技術学会雑誌*, 72(10): 1007-1014, 2016.

【Original article】

The influence on backscatter factors in relation to difference in thickness and material of phantom

MASAYA KUDO^{*1} KOHSEI KUDO^{*2} NOBUHIRO KOMIYA^{*1}
MINORU OSANAI^{*2} MEGUMI TSUSHIMA^{*2} JUNICHI HIROTA^{*2}
SATOSHI NARAKI^{*3} MASATAKA NARITA^{*3} YOHEI FUNATO^{*3}
KATSUMASA SUZAKI^{*3} HIDEYA MATSUTANI^{*4} MASAHIKO AOKI^{*4}
YOICHIRO HOSOKAWA^{*2}

(Received November 27, 2018 ; Accepted February 22, 2019)

Abstract: Diagnostic reference levels (DRLs), an index for medical radiation protection, were set for exposure dose optimization. DRLs are prescribed by entrance surface dose; however, in clinical settings, entrance surface dose is difficult to measure, so it is calculated using backscatter factor (BSF). BSF varies with the subject thickness, tube voltage, irradiation field size, dosimeter position, and scattering medium. In this paper, we investigated the influence of these factors on BSF, and compared BSFs calculated through simulations with measured values. The results show that BSF saturated at 10-cm subject thickness, increased with increasing tube voltage and irradiation field size, and decreased with increasing dosimeter-phantom distance. BSFs for acryl phantom, soft tissue, and tough water phantom decreased in the order acryl > soft tissue > tough water. The results suggest that calculation of BSF using acryl was optimal to avoid underestimation of incident surface dose and that, in particular, using tough water could lead to underestimation. (154)

Keywords: backscatter factor, DRL, diagnostic X-ray