臨床技術

多方向スキャンデータの平均補正係数を使用した フラットベッドスキャナ由来のラジオクロミックフィルム 線量測定の不均一性の改善

國本陽英¹ 三浦英治^{2,3} 宮沢正則⁴ 早田将博² 松浦貴明^{2,5} 小澤修一^{2,3}
山田 聖² 永田 靖^{2,3}

論文受付
2019年5月21日

論文受理
2019年12月12日

Code Nos. 800
850
852

¹ 広島がん高精度放射線治療センター(現 県立広島病院放射線診断科・治療科)

² 広島がん高精度放射線治療センター

³ 広島大学大学院医系科学研究科放射線腫瘍学

⁴ アールテック有限公司

⁵ 広島大学大学院医系科学研究科総合健康科学専攻

緒言

高精度放射線治療である intensity modulated radio-

therapy (IMRT) や volumetric modulated arc therapy (VMAT) は、標的臓器への線量集中性を高めつつ

Improvement of Nonuniformity on Flatbed Scanner for Radiochromic Film Dosimetry Using Average Correction Factor with Multi-direction Scan Data

Haruhide Kunitomo,^{1*} Hideharu Miura,^{2,3} Masanori Miyazawa,⁴ Masahiro Hayata,² Takaaki Matsuura,^{2,5} Shuichi Ozawa,^{2,3} Kiyoshi Yamada,² and Yasushi Nagata^{2,3}

¹ Hiroshima High-Precision Radiotherapy Cancer Center (Current address: Department of Diagnostic Radiology / Radiation Oncology, Hiroshima Prefectural Hospital)

² Hiroshima High-Precision Radiotherapy Cancer Center

³ Department of Radiation Oncology, Graduate School of Biomedical & Health Sciences, Hiroshima University

⁴ R-TECH, INC

⁵ Division of Integrated Health Sciences, Graduate School of Biomedical & Health Sciences, Hiroshima University

Received May 21, 2019; Revision accepted December 12, 2019

Code Nos. 800, 850, 852

Summary

In order to correct the lateral effect caused by the light source of the flatbed scanner in the Gafchromic film EBT3, the usefulness of the correction method using the average value of the correction coefficient considering the scan directions were evaluated. EBT3 was scanned from four directions to measure the optical density (OD) of the red, blue, and, red/blue components and the correction coefficient were calculated. For the correction coefficients, average values were calculated for the purpose of use, when the scan directions could not be aligned (average lateral effect correction). Correction accuracy was verified with the pass rate of gamma analysis (3 mm/3%, threshold 30%) of the dose distribution using the EBT3 film irradiated with the step pattern. OD of the red, blue, and, red/blue components in the scanning vertical direction tended to be higher in the center than in the peripheral portion. The pass rate of the step pattern was the red component's before correction, from 26.9 to 45.1% (before correction), from 84.1 to 96.7% (after correction), the red/blue component, from 37.6 to 48.4% (before correction) and from 84.4 to 96.7% (after correction). When using the correction coefficient using the average value, the pass rate was 89.8% for the red component and 94.7% for the red/blue component. The lateral effect correction improves the accuracy of the dose distribution verification, and the correction coefficient using the average value is useful when the scanning direction is different from that at the time of obtaining the dose concentration curve.

Key words: lateral effect, Gafchromic film, EBT3, average lateral effect correction, gamma analysis

*Corresponding author

スク臓器の線量を下げることができる照射方法として使用されている。これらの照射方法は、multileaf collimator (MLC) の形状変化だけでなくガントリ回転速度や線量率が変化するため、3 dimensional conformal radiation therapy (3D-CRT) などの従来の照射方法と比較して線量分布は複雑であり、局所における線量勾配も急峻である。そのため、それらの装置精度が投与線量へ影響する可能性があるため、治療開始前に患者毎の線量検証を実施する必要がある。線量検証は、電離箱を用いる評価点線量検証とフィルムを用いる線量分布検証が推奨されている¹⁾。フィルムは高い空間分解能を有し、照射範囲の形状が把握できるため広く使用されている。また、フィルムは、現像を必要とするラジオグラフィックフィルム (radiographic film: RGF) と現像を必要としないラジオクロミックフィルム (radiochromic film: RCF) に分類できる。RGF は感光物質に人体組成と異なる銀粒子を用いているため、放射線治療領域では人体組成に等価な放射線特性を有する RCF が用いられている。近年は、フィルムレス化により現像機を所有していない施設も多いことから、RCF の需要は高い。RCF は、放射線に反応して着色するモノマの感応層と癒着層がクリアポリエステルなどでラミネートされた構造である。主に患者個別の品質保証 (quality assurance: QA) で使用されている RCF として、EBT3 や EBT-XD (Ashland 社) が挙げられる。EBT3 は通常治療で使用する線量における IMRT の線量分布検証、EBT-XD は定位放射線治療のように大線量で小照射野の線量分布検証に用いられる²⁾。

RCF は、フラットベッドスキャナを使用してスキャンすることが一般的である。RCF はフラットベッドスキャナでスキャンする際、スキャナ光源の走査方向に対して垂直方向で顕著な不均一性 (lateral effect) を示す特徴がある^{3,4)}。Lateral effect は、フィルム自体の粒子ムラや感光物質の塗布ムラなど素材や構造とフラットベッドスキャナの組み合わせに起因するものであり、感光物質の粒子ムラや塗布ムラはロットによって影響は異なる。RCF の感光物質の粒子ムラや塗布ムラの影響を低減する方法は、平坦度情報である青色成分を利用した red/blue correction 法^{5~7)} や triple-channel 法^{8,9)}、校正用フィルムを利用した background correction 法がある¹⁰⁾。Lateral effect は、補正によって測定精度の改善が期待できるため、赤色成分と赤色/青色成分において補正法の有用性が報告されている¹¹⁾。EBT3 の感光物質は放射線感受性モノマが棒状構造のため、スキャン時に向きおよび表裏のスキャン方向依存性がある。方向依存性は、RCF の

線量測定の際に生じる不確かさの一つとされており、線量分布検証に影響するためフィルムスキャン方向と lateral effect の関係性について把握することは非常に重要である^{12~14)}。通常の線量分布検証は、同一ロットにおいては線量-濃度曲線 (特性曲線) 取得時とフィルムスキャン方向を一致させることで方向依存性の影響を低減しているが、頭頸部や骨盤部のように比較的広範囲な治療領域の線量分布検証時は必ずしもフィルムスキャン方向を揃えることはできない。Lateral effect は、EBT-XD では定位放射線治療のような大線量、小照射野で使用するため問題にならないが、EBT3 では大照射野を対象とする場合があり無視できない。過去に、フィルムの粒状性が lateral effect に及ぼす影響についてスキャン方向を 90° 回転させて評価した報告はあるが、フィルムのスキャン方向および表裏を考慮して lateral effect を評価した報告はされていない⁴⁾。更に、lateral effect 補正をする際に、lateral effect 補正係数として複数方向の平均値を使用した報告もされていない。

本研究では、線量分布検証のために使用する EBT3 において、フラットベッドスキャナによるスキャン時に発生するスキャナ由来の不均一性を補正する方法を検討した。Lateral effect はスキャン方向によってフィルム固有のムラが影響し optical density (OD) が変化することを考慮し、EBT3 は 4 方向からスキャンし、赤色成分、青色成分、赤色/青色成分の OD と lateral effect 補正係数を算出した。Lateral effect 補正係数は、線量分布検証で lateral effect 補正の正確性を評価し、広い照射野でスキャン方向を一致させることができない場合を考慮して OD の平均値から算出した lateral effect 補正係数 (average lateral effect 補正係数) の有用性も評価した。

1. 方法

1-1 使用機器とスキャン条件

RCF は、radiochromic EBT3 (Lot#: 06051404, Veritas 社) を使用した。EBT3 は、活性層が保護層のポリエステルで対称的に挟まれている。この保護層の表面に凹凸を付加することによってニュートンリングのような不均一の障害陰影は除去できる。直線加速器は TrueBeam STx (Varian Medical Systems 社)、治療計画装置 (treatment planning system: TPS) は Eclipse Ver.13.5 (Varian Medical Systems 社)、エネルギーは 6MV-X 線、計算アルゴリズムは Acuros XB を使用した。TPS の線量計算グリッドサイズは、2.0 mm に設定した。フラットベッドスキャナは、ES-10000G

Fig. 1 Geometric layout of Epson 10000 XL scanner.

The scanning movement direction of the light source was the x-axis, and direction parallel to the light source was the y-axis. The long axis of the EBT3 was parallel to the y-axis, and the EBT3 was arranged by the measure tool and can be measured at the same position every scan.

(EPSON 社)を使用した。フィルムの幾何学的配置を Fig. 1 に示す。本研究では、スキャナ光源の走査方向を x 軸、走査垂直方向を y 軸とした。フィルムは、 $2 \times 25 \text{ cm}^2$ の大きさに切断し、y 軸に対してフィルムの長軸が対応するように配置した。スキャンは、放射線照射後のフィルム濃度安定を考慮して照射 24 時間後とした。スキャン条件は、分解能を 75 dot per inch (dpi)、48 bit 三原色成分ですべて 3 回スキャンの平均値を測定結果として TIFF 形式で保存した。フィルムの配置は、位置誤差を最小限にするためスキャナ y 軸に定規を設置して毎回同一位置でスキャンした。スキャンした結果の画素値(pixel value: PV)は、式(1)を用いて OD に変換した。

$$\text{OD} = -\log_{10} (\text{PV}/65535) \quad \dots\dots\dots (1)$$

1-2 EBT3 における特性曲線と lateral effect 補正係数

幾何学的配置は、EBT3 を水等価ファントム(京都科学社)の深さ 10 cm 地点に設置して source-surface distance を 90 cm とした。また、後方散乱を考慮して EBT3 の下に 10 cm 厚の水等価ファントムを設置した。照射野サイズは、切断したフィルムを十分に含むことができる $5 \times 30 \text{ cm}^2$ 、処方線量は 0, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 cGy に設定した。スキャンは、lateral effect に対するフィルム固有のムラの影響を考

慮して 4 方向で行った。スキャン方向は、フィルムの右上に印があるときを Right-Up-Front (RUF)、右下を Right-Down-Back (RDB)、左下を Left-Down-Front (LDF)、左上を Left-Up-Back (LUB) とした。スキャン範囲は、x 軸 1 cm、y 軸 18 cm とした。フィルム不均一性補正は、フィルム解析ソフトウェア 2D-Flat プログラム (R-TECH 社)を使用した。2D-Flat プログラムの手順は、スキャン方向別に赤色成分、青色成分、赤色/青色成分で y 軸位置に対応させて特性曲線が作成される。赤色成分、青色成分の OD は式(2)、式(3)で算出し、赤色/青色成分に関しては OD_{RED} から OD_{BLUE} を除することにより算出される。Lateral effect 補正係数は、y 軸位置に対応した特性曲線を算出し、y 軸位置における処方線量と OD との y 軸中央に対する比となる。Average lateral effect 補正係数の算出方法を Fig. 2 に示す。設定した線量で照射したフィルムは、2D-Flat プログラムで各スキャン方向のスキャン位置と線量に対応した PV に変換される。Figure 2 に示されるように各スキャン方向の PV は、OD に変換後に平均値を算出し、その平均値を用いて average lateral effect 補正係数を算出される。設定した処方線量間の lateral effect 補正係数は、離散的であるため内挿してデータ補間される。

Fig. 2 Average lateral effect correction factor calculation method.

Fig. 3 Optical density profile for (a) red, (b) blue and (c) red/blue components of non-irradiated and irradiated (100, 200 and 400 cGy) EBT3 film pieces scanned along the y-axis.

$$OD_{RED} = -\log_{10} (PV_{RED} / 65535) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$OD_{BLUE} = -\log_{10} (PV_{BLUE} / 65535) \quad \dots\dots\dots (3)$$

1-3 Lateral effect 補正係数の正確度検証

Lateral effect 補正係数による補正が線量分布検証に及ぼす影響について調べた。Lateral effect 補正係数の正確度検証は、ステップパターンと頭頸部 IMRT プランを照射したフィルムを用いた。幾何学的条件は 1-2 と同様とし、照射したフィルムはスキャナに RUF 方向で配置してスキャンした。スキャン結果は、2D-Flat プログラムで赤色成分と赤色/青色成分の補正有無のデータを取得し、TPS で算出した線量分布と比較してガンマ解析のパス率で評価した。解析条件は、3% dose difference (DD)/3 mm distance to agreement (DTA), threshold 30% に設定した。

1-3-1 ステップパターン

ステップパターンは、20×25 cm² のフィルムに 2.5 cm 間隔の 5 段ステップで処方線量 100, 170, 250, 320,

380 cGy を照射した。

1-3-2 頭頸部 IMRT プランのデータ取得

頭頸部 IMRT プランは、lateral effect の影響が大きいと考えられる広い照射野を必要とする頭頸部領域とした。頭頸部 IMRT プランは、ATOM ファントム (CIRS 社) に計画標的体積 (planning target volume: PTV) を作成後、水等価ファントムにマッピングして 20×25 cm² のフィルムに照射した。処方線量は、PTV に対して 200 cGy (D95% 処方) とした。

2. 結果

2-1 スキャン方向による OD の変化

Figure 3 に赤色成分、青色成分、赤色/青色成分の OD を示す。Figure 3 に示すように OD のプロファイルは、赤色成分、青色成分、赤色/青色成分のすべてにおいて中央より周辺部で OD が低い傾向であり、線量が高いほどその傾向は強く、400 cGy のときに差は最大となり、それぞれ 7.4, 3.5, 5.6% であった。Figure 4 に処方線量 200, 400 cGy のフィルムのスキャン方向を

変化させたときの OD を示す。Figure 4 に示すように、y 軸中央からの距離が同じであっても OD の変化は非対称であった。赤色成分、青色成分、赤色/青色成分における y 軸中央からの距離に応じたスキャン方向による OD の変化は、傾向は同じであったが、変化率はそれぞれ異なった。

2-2 Lateral effect 補正係数

Lateral effect 補正係数は、患者 QA で使用される機会が多い赤色成分と赤色/青色成分とした。赤色成分と赤色/青色成分の lateral effect 補正係数は、2-1 の OD から 2D-Flat プログラムを使用して算出される。Figure 5 に赤色成分および赤色/青色成分の lateral effect 補正係数を示す。Lateral effect 補正係数は、y 軸中央からの距離が離れるとともに差は顕著になり非対称となった。赤色成分および赤色/青色成分においても同様の傾向であった。Lateral effect 補正係数は、赤色成分と赤色/青色成分において中央より周辺部で高い傾向であった。Lateral effect 補正係数の線量依存性は、400 cGy のときに最大であり、赤色成分は 8.7%、赤色/青色成分は 6.0%であった。

2-3 Lateral effect 補正係数の正確度検証

Lateral effect 補正の有用性は、補正前後の線量分布を比較することで検証した。Lateral effect 補正は、すべてのスキャン方向において補正前で中央より周辺部で線量差が大きく、補正後で周辺部の線量差は低減した。ガンマ解析評価では、補正前は周辺部においてガンマ値が 1 を超える領域が多く、補正後はガンマ値が 1 を超える領域は減少し、パス率は改善した。

2-3-1 ステップパターン

Lateral effect 補正前後で比較した線量プロファイルと線量分布を Fig. 6 に示す。線量プロファイルにおいて補正前後の線量差は、y 軸中央から 100 mm 離れた位置で最大となった。測定位置が y 軸中央 0 mm と 100 mm 離れた位置における線量差を Table 1 に示す。100 mm 離れた位置での補正前後における線量差の平均±標準偏差は、補正前が赤色成分で $16.3 \pm 2.5\%$ 、赤色/青色成分で $18.8 \pm 3.3\%$ であり、補正後が赤色成分で $1.7 \pm 1.2\%$ 、赤色/青色成分で $0.6 \pm 1.4\%$ であった。各スキャン方向における補正前後のパス率を Table 2 に示す。パス率は、赤色成分では補正前が 26.9–45.1%、補正後が 84.1–96.7%、赤色/青色成分では補正前が 37.6–48.4%、補正後が 84.4–96.7% となった。パス率は、LDF が最も低い結果となり、赤色成分で 84.1%、赤色/青色成分で 84.4% であった。Average lateral ef-

fect 補正係数を使用した場合では、パス率が赤色成分で 89.8%、赤色/青色成分で 94.7% となり、赤色/青色成分が 4.9% 高い値を示した。特性曲線取得時と同一方向である RUF 方向と average lateral effect 補正係数を使用して補正したガンマ解析のパス率は、RUF 方向が赤色成分で 3.7%、赤色/青色成分で 2.0% 高かった。特性曲線取得時と線量分布検証時のフィルムスキャン方向を一致させることができない場合、average lateral effect 補正係数を使用して補正したガンマ解析のパス率は、LDF に対して赤色成分で 5.7%、赤色/青色成分で 10.3% 高かった。

2-3-2 頭頸部 IMRT プラン

Lateral effect 補正前後で比較した線量プロファイルと線量分布を Fig. 7 に示す。線量プロファイルにおいて補正前後の線量差は、y 軸中央から 80 mm 離れた位置で最大となった。測定位置が y 軸中央 0 mm と 80 mm 離れた位置における線量差を Table 3 に示す。80 mm 地点での補正前後における線量差の平均±標準偏差は、補正前が赤色成分で $16.2 \pm 1.0\%$ 、赤色/青色成分で $21.2 \pm 0.7\%$ であり、補正後が赤色成分で $1.8 \pm 0.6\%$ 、赤色/青色成分で $2.1 \pm 0.8\%$ であった。各スキャン方向における補正前後のパス率を Table 4 に示す。パス率は赤色成分で補正前が 58.9–61.2%、補正後が 91.1–98.7%、赤色/青色成分で補正前が 59.3–63.3%、補正後が 90.8–98.6% となった。パス率は、LDF が最も低い結果となり、赤色成分で 91.1%、赤色/青色成分で 90.8% であった。Average lateral effect 補正係数を使用した場合では、パス率が赤色成分で 96.1%、赤色/青色成分で 98.5% となり、赤色/青色成分が 2.4% 高い値を示した。特性曲線取得時と同一方向である RUF 方向と average lateral effect 補正係数を使用して補正したガンマ解析のパス率は、RUF 方向が赤色成分で 2.6%、赤色/青色成分で 0.1% 高かった。特性曲線取得時と線量分布検証時のフィルムスキャン方向を一致させることができない場合、average lateral effect 補正係数を使用して補正したガンマ解析のパス率は、LDF に対して赤色成分で 5.0%、赤色/青色成分で 7.7% 高かった。

3. 考 察

本研究では、EBT3 におけるフラットベッドスキャナ由来の不均一性の補正方法について検討した。Lateral effect は、過去の報告と同様に 400 cGy までの線量領域において y 軸中央からの距離とともに出現し、線量が高いほど影響は大きかった^{3,4)}。赤色成分、青色成分における周辺部の線量差は、赤色成分で大き

Fig. 4 Optical density profile along the y-axis of EBT3 films irradiated with prescription dose of 200 cGy for (a) red, (b) blue and (c) red/blue, with prescription dose of 400 cGy for (d) red, (e) blue and (f) red/blue components on different scanned directions. LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back, RDB: Right-Down-Back, RUF: Right-Up-Front

Fig. 5 Correction factor curves of optical density for (a) red and (b) red/blue components with the prescription dose of 200 cGy, and for (c) red and (d) red/blue components with the prescription dose of 400 cGy. LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back, RDB: Right-Down-Back, RUF: Right-Up-Front

Fig. 6 Planar dose distributions and y-axis dose profiles of step pattern for (a) the uncorrected film of the red, (b) the corrected film of the red, (c) the uncorrected film of the red/blue and (d) the corrected film of the red / blue components, respectively. Dash line with arrow indicates position of profile line. In the upper planar dose distributions, the y-axis is the vertical axis and the x-axis is the horizontal axis. In the lower dose profile, the vertical axis represents the dose and the horizontal axis represents the y-axis position in the upper planar dose distributions.

Table 1 Dose difference between TPS and EBT3 in step pattern

Setting	Error at 0 mm (%)				Error at 100 mm (%)			
	RED		RED/BLUE		RED		RED/BLUE	
	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected
RUF	3.1	4.1	3.2	4.3	14.5	0.2	17.6	-1.2
RDB	3.4	3.1	4.4	2.6	19.5	1.6	23.7	1.7
LDF	2.2	4.5	2.2	2.9	17.0	3.2	16.5	1.6
LUB	2.7	4.9	1.7	3.6	14.1	1.6	17.4	0.2
Average	2.9	4.2	2.9	3.4	16.3	1.7	18.8	0.6
SD	0.5	0.8	1.2	0.7	2.5	1.2	3.3	1.4
Average lateral effect correction factor	—	3.3	—	3.6	—	0.4	—	1.3

RUF: Right-Up-Front, RDB: Right-Down-Back, LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back

Table 2 Pass rate of the step pattern with or without correction

Setting	Pass rate (%)			
	RED		RED/BLUE	
	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected
RUF	42.3	93.5	45.0	96.7
RDB	26.9	87.3	37.6	90.1
LDF	33.1	84.1	48.4	84.4
LUB	45.1	96.7	47.8	96.3
Average lateral effect correction factor	—	89.8	—	94.7

RUF: Right-Up-Front, RDB: Right-Down-Back, LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back

Fig. 7 Planar dose distribution and y-axis dose profile of IMRT plan for (a) the uncorrected film of the red, (b) the corrected film of the red, (c) the uncorrected film of the red/blue and (d) the corrected film of the red/blue components, respectively. Dash line with arrow indicates position of profile line. In the upper planar dose distributions, the y-axis is the vertical axis and the x-axis is the horizontal axis. In the lower dose profile, the vertical axis represents the dose and the horizontal axis represents the y-axis position in the upper planar dose distributions.

Table 3 Dose difference between TPS and EBT3 in IMRT plan

Setting	Error at 0 mm (%)				Error at 80 mm (%)			
	RED		RED/BLUE		RED		RED/BLUE	
	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected
RUF	3.0	-0.5	4.6	2.2	15.0	1.1	20.2	1.4
RDB	3.7	2.2	5.1	3.6	15.8	2.4	21.9	3.2
LDF	3.2	3.1	5.5	3.2	17.0	2.4	21.5	2.2
LUB	3.0	1.2	5.3	2.6	17.0	1.5	21.1	1.7
Average	3.2	1.5	5.1	2.9	16.2	1.8	21.2	2.1
SD	0.3	1.6	0.4	0.6	1.0	0.6	0.7	0.8
Average lateral effect correction factor	—	2.6	—	3.0	—	2.9	—	1.8

RUF: Right-Up-Front, RDB: Right-Down-Back, LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back

Table 4 Pass rate of the IMRT plan with or without correction

Setting	Pass rate (%)			
	RED		RED/BLUE	
	Un-corrected	Corrected	Un-corrected	Corrected
RUF	60.6	98.7	63.3	98.6
RDB	58.9	98.4	62.0	94.2
LDF	61.2	91.1	59.5	90.8
LUB	60.9	98.1	59.3	98.5
Average lateral effect correction factor	—	96.1	—	98.5

RUF: Right-Up-Front, RDB: Right-Down-Back, LDF: Left-Down-Front, LUB: Left-Up-Back

かった。EBT3では、青色成分に比べて赤色成分は、1000 cGyまでの線量域で感度が高く lateral effectの影響を強く受けたと考える¹²⁾。青色成分は線量の感度が低くフィルム固有のムラなどの情報を有しており、HayashiらやPalmerらが報告した補正方法であるtriple-channel法に利用されている^{8,9)}。スキャン方向の違いによるODは、青色成分におけるODのバラツキに示されるようにEBT3の感光物質形状が不規則に存在しているため、スキャン方向によって不規則に光を散乱させたと想定される。

本研究では、赤色成分、赤色/青色成分におけるスキャン方向を考慮した補正法を検討した。感光物質の粒子による光拡散の違いを考慮して $1 \times 18 \text{ cm}^2$ の面積を4方向からスキャンしてlateral effect補正係数を取得した。スキャン方向の違いによるlateral effect補正係数は、最大で1.0%の差が生じた。EBT3のODは、スキャン方向によって0.7–4.5%変化することが報告されている¹²⁾。y軸位置のODを利用する補正係数は、EBT3のスキャン方向に影響を受けると考える。

ステップパターンの補正前後の線量プロファイルは、lateral effect補正によって周辺部における線量差は低減した。ガンマ解析では補正前後でガンマ値が1を超える領域は減少し、パス率は改善した。Lateral effectは高線量かつ周辺部で影響が大きく、周辺部に高い処方線量を設定したステップパターンにおいてパス率が改善したことは、周辺部に高線量領域があった場合でもスキャン位置に対して線量に応じたlateral effect補正は正確に実施できたと考える。赤色/青色成分は、赤色成分から青色成分が有するフィルム固有のムラを除去しているため検証精度は高く、本研究においてもパス率は赤色成分に比較して高かった。赤色/青色成分のように複数のチャンネルを複合して用いる方法は、フィルム保護層の厚みなどフィルム固有の特性とフラットベッドスキャナの性質やスキャン条件による不均一性を低減させるため、過去の報告と同様の結果であった⁵⁾。本研究において、ステップパターンおよび頭頸部IMRTプランのガンマ解析のパス率は、lateral effect補正によって向上しており正確度は高いと考える。Lateral effect補正は、小照射野の定位放射線治療ではなく大照射野の頭頸部領域や骨盤部領域で有用であり、本研究の手法は効果的なlateral effect補正を行うことができると考える。

Lateral effect補正法は、フラットベッドスキャナに起因する誤差とフィルム固有のムラに起因する誤差を事前に調査して補正関数を作成するbackground correction法がある¹⁰⁾。Background correction法は、未

照射のフィルムを用いて照射後のフィルムからフィルム固有のムラの情報を除去し補正することでlateral effectを8%から2.5%に低減できると報告されている。本研究では、y軸周辺部の線量差の平均値は、ステップパターンにおいて赤色成分で14.6%、赤色/青色成分で18.2%、頭頸部IMRTプランにおいて赤色成分で14.4%、赤色/青色成分で19.1%低減できた。本研究におけるlateral effect補正は、background correction法と比べてy軸位置に対する線量を考慮しているため標的臓器やリスク臓器の位置における線量分布検証を正確に評価し、更にRCFの不確かさの一つであるフィルム固有のムラの影響を低減できると考えられる^{13,14)}。Average lateral effect補正係数は、照射野が大きくスキャン方向が特性曲線取得時と一致させることができない場合に、再度特性曲線を取得しなくても赤色成分においてステップパターンで5.7%、頭頸部IMRTプランで5.0%、赤色/青色成分においてステップパターンで10.3%、頭頸部IMRTプランで7.7%と補正精度を改善できるため有用と考える。

本検討は、ステップパターンと頭頸部IMRTプランに対してファントムを使用して、フィルム線量分布を評価した。臨床データを使用したlateral effect補正の有用性を検討することは重要であり、今後更なる検討が必要である。

4. 結 語

本研究では、線量分布検証のために使用するEBT3においてフラットベッドスキャナによるスキャン時に発生するスキャナ由来の不均一性を補正する方法を検討した。Lateral effect補正は、走査垂直方向の周辺部で影響が大きいため大照射野で必要性が高く、補正することで線量プロファイルとパス率はTPSで計算された線量分布と良好な一致を示した。本研究で提案したaverage lateral effect補正係数は、特性曲線取得時と線量分布検証時のフィルムスキャン方向を一致させることができない比較的広範囲な治療領域で有用である。

謝 辞

本研究に際しご指導いただいた県立広島病院放射線治療科主任部長の和田崎晃一氏に感謝申し上げます。

なお、本研究の要旨はガフクロミックフィルム研究会(2017年、大阪)にて発表した。

利益相反

共著者の宮沢正則は、アールテック有限会社の社員である。それ以外の共著者に、開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) IMRT 物理 QA ガイドライン専門小委員会(日本放射線腫瘍学会 QA 委員会). 強度変調放射線治療における物理・技術的ガイドライン 2011. <https://www.jastro.or.jp/customer/guideline/2016/10/IMRT2011.pdf>(アクセス日: 2019 年 1 月 20 日).
- 2) Miura H, Ozawa S, Hosono F, et al. Gafchromic EBT-XD film: dosimetry characterization in high-dose, volumetric-modulated arc therapy. *J Appl Clin Med Phys* 2016; 17(6): 312-322.
- 3) Menegotti L, Delana A, Martignano A. Radiochromic film dosimetry with flatbed scanners: a fast and accurate method for dose calibration and uniformity correction with single film exposure. *Med Phys* 2008; 35(7): 3078-3085.
- 4) Poppinga D, Schoenfeld AA, Doerner KJ, et al. A new correction method serving to eliminate the parabola effect of flatbed scanners used in radiochromic film dosimetry. *Med Phys* 2014; 41(2): 021707.
- 5) Micke A, Lewis DF, Yu X. Multichannel film dosimetry with nonuniformity correction. *Med Phys* 2011; 38(5): 2523-2534.
- 6) Kairn T, Aland T, Kenny J. Local heterogeneities in early batches of EBT2 film: a suggested solution. *Phys Med Biol* 2010; 55(15): L37-42.
- 7) Aland T, Kairn T, Kenny J. Evaluation of a Gafchromic EBT2 film dosimetry system for radiotherapy quality assurance. *Australas Phys Eng Sci Med* 2011; 34(2): 251-260.
- 8) Hayashi N, Watanabe Y, Malmin R, et al. Evaluation of triple channel correction acquisition method for radiochromic film dosimetry. *J Radiat Res* 2012; 53(6): 930-935.
- 9) Palmer AL, Dimitriadis A, Nisbet A, et al. Evaluation of Gafchromic EBT-XD film, with comparison to EBT3 film, and application in high dose radiotherapy verification. *Phys Med Biol* 2015; 60(22): 8741-8752.
- 10) Saur S, Frengen J. GafChromic EBT film dosimetry with flatbed CCD scanner: a novel background correction method and full dose uncertainty analysis. *Med Phys* 2008; 35(7): 3094-3101.
- 11) 上原隆三, 橘 英伸, 伊藤 康, 他. 線量分布解析におけるラジオクロミックフィルムドジメトリーの正確性の向上に関する取り組み—フラットベッドスキャナの影響の補正法と色成分を利用した補正法の組み合わせ—. *日放技学誌* 2013; 69(6): 617-631.
- 12) Casanova Borca V, Pasquino M, Russo G, et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification. *J Appl Clin Med Phys* 2013; 14(2): 4111.
- 13) Andrés C, del Castillo A, Tortosa R, et al. A comprehensive study of the Gafchromic EBT2 radiochromic film. A comparison with EBT. *Med Phys* 2010; 37(12): 6271-6278.
- 14) Bouchard H, Lacroix F, Beaudoin G, et al. On the characterization and uncertainty analysis of radiochromic film dosimetry. *Med Phys* 2009; 36(6): 1931-1946.

問合せ先

〒734-8530 広島市南区宇品神田1丁目5番54号
県立広島病院放射線診断科・治療科 國本陽英