臨床技術

論文受付
2019年2月5日

論文受理
2019年8月30日

Code No. 431

Clarkson 法による MLC 不整形照射野の深さを考慮した ファントム散乱係数の推定精度の検討

早川岳英¹ 山田 巧² 坂井裕則² 笹本龍太¹

¹新潟大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

²新潟大学医歯学総合病院診療支援部放射線部門

緒言

X線治療の治療計画装置とは別手段で行う計算による monitor unit (MU) 独立検証で、出力係数(または全散乱係数 $S_{c,p}$) はコリメータ散乱係数 S_c とファントム散乱係数 S_p に分離する方法が³, multileaf collimator (MLC) を用いた照射野 (MLC 照射野) の検証で推奨さ

れている^{1,2)}。一般的に $S_{c,p}(A) = S_c(A) \times S_p(A)$ で表され³⁾, 照射野サイズ A は考慮されるが深さ d は考慮されない。 S_c は空中出力のデータであり、混入電子を除去するために深さ一定のミニファントムを用いて測定される⁴⁾。一方、 S_p は $S_{c,p}$ と S_c の測定データから求められ、任意の深さ d では $S_{c,p}(d, A) = S_c(\text{深さ一定}, A)$

Investigation of Estimation Accuracy of Phantom Scatter Factor by Clarkson Method Considering Depth in MLC Irregular Field

Takahide Hayakawa,^{1*} Takumi Yamada,² Hironori Sakai,² and Ryuta Sasamoto¹

¹ Department of Radiological Technology, School of Health Sciences, Faculty of Medicine, Niigata University

² Division of Radiology, Department of Clinical Technology, Niigata University Medical and Dental Hospital

Received February 5, 2019; Revision accepted August 30, 2019

Code No. 431

Summary

In monitor unit (MU) independent verification by calculation for irregular field (MLC field) using multileaf collimator in X-ray therapy, it has become common to use collimator scatter factor (S_c) and phantom scatter factor (S_p) instead of total scatter factor ($S_{c,p}$). It is usually expressed as $S_{c,p}(A) = S_c(A) \times S_p(A)$, and the field size A is considered but the depth d is not. S_c is data of in-air output, and measure with a mini-phantom at constant depth to remove electron contamination. On the other hand, S_p is obtained from measurement data of $S_{c,p}$ and S_c , and can be expressed as $S_{c,p}(d, A) = S_c(\text{constant depth}, A) \times S_p(d, A)$ at an arbitrary depth d , thus S_p depends on the depth of $S_{c,p}$. Therefore, S_p needs to consider depth. In addition, a linear accelerator equipped with the tertiary MLC has two field sizes, that are collimator field by upper and lower collimators and MLC field by tertiary MLC below them. In MU independent verification by calculation, it is often used that the estimated value of S_p obtained by converting MLC field to equivalent square field and referring to data of S_p in square field. To convert the MLC field to equivalent square field, a conversion formula from sector radius r to equivalent square field L by Clarkson's sector integration (Clarkson method) is used. In this study, using 24 types of MLC fields to evaluate estimation accuracy due to the difference of conversion formula in Clarkson method, we estimated value of S_p using $r=0.5611L$ of B-Clarkson method and using $r=0.5580L$ of A-Clarkson method. And the difference with the measured value of S_p obtained by measuring $S_{c,p}$ and S_c in the same MLC fields was compared. While, to evaluate estimation accuracy due to the different depths using these Clarkson methods, the difference between estimated value and measured value of S_p similarly obtained at depth of 5, 10 and 15 cm was compared. As results, estimated value of S_p using A-Clarkson method than using B-Clarkson method was close to measured value, and it was the same trend at depth of 5, 10 and 15 cm. Therefore, it was suggested that estimation accuracy of S_p by A-Clarkson method is higher than B-Clarkson method when verifying beams with different depths in MU independent verification by calculation for MLC field.

Key words: radiation therapy, Clarkson method, MLC field, different depth, phantom scatter factor

*Corresponding author

$\times S_p(d, A)$ と表すことができ S_p は $S_{c,p}$ の深さに依存する。よって、 S_p は深さを考慮する必要がある。

第三段 MLC を装備するリニアックには、上段と下段のコリメータによるコリメータ照射野と、その下方の第三段 MLC による MLC 照射野の二つの照射野サイズがあり、 S_c はコリメータ照射野サイズ、 S_p は MLC 照射野サイズで変化すると考えられている³⁾。計算による MU 独立検証では、MLC 照射野を等価正方形照射野に変換し、正方形照射野の S_p のデータを参照して S_p の推定値を求める方法がよく用いられる。その MLC 照射野の等価正方形照射野への変換に、Clarkson の扇形積分⁵⁾ (Clarkson 法) を用いる。Clarkson 法は、照射野内の任意の評価点線量が照射野辺縁までの距離(半径)に依存するとの考えに基づき、評価点から MLC 照射野辺縁まで中心角(例えば 10 度)ごとに分割した扇形の半径を利用する。Georg ら⁶⁾ や保科ら⁷⁾ の報告では、MLC 照射野を分割した各扇形半径 r を等価正方形照射野の一边 L へ変換し、正方形照射野の S_p のデータを参照して L に対する S_p の推定を行い、最終的に各扇形で得た S_p の推定値の平均を求めている。それらの報告では、 r と L の変換に Bjärngard ら⁸⁾ が報告した円形照射野と正方形照射野の等価性に関する式 $r=0.5611 L$ を用いているため、ここでは Bjärngard らの式を用いた Clarkson 法(以下、B-Clarkson 法)とする。一方、早川ら⁹⁾ はコリメータ照射野の S_p の推定において、Bjärngard らの式を修正した面積比補正(area ratio correction: ARC)法を提案し、円形照射野と正方形照射野の等価性に関する式 $r=0.5580 L$ を報告している。しかし、MLC 照射野において ARC 法の式を用いた Clarkson 法(以下、A-Clarkson 法)による S_p の推定に関する報告はない。

また、早川ら⁹⁾ の報告では、コリメータ照射野から等価正方形照射野への変換に Day 法、A/P 法、ARC 法を用いた場合の S_p の推定値と測定値の差を比較し、いずれの方法も推定精度は同程度だったとしているが、深さ 10 cm に限定しているため深さの違いは考慮されていなかった。深さの違いを考慮して深さ 5, 10, 15 cm で行った検討¹⁰⁾ では、どの深さにおいても Day 法や A/P 法より ARC 法を用いた場合の方が S_p の推定精度が良かったとしている。しかし、MLC 照射野において深さの違いを考慮した S_p の推定に関する報告はない。

そこで本研究では、MLC 照射野における S_p の推定に関して、Clarkson 法の扇形半径から等価正方形照射野辺への変換式の違いによる影響を検討するため、Georg ら⁶⁾ や保科ら⁷⁾ の報告に基づいて大きさと形状

の異なる MLC 照射野で測定した $S_{c,p}$ と S_c から求めた S_p の測定値と、B-Clarkson 法と A-Clarkson 法による S_p の推定値との差をそれぞれ比較した。また、深さの違いによる影響についても検討するため、早川らの報告¹⁰⁾ に基づいて深さ 5, 10, 15 cm の S_p の測定値と、B-Clarkson 法と A-Clarkson 法による S_p の推定値との差を比較した。

1. 方法

1-1 使用機器

直線加速器は Clinac-iX (Varian Medical Systems 社)、MLC は Millennium 120 (Varian Medical Systems 社)を使用した。X 線エネルギーは 4 MV と 10 MV である。電位計は RAMTEC Smart (東洋メディック社)と一体で校正済みのファーマ形電離箱 TN30013 (PTW 社)を使用した。全散乱係数 $S_{c,p}$ の測定は 3-dimensional (3D) 水ファントム Blue Phantom (IBA Dosimetry 社)を使用した。コリメータ散乱係数 S_c の測定はアクリル製で直径 4 cm ϕ 、深さ一定の 10 cm のミニファントム(クオリタ社)を使用した。水温計と気圧計は計量法検定済のものを使用した。表計算ソフトは Microsoft Excel 2013 (Microsoft 社)を使用した。

1-2 全散乱係数 $S_{c,p}$ の測定

ビーム中心軸は床に垂直にして、水温が室温と同じになるようにした 3D 水ファントムの水中 5, 10, 15 cm の 3 種類の深さでそれぞれ全散乱係数 $S_{c,p}$ を測定した。電離箱長軸はビーム中心軸に一致させ、線源電離箱間距離は一定で電離箱の幾何学的中心をアイソセンタに固定した (Fig. 1)。MU 値は 50 に設定して照射した。各照射野の測定は連続した 3 回の平均を読み値 $M_{c,p,raw}$ [nC] とし、この $M_{c,p,raw}$ に温度気圧補正係数 k_{TP} を乗じ、線量計に依存する他の補正係数には変化がないものとして、 $M_{c,p}=M_{c,p,raw} \times k_{TP}$ により $M_{c,p}$ [nC] を求めた。そして、式(1)により $S_{c,p}$ を求めた。

$$S_{c,p}(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc}) = \frac{M_{c,p}(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc})}{M_{c,p}(X=X_{mlc}=10 \text{ cm}, Y=Y_{mlc}=10 \text{ cm})} \quad \cdots (1)$$

コリメータ照射野の大きさは幅 X と高さ Y 、MLC 不整形照射野および MLC 正方形照射野の大きさは幅 X_{mlc} と高さ Y_{mlc} で表す。測定した MLC 不整形照射野の大きさ (X , Y , および X_{mlc} , Y_{mlc}) と形状は Table 1 と Fig. 2 に示す 24 種類である (Table 1 の 1~24)。24 種類の MLC 照射野の大きさと形状は、Georg ら⁶⁾ や保科ら⁷⁾ の報告に基づき作成した。このほか、MLC

Fig. 1 Instruments and setup for measuring $S_{c,p}$ and S_c .

正方形照射野の近似式を求めるために、大きさの異なる MLC 正方形照射野での $S_{c,p}$ の測定も行った。その MLC 正方形照射野の大きさと形状は Table 2 と Fig. 3 に示す 12 種類 (Table 2 の a~l) である。なお、24 種類の MLC 不整形照射野と 12 種類の MLC 正方形照射野はミニファントム (深さ一定の 10 cm, 直径 4 cm ϕ) がアイソセンタ面で照射野に含まれる大きさと形状である (Table 1, 2 の r_{min} はアイソセンタから MLC 先端までの最小半径で $r_{min} \geq 2$ cm)。更に、加速器の日内変動の補正のために、基準 MLC 正方形照射野 (Table 2 の s10) での測定を途中で繰り返し行った。

1-3 コリメータ散乱係数 S_c の測定

ビーム中心軸は床に平行にして、治療寝台上に高さ約 55 cm の発泡スチロールを設置し、その上にミニファントムを装着した電離箱を配置してコリメータ散乱係数 S_c を測定した。 S_c は深さ一定の 10 cm のみである。電離箱長軸はビーム中心軸に一致させ、線源電離箱間距離一定で電離箱の幾何学的中心をアイソセンタに固定した (Fig. 1)。MU 値は 50 に設定して照射した。各照射野の測定は連続した 3 回の平均を読み値 $M_{c,raw}$ [nC] とし、この $M_{c,raw}$ に温度気圧補正係数 k_{TP} を乗じ、線量計に依存する他の補正係数には変化がないものとして、 $M_c = M_{c,raw} \times k_{TP}$ により測定値 M_c [nC] を求めた。そして、式 (2) により S_c を求めた。

$$S_c(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc}) = \frac{M_c(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc})}{M_c(X=X_{mlc}=10 \text{ cm}, Y=Y_{mlc}=10 \text{ cm})} \quad \dots (2)$$

測定した MLC 不整形照射野と MLC 正方形照射野

の大きさと形状は、 $S_{c,p}$ の測定と同じそれぞれ 24 種類と 12 種類である (Table 1, 2, Fig. 2, 3)。更に、加速器の日内変動の補正のために、基準 MLC 正方形照射野 (Table 2 の s10) での測定を途中で繰り返し行った。

1-4 ファントム散乱係数 S_p の測定値

ファントム散乱係数 S_p は測定で直接求めることは難しいため、MLC 不整形照射野と MLC 正方形照射野の大きさと形状が同じときの $S_{c,p}$ と S_c の測定値から式 (3) で計算により求めた。

$$S_p(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc}) = \frac{S_{c,p}(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc})}{S_c(X=X_{mlc}, Y=Y_{mlc})} \quad \dots (3)$$

$S_{c,p}$ は深さ 5, 10, 15 cm の各点で測定した $S_{c,p,5 \text{ cm}}$, $S_{c,p,10 \text{ cm}}$, $S_{c,p,15 \text{ cm}}$ の値であり、 S_c は深さ一定の 10 cm で測定した値を用いて、計算により深さ 5, 10, 15 cm の S_p の測定値 (measured) を $S_{p,5 \text{ cm}}$, $S_{p,10 \text{ cm}}$, $S_{p,15 \text{ cm}}$ としてそれぞれ求めた。

1-5 MLC 正方形照射野の S_p の近似式

深さ 5, 10, 15 cm でそれぞれ測定した MLC 正方形照射野の S_p の測定値に、Microsoft Excel 2013 (Microsoft 社) でカーブフィッティングして近似式を求めた。近似式は早川らの報告¹⁰⁾ に基づき 5 次の多項式の式 (4) を採用した。

$$S_{p,fit}(L) = a_5 L^5 + a_4 L^4 + a_3 L^3 + a_2 L^2 + a_1 L + a_0 \quad \dots (4)$$

a_j ($j=0 \sim 5$) はフィッティングパラメータとなる定数、 L (cm) は MLC 正方形照射野の一辺の長さ (= 等価 MLC

Table 1 Type and size of measurement MLC irregular fields Numbers 1 to 24 correspond to the field number of Fig. 2

MLC field		MLC field [cm]		MLC field radius	X collimator field [cm] X=X1+X2		Y collimator field [cm] Y=Y1+Y2		MLC field area/ collimator field area
number	type	X _{mlc}	Y _{mlc}	r _{min} [cm]	X1	X2	Y1	Y2	
1	r10	10	10	4.79	5	5	5	5	0.788
2	r14	14	14	6.92	7	7	7	7	0.787
3	r18	18	18	8.93	9	9	9	9	0.786
4	dia10	10	10	3.89	5	5	5	5	0.550
5	dia14	14	14	5.2	7	7	7	7	0.536
6	dia18	18	18	6.53	9	9	9	9	0.528
7	T10	10	10	2.5	5	5	5	5	0.625
8	T14	14	14	3.5	7	7	7	7	0.625
9	T18	18	18	4.5	9	9	9	9	0.625
10	L10	10	10	2.5	5	5	5	5	0.563
11	L14	14	14	3.5	7	7	7	7	0.563
12	L18	18	18	4.5	9	9	9	9	0.563
13	tri9	9	9	2.88	4.5	4.5	3	6	0.528
14	tri12	12	12	3.72	6	6	4	8	0.521
15	tri15	15	15	4.52	7.5	7.5	5	10	0.517
16	para9	9	9	2.02	4.5	4.5	4.5	4.5	0.528
17	para12	12	12	2.88	6	6	6	6	0.521
18	para15	15	15	3.46	7.5	7.5	7.5	7.5	0.517
19	w9	9	18	4.5	4.5	4.5	9	9	0.782
20	w9-90	18	9	4.5	9	9	4.5	4.5	0.784
21	w12	12	18	6	6	6	9	9	0.782
22	w12-90	18	12	6	9	9	6	6	0.782
23	w15	15	18	7.5	7.5	7.5	9	9	0.782
24	w15-90	18	15	7.5	9	9	7.5	7.5	0.782

Fig. 2 Shape of MLC irregular fields measured for $S_{c,p}$ and S_c (24 types).
 Size of collimator field and MLC irregular field, see Table 1.
 Numbers 1 to 24 correspond to the field number of Table 1.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24

Table 2 Type and size of measurement MLC square fields Alphabets *a* to *l* correspond to the alphabet in Fig. 3

MLC field		MLC field [cm]		MLC field radius	X collimator field [cm] X=X1+X2		Y collimator field [cm] Y=Y1+Y2		MLC field area/ collimator field area
Alphabet	type	X _{mlc}	Y _{mlc}	r _{min} [cm]	X1	X2	Y1	Y2	
<i>a</i>	s5	5	5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.00
<i>b</i>	s6	6	6	3	3	3	3	3	1.00
<i>c</i>	s8	8	8	4	4	4	4	4	1.00
<i>d</i>	s10	10	10	5	5	5	5	5	1.00
<i>e</i>	s12	12	12	6	6	6	6	6	1.00
<i>f</i>	s15	15	15	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	1.00
<i>g</i>	s18	18	18	9	9	9	9	9	1.00
<i>h</i>	s20	20	20	10	10	10	10	10	1.00
<i>i</i>	s24	24	24	12	12	12	12	12	1.00
<i>j</i>	s28	28	28	14	14	14	14	14	1.00
<i>k</i>	s30	30	30	15	15	15	15	15	1.00
<i>l</i>	s40	40	40	20	20	20	20	20	1.00

Fig. 3 Shape of MLC square fields measured for $S_{c,p}$ and S_c (12 types).
Size of collimator field and MLC square field, see Table 2. Alphabets *a* to *l* correspond to the alphabet in Table 2.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>

正方形照射野辺)である。この式(4)を利用することで任意の L に対する S_p の推定値を求めることができる。

1-6 Clarkson 法の扇形半径から等価 MLC 正方形照射野辺への変換式

MLC 不整形照射野を中心角 10° ずつ 360° まで分割した扇形のそれぞれの半径 r_i を、B-Clarkson 法は Bjärngård ら⁸⁾ の式(5)を用いて等価 MLC 正方形照射野辺 $L_{B,i}$ に変換した。

$$L_{B,i} = \frac{r_i}{0.5611} \quad \text{..... (5)}$$

同様に、A-Clarkson 法は ARC 法⁹⁾ の式(6)を用いて等価 MLC 正方形照射野辺 $L_{A,i}$ に変換した。

$$L_{A,i} = \frac{r_i}{0.5580} \quad \text{..... (6)}$$

1-7 S_p の推定値

式(5)の $L_{B,i}$ と式(6)の $L_{A,i}$ は、それぞれ式(4)に代入すると各扇形の $S_{p,fit}(L_{B,i})$ と $S_{p,fit}(L_{A,i})$ が求められる。その平均を MLC 不整形照射野の S_p の推定値(estimated)とした。つまり、B-Clarkson 法の場合は、

$$S_{p,B} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} S_{p,fit}(L_{B,i}) \quad \text{..... (7)}$$

A-Clarkson 法の場合は、

$$S_{p,A} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} S_{p,fit}(L_{A,i}) \quad \text{..... (8)}$$

である。深さ 5, 10, 15 cm でそれぞれ S_p の推定値を求め、それぞれ $S_{p,B5\text{ cm}}$, $S_{p,B10\text{ cm}}$, $S_{p,B15\text{ cm}}$, および $S_{p,A5\text{ cm}}$, $S_{p,A10\text{ cm}}$, $S_{p,A15\text{ cm}}$ とした。

B-Clarkson 法と A-Clarkson 法のそれぞれの S_p の推定値を求めるワークシートは表計算ソフトの Microsoft Excel 2013 を用いた。なお、Fig. 4 に示す MLC 不整形照射野では中心角 10° ずつ扇形に分割す

Fig. 4 Example of MLC irregular field with multiple sector radius.

ると、330°のとき複数の半径(図中では r_a , r_b , r_c)になる。そのような場合はそれぞれの半径の等価MLC正方形照射野辺(L_{r_a} , L_{r_b} , L_{r_c})で S_p を求めて、

$$S_p(L) = S_p(L_{r_c}) - S_p(L_{r_b}) + S_p(L_{r_a}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

のように開口部と遮蔽部に応じて加算または減算する方法を採用した⁷⁾。

1-8 S_p の測定値と推定値の差

各MLC不整形照射野の測定値 S_p と推定値 $S_{p,B}$, $S_{p,A}$ との差(difference)をそれぞれ求めた。深さごとの差は以下の式で求め、これが小さいほどMLC不整形照射野とMLC正方形照射野の線量差が小さい、より等価に近いとの評価になる。

深さ5 cmの差,

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,5\text{ cm}} - S_{p,B5\text{ cm}})}{S_{p,B5\text{ cm}}} \times 100, \text{ または,}$$

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,5\text{ cm}} - S_{p,A5\text{ cm}})}{S_{p,A5\text{ cm}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (10)$$

深さ10 cmの差,

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,10\text{ cm}} - S_{p,B10\text{ cm}})}{S_{p,B10\text{ cm}}} \times 100, \text{ または,}$$

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,10\text{ cm}} - S_{p,A10\text{ cm}})}{S_{p,A10\text{ cm}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (11)$$

深さ15 cmの差,

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,15\text{ cm}} - S_{p,B15\text{ cm}})}{S_{p,B15\text{ cm}}} \times 100, \text{ または,}$$

$$\text{difference}(\%) = \frac{(S_{p,15\text{ cm}} - S_{p,A15\text{ cm}})}{S_{p,A15\text{ cm}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(10), (11), (12)の差は24種類のMLC不整形照射野でそれぞれ求めた。そして、それぞれの深さで、B-Clarkson法とA-Clarkson法の S_p の差の平均を求

め、統計解析ソフトRを用いてt検定を行い、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。

2. 結果

2-1 $S_{c,p}$ と S_c の測定値

Figure 5は4 MVと10 MVのX線の深さ5, 10, 15 cmにおけるMLC正方形照射野の $S_{c,p}$ の測定値、および深さ10 cmにおけるMLC正方形照射野の S_c の測定値のグラフを示す。 $S_{c,p}$ はどちらのエネルギーのX線でも、深部ほど傾きが大きかった。 $S_{c,p}$ の変化の幅(最小値と最大値の差)は、4 MV-X線は深さ5 cmで0.23(最小0.92, 最大1.15), 深さ10 cmで0.36(最小0.88, 最大1.24), 深さ15 cmで0.48(最小0.86, 最大1.34)となり、10 MV-X線は深さ5 cmで0.18(最小0.93, 最大1.11), 深さ10 cmで0.25(最小0.91, 最大1.16), 深さ15 cmで0.31(最小0.90, 最大1.21)で、同じ深さでは4 MVの方が10 MVのX線に比べて大きかった。また、 S_c の変化の幅(最小値と最大値の差)は、4 MV-X線は0.07(最小0.97, 最大1.04), 10 MV-X線は0.09(最小0.96, 最大1.05)で、10 MVの方が4 MVのX線に比べて大きかった。

2-2 MLC正方形照射野の S_p の測定値と近似式

Figure 6は4 MVと10 MVのX線の深さ5, 10, 15 cmにおけるMLC正方形照射野の S_p の測定値と近似式のグラフを示す(定数 a_i は図中に示す)。どちらのエネルギーのX線でも深部ほど傾きが大きかった。 S_p の変化の幅(最小値と最大値の差)は、4 MV-X線は深さ5 cmで0.16(最小0.95, 最大1.11), 深さ10 cmで0.28(最小0.91, 最大1.19), 深さ15 cmで0.40(最小0.88, 最大1.28)となり、10 MV-X線は深さ5 cmで0.09(最小0.97, 最大1.06), 深さ10 cmで0.15(最小0.95, 最大1.10), 深さ15 cmで0.22(最小0.93, 最大1.15)で、同じ深さでは4 MVの方が10 MVのX線に比べて大きかった。

2-3 S_p の測定値と推定値の差

Figure 7とFig. 8に4 MVと10 MVのX線の深さ5, 10, 15 cmでのB-Clarkson法とA-Clarkson法の式(10), (11), (12)の S_p の差を、24種類のMLC不整形照射野ごとに示す。4 MV-X線の深さ5, 10, 15 cmの S_p の差はそれぞれ、B-Clarkson法では0.01~0.34%, 0.06~0.60%, 0.05~0.61%, A-Clarkson法では-0.03~0.30%, -0.02~0.52%, -0.06~0.51%であった。また、B-Clarkson法よりA-Clarkson法の方が S_p の差(絶対値)が小さかったのは、深さ5, 10, 15 cmでそれぞれ

Fig. 5 Measured values of $S_{c,p}$ and S_c in MLC square fields.

- (a) 4 MV X-ray, $S_{c,p}$, depth 5 cm (diff.: 0.23, min: 0.92, max: 1.15), depth 10 cm (diff.: 0.36, min: 0.88, max: 1.24), depth 15 cm (diff.: 0.48, min: 0.86, max: 1.34), S_c , depth 10 cm (diff.: 0.07, min: 0.97, max: 1.04)
 (b) 10 MV X-ray, $S_{c,p}$, depth 5 cm (diff.: 0.18, min: 0.93, max: 1.11), depth 10 cm (diff.: 0.25, min: 0.91, max: 1.16), depth 15 cm (diff.: 0.31, min: 0.90, max: 1.21), S_c , depth 10 cm (diff.: 0.09, min: 0.96, max: 1.05)
 (*) diff. is difference between minimum value and maximum value.

Fig. 6 Measured values of S_p in MLC square field, and the fitted curve.

- (a) 4 MV X-ray, depth at 5 cm (diff.: 0.16, min: 0.95, max: 1.11), (b) 10 MV X-ray, depth at 5 cm (diff.: 0.09, min: 0.97, max: 1.06),
 (c) 4 MV X-ray, depth at 10 cm (diff.: 0.28, min: 0.91, max: 1.19), (d) 10 MV X-ray, depth at 10 cm (diff.: 0.15, min: 0.95, max: 1.10),
 (e) 4 MV X-ray, depth at 15 cm (diff.: 0.40, min: 0.88, max: 1.28), (f) 10 MV X-ray, depth at 15 cm (diff.: 0.22, min: 0.93, max: 1.15)
 (*) diff. is difference between minimum value and maximum value.

a	b
c	d
e	f

Fig. 7 Percentage difference between measured value and estimated value of S_p in B-Clarkson method and A-Clarkson method at each depths (4 MV X-ray).
(a) depth at 5 cm, (b) depth at 10 cm, (c) depth at 15 cm

Fig. 8 Percentage difference between measured value and estimated value of S_p in B-Clarkson method and A-Clarkson method at each depths (10 MV X-ray).
(a) depth at 5 cm, (b) depth at 10 cm, (c) depth at 15 cm

Fig. 9 Percentage point of differences between B-Clarkson method and A-Clarkson method at each depths.
(a) 4 MV X-ray, (b) 10 MV X-ray

Fig. 10 Mean value and standard deviations (SD) in B-Clarkson method and A-Clarkson method at each depths.
(a) 4 MV X-ray (number of MLC irregular fields, $n=24$), B-Clarkson, depth 5 cm (mean: 0.20, SD: 0.08), depth 10 cm (mean: 0.34, SD: 0.14), depth 15 cm (mean: 0.41, SD: 0.15), A-Clarkson, depth 5 cm (mean: 0.15, SD: 0.08), depth 10 cm (mean: 0.27, SD: 0.14), depth 15 cm (mean: 0.30, SD: 0.15) (* $p<0.05$)
(b) 10 MV X-ray (number of MLC irregular fields, $n=24$), B-Clarkson, depth 5 cm (mean: 0.25, SD: 0.08), depth 10 cm (mean: 0.24, SD: 0.05), depth 15 cm (mean: 0.29, SD: 0.09), A-Clarkson, depth 5 cm (mean: 0.23, SD: 0.08), depth 10 cm (mean: 0.20, SD: 0.05), depth 15 cm (mean: 0.24, SD: 0.09) (* $p<0.05$)

23 種類(W9-90 以外), 24 種類, 23 種類(W9-90 以外)であった。10 MV-X 線の深さ 5, 10, 15 cm の S_p の差はそれぞれ, B-Clarkson 法では 0.07~0.41%, 0.10~0.32%, 0.03~0.43%, A-Clarkson 法では 0.05~0.39%, 0.06~0.28%, -0.03~0.37% であった。また, B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の方が S_p の差(絶対値)が小さかったのは, 深さ 5, 10, 15 cm でそれぞれ 24 種類であった。

また, Fig. 9 に 24 種類の MLC 不整形照射野ごとに式(13)で求めた差のパーセント (percentage point of difference)を示す。

差のパーセント (percentage point of difference)

$$= (\text{B-Clarkson 法の } S_p \text{ の差} \%) - (\text{A-Clarkson 法の } S_p \text{ の差} \%) \quad (13)$$

4 MV と 10 MV の X 線の 24 種類すべての MLC 不

整形照射野で深部ほど差のパーセントは大きく, 10 MV より 4 MV の X 線の方が大きかった。

そして, Fig. 10 に 4 MV と 10 MV の X 線の深さ 5, 10, 15 cm での 24 種類の MLC 不整形照射野の B-Clarkson 法と A-Clarkson 法の式(10), (11), (12)の S_p の差の平均と標準偏差を示す。4 MV-X 線の深さ 5, 10, 15 cm の平均と標準偏差はそれぞれ, B-Clarkson 法では $0.20 \pm 0.08\%$, $0.34 \pm 0.14\%$, $0.41 \pm 0.15\%$, A-Clarkson 法では $0.15 \pm 0.08\%$, $0.27 \pm 0.14\%$, $0.30 \pm 0.15\%$ であった。10 MV-X 線の深さ 5, 10, 15 cm の平均と標準偏差はそれぞれ, B-Clarkson 法では $0.25 \pm 0.08\%$, $0.24 \pm 0.05\%$, $0.29 \pm 0.09\%$, A-Clarkson 法では $0.23 \pm 0.08\%$, $0.20 \pm 0.05\%$, $0.24 \pm 0.09\%$ であった。4 MV-X 線では深さ 15 cm で, 10 MV-X 線では深さ 10, 15 cm で B-Clarkson 法と A-Clarkson 法の S_p の差

の平均の間に統計的な有意差 ($p < 0.05$) を認めた。

3. 考 察

まず Fig. 6 から, S_p は照射野内の水の体積の変化に伴う散乱線の増減を反映するため¹¹⁾, そのグラフの傾きは深部ほど大きくなり, エネルギーでは 10 MV-X 線より 4 MV-X 線で大きいことがわかった。

次に Fig. 7 と Fig. 8 から, ほとんどの MLC 不整形照射野でどの深さでも B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の方が S_p の測定値と推定値の差が小さいことがわかった。そして, その差は深部になると拡大する傾向があった (Fig. 9)。B-Clarkson 法と A-Clarkson 法の違いは式 (5) と式 (6) の 0.5611 と 0.5580 の定数の差 (約 0.6%) であり, これは深さに関係なく S_p の推定値に影響する (定数の違いについては付録参照)。Figure 6 の S_p のグラフの傾きは深部ほど勾配が急峻になるため, S_p の推定値への影響は大きく, 逆に, 浅部では勾配が緩やかであるため S_p の推定値への影響は小さくなったと考える。このことから, MLC 不整形照射野では, B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の方が深さの違いによる S_p の推定精度が高いといえる。その深さの違いによる推定精度は, 深さ 5 cm と 15 cm を比べると 4 MV は約 0.1%, 10 MV は約 0.05% で 10 MV の X 線の方が高い (Fig. 9)。これは, Fig. 6 の S_p のグラフの傾きがエネルギーによって異なる (10 MV-X 線で傾きが小さい) ことが影響していると考ええる。

また, すべての MLC 不整形照射野において S_p の測定値と推定値に差を生じた (Fig. 7, 8)。特に L 字形 (L), 三角形 (tri), 平行四辺形 (para) の形状では S_p の測定値と推定値の差が大きい傾向があった。これは, 上段, 下段のコリメータと, 第三段の MLC から成る MLC 照射野で報告されているコリメータ散乱係数 S_c の aperture effect¹²⁾ の影響と考える。aperture effect の影響は, 大きさ L_{MLC} の MLC 照射野が, 大きさ L_{jaw} のコリメータ照射野で形成されるとき, コリメータ散乱係数 $S_c(L_{MLC})$ はコリメータ散乱係数 $S_c(L_{jaw})$ と leaf transmission などの因子に分けて, $S_c(L_{MLC}) = S_c(L_{jaw}) + B \exp(-CX)$ の関係 (B, C は定数, X は MLC 照射野の等価正方形照射野辺) で説明されている¹²⁾。Table 1 の 24 種類の MLC 不整形照射野では, コリメータ照射野より小さい MLC 照射野が X 線を最終的に遮蔽するため leaf だけの部分が存在し, その部分で leaf transmission などがあると考ええる。leaf だけの面積が大きい, つまり MLC 照射野/コリメータ照射野比が小さいとき上記式の第 2 項の因子は大きいと考える。一方, Table 2 の MLC 正方形照射野では, コリメータ

照射野と MLC 照射野は同じ大きさ (MLC 照射野/コリメータ照射野比は 1) であり, 第 2 項の因子は小さいと考える。よって, Table 2 の MLC 正方形照射野で測定した $S_{c,p}$ と S_c のデータから求める Clarkson 法による S_p の推定値は第 2 項の因子の影響は小さいと考えるが, Table 1 の MLC 不整形照射野で測定した $S_{c,p}$ と S_c から求める S_p の測定値は, MLC 照射野/コリメータ照射野比に依存して第 2 項の因子の影響があると考ええる。その第 2 項の因子の影響の差が, S_p の測定値と推定値の差に現れたと考える。これは, S_p の測定値と推定値の差がほとんど正の値であることでもわかる。

しかし, 菱形 (dia) と楕円 (w と w-90) のように aperture effect の影響とは異なり, 同じ MLC 形状でも大きさによって S_p の測定値と推定値の差が大きく変化した MLC 不整形照射野があった。これは, MLC の leaf 幅が有限なことによる step field effect の影響^{13, 14)} が考えられる。そのために, 階段状の leaf 部分がある菱形や楕円のような MLC 不整形照射野の S_p の測定値と, 等価正方形照射野辺に変換して階段状の leaf 部分が少ない MLC 正方形照射野のデータから得る S_p の推定値との差が大きく変化したと考える。

B-Clarkson 法と A-Clarkson 法による S_p の推定値は, 同じ MLC 照射野の S_p の測定値と差があり, どちらも浅部より深部で拡大する傾向があった (Fig. 7, 8)。これは, 本検討で用いた Clarkson 法による S_p の推定の限界であり, さらなる推定精度の向上にはこの差を小さくする方法の検討が必要といえる。

4. 結 語

MLC 不整形照射野の深さを考慮した Clarkson 法のファントム散乱係数の推定に関して, B-Clarkson 法と A-Clarkson 法による推定精度を, 4 MV と 10 MV の X 線の深さ 5, 10, 15 cm で, それぞれ 24 種類の MLC 不整形照射野で測定した S_p のデータを使って検討した。

4 MV-X 線では深さ 5 cm と 10 cm で 23 種類の MLC 不整形照射野が, 深さ 10 cm で 24 種類の MLC 不整形照射野が B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の推定精度が高かった。10 MV-X 線ではどの深さでも 24 種類の MLC 不整形照射野が B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の推定精度が高かった。また, どのエネルギーの X 線でも浅部より深部で推定精度が低下する傾向があったが, その低下の程度は B-Clarkson 法より A-Clarkson 法の方が小さかった。よって, MLC 照射野の計算による MU 独立検証で深さが違うビームの検証を行うとき, B-Clarkson 法より A-Clarkson 法

の S_p の推定精度が高いことが示された。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた新潟大学医歯学総合病院の診療放射線技師の皆様に深く感謝申し上げます。本検討の実験にご協力いただいた新潟大学医学部保健学科(当時)の丸山千夏氏、大窪梨萌氏に心より感謝いたします。

利益相反

筆頭著者および共著者全員が開示すべき利益相反はない。

付 録

定数の違いについて

面積が等しい照射野は等価照射野と仮定する場合、正方形照射野辺 s と等価な円形照射野の半径 r_0 の関係は面積が等しいので $s^2 = \pi r_0^2$ 、このときの面積 A_0 とすると面積比 P_0 は、

$$P_0 = \frac{A_0}{A_0} = 1$$

$$r_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} s = 0.5641... \times s$$

Björngard らの方法の場合、正方形照射野辺 s と等価な円形照射野の半径 r_1 の関係は $r_1 = 0.5611... \times s$ なので、このとき面積 A_1 とすると A_0 に対する面積比 P_1 は、

$$P_1 = \frac{A_1}{A_0} = \frac{\pi \cdot (r_1)^2}{\pi \cdot (r_0)^2} = \frac{(0.5611... \times s)^2}{(0.5641... \times s)^2} = 0.9891...$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{A_1}{A_0}} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} s = \sqrt{0.9891...} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} s = 0.5611... \times s$$

面積比補正 (ARC) 法の場合、正方形照射野辺 s と等価な円形照射野の半径 r_2 の関係は $r_2 = 0.5580... \times s$ なので、このとき面積 A_2 とすると A_0 に対する面積比 P_2 は、

$$P_2 = \frac{A_2}{A_0} = \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 = (0.9891...) ^2 = 0.9878...$$

$$r_2 = \sqrt{\left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} s = \sqrt{(0.9891...) ^2} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} s = 0.5580... \times s$$

となる。

参考文献

- 1) Stern RL, Heaton R, Fraser MW, et al. Verification of monitor unit calculations for non-IMRT clinical radiotherapy: report of AAPM Task Group 114. Med Phys 2011; 38(1): 504-530.
- 2) Karlsson M, Ahnesjö A, Georg D, et al. Independent dose calculations, concepts and models. ESTRO Booklet Series No.10, ESTRO, Brussels, 2010.
- 3) Khan FM, Sewchand W, Lee J, et al. Revision of tissue-maximum ratio and scatter-maximum ratio concepts for cobalt 60 and higher energy x-ray beams. Med Phys 1980; 7(3): 230-237.
- 4) Zhu TC, Ahnesjö A, Lam KL, et al. Report of AAPM Therapy Physics Committee Task Group 74: in-air output ratio, S_c , for megavoltage photon beams. Med Phys 2009; 36(11): 5261-5291.
- 5) Clarkson JR. A note on depth doses in fields of irregular Shape. Br J Radiol 1941; 14: 265-268.
- 6) Georg D, Olofsson J, Künzler T, et al. On empirical methods to determine scatter factors for irregular MLC shaped beams. Med Phys 2004; 31(8): 2222-2229.
- 7) 保科正夫, 都丸好孝. 2. 患者処方線量の不確かさの検討 II. スプレッドシートによる MU 計算. 放射線治療分科会誌 2006; 20(1): 55-65.
- 8) Björngard BE, Siddon RL. A note on equivalent circles, squares, and rectangles. Med Phys 1982; 9(2): 258-260.
- 9) 早川岳英, 山田 巧, 坂井裕則, 他. 矩形照射野のファントム散乱係数 S_p の推定. 日放技学誌 2012; 68(1): 15-29.
- 10) 早川岳英, 山田 巧, 坂井裕則, 他. 等価正方形照射野への変換法の違いがファントム散乱係数の深さ方向に与える影響の検討. 日放技学誌 2019; 75(6): 525-535.
- 11) 付録 17 光子線の等価照射野, 散乱係数, 出力係数. 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法(標準計測法 12). 日本医学物理学会編. 通商産業研究社, 東京, 2012: 234-240.
- 12) Alaei P, Higgins P. Effect of multileaf collimator-defined segment size on S_c . Med Phys 2010; 37(6): 2731-2737.
- 13) Galvin JM, Leavitt DD, Smith AA. Field edge smoothing for multileaf collimators. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1996; 35(1): 89-94.
- 14) Liu Y, Shi C, Tynan P, et al. Dosimetric characteristics of dual-layer multileaf collimation for small-field and intensity-modulated radiation therapy applications. J Appl Clin Med Phys 2008; 9(2): 15-29.

問合せ先

〒951-8518 新潟市中央区旭町通 2-746
新潟大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 早川岳英