

# 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 —線形加速器Synergyにおける計測—

早川 岳英<sup>1)</sup>・山田 巧<sup>2)</sup>・坂井 裕則<sup>2)</sup>・笹本 龍太<sup>1)</sup>・石川 玉樹<sup>3)</sup>・吉田 泰久<sup>4)</sup>

Key words : 放射線治療, 等価正方形照射野, 矩形照射野, 深さ依存, ファントム散乱係数

**要旨** X線治療の計算によるMU独立検証で等価正方形照射野(等価正方形辺)は, 検証の精度に影響するため重要である. 等価正方形辺は深さやエネルギーに依存しないと仮定されている. しかし, 先行研究で線形加速器Clinac-iX (Varian社製)の矩形照射野で求めたファントム散乱係数 $S_p$ の測定値と, 同じ矩形照射野を等価正方形辺に変換して求めた $S_p$ の推定値の差は深さによって変わる深さ依存があり, その仮定は有効ではなかった. また, Day法やA/P法に比べARC法の等価正方形辺はその深さ依存が小さいことも報告された. 本研究は, Clinac-iXとガントリヘッドの構造が異なる線形加速器Synergy (Elekta社製)で, 同じ方法により $S_p$ の測定値と推定値の差を調べた. その結果, Synergyでも深さ依存が見られ, ARC法がDay法やA/P法に比べて小さく,  $S_p$ の推定精度が良いことが示された.

## 1. 緒 言

X線治療において, 治療計画装置とは別の方法でmonitor unit (MU) 独立検証を行う必要がある<sup>1,2)</sup>. 計算によるMU独立検証では, あらかじめ測定したデータを利用して等価照射野<sup>3)</sup>による推定が行われることが多い. その等価照射野で, 矩形照射野から等価正方形照射野(等価正方形辺)を求める方法には標準計測法12の表<sup>4)</sup>(以下, Day法)や, 照射野の面積周囲長比(area/perimeter, A/P)の式<sup>5)</sup>(以下, A/P法), 面積比補正(area ratio correction, ARC)法<sup>6)</sup>(以下, ARC法)がある. それらの方法の等価正方形辺は深さやエネルギーに依存しないと仮定されている. しかし, 先行研究のVarian社製の線形加速器Clinac-iXのX線において, 矩形照射野の測定で求めたファントム散乱係数 $S_p$ の測定値と, 同じ矩形照射野を等価正方形辺に変換して求めた $S_p$ の推定値の差は深さによって変わる深さ依存があり, その仮定は有効ではなかった. そして, その深

さ依存はDay法やA/P法よりARC法で小さいことが報告された<sup>7)</sup>.  $S_p$ は直接測定することができないため, 同じ照射野サイズ $A$ で水ファントムを用いて測定した全散乱係数 $S_{c,p}(A)$ と, ミニファントムを用いて測定したコリメータ散乱係数 $S_c(A)$ の, それぞれの測定値から $S_p(A) = S_{c,p}(A) / S_c(A)$ の計算で求める<sup>8)</sup>.  $S_c(A)$ はガントリヘッド内の構造に由来する散乱線が変わる因子とされており<sup>8)</sup>, ガントリヘッド内の構造が異なる線形加速器では変化に違いが現れる<sup>9)</sup>.  $S_c(A)$ の変化の違いは $S_{c,p}(A)$ にも現れるが, それらの除算で求める $S_p(A)$ の測定値にも現れるかは明らかではない. また, その $S_p(A)$ の測定値と推定値との差の深さ依存への影響も不明である. そこで, Clinac-iXとはガントリヘッドの構造が異なるElekta社製の線形加速器SynergyのX線において, 先行研究と同じ方法で $S_p$ の測定値と推定値を求め, それらの差の深さ依存について検討した.

- 1) 新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野
  - 2) 新潟大学医歯学総合病院診療支援部放射線部門
  - 3) 国立病院機構相模原病院放射線科
  - 4) 国立病院機構西新潟中央病院放射線科
- 令和元年11月12日受理

表1 測定した照射野の組合せ

○ : 矩形照射野, 正方形照射野のどちらかで測定

◎ : 矩形照射野, 正方形照射野の両方で測定

Height, Y [cm]	Width, X [cm]									
	5	6	8	10	15	20	25	30	35	40
5	◎	○	○	○						
6	○	◎	○	○						
8	○	○	◎	○						
10	○	○	○	◎	○			○		○
15				○	◎			○		○
20						○				
25							○			
30				○	○			◎		○
35									○	
40				○	○			○		◎

## 2. 方法

### 2-1. 使用機器

線形加速器はSynergy (Elekta社製), multi-leaf collimator (MLC) はAgility (Elekta社製) 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 Duo (東洋メディック社製) と一体で校正済みのファーマ形電離箱TN30013 (PTW社製) 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 Phantom2 (IBA Dosimetry社製) 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  $\phi$ , 深さは一定で10 cmのミニファントム (クオリタ社製) を使用した. 水温計と気圧計はTempressure (東洋メディック社製) を使用した. 表計算ソフトはMicrosoft Excel 2013 (Microsoft社製) を使用した.

### 2-2. 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5 cm, 10 cm, 15 cmのそれぞれの深さで全散乱係数 $S_{c,p}$ 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(図1). MU値は50または100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. 正方形照射野辺の長さは  $L$  (cm), 矩形照射野は幅  $X$  (cm) と高さ  $Y$  (cm) で表す. Synergyの矩形照射野の幅  $X$  は上段にあるMLCによる開度で, 高さ  $Y$  は下段にあるモノブロックコリ

メータによる開度である<sup>10,11)</sup>.

$$S_{c,p}(L) = \frac{M_{c,p}(L)}{M_{c,p}(10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm})}$$

または,

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

表1に測定した照射野の組合せを示す(先行研究<sup>7)</sup>と同じ). 幅  $X$ , 高さ  $Y$  の矩形照射野31種類, 辺  $L$  の正方形照射野10種類の合計41種類である. なお, 正方形照射野は矩形照射野の一つでもあるので, ◎は辺  $L$  の正方形照射野としての測定と, 幅  $L$ , 高さ  $L$  の矩形照射野としての測定の2回行っていることを示す. 5 cm, 10 cm, 15 cmの深さでそれぞれ41種類の照射野の  $S_{c,p}$  を測定し  $S_{c,p,5}$ ,  $S_{c,p,10}$ ,  $S_{c,p,15}$  とした. この他に, 加速器の日内変動の補正のために, 正方形照射野10 cm  $\times$  10 cmの測定を途中で繰り返し行った.

### 2-3. 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30 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.  $S_c$  の深さは一定で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(図1). MU値は50または100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。

$$S_c(L) = \frac{M_c(L)}{M_c(10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm})}$$

または、

$$S_c(X, Y) = \frac{M_c(X, Y)}{M_c(10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm})} \quad (2)$$

測定した矩形照射野と正方形照射野は $S_{c,p}$ の測定と同じ表1の組合せである。この他に、加速器の日内変動の補正のために、正方形照射野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の測定を途中で繰り返し行った。

#### 2-4. 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、式(3)の $L$ が同じ $S_{c,p}(L)$ と $S_c(L)$ 、または $X, Y$ が同じ $S_{c,p}(X, Y)$ と $S_c(X, Y)$ の測定値から計算で求めた。

$$S_p(L) = \frac{S_{c,p}(L)}{S_c(L)}$$

または、

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

深さ5 cm, 10 cm, 15 cmで測定した $S_{c,p_5}(L)$ ,  $S_{c,p_{10}}(L)$ ,

$S_{c,p_{15}}(L)$ と、深さ10 cmで測定した $S_c(L)$ から、深さ5 cm, 10 cm, 15 cmの $S_p$ の測定値(measured)の $S_{p_5}(L)$ ,  $S_{p_{10}}(L)$ ,  $S_{p_{15}}(L)$ をそれぞれ求めた。 $S_{c,p}(X, Y)$ と $S_c(X, Y)$ も同様で、 $S_{p_5}(X, Y)$ ,  $S_{p_{10}}(X, Y)$ ,  $S_{p_{15}}(X, Y)$ をそれぞれ求めた。

#### 2-5. 正方形照射野の $S_p$ の近似式と推定値

正方形照射野の $S_p$ の測定値にカーブフィッティングする式(4)の5次の多項近似式をMicrosoft Excel 2013 (Microsoft社製)で求めた。

$$S_{p\_fit}(L) = a_5L^5 + a_4L^4 + a_3L^3 + a_2L^2 + a_1L + a_0 \quad (4)$$

$a_i$  ( $i=0\sim5$ ) は定数、 $L$ は正方形照射野辺(cm)である。この近似式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。式(4)の $L$ に後述の等価正方形辺 $L_{Day}$ ,  $L_{A/P}$ ,  $L_{ARC}$ のいずれかを代入して5 cm, 10 cm, 15 cmの各深さにおける $S_p$ の推定値(estimated)の $S_{p\_fit5}(L_{Day})$ ,  $S_{p\_fit10}(L_{Day})$ ,  $S_{p\_fit15}(L_{Day})$ と、 $S_{p\_fit5}(L_{A/P})$ ,  $S_{p\_fit10}(L_{A/P})$ ,  $S_{p\_fit15}(L_{A/P})$ , および $S_{p\_fit5}(L_{ARC})$ ,  $S_{p\_fit10}(L_{ARC})$ ,  $S_{p\_fit15}(L_{ARC})$ をそれぞれ求めた。

なお、いずれのX線エネルギーと深さでも、5次の多項近似式の妥当性は、回帰分析により回帰係数の有意水準 ( $p < 0.05$ ) を目安に確認した。

#### 2-6. 矩形照射野から等価正方形辺への変換

Day法の等価正方形辺 $L_{Day}$ は、標準計測法12の表か

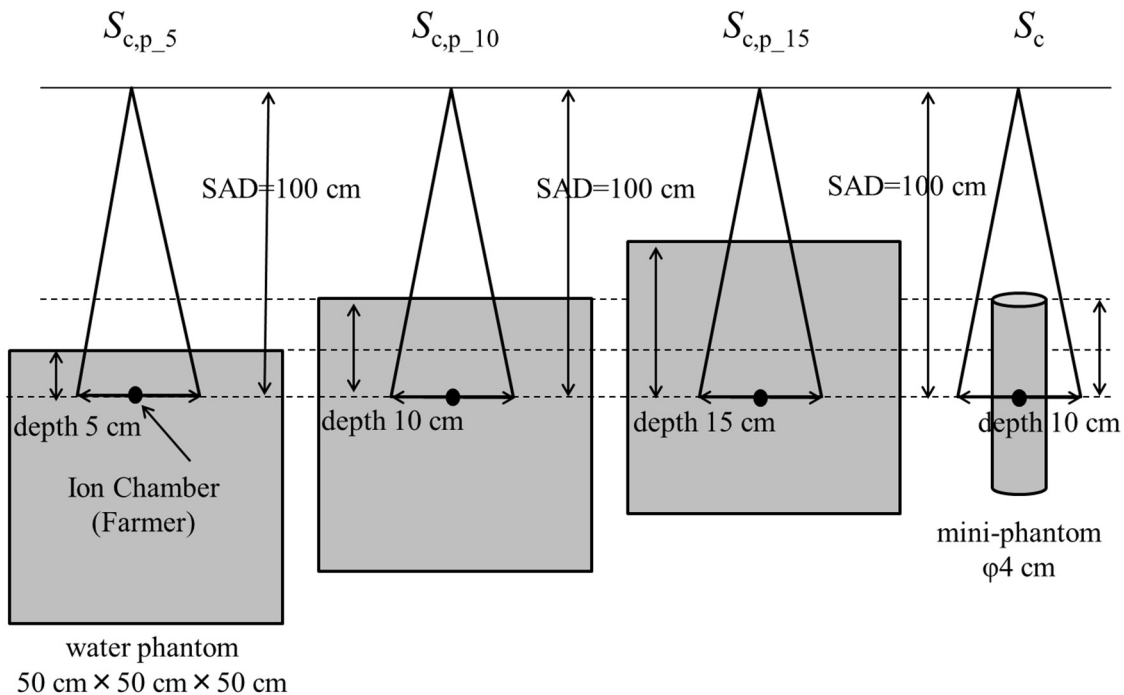


図1  $S_{c,p}$ と $S_c$ の測定機器と配置

表2 矩形照射野に対するそれぞれの方法の等価正方形辺[cm]  
上段： $L_{Day}$ ，中段： $L_{A/P}$ ，下段： $L_{ARC}$

Height, Y [cm]	Width, X [cm]									
	5	6	8	10	15	20	25	30	35	40
5	5	5.5	6.2	6.7						
	5	5.455	6.154	6.667						
	5	5.450	6.119	6.587						
6	5.5	6	6.9	7.5						
	5.455	6	6.857	7.500						
	5.450	6	6.842	7.450						
8	6.2	6.9	8	8.9						
	6.154	6.857	8	8.889						
	6.119	6.842	8	8.877						
10	6.7	7.5	8.9	10	11.9			13.9		14.1
	6.667	7.500	8.889	10	12.000			15.000		16.000
	6.587	7.450	8.877	10	11.949			14.575		15.310
15				11.9	15			18.9		19.5
				12.000	15			20.000		21.818
				11.949	15			19.761		21.317
20						20				
						20				
						20				
25							25			
							25			
							25			
30				13.9	18.9			30		33.5
				15.000	20.000			30		34.286
				14.575	19.761			30		34.212
35									35	
									35	
									35	
40				14.1	19.5			33.5		40
				16.000	21.818			34.286		40
				15.310	21.317			34.212		40

ら求めた<sup>3)</sup>。

A/P法の等価正方形辺 $L_{A/P}$ は式(5)で求めた<sup>5)</sup>。Aは面積 (area), Pは周囲長 (perimeter) である。

$$L_{AP} = \frac{4A}{P} = \frac{2XY}{X+Y} \quad (5)$$

ARC法の等価正方形辺 $L_{ARC}$ は式(6)で求めた<sup>6)</sup>。 $r_{rec}$ は矩形照射野の平均半径, Dは矩形照射野の対角線の長さで,  $D = \sqrt{X^2 + Y^2}$  である。

$$L_{ARC} = \frac{r_{rec}}{0.5580} \sqrt{\frac{\pi}{XY}} \frac{1}{\pi} \left( Y \ln \frac{D+X}{Y} + X \ln \frac{D+Y}{X} \right) \quad (6)$$

本検討で用いた $L_{Day}$ ,  $L_{A/P}$ ,  $L_{ARC}$ の値を表2に示す(先行研究<sup>7)</sup>の表2と同じ)。

### 2-7. $S_p$ の測定値と推定値の差

矩形照射野での測定値 $S_p(X,Y)$ は, 照射野の幅Xと高さYから求めた $L_{Day}$ ,  $L_{A/P}$ ,  $L_{ARC}$ における $S_p$ の測定値 $S_p(L_{Day})$ ,  $S_p(L_{A/P})$ ,  $S_p(L_{ARC})$ として扱い, 近似式から求

めた推定値 $S_{p\_fit}(L_{Day})$ ,  $S_{p\_fit}(L_{A/P})$ ,  $S_{p\_fit}(L_{ARC})$ との差 (difference)をそれぞれ求めた。深さごとの差は式(7), (8), (9)で求め ( $L_{method}$ は $L_{Day}$ ,  $L_{A/P}$ ,  $L_{ARC}$ のいずれか), これが小さいほど矩形照射野と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での差,

$$\text{difference} (\%) = \frac{\{S_{p\_5}(L_{method}) - S_{p\_fit5}(L_{method})\}}{S_{p\_fit5}(L_{method})} \times 100 \quad (7)$$

深さ10 cmでの差,

$$\text{difference} (\%) = \frac{\{S_{p\_10}(L_{method}) - S_{p\_fit10}(L_{method})\}}{S_{p\_fit10}(L_{method})} \times 100 \quad (8)$$

深さ15 cmでの差,

$$\text{difference} (\%) = \frac{\{S_{p\_15}(L_{method}) - S_{p\_fit15}(L_{method})\}}{S_{p\_fit15}(L_{method})} \times 100 \quad (9)$$

また, 各等価正方形辺の $S_p$ の差の平均に統計的な有意差があるか調べるため, 統計解析ソフトRを用いて,

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

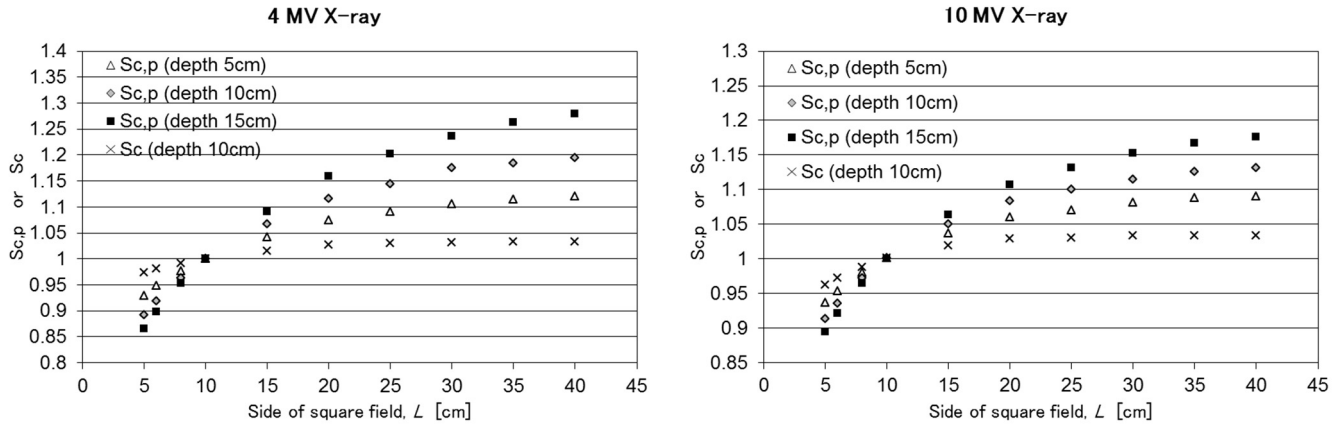


図2 正方形照射野の $S_{c,p}$ と $S_c$ の測定値

(a)4 MV-X線, (b) 10 MV-X線

a	b
---	---

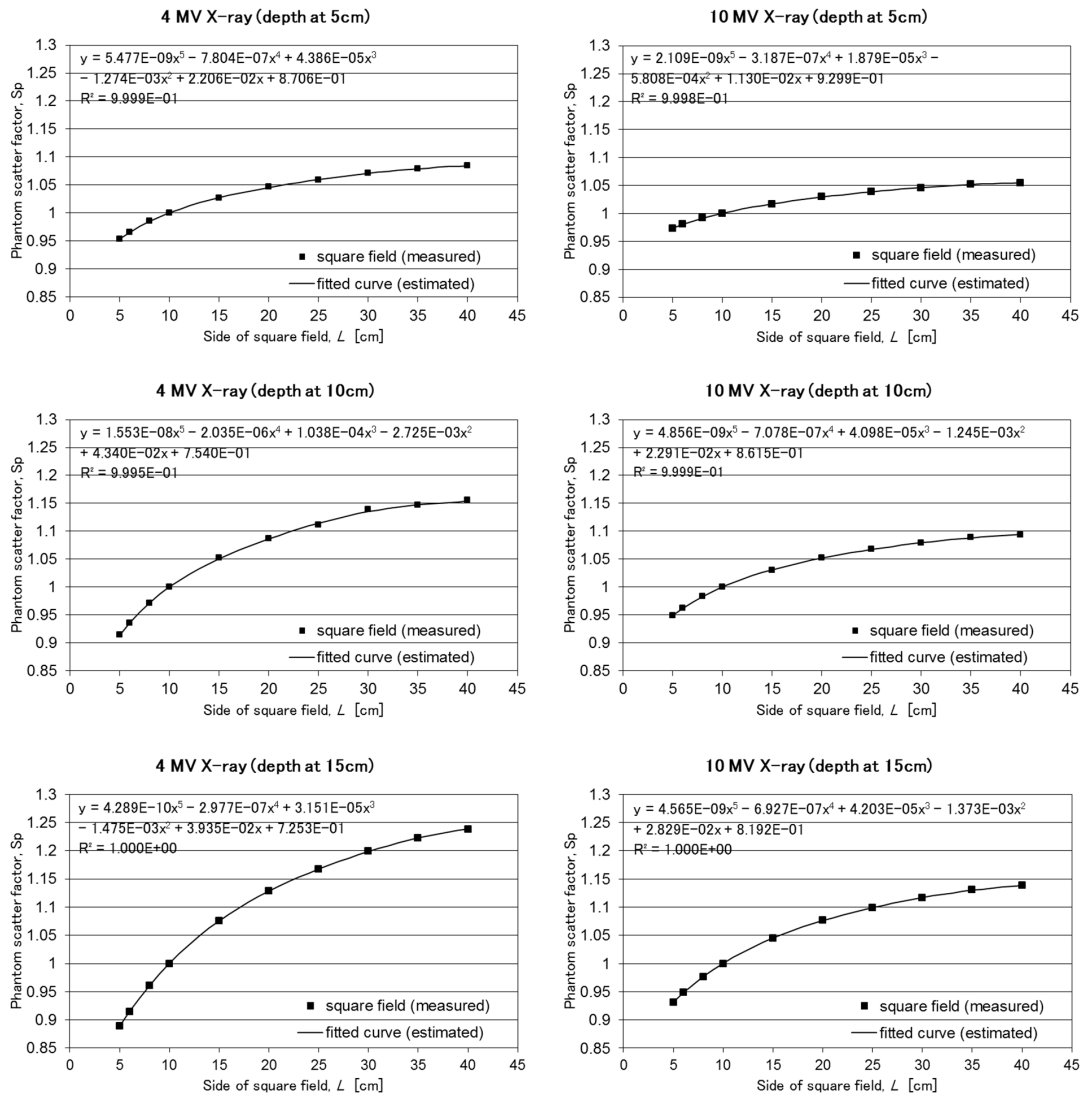


図3 正方形照射野の $S_p$ の測定値と近似曲線

(a) 4 MV-X線, 深さ5 cm, (b) 10 MV-X線, 深さ5 cm  
 (c) 4 MV-X線, 深さ10 cm, (d) 10 MV-X線, 深さ10 cm  
 (e) 4 MV-X線, 深さ15 cm, (f) 10 MV-X線, 深さ15 cm

a	b
c	d
e	f

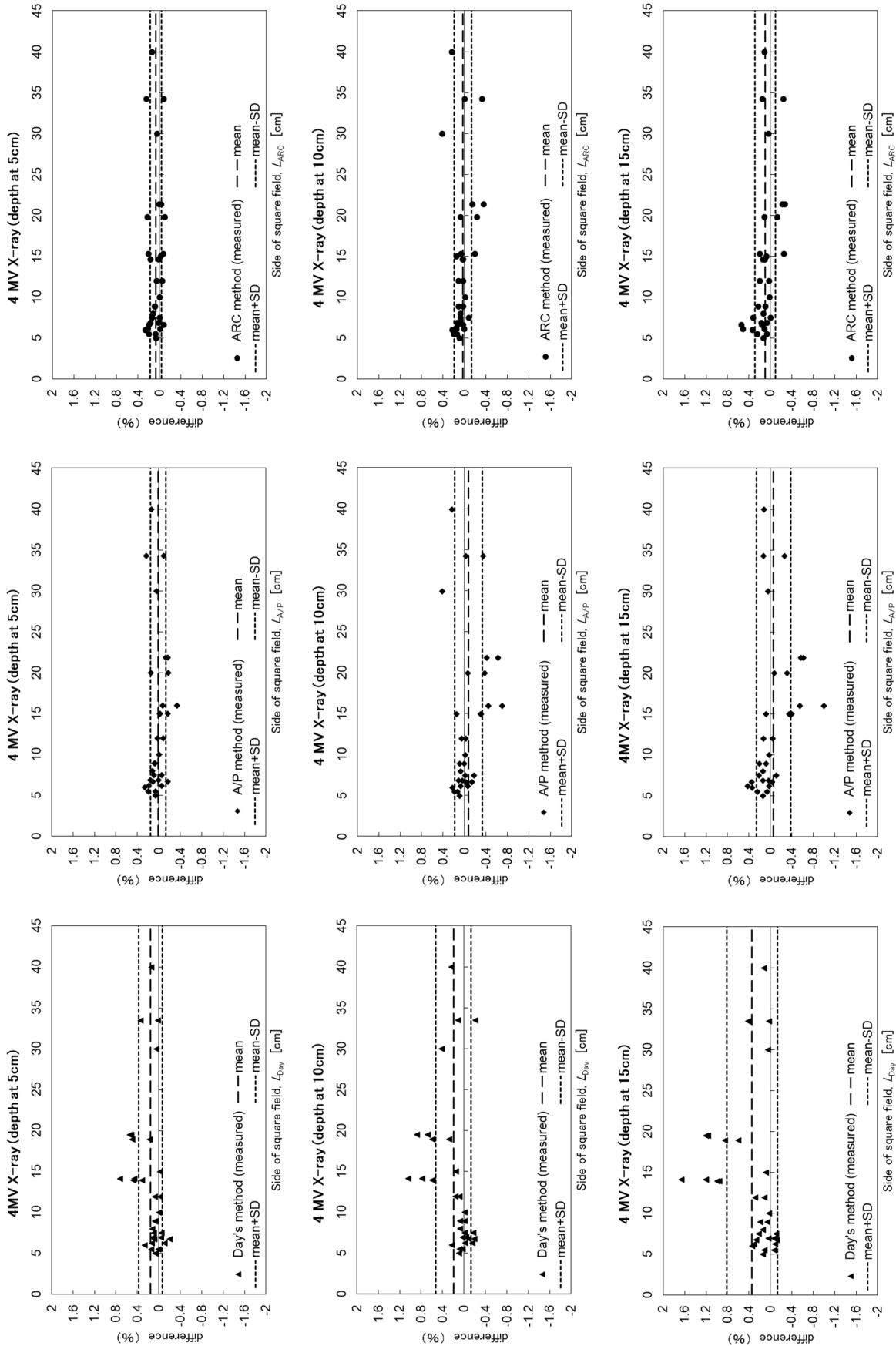


図4  $S_p$  の測定値と推定値の差(4 MV-X線)

(a) Day法, 深さ5 cm (平均: 0.16%, 標準偏差: 0.22%), (b) A/P法, 深さ5 cm (平均: 0.01%, 標準偏差: 0.14%), (c) ARC法, 深さ5 cm (平均: 0.07%, 標準偏差: 0.11%), (d) Day法, 深さ10 cm (平均: 0.20%, 標準偏差: 0.33%), (e) A/P法, 深さ10 cm (平均: -0.07%, 標準偏差: 0.26%), (f) ARC法, 深さ10 cm (平均: 0.03%, 標準偏差: 0.16%), (g) Day法, 深さ15 cm (平均: 0.34%, 標準偏差: 0.47%), (h) A/P法, 深さ15 cm (平均: -0.06%, 標準偏差: 0.32%), (i) ARC法, 深さ15 cm (平均: 0.10%, 標準偏差: 0.19%)

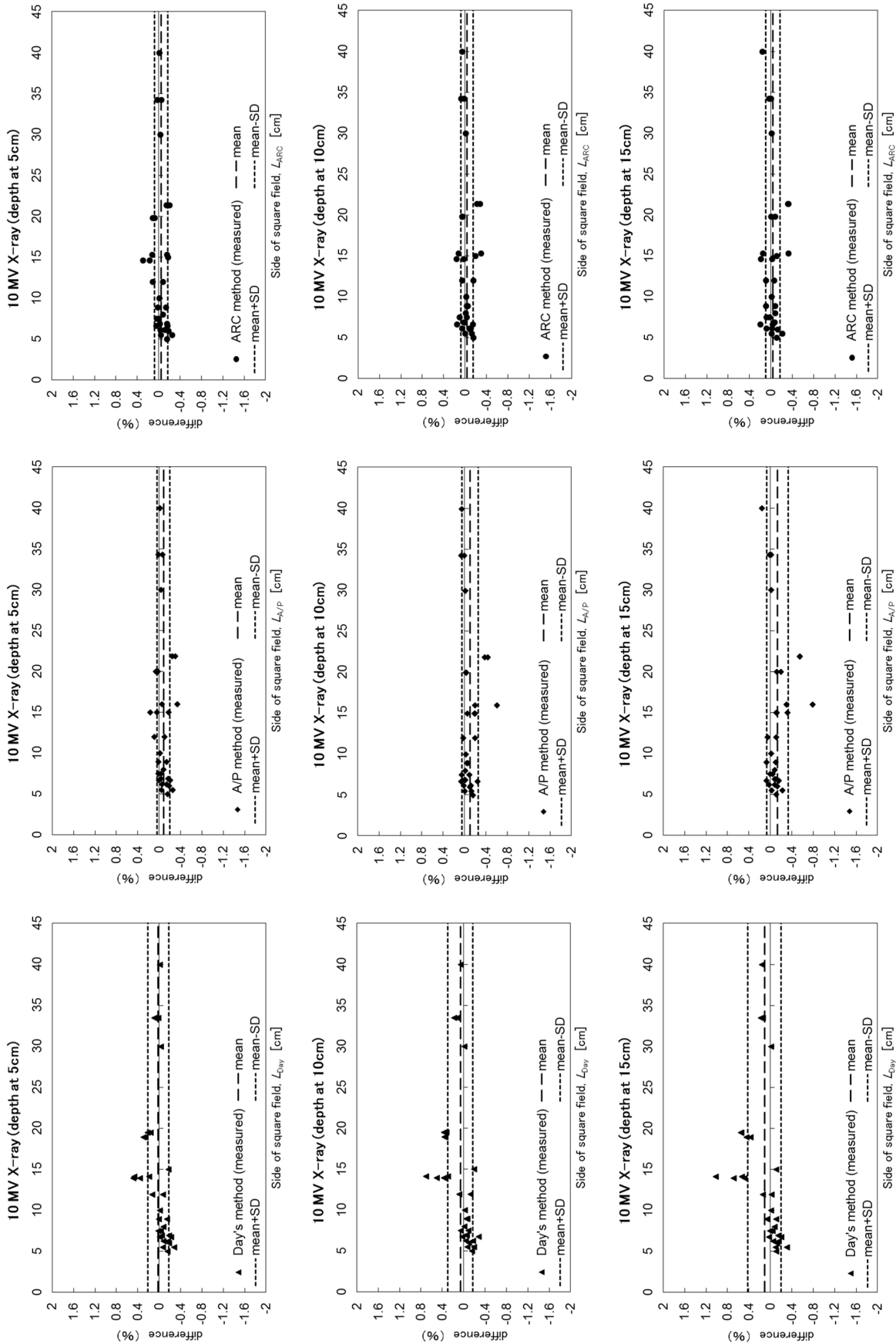


図 5  $S_p$  の測定値と推定値の差(10 MV-X線)

(a) Day法, 深さ5 cm (平均 : 0.02%, 標準偏差 : 0.20%), (b) A/P法, 深さ5 cm (平均 : -0.08%, 標準偏差 : 0.12%), (c) ARC法, 深さ5 cm (平均 : -0.04%, 標準偏差 : 0.12%), (d) Day法, 深さ10 cm (平均 : 0.06%, 標準偏差 : 0.23%), (e) A/P法, 深さ10 cm (平均 : -0.10%, 標準偏差 : 0.15%), (f) ARC法, 深さ10 cm (平均 : -0.04%, 標準偏差 : 0.12%), (g) Day法, 深さ15 cm (平均 : 0.11%, 標準偏差 : 0.31%), (h) A/P法, 深さ15 cm (平均 : -0.13%, 標準偏差 : 0.20%), (i) ARC法, 深さ15 cm (平均 : -0.04%, 標準偏差 : 0.14%)

a	b	c
d	e	f
g	h	i

3群以上の比較に用いるノンパラメトリック検定であるKruskal-Wallis検定を行い、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。

### 3. 結果

#### 3-1. $S_{c,p}$ と $S_c$ の測定値

図2は4 MVと10 MVのX線の5 cm, 10 cm, 15 cmにおける正方形照射野の $S_{c,p}$ の測定値, および深さ10 cmにおける正方形照射野の $S_c$ のグラフを示す。 $S_{c,p}$ はどのエネルギーのX線でも深部ほど, 照射野が大きいほど値が大きかった。変化の大きさ(最小値と最大値の差)は4 MVの方が10 MVのX線に比べて大きかった。

#### 3-2. 正方形照射野の $S_p$ の測定値と近似式

図3は4 MVと10 MVのX線の深さ5 cm, 10 cm, 15 cmにおける正方形照射野の $S_p$ の測定値と近似曲線を示す(定数 $a_j$ は図中に示す)。どのエネルギーのX線でも深部ほど, 照射野が大きいほど $S_p$ は大きくなった。変化の大きさ(最小値と最大値の差)は4 MVの方が10 MVのX線に比べて大きかった。

#### 3-3. $S_p$ の測定値と推定値の差

図4と図5は4 MVと10 MVのX線の深さ5 cm, 10 cm, 15 cmでの, Day法の $L_{Day}$ とA/P法の $L_{A/P}$ , およびARC法の $L_{ARC}$ における式(7), (8), (9)の $S_p$ の差とその平均(mean), 標準偏差(standard deviation, SD)をそれぞれ示す。

Day法の $S_p$ の差は4 MV-X線と10 MV-X線で $L_{Day}$ が10~25 cmで深部ほど正の値の変化の幅が大きかった。また,  $S_p$ の差の平均は, 4 MV-X線と10 MV-X線でどちらも深部ほど負の値が大きくなり, 標準偏差は深部ほど大きかった。

また,  $S_p$ の差の平均は, 4 MV-X線と10 MV-X線でどちらも深部ほど負の値が大きくなり, 標準偏差は深部ほど大きかった。

A/P法の $S_p$ の差は4 MV-X線と10 MV-X線で $L_{A/P}$ が10~25 cmで深部ほど負の値の変化の幅が大きかった。また,  $S_p$ の差の平均は, 4 MV-X線と10 MV-X線でどちらも深部ほど負の値が大きくなり, 標準偏差は深部ほど大きかった。

ARC法の $S_p$ の差は4 MV-X線と10 MV-X線で $L_{ARC}$ が5~40 cmで同程度の正負の値でバラついたが深さによる変化の幅はDay法, A/P法に比べて小さかった。また,  $S_p$ の差の平均は, 4 MV-X線と10 MV-X線でどちらも深さによる変化は小さかった。標準偏差はどの方法の等価正方形辺でも4 MV-X線の深部ほど大きかったが, 10 MV-X線では深さによる変化は小さかった。

また,  $S_p$ の差の平均と標準偏差のグラフを図6に示す。4 MV-X線では深さ5 cm, 10 cm, 15 cmのDay法とA/P法の間で統計的な有意差が認められた。10 MV-X線では深さ15 cmのDay法とA/P法の間で統計的な有意差が認められた。

### 4. 考察

正方形照射野において $S_p = S_{c,p} / S_c$ の計算で求めた $S_p$ の測定値(図3のプロット)は先行研究<sup>7)</sup>の線形加速器Clinac-iXと同じく, 変化の大きさ(最小値と最大値の差)は深部ほど大きい傾向があった(図3)。上記の式は $S_p = (S_c \times S_p) / S_c$ と考えることができ,  $S_p$ を求める際にガントリヘッドの構造に由来する因子とされる $S_c$ の影響をキャンセルしていると考えられる。これより, 先行研究<sup>7)</sup>の考察で述べたとおり $S_p$ は深さ $d$ や照射野 $A$ の変化による照射野内の水の体積の増減に伴う散乱線の増減を反映する関数 $S_p(d, A)$ であることに加

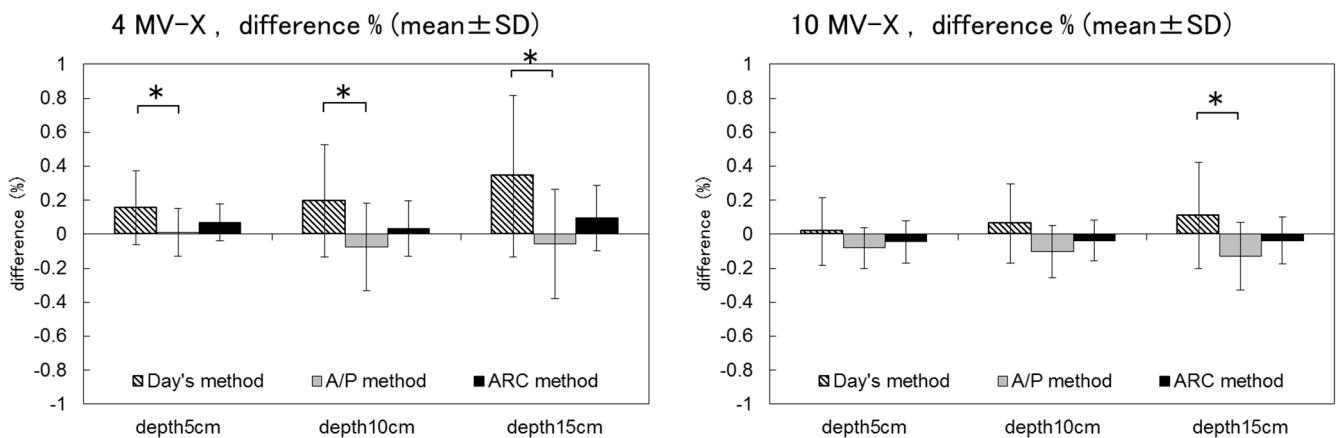


図6 各等価正方形辺と深さにおける平均(mean)と標準偏差(SD)  
(a) 4 MV-X線, (b) 10 MV-X線, (\*  $p < 0.05$ ) (いずれも $n = 41$ でのmean ± SD)



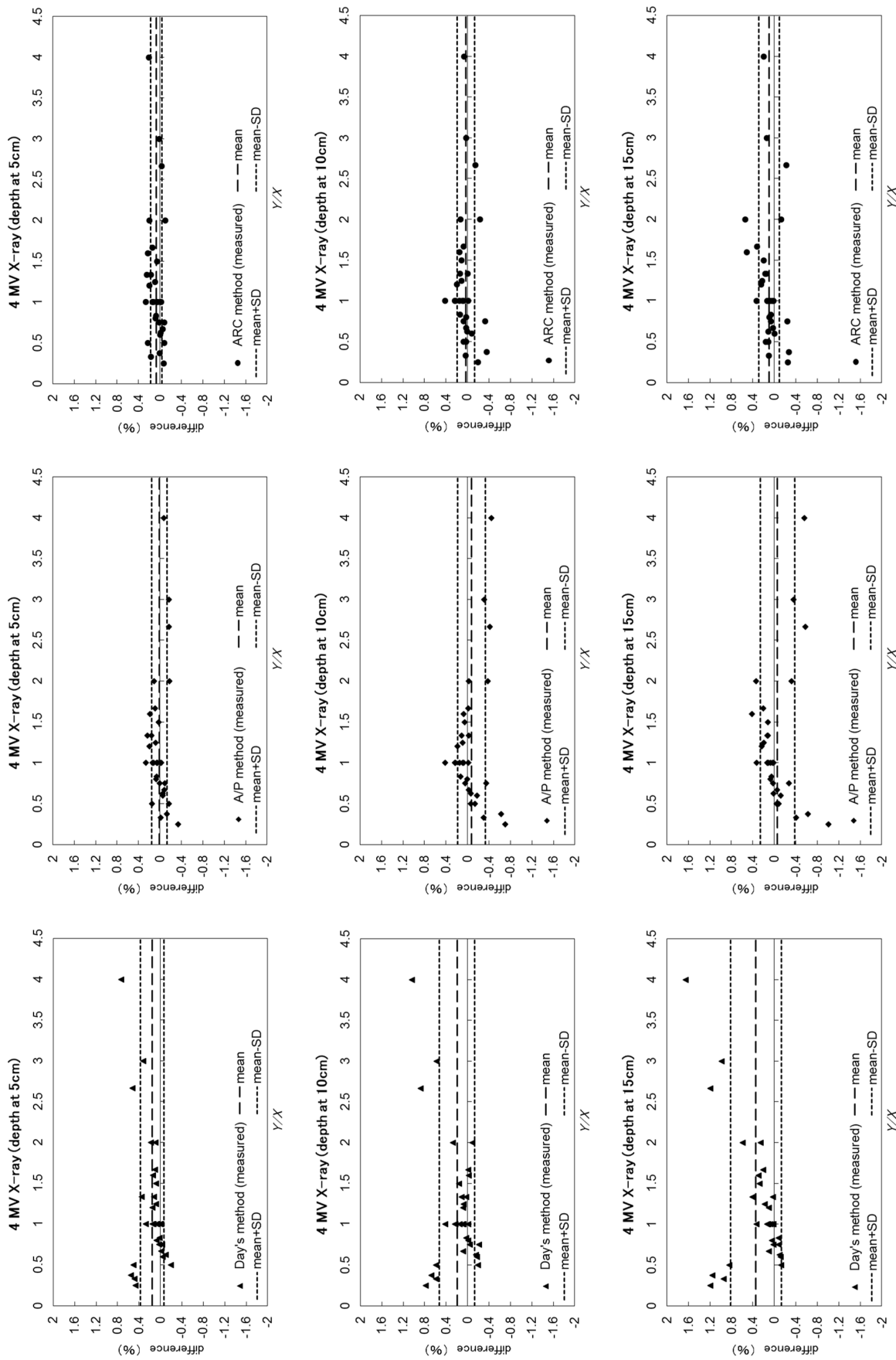


図7 縦横比における $S_p$ の測定値と推定値の差 (4 MV-X線)

- (a) Day法, 深さ5 cm, (b) A/P法, 深さ5 cm, (c) ARC法, 深さ5 cm,
- (d) Day法, 深さ10 cm, (e) A/P法, 深さ10 cm, (f) ARC法, 深さ10 cm,
- (g) Day法, 深さ15 cm, (h) A/P法, 深さ15 cm, (i) ARC法, 深さ15 cm

a	b	c
d	e	f
g	h	i

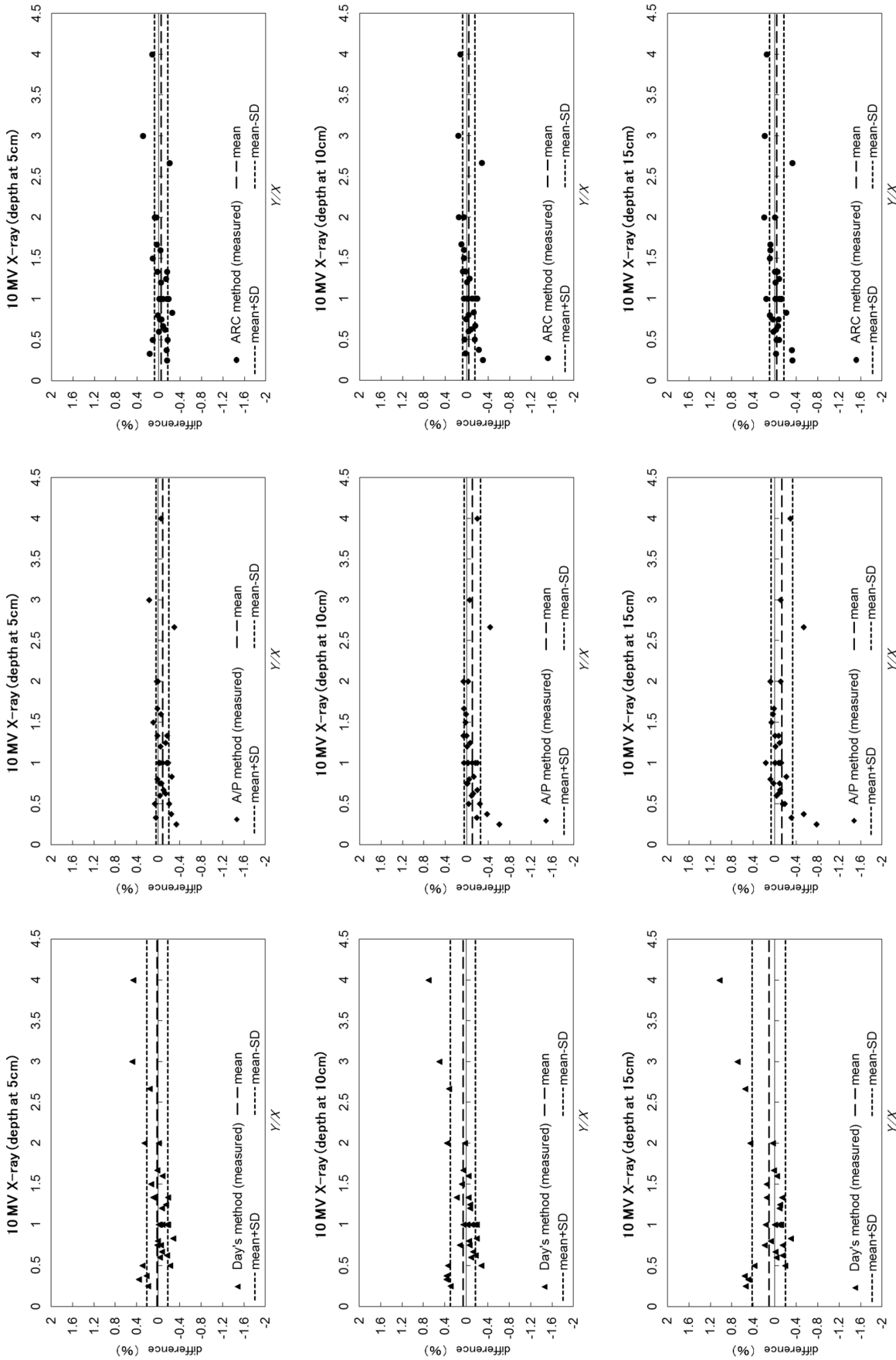


図 8 縦横比における $S_p$ の測定値と推定値の差 (10 MV-X線)

- (a) Day法, 深さ5 cm, (b) A/P法, 深さ5 cm, (c) ARC法, 深さ5 cm,
- (d) Day法, 深さ10 cm, (e) A/P法, 深さ10 cm, (f) ARC法, 深さ10 cm,
- (g) Day法, 深さ15 cm, (h) A/P法, 深さ15 cm, (i) ARC法, 深さ15 cm

a	b	c
d	e	f
g	h	i

え、線形加速器の機種ごとに異なる $S_c$ の影響を受けない因子であることが確認できた。それは、図4と図5、および図6に示すように、線形加速器Synergyの4 MVと10 MVのX線において、矩形照射野の $S_p$ の測定値と各等価正方形辺の $S_p$ の推定値の差の深さ依存が、Day法やA/P法よりARC法で小さいという結果が、先行研究のClinac-iXの場合と一致したことから明らかと考える。そして、これはARC法の矩形照射野の平均半径による面積と、幅 $X$ と高さ $Y$ による面積( $X \times Y$ )との比の面積比を乗じる補正<sup>9)</sup>が、Day法やA/P法よりも深さの変化による水の散乱線の増減をよく反映し、線形加速器の機種に拠らないことを示している。さらに、図4と図5のグラフの横軸を縦横比( $Y/X$ )に変えた図7と図8のグラフで、差の深さ依存はDay法、A/P法は縦横比が0.5以下、または2以上で大きい、ARC法では小さいことも先行研究<sup>7)</sup>と同じ傾向であった。したがって、 $S_p$ の推定においてこれらの等価正方形辺は、線形加速器の機種の違いで精度が変化しないといえる。

ただし、すべての矩形照射野においてDay法、A/P法、ARC法の精度が変化しないわけではない。実際はどの機種の線形加速器でも構造上、ガントリヘッド内の $X$ と $Y$ のコリメータの上面からの後方散乱線がモニタ線量計へ余計にカウントされてビーム停止が早まる現象<sup>12)</sup>があるために、 $S_c$ や $S_{c,p}$ の測定値に誤差が生じることがある。特に $X$ 、 $Y$ のうち一方が小さくもう一方が大きい、縦横比の大きい矩形照射野では影響が顕著に現れる。その矩形照射野を等価正方形照射野へ変換して求めた $S_p$ の推定値は、どの変換法を用いても精度は低下するため注意が必要と考える。

以上より、計算によるMU独立検証では、ARC法による等価正方形照射野を用いて $S_p$ を推定すると、線形加速器の機種の違いに拠らず精度が良いことが示された。

## 5. 結語

線形加速器Synergyを用いて、先行研究と同じ方法で $S_p$ の測定値と推定値の差の深さ依存を検討した。その結果、Synergyにおいても $S_p$ の測定値と推定値の差に深さ依存があり、それはDay法とA/P法よりARC法で小さかった。よって、計算によるMU独立検証でARC法による等価正方形照射野を用いて $S_p$ を推定すると、線形加速器の機種の違いに拠らず精度が良いことが示された。

## 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、西新潟中央病院の診療放射線技師の皆様へ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)の池田紀子氏、簾内彩瑛氏に心より感謝いたします。

## 引用文献

- 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 No.10, ESTRO, Belgium, 2010.
- 3) 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.
- 4) Day MJ, Aird EGA. The equivalent field method for axial dose determination in rectangular fields. Br J Radiol 1996; Suppl 25: 138-151.
- 5) Sterling TD, Perry H, Katz L. Automation of radiation treatment planning. Br J Radiol 1964; 37: 544-550.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Agility<sup>TM</sup>およびIntegrity<sup>TM</sup>アプリケーショントレーニングガイド, Elekta, 2014; 34-35.
- 11) Agility<sup>TM</sup>, <https://jp.medical.canon/products/rt/agility>, キヤノンメディカルシステムズ株式会社.
- 12) Liu HH, Mackie TR, McCullough EC. Modeling photon output caused by backscattered radiation into the monitor chamber from collimator jaws using a Monte Carlo technique. Med Phys 2000; 27(4): 737-744.

Investigation of the influence of the conversion method to equivalent square field on the  
depth direction of phantom scatter factor  
— Measurement in Synergy linear accelerator —

Takahide HAYAKAWA<sup>1)</sup>, Takumi YAMADA<sup>2)</sup>, Hironori SAKAI<sup>2)</sup>, Ryuta SASAMOTO<sup>1)</sup>,  
Tamaki ISHIKAWA<sup>3)</sup>, Yasuhisa YOSHIDA<sup>4)</sup>

- 1) Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Sciences, Niigata University
- 2) Division of Radiology, Department of Clinical Technology, Niigata University Medical and Dental Hospital
- 3) Department of Radiology, Sagamihara National Hospital
- 4) Department of Radiology, Nishiniigata Chuo National Hospital

*Key words* : radiation therapy, equivalent square field, rectangular field, depth dependency, phantom scatter factor

**Abstract** In X-ray therapy, equivalent square field (side of equivalent square field) is important because it influences the accuracy of monitor unit (MU) independent verification by calculation. It is assumed that equivalent square field does not depend on depth and X-ray energy. However, in Clinac-iX (manufactured by Varian Co.) linear accelerator of previous research, the difference between measured value of  $S_p$  obtained by measuring rectangular field and estimated value of  $S_p$  obtained from equivalent square field of same rectangular field indicated depth dependency that varied with depth, and it was suggested that the assumption was not valid. And it was reported that the depth dependency in side of equivalent square of ARC method was smaller than Day method and A/P method. In this study, using Synergy (manufactured by Elekta Co.) that was linear accelerator with different structure in the gantry head of Clinac-iX investigated the difference between measured value and estimated value of  $S_p$  by the same method of previous research. As result, the depth dependency was found also in Synergy, and it was shown that side of equivalent square of ARC method was smaller than Day method and A/P method, and the estimation accuracy of  $S_p$  was better.

Accepted : 2019.11.12