

4. ダイナミックウェッジの出力測定

Symposium

館岡邦彦
札幌医科大学医学部附属病院

1. はじめに

近年、コンピュータ制御による一次元の線量強度変動として、dynamic wedge(以下、DW)が利用されるようになった^{1,2)}。

DWは従来の物理くさびフィルタに比して、以下の点で優れている。(1)照射野の広い範囲と深部でくさび角度が維持される。(2)くさび角度のない方向の中心軸外線量比の均一度が高い。(3)深部線量百分率の変化がオープン照射野と同等である(Fig.1)。また、従来の物理くさびフィルタは、全散乱係数がオープン照射野と異なるという欠点を有していた。一方、DWの出力は絞り駆動の制御法に大きく依存する^{3~5)}。

ここではVarian社のDWとenhanced dynamic wedge(以下、EDW)の2種類について、制御法および出力計算に必要な散乱係数とくさび係数の測定方法について報告する。

2. 制御法

2-1 dynamic wedgeの制御法

DWの制御は、各くさび角度に対して、上絞りの位置とMUを規定するsegmented treatment table(STT)によっている。STTの例をTable示す。STTは各非対称照射野の累積MU値であり、照射野の最小値(上絞りの終端)で常に一定の値としている。分かりやすくするために、設定MU値を100MUとした場合を()で示した。このSTTにより、各照射野サイズの中心軸上での累積MUは異なり、DWの出力の照射野サイズ依存を

生む。Fig.2aに4MVのX線におけるDWを用いた正方形照射野の出力(全散乱係数:以下、 $S_{c,p}$)を示すが、それは照射野サイズに依存し、複雑な変化を示す。Fig.2bにくさび面の照射野の長さ(上絞りを)5, 10, 15cm一定とし、もう一方の照射野辺の長さ(下絞りを)を4~20cmまで変化させた場合の矩形照射野の $S_{c,p}$ を示す。この場合の $S_{c,p}$ は、くさび面の照射野に影響を受けず、矩形オープン照射野と同様の变化である。

2-2 enhanced dynamic wedgeの制御法

EDWの制御はgolden STT(GSTT)と呼ばれるSTTを用いている。これは、くさび角度60度のEDWの最大照射野に対して、X線エネルギーごとに一つである。60度以外のくさび角度はGSTTにオープン照射野のMUを各くさび角度ごとに一定の比率で加えることでつくられる^{6,7)}。

Fig.3aに各くさび角度のGSTTを示すが照射野は非対称最大照射野30cmである。ただし、上絞りの最終停止位置は設定照射野より常に0.5cm少ない位置となるため、-9.5cmとなる。Fig.3aの縦軸は、この終端の値を100とした標準化GSTT(NGSTT)である。任意の照射野サイズにおいても上絞りが最終的に停止する位置の累積MUで再度標準化される(Fig.3b)。よって、EDWの中心軸上の線量は各照射野サイズの上絞りの最終位置に依存して変化する。

Fig.4aにEDWの正方形照射野の $S_{c,p}$ を示す。Fig.4aより、照射野サイズに依存して、くさび角度が大きいほど

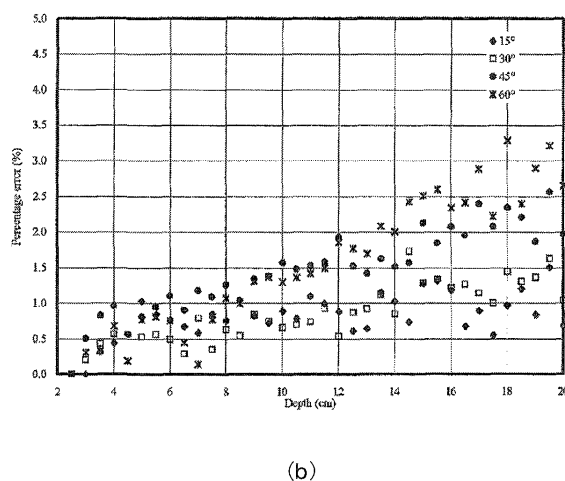
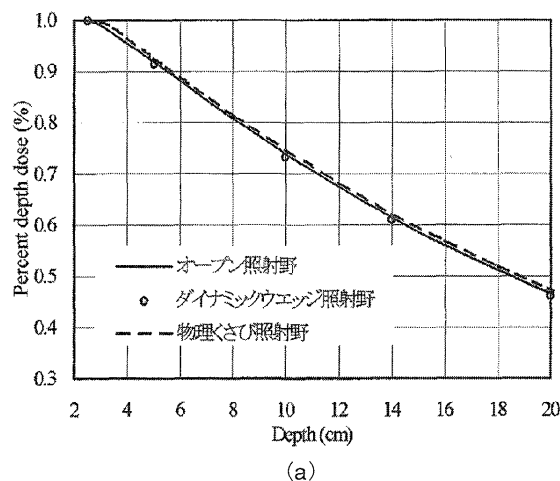
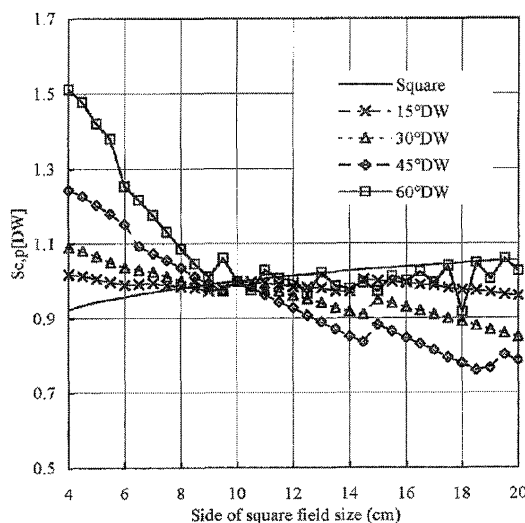


Fig. 1 CLINAC2100Cの10MV X線、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ における、45° dynamic wedge, 45°物理くさびフィルタとしてオープン照射野の深部量百分率(a)、各物理くさびフィルタとオープン照射野の各深さにおける深部量百分率の相対誤差(b)。

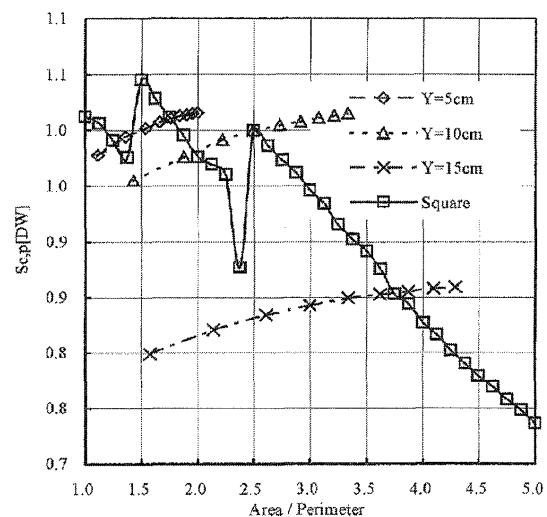
Table Varian社CLINAC2100Cの10MV X線, 60° dynamic wedgeのSTTの例.

各照射野におけるY絞りの終端における累積MUは、常に65535に設定されている。また、Y絞りの位置は4倍された値となっている。()内は設定MUが100の時の各Y絞りの位置での累積MUである。

照射野 60mm			照射野 80mm			照射野 100mm			照射野 120mm			照射野 140mm		
STT	4y(mm)		STT	4y(mm)		STT	4y(mm)		STT	4y(mm)		STT	4y(mm)	
36297 (55.39)	120		29982 (45.75)	160		28877 (44.06)	200		24062 (36.72)	240		21952 (33.50)	280	
36297 (55.39)	116		29982 (45.75)	156		28877 (44.06)	192		24062 (36.72)	232		21952 (33.50)	272	
36297 (55.39)	84		29982 (45.75)	116		28877 (44.06)	172		24062 (36.72)	212		21952 (33.50)	252	
37254 (56.85)	76		30411 (46.40)	104		29128 (44.45)	152		24520 (37.42)	192		22400 (34.18)	232	
38017 (58.01)	64		30951 (47.23)	96		30059 (45.87)	132		25139 (38.36)	172		22983 (35.07)	212	
38643 (58.97)	56		31313 (47.78)	84		31453 (47.99)	112		25992 (39.66)	152		23650 (36.09)	192	
39268 (59.92)	44		32171 (49.09)	76		32736 (49.95)	92		26933 (41.10)	132		24396 (37.23)	172	
40379 (61.61)	36		33172 (50.62)	64		34377 (52.46)	72		28040 (42.79)	112		25233 (38.50)	152	
41477 (63.29)	24		33612 (51.29)	56		35600 (54.32)	52		29201 (44.56)	92		26143 (39.89)	132	
42588 (64.99)	16		34102 (52.04)	44		37233 (56.81)	32		30470 (46.49)	72		27155 (41.44)	112	
43845 (66.90)	4		35102 (53.56)	36		39244 (59.88)	12		31792 (48.51)	52		28294 (43.17)	92	
45027 (68.71)	-4		36037 (54.99)	24		41200 (62.87)	-12		33209 (50.67)	32		29487 (44.99)	72	
45928 (70.08)	-16		36967 (56.41)	16		43003 (65.62)	-32		34927 (53.30)	12		30734 (46.90)	52	
47496 (72.47)	-24		38005 (57.99)	4		45005 (68.67)	-52		36549 (55.77)	-12		32145 (49.05)	32	
48115 (73.42)	-36		38970 (59.46)	-4		47841 (73.00)	-72		38094 (58.13)	-32		33804 (51.58)	12	
49261 (75.17)	-44		39705 (60.59)	-16		50372 (76.86)	-92		39808 (60.74)	-52		35295 (53.86)	-12	
51311 (78.30)	-56		41050 (62.64)	-24		53312 (81.35)	-112		42219 (64.42)	-72		36690 (55.99)	-32	
52866 (80.67)	-64		41508 (63.34)	-36		56991 (86.96)	-132		44258 (67.53)	-92		38218 (58.32)	-52	
54554 (83.24)	-76		42445 (64.77)	-44		61359 (93.63)	-152		46685 (71.24)	-112		40487 (61.78)	-72	
56676 (86.48)	-84		44195 (67.44)	-56		65535 (100.00)	-160		49685 (75.81)	-132		42366 (64.65)	-92	
59796 (91.24)	-96		45427 (69.32)	-64					52735 (80.47)	-152		44523 (67.94)	-112	
65535 (100.00)	-100		46693 (71.25)	-76					56923 (86.86)	-172		47229 (72.07)	-132	
			48462 (73.95)	-84					61175 (93.35)	-192		49960 (76.23)	-152	
			49272 (75.18)	-96					65535 (100.00)	-200		53749 (82.02)	-172	
			50989 (77.80)	-104								57382 (87.56)	-192	
			53172 (81.14)	-116								61677 (94.11)	-212	
			56037 (85.51)	-124								65535 (100.00)	-220	
			59594 (90.93)	-136										
			65535 (100.00)	-140										



(a)



(b)

Fig. 2 CLINAC2100Cの4MV X線における、各dynamic wedge照射野の全散乱係数(a)と45° dynamic wedge照射野の矩形照射野と正方形照射野サイズの全散乱係数(b)。

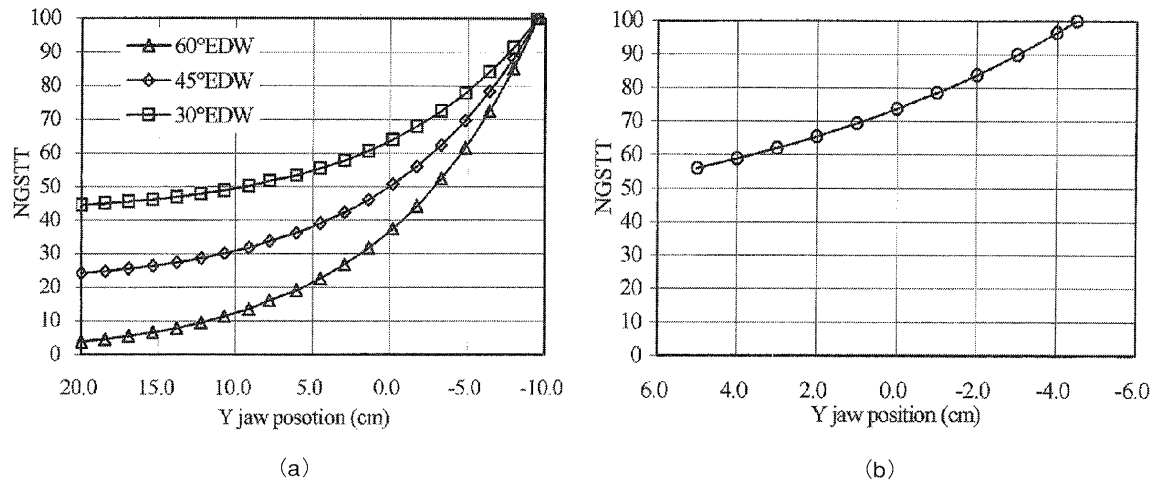


Fig. 3 CLINAC600Cの4MV X線におけるenhanced dynamic wedge (EDW)のgolden segmented treatment table (a). 照射野サイズは最大照射野の片側 20cm, 反対側 10cmの非対称照射野である. (b)は45° EDWの照射野サイズ10×10cm²の場合での変更されたGSTTである.

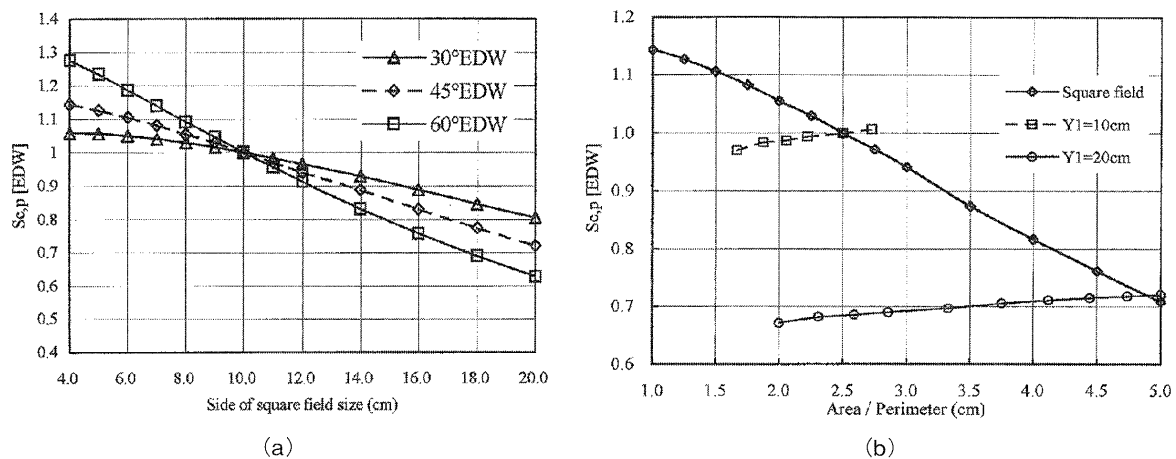


Fig. 4 CLINAC600Cの4MV X線における各enhanced dynamic wedgeの全散乱係数 (a), 45° enhanced dynamic wedgeの正方形照射野と矩形照射野サイズの全散乱係数 (b).

ど $S_{c,p}$ が大きく変化していることが分かる. また, Fig.4bにDWと同じ方法で行った45度EDWの矩形照射野の $S_{c,p}$ を示す.

3. dynamic wedgeの標準化処理

3-1 dynamic wedgeの標準化係数

3-1-1 正方形照射野

前述したようにDWの中心軸上の線量, すなわち出力はSTTに依存する. そこで, 基準照射野(10×10cm²)に対する任意の照射野の中心軸上のSTTの比率である標準化係数を導入することにより, オープン照射野の $S_{c,p}$ をDWに対して用いることができる. この手順について, Liuら⁸⁾の方法に従って以下に示す.

DWの標準化係数は, 次式で定義される.

$$N(C_y) = \frac{STT(C_y, y_i = 0)}{STT(C_y = 10, y_i = 0)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, C_y はくさび面の照射野幅, y_i は上絞りの位置と中心軸との距離である. $y=0$ は上絞りが中心軸上にあることを意味する.

標準化係数を用いると, 標準化全散乱係数 $S_{c,p,N}(C_x, C_y)$ は次式で定義される.

$$S_{c,p,N}(C_x, C_y) = \frac{O_{DW}^{water}(C_x, C_y)}{O_{DW}^{water}(10 \times 10) \cdot N(C_y)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $O_{DW}^{water}(C_x, C_y)$ は, DWを用いた照射野サイズ $C_x \times C_y$ の水中最大線量深の線量である.

Fig.2aのDWの $S_{c,p}$ を, 式(2)により標準化全散乱係

数に変換したものをFig.5aに示す。比較のためにオープン照射野の $S_{c,p}$ も示す。各くさび角度による相違は消去され、照射野サイズに伴う変化はオープン照射野に近づく。このときの誤差は平均して0.5%以下、最大1%強である。従来の物理くさびフィルタがもつ $S_{c,p}$ や深部量百分率の誤差と比較すると、 $N(C_y)$ の有効性は明らかである。

3-1-2 矩形照射野

DW矩形照射野 $C_x \times C_y$ のSTTは、くさび平面の大きさ C_y にのみを考慮している。したがって、矩形照射野の場合には照射野サイズをA/P値に変換し⁹⁾、式(2)を用いることができる。矩形照射野の $S_{c,p}$ (Fig.2b)を、式(2)により標準化全散乱係数に変換したものをFig.5bに示す。この図より、DW矩形照射野においても、正方形照射野同様に $N(C_y)$ の有効性は明らかである。しかし、不整形照射野や非対称照射野の等価正方形照射野の変換は、このシンポジウムの中田の方法に従うべきである。

3-2 dynamic wedgeのくさび係数

DWのくさび係数もSTTによる影響を受けるため、照射野サイズ依存性を取り除かなければならない。DWの標準化くさび係数は、次のように定義される。

$$WF_N(C_x, C_y) = \frac{O_{DW}^{water}(C_x, C_y)}{O_{open}^{water}(C_x, C_y) \cdot N(C_y)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $O_{DW}^{water}(C_x, C_y)$ と $O_{open}^{water}(C_x, C_y)$ はDWを用いた照射野とオープン照射野の中心軸上における水中で測定

した出力である。現在の国際規格では^{10,11)}、くさび係数は深さ10cmで定義される。しかし、DWの深部特性や標準化全散乱係数はオープン照射野とほとんど変わらない。そこで、組織最大線量比や標準化全散乱係数と整合させるために、 $O_{DW}^{water}(C_x, C_y)$ は最大線量深で求める。

Fig.6にDWの標準化くさび係数を示す。標準化くさび係数の照射野サイズ依存性はほとんどない。したがって、各くさび角度ごとに、DWとオープン照射野の基準照射野(10×10cm²)の相対測定のみで、各標準化くさび係数を求めることができる。

4. enhanced dynamic wedgeの標準化処理

4-1 enhanced dynamic wedge標準化

EDWにおける出力の照射野サイズ依存性は、上絞りの最終停止位置でGSTTが再標準化されることによる。そこで、基準照射野と任意の照射野の上絞りの最終停止位置の累積MUの比率から、照射野サイズ依存性を打ち消すことができる。この手順について、Liuら¹²⁾の方法に従って示す。

EDWの標準化全散乱係数 $S_{c,p,N}(C_x, C_y)$ は次式で定義される。

$$S_{c,p,N}(C_x, C_y) = \frac{O_{EDW}^{water}(C_x, C_y) \cdot N(Y_{FIN})}{O_{EDW}^{water}(10 \times 10) \cdot N(4.5)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $O_{EDW}^{water}(C_x, C_y)$ はEDWを用いた照射野 $C_x \times C_y$ の、水中最大線量深における線量である。 $N(Y_{FIN})$ と $N(4.5)$ は、それぞれ C_y の最終位置と $C_y=10$ cmの最終位置の

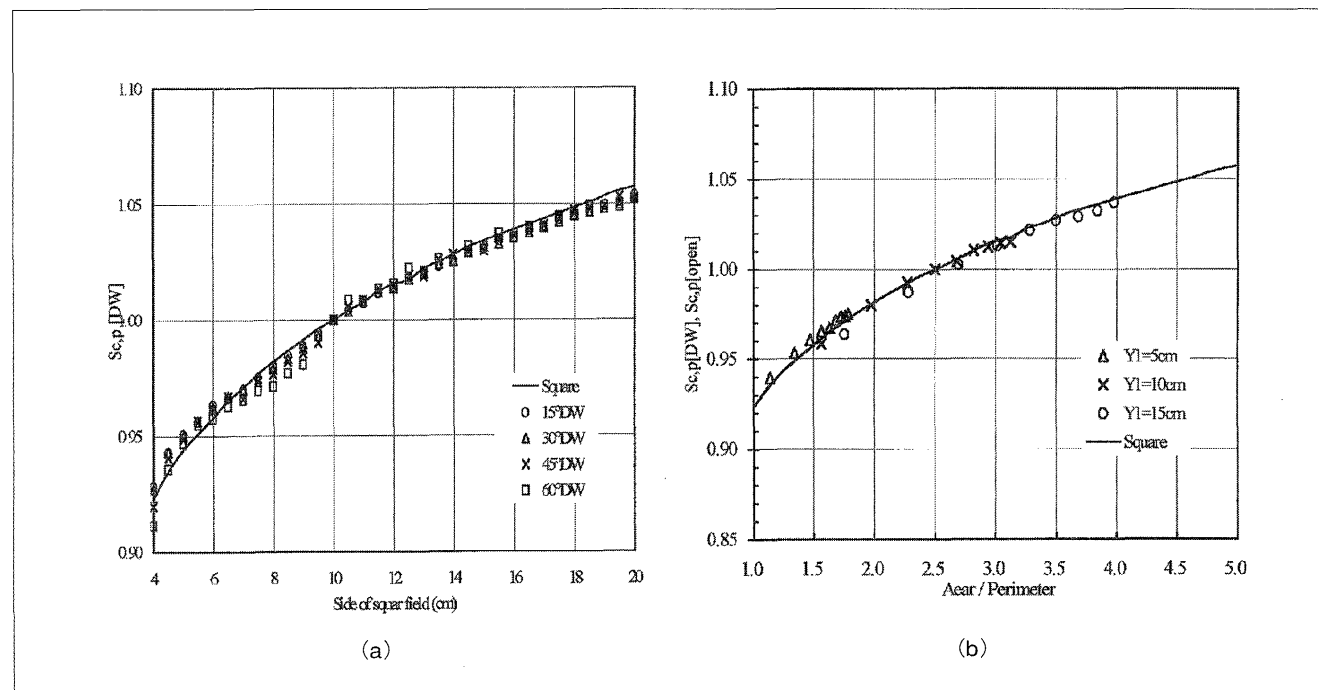


Fig. 5 CLINAC2100Cにおける4MV X線の各dynamic wedgeの標準化全散乱係数(a)と矩形照射野の標準化全散乱係数(b)。

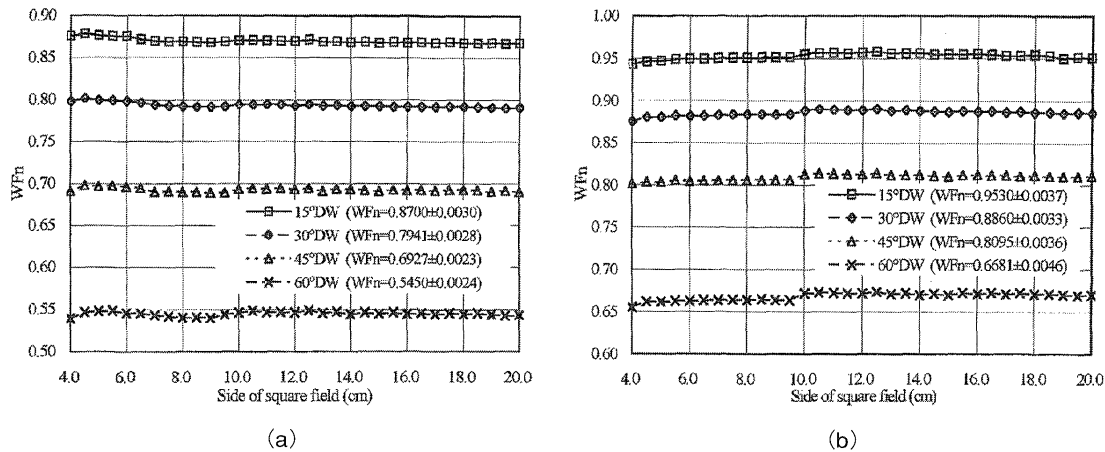


Fig. 6 CLINAC2100Cにおける4MV X線(a), 10MV X線(b)のdynamic wedgeの標準化くさび係数.

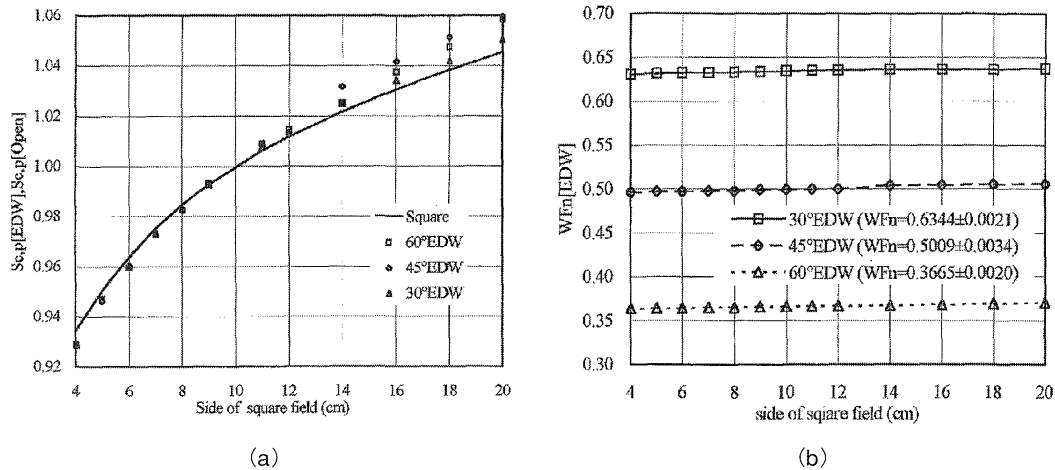


Fig. 7 CLINAC600Cにおける4MV X線の各enhanced dynamic wedgeの標準化全散乱係数(a), 標準化くさび係数(b).

NGSTTの値を表す。Fig.7aにEDWの標準化全散乱係数を示す。45度EDWにおいて、照射野サイズ14～20cmの範囲で1%強の差がある。それ以外では±0.5%の差であった。この誤差もDWの場合と同様に実用上問題はないと考えられる。

4-2 enhanced dynamic wedgeのくさび係数

EDWのくさび係数も、DWと同様にGSTTによる照射野サイズ依存性を補正する標準化が必要である。EDWの標準化くさび係数を次式で定義する。

$$WF_N(C_x, C_y) = \frac{O_{EDW}^{water}(C_x, C_y) \cdot N(Y_{FIN})}{O_{open}^{water}(C_x, C_y)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $O_{EDW}^{water}(C_x, C_y)$ と $O_{open}^{water}(C_x, C_y)$ は、それぞれEDW

とオープン照射野の中心軸上の最大線量深での出力である。Fig.7bに4MV X線における標準化くさび係数を示す。図から分かるように、すべての標準化くさび係数は照射野サイズではほぼ一定となる。

5. まとめ

DWとEDWの出力はSTTもしくはGSTTの影響を受け、照射野サイズに大きく依存する。しかし、標準化係数を用いることによってこれらの依存性は、オープン照射野サイズと同等のものとなる。また、矩形照射野の取り扱いも等価正方形照射野として取り扱うことが可能になる。このような処置により、dynamic wedgeの受入試験が容易となるだけでなく、出力評価もオープン照射野と同様の対処が可能となる。

参考文献

- 1) Kijewski PK, Chin LM and Bjarngard BE: Wedge shaped dose distributions by computer-controlled collimator motion. *Med. Phys.*, 5 (5), 426-429, (1978).
- 2) Leavitt DD, Martin M, Moeller JH, et al.: Dynamic wedge field techniques through computer-controlled collimator motion. *Med. Phys.*, 17 (1), 87-97, (1990).
- 3) Bidmead AM, Garton AJ and Childs PJ: Beam data measurements for dynamic wedges on Varian 600C (6-MV) and 2100C (6- and 10-MV) linear accelerators. *Phys. Med. Biol.*, 40, 393-411, (1995).
- 4) Klein EE, Low AD, Meigooni AS, et al.: Dosimetry and clinical implementation for dynamic wedge. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 31 (3), 583-592, (1995).
- 5) Tomas SJ and Foster KR: Radiotherapy treatment planning with dynamic wedges-an algorithm for generating wedge factors and beam data. *Phys. Med. Biol.*, 40, 1421-1433, (1995).
- 6) Petti PL and Siddon RL: Effective wedge angles with a universal wedge. *Phys. Med. Biol.*, 30, 985-991, (1985).
- 7) Shackford H, Bjarngard BE and Vadash P: Dynamic universal wedge. *Med. Phys.*, 22 (11), 1735-1741, (1995).
- 8) Liu C, Zhu TC and Palta JR: Characterizing output factor for dynamic wedge. *Med. Phys.*, 23 (7), 1213-1218, (1996).
- 9) Sterling TD, Perry H and Katz L: Automation of radiation treatment planning IV: Derivation of a mathematical expression for the percent depth dose surface of cobalt 60 beams and visualization of multiple field dose distributions. *Br. J. Radiol.*, 37, 544-550, (1964).
- 10) ICRU Report 24: Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of x or gamma rays in radiotherapy procedures. ICRU publication Washington, D. C., (1976).
- 11) IEC 976: Medical electrical equipment, Medical electron accelerators-functional performance characteristics. International Electrotechnical Commission, (1989).
- 12) Liu C, Li Z and Palta JR: Characterizing output factor for the Varian enhanced dynamic wedge field. *Med. Phys.*, 25 (1), 64-70, (1998).