

卒業論文

題目：診断X線領域における深部量百分率の近似関数の作成

(The construction of approximate function of the percentage depth
dose in the diagnosis X-ray level)

大阪大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

(指導：医用物理工学講座 松本光弘 准教授)

05C12038 三宅 綾香

(平成 27 年 12 月日提出)

1.目的

近年、個人の被曝量の把握が重要視され始めた中で、医療現場においても放射線技師は患者に与える被曝量をある程度知っておく必要があるのではないかと考えた。そこで診断X線領域において簡便に深部量百分率(以下、PDD)が算出できる近似関数の作成を行い、実測値とシミュレーションソフトウェアとの比較を行った。

2.使用器具

X線発生装置 KXO-80G(TOSHIBA 社製)

X線管 A-192(Varian 社製)

ROTANODE DRX-3724HD(TOSHIBA 社製)

Unfors Thinx RAD(Unfors RaySafe AB 社製)

線量計 UNIDOSE E 型(PTW 社製)

平行平板形チェンバ 34069 型 6cm³ (PTW 社製)

アクリルファントム

アネロイド気圧計 No.7610-20(SAITO-KEIRYOKI 社製)

標準温度計 1号 No.91655(NIKKEI 社製)

3.方法

3-1 X線装置の半価層測定

二つのX線装置のAl半価層をUnfors Thinx RADを用いて求めた。

測定条件をTable.1に示す。二つの測定は共にFCD=100cm、照射野は6×6cmとした。

Table1 測定条件

| | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|
| kV | 60 | 80 | 100 | 120 |
| mA | 320 | 160 | 200 | 100 |
| ms | 125 | 100 | 100 | 100 |

測定された値と参考文献¹の近似式を用いて、測定した半価層値を実効エネルギーに変換した。用いた近似式を以下に示す。

$$y = 0.07461x^3 - 1.112x^2 + 9.340x + 13.62 \quad \dots\text{式(1)}$$

[x:半価層(Almm)、y:実効エネルギー(keV)]

3-2 PDD 曲線の作成

SSD=100cm とし、アクリルファントムを用いてチェンバの位置を深さ 0,1,2, 3,4,5,10,15,19cm、照射野を 10×10, 20×20, 30×30cm と変化させた。各点で 3 回ずつ照射し、その平均を測定値とした。照射条件は Table.1 に示したものと同一とする。

測定値からそれぞれの条件下での PDD 曲線を作成した。

3-3 PDD 近似関数の算出

30×30cm 照射野を基準とし、作成された深部量百分率曲線から近似関数を算出した。近似関数は、実測された PDD が約 50%となる深さ 5cm よりも浅い部分と深い部分に分けて作成した。また、照射野を 30×30cm から変化させたとき、近似関数を補正するために用いる照射野係数も合わせて算出した。

3-4 近似関数の検証

3-3 で作成した近似関数によって算出された値と、実測された値、シュミレー

シモンソフトによって算出される値の 3 つを比較した。シミュレーションソフトには藤田保健衛生大学 加藤秀起教授の「診断 X 線の深部線量率計算」を用いた。

4. 結果

4-1 X 線装置の半価層測定

A-192(Varian 社製)の半価層測定の結果を Table2 に、ROTANODE DRX-3724 HD(TOSHIBA 社製)の半価層測定の結果を Table3 に示す。

Table2 A-192 の半価層測定結果

| | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 管電圧(kV) | 60 | 80 | 100 | 120 |
| 半価層(mmAl) | 2.2 | 3.0 | 3.9 | 4.7 |

Table3 ROTANODE DRX-3724HD の半価層測定結果

| | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|------|
| 管電圧(kV) | 60 | 80 | 100 | 120 |
| 半価層(mmAl) | 2.1 | 2.7 | 3.5 | 4.33 |

式(1)を用いて半価層値を実効エネルギーに変換した結果を Table4 に示す。

Table4 半価層値と実効エネルギー

| | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 半価層(mmAl) | 2.1 | 2.2 | 2.7 | 3.0 |
| 実効エネルギー(keV) | 29.02 | 29.58 | 32.20 | 33.65 |

| | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 半価層(mmAl) | 3.5 | 3.9 | 4.33 | 4.7 |
| 実効エネルギー(keV) | 35.89 | 37.56 | 39.27 | 40.70 |

4-2 PDD 曲線の作成

各条件下において測定した結果を Table5 と Fig.1～3 に示す。

Table5 測定した線量と PDD

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|---|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm 実効エネルギー 29.0keV (管電圧 60kV) | 0 | 491.00 | 100.00 |
| | 1 | 424.00 | 86.35 |
| | 2 | 350.33 | 71.35 |
| | 3 | 288.00 | 58.66 |
| | 4 | 237.67 | 48.40 |
| | 5 | 195.67 | 39.85 |
| | 10 | 69.00 | 14.05 |
| | 15 | 24.00 | 4.89 |
| | 19 | 10.00 | 2.04 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|---|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm 実効エネルギー 29.6keV (管電圧 60kV) | 0 | 444.67 | 100.00 |
| | 1 | 388.00 | 87.26 |
| | 2 | 315.00 | 70.84 |
| | 3 | 253.00 | 56.90 |
| | 4 | 201.00 | 45.20 |
| | 5 | 160.00 | 35.98 |
| | 10 | 44.00 | 9.90 |
| | 15 | 13.00 | 2.92 |
| | 19 | 5.00 | 1.12 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-----------------------------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm 実効エネルギー 32.2keV | 0 | 422.00 | 100.00 |
| | 1 | 368.00 | 87.20 |
| | 2 | 303.00 | 71.80 |

| | | | |
|------------|----|--------|-------|
| (管電圧 80kV) | 3 | 250.67 | 59.40 |
| | 4 | 211.00 | 50.00 |
| | 5 | 168.00 | 39.81 |
| | 10 | 56.00 | 13.27 |
| | 15 | 19.00 | 4.50 |
| | 19 | 8.00 | 1.90 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm | 0 | 407.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 369.67 | 90.83 |
| 33.7keV | 2 | 310.00 | 76.17 |
| (管電圧 80kV) | 3 | 257.67 | 63.31 |
| | 4 | 212.00 | 52.09 |
| | 5 | 174.00 | 42.75 |
| | 10 | 55.00 | 13.51 |
| | 15 | 18.00 | 4.42 |
| | 19 | 8.00 | 1.97 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm | 0 | 522.67 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 469.00 | 89.73 |
| 35.9keV | 2 | 395.00 | 75.57 |
| (管電圧 100kV) | 3 | 333.00 | 63.71 |
| | 4 | 286.00 | 54.72 |
| | 5 | 233.00 | 44.58 |
| | 10 | 85.00 | 16.26 |
| | 15 | 31.00 | 5.93 |
| | 19 | 13.67 | 2.61 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm | 0 | 507.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 472.67 | 93.23 |
| 37.6keV | 2 | 404.67 | 79.82 |
| (管電圧 100kV) | 3 | 344.00 | 67.85 |

| | | |
|----|--------|-------|
| 4 | 289.00 | 57.00 |
| 5 | 240.33 | 47.40 |
| 10 | 83.00 | 16.37 |
| 15 | 29.00 | 5.72 |
| 19 | 13.00 | 2.56 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm | 0 | 488.33 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 462.00 | 94.61 |
| 39.3keV | 2 | 416.00 | 85.19 |
| (管電圧 120kV) | 3 | 370.67 | 75.90 |
| | 4 | 329.00 | 67.37 |
| | 5 | 288.00 | 58.98 |
| | 10 | 139.00 | 28.46 |
| | 15 | 63.00 | 12.90 |
| | 19 | 32.00 | 6.55 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 10×10cm | 0 | 443.67 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 417.00 | 93.99 |
| 40.7keV | 2 | 360.00 | 81.14 |
| (管電圧 120kV) | 3 | 313.33 | 70.62 |
| | 4 | 264.00 | 59.50 |
| | 5 | 223.00 | 50.26 |
| | 10 | 81.33 | 18.33 |
| | 15 | 30.00 | 6.76 |
| | 19 | 14.00 | 3.16 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 488.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 418.00 | 85.66 |
| 29.0keV | 2 | 342.00 | 70.08 |
| (管電圧 60kV) | 3 | 282.00 | 57.79 |
| | 4 | 230.00 | 47.13 |

| | | | |
|--|----|--------|-------|
| | 5 | 188.67 | 38.66 |
| | 10 | 64.00 | 13.11 |
| | 15 | 21.00 | 4.30 |
| | 19 | 9.00 | 1.84 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 472.33 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 417.33 | 88.36 |
| 29.6keV | 2 | 352.00 | 74.52 |
| (管電圧 60kV) | 3 | 290.00 | 61.40 |
| | 4 | 238.00 | 50.39 |
| | 5 | 192.00 | 40.65 |
| | 10 | 66.00 | 13.97 |
| | 15 | 22.00 | 4.66 |
| | 19 | 9.00 | 1.91 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 445.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 398.00 | 89.44 |
| 32.2keV | 2 | 338.00 | 75.96 |
| (管電圧 80kV) | 3 | 290.00 | 65.17 |
| | 4 | 246.00 | 55.28 |
| | 5 | 208.00 | 46.74 |
| | 10 | 83.00 | 18.65 |
| | 15 | 31.00 | 6.97 |
| | 19 | 14.00 | 3.15 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 440.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 405.67 | 92.20 |
| 33.7keV | 2 | 355.00 | 80.68 |
| (管電圧 80kV) | 3 | 302.00 | 68.64 |
| | 4 | 257.67 | 58.56 |
| | 5 | 216.00 | 49.09 |

| | | | |
|--|----|-------|-------|
| | 10 | 87.00 | 19.77 |
| | 15 | 33.00 | 7.50 |
| | 19 | 14.00 | 3.18 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 560.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 516.00 | 92.14 |
| 35.9keV | 2 | 447.00 | 79.82 |
| (管電圧 100kV) | 3 | 393.33 | 70.24 |
| | 4 | 340.67 | 60.83 |
| | 5 | 294.00 | 52.50 |
| | 10 | 128.67 | 22.98 |
| | 15 | 51.00 | 9.11 |
| | 19 | 25.00 | 4.46 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 558.67 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 526.00 | 94.15 |
| 37.6keV | 2 | 472.33 | 84.55 |
| (管電圧 100kV) | 3 | 410.33 | 73.45 |
| | 4 | 357.67 | 64.02 |
| | 5 | 305.33 | 54.65 |
| | 10 | 134.33 | 24.05 |
| | 15 | 55.00 | 9.84 |
| | 19 | 25.00 | 4.47 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|-------------|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm | 0 | 478.67 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 448.67 | 93.73 |
| 39.3keV | 2 | 394.00 | 82.31 |
| (管電圧 120kV) | 3 | 352.00 | 73.54 |
| | 4 | 309.00 | 64.55 |
| | 5 | 270.00 | 56.41 |
| | 10 | 125.00 | 26.11 |

| | | |
|----|-------|-------|
| 15 | 52.00 | 10.86 |
| 19 | 26.00 | 5.43 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|--|--------|------------|--------|
| 照射野 20×20cm 実効エネルギー 40.7keV (管電圧 120kV) | 0 | 488.33 | 100.00 |
| | 1 | 469.00 | 96.04 |
| | 2 | 426.67 | 87.37 |
| | 3 | 378.33 | 77.47 |
| | 4 | 329.33 | 67.44 |
| | 5 | 287.67 | 58.91 |
| | 10 | 133.00 | 27.24 |
| | 15 | 56.67 | 11.60 |
| | 19 | 27.00 | 5.53 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|---|--------|------------|--------|
| 照射野 30×30cm 実効エネルギー 29.0keV (管電圧 60kV) | 0 | 491.00 | 100.00 |
| | 1 | 424.00 | 86.35 |
| | 2 | 350.33 | 71.35 |
| | 3 | 288.00 | 58.66 |
| | 4 | 237.67 | 48.40 |
| | 5 | 195.67 | 39.85 |
| | 10 | 69.00 | 14.05 |
| | 15 | 24.00 | 4.89 |
| | 19 | 10.00 | 2.04 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|---|--------|------------|--------|
| 照射野 30×30cm 実効エネルギー 29.6keV (管電圧 60kV) | 0 | 480.33 | 100.00 |
| | 1 | 425.67 | 88.62 |
| | 2 | 358.33 | 74.60 |
| | 3 | 298.33 | 62.11 |
| | 4 | 246.67 | 51.35 |
| | 5 | 200.67 | 41.78 |
| | 10 | 73.00 | 15.20 |
| | 15 | 25.00 | 5.20 |

| | | | |
|-------------|--------|------------|--------|
| | 19 | 11.00 | 2.29 |
| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
| 照射野 30×30cm | 0 | 452.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 407.00 | 90.04 |
| 32.2keV | 2 | 351.00 | 77.65 |
| (管電圧 80kV) | 3 | 300.33 | 66.45 |
| | 4 | 257.00 | 56.86 |
| | 5 | 218.00 | 48.23 |
| | 10 | 91.00 | 20.13 |
| | 15 | 37.00 | 8.19 |
| | 19 | 17.00 | 3.76 |
| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
| 照射野 30×30cm | 0 | 449.00 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 417.67 | 93.02 |
| 33.7keV | 2 | 365.00 | 81.29 |
| (管電圧 80kV) | 3 | 314.33 | 70.01 |
| | 4 | 269.67 | 60.06 |
| | 5 | 229.00 | 51.00 |
| | 10 | 97.00 | 21.60 |
| | 15 | 39.00 | 8.69 |
| | 19 | 18.00 | 4.01 |
| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
| 照射野 30×30cm | 0 | 570.67 | 100.00 |
| 実効エネルギー | 1 | 529.00 | 92.70 |
| 35.9keV | 2 | 468.33 | 82.07 |
| (管電圧 100kV) | 3 | 411.00 | 72.02 |
| | 4 | 359.00 | 62.91 |
| | 5 | 311.67 | 54.61 |
| | 10 | 142.00 | 24.88 |
| | 15 | 62.00 | 10.86 |
| | 19 | 30.00 | 5.26 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|--|--------|------------|--------|
| 照射野 30×30cm 実効エネルギー 37.6keV (管電圧 100kV) | 0 | 573.33 | 100.00 |
| | 1 | 547.67 | 95.52 |
| | 2 | 489.00 | 85.29 |
| | 3 | 430.33 | 75.06 |
| | 4 | 377.00 | 65.76 |
| | 5 | 327.00 | 57.03 |
| | 10 | 151.00 | 26.34 |
| | 15 | 65.67 | 11.45 |
| | 19 | 32.33 | 5.64 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|--|--------|------------|--------|
| 照射野 30×30cm 実効エネルギー 39.3keV (管電圧 120kV) | 0 | 488.33 | 100.00 |
| | 1 | 462.00 | 94.61 |
| | 2 | 416.00 | 85.19 |
| | 3 | 370.67 | 75.90 |
| | 4 | 329.00 | 67.37 |
| | 5 | 288.00 | 58.98 |
| | 10 | 139.00 | 28.46 |
| | 15 | 63.00 | 12.90 |
| | 19 | 32.00 | 6.55 |

| | 深さ(cm) | (μ C) | PDD(%) |
|--|--------|------------|--------|
| 照射野 30×30cm 実効エネルギー 40.7keV (管電圧 120kV) | 0 | 503.00 | 100.00 |
| | 1 | 489.33 | 97.28 |
| | 2 | 440.33 | 87.54 |
| | 3 | 398.00 | 79.13 |
| | 4 | 354.00 | 70.38 |
| | 5 | 309.00 | 61.43 |
| | 10 | 151.00 | 30.02 |
| | 15 | 68.00 | 13.52 |
| | 19 | 35.00 | 6.96 |

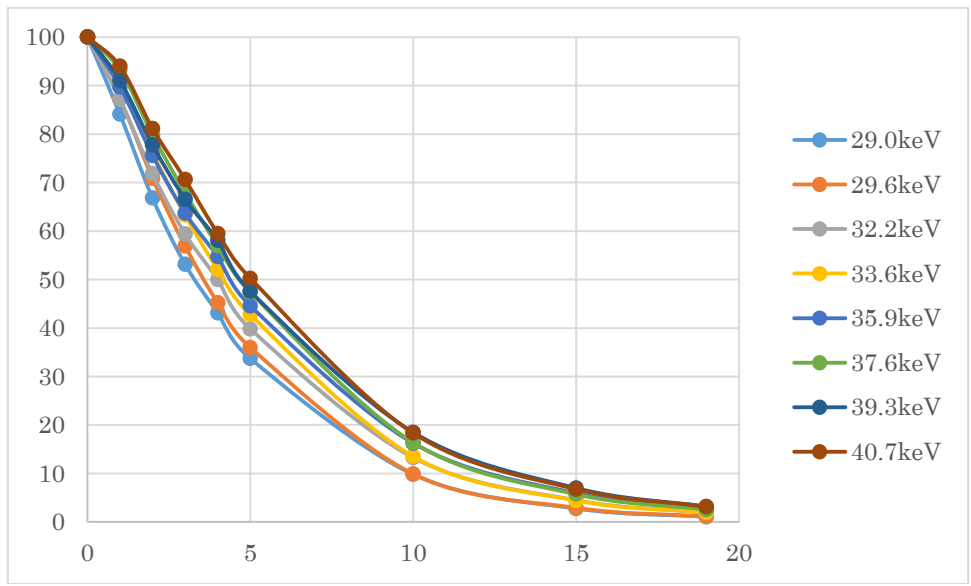


Fig.1. 照射野 10×10cm のときの各実効エネルギーにおける PDD 曲線

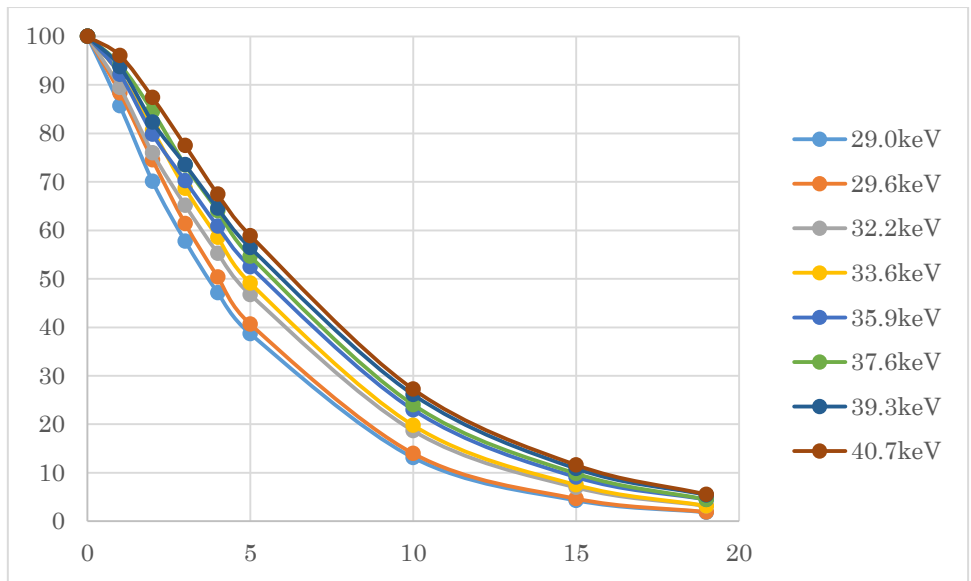


Fig.2. 照射野 20×20cm のときの各実効エネルギーにおける PDD 曲線

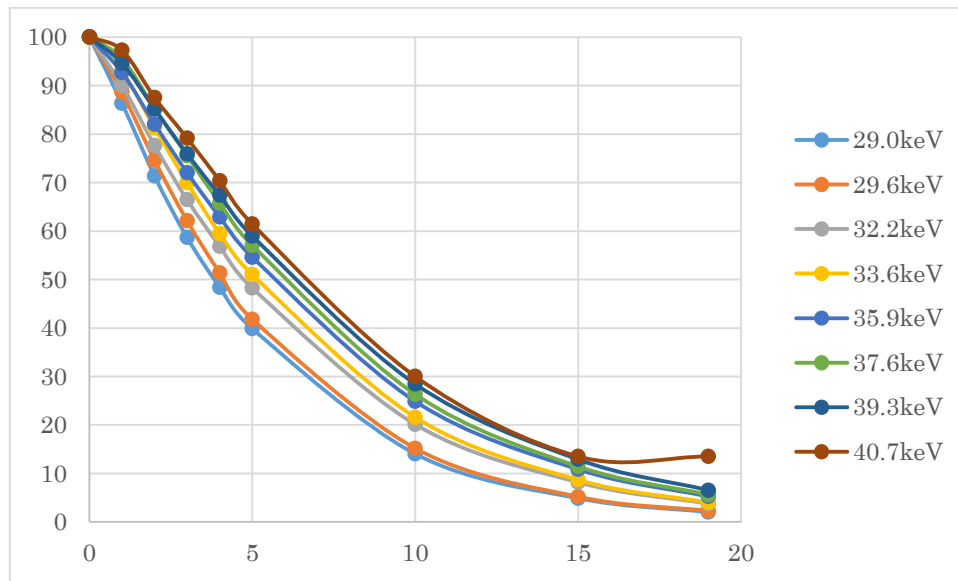


Fig3. 照射野 30×30cm のときの各実効エネルギーにおける PDD 曲線

4-3 PDD 近似関数の算出

1) 30×30cm 照射野において、深さ 0～5cm の場合

$y = \text{PDD}(\%)$ 、 $x = \text{depth}(\text{cm})$ として近似式を求めると

$$29.0\text{keV} : y = 102.3 e^{-0.187x} \quad \dots \text{式(2)}$$

$$29.6\text{keV} : y = 103.75e^{-0.177x} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$32.2\text{keV} : y = 102.7e^{-0.148x} \quad \dots \text{式(4)}$$

$$33.6\text{keV} : y = 104.26e^{-0.138x} \quad \dots \text{式(5)}$$

$$35.9\text{keV} : y = 103.05e^{-0.123x} \quad \dots \text{式(6)}$$

$$37.6\text{keV} : y = 104.53e^{-0.116x} \quad \dots \text{式(7)}$$

$$39.3\text{keV} : y = 103.44e^{-0.108x} \quad \dots \text{式(8)}$$

$$40.7\text{keV} : y = 104.61e^{-0.1x} \quad \dots \text{式(9)}$$

となった。これらは定数 a, b を用いると

$$y = a \cdot e^{-bx} \quad \dots \text{式(10)}$$

という一般式で表すことができる。

式(2)～(9)より実効エネルギー(以下、E)と定数の関係を求めると

$$a = 0.1172 \times E + 99.508 \quad \dots \text{式(11)}$$

$$b = -0.0072 \times E + 0.3867 \quad \dots \text{式(12)}$$

式(11)、(12)を式(10)に代入したところ

$$y = (0.1172 \times E + 99.508) \cdot e^{-(0.0072 \times E + 0.3867) \cdot x} \quad \dots \text{式(13)}$$

という近似関数が算出された。

2) 30×30cm 照射野において、深さ 6～20cm の場合

y = PDD(%), x = depth(cm)として近似式を求めると

$$29.0\text{keV} : y = 120.61 e^{-0.214x} \quad \dots \text{式(14)}$$

$$29.6\text{keV} : y = 123.93e^{-0.21x} \quad \dots \text{式(15)}$$

$$32.2\text{keV} : y = 130.74e^{-0.186x} \quad \dots \text{式(16)}$$

$$33.6\text{keV} : y = 156.93e^{-0.15x} \quad \dots \text{式(17)}$$

$$35.9\text{keV} : y = 141.04e^{-0.172x} \quad \dots \text{式(18)}$$

$$37.6\text{keV} : y = 146.7e^{-0.171x} \quad \dots \text{式(19)}$$

$$39.3\text{keV} : y = 146.32e^{-0.163x} \quad \dots \text{式(20)}$$

$$40.7\text{keV} : y = 152.83e^{-0.162x} \quad \dots \text{式(21)}$$

となった。

式(14)～(21)より実効エネルギーと定数の関係を求めると

$$a = 2.4492 \times E + 54.82 \quad \dots \text{式(22)}$$

$$b = -0.0042 \times E + 0.3231 \quad \dots \text{式(23)}$$

式(21)、(22)を式(10)に代入したところ

$$y = (2.4492 \times E + 54.82) \cdot e^{-(0.0042 \times E + 0.3231) \cdot x} \quad \dots \text{式(24)}$$

という近似関数が算出された。

3) 照射野係数の算出

照射野を 30×30cm の大きさから変化させたとき、深さ 0～5cm の領域では PDD に大きな変化は見られなかったが、深さ 6cm 以上の領域では値が大きく変化したため、この領域においてのみ照射野係数を設定することとした。

10×10cm 照射野において実測した PDD データを、式(24)の近似関数によって算出されるデータで除したところ、Table6 のような係数が得られた。

Table6 10×10cm 照射野における照射野係数

| 深さ(cm) | 29.0keV | 29.6keV | 32.2keV | 33.6keV |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 10 | 0.58 | 0.57 | 0.65 | 0.61 |
| 15 | 0.45 | 0.45 | 0.56 | 0.49 |
| 19 | 0.39 | 0.39 | 0.5 | 0.45 |

| 深さ(cm) | 35.9keV | 37.6keV | 39.3keV | 40.7keV |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 10 | 0.64 | 0.58 | 0.60 | 0.54 |
| 15 | 0.55 | 0.47 | 0.50 | 0.43 |
| 19 | 0.48 | 0.40 | 0.42 | 0.37 |

同じく 20×20cm 照射野において実測した PDD データを、式(24)の近似関数によって算出されるデータで除したところ、Table7 のような係数が得られた。

Table7 20×20cm 照射野における照射野係数

| 深さ(cm) | 29.0keV | 29.6keV | 32.2keV | 33.6keV |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 10 | 0.78 | 0.8 | 0.91 | 0.89 |
| 15 | 0.7 | 0.72 | 0.87 | 0.84 |
| 19 | 0.67 | 0.65 | 0.84 | 0.73 |

| 深さ(cm) | 35.9keV | 37.6keV | 39.3keV | 40.7keV |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 10 | 0.9 | 0.86 | 0.84 | 0.81 |
| 15 | 0.85 | 0.8 | 0.77 | 0.74 |
| 19 | 0.83 | 0.71 | 0.73 | 0.64 |

Table6 と 7 の結果をそれぞれ平均したところ、0.50、0.79 という係数が得られた。これらの係数と照射野の一辺(cm)の関係を式で表すと

$$y = 0.0249x + 0.266 \quad \dots \text{式(25)}$$

という照射野係数を求める式が算出できた。

ここでは y : 照射野係数、x : 照射野の一辺(cm)とする。

4-4 近似関数の検証

近似関数である式(13)、(24)と照射野係数を表す式(25)を用いて近似関数の検証を行った。

Table8 には基準である 30×30cm 照射野での近似関数による計算値とソフト値の誤差を、Table9 には同じく 30×30cm 照射野での計算値と実測値の誤差を示した。

Table8 近似関数による計算値とソフト値の誤差

| 深さ(cm) | 29.0keV | | | 29.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 83.72 | 88.00 | -4.28 | 84.06 | 85.28 | -1.22 |
| 2 | 70.08 | 71.26 | -1.18 | 70.65 | 67.09 | 3.56 |
| 3 | 58.67 | 57.18 | 1.49 | 59.39 | 52.79 | 6.60 |
| 4 | 49.12 | 45.85 | 3.27 | 49.92 | 41.73 | 8.19 |
| 5 | 41.12 | 36.76 | 4.36 | 41.96 | 33.10 | 8.86 |
| 6 | 37.65 | 29.07 | 8.58 | 38.59 | 25.97 | 12.63 |
| 7 | 30.78 | 23.29 | 7.49 | 31.63 | 20.66 | 10.98 |
| 8 | 25.17 | 18.65 | 6.52 | 25.93 | 16.46 | 9.47 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 9 | 20.59 | 15.00 | 5.59 | 21.25 | 13.16 | 8.09 |
| 10 | 16.83 | 12.30 | 4.53 | 17.42 | 10.75 | 6.67 |
| 11 | 13.77 | 9.65 | 4.12 | 14.28 | 8.41 | 5.87 |
| 12 | 11.26 | 7.77 | 3.49 | 11.70 | 6.75 | 4.95 |
| 13 | 9.20 | 6.25 | 2.95 | 9.59 | 5.42 | 4.18 |
| 14 | 7.53 | 5.02 | 2.51 | 7.86 | 4.34 | 3.52 |
| 15 | 6.16 | 4.19 | 1.97 | 6.45 | 3.61 | 2.84 |
| 16 | 5.03 | 3.25 | 1.78 | 5.28 | 2.80 | 2.48 |
| 17 | 4.12 | 2.63 | 1.49 | 4.33 | 2.26 | 2.08 |
| 18 | 3.37 | 2.12 | 1.25 | 3.55 | 1.82 | 1.73 |
| 19 | 2.75 | 1.78 | 0.98 | 2.91 | 1.52 | 1.39 |
| 20 | 2.25 | 1.38 | 0.88 | 2.38 | 1.18 | 1.21 |

| 深さ(cm) | 32.2keV | | | 33.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 85.66 | 92.22 | -6.56 | 86.55 | 90.01 | -3.45 |
| 2 | 73.37 | 79.02 | -5.65 | 74.91 | 75.42 | -0.50 |
| 3 | 62.84 | 66.72 | -3.88 | 64.84 | 62.72 | 2.12 |
| 4 | 53.83 | 56.06 | -2.23 | 56.11 | 52.11 | 4.00 |
| 5 | 46.10 | 46.98 | -0.88 | 48.57 | 43.31 | 5.26 |
| 6 | 43.31 | 38.70 | 4.61 | 46.11 | 35.43 | 10.68 |
| 7 | 35.89 | 32.24 | 3.65 | 38.44 | 29.36 | 9.08 |
| 8 | 29.74 | 26.85 | 2.90 | 32.05 | 24.34 | 7.71 |
| 9 | 24.65 | 22.37 | 2.28 | 26.72 | 20.20 | 6.52 |
| 10 | 20.43 | 19.08 | 1.35 | 22.28 | 17.17 | 5.11 |
| 11 | 16.93 | 15.46 | 1.47 | 18.58 | 13.88 | 4.70 |
| 12 | 14.03 | 12.88 | 1.15 | 15.49 | 11.54 | 3.96 |
| 13 | 11.63 | 10.71 | 0.92 | 12.92 | 9.57 | 3.35 |
| 14 | 9.64 | 8.89 | 0.75 | 10.77 | 7.93 | 2.84 |
| 15 | 7.99 | 7.68 | 0.31 | 8.98 | 6.84 | 2.14 |
| 16 | 6.62 | 6.14 | 0.48 | 7.49 | 5.46 | 2.03 |
| 17 | 5.48 | 5.11 | 0.37 | 6.24 | 4.54 | 1.70 |
| 18 | 4.54 | 4.25 | 0.29 | 5.20 | 3.60 | 1.60 |
| 19 | 3.77 | 3.70 | 0.07 | 4.34 | 3.28 | 1.06 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 20 | 3.12 | 2.94 | 0.19 | 3.62 | 2.60 | 1.02 |
|----|------|------|------|------|------|------|

| 深さ(cm) | 35.9keV | | | 37.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 87.96 | 94.85 | -6.88 | 89.02 | 93.07 | -4.04 |
| 2 | 77.37 | 84.02 | -6.65 | 79.25 | 81.02 | -1.77 |
| 3 | 68.05 | 73.05 | -5.00 | 70.55 | 69.61 | 0.95 |
| 4 | 59.86 | 63.02 | -3.16 | 62.81 | 59.53 | 3.28 |
| 5 | 52.65 | 54.12 | -1.47 | 55.91 | 50.77 | 5.14 |
| 6 | 50.73 | 45.56 | 5.17 | 54.43 | 42.52 | 11.92 |
| 7 | 42.70 | 38.78 | 3.93 | 46.14 | 36.03 | 10.11 |
| 8 | 35.94 | 32.95 | 2.99 | 39.11 | 30.51 | 8.60 |
| 9 | 30.25 | 27.98 | 2.27 | 33.15 | 25.83 | 7.32 |
| 10 | 25.46 | 24.34 | 1.12 | 28.09 | 22.41 | 5.68 |
| 11 | 21.43 | 20.07 | 1.36 | 23.81 | 18.44 | 5.38 |
| 12 | 18.04 | 17.02 | 1.02 | 20.18 | 15.60 | 4.59 |
| 13 | 15.18 | 14.38 | 0.80 | 17.11 | 13.16 | 3.95 |
| 14 | 12.78 | 12.15 | 0.63 | 14.50 | 11.10 | 3.41 |
| 15 | 10.75 | 10.67 | 0.09 | 12.29 | 9.73 | 2.56 |
| 16 | 9.05 | 8.66 | 0.39 | 10.42 | 7.89 | 2.53 |
| 17 | 7.62 | 7.33 | 0.29 | 8.83 | 6.67 | 2.16 |
| 18 | 6.41 | 6.18 | 0.23 | 7.48 | 5.62 | 1.86 |
| 19 | 5.40 | 5.47 | -0.07 | 6.34 | 4.97 | 1.37 |
| 20 | 4.54 | 4.41 | 0.13 | 5.38 | 4.00 | 1.38 |

| 深さ(cm) | 39.3keV | | | 40.7keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) | 計算(%) | ソフト(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 90.13 | 96.59 | -6.46 | 91.06 | 95.16 | -4.10 |
| 2 | 81.23 | 87.44 | -6.21 | 82.92 | 84.95 | -2.03 |
| 3 | 73.21 | 77.48 | -4.27 | 75.50 | 74.56 | 0.94 |
| 4 | 65.98 | 67.99 | -2.01 | 68.75 | 64.97 | 3.78 |
| 5 | 59.47 | 59.29 | 0.18 | 62.61 | 56.35 | 6.26 |
| 6 | 58.46 | 50.63 | 7.83 | 62.01 | 47.90 | 14.11 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 7 | 49.91 | 43.66 | 6.25 | 53.26 | 41.17 | 12.09 |
| 8 | 42.61 | 37.58 | 5.03 | 45.74 | 35.33 | 10.41 |
| 9 | 36.37 | 32.29 | 4.09 | 39.28 | 30.28 | 9.01 |
| 10 | 31.05 | 28.43 | 2.62 | 33.74 | 26.61 | 7.13 |
| 11 | 26.51 | 23.70 | 2.81 | 28.98 | 22.13 | 6.85 |
| 12 | 22.63 | 20.30 | 2.33 | 24.89 | 18.94 | 5.95 |
| 13 | 19.32 | 17.34 | 1.98 | 21.37 | 16.15 | 5.22 |
| 14 | 16.49 | 14.80 | 1.69 | 18.36 | 13.77 | 4.59 |
| 15 | 14.08 | 13.14 | 0.95 | 15.77 | 12.21 | 3.56 |
| 16 | 12.02 | 10.78 | 1.25 | 13.54 | 10.00 | 3.55 |
| 17 | 10.26 | 9.20 | 1.06 | 11.63 | 8.54 | 3.09 |
| 18 | 8.76 | 7.84 | 0.93 | 9.99 | 7.26 | 2.73 |
| 19 | 7.48 | 7.01 | 0.47 | 8.58 | 6.49 | 2.09 |
| 20 | 6.39 | 5.70 | 0.69 | 7.37 | 5.28 | 2.09 |

Table9 近似関数による計算値と実測値の誤差

| 深さ(cm) | 29.0keV | | | 29.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 83.72 | 86.35 | -2.64 | 84.06 | 88.62 | -4.56 |
| 2 | 70.08 | 71.35 | -1.27 | 70.65 | 74.60 | -3.95 |
| 3 | 58.67 | 58.66 | 0.01 | 59.39 | 62.11 | -2.72 |
| 4 | 49.12 | 48.40 | 0.71 | 49.92 | 51.35 | -1.44 |
| 5 | 41.12 | 39.85 | 1.27 | 41.96 | 41.78 | 0.18 |
| 10 | 16.83 | 14.05 | 2.78 | 17.42 | 15.20 | 2.22 |
| 15 | 6.16 | 4.89 | 1.27 | 6.45 | 5.20 | 1.24 |
| 19 | 2.75 | 2.04 | 0.72 | 2.91 | 2.29 | 0.62 |

| 深さ(cm) | 32.2keV | | | 33.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 85.66 | 90.04 | -4.39 | 86.55 | 93.02 | -6.47 |
| 2 | 73.37 | 77.65 | -4.29 | 74.91 | 81.29 | -6.38 |
| 3 | 62.84 | 66.45 | -3.60 | 64.84 | 70.01 | -5.17 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4 | 53.83 | 56.86 | -3.03 | 56.11 | 60.06 | -3.94 |
| 5 | 46.10 | 48.23 | -2.13 | 48.57 | 51.00 | -2.43 |
| 10 | 20.43 | 20.13 | 0.29 | 22.28 | 21.60 | 0.68 |
| 15 | 7.99 | 8.19 | -0.20 | 8.98 | 8.69 | 0.29 |
| 19 | 3.77 | 3.76 | 0.01 | 4.34 | 4.01 | 0.33 |

| 深さ(cm) | 35.9keV | | | 37.6keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 87.96 | 92.70 | -4.74 | 89.02 | 95.52 | -6.50 |
| 2 | 77.37 | 82.07 | -4.70 | 79.25 | 85.29 | -6.04 |
| 3 | 68.05 | 72.02 | -3.97 | 70.55 | 75.06 | -4.51 |
| 4 | 59.86 | 62.91 | -3.05 | 62.81 | 65.76 | -2.95 |
| 5 | 52.65 | 54.61 | -1.97 | 55.91 | 57.03 | -1.12 |
| 10 | 25.46 | 24.88 | 0.58 | 28.09 | 26.34 | 1.76 |
| 15 | 10.75 | 10.86 | -0.11 | 12.29 | 11.45 | 0.84 |
| 19 | 5.40 | 5.26 | 0.14 | 6.34 | 5.64 | 0.70 |

| 深さ(cm) | 39.3keV | | | 40.7keV | | |
|--------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) | 計算(%) | 実測(%) | 誤差(%) |
| 0 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 0.00 |
| 1 | 90.13 | 94.61 | -4.48 | 91.06 | 97.28 | -6.23 |
| 2 | 81.23 | 85.19 | -3.96 | 82.92 | 87.54 | -4.62 |
| 3 | 73.21 | 75.90 | -2.70 | 75.50 | 79.13 | -3.62 |
| 4 | 65.98 | 67.37 | -1.39 | 68.75 | 70.38 | -1.63 |
| 5 | 59.47 | 58.98 | 0.49 | 62.61 | 61.43 | 1.17 |
| 10 | 31.05 | 28.46 | 2.59 | 33.74 | 30.02 | 3.72 |
| 15 | 14.08 | 12.90 | 1.18 | 15.77 | 13.52 | 2.25 |
| 19 | 7.48 | 6.55 | 0.93 | 8.58 | 6.96 | 1.62 |

また、Fig.4～11 には 30×30cm 照射野において各実効エネルギーにおける計算値・実測値・ソフト値を比較したグラフを示した。

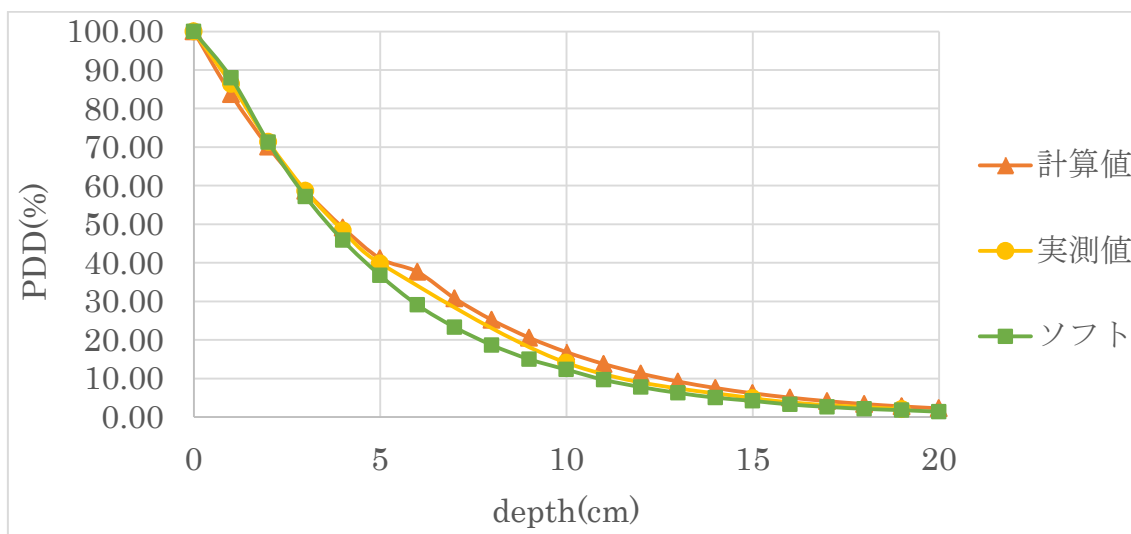


Fig.4 29.0keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

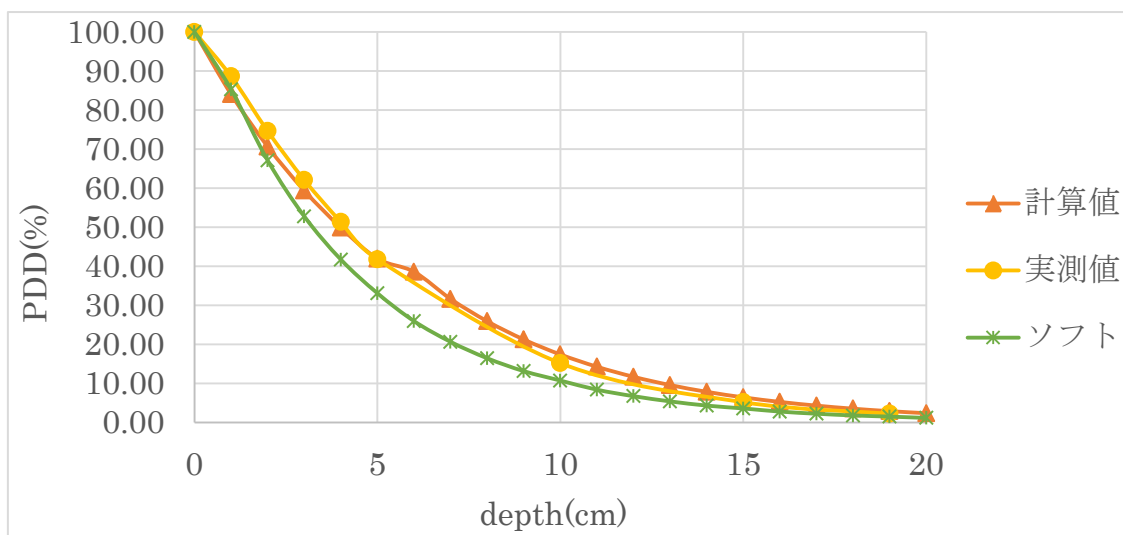


Fig.5 29.6keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

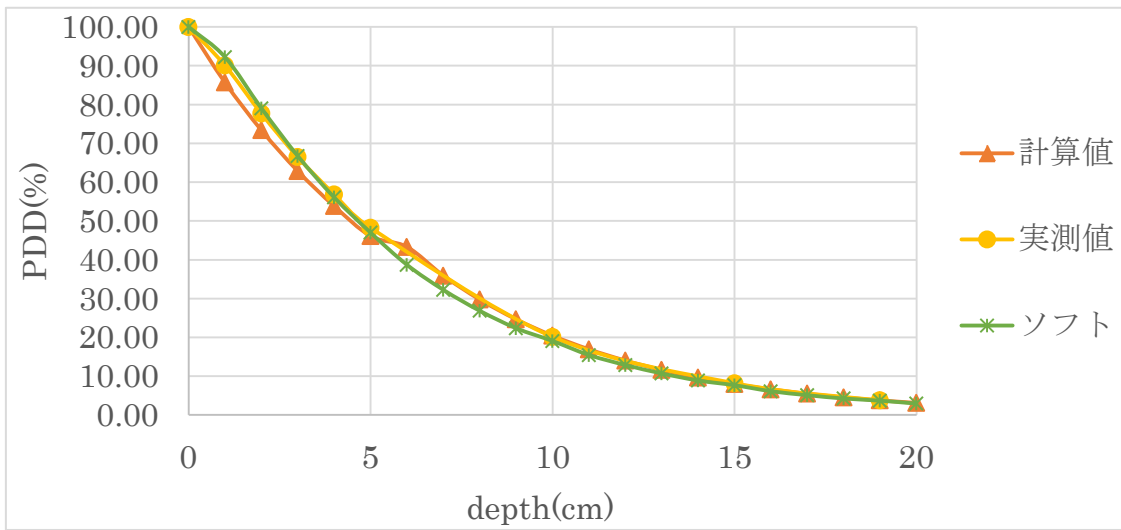


Fig.6 32.2keV における計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

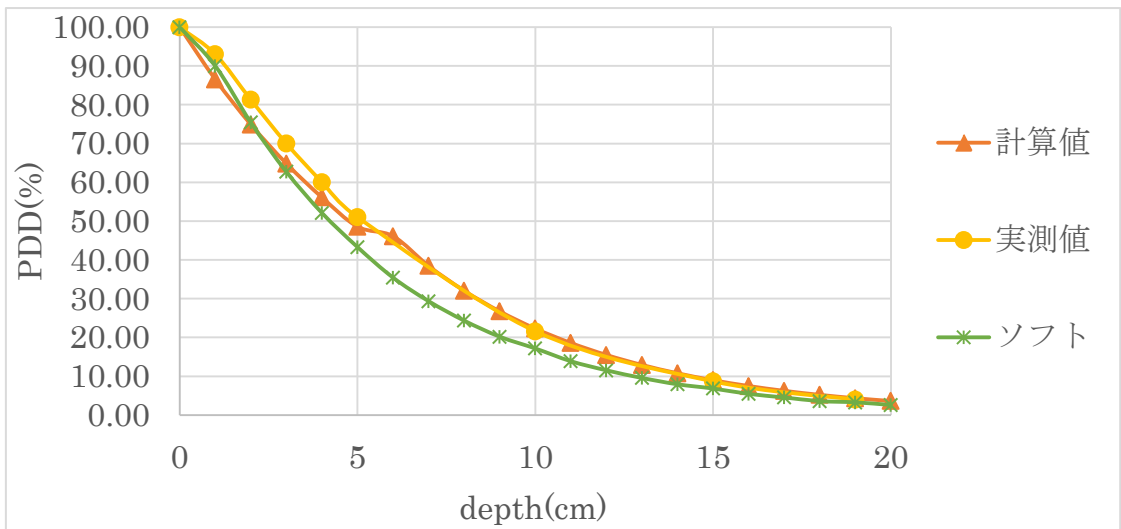


Fig.7 33.6keV における計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

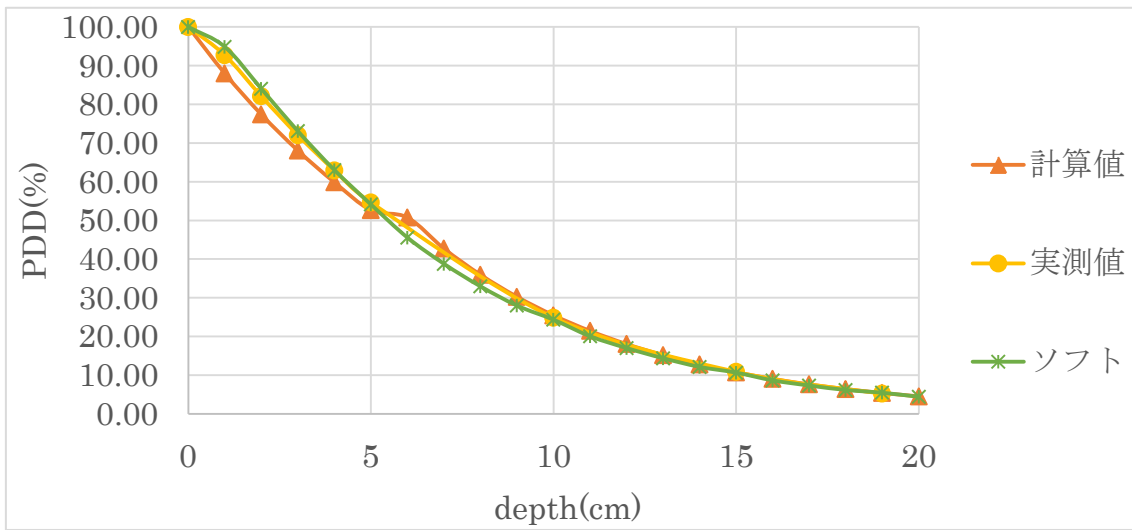


Fig.8 35.9keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

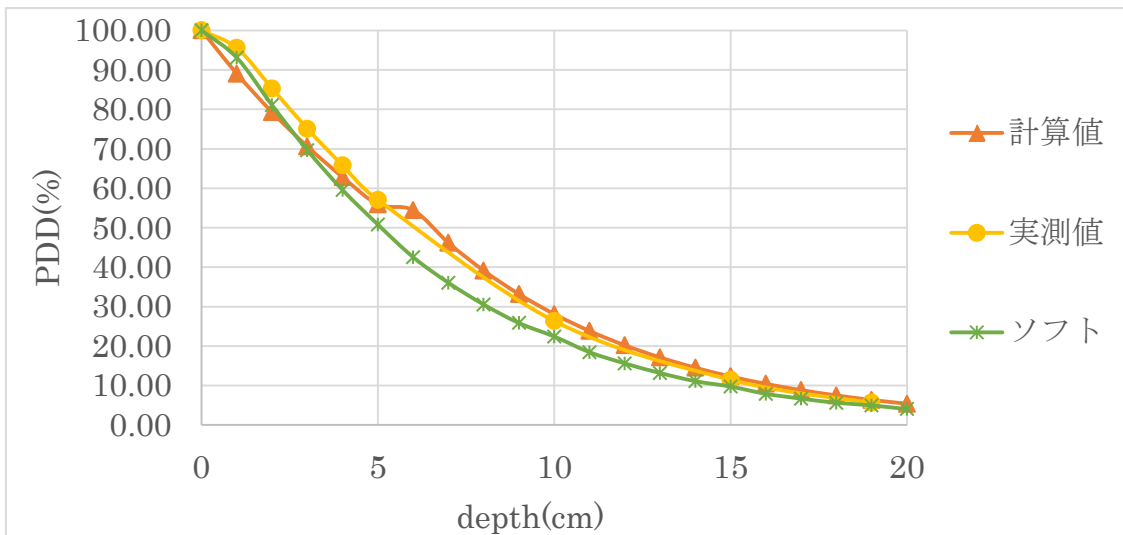


Fig.9 37.6keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

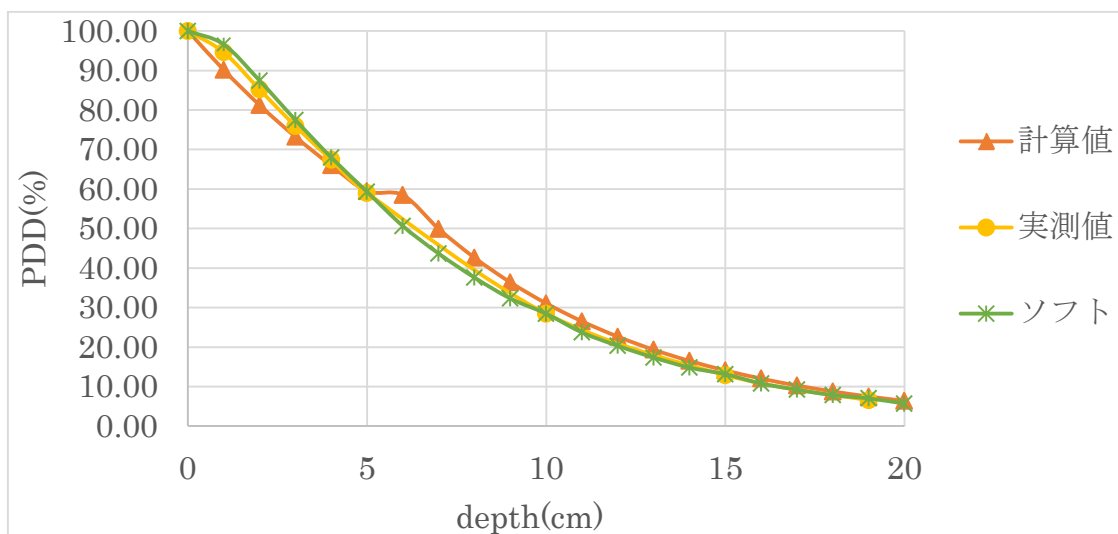


Fig.10 39.3keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

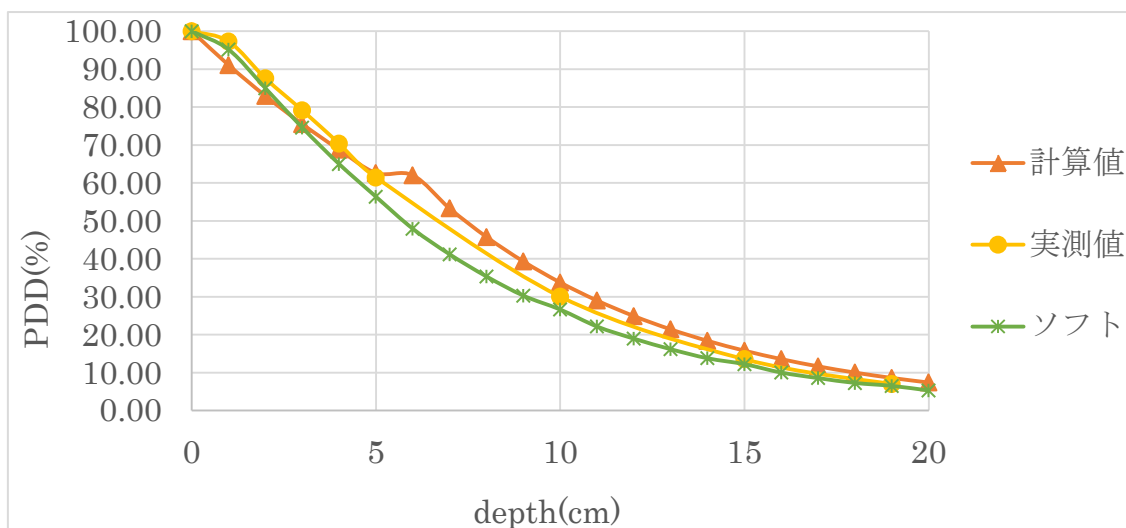


Fig11 40.7keVにおける計算値・実測値・ソフト値 (FS=30×30cm)

30×30cm 照射野で深さ 0 から 20cm の領域において、近似関数による計算値と実測値の誤差は±6.5%以内、計算値とソフト値の誤差は±14.1%以内となった。全実効エネルギーで算出された誤差を照射野ごとに平均したものを Table10、11 に示す。

Table10 近似関数によって算出された PDD との誤差平均

| | 10×10cm | 20×20cm | 30×30cm |
|---------|---------|---------|---------|
| ソフト値(%) | 12.5 | 3.6 | 3.6 |
| 実測値(%) | 1.0 | 3.9 | 2.5 |

Table11 実測された PDD とソフトウェアによる PDD の誤差平均

| | 10×10cm | 20×20cm | 30×30cm |
|---------|---------|---------|---------|
| ソフト値(%) | 12.3 | 14.3 | 2.4 |

5.考察

参考文献

- 1) 新田哲也、卒業論文「蛍光ガラス線量計小型素子システムにおける高エネルギー用素子(Sn フィルタ未装着)の低エネルギー領域への応用について」、p13、2009