

主 論 文

Oblique Surface Dose Calculation in High Energy X-ray Therapy
(高エネルギーX線治療における斜入表面線量の算出)

成廣直正、笈田将皇、竹田芳弘

Acta Medica Okayama (掲載予定)

主 論 文

Oblique Surface Dose Calculation in High Energy X-ray Therapy

〔緒言〕

放射線治療において、高エネルギー4~6MVのX線を用いた乳癌や頭頸部腫瘍の照射では身体の形状により、皮膚表面に対して垂直に照射ができず、斜入となる場合がある。斜入となった場合、高エネルギーX線治療の利点である皮膚保護効果が失われ、皮膚表面に高線量が照射されるため、重篤な皮膚障害が発生する可能性がある。皮膚線量を把握することは放射線障害の発生を予測するうえで重要である。本研究では、個人被ばく線量測定に開発された光刺激ルミネセンス (Optically Stimulated Luminescence Dosimeter : OSLD) を使用し、その測定値から斜入表面線量の算出式を導出した。

〔使用機器および方法〕

1. nanoDot OSLD

OSLDは長瀬 LANDAUER社の nanoDot OSLDを用いた。線量計はポリエチレンで覆われたシート状の炭素添加 α -酸化アルミニウム (α -Al₂O₃:C) で構成されている。これは直径0.5cm、厚さ0.03cmの円形素子であり、1cm×1cm×0.2cmのケースで遮光されている。遮光ケースにシリアル番号とバーコードが表示されている。読み取りを行う測定装置は長瀬 LANDAUER社の microStarを使用した。高エネルギーX線照射装置はSIEMENS社のリニアック PRIMUS-KD2、ファントムは nanoDot OSLDを挿入可能に加工した TOYO MEDIC社の Solid Water ファントム(密度1.04 g/cm³, 40cm×40cm×20cm)を使用した。

2. 線量のバラツキ

66個の nanoDot OSLDをファントムの上に設置し、同時に照射した。照射のX線エネルギーは4MV、線量率は200MU/min、線源線量計間距離は100cm、照射野は40cm×40cm、モニタユニット値は200MUである。線量のバラツキは変動係数 CV で評価した。

3. 角度依存性

照射は nanoDot OSLDの周りに散乱線のない状況で行った。nanoDot OSLDのバーコード面に対して、垂直方向の角度を0度とした。リニアックのガントリー角度が0度から345度までの15度間隔の24方向から照射した。X線エネルギーは4MV、線量率は200MU/min、線源線量計間距離は100cmに一定とした。照射野は10cm×10cm、モニタユニット値は200MUである。読み取りの測定方法は線量のバラツキと同様である。測定値から0度に対する各角度の線量比を求めた。nanoDot OSLDのバーコード面を右に90度回した場合についても同様に24方向から照射し、線量比を求めた。

4. 斜入表面線量の測定

nanoDot OSLD をファントムの表面に埋め込んだ。照射は正方形照射野の一辺が 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30cm の 11 通り、斜入角度は 0 度から 75 度まで 15 度間隔の 6 通りの計 66 通り全ての組み合わせで行った。照射の X 線エネルギーは 4MV、線量率は 200MU/min、線源線量計間距離は 100cm に一定とした。モニタユニット値は 200MU である。読み取りの測定方法は線量のバラツキと同様である。測定値は線量計の角度依存性の補正を行い、1MU あたりの吸収線量を求めた。

5. 斜入表面線量の計算式

前項までの結果から、1MU あたりの表面線量を計算し、2 次元多項式を使用して斜入表面線量を計算する式を導出した。この式を使用して得られる線量は、4 MV X 線の照射野の中心にある深さ 0.1cm での吸収線量である。計算式を使用して、nanoDot OSLD を測定した場合と同様の条件で計算し、測定値に対する計算値の誤差を求めた。

[結果]

1. 線量のバラツキ

nanoDot OSLD 66 個の変動係数の平均値は 1.00%、最小値は 0.33%、最大値は 1.71%であった。

2. 角度依存性

線量比は全て 1.00 以上となり、最大値は 1.37 となった。線量計を 90 度回した場合もほぼ同じ傾向となった。角度依存性は線量計表面に対して水平方向から大きい傾向であった。

3. 斜入表面線量

0 度から斜入角度が 75 度までの全ての角度において、斜入角度が大きくなると線量相対値は増加した。また、照射野が大きくなると、線量相対値も増加した。斜入角度が大きくなるにつれて増加幅も大きくなる傾向にあった。正方形 1 辺の長さが 5cm で表面に対して垂直に入射した時の 1MU あたりの線量は 0.39cGy となり、測定した線量の最小値となった。また、測定した線量の最大値は正方形 1 辺の長さが 20cm と 25cm、斜入角度 75 度の時で 0.81cGy となった。

また、照射野が小さいほど、より照射角度が大きくなるにつれて増加幅が大きくなった。表面線量は照射野が小さいほど、照射角度による依存性が大きい。

4. 斜入表面線量の計算式

1MU あたりの表面線量から 2 次元の多項式に最少 2 乗法を用いて導出した斜入表面線量の算出式とパラメータを次に示す。

$$z = (Z_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 + A_5x^5 + B_1y + B_2y^2 + B_3y^3 + B_4y^4 + B_5y^5) \times MU$$

ここで、

z : 斜入表面線量 (cGy)

x : 正方形照射野の 1 辺 (cm)

y : 照射角度 (度)

MU：モニタユニット値 (MU)

である ($R^2=0.9896$).

表面線量算出のためのパラメータは以下に示す.

Z_0 : 0.28848

A_1 : 0.02949

A_2 : -0.00233

A_3 : 1.55285×10^{-4}

A_4 : -5.07844×10^{-4}

A_5 : 5.9578×10^{-8}

B_1 : 1.55206×10^{-4}

B_2 : 1.0485×10^{-5}

B_3 : 1.038178×10^{-6}

B_4 : -1.40893×10^{-8}

B_5 : 7.10076×10^{-11}

この式を使用して計算された 1MU あたりの斜入表面線量と, nanoDot OSLD を使用して測定された値を比較した結果, 測定値に対する計算値の誤差範囲は-7.7~5.1%であった.

[考察]

1. 線量のバラツキ

nanoDot OSLD 66 個の変動係数の平均値は 1.00%, 最大値が 1.71%であった. 通常 2%以下であることから, 使用した 66 個全ての nanoDot OSLD のばらつきは適切であると考えられた.

2. 角度依存性

nanoDot OSD には角度依存性が認められる. 線量計の表面に対して垂直方向での角度依存性は見られないが, 水平方向に近づくと角度依存性が大きくなる. この原因は線量計の形状にあると考えられる. 線量計のポリエステルケースからの 2 次電子の発生が影響し, 垂直方向のポリエステルケース厚は水平方向に比較して薄いため, 2 次電子の発生が少なく, また, 水平方向でも 90 度と 270 度とでは若干線量が異なるのは円形素子が線量計の中心に配置されていないためと考えられる.

3. 斜入表面線量

表面線量の寄与は主に, 加速装置の構造に関係した表面上の空気から散乱した電子及び表面下部からの線量に関係している. 表面に対して垂直入射の場合, 高エネルギー 4MV の X 線では入射点から深さ 1cm で線量は最大となる. 斜入の場合でも同様に, 入射点から深さ 1cm で最大となるが, 最大線量は浅い領域となる. そのために斜入の角度が大きくなると表面線量も大きくなると考えられる.

4. 斜入表面線量の計算式

計算式プログラムを利用すれば、正方形の照射野寸法、照射角度、モニタユニット値の 3 つの入力で表面線量を簡単に計算できる。ただし、誤差範囲は-7.7~5.1%でる。この誤差を念頭に置いて計算式を使用する必要がある。本研究は、モンテカルロシミュレーションや平行板電離箱測定などの標準的な方法と比較は行っていない。

[結論]

本研究は、高エネルギー4 MV X 線と nanoDot OSLD を使用して、深さ 0.1 cm の斜面線量を計算するための新しい方程式を導出した。計算式から得られた値を nanoDot OSLD の測定値と比較すると、誤差範囲は-7.7~5.1%であった。