テクニカルノート

不均質ファントムにおける深部線量曲線の測定

石 崎 邦 明・杉 山 卓・舟 橋 勝 夫

藤 浪 喜久夫・*渡 辺 伸 也

都立駒込病院放射線診療科

*都立豊島病院放射線診療科

(論文受理 1987年11月7日)

(最終論文受理 1988年8月19日)

(Code No. 234.2, 228.2)

Key words: Thermoluminescent dosimeter, Build-down effect, Inhomogeneous material, Depth dose curve

MEASUREMENT OF DEPTH DOSE CURVES IN INHOMOGENEOUS PHANTOM

KUNIAKI ISHIZAKI, TAKASHI SUGIYAMA, KATSUO FUNABASHI

KIKUO FUJINAMI, *SHINYA WATANABE

Department of Radiological Technology, Tokyo Metropolitan Komagome Hospital

*Department of Radiological Technology, Tokyo Metropolitan Toshima Hospital

Summary

Build-down effects in water equivalent phantoms and depth dose curves in inhomogeneous phantoms were measured with thermoluminescent dosimeters (TLDs). The kind of TLDs was CaSO_4 : Tm foil type, and its thickness and diameter were 0.06 mm and 8 mm, respectively. As a result, minute changes in the depth dose in inhomogeneous phantoms were evaluated, and the exit plane was more than the entrance plane for the surface dose. We obtained identical same clinical results in radiotherapy in which the skin reaction was harder on the exit plane.

1. 緒 言

照射精度の高い放射線治療をめざす上で、不均質組織内の線量分布を解明することは重要なテーマである。しかしながら、どのような線量計で測定すれば良いかとなると難しい問題である。指頭型電離箱で不均質部位と射出側近傍を測定しようとする、二つの大きな問題につきあたってしまう。それは、電離箱が占める容積の問題

と、専用のファントムを必要とする問題である。一般に、容積を有する測定器は、線量勾配が急峻な入射表面、射出表面、および不均質境界面等の測定には適していない。そこで、これらの部位の線量を測定する目的で、厚さが薄くて信頼性があり、測定の容易なホイル型熱蛍光線量計(以下 TLD と略す)を用いて測定することにした。その結果、ビルドアップ (build-up effect) と、ビルドダウン (build-down effect^{1)*}) や、不均質物質内の線量の変

化について、若干の知見を得たので報告する。

2. 実験方法

2.1 使用機器

照射装置：NEC NELAC-1004 (4 MV X線)

Valian Clinac-18 (10 MV X線)

いずれの場合もビームストッパー付きである。

照射野：10×10 cm²

線量計：Ionex. type-2500/3

2581 型0.6 cc チェンバ

VICTOREEN 500 型ラドコン線量計

550-6A 型0.33 cc チェンバ

TLD：CaSO₄ (Tm) 素子…ナショナル UD-100M8

Reader…ナショナル UD-502B

Phantom：水等価ファントム…RMI 社製 451 型ファントム²⁾と Mix-Dp の併用

骨等価ファントム…RMI 社製 450 型ファントム²⁾ (密度 $\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$)

肺等価ファントム…コルク ($\rho = 0.23 \text{ g/cm}^3$)

各ファントム面積は、30×30 cm² である。

2.2 TLD の取扱と各種補正係数

初めに 4 MV X線リニアックを用いて素子個々の校正定数を求めた。10 MV X線の線量値は、4 MV X線の線量校正定数に補正係数を掛ける方式をとった。TLD 特性の一つである超直線性 (supralineality) については、当施設で測定を行い、supralineality が生じないように一回の照射線量を $1.3 \times 10^{-2} \text{ C/kg}$ 以下とした。過去に、大線量の測定に使用した素子は、小線量の測定に使用しないようにした。フェーディング効果については、その補正を無視できるように、校正・線量測定ともに、照射後同一時間経過してから測定を開始するようにした。

被曝量が 0.2 C/kg 以上に達した素子は廃棄した。また、アニール回数が 15 回以上に達した素子も廃棄した。

ファントムに入射された X線は、深部に到達するに従い低エネルギー成分が多くなる。そこで、深さごとに電離箱線量計と TLD の深部線量の比較を行った。⁶⁰Co 線源を用いて空中で校正した都丸³⁾の場合は、深さが増すにつれ TLD が電離箱線量計より過応答を示した。今回のわれわれの実験では、校正を深さ 5 cm の水等価ファントム中で実施したため、校正の時点で低エネルギー成分について充分に考慮される結果となり、電離箱線量計と TLD との間にはほとんど差がなく、無視できる値に

なった。

バックグラウンドの値は、照射線量の 10^{-3} 程度なので無視した。

すべての実験は、20×20 cm² 程度の穴が開いた枠の上に Fig. 1 で示したように薄いファントムを何枚も積み重ねて、各ファントム間に TLD を 3 枚挟み込み、一括照射する方式を採用した。各測定点の線量値は TLD 3 枚

Fig. 1 Geometrical relationship of dose measurements with TLDs and phantoms. Three pieces of TLDs are placed on the surface and inside of the inhomogeneous phantom. High energy X-ray is irradiated to the inhomogeneous phantom, so that any TLD is irradiated with a single exposure.

Fig. 2 Histogram showing the frequency concerning as the coefficient of variation of dose measured by three pieces of TLD. A total TLD 390 pieces were used for this experiment.

の値の平均値とした。3枚の値のばらつきを示す変動係数 (Coefficient of Variation) は極めて悪い値で3%, 多くは1%前後であった。使用した素子3枚ごとの変動係数の度数 (Frequency) 分布を Fig. 2 に示す。

3. 結 果

Fig. 3 は、水等価ファントムを用いて、5, 10, 15, 20 cm という4種類の厚さのファントムを作り、4 MV X線を照射したときのビルドアップからビルドダウンまでの深部線量曲線である。ビルドダウンがきれいに測定されており、表面線量は、入射側の線量より射出側の線量の方が高い値を示した。ファントムの厚さが5 cmの場合、射出側表面線量は入射側表面線量の2.6倍であった。また、ファントムの厚さが変わると同じ照射野でも深部線量曲線に差が生じた。

Fig. 3 The depth dose curves for the 4MV X-rays with water equivalent phantoms, of which thicknesses were 5 cm, 10 cm, 15 cm, and 20 cm. Field size was 10×10 cm.

Fig. 4 は、肺等価物質の上下を水等価物質で挟むように重ねて作った不均質ファントムに、10 MV X線を照射したときの深部線量曲線である。各物質の境界面近傍では線量曲線に微妙な変化が見られた。

Fig. 5 は、前例の肺等価物質を骨等価物質に置き換えて作った不均質ファントムに、10 MV X線を照射したときの深部線量曲線である。水-骨等価物質の境界面でビルドアップが、骨-水等価物質の境界面でビルドダウンが顕著に現れている。

次に、Fig. 6 に示すような、臨床上用いられている食道癌に対する斜め照射について検討してみた。

その食道の斜め照射の一例を不均質ファントムで再現

Fig. 4 The depth dose curve for the 10MV X-rays using the inhomogeneous phantom which were composed of water equivalent material and cork. The density of cork is 0.23 g/cm^3 . Field size is 10×10 cm.

Fig. 5 The depth dose curve for the 10MV X-rays using the inhomogeneous phantom which were composed of water equivalent material and bone equivalent one. The density of bone equivalent material was 1.84 g/cm^3 . Field size was 10×10 cm.

したのが、Fig. 7 である。このような不均質ファントムの照射野内において、ビーム通過方向によって線量値がど

Fig. 6 Transverse section for the oblique irradiation technique of the esophageal carcinoma. The depth dose on the line through the esophagus and one through the vertebral body were measured using TLDs.

Fig. 7 Geometrical schema showing dose measurement into inhomogeneous phantom with 10MV X-rays, simulated as oblique irradiation technique of the esophageal carcinoma.

のように変わるかを知る目的で二つの測定系を設定した。すなわち、X線が食道を通る経路を Line 1、食道に隣接した脊椎を通る経路を Line 2 とし、それぞれの経路上に TLD を配置した。

このモデルに、10 MV X線を照射したときの深部線量曲線が Fig. 8 である。それぞれの経路に沿って、複雑な線量曲線を示した。

4. 考 察

Fig. 8 The depth dose curves for the 10MV X-rays in the inhomogeneous phantom with the oblique irradiation technique of the esophageal carcinoma. The density of cork and bone equivalent material were 0.23 g/cm^3 and 1.84 g/cm^3 , respectively. Field size was $10 \times 10 \text{ cm}$.

われわれは、不均質ファントム内の線量を測定する目的でホイル型 TLD を用いたが、その理由は、直径が 8 mm で、厚さが 0.06 mm と、非常に薄くて小さい構造のため、今回の測定に用いるのに適していると考えたからである。Dutreix ら⁴⁾は、シャロー型と思われる電離箱線量計で金属と水との境界面を測定している。これは、現在問題となっているテーマを含んでいて興味深い実験であるが、厳密にはシャロー型電離箱で不均質内を測定することは、容器の材質・形状を無視することができないので好ましくない。

平岡ら⁵⁾は、フリック溶液を用いて、核磁気共鳴映像法 (MRI) による線量分布の可視化を試みているが、骨や肺組織の等価ファントムから MRI として有効な画像信号を取り出すには至っていない。

TLD を使った事例では、Nilsson ら¹⁾によってディスクタイプの TLD を使ったビルドダウン、およびビルドアップの測定が行われている。臨床的ではないが、ビル

不均質ファントムにおける深部線量曲線の測定 (石崎・他)

ドダウンとビルドアップの測定は不均質内の線量を測定するうえで、基礎になる実験である。この Nilsson らの実験によって、TLD の実用性が古くから明らかにされた。

Nilsson¹⁾ らの使用した TLD は、LiF 素子であるが、現在では、ホイル型 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 素子が入手しやすく便利である⁶⁾。高エネルギー領域での $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 素子の優秀性に関しては、中島⁷⁾ や都丸³⁾ によって報告されている。入船⁸⁾ も絞りをを用いて、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ 素子の精度の向上を試みている。今回の TLD を使用した実験は、Fig. 2 で見られるように充分精度の高いものであった。

一般に、標的吸収線量を決定するための基礎データは、後方散乱、側方散乱が充分に考慮されたファントムの大きさのもとで測定されたものである。ゆえに、薄いファントムの場合、後方散乱成分の在り方が基礎データとは異なる。Fig. 3 にその様子がよく現れており、ビルドアップ以後すぐに後方散乱成分が不足する厚さ 5 cm の場合と、後方散乱成分が充足している厚さ 20 cm の場合とでは、それら線量曲線の間にかなりの開きがある。四肢等の薄い部位の治療のときは、補正を考える必要があるだろう。

また、Fig. 3 では射出側表面線量の方が入射側表面線量より高線量になっており、この事実から、皮膚反応が射出側線量に依存していると推測できる。実際、患者の皮膚反応を見ているとほとんどの場合、治療照射野より大きい範囲で皮膚に紅斑が出現している。治療時、射出側であっても患者の下に厚いマットをひくことは、極力避けねばならない。

X線束が密度の高い物質から密度の低い物質に入ると、後方散乱成分の減少からビルドダウンを生じ、逆に密度の高い物質に入ると、後方散乱成分の増加によりビルドアップを生じる。このため、不均質境界面近傍には、小さなビルドアップやビルドダウンが生じる⁴⁾。Fig. 4 や Fig. 5 にその様子がよく現れている。特に Fig. 5 において顕著で、骨内の深部線量が高めなのに対して、骨の射出側表面に病巣がある場合、線量が低めに投与されることがわかる。

食道の斜め照射は、治療線束内に筋肉・肺・骨を含んでいて、複雑な不均質モデルの代表的なものの一つである。

Fig. 8 では、Line 1 上の線量曲線の動きが、Line 2 上

の動きに追従して複雑に変化している。これは、隣接した骨からの散乱線の影響によるものと考えられる。このような微妙な変化を電離箱線量計で測定することは難しい。

ところで、TLD にこれだけの能力があるにもかかわらず、現在に至るまで充分に利用されているとはいいがたい。都丸³⁾ や岡島ら⁷⁾ の成果を踏まえて、さらに、現場技術者にとって実際の、かつ、わかりやすい統一された TLD の取扱方法を確立することが必要かと思われる。

また、人体用不均質ファントムが充実してきた今日、容易にさまざまな臨床モデルを作ることが可能である。さらに、ホイル型 TLD を使用すると、不均質ファントム内の微細な線量分布測定が可能になる。例えば、口腔への側方照射の場合の口腔粘膜の線量評価なども興味深い測定だと思う。今回の方法は、今後広く利用されてしかるべき、利用価値の高い測定法であると考えられる。

5. 結 論

電離箱線量計では測定しにくい、ビルドダウンと不均質内の線量分布を、ファントムに対して無侵襲なホイル型 TLD を利用して測定した結果、以下の結論を得た。

1) ホイル型 TLD と不均質ファントムの使用により、ビルドアップからビルドダウンまでに至る不均質ファントム内の深部線量曲線を、微細に変化する細かい所まで容易に求めることができた。

2) 射出側線量の定量化に伴い、入射側より射出側の線量の方が多いことがわかった。

3) 四肢等の薄い部位を治療する場合、その条件にみあったファントムでの特定点線量と、校正用ファントムでの基準点線量を TLD を用いて測定し、それらの比を新しい TPR (Tissue Peak dose Ratio) とすることが望ましい。

4) 今後、コンピュータによる散乱線を考慮した線量計算が普及するに従い、それを実測で評価する方法が必要になる。ホイル型 TLD による実測は、深部線量曲線を評価する場合の一つの有効な手段である。

謝 辞

本研究にあたって、多大な尽力を戴いた都立駒込病院放射線診療科 茅沼浩、中川俊夫、萩谷敬二、吉田弘志、富田典夫技師、ならびに、御助言を戴いた都立駒込病院副院長松田忠義先

*前方散乱成分の増大にともなう生じる入射側のビルドアップ効果に対して、後方散乱成分の減少にともなう射出側の線量が減少する効果をビルドダウン効果という。

生, 同部長田中良明先生, 癌研物理部長尾内能夫先生に深く感謝致します。

(なお, 本論文の要旨は, 第43回日放技術学会総会において発表したものである。)

文 献

- 1) Nilsson B and Schnell P.-O.: Build-up effects at air cavities measured with thin thermoluminescent dosimeters. *Acta Radiol. (Ther.)*, **15**, 427-432, (1976).
- 2) White DR, Martin RJ and Darlison R: Epoxy resin based tissue substitutes. *Brit. J. Radiol.*, **50**, 814-821, (1977).
- 3) 都丸禎三: CaSO_4 と BeO 熱ルミネセンス線量計素子の特性と線量測定への応用. *日医放会誌*, **36**, 808-825, (1976).
- 4) Dutreix J and Bernard M: Dosimetry at interfaces for high energy x and gamma rays. *Brit. J. Radiol.* **39**, 205-210, (1966).
- 5) 平岡 武, 福田信男: 核磁気共鳴映像法 (MRI) による線量分布の可視化. *放射線科学*, **30**(3), 59-64, (1987).
- 6) 岡島俊三, 他: TLD による医療用放射線の標準測定法, 文部省科学研究費助成金試験研究 (1) 研究成果報告書, (1983).
- 7) Nakajima T: Optical and thermal effects on thermoluminescence response of $\text{Mg}_2\text{SiO}_4(\text{Tb})$ and $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ phosphors. *Health Physics*, **23**, 133-136, (1972).
- 8) 入船寅二: 熱ルミネセンス線量計による密封小線源近傍の線量分布測定法の開発とその応用. *日医放会誌*, **41**, 619-632, (1981).