

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32620

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K19210

研究課題名(和文)熱蛍光薄膜体を用いた真の投与線量分布評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of an evaluation system for actual patient dose with thermoluminescence sheet

研究代表者

黒河 千恵(Kurokawa, Chie)

順天堂大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20399801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、独自に開発された熱蛍光薄膜体(TLDシート)を用いて、被ばく線量も含めた患者線量分布の測定・評価を行うことを目的とした。TLDシートは、1) 80 kVから6 MVのX線エネルギーに対してエネルギー依存性が非常に小さいこと、2) 上述のエネルギー領域において0.01 Gyから20 Gyの線量に対して、線量応答の直線関係が保たれることが明らかとなった。これらの結果から、診断・治療で用いられる幅広いエネルギー領域において、被ばく線量まで含めた患者への線量分布の測定がTLDシートによって可能であることが示された。

研究成果の概要(英文)：We have developed the TLD sheets and demonstrated their characteristics for dose distribution measurements for photon and electron beams. One of the advantages of our TLD sheets is linear dose response over a wide range of doses used in radiation therapy. The purpose of this study is to evaluate actual patient dose including imaging dose by CT or Cone-Beam CT (CBCT) with the tissue-equivalent TLD sheet. Before the imaging dose measurements, the energy dependence of the TLD sheets exposed to 80 kV, 140 kV (with and without Al filter) and 6 MV X-ray beams was investigated. The TLD sheet's response was weakly dependent on the energy of photon beams generally used in diagnostic and radiotherapy purpose. For the feasibility of imaging dose measurements for CBCT, the signal was clear and it could be distinguished from the background. We thus consider that our sheet can be applicable for an in vivo dose verification of the non-uniform 2D dose distributions for CBCT.

研究分野：医学物理学

キーワード：放射線治療 線量計測 TLD 被ばく線量 コーンビームCT 多次元線量計

## 1. 研究開始当初の背景

現在の放射線治療は、CTを用いた3次元治療計画により、複雑な形をもつターゲットに対して、線量を局在して投与することが可能となった。とりわけ、強度変調放射線治療（IMRT）では、照射野を形作るマルチリーフコリメータ（MLC）の複雑な動きにより、高線量をターゲットに与えつつ、周囲の正常組織への線量を抑えることができる。しかし同時に、IMRTのような高精度治療では、MLCの動きを含めた治療に関わる様々なパラメータが計画から逸脱すると、ターゲットへ十分な線量が投与されず、正常組織には制限を超えた線量が照射される恐れもはらんでいる。したがって、計画通りに線量が投与されているか治療中に直接測定することが最も望ましい。しかしながら、線量計のタイプや設置場所の制限から、患者を模擬したファントムを用いて治療前に線量分布の測定を行うか、治療中に線量を確認する場合は特定の点についてのみに限られており、線量分布として治療中に測定・評価することは困難である。

ターゲット周囲の正常組織への被ばく線量も含めて、治療中に投与される真の患者線量分布を測定・評価するためには、治療中に患者、もしくは患者周囲へ設置可能である放射線場を乱さない多次元線量計が必要である。

## 2. 研究の目的

申請者はこれまでに熱蛍光薄膜体（thermoluminescence dosimetry sheet: TLDシート、図1）という新しいタイプの2次元線量計を用いて、既存の線量計では測定が困難であった表面線量を含めた線量の2次元・3次元評価を行ってきた。

TLDシートの特徴は以下の通りである。

- 人体の元素組成とほぼ等しい
- 線量のダイナミックレンジが広い
- 放射線場を乱さない（擾乱が小さい）
- 厚さ約0.1 mmと非常に薄いため、シート面と、設置した深さ方向の両方に対して高い解像度を持つ
- 柔らかく、任意の形に成形可能である

上記の特徴から、TLDシートは放射線場を乱さずいかなる場所へも設置可能であり、本研究の目的に沿っていることがわかる。



図1. TLDシート

本研究ではこのTLDシートを用い、治療中の患者線量分布の直接評価を行うことで、より高精度な治療を安心して患者へ提供できるようにすることを目的とする。

本研究で用いた2種類のTLDシート（特許第5756949号他）の組成と物理的な特性について表1にまとめる。

表1. TLDシートの組成と物理的特性

種類	組成	実効原子番号	読取り方法
TLD (M型)	$\text{LiB}_3\text{O}_5:\text{Mn}$	7.3	275°C, 480秒
TLD (C型)	$\text{Li}_3\text{B}_7\text{O}_{12}:\text{Cu}$	7.4	200°C, 180秒

## 3. 研究の方法

本研究では、TLDシートのエネルギー依存性を調べた後、低エネルギー放射線であるコーンビームCT（CBCT）からのX線による被ばく線量の評価を行った。

### (1) TLDのエネルギー依存性

エネルギー80 kV、140 kVのX線（東京都立産業技術センター）を用いて、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の照射野サイズに対し、10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 mGyの7点の線量をTLDシート全体に照射した。この際、各エネルギーのX線に対して、図2に示されるように、その射出口に4 mm厚のアルミニウム（Al）フィルターを置いた場合と置かない場合で測定を行った。これにより、各エネルギーに対してAlフィルターの有無による合計4種類の線質に対するTLDシートのレスポンスを調べた。

また、各線量での測定を行う前に、照射野内の線量分布の均一性を確認するため、照射野中心およびその周囲の計5点（図2における

赤い点) の線量を電離箱により測定した。比較のため、TLDシート同様にしてGafchromic EBT3を照射し、その感度を調べた。

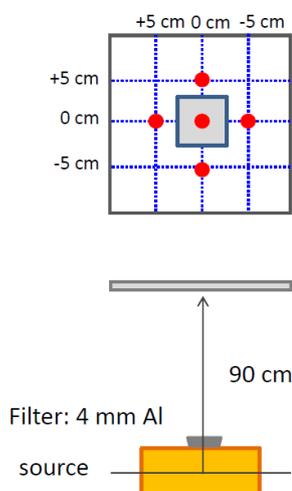


図2. 80 kV, 140 kV X線による照射実験のセットアップ (於：東京都立産業技術研究センター)

## (2) CBCTによる被ばく線量の測定

TLD (サイズ:  $18 \times 24 \text{ cm}^2$ , 厚さ  $0.35 \text{ mm}$ ) を専用のファントム ( $18 \times 18 \times 34 \text{ cm}^3$  tough water phantom :Taisei Medical, Japan) の周囲と内部 (図3における深さ0 mmから180 mmまでの数点) にビームに対して垂直面に挿入し、測定を行った。被ばく線量の測定では、線量が数 mGy~数10 mGyと低く、TLDを熱することで放射される光量も少なくなるため、これまで用いてきた厚さ0.1 mmのものよりも厚い0.35 mmのTLDシートを用いた。ただし、厚さが変化しても、感度の大きさ以外の基本的特性に変化は見られなかった。測定に用いたCBCTはエレクタ社製のリニアックSynergyに搭載されたXVIである (X-ray Volumetric Imager (XVI) integrated)。また、測定前のシートの感度校正を行うため、同リニアックによる6 MVのX線を用いているTLD全体を照射し、補正係数を求めた。

CBCTのスキャンプロトコールはガントリ角度 $273^\circ$ から $269^\circ$ までファントム周囲を1回転するPelvisスキャンを用いた (図3)。プロトコールの詳細は表2の通りである。

表2 XVIのPelvisスキャンプロトコールパラメータ

Protocol	Pelvis
kV Collimator	M20
Filter	F1
kVp	120 kV
Total mAs	1040 mAs
Acquisition angle	$273^\circ$ - $269^\circ$
Number of flames	650

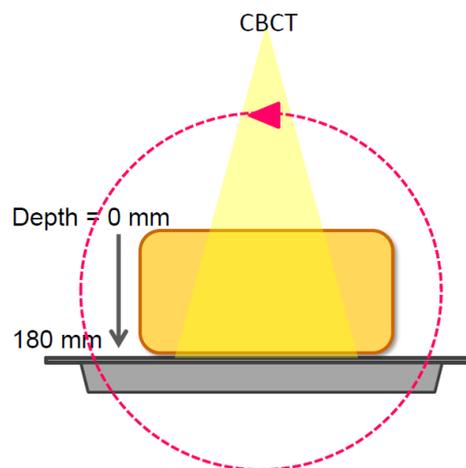


図3. CBCT被ばく線量の実験セットアップ。スキャンプロトコールはファントム周囲を1回転するPelvisスキャンを用いた。また、TLDシートは、ファントム周囲、およびファントム表面(0 mm)から、深さ180 mmまでの何点かの深さに挿入し、照射を行った。

## TLDの読み取り方法

(1)、(2)の実験ともに、照射後、TLDシートを $165^\circ\text{C}$ で180秒間熱し、放射された光をCCDカメラで読み取った。読み取り装置は、東洋メディック社のプロトタイプのものを用いた。

また、我々のTLDシートの長所の一つとして、室温付近に大きなグローコンポーネントが無いいため、プレアニーリングが必要ないことがある。したがって、読み取り後、すぐに次の測定にTLDシートを用いることが可能である。

## 4. 研究成果

### (1) TLDのエネルギー依存性

図4にAlフィルターの有無による80 kVと140 kVのX線のエネルギースペクトルを示す。Alフィルターがあることにより、どちらのエネルギーにおいても20 keV以下の成分が減少していることがわかる。また、あらかじめ電離箱にて測定した照射野内の線量

分布の均一性は4%以内であった。

図5に80kV、140 kVのX線（Alフィルターの有無）と6 MVのX線の線量応答性を示す。この測定から、すべての線質において、直線の傾きは3%以内で一致した。この際、線量分布測定の不確かさは4%である。同様に測定したEBT3フィルムを解析したところ、エネルギー依存性は非常に小さかった。一方、よく知られている通り、10 mGy から 1000 mGy までの線量応答に対して、TLDシートに比べるとEBT3フィルムには直線関係が弱かった。

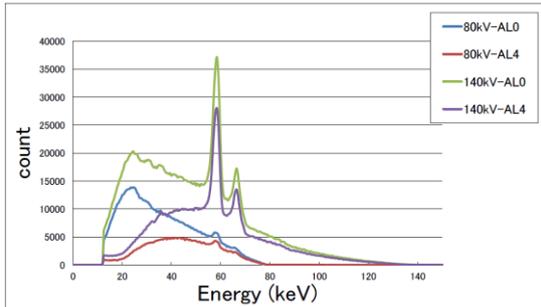


図4. 80 kV から 140 kV (Al フィルター有無) のエネルギースペクトル。

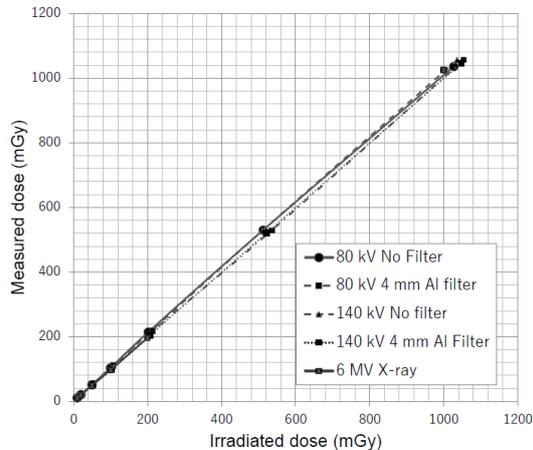


図5. 80 kV から 6 MV の X 線に対する TLD シートの線量応答。

## (2) CBCT 被ばく線量の測定

(1)より CBCT に用いられる低エネルギー X 線からリニアックの高エネルギー X 線まで、TLD シートは線量応答のエネルギー依存性はほとんどないことがわかった。そこで、このシートを用いて CBCT による被ばく線量を測定する。

図6は6 MVのX線によるTLDのダイナミックレンジを示す。図からわかるように、TLDシートは0.01 Gy から 20 Gy まで広い

線量レンジにおいて感度の直線性が高い ( $R^2=1.0$ )ことが確認できる。

図7は、ファントムに対してCBCTの照射を1回、および3回行った線量分布を比較した結果を示す。図7(a)は深さ0 mmにおけるファントムの coronal 面での線量分布を示している。表2に示した Pelvis のスキャンプロトコルでは、シート中央付近に緩やかなピークを生成することがわかる。平均の表面線量は、1回照射の場合12.1 mGy、3回照射した場合は、37.3 mGyであり、線量の線形性が保たれていることを改めて確認できた。1回照射の線量は、TLDシートの検出限界に近いものであったが、シグナルはバックグラウンドと明確に区別できた。

図7(b)はファントム表面(深さ0 mm)からファントムの裏側(深さ180 mm)までの複数の面に挿入したTLDの線量と深さ方向の関係について図示したものである。ファントム表面から数 mm の深さのところピークとなり、その後次第に減少し、180 mm で再び線量が高くなるのがわかる。ファントムの形が上下対称であるのに対して、0 mm に比べ180 mm での線量が高くなるのは、カウチを通過することによって線量が増加するビルドアップの影響であると考えられる。

表3. 1回、および3回のCBCTによる照射線量の比。全ての深さにおいて、比例関係が成立している。

深さ (mm)	Dose (3回)/Dose(1回)
0	3.09
2	3.24
4	2.92
90	3.15
176	3.06
178	3.00
180	3.04

以上の結果から、1) 80 kVから6 MVのX線エネルギーに対してエネルギー依存性が非常に小さいこと、2) 上述のエネルギー領域において0.01 Gyから20 Gyの線量に対して、線量応答の直線関係が保たれることが明らかとなった。これらの結果から、CTやコンビームCT、治療装置(リニアック)で用いられる幅広いエネルギー領域で、TLDシートによる測定が可能であることが示された。さらに、患者体内を模擬した不均質なファントムによる測定を通して、TLDシートが高い検出能力を保つことが明らかとなった。以上より、被ばく線量を含め、患者への投与線量を表面線量のin vivo測定の結果から導出できる可能性を示唆した。

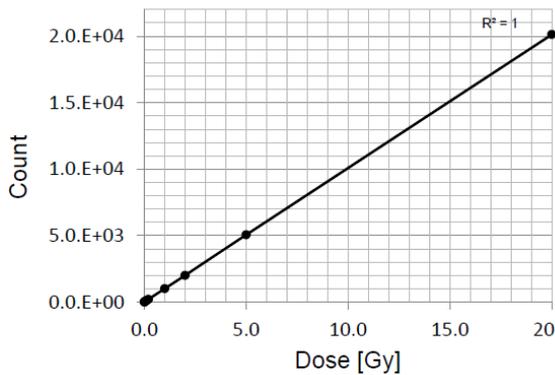


図6. TLDシートの線量に対するダイナミックレンジ。0.01 から20 Gyまで直線性が保たれている。

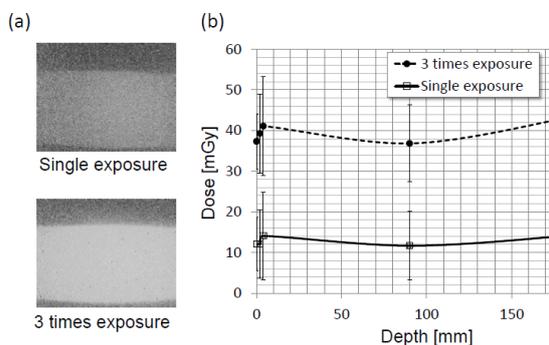


図7. CBCTを1回、3回照射した場合の線量分布。(a) 表面(深さ0 mm)でのコロナル面の線量 (b) 深さ方向の線量変化。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Kurokawa C, Ito K, Aoki K, Fujita T, Ozawa S, Sugimoto S, Karasawa K, Sasai K: Couch displacement effects on volumetric modulated arc therapy delivery and verification of simplified couch structure, *Juntendo Medical Journal*, Vol. 63, 2017, p. 458-466.

[学会発表] (計 4 件)

1. 田中千晶, 原直哉, 磯邊哲, 大淵隼平, 加藤春香, 芳土戸治義, 黒河千恵, 鹿間直人, 笹井啓資: TLD シートを用いた 3DCRT, IMRT の線量分布検証, 第 31 回高精度放射線外部照射研究会, 2018.

2. 山田佳菜, 黒河千恵, 藤田隆之, 直居豊, 三浦康平, 漆山秋雄: 軟膏塗布による皮膚線量変化の検討, 日本放射線腫瘍学会第 30 回学術大会, 2017.
3. Kurokawa C, Urushiyama A, Inoue T, Usui K, Sugimoto S: Feasibility study of CBCT dose measurements with tissue-equivalent thermoluminescence sheet, 59th AAPM Annual Meeting (国際学会), 2017.
4. 黒河千恵, 漆山秋雄, 井上達也, 臼井桂介, 杉本聡: Feasibility study of CBCT dose measurements with tissue-equivalent thermoluminescence sheet, 第 113 回日本医学物理学会学術大会, 2017.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

電子線I—電子線の物理および計測—, 電子線II—電子線外部照射における治療計画—, JSMP医学物理サマーセミナー, 2017年

教育講演 5 放射線物理—電子線治療における物理. 日本放射線腫瘍学会第 30 回学術大会, 2017 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒河 千恵 (KUROKAWA, Chie)

順天堂大学・医学部・助教

研究者番号：20399801

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

漆山 秋雄 (URUSHIYAMA, Akio)

立教大学・名誉教授