

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 年度～2011 年度

課題番号：22791212

研究課題名（和文）組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計による陽子線と炭素線の 3 次元線量分布測定

研究課題名（英文）3-dimensional dose distribution of proton and carbon particle beams using Tissue equivalent phantom thermoluminescence dosimeter

研究代表者

眞正 浄光（SHINSHO KIYOMITSU）

首都大学東京・人間健康科学研究科・助教

研究者番号：20449309

研究成果の概要（和文）：

組織等価ファントム熱蛍光線量計（TEP-TLD）による陽子線と炭素線の3次元線量分布測定を行い、本システムの有用性の調査と、両核種の深部線量を3次元的に明らかにすることを目的とした。3次元線量分布測定に必要な測定システムと校正法の確立、および基礎特性の評価、線量分布測定を行った。高い再現性と線量応答性を示し、LET依存性を補正すると簡易的に分解能の高い2・3次元の炭素線線量分布を取得できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

The purpose is to investigate the usefulness of this system and three-dimensional dose distribution measurement for proton and carbon beam by Tissue Equivalent Phantom Thermoluminescence Dosimeter (TEP-TLD). We established a measuring system and the calibration method for three-dimensional dose distributions. Additionally, we performed basic characteristic evaluation and dose distribution measurement. As a result, our system shows a high reproducibility and dose response, it was found that the dose distribution can be obtained with high resolution 2.3-dimensional carbon beam by LET calibrations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：放射線科学

キーワード：粒子線治療、3次元線量分布、熱ルミネセンス

1. 研究開始当初の背景

炭素線の治療計画の検証は、2次元、3次元による線量分布の検証の下、治療を実施

することが望ましいが、測定点を増やすと膨大な時間を有し、また、検出器を多く配置すると、配置した線量計の吸収や散乱により測

定場が乱れ、正しい線量分布の測定を行うことができない。現行の電離箱によるポイント測定に加え、新しい線量分布測定システムによる高次元での検証が望まれている。

その線量分布測定システムの開発には、線量計自身による測定場の乱れを抑えるため、3次元的に組織等価性の高い線量計であることが不可欠である。現在、組織等価性の高い3次元放射線吸収線量分布測定システムとして、特殊な有機ポリマーに放射線を照射すると、その部分が重合することを利用するもの（ポリマーゲル線量計¹⁾）があるが、ファントムの作製や取り扱いが煩雑で測定後に大量の廃棄物が生じること、および測定システムが高価であるため、より簡便な測定システムが求められている。

我々が開発した組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計^{2,3)}（TEP-TLD）（図1）は、放射線活性を有し、また生体の軟組織に近い実効原子番号（7.3-7.5）を有する四ホウ酸リチウム系熱蛍光体と合成樹脂を主材料として、ほぼ生体密度に近い密度 1.0 g cm^{-3} の板状体を作製し、これを数十枚重ねてマトリックスとして、全体を組織等価ファントム兼3次元放射線線量計システムとして用いる。つまり、人体組織等価ファントムそのものが組織等価3次元熱蛍光線量計として機能する。放射線が照射された後に板状体を1枚ずつ加熱し、得られる2次元熱蛍光像を合成して人体に照射された場合に各部分が吸収する3次元線量分布を得る。繰り返し使用できることからランニングコストも小さい。



図1. 組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計 (TEP-TLD)

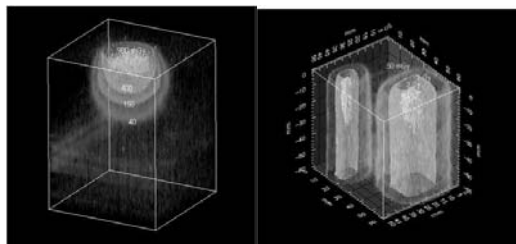


図2. TEP-TLDによる電子線（左）とX線の3次元線量分布（右）

図2にTEP-TLDによる4MeV電子線と4MV X線の線量分布を示す。電子線はファントム上部方向から照射野を直径2cm、最大線量を1Gyとした。X線は照射野を1cm×1cmと3cm×3cm、最大深部線量をそれぞれ3Gyとした。いずれも1回の照射により3次元の線量分布を簡易的かつ高分解能で取得できている。そ

の他、X線および電子線の深部線量百分率や軸外線量比から3次元的に高い組織等価性を持っていることが確かめられている。

2. 研究の目的

TEP-TLDの陽子線及び炭素線に対する有用性を調査し、両核種のエネルギー損失過程（線量分布）を3次元的に明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) TEP-TLDの製作

①ホウ酸リチウム系TL素子の合成

母材料となるホウ酸リチウムとCuやMn等の添加物を融点付近で焼結させTL素子を合成した。できた焼結体は、粉碎し200 μm 以下とした。

②TEP-TLDの成形

①で合成したTL素子と耐熱エポキシ樹脂、増粘材等を混合、攪拌し、独自に製作した枠に一定の圧力をかけ、板状に成形した。成形した板状体をエポキシ樹脂の反応温度で反応させ硬化させた。

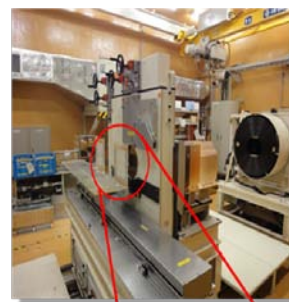
(2) 大型TEP-TLD測定システムの構築

温度分布を均一になるようにヒータ密度を設計したホットプレートと温度プログラム制御器、CCDカメラ、PC、および断熱構造と遮光の高い暗箱を組み合わせて測定システムを構築した。

(3) TEP-TLDの校正

放射線医学総合研究所の⁶⁰Coガンマ線標準場にて電離箱による2次元線量分布を測定し、TL量と線量の相関係数を算出した。使用したTEP-TLDのサイズは200mm x 200mm x 2.5mmとした。

(4) 炭素線の照射実験



BI0 ϕ 20 cm ¹²C 290 MeV/u Mono を使用し、平行平板形電離箱線量計と同条件下で校正したTEP-TLDの水等価深度分布を測定した。(Binary Filterを使用) その時の実験配置図を図3に示す。下図はTEP-TLDの配置部を拡大した。



図3. 炭素線の実験配置図

4. 研究成果

(1) TEP-TLDの製作

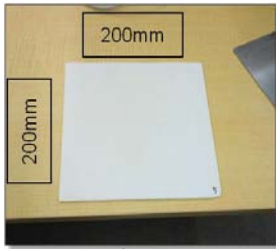


図4. 大型化した TEP-TLD

図4に大型化した TEP-TLDを示す。サイズは 200 mm x 200 mm x 2.5 mm で、実効原子番号と密度をほぼ水等価に制御されている。これまでは、8cm 角のサイズであったため、実際

の治療計画に合わせた実験を行うことが難しかったが、大型化されたことでよ

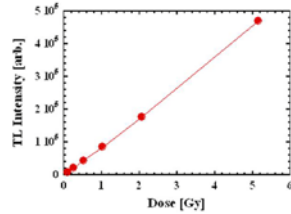


図8. TEP-TLDの線量応答性

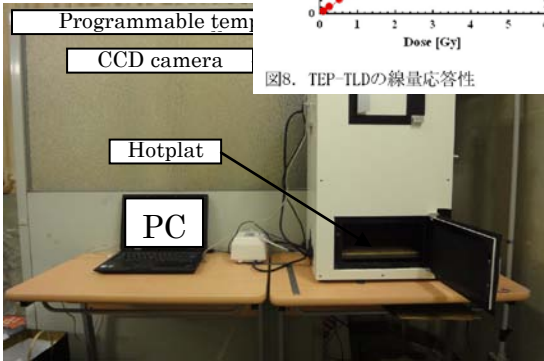


図5. TEP-TLD 測定システム
り実用的な評価が可能になった。また、平面均一性の向上も見られた。

(2) 大型 TEP-TLD 測定システムの構築

図5に新たに構築した TEP-TLD 測定システムを示す。小型の TEP-TLD 測定システムと異なり、CCD への熱伝導を遮断する目的で断熱層を設けた。3次元測定を行う際には、連続で多数枚の測定を行う必要があるが、この断熱層により多数枚、長時間測定を行っても取得データに CCD の感度低下やノイズ上昇等の変化は認められず、本システムの有用性が確かめられた。

(3) TEP-TLD の校正

⁶⁰Co ガンマ線標準場にて電離箱による2次元線量分布を測定した結果を図6に示す。測定は 20cm x 20cm の範囲を 2cm 間隔で計 81 点行った。図6(左)は、測定結果を基に算出された2次元線量分布 $D(i, j)$ である。この線量値と同条件にて照射した TEP-TLD の各ピク

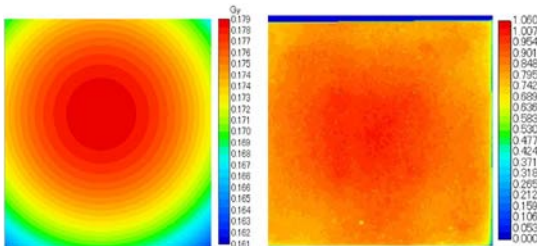


図6. 電離箱による⁶⁰Coガンマ線2次元線量分布(左)とTEP-TLDの2次元補正係数(右)

セル値 (TL 量: $L(i, j)$) からピクセル毎に補正係数 ($\epsilon(i, j)$) を算出した。(図6(右))

$$\epsilon(i, j) = L(i, j) / D(i, j)$$

(4) TEP-TLD の基本特性

①再現性

⁶⁰Co ガンマ線を TEP-TLD 中心位置で 250mGy 照射した。1枚の TEP-TLD につき5回同条件にて再現性を調べた。その結果を図7

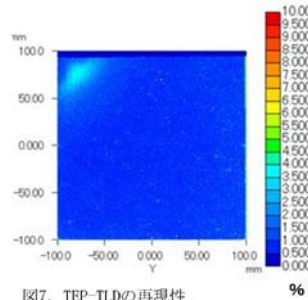


図7. TEP-TLDの再現性

に示す。TEP-TLD の測定システムの再現性が平均で2%以下であった。

②線量応答性

⁶⁰Co ガンマ線を 0.1-5Gy 照射して線量応答性を評価した。高い線量応答性が確認できた。時間を要するため大線量までの評価ができなかったが、X線照射による線量応答性の実験では 50Gy まで高い応答性が確認できた。

(5) 炭素線照射実験

3. (4)に記載した方法による水等価深部線量と TL 応答を図9に示す。電離箱と Geant4 による結果と比較して、ブラックピーク付近で大きな LET 依存性がみられた。

図10: 上に示した水等価ファントムを用いて深部線量を測定した。得られた TL 画像(図10: 中)線量に変換するために水等価深度に対する TL 効率を求めた。(図11) TL 効率 = $TL(^{60}\text{Co-}\gamma) / \text{Dose (IC)}$ とした。TL 分布図(図10: 下) 図11で得られた変換係数を乗じると高分解能で簡易的に深部線量を測定できた。

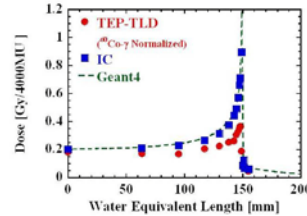


図9. 水等価深部線量と TL 応答

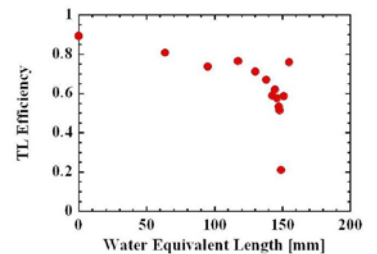
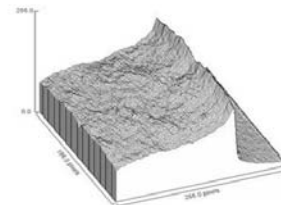
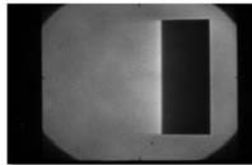


図11. 水等価深度に対する TL 効率

(6) 3次元線量分布と今後の展望

TEP-TLD を複

図10. ¹²C 290 MeV/u monoの深部線量(使用ファントム: 上、TEP-TLDによる取得画像: 中、3次元 TL 分布図: 下)

数枚重ねて水等価ファントムとして使用し、3次元の線量分布を取得できることは十分に確認されたが、マシンタイムに物理的な制限が生じるため3次元的な各位置でのTL効率の決定が不足した。今後は、本システムの信頼性を高めること、および、TL量だけでなく、TLスペクトルやグロー曲線の分析から得られる情報を2次元的に組み合わせ、電離箱では測定することのできない生物線量の測定法を確立させたい。今回は、それらのポテンシャルを示す結果となった。

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5件)

1. Kiyomitsu Shinsho, Yuji Tomizawa, Hiroki Horikawa, Satoshi Miyajima, Hidetoshi Saitoh, Akio Urushiyama, Basic characteristic of a prototype tissue equivalent phantom thermoluminescence dosimeter (TEP-TLD), Radiation Measurements, 有, Volume 46, Issue 12, 2011, 1912-1915

2. 眞正浄光、古場裕介、若林源一郎、齋藤秀敏、松藤成弘 組織等価3次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究, 放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書, 無, NIRS-M-244 HIMAC - 136, 2011, 262-263

3. 眞正浄光、漆山秋雄、若林源一郎、大谷浩樹、齋藤秀敏 組織等価3次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究, 放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書, 無, 2010, 376-378

4. 室井勇佑, 眞正浄光, 堀川裕明, 齋藤秀敏, 漆山秋雄, PDD測定によるTEP-TLDの評価, 医学物理, 無, 30 Sup2, 2010, 340-341

5. 眞正浄光、漆山秋雄、若林源一郎、大谷浩樹、齋藤秀敏、松藤成弘, 組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計(TEP-TLD)の炭素線に対するダイナミックレンジの測定, 医学物理, 無, 30 Sup5, 2010, 227-228

[学会発表] (計15件)

1. 眞正浄光, 放射線治療における蓄積型放射線検出器の先端技術, りそな共同セミナー, 平成23年10月6日, 首都大学東京

2. 眞正浄光, 放射線イメージングデバイスの開発～先進放射線治療を安全に管理運営

し、安心して利用して頂くために～, 第3回都市科学連携機構施策提案発表会, 平成23年7月19日, 東京都庁

3. 眞正浄光、森本良、齋藤秀敏、漆山秋雄, 組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計の改良, 第101回日本医学物理学会 平成22年5月9日, 震災のためWeb開催

4. 眞正浄光, 高精度放射線治療の新しい検証システム「組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計」の紹介, 鹿児島県連放射線部会総会, 平成23年4月16日, 国分医療生協病院

5. 室井勇佑, 眞正浄光, 堀川裕明, 齋藤秀敏, 漆山秋雄, PDD測定によるTEP-TLDの評価, 第99回日本医学物理学会, 平成22年4月10日, パシフィコ横浜

6. 眞正浄光、漆山秋雄、若林源一郎、大谷浩樹、齋藤秀敏 組織等価3次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究, 平成21年度HIMAC共同利用研究成果発表会, 平成22年4月20日, ホテルポートプラザちば

7. KIYOMITSU SHINSHO, YUJI TOMIZAWA, HIROAKI HORIKAWA, HIDETOSHI SAITOH and AKIO URUSHIYAMA, Basic Characteristics Of A Tissue Equivalent Phantom Thermoluminescence Dosimeter (Prototype), 16th International Solid State Dosimetry Conference, September 19-24, 2010, Sofitel, Sydney

8. 新納史朗、井原章博、田原和弥、表和歩、若林源一郎、眞正浄光, 重粒子線入射による組織等価TLD中でのフラグメント生成 応用物理学会放射線分科会, 平成22年8月3日, 茨城県開発公社 いこいの村潤沼

9. 眞正浄光、漆山秋雄、若林源一郎、大谷浩樹、齋藤秀敏、松藤成弘, 組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計(TEP-TLD)の炭素線に対するダイナミックレンジの測定, 第100回医学物理学会, 平成22年9月23～25日, 学術総合センター

10. 眞正浄光, 放射線による先進がん治療法の治療計画検証システムの開発, イノベーションジャパン2010大学見本市, 平成22年9月29～10月1日, 東京国際フォーラム

11. 新納史朗、表和歩、井原章博、田原和弥、若林源一郎、眞正浄光、古場裕介、松藤成弘, 組織等価TLDへの重粒子入射により生成する

フラグメントの測定，日本原子力学会九州支部第 29 回研究発表講演会，平成 22 年 12 月 10 日，九州大学

12. 眞正浄光，若林源一郎，古場裕介，室井勇佑，藤田幸男，張維珊，森本良，齋藤秀敏，松藤成弘，漆山秋雄，組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計の炭素線に対する線量特性，春季第 58 回応用物理学会，平成 22 年 3 月 24～3 月 27 日，神奈川工科大学

13. 表和歩，新納史朗，井原章博，田原和弥，若林源一郎，眞正浄光，古場裕介，松藤成弘，組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計への重粒子線入射による生成フラグメントの測定，春季第 58 回応用物理学会 平成 22 年 3 月 24～3 月 27 日，神奈川工科大学

14. 眞正浄光，高精度放射線治療の新しい検証システム「組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計」の紹介，鹿児島県放射線技師会，平成 23 年 3 月 5 日，鹿児島厚生連病院

15. 眞正浄光，熱ルミネセンスを利用した新しい治療計画検証システムの紹介，東京都立病院放射線技師会，平成 23 年 1 月 28 日，首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス

〔図書〕（計 1 件）

1. 福土政広，柏倉健一，山本勝美，眞正浄光，株式会社メジカルビュー社，放射化学 2010，145

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

1.

名称：熱蛍光体板状体とそれを用いてなる画像読取装置

発明者：眞正浄光

権利者：首都大学東京

種類：特許

番号：特許出願 2012—4573

出願年月日：平成 24 年 1 月 13 日

国内外の別：国内

2.

名称：熱蛍光板状体、熱蛍光積層体、熱蛍光板状体の製造方法、及び熱蛍光積層体の製造方法

発明者：漆山秋雄、眞正浄光、富澤祐司

権利者：首都大学東京・立教大学

種類：特許

番号：特許出願 2010—197878

出願年月日：平成 22 年 9 月 3 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 1 件）

1.

名称：熱蛍光板状体、熱蛍光積層体、熱蛍光板状体の製造方法、及び熱蛍光積層体の製造方法

発明者：漆山 秋雄、眞正浄光、堀川裕明

権利者：立教学院、首都大学東京

種類：特許

番号：特許公開 2012—52072

取得年月日：平成 24 年 3 月 15 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞正 浄光 (SHINSHO KIYOMITSU)

首都大学東京・人間健康科学研究科・助教

研究者番号：20449309