

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：31201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K09068

研究課題名(和文)放射線治療用小型皮膚線量計の開発

研究課題名(英文) Development of a capacitor dosimeter using a skin-insulated USB-A substrate with a silicon X-ray diode in radiation therapy

研究代表者

山口 哲 (Yamaguchi, Satoshi)

岩手医科大学・医学部・助教

研究者番号：10611006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：放射線治療分野において、放射線治療中の患者皮膚表面の被ばく量を簡便に実測できる安価でケーブル不要の小型積算線量計と、迅速にその線量計の測定値を直読できる測定端末をSiフォトダイオードとコンデンサ、およびマイクロコンピュータを使って開発した。線量計のコンデンサ静電容量を最適化することにより、放射線治療で使用されているX線管や放射線治療装置(リニアック)での線量測定が可能であることが本研究で示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したコンデンサ線量計は従来から表面線量の測定に使用されてきた熱ルミネッセンス線量計やガフクロミックフィルムよりも測定値のばらつき(標準偏差)が小さく優れた特性を有する。さらに線量計自体が安価で使い捨て可能であるため、臨床現場で使用する用途に望ましく、特に頭頸部の放射線治療においては、治療中の腫瘍部縮小や体型変化を伴うことで重篤な皮膚障害が発生するため、それら治療期間中の皮膚線量のモニタリングと障害防止に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To monitor patient-surface dose in radiation therapy, we have developed a low-priced capacitor dosimeter incorporating a mini-substrate with a capacitor, and a silicon X-ray diode, which no needed cable connection for dose measurement. The dosimeter's electric circuit is insulated from the patient's skin by surface mounting, and the substrate can be disposable. We carried out a feasibility study using X-ray tube and medical linear accelerator. The dose was proportional to decrease in the charging voltage, and the calibrated dose corresponded well to those obtained using a typically available ionization chamber. In addition, the surface dose measured on a solid-phantom was equivalent to those obtained from a treatment planning system. Those results suggest for monitoring patient-surface dose during radiation therapy.

研究分野：放射線科学

キーワード：コンデンサ積算型線量計 使い捨てUSB-A基板 Siフォトダイオード 放射線治療 皮膚線量モニタリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、放射線治療分野の技術革新は著しく、加速器を使った放射線治療装置の発展により、体深部にある腫瘍部へ高い線量が投与され治療成績が向上してきている。さらに最新の放射線治療においては X 線撮影やコンピュータ技術等を駆使した高精度放射線療法が実現し、従来よりも人体内部では放射線治療に起因した障害が軽減されてきている。しかしながら、これまでの放射線治療では人体内部への投与量に重点がおかれ、放射線治療期間中の患者体表面の皮膚被ばく量については明らかにされてこなかった。放射線治療では治療効果をより高めるために体内での投与量が増加傾向にあり、放射線の照射範囲内においてこれまでよりも重篤な皮膚炎を生じるケースが増えてきている。重篤な放射線性皮膚炎発生による放射線治療の中断は治療成績の低下をまねき、患者への悪影響を及ぼすため放射線治療期間中の患者皮膚線量の実態解明は今後の放射線治療発展のためにも急務である。副作用として生じる放射線性皮膚炎を最小限に抑えつつ健全な放射線治療を実現するためには、放射線治療期間中の任意位置での患者皮膚線量がモニタリングされ、必要に応じて治療計画の再プランなどが適切に反映される仕組みが必要であるが、これまでに国内外含め病院の臨床現場では行われていない。これは現在の放射線治療分野において任意位置での患者体表面の線量を実測で簡便にモニタリングできる安価で小型の放射線線量計が実用化されていないことが背景にある。

2. 研究の目的

本研究では、放射線治療期間中の患者皮膚表面の任意位置での被ばく量を簡便に実測することができる小型でケーブル不要の積算線量計を試作し、直ちにその場で線量が直読できる安価な測定システムを新規に研究開発する。これにより、放射線医療において使いやすく汎用性の高い小型積算線量計を実用化する。

3. 研究の方法

本研究の目的とする小型積算線量計を実現するために受光面サイズが $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ と小さく、安価な Si フォトダイオード (Si-XD) と小型コンデンサおよび抵抗を用いた USB-A タイプの小型線量測定基板を試作した。図 1 に本研究で開発した測定基板 (コンデンサ線量計) とその測定基板の線量を取得する測定システムを示す。

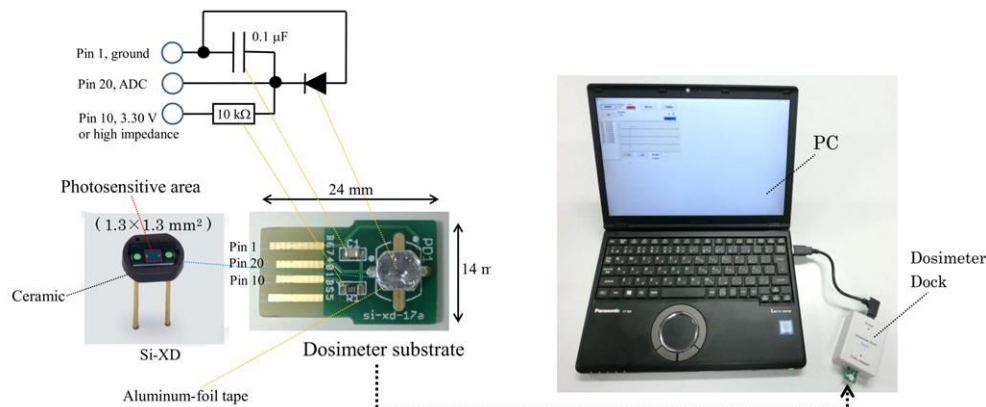


図 1 コンデンサ線量計と測定システム全体図

本測定システムはサイズが $24 \times 14 \text{ mm}^2$ の測定基板 (Dosimeter substrate)、測定端末 (Dosimeter dock) およびノートパソコン (PC) で構成される。測定基板は、放射線照射前にコンデンサ充電が一度必要であり、そのためにマイクロコンピュータを内蔵した専用の測定端末も開発している。本線量計の測定方法は以下のとおりである。a) まず、測定基板を測定端末に接続し、アナログデジタルコンバータ (ADC) を介して 3.30 V にまで基板内のコンデンサを充電する。b) 次に、充電された測定基板を測定端末から切り離し、任意の測定位置に置く。c) 放射線照射によって Si-XD から発生した光電流によりコンデンサの放電が生じる。d) 放射線照射後の測定基板を再び測定端末に接続して、放電が生じた分の電圧値を即時測定する。e) 最後に本測定で得られた電圧値を校正して線量 (Gy) に変換する。測定端末は USB ケーブルを介して PC に接続されており、コンデンサの充電と電圧測定は PC からの操作により行う仕組みである。

(1) X 線管を用いた基礎特性評価

本研究で開発したコンデンサ線量計の基礎特性を評価するために、物理実験室にある R-tec 社製の X 線管 (RXG-1052) を用いた基礎特性評価を行った。0.1 μF のコンデンサ線量計を使用し、実験条件として X 線管とコンデンサ線量計との距離は 1.0 m で、a) 管電圧 100 kV、管電流 1.0 mA の一定条件で照射時間 1 ~ 5 分間の測定実験と、b) 照射時間 5 分間、管電流 1.0 mA の一定条件で管電圧を 50 ~ 100 kV とした測定実験を行った。測定された各電圧値を線量 (Gy) に変換するために、基準線量計として Scanditronix Wellhofer 社製の電離箱 (DC300) を用いて同実験条件での測定を行い、コンデンサ線量計の校正を行った。校正方法は電離箱で測定された最大値

(41.8 mGy)で行う1点校正を行った。

(2) 放射線治療装置(リニアック)での基礎特性評価

放射線治療用X線ビームでの基礎特性評価を行うために、バリアン社製のリニアック(Clinac iX)とタフウォータファントムを用いた測定実験を行った。実験方法は、コンデンサ線量計をタフウォータファントム表面の中心位置に置き、線源との測定距離(SSD)を1.0mとし、オープン照射野100×100mm²の照射条件で4MVと10MVのエネルギーを用いてそれぞれX線出力25~200 Monitor Unit (MU)までの変化量を測定した。各エネルギーの線量率はそれぞれ250および300 MU/minとした。治療用X線ビームでの最適なコンデンサ容量を決定するため、0.1μFと1.0μFの2種類のコンデンサ線量計を試作し、それぞれ測定を行った。線量校正はKyokko社製の熱ルミネッセンス線量計(TLD)を使い100 MUでの測定線量を用いた1点校正を行った。

(3) 強度変調放射線治療(IMRT)での線量評価

近年のX線を用いた放射線治療ではリニアックに標準搭載されているマルチリーフコリメータ(MLC)とコンピュータ技術を駆使した強度変調放射線治療(IMRT)が一般に普及しているため、同照射方法での患者皮膚表面での線量測定がコンデンサ線量計で可能か、実現可能性の検証を特注の頭頸部ファントムとバリアン社製のリニアック(Clinac iX)および放射線治療計画装置(TPS)を用いて行った。頭頸部ファントムの治療計画用CTを撮像後に、TPS上で仮想上のターゲットを設定し、4MV(線量率250 MU/min)で9門を使ったIMRTの線量分布を作成した。次に、0.22μFのコンデンサ容量を持つ計5つの測定基板を頭頸部ファントム表面の任意位置(S1, S2, S3, S4, S5)にのせて撮像した線量測定用CTをTPSに読み込み、治療計画用CTで作成したIMRTビームデータを線量測定用CTに転送してIMRT線量測定プランを作成した。線量評価は線量測定用CTから各測定基板上にあるSi-XD位置での関心領域(ROI)を描出し、線量体積分布(DVH)から各Si-XDの平均値と最大値(D_{2%})を算出して、実測値との比較を行った。測定基板の線量校正はPTW社製のファーマ電離箱(N30013)とタフウォータファントムを用いて照射野100×100mm²の条件で線源表面間距離(SSD)0.9m,校正深0.1mで行った。図2にTPSで作成した本実験のIMRT線量評価プラン(a)と測定基板との線量評価に用いたDVHグラフ(b)を示す。

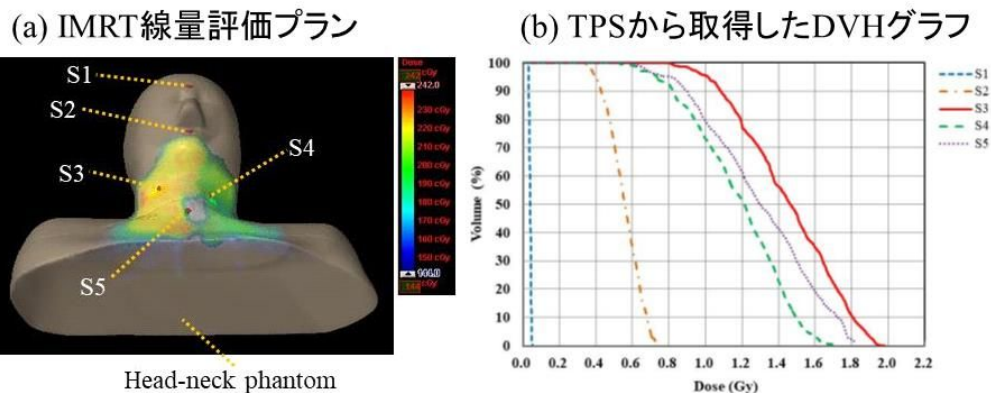


図2 治療計画装置で作成したIMRT線量評価プランとDVHグラフ

4. 研究成果

(1) X線管測定

図3にX線管を用いた照射時間依存性と管電圧依存性のグラフを示す。X線の照射により、線量が増加するに従いコンデンサの充電電圧の低下が見られた。各測定条件での標準偏差(SD)は非常に小さく、最大で 3×10^{-3} V程度であった。これは測定基板がX線の線量測定に対して安定しており、線量計としての使用が可能であることを示している。

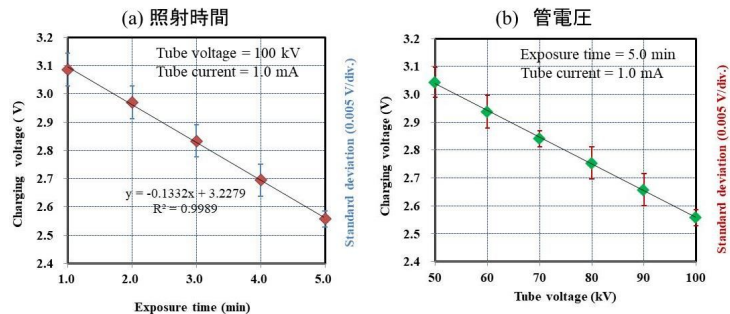


図3 X線管による測定基板の照射時間依存性および管電圧依存性

次に電離箱(DC300)で測定した積算線量(空気カーマ Gy)を用いて校正した1点校正後の線量測定グラフを図4に示す。照射時間または管電圧の増加に伴い積算線量の増加が共に見られた。しかし本線量計ではコンデンサ充電後に測定ドックから切り離す際に、ADCインピーダンスの影響でわずかに初期充電電圧が下がっていることが判明した。そのため、線量に校正する際にはあらかじめ充電後の初期電圧を実験的に把握しておくことが重要である。図3(a)のグラフより測定基板の初期充電電圧は3.23Vであった。

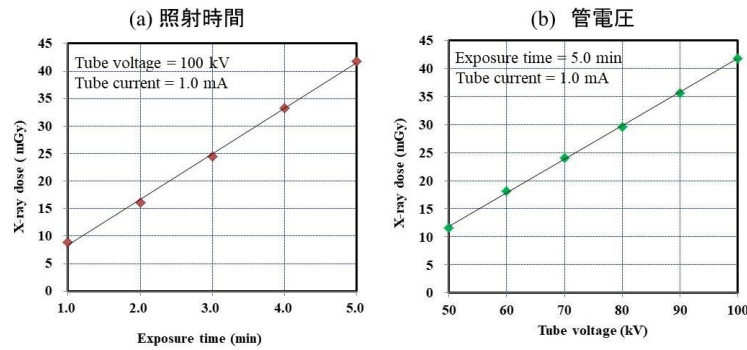


図4 測定基板の積算線量測定結果

(2) リニアック測定

図5に測定基板を用いたリニアックでの電圧測定結果を示す。4MV, 10MV共に MU の増加に伴い、充電電圧の低下が見られた。コンデンサ容量が 0.1 μF の測定基板は、1.0 μF の測定基板よりも MU 値に対して電圧低下量が大きく、1.0 μF の測定基板ではほとんど電圧低下が見られなかった。本測定基板はコンデンサ容量を上げることによって高線量測定が可能であるが、感度も落ちてしまうため、線量に応じた適切なコンデンサ容量を選択する必要がある。本実験では 0.1 μF の測定基板を用いて線量校正を行った。TLD で測定した 100 MU での線量(空気カーマ Gy)を用いて校正した 1 点校正の結果を図6に示す。4MV, 10MV 共に MU 値の増加に比例して線量増加が見られた。4MV が 10MV の測定結果よりも全体的に高めとなっているのは、本測定がタフウォータファントム表面でのビルドアップ領域の線量を測定しているためである。

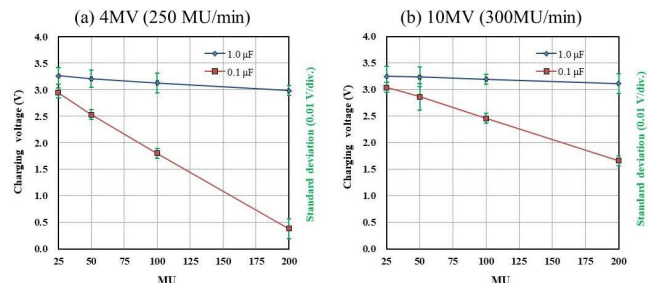


図5 リニアックによる測定電圧と MU の関係

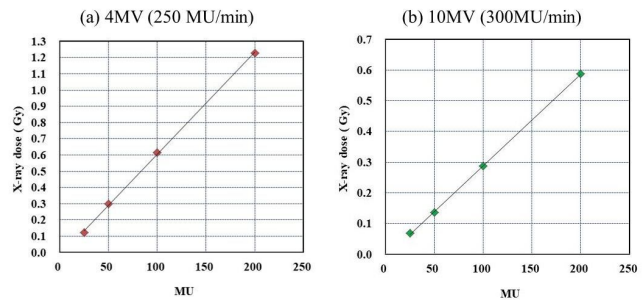


図6 TLD による 1 点校正後の積算線量

(3) IMRT 測定

図7(a)にタフウォータファントムを使って校正深 10 cm で測定したファーマ電離箱の測定結果を、図7(b)に同位置での測定基板の電圧測定結果を、図7(c)にファーマ電離箱で測定した最大線量(1.82 Gy)を用いた測定基板の 1 点校正結果を示す。図7(c)より測定基板の水吸収線量測定値(Gy)はファーマ電離箱の測定結果と同等であった。表1に頭頸部ファントム表面に置いた測定基板の IMRT 線量測定結果を示す。測定電圧の線量換算は図7の 1 点校正を用いた。測定基板の位置 S1 から S5 までの測定線量は平均 \pm SD で 1.08 ± 0.66 Gy に対して TPS で計算された Si-XD の最大値 ($D_{2\%}$) は 1.22 ± 0.81 Gy, 平均値では 0.91 ± 0.59 Gy であり、全体では 20% 以下の線量誤差範囲内であった。S1 での測定値のみが TPS の計算値よりも突出して高いのは S1 位置が IMRT の照射野外に位置していたためで、これは、治療計画装置(TPS)の照射野外での線量計算精度そのものが低く、照射野外での被ばく線量を TPS が過小評価しているためと思われる。

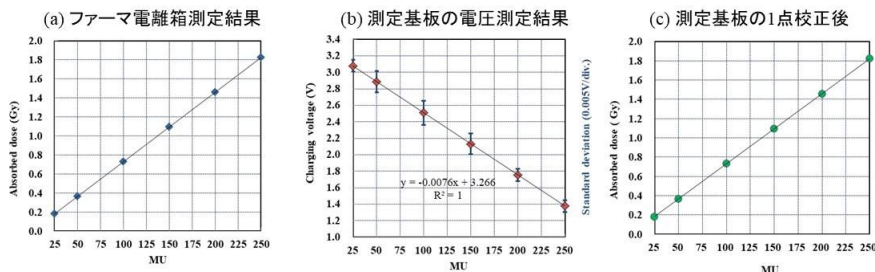


図7 タフウォータファントムの測定結果

表 1 測定基板を用いた IMRT 線量評価プランの線量実測値と TPS との比較

Location	Substrate Dose (Gy)	TPS($D_{2\%}$) Dose (Gy)	TPS(D_{mean}) Dose (Gy)
S1	0.11	0.05	0.04
S2	0.69	0.72	0.56
S3	1.67	1.92	1.45
S4	1.47	1.62	1.18
S5	1.46	1.81	1.30
Average \pm SD	1.08 \pm 0.66	1.22 \pm 0.81	0.91 \pm 0.59

以上の結果より、本研究で開発したコンデンサ線量計は測定する被ばく量に応じて、コンデンサ容量を最適化することにより、X線管から出力される放射線診断用の低線量測定から、放射線治療用のリニアックから出力される治療用X線ビームを使った高線量測定までの幅広い用途での線量測定が実施可能であり、その汎用性の高さが明らかとなった。また、本線量計の特徴は測定時にケーブルを必要とせず、検出器自体が安価に製作できることである。測定基板の原価は千円以下であることから、例えば感染などが疑われる治療患者に対して使用後に捨てることも可能である。ただし、絶対線量基準計として使用するにはまだ数多くの課題がある。測定端末から切り離す際に、ADCインピーダンスの影響で初期充電電圧がわずかに下がることが判明したため、線量校正の際には初期充電電圧の確認が必須である。また、充電後に長時間放置されると、コンデンサの自己放電が懸念されるため、充電後の迅速な線量測定が必要である。そのためにも、測定基板と合わせて本研究で開発したコンパクトで携帯可能な測定端末は有用である。その他、体表面での線量校正方法については世界的に標準化されたものがないため、本研究で開発したコンデンサ線量計の線量校正方法については今後の研究課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoshi Yamaguchi, Eiichi Sato	4. 巻 12(1)
2. 論文標題 Product development of a condenser dosimeter using a skin-insulated USB-A-substrate with a silicon X-ray diode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiological Physics and Technology	6. 最初と最後の頁 69-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/s12194-018-00493-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yamaguchi, Eiichi Sato, Ryuji Nakamura, Hirobumi Oikawa, Hisao Kakuhara, Koyo Kikuchi, Hisanori Ariga, Shigeru Ehara	4. 巻 7
2. 論文標題 Disposable Condenser Dosimeter Using a Skin-Insulated Mini-Substrate with a Silicon X-Ray Diode in Image-Guided Radiation Therapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology	6. 最初と最後の頁 35-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/ijmpcero.2018.71004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山口 哲, 佐藤 英一, 角原 久夫, 菊池 光洋, 及川 博文, 中村 隆二, 有賀 久哲, 江原 茂
2. 発表標題 シリコンX線ダイオードを用いたUSB-Aタイプの小型コンデンサー線量計開発
3. 学会等名 第115回日本医学物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi, Eiichi Sato, Hisanori Ariga, Shigeru Ehara
2. 発表標題 Fundamental study on a disposable condenser dosimeter using a skin-insulated USB-A-substrate with a silicon X-ray diode in radiation therapy
3. 学会等名 Asia-Oceania Congress of Medical Physics & South-East Asian Congress of Medical Physics 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi, Eiichi Sato, Hisao Kakuhara, Koyo Kikuchi, Hirobumi Oikawa, Ryuji Nakamura, Hisanori Ariga, Shigeru Ehara
2. 発表標題 シリコンX線ダイオードを用いた放射線治療のためのマイクロ線量計の開発
3. 学会等名 第113回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山口 哲, 佐藤 英一, 角原 久夫, 菊池 光洋, 及川 博文, 中村 隆二, 有賀 久哲, 江原 茂
2. 発表標題 シリコンX線ダイオードを用いた小型コンデンサー線量計のリニアックによる基礎検証
3. 学会等名 第117回日本医学物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi, Eiichi Sato, Hirobumi Oikawa, Hisao Kakuhara, Koyo Kikuchi, Hisanori Ariga
2. 発表標題 4 MV X-ray detection using a novel condenser dosimeter with disposable silicon-diode substrates in radiation therapy
3. 学会等名 第19回固体線量計測国際学会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	佐藤 英一 (Sato Eiichi) (90154038)	岩手医科大学・教養教育センター・教授 (31201)	