

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12101

研究課題名(和文)3次元計測のためのゲル線量計用光CTの開発

研究課題名(英文)Optical CT for gel dosimeter for 3D measurement

研究代表者

中山 和也 (Nakayama, Kazuya)

金沢大学・保健学系・准教授

研究者番号：80242543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：放射線の線量を3次元的に測定するゲル線量計用の光学CT装置の開発をおこなった。撮影には、可変色光源とカラーカメラを使用した。カラー画像の赤成分、緑成分、青成分といった色成分のデータを個別に取り出すことができるようにした。これにより異なる色成分の情報が得られる。画像ノイズの原因の一つである散乱光は、スパッタフェルトを使用することで改善できた。また、画像ノイズの低減方法として加算平均処理の有効性を調べた。光学CT装置の特性試験用の模擬試料も開発した。模擬試料を用いて光学CT装置の動作確認を行った。その結果、試料濃度と断層像のピクセル値の関係が理論通りであり、測定に問題ないことが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゲル線量計を使用すると、放射線の線量を3次元的に測定することが可能である。このゲル線量計の読み取り装置の一つである光学CT装置を開発した。放射線治療はがん治療の一つであり、手術が不要、通院で治療可能な場合があるなど利点が多い。本治療の品質管理には線量の3次元的な測定が可能なゲル線量計が適している。このゲル線量計を簡便にまた正確に読み取ることができる光学CT装置の開発は社会的に非常に有益である。また今後の放射線治療技術の進歩にも有益である。

研究成果の概要(英文)：We have developed an optical CT system for gel dosimeters that measures radiation dose three-dimensionally. A variable color light source and a color camera were used. Data of color components such as red component, green component, and blue component of a color image can be extracted individually. This provides information on different color components. Scattered light, which is one of the causes of image noise, could be improved by using sputter felt. In addition, we investigated the effectiveness of averaging as a method of reducing image noise. A simulated samples for the characteristic test of the optical CT system were also developed. The operation of the optical CT system was confirmed using simulated samples. As a result, it was confirmed that the relationship between the sample density and the pixel value of the tomographic image was in accordance with the theory, and that there was no problem with the measurement.

研究分野：医用電気情報光学

キーワード：光学CT装置 ゲル線量計

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

放射線治療は、がん治療の一つであり、がん細胞に放射線を照射して、がん細胞を消滅させるか、または少なくする治療方法である。この治療では、がん細胞にだけ放射線が照射されるようにする。実際にどこにどの程度の放射線が照射されたかを確認することは極めて重要であるが、一部の例を除けば、現在2次元計測が主流である。2次元計測では奥行方向の情報が得られず、がん細胞が臓器の奥側に存在する場合、奥側に照射されているか、誤って手前側に照射されているか判断できない。そこで3次元的な線量分布が測定可能なゲル線量計が研究されている。ある種のゲルは放射線を照射すると白濁化する（又は色が濃くなる）ことが知られている。この白濁化した場所などを測定するためにはMRIや光学CT装置が必要である。MRIは高額なため、本目的のために準備することは通常不可能である。光学CT装置は海外で製品化された例はあるが、試料形状が決まっており、高額である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、臨床現場で容易に使用できるゲル線量計用光学CTの開発である。人体の代わりに透明なゲル試料に放射線を照射する。照射された部分はその照射量に依存して、白濁化する（又は色が濃くなる）。照射後、試料に光を照射しその透過量（減衰量）を360度（1回転）撮影し、ある種の演算（再構成）を行うと、試料の断層像を得ることができる。試料全体の断層像を得れば、放射線がどこにどの程度照射されたかを確認することができる。測定時に光の散乱（迷光）があると、画像上のノイズとなる。このノイズの低減が目的の一つである。次の目的は光源の波長依存性である。色素ゲル線量計は組成によりその色が異なる。これまでの発表は単色光源を使用したものばかりであった。本研究では可色光源を使用し波長依存性（適した光源色）を調べることが目的の一つである。次の目的は装置の駆動系、撮影系、プログラムの改善である。異なる大きさの試料が測定できるようにし、光源色の可変および、複数の色を同時に処理する関係から、大量のデータを処理する必要がある。これら測定方法と装置の改良が目的である。

3. 研究の方法

新規に考案した模擬試料を用いて、試作機を改良しながら研究を進めた。

実際のゲル線量計は経時的に色の濃さが変化するため、試作機の特性試験には向いていない。そこで、最初に測定に適した模擬試料の開発を行った。検討の結果、入手が容易いで、経時的変化が少なく、室温安定性が良い、ローカストビーンガム（マメ科の種子抽出物）とカラギーナン（海藻抽出物）、リン酸カルシウム、ブドウ糖が主成分のゲル化剤を使用することにした。本ゲル化剤は、常温（30から40度）で固まるという利点、食用であり保管と廃棄が容易であるといった特徴がある。着色材には、白濁化する試料の模擬試料としては食用の二酸化チタン粉末、色素ゲル線量計の模擬試料としては食用色素を用いた。これら着色剤も食用であり、保管と廃棄が容易である。

開発した光学CT装置の概要を次に説明する。試料回転機構にはバイポーラステッピングモータを用いたダイレクトドライブ方式とした。脱調を防止し滑らかな回転を実現するために、一回転当たり400ステップのモータを1/128マイクロステップが可能なモータドライバで駆動した。アルミブロックを旋盤加工して作製した試料固定治具でモータと試料を固定した。空気と水の屈折率の違いによる画像のひずみを緩和するために、試料を水中にも配置できるようにしてある。光源にはLCDモニターを使用し光源色を可変できるようにした。可変光源の使用は本研究の特徴の一つである。散乱光防止材としてスパッタフェルトを使用した。光源、試料、カメラ付近など光が反射、散乱すると思われる箇所をスパッタフェルトで覆った。スパッタフェルトは耐熱性にすぐれており、黒いため光を吸収しやすい。撮影にはデータ転送速度が速い産業用USBカラーカメラ（USB 3.0対応）を用いた。モータドライバとカメラの制御にはワンボードコンピュータを使用した。得られたデータを後日解析できるようにしたため、一度の測定で得られるデータが、70 GByteを超えることもあり、撮影したデータを外付けハードディスクに保存できるようにした。本光学CT装置は、ネットワーク経由で遠隔操作が可能である。また任意の大きさの試料に対応しやすいように、本光学CT装置の骨格にはLアングルを使用した。これらの試料と装置を用いた測定結果を次に示す。

4. 研究成果

新規に考案した模擬試料の光学特性およびその経時変化を測定した。その結果、測定に適した（着色剤、ゲル化剤、水の混合比などの）製造方法が確立できた。模擬試料の保存期間（有効期限）は半年以上あることが確認できた。なお光スペクトルを測定する装置（測定波長は340 nmから850 nmまで）も本研究で開発した。本光スペクトル測定器を使用すると、模擬試料や光源の光スペクトルを調べることができ、光学CT装置の撮影条件の設定に使用できる。光の散乱による影響に関しては、スパッタフェルトを使用することで低減できることが、投影像から確認できた。

次に開発した光学 CT 装置の実際の測定結果の一部について説明する。これは青色系のゲル線量計を模擬した実験である。青色食用色素の濃度が異なる試料を 5 種類（濃度 1 から 8）と食用色素を添加しない試料（濃度 0）を作製し、開発した光学 CT 装置で得られた断層像のピクセル値の変化を調べた（図 1）。本測定では光源色を白色とした。図 1 の横軸は最も薄い色素濃度の試料を 1 としている。本光学 CT 装置では、カラーカメラで撮影した投影像の赤成分、緑成分、青成分を取り出せるようにしてあり、それぞれの色成分ごとの断層像と、カラー画像を白黒化した断層像の合計 4 種類の情報が得られるようにしてある。図 1 の R は赤成分画像、G は緑成分画像、B は青色成分画像、WB はカラー画像を白黒化した画像の結果を示す。このように色成分（光の波長）ごとの情報を、一度の測定で得られる点も本研究の特徴の一つである。図 1 から赤成分画像での輝度値の変化が大きいことが分かる。青色食用色素を使用したため、赤色の光を吸収しやすい。そのため色素濃度を変化させることにより、赤色成分の画像の変化率が大きいことが確認できた。

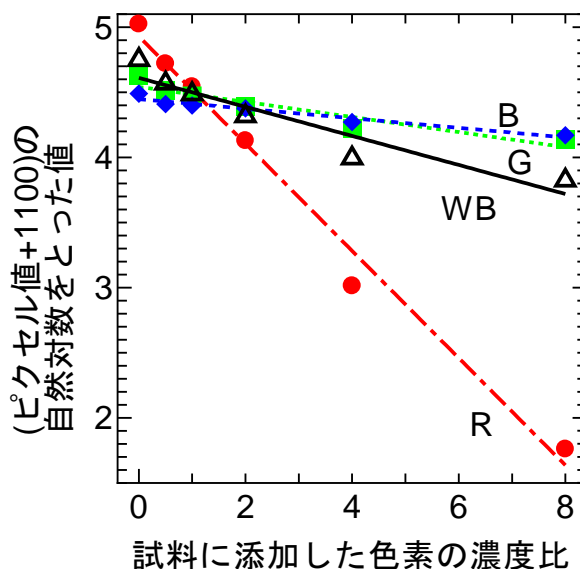


図 1 試料の色素濃度とピクセル値の関係
 (丸は赤成分画像、四角は緑成分画像、菱形は青成分画像、三角は白黒成分画像)

本研究で開発した光スペクトルメータを用いて試料の透過光を調査した結果、600 nm から 650 nm の波長の変化が大きいことが判明し、図 1 の結果が妥当であると考えている。これより、色素ゲル線量計においては、その色素の色によって測定に適した色成分を使用することが良いと考えている。次に色素濃度と断層像のピクセル値の関係について述べる。ランベルト・ベールの法則によれば、半透明物質の光の透過は、入射強度を I_0 、透過強度を I 、光路長を x 、光路中の物質の光の吸収係数を μ とすると、 $I = I_0 e^{-\mu x}$ で求めることができる。本光学 CT 装置のデータ処理の都合で断層像のピクセル値は負の値となるため、ピクセル値に定数 (1100) を加算した値の自然対数をとったものが図 1 である。それぞれの色成分画像の近似式を求め、図 1 中に線として描いている。これらの近似式の R2 は、0.89 から 0.99 であつことから、ランベルト・ベールの法則を満たしており、断層像のピクセル値から試料濃度を求めることに問題がない（測定装置として問題がない）と考えている。

画像のノイズは測定精度にも関係しているため、画像のノイズ低減方法について追加で開発を行った。開発した方法の一つに投影像の加算平均がある。断層像を得るために試料を回転させながら投影像を得ている。本研究では 0.9 度刻みで投影像を撮影しているが、1 ステップあたり 1 から 50 枚の投影像を撮影し、それらの画像を加算平均化することによって画像ノイズを低減する方法を試した。具体的には、濃度が均一な試料の断層像の画素値の標準偏差を求め、標準偏差と加算平均枚数との関係から、ノイズ低減効果を推測した。その結果、5 枚の加算平均処理で 10% 程度のノイズが低減できたこと、10 枚以上では、加算平均の低減効果の向上が小さいことがわかった。なお加算平均枚数が多くなれば、当然撮影に時間がかかる。加算平均無しの場合（1 ステップあたり 1 枚の撮影、1 回転で 400 枚撮影した場合）の撮影時間は 90 秒程度である。これが 1 ステップあたり 5 枚（1 回転で 2000 枚）の場合 8 分程度となる。冷所保管が必要なゲル線量計も少なくないため、長時間の撮影は好ましくない。これらの点から本光学 CT 装置では加算平均枚数は 5 枚以下が望ましいと考えている。なお、加算平均のノイズ低減効果を検証することもあり、カメラから出力される整数形式の画像データ（8 ビット整数形式）を浮動小数点形式（単精度浮動小数点形式）に変換してから処理をおこなった。そのためデータ量が増えるという欠点もある。このように加算平均処理については、ノイズ低減効果といった長所と、測定時間とデータ量の増加といった短所をよく検討して調整する必要がある。

これらの結果から、測定時間やデータ量の問題があるものの、ゲル線量計の測定に適した光学 CT 装置が開発できたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 中山 和也、佐南谷 葉月、岡本 一将、尾崎 咲耶、武村 哲浩	4. 巻 44
2. 論文標題 ゲル線量計用光CT装置のピクセル値の変化量について	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 45-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24517/00060409	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 中山 和也、小出 智生、鈴木 理臣、佐南谷 葉月、和田 拓也、武村 哲浩	4. 巻 43
2. 論文標題 ゲル線量計用光CT 装置の光源色依存性について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 71-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24517/00055106	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 中山和也、大原諒太、寺田香織、松田哲也、和田拓也、武村 哲浩	4. 巻 42
2. 論文標題 ゲル線量計用光 CT 装置の特性 - 歪みとその補正、解像度特性 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 67-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24517/00051946	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 Wada Takuya, Nakayama Kazuya, Takemura Akihiro, Yamamoto Hiroaki, Kojima Hironori, Isomura Naoki, Noto Kimiya	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Optical Computed Tomography for Evaluation of the Absorbed Dose of the Dyed Gel Dosimeter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018	6. 最初と最後の頁 581 ~ 584
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-10-9023-3_107	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐南谷葉月、中山和也、武村哲浩、岡本博之
2. 発表標題 ゲル線量計用光学CT装置における加算平均画像を用いた画質改善の検討
3. 学会等名 第8回3次元ゲル線量計研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Wada, Kazuya Nakayama, Akihiro Takemura, Hiroaki Yamamoto, Hironori Kojima, Naoki Isomura, Kimiya Noto
2. 発表標題 Development of Optical Computed Tomography for Evaluation of the Absorbed Dose of the Dyed Gel Dosimeter
3. 学会等名 World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田拓也、武村哲浩、中山和也、鉞時貞、能登公也、小島札慎、磯村直樹
2. 発表標題 色素ゲル線量計の容器サイズによる光学CTの信号値への影響
3. 学会等名 3次元ゲル線量計研究会
4. 発表年 2018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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------