

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：22304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K21257

研究課題名(和文)ゲル線量計評価用CCDタイプ光CT構築と粒子線量測定

研究課題名(英文)Gel dosimetry in ion beam with CCD type optical computed tomography system

研究代表者

川村 拓(KAWAMURA, HIRAKU)

群馬県立県民健康科学大学・診療放射線学部・助教

研究者番号：80424050

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)：ゲル線量計は3次元線量測定の可能性を有した人体組織等価線量計である。臨床 MRI 装置にてスピンスピン緩和速度を測定し線量評価する手法が従来から用いられてきたが、測定精度が高い反面、長い時間を要し、薄いスライス厚設定が難しいなどの課題を有していた。本研究では、ゲル線量計評価法としてゲル線量計の透過光量測定を実施した。得られた透過光量データを画像再構成し光学CT断層像を得た。前回のレーザー-光ダイオードによる装置のデータを生かしつつ新たに面光源-CCDカメラを用いたより効率的なゲル線量計用光CTシステム構築を行い、構築したシステムを用いて炭素線の線量測定を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の放射線治療装置はコンピューター制御され、正確に標的に照射される。また治療計画の計算は複雑となるが、標的に対する線量検証は必要な手順であり、最終的に人間による管理や確認が必要不可欠である。ゲル線量計の臨床応用が可能となれば、現在用いられている電離箱線量計やフィルムなどの検証ツールと併用・使用の選択肢が増えると予想される。つまり目的に合わせて最適な線量計・検出器を選択することができるようになると思われる。ゲル線量計の臨床応用には新しいゲル線量計評価手法が必要とされており、本研究を発展・応用させることにより、将来的に放射線治療技術への貢献が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The advantages of gel dosimeter, as polymer gel and fricke gel and dye gel are a human tissue equivalent and a possibility of three-dimensional dosimetry. The dose evaluation method of polymer gel dosimeter has been used by measuring spin-spin relaxation rate, called R2 method using clinical MRI until now. Although the R2 method has high accuracy, it is difficult to obtain the images of thin slice thickness, and it is needed to scan that it takes a long time for accuracy images.

In this study, new method for evaluation of gel dosimeters using constructed optical computed tomography system composed of charge coupled device, CCD, was proposed. We tried to measure carbon dose using polymer gel dosimeter. The dosimetric results of cross-sectional reconstructed image was employed to based the transmitted light amount of the gel dosimeter.

研究分野：医学物理学・放射線技術学

キーワード：光CT ポリマーゲル線量計 粒子線治療 画像再構成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代における国民の死因の一位はがんであり、がん治療に関連した治療方法や治療技術を開発することが必要とされている。放射線治療は手術療法や化学療法と並び 3 大治療法とされ、がんの治療法において必要不可欠な手段の一つである。さらには放射線治療装置の開発・進歩およびコンピューターの高速化により、強度変調放射線治療や陽子線治療をはじめとする高精度放射線治療が可能となっている。高精度放射線治療は従来の放射線治療と比較して、人体のさまざまな方向から放射線を分散して照射することで標的である腫瘍に放射線量を集中させ、標的周囲の正常組織およびリスク臓器への放射線量を減らすことで副作用を回避することが可能な治療方法であり、この方法を用いた放射線治療件数は年々増加している。放射線治療を実施する治療装置はコンピューター制御され、最終的に人間による管理や確認が必要不可欠である。また標的に照射するための計画は高精度な治療計画装置によって行われる。治療計画の計算は複雑であり、人間による手計算では詳細な結果の検証は難しい現状がある。実際に標的に対して線量が集中されているかの検証や保証、確認は人間が線量計などを使用して放射線治療前に行う必要があり、これらが不十分な場合には放射線量照射過小および過多などの医療事故につながる危険性を有している。

放射線治療における線量測定は現在、電離箱線量計(電離箱)が一般的に用いられている。電離箱は精度が高く再現性も良いという利点を持つ反面、1 点のみを測定するポイント線量計であるため、平面的な分布(2 次元)や立体的な広がり(3 次元)を測定するためには非常に長い時間がかかり実用的ではない。それに対して、本研究で使用するポリマーゲル線量計(ゲル線量計)は 3 次元測定が効率よく実施可能な特長を有している。この線量計が実用化されれば、電離箱を用いた 1 点測定と同等の時間またはそれ以下で臨床における 3 次元の線量分布が測定可能となる。

2. 研究の目的

放射線治療計画時の体内標的に対する放射線量の計算は、骨や肺など特別な臓器を除いて人体を水に置換して行う。ゲル線量計は水にメタクリル酸、ゼラチン、触媒を混合したゲル状の化学線量計であり、構成成分の大部分が水であることから人体組織等価と置換可能である。したがって電離箱線量計と比較して組織等価換算による誤差が小さいと考えられる。ゲル線量計に放射線照射すると放射線量に依存したラジカル重合反応が発生する。この重合反応量を測定する事により線量測定が可能となる。

ゲル線量計を臨床現場で使用するためには解決すべき課題がいくつかある。その 1 つにゲル線量計の線量評価測定手法がある。本研究では今まで用いられてきた MRI 装置を用いたスピン-スピン緩和速度($R_2=1/T_2$)測定ではなく、新しく構築する CCD イメージセンサ(CCD)を用いた光 CT システムによる線量評価測定手法を用いることでゲル線量測定上の課題を解決し、ゲル線量計の臨床応用への試みの一つとして重粒子線照射による線量評価を行うことを目的とする。

ゲル線量計は図 1 のように様々な装置を用いて線量測定を行うことが可能であり、その選択肢を図 1 に示す。線量評価(図 1 中の 3)は、古くから MRI 装置を用いてゲル線量計のスピン-スピン緩和速度(R_2)を測定することにより行われてきた¹⁾。この方法は臨床で普及している MRI 装置を用いて測定可能な特色があるが、高精度な結果を求める場合には長い測定時間を必要とする。また MRI 装置に起因する磁場の不均一性のため測定精度低下、測定中の試料の条件変化(たとえば温度変化)による測定精度の低下、などいくつかの課題を有することが知られている¹⁾。

筆者らは平成 24 年度から 28 年度までプロトタイプ光断層システムを構築・測定した。この研究で放射線照射による吸収線量とゲル線量計の重合反応による可視光吸収量との定量評価を行うことができ、MRI 装置による R_2 測定に代わるゲル線量計評価ツールとして実施可能である事を明らかにした。しかしながら光断層システムを用いる場合においても信号雑音比が良好な画像取得のためには MRI 同様測定時間が長くなることが課題として判明した。

今回の研究では光 CT の検出器として単一素子のダイオードに代えて受光部分に 2 次元検出器である CCD を使用しより効率的なゲル線量計評価用光 CT システム構築・測定を行う事を計画した。

ゲル線量計は実際の放射線治療には実用されておらず研究ベースではあるが、本研究成果として有用性・実用性が関連学会や学術誌上で発表できれば、高精度放射線治療および今後発展する臨床でのより立体的な治療計画分布に対応した放射線照射技術への線量評価が実施可能とな



図 1. ゲル線量計の測定方法と使用装置

る。この点は他の線量計および線量測定方法にはない特色である。また、今回構築する光 CT システムによる線量評価は、収集・再構成条件の設定により、理論的にはフィルムや EPID 以上の高空間分解能測定が可能となる点が特徴的である。電離箱や半導体検出器での線量測定に関する分解能は数 mm 単位、フィルムや電子ポータル画像装置 (EPID) で数 100 μm 単位の分解能である一方で、研究で使用予定のゲル線量計は 3 次的に連続した構造を有していることも特長である。

[参考文献]

1) C Baldock, Y De Deene, S Doran, G Ibbott, et al. Phys. Med. Biol. 55. 2010. R1-R63.

3. 研究の方法

CCD タイプ光 CT システムの構築

平成 24 年度から 27 年度まで作製した光断層システムのデータを参考にしながら CCD タイプ光 CT システムを構築した。以下にシステムについて説明する。測定対象であるゲル線量計を中心として一方に光源、その対向方向に検出器である CCD を配置した。光源 (LED 発光パネル) およびゲル線量計・CCD を一直線上に配置した。本研究で構築する光 CT システムは、医療用の X 線 CT 装置のように被写体周囲を光源および検出器が回転するシステムではなく、光源および検出器を固定し、ゲル線量計を回転ステージによる制御により運動させるシステムを設計した。光源からの光はゲル線量計へ向けて放射され、ゲルを通過し、検出器である CCD で計測される。回転ステージによりゲルサンプルを回転しつつ信号収集することが可能で角度毎の 2 次元画像を取得可能なデザインとした。画像処理ソフトウェアを用いることで任意の位置における 360° 角度データが取得でき、そこからサイノグラムを作成可能となった。サイノグラムから逆投影法や逐次近似などの画像再構成手法により 2 次元断層像とした。

CCD を用いることで、2 次的なデータ収集が可能であり任意の断面を再構成する事で被写体のあらゆる断層像が作成可能となり、以前の光断層システムより効率的に信号収集が可能となるシステムを設計構築した。

基礎特性測定と再構成フィルターによる応答直線変化に対する応答

ゲル線量計については PAGAT ポリマーゲル線量計を作成・使用した。ポリマーゲル線量計はビニルモノマーおよび水を主成分とする線量計であり、任意の容器に封入することで任意の形状の線量計が作製可能である。ゲル線量計の放射線照射実験については、X 線照射装置を用いた基礎実験、医療用リニアックを用いた X 線照射実験、重粒子線がん治療装置を使用した炭素線照射実験を行った。

作製したゲル線量計サンプルに対して放射線照射し、照射後のサンプルを構築した光 CT で読み取り、線量評価を行った。

基礎特性として X 線装置によって照射したゲル線量計を用いて線量応答特性を測定した。応答特性の測定は放射線量と透過光量との関係を求めるため、X 線照射装置で 2、4、6Gy 照射したゲル線量計と未照射のゲル線量計サンプルを光 CT でスキャンし、画像再構成により断層像を得た。得られた断層像から有効範囲 (断面の約 3/4 の面積) を関心領域として設定し、画素値を記録し、放射線量と光 CT による画素値との関係を求めた。

次に X 線照射時にコリメーターでゲル線量計を半分だけ照射 (半身照射) したサンプルを用いて、画像再構成によって断面像が適切に半身照射を表示するか試験した。

それから、以前作製した光断層システムの測定実験において再構成画像上にアーチファクトが発見され、これらの原因分析とともにアーチファクト低減手法の検討を行った。画像上のアーチファクトについて再構成手法を再検討するとともに再構成時の最適な画像フィルターの検討を行った。

粒子線線量評価の検討

放射線医学総合研究所での HIMAC 共同利用研究申請に基づき炭素ビームの線量測定研究を行った。重粒子において線量集中性を実現可能にしているブラッグピークについてゲル線量計を用いての照射試験を行い、後日光 CT による線量画像作成を試みた。ビーム深さ方向に重ね合わせたブラッグピークの可視化・線量測定が可能か検討した。

4. 研究成果

CCD タイプ光 CT システムの構築

検出器として CCD カメラ、光源としての LED 発光パネル、ゲル線量計固定のチャックおよび固定治具、360° 収集データに必要な回転ステージを準備し、次頁図 2 上のように組み立てた。あらかじめ X 線照射した PAGAT ポリマーゲル線量計を CCD タイプ光 CT 装置にセッティングしプログラム制御によって回転させつつ透過光量を CCD で測定し、得られたデータを用いて画像再構成した。結果の一例として、それぞれ図 2 左下、中下、右下に半身照射ゲルサンプルの外観、サンプルを 360° 回転データ収集したサイノグラム像、Filtered back projection (FBP) によってサンプルの高さ中心位置を再構成した断層像を示す。光透過に基づく再構成像を出力するシステムを構築することができた。

基礎特性測定と再構成フィルターによる応答直線変化に対する応答

放射線照射されたゲル線量計は放射線量に応じた重合反応を起こし、視覚的にも白濁した。光 CT に設置してある発光パネル(図 2 上の左側)からゲル線量計に入射した光は、ゲル線量計の白濁の程度によって吸収または散乱、あるいは一部透過した。透過光は CCD で検出され、検出した画像データから必要部分を抽出し、2 次元の光透過画像が得られた。放射線量に依存してゲル線量計の放射線重合による反応は大きくなり、再構成画像上でも画像中の画素値を計測することで線量応答測定が可能となった。

続いて画像フィルターによるアーチファクト低減手法の検討を行った。

図 3 上は放射線未照射のゲル線量計に対してスキャンし得られたデータを FBP で画像再構成した断層像である。左からフィルターなし、Hann フィルター、Butterworth フィルター、Ramp フィルターを使用した際の各フィルターによる画像の違いを示す。また、図 3 下には各フィルターによる線量応答曲線を示す。横軸は X 線の吸収線量、縦軸は透過光量を反映した画素値を相対値として示している。さらに従来の MRI による R_2 測定結果とも比較検討した。

検討結果では Ramp フィルターが比較的直線性良好な結果となった。

線量応答性試験では放射線の吸収線量に応じて透過光量が減少した反応を見せた。さらにはゲルサンプル容量が大きくなるとともに透過光量が減少し、吸収線量に対する直線性が確保できない現象がみられた。

粒子線線量評価の検討

放射線照射実験については放射線医学総合研究所における重粒子線がん治療装置 HIMAC を使用してポリマーゲルサンプルに対して炭素ビームを照射し、照射後のサンプルを光 CT で読み取り、線量評価を行った。

線量応答性試験では炭素線の吸収線量に応じた反応を見せた。しかしながら比較のために行った同一サンプルによる MRI 線量評価試験の結果と比較すると吸収線量と読み取りの直線性や近似直線の相関係数に差がみられた。同一ゲルサンプルに対する光 CT と MRI での測定結果の差異については、入射光のゲルサンプル容器および本体との境界および内部での屈折・散乱の影響によるものと考察した。

続いて線量応答性試験で使用したゲルサンプルより容量が大きいサンプルを用意し、HIMAC にてブラッグピークの形状が観察できるような条件で照射し、光 CT で読み取り及び線量評価を実施した。光 CT にて得られた投影データから画像再構成を行い 2 次元画像として表示させることができ、本研究成果としてブラッグピークの位置を特定することが可能となった。また再構成した画像より炭素ビーム照射中心の深部線量プロファイルを取り出し、照射時の測定データと比較した。ビーム中心軸のブラッグピーク/プラトー比がゲル線量計と測定データとの間に差がみられた。2 次元画像からはブラッグピークの位置を把握できたものの、ブラッグピークの線量寄与の測定結果には課題が見られ、今後とも検討を続けることが必要であることがわかった。

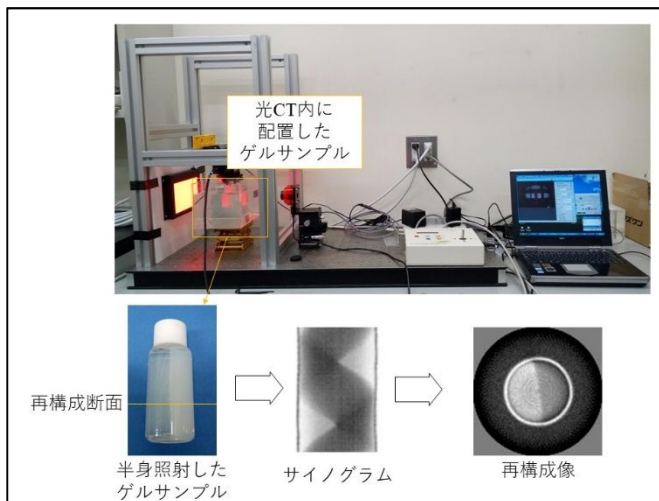


図 2. CCD タイプ光 CT 装置(上)および半身照射ゲル線量計サンプルの測定結果としての再構成画像(右下)

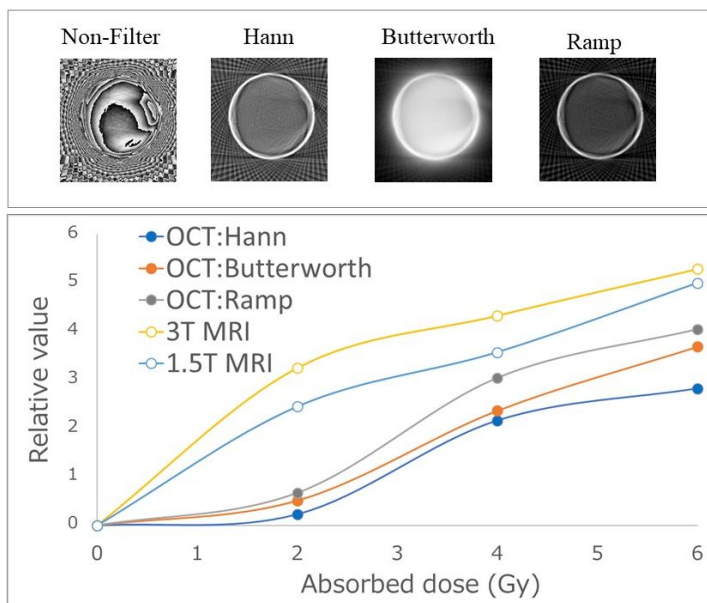


図 3. CCD タイプ光 CT による X 線照射ゲル線量計の測定結果 上：フィルターによる再構成像の違い、下：線量応答特性の違い

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 H Kawamura, K Shinoda, H Fuse, T Takanashi, Y Shimada, Y Ishimori, M Monma, K Miyamoto, H Sato, T Fujisaki, T Sakae, A Matsumura	4. 巻 7
2. 論文標題 Investigation of Temperature Dependence of Polymer Gels for Use with Scanning Magnetic Resonance Imaging.	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 261-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ijmpcero.2018.72022	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 該当する
1. 著者名 SI Hayashi, H Kawamura, S Usui, T Tominaga	4. 巻 11
2. 論文標題 Influence of magnesium chloride on the dose-response of polyacrylamide-type gel dosimeters.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Radiological Physics and Technology	6. 最初と最後の頁 375-381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s12194-018-0473-2	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 T Takanashi, H Kawamura	4. 巻 68/1
2. 論文標題 Evaluation of Spatial Resolution of MRI, Optical CT and X-Ray CT Using MTF for Gel Dosimeter.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Part of the IFMBE Proceedings book series	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/978-981-10-9035-6_6	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Takanashi T, Kawamura H, Fukasaku K, Sahade DA, Hamada T.	4. 巻 847
2. 論文標題 A comparison of the dose response behavior of AQUAJOINT based polymer gel and PAGAT gel dosimeters measured using Optical CT and MRI.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/847/1/012013	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 該当する

1. 著者名 川村拓, 高梨宇宙, 嶋田芳和, 佐藤裕一, 阿部慎司, 原敏.	4. 巻 37
2. 論文標題 ポリマーゲル線量計のための光学CTを用いた線量評価 0次元から2次元読取	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 医学物理.	6. 最初と最後の頁 107-110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11323/jjimp.37.2_111	査読の有無 無
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 該当する

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 川村拓, 高梨宇宙
2. 発表標題 レーザー - フォトダイオード型および面光源 - カメラ型光学CT の構築
3. 学会等名 第7回 3次元(3D)ゲル線量計研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M Ishida, H Kawamura, M Sato, H Takei, T Sakae
2. 発表標題 The investigation of the polymer gel dosimetry in patch-field proton therapy using beam current modulation
3. 学会等名 18th Asia-Oceania Congress on Medical Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kawamura H, Takanashi T, Shimada Y, Sato Y, Abe S.
2. 発表標題 INVESTIGATION OF RECONSTRUCTED FILTERS OF OPTICAL COMPUTED TOMOGRAPHY FOR POLYMER GEL DOSIMETER.
3. 学会等名 17th Asia Oceania Congress of Medical Physics & 38th Annual Conference of Association of Medical Physicists of India (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takaoki Takanashi, Hiraku Kawamura, Kazuaki Fukasaku, Daniel Antonio Sahade and Toshimasa Hamada
2. 発表標題 A comparison of the dose-response behavior of AQUAJOINT and PAGAT polymer gel dosimeters measured by Optical CT and MRI
3. 学会等名 9th International Conference on 3D Radiation Dosimetry (IC3DDose) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Kawamura, T. Takanashi, Y. Shimada, Y. Sato, S. Abe
2. 発表標題 Construction and measurement of optical CT system for evaluation of polymer gel dosimeters
3. 学会等名 22ND International Conference on Medical Physics 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016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	高梨 宇宙 (Takanashi Takaoki) (40646692)	国立研究開発法人理化学研究所・科技八産連本部・研究員 (82401)	
連携研究者	林 慎一郎 (Hayashi Shinichirou) (20238108)	広島国際大学・保健医療学部・准教授 (35413)	
連携研究者	吉井 裕 (Yoshii Hiroshi) (20334047)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高度被ばく医療センター 計測・線量評価部・主幹研究員 (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	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	阿部 慎司 (Abe Shinji) (00274978)	茨城県立医療大学・保健医療学部・教授 (22101)	