

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：82606

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K15614

研究課題名（和文）ポリマーゲル線量計を用いた線量検証システムの開発

研究課題名（英文）Development of dose verification system using the polymer gel dosimeter

研究代表者

飯島 康太郎 (Iijima, Kotaro)

国立研究開発法人国立がん研究センター・中央病院・医学物理士

研究者番号：50792909

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本助成事業では、ゲル線量計を用いて放射線量の分布を検証するシステムを開発し、先進化する放射線治療装置に対して新しい検証手法を提示することを目的としていた。成果としては、ポリマーゲル線量計のMR画像誘導放射線治療装置への適用や錯体形成型ゲル線量計を用いたホウ素中性子捕捉療法の線量測定に関して多くの場で成果を公表した。小線源治療への適応については、本研究助成期間中に他者によって決定的な報告がなされたため、研究対象から外すこととなった。このように、一部当初の計画通りに遂行できなかった部分があるものの、本研究助成事業によって遂行したポリマーゲル線量計に関する研究は十分良い成果を得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本助成事業による研究で得られた成果は、先進化が著しい放射線治療に対して十分な影響を与えると考える。現状の放射線治療では、放射線の3次元的な線量分布は断片的に測定されているため、「真」の線量分布を測定することはできない。しかし、本研究ではポリマーゲル線量計を用いることで放射線の線量分布を3次元的に取得できることが示され、そのために必要なシステムや手法を提示することができた。このことから本助成事業の学術的・社会的意義は非常に大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：The objective of this grant project was to develop a system to verify a dose distribution using a gel dosimeter and to present a new verification method for increasingly advanced radiation therapy machine.

We have published our results in many forums on the application of the polymer gel dosimeters to the MR image-guided radiation therapy machine and on the dosimetry of the boron neutron capture therapy using a complex-forming gel dosimeters.

The application to small-source radiation therapy was reported conclusively by others during the period of this grant, and thus was removed from the scope of this research. Thus, although some parts of the research could not be carried out as originally planned, the research on polymer gel dosimeters carried out by this research grant has yielded satisfactory results.

研究分野：医学物理学

キーワード：ゲル線量計 放射線治療 品質保証 品質管理

1. 研究開始当初の背景

近年、放射線治療の発展は目覚ましく、日本でも新技術を備えた放射線治療装置が臨床に導入され始めている。例えば、国立がん研究センター中央病院には MR 画像誘導放射線治療装置や BNCT(Boron-Neutron Capture Therapy)が臨床に導入されつつある。一方、放射線治療は目に見えない放射線を腫瘍に正確に照射する必要があるため、どのような優れた装置を用いても治療計画に問題がないか検証(治療計画検証)をする必要がある。現在の検証は主に半導体放射線検出器を用いることが多いが、半導体には、小さく加工できないため細かい放射線の分布を知ることができない、電気回路を使用するため放射線や磁場、経年劣化による故障が存在する、極めて高価である、など多くの制限が存在する。これらの問題は、現在臨床で広く使用されている検出器のほぼすべてに当てはまる。今後電気回路を使用する検出器では上記の問題が解決されることはないと思われ、より高精度で様々なアプローチによって進化していく放射線治療において、これらの問題は解決されなければならない。これらの問題を解決する検出器にゲル線量計と呼ばれる化学固体線量計がある。ゲル線量計は製品化されているものは少なく、いまだ発展途上の線量計ではあるが、十分に将来性を有する線量計である。本申請ではゲル線量計に関する基礎研究を実施するとともに臨床導入のためのアイデアを検討していく。

2. 研究の目的

本研究の目的は先進化する放射線治療装置に対する治療検証システムの可能性を広げることであり、ゲル線量計を用いた線量検証システムを開発、臨床導入することである。近年、日本でも高精度放射線治療や新技術を備えた先進的放射線治療装置が臨床に導入され始めている。このような高精度・先進的放射線治療では高い線量検証精度が求められる。このための精密な検証はこれまで 2 次元的に評価されてきたが、現在は品質保証・品質管理の観点からその線量評価を直接 3 次元的に行うことが求められている。現在の 3 次元的検証は主に半導体検出器を用いるが、半導体は技術的な制限が多くまた極めて高価である。一方、ゲル線量計は半導体が有する多くの制限を持たず、細かい線量分布を得ることができる。本研究ではゲル線量計を用いた線量検証システムを開発・臨床導入し先進化していく放射線治療に対する線量検証の新たな可能性を提示していく。

3. 研究の方法

本申請による研究の目的はゲル線量計の臨床における有用性を示し、臨床導入の足掛かり、ひいては臨床導入の先駆けとなることである。したがって、本申請の研究は「臨床導入のための検討」が第一にあるが、それとは別に最新技術に対するアプローチとして 3 つの基礎検討も行った。

(1) 臨床導入のための検討

ゲル線量計を安定して開発できる環境を確立し、ゲル線量計の基礎特性を既出の論文と比較することで、再現性が得られるか検討する。ゲル線量計には多くの種類が存在するため、特に臨床導入に有用だと考えられるゲル線量計を開発できる環境を構築した。それらのゲル線量計の基礎特性は、ゲル線量計をガス非透過容器やセル等に封入し、MRI や可視分光光度計を用いて調査した。また臨床への受け入れやすさを考え、平板上の 2 次元ゲル線量計を開発し、一般的な品質管理・品質保証に適用できるか検討した。

(2) MR 画像誘導放射線治療における磁場の線量分布への影響の調査

本調査用のファントムを製作し、MR 画像誘導放射線治療装置においてゲル線量計が使用できるか調査した。ポリマーゲル線量計の線量校正曲線は照射線量と T2 緩和速度が比例的であるという原理を利用しているため、線量読出しは MRI を用いた。線量分布測定のために大容量のガス非透過容器にポリマーゲル線量計を密封し、専用ファントムを用いて線量分布測定を行った。線量検証能力があるか検討するために、治療計画の線量分布と測定した線量分布に対してガンマ解析を行った。

(3) 小線源治療における実測線量と計画線量の差の調査

当初の研究計画では小線源治療に対するゲル線量計線量検証システムを開発する予定であったが、研究実施期間中に決定的な論文、製品が開発されたため、本申請では研究を断念した。

(4) ゲル線量計を用いた線量測定手法の BNCT に対する有用性の評価

国立がん研究センター中央病院にある直線加速器型 BNCT システムを用いて、ゲル線量計が BNCT に有用な線量計となり得るかを検討した。ゲル線量計には不純物に対して適正のある PVA-I ゲル線量計を使用した。PVA-I ゲル線量計にボロンを混合し、中性子線量を取得できるか試みた。

4. 研究成果

(1) 臨床導入のための検討

本研究で検討したゲル線量計は主に MAGAT、PAGAT、PVA-I ゲル線量計である。これらの基礎特性を図 1 に示す。既出文献を十分に再現することができており、線量計として十分利用可能であることが確認された。また、図 2 に平板化したゲル線量計を示す。平板ゲル線量計を用いて放射線治療装置の品質管理項目であるスターショットとフェンステスト、線量分布検証を実施した。スターショットでは、照射中心のずれが ± 1 mm 以内で一致していることを確認することができ、フェンステストでは最小 0.4 mm の Leaf のずれを認識することができた。また線量分布測定ではガンマ解析を実施し、DD/DTA=3%/3 mm、Threshold>30%としたときのガンマパスが 98%を超えることを確認した。これらの結果は従来の検出器で得られている結果と一致していたことから、ゲル線量計を品質管理機器として使用することは十分実施可能であることが示された(図 3)。



図 1. 各ゲル線量計の基礎特性

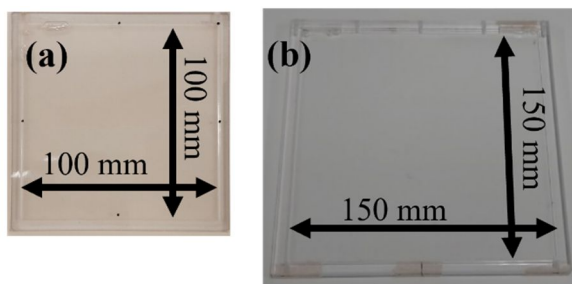


図 2. 平板ゲル線量計

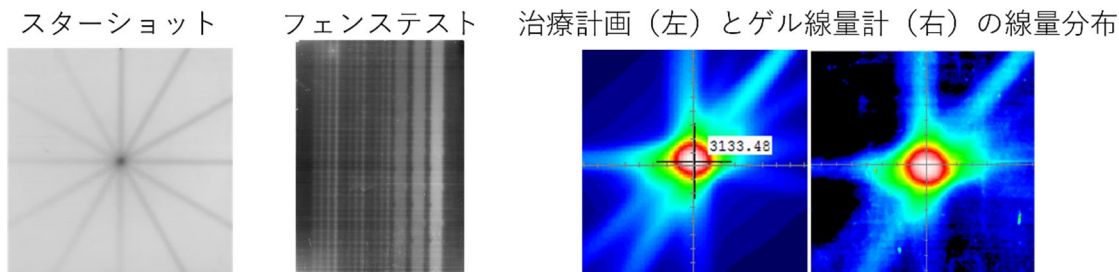


図 3. 放射線治療装置の品質管理項目におけるゲル線量計の測定画像

(2) MR 画像誘導放射線治療における磁場の線量分布への影響の調査

MR 画像誘導放射線治療用ゲル線量計線量測定ファントムとゲル線量計 MR 画像取得用ファントムを図 4 に示す。線量測定ファントムは小型容器と大型容器の 2 種類を設置可能な構造になっており、本ファントムを用いることで 3 次元線量分布を測定するだけでなく、線量校正曲線を取得することも可能である。本ファントムで得られた線量分布と計画線量分布、ガンマ解析結果を図 5 に示す。治療計画は磁場を考慮した線量分布になっているため、この線量分布と測定線量分布が十分な一致を示したことから、線量分布は磁場の影響を受けるが治療計画装置でその補正は十分に可能であることが確認された。またゲル線量計の線量検証への適用可能性も示唆された。

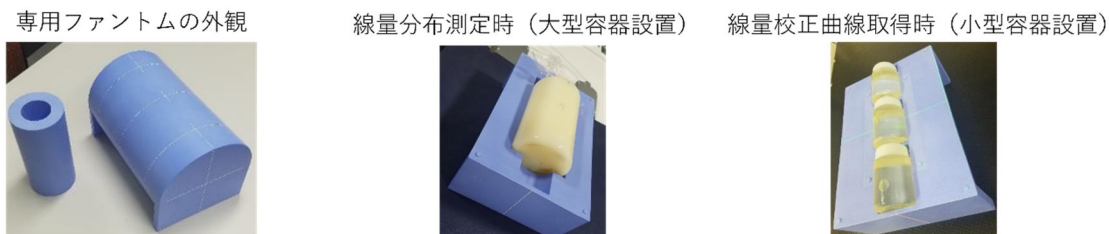


図 4. MR 画像誘導放射線治療用ゲル線量計線量測定ファントム

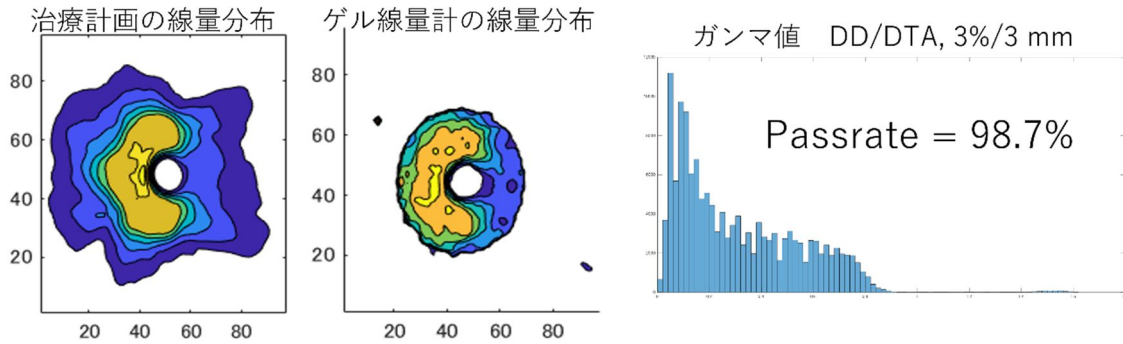


図 5. MR 画像誘導放射線治療装置における治療計画の線量分布とゲル線量計で測定した線量分布のガンマ解析結果

(4) ゲル線量計を用いた線量測定手法の BNCT に対する有用性の評価

PVA-I ゲル線量計にボロンを混合することで、中性子線量が取得可能か調査した。図 6 に BNCT 照射時のゲル線量計の設置方法を示す。各ゲル線量計に均等に照射されるように設置した。図 7 に照射時間を一定にしてボロンの混合割合を変化させたときの応答特性とボロン混合割合を一定にして照射時間を変化させたときの応答特性を示す。ボロンの量と照射時間が増加することでゲル線量計の応答は増加するよう見えるが、その応答は非常に不安定であることがわかる。これはボロンの混合方法等に依存するものと考えられるため、ゲル線量計の製作方法から再検討しなければならない。

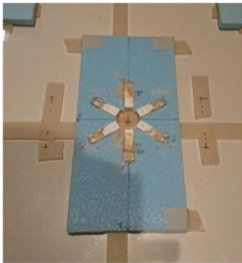


図 6. BNCT 照射時の PVA-I ゲル線量計の設置方法

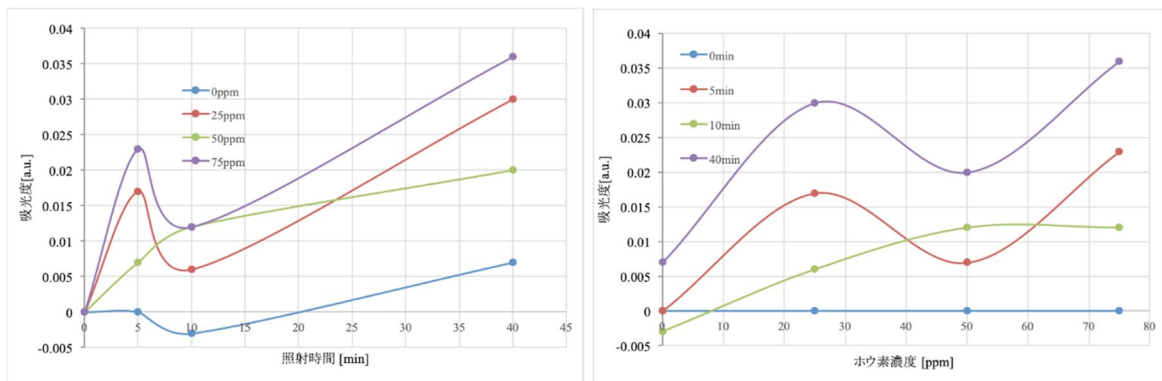


図 7. 左: ボロン濃度を一定にし、照射時間を変化させたときの応答。右: 照射時間を一定にし、ボロン濃度を変化させたときの応答³

上記の(1)から(4)で示した通り、本研究では非常に多くの成果を得ることができた。特にゲル線量計が一般的な臨床で実施されている品質管理を十分に実施可能であるということを示せたことは、本研究に大きな意義を持たせる。より高精度に先進的に進化していく放射線治療を支えていくために、今後も研究を継続していく。

引用文献

- ・ 飯島康太郎、岡本裕之、中村哲志、他。MR 画像誘導放射線治療装置に対する 3D ゲル線量計の適合性の基礎的検討、第 32 回高精度放射線外部照射部会学術大会。
- ・ Iijima K, Okamoto H, Takemori M, et al. Basic study of the PVA-I flat gel dosimeter in star-shots. JSMP. 2020.
- ・ 竹森望弘、中村哲志、飯島康太郎、他。ホウ素入り PVA-I 線量計の BNCT に対する適応性の検討、第 8 回 3 次元ゲル線量計研究会。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kotaro Iijima, Hiroyuki Okamoto, Mihiro Takemori, Satoshi Nakamura, Shie Nishioka, Hiroki Nakayama, Junichi Kuwahara, Miyuki Murata, Yuki Miura, Hironori Murakami, Shoichi Katsuta and Jun Itami
2. 発表標題 Basic study of the PVA-I flat gel dosimeter in star shot analysis
3. 学会等名 The 119th Scientific Meeting of the JSMP
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯島康太郎、竹森望弘、中村哲志、西岡史絵、千葉貴仁、中山広貴、桑原潤一、村田美幸、三浦悠記、久木裕也、井垣浩、岡本裕之、伊丹純
2. 発表標題 平板型PVA-Iゲル線量計のFence試験への応用
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第33回学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takemori M, Iijima K, Okamoto H, et al.
2. 発表標題 Preliminary study of polymer gel dosimeter for QA in MRI-guided radiotherapy system
3. 学会等名 The 117th Scientific Meeting of the JSMP
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 飯島康太郎、岡本裕之、竹森望弘、他.
2. 発表標題 平板型PVA-I線量計のスターショットを用いた基礎検証
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～2020年

1. 発表者名 竹森 望弘, 中村 哲志, 飯島 康太郎, 他
2. 発表標題 ホウ素入りPVA-I線量計のBNCTに対する適応性の検討
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～2020年

1. 発表者名 竹森望弘
2. 発表標題 ポリマーゲル線量計を用いたMR画像誘導放射線治療装置のQAに関する基礎研究
3. 学会等名 第7回3次元ポリマーゲル線量計研究会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 飯島康太郎
2. 発表標題 MR画像誘導放射線治療装置に対する3Dゲル線量計の適合性の基礎的検討
3. 学会等名 第32回高精度放射線外部照射部会学術大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 竹森望弘
2. 発表標題 Preliminary study of polymer gel dosimeter for QA in MRI-guided radiotherapy system
3. 学会等名 第117回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------