

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：35413
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：20K08039
研究課題名（和文）ヨウ素錯体を利用した3次元ラジオクロミックゲル線量計の開発と応用に関する研究

研究課題名（英文）Study on development and application of three-dimensional radiochromic gel dosimeter using iodine complex

研究代表者
林 慎一郎（Hayashi, Shin-ichiro）
広島国際大学・保健医療学部・教授

研究者番号：20238108
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）：放射線治療における三次元線量分布を直接評価するためのツールとして、放射線によってゲル溶液中で形成されるヨウ素とポリビニルアルコールの錯体による赤い発色を利用した新規なラジオクロミックゲル線量計の開発を行った。組成の最適化や各種添加剤による特性改良とその基礎特性評価を行った。その結果、経時・空間・熱安定性や線量応答（感度）等に大幅な改良がなされた。同時にその臨床応用にも取り組み、医療用加速器からのX線や電子線に対する深部線量分布評価や精度保証のための位置検出器として利用する方法を確立した。さらに、三次元線量分布評価に不可欠な光学CT装置を自作し、治療計画との比較を行い、その有用性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

三次元ゲル線量計、特にラジオクロミックゲル（RG）線量計の開発と臨床応用は、これまで欧米の研究が先行していたが、我々の開発した新規なRG線量計は既存のRG線量計とは異なる発色機構を用いており、国産のRG線量計である。我々のRG線量計では既存のRG線量計のいくつかの欠点が改善されており、再利用可能である点も画期的である。また、自作した汎用型光学CT装置と併せたシステムを構築し、RG線量計を実臨床へ応用する手法をいくつか確立した。これらの成果は今後の放射線治療における三次元線量分布評価法として臨床への普及にも大きく貢献できると考えている。

研究成果の概要（英文）：As a tool for directly evaluating three-dimensional dose distribution in radiotherapy, we developed a new radiochromic gel dosimeter that utilizes the red color produced by the complex of iodine and polyvinyl alcohol formed in a gel solution by radiation. We optimized the composition, improved the properties using various additives, and evaluated the basic properties. As a result, significant improvements have been made in terms of temporal, spatial, and thermal stability, as well as dose response (sensitivity). At the same time, we worked on its clinical application and established a method for using it as a position detector for evaluating deep dose distribution and ensuring accuracy for X-rays and electron beams from medical accelerators. Furthermore, we created an optical CT device that is essential for three-dimensional dose distribution evaluation, and compared it with the treatment plan, demonstrating its usefulness.

研究分野：放射線化学

キーワード：3次元ゲル線量計 ラジオクロミックゲル 医学物理学 放射線治療 治療計画 光学CT装置 放射線化学 化学線量計

1. 研究開始当初の背景

近年、放射線治療の分野において、正常な組織へのダメージを低減しつつ、腫瘍の形に合わせて線量を集中させて X 線照射を行う強度変調放射線治療や、陽子線や炭素線、さらには中性子線を用いた粒子線治療などの高精度放射線治療が普及してきている。これらの放射線治療ではその性能に合わせた高い位置精度や線量精度が求められる。通常、治療に先立って X 線 CT 画像などを元に精密な治療計画が立てられる。この精度を検証するために、これまでは電離箱線量計や半導体検出器、あるいはフィルムといった点状・面状の線量計が用いられてきた。一方で、放射線治療計画の更なる品質管理・品質保証 (QC・QA) の観点からその線量評価を直接三次元 (3D) 的に行うことが求められており、その候補のひとつとして 3D ゲル線量計が注目を集めている[1-3]。

3D ゲル線量計とは、放射線感受性物質を含む水溶液をゼラチン等のゲル化剤で固化した化学線量計の一群である。放射線照射による溶液中の生成物はゲルマトリクスによって空間的に保持され、その変化を MRI や X 線 CT、光学 CT (Optical CT, OCT) 装置を用いて直接三次元画像として読み出すことにより三次元吸収線量分布を評価することができる。また、その重量の 90% 前後が水であることから水 (組織) 等価とみなすことができ、生体に対する吸収線量測定に適している。

筆者らは先の研究 (科研費基盤(C)17K09072) において、有機色素を用いた新規なラジオクロミックゲル線量計の探索・開発を進めていく中で、ポリビニルアルコールとヨウ素の錯体 (PVA-Iodide, PVA-I) 形成に基づく発色を利用した新規なラジオクロミックゲル線量計[4,5]を見出した。この PVA-I ゲル線量計はこれまでに知られている放射線感受性色素を用いたラジオクロミックゲル線量計 (ミセルゲル線量計 [6,7]) と比べてより高い線量感度や時間的・空間的安定性を示し、線量応答が線量率に依存しないなどの優れた特性をもつことが示された。さらに特筆すべきはこの PVA-I ゲル線量計は含まれる還元糖の働きにより、加熱処理によって I_3^- が I^- に完全に還元され、初期化 (脱色)・再利用することができることが明らかになった[8]。

2. 研究の目的

一般にゲル線量計はその基礎特性 (線量感度、線量率・エネルギー依存性、積算性、時間・空間安定性等) が組成や添加剤の量・種類により大きく変化する (逆に言えばコントロールできる) 。

そこでまず、

- ・小型試料を用いて PVA-I (PVA-GTA-I) ゲル線量計の組成の最適化、及び各種添加剤の影響を調べる。
- ・中型・大型ゲルファントムを用いて臨床への応用 (位置検出、深部線量分布の評価等) を試みる。さらに自作 OCT による 3D 線量評価の可能性を検証する。

これらの結果から、3D ラジオクロミックゲル線量計の放射線治療における QC・QA ツールとしての利用方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) ゲル線量計の作製

本研究では大きく分けて 2 種類の PVA-I 型ラジオクロミックゲル線量計を開発した。ひとつは物理架橋を利用してゲル化した「PVA-I ラジオクロミックゲル線量計」、もうひとつは化学架橋によりゲル化した「PVA-GTA-I ラジオクロミックゲル線量計」である。

PVA-I ラジオクロミックゲル線量計[4,5]

このゲル線量計は、部分けん化型 PVA (けん化度: 86~90 mol%)、ヨウ化カリウム (KI)、フルクトース、ゲランガム (GG)、および蒸留水からなる。ゲル化剤として用いた GG は植物組織培養で一般に使用されるゲル化剤である。GG ゲルは透明度が高く、微量の陽イオン (ここでは K^+) による物理架橋によってゲル化する。また、一度ゲル化すると 100 以上に加熱しても融解せず熱安定性が高い。

PVA-GTA-I ラジオクロミックゲル線量計[8]

PVA-GTA-I ゲル線量計では PVA-GTA-Fricke ゲル[9,10] に習って PVA 濃度を 10 wt% とし、架橋剤としてグルタルアルデヒド (Glutaraldehyde, GTA) を使用している。さらに架橋を促進するための酸触媒としてグルコノデルタラクトン (Glucono- δ -lactone, GDL) を添加している。すべての試薬は室温での調合が可能で、容器に充填後、45℃ で 12 時間加熱することにより固化する。化学架橋ゲルであるため再融解せず熱安定性が高いのが利点である。

(2) 照射

広島平和クリニック (広島市) の医療用直線加速器からの 6 MV-X 線を用いた。

基礎特性を調べるための試料は小型試料容器 (PMMA キュベット, 4.5 mL) に充填され、タフウォーターファントム中に配置して照射を行った。

臨床応用にはアクリルの角筒容器や PET ボトルを使用し、水槽あるいは専用水ファントム中に配置して照射を行った。

(3) 測定

基礎特性については小型試料を用い、その吸光度変化を紫外可視分光光度計により測定し、線量応答特性評価を行った。

臨床応用では、透過型 2 次元スキャナ、および自作の OCT 装置を用いて読み取った。

4. 研究成果

(1) PVA-I ラジオクロミックゲル線量計

図 1 (左) に照射後の試料 (PMMA キュベット) を示す。照射前は無色透明であるが、照射後は吸収線量に応じて赤く発色する。図 1 (右) はそれらの吸収スペクトルを示している。この吸収スペクトルは 490 nm 付近を中心にほぼ単一の吸収ピークを示す。組成の最適化でフルクトース濃度を上げると自動酸化 (バックグラウンドの上昇) が大幅に抑制できることがわかった。ただし過剰なフルクトースは過剰な還元によるフェーディング (消色) を引き起こすので、その後の研究から最適な濃度として 300 mM を標準組成とした。

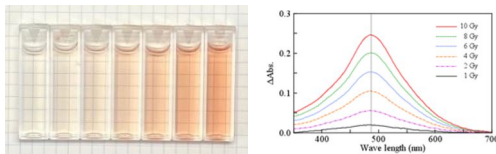


Figure 1 照射された PVA-I ゲル線量計 (左) と吸収スペクトル (右)。

臨床応用 (1) X 線および電子線の PDD 計測 [11,12]

図 2a に照射時のファントムセットアップと照射された PVA-I ゲル線量計の画像、図 2b にフラットベッドスキャナ (ES-10000 G: エプソン社製) を用いて計測した X 線と電子線の深部量百分率 (PDD) を示す。PVA-I ゲル線量計を充填したアクリル容器 (X 線用: 2 cm×2 cm×25 cm, 電子線用: 2 cm×2 cm×12 cm) を水中に配置し、線源水面間距離 (SSD) を 100 cm に設定して、照射野 10 cm×10 cm で照射した。照射により、深部方向にかけて赤く発色していることが目視でも確認できる。スキャナによる読み出しは、TIFF 画像から最も赤色を吸収する青色チャネルを抽出し、正味の光学濃度を算出した。

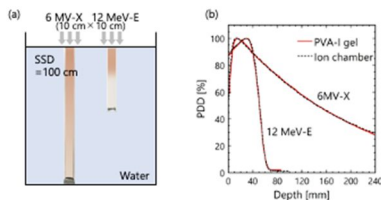


Figure 2 PVA-I ゲル線量計を用いた PDD 計測

a: PVA-I ゲル線量計を用いた PDD 計測のファントムセットアップと 6 MV-X 線, 12 MeV-電子線を照射した PVA-I ゲル線量計のスキャン画像, b: PVA-I ゲル線量計と電離箱で計測した PDD の比較。

X 線、電子線共に PVA-I ゲル線量計により計測した PDD は、電離箱計測値とよく一致している。電離箱を用いた電子線の PDD 計測は深さでエネルギーが急激に変化するため、深さごとに水と空気の阻止能比にて計測値を補正する必要があるが、水等価な PVA-I ゲル線量計はそのような補正が不要である。小照射野計測をはじめ、エネルギー依存性や再利用性なども良好な結果を得ており、特に電子線を利用する実臨床において、PVA-I ゲル線量計は有用な深部線量計測ツールになりうると考えている。現在、最適なファントムサイズや計測法など、さらなる改良を試みている。

臨床応用 (2) SRS の 3D アイソセンタ位置評価 [13]

PVA-I ゲル線量計とスキャナを用いて、定位放射線照射 (SRS) の 3D アイソセンタ位置評価を行った。SRS のアイソセンタ位置評価には、従来からフィルムや EPID (electronic portal imaging device) を用いた Winston-Lutz (WL) テストが広く実施されている。この WL テストは、金属球をアイソセンタに設置して多方向から小照射野で照射し、画像化された金属球と照射野の重心のズレから二次元アイソセンタ位置の変位を評価する試験である。しかし、この手法で 3D アイソセンタ位置を把握するのは困難で、レーザー位置修正には試行錯誤を要する。一方、筆者らが開発した WL ゲルファントム (金属球を埋め込んだ PVA-I ゲル線量計) (図 2a, 2b) は、多方向から照射した後に正面と側面の 2 方向からスキャンし、得られた画像から金属球と放射線照射野の重心のズレを求めることで、3D アイソセンタ位置の評価が簡便にできる。放射線照射野は、2 方向のスキャン画像 (青色チャネル) から 40% 強度の画素値を閾値としてエッジ抽出し、モルフォロジー解析によりその重心を算出した (図 3c)。また、この WL ゲルファントムは、ガントリや治療台との干渉がなく、実臨床と同じビーム設定で照射することが可能である。WL ゲルファントムに 6 アークの SRS を想定した照射を行い、同じ照射とアニーリング (初期化) を繰り返しながら、1 週間ごとに 5 か月間で 24 回、アイソセンタ位置試験を行った結果を図 4 に示す。二次元および三次元プロットから、長年にわたって幾何学的アイソセンタと放射線アイソセンタの位置変位が 0.5mm 以内で維持されていることがわかる。このように、PVA-I ゲル線量計は線量評価のみならず位置検出器としても活用できる。

臨床応用 (3) OCT の作製と SRS の 3D アイソセンタ位置評価 [14,15]

ラジオクロミックゲル線量計の 3D 読取りは一般的に OCT にて行われ、放射線照射による三次元的な線量分布を直接評価できるため、放射線治療分野での応用が期待されている。本研究では、PVA-I ゲル線量計について、自作した OCT 装置による計測を行い、その 3D 線量分布の計測精度と再利用性を評価することを目的とした。

直径 9.5 cm の PET 容器に充填した PVA-I 線量計に対し、医療用直線加速器からの 6 MV-X 線を用いて、小径の脳腫瘍を想定した SRS 照射を施行した。その際、線量計は水ベース SRS ゲルファントムの内部に設置した。また、SRS 照射は予めラジオクロミックフィルムにて精度検証を行い、ガンマ解析(2%/2 mm)にて 95%以上のパス率を示すことを確認した。

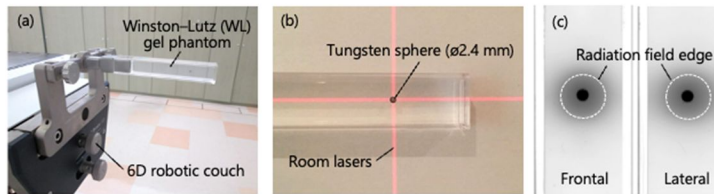


Figure 3 開発した WL ゲルファントム

- a: PVA-I ゲル線量計を用いた Winston-Lutz (WL) テストのセットアップ
- b: 治療室レーザーを基準にした WL ゲルファントム (金属球) のアライメント
- c: フラットベッドスキャナで取得した正面と側面 2 方向の青色チャンネル画像

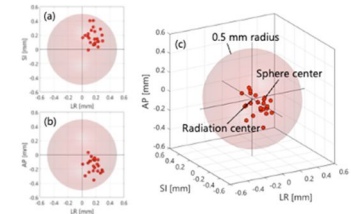


Figure 4 WL ゲルファントムを用いた SRS

アイソセンタ位置試験の結果

- a, b: 二次元プロット
- c: 三次元プロット

OCT は、25 mm 固定焦点レンズを装着した USB カメラ、回転テーブルおよび緑色 LED 光源を直列に配置した構造とし (図 5)、回転テーブルに照射後の線量計を懸下し水槽内に設置した後、線量計の回転および撮影を自動的に繰り返すことで全周の投影像を取得した。続いて、投影像から再構成した三次元画像を線量変換することで三次元線量マップを作成し、その計測精度を評価した (図 6)。さらに、計測後の線量計はアニーリング処理にて消色し、上記手順を複数回繰り返すことで再利用性を評価した。

PVA-I ゲル線量計に対して行った SRS 照射の実測の三次元線量分布は、治療計画装置の計算値と良く一致し、ガンマ解析(2%/2 mm)にて 90%以上のパス率を示した (図 7)。また、繰り返し実験において三次元線量分布に有意な変化はみられなかった。

自作した OCT を用いて PVA-I ゲル線量計の計測を行った。その結果、得られた三次元線量分布は高い計測精度を示し、優れた再利用性を確認できた。

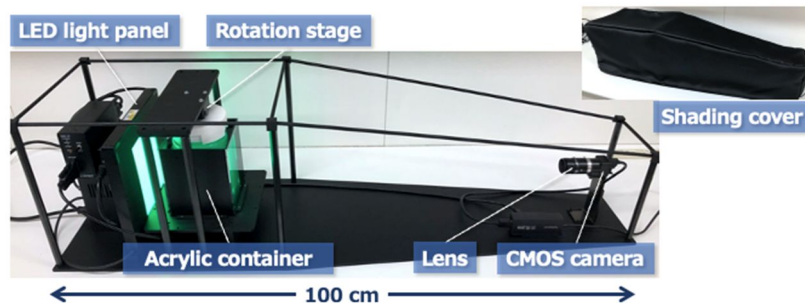


Figure 5 自作 OCT 装置

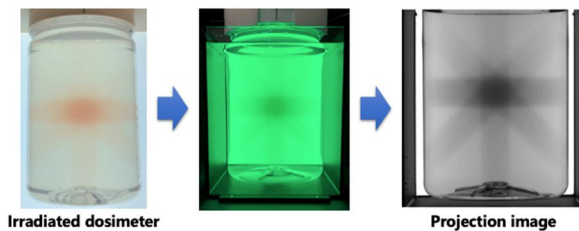


Figure 6 照射されたゲル線量計と投影画像

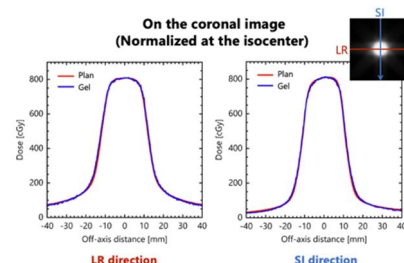


Figure 7 治療計画 (plan) と実測値の比較

(2) PVA-GTA-I ラジオクロミック線量計

PVA-GTA-I ゲル線量計は、ゲル化剤 (GG) を使用せずに、PVA の濃度を上げ (10 wt%)、グルタルアルデヒドで化学架橋することによりゲル化させたものである。発色原理と基本特性は

PVA-I ゲル線量計と同じであるが、その透明度がほぼ水と同程度に高くなることと線量感度が PVA-I ゲル線量計の約 3 倍に増加する。また、発色中心 (PVA の非けん化部位) がゲルマトリクスに含まれることからより高い空間安定性 (発色の不拡散) を示す。

線量応答に対する組成の影響 [8]

PVA-I ゲル線量計の場合と同様、まずカリウム塩の種類、および PVA のけん化度 (Degree of saponification, DS) と重合度 (Degree of polymerization, DP) の違いによる線量応答への影響を調べた。その結果、図 8a に示すように PVA-I ゲル線量計の場合と同様、線量応答はカリウム塩のカチオンの種類には依存しないことがわかった。また、PVA の DS と DP を変えて作製した PVA-GTA-I ゲル線量計も、DS が 98mol% のもの以外はほとんど影響がないことがわかった (図 8b)。

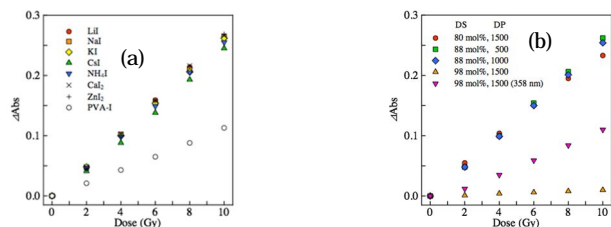


Figure 8 それぞれ異なるカリウム塩(a)および DS と DP (b) をもつ PVA-GTA-I ゲル線量計の用量反応。白丸(○)は比較のための PVA-I ゲル線量計の応答を示す [5]。

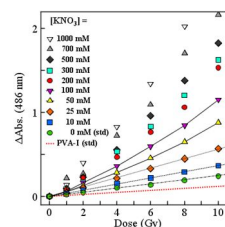


Figure 9 PVA-GTA-I ゲル線量計の線量応答に対する硝酸塩濃度の影響

水和電子捕捉剤による増感効果

前述のように、ヨウ化物イオン (I^-) が水の放射線分解によって生じたラジカル (R^\cdot) によって酸化され、ヨウ素分子 (I_2) が生成する。このとき、生成したヨウ素ラジカル (I_2^\cdot) は水和電子 (e_{aq}^-) と再結合して I^- に戻り、発色に必要な I_3^- の生成を阻害している可能性があると考えた。つまりこの水和電子を除去することができれば、 I_3^- の生成が促進され、増感効果が期待できる。一般に水和電子は水素イオン (H^+) によって容易に捕捉されるが、酸性条件下では I^- の自動酸化が促進され (バックグラウンドの増加)、かつフルクトースによる I_3^- の還元 (初期化) が阻害される。そこで本研究では中性の水和電子捕捉剤の効果を調べた [16]。水和電子捕捉剤としては硝酸カリウム (KNO_3 , 0, 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000 mM) を添加した。

図 9 は各 KNO_3 濃度に対する線量応答を示す。 KNO_3 濃度の増加とともに吸光度 (発色) が急激に増加することがわかる。しかし、感度の向上は KNO_3 濃度だけでなく吸収線量にも依存し、 KNO_3 濃度の増加に伴って線量応答の直線性が損なわれている。この理由はまだ明らかではないが、水和電子との再結合を阻害することにより生き残るヨウ素ラジカルに加えて、水和電子を捕捉した硝酸イオン (NO_2^\cdot) に起因するさらなるヨウ素ラジカルの生成等が示唆される。

PVA とヨウ素の錯体形成による発色を利用した新規なラジオクロミックゲル線量計はこれまでに知られているラジオクロミックゲル線量計と比べて、様々な点でより優れた線量応答特性を有している。特にその再利用性は画期的な特性である。

本研究では PVA-I ラジオクロミックゲル線量計の臨床応用をいくつか考案しその有用性を示すことができた。また、まだプロトタイプではあるが OCT を作製することができたので大型ゲルファントムを用いた 3D 線量分布評価も可能になってきた。加えて、その感度や安定性に、より優れた PVA-GTA-I ゲル線量計と組み合わせることにより、さらに高精度の線量評価が可能になるであろう。

今後 OCT のさらなる改良と PVA(-GTA)-I ラジオクロミックゲル線量計の高機能化を組み合わせることで 3D ラジオクロミックゲル線量計の放射線治療における QC・QA ツールとしての利用方法を開発し普及への一助としたい。

< 引用文献 >

- [1] L. J. Schreiner, J. Phys.: Conf. Ser., **3** (2004) 9.
- [2] C. Baldock, et al, Phys. Med. Biol., **55** (2010) R1.
- [3] Y. De Deene, Gels, **8** (2022) 599.
- [4] S. Hayashi, et al, J. Phys.: Conf. Ser. **1305** (2019) 012031.
- [5] S. Hayashi, et al, Radiat. Meas. **131** (2020) 106226.
- [6] S. Babic, et al, J. Phys.: Conf. Ser., **164** (2009) 012044.
- [7] K. Jordan, N. Avvakumov, Phys. Med. Biol., **54** (2009) 6773.
- [8] S. Hayashi, et al, J. Phys.: Conf. Ser. **2167** (2022) 012014.
- [9] S. Gallo, et al, Radiat. Phys. Chem., **160** (2019) 35.
- [10] A. Marini, et al, Radiat. Meas., **106** (2017) 618.
- [11] K. Fujino, K. Ono, S. Hayashi, et al, Radiat. Meas., **135** (2020) 106338.
- [12] K. Ono, K. Fujino, S. Hayashi, et al, Radiat. Meas., **135** (2020) 106340.
- [13] K. Ono, K. Fujino, R. Kurihara, et al, Phys. Med. Biol., **66** (2021) 205001.
- [14] K. Fujino, et al, 第 12 回 3 次元ゲル線量計研究会要旨集 (2023).
- [15] K. Fujino, et al, 第 80 回日本放射線技術学会総会学術大会予稿集 (2024).
- [16] S. Hayashi, et al, IUPESM: World Congress 2022 (poster).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Watanabe Yusuke, Maeyama Takuya, Mizukami Shinya, Tachibana Hidenobu, Terazaki Tsuyoshi, Takei Hideyuki, Muraishi Hiroshi, Gomi Tsutomu, Hayashi Shin-ichiro	4. 巻 63
2. 論文標題 Verification of dose distribution in high dose-rate brachytherapy for cervical cancer using a normoxic <i>N</i>-vinylpyrrolidone polymer gel dosimeter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 838 ~ 848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rrac053	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 -
1. 著者名 林慎一郎	4. 巻 113
2. 論文標題 ポリビニルアルコール - ヨウ素錯体の発色を利用したラジオクロミックゲル線量計の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 放射線化学	6. 最初と最後の頁 5-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 小野薫, 池田幸恵, 藤野圭介, 栗原凌佑, 林慎一郎, 赤木由紀夫, 廣川裕	4. 巻 113
2. 論文標題 ラジオクロミックゲル線量計の臨床応用 反復利用型PVA-Iゲル線量計を用いた3次元 Winston-Lutzテスト	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 放射線化学	6. 最初と最後の頁 13-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 林慎一郎	4. 巻 23
2. 論文標題 ポリビニルアルコール - ヨウ素錯体の発色を利用した3Dラジオクロミックゲル線量計の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SIS Letters (ヨウ素学会誌)	6. 最初と最後の頁 9-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 林慎一郎	4. 巻 74-2
2. 論文標題 3次元ゲル線量計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 109-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Ono Kaoru, Fujino Keisuke, Kurihara Ryosuke, Hayashi Shin-ichiro, Akagi Yukio, Hirokawa Yutaka	4. 巻 66
2. 論文標題 Three-dimensional Winston-Lutz test using reusable polyvinyl alcohol-iodide (PVA-I) radiochromic gel dosimeter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 205001 ~ 205001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ac279d	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 -

1. 著者名 Hayashi Shin-ichiro, Ono Kaoru, Fujino Keisuke, Kurihara Ryosuke	4. 巻 2167
2. 論文標題 Effects of PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter components on optical dose-response	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2167/1/012014	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 Tanaka Kenichi, Kajimoto Tsuyoshi, Mitsuyasu Aruma, Ito Yuto, Hayashi Shin-ichiro, Sakurai Yoshinori, Tanaka Hiroki, Takata Takushi, Bengua Gerard, Endo Satoru	4. 巻 2167
2. 論文標題 Measurement of spatial fluence distribution of neutrons and gamma rays using MAGAT-type gel detector doped with LiCl for BNCT at Kyoto University Reactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012006 ~ 012006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2167/1/012006	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 Inoue K., Watanabe Y., Maeyama T., Mizukami S., Hayashi S., Terazaki T., Muraishi H., Gomi T., Shimono T.	4. 巻 2167
2. 論文標題 Dosimetry in high-dose-rate brachytherapy with a radio-fluorogenic gel dosimeter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012032 ~ 012032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2167/1/012032	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 Fujino Keisuke, Ono Kaoru, Hayashi Shin-ichiro, Yasuda Hiroshi, Akagi Yukio, Hirokawa Yutaka	4. 巻 135
2. 論文標題 Influence of the components of a radiochromic PVA-Iodide gel dosimeter on the thermal and spatial stability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiation Measurements	6. 最初と最後の頁 106338 ~ 106338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radmeas.2020.106338	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 -

1. 著者名 Ono Kaoru, Fujino Keisuke, Hayashi Shin-ichiro, Akagi Yukio, Hirokawa Yutaka	4. 巻 135
2. 論文標題 Dosimetric impact of iodine content in a polyvinyl alcohol-iodide radiochromic gel dosimeter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiation Measurements	6. 最初と最後の頁 106340 ~ 106340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radmeas.2020.106340	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 -

1. 著者名 Watanabe Yusuke, Maeyama Takuya, Mochizuki Anri, Mizukami Shinya, Hayashi Shin-ichiro, Terazaki Tsuyoshi, Muraishi Hiroshi, Takei Hideyuki, Gomi Tsutomu, Shimono Tetsunori	4. 巻 65
2. 論文標題 Verification of dose distribution in high-dose-rate brachytherapy using a nanoclay-based radio-fluorogenic gel dosimeter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 175008 ~ 175008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ab98d2	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 -

1. 著者名 小野 薫, 林 慎一郎	4. 巻 38
2. 論文標題 ゲル線量計による三次元線量評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 月刊インナービジョン	6. 最初と最後の頁 34 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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36件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Ryosuke Narita, Yoshinori Sakurai, Shin-ichiro Hayashi
2. 発表標題 A characterization of LCV micelle gel dosimeters for boron neutron capture therapy
3. 学会等名 13th International Conference on 3D and Advanced Dosimetry (IC3DDose2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 栗原凌佑, 小野薫, 池田幸恵, 藤野圭介, 林慎一郎, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 反復利用型PVA-Iゲル線量計による小照射野電子線のPDD計測
3. 学会等名 第79回 日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 BNCTにおける品質保証のための色素ゲル線量計の最適化検討
3. 学会等名 第19回 日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Ryosuke Kurihara, Keisuke Fujino, Sachie Ikeda, Kaoru Ono
2. 発表標題 Influence of the composition on the dose-response of PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 17th International Congress of Radiation Research (ICRR2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤野圭介, 林慎一郎, 栗原凌佑, 池田幸恵, 小野薫, 廣川裕
2. 発表標題 反復利用型PVA-Iゲル線量計を用いた3次元線量評価
3. 学会等名 第26回 ヨウ素学会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 BNCTにおける品質保証のためのミセルゲル線量計の最適化
3. 学会等名 第126回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野薫, 池田幸恵, 藤野圭介, 栗原凌佑, 林慎一郎, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 肝癌定位放射線治療計画におけるヨード造影剤の影響 —PVA-Iゲル線量計を用いたPDD評価—
3. 学会等名 第126回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗原凌佑, 小野薫, 池田幸恵, 藤野圭介, 林慎一郎, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 PVA-Iゲル線量計による3次元線量分布計測に影響する因子の検討
3. 学会等名 第126回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 姜裕錫, 林慎一郎
2. 発表標題 光学CT装置を用いたPVA-Iゲル線量計の反復利用性の検討
3. 学会等名 第126回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Ryosuke Kurihara, Keisuke Fujino, Sachie Ikeda, Kaoru Ono
2. 発表標題 Potential of a novel radiochromic gel dosimeter using a boric acid-crosslinked PVA-iodide complex
3. 学会等名 The 20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 ホウ素中性子捕捉療法における品質保証に適したミセルゲル線量計の組成
3. 学会等名 第66回放射線化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 ホウ素中性子捕捉療法の品質保証を目的としたミセルゲル線量計の組成最適化検討
3. 学会等名 日本放射線影響学会第66回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 若林源一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 ミセルゲル線量計の光子線および中性子線に対するエネルギー依存性の評価
3. 学会等名 日本保健物理学会第56回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田亮介, 林慎一郎, 櫻井良憲
2. 発表標題 ホウ素中性子捕捉療法のためのLCVミセルゲル線量計の中性子・ガンマ線照射特性評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2024年春の年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤野圭介, 栗原凌佑, 小野薫, 池田幸恵, 林慎一郎, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 光学CT装置によるラジオクロミックゲル線量計計測システムの構築および3次元線量評価
3. 学会等名 第80回 日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Ryosuke Narita, Yoshinori Sakurai
2. 発表標題 Preliminary study for 3D dose distribution evaluation in neutron capture therapy using a PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 20th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT20) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryosuke Narita, Yoshinori Sakurai, Shin-ichiro Hayashi
2. 発表標題 A study on dose components discrimination estimation methods using micellar gel dosimeters for quality assurance in boron neutron capture therapy
3. 学会等名 20th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT20) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 池田幸恵, 小野薫, 藤野圭介, 栗原凌佑, 林慎一郎, 日置一成, 宮沢正則, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 多発転移性脳腫瘍に対する定位放射線照射のポリマーゲル3次元線量計測
3. 学会等名 第78回 日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Kaoru Ono, Ryosuke Kurihara, Keisuke Fujino
2. 発表標題 Improvement of the sensitivity of a PVA-iodide radiochromic gel dosimeter using a hydrated-electron scavenger
3. 学会等名 IUPESM World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Kurihara, Kaoru Ono, Sachie Ikeda, Keisuke Fujino, Shin-ichiro Hayashi, Yukio Akagi, Yutaka Hirokawa
2. 発表標題 PDD measurements of electron beams using a reusable radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 第124回 日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田幸恵, 小野薫, 藤野圭介, 栗原凌佑, 林慎一郎, 宮沢正則, 赤木由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 円筒型半導体アレイとポリマーゲル線量計によるノンコプラナーVMATの3次元線量検証
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第35回学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤野圭介, 小野薫, 池田幸恵, 栗原凌佑, 林慎一郎, 五東弘昭, 宮沢正則, 赤木 由紀夫, 廣川裕
2. 発表標題 反復利用型 PVA I ゲル線量計 による 3 次元線量評価 の有用性
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第35回学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Kaoru Ono, Keisuke Fujino, Ryosuke Kurihara
2. 発表標題 Influence of the components of a PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter on the optical dose response
3. 学会等名 11th International Conference on 3D and Advanced Dosimetry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Tanaka, Yuto Ito, Yuto Murakami, Tsuyoshi Kajimoto, Shin-ichiro Hayashi, Yoshinori Sakurai, Hiroki Tanaka, Takushi Takata, Gerard Bengua, Satoru Endo
2. 発表標題 Measurement of spatial fluence distribution of neutrons and gamma rays using MAGAT-type gel detector doped with LiCl for BNCT at Kyoto University Reactor
3. 学会等名 11th International Conference on 3D and Advanced Dosimetry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Inoue, Y. Watanabe, T. Maeyama, A. Mochizuki, S. Mizukami, S. Hayashi, T. Terazaki, H. Muraishi, T. Gomi, T. Shimono
2. 発表標題 Dosimetry in high-dose-rate brachytherapy with a radio-fluorogenic gel dosimeter
3. 学会等名 11th International Conference on 3D and Advanced Dosimetry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井良憲, 柿本有貴, 林慎一郎, 高田卓志, 田中浩基
2. 発表標題 PVA-GTA-1ラジオクロミックゲル線量計を用いたBNCT照射場の2次元線質弁別評価に関する検討
3. 学会等名 第17回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中憲一, 梶本剛, 櫻井良憲, 林慎一郎, 光安歩真, 田中浩基, 高田卓志, 遠藤暁
2. 発表標題 MAGATゲルを用いた熱中性子および線の弁別測定
3. 学会等名 第17回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinori Sakurai, Yuki Kakimoto, Shin-ichiro Hayashi, Takushi Takata, Hiroki Tanaka
2. 発表標題 A Study on 2D Component-Discrimination Estimation for BNCT Irradiation Field using Radiochromic Gel Dosimeter
3. 学会等名 The 9th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林慎一郎
2. 発表標題 アミロース - ヨウ素錯体を利用した3Dラジオクロミックゲル線量計の開発
3. 学会等名 第24回 ヨウ素学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinori Sakurai, Shin-ichiro Hayashi
2. 発表標題 A study on 2D component-discrimination estimation for BNCT irradiation field using a PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 19th International Congress on Neutron Capture Therapy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林慎一郎、小野薫、藤野圭介、木下佳祐、栗原凌佑
2. 発表標題 How to make a PVA-I radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗原凌佑、小野薫、藤野圭介、林慎一郎、赤木由紀夫、廣川裕
2. 発表標題 PDD measurements of electron beams with a reusable radiochromic gel dosimeter
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K Ono, T Sera, T Shiinoki, S Hayashi, K Fujino, Y Akagi, Y Hirokawa
2. 発表標題 Three-Dimensional Isocenter Verification for Real-Time Tumor-Tracking Radiotherapy System Using a Reusable PVA-I Radiochromic Gel Dosimeter
3. 学会等名 AAPM 2020 62th Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林慎一郎
2. 発表標題 ヨウ素錯体を利用したラジオクロミックゲル線量計の可能性
3. 学会等名 第63回 放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田純吾, 田中憲一, 林慎一郎, 光安歩真, 梶本剛, 遠藤暁
2. 発表標題 PVA-I / B(OH)3; 色素ゲル線量計の線量応答特性と組成依存性の測定
3. 学会等名 日本原子力学会中国・四国支部第14回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柿本有貴、林慎一郎、高田卓志、田中浩基、櫻井良憲
2. 発表標題 BNCTにおけるPVA-GTA-1ゲル線量計を用いた2次元線質弁別評価に関する研究
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

3Dゲル線量計研究会 http://jc3ddose.deca.jp/

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
研究分担者	五東 弘昭 (Goto Hiroaki) (80635235)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	小林 毅範 (Kobayashi Takenori) (10459365)	帝京大学・医療技術学部・教授 (32643)	

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