

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：35309

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K07652

研究課題名（和文）マンモグラフィにおける乳房の三次元での被ばく線量分布の解明

研究課題名（英文）Elucidation of three-dimensional exposure dose distribution of breast in mammography

研究代表者

五反田 龍宏（Gotanda, Tatsuhiro）

川崎医療福祉大学・医療技術学部・准教授

研究者番号：60711447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：乳房は放射線感受性が高いため、マンモグラフィによる被ばくの線量評価は安全性の観点から重要である。本研究では、マンモグラフィの詳細な被ばく評価のために、マンモグラフィファントムの開発とラジオクロミックフィルムを用いた三次元での被ばく線量分布の解明を目的としている。初年度は、乳房の脂肪と等価材質ならびに乳腺と等価材質を一辺10 mmの正立方体に成型し、ブロック状ファントムを作成した。2年目は、ブロック状ファントムに配置するラジオクロミックフィルムの適用性について検証した。3年目から最終年度は、マンモグラフィの線量評価を行い、マンモグラフィの三次元的な線量分布が計測可能であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、マンモグラフィの線量評価には、平均乳腺線量が用いられており、日本国における算出方法は、ガイドラインによってDanceのシミュレーションが主流となっている。そのため、マンモグラフィは実測による詳細な線量評価ができていないことと、マンモグラフィの線量評価を可能とするファントムが存在しないことが問題となっていた。本研究では、被検者毎に異なる乳房の形状を再現できるブロック状ファントムと線量分布を測定できるラジオクロミックフィルムを使用することで、マンモグラフィの三次元での線量評価を可能にした。

研究成果の概要（英文）：The breast is highly sensitive to radiation, so the dose assessment of mammography is important from a safety perspective. This study aims to develop a mammography phantom and investigate the three-dimensional dose distribution using radiochromic film for detailed dose evaluation in mammography.

In the first year, a block phantom was created by molding materials equivalent to the fatty tissue and glandular tissue of the breast into a 10 mm cubic shape. In the second year, the applicability of radiochromic film placed in the block phantom was verified. From the third year to the final year, dose assessment of mammography was conducted, and it was demonstrated that the three-dimensional dose distribution in mammography can be measured.

研究分野：放射線科学

キーワード：線量計測 マンモグラフィ ラジオクロミックフィルム 乳房ファントム

1. 研究開始当初の背景

マンモグラフィで使用する X 線は非常に低い実効エネルギーであり、ヒール効果やフィルタへの斜入射などで線量分布も均一ではないため、線量評価が困難である。現在、マンモグラフィの線量評価には、平均乳腺線量が用いられており、日本国における算出方法は、ガイドラインによって **Dance** のシミュレーションが主流となっている。平均乳腺線量の概念は、乳腺への被ばくに対する一つの指標として効果的である一方、照射線量からシミュレーションによって乳腺への平均した線量を算出しているに過ぎないため、線量分布による詳細な線量評価ができていないという問題点と、マンモグラフィの線量評価を可能とするファントムが存在しないため、乳腺への線量を実測して評価できないという 2 つの問題点がある。

本研究では、一つ目の問題点解決のために、ラジオクロミックフィルムの特性に着目した。ラジオクロミックフィルムは、二次元線量分布が計測可能で、厚みが薄くかつ自由に形を変えることができるためファントムのどんな場所でも配置が可能である。しかし、マンモグラフィは低線量かつ低実効エネルギーの X 線が使用されるため、推奨されるラジオクロミックフィルムは存在していない。そのため、既存のラジオクロミックフィルムの精度を上げて、マンモグラフィに適用させる必要がある。申請者らの研究において、透過用フィルムに対して反射型設定でスキャンすることで低線量領域において感度を向上させる方法 (**Gotanda et al. Australas Phys Eng Sci Med 2013**)、ラジオクロミックフィルムに特定の紫外線を均一照射し、その濃度変化を差分することで濃度ムラを低減させる方法 (**Katsuda et al. J Appl Clin Med Phys 2016**) などが立証されており、既存のラジオクロミックフィルムにおいても、マンモグラフィの線量評価が可能であると考えた。

二つ目の問題点に関しては、一辺が 10 mm の正立方体の乳房等価材質のファントムを組み合わせて、乳房ファントムを作成することで解決できると考えた。このファントム内にラジオクロミックフィルムであれば自由に配置できるため、さまざまな深度での線量分布の評価も可能となる。

2. 研究の目的

女性の乳房は放射線感受性が高いため、マンモグラフィによる被ばくの線量評価は安全性の観点から重要である。しかしながら、現時点での標準的な方法は平均乳腺線量を算出するのみで、乳房全体の線量分布を実測する方法は確立されていない。本研究は、マンモグラフィの被ばく線量評価を行うための乳房ファントムを開発することと、それに適したラジオクロミックフィルムを利用して三次元での被ばく線量分布を評価することによって、被検者の乳房への被ばく線量を詳細に解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ブロック状乳房ファントムの開発

乳房の脂肪と等価材質ならびに乳腺と等価材質の 10 mm 厚の板状の樹脂を、一辺 10 mm の正立方体に成型 (図 1) し、乳房ファントムを作成する方法を検討した。この時の切断で生じる誤差は ± 0.03 mm で、高精度にブロック状乳房ファントムを作成することが可能だった。ブロック状乳房ファントムを乳房に似た形にするために、X 線吸収の少ないセロハンテープで上面下面を接着し固定した。乳腺含有率は任意に変更が可能であるが、プロトタイプとして乳腺の分布は塊となるよう配置し設計した (図 2)。ブロック状乳房ファントムは 3 段の構成とし、1 段目は脂肪のみの層、2 段目は乳腺と脂肪が混合にある層、3 段目は脂肪のみの層とした。各層に線量計測用フィルムを配置するため、ブロック状乳房ファントムの縦軸での固定は行わないよう設計した。



図 1. 乳房の脂肪と等価材質ならびに乳腺と等価材質の 10 mm 厚の板状の樹脂 (ファントムブロック)



図 2. ブロック状乳房ファントム

(2) ラジオクロミックフィルムの選択と測定方法の確立

マンモグラフィの線量分布を評価するために適したラジオクロミックフィルムの選択とラジオクロミックフィルムを高精度にスキャンする測定方法の2項目を検討した。

マンモグラフィに適したラジオクロミックフィルムの検討

低線量かつ低実効エネルギーが利用されるマンモグラフィに適したラジオクロミックフィルムの選択を行った。検証するラジオクロミックフィルムは、**GAFCHROMIC EBT3 (EBT3)**と**GAFCHROMIC XR-QA2 (XR-QA2)**とした。マンモグラフィで使用される実効エネルギー領域でのラジオクロミックフィルムのエネルギー依存性の検討と、低線量領域における線量・濃度校正曲線からラジオクロミックフィルムの感度の検討を実施した。

新しく導入したスキャナの特性評価とスキャン方法の検討

研究で使用していた **A3** フラットベッドスキャナ (**EPSON**) が新しく更新され型番が『**ES-10000G**』から『**DS-G20000**』となった。構造の違いは、光源がキセノンから **LED** となり、スキャン時の光源の安定性が向上している。モアレアーチファクト等の影響を検討し、より再現性の高い最適な条件でのスキャン方法を解明した。

(3) マンモグラフィの線量分布の実測

ブロック状乳房ファントムを任意に組み合わせて作成したマンモグラフィファントムの中に計測に最適なラジオクロミックフィルムを配置して、マンモグラフィの線量分布を各階層において測定した(図3)。各階層の線量分布を三次元再構成して深度を含めた三次元線量分布を作成し、線量評価を行った。

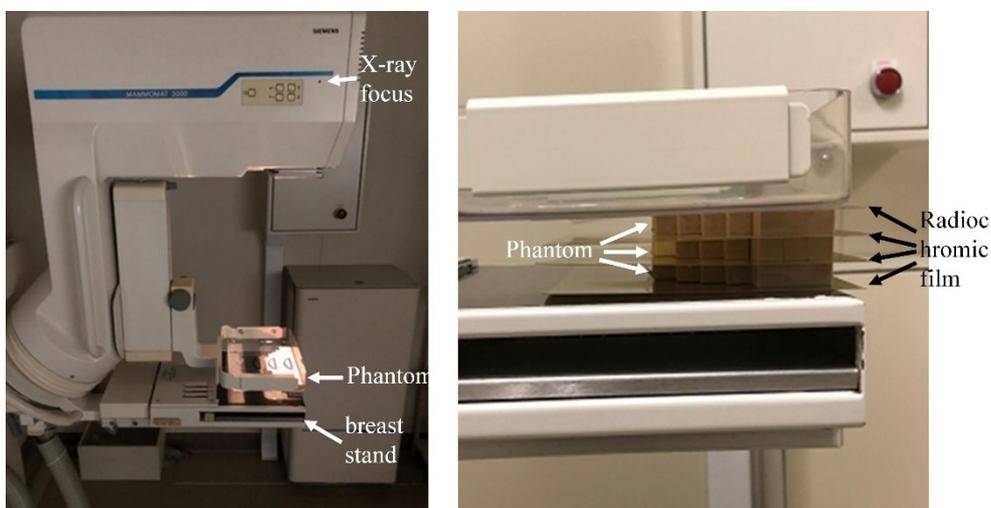


図3. マンモグラフィ装置とブロック状ファントムとラジオクロミックフィルムの配置

(4) 新しいラジオクロミックフィルムの基礎検討

XR-QA2 が製造終了となり、後継品として **GAFCHROMIC LD-V1 (LD-V1)** が発表された。**LD-V1** における、マンモグラフィ領域でのエネルギー依存性および感度特性を **XR-QA2** と比較し、マンモグラフィにおける線量評価の適用性を検討した。

4. 研究成果

(1) ラジオクロミックフィルムの選択

XR-QA2 と **EBT3** の濃度吸収線量校正曲線を図4に示す。ターゲット/フィルタが **W/Rh**, **Mo/Mo**, 設定管電圧が **24 kV**, **30 kV** で各フィルムに **X** 線を照射した。**EBT3** の校正曲線は直線的な相関を示し、濃度変化が小さく低感度だった。一方、**XR-QA2** の校正曲線は二次曲線の相関を示し、濃度変化が大きく高感度であった。**3.0 mGy** 以下での校正曲線を図5に示す。**EBT3** はエネルギー依存性が低いため、濃度変化が明確な線量を照射できれば、マンモグラフィの線量測定に優れていることが明確となった。ただし、複数回の照射による **X** 線管への影響を考慮する必要がある。**XR-QA2** は **EBT3** よりも感度が高く、複数回の照射を必要としないが、エネルギー依存性の影響が大きかった。エネルギー分布の広い **W/Rh** を測定する場合には、計測精度に誤差が生じることに留意する必要がある。

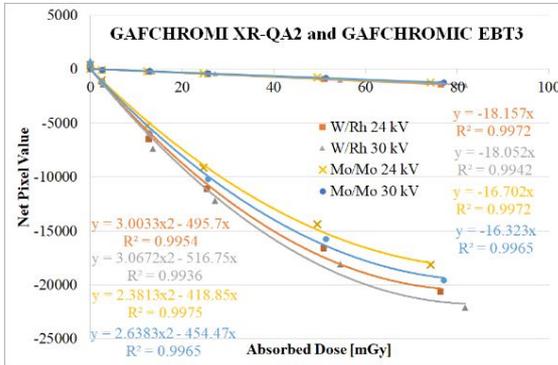


図4. XR-QA2 と EBT3 の濃度吸収線量校正曲線

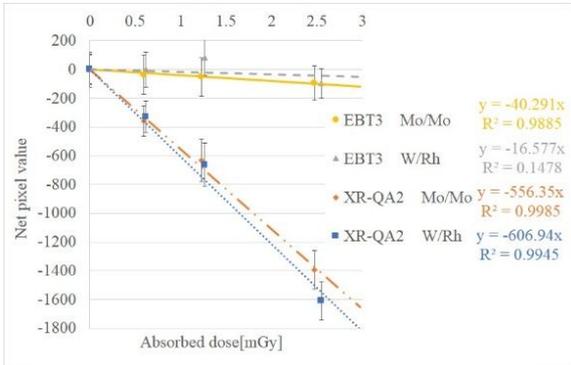


図5. XR-QA2 と EBT3 の 3 mGy 以下の濃度吸収線量校正曲線

(2) スキャナの特長評価とスキャン方法

放射線治療用のラジオクロミックフィルムである **EBT3** と診断領域で使用される **XR-QA2** のモアレアーチファクトの影響に関する研究を実施し、最新のスキャナである **EPSON DS-G20000** を使用することで、モアレアーチファクトの影響が最小限になること、および **XR-QA2** がマンモグラフィの線量評価に適していることを明確にした。

(3) マンモグラフィの線量分布

図6は、マンモグラフィで1回照射した場合の各層に該当する吸収線量分布を示す。点線は、腺組織ファントムブロックに対応する領域を示している。水平面上の線量分布は、表面と深さ **10 mm** で均一に分布しており、平均値はそれぞれ **16.15 mGy** と **7.51 mGy** であった。深さ **20 mm** の線量分布は、腺組織等価ファントムブロックの下で低い値となった。乳房全体の平均値は **3.25 mGy** であるのに対し、腺組織等価ファントムブロック領域の平均値は **2.64 mGy** であり、深さ **20 mm** における全体の平均値の **81.3%** であった。深さ **30 mm** での線量分布は、**20 mm** の場合と同様に腺組織相当ファントムブロックの下はやや低くなった。乳房全体の平均値は **1.68 mGy**、腺組織等価ファントム

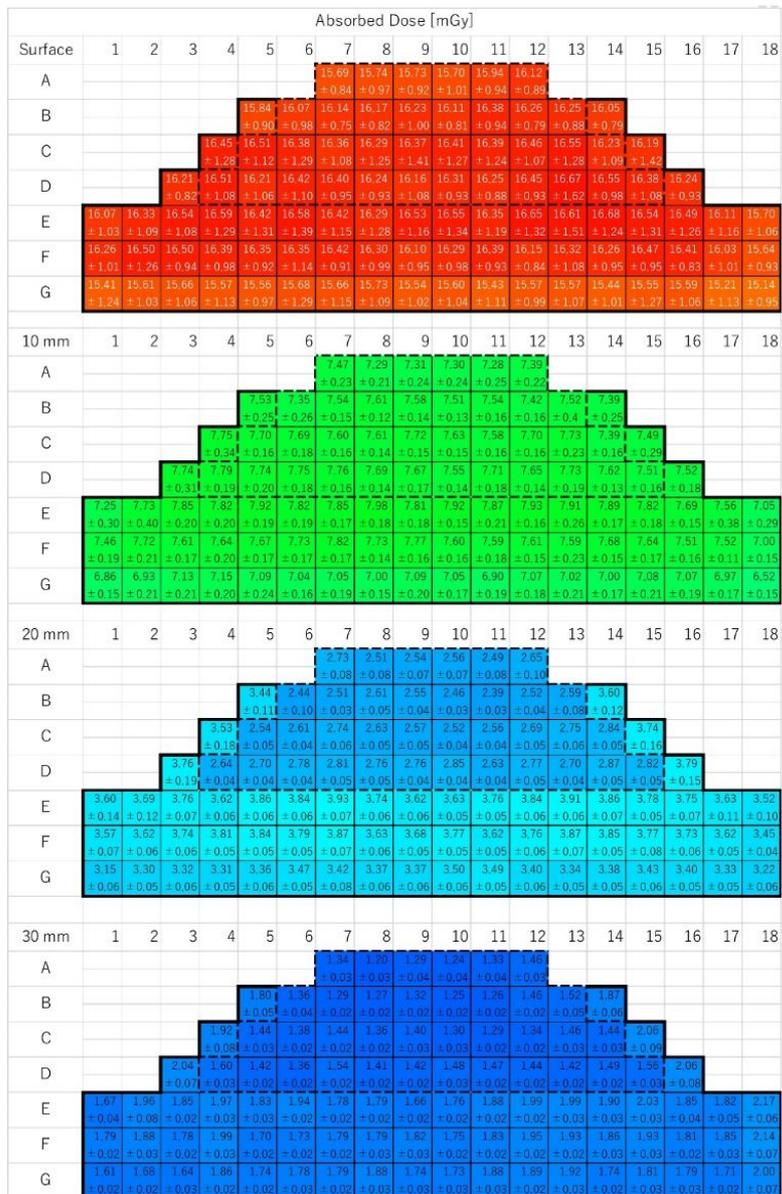


図6. 表面と深さ 10 mm, 20 mm, 30 mm におけるマンモグラフィの吸収線量分布。点線は、腺組織ファントムブロックに対応する領域

ムブロック部分の平均値は **1.39 mGy** で、深さ **30 mm** での全体の平均値の **82.8%** となった。

表 1 は、乳房領域全体と腺組織相当ファントムブロック領域の深さ方向の平均吸収線量を示したものである。マンモグラフィで使用される放射線はほぼ単色であるため、吸収線量はファントムの表面から指数関数的に減少している。乳房全体と腺組織相当ファントムブロック領域の平均吸収線量の差は、乳房内の位置が図 2 に示す **36** 個の白いブロックに相当する腺組織を挟んで深さ **20mm** で **0.61mGy** となった。乳房全体の深さ **10 mm**、**20 mm**、**30 mm** の平均吸収線量比はそれぞれ **46.5%**、**20.1%**、**10.4%** となり、腺組織相当ファントムブロックの領域では表面の **46.6%**、**16.3%**、**8.6%** となった。

今回開発したブロック状乳房ファントムは、前例がなく、腺組織や脂肪組織に相当するファントムブロックを自由に配置・組み合わせることで、ブロック単位ではあるが、ほぼ無限に乳房のバリエーションを構築することが可能となった。また、ブロック状乳房ファントムの表面や内部に配置できる **EBT3** を用いることで、ファントム内部の線量分布を評価することで従来法よりも詳細な乳房の線量分布を得ることが可能となった。

表 1 . 乳房領域全体と腺組織相当ファントムブロック領域の深さ方向の平均吸収線量

Depth [mm]	Whole breast area		Glandular tissue-equivalent phantom block area	
	Absorbed Dose [mGy]	SD	Absorbed Dose [mGy]	SD
0	16.15	0.37	16.25	0.24
10	7.51	0.30	7.57	0.15
20	3.25	0.50	2.64	0.13
30	1.68	0.25	1.39	0.10

(4) LD-V1 と XR-QA2 の比較

XR-QA2 の販売が終了し、新しく **GAFCHROMIC LD-V1 (LD-V1)** に更新されたため、**LD-V1** の感度特性を **XR-QA2** と比較検討した。濃度吸収線量校正曲線を図 7 に示す。マンモグラフィ領域の線量評価において、**LD-V1** は **XR-QA2** の半分程度の感度であることが明確となった。

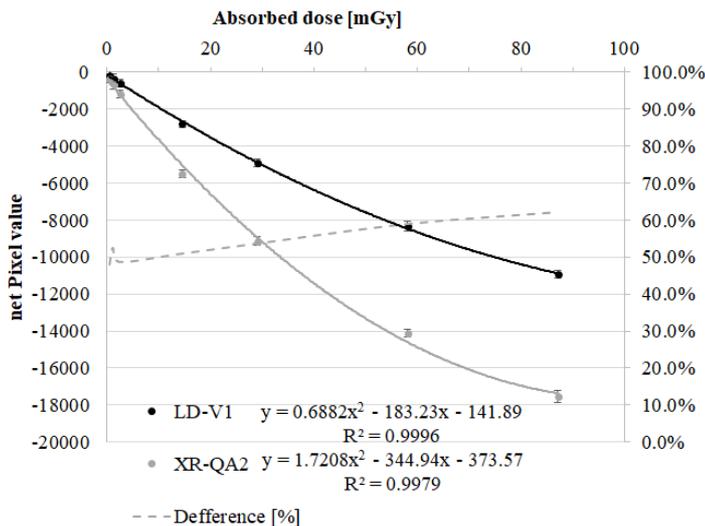


図 7 . LD-V1 と XR-QA2 の濃度吸収線量校正曲線

本研究では、マンモグラフィの線量計測に最適だった **XR-QA2** が製造中止となり、**EBT3** で計測することとなった。十分な線量を与えることで **EBT3** でも十分にマンモグラフィの線量評価が行えることが検証された。また、開発したブロック状乳房ファントムを用いることで、マンモグラフィの詳細な線量評価が可能となった。加えて、**XR-QA2** の後継品である **LD-V1** が、感度は半分程度あるが、十分マンモグラフィの線量評価に使用できることが明確となり、今後の線量評価に最適になることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

1. 著者名 Tatsuhiko Gotanda, Toshizo Katsuda, Hidetoshi Yatake, Yasuyuki Kawaji, Rumi Gotanda, Shinya Imai, Takuya Akagawa, Masashi Sasaki	4. 巻 196(3-4)
2. 論文標題 Three-Dimensional Dosimetry of Mammography Using a Block Cube Breast Phantom and Radiochromic Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 226-233
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/rpd/ncab153	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 Tatsuhiko Gotanda, Toshizo Katsuda, Rumi Gotanda, Takuya Akagawa, Tadao Kuwano, Nobuyoshi Tanki, Hidetoshi Yatake, Yasuyuki Kawaji, Takashi Amano, Shinichi Arao, Atsushi Ono, Akihiko Tabuchi	4. 巻 68(3)
2. 論文標題 Evaluation of effective energy distribution of 320-multidetector CT using GAFCHROMIC EBT3	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Federation Medical and Biological Engineering Proceedings	6. 最初と最後の頁 525-528
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_94	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 Tatsuhiko Gotanda, Yasuyuki Kawaji, Hidetoshi Yatake, Shinya Imai, Takuya Akagawa, Toshizo Katsuda	4. 巻 199(8-9)
2. 論文標題 Dosimetry using a radiochromic film and a mammography phantom	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 1007-1011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/rpd/ncad104	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tatsuhiko Gotanda, Toshizo Katsuda, Hidetoshi Yatake, Yasuyuki Kawaji, Shinya Imai, Takuya Akagawa, Rumi Gotanda, Masashi Sasaki
2. 発表標題 Adaptability of Radiochromic films in mammography
3. 学会等名 European Congress of Radiology 2022（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桧垣夏怜, 五反田龍宏, 武本春菜, 森下快晟
2. 発表標題 スキャナの光源および経時的変化によるGAFCHROMIC Filmの濃度変化の影響
3. 学会等名 第9回MDD学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武本春菜, 五反田龍宏, 森下快晟, 桧垣夏怜
2. 発表標題 スキャナ光源の違いによるGAFCHROMIC Filmに対する不均一性誤差の影響
3. 学会等名 第9回MDD学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森下快晟, 五反田龍宏, 桧垣夏怜, 武本春菜
2. 発表標題 スキャナ光源の違いによるGAFCHROMIC Filmに対するモアレアーチファクトの影響
3. 学会等名 第9回MDD学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuhiko Gotanda, Toshizo Katsuda, Hidetoshi Yatake, Yasuyuki Kawaji, Rumi Gotanda
2. 発表標題 Three-dimensional dosimetry of mammography using a block cube breast phantom and radiochromic film
3. 学会等名 第7回 MDD学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五反田龍宏, 眞鍋佳恋, 中川裕理, 山崎恭介
2. 発表標題 マンモグラフィ領域でのGAFCHROMIC XR-QA2とGAFCHROMIC EBT3の比較
3. 学会等名 第8回 MDD学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五反田 龍宏
2. 発表標題 マンモグラフィの線量分布計測の進捗状況
3. 学会等名 第3回MDD学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Gotanda, Toshizo Katsuda, Rumi Gotanda, Takuya Akagawa, Tadao Kuwano, Nobuyoshi Tanki, Hidetoshi Yatake, Yasuyuki Kawaji, Takashi Amano, Shinichi Arao, Atsushi Ono, Akihiko Tabuchi
2. 発表標題 Evaluation of effective energy distribution of 320-multidetector CT using GAFCHROMIC EBT3
3. 学会等名 World Congress for Medical Physics and Biomedical Engineering 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Gotanda, Yasuyuki Kawaji, Hidetoshi Yatake, Shinya Imai, Takuya Akagawa, Toshizo Katsuda
2. 発表標題 DOSIMETRY USING A RADIOCHROMIC FILM AND A MAMMOGRAPHY PHANTOM
3. 学会等名 6th European Congress on Radiation Protection (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuhiko Gotanda, Yasuyuki Kawaji, Hidetoshi Yatake, Shinya Imai, Takuya Akagawa, Toshizo Katsuda
2. 発表標題 Effects of moire artifacts caused by the scanner light source and the radiochromic film type
3. 学会等名 IUPESM_WC2022; IUPESM World Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五反田龍宏, 川路康之, 今井信也, 赤川拓也, 矢竹秀稔
2. 発表標題 放射線被ばく管理に利用するラジオクロミックフィルムに生じるニュートン環の影響
3. 学会等名 2022年電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五反田龍宏
2. 発表標題 乳腺被ばく線量測定のためのブロック状乳房ファントム (BCBP) の開発
3. 学会等名 第7回 KMSメディカル・アーク 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 乳房ファントムの製造方法、それに使用する分析用ファントム、及び乳房ファントム	発明者 五反田 龍宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2021-159160	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 乳房ファントムの製造方法、それに使用する分析用ファントム、及び乳房ファントム	発明者 五反田 龍宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-061530	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

川崎医療福祉大学 教員情報 五反田龍宏
<https://kweb-res.kawasaki-m.ac.jp/kwhp/KgApp?section=15&kyoinId=Kggydseg>

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	五反田 留見 (Gotanda Rumi) (70542281)	川崎医療福祉大学・医療技術学部・助教 (35309)	
研究 分 担 者	天野 貴司 (Amano Takashi) (90249558)	川崎医療短期大学・放射線技術科・准教授 (45309)	

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