

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：22101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22591373

 研究課題名（和文） マンモグラフィ装置の精度管理用の高精度可搬式開放窓型  
電離箱検出器の開発

 研究課題名（英文） Development of a portable type open-window-ionization chamber  
in mammography

研究代表者

佐藤 斉 (SATO HITOSHI)

茨城県立医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号：90285057

研究成果の概要（和文）：マンモグラフィの正確な線量計測値に基づく精度管理を行うため、マンモグラフィで使用される低エネルギー領域 X 線の線量計測において応答特性が変化しない、可搬式の開放窓型電離箱検出器を開発した。従来の自由空気電離箱とは異なり、集電極の形状と配置を検討して可搬型としたものである。乳がん検診で使用されるマンモグラフィ装置と同様のエネルギースペクトルを持つ X 線の線量標準場を用い、試作した電離箱検出器のエネルギー特性及び絶対計測線量の評価を行った結果、 $\sim 15 \text{ mGys}^{-1}$  までの線量率に対して良好な直線性で、管電圧 23 kV から 110 kV までの X 線エネルギー範囲において、検出器の応答変化は 3% 以内だった。また、暗電流は  $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ A}$  であり、長時間、安定した計測値が得られ、優れた基本性能を有していることを確認した。新しい概念により開発した電離箱検出器により、医用放射線管理の一環として実施する医療施設に設置されているマンモグラフィ装置における精度管理に必要な線量評価に際し、高精度で安定した測定を実施することができる。

研究成果の概要（英文）：In order to perform accuracy management based on the measurement value of the correct dose in mammography, in dose measurement of the low energy X-rays from mammography equipment, the portable type open-window-ionization chamber which the characteristic of response does not vary was developed. In order to consider it as a portable type unlike the conventional free-ionization chamber, the shape of a collector electrode and arrangement were considered. The energy dependence and the evaluation of absolutely measurement of experimental model of an ionization-chamber were performed using the dose standard place with the same energy spectrum as the equipment used in mammography screening of X-rays. The linearity of dose rate dependence was good to  $\sim 15 \text{ mGys}^{-1}$ . In the energy range of the X-rays from tube voltage 23 kV to 110 kV, change of the response of a detector was less than 3%. Moreover, dark current is  $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ A}$ , and it checked that the stable measurement value was obtained for a long time. The portable type open-window-ionization-chamber developed by a new concept can implement highly accurate and stabilized measurement in case of dose evaluation required for the accuracy management in the mammography equipment currently installed in medical facilities.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：電離箱、マンモグラフィ、精度管理、医用放射線管理

### 1. 研究開始当初の背景

(1)「がん対策基本法(2006年)」に基づき策定された「がん対策推進基本計画(2007年)」により、乳がん検診においてマンモグラフィが積極的に導入された。マンモグラフィの受診者数は年々増加し、2009年には190万人が受信した。がん検診で使用されるマンモグラフィ装置は、従来のアナログ方式からデジタル方式へと急速に移行しており、すでに約65%がデジタル方式の装置が使用されている。今後、デジタル方式への移行がさらに進むことが予測される。

デジタル方式の装置はアナログ方式と比較すると、画像品質は線量に大きさに対して依存度が大きい。また、画像処理による補正が容易であるため、線量過多の場合でも画像からの判定が難しい。そのため、マンモグラフィにおける線量と画質との関係をより正確に把握することが必要であり、線量計を用いた被曝線量の評価に基づく精度管理が重要となる。

(2) X線診断検査では最大エネルギー150 keV以下の連続X線が用いられている。マンモグラフィにおいては、乳腺と脂肪組織内における微小な吸収差を描出する必要があることから、さらに低エネルギーの30 keV以下のX線が主に用いられる。

この低エネルギー領域における連続X線の線量計測は、放射線によって生じる空気の電離量に基づく電離箱式検出器が用いられている。放射線によって生じる電離電流は $10^{-12}$  A程度であり、非常に微弱な電流を計測する。そのため、一般的に用いられている電離箱式検出器は外部の静電誘導による測定値への影響を防ぐために、検出器前面に厚さ $50\mu\text{m}$ 程度の導電性薄膜のX線入射窓を有する構造となっている。

X線入射窓を有する構造の電離箱式検出器によるX線の線量計測では、検出器前面の入射窓によりX線が吸収されて検出感度が大きく変化する。そのため、真の値を評価することが困難である。この検出器前面の薄膜によるX線吸収の問題は、マンモグラフィで用いられる低エネルギー領域X線では顕著に現れ、正確な線量計測に基づく精度管理を実施する上で大きな課題となっている。

(3)この課題を解決するには、測定を実施する各医療施設で、国家標準場の自由空気電離箱による測定値との比較により正確な補正係

数を求めることが必要であるが、現実には実施困難である。国家標準場で用いられている自由空気電離箱は、入射窓の薄膜が無く、吸収の補正を必要としない開放窓型の電離箱式検出器であり、空気または気体中に放出された真の全エネルギーを絶対測定することが可能なものである。このような開放窓型電離箱式検出器は静電誘導の影響を避けるために、保護電線を複雑に配置する必要がある。そのため、検出器全体の重量も重く、移動しての使用は不可能であり、ごく限られた研究施設でのみ用いられている。

### 2. 研究の目的

前述の課題を解決するために、これまでに外部からの静電誘導を受けず、高感度で安定な測定ができる可搬式開放窓型電離箱検出器を試作した。この新しい電離箱式検出器は、小型・軽量であり移動使用が可能であるため、各医療施設で正確な線量計測値に基づく精度管理に用いることができる。

放射線の線量は、単位質量の空气中で放射線によって生成される全電荷量( $\text{Ckg}^{-1}$ )として定義されている。従って、任意体積の空気から放射線によって生じた電離電流を測定することにより、線量の絶対計測が可能となる。そのためには、集電極の絶縁と外部の静電誘導の影響の防止、正確な電離体積が必要となる。現行の試作機は、製作が容易でありコストの観点から電極の形状を円形にしている。しかし、測定するX線はビーム軸に沿って円筒対照であることが多く、その場合、電離体積の評価が非常に難しく、線量の絶対計測を評価する上で大きな課題となってしまう。

本研究では、上記の電極の形状を矩形に変えた試作器の設計・製作を行う。そして、この電極形状の異なる試作器のエネルギー特性及び絶対計測量を評価し、可搬式開放窓型電離箱検出器の最適な測定条件を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1)試作した可搬式開放窓型電離箱検出器は、低エネルギーX線に対して感度が低下することが無いように、従来の電離箱検出器に必要な入射窓部の薄膜またはグリッドが無い構造である。放射線により生じた微小な電流を測定するため、単に薄膜やグリッドを取り除

いた状態では外部からの静電誘導を受け、一般的には安定した測定ができない。この静電誘導は、外部から入射窓を通して入る静電誘導の影響を受けない位置に集電極を配置することによって解決した。

入射窓を通して外部から入る静電誘導の影響を受けないように、集電極を2段構造とした、開放窓型電離箱式検出器を新たに試作した(図1)。

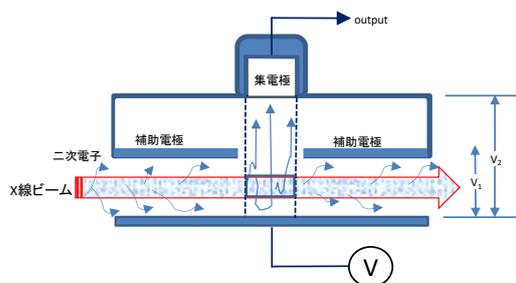


図1 開放窓型電離箱検出器の概念図  
静電誘導の影響を受けずに、入射線ビームにより生じた電荷を収集する2段電極構造。

本検出器は、入射窓の吸収補正を必要とせず、また、グリッドが無い場合、一般的な自由空気電離箱で問題となるグリッドからの散乱線の影響がない。小型・軽量で、可搬型の自由空気電離箱であり、これまでにこのような検出器は存在しない。

(2)測定するX線のエネルギーが10~100 keVの範囲で、感度の変化を5%以下に収めることを目標に、集電極形状を最適設計して検出器を試作した。X線管からのX線ビームは、軸に沿って円筒対称であることが多く、電極が円形の場合、電離体積の見積もりが困難となり絶対値を評価する際に問題となる懸念がある。そこで、電離体積の見積もりを容易とするために集電極の形状を矩形として実用的な開放窓型電離箱式検出器を作成した。

この電極構造の電極間隔と印加電圧による検出器内部の電場の様子を調べるため、電極配置を模擬して2次元の電界強度分布を求めた。電界強度の計算は、電磁界解析システム( $\mu$ -TEC Co. LTD.)を用いた。試作した電離箱の電極間距離  $d$  は20 mm であり、イオン収集効率  $f$  を次式により求めた。

$$f = \frac{1}{u} \ln(1+u), u = \mu r d^2 / V$$

$\mu$ :  $3.02 \times 10^{10} \text{ VmC}^{-1}$ ,  $r$ : 電離密度  $\text{C m}^{-3}\text{s}^{-1}$

(3)印加電圧の最適値を調べるため、高压電源(AE-136W:応用技研, KD2689:Matsusada)を用いて電離箱に直流電圧を印加し、X線発生装置(KXO-50G:TOSHIBA)によりX線を照射し、エレクトロメータ(6517A:Keithley)を用いて電離電流を測定した。

(4)線量率特性およびエネルギー応答特性を調べるために、X線発生装置(KXO-50G:TOSHIBA), (DHF-155HA:HITACHI)を用いて、管電圧23 kV から130 kV までの電離電流を測定した。

(5)医療施設に設置されているマンモグラフィ装置を用いて、測定の再現性、安定性を調べ、実用的な測定方法を検討した。

#### 4. 研究成果

(1)新しい概念によりこれまでに試作した開放窓型電離箱式検出器を図2に示した。全体重量は約1.5 kg であり、移動試用が可能である。測定に必要なシステムは、検出器の他に、2 ch の高压電源とエレクトロメータのみである(図3)。

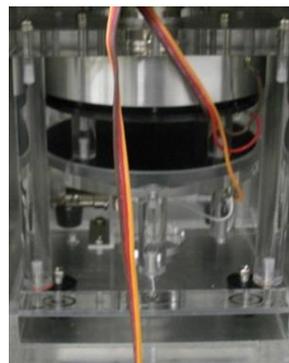


図2 新しい概念による開放窓型電離箱式検出器



図3 測定システムの例(本システムでは上段のみを使用) 上段左から、エレクトロメータ(Keithley), 高压電源(応用技研), 高压電源(Matsusada) 下段左から、エレクトロメータ(応用技研), エレクトロメータ(Keithley)

(2)電極配置と印加電圧を検討するために電離箱内部の電界強度分布をシミュレーション計算した結果の例を図4に示した。2段電極の各印加電圧は、下段と上段の電位差が2倍以下で良好な電解分布が得られた。

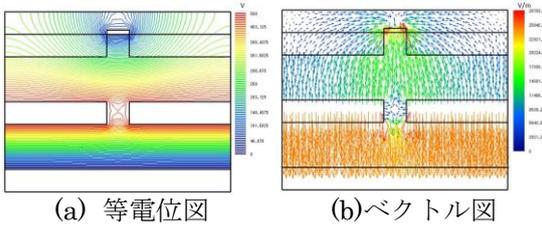


図4 電離箱内部の電界強度分布の計算結果。  
V1= 500 V, V2= 1000V

(3)第1電極(HV-H)の印加電圧を0Vから2400Vまで変化させたときの電離電流の測定結果を図5に示した。第2電極の印加電圧は、電離電流が最大となる赤線で示した値とした。青線で示した電離電流の測定結果は、第1電極の印加電圧が200Vから直線的に増加した。約1000Vからは勾配が緩やかになり、約2300Vでほぼ飽和した。図は管電圧70kV、線量率10mGys<sup>-1</sup>の場合である。

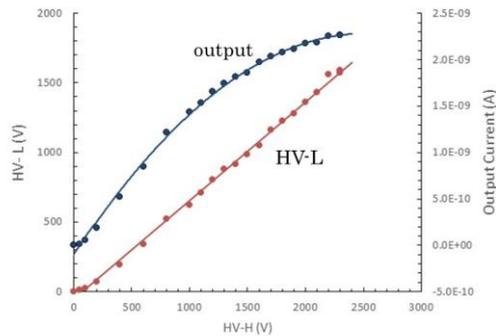


図5 印加電圧による電離電流の測定結果。  
第2電極の印加電圧は、第1電極のそれぞれの印加電圧に対して最大の電離電流が得られる値に設定。  
(70kV, 10mGys<sup>-1</sup>)

(4)線量率特性を調べた結果を図6に示した。第1電極の印加電圧を0Vから2000V、線量率を最大12.5mGys<sup>-1</sup>まで変化させて電離電流を測定した。第2電極の値は第1電極のそれぞれの印加電圧に対して最大の電離電流が得られる値に設定した。電離電流の測定値から、空気カーマに換算して示した。印加電圧2000Vのとき、約15mGy/sまで直線的に応答し、再結合損失は1%以下だった。

また、エネルギー特性を調べた結果を図7に示した。管電圧23kVから110kVまでの範囲での応答の変化は3%以内だった。

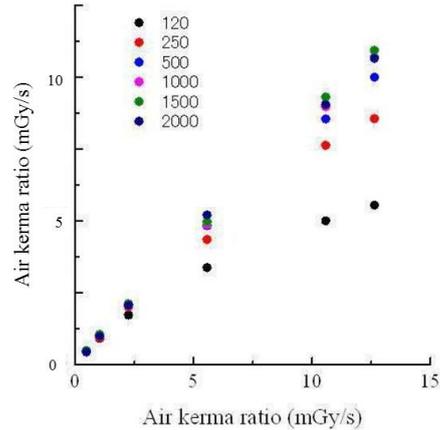


図6 線量率特性の測定結果。HV=2000Vのときの再結合損失は1%以下。

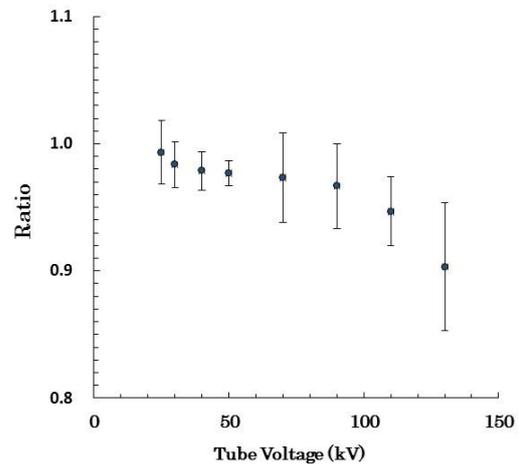


図7 エネルギー応答特性の測定結果  
管電圧23kVから110kVまでの応答の変化は3%以下。

(5)医療施設に設置されているマンモグラフィ装置は、X線管-イメージレセプタ間距離が短く、周囲からの散乱線が大きいので、測定値への影響が大きい。X線管アームを90度傾けて、X線ビームを水平方向に照射し、さらに検出器周囲を1.5mmの鉛シールドで囲んだ。これにより、測定の再現性と安定性が向上し、実用的な測定ができる。図8にマンモグラフィ装置を用いた測定の実施例を示した。

(6)電離箱式線量計の低エネルギーX線に対する応答変化の問題を解決した入射窓が無い、可搬式の電離箱式検出器を開発した。これまではこのような低エネルギー領域の線

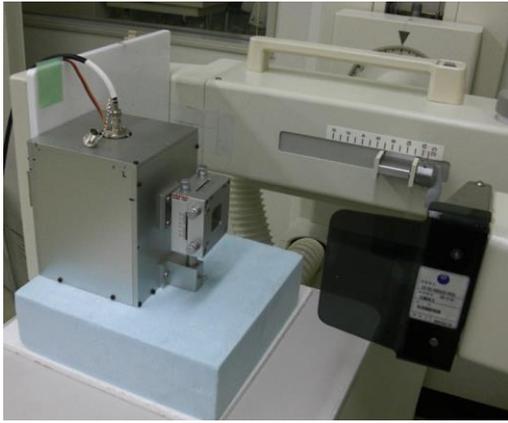


図8 マンモグラフィ装置による測定の実施例

量計測は特別に注目されていなかった。しかし、医療施設に設置されているマンモグラフィ装置の台数は3,000台以上で、今後も設置台数が増加していくことが考えられ、正確な線量計測値に基づく精度管理を行うことが重要となる。マンモグラフィでは乳房の形態や状態に応じ、撮影管電圧すなわちエネルギースペクトル(線質)を変化させて撮影する。開発した可搬式開放窓型電離箱検出器は、マンモグラフィから一般撮影に用いられる低エネルギーX線領域の正確な線量計測を一台で可能にする革新的な線量計である。そのため線量計の取扱いや校正に不慣れた医療現場において、線質の違い等を意識せず、簡便で正確に線量計測を実施できる測定器として利用できる。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計15件)

- ① 佐藤 斉, 對間博之, X線画像部門と核医学部門における品質管理(QC)の必要性, 月刊新医療, 査読無, 3, 2013, 55-56.
- ② 佐藤 斉, 可搬式開放窓型電離箱のX線エネルギー適用範囲の改善, 日本放射線技術学会防護分科会誌, 査読無, 35, 2012, 62
- ③ 高田麻里子, 佐藤 斉, 五反田留見, 根本宏美, 新たな入射窓膜を用いた平行平板電離箱のマンモグラフィ領域低エネルギーX線に対する応答特性, 日本放射線技術学会防護分科会誌, 査読無, 35, 2012, 61
- ④ 佐藤 斉, 放射線計測の理論3-放射線統計-, 日本放射線技術学会計測分科会誌, 査読無, 20(2), 2012, 14-15
- ⑤ 佐藤 斉, X線診断領域における患者線量推定法の利用, 日本放射線技術学会誌, 査読有, 68(6), 2012, 733-742
- ⑥ 佐藤 斉, 薄型半導体検出器によるX線CT装置の線量測定, 日本放射線技術学会計測分科会誌, 査読無, 20(2), 2012, 34-38
- ⑦ Hitoshi Sato, Masami Ando, Daisuke Shimao, Investigation of absorbed radiation dose in refraction-enhanced breast tomosynthesis by a Laue case analyser, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 146(1), 2011, 231-233
- ⑧ 安藤正海, 霍慶凱, 酒井正樹, 湯浅哲也, 砂口尚輝, 杉山弘, 兵頭一行, 市原周, 遠藤登紀子, 森健策, 国定俊之, 平野伸一, 岩谷剛一, 島雄大介, 佐藤 斉, 近浦吉則, 臨床応用をめざす軟組織描画用の開発: X線暗視野法の現状と将来見通し, 放射線, 査読有, 37(2), 2011, 39-45
- ⑨ Gotanda R, Katsuda T, Gotanda T, Tabuchi A, Kuwano T, Yatake H, Yabunaka K, Akagawa T, Sato H, Takeda Y Dose Distribution in Pediatric CT Head Examination: Phantom Study, International Federation Medical and Biological Engineering, 査読有, 37, 2011, 547-550
- ⑩ 佐藤 斉, 森浩一, 藤咲賢, 米田隼人, X線診療室内の空間線量率分布計算用モンテカルロ計算ツールの開発, 医学物理, 査読有, 30, 2010, 25-38
- ⑪ 佐藤 斉, 田中隆宏, 品川弦一郎, 横山光隆, 横山義隆, 可搬式開放窓型電離箱の開発, 医学物理, 査読無, 30(5), 2010, 233-234
- ⑫ Hiroshi Muraishi, Tatsuya Mogaki, Shinji Abe, Hitoshi Sato, Satoshi Hara, Hidetake Hara, Shoko Miyake, akeshi Himukai, and Tatsuaki Kanai, A Study on Heavy Ion CT Based on the Measurement of Residual Range Distribution in HIMAC, 49th Annual Meeting of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG 49), 査読無, 2010, 29
- ⑬ Hitoshi Sato, Masami Ando, Daisuke Shimao, Investigation of absorbed radiation dose in refraction-enhanced breast tomosynthesis by a Laue case analyzer, The Third Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection, 査読有, 2010, 198-201
- ⑭ 佐藤 斉, 米田隼人, 藤咲賢, 空間線量分布評価用モンテカルロ計算ドライバーシステムの開発, 放射線防護分科会誌, 査読無, 30, 2010, 65

- ⑮ 佐藤 斉, モンテカルロ計算による患者線量の算出, 日本放射線技術学会雑誌, 査読有, 57 (689), 2010, 207-212

〔学会発表〕(計 17 件)

- ① 長谷川健, 佐藤 斉, 千木崎信介, 長谷川光昭, 栗野泰市, 五反田留見, 沼尻俊夫, 山下典教, 新井誠, 釜屋憲司, 大内啓之, 伊藤善行. 患者線量推定ソールの配布と利用状況の分析, 日本放射線技術学会, 第 59 回関東部会研究発表大会 2013 年 2 月 2 日, つくば
- ② 高田麻里子, 佐藤 斉, 江原真宏, 市川秀也, 五反田留見. マンモグラフィにおける低エネルギー X 線測定用平行平板型電離箱の試作, 第 40 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2012 年 10 月 5 日, 船堀
- ③ 江原真宏, 佐藤 斉, 高田麻里子, 市川秀也, 五反田留見, 川崎善幸, 根本善誉, 田所俊介, 遮蔽シートを用いたコンビューム CT における水晶体被曝線量低減の検討, 第 40 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2012 年 10 月 5 日, 船堀
- ④ 市川秀也, 佐藤 斉, 江原真宏, 高田麻里子, 五反田留見, X 線 CT 検査時の水晶体防護に用いる放射線遮蔽シートの最適設計, 第 40 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2012 年 10 月 5 日, 船堀
- ⑤ 高田麻里子, 佐藤 斉, 五反田留見, 根本宏美, 新たな入射窓膜を用いた平行平板電離箱のマンモグラフィ領域低エネルギー X 線に対する応答特性, 第 68 回日本放射線技術学会総会学術大会, 2012 年 4 月 14 日, 横浜
- ⑥ 佐藤 斉, 高田麻里子, 五反田留見, 根本宏美, 可搬式開放窓型電離箱の X 線エネルギー適用範囲の改善, 第 68 回日本放射線技術学会総会学術大会, 2012 年 4 月 14 日, 横浜
- ⑦ Gotanda R., Katsuda T., Gotanda T., Tabuchi A., Kuwano T., Yatake H., Yabunaka K., Akagawa T., Sato H., Takeda Y., Dose Distribution in Pediatric CT Head Examination: Phantom Study, 5rd European Medical & Biological Engineering Conference, Budapest, 2011.9.11
- ⑧ 佐藤 斉, 小松崎哲也, 高田麻里子, 栗山 和, 藤田元春, 薄型半導体検出器を用いた X 線ビームプロファイル測定による CTDI の評価, 日本保健物理学会第 44 回研究発表会, 2011 年 10 月 18 日, 水戸
- ⑨ 佐藤 斉, 高田麻里子, 大川裕子, 藤田元春, 栗山 和, 五反田留見, 可搬式開放窓型電離箱の応答特性, 日本放射線技術学会第 39 回秋季保学術大会, 2011 年 10 月 29 日, 神戸
- ⑩ 安藤正海, 遠藤登喜子, 市原周, 湯浅哲也, 霍慶凱, 砂口尚輝, 酒井正樹, 植野映, 島雄大介, 佐藤 斉, 森健策, 近江綾, X 線暗視野法を用いた乳癌早期診断法の提案: 開発の現状と将来, 第 20 回日本乳癌画像研究会, 2011 年 2 月 10 日, 東京
- ⑪ M. Ando, T. Endo, S. Ichihara, T. Yuasa, K. Mori, D. Shima, H. Sato, Q. Huo, T. Sunaguchi, M. Sakai, A. Omi, H. Awane, 2-Dimensional and 3-Dimensional View of Breast Cancer Using Dark-Field Imaging, International Forum on Medical Imaging in Asia 2011, 2011.1.12, Naha
- ⑫ 佐藤 斉, 長谷川光昭, X 線検査の患者線量調査データに基づく臓器線量の推移, 日本放射線安全管理学会第 9 回学術大会, 2010 年 12 月 2 日, 広島
- ⑬ 佐藤 斉, 五反田留見, 根本宏美, 田上美里, 江原真宏, 大村, 奈良昌敏, マンモグラフィ領域 X 線用電離箱の入射窓の違いによる応答特性の評価, 第 38 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2010 年 10 月 15 日, 仙台
- ⑭ 田上美里, 佐藤 斉, 五反田留見, 根本宏美, 江原真宏, 大村祐貴, 奈良昌敏, 単色 X 線マンモグラフィの画像特性評価による最適線量の検討, 第 38 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2010 年 10 月 15 日, 仙台
- ⑮ 根本宏美, 佐藤 斉, 五反田留見, 田上美里, 江原真宏, 大村祐貴, 奈良昌敏, 単色 X 線トモシンセシスマンモグラフィの被曝線量測定, 第 38 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2010 年 10 月 15 日, 仙台
- ⑯ Hitoshi Sato, Masami Ando, Daisuke Shima, Investigation of absorbed radiation dose in refraction-enhanced breast tomosynthesis by a Laue case analyzer, AOCRP-3, 2010.5.12, Tokyo
- ⑰ 佐藤 斉, 藤咲 賢, 米田隼人, X 線検査における患者線量算出の不確かさ, 日本放射線技術学会第 64 回総合学術大会, 2010 年 4 月 5 日, 横浜

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 斉 (SATO HITOSHI)

研究者番号: 90285057

### (3) 連携研究者

五反田留見 (GOTANDA RUMI)

研究者番号: 70542281