

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K19202

研究課題名(和文)成人および小児体幹部CT検査における各患者体型に適した撮影条件の検討

研究課題名(英文)Evaluation of scan protocols appropriate for patient-size in adult and pediatric CT examinations

研究代表者

藤井 啓輔(Fujii, Keisuke)

名古屋大学・医学系研究科(保健)・助教

研究者番号：40469937

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):本研究の目的は、線量および画質評価に基づいて体幹部CT検査における至適撮影条件を検討することである。管電流変調機能(TCM)を含むシミュレーションモデルを構築し、シミュレーション計算を行うことで成人および小児腹部-骨盤CT検査時の臓器線量を推定した。また、この計算値を実測値と比較し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。一方、CT画質を評価するため、代表的な成人の腹部径を模擬した画質評価ファントムを作成した。TCM使用時と管電流一定の条件で画質評価ファントムを撮影し、画質と線量を評価したところ、TCMを用いることで線量分布は均一になり、画像ノイズが大きい箇所が少なくなっていることが分かった。

研究成果の概要(英文):The aim of this study is to investigate scan protocols appropriate for CT examinations based on the evaluation of radiation doses and image quality. We built Monte Carlo (MC) simulation models for adult and pediatric abdomen-pelvis CT scans with tube current modulation (TCM) and evaluated organ doses in the CT examinations using the simulation models. The doses were compared with those measured using adult and pediatric anthropomorphic phantoms and radio-photoluminescence glass dosimeters. We also developed an image quality phantom representing an adult abdominal shape. The image quality phantom was scanned with fixed tube current and TCM protocols which deliver almost the same CT dose index, and the radiation doses and image quality were evaluated. The results showed that dose distribution in CT scans with TCM was more uniform, and image noise on CT images obtained with TCM decreased in some regions.

研究分野：放射線防護学

キーワード：医療被ばく CT 線量評価 画質評価

1. 研究開始当初の背景

近年、病変の存在診断や質的診断等を目的として、多くの医療施設で X 線 CT 検査が行われている。UNSCEAR 報告書^①によれば、単位人口当たりの CT 装置台数は日本が世界第 1 位であり、CT 検査はより身近な診断検査となっている。一方で、CT 検査は他の放射線診断検査に比べて 1 検査あたりに高い被ばく線量を伴うことが知られている。CT 検査を受ける被検者の放射線リスクを可能な限り低減するためには、診断に必要な画質を損なわない範囲で医療被ばくを低減することが必要である。また、CT 検査における被ばく線量の最適化は重要な課題となっており、線量の最適化を実践するには、異なる撮影条件で撮影した CT 画像の画質や線量に関する定量的な評価が欠かせない。

CT 検査を受診した被検者の放射線リスクを評価するには、体内の各組織・臓器の吸収線量（臓器線量）を求めることが必要である。また、CT 検査では、被検者の体型ごと、撮影部位ごとに撮影線量が異なるため、各体型、各撮影プロトコルにおける線量を評価する必要がある。しかし、実際の人体で臓器線量を直接測定することはできないため、被検者の線量を評価する方法として、人体形状を模擬したファントム内の各組織・臓器位置に小型線量計を設置した線量計測体系を用いる方法や CT 装置および被写体を仮想的に想定し、撮影条件を設定して、モンテカルロシミュレーション計算に基づいて線量を推定する方法がある。シミュレーション計算による方法では、任意の CT 装置や被検者に対する線量を評価することが可能であるが、シミュレーション計算により評価した線量値は、例えば、実測に基づいて評価した値と比較するなど、計算値の検証を必要とする。

一方、CT 画質について、CT 画像上で病変の大きさや形状を正確に把握することは、病変の存在診断や質的診断を行う上で重要である。X 線画像では、線量を下げると画像ノイズ（主に X 線量子ノイズ）が増加し、また、正常組織との CT 値差が小さい病変組織を描出できる能力（低コントラスト分解能）が低下するため、画像ノイズ、低コントラスト分解能等の画質評価因子が、濃度的に淡い病変の検出能に影響を与えると考えられる。従って、画質と線量を定量的に評価し、両者のバランスが取れた撮影条件を検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、体幹部 CT 検査における撮影条件を検討するため、以下のような線量および画質評価を行った。

(1) CT 線量シミュレーション体系を構築し、成人および 5 歳小児体型を被写体として想定し、シミュレーション計算を行った。シミュレーション計算により推定した線量値を、成人ファントムおよび蛍光ガラス線量計を用いて測定した線量値と比較し、シミュレーショ

ン計算により推定した線量値の妥当性について検証した。

(2) 成人の腹部径を模擬し、サイズおよび濃度が異なる模擬腫瘍モジュールを複数個封入した画質評価ファントムを作成した。また、近年、臨床で利用されている管電流変調機能（Tube current modulation: TCM）を使用した場合と一定の管電流を使用した場合で、画質評価ファントムを撮影し、得られた CT 画像の画質を評価した。また、このファントムを被写体として想定し、シミュレーション計算を行うことでファントム内の線量分布を推定し、画質と線量の関係性を定量的に評価した。

3. 研究の方法

(1) 線量シミュレーション体系の構築

① CT 装置の X 線スペクトルおよびボウタイフィルタ形状の推定

本研究では、シミュレーションソフトウェア: ImpactMC (Advanced Breast CT, GmbH) を用いて線量評価を行った。ImpactMC を用いて線量シミュレーションを行うには、CT 装置の構造や X 線ビームデータについて把握し、ソフトウェア上で設定する必要がある。特に、CT 装置の X 線管球側に備わっている、ビーム整形フィルタ（ボウタイフィルタ）の材質や形状は、メーカー社外秘になっており、不明なことが多い。そこで、本研究では、CT 装置: Aquilion 64 および Aquilion ONE ViSION (Canon Medical Systems Co.) を用いて、アイソセンタからファン角方向に一定の間隔をあけた各測定点に CT 用電離箱線量計 (model 10X5-3CT; Radcal Co.) を設置して線量を測定し、各測定点の線量値からボウタイフィルタ形状を推定した。また、ボウタイフィルタの材質は Al と仮定した。さらに、X 線スペクトルを推定するため、各 CT 装置で Al 半価層を測定し、この Al 半価層値と Tucker 等^②が提案した近似式から X 線スペクトルを推定した。

② TCM 使用時の各 X 線投影角度における管電流の推定

現在、臨床で利用されている CT 装置には、様々な被ばく線量低減機構が備わっている。このような機構の 1 つに TCM があり、各撮影スライスで画質が一定となるよう、被写体の X 線減弱強度に合わせて管電流を増減させることで、線量を調節している。本研究で使用した CT 装置の TCM (Volume-EC) は、通常、スキャンを行う前に撮影される位置決め画像から X 線透過量を計算し、ユーザが設定したノイズレベルに応じて管電流を決定している。

近年行われている CT 検査では、多くの場合、TCM が使用されており、シミュレーション計算に基づいて各被検者が受ける線量を推定するには、CT スキャン時の各 X 線投影角度（各寝台位置）における管電流を把握する必要がある。しかし、その管電流値は、通常、

raw データに含まれているため、ユーザが各 X 線投影角度における管電流値を入手するのは困難である。そこで、本研究では、各 X 線投影角度における管電流を推定するため、CT 装置: Aquilion 64、楕円体形状のアクリルフアントムと半導体検出器: CT dose profiler(Piranha)を用いて線量プロファイルを測定し、線量値から管電流を求めた。

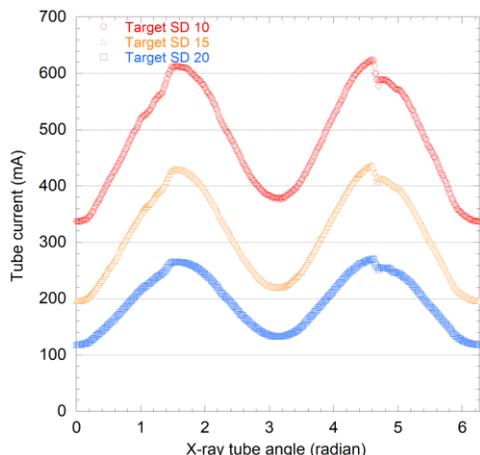


図 1 Target SD 10, 15, 20 における線量測定値から換算した管電流プロファイル

図 1 に示す測定結果から、各 X 線投影角度における管電流を(1)式のように推定した。

$$I = \left(\frac{A_{max} - A_{min}}{2} \right) \times \sin\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) + \left(\frac{A_{max} + A_{min}}{2} \right) \quad (1)$$

ここで、 I は管電流、 θ は X 線管球角度、 A_{min} と A_{max} は位置決め画像撮影後に決定されるスキャン時の管電流で、 A_{min} は X 線管球角度 0° 、 180° の位置(短径方向)における管電流を、 A_{max} は X 線管球角度 90° 、 270° の位置(長径方向)における管電流を表す。また、X 線管球角度 θ は、寝台位置 z の関数として(2)式のように表すことができる。

$$\theta = 2\pi \left(\frac{z - z_0}{L} \right) + \theta_0 \quad (2)$$

z_0 は X 線照射開始時の寝台位置、 L は X 線管球 1 回転あたりの寝台移動距離、 θ_0 は X 線照射開始時の X 線管球角度である。

次に、被写体として日本人成人体型を模擬したファントム(京都科学(株))および 5 歳小児体型を模擬したファントム(models ATOM 705-C CIRS Inc.)を用いて、それぞれ位置決め画像を撮影し、代表的な成人および 5 歳小児腹部-骨盤 CT 撮影条件(表 1)における各寝台位置の管電流を(1)、(2)式から推定した。例として、成人および 5 歳小児腹部-骨盤 CT 検査時の位置決め画像および各寝台位置における推定管電流を図 2(a),(b)に示す。

表 1 成人および 5 歳小児腹部-骨盤 CT 撮影条件

| プロトコル | 成人 | 5 歳小児 |
|---------------------------|--------|-------|
| 管電圧 (kV) | 120 | 120 |
| 収集 FOV (mm) | 400 | 240 |
| 平均管電流 (mA) | 504 | 149 |
| 管球回転時間 (s) | 0.5 | 0.5 |
| ビーム幅 (mm) | 32 | 32 |
| ピッチファクタ | 0.828 | 0.828 |
| 設定スキャン範囲 (mm) | 420 | 300 |
| CTDI _{vol} (mGy) | 36.5 | 18.8 |
| DLP (mGy · cm) | 1759.4 | 679.2 |

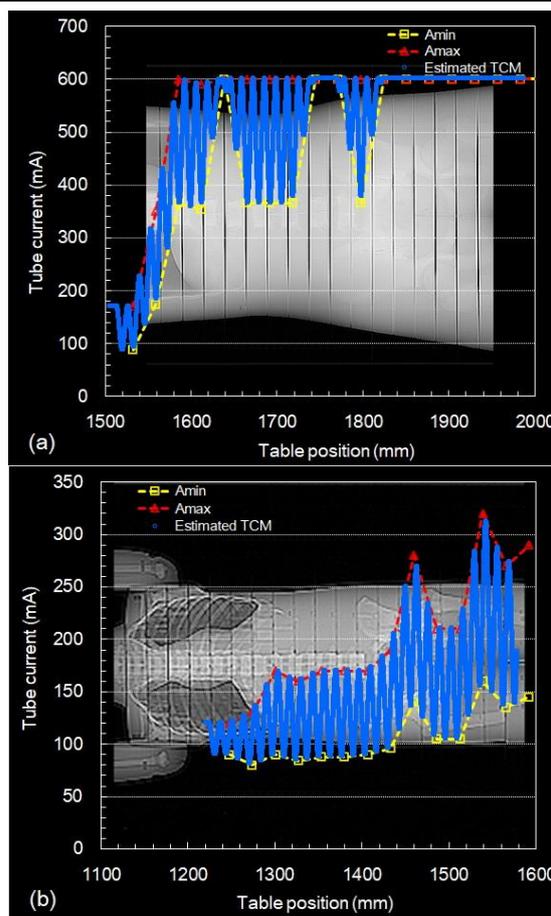


図 2 (a)成人ファントムおよび(b)5 歳小児ファントムを用いた腹部-骨盤 CT 検査時の各寝台位置における推定した管電流プロファイル

次に、TCM を用いた成人および小児腹部-骨盤 CT 検査時の臓器線量をシミュレーション計算により推定し、人体ファントムと小型線量計を用いて測定した線量値と比較した。実測による評価では、成人および 5 歳小児ファントム内の各組織・臓器位置およびファントム表面に蛍光ガラス線量計(AGC テクノガラス(株))を設置し、CT 装置: Aquilion 64 を用いて表 1 の腹部-骨盤 CT 撮影条件でファントムをスキャンした。蛍光ガラス線量計の測定値から各組織・臓器の吸収線量(実測値)を評価した。一方、シミュレーションによる評価では、成人および 5 歳小児ファントムの CT 画像を ImpactMC に入力してボクセルファン

トムを作成し、また、成人および小児腹部-骨盤 CT 検査時の撮影条件を設定して、シミュレーション計算を行い、線量分布を求めた(図 3(a),(b))。この線量分布画像上で、蛍光ガラス線量計の設置箇所に対応する位置に 10×10 pixels の関心領域 (Region of Interest: ROI) を設置し、各 ROI 内の平均吸収線量から各組織・臓器の臓器線量(計算値)を求め、計算値と実測値の相対誤差を評価した。

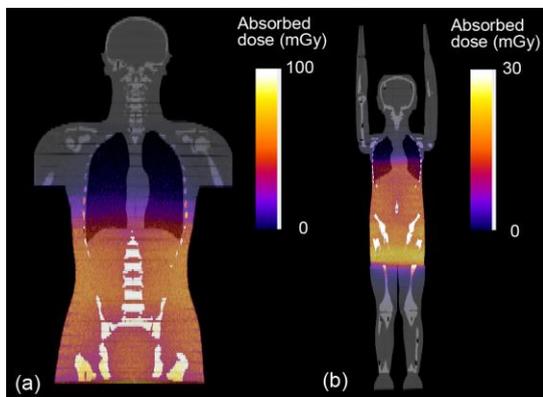


図 3 (a) 成人ファントムおよび(b) 5 歳小児ファントムの腹部-骨盤 CT 検査における線量シミュレーションにより得られた線量分布画像

(2) 画質評価ファントムを用いた画質および線量評価

① 画質評価ファントムの作成

過去に体幹部 CT を受診した被検者の CT 画像を匿名化した後に収集し、患者の縦横径や各臓器の CT 値を解析した。そして、解析結果に基づいて、画質評価ファントムの材質、CT 値、形状等を決定した。本研究では、予算の都合上、代表的な成人腹部径を模擬した画質評価ファントムのみを作成した。画質評価ファントムのベース素材には、ポリウレタン樹脂(軟組織等価材質)を使用し、CT 装置: Aquilion ONE ViSION, 管電圧:120 kV の線質で CT 値が約 50 HU となるよう、ハイドロキシアパタイトを混合したものを使用した。また、直径 3,5,7,10 mm、ファントムのベース濃度よりも CT 値が 5-15 HU 高い、球形の模擬腫瘍モジュールをファントム内に複数個封入した。

② 画質および線量評価

CT 装置: Aquilion ONE ViSION を用いて、TCM 使用時の撮影条件(Target SD:10)と管電流を一定とした撮影条件で、作成した画質評価ファントムを撮影し、スライス厚 5 mm、腹部標準閾値で再構成し、CT 画像を取得した。ただし、管電流一定時の線量指標($CTDI_{vol}$)の値は、TCM 使用時と同一とした。本研究では、CT 値差約 15 HU の模擬腫瘍モジュールが最もよく見える横断面の CT 画像を解析対象画像(図 4 (a),(b))とし、ノイズマッピング法^③を用いて解析対象画像の画質評価を行った。初めに、Top-Hat 変換を用いて解析対象画像からテクスチャを除去した画像を作成した。次

に、その画像上に 10×10 pixels の関心領域 (Region of interest: ROI)を設定し、Gauss 法^④を用いて ROI 内の Noise SD を算出し、ROI を 1 pixel ずつ上下左右にずらして各 ROI 内の Noise SD を求め、ノイズマップ画像を作成した。また、画質評価ファントムの CT 画像を ImpactMC に入力してボクセルファントムを作成し、また、TCM を使用した条件と管電流を一定とした条件を設定して、シミュレーション計算を行い、ファントム内の線量分布画像を取得した。線量分布画像とノイズマッピング画像から、TCM の使用の有無による線量と画質の違いについて検討した。

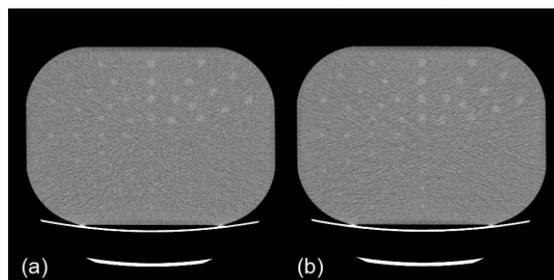


図 4 画質評価ファントムの解析対象画像 ((a)TCM を使用した場合、(b)管電流一定の場合)

4. 研究成果

(1) 線量シミュレーションの妥当性評価

ボウタイフィルタおよび X 線スペクトルの推定精度を検証するため、推定したボウタイフィルタおよび X 線スペクトルを含む撮影条件を ImpactMC に入力し、シミュレーション計算により $CTDI_{vol}$ を求めた。この $CTDI_{vol}$ を、実測により評価した $CTDI_{vol}$ と比較したところ、計算値と実測値の相対誤差は約 5% 以内であった。

代表的な成人および 5 歳小児腹部-骨盤 CT 検査における臓器線量について、シミュレーション計算に基づいて評価した値および実測に基づいて評価した値をそれぞれ図 5(a), (b) に示す。スキャン範囲内に位置する組織・臓器の臓器線量について、計算値と実測値の相対誤差は約 13% 以内に収まっており、シミュレーションにおける統計誤差や実測値に含まれる不確かさ等を考慮すると、計算値と実測値はよく一致していると考えられる。また、推定した管電流値は、実際の CT 検査時の管電流値によく合っていると考えられる。

(2) 画質評価ファントムを用いた画質および線量評価

TCM 使用時と管電流一定時のノイズマップを図 6(a), (b)に示す。両者のノイズマップを比較すると、TCM を用いて撮影した画像の方が、ファントム中心部(100×100 pixels)の平均 Noise SD は 1.5%程度小さく、また、Noise SD が 15 以上を示す、画像ノイズが比較的大きい箇所は 11%程度少なくなっていた。しかし、図 4 のように、TCM の使用の有無により模擬腫瘍モジュールの見え方に違いは認

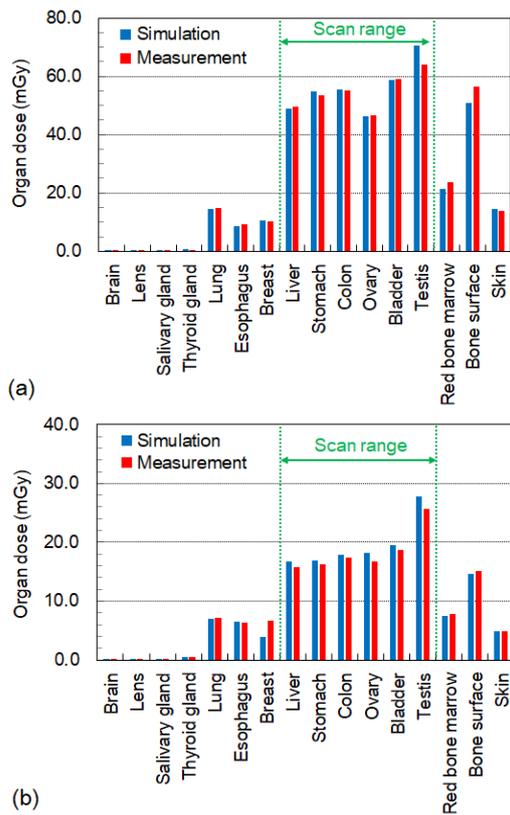


図 5 (a) 成人および(b) 5 歳小児の腹部・骨盤 CT 検査におけるシミュレーション計算により推定した臓器線量と実測により評価した臓器線量

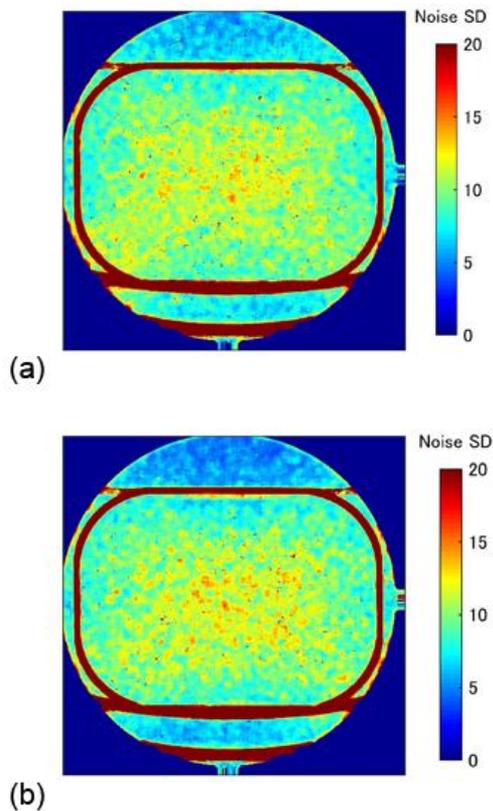


図 6 画質評価ファントムのノイズマップ ((a)TCM を使用した場合、(b)管電流一定の場合)

められなかった。

また、TCM 使用時と管電流一定時の線量分布画像を図 7(a),(b)に示す。両者の線量分布画像を比較すると、TCM 使用時の方が管電流一定時と比べて、ファントム中心部(100×100 pixels)の平均線量は 11%程度小さく、また、ファントムの前面および後面の線量は、17-19%程度低減していることが分かった。従って、TCM は、甲状腺や乳房など体表面臓器の線量を抑えながら、画像ノイズを低減するのに有効であると考えられる。

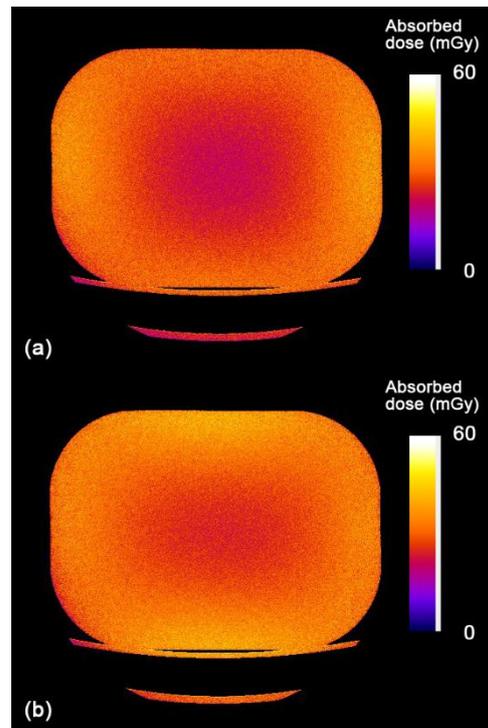


図 7 画質評価ファントムの線量分布画像 ((a)TCM を使用した場合、(b)管電流一定の場合)

(3) まとめ

本研究では、CT 線量シミュレーションを行うために必要なボウタイフィルタ形状や TCM 使用時の各 X 線投影角度における管電流等を推定し、シミュレーション体系を構築した。また、この体系を用いて、代表的な成人および小児腹部・骨盤 CT 検査時の臓器線量を推定した。シミュレーション計算により推定した線量値は、実測値とよく一致していたことから、この体系は、CT 検査時に各被検者が受ける線量をシミュレーション計算に基づいて評価する際に役立つと考えられる。さらに、本研究では、画質評価ファントムを作成し、TCM 使用の有無による画質と線量の違いについて評価した。この画質評価ファントムは、画質および線量評価に基づいて撮影条件を検討する際に有用であると考えられるが、被検者の体型によって線量は大きく異なるため、各体型に適した撮影条件を検討するには、異なるサイズの画質評価ファントムが必要であると考えられる。

[引用文献]

- ① UNSCEAR 2008 Report to the generally assembly with scientific annexes, 2008.
- ② Tucker DM, et al. Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra. Medical Physics 18, 211-218, 1991.
- ③ 高瀬 郁子, 他. Top-hat 変換 Gauss 法を用いた脳梗塞画像の Noise Mapping. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 299, 2013.
- ④ Imai K, et al. A detection method for streak artifacts and radiological noise in a non-uniform region in a CT image. Physica Medica 26, 157-165, 2010.

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 7 件)

- ① Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Satoshi Obara, Keiichi Akahane, Masahiko Kusumoto. Organ dose evaluations based on Monte Carlo simulation for CT examinations using tube current modulation. Radiation Protection Dosimetry 174, 387-394, 2017, 査読有, DOI: 10.1093/rpd/ncw144
- ② Keisuke Fujii, Kyle McMillan, Maryam Bostani, Christopher Cagnon, Michael McNitt-Gray. Patient size-specific analysis of dose indexes from CT lung cancer screening. American Journal of Roentgenology 208, 144-149, 2017, 査読有, DOI: 10.2214/AJR.16.16082
- ③ Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Keisuke Takahashi, Satoshi Obara, Keiichi Akahane, Mitsuo Satake. Evaluation of organ doses in adult and paediatric CT examinations based on Monte Carlo simulations and in-phantom dosimetry. Radiation Protection Dosimetry 165, 166-171, 2015, 査読有, DOI: 10.1093/rpd/ncv074
- ④ Toshio Kawasaki, Keisuke Fujii, Keiichi Akahane. Estimation of organ and effective doses for neonate and infant diagnostic cardiac catheterizations. American Journal of Roentgenology 205, 599-603, 2015, 査読有, DOI: 10.2214/AJR.14.13852

[学会発表] (計 25 件)

- ① 藤井啓輔、野村恵一、村松禎久、後藤崇博、小原 哲、赤羽恵一、楠本昌彦. シミュレーション計算に基づいた管電流変調機能使用時の小児 CT 検査における臓器線量の評価. 第 73 回日本放射線技術学会総会学術大会, 横浜, 2017 年 4 月 13 日
- ② 野村恵一、藤井啓輔、長澤宏文、村松禎久、塚越伸介、柿沼龍太郎. 超高精細 CT と従来 CT

の比較: 線量シミュレーションによる腹部 CT 撮影の被ばく線量の検討. 第 73 回日本放射線技術学会総会学術大会, 横浜, 2017 年 4 月 13 日

③ Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Miki Yoshimura, Naotaka Sato, Masahiko Kusumoto. Organ dose evaluations based on Monte Carlo simulation and in-phantom dosimetry for interventional radiology. Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA), Chicago, November 26 – December 3, 2016

④ Yoshihisa Muramatsu, Keiichi Nomura, Keisuke Fujii, Michael McNitt-Gray, Masahiko Kusumoto. Can Size-Specific Dose Estimates (SSDE) be regarded as the preferred dose index for the detectability in lung cancer CT screening? Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA), Chicago, November 26 – December 3, 2016

⑤ Keisuke Fujii, Kyle McMillan, Maryam Bostani, Christopher Cagnon, Michael McNitt-Gray. Patient-Size Specific Analysis of CT Doses From Lung Cancer Screening. American Association of Physicists in Medicine 57th Annual Meeting, Anaheim, July 16, 2015

⑥ Keisuke Fujii, Maryam Bostani, Christopher Cagnon, Michael McNitt-Gray. Benchmarking Head CT Doses: A Pooled Vs. Protocol Specific Analysis of Radiation Doses in Adult Head CT Examinations. American Association of Physicists in Medicine 57th Annual Meeting, Anaheim, July 12 - 16, 2015

⑦ Keisuke Fujii, Kyle McMillan, Maryam Bostani, Christopher Cagnon, Michael McNitt-Gray. Differences Observed in Radiation Doses Across 2 Similar CT Scanners From Adult Brain-Neck CT Angiography. American Association of Physicists in Medicine 57th Annual Meeting, Anaheim, July 12 - 16, 2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 啓輔 (FUJII Keisuke)

名古屋大学・大学院医学系研究科・助教
研究者番号: 40469937