

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K09897

研究課題名(和文) X線CTの水ファントムを用いた吸収線量計測法に基づく臓器被ばく線量の定量的な評価

研究課題名(英文) Patient organ doses from CT based on absorbed dose-to-water dosimetry using cylindrical water phantoms.

研究代表者

荒木 不次男 (Araki, Fujio)

熊本大学・大学院生命科学研究部(保)・教授

研究者番号：00295148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、X線CTの円筒形水ファントムを用いた吸収線量計測法に基づいて、患者CT画像を用いたモンテカルロ計算から各社MDCT装置の臓器被ばく線量を定量的に評価した。具体的には、(1)モンテカルロ法によって各社MDCT(東芝、GE、Philips、Siemens)のX線ビームモデリングを行った。(2)円筒形水ファントムを用いた電離箱測定とモンテカルロ計算によって吸収線量を評価した。(3)CT画像を用いたモンテカルロ計算と線量体積ヒストグラム(DVH)によって臓器被ばく線量を算出した。(4)管電流変調スキャンに対応したモンテカルロ計算による被ばく線量低減化の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we evaluated patient organ dose based on absorbed water-to-dose measurements using cylindrical water phantoms. (1) The sources for four commercial MDCT scanners were modeled with the Monte Carlo method based on AI-attenuation curves and lateral dose profiles in free air. (2) The absorbed dose to water in cylindrical water phantoms was measured with a Farmer-type ionization chamber and was calculated by Monte Carlo method (3) The patient organ dose was calculated from dose volume histograms obtained by the Monte Carlo method using CT images. (4) The reduction of the exposure dose investigated by simulating a tube-current modulation technique using the Monte Carlo method.

研究分野：放射線線量計測学

キーワード：Multi-detector CT Monte Carlo simulation CT dosimetry organ dose 被ばく線量

1. 研究開始当初の背景

近年、X線CTによる被ばく線量の増加や米国での脱毛事故等が国際的に注目され、各国際機関からCTの線量計測に関する現状と問題点が報告されている。我が国ではCTの被ばく線量は、年間医療被ばくの約半分(一人当たり2.3 mSv)を占めており、諸外国に比べて圧倒的に多く、被ばく線量の評価と低減が重要な課題となっている。この対策として、各CTメーカーは逐次近似法画像再構成や管電流変調スキャンなどの技術を導入して、線量と画質の適正化を図っている。一方で、CTの被ばく線量(吸収線量)の計測法や、患者固有の臓器被ばく線量の定量的な評価法は確立されていない。一般的に、円筒形アクリルファントム内の空気カーマを指標としたCTDI_{vol}(volume computed tomography dose index)が、CTの線量指標として用いられている。また、最近では国際放射線防護委員会(ICRP)の人体類似ボクセルファントムを用いた数値計算から臓器の実効線量が評価されている。しかし、実際には患者固有の臓器被ばく線量を評価する必要がある。

研究代表者は、平成24-26年度科研費によって、画像誘導放射線治療に使用されているCone beam CT(CBCT)の吸収線量計測法の開発と、患者CT画像を用いたモンテカルロ計算から臓器被ばく線量の評価を行ってきた。さらに、本計測法とモンテカルロ計算を新たに診断用CTの被ばく線量評価に応用し、その有用性を報告してきた。図1はCTの吸収線量計測を目的に開発した円筒形水ファントムである。図2はCTのX線スペクトルとボウタイフィルタをモデリングし、モンテカルロ計算から求めた骨盤CTの線量分布で、図3は線量体積ヒストグラムを示す。線量分布は、図1-1のファントム測定による吸収線量で校正されている。本法は、従来のCT用電離箱測定によるCTDI_{vol}での空気カーマ評価と異なり、円筒形水ファントム中での電離箱測定から、電離量の感度補正をモンテカルロ計算で行い、直接的にCTの吸収線量を評価する新たな計測法である。

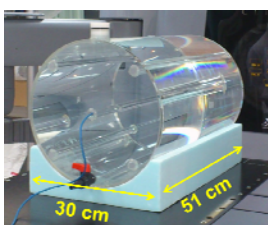


図1. 円筒形水ファントム

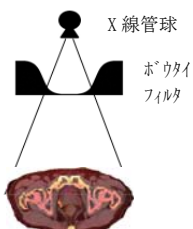


図2. 骨盤CTの線量分布計

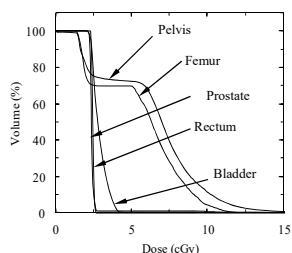


図3. 線量体積ヒストグラム

本研究では、これまでに研究した「CBCTと診断用CTの吸収線量計測法の開発」及び「CT画像を用いたモンテカルロ計算による臓器被ばく線量の評価」に基づき、各社CTを対象に、モンテカルロ計算による患者固有の臓器被ばく線量(ヘリカルとノンヘリカルスキャンを含む)の定量的な評価と比較、管電流変調スキャンによる被ばく低減化の検討、吸収線量と画質の適正化を行った。

2. 研究の目的

本研究では、X線CTの水ファントムを用いた吸収線量計測法に基づいて、患者CT画像を用いたモンテカルロ計算から各社CTの臓器被ばく線量を定量的に評価・比較した。

1. モンテカルロ法による各社CT装置(東芝, GE, Philips, Siemens)のX線ビームモデリング
2. 円筒形水ファントムを用いた電離箱測定とモンテカルロ計算による吸収線量評価
3. CT画像を用いたモンテカルロ計算と線量体積ヒストグラム(DVH)による患者臓器被ばく線量の算出
4. 管電流変調スキャンに対応したモンテカルロ計算による被ばく線量低減化の検討

3. 研究の方法

- 3.1. 各社CT装置のX線ビームモデリング
 - (1) CTのA1減弱曲線の測定と空中軸外線量比(OCR_{air})の測定

図4に示す配置で、各電圧(120, 100 kVp)で測定した。

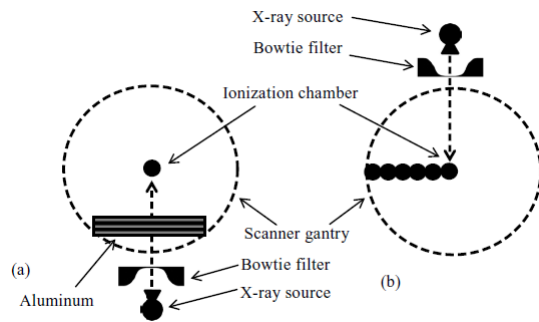


図4. CT-X線のA1減弱曲線の測定とOCR_{air}測定

- (2) CTのX線スペクトルとボウタイフィルタのモデリング

測定したA1減弱曲線からX線スペクトルを推定し、OCR_{air}ではボウタイフィルタの形状を推定する。モデリングの検証は、モンテカルロ計算と測定によるA1減弱曲線とOCR_{air}の比較で行った。

3.2. 円筒形水ファントムを用いた吸収線量計測

腹部用(径30 cm, 長さ51 cm)と頭部用(径16 cm, 長さ33 cm)の円筒形水ファントム(図3-2)を用いて、ファントム長さのフルスキャンを同一撮影条件で行い、中心と周囲4箇

所の電離箱測定から各社 CT のアクリル棒内の吸収線量を評価する。図 5 は、円筒形水ファントムの CT 画像と線量評価点を示す。測定はコバルト水吸収線量校正定数を持ったファーマ型電離箱 (0.6 cm³) を各測定箇所へ挿入し、他の 4 箇所にはアクリル (PMMA) 棒を挿入して行った。

円筒形ファントムを用いた測定電離量は、図 6 に示す手順にしたがって水の吸収線量に変換された。(a) で測定された電離量は、(b) の水中での電離量に MC で算出したファントム補正係数で変換され、(c) の水吸収線量は ⁶⁰Co と kV-CT の線質変換係数 k_q によって求められる。最終的には、(d) の 5 箇所の PMMA の吸収線量測定で評価された。ここで、CT の各電圧 (120, 100 kVp) での電離箱の線質変換係数 (感度補正)、及び水とアクリルの線量比は、円筒形水ファントムと電離箱をモンテカルロ法でモデリングして算出した。

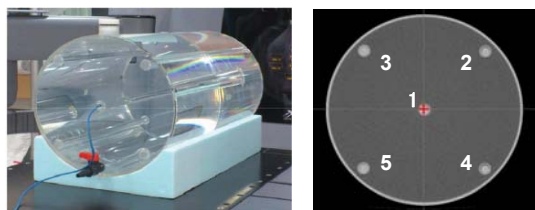


図 5. 円筒形水ファントムとその CT 画像と線量評価点

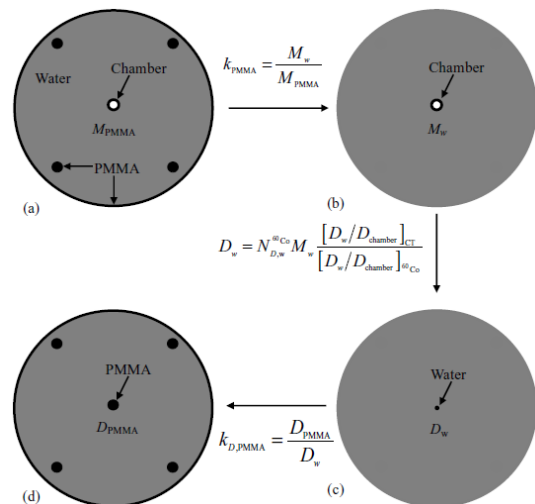


図 6. 円筒形水ファントムを用いた水吸収線量の評価

表 1. 腹部用円筒形水ファントムにおける照射条件

CT Scanner	Tube current (mA)	Beam pitch	Rotation speed (sec/rotation)	Nominal beam collimation (mm)
Brilliance	302	0.804	0.4	40
LightSpeed	335	0.984	0.5	40
Aquilion	300	0.828	0.5	32
SOMATOM	300	1.0	0.5	38.4

表 2. 頭部用円筒形水ファントムにおける照射条件

CT Scanner	Tube current (mA)	Beam pitch	Rotation speed (sec/rotation)	Nominal beam collimation (mm)
Brilliance	261	0.392	0.75	40
LightSpeed	300	0.531	0.5	40
Aquilion	300	0.590	0.5	32
SOMATOM	240	0.6	0.5	38.4

3.3. CT 画像を用いたモンテカルロ計算による臓器被ばく線量 (平均吸収線量) の定量的な評価

CT 画像を DICOM 出力で取込み、同一スキャン条件でのモンテカルロ計算から線量分布を作成した。各 CT の臓器被ばく線量 (ヘリカルとノンヘリカルスキャンを含む) は、臓器輪郭と線量分布から線量体積ヒストグラム (DVH) を算出して評価した。

以上のように、項目 3.1, 3.2, 3.3 の手順にしたがって、各社 CT の各電圧 (120, 100 kVp) での線量測定及びモンテカルロ計算から頭部、頸部、胸部、腹部の各臓器被ばく線量の定量的な評価と比較を行った。

3-4. 管電流変調スキャンに対応したモンテカルロ計算による被ばく線量低減化の検討

管電流変調スキャンに対応したモンテカルロ計算を行うために、図 7 に示すサイズの異なる 3 種類の楕円ファントムと 1 種類の円筒ファントムを組み合わせたアクリルファントムを製作し、その周辺線量の測定からファントム厚に応じた管電流の変化率を求めた。また、管電流の変化率を設定したモンテカルロ計算から被ばく線量低減化の有用性を検討した。

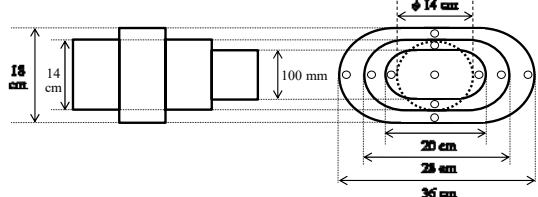


図 7. 管電流変調測定用アクリルファントム

4. 研究成果

4.1. 各社 CT 装置の X 線ビームモデリング

図 8 に、各社 CT 装置 (東芝, GE, Philips, Siemens) の腹部 bowtie filter と頭部 bowtie filter における 120 と 100 kVp の測定とモンテカルロ計算による Al 減弱曲線を示す。表 1 に Al 半価層を示す。

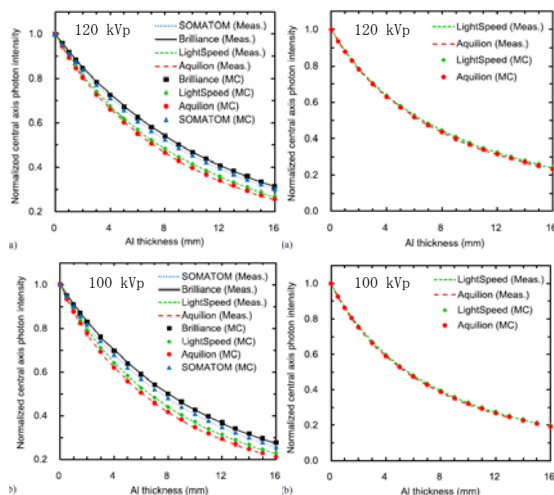


図 8. 各社 CT 装置の Al の減弱曲線 (左図: 腹部 bowtie filter, 右図: 頭部 bowtie filter)

表 3. 各社 CT 装置の腹部と頭部 bowtie filter における 120, 100 kVp の A1 半価層 (mm)

X-ray voltage (kVp)	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
Bowtie filter for body scan				
120	9.10 (9.10)	7.54 (7.57)	7.17 (7.15)	8.65 (8.65)
100	8.03 (8.03)	6.61 (6.60)	6.12 (6.11)	7.53 (7.52)
Bowtie filter for head scan				
120	-	6.63 (6.63)	6.42 (6.42)	-
100	-	5.63 (5.62)	5.47 (5.48)	-

腹部 bowtie filter では、同じ管電圧でも A1 半価層が約 2 mm まで異なるが、頭部 bowtie filter ではほぼ一致する。

図 9 は同様に各社 CT 装置の OCR_{air} 示す。OCR_{air} は腹部 bowtie filter と頭部 bowtie filter の形状を示している。

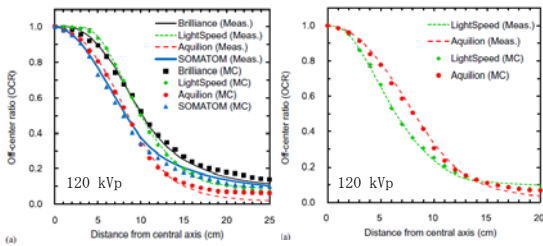


図 9. 各社 CT 装置の空中軸外線量比 (左図: 腹部 bowtie filter, 右図: 頭部 bowtie filter)

4. 2. 円筒形水ファントムを用いた吸収線量計測

4. 2. 1. ファントム補正係数と線質変換係数
表 4~7 に、図 6(a)~(d) の円筒形水ファントムにおける MC 計算から求めた各社 CT 装置の水と PMMA の電離量比 $k_{p,PMMA}$ と線質変換係数 k_Q 、PMMA と水の吸収線量比 $k_{D,PMMA}$ 示す。MC 計算の不確定度は 1 s. d. である。

表 4. 腹部用水ファントムの 120 kVp の各種補正係数

Quantity	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
k_{PMMA}	0.9934 ± 0.10	0.9890 ± 0.11	0.9889 ± 0.11	0.9918 ± 0.10
k_Q	0.8922 ± 0.11	0.8909 ± 0.11	0.8877 ± 0.11	0.8915 ± 0.11
$k_{D,PMMA}$	0.7645 ± 0.10	0.7570 ± 0.10	0.7555 ± 0.10	0.7625 ± 0.10
k_{all}	0.6776 ± 0.11	0.6671 ± 0.11	0.6632 ± 0.11	0.6742 ± 0.11

表 5. 腹部用水ファントムの 100 kVp の各種補正係数

Quantity	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
k_{PMMA}	0.9881 ± 0.11	0.9843 ± 0.11	0.9880 ± 0.11	0.9887 ± 0.11
k_Q	0.8842 ± 0.11	0.8809 ± 0.12	0.8775 ± 0.12	0.8817 ± 0.12
$k_{D,PMMA}$	0.7428 ± 0.10	0.7381 ± 0.11	0.7359 ± 0.11	0.7409 ± 0.11
k_{all}	0.6489 ± 0.11	0.6400 ± 0.12	0.6380 ± 0.12	0.6459 ± 0.12

表 6. 頭部用水ファントムの 120 kVp の各種補正係数

Quantity	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
k_{PMMA}	0.9858 ± 0.08	0.9823 ± 0.09	0.9819 ± 0.09	0.9850 ± 0.09
k_Q	0.8961 ± 0.09	0.8876 ± 0.10	0.8861 ± 0.10	0.8951 ± 0.09
$k_{D,PMMA}$	0.7796 ± 0.08	0.7631 ± 0.08	0.7613 ± 0.08	0.7747 ± 0.08
k_{all}	0.6887 ± 0.09	0.6653 ± 0.10	0.6624 ± 0.10	0.6829 ± 0.09

表 7. 頭部用水ファントムの 100 kVp の各種補正係数

Quantity	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
k_{PMMA}	0.9828 ± 0.08	0.9796 ± 0.09	0.9788 ± 0.09	0.9830 ± 0.09
k_Q	0.8869 ± 0.09	0.8791 ± 0.10	0.8762 ± 0.10	0.8838 ± 0.10
$k_{D,PMMA}$	0.7569 ± 0.08	0.7412 ± 0.09	0.7406 ± 0.09	0.7538 ± 0.08
k_{all}	0.6597 ± 0.09	0.6383 ± 0.10	0.6351 ± 0.10	0.6549 ± 0.09

4. 2. 2. 円筒形水ファントムの吸収線量評価

図 10 に、腹部用と頭部用水ファントムを用いた 5 箇所の測定点 (図 5) での各社 CT 装置の電離箱測定値とモンテカルロ計算値による吸収線量の比較を示す。各 CT 装置の吸収線量は同一条件で示されている。吸収線量は、A1 半価層 (線質) が大きいほど小さくなっている。また、測定値と計算値は 120 kVp で 3%以内、100 kVp で 5%以内の一致であった。

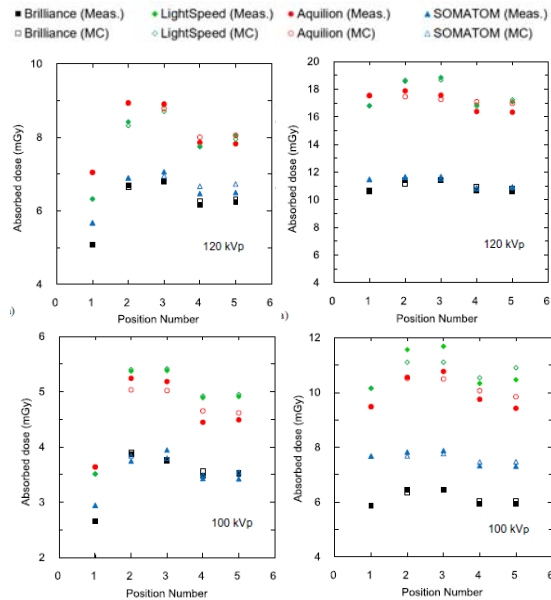


図 10. 円筒形水ファントムを用いた各社 CT 装置の各測定点での比較 (左図: 腹部用, 右図: 頭部用)

4. 3. CT 画像を用いたモンテカルロ計算による患者臓器被ばく線量 (平均吸収線量) の定量的な評価

図 11 は、頭部 CT 撮影と腹部 CT 撮影におけるモンテカルロ計算による線量分布の例を示す。骨において高い吸収線量を示していることがわかる。

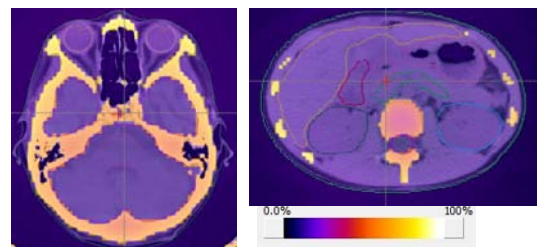


図 11. 頭部 CT と腹部 CT における線量分布

表 8 は、頭部撮影、胸部撮影、腹部撮影における臓器の平均線量を示す。頭部では体表面に位置する水晶体、眼球において線量が高くなった。脳幹の線量は低くなったが、体積全体が均一に照射された。胸部では、体表面に近い肺、心臓の線量が高くなり、脊髄の平均線量は低い。一部の体積では肺、心臓より高い線量が見られた。腹部では、すべての臓器が均一に照射された。肝臓および腎臓は平均線量に大きな差は見られなかったが、中心に近い直腸で線量が低くなった。

表 8. 頭部, 腹部, 腹部 CT 撮影における各臓器の平均線量 (mGy)

Organ	Brilliance	LightSpeed	Aquilion	SOMATOM
Head scan				
Eye	20.0	35.3	41.7	28.9
Eye lens	21.7	38.5	47.2	31.3
Brain stem	13.6	22.9	26.1	20.4
Chest scan				
Lung	21.1	26.1	35.3	23.0
Heart	22.0	27.4	36.9	25.2
Spinal cord	15.5	18.4	23.8	17.6
Abdominal scan				
Liver	16.5	21.3	22.7	18.8
Kidney	17.5	21.8	23.1	19.5
Rectum	12.3	14.4	15.8	14.3

4. 4. 管電流変調スキャンに対応したモンテカルロ計算による被ばく線量低減化の検討

図 12 は, 管電流変調測定用アクリルファントムを用いた管電流変調ありと無しでの電離箱測定値とモンテカルロ計算値の線量変化の比較を示す. 管電流変調を使用することで, 体厚に応じた電流値となり, 被ばく線量低減の最適化が可能となった. また, 画質の SD の変化が小さくなった.

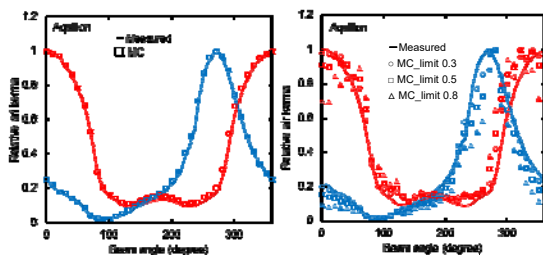


図 12. 管電流変調による線量変化 (mGy). 左図: 管電流変調なし, 右図: 管電流変調あり. 赤はファントムの 0°, 青は 270° の位置で測定された空気カーマ

引用文献

- ① Kazunari Hioki, Fujio Araki, et al, Phys Med Biol, 59, 7297-7313, 2014
- ② Takeshi Ohno, Fujio Araki, et al, Phys Med Biol, 60, 4517-4531, 2015
- ③ Kazunari Hioki, Fujio Araki, et al, Biomed Phys Eng Express, 1, 025203-1-8, 2015
- ④ Takeshi Ohno, Fujio Araki, et al, Physica Medica 35, 50-58, 2017

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Takeshi Ohno, Fujio Araki, Ryota Onizuka, New absorbed dose measurement with cylindrical water phantoms for multidetector CT, Phys. Med. Biol. 60, 4517-4531, 2015, 査読有, Doi:10.1088/0031-9155/60/11/4517
- ② Kazunari Hioki, Fujio Araki, Takeshi Ohno, et al, Monte Carlo-calculated patient organ doses from kV-cone beam CT in image-guided radiation therapy, Biomed.

Phys. Eng. Express, 1, 025203-1-8, 2015, 査読有, Doi:10.1088/2057-1976/1/2/025203

③ Takeshi Ohno, Fujio Araki, Ryota Onizuka, et al, Comparison of dosimetric properties among four commercial multi-detector computed tomography scanners, Physica Medica 35, 50-58, 2017, 査読有, http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.02.007

④ 北里裕美子, 久家教幸, 荒木不次男, 画像誘導放射線治療(IGRT)における CBCT の吸収線量評価—施設, 装置間比較—, 日本放射線技術学会, 4, 309-316, 2017

DOI: 10.6009/jjrt.2017_JSRT_73.4.309

[学会発表] (計 6 件)

① Takeshi Ohno and Fujio Araki, Comparison of beam characteristics and organ dose from four commercial Multidetector computed tomography Scanners, 第 57 回米国医学物理学学会学術大会, 2015.7.12-16, Anaheim, CA, USA

② 大野 剛, 荒木不次男, 他, CT の吸収線量測定法の確立と患者臓器線量の定量的評価, 第 43 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2015, 金沢市

③ Fujio Araki and Takeshi Ohno, New ionization chamber dosimetry of absorbed dose to water in diagnostic kV x-ray beams, 第 58 回米国医学物理学学会学術大会, 2016.7.31-8.4, Washington, DC, USA

④ Daisuke Sakabe, Takeshi Ohno, Fujio Araki, et al, Combined organ dose for digital subtraction angiography and computed tomography using Monte Carlo simulation, 第 58 回米国医学物理学学会学術大会, 2016.7.31-8.4, Washington, DC, USA

⑤ Takeshi Ohno and Fujio Araki, Comparison of performance of tube-current modulation of three commercial MDCT scanners, 第 58 回米国医学物理学学会学術大会, 2016.7.31-8.4, Washington, DC, USA

⑥ Fujio Araki, Suzuna Umeno, Takeshi Ohno, Comparison of absorbed dose based on air-kerma calibration and ⁶⁰Co absorbed-dose calibration in diagnostic x-ray beams, 第 59 回米国医学物理学学会学術大会, 2017.7.30-8.3, Denver, CO, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木 不次男 (ARAKI Fujio)

熊本大学・大学院生命科学研究部・教授

研究者番号: 00295148

(2) 研究分担者

大野 剛 (OHNO Takeshi)

熊本大学・大学院生命科学研究部・助教

研究者番号: 20646971