

令和元年5月30日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K09014

研究課題名(和文)人体ファントム内線量計測に基づく日本の乳幼児CT被ばくの実態解明

研究課題名(英文) Investigation into the current status of radiation exposure in Japanese infant CT examinations using an in-phantom dosimetry system

研究代表者

川浦 稚代 (Yamauchi-Kawaura, Chiyo)

名古屋大学・医学系研究科(保健)・講師

研究者番号：60324422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本人0.5歳児の体型を模擬した頭-胸部ファントムを作製し、その内部に蛍光ガラス線量計を多数設置した人体ファントム臓器線量計測システムを構築し、それを用いて乳児頭部CT検査時の被ばくの現状を実測に基づいて調査した。また、乳幼児頭部の診断画像の画像ノイズを評価し、ノイズと患者年齢、検査目的、頭部形状、線量との関係から検査の最適化について検討を行った。一方で、放射線照射による高分子材料の発光現象を利用した被写体内線量分布測定システムを考案し、その精度検証を行った。本システムは、従来よりも安価で簡便に線量分布を測定でき、検査の最適化やリスク評価において有益な線量情報をもたらすであろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

わが国では、X線CT検査による子供の被ばくリスクが大きな社会問題となっているが、CT検査の最適化や、被ばくリスクの推定精度の検証に必要な臓器線量データは皆無であった。本研究ではこの問題を解決すべく、日本人体型を模擬した人体ファントムによる線量評価により、乳幼児において実施頻度が最も高い頭部CT検査の臓器線量レベルを明らかにした。同時に、診断画像を基に、画質と線量との関係を年齢、検査目的、頭部形状別に調べることで、年齢別に最適検査条件を提案した。本研究で得られた線量や画質データは、検査の最適化だけでなく、より効果的な放射線防護法の開発や、リスク推定の精度向上に大いに役立つであろう。

研究成果の概要(英文)：In this study, to investigate the current status of radiation exposure in Japanese infant CT examinations, we developed a Japanese 0.5-year-old head-chest phantom and constructed an in-phantom dosimetry system consisting of radiophotoluminescence glass dosimeters installed at various tissue/organ sites within the phantom. In addition, we quantitatively and qualitatively evaluated the image noise of diagnostic images in head CT examinations, and investigated the optimization of head CT examination from the relationship between image noise, patient age, examination purpose, head shape, and radiation dose. On the other hand, we devised an internal dose distribution measurement system based on the luminescence from polymer materials by X-ray irradiation and verified its accuracy. This system can more economically and easily measure the dose distribution than conventional methods and will provide useful dose information in the risk assessment and the optimization of CT examinations.

研究分野：放射線計測学

キーワード：放射線防護 医療被ばく 乳幼児CT 人体ファントム

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、各国の大規模な疫学研究の進展により、幼少期に X 線 CT 検査(特に頭部 CT 検査)を 1 回以上受診した患者群において、成長後のがんの発生率が優位に増加するという結果が数多く報告されている<sup>①</sup>。しかし、これら疫学研究では、発がん素因や交絡因子、被ばく線量(臓器線量)の評価等に不確かさを含んでいるため、リスクの大小の判断には注意が必要である。

(2) その不確かさの要因の一つである被ばく線量評価では、一般に、①微小線量計を多数設置した人体ファントムを利用した実測法と②モンテカルロシミュレーション法の 2 種類の評価方法が汎用されている。どちらも、人体構造を精密に模した人体ファントム(①物理的、②数学的)を必要とするが、小児においては、体型変動を考慮して年齢別に複数の人体ファントムを必要とする。しかし、日本人体型を模した小児型の物理ファントムは 1 体(6 歳相当)しか市販されていないため、年齢に応じた線量評価ができていないのが現状である。そこで我々は、先の研究<sup>②-③</sup>において、患者の CT 画像から体格・骨格形状を計測し、0 歳、0.5 歳、1 歳、3 歳児の日本人型乳幼児人体ファントムを設計し、試作した 3 歳児ファントムを用いて、小児 CT 検査時の線量レベルの決定や検査の最適化について検討を行った。

(3) しかし、小児 CT 検査において実施件数が最も多い年齢は 1 歳未満の乳児であり、3 歳児同様、被ばくレベルや線量と画質の関係が不明なため、リスク評価や被ばく低減に向けた検査の最適化が立ち遅れているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、国内外で発がんリスクが大きな問題となっている乳幼児 CT 被ばくの実態を、独自に開発する日本人乳幼児型人体ファントム内の線量計測に基づいて解明することを目的とする。具体的には、

(1) 日本人型 0.5 歳児ファントムを作製し、その内部の主要組織・臓器位置に、蛍光ガラス線量計を多数設置した人体ファントム臓器線量計測システムを構築する。

(2) 構築したシステムを用いて、臨床条件における被ばく線量を臓器ごとに測定し、現状での乳児 CT 被ばくによる線量レベルを明らかにする。

(3) また、乳幼児 CT 検査時の画質と線量との関係を調査し、年齢に応じた検査の最適化の可能性について検討を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 日本人型 0.5 歳児頭-胸部ファントム臓器線量計測システムの作製

日本人体型を模した 0.5 歳児ファントムの構造は、2010~2012 年度の科研費研究(代表者：川浦)において、患者の CT 画像から計測した体格、骨格データを基に決定された。しかし、0.5 歳児の体格は小さいため、骨格の加工では 3 歳児よりも非常に繊細な加工が必要となり、研究計画当初に予定していたよりもマシンタイムが超過する可能性が出た。そこで、ファントムの全身の作製を断念し、頭部から胸部までの作製に計画変更した。先の研究<sup>②-③</sup>と同様に、ファントム素材には、アクリル樹脂(筋肉等価材)、石膏(骨等価材)、タフラング 260(肺等価材)を使用した。全パーツをマシニング加工により作製し、骨部分には石膏を流し込んで固めた。International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 103<sup>④</sup>において、実効線量評価に必要とされているリスク臓器に対し、市販の蛍光ガラス線量計(GD-352M、旭テクノグラス社)を設置するための 4.6mm 直径の穴を開けた。ガラス線量計は、国家標準電離箱線量計とトレーサビリティの取れた電離箱線量計を用い、CT 検査において一般に使用されている X 線のエネルギー範囲(30keV~70keV)で校正を行った。ファントムの主要な組織・臓器位置に合計 65 個のガラス線量計を設置し、X 線照射後のガラス線量計の読み値から臓器線量を算出する専用の解析ツールを作成した。以上の構成により、0.5 歳児頭-胸部ファントム臓器線量計測システムを構築した。

#### (2) 0.5 歳児頭-胸部ファントムによる頭部 CT 検査時の被ばく線量評価

愛知県内の 3 つの病院に臓器線量計測システムを持ち込み、各病院で日常的に使用している 7 種類の頭部 CT 検査条件を使って被ばく線量を測定・評価した。また、CT スキャン時にコンソール上に表示された volume CT dose index(以下、CTDI<sub>vol</sub>)と dose length product(以下、DLP)を記録し、医療被ばく研究情報ネットワーク(J-RIME)が公表している診断参考レベル(DRLs 2015)<sup>⑤</sup>と比較することで、現状の乳児頭部 CT 検査における線量レベルを確認した。さらに、CT 装置の技術進歩や診断ポリシーの変更などによって、経年的に乳児の被ばく線量が変動しているかどうかを調べるために、2010~2011 年に市販の欧米人型を持つ 0~1 歳児ファントム(ATOM ファントム、CIRS 社)を用いて測定した頭部 CT 検査時の平均臓器線量<sup>⑥-⑦</sup>と本研究で得られた 7 条件における各臓器の平均吸収線量とを比較した。

#### (3) 頭部 CT 検査における画質と線量の関係

本研究では、2006~2016 年の期間に名古屋大学病院において診断目的で CT 検査を受診した 15 歳未満の患者の診療データを基に、CT 検査の実施状況を調査した。患者データの抽出は、名古屋大学生命倫理審査委員会の承認を得て行われた。実施状況調査により、最も検査件数が多い年齢は 0 歳児であり、頭部領域の撮影頻度が最も多いことが分かった。ただし、2011 年ごろを境に、乳幼児の頭部 CT 検査の撮影法は、non-helical から helical スキャンモードへ移行され始め



低く設定されており、概ね検査の最適化はなされていると判断できた。次に、臓器ごとに平均吸収線量を求め、過去(2010~2011年)に我々が乳児ファントムを用いて測定した時の臓器線量<sup>⑥</sup>との比較を行った(図3)。その結果、スキャン範囲内に位置する脳や水晶体の線量は、過去も現在も同程度であったが、スキャン範囲の境界やその付近に位置する唾液腺や甲状腺の線量は、両者で大きく異なることが分かった。この理由には、スキャンモードの違いが影響していると考えられた。2010~2011年ごろは頭部CT検査において non-helical スキャンモードを選択することが標準法であったが、近年のCT装置の技術進歩(検出器の多列化や時間分解能の向上など)により、現在は、じっとしてられない乳児や小児の検査において、短時間に広範囲のスキャンデータが収集できる helical スキャンモードを選択することが一般的になっている。本研究での実態調査においても、0歳児の頭部CT検査時の helical スキャンモードの選択率は、2012年には36%であったが、2016年には74%と2倍以上に増加していることを確認している。本研究の7種類の撮影条件も、面検出器を搭載する Aquilion ONE 以外のCT装置では全て helical スキャンモードが選択された。いくつかの利点を持つ helical スキャンモードではあるが、欠点として、オーバーレンジによる設定スキャン範囲外の臓器の線量増加が問題となる。本研究の唾液腺や甲状腺の線量の高さは、このオーバーレンジの影響によるものと考えられる。最新のCT装置には、オーバーレンジによる余分な被ばくを軽減する非対称可変コリメータを装備している機種もあるが、コリメータの使用によっても、オーバーレンジによる余分な被ばくを全てカットすることはできないことが我々の調査において確認されている。よって、特に体の小さな乳児に対しては、オーバーレンジを考慮して、スキャン範囲、ビーム幅、ビームピッチを見直す必要があると考える。このように、自施設の線量が、DRLよりも低い値を示す場合においても、CT装置や検査手技の変更に応じて、個々の臓器の線量は経年的に変動している可能性がある。よって、被ばく評価は定期的に臓器線量レベルで行うことが放射線防護上重要であると考えられる。上記成果は現在英文誌に投稿中である。

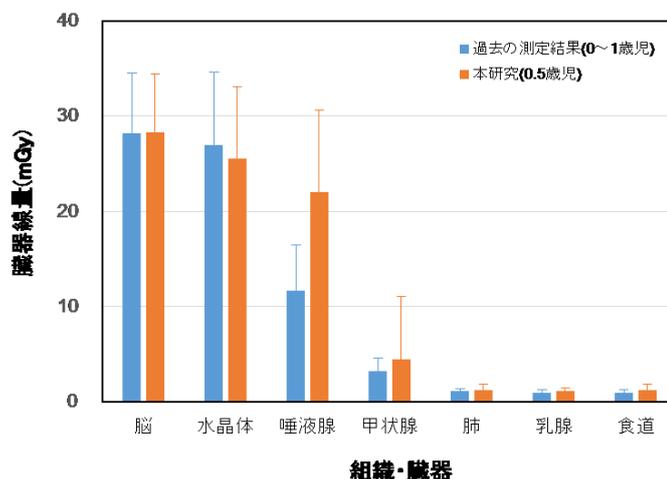


図3 乳児頭部CT検査における過去と現在の臓器線量比較

## (2) 頭部CT検査における最適条件の検討

図4は non-helical CT画像における年齢ごとの平均 Noise SD 値と線量(mAs)との関係を示している。このグラフから、同じ線量であれば、年齢が若いほど Noise SD は小さくなることが分かった。また、大脳レベルでは低年齢ほど、逆に小脳レベルでは高年齢ほど線量を大幅に増加させも劇的な画質の改善は認められないことが確認できた。

次に、検査目的と線量(mAs)との関係を年齢別に調査した。その結果、外傷も外傷以外の疾患も、0~3歳までは頭の大さに依存せず、照射線量(mAs)は一定であった。10歳児では、外傷以外の疾患の方が、外傷よりも50mAsほど線量を高く設定していることが分かった。また本研究で調査した全年齢において、小脳レベルは大脳レベルよりも骨から発生するアーチファクトを軽減するため、50mAsほど線量を高く設定していることも確認できた。以上の結果から、どの年齢も大脳レベルでは線量を大幅に低減してもノイズの変動は小さいので、年齢別にある程度の線量低減が可能であると考えた。一般に、小児の頭部診断画像における脳の推奨 Noise SD は3.5-4であることを考慮すると、図4(a)の結果から、大脳レベルの線量を0歳児では100mAs、1歳児では150mAs、3歳児では225mAs、10歳児では250mAsに設定することで、画質を大幅に低下させることなく被ばく低減が可能になるのではないかと考えた。しかし、頭の形状の違いによっては画像ノイズの分布に偏りが出る可能性がある。そこで次に、頭部の形状が画質と線量に与える影響を調べた。同じ撮影条件で撮影した

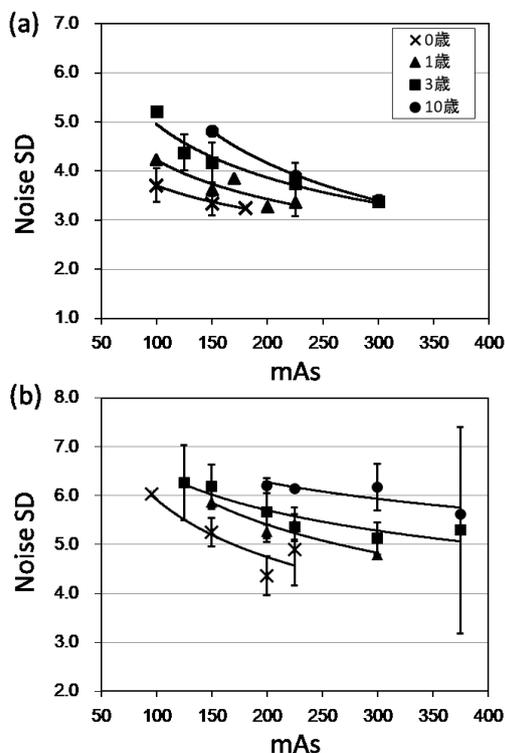


図4 年齢別頭部CT検査時の画像ノイズと線量(mAs)との関係 (a)大脳レベル、(b)小脳レベル

(脳の平均 Noise SD=3.6、CTDI<sub>vol</sub>=32mGy)長頭型と短頭型の大脳レベルのノイズ分布を比較すると、長頭型は脳の中心に帯状に Noise SD が高い部分が存在し、短頭型に比べノイズが不均一に分布していることがわかった。同様に、線量分布画像も長頭型では、中心に帯状に線量が低い部分が存在した。そこで、線量分布画像から水晶体の平均吸収線量を計測したところ、長頭型では、両目の平均が 56.3mGy であったのに対し、短頭型では 68.1mGy と長頭型に比べ 17% も線量が増加していることがわかった。欧米人に比べ日本人の頭部は短頭型が多いことや、今後検出器を使用した CT 装置による non-helical スキャンモードの使用が増加する可能性を考慮すると、患者の状態や頭の形状、CT 装置の性能などに応じて適切な水晶体防護を検討すべきであると考えられる。ただし、診断が確定していない初期精査において、体型や検査目的を考慮せずに線量を大きく低減させ、画質を低下させるような撮影条件を適用するのは患者の利益を損ないかねない。よって本研究では、診断確定後の必ずしも精査と同等の画質が必要ではないフォローアップ等に、本研究で提案する年齢に応じた被ばく低減法を適用することが有効であると考えられる。

### (3) 高分子材料の微弱発光を利用した線量分布測定法の開発

図 5 は、微弱光測定システムを用いて PET ファントムの輝度を線量に変換して作成した線量分布画像と、同じスキャン条件において、MCシミュレーション法により推定した水ファントムの線量分布画像を比較している。これら各画像の 17 か所に 10mm×10mm の正方形の ROI を取り、ROI 内の平均線量の相対誤差を求めたところ、両者は 20% の許容誤差内で一致することが明らかとなった。この結果から、開発した線量分布測定システムを用いれば、比較的安価で簡便に精度よく被写体の線量分布を測定することが可能になると考えられ、この手法は、乳幼児のような体型変動を考慮した検査の最適化を検討する上で、有力なツールになると考えられた。

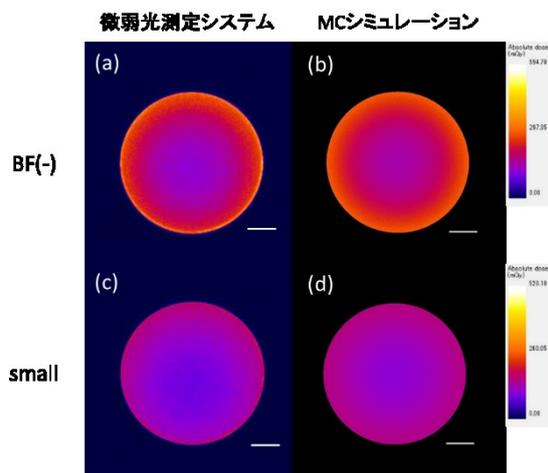


図5 微弱光測定システムによる輝度から求めた線量分布画像とMCシミュレーションにより推定された線量分布画像の比較  
上段はbowtie filter(BF)無し、下段はBF(small filter)ありの場合。

### (4) まとめ

本研究では、日本人 0.5 歳児の体型を模擬した頭-胸部ファントムを作製し、乳児用の人体ファントム臓器線量計測システムを構築した。このシステムを用いて、現状での乳児頭部 CT 検査における臓器線量レベルを明らかにした。また、乳幼児の頭部 CT 検査の実施傾向や、画質と線量の関係を調査し、頭部 CT 検査における検査の最適化について検討を行った。さらに、従来法よりも安価で簡便に使用可能な線量分布測定システムを考案し、その精度検証を行った。本研究で開発された 2 種類の線量計測システムは、乳幼児 CT 検査の最適化やリスク評価において有益な線量情報を提供し得るものと期待される。

### <引用文献>

- ①Sheppard, J.P. et al. Risk of brain tumor induction from pediatric head CT procedures: a systematic literature review. *Brain Tumor Res. Treat.* 6(1), 2018, 1-7.
- ②Yamauchi-Kawaura, C. et al. Development of age-specific Japanese head phantoms for dose evaluation in pediatric head CT examinations. *Radiat. Prot. Dosim.* 163(2), 2015, 188-201.
- ③Yamauchi-Kawaura, C. et al. Development of age-specific Japanese physical phantoms for dose evaluation in infant CT examinations. *Radiat. Prot. Dosim.* 171(4), 2016, 483-502.
- ④International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Elsevier 2007.
- ⑤Japan Association on Radiological Protection in Medicine, et al. Diagnostic reference levels based on latest surveys in Japan: Japan DRLs 2015., 2015. <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyoEng.pdf>.
- ⑥ Fujii, K. et al. Evaluation of organ doses in CT examinations with an infant anthropomorphic phantom. *Radiat. Prot. Dosim.* 147(1-2), 2011, 151-155.
- ⑦ Sugimoto, N. et al. Comparison of radiation doses between newborns and 6-y-old children undergoing head, chest and abdominal CT examinations—a phantom study. *Radiat. Prot. Dosim.* 153(1), 2013, 85-91.
- ⑧Imai, K. et al. A detection method for streak artifacts and radiological noise in non-uniform region in a CT image. *Phys. Medica*, 26, 2010, 157-165.
- ⑨高瀬郁子他、Top-hat 変換 Gauss 法を用いた脳梗塞画像の Noise Mapping、2013 巻、2013、電子情報通信学会総合大会講演論文集、p299

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① Yamauchi-Kawaura Chiyo, Fujii Keisuke, Yamauchi Masato, Yamamoto Seiichi, Kozuka Miki, Ohzawa Naoko, Suga Nanami and Ito Narumi, Shape estimation of bowtie filters based on the luminescence from polyethylene terephthalate resin by X-ray irradiation. Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 2019, in press. DOI:10.1093/rpd/ncz031

② Yamauchi-Kawaura Chiyo, Yamamoto Seiichi, Fujii Keisuke, Komori Masataka, Yamauchi Masato, Kozuka Miki, Ohzawa Naoko, Suga Nanami, Ito Narumi, Fukuyama Atsushi, Measurement of internal radiation dose distribution in CT examinations using polyethylene terephthalate resin, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, Vol.181, No. 4, 2018, 303-309 DOI:10.1093/rpd/ncy026

③ 川浦稚代、X線コンピュータ断層撮影における被ばく(3) X線CT撮影における被ばく線量の実際、Medical Imaging Technology、査読無(総説)、35巻、4号、2017、250-254 DOI: <https://doi.org/10.11409/mit.35.250>

〔学会発表〕(計 17 件)

① 川浦稚代、藤井啓輔、山内雅人、小森雅孝、山本誠一、高分子材料の微弱光測定を利用した Organ dose modulation 使用時の被写体内線量分布測定、第 46 回日本放射線技術学会秋季学術大会、2018 年 10 月 4-6 日、仙台国際センター(宮城県)

② 川浦稚代、大澤直子、藤井啓輔、山内雅人、今井國治、池田 充、伊藤公一、奈良井和宏、日本人型 0.5 歳児ファントムの開発、日本保健物理学会第 51 回研究発表会、2018 年 6 月 29-30 日、ホテルライフオー ト札幌(北海道)

③ 川浦稚代、山内雅人、小塚美喜、大澤直子、菅 七海、伊藤菜る美、山本誠一、高分子材料の微弱光測定に基づいたボウタイフィルタの形状推定、第 45 回日本放射線技術学会秋季学術大会、2017 年 10 月 19-21 日、広島国際会議場(広島県)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：藤井 啓輔

ローマ字氏名：(FUJII, keisuke)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院医学系研究科

職名：講師

研究者番号 (8 桁)：40469937

研究分担者氏名：今井 國治

ローマ字氏名：(IMAI, kuniharu)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院医学系研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：20335053

研究分担者氏名：池田 充

ローマ字氏名：(IKEDA, mitsuru)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院医学系研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50184437

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：赤羽 恵一

ローマ字氏名：(AKAHANE, keiichi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。