

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22611009

研究課題名（和文）

X線CT検査による乳幼児患者の年齢別被ばく評価と防護の最適化に関する研究

研究課題名（英文）

Age-specific dose evaluation and optimization of radioprotection in infant CT examinations

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）・助教

研究者番号：60324422

研究成果の概要（和文）：我が国の乳幼児におけるCT被ばくの実態を把握するために、日本人の3歳児体型を模擬した3歳児頭頸部ファントムを考案・作製し、そのファントム内部に微小線量計を多数配置した3歳児頭頸部ファントム臓器線量計測システムを開発した。作製した臓器線量計測システムを用いて、検査件数の半数以上を占める頭部CT検査時の臓器線量評価を行った。過去に我々が開発した0歳児および6歳児人体ファントム臓器線量計測システムを用いた線量評価結果と合わせて、年齢別に各臓器の線量レベルを比較した。乳幼児と成人について、管電流変調機構を利用した最新の被ばく線量低減システムの被ばく低減効果を調べたところ、乳幼児の被ばく低減率は大人よりも低いことが分かった。本研究成果は、乳幼児CT被ばくの防護や検査の最適化を検討する際の基盤情報となるだろう。

研究成果の概要（英文）：To investigate the radiation doses in CT examinations for Japanese infants, we developed an in-phantom dosimetry system consisting of small-sized photodiode dosimeters installed at various organ sites within a 3-year-old head phantom. Organ doses in head CT examinations that have been routinely performed most frequently were measured with the in-phantom dosimetry system in several hospitals. The evaluation of organ doses in head CT examinations for 0-year-old and 6-year-old children was also conducted using in-phantom dosimetry systems that we developed in the past then the dose level with each age was compared. We investigated the effect of the latest dose reduction system on infant and adult, and we found that the dose reduction effects of tube-current modulation systems on infant, which have no waist and a small body, was few compared with adult. The results obtained in this study would become the useful information when we reconsidered the radioprotection and the optimization of infant CT examinations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2012年度	200,000	60,000	260,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：放射線計測学

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：医療被ばく、乳幼児、X線CT、人体ファントム、線量測定・評価

1. 研究開始当初の背景

平成16年2月、英国の医学雑誌LANCET

で指摘された日本人の医療被ばくによる発がんの危険性は大きな社会不安を引き起こ

した。日本はCT保有国第一位であり、CT検査数も年々増加傾向にある。CT検査は、一検査あたりの被ばく線量がX線単純撮影検査と比べて二桁も高いため、CT検査数の増加による日本国民全体の医療被ばくの増加が懸念される。現在、そのCT被ばくで特に問題なのが、乳幼児における検査である。ヨーロッパ諸国では、十数年前から、X線検査における乳幼児の年齢と被ばく線量の関係についての大規模な調査が定期的に行われており、その結果を基に、乳幼児における診断参考レベル(DRL)の制定、ならびに、被ばく低減対策への取り組みが活発に行われている。一方、日本では、宮崎らの2004年に行ったスキャンプロトコールについてのアンケート調査(O. Miyazaki et al., *Nippon Acta Radiol.* 65, 216-223, 2005)があるのみであり、具体的な乳幼児医療被ばくの線量レベルは不明なうえ、我が国でのDRL制定の可否については全く検討されていない。宮崎らの報告によると、日本のCTオペレーターの9割が、子供の撮影条件を大人とは変えて設定していると答えているが、そのスキャンパラメータを変える根拠の大半が、医療従事者の経験によるものであった。CT装置の性能の違いによっても撮影条件は大きく異なる上、体型が年齢で大きく異なる乳幼児の撮影条件の決定は非常に難しい。また、問診により正確な症状を判断することが難しい乳幼児患者においては、高画質なX線画像による画像診断に頼らざるを得ないのが現状で、画質と線量がトレードオフの関係にあるX線診断検査において、乳幼児の被ばく線量の最適化への意識は一般的にかなり低いと考えられる。乳幼児は成人と比較して寿命が長い将来的な発がん率を考えると、X線診断検査の中でも特に高線量検査であるCT検査による乳幼児医療被ばくの低減対策は、国民の将来的な癌の発症率増加を抑制する上でも急務であると考えられる。しかし、わが国での乳幼児CT被ばくがどの程度なのか？将来どれくらいのリスクが予測されるのか？日本でのDRLは？という具体的な数値はどこにも公表されていないため、医療従事者が医療被ばくの現状を把握し、自覚を持って乳幼児CT検査の最適化を検討することは非常に困難である。

2. 研究の目的

本研究では、日本の乳幼児CT被ばくの現状を調査するために、まず、日本人乳幼児の体型を精密に模した人体等価ファントムを独自に作製し、その人体ファントム内部の種々の組織・臓器位置に、微小なX線センサーを多数埋め込んだ、乳幼児ファントム臓器線量計測システムを独自に開発する。これを用いて、放射線医学診断検査の中でも高線量

被ばくを伴う乳幼児CT検査における被ばく線量を組織・臓器ごとに精密に測定・評価し、日本の乳幼児CT被ばくの実態を解明するとともに、乳幼児CT検査の最適化を検討する。

3. 研究の方法

(1) ファントム作製：日本人の小児体型を精密に模した人体ファントムは、6~7歳児相当の体型を有したものしか市販品が無い。また、人体ファントム作製に必要な体格や骨格などの詳細な人体構造データは、どこにも見当たらない。そこで本研究では、名古屋大学医学部倫理委員会からの承認を得て、名古屋大学医学部附属病院のデータベースから、過去にX線CT診断検査を受診したことがある乳幼児のCT検査を抽出し、各画像データから全身の骨の長さ、太さ、頭囲、胸囲、腹囲、などを計測することとした。具体的には、画像解析ソフトウェアZioTerm2009を使用して、1歳児(202件)と3歳児(136件)のCT画像において、全身で318箇所の計測部位を設定し、解剖学的構造を計測した。計測したデータを基に、ファントムの形状を決定し、設計図を作成した。本研究では、ファントム素材として、International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 44に放射線線量計測用組織等価物質として報告されているアクリル樹脂(筋肉等価)と石膏(骨等価)を使用した。今回は、予算の関係から、3歳児の頭頸部のみを作製した。マシニング加工により、アクリル樹脂を設計図に合わせてパーツごとに切り出し、骨部分に石膏を流し固めることでファントムを作製した。作製した頭頸部ファントム全体を2.5cm間隔で切断し、各スライスの子体主要な組織・臓器位置に市販のガラス線量計素子(GD-302M, 旭テクノグラス(株))を設置するための直径4.5mmの穴を合計32箇所(頭頸部のみ)開け、同様に、自作のSi-pinフォトダイオード線量計を設置するために、合計9箇所(頭頸部のみ)に直径6.5mmの穴を開けた。

(2) 臓器線量計測システムの作製：臓器線量計測用の微小線量計として、本研究では、市販のガラス線量計と自作のSi-pinフォトダイオード線量計を使用した。Si-pinフォトダイオード線量計の作製方法、物理特性および校正方法は、既発表論文(T. Aoyama et al., *Med. Phys.* 29, 1504-1510, 2002)で詳述されている。

各線量計は、ICRP Publication 103で実効線量評価に必要な組織加重係数が与えられている組織・臓器位置に設置した。その概要を表1に示す。

(3) 臓器線量測定・評価：作製した3歳児頭頸部ファントム臓器線量計測システムを各病院に持ち込み、ルーチン条件で撮影を行ってもらい、その時の被ばく線量を測定・評価した。また、他の年齢における線量レベルと

表1 線量評価に使用した線量計の数

組織・臓器	RGD	Si-pin
頭蓋骨	8	2
脳	8	2
水晶体	2	2
耳下線	2	1
舌下腺・顎下腺	2	1
口腔粘膜	4	1
下顎骨	4	1
甲状腺	1	1
外気道	2	1
頸椎	1	1
皮膚	12	2

RGD: ガラス線量計

Si-pin: フォトダイオード線量計

の比較を行うために、平成 18 年-20 年度の科学研究費補助金(分担研究)で共同開発した日本人型 6 歳児ファントム臓器線量計測システムと、平成 22 年-23 年度の科学研究費補助金(分担研究)で共同開発した欧米人型 0 歳児ファントム臓器線量計測システムを用いて CT 検査における臓器線量・実効線量評価を行った。実効線量評価は、ICRP Publication 103 に従って行った。

4. 研究成果

(1) 図 1 に、CT 画像から計測した解剖学的人体構造データを基に設計した人体ファントム(3 歳児)の全体像を示す。

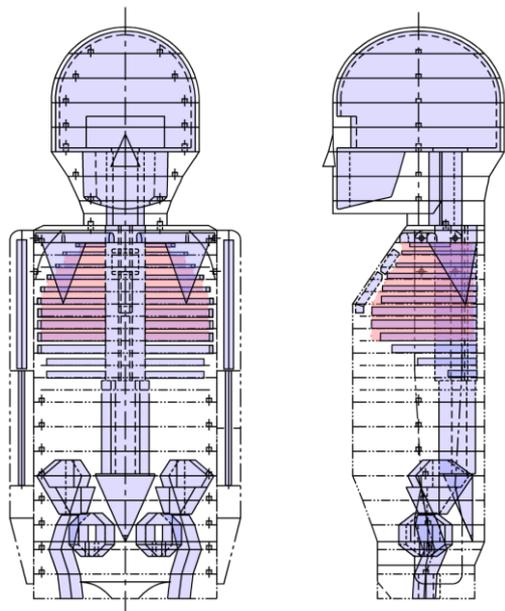


図1 3歳児ファントム設計図

厚生労働省が公表している、平成 22 年乳幼児身体発育調査結果によると、1 歳児と 3 歳児の頭囲は、それぞれ 47cm と 49cm であり、

CT 画像から計測した体型データを基に、頭部を楕円体として近似した時のファントムの頭囲を計算したところ、1 歳児で 47cm、3 歳児で 50cm であった。また、胸囲の場合、厚生労働省の調査結果は、1 歳児で 47cm、3 歳児で 51cm であり、我々の設計したファントムの胸囲は、1 歳児で 46cm、3 歳児で 51cm と、いずれも厚生労働省の調査結果とよく一致していることから、本研究での人体計測法およびファントムデザインが、人体ファントム作製において妥当な技法であることが示された。上記設計図を基に、本研究では、予算の関係から、3 歳児の頭頸部のみを作製した。図 2 は、作製した頭頸部ファントムの外観図と 3D-CT 画像を示している。右図の赤色部分は、装着した自作の Si-pin フォトダイオード線量計を示している。

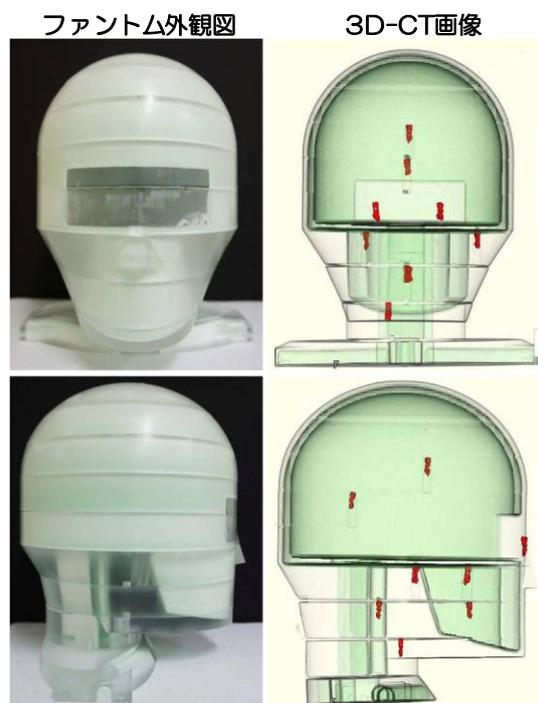


図2 作製した 3 歳児頭頸部ファントム
右図内赤色部分は、Si-pin フォトダイオードを示す

(2) 作製した Si-pin フォトダイオード線量計測システムは、X 線照射により発生した各 X 線検出部からの電流信号を多チャンネルの電子回路に一度に読み取り、線量に比例した電圧信号に変換した後、AD 変換器を通してパーソナルコンピュータに取り込み、自作の線量計算ソフトウェアを用いて出力を電圧値から臓器線量値に変換している。このシステムを用いることで、従来操作が煩雑であった臓器線量の測定・評価が、リアルタイムで簡便に行えるようになった。

(3) 厚生労働省の調査結果によると、6 歳児の頭囲は 51cm と、3 歳児の頭囲とほぼ同じ大きさであることが分かっている。そこで過去に我々が作製した 6 歳児ファントム臓器線

量計測システムと本研究で作製した3歳児頭頸部ファントム臓器線量計測システムを同じ撮影条件で撮影した時の臓器線量を比較することで、本研究で作製した頭頸部ファントム臓器線量計測システムの妥当性を検証した。図3は、頭部CT検査条件を基に、実効mAs値を変化させ、それぞれのファントムを撮影した時の、脳と水晶体の吸収線量を示している。3歳児ファントムに市販のガラス線量計を設置した場合の臓器線量も合わせて示した。

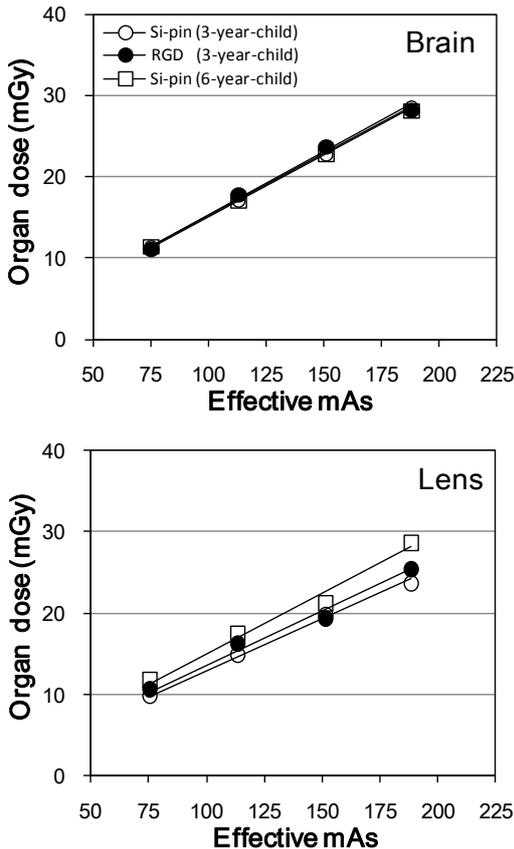


図3 3歳児および6歳児ファントム臓器線量計測システムによる臓器線量の比較

脳の線量は、頭囲が同等であるので、3歳児も6歳児も同じ値を示した。しかし、水晶体の線量は若干3歳児ファントムの方が低い値を示した。これは、後頭部の形状の違いが起因しているものと考えられた。ファントムの形状の違いにより若干の吸収の違いがあるものの、スキャン範囲内の主要臓器である脳の線量が一致したことから、本研究で作製した3歳児頭頸部ファントム臓器線量計測システムは、3歳児のCT被ばく評価において、有意な線量情報を提供できると考えられた。

次に、この3歳児頭頸部ファントム臓器線量計測システムを用いて、頭部CT検査におけるルーチン条件での線量評価を行い、他の年齢における線量評価結果と比較を行った。その結果を図4に示す。

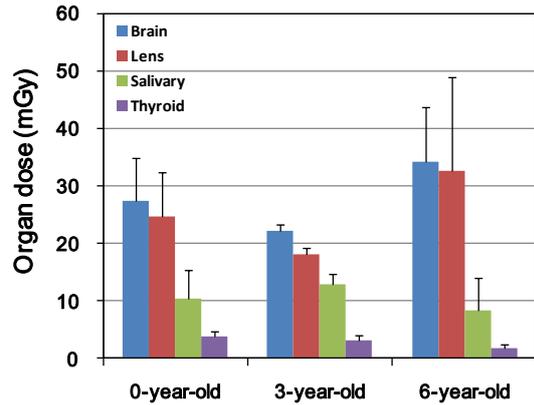


図4 頭部CT検査における年齢別臓器線量比較

スキャン範囲内の臓器である脳や水晶体は、頭の大きさに依存せず、その臓器線量はどの年齢もほぼ同程度であることが分かった。一方、スキャン範囲外の甲状腺の線量は、年齢の増加と共に減少することが分かった。これは、成長と共に、スキャン範囲と甲状腺の距離が離れるためであると考えられた。同一撮影条件で、各年齢のファントムを撮影した場合は、頭の大きさが最も小さい0歳児の脳線量が、3歳児や6歳児の1.3倍高くなったが、図4のように、様々な病院でのルーチン条件では、どの年齢でも平均的に同程度の脳線量を示したことから、実際の臨床現場では、体の大きさに合わせて各病院で撮影条件が適切に変更されていると推察された。

(4) 図4で示されているように、頭部CT検査においては、診断対象にはあまり該当しない水晶体での線量が比較的高い。ところが、最新の疫学調査によると、放射線被ばくによる水晶体の混濁に関しては、しきい線量が非常に低いことが分かってきており、医療被ばくにおいても、特に子供における水晶体線量低減への対策が再考されつつある。かかる状況下、最新のCT装置には、Organ-based tube-current modulation (OBTCM) と呼ばれる新しい被ばく低減システムが搭載されつつある。このシステムは、患者前方での管電流を大幅に減少させ、後方では、画質を担保するために管電流を増加させることで、患者前方に存在する放射線感受性の高い水晶体や乳腺の被ばくを効果的に低減できるといわれている。そこで、0歳児と6歳児と成人の臓器線量計測システムを用いて、OBTCMの被ばく低減効果を評価した。その結果、OBTCMを使用した場合、脳の線量はほとんど変化しなかったが、水晶体の線量は、0歳児で21%、6歳児で26%、成人で32%低減した。どの年齢も、OBTCMの使用で、水晶体線量は20-30%低減可能であるが、体の小さな子供ほどOBTCMによる線量低減効果が低いことが分かった。一方、後頭部の皮膚線量は、0、6歳児で共に16%、成人で19%増加

することが分かり、OBTCM の使用時には、後頭部の皮膚線量の増加に注意が必要であることが分かった。また、胸部 CT 検査での OBTCM の使用では、乳腺線量は 0 歳児で 5%、6 歳児で 17%、成人で 32% 減少したが、後方皮膚の線量増加率は、0 歳児では 0%、6 歳児で 11%、成人で 17% であった。しかし、各スライス面での画質を一定にするために、XYZ 方向の体の厚みを考慮して管電流を変化させる Automatic tube-current modulation (ATCM) システムと OBTCM を併用した場合、乳腺線量も後方の皮膚線量も低減できることがわかった。CTDIvol、DLP、実効線量等の線量指標は、OBTCM の使用の有無にかかわらず変化しなかったため、管電流変調技術を基盤とした被ばく低減システムの使用を検討する場合は、各臓器の線量変化を考慮に入れるべきであると考えられる。このように、年齢や体型に応じた適切な放射線防護方法について詳細な検討を行うには、我々が開発したような人体ファントム臓器線量計測システムによる臓器線量評価が今後必要であるだろう。

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 8 件)

- ① Chiyo Yamauchi-Kawaura, Masato Yamauchi, Kuniharu Imai, Mitsuru Ikeda and Takahiko Aoyama, Image quality and age-specific dose estimation in head and chest CT examinations with organ-based tube-current modulation, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 2013, in press, DOI:10.1093/rpd/nct137
- ② Yuka Matsuzaki, Keisuke Fujii, Motoki Kumagai, Ichiro Tsuruoka and Shinichiro Mori, Effective and organ doses using helical 4DCT for thoracic and abdominal therapies, Journal of Radiation Research, 査読有, 2013, in press, DOI:10.1093/jrr/rrt024
- ③ Toshio Kawasaki, Takahiko Aoyama, Chiyo Yamauchi-Kawaura, Keisuke Fujii and Shuji Koyama, Organ dose and effective dose estimation in pediatric chest radiographic examinations by using pin silicon photodiode dosimeters, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 154, 2013, pp314-319, DOI:10.1093/rpd/ncs251
- ④ Naruto Sugimoto, Takahiko Aoyama, Shuji Koyama, Chiyo Yamauchi-Kawaura and Keisuke Fujii, Comparison of radiation doses between newborns and 6-y-old children undergoing head, chest and abdominal CT examinations-A phantom study, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 153, 2012,

pp85-91, DOI:10.1093/rpd/ncs085

- ⑤ 青山隆彦、小山修司、川浦稚代、杉本成人、藤井啓輔、川崎稔生、診断 X 線検査による乳幼児、小児、成人の被ばく線量 - X 線単純撮影の場合、保健物理、査読有、47(2)、2012、pp130-140
- ⑥ 青山隆彦、小山修司、川浦稚代、杉本成人、藤井啓輔、川崎稔生、診断 X 線検査による乳幼児、小児、成人の被ばく線量 - X 線 CT の場合、保健物理、査読有、47(4)、2012、pp270-281
- ⑦ Keisuke Fujii, Keiichi Akahane, Osamu Miyazaki, Tetsuya Horiuchi, Ayano Shimada, Hiroshi Nagamatsu, Masato Yamauchi, Chiyo Yamauchi-Kawaura and Toshio Kawasaki, Evaluation of organ doses in CT examinations with an infant anthropomorphic phantom, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, 147, 2011, pp151-155, DOI:10.1093/rpd/ncr289
- ⑧ Chiyo Yamauchi-Kawaura, Keisuke Fujii, Takahiko Aoyama, Shuji Koyama and Masato Yamauchi, Radiation dose evaluation in head and neck MDCT examinations with a 6-year-old child anthropomorphic phantom, Pediatric Radiology, 査読有, 40, 2010, pp1206-1214, DOI: 10.1007/s00247-009-1495-z

[学会発表] (計 18 件)

- ① 浅井博之、藤井啓輔、野村恵一、渋谷俊之、高橋圭祐、花井耕造、低線量肺がん CT 検診における撮影および画像再構成条件の検討、第 20 回日本 CT 検診学会学術集会、2012 年 2 月 15-16 日、秋葉原コンベンションホール(東京都)
- ② 藤井啓輔、野村恵一、浅井博之、渋谷俊之、高橋圭祐、花井耕造、低線量肺がん CT 検診における患者被ばく線量の評価-人体ファントムを用いた実測による評価と計算シミュレーションによる評価-、第 20 回日本 CT 検診学会学術集会、2012 年 2 月 15-16 日、秋葉原コンベンションホール(東京都)
- ③ 山内雅人、藤井啓輔、川浦稚代、MDCT 検査における臓器別被ばく低減機構の動作特性、平成 24 年度日本生体医工学会東海支部大会、2012 年 10 月 20 日、株式会社スズケン本社(愛知県)
- ④ 川浦稚代、山内雅人、今井國治、池田充、臓器別線量低減機構を用いた頭部 X 線 CT 検査における画質と線量評価、平成 24 年度日本生体医工学会東海支部大会、2012 年 10 月 20 日、株式会社スズケン本社(愛知県)
- ⑤ 山内雅人、川浦稚代、小児単純 CT 検査における管電圧最適化機構による被ばく低

- 減効果、第40回日本放射線技術学会秋季学術大会、2012年10月4-6日、タワーホール船堀(東京都)
- ⑥ 新井知大、荒井美紀、野村恵一、藤井啓輔、長澤宏文、村松禎久、佐々木徹、CT線量分布シミュレーションの精度向上に向けた bow-tie filter の推定、第40回日本放射線技術学会秋季学術大会、2012年10月4-6日、タワーホール船堀(東京都)
- ⑦ 野村恵一、藤井啓輔、村松禎久、新井知大、荒井美紀、長澤宏文、高橋圭祐、花井耕造、シミュレーション線量計算ソフトウェアを用いた CT-AEC における被写体の線量分布の検討、第40回日本放射線技術学会秋季学術大会、2012年10月4-6日、タワーホール船堀(東京都)
- ⑧ 藤井啓輔、野村恵一、村松禎久、新井知大、荒井美紀、長澤宏文、高橋圭祐、花井耕造、各種 CT 装置におけるシミュレーション線量計算ソフトウェアの有効性に関する検討、第40回日本放射線技術学会秋季学術大会、2012年10月4-6日、タワーホール船堀(東京都)
- ⑨ 川浦稚代、藤井啓輔、赤羽恵一、山内雅人、奈良井和宏、勝利彦、頭部 CT 検査における年齢別被ばく線量評価を目的とした3歳児頭部ファントム臓器線量計測システムの開発、第40回日本放射線技術学会秋季学術大会、2012年10月4-6日、タワーホール船堀(東京都)
- ⑩ 伊勢谷昌弘、山内雅人、川浦稚代、頭部 CT 検査における臓器感受性を考慮した被ばく低減撮影の基礎的検討、第28回日本診療放射線技師学術大会、2012年9月28-30日、名古屋国際会議場(愛知県)
- ⑪ 藤井啓輔、小児 CT 検査における被ばく線量評価について、医療被ばくセミナー in 大分、2012年8月31日、大分県立看護科学大学(大分県)
- ⑫ 青山隆彦、小山修司、川浦稚代、藤井啓輔、多列検出器 CT 装置の進歩による CT 被ばく線量の変化、日本保健物理学会第45回研究発表会、2012年6月16-17日、名古屋大学 ES 総合館 IB 電子情報館(愛知県)
- ⑬ 川浦稚代、藤井啓輔、赤羽恵一、山内雅人、奈良井和宏、青山隆彦、勝利彦、X線 CT 検査における年齢別被ばく線量評価を目的とした日本人型小児ファントムの作製、日本保健物理学会第45回研究発表会、2012年6月16-17日、名古屋大学 ES 総合館 IB 電子情報館(愛知県)
- ⑭ 川浦稚代、藤井啓輔、山内雅人、赤羽恵一、奈良井和宏、青山隆彦、勝利彦、小児 CT 検査における年齢別被ばく線量評価を目的とした人体ファントム作製、第103回日本医学物理学会学術大会、2012年4月12-15日、パシフィコ横浜(神奈川県)
- ⑮ 杉本成人、青山隆彦、小山修司、川浦稚代、川崎稔生、X線医学検査による乳幼児被ばく線量の評価、日本保健物理学会第44回研究発表会、2011年10月17-18日、ホテルレイクビュー水戸(茨城県)
- ⑯ 川浦稚代、X線 CT 検査における医療被ばく～子どもの被ばくを中心に～、第27回徳島 CT 研究会(招待講演)、2011年10月7日、徳島大学 長井記念ホール(徳島県)
- ⑰ 藤井啓輔、赤羽恵一、福田利恵子、宮寄治、堀内哲也、嶋田彩乃、永松洋志、川崎稔生、乳幼児 CT 検査における被ばく線量の評価、第100回日本医学物理学会大会、2010年9月24-25日、学術総合センター(東京都)
- ⑱ Keisuke Fujii, Keiichi Akahane, Osamu Miyazaki, Tetsuya Horiuchi, Ayano Shimada, and Toshio Kawasaki, Evaluation of organ doses in CT examinations with an infant anthropomorphic phantom, International Conference on Radiation Protection in Medicine, 1-3 September, 2010, Varna, Bulgaria

6. 研究組織

(1) 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)・助教
研究者番号：60324422

(2) 研究分担者

藤井 啓輔 (FUJII KEISUKE)

独立行政法人国立がん研究センター・東病院・診療放射線技師
研究者番号：40469937

(3) 連携研究者

青山 隆彦 (AOYAMA TAKAHIKO)

名古屋大学・医学系研究科(保健)・教授
研究者番号：80023307

(4) 連携研究者

赤羽 恵一 (AKAHANE KEIICHI)

独立行政法人放射線医学総合研究所・重粒子医科学センター・室長
研究者番号：80202521