

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K07709

研究課題名（和文）画質および線量評価に基づく被検者体型に適したCT撮影条件の検討

研究課題名（英文）Evaluation of CT scan protocols appropriate for patient size based on the evaluation of radiation doses and image quality

研究代表者

藤井 啓輔 (Fujii, Keisuke)

名古屋大学・医学系研究科（保健）・講師

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）：本研究では、成人および小児患者のCT画像を用いたシミュレーション計算に基づいて、各被検者の臓器線量を推定し、胸部-骨盤CT検査時の線量が被検者体型によってどの程度異なっているかを評価した。また、小児および成人腹部径を模擬した画質評価ファントムを作成し、このファントムを異なる条件で撮影、再構成して得られた画像等に対し、視覚的印象を反映した見かけのノイズを評価した。そして、画質および線量評価に基づいて被検者体型に適した撮影線量を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線CT検査は、他の放射線診断検査に比べ高い被ばく線量を伴い、受診者がCT検査によって受ける放射線リスク（発がんリスク等）を可能な限り低減するために、CT検査時の撮影線量の最適化が課題となっている。本研究で作成した、小児および成人腹部径を模擬した画質評価ファントム、および、このファントムを様々な条件で撮影、再構成して得られたCT画像の画質評価結果は、各被検者体型に適した撮影条件を検討する際に有益であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to evaluate CT scan protocol appropriate for patient size based on the evaluation of radiation doses and image quality. We performed Monte Carlo simulation using the simulation models created from CT images of each patient, and evaluated how much organ doses in adult and pediatric chest-abdomen-pelvis CT examinations differ depending on patient size. In addition, we developed image quality evaluation phantoms representing adult and child abdominal shapes, and evaluated image noise reflecting visual impression (apparent noise) on the phantom CT images obtained with different radiation doses and non-linear reconstruction algorithms. Furthermore, we examined radiation doses appropriate for each patient size based on the apparent noise evaluation.

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

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

X線CT検査数は、近年も増加傾向にあり、日本学術会議の報告¹⁾によれば、現在、国内の医療施設において年間3000万件のCT検査が行われていると推定されている。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。従って、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撮影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)を把握する必要がある。また、CT検査では、被検者の体型によって撮影線量が異なるため、各被検者の線量を評価する必要がある。被検者の線量を評価する方法の一つとして、CT装置および被写体を想定し、モンテカルロシミュレーション計算に基づいて線量を評価する方法がある。この方法では、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、X線スペクトル等のビームデータやCT撮影時に管電流変調(Tube Current Modulation, TCM)を使用した場合は、その管電流プロファイル等が必要で、各CT装置および被検者体型に応じてシミュレーション体系を構築する必要がある。

画質評価に基づいて各被検者体型に即した撮影条件を検討するには、様々な被写体サイズを模擬した画質評価ファントムが必要である。また、線量と画像ノイズはトレードオフの関係にあり、画像ノイズが増加することで、正常組織とのCT値差が小さい病変組織を描出できる低コントラスト分解能が低下する。従って、画質評価指標の中でも、画像ノイズを評価することは、撮影条件を検討するうえで重要であると考えられるが、近年のCT検査で見られる逐次近似再構成画像のような非線形画像に対して画像ノイズを評価することは困難である。そこで、非線形画像に対して、視覚的印象を反映したノイズ評価方法を考案することは、被検者体型に適した撮影線量を検討する上で有益であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、シミュレーション計算に基づいて、各被検者の臓器線量を推定し、胸部-骨盤CT検査時の線量が被検者体型によってどの程度異なっているか評価することを目的としている。また、被写体サイズが異なる画質評価ファントムを作成し、異なる撮影条件、画像再構成条件で得られた画質評価ファントムのCT画像の画質(主に画像ノイズ)を評価し、画質および線量評価に基づいて被検者体型に適した撮影条件を検討することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 線量シミュレーションによる各被写体の臓器線量評価

本研究では、線量シミュレーションソフトウェアであるImpactMC (Advanced Breast CT)を使用して線量評価を行った。成人80例の胸部-骨盤CT画像をImpactMCに入力して、各被写体のボクセルファントムを作成した。また、CT装置:Aquilion ONE ViSION(Canon Medical Systems)のX線スペクトル(管電圧:120 kVp)やボウタイフィルタ形状、TCMプロファイルを含む撮影条件(ビームコリメーション:40 mm, ピッチファクタ:0.8125)等をImpactMCに入力してシミュレーション計算を行い、被写体の線量分布を求めた。そして、甲状腺、肺、食道、乳房、肝臓、胃、膀胱の各臓器について、各被検者のCT画像上で臓器ごとに輪郭を囲んで、各臓器の関心領域(Region of Interest, ROI)を作成し、これを線量分布画像上に設定して各ROI内の平均吸収線量を算出し、各臓器の吸収線量(臓器線量)を求めた。また、小児51例の胸部-骨盤CT画像、および、CT装置:Aquilion ONE(Canon Medical Systems)のX線ビームデータ、撮影条件等をImpactMCに入力してシミュレーション計算を行い、成人と同様に、甲状腺、肺、食道、肝臓、胃、膀胱の各臓器の臓器線量を評価した。次に、CT線量管理システム等で収集されるvolume CT Dose Index (CTDI_{vol})を用いて各臓器位置におけるCTDI_{vol}を算出した。ただし、成人ではCTDI_{vol,32}(直径32cmCTDIファントムに基づく値)を、小児ではCTDI_{vol,16}(直径16cmCTDIファントムに基づく値)を用いている。また、各被写体のCT画像から各臓器位置におけるCTDI_{vol}および水等価直径の平均値を算出し、被写体厚を考慮した線量指標(Size specific dose estimates, SSDE)を求めることで、各臓器位置に対応したSSDE(Organ-specific SSDE)を求めた。そして、各線量指標(CTDI_{vol}, SSDE, Organ-specific SSDE)と臓器線量との関係性を評価した。

(2) 画質評価ファントムを用いた画質と線量の関係性評価

画質評価ファントムの作成

本研究では、過去に診断目的で胸部-骨盤CT検査を受診した被検者のCT画像を用いて、肝門部のスライス位置で縦横径を測定し、画質評価ファントムの形状を決定した。また、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、管電圧:120 kVpのX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。さらに、ファントムのベース部分の CT 値よりも約 10 および 20 HU 高い、直径 3, 5, 7, 10 mm の球形の低コントラストモジュールをファントム内に入れて、画質評価ファントムを作成した。

画質評価ファントムを用いた見かけのノイズ評価

小児サイズ(縦: 14 cm, 横: 19cm)、成人標準サイズ(縦: 21 cm, 横: 29 cm)、肥満サイズ(縦: 28 cm, 横: 35 cm)の 3 種類の画質評価ファントムを、CT 装置: Aquilion Precision(Canon Medical Systems)を用いて、表 1 の条件で撮影し、従来のフィルタ補正逆投影法(FBP, 再構成関数:FC13)、逐次近似応用画像再構成法(Adaptive Iterative Dose Reduction 3D:AIDR 3D, 設定強度:standard, 再構成関数:FC13)、深層学習を利用した再構成法(Advanced intelligent Clear-IQ Engine: AiCE, 再構成関数:Body)で画像再構成を行った。そして、同一の撮影条件、再構成条件でファントムの CT 画像を 3 枚ずつ取得した。次に、各ファントム画像の中心に、40×40 pixel の ROI を設定した(図 1(a)-(c))。各 ROI 内で、N×N pixel (N=1,2,...,20)の移動平均フィルタを縦および横方向に 1 pixel ずつ走査し、平均 CT 値の標準偏差を求めた。ここで、移動平均フィルタ内のピクセルの平均 CT 値を \bar{X} とし、 \bar{X} が平均 μ 、分散 σ^2 の独立かつ同一な確率分布に属していると仮定した場合、 \bar{X} の標準偏差 $\sqrt{V(\bar{X})}$ は、

$$\sqrt{V(\bar{X})} = \frac{\sigma}{N} \quad (1)$$

と表すことができる。この σ を、本研究では、「見かけのノイズ」と定義し、各撮影条件、再構成条件で得られた画像について、見かけのノイズを評価した。

表 1 CT 撮影条件および画像再構成条件

管電圧 (kVp)	120
管電流時間積 (mAs)	50 - 375
ビーム幅 (mm)	40
ピッチファクタ	0.8125
表示 CTDI _{vol} (mGy)	4.5-33.4
再構成スライス厚 (mm)	5
再構成方法	FBP, AIDR 3D, AiCE
表示 FOV (mm)	400

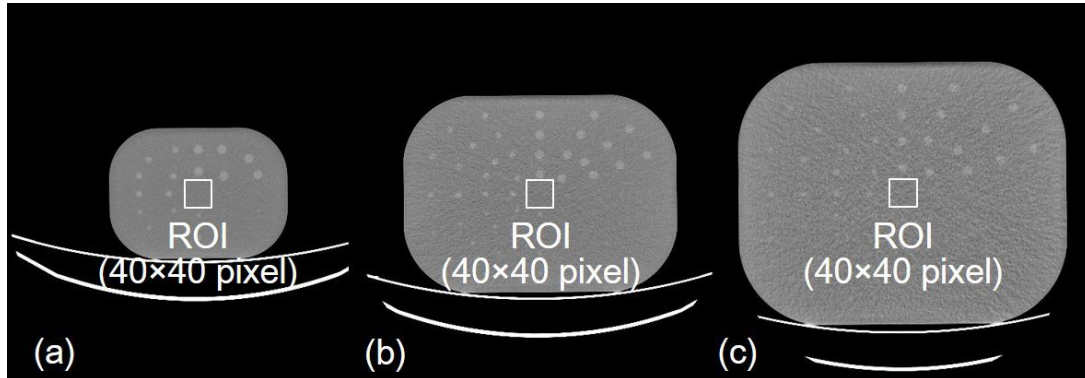


図 1 小児サイズ(a)、成人標準サイズ(b)、肥満サイズ(c)の画質評価ファントム

4. 研究成果

(1) 線量シミュレーションによる各被写体の臓器線量評価

成人胸部-骨盤 CT 検査における各被写体に対するシミュレーション線量分布画像を図 2(a)-(d)に示す。各線量分布画像から求めた各臓器の臓器線量は、被検者の体型によって、2-3 倍程度異なっていた。また、成人同様、シミュレーション計算に基づいて評価した小児胸部-骨盤 CT 検査における臓器線量について、5-10 歳児の臓器線量は、0-5 歳児に比べて 30-47%程度高いことが分かった。さらに、線量指標と臓器線量との関係性を評価したところ、Organ-specific SSDE は、CTDI_{vol} や SSDE よりも、臓器線量とより強い相関を有することが分かった(図 3(a), (b))。従って、Organ-specific SSDE を用いることで、CTDI_{vol} や SSDE を用いた場合よりも、簡便かつ正確に臓器線量を推定できると考えられた。

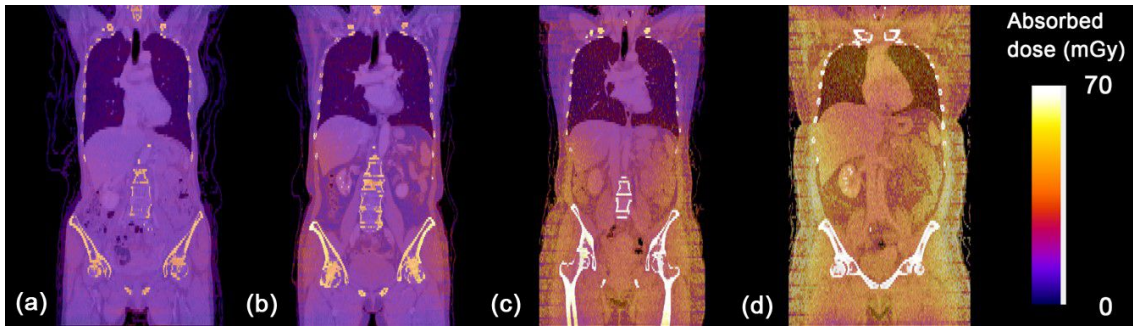


図 2 低体重(a)、標準体重(b)、高体重(c)、肥満体型(d)の各被写体に対する成人胸部-骨盤 CT 検査時のシミュレーション線量分布画像

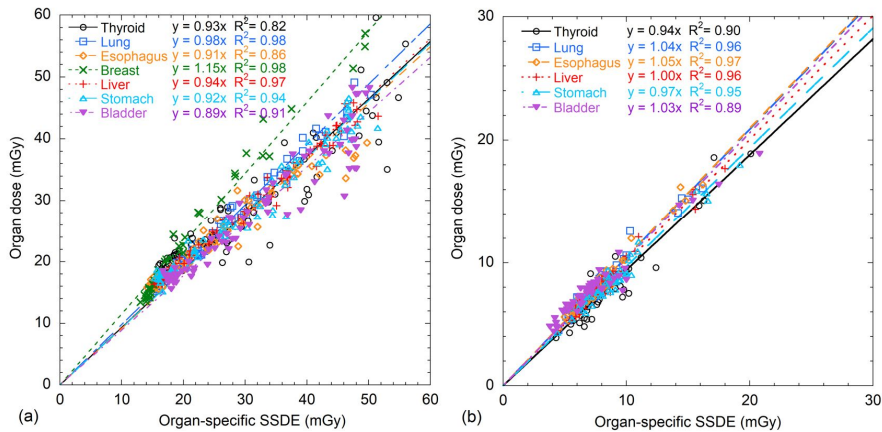


図 3 成人(a) および小児(b)胸部-骨盤 CT 検査における Organ-specific SSDE と臓器線量との関係

(2) 画質評価ファントムを用いた画質と線量の関係性評価

本研究では、線量(mAs 値)を変えて、各ファントムを撮影し、FBP、AIDR 3D、AiCE で再構成した CT 画像における移動平均フィルタのサイズ(1 辺)と平均 CT 値の標準偏差との関係性を求めた。例として、成人標準サイズのファントム画像における両者の関係を図 4(a)-(c)に示す。FBP 画像上の平均 CT 値の標準偏差は、フィルタサイズの増加に伴い、両対数スケールで直線的に低下していた。一方、AIDR 3D 画像および AiCE 画像では、およそ 5-10 pixel 以上のフィルタサイズにおいて、フィルタサイズの増加に伴い、平均 CT 値の標準偏差は直線的に低下していた。そこで、各データ点を、 $y=c/x$ (c: 定数)でフィッティングし、各近似式と(1)式から見かけのノイズの値を求めた。見かけのノイズの評価結果から、低線量ほど、また、被写体サイズが大きいほど、AiCE によるノイズ低減効果が大きいことが分かった。そして、図 5(a)-(c)に示す mAs 値と見かけのノイズの関係から、見かけのノイズは、いずれの被写体サイズにおいても、線量の平方根におよそ反比例していることが分かった。ただし、100mAs 以下で撮影された肥満サイズファントムの FBP 画像ではストリーク状のアーチファクトが多く発生していたことから、これらのデータ点については、近似直線から外れていると考えられた。さらに、異なるサイズのファントムを同一の線量で撮影した場合、肥満サイズファントムの AiCE 画像の見かけのノイズは、成人標準サイズファントムの AiCE 画像に比べて 2 倍程度大きく、また、肥満サイズファントム内の低コントラストモジュールを視認することが困難であった。従って、被写体サイズが大きい場

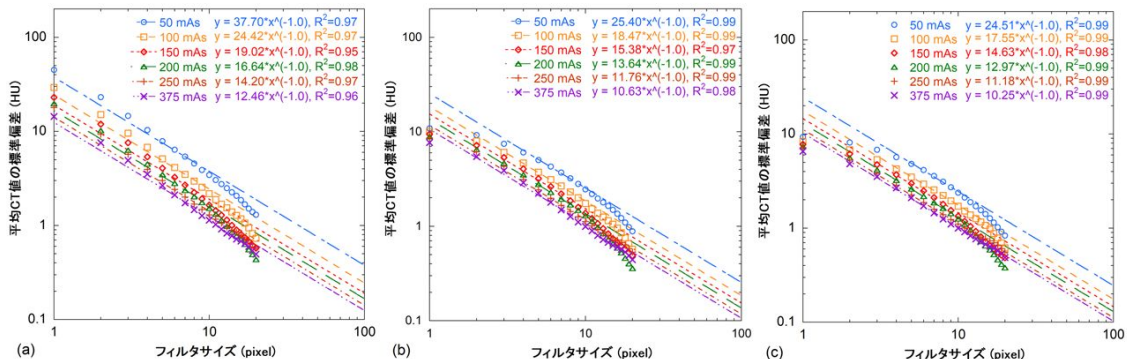


図 4 成人標準サイズファントム画像(FBP(a), AIDR 3D(b), AiCE(c))のフィルタサイズと平均 CT 値の標準偏差との関係

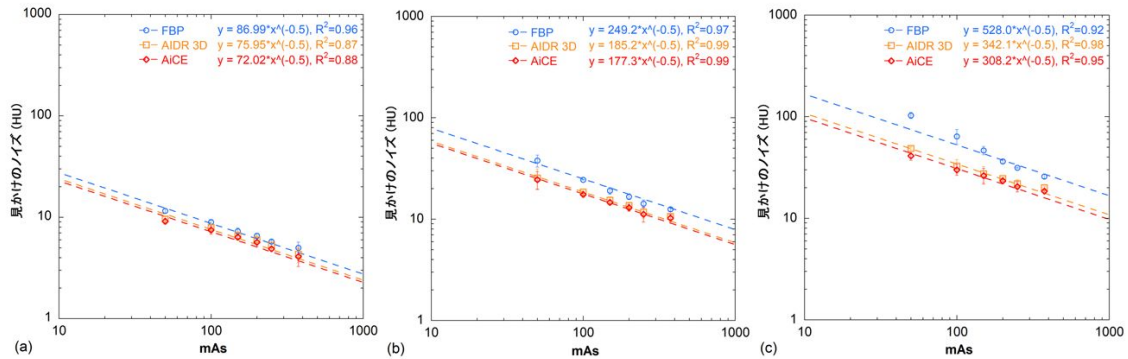


図5 小児サイズ(a)、成人標準サイズ(b)、肥満サイズ(c)の画質評価ファントム画像に関する mAs と見かけのノイズとの関係

合、見かけのノイズ(低コントラスト検出能)を維持するには、非線形画像においても、標準体型に比べて線量を増加する必要があると考えられ、また、線量評価結果を考慮すると、現行のCT検査では、TCM機能の使用によって、被写体厚に応じて適度に線量が調節されていると考えられる。

(3) まとめ

本研究では、小児および成人胸部-骨盤CT検査時に各被検者が受ける臓器線量をシミュレーション計算に基づいて評価し、現行のCT装置に搭載されているTCM機能によって、被写体に応じて管電流が調節されることで、臓器線量は体型間で2-3倍程度異なっていることが分かった。また、CT線量管理システム等で収集される線量指標から求めた、各臓器位置に対応した線量指標であるOrgan-specific SSDEは、臓器線量との間に高い線形相関を有することが分かり、従来の線量指標を用いるよりも、Organ-specific SSDEを用いることで、精度よく臓器線量を推定できることが示唆された。また、本研究では、被写体サイズが異なる画質評価ファントムを作成し、そして、作成したファントムを異なる撮影条件で撮影し、得られたFBP, AIDR 3D, AiCE画像に対して、視覚的印象を反映した画像ノイズ(見かけのノイズ)を評価したところ、AIDR 3D画像やAiCE画像のような非線形画像において、見かけのノイズは、線量の平方根におよそ反比例していることが分かった。また、肥満サイズファントム画像では、標準サイズファントム画像と比べて、見かけのノイズが大きく、低コントラストモジュールの検出が困難であるため、被写体サイズが大きい場合、非線形画像においても、標準体型に比べて線量を増加する必要があると考えられる。現行のCT検査では、TCM機能を使用することで被写体厚に応じて線量を調節することが可能であるが、TCMを使用するにあたり、各CT装置、また、撮影目的に応じて、ユーザーが管電流の変調強度を設定する必要がある。このようなTCM設定等を含む撮影条件の最適化を検討する際に、本研究の線量評価および画質評価結果は有用であると考えられる。

<引用文献>

- 1) 日本学術会議「CT検査による医療被ばくの低減に関する提言」、2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujii Keisuke, Nomura Keiichi, Muramatsu Yoshihisa, Goto Takahiro, Obara Satoshi, Ota Hiroyuki, Tsukagoshi Shinsuke	4. 巻 77
2. 論文標題 Correlation analysis of organ doses determined by Monte Carlo simulation with dose metrics for patients undergoing chest-abdomen-pelvis CT examinations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2020.07.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nomura Keiichi, Fujii Keisuke, Goto Takahiro, Tsukagoshi Shinsuke, Ota Hiroyuki, Iwabuchi Yuto, Suzuki Hidenobu, Muramatsu Yoshihisa, Kobayashi Tatsushi	4. 巻 45
2. 論文標題 Radiation Dose Reduction for Computed Tomography Localizer Radiography Using an Ag Additional Filter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computer Assisted Tomography	6. 最初と最後の頁 84~92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1097/RCT.0000000000001026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujii K, Nomura K, Muramatsu Y, Obara S, Goto T, Akahane K, Ota H, Tsukagoshi S, Kusumoto M	4. 巻 182
2. 論文標題 VALIDATION OF MONTE CARLO DOSE CALCULATION FOR PAEDIATRIC CT EXAMINATIONS USING TUBE CURRENT MODULATION BASED ON IN-PHANTOM DOSIMETRY	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 508~517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/rpd/ncy109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 野村恵一, 藤井啓輔, 太田博之, 篠崎雅史, 持永紗枝子, 村松禎久
2. 発表標題 CT検診における位置決め撮影線量の低減に関する検討
3. 学会等名 第28回日本CT検診学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Hiroyuki Ota, So Tsushima, Shinsuke Tsukagoshi
2. 発表標題 Analysis of correlation between organ doses and dose metrics in adult and pediatric chest-abdomen-pelvis CT examinations
3. 学会等名 106th Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Hiroyuki Ota, Takahiro Goto, So Tsushima, Shinsuke Tsukagoshi
2. 発表標題 Organ Dose Evaluations for Individual Patients in Chest-Abdomen-Pelvis CT Examinations Using Deep Learning-Based Automatic Segmentation
3. 学会等名 105th Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi Nomura, Keisuke Fujii, Takahiro Goto, Yuto Iwabuchi, Hiroyuki Ota, Tatsushi Kobayashi, Yoshihisa Muramatsu
2. 発表標題 Size-Specific Analysis of Patient Doses From CT Localizer Radiographs
3. 学会等名 105th Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井啓輔, 今井國治, 池田 充, 川浦稚代, 野村恵一, 村松禎久, 太田博之
2. 発表標題 移動平均フィルタを用いた低コントラストCT画像の画質評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 イメージメディアクオリティ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Fujii, Keiichi Nomura, Yoshihisa Muramatsu, Takahiro Goto, Satoshi Obara, Keiichi Akahane, Hiroyuki Ota, Shinsuke Tsukagoshi
2. 発表標題 Patient-specific analysis of organ doses in chest-abdomen-pelvis CT examinations with tube current modulation
3. 学会等名 104th Scientific Assembly and Annual Meeting of Radiological Society of North America (RSNA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野村恵一, 藤井啓輔, 太田博之, 村松禎久
2. 発表標題 異なる管電圧における線量シミュレーションの精度検証
3. 学会等名 日本CT技術学会第6回学術大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野村 恵一 (Nomura Keiichi) (50767738)	国立研究開発法人国立がん研究センター・東病院・放射線技師 (82606)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	今井 國治 (Imai Kuniharu) (20335053)	名古屋大学・医学系研究科(保健)・教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------