

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K17173

研究課題名（和文）小児CTにおける深層学習画像再構成を用いた低被ばく撮影法の開発

研究課題名（英文）Development of Radiation Dose Reduction Strategy Using Deep-learning Reconstruction for Pediatric CT

研究代表者

永山 泰教（Nagayama, Yasunori）

熊本大学・病院・助教

研究者番号：60791762

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：小児は成人と比べて放射線感受性が高く、CTに際して線量の最適化が重要である。被ばく線量と画質の間にはトレードオフの関係があり、低被ばくと高画質を両立するには画像ノイズ除去と空間/コントラスト分解能の保持に優れた画像再構成法が必要である。近年、人工知能技術を用いて画質向上を図る新たな深層学習画像再構成（Deep Learning Reconstruction: DLR）が開発された。本研究課題では、DLRの画質特性を検証し、小児CTにおける被ばく低減への臨床応用を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年のAI技術の発達に伴い開発されたdeep-learning reconstruction (DLR) の小児CTにおける被ばく低減効果を示した。CT被ばくに起因する潜在的な発がんリスクの低下に寄与する成果であり、社会的意義は大きい。また、AIを活用した画像生成技術の有益な臨床応用例として、将来の研究の基礎となるという観点からも学術的意義の高い研究成果と考える。

研究成果の概要（英文）：Children are known to be more radiosensitive than adults, highlighting the importance of optimizing radiation dose in CT scans. A trade-off exists between radiation dose and image quality, necessitating the incorporation of image reconstruction algorithms capable of reducing image noise and enhancing spatial/contrast resolution. In recent years, deep learning reconstruction (DLR) has emerged as an artificial intelligence-based technology for improving image quality. This research project investigated the image quality characteristics of DLR and evaluated its clinical application in reducing radiation exposure in pediatric CT scans.

研究分野：放射線診断学

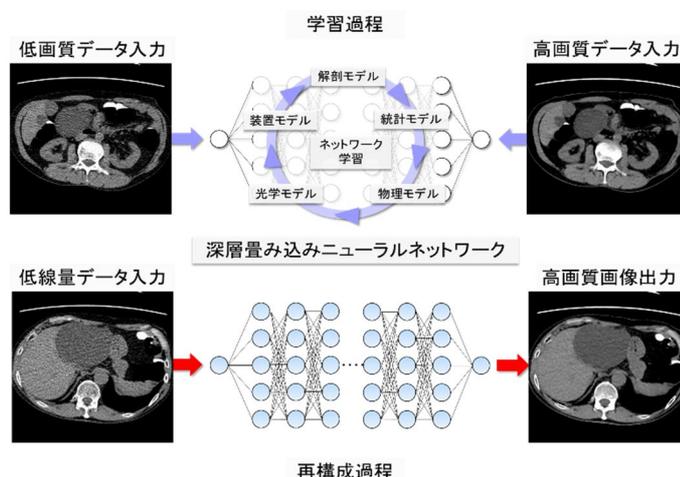
キーワード：小児CT被ばく 深層学習 CT画像再構成法

## 1. 研究開始当初の背景

CT は迅速かつ高精度に様々な病態の診断を可能とする画像診断モダリティとして、臨床において必要不可欠な役割を担っている。近年、CT の X 線被ばくによるリスクが懸念されており、特に小児では ALARA (as low as reasonably achievable) の原則に基づき、可能な限り被ばく低減に努めなければならない。画質と被ばく線量はトレードオフの関係があり、診断能を損なうことなく被ばくを低減するには、空間/コントラスト分解能を保ちつつ、画像ノイズを効果的に低減することのできる画像再構成手法が必要である。

CT において標準的な画像再構成法であったフィルタ補正逆投影 (filtered-back projection: FBP) 法は、シンプルで処理が速い反面、低線量においてノイズが著しく増加するため、被ばく低減には適していない。逐次近似画像再構成 (iterative reconstruction: IR) 法は、統計学的ノイズモデルなどを組み込んだ反復処理を行う再構成法で、低線量撮影でも FBP よりもノイズの少ない良好な画像を得ることができる。IR 法は FBP 法との組合せである hybrid IR と、真の IR 法といえる model-based IR (MBIR) に分類される。IR では肺や骨などの高コントラスト領域で大幅な被ばく低減が可能だが、一定以上の低線量域では粒状性や鮮鋭度の維持が困難となり、特に低コントラスト領域における被ばく低減効果は限定的であった。また MBIR は処理時間や違和感のある画質も臨床的に問題であった。

Deep Learning Reconstruction (DLR) は、深層学習を用いてノイズ低減や分解能の保持、自然な質感の維持を可能とする新しい画像再構成法として開発された (左図)。FBP や IR では困難であった粒状性や低コントラスト分解能が良好に保たれ、また MBIR よりも短時間で画像処理が可能である。DLR は小児 CT の被ばく低減に寄与する技術と考えられたが、臨床普及に際して包括的な画質特性の検証と低被ばく撮像法の確立が急務であった。



## 2. 研究の目的

本研究課題では、DLR の画質特性や病変検出能を包括的に検証し、小児 CT における被ばく低減手法として臨床応用することを目的とした。

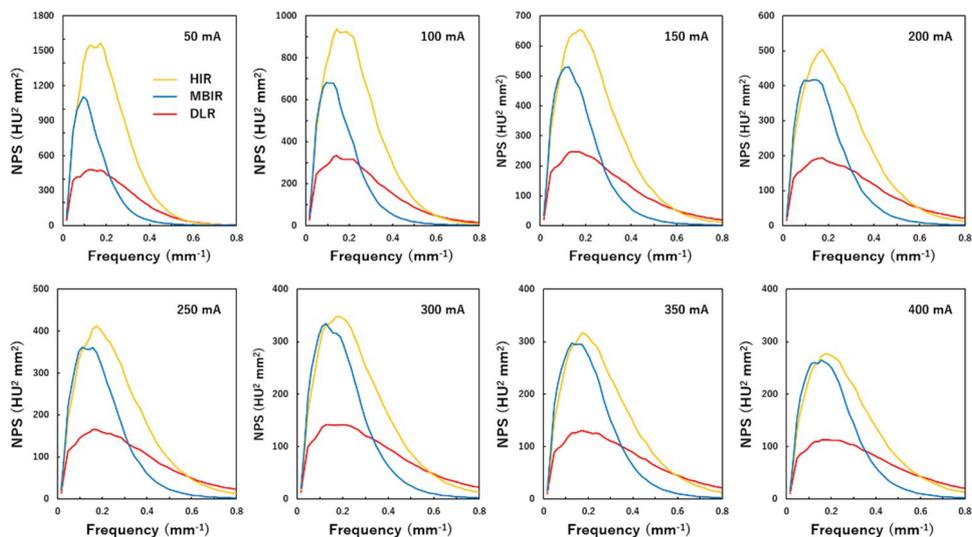
## 3. 研究の方法

ファントムを用いた基礎的画質検証のため、様々な線量で収集した投影データを FBP、hybrid-IR、MBIR、DLR を用いて画像再構成を行った。それぞれのアルゴリズムに対してノイズ (SD 値)、ノイズ特性 (NPS)、空間分解能 (TTF)、数学的検出能などの物理特性と再構成時間を評価した。また放射線被ばく量と画質との線形関係・非線形関係について検証を行った。複数の放射線診断医がノイズの強度や質感、画像鮮鋭度、アーチファクト、模擬病変の見え方、全体的な画質などについて視覚 (定性) 評価を行った。特にコントラスト分解能については、高コントラストと低コントラストの分解能に分けて再構成法の影響を検証した。これらの評価に基づき、DLR を用いた場合に従来画像再構成法と同等レベルの画質を得るために、どの程度の被ばく低減が可能かを推測した。臨床画像を用いた検討では、腹部 CT、肺 CT、頭部 CT において、DLR を用いて再構成した低線量画像に対して定性的、定量的な画質評価を行い、通常線量の hybrid IR 画像と比較を行った。

## 4. 研究成果

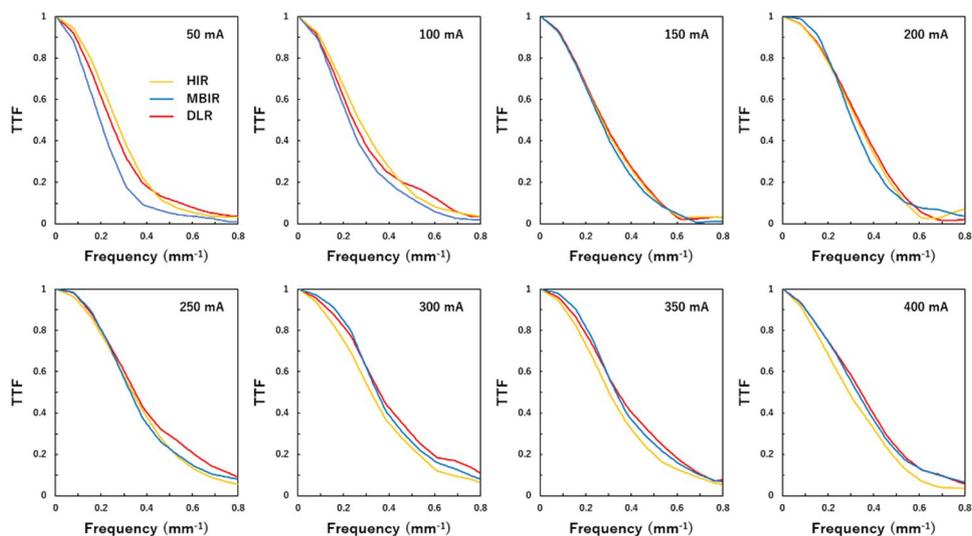
まず DLR の Body パラメータを用いて、腹部 CT における画質特性をファントム実験で検証した。従来法 (hybrid IR) で処理した画像を基準とした場合、DLR では線量を 50% ほど低下してもノイズが少なく、ノイズの質感 (粒状性) や空間分解能度、数学的検出能も良好に保持されることが示された。これらの画質特性は、低線量の臨床画像を用いた検証においても裏付けられ、被ばく線量の最適化を促進させる有望な技術であることが示唆された。研究成果は英文原著論文として、国際学術誌に報告した (Nagayama et al. AJR Am J Roentgenol.2022 Aug;219(2):315-324, Nagayama et al. Eur J Radiol.2022 Jun;151:110280)。

## NPS によるノイズ特性解析



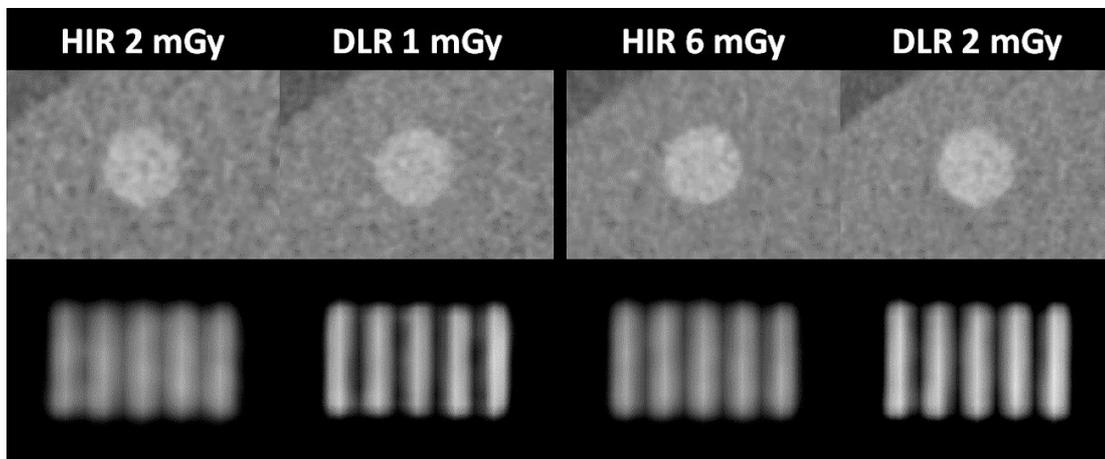
DLR はノイズが最も少なく、特に低周波ノイズが抑制されるため粒状性が細かい

## TTF による分解能解析



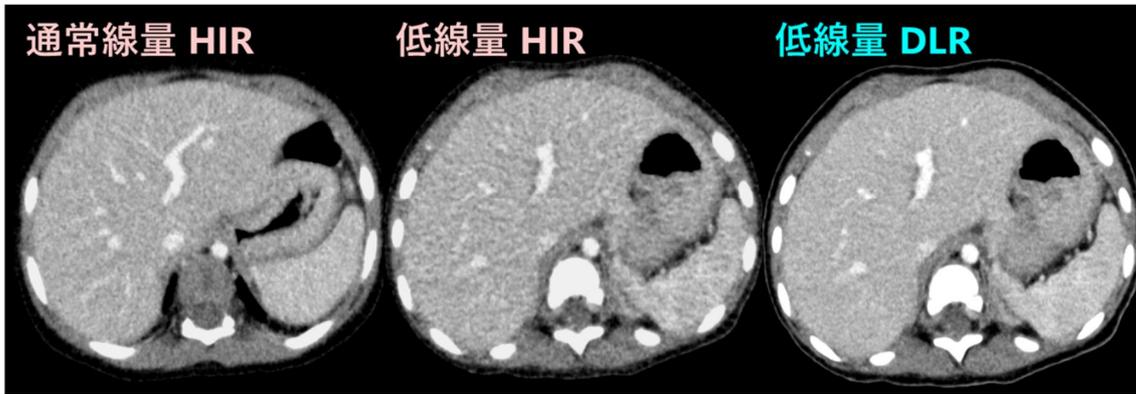
DLR では全ての線量域で低コントラスト分解能が保持される

## ファントム画像による低線量と高線量の画質比較



低線量の DLR 画像では高線量の hybrid IR(HIR)と比べて低コントラストおよび高コントラスト構造物が良好に描出される。

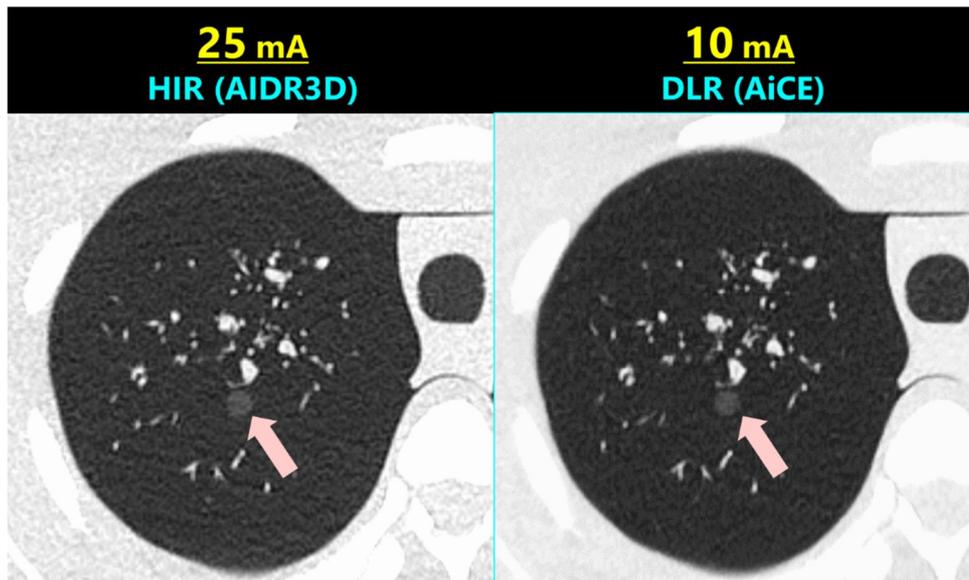
## 小児腹部 CT 画像



通常線量の hybrid IR(HIR)画像と比べて低線量の DLR 画像の方がノイズの少なく、鮮鋭度も保持された非常に良好な画質が得られる。HIR と比べて 50%程度の被ばく低減が可能であることが示唆された。

胸部 CT を対象とし肺に最適化された Lung パラメーターの物理特性評価を行った。人体ファントムを用いた検証では、DLR を用いることで従来再構成法と比べて低線量でも画像ノイズや解像度や模擬結節の描出能が保持されることが示唆された。臨床の超低線量肺 CT を用いた検討でも、大幅なノイズ低減と違和感のない画質が両立されることが明らかとなり、DLR が肺 CT における被ばく低減に適していることが示唆された。一連の研究成果を原著論文として発表した ( Goto, Nagayama et al. Acad Radiol. 2023 Mar;30(3):431-440 )。

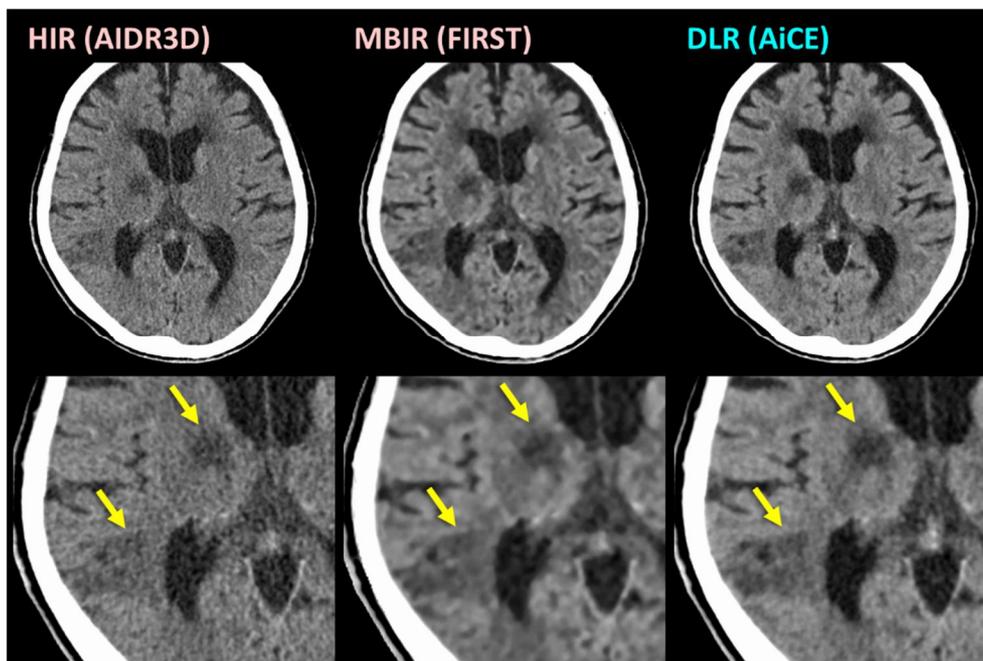
## 人体ファントムの低線量肺 CT 画像



低線量 ( 25 mA ) の hybrid-IR 画像と比べて、超低線量 ( 10 mA ) の DLR 画像の方がよりノイズが少なく、すりガラス状結節の描出能も保持される。

頭部 CT では脳実質評価に最適化された Brain パラメーターを用いて、ノイズ特性評価を行った。ファントム実験では低線量域においても Hybrid IR よりも画像ノイズが少なく低コントラスト分解能が良好で、かつ MBIR と比べて粒状性が良好に保持されることが示された。臨床画像では線量を 25%低減しても DLR で画像再構成を行うことで、通常線量の hybrid IR 画像よりも良好な画質や病変視認性が得られるとの結果を得た。研究成果は原著論文として報告した。いずれの研究でも DLR の再構成時間は MBIR より短いとの結果を得ており、実用性の高さが示された( Nagayama et al. Eur Radiol. 2023 May;33(5):3253-3265 )。

## 低線量頭部 CT 画像



DLR では hybrid IR と比べてノイズが少なくコントラストが良好で、MBIR と比べて自然で粒状性の細かい画像が得られている。頭蓋内病変の描出は DLR で最も良好であった。DLR の画像再構成時間は MBIR の 1/5 程度であり、急性期病変に対する実用性も高い。

また側頭骨 CT や脊椎 CT、心臓 CT などにおいても、低線量撮影に DLR を用いることで画質向上が認められており、被ばく低減に寄与しうることを総説論文にて報告した ( Nagayama et al. Radiographics.2021 Nov-Dec;41(7):1936-1953 )。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5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 Nagayama Yasunori, Sakabe Daisuke, Goto Makoto, Emoto Takafumi, Oda Seitaro, Nakaura Takeshi, Kidoh Masafumi, Uetani Hiroyuki, Funama Yoshinori, Hirai Toshinori	4. 巻 41
2. 論文標題 Deep Learning-based Reconstruction for Lower-Dose Pediatric CT: Technical Principles, Image Characteristics, and Clinical Implementations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RadioGraphics	6. 最初と最後の頁 1936 ~ 1953
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1148/rg.2021210105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nagayama Yasunori, Goto Makoto, Sakabe Daisuke, Emoto Takafumi, Shigematsu Shinsuke, Taguchi Narumi, Maruyama Natsuki, Takada Sentaro, Uchimura Ryutarō, Hayashi Hidetaka, Kidoh Masafumi, Oda Seitaro, Nakaura Takeshi, Funama Yoshinori, Hatemura Masahiro, Hirai Toshinori	4. 巻 151
2. 論文標題 Radiation dose optimization potential of deep learning-based reconstruction for multiphase hepatic CT: A clinical and phantom study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Radiology	6. 最初と最後の頁 110280 ~ 110280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejrad.2022.110280	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 Nagayama Yasunori, Goto Makoto, Sakabe Daisuke, Emoto Takafumi, Shigematsu Shinsuke, Oda Seitaro, Tanoue Shota, Kidoh Masafumi, Nakaura Takeshi, Funama Yoshinori, Uchimura Ryutarō, Takada Sentaro, Hayashi Hidetaka, Hatemura Masahiro, Hirai Toshinori	4. 巻 -
2. 論文標題 Radiation Dose Reduction for 80-kVp Pediatric CT Using Deep Learning-Based Reconstruction: A Clinical and Phantom Study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Journal of Roentgenology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2214/AJR.21.27255	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 Nagayama Yasunori, Iwashita Koya, Maruyama Natsuki, Uetani Hiroyuki, Goto Makoto, Sakabe Daisuke, Emoto Takafumi, Nakato Kengo, Shigematsu Shinsuke, Kato Yuki, Takada Sentaro, Kidoh Masafumi, Oda Seitaro, Nakaura Takeshi, Hatemura Masahiro, Ueda Mitsuharu, Mukasa Akitake, Hirai Toshinori	4. 巻 33
2. 論文標題 Deep learning-based reconstruction can improve the image quality of low radiation dose head CT	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Radiology	6. 最初と最後の頁 3253 ~ 3265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00330-023-09559-3	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 Goto Makoto, Nagayama Yasunori, Sakabe Daisuke, Emoto Takafumi, Kidoh Masafumi, Oda Seitaro, Nakaura Takeshi, Taguchi Narumi, Funama Yoshinori, Takada Sentaro, Uchimura Ryutaro, Hayashi Hidetaka, Hatemura Masahiro, Kawanaka Koichi, Hirai Toshinori	4. 巻 30
2. 論文標題 Lung-Optimized Deep-Learning-Based Reconstruction for Ultralow-Dose CT	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Academic Radiology	6. 最初と最後の頁 431 ~ 440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.acra.2022.04.025	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 永山 泰教	4. 巻 38
2. 論文標題 特集 専攻医1年目で知っておきたいCT 14のこと~指導医からのメッセージ~ これだけは知っておきたいCTの医療被ばく	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床画像	6. 最初と最後の頁 12 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18885/ci.0000001052	査読の有無 無
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 永山泰教	4. 巻 37
2. 論文標題 DLRが可能とする低被ばくと高画質の両立	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 INNERVISION	6. 最初と最後の頁 4 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Yasunori Nagayama
2. 発表標題 Deep-learning reconstruction for unenhanced brain CT: Assessment of image quality and dose optimization potential
3. 学会等名 第107回 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂部 大介 , 船間 芳憲 , 永山 泰教 , 中戸 研吾 , 後藤 淳 , 榎本 隆文 , 羽手村 昌弘
2. 発表標題 低線量CTにおけるDeep Learningを用いた再構成の画像特性 ファントム研究
3. 学会等名 日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Daisuke Sakabe, Makoto Goto, Takafumi Emoto, Seitaro Oda, Takeshi Nakaura, Osamu Ikeda, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Deep Learning-Based Reconstruction to Facilitate Lower Dose Pediatric CT: Technical Principles, Image Characteristics, and Clinical Implementations
3. 学会等名 107th Scientific Assembly and Annual Meeting of the Radiological Society of North America (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Seitaro Oda, Daisuke Sakabe, Takafumi Emoto, Makoto Goto, Takeshi Nakaura, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Image quality and radiation dose reduction potential of the novel deep-learning reconstruction algorithm for pediatric body CT
3. 学会等名 European Congress of Radiology (ECR) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Daisuke Sakabe, Makoto Goto, Takafumi Emoto, Seitaro Oda, Takeshi Nakaura, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Image quality characteristics and dose optimization potential of novel deep-learning reconstruction algorithm: a phantom experiment
3. 学会等名 European Congress of Radiology (ECR) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Goto, Yasunori Nagayama, Daisuke Sakabe, Takafumi Emoto, Masafumi Kidoh, Seitaro Oda, Takeshi Nakaura, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Impact of deep-learning reconstruction algorithm on image quality of ultralow-dose lung CT: A phantom study
3. 学会等名 European Congress of Radiology (ECR) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Sakabe, Yoshinori Funama, Yasunori Nagayama, Kengo Nakato, Makoto Goto, Takafumi Emoto1, Masahiro Hatemura
2. 発表標題 Imaging characteristics of a deep learning reconstruction at low dose CT: A phantom study
3. 学会等名 The 77th Annual Meeting of the Japanese Society of Radiological Technology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seitaro Oda, Narumi Taguchi, Takafumi Emoto, Takeshi Nakaura, Yoshinori Funama, Masafumi Kidoh, Yasunori Nagayama, Hiroyuki Uetani, Akira Sasao, Yasuyuki Yamashita
2. 発表標題 Deep learning reconstruction can improve image quality and subjective acceptance in low radiation dose abdominal CT: Comparison with iterative reconstruction algorithm
3. 学会等名 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永山泰教
2. 発表標題 深層学習画像再構成 に関する研究
3. 学会等名 FCA-Webinar in 熊本・宮崎
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Takafumi Emoto, Daisuke Sakabe, Sentaro Takada, Takeshi Nakaura, Yoshinori Funama, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Seeing More with Super-Resolution Deep-Learning CT Reconstruction: Physical Property and Clinical Potential
3. 学会等名 第108回 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Takafumi Emoto, Daisuke Sakabe, Sentaro Takada, Takeshi Nakaura, Yoshinori Funama, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Task-based Image Quality Assessments of Super-Resolution Deep-Learning Reconstruction for Coronary CT Angiography
3. 学会等名 第108回 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Takafumi Emoto, Daisuke Sakabe, Sentaro Takada, Takeshi Nakaura, Masafumi Kidoh, Seitaro Oda, Hidetaka Hayashi, Yoshinori Funama, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Efficacy of Super-Resolution Deep-Learning Reconstruction for the Assessments of Obstructive Coronary Artery Disease on Coronary CT Angiography
3. 学会等名 第108回 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Takafumi Emoto, Daisuke Sakabe, Sentaro Takada, Takeshi Nakaura, Masafumi Kidoh, Seitaro Oda, Hidetaka Hayashi, Yoshinori Funama, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Improvement of Coronary Stent CT Imaging with Super-Resolution Deep-Learning Reconstruction: An Initial In Vivo Experience
3. 学会等名 第108回 北米放射線学会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Nagayama, Takafumi Emoto, Daisuke Sakabe, Sentaro Takada, Takeshi Nakaura, Masafumi Kidoh, Seitaro Oda, Hidetaka Hayashi, Yoshinori Funama, Toshinori Hirai
2. 発表標題 Usefulness of Super-resolution Deep-Learning-based Reconstruction for CoronaryCT Angiography: A Clinical and Phantom Study
3. 学会等名 European Congress of Radiology (ECR) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0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

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