

原著

仮想単色 X 線 CT 画像を利用した前立腺高線量率組織内照射の治療計画における最適なエネルギー選択に関する検討

畑中 星吾¹⁾、大友 哲也²⁾、保坂 勝仁²⁾、渡邊 哲也²⁾、轟 圭介²⁾、
中嶋 剛²⁾、鷲巣 佳奈¹⁾、内海 暢子^{3,1)}、山野 貴史¹⁾、
西村 敬一郎¹⁾、新保 宗史¹⁾、高橋 健夫¹⁾

¹⁾ 埼玉医科大学総合医療センター 放射線腫瘍科

²⁾ 埼玉医科大学総合医療センター 中央放射線部

³⁾ JCHO 東京新宿メディカルセンター 放射線治療科

抄録

高線量率組織内照射が前立腺癌に対する治療法としてよく用いられており、CT 画像を利用した 3 次元治療計画が一般的に行われている。治療に用いるアプリケーションからの金属アーチファクトを低減させるために、2 種類のエネルギーの X 線を用いて取得した投影像から再構成した仮想単色 X 線 CT 画像を利用する方法などがあるが、最適な設定エネルギーについて検討した報告はほとんどない。そこで本研究では、物理特性および視覚的評価を行い、前立腺癌に対する高線量率組織内照射の治療計画における仮想単色 X 線 CT 画像の利用について、最適な設定エネルギーを明らかにすることを目的とした。CT 装置には Siemens 社製 SOMATOM Definition Flash を使用した。物理特性はファントム画像を利用した Noise Power Spectrum によるノイズ特性および Contrast to Noise Ratio による低コントラスト分解能で評価した。視覚的評価では実際の臨床画像を使用した。CT 画像を現像したフィルムを 13 名が 3 つの項目（金属アーチファクト、画像ノイズ、総合評価）について、正規化順位法にて評価を行った。結果より、ノイズ特性は設定エネルギーが 70 ～ 90 keV、低コントラスト分解能は 70 ～ 80 keV の場合に最も良好であった。金属アーチファクトはエネルギーが高いほど、画像ノイズは 80 keV、総合評価では 100 ～ 120 keV の場合に最も良好であった。仮想単色 X 線像は設定エネルギーが高いほど金属アーチファクトが低減されるが、ノイズが増大する傾向にあると考えられ、ノイズの影響を許容でき、かつ金属アーチファクトがより低減された画像を提供することが重要である。ノイズ特性および低コントラスト分解能は 70 ～ 90 keV 程度が最も良好であるが、金属アーチファクトの低減は不十分であり、アーチファクトおよび総合評価の結果より前立腺癌に対する高線量率組織内照射には 100 keV 程度が最適であると考えられた。

key words

前立腺癌、密封小線源治療、仮想単色 X 線 CT 画像、ノイズ特性、低コントラスト分解能

連絡先：〒 350-8550

埼玉県川越市鴨田 1981 番地

埼玉医科大学総合医療センター 放射線腫瘍科 畑中 星吾

TEL：049-228-3511

FAX：049-228-3753

【投稿受付：2016 年 4 月 25 日】【査読完了：2016 年 6 月 1 日】

1. 背景

がんの三大治療法の一つである放射線治療は近年急速に発展を遂げ、その患者数も増加の一途を辿っている。放射線治療の中でも高線量率小線源治療 (high dose rate brachytherapy, HDR) は、腫瘍部に直接線源を装着または刺入することにより大線量を集中させ、かつ正常組織への線量を抑えることが可能な治療法である¹⁾。HDR では線源移送用の金属アプリータを挿入または刺入している状態で正側 2 方向の X 線写真を撮影し、2 次元画像に基づく治療計画が従来から行われてきたが、近年では CT 画像を利用した 3 次元治療計画が普及しつつある¹⁾。CT 画像は軟部組織の詳細な情報が得られるため、標的に高線量を投与しながら正常組織の線量を低減することで従来の方法より良好な線量分布を作成することが可能だが、アプリータによる金属アーチファクトが発生し、情報の一部が欠損してしまうことが問題点として挙げられる²⁾。

前立腺癌に対する放射線治療は手術と比較して男性機能および尿路系機能の治療後の生活の質を保てることから、高線量率組織内照射が前立腺癌に対する治療法としてよく用いられており^{1,3-11)}、近年では 3 次元治療計画が一般的となっている。金属製のアプリータを使用した 3 次元治療計画で問題となるアーチファクトを低減させるには、2 種類のエネルギーの X 線を用いて取得した投影像から再構成した仮想単色 X 線 CT 画像を利用する方法がある¹²⁻¹⁶⁾。これは X 線エネルギーが単色であると仮定した CT 画像を再構成する方法であり、数十～数百 keV 領域の範囲でエネルギーを選択可能であるため、目的に応じて最適なエネルギーを選択する必要がある。前立腺癌に対する高線量率組織内照射

では、軟部組織を把握できるだけのノイズ特性および低コントラスト分解能が要求され、かつアプリータの位置を特定するために十分にアーチファクトを低減させる必要がある。しかし、前立腺癌に対する高線量率組織内照射において、金属アーチファクト低減を目的とした仮想単色 X 線 CT 画像の最適なエネルギー選択に関する検討はほとんどないのが現状である。そこで本研究では、前立腺癌に対する高線量率組織内照射の治療計画における仮想単色 X 線 CT 画像の利用について、最適な単色エネルギーを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

CT 装置には Siemens 社製 SOMATOM Definition Flash を使用した。組織内照射用の刺入針にはニュークレトン社製トロカルポイントニードル (200 mm × 1.5 mm φ) を使用した。

2.1. 物理特性

評価用のファントムとしてファントムラボラトリー社製 CATPHAN600 を使用し、CT 撮影を行った。スキャン条件を表 1 に示す。撮影した投影像を基に、仮想単色 X 線の設定エネルギーを 50、60、70、80、90、100、110、120、130、140、160、180 keV とし、それぞれ画像を再構成した。

2.1.1. ノイズ特性

それぞれの画像について Noise Power Spectrum (NPS) を測定し、ノイズ特性の評価を行った。NPS は各空間周波数に対応したノイズ成分の振幅を表す尺度であり、ノイズ特性の定量的指標として利用されている^{17,18)}。NPS の算出には仮想スリット

表 1. CT 撮影条件

管電圧	100 kV (218 mAs) 140 kV (168 mAs)※
Rotation time	0.33 s/rot.
Pitch factor	0.6
スライス厚	2 mm
FOV	210 mm
再構成関数	D26f med.smooth ASA

※低エネルギー成分カット用の Sn フィルタ使用

法^{17,18)}を使用した。図 1 に CATPHAN600 におけるノイズ特性の評価部分である CTP486 の撮影スライスおよび仮想スリットを示す。解析にはオープンソースでパブリックドメインの画像処理ソフトウェアである ImageJ ver. 1.46r を使用した。取得した CT 画像の該当スライスにて仮想スリット (X 方向 1 ピクセルかつ Y 方向 30 ピクセル) を設定し、X 方向による 256 ピクセル分スキャンすることで 1 次元ノイズプロファイルを取得した。これをトレンド補正およびフーリエ変換することで NPS を算出した^{17,18)}。

2.1.2. 低コントラスト分解能

それぞれの画像について Contrast to Noise Ratio (CNR) を測定し、低コントラスト分解能の評価を行った。CNR は一般的にロッド内部の平均 CT 値と隣接するバックグラウンドの平均 CT 値をバックグラウンドの標準偏差値で除した値で、低コントラスト分解能の指標として用いられる^{17,18)}。図 2 に CATPHAN600 における低コントラスト分解能の評価部分である CTP515 の撮影スライスを示す。CTP515 には周辺部に体軸方向に 40 mm の長さを有し、周辺と X 線吸収が異なるロッドが複数配置されている。本研究では直径が 15 mm のロッドに対して径 14 mm の region of interest (ROI) を設定し、CT 値の平均を算出した。周辺部をバックグラウンドとして、同サイズの ROI を設定し、CT 値の平均と標準偏差を算出し、以下の式を用いて CNR を算出した。解析には ImageJ ver. 1.46r を使用した。

$$CNR = \frac{ROI_M - ROI_B}{SD_B}$$

ここで、 ROI_M はロッド内部の CT 値の平均、 ROI_B はバックグラウンドの CT 値の平均、 SD_B はバックグラウンドの CT 値の標準偏差である。

2.2. 視覚的評価

視覚的評価には当センターで前立腺癌に対する高線量率組織内照射を実施した 6 例の CT 画像を使用した。スキャン条件は表 1 と同様である。仮想単色 X 線エネルギーを 70、80、90、100、120、160 keV としそれぞれ再構成し、フィルムに現像

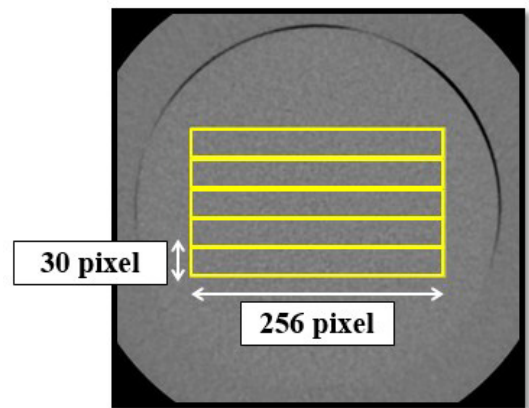


図 1. ノイズ特性の評価に使用した画像および仮想スリット
取得した CT 画像の該当スライスにて仮想スリット (X 方向 1 ピクセルかつ Y 方向 30 ピクセル) を設定し、X 方向による 256 ピクセル分スキャンすることで 1 次元ノイズプロファイルを取得した。

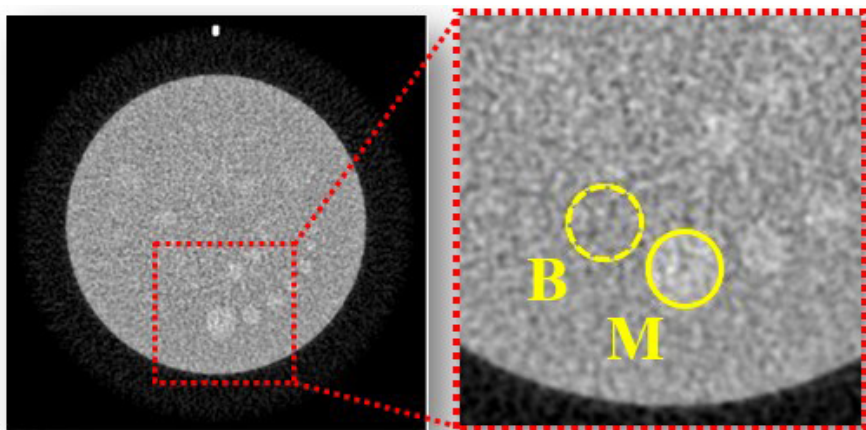


図 2. 低コントラスト分解能の評価に使用した画像
図中の M はロッド内部に設定した ROI であり、B は周辺部 (バックグラウンド) に設定した ROI を示す。

した。現像したフィルムを 13 名(放射線腫瘍医 4 名、放射線治療に従事する診療放射線技師 8 名、医学物理士 1 名)が視覚的に評価を行った。評価項目は金属アーチファクト、画像ノイズ、総合評価とし、それぞれ順位付けを行った。総合評価は評価者が画像を治療計画に使用する際に適切かどうかを主観的に判断し、順位をつけた。それぞれの項目について正規化順位法にて評価を行った^{19,20)}。

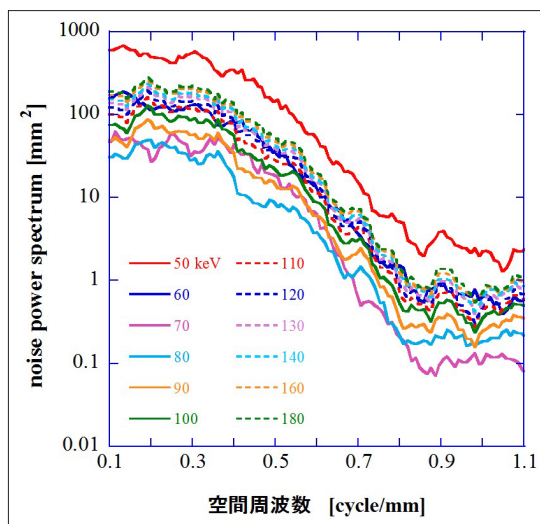


図 3. 単色 X 線エネルギーの違いによる画像の NPS の変化
ノイズ特性に対する物理評価では設定エネルギーが 70 ～ 90 keV の場合に最も良好であった。

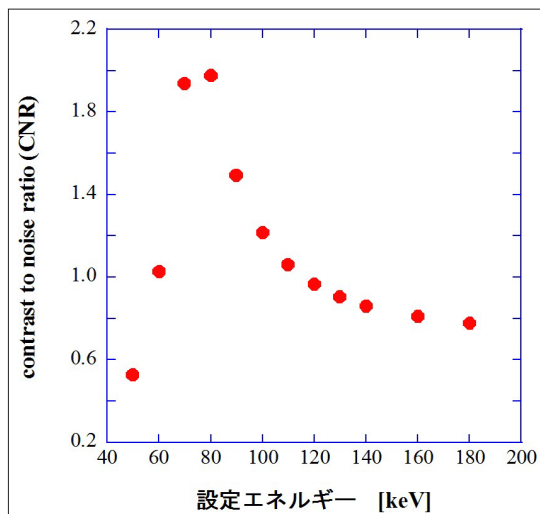


図 4. 単色 X 線エネルギーの違いによる画像の CNR の変化
低コントラスト分解能に対する物理評価では設定エネルギーが 70 ～ 80 keV の場合に最も良好であった。

3. 結果

3.1. 物理特性

図 3 に単色 X 線エネルギーの違いによる画像の NPS の変化を示す。ノイズ特性に対する物理評価では設定エネルギーが 70 ～ 90 keV の場合に最も良好であった。

図 4 に単色 X 線エネルギーの違いによる画像の CNR の変化を示す。低コントラスト分解能に対する物理評価では設定エネルギーが 70 ～ 80 keV の場合に最も良好であった。

3.2. 視覚的評価

図 5 に各設定エネルギーの再構成画像の 1 例、

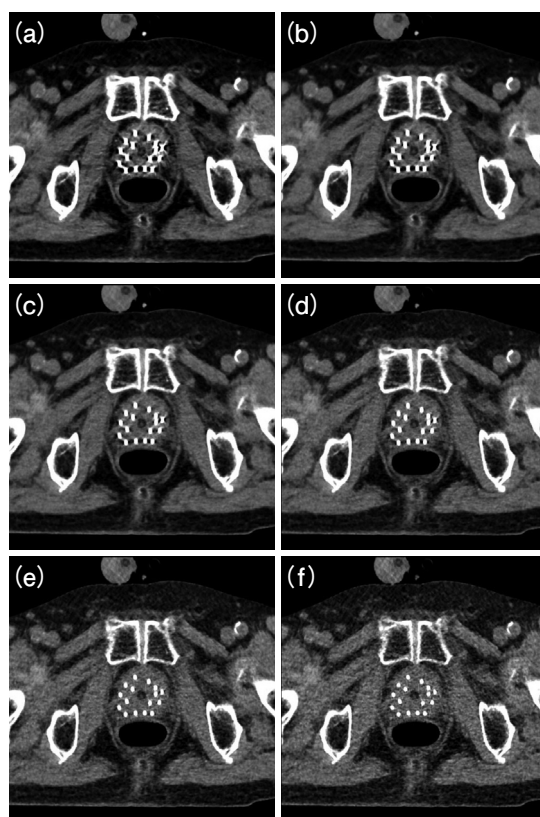


図 5. 各設定エネルギーの再構成画像の 1 例

(a) - (f) はそれぞれ設定エネルギーが 70、80、90、100、120、160 keV で再構成した仮想単色 X 線画像である。視覚的に高エネルギーほど金属アーチファクトは低減しているが、ノイズがやや増加している。

表 2 に各評価項目における順位の内訳および距離尺度を示す。視覚的評価の結果から、金属アーチファクトは設定エネルギーの増加に伴い改善される傾向であることが示された。画像ノイズは 80 keV の場合に最も良好であることが明らかになった。総合評価では 100 ～ 120 keV の場合に最も良好であった。

4. 考察

2 種類のエネルギーの X 線を用いて取得した投影像から再構成した仮想単色 X 線画像は、任意の単色エネルギーを設定できるため、ユーザが自由に最適なエネルギーを選択することが可能となる。結果より、ノイズ特性に対する物理評価では設定エネルギーが 70 ～ 90 keV の場合に最も良好であった。

表 2. 視覚的評価における各項目の順位内訳

(a) 金属アーチファクトの低減

	70 keV	80 keV	90 keV	100 keV	120 keV	160 keV
1位	0	0	0	0	1	12
2位	0	0	0	0	12	1
3位	0	0	0	13	0	0
4位	0	0	13	0	0	0
5位	0	13	0	0	0	0
6位	13	0	0	0	0	0
距離尺度	-1.27	-0.64	-0.20	0.20	0.69	1.22

(b) 画像ノイズ

	70 keV	80 keV	90 keV	100 keV	120 keV	160 keV
1位	1	10	2	0	0	0
2位	2	3	8	0	0	0
3位	6	0	3	4	0	0
4位	4	0	0	9	0	0
5位	0	0	0	0	13	0
6位	0	0	0	0	0	13
距離尺度	0.38	1.04	0.60	0.10	-0.64	-1.27

(c) 総合評価

	70 keV	80 keV	90 keV	100 keV	120 keV	160 keV
1位	0	0	0	7	6	0
2位	0	0	2	3	5	3
3位	0	2	2	3	1	5
4位	0	0	9	0	1	3
5位	2	11	0	0	0	0
6位	11	0	0	0	0	2
距離尺度	-1.17	-0.51	-0.01	0.88	0.83	-0.02

また画像ノイズに対する視覚的評価でも 80～90 keV の場合に最も良好であった。したがって、前立腺などの軟部組織の描出には 80 keV 程度の設定エネルギーが有用であると考えられ、過去の文献とほぼ同じ結果であった¹³⁾。しかし、デュアルエネルギー撮影は一般的な管電圧 120 kV のシングルエネルギー撮影と比較して被ばく線量はほとんど変わらないが、仮想単色 X 線画像は低電圧撮影で得られる画質に劣る傾向にあるとの報告もある¹³⁾。ノイズ特性やコントラストを改善することのみでは仮想単色 X 線画像を取得する十分な根拠とはならない可能性があることを認識する必要がある。

金属アーチファクトは設定エネルギーが高いほど低減されていた。これは X 線エネルギーが高いほど高密度の金属によるビームハードニングの影響が小さくなるためと考えられ、金属アーチファクトの低減にはより高い設定エネルギーが有用である。本研究では、金属アーチファクトに対しては視覚的評価のみとした。これはノイズやコントラスト特性などの評価では物理的解析手法が数多く報告されているのに対し、金属アーチファクトでは有効な手法が現状では確立されていないためである。しかし、金属アーチファクトを視覚的に評価した論文は今までにも報告されており²¹⁻²⁴⁾、本研究においても視覚的な手法のみで十分に金属アーチファクトを評価できて

いると考えられる。

設定エネルギーが高いほど金属アーチファクトは低減可能であるのに対し、ノイズは増大する傾向にあるため、ノイズの影響を許容でき、かつ金属アーチファクトがより低減された画像を提供することが重要と考えられる。ノイズ特性および低コントラスト分解能は 70～90 keV 程度が最も良好であるが、70～90 keV では金属アーチファクトの低減は不十分であると考えられる。総合評価の結果より、100 keV であればアプリケーションの位置を認識するために十分に金属アーチファクトは低減でき、かつ十分な前立腺の描出が可能と考えられるため、前立腺癌に対する高線量率組織内照射には 100 keV 程度の設定エネルギーが最適であることが明らかになった。

5. 結論

前立腺癌に対する高線量率組織内照射において、金属アーチファクト低減を目的とした仮想単色 X 線 CT 画像の最適なエネルギー選択に関する検討はほとんどない。本研究では物理特性および視覚的な評価を行い、仮想単色 X 線 CT 画像の最適な単色エネルギーについて検討した。前立腺癌に対する高線量率組織内照射の治療計画において仮想単色 X 線 CT 画像は非常に有用であり、最適な設定エネルギーは 100 keV 程度であることが明らかになった。

参考文献

1. 日本放射線腫瘍学会 小線源部会編：密封小線源治療 診療・物理 QA マニュアル、東京、金原出版、2013
2. 齋藤陽子、市川勝弘：考える CT 撮像技術 - 知っているつもりで、知らなかった技術のすべて、文光堂、22-26、2013
3. Yoshioka Y, Konishi K, Sumida I, et al. Monotherapeutic high-dose-rate brachytherapy for prostate cancer: five-year results of an extreme hypofractionation regimen with 54 Gy in nine fractions. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 80 (2) :469-75. 2011.
4. Ghilezan M, Martinez A, Gustason G, et al. High-dose-rate brachytherapy as monotherapy delivered in two fractions within one day for favorable/intermediate-risk prostate cancer: preliminary toxicity data. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 83 (3) :927-32 2012.
5. Corner C, Rojas AM, Bryant L, et al. A Phase II study of high-dose-rate afterloading brachytherapy as monotherapy for the treatment of localized prostate cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 72 (2) :441-6. 2008.
6. Cury FL, Duclos M, Aprikian A, et al. Single-fraction high-dose-rate brachytherapy

- and hypofractionated external beam radiation therapy in the treatment of intermediate-risk prostate cancer - long term results. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 82 (4) :1417-23. 2012.
7. Sato M, Mori T, Shirai S, et al. High-dose-rate brachytherapy of a single implant with two fractions combined with external beam radiotherapy for hormone-naïve prostate cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 72 (4) :1002-9. 2008.
8. 築山巖、小林伶子、平塚純一、他：中リスク前立腺癌に対する外部照射併用高線量率イリジウム組織内照射の臨床第Ⅱ相試験の多施設共同研究報告、臨床放射線、57 (4)、577-83、2012
9. Martinez AA, Kestin LL, Stromberg JS, et al. Interim report of image-guided conformal high-dose-rate brachytherapy for patients with unfavorable prostate cancer: the William Beaumont phase II dose-escalating trial. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 47 (2) :343-52. 2000.
10. Hiratsuka J, Jo Y, Yoshida K, et al. Clinical results of combined treatment conformal high-dose-rate iridium-192 brachytherapy and external beam radiotherapy using staging lymphadenectomy for localized prostate cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 59 (3) :684-90. 2004.
11. Ishiyama H, Kitano M, Satoh T, et al. Genitourinary toxicity after high-dose-rate (HDR) brachytherapy combined with Hypofractionated External beam radiotherapy for localized prostate cancer: an analysis to determine the correlation between dose-volume histogram parameters in HDR brachytherapy and severity of toxicity. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 75 (1) :23-8. 2009.
12. 兵頭朋子、村上卓道：Dual Energy CT の臨床、日獨医報、57 (2)、68-82、2012
13. Lifeng Yu, Shuai Leng, Cynthia H, et al. Dual-Energy CT-Based Monochromatic Imaging. *AJR*:199,S9-S15,2012
14. 上野恵子：スペクトラル CT- 基本原理と臨床応用、秀潤社、56-58、2013
15. 丹羽徹：Single Source CT による Dual Energy Imaging の臨床応用、INNERVISION 別冊付録、29 (11)、10-11、2014
16. 笹森大輔：Monochromatic Image を活用した脳動脈瘤の新たな画像診断、INNERVISION、27 (11)、44-49、2012
17. 日本放射線技術学会 監修、市川勝弘、村松禎久共編：標準 X 線 CT 画像の計測、オーム社、2009
18. 西丸英治：初級！空間分解能と低コントラスト検出能、アールティ、No.59、2-6、2013
19. 内田治、平野綾子：官能評価の統計解析、日科技連出版社、95-96、2012
20. 中前光弘：順位法を用いた視覚評価の信頼性について - 順序尺度の解析と正規化順位法による尺度構成法 -、日本放射線技術学会雑誌、56 (5)、725-730、2000
21. Funama Y, Taguchi K, Utsunomiya D, et al. A newly-developed metal artifact reduction algorithm improves the visibility of oral cavity lesions on 320-MDCT volume scans. *Phys Med*: 31 (1) , 66-71, 2015.
22. Gondim Teixeira PA, Meyer JB, Baumann C, et al. Total hip prosthesis CT with single-energy projection-based metallic artifact reduction: impact on the visualization of specific periprosthetic soft tissue structures. *Skeletal Radiol*: 43 (9) , 1237-1246, 2014.
23. Jeong S, Kim SH, Hwang EJ, et al. Usefulness of a metal artifact reduction algorithm for orthopedic implants in abdominal CT: phantom and clinical study results. *AJR Am J Roentgenol*: 204 (2) , 307-317, 2015.
24. Wang Y, Qian B, Li B, et al. Metal artifacts reduction using monochromatic images from spectral CT: evaluation of pedicle screws in patients with scoliosis. *Eur J Radiol*: 82 (8) , e360-366, 2013.

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619