

原著

低線量 CT を用いた尿管結石診断のための最適パラメーターの検討

永草大輔¹⁾ 川村研二²⁾ 奥村みず穂¹⁾ 佐道裕輔¹⁾ 辻口美奈子¹⁾ 延田宗久¹⁾

野田英治¹⁾ 林圭子¹⁾ 赤坂正明¹⁾ 坂下純司¹⁾ 井上大³⁾ 角弘論⁴⁾

¹⁾恵寿総合病院 放射線課 ²⁾恵寿総合病院 泌尿器科

³⁾金沢大学附属病院 放射線科 ⁴⁾恵寿総合病院 放射線科

【要約】

【目的】低線量 CT は、尿管結石の診断・評価に有効であるとする報告が散見される。再構成パラメーターの設定により更なる被ばく低減の余地があると考え、尿管結石の評価に最適な設定値を検討した。

【方法】1.0～3.0mm (0.5mm 間隔：5 個) のシュウ酸カルシウム結石を、直径 33cm アクリルファントムに封入し、被ばく線量を 30%から 10%まで 5%刻みに変化させ撮影した。それらの画像から再構成関数、スライス厚、逐次近似再構成の使用の有無を変化させ画像を作成し、視覚評価およびプロフィールによる物理評価を行った。

【結果】線量 10%で最も小さい結石まで評価できたのは、標準軟部用関数 B40f、スライス厚 2mm、逐次近似再構成の使用となり、それぞれ 2mm 結石、1.5mm 結石、2mm 結石が評価可能であった。視覚評価とプロフィールによる評価の結果は矛盾しないものであった。最適な再構成パラメーターを設定することで線量 10%において 1.5mm 以下の結石が評価可能であることが示唆された。

【結語】結石患者を模擬したファントムによる基礎的検討により、各条件で最も優れた再構成パラメーターを用いることで線量 10%まで低減しても 1.5mm の結石が識別可能であると示唆された。

Key Words : 低線量 CT, 尿管結石, 逐次近似再構成

【はじめに】

本邦では、尿路結石治療の判定基準として、1989 年に園田らにより報告された「ESWL における結石治療の評価基準」¹⁾が広く用いられてきた。この評価基準は、破碎後残石の KUB での長径のみでの評価であったが、単純 CT による結石の評価の有用性の報告がされ²⁾、CT で体積も含めて評価する「新たな尿路結石治療の評価基準」³⁾が提案された。単純 CT では、結石の密度、内部構造、皮膚からの距離など有用な情報が多く得られるが、放射線被ばくが増加することが欠点として挙げられる。特に本邦では医療被ばくが多いと報告されており⁴⁾、被ばく量低減に留意する必要がある。3mm 以上の尿管結石は低線量 CT でも通常の CT と同等な診断率が得られる

という報告も散見されるが⁵⁻⁸⁾、再構成パラメーターについて詳細な検討はなされていない。

一般的に線量が少なくなると画質が低下するとされているが、再構成パラメーターを診断目的に合わせて適切に設定することにより画質の低下を補うことができる可能性がある。

再構成パラメーターにも様々あるが、今回は低線量で微小結石を観察することを想定し、再構成関数（高コントラスト物体である結石を観察するにはどの空間周波数強調関数が最適か）、スライス厚（薄いスライス厚では小さい結石まで評価可能か）、逐次近似再構成の使用（低線量でのノイズの増加による影響を低減可能か）の 3 点に着目した。これらの適正化により、診断に必要な画質を担保しつつ、更なる

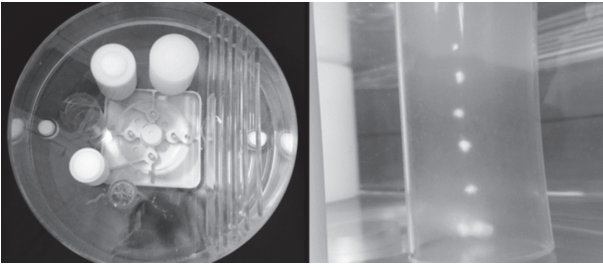


図1 シュウ酸カルシウム結石を封入した円形水ファントム

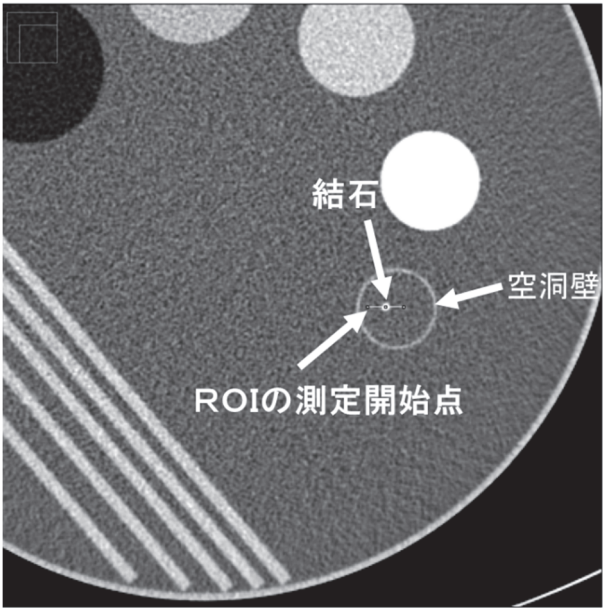


図2 1次元プロファイルの作成方法

被ばく量低減が期待される。

本研究の目的は、低線量 CT で尿管結石を評価する時の最適な再構成パラメーター（再構成関数、スライス厚、逐次近似再構成法）を検討する事である。

【対象および方法】

対象として、長径が約 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm (各±0.1mm 以内)の計 5 個のシュウ酸カルシウム結石 (CaOx : 95%) を封入した直径 33cm の円形水ファントム (TOSHIBA 社製) を作成した (図 1)。

撮影線量を患者体型に合わせて調節する自動露出制御機構を用いて腹部を撮影する時の当院での設定線量を 100% (Quality ref. mAs = 300, CTDIvol = 約 20mGy) とし、線量 30%から 10%まで 5%ずつ変化させた線量でファントムを撮影した。撮影には SOMATOM Definition Flash (SIEMENS 社製) を

使用した。撮影条件は、当院で腹部 CT に使用している、管電圧:120kV, ローテーションタイム:0.5s, ヘリカルピッチ : 0.6s とした。

得られた各線量での撮影データを、再構成関数・スライス厚・逐次近似再構成法の使用の有無をそれぞれ変化させ画像再構成を行った。再構成関数の変化による比較では、骨用高空間周波数強調関数である B70f, 通常腹部 CT に使用される B40f, スムージング関数である B10f の 3 種類を使用し、スライス厚は 3mm で固定した。スライス厚の変化による比較では、1mm, 2mm, 3mm の 3 種類を使用し、再構成関数は B40f で固定した。逐次近似再構成法の使用の有無による比較では最大強度である強度 5 を使用し、再構成関数 B40f, スライス厚 3mm で固定した。FOV (field of view)は全画像で 320mm とした。

再構成した全ての画像を、当院放射線技師 8 名 (経験年数 : 中央値 17 年, 範囲 : 6-35 年) で、ファントムに封入された結石のうち識別可能な最小結石サイズを評価し、8 名の平均値を視覚的評価として用いた。表示条件はウィンドウ幅 : 300, ウィンドウレベル : 35 で固定して観察を行った。画像観察用モニターとしての読影用モニター RadiForce RX211 (EIZO 社製, 解像度 1200×1600) を使用した。

視覚的評価の裏付けとして物理的評価 (プロファイルの解析) を行った。各サイズの結石が中央となるような位置にそれぞれ 1×25pixel の ROI (region of interest) を配置し 1 次元プロファイルを測定し結石部分の形の変化やノイズによる CT 値の変動を比較した (図 2)。画像解析ソフトとして ImageJ (株式会社リジット) を用いた。

倫理的配慮:今回はファントムによる研究のため、特定の個人を識別することができる個人情報を用いておらず、患者への介入も行っていない。ヘルシンキ宣言に従って研究を実施した。この研究は、恵寿総合病院倫理委員会の承認を得て行った (審査番号 2020-5-3 号)。

【結果】

線量変化が視覚評価におよぼす影響 (図 3) : 線量

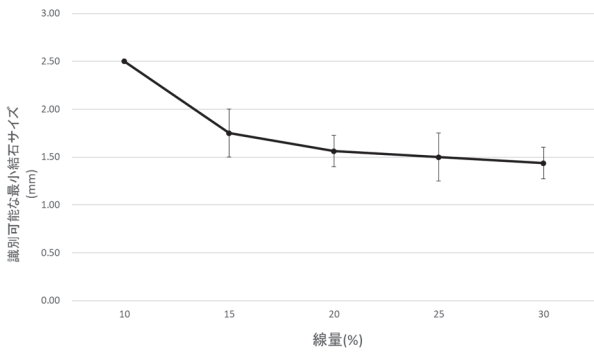


図 3 線量を変化させた時の視覚評価の結果 Bar は標準偏差を示した。

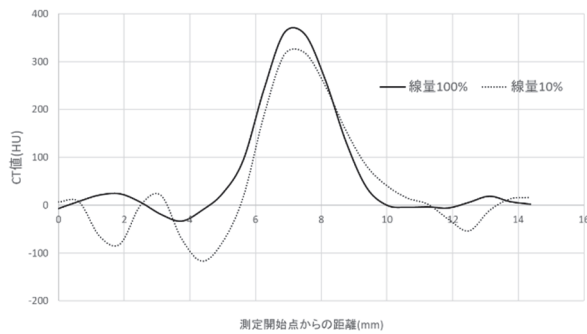


図 4 線量を変化させた時の 3mm 結石のプロファイルカーブ
中央のピークが結石部分，左右の平坦部が結石周囲のバックグラウンドとなっている。

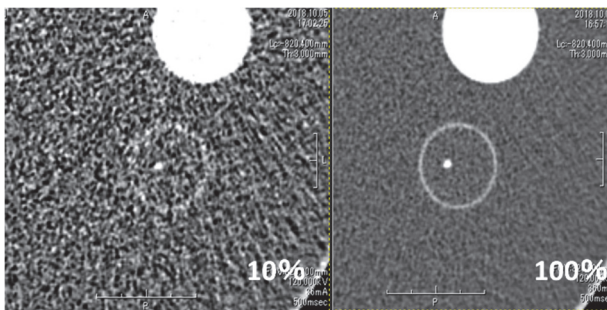


図 5 線量を変化させた時の 3mm 結石の画像
線量 10% (左) では線量 100% (右) に比べ、ノイズが増加し明らかに画質低下が低下した。

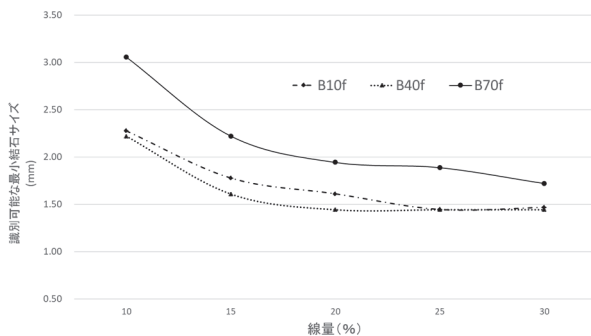


図 6 再構成関数を変化させた時の視覚評価の結果

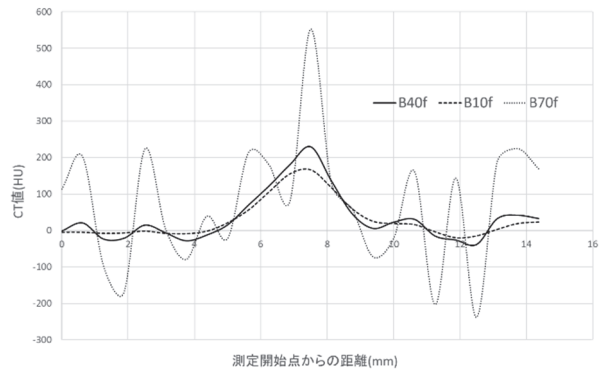


図 7 線量を変化させた時の 2mm 結石 (線量 20%) のプロファイルカーブ

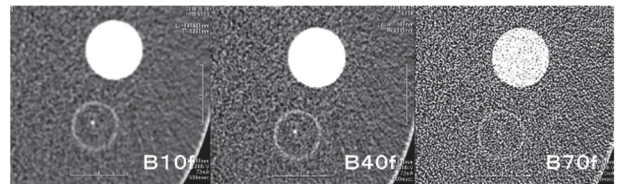


図 8 再構成関数を変化させた時の 2mm 結石 (線量 20%) の画像
B10f (左) では B40f (中央) と比較し結石周囲のノイズは減少したが結石のコントラストがわずかに低下した。B70f (右) では細かいノイズが増加し B40f と比較し視認性が低下した。

を 10~30%まで変化させた時、10%では 2.5mm 結石が識別可能であり、25%に増加させると 1.5mm 結石まで識別可能となった。

線量変化が画質におよぼす影響 (図 4, 5) : プロファイルカーブにおいて線量 10%では線量 100%に比べ、結石部分の CT 値低下、および結石周囲のノイズ増加による CT 値の変動を認めた。画像上でも線量 10%では明らかに画質低下を認め、結石とノイズの判別が困難となった。

再構成関数が視覚評価におよぼす影響 (図 6) : 線量 10%で B10f・B40f が 2mm 結石、B70f が 3mm 結石まで識別可能であった。B40f は B10f と比較して線量 25%までは差は認めなかったが、線量 10~20%では識別可能な最小結石サイズの平均値がわずかに低下し、結石の検出能の向上が得られた。

再構成関数が画質におよぼす影響 (図 7, 8) : プロファイルカーブにおいて、B10f では B40f と比較し結石周囲のノイズは低減されたが結石部分の CT 値の低下も認めた。これにより結石部分と周辺との

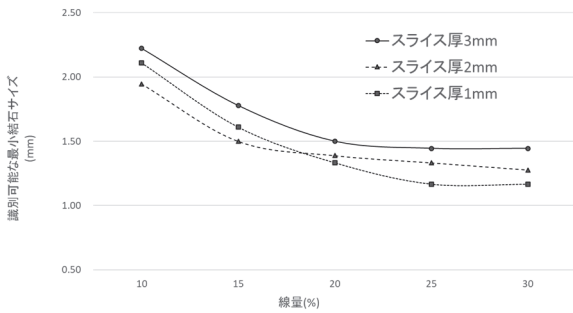


図9 スライス厚を変化させた時の視覚評価の結果

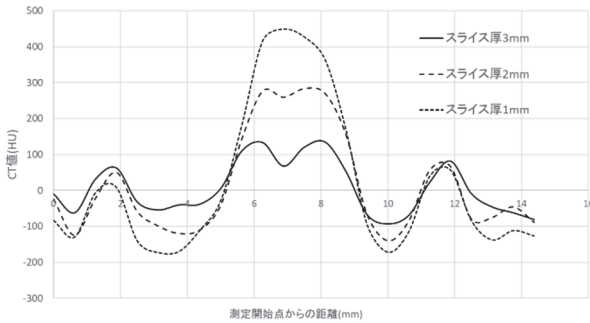


図10 スライス厚を変化させた時の2mm結石(線量10%)のプロファイルカーブ

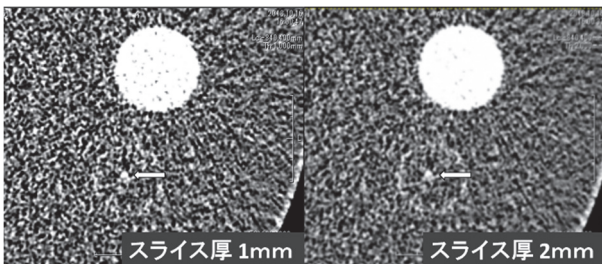


図11 スライス厚を変化させた時の2mm結石(線量10%)の画像(左:スライス厚1mm, 右:スライス厚2mm)。矢印は結石を示した。スライス厚1mmはノイズが増加しスライス厚2mmと比較し結石とノイズの判別が困難となった。

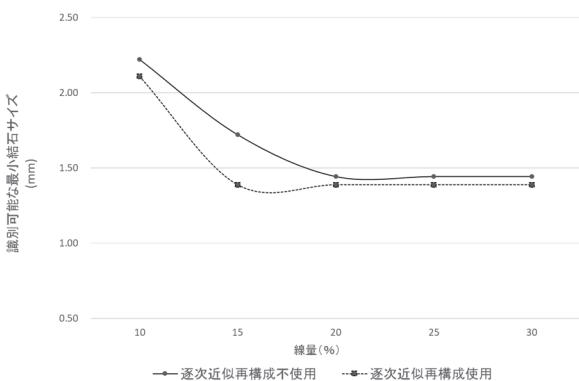


図12 逐次近似再構成の有無を変化させた時の視覚評価の結果

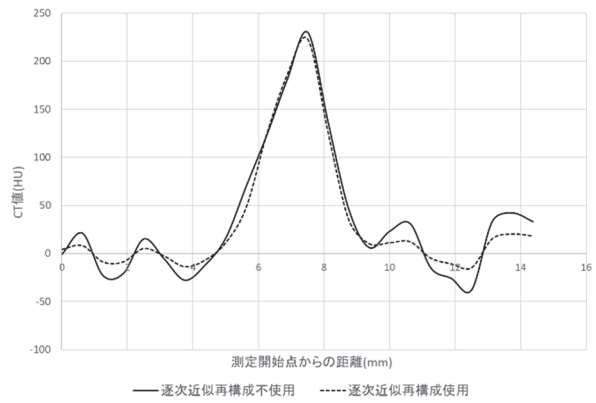


図13 逐次近似再構成の有無を変化させた時の2mm結石(線量30%)のプロファイルカーブ

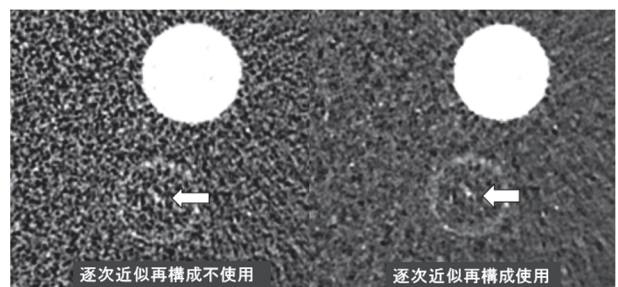


図14 逐次近似再構成の有無を変化させた時の2mm結石(線量10%)の画像(左:逐次近似再構成不使用, 右:逐次近似再構成使用)。矢印は結石を示した。逐次近似再構成の使用により結石周囲のノイズが低減を認めた。

CT 値の差が B10f では約 170HU, B40f では約 250HU となった。B70f では、B10f・B40f と比較し結石部分と結石周囲のノイズの CT 値変動がともに著しく増加し結石とノイズの形状の差を認めなくなった。結石のピークは B70f が最も高かったものの周囲ノイズの上昇や不均一性が高まっており、B40f の優位性が示唆された。B10f の画像では B40f と比較し結石周囲のノイズは減少したが結石のコントラストがわずかに低下した。B70f の画像では細かいノイズが増加し B40f と比較し視認性が低下した。

スライス厚の変化が視覚評価におよぼす影響(図9): 線量15%以下ではスライス厚2mmが最も小さい結石サイズまで識別可能であった。スライス厚1mmは線量20%まではほかの条件より小さい結石まで識別可能であったが線量15%以下ではスライス厚2mmに劣る結果となった。

スライス厚の変化が画質におよぼす影響(図10,

11):プロファイルカーブにおいて結石部分のCT値は1mm, 2mm, 3mmの順で高い値となった。結石周囲のCT値変動は1mm, 2mm, 3mmの順で大きくなった。図11に視覚的評価で逆転が生じた線量10%での2mm結石の画像を示す。スライス厚1mmの画像はノイズが増加しスライス厚2mmと比較し結石とノイズの判別が困難となった。

逐次近似再構成の使用が視覚評価におよぼす影響(図12):線量20%までは逐次近似再構成の使用による優位性はほとんど認められなかったが、線量20%以下の低線量帯においては逐次近似再構成を使用することで不使用時より小さい結石が識別可能となった。

逐次近似再構成の使用が画質におよぼす影響(図13, 14):プロファイルカーブにおいて逐次近似再構成の使用によりカーブ中央の結石部分のCT値の低下を抑えつつ、結石周囲のノイズが低減された。画像上でも逐次近似再構成の使用により結石周囲のノイズが低減を認めた。

【考察】

Poletti PA et al は線量約16.6%で3mm結石が評価可能と報告⁵⁾されているが、本研究では線量10%に設定してもスライス厚2mmで1.5mm結石が識別可能であった。ファントムベースの検討であるChristopher L.M et al の検討⁸⁾では、模擬結石としてphenolicとnylonを使用した場合に線量15%において3mmの結石を検出できないとされているが、尿管結石成分の約90%を占めるシュウ酸カルシウム結石を用いた本研究では、再構成関数B70fを使用した場合を除くすべての条件下で線量10%においても2.5mm結石が識別可能であった。3mm以上の結石では、線量100%, 50%, 25%で臨床において検出に差はないと報告⁷⁾されているが、25%未満の線量については検討が行われていなかった。今回の研究では線量10%まで検討し、すべての条件下で3mm結石の識別が可能であった。

今回の研究では再構成関数は腹部CTで使用される軟部用関数であるB40fが最も優れた結果となった。この理由として、高周波強調関数のB70fで、結

石のCT値は高くなるが、周辺ノイズも大きくなり結石がノイズに紛れてしまい視認性が低下した事と、スムージング処理が強くなるB10fで、周辺ノイズは減少したが結石のCT値も低下したためB40fに比べ結石と周囲のコントラストが低下し視認性が低下した事が考えられた。また、B70fとB10fのどちらの場合においても結石のプロファイルの形が変動してしまい結石サイズが正しく評価できない可能性も示唆された。普段の見慣れた画像となり評価しやすという点から考えても再構成関数は通常時と同じくB40fを使うことが望ましいと考えられた。

スライス厚による比較では、線量20%まではスライス厚1mmが最も視認性が高い結果となったが、線量15%以下でスライス厚1mmよりスライス厚2mmにおける視認性が上回った。これは、スライス厚が薄くなるほどパーシャルボリューム効果の影響が小さくなりCT値が高くなるため視認性が高くなるが、薄くなりすぎると周辺のノイズが大きくなるため視認性が低下した事が原因と考えられた。

今回の結果では2mmスライス厚が唯一10%線量でも1.5mm結石まで識別可能であったため、線量10%を用いる時は2mmスライスを設定することが最も望ましいと考えられた。また、通常線量下において3mm結石の識別にスライス厚3mmとスライス厚1.5mmでは差が見られなかったとする報告⁹⁾があるが、今回の検討ではスライス厚により識別可能な結石サイズに差を認め、低線量CTにおいては適切なスライス厚設定が必要であることが示唆された。

今回の研究で逐次近似再構成の使用により視認性は向上した。この原因として、逐次近似再構成の使用により結石周囲のノイズが小さくなった事と、結石自体のプロファイルカーブの変化が少なかった事が考えられた。逐次近似再構成法では空間周波数の非線形変化による画質の低下がデメリットとして挙げられるが¹⁰⁾、本研究では逐次近似再構成の使用による検出能の低下は認めなかった。この理由として、先行研究が低コントラストの腫瘍等の検出を対象とした検討であったのに対し、本研究では高コントラストである結石を対象とした事が考えられた。これ

により尿管結石の検出に関しては逐次近似再構成法の積極的な使用が推奨される可能性が示唆された。

今回の研究において線量 10%での最も優れたパラメーターは、標準軟部用関数 B40f, スライス厚 2mm, 逐次近似再構成の使用となり, それぞれ 2mm 結石, 1.5mm 結石, 2mm 結石が評価可能であった。またスライス厚 1mm, 2mm と逐次近似再構成を使用した 3 条件では、線量 20%で 1mm 結石まで識別可能であることも示唆された。このことから見逃しのリスクを避けるため観察したい結石サイズに応じて適切な線量を設定することが重要であると考えられた。ESWL 後のサイズの評価では 4mm が残石の基準であるため¹⁻³⁾, 再構成パラメーター (B70f, スライス厚 2mm, 逐次近似再構成使用) で線量 10%においても臨床的に十分有用である可能性が示唆された。

【結語】

結石患者を模擬したファントムによる基礎的検討により、各条件で最も優れた再構成パラメーターを用いることで線量 10%まで低減しても 1.5mm 以下の結石が識別可能であると示唆された。

【文献】

- 1) 園田孝夫: ESWL における結石治療の評価基準. 日泌尿会誌 80 : 505-506, 1989
- 2) 郡健二郎, 金子茂男, 馬場志郎, 他: 「尿路結石症診療ガイドラインの適正評価に関する研究」総合研究報告書. 厚生労働科学研究費補助金医療技術評価総合研究事業, 2005
- 3) 山口秋人, 東 義人, 麦谷荘一, 他: 我々が提案する新たな尿路結石治療の評価基準. Jpn J Endourol 28 : 17-20, 2015
- 4) UNSCEAR 原子放射線の影響に関する国連科学委員会 : 2008 年報告書 (http://www.aec.go.jp/jicst/NC/finkai/teirei/siryo2010/siryo59/siryo1.pdf) 最終アクセス 2020 年 10 月 23 日
- 5) Poletti PA, Platon A, Rutschmann OT, et al. : Low-dose versus standard-dose CT protocol in patients with clinically suspected renal colic .

AJR Am J Roentgenol 188 : 927-933, 2007

6) Hui-Hsien Chen, Cheg-Ching Yu, Fang-Yuh-Hsu : Evaluation of optimal parameters for using low-dose computed tomography to diagnose urolithiasis. Radiation Physics and Chemistry 140 : 242-246, 2017

7) Ciaschini MW, Remer EM, Baker ME, et al. : Radiation dose reduction of 50% and 75% at CT-effect on sensitivity. Radiology 251 : 105-111, 2009

8) Christopher LM, Brock D : Ureteral stones implementation of a reduced-dose CT protocol in patients in the emergency department with moderate to high likelihood of calculi on the basis of stone score. Radiology 280 : 743-751, 2016

9) Memarsadeghi M : Unenhanced multi detector row CT in patients suspected of having urinary stone disease: Effect of section width on diagnosis. Radiology 178 : 530-536, 2005

10) Katsura M, Ohtomo K : Iterative reconstruction techniques for radiation dose reduction. Med Image Tech 32 : 267-271, 2014