

CTの被ばくおよびLow-Dose CTのための工夫

中浦 猛

天草地域医療センター 放射線科

Low radiation dose protocol for abdominal CT : Usefulness of low kVp scan and hybrid iterative reconstruction algorithm (iDose™)

Takeshi Nakaura

Diagnostic Radiology, Amakusa Medical Center

Abstract The lifetime cancer risk based on current computed tomography (CT) use has been estimated to be lower than other risk factors such as diet and viruses, etc. Recent reports have shown that use of CT has increased dramatically over the last two decades in many countries. CT alone accounts for about half of all medical radiation doses. As a result, attention has recently focused on the potential risks of radiation-induced carcinogenesis from CT.

Low kVp scanning offers reduced radiation and increased enhancement of contrast material because the x-ray output energy at these low voltages is closer to the iodine K edge of 33 keV. The disadvantage of low kVp scan is increased image noise during abdominal scanning. However, the increase in contrast enhancement is higher than the increase in image noise. As a result, the contrast-to-noise-ratio (CNR) is increased at low kVp scanning and the same CTDI. Additionally, an iterative reconstruction algorithm for CT was introduced to help reduce the quantum noise associated with filtered back-projection (FBP) reconstruction algorithms. These techniques might be useful for radiation dose reduction at abdominal scanning.

In this paper, we reported the potential risks of radiation-induced carcinogenesis from computed tomography, the radiation dose at pediatric CT, and the usefulness of low kVp scan and hybrid iterative reconstruction algorithm (iDose™) reconstruction for radiation dose reduction at abdominal scanning.

Keywords CT, Radiation Dose, Low tube voltage, Iterative reconstruction

近年、CT検査の被ばくによる発癌が注目されているが、CT検査のような低線量被ばくによる発癌リスクの増加は完全には証明されておらず、喫煙、食事、ウィルスなどと比較してかなり低いことが予想されている。しかし、最近ではCTの

有用性の高さからCTの対象となる患者数と患者1人当たりの検査回数が増加し、CTの高速化・高性能化からCTの1件あたりの被ばく線量も増加しており、CTによる医療被ばくは急激に増加している。CTスキャンに関連する個々の発癌リス

クは非常に小さいと考えられるが、こうした僅かなリスクにさらされている患者が社会全体としては増加していることが問題となる可能性があり、CTの被ばくが注目されている原因と思われる。

小児のCTは①成人より放射線に対する感受性が著しく高いこと、②平均余命が長いこと放射線障害が発現する機会がより多くなること、③体格が小さいため、成人と同様の撮影条件では、臓器あたりの被ばく量は2倍から5倍になること¹⁾などの要因から特に被ばくに注意する必要がある、CT検査の適応を厳密に検討し、小児に最適化した低被ばくプロトコルを使用することが推奨されている。しかし、多列検出器型CT (MDCT)の急性腹症や外傷などの診断能は非常に高く、小児においても被ばくのリスクと診療上のベネフィットを考慮した場合はベネフィットが上回る場合がほとんどである。小児のCTによる医療被ばくを可及的に減少させる為には、低被ばくプロトコルの導入は必須である。

近年では小児の低被ばくCTプロトコルとして低電圧撮影が推奨されており、近年導入された逐次近似再構成法も有用と思われる。今回、低電圧撮影の基礎と被ばく低減への応用、フィリップス社の逐次近似再構成アルゴリズムであるiDoseTMの初期経験について報告する。

CTによる発癌リスク

CTは小児においても非常に有用であり、外傷や急性腹症の診断には欠かすことのできない検査である。しかし、CTはその有用性から過去20年間で劇的に増加しており、2007年のアメリカでは年間7200万件のCT検査が行われている²⁾。また、比較的被ばくの多い検査でもあることから、今日では医療被ばくの半分はCTによるものである³⁾。

放射線の人体に対する影響は急性期障害と慢性期障害があるが、医療被ばくにおいては通常慢性期障害の中の発癌のみが問題となる。放射線の発癌への影響については、広島や長崎の原子爆弾の被害者やチェルノブイリ原発事故の被ばく者などの症例を基にした研究がほとんどであり、最近では原発で働く労働者などを対象にした臨床研究もある。しかし、このような研究で明確にわかっていることは「一度に多量の被ばくを受けた場合は

発がんリスクが上昇し、そのリスクは線量とともに増加する⁴⁾ことのみであり、100mSv以下の被ばくによる影響は線形性がある(しきい値なしの直線モデル)という証拠もないものの、これを否定するような証拠もない。それどころか、実際に発癌リスクがあるかどうかは証明されてはおらず、CTで被ばくするような低線量の被ばくによる発がんリスクはほとんどわかっていないのが現状である。

低線量放射線による発癌リスクが確認されていない理由は喫煙、食事、ウイルスなどの他のリスク因子と比較して、放射線による発癌リスクがかなり低いと思われる。放射線防護に対する指針で最も広く用いられているBEIR-VIIでは、放射線の発癌リスクに対して「しきい値なしの直線モデル」を採用しているが、かなり厳しいと思われるこのモデルでも100mSv以下の放射線による発癌の増加は1%以下である。リスクを推定するためにはこのような低線量で被ばくした集団を集める必要があるが、実際にはタバコなどのさらに高リスクな因子の影響が強いため、被ばくのみの影響を検出するためには非常に大きな集団が必要となる。現時点ではそのような大規模な低線量被ばく者のデータはなく、CTのような低線量被ばくの発癌への影響については推定する他ないのが現状である。このような状況ではCTによる診断が必要な場合に被ばくのためにCTの使用を躊躇すべきでないものの、「よくわかっていないから、いくら被ばくさせても大丈夫」と考えるのは危険であり、やはり「よくわかっていないから、必要最低限の被ばくで撮影を行う。—ALARA (as low as reasonably achievable)」と考えることが重要と思われる。

小児CTでの被ばく

小児では放射線による発癌リスクが成人よりも高いことが広く知られている。

1. 細胞の放射線感受性

動物実験のデータによれば、若い生物ほど放射線に対する感受性が高い。これは若い生物ほど分裂している細胞やこれから分裂する細胞が多く、そのような細胞は分裂を休止している細胞より放射線に対する感受性が一般的に高い。

2. 予後

小児は成人と比較すると平均予命が長く、当然ながら放射線障害が発現する機会がより多くなる。しかし、逆にいえば検査で疾患による死亡確率が減少した場合の寿命延長効果は小児の方が高い。

3. 体格による被ばく増加

一般にCTで同等の条件で撮影した場合、小児の実効線量は成人の2～5倍程度になる¹⁾。小児に限らず体格が小さい場合は皮下脂肪や筋肉が薄く、体の直径も小さいため、内臓に高線量の放射線が到達する。しかし、組織荷重係数(ICRP2007, Table 1)は皮膚や筋肉、皮下脂肪などの体表の臓器は低く、内臓では高くなっているため、結果として被ばく線量が大きくなるためである。

これらのことから小児のCT検査については慎重になる必要があるが、画質を落とすのは問題があると思われる。なぜならば小児では検査によって死亡確率が低下した場合の寿命延長効果が大きく、言い換えれば同じCT検査でも成人よりも検査の重要性が高いためである。CTのような低線量放射線による被ばくでの危険性は比較的低いと見積もられているが、急性腹症や外傷などのCTによる精査が必須の状況で、CTの画質が十分でない場合の損失は計り知れず、十分な画質を保ったまま被ばくを低減するのが重要であろう。

被ばく低減の工夫

一般にCTの画質評価で一般的に使われているのはコントラストノイズ比(contrast to noise ratio: CNR)であり、CTの被ばく線量の目安に用いられているCTDIやDLPの二乗はノイズに反比例するという性質があることから、CNRをCT施行者が調整可能なコントラスト(造影CTの場合はほぼ造影剤量に比例)とCTDIとの関係で表すと下記のよう計算することができる。

$$\begin{aligned} \text{CNR} &= \frac{\text{Contrast}}{\text{Noise}} \\ &\propto \frac{\text{Contrast}}{\sqrt{1/\text{CTDI}}} \\ &= \text{Contrast} \times \sqrt{\text{CTDI}} \end{aligned}$$

Table 1

組織・臓器	組織荷重係数	組織・臓器	組織荷重係数
乳房	0.12	食道	0.04
骨髄	0.12	肝臓	0.04
結腸	0.12	膀胱	0.04
肺	0.12	骨表面	0.01
胃	0.08	皮膚	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
甲状腺	0.04	唾液腺	0.01

よってCTDIは下記のような式でも表すことができる。

$$\text{CTDI} \propto \frac{\text{CNR}^2}{\text{Contrast}^2}$$

このことから施行者が被ばくを低減するには、低画質を許容するか、造影剤を増やしてコントラストを上昇させる⁵⁾必要があった。しかし、最近では低電圧や逐次近似再構成を用いることにより、画質を保ったまま被ばく線量を減らすことが可能となっている。

脚注)CTDIとDLP

CT検査の線量指標で撮影時にdose reportの中に記録される。CTによる放射線被ばくは、管電流、管電圧、撮影ピッチ、回転速度、患者の体格、CTの機種など多数の要因により変動する。

CTDI(CT dose index: 単位mGy)は、頭や胴体を模したファントム内で計測された吸収線量を、中心や周辺で重みづけし、スキャンのビーム幅と撮影ピッチで除して求めるもので、撮影している局所の線量指標となるものである。このCTDIに撮影範囲の長さに乗じたものがDLP(Dose Length Product: Gy・cm)であり、被ばくの総量を示す指標となる。このDLPに一定の係数をかけることで患者個人への影響の指標となる実効線量の推計を行う。

低電圧CT

低電圧CTはヨード造影剤の造影効果が改善するため(Fig.1)、造影剤の減量には非常に有効なテクニックである⁶⁾。これはヨードの質量減弱係数(μ/ρ)はX線エネルギーが低下するにしたがって上昇するためである。Fig.2にX線のエネルギーおよびiCTの実効管電圧とヨードの質量減弱係数

(μ/ρ)の関係を示すが、低電圧撮影ではヨードの質量減弱係数が急激に増加していることがわかる。一方で低電圧撮影の欠点としてはノイズの上昇があるが、CTDIvolが同一の場合は低電圧によるノイズの増加はコントラストの上昇と比較すると軽度である。Fig.3にiCTで行ったファントム実験(腹部ファントムおよび各種濃度の造影剤ファントムで造影効果、ノイズを計測したもの)の結果を示すが、120kVpから80kVpに電圧を低下させることによって、造影剤のCT値は65%増加し、ノイズも17%増加しているものの、CNRは47%増加している。また、100kVpではSDの上昇は3%程度であり、造影効果は27%増加することから、CNRは

21%増加している。

この低電圧撮影によるCNRの上昇は造影剤の減量に用いられることが多いが、造影剤を減量せずに低電圧撮影を行った場合は造影剤を増量したのと同様の効果が得られるため、被ばく線量の低減に使用することができる。我々は痩せた大人の腹部造影CTにおいて120kVpから80kVpに電圧を低下させることによって、CNRが増加し、被ばくも低下することを報告している⁷⁾。また、この論文では画像の観察の際に広いウィンドウ幅(window width : WW)を使用することにより、低電圧CTの視覚評価が改善することも報告している。

小児のCTではさらに低電圧CTが有用と思われる

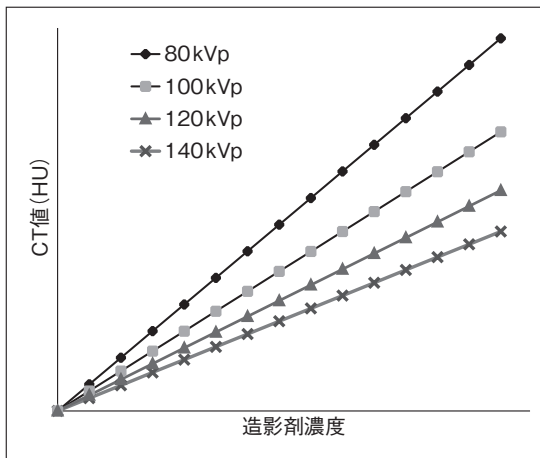


Fig.1 電圧と造影効果の関係

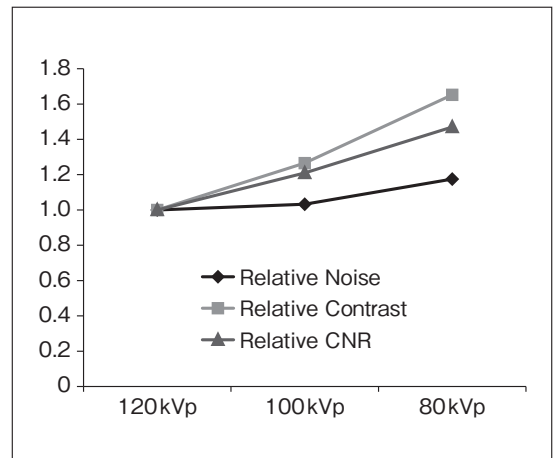


Fig.3 同一CTDIw時のヨードのCNR

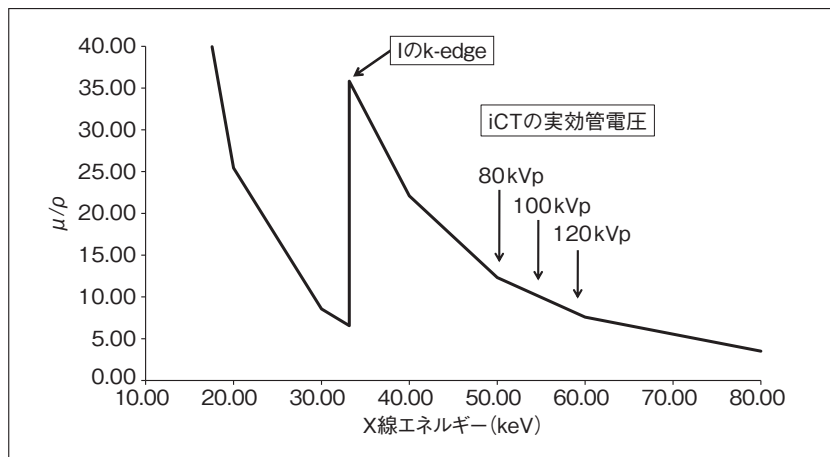


Fig.2 ヨードの質量減弱係数(μ/ρ)とX線エネルギーの関係

る。なぜならば低電圧CTのノイズの増加は、対象が小さい場合は少ないためである。我々の以前の検討から、WWはやや広くしたほうが良いと思われる。当院では最近までiDoseが導入されていなかったため、腹部dynamic CTにおいてはTable 2の低電圧撮影をルーチンとしていた。この条件は極端な低被ばく撮影ではないものの、非常に良好な画質が安定して得られるものであり、Auto mAによって体格にあわせた線量で撮影される。Fig.4はこのような条件で撮影されたものである。体重30kgの9歳男児であるが、CTDIが6.7mGyと低い割にかなり良好な画質が得られており、左腎盂腎炎の所見であるくさび状の低吸収域が明瞭に描出されている。

Table 2

管電圧	100kVp
管電流	Auto mA (小児ではかなり低下)
Reference CTDI	12mGy (成人の75%)
Rotation time	0.5sec (呼吸停止困難な場合 0.33~0.4sec)
Helical pitch	0.8
Window Level	50HU (成人*1.25)
Window Width	350HU (成人*1.25)
造影剤使用量	300mgI/kg
造影剤注入時間	30sec

iDose™

iDoseは逐次近似法を応用した画像再構成法—ハイブリッド型逐次近似画像再構成で、従来法に比べ大幅に画像ノイズを低減することが可能である。低電圧撮影の欠点としてノイズが増加することがあるが、iDoseを併用することでこれらの欠点を克服することが可能である。当院の検討では通常の6割の造影剤(360mgI/kg 30秒注入)で80kVp、iDoseを併用してdynamic CTを行った場合でも120kVpの通常のdynamic CTと同等の造影効果が確保されており、ノイズもほとんど目立たなかった。当院の検討ではiDoseにより40~50%程度の被ばく低減も可能であった。

CTのような低線量被ばくによる発癌の危険性については、現時点では確定していない。しかし、小児ではX線の影響が成人よりも大きいことは確かであり、平均予後が長いことから、CT検査の重要性も非常に高い。このような状況では画質を保ったまま、できるだけ被ばくを低減する努力が必要と思われる。低電圧撮影およびiDoseはほとんど画質を損なうことなく、被ばく線量を低下させることができる点で非常に有用な手法と思われる。

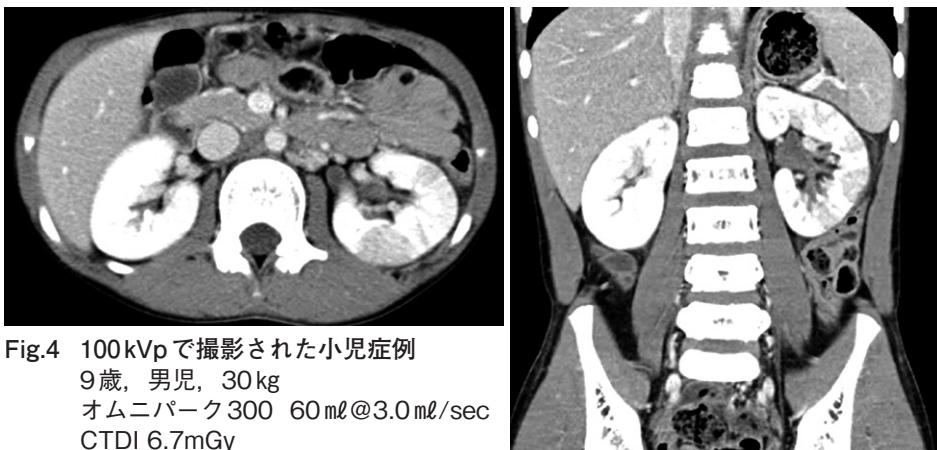


Fig.4 100kVpで撮影された小児症例
9歳, 男児, 30kg
オムニパーク300 60mℓ@3.0mℓ/sec
CTDI 6.7mGy

●文献

- 1) Igarashi T : Overview of ICRP publication 87 "managing patient dose in computed tomography". Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi 2004 ; 60 : 1065-1071.
- 2) Berrington de Gonzalez A, Mahesh M, Kim KP, et al : Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. Arch Intern Med 2009 ; 169 : 2071-2077.
- 3) Mettler FA Jr, Thomadsen BR, Bhargavan M, et al : Medical radiation exposure in the U.S. in 2006 : preliminary results. Health Phys 2008 ; 95 : 502-507.
- 4) Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, et al : Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13 : Solid cancer and noncancer disease mortality : 1950-1997. Radiat Res 2003 ; 160 : 381-407.
- 5) Watanabe H, Kanematsu M, Miyoshi T, et al : Improvement of image quality of low radiation dose abdominal CT by increasing contrast enhancement. AJR Am J Roentgenol 2010 ; 195 : 986-992.
- 6) Nakayama Y, Awai K, Funama Y, et al : Lower tube voltage reduces contrast material and radiation doses on 16-MDCT aortography. AJR Am J Roentgenol 2006 ; 187 : W490-497.
- 7) Nakaura T, Awai K, Oda S, et al : Low-kilovoltage, high-tube-current MDCT of liver in thin adults : pilot study evaluating radiation dose, image quality, and display settings. AJR Am J Roentgenol 2011 ; 196 : 1332-1338.
- 8) Marin D, Nelson RC, Samei E, et al : Hypervascular liver tumors : low tube voltage, high tube current multidetector CT during late hepatic arterial phase for detection-initial clinical experience. Radiology 2009 ; 251 : 771-779.
- 9) Huda W, Scalzetti EM, Levin G : Technique factors and image quality as functions of patient weight at abdominal CT. Radiology 2000 ; 217 : 430-435.