

第49回日本小児放射線学会シンポジウムより
特集 CT被ばく：小児CT被ばくの現状、各CT機器メーカーの対応

1. CT被ばく 正当化と最適化

宮 寄 治

国立成育医療研究センター 放射線診療部

Justification and optimization of pediatric CT

Osamu Miyazaki

Department of Radiology, National Center for Child Health and Development

Abstract

This review article will look at how we might quantify our performance regarding the justification and optimization of radiation protection. The Japan Radiological Society and the Japanese College of Radiology published “Diagnostic guidelines 2013”. These evidence-based guidelines included the contra-indication of head CT for pediatric minor head trauma. Also, ultrasonography is recommended for children with right lower quadrant pain prior to contrast enhanced abdominal CT. Wider use of these guidelines might help to reduce unnecessary irradiation of pediatric patients.

Recently, the optimization of pediatric CT technique has also been changed as compared to several years ago. New technical innovations such as iterative reconstruction used in daily practice and lower kilo-voltage of X-ray tube voltage have been positively applied to pediatric chest and abdominal CT. Each department should investigate its own local diagnostic reference level (DRL) of CTDI_{vol} and dose length product (DLP) as to whether they are reasonably optimized or not as compared with standard DRLs in the literature. We should know Size Specific Dose Estimation (SSDE) as a newly introduced CT radiation unit by the American Association of Physicists in Medicine (AAPM). SSDE overcame the disadvantage of CTDI_{vol}, which had not reflected a patient’s individual size. National dose index registry (DIR) might be organized for future work of the radiological society. It is necessary that physicians who take part in pediatric radiology adopt the contemporary state of the art described above in daily practice for continuous minimization of CT radiation exposure in children.

Keywords : CT, Radiation, Children, Guidelines, Optimization

はじめに

本項は2013年6月22日に山口県で行われた第49回小児放射線学会学術集会のシンポジウムの内容につき、その一部を総説の形で記載する。当日のシンポジウムは前半筆者が腹部領域の発表をし、後半に循環器領域を佐藤修平先生(岡山大学医学

部附属病院 放射線科)に発表していただいた。その後にCTメーカー4社の方々の低被ばくへの取り組みにつき主に技術面を解説していただいた。本項は当日の発表に準じて前半は正当化について、後半は最適化について解説する。内容については当日から半年経過しており、当日の講演に加え最新の情報を追記していることを明記したい。

小児CTの正当化

CT検査件数の最近の傾向

近年, Multidetector row CT (以下MDCT) の技術的進化和台数の普及により, CT検査は年々増加傾向を辿っている¹⁾. 最新の情報 (IMV medical information division) によれば北米のCT検査件数は2011年8,500万件をピークに, 2012年, 2013年と連続5.5%検査件数が減少し2013年は7600万件と報告されている^{2,3)}. CT検査件数全体の減少の原因として, 1) 患者と医療者の放射線被ばくに対する意識の高まり, 2) 北米の医療保険会社のCT検査適応の基準がより高くなったこと, 3) 胸部, 腹部, 骨盤など多部位の連続スキャンを1回と換算するなどの変化によると推測される²⁾. いずれにせよ米国は2007年までは年間+10%⁴⁾, 2007年~2011年までは+5.6%³⁾の増加率であったCT検査件数に変化が生じているようである. 米国の小児CTの比率は成人の約10%と報告されており⁵⁾, 2013年の時点では年間760万件程度と思われる.

本邦はTsusimaらの報告ではCT検査総数2990万件, 小児のCT検査件数143万件 (約4.8%) と推定されている⁶⁾.

CT検査の適応

文献上小児のCT検査のうち30%は検査不要か, あるいは放射線被ばくのない他の検査に変更が可能であると考えられている¹⁾. これらの不必要な検査を減らす方法としてガイドラインの適応が考

えられ, ガイドラインに従って検査適応を決定した場合, 20%の不要な検査を減らすことが可能と考えられている⁷⁾.

本邦では昨年, 日本医学放射線学会, 日本放射線科専門医会・医会が編集した画像診断ガイドライン—2013年版が刊行された⁸⁾. この書籍に小児画像診断セクションの大項目はないが, 頭部領域, 腹部領域には小児の画像診断の適応を決定する, 以下のふたつの重要な項目が含まれる.

1) 軽度の頭部外傷におけるCT検査の適応

日本医学放射線学会の画像診断ガイドラインは画像診断におけるclinical question (CQ) に対し, EBM (evidence based medicine) の観点から推奨度合を決め, 表に表わす形で統一されている. 小児の頭部CTについて“5 軽度の頭部外傷を有する小児患者においてCTを推奨するか?”の設問があり, その解答をTable 1に示す. CTの推奨グレードはDランキングである. Dは「無効性あるいは害を示す科学的根拠あり」である. 過去10年のCTに起因する発がんリスク推定論文などを反映したためであろう. 後述するような基準を使用して頭蓋内損傷のリスクを評価し, リスクの高い場合に限ってCTを行うべきである.

日本医学放射線学会ガイドラインの推奨する小児頭部外傷のリスク評価は, 2006年にArchives

Table 1 日本医学放射線学会 画像診断ガイドライン—2013「軽度の頭部外傷を有する小児患者においてCTを推奨するか？」

推奨 グレード	
A	強い科学的根拠あり, 行うよう強く推奨
B	科学的根拠あり, 行うよう推奨
C1	科学的根拠はないが行うよう推奨
C2	科学的根拠はなく行わないよう推奨
D	CT 無効性あるいは害を示す科学的根拠あり

小児の軽度の頭部外傷においては, CHALICE rule (Table 2) などの基準を使用して頭蓋内損傷のリスクを評価し, リスクが低い場合はCTを行うべきではない (文献8より引用, 改変)

Table 2 日本医学放射線学会 画像診断ガイドライン—2013の推奨するCHALICE rule (Children's head injury algorithm for the prediction of important clinical events. Dunning et al 2004)

- ・5分以上の意識消失
- ・5分以上の健忘
- ・傾眠傾向
- ・3回以上の嘔吐
- ・虐待の疑い
- ・てんかんの既往歴のない患者での痙攣
- ・GCS<14, 1歳未満ではGCS<15
- ・開放骨折, 陥没骨折の疑い, または大泉門膨隆
- ・頭蓋底骨折の所見 (耳出血, パンダの目徴候, 髄液漏, バトル徴候)
- ・神経学的異常
- ・1歳未満では5cm以上の皮下血腫や打撲痕
- ・高エネルギー外傷などの危険な受傷機転

* 上記の1項目でも該当する場合にはCTによる精査が必要である (文献8より引用)

of disease in childhood誌に掲載されたDunningらの提唱を引用している。この論文はchildren's head injury algorithm for prediction of important clinical events (CHALICE) と呼ばれる評価システムを設定しリスク評価をしている (Table 2)。

この表の一項目でもあればCTの適応ありと判断し、表に該当項目がない場合はCTの適応がないと判断可能である。

2) 小児の急性虫垂炎の画像診断法ではどのような検査法を推奨するか？

日医放画像診断ガイドライン2013の103番目には上記の軽度の頭部外傷と並んで頻度の高い小児右下腹部痛の画像診断の推奨が記載されている (Table 3)。米国のスタンダードなガイドライン ACR (American college of radiology) guideline (Table 4)⁹⁾と同様に、腹部超音波がCTよりも推奨グレードが高く、次いでCT、腹部単純X線撮影となっている。

小児右下腹部痛の超音波検査が24時間365日、均質な診断クオリティで可能な医療施設は本邦においては多くはないと思われる。

ACRのガイドラインには成人、小児の相対的な放射線被ばく線量の指標が付記されており、放射線マークの個数により直観的に被ばく線量の目安が確認できる仕組みになっている。Table 5に小児実効線量の概算を示す⁹⁾。

Table 3 日本医学放射線学会 画像診断ガイドライン—2013「小児の急性虫垂炎の画像診断法ではどのような検査法を推奨するのか？」

推奨 グレード	
A	強い科学的根拠あり、行うよう強く推奨
B	超音波 科学的根拠あり、行うよう推奨
C1	CT 科学的根拠はないが行うよう推奨
C2	腹部単純X線撮影 科学的根拠はなく行わないよう推奨
D	無効性あるいは害を示す科学的根拠あり

CTは超音波より高い感度をもつ、特異度は同等であるが、被ばくやアクセスの問題がある。そのため超音波を先行させ、超音波で異常を指摘し得ないときや診断困難な場合にCTを施行することを推奨する。腹部単純X線撮影を撮る意義ははっきりせず、推奨しない (文献8より引用、改変)

小児CTの最適化

年齢、体格に見合った線量設定

2001年以降、小児のCT被ばく低減は年齢、体格に合った管電流 (mA) 設定がもっとも簡便かつ基本的な事項と思われる。CTはメーカー、検出器列数、機種や世代によって画質や曝射の方式が異なるため統一された撮影条件の推奨を示すことは難しい。

これに対し米国小児放射線学会の内部から立ちあがった被ばく低減キャンペーンである“Image Gently”のウェブサイトには、新生児から15歳まで5段階の年齢区分における管電流設定の推奨が計算可能な無料エクセルワークシートを公開している¹⁰⁾。このImage Gently法が優れているのは、その施設で普段行っている成人のCTのルーチンのプロトコルの検証をし、これに対し小児の年齢によって管電流を低減するステップを踏んでいる点である。このプロセスにより世代や性能が異なっ

Table 4 米国ACR (American College of Radiology) appropriateness criteria 14歳以下の小児、発熱、白血球増多、右下腹部痛で虫垂炎疑い画像診断検査の推奨

画像診断 手技	推奨	コメント	相対的放射線 被ばくレベル
右下腹部 超音波	8	graded compression method併用	0
腹部骨盤 造影CT	7	超音波が正常または不明瞭な場合に有用。下腹部限定CTも考慮	
腹部単純 X線撮影	6	腹腔内遊離ガス、腸閉塞の除外	

(文献9より引用、改変)

Table 5 米国ACR (American College of Radiology) ガイドライン画像検査の被ばく量の目安

相対的放射線被ばくレベル	小児実効線量推定
0	0mSv
	< 0.03mSv
	0.03~0.3mSv
	0.3~3mSv
	3~10mSv

(文献9より引用、改変)

Table 6 Image Gently CT撮影条件の推奨¹⁰⁾

Table I : mAs Reduction Factors for the Pediatric Abdomen and Thorax					
Room # : _____		CT Unit : _____		Date : _____	
Abdomen Baseline :	kVp	mA	Time (sec)	Pitch Abdomen	Pitch Thorax
	120	400	0.40	1.60	1.50
PA Thickness (cm)	Approx Age	Abdomen		Thorax	
		mAs Reduction Factor (RF)	Estimated mAs = BL × RF	mAs Reduction Factor (RF)	Estimated mAs = BL × RF
9	newborn	0.43	68.80	0.42	63.00
12	1 yr	0.51	81.60	0.49	73.50
14	5 yr	0.59	94.40	0.57	85.50
16	10 yr	0.66	105.60	0.64	96.00
19	15 yr	0.76	121.60	0.73	109.50
22	small adult	0.90	144.00	0.82	123.00
25	med adult	1.0	160.00	0.91	136.50
31	large adult	1.27	0.51	1.16	174.00

たCT機種にも対応できる汎用の推奨方法である。具体的にはmedium sizeの成人の撮影条件を基本とし、体格の小さい成人、15歳、10歳、5歳、1歳、新生児の腹部前後径 (PA thickness) の目減り率を利用し、このパーセンテージを管電流設定の目減り分に適応している¹⁰⁾。

CTの新たな潮流の導入

躯幹部および頭部CTは、従来管電圧を120kVで行っていたが、近年成人領域のCT検査で80kVや、100kVの低管電圧による検査が行われるようになってきた。低管電圧による撮影のメリットのひとつは被ばく低減であり、もうひとつはヨード造影剤使用時の造影コントラストの増加である¹¹⁾。低管電圧におけるCT画質は全体としての画像ノイズの増加があるにもかかわらずヨード造影剤のコントラストの増加が補うため、全体として読影は容易となる。また低管電圧は被検者の体格が大きいほどノイズが増加するが、体格の小さい小児ではCNR (contrast-noise ratio) の増加のメリットが大きい。

著者の施設では文献¹¹⁾を参考に、現在、腹部(胸腹部) CTにおいて管電圧80kVを体重10kg以下に、100kVを体重10~20kgのルーチン撮影に導入している。

近年導入されたもうひとつの新しいCT画像再

構成技術として逐次近似法 (iterative reconstruction) がある。小児における逐次近似法のメリットは低被ばく線量で撮影した画像を再構成技術で補正することで被ばく低減が可能となる。Hopkins

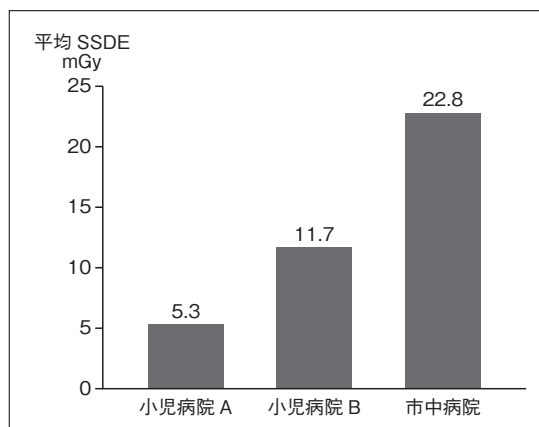


Fig.1 逐次近似法の導入の有無による小児CT被ばく線量の比較

小児病院Aは小児の低被ばくCTプロトコルに加え、逐次近似法を使用している群である。Bは小児病院で低被ばくプロトコルにFBP法 (filterback projection) による表示である。AはBに対し約半分の被ばく線量である。また低被ばくプロトコルを行っていない市中病院と比較するとA群の線量は約1/4である。(文献12より引用、改変)

ら¹²⁾は米国の一般病院と、小児病院で逐次近似法を使用している群、未使用の群とに分け、被ばく線量 (SSDE, 後述) の比較調査を行っている。その結果、胸部～骨盤部のスキャンにおいて逐次近似を行っている小児病院のCT被ばく量 (SSDE=5.3mGy) は、逐次近似法を行っていない小児病院 (同11.7mGy) の約半分、一般市中病院の小児CT被ばく量 (同22.8mGy) の約1/4であったと報告している (Fig.1)¹²⁾。

診断参考レベルの導入

診断参考レベル (Diagnostic reference level : 以下DRL) は国や地域の複数の医療施設の撮影条件を調査し、その結果を標準的な線量の傾向として示すものである。各医療施設はその調査結果と比較し、その施設の調査結果 (local DRL) がそれと大きく変わらないことを確認する指標である。もしlocal DRLが文献的DRLを超えている場合はルーチンプロトコルの見直しをするべきである。現在放射線診断で用いられているDRLはその調査した集団の75パーセンタイル (第3四分点) が用いられている。

文献的には数多くの国や地域、あるいは小児病院のlocal DRLなどの報告がなされている。一方、本邦には小児を含めた成人領域の全国的なDRLの報告はいまだなされていない。

日本放射線技術学会は、2012年度に我が国の小児CT患児が受ける線量の実態調査 (班長 竹井泰孝 (浜松医大)) を行っており、調査結果の発表が待たれる。また日本医学放射線学会も近い将来全国的なDRL調査を行う計画がある。

IAEA (International Atomic Energy Agency : 国際原子力機関) は世界40か国 (アジア, 欧州, 南米, アフリカ) 146台の小児CT撮影条件の調査を行い2013年に報告している¹³⁾。

Table 7に頭部、胸部、腹部のCTDI_{vol}のDRLを示す。読者の先生方の各施設のlocal-DRLと比較されたい。なお表示したCTDI_{vol}は頭部が16cm、胸部、腹部が32cmファントムのデータである。各施設のCTDI_{vol}の表示が32cmファントムの場合も多いため注意が必要である (後述)。

Table 7 IAEAが世界40か国を調査した診断参考レベルの抜粋

CTDI _{vol}	0 year	1~5 years	5~10 years	10~15 years	成人
頭部	29	37.7	46.1	58.1	75.2
胸部	7	8.2	10	13.2	15.5
腹部	10.7	13	12	14.3	18.2

*CTDI_{vol}の値は頭部が16cm、胸部、腹部が32cmファントムの数字である
(文献13より引用, 改変)

CTDIの問題点

CTDIは装置側の被ばく線量の表示であり、これまで解説してきたとおりプロトコルの決定や、個々の被ばく多寡評価、多施設と比較する場合のlocal DRL、国や地域でのDRLの指標となるなど、さまざまな場面で使用されている便利な単位である。

CTDI_{vol}は16cm、32cmの2つのサイズのCTDIアクリルファントムから算出されている。これは成人の頭部と腹部を模した設定であるが、小児の体格は、新生児から思春期まで様々でCTDI_{vol}は小児の体型のバリエーションを反映していない。また各CTメーカーによりCTDI_{vol}の表示の仕方も16cmと32cmの2種類が混在しており、local DRLを過去のDRLの報告と比較する際にも注意が必要である。

これに対しAmerican Associations of Physicist in Medicine (AAPM : 米国医学物理学会) は患者の体格を考慮した新しいCT被ばくの推定値であるSize Specific Dose Estimation (SSDE) を考案した¹⁴⁾。SSDEはCTDI_{vol}を患者の体格から補正した値になっている。このため小児の体格に見合った、より正確な線量を知ることが可能となった。

将来的にはSSDEはCTDI_{vol}に取って代わり普及する可能性があり、小児CTのDRLもSSDEで比較した方が正確であり誤解も少ない。

まとめ

小児CT被ばくの正当化と最適化について解説した。小児CT検査で最も頻度の高い頭部CTの適応を決定するガイドラインが日本医学放射線学会から昨年呈示された。また右下腹部痛の第一選択

ガイドラインを臨床の現場に取り入れることで必要なCT検査を割愛できる可能性がある。

小児CT撮影条件の最適化も刻々と変化し、低管電圧、逐次近似画像再構成、local DRL、本邦のDRL、CTDIに代わるSSDEの導入など、さまざまな新たな概念や手法が試され、臨床導入されつつある。また今回紹介していないが、各施設でのCT被ばく線量の管理、我が国全体での線量の集計、管理(Dose Index Registry : DIR)も将来必要となるために準備しなければならない。

小児画像診断に携わる我々は、これらの時代の潮流を取り入れ、少しでも小児CT被ばくの低減が行われるよう日々努力することが大切である。

●文献

- 1) Nievelstein RAJ, DAM IMV, Molen AJVD : Multidetector CT in children : Current concepts and dose reduction strategies. *Pediatr Radiol* 2010 ; 40 : 1324-1344.
- 2) <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=cto&pag=dis&ItemID=106209> (最終アクセス2014年1月18日)
- 3) http://www.imvinfo.com/user/documents/content_documents/abt_prs/2014_01_15_16_48_19_246_IMV_CT_2013_Press_Release_1_16_14.pdf (最終アクセス2014年1月18日)
- 4) IAEA homepage ; Paediatric radiation-protection-of-children-in-CT
http://search.yahoo.co.jp/search?p=Paediatric+radiation-protection-of-children-in-CT+&search.x=1&fr=top_ga1_sa&tid=top_ga1_sa&ei=UTF-8&aq=&oq= (最終アクセス2014年1月18日)
- 5) Thomas KE : CT utilization-trends and developments beyond the United States' borders. *Pediatr Radiol* 2011 ; 41 : s562-s566.
- 6) Tsushima Y, Taketomi-Takahashi A, Takei H, et al : Radiation exposure from CT examinations in Japan. *BMC Med Imaging* 2010 ; 10 : 1-8.
- 7) Oakeshott P, Kerry SM, Williams JE : Randomized controlled trial of the effect of the Royal College of Radiologists' guidelines on general practitioners' referrals for radiographic examination. *British J of General Practice* 1994 ; 44 : 197-200.
- 8) 画像診断ガイドライン【2013年版】日本医学放射線学会、日本放射線科専門医会・医会編、東京、金原出版株式会社、2013.
- 9) ACR (American College of Radiology) Appropriateness Criteria
http://gm.acr.org/SecondaryMainMenuCategories/quality_safety/app_criteria/pdf/ExpertPanelonPediatricImaging/OtherTopics/RightLowerQuadrantPain.aspx (最終アクセス2014年1月19日)
- 10) Image Gently homepage Radiology Safety. Protocol for Image Gentry
<http://pedrad.org/associations/5364/ig/Procedures/InterventionalRadiology/Protocols.aspx#1989769-protocol-recommendations> (最終アクセス2014年1月19日)
- 11) Yu L, Bruesewitz MR, Thomas KB, et al : Optimal tube potential for radiation dose reduction in pediatric CT : principles, clinical implementations, and pitfalls. *Radiographics* 2011 ; 31 : 835-848.
- 12) Hopkins KL, Pettersson DR, Koudelka CW, et al : Size-appropriate radiation doses in pediatric body CT : a study of regional community adoption in the United States. *Pediatr Radiol* 2013 ; 43 : 1128-1135.
- 13) Vassileva J, Rehani MM, Applegate K, et al : IAEA survey of paediatric computed tomography practice in 40 countries in Asia, Europe, Latin America and Africa : procedures and protocols. *Eur Radiol* 2013 ; 23 : 623-631.
- 14) Strauss KJ, Goske MJ : Estimated pediatric radiation dose during CT. *Pediatr radiol* 2011 ; 41 : S472-482.