

神奈川CTアンケート調査における線量低減に対する逐次近似画像再構成法の寄与

Contribution of Iterative Reconstruction to Dose Reduction in Kanagawa CT Questionnaire Survey

小川 泰良¹⁾, 渡邊 浩²⁾, 新田 正浩¹⁾, 今尾 仁²⁾, 前原 善昭³⁾, 曾我部 和美⁴⁾, 飯塚 芳弘⁵⁾

1) 聖マリアンナ医科大学病院 画像センター 2) 群馬バース大学 保健科学部 放射線学科
3) 聖マリアンナ医科大学病院 放射線管理室 4) 汐田総合病院 放射線科(現 帝京大学 医療技術学部 診療放射線学科)
5) 東海大学医学部付属大磯病院 放射線技術科

Key words: computed tomography (CT), X-ray dose investigation, iterative reconstruction (IR), diagnostic reference levels (DRLs), dose optimization

【Abstract】

The Japan diagnostic reference levels (DRLs) have been established since June 2015. In this study, we attempted to define the effect of these DRLs. We conducted a questionnaire-based dose survey for medical facilities with computed tomography (CT) in Kanagawa prefecture and evaluated the usage of corresponding volume CT dose index (CTDI_{vol}), dose-length product (DLP), and iterative reconstruction (IR) method. As a result of dose level in Kanagawa prefecture, the 75th percentile values of CTDI_{vol} and DLP were as follows: head (CTDI_{vol}: 78 mGy; DLP: 1,300 mGy cm), chest (CTDI_{vol}: 12 mGy; DLP: 450 mGy cm), and abdomen to pelvis (CTDI_{vol}: 16 mGy; DLP 750 mGy cm). These dose levels were equal to the DRLs. By using the IR, we revealed that the usage rate of the head was as low as 25%, even with the IR mounting device. Furthermore, we found that the CT dose was not always significantly reduced compared with the conventional filtered back-projection method. Although IR has been considered to contribute to CT dose reduction, we found that it was limited in the dose investigation.

【要旨】

2015年6月に、わが国で初めて診断参考レベル (Japan DRLs 2015) が公表された。そこで2017年に神奈川県内でComputed tomography (CT) 装置を保有する医療施設に対してアンケート方式の線量調査を行い、各プロトコルにおける装置スペック、CTDI_{vol}、DLP、逐次近似画像再構成法 (IR) の使用状況を評価した。その結果、神奈川県のCTDI_{vol}およびDLPの75パーセントイル値について、頭部はCTDI_{vol} 78mGy、DLP 1,300mGy cm、胸部はCTDI_{vol} 12mGy、DLP 450mGy cm、腹部～骨盤はCTDI_{vol} 16mGy、DLP 750mGy cm となり、DRLs 2015と同等の線量レベルであった。頭部のIR使用率は、IR実装装置であっても約25%と低いことが判明した。IRの線量は、フィルター補正逆投影法 (FBP) と比べ必ずしも有意に低減しておらず、IRの線量低減効果は限定的であった。

緒 言

医療被ばくにおける放射線防護の最適化は世界的な課題であり、適切な線量設定と患者線量、そして医療目的のバランスを管理するための手段として、国際

OGAWA Yasuyoshi¹⁾, WATANABE Hiroshi²⁾,
NITTA Masahiro¹⁾, IMAO Masashi²⁾,
MAEHARA Yoshiaki³⁾, SOGABE Kazumi⁴⁾,
IIZUKA Yoshihiro⁵⁾

- 1) Department of Radiology Center, St. Marianna University School of Medicine Hospital
- 2) School of Radiological Sciences, Faculty of Health Science, Gunma Paz University
- 3) Radiation Control Office, St. Marianna University School of Medicine Hospital
- 4) Department of Radiology, Ushioda General Hospital (Current address: Department of Radiological Technology Faculty of Medical Technology, Teikyo University)
- 5) Department of Radiological Technology, Tokai University Oiso Hospital

Received May 29, 2020; accepted November 25, 2020

放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection : ICRP) および国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency : IAEA) は診断参考レベル (diagnostic reference levels : DRLs)の策定を推奨した^{1), 2)}。欧州では、2013年に欧州指令 COUNCIL DIRECTIVE 2013/59により加盟国に対してDRLsの策定と法令への取り入れを義務付けており、医療被ばくの最適化を推進している³⁾。その後、これまでのDRLsに関する情報を集約し技術的進歩に対応するため、2017年にICRPはPublication 135を公表し、DRLsの定義、DRL値の決定方法、再評価の適切な間隔、実際の運用方法などを示した⁴⁾。一方、わが国では2000年と2006年に日本診療放射線技師会 (The Japan Association of Radiological Technologists : JART) が医療被ばくガイドラインを策定し、医療被ばく低減目標値として報告した⁵⁾。そして2015年6月には、医療被ばく研究情報ネットワーク (Japan Network for Research and Information on Medical Exposure : J-RIME)

から医療放射線に関連する多くの学会・専門団体が協力するかたちで、本邦において初めてのDRLs (Japan DRLs 2015) が策定された⁶⁾。DRLsの普及により著しく高い線量の施設や装置を特定し、より適切な線量設定を促すことが期待され、国内のみならず諸外国との比較も可能になり、国際社会においても意義のある策定となった。その後、J-RIMEは5年の年月を経て、2020年7月にJapan DRLs 2015を改訂した最新のJapan DRLs 2020を公開した⁷⁾。

Computed tomography (CT) は、医療現場の放射線診療において重要な役割を果たしており、臨床的有用性の高いモダリティとして広く認知されている。一方で、CTは他の診断領域の検査と比べ患者線量は高いレベルになることが問題視され、ICRPはCTの潜在的リスクを正しく認識し、DRLsを適用して患者線量を適切に管理する重要性の理解を求めた⁸⁾。わが国でも同様に、医療被ばくの増大に大きく関わるモダリティとして重要視されるようになり、2017年8月3日に日本学術会議より「CT検査による医療被ばくの低減に関する提言」が公表され、その背景因子の分析や具体的な被ばく低減への取り組みについて報告している⁹⁾。この中で、CT検査の診療実態の把握とともにDRLsの利用促進について提言されているが、Japan DRLs 2015ではスキャンプロトコルや標準体格の設定はあるものの、CT装置の性能や線量低減技術導入の有無には触れられていない。特に線量低減技術の有無は被ばく低減の重要な要素であり、ソフトウェア面からは新しい画像再構成法として逐次近似法の理論を取り入れた再構成法 (iterative reconstruction: IR) が広く普及し始めている¹⁰⁾。

従来の画像再構成法であるフィルター補正逆投影法 (filtered back-projection: FBP) は、その理論上の定義と実際の走査モデル間の差異によって、画像ノイズや各種アーチファクトが出現して画質に影響することが知られている¹¹⁾。この画質に影響するいろいろな問題を解決すべく、IRの理論を画像再構成法に応用して画像ノイズおよびアーチファクトの発生を抑えることで線量低減が可能になるといわれている¹²⁾。またIRは各ベンダーによってさまざまな特徴があり、強度設定を使用者が任意で選択することも可能で、40~80%程度の線量低減効果が期待できるとされている¹³⁾。IRは線量低減だけではなく画質向上にも寄与するため¹⁴⁾、¹⁵⁾、実際に線量の最適化がどの程度実現できているかを把握することは重要である。そこで本研究の目的は、2016年度に実施された神奈川CTアンケート

調査の線量評価と、IRの使用状況および線量低減効果と最適化について明らかにすることである。

1. 方法

日本学術会議「CT検査による医療被ばくの低減に関する提言」によれば、わが国に設置されているCT装置は1万3千台以上とされているが、保有している医療機関の詳細は明らかになっていない。そのため『月刊新医療』2015年11月号に掲載されたマルチスライスCT設置施設名簿¹⁶⁾を基に、神奈川県内でCT装置を保有していることが確認できた423施設を対象として、アンケート調査票を各医療機関へ郵送で送付し回収した。実施期間は2017年1月16日から2017年3月15日までとし、複数台のCT装置を保有する医療機関は主要装置2台までを調査対象とした。なお、本研究は独立行政法人 労働者健康安全機構 横浜労災病院の倫理委員会の承認を得て実施した (受付番号42-82)。

1-1 データ収集

施設データおよび線量データは、Table 1に示す項目について収集した。CTDI_{vol}およびDLPは、国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission: IEC) によるCT装置の標準規格IEC 60601-2-44に規定される装置オペレーターコンソール上の表示値¹⁷⁾の記載を条件とした。調査部位については、成人はJapan DRLs 2015で公表されているスキャンプロトコルである頭部単純ルーティン、胸部1相、胸部~骨盤1相、腹部~骨盤1相、肝臓ダイナミック、冠動脈を対象とした。標準体格の設定も同様に体重による区分とし、標準体重を50~60kg、冠動脈のみ50~70kgとした。小児については頭部の1歳未満および1~5歳の年齢区分のみを調査対象とした。本調査

Table 1 Contents of the Kanagawa CT questionnaire

Section	Item
Facility and equipment information	Type of institute
	Vendor and Scanner type
	Presence of IR technology
	Purpose of using IR
	Reference for display CTDI _{vol}
Dose information	Scan mode
	CTDI _{vol}
	DLP
	Scan range Phantom size

IR: iterative reconstruction, CTDI_{vol}: volume computed tomography dose index, DLP: dose length product

では、各スキャンプロトコルの集計は最大10例までの記述とし、その中央値を各装置におけるスキャンプロトコルの代表値として採用した¹⁸⁾。CTDI_{vol}は、CT自動露出機構 (CT-auto exposure control: CT-AEC) を利用してスキャン中に線量変調した場合、装置の製造時期によって最大値または平均値として表示されることが知られており¹⁹⁾、表示値の基準が異なることでデータ解析に影響を与えることが懸念される。そのため本研究の線量データは平均値表示装置のみを対象とした。また肝臓ダイナミックはJapan DRLs 2015が上腹部のみとしていることから、本研究でも同様に上腹部のみを検査対象としている線量データを対象とした。スキャン範囲は記載されていないケースが多かったため、データ解析には使用しなかった。以上の方針に基づき、本調査結果と先行研究の比較を行い、神奈川県内の線量レベルについて評価した。

1-2 IRの使用状況と線量比較

本調査において、IRが線量低減に対してどのように寄与しているかを評価するため、装置への実装状況とスキャンプロトコル別の使用状況を調査し、CTDI_{vol}およびDLPの線量比較を行った。なお、各スキャンプロトコルの中で、肝臓ダイナミックは上腹部のみを対象としている施設が少ないため、IRの検討からは除外した。また小児頭部にはIRの設定をされていないため評価していない。

1-3 統計解析

線量データの統計解析には、ソフトウェアとしてEZR version 1.38²⁰⁾を使用した。平均値の解析はStudent's t-test、その他の解析はWilcoxon rank sum testを用いて行い、統計学的有意水準を5%未満と判定した。

2. 結果

2-1 アンケート調査票の回収率

調査票の回収率は110/423 (26%) となり、回答施設の装置数は149装置であった。医療機関の形態および装置性能についてはこの結果に基づいて示す。この149装置のうち、線量データの無添付、ファントムサイズの未記載、CTDI_{vol}最大値表示の計40装置については線量解析の対象外とした。以上より、線量データの有効率は109/149 (73%) であった。

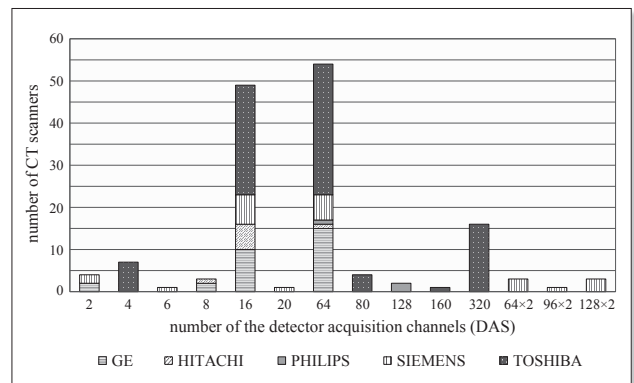


Fig.1 Number of CT scanners to the distribution of detector acquisition channels in each vendor

2-2 医療機関の形態および装置性能

本調査で回答が得られた110施設の医療機関の形態と施設数について、大学病院を除く病院が73施設と最も多く、次いで診療所 (クリニック) が22施設、大学病院 (附属病院を含む) が12施設、検診施設が3施設となった。装置ベンダー別で見ると、149装置のうちTOSHIBA MEDICAL SYSTEMS (現CANON MEDICAL SYSTEMS) が85装置と最も多く、続いてGE Healthcare Japanが29装置、SIEMENS Healthineersが24装置、HITACHIが8装置、PHILIPS JAPANが3装置となった。列数の集計では、149装置のうち64列が54装置と最も多く、次いで16列が49装置、320列が16装置、4列が7装置、その他が23装置となった (Fig.1)。

2-3 線量調査結果

線量データの検討対象となった109装置の線量調査結果 (以下、KANAGAWA 2016) について、各スキャンプロトコル別のCTDI_{vol}およびDLPの分布をTable 2に示す。IRの実装状況については、解析対象となった109装置のうち、IRが実装されている装置は67装置 (61%) であった。各スキャンプロトコル別に見た装置のIR実装状況については、頭部は54/82 (66%)、胸部は55/85 (65%)、胸部~骨盤は54/78 (69%)、腹部~骨盤は45/73 (62%)、冠動脈は31/36 (86%) の装置にIRが実装されていた。

3. 考察

3-1 KANAGAWA 2016とJapan DRLs 2015の比較

KANAGAWA 2016とJapan DRLs 2015を比較する場合、そのままでは統計解析による評価が難しい

Table 2 The results of the Kanagawa CT questionnaire survey in 2016 (KANAGAWA 2016)

Scan protocols	Number of scanners	CT examinations	Minimum [mGy], [mGy cm]	25th percentile [mGy], [mGy cm]	Median [mGy], [mGy cm]	75th percentile [mGy], [mGy cm]	Maximum [mGy], [mGy cm]	Mean [mGy], [mGy cm]	Standard deviation	
Routine brain	82	709	CTDI _{vol}	10.8	53.7	68.3	77.9	195.5	72.3	29.2
			DLP	255.8	950.9	1,093.7	1,267.4	2,292.7	1,103.9	347.4
Routine chest	85	763	CTDI _{vol}	2	7.3	9.7	11.1	33.6	10	4.7
			DLP	65.5	281.5	385.2	438.4	1,213.4	379.9	153.9
Chest to pelvis	78	676	CTDI _{vol}	3.9	9.7	11	13.8	35.7	12.5	5.2
			DLP	262.3	676.1	813.4	980.8	1,754.5	846.6	276.3
Abdomen to pelvis	73	622	CTDI _{vol}	4.7	9.9	12	15.4	39.5	13.3	6
			DLP	210.3	473.8	586.6	715.4	1,404.5	632.3	244.4
Hepatic dynamic	16	121	CTDI _{vol}	7.3	9.7	13.3	15.6	21	13.3	4.1
			DLP	775	1,104	1,292.4	1,809.4	2,676	1,451.7	502
Coronary artery	36	342	CTDI _{vol}	2.8	28.6	47.5	74.4	134.3	51.6	30.7
			DLP	51.4	403	711.3	1,203.5	1,940.1	808.9	524.2
Child Head CT younger than 1 year	16	55	CTDI _{vol}	14.8	23.5	28.2	32.3	61.3	29.2	10.2
			DLP	29.2	365	424.9	474.7	657.1	399.6	148.8
Child Head CT 1-5 year	36	159	CTDI _{vol}	19.8	29.7	37.1	47.3	103.8	40.6	16.8
			DLP	56.7	455.2	609.7	837.9	1,253.9	638.8	274

CTDI_{vol}: volume computed tomography dose index [mGy], DLP: dose length product [mGy cm]

ため次のような解析を行った。CT領域のJapan DRLs 2015は、2014年に日本医学放射線学会が専門医修練機関を対象に実施した調査結果と、2013年にJARTが実施したアンケート調査結果 (JART 2013) に基づいているとしている⁷⁾。前者の詳細なデータは公開されていないが後者は公開されているため²¹⁾、本調査結果との統計解析を行った。両者の標準体格を合わせるため、Japan DRLs 2015の策定ではJART 2013のデータに補正係数 (成人頭部 CTDI_{vol}:0.97, DLP:0.98, 腹部～骨盤 CTDI_{vol}:0.89, DLP:0.87) を乗じて評価している。本調査も標準体格を50～60kgとしたため、同様の補正係数を用いて比較した。また同一の検討対象となった頭部、胸部、腹部～骨盤、冠動脈 (ヘリカルスキャン) を評価した。その結果、CTDI_{vol}について頭部は両者に有意差を認めず、胸部、腹部～骨盤、冠動脈 (ヘリカルスキャン) はKANAGAWA 2016が有意に低くなった。DLPについて、頭部はKANAGAWA 2016が有意に高く、胸部は低くなり、腹部～骨盤および冠動脈 (ヘリカルスキャン) については有意差を認めなかった (Table 3)。次に、神奈川県内のCT線量調査における75パーセント値 (以下、KANAGAWA DRLs 2016) とJapan DRLs 2015を比較した結果をTable 4に示す。Japan DRLs 2015より高い線量レベルとなったスキャンプロトコルは小児頭部1～5歳のDLPであった。その他のスキャンプロトコルでは同等または低い線量となった。

先行調査より本調査の線量レベルが低くなっていることについては、Fukushimaらの報告²²⁾で述べられているように、J-RIMEやJARTをはじめとする各専門団体による線量調査のフィードバック効果や、経時

的な装置更新によるものと考えられる。しかし、成人頭部のDLPは有意に高くなり、小児頭部もDLPが高くなる傾向を示した。頭部のDLPが高くなる傾向を示す理由として、多くの施設で頭部のスキャン方式がノンヘリカルスキャンからヘリカルスキャンに変わってきていることが考えられ、ヘリカルスキャンの特性として、画像再構成に寄与しない範囲外にX線が照射される現象であるオーバーレンジの発生²³⁾や、スキャン範囲の延長が容易に変更可能となること、さらに頭部の基本的な基準線である眼窩耳孔線 (orbitomeatal base line: OM-line) に合わせるため、多断面再構成法 (multi planar reconstruction: MPR) 作成時に横断面を斜めに作成することを考慮して、スキャン範囲が長くなったためDLPが高くなったと推察する。また小児頭部では鎮静の有無や体動の程度、検査に対する患児の理解度などにより、状況によっては撮影範囲を広く撮るケースが多くあることも関係している可能性がある。0～1歳の年齢層では差を認めなかった理由も併せて早急な原因究明が必要である。

3-2 IR使用率

対象となった109装置のうち61%の装置にIRが実装されていたが、IRを使用できる環境下で実際にどの程度使用しているかが重要であると考え、IR実装装置におけるスキャンプロトコル別のIR使用率について解析した。その結果、頭部は26%、胸部は76%、腹部～骨盤は76%、上腹部～骨盤は73%、冠動脈は90%となり、体幹部に比べ頭部は、IRを実装していてもその使用率が低いことが明らかとなった (Fig.2)。Matsunagaらによる報告²⁴⁾では、頭部と体幹部 (上腹

Table 3 Comparison between JART dose survey 2013 and KANAGAWA 2016

	Scan protocols	Institutional characteristics	Number of scanners	Mean [mGy], [mGy cm]	Standard deviation	test results	p value
CTDI _{vol}	Routine brain	JART 2013	247	71.8	23.0	NS	0.874
		KANAGAWA 2016	82	72.3	29.2		
	Routine chest	JART 2013	285	13.0	5.6	***	0.00001
		KANAGAWA 2016	85	10.0	4.7		
Abdomen to pelvis	JART 2013	287	15.1	5.7	*	0.018	
	KANAGAWA 2016	73	13.3	6.0			
Coronary artery (helical)	JART 2013	136	80.0	53.6	*	0.023	
	KANAGAWA 2016	24	54.3	24.1			
DLP	Routine brain	JART 2013	250	928.1	391.1	***	0.0003
		KANAGAWA 2016	82	1,103.9	347.4		
	Routine chest	JART 2013	282	460.0	216.2	**	0.002
		KANAGAWA 2016	85	379.9	153.9		
Abdomen to pelvis	JART 2013	287	591.6	293.4	NS	0.275	
	KANAGAWA 2016	73	632.3	244.4			
Coronary artery (helical)	JART 2013	135	1,008.0	473.8	NS	0.520	
	KANAGAWA 2016	24	938.7	543.5			

CTDI_{vol}: volume computed tomography dose index [mGy] test: Student's t-test
 DLP: dose length product [mGy cm] NS: not significant
 JART 2013: Results of The Japan Association of Radiological Technologists dose survey in 2013 ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05

Table 4 Comparison between KANAGAWA DRLs 2016 and Japan DRLs 2015

Scan protocols	Japan DRLs 2015 (CT)		KANAGAWA DRLs 2016 (CT)	
	CTDI _{vol}	DLP	CTDI _{vol}	DLP
Routine brain	85	1,350	78 (77.9)	1,300 (1,267.4)
Routine chest	15	550	12 (11.1)	450 (438.4)
Chest to pelvis	18	1,300	14 (13.8)	1,000 (980.8)
Abdomen to pelvis	20	1,000	16 (15.4)	750 (715.4)
Hepatic dynamic	15	1,800	16 (15.6)	1,850 (1,809.4)
Coronary artery	90	1,400	75 (74.4)	1,250 (1,203.5)
Child Head (<1y.o.)	38	500	33 (32.3)	500 (474.7)
Child Head (1~5y.o.)	47	660	48 (47.3)	850 (837.9)

CTDI_{vol}: volume computed tomography dose index [mGy], DLP: dose length product [mGy cm]
 Japan DRLs 2015: diagnostic reference levels based on latest surveys in Japan
 The 75th percentile is shown in parentheses for KANAGAWA DRLs 2016

部)のIR使用率はそれぞれ約15%と約35%であったと報告している。本調査のIRを実装していない装置も含めた全体のIR使用率は頭部が15%、体幹部が43%であり、前述の報告に近い結果となったため、IRを実装していない装置を含めた使用率であると推察する。今後の線量調査におけるIRの線量低減効果を検討する上で、IRを実装している装置の中でIRを使用している装置がどの程度あるのか、あるいは使用していない装置がどの程度あるのかも評価すべきであり、スキャンプロトコル別にそれらの傾向を把握することは、IRの適切な利用推進の重要な指標になると考える。

頭部においてIRの臨床応用が進んでいないことについては、低線量などの条件によっては過度な平滑化による低コントラスト領域の検出能低下と、違和感のある画像テクスチャーに変化することがIRの基本的課題として知られており¹³⁾。脳実質の評価では、灰白質と白質の淡いコントラスト差(線減弱係数の差)の描出が早期梗塞巣の検出に重要であるといった背景など

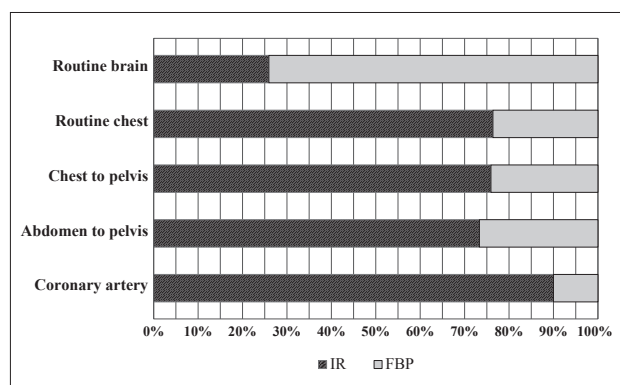


Fig.2 Relationship of IR usage rate in each protocol, showing the actual usage rate of IR equipped scanners

IR: iterative reconstruction, FBP: filtered back projection

によって、頭部のIR使用率が低くなっていると推察する。一方で、多田ら²⁵⁾は同部位におけるIRの診断精度に関する有用性について報告しており、線量低減の可能性にも言及していることから、今後の研究や施設の動

向と合わせ慎重に評価していく必要があると考える。

3-3 IRの使用目的と線量低減

本調査では、IRを使用している場合の目的として「画質向上」と「被ばく低減」の選択肢を設定したが、双方にチェックを入れた施設が多く見られたため、解析においては「画質向上と被ばく低減」を追加設定して評価を行った。その結果、IRの使用目的について頭部、胸部、胸部～骨盤、腹部～骨盤、冠動脈は、「画質向上」に比べ「被ばく低減」および「画質向上および被ばく低減」が上回っており、多くのスキャンプロトコルにおいて被ばく低減を強く意識している結果と

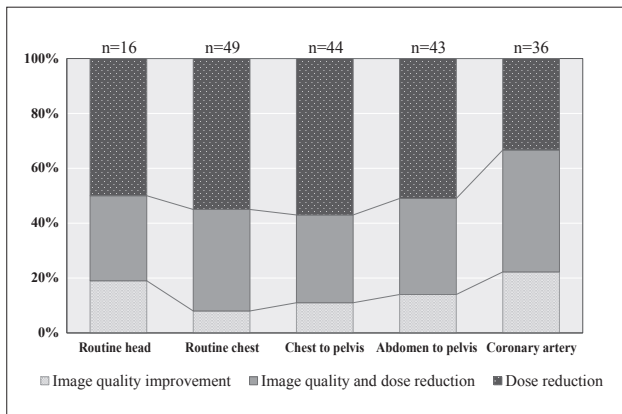


Fig.3 Percentages of use purpose of IR and the number of scanners in each scan protocol

なった (Fig.3)。IRと線量の関係について、IRを使用した群とFBP群の線量を比較した結果をTable 5に示す。成人頭部、胸部、胸部～骨盤、腹部～骨盤、冠動脈において、CTDI_{vol}・DLP共にIRとFBPの間に有意差を認めなかった。IRの使用目的として、「被ばく低減」を目的とした群とFBPを比較した結果をTable 6に示す。被ばく低減を目的に使用しているIR群との比較においても有意差を認めなかった。

IRが線量低減を可能とする画像再構成技術として普及してきているにもかかわらず、従来の再構成法であるFBPと比べ線量の有意差を認めなかった要因について、大きく2つの理由があると考えられる。

1つ目として、線量を最適化する過程において、診断能を担保しながら線量を低減することは容易でないことが挙げられる。IRを臨床応用するに当たり、解像度特性の向上やアーチファクト低減など画質を改善する方向で使用するのか、あるいは線量低減の手段として使用するのかは目的によって決定されるが、その実態まで評価することは難しい。例えばある施設でIRの使用目的を線量低減としながらも、過度に画質を優先した撮影条件を設定している場合、その施設的には最初の設定に比べれば線量低減となっても、多施設群の中では異なる結果になることが考えられる。この傾向は使用している装置ベンダーやIRの種類や強度によっても変わることが想定される。今後のIR調査について

Table 5 Comparison of reconstruction methods in KANAGAWA 2016: IR vs. FBP

CTDI _{vol}												
Scan protocols	Reconstruction	Number of scanners	Minimum [mGy]	25th percentile [mGy]	Median [mGy]	75th percentile [mGy]	Maximum [mGy]	Mean [mGy]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]	test results	p value
Routine brain	IR	14	37.2	51.5	58.6	69.3	83.1	59.4	12.0	20	NS	0.0545
	FBP	63	17.8	55.6	70.3	81.0	195.5	75.7	31.6	42		
Routine chest	IR	42	4.1	7.6	9.7	10.3	16.2	9.3	2.2	24	NS	0.492
	FBP	38	2.0	6.2	9.9	11.6	32.3	10.1	5.3	52		
Chest to pelvis	IR	41	5.9	9.8	10.6	13.3	22.5	11.6	3.2	28	NS	0.641
	FBP	32	3.9	9.7	11.4	14.4	35.7	13.3	6.5	49		
Abdomen to pelvis	IR	33	4.7	9.9	12.2	15.2	24.6	12.5	4.3	34	NS	0.922
	FBP	36	4.7	9.6	11.8	15.9	39.5	13.5	6.8	50		
Coronary artery	IR	28	2.8	27.4	45.6	67.7	134.3	48.3	30.3	63	NS	0.413
	FBP	7	14.8	38.3	62.8	76.1	92.1	56.9	26.3	46		

DLP												
Scan protocols	Reconstruction	Number of scanners	Minimum [mGy cm]	25th percentile [mGy cm]	Median [mGy cm]	75th percentile [mGy cm]	Maximum [mGy cm]	Mean [mGy cm]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]	test results	p value
Routine brain	IR	14	575.5	839.7	1,001.7	1,273.2	1,665.6	1,046.0	300.2	29	NS	0.499
	FBP	63	255.8	953.1	1,093.1	1,249.6	2,292.7	1,103.5	350.9	32		
Routine chest	IR	42	175.5	304.8	386.4	438.8	581.9	377.7	92.1	24	NS	0.542
	FBP	38	65.5	258.5	370.8	426.1	855.3	360.7	154.1	43		
Chest to pelvis	IR	41	389.6	683.8	837.5	970.9	1,349.5	824.4	209.7	25	NS	0.937
	FBP	32	262.3	670.0	798.4	1,004.8	1,754.5	856.8	315.6	37		
Abdomen to pelvis	IR	33	224.1	464.4	607.2	725.6	1,021.3	613.3	194.3	32	NS	0.921
	FBP	36	210.3	473.3	585.7	683.8	1,219.0	634.1	263.0	41		
Coronary artery	IR	28	51.4	373.5	610.5	955.2	1,940.1	742.3	507.2	68	NS	0.341
	FBP	7	225.5	556.5	1,087	1,335.1	1,749.5	977.9	521.1	53		

CTDI_{vol}: volume computed tomography dose index [mGy], DLP: dose length product [mGy cm]

test: Wilcoxon rank sum test
NS: No significant

Table 6 Comparison of reconstruction methods in KANAGAWA 2016: IR (used for dose reduction) vs. FBP

CTD _{vol}												
Scan protocols	Reconstruction	Number of scanners	Minimum [mGy]	25th percentile [mGy]	Median [mGy]	75th percentile [mGy]	Maximum [mGy]	Mean [mGy]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]	test results	ρ value
Routine brain	IR (dose reduction)	5	37.2	47.4	55.7	66.2	83.1	57.4	15.0	26	NS	0.261
	FBP	63	17.8	55.6	70.3	81.0	195.5	75.7	31.6	42		
Routine chest	IR (dose reduction)	23	4.1	7.3	8.5	10.2	13	9.1	2.5	27	NS	0.349
	FBP	38	2.0	6.2	9.9	11.6	32.3	10.1	5.3	52		
Chest to pelvis	IR (dose reduction)	21	5.9	9.2	10.5	12.4	17.5	10.8	2.8	26	NS	0.25
	FBP	32	3.9	9.7	11.4	14.4	35.7	13.3	6.5	49		
Abdomen to pelvis	IR (dose reduction)	15	4.7	8.4	10.1	15.9	19.5	11.7	4.8	41	NS	0.351
	FBP	36	4.7	9.6	11.8	15.9	39.5	13.5	6.8	50		
Coronary artery	IR (dose reduction)	12	2.8	26.2	32.0	74.4	98.5	43.7	29.5	67	NS	0.425
	FBP	7	14.8	38.3	62.8	76.1	92.1	56.9	26.3	46		

DLP												
Scan protocols	Reconstruction	Number of scanners	Minimum [mGy cm]	25th percentile [mGy cm]	Median [mGy cm]	75th percentile [mGy cm]	Maximum [mGy cm]	Mean [mGy cm]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]	test results	ρ value
Routine brain	IR (dose reduction)	5	575.5	715.5	1,047.4	1,415.9	1,665.6	1,096.1	391.2	36	NS	0.926
	FBP	63	255.8	953.1	1,093.1	1,249.6	2,292.7	1,103.5	350.9	32		
Routine chest	IR (dose reduction)	23	175.5	286.8	353.7	399.7	561.6	364.3	98.8	27	NS	0.994
	FBP	38	65.5	258.5	370.8	426.1	855.3	360.7	154.1	43		
Chest to pelvis	IR (dose reduction)	21	389.6	635.4	795.5	948.5	1,095.9	774.1	197.0	25	NS	0.544
	FBP	32	262.3	670.0	798.4	1,004.8	1,754.5	856.8	315.6	37		
Abdomen to pelvis	IR (dose reduction)	15	224.1	396.4	510.1	829.3	946.7	575.8	231.7	40	NS	0.374
	FBP	36	210.3	473.3	585.7	683.8	1,219	634.1	263.0	41		
Coronary artery	IR (dose reduction)	12	51.4	385.7	520.9	1,210.3	2,568.8	835.4	735.2	88	NS	0.375
	FBP	7	225.5	556.5	1,087	1,335.1	1,749.5	977.9	521.1	53		

CTD_{vol}: volume computed tomography dose index [mGy], DLP: dose length product [mGy cm] test: Wilcoxon rank sum test
 NS: No significant

は線量のみに着目するのではなく、IRの使用目的や施設環境の状況を確認するとともに、渡邊ら²⁶⁾が提唱する benchmark dose (BD) の概念による装置性能の特性を考慮した、新しい線量指標による評価方法に期待したい。

2つ目として、峰広ら²⁷⁾はCatphanファントムを使用したSD値の評価より、IRのノイズ低減率は約50%でKalraら²⁸⁾やShinら²⁹⁾の報告と同等であったとしているが、視覚評価ではIRとFBPの有意差を認めなかったと報告している。このことから、IRの線量低減効果はファントム実験においては約50%になるが人体とは異なるため、診断能との兼ね合いが重要になる実際の検査では、大幅な線量低減に対して慎重になっている可能性がある。以上より、IR技術は線量低減を可能にするポテンシャルはあるものの、多施設群を対象とした線量調査においては、施設のIRに対する評価と線量設定および画質の基準が大きく影響する可能性があるため、十分に留意して評価すべきであると考えられる。

4. 研究限界

複数台のCT装置を設置している医療機関は、主に使用している装置2台までの調査となっており、代表的な線量値ではあるが全装置を対象とはしていない。

い。臨床で稼働している膨大なCT装置の詳細な線量調査は、各医療機関の多大な労力と協力態勢の構築が必要である。

5. 結語

KANAGAWA 2016はJapan DRLs 2015と比べ、小児頭部1~5歳を除き同等以下の線量レベルであった。IRについては、スキャンプロトコル別にIR実装装置の割合とその使用率、そして使用目的との関係について明らかにした。さらにIRはこれまでのファントム研究または臨床研究において線量を低減することが可能であると示されてきたが、本線量調査研究ではIRの線量低減への寄与は限定的であった。この難しい現状を解決するためには、客観性と適応性に優れた新しい最適化の手法が必要であり、今後の研究開発に期待したい。

6. 利益相反

本研究に関して開示すべき利益相反事項はない。

謝辞

線量調査に多大なご協力を頂いた神奈川県医療機関の皆さま、ならびにデータ解析に尽力いただいた当院

画像センター諸姉諸兄に、深く感謝を申し上げます。

本調査は、公益社団法人神奈川県放射線技師会の医療被ばく最適化推進委員会(現 放射線安全管理委員会)による医療被ばく最適化事業の一環として実施した。

表の説明

Table 1	神奈川県CTアンケート調査項目
Table 2	神奈川県CTアンケート調査結果 (KANAGAWA 2016)
Table 3	JARTによる線量調査 (2013) と KANAGAWA 2016 の比較
Table 4	KANAGAWA DRLs2016 (75パーセンタイル値) と Japan DRLs 2015 の比較
Table 5	KANAGAWA 2016における再構成方法の違いによる線量比較; IRを使用している群とFBP群の比較
Table 6	KANAGAWA 2016における再構成方法の違いによる線量比較; IRを被ばく低減目的で使用している群とFBPの比較

図の説明

Fig.1	各ベンダーにおける列数に対するCT装置数の分布
Fig.2	各スキャンプロトコルにおけるIR使用率の関係; 全装置とIR実装装置に対するIR使用率の比較
Fig.3	各スキャンプロトコルにおけるIRの使用目的と施設数の割合

参考文献

- 1) 日本アイソトープ協会 訳: 医学における放射線の防護と安全 (ICRP Publ.73). 東京, 日本アイソトープ協会, 1997.
- 2) International Atomic Energy Agency (IAEA): International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. IAEA Safety Series, No.115, 1996.
- 3) European Commission: COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF> (Accessed 2019.11.12)
- 4) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP publication 135, 2017.
- 5) 日本放射線技師会 編: 放射線量適正化のための医療被曝ガイドライン. 12-139, 文光堂, 2009.
- 6) 医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME): 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定 (DRLs 2015). Available from: <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyo.pdf> (Accessed 2019.5.15)
- 7) 医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME): 日本の診断参考レベル (2020年版). Available from: http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020_jp.pdf (Accessed 2020.08.01)
- 8) 日本アイソトープ協会 訳: CTにおける患者線量の管理 (ICRP Publ.87). 東京, 日本アイソトープ協会, 2004.
- 9) 日本学術会議: CT検査による医療被ばくの低減に関する提言. Available from: <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t248-1.pdf> (Accessed 2020.5.12)
- 10) Beister M, et al.: Iterative reconstruction methods in

- X-ray CT. *Physica Medica*, 28(2), 94-108, 2012.
- 11) F Edward Boas & Dominik Fleischmann: CT artifacts: Causes and reduction techniques. *Imaging Med*, 4(2), 229-240, 2012.
- 12) Stiller W: Basics of iterative reconstruction methods in computed tomography: A vendor-independent overview. *Eur J Radiol*, 109, 147-154, 2018.
- 13) Willeminck MJ, et al.: Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 1: Technical principles. *Eur Radiol*. 23, 1623-1631, 2013.
- 14) Willeminck MJ, et al.: Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 2: initial results in dose reduction and image quality. *Eur Radiol*, 23, 1632-1642, 2013.
- 15) Lucas L, et al.: State of the Art: Iterative CT Reconstruction Techniques. *Radiology*, 276(2), 339-357, 2015.
- 16) マルチスライスCT設置施設名簿Part 2: 月刊新医療, 42(11), 491, エム・イー振興協会, 2015.
- 17) International Electrotechnical Commission 60601-2-44, Edition 2.1. Medical electrical equipment- Part 2-44: Particular requirements for the safety of X-ray equipment for computed tomography, 2.1 ed. IEC International Standard 60601-2-44: IEC: Switzerland, 2002.
- 18) 医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME), 診断参考レベルワーキンググループ: 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定 (その2). Available from: <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLkyotusiry-ou-2.pdf> (Accessed 2020.4.04)
- 19) Watanabe H, et al.: A new shielding calculation method for X-ray computed tomography regarding scattered radiation. *Radiol Phys Technol*, 10(2), 213-226, 2017.
- 20) Kanda Y: Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. *Bone Marrow Transplantation*, 48, 452-458, 2013.
- 21) 藤原理吉, 他: 中間報告書 医療被ばくガイドライン改訂「X線CT」. *日放技誌*, (61), 737, 331-335, 2014.
- 22) Fukushima Y, et al.: Prefecture-wide multi-centre radiation dose survey as a useful tool for CT dose optimisation: report of Gunma radiation dose study. *Radiat Prot Dosimetry*, 167(4), 519-524, 2015.
- 23) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT). ICRP publication 102, 2007.
- 24) Matsunaga Y, et al.: Survey of volume CT dose index in Japan in 2014. *Br J Radiol*, 88(1052), 2015.
- 25) 多田佳司, 他: 急性期脳梗塞CT検査における逐次近似応用再構成法の有用性. *日放技学誌*, 71(11), 1090-1095, 2015.
- 26) 渡邊 浩, 他: 一般撮影の医療被ばくの防護を最適化するためのベンチマークドーズ (BD) の提案. *日放技学誌*, 74(5), 443-451, 2018.
- 27) 峰広香織, 他: 胸部ファントムを用いた低線量肺がんCT検査における逐次近似再構成法による被ばく低減の検討. *日放技学誌*, 71(12), 1201-1208, 2015.
- 28) Kalra MK, et al.: Radiation dose reduction with Sinogram Affirmed Iterative Reconstruction technique for abdominal computed tomography. *J Comput Assist Tomogr*, 36(3), 339-346, 2012.
- 29) Shin HJ, et al.: Radiation dose reduction via sinogram affirmed iterative reconstruction and automatic tube voltage modulation (CARE kV) in abdominal CT. *Korean J Radiol*, 14(6), 886-893, 2013.