頭部・腹部X線CT検査における適正線量の簡易設定法

近藤裕二

名古屋掖済会病院中央放射線部

論文受付
2004年8月6日

論文受理
2005年1月17日

Code Nos. 251
622

緒言

近年、X線CTの撮影方式はシングルスライス方式からマルチスライス方式^{1, 2)}に移行していく傾向にある。それに伴って3D技術、線量低減技術(Real EC, Adaptive mA, Auto dose, CARE doseなど^{3, 4)}、膨大な画像データを処理・保管する技術などが有効に活用されつつある。特に線量低減技術には被検者の被曝低減に大きな期待が寄せられている。しかし、現在わが国で主に使用されている従来のシングルスライス方式のX線CT装置には線量低減技術は装備されておらず、これらの装置では個々の被検者に対して適正な線量で撮影されているか疑問である。

X線CTでは、アナログ式の一般X線撮影のように“一定の画像濃度を得るためには一定のX線量が必要”という概念はなく、診断の目的や体格に応じて撮影条件を変更せずに、一定のCT値として出力できるという利点がある。そのため、頭部の大きさ、腹部の厚さが増えた場合でも、一定の撮影条件で撮影されており、きめ細かい適正な撮影条件の設定があまりなされていないのが現状で、場合によっては過剰な線量が使用されている。

本論文では、線量低減技術が装備されていないX線CT装置で、ルーチン検査を行う個々の被検者に対して、適正な撮影条件を設定する方法について検討し

Simple Method of Setting Proper Exposure in X-ray CT Examination of Head and Abdomen

YUJI KONDO

Department of Radiology, Nagoya Ekisaikai Hospital

Received Aug. 6, 2004; Revision accepted Jan. 17, 2005; Code Nos. 251, 622

Summary

In abdominal X-ray computerized tomography (CT), exposure conditions can be established by real-time exposure control and manual procedures, depending on the body type. In the former, appropriate dose control can be attained. In the latter, dose cannot be controlled to a very precise level, since the dose is controlled manually, according to body type. In head X-ray CT, the conditions are in most cases established manually. We determined the causal relationship between the body mass index (BMI) showing the body type of a subject and the abdominal cross section/circumferential length of the subject. Then a water phantom that simulated the abdominal area was used to take pictures, with the current time integrator changed, relating the section area and circumferential length of the water phantom with the body mass index, thereby determining the relationship with the current time integrator. Further, a water phantom simulating the head was used to take pictures, with the current time integrator changed, thereby determining the relationship between the circumferential length of the water phantom with the current time integrator. We determined that pictures can be taken at a dose that is close to an appropriate dose, when these relationships are plotted to determine the standard deviation (SD) for establishing exposure conditions.

Key words: CT, BMI, Physique, Dose reduction, SD

別刷資料請求先: 〒454-0854 名古屋市中川区松年町4-66
名古屋掖済会病院 放射線部 近藤裕二 宛

た。頭部CTの撮影条件を被検者から得られた頭部の周囲長および腹部CTの撮影条件を被検者から得られた身長と体重を基に設定する簡易的な方法について報告する。

1. 実験方法

1-1 円形水ファントムの円周と電流時間積との関係

円周の異なる4種類の円形水ファントム(ゴム風船に水道水を入れて作製)を模擬頭部と仮定し、日立メディコ社製Radix TurboシングルスライスCT装置にて、電流時間積(以下mAsと記す)を変化させてそれぞれ3回ずつ撮影した。このとき得られたCT画像の標準偏差(standard deviation: 以下SDと記す)が、約2~4(一般的に頭部CT撮影条件は水ファントムにてSD=3~4になるように設定されている)になるよう撮影条件を設定し撮影を行った。SDは、関心領域を国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)の測定条件⁵⁾に従い、断面積の1/10以下(画素数344)で画像の中心部に設定し測定した。

撮影された円形水ファントムの画像より求めた円周をパラメータとしたSDとmAsとの関係をグラフ化した。円形水ファントムの円周は画像上で直径 r を計測し、円周 $=\pi r$ として求めた。使用した4種類の円形水ファントムの半径と円周をTable 1に示す。

実際の検査において、頭部の断面積のデータ収集は困難なため、この実験での取り扱いは、頭部周囲長を仮定した水ファントムの円周だけとした。スキャン条件は以下のとおりである。

スキャン条件: スライス厚10mm, 時間2.0sec/回転, 電圧120kV一定, 電流(100~300mA), 再構成関数2, 撮影領域(field of view: FOV)210mm

これらの結果より、頭部CT撮影において適正線量の撮影条件の設定ができる関係を検討した。

1-2 楕円形水ファントムの断面積・周囲長とmAsとの関係

断面積・周囲長の異なる8種類の楕円形水ファントム(ゴム風船に水道水を入れて作製)を模擬腹部と仮定し、日立メディコ社製Radix TurboシングルスライスCT装置にて、mAsを変化させてそれぞれ3回ずつ撮影した。このとき、得られたCT画像のSDが約6~14(一般的に腹部CT撮影条件は水ファントムにてSD=8~12になるように設定されている)になるよう撮影条件を設定し撮影を行った。SDの測定方法は1-1項と同じである。

撮影された楕円形水ファントムの画像より求めた断面積・周囲長をパラメータとして、SDとmAsとの関係をグラフ化した。楕円形水ファントムの断面積は次

Table 1 Radius and circumference of circular water phantoms.

Circular phantom	A	B	C	D
Diameter (mm)	180.5	171.3	161.5	151.1
Circumference (mm)	562	534	504	471

式で求めた。

$$\text{断面積} = \pi \cdot \frac{r_a}{2} \cdot \frac{r_b}{2} \dots\dots\dots (1)$$

(r_a : 短径 r_b : 長径)

周囲長は近似式として次式で求めた。

$$\text{周囲長} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{r_a}{2} \right)^2 + \left(\frac{r_b}{2} \right)^2 \right\}} \dots\dots\dots (2)$$

使用した8種類の楕円形水ファントムの断面積・周囲長をTable 2に示す。今回使用した水ファントムの断面は正確な楕円ではないが、楕円に準じるものとした。スキャン条件は以下のとおりである。

スキャン条件: スライス厚10mm, 時間1.0sec/回転, 電圧120kV一定, 電流(25~350mA), 再構成関数5, FOV350mm

楕円形水ファントムを実際にスキャンした画像の一例をFig. 1に示す。

1-3 腹部の断面積・周囲長と体格指数との相関

当院において、今回の実験の趣旨を説明し承諾を得た、腹部X線CT検査、腹部X線検査を受けた成人男女139名(男性69名 平均年齢 47.2 ± 18.0 歳, 女性70名 平均年齢 59.8 ± 18.7 歳)の腹部の厚さを、前後方向(frontal, 臍の位置)と左右方向(lateral, Jacoby線⁶⁾より1~2cm上方)について腹厚計を用いて測定した。臍およびJacoby線あたりを測定部位としたのは、上腹部と下腹部の中心あたりに位置し、測定時の基準として適当であるためである。そして、腹部の断面を楕円形と想定して、(1), (2)式によりその断面積と周囲長を算出した。

次に、被検者139名の身長と体重をパラメータとした、以下に示す(3)~(6)式により算出される体格指数⁷⁾と、先に算出した腹部断面積と周囲長との相関関係を調査した。

・肥満率(fatness rate)

$$\text{標準体重} = (\text{身長})^2 \times 22$$

$$\text{肥満率}(\%) = (\text{実測体重} - \text{標準体重}) / \text{標準体重} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

・比体重(weight to height ratio)

$$\text{比体重}(\text{kg/m}) = \text{体重} / \text{身長} \dots\dots\dots (4)$$

Table 2 r_a , r_b , circumference, and cross section of ellipsoid water phantoms.

Ellipsoid phantom	E	F	G	H	I	J	K	L
r_a (mm)	206.0	214.4	196.9	180.5	173.7	160.4	154.9	150.8
r_b (mm)	303.0	282.0	270.8	256.8	248.2	231.1	223.3	205.3
Circumference (mm)	808	782	739	692	668	621	600	562
Cross section (mm ²)	48998	47462	41857	36387	33843	29099	27152	24303

・ Body Mass Index (BMI)

$$\text{BMI} = \text{体重} / (\text{身長})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

・ ローラ指数 (Rohler Index)

$$\text{Rohler Index} = \text{体重} / (\text{身長})^3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、体重はkg、身長はmを単位とする。

1-4 mAsと体格指数との関係

1-2項で得られた各サイズの楕円形水ファントムの断面積・周囲長をパラメータとしたSDとmAsの関係と、1-3項で得られた被検者腹部の断面積・周囲長と体格指数との相関関係のなかで高い相関係数を示し、かつ取り扱いが容易な関係式を用いて、SDをパラメータとしたmAsと体格指数との関係をグラフ化し、腹部X線CT検査において、適正線量に近い撮影条件を設定する指標を求めた。

1-5 統計学的手法

被検者腹部の断面積・周囲長と体格指数との相関係数の検定には、Pearson⁸⁾を用いた。この検定では有意水準5%とした。

2. 結果

2-1 円形水ファントムの円周とmAsとの関係

円形水ファントムの大きさをパラメータとしたmAsとSDとの関係をFig. 2に示す。同じmAsのときに円形水ファントムの円周が小さくなるにつれてSDは小さくなり、同サイズの円形水ファントムにおいては、mAsが高くなるにつれてSDは小さくなった。しかし、円形水ファントムB、C、DのSD間に大きな差はなく、円形水ファントムの円周が534mmより小さくなるとSDの大きな変化は認められなかった。このことから、このサイズでのmAsの変化はSDにあまり影響しないことが判明した。

2-2 楕円形水ファントムの断面積・周囲長とmAsとの関係

楕円形水ファントムのサイズをパラメータとしたmAsとSDとの関係をFig. 3に示す。同じmAsのときに楕円形水ファントムのサイズが小さくなるにつれてSDは小さくなり、同サイズの楕円形水ファントムに

Fig. 1 CT image of ellipsoid water phantom simulating the human abdomen.

Fig. 2 Graph showing SD (standard deviation) of a CT image as a function of mAs (tube current-exposure time product) for circular water phantoms (A-D) simulating the human head.

おいては、mAsが高くなるにつれてSDは小さくなった。また、楕円形水ファントムのサイズが小さくなるにつれて各曲線の間隔は小さくなり、mAsの変化ではSDは大きく影響しなかった。例えば175mAsにおいて、サイズ別のSDの変化を見ると、E-F間 1.02、F-G間 1.39、G-H間 1.62、H-I間 0.74、I-J間 0.36、J-K間 0.61、K-L間 0.72となっており、サイズが小さくなる

Fig. 3 Graph showing SD of CT image as a function of mAs for ellipsoid water phantoms (E-L) simulating the human abdomen.

ほどSDの変化量は小さくなる傾向にあった。また、ファントムE～Hでは約100～350mAsの範囲でSDが変化しているのに対して、ファントムI～Lでは約30～220mAsの範囲で変化しており、ファントムサイズが小さくなるほど少しのmAsの変化によりSDが大きく変化することが分かった。

2-3 腹部の断面積・周囲長と体格指数との相関

Fig. 4aに男女を合わせた被検者139名の腹部周囲長と比体重との相関を示す。相関係数は0.847であった。Fig. 4bに女性の腹部断面積とBMIとの相関を示す。相関係数は0.852であった。

同様に求めた被検者139名を、男性、女性、全体の3グループに分けた腹部の断面積・周囲長と体格指数との相関係数の一覧をTable 3に示す。断面積との相関係数などと周囲長との相関係数には大きな差はなく、比体重とBMIが四つの体格指数のなかでは良い相関を示した。そのなかでも、女性の腹部断面積とBMIとの相関係数が0.852で最も良く、次に全体の被検者の腹部周囲長と比体重との相関係数は0.847であった。

2-4 mAsと体格指数との関係

2-3の結果より、腹部断面積・周囲長と体格指数との相関式のなかで、高い相関係数を示し、かつ取り扱いが良い関係は、全体の被検者の腹部周囲長と比体重との相関であり、その一次回帰式は次式で示された。

$$y = 0.7x - 10.7 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここでx：腹部周囲長，y：比体重

(7)式を使用して腹部周囲長を比体重に換算し、Fig. 3に示したmAsとSDの関係を、SDをパラメータとしたmAsと比体重との関係に変換したものをFig. 5に示

す。比体重が大きくなるとき、SDを一定に保つにはmAsを上げる必要がある。比体重約37kg/mあたりからグラフの傾きが急峻になり、SDを一定に保つにはmAsを大きく上げなければならなかった。特にSD=8においては顕著にその傾向が強かった。

2-5 統計学的手法

Pearsonの相関係数の検定では、男性、女性、全体の腹部断面積、周囲長と肥満率、比体重、BMI、Rohler Indexの関係におけるすべての相関係数は、標準化値 $Z_{cal} = 5.88 \sim 9.88$ 、有意水準 $\alpha = 0.05$ 、自由度66～136において棄却領域 $R > Z_0(0.025) = 1.980 \sim 2.000$ であった。すべての相関係数は、 $Z_{cal} > Z_0$ の棄却領域Rのなかに入り相関関係が危険率5%で認められたので、すべての関係において良い相関を示し有意性があることを確認した。

3. 考 察

3-1 頭部CT撮影の適正撮影条件設定について

実際のX線CT検査への応用としては、検査時に被検者の頭部周囲長を上記の方法で測定し、SDの値を決めてFig. 2のグラフからmAsを読み取り、撮影条件設定を行えば個々の被検者に対して適正線量に近い撮影条件の設定ができると考えられた。

頭部周囲長は、被検者の頭部をヘッドレストに固定するときに、マジックテープに目盛りを付けるなどの工夫をすれば可能であると考え、円周とmAsの関係だけの検討とした。ただし成人頭部の周囲長は大きな個人差はないので、各施設でSDを決めておいて、Fig. 2に示すような最大円周のファントム(A)の曲線を作製し撮影条件設定を行えばよいと考える。例えば成人頭部でSD=4.0と設定しFOV 210mm, 120kVで撮影する

Fig. 4 (a) Correlation between weight to height ratio and circumference of human body (male + female).
(b) Correlation between BMI and cross-section of human body (female).

a | b

Table 3 Correlation coefficient between cross section and circumference of client's body, and fatness rate, weight to height ratio, BMI and Rohrer Index.

	Cross section			Circumference		
	Male	Female	Total	Male	Female	Total
Fatness rate	0.794	0.799	0.728	0.793	0.778	0.710
Weight to height ratio	0.831	0.819	0.831	0.845	0.822	0.847
BMI	0.823	0.852	0.833	0.829	0.843	0.832
Rohrer Index	0.729	0.810	0.670	0.725	0.790	0.649
	Male n=69			Female n=70		

(All correlation coefficients in Table 2 are significant at $P < 0.05$)

場合, Fig. 2より200mAsの撮影条件となる。

小児の場合も, 成人と同様に行えばよいと考えるが, Fig. 2のファントムB, C, Dの曲線のように円周が小さくなるとmAsを変化させてもSDに有意な差がないので, 撮影条件設定には不必要な線量を使用しないよう注意が必要である。

3-2 腹部CT撮影の適正撮影条件設定について

実際のX線CT検査において, 被検者の腹部の断面積・周囲長を求めるのは容易でないため, 被検者の属性として簡単に得られる身長と体重から体格指数を求め, その体格指数と断面積・周囲長を相関式として表した。Table 3より女性の腹部断面積とBMIとの相関が0.852で最も良く, 次に全体の被検者の腹部周囲長と比体重との相関が0.847であったが, 相関係数は前記の両者で大きな違いがなく, また男女の区別がなく, 全体の被検者として取り扱える腹部周囲長と比体重との相関関係を採用した。この関係式を基に楕円形水ファントムE~Lの円周を比体重として表し, SDをパラメータとしたmAsとの関係をグラフ化した(Fig. 5)。

Fig. 5 Graph showing mAs as a function of weight-to-height ratio of human body for several SDs (SD=8-12) of CT image.

このグラフは, 体格指数が成人だけの指数であるため, 取り扱いは成人腹部X線CT検査のみとなる。

実際のX線CT検査への応用としては, 検査時に被検者の身長と体重より比体重を計算し, SDの値を決め

てFig. 5のグラフからmAsを読み取り、撮影条件設定をすれば適正線量に近い撮影条件の設定ができると考えられる。例えば成人腹部でSD=8.5と設定しFOV350mm, 120kVとして撮影する場合、被検者の比体重が40kg/mであれば、Fig. 5より225mAsの撮影条件となる。

3-3 X線CT検査による被曝について

平成16年に発表されたLANCETの論文⁹⁾では、わが国の診断X線撮影頻度が推定され、癌起因リスクの推定値は他の先進13カ国では0.6~1.8%の範囲であるのに対し、日本では3.2%であったと報告している。この診断X線撮影のなかにはCT検査が含まれており、その示されたデータの妥当性はともかく、X線CT装置の被曝線量について、われわれはこれを直視し被曝低減を実行しなければならない。またX線CT装置の機種、撮影方法などによって被曝線量は、各施設で大きく違っており、自施設がどの程度の被曝線量であるか把握しておくことも重要である¹⁰⁾。近年、線量低減技術が出現し、胸部、腹部などでは適正線量で撮影されるようになってきたが、従来通りの撮影方法で行われている施設がほとんどである。

本論文では、シングルスライスCT装置の頭部と腹部の撮影条件設定について述べたが、撮影条件は、フィルタ(実効エネルギーの違い)、距離、再構成関数、FOV、マルチスライスCT装置かシングルスライスCT装置か、ヘリカル撮影か否かなどの違いにより変化する。また、この実験のSD測定において、関心領域の画素数が大きくなるとSDは大きくなり、画素数が小さくなるとSDは小さくなるので、IECの測定条件に準拠した方法により測定することが重要である。例え

ば、SDの測定は、今回われわれが行った方法のように、実際のCT画像の断面積の1/10以下である画素数344と一定で行うようにする。

このように各施設で実際に使用しているX線CT装置にて、1-1、1-2、1-3に示した測定法を標準化しグラフ化しておけば、適正線量に近い撮影条件の設定ができると考えられる。

日本のX線CT装置の台数は約13,000台で、全世界で稼働しているX線CT装置の約1/3を占め、そのうちの約1,750台がマルチスライスCTである。この約13,000台のうち線量低減技術が装備されていない従来通りの撮影方法で行われている施設を対象に、撮影条件の適正化¹¹⁾が行われれば、日本全体のX線CT装置における総被曝線量を抑制することができ、年間撮影頻度から推定される癌起因リスクの推定値を減少させることができると考えられる。

4. まとめ

線量低減技術が装備されていないX線CT装置で、個々の被検者に対して適正な撮影条件を設定する方法について検討した。まとめると以下のとおりである。

- (1) 頭部X線CT検査において、頭部周囲長をパラメータとしたmAsとSDとの関係をグラフ化し、指定SDおよび被検者の頭部周囲長に対応する線量(mAs)を選択することにより、適正線量での撮影条件設定ができる。
- (2) 成人腹部X線CT検査において、SDをパラメータとした比体重とmAsとの関係をグラフ化し、指定SDおよび被検者の比体重に対応する線量(mAs)を選択することにより、適正線量での撮影条件設定ができる。

参考文献

- 1) 辻岡勝美：マルチスライスCTの原理。日放技学誌，56(12)，1391-1396，(2000)。
- 2) 辻岡勝美，松村禎久，塚越伸介，他：マルチスライスCTとシングルスライスCTの性能比較。映像情報(M)，32(1)，78-87，(2000)。
- 3) 小林謙一，佐藤真爾，豊田昭博，他：マルチスライスヘリカルCTにおける可変管電流制御システム(Real-EC)の被ばく線量評価。日本放射線技術学会，放射線防護分科会誌，14，24，(2002)。
- 4) 工藤正幸：GE社製MDCT LightSpeedの最新技術解説。日放技学誌，56(12)，1401-1405，(2000)。
- 5) 日本放射線技師会：放射線安全管理の手引き。pp.157-171，医療科学社，東京，(2002)。
- 6) 山下一也，小川敬壽，巢組一男，他：診療放射線技術学大系専門技術学系9 放射線検査学(X線)。日本放射線技術学会編，pp.297-304，(1986)。
- 7) 池田義雄，井上修二編：肥満の臨床医学。pp.129-147，朝倉書店，東京，(1993)。
- 8) 木村 都，佐藤元信，砂田久一，他：医療統計学。pp.107-145，廣川書店，東京，(2001)。
- 9) Berrington de Gonzalez A, and Darby S: Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. The LANCET, Vol.363, 345-351, January 31, (2004)。
- 10) 青山隆彦，小山修司，川浦雅代，他：X線医学診断に伴う医療被曝による臓器線量計測システムの開発(研究課題番号14580568)。平成14年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書，(2004)。
- 11) 赤羽正章，大友 邦：CTの被曝と撮影条件最適化ーマルチスライスCTも含めてー。画像診断，22(3)，318-326，(2002)。

図表の説明

- Fig. 1 模擬腹部楕円形水ファントムのCT画像
- Fig. 2 頭部用円形水ファントムのサイズをパラメータとした電流時間積とSDの関係
- Fig. 3 腹部部用楕円形水ファントムのサイズをパラメータとした電流時間積とSDの関係
- Fig. 4 (a)比体重と全体(男性・女性)の被検者の腹部周囲長との相関
(b)BMIと女性の被検者の腹部断面積との相関
- Fig. 5 SDをパラメータとし、被検者の腹部周囲長を比体重として表したときの電流時間積との関係
- Table 1 円形水ファントムの半径と円周
- Table 2 楕円形水ファントムの長径・短径と断面積・周囲長
- Table 3 被検者の腹部断面積、周囲長と肥満率、比体重、BMI、Rohler Indexとの相関関係