臨床技術

全身照射のためのファントムによる線量測定

手塚貴子・坂倉規之・小幡康範・田伏勝義
 小山修司・青山裕一¹⁾・下平晃代¹⁾・近藤 悟¹⁾

論文受付
 2001年5月1日

論文受理
 2002年1月8日

Code No. 431

名古屋大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
 1)名古屋大学医学部附属病院放射線部

緒言

1957年, E.D.Thomasによって全身照射total body irradiation (TBI)は, 骨髄移植(BMT)を要する疾患・病態に対する前処置の一環として行われ¹⁾, 現在化学療法との組み合わせで難治性白血病などの治療法としてほぼ確立されたがなお, 適応の拡大が期待されている。

全身照射の意義は, 腫瘍細胞を死滅させると同時に, 宿主の免疫能を低下させ, ドナー由来の造血幹細胞の生着場所を用意することにある。対象は白血病のほか, 再生不良性貧血, 骨髄異形成症候群などの血液

疾患が主であり, 悪性リンパ腫, 神経芽細胞腫などの一部の固形癌にも試みられている。

しかし, 全身照射は, その照射法をはじめ, 総線量/分割/日, 線量率, 照射スケジュールなど各施設²⁾により差がみられた。照射方法としては, X線束を水平^{3, 4)}, 垂直⁵⁾, 振り子照射⁶⁾あるいは, 線源移動方式⁷⁾, 寝台移動方式^{8, 9)}で照射する方法が考案されている。現在ではX線束を水平にし, 線源標的間距離(STD)を大きくして大照射野を得る方法が一般的に行われている。

Dosimetry with Phantom for Total Body Irradiation (TBI)

TAKAKO TEZUKA, NORIYUKI SAKAKURA, YASUNORI OBATA, KATUYOSHI TABUSHI, SYUUJI KOYAMA,¹⁾ YUICHI AOYAMA,¹⁾ AKIYO SHIMOHIRA,¹⁾ and SATORU KONDOU

Department of Radiation Technology, Nagoya University, School of Health Sciences

1) Division of Radiology, Nagoya University Hospital

Received May 1, 2001; Revision accepted Jan. 8, 2002; Code No. 431

Summary

Total body irradiation (TBI) is being used as a method of preparation for bone marrow transplantation (BMT). In TBI, the dose calculation is based on dosimetry using a phantom. We measured the basic dose with a phantom using a 10 MV X-rays. We confirmed the accuracy of the dose calculation performed in our facilities and investigated a method of more accurate dosimetry. We measured the variation in dose according to the size of the phantom and the depth using a tough water phantom, and examined the difference in TMR according to SCD, field size, and size of the phantom. Consequently, the dose has been changed regardless of the size of the phantom at larger than $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, and it is about 1% larger than $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Also TMR has changed according to various conditions, including the size of the phantom, field size, and SCD. Therefore, it was found that dosimetry using the $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ phantom leads to underestimation in dose calculation, and there is no difference in dose between the field size of $151.5 \times 160 \text{ cm}^2$ and $151.5 \times 80 \text{ cm}^2$. It is also necessary to consider the effect of the vertical size of the phantom.

Key words: Total body irradiation (TBI), Phantom, Dosimetry

別刷資料請求先: 〒461-8673 愛知県名古屋市東区大幸南 1-1-20
 名古屋大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 小幡康範 宛

Fig. 1 Schematic illustration of dosimetry for TBI using the phantom.

今まで、当施設では、線源検出器間距離(SCD)400cmで、 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の大きさのファントムによる線量測定を基に投与線量の計算を行っていた。これは人体の大きさで測定した場合より散乱線の量が少なく線量は過小評価となることが考えられる。しかし、その差についてPodgorsakら¹⁰⁾は10MV X線に対する測定データから人体サイズに近い $140 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ と使用したファントム $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ の比較で、出力の差は0.1%、深部量百分率(PDD)では深さ20cmで0.5%であり、ほとんど問題にならない、と報告している。しかしながら、各施設の全身照射の状況によってその差には違いがあると考えられる。実際に人体に正確な線量を投与するためには、どのような大きさのファントムで線量を測定したらよいのか確認する必要がある。本論文では、主にファントムの大きさを中心に測定条件に及ぼす影響について検討した。

1. 方法

使用した直線加速器はシーメンス(東芝製)MEVATRON 77 DX 67で、10MV X線である。Fig. 1に示すようにSCDは400cmとし、照射野は線量計の位置で $151.5 \times 160 \text{ cm}^2$ である。Fig. 1に示すようにBeam Stopperが一番納めた状態でも少し照射野にかかり、横は160cmとならず151.5cmとなっている。測定に用いたファントムは主にタフウォーターであるが、まだファントムが必要な末端部では、Mix-Dpを加え、指頭形電離箱チェンバ容量0.6mlのJARP型線量計(応用

技研AE-132a)で測定した。各測定は3回行い、その平均を測定値とした。また、当院での患者測定基準深度位置での線量率は $5 \sim 10 \text{ cGy/min}$ 以内に収めるようにしており、測定時の線量率は約 9.85 cGy/min であった。

1-1 ファントムの大きさによる線量変化

ファントムによる線量変化をみるため、厚さの異なるタフウォーターファントムを組み合わせ、 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の大きさとし、深さとして、まず10MV X線の基準深2.5cmに合わせ測定した。縦と厚みを各30cmと一定にし、横を30cmから120cmまで順次増やして各ファントムの大きさでの線量を測定した。深さ5cm、15cmでも同様に各大きさのファントムについて線量を測定した。この時いずれも、線量計はファントムの上方から挿入した。

1-2 線量計のステムとケーブルの照射効果

照射野に入る線量計のステム・ケーブルの効果を実測し、確認するため、照射野 $151.5 \times 24 \text{ cm}^2$ の短軸方向からと長軸方向から挿入した場合を深さ2.5cmで測定した。

1-3 照射野の大きさによる線量の比較

照射野の違いによる影響をみるためファントム $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 、SCD400cmにおいて照射野の横は151.5cmと一定にし、縦を40~160cmと変化させ、線量を測定した。このとき、線量計はファントムの上方から挿入し、ケーブルは天井に固定した。

1-4 ファントムの縦の大きさによる影響

ファントムの大きさによる線量変化の測定は、ファントムの形状の制限から縦と厚みを30cmに設定したが、実際の人体の標準的な横断面 $20 \times 30 \text{ cm}^2$ に合わせてファントムを組み合わせると、横は80cmがとれず90cmとなる。縦の大きさを15cm、20cm、30cmと変化させて、SCDは400cm、照射野は $151.5 \times 80 \text{ cm}^2$ で、線量計をファントムの後方から前方に向けて挿入し、深さ15cmとして線量の変化を測定した。

1-5 TMRの測定

各条件における組織最大線量比(TMR)

① ファントムの大きさによるTMRの比較

SCD400cm、照射野 $151.5 \times 160 \text{ cm}^2$ において、ファントム $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ と $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ のTMRをそれぞれ測定により求めて比較した。

② SCDによるTMRの比較

ファントム $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 、線量計の位置での

Table 1 Difference in dose normalized by the phantom ($30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) according to the horizontal size of the phantom and the depth of measurement.

The horizontal size of phantom (cm)	Depth 2.5 cm	Depth 5 cm	Depth 15 cm
30	1.000	1.000	1.000
40	1.003	1.005	1.009
50	1.005	1.006	1.017
60	1.006	1.007	1.020
80	1.008	1.008	1.022
100	1.009	1.008	1.019
120	1.008	1.006	1.018

Fig. 2 Difference in dose normalized by the phantom ($30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) according to the horizontal size of the phantom and the depth of measurement.

照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ において, SCD400cm と 100cm の TMR を測定し比較した。

③ 照射野の大きさによる TMR の違い

ファントム $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, SCD400cm において, 照射野 $151.5 \times 80 \text{ cm}^2$ と $151.5 \times 160 \text{ cm}^2$ の TMR をそれぞれ測定により求めて比較した。

2. 結果

2-1 ファントムの大きさによる線量の変化

Table 1 に各深さにおけるファントムの大きさによる線量の変化を示す。ファントムの大きさが $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 以上では線量は飽和する傾向がみられた。 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の線量の値を 1 とし, 各線量の比をとり, これをグラフに示した (Fig. 2)。縦軸はファントム $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の線量の値を 1 としたときの各線量の比で, 横軸はファントムの大きさを表す。ファントム $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の値は $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ と比べ, 深さ 2.5cm, 5cm では約 1%, 深さ 15cm では約 2% 大きな値となる。また, ファントム $120 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の線量にはやや減少する。

Fig. 3 Difference in dose according to field size.

Table 2 Influence of the vertical size of the phantom.

P phantom (cm^3)	$90 \times 30 \times 30$	$90 \times 20 \times 30$	$90 \times 15 \times 30$
Indicated dose	16.11	15.88	15.82
Normalized by the phantom ($90 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$)	1	0.985	0.982

2-2 線量計のステムとケーブルの照射効果の検証

照射野 $151.5 \times 24 \text{ cm}^2$ で短軸と長軸とを交換した場合を比較すると, ステムとケーブルを長く含む照射野 $151.5 \times 24 \text{ cm}^2$ の値の方が約 2% 大きくなった。

2-3 照射野の大きさによる線量の変化

結果を Fig. 3 に示す。照射野の縦を小さくしていったところ 80cm まではほぼ一定になり, それ以上小さくすると, 急に減少した。

2-4 ファントムの縦の大きさによる影響

結果を Table 2 に示す。ファントムの縦 30cm の線量の値を 1 とし, 縦 20cm, 15cm の値を比にとると, それぞれ 1.5%, 1.8% 小さくなった。

2-5 TMR の測定

① ファントムの大きさによる TMR の違い (Table 3, Fig. 4)

ファントム $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ と $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の TMR を比較すると, 深さ 10cm まではほぼ一致し, 深さ 15~25cm では $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の方が 0.8~1.4% 大きくなった。

② SCD による TMR の違い (Table 4, Fig. 5)

SCD400cm と 100cm の TMR を比較すると, ビルドアップ領域では約 4.8% SCD400cm の方が小さ

Table 3 Difference in TMR according to the size of the phantom.

SCD 400 cm		
Field size 151.5 × 160cm ²		
Phantom		
Depth (cm)	30 × 30 × 30 cm ³	80 × 30 × 30 cm ³
0.5	0.827	0.827
1.0	0.934	0.936
1.5	0.979	0.983
2.0	0.996	0.999
2.3	0.999	1.002
2.5	1.000	1.000
2.7	1.000	1.000
3.0	0.998	0.997
5.0	0.965	0.966
10.0	0.873	0.879
15.0	0.779	0.787
25.0	0.606	0.620

Fig. 4 Difference in TMR according to size of the phantom.

な値となった。2.5cmより深いところではほぼ一致している。

③ 照射野の大きさによるTMRの違い (Table 5, Fig. 6)

照射野151.5 × 80cm²と151.5 × 160cm²のTMRを比較すると、浅いところでは約4.6%，照射野151.5 × 160cm²のほうが大きくなり、深いところではほぼ一致している。

3. 考 察

3-1 ファントムの大きさによる線量の変化

従来の線量測定で用いられている30 × 30 × 30cm³の大きさのファントムでは少なくとも過小評価となっていることが分かった。熊谷によればファントムの大きさは30 × 30 × 30cm³以上あればよいとしている¹¹⁾。症例によって体の大きさは異なるので、本来ならばそれ

Table 4 Difference in TMR according to SCD.

Phantom 30 × 30 × 30 cm ³		
Field size 10 × 10cm ²		
SCD		
Depth (cm)	100 cm	400 cm
0.5	0.620	0.572
1.0	0.832	0.802
1.5	0.935	0.919
2.0	0.981	0.975
2.3	0.996	0.993
2.5	1.000	1.000
2.7	1.003	1.004
3.0	1.002	1.006
5.0	0.965	0.970
10.0	0.849	0.848
15.0	0.734	0.731
25.0	0.538	0.536

Fig. 5 Difference in TMR according to SCD.

ぞれの症例と等価なファントムの大きさに測定を行うべきなのだが等価なファントムの大きさを決定することにも困難がある。80 × 30 × 30cm³より大きいと線量はこれ以上には大きくなり飽和するので80 × 30 × 30cm³で測定すれば症例の大きさにあまり関係なく誤差が少なくなると考えられる。ただこの大きさは72kg位の体重となり大人の標準には近いが子供の場合は50 × 30 × 30cm³位が標準となるかもしれない。

3-2 ステムの影響

ステム効果による線量測定上の変動を配慮し、線量計のケーブルは照射野内に最小限にする必要があるがTBIでは一般的に大照射野を用いているため限界がある。後で述べる照射野の大きさの影響も考慮すると症

Table 5 Difference in TMR according to field size.

SCD 400 cm		
Phantom $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$		
Field size		
Depth (cm)	$151.5 \times 160 \text{ cm}^2$	$151.5 \times 80 \text{ cm}^2$
0.5	0.827	0.781
1.0	0.936	0.904
1.5	0.983	0.963
2.0	0.999	0.987
2.3	1.002	0.999
2.5	1.000	1.000
2.7	1.000	1.000
3.0	0.997	0.998
5.0	0.966	0.970
15.0	0.787	0.790
25.0	0.620	0.621

例の体が十分に入るなら測定においてはできるだけ照射野の縦は小さくすることが必要と考えられる。

3-3 照射野の影響

大照射野を確保するためにSCDを大きくとる必要がある。またSCDを大きくすることで治療室の壁との間に距離がとれないことが多い。したがって、壁などからの散乱線の影響を考慮しなくてはならない。後方の壁からの散乱線は、壁からの距離と壁の材質により変化し、また、照射野の大きさにも依存する。後方の壁からの散乱線について穴井重男ら¹²⁾はSTD = 500cm(後方の壁から63cm)では後方の壁からの散乱線はほとんど無視できると報告している。本測定での後方の壁からの距離は50cmであることから後方からの散乱線の影響はほとんど無視できると考える。また、照射野の大きさについては、縦の照射野を80cmまで小さくしても今までの160cmと比較して線量は変わらないことが確認できた。また基準の線量測定やTMRの測定を最初から照射野を縦50cm或いは60cmで行えば、TBIをより壁など周囲からの散乱線の影響が少ない状況で実施できることになる。

3-4 ファントムの縦の大きさによる影響

より人体に近い大きさのファントムにするため、縦の大きさを変化させたところ、縦30cmでは、20cm、15cmと比べ2.4%、2.9%の過大評価を行っていることが分かった。人体の厚みは30cmよりも20cmの方が近いのでできれば縦20cmで測定を行いたい方がファントムの大きさの制限により横の大きさをいろいろ変化させて測定することができなかった。90cm

Fig. 6 Difference in TMR according to field size.

に固定して測定したがこの大きさは体積的には $60 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ にほぼ相当しているのでTable 1からすれば $90 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ とは線量に差がないはずである。散乱体が近くに多くある方が線量が多くなることがその差となっていると考えられる。またこの場合の線量測定では線量計をビーム方向に挿入せざる得えず、深さは15cmのみで他の深さは設定できない。線量計の挿入方向による線量の違いについては $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ のファントムで上からの挿入と比較したが差はみられなかった。

3-5 TMRの測定

ファントムの大きさによりTMRに多少の差がある。これは予想できることであるが体の大きさが異なる症例ごとに測定を行うのは難しい。平均的な大きさとして $80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 或いは $90 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$ などの測定値を適用すれば各症例との誤差は少なく計算できると考えられる。

また、40cm以上のSCDではTMRはSCDの影響を受けないとされている。SCD100cmと400cm、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ のTMRを比較していたところ、SCD400cmのピーク深がやや深くなりそれより深い部分では一致していたが、ピークより浅いビルドアップ領域ではSCD100cmの方が線量はやや大きい。これは測定点での照射野面積を一定にする測定ではSCDが長くなるとエネルギーの均等性が良くなり理論上エネルギーが上がることによると考えられる。

$80 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ のファントムを使って照射野が異なる場合のTMRを比較すると、やはりピークより深いところでは差がなく一致するがビルドアップ領域では大きな照射野の方が線量は大きい。これは散乱線の影響と考えられるが今回の目標は誤差の少ない線量測定

ができればよいということでこれ以上の追求は今後の検討とした。

4. 結 論

10MV X線を用いた全身照射における線量計算のための基準となる線量測定をタフウォーターファントムを用いて検討した。

1) $30 \times 30 \times 30 \text{cm}^3$ の大きさのファントムでは線量が過小評価となり、 $80 \times 30 \times 30 \text{cm}^3$ と比較すると深さ15cmでは約2%の誤差がある。

2) 照射野の縦を80cmまで絞っても現在使用している縦160cmと線量に差はみられない。

3) 線量測定に用いるファントムの縦の大きさを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Thomas ED, Lochete HL Jr, Lu WC, et al.: Intravenous infusion of bone marrow in patient receiving radiation and chemotherapy. N Engle J Med, 257, 491-495, (1957).
- 2) 井上俊彦: 白血病に対する骨髄移植療法と全身照射法の国内の現状. 日放技学誌, 44, 765-772, (1988).
- 3) Khan FM, Williamson JF, Sewchand W, et al.: Basic data for dosage calculation and compensation. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 6, 745-751, (1981).
- 4) 栗栖孝一: 骨髄移植の前処置としての全身照射法に関する基礎的ならびに臨床的研究. 日本医放会誌, 51(7), 799-809, (1991).
- 5) Van Dyk J: Dosimetric considerations of very large cobalt-60 fields. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 6, 753-759, (1980).
- 6) 菊池 峻, 平林久枝, 園田辰夫, 他: ムービングによる全身照射法. 日本医放会誌, 47(11), 1909-1915, (1991).
- 7) Cunningham JR and Wright DJ: A simple facility for wholebody irradiation. Radiology, 78, 941-949, (1962).
- 8) 津田政行: 寝台移動法について. 日放技学誌, 47(12), 2043-2048, (1991).
- 9) Lech Papiez, Joseph Montebello, Colleen DesRosiers, et al.: The clinical application of dynamic shielding and imaging in moving table total body irradiation. Radiotherapy and Oncology, 51, 219-224, (1999).
- 10) Podgorsak EB, Pla C, Evans MDC, et al.: The influence of phantom size on output, peak scatter factor, and percentage depth dose in large-field photon irradiation. Med Phys, 12(5), 639-645, (1985).
- 11) 熊谷孝三: TBIにおけるLong SAD法について. 日本医放会誌, 47(12), 2032-2042 (1991).
- 12) 穴井重男: TBI(total body irradiation)のための水補償フィルタの基礎的検討—補償材厚さの検討—. 日放技学誌, 56(6), 826-833, (2000).

図表の説明

- Fig. 1 測定配置図.
Fig. 2 ファントムの大きさと深さによる線量の比較.
Fig. 3 照射野の大きさによる線量の比較.
Fig. 4 ファントムの大きさによるTMRの比較.
Fig. 5 SCDによるTMRの比較.
Fig. 6 照射野によるTMRの比較.

- Table 1 ファントムの大きさと深さによる線量の比較.
Table 2 ファントムの縦の大きさによる影響.
Table 3 ファントムの大きさによるTMRの比較.
Table 4 SCDによるTMRの比較.
Table 5 照射野によるTMRの比較.