



Title	高エネルギー電子線治療における骨の影響（超高压照射法の研究 第12報）
Author(s)	服部, 浩之; 北川, 俊夫; 北畠, 隆
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1968, 27(11), p. 1457-1462
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16187
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

高エネルギー電子線治療における骨の影響

(超高圧照射法の研究 第12報)

愛知県がんセンター研究所放射線部(部長:北畠隆)

服部浩之, 北川俊夫, 北畠 隆

(昭和42年5月19日受付)

Influence of Bony Tissue upon Dose Distribution in High Energy Electron Beam Therapy

By

Hiroyuki Hattori, Toshio Kitagawa and Takashi Kitabatake

(From the Dept. of Radiotherapy, Aichi Cancer Center, Nagoya)

For evaluating effects of inhomogeneity of dose distribution caused by bone in high energy electron beam therapy, the absorption equivalent thickness (AET) of bone against water was studied. Bone specimens used were obtained from the pelvis, sternum and ribs of four cadavers who were died of cancer in fifty to sixty years of age.

The energy dependency of absorption difference between bone and water, examined using bone specimens described above, was practically negligible for the range of 16 to 31 MeV. The AET values were measured using 25 MeV electrons. The mean AET for nine specimens of which the mean density was 1.18 g/cm³ was 1.14.

Therefore, the effect of bone absorption on dose distribution is regarded to be of less practical significance in electron beam radiotherapy of the chest wall or pelvic region of cancer patients.

緒 言

高エネルギー電子線を用いる治療の照射計画の立案に際して、その計画をより正確なものとする為には、人体各組織間の電子線に対する吸収の差異を知ることが必要となる。骨組織は他の水等価とみなしえる軟組織に比較して高密度であるので、電子線に対する吸収が異なることが予想される。そこで此の論文では、高エネルギー電子線の人骨による吸収がどの程度であるかを知るために行なつた実験結果について述べようと思う。

方 法

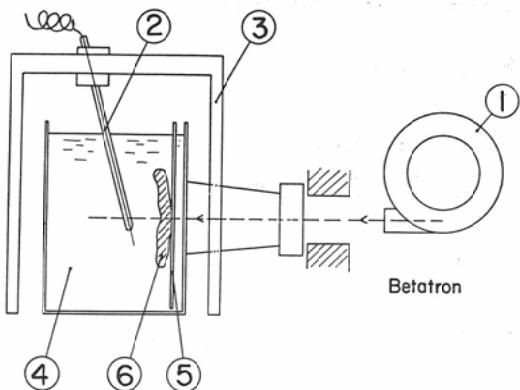
実験装置の概略を図1に示す。図において、①は線源で、東芝製BMR-31型ベータトロン、②は東芝製指頭型電離槽直読線量計であり、電離槽は曲面をなす骨試料の近傍での線量を測定する為に、③のスキャンナーに鉛直方向に対

して約15°の傾斜をつけて固定されている。④は東芝製等線量曲線自記器のスキャンナーであり、遠隔操作により、それに固定された電離槽で水ファントーム内の任意の場所の線量を測定出来る。⑤は水ファントームであり、40×40×40cmのアクリライト製水槽に水を満たしたものである。⑥は骨試料を水ファントーム中の所定の場所に固定する為の、厚さ2mmのアクリライト板である。⑦は骨試料である。骨試料は癌で死亡した50~60才代の男女各2体の腸骨、胸骨および肋間筋をも含めた肋骨の合計12個で、いずれも採取後直ちに実験に用いられた。

実験および結果

水ファントーム中の深部率曲線、および水ファントーム中に骨試料を設置した場合の同曲線をポイント測定によつて求めた。この間、電子線の

Fig. 1 Experimental arrangements.



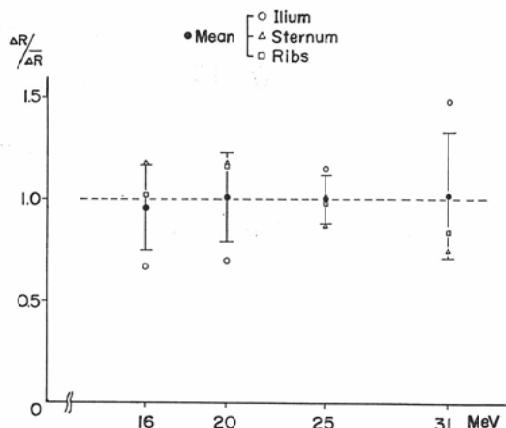
①: Betatron, ②: Thimblechamber, ③: Scanner with remote control system, ④: Water phantom, ⑤: Specimen holder, ⑥: Bone specimen:

線量率は一定に保たれた。水ファントム中の電子線の分布は治療時に用いるスキャッタリングホイルによつて平坦化されている。

(A) エネルギー依存性

先ず、骨組織と水との電子線吸収差のエネルギー依存性を調べる為に、58才の男子の骨試料について次のような条件で実験を行つた。即ち、照射野は、腸骨、肋骨については $6 \times 4 \text{ cm}$ 、胸骨については $4 \times 2 \text{ cm}$ であり、いずれの場合も骨試料は照射野より充分に大きく、骨を透過せずに測定点に達した一次線はないものとみなしてよい。水ファントム表面と骨表面との間隔は約 1.0 cm であり、使用した電子線エネルギーは16, 20, 25, 31 MeVである。骨試料の厚さは照射野中心付近で腸骨 1.5 cm 、胸骨 1.0 cm 、肋骨 0.8 cm であった。各骨試料について上記4種のエネルギーで深部率曲線を求め、12の測定例を得た。これらの測定例の各々について、骨のある場合とない場合での外挿飛程の差(ΔR)を求めた。 (ΔR) は約 $1 \sim 3 \text{ mm}$ と小さく、線源出力の変動、スキャンナーのパックラッシュなどのため、その値は数十%の誤差を有している。各骨試料について (ΔR) の平均($\bar{\Delta R}$)を求め、 $(\Delta R/\bar{\Delta R})$ を算出した。これを図2に示す。図に示される如く、3種の骨試料の $(\Delta R/\bar{\Delta R})$ の各エネルギーについての平均値

Fig. 2 The difference of extrapolation ranges of electron beams in water phantom before and after interposition of bone specimens of ilium, sternum and ribs for 16, 20, 25 and 31 MeV electron beams.



Ordinate: The ratio of difference of extrapolation ranges to mean of them for each of specimens:
Abscissa: Energy of electrons.

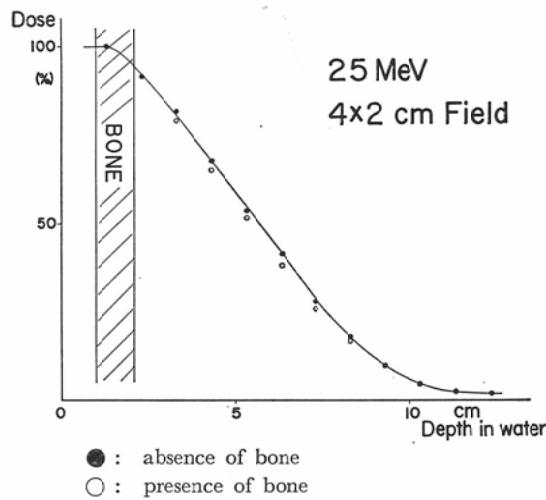
Error ranges indicate the standard deviation of $(\Delta R/\bar{\Delta R})$ for three specimens (See text.).

はいずれも 1.0 に近い。それ故、実験誤差の範囲内、即ち実際的な意味では、骨組織と水との電子線吸収差のエネルギー依存性はないものと結論し得る。

(B) A E T 値

次に、骨組織の水に対する吸収等価厚さ、AET(Absorption Equivalent Thickness)値を求める実験を① 51才と、② 52才の女子および、③ 65才の男子の骨試料を用いて行つた。使用した電子線エネルギーは25 MeVである。照射野は $4 \times 2 \text{ cm}$ であり、いずれの骨試料もこの照射野を充分におおついている。水ファントム表面と骨表面との間隔は約 1.0 cm である。骨による線量の減少を量的に求める為に、骨のある場合、ない場合とも水ファントム中の同一の場所の線量を測定した。この様にして得られた測定結果の1例を図3に示す。これは前述の②の試料の胸骨についての結果である。図中の各点は、黒点が骨のない場合、白点が骨のある場合の測定値を示している。我々はこれらの測定値から、次の様な方法でA E T値を算出した。即ち、図3に示される如く、骨のある

Fig. 3 The dose difference before and after interposition of bone specimens of sternum with 25 MeV electrons and 4×2 cm field.

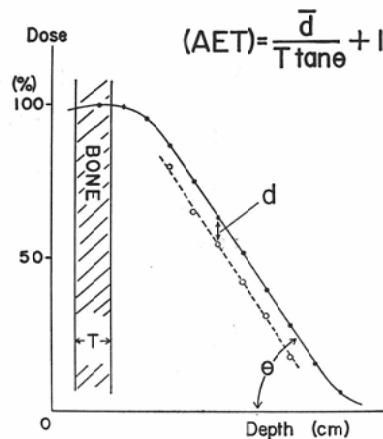


場合の測定点は、深さ 3.3~8.3cm の間に 1cm 間隔で 6 点あり、しかもこの範囲での深部率曲線はほぼ直線状である。それ故、それぞれの測定例について骨による線量減少量はほぼ一定となるので、図 4 に示す如く、これらの減少量 (d) を平均し、その平均値 (\bar{d}) を深部率曲線の直線部分の勾配 ($\tan\theta$) で除してやれば、骨が入ったことによる飛程の減少量が得られる。この減少量をその場合の骨の厚さ (T) で除してやれば、骨と水との単位厚さ当りの電子線飛程減少量の差、即ち ($AET - 1$) の値が得られる。故に、 AET 値は

$$(AET) = \frac{\bar{d}}{T \tan\theta} + 1$$

として求められる。骨の厚さは照射野中心にあた

Fig. 4 Method of calculation of AET value.



d : Mean of the dose difference before and after interposition of bone.
 θ : The angle between the linear part of depth dose curve and abscissa,
 T : The thickness of bone.

る部分を測定して求めた。以上の様にして測定し、算出された \bar{d} , $\tan\theta$, T および AET 値、それに骨の密度を表 I に示す。骨の密度はその容積と重量とを測定して求めた。 AET 値の精度は \bar{d}, T の誤差から推定して土 4% 程度と思われる。 AET 値の全平均は 1.14 であった。

考 察

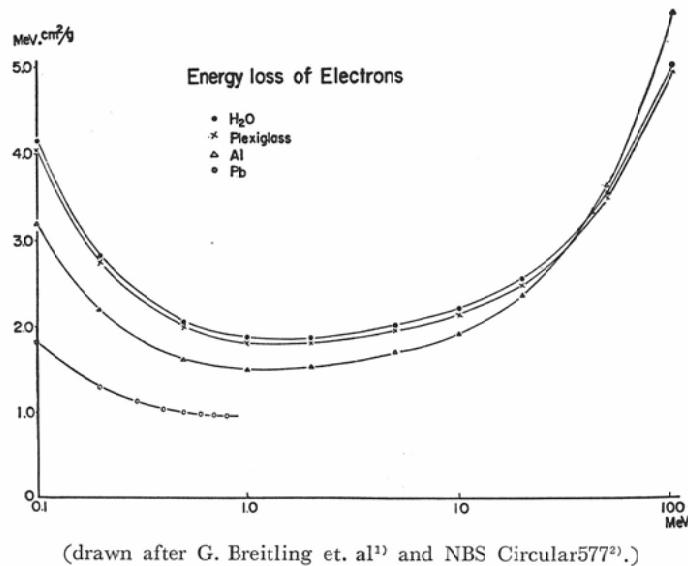
(A) 骨 AET 値の電子線エネルギーおよび骨密度との関係

種々の物質中での、電子エネルギーと電子のエネルギー損失との関係を図 5 に示す。これは Breitling 等の論文¹⁾、および NBS Circular²⁾より引用した値を図示したものである。図に見られる如

Table I. Experimental results of AET value of bone specimens and its density.

Specimens	Mean dose difference \bar{d} (%)	Thickness of bone T (mm)	$\tan\theta$	AET	Density (g/cm^3)
Ilium	① 3.55	20	1.30	1.14	1.16
	② 1.85	11	1.30	1.13	1.16
	③ 2.33	15	1.30	1.12	1.20
Sternum	① 1.75	10	1.30	1.14	1.18
	② 2.13	11	1.30	1.18	1.16
	③ 2.04	9	1.30	1.18	1.18
Ribs	① 1.62	8	1.30	1.16	1.17
	② 2.08	10	1.30	1.16	1.20
	③ 1.00	8	1.30	1.10	1.17
Mean				1.14	1.18

Fig. 5 Relationship between energy and energy loss of electrons in various materials.

(drawn after G. Breitling et. al¹⁾ and NBS Circular 577²⁾.)

く、物質の電子との衝突による損失が大部分である20~30 MeV 以下では、原子番号の大きい物質中の方が単位質量当たりのエネルギー損失は小さいが、高エネルギーとなるに従つて制動輻射による損失が増大し、逆に原子番号の大きい物質中のエネルギー損失が大となる。それ故、骨と水との電子線吸収差のエネルギー依存性については次のように言つてもよいであろう。即ち、Ca, Mg, P 等を含有し、平均的な原子番号が水よりも大きい骨組織による電子線吸収は、エネルギーが大なる程水に比較して相対的に大きくなる。しかし、実際的には、骨の吸収にあずかる電子線エネルギーが30 MeV 程度以下であるならば、我々の実験結果に示される如く、吸収差のエネルギー依存性、即ちA E T 値のそれはないものと看做し得るであろう。

また、骨試料の平均密度は1.18g/cm³ であった。この値はA E T 値の平均1.14より4% 程大きい。Biochemist's Handbook³⁾によれば、骨の組成はほぼ無機物50%，有機物30%，水20%と推定される。無機物はCa の磷酸、炭酸塩で水素を含まず、また有機物はそれを構成する原子の半数が水素であると仮定して骨の単位質量当たりの電子数

を概算すると、水のそれに比べて6% 程少ないとになる。比較的低エネルギーでは電子線エネルギー損失は物質中の電子密度に近似的に比例するものと考えられる故、骨のA E T 値がその密度よりも数% 小さくなることは合理的なことと思われる。密度の大きな骨ほど無機物の割合が大きくなり、従つてA E T 値がその密度(g/cm³)より減少する割合は大きくなるものと思われる。

(B) 骨組織密度の検討

我々の用いた試料骨組織の平均密度は1.18 g/cm³ であつた。骨の密度についてはSpiers⁴⁾ が骨髓と骨膜を除去した緻密な大腿骨の固体状のものの密度を1.87g/cm³、粉末状にしたもの密度を1.85 g/cm³ と報告している。また Trübstein⁵⁾ は大腿骨皮質について1.47g/cm³、骨多孔症に犯された骨膜とともになつた腰椎について1.144g/cm³ の値を示している。大腿骨皮質についてはSpiers と Trübstein の値にはかなりの差がある。そこで我々は大部分が骨皮質である腸骨の薄い部分の密度を比重液を用いて測定した結果、1.32g/cm³ の値を得た。この値は Spiers よりも Trübstein の骨皮質密度に近い。また Trübstein⁵⁾ は脛骨について、健康なものと栄養不良なものとで、その成分

の組成にちがいのあることを示している。骨組織の密度および組成は骨の種類、年令、健康状態などによつて異なるであろう。それ故、我々が照射対象である癌患者各部の骨についてA E T値を調べたことは適切であると言えるであろう。

(C) 従来の研究成果

以上の我々の結果を従来の幾つかの研究と比較、検討してみる。先ず、Hass等⁶⁾は骨粉を板状に形成した試料を水中に設置し、13.1および17.9 MeV電子線について骨による電子線飛程の減少を測定しており、この結果をA E T値に換算すると1.6となる。

また、Markus⁷⁾は骨と軟組織の間の不均質性を固体硫黄とM3ファントームの相異におきかえ、3.2から15.0 MeV電子線について種々の場合の深部率曲線を求めている。

Breitling等¹⁾は骨と軟組織と肺の間の不均質性を硫黄とplexiglassと発泡ゴムの相異におきかえ、11.0から16.2 MeV電子線について種々の場合の線量分布をフィルム法によつて求めている。これらの場合、硫黄のM3に対するA E T値は約1.8となつてゐる。

Laughlin⁸⁾は骨と肺の補正法の中で、骨の比重1.9に対応するものとしてA E T値1.6を示している。

しかし、これらの研究はいずれも実際の骨組織を試料としてなされたものではなく、骨の密度あるいは組成を仮定し、その骨が線量分布におよぼす影響を調べたものである。そして一般にその結果は我々のそれよりも骨の影響を大きく評価している。

一方、実際の骨組織を用いてなされた研究では、Veraguth⁹⁾が30 MeV電子線で、3 cm厚さの骨について7%の線量の減少を報告している。これはA E T値に換算すると1.2となる。この値は我々の結果と比較的よく一致している。

また Boone等¹⁰⁾は18 MeV電子線を用い、頸骨による線量の減少量を生体中で測定し、Spiers⁴⁾の骨密度および骨電子密度を仮定したときに予想される線量の減少量とよく一致したと述べている。これはA E T値1.65を与える。

Almond等¹¹⁾は12および15 MeV電子線を用い、胸骨について平均A E T値1.0と報告している。

以上の様に、骨による電子線吸収を調べた研究は数多くあり、そのA E T値も1.0以下から1.6以上にまで広い範囲に亘つてゐる。これらの諸研究の実験方法は必ずしも同じでなく、また分析の仕方も異なる。分析や評価の方法は必ずしも全く完全であるものばかりでもない。ともあれ、これらの実験に用いられた試料は仮想的な骨、あるいは欧米人の骨組織であり、我々の対象とする所謂癌年令(50~60才代)の日本人の症例について、直ちにこれ等の値を電子線治療計画に適用し得るか否かは問題であろう。そこで改めて、我々の対象とする骨組織について、より正確な実験的研究を試みたのである。

結論

骨組織のAET(Absorption Equivalent Thickness)値は通常医療に用いられる電子線エネルギー範囲(31 MeV以下)では、ほぼ一定と看做し得る。そしてその値は骨の密度(g/cm³)より数%小さい。

通常の癌患者の骨盤、胸壁骨の密度は1.18 g/cm³程度であり、そのA E T値は1.14附近である。それ故、これらの骨組織が線量分布におよぼす影響は小さく、電子線治療上骨による吸収は軟組織によるそれと殆んど同一であると看做してもよい。

本論文の要旨は、第16回日医放会物理部会(41.9.30.金沢)および第26回日医放総会(42.4.5.岐阜)において発表した。

本研究は厚生省がん研究助成金の援助によつた。感謝の意を表する。

文献

- 1) Breitling, G. und Vogel, K.H.: Dosisverteilung bei der Bestrahlung inhomogener Medien mit schnellen Elektronen. Strahlentherapie 122 (1963), 321-340.
- 2) Nelms, A.T.: Energy Loss and Range of Electrons and Positrons. Suppl. to NBS Circular 577. U.S. Government Print. Office, Washington, D.C., 1958.
- 3) Cyril, L.: Biochemist's Handbook. Richard Clay Inc, Great Britain.
- 4) Spiers, F.W.: Effective atomic number and energy absorption in tissue. Brit. J. Radiol.

- 19 (1946), 52—63.
- 5) Trübestein, H.: Die "Absorbierte Dosis" im Gewebe für Röntgenstrahlen von 10KeV bis 1MeV und die Gewebedichte. Strahlentherapie 111 (1960), 122—138.
- 6) Hass, L.L. and Sandberg, G.H.: Modifications of depth dose curves of high energy X-ray and electron beams by interposed bone. Radiology 66 (1956), 102—104.
- 7) Markus, B.: Ionizationdosimetrie und Dosisverteilungen schnellen Elektronen in Knochengewebe. Strahlentherapie 113 (1960), 379—393.
- 8) Laughlin, J.S.: High energy electron treatment planning for inhomogeneities. Brit. J. Radiol. 38 (1965), 143—147.
- 9) Veraguth, P.: Clinical experiments with electron therapy up to 30Me V. Brit. J. Radiol. 34 (1961), 152—159.
- 10) Boone, M.L., Crosby, E.H. and Shalek, R.J.: Skin reactions and tissue heterogeneity in electron beam therapy. Part II: In vivo dosimetry. Radiology 84 (1965), 817—821.
- 11) Almond, P.R. and Boone, M.L.: The effects of sternum upon the central axis depth dose curves for high-energy electrons. Radiology 86 (1966), 148—149.