メタアクリル酸メチル樹脂(アクリライト)の人体ファントムとしての適用性について(とくに深部治療領域X線質に対する)

京都大学医学部放射線医学教室

森 川 進・川 勝 昇・小野山靖人・平井昭一

レントゲン技術専修学校

木村幾生・山田勝彦

(論文受付 昭和33年12月1日)

ON THE APPLICABILITY OF THE POLYMETHYL METACRYLATE (ACRYLITE) AS A BODY PHANTOM FOR THE DEEP RADIOTHERAPY

By SUSUMU MORIKAWA,
NOBORU KAWAKATSU,
YASUTO ONOYAMA and
SHOICHI HIRAI
Department of Radiology, Faculty of
Medicine, Kyoto University.
(Director : Prof. MASASHI FUKUDA)

By IKUO KIMURA and
KATSUHIKO YAMADA
X-ray Technical College, Kyoto.

(Article received : December 1, 1958)

Summary

We attempted to test the applicability of the polymethyl metacrylate (Acrylite) as a body phantom for the deep radiotherapy.

We measured the attenuation curves of the Acrylite and the percentage depth dose curves in the Acrylite phantom for the X-rays of the half value layer 0.146 mm Cu, 0.26 mm Cu, 0.57 mm Cu, 0.82 mm Cu and 2.07 mm Cu.

The attenuation curves of the Acrylite for these X-ray qualities were compared with the zero field percentage depth dose data of the Quimby's table, and also the effective mass absorption coefficients of the Acrylite for various X-ray qualities were determined from the attenuation curves.

We found that the effective mass absorption coefficient of the Acrylite for the 0.1 Å X-rays was equal to that of water. On the other hand, it was found that the percentage depth dose curves in the Acrylite phantom for these X-ray qualities coincided with those in water phantom, in spite of the difference of density between the Acrylite and water.

Then we concluded that this circumstance was caused by the scattering in the Acrylite phantom.

結 論

近時合成樹脂工業の発達により各種の合成樹脂が生産

され、また市販されるに到り、医療界においてもこれらを種々の目的に利用する機会が多くなった。その利用方法の一つとして、放射線的に人体ファントムとするこ

とがある。この目的にわれわれはメタアクリル酸メチル樹脂（三菱レイヨンの商標名としてアクリライトなる名称がよく普及しているの、以下アクリライトという）をとりあげてみることにした。

アクリライトを人体ファントムとして使用する場合に問題となるのは、その適用性の程度であり等価性の程度である。さらに、具体的にはその厚さに対してどのような注意を払えばよいかということである。しかし、実際に人体と比較することは困難であるから、従来人体ファントムとして用いられてきて、かつ、X線γ線に対する性質も明らかである水と比較することにした。そして水とアクリライトの比較をもって直ちに人体との比較とみなした。人体ファントムとしての適用性を比較する際、対照となるのはこれらの物質の減弱曲線、質量吸収係数、深部百分率などであるから、われわれは深部治療範囲の線質のX線、 Co^{60} γ線についてこれらを実験により求めて、それぞれ比較検討した。

アクリライトの一般的性質として必要なものを下に示す。

化 学 式	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$
比 重	1.18~1.20 (25°C)
硬 度	20~24 (ブリネル)
吸 水 率	0.3~0.5% (25時間常温浸漬)
比 熱	0.35 Cal/°C/gr
線膨張係数	$7\sim9 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
容積固有抵抗	$10^{15}\sim 10^{19} \text{ohm-cm}$
絶 縁 耐 力	50kV/mm

実験および実験結果

〔A〕 減弱曲線

普通減弱曲線は目的を異にする二つの条件のもとで求められる。一つは broad beam condition で、他の一つは narrow beam condition である。質量吸収係数を求めるには narrow beam condition で減弱曲線を求めなければならない。このための実験装置を Fig. 1 に示す。管球窓の部を鉛の diaphragm で絞り、電離槽の位置で $3 \times 3 \text{cm}^2$ の照射野とした。

実験に使用した装置および線質は次のとおりである。

アクリライト板：厚さ 1mm, 5mm, 10mm, 20mm の四種。面積 $30 \times 30 \text{cm}^2$

測 定 器：Philips Universal dosemeter

X 線 装 置：島津製作所製信愛号 (200kVp, 25mA)

γ 線 源：島津製作所製 RT 2000 型 Co^{60} 治療装置 (503 キュリー)

Fig. 1 実験装置

Fig. 2 アクリライトの減弱曲線 (Narrow beam)

メタアクリル酸メチル樹脂(アクリライト)の人体ファントムとしての適用性について (森川他) (3)

Fig. 3 アクリライトと水の減弱曲線の比較

Fig. 4 アクリライトの深部量曲線

Fig. 5 アクリライトの深部量曲線

Fig. 6 アクリライトの深部量曲線

Fig. 7 アクリライトの深部量曲線

Fig. 8 アクリライトと水の深部量曲線 -Co⁶⁰ γ線

線 質：半価層 0.146mm Cu, 0.26mm Cu,
0.57mm Cu, 0.82mm Cu, 2.07mmCu
および Co-60 γ 線

(X線質は一応電気試験所の較正点に準じた)

選定した5種のX線質および Co⁶⁰ γ 線に対するアクリライトの減弱曲線を Fig. 2 に示す。

Fig. 3 に実験で得た半価層 2.07mmCu のアクリライト減弱曲線と水の減弱曲線とを対比して示す。ここで水の減弱曲線は実験上種々の困難があるため、Grebe-Wiebe および Quimby の深部量表に示されている $0 \times 0 \text{cm}^2$ の値を用いた。

〔B〕 深部量曲線

人体ファントム材料としてもっとも重要な資料は深部量曲線である。よってアクリライトに対する深部量曲線を求めた。

使用した実験装置および線質は〔A〕に同じ。アクリライトファントムの厚さは約 20cm とした。

表面線量は電離槽がアクリライトによって密接に包含されるように、アクリライトを電離槽の型に切削し、かつ中央で二つに割れるように加工したものの中に電離槽を半埋没し、電離槽の中心電極とファントム表面が一致するようにして測定した。(Fig. 1)照射配の大きさは Grebe-Wiebe の値と比較するのに便利のように $10 \times 10 \text{cm}^2$ に限定した。

X線に対する測定結果を Fig. 4,5,6,7 に示し、Co⁶⁰ γ 線に対する結果を Fig. 8 に示す。横軸はアクリライト中の表面より電離槽中心までの深さ、縦軸は表面線量を100%として示してある。以上のアクリライト深部量曲線を水のそれと比較するために、Grebe-Wiebe による深部曲線を相当する線質について鎖線で示した。実験に使用した線質と Grebe-Wiebe の線質とに少しく差異があるが(例えば 0.26mmCu に対して 0.25mmCu)、これらは実験誤差の範囲で一致すると考えてよい。Co⁶⁰ γ 線に対する深部量曲線は水、アクリライトいずれも実験より求めたものである。

実験結果に対する検討

〔A〕 減弱曲線について

アクリライトの減弱曲線(Fig. 2)から、深部治療用のX線質では半価層はおおよそ 2~3cm であることがわかる。また Co⁶⁰ γ 線ではアクリライトの半価層は約 7cm 程度である。

水の減弱曲線とアクリライトのそれとを比較検討するために、半価層 2.0mmCu のX線質のそれらを Fig. 3

Fig. 9

に示したが、この結果に対してわれわれは次の考察を行った。

水およびアクリライトに対する減弱曲線から得られた半価層をもとにして次式により質量吸収係数を算出した。

$$\text{実効吸収係数 } \mu_{\text{eff}} = \frac{0.693}{\text{半価層}}$$

$$\text{実効質量吸収係数} = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\text{比重}}$$

(アクリライト 1.2gr/cm³)

Fig. 9 は横軸に Cu 半価層から決定した実効波長(Å)をとり、縦軸は物質の実効質量吸収係数を目盛ってある。アクリライト以外にも Presswood (比重1.05)、ナイロンを参考のためにあげた。

Fig. 9 において、とくに水とアクリライトに注目してみると、短波長側で両者の質量吸収係数はほとんど一致していることがわかる。しかし長波長側に移行するにつれてかなりの差を生じ、実効波長 0.3Å 付近では約 7% の偏差となる。しかし 0.3Å~0.4Å という線質は治療にはあまり使用されない領域である。以上二つの観点より水とアクリライトの実効質量吸収係数は治療領域の線質では一致すると考えてよい。

以上を総合して考察すると次の結論を得る。減弱曲線より導いた実効質量吸収係数が水とアクリライトの両者で一致することは、アクリライトを使用する際密度の差のみを考慮すればよいことを意味する。すなわち、アクリライトの密度は 1.2 であるから、たとえばアクリライト 10cm と水 12cm は減弱特性に関するかぎり等価であると考えられる。ただし以上の結果は散乱を伴わない直接線のみを考えた場合である。

われわれが最も必要とするのは、吸収、散乱を伴った深部量曲線である。ファントムとしての適用性はこの測定結果に依存する。

〔B〕 深部量曲線について

(i) X線について

上述のX線質に対する深部量曲線を Fig. 4, 5, 6 に示す。またそれぞれの曲線に比較のため付記した鎖線は、ほぼ同じ線質に対して Grebe-Wiebe の表から求めた水の深部量曲線である。

それぞれ対応する深部量曲線から、若干の偏差を無視すると、水とアクリライトはほとんど一致することがわかる。相違の第一は全て中間で交叉していること、第二は表面付近での偏差である。この後者に関しては次のごとく解釈される。先述のごとく表面付近の線量測定は非常な困難を伴ない、測定方法によって種々の差違ある結果が得られる。こころみに、Quimby による深部量曲線をみると、明らかに Grebe-Wiebe の表のごとき表面付近における曲線の立ち上がりはみられない。またわれわれの測定結果と Quimby の深部量曲線を比較すると、表面付近においてもよく一致することが認められた。しかし、Quimby の深部量曲線と比較せずに Grebe-Wiebe のそれと比較したのは、Quimby の資料には測定点(線質の数)が少いためにわれわれの測定線質に対応する線質が見当らなかったからである。

次に、前者の曲線が交叉するということは、実験方法の相違あるいは測定誤差に原因するものと考えてよい。たとえば、Grebe-Wiebe と Quimby の深部量曲線を比較するとこの程度の差異が存在する。このことから考えてこの程度の差異は測定器の種類あるいは測定方法などによって惹起されるべきものであると考えられる。かくしてわれわれはX線に関しての深部量曲線は実験誤差の範囲内で Grebe-Wiebe のそれと一致すると結論した。

減弱曲線および深部量曲線に関する結果から次のように考察した。

深部量曲線に関する限りは水とアクリライトが一致するから、水とアクリライトは等しい厚さでファントムとして使用すればよく、両者は同等とみなされる。一方減弱曲線およびそれから求めた実効質量吸収係数からみると、アクリライトと水の密度の差を考慮する必要がある。減弱曲線の場合、被照射体散乱の影響はないから、このような差異を生ずるのは被照射体散乱現象にあると考えられ、X線の散乱に関しては実験に使用した治療線質領域においてはコンプトン散乱が dominant である。コンプトン散乱は物質中の電子密度(電子数/cm³)にのみ

依存して物質の原子番号には無関係である。今アクリライトと水との電子密度を比較すると水よりもアクリライトの方が大きい(水: $3.34 \times 10^{23}/\text{cm}^3$, アクリライト: $3.9 \times 10^{23}/\text{cm}^3$)。したがってコンプトン散乱に関するかぎり水よりもアクリライトの方が大きいと解釈できる。また実効原子番号は水の 7.42 に対してアクリライトは 6.5 で小さい。しかし、上述のごとく実験に使用した線質範囲ではコンプトン効果に比して光電効果は無視できるほど小さいから、1cm あたりの減弱はアクリライトの方が水より約 $3.9/3.34$ 倍大きいと考えられる。しかし質量吸収係数は $3.9/3.34 \times 1/1.2 \approx 1$ となりほとんど等しくなる。一方深部量曲線については、1cm 当りの減弱はアクリライトの方が小さいが、電子密度に比例すると考えられる散乱付加が加算されて水の深部量曲線とほとんど一致するものと思われる。以上のごとく減弱曲線では密度の考慮を必要とし、深部量曲線では密度に関せず両者等価となる。そしてこの後者はアクリライトと水の電子密度の差によるものと解釈される。

(ii) Co⁶⁰ γ線について

Co⁶⁰ γ線の水とアクリライトの深部量曲線を Fig. 8 に示す。両者ともに実験値である。X線の場合と異なり、この両曲線は明らかに分離しており、かつ深さを増すとともにその差が大きくなっている。今かりにアクリライトの値に定数 1.1 を乗ずると二曲線は一致する。このことは Co⁶⁰ γ線を使用する場合には、アクリライトの厚さに 1.1 の定数を乗じた厚さが水の厚さに相当することを意味する。これは Co⁶⁰ の線質ではコンプトン散乱の起り方が少し減少するために、散乱が全くない減弱曲線の地合の密度比を示す 1.2 なる定数と、散乱が強く影響して密度比を打消す場合の治療領域のX線質の定数 1.0 との中間の値をとるようになると考えられる。

結 論

われわれはアクリライトの人体ファントムとしての適用性を検討するための実験から次のごとき結論を得た。

1) 治療領域のX線質に対してはアクリライトと水は同等とみなして使用することができる。

2) Co⁶⁰ γ線に対してはアクリライトの厚さに 1.1 を乗じたものが水の厚さに相当するとして使用できる。

以上のごとく線質によって深部量曲線に差を生ずるのは被照射体散乱現象にその理由を求めることができる。なぜなら減弱特性(散乱がない状態)についてはX線では密度比である 1.2 なる定数を乗ずる必要性を生じたにもかかわらず、深部量曲線では 1.2 の密度比を考慮しな

くてよいからである。また、X線と Co^{60} γ 線において定数の値が異なるのは、コンプトン散乱の起り方がこの両者で差のあるためと推定される。

アクリライトの Co^{60} γ -線についての減弱特性については近く別に報告の予定である。

謝 辞

この実験について適切な御指導と御検討をいただいた当教室主任福田教授、県立尼崎病院長沼博士に深く感謝いたします。また、種々御協力いただいた当教室仲川技術主任、県立尼崎病院中松技師その他の方々、および資料の御提供をいただいた三菱レイヨン株式会社には心から御礼申し上げます。

文 献

- 1) 三菱レイヨン技術ニュース, 第12報 (), 「アクリライトの耐溶剤性」.
- 2) 三菱レイヨン株式会社「アクリライト」.
- 3) L. A. Wall, and D. W. Brown : γ -irradiation of polymethyl, methacrylate and Polystyrene. Journal of physical chemistry. Vol., 61. No. 2 (1957).
- 4) Leonhard Grebe und Werner Wiebe : Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen (1950). Urban & Schwarzenberg/Berlin und München.
- 5) Gerald J. Hine & Gordon L. Brownell : Radiation Dosimetry (1956). Academic Press Inc. N. Y.
- 6) Otto Glasser et al : Physical Foundations of Radiology. Second Edition. Paul B. Hoeber Inc. (1957).

Fujicon 2FE2

自由傾斜透視台型

蓄電器放電式X線装置

放電撮影 80 K.V. 1000 mA 1/30 秒
透視 80 K.V. 3mA 連続

富士レントゲン工業株式会社

本社 東京都文京区喜木町二丁目三番 工場 東京都文京区喜木町二丁目
電話 小5川(92) 1561・5362・6814・7578