

X線の線質の絶対計測法とその治療への応用

Ein absolutes Maß für die Qualität der Röntgenstrahlen und dessen Verwendung in der Therapie

Christen T. Verhand Deutsch Röntgengesellschaft 8:119-124,1912

メートル計測法は、なぜ他のすべての計測法に勝利したのだろうか？ 単に10進法だからではない。それを言えば、フランス式フィートもフランスのトワーズ [1] も10, 100で分割されていた。成功の鍵は、それが従前のように恣意的な長さではなく、地球の子午線の1/10,000,000の長さで定義されたからである [2]。

他の領域でも、便宜的な単位が絶対的なものに置換されている。その場合、単に相対的な値から絶対的な値が得られるようになっただけでなく、従前の単位が本当に計測対象に応じたものであったのかという点も考慮せざるを得なくなる。パルス波の機械的エネルギーの研究で絶対計測法を確立したところ、以前の相対的な値は相対的な計測にすらなっていなかったことが明らかとなったことが思い起こされることである。

X線の質を評価するにあたっては、絶対計測法の導入は利点が多い。1つの硬度尺度から他の尺度への変換が不便を解消するだけでなく、ここで提案する絶対的な計測法は表面効果、深部効果に関する明確な情報を提供しうるからである。

さらにこの新しい計測法を使えば、深部放射線治療において正確な線量を計測することができ、照射領域の厚さを正確に推定しうる

まず初めは、不均一な放射線は扱わないことにする。これは1つの計測値で表わすことができず、少なくとも3つの値が必要となり [3]、場合によっては数百、数千にもなりうるからである。また最も柔らかいX線はガラスで阻止しうるということが分かっているが、唯一の例外はLindemann管球である [4]。従って以下の議論ではこれを除外する。Lindemann管球は、特に深部放射線治療ではあまり使用されない。

従前の計測方法は均一な放射線を前提としているが、実際に不均一な放射線は、意図的にせよ偶然にせよ、無限個数の放射線の混合物であり、全ての段階の硬度が含まれていることをあらためて強調しておく。

1. 訳注。フランス革命以前の度量衡のひとつ。フランス式フィート (Paris foot, pied) = 32.48cm。トワーズ Toise = 6 pied = 1.949m

2. 訳注。1983年に、光速を基準とする定義に変更された。

3. 2つの吸収係数および1つの混合率。

4. 訳注：Lindemann管球。ホウ酸リチウム-酸化バリウムを成分とするリンデマンガラス (Lindemann glass) は、大きな原子番号の物質を含まないため、非常に波長の長いX線も通過する。現在でもX線分析の試料容器として利用されている。

これまでの硬度計測は何に基づくものであったであろうか？ これは、さまざまな硬度の放射線に対してほぼ同程度の吸収能をもつ銀を使い、一定の厚さの銀箔の吸収能を、異なる厚さの他の金属 (通常はアルミニウム) の吸収能と比較する方法であった。銘記すべきは、全く恣意的に選ばれた厚さに対して、特定の数字が割りられ、この数字に基づいて硬度が指定されていることである。

また試験物質については、その放射線を「そのまま通過させる」ものを選択するが、この表現には誤りがある。吸収は指数関数的で、曲線の縦軸は決してゼロにはならない。下限値をゼロではなく「検知しうる最小値」とすると、そのような値は線質のみならず強度にも依存するため誤りが混入する。

均一な放射線を扱う場合、線質を絶対的に計測できる、すなわち吸収係数が求められることは、物理学者にとっては自明である。この値は、理論に基づいて非常に簡単に求めることができる性質のものである。しかしこれは、物理学の非専門家にとっては、直観的なものではないという欠点がある。さらにX線治療にたずさわる医師の多くは、線質の尺度として吸収係数を使用するほど物理数学の知識を持ち合わせていないということも考慮しなくてはならない。事実著者の知る限り、医師は一般に吸収係数の cm^{-1} という単位については馴染みがない。

そこで著者は、半価層 (Halbwertschicht) の概念を導入した。その意味するところは簡単に記述できる。すなわち、吸収層が厚いほど吸収によるX線の減弱が大きいということである。いかなる放射線に対しても、入射光線が吸収されて半減するような吸収層の厚さを選択することができる。

つまりある放射線の半価層は cm で表わされ、吸収によって放射線の強度が半分になる厚さである。吸収係数 h と、半価層 a の間には、下記のような簡単な関係があり、

$$h a = \ln 2$$

概値としては、

$$a = 7/10 h$$

ここで、それぞれの放射線について実際的にこれを求める方法が当然必要である。まず、このために最適な物質は何かという問題がある。考え得るのは唯一、蒸

留水である。これは、物理学の他の分野で単位の測定に利用されているということだけでなく、体組織の吸収能が蒸留水とほとんど同じで、せいぜい体組織間の差異程度しか変わらないという理由である。

そこでまず、放射線の蒸留水における半価層を決定する方法を見いだす必要がある。これは放射線の半分を阻止、半分を通過させるような第2の比較用物質を用意すれば容易である。残念ながら一般にこのような目的に最も確実な、刻みをいれた回転円板は利用できない。X線は不連続なため、このような円板に照射すると著しい干渉像が発生し、他の部位と比較できるような均一な輝度面が得られないからである。

そこで他の方法を求める必要に迫られたが、著者は微小孔のあいた不透過性物質を使うに到った。この微小孔は、いずれも同じ直径で、表面に規則的に分布しており、小孔の合計面積が総面積のちょうど半分になるようなものとする。そして、目で見ても小孔の形が見えず均一な輝度面として見えるような透視板から離れた位置におけばよい。

最後に、技術的な理由から、蒸留水を同等の吸収能をもつ固体で代替する必要があった。これについては、Reiniger, Gebbert & Schall社の御厚意で数々の物質を試験することができた。我々の目的に最適なベークライトを示唆された同社の技術者に謝意を表するものである。Perthesの方法によれば、ベークライトと水の吸収能の同等性を試験する最適な方法は、ベークライトを水に浸し、写真乾板をその上に載せて全体を照射することである。写真には、ベークライトの輪郭は全く写らないか、写ってもほとんど認識できない程度であった。吸収能に差異があれば、ベークライトの輪郭が明瞭な陰影あるいは透亮として見えるはずである。

以上のことから、絶対硬度計測器を作ることができる。ベークライト階段を作って、これを透視板の裏に取付けた。そして比較領域として、前述の微小孔のあいた板を前置した。この比較領域は常に、いかなる硬度についても入射光線の半分の強度を示す。従って、2つの領域が等輝度になるようにベークライト階段を動かし、前置した光源側にあるベークライト板の厚さを読むだけでよい。当該のベークライト階段が入射光線を半減し、その厚さがベークライトの半価層であり、蒸留水の半価層でもあると言える。

ついでに、完全に不透過性で、術者を放射線から防護すると同時に、昼光を型のごとく減光して明室でもこの装置を使えるようにできるプレートを追加した。

この装置により、放射線の半価層を透視板上で直読することができ、絶対的な線質を理論的のみならず実際的に計測することができる。

医師の多くは、吸収係数が例えば 0.7cm^{-1} といっても

その重要性を思い描けないが、半価層が1cmであると言えば誰もが直ちにこれを理解できる。そしてその放射線の透過性が非常に高く、厚さ1cmの水あるいは軟部組織で強度が半分に減ずることを知ることができ、即座に具体的なイメージを持つことができる。

しかし、それだけにとどまらない。半価層を使えば、体表のみならず深部についても正確な線量を計測できるのである。少なくとも、照射したい組織の深さに狙いを定めることができる。著者はこれまでさまざまな発表を通じて、軟部組織の深度に応じて、それぞれ最大限の効果をもたらすような線質が存在することを述べてきた。

X線が軟らかいと、深部に十分なX線が到達せず、皮膚を照射することになる。逆に硬い場合は、深部に十分量が達するが、今度は硬いために組織に十分吸収されない。照射効果は、入射エネルギー量ではなく吸収エネルギー量に依存するので、後者の場合もやはり生理学的効果は不十分となる。

この関係は、次の図を見ると良くわかる。

w は軟部組織層の厚さである。さまざまな硬度について、それぞれ吸収曲線が描かれている。異なる放射線について、入射線量は等しく I_0 とする。放射線が半価層を通過すると、その強度は $I = I_0/2$ に減ずる。最も軟らかいX線の半価層は $a = w/4$ 、すなわち軟部組織の厚さの1/4で最初の強度の半分になる。もちろん、このとき皮膚効果は最も強い。これは左上の垂直線で確認できる。この線は、組織厚の最初の1/10を通過後、どの程度の光線が吸収されるかを示すものである。

既に軟部組織の近位端で放射線強度が非常に低くなっているため、小さな三角形の高さで示されるこれ以上の減弱量はもうほとんどない。

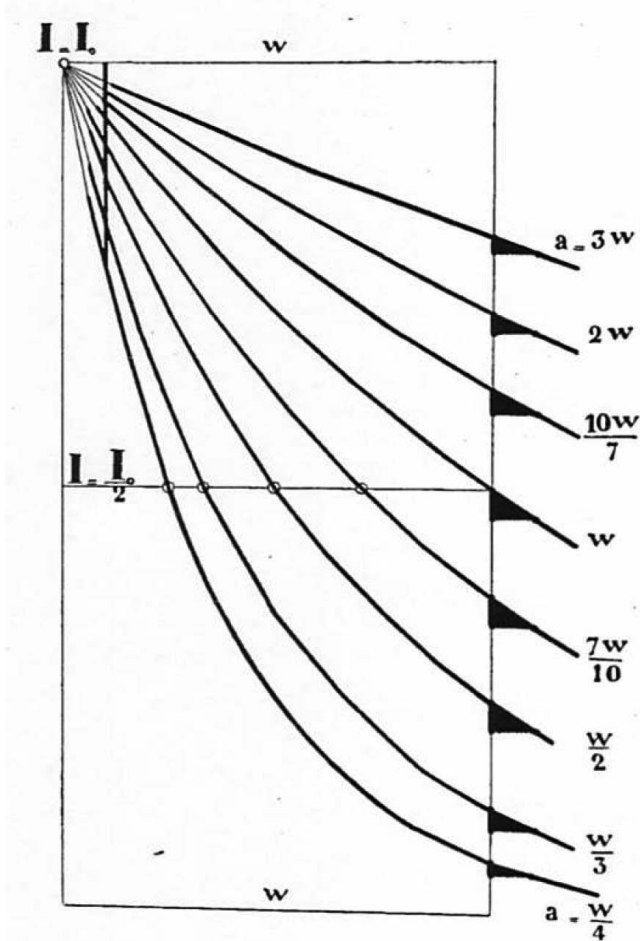
三角形の底辺は、 $w/10$ としてある。従って三角形の高さは、組織の1/10厚で吸収されるX線エネルギー量を表わす。この $w/10$ は任意に選んだ値で、概念の説明に使うため、以下のように $w/20$, $w/30$ を選んでも同様である。

硬度が $a=w/3$, $a=w/2$ では、三角形の高さは漸増し、 $a = 7w/10$ で最大となる。

これに続く硬度、 $a=w$, $a=10w/7$, $a=2w$, $a=3w$ では、深部で吸収される放射線量を表す三角形の高さは、再び漸減する。

この図から、既に純粋に数学的にも証明したように、半価層が組織の7/10の時にその深さでの効果が常に最大となることが分かる。ここでは幾何学的にこれを証明できた。

しかしここで、実用上もう一段階簡単なものとした。図から次のようことがわかる。 $a=7w/10$ と $a=w$ で



は、三角形の高さはほとんど同じで、すなわち深さでの効果に有意の差がない。従って、 $a=7w/10$ を $a=w$ に代えても、その深さにおける効果が目に見えて損なわれることはない。こうすることには、3つの利点がある。第1に、図の左上から分かるように、 $a=w$ の場合、 $a=7w/10$ に比べて皮膚効果がかなり小さい。第2に、計算が必要な $a=7w/10$ よりも $a=w$ の方が実用的に簡単である。そして第3に、 $a=w$ の場合、(常に考慮すべき散乱線を除けば) 深部線量は表面線量のちょうど半分であるが、 $a=7w/10$ の場合は $3/8$ となり簡単とは言えない。

前述の内容に関する物理数学的な根拠に関心のある読者のために、対象となる数値の関連、すなわち硬度あるいは半価層が線量に及ぼす影響について簡単に述べる。

「線量」は、吸収される X 線エネルギーを体積で除したものと定義する。この時、以下の結論が導かれる。

X 線エネルギー E が、時間 T に小表面 F を照射し、深さ x に達する場合、

線量は体積 $dV = F \cdot dx$ における減弱量に一致する。

$$-\frac{dE}{dV} = -\frac{dE}{F \cdot dx}$$

前述のように強度 I 、吸収係数 h とすると、強度 I は

$$I = \frac{E}{F \cdot T}$$

ここで

$$\frac{dE}{dx} = F \cdot T \cdot \frac{dI}{dx}$$

均一な放射線については

$$I = I_0 \cdot e^{-h \cdot x}$$

従って

$$\frac{dI}{dx} = -I_0 \cdot h \cdot e^{-h \cdot x} = -I \cdot h$$

ここで

$$-\frac{dE}{dx} = h \cdot I \cdot F \cdot T$$

および

$$D = h \cdot I \cdot T$$

吸収係数 h と半価層 a の既知の関係を使えば、

$$D = \frac{7 \cdot I \cdot T}{10 \cdot a}$$

これから、線量は強度 I 、照射時間 T に依存するのみならず、半価層に逆比例することがわかる。これは、通常の計測装置を使うと、硬い X 線による線量不足、軟らかい X 線による線量過多となることの説明となる。これらの式から得られる更なる結果については、拙稿^{*}を参照されたい。

深部放射線治療の簡単なルールは、表在軟部組織の厚さと同じ半価層の線質を選択すると、皮膚の保護、深部治療効果ともに最大となる、というものである。この時、(散乱線を考慮しなければ) 深部線量表面線量の半分となる。

これにより、放射線治療医は常に最適な深部治療効果を保証する線質を選べることになる。同時に、深部線量の大きさ、すなわち皮膚線量の半量を知ることでもできる。

最後にひとつ加えるが、前述の内容ならびに人体の条件から、すべての深部組織でこのような条件を満たすためには非常に硬い X 線が必要となり、これはアルミニウムフィルターなしには得られず、多くの X 線を浪費して、管球の破損も懸念されるものである。

大きな硬度は、もちろん現状のすべての計測器の測定範囲外である。従って、実際の生理学的線量はこれらの計測器の示度よりもずっと小さいものとなる。残念ながら、この非常に興味深い問題についてこれ以上言及するだけの十分な定量的な関係が分かっていない。Sabouraud 方式の硬線では線量が不足することが分かっているが、どの程度まで Sabouraud 線量を増やせば十分な線量にできるか不明である。逆に Sabouraud 方式の軟線は過線量となるが、正常線量とするために

^{*} Einige Anwendungen der Absorptionsgesetze auf die Röntgen-therapie (X 線治療における吸収則のいくつかの応用について). Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen. Band XVI.

ほどの程度の割合を使用したら良いのか不明である。ここが今後の研究の起点であり、直接線量計測が基本であり、それを放射線治療に導入することによって硬度によらず信頼性の高い線量設定が可能になるであろうという自分の予測が証明されることを確信している。

このような定量的な試験を行ない、多くの臨床例で確認する前に、(非常に軟らかいX線については当面置いて)非常に硬いX線の深部線量については皮膚線量と同じく、一方が他方の半分であるということは分かっているものの、なお不明の点が多い。しかし、更なる目標である直接線量計測が達成できれば、いかなる硬度に対しても半価層によって皮膚線量のみならず深部線量を知ることができるようになるであろう。

要約

1. X線の線質計測法としての半価層は、従前の方法に比較して、絶対値の測定であり、その意味が万人に理解しやすく、放射線透過性の具体的なイメージを与えることができる点で優れている。
2. 前述の絶対硬度計によって、いかなるX線の半価層も適切に直接測定できる。
3. 深部治療効果については、その表面にある軟部組織の厚さに等しい半価層のX線を使用する場合に、最適な条件が得られる。
4. この場合、深部線量は(散乱線を除けば)表面線量の半分となる。
5. 信頼性の高い線量を表面、深部に照射するには、既知の試験物質はいずれも精度が一定の範囲の硬度内に限られていることから、直接線量測定が推奨される。