

放射線治療における組織透過性の意義を考慮した X線の人体組織透過性測定を試み

Versuch einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotheapie

Perthes G. Fortschr Geb Röntgenstr 8:12-25,1904/1905

皮膚を透過したX線が、深部においても皮膚と同じような作用、例えば病理学的効果を及ぼしうるかという点は、言うまでもなく重要な問題である。特に興味深い点は、比較的短時間のX線照射が、皮膚癌と同じように深部の癌の治療に適用できるかという点である。この問題は未だ肯定、否定、いずれの結論も得られていない。しかし、Albers-Schönberg[1-1]は、X線が皮膚表面に大きな障害を与えることなく精巢の胚細胞に特定の効果を発揮することを示しており、またHeincke[1-2]も脾、リンパ節のリンパ組織に特定の効果を報告しており、著者自身[1-3]も口唇癌のリンパ節転移を皮膚を通して照射して消失させることができたことから、X線の生理学的効果は皮膚によって消失しないと思われる。この効果がどの程度の深度まで達するかという点については、人体における臨床的な観察による必要がある。そこで確実な臨床的、実験病理学的研究の補助として、深部組織へのX線の効果を検討した。組織に対する効果に影響する最も重要な因子はX線強度であり、人体組織に照射する時、深度によってX線強度がどのように変化するかが問題である。X線強度が、任意単位で1/2あるいは1/3になる深度はどこか？以下の研究は、この問題の答を求めるものである。

体内を通過するX線強度の減弱は、2つの因子によって変化する。すなわち、(1)線源からの距離、(2)通過組織による吸収である。

1. 距離の増加に伴う組織内X線強度の減弱

まず第1の因子について考える。X線も、光線の強度は線源からの距離、すなわち放射線を放出するX線管の対陰極からの距離の2乗に反比例して減弱するという法則に従う。対陰極からの距離10cmにおける強度が、任意単位で100単位として、5cmずつ距離を離れて行くときの強度を測定すると、図1の曲線のように減少する。

管球に近い部位での強度減少は、距離が遠い場合に比較して急速であることがわかる。例えば、被写体を対陰極から15cmの位置に置くとき、組織深度5cmでは、組織による吸収とは別に単に距離が遠くなるだけで強度が44.44から25に減少する(表1)。つまり組織が全く無吸収だとしても、入射光線は $44.44/25 = 56.55\%$ となる。一方、被写体が95cmの位置にある時

は、強度は1.108から1.0、すなわち皮膚面と比べて90.25%にしか減弱しない。対陰極からの距離による強度の減弱は、線源と被写体の距離が近いほど大きなものとなる。線源と被写体の距離を大きくすると、この曲線に示すように強度自体は大きく減ずるが、体内の強度の減少はより緩徐になるため、深度沿って比較的均一に分布する。

このような関係は、X線よりもラジウム線の場合により重要となる。ラジウムカプセルを皮膚面に直接置く場合、距離1mmとくらべて、距離5cm = 50mmでは $1/50^2 = 1/2,500$ 、1cmでは1/100しか効果がない。このことから、距離による強度減弱のため、ラジウムを皮膚に直接置くと十分な深部効果が得られないこと

図1. 対陰極からの距離とX線強度(%)の関係

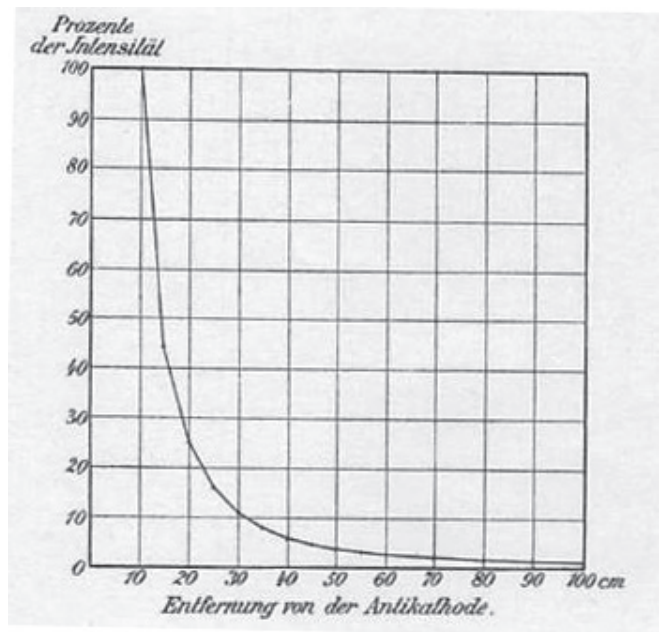


表1

距離(cm)	強度	距離(cm)	強度
10	100.00	60	2.78
15	44.44	65	2.37
20	25.00	70	2.04
25	16.00	75	1.78
30	11.11	80	1.56
35	8.16	85	1.39
40	6.25	90	1.24
45	4.82	95	1.11
50	4.00	100	1.00
55	3.31		

が分かる。深度 1cm における強度が弱く全く効果がない場合も、あるいは深度 1cm で十分効果が現われるまでラジウムを長時間留置する場合も、いずれにせよ線源から 1mm の位置の位置では 100 倍の作用があり、病変組織への作用が正常組織への作用よりも 100 倍強いという前提がない限り、皮膚は完全に破壊されることになる。

2. 透過性に関する先行研究

体内の X 線強度に影響する第 2 の重要な因子は、組織による吸収である。レントゲンによる発見以来、X 線の吸収については多くの物理学的研究が行なわれている [2-1]。しかしこれらはほとんどが問題の物理学的側面に関するもので、その重要な結果として、吸収は被写体の厚さによって増加すること、化学組成の異なる同じ大きさの物質を比較すると、原子量が大きいほど X 線吸収が大きいこと、吸収は原子の配列とは無関係で個々の化合物の吸収の和によることが示されている。人体組織の X 線吸収については、眼球についての研究が少数あるのみである。Darier & Rochas[2-2] は、X 線の屈折体は X 線透過性が非常に小さいことを示した。Salvioni[2-3] は、ヒトの眼球全体は 1mm 厚のガラスと同程度の X 線吸収を示し、レンズは角膜よりずっと透過性が低いことを示した。Brandes & Dorn[2-4] は、ブタの眼球は 1.5mm 厚アルミニウムと同程度の吸収を示し、レンズと他の部分では基本的に同じであるとしている。Chalupecky[2-5] は、眼球による X 線吸収は、角膜、レンズ、硝子体ではより軽度であるとしている。この他にも、眼球による X 線吸収に関する研究が Darier[2-6]、Antonelli[2-7]、Batteli[2-8] らにより行なわれているが、残念ながらこの 3 件については引用しか見ることができず、眼球の透過性に関する意義は不明である。眼球以外の人体組織に関する系統的な研究は見当たらないことから、自ら研究することは意義あることと思われた。

3. 異なる条件下での透過性

まず、X 線の組織透過性は、異なる色の通常光線透過性の測定の場合と同じように、常に同じ値になるとは限らないことを知る必要がある。

レントゲンはその第 1 報 [3-1] で、物体の透過性を「物体の背後に光線と垂直に置いた蛍光板の輝度と、他の条件は同じにして物体を置かない場合の蛍光板の輝度の比」とした。しかし蛍光作用は、X 線の唯一の効果ではない。さらに、強度の計測については、写真乾板への光化学的影響、空気の導電性の変化、ヒトや動物など生体組織への影響も考慮する必要がある。しかしこれら 4 つの効果は互いに比例するものなのか、蛍光板の輝度を 2 倍にする X 線強度が、写真乾板の銀沈着も 2 倍にするのか、ヒトの皮膚の反応も 2 倍になるの

かという点は疑問である。Röntgen 自身も、異なる管球では蛍光の励起と写真乾板の化学反応が平行しないと述べており [3-2]、同様に他の効果についても X 線強度の尺度としてただちに利用できるものでないことは明らかである。X 線強度を X 線透視、X 線撮影、電気的方法などで計測する場合、その結果は一定の条件下に限れば、生理学的効果として利用しうる。総じて、蛍光板の輝度に基づく X 線強度の測定値は、ある程度生理学的効果の予測に役立つといえる。人体組織の X 線透過性は、すべての X 線が同じ透過性を持つとすれば容易に推定できる。しかし、X 線管によって X 線透過性が異なること、線質は主に X 線管の電流に対する抵抗によって決まり、これが管球のガス濃度によって変動することは良く知られている。X 線管の透過性は、Walter 光度計で容易に知ることができる。表 2 で、硬度 (第 1 列) は、X 線が通過する一定の白金層の厚さ (第 2 列) に対応している。10 本の異なる構造の X 線管球を測定した結果 [3-3]、硬度が並列に接続した管球のスパーク長に関連することが第 3 列からわかる。これから、硬度 7 の管球から出る X 線は、硬度 2 の X 線に比べて厚さ 32 倍の白金層を通過し、第 1 の管球の「透過性」は第 2 の管球よりはるかに高いといえる。従って特定の物質について絶対的な透過性を表す数値は存在せず、それぞれの X 線管球について記述する必要がある。

さらに、X 線管からある時点で放出されている放射線は、「均一」ではないことに注意が必要である。

実際には、Röntgen も述べているように [4-1]、異なる吸収性、強度の混合線であり、その組成は放電電流の経時的変化に依存する。人体に吸収されやすい光線は、人体によっても異なる。この結果、X 線が吸収されると放射線の組成が変化する。X 線は表層でまず吸収されるので、残りの光線の平均透過力は増強している。このため、第 1 層で求めた吸収係数は、必ずしも第 2 層には当てはまらず、任意の深度についても同様である。従って各層について経験的に強度を求める必要がある。最後に、X 線が通過する組織は、X 線を吸収するだけでなく X 線、いわゆる二次線を発生する。

表 2

管球硬度 (Walter スケール)	白金層の厚さ(mm)	相当スパーク 間隙長(cm)
1	0.005	-
2	0.01	3 - 4
3	0.02	-
4	0.04	8
5	0.08	9
6	0.16	13 - 14
7	0.32	20 - 24
8	0.64	-

このX線生成によって、組織による吸収がある程度相殺される。これがX線吸収計測の誤差要因となることは明らかである。しかし我々の目的に重要なことは、X線が直接線束に由来するか二次的なものかに関わらず、組織の異なる深度におけるX線強度を知ることであり、この誤差は無視しうる。

4. 人体組織の透過性と水およびアルミニウムの比較

我々は、人体組織の透過性を、(1) 透過性が既知あるいは容易に計測できる組織との比較、および(2) 異なる深度におけるX線強度の直接測定により求めた。

第1の方法については、まず管球の硬度を考慮する必要がある。管球の硬度が上昇すると、X線透過性は体の部位によって透過性は一様に上昇しないからである。例えば、次頁に示すような紙製の透視容器を、厚さ2cmの水層とアルミニウムの上に置き、軟らかい管球で照射してアルミニウム陰影が水と同じ暗さになるようにしてから、次いで硬い管球で照射すると、全体が強度が低下するだけでなく、アルミニウムの部分の陰影は水の部分に比してはるかに明るくなる。比較するには、水は特に好適な物質である。透過性が水よりも小さい物質を水中に置いて蛍光板で見ると、暗い陰影となるが、透過性が水より大きい場合は暗い背景に明るく見える。透過性が等しい場合は、全く見えなくなる。

透視には、側面と底面にパラフィン含浸紙で作った箱を使用し、側面から、あるいは底面から上面に向けてX線を照射した。紙はX線をほとんど吸収しないため無視しうる。このような紙の箱に水を満たし、その上に手をかざして下から照射すると、もちろん水の陰影を背景として手の陰影が蛍光板に明瞭に見える。しかし手を水の中に浸すと、手の軟部の陰影は完全に消失し、骨のみが見え、関節腔が鮮明に輪郭される。このことから、手の軟部は水とほぼ同じ透過性を有することがわかる。

この原理により、様々な組織の透過性を透視および撮影によって蒸留水と比較した(表3)。2cm厚の脾、肝、腎、筋肉を水に浸した、壁の間隔2cmの容器に入れ、上下方向あるいは側方向の透視で試験した。水に浸すことにより、以下の組織はいずれも全く見えなくなった:舌筋、三角筋、心臓、肝、脾、腎、凝血、牛の眼球、硝子体、レンズ、大動脈壁、皮下脂肪織、脳。組織を水中から引き揚げて水面上に保ち、下から照射すると非常に明瞭な陰影が現われ、水中に浸すと陰影は直ちに消失する。ここでは、硬い管球、軟らかい管球、いずれを使用しても違いはない。肺、乳房皮下脂肪、大網、皮下組織のみが、明るい陰影として認められた。

中等度ないし硬い管球を使用して、水中の組織を非常に短時間の曝射で撮影する実験でも同様の結果であつ

た。脂肪織と肺を除き、水中ですべての組織は写真乾板に陰影を示さなかった。これに対して、肺、脂肪織は水よりも黒くなる。スパーク間隙2~3cm相当の非常に軟らかい管球で、非常に短時間(5~10秒)で撮影すると、水中に浸した脾、肝、腎、弾性組織(大動脈)、ウシあるいはブタの眼球、筋肉、凝血は、水よりもわずかに不透過性であった。この実験では、上皮、脳はわずかに識別できた。この実験の不首尾から、X線により脳膿瘍を描出できることはほとんど期待できない。

表3

	厚さ (cm)	アルミニウム等価層 (mm)	使用管球の性状と並列接続スパーク間隙長	水による実験	
				厚さ (cm)	アルミニウム等価層 (mm)
I. 血液					
血清	1	0.7	軟, 3.5cm	1	0.7
フィブリン除去血液	"	0.7	中, 9cm	"	0.6
	2	1.4	軟, 3.5cm	2	1.4
血清	"	1.7	軟, 4cm	"	1.6
フィブリン除去血液	"	1.8-2.0	硬, 18cm	"	1.8
血清	3	2.6	軟, 3.5cm	3	2.4
	"	2.6	軟, 4cm	-	-
	"	2.8	中, 8cm	"	2.6
フィブリン除去血液	"	2.8-3.0	硬, 18cm	-	-
	4	5.2	中, 9cm	4	4.6
	5	6.2	中, 9cm	5	5.6
II. 筋肉	1	0.7	軟, 6.5cm	-	-
	"	0.8-0.9	硬, 16cm	-	-
	1.7*	1.8	中, 10cm	-	-
	1.8*	1.9	硬, 20cm	-	-
	2	1.5	軟, 6.5cm	-	-
	3	3.0	軟, 6.5cm	-	-
	"	3.6	硬, 16cm	-	-
III. 肝	2	1.8	軟, 6.5cm	-	-
	"	2.0	硬, 16cm	-	-
	2.4*	2.6	中, 10cm	-	-
	2.4*	3.2	硬, 20cm	-	-
	3	3.0	軟, 6.5cm	-	-
	"	4.0	硬, 16cm	-	-
	4.5	5.0	中, 12cm	-	-
IV. 脾	1.9*	1.9	中, 10cm	-	-
	2	2.3	硬, 20cm	-	-
V. 脳	1.8*	1.8	中, 12cm	-	-
	2	1.6	軟, 6.5cm	-	-
	"	2.4	硬, 20cm	-	-
VI. 皮膚, 皮下組織	1*	0.7	中, 10cm	-	-
	"	1.0	中, 12cm	-	-
	"	0.8	硬, 20cm	-	-
(上記の二重層)	2*	1.5	硬, 20cm	-	-
(皮膚, 皮下組織, 筋肉)	2.6*	2.6	硬, 20cm	-	-

*を付したものは、組織をできるだけ薄く切り、容器にいれずにアルミニウムに載せて照射した。それ以外は、紙製容器に組織を充填して照射した。

水よりも軽い組織(肺, 脂肪織)を除いて, 全ての人体軟部組織は, X線透過性に関して蒸留水に著しく近似していることがわかる。非常に軟らかい管球の実験では, 肺と脂肪織のみ透過性で, その他はわずかに不透過性であった。水中のX線透視で見えない軟部組織の透過性がいかに接近しているかについては, 以下の実験で知ることができる。20mm厚の水層の上に2mm厚の氷の板を置いて下から照射すると, 蛍光板上に氷の陰影を識別できるが, 氷を水中に浸すとももちろん陰影は消失する。2mm厚(訳注: 原文は20mmとなっているが, 正しくは2mmと思われる)の筋肉は深さ20mmの水中で見えないことから, その透過性は22/20よりも水に近いこと, 筋肉の透過性は水と1/10しか変わらないことがわかる。

水との比較実験の追加として, アルミニウムによる比較実験を行なった。これは, 組織の隣に0.2mm厚の多数のアルミニウム板を, アルミニウムの陰影が組織の陰影と同じになるまで重ねてゆく方法である。

表中の個々の測定値を得るには, 正確に平板状の組織を切り出す困難を克服する必要があった。厚さ1mmの誤差は避けられなかった。従って, 血液の透過性の測定には特に真鍮製の容器を使用した[6-1]。両側壁はパラフィン含浸紙で, 距離1, 2, 3, 4, 5cmとした。この容器に血液あるいは組織で充填することにより, 厚さを正確に決定できる。アルミニウムの試験片が正確に水面に一致して置けるような側方に張り出した金属容器に設け, 適当なアルミニウム層を選んで蛍光板の陰影が完全に均一になるようにした。

表3の結果から, 同じ組織, 同じ厚さの計測でも, かなり結果が異なることが分かる。大きな値は一貫して硬い管球で得られている。この差は, 計測誤差によるものではなく, 管球の特性によるものである。

様々な組織も, 互いに, あるいは水と比較して, 異なる値を示している。しかしこの差は, 同じ組織における異なる管球による差よりも小さい。従って, このデータから個々の臓器に特異的な値が得られるとは考えられず, 以前の実験で表中の組織の水の値と一致することが分かっているアルミニウムと比較して, 全般的な結果が得られるのみであると考えられる。

5. 透過性の直接測定

放射線治療では, 組織と他の物質との比較よりも, X線が一定の深度で吸収によりどの程度減弱するかという問題, すなわち透過性の直接測定が重要である。

この問題の解決には, 例えば McClund & McIntosh の[7-1] 報告のように, 電気計測法が好適である。X線は空気に導電性を付与する。従って, それぞれ正負に荷電した2枚の電極間をX線が通過すると, 電極間に電流を生じ, その強さは空気に導電性を付与したX線に

依存し, これにより放射線強度を測定できる。しかし我々の目的には, Röntgen 自身も様々な物質のX線透過性を知るために使用した検電鏡法が適していると考えられる。

Röntgen が使用した装置は, Bouguer 測光計で, Röntgen は次のように記載している[7-2]。「高さ35cm, 長さ150cm, 厚さ0.15mmの長方形の鉛泊を木の枠にはめ, 長いテーブルの中央に垂直に設置する。テーブルの両側に放電管を置く。鉛泊の一侧に蛍光板を取付け, 鉛泊の半分がそれぞれ1つの管球から垂直に受光するようにする。測定にあたっては, 蛍光板のそれぞれ半分の面の輝度が等しくなるようにする。等輝度になった蛍光板の前に, 板状の被写体(アルミニウム, 錫箔, ガラスなど)を置き, 不均一になった輝度が再び同じに補正されるように, 放電管の距離を遠ざけたり近づけたりする。いずれの場合も, 移動前後の放電管の白金版と蛍光板の距離の2乗の比が, 蛍光板の前に置いた被写体の透過性である」

我々の目的には, Röntgen のセットアップにいくつか手直しが必要である。机の代わりに, 我々は特製の長さ2mの木製台を使用し, 中心から23cm離れた位置に切った2本の縦方向の溝に沿って2つの管球支持台を前後に移動できるようにした。それぞれの管球の対陰極面から蛍光板までの距離を読み取れるように, この溝に目盛を付けた。蛍光板の周辺を, 中心線を挟んで左右それぞれ5cm四方の領域を残してマスクする。2つの領域は直接隣接しており, 両者の輝度が同じ時, 2つの管球を隔てる鉛板を蛍光板に十分近づけると, 2つの領域は互いに途切れなく融合して見える。こうすることにより, 2つの領域が明るい線あるいは暗い線で隔てられている場合よりも, はるかに正確に輝度を比較することができる。X線は蛍光板の中央に垂直に当たらず, 両側から斜めに当たるが, これによる誤差は計算により補正できる。手元にはスパーク長65cmの誘導コイルが1台しかないことから, 測光計の両側

表 4

左半	右半		左半	右半	
(水なし, 43cm)	40cm	= (I)	水 3cm	90cm	<
水 1cm	54cm	>		80cm	>
	58cm	<		82cm	>
	56cm	<		84cm	=
	57cm	= (II)		85cm	<
水 2cm	65cm	>	86cm	<	
	70cm	<	水 4cm	90cm	>
	75cm	<		105cm	<
	72cm	=		100cm	<
		95cm		=	

表 5

実験	A. 水							B. 血液			C. 筋肉		D. 脳
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII (凝血)	IX (血清)	X (凝血)	XI	XII	XIII
スパーク間隙長 (cm)	5.8	7	9	10	10.5	14	24	9	19	21	10.5	16	16
透過性 (%)													
深度 1cm	46	59	61	59	54	69	69	9	19	21	10.5	16	16
深度 2cm	29	41	42	38	36	44	43	38	56	53	38	50	50
深度 3cm		29	27	29	27			17		29			
深度 4cm					21					23			

E. その他個別領域		
管球	軟	中
筋肉, 皮下組織, 筋層 (9mm 厚)	49%	58%
筋肉, 皮下脂肪織 (12mm 厚)		49%
同上, 2層 (24mm 厚)		27%
腹壁皮膚 (2mm) + 脂肪層 (26mm)		37%
脂肪層 (15mm)		63%

にある X 線管球を 1 台で駆動できる方法を考えた。これは、2 本の管球が同じ硬度、すなわち同じ抵抗をもち、大きく異ならなければ可能である。2 本の管球を互いに連結して、同じ構造、硬度の管球を蛍光板から等距離に置くと、蛍光板の輝度は等しくなる。管球の硬度が異なる場合、これを直列に連結して両者を並べると硬い管球の方が明るくなり、電流は当然軟らかい管球に多く流れる。2 本の管球の硬度をできるだけ等しくするため、我々は多くの実験で真空度の調整が容易な Volthohm ϵ 管球を選択した。2 本の管球の輝度が異なる場合、測定の前に蛍光板の左右領域が等輝度になるように管球を移動する必要がある。血液あるいは血清の透過性測定には、前述の照射面にパラフィン含浸紙を貼った金属容器を使用した。0.2mm 厚のアルミニウム壁の容器は、第 1 の実験にのみ使用した。試料を入れた箱は、紙の面に X 線が垂直に当たるように蛍光板の半領域の前に置き、空の箱をもう一方の半領域の前に置く。試料の厚さはできる限り同じにするか、あるいは厚さ 1, 2, 3, 4cm が正確に保証されている容器に充填する。組織は、病理部門から新鮮なものを取寄せた。

測定例として、蛍光板の右半を左半と比較した例を示す (表 4)。記号の意味は、> 輝度が明るい、< 輝度が暗い、= 輝度が等しい。

実験 V. Volthohm ϵ 管球、硬度中等度。右側の管球はスパーク長 10 ~ 10.5cm, 左側は 10.5 ~ 11.0cm

右管球 40cm, 左管球 43cm の位置で、左右の領域の輝度が等しい。左側は紙製の壁の容器に水を入れたもので、管球は固定し、右側の管球を移動して輝度を調整した。

ここで右管球の輝度を L_r とすると、左管球による蛍光板の輝度は測定値 I から $L_r/40^2$, 1cm 厚の水を通過した左管球による輝度は測定値 II で、 $L_r/57^2$ となる。

$$D = 40^2/57^2 = 0.4925 = 49.25\%$$

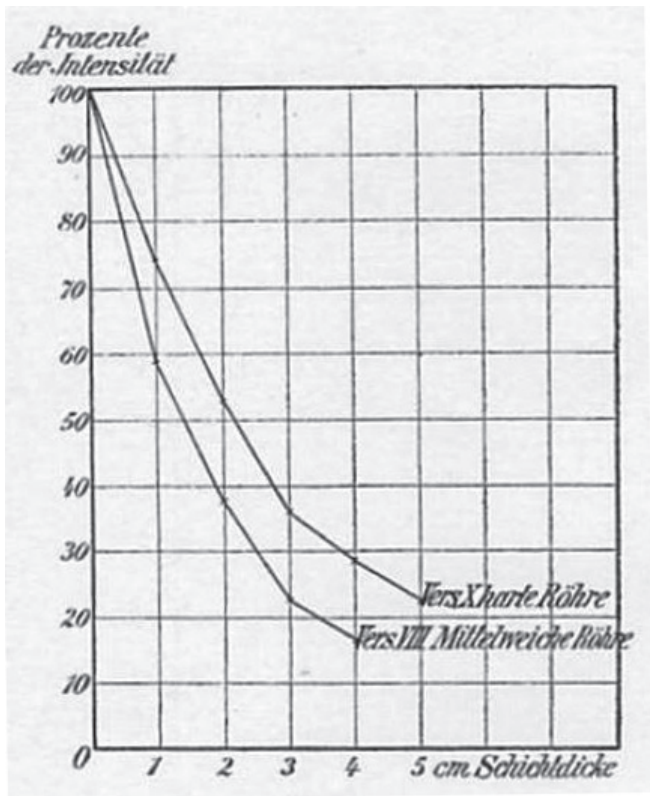
同様に、2cm では 30.85%, 3cm で 22.68%, 4cm で 17.73% となる。X 線の斜入を考慮した補正後は、1cm 53.82%, 2cm 35.74%, 3cm 26.62%, 4cm 21.04%, すなわち約 54%, 36%, 27%, 21% となる。上表の基本的な結果は、実験 VIII, X の血液の透過性のグラフに良く表われている。これは血液に照射した X 線を 100% とする時、各位置における残存 X 線強度を示したものである。硬い X 線管、中等度の X 線管を使用する歳男性場合、X 線強度は急速に低下し、5cm で 25% 以下になることが分かる。凝血と血清の測定には、大きな差は認められなかった。特に実験 X では、凝血の容器を血清の容器に置換したが、蛍光板の輝度に変化はなかった。従って、血清と凝血は同じ値と考えられ、これは全血についても適用できると考えられる。血液と筋肉の透過性には有意の差がなく、血液、筋肉ともに水に非常に近く、前述の関節結果に一致する。

我々の測定から、中等度の管球 (スパーク長 7 ~ 10cm) を使用する場合、人体の軟部の X 線強度は、1cm で 50 ~ 60%, 2cm で 35 ~ 45%, 3cm で 20 ~ 30% に減弱する。5cm 以上の深部については、残念ながら観察領域が暗すぎて正確な比較ができないため測光法は使用不能である。放射線治療には、最初の 3cm の X 線強度低下の測定が非常に重要である。別の論文 [8-1] で、我々は組織透過性が X 線の効果にどの程度影響するか、いかにこれを正確に測定するか、さらに癌を縮小させる X 線強度が皮膚細胞の最大許容量とどの程度離れているかを検討した。この差の測定はさらに検討が必要であり、ここでは立ち入らないこととする。

表に示した全ての実験の血管をグラフに表わすと、いずれも非常に良く似た形であることがわかる。

異なる組織間では基本的に差異がないが、異なる硬度の管球間には差異が認められる。硬い管球、つまりスパーク長の長い管球の曲線は一般に減弱が緩徐である。

図2. 深度とX線強度の関係 (上: 硬い管球, 下: 中等度の管球)



すなわち硬い管球の透過性は高い (曲線X, VIIIを比較されたい).

これは放射線治療で考慮される点である. 透過性の高いX線を使用すればその生理学的作用はより深部に及び, 最小限の効果を持つ深度は深くなる. しかし, 同じ強度の硬線と軟線が及ぼす効果は同じではないことを考慮しなくてはならない. 組織を透過する一定強度の硬線は, 透過性が大きいために同じ強度の軟線よりも吸収される割合が小さいからである. しかし生理学的作用は, 透過量ではなく吸収量に比例するので, 透過性の高いX線では小さい. さらに, 吸収された硬線が同量の軟線に比べて生理学的作用が小さいか否かも研究されていない. これらの答は, ここでは示唆することができるだけで明示することはできない.

ここでは, 硬線の大きな透過性は, 硬い管球を使用して深部効果を増強しようとする限りにおいて, 実際的な重要性を持つことを示すとどめる. しかし計測結果は, 硬い管球を使用しても過度の期待は禁物であることを示している. 非常に硬い管球を使用した実験X (図2)のグラフをみると, 急速に低下しているからである. 硬い管球から放出される混合線には明らかに大量の吸収されやすく透過しにくいX線が含まれており, これは浅層で捕捉され, 強度曲線の急速な低下を説明できる. 著者の考えでは, 可及的に硬い管球を求めて使用するよりも, フィルターすることによってX線の効果を制限する方が効果的である. X線が, 同じ厚さ, 同じ性質の層を何層も通過するとき, 第2層は第1層

表6

実験	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
深度 1cm	56	59	61	59	54	69	69	59	69	74	57	64	69
深度 2cm	63	69	69	64	66	64	62	64	81	72	67	78	72
深度 3cm	-	70	64	76	75	-	-	58	75	68	74	80	76
深度 4cm	-	-	-	-	77	-	-	77	-	80	-	-	-
深度 4cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79	-	-	-

と同量の割合でX線を吸収するのではなく, 吸収量は少なくなる. すなわち, 透過性は深い層ほど大きくなる. 実験IV (表5)では, 初めの1cmでは入射光線の59%, 次の1cmでは38%が透過する. 第1層通過後, もとのX線59%が残っており, 第2層ではこれが38%, すなわち第2層に入射した59%の64%となる.

このようにして各層の透過性を計算すると, 以下のようになる: Röntgenはその第2報で, 深部で全般に透過性が増大することを指摘し, アルミニウム, ガラス, 錫箔の透過性測定から, 「被写体がX線に垂直な方向に複数の同じ厚さの層に分割されているとすると, 各層の透過性はその前の層の透過性よりも大きい」としている. これは, 吸収されやすい光線が浅層に捕捉される結果, 深層では混合放射線の性質が浅層と異なることで説明できる.

これは以下の実験でも明らかである. X線測光計の半領域に2cm厚の水層を置き, 2本目の管球を移動して各領域の輝度を等しくしてから, さらに各領域の前に1mm厚のアルミニウム板を置く. すると, それまでは各領域とも同じ輝度で, その前に同じアルミニウム板を置いたにもかかわらず, 水の側が他側よりもかなり明るくなる. 唯一可能な説明は, 水を通じた光線の性質が変化し, 全体の強度は吸収により減じたが, 平均透過性は上昇したことである.

以前の論文 [9-1]で著者は, フィルター, 錫箔, アルミニウム層などで硬線から軟線成分を分離できること, これにより放射線治療における深部効果を向上できること, 混合X線の透過性を増強し, 長時間照射により総線量の減少を補償できることを明らかにした. 上記の実験から, この考えが正しいことが証明された. この方法でどの程度まで生理学的効果, 特に癌への効果が得られるか, 正確に測定できることが望まれる. しかし, これには厚さ4cm以上の軟部の吸収を測定する必要があり, 我々が使用した測光法では不十分である.

最後に, 上記の実験の主な結果を要約する.

1. 人体の軟部組織の透過性は, 水よりも比重の小さい組織 (肺と脂肪織) を例外として, 水に非常に近い.

肺と脂肪織のみ水よりも透過性が高く、その他の軟部は互いにほぼ同じでわずかに水よりも透過性が低い。

2. 人体を照射すると、X線強度は表面から体内にかけて急速に低下する。中等度の硬さの管球では、深度1cmで元の強度の50~60%、2cmで35~45%、3cmで20~30%となる。

3. 硬い管球を使用すると強度の減少は緩和されるが、それでも4cmで元の強度の40%以下、5cmで25%以下に減少する。

4. 深部の強度減弱は、体表に吸収層(1mm厚のアルミニウム)を置くと、著しく緩和される。

1-1 ¹⁾ Albers-Schönberg, Über eine bisher unbekannte Wirkung der Röntgenstrahlen auf den Organismus der Tiere. Münch. med. Wochenschr. 1903. Nr. 43.

1-2 ²⁾ Heineke, Über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf innere Organe. Münch. med. Wochenschr. 1904. Nr. 18.

1-3 ³⁾ Perthes, Zur Frage der Röntgentherapie des Carcinoms. Archiv für klinische Chirurgie. Bd. 74, Heft 2. 1904.

2-1 ¹⁾ v. Röntgen, Sitzungsberichte der physik. med. Gesellschaft zu Würzburg. 1895.

v. Röntgen, Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. Sitzungsber. der kgl. preuss. Akad. der Wiss. zu Berlin. 1897. S. 581.

Oberbeck, Die Absorption der Röntgenstrahlen. Naturw. Rundschau. 1896. S. 265 u. 458.
Benoist et Hurmuzescu, Nouvelle recherches sur les rayons X. Comptes rendus T. 122, p. 379. 1896.

Louis Benoist, Loi de transparence de la matière pour les rayons X. Comptes rendus T. 132, p. 324—327. 1901.

Novak und Sule, Zeitschr. f. physik. Chemie. 1896. 19, S. 489.

Voller und Walter, Zeitschr. f. angewandte Chemie. 1897, Heft 15.

W. J. Humphrey, Philosophical Magazine. 1897, Ser. 5. Vol. 44, p. 401.

Mc. Clung and Mc. Intosh, Absorption of Röntgen-rays by aqueous solutions. Philosophical Magazine. 1902, Series 6. Vol. III, S. 68. Hierin zahlreiche Hinweise auf andere Arbeiten über das gleiche Thema.

2-2 ²⁾ Darier et Rochas, Sur le cause de l'invisibilité des rayons de Röntgen. Comptes rendres T. 122, p. 458.

2-3 ³⁾ Salvioni, Nature. T. 53, p. 424.

2-4 ⁴⁾ Brandes u. Dorn, Wiedemanns Ann. f. Physik. Bd. 60, S. 478.

2-5 ⁵⁾ Chaluppecky, Zentralbl. f. Augenheilkunde. 1897, August.

2-6 ⁶⁾ Darier, Perméabilité de l'œil aux rayons Röntgen. Rev. gen. d. Ophth. 1896.

2-7 ⁷⁾ Antonelli, Progrès medic. 1897. Nr. 52.

2-8 ⁸⁾ Battelli, Intorno al passaggio e all azione dei raggi di Roentgen sull'occhio. Suppl. al. Policlinico II 18. Ref. Annali di Ottalm. XXV, p. 409. 1896.

3-1 ¹⁾ l. c.

3-2 ²⁾ Sitzungsber. d. Berliner Akademie 1897, S. 589.

3-3 ³⁾ Ich verwendete, wie auch zu den unten mitgeteilten Durchlässigkeitsbestimmungen, folgende Röhrentypen: Regulierbare Röhre von Müller-Hamburg, Voltohm- ϵ und Voltohm- γ , Röhren von Gundelach-Gehlberg, Wasserkühlungsröhren von M. Kohl-Chemnitz.

4-1 ¹⁾ l. c. S. 588.

5-1 Fortschritte a. d. Gebiete d. Röntgenstrahlen. VIII.

6-1 ¹⁾ von E. Zimmermann, Präzisionsmechaniker, Leipzig, Emilienstrasse.

¹⁾ Mc. Clung and Mc. Intosh, Absorption of Roentgen Rays by Aqueous Solutions. Philosophical Magazine. 1902, p. 68.

7-1 ²⁾ Sitzungsber. der Berliner Akademie. 1897. S. 578 u. 581.

8-1 ¹⁾ Archiv f. klin. Chir. Bd. 74, S. 421.

9-1 ¹⁾ Arch. für klin. Chir. Bd. 71, Heft 4.