

2つのX線量単位の比較研究－フランス R(Solomon) とドイツ R(Behnken)*¹

Vergleichende Studie von zwei dosimetrischen Röntgeneinheiten - das französische R (Solomon) und das deutsche R (Behnken)

*Murdoch J^{*2}, Stahel E^{*3}. Strahlentherapie 27:561-70,1928*

I. はじめに

X線量計測の問題は、まだ全般的な解決が得られていない。医学用途については、電離計測法によって定量することができるかとされており、現在放射線科医が使用している測定装置はすべて電離に基づくものである。

しかし、電離箱によるイオン電流から放射線強度を直接計測することはできない。イオン電流は、電離箱の大きさ、形状、方向、材質に依存するからである。このような計測誤差に加えて、放射線の質によるこのような因子の変化によっても誤差が増大する。つまり、電離状態は放射線の波長によって異なり、また装置ごとに異なるのである。このような不正確さを回避できるような単位の選択は、以前から求められてきた。非常に多くの案が提唱されており、標準化が望まれるが、まだ各国の研究者の意見の隔たりは大きい。現状では多くの提案が脱落し2つだけが生き残っているが、あいにくなことにそのいずれも同じRで表示されている。

ひとつは、1920年にSolomonが提唱したもので、主にラテン系諸国で使用されており、これをフランスR(fr.R)と称することにする。

もうひとつのR、ドイツR(d.R)は、1924年にドイツレントゲン学会で提案されたものである。

各国の専門家による生物学的、治療的效果を比較するためには、この2つの単位の関係を理解することが必須である。この関係を確認する努力が繰り返されてきた。

1. Caplan (AJR, 464,1925) は、両者の比を3.0としている。

2. Solomon (La Radiothérapie profonde, 146,1926) は比2.2としている (1 d.R = 2.2 fr. R)

3. Jonah (Internationale Radiotherapie I: 812,1926) は、比は2.5～3.0としている。

1. Archives d'électricité médicale et de physiothérapie du cancer. 35:1927より。Dr. Gustav Wittigschlager (プレーメン) 記

2. Leiter der Universitätsklinik und Chef der Radiologischen Station an der Antikrebszentrale in Brüssel (大学病院チーフ、ブリュッセルがんセンター放射線部門長)

3. Leiter der physikalischen Kurse an der freien Universität in Brüssel (ブリュッセル自由大学物理学研究室チーフ)

4. R/秒。単位Rは、ときに照射線量の単位、ときに放射線強度の単位として用いられ、混乱を来している。ここではSolomonの定義に従っている。放射線強度(Intensität)はR/秒、照射線量(Dosis)は強度×時間(R)となる。

我々は、新たに系統的な比較が必須であるという結論に至った。

II. 2つのR単位の定義

まずX線量と発生する電離との関係は、どのように定義されているであろうか。

a) フランスRは、X線による電離をラジウムのγ線による電離と比較して次のように定義される。「電離箱の軸線上で距離2cm、0.5mm厚の白金でフィルターされたラジウム1gと等量の電離をもたらすX線強度」*⁴

この定義は、使用する電離箱を指定していない。しかし暗黙にSolomonの装置(イオノメーター)を使用することを前提としている。他の電離箱による計測にこの定義を適用すると、異なる結果となる(下記参照)。

b) ドイツRの定義は、一定の厳密に定められた条件下において発生する電離に直接関係付けられており、静電単位で表わされる。「X線量の絶対単位は、18℃、760mm圧の空気1ccを照射するとき、電子を完全に利用し、壁効果がない状態で発生するX線量で、発生する飽和電流を静電単位で表わしたものである」。この定義による単位は、測定条件が満たされている限り電離箱の種類と独立であることから、大きな利点がある。通常の電離箱はこの条件を満たさないで直接使うことはできない。Behnkenらは、空気の電離だけが計測されて二次的な壁効果を除去できる大型の電離箱を設計した。このような標準測器における一致率は非常に良好である。小型の電離箱と標準電離箱の比較は、放射線科医が使用する電圧、フィルターに応じてR単位による較正が可能である。

III. 2つの単位Rの量的関係

我々は、以下の様な方法で比較実験を行なった。d.Rで較正されたSiemens社の線量計と、Solomonのイオノメーターを同時に照射して、同時に計測する。Siemens社の装置はd.Rで、Solomonの装置はfr.Rで表示される。これにより容易に2つの単位を比較できる。

正確を期するために数々の注意を払った。

a) Siemens社の装置について、その示度の信頼性、飽和度、時定数の恒常性について試験した。その結果は満足のゆくもので、詳細については続報の予定である。

b) ドイツRによる較正の精度試験。我々のイオノメー

ターを、2 台目の Siemens 社製装置、および同様に Wulff 社製装置と比較した。この結果、3 台の装置の違いは常に 5% 以下であった。3 台の装置はいずれもベルリンの物理学研究所 (Physikalische Reichsanstalt) で較正されたもので、その証明書は信頼のおけるものである。

c) Solomon の装置の較正。フランス R の定義の正しさを確認する目的で行なった。ラジウム 132mg (0.5mm 厚白金でフィルター) をシリンダー状容器にいて、ラジウムのガンマ線が電離箱ののみ照射するように線束方向に置いた。検電計との接続管は数 cm の鉛で覆った。

d) 我々が使用した Solomon のイオノメーターは、X 線に対して十分に遮蔽できなかった。電離槽を鉛で被覆しても、接続管内の電離による強力な電流がなお存在した。この寄生電流は非常に大きく 30% に達し、鉛箔によって慎重に除去する必要があった。この鉛の被覆によって約 3% まで低減することができた。2 つの電離箱が、二次電流によって互いに干渉することはない、たかだが 1% 以下であった。

f) 定常電圧は、球形スパーク計 (25cm), Seemann スペクトル計、この目的のために特にブリュッセル大学物理学研究室で較正した Abraham Villard 静電電圧計を組合わせて計測した。

このような事前の注意をすべて行なってから、2 つのイオノメーターの示度を系統的に比較した。

分かりやすいように例を挙げると、200kV の放射線を 1.5mm 厚銅、1mm 厚アルミニウムでフィルターした場合、Solomon の装置は 0.87 fr.R/ 秒、Siemens の装置は 0.204 d.R/ 秒を示した。両者は同一の装置で同時に照射し、2 人の観測者が同時に計測したので、2 つの単位の比は $0.87 / 0.204 = 4.27$ となる。

計測結果を、表 1 にまとめた。

この表は、 $d.R / fr. R$ は、電圧とフィルターの関数であることを示している。

電圧 kV (定電圧)	銅フィルター						
	0,1 mm Cu + 1 mm Al	0,3 mm Cu + 1 mm Al	0,5 mm Cu + 1 mm Al	0,7 mm Cu + 1 mm Al	1 mm Cu + 1 mm Al	1,5 mm Cu + 1 mm Al	2 mm Cu + 1 mm Al
120	2,55	2,68	2,73	2,76	2,78	2,80	2,87
130	2,60	2,74	2,79	2,84	2,86	2,94	3,03
140	2,66	2,80	2,87	2,93	2,97	3,09	3,23
150	2,72	2,87	2,94	3,03	3,11	3,26	3,43
160	2,79	2,95	3,03	3,41	3,28	3,46	3,64
170	2,85	3,04	3,13	3,28	3,47	3,67	3,86
180	2,92	3,13	3,24	3,45	3,67	3,87	4,08
190	2,99	3,24	3,35	3,63	3,86	4,08	4,31
200	3,07	3,35	3,49	3,84	4,06	4,32	4,55

電圧 kV (定電圧)	アルミニウムフィルター	
	1 mm Al allein	5 mm Al
100	2,47	2,60
110	2,40	2,56
120	2,42	2,57
130	2,47	2,62
140	2,54	2,68
150	2,60	2,74
160	2,68	2,81

表 1. 2 つの線量単位 - d. R, fr. R の比

表の上段は、銅 (0.1 ~ 2mm) フィルター、電圧 120 ~ 200kV に対する値、下段は弱いアルミニウムフィルターに対する値である。

一見して、 $d.R / fr. R$ は、電圧が高くなり、フィルターが強くなるにつれて大きくなるのがわかる。例えば、120kV, 0.1mm Cu + 1mm Al フィルターの場合は 1000 fr.R が 393 d.R に相当するが、200kV, 2mm Cu の場合は わずか 200 d.R になる。これらはすべて空气中で、ファントムなしに計測したものである。図 1 の曲線は、2 つの R の関係を図示してものである。

2 つの単位の比 $d. R / fr. R$ は、X 線管球の電圧 (kV) と異なるフィルターの関数となる。

最も重要なことは、2 つの単位 R の比が、全く一定ではないということである。我々が照射した電圧、フィルターの範囲では、2.40 から 4.55 まで変化する。我々の計測は、Jona (前出) の結果を確認、補完するものである。Solomon の電離箱はすべて同じ原理に基づいて作られていることから、我々の計測はこの種の装置すべてに適用できる。しかし、装置の設計に変更が加われば当然のことながらその正当性は失われる。

IV. フランス R の定義による Solomon 以外の電離箱の較正

fr. R の較正を他の電離箱に適用するとどのような結果が得られるかという実験は興味深いところである。この目的のために我々は、Solomon の方法に従ってラジウム 132mg によって Siemens 社の線量計を較正し、Solomon の装置と比較した。

f. R が絶対単位であれば、同じ方法で較正されたこれら 2 つの装置から、同じ示度が得られるはずである。実験の結果は、全く異なるものであった。結果を表 2 に示す。この表から、電圧が 130 ~ 160kV では 2 つの装置の示度は概ね一致するが、これより高電圧ではその差は 24% に及ぶことがわかる。フィルターを変えると、この差はさらに大きくなる

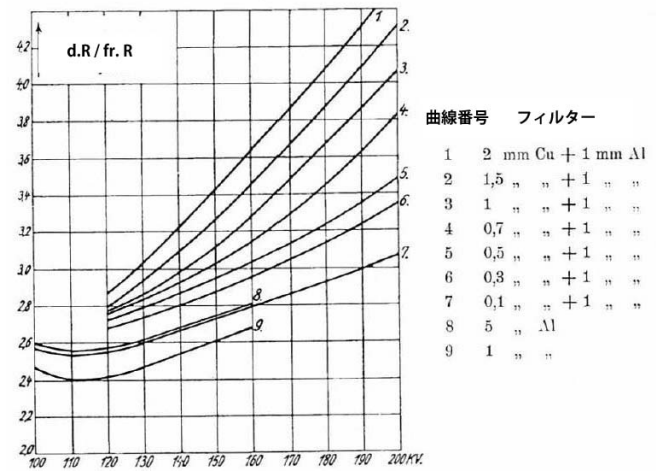


図 1

要約すると、Solomon の定義に従ってラジウムによって同じように厳密に校正した 2 つの電離計測装置の示度には、1 ~ 2 倍 (0.64 ~ 1.31) の差があるといえる。

例を表 3 に示す。

このことから、Solomon の定義は全ての電離箱に等しく適用できるものではなく、f. R は絶対単位ではないことがわかる。

この理由で我々は、校正が非常に容易ではあるが、fr. R は使わないことにした。

V. ファントムの影響

ラテン系の国々では、電離箱をパラフィンあるいは水のファントムの上に置いて計測するのが普通である。この場合、照射されたファントムが発生する二次線が一次線に加わることになる。これに対して d. R は、ファントムを使わずに空気中の一次線によって決まる。非常に重要な二次放射線を除去してしまう、一見すると非論理的に思えるこの方法の根拠は、Debye-Compton 効果のために二次線の波長が一次線より長いことにある。現在使われている電離箱はすべて、異なる波長の放射線に対する反応が異なるので、一次線と二次線を同時に定量することは不可能である。一定の一次線について R 単位で校正した線量計に、同時に二次線を入射すれば不正確な示度となる。

この 2 つの方法 (ファントムあり、なし) で計測した結果を比較するために、我々はファントムによって発生する二次線の重要性を慎重に検討した。この計測は、

電圧 kV (定電圧)	放射線強度 (fr. R / 秒)		
	Siemens社の装置	Solomonの装置	Siemens社 / Solomon
130	0,33 fr. R/Sekunden	0,31 fr. R/Sekunden	1,06
140	0,44 " "	0,45 " "	0,98
150	0,59 " "	0,58 " "	1,02
160	0,73 " "	0,79 " "	0,93
170	0,87 " "	1,01 " "	0,86
180	1,01 " "	1,33 " "	0,86

表 2. フィルターはすべて 0.7mm Cu+1mm Al

フィルター	ファントムの効果 による増加係数
0,1 Cu + 1,0 Al	1,31
0,2 Cu + 1,0 Al	1,31
0,3 Cu + 1,0 Al	1,31
0,5 Cu + 1,0 Al	1,30
0,7 Cu + 1,0 Al	1,29
1,0 Cu + 1,0 Al	1,27
1,5 Cu + 1,0 Al	1,25
2,0 Cu + 1,0 Al	1,24
1,0 Al	1,31
3,0 Al	1,30
5,0 Al	1,30

表 3

5. この計測は、大きな照射野 (15 x 15cm 以上) によるものである。この問題に関するさらに詳しい研究は続報の予定である。

Solomon の線量計を使って行ない、この線量計についてのみ正当なものである。そこでファントムがある場合とない場合を比較した。二次線の影響は小さかったが (異なる電圧、フィルターについて最大 7%), これは入射口を実験中常に一定にする場合に限ることがわかった⁵⁾(表 4)。

この値が有効であれば、ファントムを使用して計測した fr. R と空気中で計測した d. R の比を求めることができる。表 5 はこの比較結果を示すもので、fr. R を d. R に変換するための除数を与えている。

これらの表から、電圧、フィルターの関数として、fr. R を d. R に変換する時の除数がわかる。前者はファントムを使用、後者は空気中での計測である。

VI. フランスとドイツの線量の比較

フランス、ベルギーでは、放射線治療において電圧 160 ~ 200kV、フィルター下の 1 回照射で、約 4000R で明らかな紅斑を生じ、放射線皮膚炎に進む可能性があるとしてされている。

これに相当する d. R を求める。非常に透過性の高い放射線 (200kV, 1mm Cu + 1mm Al フィルター) では、表 5 から変換係数は 5.16 である。従ってファントムで計測した 4000 fr. R は、空気中で計測した 4000 / 5.16 = 774 d. R に相当する。

しかし、我々の癌治療の経験では、760 ~ 800 d. R を大きな照射門 (例えば 15 x 15cm) で 1 回照射する場

フィルター	ファントムの効果 による増加係数
0,1 Cu + 1,0 Al	1,31
0,2 Cu + 1,0 Al	1,31
0,3 Cu + 1,0 Al	1,31
0,5 Cu + 1,0 Al	1,30
0,7 Cu + 1,0 Al	1,29
1,0 Cu + 1,0 Al	1,27
1,5 Cu + 1,0 Al	1,25
2,0 Cu + 1,0 Al	1,24
1,0 Al	1,31
3,0 Al	1,30
5,0 Al	1,30

表 4

電圧 kV (定電圧)	フィルター									
	0,1 mm Cu + 1 mm Al	0,3 mm Cu + 1 mm Al	0,5 mm Cu + 1 mm Al	0,7 mm Cu + 1 mm Al	1 mm Cu + 1 mm Al	1,5 mm Cu + 1 mm Al	2 mm Cu + 1 mm Al	1 mm Al	5 mm Al	
100	3,37	—	—	—	—	—	—	3,25	3,38	
110	3,33	—	—	—	—	—	—	3,14	3,33	
120	3,34	3,51	3,55	3,56	3,53	3,50	3,56	3,16	3,33	
130	3,40	3,53	3,63	3,66	3,64	3,67	3,75	3,24	3,41	
140	3,48	3,67	3,73	3,78	3,77	3,86	4,00	3,32	3,48	
150	3,56	3,75	3,83	3,91	3,95	4,07	4,25	3,40	3,56	
160	3,65	3,86	3,94	4,05	4,16	4,32	4,51	3,51	3,65	
170	3,73	3,98	4,06	4,23	4,40	4,59	4,77	—	—	
180	3,72	4,10	4,20	4,45	4,66	4,74	5,05	—	—	
190	3,91	4,24	4,33	4,68	4,90	5,09	5,34	—	—	
200	4,02	4,38	4,54	4,95	5,16	5,40	5,65	—	—	

表 5. fr. R (ファントム使用), d. R (ファントム不使用) の比

合、水泡、落屑を伴う 2 度の紅斑 (放射線皮膚炎) を生ずる。

720 d. R を同じ条件で 1 回照射すると、高度の色素沈着を伴う非常に顕著な紅斑を生ずる。600 d. R では 3 週後に軽度の色素沈着を伴う 1 度の紅斑を生ずる。ドイツ、フランスの単位による紅斑線量の不一致は、2 つの単位の変動関係と、ファントムによる計測に際する二次線を考慮すれば消失する。

結論

1. 2 つの R 単位の関係は一定ではない。比は 2.40 から 4.55 まで変動し、電圧、フィルターに応じて増大する。

2. Solomon の定義によるラジウムで厳密に校正したさまざまな電離箱の示度は大きく異なる。fr. R は、絶対単位とはみなすことができない。

3. 通常使用される小型電離箱は、大型の標準電離箱によって、異なる電圧、フィルターに対して校正することが必須である。

4. 波長に依存しない電離箱がない限り、電離計測はファントムを使用せずに空気中に行なう必要がある。

5. しかし、Solomon の装置において二次線を考慮すれば、フランス方式、ドイツ方式を比較することができる。

6. これらさまざまな要因を考慮すれば、ラテン系の国々とドイツにおける X 線の生物学的効果の物理学的計測の誤差は非常に小さいと結論する。