

X 線 高 電 圧 撮 影 法

High Voltage Radiography

草 谷 晴 之*

内 容 梗 概

従来診療用 X 線装置の管電圧は 45~90 kVP が用いられているが最近ではさらに高い電圧が用いられる傾向にある。こゝには高電圧撮影法の特徴を知るべく、

- (1) 適当な黒化度の X 線写真を撮るには mAs は電圧によりどのように変化するか。
 - (2) 被写体より出る散乱線は被写体の種類、厚さおよび管電圧によつてどのように変化するか。
 - (3) 散乱線除去のための grid の性能。
 - (4) 写真コントラストの被写体の種類、管電圧による変化。
- などを調べ、それを基にして、人体撮影の場合には高電圧と低電圧ではどのように異なるかを比較検討した。

[I] 緒 言

従来 X 線診療用として使用されてきた管電圧は 45~90 kVP であるが、米、英、独などにおいてはさらに高い電圧を用いる趨勢にあり、そのための装置も作られるようになってきている。一方我国においても数年来、高電圧撮影法の研究および装置の製作が始められている。筆者は高電圧撮影法について二三の実験検討を行つたのでこれを報告する。

管電圧を高くすることによる利点は単位電力当りの X 線発生量が増加することである。このことはさらに X 線管焦点を小さくして半影によるボケを少なくすると共に、照射時間を短くして運動によるボケを減ずることもできる。また患者の撮影の際にうける線量も著しく減ずる。

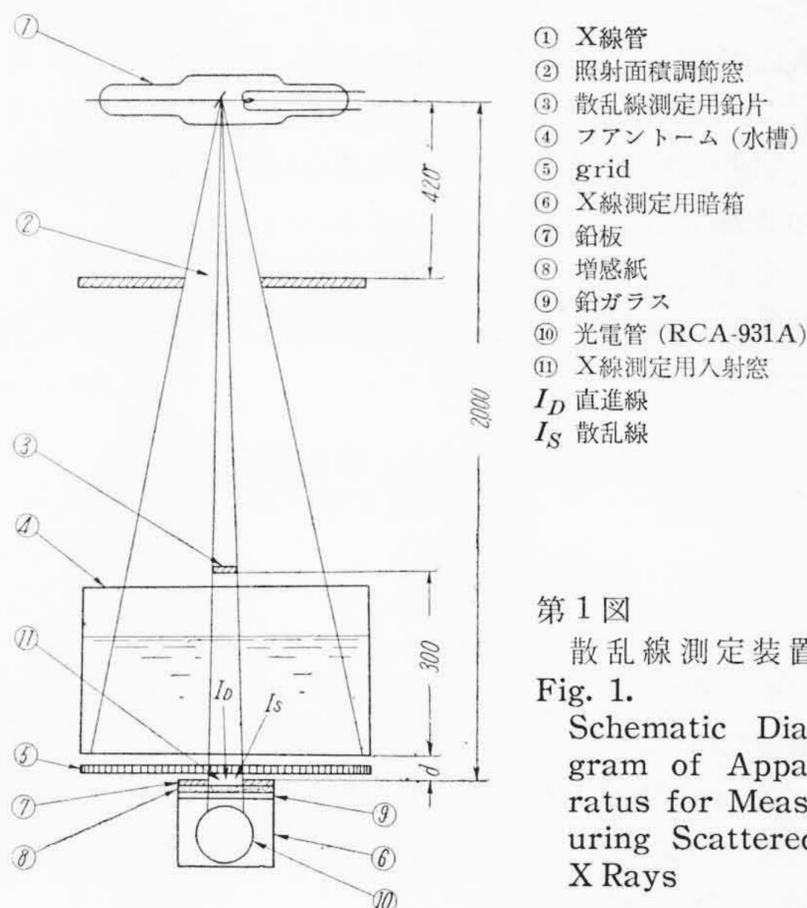
しかし一方電圧を上げると物質の X 線吸収係数が減じ、また被写体よりの散乱線が増加して写真のコントラストが低下するので、グリッドを用いて散乱線を取り除くことが行われている。したがつて高電圧撮影においては、物質の吸収係数、散乱線含有率が電圧と共にどのように変化するか、またグリッドの能率はどのようにであるかということが問題となる。そこでこの実験においてはつぎの点を調べた。

- (i) 管電圧、被写体、X 線量の関係
- (ii) 散乱線含有率の被写体、管電圧に対する関係
- (iii) 散乱線除去に対する grid の効果
- (iv) 各種物質の X 線吸収係数の管電圧による変化

[II] 実 験 方 法

高圧発生装置は間接撮影用変圧器 2 箇を直列とし、半波整流とした。管電圧は球間隙により校正し、管電流は高圧側に電流計を入れ、低圧側の電流計を校正して用いた。管球は油浸ハウベに納めた DOH-10NV (焦点 2.3

* 日立製作所亀戸工場



第 1 図
散乱線測定装置
Fig. 1.
Schematic Diagram of Apparatus for Measuring Scattered X Rays

×2.3 mm²) を用いた。

X 線の強さの測定は第 1 図に示すように撮影用増感紙に X 線を当て、その光を光電管 (RCA-931A) にて測定した。すなわち、X 線測定用入射窓⑪とそれを丁度覆うような大きさの鉛片③を中心軸上におくと、散乱線 I_s のみが測定器に入射し、鉛片③を取除くと、散乱線 I_s と直進線 I_D の合成が測定できる。この場合鉛片の大きさは小さい程良いが測定器の感度に制限されるので窓⑪の直径を 8 mm に選んだ。このようにして $I_D + I_s$ および I_s を測定してその差より I_D を求め得るが別に鉛片③およびファントーム④を取除き、照射面積調節窓②の上側に被写体をおけば直進線を直接測定できる。この場合鉛片③が中心軸上に合致しているか否かを確認する。実験によると窓②が大きい時は空気による散乱線が入るため零とはならないが、ファントームの底で直径 7.5 cm になるように窓②をしぼると鉛片③を置かない

時の $\frac{1}{1000}$ 以下にする事ができる。

第 1 図 d は実際の人体撮影の場合と等しく 2.5 cm とした。直進線を上記 2 方法で測定したが実験誤差範囲内で一致することを確かめた。なお物質の吸収係数の測定においては後者の直進線を直接測る方法によつたがほかの測定はすべて前者すなわち $I_D + I_s$ と I_s の測定を行つた。

〔III〕 実 験 結 果

(1) 管電圧・被写体・X線量の関係

写真黒化に有効な X 線量 I_T は被写体を通過して来た直進線 I_D と散乱線 I_s との合成である。入射線量は管電圧の 2 乗に比例するが被写体があるとその X 線吸収係数は管電圧が低い時程大きいため、管電圧の上昇に対し I_T は電圧の 2 乗以上の割合で増加する。したがつて一定黒化度の写真を撮るのに必要な mAs の値は管電圧の 2 乗以上に逆比例して減少する。

今 (1) 式で与えられる k_m (照射係数と名づける) を管電圧を横軸にとつて示すと第 2 図および第 3 図のようになる。

$$k_m = \frac{\text{(グリッドなし, 60 kVP, 4 mA)}}{\text{(任意電圧における 4 mA)}} \cdot \frac{\text{の時の光電流}}{\text{の時の光電流}} \dots\dots\dots (1)$$

この照射係数 k_m は任意管電圧で一定黒化度の写真を撮るために必要な mAs の値を 60 kVP, グリッドを用いない時を基準とした比率で、第 2 図、第 3 図はそれぞれ水 8 cm, 16 cm および 4 cm, 12 cm を被写体として用いた時を示す。

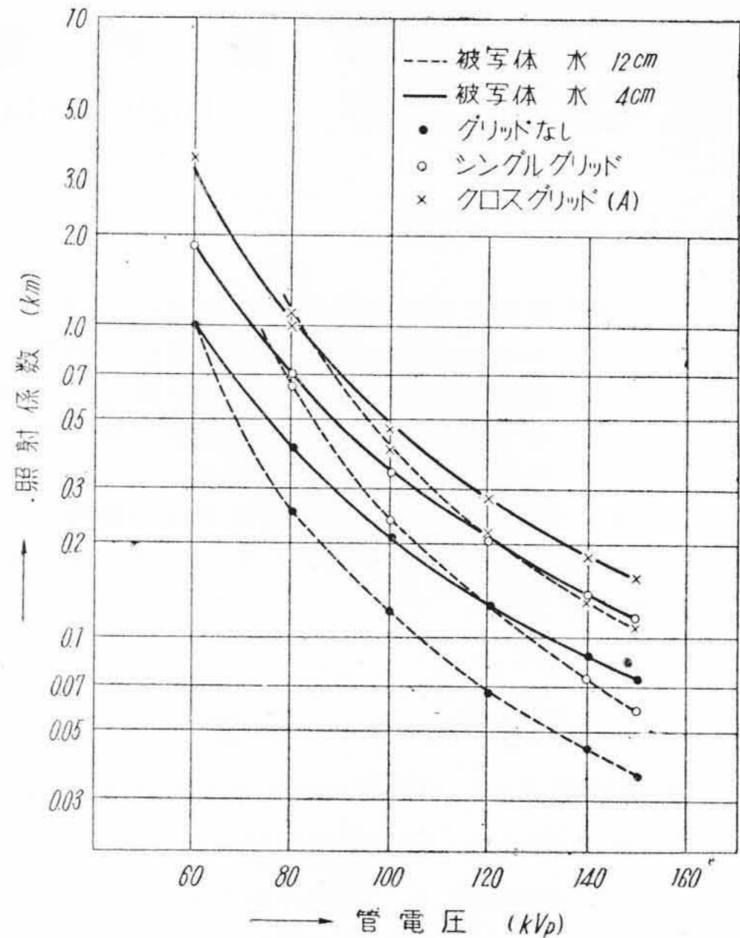
なおこの k_m は照射面積 (フィルム面上の面積) $45 \times 45 \text{ cm}^2$ の場合の値であるが、照射面積 $22 \times 22 \text{ cm}^2$ の場合に求めた値もこの値とほとんど差は認められなかつた。

第 2 図、第 3 図より電圧上昇につれて k_m は減少するが、被写体が厚い時程減少が著しいことがわかる。

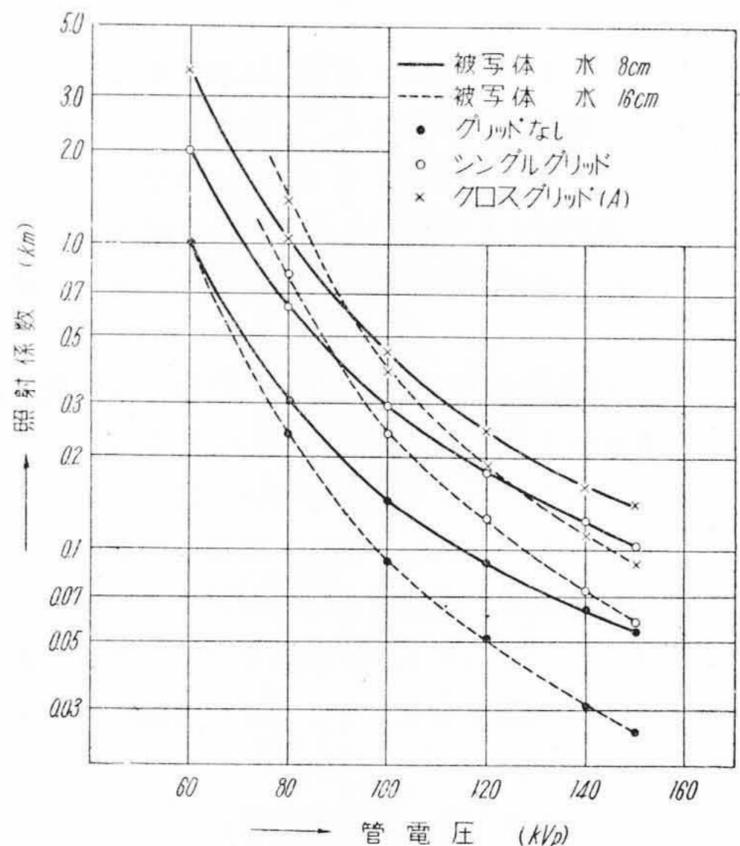
なお、日本人成年男子は胸部の厚さが平均 20 cm で水にして 8 cm に相当するといわれているが⁽¹⁾、腹部の厚さは 10~25 cm でこれはそのままの厚さの水に置きかえられるものと考えられる。(第 15 図参照)

(2) 散乱線含有率

散乱線含有率は被写体の種類、厚さ、照射面積などにより異なるが、被写体として水 4, 8, 12, 16 cm を用いた時の測定結果を第 4 図 (1), (2), (3), (4) に示す。各図とも照射面積大 ($45 \times 45 \text{ cm}^2$) および中 ($22 \times 22 \text{ cm}^2$) の場合に対し、グリッドなし、シングルグリッド、クロスグリッド (A) および (B) の場合を横軸に電圧をと



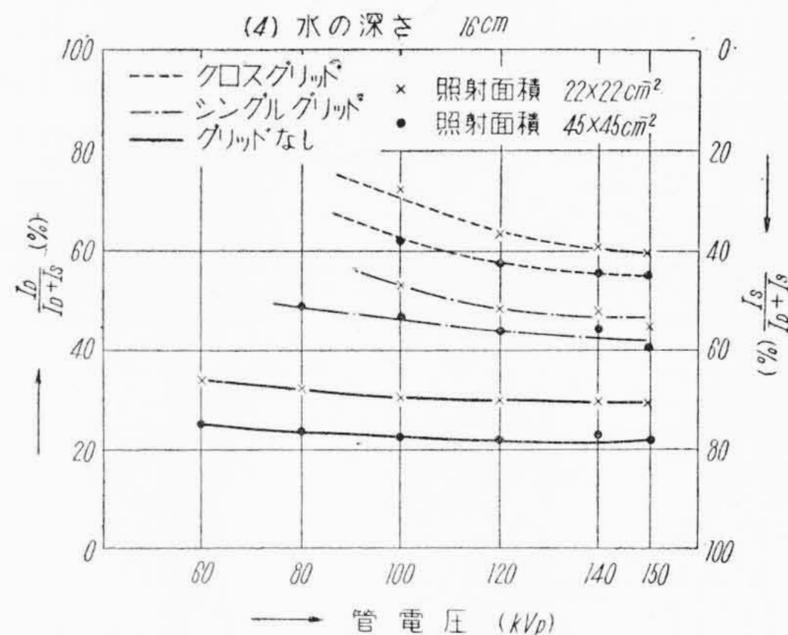
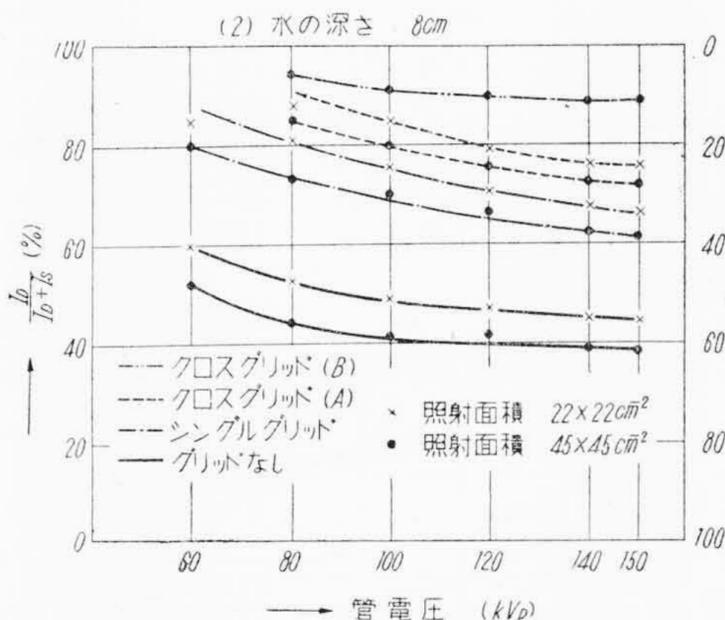
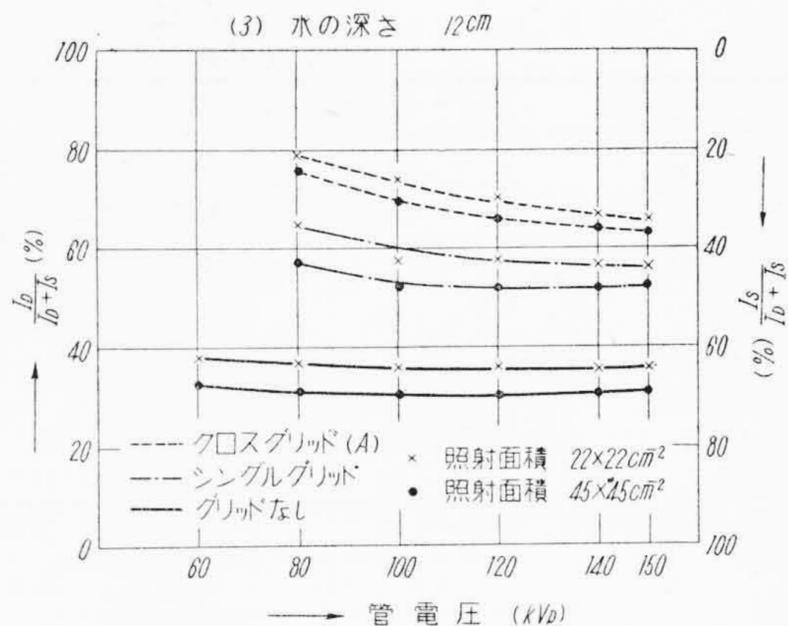
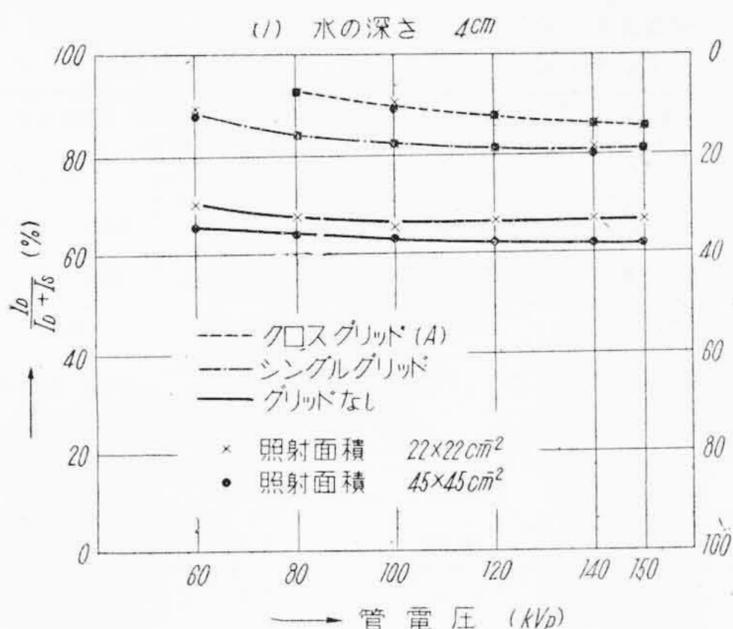
第 2 図 照射係数 (k_m) の管電圧による変化
Fig. 2. Relative Exposure as a Function of Tube Voltage



第 3 図 照射係数 (k_m) の管電圧による変化
Fig. 3. Relative Exposure as a Function of Tube Voltage

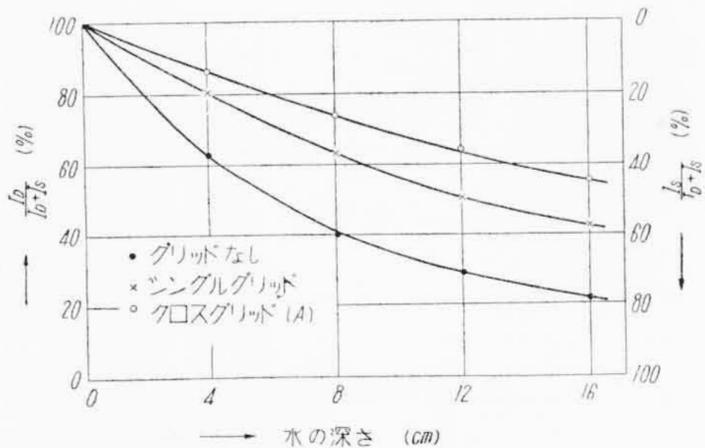
つて示した。また第 5 図は 140 kVP における $\frac{I_D}{I_D + I_s}$ を水厚に対して示したものでこれ等より散乱線含有率は管電圧に対しては大きな変化を示さず、水厚に対して大きく変化していることが知られる。

つぎに被写体として厚さ 9 mm の Al 板を用いた時の含有率を第 6 図に示すが、水の場合より散乱線はずつと少ない。また照射面積による差も少ない。



第 4 図 被写体水の場合の散乱線含有率

Fig. 4. Percentage of Scattered X Rays in Water



第 5 図 140 kVp における被写体 (水) の厚さと散乱線含有率の関係

Fig. 5. Percentage of Scattered X Rays as a Function of Water Depth at 140 kVp

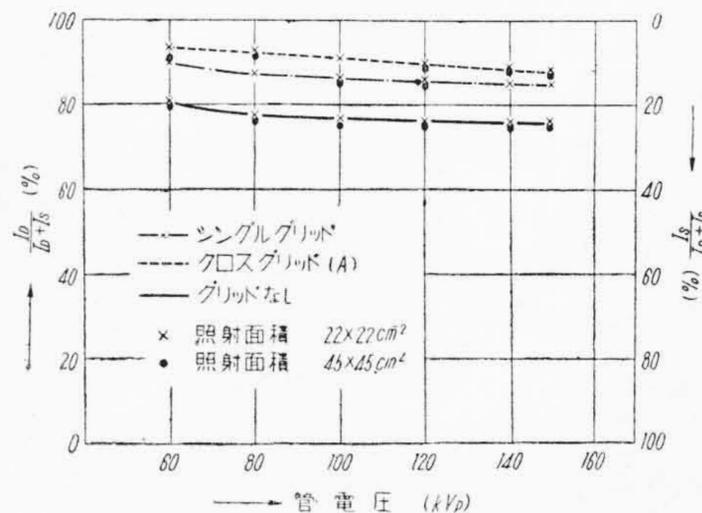
(3) 散乱線の除去

(A) グリッドおよび散乱線フィルタとしての Al 板の効果

散乱線の除去には一般にグリッドが用いられるが、これは第 7 図 (次頁参照) のように鉛のリボンを一定ピッチに並べ、その間を X 線が透過し易い物質でうめ、鉛片が管球中心を向くように並べて一定焦点距離をもたせたものと平行のものがある。本実験に用いたグリッドの構

第 1 表 グリッドの構造要目
Table 1. Details of the Grids

項目	シングルグリッド	クロスグリッド (A)	クロスグリッド (B)
鉛リボンの厚さ (mm)	0.045	0.04	0.04
高さ (mm)	1.7	1.9×2	2.6×2
ピッチ P (mm)	0.416	0.423	0.43
格子比 = 高さ / ピッチ	4.1 : 1	(4.5 : 1) × 2	(6 : 1) × 2
焦点距離 (m)	1	∞	∞

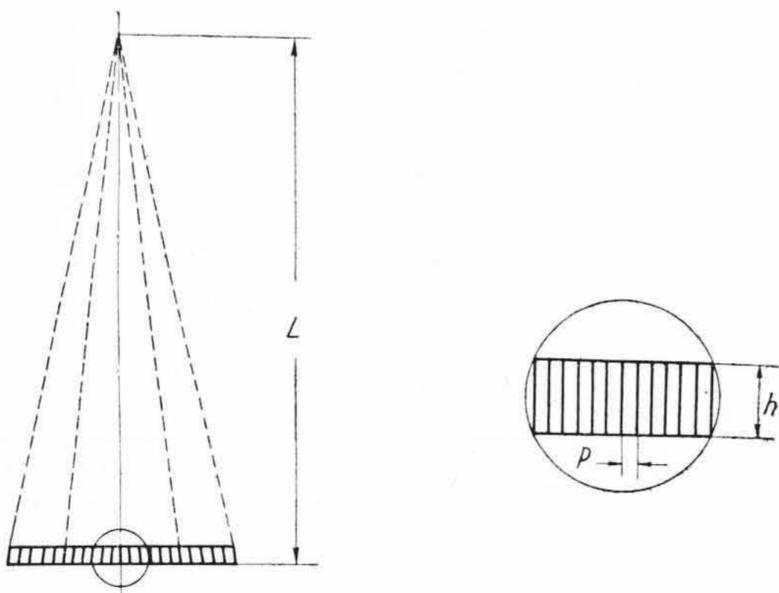


第 6 図 被写体 Al の場合の散乱線含有率
Fig. 6. Percentage of Scattered X Rays in Al

第 2 表 グリッドの性能試験結果
Table 2. Test Data of the Grid

グリッドの種類	項目	電圧					
		60 kVP	80 kVP	100 kVP	120 kVP	140 kVP	150 kVP
シングル グリッド	a (%)	69.3	70.6	76.6	78.3	80.8	82.1
	b (%)	19.1 (18.1)	22.7 (23.5)	27.3 (28.3)	29.6 (32.3)	32.3 (33.8)	32.9 (35.9)
	a/b	3.6 (3.8)	3.1 (3.0)	2.8 (2.7)	2.7 (2.5)	2.5 (2.4)	2.5 (2.3)
クロス グリッド (A)	a (%)		62.9	62.8	65.4	66.1	69.3
	b (%)		8.6 (9.5)	12.0 (11.5)	15.7 (16.4)	16.6 (19.1)	16.7 (19.9)
	a/b		7.3 (6.6)	5.2 (5.5)	4.2 (4.0)	4.0 (3.5)	4.1 (3.5)
クロス グリッド (B)	a (%)		12.7	26.8	32.8	36.5	36.6
	b (%)		0.67	1.49	2.28	2.64	3.0
	a/b		18.4	13.0	14.4	13.8	12.2
Al 板 0.8mm	a (%)	77.7	87.0	90.7	92.5	91.2	93.3
	b (%)	66.7	81.2	87.6	90.3	89	90.3
	a/b	1.15	1.07	1.03	1.02	1.02	1.03
Al 板 1.6mm	a (%)	55.5	74.0	83.8	85.0	90.0	88.2
	b (%)	44.5	68.7	75.0	78.0	80.8	80.1
	a/b	1.25	1.08	1.11	1.09	1.11	1.10

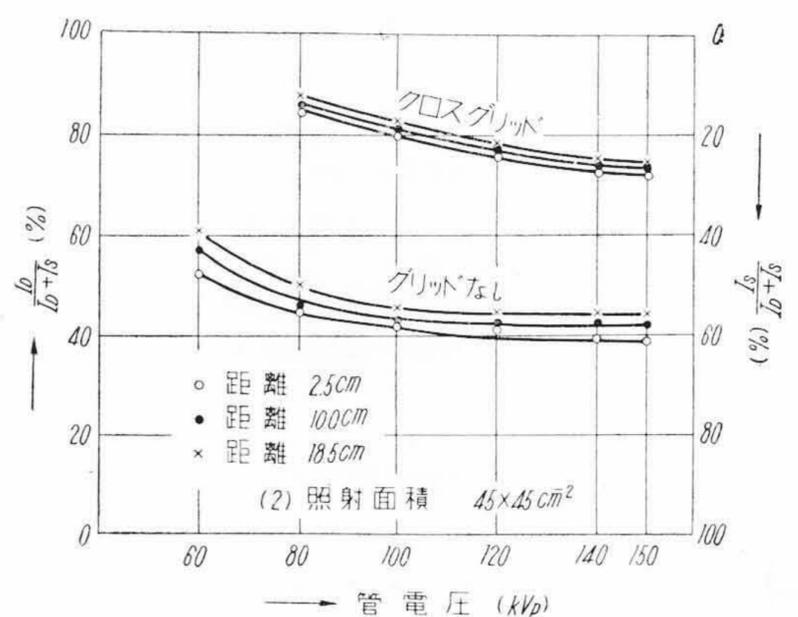
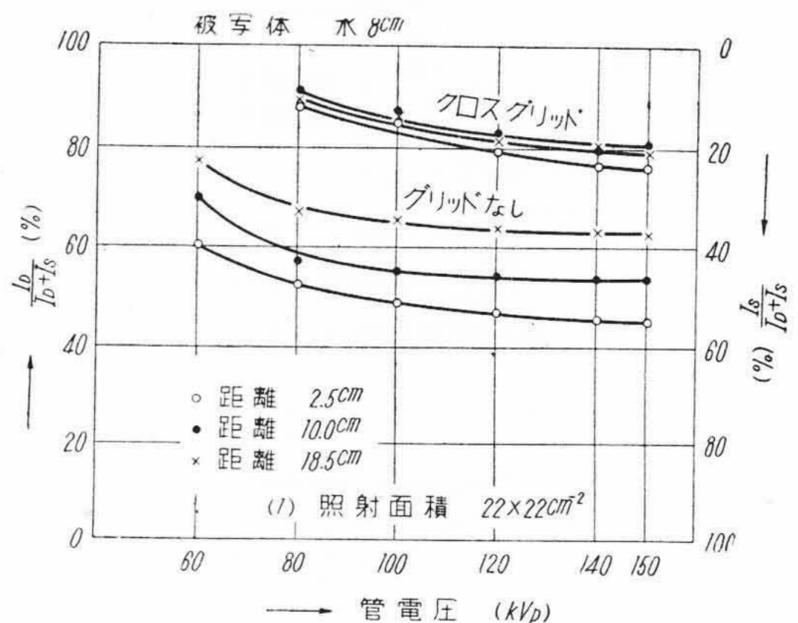
(注) () は照射面積 22×22 cm², それ以外は 45×45 cm²



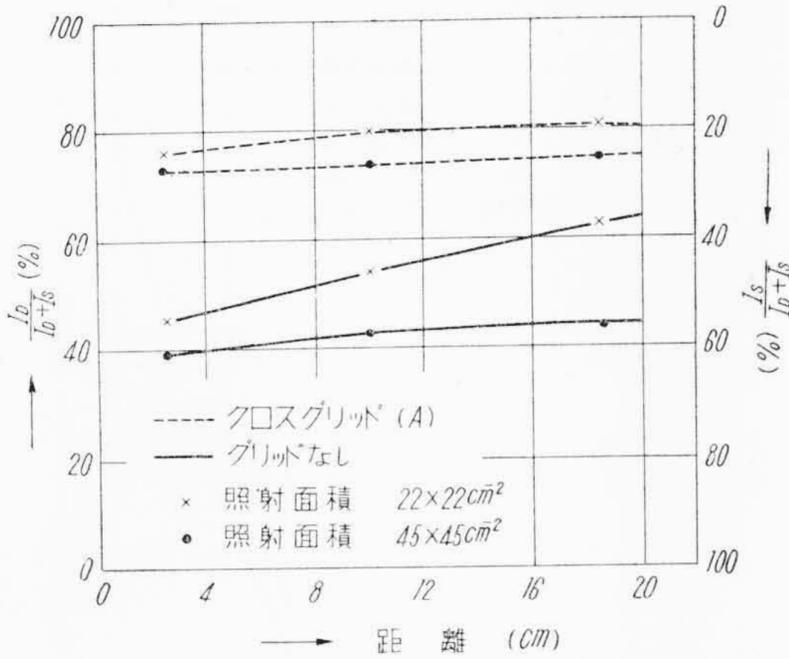
第 7 図 グリッドの構造
Fig. 7. Schematic Diagram of Lysholm's Grid

造は第 1 表の通りである。また散乱線と直進線では線質が異なり、散乱線の方が波長が長く物質により吸収され易いと考えられるのでグリッドの代わりに Al 板 0.8 mm および 1.6 mm をおいて散乱線除去の効果を測定した。

被写体を出た直後の X 線のうち直進線が I_D 、散乱線が I_S であつたものがグリッドを通つてそれぞれ $a \cdot I_D$ 、 $b \cdot I_S$ になつたとすると散乱線除去の効果は $\frac{a}{b}$ で求められる。除去せぬ時の含有率は $\frac{I_S}{I_D+I_S}$ 、除去後の含有率は $\frac{b \cdot I_S}{a \cdot I_D + b \cdot I_S}$ でこれ等を第 4 図に示したが、さらにグリッドの効果をみるために $a, b, \frac{a}{b}$ をまとめると第 2 表のごとくなる。これより効率はクロスグリッド (B), (A), シングルグリッドの順となり、種類により可成りの差のあることがわかる。また Al 板は余り効果

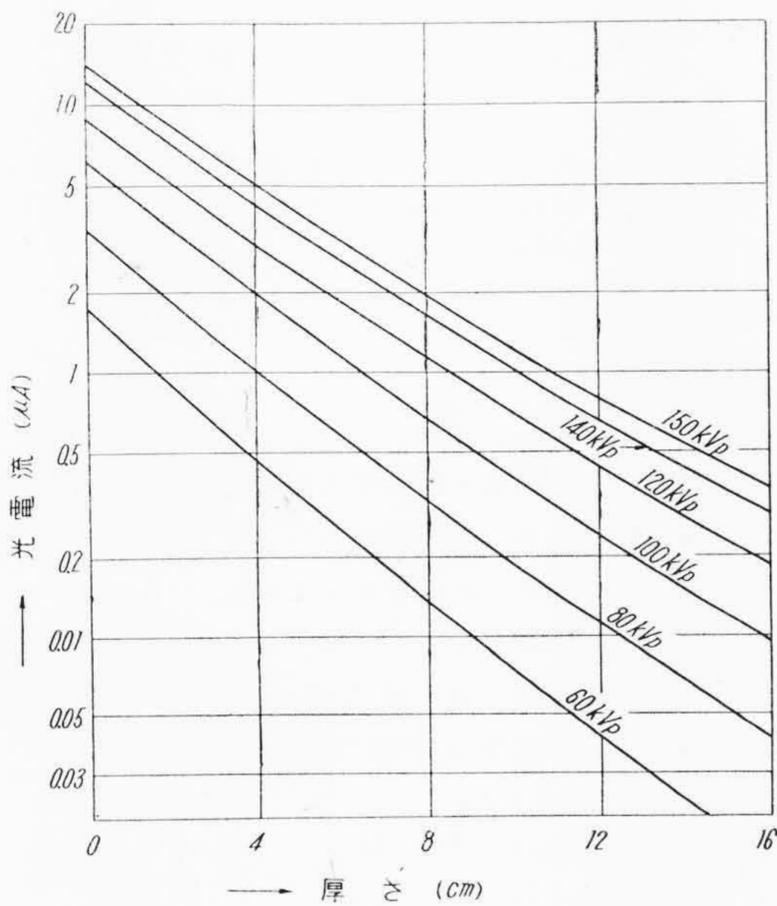


第 8 図 散乱線含有率と被写体フィルム間距離との関係
Fig. 8. Percentage of Scattered X-Rays as a Function of Distance between Object and Film



第9図 散乱線含有率と被写体フィルム間距離との関係

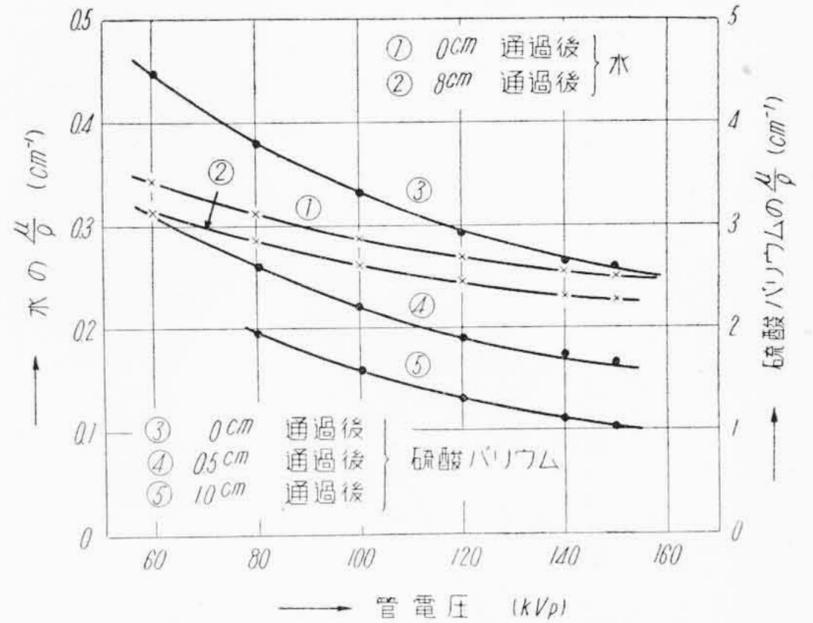
Fig. 9. Percentage of Scattered X-Rays as a Function of Distance Between Object and Film



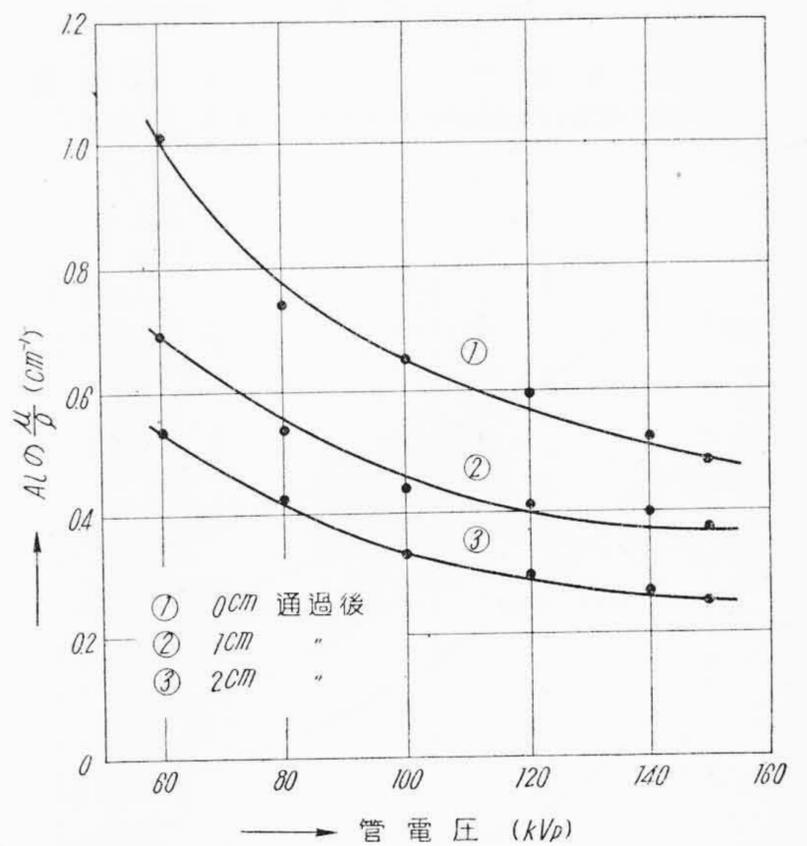
第10図 水による直進 X 線の吸収
Fig. 10. Absorption of Direct X-Rays in Water

がなく、したがって散乱線と直進線では線質に余り大きな差はないものと考えられる。

(B) 被写体、フィルム間距離と散乱線含有率の関係
照射面積大、小二つの場合に被写体と測定点までの距離(第1図d)を2.5, 10, 18.5 cmと変化させて散乱線含有率を測定した結果は第8図(1), (2)の通りである。これより140 kVPの値を距離を横軸にとつて示すと第9図のようになり、照射面積が小さい時は測定点の散乱線源に対する立体角が距離により大きく変るため、



第11図 水および硫酸バリウムの質量吸収係数
Fig. 11. Mass Absorption Coefficients for X-Rays in Water and Barium Sulphate



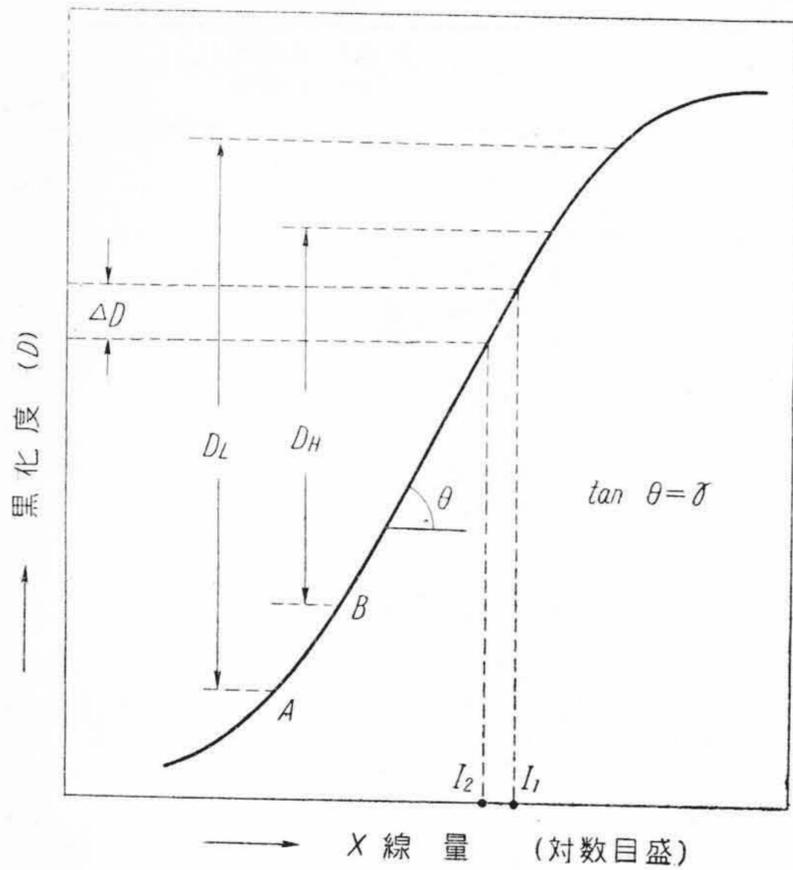
第12図 Al の質量吸収係数
Fig. 12. Mass Absorption Coefficients for X-Rays in Al

含有率もかなり減少するが、照射面積が大きい時は余り変化していない。またグリッドを用いる時は距離により含有率は余り変化しない。

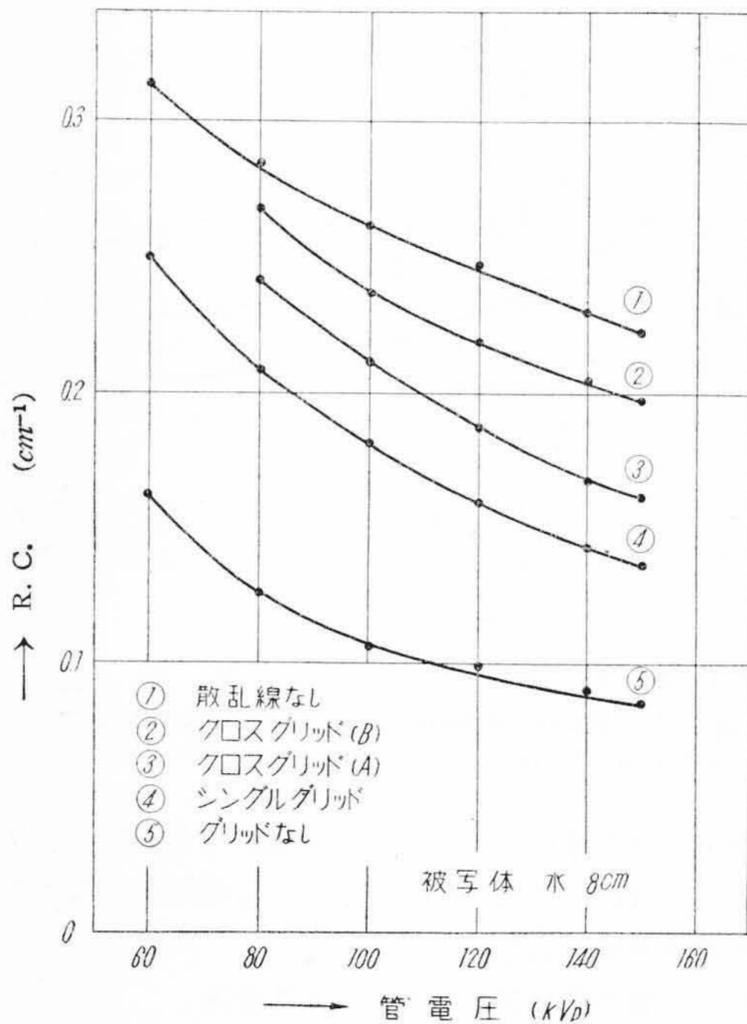
(4) 物質の吸収係数の電圧による変化

第1図において水槽④を除き、照射調節窓②の上側に各種物質をおき、その厚さを変えて直進線を測定するとその物質の吸収係数を求め得る。

物質として水を用いた場合は第10図のごとくである。この図の縦軸には光電流をとつたが、これはX線強度に比例した量で、しかも対数目盛であるからこの曲線の傾斜より直ちに水の吸収係数 μ が求められる。かくして求めた μ をその密度 ρ で割れば質量吸収係数となり、それ

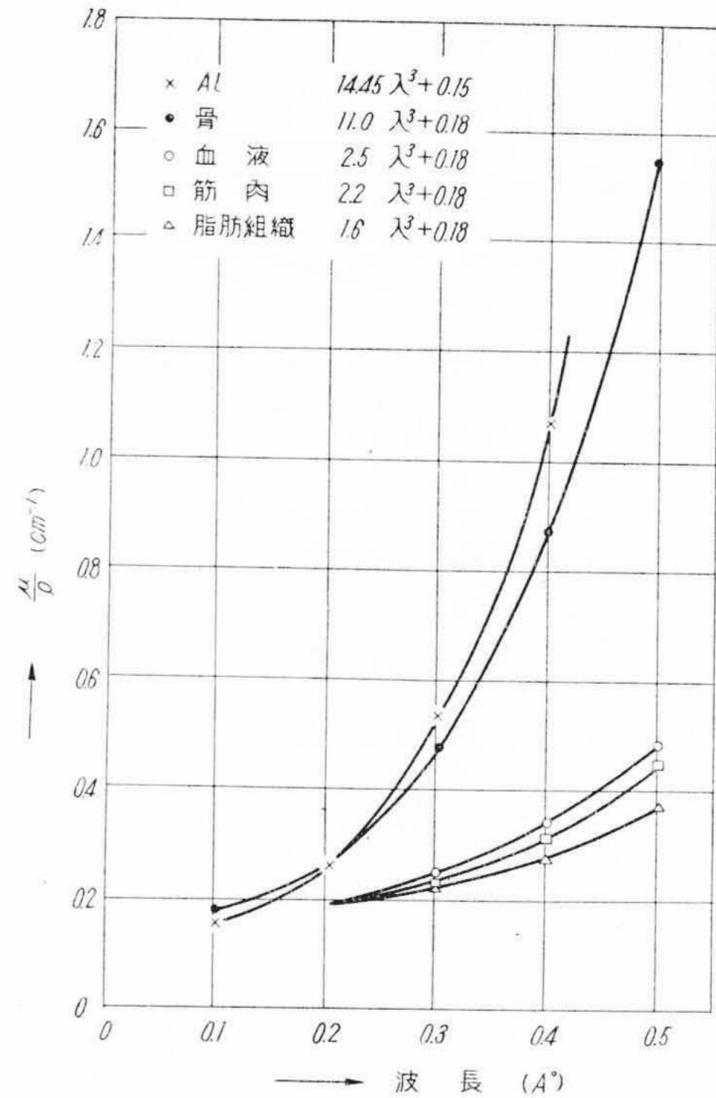


第13図 X線フィルムの特性曲線
Fig. 13. Characteristic Curve of X Ray Film



第14図 Radiation Contrast と X線管電圧との関係
Fig. 14. Radiation Contrast as a Function of Tube Voltage

を第11図に示した。同様にして求めた硫酸バリウム ($\rho = 1.45$) および Al ($\rho = 2.7$) の $\frac{\mu}{\rho}$ をそれぞれ第11図, 第12図に示す。ただしこの場合硫酸バリウム (硫酸バリウム 94%, 粘調剤 6%) 50g を水 70g にといたもの



第15図 各種物質の質量吸収係数
Fig. 15. Mass Absorption Coefficients of Several Materials

($\rho = 1.45$) で測定した。

〔IV〕 考 察

先に管電圧を上げると物質のX線吸収係数が減じ、また散乱線の影響もあつて写真のコントラストが低下すると記したが、さらにこの点を考えてみる。

今一定の吸収係数 μ をもつた物質の厚さ $\Delta\lambda$ だけ異なる二部分を撮つた場合、黒化度差が ΔD となつたとするとつぎの関係式が成立つ。(第13図参照)

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{\Delta D}{\log_{10} I_1 - \log_{10} I_2} \\ I_1 &= I_D + I_S \\ I_2 &= I_D e^{-\mu \cdot \Delta\lambda} + I_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし I_D : 直進線 I_S : 散乱線
 δ : フィルムの特性曲線の傾斜

よつて

$$\Delta D = \delta \left\{ -\log_{10} e \cdot \log e \frac{1 - \mu \cdot \Delta\lambda + \frac{I_S}{I_D}}{1 + \frac{I_S}{I_D}} \right\}$$

$$= \delta \cdot \left\{ -\frac{1}{2.3} \cdot \log e \left(1 - \frac{\mu \cdot \Delta\lambda}{1 + \frac{I_S}{I_D}} \right) \right\}$$

$$\therefore \Delta D = \frac{\delta}{2.3} \cdot \frac{\mu \cdot \Delta\lambda}{1 + \frac{I_S}{I_D}} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式よりコントラストはフィルムの δ および吸収係数 μ に比例し、散乱線は $\frac{1}{1+\frac{I_s}{I_D}} = \frac{I_D}{I_s+I_D}$ なる係数で効く事がわかる。

$$R.C. = \frac{\mu}{1+\frac{I_s}{I_D}} = \mu \cdot \frac{I_D}{I_s+I_D} \dots\dots\dots(4)$$

そこで(4)式で与えられる R.C. を Radiation Contrast と呼んでいる⁽²⁾。

被写体が水の場合の散乱線含有率 (第4図), 吸収係数 (第11図) を知ったから, 胸部の場合として水 8 cm を通過した後における吸収係数を用いて R.C. を求めると第14図のようになる。

この図の①は $I_s=0$ の場合で μ そのものを示す。またこの図より, 従来の 60 kVP 撮影ではグリッドを用いていなかったため R.C. = 0.163 であつたわけで, シングルグリッドを用いれば 120 kVP まで, またクロスグリッド (A) では 150 kVP まで電圧を上げててもコントラストは今までより低下しないことがわかる。また管電圧の上昇につれ, 主として μ の低下によつてコントラストが悪くなりグリッドを用いざるを得なくなる。

つぎに上述のこともわかるようにコントラストの問題は, 物質の吸収係数 μ を考えるとよい。しかし μ の値は X 線波長に対しては理論的にも判然とし, 成書⁽³⁾にも第15図のごとくわかっている。ところが実際に用いる X 線は単一波長の X 線でなく種々な波長の X 線の合成で, このような場合には実効波長がわかっていると都合がよい。そこで実際に用いている正弦波電圧で 60kVP~150 kVP の X 線の実効波長を求めると, 水の質量吸収係数について第11図と第15図を比較することにより 60 kVP では実効波長は約 0.4 Å であり, 150 kVP では約 0.3 Å で

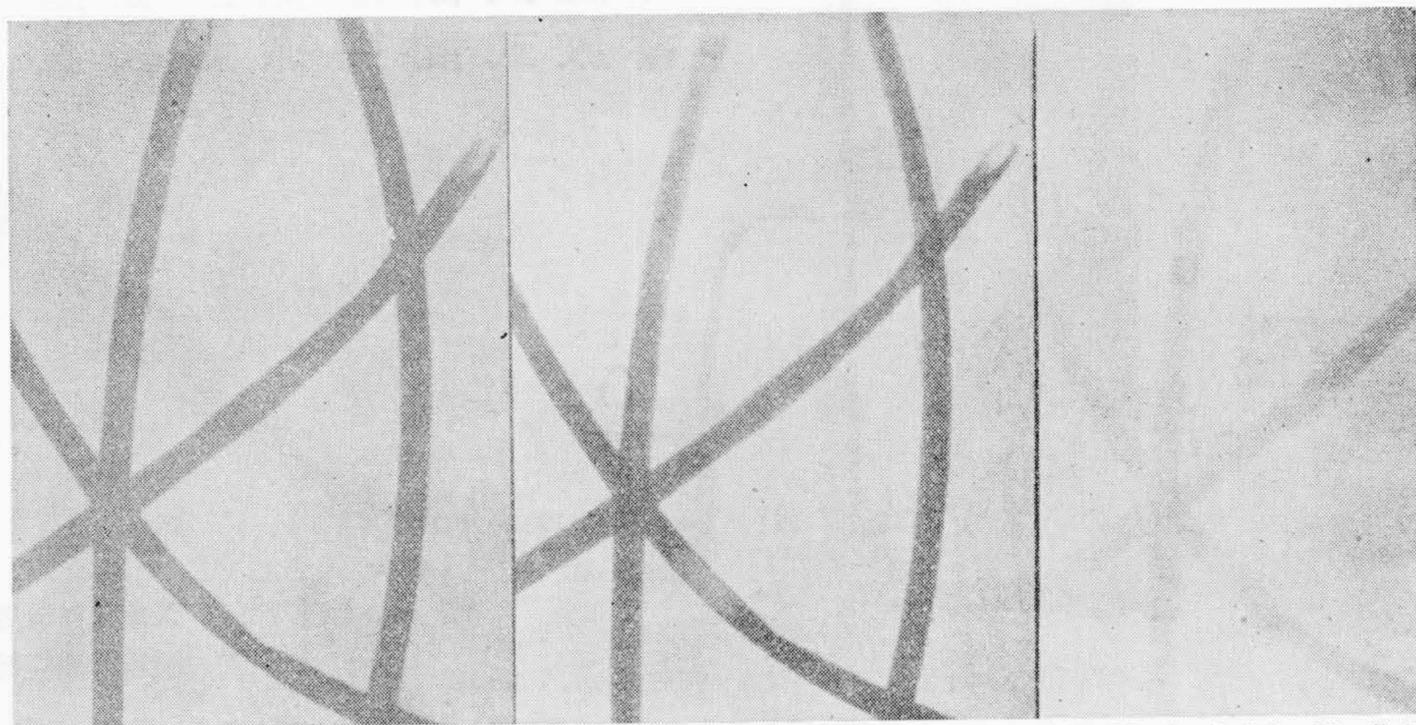
ある。また Al の $\frac{\mu}{\rho}$ について第12図と第15図を比較して 60 kVP では 0.395 Å, 150 kVP では 0.29 Å となつて水の時と大体一致する。以上は被写体を通過せぬ時についてであるが, 水 8 cm を通過後の $\frac{\mu}{\rho}$ を比較すると, 60 kVP で 0.38 Å, 150 kVP で 0.26 Å となる。

第15図よりすれば骨と Al とはよく近似した吸収特性を示している故, 骨の代わりに Al を用いて実験できることがわかる。

つぎに胸部撮影の場合について考える。写真黒化度の最大, 最小の幅は骨の影とその他の部分との黒化度の差で決まるが, 高圧になると骨の吸収係数は第14図に示したごとく急激に減少する。したがつて第13図に示したように低圧では D_L のごとく大きな幅であつたものが高圧になると D_H のように幅が小さくなる。したがつて高圧では少々照射量を間違えてもフィルム傾斜の直線部分に入り易くなる。すなわち撮影技術は高電圧の方が厳密を要さず容易になる。

第15図よりすれば骨では電圧上昇による $\frac{\mu}{\rho}$ の減少が著しく骨の微細構造を撮るには高電圧になるとコントラストが減じてよくないことがわかる。他方血管・筋肉などは $\frac{\mu}{\rho}$ が骨のような著しい減少を示さないし, また骨の影は低電圧では δ の小さい A 点 (第13図) のような所に来るが, 高電圧では B 点のような直線部分に来るから, 骨の影にある血管, 病巣などに対して, かえつて高電圧の方がコントラストがよくなる。

つぎに腹部の撮影について考える。こゝでは胸部に比し被写体の厚さが厚いので第2図よりわかるように, 電圧を上昇することによる管球負荷の減少は著しい。また散乱線含有率も多い上に (第5図参照), 臓器類の吸収係数の差が少ないので, コントラストは極めて悪く, 硫酸



60 kVP, 4 mA, 300 Sec No Grid 140 kVP, 4 mA, 33 Sec Cross Grid A 140 kVP, 4 mA, 9 Sec No Grid

第16図 水 (16 cm の深さ) の中に入れた硫酸バリウムの X 線写真
Fig. 16. Radiograph of Barium Sulphate in Water (Depth 16 cm)

バリウムなどの増影剤を用いねばならない。そこで模型としてビニールチューブ（外径7mmφ、内径6.5mmφ）に硫酸バリウム（ $\rho=1.45$ ）をつめ、これを水深16cmの水槽に入れて撮つたものは第16図のごとく60kVPではバリウムの重り目がはつきりせず一様になつていますが、140kVPでは重り目がはつきりしている。これはバリウムの吸収係数が低電圧では大き過ぎ、高電圧では減少してかえつて適当な値となつていたため、このことは腸の増影撮影のような場合には好都合である。

〔V〕 結 言

以上の結果よりつぎの結論を得る。

- (1) 管電圧の上昇によるX線管負荷の軽減は被写体の厚さが厚い程効果的である。
- (2) 散乱線含有率は電圧によるよりもむしろ被写体の厚さによつて大きく変化し、厚さと共に増加する。また照射面積が小さい程少ない。
- (3) 照射面積が小さい時は被写体とフィルム間距離を大きくすることにより散乱線含有率はかなり減少できる。
- (4) Al板で散乱線を除こうとしてもグリッド程の

効果はない。

(5) 高電圧になると吸収係数が小さくなるため、全般にコントラストは低下するが、吸収係数の減少の甚しくないもの（血管像など）はグリッドを用いることによりコントラストの低下を防ぎ得る。

(6) 骨は吸収係数の減少が甚しいので、骨自身の像は低圧程コントラストはよいが、骨の影にある病巣、血管などは高圧の方がコントラストはよくなる。

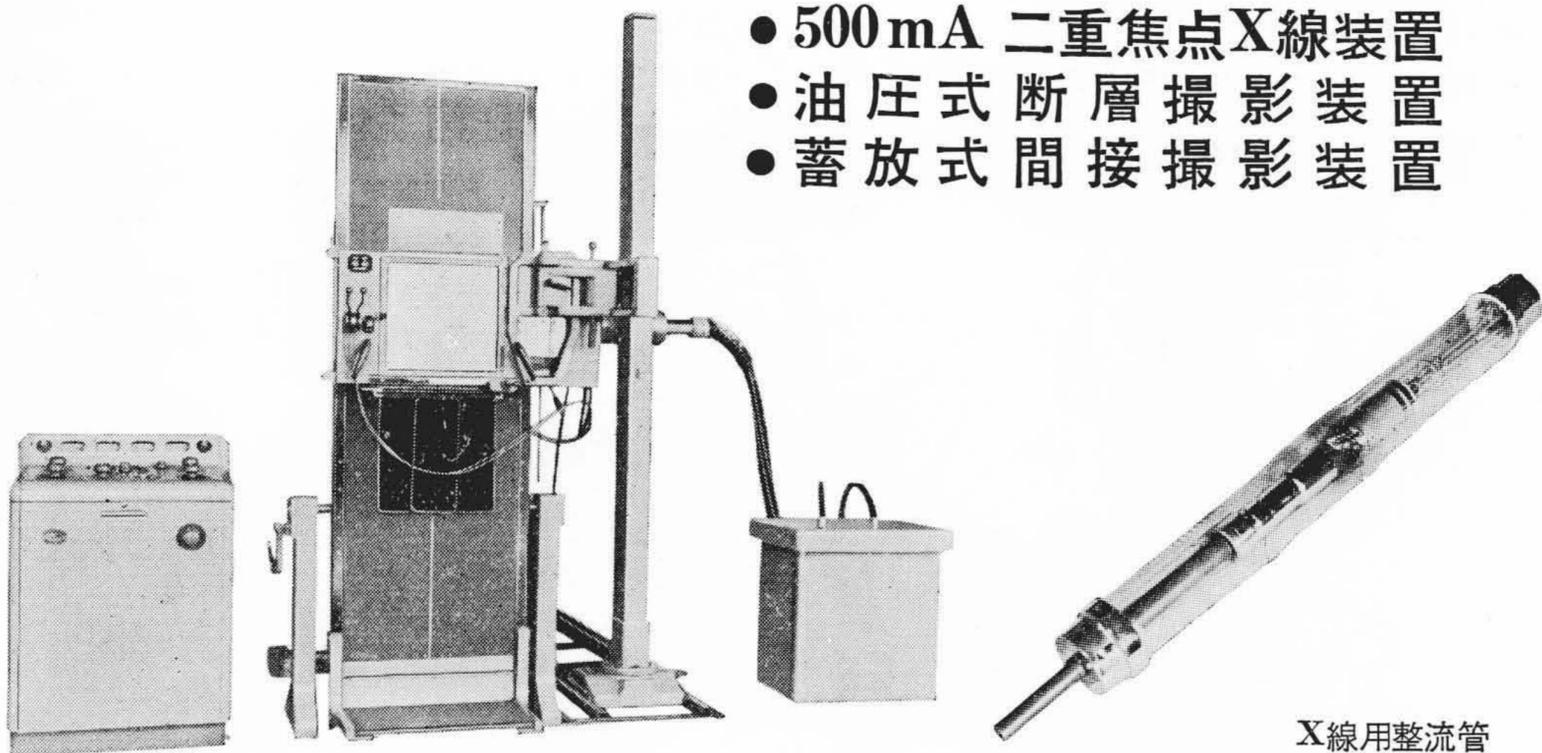
(7) 撮影技術は高圧の方が厳密を要さず容易である。

なおグリッドは散乱線除去の能率のよいものは照射量を多く要し、またフィルム、増感紙についても感度をよくすれば鮮鋭度の低下を来しどのような性能のものが最適であるかの問題、またフィルムの σ の大きなものを用いてコントラストをよくする工夫なども考えられるが、これらは今後検討を要する。

参 考 文 献

- (1) 神田：日医放學誌 14 10 (1955)
- (2) A. Nemert., T.H. Hills: Brit. J. Radiology 26 304 (1953-3)
- (3) 江藤：人体と放射線（岩波）173（昭-29）

日立 診療用 X線装置



- 500mA 二重焦点X線装置
- 油圧式断層撮影装置
- 蓄放式間接撮影装置

X線用整流管
医療用真空管

日立レントゲン販賣株式会社 日立製作所