

診断用 X 線管陽極角度の出力と半価層に与える 影響のコンピュータ・シミュレーション

大阪大学歯学部歯科放射線学教室

速 水 昭 宗 淵 端 孟

滋賀医科大学放射線医学教室

山 崎 武

大阪大学病院中央放射線部

森 嘉 信

大阪大学医学部放射線医学教室

大 関 修 治

(昭和55年3月6日受付)

(昭和55年6月9日最終原稿受付)

Computer simulation for the effect of target angle in diagnostic x-ray tube on x-ray output and half-value layer

Akimune Hayami and Hajime Fuchihata

Department of Oral Radiology, Osaka University Dental School

Takeshi Yamazaki

Department of Radiology, Shiga University of Medicine

Yoshinobu Mori

Central Clinic of Radiology, Osaka University Hospital

Syuji Ozeki

Department of Radiology, Osaka University Medical School

Research Code No.: 203, 204.1

Key Words: Diagnostic x-ray tube, Target angle, X-ray output,
half-value layer, Total filtration

The change of target angle of X-ray tube plays an important role in changing both the output and the quality of X-rays. A computer simulation was made to estimate the effect of target angle on the output and the quality (half-value layer:HVL) in the central ray using Storm's semiempirical formula. The data here presented are the values of output and HVL for the target angles of 10,15,20 and 30 degrees and for the total filtrations of 1,2,3 and 4 mm Al eq., at an increment of 10 kV steps of applied voltage between 50 and 150 kV. The output values and HVL's as a function of target angle, applied voltage and total filtration are shown for a full-wave rectified diagnostic X-ray generator. As a result, changes ranging from 17 to 76% in the output and 5 to 66% in the HVL were noted by varying the target angle from 10 to 30 degrees. Therefore, the target angle of X-ray tube should be clearly stated whenever the output and the quality (HVL) of X-ray generator are discussed.

1. はじめに

X線診断時の患者被曝線量低減,あるいはX線写真像質の最適化を進めるには,X線装置の出力と線質についての十分な知識が要求される。

X線出力(以下出力と略)と線質が,管電圧,管電流およびそれらの波形,高圧ケーブルの長さ,総濾過,管球の使用時間,焦点外X線,ターゲットの材質とその角度によって変化することは,広く知られている。しかし,これら要因のうちターゲット(陽極)角度が,中心軸上の出力と線質へもたらす影響についての知識は,古くからほぼ同質の効果の heel effect¹⁾²⁾が知られている割には乏しい様である。

そこで,12~300keVの範囲について20%以内の精度で測定値と一致するという Storm の半実験式を利用して,単相全波整流の場合,陽極角度が中心軸上の出力と線質におよぼす影響を,管電圧と総濾過および半価層についてシミュレーションを試みた。

2. 方 法

2-1. Storm の半実験式について

(1),(2)式に計算で利用した Storm の半実験式を示す³⁾。

$$I_{E_0,k} \approx \left(\frac{11}{4\pi} Z \frac{(E_0 - k)(1 - e^{-3k/E_K})}{(k/E_0)^{1/3}(1 - e^{-E_0/E_K})} \right) f_{E_0,k,\alpha} \quad \text{erg/s mA keV sr} \dots\dots (1)$$

$$f_{E_0,k,\alpha} \approx \exp(-0.2 C_{E_0,k} R_{E_0} \mu_k / \tan \alpha) \dots\dots (2)$$

ここに, E_0 は初期電子エネルギー k は光子エネルギー, E_K は陽極物質K殻の電離エネルギー, Z は陽極物質の原子番号, $I_{E_0,k}$ は放出光子エネルギー, $C_{E_0,k}$ は初期電子エネルギーと光子エネルギーに依存する補正值, R_{E_0} は初期エネルギー E_0 の電子の陽極物質中の飛程, μ_k は光子エネルギー k の陽極物質での減弱係数, α は陽極角度, したがって $f_{E_0,k,\alpha}$ は光子の陽極物質中の減弱補正項である。

2-2. 計算方法の概要

陽極物質はタングステンとする。管電圧および管電流波形は同位相の正弦波とし,管電流は平均値から波高値に換算するとともに,波高値を1に

規格化して計算の便をはかった。両波形とも位相を3度ごとに分割し,各分割点では10keV以上について2keVおきに,その位相での管電圧まで計算した。70kV以上の管電圧の場合には,K特性X線の寄与を Hettinger⁴⁾のデータによって付加している。一方,L特性X線の寄与は無視した。

(1)式のように Storm の半実験式は,立体角あたりについての放出光子エネルギー量を与えるが,これをある距離での光子フルエンス,エネルギーフルエンスおよび照射線量の三者に,途中の空気による減弱も含めて換算することは容易である。計算結果は10keVから2keVごとの三者の値とその合計,さらにAlに対する第1,第2半価層および均等度が得られる様にしている。

半価層の値については,吸収係数とAl板厚による計算値であるところから,理想的な幾何学的条件と電離箱線量計によるものとみなしうる。

これら計算値は,X線管陽極表面に荒れの無い場合,いいかえると新しいX線管による場合に相当するものであって,agingにもとずく陽極表面の荒れがあると,陽極物質の管壁への燕着によって固有濾過が増加し,出力の低下と線質の硬化が起ることになる。

3. 結 果

管電圧50kVから10kVおきに150kVまで,陽極角度10,15,20,30度のそれぞれについて焦点から75cmの距離でのmR/mAsで表わした中心軸上の出力を, Fig. 1 a, b では総濾過について(図の混乱を避けるため,110,120および140kVは記入せず), Fig. 2 では半価層について与える。

Fig. 3 には,総濾過と半価層の関係を,60,90および120kVについて示す。

いずれも図中,■が30度,△度が20度,○が15度そして●が10度の陽極角度での値である。

また,これらの値を Hospital Physicists' Association (HPA)⁵⁾ および 尾内ら⁶⁾のデータと比較し,このシミュレーションの妥当性を検討するため実線で HPA,点線で尾内らのデータを記入してある。ただし,両氏ともに陽極角度の記述は

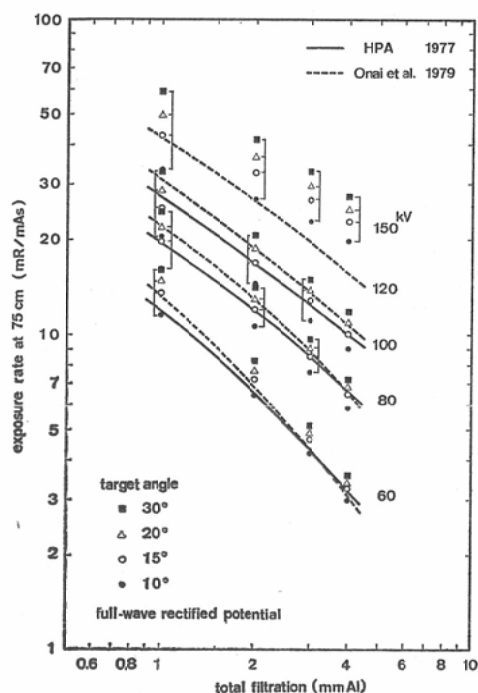


Fig. 1a

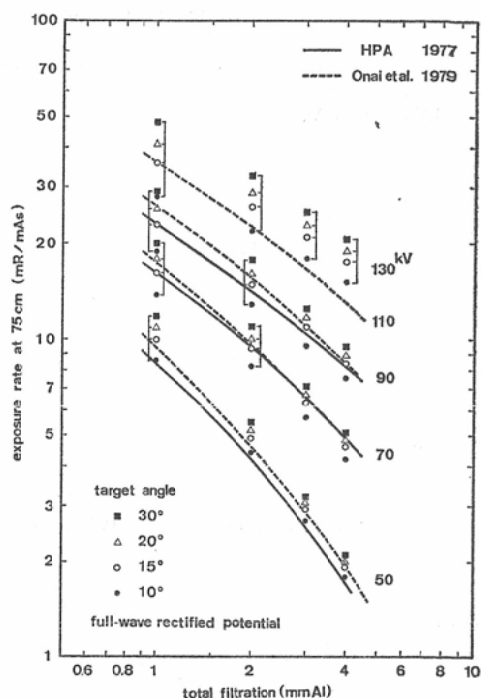


Fig. 1b

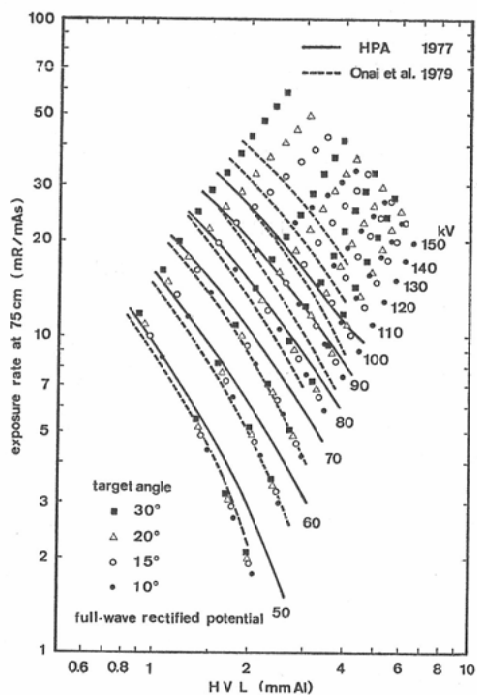


Fig. 2

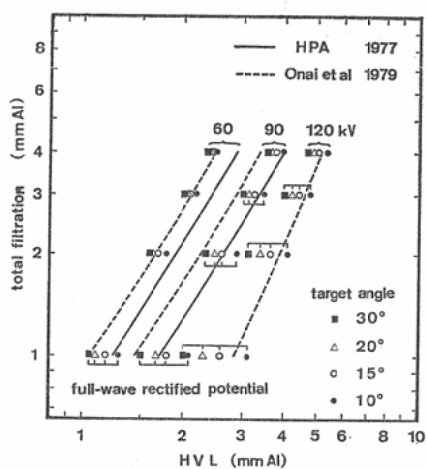


Fig. 3

Fig. 1 a), b) Output values versus total filtration for different kV values and target angles.

Fig. 2 Output values versus HVL for different kV values and target angles.

Fig. 3 Total filtration versus HVL for 60, 90, 120 kV values and target angles.

Table 1 The effect of target angles on output and HVL.

applied volt. (kV)	total filt. (mm Al)	output (mR/mAs) target angle				exposure ratio (30°/10°)
		10°	15°	20°	30°	
50	1	8.58 (1.04)	9.93 (0.97)	10.7 (0.93)	11.7 (0.90)	1.36
	2	4.39 (1.47)	4.88 (1.41)	5.16 (1.38)	5.47 (1.35)	1.25
	3	2.68 (1.80)	2.92 (1.75)	3.06 (1.72)	3.21 (1.69)	1.20
	4	1.78 (2.07)	1.92 (2.02)	2.00 (1.99)	2.08 (1.97)	1.17
100	1	20.3 (2.41)	25.2 (2.04)	28.4 (1.86)	32.7 (1.67)	1.61
	2	14.4 (3.26)	16.9 (2.94)	18.5 (2.77)	20.4 (2.60)	1.42
	3	11.1 (3.90)	12.7 (3.63)	13.7 (3.49)	14.8 (3.33)	1.33
	4	9.02 (4.43)	10.1 (4.20)	10.8 (4.09)	11.6 (3.95)	1.28
150	1	33.2 (4.29)	42.5 (3.49)	49.2 (3.05)	58.5 (2.59)	1.76
	2	26.7 (5.30)	32.4 (4.68)	36.3 (4.32)	41.3 (3.93)	1.55
	3	22.5 (6.01)	26.7 (5.52)	29.4 (5.23)	32.7 (4.92)	1.45
	4	19.5 (6.57)	22.8 (6.17)	24.8 (5.94)	27.3 (5.68)	1.39

exposure at 75cm. () : HVL in mm Al eq.

なく、不明である。

Table 1 には、50, 100および150kV の場合の、総濾過と陽極角度の種々の組合せについて、出力と()内に半価層の値を、そして陽極角度30度と10度の出力比を示した。

4. 考 察

診断用X線装置の出力と線質を推定する目的の大部分が、放射線防護と画質の改善のためであるとすれば、それらの数値に要求される精度はどの程度なのか、議論のあるところであろうが、ここではこの点にふれず、また Storm の半実験式の内容についても討論しない。

出力および線質の推定に役立つ、出力と半価層、出力と総濾過、そして総濾過と半価層などについての表または図は、文献上比較的容易に得られる^{9)~12)}。しかし、これらの表または図には、陽極角度の記載が充分ではない。

一方、微細構造描写など診断上の要求から、実効焦点面積を小さくする必要があり、熱負荷の面から相対的に実焦点面積を大きくするために、陽極角度は小さくなる傾向にある。X線管のカタログをみると、18度、16度から10度の間が多く、10度以下にも7度、なかには5度というもので出現している。したがって、このような小陽極角度では、従来の比較的大きい角度の陽極に比して、

陽極物質自身による減弱あるいは濾過の効果が増加していることになり、陽極角度を除く他のすべての条件が同一であっても、陽極角度の変化のみで出力と線質が影響を受けるであろう。

陽極角度だけを変え、残りの条件を全て同じにという実験は難かしく、陽極角度の異なる焦点を持った Bianglix tube によるものや¹⁴⁾、管球軸を傾けて heel effect を利用した検討¹⁵⁾がみられる位であって、しかもこれらは、このシミュレーションの様に広範囲なものでは無く、かなり限られた条件下のデータしか得られていない。

まず、図によって HPA および尾内らのデータと計算値との比較をしてみると、Fig. 1 a, b から、陽極角度10度と30度の間に50kV では尾内らが、60から100kV では両者ともが含まれてしまう。50kV においても、陽極角度10度と HPA とのズレは小さい。図の混乱を避けるため、尾内らの110, 120kV に対応する計算値を記入していないが、傾向は100kV までと同様である。

Fig. 2 では、全体の傾向として半価層の厚い場合に70kV までは尾内らのデータと良く一致し、80kV からは HPA のデータと一致する方向に移って行くが、その理由は不明である。そして薄い半価層の場合に、計算値が両データを上回る傾向にあるが、この原因の一つにはシミュレーション

が10keV以下の光子エネルギーとL特性X線の寄与について計算を行っていないので、線量スペクトルのうち、合計線量に寄与する低エネルギー成分が過小評価されたことから、線量表示にもとづく半価層が、実際より厚い目に評価されたのではないかと考えられる。

Fig. 1, 2をノモグラフとして実際上利用するときには、Fig. 1は総濾過に対する出力であることから、固有濾過が不明の場合には総濾過を推定しなければならず、不便であろうと思われる。一方、Fig. 2は半価層に対する出力であることから、半価層の測定に問題を残すものの、測定が正しく行なわれれば良いだけでなく、ほぼ100kVまでは陽極角度の変化を含めて管電圧ごとに一本の曲線とみなし得るところからも、Fig. 1より便利であろう。

総濾過と半価層の関係を与える図または表などは、総濾過が不明の場合に半価層を測ることから総濾過を推定することの可能性を示すが、Fig. 3から明らかな様に、陽極角度を指示しなければ推定値にはかなりの相異があることになる。

以上の4つの図から、両氏のデータと計算値との比較をしてみると、両氏とも陽極角度の記載が無いために具体的な対応の検討は無理であったが、大まかなところではStormの半実験式を応用したシミュレーション方法は、利用に耐えるものであるといえよう。

次にTable 1から、陽極角度による出力と半価層の変化は管電圧と総濾過に関係し、出力でみると表中、陽極角度10度と30度の比で、最小と最大は1.17および1.76にもなり、とくに薄い総濾過と高電圧において変化は大きい。これは陽極角度が同じ場合に陽極自身による効果を一定と考えると、総濾過が薄くなると濾過の程度が減少すること、高電圧の場合には、電子の陽極物質内への射入深さが増すことから、相対的に深部で発生した光子の陽極物質自身による吸収長（濾過厚）が陽極角度に大きく依存することによるものと考えられる。

一方、半価層の変化も10度と30度の比で、最小

と最大では1.05および1.66にもなり、出力の場合と同様に、薄い総濾過と高電圧の場合に影響が大きい³、これも出力と同じく濾過の変化にもとづくものである。したがって、小陽極角度のX線管では大きい陽極角度の場合よりも、コントラストの低下をみるかも知れない。

なお、医療法施行規則第30条では、60kV以上の利用線錐の総濾過は2mm Al eq. 以上とあり、このシミュレーションには非合法のものも含まれているが、全体の傾向をみる必要上から取入れたものである。

フィルター法（または吸収法）による固有濾過および管電圧の測定にも、陽極角度は影響を与えることが知られている¹⁴⁾¹⁶⁾、総濾過と半価層の関係も陽極角度によって影響を受ける（陽極物質自身の濾過は、実効的な固有濾過の一部に相当するとみなし得る）など波及の範囲は広い。

したがって出力や線質について述べる時には、第1項で示したさまざまな要因の中でも、半価層より簡単に調べられる陽極角度は、必ず表示すべきである。

充分なデータの得られていない現状では、注意深く配慮された実測によって、このシミュレーションの内容が裏付けられなければならないが、そのためには、高エネルギー放射線の吸収線量測定法¹⁷⁾またはHPAの各種レポートにみられる様な具体的なマニュアル類の作製、さらに電離箱線量計のみならず、管電圧、固有濾過などを含めた測定と校正のシステム、いいかえればquality assuranceのシステムが³、診断用X線の領域において確立されることが急務であろう。

5. まとめ

単相全波整流診断用X線装置のX線管の陽極角度10, 15, 20, 30度および総濾過1, 2, 3, 4mm Al eq. のそれぞれの組合せについて、管電圧50kVから150kVまで10kVおきに中心軸上の出力と半価層を、Stormの半実験式にもとづいて計算した。

陽極角度が10度から30度に変わるだけで、出力に17~76%、半価層に5~66%もの変化が認めら

れたので、出力や線質について述べる場合には、必ず陽極角度を明らかにすべきである。

文 献

- 1) Zinthero, C.J.: Variations in the intensity and quality of roentgenray output as affected by the angle to the central ray, the roentgen tube and the roentgen machine. *Am. J. Roentgenol.*, 37: 98—104, 1937
- 2) ICRU Report 10b: Physical aspects of irradiation. pp. 66—72, 1962, ICRU Publications, Washington, D.C.
- 3) Storm, E.: Calculated bremsstrahlung spectra from thick tungsten target. *Physical Review A.*, 5: 2328—2338, 1972
- 4) Hettinger, G. and Starfelt, N.: Bremsstrahlung spectra from roentgen tubes. *Acta Radiologica.*, 50: 381—394, 1958
- 5) HPA: The physics of radiodiagnosis. 2nd ed. pp. 53—59, 1977, The Hospital Physicists' Association, London
- 6) 尾内能夫, 都丸禎三, 入船寅二, 内田 勲: 診断用X線装置のX線出力と半価層の推定図表に関する考察. *日本医放会誌*, 39: 637—644, 1979
- 7) Hale, J.: The homogeneity factor for pulsating potential X-ray beams in the diagnostic energy region. *Radiology*, 86: 147—148, 1966.
- 8) NCRP Report No. 33: Medical X-ray and gamma ray protection for energies up to 10 MeV, equipment design and use. pp. 42—44, 1968, NCRP Publications, Washington, D.C.
- 9) *Radiological health handbook*, rev. ed., pp. 156—160, 1970, U.S. DHEW, Maryland
- 10) Gitlin, J.N. and Lawrence, P.S.: Population exposure to U.S. 1964. pp. 41—42, 68—69, 1966, U.S. DHEW, Washington, D.C.
- 11) McCullough, E.C. and Cameron, J.R.: Exposure rates from diagnostic X-ray unit. *Brit. J. Radiol.*, 43: 448—451, 1970
- 12) 佐藤孝司: 診断用X線管の管電圧, 管電流と波形による放射X線の特性変化(Ⅱ)基本整流波形. *日放技会誌*, 30: 255—265, 1974
- 13) Osborn, S.B.: X線診断における患者の防護—ICRP 16, pp. 86, 1974, 日本アイソトープ協会, 東京
- 14) Ardran, G.M. and Crooks, H.E.: The measurement of inherent filtration in diagnostic X-ray tube and the effect of target angle on X-ray quality. *Brit. J. Radiol.*, 45: 599—602, 1972
- 15) Gibson, J.A.B., Ardran, G.M., Peaple, L.H.J., Marshall, M., Crooks, H.E. and Birch, R.: Standardization of the output from diagnostic X-ray generators. (In) *Biomedical dosimetry*, STI/PUB/401. pp. 509—519, 1975, IAEA, Vienna
- 16) Weise, H.P.: A simple filter method for measuring peak voltage and inherent filtration of pulsating potential X-ray machines. *Health Physics*, 34: 486—489, 1978
- 17) 日本医学放射線学会 物理部会 編: 放射線治療における⁶⁰Coガンマ線および高エネルギーX線の吸収線量の標準測定法. 1972, 通商産業研究社, 東京