原 著

インバータ式X線装置の短時間特性

宮 崎 茂・原 孝 光・松 谷 一 雄

*斎 藤 一 彦

東邦大学医学部附属大橋病院放射線部

*日本鋼管病院放射線科

(論文受理 1993年 3 月23日)

(最終論文受理 1993年 7 月16日)

(Code No. 731)

Key words: Inverter type X-ray generator, Short irradiation time characteristics, Radiographic effect, X-ray output, Current time product

SHORT IRRADIATION TIME CHARACTERISTICS OF THE INVERTER TYPE
X-RAY GENERATOR

SHIGERU MIYAZAKI, TAKAMITU HARA, KAZUO MATUTANI

*KAZUHIKO SAITO

Department of Radiology, Ohashi Hospital Attached to the School of Medicine, Toho University

*Department of Radiology, Nippon Kokan Hospital

Summary

The linearity of the X-ray output is an important factor in radiography. It is a composite of the linearities of the X-ray tube voltage, the X-ray tube current, and the exposure time. This paper focuses on the linearity of exposure time.

Non-linearity of the X-ray output for short-time exposure became a problem when the three-phase X-ray generator was introduced.

This paper describes the inverter-type X-ray generator, which is expected to become predominant in the future. previously, we investigated X-ray output linearity during short-time exposure using the technique of dynamic study. In this paper, we describe the application of a digital memory and a personal computer to further investigation. The non-linearity of the X-ray output was caused by irregular waveforms of the X-ray tube

voltage found at the rise time and the fall time. When the rise time was about 0.6 ms, the non-linearity was about 2%, which is negligibly small.

The non-linearity due to the fall time of the X-ray tube varied greatly according to the X-ray tube current. For the minimum irradiation time of 1 ms, 4% to 27% of the non-linearity was attributable to the fall time. The main cause was the stray capacitance of the X-ray high-voltage cables. When the X-ray tube current exceeded 400 mA, the rise time was almost equal to the fall time, and the problem did not occur. Consequently, the ideal generator should have a fall time which is equal to the rise time of the X-ray tube voltage. Strictly speaking, such a generator should have rectangular waveforms.

1. 緒 言

近年、医療技術の進歩にともない高度なX線撮影技術が要求されている。それに伴い診断用X線装置のX線制御技術も進み、今まで二次側制御でなくては行えなかった1 msの撮影もインバータ式X線装置の出現で可能な時代となってきた¹⁻²⁾。

こうした制御技術の進歩に対し短時間撮影と装置の応答に関する研究も活発に行われ、撮影時間10 ms以下の極めて短い短時間撮影では極僅かな管電圧、管電流波形、照射時間の変化、および管電圧の立ち上がり立ち下がり時間がX線出力（本論文では蛍光強度で表す）に大きな影響を及ぼし、短時間撮影時のX線出力の非直線性の原因となっていることは明らかとされている²⁻⁷⁾。

一方X線撮影技術を考えた場合、X線出力の直線性は重要な問題であり撮影条件の定量化にとって見過ごすことのできない問題となっている。

本報告では、現在最も管電圧の立ち上がり時間が早く、管電圧脈動率の少ないインバータ式X線装置を用い短時間時におけるX線出力の直線性に付いて、管電圧の立ち上がり立ち下がり時間、および管電圧、管電流、照射時間と写真効果の関係を明らかにする。

2. X線装置及び測定器

2.1 インバータ式X線装置

装置の形名：UD150B-10 (株)島津製作所

短時間定格：80 kV, 1000 mA

100 kV, 800 mA

125 kV, 630 mA

150 kV, 500 mA

長時間定格：125 kV, 4 mA

公称最大電力：80 kW

インバータ周波数：最大30 kHz

インバータの種類：共振形 最小管電流時間積0.5 mAs (最短照射時間1 ms)

X線用高電圧ケーブル長：10 m (浮游容量約250 pF/m)

X線管：DRX-2903HD (株)東芝

電源電圧：400 V (最大定格負荷において電源電圧変動率0.5%以下)

2.2 測 定 器

管電圧・管電流計：AB2015D トーレック(株)

蛍光量計：EY-1001D トーレック(株)

オシロスコープ：TEKTRONIX7633 ソニー・テクトロニクス(株)

パーソナルコンピュータ：PC-9801DA 日本電気(株)

トランジェントコンバータ：TCCQ1216, 記憶容量；16000 word, サンプルング時間；50 ns/word, 16 bit, 理研電子(株)

プリンタ：PC-PR201/65A 日本電気(株)

3. 測定方法

管電圧・管電流計を陽極回路に接続しX線利用ビーム内に蛍光量計検出部を置き、これらの出力電圧をオシロスコープおよびデジタルメモリに入力し管電圧、管電流、蛍光強度波形を計測する。

従来、各波形の計測はオシロスコープによって吟味していたが、今回はデジタルメモリで得られた各波形をパーソナルコンピュータを用い計測を行った。この手法により管電圧、管電流、照射時間、蛍光量の他に管電圧脈動率、任意な時間の蛍光量などが容易に計算ができるようになった (Fig. 1)^{8,9)}。管電圧、管電流は定常状態における二点間 (measurement time) の管電圧波高値、波低値および計算された管電圧脈動率、管電流平均値を示す。照射時間は管電圧波高値の立ち上がり立ち下がり75%を計測する。蛍光量については負荷時間における蛍光量、管電圧立ち上がり部における波高値の75%までの蛍光量、同じく立ち下がり部75%から0電位までの蛍光量と照射時間内の蛍光量、この他に任意に定めた時間内における蛍光量を測定し吟味した。

インバータ式X線装置の短時間特性 (宮崎・他)

Fig. 1 Example of measurement by personal computer. X-ray tube voltage, 100 kV (upper). X-ray tube current, 200 mA (lower), X-ray output waveform (center). Exposure time, 2 ms.

短時間撮影時における時間に対するX線出力の非直線性を示す因子は管電圧の立ち上がり立ち下がり時間に因る写真効果(斜線部分)が主であると言われている¹⁾(Fig. 1)。このことから装置の設定値から求めた直線性、実測値から求めた直線性、X線装置の波形の無歪み状態の直線性を検討した。その条件下で、フィルム濃度からも調べた。

尚今回の測定では時間に対するX線出力を吟味するこ

とから各管電流とも最短照射時間を1 msから測定を行った。

4. 測定結果

4.1 X線管電圧波形の比較

短時間照射時の管電圧、管電流、蛍光強度波形のオシログラムをFig. 2, 3に示す。各管電流とも極僅かであるが過渡現象が見られ、管電圧波形が定常値に達するまで

Fig. 2 High-voltage waveform of inverter-type X-ray high-voltage generator. X-ray tube voltage (upper), X-ray tube current (lower), and X-ray output (center) waveforms.

Fig. 3 High-voltage waveform of inverter-type X-ray high-voltage generator. X-ray tube voltage (upper), X-ray tube current (center), and X-ray output (lower) waveforms.

Table 1 Tube voltage percent ripple X-ray tube voltage: 100 kV.

kV \ mA	50	200	400	800
100	4.2	2.7	3.2	4.8

(%)

数 ms 時間がかかっている。また管電圧の立ち上がり立ち下がり時間を見ると、立ち上がり時間はX線負荷にほとんど影響ないが、立ち下がり時間に大きく変化が表れている。

管電圧100 kV 時の管電圧脈動率を **Table 1** に示す。これから管電圧脈動率は約 3～5 % 程度である。

4.2 照射時間の比較

設定照射時間と実際の照射時間の関係を **Table 2** に示す。

設定照射時間と実測照射時間の関係を見ると設定時間は実測時間に比べ長く、その傾向は短時間になるほど、また小管電流ほど顕著に表れている。設定照射時間は各電流とも照射時間が長くなるに従い誤差時間が短くなる

Table 2 Relationship between the displayed time and the measured time. X-ray tube voltage: 100 kV.

Timer mA	1	2	4	5	8	10	20	40
50	1.82	2.78	4.70	5.74	8.71	10.69	20.66	40.62
200	1.15	2.13	4.12	5.12	8.12	10.06	20.09	39.92
400	1.02	2.03	4.01	5.00	8.00	9.96	19.92	39.87
800	0.98	1.97	3.98	4.95	7.95	9.96	19.86	39.84

(ms)

ことから、高電圧ケーブルの影響が少ない管電流400 mA の10 ms 以上と管電流800 mA は設定時間に比べ極僅かであるが短くなっている。

4.3 X線出力の直線性

管電流時間積 (mAs) のX線出力の直線性を調べた結果を **Fig. 4** に示す。縦軸は管電圧の立ち上がり立ち下がり時に生じる写真効果の割合、横軸は操作盤上の設定照射時間である。装置の有する最短照射時間の非直線性の程度は管電流50 mA で18.7, 200 mA で8.0, 400 mA では

インバータ式X線装置の短時間特性 (宮崎・他)

Fig. 4 Linearity of X-ray output.

6.3, 800 mA 5.5%である, このように管電流により直線性は異なり, 低管電流になるほど直線性は失われる。

5. 考 察

短時間撮影において管電圧, 管電流, 照射時間の極僅かな変動が写真効果に大きく影響することは前述した。考察にあたり, 今回測定した各波形を深く吟味すると, 管電圧の立ち上がりにおいて僅かであるが投入時の管電圧に過渡現象が表れたり, 照射時間の誤差などで解析が複雑になるためこれらの影響を取り除き今回使用したX線装置の理想状態におけるX線出力の直線性を求め (Fig. 5), 管電流時間積におけるX線出力の直線性に付いて考察する。

5.1 管電圧波形の立ち上がり立ち下がり時間による写真効果

Table 3 Non-linearity due to the rise time and fall time of the X-ray tube voltage waveform. X-ray tube voltage: 100 kV.

mA	50	200	400	800
Rise Volume	1.5	2.5	2.1	2.2
Fall Volume	26.5	6.5	4.0	3.6

(%)

実測照射時間 1 ms における管電圧波形の立ち上がり立ち下がり時間による写真効果の割合を **Table 3** に示す。

管電圧波形の立ち上がり時間と立ち下がり時間による写真効果に付いてみると, 各管電流とも立ち上がり時間による写真効果に比べ立ち下がりによる写真効果が大きく, その傾向は小管電流ほど顕著となる。

Fig. 5 High-voltage waveform analyzed using personal computer. X-ray tube voltage, 100 kV (upper). X-ray tube current, 400 mA (lower), X-ray output waveform (center). Exposure time, 2 ms.

Fig. 6 Linearity of X-ray output.

Table 4 Non-linearity due to the rise time and fall time of the X-ray tube voltage waveform. X-ray tube voltage: 100 kV. H: 0.6 ms/div. Rise time: From 0 V to the peak value of the X-ray tube voltage. Fall time: From the X-ray tube voltage peak value to 10 kV.

mA	50	200	400	800
Rise Time	0.56	0.63	0.57	0.63
Fall Time	4.00	1.18	0.57	0.33

(ms)

管電流50 mA, 照射時間1 ms では全体のX線出力の約28%は管電圧の立ち上がり立ち下がり時間による写真効果であることがわかる。しかし, 管電流200 mA 以上になると直線性への影響は9%程度でかなり改善されることになる (Fig. 6).

5.2 管電圧・管電流による写真効果

管電圧波形の立ち上がり立ち下がり時間の関係について調べたものを Table 4 に示す。立ち上がり時間は管電圧波高値に至るまでの時間, 立ち下がり時間は管電圧波高値から10 kV に降下するまでの時間を測定した。

立ち上がり時間は各管電流とも約0.6 ms でX線負荷により変わらないが, 立ち下がり時間は0.3 ms ~ 4 ms

Fig. 7 Linearity of X-ray output by density.

Fig. 8 Linearity of X-ray output by phantom. Right: 100 kV, 50 mA, 1 ms, SID 100 cm. Left: 100 kV, 200 mA, 1 ms, SID 200 cm.

と管電流によって大きく異なる。この原因はX線用高電圧ケーブルの浮游容量などによるもので高電圧ケーブルの長さ、太さなどによって異なる。

管電流400, 800 mAにおいて、管電圧波形の立ち下がり時間は立ち上がり時間に比べ等しいかそれより短い (Table 4) にもかかわらず写真効果は大きい (Table 3)。この主な要因は管電流負荷によるもので、大電流になるほど管電圧の立ち上がり時は波形痩せを、立ち下がりでは管電流の遮断の遅れが写真効果に影響を与えていることが考えられる (Fig. 2, 3, 5)。

5.3 フィルム濃度とX線出力の直線性

今まで述べてきたX線出力の直線性と濃度の関係を検討するため、距離法により求めたものを Fig. 7 に示す。

蛍光強度から求めた結果同様、最短照射時間に近づくに従いフィルム濃度は上昇し、その傾向は管電流が低いほど顕著になる。また、蛍光強度に比べ非直線性の割合は大きい。このおもな要因は設定照射時間値と実測値の違いによるものである (Table 2)。管電流200 mA, 1 msで濃度は差ほど高くない。これは管電圧が数 kV 低い (Fig. 2) ためと考えられる。

Fig. 8 は管電圧100 kV, 管電流50, 200 mA, 照射時間1 ms で距離による補正を行い撮影した臨床写真である。

6. 結 論

現在、国内で市販され使用されているインバータ式X

線装置の中で最も各特性が優れていると考えられている装置から、X線撮影技術の中で欠くことの出来ない短時間撮影に付いての特性の検討を行うことができた。

投入時の管電圧の立ち上がり時間は約0.6 ms 前後でこの値はテトロード管を用いた二次側制御装置に匹敵するものであった。

立ち上がりの写真効果は最短照射時間で全体の数%であることから装置の保有する最短時間までX線出力の直線性を保つには管電圧の立ち上がり時間は1 ms より短い立ち上がりが必要と考える。

管電圧の立ち下がり時間特性は装置の二次側の容量で決まるが、今回使用した装置は負荷コンデンサなど使っていないことからX線用高電圧ケーブルの浮游容量による影響が大きい。管電流200 mA 以下の軽負荷ではその影響から管電圧の立ち下がり時間は1 ms 以上となり直線性に影響を及ぼす。しかし、管電流400 mA 程度なら写真効果は約4 %でほとんど問題とならない。従って、直線性が保たれた状態で撮影するには短時間大電流撮影が必要となる。X線出力の直線性を軽負荷まで保つには現在では波尾切断¹⁰⁾を行う方法などあるが経費や、スペースなどから現実的でないとする。

インバータ式X線装置は電源周波数に対し数十倍から数百倍の高周波で高電圧を発生させることから、高電圧発生装置を小形化できる他に高精度の制御ができるなど今までの三相装置に比べ数多く利点を有している。

今回測定した装置は照射時間誤差や管電圧の投入時に起る過渡現象など問題は多少のこるが、X線出力との直線性では立ち上がりについてはある程度満足できる値を示していたが、相対的に直線性を考えると立ち下がりによる写真効果の影響が大きい。従って理想的には立ち上がり時間による写真効果に等しい写真効果をもつ立ち下がり時間を保有する装置 (Fig. 5) が望ましい。

終わりに今回の測定に協力いただいた株式会社島津製作所、東芝株式会社の各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 斎藤一彦：三相装置の諸特性 日放技学誌, 42(7), 1001-1029 (1986).
- 2) 青柳泰司：インバータ式X線装置の特性と臨床評価 2. 動作特性, 日放技学誌, 46(12), 1885-1900 (1992).
- 3) 斎藤一彦他：多相装置のタイマ表示値と実効的照射時間 日放技学誌, 34(3), 256-257 (1978).
- 4) 青柳泰司：改訂診断用X線装置, コロナ社, 265-272 (1979).
- 5) 工藤和美：多相装置の短時間特性 (管電圧と被写体厚の関係) 日放技学誌, 36(5), 653 (1980).
- 6) 宮崎 茂他：三相装置の短時間特性 (第4報) 日放技学誌, 40(5), 766-767 (1984).
- 7) 昼間隆弘他：乳幼児撮影とX線装置 小児放射線技術, 15, 29-34 (1990).
- 8) 加藤 洋他：パソコンを利用したX線装置の測定および解析, 日放技学誌, 46(8), 1272 (1990).
- 9) 加藤 洋他：パーソナルコンピュータを利用したX線装置の特性解析 東京都立医療技術短期大学紀要, 第5号, (1992).
- 10) 宮崎 茂他：三相装置の短時間特性 (第5報) 日放技学誌, 45(8), 1034 (1989).