

# 非接続形X線測定器の測定について

首都大学東京 健康福祉学部 安部 真治

## はじめに

X線診断において常に最適な医用画像を提供するためには、日常のX線装置の品質管理が重要であり、国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission : IEC) や JIS においても医用画像機器の安全や品質保証に関する規格化がされている<sup>1)~5)</sup>。X線装置の性能、品質維持には、管電圧、管電流、撮影時間および線量などの総合的な把握が必要であり、線量以外の各因子は、X線高電圧装置に JIS に規定される管電圧<sup>6)</sup>・管電流計などの直接接続形測定器を接続し、定義に従った精密な測定を行う必要がある。しかし、医療施設でこれら各因子の直接測定を行うことは、直接接続形測定器を保有する施設が少なく、時間的要因や安全面などの点からも困難と思われる。このため、使用者が行うX線装置管理では、安全で簡便に測定可能な非接続形X線測定器 (以下; 非接続形測定器) による管理が重要となる。非接続形測定器は、本来直接接続して行う測定を非接続 (非接触) で測定可能とした測定器であり、JIS Z 4005<sup>7)</sup>では“非接続式測定 (Non-invasive measurement) : 放出される放射線の分析によるX線管電圧の測定”と定義され、おもに管電圧測定が対象である。管電圧測定は、異なる厚さのフィルタ (銅板) のX線吸収差を検出し計算することにより、安全で比較的精度の高い測定が行われるようになった。初期の頃は管電圧や照射時間などの単一機能を有する測定器が多くみられたが、現在では、多機能の測定器が普及し、一度の測定で各種の特性把握が可能となっている。また、非接続形測定器の用語について、文献等では非接続形のほかに非接続型、非接触形などの表現もみられるが、JIS<sup>8)</sup>では「型」は模

型、鋳型などのように型 (かた) そのものに用い、それ以外は原則「形」の表現を用いるとしており、「非接続形X線測定器」の表現を用いた。また、現在では多機能の測定器が普及し、管電圧以外の撮影時間 (照射時間)、管電流測定などの測定機能も含め非接続形測定器として扱う。

今回、非接続形測定器の変遷、測定システム、特性、現状などについて解説する。

## 1. 非接続形測定器の変遷

管電圧を非接続で測定する試みは、1944年に厚さの異なる2種の銅板による吸収差を利用する方法 (R.H. Morgan) に始まり、その後各種の研究が進み、1968年ペネトラメータカセット法 (G.M. Ardran, H.E. Crooks)、1976年ウイスコンシンテストカセット法 (A.F. Jacobson, 他) などのkVカセットを用いた管電圧測定へと発展している<sup>9)~10)</sup>。1980年代には、これらの銅板の吸収差を信号検出し、マイクロコンピュータで計算することにより、比較的精度の高い管電圧測定が可能となった<sup>11)</sup>。Fig.1に各種非接続形測定器を示す。(a)~(d)は初期の測定器であり、(a)kVカセット (1980年頃) は、カセットの前面に各管電圧範囲に対応した厚さの異なるCuステップウエッジが埋め込まれ、撮影したフィルムのCuステップウエッジ濃度と光学的中性濃度フィルタの濃度が一致するステップ番号を求め、キャリブレーション表より、対応した管電圧を求めることができる。1980年代では、(b)、(c)のような管電圧、照射時間、線量、半価層、波形などの測定が可能で多機能X線出力アナライザが登場した。一方、(d)のような管電圧、照射時間、線量など、単一機能の各種測定器も普及

●初期の非接続形測定器



(a) kVカセット(RMI) (b) NERO6000B(Victreen) (c) NOMEX (PTW) (d) 9001,6004,5001(Unfors)

●撮影用・多機能(汎用)



(e) ThinXRAD (Unfors) (f) Cobia SMART (RTI)

●多用途・多機能(高性能)



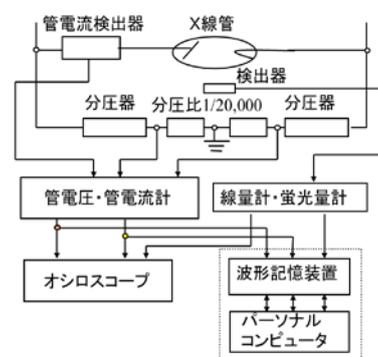
(g) Xi (Unfors) (h) Piranha (RTI) (i) ACCU-PRO (Radcal) (j) NOMEX multimeter (PTW)

Fig.1 非接続形X線測定器

している。その後、多くの非接続形測定器<sup>12)</sup>が開発され、現在ではメーカーにより測定項目は異なるが、管電圧、管電流、撮影時間、線量・線量率、総ろ過、半価層 (HVL) および管電圧・放射線出力波形などの計測が可能で、コンパクトな測定器へと発展してきている。(e)~(j)は、最近の非接続形測定器である。(e)、(f)は、用途別の多機能測定器であり、一般撮影用など用途を限定した小形・軽量で比較的廉価な機種である。一方、(g)~(j)は、コンパクトで各種モダリティ装置に対応した多用途・多機能の比較的高額な機種であり、今後二分化の傾向が進むと思われる。

2. 直接接続形測定器によるX線装置測定

管電圧、管電流、撮影時間の精密な測定は、管電圧・管電流計をX線装置の高電圧側に直接接続し、同時に線量計(蛍光量計)、オシロスコープ、パーソナルコンピュータなどを用いた直



・管電圧、管電流、撮影時間、X線出力の精密測定が可能

Fig.2 直接接続形X線装置測定システム

接接続形測定器システム<sup>13)</sup>によって行うことができる (Fig.2)。これらのシステムにより、管電圧は、X線管の両極に印加される電位差を分圧器を用いて2万分の1程度に分圧し、管電流はX線管に流れる陽極電流を直接検出し、管電圧・管電流計で測定する。撮影時間は、一部の装置を除き、管電圧波形の75%の立ち上がりおよび立ち下がり間の時間をオシロスコープなどにより測定する。線量計は、直接接続形測定

Table 1 X線高電圧装置のJIS	
性能項目	許容誤差
管電圧	±10 % (乳房用装置: ±5 %)
管電流	±20 %
撮影時間	±(10 % + 1ms)
管電流時間積	±(10 % + 0.2 mAs)
X線出力の再現性 (変動係数)	0.05
JIS Z 4751-2-7, JIS Z 4751-2-45	

器ではないが、システムとして電離箱形線量計を用いて、線量の把握やX線出力の再現性（変動係数）などの同時測定を行う。また、波形記憶装置を用いて、管電圧、管電流、X線出力などの各種波形を取り込み、解析を行うことによりX線装置の高電圧現象を正確に測定、把握することが可能となる。X線装置の品質管理、性能維持には、これらの直接測定システムによって、少なくとも Table 1 に示す性能項目<sup>14),15)</sup>について十分な把握が必要である。

Fig.3 は、直接測定によるオシログラム及びパソコンを用いた解析例である。これらの波形解析により、管電圧のリプル百分率やX線出力波形の把握も可能である。X線出力波形の測定は、電離箱形線量計では、出力インピーダンスが高く、時間応答特性が劣るため、忠実なX線強度波形の描出は困難であり、蛍光量計によるX線出力波形が望ましい。

### 3. 非接続形測定器によるX線装置測定

Fig.4 は、管電圧、撮影時間、線量などの測定可能な測定器とクランプ式管電流計を組み合わせた非接続形測定システムである。これにより直接測定システムとほぼ同様な項目のX線装置の品質管理が可能となる<sup>16)</sup>。非接続形測定器による測定は、定義に従った直接測定ではないため、直接接続形測定器と同じ精度の測定は困難であるが、近年では比較的高い精度の測定が可能となり、定期的な校正によって精度を維持し、安全かつ簡便に行えることが重要である。

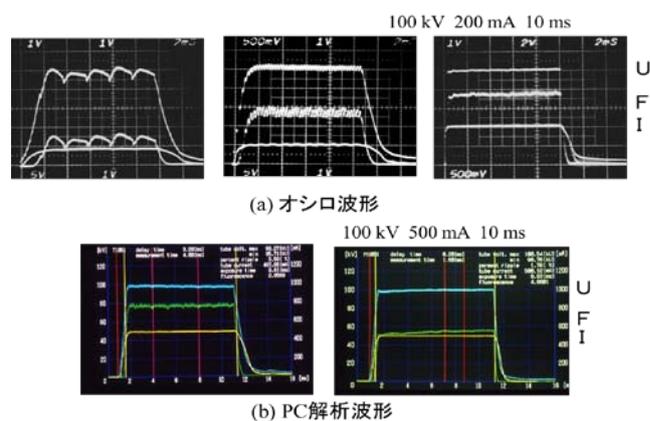


Fig.3 X線高電圧装置の各種波形  
U:管電圧 F:蛍光強度 I:管電流

#### 3-1 管電圧測定・撮影時間測定

非接続形測定器の管電圧測定の原理は、適度な厚さのフィルタを透過したX線の吸収差は管電圧の線形関数になることから、一般に厚さの異なる2種類のフィルタ（銅板: Cu）の吸収差（透過率）を検出器で受け、この信号比の関数から管電圧が求められる(Fig.4)。また撮影時間や波形の測定が可能な測定器では、入射X線に対応する応答時間のカウントから撮影時間を算出する。これらの結果はメモリされ、マイクロプロセッサにより放射線（X線出力）波形や管電圧波形を再構成して表示される。

また、JIS では、管電圧はピーク値と規定<sup>14)</sup>されており、ピーク値を正しく測定できることが必要であるが、近年、非接続形測定器では、管電圧値として、PPV (Practical peak voltage : 加重平均ピーク電圧) の測定可能な測定器も普及してきている。PPV は、指定のファントム透過後の空気カーマコントラストは、管電圧波形によらず、同一定電圧によって生成された放射線と同等であるとの考えから、IEC に規定<sup>17)</sup>されており、一般に  $kV_{peak}$  値より低い値となる。PPV の測定機能をもつ測定器では、 $kV_{peak}$  と  $kV_{PPV}$  値を同時に測定するものが多い。

#### 3-2 管電流測定

管電流測定は、基本的に回路に侵襲的に行わなければならない測定不能である。これまで非接続形測定器の管電流測定は、高電圧回路の中性点端子

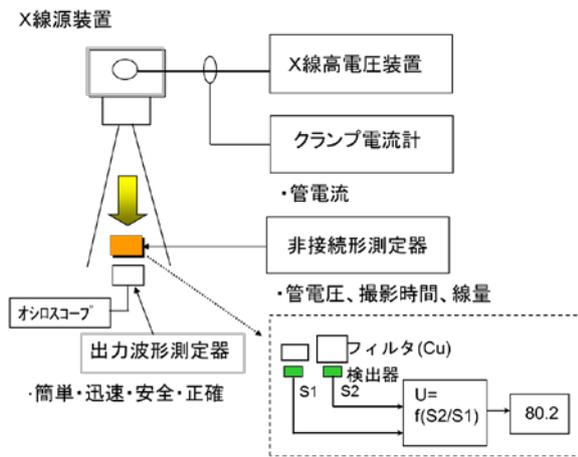


Fig.4 非接続形X線装置測定システム

に電流計を接続して測定する方法が行われていた。しかし、この場合も回路に直接接続する侵襲的な測定であり、接続が不適切な場合、安全面の問題や装置の故障原因にもなるため、測定時には十分な注意が必要である。そこで、管電流測定を簡便、安全に測定する方法として、クランプ式管電流計を用いた非接続測定が行われるようになった。この測定は、検出部にホール素子を埋め込んだフェライトコアを用いており、高電圧ケーブルに挟むだけで測定可能である。

Fig.5 に測定原理を示す<sup>18)</sup>。測定電流  $I_1$  によって発生する磁束を  $\Phi_1$  とすると、フェライトコアに埋め込まれたホール素子は  $\Phi_1$  により電圧を発生する。この電圧を増幅し  $\Phi_1$  と逆方向の磁束  $\Phi_2$  を発生させ、 $\Phi_1$  が零になるような打ち消し電流  $I_2$  を流す。この回路に抵抗  $R$  を入れ、その電位から  $I_1$  を求めることができる。この測定器の普及

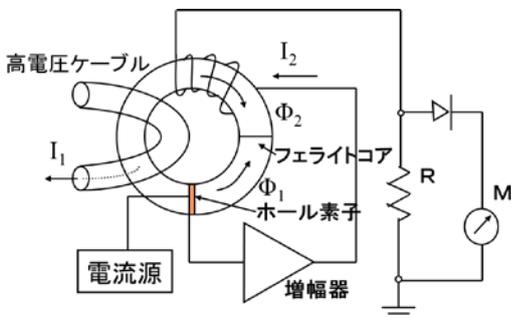


Fig.5 非接続形管電流計(クランプ式管電流計)の原理

により、安全で簡便な測定が可能となった。初期の非接続形管電流計は、管電流や測定時間などの測定条件が制限され、また誤差も大きく問題点も多かったが、近年では性能も向上し、比較的精度の高い測定が可能となっている。Fig.6 に各種非接続形管電流計を示す。(a)の管電流計は、高い精度の測定が可能であったが、検出部が入手困難となり、現在は、製造中止となっている。(b)~(d)は管電流の単独測定は不可能であり、おもに多機能非接続測定器のオプション機能として管電流を同時に測定するものである。

### 3-3 線量測定

非接続形測定器の線量測定は、初期の頃の電離箱形線量計を組み込んだものから半導体検出器 (Si) となり、検出器の軽量、コンパクト化が進んでいる。半導体検出器は、電離箱形線量計に比較し、気温や気圧の影響はほとんど受けないが、エネルギー依存性やフィルタ依存性の影響があり、これらの補正が必要である。近年では、アクティブ補償 (X線照射中にビーム線質を自動判定し、管電圧や線量を内部で補償) などの機能により、自動補正を行う測定器が普及してきている。

## 4. 非接続形測定器の特性

### 4-1 非接続形測定器の測定機能

Fig.7 は非接続形測定器に設定されている測定パラメータの一例である。①~⑦は検出器の最小トリガレベル (この範囲内で線量を測定)、

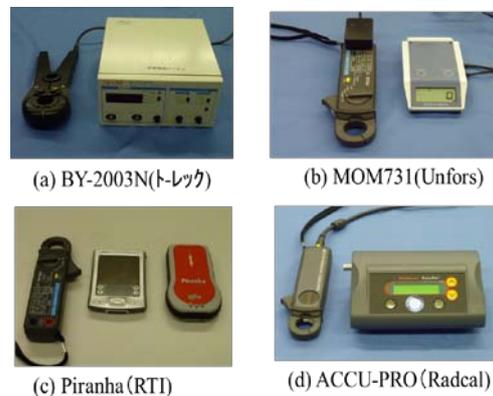


Fig.6 各種非接続形管電流計

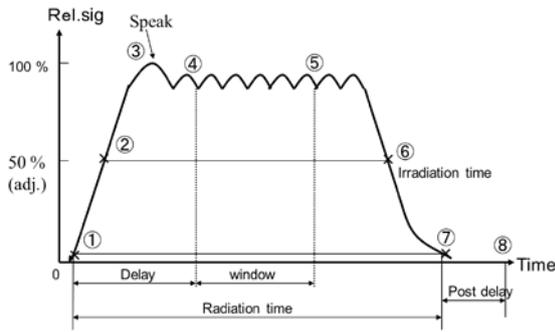


Fig.7 非接続形測定器の測定機能(例)

②-⑥は照射時間(撮影時間)を計測(この例では、信号最大値の50%の位置で測定、ユーザで設定変更可)、③は信号の最大値、①-④は遅延時間(管電圧波形のオーバシュートを避ける)、④-⑤は管電圧(kV)の測定範囲、⑦-⑧は信号がないとき照射終了とみなす時間である。トリガレベルは、ユーザによる設定変更が可能であり、遅延時間の設定値や測定機能は、メーカーによって若干異なっている。

#### 4-2 各種依存性

Fig.8 に管電圧測定時の各種依存性について示す。

距離依存性では、基本的にSID 100 cm において必要とするすべての照射条件で管電圧や線

量の測定が可能なのが重要で、SID 50~200 cm の範囲でも同様に測定できることが望ましい。Fig.8(a)では、Aは距離が長くなると若干高い傾向にあるが、Bでは距離によらずほぼ一定の値である。初期の測定器では、距離による影響が大きく、SIDを指定(例:60 cmなど)し、照射条件により距離を変更するなど測定上の制限が多く、距離依存性の影響が大きかった。

フィルタ(ろ過)依存性については、管電圧測定値は、装置の総ろ過や付加フィルタ厚の影響を受けるため、一般に一定の条件(例:総ろ過3.0 mmAl)で校正されている。このため、総ろ過を校正値に合せて測定するか、補正係数による補正を行う必要がある。最近では、多数の半導体検出器を用いたマルチ検出器によりアクティブ補償などの自動補正が行われ、総ろ過や

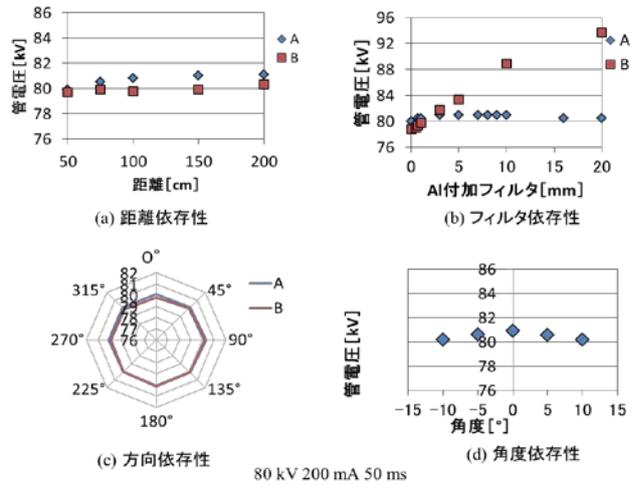


Fig.8 管電圧測定の各種依存性

Al 付加フィルタ厚に依存せずほぼ正確な測定が可能となっている。Bは従来の測定器で、付加フィルタの増加により管電圧値は高くなり、Al 20 mm では14 kV程度の誤差となる。Aは最近の測定器で、自動補正機能により、フィルタ厚に関係なく、管電圧値はほぼ一定の値である[Fig.8(b)]。

方向依存性・角度依存性は、初期の頃は検出器サイズも大きく、検出器の方向依存性にも注意が必要であった。最近の測定器は半導体検出器を用い、小形化され、すべての検出器が数cm以内に配置され、方向依存性の影響は少ない。角度依存性は、通常水平あるいは垂直で測定するため特に問題はないが、角度により管電圧値は低下し、角度10°以上では、誤差はかなり大きくなるので注意が必要である[Fig.8(c), (d)]。

測定器購入時には、これらの各種依存性について十分に把握しておく必要がある。

#### 4-3 最近の非接続形測定器の特性

Fig.9 は、X線装置の品質管理の実施にあたり、筆者らが毎年実施している直接接続形測定システムによる非接続形測定器の校正配置である。この測定システムを用い、最近の非接続形測定器について、管電圧、撮影時間、線量、半価層、管電流の精度および波形機能などの諸特性について述べる。

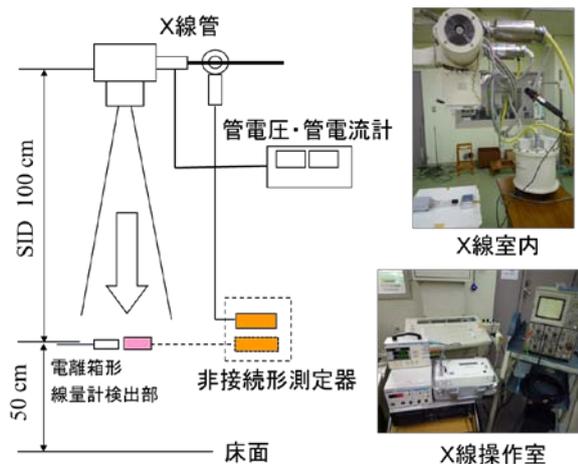


Fig.9 非接触形測定器の校正配置

#### 4-3-1 管電圧

管電圧変化に対する管電圧誤差を Fig.10(a)に示す。A, Cは、 $\pm 1 \sim 3\%$ 以内、B, Dでは、ほぼ $\pm 1\%$ 以内であった。また、管電流変化に対する誤差は、管電流 50mA 以下で若干大きい傾向を示すが、ほぼ $\pm 1 \sim 2\%$ 以内、撮影時間変化に対しては、すべての機種で短時間側 10 ms まで管電圧測定が可能であり、誤差 $\pm 1 \sim 2\%$ 以内であった。撮影時間 10ms 以下では測定できない機種や誤差の大きい機種もあり、短時間撮影での管電圧測定には注意が必要である。

#### 4-3-2 撮影時間

撮影時間測定誤差を Fig.10(b)に示す。撮影時間はほとんどの機種で誤差値は 1 ms 以内であり、誤差は 20 ms 以上では $\pm 1\%$ 以内、10 ms でも数%以内である。また、10 ms 未満でも誤差値は 1 ms 以内であるが誤差率は大きくなるため、2.5 ms では数十%の機種もある。従って、10 ms 以下の測定では、これらの特性を十分に把握しておく必要がある。

#### 4-3-3 線量

線量測定誤差を Fig.10(c)に示す。管電圧変化に対する誤差は、ほぼ $\pm 5\%$ 以内であり、B, Dでは、 $\pm 1\%$ 以内である。管電流変化、照射時間変化における線量誤差もほぼ同様の傾向であった。A, Cについても、直線性がよいことから回帰直線による補正により、さらに精度の高い

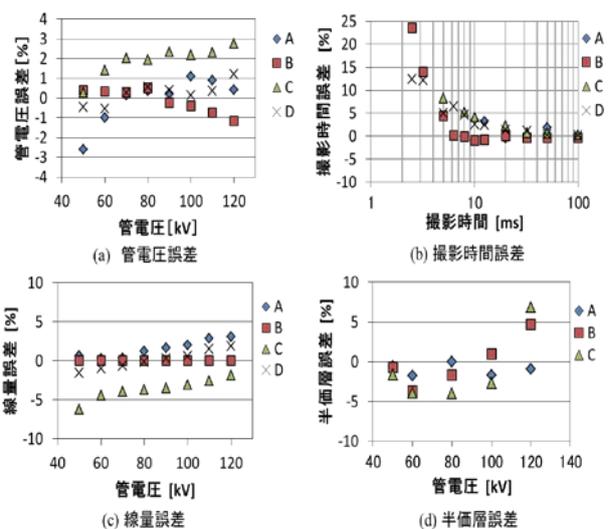


Fig.10 最近の非接触形測定器の特性

測定が可能と思われる。また、線量測定においても管電圧と同様に 4-2 の各種依存性について把握しておく必要がある。

#### 4-3-4 半価層

半価層測定誤差を Fig.10(d)に示す。これらの測定値は、いずれも 1shot 測定（一度の測定で半価層(HVL)を表示)の値で、自動補正が行われている測定器のデータである。管電圧が高くなるほど誤差はやや高い傾向を示すが、ほぼ $\pm 5\%$ 以内である。特に A では管電圧によらずほぼ $2\%$ 以内となっている。通常の AI フィルタ法で測定した場合より、若干誤差は大きいですが、一度の測定で比較的高い精度で半価層を測定できることは品質管理において有用と思われる。

#### 4-3-5 管電流

管電流誤差を Fig.11(a)に示す。A~C は比較的最近の測定器、D は初期の測定器である。A~C については、管電流 100 mA 以上ではほとんど数%以内の誤差であるが、50 mA 以下では誤差が大きくなる傾向にある。C では 20 mA まで比較的高い精度で測定可能であった。D は管電流 200 mA 以下で誤差が大きくなり、再現性についても若干の問題があった。管電流は微弱の直流電流を測定するため、特に測定前の零調整を行うことや再現性に注意が必要である。Fig.11(b)の管電流波形の比較では、実際の管電

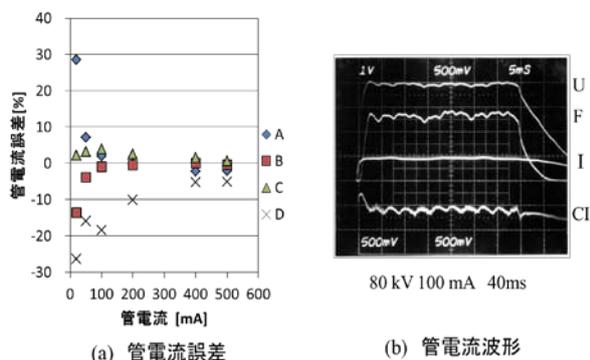


Fig.11 非接触形管電流計の特性  
 U:管電圧 F:蛍光強度 I:管電流  
 CI:クランプ管電流波形

流波形(I)に比較し、クランプ管電流波形(CI)は高電圧ケーブルの充放電電流やノイズの影響によるリップルが見られるが、管電流値は平均値であるため、測定値への影響はほとんどない。

#### 4-3-6 管電圧波形・X線出力波形 Fig.12 に、非

接触形測定器の波形を示す。非接触形測定器の波形測定では、管電圧波形のみ、X線出力波形のみ、両者の測定可能なものなどがある。管電圧波形は、検出した二つの信号の再構成によるため、低管電圧部は表示されない。X線出力波形は、検出した信号全体を波形として表示する。現在の非接触形測定器は、サンプリング周波数数 10 kHz 程度以下のものが多く、(a)のように全体的な波形の把握やX線装置の異常現象の把握にはほぼ対応可能であるが、細かいリップルや周波数などの波形解析は困難である。(b)~(d)は各非接触形測定器の短時間の波形であるが、インバータ周波数 5~10 kHz 程度までの対応が限界と思われる。(e)は、筆者らが製作したホットダイオードと OP アンプを用いたアナログ式の出力測定器の波形で、インバータ周波数 20 kHz 程度まで対応可能となり、X線出力波形用としてX線装置管理に用いている。

非接触形測定器に必要な要件として、小形・軽量で、精度が高く、安全、簡便に使用できることや多機能、多用途などが要求される。最近の非接触形測定器は、一般的な測定条件での誤差は、管電圧 $\pm 1\sim 2\%$ 、撮影時間(短時間側を

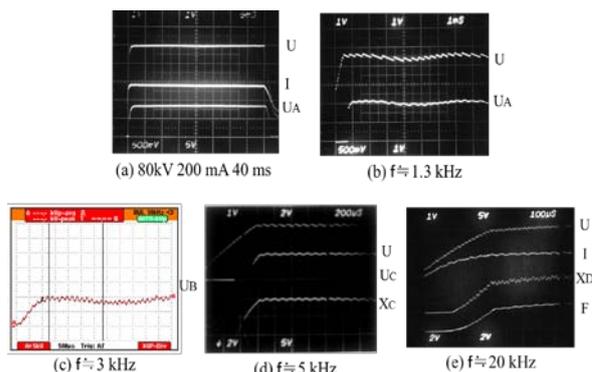


Fig.12 管電圧波形・X線出力波形

U:管電圧 F:蛍光強度 I:管電流  
 UA-UC:非接触形測定器A~Cの管電圧波形  
 Xc:非接触形測定器CのX線出力(線量)波形  
 Xd:自作測定器のX線出力波形 F:インバータ周波数

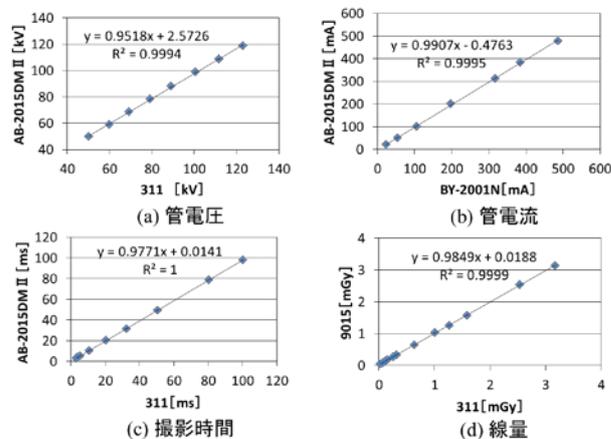


Fig.13 非接触形測定器の校正

除く) 1~2% (または 1 ms), 線量 $\pm 5\%$ 、管電流 $\pm 5\%$ 、半価層 $\pm 2\sim 5\%$ 程度であり、かなりの精度向上がみられる。現在、様々な非接触形測定器が普及しており、性能や特性は異なるため、各測定器の各種依存性や諸特性について十分把握して測定する必要がある。Fig.13 は直接接触形測定器による非接触形測定器の校正例である。非接触形測定器は、測定開始前あるいは年 1 回程度の定期的な校正により、測定器の精度や性能の維持管理に努めることが重要である。

## 5. まとめ

非接触形X線測定器は、安全、簡便に測定できる測定器であり、近年では一度の照射で、精度の高い各種の測定が可能となっている。また、最近のX線装置では、X線管の周囲がカバーされ、直接接触測定が困難な装置もあり、今後、

さらに多機能の非接続形測定器が、普及していくものと思われる。X線装置の品質管理のためには、非接続形測定器の定期的な校正により、精度を維持することが重要である。今後、医療施設において、最適な医用画像の提供、医療事故防止、医療被曝低減に向けて、安全で簡便かつ精度の高い非接続形測定器による品質管理が普及することを期待したい。

## 参考文献

- 1) IEC 61223-1:1993 : Evaluation and routine testing in medical imaging departments-Part 1: General aspects.
- 2) IEC 61223-3-1:1999 : Evaluation and routine testing in medical imaging departments-Part 3-1: Acceptance tests—Imaging performance of X-ray equipment for radiographic and radioscopy systems.
- 3) JIS Z 4752-1 医用画像部門における品質維持の評価及び日常試験方法—第1部 総則。日本規格協会，東京，2001.
- 4) JIS Z 4751-3-1 医用画像部門における品質維持の評価及び日常試験—第3-1部：受入試験—診断用X線装置。日本規格協会，東京，2004.
- 5) JIS Z 4752-2-11 医用画像部門における品質維持の評価及び日常試験—第2-11部：不変性試験—直接撮影用X線装置。日本規格協会，東京，2005.
- 6) JIS Z 4921 X線管電圧測定器。日本規格協会，東京，1994.
- 7) JIS Z 4005 医用放射線機器—定義した用語。日本規格協会，東京，2012.
- 8) JIS Z 8301 規格票の様式及び作成方法。日本規格協会，東京，2008.
- 9) Ardran G M, Crooks H E: Checking diagnostic X-ray beam quality. Brit. J. Radiol. 1968 ; 41 : 193-198.
- 10) Jacobson A F, Cameron J R ,Siedband M P, and et al: Test cassette for measuring peak tube potential of diagnostic X ray machines. Med.Phys. 1976 ; 3(1) : 19-25.
- 11) 齋藤一彦，宮崎 茂，青柳泰司.新しい Non-Invasive 測定器について NERO 6000 の管電圧，管電流，曝射時間，波形特性.日放技学誌 1983 ; 39(6) : 880-885.
- 12) 加藤 洋. X線装置の QA, QC 用簡易測定器. 日放技学誌 2005 ; 61(4) : 487-492. 13) 13) 安部真治，青柳泰司，小倉 泉，他. 放射線医療技術学叢書 (10) インバータ式X線装置の特性と臨床への適用. 日本放射線技術学会，1995.
- 14) JIS Z 4751-2-7 診断用X線高電圧装置-安全. 日本規格協会，東京，2008.
- 15) JIS Z 4751-2-45 乳房用X線装置及び乳房撮影定位装置—安全. 日本規格協会，東京，2006.
- 16) 安部真治，根岸 徹，小倉 泉，ほか. 非接触形計測器による X 線測定システムの構築. 東保学誌.1999 ; 12(3) : 35-39.
- 17) IEC 61676:2002 : Medical Electrical Equipment-Dosimetric instruments used for non-invasive measurement of X-ray tube voltage in diagnostic radiology.
- 18) 安部真治，小倉 泉，青柳泰司，他：クランプ管電流計による非接続形管電流測定について。都医短紀要 1991 ; 4 : 143-154.