可搬型 X 線電子写真装置の開発

正会員 白水俊次^{†*}, 正会員 井上正一^{††}

A New X-ray Instant Camera

Shunji Shirouzu[†] and Shoichi Inoue^{††}

Abstract A highly sensitive x-ray image pickup device has been developed based on the gadolinium phosphor and phthalocyanine organic photoreceptor conversion method for radiation images. As compared with the screen-film combination used routinely in medical and industrial fields, sensitivity is nearly 10 times higher.

The prototyp camera has a 10×10-cm image plate that consists of gadolinium phosphor and phthalocyanine photoreceptor laminated layers together with a corotron charger and a toner developer. This portable camera is capable of taking series of x-ray photographs at various energies in a short time.

1. ま え が き

X 線透視像を使った診断・検査・観察は、医療用、産業用その他、あらゆる分野で欠かせない情報源となっている。医療の分野では人体の被爆量をできるだけ軽減して、しかも多くの X 線透視情報を得る目的から、イメージインテンシファイヤテレビシステムや X 線 CT などの電子的な画像手段が急速に普及しつつある。特に、被検部からできるだけ大面積で高い分解能と広いダイナミックレンジの画像情報を検知し、これに電子的加工・処理を加えた後に、種々の判断情報を引き出したいという要望に対して、蛍光体の輝尽発光を利用した X 線イメージングプレートが開発されている¹⁾。

しかし、蛍光体の輝尽発光を利用して記憶した潜像を再び電気信号として取出すには、再生装置が非常に大型であること、潜像の保持時間が 8～9 時間しかないという欠点がある。例えば、山頂に発電機を設置する場合など、撮影したイメージングプレートを 1 枚毎に保持時間内に地上の再生装置まで運ぶことは困難であり、産業用には使い難いといわれている。

したがって、診断や記録目的では今なお X 線フィルムが不可欠である。しかし、現像に時間を要し、しかも化学的処理を伴う煩わしさのあること、シャーカステンと称するライトボックスが必要であることなど、様々な欠点がある。これを解決するひとつの手法として、蛍光体(ガドリニウム系)のシンチレータと感光体(フタロシアニン)とを基板の上に積層させたイメ

キーワード：X 線撮像装置，電子写真，インスタントカメラ

1992 年 10 月 12 日，Japan Display '92 で発表

1992 年 11 月 2 日受付，1993 年 1 月 11 日再受付

[†] 株式会社東芝 研究開発センター 材料・デバイス研究所 (〒210 川崎市幸区小向東芝町 1，TEL 044-549-2136)

* 平成 5 年 4 月より長野工業高等専門学校電子情報工学科

^{††} 東芝リビングサービス株式会社 (同上，TEL 044-549-2098)

[†] Material and Devices Lab., R&D Center, Toshiba Corporation (1 Toshib-cho, Komukai, Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan)

* Nagano National College of Technology (716 Oaza Takuma, Nagano 381, Japan)

^{††} Toshiba Living Service Corporation (ditto)

ージプレートを使って、X線像を実寸大の電位パターンに変換し、これを電子的に読出す方法が考えられている²⁾³⁾。被検体と等寸のX線透視像から直接画像信号を取出すことができれば、高感度で高分解能の再生像を得ることが可能になるためである。被検体から等寸大で投影された電子像から再生像を得る方法は以下の2つに分けられる。

- (1) 単一またはアレイ状の1次元電位センサを機械的に走査して電気信号を取込む。この方法によれば、種々の画像処理を施すことが可能であり、X線照射量が非常に少なく像電位が低い状態でも検出できる利点はあるが、処理装置の大型化は避けられない。
- (2) イメージプレート上の電位潜像をトナーで現像し、一般の紙に転写してハードコピーを作る。トナーで現像できるためには、イメージプレートに一定電圧以上の潜像電位が必要で、X線照射量が極度に少ない状態では使えないが、装置の小型化と処理時間の大幅な短縮が可能になる。

現在、2つの方法を検討しているが、(2)が極めて実用的で、従来のX線フィルムの欠点を大幅に改善する道となることがわかった⁴⁾。ここでは、イメージプレートを使った新しいX線電子写真技術の開発について述べる。

2. イメージプレート

2.1 イメージプレートによるX線電子写真の形成

図1の撮像から現像までの行程図に示すように、まず、イメージプレートを用いて被検体のX線透視像

を電荷像に変換させる。イメージプレートは部分拡大図に示すように、アルミ基板の上にガドリニウム蛍光体層、透明導電膜およびフタロシアニン有機感光体層を重ねた3層構造である。感光体層を高圧に帯電させた後にX線を照射すると、蛍光体の発光で導電効果を生じ、透視像の電位パターンが形成される。

撮影後、現像からトナーによるハードコピー化まで、行程は一般の複写機に似て全電子的に行われる。

2.2 イメージプレートの構成

図1の部分拡大図に示した蛍光体層はガドリニウム系($\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$)蛍光体粉末を200 μm 厚にスクリーン印刷したもので、その上に透明導電層(ITO)を介して20 μm 厚の有機感光体(フタロシアニン)層が重ねられている。従来の蛍光増感紙はガドリニウム系に限らず、蛍光体粉末をニトロセルロースを主体とするバインダで固めたものである。したがって、イメージプレートのように層を後から順次重ねて行く場合、前後処理のために必要な種々の薬品や高温の処理に耐えることができない。

薬品と高温処理に耐え得る有機被膜として、ポリイミド系材料がまず考えられる。しかし、硬化のための熱処理完了後に着色せず、透明なものはいまだに開発されておらず、イメージプレートのような光を取出すものの固定剤には使えない。種々のバインダを検討した結果、溶剤などの薬品に耐性が優れていること、100 $^{\circ}\text{C}$ 以上の耐熱性を示すこと、さらに、熱処理完了後に良い透明度を示すこと、の3つの条件を満足するものとしてポリブタジエンが最良であることがわかった。

一方、感光体層はX線透視のように実寸大の像を

図1 X線透過像の再生行程
Image reproduction procedure.

図 2 イメージプレートの波長特性
Wave length characteristics of image plate.

取り扱うためには、高感度、大面積化が容易でなければならない。順次積層して行くための前後処理と大面積化が容易という点では、アモルファスシリコン (a -Si) やセレン (Se) に代わって、有機感光体が最も適していることがわかった。

2.3 イメージプレートの X 線変換特性

図 2 は、ガドリニウム系蛍光体 ($Gd_2O_2S:Tb$) の X 線による発光波長とフタロシアニン有機感光体の波長感度とを重ねて示したものである。($Gd_2O_2S:Tb$) 蛍光体は 544 nm をピークに、広がり狭い発光特性を持つ。一方、フタロシアニン感光体は短波長側から長波長側まで幅の広い波長感度を有し、発光波長を十分にカバーしている。

エネルギーの比較的弱い 100 kV 程度の X 線領域では、ガドリニウム系蛍光体を使ったシンチレータは 1 個の X 線量子を約 1000 個の光量子に変換するといわれている⁶⁾。当然、感光体の量子効率も大きければ大きいほど、この光量子で感光体内に励起される電荷キャリアは多くなる。有機感光体の量子効率は最近非常に改善されて 50% 近いものが可能になっており、上記蛍光体とこの有機感光体とを組合せたイメージプレートの場合、1 個の X 線量子によって、感光体では 300~400 個の正孔が形成される。

3. X 線電子写真の量子効率

被写体の X 線露光に先立ち、イメージプレートの感光体表面は図 1 の行程図に示すように、 -800 V の高電位に一樣に帯電される。次に X 線照射を受けると蛍光体が可視光を発し、感光体の帯電を放電して、被写体の潜像電位を形成する。図 3 はイメージプレートを X 線で照射した場合、X 線の照射量によって感光体表面帯電位が受ける変調特性を示したものであ

図 3 イメージプレートの X 線変換特性
X-ray transfer characteristics of image plate.

る。

1980 年代に発表された X 線電子写真では、X 線感応と像電位の形成を単体の Se 薄膜 (20~60 μm) で行っていた⁶⁾⁷⁾。Se 膜に前もって高圧の帯電を行い、これに X 線を照射すると膜内で止められた X 線量子が電荷キャリアに変換され、電位潜像となる直接変換である。これに比べ、蛍光体/感光体方式のイメージプレートは間接変換である。

両者を比較すると、まず、X 線の阻止能が単位膜厚当たりガドリニウム系蛍光体は Se の 5 倍である⁸⁾。その後の変換行程もそれぞれに異なっているが、総合してイメージプレートの X 線から電荷への変換効率では Se の 50~100 倍に達する。

4. 可搬型 X 線撮像装置の試作

4.1 X 線撮像装置の構成

図 1 の撮像から現像までの行程図で示したように、イメージプレートが平板で感光層の構成が異なることを除けば、一般の複写機の構造や動作に類似している。X 線で形成されたイメージプレート上の電位潜像は、図 1 のようにトナー現像器で走査されて、トナー粉末を付着させて現像される。次に、上からシート状の紙を押し付け、裏面から高圧帯電器で再び走査されて、トナー粉末は紙側へ転写される。これを定着してハードコピーが完成する。写真 1 は試作した撮像装置の外観で、横 60 cm、幅 45 cm、高さ 18 cm、総重量は約 20 kg である。ボックス内に帯電や現像に必要なすべての部品が納められている。X 線発生装置は別であるが、撮像装置全体が持ち運び可能である。試

写真 1 試作した撮像装置の外観
External view of the experimentally made electro-radiographic camera.

作機では有効面積 250×180 mm サイズのイメージプレート(女性が手に持っている)から B5 判サイズのイメージプレートまで撮像できる。被検体(写真 1 では電卓)を定位置に置いて撮像すると、X 線の照射時だけイメージプレートがカメラ内部で移動し、被検体の直下 12 mm まで近接して、X 線管の焦点サイズによるぼけと拡大投影になることを防止している。

X 線照射後、イメージプレートはカメラ内部で下降し、その上をトナー現像機が走査して潜像を黒化する。このイメージプレート上に一般の紙を密着させて、その裏面を再び高電圧帯電器で走査することによってトナーパターンは紙側へ転写される。これは熱またはフラッシュランプによって定着され、ハードコピーが完成する。X 線照射後、ハードコピーが完成するまでの所要時間は僅か数 10 秒である。

4.2 X 線透視像の実例

写真 2 は、携帯用電子機器(右側)とその透視像ハードコピーを並べたものである。構成部品がプラスチックや金属の細線であるため、50~60 kV の低いエネルギーでないと X 線の透過し易い部分は消えてしまう。

この撮像装置の分解能はイメージプレートで決まる。主にイメージプレートを構成するガドリニウム系蛍光体の厚みに左右され、薄いと分解能は向上するが、X 線の阻止能が低下し、感度が低下する。逆に厚い方が感度は高くなるが、蛍光体層内で発光が散乱して分解能は低下する。このイメージプレートは蛍光体層厚 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ である。このとき、分解能は鉄およびステンレスでは $50 \sim 60 \mu\text{m}$ 径のワイヤが、アルミでは $150 \mu\text{m}$ 径のワイヤまで判別できた。エネルギーの大きさや照射量など X 線の条件を次々に変え、短

写真 2 被検体とその X 線透過像の比較
Comparison of the object and its x-ray transmitted hard-copy.

時間に像再生とその記録が得られるので、X 線条件を変えた結果を同時に観察して比較分析することが可能である。

5. X 線透視像撮像特性

5.1 X 線感度

同じ電子写真方式でも、X 線の阻止と電荷キャリアの発生を 1 つの Se の薄膜に行わせる直接変換では、阻止能を高めて、潜像形成に必要な電荷キャリアの発生や寿命などの諸条件を両立させることは困難で、3 章で述べたごとく X 線に対する感度は非常に低いものであった⁷⁾。これに対し現在広く使われている蛍光増感紙-X 線フィルム(通称スクリーンフィルム)方式では、阻止能の充分大きい蛍光増感紙で X 線を光に変換させ、その発光をフィルムで感光させるため、両者の機能を独立して向上させ得る利点がある。

図 4 は現行のスクリーンフィルム方式の原理図であるが、X 線フィルムを両側から蛍光増感紙で挟んで透過 X 線の再利用を図り、感度向上を行っている。

図 5 は、X 線透過像と背景とのコントラスト比

図 4 従来の蛍光体-フィルム方式
Currently used screen-film combination.

図5 イメージプレートとX線フィルムの感度比較
Comparison of x-ray sensitivity between the image plate and the screen-film.

10:1, 100:1, 1000:1が得られるための条件, すなわちエポキシ角棒の大きさ, X線管電圧, 照射時間の関係を示したものである. このとき, X線管の電流は4mA, 被写体までの距離は700mmとした. 図中の実線がイメージプレートによるもので, 破線が工業用スクリーンフィルム方式である. 例えば, 30mm角のエポキシ棒をコントラスト比100:1で撮像する場合の照射時間は, X線管電圧が70kVのとき, イメージプレートでは8秒程度であるが, スクリーンフィルム方式では60秒近い長い時間が必要である. これは, イメージプレートの感光体に比べてX線フィルムの光に対する量子効率が1桁違うことによるものである.

5.2 コントラスト強調効果

図3に示すように, X線でイメージプレート上に形成される電圧パターンは負変調である. つまり, 明部と暗部が反転してはいるが, X線の照射量に対してリニアである.

しかし, この電位パターンをトナーで現像すると図6に示すように, 特異な変換特性を呈する. X線照射量が極端に少ないか, または多い状態では, 現象の黒化曲線, γ が1より小さくなるが, 中間域では $\gamma=2$ で黒化が強調され, コントラストの強い画像となる. コントラストの強すぎる画像は不自然なため, 当然一

図6 イメージプレートのトナー現像特性
Toner development characteristics of the image plate.

図7 X線エネルギーの大きさによる透過像の違い
The variation of transmitted image by the x-ray energy difference.

般の写真の目的からはずれるように, X線透視の場合も, できるだけ薄いものから厚いものまですべてを一度に撮影するという目的には適さない. しかし, 厚い被検体の中の小さな欠陥など, 低コントラスト部を撮影するには, その部分のコントラストを強調することによって, 検出能力を高めることができる. 例えば, 産業用では厚いエポキシブロックの中の小さな気泡や, 医療用では乳癌の検診などがこれに相当す

る⁹⁾。

図7は、電気配線用の雄雌プラグをX線管電圧を30 kV から 90 kV まで7段階選び、X線の透過しにくい金属端子部と周囲とのコントラスト比が100:1になるよう照射時間を調節して得た透視像を比較したものである。管電圧が低く、X線エネルギーの弱い状態では、プラスチックカバーの肉厚の違った細部まで再現されている。しかし、管電圧がある程度以上高く、X線の透過エネルギーが大きくなると、透過し易い部分は急激に見えなくなることがわかる。

このように急激な変化は、トナー現像特有の効果でかなり誇張されて再現されるが、低コントラスト部位を検知するためには有効な特性である。

6. む す び

蛍光体、有機感光体を積層した新しいイメージプレートを開発することにより、現用のX線フィルムに比べ数々の利点を持つX線電子写真撮像装置を実現した。その利点を列記すると、

- (1) 現像工程がすべて電子的に行われるため、現用X線フィルムのように長時間を要する煩わしい化学的処理が不要である。
- (2) X線フィルム方式に比べ、X線に対する感度が1桁高感度のため、少ないX線の照射量で鮮明度の高い透視像が得られる。
- (3) イメージプレート上の画像はトナーで現像後、通常の紙に転写してハードコピーを得ることができ、その間僅か数10秒で、繰り返し撮像が行える。
- (4) トナー現像のコントラスト強調効果により、被検体の低コントラスト部位を鮮明に再現するので、欠陥の検知が容易になる。

などである。

X線発生装置では、小型で携帯可能な機種がすでにいく種類も実用化されている。X線フィルムを使う場合、蛍光増感紙とX線フィルムを納めたカセツ

ト自体は小型で携帯可能である。しかし、X線照射後のフィルムをその場で現像するのは容易ではなく、最適のX線条件や撮影方向を割り出すための試し撮りはできなかった。ここで開発した撮像装置は充分携帯可能で、僅か数10秒で次々に試し撮りの結果を観察することができる。この効果を利用することによって、移動不可能な物体や短時間での判断を必要とするX線透視検査に大きな効力を発揮すると考えられる。

【参 考 文 献】

- 1) M. Sonoda, et al.: Radiology, **148**, p. 833 (1983)
- 2) S. Shirouzu, et al.: Tec. Digest of 9th Sens. Sympo., pp. 129-132, Tokyo (May 1990)
- 3) S. Shirouzu, et al.: Tec. Digest of 10th Sens. Sympo., pp. 101-104, Tokyo (May 1991)
- 4) S. Shirouzu, et al.: Proc. of 12th Int. Disp. Res. Conf., Jpn. Disp. '92, S4-3, Hiroshima (Oct. 1992)
- 5) Ir. A. L. N. Stevens: Medica-Mundi, **20**, pp. 12-22 (1975)
- 6) R. M. Shaffert: "Electrophotography", Focal Press N. Y., 102 (1965)
- 7) Xeroradiography: Operations Manual 1975, Xerox Corporation
- 8) Storm E. Israel HI: "Photon cross section from 1keV to 100MeV", Nuclear Table (1970)
- 9) M. Kato, et al.: Proc. SPIE, **347**, pp. 47-48 (1982)

しろすず しゅんじ
白水 俊次 昭和37年、東京大学理学部物理学科卒業。同年、(株)東芝に入社。総合研究所にて、撮像管等、光電変換装置の研究開発に従事。昭和48年より、圧力、流体等、各種半導体センサの研究開発をに従事し、その後、研究開発センターにて赤外線、X線等の不可視光イメージセンサの研究開発に従事。平成5年4月より、長野工業高等専門学校電子情報工学科教授。理学博士。正会員。

いのうえ しょういち
井上 正一 昭和33年、神奈川県立工業高校卒業。同年、(株)東芝マツダ研究所に入所。フォトマル、イメージ管の研究開発に従事。後に、総合研究所にて撮像管、赤外線センサ等、各種撮像素子の実装技術の担当を経て、X線イメージセンサの研究開発に従事。現在、東芝リビングサービス(株)に勤務。正会員。