

TFT アレイを利用した医療用大面積 X 線ディテクタ

Diagnostic large-area X-ray detector using a TFT array

和 泉 良 弘*¹
Yoshihiro Izumi

寺 沼 修*²
Osamu Teranuma

高 橋 昌 之*²
Masayuki Takahashi

上 原 和 弘*²
Kazuhiro Uehara

山 根 康 邦*²
Yasukuni Yamane

種 部 慎*³
Makoto Tanebe

近 藤 直 文*⁴
Naofumi Kondoh

要 旨

次世代の医療診断用デジタル X 線撮像システムを実用化するため、17×17インチの広い検出領域を有する直接変換方式のフラットパネル X 線ディテクタを開発した。本ディテクタは、2次元読み出し回路として機能する薄膜トランジスタ (TFT) アレイと、X 線変換膜 (アモルファスセレン) から構成される。開発のポイントは、信号読み出し経路の低ノイズ化であり、TFT アレイ、信号読み出し LSI、X 線変換膜の設計を各々最適化することで、優れた画質と高い検出効率を達成することが可能となる。本ディテクタは、動画と静止画の撮影が可能であり、さらに、診断能の向上や被ばく線量の低減に対しても有用であることから、各種 X 線診断システムへの搭載が期待される。

A direct-conversion flat-panel X-ray detector with a large detection area of 17"×17" has been developed to achieve the practical use of a diagnostic digital X-ray imaging system for the next generation. The detector consists of a thin film transistor (TFT) array that functions as a two-dimensional readout circuit and an X-ray conversion film (amorphous selenium). Key point of the development is the noise reduction in the signal readout path. Design optimization of the TFT array, the readout LSIs, and the X-ray conversion film allows the detector to achieve good image quality and high detection efficiency. The detector can be used for radiography and fluoroscopy, with the improvement of diagnostic capability and the reduction of radiation dose. It is expected that the detector will be applied to a variety of X-ray diagnostic systems.

まえがき

X 線画像診断の分野では、その診断目的に応じて、胸部や乳房など動きの少ない部位を対象にする精密画像観察 (静止画) と、消化器官や心臓など動きの大きな部位を対象とするリアルタイム画像観察 (動画) が使い分けられている。

静止画の撮影には、主に X 線フィルム (フィルムと増感紙を組み合わせたフィルム/スクリーンシステム) が今なお使用されている。一方、動画の撮影には、光電子増倍管と CCD を組み合わせた撮像管 (イメージインテンシファイア) が使用されている。

X 線フィルムは、空間分解能が高い反面、感度が低く静止画しか撮影できない、撮影後に現像処理を必要

とし即時性に欠けるといった欠点がある。一方、撮像管は、感度が高く動画の撮影が可能である反面、空間分解能が低い、バルキーな真空デバイスであるため大型化に限界がある (検出領域が制約される) といった欠点がある。

そこで、これら既存の撮影システムの長所を取り入れ、高空間分解能と高感度化の両立、動画・静止画の兼用、X フィルムと同等以上の広い検出領域、即時性、筐体の薄型化が一挙に実現できる大面積検出システムが待ち望まれていた。さらに近年の医療のデジタル化・IT 化の加速にも後押しされ、次世代のデジタル X 線検出デバイスとしてフラットパネル X 線ディテクタが注目されるようになった^{1, 2, 3, 4)}。フラットパネル X 線ディテクタは、液晶ディスプレイの基幹デバ

*¹ 液晶事業統轄 液晶事業戦略推進室

*² ディスプレイ技術開発本部 機能デバイス研究所 第 1 研究部

*³ モバイル液晶事業本部 MB 液晶第 1 事業部 開発技術部

*⁴ AVC 液晶事業本部 開発センター 第 1 開発技術部

イスである二次元の薄膜トランジスタ (TFT) アレイと、半導体やシンチレーターなどのX線変換膜を組み合わせた新しいタイプの撮像デバイスであり、飛躍的な画質向上と高感度化が達成できる。

当社、(株) 島津製作所、新電元工業 (株) の3社は、共同開発により、2003年後半に検出領域9インチ角サイズのフラットパネルX線ディテクタを実用化し、専門家から、これまでにない高画質な画像で心臓やカテーテルが鮮明に見える等、高い評価を受けている⁵⁾。そして今回、X線フィルム (最大17インチ×14インチ) を上回る検出領域17インチ角サイズの動画・静止画兼用型大面積フラットパネルX線ディテクタを世界で始めて開発・実用化することに成功した。本稿では、この大面積フラットパネルX線ディテクタの概要について紹介する。

1. フラットパネルX線ディテクタの原理

X線を検出する方式は、X線を電荷に変換するプロセスの違いによって、「直接変換方式」と「間接変換方式」に大別できる。図1は、両者の違いを示す図である。(a)「直接変換方式」では、X線を直接電荷に変換して画像化するのに対し、(b)「間接変換方式」では、X線を一旦光に変換し、さらに光を電荷に変換するプロセスを経て画像化する。したがって、(b)「間接変換方式」は、光の散乱による画像劣化 (空間分解能の低下) が不可避であるのに対して、(a)「直接変換方式」は、空間分解能の面で大きな優位性をもっている。

図2は、今回採用した「直接変換方式」のフラットパネルX線ディテクタの構成図である。薄膜トランジスタ (TFT) と電荷収集電極 (蓄積容量) がマトリクス状に二次元配列されたTFTアレイと、その上に積層されたX線変換膜、および上層電極によって検出パネルが構成される。またTFTアレイの周辺部には、TFTを駆動するための駆動回路、及び信号読み出しLSIが接続される。X線発生器から放射されたX線は、患者等の被検体を透過した後、X線変換膜に入射し、そこで電荷 (正孔-電子対) に変換される。X線変換膜で発生した電荷は、上層電極によって印加された電界に沿ってX線変換膜内を移動し、TFTアレイの電荷収集電極 (蓄積容量) に収集される。その後、TFTを順次ON/OFFし、この電荷をTFTアレイの周辺部に接続された信号読み出しLSIで読み出すことでX線画像を得ることができる。読み出しのレートを30frame/secで走査することで、動画の撮影が可能となる。

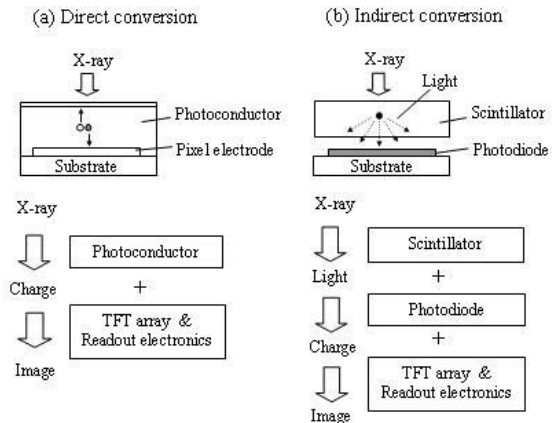


図1 X線検出の原理; (a) 直接変換方式, (b) 間接変換方式
Fig. 1 Principle of X-ray detection;
(a) direct conversion, (b) indirect conversion.

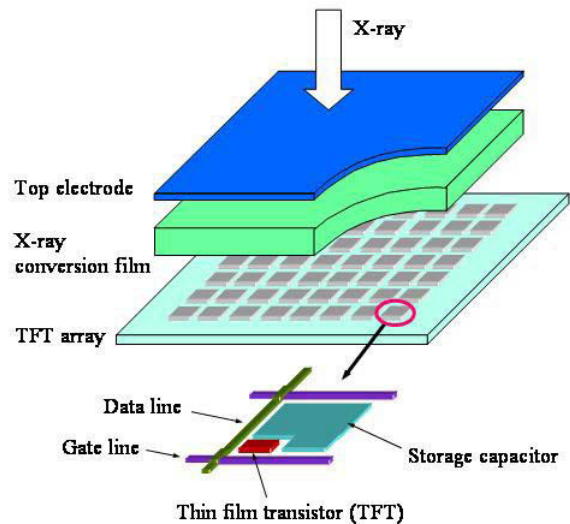


図2 直接変換方式フラットパネルX線ディテクタ構成図
Fig. 2 Scheme of a direct-conversion flat-panel X-ray detector.

2. 要素技術

動画・静止画の撮影が兼用でき、かつ高画質なフラットパネルX線ディテクタを実現するためには、S/Nの向上が極めて重要であり、高感度なX線変換膜の開発、回路ノイズを低減した大面積TFTアレイと信号読み出しLSIの開発が必要となる。

2・1 X線変換膜

X線変換膜には、感光体ドラムへの成膜で実績があり、大面積基板への成膜が低温で比較的容易にできる非晶質セレン (アモルファスセレン) を採用した⁶⁾。

セレンは、原子番号が34と大きく、暗抵抗が $>10^{12} \Omega \text{ cm}$ と高いことから、X線検出用の半導体材料として適している。今回、既存のX線撮像管を上回る検出量子効率を達成することを目標とし、入射するX線を全て吸収できるようにセレン膜の厚さを1 mmに設定した。また、セレン膜内で発生した電荷を全て画素の蓄積容量に収集できるように、1 mm厚のセレン膜に対して10KV ($10\text{V}/\mu\text{m}$)の電圧を印加するよう設定した。1 mm厚のセレン膜を大面積に成膜し、かつ10KVもの高電圧を印加した状態でX線を電気信号に変換させる特性を安定して維持させることは容易でなく、セレン膜の成膜条件の最適化とパネル構造の工夫が必要となる。

2・2 大面積 TFT アレイ

図3は、フラットパネルX線ディテクタの信号読み出し経路を示す等価回路である。TFTアレイのデータ線端に電荷検出アンプ (CSA: Charge Sensitive Amplifier) から構成される信号読み出し回路が接続されている。X線照射により画素の蓄積容量Csに蓄積された電荷は、仮想接地レベルのデータ線を介して電荷検出アンプの入力に引き寄せられ、フィードバック容量Cfに蓄積される。その結果、電圧 $V=Q/C_f$ がCSAから出力される。

照射X線量が少ない動画撮影時に読み出し信号のS/Nを確保するためには、この経路のトータルノイズを如何に低減するかが重要となる。ノイズの主要因は、TFTアレイのデータ線の抵抗成分に起因する熱ノイズと、電荷検出アンプのノイズである⁷⁾。データ線の等価雑音電荷 σ_{data} 、電荷検出アンプの等価雑音電荷 σ_{amp} は、各々以下の式で表される。

$$\sigma_{data} \propto v_d \cdot C_d = \sqrt{4kTR_d} \cdot C_d$$

$$\sigma_{amp} \propto v_a \cdot (C_d + C_f)$$

R_d : データ線抵抗	C_d : データ線容量
C_f : CSAのフィードバック容量	
k : ボルツマン定数	T : 絶対温度
v_d : データ線の熱雑音電圧	
v_a : CSAに内在する熱雑音電圧	

ここで注目すべきは、データ線抵抗 R_d に増してデータ線容量 C_d がノイズ特性に大きく影響を与えている点である。つまり、データ線容量 C_d を低減することにより、画質の大幅な向上が期待できる。そこで、液晶ディスプレイ用に使用していたTFTアレイの設計ルールを見直し、データ線の低容量化を最優先に

して、TFTアレイの構造と配線レイアウトの最適化を行った。

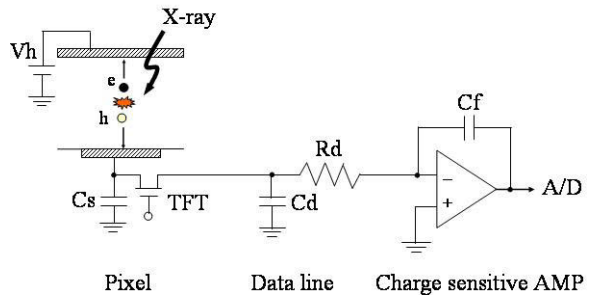


図3 フラットパネルX線ディテクタの信号読み出し経路
Fig. 3 Signal readout pass of a flat-panel X-ray detector.

2・3 信号読み出し LSI

信号読み出し回路については、アンプに内在する熱雑音の大幅な低減が求められることから、新たに128chの低ノイズCMOS-LSIを開発した。図4に、その信号読み出しLSIの基本構成を示す⁸⁾。また図5に、その駆動タイミングを示す。電荷検出アンプ (CSA)、2段の積分増幅回路MA1、MA2 (MA: Main Amplifier)、及びサンプルホールド回路 (S/H) から構成される。サンプルホールドされた信号は、最終的に14ビットのA/Dコンバーターを経てデジタル信号として読み出される。

CSAと1段目の積分増幅回路MA1の間には、CSA及びTFTアレイに起因するノイズを効果的に除去するローパスフィルターが設置されている。また、MA1、MA2は相関2重サンプリング (CDS: Correlated Double Sampling) の役割を果たし、更に低ノイズ化が図られる。この新規開発された低ノイズ信号読み出しLSIと、上述したTFTアレイを用いることで、フラットパネルX線ディテクタのトータルノイズを、X線量が最も少ない動画撮影時でも実用的な画像信号読み出しが可能なレベルに抑えることが可能となった。

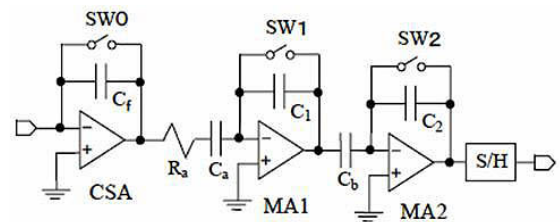


図4 信号読み出しLSIのブロック図
Fig. 4 Block diagram of the readout channel.

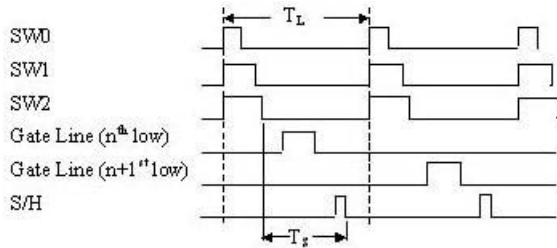


図5 信号読み出しシーケンスのタイミング
Fig. 5 Timing diagram of the readout sequence.

3. フラットパネルX線ディテクタの特性

3.1 仕様

表1に、開発した大面積フラットパネルX線ディテクタの仕様を示す⁹⁾。18インチ角の画素アレイ領域を有するTFTアレイを使用し、周辺画素領域(画像処理に利用する参照データ取得用の画素)を除く17インチ角の領域がX線の検出領域となる。30frame/secの読み出しレートを実現しており、静止画だけでなく動画の撮影にも対応できる。

図6に、ディテクタモジュールの外観を示す。手前が今回開発した検出領域17インチ角のディテクタ、奥が先に開発した9インチ角のディテクタである。

表1 大面積フラットパネルX線ディテクタの仕様
Table 1. Specification of a large-area flat-panel X-ray detector.

Description	Specification	Units
Active area size (Pixel array format)	18×18 (3072×3072)	inch
Detective area size (Pixel array format)	17×17 (2880×2880)	inch
Pixel pitch	0.15	mm
X-ray conversion film	amorphous Se	
Film thickness	1	mm
Electric field	10	V/μm
Readout rate	30	fps

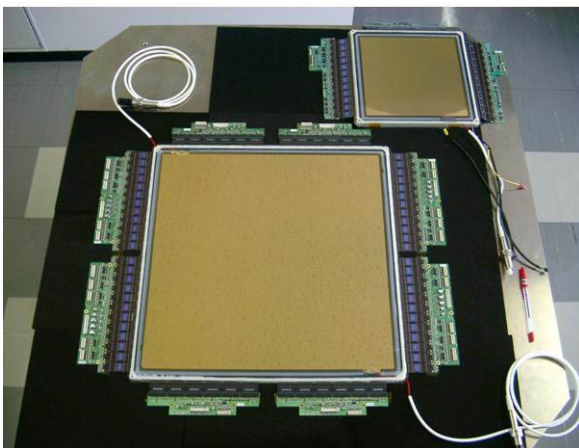


図6 大面積フラットパネルX線ディテクタの外観
Fig. 6 External view of a large-area flat-panel X-ray detector with peripheral electronics.

3.2 性能

X線検出器における動画撮影時の画質評価の指標として、検出量子効率 (DQE: Detective Quantum Efficiency) が使用される。DQEは、下式で表すことができ、S/N特性を表す指標である。理想的な撮影システムでは、出力信号のS/N_{out}が入力信号と同じS/N_{in}に保持され、DQEは1となる。

$$DQE = \frac{(S/N)_{out}^2}{(S/N)_{in}^2}$$

表2に、各種X線撮影システムによるDQEの比較を示す。アモルファスセレンをX線変換膜に用いた直接変換方式のフラットパネルX線ディテクタは、既存システムと比べて同等以上の優れたS/N特性を備えていることがわかる。これは、前節で述べたように、入射したX線を最大限に利用するためのX線変換膜の設計、及びTFTアレイと信号読み出しLSIの低ノイズ化設計により達成される。

図7は、解像度テストパターンを撮影したX線写真である。(a)はフラットパネルX線ディテクタ、(b)は従来のX線撮像管で撮影したものである。フラットパネルX線ディテクタの撮影画像が非常に鮮明であり、光変換プロセスを伴わない直接変換方式(X線→電荷)により、高い空間分解能を実現していることがわかる。

図8は、格子パターンを撮影したX線写真である。(a)はフラットパネルX線ディテクタ、(b)は従来のX線撮像管で撮影したものである。フラットパネルX線ディテクタの画像は歪がなく、かつ4隅まで有効に視野を確保できることがわかる。

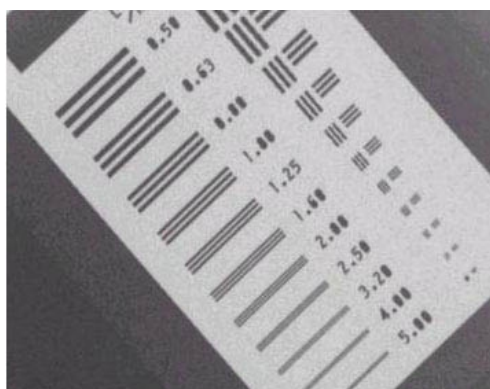
このように、フラットパネルX線ディテクタは、高感度・高い空間分解能・歪みのない画面を全て備えた高画質なX線写真を撮影することができる。

表2 各種X線撮影システムによるDQE比較¹⁰⁾
Table 2. DQE comparison between various X-ray imaging systems.

X-ray imaging system	DQE (@0 lp/mm)
Film/Screen	0.15~0.2
CR (Computed Radiography)	0.2~0.25
I.I.-TV (Image Intensifier TV)	0.5~0.6
Direct conversion flat-panel detector	0.5~0.8



(a)

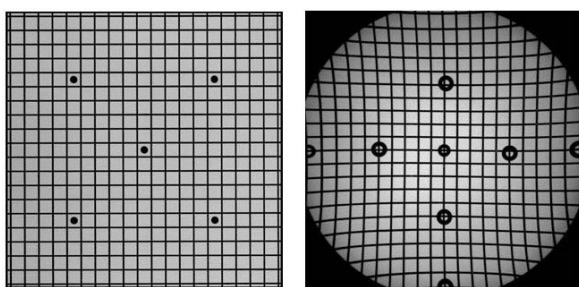


(b)

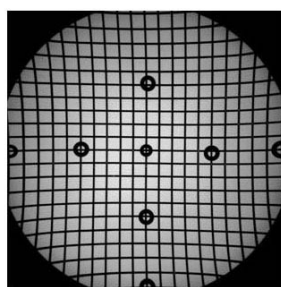
図7 解像度テストチャート撮影像

(a) フラットパネル X 線ディテクタ, (b) X 線撮像管

Fig. 7 Image of a resolution test pattern taken by (a) flat-panel X-ray detector, (b) I.I.-TV.



(a)



(b)

図8 格子テストチャート撮影像

(a) フラットパネル X 線ディテクタ, (b) X 線撮像管

Fig. 8 Image of a grid test pattern taken by (a) flat-panel X-ray detector, (b) I.I.-TV.

3.3 臨床画像例

図9, 図10に, 検出領域17インチ角サイズのフラットパネル X 線ディテクタを用いた臨床画像例を示す。フラットパネル X 線ディテクタの特徴である, 周辺まで歪みがなく, 高い分解能と広いダイナミックレンジにより, 鮮鋭な画像が得られている。

ノイズの少ない高精細な画像により, 今まで見えにくかった微細病変が見えやすくなり, また, X 線量を $1/2 \sim 1/3$ に減少しても X 線フィルム撮影と同等以上の静止画像が得られるといった効果が期待されている。



図9 静止画撮影例 (胸部撮影像)

Fig. 9 Example image of radiography.

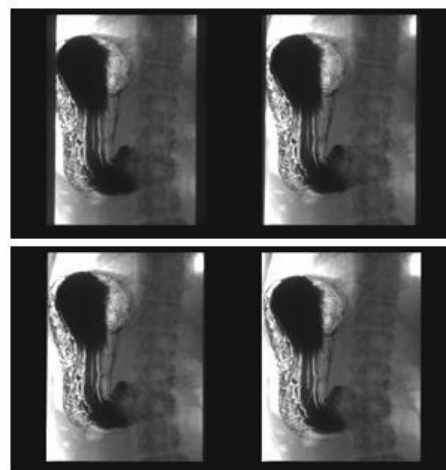


図10 動画撮影例 (胃の透視像)

Fig. 10 Example image of fluoroscopy.

4. 診断システム搭載例

2004年末, (株) 島津製作所から, 検出領域17インチ角サイズのフラットパネル X 線ディテクタを搭載した X 線診断用のデジタルテーブルシステム (図11)

とX線撮影システムが発売された^{11, 12)}。医療用X線フィルムの最大サイズをカバーする大視野を得ることができるため、従来のシステムでは不可能だった広範囲にわたる検査が可能になり、検査領域のポジショニング操作も容易である。また、1台のシステムで動画から静止画撮影までリアルタイムに画像を得ることができるため、検査での即時診断が可能になるといった特徴を備えている。

フラットパネルX線ディテクタは、その特徴を活かした新たな診断手法開発への期待も大きく、今後、コンピューター断層撮影 (CT: Computed Tomography) をはじめ、非破壊検査やセキュリティ検査など、幅広い診断・検査システムへの展開が期待される。



図 11 17インチ角フラットパネルX線ディテクタが搭載された(株)島津製作所のデジタルテーブルシステム
Fig. 11 Shimadzu's digital table system with a 17-inch square flat-panel X-ray detector.

むすび

フラットパネルX線ディテクタは、高画質化による診断能力の向上と、デジタル化による診断支援が最大の特徴であるが、検査時間の短縮やX線被ばく量の低減といった被験者メリットの向上、X線フィルムレスによる環境負荷の低減、画像通信による遠隔医療の実現などの点でも有用であり社会からの期待も大きい。今後10年間で、既存のX線撮影システムは急速にフラットパネルX線ディテクタに置き換わっていくものと思われる。

本開発を通し、液晶ディスプレイの基幹技術を、異

業種のディスプレイ以外のデバイスに適用できたことは、意義深いことである。この開発を良き前例とし、今後も社会に貢献できる新規デバイスの開発に取り組んでいきたい。

謝辞

本開発にあたり、多大なご支援・ご協力を頂きました(株)島津製作所の関係者の皆様に感謝致します。

また、本開発にご協力を頂きました旧AVC液晶事業本部第1開発技術部、旧IC事業本部要素技術開発センターの関係者の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1) L.E.Antonuk et al., "Development of thin-film, flat-panel arrays for diagnostic and radiotherapy imaging", Proc. SPIE 1651, pp.94-104(1992).
- 2) D.L.Lee et al., "A New digital detector for projection radiography", Proc. SPIE 2432, pp.237-249(1995).
- 3) R.L.Weisfield et al., "New amorphous-silicon image sensor for X-ray diagnostic medical imaging applications", Proc. SPIE 3336, pp.444-452(1998).
- 4) 和泉 他, "フラットパネルX線イメージセンサの開発", シャープ技報, 12(通巻80号), pp.25-30(2001).
- 5) "デジタルアンギオグラフィに変革をもたらす直接変換方式FPD", INNERVISION, 19, 1(2004)別冊.
- 6) 佐藤 他, "医療用大面積X線センサーの開発", 応用物理, 73, 7, pp.931-934(2004).
- 7) S.Adachi et al., "Noise properties of a Se-based flat-panel X-ray detector with CMOS readout integrated circuits", Proc. SPIE 4682, pp.580-591(2002).
- 8) M.Takahashi et al., "A TFT-Based flat-panel X-ray detector for medical imaging with low-noise C-MOS readout LSIs", Proc. AM-LCD'03, p.209-212(2003).
- 9) Y.Yamane et al., "Flat-panel X-ray detectors for medical imaging", Proc. AM-LCD'04, pp.91-94(2004).
- 10) 中村, "FPDの現状と将来～島津直接変換型FPD搭載XTVシステム", 映像情報Medical, 37, 2, pp.160-165(2005).
- 11) 今西 他, "17インチ直接変換方式FPD搭載透視撮影台システムSonialvision Safireの開発", 島津評論, 61, 3・4, pp.117-125(2005).
- 12) 荒木 他, "FPD搭載型デジタル一般撮影装置RADIOTEX Safireの開発", 島津評論, 61, 3・4, pp.161-170(2005).

(2005年6月10日受理)