

講 演

近未来のデジタルX線システム

— X線平面検出器の現状と将来 —

株式会社 東芝 医用機器・システム開発センター 藤井千蔵

1. はじめに

近年半導体製造技術の向上によりX線平面検出器が急速に現実的なものとなってきた。このX線平面検出器は、フィルムを凌駕する画質性能をもち動画にも対応可能で、デジタル化が容易であり、フィルムおよびX線イメージインテンシファイアに置き換わる新たなX線検出器である。これからのデジタル総合画像診断、医療情報ネットワーク時代に向け、胸部の一般撮影から消化器や心臓・血管の造影検査まで幅広く応用し、多くの臨床メリットを提供することが可能である。

2. X線平面検出器研究開発の経緯 (X線画像デジタル化の歴史)

X線画像のデジタル化は診断X線領域の長年の夢であり、フィルムデジタイザや特殊なデジタルX線の研究が行われてきた。1980年頃、DSA装置の登場によりX線画像のデジタル化が実用化を迎え、1,024マトリクスのDSA装置や輝尽性蛍光体とレーザ技術を組合わせたCR装置、DSA装置の心臓循環器領域への応用、90年代に入って、CCDを用いたDSA装置や消化管領域への応用としてDR装置が登場し、種々の発展を見せてきた。しかしながらCRを除くとこれらデジタル化はすべてX線イメージインテンシファイアをX線検出器としたもので、形状や画質に対しては大きな飛躍は期待できない。また、CRを含め、X線診断の多くを占める一般撮影の分野への適用には限界がある。

これに対し、90年前後、世界のX線物理の先駆的研究者らは、X線診断装置を世代交代させる重要な技術ブレイクスルーとしてX線平面検出器に注目し研究を始めた。この研究を加速したのが、

液晶ディスプレイ分野のTFT技術であり、TFT技術を応用することにより2次元平面にX線の検出素子を配列することが可能となり、一気に実用化を目指した開発が活発になった。95年の北米放射線学会での直接変換方式の静止画用X線平面検出器の発表、97年の間接変換方式の静止画用平面検出器、直接変換方式の動画用平面検出器の発表等につき、98年も実用化を目指した種々の研究開発が行われている。

3. X線平面検出器の原理、基本構造

X線平面検出器は、図1に示すように、

- 1) X線を電荷に変換する「X線変換部」
- 2) 発生した電荷を2次元にアレイ状に配列した画素で蓄積し、各画素に構成されたスイッチ素子を駆動することにより蓄積した電荷を電気信号として外部に取り出す為の「検出素子アレイ部」
- 3) 取り出した信号を処理し、デジタルデータとして出力する「高速信号処理部」「デジタル画像伝送部」等から構成される。

X線平面検出器は、X線変換部の構造により大きく2種類の方式に分類される。図2に示すように、Se(セレン)等の光導伝体を用いてX線を直接電荷に変換する「直接変換方式」と、CsI

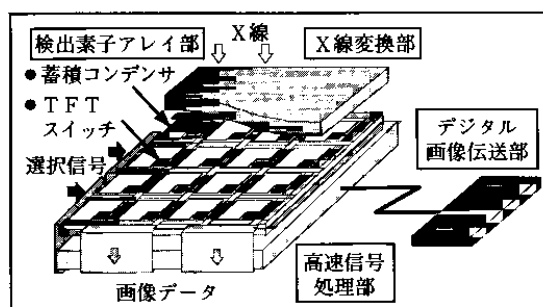


図1 X線平面検出器の構造

(沃化セシウム)等のシンチレータを用いてX線を一旦光に変換した後、フォトダイオードにて電荷に変換する「間接変換方式」である。空間周波数特性を考えると、光散乱等のない直接変換方式は理想的な特性を示す。一方、間接変換方式は原理的には従来のフィルム/スクリーン系と同等またはそれ以下の特性となる。

「検出素子アレイ部」は主に液晶ディスプレイで知られる、ガラス上に薄膜の半導体スイッチを構成する技術(薄膜トランジスタ、Thin Film Transistor; TFT)で作られ、高精細画素サイズ(100 μm²程度)で大視野アレイ(43 cm²等)の開発も可能である。

4. 次世代X線検出器の備えるべき性能

X線平面検出器の開発状況が広まるにつれ、臨床分野からは研究開発者の予想を超える期待が寄せられている。果たしてX線平面検出器は真に次世代X線検出器となり得るのであるか? そのためにはどのような性能を有しなければならないか?

次世代X線検出器の可能性を論じるには、偏った性能だけで論じてはならない。あらゆるX線診

断システムとして必要な性能を比較検討する必要がある。図3にX線検出系の性能評価指標を示す。静止画質に関わる性能として、空間方向と濃度方向の特性、動画性能に関わるものとして時間方向の特性、また、使用環境に適合するための形態的な特性、さらに経年変化等の信頼性も評価指標として重要である。

X線平面検出器の評価は始まったばかりであり、まだ一般論として定量的な評価にはいたっていない。また、種々の今後の開発要素もあり結論を出すことは難しい段階であるが、一般的な傾向を定性的に示し今後の開発のポイントを明確にするため、あくまで私見として表1~4に各検出方式(フィルム増感紙系、X線イメージインテンシファイア-TVカメラ系を含む)の性能比較を示す。

これらの表からわかるように、X線平面検出器の特性は全体的に今までのX線イメージインテンシファイア-TVカメラ系よりも高い特性を持ち、静止画質でもフィルム増感紙系を凌駕する特性を有する可能性を持つ。

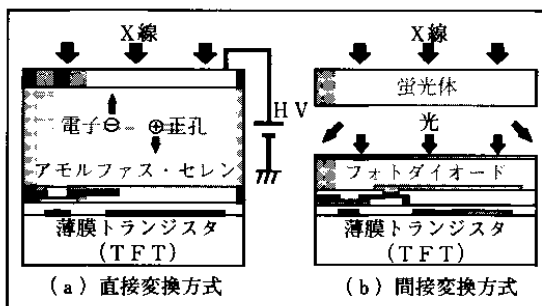


図2 直接変換方式と間接変換方式

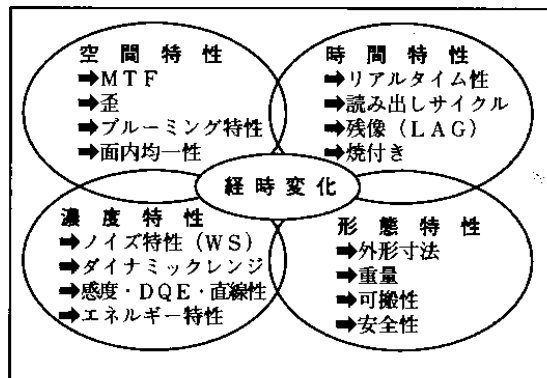


図3 X線検出系の性能評価指標

表1 空間方向の特性比較

評価因子 (空間特性)	Screen-Film	I.I.-TV	間接FPD	直接FPD	備考 (FPD)
MTF	◎	△	○	◎	限界解像度は画素サイズにより限定されるが直接のMTFはFilmより高い
歪	◎	×	◎	◎	空間的歪は一切なし
ブルーミング特性	○	×	○	○	飽和画素からの他画素への影響を抑えるTFT設計が必要
面内均一性	○	△	○	○	各膜構造の均一性 Ampゲイン・オフセット等を含んだ補正が必要

5. 動画対応 vs. 静止画対応

前項での性能比較により、X線平面検出器は次世代のX線検出器となり得る潜在能力を有していることがわかる。現在、開発・製品化が進められているのは、静止画のみを対象としたものが主流を占めているが、近い将来動画をも対象にした製

品が開発され、真に次世代の検出器となることが期待される。しかしながら、以下に示すように静止画対応から動画対応へは技術的に大きなギャップがある。

1) 入力視野サイズの自由度を上げる

動画対応のアプリケーションでは、入力視野サイズの切り替えが必須である。しかし動画で処理する

表2 濃度方向の特性比較

評価因子 (濃度特性)	Screen-Film	I.I.-TV	間接FPD	直接FPD	備考 (FPD)
ノイズ特性 (WS)	○	△	○	○	電気回路系 (特に初段積分アンプ) の低ノイズ化がポイント
ダイナミックレンジ	△	×	◎	◎	直接方式では飽和レベルでのTFT高電圧保護が必要
感度・DQE・直線性	○	○	◎	◎	間接方式ではシンチレータ厚に依存するが、MTF特性とのバランスが重要
エネルギー特性	○	○	○	○	シンチレータ、フォトコンダクタ材質に依存するが、従来検出系に比して遜色なし

表3 時間方向の特性比較

評価因子 (時間特性)	Screen-Film	I.I.-TV	間接FPD	直接FPD	備考 (FPD)
リアルタイム性	×	◎	◎	◎	TFT駆動方法と信号処理部の高速化必要 (積分アンプのノイズ特性に影響)
読出しサイクル	×	◎	◎	○	フォトコンダクタ方式によってはディスプレイチャージが必要な場合あり
残像 (LAG)	-	△	○	○	シンチレータの残光、フォトコンダクタの残電荷、TFTでの読み残し等に依存
焼付き	-	△	○	○	各構造での電子トラップ度合いに依存 (各膜構造設計に依存)

表4 形態的な特性比較

評価因子 (形態特性)	Screen-Film	I.I.-TV	間接FPD	直接FPD	備考 (FPD)
外形寸法	◎	×	◎	◎	受光面+数cm、数cm厚の実装可能 (LCD実装技術の応用)
重量	◎	×	○	○	透視装置として使用する場合、透過X線の遮蔽必要
可搬性	◎	×	△	△	可搬型の可能性あり
安全性	◎	△	○	△	被験者接触部等の安全性確保重要 (規格対応)
経時変化	○	×	○	○	TFT等のX線耐性等の確認必要

ためのマトリクスサイズには制限があり、そのギャップをどう埋めていくか、画質・被曝線量を考慮しつつ最適な方法を実現していかなければならない。

2) 透視から撮影までのダイナミックレンジへの対応

X線変換部、ならびに検出素子アレイ部では、いわゆるゲイン切り替えを行うことはできない。したがって、あるS/Nレベルを保ちながら、透視レベルの線量から撮影レベルの線量までの広いダイナミックレンジの電気信号を扱う必要がある。また、I.I.-TVシステムのような光量調整や光量フィードバックによるX線条件制御ができないため、ダイナミックに変化する被検体に合わせたX線条件制御方式が必要となる。

6. 当社の取り組み

X線平面検出器の特性を最大限に生かし、臨床の場に役立てるためには、動画撮像の可能な「直接変換方式」X線平面検出器の実用化が必須である。東芝では、97年小サイズながら直接変換方

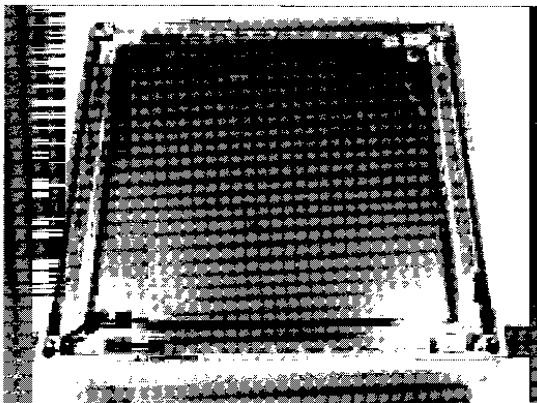


写真1 (東芝が試作した)
直接変換方式のX線平面検出器

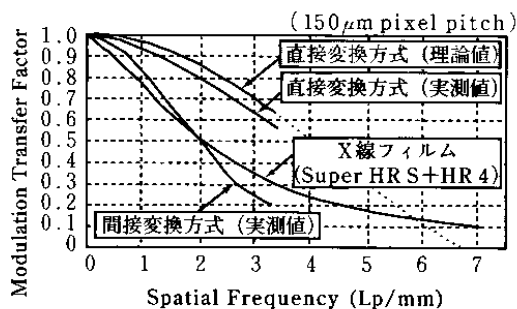


図4 MTF特性

式での動画撮像を確認し、98年実用化を目指した試作品の開発に成功した(写真1)。概略仕様は以下の通りである。

- 有効視野：23 cm \times 23 cm
- 検出素子サイズ：150 μ m \times 150 μ m
- 動画撮像：最大30 fps

この試作品を用い、図4に示すようなMTF特性を得ることに成功した。

7. 次世代のX線診断装置が提供するメリット

このような次世代X線検出器であるX線平面検出器を用いることにより、X線診断装置の姿が大きく変わることが予想される。

- 1) 既存のX線検出手段を凌駕する空間解像力、コントラストの高いデジタル透視・撮影像を生成し、病変部の僅かな組織の変化、血管の狭窄、IVR デバイスの様子を鮮鋭に観察できる。
- 2) 僅かな組織の変化やインターベンション・デバイスを容易に観察できるため、透視時間の短縮、撮影回数の低減により、患者・医師・スタッフの被曝低減、検査時間の短縮が図れる。
- 3) 軽量・コンパクトの特長を活かし、X線透視・撮影装置の機構はスムーズでスピーディな動き、使い易さを提供する。患者への圧迫感の開放、寝台への乗り降りも楽になる。
- 4) X線イメージングのフルデジタル化により、病院ネットワークへの接続は容易になり、遠隔画像診断の普及も期待できる。X線フィルムを使わない画像診断の時代へ移行することで、暗室、現像用設備及び薬品類、保管庫が不要になり、病院経費の削減にも貢献する。
- 5) 空間的な歪のないデジタル画像が得られるため、距離計測やQCAの精度向上が図られ診断の定量化が活発に行われる。X線画像の三次元化も容易となり、新しい診断上の提供が行われる。

8. まとめ

X線平面検出器の技術開発はX線診断装置の長い歴史の中で最も重要な技術革新の1つと期待さ

れるものである。我々医用機器開発メーカーは、臨床サイドからのご意見、ご提案を戴き、X線平面検出器の特長を十二分に活かした新たなコンセプトの次世代X線診断装置を創造し、変貌する21世紀のX線診断、治療支援へ貢献していきたい。

参考文献

- 1) D.L. Lee, L.K. Cheung, L. Jeromin :
A New Digital Detector For Projection
Radiography. SPIE 2432 : 237 (1995)
- 2) L.E. Antonuk, Y. El-Mohri, A. Hall
et al. : A Large-Area, 97um Pitch, Indirect-
Detection, Active Matrix, Flat-Panel
Imager (AMFPI). SPIE 3336 : 2 (1998)
- 3) A. Tsukamoto, S. Yamada, T. Tomisaki
et al. : Development of a Selenium-
based Flat Panel Detector for Real-
Time Radiography and Fluoroscopy.
SPIE 3336: 388 (1998)