

# 画像診断装置の発展を支えるFPDとX線管

X-ray Flat Panel Detectors and X-ray Tubes Contributing to Development of X-ray Diagnostic Systems

藤田 晃年      阿武 秀郎

■ FUJITA Terutoshi      ■ ANNO Hidero

平面X線検出器 (FPD) 及びX線管は、高度化する医療を支える画像診断装置のキーデバイスである。FPDは、被写体からのX線像を電気信号に変換し、画像診断に必要なかつ有益な情報を提供する。X線管は、CT (コンピュータ断層撮影) や、循環器診断、一般透視撮影、マンモグラフィ、歯科診断など、様々な用途に適したX線を発生させる。

東芝電子管デバイス(株)は、微細な構造を持つヨウ化セシウム (CsI) シンチレータ成膜技術や微小な画素を配列したTFT (薄膜トランジスタ)・PD (フォトダイオード) アレイなどの開発により、高画質化と低線量化を高い次元で両立させたFPDを製品化した。近年、高い出力が要求されるX線管では、液体金属潤滑動圧軸受 (LM軸受) などを開発し、長寿命で高速回転が求められる医療用CT装置や静粛性が求められる循環器診断システムなどに採用されている。また、X線管の冷却を従来の絶縁油から水系冷却剤に変更することで環境負荷を低減させるとともに、X線管の更なるコンパクト化を進めている。

X-ray flat panel detectors (FPDs) and X-ray tubes are key devices allowing X-ray diagnostic systems to support more sophisticated medical care. FPDs provide valuable information for the diagnosis of various diseases through the conversion of X-ray images of the human body into electronic signals, while X-ray tubes are used in a wide range of applications such as computed tomography (CT), angiography, fluoroscopy, mammography, and dental systems.

Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd. has developed and commercialized FPDs providing high-quality diagnostic X-ray images with low dose exposure through the development of cutting-edge technologies including a fine crystal formation technology for cesium iodide (CsI) scintillators, thin-film transistor (TFT) arrays with photodiodes, and so on. In the field of X-ray tubes that can generate a high output of X-rays, we have developed a liquid metal hydrodynamic bearing (LM bearing) technology for various diagnostic systems including medical CT systems with a long lifetime and high rotation speed, and cardiovascular imaging systems with quiet operation. Furthermore, LM bearing technology reduces the burden on the environment by replacing insulating oil with water coolant for the cooling system and making the X-ray tubes more compact.

## 1 まえがき

X線画像診断装置用のX線画像検出器は、画像信号のデジタル化とともに固体デバイス化が進み、撮影装置では従来のアナログフィルムから静止画用平面X線検出器 (FPD) へ、透視装置ではI.I. (Image Intensifier) から動画用FPDへの置換えが進んでいる。

FPDには、デジタル画像出力という特長に加えて、正確な診断に不可欠な高画質画像や、被ばく線量低減が可能な高量子検出効率、高信頼性などがこれまでより更に高い次元で要求されている。また、X線を発生させるX線管は、歯科用、一般透視・撮影、及び乳房撮影から、高い時間・空間分解能が求められる循環器診断やCT (コンピュータ断層撮影) 用途に至るまで各種の診断装置に適用されている。FPDとX線管は、画像診断装置のキーデバイスである。

東芝電子管デバイス(株)は、FPD及びX線管ともに多様な製品群を開発している。ここでは、FPDとX線管の動作原理、求められる特性、及びそれを実現する技術とともに、最新の開発成果と将来展望について述べる。

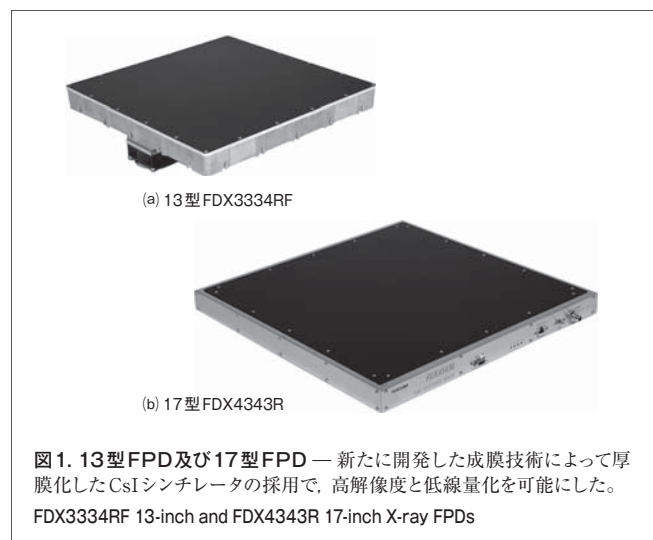


図1. 13型FPD及び17型FPD — 新たに開発した成膜技術によって厚膜化したCsIシンチレータの採用で、高解像度と低線量化を可能にした。  
FDX3334RF 13-inch and FDX4343R 17-inch X-ray FPDs

## 2 FPD

### 2.1 動作原理と特徴

当社は、優れた画質特性と高信頼性を備えた、有効視野

表1. FPDの主な仕様  
Main specifications of FPDs

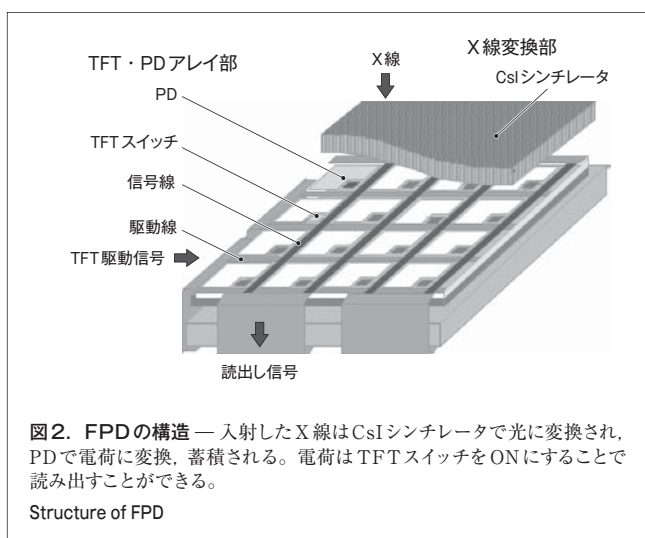
項目	仕様	
型名	FDX3334RF	FDX4343R
用途	透視, 撮影	撮影
視野サイズ (mm)	330×343	430×439
画素サイズ (μm)	143×143	143×143
有効画素数	2,304×2,400	3,008×3,072
画像収集速度	透視: 30フレーム/s (2×2画素加算) 撮影: 15フレーム/s (1×1非画素加算)	撮影サイクル時間 6s
DQE (0 lp/mm)	70%	70%
MTF (2 lp/mm)	36%	36%

lp/mm: 空間周波数の単位で、テストチャートの明暗の線対(ラインペア)の解像度を表す

寸法330×343 mmで有効画素数約550万画素の透視・撮影装置(動画対応)用13型FPD FDX3334RF, 及び有効視野寸法430×439 mmで、有効画素数約920万画素の撮影装置(静止画対応)用17型FPD FDX4343Rを開発し商品化した。それぞれの外観を図1に、主な仕様を表1に示す。

FPDは入力したX線像をデジタル信号に変換し、画像データとして出力する平面状の薄型固体センサであり、図2に示す構造を持つ。その動作原理を以下に述べる。

入射したX線は、まずヨウ化セシウム(CsI)シンチレータで光に変換される。この光は、CsIシンチレータのファイバ状構造に導かれて各画素に設置されたフォトダイオード(PD)に入射し電荷として蓄積される。電荷は各PDに配置されたTFT(薄膜トランジスタ)スイッチによって信号線を通して読み出される。信号の読出しは駆動線1ラインごとに行われる。駆動線にTFTスイッチONの信号を与えると、この駆動線につながっている1ライン全てのTFTスイッチがON状態になり、PDに蓄積されていた電荷は各信号線に流れ出す。この電荷は低ノイズアンプによって増幅され、A/D(アナログ/デジタル)変換されてデジタル映像信号となる。



ここで、TFTはガラス基板上に形成されたトランジスタであり、パソコン(PC)やテレビ(TV)などの液晶ディスプレイ(LCD)用と同じ技術で製作される。また、PDはCsIシンチレータの発光を効率よく電荷に変換できるようにFPD専用開発したものである。

FPDには、上述したCsIシンチレータを備えた間接変換型FPDの他に、X線を直接電荷に変換するX線変換部を備えた直接変換型FPDがある。直接変換型はMTF(Modulation Transfer Function)<sup>(注1)</sup>特性に優れているが、高い量子検出効率(DQE: Detective Quantum Efficiency)を達成するにはX線変換膜に高電圧を印加する必要がある。一方、間接変換型はMTF特性が直接変換型に比べて劣るが、低電圧回路だけで回路を構成できるというメリットがある。今回開発したFPDは、周辺回路を含めた総合的な画質特性の検討から間接変換型を採用している。画質特性のキーとなるCsIシンチレータ膜の技術開発を行った結果、高いMTF特性を持つFPDの開発に成功した。

FPDの特長は、コンパクトな形状と高画質のデジタルX線画像をリアルタイムに出力できることである。静止画像では、フィルムのような現象が不要であり、画像処理を施した最適な画像で即時診断が可能になる。更に動画像では、従来使用されていたI.I.-TVに比較して以下の特長が挙げられる。

- (1) 高画質デジタル画像による診断能力の向上
- (2) 高いDQEによる被ばく線量の低減
- (3) 幾何学ひずみ及び磁気ひずみのない画像による診断能力の向上
- (4) 小型・軽量化及びコンパクト化による患者への圧迫感の低減

## 2.2 求められる特性

FPDには、より正確な診断を可能とする高画質像が、患者の被ばく線量を低減するため、低X線量で得られることが求められる。高画質化には高MTF、高感度、及び低ノイズ特性が必要であり、低線量化には高DQEが必要になる。

当社は、高画質化と低線量化という一般にX線検出器では二律背反の特性を、以下に述べる新たな技術を開発することにより、高い次元で両立させることに成功した。

## 2.3 主要な技術

### 2.3.1 高MTF及び高DQEのCsIシンチレータ成膜技術

従来からI.I.に用いられてきたCsIシンチレータの成膜技術を更に進化させ、二律背反する高MTFと高DQEを両立できる新たな成膜技術を開発した。

CsIシンチレータ膜はファイバ状の独立した細い柱状結晶から成り、このライトガイド効果によって光の散乱を抑えること

(注1) コントラストの再現性を空間周波数(1mm間に何本の線が再現できるか)で表現したもの。

で、GOS (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb: 酸硫化ガドリニウム (テルビウム添加)) など他のシンチレータ材料に比べ高いMTF特性を実現している。しかし、DQEを高くするためにCsIシンチレータ膜を厚くすると、従来の製造方法では柱状結晶径が大きくなり、また結晶間の独立性が悪くなることで、MTF特性が悪化してしまうという問題があった。

この問題を解決するため、今回、新たな成膜技術を開発し、DQE特性向上のため従来のI.I.では400 μmであった膜厚を600 μmに厚膜化するとともに、目標とするMTF特性に必要な柱状結晶径10 μm以下を達成した。更に、17型FPDに求められる視野サイズ430×439 mmの大面积に中心から周辺まで均一に成膜できるようにした。

作製したCsI結晶の電子顕微鏡写真を図3に示す。柱状結晶が先端まで独立して形成されていることがわかる。この新しいCsIシンチレータ膜を用いて、DQE (0)<sup>(注2)</sup>が70%という高いDQE特性と同時に、空間周波数2 lp/mmで36%という高いMTF特性 (図4) を実現することができた。

**2.3.2 光反射膜による高感度化技術** CsIシンチレータ膜で発光した光のうち、X線入射方向に向かうものはPDに届かず無効となってしまふ。そこで、図5に示す光反射膜をCsI表面にコーティングすることで、これら無効となる光をPD方向に反射させ感度を向上させることができる。光反射膜材料には、CsI発光波長に対する高い反射率、CsI材料との接着性、及び不反応性が求められる。

これらに適合した光反射材と反射膜プロセスの開発に成功し、光反射膜がない場合に比べ約80%の感度の向上を達成した。この技術を用いることによって、微小画素サイズのTFT・PDアレイを使用することが可能になり、高いMTF特



図3. CsIシンチレータ — 細く独立した柱状結晶がライトガイドとなり、光の散乱を抑え高いMTF特性を実現する。  
CsI scintillator

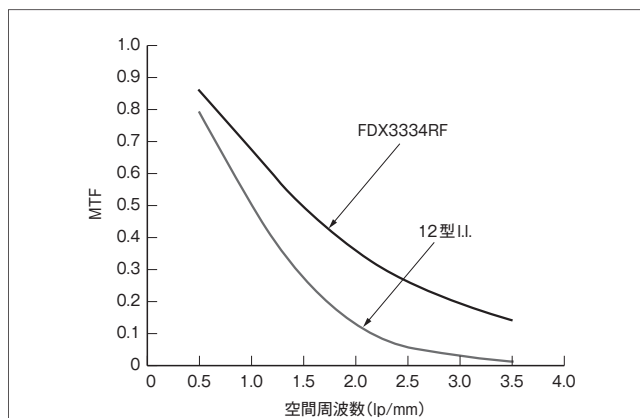


図4. MTF特性 — 新たに開発したFPDは、従来のI.I.に比べて高いMTF特性を達成できた。  
Comparison of modulation transfer function (MTF) characteristics of newly developed FPD and conventional image intensifier (I.I.)

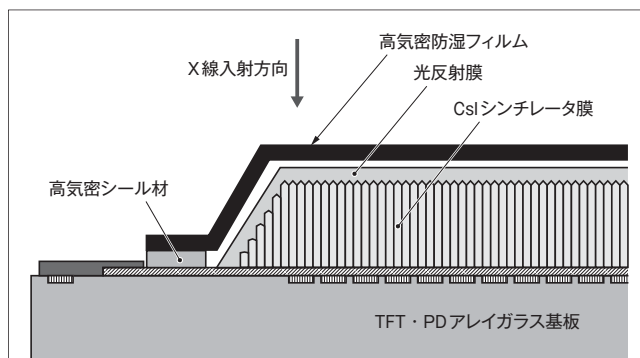


図5. X線変換部の構造 — CsIシンチレータ膜で発光した光のうち、X線入射方向に向かうものを光反射膜でPD方向に反射させ、感度を向上させた。更に、潮解性のあるCsIシンチレータ膜を湿気から保護するため、光反射膜の上に高気密防湿フィルムを接着している。  
Structure of X-ray conversion layer

性が得られる。

**2.3.3 低ノイズ化回路技術** 微小画素サイズのTFT・PDアレイを使用すると、PDから読み出す信号強度が非常に小さくなる。このため、信号を低ノイズかつ高ゲインで増幅するアンプを設計し、専用ICとして開発した。

また、動画用FPDでは、透視における信号強度は更に低いいため、電源回路やTFT駆動回路などが発生する回路ノイズの低減が必要であった。このため、リアルタイムでノイズ低減を行う、電源ノイズキャンセル画像処理回路及びゆらぎノイズキャンセル画像処理回路を開発した。

これらの専用ICや画像処理回路によって、低ノイズを実現した。

**2.3.4 高信頼性防湿技術** 潮解性のあるCsIシンチレータ膜を湿気から保護するため、高気密防湿フィルムを開発した。防湿フィルムにはX線透過減衰の少ない薄膜金属を採用し、ガラス基板と高気密シール材で接着した。これにより、

(注2) 空間周波数が0 lp/mm (全画像領域) での量子検出効率。

長期間の特性維持が可能になり、高い信頼性が得られた。

## 2.4 将来展望

FPDは、X線画像診断装置の用途や目的に応じて、サイズや、機能のラインアップが拡充されていき、今後、デジタルX線画像検出器の主流になり、将来的には、大半のX線画像診断装置の検出器がFPDに置き換わっていくと予想される。

また、他の検出器にはないリアルタイムで高画質画像を実現できる特長から、これらの特性が求められるIVR (Interventional Radiology) といった循環器治療でのリアルタイムX線画像検出装置などで更にその特性が磨かれ進化していくと考えられる。

## 3 X線管

### 3.1 動作原理と特徴

X線管は、ラジオやTVなどに用いられていた一般的な真空管とは異なり固体デバイス化できない電子管である。X線は、真空中において、陰極（フィラメント）から放出された熱電子が陰極と陽極（ターゲット）間の100 kV程度の電位差で加速、集束され、ターゲットに衝突することによって発生する。発生X線のエネルギースペクトルは、電子の制動放射による連続X線（白色X線）と、ターゲット金属に特有の特性X線（線スペクトル）とから構成される。例えば、一般の診断用X線管には連続X線が、マンモグラフィのような軟部組織診断には特性X線が用いられている。

### 3.2 求められる特性

最新の循環器診断用X線管やCT用X線管に求められる性能は、機械工学、材料工学、及び電気工学を融合させないと達成できないものである。例えばCT用X線管では、20 G以上の重力加速度に耐えることができる構造体で、常温から3,000℃まで温度変化する回転体を、10,000 rpmで回すための軸受や、150 kVの電圧を数cmの間隔で絶縁するための絶縁技術などが必要である。

また、医療用X線管は、患者に不要な被ばくをさせない技術、及び万一故障しても患者の安全を守る防御機構を備えることが要求されている。更に、診断機器のいっそうの普及には製品の低コスト化も要求されている。

### 3.3 液体金属潤滑動圧軸受

高い出力が要求されるX線管の陽極は、熱によるターゲットの溶解を防ぐため高速で回転している。一般に、陽極の回転機構には玉軸受が用いられるが、当社は、管球の長寿命化と静粛性を実現するため、液体金属潤滑動圧軸受（LM軸受）を開発した。LM軸受を採用し、高耐荷重性能と連続高速回転を実現した独自の回転陽極を図6に示す。この構造は、2007年度日本機械学会賞（技術）及び2007年度日本トライボロジー学会技術賞を受賞している。

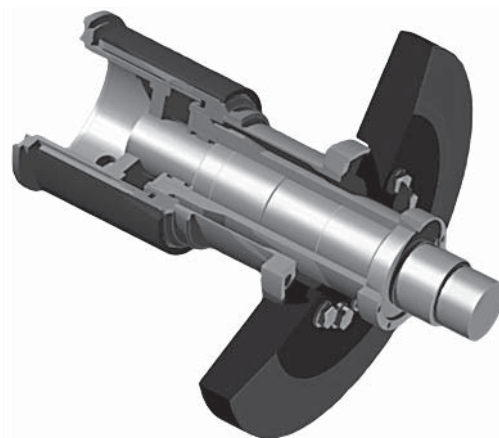


図6. 両端支持構造LM軸受 — 高耐荷重性能と連続高速回転を実現した独自の回転陽極である。  
Straddle-type LM bearing

LM軸受は、液体金属を潤滑材とする動圧滑り軸受で、回転時に軸受面どうしが液体潤滑材を介して互いに接触することがないため、高荷重を受けても摩耗粉を発生させず、長寿命を達成できる。そのため、LM軸受を使用したX線管は高速回転の医療用CT装置に適用している（図7）。

X線管の冷却には、冷却液として従来は絶縁油が使用されていたが、各種防食技術の開発によって絶縁油から水系冷却液に変更し、環境負荷の低減を実現させた。これを評価され、2007年度に第4回エコプロダクツ大賞推進協議会会長賞を受賞している。また、回転時に軸受面どうしが互いに接触しないことから、低騒音であり、LM軸受を使用したX線管は

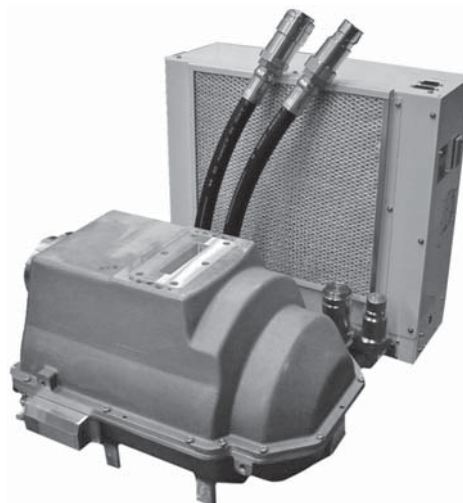


図7. 医療用CT装置に適用したオイルフリーX線管 — X線管の冷却に、従来使用していた絶縁油から各種防食技術の開発によって水系冷却液に変更することで、環境負荷の低減を実現した。  
Oil-free X-ray tube assembly for medical CT scanners

静粛性が特に要求される循環器診断システムに適している(図8)。

図9は、片持ち支持構造のLM軸受を採用した独自のコンパクトな回転陽極で、この構造のLM軸受を使用したX線管は、静粛性と連続高速回転を実現するとともに、構造が単純なことから普及タイプの診断機器にも適用できる。更に、LM軸受はX線管のターゲットの熱を冷却液に伝導させる熱経路として利用することができ、従来に比べて冷却能力を向上させることが可能になる。この特長を生かすことで、よりコンパクトで高出力なX線管を実現できることから、診断性能の向上と



ともに、検査時間のいっそうの短縮によって患者の負担低減を図るために開発を進めている。

### 3.4 将来展望

X線管に求められる特性は、低被ばく、コンパクト、長寿命、及び低騒音である。当社は、3次元数値シミュレーションや、品質工学などを駆使して焦点設計、熱解析、流体解析、及び構造解析を行い、顧客ニーズに応えるX線管を短期間で開発していく。

## 4 あとがき

当社が開発したFPDやX線管は、その特性や信頼性により、国内外から高い評価を受けている。

今後も、これらの製品を最先端技術を適用して開発し、提供していくことで、医療機器の高画質や低被ばくなどの性能や信頼性を向上させ、医療の発展と人類の健康に貢献し続けたい。

## 文献

- (1) 間庭祐司 他. 新たな役割を開拓するX線診断装置. 東芝レビュー. 62, 1, 2007, p.7-10.



### 藤田 晃年 FUJITA Terutoshi

東芝電子管デバイス(株) イメージングデバイス技術部 デバイス担当参事。FPDの設計・開発に従事。  
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.



### 阿武 秀郎 ANNO Hidero, Ph.D

東芝電子管デバイス(株) X線管技術部 技術第一担当、理博。X線管の設計・開発に従事。日本物理学会、日本放射線技術学会会員。  
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.