

# 高感度・高精細デジタルマンモグラフィシステム「AMULET」の開発

入澤 覚\*, 荒井 毅久\*, 中田 肇\*, 千代 知成\*, 桑原 孝夫\*, 山根 勝敏\*

## Development of High-sensitivity and High-resolution Digital Mammography System 'AMULET'

Kaku IRISAWA\*, Takahisa ARAI\*, Hajime NAKATA\*, Tomonari SENDAI\*,  
Takao KUWABARA\*, and Katsutoshi YAMANE\*

### Abstract

FUJIFILM's newly-developed 'AMULET', a digital mammography system, simultaneously realizes high-image quality, low-dose image acquisition and high-throughput as well as patient-oriented design. A detector mounted on AMULET directly converts X-ray signals into electronic signals to readout the electronic signals by using a uniquely developed "Direct Optical Switching" readout method in its imaging process. This detector with dual amorphous Se layers makes it possible to deliver high-definition diagnostic images consisting of 50  $\mu\text{m}$ -size pixels providing the finest resolution among direct-conversion X-ray image detectors. Well-optimized Auto-Exposure-Control between the direct-conversion detector and an x-ray tube with Mo and W targets can meet the wide range of diagnostic needs from high-image quality to low-dose exposure. Moreover, ergonomic design helps to alleviate patient's discomfort.

### 1. はじめに

当社は、X線信号を電気信号に「直接変換」し、電気信号を独自の「光スイッチング読出」によりデジタル画像化するX線画像センサーの開発に成功し、アモルファスセレン半導体を用いた高画質センサーにおいて世界最小となる画素サイズ50 $\mu\text{m}$ の高精細画像の取得を可能とした。本画像センサーを搭載したデジタルマンモグラフィシステム「AMULET」(Fig. 1)は、高画質と被曝線量の低減、および快適なスループットを高いレベルで両立できた。本稿においては、その開発背景、システム構成と特徴、および諸性能について概説する。

### 2. 開発の背景

日本女性のがんで、乳がんは現在最も高い罹患率を示しており、乳がんによる死亡率も年々増加する傾向にある。そのため、乳がんの早期発見を目的にマンモグラフィを中心とする乳がん検診が広く行なわれるように



Fig. 1 System configuration of AMULET (FDR MS-1000).

本誌投稿論文 (受理2008年11月20日)

\* 富士フイルム (株) R&D統括本部  
機器システム開発センター

〒258-8538 神奈川県足柄上郡開成町宮台798

\* Equipment Research & Development Center

Research & Development Management Headquarters  
FUJIFILM Corporation

Miyanodai, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa  
258-8538, Japan

なり、同時に、近年の医療現場のデジタル化とともにデジタルマンモグラフィシステムの導入が進んでいる。当社は、世界に先駆けてコンピューテッドラジオグラフィ（CR）方式によるX線診断画像のデジタル化に成功した。以来、デジタルX線画像診断機器を市場に供給し続け、2003年にはCR方式のマンモグラフィ画像読取装置「PROFECT」を販売開始し、既存のX線源に組み合わせて容易にデジタル化が可能との評判を得ている。

デジタルマンモグラフィでは、従来のフィルム/スクリーン方式に比べてX線利用効率が高く、ダイナミックレンジが広いため、腫瘍の描出能に優れ、被曝線量の低減が可能である。一方で、精細さは画素サイズにより制限されて劣るとされている。「PROFECT」では比較的微細な50 $\mu\text{m}$ 画素サイズを実現しているものの、現在市販のX線源とフラットパネルディテクタ（FPD）を組み合わせたデジタルマンモグラフィシステムの画素サイズは70から100 $\mu\text{m}$ となっている。マンモグラフィ診断においては1mm以下の微小石灰化の有無、分布、および形状などが診断上重要な指標となることから、より微細な画素に対する要求が根強い。

また、デジタル化の恩恵として、撮影の高スループット化、画像処理や画像表示および、ネットワーク形成による画像管理の効率化、過去画像比較やコンピュータ支援診断による診断の効率化・精密化など、マンモグラフィ検診と診断における総合的な利便性の向上が期待されている。撮影スループットについては、カセットを用いるCR方式よりもFPDシステムの方が全般に高いものの、高画質なFPDシステムほどスループットが低い傾向にあるために改善が求められている。

このような背景から、被検者が安心して受診でき、医師がより診断しやすく、技師が撮影しやすいデジタルマンモグラフィシステムを目指して、高感度・高精細による診断能の向上と被曝量の低減、および快適なスループットを実現した「AMULET」（型式：FDR MS-1000）を開発した。

### 3. AMULETのシステム構成

Fig. 1に示すように、「AMULET」は撮影装置部とコンソール（操作卓）部から成る。撮影装置部で撮影された画像は、コンソール部で画像処理および表示がされ、ネットワークを介して外部のサーバーやアプリケーションにおいて保存および利用が可能となる。撮影装置部は、X線を発するX線源部と被検者の乳房を透過したX線像を検出する、新規に開発された画像センサー部から成る。これらの被検者が触れる部分には痛みや冷えを和らげ、体位を安定させるデザインが採用されている。以下に、「AMULET」の特徴をなす画像センサー、X線源、および被検者に優しいエルゴノミクスデザインについて述べる。

#### 3.1 画像センサー

「AMULET」は、冒頭に述べたように、アモルファスセレン半導体を用いた高画質X線センサーとして世界最小となる画素サイズ50 $\mu\text{m}$ のセンサーを搭載している。Fig. 2に画像センサーの概観を示す。

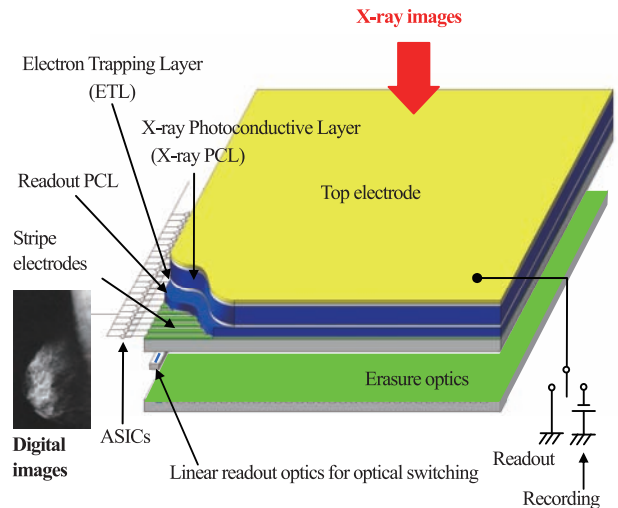


Fig. 2 Schematic view of the novel image sensor.

センサーは、ガラス基板上に、チャージアンプASICに接続されるストライプ状の透明電極層（Stripe electrodes）、読出光導電層（Readout PCL）、電子蓄積層（ETL）、X線光導電層（X-ray PCL）、上部電極（Top electrode）が形成されている。さらに、透明電極に直交した光スイッチング読出用ライン光源（Linear readout optics）と、残電荷消去用面光源（Erasure optics）を基板下部に配置している。以下に、本センサーの各層の機能と画像化原理を説明する。

X線画像センサーは一般に、(a) X線から電荷へ変換、(b) 電荷蓄積、(c) 電荷読出のプロセスを経ることでX線画像を得る。X線撮影では撮影時の照射X線量が少ないほど被曝者の被曝量が低減される。したがって、センサー入射時のX線像が有するS/N比、鮮鋭度を、センサー内の上記各プロセスで極力劣化させずに画像を得ることが良いセンサーの条件となる。「直接変換」方式とは、電圧が印加された半導体にX線を入射させると、X線量子のエネルギーが半導体内の電子に吸収され、最終的に自由電子と自由正孔となり、電界にしたがって輸送される、いわゆる光導電現象を利用してX線信号を電気信号に変換する方式である。直接変換方式の場合、信号電荷の進行方向は電界によって定められるため鮮鋭度の劣化は少ない。

これに対して、「間接変換」方式においてはX線吸収の高い蛍光体層にX線を入射させて可視光に変換した後、フォトダイオードやCCDなどの受光素子により電気信号化する。この方式では、蛍光が等方的に発せられる上に、発光部から受光素子までで光散乱が避けられず、鮮鋭度が劣化する。鮮鋭度維持のために蛍光体層を薄くした場合、X線吸収率の減少によりセンサー感度が低下するため、間接変換方式においては鮮鋭度と感度の両立に困難が伴う。

したがって、新開発画像センサーには、X線光導電層にアモルファスセレン半導体を用いた直接変換方式を採用し

た。Fig. 3 (a) のストライプ電極方向のセンサー断面図中に示すように、上部電極に負電圧を印加した状態でX線を入射させ、生成された自由電子を、電界により電子蓄積層に収集し、Fig. 3 (b) のように電子潜像を形成させる。

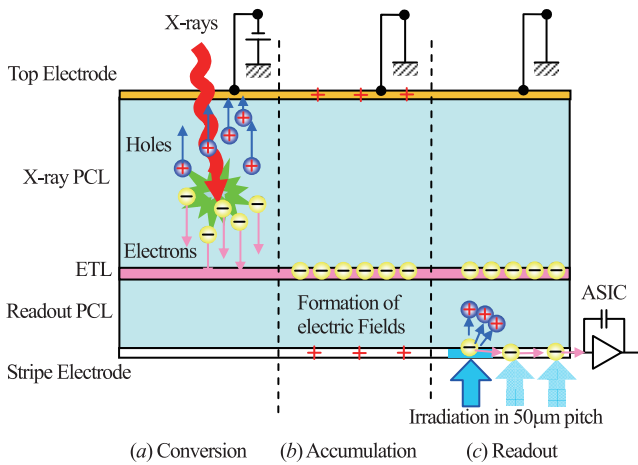


Fig. 3 Cross-section of the sensor, and its imaging process from (a) to (c).

アモルファスセレンは、マンモグラフィ用X線源から発生されたX線の90%以上を吸収して電荷に変換可能である。さらに、不純物量のきわめて少ない高純度セレンを原料として用いることで、電子が移動する際のトラップ量を低減させ、電子を効率良く電子蓄積層に収集可能とした。これらにより、X線電荷変換から電子蓄積までのプロセスにおける鮮鋭度およびS/N比の劣化を抑制した。

本センサーのもう一つの特徴は、光導電効果（光誘起放電効果）を利用する「光スイッチング読出」を実現するために、電子蓄積層、読出光導電層（アモルファスセレン）、ストライプ状の透明電極層の構成としたことである。Fig. 3 (b) に示すように、電子蓄積層に電子が蓄積した状態では、電極に正電荷が誘導されて読出光導電層内に電界が生じる。この状態で透明電極側から読出光を照射すると、Fig. 3 (c) に示すように読出光導電層において自由電子-正孔対が発生する。発生した正孔は蓄積電子のもとへ移動して中和され、電子は電極を経由して接続されたチャージアンプにおいて検出され、信号となる。自由電子-正孔対の発生量は蓄積電子量と対応するため、蓄積電子量に対応した検出信号量が得られる。また、読出後には、残電荷消去用面光源からセンサー全面に高輝度光を入射させ、残像を効率的に消去して撮影サイクルの短縮化を可能としている。

光スイッチング読出においては、ストライプ電極が50 $\mu$ mピッチで形成された基板に対して、読出ライン光源を50 $\mu$ mごとに発光させることで、50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m画素

の高精細画像を比較的容易に得ることができる。また、TFT読出方式のように読出配線に直交するゲート配線やTFT部を持たず、読出配線の寄生容量が小さいために低ノイズで読出が可能である。画素を微細化する場合には、TFT読出の場合は配線の直交部やTFT部がさらに増えるため、光スイッチング読出の利点がより顕著に現れる。したがって、新開発センサーは読出の際に追加される電気ノイズが少ないために、X線像が本来持つS/N比に対するセンサー出力時のS/N比の劣化を極力抑えることができ、いわゆる、感度や量子検出効率（DQE）などの画質の低下を抑えながら画素サイズの縮小が可能な構造といえる<sup>1)</sup>。これまで市販されている、間接変換方式や直接変換方式センサーにおけるTFTの製作ルール下での画素の微細化は画質の低下を招くが、新開発センサーにおいては、Fig. 4に示すように高い画質を保ちながら画素の微細化が可能と予想する。

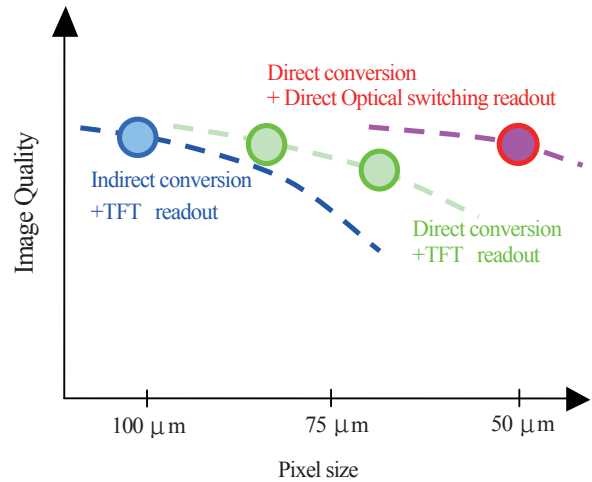


Fig. 4 Relation between image quality and pixel size in each imaging method.

### 3.2 X線源

新開発画像センサーは、従来のフィルム/スクリーン方式と比べてダイナミックレンジおよびリニアリティに優れるため、X線量やX線質を選択する際の自由度が高い。さらに、X線光導電層を厚くすることで、従来のフィルムやイメージングプレートよりも容易に高エネルギーのX線吸収率を高くできる。このようなセンサーの特長を活かすために、「AMULET」のX線源には現在広く用いられているモリブデン（Mo）ターゲットに加えて低被曝化に有利なタングステン（W）ターゲットが搭載されている<sup>2)</sup>。X線フィルタにはMoとロジウム（Rh）を設定でき、ターゲット/フィルタの組み合わせ（T/F）としてMo/Mo、Mo/Rh、W/Rhの3種から選択できる。



Fig. 5に、各T/Fにおける0.2mm厚のAlの画像コントラストと画像ノイズの比（CNR）と、50%乳腺-50%脂肪の乳房を模擬するPMMAの厚さとの関係を示す。

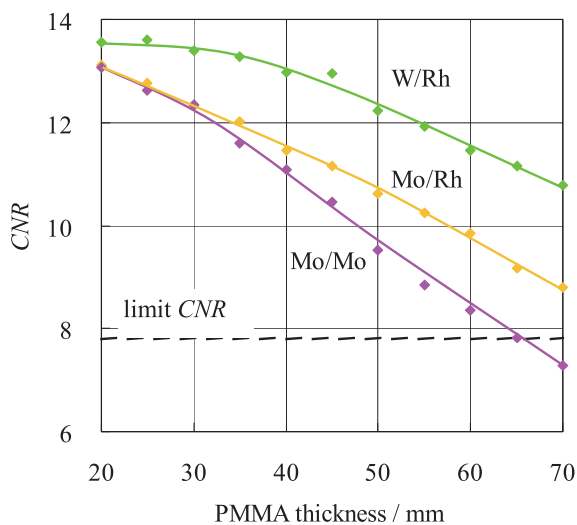


Fig. 5 Relation between CNR under achievable-AGD at each T/F and PMMA thickness.

ここでいう CNR とは、被曝の程度を示す平均乳腺線量（AGD）が EUREF 規格<sup>3)</sup>において Achievable (Fig. 6 参照) とされる値になる管電圧と mAs 値の組み合わせで求めた CNR のうち、最大の CNR を意味する。

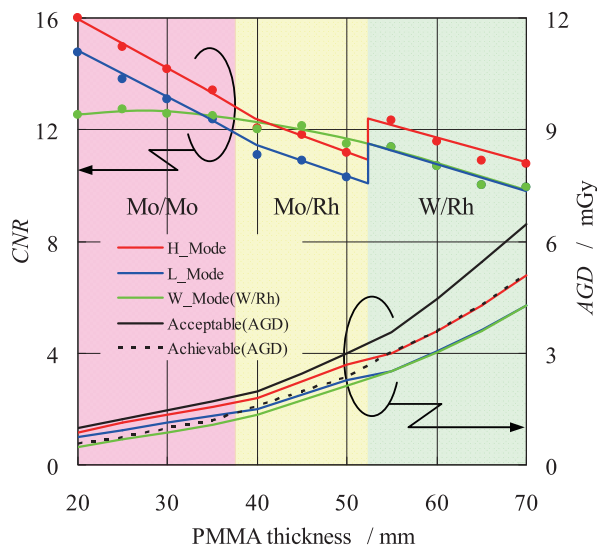


Fig. 6 PMMA thickness dependences of CNR and AGD at each AEC mode.

低い PMMA 厚においては Mo/Mo でも十分高い CNR が得られるが、厚くなるにしたがい低下して Mo/Rh との差が開き、ついには限界 CNR を下回る。W/Rh では、PMMA が厚い場合でも CNR が高く、X 線量子がより高エネルギーに分布した硬い線質のために、厚い乳房にお

いても十分な X 線透過量が得られることを示している。また、全 PMMA 厚において W/Rh の CNR が最も高いことから、W/Rh を用いることで被曝線量をより抑えられることが示唆される。

「AMULET」は、これら 3 種の T/F および照射線量を乳房の厚みに合わせて自動で設定する自動露出制御（AEC）機構を有し、撮影技師の負担軽減を図っている。露出制御は、画像センサーと独立した AEC 専用基板により行なう。専用基板としたことにより、照射線量決定のためのプレ曝射時の信号電荷を、本曝射による信号電荷と画像センサー内部において加算し、読出を 1 回のみとできる。そのため、余分に読出ノイズを加算せずに画質の劣化が抑制される。AEC による自動撮影時には、撮影目的に応じて H\_MODE（高画質）、L\_MODE（標準画質）、W\_MODE（低被曝）の 3 種類のモードから選択できる。T/F 切換え乳房厚みと撮影管電圧値は、上述の物理評価と、（独）国立病院機構名古屋医療センター、遠藤登喜子先生のグループと協力して行なった乳がん切除サンプルの画像評価に基づいて決定された。

さまざまな厚みの乳がん切除サンプルにおける石灰化や腫瘍の視認性評価を行なった結果、サンプル画像の粒状感と CNR と良く対応することが明らかになった。また、石灰化や腫瘍の視認性と関係する鮮鋭感は、より軟質な T/F において良いことが明らかになった。すなわち、粒状性が許容できる範囲でより軟質の T/F を選ぶことで最適な診断画像が得られる<sup>4)</sup>。

Fig. 6 に、H、L および W\_MODE において設定される管電圧と mAs 値における AGD および CNR の PMMA 厚み依存性を示す。また、H および L\_MODE において選択される T/F は背景色により示した。T/F は、PMMA 厚の増加に伴い、Mo/Mo、Mo/Rh、W/Rh の順に選択される。H\_MODE の場合には、画質優先のため AGD を Acceptable まで近づけて粒状感と鮮鋭感が最も良い画像を提供する。L\_MODE においては、AGD と粒状感のバランスを考慮した画像を提供する。被曝の多い乳房の厚い被検者においても、W/Rh により、高画質でありながら被曝量低減にも配慮した撮影が可能である。W\_MODE の場合には乳房厚みによらず W/Rh を用い、低被曝を優先しながら診断可能なレベルの粒状性の画像を提供する。W/Rh を用いることで、Achievable とされる AGD を下回ることが可能となり、このような低線量域における臨床価値の評価を現在進めており、若年の被検者のリスク軽減も期待される。

### 3.3 被検者に優しいエルゴノミクスデザイン

装置撮影部のアームレスト、およびセンサーの胸壁部と側面部は、撮影時に被検者が直接接触する場所であるため、被検者が安心感・安定感を持って撮影に臨めるデザ

インを志向した。Fig. 7に、「AMULET」のアームレストおよび胸壁・パッドの概観を示す。

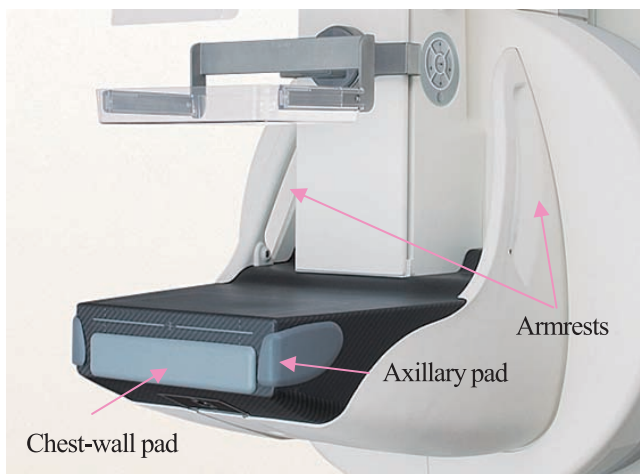


Fig. 7 Armrests, and chest-wall and axillary pads of AMULET.

従来のシステムにおいては、頭尾方向（CC）撮影時における被検者の腕の自然配置が困難な場合があるとの撮影技師の意見を参考に、撮影台に対してハンドルを手前に傾斜させることで自然に腕を配置できる形状とした。また、内外斜位方向（MLO）撮影時の被検者の腕から手にかけて段差の無いように丸みを帯びたデザインとし、アームレストに柔らかい素材を用いることで腕の痛みが軽減される。さらに、胸壁・腋窩部に発泡ウレタン製のパッド（交換可能な消耗品）を設けることで、撮影時に胸部を押し付ける際の痛みが軽減できるよう配慮した。

#### 4. 「AMULET」の諸性能

マンモグラフィの画質を構成する因子には、画像コントラスト（信号）、鮮鋭度、粒状性（ノイズ）などがあるが、画質評価の総合的な指標としてこれらを内を含むDQEの周波数依存性が広く用いられている。Fig. 8に、「AMULET」のIEC規格に準拠した条件<sup>5)</sup>により測定されたDQEを示す。線質はMo/Mo, 28kV, Alフィルタ2mmのRQA-M2条件を用いた。

一般に、画素サイズ $x$ のセンサーにおいては、ナイキスト定理により、DQEは $1/2x$ の周波数までが意味を持ち、画素サイズが小さいほど画像の高周波成分まで電気信号化可能となる。「AMULET」は $50\mu\text{m}$ 画素で読出するため、 $10\text{mm}^{-1}$ の高周波数まで画像を電気信号化でき、実用線量域である71から $125\mu\text{Gy}$ において高いDQEを示す。このことは、X線吸収率の高いアモルファスセレンによる直接変換と、当社独自の光スイッチング読出が微細画素におけるS/N比の改善に寄与し、高感度と高精細の両立にきわめて有効であることを示している。また、 $36\mu\text{Gy}$ の低線量においてもDQEが13%程度の低下

にとどまり、読出電気ノイズの影響が少ないシステムであることを示唆している。

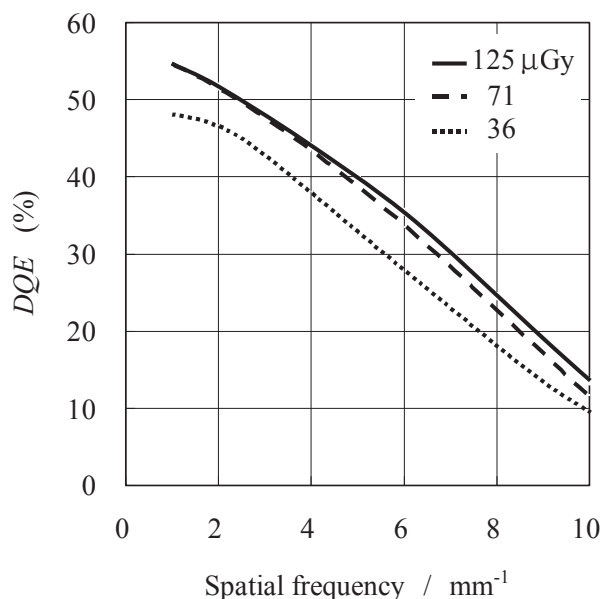


Fig. 8 DQEs of AMULET at various doses.

視覚評価として、EUREF規格に準拠した条件<sup>3)</sup>（Mo/Mo, 28kV）により、直径と厚さを変えたAu円柱の視認性を確認するContrast-Detailファントム評価を行なった結果をFig. 9に示す。

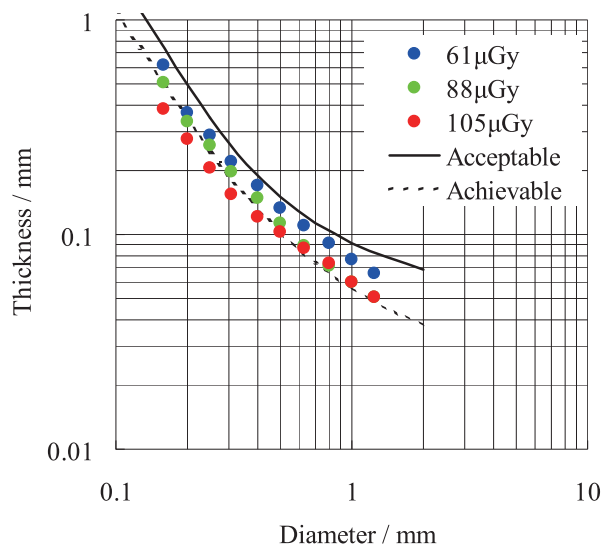


Fig. 9 Contrast-detail curves for AMULET for three different doses at Mo/Mo, 28kV.

この図において、各線量におけるプロットを結んで得られる線は、Au円柱の視認の可否を区別する境界であり、直径と厚さの小さい方へシフトするほど、より微小な乳房内の対象を視認しやすいことを示す。「AMULET」では、 $61\mu\text{Gy}$ の低線量においてもAcceptableとされる境界を十分に越えている。また、通常撮影線量と同程度の $105\mu\text{Gy}$ で微細な側において大きくAchievableとされ



(a) Image with AMULET.



(b) Image with PROFECT.

Fig. 10 Image comparison of the resected breast specimen<sup>6)</sup>.

る境界を越えており、石灰化の視認向上が期待される。

Fig. 10に、「AMULET」および「PROFECT」で撮影された乳がん切除サンプルの石灰化部を拡大表示した画像を示す<sup>6)</sup>。厚さ5mmのPMMA上に40mm厚の乳がん切除サンプルを置き、計45mm厚の乳房を模擬して、Mo/Rh, 28 kV, 42 mAsの条件において撮影を行なった。「AMULET」で撮影された画像は全体に粒状感が良く、石灰化の形状や境界がより明確に現れており、立体的に描出できている。また、周辺の脂肪や乳腺組織も、より鮮鋭に写し出されている。

最後に、「AMULET」の撮影スループットについて述べる。アモルファスセレンは、不純物に由来した電荷トラップを多く含むために残像を誘発し、スループット悪化の要因となり得る。これに対し、新開発画像センサーにおいては、高純度セレンを用いて電荷トラップを低減し、さらに残電荷消去光を全面に照射可能なセンサー構造として残像を抑制した。また、高精細画像のために画像データが大容量となり、画像処理に時間を要するが、画像データを並列に画像処理するための専用基板を設けた。これらの施策により、ユーザーが求める撮影間隔「同一被検者の撮影間隔が15秒以下」の目標（当社調査より設定）を達成できる見通しを得た。

## 5. まとめ

デジタルマンモグラフィシステム「AMULET」は、アモルファスセレンによる直接変換と光スイッチング読出を特徴とする画像センサーを搭載しているため、高感度・高精細画像が取得できる。また、MoとWの2極を有するX線源と画像センサーの連動により、高画質から低被曝までの幅広いニーズに応じた撮影を簡便に行なう

ことができる。さらに、被検者の肉体的・心理的な負担緩和に配慮したデザインとなっている。本システムのような、画質とスループット性能を併せ持った製品は現時点で他になく、マンモグラフィ検診・診断の精度および効率の向上、被検者の負担低減に寄与し、乳がんの早期発見と予後の改善に貢献できると期待している。このような高性能デジタルマンモグラフィシステム「AMULET」と既存のX線源を活かす「PROFECT」により、それぞれの病院の状況に適したデジタルマンモグラフィソリューションの提案が可能となった。

## 参考文献

- 1) K. Irisawa; K. Yamane et al. Proc. SPIE. **7258** (2009). To be published.
- 2) P. Bernhardt et al. Med. Phys.. **33** (11), 4337-4349 (2006).
- 3) European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis, 4th ed.. Luxembourg, European Communities, 2006.
- 4) T. Kuwabara; N. Iwasaki et al. Proc. SPIE. **7258** (2009). To be published.
- 5) IEC 62220-1-2: Medical electrical equipment – Characteristics of digital x-ray imaging devices – Part 1-2: Determination of the detective quantum efficiency – Detectors used in mammography, 2007.
- 6) 遠藤登喜子（編）. 見て視て診るマンモグラフィ画像読影ハンドブック 改訂第2版. 大阪, 永井書店, 2008, 193.

（本報告中にある“AMULET”, “FUJIFILM”は富士フイルム株の登録商標です。）