

第三世代ワイヤレスタイプ可搬型DR (AeroDR3) の開発

Development of the Third Generation Wireless Portability Type DR (AeroDR3)

糠 信 武 志* 西 哲 夫* 菊 地 遼 平*
Takeshi NUKANOBU Tetsuo NISHI Ryouhei KIKUCHI

三 好 浩 平* 太 田 生 馬* 石 阪 修 吾**
Kohei MIYOSHI Ikuma OHTA Shugo ISHIZAKA

要旨

医療用X線画像診断におけるデジタル化としてDR (Digital Radiography) が登場して既に10年余りが経過し、現在はDR撮影が主流である。当社も2011年にワイヤレスタイプ可搬型DR AeroDRシステム (以下AeroDR) を発売し、世界最軽量・堅牢性を武器にDRのスタンダードとしての地位を築いてきた。2014年には世界最軽量の座を維持しつつ、IPX6の防水性、堅牢性の強化を図り、使いやすさを洗練させた第二世代ワイヤレスタイプ可搬型DR AeroDR2システム (以下AeroDR2) を発売した。

しかしながら、新たな競合他社の参入等により競争が激化しており、更なる差別化が必要な状況となっている。その現状を踏まえ、第三世代ワイヤレスタイプ可搬型DR AeroDR3システムでは、TFTセンサを含む全構成を一新し、基本性能の圧倒的な向上による新たなDRのスタンダードを確立すべく、整形分野などで要求される画素サイズの高精細化、ユーザビリティ向上のための新X線自動検出技術 (AeroSync) の導入、筐体設計の刷新による軽量性維持と堅牢性向上の両立、低被爆・診断精度につながる画質性能の向上といった技術革新に取り組み、大幅に機能・性能の向上を図った。更に、従来の静止画撮影機能に加えて、連続撮影機能を追加し、今後の適用用途拡大を図っている。

このようにAeroDRシリーズのフラッグシップ機として、大幅な進化を遂げた第三世代ワイヤレスタイプ可搬型DR AeroDR3 (以下AeroDR3) について紹介する。

Abstract

The DR (Digital Radiography) system was introduced as a way of digitalization of X-ray diagnostic imaging more than 10 years ago, and the DR is currently a mainstream. We put in a market a wireless portable DR AeroDR system in 2011, and the system has been establishing a status as a standard of DR system, taking advantage of its world lightest weight and robustness. In 2014, we put in a market our second generation wireless portable DR AeroDR2 system, which was rated to the IPX6 water resistant standard, was further reinforced, and at the same time was still the world's lightest weight system.

However, the competition is getting fierce with new competitors in the market, and further differentiation is required. In view of the current situation, we have developed our third generation wireless portable DR AeroDR3 system as the flagship system of the AeroDR series. The whole configuration of the system including a TFT sensor is newly developed.

In order to set a new standard of the DR system with massive improvement of basic functions, the AeroDR3 system has the following improvements.

1. High definition pixels satisfying the requirement in the field of cosmetic surgery;
2. Introduction of a new automatic X-ray detection technology (AeroSync) for better usability;
3. A good balance between light weight and robustness with a new design of the housing; and
4. Better image quality achieving low exposure and accurate diagnosis.

In addition, for a wider application of the system, we have added a new function of continuous imaging.

This paper describes the third generation wireless portability type DR AeroDR3, which has been greatly improved as the flagship system.

*ヘルスケア事業本部 開発統括部 X線システム開発部
**ヘルスケア事業本部 開発統括部 技術開発部

1 はじめに

我々は、2011年に、世界最軽量・堅牢のAeroDRを発売し、2014年には軽量性、堅牢性を更に向上、防水性も実現するAeroDR2を発売するなど、これまで可搬型DRにとって最重要な、軽くて壊れにくいという顧客価値を提供し続けてきた。

しかしながら、新たな競合メーカーの参入等による競争激化に加え、DR普及による顧客要求の高まりがある。

【課題・顧客要求】

①画素サイズの高精細化

ある病院施設では胸部撮影などではDRを使用するが、手指骨などの撮影では、DR (175 μm) を使用せず、CR (87.5 μm) を使用しているなど、整形領域ではDRの高精細化が求められるケースがある。また、昨今の入札要件に、画素サイズ150 μm 以下の基準が求められる事もあり、高精細化の要求が強まっている。

②放射線被曝量の低減

X線診断における被曝量は、患者のために、少しでも低減することが常に要求されている。

③安心して使える AeroSync (X線自動検出技術)

X線撮影する現場には、様々な医療機器、電子機器があるため、多様な電磁波が存在し、その電磁波の影響で、誤ってX線検出してしまうケースがある。

④海外での使用条件に対応した落下強度の不足

これまでも堅牢性の強化を行ってきたが、日本と比較し、欧米では立位撮影台の設定位置が高いため、故障に至る場合があった。

⑤技師への負担が大きい

従来機も軽量化が図られているが、力の弱い女性技師等からは作業負担がまだ大きいという声強い。

上記課題に対し、我々は下記のコンセプトを元に各課題の解決を行った。

【開発コンセプト】

①高精細化

競合他社のDRの画素サイズは125 μm ~150 μm に集中しており、第三世代では、画素サイズを従来の175 μm から100 μm にすることで競合に対して、優れたポジションを獲得すると共に、CRに近い精細な描写性能まで改善することで、DRを使用できるシーンを拡大する。一方で、画素数は従来の3倍(扱うデータ量が3倍)となる。データ量増加に伴い、消費電力が増加し、撮影可能枚数への影響があるため、新たな省電力化技術を開発する。

②線量低減化

AeroDR3では従来機に対して全線量領域、特に低線量領域でのDQE向上した高画質化を実現させる。これにより、現行機に対して20%の線量低減を実現した。

③AeroSyncのロバスト性向上

通常、X線の誤検出耐性と、検出性能はトレードオフの関係にあるが、AeroDR3では、高バランスの性能を実現することで、使い勝手の良さを提供する。

④堅牢性向上

従来機は国内平均的な立位撮影台の高さ1.0m落下耐性だが、欧米での平均的な立位撮影台高さである1.2mからの落下に耐えるレベルを目標とした。

⑤負担を軽減

負担軽減するには軽量化が一番の近道だが、堅牢性を向上しつつ、更なる軽量化するのは困難である。そのため、持ちやすさを向上させる構造とすることで、体感的な重量を低減させ、技師への負担を軽減させる。

⑥新規診断価値創出

AeroDR3では、新たな価値創出のために、従来の静かな一般X線撮影機能に加えて、パルス照射の連続撮影機能という新しい撮影機能を追加した。

以下、開発技術の一覧を示し、個別に詳細技術を説明する (Fig. 1)。

Purpose of development	Developed technology
Efficiency of development	Platform of electronic circuit
High definition/ Continuous imaging	New TFT pixel design
	Adoption of new design of read-out IC
	New correction technology
Performance improvement of AeroSync	Power-saving technology
	New shock-resistant structure
	Longer exposure time technology
Robustness improvement/ Handleability improvement	New housing structure (two-piece structure)

Fig. 1 Technologies developed for AeroDR3.

2 基本画質向上 (高精細化/高画質化)

AeroDR3では高精細化要求により、画素サイズを従来製品の175 μm から100 μm へと縮小したことに伴い、画素面積が従来の約1/3倍となり、TFTセンサーパネルのSN比の低下が課題となる。我々は以下の新規技術を採用する事で、センサーの感度向上とノイズ低減を行い、従来製品より高い画質性能を達成した。

2.1 高性能TFT素子の採用

TFTセンサーパネルの感度向上には1画素当たりのTFT素子が占める面積を小さく、フォトダイオード面積率を大きくすることが重要である。また、ノイズ低減のためには信号線の寄生容量を低減する事が望ましい。これら要件を満たすためには、スイッチ素子であるTFT素子面積は最小にすることが必要である。AeroDR3のTFT素子は半導体層の性能改善により単位面積当たりの駆動能力を従来比約1.6倍に向上している。この素子の採用によりTFT面積を縮小し、従来素子で設計した場合に比べ、感度を5%向上し電気ノイズを10%低減することが実現出来た。

2.2 高感度フォトダイオード素子の採用

TFTセンサーパネルはシンチレータが発光した光をフォトダイオードのアモルファスシリコン層で吸収し電荷に変換している。アモルファスシリコン層の光入射面側には電極形成や素子保護を目的とした透明層が複数形成されている。これらの膜による入射光の減衰によりフォトダイオードの感度低下が生じている。AeroDR3ではこれらの透明膜の構造を光学的に最適化し光の減衰を最小限に抑えた。その結果、単位面積当たりのフォトダイオード感度は従来比1.4倍の向上を実現した。

2.3 低ノイズ読み出しICの採用と設計最適化

電気ノイズの低減には、新規に低ノイズで高速読み出しが可能な読み出しIC (Read Out IC: 以下, ROIC) を採用し, ROICとTFTセンサーパネルの電気特性の整合の最適化により対応した。これにより従来製品に対し, 40%の電気ノイズ低減を実現した。

これらの新規技術の採用により, TFTセンサーパネルの高精細化を実現しながら, 従来同等の1画素あたりのSNを確保したことにより, 単位面積あたりのSNを低減し, 画質性能指標であるDQE (1mR, 1 cycle/mm) を従来機の51%から56%へ向上させる事に成功した (Fig. 2)。このDQE向上により, 線量対雑音指数も良化し, 従来機より20%減の線量低減を達成した (Fig. 3)。

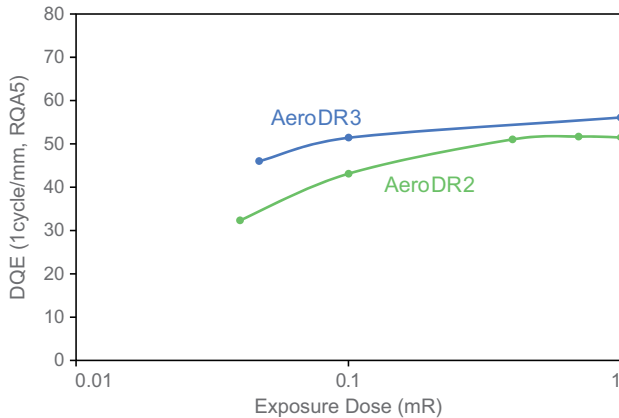


Fig. 2 Comparison of DQE between AeroDR2 and AeroDR3.

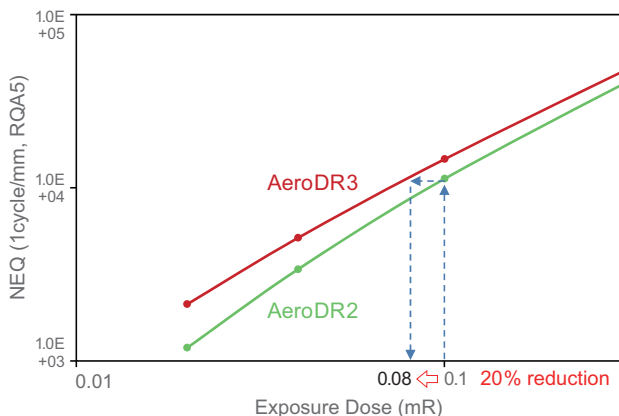


Fig. 3 Comparison of NEQ between AeroDR2 and AeroDR3.

3 AeroSyncの進化

AeroSyncとは、可搬型DRにおいて、X線が照射されたことを検知するX線自動検出技術の名称である。

AeroSyncを利用することで、X線装置とのインターフェースなしでX線撮影が可能となり、不可欠な技術となっている。しかしながら、AeroDR3においては高精細化に伴い、消費電力が増大し、撮影枚数などの駆動性能低下の懸念があった。

そのため、新AeroSync技術を開発し、最も利用されている回診撮影において、十分な撮影回数、サイクルタイムの確保を実現した。また、外乱耐性も同時に向上し、放射線治療後の患者にも対応、さらに、照射可能時間を拡大し、在宅向けのポータブル低出力X線装置にも対応するなど、従来機よりも使用シーンを拡大し、顧客にとっての価値向上に成功した。

3.1 省電力化技術

従来方式のAeroSyncでは、X線の照射により生じる各画素の漏れ電流の微小変化を、画像信号読み出し用IC (ROIC) で測定し、一定以上の電流変化が生じた場合にX線が照射されたと判断している。画像領域全面をカバーするためには、多くのROICの駆動が必要であり、これには大きな電力を必要とする。そのため、高精細化により既存機より多数のROICを制御する従来方式をそのまま適用すると、消費電力が大幅に増加することになる。

そこで、新AeroSyncでは、ROICを利用せずにTFTセンサーパネルの電流変化を検出する回路部を1つだけ用いる方式に変更することで消費電力の大幅な削減を実現した。同時に、検出信号の取得タイミングの最適化に加え、複数のデジタルフィルタの適用とその周波数特性の最適化を実施することにより、必要なSNRも達成した。

Fig. 4に示すように、新AeroSyncの消費電力は、従来方式に比べ、約90%の削減を達成した。また、総合的な電力においても、既存機に対して30%以上の削減を達成した。

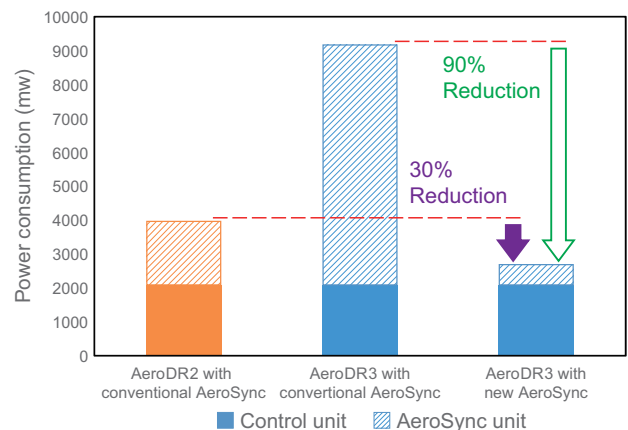


Fig. 4 Comparison of the power consumption among AeroDR2 with the conventional AeroSync technology (left), AeroDR3 with the conventional AeroSync (middle), and AeroDR3 with the new AeroSync technology (right).

3.2 外乱耐性の向上

従来機においては、非常に高感度なX線検出が可能なことにより、周辺の機器から放射される電磁波や核医学検査、放射線治療後の患者から放射される放射性同位元素 (RI) などの外乱を検知してしまうことがまれに発生し、感度調整などの運用対応を頂いている場合がある。

新 AeroSync 技術の開発に当たっては、外乱耐性を強化するための新規技術も合わせて開発し、ロバスト性を担保した。

3.2.1 電磁波影響の低減技術

新 AeroSync では、検出信号に重畳する外乱ノイズを除去するため、複数のデジタルフィルタを用いることで、必要な検出信号の帯域のみを通過させるバンドパスフィルタ (BPF) を採用した。

これにより、電磁波起因の高周波ノイズを大幅に除去することができ、従来機を超えるロバスト性を実現した。

3.2.2 RI 影響の低減技術

一般的に、医療現場で使用されている RI には、X線の有するエネルギーより高いエネルギーを有するものと同程度のエネルギーを有するものが存在する。X線よりもエネルギーが高い RI は、LPF を用いて影響を低減し、同等のエネルギーの RI は、X線との線量率の違いを用いてフィルタリングすることで影響を低減する処理を適用した。

これにより、Fig. 5 に示すように、従来機の約 25 倍の RI 耐性を達成した。

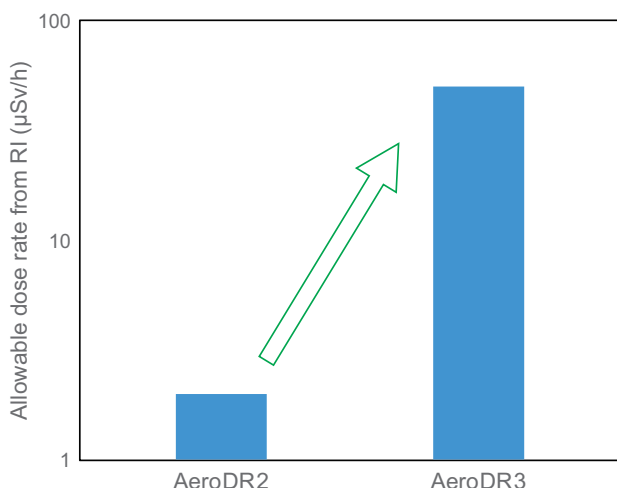


Fig. 5 Comparison of allowable RI dose rates between AeroDR2 and AeroDR3.

3.3 照射可能時間の拡大

従来方式の AeroSync は、照射可能時間が 0.8 秒であり低出力 X 線装置などにおいて、露光量が不足するケースがあった。

新 AeroSync では、0.8 秒を越える時間照射時のアーティファクト発生を抑制する技術を搭載することによって、最大 4 秒までの照射を可能とした。

4 堅牢性・グリップ性の向上

4.1 堅牢性向上

AeroDR3 では、従来機種とは筐体構造を一新し、曝射面側カバー (フロント板) と非曝射面側カバー (バック板) による 2 ピース型の筐体構造を採用した (Fig. 6)。

落下によるカセットへのダメージは、小さな領域に応力が集中する角部からの落下において最も大きい。外装が大きく変形したり、割れたりすると、内部部品の破損につながる。そこで、衝撃を受け止めるフロント板を、比強度に優れたカーボン素材で、かつ角部の繊維が連続的になるよう特殊な製造方法により形成した (Fig. 7)。

それにより角部の強度を向上させ、軽量性を維持しながら、目標の 1.2 m からの落下に対する耐性を確保した。

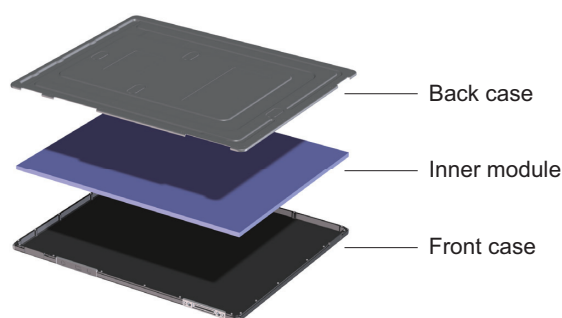


Fig. 6 Structure of AeroDR3 cassette. Inner module is sandwiched by a front case and a back case.

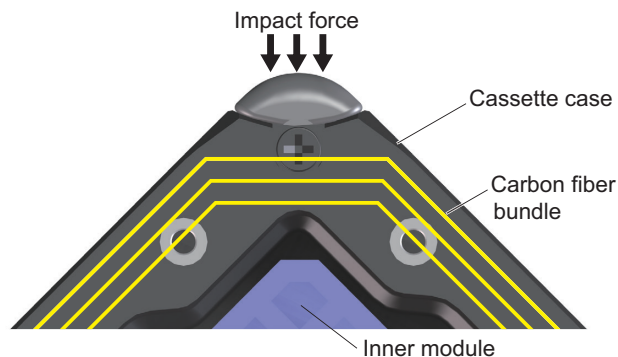


Fig. 7 Impact-force-resisting corner structure of the cassette. Carbon fiber bundles are disposed with no connection at the corner.

4.2 グリップ性向上

グリップ性を向上させるために、外装の一部にくぼみを設け、指を引っ掛けるようにして持てる構造を盛り込んだ。くぼみによって把持力 (保持するために必要な握力) の低減が期待できる。実験の結果、くぼみの深さ 1 mm 毎に把持力が約 10% 低減されることを確認した (Fig. 8)。

製品への適用に際し、技師が撮影作業中に持つ頻度の高い DR 上辺側には深さ約 4 mm、その他の辺には深さ約 2 mm のくぼみを設けた。約 2 mm のくぼみでは約 20% 相当の把持力低減効果となり、カセットの実重量 2.6 kg に対し、把持力は約 2.1 kg 相当となる。結果、全ての辺で目標としたレベルの体感的な重量低減を達成した。

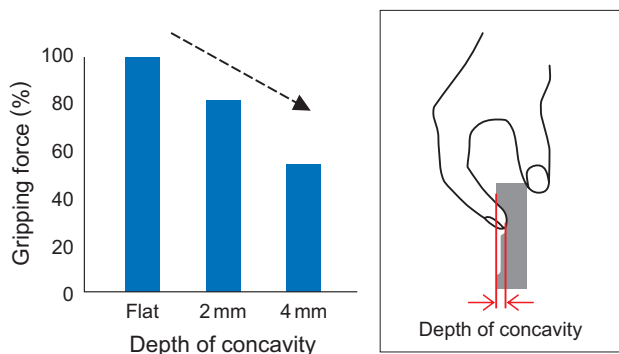


Fig. 8 Dependency of gripping force on the depth of a concavity provided in the cassette case.
Gripping force is reduced by 10% for every 1 mm increase in the concavity depth.

5 パルス照射の連続撮影機能

AeroDR3では、従来の静止画一般X線撮影に加え、新たにパルス照射の連続撮影機能への対応が求められた。そのため、TFTから電荷を読み出すROICの読み出し間隔を、従来機に対して約10倍近く高速化する必要があり、前述したように、短時間で電荷を読み出せるTFT技術、高速読み出しに対応できるROICを新たに採用した。ただし、これら新規技術を採用しても、短時間で全電荷を読み出す事は困難であり、残った前画像の電荷が現画像に残像ノイズとして現れてしまう。今回この課題を解決するために新たな補正技術を適用した。

また、パルス照射の連続撮影機能では一定期間、X線照射、読み出しを繰り返すことが必要である点が、従来撮影と大きく異なる。ROICは高速読出し、ADC、データ伝送機能を担っているため、駆動時間に応じて、ROIC自体が温度上昇し、それにより信号値がドリフトする。ドリフト量によっては画像にノイズとして現れてしまうため、この対策として、ROICを放熱させる新しい仕組みを適用した。

5.1 補正技術

新規高速読出し技術を採用したAeroDR3においても、ゲートあたりのスイッチングにかかる時間を短縮して、読み出し間隔を短時間化すると、X線信号を十分に読み出すことが出来ずに、読み残した信号成分が次のフレームの画像に残像として発生する。この課題に対して、目標である残像量5%以下を実現するために、新規残像補正技術を開発した。残像補正処理は前フレームの画像と補正係数を用いて逐次的に読み残し成分を除去することで行う (Fig. 9)。処理で用いる補正係数は信号を与えた画像およびその次フレームの読み残した信号成分が重畳した画像を用いて作成する。画像にはノイズ成分が含まれるため、補正係数にもノイズ成分が含まれるが、補正処理後の画像のノイズ特性に影響しないよう、与える信号の強度を最適化した。本補正処理を回転体物理ファントムに適用した結果を Fig. 10 に示す。未処理の Fig. 10 (a)

に対し、処理後の Fig. 10 (b) は残像が低減しており、高負荷試験条件下で20%の残像があった場合も、本処理により1%未満まで低減可能となった。

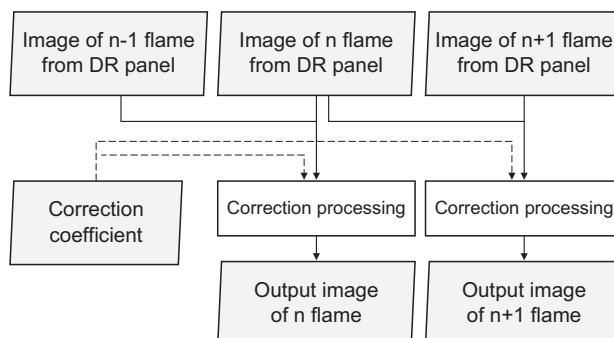


Fig. 9 Lag correction algorithm using the previous frame image and an appropriate correction coefficient.

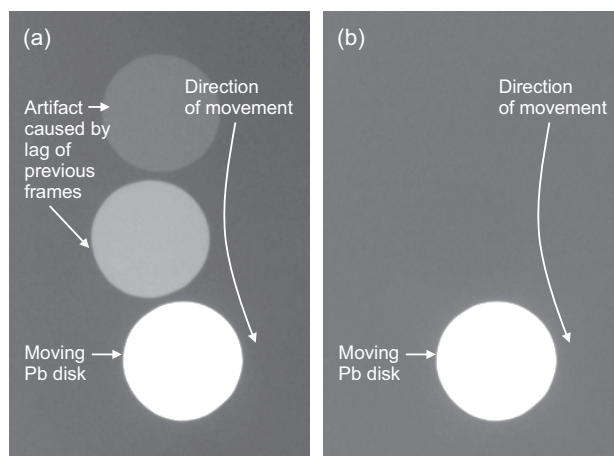


Fig. 10 Comparison of picked-up images of a moving Pb disk between (a) before lag correction and (b) after lag correction.

5.2 放熱による温度ドリフト低減

温度ドリフトの原因となる、ROICから発生した熱を機外に排熱するため、熱伝導率の大きい放熱部材をROICとバック板の間に配置して熱を積極的にバック板側に伝えている。逆にTFT側には断熱部材を設けて、TFTへ熱が伝わらない構成としている (Fig. 11)。

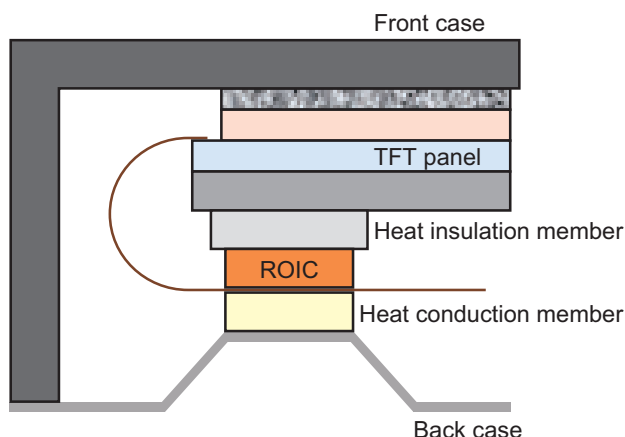


Fig. 11 Heat dissipating structure.

バック板には軽量かつ熱伝導率の大きいマグネシウム材を用い、バック板をROIC側に凹ませて近づけ、伝熱距離を短縮することで排熱効率を向上させ、対策なしに比べ温度変動を4分の1以下に抑制することを可能とした。

6 まとめ

第三世代ワイヤレスタイプ可搬型DR AeroDR3は、100 μ mの高精細画素サイズに対し、TFT設計やAeroSync方式を大幅に刷新することで、高画質化の実現、高画質による線量低減化、省電力、高ロバスト性を実現した。また、構造と材質の双方を刷新した新筐体採用による軽量性と堅牢性向上の両立を達成。そして、読み出し制御の刷新と新規補正適用等によるパルス照射の連続撮影機能を実現した。

このように、本開発では従来技術の延長ではなく、顧客価値実現のために、ほぼ全てのコア技術を刷新し、フラッグシップ機としての仕様を達成した。

このフラッグシップ機の製作に満足することなく、今後も顧客価値追求を忘れず、物作りから医療現場への貢献を行っていく次第である。

●参考文献

- 1) 徳弘 修, 儀同智紀, 榎野昭雄: コードレスカセット型DR “AeroDR”の開発, KONICA MINOLTA Tech.Rep., Vol.8, 96-100 (2011)
- 2) 出口 俊, 西島裕一, 手塚英剛, 滑川 寛, 野澤 肇: ワイヤレスカセットFPD AeroDR SYSTEM 2の開発, KONICA MINOLTA Tech.Rep., Vol.12, 66-70 (2015)