

「MR 技術における Deep Learning 画像再構成の進化：画質と時間のトレードオフを克服する」

GE ヘルスケア・ジャパン株式会社

イメージング本部 MR 部

名内 存人

はじめに

画像診断領域において、人工知能（Artificial Intelligence: AI）の応用は日進月歩で進化し続けており、中でも深層学習を用いた画像再構成技術（Deep Learning Reconstruction: DLR）は MRI で広く実装されている。本稿では、既に実臨床で普及してきている DLR の現状を俯瞰しその 2 つの方向性、すなわち画質改善と高速撮像に対する応用について紹介したい。

DLR で画質を向上させる

MRI 検査においては、SNR（Signal to Noise Ratio）と空間分解能、撮像時間の間にはトレードオフがあり、このバランスを理解して最適なプロトコルで撮像条件を調整する必要がある。このハードルを克服することが、これまでの MRI 開発史において最も重要な要素の一つであったと言っても過言ではない。実際に高磁場化、フェイズドアレイコイル、パラレルイメージング、圧縮センシングなど、この 40 年において多くのイノベーションが臨床に普及してきた。

一方で昨今 あらゆる分野において AI、特に DL を用いた技術が応用されている。特に画像診断分野においては、画像のカテゴリ分類やセグメンテーション、ノイズ除去、画像合成・変換などを含む種々のタスクで研究が進んでいる。これらの研究開発の結果として、GE HealthCare はいち早く 2020 年に Convolutional Neural Network (CNN) を応用して MR の画像再構成に DL を適用した技術：AIR™ Recon DL を製品として発表している。AIR™ Recon DL は MR の画像再構成パイプラインに組み込まれており、最終的な画像生成の前にノイズとトランケーションアーチファクトを除去するための DL アルゴリズムである。このネットワークの学習には 100,000 を超える固有パターン認識が用いられていて、ノイズの多いデータや低空間分解能の raw data からより高画質な画像に再構成することが可能になっている¹⁾。

DLR には raw data に直接 DL アルゴリズムを適用するものとフーリエ変換後の実画像（Magnitude 画像）に適用するものの 2 種類がある。その一長一短として実画像適用型の方が汎用性は高いが、一方で AIR™ Recon DL のような raw data 適用型は、ノイズ低減のみでなくトランケーションアーチファクト抑制と画像尖鋭度（edge sharpness）の向上という 3 つの効果を同時に得られる点に特徴がある（図 1-4）。また、AIR™ Recon DL は raw data 適用型でありながら、現在では 2D のみならず 3D や動き補正（PROPELLER）、各種定量マッピング等にも応用範囲が広がっており、実画像適用型と同様の汎用性を持つに至っている。さらに、パラレルイメージングや圧縮センシングと異なり、DLR はフェイズドアレイコイルの geometry（エレメント配置）への依存性が小さいために²⁾、AIR™ コイルのような高密度多チャンネル型コイルとの親和性も高いと考えられ、ソフトウェアとハードウェアの組み合わせによる相乗効果にも期待できる。

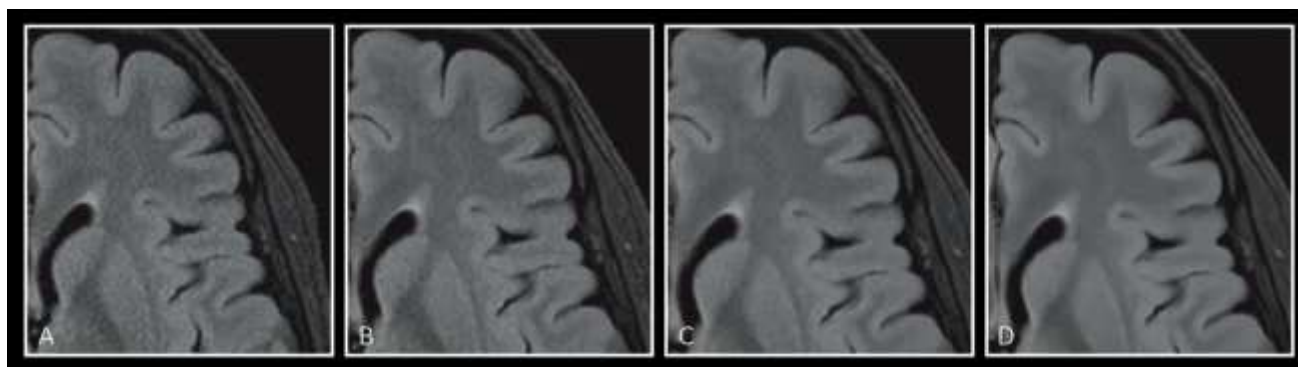


図1: AIR™ Recon DL によるSNR 向上レベル (DL 強度) A: 従来法の画像再構成、B: AIR™ Recon DL Low、C: AIR™ Recon DL Mid、D: AIR™ Recon DL High ※全ての画像は同一の raw data から再構成されている。

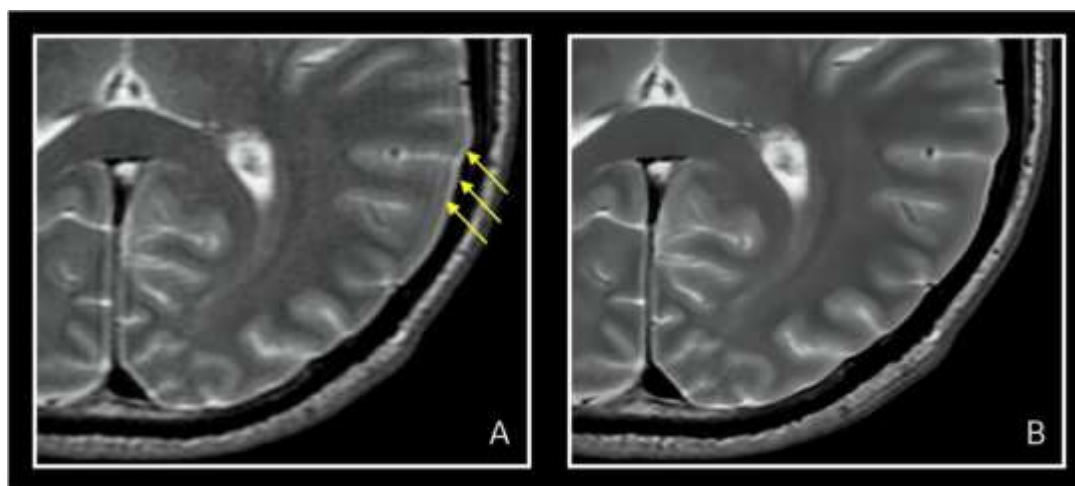


図2: AIR™ Recon DL によるトランケーションアーチファクト抑制 A: 従来法の画像再構成ではトランケーションアーチファクトが見られる (矢印)。 B: AIR™ Recon DL (High) ではノイズが低減され、トランケーションアーチファクトが除去されている。

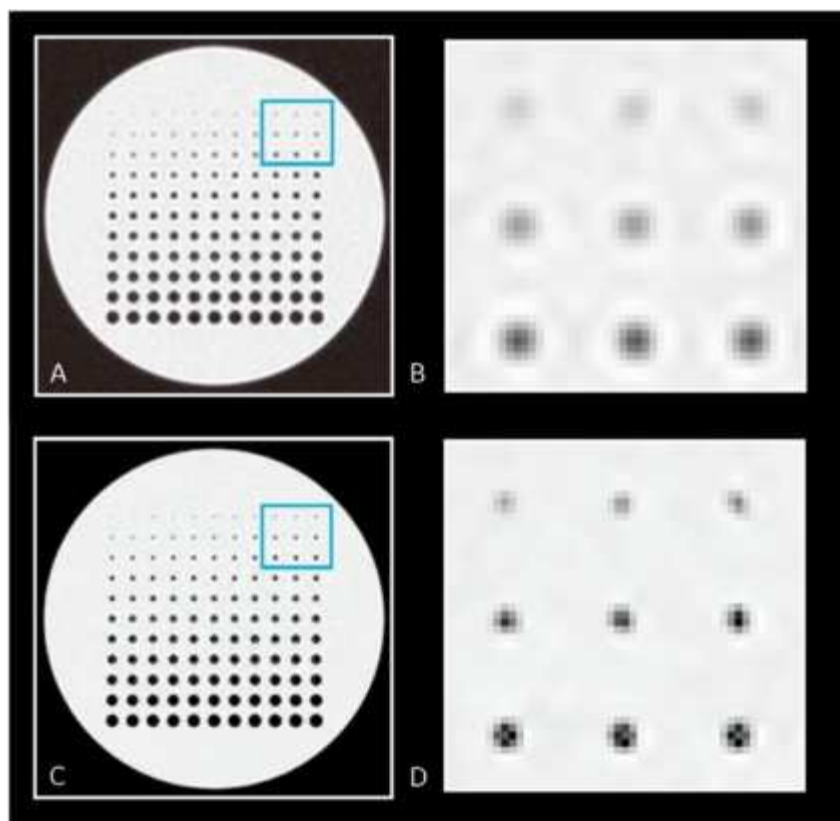


図3: AIR™ Recon DLによる画像尖鋭度の向上（ファントム実験例） A-B: 従来の画像再構成では、円形の細部構造情報が失われている。 C-D: 同一の raw data から AIR™ Recon DL を用いて再構成された画像では、拡大しても鮮明な画像が得られていることが分かる。

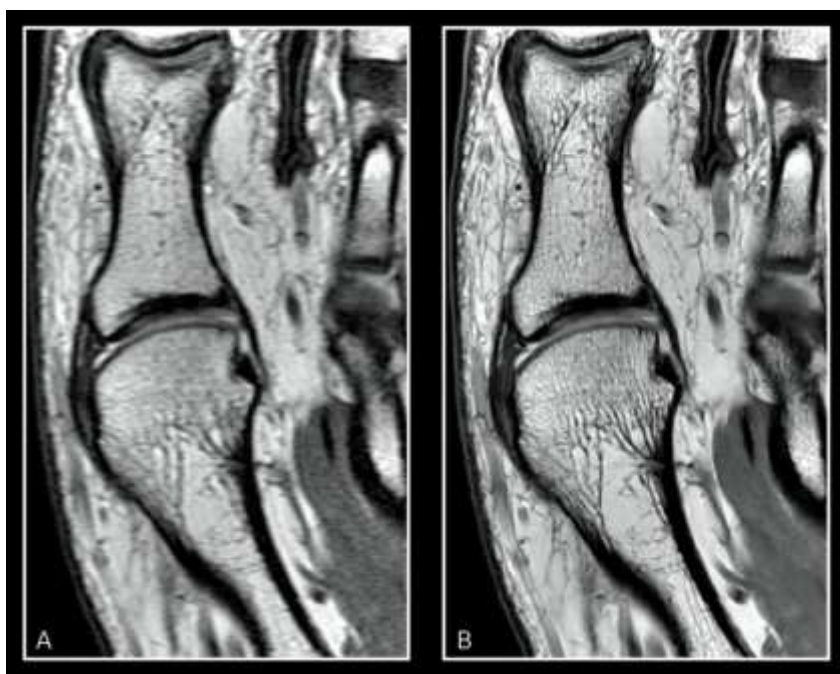


図4: AIR™ Recon DLによる尖鋭度向上の例 第一中足骨のFSEプロトン密度強調画像 Cor 0.3 x 0.3 x 1.0mm
A: 従来の画像再構成法 B: 同一 raw data（同一マトリクス・撮像時間）の AIR™ Recon DL（High）骨梁が明瞭に描出されている。

一般的に、静磁場強度を 1.5T から 3.0T へ 2 倍にすると画像の SNR も約 2 倍になるが、AIR™ Recon DL は従来の画像再構成で得られる SNR に一定数倍乗じた SNR を出力として得ることができ、その利点は当然ながらより高い磁場強度にも反映される。図 5 は従来の画像再構成で得られる SNR を入力 SNR、AIR™ Recon DL で得られる SNR を出力 SNR としてプロットしたものだが、AIR™ Recon DL は入力 SNR を一定数倍にする効果があり、静磁場強度による SNR 増加分に対しても同様に SNR 改善効果を発揮するため、3.0T 以上であっても静磁場強度に依存せずメリットがある。

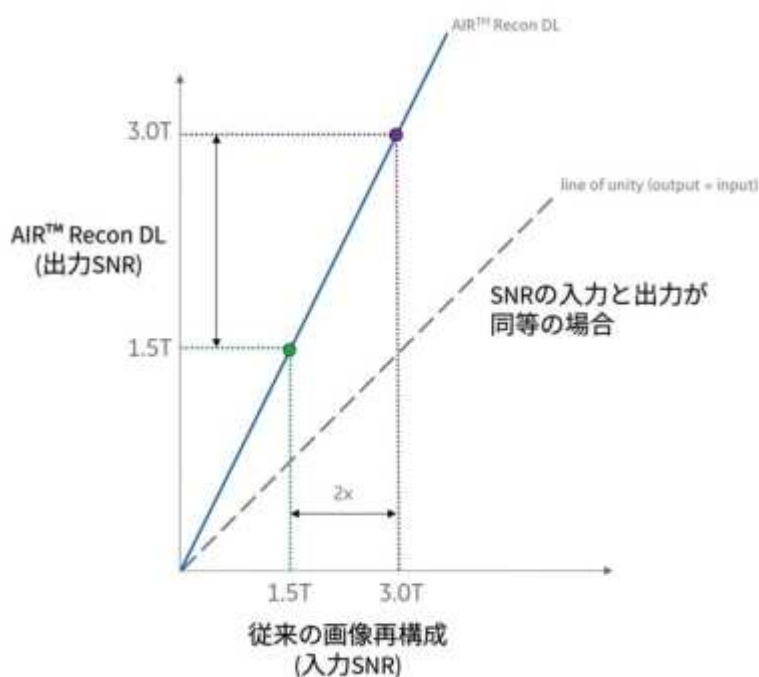


図5: 異なる静磁場強度におけるAIR™ Recon DLのSNR変化

従来の画像再構成法において、3.0Tでは1.5Tの約2倍のSNRとなるが、この磁場強度によるSNR向上効果は、AIR™ Recon DLにおいても同様である。

より AIR™ Recon DL の効果が分かりやすい例として、拡散強調画像 (Diffusion Weighted Imaging: DWI) を挙げる。図 6 で示されるように (DWI に限らず) SNR と撮像時間には臨床現場において許容可能な閾値が存在する。点 A のように SNR は十分に高くとも撮像時間が長過ぎるような場合には、AIR™ Recon DL によって点 B で示されるように顕著に短い時間で同じ SNR を実現することができる。逆に従来の再構成を用いたプロトコルが点 C のように実現可能な撮像時間だが SNR が不足している場合、AIR™ Recon DL は SNR を許容可能なレベル (点 B) まで改善することになる。実際の画像例として、点 A/B/C の代表的な DWI を図 7 に示す。

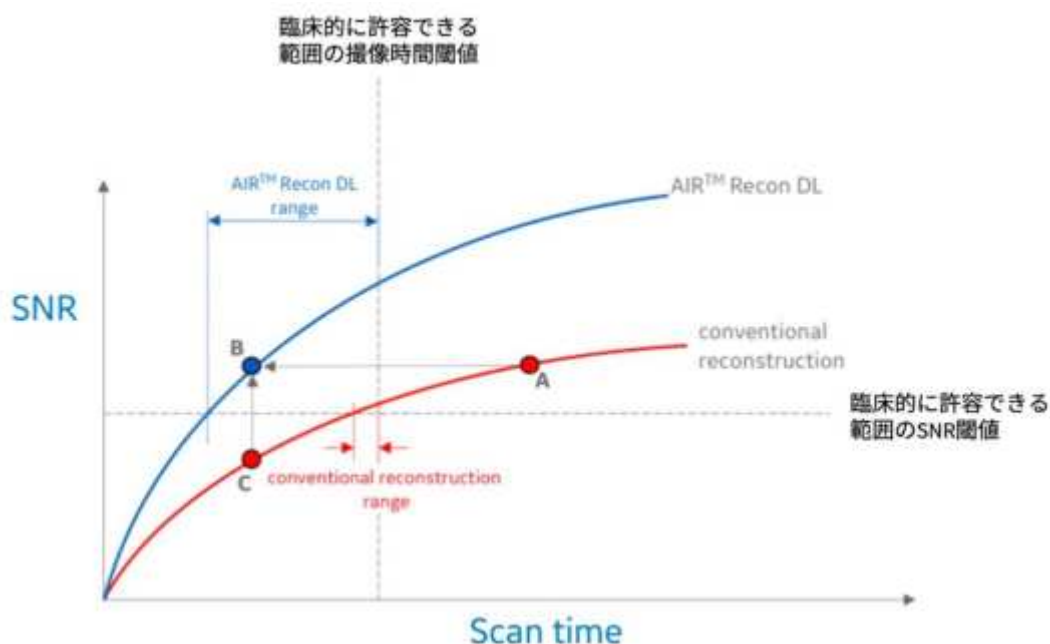


図6: スキャン時間(NEX)の関数としてのSNR

従来型 (赤線 —) とAIR™ Recon DL (青線 —) のSNRはスキャン時間の平方根として変化する。AIR™ Recon DLは十分な臨床SNRを維持しながらスキャン時間を短縮できる。

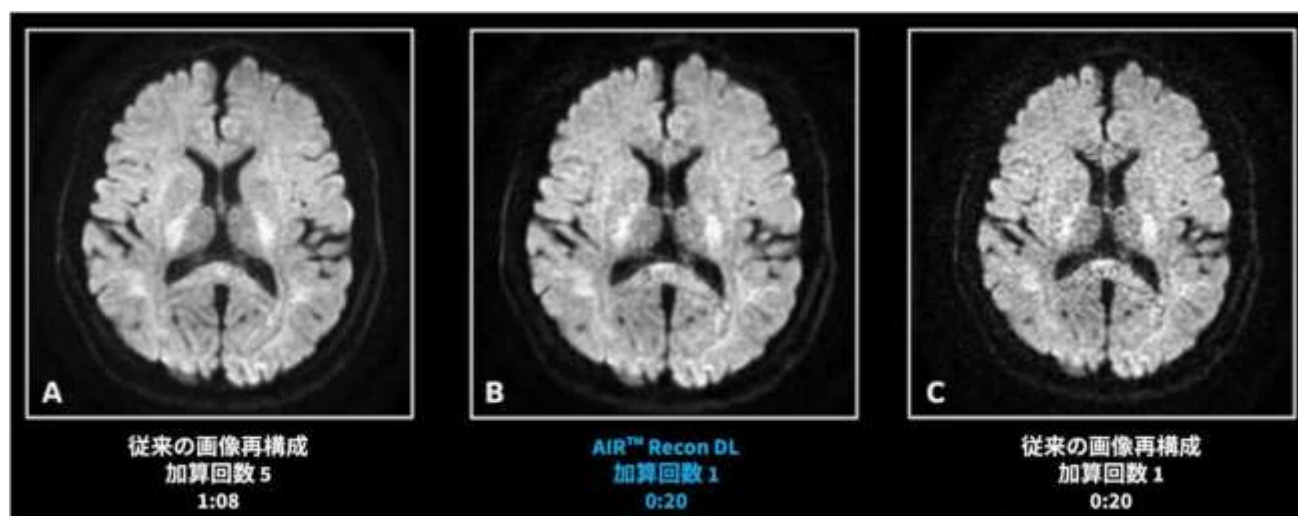


図7: 図6における点A/B/Cに対応するDWI画像例 分解能1.5 x 1.5 x 3.0mm、b = 2,500s/mm²にて、Aは従来の画像再構成で加算回数 (NEX) 5、BはAIR™ Recon DL を使用してNEX1、Cは従来の画像再構成でNEX1を示す。BとCは同一のraw dataから再構成されている。

DWIでは一般的にb値によって定量化される gradient pulse を用いるが、これが大きく長くなればなるほどb値は大きくなり拡散強調の度合いも大きくなる。一方でb値は大きくなるほど信号とSNRが小さくなる。なぜなら、信号強度は $S = S_0 \cdot e^{-bD}$ の指数減衰モデルに従い (Sは観測信号、S₀は拡散の重み付けがない場合の信号強度、Dは特定の組織の見かけの拡散係数)、例えば灰白質と白質では拡散係数がそれぞれ約 $1 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ と $0.7 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ で

ある。これは灰白質の信号が b 値の増加とともに白質よりも早く減衰することを意味し、これを考慮すれば $1,000\text{s/mm}^2$ の b 値を適用すると、灰白質の元の信号の 37%しか得られないということを意味する。 b 値が $2,500\text{s/mm}^2$ の場合は、さらに 8%まで減少することになる。この時、AIR™ Recon DL が DWI の SNR にもたらす利点は、SNR の b 値による指数関数的減衰の挙動を示す図 8 で説明される。SNR と撮像時間に関する上述の議論と同様に、AIR™ Recon DL の SNR（青線）は従来の再構成 SNR（赤線）と同様にモデル化することができ、どちらも十分に高い b 値でゼロに近づく。臨床的に許容されるプロトコルは SNR の閾値以上且つ許容できる b 値以上を使用することになる。図 8 の点 A は b 値が低すぎるが十分な SNR を実現している一方、AIR™ Recon DL では点 B で示されるように同じ SNR でも遥かに高い b 値を得ることができる。すなわち、AIR™ Recon DL で使用可能な b 値の範囲が SNR の増加によって従来よりもかなり大きくなっていることが分かる。

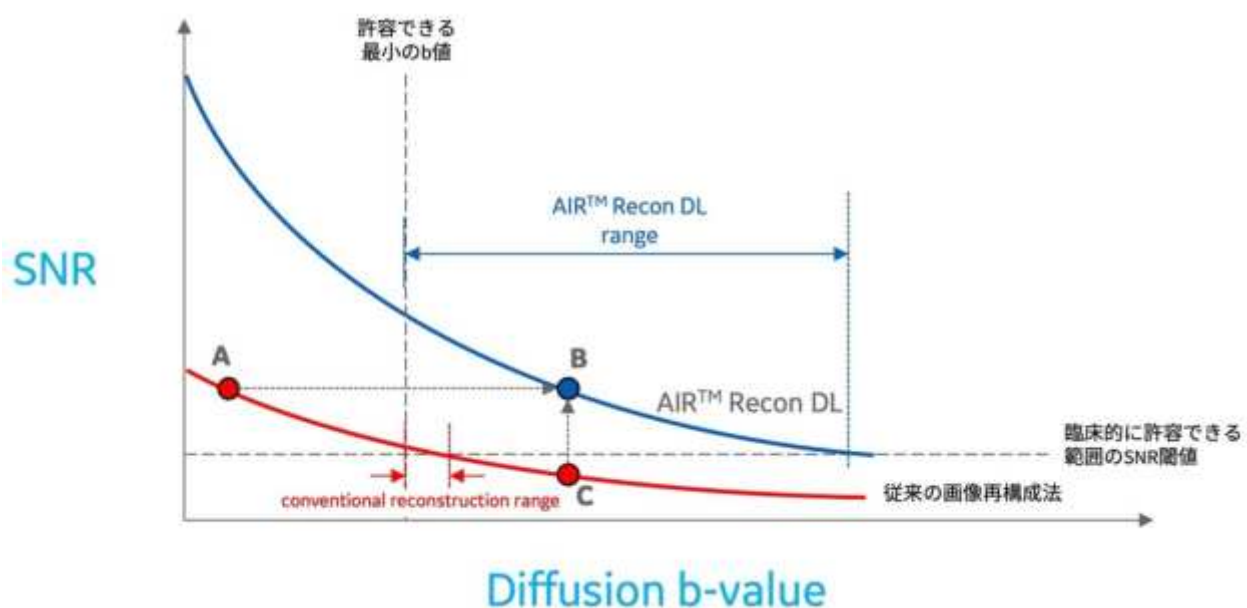


図8: 拡散の b 値に対するSNRの関数 従来型とAIR™ Recon DLのSNRは指数関数的に減衰する。AIR™ Recon DLは十分なSNRを維持しながら、より高い b 値を可能にする。

AIR™ Recon DLのような画像再構成技術は、より高い静磁場強度や高密度なフェイズドアレイコイルなどのハードウェアの発展と密接に関連する。中でも特にDWIに関連性が高いgradient performanceについて考えてみると、より高いピーク振幅、より高いスリューレイトを実現することで、パルス波形を最適化することが可能となり、より高い b 値とTE (Echo time) の短縮につながり、高い拡散強調コントラストやSNRを実現することができる。図9は4つの異なる b 値を持つ従来型画像再構成とAIR™ Recon DL、さらにより短いTE設定を可能とするhigh performance gradientによるDWIを示している。AIR™ Recon DLとgradient performanceの向上を組み合わせることによって、 $b = 10,000$ というhigh b -valueにおいても十分なSNRとコントラストを示しているのが分かる。

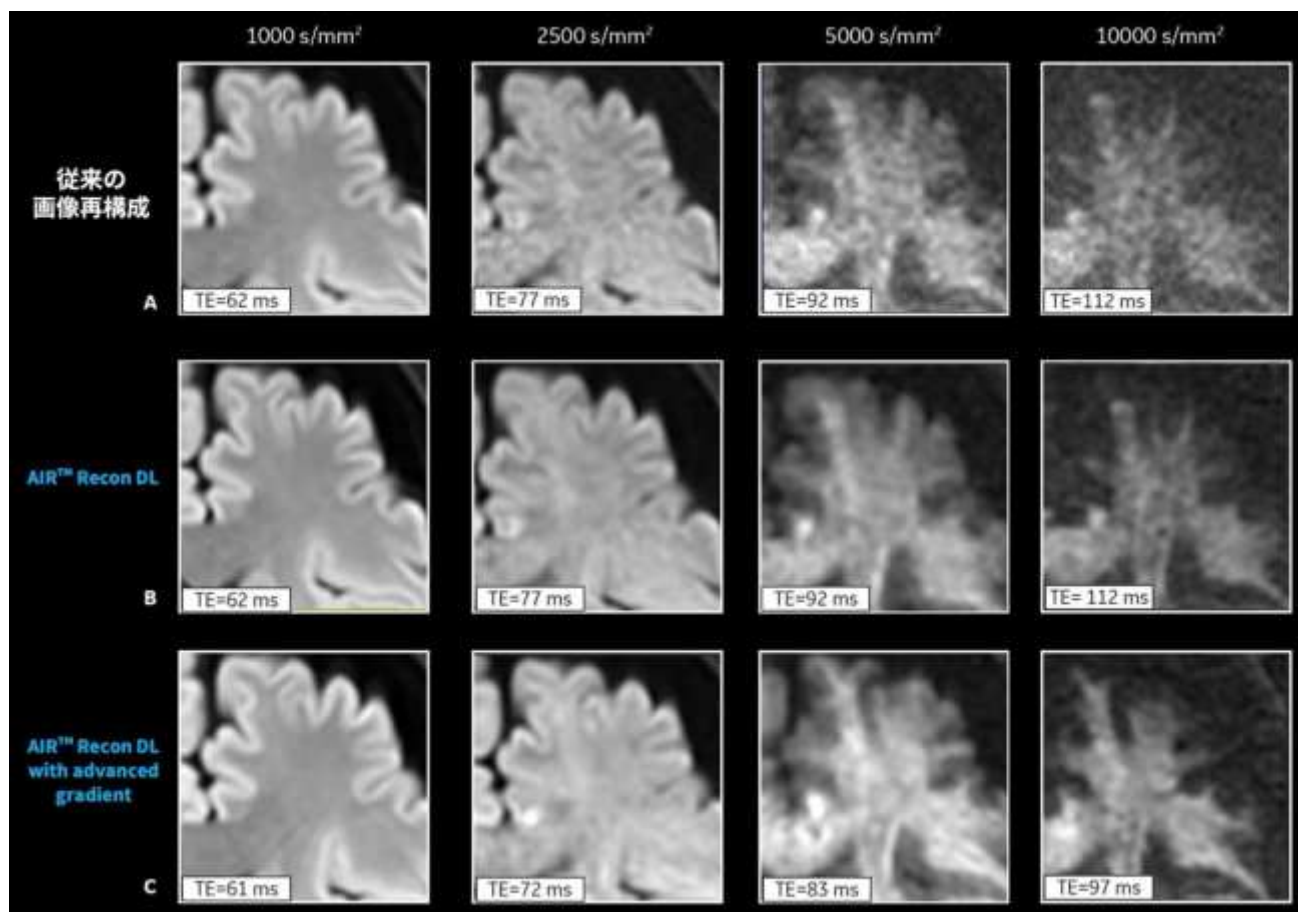


図9: AIR™ Recon DL と high performance gradient が DWI の SNR に与える影響 1.5 x 1.5 x 3.0 mm で b 値 1000、2500、5000、10000s/mm² の画像を示す (A と B は同一の raw data から再構成されている)。C (High performance gradient と AIR™ Recon DL を使用) では特に high b-value において TE が短縮し、さらに SNR が高くなっている。

AIR™ Recon DL は raw data を直接活用することで、空間分解能や SNR、撮像時間の繊細なバランスをコントロールしやすくなり、実臨床で使用できる撮像プロトコルの許容範囲が大きく広がることで、それぞれの施設のニーズに合わせた柔軟なスキャン条件作成が可能となる。

DLR でスキャン時間を短縮させる

画質向上を本来の目的とする AIR™ Recon DL に対して、スキャンの高速化に重点を置いた新しい DLR 技術として 2023 年には Sonic DL™ を新たに発表している。Sonic DL™ は physics-driven タイプの DLR によって、これまでのパラレルイメージングや圧縮センシング等の高速化技術の問題点、すなわちエイリアシングアーチファクトが生じる可能性や SNR 低下などを克服した加速法である。空間・時間に対して variable undersampling された raw data に 650 万回以上の演算処理によって構築された学習アルゴリズムを適用して画像再構成を行っている。Sonic DL™ の適用対象として心臓 cine 撮像が挙げられ、フルサンプリングされた心臓 cine 撮像に対して最大 83% のスキャン時間の短縮を実現する。その恩恵により、様々な患者状態や病態に対して最適な撮像パラメータを構築することができる³⁾。

心臓 cine 撮像における Sonic DL™の臨床的メリットとして3点が挙げられる。①画質を維持しながら、撮像時間や息止め時間を柔軟に調整できることで、一度の息止めで複数断面の撮像も可能となり、検査時における患者負担を軽減し、心臓MR検査のワークフロー改善にも貢献することが期待される。②最短で、一スライスあたり一心拍での撮像も可能となり、不整脈を有する患者に対してブレのない心臓 cine 撮像を提供することができる。③Sonic DL™と呼吸同期技術を組み合わせることで、息止めが困難な小児患者等にも対応できる (図 10)。①心臓 cine 撮像の高速化によるワークフロー改善の例として、ガドリニウム造影タイミングから遅延造影撮像までの時間内に cine 画像を取得して画質や心機能解析結果への影響を検証したところ、造影剤による有意な差がないことが示され、臨床現場における検査効率の向上に寄与することも期待されている⁴⁾。

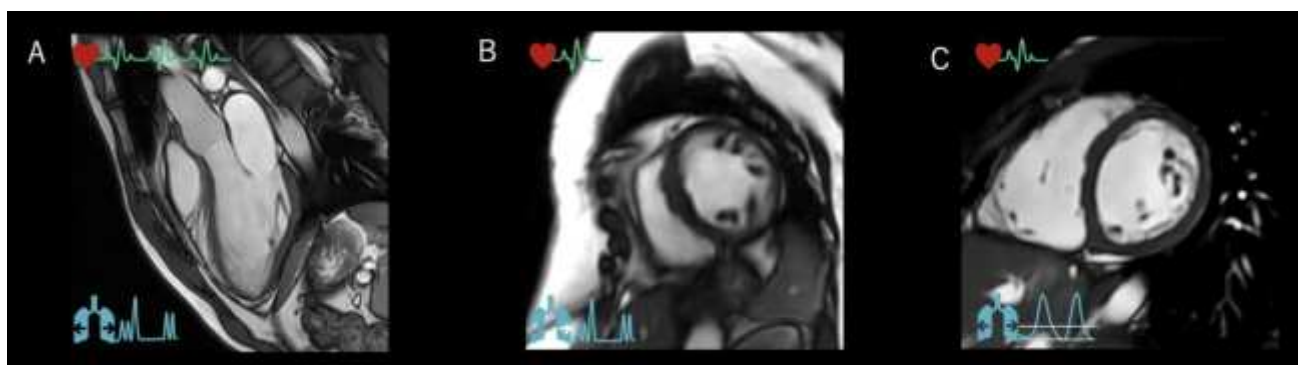


図 10: Sonic DL™ による cine 撮像の高速化の活用例 A: 標準プロトコルの撮像時間削減 (Sonic DL™ 8 倍速 3RR/slice)、B: 不整脈がある場合のプロトコル (Sonic DL™ 12 倍速 1RR/slice)、C: 息止めできない患者のプロトコル (Sonic DL™ 12 倍速を用いた自由呼吸下撮像)

心臓MRI検査は、前述の AIR™ Recon DL と Sonic DL™がともに生きる領域である。虚血性心疾患に対して心臓MRI検査を施行し、心室中隔に遅延造影部位が確認された一例を図 11 として紹介する。心臓 cine において、従来法では息止め不良や不整脈の影響で左室全体に画質の劣化が見られたが、Sonic DL™を用いることで高速化を図り、左室短軸像を取得するために必要な息止め回数も減らすことで、結果として動きの影響を抑えた高画質な cine 画像を得ることが可能であった症例である。さらに 3D AIR™ Recon DL によって遅延造影撮像においても低ノイズで良好なコントラストが得られている (黄矢印)。

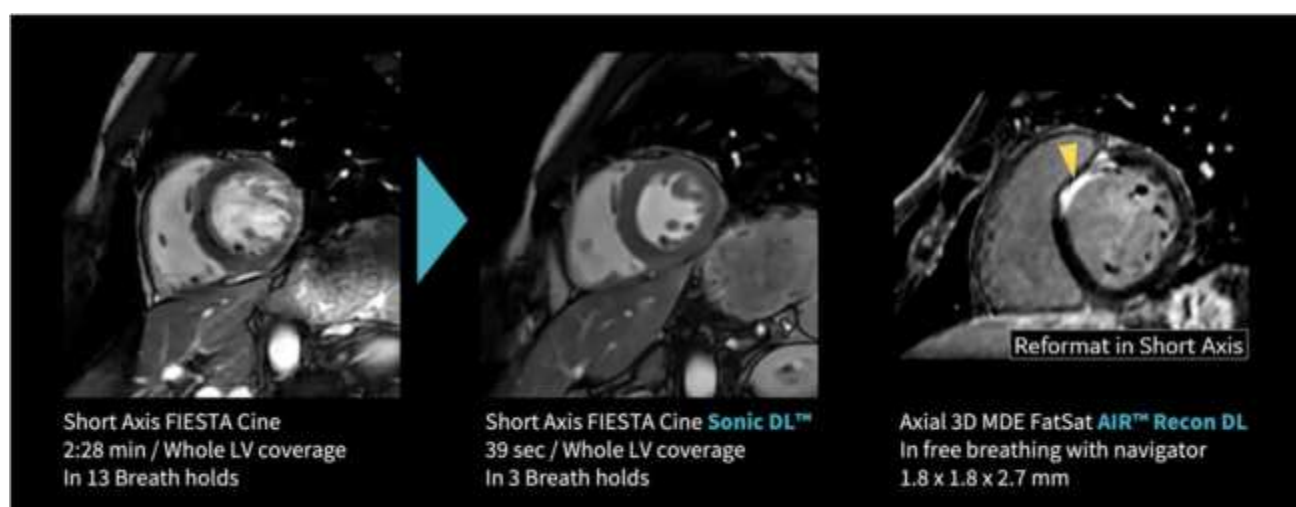


図 11: 虚血性心疾患の症例における Sonic DL™および AIR™ Recon DL の使用例

おわりに

本稿では、GE HealthCare が製品開発を重ねてきた DLR : AIR™ Recon DL と Sonic DL™について、それぞれ画質改善と高速撮像という 2 つの側面から概説した。今後はこれらの DLR 技術の拡張性が広がったり、この 2 つを組み合わせ使用したり、さらには全く新しい DLR 技術の登場など、応用の幅が広がっていくことが期待されている。また、DLR 技術はハードウェアの進歩と組み合わせることでより大きなメリットをもたらすことが可能になるので、傾斜磁場コイルやフェイズドアレイコイルなどの進歩との相互作用も重視される。さらに、昨今では DLR に限らずセグメンテーションや自動位置決めなど様々な AI 技術がますます臨床の現場に普及し、ワークフロー向上やそれに伴う収益改善など、医療への貢献が進んでいくと予想される。

製造販売 GE ヘルスケア・ジャパン株式会社

販売名称：ディスカバリーMR750w 類型：シグナ Architect/シグナ Premier

医療機器認証番号：223ACBZX00061000

販売名称：シグナ Pioneer

医療機器認証番号：227ACBZX00011000

販売名称：シグナ Voyager

医療機器認証番号：228ACBZX00009000

販売名称：48ch Head コイル 3.0T

医療機器認証番号：228ABBZX00152000

販売名称：AIR コイル 3.0T

医療機器認証番号：229ABBZX00123000

販売名称：AIR コイル 1.5T

医療機器認証番号：301ACBZX00001000

引用：

- 1) Lebel RM “Performance characterization of a novel deep learning-based MR image reconstruction pipeline.” *arXiv*: 2008. 06559, 2020.
- 2) Dubljevic N et al., “Effect of MR head coil geometry on deep-learning-based MR image reconstruction.” *Magnetic Resonance in Medicine* 92(4): 1404-1420, 2024.
- 3) Zucker EJ et al., “Free-breathing Accelerated Cardiac MRI Using Deep Learning: Validation in Children and Young Adults” *Radiology* 300(3): 539-548, 2021.
- 4) Orii M et al., “Reliability of post-contrast deep learning-based highly accelerated cardiac cine MRI for the assessment of ventricular function” *Magnetic Resonance Imaging* 117: 110313, 2025.

JB11676JA