キヤノンメディカルシステムズMRIの最新技術

キヤノンメディカルシステムズ株式会社
国内営業本部　MRI営業部　営業技術担当
石井　順也

【キーワード】
Deep Learning Reconstruction(DLR)技術、アーチファクト低減技術

【はじめに】

MR 画像診断において、診断の質を向上させるための画質改善への取り組みは長年にわたり行われており、今日までに分解能やSNRの向上、アーチファクトの低減など多様な技術が検討されてきた。当社は、Deep Learningを用いた画像再構成技術の開発にいち早く取り組み、SNR向上技術「Advanced intelligent Clear-IQ Engine(AiCE)」と、超解像技術「Precise IQ Engine(PIQE)」をMRIに実装した。さらに、それと並行して診断の妨げとなるアーチファクトの発生を抑制する技術の開発にも取り組んでいる。本稿では、これらDeep Learning技術をはじめとする当社のMRI最新技術について紹介する。

【Deep Learning Reconstruction(DLR)技術による高画質化】

●SNR向上技術：Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE)

AiCEは開発設計段階にDeep Learningを用いたSNR向上技術である。低SNRの入力画像と高 SNR の教師画像を用いて学習させた畳み込みニューラルネットワーク(Convolution Neural Network:CNN)を用いることで、高SNRの画像を得ることができる[1)]。低周波成分と高周波成分を分離し、高周波成分に含まれるノイズのみを学習させることで、コントラストに影響を与えずノイズ成分のみを低減することを可能にしている(図1)。従来のSNR向上技術である一般的なスムージングフィルタでは、オリジナル画像との差分において輪郭情報が残っており実質信号の大きな変動が観察される。一方AiCEでは、辺縁の情報はなくノイズ成分のみが観察されており、オリジナルの信号を維持したままノイズを低減できていることが分かる(図2)。

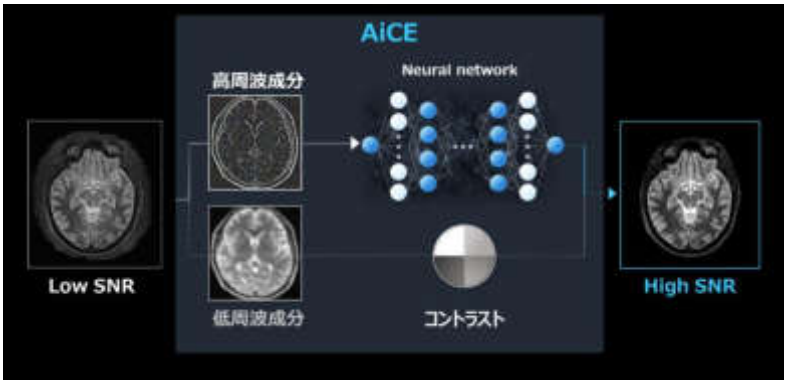

図1　AiCEの概要図

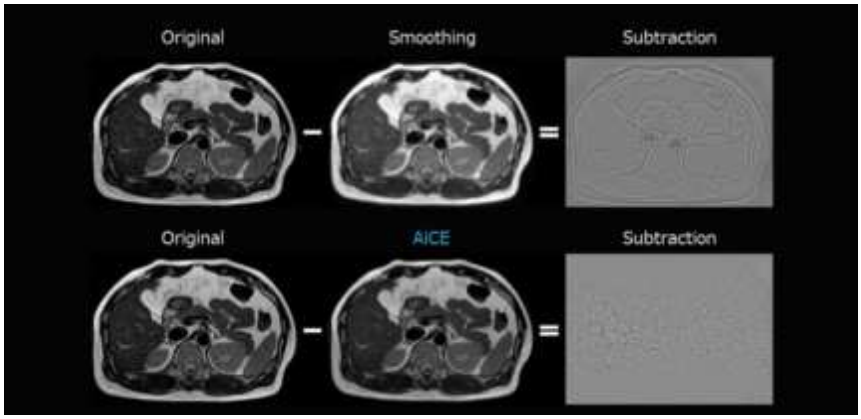

図 2　AiCE とスムージングフィルタ適用後のオリジナル画像との差分画像

さらに、コントラスト情報を有する低周波成分を学習ネットワークから除外することで、画像種依存の影響を低減している。このため、AiCE は様々なコントラストや撮像シーケンスに適用可能であり、全身のあらゆる部位で使用できる汎用性の高さが大きな特長である(図 3)。

AiCE の SNR 向上技術や高い汎用性が評価され、2024 年 12 月現在、国内では 540 台以上(予定含む)の AiCE 搭載装置が導入され、クリニックから大学病院までの幅広い臨床現場において画質向上に大きく貢献している。

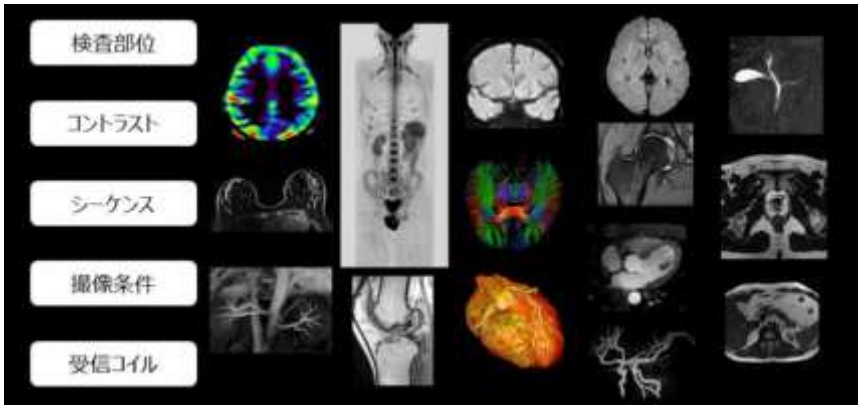

図 3　AiCE の汎用性の高さ

●超解像技術：Precise IQ Engine (PIQE)

PIQE はノイズ低減、超解像の 2 段階で CNN を用い、低 SNR 低空間分解能の画像から高 SNR 高空間分解能の画像を生成する超解像技術である [2)]。はじめに AiCE から継承した CNN によってノイズ低減処理を行った後、Zero-fill interpolation(ZIP)処理を用いて高空間分解能化を行う(図 4)。ZIP 処理は k-space 上の高周波成分にゼロを充填することで見た目の解像度を向上させる手法であるが、ブラーリングやリンギングアーチファクトが発生する点が問題であった。そこで PIQE では、デノイズと ZIP 処理を行った画像を入力画像とし、実収集でフルサンプリングした高空間分解能画像を教師画像として学習させた CNN を用いることで、アーチファクトを低減し、ZIP 処理の課題を解決した(図 5、図 6)。これら 2 つの CNN を用いることで、ZIP 処理特有のアーチファクトを抑えた高 SNR かつ高空間分解能な画像を安定して取得できる。

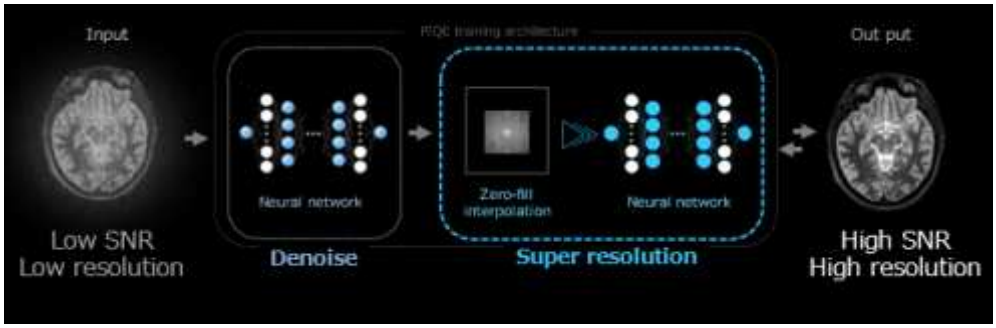

図 4　PIQE の概要図

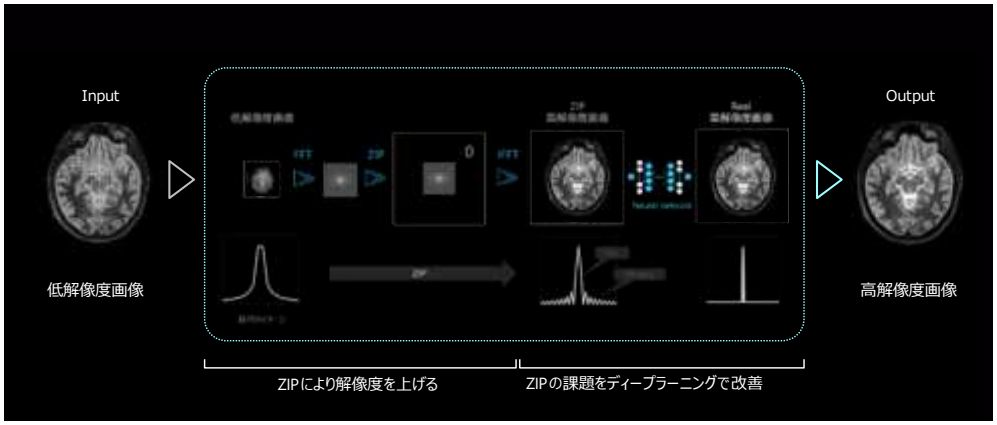

図 5　超解像処理の概要図

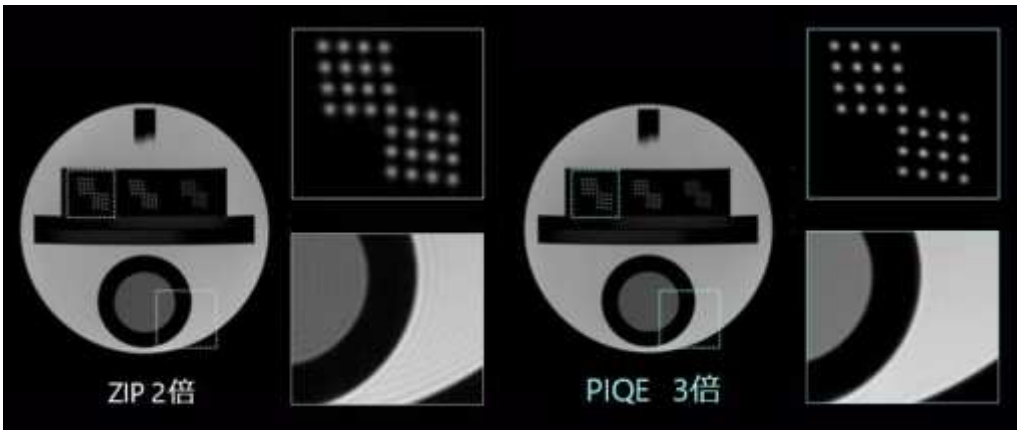

図 6　ZIP 処理と PIQE の超解像の比較

PIQE は再構成によって最大 3 倍まで空間分解能を向上させることが可能であり、高空間分解能画像の撮像を時間の延長なく実現できる。この特長を応用し、短時間撮像した画像の分解能を引き上げることも可能である[3)]。さらに、撮像後の再再構成でデノイズ強度や超解像の倍率を変更できるため、読影医や各診療科医が要望する画像を再撮像なく効率的に取得しやすくなる。

PIQE による高空間分解能化、撮像時間短縮化の活用例を以下で説明する。

1.　高空間分解能化

1.5T での小 FOV 高空間分解能撮像は、SNR の低下を補うために撮像時間を延長する必要があり、臨床での検査には限界があった（図 7 左)。収集マトリクスを下げて撮像した画像に PIQE を用いることで、SNR の低下を伴わず、コントラストを維持したまま高空間分解能化することができる。そのため、1.5T においても PIQE を適用することで、微小構造の明瞭な描出が可能になった(図 7 右)。

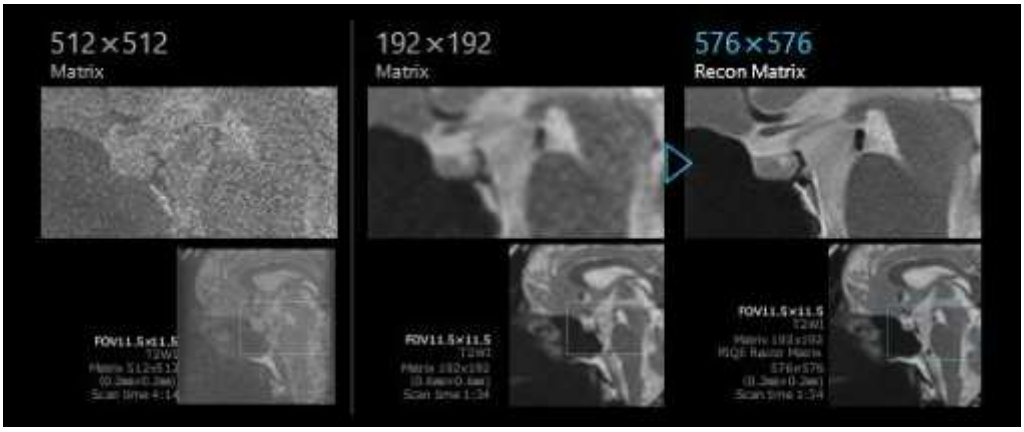

図 7　1.5T での下垂体撮像における高空間分解能化

2.　撮像時間短縮化

MRI 検査の需要は高まる一途であり、検査数の増加に対応するために撮像時間の短縮が求められている。収集マトリクスを減らし短時間で収集した画像に PIQE を適用することで、フルサンプリングと同様の空間分解能を維持したまま撮像時間を短縮することができる。従来は、パラレルイメージング法を用いて撮像時間の短縮を行っていたが、SNR の低下やコントラストの維持を考慮するとリダクションファクターの上げ幅に限界があった。この課題に対して、PIQE を組み合わせることで原理的なトレードオフを最小限に抑えた、さらなる撮像時間の短縮が可能になる。1.5T の肩関節ルーチン撮像において高速化技術と PIQE を併用することによりスライス厚 3mm で各コントラスト 1 分未満での撮像が可能になる(図 8)。PIQE を用いた撮像時間の短縮により、検査数増加や検査間に救急患者の検査受け入れが可能になるなどスループット向上に寄与している。

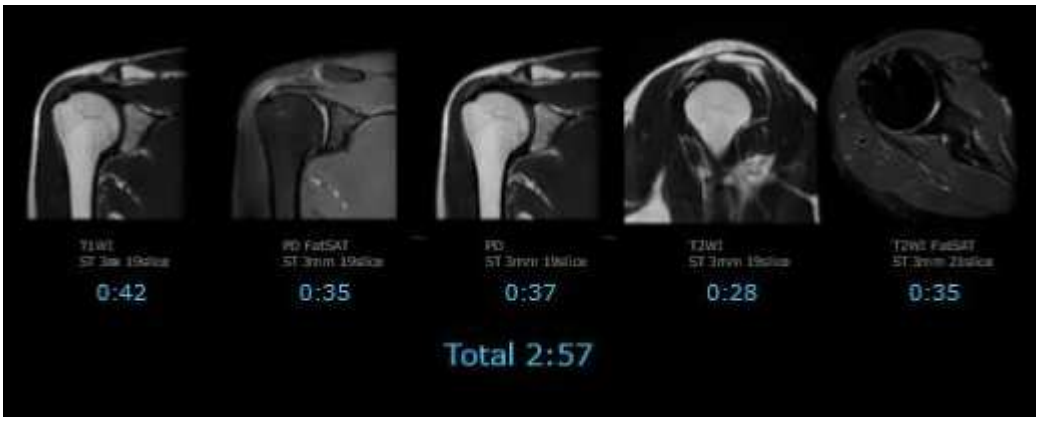

図 8　1.5T での肩関節検査の短時間ルーチン

【アーチファクト低減技術】

診断の妨げとなるアーチファクトの抑制は、MRI 撮像において長年の課題である。上述の AiCE や PIQE は、学習方法の工夫により様々な撮像シーケンス、コントラストに対してノイズ除去および高空間分解能化が可能だが、MRI 特有のアーチファクトを低減するものではない。そのため、さらなる画質向上と検査安定性の向上を目的にアーチファクト低減技術を開発してきた。以下に、当社の開発したアーチファクト低減技術を 2 例紹介する。

●モーションアーチファクト低減技術：Iterative Motion Correction(IMC)

IMC は、撮像中の散発的な動きによって生じるモーションアーチファクトを再構成のみで補正する技術である[4)]。モーションアーチファクト対策として代表的な Radial 収集では、コントラストが通常の Cartesian 収集と異なることや、ストリークアーチファクトが発生することなどの問題があった。IMC では信号を Cartesian 収集しており、動きの大きいデータを除去した後に再構成によって動きを補正しているため、コントラストに影響を与えることなくモーションアーチファクトを低減することができる。IMC には、剛体の動き(並進、回転)のみを補正する Rigid、剛体の動きに加えて非剛体的な動き(嚥下など)に由来する動きを補正する Non-Rigid、また体動の影響のない画像を教師画像として学習させた Deep Learning を使用した手法がある。本稿では、基本的な面内の動きを補正する Rigid について詳しく説明する。

Rigid では大きく分けて、2 つのプロセスによりモーションアーチファクトを補正する。はじめに shot ごとの動きの大きさを判定し、動きの影響が大きいと判断した shot のデータを除去する。続いて Under sampling によるエンコードゴーストや小さな動きによるゴーストを補正する。前者に対しては CG-SENSE 法を使用し、元画像を繰り返し変化させて実収集データと同じになる元画像を推定することで処理する。後者に対しては剛体補正によってゴーストの除去を行う。誤差最小法を用いた Iterative 再構成により shot 毎の動き係数（平行・回転）を推定し、Shot 毎の動きを加味することで処理する。このように元画像の推定と体動補正係数の計算による平行移動・回転の推定を交互に行うことで、最終的に並進、回転によるモーションアーチファクトを低減した画像を再構成することができる(図 9)。IMC を用いることで、安定した画質が得られるだけでなく、再撮像を減らすことで検査時間全体の短縮にも寄与できる。

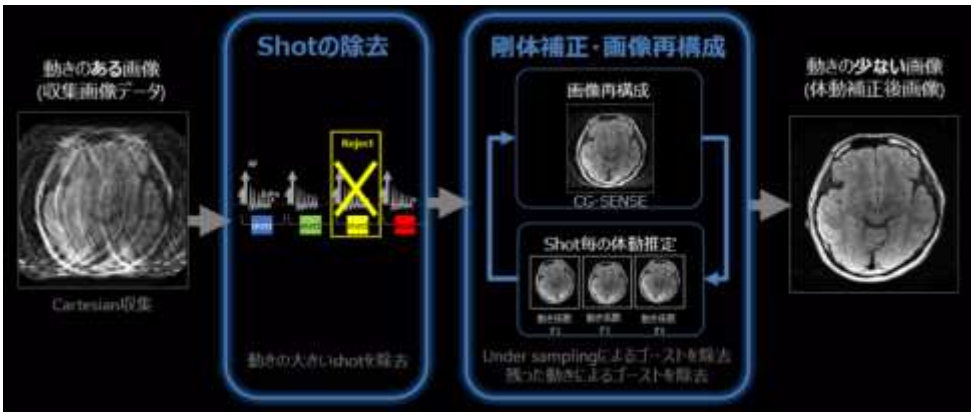

図 9　頭部 FLAIR における IMC のモーションアーチファクト低減効果

●歪み低減技術：RDC DWI(Reverse encoding Distortion Correction DWI)

RDC DWI は位相エンコードの極性を反転させた順方向と逆方向の両方向で収集したデータから歪み量を表すシフトマップを作成し、それぞれを補正・加算することで位相方向に生じる画像の歪みを低減する技術である。Single shot EPI による DWI の画像の歪みは、局所磁場の不均一や MPG パルスの印加による渦電流の影響によって位相エンコード方向に生じる。RDC DWI の特長は、b0 画像だけでなく MPG を印加した画像からも補正を行う点である。磁場不均一性の影響に加え、渦電流の影響による歪みの補正もできるため、より精度の高い歪み低減が可能である[5)](図 10)。RDC DWI は、従来困難であった組織と空気の境界など、磁場の不均一な領域に存在する病変の評価において、非常に有用な撮像法である。

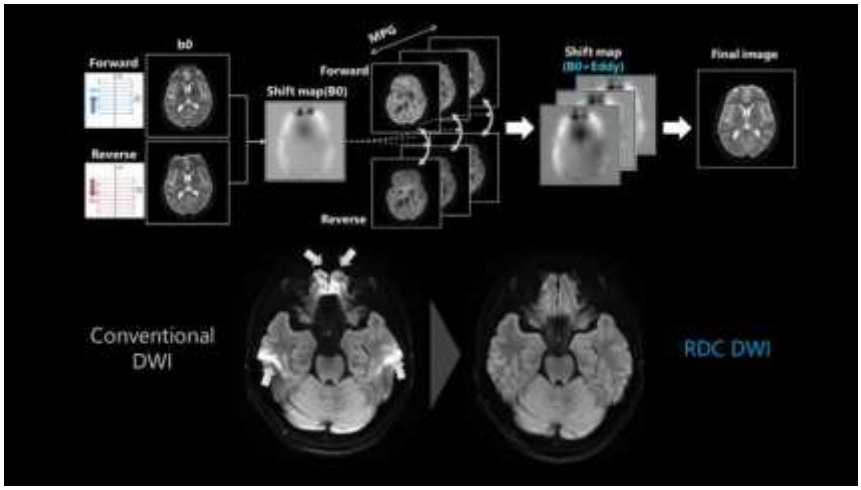

図 10　RDC DWI の画像歪み低減効果

【おわりに】

DLR 技術によって、原理的にトレードオフの関係があり困難とされてきた高 SNR、撮像時間の短縮、高空間分解能の同時実現が可能になりつつある。さらにアーチファクト低減技術によって、患者の状態や撮像部位に依存しない安定した画像を得ることが可能になってきた。今後、これらの技術が広く使用されることで、医療従事者の負担軽減や診断能向上、さらには診断の質向上に貢献できることを期待する。キヤノンメディカルシステムズは「Made for Life」の理念の下、医療のさらなる発展に貢献していく。

※本記事中の AI 技術については、開発設計段階に AI を使用しており、装置自体に自己学習機能を有しておりません。

●参考文献

[1] Kidoh M, et al. Deep Learning Based Noise Reduction for Brain MR Imaging: Tests on Phantoms and Healthy Volunteers. Magnetic Resonance in Medical Sciences 2019;19(3):195-206.

[2] Matsuo K, et al. Feasibility study of super-resolution deep learning-based reconstruction using k-space data in brain diffusion-weighted images. Neuroradiology 2023;65(11):1619-1629.

[3] Akai H, et al. Faster acquisition of magnetic resonance imaging sequences of the knee via deep learning reconstruction: a volunteer study. National Library of Medicine 2024;79(6):453-459.

[4] Yasaka K, et al. Iterative Motion Correction Technique with Deep Learning Reconstruction for Brain MRI: A Volunteer and Patient Study. Journal of Imaging Informantics in Medicicne 2024;37:3070-3076.

[5] Furuta M, et al. Diffusion Weighted Imaging with Reverse Encoding Distortion Correction: Improvement of Image Quality and Distortion for Accurate ADC Evaluation in In Vitro and In Vivo Studies. European Journal of Radiology. 2024;171:111289.