



画像再構成：臨床医のための解説 第1回 MRIにおける折り返しアーチファクトの発生機序と対策

篠原 広行¹⁾、小島 慎也²⁾、橋本 雄幸³⁾、上野 恵子²⁾

¹⁾ 首都大学東京

²⁾ 東京女子医科大学東医療センター 放射線科

³⁾ 横浜創英大学こども教育学部

はじめに

MRIでは折り返しアーチファクトやモーションアーチファクト、磁化率アーチファクト、ケミカルシフトアーチファクトなど様々なアーチファクトにより画像が劣化する。そのため、良好なMR画像を得るには、これらのアーチファクトを理解し適切に抑制することが肝要である。本稿では折り返しアーチファクトの発生機序¹⁻⁶⁾を解説し、その対策をいくつか紹介する。

1. MRIにおける折り返しアーチファクト

MRIにおける折り返しアーチファクトはFOV (Field of view; 撮像視野)の外側にある対象物が、FOVの内側に映り込む現象である。その際、折り返しアーチファクトは位相エンコード方向に出現する。図1(a)は実際の腹部撮像時のFOV設定画面である。図中の黄色の四角が設定されたFOV、

矢印が位相エンコード方向を表す。この場合、FOVの外側に両腕が存在する為、図1(b)のように撮像された画像ではFOVの内側に両腕(矢印)が映り込んでいる。この現象がMRIにおける折り返しアーチファクトである。

2. 折り返しアーチファクトの発生機序

図2(a)に折り返しアーチファクトの発生機序を示す。MRIでは位相エンコードとしてFOVの端から端までに 0° から 360° の位相を割り振る。その際、FOVの外側の対象物は 0° 以下もしくは 360° 以上の位相となる。しかし、画像再構成する際、 0° から 360° までの位相のみしか認識できない。図2(a)では右腕(赤矢印)は -45° 、左腕(緑矢印)は 405° 程度の位相に相当するが、この場合、右腕は約 315° ($-45^{\circ} + 360^{\circ}$)、左腕は約 45° ($405^{\circ} - 360^{\circ}$)の位相と誤認される。したがって、撮像された画像で

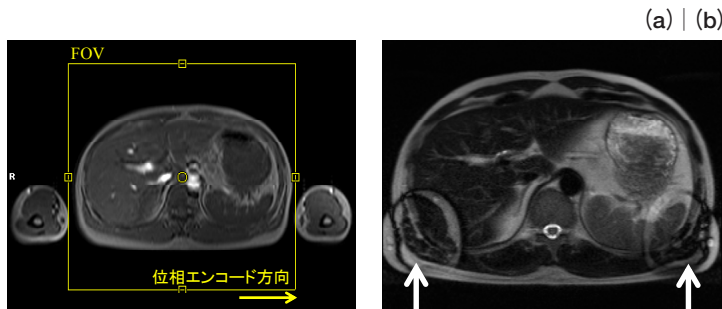


図1. MRIにおける折り返しアーチファクト
(a) FOVの設定と位相エンコード方向、(b) 撮像画像

は図2 (b) に示すように、左右両腕は誤認された位置に描出され、画像の右側に左腕が、左側に右腕が折り返しアーチファクトとして映し出される。この現象は、四肢などの撮像の際は左右について特に気を付ける必要がある。

3. 折り返しアーチファクトの対策

MRIにおいて、折り返しアーチファクトを適切に抑制することは大変重要である。その対策法は幾つかあるが、ここでは1) 位相エンコード方向を入れ換える方法、2) FOVを大きくする方法、3) サチュレーションパルスを利用する方法、4) フェイズオーバーサンプリングを利用する方法についてその利点や欠点などを紹介する。

1) 位相エンコード方向を入れ換える方法

位相エンコード方向を入れ換える方法は、最も簡単に折り返しアーチファクトを抑制することができる。図3(a)のように位相エンコード方向を左右方向

から前後方向へ変更するだけで、図3(b)のように両腕からの折り返しアーチファクトを抑制できる。この方法は撮像時間の延長を伴わず、画像の描出能の指標である空間分解能も低下しないなどの利点がある。欠点としては、モーションアーチファクトやケミカルシフトアーチファクトの出現方向も変化するので、注意が必要である。また、位相エンコード方向を入れ換えてもその方向のFOVの外側に対象物がある場合は効果がない。

2) FOVを大きくする方法

FOVを大きくする方法も簡単に折り返しアーチファクトを抑制することができる。図4は図1よりもFOVを大きく設定した場合を示す。この場合、図4(b)のように左右の両腕上にそれぞれ折り返しアーチファクトが見られ(矢印)、完全に抑制されていないが、体幹部上では抑制されている。FOVを大きくする方法は撮像時間の延長も伴わず、SNR (Signal-to-noise ratio ; 信号雑

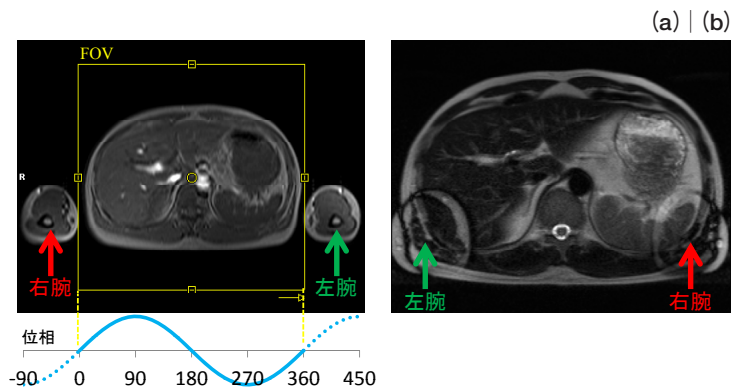


図2. 折り返しアーチファクトの発生機序
(a) FOVと位相エンコード、(b) 撮像画像

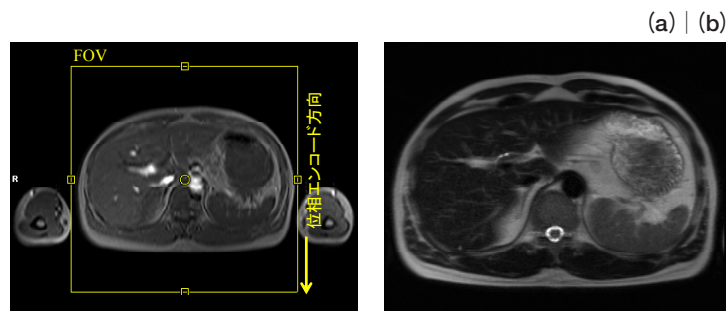


図3. 位相エンコード方向を入れ換える方法
(a) FOVの位相エンコード方向、(b) 撮像画像

音比)も向上する利点もある。しかし、FOVを大きくすると空間分解能の低下を招く。したがって、折り返しアーチファクトの対策としてFOVを大きくする場合、その増加量は必要最小限とし、空間分解能を担保したい場合は撮像マトリクス数を増やすなどの対応が必要である。

3) サチュレーションパルスを利用する方法⁷⁾

サチュレーションパルス(前飽和パルス)とはMR信号を飽和させるパルスの総称である。図5(a)において黄色い網掛け部分がサチュレーションパルス

を加える領域であり、この領域からのMR信号は抑制される。この場合、両腕からのMR信号が折り返しアーチファクトとなるため、両腕部分にサチュレーションパルスを加え、左右両腕の信号を抑制する。図5(b)のように図1(b)よりも折り返しアーチファクトが抑制されているが、折り返しアーチファクトが多少確認され(矢印)その抑制効果は完全ではない。この方法は簡便であり空間分解能が低下しないなどの利点はあるが、折り返しアーチファクトの抑制効果は低い。また、サチュレーションパルスを加える分だけ撮像時間が若干延長する。

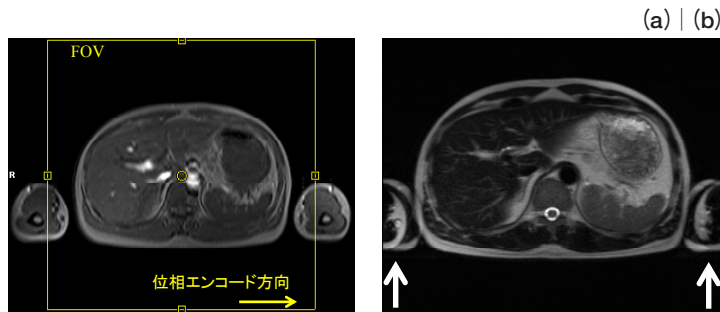


図4. 大きなFOVによる方法
(a) 大きなFOVの設定、(b) 撮像画像

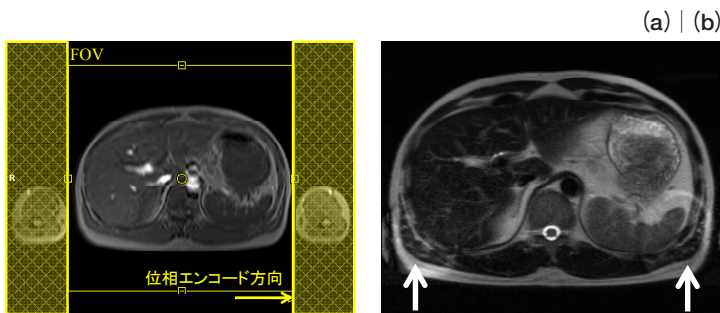


図5. サチュレーションパルス(前飽和パルス)を利用した方法
(a) サチュレーションパルスの設定、(b) 撮像画像

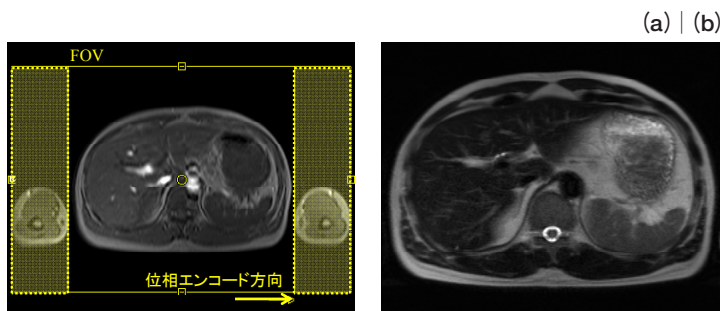


図6. フェイズオーバーサンプリング(位相過剰サンプリング)を利用した方法
(a) フェイズオーバーサンプリングの設定、(b) 撮像画像

4) フェイズオーバーサンプリングを利用する方法⁷⁾

フェイズオーバーサンプリング (Phase over sampling: POS) については後に解説する。図 6(a) はフェイズオーバーサンプリング (位相過剰サンプリング) の設定画面を示し、黄色い部分がフェイズオーバーサンプリングに相当する領域である。この場合、図 6 (b) のように折り返しアーチファクトを抑制することができる。次に、フェイズオーバーサンプリングの概要を図 7 に示す。仮に位相エンコード数を 8 とした場合 (実際の MRI では 256 などを使用する)、フェイズオーバーサンプリングが 0% とするとサンプリングする位相エンコード方向のデータ数は 8 個のみである。フェイズオーバーサンプリングを 50% とするとサンプリングするデータ数が 4 個 (8 の 50%) 増えて 12 個となり、100% とすると 16 個とな

る。すなわち、フェイズオーバーサンプリングとはサンプリングする位相エンコード方向のデータを増やすことを意味する。この際、重要なことはただ単にデータ数を増やすのではなく、サンプリングする間隔を短くし密にサンプリングすることである。

図 8 を用いてサンプリング間隔と折り返しアーチファクトの関係について解説する。まず、シンク関数を離散フーリエ変換すると、複数の矩形関数となる。図 8(a) のようにサンプリング間隔を密とした場合 (図中の赤い点がサンプリングポイントを表す)、離散フーリエ変換後の矩形関数の出現間隔は広い。この際、サンプリング間隔を長くすると、徐々に矩形関数の出現間隔が狭くなる。図 8 (b) のようにサンプリング間隔を疎とすると、離散フーリエ変換後の矩形関数が重なり合ってしまう、この重なりが折り返しアーチ

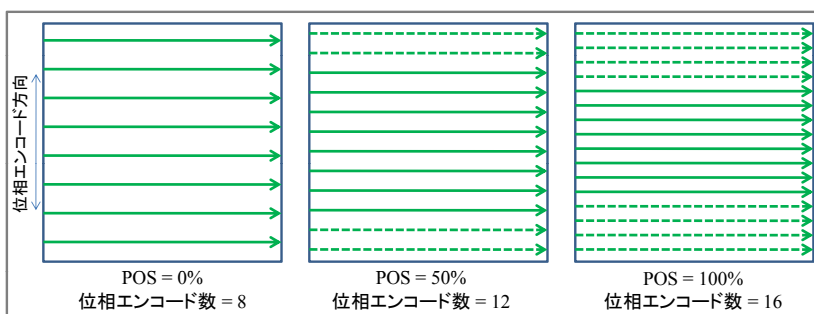


図 7. 位相オーバーサンプリングの概略

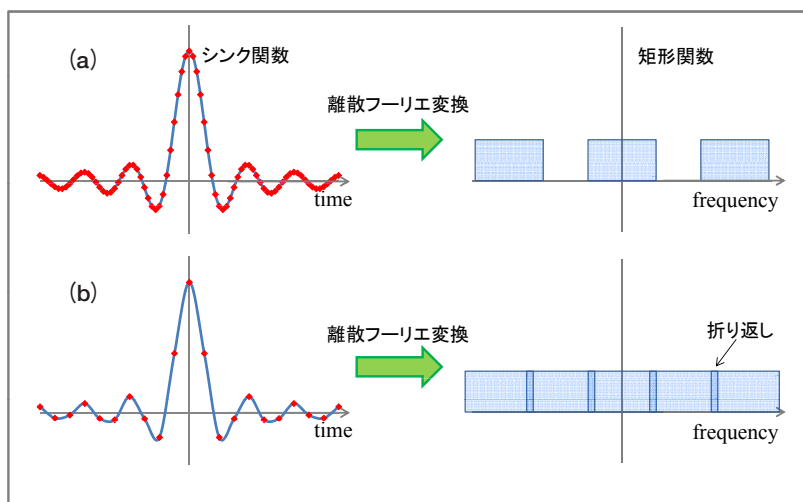


図 8. サンプリング間隔と折り返しアーチファクト
(a) サンプリング間隔が短い (密) の場合、(b) サンプリング間隔が長い (疎) の場合

ファクトとなる。MRIではサンプリングしたデータを離散フーリエ変換し画像再構成を行う。したがって、サンプリングしたデータが疎である場合、折り返しアーチファクトの原因となる。

図9は自作ファントムの画像である。図9(a)のようにFOVと位相エンコード方向を設定すると、撮像画像は図9(b)のように折り返しアーチファクトが見られる。図9(c)は設定したFOVの外側を含む撮像画像である。この画像から、位相エンコード方向に撮像対象物が周期的に出現し、重なっている部分が折り返しアーチファクトとなっていることがわかる。図10にフェイズオーバーサンプリングを増やした場合の、FOVの外側を含む撮像画像を示す。フェイズオーバーサンプリングの増加に伴い、撮像対象物の出現間隔が広くなり、50%以上では対象物の重なり合いが無くなっている。このように、フェイズオーバーサンプリングはサンプリングするデータ量を増やし密にサンプリングすることで、撮像対象物の出現間隔を広くし折り返しアーチファクトを抑制す

る。この方法の利点の一つとして空間分解能が低下しないことが挙げられる。図7においてフェイズオーバーサンプリングが増えるとデータ数が増え、サンプリング間隔が密となり、空間分解能が向上するかのようにも捉えられるが、空間分解能はそのままである。図11にフェイズオーバーサンプリングと空間分解能の関係について示す。仮にサンプリング数(赤い点がサンプリングポイント)を16とすると、空間分解能を2倍とした場合とフェイズオーバーサンプリングを100%とした場合では、両方もサンプリング数は32となる。この際、空間分解能を倍にすると、より高周波数領域のデータをサンプリングする。高周波数領域のデータは再構成画像のより細部の描出に寄与し、その結果、空間分解能が向上する。一方、フェイズオーバーサンプリングを100%とすると、サンプリングするデータ数は増えるが高周波数領域のデータをサンプリングしないため、空間分解能も変化しない。この方法のその他の利点として、サンプリングするデータ数が増えるためSNRが

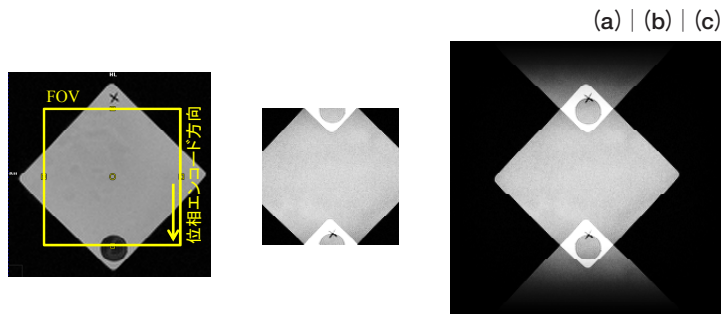


図9. 折り返しアーチファクトの出現の様子
 (a) FOVの設定、(b) 撮像画像 画素数：128×128
 (c) FOVの外側を含む画像 画素数：256×256

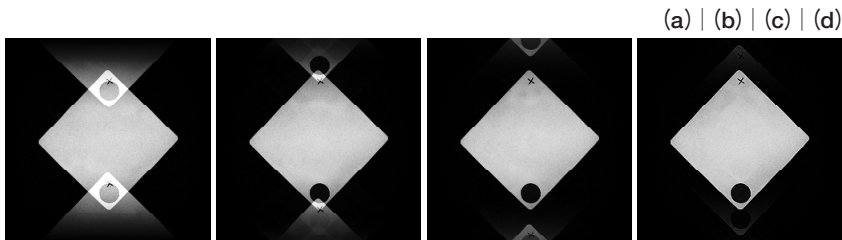


図10. フェイズオーバーサンプリングと折り返しアーチファクト
 (a) POS = 0% 画素数：256×256、(b) POS = 25% 画素数：256×256
 (c) POS = 50% 画素数：256×256、(d) POS = 75% 画素数：256×256

向上する、折り返しアーチファクトの抑制効果が高いなどが挙げられる。欠点はサンプリングデータが増える分、撮像時間が延長する。その為、フェイズオーバーサンプリングを使用する際は最適なフェイズオーバーサンプリングを使用することが重要である。

おわりに

本稿では MRI における折り返しアーチファクトの発生機序を解説し、その対策をいくつか紹介した。これらの対処法は一長一短があり、一つの方法にて折り返しアーチファクトを完全に抑制することは困難である。したがって、検査毎にこれらの方法を組み合わせて、より効率的かつ効果的に折り返しアーチファクトを抑制することが肝要である。

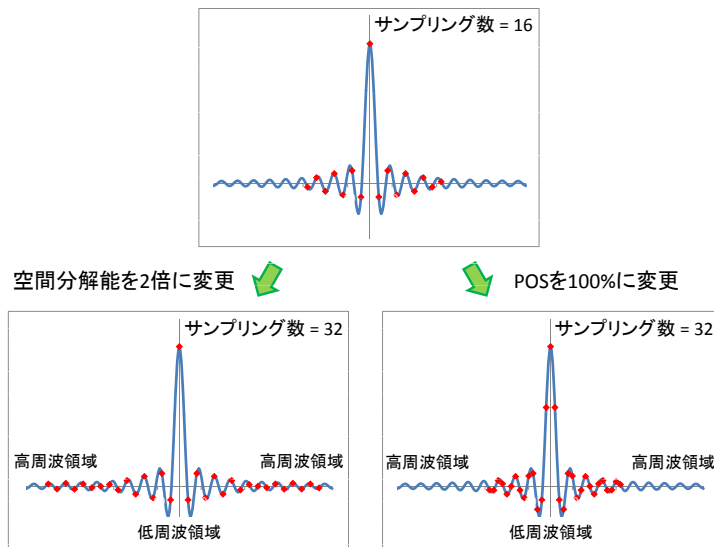


図 11. フェイズオーバーサンプリングと空間分解能

参考文献

1. レイ, H. ハシエミ (荒木 力監訳) : MRI の基本 パワーテキスト第 2 版. メディカルサイエンスインターナショナル. 2004: 193-197.
2. 荒木 力 : MRI「再」入門 臨床からみた基本原理. 南江堂, 1999: 270-273.
3. 日本磁気共鳴医学会教育委員会 編 : MRI レクチャー 基礎から学ぶ MRI. 2001: 124-129.
4. 笠井俊文, 土井 司 編 : MR 撮像技術学改訂 2 版. オーム社, 2008: 160-164.
5. 篠原広行, 橋本雄幸 : MRI 画像再構成の基礎. 医療科学社, 2007: 113-116.
6. 森 一生, 山形 仁, 町田好男 編 : CT と MRI - その原理と装置技術 -. コロナ社, 2010: 193-195.
7. Kojima S, Morita S, Ueno E, Hirata M, Shinohara H, Komori A : Aliasing Artifacts With the BLADE Technique: Causes and Effective Suppression. J Magn Reson Imag 33:432-440, 2011