

## MRI における呼吸同期撮像法に関する基礎的検討

荒尾 信一<sup>1</sup>, 北山 彰<sup>1</sup>, 原内 一<sup>1</sup>,  
天野 貴司<sup>1</sup>, 林 明子<sup>1</sup>, 吉田 耕治<sup>2</sup>,  
角場 幸紀<sup>2</sup>, 柳元 真一<sup>1,2</sup>

### Fundamental Study of Magnetic Resonance Imaging Using Respiratory Triggering

Shinichi ARAO<sup>1</sup>, Akira KITAYAMA<sup>1</sup>, Hajime HARAUCHI<sup>1</sup>,  
Takashi AMANO<sup>1</sup>, Akiko HAYASHI<sup>1</sup>, Koji YOSHIDA<sup>2</sup>,  
Kouki KAKUBA<sup>2</sup> and Shinichi YANAGIMOTO<sup>1,2</sup>

キーワード：モーションアーチファクト，呼吸同期撮像法，トリガポイント，NMSE

### 概 要

上腹部 MRI の検査では，呼吸運動によってモーションアーチファクトが発生し，読影診断に影響を与えてしまうおそれがある。本研究ではアーチファクトを低減する方法のうち呼吸同期撮像法の特徴について基礎的な実験を行った。呼吸同期撮像法では呼吸運動をセンサでモニタリングし，位置変動の少ない呼気相でのみ信号収集を行う撮像法である。模擬呼吸運動させたファントムを対象として信号収集のタイミングと信号収集期間を決定するパラメータであるトリガポイントを変化させて撮像を行った。アーチファクト低減効果を視覚的および画素データを使用した NMSE (Normalized Mean Square Error) を算出することで評価を実施した。結果としてファントムの動きが大きい位相に信号収集期間設定した場合ほど効果が見られず，呼吸運動波形にあったパラメータ設定を行うことが重要であることが確認できた。

### 1. 緒 言

MRI (magnetic resonance imaging) 検査では撮像時間が長く，上腹部の検査では，呼吸による動きによってモーションアーチファクト (motion artifact: 運動アーチファクト) が発生し，読影診断に影響を与えてしまうおそれがある。呼吸のような周期的な動きによるアーチファクトはゴーストアーチファクトとも呼ばれ，MRI 画面上の位相エンコード方向に偽陰影 (影) が一定の間隔で周期的に出現する。このアーチファクトを低減する方法として，息止めによる呼吸停止撮像法，呼吸同期撮像法や横隔膜同期撮像法が施行されることが多い。特に自発的な息止めが実施できない場合には，呼吸同期法や横隔膜同期撮像法が多用されている。これらの同期撮像法では呼吸運動を正確にモニタ

リングし，位置変動の少ない呼気相でのみ信号収集を行うことがアーチファクトの少ない画像を取得するために重要である。<sup>1),2),3),4)</sup>

本研究の目的は呼吸同期撮像法について，信号収集パラメータの 1 つであるトリガポイント (trigger point) を変化させた場合のアーチファクト低減効果について，一定周期で模擬呼吸運動をさせたファントムを撮像して確認することである。また，呼吸運動波形の形状とトリガポイントの設定について基本的な検討を行ったので報告する。

### 2. 呼吸運動波形モニタリングと呼吸同期撮像法について

呼吸運動波形の検出は腹部に巻き付けたセンサによって行う。今回使用した装置のセンサはベローズチューブタイプのものを使用している。(図 1) ベローズチューブとは蛇腹状の中空管である。腹囲の変化で伸縮することによる管内空気圧の変化を測定して腹部の動きを感知する仕組みとなっている。図 2 に計測される一般的な呼吸運動波形の例を示す。波形は 50ms ごとに

(平成 20 年 10 月 15 日受理)

<sup>1</sup>川崎医療短期大学 放射線技術科，<sup>2</sup>川崎医科大学附属病院 中央放射線部

<sup>1</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

<sup>2</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki Medical School Hospital

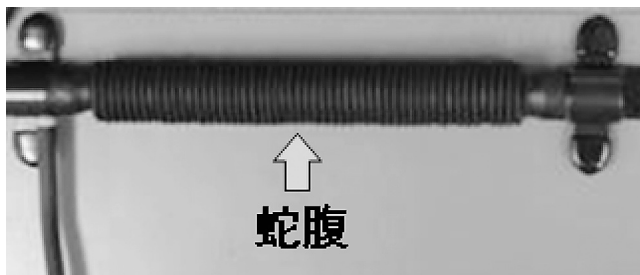


図1 呼吸運動センサ（ペローズチューブタイプ）

サンプリングされたデータで描出され、吸気でピークを示す波形となる。得られた波形を元に MR 信号収集の設定を行う。信号収集は基本的にピーク間の波形の平坦な部分（動きの少ない呼気の部分）を利用してモーションアーチファクトを低減する。

信号収集パラメータ設定の方法を図3に示す。呼吸波形のピークから次のピークまでの時間を100%とした場合に初めのピークから何%のタイミングで収集を開始するかを決定するパラメータがトリガポイントである。また、トリガウインドウ (trigger window) は次のトリガポイントを基準として信号収集の終了の時間を決めるパラメータである。つまり、トリガポイントからトリガウインドウまでが信号収集時間となる。

2つのパラメータの設定によって呼吸運動中の信号収集のタイミングと収集時間の長さが決定されるが、データ収集期間が平坦部分と重なっているかどうか、変化量の少ない位相に重なっているかどうかアーチファクト低減に大きく影響を与える。

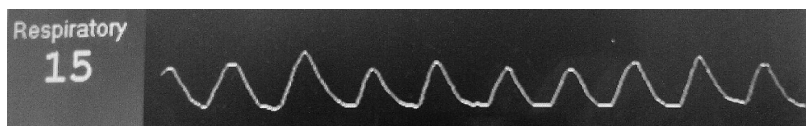


図2 一般的な呼吸運動波形の例

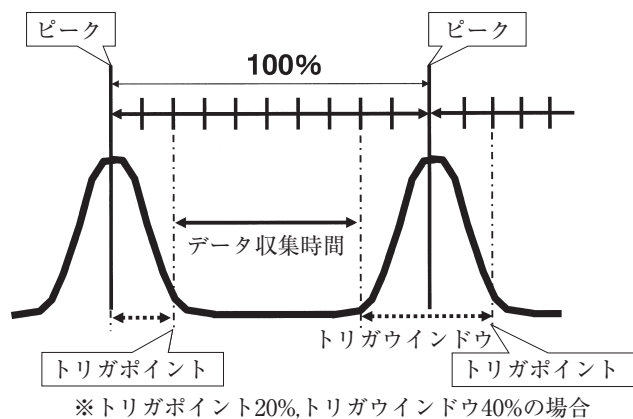


図3 信号収集パラメータ設定の方法

撮像は高速 SE (fast spin echo) 法で実施され、T2 強調画像を収集することが多い。高速 SE 法は1回の励起 (90°パルス印加) の後、180°パルスを繰り返し印加して複数のエコー信号を収集するシーケンスである。励起パルスから次の励起パルスまでの時間を TR (繰り返し時間) と呼ぶ。呼吸同期撮像では呼吸波形のピーク間の時間が TR に相当するが、トリガポイントおよびトリガウインドウで収集時間が限定されるため、TR の全ての時間を収集に使用することはできない。また、通常の腹部 MRI 検査では、複数スライスデータを TR (繰り返し時間) 内で並列収集するマルチスライスで撮像が行われるため、収集時間が短いと最大撮像枚数の制限を受けてしまう。(図4)

### 3. 研究方法 (材料・方法)

MRI 装置は SIGNA Horizon LX 1.5T Echospeed (GE ヘルスケア社製) を使用した。撮像対象は頭部 QA ファントム (楸横河メディカル社製) で内容物質は塩化ニッケル (NiCl<sub>2</sub>) 水溶液を封入した。ファントムを模擬呼吸運動させるために図5、6に示す台座を作成した。ファントムの上下動 (模擬呼吸運動) は手押しポンプからの空気圧によって台座下のバルーンを膨張させてファントムを持ち上げ、その後、ファントム荷重および撮像用の腹部ラップラウンド形コイルの圧迫でバルーンが萎んで台座を元の高さに戻すという運動を一定周期で繰り返した。今回の実験の呼吸運動

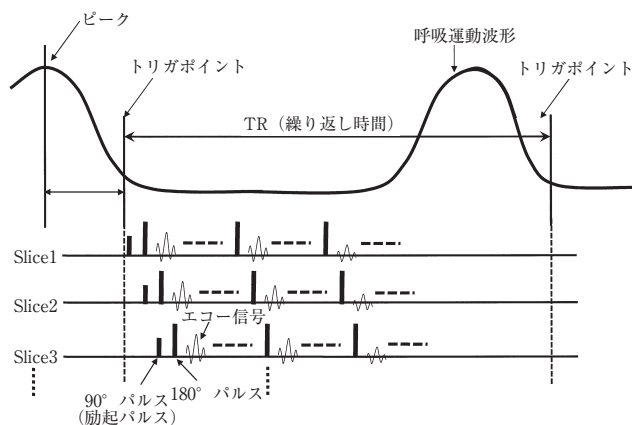


図4 FSE 法のマルチスライス撮像

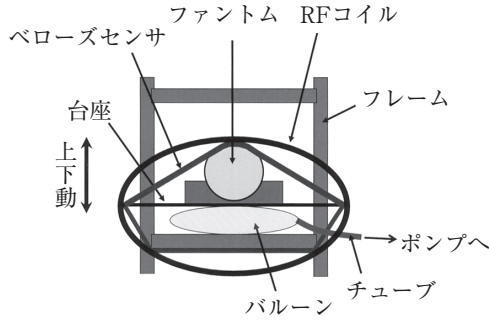


図5 ファントムの模擬呼吸運動用台座の構成

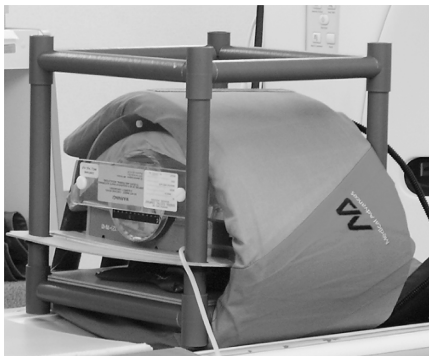


図6 実験配置したファントム

数の設定は11~12回/分(約5秒に1回の一定周期呼吸を想定)とした。撮像はFSE法によるT2強調画像でTR5000msec, 実効TE89.5msec, ETL16, スライス厚6mm, マトリックス数256×192, 画像加算回数は1回で実施した。撮像時間は65secである。

図7(a)~(d)に呼吸同期パラメータ(トリガポイントおよびトリガウインドウ)の設定について示す。トリガウインドウは40%で固定とし、トリガポイントを10, 20, 30, 40%と変化させて撮像した。この設定では、トータルの信号収集時間(撮像時間)は一定でデータ収集(撮像)の開始を10%ずつ遅らせた場合を想定していることになる。したがって、データ収集の開始が遅れるほど動きの大きい吸気部分が撮像時間に含まれ

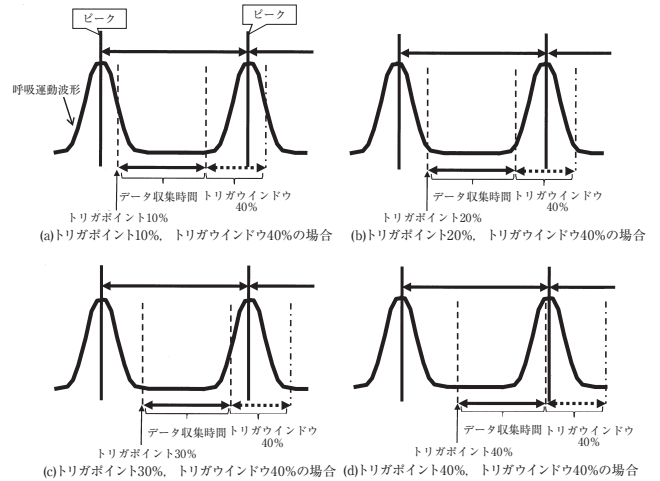


図7 呼吸同期パラメータ(トリガポイントおよびトリガウインドウ)の設定

ることが予測できる。

体動アーチファクトの評価は、視覚評価およびNMSE (Normalized Mean Square Error) を算出することで行った。NMSEはファントムを静止させた状態と模擬呼吸運動させた状態のそれぞれの画像上の同じ位置に30×50ピクセルの関心領域(ROI)を設定し、以下に示す計算式で求めた。

$$NMSE = \frac{\sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y \{g(x, y) - f(x, y)\}^2}{\sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y f(x, y)^2}$$

ここで、 $f(x, y)$  は静止画像の画素値、 $g(x, y)$  は模擬呼吸運動画像の画素値とする。NMSEの値が大きくなるほど静止画像との差異が大きくなり、モーションアーチファクトを低減できていないものとし、トリガポイントの変化によるアーチファクト抑制効果の傾向を確認した。図8に撮像したファントムの断面画像とROIの設定位置を示す。

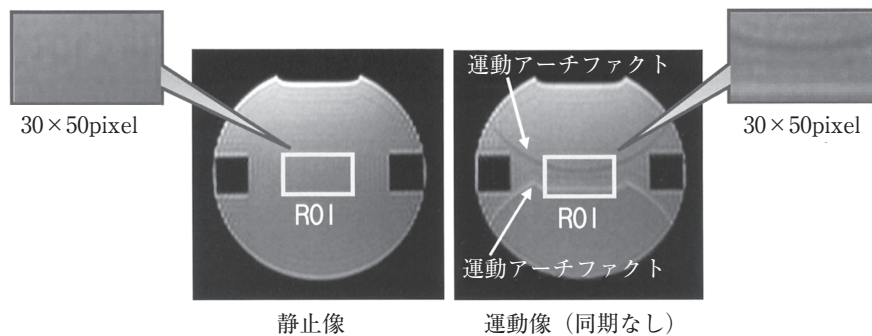


図8 撮像したファントムの断面画像とROIの設定位置

#### 4. 結 果

図9に模擬呼吸運動で計測された呼吸運動波形を示す。実際の理想的な呼吸波形と比べて、立ち上がりが速く、立ち下がりがやや遅いものとなった。

図10に各トリガポイントを設定したときのファントム画像を示す。今回の模擬呼吸運動の波形では平坦部分がほとんどなく、結果的に完全にアーチファクトを除去することはできなかったが、視覚的な評価では、どのトリガポイントの設定でも呼吸同期なしに比べ、モーションアーチファクトの低減が確認できた。トリガポイントによる抑制効果の違いについては、同期条件設定時の予想どおり、トリガポイントが大きくなる（後方に設定する）とモーションアーチファクトがわずかに強くなることが確認できた。

図11に呼吸同期なしの場合と各トリガポイントの画像から求めた NMSE のグラフを示す。NMSE による評価においても呼吸同期なしに比べ、呼吸同期ありでは小さな値となりモーションアーチファクトの抑制効果が確認できた。トリガポイントの設定についてもトリガポイントが大きい（後方に設定する）ほど NMSE

は大きな値となる傾向が見られた。このことより、今回の呼吸運動波形については、信号収集時期を前方へ移動させた方がアーチファクトの低減ができることを示唆しているといえる。

#### 5. 考 察

本実験方法によって、基本的な呼吸同期撮像法の効果を確認することができた。また、視覚評価だけでなく NMSE を算出することでパラメータ設定の違いによる影響を評価できる可能性があると考えられた。図12に今回の実験で使用した台座の上下運動による模擬呼吸運動の呼吸波形と設定した呼吸同期パラメータ（トリガポイントおよびトリガウインドウ）の関係を示す。トリガポイントが大きい（後方に設定する）ほど NMSE は大きい値となる傾向が見られた理由として、データ収集期間がピーク間の後方に設定されるため、波形の傾きが急な立ち上がり部分が、信号収集期間に含まれる確率が高くなったからだと推測できる。このように動きが速い部分が収集時間に含まれるほど、各呼吸間での信号収集位相にずれが生じやすくなり、モーションアーチファクトの影響が大きくなった

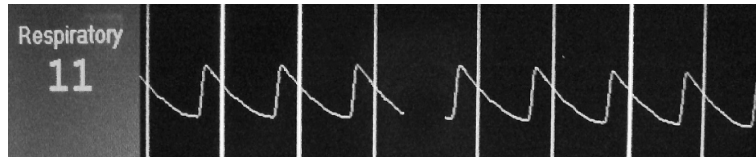


図9 模擬呼吸運動で計測された呼吸運動波形



静止                      トリガポイント10%                      トリガポイント20%



トリガポイント30%                      トリガポイント40%                      同期なし

図10 各トリガポイントを設定したときのファントム画像

ものと考えられた。本実験手法は呼吸間隔が一定のモデルについて、パラメータの設定の有用性を評価する手段として利用可能であると思われる。しかし、作成した模擬呼吸運動用台座の完成度が低く、任意の呼吸波形を作成することは不可能であった。多くの呼吸パターン（シミュレーション）を実施するためには、台座について改善の余地があると思われる。

実際の臨床における撮像では、呼吸運動波形を術者が確認し、同期パラメータを経験則に基づいて設定していることが一般的である。より最適な抑制効果を得るためには、被検者の呼吸波形の形状、呼吸数を正確にモニタリングして、平坦な部分に信号収集時間を重ね合わせる必要があるといえる。呼吸同期法は

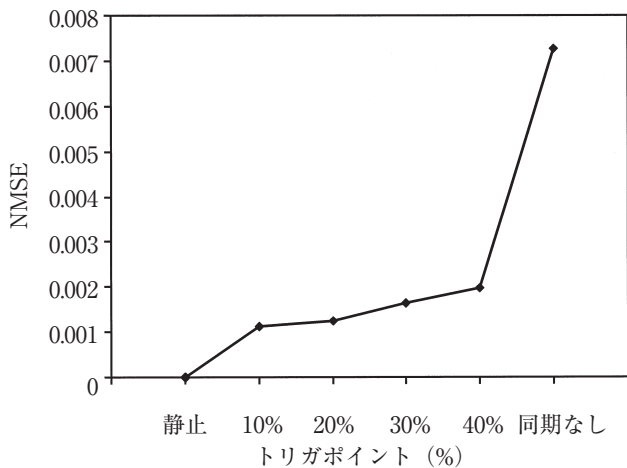


図11 各トリガポイントの画像から求めた NMSE

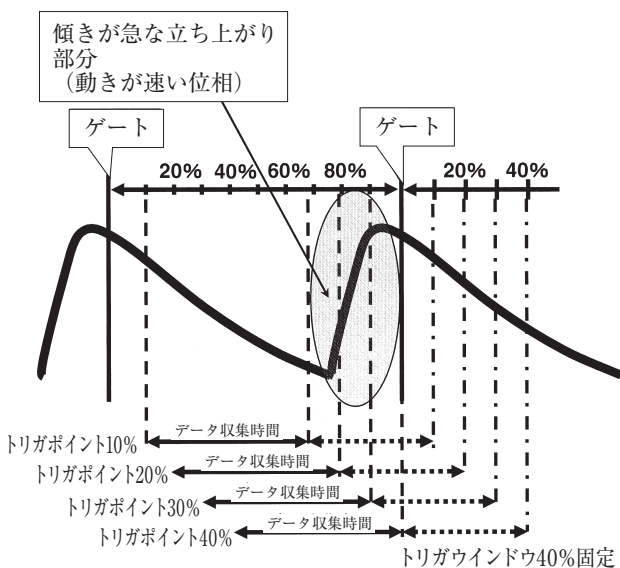


図12 台座の上下運動による模擬呼吸運動の呼吸波形と設定した呼吸同期パラメータ（トリガポイントおよびトリガウインドウ）の関係

一定の呼吸の深さで一定の間隔で規則的な呼吸ができることが前提の改善方法であるので、呼吸が安定しない被検者に対しては不向きである。効果的なアーチファクト低減のためには、より正確に実際の呼吸運動を検出するモニタリング方法を選択し、動きを感知しやすい位置にセンサを取り付ける必要がある。また、検査前に呼吸練習をすることも重要である。さらに呼吸数が多い被検者については波形ピーク間の時間が短くなる。モーションアーチファクトを低減しようと信号収集時間を短くすると設定できるエコートレイン数が減少し、撮像時間が延長したり、マルチスライスでの撮影枚数が制限されることになる。また、ピーク間隔が短くなることで TR も短縮し、画像コントラストにも影響を与えるため、呼吸同期パラメータの設定には注意が必要である。個人によって異なる呼吸同期パラメータの設定を適切に行うには、今後さまざまな呼吸運動パターン（呼吸数、呼吸の深さ、呼吸間隔の異なるパターン等）についてシミュレーションを行うことが有用であると思われる。そして個々の被検者に対するパラメータ設定のノウハウを確立することが、一定水準以上の画像情報を提供する上で重要であると考えられる。

## 6. 謝 辞

本研究にご協力いただいた、放射線技術科第28期生の小橋一雅、笹田美穂、西山陽子、宮井純平、西村章央の各氏に深く感謝いたします。

## 7. 文 献

- 1) 笠井俊文, 土井 司: MR 撮像技術学, 東京: オーム社, pp. 148-155, 2008.
- 2) 土井 司: 超実践マニュアル MRI(II 実践編-4 腹部), 東京: 医療科学社, pp. 123-132, 2006.
- 3) 吉川宏起, 多湖正夫, 戸辺公子: 胸・腹部領域の MRI における呼吸同期撮像法, INNEVISION11 9: 47-51, 1996.
- 4) 本城和光, 伊東克能, 藤田岳史, 小池晋司, 高野勝之, 栗屋ひとみ, 平林文美, 岡崎 肇, 松永尚文, 橋田昌弘, 片山節: 呼吸同期撮像法と息止め下撮像法 腹部領域の MRI における呼吸停止下撮像法, INNEVISION11 9: 43-46, 1996.

