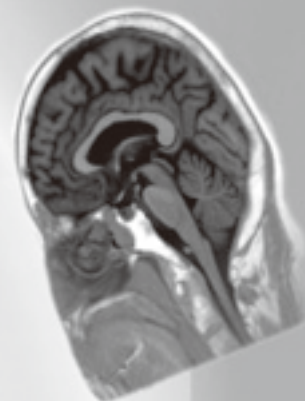
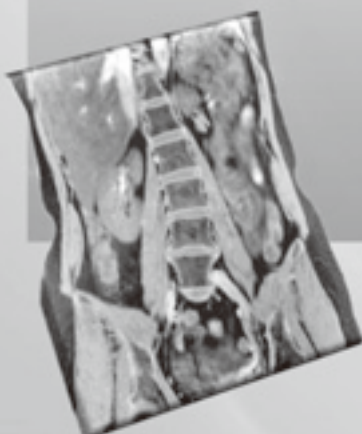


# 連載企画 MRI



▶ MRIのアーチファクト  
ーケミカルシフトアーチファクト編ー

埼玉医科大学病院  
中央放射線部 平野 雅弥



埼玉県放射線技師会  
編集・情報委員会

# MRIのアーチファクト

## ～ケミカルシフトアーチファクト編～

埼玉医科大学病院  
中央放射線部 平野 雅弥

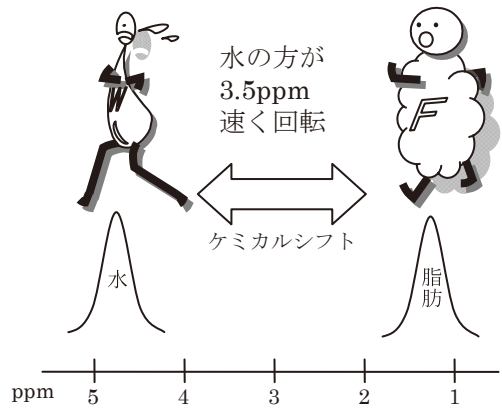


図1：ケミカルシフト

### 1. はじめに

MRI (Magnetic Resonance Imaging) のアーチファクトは多くの種類があり、それぞれ特徴的です。しかし、アーチファクトは原因がなければ発生しないので、その原因を理解すればなんとなく特徴もつかめるはず。そこで今回は、いくつかあるアーチファクトの中でもケミカルシフトアーチファクトに絞って考えていきたいと思います。

### 2. ケミカルシフトの発生原因

ケミカルシフトは、MR信号を発する原子がどのような化学結合状態におかれているかによって起こります。MRIは、ほとんどが水と脂肪の水素原子の原子核であるプロトンからの信号のみで画像を作りだしていますが、この水 (H<sub>2</sub>O) と脂肪のメチレン基 (-CH<sub>2</sub>-) の水素原子の化学結合状態では歳差運動の周波数がチョットだけ違います。どれだけ違うかというと水の方が100万分の3.5 (3.5 × 10<sup>-6</sup>) だけ大きい値になります<sup>1)</sup>。100万分の3.5は一般的には100万分の1を表わすppm (parts per million) を使って3.5ppmと表記することが多いです。この水と脂肪の3.5ppmの差がケミカルシフトの原因になります (図1)。

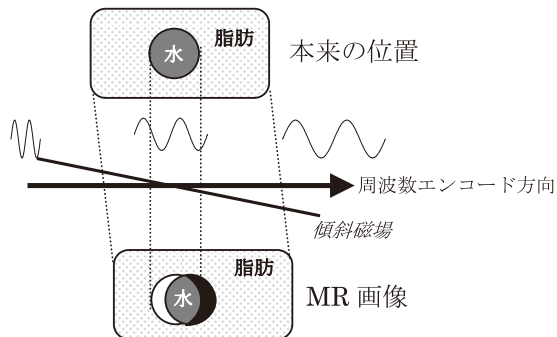
では、3.5ppm違うというのはどういうことでしょうか。まず、水素原子の歳差運動周波数について考えてみます。それを理解する上でラーモアの式を抑えておく必要があります。

ラーモアの式  $\omega = \gamma B_0$  …………… (1)

ここで $\omega$ は水素原子の周波数、 $\gamma$ は磁気回転比で水素原子の場合42.6 [MHz/T]です。 $B_0$ は外磁場強度です。では、具体例を示します。

$B_0$ は外磁場 (静磁場) の値なので静磁場強度が1テスラの場合 (1) 式にあてはめると  
水素原子の周波数 = 42.6 × 1 = 42.6MHz  
同様に、静磁場強度が1.5テスラの場合  
水素原子の周波数 = 42.6 × 1.5 = 63.9MHz …… (2)

静磁場強度が3テスラの場合  
水素原子の周波数 = 42.6 × 3 = 127.8MHz  
となり静磁場の強さに比例して共鳴周波数が大きくなります。



脂肪が低周波方向に位置ズレする。結果として水と脂肪が重なる部分は高信号(白い帯)になり、反対側は低信号(黒い帯)になる。また、水と脂肪の関係が逆になると高信号・低信号の関係も逆になる。

図2：ケミカルシフトによる位置ズレ

では1.5テスラの装置でケミカルシフトの例をみていきます。1.5テスラの共鳴周波数は(2)式より63.9MHzなので水と脂肪の周波数の差3.5ppmをかけ合わせると

$$63.9\text{MHz} \times 3.5\text{ppm} = 63.9 \times 10^6\text{Hz} \times 3.5 \times 10^{-6} = 223.65\text{Hz} \quad \dots\dots (3)$$

223.65Hzだけ異なります。よって水の方が約224Hzだけ周波数が大きくなります。

### 3. ケミカルシフトにより生じるアーチファクト

ケミカルシフトが起因するアーチファクトは主に“位置ズレ”と“信号変化”です。位置ズレは水と脂肪の3.5ppmの差によって、水と脂肪が同じ場所(ボクセル)にあったとしてもMR画像として表示された際、異なる場所(ピクセル)に描かれてしまいます。また、MR画像は画像の縦方向や横方向に対応した形で周波数エンコード方向と位相エンコード方向に分けてk-spaceデータ充填を行うため、その種類によって位置ズレ方向が異なります。

さらに、水と脂肪が同ボクセル内にあると信号を得るタイミングによって信号変化が起きてしまいます。



腎臓の左右で内臓脂肪と腎臓(水)が位置ズレして信号差を生じる

図3：ケミカルシフト画像例

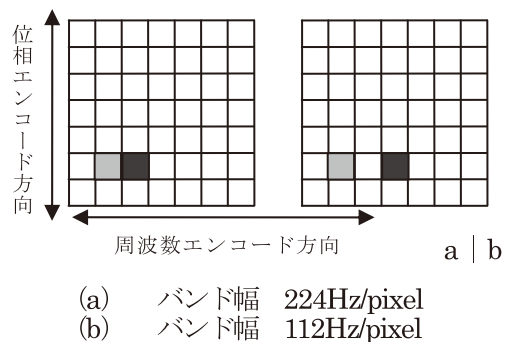


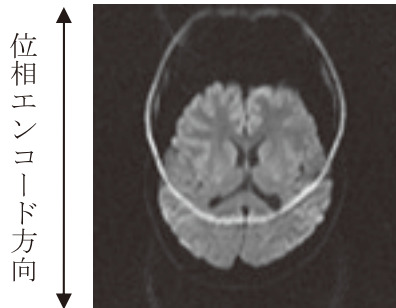
図4：周波数方向に位置ズレする

### 4. ケミカルシフトによる“位置ズレ”

#### 4.1 周波数エンコード方向の“位置ズレ”

MRIは撮像部位のプロトンを励起してそこからの信号を得て画像化しています。しかし、どの場所のプロトンからの信号かということを知るには工夫が必要です。その工夫が傾斜磁場になります。傾斜磁場は磁場の高い部分と低い部分を作り出し場所による差をもたせ、どの場所からの信号かということを特定します。磁場が違くと先に述べた(1)式のラーモアの式により読み取り方向の周波数が異なります。そのため一般的に周波数エンコード方向に位置ズレを起こします(図2、3)。

1.5Tの場合、1ピクセル当りのバンド幅が224Hzであれば1ピクセル分だけ位置がズレ、112Hzで



頭部拡散強調像  
位相エンコード方向に頭皮脂肪のケミカルシフト

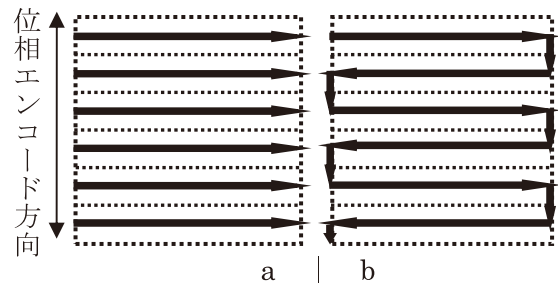
図5：EPIでのケミカルシフト画像

あれば2ピクセル位置ズレします (図4)。バンド幅が1/2になれば位置ズレは2倍になるので<sup>2)</sup>、狭いバンド幅アーチファクトとして目立ちます。

#### 4.2 EPIは位相エンコード方向に“位置ズレ”

k-spaceへのデータ充填を高速に行うEPI (Echo Planar Imaging) では位相エンコード方向に顕著にケミカルシフトアーチファクトが現れます (図5)。この理由は、周波数エンコード方向の勾配磁場が強く1ピクセルあたりのバンド幅が広い (一般的に1000Hz以上) ためケミカルシフトは1ピクセル内に収まり画像上位置ズレは生じません。それに比べ位相エンコード方向の勾配磁場は小さく周波数帯域も狭い (10Hz程度) ので結果的に位相エンコード方向に大きなアーチファクトとして現れます。

また、EPIではk-spaceのデータ充填軌道が特徴的で、一言でいえば“一筆書きのジグザグ”です (図6)。一般的なスピエコー法では各サイクルで位相のズレを補償し元に戻すのですが、EPIでは補償されず位相のズレはどんどん増えて大きなズレとして表示されます。そのため、位相エンコード方向で次の列に移行する場合に少しのズレであってもズレが修正されることなく蓄積されま



(a) 一般的な軌道  
各位相エンコードが独立しているので位相ズレは補償される。  
(b) EPIでの軌道  
軌道が“一筆書きジグザグ”なので位相ズレが蓄積されていく。

図6：k-spaceの軌道

す。結果として、位相エンコード方向に大きな“位置ズレ”を起こします。

#### 5. グラジエントエコー法では“信号変化が起きる”

##### 5.1 第2のケミカルシフト

MR関連の専門書の多くに“第2のケミカルシフト”と記され<sup>3,4)</sup>、グラジエントエコー法にのみ見られる現象で、位相エンコード方向、周波数エンコード方向に関係なく現れます。グラジエントエコー法では脂肪は水よりも歳差運動周波数が低いために位相が揃ったりズレたりを繰り返し、水と脂肪が混在している部分では信号を得る瞬間によって信号が異なるのでコントラスト変化につながります。

これは、図7のように水と脂肪が磁場方向に垂直な面で時計回り方向に同時スタート (図7a) した後、脂肪は水にどんどん引き離され遅れていきます (図7b)。ある時間が経つと脂肪と水の信号が逆方向を向く時点 (図7c) があります。またさらに時間が経過すると1周遅れで水に追いつかれ、再び信号が同じ方向を向く時点 (図7d) があります。次にまた離されて逆方向を向く時点があり、2周遅れで同じ方向を向く時点がありそれを

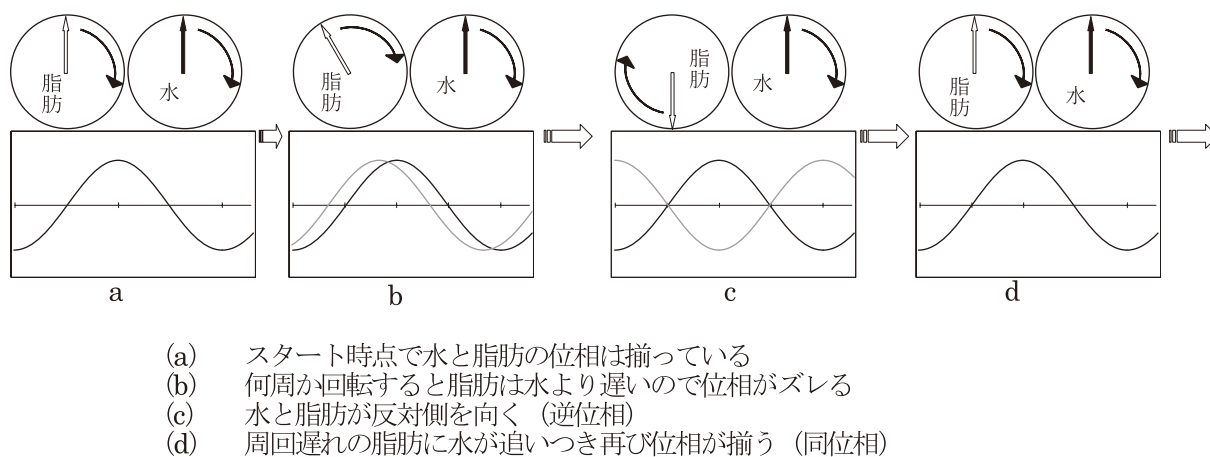
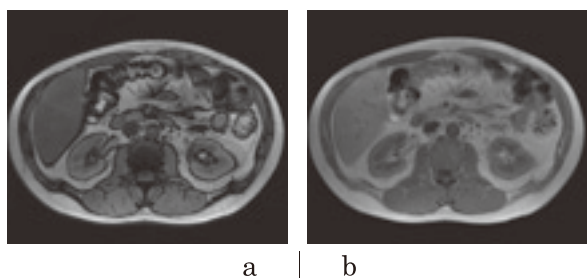


図7：第2のケミカルシフト



(a) 逆位相像 TE=2.4msec  
 (b) 同位相像 TE=4.8msec

a の逆位相像では脂肪に囲まれた臓器の辺縁が第2のケミカルシフトにより低信号に (黒く) なる

図8：逆位相像と同位相像

次々と繰り返します。信号が逆方向を向く時点を逆位相 (opposed phaseまたはout of phase)、同じ方向を向く時点を同位相 (in phase) と言います。逆位相の場合、水と脂肪が混合している部分では信号低下により画像上黒く描出されます (図8)。

また、スピンエコー法では、180°パルスを使用してエコー中心を同位相に戻すようにしているため、このような現象は起こりません。

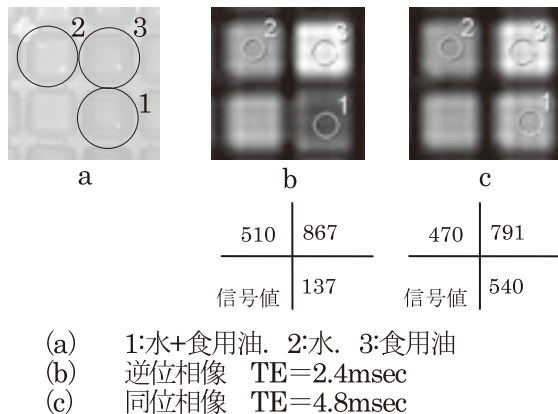
## 5.2 同位相・逆位相になるタイミング

### 5.2.1 同位相になるタイミング

同位相や逆位相になるタイミングを1.5テスラの場合でみていきます。水と脂肪の周波数差は(2)式より223.65Hzですが計算が容易なように脂肪の周波数を64000000Hz (64MHz) ピッタリとします。そうすると、水の周波数は224Hz (64MHz×3.5ppm) 大きいので64000224Hzになります。1Hzは1秒間で1回転することなので、水と脂肪の位相が揃っている状態 (同位相) からスタートすると、1秒間に脂肪は64000000回転、水は64000224回転することになり、スタートしてから1秒の間に224回追いつかれる (同位相になる) 瞬間が生じます。1秒間に224回、等間隔で同位相になるのですから最初に同位相になる瞬間は0.0045秒後 (≒1秒/224) に訪れ、その次の同位相になる瞬間は0.0045秒経過した0.009秒 (9msec)、またその次は0.0135秒 (13.5msec)・・・になります。

### 5.2.2 逆位相になるタイミング

逆位相になるタイミングは最初の同位相になる半分の時間に反対方向を向く (逆位相になる) の



水+食用油 (脂肪) の信号が、逆位相像では同位相像に比べ大きく低下している

図9：逆位相と同位相の信号値

で $0.0045\text{秒}/2=0.00225\text{秒}$  (2.25msec) になります。同位相になる瞬間と同じように、次の逆位相の瞬間は $0.0045\text{秒}$ 経過した $0.00675\text{秒}$  (6.75msec)、その次は $0.01125\text{秒}$  (11.25msec)・・・となります。

### 5.3 逆位相・同位相像を得るためのTE設定

同位相や逆位相になる瞬間の時間 (タイミング) が意味しているものは何でしょうか。これはグラジエントエコー法でRFパルスをかけた直後は同じ位置からスタートしているのですから、TE (エコー時間) をそれぞれに合わせれば同位相や逆位相になります。よって、TE値を4.5msecや9msec近くに設定すれば同位相の画像、2.25msecや6.75msec近くに設定すれば逆位相の画像が得られます。水と脂肪が同ボクセル内にあり、それぞれ同じ大きさの信号を発しているとすると、逆位相の状態では信号を打ち消し合うため、信号の低下になります (図9)。

## 6. ケミカルシフトアーチファクトの抑制

ケミカルシフトは水と脂肪が混在する場所に、どうしても発生してしまいます。ただし、目立た

なくすることは可能です。抑制のための一般的な方法は以下です。

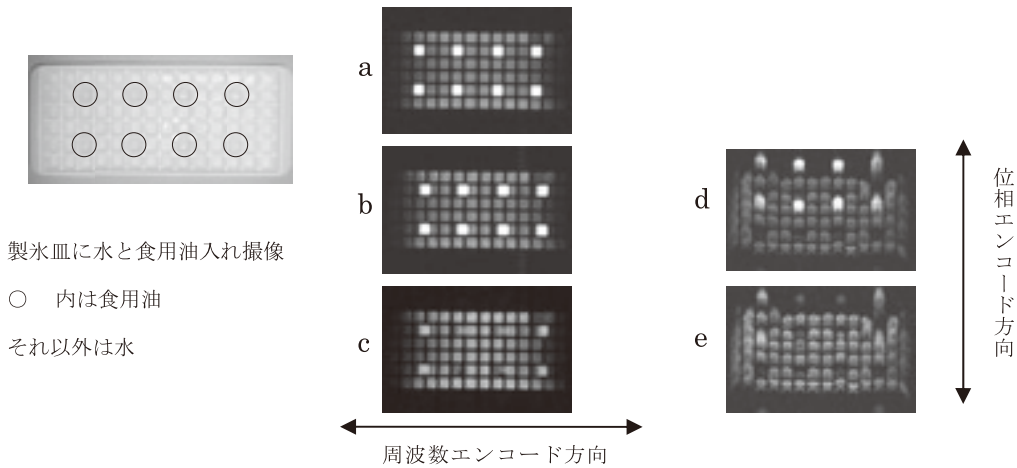
- ①静磁場強度↓
- ②バンド幅↑
- ③脂肪の信号↓

①の方法は先に述べたラーモアの式から静磁場強度が小さくなるとそれに比例して共鳴周波数が小さくなるのでケミカルシフトも小さくなります。しかし、3テスラ装置を0.5テスラにすることは不可能なので現実的には無理です。②の方法はバンド幅の値を広くすればいいのですが、バンド幅を広くするとS/Nが低下するので使用するには注意が必要です。③の方法は脂肪抑制を併用すればよいので有効な方法だといえます。また、EPIでは位相エンコード数を減らすようなパラレルイメージングの使用、長方形のFOV (rectangular FOV) の使用も有効です<sup>5)</sup>。

図10に1.5テスラ装置を使用して、水と食用油をスピネコー及びEPIで撮像した画像を示します。図10aでは、バンド幅が725Hz/pixelのためケミカルシフトの224Hzに比べ十分大きいので画像上位置ズレは生じません。図10bでは、バンド幅が70Hz/pixelで224Hzよりも小さく、約3ピクセル ( $\approx 224/70$ ) のズレが生じています。また図10cでは、バンド幅は図10bと同じですが、脂肪抑制を用いているのでアーチファクトは目立たなくなります。EPIで撮像した図10dと図10eでは位相エンコード方向に大きなケミカルシフトアーチファクトを生じていますが、こちらも脂肪抑制を使用することで若干目立たなくなっています。

## 7. まとめ

ケミカルシフトは画像上問題になることもありますが、このアーチファクトが出現すれば間接的に脂肪の存在確認にもなります。そのため、腫瘍



- (a) スピンエコー. バンド幅 725Hz/pixel. 脂肪抑制なし
- (b) スピンエコー. バンド幅 70Hz/pixel. 脂肪抑制なし
- (c) スピンエコー. バンド幅 70Hz/pixel. 脂肪抑制あり
- (d) EPI. バンド幅 1860Hz/pixel (位相方向の周波数帯域 13Hz/pixel). 脂肪抑制なし
- (e) EPI. バンド幅 1860Hz/pixel (位相方向の周波数帯域 13Hz/pixel). 脂肪抑制あり

図10：水と食用油をスピンエコー及びEPIで撮影した画像

や骨髄など撮影の際には、同位相と逆位相が得られるグラジエントエコーを使用し、逆位相で信号低下が見られれば微量な脂肪の検出にもつながります。特に副腎腫瘍の良性腺腫は脂肪を含んでいる場合が多く、数10秒のシーケンスを付け加えることで大きな診断の手助けになります。

よって、発生原因を理解しケミカルシフトを有効に扱うことも必要な事だと思います。

- 5) 小林正人 : 拡散強調画像の上手な使い方ー設定編ー. 日放技学誌,64 (7) 862-871, (2008)

参考文献

- 1) 日本磁気共鳴医学会教育委員会 編：基礎から学ぶMRI、(株)インナービジョン (2001)
- 2) 土橋俊男 : MRIのArtifact. 日放技学誌,59 (11) 1370-1377, (2003)
- 3) 荒木 力 監訳 : MRI「超」講義第2版. (株)メディカル・サイエンス・インターナショナル、(2006)
- 4) 荒木 力 監訳 : MRIの基本パワーテキスト第2版. (株)メディカル・サイエンス・インターナショナル、(2004)



[執筆者紹介]

平野 雅弥 (ひらの まさや)  
 1968年生。埼玉県毛呂山町出身。  
 技師歴21年。MR担当歴約7年。