臨床技術

Balanced steady-state free precession における
バンディングアーチファクトを用いた
脂肪抑制不良域の推定高木祐一¹ 橋田昌弘² 小味昌憲³ 羽手村昌宏¹論文受付
2021 年 1 月 27 日論文受理
2021 年 6 月 24 日

Code No. 261

¹ 熊本大学病院医療技術部診療放射線技術部門² 熊本大学病院医療技術部診療放射線技術部門 (現 帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科)³ 熊本大学病院医療技術部診療放射線技術部門 (現 宮崎大学医学部附属病院放射線部)

緒言

Magnetic resonance imaging (MRI) 検査において、脂肪抑制法は、使用頻度が高く、炎症や腫瘍性疾患の診断に欠かせない撮像法である。しかし、頸部や四肢等の被写体の形状が複雑な部位では、均一な脂肪抑制が困難なことが多く、再撮像になる場合がある。MRI

検査は騒音が激しく、閉鎖的空間に長時間拘束されるため、再撮像になると患者の身体的、精神的、負担は大きい。また、再撮像は検査のスループットにも大きな影響を与える。したがって、再撮像による検査時間の延長は可能な限り回避する必要がある。

脂肪抑制不均一の主な原因は、静磁場 (B_0) の不均一

Prediction of the Incomplete Region of Fat Suppression Using the Banding Artifact of the Balanced Steady-state Free Precession Sequence

Yuichi Takaki,¹ Masahiro Hashida,² Masanori Komi,³ and Masahiro Hatemura^{1*}¹ Division of Radiology, Department of Medical Technology, Kumamoto University Hospital² Division of Radiology, Department of Medical Technology, Kumamoto University Hospital (Current address: Faculty of Fukuoka Medical Technology, Teikyo University)³ Division of Radiology, Department of Medical Technology, Kumamoto University Hospital (Current address: Division of Radiology, Miyazaki University Hospital)

Received January 27, 2021; Revision accepted June 24, 2021

Code No. 261

Summary

When the fat-suppression technique was used in the MRI examinations of neck and extremities, incomplete regions of fat suppression were depicted frequently. These incomplete regions were caused by the non-uniform static magnetic field (B_0). On the other hand, a non-uniform B_0 caused banding artifacts using a balanced steady-state free precession (bSSFP) sequence. We investigated the prediction of incomplete regions of fat suppression using the banding artifacts of the bSSFP sequence. The fat-suppression techniques used in this study were the chemical shift selective and spectral adiabatic inversion recovery methods for turbo spin echo imaging. Using an oil bottle attached to a staple, the scan parameters of the bSSFP sequence were adjusted to overlap with the banding artifacts in the incomplete regions of fat suppression. The neck, ankle joint and femur of healthy volunteers were scanned using the obtained scan parameters, and a visual assessment was performed. As a result, the incomplete region of fat suppression matched the region of the banding artifact. We were able to predict the incomplete region of fat suppression using the banding artifacts of the bSSFP sequence. If the optimized bSSFP sequence is used as the localizer, we can assess the situation of incomplete fat suppression before the main scanning and reduce rescanning due to incomplete fat suppression.

Key words: fat suppression, banding artifact, static magnetic field inhomogeneity, balanced steady-state free precession

*Corresponding author

Table 1 Sequence parameters

	Turbo spin echo T ₂ WI	Turbo spin echo T ₂ WI	Turbo spin echo T ₁ WI	True FISP (bSSFP)
Fat suppression	CHESS	SPAIR	CHESS	Off
Repetition time (ms)	4000	4000	550	4–7
Echo time (ms)	84	84	9.8	2–3.5
Echo train length	21	21	3	–
Flip angle (degree)	90–180	90–180	90–160	50
Parallel imaging	Off	Off	Off	Off
Number of sample averaged	1	1	1	1
Number of slices	10	10	10	10
Matrix	256×256	256×256	256×256	256×205
Scan time (s)	96	96	93	10–18

と考えられ¹⁾, 均一性の確保が必要となる. 一般的な対処法として, 観察したい領域に関心領域を設定し, 局所の B₀ シミリングを行うボリュームシミリングがある²⁾. また, 空気と人体の急激な磁化率の変化を抑制するために, 専用のパッドを被写体の横に添える方法もある. この方法に関しては市販されている専用のパッドが高価なため, 米やポリエスチレンボール, ガラスビーズ等, さまざまな材質を用いた自作パッドの報告がある^{3–7)}. しかし, 脂肪が均一に抑制されるかは, 撮像後でないと確認できないのが現状である.

今日まで脂肪抑制の均一性向上に関しては, 前述のようなさまざまな方法が報告されている. しかし, 脂肪抑制が不均一な領域(脂肪抑制不良域)を事前に予測する研究は, われわれの知る限りでは報告がない. そこでわれわれは, 脂肪抑制法と同様に B₀ 不均一の影響を受けやすい balanced steady-state free precession (bSSFP) 法を用いた脂肪抑制不良域の予測を考案した.

bSSFP 法は, signal-to-noise ratio (SNR) の高い画像が数秒で得られるため, 使用頻度が高く, 検査の最初に localizer としても使用可能な撮像法である. しかし, B₀ が不均一な領域にはバンディングアーチファクトが出現しやすい問題があり, 画像診断の妨げとなる場合も少なくない⁸⁾. バンディングアーチファクトは, B₀ が不均一な領域に幾重ものブラックバンドとして出現し, repetition time (TR) や echo time (TE) の変化に伴い領域が変化する. したがって, 脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域が一致する撮像パラメータ (TR, TE) の設定が可能であれば, 脂肪抑制不良域を視覚的に予測できる可能性がある.

本研究では, bSSFP 法にて発生するバンディングアーチファクトを利用し, 脂肪抑制法にて問題となる脂肪抑制不良域の予測の可否について, ファントムと健常ボランティアにて検証する. 検証する脂肪抑制シーケンスは, 当施設で使用頻度の高い T₂ weighted

image (WI) の turbo spin echo (TSE) 法に chemical shift selective saturation (CHESS) 法を使用したシーケンスと spectrally adiabatic inversion recovery (SPAIR) 法を使用したシーケンス, T₁WI の TSE 法に CHESS 法を使用したシーケンスの 3 種類である.

1. 方法

1-1 自作ファントムによる bSSFP 法の撮像パラメータの最適化

装置は, Siemens (Erlangen, Germany) 製 MAGNETOM Trio 3T を使用した. bSSFP 法の撮像パラメータ (TR, TE) を変化させ, 脂肪抑制法にて発生する脂肪抑制不良域と bSSFP 法で発生するバンディングアーチファクトの領域が一致する撮像パラメータを検索した. なお, 自作ファントムの撮像と両領域の一致についての判断, 予測における最適な撮像パラメータの決定は, 筆頭著者が一人で行った.

検証する脂肪抑制シーケンスは, T₂WI の TSE 法に CHESS 法を使用したシーケンスと SPAIR 法を使用したシーケンス, T₁WI の TSE 法に CHESS 法を使用したシーケンスの 3 種類である. また, 予測に用いる bSSFP 法のシーケンスは true fast imaging with steady state precession (true FISP) を使用した. true FISP は, TR を 4 ms から 7 ms まで 0.5 ms 間隔で変化させ撮像した. TE は TR の 1/2 である. 撮像パラメータの詳細を Table 1 に示す.

自作ファントムとして食用のサラダオイルが入ったプラスチックボトル (以下, オイルボトル) を用いた. オイルボトルはサイズが 65×75×220 mm で, 直方体に類似した形状である. オイルボトル側面にはホチキスの芯を貼り付け, 脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトを意図的に発生させた. ホチキスの芯の材質は亜鉛でメッキされた軟鉄で, 閉じた状態で用いた. サイズは 10×1×0.5 mm ある. また, 水の共鳴

周波数を検知するために、装置メンテナンス用の硫酸ニッケルファントムを、オイルボトルの隣に配置した。使用したコイルは spine coil である。Figure 1 に true FISP にて撮像したオイルボトルと硫酸ニッケルファントムの冠状断を示す。オイルボトルにはホチキスの芯を中心にバンディングアーチファクトが発生している。脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域を測定するために、オイルボトル上に直線を設定し、ImageJ^{9,10)} を用い直線上の画素値からプロファイルカーブを作成した。なお、直線はバンディングアーチファクトが発生しやすいオイルボトル上部のキャップ部分、ホチキスの芯の近傍、オイルボトル下部表面の3箇所を通過する直線とした。

1-2 健常ボランティアによる検証

本研究の目的と方法について十分に説明し、同意を得た健常ボランティア(男性 10 人、年齢 24~42 歳)に、三つの脂肪抑制シーケンスと true FISP を撮像し、脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域の一致度を視覚的に評価した。なお、健常ボランティアの撮像に関しては、施設内倫理委員会の承認を得ている。

撮像部位と撮像方向は、脂肪抑制が不均一になりやすい頸部の冠状断、足関節部の矢状断、両大腿中央部の横断である。脂肪抑制シーケンスと true FISP の撮像パラメータは、field of view (FOV)、受信バンド幅以外、ファントム実験と同じである。ただし、true FISP の TR、TE は、ファントム実験で決定した値とした。また、コイルは、頸部が neck coil、足関節部が head coil、両大腿部が body array coil を使用した。コイルはいずれも受信型コイルである。

視覚評価は、MRI 検査の経験がある診療放射線技師 5 名(経験年数 2~20 年)にて 5 段階のスコア評価を行った。また、観察者には評価方法を十分に理解してもらうため、典型例を用いて事前にトレーニングを行った。なお、観察者には評価結果の公開について承諾を得ている。スコアの詳細を以下に示す。スコア 1: バンディングアーチファクトより脂肪抑制不良域が遥かに広い、または、バンディングアーチファクトとは異なる領域に明らかな脂肪抑制不良域を認める(バンディングアーチファクト<<脂肪抑制不良域)。スコア 2: バンディングアーチファクトより脂肪抑制不良域がわずかに広い、または、バンディングアーチファクトとは異なる領域にわずかな脂肪抑制不良域を認める(バンディングアーチファクト<脂肪抑制不良域)。スコア 3: バンディングアーチファクトと脂肪抑

Fig. 1 The phantom images of the true FISP sequence (coronal images).

The oil bottle is on the right side. In order to make the non-uniform static magnetic field, a staple was attached to the oil bottle. The straight line on the oil bottle image (right) shows the position for analyzing the profile curve. The left side is the nickel sulfate (NiSO_4) bottle.

制不良域がほぼ等しい(バンディングアーチファクト=脂肪抑制不良域)。スコア 4: バンディングアーチファクトより脂肪抑制不良域がわずかに狭い、または、脂肪抑制不良領域とは異なる領域にわずかなバンディングアーチファクトを認める(バンディングアーチファクト>脂肪抑制不良域)。スコア 5: バンディングアーチファクトより脂肪抑制不良域が明らかに狭い、または、脂肪抑制不良領域とは異なる領域に明らかなバンディングアーチファクトを認める(バンディングアーチファクト>>脂肪抑制不良域)。

Figure 2~4 に観察者の視覚評価のトレーニングに用いた画像とスコアの例を示す。Figure 2 は頸部の冠状断の画像で、左側から true FISP と TSE の $T_2\text{WI/CHES}$ 法、 $T_1\text{WI/CHES}$ 法である。true FISP 画像にて頸部と胸部の境界と両側外耳部、両側頸部皮膚表面にバンディングアーチファクト(ブラックバンド)を認め、矢頭で示した。画像中央と右側の脂肪抑制画像では、両肩から胸部にかけて明らかな脂肪抑制不良域を認める。脂肪抑制画像には、true FISP 画像上のブラックバンドの位置を点線として重ね合わせた。いずれの脂肪抑制画像においても脂肪抑制不良域の境界が

Fig. 2 Examples of the neck images and scores used for visual evaluation training. The left image shows true FISP image with banding artifact (arrow head: black band). The center image and right image show T_2 WI/CHES image and T_1 WI/CHES image with an incomplete fat-suppression area (dotted line). Both fat-suppression images are examples with a score of 3.

Fig. 3 Examples of the ankle images and scores used for visual evaluation training. The left image shows true FISP image with banding artifact (arrow head: black band). The center image and right image show T_2 WI/CHES image and T_1 WI/CHES image with an incomplete fat-suppression area (dotted line). T_2 WI/CHES image is an example with a score of 3. T_1 WI/CHES image is an example with a score of 4.

Fig. 4 Examples of the femur images and scores used for visual evaluation training. The left image shows true FISP image without banding artifact. The center image shows T_2 WI/SPAIR image without an incomplete fat-suppression area. T_2 WI/SPAIR image is an example with a score of 3. The right image shows T_1 WI/CHES image with an incomplete fat-suppression area (small dotted line). T_1 WI/CHES image is an example with a score of 1.

ブラックバンドと一致していることがわかる。観察者には、ブラックバンドより外側の領域をバンディングアーチファクトの領域と説明し、脂肪抑制不良域と一致することから、スコアは3になると説明した。また、両側頸部皮膚表面にもわずかな脂肪抑制不良域を認める。一見、バンディングアーチファクトの領域に対し、脂肪抑制不良域が狭い印象だが、バンディングアーチファクト内の脂肪組織は、わずかな皮下脂肪のみである。観察者には、バンディングアーチファクトの領域のどの部分が脂肪組織なのかを把握したうえで評価するように説明した。両側外耳部のバンディングアーチファクトはわかりにくい、同部の脂肪抑制は不良である。

Figure 3は足関節部の矢状断の画像で、左側からtrue FISPとTSEの T_2 WI/CHESS法、 T_1 WI/CHESS法である。true FISP画像にて距骨中央部と足底部、中足骨遠位部にブラックバンドを認め、矢頭で示した。画像中央 T_2 WI/CHESS法は、スコア3の例である。距骨中央部より頭側の脂肪抑制が不良であり、true FISP画像上のブラックバンドの位置を点線として重ねると、脂肪抑制不良域の境界がブラックバンドと一致していることがわかる。また、足底部と中足骨遠位部にもわずかなが、脂肪抑制が不良である。画像右側 T_1 WI/CHESS法は、一見、全体的に脂肪が抑制されているように見えるが、距骨中央部より頭側の骨髓の信号は尾側と比較するとやや高い。観察者には、皮下脂肪だけでなく骨髓内の脂肪の信号にも注意するように説明した。また、脂肪抑制不良域がバンディングアーチファクトの領域と同じでも、脂肪の信号がある程度抑制されている場合は、脂肪抑制不良域はバンディングアーチファクトより狭い(バンディングアーチファクト>脂肪抑制不良域)とし、スコアを4にするように説明した。

Figure 4は大腿部の横断の画像で、左側からtrue FISPとTSEの T_2 WI/SPAIR法、 T_2 WI/CHESS法である。画像は片側でトリミングしている。true FISP画像ではバンディングアーチファクトは発生していない。この場合、脂肪抑制不良域も発生しないことになる。画像中央 T_2 WI/SPAIR法では脂肪は均一に抑制されており、スコアは3となる。画像右側 T_2 WI/CHESS法では皮下脂肪の一部(小点線)が、全く抑制されておらず、バンディングアーチファクトとは異なる領域に明らかな脂肪抑制不良域を認めるとし、スコアは1になると説明した。

2. 結果

2-1 自作ファントムによるbSSFP法の撮像パラメータの最適化

Figure 5に脂肪抑制シーケンスで撮像したオイルボトルの画像を示す。ただし、オイルボトルの隣に配置した硫酸ニッケルファントムは、画像の比較しやすいのために示していない。

オイルボトルの上部とホチキスの芯を貼り付けた部分、オイルボトルの下部表面は信号値が高く、脂肪抑制不良域が発生している。Figure 6にそれぞれの脂肪抑制シーケンスのオイルボトル上の直線のプロファイルを示す。プロファイルの左側がオイルボトルの上部で、右側がオイルボトルの下部である。プロファイルの左側の二つの信号値の上昇は、オイルボトルの上部とホチキスの芯を貼り付けた部分の脂肪抑制不良域であり、プロファイル右側の信号値の上昇はオイルボトルの下部表面の脂肪抑制不良域である。いずれも脂肪抑制効果(信号値)は若干異なるが、脂肪抑制不良域の範囲はほぼ同じである。

Figure 7にtrue FISPで撮像した7種類(TRとTEの組み合わせ)のオイルボトルの画像を示す。TR、TEの変化に伴いバンディングアーチファクトの位置と領域が変化している。オイルボトルの中心から最初に出現するバンディングアーチファクトをFig. 5の脂肪抑制不良域の境界として捉えた場合、視覚的に一致するのはTR 4.5 msと5.0 msの2種類であった。

Figure 8に三つの脂肪抑制シーケンスの平均のプロファイルと、true FISPのTR 4.5 msと5.0 msのプロ

Fig. 5 The oil bottle images using two types of fat-suppression methods.

Comparison of the incomplete region of fat suppression caused by the non-uniform static magnetic field on 3 types of combinations (T_2 WI/CHESS, T_2 WI/SPAIR, and T_1 WI/CHESS).

Fig. 6 The measurement results of profile curves on the oil bottle images. The solid line, large dotted line, and small dotted line show T_2 WI/CHES, T_2 WI/SPAIR, and T_1 WI/CHES, respectively.

Fig. 7 The oil bottle images using the true FISP sequence on different combinations of TR and TE. Comparison of the location and area of banding artifact on oil bottle images on different combinations of TR and TE.

Fig. 8 Comparison of the shape between the mean profile curve of fat-suppression sequences and the two profile curves of true FISP (TR: 4.5 ms and 5.0 ms) on the oil bottle image. The solid line, large dotted line, and small dotted line show fat-suppression sequences, true FISP/TR 4.5 ms, and true FISP/TR 5.0 ms, respectively.

Table 2 The results of the visual assessment of 5 scores

		Turbo spin echo T ₂ WI CHESS	Turbo spin echo T ₂ WI SPAIR	Turbo spin echo T ₁ WI CHESS
Neck	Score 1	0	0	0
	Score 2	0	0	0
	Score 3	50	49	35
	Score 4	0	1	15
	Score 5	0	0	0
	Mean score	3.0	3.02	3.3
Ankle	Score 1	0	0	0
	Score 2	3	1	0
	Score 3	46	42	16
	Score 4	1	7	31
	Score 5	0	0	3
	Mean score	2.96	3.12	3.74
Femur	Score 1	45	0	0
	Score 2	4	5	9
	Score 3	1	44	17
	Score 4	0	1	21
	Score 5	0	0	3
	Mean score	1.12	2.92	3.36

The evaluated images are the neck, ankle, and femur of healthy volunteers using T₂WI/CHESS, T₂WI/SPAIR, and T₁WI/CHESS. The values of results in Table 2 are the frequency and mean of the scores.

ファイルを示す。バンディングアーチファクトは低信号であり、点線で示すように尖った谷のような形状をしている。TR 4.5 ms と 5.0 ms は、いずれもバンディングアーチファクトの尖った谷が実線で示す脂肪抑制不良域の高信号の山を挟む形となっている。以上の結果より、プロファイル上も、true FISP の TR 4.5 ms と 5.0 ms のバンディングアーチファクトが、脂肪抑制不良域の境界と一致していることがわかる。そこで、健常ボランティアの撮像に用いる true FISP の撮像パラメータは、TR が長い方が FOV 等に制限がかかりにくいいため、TR 5.0 ms, TE 2.5 ms の条件とした。

2-2 健常ボランティアを対象とした視覚評価

Table 2 に視覚評価における各スコアの頻度とスコアの平均値を示す。スコアの頻度の合計は、健常ボランティア 10 人を 5 人の観察者で評価しているため、50 となる。

頸部の TSE T₂WI/CHESS 法ではスコア 3 の頻度が 50 であり、すべての観察者がバンディングアーチファクトの領域と脂肪抑制不良域が一致しているとしている。また、頸部の TSE T₂WI/SPAIR 法と TSE T₁WI/CHESS 法、足関節部の TSE T₂WI/CHESS 法と TSE T₂WI/SPAIR 法、大腿部の TSE T₂WI/SPAIR 法もスコア 3 の頻度が高い。足関節部と大腿部の TSE T₁WI/CHESS 法は、スコアの頻度が 3 から 4 ヘシフ

トしており、平均スコアも 3.36~3.74 とやや高い。大腿部の TSE T₂WI/CHESS 法に限ってはスコア 1 の頻度が 45 と明らかに高く、平均スコアは、1.12 である。これは、バンディングアーチファクトとは異なる領域に脂肪抑制不良域が発生していることになる。

Figure 9 は大腿部の横断像である。true FISP 画像にて両大腿部の腹側と内側の皮下脂肪の一部にわずかなバンディングアーチファクトを認める。TSE T₂WI/SPAIR 法と TSE T₁WI/CHESS 法は、同領域の脂肪抑制が不良である。しかし、大腿部 TSE T₂WI/CHESS 法は、バンディングアーチファクトより遥かに広い範囲の皮下脂肪の脂肪抑制が不良である。

3. 考 察

脂肪抑制法において脂肪抑制の均一性は臨床上問題となるが、本研究の目的は均一性の向上ではなく、脂肪抑制不良域の予測である。事前に脂肪抑制不良域の発生位置と範囲が把握できれば、適切な脂肪抑制シーケンスの選択とボリュームシミングの設定が可能となる。また、磁化率の変化を抑えるためにパットを使用した場合、パットの効果も確認できる。したがって、脂肪抑制不良域を予測することは、再撮像を回避するうえで重要である。

本研究の注目すべき点は、bSSFP 法で発生するバンディングアーチファクトを利用した点である。本来、

Fig. 9 The results of healthy volunteer scan on the region of the femur (axial images). Comparison of the area between the banding artifact and incomplete fat suppression on the volunteer's femur image. The left up image shows true FISP image with banding artifact (arrow head: black band). The left down image, right up image, and right down image show T₂WI/SPAIR image, T₂WI/CHES image, and T₁WI/CHES image with an incomplete fat-suppression area, respectively.

画像診断の妨げとなるアーチファクトだが、 B_0 が不均一な領域に発生するため、不均一な領域が視覚的に把握可能である。また、数秒で撮像できるため、検査の最初に localizer として用いれば、検査時間の延長なく予測可能となる。ただし、脂肪抑制不良域を正しく予測するには、脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域が一致するように bSSFP 法の撮像条件を最適化する必要がある。

本来、ガントリ内の B_0 はパッシブシミングにより均一性が保たれているが、ガントリ内に人体が入ることによって均一性が失われる。脂肪抑制法の多くは水と脂肪の共鳴周波数の差(化学シフト)を利用しており、 B_0 の均一性が化学シフトより低下することで、脂肪抑制が不良となる¹¹⁾。自作ファントムによる実験では、ホチキスの芯を貼り付けた位置に、意図的に脂肪抑制不良域を発生させることができた。また、磁化率が急激に変化するオイルボトルの表面や、形状が複雑なオイルボトル上部にも脂肪抑制不良域が発生した。

bSSFP 法は傾斜磁場のタイミングを合わせるこ

により free induction decay, spin echo, stimulated echo の信号を同期させ、短時間に SNR の高い画像が取得できる。しかし、 B_0 が不均一な場合、それぞれの信号に位相のずれが生じ、お互いの信号を打ち消し合うため、バンディングアーチファクトが発生する¹²⁾。バンディングアーチファクトは TR のわずかな違いにより変化する。TR が長いほど位相のずれが大きくなり、バンディングアーチファクトは増加し、間隔は狭くなる (Fig. 7)。そこで TR と TE を変化させることで脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域が一致する bSSFP 法の撮像パラメータを決定した。

バンディングアーチファクトは Fig. 8 で示すように低信号の谷として検出できる。この低信号の谷は、高信号の山、すなわち脂肪抑制不良域を挟む形となっており、バンディングアーチファクトを脂肪抑制不良域の境界線として利用可能なことを示している。バンディングアーチファクトを参考にすることで、脂肪抑制不良域の境界を視覚的に把握可能だが、境界線のどちら側が脂肪抑制不良域なのかは、観察者が予測する

ことになる。前述したように、被写体の表面や、形状が複雑な領域に発生しやすいため、この予測は容易だと考える。

ボランティアを対象とした視覚評価では、平均スコアが3前後であった。スコアの定義から、スコアが2から4の間であれば、観察者は脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域がほぼ一致していると判断していることになる。つまり、バンディングアーチファクトによる脂肪抑制不良域の予測が可能なが示唆される。しかし、大腿部 TSE T₂WI/CHESS 法に限り、脂肪抑制不良域がバンディングアーチファクトとは全く異なる領域に発生しており、平均スコアも 1.12 と明らかに低下していた (Table 2)。

CHESS 法は脂肪の共鳴周波数に選択的に 90° radio frequency (RF) パルス照射することで縦磁化を消失させ、スポイラー磁場勾配により横磁化を消失させる。これにより脂肪信号のみが抑制されるが、RF パルスを使用しているため RF 磁場 (B₁) が不均一な場合、脂肪の縦磁化を 90° 倒すことができず、脂肪抑制不均一の原因となる¹⁾。3T-MRI の場合、大腿部のように比較的ボリュームが大きく、筋肉が多い部位では、誘電効果により B₁ が不均一になることがある¹³⁾。近年、B₁ 不均一の改善のために、RF コイルの電源供給ポイントを増やした multi transmit の装置が普及しているが、本装置は single transmit であり、脂肪抑制不均一の原因になったと考える。このように bSSFP 法のバンディングアーチファクトは B₁ 不均一の影響は受けないが、脂肪抑制法はシーケンスにより B₁ 不均一の影響を受ける可能性があり、高磁場 MR 装置では注意が必要である。

一方、大腿部でも TSE T₂WI/SPAIR 法と TSE T₁WI/CHESS 法は、脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域がほぼ一致している。これは TSE T₂WI/SPAIR 法が脂肪抑制パルスに adiabatic pulse を用いており、B₁ 不均一が改善されたと考える。Adiabatic pulse とは、単一 RF パルスを複数の小さいフリップ角に分割し、照射することで、B₁ 不均一による RF パルスの不完全性を相殺可能なパルスである^{14, 15)}。

TSE T₁WI/CHESS 法は、TSE T₂WI/CHESS 法と比較し、CHESS パルスからエコー収集までの時間が短いため、脂肪抑制効果が高いことが予想される。B₁ が不均一な場合 CHESS パルスを照射しても、脂肪の縦磁化を 90° 倒せないため、脂肪の縦磁化が残存する。Echo train length (ETL) が大きく TE が長い TSE T₂WI/CHESS 法の場合、残存した縦磁化は経時的に回

復し、脂肪抑制不良となる。しかし、ETL が少なく TE が短い TSE T₁WI/CHESS 法の場合、残存した縦磁化の回復はわずかであり、TSE T₂WI/CHESS 法と比較すると脂肪抑制効果は高くなる。これは大腿部に限らず、足関節部の TSE T₁WI/CHESS 法でも同様であり、Table 2 でスコアの頻度が 3 から 4 へシフトしている原因につながると考える。

脂肪抑制法は、今回検証した CHESS 法、SPAIR 法以外に水励起法、Dixon 法、short tau inversion recovery (STIR) 法等、多数存在する。なかでも、縦緩和時間の差を利用した STIR 法は、CHESS 法と比較し、B₀ 不均一の影響を受けにくい¹⁶⁾、脂肪抑制不良域の範囲はバンディングアーチファクトで予測した範囲よりも狭くなると思われる。

本研究のリミテーションは、脂肪抑制法やベースとなるシーケンス、静磁場強度の違いにより、脂肪抑制不良域の範囲が変化することである。したがって、脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトの領域を正確に一致させるには、各々の装置、シーケンスごとに bSSFP 法の最適な撮像パラメータを検索する必要がある。すべての脂肪抑制シーケンスに対し検索するのは煩雑であるが、検査部位や内容により使用頻度の高いシーケンスは決まっており、事前にパラメータを調整しておくことで対応可能だと考える。本研究でも、当施設で使用頻度の高い三つのシーケンスに限定して、撮像パラメータを検索した。いずれも脂肪抑制効果 (信号値) は若干異なるが、脂肪抑制不良域の範囲はほぼ同じであった。もちろん、他の脂肪抑制シーケンスを使用する場合、脂肪抑制不良域とバンディングアーチファクトとの間に多少のずれが生じる可能性がある。しかし、多少のずれが生じたとしても脂肪抑制不良域の範囲が変化するだけで、発生する位置は変化しないので、予測するうえでの有用な情報に変わりはないと考える。

4. 結 語

脂肪抑制法で問題となる脂肪抑制不良域は、bSSFP 法で発生するバンディングアーチファクトを利用することで、発生位置と範囲が予測可能であった。また、最適化された bSSFP 法を検査の最初に localizer として用いることで、検査のスループットを低下させることなく、再撮像のリスク低減が可能だと考える。

謝 辞

本研究に際しご協力いただいた熊本大学病院中央放射線部の診療放射線技師諸兄に感謝申し上げます。

なお、本研究の要旨は第 41 回日本放射線技術学会
秋季学術大会 (2013, 福岡) にて発表した。

利益相反

筆頭著者および共著者全員に開示すべき利益相反は
ない。

参考文献

- 1) 荒木力. 化学シフトの差を利用した脂肪抑制法. 決定版 MRI 完全解説 第 2 版. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2014: 313-315.
- 2) 土屋一洋, 扇和之. Volume shimming. 改訂版 MRI データブック 最新用語辞典. メジカルビュー社, 東京, 2010: 367.
- 3) Moriya S, Miki Y, Yokobayashi T, et al. Rice pads reduce geometric distortion of echo-planar diffusion-weighted images of the cervical spinal cord. *Magn Reson Med* 2011; 10(1): 65-69.
- 4) Moriya S, Miki Y, Yokobayashi T, et al. Rice pads: novel devices for homogeneous fat suppression in the knee. *Acta Radiol* 2010; 51(2): 175-178.
- 5) Moriya S, Miki Y, Yokobayashi T, et al. Improved CHESS imaging with the use of rice pads: Investigation in the neck, shoulder, and elbow. *J Magn Reson Imaging* 2010; 31(6): 1504-1507.
- 6) 池口裕昭, 庄内孝春, 已上綾, 他. 脂肪抑制 Magnetic Resonance Image のためのポリスチレンボール弾を用いた静磁場不均一軽減補助具の試作と効果の検討. *日放技学誌* 2013; 69(1): 71-79.
- 7) 椎名亮介, 小倉明夫, 竹内友一, 他. 微小ガラスビーズパッドを使用した頸部および手指の MRI 脂肪抑制効果の向上について. *日放技学誌* 2019; 75(5): 446-453.
- 8) 荒木力. Q5. 17 “true FISP” とは何ですか. MRI「超」講義 第 2 版—Q & A で学ぶ原理と臨床応用—. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2003: 123.
- 9) Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018.
- 10) Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* 2012; 9(7): 671-675.
- 11) 荒木力. Q8-7 シムコイルは何のためにあるのですか? 決定版 MRI 完全解説 第 2 版. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2014: 372-373.
- 12) 土屋一洋, 扇和之. Banding artifact. 改訂版 MRI データブック 最新用語辞典. メジカルビュー社, 東京, 2010: 22.
- 13) 荒木力. Q8-19 3T になると RF の空間分布が不均一になるのはなぜですか? 決定版 MRI 完全解説 第 2 版. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2014: 406-407.
- 14) Kaldoudi E, Williams SC, Barker GJ, et al. A chemical shift selective inversion recovery sequence for fat-suppressed MRI: theory and experimental validation. *Magn Reson Imaging* 1993; 11(3): 341-355.
- 15) 荒木力. Q11-14 コンボジットパルスや断熱高速通過パルスは何に使われるのですか? 決定版 MRI 完全解説 第 2 版. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2014: 552-557.
- 16) 荒木力. T1 の差を利用した脂肪抑制法. 決定版 MRI 完全解説 第 2 版. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2014: 312.

問合せ先

〒860-8556 熊本市中央区本荘 1-1-1
熊本大学病院医療技術部診療放射線技術部門 羽手村昌宏