

SPAIR, FLAIR, STIR における null point 算出法： Part 2. 骨盤部 SPAIR 併用拡散強調像 (3T) への応用

北 美保¹, 河野和浩², 米谷克也², 金堂敏彦²,
島本一宏², 田中文浩¹, 尾田英之¹, 小嶋章裕¹,
佐藤守男³

¹生長会府中病院中央放射線部画像診断部 ²同放射線室
³和歌山県立医科大学放射線医学教室

はじめに

拡散強調像においては、脂肪抑制が不十分であると、脂肪の拡散係数が非常に小さいため¹⁾脂肪信号が相対的に高くなり²⁾、また位相方向のバンド幅が小さいため位置ずれが大きくなって³⁾、強い chemical shift artifact として画像に重なりやすく、特に 3T 装置において顕著となる²⁾。したがって、3T の拡散強調像においては、十分な脂肪抑制が必要で、新しい手法も開発されつつあるが^{2),3)}まだ普及しておらず、現状では脂肪抑制に SPAIR (spectral attenuated inversion recovery) パルスが用いられることが多い。SPAIR パルスを 2D マルチスライス撮像に用いた場合は、繰り返し時間 (TR) だけでなく、撮像枚数や撮像分割数 (package 数) が変わっても、SPAIR パルス間隔 (SPAIR 繰り返し時間; SPAIR TR) が大きく変化して、脂肪の null point も変動するため、SPAIR inversion delay の最適化がその都度必要となるが、すぐには困難なことも多い⁴⁾。

我々は先の論文で、SPAIR を含む種々の反転回復法 (IR 法) において、null point となる

反転時間 (TI_{null}) の数式による即時算出法について報告した⁵⁾。今回は、その方法を、脂肪の消え残りが目立ちやすい 3T の骨盤部 SPAIR 併用拡散強調像に応用して、SPAIR inversion delay を数式で算出した TI_{null} に合わせることによる脂肪抑制効果への有用性について検討を行った。

方 法

使用した MRI 装置は、3T の Philips 社製 Achieva X-series (Release 2.6) である。対象は、当院の倫理委員会の承認を受け、書面にて同意を得たボランティア 13 名と前立腺疾患症例 65 例で、3T の骨盤部 SPAIR 併用拡散強調像を撮像した。

撮像方法としては、まず、SPAIR パルス後に脂肪が null point となる反転時間 (TI_{null}) を以下の如く算出し、 TI_{null} 計算値とした。

2D multi-slice SPAIR 併用拡散強調像における脂肪の TI_{null} を求める数式は、次式で表される⁵⁾。

キーワード diffusion weighted image (DWI), null point, spectral attenuated inversion recovery (SPAIR), equation, 3 Tesla

$$TI_{null} = T_1 \left[\ln 2 - \ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{TR_{SPAIR}}{T_1} \right) \right\} \right]$$

ここで、 T_1 は脂肪の縦緩和時間、 TR_{SPAIR} は SPAIR パルスの印加間隔 (SPAIR TR) で、

$$TR_{SPAIR} = \frac{TR}{\text{全スライス数/package 数}}$$

である。ここで、package 数はマルチスライスの撮影分割数を表す。3Tでの脂肪の T_1 値は、測定値や文献での報告値^{6),7)}などから総合的に決定し、340 ms (320~370 ms) とした。

上記の TI_{null} の数式をパソコンの Excel に組み込んで作成した計算シート (Fig. 1)^{5),8)}を用いて、3Tでの脂肪の T_1 値 (340 ms) と、SPAIR TR の値とを入力することにより、 TI_{null} 計算値を即時算出した。あるいは、数式のグラフ化 (Fig. 2) より、目視で求めることもできた。こうして得られた TI_{null} 計算値を SPAIR inversion delay として MR 装置に設定し、撮像を行った。

撮像パラメーターは、自由呼吸下の 2D multi-slice single-shot SPAIR-SE-EPI 法で、b 値 = 0 and 1800 s/mm², TR = 3600 ms, スライス数 = 16, package 数 = 1, SPAIR TR = 3600/16 = 225 ms, SPAIR frequency offset = 250 Hz, TE = 80 ms, 加算回数 = 4~6, スライス厚 = 4 mm, FOV = 220~330 mm, acquisition matrix = 96 × 96, SENSE reduction = 2, である。この場合 (SPAIR TR = 225 ms, T_1 値 = 340 ms)

の TI_{null} 計算値は 94.2 ms と算出された。

1. 種々の SPAIR inversion delay での撮像

ボランティア 13 名において、 TI_{null} 計算値 (94.2 ms) を中心に 5 ms 間隔で、 TI_{null} 計算値 ± 25 ms の範囲の種々の値を SPAIR inversion delay に設定して撮像し、それぞれで脂肪抑制の程度を評価した。なお、静磁場不均一性など、null point 以外の要因による影響が少ないと思われる真ん中のスライスで評価を行った。

評価方法は、得られた b 値 1800 s/mm² の拡散強調画像 16 枚のうちの 8 枚目のスライスにおいて、3 名の放射線科医の合議により、脂肪抑制の程度を good, fair, poor の 3 段階に分類

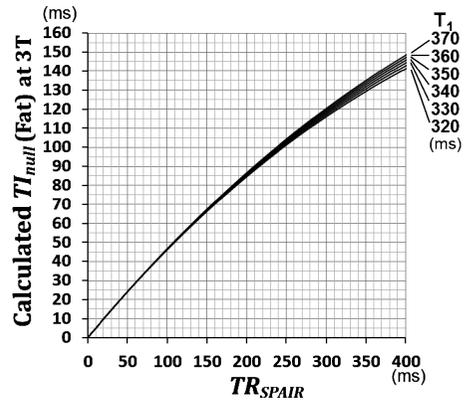


Fig. 2. Calculated TI_{null} as a function of TR_{SPAIR} for various values of fat T_1 at 3T. The graph applies to 2D multi-slice imaging with SPAIR pulse, showing only clinical range of TR_{SPAIR} used for DWI.

Calculation of TI_{null} for SPAIR 2D multi-slice sequences

[SPAIR-DWI (2D multi-slice single-shot SPAIR-SE-EPI), 2D multi-slice SPAIR-TSE, etc.]

Fat T_1 (at 3T)	TR_{SPAIR}
340	
$TI_{null} =$	

$$TI_{null} = T_1 \left[\ln 2 - \ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{TR_{SPAIR}}{T_1} \right) \right\} \right]$$

$$TR_{SPAIR} = \frac{TR}{\text{number of slices / package}}$$

Fig. 1. Excel worksheet for calculating TI_{null} for SPAIR 2D multi-slice sequences at 3T. Enter TR_{SPAIR} in the blank cell, then calculated value of TI_{null} will be immediately displayed in the gray-colored cell.

して評価した。すなわち、脂肪の大部分を占めるメチレン基やメチル基の chemical shift^{9),10)}に相当する大きな位置ずれをもつ脂肪信号について、十分に脂肪抑制されて chemical shift artifact が全く認められず画質が鮮明なものを good (脂肪抑制良好), わずかな残存脂肪による弱い chemical shift artifact が認められるが診断の妨げにはならないものを fair (脂肪抑制ほぼ良好), 残存脂肪による強い chemical shift artifact が認められ画像に重なり診断の妨げとなるものを poor (脂肪抑制不良), と評価した。

Wilcoxon signed-rank test で統計学的解析を行い、種々の SPAIR inversion delay の間で脂肪抑制の程度に有意差があるかを検定した。

2. TI_{null} 計算値を用いた臨床撮像

前立腺疾患症例 65 例において、 TI_{null} 計算値 (94.2 ms) を SPAIR inversion delay に設定して撮像し、脂肪抑制の程度を評価した。

評価方法は、前述と同じ方法で、脂肪抑制の程度を good, fair, poor の 3 段階に分類して評価し、それぞれの割合を求めた。

結 果

1. 種々の SPAIR inversion delay における脂肪抑制の程度

ボランティア 13 例での、種々の SPAIR inversion delay における脂肪抑制の程度を Fig. 3 と Table に示す。

脂肪抑制の程度は、本法による TI_{null} 計算値を SPAIR inversion delay に用いた場合に 13

例全例 (100%) で good となり、 TI_{null} 計算値が最も優れた脂肪抑制効果を示した。実際に用いた SPAIR inversion delay の値と TI_{null} 計算値との差が大きくなるほど、残存脂肪による chemical shift artifact が強くなった (Fig. 4)。 TI_{null} 計算値より ± 5 ms 異なると、31~38% の例では good を保っていたが、残り 62~69% の例ではわずかに chemical shift artifact が出現して fair の評価に下がった。 TI_{null} 計算値より ± 10 ms 異なると、chemical shift artifact が強くなって poor となる例が 77% に出現した。 TI_{null} 計算値より ± 15 ms 以上異なると、100% の例で poor となり、残存脂肪信号が大きく位置ずれして画像に重なった (Fig. 4)。

Wilcoxon signed-rank test で統計学的解析を行った結果、種々の SPAIR inversion delay 設定値での脂肪抑制効果は、 TI_{null} 計算値が有意に最も優れており ($P < 0.01$), TI_{null} 計算値

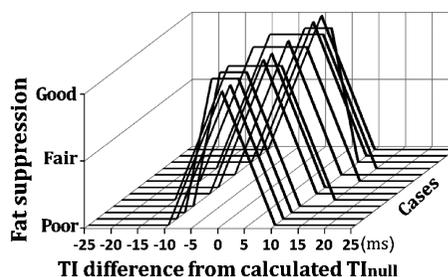


Fig. 3. Results of 13 volunteer cases : grades of fat suppression for various SPAIR inversion delay times (TI) in SPAIR-DWI
The transverse axis represents the difference between the actual TI and the calculated TI_{null} .

Table. Summary of Fat Suppression in 13 Cases, for Various SPAIR Inversion Delay Times (TI) in DWI

	TI Difference from the Calculated TI_{null} (ms)								
	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20
Good	0	0	0	5 (38%)	13 (100%)	4 (31%)	0	0	0
Fair	0	0	3 (23%)	8 (62%)	0	9 (69%)	3 (23%)	0	0
Poor	13 (100%)	13 (100%)	10 (77%)	0	0	0	10 (77%)	13 (100%)	13 (100%)

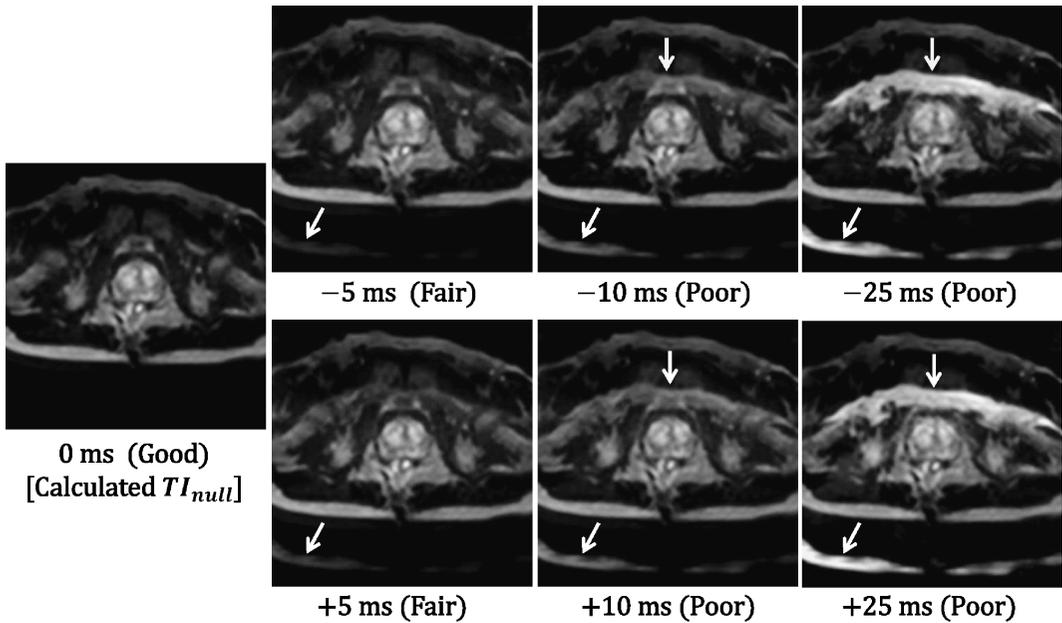


Fig. 4. Pelvic SPAIR-DWIs ($b = 1800 \text{ s/mm}^2$) at 3T in a volunteer, using various SPAIR inversion delay times (TI)

The numbers below the figures represent the difference between the actual TI and the calculated TI_{null} . The characters in the parentheses express the grade of fat suppression. By using the calculated TI_{null} , good fat suppression was obtained. As the difference became larger, chemical shift artifacts (arrows) increased.

より $\pm 5 \text{ ms}$ 以上異なると有意に低下した ($P < 0.01$).

2. TI_{null} 計算値を用いた臨床例での評価

前立腺疾患の症例 65 例において、本法で算出した TI_{null} 計算値を用いて撮像した結果、脂肪抑制の程度は good が 65 例中 61 例 (94%)、fair が 4 例 (6%)、poor が 0 例 (0%) であった。すなわち、本法により、臨床症例の 94% で良好な脂肪抑制が得られ、chemical shift artifact の重なりのない鮮明な拡散強調画像が得られた (Fig. 5)。

考 察

3T の拡散強調像では、脂肪の chemical shift artifact が目立ちやすいため、厳密な脂肪抑制が必要となるが^{2),3)}、本法は、既存の一般

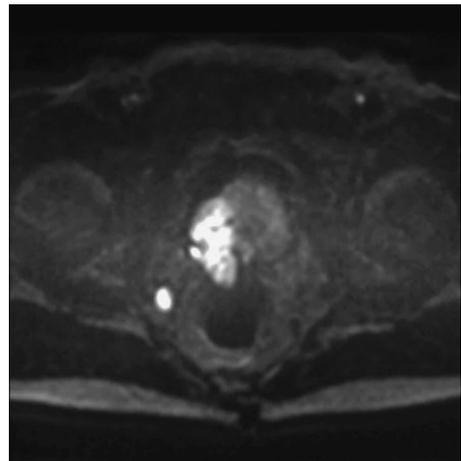


Fig. 5. Pelvic SPAIR-DWI ($b = 1800 \text{ s/mm}^2$) at 3T, using the calculated TI_{null} .

Adequate fat suppression was obtained. Prostatic cancer and small metastatic lymph node were clearly delineated.

的な装置でもすぐに汎用可能で、ボランティアの 100%と臨床例の 94%で良好な脂肪抑制を得ることができ、有用と考えられた。SPAIR 併用拡散強調像など、SPAIR パルスをを用いた 2D マルチスライス撮像では、TR・撮像枚数・撮像分割数のどれか一つを変更しても null point が大きく変動するので、その都度本法で直ちに TI_{null} を算出して撮像に利用することは重要と思われる。さらに、本法を Web 公開⁸⁾したことで、誰もが簡単に TI_{null} を即時算出できるようにした。

なお、SPAIR パルスは、脂肪の大部分を占めるメチレン基やメチル基の周波数成分を選択的に反転する^{9),11)}が、水の信号低下を避けるために水に近い周波数を含まないように設定される⁹⁾ので、水に近い共鳴周波数を持つ不飽和脂肪酸¹⁰⁾などの一部の脂肪成分は抑制されない^{9),11)}。本法を用いた 3T の SPAIR 併用拡散強調像 (Fig. 5) では、脂肪組織の位置にはほぼ一致して若干の信号が見られ、不飽和脂肪酸などの信号と思われたが、位置ずれも信号強度も小さいため、骨盤部の診断の妨げにはならなかった。

本法の限界としては、腸管ガスなどによる B_0 不均一性や動きによる影響を排除できない点である。本法の TI_{null} 計算値を用いることにより、ボランティアでは全例で良好な脂肪抑制が得られたが、臨床例の 4 例 (6%) で軽度の chemical shift artifact が見られ、腸管ガスや体動などの影響が疑われた。

また、本研究では、症例ごとの T_1 値測定を行わなかったが、一律の T_1 値から算出した TI_{null} を用いて撮像した結果、脂肪の消え残りが目立ちやすい 3T の SPAIR 併用拡散強調像においても、ボランティアの 100%と臨床例の 94%で良好な脂肪抑制を得ることができ、 T_1 値測定を行わなくても有用性は高いと考えられた。これは、Fig. 2 に示すように、 TI_{null} 計算値に及ぼす T_1 値の影響が、 TR_{SPAIR} の変更による影響よりも小さく、脂肪の T_1 値に若干の

個人差があっても TI_{null} 計算値の差異はごくわずかであるためと思われる。

なお、今回は単一の b 値のみの検討であるが、脂肪は拡散係数が非常に小さいために^{1),2)}、b 値が大きくなる程、脂肪以外の信号が低下して相対的に残存脂肪信号が目立ちやすくなり、null point を正確に合わせることでより重要になると考えられる。本研究では、比較的大きな b 値 1800 s/mm²での検討で良好な脂肪抑制を得ることができ有用と思われたが、もっと大きな b 値における本法の有用性については、今後、検討してゆきたい。

結 語

3T の SPAIR 併用拡散強調像において、数式により算出した TI_{null} 計算値を SPAIR inversion delay に設定して撮像することにより、良好な脂肪抑制が得られた。

本法は、臨床現場で TR・撮像枚数・撮像分割数のいずれを変更しても、即座に最適な TI_{null} を算出でき、機種やバージョン・リリースを問わず汎用できると考えられた。

なお、本研究の要旨は第 39 回日本磁気共鳴医学会大会 (2011 年) において発表した。

文 献

- 1) Lehnert A, Machann J, Helms G, Claussen CD, Schick F: Diffusion characteristics of large molecules assessed by proton MRS on a whole-body MR system. Magn Reson Imaging 2004; 22: 39-46
- 2) Sarlls JE, Pierpaoli C, Talagala L, Luh WM: Robust fat suppression at 3T in high-resolution diffusion-weighted single-shot echo-planar imaging of human brain. Magn Reson Med 2011; 66: 1658-1665
- 3) Nagy Z, Weiskopf N: Efficient fat suppression by slice-selection gradient reversal in twice-

- refocused diffusion encoding. *Magn Reson Med* 2008 ; 60 : 1256-1260
- 4) Mürtz P, Krautmacher C, Träber F, Gieseke J, Schild HH, Willinek WA : Diffusion-weighted whole-body MR imaging with background body signal suppression : a feasibility study at 3.0 Tesla. *Eur Radiol* 2007 ; 17 : 3031-3037
 - 5) 北 美保, 河野和浩, 米谷克也, 金堂敏彦, 島本一宏, 田中文浩, 尾田英之, 小嶋章裕, 佐藤守男 : SPAIR, FLAIR, STIR における null point 算出法 : Part 1. Theory. *日磁医誌* 2013 ; 33 : 22-32
 - 6) Rakow-Penner R, Daniel B, Yu H, Sawyer-Glover A, Glover GH : Relaxation times of breast tissue at 1.5T and 3T measured using IDEAL. *J Magn Reson Imaging* 2006 ; 23 : 87-91
 - 7) Kuroda K, Iwabuchi T, Obara M, Honda M, Saito K, Imai Y : Temperature dependence of relaxation times in proton components of fatty acids. *Magn Reson Med Sci* 2011 ; 10 : 177-183
 - 8) 北 美保, 河野和浩, 米谷克也, 玉垣大地, 谷知美 : SPAIR · FLAIR · STIR の null point (自動計算サイト). <http://www.seichokai.or.jp/fuchu/dept1602.php>
 - 9) Kaldoudi E, Williams SCR, Parker GJ, Tofts PS : A chemical shift selective inversion recovery sequence for fat-suppressed MRI : theory and experimental validation. *Magn Reson Imaging* 1993 ; 11 : 341-355
 - 10) Schick F, Eismann B, Jung WI, Bongers H, Bunse M, Lutz O : Comparison of localized proton NMR signals of skeletal muscle and fat tissue *in vivo* : two lipid compartments in muscle tissue. *Magn Reson Med* 1993 ; 29 : 158-167
 - 11) Hernando D, Karampinos DC, King KF, Haldar JP, Majumdar S, Georgiadis JG, Liang ZP : Removal of olefinic fat chemical shift artifact in diffusion MRI. *Magn Reson Med* 2011 ; 65 : 692-701

Calculation of Null Points in SPAIR, FLAIR, and STIR : Part 2. Application to Pelvic Diffusion-weighted Imaging with SPAIR at 3T

Miho KITA¹, Kazuhiro KAWANO², Katsuya KOMETANI²,
Toshihiko KONDO², Kazuhiro SHIMAMOTO², Humihiro TANAKA¹,
Hideyuki ODA¹, Akihiro KOJIMA¹, Morio SATO³

*Departments of ¹Radiology and ²Radiological Technology, Seichokai Fuchu Hospital
1-10-17 Hiko-cho, Izumi, Osaka 594-0076 Japan
³Department of Radiology, Wakayama Medical University*

Diffusion-weighted imaging (DWI) requires adequate fat suppression because of its sensitivity to chemical shift artifacts, especially at 3 Tesla (T). We investigated the utility of calculating the inversion time of the null point (TI_{null}) in pelvic DWI with spectral attenuated inversion recovery (SPAIR) at 3T for obtaining adequate fat suppression.

Thirteen volunteers underwent pelvic SPAIR-DWI using various SPAIR inversion delay times (TI) at 5-ms intervals in the range of the calculated $TI_{null} \pm 25$ ms. The degree of fat suppression was evaluated into 3 grades and was compared among the various SPAIR-TIs with the calculated TI_{null} . In 65 cases of prostatic disease, we evaluated the ratio of adequate fat suppression obtained using the calculated TI_{null} .

We obtained adequate fat suppression in all 13 volunteers and in 61 (94%) of the 65 patients using the calculated TI_{null} . Fat suppression was best when the calculated TI_{null} was used ($P < 0.01$), and significantly decreased when the SPAIR-TI value differed by more than 5 ms from the calculated TI_{null} ($P < 0.01$). Chemical shift artifacts increased as the difference between the actual SPAIR-TI and the calculated TI_{null} increased.

In conclusion, this method of calculating the TI_{null} may be useful for obtaining adequate fat suppression for pelvic SPAIR-DWI at 3T.