

## 先行パルスを考えよう！ ～組織抑制とコントラストの強調～

座長 新潟大学医歯学総合病院 診療支援部放射線部門 内藤 健一 (Naito Kenichi)

### 【座長集約】

先行パルスとは、励起パルスの前に印加するRFパルスのことで、特定の組織を抑制することや、組織間コントラストを強調する目的で使用される技術である。広義には、周波数選択的な脂肪抑制パルスや空間飽和パルスなども先行パルスに含まれるが、今回テーマとして取り上げたのは、組織抑制や組織間コントラストの強調を目的に使用される先行パルスで、主に反転回復 (Inversion Recovery : IR) 法である。

IRを利用した撮像法であるFLAIRやSTIRは、IRパルスから撮像開始までの時間(TI)の設定により脳脊髄液や脂肪信号を抑制でき、病変検出に有用なことから臨床に広く利用されている。一方、これらの画像コントラストを問われた場合、FLAIRは「脳脊髄抑制T2強調画像」、STIRは「脂肪抑制T2強調画像」と答える方が多いと思われる。これで本当に正しいのか？ 端的な表現として間違いではないが、正しい表現とは言えないと考える。その理由として、これらは、IRパルスを用いる撮像法であるからである。IRパルスを用いた場合、少なからず縦緩和(組織のT1値)の影響を受ける。FLAIRでは、造影剤を用いることで髄膜炎などによる髄膜の異常増強効果を高信号として描出できる。また、STIRではT1、T2 値の長い組織が相乗的に(T1値の影響を大きく受け)高信号となり、IRパルスにより造影や出血部分の信号がnullとなる場合がある。これらはIRによる縦緩和の影響であり、通常のT2強調画像ではあり得ない。つまり、FLAIRやSTIRは、おかれた環境(および撮像条件)によっては通常のT2強調画像と異なるコントラストを呈する。

また、IR法はTIの設定により信号極性が反転する。繰り返し時間(TR)やデータ収集後次のIRパルスまでの回復時間により画像コントラストは大きく変化することも特徴的である。先行パルスは画像コントラストを修飾する有用な方法であるが、通常の撮像法に比べ条件設定に注意すべきポイントが多い。

そこで、先行パルスを用いた撮像の基本原則と注意すべきポイントについて新潟厚生連上越総合病院の荻原義貞氏と北福島医療センターの高橋大輔氏に講師をお願いした。荻原氏からはFLAIRについて講演して頂いた。FLAIRは、条件設定によりT1あるいはT2を強調することができる。脳脊髄液をnullとするTIはTRによって変化する。画像コントラストに関わる撮像条件の設定について解説して頂いた。高橋氏からは、GRE法におけるコントラストを強調する手法について講演して頂いた。3Dの高速GRE法にIRパルスを用いる場合、TIだけでなく回復時間(shot interval)が画像コントラストに影響する。T1だけでなくDE(Driven- Equilibrium)プリパレーションによりT2コントラストを強調する方法を解説して頂いた。また、各講演の中で先行パルスを用いた撮像の応用例を紹介して頂いた。荻原氏からはbalancedシーケンスにFLAIRを応用し、脳脊髄液抑制による脊髄血管の描出について紹介して頂いた。高橋氏からはbalancedシーケンスにDEプリパレーションを応用し、脈管の信号を抑制し水信号を強調したMRCPを紹介して頂いた。同じbalancedシーケンスでありながら、先行パルスを変えることで異なる組織の信号を抑制または強調できる。大変興味深い応用例を紹介して頂いた。

今回、先行パルスを用いる手法としてFLAIRとGRE法におけるコントラストの強調をテーマとした。共通して言えるポイントとして、TIだけでなくFLAIRでは「TR」、GRE法では「shot interval」すなわち励起後の縦磁化の回復時間がコントラストに影響を与える因子として大変重要であることが理解できたと思われる。この講演が先行パルスについて今一度考える機会となり、また皆様の診療に役立つ情報となれば幸いである。

# FLAIR 法

新潟厚生連上越総合病院 放射線科 荻原 義貞 (Ogihara Yoshisada)

## 【目的】

Inversion Recovery(IR)法は励起パルスの前に180°パルスを印加するパルスシーケンスである。脂肪を抑制するSTIR法や脳脊髄液(CSF)を抑制するFLAIR法がよく使われる。その中で、T1の長い組織である脳脊髄液を抑制するFLAIR法におけるパラメータと画像コントラストの関係を中心にまとめる。

## 【NPを変化させる因子】

IR法で対象組織が抑制されるTIをNull Point(NP)と呼ぶ。ボランティアにて頭部の画像を撮像し、CSFの信号強度を計測しNPを求めた。TRを変化させた場合のNPの変化および異なるIR pulse type(StandardとRobust)でのNPの違いを確認した。また、シミュレーションで磁場強度の異なる場合(1.5Tと3.0T)のNPを比較した。

TRを長くするとNPは延長するが徐々に変化が少なくなる。IR pulse typeはRobustの方が200ms NPが延長した。また、異なる磁場強度の比較では3.0Tの方がNPは若干延長した。

NPには、IRパルスを印加時のCSFの縦磁化の大きさやpulse type(倒れ具合)、緩和時間(戻り具合)が影響する。

## 【T2-FLAIRとT1-FLAIRの違い】

FLAIRのTRを変化させ、それぞれCSFのNPでの画像を撮像した。またTEは4種類変化させた。白質(WM)および灰白質(GM)にROIをとり、信号強度を計測し、WM-GM間コントラストを算出した(Fig.1)。TRとTEが長い場合はコントラストが負の値(GM>WM)となり、臨床でよく用いるFLAIRに近いコントラストになる(T2-FLAIR)。一方、TRとTEが短い場合はコントラストが正の値(WM>GM)となり、T1WIに近いコントラストになる(T1-FLAIR)。例えば、T2-FLAIRでTEを短くした場合やT1-FLAIRでTRを長くした場合は、通常のT2WI,T1WIと同様に、WM-GM間のコントラストがつかないPDWI様の画像に近づく。全体としてはTEよりもTRの設定が大きく影響する。

## 【T2-FLAIR】

T2-FLAIRは一般的によく使われている「FLAIR」で脳室周囲病変や深部皮質下白質病変の検出能が高く、中枢神経領域の検査には必須のコントラストである。

ボランティアにて3.0T装置を用いてFLAIRのTRを変化させ、それぞれNPでの画像を撮像した。またTEも3種類変化させた。FLAIR高信号の病変部(LP)およびWMにROIをとり、信号強度を計測し、LP-WM間コントラストを算出した(Fig.2)。TRが長い方がコントラストは高くなり、12000ms以上ではほぼプラトーになった。ガイドラインにおいても1.5TではTR10000ms以上、3.0TではTR 12000ms程度が推奨されている<sup>1)</sup>。TRを長くすると撮像時間が延長するので必要最小限の延長に留める必要がある。また、TEが長い方がコントラストは高い結果となったが、信号強度も低下するためにそれも考慮してTEを選択する必要がある。

T2-FLAIRでは前橋槽やモンロー孔付近などの流れの速い部位にCSFのflow artifactを認めることが多い。これは、IRパルスが照射されていない隣のスライスからCSFが流入するためである。対策としては、packageを増やし、IRの印加厚を厚くすることが挙げられるが、分割数を多くすると撮像時間が延長する。また、非選択のIRを用いる3D-FLAIRもartifactの抑制に有効である<sup>2)</sup>。

造影後にT2-FLAIRを撮像することで髄膜炎などの髄膜病変が明瞭になる<sup>3)</sup>。これはT2-FLAIRがIRパルスを用いているためにT1コントラストが混入していることと、TEが長く、GdによるT2短縮の影響が強いため、濃度の高いGdが分布する血管が高信号にならないことを利用している。

## 【T1-FLAIR】

3.0TのT1 SEではT1値延長によりT1コントラストが低下する。特に頭部でWM-GM間コントラストの改善を目的に使われている。造影後の利用を想定して、パラメータと造影効果の関係を求める実験を行った。2.5% agarose含む0.05～

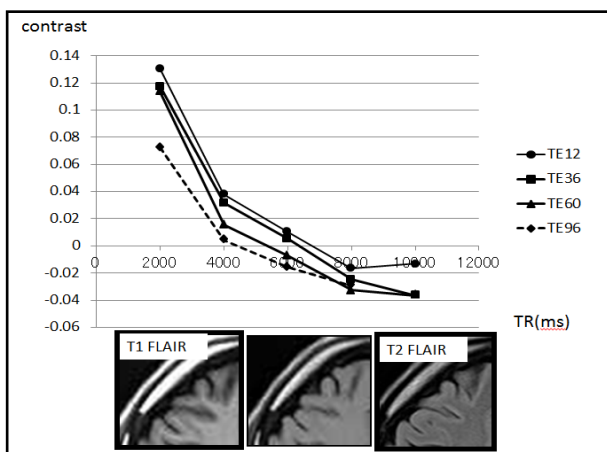


Fig.1 TRとGM-WM間コントラストの関係

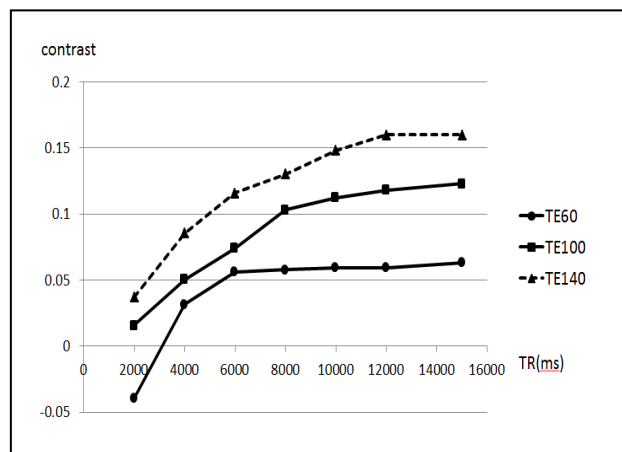


Fig.2 TRとLP-WM間コントラストの関係

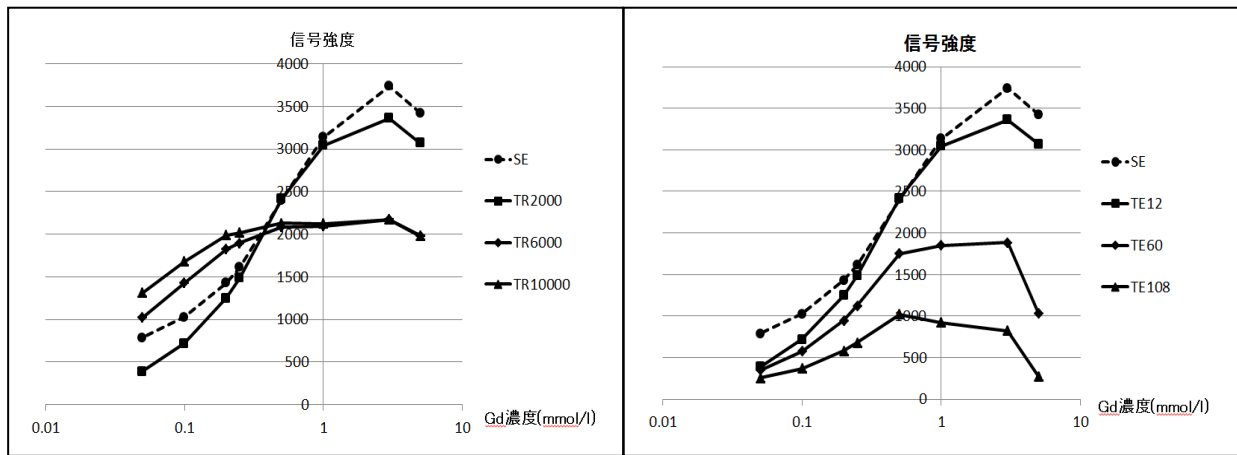


Fig.3 Gd濃度と信号強度の関係(左:TR変化, 右:TE変化)

0.5mmol/lのGd希釈溶液をTRおよびTEを変化させ、それぞれCSFのNPで撮像した。なお、比較としてSE T1W(TR500ms, TE12ms)も撮像した(Fig.3)。基本撮像条件はTR2000ms, TE12ms, ES12, ETL4, 5mm slice, BW 163 (SEは81Hz/pixel)。TRが長くなるにつれてグラフの傾きが小さく、特に高濃度部ではプラトーとなりコントラストが低下する。TEが長くなるとGd濃度の高い部分では右肩下がりとなり造影効果を示さない。TRおよびTEが短い場合(TR2000ms, TE12ms)にSEに近い、右肩上がりのグラフとなり、造影効果が近くなる。

#### 【balanced sequenceにおける応用】

balanced sequenceは、定常状態では血液、水、脂肪などが高信号となる。血管撮像に応用する際、脂肪抑制や移行期のデータを利用することで脂肪の信号を落とすことができるが血液と水の分離はできない。そこでIRパルスを付加して水のNPで撮像すると血管が残る。その際、Multi shotではshot interval (SI)によりNPが変化する<sup>4)</sup>。SIが長くなるとNPも延長する。balanced sequenceのSIは、SE系のFLAIRにおけるTRに類似した位置づけとなる。IRを付加しない場合(non IR)にはSIを長くすることで血液の信号を上げることができるが、IRを付加した場合には水と血液のNPが近いので、SIを長くしてもnon IRの時ほどの血液信号の上昇を期待できない。しかし、造影後に撮像することでそれを補うことができ、

さらにSIを短くすることで撮像時間も短縮することができる。balanced sequenceはSNの高い撮像法であり、3Dで脊髄領域の微細血管の描出などの臨床応用が可能である。

#### 【まとめ】

FLAIR法では対象物であるCSFを抑制するという点でNPを把握しておく必要がある。また、パラメータによって画像コントラストが変化し、T2WIにもT1WIにも近づけることができる。IRパルスはSE系のみならず、balanced sequenceにおいてもCSF抑制として利用可能である。

#### 【参考文献・図書】

- 1) 脳ドックガイドライン2014 日本脳ドック学会 響文社
- 2) Naganawa S, Koshikawa T, Nakamura T, et al. : Comparison of flow artifacts between 2D-FLAIR and 3D-FLAIR sequences at 3T.MR Imaging. Eur Radiol, Oct ; 14(10): 1901-8, 2004
- 3) Splendian iA, Puglielli E, De Alilicis R, et al. : Contrast-enhanced FLAIR in the early diagnosis of infectious Meningitis. Neuroradiology, Aug; 47 (8): 591-8, 2005
- 4) 荻原義貞, 堀江朋彦, 室伊三男 他 : FLAIR-B-TFEの基礎的検討. 日本放射線技術学会雑誌; 61(5): 701-8, 2005

## - GRE 法におけるコントラストの強調 -

北福島医療センター 放射線技術科 高橋 大輔 (Takahashi Daisuke)

#### 【はじめに】

撮像時間の短縮を目的に短いTRや小さいFAを用いた高速GRE法が多用されているが、最適な組織コントラストが得られない場合がある(Fig.1)。そのため、 $\alpha$  RFパルスを照射する前に他のRFパルス(先行パルス)を加えてコントラストを生じさせる方法がある。この方法では、先行パルスの種類や印加時間、収集時間(acquisition duration)、次の先行パルスあるいは励起パルスまでの待ち時間(shot interval)などに応じて、組織にT1あるいはT2コントラストが生じる。

今回、先行パルスによるコントラスト強調手法と撮像条件に

よる信号変化について知ることを目的として、RFパルスの種類や各種撮像パラメータを変化させた際の信号変化について比較検討を行った。

#### 【T1コントラストの強調について】

T1コントラストを強調する手法として、 $\alpha$  RFパルスの前に非選択の90°あるいは180°パルスを加える反転回復(IR)プリパレーション法がある。これはFLAIRやSTIR法に似た技術で、よりT1コントラストを強めながらパラメータに応じて組織信号を強調することができる。

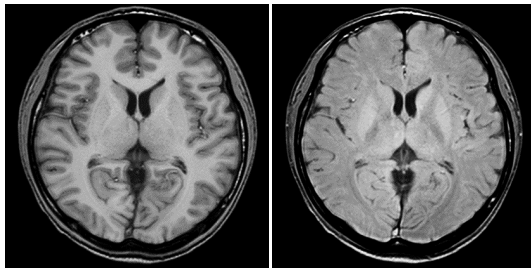


Fig.1 T1コントラストが低下した例  
 左:TR 170ms, TE 1.8ms, FA 80°  
 右:TR 9.4ms, TE 4.6ms, FA 10°

今回、ガドリニウム希釈溶液およびポリビニルアルコール (PVA) を封入した試料ファントムを撮像対象として、①反転時間(TI)、②shot interval、③shot数(TFE factor)およびk-space充填方法を変化させて信号変化を観察した。なお、基本撮像条件は3D T1-TFE、TR/TE:8.1/4.6ms、TI:1500ms、TFE factor:8、shot interval:5000ms、low-high order、NSA:1である。

**【結果】**

① TIによる変化

TIを50~4000msまで変化させた場合、50~1000msの範囲でコントラストの反転や低下が見られた。1500ms以上ではどの試料も信号が上昇する傾向を示し、試料間のコントラストも概ね保たれていたが、3000ms以上ではどの試料も高い信号強度を示しコントラストの低下が見受けられた。

② Shot intervalによる変化

Shot intervalを1550~10000msまで変化させた場合、shot intervalの延長に伴いT1値が長い試料の信号強度は低下し、画像全体のコントラストは向上した。また、同様にボランティアの頭部を撮像してコントラストの確認を行ったところ、ファントム実験と同様の傾向が見られた (Fig. 3)。

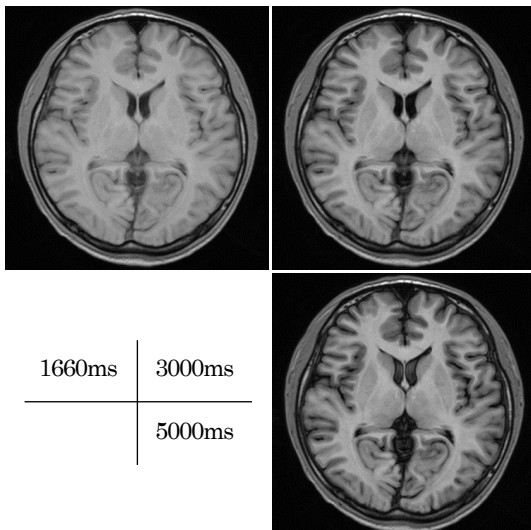


Fig.3 Shot interval によるコントラスト変化

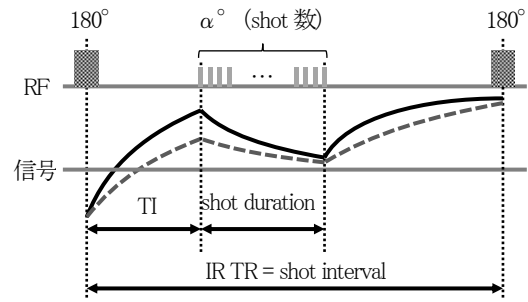


Fig.2 IR プリパレーション法の概略

③ Shot数およびk-space充填方法による変化

Low-high orderの場合はshot数を8~128shotsまで変化させても信号変化は見られなかったが、linear orderの場合にはshot数の増加に伴い信号強度およびコントラストは低下した。これは低周波側を充填するタイミングの違いが要因と思われる、low-high orderは低周波側から充填するため影響は比較的小さく、linear orderはshot数(segment数や先行パルスの数)によって低周波側を充填するタイミングが異なるためであると考えられた。しかし、low-high orderの場合にはshot数の増加に伴いブラーリングも増加するため注意が必要である。

**【考察】**

- FLAIRやSTIR法と同様に、適切な反転時間(TI)の設定が必要である。しかし、FLAIRやSTIR法のnull pointとはやや異なるため、撮像時間や目的コントラストに応じて臨機応変にTI設定すれば良いと考えられる。
- 反転時間(TI)と同様に重要となるパラメータがshot intervalであると考えられる。短すぎる場合には、T1値の長い組織の回復が不十分なうちに次の先行パルスが打たれるために組織間の信号差が小さくなり、コントラストが低下することがあるため設定には注意が必要である。

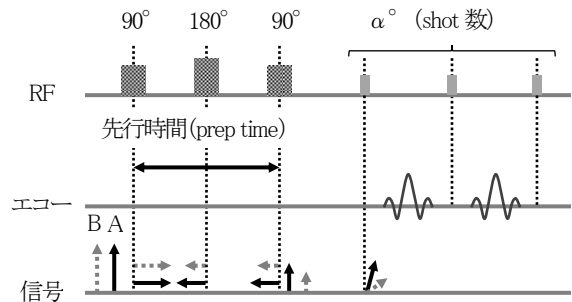


Fig.4 DE プリパレーション法の概略

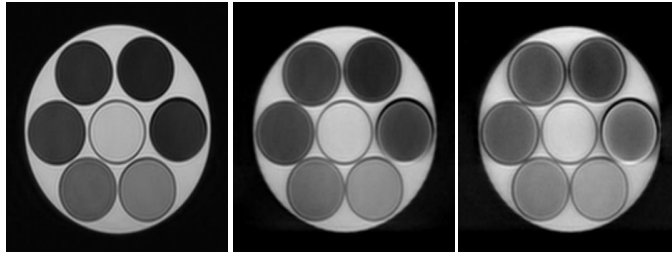


Fig.5 Shot 数によるコントラスト変化  
左:8shots, 中:64shots, 右:128shots

- Shot数はshot intervalに関係するだけでなく、先行パルスの印加回数(何回毎に印加するか)にも関わる。Shot数が少ないほど先行パルスの印加回数が多くなるため、先行パルスの効果が強く反映されると考えられる。K-space充填方法と上手く組み合わせることで、より短時間でコントラストの強調が実現できるものと考えられた。
- STIR法と同様な技術であるため、造影剤投与後の撮像において脂肪抑制手段として用いることは難しいが、頭部などのように脂肪のnull pointよりも比較的長いT1(300msまたはそれ以上)が用いられることの多い部位では、造影剤によって灌流組織のT1値が短縮して強い高信号を呈するため使用可能であると思われる。

#### 【T2コントラストの強調について】

T2コントラストを強調する手法として、 $\alpha$  RFパルスの前にSE法に類似した $(90^\circ) - (180^\circ) - (90^\circ)$ パルスを加えるDriven-Equilibrium (DE) プリパレーション法がある(Fig.4)。これは先行パルスの印加時間(先行時間:prep time)が長いほどT2減衰が進むため、組織コントラストはT2を強調したものとなる。

今回、アガロース希釈溶液を封入した試料ファントムを撮像対象として、①先行時間(prepare time)、②shot数(TFE factor)を変化させて信号変化を観察した。なお、基本撮像条件は3D TFE, TR/TE:15/4.6ms, prep time:100ms, TFE factor:8, shot interval:3000ms, low-high order, NSA:1である。また、shot intervalおよびk-space充填方法も信号変化に関与するものであるが、基本的にはIRプリパレーション法における信号変化と同様な変化を示すため、時間の都合上、本検討では割愛させていただいた。

#### 【結果】

##### ① Prep timeによる変化

Prep timeを50~500msまで変化させた場合、prep timeの延長に伴いT2値が短い試料の信号は大きく減衰し、長い試料は緩やかに減衰した。また、prep timeが長いほどコントラストが2値化(よりT2値の長い組織のみ強調)する傾向を示した。

##### ② Shot数による変化

Shot数を8~128shotsと変化させた場合、shot数の増加に伴いT2値が短い試料ほど信号強度は上昇する傾向が見られ、コントラストは低下した(Fig. 5)。

#### 【考察】

- 先行時間(prepare time)に応じてT2コントラストは強調されるが、それに伴い2値化する傾向が見られるため目的に応じて適切な設定が必要である。また、DEプリパレーション法はT2コントラストを強調することができるが、T1値が大きく異なる場合にはT1回復の影響も受けるため、DEプリパレーション後のエコー収集手段(T1, T2\*など)には注意が必要であると思われた。
- DEプリパレーションの場合、先行パルスによって強調できるコントラスト(信号差)がごくわずかであるため、shot数が多くなるほどエコー収集中に信号差が小さくなるものと思われる。DEプリパレーション法を用いる場合にはshot数は小さい方が効果的であると考えられた。

#### 【臨床応用】

BalancedシーケンスにDEプリパレーションを付加した3D MRCPは背景組織の情報を保ち、また、T2短縮によって高速SE系MRCPでは不明瞭となりやすい高粘性胆汁も描出ができるため、血管系と脈管系の位置関係が把握しやすいメリットがある。また、Prep timeの調整で背景組織や血管系と脈管系のコントラスト制御が可能である(Fig. 6)。

#### 【まとめ】

先行パルスのメリットは、様々なシーケンスに付加できる自由度の高さであるが、実験を通して、先行パルスの種類や撮像条件によって多様なコントラストが得られることを知ることができた。一方、少なからず撮像時間の延長を招くため、先行パルスを付加すること無くTRやFAを調整して得られる画像よりも時間あるいはコントラストの観点からメリットがある場合に有効な手法であることを再確認することができた。