

## Gradient Echoの基礎技術 - 使いこなす上で抑えておくべき基礎的事項 -

北福島医療センター 放射線技術科 ○丹治 一(Tanji Hajime)

**【はじめに】**

本稿は、第9回TCRT「入門セミナー・エキスパートに学ぶMRI撮像技術」で述べた、Gradient echo (以下GRE) 法に関する内容を、事後抄録として纏めたものである。

**【撮像工程】**

GREは、撮像の高速化を図る手立てとして再収束パルスを排除し、任意角の励起パルスのみで信号を得る撮像方法である。工程的には、励起パルスによって生じたFID信号(Free Induction Decay)を対象にして、読み取り勾配に、位相分散勾配(dephasing lobe)と、収束勾配(rephasing lobe)で構成される傾斜磁場勾配(bilobed gradient)を印加することで信号を取得する。取得したFID信号は、Spin Echo法(以下SE)のように再収束パルスを用いて取得するエコーと異なり、外部磁場などの影響が補償できていない。そのため、T2を時定数に減衰するEcho(SE)に比べて減衰速度が速いのが特徴である。この信号減衰を「T2\*」として区別し、この信号から得たT2 likeなコントラストを「T2\*コントラスト」として取り扱う。

**【画像特徴】**

再収束パルスを排除したことで、磁化率変化や位相変化に敏感となり、GRE画像には、磁化率影響・効果(susceptibility artifact・effect)と、境界効果(Chemical shift artifact of the second kind)の特徴的な変化が生じる。また、励起パルスから信号取得までの時間が短いことと、後述するSteady State Free Precessionに伴う画像変化によって、インフロー効果(Flow Related Enhancement)の特徴が生じ易くなる。

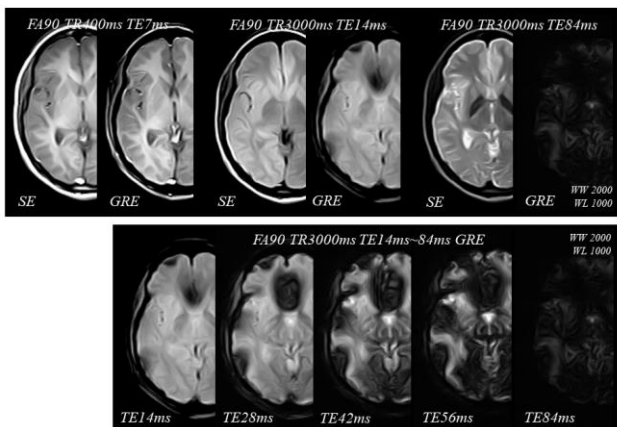
**【条件構築】**

SEとGREで得られる信号は、式(1)で表され、T2緩和を示す項の“T2”が、“T2\*”であること以外に違いは生じない。SEと同じ励起角(RF90°)を用いて同一なTRとTEで撮像を行い、その画像を比較すると、GREの特徴を感覚的に理解することができる (Fig.1)。

式(1)-1  $S_{SE \text{ and } S_{GRE (RF90deg)}} = p (1-E_1) \exp(-TE/T_2)$

式(1)-2  $E_1 = \exp(-TR/T_1)$

式(2)  $S_{GRE (TR \geq T_2)} = p (\sin \theta (1-E_1) \exp(-TE/T_2)) / (1-E_1 \cos \theta)$



T1緩和を反映した条件下では、SEもGREも類似したコントラスト画像が得られる。プロトン密度像では、僅かなコントラストの違いと、GREには前頭洞・篩骨洞・乳突蜂巣付近の磁化率影響が見られる。T2緩和を得る条件下でのGREでは、信号が乏しく、僅かな髄液信号と磁化率影響が見られるのみで、有益な情報は存在しない。この状況はTEを変化させても変わらない。(TEに相関して磁化率影響の程度が変化するだけで、SEのようなT2コントラスト像を生成することは出来ない。)

Fig.1 SE法とGRE法の画像比較(同一条件)

Fig.1から、T2に類似するコントラストを得るためには、励起パルスのFlip angle(以下FA)を制御する必要が生じる。FAを90°未満で制御する場合の信号は式(2)で表わすことができ、FAを下げることでT1の影響を抑え、T2\*の関与を増やすような制御が必要となる。FA制御による実際の画像変化をFig.2に示す。残留磁化が生じないことを前提にした場合(TR ≥ T2 or Spoiled GREの場合)、良質なT2\*画像を得るためには、ある程度長いTR設定を施す必要がある。また、仮にTRを短縮した場合にはFig.3のような白質・灰白質・脳脊髄液の信号変化が齎される。

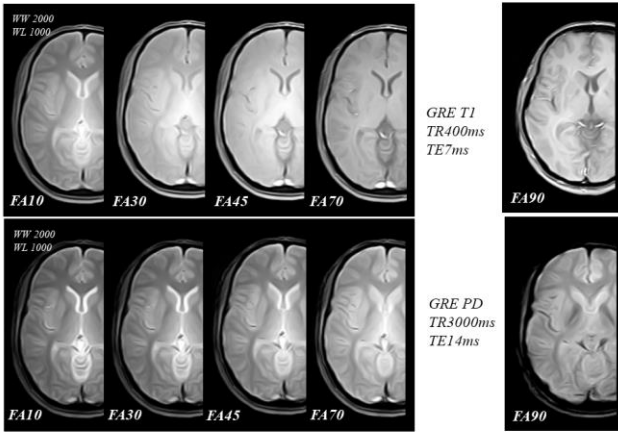


Fig.2 T2\*を得るためのTRとFAの関係

T1支配の小さい条件下(PDW)では僅かにFAを下げるだけで、コントラストはT2側に傾く。一方、TRが短く、T1支配の強い条件下(T1W)では、FAを下げてT2側へのコントラストの傾きは弱くなり、良質なT2コントラストは得にくくなる。

【Ernst角】

Fig.4に、TR500msにおけるFAと各組織(白質、灰白質、脳脊髄液)の信号強度の関係を示す。90°の励起角が最も高い信号強度を成す訳ではない。設定するTRや組織のT1に依存して、信号が最も強くなるFAが存在する。これをエルンスト角(Ernst angle)と言う。TR≧T2の場合や後述するSpoiled GREにおいては、FAがエルンスト角よりも大きい場合にはT1コントラストが増加する傾向を示す。また、FAがエルンスト角よりも小さい場合には、プロトン密度に依存したコントラストを呈する。エルンスト角は式(3)で求めることができ、TRとエルンスト角の関係をFig.5に示す。

式(3) Ernst angle  $\cos \theta = \exp(-TR/T1)$

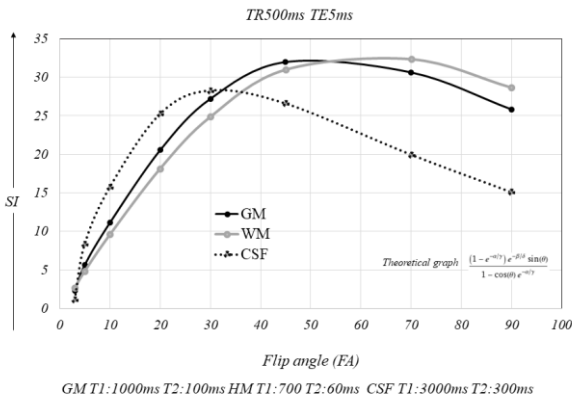


Fig.4 FAと信号強度の変化

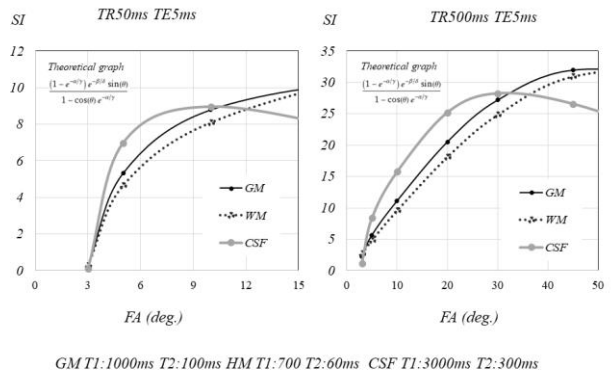


Fig.3 TRとFAの関係:式(2)による理論値

短いTRを用いた場合でも理論上はFAを下げることでコントラストはT2側へ傾く。しかし、信号量の低下とともに組織差も小さくなり、適当なFAの範囲も狭くなる。(Spoiled GRE)

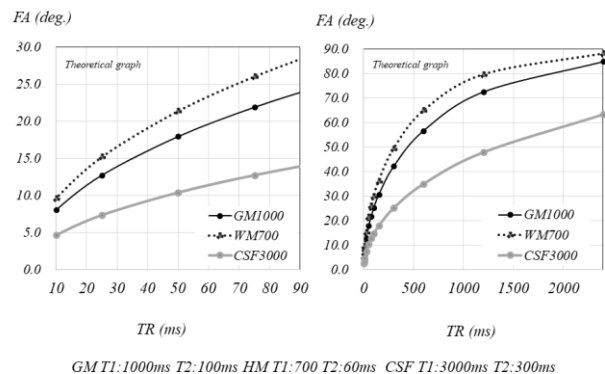


Fig.5 TRと最適角(エルンスト角)

【TR≦T2の影響】

GREで重要な点は、TRの短縮に伴って生じる残留磁化の影響である。Fig.6に、励起角90°においてTRを短縮させた場合の画像変化と、短いTR(14ms)においてFAを小さくした場合の画像変化を示す。大きなFAのまま、TRを短縮すると、磁化の回復が十分に保たれず、著明な信号低下が生じる。また、次第にT1コントラスト上に髄液信号を上書きしたかのような変化が見られ、T2likeな様相を見せ始める。FAを小さくすると傾向が緩和するが、これらの変化は、上述した式(2)による挙動とは異なってくる。(Rewound GRE:後述)

**【定常状態】**

TRを短縮すると、磁化の回復が間に合わずに部分飽和が生じ、組織信号が低下する。また、 $TR \leq T1, TR \leq T2$ の経過とともに、縦磁化→横磁化の順で定常磁化状態(Steady state)に至り、 $TR \leq T2^*$ 程になると、自由歳差運動 (Steady State Free Precession)と呼ばれるコヒーレントな状況に陥る。この状況下では、FID以外に、SE(Hahn echo ,eight ball echo)やSTE(stimulated echo)などの信号が生じ、混在するようになる。この影響によって、式(2)の挙動( $TR \geq T2$ の場合やSpoiled GREの挙動)とは一線を画すようになる。

Steady state状態におけるGREの撮像では、残留磁化の取り扱いや、生成信号の取り扱い方の違いによって、幾つかの撮像方法論と理論式が存在する。どの方法論でも、Steady stateに至るまでには相応の移行時間を要し、場合によっては画像コントラストにも影響を与える。そのため、dummy-pulseの活用や、画像空間への信号充填方法(Profile order)を工夫するなどの対策が必要となる。

**【Spoiled GRE】**

Steady state状態におけるGREの撮像法は4つに大別できる。1つは、式(2)の理論に則って使用することができるSpoiled GRE (類似法：SPGR, T1FFE, FLASH, Fast FE, RF spoiled SARGE) である。この方法は、コヒーレントな状況で生じる各種の信号を排除するように設計されたもので、TR毎に位相変化(phase cycling)を施したRFや、線形(或いはsemi random)に変化を加えたGradientを駆使して残留横磁化を事後相殺する。よって、短いTRにおいてもT1強調像やプロトン密度像が生成できる。また、Long-TRによるT2\*像の生成にも支障をきたすことはない。日常臨床において、最も活用されている撮像方法である。

**【Rewound GRE】**

2つ目は、TRの短縮によって生じた残留横磁化を反映するRewound GRE(類似法：GRASS, FFE, FISP)である。この方法は、先に述べた古典的なGREであり、GradientにRewinderと呼ばれる位相を整える手段を講じただけのシンプルなものである。Long-TRによるT2\*像の取得に利用するだけでなく、短いTRで生じた残留横磁化を主たる信号として、T2\*likeな画像取得にも役立てられている。残留横磁化を含んだRewound GREの信号は式(4)で表され、極めて複雑になる。

式(4)-1  $S_{\text{Rewound GRE}} = p [ (1-E_1) \sin \theta ] / C [ (C+D E_2) / (D^2-C^2)^{1/2} - E_2 ]$

式(4)-2  $E_2 = \exp(-TR/T_2)$

式(4)-3  $C = E_2(E_1-1)(1+\cos \theta)$

式(4)-4  $D = (1- E_1 \cos \theta) - (E_1 - \cos \theta) E_2^2$

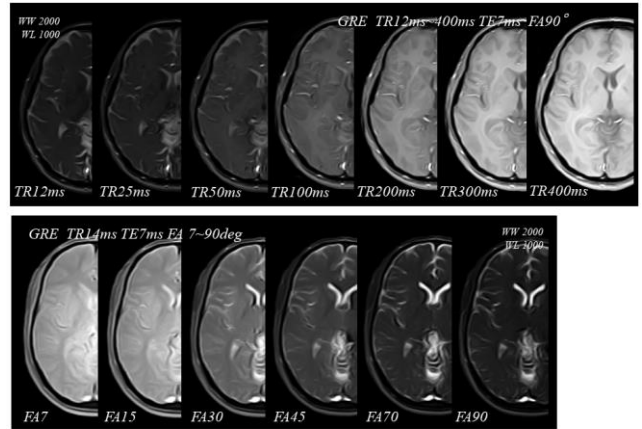


Fig.6 古典的なGREのコントラスト変化 (Rewound GRE)

$$p \times \frac{(1 - \frac{t}{T_1}) \sin(\alpha)}{1 - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha))} \times \frac{1 - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha)) + (1 - \cos(\alpha)) \times \frac{2t}{T_2} \times 1 - \frac{t}{T_2}}{((1 - \cos(\alpha)) \times \frac{2t}{T_2})^2 - \sqrt{1 - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha))^2} - (1 - \frac{t}{T_2})}$$

**【Time reversed GRE】**

3つ目は、Time reversed GRE(類似法：SSFP, T2FFE, PSIF)と言われる方法である。励起によって生成されたFIDと、Steady state によって生じたSE(STE)の信号を分離して、SE(STE)の信号のみを収集する手法である。この方法では、dephasing lobeと, rephasing lobeの印加操作によって、FIDとSE(STE)の位相を意図的にずらす。この操作によって、SEの収束タイミングが1TR分遅れることから、“TRよりTEが長いsequence”とも言われる。Time reversed GREで得られる信号は式(5)で表され、T2\*でなく、T2となる。FIDや残留する横磁化信号を取得するRewound GREとは、収束タイミングだけが違うことから、両方の信号を一度に得る撮像方法も存在する(例: DESS, CISS)。

$$\text{式(5)} \quad S_{\text{Time reversed GRE}} = p \left[ \frac{(1-E_1)E_2}{C} \sin \theta \frac{1 - (D+C E_2)/(D^2-C^2)^{1/2}}{1} \right]$$

$$p \left( 1 - \left( 1 - \frac{t}{T_1} \right) \times \frac{1 - \frac{t}{T_2}}{1} - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha)) \sin(\alpha) \times 1 - \frac{1 - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha)) (1 - \frac{t}{T_2})}{(1 - \cos(\alpha)) \times \frac{2t}{T_2} + \sqrt{(1 - \cos(\alpha)) \times \frac{2t}{T_2}} - \sqrt{1 - \frac{t}{T_2} \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha))^2}} \right)$$

【Rephased GRE】

4つ目は、FID、SE、STEを纏めて捉えるRephased GRE(類似法：FIESTA、B-FFE、TrueFISP、TrueSSFP)である。全ての信号の位相を正確に整えるため、180°でphase cycleさせるRFと、symmetryなgradient-componentを用いることから、Balanced GREとも呼ばれている。T2より極めて短いTRと、T2\*より短いTEを前提条件にした場合、Rephased GREで得られるコントラストは、T2/T1を成す。Rephased GREは式(6)で表され、Fig.7に示すようにTRを変化させてもコントラストは変化しない。

$$\text{式(6)} \quad S_{\text{Rephased GRE}} = p \left[ \frac{(1-E_1) \sin \theta}{(C+D)} \right]$$

$$k p \times \frac{(1 - \frac{t}{T_1}) \sin(\alpha)}{(1 - \frac{t}{T_2}) \times \frac{t}{T_1} (1 - \cos(\alpha)) + (1 - \cos(\alpha)) (2 \times \frac{t}{T_2})}$$

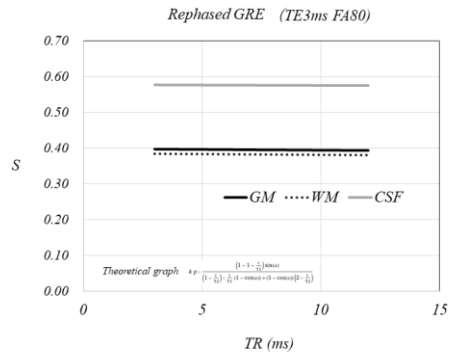
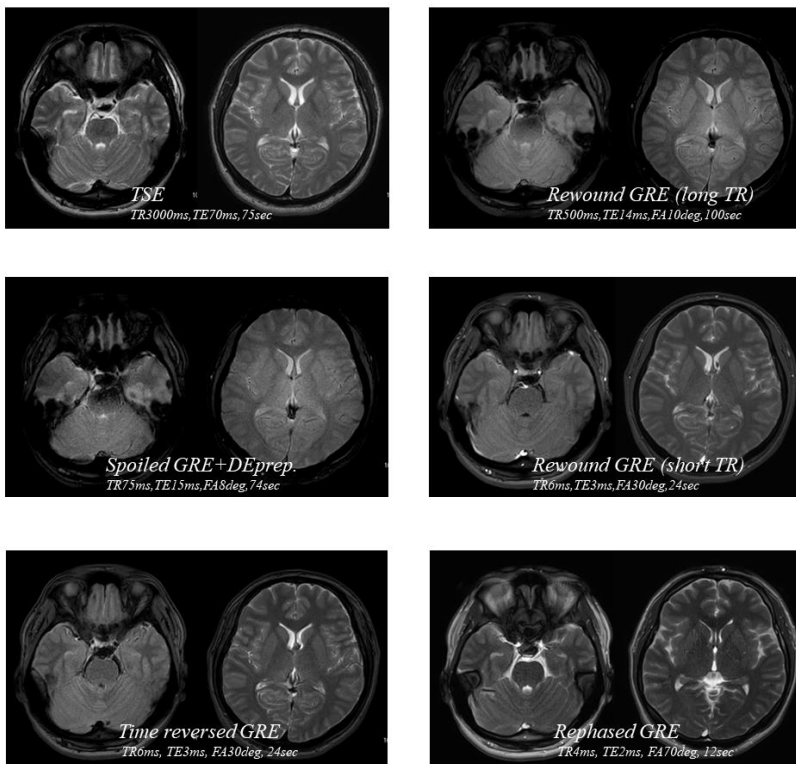


Fig.7 Rephased GRE：TRとコントラスト

【実際】

Fig.8に上述の方法論によって得た、T2コントラストの比較画像を示す。どの方法論においても短時間で良質な画像が得られるが、細部で一長一短が存在する。そのため、用途に応じて使い分けが必要である。

装置性能の向上に伴って、GREも有用なコントラストを取得できる条件範囲が広がっており、新たな活用法にも期待が持てるところである。本稿が今後のGRE活用の一助となれば幸いである。



後頭蓋窩レベルではSEに比べて磁化率影響を受け易い。また、橋周囲の髄液信号は磁化率と流れの影響によって分散(diphase)しやすく、低信号を呈する場合がある。TR << T2\*でのRewound GREとTime reversed GREは、類似するコントラストを呈し、T2\*とT2の違いをあまり感じさせなくなる。Flow Related Enhancementの有無のみが違いとして現れる。

(Philips3.0T MRI)

Fig.8 各方法によるT2(T2\*)画像