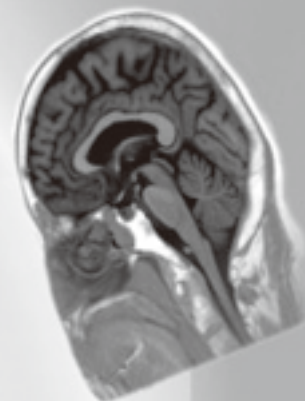
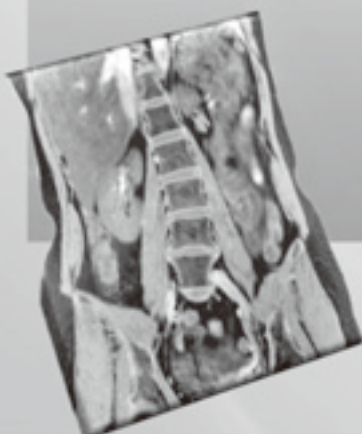


連載企画 MRI



▶ パルスシーケンスを理解する
—Spin Echo法—

済生会栗橋病院
放射線技術科 渡邊 城大



埼玉県放射線技師会
編集・情報委員会

パルスシーケンスを理解する

— Spin Echo法 —

済生会栗橋病院
放射線技術科 渡邊 城大



1. はじめに

MRI (Magnetic Resonance Imaging) の基礎を勉強しようと思って文献や教科書を開くと必ずといっていい程、どの本にも出演依頼の多いパルスシーケンス (別名: シーケンスチャート、パルス系列など) と呼ばれる時系列に並んだ工程表に遭遇します。まず図1と図2を見比べてみてください。どの本にも書かれているごく一般的なSE法 (Spin Echo法) のパルスシーケンスですが、微妙にそれぞれのパーツ (傾斜磁場) の位置が異なっていることがわかります。どちらが正しいのでしょうか? また両方正しいとするならば何らかの法則や決まりごとに従ってパーツを動かしてもよい可能な範囲があるはずです。これらをクリアにして実際に出てきた時に迷わずに (わかった気分で) 本の続きを読んでいける手助けになればと思っています。

ちなみに数式に登場していただいても私には上手に説明できるとは考えにくいため今回は出演をご遠慮いただきました。もっと深く理解したい方は専門書を一読して頂けたらと思います。

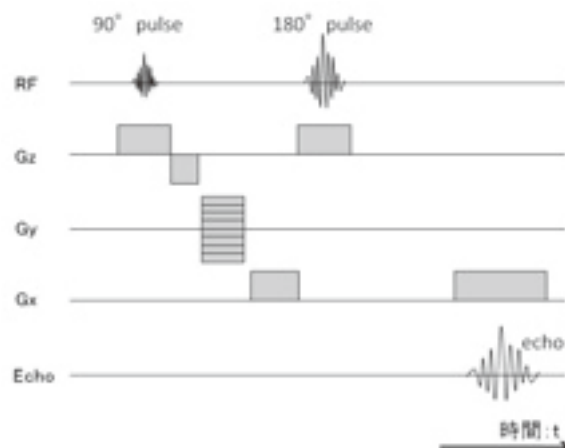


図1: SE法のパルスシーケンス I

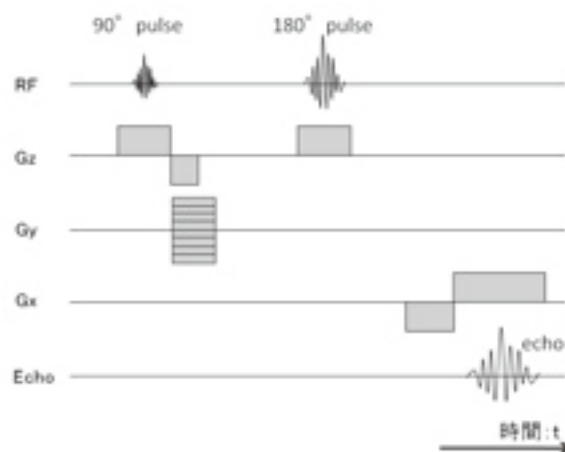
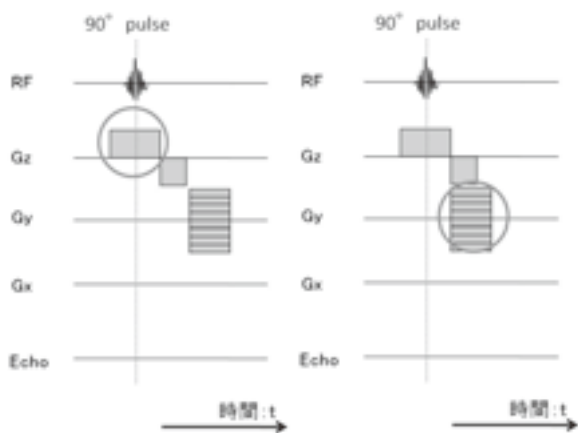


図2: SE法のパルスシーケンス II

2. point1

『RFパルスを印加する時の傾斜磁場は一つ』

パルスシーケンスを理解するにあたりいくつかの鉄則があります。ここでは“point”という形で書きました。最初は『RFパルスを印加する時の傾斜磁場は一つ』です。90°パルスや180°パルスとよばれるRFパルス (radio frequency pulse) を印加する時、位相が崩れないように一定の強さの傾斜磁場で行う必要があります。通常はスライスの位置や厚さを決定するためのスライス決定用傾斜磁場 (Gz) とRFパルスを同時に行います (図3.4)。そのため他の位相エンコード傾斜磁場 (Gy) や周波数エンコード傾斜磁場 (Gx) が同時に被ってしまうとそれらの影響により傾斜磁場が一定にならず位相が崩れてしまいます (図5)。これは180°パルスも同様であり、RFパルス印加時にGz以外の傾斜磁場がくることはありません (図6.7)。



左図

図3：90° pulseとGzのタイミング (可) I

右図

図4：90° pulseとGzのタイミング (可) II

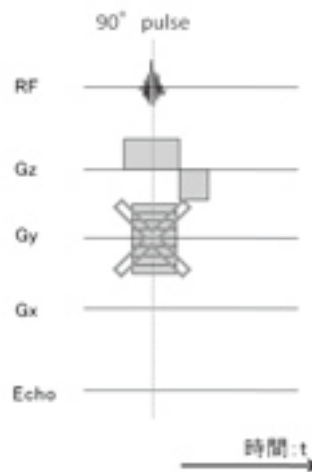


図5：90° pulseとGzのタイミング (不可)

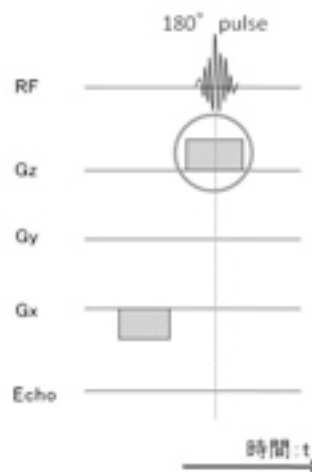


図6：180° pulseとGzのタイミング (可)

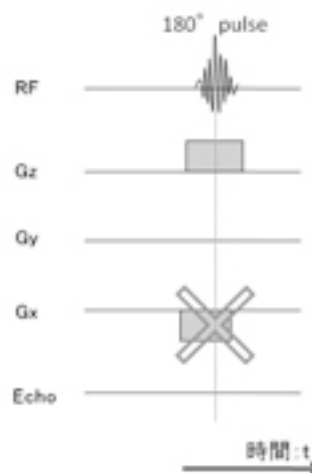
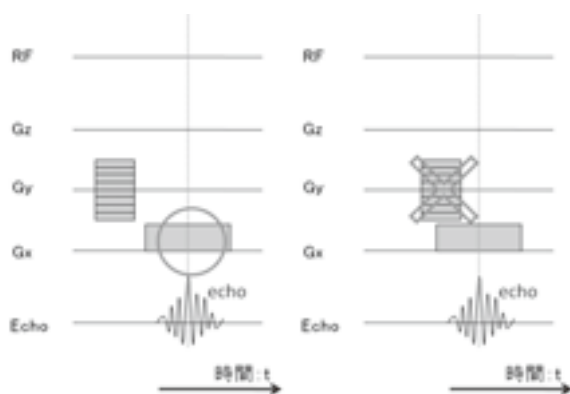


図7：180° pulseとGzのタイミング (不可)

3. point2

『Echoを収集する時の傾斜磁場は一つ』

二番目としては『Echoを収集する時の傾斜磁場は一つ』です。考え方はpoint1と同じで、echoを収集する時は読み取りに必要な傾斜磁場である周波数エンコード傾斜磁場 (G_x) を同時に行います。こちらも一定の強さの傾斜磁場が必要で、位相が崩れないようにします (図8,9)。



左図

図8: echoと G_x のタイミング (可) I

右図

図9: echoと G_x のタイミング (不可)

4. point3

『Echoの収集時は位相が収束している部分でとる』

point1,2は傾斜磁場が位相を崩すことを中心に考えましたが、ここでdephasingとrephasingについて考えます。位相が揃った状態から揃っていない状態になることをdephasing (dephase) といい、逆に位相の揃っていない状態から揃った状態になることをrephasing (rephase) といいます。point1,2はどちらかといえばdephasingの話だったことがわかると思います。揃っている位相に傾斜磁場を行うとdephasingがおきます。その後、逆の方向に傾斜磁場をかけるとrephasingされて再び位相が揃うこと (再収束) になります (図10)。

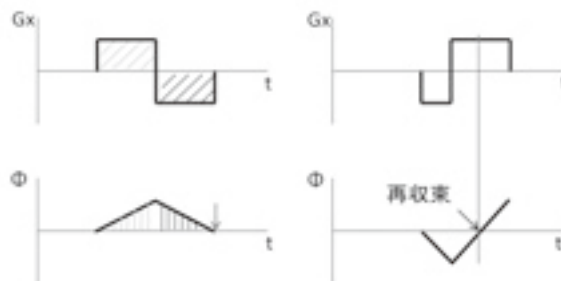
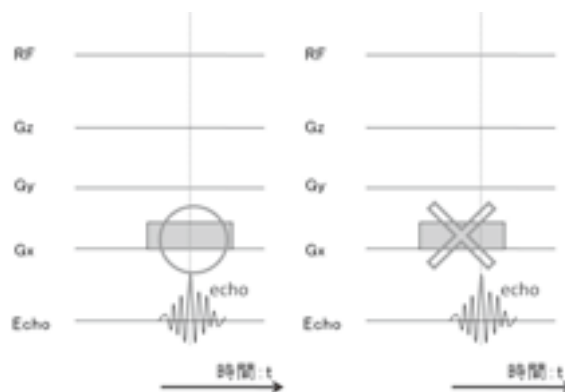


図10: 傾斜磁場と再収束の関係

point2で述べたようにechoを収集する時は G_x を同時に行いますが、発生するechoが一番強い時にちょうどrephasingされて位相が再収束した部分とタイミングを合わせる必要があります (図11,12)。



左図

図11: echoと G_x のタイミング (可) II

右図

図12: echoと G_x のタイミング (不可)

5. 周波数と位相

実際のMRI検査を考えてみます。静磁場に入ってきたプロトンの周波数 (簡単にいえば単位時間あたりの波の回数) と位相 (1周期内の波の位置) はどうなっているのでしょうか? 結果から述べてしまいましたが周波数は揃っていて、位相は揃っていない状態 (分散) にあります。そこに傾斜磁場をかけてみます。周波数においては傾斜磁場の強い

部分（プラスの部分）では波の回数が多くなる、つまり周波数は高くなります。ちょうど中心部分では傾斜磁場の強さが変わらないために周波数も変化はなく、逆に傾斜磁場は強いがマイナスの部分では周波数は低くなります。位相においてはもともと揃っていない状態なので、傾斜磁場を行ってもかわらず揃っていない状態にあります。ただ今回は理解しやすくするために傾斜磁場によって余計に分散する、より速く分散すると考えて進めていきます。

次に傾斜磁場を切った状態を考えてみます。周波数と位相はどうなるでしょうか？周波数は傾斜磁場を行う前の状態に戻り、位相はもともと揃っていないので揃うことはありません。つまり周波数は傾斜磁場を切って時間が経過すると揃いますが、位相は時間が経過するだけでは揃わない（逆向きに傾斜磁場をかけると4にでてきたrephasingにより再収束しますが、今は逆向きを考えずに純粋に傾斜磁場だけを考慮しています）ということになります。

6. RFパルスと位相

図13は位相を太線として、揃っている状態では直線上の傾斜磁場がかかっていない高さに、また位相の揃っていない状態では傾斜磁場の強い部分付近になるように示しています。

本来位相は全体を通して考えなくてははいけません、各傾斜磁場に分割し説明してから最終的に一つにまとめたいと思います。ここまで述べてきて気付いたかもしれませんが先ほどから『位相』という言葉が多用されています。SE法のみでなくGE法（Gradient Echo法）のパルスシーケンスを考える時にわかっているととても便利なので『位相』をクリアにすることを中心に進めます。

さて、図14は90°パルスをかけている時の位相の変化を示したものです。90°パルスと同時にスライス選択のためのGzを印加しますが、5で述べ

たように位相の揃っていない所に傾斜磁場をかけるとさらに位相は崩れます。しかし90°パルスはもともと位相を揃えて巨視的磁化ベクトルを90°傾けるパルスであるために、揃っていない位相も揃うことになります。その後再び傾斜磁場によって崩れますが、逆向きに傾斜磁場を印加することで4にでてきたrephasingにより再収束することになります。

ここで一つの矛盾が生じます。傾斜磁場は位相をdephasingさせますが、90°パルスは位相を揃えるという逆の作用があり、なおかつそれらが同時におこなわれることです。傾斜磁場の観点から見ると図14、90°パルスの観点から見ると図15となります。どちらの効力が大きいかというと後者の力が強いといわれていますが、90°パルスの中心においてはどちらも位相が揃うことになり違いはありません。



図13：位相の状態

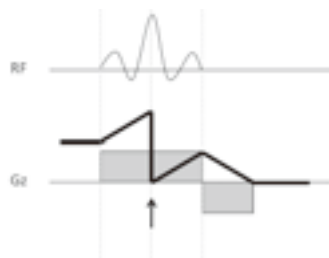


図14：90° pulseと位相の再収束 I

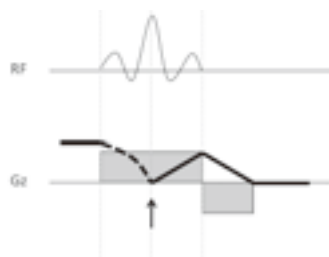


図15：90° pulseと位相の再収束 II

7. スライス決定用傾斜磁場 (Gz)

Gzの位相を完成させてみます (図16)。90°パルスは図15の作用をしますが、180°パルスは位相を逆向きにする働きをします (180°パルスの直前に揃った位相がくるので途中で逆向きになりますが再び位相は揃います)。

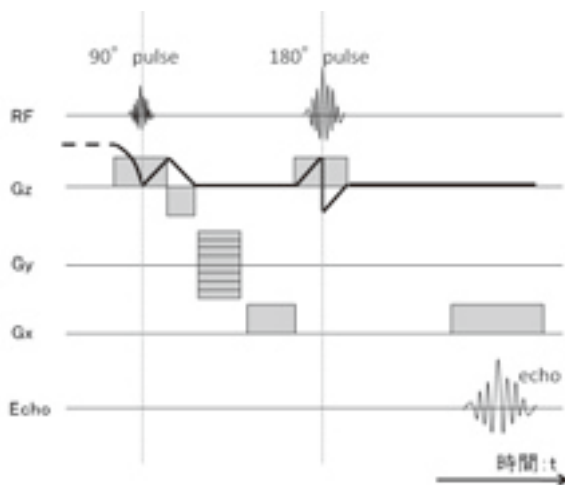


図16：Gzの位相の状態

8. 位相エンコード傾斜磁場 (Gy)

Gyは一度にすべてのエンコードの信号を取得することができないため、TR (repetition time) ごとに傾斜磁場の強さをかえて繰り返す必要があります。本当であれば図17の下のように書くのが正しいのですがとても長くなるのでそれらをひとまとめにしたものを使用することが多いです。

Gyの位相を図18にまとめました。揃っていない位相は90°パルスによって揃い、その後Gyの強度分だけdephasingすることになり、そのままecho取得を行います。Gzとの違いは位相が揃っていない (Gyの強度分だけずれたまま) 状態でechoの収集を始めることです。

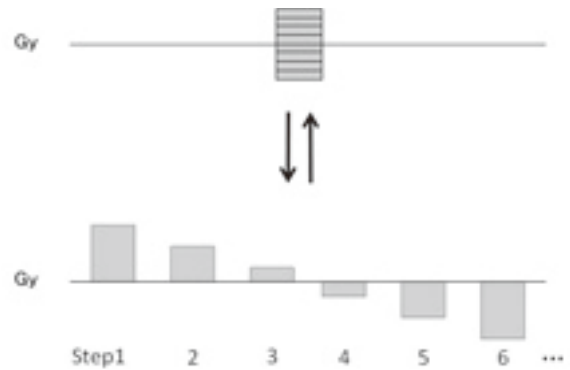


図17：Gyの傾斜磁場毎の分割図

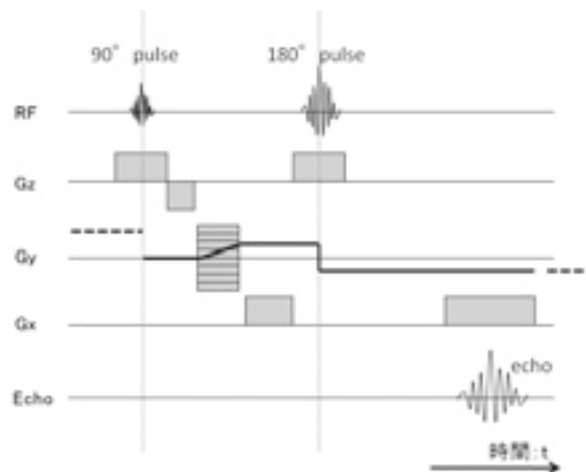


図18：Gyの位相の状態

9. 周波数エンコード傾斜磁場 (Gx)

GzおよびGyと同じ考えでGxの位相を書いてみてください (図19,20)。point3で述べたように図19,20共にechoを収集する時の一番信号の強いところで位相が収束し揃っているはずですが、つまりどちらのGxの位置でも可能であり、SE法では同じ結果になることがわかります。

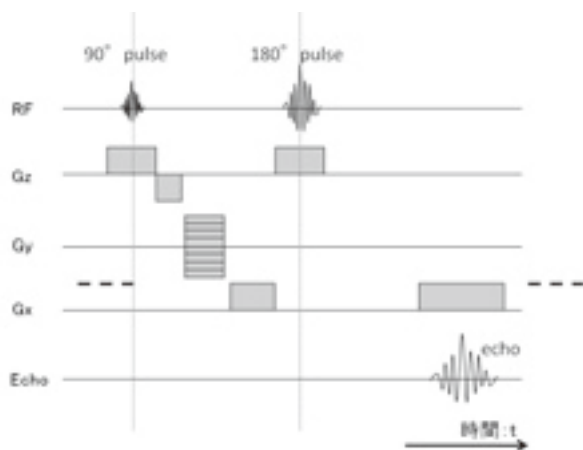


図19：Gxの位相の状態 I

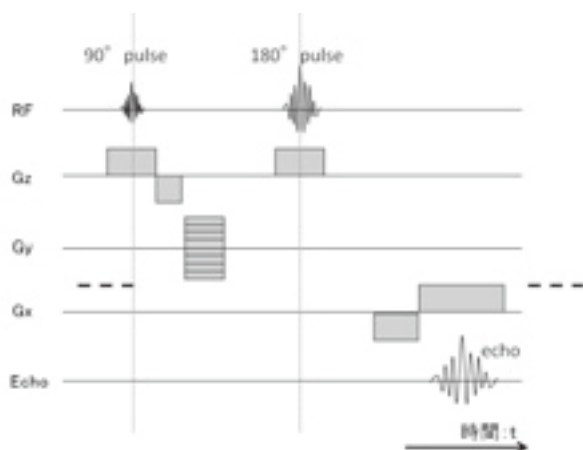


図20：Gxの位相の状態 II

10. まとめ

図21,22にすべての傾斜磁場に対する位相を加えました。echo収集時にGzおよびGxの位相は揃っていますが、Gyのみ『Gyの強度分だけずれたまま』信号を取得することになります。

つまり全体を通してGyの違いのみ位相の違いとして信号が得られ、読みとる作業を位相エンコード分だけ繰り返すことになります。point1とpoint2の『RFパルス印加する時とEchoを収集する時の傾斜磁場は一つ』であることとpoint3の『Echoの収集時は位相が収束している部分でとる』ことを思い出していただき、図1,2をもう一度見直してみてください。

どちらもSE法のパルスシーケンスとして間違っていないことがわかります。

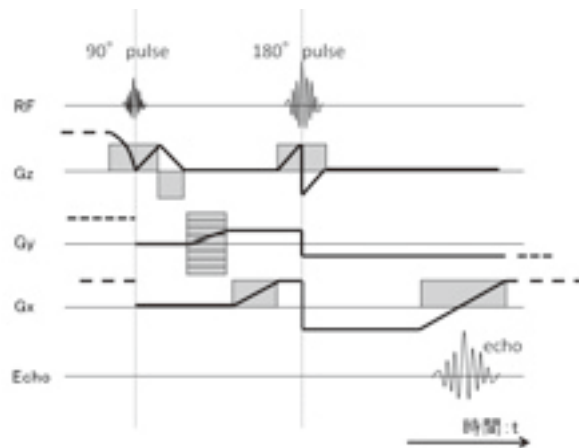


図21：SE法パルスシーケンスの位相の状態 I

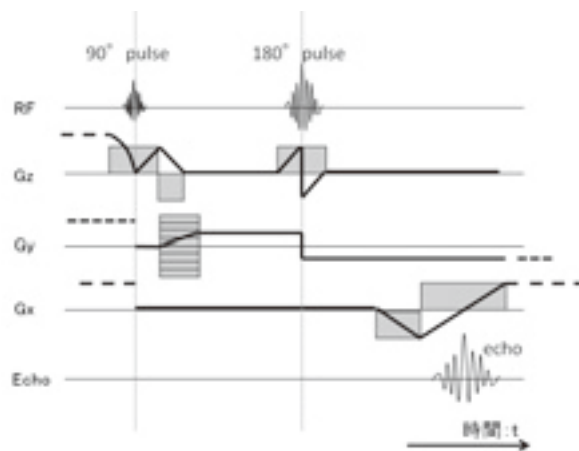


図22：SE法パルスシーケンスの位相の状態 II

長々と書いてしまいましたがSE法のパルスシーケンスについて多少なりとも理解していただけましたでしょうか？少しでも分かった気分になっていただけたら幸いです。

最後に執筆にあたりご協力いただきました済生会栗橋病院放射線技術科諸兄、西井律夫氏、岩井悠治氏、栗田幸喜氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 荒木力著：決定版MRI完全解説. 秀潤社、2008
- 2) 今西好正, 徳原正則, 小谷博子著：心から納得・理解できるMRI原理とMRS. 医療科学社、2009
- 3) アレン・D.エルスター, ジョナサン・H.バーデット著, 荒木力訳：MRI「超」講義.メディカルサイエンスインターナショナル、2003
- 4) レイ・H.ハシェミ, クリストファー・J.リサンチ, ウィリアム・G.Jrブラッドリー著, 荒木力訳：MRIの基本パワーテキスト.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]

渡邊 城大 (わたなべくにひろ)

技師歴21年

担当歴7年