ノート

論文受付
2010年 5月24日論文受理
2011年 4月25日

Code No. 261

1.5 T と 3 T におけるスピネコー法の
クロストークの影響に関する検討梶迫正明^{1,2)}・宮地利明²⁾・谷口正洋¹⁾・赤土裕子³⁾
小泉幸司¹⁾・平賀 顯¹⁾・三木幸雄⁴⁾

1) 京都大学医学部附属病院放射線部

2) 金沢大学大学院医学系研究科

3) 医療法人社団亮人会那須中央病院放射線部

4) 大阪市立大学大学院医学研究科

緒 言

3 T の magnetic resonance imaging (MRI) の脳の撮像において, spin-echo (SE) 法の T_1 強調像は, 白質と灰白質のコントラストが低下するといわれている。これには T_1 値の延長が原因であるとの報告がある¹⁻³⁾。しかし, このコントラスト低下は, T_1 値の延長だけでなく magnetization transfer effect (MT 効果) とクロストークが影響する可能性を示した報告がある⁴⁾。この MT 効果とクロストークにおいて, 3 T での MT 効果がコントラストに及ぼす影響についての報告がある⁵⁾。また 3 T でクロストークの影響を考慮した撮像により白質と灰白質のコントラストノイズ比が改善するという報告がある⁶⁾。過去の報告^{4, 6)}では, コントラストノイ

ズ比での評価であるが, 1.5 T と 3 T といった静磁場強度の違いによる評価ではノイズレベルが異なってくるので, ノイズの影響があるコントラストノイズ比よりもコントラストのみのほうが正確に評価することができる。また, どの程度のスライス間隔で 1.5 T と 3 T との違いが現れるかといった詳細なクロストークの静磁場強度の違いによる影響の検討はなされていない。

そこで, われわれはファントムを用いて 1.5 T と 3 T におけるクロストークの画像コントラストに与える影響を解明するために, 最初にスライスプロファイルとその半値幅 (full width at half maximum; FWHM) の測定を行い, さらに FWHM の違いが画像コントラストにどのように関与するかを健常ボランティアの脳を撮

Evaluation of Crosstalk Effect on Spin-echo Images at 1.5 and 3 T

Masaaki Kajisako,^{1,2)} Tosiaki Miyati,²⁾ Masahiro Taniguchi,¹⁾ Yuko Syakudo,³⁾
Koji Koizumi,¹⁾ Akira Hiraga,¹⁾ and Yukio Miki⁴⁾

1) Department of Radiology, Kyoto University Hospital

2) Division of Health Science, Kanazawa University Graduate School of Medical Sciences

3) Department of Radiology, Nasu Central Hospital

4) Osaka City University Graduate School of Medicine

Received May 24, 2010; Revision accepted April 25, 2011; Code No. 261

Summary

The purpose of this study is to evaluate the crosstalk effect on spin-echo (SE) images at 1.5 and 3 T MRI. We examined the influence of crosstalk by comparing the full width at half-maximum (FWHM) and slice profile of images of a wedge-shaped phantom for various slice gaps. We also assessed crosstalk effect in the brain by comparing image contrast among healthy volunteers ($n=8$). Among the subjects, the shapes of the slice profiles at 1.5 T were similar to those at 3 T for long repetition times (TRs); however, at shorter TRs, differences in slice profiles were observed among the subjects and were more apparent at 3 than at 1.5 T. The relative contrast between white matter and gray matter on T_1 -weighted images was lower at 3 than at 1.5 T. The crosstalk effect was strongest when the TR of the excitation pulse was short. The influence of the adjacent excitation pulse is important in the process of T_1 relaxation because T_1 values are greater at 3 T. In conclusion, the influence of crosstalk on SE T_1 -weighted images is greater at 3 than at 1.5 T.

Key words: crosstalk, spin-echo, magnetic resonance imaging (MRI), 3.0 Tesla, 1.5 Tesla別刷資料請求先: 〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町 54
京都大学医学部附属病院放射線部 梶迫正明 宛

像して検討した。

1. 方 法

1-1 使用機器

MR 装置は Siemens 社製の MAGNETOM Avanto 1.5T(ver:syngo MR B15)と MAGNETOM Trio a Tim System 3T(ver:syngo MR B15)を用いた。1.5 T と 3 T とともに最大傾斜磁場強度は 45 mT/m, 最大スリューレートは 200 T/m/s である。またコイルは 12 ch head matrix coil(ファントム撮影時)と全身用送受信コイル(健常ボランティア撮影時)を使用した。

健常ボランティアは 8 名(年齢 22~29 歳, 平均年齢 25.7±2.6 歳, 男性 6 名, 女性 2 名)において行った。また本研究の目的および意義について, 自由意志に基づいている点や利益相反はない点などを詳細に説明し同意を得た後, 本研究を行った。

1-2 ファントムの撮像方法

MRI ファントム 90-401 型(日興ファインズ工業株式会社)に備えてある対向くさびファントムを, 繰り返し時間(repetition time; TR)とスライス間隔を変えて撮像した。撮像断面は横断面とし, ガントリー中心に MRI ファントムを配置した。

ファントムの撮像条件については, SE 法を使用し撮像視野(field of view; FOV)256×256 mm, マトリクス 512×512, TR 500~5000 ms, エコー時間(echo time; TE) 9.3 ms, スライス厚 5 mm, 撮像加算回数 3 または 12, 分割回数を 1, 受信バンド幅 217 Hz/ピクセル, スライス励起方法は sequential とした。Radio frequency (RF)パルスの印加時間は 1.5 T と 3 T とともに 90 度パルスで 2.048 ms, 180 度パルスで 2.560 ms とした。スライス枚数は 1, 3 とした。スライス間隔はこれらスライス枚数において 0 mm(0%), 0.5 mm(10%), 1 mm(20%), 2 mm(40%), 4 mm(80%), 10 mm(200%) とした。また 3 T の長い TR においてスライス枚数 1, 5, 13 とスライス間隔 0.5 mm(10%), 10 mm(200%)の組み合わせの条件でも撮像を行った。

米国電気製造者協会(National Electrical Manufacturers Association; NEMA)基準によるスライス厚測定試験の TR は測定物質の T_1 値の 3 倍以上と規定されている⁷⁾。ファントム素材である 80% PVA ゲルの T_1 値は 1.5 T が 940 ms, 3 T が 1130 ms であったので TR を 1.5 T で 4000 ms と 3 T で 5000 ms に設定した($TR/T_1 > 4$)。また頭部の T_1 強調像を想定して, 短い TR の検討においては, T_1 値から同一の TR/T_1 となるように, 1.5 T で 500 ms と 3 T で 600 ms に設定した($TR/T_1 \approx 0.53$)。

1-3 ファントムの解析方法

ファントム撮像における FWHM とスライスプロファイルの測定は, NEMA 基準のスライス厚測定試験^{7,8)}に基づいて行った。これによって得られたファントム画像のくさび板に 25×150 ピクセルの領域を設定し, 各列(25 ピクセル)の平均信号強度を求めた。次に設定領域の隣接したピクセルの差分値をプロットし, スライスプロファイルを得た。次に互い違いになっているくさび板の FWHM から回転補正を行った。また 1.5 T と 3 T のスライスプロファイルの形状の比較のためにピーク値で正規化を行った。この際スライスプロファイルにはノイズが多く含まれており, 観察しやすくするため高周波遮断によるノイズ除去を行った。処理は二次バターワース特性をもつ low pass フィルタのノイズ除去を行った。

シングルスライスの FWHM($FWHM_{ss}$)と信号強度(SI_{ss})を基準として, マルチスライスにおいてスライス間隔を変化させた時の FWHM($FWHM_{ms}$)と信号強度(SI_{ms})の減少率 RR_{FWHM} (Reduction Rate $_{FWHM}$)と RR_{SI} (Reduction Rate $_{SI}$)を式(1), (2)から計算した。

$$RR_{FWHM} = FWHM_{ms} / FWHM_{ss} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$RR_{SI} = SI_{ms} / SI_{ss} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ファントム撮像は 5 回行い, RR_{FWHM} と RR_{SI} の平均値を求めた。

1-4 健常ボランティアの撮像方法

撮像条件は, SE 法の T_1 強調像を, FOV 179×220 mm, マトリクス 208×256, TR 500/600 ms(1.5 T/3 T), TE 9.3 ms, スライス厚 4 mm, 撮像加算回数 1, 分割回数を 1, 受信バンド幅 217 Hz/ピクセル, スライス励起方法を sequential とした。スライス枚数は 1, 3 とした。スライス間隔はこれらスライス枚数において 0 mm(0%), 0.4 mm(10%), 0.8 mm(20%), 1.2 mm(40%), 3.2 mm(80%)とした。スライス面は anterior commissure と posterior commissure を結ぶラインに平行な基底核レベルの横断面とした。

TR の設定については, Lu ら⁹⁾は 1.5 T と 3 T の前頭葉の白質と灰白質の T_1 値を測定しており, 前頭葉白質の T_1 値は 1.5 T にて 556±20 ms, 3 T にて 699±38 ms, また灰白質の T_1 値は 1.5 T にて 1048±61 ms, 3 T にて 1209±109 ms と報告している。この値からファントム実験と同様に 1.5 T で 500 ms と 3 T で 600 ms に設定した。

1-5 健常ボランティアの解析方法

健常ボランティア 8 名において, 脳の撮像を行い

Fig. 1 Setting the regions of interest (ROIs). The positioning for gray matter (a) and white matter (b) is indicated by the white circles.

前頭葉の白質と灰白質に関心領域(region of interest; ROI, 平均 20 pixel)を設定し信号強度を測定した(Fig. 1). これらの信号強度からコントラスト($Contrast_{WM-GM}$)を以下の式(3)で求めた.

$$Contrast_{WM-GM} = (SI_{WM} - SI_{GM}) / (SI_{WM} + SI_{GM}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

SI_{WM} は白質の信号強度, SI_{GM} は灰白質の信号強度である. また, シングルスライスのコントラスト($Contrast_{ss}$)を基準として, マルチスライスでスライス間隔を変化させたときのコントラスト($Contrast_{ms}$)の変化 relative contrast(RC)を式(4)により計算した.

$$RC = Contrast_{ms} / Contrast_{ss} \quad \dots\dots\dots (4)$$

1.5 T と 3 T の RC についての有意差検定は, 有意水準を 5%とした Wilcoxon signed-rank test で比較した.

2. 結 果

2-1 ファントムにおける検討

長い TR では, 1.5 T と 3 T とともにスライス間隔の違いによってスライスプロファイルに変化はなかった(Fig. 2).

一方, T_1 強調像を想定した短い TR では, 1.5 T と 3 T とともに, スライス間隔が 0%の時に最もスライスプロファイルが狭くなりスライス間隔をあけるにつれてスライスプロファイルが広がり, 1 スライスで最大となった(Fig. 3, 4). RR_{FWHM} は 1.5 T では, スライス間隔が 0%, 10%, 20%, 40%, 80%の順で 0.842, 0.918, 0.978, 0.995, 0.992 となり, 3 T では 0.804, 0.844, 0.916, 0.981, 0.989 となった. すべてのスラ

Fig. 2 Slice profiles at 1.5 and 3 T for a long TR.

イス間隔において 3 T のほうが RR_{FWHM} は小さくなった(Fig. 5). RR_{SI} は 1.5 T では, スライス間隔が 0%, 10%, 20%, 40%, 80%の順で 0.785, 0.833, 0.889, 0.953, 0.982 となり, 3 T では 0.779, 0.836, 0.882, 0.947, 0.981 となり RR_{SI} に違いは認められなかった. またスライス間隔が 80%と 200%とでは FWHM に変化はなく, 信号強度は 1%程度の違いがあった.

3 T において長い TR でスライス間隔 10%では, マルチスライス枚数が 5 の場合(RR_{FWHM} : 0.948)よりも 13 の場合(RR_{FWHM} : 0.877)のほうが, スライスプロファイルは狭くなった(Fig. 6a). この条件下で, スライス間隔を 200%にすると両方のスライスプロファイルは同様な形状を示した(Fig. 6b). ファントム素材である 80% PVA ゲルの信号強度は, スライス枚数 1, 3, 5, 13 の順に 3061 ± 12.3 , 3054.5 ± 11.3 , 3058.5 ± 12.7 , 3044.7 ± 14.5 となった.

2-2 健常ボランティアにおける検討

健常ボランティアにおける脳前頭葉の白質と灰白質の RC はスライス間隔が 0%, 10%, 20%で 3 T のほうが 1.5 T より RC は有意に低下した(Table 1). 1.5 T と 3 T で撮像した脳の 1 スライスの画像と 3 スライスでスライス間隔が 0%の画像を Fig. 7 に示す.

3. 考 察

T_1 強調像を想定した短い TR では, 3 T のほうが 1.5 T と比べてスライス間隔が小さい時の RR_{FWHM} が大きく, 3 T ではスライス間隔が小さくなるにつれてスライスプロファイルの形状が狭くなっていた. 特に

Fig. 3 Slice profiles for various slice gaps at 1.5 T (TR=500 ms).

Fig. 4 Slice profiles for various slice gaps at 3 T (TR=600 ms).

Fig. 5 Relationship between slice gap and reduction ratio of FWHM at 1.5 and 3 T.

Fig. 6 Slice profiles for various numbers of slices at 3 T.
(a) TR=5000 ms; slice gap=10%.
(b) TR=5000 ms; slice gap=200%.

スライス間隔が20%以下で3 Tのほうがクロストークの影響が大きいことが明らかになった。また長いTRではスライス間隔による RR_{FWHM} の影響が少ないことからクロストークの影響はほとんどないことが判明した。しかし、この際マルチスライス枚数を増加させると、スライスプロファイルが狭まった(Fig. 6a)。これらのことから長いTRの時でも、マルチスライスのように励起パルスを与える時間間隔が短いときに、十分に縦磁化が回復する前に次の励起パルスの影響によって信号強度が低下すると考える。この際、縦磁化の回復は T_1 値の長い3 Tのほうが遅いので、結果的に3 Tが1.5 Tよりもクロストークの影響が大きくなると考えられる。Kasaharaら⁶⁾も3 Tのクロストークが大きくなる原因として T_1 値の延長の影響を示唆しており、筆者の見解と一致する。スライス枚数の増

Table 1 Change in relative image contrast with various slice gaps at 1.5 and 3 T

	Relative contrast (1.5 T)	Relative contrast (3 T)	P value
1 slice	1.000	1.000	
3 slices – gap 0%	0.853	0.781	P<0.05
3 slices – gap 10%	0.923	0.817	P<0.05
3 slices – gap 20%	0.940	0.855	P<0.05
3 slices – gap 40%	0.981	0.924	NS
3 slices – gap 80%	0.989	0.960	NS

NS, not significant

加により MT 効果も同時におこり両者の影響が考えられる。今回使用したファントムではスライス間隔 200% にてスライス枚数を増加させたときのスライスプロファイルに変化がなかったが (Fig. 6b), 信号強度はスライス枚数が 13 枚の時に若干減少傾向が見られた。スライス枚数が 1, 3, 5 枚の範囲では信号強度の違いは小さく、ファントム実験のクロストークの影響の検討はスライス枚数 3 枚で行ったので MT 効果の影響は小さいと考える。厳密にはスライス間隔を変化させると MT 効果も変化すると考えられる。スライス間隔が 80% の時と 200% の時とで、信号強度の違いは 1% 程度であり、ほぼ同じ値であった。これらのことから、スライス間隔の変化による MT 効果の影響は小さくファントム実験の結果はクロストークの影響を大きく示した結果であると推測する。

今回は 1.5 T と 3 T とで異なる TR を使用している。T₁ 値の延長を考慮しても、なお 1.5 T と 3 T とで RR_{FWHM} が異なった。これはマルチスライスにおける実際の励起パルスは TR よりも短い時間で印加されているために 1.5 T と 3 T で差が発生したものと考えられる。

一方、健常ボランティアにおける結果においては、クロストークによるコントラストへの影響もファントムでの検討同様に 3 T のほうが大きくなることが明らかになった。しかし MT 効果の影響との切り分けは既出の論文⁴⁾同様十分でない。3 T の SE 法の T₁ 強調画像における白質と灰白質のコントラストについては、Lu ら⁹⁾により条件を最適にすればコントラストノイズ比は 1.5 T より 3 T のほうが良いという報告がある。しかし、これはシングルスライスでの検討であり、クロストークの影響は検討されていない。また、Fushimi ら⁴⁾は、マルチスライスにて 1.5 T と 3 T における白質と灰白質のコントラストノイズ比を比較している。これによるとスライス間隔を空ければ 3 T のほ

Fig. 7 T₁-weighted brain images obtained using one and three slices at 1.5 and 3 T.

- (a) 1.5 T, one slice.
(b) 1.5 T, three slices, gap=0%.
(c) 3 T, one slice.
(d) 3 T, three slices, gap=0%.

a	c
b	d

うがコントラストノイズ比は良くなるという報告があり、クロストークの影響が 3 T で大きくなるとしている。しかし、コントラストノイズ比は signal to noise ratio (SNR) の違いが影響しているため、1.5 T と 3 T の本質的なクロストークの効果を比較するのは困難である。そこでわれわれは、コントラストノイズ比ではなく相対的な画像コントラストで 1.5 T と 3 T の比較を単純に行ったので、クロストークに与える因子をより正確にとらえていると考える。また藤原¹⁰⁾も 3 T における研究にて、3 T は 1.5 T と比較してクロストークの影響を強く受けると考察しており、われわれの結果と一致している。ただし、今回の健常ボランティアにおける検討では対象群の年齢が比較的若い成人であったため、他の年齢層や疾患群において本事実が必ずしも当てはまらないかもしれない。検討対象と人数を増やして詳細な解析を行う必要がある。また、RF 形状や測定位置によっても結果が異なる可能性がある。さらに、高速 SE 法はクロストークや前出の MT 効果に加えて、ブラーリングや J カップリングなどがコントラストに影響を及ぼす¹¹⁾ために本研究のような解析はより複雑になると予想されるが、今後

は高速 SE 法においても因子ごとの検討が必要であると考える。

4. 結 論

3 T の SE 法 T_1 強調像では 1.5 T よりもクロストークの影響が大きくなることが示唆された。脳の SE 法 T_1 強調画像撮像時にも 3 T では 1.5 T よりクロストークの影響により脳実質のコントラストを大きく低下させる。

3 T の装置ではこのことを念頭においてスライス間隔を十分にとるか、分割回数を 2 以上に設定し交互

に撮像してクロストークの影響を考慮した検査を行う必要がある。

謝 辞

本研究にあたり貴重なご助言をいただきました近畿部会学術委員会論文塾運営委員の各位に誌面を借りて御礼を述べさせていただきます。

なお、本論文の一部は日本放射線技術学会第 65 回総会学術大会(2009 年 4 月, 横浜)・第 37 回秋季学術大会(2009 年 10 月, 岡山)にて発表した。

参考文献

- 1) Kuhl CK, Träber F, Schild HH. Whole-body high-field-strength (3.0-T) MR Imaging in Clinical Practice. Part I. Technical considerations and clinical applications. *Radiology* 2008; 246(3): 675-696.
- 2) Scarabino T, Nemore F, Giannatempo GM, et al. 3.0 T magnetic resonance in neuroradiology. *Eur J Radiol* 2003; 48(2): 154-164.
- 3) Ross JS. The high-field-strength curmudgeon. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004; 25(2):168-169.
- 4) Fushimi Y, Miki Y, Urayama S, et al. Gray matter-white matter contrast on spin-echo T_1 -weighted images at 3 T and 1.5 T: a quantitative comparison study. *Eur Radiol* 2007; 17(11): 2921-2925.
- 5) Chang Y, Bae SJ, Lee YJ, et al. Incidental magnetization transfer effect in multislice brain MRI at 3.0T. *J Magn Reson Imaging* 2007; 25(4): 862-865.
- 6) Kasahara S, Miki Y, Mori N, et al. Spin-echo T_1 -weighted imaging of the brain with interleaved acquisition and pre-saturation pulse at 3 T: a feasibility study before clinical use. *Acad Radiol* 2009; 16(7): 852-857.
- 7) National Electric Manufacturers Association: Determination of slice thickness in diagnostic magnetic resonance images, NEMA Standard Publication, MS5(2003).
- 8) 土井 司. 実際編 -6.2 スライス厚測定試験. 臨床放射線技術ハンドブック(上), 通商産業研究社, 1996: 468-472.
- 9) Lu H, Nagae-Poetscher LM, Golay X, et al. Routine clinical brain MRI sequences for use at 3.0 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 2005; 22(1): 13-22.
- 10) 藤原康博, 石森佳幸, 山口 功, 他. 3.0T MRI を用いた高速 FLAIR 法における CSF artifact の抑制について. *日放技学誌* 2008; 64(12): 1513-1521.
- 11) Constable RT, Anderson AW, Zhong J, et al. Factors influencing contrast in fast spin-echo MR imaging. *Magn Reson Imaging* 1992; 10(4): 497-511.

図表の説明

- Fig. 1 関心領域(ROI)の設定
白い円により(a)灰白質と(b)白質の位置を示す。
- Fig. 2 長い TR による 1.5 T と 3 T とのスライスプロファイル
- Fig. 3 1.5 T における異なるスライス間隔でのスライスプロファイル(TR=500 ms)
- Fig. 4 3 T における異なるスライス間隔でのスライスプロファイル(TR=600 ms)
- Fig. 5 1.5 T と 3 T とのスライス間隔と FWHM の reduction ratio との関係
- Fig. 6 3 T の異なるスライス枚数でのスライスプロファイル
(a)TR=5000 ms スライス間隔 = 10%
(b)TR=5000 ms スライス間隔 = 200%
- Fig. 7 1.5 T と 3 T の 1 スライスと 3 スライスで得られた脳の T_1 強調画像
(a)1.5 T のシングルスライス
(b)1.5 T の 3 スライスでスライス間隔 = 0%
(c)3 T のシングルスライス
(d)3 T の 3 スライスでスライス間隔 = 0%

Table 1 1.5 T と 3 T との異なるスライス間隔での relative contrast の変化