

胸部領域における高速 T₂ 強調撮像法 —Black-blood 法による高速スピネコー法と 従来型高速スピネコー法の比較検討—

津野田雅敏, 戸上 泉, 黒川浩典, 笹井信也,
赤木史郎, 平木祥夫

岡山大学医学部放射線医学教室

はじめに

胸部領域の MRI 診断において病変の描出および性状の鑑別のために T₂ 強調撮像法は重要な検査法であり, 心大血管のアーチファクトを抑制するため心電図同期法¹⁾を併用した conventional spin echo (CSE) 法^{2)~4)}により撮像される場合が多い。しかし, CSE 法による心電図同期 T₂ 強調撮像法は一般的に撮像時間が長く, 通常のマルチスライスモードではトリガー後の第 2 心拍目以降に収集されるデータは RR 間隔の変動により同期が不十分となる場合があり, また血流信号のアーチファクトにより鮮明な画像が得られないこともしばしば経験される。最近では心電図同期 turbo spin echo (TSE) 法により撮像時間の短縮と画質の改善が得られることが報告⁵⁾されているが, やはり不十分な同期や血流信号のアーチファクトによる画質劣化が診断の妨げとなることがある。

血流信号の抑制はプレサチュレーションパルスでは不十分な場合があり, 非選択的 180 度パルスによるプレパレーション⁶⁾や, 非選択的 180 度パルスと選択的 180 度パルスを組み合わせた black-blood 法⁷⁾のような広範囲に血流

信号を抑制する方法が報告されている。また Simonetti ら⁸⁾により, black-blood 法と拡張期にデータ収集を行う TSE 法や turbo STIR 法を組み合わせることで, 血流や心大血管の拍動によるアーチファクトを抑制した明瞭な T₂ 強調画像が得られることが報告されており, black-blood 法と half-Fourier single shot turbo spin echo (HASTE) 法の組み合わせにより非常に短時間で撮像することも可能である⁹⁾。我々は胸部領域におけるこれらの新しい高速 T₂ 強調撮像法の有用性を検討するため, 臨床例において black-blood 法を併用し拡張期にデータ収集を行う TSE 法および HASTE 法と, 従来型の心電図同期 TSE 法との比較検討を行った。

対象および方法

対象は胸部腫瘍性疾患の精査目的で MRI 検査を施行された 40 例 (男性 32 例, 女性 8 例, 平均年齢 60.8 歳) である。症例の内訳は, 肺癌 23 例, 神経原性腫瘍 4 例, 転移性肺腫瘍 2 例, 胸腺腫 2 例, 中皮腫 2 例, 食道癌 2 例, その他 5 例であった。

キーワード thorax, MRI, T₂-weighted imaging, black-blood

使用装置は Siemens 社製 Magnetom Vision (1.5T) であり、ボディアレイコイルを使用した。従来型の心電図同期 TSE 法 (TSE 法)、black-blood 法を併用し拡張期にデータを収集する TSE 法 (BB-TSE 法) および HASTE 法 (BB-HASTE 法) をいずれも安静呼吸下で横断像を撮像し比較検討を行った。

撮像条件は各撮像法共に FOV=320×240 cm, スライス厚=8 mm に統一し、TSE 法がマトリックス=154×256, TR=1910~3856 ms (2~3 心拍), TE=99 ms, echo train length (ETL)=11, acquisition=1, phase oversampling=100%, band width=130 Hz/pixel, echo space=16.5 ms, 前胸壁および撮像範囲の上下にプレサチュレーションパルスを使用し、11 スライスで撮像時間は約 1~2 分であった。BB-TSE 法はマトリックス=161×256, TR=1616~3267 ms (2~3 心拍), TE=76 ms, ETL=23, acquisition=1, phase oversampling=100%, band width=325 Hz/pixel, echo space=6.4 ms, 前胸壁にプレサチュレーションパルスを使用し、1 スライスの撮像時間が約 30~40 秒であった。BB-HASTE 法はマトリックス=160×256, TR=∞ ms, TE=43 ms, ETL=88, acquisition=1, phase oversampling=0%, band width=650 Hz/pixel, echo space=4.3 ms, ハーフフーリエ法を使用し、20 スライスで撮像時間は約 30~60 秒であった。TR は心拍数に依存するため一定ではなく、撮像時間も各症例により異なっている。

Black-blood 法では、R 波の直後に非選択的 180°パルスと選択的 180°パルスを連続して照射し、スライス面外の血液信号が 0 に近くなるように反転回復時間を設定して撮像を行う⁸⁾。今回の検討では最初の 180°パルスからデータ収集終了までの時間を RR 間隔によって約 600~800 ms と設定し、データ収集はほぼ心臓の拡張期に合わせて行った。TSE 法では従

来型の心電図同期法により撮像した。

視覚的評価としては、ゴースト、血流信号の抑制、心/縦隔構造の明瞭さ、病変の描出能、全体的な画質についての 5 段階評価を 2 名の放射線科医の合議により行った。各評価とも 1~5 点 (1: unacceptable, 2: poor, 3: fair, 4: good, 5: excellent) 評価で行った。これらの結果は Wilcoxon signed rank test を用いて有意差検定を行った。また定量的な評価として、各撮像法ともほぼ同一の部位で、病変、脂肪、骨格筋の関心領域 (ROI) の信号強度 (SI) およびバックグラウンドノイズの標準偏差 (SD) を測定し、それぞれの信号ノイズ比 (SNR) および病変/筋、病変/脂肪のコントラストノイズ比 (CNR) を以下のように算出して比較検討を行った。バックグラウンドノイズの測定は胸郭外でゴーストの影響の少ない部位で測定した。

$$\text{SNR} = \text{SI of ROI} / \text{SD of background noise}$$

$$\text{CNR} = |(\text{SI of ROI}_A - \text{SI of ROI}_B) / \text{SD of background noise}|$$

これらの結果は paired t test を用いて有意差検定を行った。

結 果

1) 視覚的評価

ゴースト、血流信号の抑制、心/縦隔構造の明瞭さ、病変の描出能、全体的な画質評価についての視覚的評価を Table 1 に示す (Figs. 1, 2)。ゴーストについては BB-HASTE 法 > BB-TSE 法 > TSE 法の順で BB-HASTE 法が高値を示し、いずれも有意差が認められた。血流信号の抑制では BB-HASTE 法 > BB-TSE 法 > TSE 法の順で BB-HASTE 法が高値を示したが BB-TSE 法とは有意差は認められなかった。

Table. 1. Results of Qualitative Analysis

Parameter	TSE	BB-TSE	BB-HASTE
Freedom from ghosting	3.2±0.8	3.8±0.7	5.0±0.2
Freedom from blood signals	3.8±0.7	4.7±0.5	4.8±0.4
Clarity of the heart and mediastinal structures	2.5±1.0	4.4±0.9	3.5±0.6
Conspicuity of abnormality	4.3±0.9	4.4±0.7	3.2±0.7
Overall quality	3.2±0.9	4.4±0.7	3.3±0.4

* : p<0.001 ** : 0.001<p<0.01

Table. 2. Results of Quantitative Analysis

Parameter	TSE	BB-TSE	BB-HASTE
SNR			
Lesion	79.6±38.3	84.2±40.8	66.5±24.8
Fat	97.7±47.2	160.7±63.4	142.1±50.3
Muscle	26.6±10.3	41.7±11.4	49.4±13.5
CNR			
Lesion/Muscle	53.2±38.9	43.8±39.4	21.2±22.1
Lesion/Fat	44.0±33.5	81.4±61.7	75.7±48.9

* : p<0.001 ** : 0.001<p<0.03

TSE法はBB-TSE法およびBB-HASTE法と比較して有意に低かった。心/縦隔構造の明瞭さではBB-TSE法>BB-HASTE法>TSE法の順でBB-TSE法が高値を示しいずれも有意差が認められた。病変の描出能についてはBB-TSE法>TSE法>BB-HASTE法の順でBB-TSE法が高値を示したがTSE法とは有意差は認められなかった。BB-HASTE法はBB-TSE法およびTSE法と比較して有意に低かった。全体的な画質評価では、BB-TSE法>BB-HASTE法>TSE法の順でBB-TSE法が高値を示し、BB-HASTE法およびTSE法と比較して有意差が認められた。BB-HASTE法と

TSE法との間には有意差はなかった。

2) 定量的評価

病変、脂肪、骨格筋のSNRおよび病変/筋、病変/脂肪のCNRをTable 2に示す。病変部のSNRはBB-TSE法>TSE法>BB-HASTE法の順でBB-TSE法が高値であったが、BB-TSE法とTSE法では有意差は認められなかった。BB-HASTE法は、BB-TSE法およびTSE法と比較して有意に低かった。脂肪のSNRはBB-TSE法>BB-HASTE法>TSE法の順でいずれも有意差が認められた。骨格筋のSNRはBB-HASTE法>BB-TSE法>TSE法の順でいずれも有意差が認められた。病変/筋

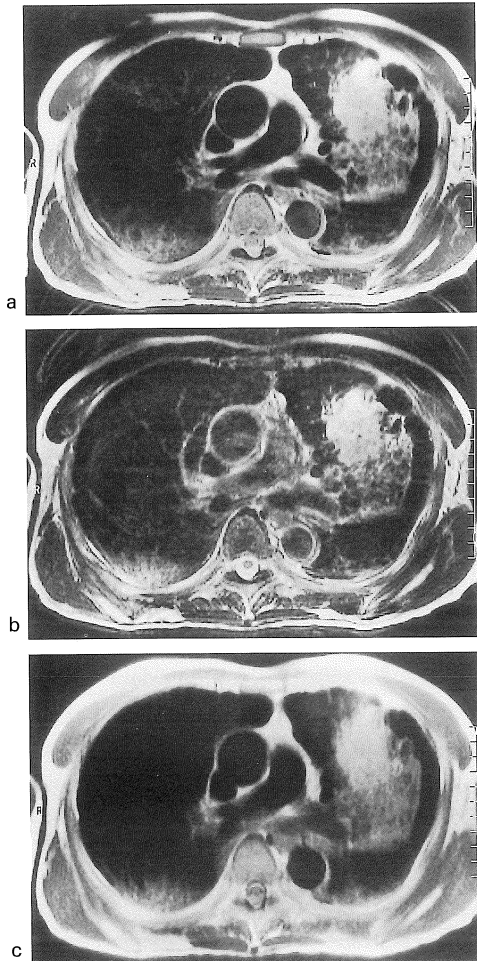


Fig. 1. Lung carcinoma in a 64-year-old male
 (a) BB-TSE, (b) TSE, (c) BB-HASTE
 The BB-TSE image shows better overall image quality and mediastinal structures more clearly in comparison with the TSE and BB-HASTE images. The BB-TSE and TSE images show greater lesion conspicuity in comparison with the BB-HASTE image.

の CNR は TSE 法 > BB-TSE 法 > BB-HASTE 法の順で TSE 法が高値であり、いずれも有意差が認められた。病変/脂肪の CNR は BB-TSE 法 > BB-HASTE 法 > TSE 法の順で BB-TSE 法が高値を示したが BB-TSE 法と BB-HASTE 法では有意差が見られず、TSE 法は

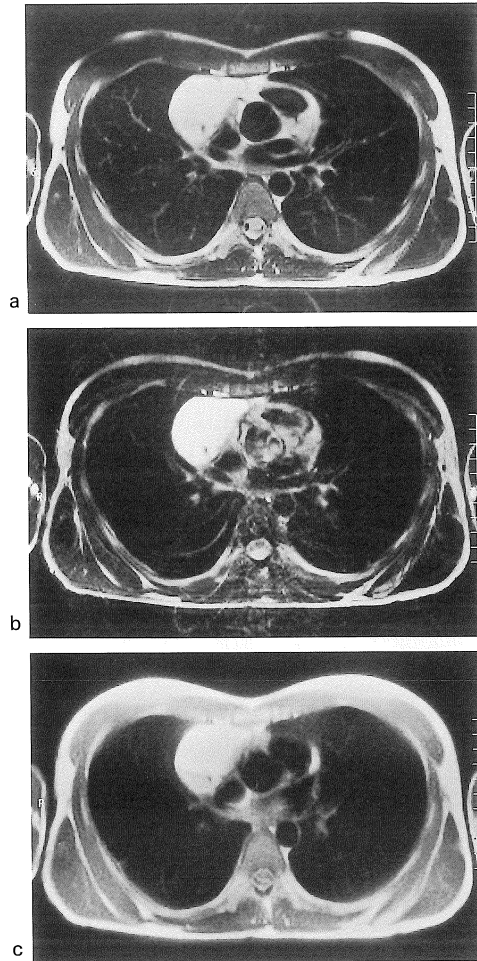


Fig. 2. Mature cystic teratoma in a 22-year-old male
 (a) BB-TSE, (b) TSE, (c) BB-HASTE
 Respiratory and flow artifacts are seen on the TSE image. It is less apparent on the BB-TSE and BB-HASTE images. The BB-TSE and BB-HASTE images show no signals in the great vessels and the higher signal intensity of fat.

BB-TSE 法および BB-HASTE 法と比較して有意に低かった。ただし、各撮像法の撮像条件は同一ではなく、これらの結果および有意差は必ずしも撮像法自体の優劣を直接的に示すものではない。

考 察

胸部領域の T₂ 強調撮像法は心電図同期 CSE 法^{1)~4)}により撮像されることが多く、最近では心電図同期 TSE 法^{5),10),11)}による報告も散見される。Haddad ら⁵⁾は心電図同期 CSE 法と心電図同期 TSE 法および同期なしの TSE 法を比較し、心電図同期 TSE 法が画質の改善および撮像時間の短縮の面で有用であったと報告している。一方で Olson ら¹⁰⁾は、TSE 法と CSE 法では撮像時間は TSE 法により短縮されるが、画質や病変の描出能は CSE 法の方が良好であったとしている。いずれにせよ、不十分な心電図同期や呼吸運動および血流信号のアーチファクトのために、他の撮像領域と比べれば CSE 法、TSE 法共にアーチファクトによる画像劣化が目立つ場合が多いと考えられる。

Black-blood 法による血液信号抑制および高速スピネコ法による拡張期のデータ収集を組み合わせた BB-TSE 法や BB-HASTE 法は、血流や心大血管の拍動によるアーチファクトを抑制することが可能であり、新しい胸部領域の T₂ 強調撮像法としての有用性が期待されている。最近では心臓領域における有用性に関する報告^{12),13)}もみられる。今回我々はこれらの手法による画質改善を検討するため、臨床例において TSE 法と BB-TSE 法および BB-HASTE 法の比較検討を行った。

画質の視覚的評価では、ゴーストに関しては BB-HASTE 法 > BB-TSE 法 > TSE 法の順でいずれも有意差が認められた。BB-HASTE 法はいわゆる single shot imaging であり撮像時間が約 390 ms と非常に短いため呼吸運動による影響はほとんどなく、拡張期に撮像できるため心大血管の動きの影響も受けにくいものと考えられゴーストはほとんど見られなかった。BB-TSE 法および TSE 法では、プレサチュレーションパルスを使用し前胸壁の信号を抑制しているが十分とはいえ呼吸運動によるゴーストが見られた。BB-TSE 法は拡張期に撮像し

ていることと black-blood 法による血液信号抑制のため、心大血管の動きや血流信号によるゴーストが減少したことで TSE 法と比較して有意に良好であったと考えられる。

血液信号の抑制については、BB-HASTE 法および BB-TSE 法が TSE 法と比較して有意に優れていた。TSE 法ではスライスの上下にプレサチュレーションパルスを用いているが十分とはいえ血管内に血液信号が残存している場合もあったが、BB-TSE 法や BB-HASTE 法ではほとんど認められず、black-blood 法は非常に効果的であると考えられる。

心/縦隔構造の明瞭さについては、BB-TSE 法 > BB-HASTE 法 > TSE 法の順で有意差が認められた。BB-TSE 法では拡張期同期の使用が効果的であったと考えられ、BB-HASTE 法では画像ボケ (blurring) の影響や single shot imaging ではあるが心周期内における各スライス当たりのデータ収集時間 (data acquisition window) は、他の 2 つの撮像法と比較して約 380 ms と長いために拡張期を捕らえきれない可能性も考えられた。従来の心電図同期法を使用した TSE 法では RR 間隔の変動の影響を受けやすく、またスライス間でのばらつきが多く不明瞭な場合が多かった。

病変の描出能については、BB-TSE 法および TSE 法では有意差は見られずほぼ同等であり、BB-HASTE 法は有意に劣っていた。これは病変部の SNR が低いことや blurring の影響によるものと考えられる。BB-TSE 法と TSE 法ではゴーストや心/縦隔構造の不明瞭さのため病変の存在部位によっては BB-TSE 法の方が有利であると考えられるが、今回の検討では有意差は認められなかった。

全体的な画質評価としては、BB-TSE 法が BB-HASTE 法および TSE 法と比較して有意に優れていた。BB-HASTE 法では心/縦隔構造がやや不明瞭であることと病変の描出能が低いためと考えられ、TSE 法では病変の描出能に関しては良好であるが血液信号の抑制が不十

分でゴーストが目立つことや心/縦隔構造が不明瞭となる場合が多いためと考えられる。BB-HASTE 法と TSE 法の間には有意差は認められなかった。

画像コントラストについては撮像法自体の問題とともに TR/実効 TE などの撮像条件の影響が大きいと考えられるが、我々の使用している MR 装置では TE は固定されており任意の値を設定できないため従来使用していた TSE 法との比較を目的として、今回のような撮像条件下での検討を行うこととした。各撮像法の撮像条件に違いがあるため、定量的評価の結果および有意差は必ずしも撮像法自体の特徴のみを示しているものではない。

病変部の SNR は BB-TSE 法 > TSE 法 > BB-HASTE 法の順で、BB-TSE 法が高値を示したが BB-TSE 法と TSE 法では有意差はなく、BB-HASTE 法は有意に低かった。骨格筋の SNR は BB-HASTE 法 > BB-TSE 法 > TSE 法の順で BB-HASTE 法が最も高値を示し、いずれも有意差がみられた。結果として病変/筋の CNR は、TSE 法 > BB-TSE 法 > BB-HASTE 法の順で TSE 法が最も良好で、いずれも有意差が見られた。これは black-blood 法特に BB-HASTE 法の実効 TE が短いこと、各撮像法の band width の違いや ETL が異なるための MTC 効果の差が主な要因であると考えられた。

脂肪の SNR は BB-TSE 法 > BB-HASTE 法 > TSE 法の順で BB-TSE 法が最も高値であり、いずれも有意差が見られた。また TSE 法と比べて black-blood 法はいずれもかなり高値であった。病変/脂肪の CNR は BB-TSE 法 > BB-HASTE 法 > TSE 法の順で BB-TSE 法が最も高値であったが、BB-TSE 法と BB-HASTE 法には有意差は見られなかった。高速スピンエコー法における脂肪の高信号化については、水および脂肪のプロトンの chemical exchange, J-coupling, diffusion の影響が考えられている¹¹⁾が、TSE 法と比べて black-blood 法

は実効 TE および echo space が短く ETL が長いこと、いずれの要因共に脂肪の高信号化を促進している可能性が考えられた。脂肪の高信号化は CSE 法で論じられてきた T₂ コントラストとは異なったものとなるが、実際の診断上は胸壁や縦隔病変はかえってコントラストが明瞭に描出されることも多く診断上有利な場合も多い。逆に T₂ 強調画像上で高信号となる嚢胞性病変などは脂肪に近い信号強度となり不明瞭となる。脂肪信号が診断の妨げになる場合には、STIR[®] や通常の脂肪抑制法の併用が有用であると考えられる。

今回の検討では black-blood 法による血流信号の抑制と拡張期のデータ収集は、胸部領域における T₂ 強調画像のアーチファクトを抑制し画質を大幅に改善させることができると考えられた。心大血管の動きの最も少ない拡張期に撮像を行うことでアーチファクトの少ない画像を得ることができ、ほぼ同一心周期の画像が得られるために従来型の TSE 法のようにスライスごとに心周期が異なる場合と比べ解剖学的な把握が容易であり、スライスごとに異なったアーチファクトが出現することも少ない。拡張期には血流が少なくスライス面内に残存した血液信号が描出される場合が考えられるが、black-blood 法ではスライス面外の血液信号を無信号化するのに加えてスライス面内の血液信号は一度収縮期を経験させることでスライス面外へ wash out されるため、血液信号をほとんど抑制することが可能である。また血液信号を無信号化するための反転回復時間は厳密に設定しなくても、血流信号は大部分抑制される⁸⁾ので臨床には拡張期にあわせて撮像するのに使いやすい。血液信号が残存する可能性としては、wash out されずに心室内に血液が停滞している場合や心臓内あるいは上行大動脈の血液信号が下行大動脈で画像上に現れてくる場合などが考えられるが、今回の検討ではほとんど見られなかった。

BB-TSE 法は撮像時間が 1 スライス当たり

30~40秒と長くかかり、多くのスライスを撮像する場合には時間がかかることが最大の欠点ではあるが、従来型のTSE法と比べてアーチファクトの少ない高画質のT₂強調画像が得られ非常に有用であると考えられた。また今回は検討していないが呼吸停止下でも十分撮像が可能であり、更なる画質改善も期待される。BB-HASTE法は画質の点ではやや劣るものの、非常に短時間で呼吸運動や心大血管によるアーチファクトのほとんどない画像が撮像可能である。胸部全体を短時間でカバーすることが可能であり、全体の大まかな把握や体動によるアーチファクトが目立つ場合などに有用であると考えられた。

文 献

- 1) Crooks LE, Barker B, Chang H, et al. : Magnetic resonance imaging strategies for heart studies. *Radiology* 1984 ; 153 : 459-465
- 2) Gamsu G, Webb WR, Sheldon P, Kaufman L, Crooks LE, Birnberg FA, Goodman P, Hinchcliffe WA, Hedgecock M : Nuclear magnetic resonance imaging of the thorax. *Radiology* 1983 ; 147 : 473-480
- 3) Webb WR, Sostman HD : MR imaging of thoracic disease : clinical uses. *Radiology* 1992 ; 182 : 621-630
- 4) Mayo JR : Magnetic resonance imaging of the chest. *Where we stand. Radiol Clin North Am* 1994 ; 32 : 795-809
- 5) Haddad JL, Rofsky NM, Ambrosino MM, Naidich DP, Weinreb JC : T₂-weighted MR imaging of the chest : comparison of electrocardiograph-triggered conventional and turbo spin-echo and nontriggered turbo spin-echo sequences. *JMRI* 1995 ; 5 : 325-329
- 6) Mayo JR, Gordon Culham JA, MacKay AL, Aikins DG : Blood MR signal suppression by preexcitation with inverting pulses. *Radiology* 1989 ; 173 : 269-271
- 7) Edelman RR, Chien D, Kim D : Fast selective black blood MR imaging. *Radiology* 1991 ; 181 : 655-660
- 8) Simonetti OP, Finn JP, White RD, Laub G, Henry DA : "Black blood" T₂-weighted inversion-recovery MR imaging of the heart. *Radiology* 1996 ; 199 : 49-57
- 9) Stehling MK, Holzknicht NG, Laub G, Bohm D, von Smekal A, Reiser M : Single-shot T₁- and T₂-weighted magnetic resonance imaging of the heart with black blood: preliminary experience. *MAGMA* 1996 ; 4(3-4) : 231-240
- 10) Olson EM, Bergin CJ, King A : Fast SE MRI of the chest : parameter optimization and comparison with conventional SE imaging. *J Comput Assist Tomogr* 1995 ; 19 : 167-175
- 11) Seelos KC, von Smekal A, Vahlensieck M, Gieseke J, Reiser M : Cardiac abnormalities : assessment with T₂-weighted spin-echo MR imaging with electrocardiogram gating at 0.5T. *Radiology* 1993 ; 189 : 517-522
- 12) 西 潤子, 山下康行, 富田静二, 横山利美, 高橋睦正 : 呼吸停止下心電図同期 black-blood 法による心臓の高速MR imaging. *日磁医誌* 1998 ; 18 : 212-219
- 13) Lim TH, Hong MK, Lee JS, et al. : Novel application of breath-hold turbo spin-echo T₂ MRI for detection of acute myocardial infarction. *JMRI* 1997 ; 7 : 996-1001
- 14) Henkelman RM, Hardy PA, Bishop JE, Poon CS, Plewes DB : Why fat is bright in RARE and fast spin-echo imaging. *JMRI* 1992 ; 2 : 533-540

**Fast T₂-weighted MR Imaging of the Chest : Comparison of
Turbo Spin Echo, Black-blood Turbo Spin Echo and
Black-blood Single-shot Turbo Spin Echo Sequences**

Masatoshi TSUNODA, Izumi TOGAMI, Hironori KUROKAWA,
Nobuya SASAI, Sirou AKAKI, Yoshio HIRAKI

*Department of Radiology, Okayama University Medical School
2-5-1 Shikata-cho, Okayama-shi, Okayama 700-8558*

In 40 patients with a diverse range of thoracic abnormalities, T₂-weighted magnetic resonance (MR) images of the chest were obtained with the three different sequences 1) electrocardiograph (ECG)-triggered turbo spin echo (TSE), 2) ECG-triggered TSE with black-blood preparation (BB-TSE) and 3) ECG-triggered half-Fourier single-shot TSE with black-blood preparation (BB-HASTE) sequences, and those images were compared qualitatively and quantitatively. In the qualitative analysis, for the overall image quality, the BB-TSE images were evidently better than the conventional TSE and BB-HASTE images. For being least influenced from blood signals, the BB-TSE and BB-HASTE images were remarkably better than the conventional TSE images. As far as ghosting is concerned the BB-HASTE images were significantly better than the conventional TSE and BB-TSE images. In the quantitative analysis, much higher lesion-to muscle contrast was obtained with the conventional TSE and BB-TSE sequences than with the BB-HASTE sequences. Lesion-to-fat and muscle-to-fat contrasts were significantly higher with both the BB-TSE and BB-HASTE sequences than with the conventional TSE sequences. In conclusion, BB-TSE imaging provides excellent T₂-weighted images of the chest and BB-HASTE imaging provides images being free from motion artifacts and blood signals in a short scan time.