

## 呼吸停止下心電図同期 black-blood 法による 心臓の高速 MR imaging

西 潤子, 山下康行, 富口静二, 横山利美,  
高橋睦正

熊本大学医学部放射線医学教室

### はじめに

心臓の MR imaging は血流や心拍動の影響を大きく受け制約が多い撮像の一つである。1984年に Crooks ら<sup>1)</sup>によって心電図同期下の SE 法が報告されている。しかし、撮像時間は数分間にも及び、また、拍動や血流、呼吸による artifact を伴うことが多かった。近年では高速撮像法の発達に伴い turbo spin echo (TSE) 法や gradient echo 法を使用することで撮像時間の短縮が可能となり画像が鮮明になりつつある<sup>2),3)</sup>。

1989年、Mayo ら<sup>4)</sup>は心電図同期下にて non-selective 180° preinversion pulse を併用することで心筋と心内腔の明瞭なコントラストを得ている。また、Edelman ら<sup>5)</sup>は section-selective 180° RF pulse を non-section selective 180° RF pulse の直後に加えることで血流信号のみを抑制し、black-blood 法として報告した。Simonetti ら<sup>6)</sup>はこの black-blood 法を TSE 法および fast-STIR 法に併用することで血流や拍動からの信号を抑制し、心臓並びに心筋の病変部をも明瞭に描出することに成功している。ま

た、Stehling ら<sup>7)</sup>は心筋の高速撮像法として turbo-FLASH 法および HASTE 法に black-blood 法を併用し有用性を報告している。我々は正常ボランティアを対象とし、血流信号を抑制する black-blood 法を併用し呼吸停止および心電図同期下にて心臓の高速撮像を試み、心筋の描出に有用なパルス系列について比較検討した。

### 対象および方法

1996年10月～1997年6月の間に、心電図同期並びに呼吸停止下にて MR 検査を施行したボランティア成人13例(19歳～74歳、平均年齢44歳、男性11例、女性2例)を対象とした。全例明らかな心疾患は認めていない。使用した装置は1.5 T 超伝導型 MRI 装置 (Siemens 社 Vision) で、信号受信には phased array coil を使用した。

MR 撮像は以下の手順で行った。まず、呼吸停止下で half-fourier single shot turbo spin echo 法 (HASTE 法) により心臓全体を撮像し、冠動脈が含まれる冠状断面を設定した。こ

---

キーワード black-blood, MRI, myocardium

れと同一断面を呼吸停止 (breath-hold : BH) および心電図同期下 (cardiac gated : CG) にて black-blood-turbo spin echo 法 (BB-TSE 法), black-blood-HASTE 法 (BB-HASTE 法), black-blood-fast STIR 法 (BB-STIR 法) の三つのパルス系列にて撮像した. 最後に, 心電図同期の TSE 法を撮像した.

Black-blood 法は Simonetti ら<sup>6)</sup>により報告されているように R 波 trigger 後すぐに non-selective と selective の paired 180° pulse をかけ, TI 時間後 (=625 ms) にデータ収集を開始した (Fig. 1).

撮像条件は FOV=340 mm, slice 厚 =7 mm

に統一し, マトリックスは TSE 法, BB-TSE 法, BB-STIR 法においては 256×231~256, HASTE 法, BB-HASTE 法にては 160×256 とした. TSE 法では echo train length=15, BB-TSE 法および BB-STIR 法にては echo train length=33, echo space=10.24 ms, TR は RR 間隔の 2 倍を使用した. TSE 法, BB-TSE 法では TE=76.0, HASTE 法および BB-HASTE 法では, TR=∞, TE=64 ms, echo space=4.2 ms, BB-STIR 法においては TE=76.0 で TI=170 と設定した.

検討方法としては, まず, 心筋信号の定量評価として, 心筋, 左室内腔, 皮下脂肪および

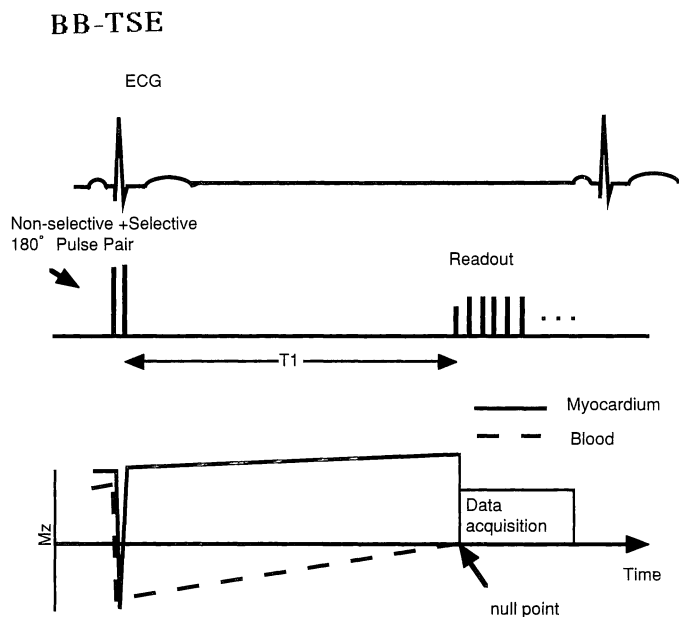


Fig. 1. Pulse sequence of BB-TSE. Timing diagram shows the effect of the blood nulling preparatory pulses. The  $T_1$  recovery curves are shown for myocardium and out-of-section blood. Non-selective inversion pulse applied at the R wave of the ECG is followed immediately by section-selective inversion pulse. Image acquisition is timed to occur as the longitudinal magnetization of blood recovers through the null point. (Simonetti OP, et al. : Radiology, 1996 ; 199 : 49-57)

noise (右胸郭外に設定) の4つの region of interest (ROI) を測定し, 心筋の signal-to-noise ratio (SNR; signal intensity (SI) of myocardium/standard deviation (SD) of noise) を算出した. また, phased array coil を使用のため正確な noise の設定が困難であることから, 左室心筋の左室内腔に対する contrast ratio (SI of myocardium/SI of lt. ventricle) および左室心筋の fat に対する contrast ratio (SI of myocardium/SI of fat) を算出し検討項目とした.

次に, 視覚的評価として, 全体の画質, 心筋の鮮明な描出および信号の均一性, 冠動脈の描出, 血流信号抑制の均一性, motion artifact の有無の6項目について, 2人の放射線科医が1~5点 (1; unacceptable, 2; poor, 3; fair, 4; good, 5; excellent) 評価で採点し, それぞれの平均値およびSDを算出した. Mann-Whitney 検定を用い  $P < 0.05$  にて有意差の検定を行った.

また, 検討対象としては加えてないものの, 心筋梗塞後の症例に応用したので併せて報告する.

## 結 果

### a) 定量評価

Table 1 に心筋の SNR および左室内腔, 皮下脂肪に対する心筋の contrast ratio を示す. SNR および左室内腔に対する心筋の contrast

ratio は, 通常の TSE 法および HASTE 法に比較し BB-TSE 法および BB-HASTE 法が有意に高かった. また BB-TSE 法に比較して BB-HASTE 法が有意に高値であった. 皮下脂肪に対する心筋の contrast ratio では BB-STIR 法のみで有意に高かったが, ほかに差は認められなかった.

### b) 視覚的評価

Table 2 に心筋の描出と均一性, 冠動脈の描出の有無, 血流抑制の効果, motion artifact および全体の画質に対する評価を示す (Figs. 2, 3). 心筋の描出と心筋信号の均一性に関しては, TSE 法および HASTE 法に比較し BB-TSE 法, BB-HASTE 法および BB-STIR 法が有意に優れていた. 冠動脈の描出率は BB-TSE 法, BB-HASTE 法では高いものの BB-STIR 法では有意に低く, むしろ HASTE 法での描出率の方が高かった (Fig. 3). 左室内腔

Table 1. Results of Quantitative Evaluations

	SNR	Myo/ventricle contrast ratio	Myo/fat contrast ratio
TSE	6.2±4.8	2.5±1.4	0.24±0.18
HASTE	18.6±9.6*	4.1±2.2	0.24±0.16
BB-TSE	17.8±5.4*	4.7±1.0*	0.17±0.07
BB-HASTE	31.7±11.5*	10.5±3.8*	0.24±0.07
BB-STIR	10.7±3.8	2.9±0.7	0.95±0.46*

\* :  $p < 0.05$

Table 2. Results of Visual Evaluations

	over all image quality	visualization of ventricular structure	uniformity of myocardial signal intensity	visualization of coronary artery	nulling of intraventricular blood	motion artifact
TSE	1.6±0.7	1.4±0.5	1.1±0.3	1.7±0.9	1.3±0.5	1.3±0.5
HASTE	3.2±0.8	3.3±0.7	2.8±1.2	3.3±0.9*	2.8±1.2	4.2±0.6*
BB-TSE	4.6±0.5*	4.5±0.6*	4.2±0.5*	4.4±0.9*	4.5±0.5*	4.3±0.6*
BB-HASTE	4.3±0.6*	4.5±0.9*	4.3±0.6*	4.3±0.9*	4.4±0.8*	4.7±0.5*
BB-STIR	3.9±1.0*	3.9±1.4*	3.2±1.7*	2.2±1.4	4.5±0.6*	4.4±1.0*

\* :  $p < 0.05$

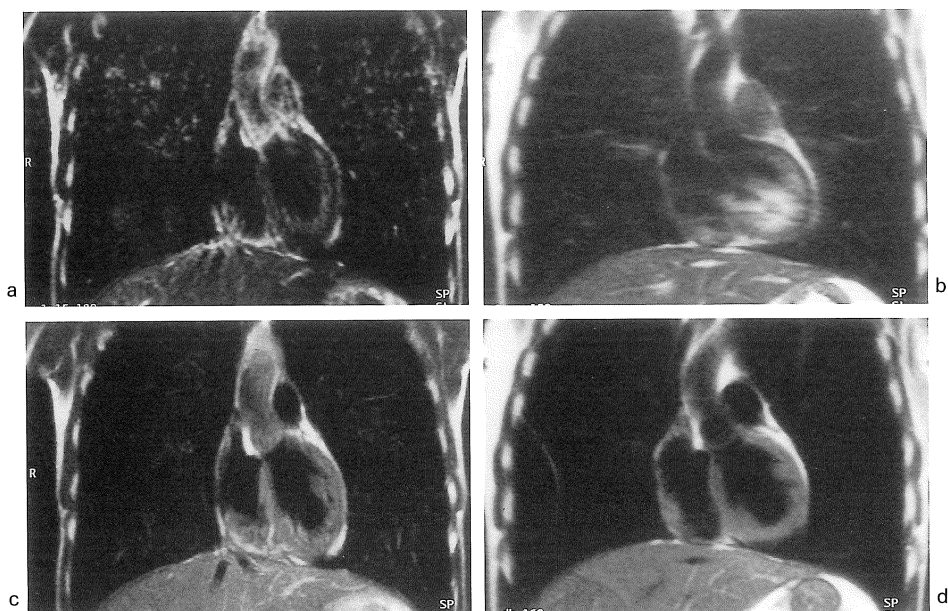


Fig. 2. (a) TSE, (b) HASTE, (c) BB-TSE, (d) BB-HASTE  
 Cardiac-gated-BB-TSE (c) and cardiac-gated-BB-HASTE imaging (d) show better overall image quality and visualise ventricular structures more clearly in comparison with cardiac-gated-TSE (a) and breath-hold HASTE (b) images. End-diastolic image of the left ventricle is clearly visualised on (c) BB-TSE and (d) BB-HASTE images.

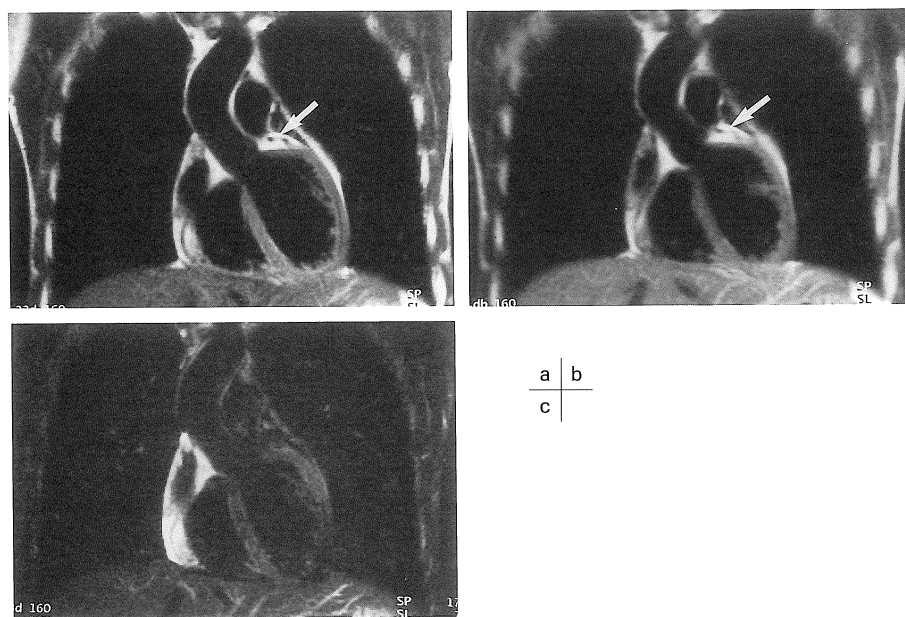


Fig. 3. Comparison of (a) BB-TSE, (b) BB-HASTE, (c) BB-fast STIR  
 All imagings show clearly the left ventricle, and cardiac-gated-BB-TSE image (a) clearly shows papillary muscles. Coronary artery (arrows in (a), (b)) are seen on cardiac-gated-BB-TSE (a) and cardiac-gated-BB-HASTE images (b).

の血流抑制効果においてはBB-TSE法, BB-HASTE法およびBB-STIR法の撮像法間に有意差はなかった。Motion artifactはTSE法でのみ明らかに目立っており, 他のパルス系列との間に明らかな差を認めた。全体の画質は通常のTSE法およびHASTE法に比較しBB-TSE法, BB-HASTE法およびBB-STIR法が有意に優れていた。BB-HASTE法では画像にぼけが見られ, 有意差は無いもののBB-TSE法が最も良好な画質が得られていた (Fig. 3)。

### 考 察

MRIによる心筋の評価は心拍動や呼吸の影響のため難しく, 長年にわたっての課題であった。1987年にMadelineら<sup>8)</sup>は, SE法によって心筋梗塞の描出が可能であったと報告しているが, 呼吸や拍動の影響でアーチファクトとの鑑別が難しい症例も多いとしている。近年では高速撮像法の一つであるgradient echo法が応用されており, cine MRによる動きの評価として使用されることが多い。また, TSE法も応用されつつあるが, 心電図同期下のTSE法は1スライスの撮像に数十秒を必要とする。このため呼吸停止を併用することが難しく呼吸に伴うアーチファクトが多い。また, 心尖部を初めとした心臓自体の拍動やそれに伴う周囲の大血管の微妙な拍動も撮像時間に伴いアーチファクトの原因となる<sup>3)</sup>。これに比較しHASTE法は1スライスを約1秒にて撮像可能であり1呼吸停止下に15~16スライスの撮像が可能となる<sup>9)</sup>。このため, 呼吸に伴うアーチファクトは減少し, 心臓形態全体を把握するのは容易となる<sup>10)</sup>。これにより冠動脈起始部の描出も可能であった。しかし, 心内腔の血液は流速によっては高信号となることも多く心内腔の描出率は低かった。また, 必ず拡張期に一致するわけではなく, 撮像タイミングに伴い時相の異なった心形態が撮像されることとなる。これに比し, BB-TSE法, BB-HASTE法およびBB-

STIR法では呼吸停止と心電図同期を併用することで呼吸および心拍動に伴うアーチファクトを減少させることが可能である<sup>6), 11)</sup>。Black-blood法としてはSimonettiらによって報告されているように, R波直後にnon-selectiveおよびsection selective 180° pulseをかけ, 血流信号がnull pointを通過する時点で(TI時間後)収集を開始する。RR間隔がおよそ1000msの場合はTI=625msで血液がnullとなると報告されている<sup>5)</sup>。これはほぼ拡張終末期に一致し, 撮像タイミングに伴う心時相のずれはなくなると考える。また, BB-TSE法, BB-HASTE法およびBB-STIR法のどの撮像法においても有意差はなく心内腔の血流抑制は良好であり, 通常のTSE法, HASTE法に比較し, 心筋と心内腔とのcontrastが明らかに上昇し, 心内腔の形態を明瞭に描出可能であった<sup>4)</sup>。

BB-TSE法およびBB-STIR法では1呼吸停止下に1スライスしか撮像できないものの, BB-HASTE法では1呼吸停止下3スライスが撮像可能である。また, BB-TSE法に比較しBB-HASTE法はSNRが高く, 心筋と心内腔とのcontrast ratioも最も高かった。しかし, これは両者間のボクセルサイズの違いやバンド幅の違いに起因すると考えられる<sup>12)</sup>。また, HASTE法はTSE法に比較しボクセルサイズが大きいのみならず, 後半のechoの信号の低下により明瞭性にかけ, blurringという現象が認められている<sup>9)</sup> (Fig. 3)。このことは有意差こそないものの全体の画質がBB-TSE法で最も高かった原因の一つと考えられる。BB-STIR法は全体の信号が弱く, 症例による画質の優劣の差が強かった。Fig. 3(c)に認められるように磁場の影響を強く受け, 脂肪抑制効果が不均一であることが多かった。このため心筋信号自体にもばらつきが多い傾向であった。また, 心尖部においては心筋の信号の描出が不良であることが多かった。BB-TSE法でもこの現象は心尖部に時折認められ, 撮像時間の長さ

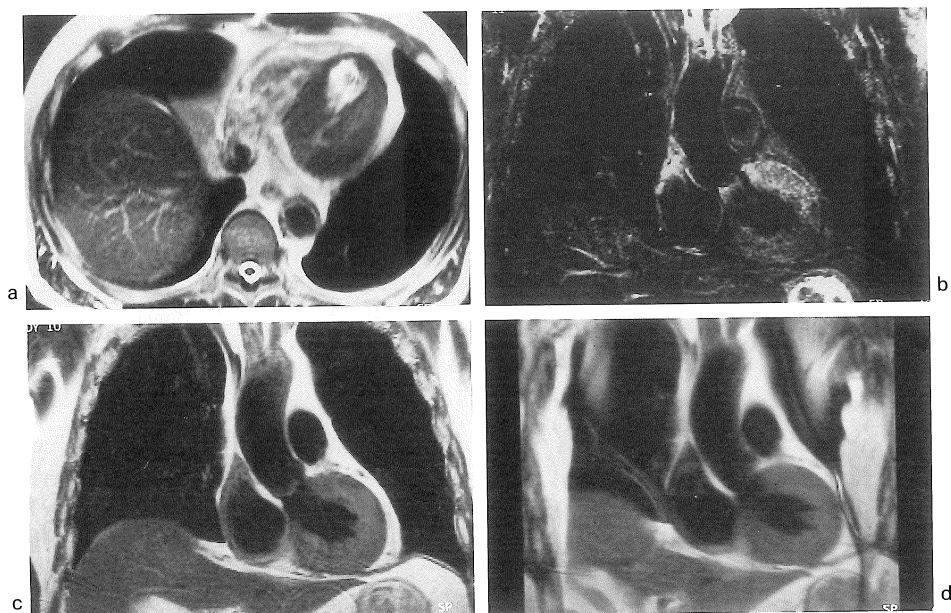


Fig. 4. 74 y.o, male (OMI of LAD lesion)  
 Axial HASTE imaging (a) shows thin wall septum and apex both had infarcted myocardium. Cardiac-gated-BB-fast STIR imaging (b) shows high signal intensity of the anterior wall, which is consistent with ischemic area on Tallium scintigraphy. Any signal changes were detected on either cardiac-gated-BB-TSE (c) or cardiac-gated-BB-HASTE imaging (d).

と心尖部の動きが微妙に影響し作用していると考えられた。BB-TSE法では横隔膜に密に接している下壁の領域の心筋の描出が不良となっている症例も存在し、これも横隔膜の動きと関連している可能性があり、今後の検討の必要性が示された。

最近我々はこの心電図同期下 black-blood 法を実際の臨床応用に適応している。Fig. 4 は心筋梗塞の例に本方法を適応したものである。いずれのパルス系列でも心筋は良好に描出されているが、心筋壁の信号の異常は STIR 法で最もよく描出されていた。ただし前述したように STIR 法は磁場の影響を強く受け通常でも心筋信号の不均一性が存在する。この症例もその可能性を否定はできない。しかし、Simonetti<sup>6)</sup>の報告においても虚血性病変は STIR 法でより明瞭に描出されている印象であり、本パルス系列は SNR は低いもののコントラストは高

いとも考えられ、今後症例を増やし臨床応用を検討していきたい。

今回の検討にて呼吸停止および心電図同期下の black-blood 法の併用で血流や拍動および呼吸に伴うアーチファクトが軽減し、全体の画質が向上した。これにより、心臓形態の把握が容易となり心筋自体の描出も明瞭であった。今後心疾患に対する臨床応用の可能性が示唆された。

## 文 献

- 1) Crooks LE, Baker B, Chang H: Magnetic resonance imaging strategies for heart studies. *Radiology* 1984; 53: 459-465
- 2) Sebastian G, Charles BH: Adult heart disease. In: Edelmann, Hesselink, Zlatkin, ed. *Clinical Magnetic Resonance Imaging*. 2nd ed. Philadelphia, USA: WB Saunders company, 1997;

- 1713-1715
- 3) Seelos KC, Smekal A, Vahlensieck M, et al. : Cardiac abnormalities : Assessment with T<sub>2</sub>-weighted turbo spin-echo MR imaging with electrocardiogram gating at 0.5 T. *Radiology* 1993 ; 189 : 517-522
  - 4) Mayo JR, Gordon Culham JA, Mackay AL, et al. : Blood MR signal suppression by preexcitation with inverting pulses. *Radiology* 1989 ; 173 : 269-271
  - 5) Edelman RR, Chien D, Kim D : Fast selective black blood MR imaging. *Radiology* 1991 ; 181 : 655-660
  - 6) Simonetti OP, Finn JP, White RD, et al. : "Black blood" T<sub>2</sub>-weighted inversion-recovery MR imaging of the heart. *Radiology* 1996 ; 199 : 49-57
  - 7) Stehling MK, Holzknrecht NG, Laub G, et al. : Single-shot T<sub>1</sub>- and T<sub>2</sub>-weighted magnetic resonance imaging of the heart with black blood : preliminary experience. *Magma* 1996 ; 4(3-4) : 231-240
  - 8) Fisher MR, McNamr MT, Higgins CB : Acute myocardial infarction : MR evaluation in 29 patients. *AJR* 1987 ; 148 : 247-251
  - 9) Gaa J, Hatabu H, Jenkins RL, et al. : Liver masses : Replacement of conventional T<sub>2</sub>-weighted spin-echo MR imaging with breath-hold MR imaging. *Radiology* 1996 ; 200 : 459-464
  - 10) Alsop DC, Hatabu H, Bonnet M, et al. : Multislice, breath-hold imaging of the lung with submillisecond echo times. *Magn Reson Med* 1995 ; 33 : 678-682
  - 11) Liu Y, Riederer SJ, Ehman RL : Magnetization-prepared cardiac imaging using gradient echo acquisition. *Magn Reson Med* 1993 ; 30 : 271-275
  - 12) Miyazaki T, Yamashita Y, Tsuchigame T, et al. : MR cholangiopancreatography using HASTE (half-fourier acquisition single-shot turbo spin-echo) sequences. *AJR* 1996 ; 166 : 1297-1303

## Breath-hold Cardiac-gated Black-blood Fast MR Imaging of the Heart

Junko NISHI, Yasuyuki YAMASHITA, Seiji TOMIGUCHI,  
Toshimi YOKOYAMA, Mutsumasa TAKAHASHI

*Department of Radiology, Kumamoto University School of Medicine  
1-1-1 Honjo, Kumamoto-shi, Kumamoto 860-8556*

In order to evaluate the value of new cardiac MR imaging techniques that overcome problems with blood flow, cardiac motion and respiratory motion, 13 healthy volunteers were studied using a 1.5 T superconductive magnet device (Siemens Magnetom Vision) using rapid imaging sequences with blood signal suppression. We implemented breath-hold cardiac-triggered HASTE, TSE and fast-STIR sequences with preparatory radio frequency pulses to eliminate signals from the flowing blood and compared the images obtained thereby with images obtained with a T<sub>2</sub>-weighted turbo spin echo technique.

Based on visual and quantitative evaluation, breath-hold black-blood HASTE, TSE and STIR imaging were free of cardiac and respiratory motion artifacts and blood signals, and provided excellent image quality and visualization of cardiac structures. Blood in the heart chambers was uniformly nulled and motion artifacts were effectively suppressed. The image quality for black-blood breath-hold cardiac triggered T<sub>2</sub>-weighted TSE, STIR and HASTE was significantly better than that for conventional turbo-spin echo sequences. Further clinical evaluation of these techniques is necessary to define their role in cardiac imaging.