

心臓の 3T MRI

東野 博¹, 齋藤 実², 岡山英樹², 檜垣實男²,
三木 均¹, 望月輝一¹, 高橋志津江³, 貞本和彦³

¹愛媛大学大学院医学系研究科生体画像応用医学 ²同病態情報内科学
³和昌会貞本病院

はじめに

近年 3T MRI 装置が急速に普及し心臓 MRI に関する報告も多くみられるようになってきた^{1)~3)}. これらのうちシネ MRI と遅延造影は, それぞれ時間分解能と濃度分解能に優れた MRI の最も得意とする領域で心臓 MRI の中心的な存在であり, また冠動脈の描出は, 臨床的に最も関心をもたれており X 線 CT と優位性を競い合っている.

本論文ではシネ MRI と遅延造影について, 1.5T MRI の一般的な内容を踏まえながら, 3T MRI の定性的および定量的な有用性を述べる.

前 処 置

3T MRI 検査を実施する前に心臓ペースメーカーなどの体内金属や閉所恐怖症などについてチェックを行い, さらにガドリニウム造影剤に

ついての説明を行い同意を得た.

著者らは X 線 CT 検査の前には心拍数が 65 心拍/分以上のときは相対的な時間分解能を上げるためにベータブロッカを用いて心拍数の調整を行っているが, MRI 検査では装置の時間分解能が良いために心拍数の調整のための前処置は行っていない. これは朝 1 番からでも検査を予約することが可能なことを示しており X 線 CT と比べて実務上たいへん優れた点である.

対象と使用機器

3 例の心筋梗塞症例を対象とした (Table 1). すべて亜急性期に心筋梗塞の重症度の判定のために 1.5T MRI 検査を施行した症例で, 慢性期の経過観察の目的で 3T MRI 検査を行った. したがって慢性期の 3T MRI と亜急性期の 1.5T MRI の比較となっていることは留意しておく必要がある.

Table 1. Patient Characteristics

Case#	Age (years)	Gender	Culprit artery#	3T from onset (days)	1.5T from onset (days)	3T-1.5T Interval (days)
1	69	M	13	132	15	117
2	76	M	7	145	22	123
3	81	M	7	64	12	52

キーワード 3T MRI, cardiac MRI, cine MRI, delayed enhancement

3T MRI 装置は、GE 社製 Signa EXCITE HD 3T、コイルは 8 チャンネル心臓用を用いた。1.5T MRI 装置は GE 社製 Signa と 4 チャンネル心臓用コイルを用いた。3T MRI と 1.5T MRI の比較であるが、コイルの性能も異なっていることは注意が必要である。

チューニングや心臓の軸合わせを行った後、シネ MRI、タギング、遅延造影を撮像した。

シネ MRI の撮像

3T MRI 装置を用いて、ASSET (array spatial sensitivity encoding technique) 併用 FIESTA (fast imaging employing steady state acquisition) 法シネ MRI を撮像した (Table 2)。撮像断面は、左室長軸断面に加えて心尖部、中間部、心基部の左室短軸断面の撮像が最低必要であるが、左室短軸断面は心基部から心尖部まで連続した断面を撮像した。左室全体を死角なく判定できるという MRI の利点を活用するためには是非とも必要な断面選択であり、特別な理由がない限り行うべきである。

撮像条件自体は 1.5T MRI の時代に既に大きな進歩を遂げており⁴⁾、k-space segmented GFE 法が登場して 1 回の息止めでシネ MRI の撮像が可能になり^{5),6)}、steady-state 法の出

Table 2. Scan Parameters : CINE SSFP (steady state free precession) Imaging

FIESTA (fast imaging employing steady state acquisition) CINE imaging with ASSET
TR = 3.6 ms
TE = 1.3 ms
Flip Angle = 60 deg.
Slice thickness = 8 mm
FOV = 400 mm
Matrix = 256
20 phases per RR interval

現で高い心筋と内腔のコントラストが得られて流入効果が期待できない心機能低下症例でも良好な画像が得られるようになった⁷⁾。

一般的に撮像断面のスライス厚は 8 mm 以下、ピクセルのサイズは 2.0 mm 以下の分解能が望ましいと言われている⁸⁾。時間分解能設定は 1 心拍 20 時相以上の情報が得られれば十分であろう。しかし装置の進歩によっては今後はもっと空間分解能を向上させることが可能かもしれない。

シネ MRI の評価

得られたシネ MRI 画像を用いて、まずアニメーション表示させて壁運動を観察した (Fig. 1)。紙面では静止画で表すことしかできないがアニメーション表示で観察するとよく認識できる。

次に左室短軸の心基部から心尖部までのすべての断面を用いて、それらすべてを同期させてアニメーション表示させて左室すべての壁運動を観察した。すべての断面の同時同期表示はシネ MRI の利点を十分に発揮した良い方法であり、局所壁運動の診断に大きな威力を発揮する (Fig. 2)。これも紙面では静止画で拡張末期像と収縮末期像のみを提示するしかないが、動画で観察することにより左室全体の局所壁運動の異常が客観的に診断できる。症例によっては心尖部で収縮期に逆に拡張することもあり得ることであり、シネ MRI の評価をきちんと行おうというのであれば必ず左室全体の同時同期表示で観察しなければならないと考える。そのためにはワークステーションの操作や動画の圧縮や配列の技術も習得する必要がある。

もちろん定量的解析も可能で、左室長軸画像を用いた古典的な area-length 法や左室全体の短軸画像を用いた true Simpson 法で左室容量の測定が行われる。後者は三次元的な測定で局

2006 年 8 月 21 日受理

別刷請求先 〒791-0295 愛媛県東温市志津川 愛媛大学大学院医学系研究科生体画像応用医学 東野 博

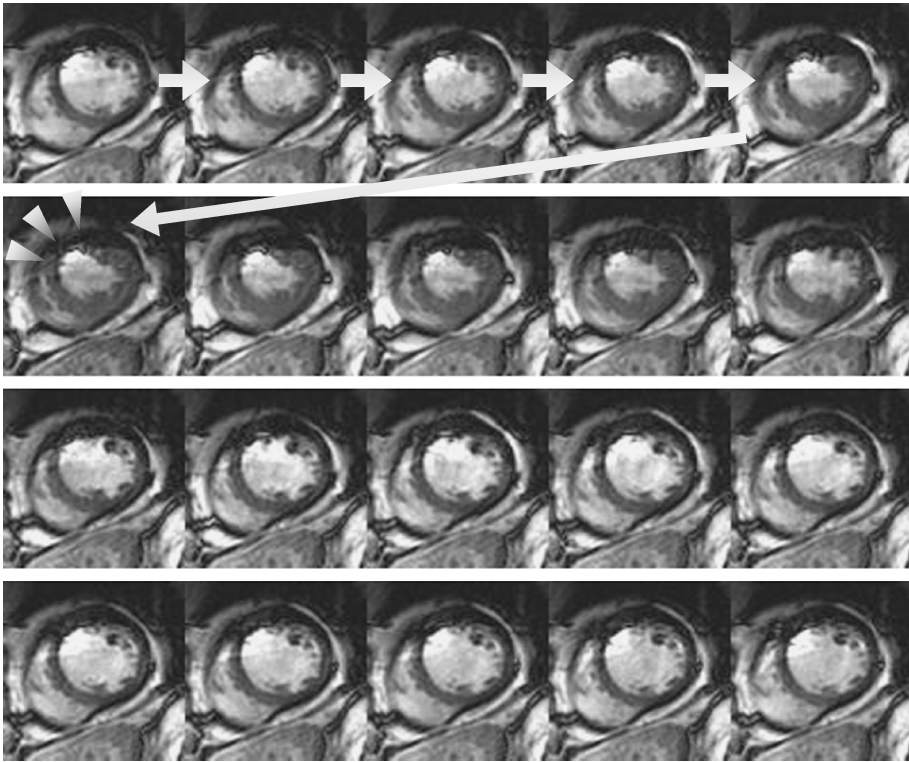


Fig. 1. Case of old myocardial infarction (case # 3). Serial images of mid-ventricular short axial movies obtained with FIESTA CINE imaging by 3T MRI. The movies show anteroseptal hypokinesis (arrowheads).

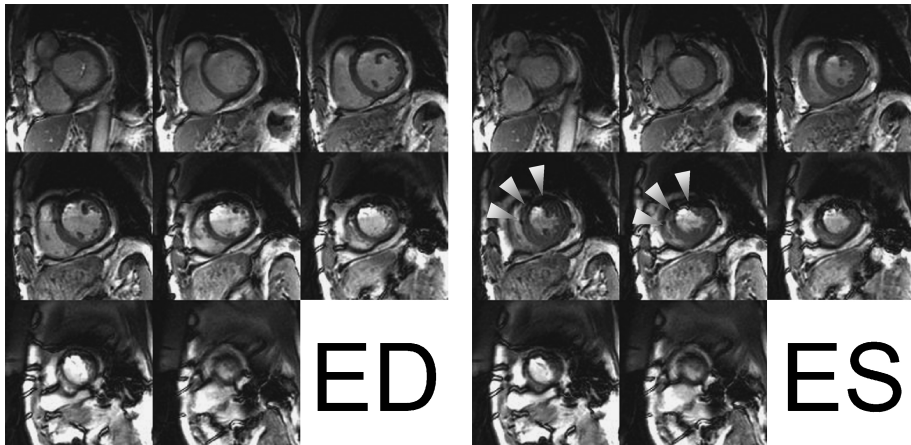


Fig. 2. Case of old myocardial infarction (case # 3). End-diastolic and end-systolic images of whole heart short axial movies obtained with FIESTA CINE imaging by 3T MRI. The movies show anteroseptal hypokinesis (arrowheads).

所的な壁運動異常があっても原理的に正確であることから多用されている⁹⁾。ただし心臓カテーテル法による左室造影の解析のような標準的なソフトウェアは通常準備されておらず、今後のシネ MRI の発展のためには検討しなければならない問題である。

シネ MRI の壁運動評価：3T MRI と 1.5T MRI

3T MRI と 1.5T MRI のシネ MRI による左室壁運動評価を比較した。3 症例の左室全体を同時同期させた動画を作成して、合計 6 個の動画が無作為に抽出して米国心臓病学会の 7 セグメント (anterobasal, anterolateral, apical, diaphragmatic, posterobasal, septal, posterolateral) ごとに 1 名の放射線科医と 1 名の循環器科医で合意の元に壁運動を 4 段階 (normal, hypokinesis, akinesis, dyskinesis) にスコア化した。一致率は 0.71 (15/21) であり (Table 3), 不一致の 6 セグメントも 1 スコアの乖離にとどまり、良好な相関であった。新しい 3T MRI 装置でもこれまでの 1.5T MRI 装置と乖離なく壁運動評価が可能なが確認された。

シネ MRI の画質評価：3T MRI と 1.5T MRI

3T MRI と 1.5T MRI のシネ MRI の画質を比較した。

定性的には 3T MRI と比べると 1.5T MRI

では粒子が粗く見えて、3T MRI の画質が明らかに勝っており、心筋壁と内腔のコントラストも良好であり、これは動画で観察するとより明瞭に判断できた。(Fig. 3)。

定量的に拡張末期 (撮像第 1 時相) の左室の中心部のスライスを用いて、心筋と内腔に適切な関心領域 ROI (region of interest) を設定して、SNR (signal to noise ratio) と CNR (contrast to noise ratio) を測定した。ノイズは前胸壁の前の適切な位置に ROI を設定した。

すべての症例で心筋の SNR と内腔の SNR は 3T MRI の方が高く、内腔と心筋の CNR も 3T MRI の方が高かった (Table 4)。定量的にも 3T MRI の画質が優れていることが示された。

シネ MRI のまとめ

定性的にも定量的にも 3T MRI のシネ MRI の画質は優れており、壁運動評価も十分に可能であり、紙面では静止画でしか表せないが動画で観察すると 3T MRI の画質の良さはより明瞭であり、総合的に優れていた。

シネ MRI は客観的で再現性も高く時間分解能も優れており、心エコー法のようなベッドサイドで行うような簡便さはないが、肺気腫や肥満など心エコー法で検査に苦慮するような症例でもシネ MRI では評価可能で、MRI 検査を施行できた全例で客観的な結果が確実に得られる。X 線 CT と比べると被曝がない上に時間分解能では今のところ X 線 CT をよせつけない。3T MRI の高画質でますますこれらの良さが発揮できて簡便で客観的で死角のない左室全体の機能評価が可能となると思われる。

しかし 3T MRI では著者らの経験でも磁化率アーチファクトが大きく認められる傾向があり¹⁰⁾、今後改善されなければならない問題と思われる。

Table 3. Correlation of Wall Motion Score between 3T MRI and 1.5T MRI

		1.5T MRI			Total
		Normal	Hypokinesis	Akinesis	
3T MRI	Normal	13	4	0	17
	Hypokinesis	0	2	2	4
	Akinesis	0	0	0	0
Total		13	6	2	21

タギングの撮像と評価

3T MRI装置を用いて、5 mm 間隔の SPAMM (spatial modulation of magnetization) を用いて心筋タギング撮像を行った (Table 5). 収縮に従って心筋タグの変形が良好に認められ、しかも撮像の最終スライスでも心筋タグの表示が

明瞭に見られた (Fig. 4).

従来の 1.5T MRI では収縮末期を少し過ぎた時相で心筋タグが消失してしまうことが多く、撮像最終時相の心筋タグの存在は高磁場 3T MRI でなければまず得られない所見である. これは心筋のねじれ現象が収縮期だけでなく拡張期も含めた全時相で解析可能なことを意

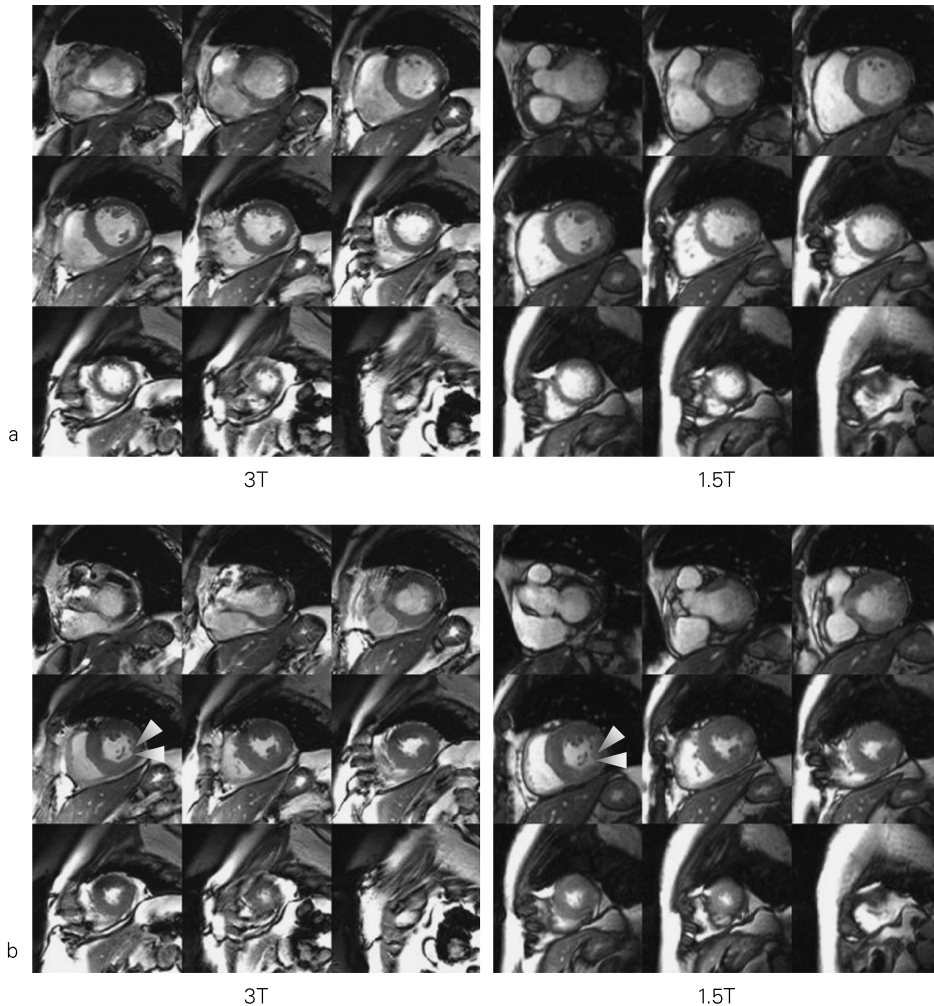


Fig. 3. Case of old myocardial infarction (case # 1). End-diastolic (a) and end-systolic (b) images of whole heart short axial movies obtained with FIESTA CINE imaging by 3T MRI and 1.5T MRI. The movies show posterolateral hypokinesis (arrowheads). Note the high SNR and quality in 3T MRI.

Table 4. Comparison of SNR and CNR in CINE Imaging between 3T MRI and 1.5T MRI

	SNR _{Myocardium}		SNR _{Cavity}		CNR _{Cavity-Myocardium}	
	1.5T	3T	1.5T	3T	1.5T	3T
Case 1	25.0	30.2	47.7	62.5	22.7	32.3
Case 2	3.1	47.6	51.8	109.8	18.7	62.3
Case 3	10.9	22.0	21.1	66.9	10.2	45.0

$SNR_{Myocardium} = \text{mean } SI_{Myocardium} / SD_{Noise}$

$SNR_{Cavity} = \text{mean } SI_{Cavity} / SD_{Noise}$

$CNR_{Cavity-Myocardium} = (\text{mean } SI_{Cavity} - \text{mean } SI_{Myocardium}) / SD_{Noise}$

SNR : signal to noise ratio

CNR : contrast noise ratio

SI : signal intensity, SD : standard deviation

Table 5. Scan Parameters : CINE Imaging with Myocardial Tagging

Segmented k-space fast gradient echo with SPAMM (spatial modulation of magnetization)
TR = 4.7 ms
TE = 2.2 ms
Slice thickness = 8 mm
FOV = 400 mm
Matrix = 256
Tag grid = 5 mm
20 phases per RR interval

Table 6. Scan Parameters : Delayed Myocardial Imaging

Gated fast gradient echo with IR pulse
TR = 4.7 ms
TE = 2.2 ms
TI = 260 ms
Slice thickness = 8 mm
FOV = 400 mm
Matrix = 256

味しており、そのためには自動的な解析方法や視覚的にわかりやすい結果の表示方法が必要であり今後の解析の進歩が強く望まれる。3T MRI ならではの心筋解析が最も期待できる分野と思われる。

遅延造影 MRI の撮像

3T MRI 装置を用いて、ガドリニウム造影剤を投与して 15 分後以降に遅延造影撮像を行った (Table 6)。

実際の撮像は TI (inversion 時間) を適切に調整しながら IR (inversion recovery) 法を用いて行った。撮像断面はシネ MRI と同様に左室短軸断面の心基部から心尖部まですべての領

域の撮像を行った。

遅延造影 MRI の評価

3T MRI でも 1.5T MRI と同等に遅延造影が認められた (Fig. 5)。3T MRI の画質は良好で、1.5T MRI では 3T MRI と比べると画像の粒子が粗く見えた。

遅延造影の有用性は X 線 CT でも報告されているが^{11),12)}、濃度分解能は MRI が極めて高く、その高信号領域は病理学的な心筋梗塞領域に一致することが報告されている¹³⁾。Kitagawa らは、心筋梗塞症例における遅延造影 MRI の viability 診断能は、特に特異度と陰性適中率が SPECT と比べて優れていたと報告している¹⁴⁾。他に心内膜下梗塞の診断感度が SPECT より高いこと¹⁵⁾や、梗塞心筋の心内膜から心

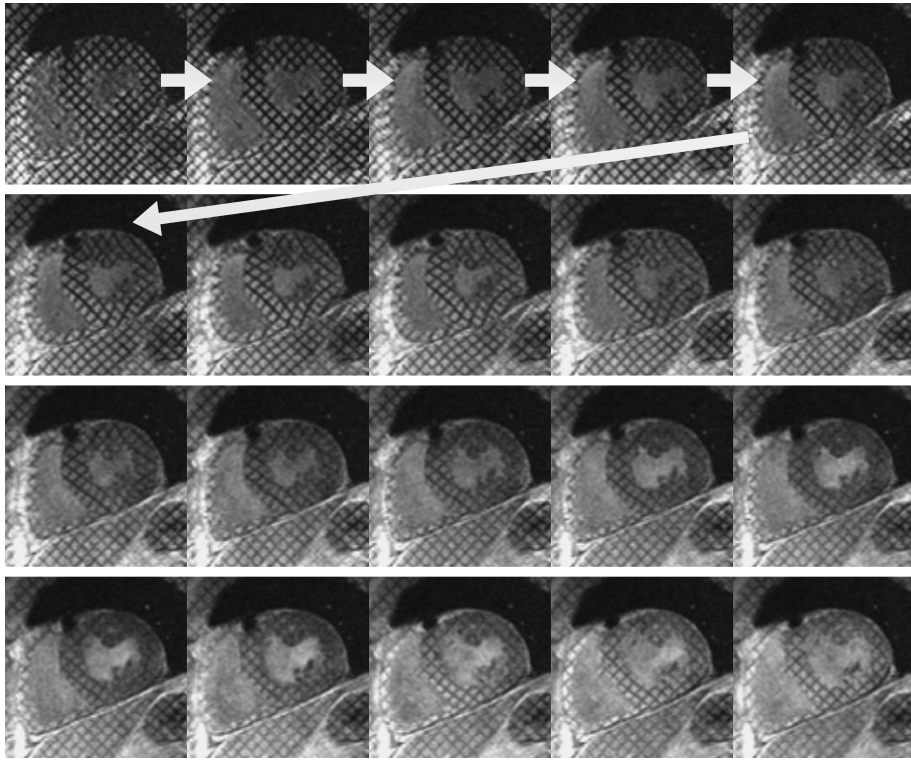


Fig. 4. Case of old myocardial infarction (case # 1). Serial images of mid-ventricular short-axial SPAMM movies obtained with segmented k-space fast gradient echo by 3T MRI. Note the tags throughout the entire heart cycle.

外膜方向への広がり50%を超えると機能回復が期待できないことも1.5T MRIで報告されている¹⁶⁾。3T MRIの高画質で今後空間分解能の向上が可能となればこれらの有用性がますます発揮できると思われる。

ま と め

シネMRI撮像と遅延造影MRIは30分以内でルチン検査として行うことが可能な前処置もほとんど必要としない簡便な検査である。早期灌流撮像や冠動脈撮像を加えれば、いわゆるone stop shoppingという1回の検査ですべての必要な情報が得られる検査である。3T MRI装置を用いることにより高画質で高精細な心臓

の画像が得られ、タギング撮像を行えば拡張期までの心筋のねじれの解析も可能である。3T MRI装置によって心臓MRI検査の普及に加速度的につくことを期待したい。

文 献

- 1) Schar M, Kozerke S, Fischer SE, Boesiger P: Cardiac SSFP imaging at 3 Tesla. Magn Reson Med 2004; 51: 799-806
- 2) Araoz PA, Glockner JF, McGee KP, Potter DD Jr, Valeti VU, Stanley DW, Christian TF: 3 Tesla MR imaging provides improved contrast in first-pass myocardial perfusion imaging over a range of gadolinium doses. J Cardiovasc Magn Reson 2005; 7: 559-564

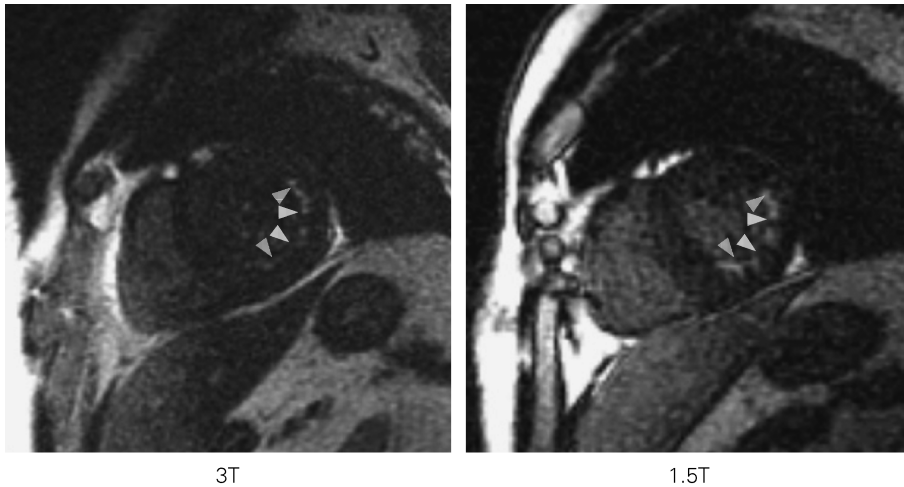


Fig. 5. Case of old myocardial infarction (case # 1). Delayed enhancement images of mid ventricular short axial view obtained with gated fast gradient echo with IR pulse by 3T MRI (TI=320 ms) and 1.5T MRI (TI=280 ms). The both images show subend delayed enhancement in territory of the left circumflex artery (arrowheads). Note the high SNR and quality in 3T MRI.

- 3) Santos JM, Cunningham CH, Lustig M, Hargreaves BA, Hu BS, Nishimura DG, Pauly JM : Single breath-hold whole-heart MRA using variable-density spirals at 3T. *Magn Reson Med* 2006 ; 55 : 371-379
- 4) Matsuoka H, Hamada M, Honda T, et al. : Measurement of cardiac chamber volumes by cine magnetic resonance imaging. *Angiology* 1993 ; 44 : 321-327
- 5) Atkinson DJ, Edelman RR : Cineangiography of the heart in a single breath hold with a segmented turbo FLASH sequence. *Radiology* 1991 ; 178 : 357-360
- 6) 東野 博, 三木 均, 棚田修二, 他 : SMASH法シネMRIによる左室駆出率測定の有用性の検討. *日医放* 1994 ; 54 (S) : 348
- 7) Thiele H, Nagel E, Paetsch I, Schnackenburg B, Bornstedt A, Kouwenhoven M, Wahl A, Schuler G, Fleck E : Functional cardiac MR imaging with steady-state free precession (SSFP) significantly improves endocardial border delineation without contrast agents. *J Magn Reson Imaging* 2001 ; 14 : 362-367
- 8) Paetsch I, Jahnke C, Fleck E, Nagel E : Current clinical applications of stress wall motion analysis with cardiac magnetic resonance imaging. *Eur J Echocardiogr* 2005 ; 6 : 317-326
- 9) 東野 博, 松岡 宏, 中田 茂, 望月輝一 : シネMRIによる心機能評価. *Heart View* 2004 ; 8 : 663-669
- 10) Atalay MK, Poncelet BP, Kantor HL, Brady TJ, Weisskoff RM. Cardiac susceptibility artifacts arising from the heart-lung interface. *Magn Reson Med* 2001 ; 45 : 341-345
- 11) Naito H, Saito H, Takamiya M, Hamada S, Yamada N, Imakita S, Ohta M, Kimura K, Tamura S : Quantitative assessment of myocardial enhancement with iodinated contrast medium in patients with ischemic heart disease by using ultrafast x-ray computed tomography. *Invest Radiol* 1992 ; 27 : 436-442
- 12) Koyama Y, Matsuoka H, Mochizuki T, et al. : Assessment of reperfused acute myocardial infarction with two-phase contrast-enhanced helical CT : prediction of left ventricular function and wall thickness. *Radiology* 2005 ; 235 : 804-811
- 13) Kim RJ, Fieno DS, Parrish TB, et al. : Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile

- function. *Circulation* 1999 ; 100 : 1992-2002
- 14) Kitagawa K, Sakuma H, Hirano T, Okamoto S, Makino K, Takeda K : Acute myocardial infarction : myocardial viability assessment in patients early thereafter comparison of contrast-enhanced MR imaging with resting (201) Tl SPECT. Single photon emission computed tomography. *Radiology* 2003 ; 226 : 138-144
- 15) Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, et al. : Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts : an imaging study. *Lancet* 2003 ; 361 : 374-379
- 16) Kim RJ, Wu E, Rafael A, Chen EL, Parker MA, Simonetti O, Klocke FJ, Bonow RO, Judd RM : The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000 ; 343 : 1445-1453

Cardiac MR Imaging at 3T

Hiroshi HIGASHINO¹, Makoto SAITO², Hideki OKAYAMA²,
Jitsuo HIGAKI², Hitoshi MIKI¹, Teruhito MOCHIZUKI¹,
Shizue TAKAHASHI³, Kazuhiko SADAMOTO³

¹*Department of Diagnostic and Therapeutic Radiology, ²Department of Integrated Medicine and Informatics, Graduate School of Medicine, Ehime University
Shitsukawa, Toon-shi, Ehime 791-0295*
³*Washokai Sadamoto Hospital*

Three-Tesla magnetic resonance (MR) imaging may be better than 1.5T imaging for cardiac imaging. We attempted to clarify the advantages of 3T cardiac MR imaging in 3 patients with old myocardial infarction. Patients underwent cardiac MR imaging examination with 8-channel, phased-array coils at 3T. Three different sets of breath-hold, electrocardiograph (ECG)-gated cardiac imaging techniques were performed, including 2D CINE SSFP (steady-state free precession) imaging, CINE imaging with myocardial tagging, and delayed SSFP imaging using gadolinium-DTPA as a contrast agent. The abnormal findings of wall motion abnormality and delayed enhancement of delayed SSFP scan were clearly visualized in old infarct areas with excellent signal-to-noise ratio (SNR). The saturation bands of 2D CINE imaging persisted throughout the cardiac cycle for all patients. Abnormal contractions of infarct area were exactly displayed as abnormal deformations of the saturation bands in the entire cardiac cycle. Especially, diastolic phase analysis with saturation bands was never provided by the 1.5T MR imaging scanner. Overall image quality for myocardial tagging sequences was higher.