

心臓・冠動脈の 3T MRI

佐久間 肇^{1,2}, 加藤真吾¹, 宮城英毅³, 永田幹紀¹,
北川覚也¹, 高瀬伸一²

¹三重大学医学部附属病院放射線診断科 ²同中央放射線部

³三重大学大学院医学研究科

はじめに

心臓 MRI は、冠動脈狭窄に伴う心筋虚血や梗塞心筋の組織性状などの評価に高い診断能を示し、最近では予後評価とリスク層別化における有効性も明らかになっている¹⁾。心臓や冠動脈は拍動性と呼吸性の動きを示すため、MRI 撮影には高速撮影が用いられている。3T 装置は 1.5T 装置よりシグナルノイズ (SN) 比が高く、これは心筋血流 MRI や冠動脈 MRA、MR 血流計測など、1.5T 装置では SN 比に制約がある分野では重要な利点となる。ただし、心臓領域では RF 加温、 B_0 (静磁場) 不均一、 B_1 (RF) 不均一など、磁場強度増加による難しさが他の臓器よりも強く現れる。最近ではマルチトランスミット法が心臓領域でも利用できるようになり、パルスシーケンスや撮影条件の最適化を行うことによって、かなり良好な心臓 MRI や冠動脈 MRA が得られるようになっている。ここでは、3T 心臓 MRI の有用性と課題について解説する。

心臓領域における 3T MRI 検査法の利点と欠点

3T MRI 装置は 1.5T 装置よりも磁場強度が高く、SN 比の高い画像が得られる²⁾。位相コントラストシネ MRI による血流計測や造影冠動脈 MRA など、グラジエントエコー法が用い

られ、90 度パルスや 180 度パルスによる T_1 プレパレーションを必要としない撮影法では、3T 装置による画質改善効果が明瞭に認められる。また、3T 装置では組織の T_1 緩和時間が延長するため、MR タギング法における磁気標識が長時間持続する利点がある³⁾。

1.5T 心臓 MRI 検査では、シネ MRI や非造影冠動脈 MRA などの撮影法で steady state free precession (SSFP) 法が多用され、造影剤を用いることなく高い血液コントラストが得られている。また、心筋血流 MRI では 90 度パルス、遅延造影 MRI では 180 度パルスによる T_1 プレパレーションが造影コントラスト形成に重要な役割を果たしている。これらの心臓 MRI 撮影法では、 B_0 (静磁場) 不均一や B_1 (RF) 不均一、SAR (specific absorption rate) の制約などから、1.5T 装置と同じアプローチを用いても 3T では良好な画像が得られない。心臓 MRI では、3T 装置による利点が大きい検査法と、マイナス面を無視できない検査法があることを理解する必要がある。

シネ MRI

1.5T シネ MRI では、高いフリップ角と短い繰返し時間 (TR) を用いた SSFP 撮影が行われ、造影剤を用いることなく非常に高い血液コントラストが得られる。3T 装置では SAR

キーワード magnetic resonance imaging, heart, coronary artery, myocardial perfusion, myocardial infarction

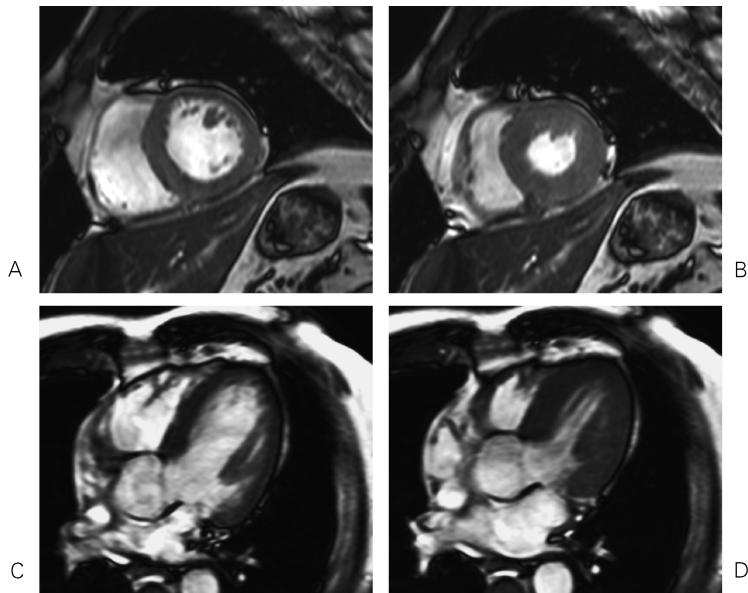


Fig. 1. Cine MRI in a 65-year-old man with normal left ventricular wall motion acquired with a steady state free precession sequence. A : short axis image at diastole, B : short axis image at systole, C : long axis image at diastole, D : long axis image at systole. High blood signal was obtained by using a MultiTransmit method.

の制限から、フリップ角を抑制し TR を延長せざるを得ず、シネ MRI の血液コントラストや血液信号の均一度が 1.5T 装置に及ばないことが多い。また、心臓は周囲を肺の空気に囲まれ、一部が肝臓と胸壁に接しているため、3T 装置では側壁や後壁に B_0 不均一や B_1 不均一によるアーチファクトが生じやすい。

最近、マルチトランスミット技術が心電図同期撮影にも対応し、3T 装置によるシネ MRI の画質はかなり改善された。マルチトランスミットは RF 送信コイルに給電点を 2 個設定し、それぞれ独立した RF アンプを用いて RF パルス送信の強度と位相を患者ごとに最適化することにより、体内で均一な RF 励起を得られるようにする技術である。シネ MRI では SAR の制限が軽減され、従来よりも短い TR や高い

フリップ角を利用できる効果が得られる。当施設においても、マルチトランスミット導入後は 3T シネ MRI の血液コントラストやアーチファクトが改善され、症例によっては 1.5T 装置と遜色ない画像が得られている (Fig. 1)。

遅延造影 MRI

遅延造影 MRI の画像データ収集にはグラジエントエコー法が用いられることが多く、磁場強度の向上に伴って SN 比や正常心筋・梗塞心筋のコントラストノイズ (CN) 比が改善される (Fig. 2)⁴⁾。遅延造影 MRI では正常心筋・梗塞心筋のコントラストを得るために 180 度パルスによるインバージョンリカバリ (IR) 法が用いられる。3T 装置では B_1 不均一の問題

2010 年 8 月 30 日受理

別刷請求先 〒514-8507 三重県津市江戸橋 2-174 三重大学医学部附属病院放射線診断科 佐久間肇

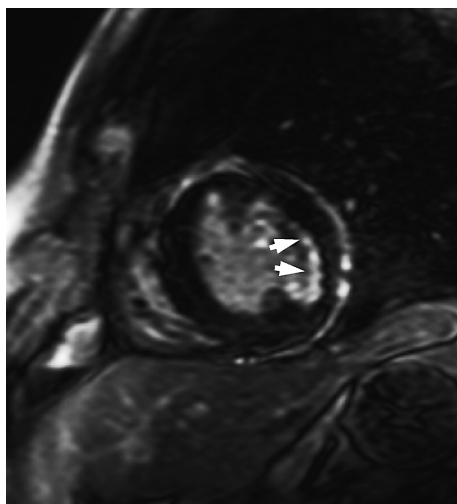


Fig. 2. Late gadolinium enhanced MRI at 3T in a 68-year-old woman with chest pain. Subendocardial infarction is observed in the lateral wall.

から、180度パルスによる T_1 コントラストが撮影面内で不均一になる例がある。マルチトランスミット技術の導入によって B_1 不均一の問題はかなり改善されたが、脂肪抑制法を併用した遅延造影 MRI では、3T 装置よりも 1.5T 装置の方が安定して良好な画像が得られる。

3T における T_1 緩和時間の延長はタギング MRI では利点となるが、遅延造影 MRI ではむしろ欠点となることにも注意が必要である。3T 遅延造影 MRI では T_1 緩和時間の延長に伴って、IR パルスから正常心筋信号がゼロに達するまでの時間 (inversion time) も長くなる。心臓 MRI では心電図同期撮影が行われるため、inversion time の延長に伴って、1.5T 装置では 2RR 間隔で撮像可能であった症例も 3RR 間隔の撮像となるなど、撮像時間が延長する場合がある。呼吸停止撮像を行うためには撮像時間を 20 秒程度に抑える必要があるため、こうした例では空間分解能などの撮影条件を下げて撮影を行う。

心筋血流 MRI

心筋血流 MRI では、ボラス静注した MR 造影剤の初回循環の動態をとらえるために、左室全体をカバーするダイナミック画像を短時間に繰り返して収集する。心筋血流 MRI の空間解像度が不足すると心内膜縁にアーチファクトが生じ、心内膜下虚血との鑑別が難しくなる。3T 装置では SN 比に余裕があるため、空間解像度の高い心筋血流 MRI を撮影することが可能である^{5)~7)}。空間解像度の改善によって、心内膜縁アーチファクトを大幅に低減することが可能となり、心筋虚血とアーチファクトの判別が容易となり、偽陽性が減少して診断特異度が向上する。

心筋血流 MRI では造影剤による T_1 コントラストを得るために、90度パルスによる T_1 プレパレーションが用いられる。3T 装置で通常の 90度パルスを用いると、 B_1 不均一のため撮影面内の場所ごとに RF 励起角度が異なり、画像コントラストが不均一となる。また、不整脈の症例では、正確な 90度励起が行われていない場所において、心拍数変動によって心筋や血液の信号強度が変化してしまう。当施設では、マルチトランスミットを用いて B_1 均一の改善を行うとともに、ある程度の B_1 不均一があっても正確な 90度励起が得られる WET パルスを T_1 プレパレーションパルスとして使い、心筋血流 MRI の撮影を行い、良好な結果を得ている (Fig. 3)。

冠動脈 MRA

冠動脈 MRA は放射線被曝を伴わず、冠動脈壁に高度石灰化があっても狭窄診断が妨げられない特長をもつ。1.5T 装置では SSFP 法を用いることにより、非造影撮影で十分に高い動脈コントラストが得られる⁸⁾。一方、3T 装置では SAR の制約などのため SSFP 法による撮影が難しく、グラジエントエコー法が用いられて

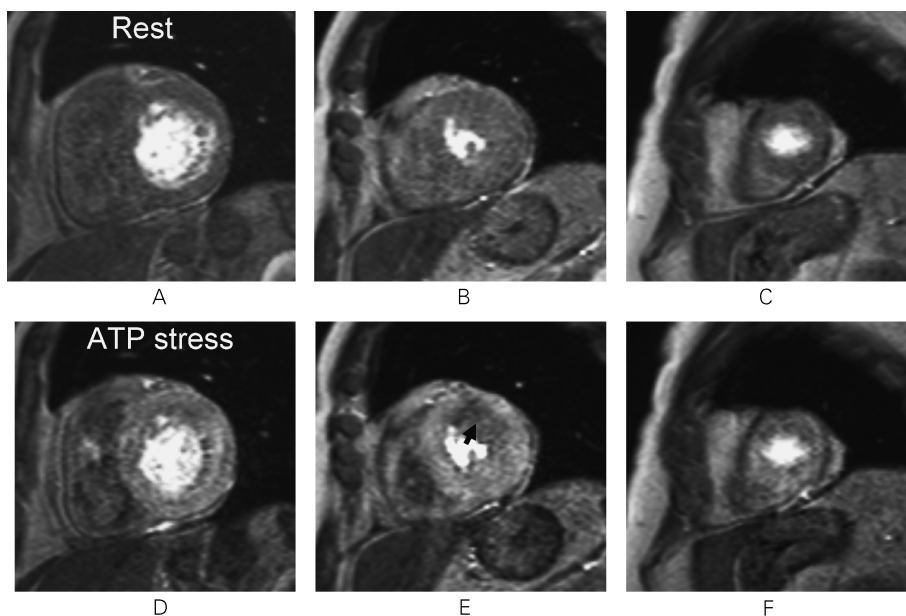


Fig. 3. Rest (ABC) and ATP stress (CDE) myocardial perfusion MRI at 3T acquired with 32-channel coils and a saturation recovery gradient echo sequence accelerated with k-t SENSE. Because of improved spatial resolution at 3T, dark banding artifact is not observed on these images. Notice that myocardial ischemia is observed in the anterior wall (arrow).

おり^{9),10)}, ガドリニウム造影剤投与が動脈コントラスト改善に有効である。

3T 冠動脈 MRA 撮影には, STIR (short time inversion recovery) による脂肪抑制を用いる方法と, 脂肪選択抑制パルスと T₂ プレパレーションを用いる方法がある. STIR では B₀ 不均一があっても良好な脂肪抑制が得られるが¹¹⁾, 造影剤を投与して血液の T₁ 緩和時間をかなり短くしないと, STIR の影響をうけて血液が高信号を示さない. 海外からは, 血液中で高い緩和度を示す MR 造影剤を 2 倍量静注投与しながら STIR 法による 3T whole heart coronary MRA を撮影し, 64 列 MDCT に匹敵する診断感度と特異度が得られたとの報告がある¹²⁾. 日本では緩和度の高い MR 造影剤の 2 倍量投与は利用できないため, STIR による 3T 冠動脈 MRA を行うことは難しい. このため, 当施設では, 遅延造影 MRI の後に脂肪選

択抑制パルスと T₂ プレパレーションによる 3T 冠動脈 MRA の撮影を行っている. 冠動脈遠位部や分枝血管においても良好な画質が得られ, 冠動脈狭窄患者の検出感度 92%, 特異度 90% とかなり良好な診断能が得られている (Fig. 4).

MR 血流計測

位相コントラストシネ MRI を用いると, 大動脈や肺動脈の血流だけでなく, 冠動脈や冠静脈洞, 冠動脈バイパスグラフトの血流量や血流パターンを非侵襲的に評価できる. 3T 位相コントラストシネ MRI の SN 比は 1.5T 装置よりも明らかに優れており, 冠動脈や冠動脈バイパスグラフトなど細い血管の血流計測精度の改善が期待できる. MR 血流計測は磁場強度増加に伴うマイナス面も特になく, 3T 装置の有効

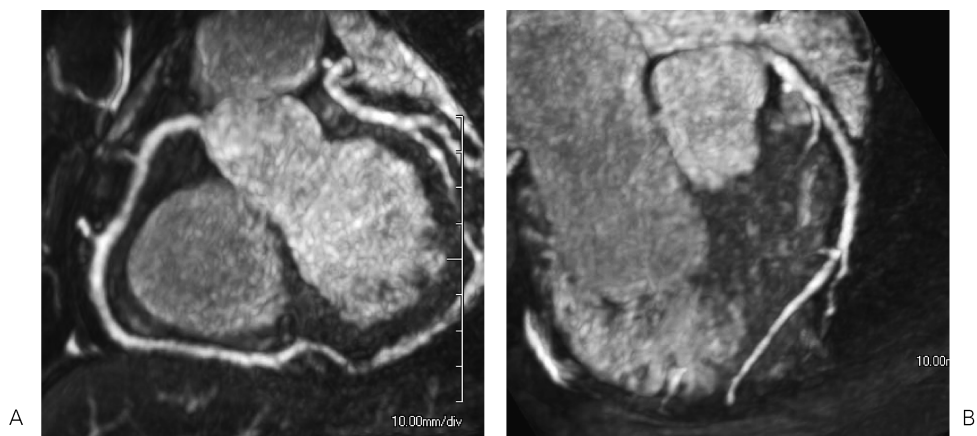


Fig. 4. Whole heart coronary MRA acquired with 3T MR imager and 32 channel cardiac coils. Free breathing MRA images were obtained by using a navigator-echo gated 3D Turbo-field-echo sequence with T₂-preparation and fat suppression. Thin slab MIP images of right coronary artery (A) and left anterior descending artery (B) demonstrate no significant stenosis in this subject.

性が最も発揮される検査法と言える。

ま と め

1.5T 装置によるシネ MRI と遅延造影 MRI は、心筋梗塞や心筋症の診断に広く利用され、パルスシーケンスや撮影条件の最適化も十分に行われている。心筋梗塞患者や心筋症患者を対象とした心機能や心筋梗塞・線維化の診断については、1.5T 装置で安定して良好な画像が得られ、3T 装置を選択する利点はあまりない。冠動脈 MRA に関しても、非造影検査を行う場合には 1.5T 装置が適している。

3T 装置の有用性が高いのは、心筋血流 MRI、造影冠動脈 MRA、ブラックブラッド T₂強調 MRI、MR 血流計測などの分野である。3T 負荷心筋血流 MRI では空間解像度の改善に伴って内膜縁アーチファクトが減少し、虚血の読影が容易になるだけでなく診断特異度も向上する。3T 造影冠動脈 MRA の診断能も 64 列冠動脈 CT に近づきつつある。狭心症などの冠動脈疾患の治療方針決定では、冠動脈狭窄の解剖

学的評価と心筋虚血の機能的診断が重要であり、3T 装置による負荷心筋血流 MRI と造影冠動脈 MRA は、近い将来慢性胸痛患者の診断に中心的役割を果たす可能性がある。

3T 心臓 MRI 検査の課題は、ルーチン診断法として実施している施設が少なく、ユーザーからメーカーへのフィードバックが不十分で、パルス系列の最適化が十分に行われていないことである。マルチトランスミットは心臓領域の B₁ 不均一の改善に大きな効果があり、3T 心臓 MRI 検査に非常に有用な技術と思われる。ただし、マルチトランスミットを使用しても B₁ 不均一は残るため、3T 用の心臓 MRI 撮影シーケンスの開発や最適化など、ソフトウェア面の改良を積極的に行い、製品シーケンスに反映させて行くことが重要である。

文 献

- 1) Ishida M, Kato S, Sakuma H : Cardiac MRI in ischemic heart disease. Circ J 2009 ; 73 : 1577-1588

- 2) Wieben O, Francois C, Reeder SB : Cardiac MRI of ischemic heart disease at 3T : potential and challenges. *Eur J Radiol* 2008 ; 65 : 15-28
- 3) Markl M, Scherer S, Frydrychowicz A, et al. : Balanced left ventricular myocardial SSFP-tagging at 1.5T and 3T. *Magn Reson Med* 2008 ; 60 : 631-639
- 4) Klumpp B, Fenchel M, Hoevelborn T, et al. : Assessment of myocardial viability using delayed enhancement magnetic resonance imaging at 3.0 Tesla. *Invest Radiol* 2006 ; 41 : 661-667
- 5) Cheng AS, Pegg TJ, Karamitsos TD, et al. : Cardiovascular magnetic resonance perfusion imaging at 3-tesla for the detection of coronary artery disease : a comparison with 1.5-tesla. *J Am Coll Cardiol* 2007 ; 49 : 2440-2449
- 6) Plein S, Schwitter J, Suerder D, et al. : k-space and time sensitivity encoding-accelerated myocardial perfusion MR imaging at 3.0 T : comparison with 1.5 T. *Radiology* 2008 ; 249 : 493-500
- 7) Plein S, Kozerke S, Suerder D, et al. : High spatial resolution myocardial perfusion cardiac magnetic resonance for the detection of coronary artery disease. *Eur Heart J* 2008 ; 29 : 2148-2155
- 8) Sakuma H, Ichikawa Y, Chino S, Hirano T, Makino K, Takeda K : Detection of coronary artery stenosis with whole heart coronary magnetic resonance angiography. *J Am Coll Cardiol* 2006 ; 48 : 1946-1950
- 9) Sommer T, Hackenbroch M, Hofer U, et al. : Coronary MR angiography at 3.0 T versus that at 1.5 T : initial results in patients suspected of having coronary artery disease. *Radiology* 2005 ; 234 : 718-725
- 10) Gharib AM, Ho VB, Rosing DR, et al. : Coronary artery anomalies and variants : technical feasibility of assessment with coronary MR angiography at 3T. *Radiology* 2008 ; 247 : 220-227
- 11) Liu X, Bi X, Huang J, Jerecic R, Carr J, Li D : Contrast-enhanced whole-heart coronary magnetic resonance angiography at 3.0 T : comparison with steady-state free precession technique at 1.5 T. *Invest Radiol* 2008 ; 43 : 663-668
- 12) Yang Q, Li K, Liu X, et al. : Contrast-enhanced whole-heart coronary magnetic resonance angiography at 3.0-T : a comparative study with X-ray angiography in a single center. *J Am Coll Cardiol* 2009 ; 54 : 69-76

Cardiac MR Imaging at 3 Tesla

Hajime SAKUMA^{1,2}, Shingo KATO¹, Hideki MIYAGI³,
Motonori NAGATA¹, Kakuya KITAGAWA¹, Shinichi TAKASE²

Departments of ¹Diagnostic Radiology and ²Radiology, Mie University Hospital

³Department of Radiology, Mie University Graduate School of Medicine

2-174 Edobashi, Tsu, Mie 514-8507

Cardiac magnetic resonance (MR) imaging allows accurate assessment of myocardial ischemia and infarction in patients with coronary artery disease. Recent studies indicate that contrast-enhanced cardiac MR imaging is of great value for risk stratification of patients with suspected heart diseases. Because of the complex motion of the heart and coronary arteries induced by respiration and cardiac contract, high speed imaging is essential in cardiac MR imaging sequences. Compared to 1.5-T MR imaging, 3-T imaging permits improved signal-to-noise, which can be an important advantage for myocardial perfusion MR imaging, coronary MR angiography, and phase-contrast cine MR imaging. However, cardiac MR imaging at 3T remains highly challenging as a result of static field inhomogeneity, radiofrequency (RF) field inhomogeneity, and RF heating effect at high field strength. With the recent introduction of multi-transmit technique and optimization of pulse sequences for cardiac imaging, the quality of stress perfusion MR imaging and contrast-enhanced MR imaging is rapidly improving. In this review, we explain the advantages and difficulties of 3-T cardiac MR imaging.