

「心血管病画像診断の進歩」

心臓MRIの進歩

佐久間 肇*

Hajime SAKUMA, MD*

三重大学医学部附属病院中央放射線部

要約

心臓MRIは局所心筋収縮能や心筋血流の定量的評価、心筋バイアビリティ診断、冠動脈狭窄診断などの情報を非侵襲的に評価できる。MRIによる心筋ストレイン評価にはタギングMRIが用いられてきたが、最近心筋組織の移動を直接計測できるDENSE MRIが開発され、各種心疾患における局所心機能を簡便・客観的に評価できる手法として注目される。遅延造影（LGE）MRIは心筋造影CTよりも梗塞病変をコントラストで描出し、米国では心筋梗塞の既往歴のない糖尿病患者の約3割にLGEが認められ、LGE陽性群の予後は陰性群と比較して不良と報告されている。当院における最近の検討では、LGEの有無は糖尿病患者だけでなく境界型耐糖能異常症例の心事故リスク予測に高い有効性を示すことが示されている。冠動脈MRAは放射線被曝を伴わずに冠動脈を描出し、最近の32チャンネルコイルを用いると撮影時間が2分の1以下に短縮され、冠動脈病変診断感度は87%、特異度は86%とかなり向上している。磁場の高い3T MRI装置ではSN比が改善され、心筋血流MRIや造影冠動脈MRAでは1.5T装置よりも高い診断能が得られている。最近の技術的進歩をみると、長期的には3T装置が心臓MRI検査の主流になっていくと思われる。

<Keywords> MRI（磁気共鳴イメージング） 心筋虚血
心筋梗塞 冠動脈疾患

J Cardiol Jpn Ed 2011; 6: 269 – 273

はじめに

心臓の非侵襲画像診断では、64列以上のマルチディテクターCT（MDCT）が広く用いられている。心臓CTは検査時間が短く、冠動脈狭窄の診断や冠動脈プラークの評価に適している。一方、心臓のMRIは、シネMRIによる左室機能の診断、遅延造影MRIによる梗塞と線維化の診断、負荷心筋血流MRIによる心筋虚血の診断など、機能診断や組織性状評価の面で優れている。冠動脈MRAに関しては、32チャンネル心臓コイルによって冠動脈MRAの撮影時間が5～6分程度に短縮し、その診断能はCTに近づきつつある。本稿では、心臓MRIの最近の進歩と将来展望について解説する。

MRIによる心機能評価

シネMRIは心電図同期を利用して、心臓の動きを1心拍16

～40コマの動画として撮影する方法である。ステディー・ステート・フリープリセッション（SSFP）法では、造影剤を使用しなくても高い血液信号が得られる¹⁾。シネMRIは患者の体型や肺気腫の影響を受けず、心機能や心筋重量計測値の再現性が高く、造影剤や放射線被曝の影響を受けない特長を持ち、現在最も正確な心機能計測法と考えられている。最近では、心臓CTによる心機能評価も行われているが、心臓CTでは診断能向上と被曝量を低減するためにβ-ブロッカーが頻繁に用いられている。β-ブロッカーは左室拡張末期容積や左室収縮末期容積を有意増大し、心拍出量を低下させる²⁾。シネMRIは時間解像度が心臓CTより高くβ-ブロッカーの必要性がないため、正確な心機能評価が可能である。

MRIによる心筋ストレイン評価には、心筋の磁気標識格子の動きを追跡するタギングMRIが用いられてきたが、画像解析に手間と時間がかかる問題があった。最近では、DENSE（Displacement encoding with stimulated echoes）MRIやSENC（Strain encoded）などの新しいストレインMRI診断法

* 三重大学医学部附属病院中央放射線部
514-8507 津市江戸橋2-174
E-mail: sakuma@clin.medic.mie-u.ac.jp

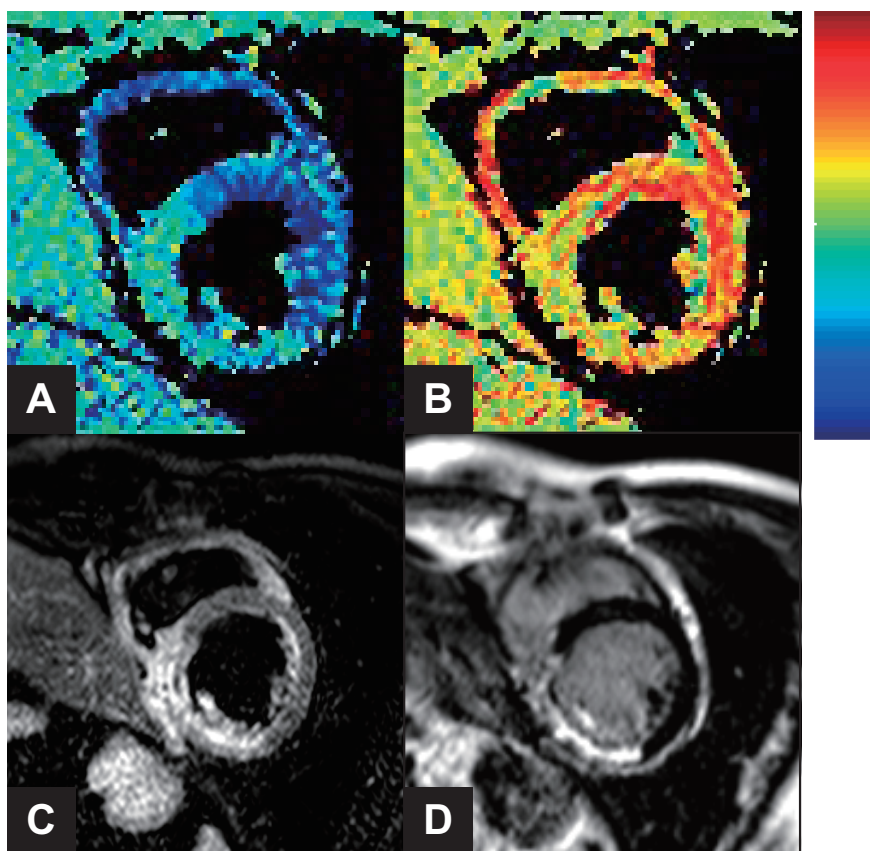


図1 50代男性，急性下壁梗塞．DENSE MRIから得たcircumferential strain画像（A），radial strain画像（B），T2強調MRI（C），遅延造影MRI（D）．遅延造影MRI（D）では下壁に梗塞が認められる．T2強調画像では梗塞領域よりもやや広い範囲に浮腫がみられる．DENSE MRIによるストレイン画像では，心筋浮腫領域にほぼ一致して心筋ストレインの低下がみられる．

が開発されている．DENSE MRIは心筋組織の移動から心筋ストレインを定量評価できる方法で，撮影時間も従来のシネMRIと変わらず，画像解析処理も自動化されているため，各種心疾患における局所収縮機能を客観的に評価できる手法としてその有用性が注目されている³⁾（図1）．

MRIによる梗塞・線維化の診断と予後の評価

MR造影剤は細胞外液に分布する性質を持ち，造影後約10分以降の平衡相に遅延造影MRIを撮影すると，細胞内液分画の少ない梗塞心筋や線維化は高信号の領域として，正常心筋は黒い領域として描出される．遅延造影MRIは空間分解能が高いため，核医学では検出困難な内膜下梗塞や右室梗塞も明瞭に描出される⁴⁾．CT造影剤もMR造影剤と同様に細胞外液に分布する性質を持つため，遅延造影CTを用い

て心筋梗塞病変を検出することも可能であるが，梗塞心筋—正常心筋のコントラストは造影MRIと比較してはるかに低い⁵⁾．

最近，遅延造影MRIの予後評価に関するエビデンスの蓄積が急速に進んでいる．Kwongらは，遅延造影MRIにおける梗塞病変の有無は，将来の心臓死や心事故の発生と密接な相関を有することを報告している⁶⁾．また，最近のCheongらによる検討によると，遅延造影MRIにおける梗塞の有無は，左室駆出率とは独立した予後規定因子であることが明らかになっている⁷⁾．糖尿病患者は心血管疾患のリスクが高く，リスク層別化は重要な課題である．Kwongらの研究によると，心筋梗塞の既往歴がない糖尿病患者において，遅延造影MRIにより心筋遅延造影が発見される頻度は約3割と高く，こうした無症候性の心筋梗塞病変を有する糖尿病症例の予後

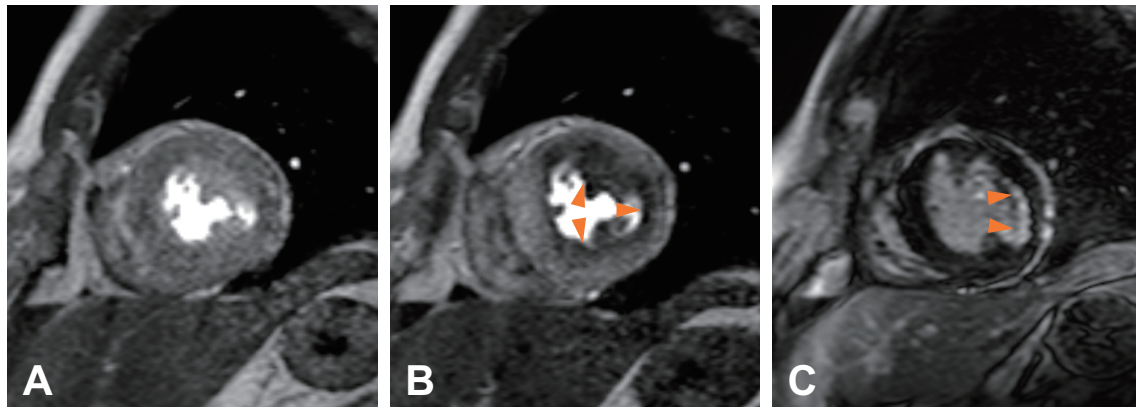


図2 50代男性，胸痛．3T安静時心筋血流MRI (A)，負荷心筋血流MRI (B)，遅延造影MRI (C)．遅延造影MRI (C)では左室側壁に内膜下梗塞が認められる．負荷心筋血流MRI (B)では，梗塞部以外の生存心筋に虚血が認められる．安静時心筋血流MRIでは特に異常を指摘できない．3T装置では心筋血流MRIの空間解像度が改善することにより，内膜下アーチファクトがかなり減少し，虚血の判定が容易となっている．

は，心筋遅延造影のない群と比較して不良であることが明らかになっている⁸⁾．当院における最近の検討では，糖尿病患者だけでなく境界型耐糖能異常例においても，遅延造影MRIにおけるLGE陽性例の心血管イベント発生率はかなり高く，予後予測において重要な役割を果たすと思われる⁹⁾．

遅延造影MRIは虚血性心筋症とその他の拡張型心筋症(DCM)の鑑別に役立つ．虚血性心筋症ではほとんどの例で心内膜下に遅延造影が認められる．これに対し，DCM患者では遅延造影が認められない症例と，心筋中層に遅延造影が認められる症例(約30%)があり，心筋中層線維化を伴うDCMの予後は遅延造影のない症例と比較して不良であることが明らかになっている¹⁰⁾．

心筋症などの心筋疾患では，線維化が心筋全体にびまん性に生じると，従来の遅延造影MRIでは異常を検出できなくなる．こうした問題を解決するために，造影剤投与前後の心筋と血液のT1緩和時間を計測し，心筋の細胞外液分画のマップを定量的に作成する研究が行われている．心筋T1緩和時間の定量計測は，撮影条件設定により誤差が生じやすいため，現時点では臨床レベルの検査法とはなっていないが，将来的には心筋症におけるびまん性線維化の診断や，梗塞後に正常心筋と梗塞心筋が入り交じった領域(灰色心筋)の評価に役立つと期待される¹¹⁾．

MRIによる心筋虚血の評価

負荷心筋血流MRIはアデノシン，ATP，ジピリダモールな

どによる薬物負荷を行いながら，少量のMR造影剤を急速静注してダイナミックMRIを行い，心筋虚血を診断する検査法である．負荷心筋血流MRIは空間解像度が高いため，心内膜下虚血も明瞭に描出され，冠動脈多枝病変も心筋全周性の内膜下虚血として診断できる．最近のメタアナリシスや多施設共同研究の結果によると，負荷心筋血流MRIの冠動脈有意狭窄検出感度は約90%，特異度は約80%であり¹²⁾，特に冠動脈多枝病変患者の診断については負荷心筋血流SPECTよりも優れた診断能を有する¹³⁻¹⁴⁾．

3T MRI装置ではS/N比に余裕があるため，1.5Tよりも空間分解能を改善することが可能である．心筋血流MRIの空間解像度を改善することによって，内膜縁に生じるdark banding artifactが低減され，心筋虚血とアーチファクトの判別が容易となり，その結果特異度が向上する(図2)．これまでの負荷心筋血流MRIの診断能に関する研究ではX線冠動脈造影がゴールドスタンダードとして用いられてきた．最近，LockieらはFFR(fractional flow reserve)をゴールドスタンダードとし，3T心筋血流MRIはPCIを必要とする血行動態的に有意な冠動脈狭窄病変を感度82%，特異度94%で診断できると報告している．負荷心筋血流MRIはPCIが必要な病変をあらかじめ予測できる点で，診療面でも重要な意義を持つと思われる¹⁵⁾．

冠動脈MRA

Whole heart coronary MRAは自由呼吸下に心電図同期

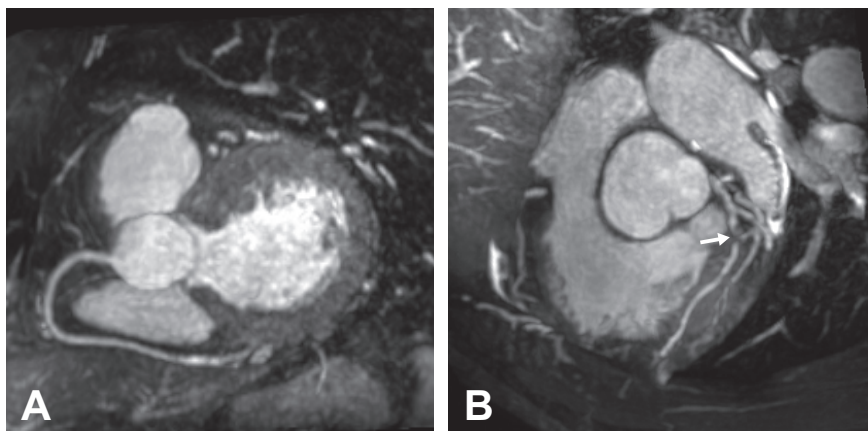


図3 60代男性，狭心症，1.5T冠動脈MRA.
1.5T whole heart coronary MRAによる右冠動脈像 (A) では異常はみられない。左冠動脈前
下行枝 (B) の近位部に狭窄が認められる (矢印)。

と呼吸同期を併用しながら冠動脈全体の3D画像を撮影する方法である(図3)。冠動脈MRAは放射線被曝を伴わず、冠動脈高度石灰化の影響をうけにくく、1.5T装置では造影剤を必要としない特長を有する¹⁶⁻¹⁷⁾。我々が1.5T MR装置と5チャンネルコイルを用いて行った多施設共同研究では、冠動脈MRAの診断感度は88%、特異度は72%、陰性的中率は88%であった¹⁸⁾。従来の5chコイルによる冠動脈MRAは検査時間が長く(10～15分)、検査成功率が90%程度にとどまるなどの弱点があったが、32チャンネルコイルを用いると撮影時間が1/2以下に短縮され、検査成功率も向上し、冠動脈MRAをルーチン心臓MRI検査に組み込むことが可能になる。最近の当施設における検討では、32チャンネルコイルを用いた1.5T冠動脈MRAの診断感度は87%、特異度は86%であった¹⁹⁾。磁場強度の高い3T装置では、現在のところMR造影剤投与が必要であるが、1.5Tよりも鮮明な冠動脈MRAを撮影することが可能で、64列MDCTとほぼ同等の冠動脈狭窄診断能が報告されている²⁰⁾。

おわりに

心臓MRIは心疾患の診断治療において鍵となるさまざまな情報を非侵襲的に提示できる画像診断法となっているが、我が国における検査件数は心臓CTや心臓核医学検査と比べてはるかに少ないのが現状である。心臓MRIは検査目的に応じて様々な撮影法を組み合わせるの必要があり、薬物負荷も行われるため、心臓CTよりも検査手技が複雑になりやす

く、高品質の画像を得るにはかなりの経験を要する。心臓MRIを日常診療に広く活用するためには、心臓MRI検査の標準化と教育トレーニング体制の充実が重要な課題である。

文献

- 1) Ichikawa Y, Sakuma H, Kitagawa K, Ishida N, Takeda K, Uemura S, Motoyasu M, Nakano T, Nozaki A. Evaluation of left ventricular volumes and ejection fraction using fast steady-state cine MR imaging: comparison with left ventricular angiography. *J Cardiovasc Magn Reson* 2003; 5: 333-342.
- 2) Schlosser T, Mohrs OK, Magedanz A, Voigtländer T, Schmermund A, Barkhausen J. Assessment of left ventricular function and mass in patients undergoing computed tomography (CT) coronary angiography using 64-detector-row CT: comparison to magnetic resonance imaging. *Acta Radiol* 2007; 48: 30-35.
- 3) Sigfridsson A, Haraldsson H, Ebbens T, Knutsson H, Sakuma H. Single breath hold multiple slice DENSE MRI. *Magn Reson Med* 2010; 63: 1411-1414.
- 4) Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, Elliott MD, Regenfus M, Parker M, Klocke FJ, Bonow RO, Kim RJ, Judd RM. Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detecting of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study. *Lancet* 2003; 361: 374-379.
- 5) Nieman K, Shapiro MD, Ferencik M, Nomura CH, Abbara S, Hoffmann U, Gold HK, Jang IK, Brady TJ, Cury RC. Reperfused myocardial infarction: contrast-enhanced 64-Section CT in comparison to MR imaging. *Radiology* 2008; 247: 49-56.
- 6) Kwong RY, Chan AK, Brown KA, Chan CW, Reynolds

- HG, Tsang S, Davis RB. Impact of unrecognized myocardial scar detected by cardiac magnetic resonance imaging on event-free survival in patients presenting with signs or symptoms of coronary artery disease. *Circulation* 2006; 113: 2733-2743.
- 7) Cheong BY, Muthupillai R, Wilson JM, Sung A, Huber S, Amin S, Elayda MA, Lee VV, Flamm SD. Prognostic significance of delayed-enhancement magnetic resonance imaging: survival of 857 patients with and without left ventricular dysfunction. *Circulation* 2009; 120: 2069-2076.
 - 8) Kwong RY, Sattar H, Wu H, Vorobiof G, Gandla V, Steel K, Siu S, Brown KA. Incidence and prognostic implication of unrecognized myocardial scar characterized by cardiac magnetic resonance in diabetic patients without clinical evidence of myocardial infarction. *Circulation* 2008; 118: 1011-1020.
 - 9) Yoon E, Kitagawa K, Kato S, Nakajima H, Kurita T, Ito M, Sakuma H. Prognostic significance of unrecognized myocardial infarction detected by magnetic resonance imaging in patients with impaired fasting glucose compared to those with diabetes. *Radiology* (revision submitted).
 - 10) Assomull RG, Prasad SK, Lyne J, Smith G, Burman ED, Khan M, Sheppard MN, Poole-Wilson PA, Pennell DJ. Cardiovascular magnetic resonance, fibrosis, and prognosis in dilated cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 1977-1985.
 - 11) Mewton N, Liu CY, Croisille P, Bluemke D, Lima JA. Assessment of myocardial fibrosis with cardiovascular magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol* 2011; 57: 891-903.
 - 12) Hamon M, Fau G, Née G, Ehtisham J, Morello R, Hamon M. Meta-analysis of the diagnostic performance of stress perfusion cardiovascular magnetic resonance for detection of coronary artery disease. *J Cardiovasc Magn Reson* 2010; 12: 29.
 - 13) Ishida N, Sakuma H, Motoyasu M, Okinaka T, Isaka N, Nakano T, Takeda K. Noninfarcted myocardium: correlation between dynamic first-pass contrast-enhanced myocardial MR imaging and quantitative coronary angiography. *Radiology* 2001; 220: 441-447.
 - 14) Schwitter J, Wacker CM, van Rossum AC, Lombardi M, Al-Saadi N, Ahlstrom H, Dill T, Larsson HB, Flamm SD, Marquardt M, Johansson L. MR-IMPACT: comparison of perfusion-cardiac magnetic resonance with single-photon emission computed tomography for the detection of coronary artery disease in a multicentre, multivendor, randomized trial. *Eur Heart J* 2008; 29: 480-489.
 - 15) Lockie T, Ishida M, Perera D, Chiribiri A, De Silva K, Kozerke S, Marber M, Nagel E, Rezavi R, Redwood S, Plein S. High-resolution magnetic resonance myocardial perfusion imaging at 3.0-Tesla to detect hemodynamically significant coronary stenoses as determined by fractional flow reserve. *J Am Coll Cardiol* 2011; 57: 70-75.
 - 16) Sakuma H, Ichikawa Y, Suzawa N, Hirano T, Makino K, Koyama N, Van Cauteren M, Takeda K. Assessment of coronary arteries with total study time of less than 30 minutes by using whole-heart coronary MR angiography. *Radiology* 2005; 237: 316-321.
 - 17) 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.
 - 18) Kato S, Kitagawa K, Ishida N, Ishida M, Nagata M, Ichikawa Y, Katahira K, Mastumoto Y, Seo K, Ochiai R, Kobayashi Y, Sakuma H. Assessment of coronary artery disease using magnetic resonance coronary angiography: A National Multicenter Trial. *J Am Coll Cardiol* 2010; 56: 983-991.
 - 19) Nagata M, Kato S, Kitagawa K, Ishida N, Nakajima H, Nakamori S, Ishida M, Miyahara M, Ito M, Sakuma H. Diagnostic accuracy of 1.5T non-contrast whole-heart coronary magnetic resonance angiography acquired with 32-channel cardiac coils: Initial single-center experience. *Radiology* 2011; 259: 384-392.
 - 20) Sakuma H. Coronary CT versus MR angiography: the role of MR angiography. *Radiology* 2011; 258: 340-349.