

QOL と予防医学における心臓 MRI の役割

西村 恒彦, 伊藤 博敏, 久保田 隆生

京都府立医科大学大学院医学研究科放射線診断治療学講座

はじめに

20 世紀後半は, 疾病の原因解明と治療法の進歩の時代であった。虚血性心疾患においても, 心筋梗塞などの“出来上がった病態”に対し PTCA, CABG などの冠血行再建術, 心臓移植などの新しい治療法が開発され, これに呼応して心筋虚血の検出, 心筋 viability 評価が超音波, 冠動脈造影, SPECT/PET を用いて行われてきた。

心臓 MRI は, その当時心電図同期スピンエコー法を用いて, 決まった心時相の画像をマルチスライスで撮像することにより心内腔と心筋壁が明瞭に区別でき形態診断は可能であったが, 長い撮像時間や呼吸によるモーションアーチファクトなどのため, 十分な画質が得られるとは限らず, 幅広くルーチンに使用されるには至らなかった。それでも放射線被曝がなく, 心形態および機能診断が行える心臓 MRI は魅力的ではあった^{1),2)}。Fig. 1 は, 我が国でより早く導入された心電図同期スピンエコー法を用いて撮像した前壁心筋梗塞症例である。前壁部位の心筋壁厚のひ薄化を認める。

ところで, 21 世紀は QOL と予防医学の時代である。マルチスライス CT や MRI, SPECT/PET を用いた“出来上がる前の病態”である冠動脈硬化病変の検出と, それに基づく予防的

治療法, 例えばスタチンによるコレステロール低下療法や糖尿病などの生活習慣病のコントロールなどが中心となる。とりわけ, MRI は放射線被曝がなく, しかも心エコー図に比し客観的に測定が行えるため, 虚血性心疾患において予防医学のスクリーニング検査として最も期待されている。

これに呼応するかのよう最近, EPI, true FISP などの高速撮像法, SENSE などの parallel imaging 技術と Gd-DTPA など MRI 造影剤の使用により心機能, 心筋灌流, 心筋 viability 評価が, 従来に比し精度高く行えるようになってきた。また, 冠動脈病変やプラークの検出も同時に行え, 虚血性心疾患における one-stop shopping の検査法として展開されつつある。

本稿では, 予防画像医学の確立を目指した心臓 MRI の役割に関して, 現時点での他のモダリティとの比較, 心臓 MRI の定着化のために必要なこと, さらには冠動脈硬化イメージングとしての今後の展開について解説する。

心機能評価

心電図同期法とグラディエントエコー法を利用した, cine MRI による左室機能評価や局所壁運動評価は既に確立されている方法であ

キーワード left ventricular function, myocardial perfusion, coronary imaging, quality of life, preventive medicine

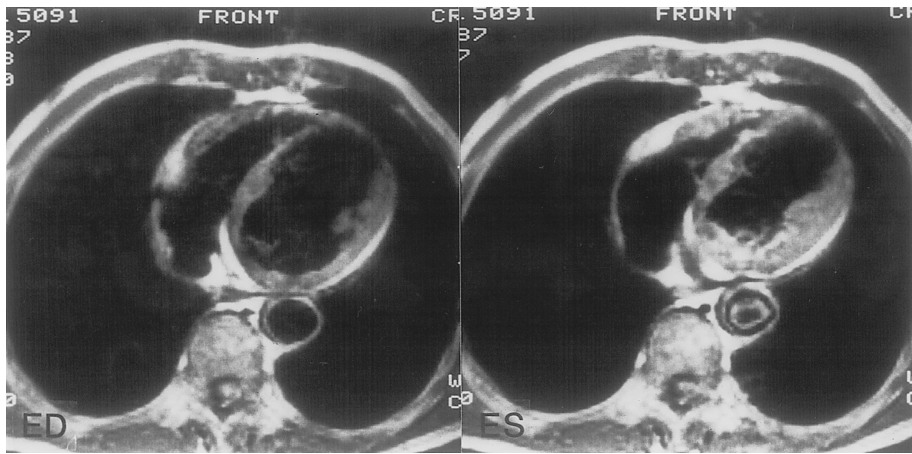


Fig. 1. Gated spin echo image of anterior myocardial infarction. Anterior wall thinning was observed at end-diastolic and end-systolic image
ED = end-diastole, ES = end-systole

る^{3)~8)}. 心エコー図や左室造影法よりも再現性が高く、検査間、検者間の変動が少ないのが大きな利点である。従来の方でも息止め時間内に、一断面の cine MRI を撮像することは可能であったが、得られる心時相に制限があり、血液-心筋コントラストが十分でなく、乱流の影響が大きいなどの問題点があった。従来の cine MRI が in-flow 効果を利用して血液を高信号に描出するのに対して、血液自体が高信号に描出される true FISP や balanced FFE 法などの開発により、より良好なコントラストと高い SNR を維持しつつ高速に撮像が可能となり、一回の息止め時間で 30~40 相もの画像が得られるようになってきている^{9),10)}。複数スライスの短軸像を一回息止めで撮像が可能である¹¹⁾。さらに、turbo field echo/EPI ハイブリッドシーケンスや SENSE 法などの parallel imaging を用いて、呼吸停止を行わずに、リアルタイムに画像収集が可能になってきている^{12)~14)}。Fig. 2 に、true FISP を用いた種々

の負荷時の心機能評価を示す。

虚血性心疾患において重要なのは、安静時の局所壁運動評価に加えて、運動、薬剤負荷時の壁運動評価である。MRI 装置はその構造上、負荷検査を行うには制約が伴うが、ハンドグリップなどの運動負荷に加えて、低容量ドパミン負荷や、ATP 負荷が MRI 室内でも行われるようになってきている^{15)~20)}。これらの薬剤負荷は比較的安全に施行できるが、緊急時の検査体制や循環器内科医との密接なコミュニケーションの確立などが必要となる。

ところで、多くの心疾患において最も早期に変化する指標の一つであり、疾病の早期発見および進行予防において重要と考えられる左室拡張能指標 (1/3 filling fraction : 1/3 FF, peak filling rate : PFR, time to PFR : TPFR) については、MRI の精度は十分に検討されておらず、現状ではドプラー法や核医学検査が拡張能評価に用いられることが多い^{21)~24)}。特に心電図同期心筋 SPECT 解析ソフトウェアである

2003年4月11日受理

別刷請求先 〒602-8566 京都市上京区河原町広小路上ル梶井町 465 京都府立医科大学大学院医学研究科放射線診断治療学講座 西村恒彦

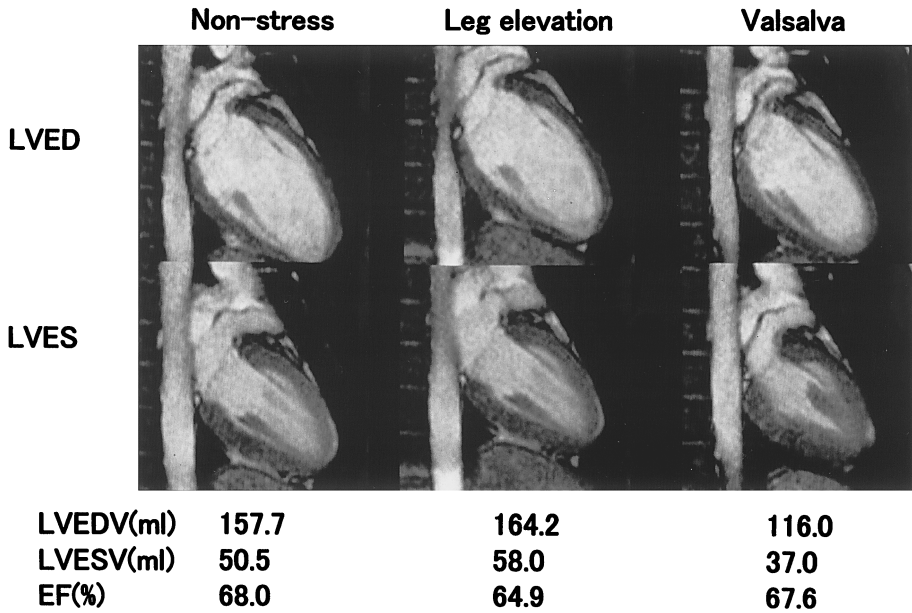


Fig. 2. Left ventricular function (end-diastolic, end-systolic and ejection fraction) at rest, leg-elevation and valsalva maneuver
LVEDV, LVESV, LVEF = left ventricular end-diastolic volume, end-systolic volume, ejection fraction

QGS (quantitative gated single-photon emission tomography) program の開発以来、心筋血流と同時に左室収縮能、拡張能も簡便に評価できるようになりつつある。拡張能評価において MRI の精度が確立されていない原因として、正確な拡張能評価に必要な高時間分解能が近年まで実現しなかったことに加え、通常汎用される prospective gating method による心電同期法には拡張末期のデータが一部欠落するという欠点があることも一因と思われる (Fig. 3)。今後、心機能評価において MRI がさらに役割を広げるためには、撮像法やデータ解析法に関する工夫、改善によって心収縮能のみならず拡張能評価においても高い精度を実現し、かつ、十分なデータ蓄積によって他のモダリティの比較のもとで信頼できるエビデンスを示していくことが必要である。

現時点では、心臓 MRI は心エコー図や gat-

ed SPECT のように普及していない。このため、心エコー図や gated SPECT のような多数の症例を用いたリスク層別化や予後予測に関する大規模共同研究が行われていない^{25)~27)}。今後、MRI を用いた虚血性心疾患におけるリスク層別化や予後予測に関するエビデンスが作られることが迫られている。最近、心エコー図が明瞭に得られない虚血性心疾患 279 症例にドプタミン/アトロピン負荷心臓 MRI を施行、3 年間の経過観察において LVEF 40%、虚血の有無の指標を用いて、明瞭なリスク層別化が行えることが示されている²⁸⁾。

また、新しい試みとして、従来の心筋磁気標識法 (tagging) を用いた心機能評価に加え、diffusion tensor imaging を用いた心筋線維の方向性から各種心疾患の心筋性状を評価する手法が開発されつつある^{29),30)}。将来、心筋の局所壁運動評価に、これらの手法が活用されるこ

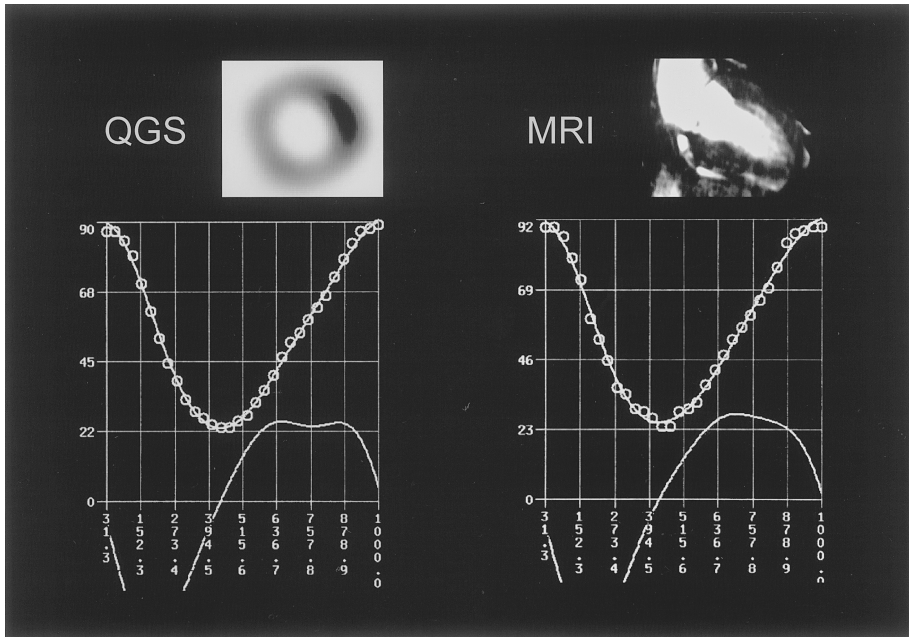


Fig. 3. Left ventricular volume curve (including first derivative curve) generated from gated SPECT and cardiac MRI.

とが期待される。いずれにしろ、MRIによる心機能評価は心エコー図とは異なり、客観的に左室全体をリアルタイムに近く評価できる点で優れている。

心筋灌流

Gd-DTPAなどのMR造影剤は心筋細胞に特異性を有さず、心筋到達後、血管内腔から細胞外液内に速やかに分布する。したがって、心筋造影効果が心筋灌流を反映するのは造影剤到達後の数秒間に限られるため、MRIによる灌流評価には非常に高い時間分解能をもった撮像法が必要である³¹⁾。1990年代までは技術的限界からMRIでは1~3スライス面の心筋血流の評価しか行えず、perfusion MRIによる虚血性心疾患の診断能は心筋血流SPECTに及ばなかった^{32),33)}。しかし近年、k-space segmentat-

ed method や EPI といった高速撮像法の発達により、2心拍ごとに5~7スライスの左室全体を撮像範囲に含んだ短軸断面による first pass imaging が可能となり、臨床適応も現実的なものとなってきた^{34)~38)}。さらに、SENSE法を併用すると1心拍ごとに5スライス程度の短軸断面の撮像が可能で、perfusion MRIのもつ時間および空間分解能は近年飛躍的に改善されている。Dipyridamole等を用いた負荷 perfusion MRIでは梗塞巣のみならず、微小な虚血巣もとらえ得ることが報告され³⁹⁾、虚血性心疾患における負荷 perfusion MRIの病変検出の感度、特異度は負荷心筋 TI SPECTと同等、またはより優れるとの報告もある^{40),41)}。

SPECTでは、偽陰性になりやすい3枝病変についても perfusion MRIは広範な内膜下虚血として明瞭に描出できる利点がある³⁹⁾。ま

た、視覚的評価のみならず、造影剤流入に伴う time intensity curve の upslope の解析により心筋灌流の定量的評価も可能となり、その有用性についても報告が散見されようになった^{42),43)}。

このように MRI の心筋灌流評価は高い空間分解能を有し、客観的に心筋全域を評価できる利点を有している。しかし、現時点では比較的限られた施設のみでしか施行されておらず、虚血性心疾患においてエビデンスをもった検査法として確立されるためにはデータ蓄積が十分でないのが現状である。また、MRI 装置内での負荷検査の安全性についても確立しているとはいえ、MRI による心筋灌流評価がルーチンに用いられるためには、撮像技術以外にも解決すべき問題を抱えている。

しかも、perfusion MRI において Gd-DTPA とファーストパス法を用いる原理は ^{201}Tl や $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -tetrofosmin などの RI トレーサを用いる心筋 SPECT や冠微小循環を反映するコントラスト・エコー法とは根本的に異なる。今後、両者との比較において冠動脈狭窄度、虚血の重症度などに関する詳細な解析が必要である。

心筋 viability

MRI による心筋 viability 評価法の一つに、薬物負荷時の局所心筋壁運動改善（心筋収縮予備能）の有無をみる方法がある^{44)~48)}。Nagel らによると心筋 viability 評価におけるドパミン負荷 MRI の感度は 86.2%，特異度は 85.7% で、いずれもドパミン負荷エコー図よりも優れているとされている⁴⁴⁾。

一方、非負荷 MRI による心筋 viability 評価指標として心筋の遅延造影効果がある。Gd 造影剤投与後 15 分以上経過してからの T1 強調像において、急性期～亜急性期の壊死心筋、および繊維化を来した陳旧性の壊死心筋はいずれも健常部と比べ高い造影効果を示す^{32),33),49),50)} (Fig. 4)。これは、壊死心筋における浮腫や細胞膜障害による Gd 分布容積増加を反映したものである。壊死心筋が遅延造影を示すことを、呼吸停止下インバージョンリカバリ法によるコントラスト改善およびアーチファクト軽減により、以前では指摘困難であった小梗塞域も描出でき、さらに内膜側から外側への梗塞進展範囲も正確に評価できるようになった (Fig. 5)。最近、造影 MRI による心筋梗塞巣の測定の再現性に関しては、心筋 SPECT と同様に精度高

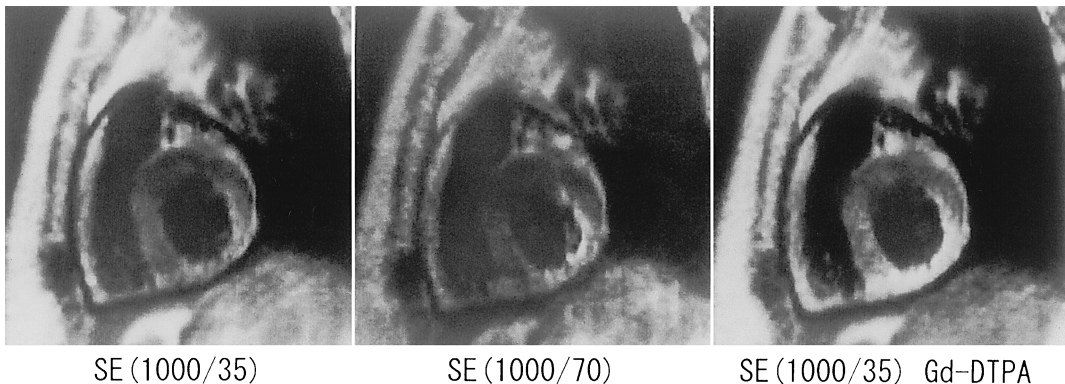


Fig. 4. Contrast enhancement of infarcted area by gated spin echo image. T1-weighted image after Gd-DTPA revealed high signal intensity at inferior-posterior region in comparison with T1 or T2-weighted image.

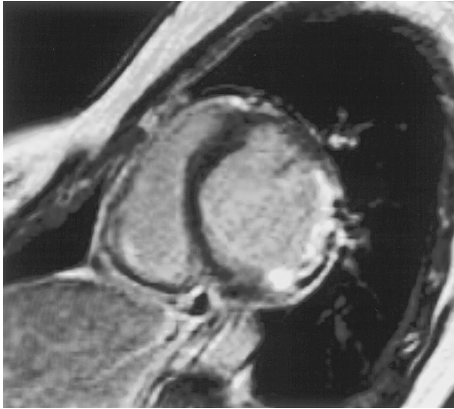


Fig. 5. Late enhancement of infarcted area. T1-weighted image after Gd-DTPA with inversion recovery revealed high signal intensity at inferior-posterior region.

いことが⁵¹⁾、また、心内膜下梗塞の検出において動物実験、臨床応用に関して SPECT と比較した成績でも造影 MRI が優れていることが報告されている³⁹⁾。梗塞巣の進展範囲から心筋 viability の推定が可能であり、心筋梗塞症例における血行再建術後の壁運動改善予測についての検討では、遅延造影のない領域では 78% において壁運動改善がみられたが、遅延造影が左室壁厚の 75% を超える領域では壁運動改善は、ほとんどみられなかったと報告されている⁵²⁾。MRI の遅延造影による viability 評価は、²⁰¹Tl SPECT と比較して偽陽性が少ないとの報告もあり⁵³⁾、今後、心筋梗塞患者の治療方針の決定に重要な位置を占めるようになる。

以上のように、MRI による撮像技術の進歩は心筋 viability 評価においても精度向上に大きく寄与している。特に遅延造影による viability 評価は薬物負荷を必要とせず、心筋 perfusion MRI の追加検査として施行でき、さらに造影 CT による心筋灌流、遅延造影描出よりも良好なコントラストが得られる点で利点は大きい。したがって、心筋 viability 評価に関して perfusion MRI とうまく組み合わせること

により、多数例の PTCA や CABG 前後において SPECT/PET やドプタミン負荷エコー図との比較において、本法の有用性に関するエビデンス作りが必要となってくる。

MR 冠動脈造影 (MRCA)

MRI による冠動脈の描出は、対象血管径が数ミリと細いだけでなく走行が三次元的で、かつ心拍動と呼吸による動きがあるため最も技術的に困難な領域である。より高分解能で描出するには、高い SNR が要求され、ハードウェアおよびシーケンスの開発が必要不可欠である。MRCA には内腔を高信号に描出する bright-blood 法と、内腔を無信号として描出する black-blood 法がある^{54)~56)}。MRCA では主に bright-blood 法を、次項の wall imaging で black-blood 法を概説する。

Bright-blood MRCA では造影剤の使用の有無、呼吸停止の有無、2D あるいは 3D のデータ収集法により分類される。最も繁用されているのが、造影剤を使用せず 3D データ収集法を行う方法に、呼吸同期で撮像する方法である。Navigator echo を利用して呼吸同期を行い、3D-TFE 法と T₂ プレパレーションパルスを利用する方法がよく用いられている^{57),58)}。この方法を用いた国際多施設共同研究では、高い sensitivity と negative productive value により非侵襲的な冠動脈狭窄のスクリーニング検査法として有用であると報告されている⁵⁹⁾。呼吸同期を用いるために撮像時間が延長し、3 枝を描出するには一時間程度は必要となる。しかし、呼吸同期と k-space 充填法を組み合わせ、また、近年では TFE 法のかわりに balanced TFE 法が用いられ、短い撮像時間でより高い描出能を得ることができる⁶⁰⁾。また k-space のデータ充填法に spiral 法を用いることにより、より高い SNR で高速に撮像が可能である^{61)~64)}。また、parallel imaging と balanced TFE 法を併用することにより、一回呼吸停止

下での撮像も可能となり、今後の検討が待たれる。

冠動脈硬化イメージング (Coronary wall and plaque imaging)

Double inversion pulse と高速スピネコーを用いた black-blood MRCA は、より高い分解能で撮像できるために、MRCA のみならず冠動脈壁の性状を描出することが可能である^{54)~56),65),66)}。近年知られているように、血管のリモデリングにより、狭窄が起こる前に壁の肥厚が認められる。多くの急性冠症候群は冠動脈狭窄部位の閉塞で起こるよりも、壁在プラークの破綻によって起こると考えられるようになってきた^{67),68)}。したがって、冠動脈病変の画像診断において内腔の狭窄を評価するだけでは不十分で、壁やプラークの性状をいかに評価するかが重要になってきている。血管内超音波 (IVUS) は、血管壁性状の画像診断における gold standard であるが、その侵襲性は非常に高い。そのために非侵襲的な CT や MRI での血管壁やプラークの描出に大きな期待が寄せ

られている (Fig. 6)。大動脈や頸動脈などの比較的太い血管や、体表に近い血管では良好な描出が可能である^{69)~73)}。頸動脈 MRI と病理組織標本を対比した検討では、TOF, T₁w, T₂w, PDw 画像を用いて、プラークの性状評価や分類が可能であるとの報告がなされている^{74)~76)}。特に脂質、線維化、石灰化、血栓の区別もある程度は可能とされ、プラーク抽出用の MRI 造影剤の開発も併せプラークの性状のみならず、破綻しやすい不安定プラークの検出にも期待が寄せられている⁷⁷⁾。

おわりに

最近の高速イメージング技術の進歩により心機能、心筋灌流および心筋 viability 評価をより精度高く、かつ短時間に行えることが可能になってきた。このため、運動負荷は困難であるが、dipyridamole や ATP などの冠拡張剤を用いた負荷検査との併用がかなり安全に行える。今後は、単に心筋 SPECT やコントラスト・エコー法と心筋虚血の検出に関する sensitivity や specificity の比較にとどまらず、欠損像の定

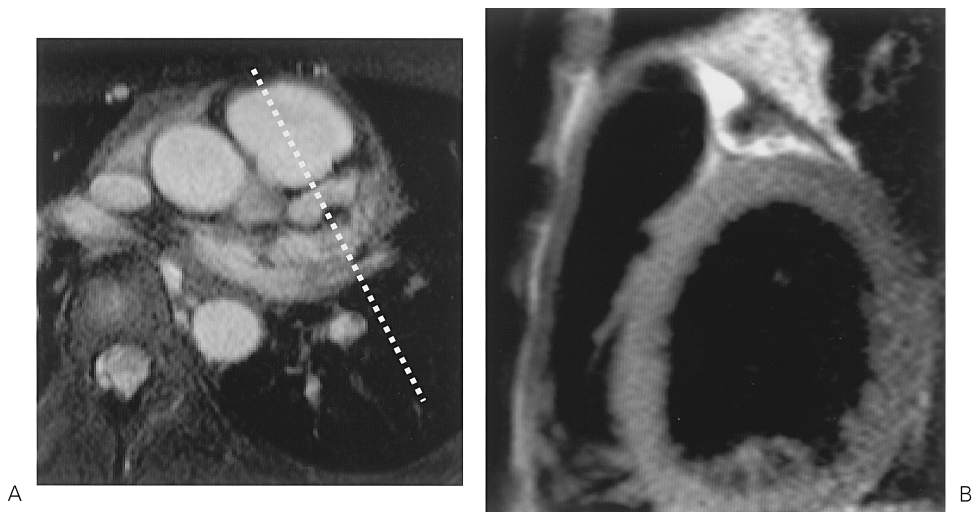


Fig. 6. Intimal thickening of coronary arterial wall in Kawasaki diseases.

量化や狭窄枝, 狭窄度別などに関して多くの施設における検討の中から, どの程度有用なのか見極める必要がある. さらに, 多施設共同研究による検査法の標準化と多数例を用いたリスク層別化, 予後評価が必要になってくる. このようなエビデンス作りを経て, はじめて心臓MRIのQOLのための検査としての位置付けが明確になる.

また, 最近, 急性冠症候群における心臓MRIの有用性についての報告が欧米において散見される^{78),79)}. MRI装置の制約のため, 救急を要する心疾患での使用は禁忌されてきたが, これらに対するチャレンジであり, 慎重な使用のもとで, その有用性を確立するとともに, 例えば, 心臓専用のオープンMR装置の開発も迫られることになる.

MRIを用いた冠動脈硬化イメージングは現時点では, 16列マルチスライスCTに劣っていると言わざるを得ない. しかし, X線被曝のない点を考慮すれば, これからの予防医学の時代において, スタチンなどによるコレステロール低下療法の効果判定, さらに糖尿病における潜在的冠動脈病変の検出などのファースト・チョイスとして用いられることが期待される.

心臓MRIは, 21世紀のQOLと予防医学の時代においてMRI技術のさらなる発展に支えられ, 循環器病学で真のone-stop shoppingの検査法となることが期待される.

文 献

- 1) 西村恒彦, 山田直明. 心・大血管MRIの読み方. 中外医学社, 1990
- 2) 西村恒彦, 内藤博昭, 楠岡英雄. 心大血管のMRIとMRS. 南江堂, 1992
- 3) Waterton JC, Jenkins JP, Zhu XP, Love HG, Isherwood I, Rowlands DJ: Magnetic resonance (MR) cine imaging of the human heart. Br J Radiol 1985; 58: 711-716
- 4) Nishimura T, Yamada N, Itoh A, Miyatake K: Cine MR imaging in mitral regurgitation: comparison with color doppler flow imaging. Am J Roentgenol 1989; 153: 721-724
- 5) Sechtem U, Pflugfelder P, Higgins CB: Quantification of cardiac function by conventional and cine magnetic resonance imaging. Cardiovasc Intervent Radiol 1987; 10: 365-373
- 6) Sechtem U, Pflugfelder PW, White RD, et al.: Cine MR imaging: potential for the evaluation of cardiovascular function. Am J Roentgenol 1987; 148: 239-246
- 7) Higgins CB, Holt W, Pflugfelder P, Sechtem U: Functional evaluation of the heart with magnetic resonance imaging. Magn Reson Med 1988; 6: 121-139
- 8) Lotan CS, Cranney GB, Bouchard A, Bittner V, Pohost GM: The value of cine nuclear magnetic resonance imaging for assessing regional ventricular function. J Am Coll Cardiol 1989; 14: 1721-1729
- 9) Pereles FS, Kapoor V, Carr JC, et al.: Usefulness of segmented trueFISP cardiac pulse sequence in evaluation of congenital and acquired adult cardiac abnormalities. Am J Roentgenol 2001; 177: 1155-1160
- 10) Larson AC, Simonetti OP: Real-time cardiac cine imaging with SPIDER: steady-state projection imaging with dynamic echo-train readout. Magn Reson Med 2001; 46: 1059-1066
- 11) Lee VS, Resnick D, Bundy JM, Simonetti OP, Lee P, Weinreb JC: Cardiac function: MR evaluation in one breath hold with real-time true fast imaging with steady-state precession. Radiology 2002; 222: 835-842
- 12) Plein S, Smith WH, Ridgway JP, et al.: Measurements of left ventricular dimensions using real-time acquisition in cardiac magnetic resonance imaging: comparison with conventional gradient echo imaging. MAGMA 2001; 13: 101-108
- 13) Pruessmann KP, Weiger M, Boesiger P: Sensitivity encoded cardiac MRI. J Cardiovasc Magn Reson 2001; 3: 1-9
- 14) Weiger M, Pruessmann KP, Boesiger P: Cardiac real-time imaging using SENSE. Sensitivity encoding scheme. Magn Reson Med

- 2000 ; 43 : 177-184
- 15) Gunning MG, Anagnostopoulos C, Knight CJ, et al. : Comparison of ^{201}Tl , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -tetrofosmin, and dobutamine magnetic resonance imaging for identifying hibernating myocardium. *Circulation* 1998 ; 98 : 1869-1874
 - 16) Hundley WG, Hamilton CA, Thomas MS, et al. : Utility of fast cine magnetic resonance imaging and display for the detection of myocardial ischemia in patients not well suited for second harmonic stress echocardiography. *Circulation* 1999 ; 100 : 1697-1702
 - 17) Nagel E, Lehmkuhl HB, Bocksch W, et al. : Noninvasive diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high-dose dobutamine stress MRI : comparison with dobutamine stress echocardiography. *Circulation* 1999 ; 99 : 763-770
 - 18) Waller C, Hiller KH, Kahler E, et al. : Serial magnetic resonance imaging of microvascular remodeling in the infarcted rat heart. *Circulation* 2001 ; 103 : 1564-1569
 - 19) Panting JR, Gatehouse PD, Yang GZ, et al. : Abnormal subendocardial perfusion in cardiac syndrome X detected by cardiovascular magnetic resonance imaging. *N Engl J Med* 2002 ; 346 : 1948-1953
 - 20) Plein S, Ridgway JP, Jones TR, Bloomer TN, Sivananthan MU : Coronary artery disease : assessment with a comprehensive MR imaging protocol—initial results. *Radiology* 2002 ; 225 : 300-307
 - 21) Grossman W : Defining diastolic dysfunction. *Circulation* 2000 ; 101 : 2020-2021
 - 22) Bonow RO, Bacharach SL, Green MV, Kent KM, Rosing DR, Lipson LC, Leon MB, Epstein SE : Impaired left ventricular diastolic filling in patients with coronary artery disease : assessment with radionuclide angiography. *Circulation* 1981 ; 64 : 315-323
 - 23) Magorien DJ, Shaffer P, Bush C, Magorien RD, Kolibash AJ, Unverferth DV, Bashore TM : Hemodynamic correlates for timing intervals, ejection rate and filling rate derived from the radionuclide angiographic volume curve. *Am J Cardiol* 1984 ; 53 : 567-571
 - 24) Kikkawa M, Nakamura T, Sakamoto K, Sugihara H, Azuma A, Sawada T, Okuyama C, Ushijima Y, Nishimura T : Assessment of left ventricular diastolic function from quantitative electrocardiographic-gated $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -tetrofosmin myocardial SPET. *Eur J Nucl Med* 2001 ; 28 : 593-601
 - 25) Brown KA : Prognostic value of thallium-201 myocardial perfusion imaging : a diagnostic tool comes of age. *Circulation* 1991 ; 83 : 363-377
 - 26) Hachamovitch R, Germano G, Berman DS, et al. : Exercise perfusion SPECT in patients without known coronary artery disease. Incremental prognostic value and use in risk stratification. *Circulation* 1996 ; 93 : 905-914
 - 27) Sharir T, Germano G, Kavanagh PB, et al. : Incremental prognostic value of post-stress left ventricular ejection fraction and volume by gated myocardial perfusion single photon emission computed tomography. *Circulation* 1999 ; 100 : 1035-1042
 - 28) Hundley WG, Morgan TM, Neagle CM, et al. : Magnetic resonance imaging determination of cardiac prognosis. *Circulation* 2002 ; 106 : 2328-2333
 - 29) Tseng WYI, Reese TG, Weisskoff RM, Wedeen VJ : Cardiac diffusion tensor MRI in vivo without strain correction. *Magn Reson Med* 1999 ; 42 : 393-403
 - 30) Geerts L, Bovendeerd P, Nicolay K, Arts T : Characterization of the normal cardiac myofiber field in goat measured with MR-diffusion tensor imaging. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2002 ; 283 : H139-H145
 - 31) Wilke N, Jerosch-Herold M, Wang Y, et al. : Myocardial perfusion reserve : assessment with multisection, quantitative, first-pass MR imaging. *Radiology* 1997 ; 204 : 373-384
 - 32) Nishimura T, Yamada N, Haze K, Nagata S : Experience using gadolinium-DTPA in cardiovascular MRI. *Magn Reson Med* 1991 ; 22 : 354-357
 - 33) Nishimura T, Kobayashi H, Ohara Y, Yamada N, Haze K, Takamiya M, Hiramori K : Serial assessment of myocardial infarction by using gated MR imaging and Gd-DTPA. *Am J Roentgenol* 1989 ; 153 : 715-720

- 34) Slavin GS, Wolff SD, Gupta SN, Foo TK : First-pass myocardial perfusion MR imaging with interleaved notched saturation : feasibility study. *Radiology* 2001 ; 219 : 258-263
- 35) Epstein FH, London JF, Peters DC, Goncalves LM, Agyeman K, Taylor J, Balaban RS, Arai AE : Multislice first-pass cardiac perfusion MRI : validation in a model of myocardial infarction. *Magn Reson Med* 2002 ; 47 : 482-491
- 36) Manning WJ, Atkinson DJ, Grossman W, et al. : First-pass nuclear magnetic resonance imaging studies using Gd-DTPA in patients with coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 1991 ; 18 : 959-965
- 37) Bertschinger KM, Nanz D, Buechi M, Luescher TF, Marinck B, von Schulthess GK, Schwitler J : Magnetic resonance myocardial first-pass perfusion imaging : parameter optimization for signal response and cardiac coverage. *J Magn Reson Imaging* 2001 ; 14 : 556-562
- 38) Nagel E, Al-Saadi N, Fleck E : Cardiovascular magnetic resonance : myocardial perfusion. *Herz* 2000 ; 25 : 409-416
- 39) 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
- 40) Kawada N, Sakuma H, Ichikawa Y, et al. Comparative diagnostic accuracy of stress myocardial perfusion MRI and SPECT in detecting coronary artery disease : receiver operating characteristic analysis in patients without myocardial infarction. *Proceedings of 9th ISMRM meeting, 2001 ; 510*
- 41) Wilke N, Jerosch-Herold M, Zenovich A, et al. : Magnetic resonance first-pass myocardial perfusion imaging. Clinical validation and future application. *J Magn Reson Imaging* 1999 ; 10 : 676-685
- 42) Al-Saadi N, Nagel E, Gross M, et al. : Improvement of myocardial perfusion reserve early after coronary intervention : assessment with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 2000 ; 36 : 1557-1564
- 43) Al-Saadi N, Nagel E, Gross M, et al. : Noninvasive detection of myocardial ischemia from perfusion reserve based on cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2000 ; 101 : 1379-1383
- 44) Nagel E, Lehmkuhl HB, Bocksch W, et al. : Noninvasive diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high-dose dobutamine stress MRI : comparison with dobutamine stress echocardiography. *Circulation* 1999 ; 99 : 763-770
- 45) Sandstede JJ, Bertsch G, Beer M, et al. : Detection of myocardial viability by low-dose dobutamine cine MR imaging. *Magn Reson Imaging* 1999 ; 17 : 1437-1443
- 46) Sandstede JJ, Lipke C, Kenn W, Beer M, Pabst T, Hahn D : Cine MR imaging after myocardial infarction—assessment and follow-up of regional and global left ventricular function. *Int J Card Imaging* 1999 ; 15 : 435-440
- 47) Baer FM, Theissen P, Schneider CA, Voth E, Sechtem U, Schicha H, Erdmann E : Dobutamine magnetic resonance imaging predicts contractile recovery of chronically dysfunctional myocardium after successful revascularization. *J Am Coll Cardiol* 1998 ; 31 : 1040-1048
- 48) Dendale P, Franken PR, Holman E, Avenarius J, van der Wall EE, de Roos A : Validation of low-dose dobutamine magnetic resonance imaging for assessment of myocardial viability after infarction by serial imaging. *Am J Cardiol* 1998 ; 82 : 375-377
- 49) Fieno DS, Kim RJ, Chen EL, Lomasney JW, Klocke FJ, Judd RM : Contrast-enhanced magnetic resonance imaging of myocardium at risk : distinction between reversible and irreversible injury throughout infarct healing. *J Am Coll Cardiol* 2000 ; 36 : 1985-1991
- 50) 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
- 51) Mahrholdt H, Wagner A, Holly TA, et al. : Reproducibility of chronic infarct size measurement by contrast-enhanced magnetic resonance imaging. *Circulation* 2002 ; 106 : 2322-2327
- 52) Kim RJ, Wu E, Rafeal A, et al. : The use of con-

- trast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000 ; 343 : 1445-1453
- 53) Kitagawa K, Sakuma H, Hirano T, et al. Delayed myocardial contrast enhancement in patients with acute myocardial infarction : comparison with thallium-201 SPECT imaging. *Proceedings of 9th ISMRM meeting, 2001 ; 222*
- 54) Feyter PJ, Nieman K : New coronary imaging techniques : what to expect? *Heart* 2002 ; 87 : 195-197
- 55) Fayad ZA, Fuster V : Clinical imaging of the high-risk or vulnerable atherosclerotic plaque. *Circ Res* 2001 ; 89 : 305-316
- 56) Corti R, Fuster V : New understanding, diagnosis, and prognosis of atherothrombosis and the role of imaging. *Am J Cardiol* 2003 ; 91 : 17A-26A
- 57) Brittain JH, Hu BS, Wright GA, Meyer CH, Macovski A, Nishimura DG : Coronary angiography with magnetization-prepared T₂ contrast. *Magn Reson Med* 1995 ; 33 : 689-696
- 58) Sandstede JJ, Pabst T, Beer M, et al. : Three-dimensional MR coronary angiography using the navigator technique compared with conventional coronary angiography. *Am J Roentgenol* 1999 ; 172 : 135-139
- 59) Kim WY, Danias PG, Stuber M, et al. : Coronary magnetic resonance angiography for the detection of coronary stenoses. *N Engl J Med* 2001 ; 345 : 1863-1869
- 60) Giorgi B, Dymarkowski S, Maes F, Kouwenhoven M, Bogaert J : Improved visualization of coronary arteries using a new three-dimensional submillimeter MR coronary angiography sequence with balanced gradients. *Am J Roentgenol* 2002 ; 179 : 901-910
- 61) Thedens DR, Irrarrazaval P, Sachs TS, Meyer CH, Nishimura DG : Fast magnetic resonance coronary angiography with a three-dimensional stack of spirals trajectory. *Magn Reson Med* 1999 ; 41 : 1170-1179
- 62) Taylor AM, Keegan J, Jhooti P, Gatehouse PD, Firmin DN, Pennell DJ : A comparison between segmented k-space FLASH and interleaved spiral MR coronary angiography sequences. *J Magn Reson Imaging* 2000 ; 11 : 394-400
- 63) Bornert P, Aldefeld B, Nehrke K : Improved 3D spiral imaging for coronary MR angiography. *Magn Reson Med* 2001 ; 45 : 172-175
- 64) Bornert P, Stuber M, Botnar RM, et al. : Direct comparison of 3D spiral vs. cartesian gradient-echo coronary magnetic resonance angiography. *Magn Reson Med* 2001 ; 46 : 789-794
- 65) Fayad ZA, Fuster V, Fallon JT, et al. : Noninvasive *in vivo* human coronary artery lumen and wall imaging using black-blood magnetic resonance imaging. *Circulation* 2000 ; 102 : 506-510
- 66) Kim WY, Stuber M, Bornert P, Kissinger KV, Manning WJ, Botnar RM : Three-dimensional black-blood cardiac magnetic resonance coronary vessel wall imaging detects positive arterial remodeling in patients with nonsignificant coronary artery disease. *Circulation* 2002 ; 106 : 296-299
- 67) Falk E, Shah PK, Fuster V : Coronary plaque disruption. *Circulation* 1995 ; 92 : 657-671
- 68) Fuster V, Corti R, Badimon JJ : The Mikamo Lecture 2002—Therapeutic targets for the treatment of atherothrombosis in the new millennium—clinical frontiers in atherosclerosis research—. *Circ J* 2002 ; 66 : 783-790
- 69) Fayad ZA, Nahar T, Fallon JT, et al. : *In vivo* magnetic resonance evaluation of atherosclerotic plaques in the human thoracic aorta : a comparison with transesophageal echocardiography. *Circulation* 2000 ; 101 : 2503-2509
- 70) Yuan C, Beach KW, Smith Jr LH, Hatsukami TS : Measurement of atherosclerotic carotid plaque size *in vivo* using high resolution magnetic resonance imaging. *Circulation* 1998 ; 98 : 2666-2671
- 71) Hatsukami TS, Ross R, Polissar NL, Yuan C : Visualization of fibrous cap thickness and rupture in human atherosclerotic carotid plaque *in vivo* with high-resolution magnetic resonance imaging. *Circulation* 2000 ; 102 : 959-964
- 72) Coombs BD, Rapp JH, Ursell PC, Reilly LM, Saloner D : Structure of plaque at carotid bifurcation : high-resolution MRI with histological correlation. *Stroke* 2001 ; 32 : 2516-2521
- 73) Serfaty JM, Chaabane L, Tabib A, Chevallier

- JM, Briguet A, Douek PC : Atherosclerotic plaques : classification and characterization with T₂-weighted high-spatial-resolution MR imaging —an *in vitro* study. Radiology 2001 ; 219 : 403-410
- 74) Yuan C, Mitsumori LM, Beach KW, Maravilla KR : Carotid atherosclerotic plaque : noninvasive MR characterization and identification of vulnerable lesions. Radiology 2001 ; 221 : 285-299
- 75) Zhang S, Hatsukami TS, Polissar NL, Han C, Yuan C : Comparison of carotid vessel wall area measurements using three different contrast-weighted black blood MR imaging techniques. Magn Reson Imaging 2001 ; 19 : 795-802
- 76) Cai JM, Hatsukami TS, Ferguson MS, Small R, Polissar NL, Yuan C : Classification of human carotid atherosclerotic lesions with *in vivo* multicontrast magnetic resonance imaging. Circulation 2002 ; 106 : 1368-1373
- 77) Yuan C, Zhang SX, Polissar NL, et al. : Identification of fibrous cap rupture with magnetic resonance imaging is highly associated with recent transient ischemic attack or stroke. Circulation 2002 ; 105 : 181-185
- 78) Kwong RY, Schussheim AE, Rekhraj S, et al. : Detecting acute coronary syndrome in the emergency department with cardiac magnetic resonance imaging. Circulation 2003 ; 107 : 531-537
- 79) Chiu CW, So NMC, Lam WWM, et al. : Combined first-pass perfusion and viability study at MR imaging in patients with non-ST segment-elevation acute coronary syndromes : feasibility study. Radiology 2003 ; 226 : 717-722

Role of Cardiac Magnetic Resonance Imaging Focusing on QOL and Preventive Medicine

Tsunehiko NISHIMURA, Hirotoishi ITO, Takao KUBOTA

*Department of Radiology, Kyoto Prefectural University of Medicine
465 Kajicho Kawaramachi Hirokoji, Kamigyo-ku, Kyoto 602-8566*

Cardiac magnetic resonance imaging (MRI) using fast imaging techniques has been developing quickly recently. Left ventricular function with pharmacological intervention can be evaluated using True FISP method. In addition, left ventricular diastolic function can be evaluated by retrospective gating with a high frame rate. Myocardial perfusion and viability can also be evaluated by first-pass imaging and delayed enhancement with Gd-DTPA.

Data concerning myocardial ischemia, viability, and left ventricular function is now almost equivalent to that of myocardial SPECT and contrast echo. Additionally, coronary arterial narrowing and coronary vessel wall can be visualized with both the bright-blood and black-blood method. These methods are still currently in the research stage.

The prognostic value of myocardial perfusion and ventricular function in ischemic heart disease should be established using large numbers of patients. Multi-center trials using cardiac MRI should be recommended for this purpose. Furthermore, detecting acute coronary syndrome in the emergency department can be performed with safety and accuracy.

MR coronary angiography should be used not only for flow-limiting coronary stenosis but also the atherosclerotic wall region. This provides information that may predict cardiovascular risk, and facilitate further study of arterothrombosis, progression and response to therapy. It may also provide for the assessment of subclinical disease.