

心臓 MRI の最前線

内藤 博昭*

最近の装置と撮像技術の進歩に伴い、心臓の画像診断における MRI の役割は急速に拡大してきた。特に重要と思われる応用は記載の3点である。このうちガドリニウム造影剤による心筋の造影異常は発見から20年を経た古い所見だが、近年、検出が格段に容易となって再注目を集める。冠動脈 MR アンジオグラフィは CT アンジオグラフィとの競合が最近の話題である。そして心機能評価では MRI 独自の手法が開発され、応用されている。

造影心筋イメージング

1) 造影 MRI での心筋異常所見¹⁻³⁾

ガドリニウム造影剤の静脈内投与早期での造影不良 (ED: early defect, initial filling defect) と後期の過剰濃染 (LE: late enhancement, delayed (hyper-) enhancement) が、造影 MRI における心筋異常所見として知られている (図1)。ガドリニウム造影剤は投与早期には大部分が心筋血管床

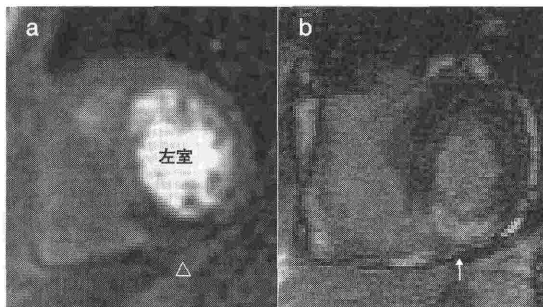


図1 造影 MRI での心筋異常所見

心筋梗塞例 (発症14日)。高速 GE 法による造影 MRI の早期像 (a) と後期像 (b)。

左室短軸断面。左室下壁の ED (▽) と LE (→)
(文献⁷⁾より引用)

内に分布し、再循環とともに間質に漏出して、数分以降に細胞外液腔を満たす。従って ED は主として心筋の血管容積減少から低灌流状態を、LE は細胞外液腔拡大という組織構築変化を基に梗塞や線維化病巣を表すと考えられる。本来この2所見はヨード造影剤を用いた CT での梗塞動物実験で見出されたが、現在では CT よりも MRI のほうが両所見を明瞭に描出できる。

2) Early defect に基づく心筋虚血検出⁴⁻⁶⁾

ED 検出に用いられる撮像法は、ガドリニウム造影剤の短ポース注入を用いた高速 GE 法による左室多断面のダイナミック MR 撮像が一般的で、最適の時相で造影不良を判断することができる (図2)。虚血誘発のための薬物負荷や、saturation recovery 前処置パルスによる ED の強調操作がしばしば併用されている。

ED に基づく心筋虚血の診断精度は、ジピリダモール負荷により感度92%、特異度85%、精度90%との報告があり、運動負荷心筋シンチグラフィに勝っている。現在、造影 MR 法は定性的には最も優れた心筋虚血評価法の1つといえるが、所見の客観性と定量性不足が大きな問題である。時間-信号強度解析から種々の心筋血流定量化手法が検討されているが、未だ確立した方法はない。

3) Late enhancement に基づく心筋梗塞・線維化病巣の診断⁷⁻⁹⁾

LE 検出に用いられる撮像法は inversion recovery (IR) パルス照射の前処置を併用した高速 GE 法である。この IR 前処置で内腔の血流信号と正常心筋の濃染が適度に抑制されて、LE は極めて明瞭に描出されるようになった。この撮像は上記の ED 検出の撮像に引き続いて行われる場合が多い。一回の造影後期撮像で LE を観るにはガドリニウム造影剤投与後20分前後の時相が適する

*国立循環器病センター放射線診療部

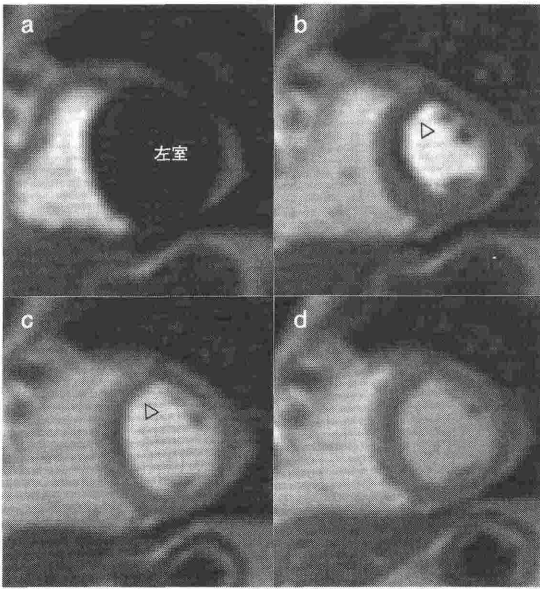


図2 ダイナミックMRIによるED検出

心筋梗塞例. 高速GE法による多断面での造影ダイナミックMR撮像画像の一部 (a: 第10心拍, b: 26心拍, c: 34心拍, d: 42心拍). 左室短軸断面画像. 前壁のED (▷)

とされている.

MRIでの心筋梗塞LEの特徴は検出感度の高さであり, 従来困難であった左室内膜下や右室梗塞などの検出も容易である (図3). 第二の特徴はLEの広がり梗塞サイズとよく一致することで, 非貫壁性梗塞例は非貫壁性のLEを示す (図4). ただし急性期~亜急性期梗塞のLEサイズは, 造影後の時間とともに変動する場合がある (図5).

虚血性心疾患例では, LEは梗塞巣の広がりをはほぼ正確に表すことから, その壁内分布に基づく心筋の「負の」バイアビリティ評価が最近, 注目を集めている. またLEは, 心筋症などでの線維化病巣の評価指標としても極めて有用である.

冠動脈イメージング

1) 冠動脈MRアンジオグラフィ^{10,11)}

冠動脈のMRアンジオグラフィ (MRA) は撮像技術の改良とともに着実に進歩している. その1つは定常状態GE法の一種のtrue FISP法のような血管内の高信号描出手法の出現であり, この使用で冠動脈内腔の描出能は著しく向上した (図6). また造影剤使用による血管内高信号化も検

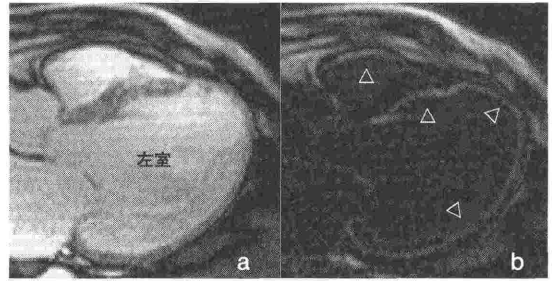


図3 多発・広範囲のLE

虚血性心筋症の例. IR前処置併用の高速GE法による造影像 (a: 造影後2分, b: 15分). 心臓の長軸断面. 両心室内膜面の広範囲LE (▷)

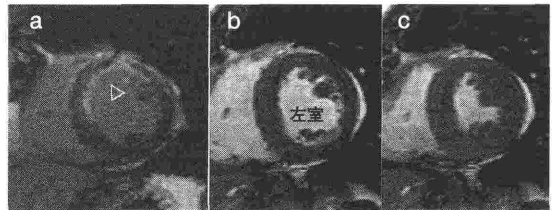


図4 非貫壁性のLE

非貫壁性梗塞例. 亜急性期での造影像 (a: 造影後30分) と慢性期のシネMR像 (b: 拡張末期, c: 収縮末期). 左室短軸断面. 左室前壁の非貫壁性LE部分 (▷) の収縮は慢性期に改善

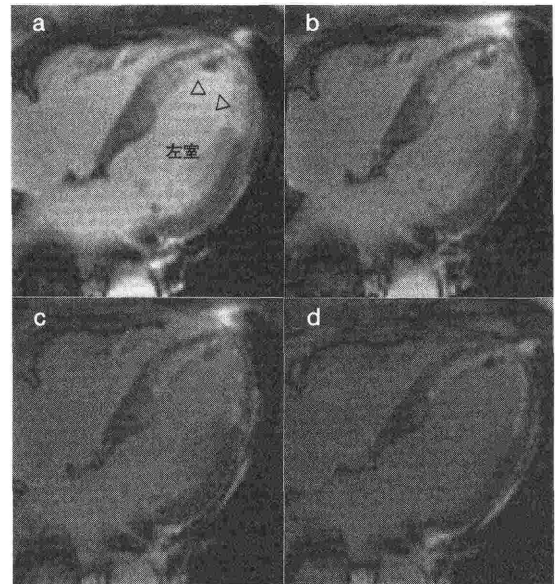


図5 LEの経時的変動

心筋梗塞例 (発症14日). 造影剤投与後5分から30分での左室前壁LE (▷) の変動 (a: 5分, b: 10分, c: 20分, d: 30分). 四腔断面像

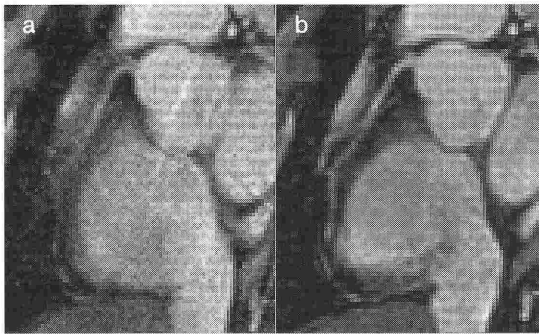


図6 冠動脈 MRA の進歩

右冠動脈の非造影 MRA, ボランティア例. 従来の 2D-FLASH 法 (a) と最近の 3D-True FISP 法の画像 (b)

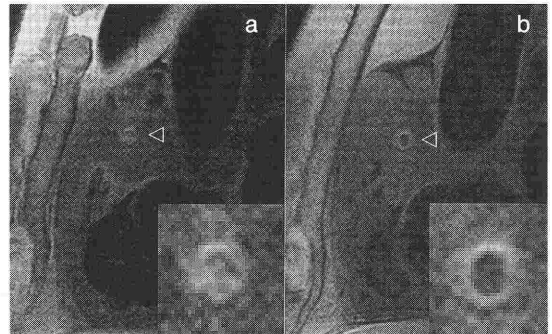


図7 冠動脈壁イメージング

冠動脈インターベンション後の右冠動脈壁内血腫例. Dark-blood 高速スピネコー法による右冠動脈 (▷) の輪切り像 (a: 血腫部, b: 健常部) (文献¹³⁾より引用)

討されている。第二の技術進歩は, parallel imaging やナビゲーターテクニックによる呼吸停止/非停止撮像法の改善である。

MRA の臨床応用では, バイパス手術後のグラフト開存性評価や冠動脈奇形の検出における有用性が確立している。冠動脈狭窄病変については, 概ね80%以上の診断精度が報告される。ステントや近傍のベッツなどの障害陰影の問題は残るが, 虚血性心疾患への臨床応用ではスクリーニング使用寸前に至っている。

2) その他の冠動脈イメージング

MRI による冠動脈の壁性状評価やプラークイメージングは撮像法を含め研究段階だが, 頸動脈の不安定プラーク診断における MRI の有用性が報告され¹²⁾, 冠動脈についても高い可能性を持つといえるだろう (図7)¹³⁾。更なる時間分解能・空間分解能の向上と動脈硬化プラーク用の新規造影剤の開発などが待たれるところである。また位相コントラスト法を用いて冠動脈やバイパスの血流が直接計測できることも MRI の利点であり, 冠動脈血流リザーブやグラフト狭窄診断における有用性が報告されている⁶⁾。

3) 冠動脈 MRI の臨床応用

低侵襲的冠動脈イメージングの最近のトピックスは, マルチスライス CT による冠動脈 CT アンジオグラフィ (CTA) の登場であり, MRA との競合が問題となっている。CTA では内腔とともに血管壁の描出が可能で, 急性心筋梗塞発症の原因となる不安定プラーク診断の可能性が示唆されたことから, 現在は CTA が MRA に少し先行し

た印象がある。しかし MRI には冠動脈壁とプラークの性状評価法としての大きな可能性があり, この分野での今後の進歩によって CT との新たな役割分担が検討されることになると思われる。

心機能・心筋機能イメージング

1) MRI による心機能解析¹⁴⁾

心機能解析の基礎となる撮像法はシネ MR 法である。この方法の最近の進歩は true FISP 法の応用による心内腔の高信号化で, これにより内腔と心室壁の境界が患者の血行動態に依存せず明瞭に判別できるようになった。さらに撮像の高速化によって心エコー図と同感覚のリアルタイム撮像までもが可能となっている。また連続多断面での撮像から, 両心室容積, 駆出率や心筋体積(重量)などの基本的な心機能指標が精度良く算出でき, 心室の局所収縮性も三次元的に評価できる。なおデータ量増加に伴ってこれらの指標の自動算出の要望が高まり, その方法開発が進められている (図8)。

通常のシネ MR 法で得られる情報は基本的には心エコー図法と同質のものではあるが, 検者の技術によらず自在な断面での定量性・再現性の良い画像が比較的短時間で得られることを考えると, 臨床でのルーチン心機能評価法としてシネ MR 法は最適と思われる。

2) シネ MR 法の特長^{14~17)}

シネ MR 法に心エコー図法では得られない付

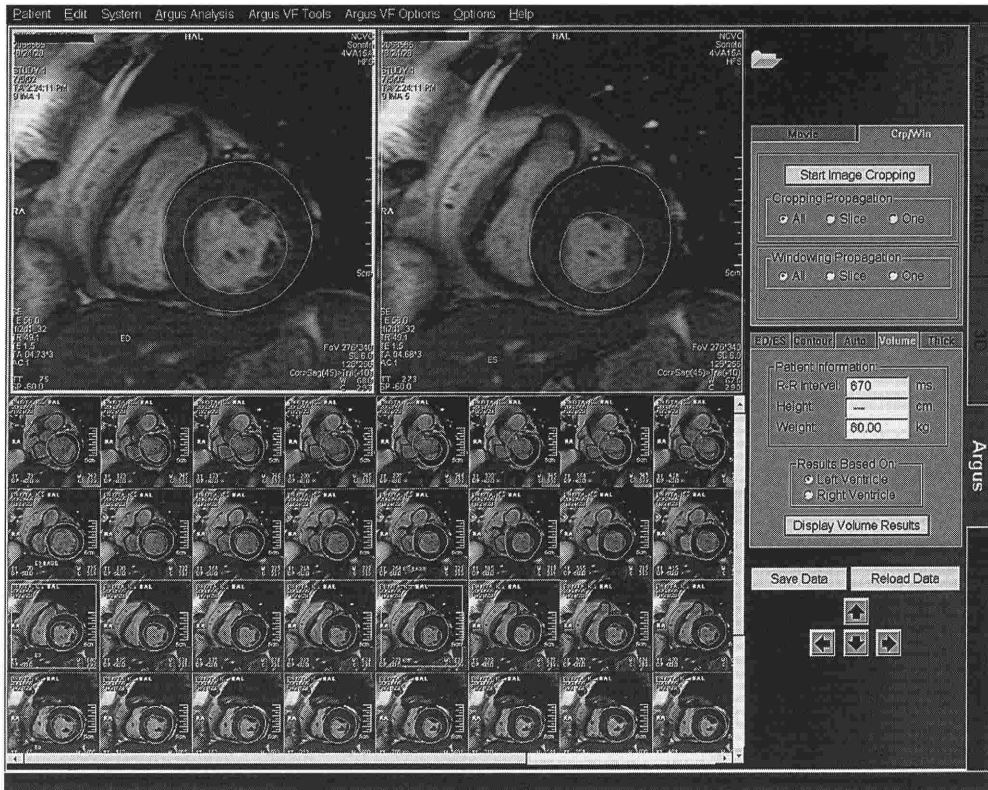


図 8 シネ MR 画像の自動解析

シネ MR 法の元画像の一部（上段）と自動辺縁トレース画像（下段）。左室容積や駆出率などが自動算出される

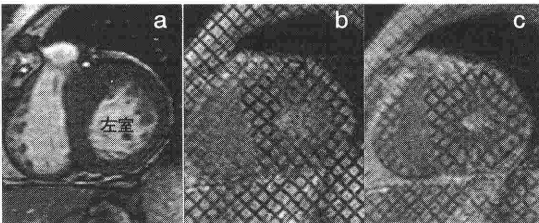


図 9 心筋タギング併用シネ MR 法

肥大型心筋症の例。通常のシネ MR 法 (a) と SPAMM タギング併用のシネ MR 法の画像 (b: 拡張末期, c: 収縮末期)。左室短軸断面。格子縞タッグの収縮末期での強い変形あり

加情報を与える手法として、心筋タギング法と心筋位相コントラスト (phase-contrast: PC) 法がある。タギング法は前処置 RF パルス照射によって心筋に低信号マークを付ける手法で、そのシネ MR 法による観察から心筋局所の圧縮・ずり変形を定量化できる (図 9)。非観血的には MRI での

み可能な手法である。シネ PC 法では心筋の移動速度の可視化と計測ができ、局所心機能や心筋内の応力の解析への応用が検討されている (図 10)。この方法は心エコー図の組織ドプラ法に似ているが、設定断面の自在性と三軸方向での速度計測が行える点では PC 法が勝っている。

文 献

- 1) Higgins CB, Carlsson E, Lipton MJ (eds): CT of the Heart and the Great Vessels: Experimental Evaluation and Clinical Application. New York, Futura, 1983, pp. 153-237
- 2) Naito H, Saito H, Takamiya M, et al: Quantitative assessment of myocardial enhancement with iodinated contrast medium in patients with ischemic heart disease by using ultrafast x-ray computed tomography. Investigative Radiology 27: 436-442, 1992
- 3) 内藤博昭: 心筋組織性状の評価 (虚血性心疾患を中心に)。森田陸司, 高宮 誠 (編); 超高速 CT の基礎と臨床。金芳堂, 京都, 1997, pp. 51-61
- 4) Slavin GS, Wolff SD, Gupta SN, et al: First-pass

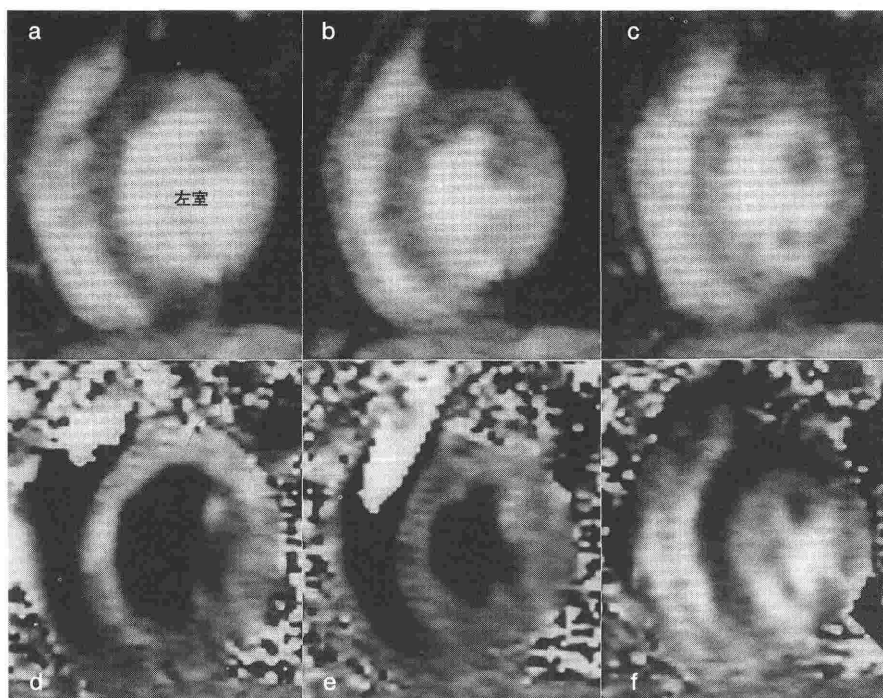


図10 心筋 PC 法

ボランティア例。シネ PC 法による左室短軸断面像。収縮早期 (a), 末期 (b), 拡張早期 (c) の強度画像。同じ心時相の位相画像 (d-f) では頭方への動きが黒く、足方への動きが白く表示される

- myocardial perfusion MR imaging with interleaved notched saturation: feasibility study. *Radiology* 219 : 258-263, 2001
- 5) Sensky PR, Cherryman GR : Myocardial perfusion in ischemic heart disease. In; Higgins CB, De Roos A (eds); *Cardiovascular MRI and MRA*. Philadelphia, Lippincott, 2003, pp.173-190
 - 6) 佐久間 肇, 竹田 寛, 中野 起; 冠血流と心筋血流の MRI 診断. 玉木長良 (編); *心血管イメージング—新世代の診断法—*. メジカルビュー社, 東京, 2002, pp.98-108
 - 7) 内藤博昭; 造影 CT/MRI における心筋 Late Enhancement について. *循環器病研究の進歩 XXIII* : 18-26, 2002
 - 8) Kim RJ, Fieno DS, Parrish TB, et al : Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. *Circulation* 100 : 1992-2002, 1999
 - 9) Choi KM, Kim RJ, Gubernikoff G, et al : Transmural extent of acute myocardial infarction predicts long-term improvement in contractile function. *Circulation* 104 : 1101-1107, 2001
 - 10) Kim WY, Danias PG, Stuber M, et al : Coronary magnetic resonance angiography for the detection of coronary stenosis. *N Engl J Med* 345 : 1863-1869, 2001
 - 11) Dirksen MS, Lamb HJ, Jukema JW, et al : Coronary arteries - Clinical approaches. In; Higgins CB, De Roos A (eds); *Cardiovascular MRI and MRA*. Philadelphia, Lippincott, 2003, pp273-283
 - 12) Moody AR, Murphy RE, Morgan PS, et al : Characterization of complicated carotid plaque with magnetic resonance direct thrombus imaging in patients with cerebral ischemia. *Circulation* 107 : 3047-3052, 2003
 - 13) Maehara A, Yamada N, Seguchi O, et al : Coronary hematoma visualized by intravascular ultrasound and magnetic resonance imaging. *Circulation* 107 : e46, 2003
 - 14) 山田直明, 内藤博昭; 心機能解析法. 玉木長良 (編); *心血管イメージング—新世代の診断法—*. メジカルビュー社, 東京, 2002, pp.109-119
 - 15) Naito H, Arisawa J, Harada K, et al : Normal nonuniformity of left ventricular contraction. Assessment by cine MR imaging with presaturation myocardial tagging. *Acta Radiol* 37 : 767-774, 1996
 - 16) Naito H, Arisawa J, Harada K, et al : Assessment of right ventricular regional contraction and comparison with the left ventricle in normal humans: a cine magnetic resonance study with presaturation myocardial tagging. *British Heart J* 74 : 186-191, 1995
 - 17) 内藤博昭; Cardiac MRI Update. 心室壁運動の解析. *日医放会誌* 58(1)付録: 16-20, 1998