

Diffusion, Perfusion Imaging の臨床応用—心臓・大血管系—

佐久間肇

三重大学医学部放射線医学教室

はじめに

心臓大血管領域の画像診断では形態的異常だけでなく心筋壁運動や血流などの機能的情報を正確に評価する必要がある¹⁾。これまでMRIによる心大血管領域の撮像には心電図同期スピンエコー法やシネMRIが用いられ、大動脈疾患、先天性心疾患、心膜疾患、心筋症などにおける形態や動きの評価が行われてきた。しかし、従来のMRIは(1)撮像速度が心筋パーフュージョンなどの機能的情報を正確に捕らえるには不十分である、(2)MR装置のデザインが負荷テストを併用した心臓検査に適していない、などの問題から心疾患の診断に広く用いられるには至っていなかった。

最近のEPIを含む超高速MR撮像法の進歩により、MRIは冠動脈の形態と冠動脈血流、心筋パーフュージョン、心筋壁運動、心筋バイアビリティーなど、虚血性心疾患の診断に有用な多彩な情報を非侵襲的に提示できるポテンシャルを有することが示されてきた。しかし、心疾患の診断には既に超音波検査、核医学検査、血管造影検査などが用いられており、いずれも高い有用性を示している。今回のMR先端講座のテーマはdiffusion, perfusion MRIであるが、diffusion MRIの心臓への応用は進んでおらず、perfusion MRIも研究開発の段階である。心臓領域のdiffusion, perfusion MRIを実現するためには超高速撮像法の更なる発展が必要であるが、本稿では循環器領域の既存の診断

モダリティーと比較してこれからの高速MRIに期待される診断的有用性を中心に考察することにする。

心臓領域の診断に用いられる高速MR撮像法

心臓の高速撮像に用いられるパルスシーケンスは基本になる画像データ収集モジュールと、組織緩和時間や血流などの機能的情報を画像コントラストや位相差として描出するために付加される機能的モジュールの組み合わせによって構成されている(図1)。臨床場にある医師や技師の立場からMR領域のエンジニアの方々に期待したいことは、新しい超高速MR装置のスペックよりも、画像データ収集モジュールと機能的モジュールがいかにかうまく組み合わせられて、診断と治療方針の決定に必要な形態と機能の情報を明確に提示できるかという点にあり、今後更に議論を深める必要があると考えられる。

(1) Gradient echo 法

Turbo FLASH や fast SPGR 法などをはじめとする gradient echo (GRE) 法は古くから心大血管のMRIに用いられてきたが、EPIが利用できるようになった現在でも心臓の高速イメージングに最も広く用いられている。その応用範囲は大血管や冠動脈の2Dおよび3DMRA、シネMRI、ダイナミックMRIによるパーフュージョン評価、血流計測など多岐にわたっている。Gradient echo 法ではEPI用ハー

キーワード fast MR imaging, heart, coronary vessels, myocardial perfusion, function

Pulse sequences for clinical cardiac MRI

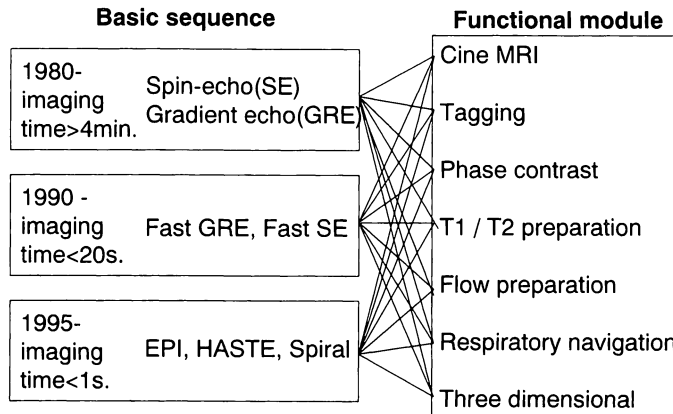


図 1. 心疾患の診断に用いられるパルスシーケンスの構成

ドウェアを必要とせず一般的な MR 装置を使用して良好な画像を得ることができることが特長であるが、最近の傾斜磁場性能の向上した MR 装置を用いるとエコー時間が 1 ms 近くまで短縮され、アーチファクトのより少ない良好な画像を得ることができる。

k-空間分割 GRE 法 (segmented k-space GRE) はシネ MRI の撮像時間を数分の一から十分の一以下に短縮し、呼吸停止下にシネ MRI を得ることを可能とした²⁾。シングルスライスマルチフェーズモードの k-空間分割 GRE 法では呼吸停止下に 1 スライス面のシネ MR 画像が得られ、マルチスライスシングルフェーズモードでは呼吸停止下に複数のスライス面の画像が得られる。前者は心筋壁運動や左室容積、心筋重量の評価に、後者は心大血管の形態的评价に用いられている。また、呼吸同期撮像法と併用して k-空間分割 GRE 画像の撮像を行うと、呼吸停止の負担なしにかなり良好な心大血管領域の MR 画像を得ることができる (図 2)。

(2) EPI

シングルショット EPI では、一回の RF 励起後に画像再構成に必要な全データの収集が行われ、撮像時間を 50~100 ms にまで短縮することができる^{3),4)}。EPI にはスピネコー (SE)-EPI とグラディエントエコー (GRE)-EPI の 2 種類の方法がある。SE-EPI はスピネコーの前後両側のスロープで EPI データを収集するため GRE-EPI と比較すると T_2^* の影響を受けにくい。一方、GRE-EPI は RF 励起後に T_2^* 減衰する信号からデータを得るため、 T_2^* の影響を受けやすい。最近の中枢神経系や肝のシングルショット EPI は臨床応用に耐えうる画質を提供しつつあるが、心臓のシングルショット EPI の画質や分解能は残念ながらまだ十分とはいえない。心臓は空気を多量に含む肺に取り囲まれているため、RF 励起後のデータ読み取り時間が長いシングルショット EPI では、磁場不均一に伴う画像のゆがみや信号低下が中枢神経系や肝よりも生じやすい。また、EPI は血流に対する位相特性があまり良くないため、位相法を用いた血流計測などにあまり適さないことも欠点の一つである。

1998 年 6 月 25 日受理

別刷請求先 〒514-8507 三重県津市江戸橋 2-174 三重大学医学部放射線医学教室 佐久間肇

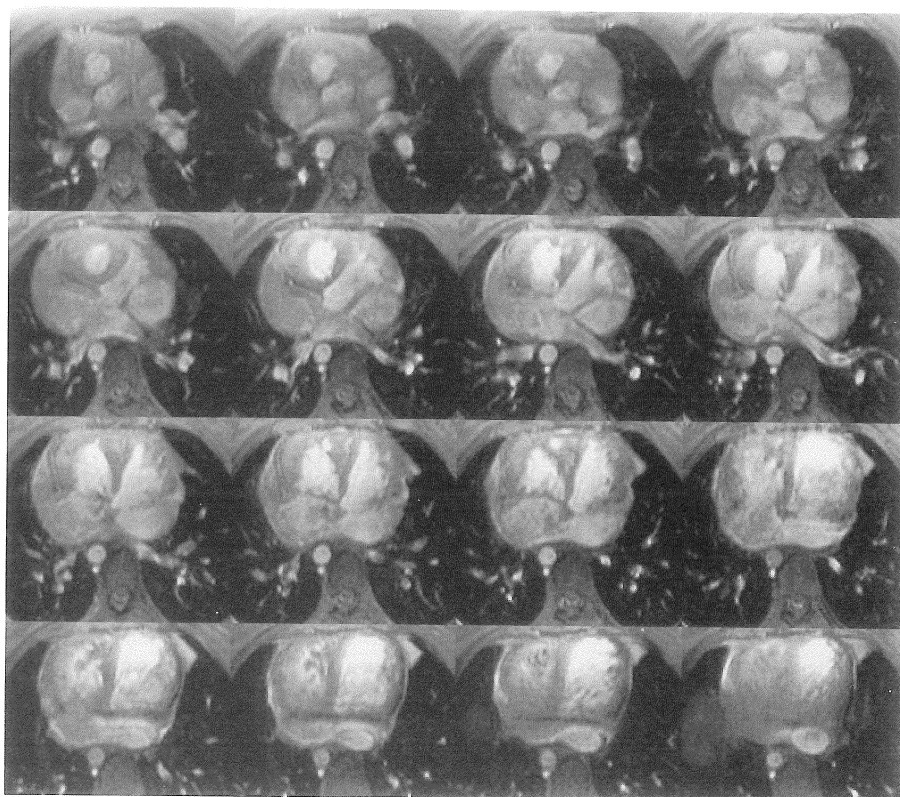


図 2. k-空間分割高速 gradient echo MRI. 修正大血管転位症例. 呼吸同期データ収集を併用し 3 mm 連続スライスの画像が得られている (TR/TE=6/1.2 ms).

心臓のシングルショット EPI には磁場不均一によるアーチファクトや不十分な空間分解能など多くの問題があるため、マルチショット EPI を用いてこれらの問題を抑えながら EPI の持つ高速撮像性を診断に生かそうとするアプローチがとられており、将来的にもシングルショット EPI より広範に臨床利用されるものと思われる。マルチショット EPI では複数の RF 励起パルスを用い k-空間を何回かに分けてデータ収集する。このため、撮像時間はシングルショット EPI よりも長くなるが、各々の RF 励起後のデータ収集時間はシングルショット EPI の数分の一に短縮されるため、磁場不均一による画像のゆがみが少なく、空間分解能も改善される。ただし、マルチショット EPI

では縦磁化の回復は TR に依存するため、縦磁化が完全回復した状態で撮像を行うシングルショット EPI と比較すると MR 信号強度は低くなる。しかし、縦磁化の完全回復が得られないマルチショット EPI の制約は、T₁ プレパレーションパルスを併用した造影心筋パーフュージョン MRI や血管内造影剤を用いた冠動脈 MRA では特に大きな欠点とはならない。最近、これらの領域におけるマルチショット EPI の有用性を示す報告も増えており⁵⁾、将来広く臨床利用されるものと期待される。

(3) fast SE 法

心臓の T₂ 強調画像は急性一重急性期における心筋梗塞病変にみられる浮腫の検出などに有用である。80 年代には心電図同期 T₂ 強調 SE

法が利用されてきたが、撮像時間が長くアーチファクトが多い、梗塞により壁運動の低下した領域では左室内血液が高信号を示すなどの問題があった。Black-blood FSE 法では心腔内や血管内の血流信号を一組のインバージョンパルスによって抑制し、呼吸停止下に FSE 法による高速撮像が行われる⁶⁾。その結果血流アーチファクトと呼吸アーチファクトの抑えられた心臓の T₂ 強調画像を得ることができる。また、脂肪抑制パルスを併用することによって更に病変コントラストの向上を図ることができる。Half-Fourier 法によるシングルショット black-blood FSE (HASTE) 法では 2 心拍に 1 画像程度の速度で T₂ 強調 MR 画像を得ることができる。シングルショット FSE 法を心臓領域に用いる場合の問題点は、心筋の T₂ 緩和時間が短いいため正常心筋の解像度が低下することである。

(4) その他の高速撮像法

Spiral MRI は k-空間の中心部から周辺部へとスパイラル状にサンプリングを行う。このため、流れや動きに対して特に優れた位相特性を示し、血流計測に適している⁷⁾。良好な spiral MR 画像を得るためには周波数が次第に変化するサイン波状の強い傾斜磁場の発生が必要であり、分解能の高い画像を得るためには画像再構成の前に適切な補正を施す必要がある。既存の MR 装置は spiral scan を考慮して開発されているわけではないため、今後改善の余地が残っている。

この他の超高速撮像法としては burst imaging など試みられており興味深いアプローチであるが⁸⁾、心臓の臨床イメージングに用いるためには更に検討が必要と考えられている。

心臓大血管の高速 MR 撮像法の臨床応用

(1) シネ MRI

シネ MRI を用いて心室全体の動画像を連続スライス面上で撮像することにより、三次元的

データ（正確には 2D シネ MRI のスタック）に基づく再現性の高い心室容積、駆出分画、心筋重量などの計測を行うことが可能である。シネ MRI による心筋重量計測値はエコーなどの他のモダリティよりも再現性に優れていると考えられ⁹⁾、肥大大心に対する薬物療法の効果を心筋重量の経時的計測から判定する目的などに特に適している。また、心筋梗塞や虚血を有する患者の心室容積や駆出分画を心エコーから判定すると、壁運動の最も低下した心筋壁を含む二次元断層像から左室全体の容積を計算することになるため、左室機能低下を過大評価する可能性がある。左室全体を評価するシネ MRI を用いるとこのような問題を改善できる。

k 空間分割 GRE 法はシネ MRI 撮像時間の大幅な短縮をもたらし、呼吸停止下のシネ MRI 撮像も可能となった。ただし、高速 MR 装置を用いた k 空間分割シネ MRI における TR/TE は従来のシネ MRI の TR/TE と比較してかなり短くなっており、読影には注意を要する。従来のシネ MRI で認められた弁逆流による flow void は TE に依存するため、高速シネ MRI で検出されないことが多い。また、高速シネ MRI では TR が短縮されているため流入血液にサチュレーション効果が強く生じ、拡張末期の心室内血液信号は低下する。このため、拡張期心内膜縁をトレースする際には拡張末期よりも拡張中期のシネ画像を用いた方が良い結果が得られるようである。

(2) 心筋バイアビリティーの評価

虚血性心疾患の診断と治療方針の決定においては局所心筋バイアビリティー有無の判定が重要である。ドプタミン負荷心エコー法は局所心筋バイアビリティーを示す有効な方法であるが、シネ MRI を用いてもドプタミン負荷による心筋バイアビリティーなどの評価を行うことができる^{10),11)}。しかし、ドプタミン負荷シネ MRI を用いて心エコーと同様の情報を得られるだけであれば、心エコーよりも高コストで手軽に利用できない MRI を負荷検査のイメージ

ング法として選択する循環器内科医は少ないと思われる。将来、超高速3D-シネMRIをこの分野に応用し¹²⁾、ドブタミン負荷前後における左室全体の三次元画像を短時間に収集して局所心筋のバイアビリティーを三次元的に評価できれば、心筋バイアビリティー評価におけるMRIの有用性が高く認識される可能性がある。MRIによるバイアビリティーの評価法としては造影剤を用いたアプローチも考えられており、MR造影剤投与後の心筋と血液のT₁値を経時的に計測し細胞外液分画を算出することによって心筋細胞膜障害を評価する方法、metalloporphyrinなどの壊死組織に親和性を有する新しい造影剤を用いて壊死組織の分布を描出する方法などが提示されている¹³⁾。

(3) MR タギング法や位相法による心筋壁運動解析

SPAMM法などで心筋に縞状ないし格子状の磁気標識を行うことによって心筋収縮、拡張に伴う局所心筋の収縮、移動、ゆがみなどを描出できる。タギング法ではスライス面に垂直方向の動きを検出できないため、直交する異なるスライス面でタギングMRIを撮像するなどの方法で三次元的な心筋の動きの解析が行われている¹⁴⁾。また、位相法によるシネMRIを用いると、局所心筋の移動速度と方向を三次元的に評価することが可能である。MRタギングなどによる壁運動評価はMRIが他のモダリティーでは得られない情報を非侵襲的に提示している点でユニークであり、前述のドブタミン負荷と組み合わせると虚血性心疾患における心筋バイアビリティー評価にも高い有用性が期待できる。タギングMRIは現在普及している一般的なMRI装置を用いて十分撮像可能であって、冠動脈MRAやパーフェュージョンMRIよりも多くの施設で実施できるはずである。タギングMRIの臨床利用がそれほど広がらない最大の原因は、必要な情報を的確に解析し表示できるタギングMRI用データ解析ソフトが製品として利用できないことではないかと思われる。

(4) 心筋パーフェュージョン

心筋パーフェュージョンMRIは核医学よりも高い空間分解能を有し心内膜下虚血を描出できる可能性があり、心臓MRIの有用性が最も期待されている領域である。T₁短縮MR造影剤をボース投与すると正常心筋の信号強度は急速に上昇するが、虚血部位では造影剤の到達が遅延し低信号の領域として認められる¹⁵⁾。心筋シンチグラフィで用いられるTl-201やTc-99m-MIBIなどの核医学トレーサーは心筋細胞に何らかの形で取り込まれるため、トレーサー投与後ある程度時間をかけて画像データを収集できる。しかし、Gd-DTPAなどのMR用造影剤は心筋細胞に特異的に集積するわけではなく細胞外液に非特異的に分布するため、正常一虚血心筋のコントラストは造影剤ファーストパスの際に最大となり、時間とともに急速に消失する。したがって、MRIを用いて心筋パーフェュージョンを評価するためにはボース投与した造影剤の心筋ファーストパスの動態を観察する必要があり、ダイナミックMRIに高い時間分解能が要求される。

心筋パーフェュージョンMRIはインバージョンリカバリ(IR)-高速GRE法を用いて試みられてきたが、GRE法による心筋虚血検出能は満足できるものではなかった^{16),17)}。これは、(1)ダイナミックMRIの時間分解能が不十分、(2)スライス枚数が限られる、(3)運動負荷ではなく薬物負荷が用いられている、などが原因と考えられる。最近、心エコー用造影剤による心筋パーフェュージョン評価も急速に進歩しつつあることを考えると、心筋パーフェュージョンMRIは左室全体のパーフェュージョン評価を目標とすべきである。最近EPIによる心筋パーフェュージョンMRIが行われ¹⁸⁾、従来のGRE法よりも良好な時間分解能と多くのスライス枚数が得られるようになってきた。十分な心筋虚血検出能を得るためにはMR装置内での運動負荷も必要と考えられ、今後MR装置のデザインを含めた改良が更に必要と思われる。

(5) 心臓 diffusion MRI

心筋組織の diffusion 係数および diffusion anisotropy の計測は、心筋繊維のサイズや配列、細胞内液/細胞外液の状態、細胞膜の状態などを反映すると考えられ、心臓の diffusion MRI は診断上有用な情報を提示する可能性がある。Edelman らは *in vivo* ヒト心筋の diffusion MRI が可能であることを示したが¹⁹⁾、心拍動などによる動きの影響を極めて強く受けるため、これまでのところ臨床応用はあまり進んでいないのが現状である。

(6) 循環器領域の MR アンギオ

造影剤ボラス投与を併用した呼吸停止 3D-MRA は高濃度の造影剤が血管を通過する際の T₁ 短縮効果を利用する方法で、この方法が導入されて以来、大動脈や肺動脈の MRA の画質と臨床的有用性は飛躍的に向上した²⁰⁾。MR スマートプレップは、設定したトラッキング領域の MR 信号を数ミリ秒ごとに連続的に観察し、造影剤が到達して信号強度が閾値を超えると 3D-MRA のデータ収集が開始される手法で、MRA のコントラストの最適化に有用である²¹⁾。また、造影剤ボラス投与 3D-MRA にテーブル自動移動法を併用すると胸部大動脈から下肢までの広範囲の良好な MRA 像を撮像できる (図 3)。

冠動脈 MRA は心臓の MRA のなかで最も期待されている MRI の応用分野である。2D 法による冠動脈 MRA では k 空間分割データ収集、スパイラルスキャン、EPI 等の方法を用いて呼吸停止下にデータ収集が行われる。2D-MRA の冠動脈狭窄病変に対する検出感度は 62~90% と報告者によってかなり幅があるのが現状である^{22),23)}。2D-MRA のメリットは一回の呼吸停止下に画像データを得られ呼吸性のブレが少ないことであるが、狭窄病変を描出するためには適切なスライス面の設定を行い呼吸停止撮像を繰り返す必要がある。

冠動脈の 3D-MRA に関してはナビゲータエコー (呼吸同期収集法) をはじめとする撮像

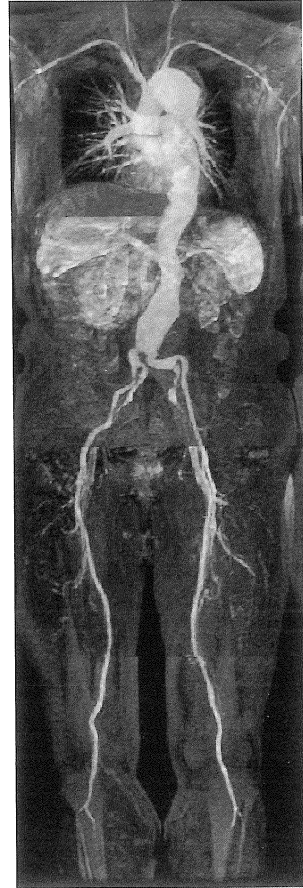


図 3. テーブル移動法を併用した造影 3D-MRA. MR 造影剤 20 ml を静注後、胸部、腹部、大腿部、下腿部の 4 か所にてテーブル自動移動を用いて順次 3D-MRA データを収集し、4 回の 3D-MRA データから MIP 合成画像を作成した (TR/TE=6/1.2 ms, spectral IR による脂肪抑制, 3D データ収集時間/ロケーション=18 秒, テーブル移動時間=約 5 秒)。

技術の改良が日進月歩で進行中である。冠動脈の 3D-MRA では 3D ボリュームデータが得られるため、検査後に任意断面の冠動脈像を再構成することができる^{24),25)}。3D-MRA では RF 励起される 3D スライスが厚くサチュレーションの影響を受けやすいため、MR 造影剤の投与が有用と考えられており (図 4)、血管内分布 MR 造影剤を併用した呼吸同期 3D-MRA は将

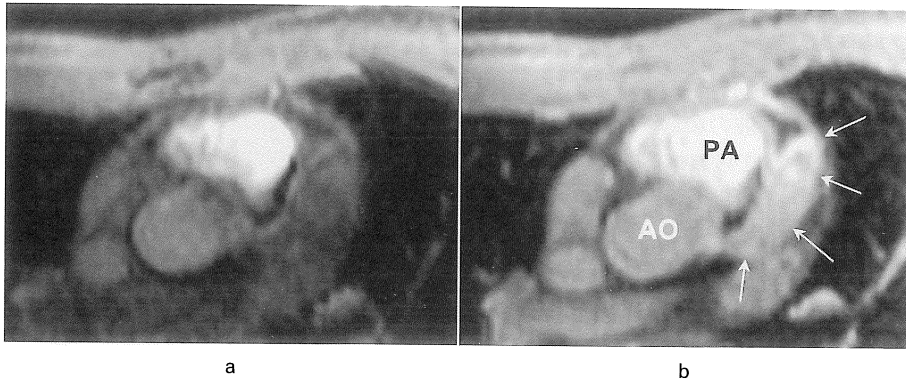


図 4. 川崎病患者における左冠動脈瘤の呼吸同期 3D-MRA (a: 造影前, b: Gd-DTPA-BMA 静注後). 造影剤投与前では冠動脈内の血液はサチュレーションのため信号が低下しているが, 通常の MR 造影剤投与によって良好な冠動脈コントラストが得られている. PA=肺動脈, AO=大動脈, 矢印=冠動脈瘤.

来の冠動脈 MRA の主流になると期待されている. 呼吸同期 3D-MRA を用いると優れた画質の冠動脈 MRA 像が得られるが, 冠動脈の位置が呼吸ごとに微妙に異なるため画像にぼけが生じ, 冠動脈狭窄の描出能が不十分となる可能性も否定できない. このため通常の MR 造影剤のボラス注入を併用して一回の呼吸停止下に心電図同期超高速 3D-MRA を撮像する方法も試みられている²⁶⁾.

(7) MRI による冠血流計測

冠動脈血流予備能は安静時冠血流量と冠血管拡張剤投与後の最大冠血流量の比であり, 冠動脈の機能的狭窄度を反映する. 冠動脈血流予備能の評価にはドップラフローワイヤ等の侵襲的方法が用いられてきたが, 最近の高速フェーズコントラストシネ MRI を用いて, 非侵襲的に冠動脈血流速度や血流予備能を計測できるようになった²⁷⁾. 我々の施設における検討では, MR による冠動脈血流予備能の経時的計測は PTCA・ステント治療後の再狭窄の非侵襲的診断に有用と考えられる. 冠動脈バイパスグラフトの開存/閉塞の診断はこれまでもシネ MRI などを利用して可能であったが, 血流計測を行うことによって狭窄/非狭窄グラフトの鑑別も

非侵襲的に行うことができる²⁸⁾.

肥大型心筋症 (HCM) などでは心筋 1g 当たりの血流量と冠血流予備能の低下がみられるが, 心筋血流量の計測には PET が必要であった. 左室心筋血流の約 9 割は冠静脈洞を通して右房に流入するため, MRI による冠静脈洞血流量の計測値は左室全体の心筋血流量のよい指標となる. 冠静脈洞は冠動脈より径が大きく, 血流量の定量化は冠動脈よりも容易と考えられる. また, 高速シネ MRI から左室心筋重量も計測すれば心筋 1g 当たりの心筋血流量の定量評価も可能である. 我々の MRI を用いた検討では, HCM におけるジピリダモール負荷後の心筋血流量と血流予備能はいずれも正常例の平均値よりも有意に低下していた. 将来的には MRI による心筋 1g 当たりの心筋血流量の評価と心筋パーフュージョン MRI を組み合わせることによって, 組織パーフュージョンを反映する定量的マップの作成なども可能になるものと期待される.

位相法による冠血流計測は MRI の特長を生かした検査法であるが, 動きの早い右冠動脈などの血流量を正確に定量化するためには画像の時間分解能と空間分解能を更に向上させること

が必要である。

ま と め

心大血管の高速 MRI の進歩に伴い、局所壁運動、冠動脈の形態と血流予備能、心筋パーフュージョンなど、形態と機能両面の評価が可能となり、MRI の虚血性心疾患に対する潜在的有用性はかなり高まっている。今後は、心臓高速 MRI 領域のハード、ソフト面でもたらされる進歩をどのように効果的に臨床に生かし、その結果をエンジニア側にうまくフィードバックしてゆくかを考えることがより重要になってくると思われる。心臓 MRI のハード面ではインターラクティブな操作性とリアルタイムに画像を表示できる機能が是非必要と思われる。一方、ソフト面では、心臓の MR タギング、冠血流計測、心筋パーフュージョンなどの解析用ポストプロセッシングソフトウェアの充実が是非必要である。これら広い領域の開発改良が進むことによって心臓領域の MRI は将来心疾患

の診断における非侵襲的でコスト効率の高い総合的診断モダリティになるものと期待される(図 5)。

文 献

- 1) Higgins CB, Sakuma H : Heart disease : functional evaluation with MR imaging. Radiology 1996 ; 199 : 307-315
- 2) Sakuma H, Fujita N, Foo TKF, et al. : Evaluation of left ventricular volume and mass with breath-hold cine MR imaging. Radiology 1993 ; 188 : 377-380
- 3) Steling MK, Turner R, Mansfield P : Echo-planar imaging : magnetic resonance imaging in a fraction of a second. Science 1991 ; 254 : 43-50
- 4) Weisskoff RM, Cohen MS, Rzedzian RR : Nonaxial whole body instant imaging. Magn Reson Med 1993 ; 29 : 796-803
- 5) Schwitter J, Debatin JF, von Schulthess GK, McKinnon GC : Normal myocardial perfusion assessed with multishot echo-planar imaging. Magn Reson Med 1997 ; 37 : 140-147

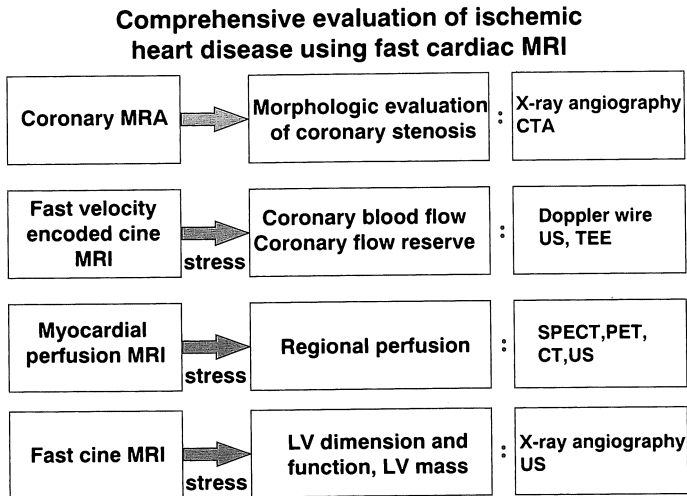


図 5. 高速 MRI による虚血性心疾患の総合診断。将来、MRI が、冠動脈の形態と流れ、組織パーフュージョン、局所心筋機能とグローバルポンプ機能を総合的に評価できるようになれば、MRI は一回の検査で治療方針に有用な情報を提供できる経済的な検査 (one stop shop) として認められる可能性がある。

- 6) Simonetti OP, Finn JP, White RD : Black blood T₂-weighted inversion-recovery MR imaging of the heart. *Radiology* 1996 ; 199 : 49-57
- 7) Nishimura DG, Irarrazabal P, Meyer CH : A velocity k-space analysis of flow effects in echoplanar and spiral imaging. *Magn Reson Med* 1995 ; 33 : 549-556
- 8) Matsuda T, Komori M, Inoue H, Hayashi K, Kimura T, Sasayama S : Another interpretation of burst imaging as a variation of line projection imaging. *Magn Reson Med* 1996 ; 36 : 796-799
- 9) Semelka RC, Tomei E, Wagner S, et al. : Normal left ventricular dimensions and function : interstudy reproducibility of measurements with cine MR imaging. *Radiology* 1990 ; 174 : 763-768
- 10) Pluim BM, Lamb HJ, Kayser HW, et al : Functional and metabolic evaluation of the athlete's heart by magnetic resonance imaging and dobutamine stress magnetic resonance spectroscopy. *Circulation* 1998 ; 97 : 666-672
- 11) Baer FM, Voth E, LaRosee K, Schneider CA, Theissen P, Deutsch HJ, Schicha H, Erdmann E, Sechtem U : Comparison of dobutamine transesophageal echocardiography and dobutamine magnetic resonance imaging for detection of residual myocardial viability. *Am J Cardiology* 1996 ; 78 : 415-419
- 12) Wielopolski PA, Manning WJ, Edelman RR : Single breath-hold volumetric imaging of the heart using magnetization-prepared 3-dimensional segmented echo planar imaging. *JMRI* 1995 ; 5 : 403-409
- 13) Herijgers P, Laycock SK, Ni Y, et al. : Localization and determination of infarct size by Gd-mesoporphyrin enhanced MRI in dogs. *Intl J Cardiac Imaging* 1997 ; 13 : 499-507
- 14) Young AA, Kramer CM, Ferrari VA, Axel L, Reichel N : Three-dimensional left ventricular deformation in hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 1994 ; 90 : 854-867
- 15) Saeed M, Wendland MF, Sakuma H, et al. : Coronary artery stenosis : detection with contrast-enhanced MR imaging in dogs. *Radiology* 1995 ; 196 : 79-84
- 16) Eichenberger AC, Schuiki E, Kochli VD, et al. : Ischemic heart disease : assessment with gadolinium-enhanced ultrafast MR imaging and dipyridamole stress. *JMRI* 1994 ; 4 : 425-431
- 17) Hartnell G, Cerel A, Kamalesh M, et al. : Detection of myocardial ischemia : value of combined myocardial perfusion and cine angiographic MR imaging. *AJR* 1994 ; 163 : 1061-1067
- 18) Edelman RR, Li W : Contrast-enhanced echoplanar imaging of myocardial perfusion : preliminary study in humans. *Radiology* 1994 ; 290 : 771-777
- 19) Edelman RR, Gaa J, Wedeen VJ, Loh E, Hare JM, Prasad P, Li W : *In vivo* measurement of water diffusion in the human heart. *Magn Reson Med*, 1994 ; 32 : 423-428
- 20) Leung DA, McKinnon GC, Davis CP, et al. : Breath-hold contrast-enhanced three-dimensional MR angiography. *Radiology* 1996 ; 200 : 569-571
- 21) Foo TK, Saranathan M, Prince MR, Chenevert TL : Automated detection of bolus arrival and initiation of data acquisition in fast, three-dimensional, gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology* 1997 ; 203 : 275-280
- 22) Manning WJ, Li W, Edelman RR : A preliminary report comparing magnetic resonance coronary angiography with conventional angiography. *N Engl J Med* 1993 ; 328 : 828-832
- 23) Duerinckx AJ, Urman M : Two-dimensional coronary MR angiography : analysis of initial clinical results. *Radiology* 1994 ; 193 : 731-738
- 24) Post JC, van Rossum AC, Hofman MB, Valk J, Visser CA : Three-dimensional respiratory-gated MR angiography of coronary arteries : comparison with conventional coronary angiography. *AJR* 1996 ; 166 : 1399-1404
- 25) Muller MF, Fleisch M, Kroeker R, Chatterjee T, Meier B, Vock P : Proximal coronary artery stenosis : three-dimensional MRI with fat saturation and navigator echo. *JMRI* 1997 ; 7 : 644-651
- 26) Goldfarb JW, Edelman RR : Coronary arteries : breath-hold, gadolinium-enhanced, three-dimensional MR angiography. *Radiology* 1998 ; 206 : 830-834
- 27) Sakuma H, Blake LM, Amidon TM, O'Sullivan

M, Szolar DH, Furber AP, Bernstein MA, Foo TKF, Higgins CB : Noninvasive measurement of coronary flow reserve in humans using breath-hold velocity encoded cine MR imaging. *Radiology* 1996 ; 198 : 745-750

28) Sakuma H, Globits S, O'Sullivan M, et al. : Breath-hold MR measurement of blood flow velocity in internal mammary arteries and coronary artery bypass grafts. *JMRI* 1996 ; 6 : 219-222

Clinical Applications of Diffusion and Perfusion Imaging : Heart and Great Vessels

Hajime SAKUMA

*Department of Radiology, Mie University School of Medicine
2-174 Edobashi, Tsu, Mie 514-8507*

Diagnosis of cardiac disease requires accurate assessment of function as well as morphology of the heart. In recent years, with advances in fast imaging techniques, nearly all aspects of cardiac morphology and function can be assessed with MRI techniques. Cine MRI has been shown to provide accurate and reproducible assessment of LV volume and mass. Fast cine MRI using segmented k-space data acquisition dramatically improves time efficiency and clinical utility of cine MRI. T₂-weighted images of the heart with good suppression of blood signal can be acquired within the breath-hold time with HASTE or multi-shot fast FSE sequences utilizing double IR preparation pulses. MR perfusion imaging has higher spatial resolution than nuclear myocardial perfusion imaging and can potentially demonstrate subendocardial myocardial ischemia. EPI has been more effective in depicting myocardial ischemia in comparison with fast gradient echo sequences because of the better temporal resolution and a larger number of slice locations. Substantial progress has been made in respiratory gated 3D coronary artery MRA with navigator echoes. However, reliable visualization of the coronary arteries with MRA is still challenging because of the small size of the structures to be visualized and the motion. Other approaches have been proposed such as 3D single breath-hold coronary MRA following a bolus injection of the MR contrast medium. Assessment of coronary blood flow and flow reserve with phase contrast MRI has the potential for noninvasive evaluation of the presence and significance of stenosis in the native coronary artery and coronary bypass conduits.