


リサーチ

オープンアクセス

心臓血管MRI (CMR) 標準化プロトコール: 2020アップデート



重要通知: この論文を引用する際には、著作権と雑誌のインパクトファクターに配慮して原著論文を引用するようにしてください。

Christopher M. Kramer^{1*} , Jörg Barkhausen², Chiara Bucciarelli-Ducci³, Scott D. Flamm⁴, Raymond J. Kim⁵ and Eike Nagel⁶

抄録

この文書は2013年にSociety of Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR)の理事会タスクフォースによって公表された心臓MRI標準化プロトコールのアップデートである。本文書の公表と同時に、3つのタスクフォースから本文書と併せて参照すべき文書が公表される予定である。1つ目は、CMRの臨床適応についての文書であり、2004年に公表された文書のアップデートである。2つ目は、2010年にSCMRタスクフォースが発行したレポートの標準化に関する文書のアップデートである。3つ目は、2013年に発行された後処理の標準化に関する文書のアップデートである。先天性心疾患に関連するすべてのプロトコールは別の文書でカバーされている。CMRに共通する技術の多くが標準化されたため、この文書では、一般的な原則および技術のセクションが拡充された。また、心臓デバイスを使用した患者の撮影についてのセクションが追加された。本文書によって、臨床CMRに対する患者ベースのアプローチが、今後さらに標準化、単純化されていくことを願っている。また、本文書はCMR領域の進歩に伴って今後も定期的に更新される予定である。

序文

この文書は2013年にSociety of Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR)の理事会タスクフォースによって公表された心臓MRI標準化プロトコールのアップデートである [1]。本文書の公表と同時に、3つのタスクフォースから本文書と併せて参照すべき文書が公表される予定である。1つ目は、CMRの臨床適応についての文書であり、2004年に公表された文書のアップデートである [2]。2つ目は、2010年にSCMRタスクフォースが発行したレポートの標準化に関する文書のアップデートである [3]。3つ目は、2013年に発行された後処理の標準化に関する文書のアップデートである [4]。先天性心疾患に関連するすべてのプロトコールは別の文書でカバーされている [5]。

CMRに共通する技術の多くが標準化されたため、この文書

では、一般的な原則および技術のセクションが拡充された。また、心臓デバイスを使用した患者の撮影についてのセクションが追加された。本文書によって、臨床CMRに対する患者ベースのアプローチが、今後さらに標準化、単純化されていくことを願っている。また、本文書はCMR領域の進歩に伴って今後も定期的に更新される予定である。

一般的な原則

磁場強度

CMRは異なる磁場強度で実施可能である。現在、大多数の検査で1.5T装置が使用されている。しかし、3Tで行われる検査が増えてきており、以下のような利点や注意点がある。

1. 心電図 (ECG) 同期は1.5Tよりも3Tで問題が生じる場合が多いかもしれない。シネMRIのようなレトロスペクティブ同期による撮像では、心電図の信号が信頼

* Correspondence: ckramer@virginia.edu

¹Cardiovascular Medicine, University of Virginia Health System, Lee Street, Box 800158, Charlottesville, VA 22908, USA

Full list of author information is available at the end of the article



できない場合、末梢脈拍ゲーティングが有効かもしれない。

2. 3Tでは信号雑音比(SNR)が向上するため、心筋パーフェュージョンMRIや遅延造影MRIに有利である可能性がある。さらに、3Tでは、タギングおよび4Dフローにも有利である可能性がある。
3. bSSFP法は1.5TにおけるシネMRに用いられ得るデフォルトの撮像法として、確立されている。しかし、3TではbSSFP法はオフレゾナンス効果に対する感受性が高く、ダークバンディング・アーチファクトや血流アーチファクトを生じる傾向がある。これらのアーチファクトを軽減するためには、慎重にシミングを行うことが必要である。また、患者毎に周波数の調整が必要な場合がある。
4. 1.5Tで安全性が検証されているデバイスは、3Tで必ずしも安全とは言えない。高磁場MRIでの安全性についてはデバイスの個別情報を確認する必要がある(下記1.6を参照(訳注;そのようなセクションはなく原文の誤りと思われる))。

設備面での考慮事項

CMRスキャナ

1. CMRに使用されるスキャナは1.0T以上の磁場強度にすべきである。一般的に用いられる磁場強度は1.5Tであり多くの施設では3Tが使用されている。
2. 複数のコイルエレメント(一般的には8個以上)を有する心臓イメージング専用の表面コイルの使用が強く推奨される。このコイルは、撮像時間および呼吸停止時間を短縮させるパラレルイメージング技術を適用するために必要となる。
3. 心電図同期を行うハードウェアとソフトウェアが必要で、ベクトル心電図同期を組み込むことが望ましい。心電図同期は、プロスペクティブ同期、レトロスペクティブ同期、およびトリガー同期が可能である必要がある。

ソフトウェア/パルスシーケンス

1. CMR検査に必要なパルスシーケンス:bSSFPシネMRI、高速マルチスライス心筋パーフェュージョンMRI、

遅延造影MRI、位相コントラストMRI、3D造影MRA

2. パラレルイメージング(SENSE、SMASH、GRAPPAなど)は、撮像時間および呼吸停止時間を短縮するために強く推奨される。

付属ハードウェア

1. 心筋パーフェュージョンMRIや造影MRAの撮像を行うためには、CMR対応のパワーインジェクタが必要である。

薬剤負荷

血管拡張薬による負荷パーフェュージョン検査は、変力薬による負荷機能検査よりも一般的である。

血管拡張薬

1. アデノシン:140 μ g/kg/minで2~4分(2-3分経過して心拍数が10bpm以上増加しない場合、または血圧が10mmHg以上低下しない場合には、施設内の基準に従って210 μ g/kg/minまで増量してもよい)
2. ジピリダモール:0.142 μ g/kg/minで4分以上
3. リガデノソン:0.4mg ボーラス投与
4. アデノシン三リン酸(ATP):140 μ g/kg/minで3~5分(2-3分経過して心拍数が10bpm以上増加しない場合、または血圧が10mmHg以上低下しない場合には、施設内の基準に従って210 μ g/kg/minまで増量してもよい)

変力薬:

1. 虚血:ドブタミン(最大投与量 40 μ g/kg/min)±アトロピン(0.25mgずつ、最大2mg)
2. 心筋バイアビリティ:ドブタミン 2.5~10 μ g/kg/min

禁忌

アデノシン、ジピリダモール、ATP、リガデノソン

- 2度もしくは完全房室ブロック
- 低血圧(<90mmHg)
- 洞性徐脈(HR <45bpm)
- 高度の高血圧症(\geq 220/120mmHg)

- 薬剤吸入を要する活動性気管支喘息・気管支痙攣
- アデノシンやジピリダモール、ATP、リガデノソンに対する過敏症の既往

ドブタミン

- 高度の高血圧症 ($\geq 220/120$ mmHg)
- 不安定狭心症
- 高度の大動脈弁狭窄症 (大動脈弁最大圧格差 > 60 mmHg または大動脈弁口面積 < 1 cm²)
- コントロール不良の心房細動などの不整脈
- 閉塞性肥大型心筋症
- 心筋炎、心内膜炎、心膜炎
- コントロール不良の心不全

アトロピン

- 狭隅角緑内障
- 重症筋無力症
- 閉塞性尿路疾患
- 閉塞性腸疾患

患者準備

1. 必要があれば、負荷検査についての説明と同意を得る。
2. 負荷薬剤の効果を十分に発揮するために、検査の少なくとも12-24時間前から負荷薬剤と相互作用の可能性がある薬剤の服用や飲食を避ける。
 - 血管拡張薬負荷の場合: カフェイン (コーヒー、紅茶、カフェインを含む飲料・食品; チョコレート、カフェインを含む薬など)、テオフィリン、ジピリダモール。
 - ドブタミン負荷の場合: β 遮断薬、硝酸薬
 注) カフェインやニコチンの影響はアデノシンやリガデノソンの投与量を増加することで克服できることを支持するデータの蓄積が進んでいる。
3. 絶食の必須はない。ただし、仰臥位で検査するため、悪心や嘔吐など負荷薬剤の副作用が問題となる可能性があり、状況に応じて絶食を考慮する。
4. もしアデノシンを使用する場合は、造影剤注入用とア

デノシン負荷用に、左右の腕にそれぞれ1本ずつ、計2本の静脈ルートを確認することが望ましい。造影剤は肘正中静脈から注入する事が望ましいが、他の血管を選択してもよい。造影剤の注入にはできるだけ太い穿刺針を使用する。造影剤の注入速度は、使用する穿刺針の太さによって変更する必要がある。

5. 血圧計のカフ圧によって造影剤や負荷薬剤の注入が影響されないように注意する。
6. リガデノソンを使用する場合、静脈ルートは1本でよい。多くの場合は、負荷検査を施行した後、リガデノソンの拮抗作用のあるアミノフィリンを100mg静注する。これにより副作用が軽減され、心拍数がすぐにベースラインに戻る可能性があるが、アミノフィリンには催不整脈作用もあるため、注意して使用する必要がある。副作用は通常2~3分後に消失する。
7. リガデノソンは他の血管拡張剤と比較すると副作用は少ないが、拮抗薬を使用しないと半減期は他の薬剤より長くなる。

副作用

アデノシン、ATP、リガデノソン負荷では顔面紅潮や胸痛、動悸、息切れが生じる可能性がある。重篤な副作用には一過性房室ブロックや一過性低血圧、気管支痙攣がある。

ジピリダモール負荷では胸痛や頭痛、めまいが生じる可能性がある。重篤な副作用として心筋梗塞や心室頻拍、一過性脳虚血発作があるがその出現率は低い。

高用量ドブタミン負荷では胸痛や動悸が生じる可能性がある。重篤な副作用として心筋梗塞や心室細動、持続性心室頻拍があるがその出現率は低い。

負荷検査および安全のための機器

1. モニター装置 (血圧計、心電図モニター、患者と会話できるインターカム、デバイスがある患者では、パルスオキシメーター)
2. MR装置から患者を迅速に避難させる準備と訓練
3. 実施施設ごとの緊急患者蘇生ポリシー
4. MRI室外に置かれた適切な薬品や機材の入った救急カート
 - a. 手元に準備するもの: β 遮断薬 (エスモロールある

表1 ガドリニウム造影剤と生食フラッシュの投与量と注入速度

適応	造影剤投与量 (mmol/kg)	注入速度	生食	注入速度
パーフュージョンMRI	0.05-0.1	3-7mL/s	30mL	3-7mL/s
遅延造影MRI	0.1-0.2		20mL	
MRA(頸動脈、腎動脈、大動脈)	0.1-0.2	2-3mL/s	20mL	2-3mL/s
タイムリゾルブドMRA	0.05	3-5mL/s	30mL	3-5mL/s
末梢動脈MRA	0.2	First10mL@1.5mL/s, rest@0.4-0.8mL/s	20mL	0.4-0.8mL/s

いはメトプロロール)、ニトログリセリン、アミノ
フィリン、気管支拡張薬、酸素

b. 救急カート内に準備するもの:フルセットの救急
薬品(エピネフリン、β遮断薬、アトロピン、気管
支拡張薬、抗不整脈薬など)

5. ドプタミン負荷MRIでは撮像しながら壁運動をその
場で迅速に評価することが必要。

ガドリニウム造影剤の投与方法と安全性

表1を参照。

注記:

1. 投与造影剤量や注入速度は造影剤や撮像プロトコ
ルによって異なる。
2. 1M造影剤(例:ガドビスト)と0.5M造影剤では注入
速度が異なる。ガイドラインでは、1M造影剤では
0.5M造影剤の注入速度の半分の速度を用いる。
3. 緩和能の高いガドリニウム造影剤の場合、投与量は少
なくてよい。

安全性についての考慮事項

1. 1988年以降、世界で3億回以上のガドリニウム造影
剤を使用したMRIが撮像されてきた[5]。ガドリニウ
ム造影剤は多くの用途で重要な医療情報を提供して
おり、安全性についての報告がなされてきた。
2. しかし、腎性全身性硬化症(NSF)や脳への長期的なガ
ドリニウム造影剤の蓄積の結果、規制措置がとられた。
3. 2017年、欧州医薬品庁(EMA)は、すべての直鎖型ガ
ドリニウム造影剤の販売許可を一時停止し、すべての
環状型ガドリニウム造影剤の使用を継続することを

決定した。米国食品医薬品局(FDA)は、すべてのガド
リニウム造影剤の使用を継続したが、直鎖型ガドリニ
ウム造影剤を使用した場合のガドリニウム沈着の大
きなリスクを伝える添付文書に警告を含める必要が
あることを決定した。さらに、製品情報の更新には、リ
スク軽減のための措置と各製品の投与方法が盛り込
まれるべきである。

4. 医療従事者は、ガドリニウム造影剤を選択する際
には、各薬剤の蓄積の特性を考慮するべきである。特に
ガドリニウム蓄積やNSFのリスクが高い患者では十分
な考慮が必要である[6]。
5. すべてのCMRの撮像においてガドリニウム造影剤の
投与量は十分な画質を得られる範囲で最小にすべき
であり、製品の添付文書や施設内、地域での基準、国
際ガイドラインに従わなければならない。
6. 造影剤検査の代替として、可能な限り、非造影検査を
考慮すべきである。

心臓デバイス(ペースメーカー、除細動器)を使用した患者の撮像

1. 安全性

- a. MRI対応デバイスおよび非対応デバイスを使用し
ている患者の撮像にはメーカーおよび施設内の
ガイドラインに従う。
- b. CMR撮像の6週間前までに心臓デバイスが埋め
込まれている患者は、臨床的にやむを得ない適応
であり、かつインフォームドコンセントが得られて
いる場合以外は、通常は撮像すべきではない。
- c. 放置されたリードまたは心外膜のリードがある患
者は、臨床的にやむを得ない適応であり、かつイ
ンフォームドコンセントが得られている場合以外

は、通常は撮像すべきではない。

- d. デバイスの設定は、患者のペースメーカー依存性と電気生理学の専門家の推奨に従って行われる。一般的に、患者がペースメーカーに依存している場合、ペースメーカーは非同期モードに設定されるべきであり、ペースメーカーに依存していない場合は、非ペーシングまたは抑制モードに設定されるべきである。
- e. CMR撮像の前後にデバイスのチェックを行う。
- f. 訓練を受けたスタッフが、撮像中常時、患者、心電図、パルスオキシメーターのモニタリングを行う。
- g. MRI室の近くに救急カートを準備する。

2. 撮像

- a. 撮像中はペースメーカージェネレーターを埋め込んでいる側の腕を頭の上に置くと、画質が向上することがある。
- b. 深吸気時の撮像は、画質を向上させる可能性がある。
- c. bSSFPシネMRIでひどいアーチファクトが存在する場合、GRE法のほうがよい場合がある。
- d. デバイス関連のアーチファクトを低減するには、ワイドバンドの遅延造影が有用かもしれない。特に植え込み型細動器(ICD)を使用している場合は考慮される。

一般的な技術

左室の形態と機能

1. スカウト像—体軸横断、冠状断、矢状断—これらは一般に1回の呼吸停止、1心拍での撮像とする。

2. 胸部全体をカバーする体軸横断(スライス厚8-10mm)のbSSFPまたは高速スピエコーの画像。これらは1-2回の呼吸停止で撮影するシングルショット、一心拍での撮像である。
3. 左室短軸像を得るためのスカウト像—長軸方向の運動と血液の流入が描出される必要があるためシングルショットMRIよりシネMRIが望ましい。
 - a. 左室二腔(垂直)長軸像:体軸横断上で僧帽弁の中心と心尖部を結ぶスライス(図1)
 - b. 四腔(水平)長軸像:二腔長軸像に垂直で、僧帽弁と左房の中心を通り、左室の長軸へと続くスライス(図1)
4. シネMRIにはSNRが高く、血液と心筋のコントラストが高いbSSFPを第一選択とする。
 - a. 3TではSSFPシネMRI画像はアーチファクトにより画質が低下するため、GRE法の使用が考慮される。
 - b. バンディング・アーチファクトを減少・移動する方法としては、シミング、TRの短縮、RF周波数の調節(周波数スカウト法が役立つ可能性がある)などがある。
 - c. シネMRIは呼吸停止下で撮像する。呼気時の呼吸停止のほうが安定した体位を得やすいが、患者によっては吸気時の呼吸停止のほうが楽で、続きやすい場合がある。
5. bSSFP左室短軸像シネMRI(図2)
 - a. 左室心基部から心尖部までを含む。
 - b. 最初の短軸断面は四腔長軸像および二腔長軸像を用いて決定する。この断面は長軸像の左室中

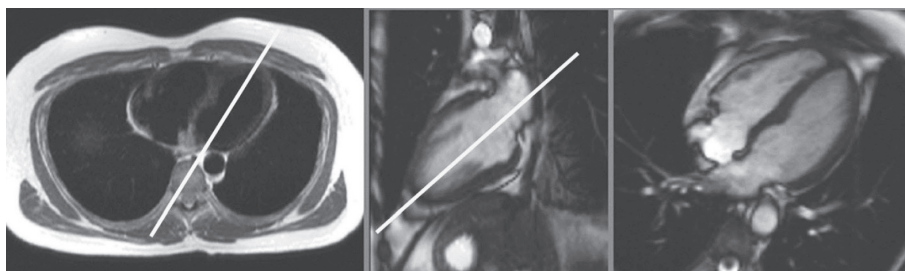


図1 左:左室と右室の基部を通る体軸横断像のブラックブラッドのスカウト画像。二腔長軸の計画線を白線で示す。中央:二腔長軸スカウト画像。四腔長軸の計画線を白線で示す。右:四腔長軸のスカウト画像。

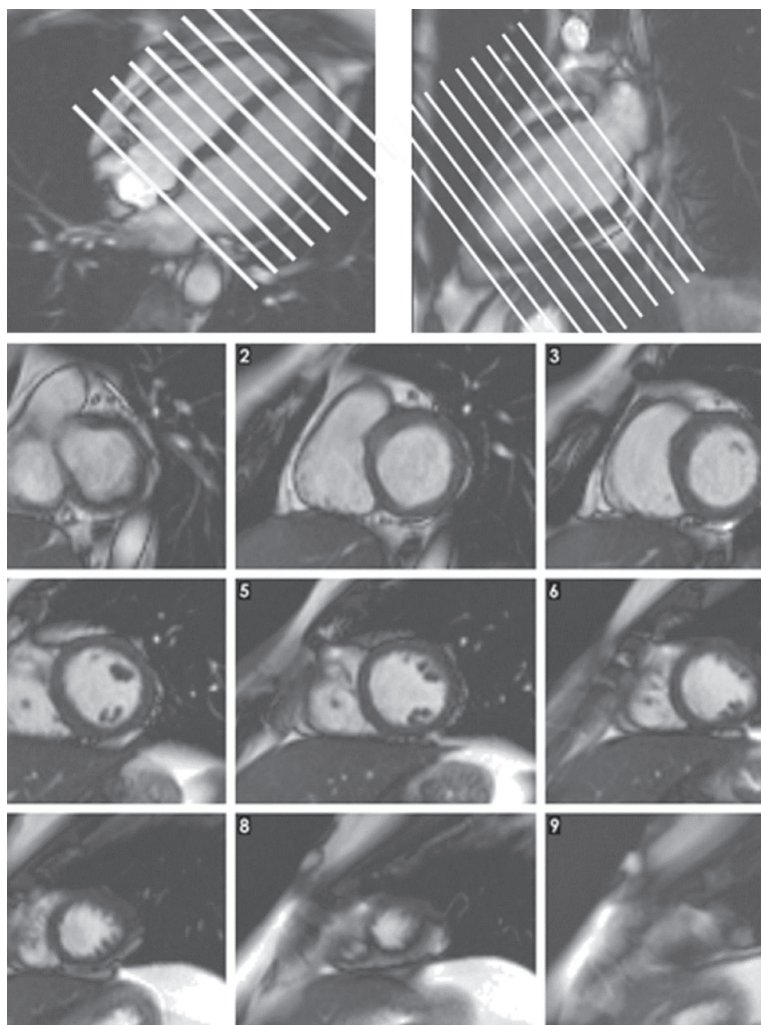


図2 上段:短軸像は、四腔長軸像(左)と二腔長軸像(右)で僧帽弁に平行となるように計画する。下段:心基部(左上)から心尖(右下)までの9つのシネMRI短軸像の断面。

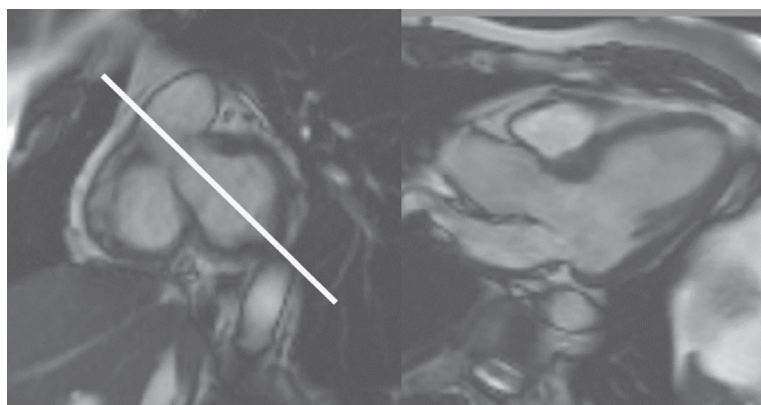


図3 左:左室基部の短軸シネMRI 三腔長軸の計画線を白線で示す。右:三腔長軸シネMRI。

央部と直交するスライスである。この断面は僧帽弁と必ずしも平行ではないかもしれない。

- c. スライス厚は、6-8mm、ギャップ2-4mm(全体で10mmとなるように)。
- d. 壁運動の評価を最適化するためにシネMRI各時相間の時間分解能 <45msecとする。
- e. 時間短縮のために可能ならパラレルイメージングを使用する。

6. bSSFP長軸像シネMRI

- a. 四腔長軸像:二腔長軸像上で、僧房弁の中心、三尖弁の中心および心尖を通る断面。心基部左室短軸像上で右室自由壁の角を通り、心室中隔に直交する断面を使用して修正してもよい。
- b. 左室二腔像:すでに得られた垂直長軸断面から左室前壁・下壁を通るように設定。
- c. 左室三腔像:心尖と僧房弁の中央を通り、左室流出路(LVOT)の中心と大動脈弁を含む断面(図3)。

- d. オプション—上記以外の長軸像断面を追加撮像してもよい。

7. リアルタイムシネ(オプション)

- a. 心室間の相互依存性を評価するため、もしくは標準的な心電図同期シネMRIを使用できない不整脈や呼吸停止ができない患者では、リアルタイムシネMRI(様々な異なるk spaceデータ収集法が使用できる)は、左室機能を評価するために有用である。
- b. 時間分解能は、可能であれば、位相間の時間分解能が60ms以下であることが好ましい。
- c. リアルタイムシネMRIを用いての左室容積の定量解析は、正確性や精度が低く、必ずしも可能ではない。

右室の形態と機能

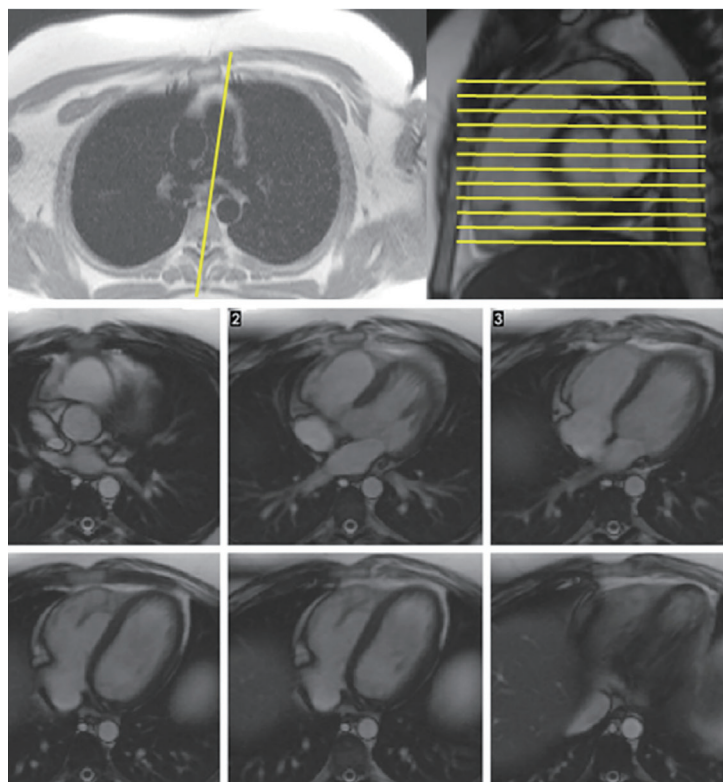


図4 左上:肺動脈を通る体軸横断像のブラックブラッドのスカウト画像。右室流出路(RVOT)画像の計画線を黄線で示す。右上:RVOT像シネMRI。体軸横断像のスタックの計画線を黄線で示す。下段:RVOT(左上)から右室下極(右下)までの6枚の連続した体軸横断像を示す。

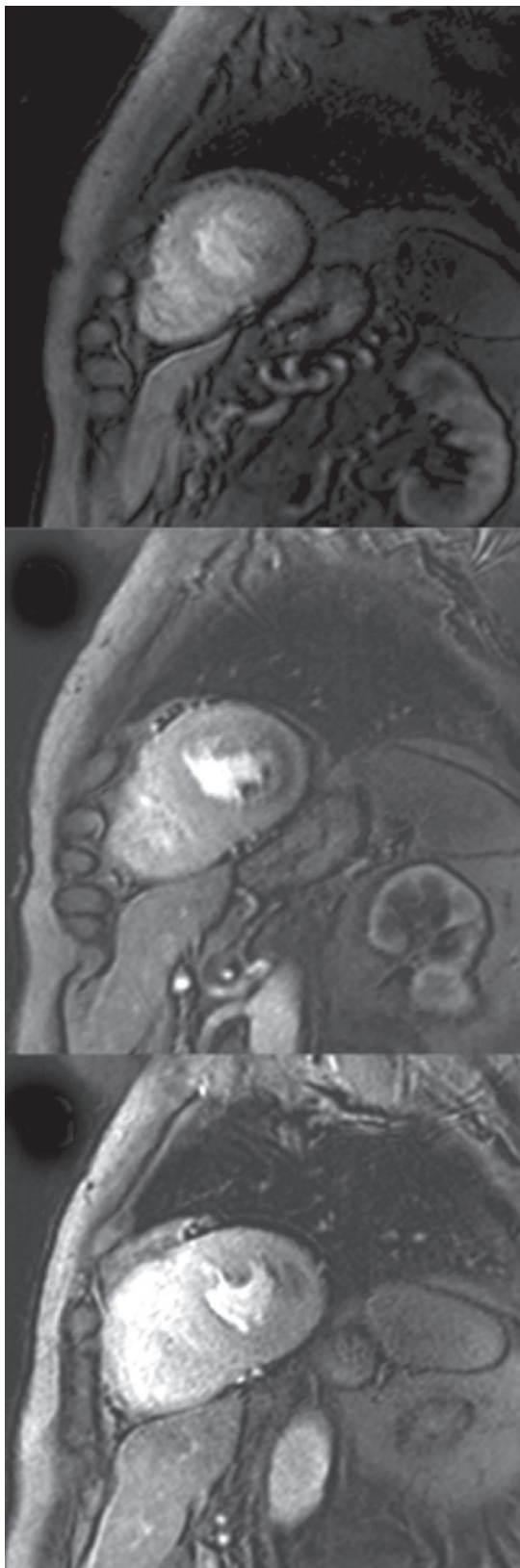


図 5 ガドリニウム造影剤 (GBCA) の初回循環の間に収集した3断面の左室短軸画像 (上: 心尖部、中央: 左室中央部、下: 心基部)。左室中央部と心基部のスライスの側壁に造影欠損が認められる。

1. 右室短軸像は左室短軸像と同様の方法で撮像可能である。右室容積計測に短軸像を使用する場合は、最も心基部側の短軸断面を右室心筋縁の直上にとることが重要である。
2. 右室長軸像としては、三尖弁流入部を通る右室垂直長軸像と右室流出路 (RVOT) 長軸像 (肺動脈弁を通る矢状断像またはオブリーク矢状断像) (図 4) などがある。
3. 右室容積計測には、右室全体を含む体軸横断像のシネ・スタックを代替的に用いることも可能である (図 4)。

初回循環パーフュージョン

1. 左室の形態と機能評価モジュールと同じスカウト像
2. パルスシークエンス: 典型的には bSSFP 法、GRE 法、GRE-EPI ハイブリッド法のいずれかによる サチュレーション・リカバリ (SR) MRI

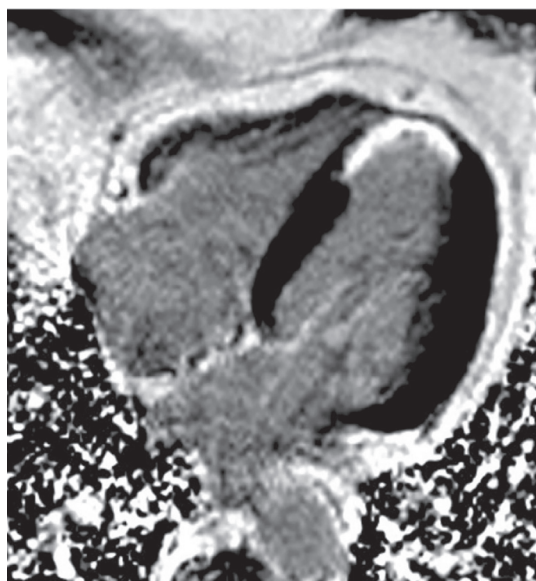


図 6 インバージョン・リカバリ GRE 法で撮像した遅延造影 MRI の四腔長軸像で、心尖部中隔と心尖に壁内深達度 50-75% の貫壁性梗塞を認める。

3. 左室短軸像(1心拍で少なくとも3スライス)(図5)
 - a. 虚血の評価のために一心拍毎に画像収集を行う必要がある。
 - b. スライス厚:8-10mm
 - c. 可能であればパラレルイメージング使用
 - d. 面内空間分解能 <3mm
 - e. 時間分解能 <100-125ms、できるだけ短く設定
 - f. 造影剤0.05-0.1mmol/kg(3-7ml/sec)+ 生食30ml(3-7ml/sec)フラッシュ
 - g. 造影剤が心筋に到達する前に呼吸停止開始
 - h. 造影剤が左室心筋を通過するまで十分な枚数の画像を収集する。(典型的には最低でも50-60心拍にわたり画像を収集。心拍量が低い患者ではそれよりも多くの画像を取得する必要があるかもしれない)。
 - i. オプション:自由呼吸下でも撮像は可能。特にモーションコレクションが使用できる場合。

遅延造影

1. パルスシーケンス
 - a. 呼吸停止が十分可能な患者では、SNRが十分であれば、2Dインバージョン・リカバリ(IR)GRE法、2D IR SSFP法、PSIR法、あるいは3D法で撮像する。
 - b. 不整脈がある患者や呼吸停止が困難な患者では、シングルショットbSSFP法で代替または追加する。
2. 造影剤注入後、少なくとも10分待つ(ガドリニウム造影剤投与量は表1参照)。注記:造影剤投与量が少ない場合には、血液(訳注:及び心筋細胞外液)の造影剤濃度が低く、十分な病変描出能が得られないため、待ち時間を10分より短くしてもよい。一般的には拡張期静止時間に撮像する。注記:負荷と安静時のパーフュージョンMRIを撮像する場合、2回目の造影剤を注入してからの待ち時間は約5分でよい。
3. シネMRIと同じ撮像断面(左室短軸像、左室長軸像)(図6)
4. シネMRIと同じスライス厚
5. 面内空間分解能~1.4-1.8mm

6. 心電図上のR-R間隔内の収集時間は200ms、ただし頻脈の際にはそれ以下とする。
7. 正常心筋の信号強度がゼロとなるようにインバージョン時間(TI)を設定する。「TIスカウト」は、R波の直後にインバージョンパルスを印加し、TIを様々に変えて収集した画像をシネ表示するシーケンスであるが。これを用いると、TIを設定する際の目安とすることができ。しかし、TIスカウトシーケンスは通常、分割収集の遅延造影シーケンスと同一の画像収集パラメータではないため、正しいTIは2つのシーケンス間で最大50ms異なる可能性がある。あるいは、PSIR法を使用する。その場合は、TIの厳密な調節をする必要がない。
 - a. 長いTI(1.5Tで~550ms、3Tで850ms)を使用した撮像は、生存心筋とno-reflow領域(訳注:MO(microvascular obstruction)のことを示している)や壁在血栓を区別するのに有用である。
 - b. 短いTI(~200ms)とPSIRを用いた撮像は、心内膜下梗塞の鑑別に有用である。
8. 通常2心拍に1回画像収集するが、徐脈(60回/分未満)の場合には1心拍毎に変更する。また、頻脈(100回/分以上)や不整脈の場合には3心拍毎に設定する。
9. ダークブラッド遅延造影(オプション)
 - a. 従来の遅延造影MRIと比較して、血流信号を抑制するダークブラッド技術は、心内膜下の遅延造影を血液と区別することに役立つ可能性がある。
 - b. 設定は、TI(使用する特定のシーケンスに応じて設定される)以外は、従来の遅延造影MRIと同様である。

負荷パーフュージョンMRI(血管拡張薬)

1. 左室の形態と機能(代替として、負荷時と安静時のパーフュージョンMRIの間に実施してもよいが、ガドリニウム造影剤注入直後は、心内膜縁と左室内血液のコントラストを低下させる可能性がある。)
2. アデノシン負荷パーフュージョンMRI:オプション・アデノシン注入は、ガントリ外で開始し、注入後半に患者をガントリ内に移動してしてもよい。
 - a. 初回循環パーフュージョン
 - b. アデノシン負荷の終了1分前に造影剤を注入する。

- c. ジピリダモールの場合も同様の方法で投与する。
- 3. 代替法:リガデノソン負荷パーフュージョンMRI(0.4mgのボラス投与)
 - a. 初回循環パーフュージョン
 - b. リガデノソンを投与して45-60s後にガドリニウム造影剤を投与する。
- 4. 安静時パーフュージョンMRI
 - a. 負荷パーフュージョンMRIの造影剤がウォッシュアウトされるまで少なくとも10分は待つ。待ち時間を利用してMRIの追加撮像(長軸像など)を行うとよい。
 - b. アデノシン/リガデノソンを使用せず、同量のガドリニウム造影剤を使用して安静時パーフュージョンMRIを撮像する。
 - c. 施設の方針や経験によっては、安静時パーフュージョンMRIを省略することができる。安静時のスキューンはほとんど情報を付加しないので、可能な限り省略すべきであるというデータが増えてきている。
 - d. 遅延造影MRIを行うために、造影剤を投与総量が $0.1-0.2\text{mmol/kg}$ となるように追加投与する。
- 5. 遅延造影モジュール
 - a. 安静時パーフュージョンMRIが実施された場合、その後、少なくとも5分待ってから撮像する。
- 6. オプションー心筋血流定量解析
 - a. 造影剤濃度と信号強度の非直線効果を軽減する

ためにデュアルボラス法もしくはデュアルシーケンス法の実施を考慮する。この方法は標準化された方法で希釈したプレボラスの注入が必要である。

- b. 造影剤投与前にプロトン強調画像の追加撮像を考慮する。この方法は定量解析時のベースライン補正に使用できる。ただし、特定のMRI装置やソフトウェアが必要になる。

負荷機能検査(ドブタミンもしくは運動負荷)

1. 左室の形態と機能
2. ドブタミン負荷(1.2 負荷薬剤の項参照)
 - a. ドブタミンを $10\mu\text{g/kg/min}$ から開始し、3分間ごとに $10\mu\text{g/kg/min}$ ずつ、目標心拍数 $[85\% \times (220-\text{age})]$ に達するまで増量する。
 - b. 心拍数増加が不十分の場合、アトロピンを 0.5mg ずつ追加する。
 - c. ドブタミン投与量を増加する毎にシネMRI(左室短軸像3断面、左室長軸像3断面)を撮像する。これらは、低心拍数では呼吸停止またはリアルタイムで取得することができますが、高心拍数では、時間分解能を向上させることができるため、呼吸停止での撮像が推奨されています。
 - d. 心電図モニタリングと血圧計測を、各ステージで行う。

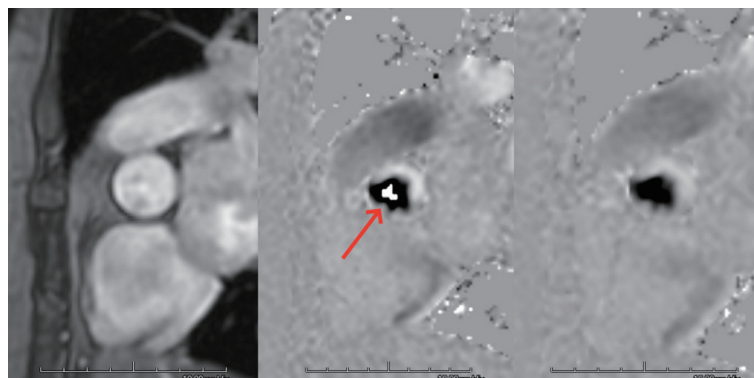


図 7 大動脈弁狭窄症患者のSTJ (sinotubular junction)で撮像された速度エンコード血流定量シーケンス。最初の画像(マグニチュード画像[左]と速度画像[中央])は、 $\text{VENC}=250\text{ cm/s}$ で撮影したものである。折り返り(赤矢印)があきらかでありVENCが短すぎる。再撮像した画像(右)は、VENCを 350m/s 上げて撮像したもので、折り返りは消失している。

- e. シネ画像は撮像後すぐに確認する。
 - f. 心拍数の増加に応じてbSSFPシネMRIの時間分解能の設定を適宜変更する。
 - g. 新たな壁運動異常が見られた場合、や重篤な副作用が起きた場合、目標心拍数に達した場合に検査を終了する。
3. 代替法: MRI検査室内でCMR対応トレッドミルを用いてトレッドミル運動を行う。ベースライン時とピーク運動負荷後に左室短軸像3断面、左室長軸像3断面を撮像する。運動負荷後の撮像では、bSSFPシネシーケンスの時間分解能を短縮する必要がある。
 4. 代替法: MRI検査室内あるいは検査台上でCMR対応エルゴメーターを用いて仰臥位で自転車こぎ運動を行う。ベースライン時とピーク運動負荷後に左室短軸像3断面、左室長軸像3断面を撮像する。運動負荷後の撮像では、bSSFPシネシーケンスの時間分解能を短縮する必要がある。

負荷機能検査(ドブタミンもしくは運動負荷)

1. 通常CMRプロトコールと組み合わせて行われる。すでに撮像されている画像を参照して撮像断面を決定する。対象血管が2方向の断面で描出されているか、MRAがスキナ上で再構成可能であればベストである(追加のbSSFPシネMRI、造影MRA、シングルショットのブラックブラッドMRIなどが役に立つ)。
2. シークエンス: 一方向(撮像断面に垂直な方向)に流速エンコードされた位相コントラスト・シネGRE法が最もよく使用される(図7)。
3. 最適な結果を得るためには:
 - a. 対象血管が中央に位置するように撮像断面を合わせる。
 - b. 予想される血流方向に対して撮像断面が垂直になるように2方向の参照断面から撮像断面を設定する。
 - c. 撮像断面をMR装置のアイソセンターに合わせる。
4. 撮像パラメータ: スライス厚5-8mm; 撮像面内の空間分解能は少なくとも血管径の1/10以下にする。Vencは予想される流速に合わせる。一折り返しが出ないだけ小さい値を使用する。スキャンごとに位相差画

像を参照して折り返しがないか確認する。もし折り返しが見られた場合は、Vencを、折り返しが無いように調節して再撮像する。速度スカウト(Velocity scout)が使用できれば最適なVencの選択が容易になる。

5. 位相間の時間分解能は50ms未満が好ましい。時間分解能は、実際に取得されるフレーム間の時間として計算されるべきである。多くのベンダーは、画像補間による余分なフレームの作成を可能にしているが、これは時間分解能を人為的に向上させるだけである。レトロスペクティブ同期は、心周期全体をカバーし、より便利であるが、不整脈に関連する不正確さを不明瞭にする可能性がある。
6. 呼吸停止ができる範囲内で多心拍にわたってk空間の分割を行ってもよい。一方で、ナビゲータエコーを用いた自由呼吸撮像も可能で時間分解能、空間分解能を上げることができる。また、複数のシグナル平均値(NEX, NSA)を用いた自由呼吸の撮像は、呼吸停止の能力が制限された患者において有用であることが証明されている。
7. TEは可能な限り短く設定する(特に狭窄部位を撮像する場合)。
8. 可能なら、4D Flow CMRの撮像を検討する。4D Flow CMRは、より簡便に利用できるようになってきており、臨床における特定の状況ではユニークな洞察を可能にする。

組織性状診断

組織性状診断の領域は急速に進歩しており、使用できるパルスシーケンスはメーカー間でかなり異なっている。1.5Tと3Tでは撮影方法は同様であるが、測定値は、1.5Tと3Tでは異なり、施設間でも異なる可能性がある。したがって、以下に列記するのは、標準化が進む中での一般的なガイドラインに過ぎない。正常値は各施設で決定する必要がある。最適な画像を得るために、特に3Tでは、撮像前に手動シミングの実施が考慮される。詳細な推奨事項については、[7]を参照。

1. T1マッピング
 - a. 非造影でネイティブT1マッピングを行う。
 - b. Look Locker imaging(modified Look

Locker Inversion recovery (MOLLI)、shorted MOLLI (ShMOLLI)、または、これらに相当するシーケンスを使用)

- c. 心房細動の場合は収縮期での撮像が好ましいが、この場合を除くと、拡張期の撮像がベストである。頻脈の患者では、頻脈用のスキームを使用すべきである(訳注;高心拍数でT1値を過小評価するスキームを避ける)。
- d. 元画像は動きやアーチファクトがないかチェックし、これらが発生した場合は撮像を再度行う必要がある。
- e. スライス厚:6-8mm、面内分解能:1.6-2.0mm
- f. 得られたスライスの数と向きは、適応に応じて決定される。少なくとも短軸像1つ必ず撮像する必要がある。
- g. 細胞外容積を測定する場合は、T1マッピングを造影前に行い、造影剤投与後10分から30分の間にさらにT1マッピングを少なくとも1回は行う。
- h. 正確な細胞外容積(extracellular volume fraction; ECV)測定のために、ヘマトクリットは、理想的には撮像から24時間以内に測定する必要がある。

2. T2マッピングとT2強調画像

- a. T2マッピング:定量化が望ましく、撮像シーケンスが利用可能な場合
 - i. 多くの代替法がある。異なるT2-prep timeを用いたT2-prepシングルショットSSFP法、グラディエント・スピネコー (GraSE)法、FSEベースのシーケンスなど。
 - ii. 動き補正を必要に応じて行う
 - iii. スライス厚:6-8mm、面分解能:1.6-2.0mm
 - iv. 得られたスライスの数と向きは、適応に応じて決定される。必ず短軸増で撮像する。
- b. T2強調画像
 - i. ブラックブラッドT2 STIR
 1. ピットフォール:血流低下領域の高信号や動きのアーチファクトによる信号低下、心筋内出血のある領域の低信号
 - ii. ブライトブラッドT2強調シーケンス
 1. T2-prepシングルショットSSFP法

2. FSE-bSSFPハイブリッドシーケンスでも可。

3. ピットフォール-心内膜縁で高信号が不明瞭になることがある。

3. T2*マッピング

- a. T2*マッピングは造影剤投与前に撮像する。
- b. パルスシーケンス:1回呼吸停止によるGRE法。2msから18ms程度の中に連続した6~9エコー時間、かつ、各エコー間隔は2ms程度としたマルチエコー法による撮影。典型的にはR波からの遅延時間は0msを使用。
- c. オプション-高度の心筋鉄沈着がある患者では、より短いエコー間隔のほうがT2*値をより正確に計測できる。1msから12ms程度の中に連続した6~9エコー時間。各エコー間隔は1ms程度)。
- d. 左室中央レベル短軸画像1スライスを撮像する。
- e. スライス厚 8-10mm;面内空間分解能<1.6-3.0mm
- f. (オプション)心電図同期なしで上記と同様の撮像シーケンスを用いて、肝中央レベルの体軸横断像を1スライス撮像し、肝への鉄沈着を評価する。心電図同期しないことによりエコー間隔が短く設定でき多くのエコー数が得られる。

高速プロトコール

1.5TのMRI装置の高速プロトコールが開発され、心筋症の評価に应用されることに成功している。心筋症に加えて、高速プロトコールを適用できる疾患としては、慢性虚血性心疾患におけるバイアビリティ評価や高血圧性心疾患があります。このプロトコールは検査時間を短縮し、費用対効果を向上する。検証されたプロトコールを以下に示す。

1. ロクライザ、二腔スカウト画像、3スライス短軸スタックスカウト画像、解剖学的評価のための体軸横断ダークブラッド・シングルショットFSEのスタック。
2. シネMRI:四腔像、二腔像、三腔像および大動脈弁でのk空間分割収集によるシネMRI。
3. 適切な投与量でのガドリニウム造影剤投与
4. シネMRI:短軸シネ・スタック(スライス厚 7mm;スライス間ギャップ 3mm)。k空間分割収集。
5. 遅延造影MRI:

- a. 最適なインバージョン時間を決定するためのオプションシーケンス (訳注; TIスカウト)
- b. k空間分割収集によるPSIR法の遅延造影MRI。標準的な長軸像および短軸像。

疾患別プロトコール

虚血性心疾患

CMRは、急性心筋障害において虚血性の病態とその他様々な非虚血性の病態とを区別するのに有用である。心筋梗塞(MI)の診断がついた後でも、CMRは心筋バイアビリティ、気絶心筋、微小血管障害の同定に役立つ可能性がある。また、左室内血栓、左室の心室瘤や仮性瘤の形成、心膜炎などの心筋梗塞後の後遺症も容易に同定できる。

急性心筋梗塞または急性冠症候群

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断—オプションだが、急性の壊死性損傷を伴う浮腫/炎症の評価に頻繁に使用される。
3. オプション—心筋パーフュージョンMRI (安静時のみ)。すでに責任冠動脈病変に対して再灌流療法が施行されている場合は、非梗塞領域の虚血評価のために負荷心筋パーフュージョンMRIを検討。
4. オプション—早期の微小循環閉塞(MVO)を診断するため、早期ガドリニウム造影MRIを造影剤注入後1-3分以内に撮像する。
5. 遅延造影MRI

慢性虚血性心疾患と心筋バイアビリティ

CMRの一般的な目的は、左室の形態、収縮能、心筋バイアビリティ、虚血を診断することである。経過観察の撮影をすることにより、発症後または治療介入後の心筋梗塞や虚血の評価だけでなく、心筋リモデリングの変化の評価にも役立つ。また、左室内血栓の検出も重要である。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断—オプションだが、他の潜在的な病態を除外するために使用される。
3. オプション—低用量ドブタミン負荷MRI。ドブタミン2.5-10 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ を5-10分間投与し、局所心筋壁

厚増加率の改善から心筋収縮予備能を評価する。

4. オプション—血管拡張薬を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
5. 遅延造影MRI

非虚血性心筋症

肥大型心筋症 (HCM)

肥大型心筋症を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能、最大左室壁厚を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)心筋線維化を評価すること、左室流出路の圧較差を計測することである。

1. 左室の形態と機能
2. 左室流出路の評価。左室流出路の乱流や僧房弁前尖・腱索の収縮期前方運動の有無を三腔像のbSSFPシネMRIで評価する。これらが認められる場合、位相コントラスト・シネMRIで血流速度を計測する(三腔像でのインプレートの撮像または、左室流出路に垂直な断面でのスループレーンでの撮像)。
3. 組織性状診断—オプションだが、よく使用される。
4. オプション—虚血性心疾患の併存が考慮される場合、血管拡張薬による負荷パーフュージョンMRIを検討。
5. 遅延造影MRI

高血圧性心疾患 (HHD)

高血圧性心疾患を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室壁厚、左室容積を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)心筋線維化を評価することである。

1. 組織性状診断—オプションだが、よく使用される。
2. オプション—血管拡張薬を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
3. オプション—二次性高血圧症の除外のための大動脈と腎動脈のMRA
4. 遅延造影MRI

左室緻密化障害 (LVNC)

左室緻密化障害を撮像する目的は、肉注を評価すること、緻

密部と非緻密部の壁厚、左室容積、左室全体の機能を評価すること、(遅延造影MRIにより)左室内血栓と心筋線維化を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断—オプションだが、他の潜在的な病態を除外するために使用される。
3. オプション—血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
4. 遅延造影MRI

拡張型心筋症 (DCM)

拡張型心筋症を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)心筋線維化を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断—オプションだが、よく使用される。
3. オプション—血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
4. 遅延造影MRI

不整脈源性心筋症 (AVC)

AVCを撮像する目的は、(シネMRIにより)右室と左室の容積、全体あるいは局所の機能を計測すること、(遅延造影MRIにより)線維化を評価することである。

1. 左室の形態と機能—スライス厚:5-6mm
2. 右室流出路を含み右室全体がカバーされた体軸横断像または斜体軸横断像のbSSFPシネMRI。三尖弁の流入部を含んだ右室垂直長軸像が推奨される。
3. オプション
 - a. 体軸横断又は斜体軸横断ブラックブラッドMRI (Double IR T1強調高速スピネコー)
 - b. 脂肪抑制像を用いて、同じスライス面の撮像をくり返す。
4. 遅延造影MRI。右室心筋の信号強度がゼロとなるようにTIを調節する。

鉄沈着症性心筋症

鉄沈着症性心筋症を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(T2*マッピングにより)鉄沈着を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. T2*マッピングを使用した組織性状診断
3. 血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
4. オプション—遅延造影MRI(左室や右室の駆出率に異常があれば検討)

拘束型心筋症 (RCM)

RCMを撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)線維化と浸潤を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断—オプションだが、よく使用される。
3. 遅延造影MRI
4. オプション(収縮性生理機能を除外するため)—異常な心室間相互依存を評価するために、動的な呼吸法を行っている間にリアルタイムシネMRI(左室中央部の短軸像)を撮像する。

心サルコイドーシス

心サルコイドーシスを撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)線維化を評価すること、(T2強調画像やT2マッピングにより)炎症/浮腫を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断
3. 遅延造影MRI

心筋炎

心筋炎を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、

左室容積、左室全体および局所の機能を計測すること、(T2強調画像やT2マッピングにより)炎症/浮腫を評価すること、(T1マッピング、遅延造影MRIにより)間質スペースの増加を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断
3. オプションー早期ガドリニウム造影MRI
4. 遅延造影MRI

がん関連性心筋症

がん関連性心筋症を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRIやT1マッピングにより)心筋線維化を評価することである。化学療法薬剤による心筋症や心筋炎が考慮される場合は、(T2強調画像またはT2マッピングにより)急性/亜急性期の炎症/浮腫を評価する。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断ーオプションだが、よく使用される。
3. オプションー血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
4. 遅延造影MRI

麻薬関連心筋症

麻薬関連心筋症を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRIとT1マッピングにより)線維化を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断ーオプションだが、よく使用される。
3. オプションー血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIあるいは高用量ドブタミン負荷シネMRIを行い、虚血の有無を診断。
4. 遅延造影MRI

心臓移植後心

心臓移植後心を撮像する目的は、(シネMRIにより)左室心筋重量、左室容積、左室全体の機能を計測すること、(遅延造影MRI

とT1マッピングにより)線維化を評価すること、(T2強調画像またはT2マッピングにより)炎症/浮腫を評価することである。

1. 左室の形態と機能
2. 組織性状診断ーオプションだが、よく使用される。
3. オプションー血管拡張剤を用いた負荷・安静時パーフュージョンMRIで虚血の有無を診断。
4. 遅延造影MRI

血管疾患

末梢MRA

1. 四肢末梢血管用コイル、あるいは、複数のコイルを組み合わせて用いる。
2. 体軸横断面の低空間分解能血管スカウト像をタイム・オブ・フライトMRAないしbSSFP法で撮像する。
3. ガドリニウム造影時の撮像タイミング
 - a. オプション1ー腹部大動脈遠位レベルにおいて体軸横断面でテストスキャンを行う。ガドリニウム造影剤2mlと生食フラッシュ20mlを注入して、造影剤注入開始から造影剤濃度が最高となるまでの時間を決定する。
 - b. オプション2ーボーラトリガー法を用いて自動的に撮像開始する。
4. 腹部大動脈の中央部レベルから両足までの冠状断・テーブル移動造影MRAを撮像する。
 - a. サブトラクションを行うために造影前と造影剤注入中の2回、3D画像収集を行う。
 - b. 静脈のコンタミネーションを減少させるためにガドリニウム造影剤注入速度を2段階に変化させて注入し、その後生食でフラッシュする。
 - c. スライス厚 1-1.5mm、面内空間分解能 0.8-1.5mm
 - d. スライス枚数は通常60-100枚程度で対象となる血管に合わせて調節する。
 - e. 腹部・骨盤～大腿の比較的太い動脈MRAの空間分解能は比較的粗くてもよいが、下肢血管MRAの空間分解能は1mm以下が望ましい。腹部・骨盤～大腿の血管の撮像には通常15-20秒で完了するが、下肢血管の撮像には高空間分解能を得るために60-90秒間かかる場合もある。エリプティカルセントリックk空間データ収集法は下肢

の撮像に有利である。可能であれば下肢血管にはタイムリゾルブド法を用いることが望ましい。

- f. パラレル収集が望ましい。(マルチチャンネルコイルが必要)

代替法:2回注入法

- 1倍量のカドミウム造影剤を投与して下腿～足のタイムリゾルブド造影MRAを行う。
- 次に1倍量のカドミウム造影剤を再度投与して腹部～大腿の造影MRAを撮像する。

代替法:非造影MRA

非造影MRA法は急速に進化しており、古い手法の修正や新しい手法が常に提案されている。いくつかの技術はほとんどの臨床CMRシステムで利用可能であるが、他のシーケンスと同様に、メーカー固有の命名法のため、一般的な説明が困難である。多くの新技術は、市販品としては、限られたメーカーのみから提供されている。

1. “Fresh Blood Imaging (FBI法)”;心電図同期3D高速スピネコー法を、一つは収縮期、もう一つは拡張期に同期させて2種類撮像する。拡張期画像から収縮期画像を差分して、動脈信号のみの画像データを得る。この技術は、メーカー固有の名称を使用して、ほとんどの臨床CMRシステムで利用可能である。
 - a. スライス厚 2mm、面内空間分解能 0.6-0.8mm
 - b. スライス枚数は通常40枚—対象となる血管に合わせて調節する。
 - c. パラレル収集が望ましい。(マルチチャンネルコイルが必要)
2. 3D IR SSFP法;IRパルスで背景信号を抑制し、適当なTIを用いることで、IRパルス照射範囲外から撮像範囲内に流入する動脈血の流入を描出可能とすることで高い動脈信号が得られる。この方法は撮像容積が小さい場合に適している。
 - a. 撮像ボリューム340x300x70mm、空間分解能 1.3x1.3x1.4mm
 - b. パラレル収集が望ましい。(マルチチャンネルコイルが必要)

3. Quiescent Interval slice selective (QISS) MRAは、心電図同期2Dマルチスライスインフロー法である。体軸横断スライスの複数グループを、骨盤から足まで徐々にテーブル移動することでカバーし撮像する。このシーケンスは、静脈血流と静止組織の信号を抑制するために磁化プリパルスを使用し、動脈信号はシングルショットbSSFP法を使用して収集する。
 - a. スライス厚 2mm、面内空間分解能 1.0-1.2mm
 - b. パラレル収集がルーチンである

胸部大動脈MRA

1. ロクライザ、3方向
2. シングルショット・ブラックブラッドまたはbSSFP法 (一回呼吸停止、胸部全体)。体軸横断像。
3. 大動脈全体をカバーするT1強調高速SEまたはGRE法体軸横断像(壁内血腫や大動脈解離の診断)
4. 大動脈に平行な傍矢状断のbSSFPシネ画像。オプションで3ポイント位置決めを使用。
5. 弁疾患のプロトコールで大動脈弁を評価する。
6. 造影タイミング
 - a. オプション 1—胸部大動脈の体軸横断/矢状断にてテストスキャンを行う。カドミウム造影剤 2ml続いて生食20mlを注入して、造影剤注入開始から造影剤濃度が最高となるまでの時間を決定する。
 - b. オプション2—自動トリガー法を用いて自動的に撮像開始する。
 - c. オプション3—タイミングシーケンスを用いない高速多時相3D収集
7. 3D造影MRA(造影剤0.1-0.2mmol/kg)
 - a. 空間分解能は少なくとも1-1.5mm
 - b. 可能であればパラレル収集
 - c. 可能であれば心電図同期
 - d. 造影後少なくとも2回撮像
8. オプション—大動脈炎の診断では造影後脂肪抑制T1強調像の体軸横断像を撮像する。
9. オプション—非造影MRA.3.2.1(末梢血管MRA)参照。

冠動脈

1. 左室の形態と機能—左室壁運動異常の評価

- a. RCAの静止時間を正確に決定するために、高時間分解能(1フェーズ20ms以下)で四腔長軸像を追加撮像する。

2. ナビゲータエコー自由呼吸3D MRA

- a. 主肺動脈近位レベルから右房中央部レベルまでの範囲(必要あれば心臓全体)の体軸横断像。スライス厚:1-1.5mm、面内空間分解能:約1.0mm。通常、脂肪抑制が使用される。
- b. スライス枚数:通常50-80程度で、対象とする血管が含まれるように調節。
- c. 心電図同期撮影におけるR波遅延時間とデータ収集幅を高時間分解能における冠動脈静止時間から決定する。
- d. パラレル収集が望ましい。
- e. ナビゲータは右横隔膜上に設定する。
- f. オプション—造影後に撮影された場合、血管の描出が顕著になる。CMRでの冠動脈撮像はスキャン時間が比較的長い場合、ボラス注入は推奨されない。

3. オプション

- a. 画質不良の場合、ナビゲータ法が使用できない場合、ナビゲータ法の信号不良の場合には呼吸停止にて撮像する。
- b. 心筋と血管の信号を抑制するためにT2-prep法が有用かもしれない。

肺静脈のMRI評価—アブレーション前後

1. 左室の形態と機能(オプション)

2. 肺静脈と左房全体を含む冠状断の呼吸停止3D造影MRA—呼吸停止が可能な範囲でできるだけ前方までカバーする。

- a. オプション—オブリーク像にして肺静脈が中心にくるようにすればスラブ厚、呼吸停止時間を減らすことができるが、左心房が含まれる範囲は少なくなる。
- b. オプション—心電図同期収集。不整脈がある場合、収縮期に同期させて収集(トリガーディレイなし)。
- c. 2-3回の3Dボリューム撮像。サブトラクション用

に造影前に1回撮像し、造影剤の初回循環時に1回、オプションで造影後にもう1回撮像する。

- d. タイムリゾルブド多時相MRA—収集と造影剤投与を同時に開始する;この方法では分離された肺静脈相の画像が得られ、再構成してアブレーション用のマッピングソフトと統合できる。
- e. ガドリニウム造影剤(0.1-0.2mmol/kg)を2-3ml/sで注入
- f. スライス厚:1-2mm、面内空間分解能:1-1.5mm
- g. スライス枚数:通常60-80程度、対象とする血管領域が含まれるように調節。

3. オプション—それぞれの肺静脈について位相コントラストMRIによる血流解析を行う。

4. オプション—左房壁の遅延造影MRI

その他

弁疾患

1.5Tや3TのCMRは人工弁の患者にも安全に施行できる。心拍出によって弁にかかる圧力は、磁場による力より何倍も強い。

1. 一般的なアプローチ

- a. 弁の形態評価は、精査する弁の弁輪が面内に含まれるスライス断面でSSFPシネMRIを撮像して行う。以下に説明するように、撮像断面の角度と高さが最適になるように注意する。
- b. 注記—窄症弁の弁口面積測定を行う場合、ジェットの本軸を横断する断面で、弁開口レベルからすぐ下流側まで連続あるいはやや重複したシネ画像のスタックを撮像することが望ましい。弁口面積測定は、ジェットの断面でなく、弁開口部の断面が明瞭に描出されている場合に最も妥当である。
- c. GRE法あるいはハイブリッド GRE/EPI法を用いると感度よく逆流のジェットを描出できる(定性的評価のみ)。
- d. 速度エンコード画像では、速度と方向を定量的に計測できる。実際の血流速度に合わせてVencを調節する(折り返しが生じない範囲で出来るだけ小さい値のVencを用いる)。
- e. 高速のジェット血流の計測にはTEをできるだけ短く設定する。

2. 弁による特異的なアプローチ (訳注; 原文に多くの誤りが含まれており参照時は注意が必要)

a. 僧帽弁

i. 逆流

1. 左室の形態と機能
2. 速度エンコード画像を、大動脈弁に垂直な断面で、拡張末期のSTジャンクションの高さで撮影する (訳注; 原文に誤りがあると思われる)。心周期全体をカバーするためには、レトロスペクティブな心電図同期が必要。

ii. 狭窄

1. 速度エンコード画像 (スループレーンの速度エンコード) を、僧帽弁に平行かつ乱流が最大となる断面 (僧帽弁を含む断面の長軸シネで同定する) で撮影する。
2. 代替として、僧帽弁のジェットに平行かつこれを含む断面でインプレーンの速度エンコード画像を撮影する。

b. 大動脈弁

i. 逆流

1. 左室の形態と機能
 - a. 左室流出路像と冠状断像から決定される大動脈弁および大動脈根部の断面を用いて以下の撮像を行う。
2. 速度エンコード画像を、大動脈弁に垂直な断面で (訳注; 「平行な断面で」が正しいと思われる)、拡張末期の大動脈弁口面より約5mm上の断面で撮像する。心周期全体をカバーするためには、レトロスペクティブな心電図同期が必要。
3. 拡張期血流回転を評価するには、速度エンコード画像を、主肺動脈のレベルで下行大動脈に垂直な断面で撮像する。

ii. 狭窄

1. 速度エンコード画像 (スループレーンの速度エンコード) を、大動脈弁に平行かつ乱流が最大となる断面 (大動脈弁を含む断面の長軸シネで同定する) で撮影する。

2. 代替として、僧帽弁のジェットに平行かつこれを含む断面でインプレーンの速度エンコード画像を撮影する。

c. 三尖弁

i. 逆流

1. 右室の形態と機能
2. 速度エンコード画像を、肺動脈弁に垂直な断面で、拡張末期の肺動脈弁口面より約5mm上の断面で撮像する (訳注; 原文に誤りがあると思われる)。心周期全体をカバーするためには、レトロスペクティブな心電図同期が必要。

ii. 狭窄

1. 速度エンコード画像 (スループレーンの速度エンコード) を、三尖弁に平行かつ乱流が最大となる断面 (三尖弁を含む断面の長軸シネで同定する) で撮影する。
2. 代替として、三尖弁のジェットに平行かつこれを含む断面でインプレーンの速度エンコード画像を撮影する。

d. 肺動脈弁

i. 逆流

1. 右室の形態と機能
 - a. 右室流出路像と冠状断像から決定される肺動脈弁および肺動脈根部の断面を用いて以下の撮像を行う。
2. 速度エンコード画像を、肺動脈弁に垂直な断面で (訳注; 「平行な断面で」が正しいと思われる)、拡張末期の肺動脈弁口面より約5mm上の断面で撮像する。心周期全体をカバーするためには、レトロスペクティブな心電図同期が必要。

ii. 狭窄

1. 速度エンコード画像 (スループレーンの速度エンコード) を、肺動脈弁に平行かつ乱流が最大となる断面 (肺動脈弁を含む断面の長軸シネで同定する) で撮影する。
2. 代替として、肺動脈弁のジェットに平行かつこれを含む断面でインプレーンの速度エンコード画像を撮影する。

心膜疾患

1. 左室の形態と機能
2. T1強調あるいはT2強調ブラックブラッド高速スピニングエコーMRI(オプション;脂肪抑制あり、または、なし)
 - a. 2-3スライスの左室長軸像と、3-4スライスの左室短軸像で心膜の厚さを計測(正常≤3mm)。
 - b. 心膜嚢胞が鑑別疾患となる場合には、腫瘍プロトコルを参照すること。
3. オプションー心膜肥厚あれば、心膜と心外膜とのすべりと癒着の有無をみるために、T1強調GREタギング・シネMRI(2-3スライスの左室長軸像と、1-2スライスの左室短軸像)を撮像する。
4. 心室運動と呼吸の相互依存関係を評価するために、自由呼吸下リアルタイム短軸画像を撮像する。
 - a. 左室中央レベルでの左室短軸像が望ましい。
 - b. リアルタイムシネMRIの時間分解能は60ms以下が望ましい。
 - c. 患者に深呼吸を繰り返すように指示し撮像時間内に2サイクル以上の呼吸を行う。
 - d. 中隔の異常運動(拡張早期の中隔の平坦化、左室腔側への膨隆)が認められた場合は収縮性心膜炎が示唆される。
 - e. 遅延造影MRI
 - a. 脂肪抑制ありの撮影と脂肪抑制なしの撮像を行うと、心臓周囲の脂肪組織と心膜の炎症とを区別しやすい。

- a. 血栓の信号をゼロにするようにTIを設定する(1.5Tで500-550ms程度、3Tで850-900ms程度)。腫瘍と血栓の鑑別に役立つ。腫瘍を取り囲むまたは腫瘍に関連する血栓を描出できる。
- b. 繰り返し遅延造影MRIを撮像すると血栓と血流の低下した腫瘍との鑑別に役立つ。

略語

Abbreviation	Description in English	日本語訳
ATP	Adenosine triphosphate	アデノシン三リン酸
AV	Atrial-ventricular	房室の
AVC	Arrhythmogenic ventricular cardiomyopathy	不整脈原性心室心筋症
bSSFP	Balanced steady state free precession	bSSFP*
CE	Contrast-enhanced	造影
CMR	Cardiovascular magnetic resonance	心臓MRI
ECG:	Electrocardiogram	心電図
ECV	Extracellular volume fraction	細胞外容積分画
EMA	European Medicines Agency	欧州医薬品庁
EPI	Echo planar imaging;	EPI*
FDA	Food and Drug Administration	アメリカ食品医薬品局
FSE	Fast spin echo	
GBCA	Gadolinium based contrast agent	ガドリニウム造影剤
GRAPPA	Generalized autocalibrating partially parallel acquisition	GRAPPA*
GraSE	Gradient and spin echo	GraSE*
GRE	Gradient echo	グラディエントエコー*
HCM	Hypertrophic cardiomyopathy	肥大型心筋症
HR	Heart rate	心拍数
ICD	Implanted cardiofibrillator	植え込み型除細動器

心臓および心臓周囲の腫瘍(血栓を含む)

1. 左室の形態と機能
2. T1強調高速スピニングエコーMRI:腫瘍および周囲の構造を含むスライス(スライス枚数は腫瘍のサイズによる)
3. 脂肪抑制T2強調高速スピニングエコーMRI(オプションで脂肪抑制なし)ー腫瘍および周囲の構造を含むスライス(同上)
4. 腫瘍を含むスライスで心筋パーフェュージョンMRI
5. 再度脂肪抑制T1強調高速スピニングエコーMRI
6. オプションー造影後bSSFPシネMRI
7. 遅延造影MRI

Abbreviation	Description in English	日本語訳
LGE	Late gadolinium enhancement	遅延造影
LV	Left ventricle/ left ventricular	左室/左室の
LVOT	Left ventricular outflow tract	左室流出路
MI	Myocardial infarction	心筋梗塞
MOLLI	Modified Look Locker inversion recovery	MOLLI*
MRA	Magnetic resonance angiography	MR血管造影
MVO	Microvascular obstruction	微小循環障害
NSF	Nephrogenic systemic fibrosis	腎性全身性線維症
PSIR	Phase sensitive inversion recovery	PSIR*
QISS	Quiescent interval slice selective	QISS*
RCA	Right coronary artery	右冠動脈
RV	Right ventricle/ right ventricular	右室/右室の
RVOT	Right ventricular outflow tract	右室流出路
SCMR	Society for Cardiovascular Magnetic Resonance	米国心臓血管MR学会
SENSE	Sensitivity encoding	SENSE*
shMOLLI	Shortened MOLLI	ShMOLLI*
SMASH	Simultaneous acquisition of spatial harmonics	SMASH*
SNR	Signal-to-noise ratio	信号雑音比
STIR	Short tau inversion recovery	STIR*
T1w	T1 weighted	T1強調
T2w	T2 weighted	T2強調
TE	Echo time	エコー時間
TI	Inversion time	インバージョン時間
Venc	Velocity encoding	速度エンコーディング

*: Name of a Sequence (撮像シーケンス名)

Abbreviations

ATP: Adenosinetriphosphate; AV: Atrial-ventricular; AVC: Arrhythmogenic ventricular cardiomyopathy; bSSFP: Balanced steady state free precession; CE: Contrast-enhanced; CMR: Cardiovascular magnetic resonance; ECG: Electrocardiogram; ECV: Extracellular volume fraction; EMA: European Medicines Agency; EPI: Echo planar imaging; FDA: Food and Drug Administration; FSE: Fast spin echo; GBCA: Gadolinium based contrast agent; GRAPPA: Generalized autocalibrating partially parallel acquisition; GraSE: Gradient and spin echo; GRE: Gradient echo; HCM: Hypertrophic cardiomyopathy; HR: Heart rate; ICD: Implanted cardioverter-defibrillator; LGE: Late gadolinium enhancement; LV: Left ventricle/left ventricular; LVOT: Left ventricular outflow tract; MI: Myocardial infarction; MOLLI: Modified Look Locker inversion recovery; MRA: Magnetic resonance angiography; MVO: Microvascular obstruction; NSF: Nephrogenic systemic fibrosis; PSIR: Phase sensitive inversion recovery; QISS: Quiescent interval slice selective; RCA: Right coronary artery; RV: Right ventricle/right ventricular; RVOT: Right ventricular outflow tract; SCMR: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance; SENSE: Sensitivity encoding; shMOLLI: Shortened MOLLI; SMASH: Simultaneous acquisition of spatial harmonics; SNR: Signal-to-noise ratio; STIR: Short tau inversion recovery; T1w: T1 weighted; T2w: T2 weighted; TE: Echo time; TI: Inversion time; Venc: Velocity encoding

Authors' contributions

CK MD – Biotelemetry – research grant. JB MD – Bayer – research grant, lecture fees; Philips Healthcare – research grant. CB-D MD – no disclosures. SF MD – Siemens Healthineers and Philips Healthcare – institutional research support. RK MD – Heart IT – board of directors; Siemens Healthineers – educational grant. EN MD – Bayer – research support, lecture fees; Amgen – lecture fees. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

None.

Availability of data and materials

Not applicable.

Ethics approval and consent to participate

Not applicable.

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹Cardiovascular Medicine, University of Virginia Health System, Lee Street, Box 800158, Charlottesville, VA 22908, USA. ²Department for Radiology, University Hospital Schleswig-Holstein, Lübeck, Germany. ³Cardiology, Bristol Royal Infirmary, Bristol, UK. ⁴Imaging Institute, and Heart and Vascular Institute, Cleveland Clinic, Cleveland, OH, USA. ⁵Duke Cardiovascular Magnetic Resonance Center, Duke University Medical Center, Durham, NC, USA. ⁶Institute for Experimental and Therapeutic Cardiovascular Imaging, University Hospital, Frankfurt, Germany.

Received: 18 December 2019 Accepted: 7 February 2020

Published online: 24 February 2020

参考文献

1. Kramer CM, Barkhausen J, Bucciarelli-Ducci C, Flamm SD, Kim RJ, Nagel E; Society for Cardiovascular Magnetic Resonance; Board of Trustees Task Force on Standardized Protocols. Standardized cardiovascular magnetic resonance (CMR) protocols: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020 Feb 24;22:17.
2. Pennell DJ et al. Clinical Indications for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J Cardiovasc Magn Reson* 2019; in press.
3. Hundley WG, Bluemke D, Bogaert JG, Friedrich MG, Higgins CB, Lawson MA,

- McConnell MV, Raman SV, van Rossum AC, Flamm S, Kramer CM, Nagel E, Neubauer S. Society for Cardiovascular Magnetic Resonance guidelines for reporting. cardiovascular magnetic resonance examinations. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2009 Mar 3;11:5.
4. Schulz-Menger J, Bluemke DA, Bremerich J, Flamm SD, Fogel MA, Friedrich MG, Kim RJ, von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Kramer CM, Pennell DJ, Plein S, Nagel E. Standardized image interpretation and post processing in cardiovascular magnetic resonance: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) board of trustees task force on standardized post processing. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2013 May 1;15:35.
 5. Fratz S, Chung T, Greil GF, Samyn MM, Taylor AM, Valsangiacomo Buechel ER, Yoo SJ, Powell AJ. Guidelines and protocols for cardiovascular magnetic resonance in children and adults with congenital heart disease: SCMR expert consensus group on congenital heart disease. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2013 Jun 13;15:51.
 6. https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Clinical-Resources/Contrast_Media.pdf. 2017.
 7. Messroghli DR, Moon JC, Ferreira VM, et al. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T1, T2, T2* and extracellular volume: a consensus statement by the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) endorsed by the European Association for Cardiovascular Imaging (EACVI). *J Cardiovasc Magn Reson*. 2017;19:75.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Ready to submit your research? Choose BMC and benefit from:

-
- fast, convenient online submission
- thorough peer review by experienced researchers in your field
- rapid publication on acceptance
- support for research data, including large and complex data types
- gold Open Access which fosters wider collaboration and increased citations
maximum visibility for your research: over 100M website views per year

At BMC, research is always in progress.

Learn more biomedcentral.com/submissions



<Translator/翻譯者>

Takanori Kokawa/粉川 嵩規

Department of Radiology, Mie University Hospital/

三重大学医学部附属病院 放射線科

<Reviewer/査読者>

Masaki Ishida/石田 正樹

Department of Radiology, Mie University Hospital/

三重大学医学部附属病院 放射線科

