

心臓と冠血管の MR 血流計測

佐久間 肇

三重大学医学部附属病院中央放射線部

はじめに

心臓や血管内の血流を非侵襲的に定量計測できることは MRI の大きな特長である。X 線 CT を用いて、ボーラス投与したヨード造影剤の動態から血流情報を得ることも不可能ではないが、MRI のように収縮期から拡張期まで刻々と変化する血流を計測することは困難である。ところで、心臓領域の血流計測にはドップラエコー法が広く用いられている。ドップラエコー法は非侵襲的でリアルタイム性が高く、ベッドサイドで手軽に実施でき、ピーク血流速度の計測に優れている。これに対し、MRI は血管に直交する撮影断面を用いて血流を計測できるため、血管の断面積と血流速度から血流量を正確に評価できる特長がある。したがって、心臓血管領域における MR 血流計測の適応は、骨や肺の陰となって超音波ビームの届かない箇所や、血流量を正確に求めたい場合が中心となる。このように心臓血管領域の MR 血流計測では、MRI とドップラエコー法の特徴をよく理解し、診断にうまく生かすことが求められる。本稿では、MRI による心臓血管領域の血流計測の方法と有用性について、冠動脈や冠静脈洞の血流計測を含めて解説する。

MR 血流計測の方法

1. 位相法による血流計測と Venc の設定

位相法による MR 血流計測法では、計測したい血流の方向にバイポーラ型の血流計測用傾斜磁場を付加し、傾斜磁場の極性を変えてデータを 2 回収集する¹⁾。得られた二つのデータの位相を比較すると、静止スピンでは同一であるが、移動するスピンでは速度に比例した位相差を生じる。位相法による MR 血流計測では、通常のマグニチュード画像に加えて位相差画像が再構成され、血流計測に用いられる。

血流速度が大きくなると位相変化が $\pm 180^\circ$ を超え、位相差画像において折り返し現象が生じる。この $\pm 180^\circ$ の位相変化に相当する計測可能最大速度を Venc と呼ぶ。Venc は血流計測用傾斜磁場の大きさや印加時間によって決まり、傾斜磁場の強度や印加時間を増大すると Venc は小さく、縮小すると Venc は大きくなる。遅い血流を計測する場合には傾斜磁場の強度又は印加時間を増大させる必要があり、傾斜磁場性能の高い MR 装置を用いると短いエコー時間 (TE) でアーチファクトの少ない画像が得られる。

MR 血流計測では Venc を適切に設定することが重要である。計測対象の血流速度の範囲を推測し、予想される最大血流速度の 1.5~2 倍程度に Venc を設定することが望ましい。Venc の設定が小さいと位相折り返しが生じるため血流計測が困難となる。また、Venc が大きすぎると位相差画像の S/N 比が低下する。

2. 位相コントラスト・シネ MRI

キーワード magnetic resonance imaging, coronary vessels, coronary artery disease, flow measurement, phase contrast imaging

シネ MRI に血流計測用傾斜磁場を付加したもので、収縮期から拡張期まで変化する血流を評価できる。k 空間分割収集を用いると、呼吸停止撮影も可能である。ナビゲーター-エコーによる呼吸同期撮影も用いられている。

ドップラエコー法では超音波ビームに平行の動きが計測されるのに対し、MRI では血流計測用傾斜磁場の方向を変えることによって、任意方向の速度成分を計測できる。心臓血管領域の MR 血流計測では、検査目的に応じて 1 軸方向のみの速度計測と 3 軸方向の速度計測を選択する。

血流量を計測する場合には血管に直交する断面を設定し、撮影断面に垂直方向 (= 血管に並行方向) に血流計測用傾斜磁場を加え、1 軸方向の速度計測を行う。血管内縁に沿って ROI を設定し、ROI の面積と平均速度の積から血流量が求められる。

一方、弁狭窄などの症例で、狭窄部の血流ジェットの最大速度から圧較差を求める場合には、ジェットの向きが一定しないため、3 軸方向の血流計測を行う必要がある。3 軸方向の速度計測には 1 軸方向の約 2 倍の撮影時間を要する。

3. マグニチュード・マス킹

臨床用 MR 装置では位相差画像が再構成される際にマグニチュード・マス킹が行われる場合がある。マグニチュード・マス킹後の位相差画像は、[速度]×[マグニチュード画像の信号強度]×定数を反映し、バックグラウンド領域などのノイズが抑制され、見かけの画質が改善される。しかし、位相差画像上の信号強度は速度と比例しなくなるため、MR 装置のコンソールやはん用の画像解析ソフトウェアを用いて血流を計測できない欠点がある。一部メーカーの製品パルスシーケンスでは、位相コントラスト・シネ MRI の際にマグニチュード・マス킹を解除できない仕様となってお

り、血流計測には専用の血流解析ソフトウェアを購入する必要がある。

心臓～大血管領域の MR 血流計測

1. 逆流性弁疾患の評価

大動脈弁逆流 (AR) の症例では、上行大動脈起始部において位相コントラスト・シネ MRI を撮像し、順行性とおよび逆行性の大動脈血流量を直接計測することにより、大動脈弁逆流血流量と逆流率を算出できる。僧帽弁逆流 (MR) の症例では、上行大動脈起始部における血流計測から左室流出血流量を、僧帽弁輪レベルにおける血流計測から左室流入血流量を求め、その差から僧帽弁逆流血流量を計測する。

2. 肺動脈血流の評価

位相コントラスト・シネ MRI は肺血流量の定量評価に有用である。正常では収縮期拡張期ともに肺動脈内に逆流血流はほとんど認められないが、肺高血圧の患者では収縮期肺動脈血流速度が正常よりも早期にピークに達し、拡張期だけでなく収縮期にも肺動脈内に逆流血流成分が認められる。また、心房中隔欠損などの先天性心疾患では、上行大動脈と肺動脈の血流量を位相コントラスト・シネ MRI を用いて計測することにより、左-右シャント血流量および肺-体血流量比 (Q_p/Q_s) を非侵襲的に計測できる (Figs. 1, 2)。

3. 大動脈側副血流量の定量

MR 血流計測は大動脈縮窄症における側副血流量の定量化と狭窄重症度の判定に有用である。正常例では位相コントラスト・シネ MR を用いて計測した下行大動脈遠位部の血流量は肋間動脈に流出する血流量のため近位部における血流量計測値よりやや小さい。一方、大動脈縮窄症では狭窄の重症度に応じて下行大動脈遠位部の血流量が逆に増加し、肋間動脈等による側副血流量を定量評価できる²⁾。

2003年8月4日受理

別刷請求先 〒514-8507 三重県津市江戸橋 2-174 三重大学医学部附属病院中央放射線部 佐久間 肇

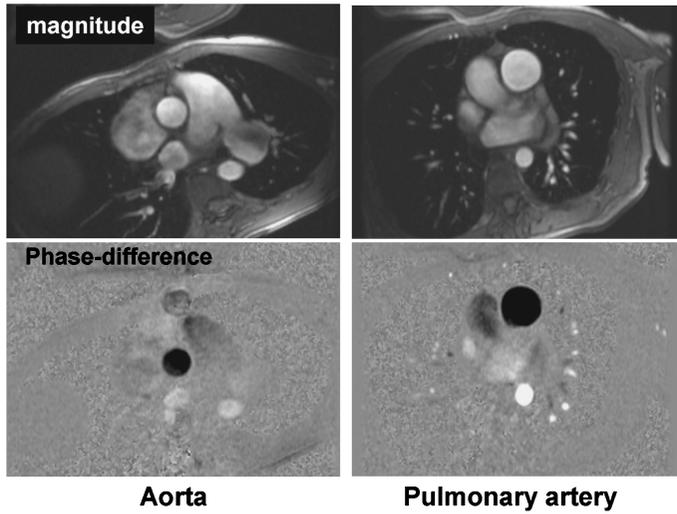


Fig. 1. Magnitude (top) and phase difference (bottom) MR images of the aorta and pulmonary artery acquired with breath-held phase contrast cine MR sequence in an adult patient with atrial septal defect (ASD).

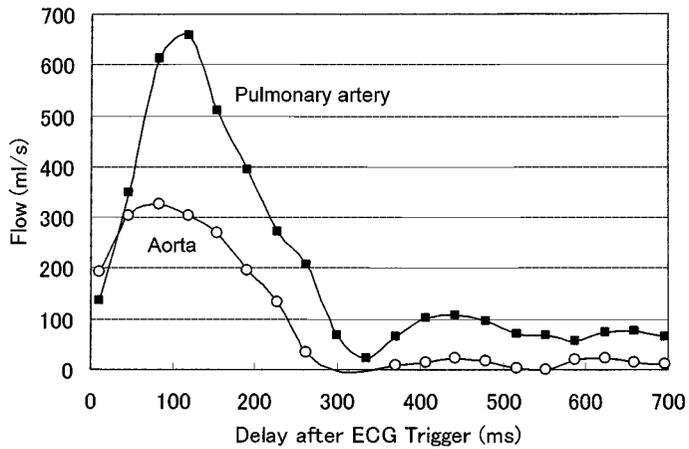


Fig. 2. Blood flow curves of the aorta and pulmonary artery measured with breath-held phase contrast cine MR sequence in an adult patient with atrial septal defect (ASD). Q_p/Q_s ratio was 2.0 in this case.

MRI による冠血流計測

- 冠動脈血流と冠血流予備能計測の意義
冠動脈狭窄の形態診断には X 線冠動脈造影

がゴールドスタンダードとして広く用いられているが、冠動脈の形態的狭窄度は機能的重症度と必ずしも一致しない³⁾。定量的冠動脈アンギオ (QCA) は読影者による狭窄診断のばらつ

きを抑える点で有用であるが、中等度狭窄の機能的重症度に関しては QCA を用いても正確に診断できない場合がある。中等度冠動脈狭窄の機能的重症度の診断は、PTCA やバイパスグラフトなどの治療適応の決定に大きな影響を及ぼすため、臨床的にも重要な問題となる。

冠動脈狭窄の機能的重症度は冠血流予備能 (= 負荷後最大冠血流量/安静時冠血流 coronary flow reserve) によって定量的に評価できる⁴⁾。正常冠循環においてアデノシンやジピリダモールを投与すると心筋内の細動脈レベルの抵抗血管が拡張し、血流は3~4倍に増加する。一方、冠動脈に有意狭窄があると、自己調節機能が働いて心筋内細動脈が拡張し、安静時血流を保とうとする。狭窄冠動脈の支配領域では安静時から細動脈が拡張しているため、薬物負荷を行っても冠血流はあまり増加せず、冠血流予備能は低下する。

冠血流予備能はこれまでドップラ法や PET を用いて評価され、冠動脈狭窄の重症度の判定に極めて有用であることが示されている。Joye らは、血管内ドップラを用いた冠動脈血流予備能計測の心筋虚血診断における感度、特異度、正診率を 94%, 95%, 94% と報告している⁵⁾。冠動脈内ドップラガイドワイヤは冠動脈血流計測に有用な方法として確立されているが、ワイヤは高価であり冠動脈アンギオ検査の際にしか利用できない。また、PET は利用できる施設も限られる。

2. MRI による冠血流と血流予備能の計測

冠動脈は径が細く心拍動と呼吸による 2 重の動きを示すため、MR 血流計測の非常に困難な対象といえる。MRI による冠血流計測の方法としては位相コントラスト法だけでなく、タイムオブフライト法や MR ポーラスタギング法など幾つかの方法が提案されたが、最近では位相コントラスト・シネ MRI が主に用いられている (Figs. 3, 4)。

我々のグループでは 90 年代半ばから呼吸停止位相コントラスト・シネ MRI による冠血流

予備能の評価を行っている。ジピリダモール静注前後の拡張期冠動脈ピーク血流速度から求めた正常ボランティアにおける冠動脈血流速度予備能は 3.14 ± 0.59 であり、ほぼ妥当な結果が得られている⁶⁾。また、MRI による冠血流予備能計測の信頼性を評価するために、左冠動脈前下行枝に様々な程度の狭窄を有する患者 14 例を対象として MRI とドップラワイヤによる血流速度予備能を比較したところ、両者は良好な直線相関を示し ($r=0.91$)⁷⁾、MR 血流計測は少なくとも左冠動脈前下行枝の血流予備能の診断に関しては十分臨床応用が可能と思われた。また、正常ボランティアを対象に MRI による左冠動脈前下行枝の血流速度予備能を $H_2^{15}O$ PET による左室前壁の心筋血流予備能と比較検討したところ、MRI は PET と良好な有意相関を示した⁸⁾。

MRI による血流量の計測には幾つかの誤差原因がある。MRI の時間分解能が低いと画像にぶれが生じ、血流速度計測値は低下する。また、空間分解能が不十分であるとピーク血流速度は低く計測され、血流量は血管内血流と周囲の静止組織のパーシャルボリューム効果から過大評価される可能性がある。Hofman らは、冠動脈血流量を正確に計測するために必要な MRI 画像の時間分解能は、左冠動脈では 120 ms、動きの大きい右冠動脈では 25 ms であると述べている⁹⁾。現在の呼吸停止シネ MRI の時間分解能は 100 ms 前後であり、左冠動脈の血流計測は可能であるが、右冠動脈の血流計測には時間分解能を改善する必要がある。最近では、ナビゲーターエコーを用いた呼吸同期撮影や、パラレルイメージングにより、時間分解能もかなり改善されている。

3. 冠動脈狭窄患者における冠血流予備能の MR 計測

MRI を用いると冠動脈狭窄症例における冠血流予備能の低下を非侵襲的に診断できる。左冠動脈有意狭窄症例と正常ボランティアの冠動脈血流速度を MR 計測したところ、薬物負荷

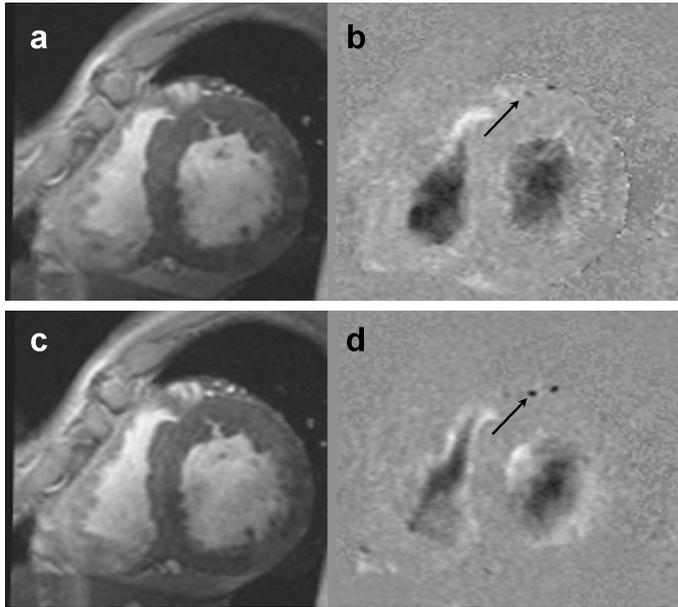


Fig. 3. Magnitude (left) and phase difference (right) MR images of the left anterior descending coronary artery in the resting state (a and b) and during dipyridamole stress (c and d) in a healthy subject acquired with breath-held phase contrast cine MR imaging. Note that blood flow in the coronary artery (arrows) is augmented during pharmacological stress.

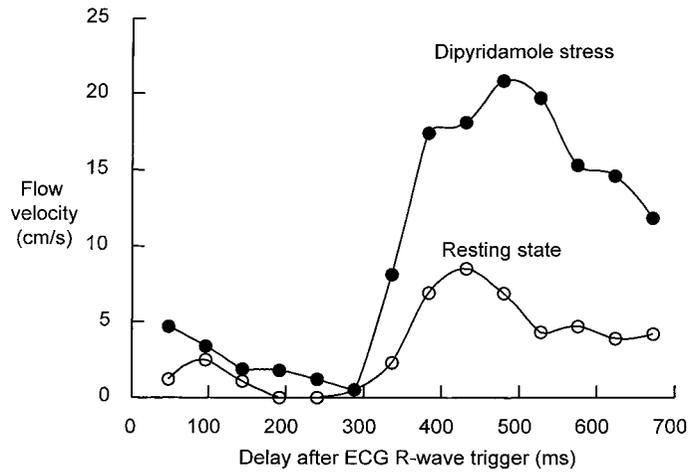


Fig. 4. Blood flow velocity curves measured in the left anterior descending coronary artery in the resting state and during dipyridamole stress measured on breath-held phase contrast cine MR images. Blood flow in the coronary artery is increased by factor of more than 2 during pharmacological stress.

前の拡張期血流速度は正常群 $13.5 \text{ cm/s} \pm 3.3$, 患者群 $13.1 \text{ cm/s} \pm 6.1$ であり, 両群に有意差は認められなかった. 一方, シビリダモール負荷中の患者群における拡張期血流速度 ($20.5 \text{ cm/s} \pm 8.9$) は正常群 ($41.9 \text{ cm/s} \pm 13.2$) と比較して有意に低く, 血流予備能は有意に低下していた ($p < 0.01$).

冠動脈インターベンション後の再狭窄は PTCA・ステント治療患者における大きな問題である. 冠血流予備能の MR 計測により, PTCA・ステント後の再狭窄を非侵襲的に診断できる. 当院の齊藤らが, PTCA・ステント施行末梢側における冠血流予備能を経時的に MR 計測したところ, 非再狭窄症例における冠血流速度予備能は術後 1 か月後 1.97 ± 0.37 , 術後 6 か月後 2.29 ± 0.31 であり, 経時的な変化はみられなかった¹⁰⁾. 一方, 再狭窄症例における冠血流速度予備能は 1 か月後 2.27 ± 0.49 , 6 か月後 1.52 ± 0.15 であり, 再狭窄に伴う冠血流予備能低下が明瞭に示されていた (Fig. 5).

4. 冠動脈バイパスグラフトの血流計測

冠動脈バイパスグラフト術後患者においては, グラフトの開存性だけでなく狭窄病変の有無を診断する必要がある. グラフト開存・閉塞の診断は, 造影 3D MRA や造影 CT を用いてほぼ確実に行うことができるが, グラフト末梢吻合部における狭窄の診断はマルチスライズ CT を用いてもなかなか困難である. MRI による冠動脈バイパスグラフトの血流計測はグラフト機能の診断を可能とし, 血流量や血流パターンからグラフト狭窄の有無を判定できる. Hoogendoorn らは静脈グラフトの MR 血流計測を行い, 正常グラフト血流量は $71 \pm 17 \text{ ml/min}$ であったが, 狭窄ないし閉塞グラフトの血流量は $9 \pm 8 \text{ ml/min}$ と高度低下がみられたと述べている ($p < 0.001$)¹¹⁾. 当施設では, 内胸動脈バイパスグラフト狭窄を MR 血流計測を用いて診断し, 血管造影所見を基準として診断能を検討した. 狭窄のないグラフトの血流は拡張期主体のパターンを示し (拡張期血流速度/

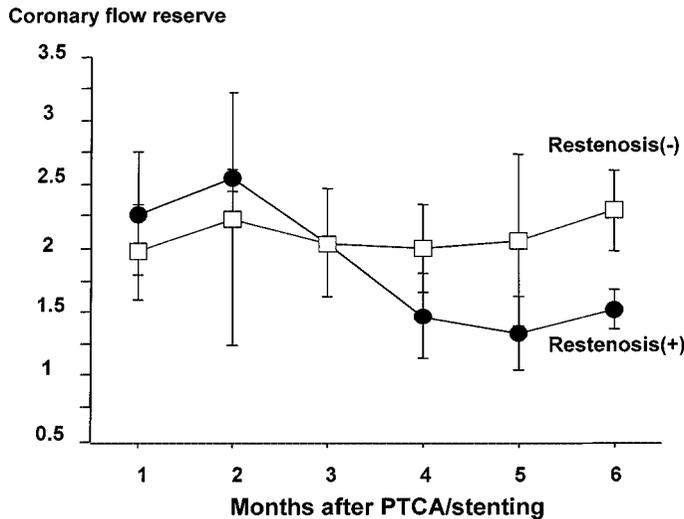


Fig. 5. The coronary flow velocity reserves measured with breath-held phase contrast cine MR imaging in the distal sides of PTCA and/or stent sites in the coronary arteries. Note that the coronary flow velocity reserve is decreased in the coronary arteries showing restenosis.

収縮期血流速度比 1.89 ± 0.91), グラフト血流量も良好に保たれていた (76.4 ± 38.4 ml/min). 一方, 血管造影においてグラフト狭窄の認められた症例では, 収縮期主体の血流パターンが認められ (拡張期血流速度/収縮期血流速度比 0.43 ± 0.32), グラフト血流量も有意に低下していた (14.3 ± 1.34 ml/min) (Fig. 6)¹²⁾.

5. 冠静脈洞の血流計測

MR 血流計測のもう一つの応用分野は冠静脈洞の血流計測による左室心筋血流量の定量化である (Fig. 7).

冠静脈洞は心筋静脈血の約 96% が通過すると言われており, MRI を用いて心筋重量と冠静脈洞血流量を計測すると心筋 1 g 当たりの平均冠血流量を定量化できる. Lund らは犬の冠静脈洞血流を MR と超音波血流量計を用いて計測し, 両者の間に良好な直線相関がみられたと報告している ($r = 0.92$)¹³⁾. また, Schwitter らの報告では, MRI による心筋 1 g 当たりの平均冠血流量は ¹³N アンモニア PET による値と良好な直線相関が示されている¹⁴⁾.

MRI による心筋全体の血流量計測は肥大型心筋症などのびまん性心筋疾患や移植心の心筋

血流異常の診断に利用できる. 当施設において肥大型心筋症 29 例を対象とした検討では, 安静時の心筋 1 g 当たりの冠血流量は正常群 0.74 ± 0.23 ml/min/g, 肥大型心筋症群 0.62 ± 0.27 ml/min/g であって, 両群間に有意差は認められなかった. 一方, ジビリダモール投与後の肥大型心筋症群における冠血流量 (1.03 ± 0.40 ml/min/g) は正常群 (2.14 ± 0.51 ml/min/g) と比べて有意に低く, 左室心筋全体の冠血流予備能にも有意の低下が認められた (1.72 ± 0.49 vs. 3.01 ± 0.75 , $p < 0.01$)¹⁵⁾.

ま と め

心臓血管領域における MR 血流計測の方法と臨床有用性について, 冠動脈および冠静脈洞の血流計測を中心に解説した. これまで, 拍動性の動きから正確な血流計測が困難であった右冠動脈の MR 血流計測も, パラレルイメージングやナビゲーターエコー法による呼吸同期撮影の導入によって可能になりつつある. MRI による血流計測は, PTCA・ステントやバイパスグラフトなどの治療効果や再狭窄の診断に高い有用性を示し, 今後臨床利用がさらに広がる

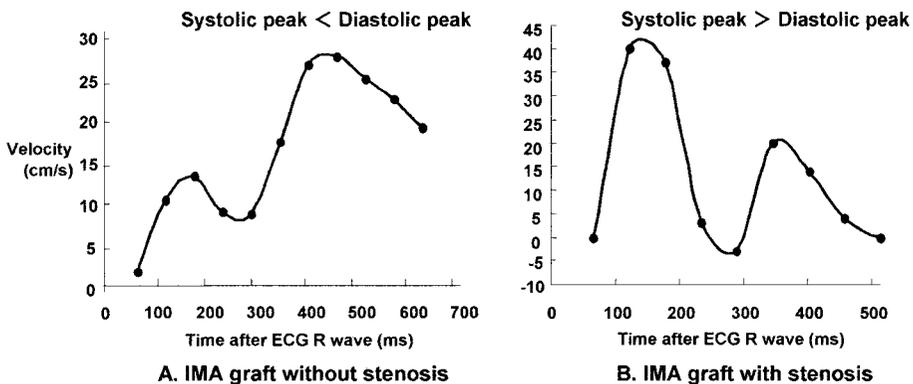


Fig. 6. Blood flow velocity curves measured in the internal mammary artery bypass grafts. In a patient without significant graft stenosis (A), the diastolic peak velocity is higher than the systolic peak velocity. In contrast, the diastolic peak velocity is lower than the systolic peak velocity in a patient with flow limiting stenosis (B).

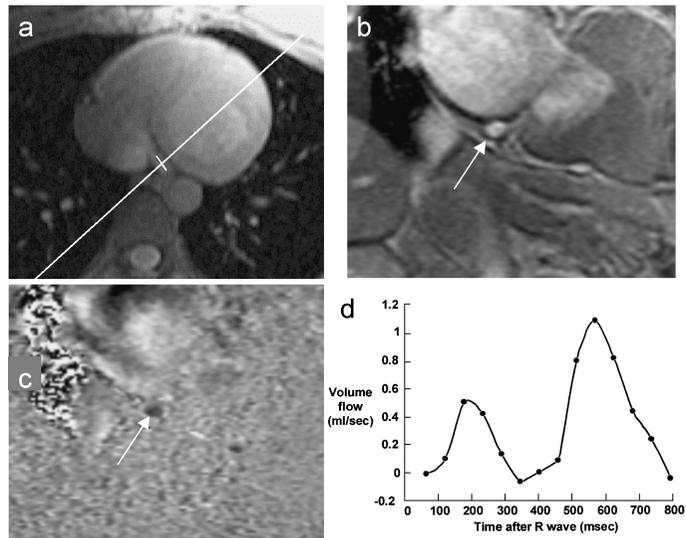


Fig. 7. MR flow measurement of the coronary sinus. (a) Definition of the imaging slice for MR blood flow measurement in the coronary sinus on a scout MR image. (b) Magnitude images of the coronary sinus. (c) Phase difference image of the coronary sinus (arrows). (d) Blood flow curve in the coronary sinus measured by MRI.

ものと期待される。

文 献

- 1) Szolar DH, Sakuma H, Higgins CB: Cardiovascular applications of magnetic resonance flow and velocity measurements. *J Magn Reson Imaging* 1996 ; 6 : 78-89
- 2) Steffens JC, Bourne MW, Sakuma H, O'Sullivan M, Higgins CB: Quantification of collateral blood flow in coarctation of the aorta by velocity encoded cine magnetic resonance imaging. *Circulation* 1994 ; 90 : 937-943
- 3) White CW, Wright CB, Doty DB, Hiratzka LF, Eastham CL, Harrison DG, Marcus ML: Does visual interpretation of the coronary angiogram predict the physiological importance of a coronary stenosis? *N Engl J Med* 1984 ; 310 : 819-825
- 4) Sakuma H, Kawada N, Takeda K, Higgins CB: MR measurement of coronary blood flow. *J Magn Reson Imaging* 1999 ; 10 : 728-733
- 5) Joye JD, Schulman DS, Lasorda D, Farah T, Donohue BC, Reicheck N: Intracoronary Doppler guide wire versus stress single-photon emission computed tomographic thallium-201 imaging in assessment of intermediate coronary stenoses. *J Am Coll Cardiol* 1994 ; 24 : 940-947
- 6) Sakuma H, Blake LM, Amidon TM, O'Sullivan M, Szolar DH, Furber AP, Bernstein MA, Foo TKF, Higgins CB: Coronary flow reserve: noninvasive measurement in humans with breath-hold velocity-encoded cine MR imaging. *Radiology* 1996 ; 198 : 745-750
- 7) Shibata M, Sakuma H, Isaka N, Takeda K, Higgins CB, Nakano T: Assessment of coronary flow reserve with fast cine phase contrast magnetic resonance imaging: comparison with measurement by Doppler guide wire. *J Magn Reson Imaging* 1999 ; 10 : 563-568
- 8) Sakuma H, Koskenvuo JW, Niemi P, et al.: Assessment of coronary flow reserve using fast velocity-encoded cine MR imaging: validation

- study using positron emission tomography. *AJR* 2000 ; 175 : 1029–1033
- 9) Hofman MB, Wickline SA, Lorenz CH : Quantification of in-plane motion of the coronary arteries during the cardiac cycle : implications for acquisition window duration for MR flow quantification. *J Magn Reson Imaging* 1998 ; 8 : 568–576
 - 10) Saito Y, Sakuma H, Shibata M, et al. : Assessment of coronary flow velocity reserve using fast velocity-encoded cine MRI for noninvasive detection of restenosis after coronary stent implantation. *J Cardiovasc Magn Reson* 2001 ; 3 : 209–214
 - 11) Hoogendoorn LI, Pattynama PM, Buis B, van der Geest RJ, van der Wall EE, de Roos A : Noninvasive evaluation of aortocoronary bypass grafts with magnetic resonance flow mapping. *Am J Cardiol* 1995 ; 75 : 845–848
 - 12) Ishida N, Sakuma H, Cruz BP, Shimono T, Tokui T, Yada I, Takeda K, Higgins CB : MR flow measurement in the internal mammary artery-to-coronary artery bypass graft : comparison with graft stenosis at radiographic angiography. *Radiology* 2001 ; 220 : 441–447
 - 13) Lund GK, Wendland MF, Shimakawa A, Arheden H, Stahlberg F, Higgins CB, Saeed M : Coronary sinus flow measurement by means of velocity-encoded cine MR imaging : validation by using flow probes in dogs. *Radiology* 2000 ; 217 : 487–493
 - 14) Schwitter J, DeMarco T, Kneifel S, et al. : Magnetic resonance-based assessment of global coronary flow and flow reserve and its relation to left ventricular functional parameters : a comparison with positron emission tomography. *Circulation* 2000 ; 101 : 2696–2702
 - 15) Kawada N, Sakuma H, Yamakado T, Takeda K, Isaka N, Nakano T, Higgins CB : Hypertrophic cardiomyopathy : MR measurement of coronary blood flow and vasodilator flow reserve in patients and healthy subjects. *Radiology* 1999 ; 211 : 129–135

MR Flow Measurements in the Heart and Coronary Vessels

Hajime SAKUMA

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

Fast phase contrast cine MR imaging is an emerging application of magnetic resonance (MR) imaging that can provide noninvasive assessments of blood flow and flow reserve in the human heart and coronary arteries. Several studies have demonstrated the usefulness of this technique in detecting coronary arterial restenosis after percutaneous revascularization procedures and in assessing patency and stenosis of coronary artery bypass conduits. MR measurement of coronary sinus blood flow also allows for noninvasive assessment of global myocardial blood flow. In this chapter, the current status and potential clinical applications of MR measurements of blood flow and flow reserve in the coronary artery, coronary artery bypass graft, and coronary sinus will be presented.