

造影 MRA と冠動脈 MRA

渡邊 祐司

倉敷中央病院放射線科

はじめに

MR angiography (MRA) は MRI を用いて血管を選択的に描出する手法の総称で、カテーテルを用いる従来の X 線血管造影に比べ、非侵襲的で簡便な血管造影法である。

この手法は、造影剤を用いる造影 MRA と、造影剤を用いない非造影 MRA に大別され、目的とする部位・血管によって最適の撮像法が異なる^{1)~20)}。しかし、いずれの撮像法でも、血管の信号を増強するようにして撮像された画像を基にして、血管を選択的に描出して、従来の X 線血管造影と類似の画像を構築するという概念は共通である。

これらの手法の中で、造影 MRA と冠動脈 MRA に関して、原理、技術的特徴、画像の特徴、臨床応用について解説する。

I. 造影 3D MR angiography

1. 原理

ガドリニウム (Gd)-造影剤を用いた造影 3D MR angiography は、Gd-造影剤の T₁ 短縮効果を利用した手法である^{1),2)}。Time-of-flight (TOF) 法や、phase contrast (PC) 法などの手法と異なり、MR 特有の血管に起因するアーチファクトや飽和効果に影響されることなく広範囲の血管を描出することが可能で、あらゆる部位に使用できる。方法は簡単で、Gd-造影剤を急速静注後、短時間の撮像を繰り返した後、

最大値投影法を用いて MRA を構成する。

2. 技術的特徴

パルスシーケンスは、撮像時間の短いグラディエントエコー法が用いられ、呼吸停止下での撮像が可能である。撮像のタイミングはボラス静注した Gd-造影剤の血中濃度のピーク (first-pass) をとらえるのが理想的である。また、急速静注により高い血中濃度が得られるので、少量の造影剤でも撮像可能である^{3)~5)}。画像処理として、従来の X 線血管造影 (DSA) に用いられたサブトラクションの手法を、この造影 3D MRA に応用することができ、高コントラストの血管像が得られる^{3)~6)}。特に造影前の画像で高信号を呈する大動脈瘤の新鮮な血栓は、造影された血管内腔との鑑別が困難になることがあるが、造影 3D MRA から造影前の元画像をサブトラクションすることで、開存している動脈瘤の内腔のみを描出することができる。

i) 脂肪抑制

造影 3D MRA の最大の課題は小動脈の描出である。大動脈や腸骨動脈などの太い動脈は比較的容易であるが、腎動脈分枝や腸間膜動脈分枝などの小動脈の描出は不十分である。この課題を克服するために、大量の造影剤を用いたり、スライス厚を薄くする試みがなされてきたが、それでもなお、小動脈の描出は不十分である。

最大の原因は、脂肪と血管の境界面に生じる black line である。TE を in-phase に設定すれ

キーワード MR angiography, subtraction, SENSE, fat-suppression, coronary angiography

ば, chemical-shift artifact で black line を生じ, TE を out-of-phase に設定すればボクセル内で水と脂肪の信号が相殺されるために, magic black line を生じる. この問題を解決する方法は脂肪抑制法である.

現在, 臨床に用いることのできる脂肪抑制法は, 周波数選択的脂肪抑制法 (SPIR など) と binomial pulse による選択的水励起法 (Proset) である⁷⁾.

周波数選択的脂肪抑制法 (SPIR) を 3D gradient echo に単純に付加すると, TR が極端に延長し, 呼吸停止下での撮像が困難となるので, EPI read-out を組み込むことで, 脂肪抑制を付加し TR が延長したままでも撮像時間を短縮することができる. 一方, 励起パルスに binomial pulse を用いて, 水成分のみを選択的に励起することによって, TR があまり延長することなく優れた脂肪抑制が得られる. これらの脂肪抑制の手法を併用することで脂肪と血管の境界面のアーチファクトを低減でき, 小動脈

の描出は格段に向上する (Fig. 1).

ii) SENSE (sensitivity encoding)

高速撮像法 SENSE は, 位相エンコードステップを間引くことで, 撮像時間を短縮し, 得られる折れ返しアーチファクトを生じた画像を複数のコイルエレメントの信号差を利用して展開することによって折れ返しアーチファクトのない画像にする手法である⁸⁾. S/N 比は reduction factor (位相エンコードステップの間引く割合) に応じて低下するが, 造影 MRA では造影剤により S/N 比の低下を補うことができる. 造影 MRA に SENSE を用いる利点は, 撮像時間を短縮することができることである. すなわち, 呼吸停止時間を短縮でき, 呼吸のアーチファクトの少ない画像が得られる. また, 腎動脈の撮像では, 腎静脈との分離が重要であるが, SENSE を用いれば, 1 回 3~5 秒 (マトリックス 384×512:256 収集, 512 再構成, スライス厚 6 mm/-3 mm, スライス枚数 26, FOV 380~400 mm), 脂肪抑制法 (Proset)

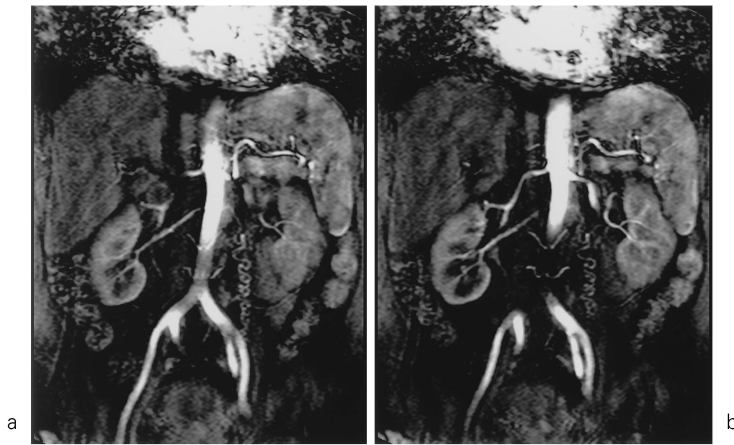


Fig. 1. Contrast-enhanced three-dimensional MR angiography with chemical selective fat-suppression technique (SPIR) and EPI read-out. a), b) Coronal source images show small arteries such as distal renal arteries and lumbar arteries very clearly. Note the accessory right renal artery.

2001年6月2日受理

別刷請求先 〒710-8602 岡山県倉敷市美和 1-1-1 倉敷中央病院放射線科 渡邊祐司

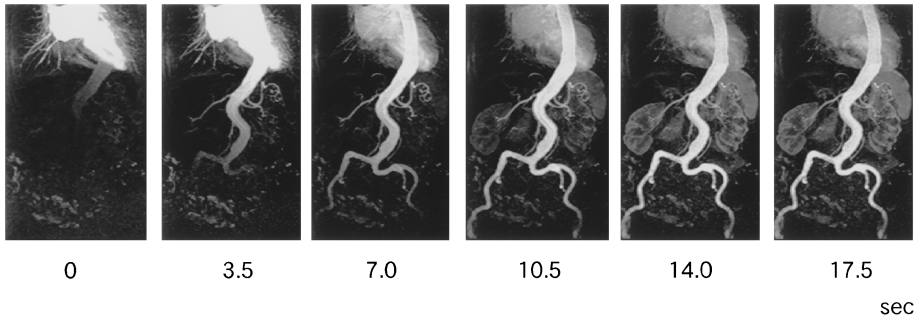


Fig. 2. Contrast-enhanced three-dimensional MR angiography with SENSE technique
MR angiograms were obtained in every 3.5 s, which allows for demonstrating dynamics of bolus of contrast material.

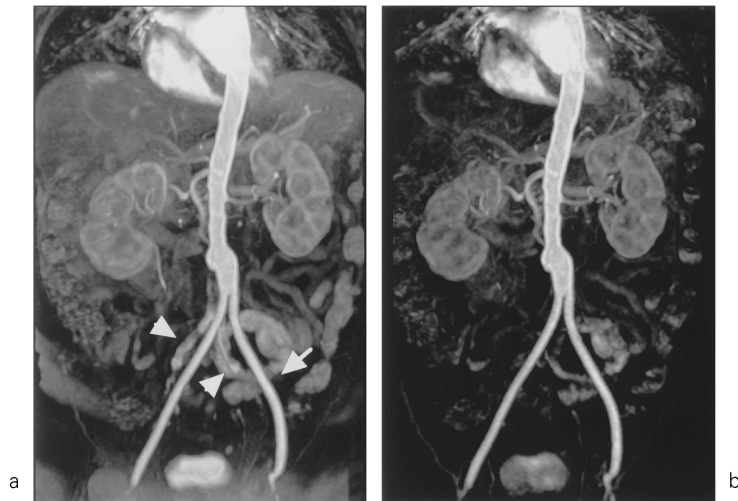


Fig. 3. Subtraction technique in contrast-enhanced three-dimensional MR angiography with Proset fat-suppression technique
a) MIP-reconstructed image shows aorto-femoral bypass graft (arrow) as well as T₁-hyperintense thrombus (arrowhead) of the lower abdominal aorta and common iliac arteries. b) MIP-reconstructed image using subtraction technique shows no T₁-hyperintense thrombus.

を用いても1回6~7秒で撮像が可能であるので、造影剤が静脈に循環する前に、動脈のみを撮像することができる (Fig. 2).

iii) 画像処理

造影 MR angiography では、元画像を最大値投影法 (MIP) で再構成して一枚の血管像

を構築する。サブトラクションを併用するとバックグラウンド信号の低い鮮明な血管像が得られる^{4)~7),9),10)}。特に、動脈瘤の撮像では、壁血栓の高信号に妨げられることなく内腔のみを描出するのに有用である (Fig. 3)。また、門脈相や静脈相のサブトラクション元画像から

動脈相のサブトラクション元画像をサブトラクションする (double subtraction) ことで門脈や静脈のみを描出することも可能である^{4),9)}。一方、加算処理も、心機能低下により循環時間が延長したり、真腔と偽腔で循環時間が異なる大動脈解離などでは、1枚の画像で動脈全体を描出するのに有用である。

3. 臨床応用

1) 腹部大動脈～下肢動脈

動脈瘤や閉塞性動脈硬化症だけでなく大動脈炎症候群、Marfan 症候群、大動脈解離なども造影 3D MRA のよい適応となる。また人工血管の開存性を検査する手法としても有用である^{10)~12)}。

これらの疾患では、病的部位だけでなく腹部大動脈～下肢動脈の広い範囲を検査する必要がある。現在この検査法には、3部位分割法 (MR dynamic subtraction angiography: MRDSA)^{3)~5),10)} とテーブル移動法 (moving-table method)^{11),12)} の2種類の手法がある。

MRDSA の手法は、腹部、大腿部、下腿部の3部位を順に撮像する^{3)~5),10)}。まず、腹部を、0.03~0.05 mmol/kg の Gd-造影剤をボラス静注した後、撮像を繰り返し行う。腹部の撮像を完了してから、大腿部と下腿部をそれぞれ同様にして撮像する。大腿部と下腿部ではそれぞれ前の部位で投与した Gd-造影剤による信号を除去するためにサブトラクションは必須である。この手法は腹部・大腿・下腿の各部位ごとに造影剤をボラス静注して繰り返し撮像を行うため、各部位の動脈・(門脈)・静脈の分離が可能となる。

テーブル移動法は腹部から下腿までをテーブル移動で連続的に撮像する手法で、正に X 線 DSA の手法を MR を用いて行うものである^{11),12)}。Gd-造影剤を持続投与することによって動脈の血中濃度を高く維持することができる。基本的には腹部、大腿部、下腿部の3部位を1セットと考えるので、すべての部位でサブトラクションを用いて画像処理する。

一度に3部位の動脈相を撮像するので、Gd-造影剤の投与法は3部位を撮像している間、ずっと Gd-造影剤を静注し続け、動脈の血中濃度を高く維持しておくのが理想的である。しかし、我が国では造影剤の使用量は 0.1 mmol/kg あるいは 20 ml と制限されているため、投与方法とパルスシーケンスのスキンの長さ k-space sampling に工夫が必要となる。

我々は、2 ml をテストに用いてスキンのタイミングを設定した後、18 ml を 1 ml/秒で 8 秒間、0.4 ml/秒で 25 秒間静注している。スキンの長さは 15 秒以下に調整し、k-space sampling は腹部 linear、大腿部と下腿部は centric view ordering に設定する。これらの組み合わせにより3部位の k-space 低周波成分は動脈の血中造影剤濃度が高い間にスキャンすることになるので、3部位とも明瞭な動脈相が得られる (Fig. 4)。造影剤投与時間に比し、撮像時間が長い場合は下腿部での静脈の重なりが顕著になり、動脈の読影が困難となる (Fig. 5)。

さて、これらの画像はカテーテル法で得られる画像と同様である。動脈の閉塞、狭窄、虫食い状変化、側副血行路など、カテーテル法と同等に判定できる (Fig. 6)。また、動脈瘤の描出能は造影 MR angiography が優れている。元画像を同時に読影することにより、動脈瘤の内腔だけでなく、瘤全体の形・大きさも判定できる。

2) 腎動脈、上腸間膜動脈などの内臓枝

腎動脈では、腎血管性高血圧のスクリーニングや腎摘出前の腎動脈のマッピングを目的として造影 3D MR angiography が行われる¹³⁾。特に Gd-造影剤は CT やカテーテル法に用いるヨード造影剤と比べ、腎毒性が低いため、腎機能の低下した患者にも安全に使用できる。腎血管性高血圧は、腎動脈近位部の狭窄だけでなく、遠位部の狭窄もその原因となるので、腎動脈全体を描出する必要がある。特に遠位部の腎動脈は細く、脂肪に囲まれており、描出が困難である。そのため、造影剤を多く使う・スライ



Fig. 4. Moving-table contrast-enhanced MR angiography
Excellent images of the aorta and main arteries of the lower extremity can be obtained when the injection method, scan time, and k-space trajectory are optimized.



Fig. 5. Moving-table contrast-enhanced MR angiography
Venous enhancement disturbs interpretation of the main arteries of the calf when scan time is too long for the injection duration.

ス厚を薄くする・脂肪抑制法を併用するなどの方法が必要である⁷⁾。腎動脈の狭窄の描出は、近位部では感度が高く、造影 MRA は腎血管性高血圧のスクリーニングとして有用な方法である。しかし、腎動脈の狭窄の程度は過大評価されると報告されている。Voxel 内の乱流が原因として挙げられるが、最大の要因は 3D gradient echo に内在する chemical shift ar-

tifact である⁷⁾。そこで脂肪抑制法を併用することで、狭窄部位の正確な評価が期待される (Fig. 6)。さらに SENSE を併用することで撮像時間を短縮し、動脈と静脈を分離して描出することも可能である (Fig. 2)。

上腸間膜動脈では、急性閉塞や、偽動脈瘤などは造影 MRA の良い適応である。脂肪抑制法を用いることで、腸間膜動・静脈の描出は格段



Fig. 6. Atherosclerosis obliterans
Moving-table contrast-enhanced MR angiography shows aorto-femoral bypass graft (arrow), occlusion of tibial arteries, and stenosis of proximal part of right renal artery (arrowhead).

に向上し、vasa recta などの小動脈も観察可能となる^{7),14)}。

骨盤の内腸骨動脈領域では、診断のためだけの DSA の役割は既に後退している。このため、造影 MRA も適応が限定されるが、子宮動脈静脈奇形や、外妊などの出血性病変は造影 3D MRA の良い適応である。

3) 門脈

食道静脈瘤や脾腎シャントなどの門脈側副血行路や血栓や腫瘍による門脈の閉塞・狭窄などが良い適応である。この領域でも、脂肪抑制法を併用した造影 MRA が有用で、門脈系の末梢循環も観察可能である^{7),14)}。また、double subtraction の手段を用いることで、門脈系を選択的に描出できる^{4),9)}。

従来のカテーテル法と比べると、門脈側副血行路の描出能は造影 3D MRA が優れている。経動脈性のカテーテル法では造影剤が希釈され、側副血行路の描出は困難なことがあるが、造影 3D MRA は高コントラストに側副血行路を描出する。また、膵癌・胆管癌の門脈浸潤の有無や動静脈奇形もカテーテル法と同様に造影 3D MRA の診断精度は高い (Fig. 7)。

II. MR coronary angiography

冠動脈は蛇行し、心拍動、呼吸の動きとともに常に動いているので、MR による冠動脈の描出は他の領域の MRA と比べ、遥かに困難な領域である^{15)~20)}。また、冠動脈は大動脈や腸骨動脈に比べ細く、冠動脈主幹部の直径は約 3~5 mm で、末梢に向かうに従い先細る。このため、狭窄・閉塞の正確な評価を行うためには、スライス面 0.5 mm × 0.5 mm の高い空間分解能が必要である。呼吸の動きのアーチファクトを低減するために息止めと呼吸同期の手法があるが、冠動脈を含むボリュームを心電同期下で高空間分解能に必要なデータサンプリングを行うためには、現在のところ、息止め下で行うことは困難である。Real-time navigator 3D MR coronary angiography (MRCA) は、呼吸同期と心電同期を用いて、あたかも呼吸と心臓の動きを停止させるようにして冠動脈を撮像する高度な技術を用いた MRA である^{16)~18)}。

1. 原理

撮像原理は time-of-flight 効果に基づいており、通常、Gd 造影剤は不必要である。しかし、より高いコントラストを得るために、T₂

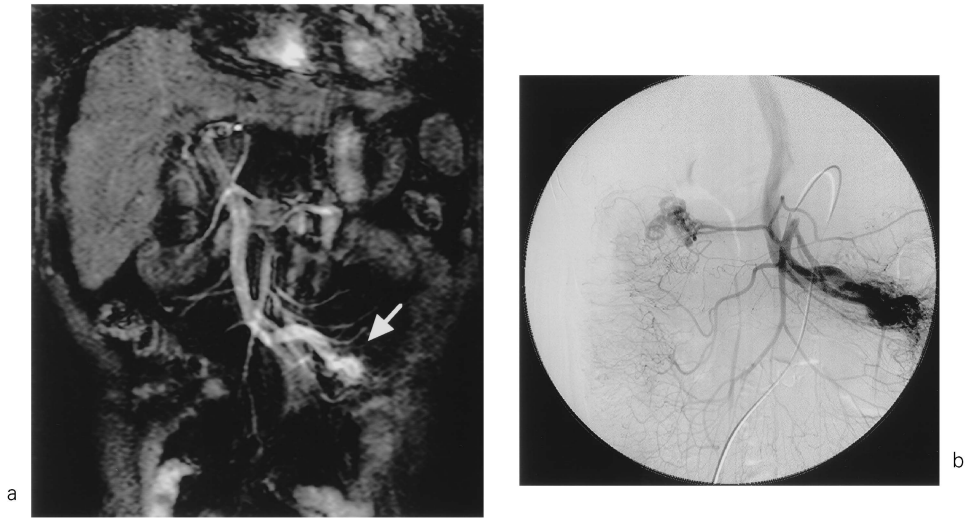


Fig. 7. Mesenteric arteriovenous malformation
a) Contrast-enhanced three-dimensional MR angiography with chemical selective fat-suppression technique and EPI read-out shows early enhancement of jejunal vein (arrow). b) X-ray DSA reveals mesenteric arteriovenous malformation.

強調用パルスを用い、心筋の信号を低下させ、脂肪抑制法を併用して脂肪の信号を低下させ、相対的に冠動脈の信号が強くなるような工夫が必要である^{17),18)}。

2. 技術的特徴と撮像方法

冠動脈を選択的に描出するために、まず正確に撮像断面を設定する必要がある。当院ではグラディエントエコーと EPI read-out のハイブリッドシーケンスで撮像して得られた心臓の横断像を用いて、目的とする冠動脈の3点(起始部、中間部、遠位部)を設定する。そして、その3点で構成される平面を決定し(3-point planscan)、本スキャンのスライス面とする(Fig. 8)^{17),18)}。

Real-time navigator 3D MRCA では、navigator echo を用いて横隔膜の動きをモニターし、心電図同期を用いて心拍動をモニターすることで、横隔膜が最高位点(呼気位)に到達し、かつ拡張後期の状態で、60~100 ms 間データを収集する(Fig. 9)。また、T₂強調用プレパ

ルスと脂肪抑制パルスを用いて、冠動脈のコントラストを高める。特に T₂ 強調プレパルスは組織のもつ T₂ 値の差異を強調するので、T₂ の短い心筋の信号を低下させ、冠動脈と心筋のコントラストが増大する。また、静脈血はデオキシヘモグロビンを多く含むため、動脈血に比べ T₂ が短いので、冠動脈の信号を低下させ、冠動脈との分別が可能となる。また、高空間分解能を実現するために我々が用いる voxel size は 0.65 × 0.92 × 1.5 mm であるが、必要な心拍数が 400~600 と多く、撮像時間が長い。実際の冠動脈の撮像時間は、約 10~25 分間であるが、検査全体としては約 1 時間かかるのが欠点である。

3. 画像再構成

若年者では冠動脈は蛇行が少なく、比較的直線的であるため、数枚のスライスで描出可能である(Fig. 10)。このため元画像を観察するのみで、撮像した冠動脈の走行を容易に追跡することができる。しかし、高齢者では冠動脈は蛇

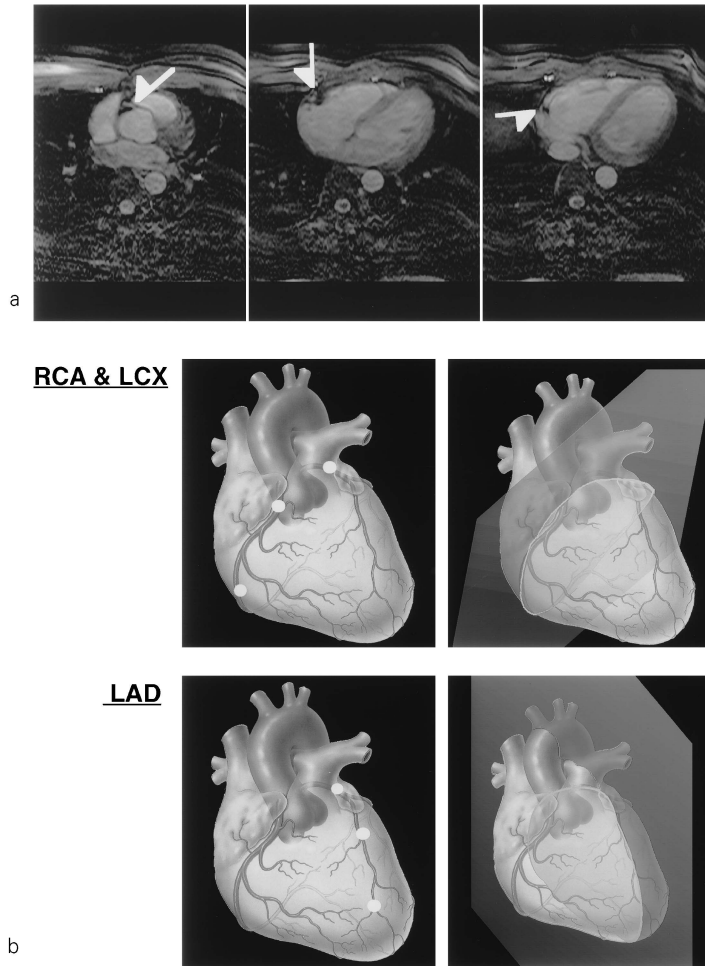


Fig. 8. Diagram of determination of imaging plane for selective MR coronary angiography

a) Three points for determination of imaging plane of right coronary artery. b) Imaging planes for right coronary, left circumflex, and left anterior descending arteries.

行しており数～十数枚のスライスにわたって描出されることが多く、一枚の画像で走行全体を観察するための画像再構成が必要である。

画像再構成には大きく分けて三つある。1) laysum MPR, 2) curved MPR, 3) MIP である。

1) laysum MPR は単なる重ね合わせ画像である。冠動脈の描出されているスライスを選択して重ね合わせる。

2) curved MPR は冠動脈の走行を追跡し、冠動脈の描出されているセグメントを継ぎ合わせていく方法である。技術的熟練を要する。

3) MIP は最大値投影法であるが、冠動脈の描出されているスライスのみを MIP (partial volume MIP) したり、冠動脈に重なりあう心腔や心臓の水の信号をワークステーション上で除去して MIP (target MIP) を行うなどの工

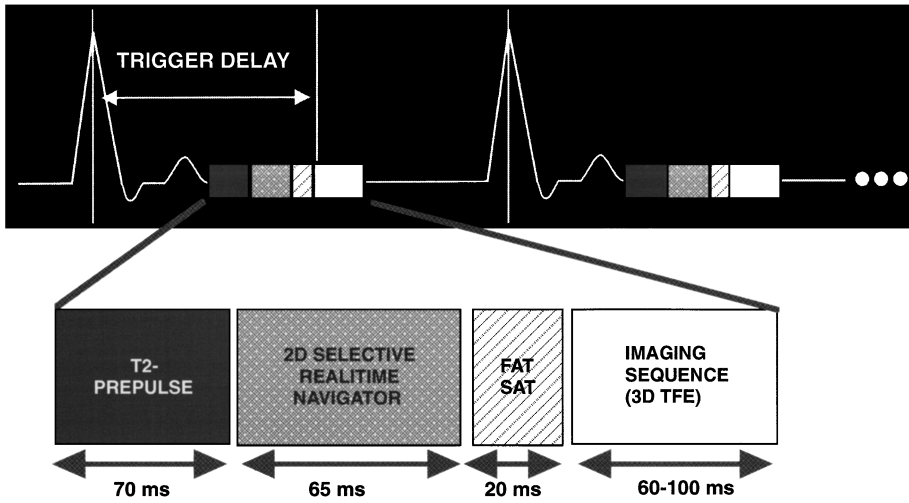


Fig. 9. Diagram of pulse sequence for MR coronary angiography

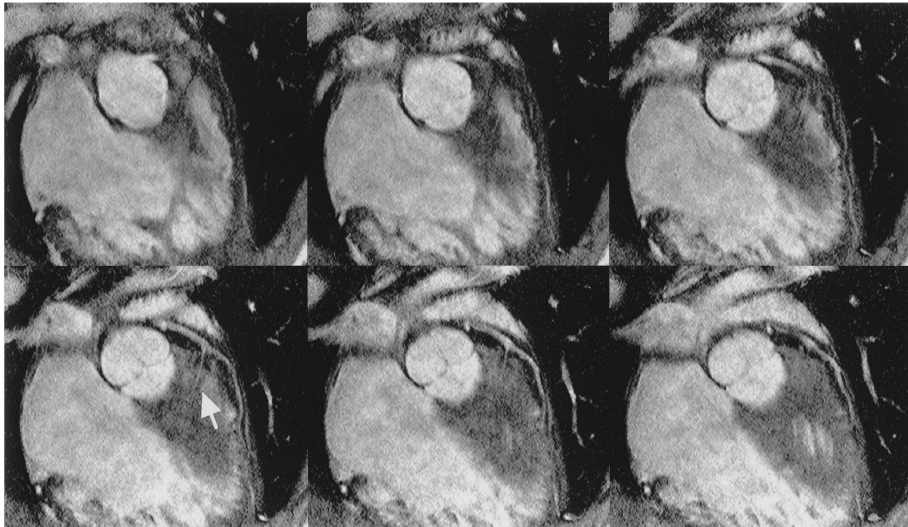


Fig. 10. Normal volunteer
Coronal source images show left main and left anterior descending arteries very clearly. Note the septal branches (arrow).

夫が必要である。

Laysum MPR や MIP は X 線冠動脈造影と同様に様々な角度から観察できるように画像を再構成することができる (Fig. 11)。しかし使

用するスライス枚数が少ない方が鮮明な画像が得られるので、蛇行している冠動脈ができるだけ少ないスライス数で描出されるように、本スキャンのスライス面の設定が最も重要である。

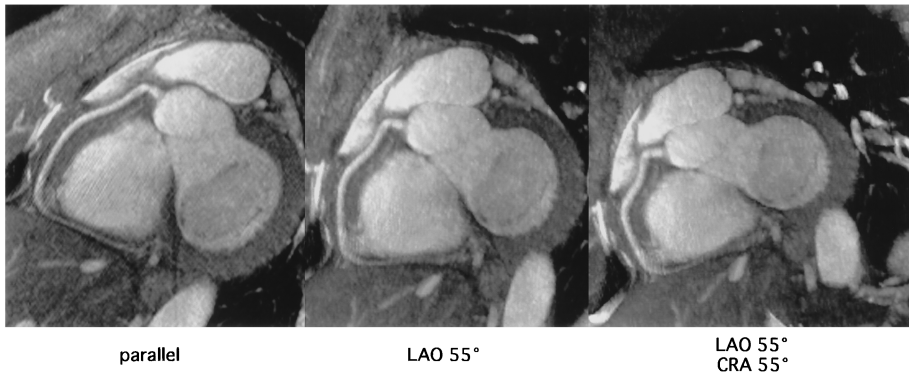


Fig. 11. MIP reconstruction
Multiple view angles allow for interpretation of MR coronary angiogram similarly with conventional coronary angiography.

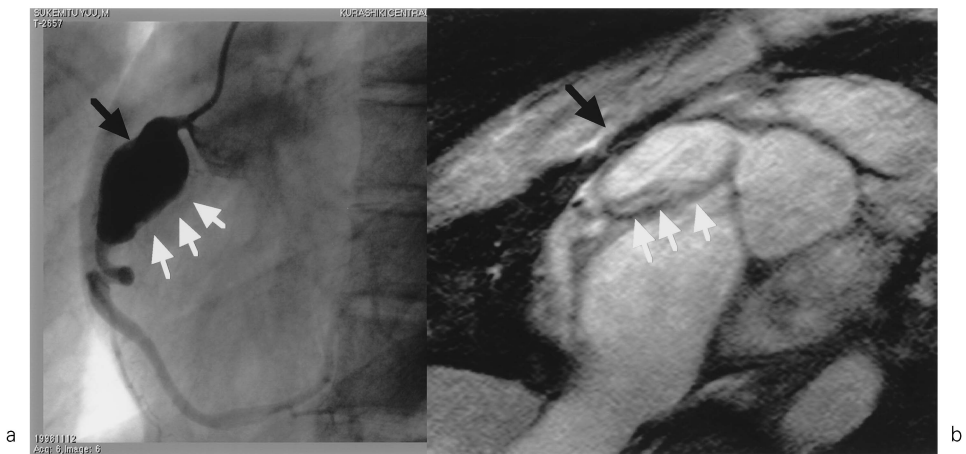


Fig. 12. Mucocutaneous-lymphnode syndrome
a) Conventional coronary angiogram shows large aneurysm (arrow) of right coronary artery. b) MR coronary angiogram also demonstrate the aneurysm. Note the thrombus (white arrow) in the aneurysm.

4. 臨床応用

冠動脈瘤を合併する川崎病や、狭心症、心筋梗塞が適応となる。冠動脈瘤の描出は比較的容易である (Fig. 12)。限局性の拡張や罹患冠動脈の蛇行も明瞭に描出される。

狭心症や心筋梗塞の原因である冠動脈狭窄・閉塞病変の MRA による描出能の特異性は高い

が、感度が低いことが報告されている¹⁶⁾。我々が行った 12 症例の検討では、50%以上の冠動脈狭窄の感度と特異性は各々 80%、60%であった (Fig. 13)。しかし、この手法は撮像時間が長いのが欠点で、患者の体動や不整脈が画質劣化の原因となることが多く、3D MRCA の撮像時間を短縮する必要がある。また、

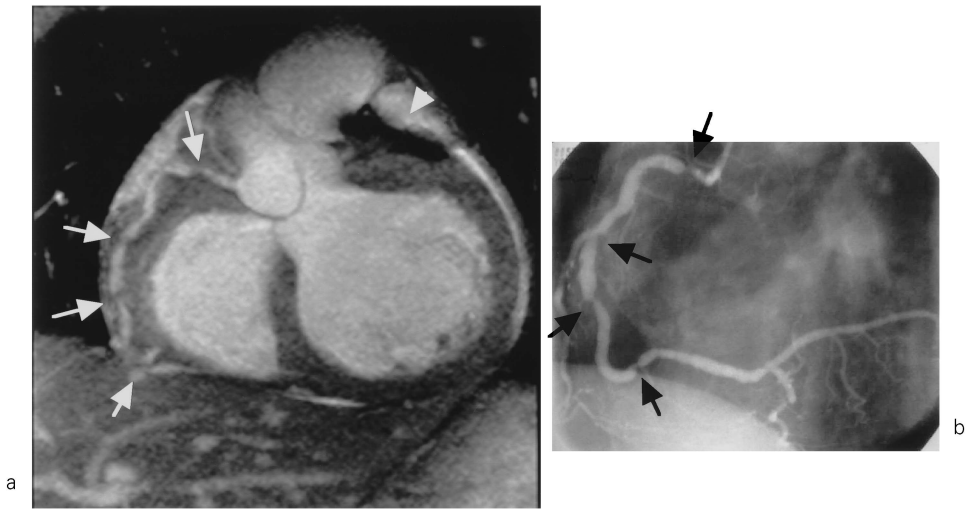


Fig. 13. Multiple stenosis of right coronary artery
a) MR coronary angiogram shows multiple moderate stenosis of right coronary artery (arrow). Note no signal can be obtained at the site of metallic stent placed in the left main trunk (arrowhead). b) Conventional coronary angiogram also reveals multiple stenosis (arrow).

MRCA では金属ステントが挿入されている部位では信号が得られず、画像化できないので、ステント部の再狭窄の評価は不可能である (Fig. 13).

結 語

MRA は目的と部位に応じた撮像法を選択することで、あらゆる部位の血管撮像が可能である。非侵襲的で簡便な血管撮像法として今後さらに発展していくものと期待される。

謝 辞

多大な協力を頂いた倉敷中央病院放射線センター秘書、陶山浩子、MRI 検査室技師、清野隆、中田和明、熊代正行、田淵 隆、光井英樹、森本規義、および放射線科医師、永山雅子、奥村 明、天羽賢樹、百々義廣の各氏に深謝いたします。

文 献

- 1) Lossef SV, Rajan SS, Patt RH, et al.: Gadolinium-enhanced magnitude contrast MR angiography of popliteal and tibial arteries. *Radiology* 1992; 184: 349-355
- 2) Prince MR: Gadolinium-enhanced MR aortography. *Radiology* 1994; 191: 155-164
- 3) Watanabe Y, Dohke M, Okumura A, et al.: Dynamic subtraction MR angiography: first-pass imaging of the main arteries of the lower body. *AJR* 1998; 170: 357-360
- 4) Watanabe Y, Dohke M, Okumura A, et al.: Dynamic subtraction contrast-enhanced MR angiography: technique, clinical applications, and pitfalls. *RadioGraphics* 2000; 20: 135-152
- 5) 渡邊祐司, 道家雅子, 天羽賢樹, 他: ハーフフーリエ法とサブトラクション処理を併用した Gd-造影 3D MRA. *Nippon Acta Radiologica* 1997; 57: 61-63
- 6) Douek PC, Revel D, Chazel S, et al.: Fast MR angiography of the aortoiliac arteries and arteries of the lower extremity: value of bolus-enhanced, whole-volume subtraction technique. *AJR* 1995;

- 165 : 431-437
- 7) 渡邊祐司 : 最新の造影 MR angiography 診断. Nippon Acta Radiologica 2000 ; 60 : 493-499
 - 8) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, Boesiger P : SENSE : sensitivity encoding for fast MRI. Magn Reson Med 1999 ; 42 : 952-962
 - 9) Okumura A, Watanabe Y, Dohke M, et al. : Contrast-enhanced three-dimensional MR portography. RadioGraphics 1999 ; 19 : 973-987
 - 10) 道家雅子, 渡邊祐司. 腹部大動脈, 四肢末梢 MRA. 杉村和朗監修. MR hydrography と MR angiography : 水と流れの画像. 東京 : メジカルビュー社, 1999 ; 183-197
 - 11) Ho KYJAM, Leiner T, de Haan MW, et al. : Peripheral vascular tree stenoses : evaluation with moving-bed infusion-tracking MR angiography. Radiology 1998 ; 106 : 683-692
 - 12) Meaney JFM, Ridgway JP, Chakraverty S, et al. : Stepping-table gadolinium-enhanced digital subtraction MR angiography of the aorta and lower extremity arteries : preliminary experience. Radiology 1999 ; 211 : 59-66
 - 13) Rieumont MJ, Kaufman JA, Galler SC, et al. : Evaluation of renal artery stenosis with dynamic gadolinium-enhanced MR angiography. AJR 1997 ; 169 : 39-44
 - 14) Shirkhoda A, Konez O, Shetty AN : Contrast-enhanced MR angiography of the mesenteric circulation : a pictorial essay. RadioGraphics 1998 ; 18 : 851-861
 - 15) Manning WJ, Li W, Edelman RR : A preliminary report comparing magnetic resonance coronary angiography with conventional angiography. N Eng J Med 1993 ; 328 : 828-832
 - 16) Post JC, van Rossum AC, Hofman HBM, et al. : Three-dimensional respiratory-gated MR angiography of coronary arteries : comparison with conventional coronary angiography. AJR 1996 ; 166 : 1399-1404
 - 17) Stuber M, Botnar RM, Danias RG, et al. : Double-oblique free breathing high resolution 3D coronary MRA. J Am Coll Cardiol 1999 ; 34 : 524-531
 - 18) 渡邊祐司, 道家雅子, 佐々木二梅恵, 他 : Real-time navigator selective 3D MR Coronary Angiography. 映像情報 1999 ; 30 : 73-78
 - 19) Goldfarb JW, Edelman RR : Coronary arteries : breath-hold gadolinium-enhanced, three-dimensional MR angiography. Radiology 1998 ; 206 : 830-834
 - 20) 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

Contrast-enhanced MR Angiography and MR Coronary Angiography

Yuji WATANABE

*Department of Radiology, Kurashiki Central Hospital
1-1-1 Miwa, Kurashiki, Okayama 710-8602*

Rapid advances in techniques using MR angiography have allowed for the evaluation of the entire aorta, its' run-off arteries, and even the coronary arteries. In this article, the technical aspects and clinical applications of contrast-enhanced MR angiography and MR coronary angiography are reviewed.

The abdominal aorta and main arteries of the lower extremities are examined by two methods, the dynamic subtraction 3D MR angiography (MRDSA) and the moving-table method. Three bolus injections of contrast material were used in MRDSA. In the moving-table method a slow continuous injection of contrast material was used. The slow continuous injection provides a convenient and excellent method of arterial imaging.

Depicting small arteries, such as the distal renal arteries and the mesenteric arteries, have been difficult using contrast-enhanced MRA. The main reason for this is the nature of the gradient echo sequences which yields a black line at the fat-tissue interface. Use of a fat suppression technique allows for the demonstration of small arteries by reducing the chemical shift artifact.

Coronary angiography with magnetic resonance (MR) is a non-invasive method, but it has been difficult to use for the diagnosis of coronary artery disease. This is due to the motion of the coronary arteries during the cardiac and respiratory cycles. Electrocardiography (ECG) gated breath-hold and navigator-echo guided data acquisition have been evaluated for use in overcoming image blurring due to this motion. By orienting the 3D imaging slab along the major axis of the coronary vessels, coronary coverage can be more favorable with smaller imaging volumes and high resolution images of the coronary arteries can be obtained.

MR angiography is still challenging and exciting. Better methods will be developed and established by using the information gained in previous work.