

下肢動脈疾患のMR angiography(MRA)による評価

竹原 康雄¹ 磯田 治夫²

要 旨：下肢末梢動脈の画像検査を要する患者は通常、糖尿病や動脈硬化症など、腎機能障害に陥りやすい背景を抱えており、腎毒性のあるヨード系造影剤使用を伴う血管造影検査のリスクは無視できない。magnetic resonance angiography(MRA)は、腎毒性造影剤を使用せず、一度の撮影で、ほぼ半身から全身の動脈を撮影でき、得られた画像は任意方向、任意断面の画像再構成が可能である。MRAはカテーテルのアプローチが不可能な症例においても施行でき、しかも、側副血行路を余すところなく描出することが可能である。無論、電離放射線被曝はなく、侵襲性も低いことから、フォローアップ目的でも繰り返し施行できる。ただし、通常のMRAでは、画像の時間分解能や空間分解能がX線による血管造影には及ばないことから、微細な病変や血行動態の評価には限界もあることに留意する必要がある。しかし、この限界は、TRICKSなどの新しいapplicationによって徐々に取り除かれつつある。(J Jpn Coll Angiol, 2004, 44: 743-753)

Key words: gadolinium chelate, contrast enhanced, magnetic resonance angiography, atherosclerosis

なぜmagnetic resonance angiography (MRA)なのか？

下肢血管を評価する方法としては、X線デジタルサブトラクション血管造影(digital subtraction angiography: DSA), CT検査, 超音波(ドプラ)検査(US), 血管内超音波検査(intravascular ultrasound: IVUS)など、ほかにも多くの画像診断方法があるが、その中でMRAが推奨される理由には下記のようなものがある。

(1) 腎毒性のない造影剤の使用

X線を使用する造影検査ではヨード系造影剤が使用され、これがhospital acquired renal insufficiencyの大きな要因の一つになっているという報告がある^{1,2)}。もともと下肢の血管造影検査の対象となる患者は、糖尿病や腎動脈の動脈硬化性変化等の合併症を抱える例が多く、ヨード系造影剤使用による腎不全のリスクは他疾患の患者よりも大きい。その点、MRIに使用されるガドリニウムキレート製剤は腎毒性がきわめて低い。腎

不全のリスクを抱えた症例に腎機能の心配なく血管評価が行える画像検査はMRAとUSだけである。

(2) セルジンガー法による目標動脈へのアプローチ不要

両側大腿動脈閉塞症例や、両側上腕動脈や腋窩動脈の閉塞例のように、セルジンガー法によるカテーテルのアプローチが不可能な症例でもMRAなら全身あらゆる部位の血管画像が得られる(Fig. 1)。このような症例にX線血管造影を施行するには、従前は経腰の大動脈造影法(ドス・サントス法)での腹部大動脈の直接穿刺による造影といった非常に侵襲的でリスクの高い検査方法が行われていた。

(3) 一度の撮影で三次元表示(任意方向、任意断面の観察)

MRAでは三次元表示ができることから、一度の造影剤注入で、さまざまな角度からの観察が可能である(Fig. 2A ~ C)。X線血管造影では多方向からの撮影を行う場合にはその都度、造影剤の注入が別途必要で(テーブル移動撮影ができなければ部位ごとの撮影も必要である), 腎機能への負担ばかりでなく、コストも余

¹浜松医科大学医学部附属病院放射線部

²浜松医科大学医学部附属病院放射線科

2004年9月7日受理



Figure 1 A 45-year-old male with Leriche syndrome. Three-station smartstep MR angiography depicts abrupt amputation of the abdominal aorta below superior mesenteric artery. The blood supply to the lower extremities is dependent on the collaterals in the abdominal wall and the thoracic wall.

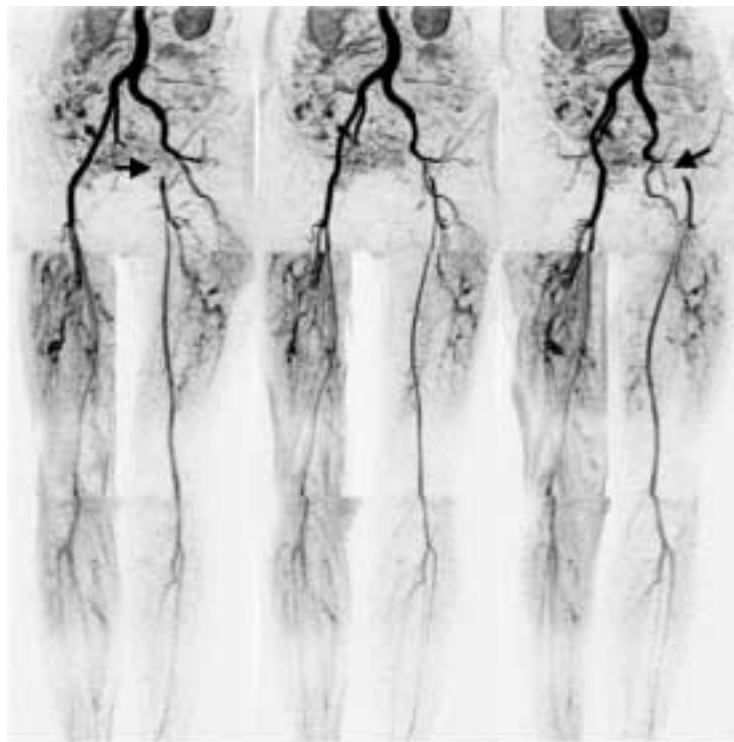


Figure 2 A 41-year-old female complaining of intermittent claudication due to arteriosclerosis-obliterans. Left external iliac artery is completely occluded (arrows). There are long stenotic segments in the right superficial femoral artery and the right deep femoral artery, which resulted in collateral circulations within the muscle. The arteries below the trifurcation are not entirely depicted; however, the reasons for this poor depictions could not be specifically explained either by the occlusion of the arteries or by the missed optimum timing with this single phase MR angiogram.

A: Left anterior oblique view.
B: Anterior view.
C: Right anterior oblique view.

A | B | C

計にかかることになる。

(4) 側副路を見逃さない

造影MRAは経静脈性の造影であるため、すべての側副路やbypass (Fig. 3A) を描出できる。カテーテル法では、造影剤の注入部より下流の血管しか描出できない。たとえば、腹部大動脈から総腸骨動脈に及ぶ閉塞症例では、胸壁 (内胸動脈など) や腹壁 (下腹壁動脈など) を介する側副路が重要であるが、カテーテル法でこれらを余すところなく個別に造影するには多くの血管へのアプローチが必要で、そのたびに別途、カテーテルの選択、造影剤の投与、電離放射線被曝が繰り返されることとなる。

(5) 介入治療後のフォローアップに適している

さまざまな (外科的、放射線学的、薬理学的) 介入治

療後の効果判定と、病変の再増悪の除外のためのフォローアップに、血管イメージング検査が何回も行われるのが通例であるが、これに、侵襲的なカテーテル法による血管造影を施行することは、患者のQOLの点でも、医療経済上も好ましくない。フォローアップには外来で手軽に施行でき、しかも、比較的安価かつ、リスクの少ないMRAを使用すべきである。

MRAの欠点

1) MRAは基本的に空間分解能が悪い。微妙な狭窄部や壁不整像が再現できない可能性がある。

2) MRAはいわゆるルミノグラフィーであるので、内腔を描出するが、壁自体の描出はできない。介入治療前には血管壁の評価のためにIVUS等も追加しなければ

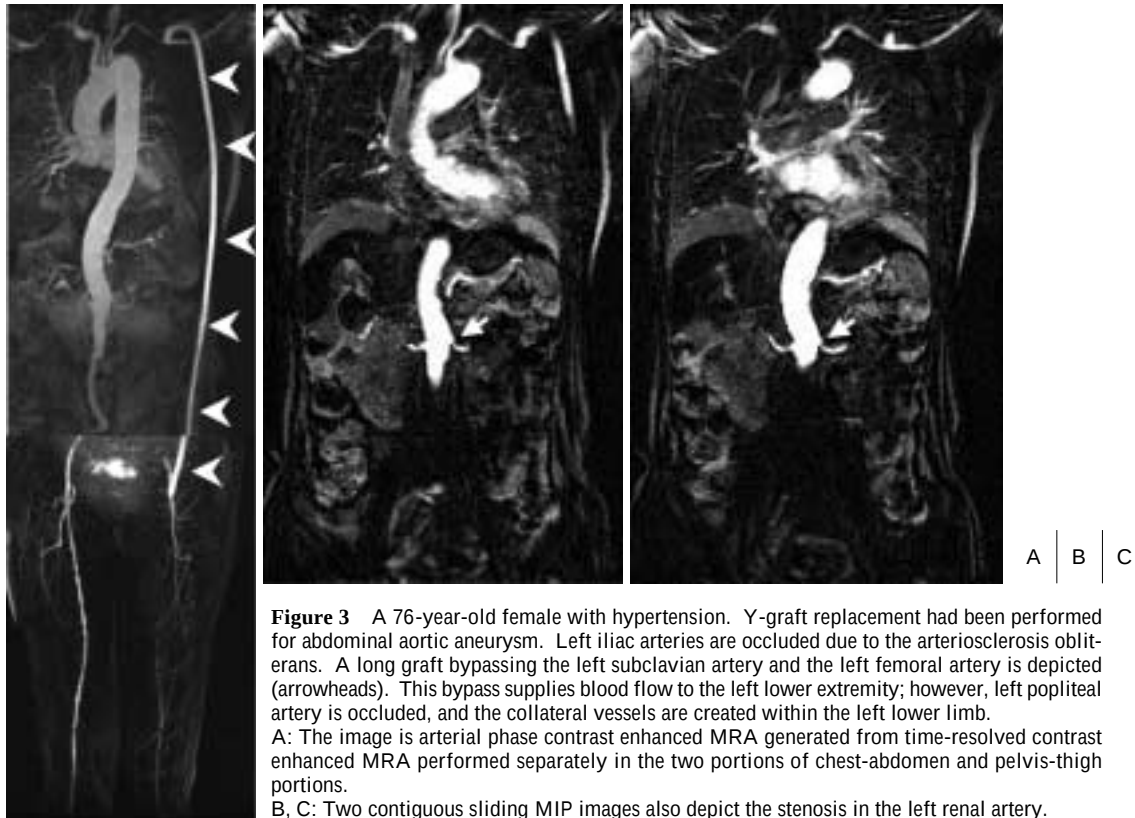


Figure 3 A 76-year-old female with hypertension. Y-graft replacement had been performed for abdominal aortic aneurysm. Left iliac arteries are occluded due to the arteriosclerosis obliterans. A long graft bypassing the left subclavian artery and the left femoral artery is depicted (arrowheads). This bypass supplies blood flow to the left lower extremity; however, left popliteal artery is occluded, and the collateral vessels are created within the left lower limb. A: The image is arterial phase contrast enhanced MRA generated from time-resolved contrast enhanced MRA performed separately in the two portions of chest-abdomen and pelvis-thigh portions. B, C: Two contiguous sliding MIP images also depict the stenosis in the left renal artery.

ならない場合がある。ただ、壁描出の重要性がMR検査でも徐々に認識されつつあり、ブランクイメージング等も試みられつつある^{3,4)}。ただし、まだMRIを用いたブランク評価の一般的な手法は確立されていない。近年、特に冠状動脈において、血管内腔の狭窄だけでなく、壁のatheromaが破裂しやすいかしくいかを評価することが試みられつつある。下肢においては、冠状動脈ほどの要請はないが、どの程度のatheromaがあるのか知っておいたほうが、バルーンでの拡張やステント留置術前の評価にも有用である。現状では最低、通常のT1強調画像(脂肪抑制が望ましい)の軸位断像を追加撮影しておくべきである。

3) 壁石灰化の有無が分からない。ただし、下肢動脈疾患における石灰化の有無の臨床的意義はまだ証明されていない。

4) ステント留置部位の評価が不可能

留置部の信号が消失する(Fig. 4D, 5)ので、留置部の疎通性は前後の描出と側副路の形成の有無で判断する

しかない。

5) MR特有の禁忌事項がある。

心臓ペースメーカー装着者、金属器具の装着者など。

撮影技術

MRAには大別して二つの撮影法(造影MRA, 非造影MRA)があり、このうちの非造影MRAはさらにtime of flight(TOF)法, phase contrast(PC)法に分類される。近年では造影MRAが安定した血管描出能を提供することからこれが主流となっており、さまざまな改良が加えられて、今日に至っている。下肢造影MRAに限ってもさまざまな工夫が加えられてきているが、共通することは3D fast SPGR[spoiled gradient recalled echo in the steady state(装置のメーカーにより呼称が異なる。要は、三次元gradient-echo系列である)]を用いて、撮影対象の動脈内で造影剤の濃度が最も高い時期を狙って撮影することである。このとき、静脈のオーバーラップを防ぐことも良い動脈造影を作る観点から重要

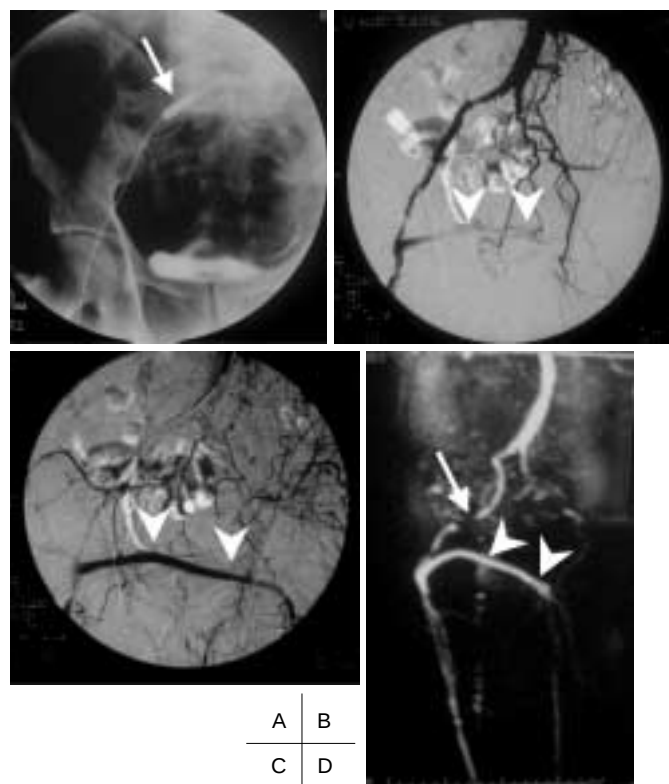


Figure 4 A 68-year-old male complaining of intermittent claudication after 100 m of ambulation. A: Balloon angioplasty followed by Palmatz-stent placement was performed for the narrowed segment. B, C: In addition, femoro-femoral bypass graft was surgically placed. The images are X-ray DSA. D: Contrast enhanced MR angiography shows a brief signal loss at the arterial segment where the stent was placed. This signal loss should not be interpreted as complete occlusion of the corresponding artery. The run-off beyond this point is good and the bypass is also enhanced with contrast media.



Figure 5 A 78-year-old male with arteriosclerosis obliterans. There are four stents placed in the bilateral common and external iliac arteries where signal loss appears. Bilateral superficial femoral arteries are occluded, and the lower extremities are fed by collaterals.

ではあるが、腎動脈や頭頸部動脈といった検査対象とは異なり、下肢では比較的撮影時間に余裕がある。これを認識せずに、いたずらに時間分解能を追求して空間分解能をおろそかにすると、十分な動脈評価が行えない場合がある。すなわち、下肢は筋肉や結合組織といった間質成分が豊富であるため、造影剤の静脈への移行が遅い。下肢動脈内の造影剤濃度をある程度維持しておけば、動脈のコントラストは保証される。したがって、下肢の造影MRAに限って言えば、造影剤をbolusで一気に注入するよりは、緩徐な注入速度で、比較的長時間動脈内の造影剤濃度を維持することが肝要である。

使用装置

繰り返し時間 (TR) やエコー時間 (TE) は短ければ短いほど良いので、装置の磁場勾配発生装置のパフォーマンスは高いものほど良い。TRが短ければ、組織に縦緩和の暇を与えないため、背景組織の信号はほとんどゼロになって血管のコントラストは向上するし、TEが短ければ、撮影voxel内の血流による位相ずれも少なくなり、血流の信号が保たれる。さらに、表面コイルを組み合わせ、それぞれに独立したレシーバーを有するphased array coilを使用することが望ましい。これは信号雑音比の向上が第一の目的である。最近では、頭尾側方向

に長い範囲をカバーする長大な表面コイルも発表されており、テーブルをスライドさせて撮影しても、コイルの着脱をしなくてよい構造になっている。組み込まれたコイルをテーブル移動とともに上から下へ順次 active にしていく仕組みである。また、こういった多チャンネルの表面コイルに最近の高速撮影技術である parallel imaging (sensitivity encoding: SENSE, simultaneous acquisition of spatial harmonics: SMASH など⁵⁻⁸⁾) を併用すると、撮影時間が短縮されたり、同じ撮影時間でも良好な空間分解能を得たりすることもできる。

撮像法

(1) Smartstep MRA (または moving bed MRA, 大視野 MRA)

腹部、骨盤部、大腿部、下腿部という具合に、撮影範囲をずらしながら、一度の造影剤注入で大視野の造影 MRA を得ることができる (Fig. 6)。造影剤の注入は腹部ではある程度の bolus 性が必要であるが、これにより動脈内の造影剤の濃度がある一定量に達した後は、引き続いて撮影される下肢では動脈内濃度を維持する量を追加投与する。注入 rate は 0.5 ~ 1.0 ml/s と、小さくてよい。この方法ではいくつかの部位の MRA をつなぎ合わせるにより、ほぼ全身の動脈造影を得ることも可能である (Fig. 1)。ただ、この方法では、基本的に一時相の MRA しか得られないため、描出されている動脈の疎通性に関しては自信を持って“閉塞なし”と診断でき

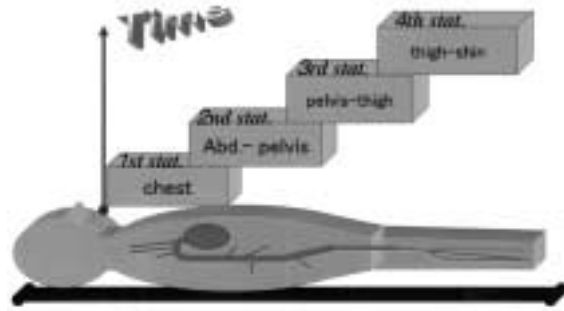


Figure 6 An extended field of view method such as “bolus chase” or “smartstep” has been recently reported. Since there is a technical limitation in the size concerning the field of view obtained in a single patient location, the stepping table movements to perform multi-station imagings chasing the bolus of the contrast media is one way to enable a whole body MR angiography. The scheme is a model of 4-station imaging.

るが、描出されていない場合には、必ずしも閉塞と診断することはできない。描出のタイミングを逃したかもしれないからである。また、多時相造影 MRA では、動脈濃染の順番から流れの方向に関してある程度の情報が得られるが、一時相ではそれも不可能である。

(2) 多時相造影 MRA (高速 MRA の同一部位での繰り返し撮影)

この方法には、三次元画像に時間分解能が加わっているため、4D MRA あるいは、3D MRDSA といった呼称も与えられている (Fig. 7)。使用するパルスシーケン

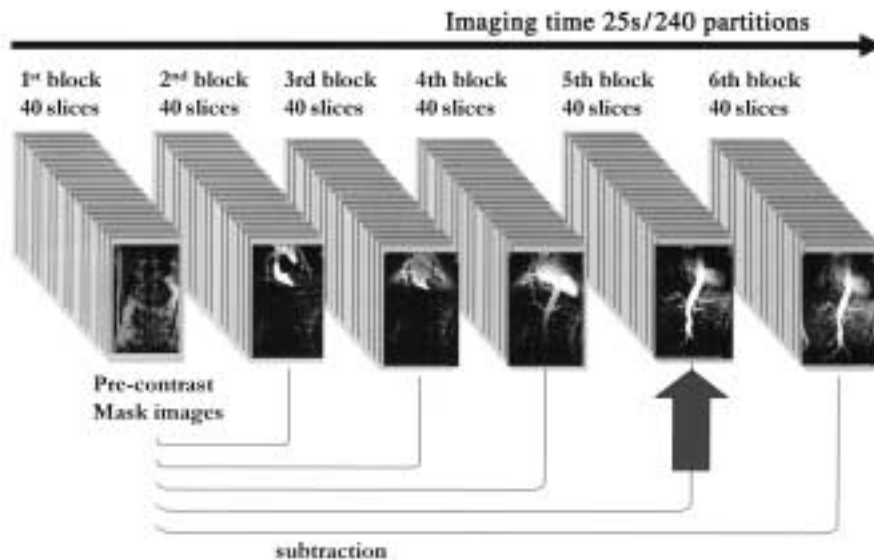


Figure 7 A scheme of time-resolved MR angiography (MRDSA). Fast 3 dimensional Fourier transform gradient echo sequence is repeated before and after the bolus injection of contrast media. Each portion of post-contrast 3D data sets is subtracted by that of pre-contrast data-sets and is post-processed by the maximum intensity projection algorithm.

スは通常、大動脈の造影MRAで用いられているものと同一のものをを用いる。腹部から骨盤部を多時相撮影後、部位を尾側に移して、別途の造影剤注入を行い、下肢を撮影しても、subtractionを使用することにより、初回の造影剤投与の影響をほぼキャンセルすることが可能である。こうして多時相造影MRAでは、至適撮影タイミングを逃すことはないが、時間分解能を高めるために、撮影matrixを小さく設定せざるを得ないため、trade-offとして、空間分解能が悪くなる恐れがある。このことが、微細な側副路の描出や、微妙な狭窄部の描出にあたり障害となることがある。

(3) EC-TRICKS (ellipsoid centric time-resolved imaging of contrast kinetics : 高空間分解能かつ高速MRAの繰り返し撮影)

本来、下肢MRAでは、考慮しなければならない技術上の問題点がいくつかある。まず、上流の動脈閉塞の程度によって、左右の下肢で造影剤到達時間が異なることがある。その至適撮影タイミングは、経験によって予測不可能である (Fig. 8)。また、撮影対象とする動脈が細いため、software triggering (後述) が可能な装置でも、tracker volumeを置く動脈を定めにくい。下腿三分岐の動脈は細く、その側副路はさらに細い。このよ

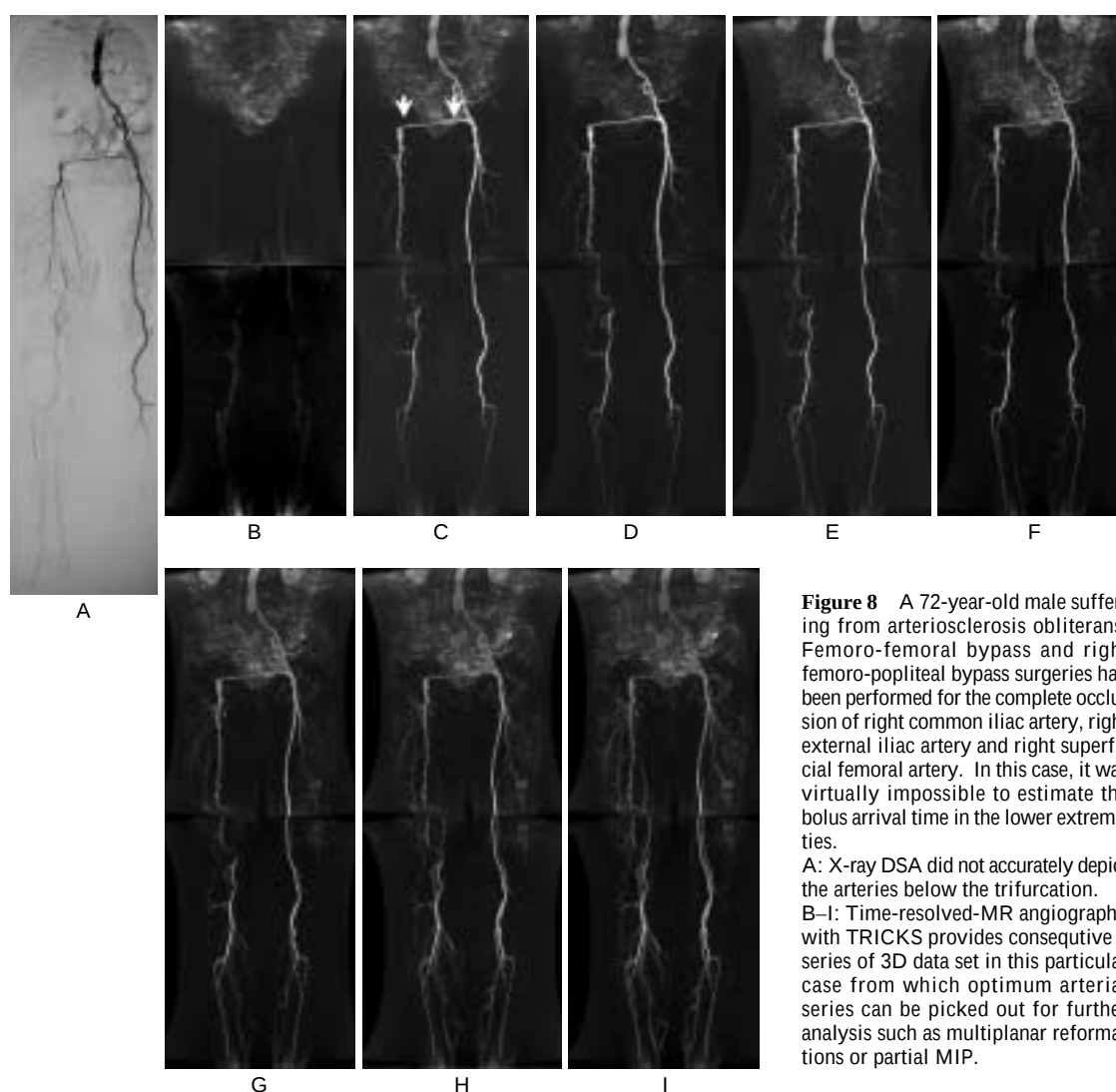


Figure 8 A 72-year-old male suffering from arteriosclerosis obliterans. Femoro-femoral bypass and right femoro-popliteal bypass surgeries had been performed for the complete occlusion of right common iliac artery, right external iliac artery and right superficial femoral artery. In this case, it was virtually impossible to estimate the bolus arrival time in the lower extremities.
A: X-ray DSA did not accurately depict the arteries below the trifurcation.
B-I: Time-resolved-MR angiography with TRICKS provides consecutive 7 series of 3D data set in this particular case from which optimum arterial series can be picked out for further analysis such as multiplanar reformations or partial MIP.

うな微細な動脈は空間周波数としては高周波成分に属しており, k-spaceの辺縁部のデータをおろそかにできないことになる(つまり空間分解能の高い画像が必要)。こういった問題点をかなり解消できるのが,

TRICKSである⁹⁻¹¹⁾。TRICKSは三次元のデータ収集を繰り返すtime-resolved-MRA(撮影法についてはFig. 9を参照)であり(Fig. 10), しかも時間分解能を維持しながら空間分解能も比較的高く設定できる。

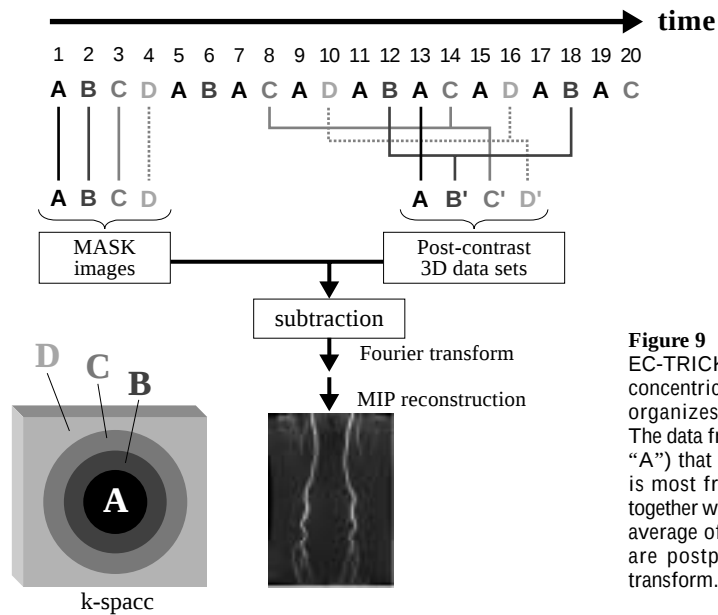


Figure 9 A scheme shows how EC-TRICKS divides k-space into concentric portions, updates, reorganizes, and reconstructs it. The data from k-space center (i.e. "A") that affects image contrast is most frequently updated. A together with B', C', D' which are average of nearby Bs, Cs and Ds are postprocessed by Fourier transform.

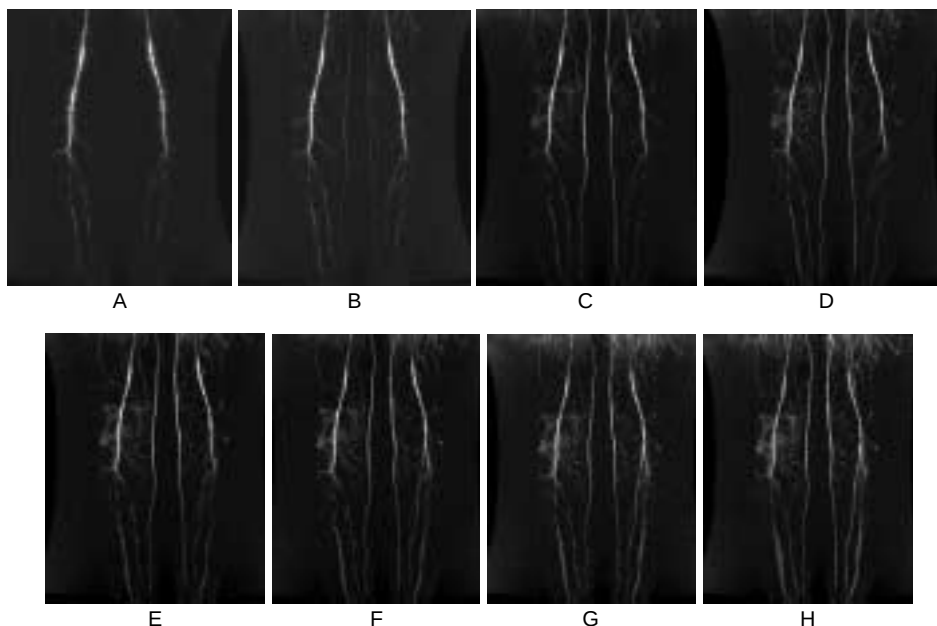


Figure 10 A 60-year-old female of arteriosclerosis obliterans. Time-resolved MR angiography using EC-TRICKS for the lower extremities below trifurcation (A-H). As the phase proceeds, enhancement of the soft tissue is increased and the venous overlaps hamper the depiction of the arteries. There are irregular stenoses in the arterial branches below the trifurcation.

造影剤投与法

造影剤の投与量は、極端な言い方をすれば、多ければ多いほど良好なMRAが得られる¹²⁾。欧米ではdouble-dose(0.2mmol/kg)やtriple-dose(0.3mmol/kg)が静脈内投与される場合が多い^{11,13)}。しかし、日本ではMRA検査にこのような高用量の承認を得ている造影剤はなく(適応外使用)、コストの問題もある。たまたま、single-doseとdouble-doseのMRAを比較的短期間に行った症例があり、骨盤部の描出能にはさほど差を感じなかったものの、下腿では、single-doseのみでは動脈内の濃度が維持できず、造影能は明らかに劣化していた。細かな側副路の描出能もdouble-doseのほうが良かった(Fig. 11A, B)。われわれの施設では、下肢MRAのみを撮影する場合は0.1mmol/kgを用いるが、腹部～骨盤部～下肢と広範囲を含める場合には市販のガドリニウム製剤を上限20mlとして、0.15～0.2mmol/kg使用することが多い。注入プログラムとしては、smartstep法では、まず、腹部～骨盤部に0.1mmol/kgの造影剤を1ml/sで注入したら、これに引き続いて下肢へ残りの0.5～1.0mmol/kgの造影剤を0.5ml/sで注入して動脈内濃度を維持する。一方、骨盤～大腿と大腿～下腿という具合に、上下2部位で多時相造影MRAを行う場合は、0.075～0.1mmol/kgの造影剤を1ml/sでそれぞれの部位にbolus注入してよい。

検査対象の動脈への造影剤到達を感知して撮影を開始する手法

腹部、骨盤部から撮影を始めて、下肢MRAまでを撮影する場合、最初の撮影開始のタイミングを計って撮影のスタート時点をも最適化すれば、その後の下肢撮影のために注入する造影剤にも無駄が少なくなる。applicationによりこのタイミングを計るものとしてsmartprep法がある¹⁴⁾。ある動脈内の造影剤濃度を検知して、それが一定の濃度(信号)を超えた時に、MR装置が自動的に本スキャンをスタートする方法である。一方、fluoro-trigger法は時間分解能の高いprescanを繰り返し、撮影対象の動脈の濃度を画像上で目視しながら、ある一定の濃度以上になったときに手動で本スキャンをスタートさせるものである。そして、test-bolus法は、まず少量の造影剤を投与して、大動脈の濃度を観察し、濃度が最大になるまでの時間を計測し、その造影剤投与からその時間を経た後にやはり手動で本ス

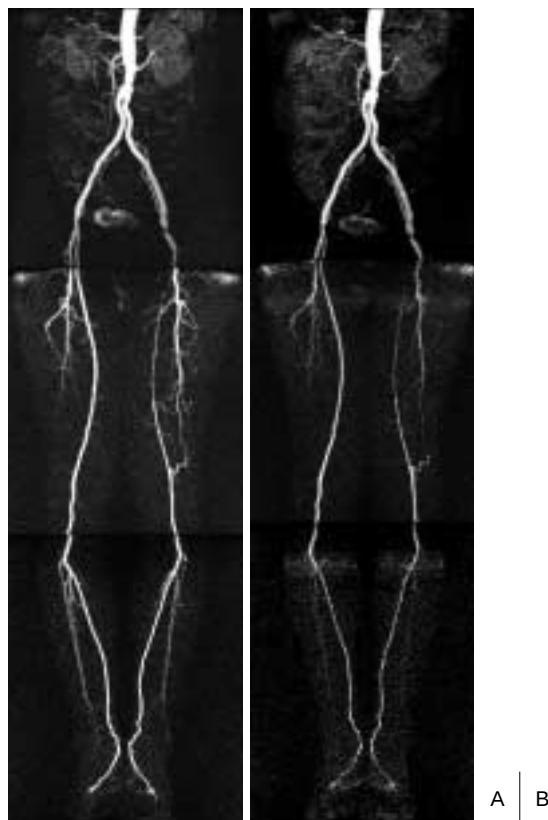


Figure 11 A 70-year-old male with arteriosclerosis obliterans. The patient underwent thrombectomy of the occluded femoral artery followed by aorto-bifemoral graft placement. Collaterals are created due to the occlusion of the left femoral artery. The depiction of the collaterals and the fine arteries below trifurcation is clearly superior in the double dose study (A) as compared to the single dose study (B). In this particular case, a body coil was used instead of a phased array coil.

キャンを開始するようにするものである¹⁵⁾。しかしながら、本スキャンの時間分解能が良ければ、上述のような方法は必要としない。何時相か撮影して、至適タイミングのMRAを選択すればよいからである。

TRICKSのような時間分解能の良いapplicationがない場合には、姑息的ではあるが、患者の膝上にて、駆血することにより、下肢動脈の血流がうっ滞し、同動脈の造影剤濃度の高い時間を延長することにより、至適撮影時間を延長することができる。

造影MRAの適応

前述のごとく、腎機能障害があって、ヨード系造影剤の使用がはばかれる場合や、セルジンガー法によ



Figure 12 A 52-year-old male with adventitial cyst in the right popliteal artery. There is a cystic lesion in the right popliteal artery.

A: An arterial phase MR angiography. A brief narrowed segment is also seen in the corresponding segment.

B: Post-contrast T1-weighted image. There is an un-enhanced area (arrow) adjacent to the enhanced popliteal artery.

C: T2-weighted image. There is an high signal (arrow) adjacent to the flow void of the popliteal artery.

るカテーテルのアプローチが困難な症例では，MRAの
良い適応となる。その他，疾患としては，血管病変を
伴うものはほぼすべて適応範囲内である。列挙する
と，閉塞性動脈硬化症(arteriosclerotic obliteration:
ASO)，Buerger病(閉塞性血栓性血管炎)，動脈瘤(真性，
偽性)，動静脈瘻，動脈解離，その他，血管壁病変
(adventitial cyst)¹⁶⁾(Fig. 12)，血管外からの圧迫
(popliteal artery entrapment症候群)等が挙げられるが，
何といてもASOの患者が一番多く，すでに多くの研
究者から造影MRAの有用性について，良好な成績が報
告されている¹⁷⁻²³⁾。

再構成

得られた画像は，通常，造影後の画像をマスク画像
(造影前の元画像)でサブトラクションし，差分画像を
得た後に，maximum intensity projection(MIP)法やslid-



Figure 13 A 73-year-old male of arteriosclerosis obliterans. Aorto-bifemoral graft and left femoro-popliteal graft were placed. In spite of the multiple severe stenoses in the larger arteries, peripheral arteries were relatively intact; therefore, the run-off was good. The case was considered to be a good candidate for bypass surgery, and the outcome was good.

ing MIP法(multiplanar volume reconstruction: MPVR)で
再構成する。これにより，三次元の任意方向からの投
影画像が得られる。

読影と解釈

MIP再構成画像による多方向からの観察を行い，血
管を概観する，MPVRにより拡張分節と狭窄分節の詳
細な評価を行い，側副路の有無を確認する。MIPのみ
では見えない側副路が多く観察可能である。バイパス
手術，PTA，ステント留置などにあたり重要なのは，
run-offの有無の確認である(Fig. 13, 14)。可能な限り多
時相のMRAを撮影して，所見の漏れがないようにす
る。頭側の腹部大動脈の状態も観察する必要がある。
また，元画像も確認し，動脈瘤がある場合は壁血栓
を評価し，さらに，金属アーチファクトの存在からス
テントの位置を確認する。

MRAの観察におけるpitfall

金属ステントが留置されている場合には，同部の信号

が消失してしまい、偽狭窄として認識される懸念がある。また、通常MRAはsubtractionされて内腔のみが見える。再構成されたMIP後のMRAのみを観察していると、壁在血栓を見落とす可能性がある。必ず、サブトラクション前の元画像を多断面で観察しておく習慣をつけたい。また、バイパス手術後の症例では必ず、MRA撮影前に施行された術式を見ておかないと、体表に近いバイパスグラフトが撮影範囲から漏れてしまう可能性がある。さらに、前述のごとく、至適撮影タイミングを逸している場合、非描出血管を閉塞と見誤る可能性があるが、これは、多時相の撮影を行うことにより回避できる。

まとめ

造影MRAは、MR技術の進歩とともに洗練されてきており、時間分解能と空間分解能の両立した画像が得られつつある。X線による血管造影の不可能な症例や、造影剤使用によるリスクの高い症例、頻回のフォローアップを必要とする症例において、MRAは特に良い適応である。

謝 辞

日頃、血管疾患の診療にご指導、ご協力をいただいている

る浜松医科大学第一外科、第二外科に深謝します。

文 献

- 1) Cox CD, Tsikouris JP: Preventing contrast nephropathy: What is the best strategy? A review of the literature. *J Clin Pharmacol*, 2004, **44**: 327–337.
- 2) Nash K, Hafeez A, Hou S: Hospital-acquired renal insufficiency. *Am J Kidney Dis*, 2002, **39**: 930–936.
- 3) Fayad ZA, Sirol M, Nikolaou K et al: Magnetic resonance imaging and computed tomography in assessment of atherosclerotic plaque. *Curr Atheroscler Rep*, 2004, **6**: 232–242.
- 4) Fayad ZA, Fuster V: Clinical imaging of the high-risk or vulnerable atherosclerotic plaque. *Circ Res*, 2001, **89**: 305–316.
- 5) Bydder M, Larkman DJ, Hajnal JV: Generalized SMASH imaging. *Magn Reson Med*, 2002, **47**: 160–170.
- 6) Maki JH, Wilson GJ, Eubank WB et al: Utilizing SENSE to achieve lower station sub-millimeter isotropic resolution and minimal venous enhancement in peripheral MR angiography. *J Magn Reson Imaging*, 2002, **15**: 484–491.
- 7) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB et al: SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI. *Magn Reson Med*, 1999, **42**: 952–962.

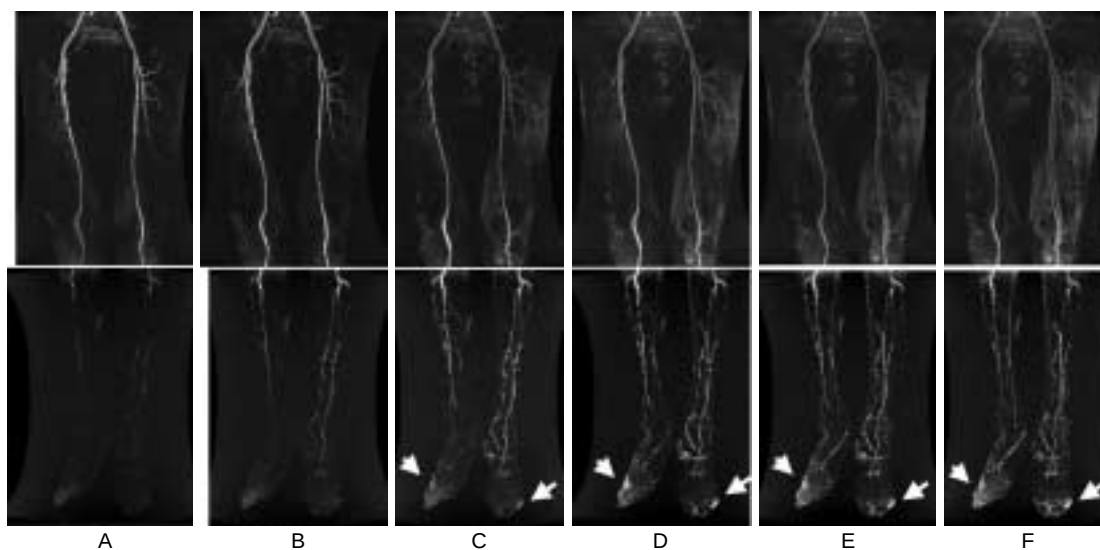


Figure 14 Six phase MR arteriogram acquired with EC-TRICKS are shown. Time-resolved MR angiogram of the two portions of upper half and lower half of the lower extremities were separately acquired. A 83-year-old male with diabetes mellitus, hyperlipidemia, hypertension, and cerebral infarction. The patient suffered from pain in the lower limbs and multiple ulcers in the toes. Peripheral arteries below the trifurcation are irregularly narrowed or occluded. There is also soft tissue enhancement at the ulcers of the toes.

- 8) Wang Y: Description of parallel imaging in MRI using multiple coils. *Magn Reson Med*, 2000, **44**: 495–499.
- 9) Du J, Carroll TJ, Wagner HJ et al: Time-resolved, undersampled projection reconstruction imaging for high-resolution CE-MRA of the distal runoff vessels. *Magn Reson Med*, 2002, **48**: 516–522.
- 10) Korosec FR, Frayne R, Grist TM et al: Time-resolved contrast-enhanced 3D MR angiography. *Magn Reson Med*, 1996, **36**: 345–351.
- 11) Swan JS, Carroll TJ, Kennell TW et al: Time-resolved three-dimensional contrast-enhanced MR angiography of the peripheral vessels. *Radiology*, 2002, **225**: 43–52.
- 12) Mitsuzaki K, Yamashita Y, Ogata I et al: Optimal protocol for injection of contrast material at MR angiography: Study of healthy volunteers. *Radiology*, 1999, **213**: 913–918.
- 13) Prince MR, Narasimham DL, Stanley JC et al: Breath-hold gadolinium-enhanced MR angiography of the abdominal aorta and its major branches. *Radiology*, 1995, **197**: 785–792.
- 14) Foo TK, Saranathan M, Prince MR et al: Automated detection of bolus arrival and initiation of data acquisition in fast, three-dimensional, gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology*, 1997, **203**: 275–280.
- 15) Kim JK, Farb RI, Wright GA: Test bolus examination in the carotid artery at dynamic gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology*, 1998, **206**: 283–289.
- 16) Unno N, Kaneko H, Uchiyama T et al: Cystic adventitial disease of the popliteal artery: Elongation into the media of the popliteal artery and communication with the knee joint capsule: Report of a case. *Surg Today*, 2000, **30**: 1026–1029.
- 17) Yucel EK, Kaufman JA, Geller SC et al: Atherosclerotic occlusive disease of the lower extremity: Prospective evaluation with two-dimensional time-of-flight MR angiography. *Radiology*, 1993, **187**: 637–641.
- 18) Borrello JA: MR angiography versus conventional X-ray angiography in the lower extremities: Everyone wins. *Radiology*, 1993, **187**: 615–617.
- 19) Kim D, Edelman RR, Kent KC et al: Abdominal aorta and renal artery stenosis: Evaluation with MR angiography. *Radiology*, 1990, **174**: 727–731.
- 20) Kricheff II: Arteriosclerotic ischemic cerebrovascular disease. *Radiology*, 1987, **162**: 101–109.
- 21) Valk PE, Hale JD, Kaufman L et al: MR imaging of the aorta with three-dimensional vessel reconstruction: Validation by angiography. *Radiology*, 1985, **157**: 721–725.
- 22) Wesbey GE, Higgins CB, Amparo EG et al: Peripheral vascular disease: Correlation of MR imaging and angiography. *Radiology*, 1985, **156**: 733–739.
- 23) Herfkens RJ, Higgins CB, Hricak H et al: Nuclear magnetic resonance imaging of atherosclerotic disease. *Radiology*, 1983, **148**: 161–166.

Magnetic Resonance Angiography for the Peripheral Vessels of the Lower Limb

Yasuo Takehara,¹ and Haruo Isoda²

¹Department of Radiology, Hamamatsu University Hospital,
and ²Department of Radiology, Hamamatsu University School of Medicine, Shizuoka, Japan

Key words: gadolinium chelate, contrast enhanced, magnetic resonance angiography, atherosclerosis

Candidates for X-ray angiography of the peripheral vessels usually suffer from diabetes mellitus, hypertension or arteriosclerosis; therefore, they are in a high risk group of contrast media-induced renal insufficiency. Gadolinium-enhanced magnetic resonance angiography (MRA) is practically free from such risks, because gadolinium chelates are virtually non-nephrotoxic. MRA allows three dimensional overviews of the whole arteries including peripheral arteries in the lower limbs as well as the aorta and its main branches. Unlike catheter angiography with X-ray, it requires no catheter approach; therefore, it does not fail to depict the collateral vessels. MRA is free from ionizing radiation or invasive approaches; therefore, it can be repeated in a short interval of time, and thereby is an ideal method in follow-up studies after surgical or pharmacological interventions. The poor spatial resolution has been an inherent limitation of MRA; however, recently innovated application such as TRICKS or sophisticated multi-channel phased array coils is improving the spatial resolutions and the optimization of the contrast timing. (*J Jpn Coll Angiol*, 2004, **44**: 743–753)