

# 全身の MR angiography

廣橋伸治

奈良県立医科大学放射線医学教室

## はじめに

動脈硬化性病変の早期発見は診断のみならず interventional radiology (IVR) を含めた治療法の選択においても大変重要である。動脈硬化症の診断には伝統的には digital subtraction angiography (DSA) が基本とされてきたが、近年では非侵襲的手法であるドップラ US や CT angiography (CTA), MR angiography (MRA) が登場し、新しい診断体系を作成する必要が生じてきた。

新しい非侵襲的診断法の 1 種である MRA においては、一つの観察領域 (FOV ; field of view) において time of flight (TOF) 法や phase contrast (PC) 法で画像を得てきた時代から、現在では、高速撮像に造影剤を併用することにより 10 数秒で高品質な血管像を高い空間分解能で得ることが可能となり、正確な診断が可能となってきた。

しかしながら、動脈硬化は局所的な疾患ではなく全身的に分布するため、一つの観察領域だけでは不十分であり、できる限り全身余すところなく評価できることが必要である。本稿では、全身 MRA を得るために必要な技術的概念について概説し、現在当院で施行している脳並びに心臓を除いた全身の造影 MR angiography を中心に撮像方法から臨床成績について述べ、将来展望についても言及する。

## 非造影 MR angiography

現在使用される非造影 MRA はその手法から、time of flight (TOF) 法、phase contrast (PC) 法、並びに fresh blood imaging (FBI) 法の 3 種に分類できる。

TOF 法は、MRA の開発初期から採用された方法で、スライス面内に流入する血流が高信号を示す効果 (inflow effect, flow related enhancement) を応用したものである<sup>1)</sup>。撮像法としては二次元法と三次元法があり、後者は頭部の MRA としては一般に普及しているが、長い撮像時間を要するのと 1 度の撮像範囲を大きくすると inflow effect が弱くなってしまうため躯幹の MRA としては二次元法が一般的である。また、動脈撮像時には通常尾側に飽和パルス (spatial presaturation pulse) を併用しながら体軸横断面で撮像した後、最大値投影 (maximum intensity projection ; MIP) 法で三次元 MRA を再構成する。この TOF の信号増強のために収縮期のみの撮像を行う心電図同期撮影の効果は絶大である (Fig. 1)。

PC 法は血流によるスピンの位相差を画像化する方法であり、パイポーラフローエンコーディンググラジェントの極性を反転させて、複数回収集したデータを互いに差し引いて画像を作成する<sup>2)</sup>。PC 法では Venc (velocity encoding) 値を任意に設定することにより、観察したい血流の情報だけを表示できることや流速の計測も可能となる点が利点である。TOF と同

---

キーワード magnetic resonance angiography, contrast media, atherosclerosis, screening

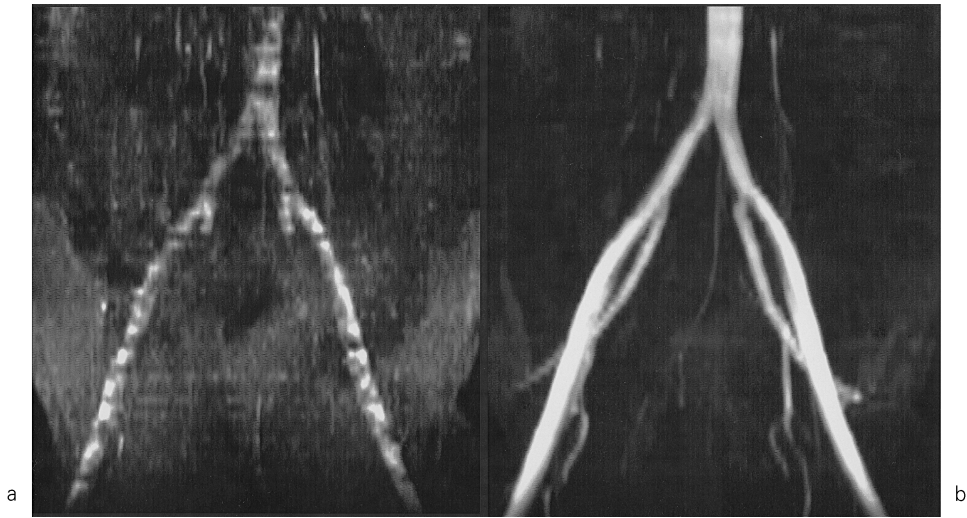


Fig. 1. Comparison of 2D-TOF MRA between with and without ECG trigger  
(a) 2D-TOF without ECG trigger : The high signals from arteries is not sufficient in many slices.  
(b) 2D-TOF with ECG trigger : The aorto-iliac arteries show homogeneous high signals which is sufficient for the diagnosis.

様に二次元法と三次元法が存在するが、頭部などは三次元法が頻用される。その理由は、遅い血流の描出が良好で血流および撮像面の向きに影響を受けず、血流の流速並びに方向に関する情報を定量的に得られることであるが、一方、撮像時間が長く、高度の磁場均一性が必要であるという欠点を有する。

FBI法はいわゆる rephase-dephase subtraction法の1種で、心電図同期により収縮期（動脈が dephase）と拡張期（動脈が rephase）の両方で高速  $T_2$  強調画像を撮影し、拡張期と収縮期の差分をとることで選択的動脈画像を、また、この選択的動脈画像との差分から選択的静脈画像を得るという方法である<sup>3),4)</sup>。その後、さらに read gradient を工夫することにより dephasing 効果を高めたり、様々な流速の血流のみを描出することも可能となり、最近では1心周期ごとに収縮期と拡張期を交互に撮影する

方法を dual phase FBI法と呼称している。

### 造影 MR angiography

造影 MRA は造影剤による  $T_1$  短縮効果を利用し、血管内腔を高コントラストで高信号に描出するもので、今までの非造影 MRA のどの原理とも異なっており、造影剤を静注後動脈内の造影剤濃度が適値である時間内に  $T_1$  強調画像を撮像する。非造影 MRA と比較すると、造影剤を静注するという点でやや侵襲はある（低侵襲である）が、短時間（30秒以下）で広範囲の血管を高コントラストで描出できるという特徴があり、躯幹部の MRA では最もはん用されている技術である（Fig. 2）。

以上の原理から最も重要なことは造影剤を静注後動脈内の造影剤濃度が適値である時間をどのように決定するかということである。すなわ

2003年9月16日受理

別刷請求先 〒634-8522 奈良県橿原市四条町 840 奈良県立医科大学放射線医学教室 廣橋伸治

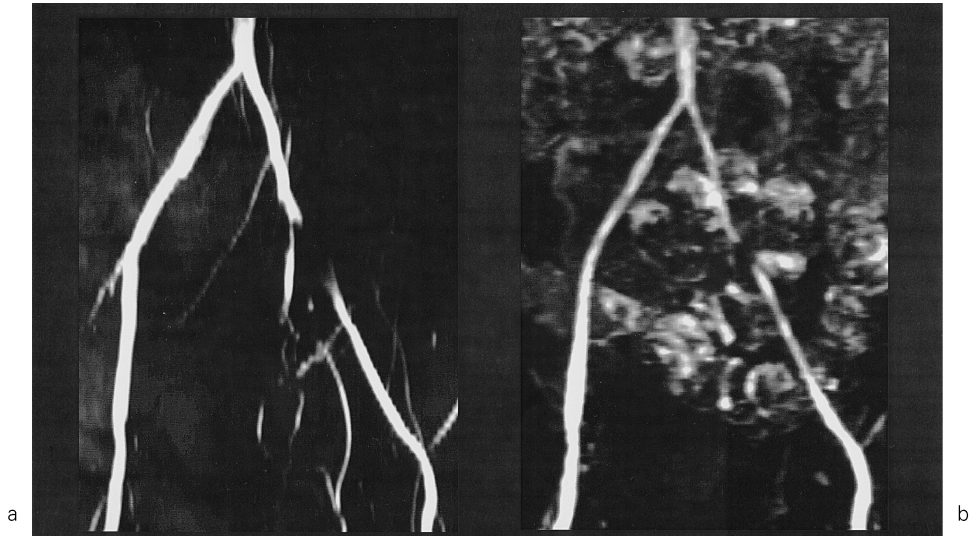


Fig. 2. Comparison between 2D-TOF and 3D-contrast-enhanced MRA

(a) 2D-TOF with ECG trigger : The signals from iliac arteries is sufficient and the segmental occlusions of left external iliac artery is depicted clearly. However the length of the occluded portion is overestimated and it takes over 4 min.

(b) 3D-contrast enhanced MRA : The occlusion of left external iliac artery is clearly demonstrated in only 20 s and the length is shorter than (a).

ち、造影 MRA の普及以前の造影 MRI では待ち時間を固定ないしは術者の経験や勘で決定していたが、もっと確実な方法が求められた。現在では、この目的に対して大きく分けて 4 種類の方法が試みられている。まず、第 1 は少量 (1~2 ml) の造影剤で大動脈到達時間を測定するタイミングポールス法<sup>5)</sup>であり、我々は本法を使用している。従来横断像で大動脈到達時間を測定していたが、横断像では大動脈の拍動によるアーチファクトのため造影剤の到達時間を間違ふ可能性があるため、現在では大動脈の長軸方向に撮像方向を設定し、長軸断面で大動脈到達時間を測定している。第 2 は目的血管の上流に関心領域において信号強度を繰り返して測定し、閾値を超えたら自動的に MRA のスキャンを開始する自動ポールス測定法である<sup>6)</sup>。第 3 は、目的血管の上流において時間分解能の高いスキャンを繰り返すいわゆる MR

透視法を用いることにより造影剤の到達を目視で確認しスキャンを開始する方法である<sup>7)</sup>。最後の第 4 番目は、そのようなタイミング設定をせずに同一部位を何度も高速 MRA のスキャンを繰り返す MR-DSA 又は time resolved MRA と呼ばれる方法である<sup>8)</sup>。

このように造影 MRA では血管のコントラストは主に造影剤の  $T_1$  短縮効果によって得られるので、TR の短縮はコントラストの向上と同時に撮像時間の短縮に直結することから、用いられるパルスシーケンスは短い TR と TE を有する  $T_1$  強調 gradient echo 法である。これを極端に縮めたものが前述の time resolved MRA である。撮像断面は血流方向を考慮する必要がないので、少ないスライス枚数で広範囲を撮像できる冠状断を用いるのが一般的である。短時間で撮像可能であるので呼吸動が問題となる上腹部では息止め可能時間内に撮像でき

るようにパラメーターを設定可能であり、骨盤～下肢領域を対象とする場合は体動の問題はほとんどないため、特に下腿などの細血管を描出する際には十分空間分解能を上げて撮像することが可能となる。これだけでも十分に血管内腔は高コントラストに描出されるが、さらに背景信号を抑制し細血管の描出能向上の目的では、造影剤静注前に同一のパラメーターでかつ同一位置を撮像した画像との差分を用いるのが通常である。こうして得られた MRA 画像は血管内腔像のみが描出され、診断的価値は高い。

高分解能の MRA を得るという観点からは、受信コイルの重要性も見逃せない。すなわち、コイルの感度が高ければ高いほど強い信号を得られるため、空間分解能を十分に上昇させることが可能となるからである。したがって、全身用コイルよりは表面コイル、特に下腿には下腿専用コイルが必要であり、高分解能画像を得ることが可能となる (Fig. 3)。

しかしながら、例えば閉塞性動脈硬化症

(ASO) の患者では骨盤から下肢動脈の全体像を撮像することが必要不可欠であることから、この造影 MRA の技術を 3～4 度繰り返すことにより下肢領域全体の動脈像を得ることが試みられた<sup>9)</sup>。しかしこの方法では各撮像に対して 1 回の造影剤注入が必要であるため、40～60 ml の造影剤が使用されていた。我が国では、最大 20 ml 注入しか認められていないため、1 領域ごとの造影剤量は必然的に数 ml に制限され、撮像タイミングは一番頭側の領域で決定し、後は経験則によって待ち時間が決定されていた。

次の段階は、1 回の造影剤注入でテーブルを移動しながら 3～4 領域を撮像するという方法であった<sup>10)</sup>。本法は腹部大動脈にカテーテルを留置してテーブルを移動して行う「テーブル移動式 DSA」と類似した方法論であるが、こうして得られた造影 MRA 像は、造影剤を低速で長時間注入することから、血流の左右差が存在する場合でも末梢まで両側ともよく描出さ

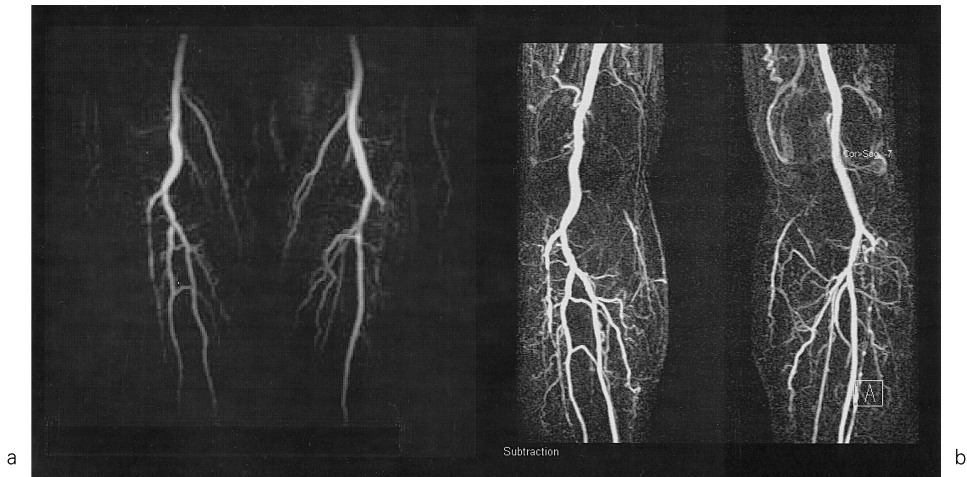


Fig. 3. Comparison between body and dedicated peripheral angio array coil  
 (a) 3D-contrast enhanced MRA with body array coil : The stenosis of right anterior tibial artery and the occlusion of left anterior tibial artery was depicted.  
 (b) 3D-contrast enhanced MRA with dedicated peripheral angio array coil : Whole arteries are more clearly shown than those with body array coil, and the conspicuity of the diagnosis is higher.



れ、テーブル移動式 DSA の画像を凌駕している (Fig. 4). さらに、カテーテルを目的血管に挿入後撮影する選択的経動脈性 DSA と比較しても同等の画像を得ることが可能である (Fig. 5). しかし、動脈硬化症のスクリーニングという意味からは、本来これだけでは不十分である. 最近、大動脈の上の分岐から下腿部までのすべての動脈をスキャンできる MRA のプロトコルが提唱され<sup>11),12)</sup>, これまでの結果は我々を勇気づけるものである. 次項では、我々の施行している全身 MRA のプロトコルに関して詳述する.

### 我々の施行している表面コイルを用いた全身 MRA

我々が全身 MRA に用いているのはシーメンス社製 Magnetom Sonata である. シーメンスの IPA (integrated panoramic array) コイルシステムでは 16 チャンネルのアレイコイルを同時に配置しておき、躯幹部から下肢全体の合計 140 cm をカバーすることが可能である (Fig. 6). この状態で自動テーブル移動を併用すれば、躯幹部・下肢をすべて高分解能で撮像可能となる. この技術を応用したものが、現在提供されている全身 MRA である.

全身 MRA の定義は内外頸動脈分岐部から足先までの MRA を得ることである<sup>11)</sup>. この目的に当初は body coil が用いられていたが、空

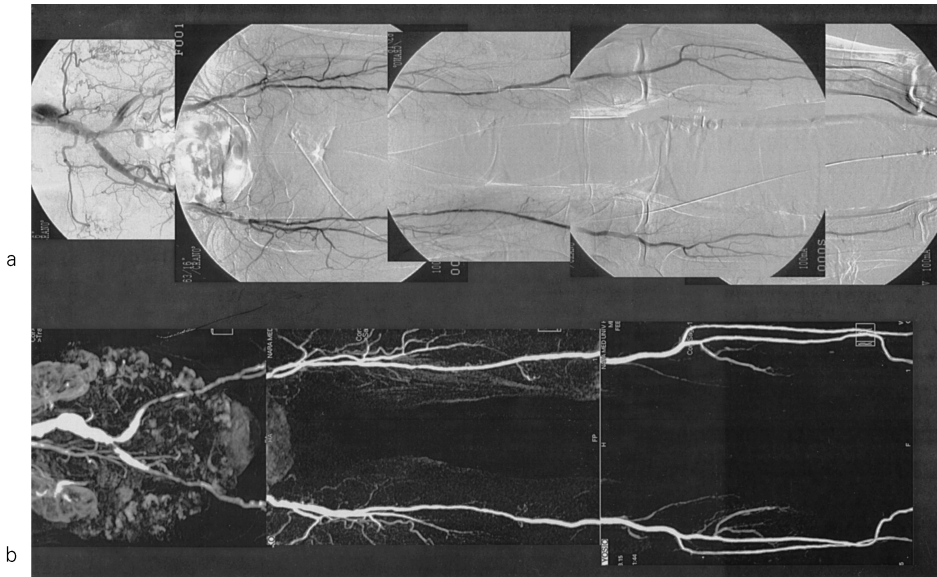


Fig. 4. The patient with bilateral intermittent claudication  
 (a) Table stepping DSA with intra aortic injection of contrast media : The arteries from iliac bifurcation to calf portion are depicted, but left external iliac artery and calf arteries are not shown clearly.  
 (b) Table stepping MRA with intravenous injection : The arteries from iliac bifurcation to calf portion are depicted more clearly than (a), and the diffuse stenosis of bilateral iliac arteries and normal findings of calf arteries are confirmed.

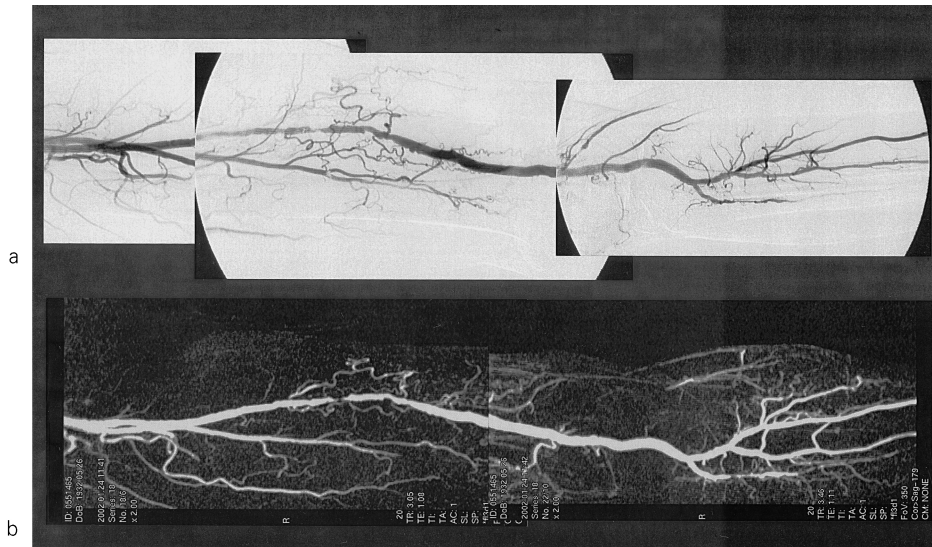


Fig. 5. A 70-year-old male with left intermittent claudication  
 (a) Table stepping DSA with the injection of contrast media via left common femoral artery : The arteries from left common femoral to calf portion are clearly shown, and the stenosis of superficial femoral artery and anterior tibial artery are clearly depicted.  
 (b) Table stepping MRA with intravenous injection : These arteries including stenotic portion were demonstrated as well as (a) in spite of intravenous injection of the contrast medium.

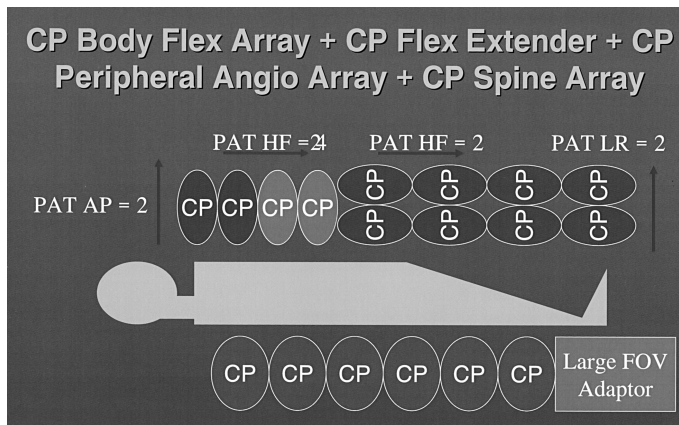


Fig. 6. Integrated panolamic array system for whole body MRA  
 We use the CP spine array on the back side which is pushed to cranial direction by the Large FOV Adaptor to compensate the coil sensitivity of the thoracic portion. The ventral side are covered by CP Body Flex Array, CP Flex Extender, and CP Peripheral Angio Array.

間分解能の問題から、最近では表面コイルの位置を固定させてテーブルのみを移動させるシステムが開発されてきている<sup>12),13)</sup>。これらはいずれも魅力的なシステムではあるが、現時点では一般には入手できない。そこで我々はシーメンス社から提供されているIPAコイルの特性をいかして、4ステーションのtable stepping MRAを撮像している。各々の撮像にparallel imagingの一方法であるGRAPPAを用いており、全体の撮像時間は73秒となっている(Table)。本法では、胸部大動脈弓部から下腿の大部分がほぼ全例において撮像可能である。本法は、厳密な意味での全身MRAの基準は満たしていないが、足部の情報は多くの場合不要であることから、ほぼ臨床的には十分な情報を得られていると考えている(Fig. 7)。

おわりに

MRAの基礎から新しい技術を応用した全身MRAについて我々の経験を元に概説した。全身MRAは動脈硬化症の評価には、石灰化の評価はできないものの有力な方法であり、いろいろな施設で応用が試みられることを期待している。また、開発中の血管プール造影剤が臨床応用されれば、最新式の機種でなくても広く心臓・脳を含めた全身MRAが活用できるようになるであろう。

文 献

- 1) Bradley WG, Waluch V : Blood flow : magnetic resonance imaging. Radiology 1985 ;154(2) : 443-450

Table. Imaging Parameters of Our Whole Body MRA

Portion	TR (ms)	TE (ms)	FatSat	No. of Partitions	Voxel Size (μl)	Acquisition Time (s)
Thoracic	3.0	1.2	+	32	2.8(1.4×0.7×3)	3.6(×4)
Abdominal	4.0	1.5	+	32	2.8(1.4×0.7×3)	12
Femoral	3.4	1.8	-	56	1.5(1.4×0.7×1.6)	14
Popliteal	3.5	1.6	-	72	1.2(1.4×0.7×1.3)	18

The imaging parameters our whole body MRA are shown. Using these parameters, it takes only 73 s including table moving time to cover the whole body.

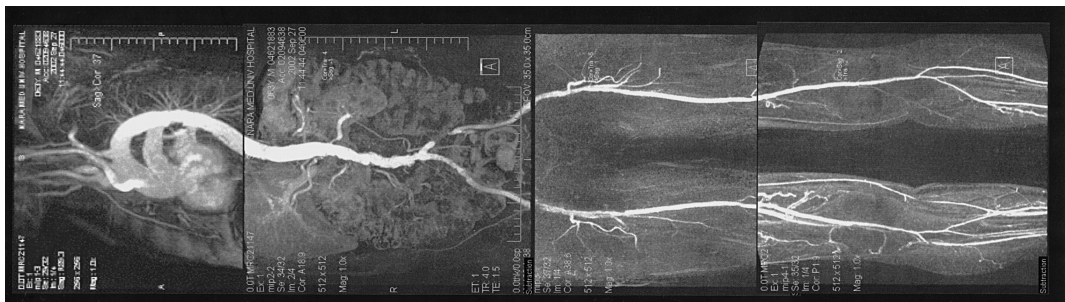


Fig. 7. Whole body MRA for the patient with left iliac arterial occlusion  
 In this patient, MRA using this method can cover the whole body from the carotid bifurcation to calf arteries. We can diagnose not only the left iliac arterial occlusion but also the arteriosclerotic change of aorta. It provides the important information that there are no other significant lesions.

- 2) Wedeen VJ, Meuli RA, Edelman RR, Geller SC, Frank LR, Brady TJ, Rosen BR : Projective imaging of pulsatile flow with magnetic resonance. *Science* 1985 ; 227 (4728) : 946-948
- 3) Miyazaki M, Sugiura S, Tateishi F, Wada H, Kassai Y, Abe H : Non-contrast-enhanced MR angiography using 3D ECG-synchronized half-Fourier fast spin echo. *J Magn Reson Imaging* 2000 ; 12(5) : 776-783
- 4) Miyazaki M, Takai H, Sugiura S, Wada H, Kuwahara R, Urata J : Peripheral MR angiography : separation of arteries from veins with flow-spoiled gradient pulses in electrocardiography-triggered three-dimensional half-Fourier fast spin-echo imaging. *Radiology* 2003 ; 227 : 890-896
- 5) Kim JK, Farb RI, Wright GA : Test bolus examination in the carotid artery at dynamic gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology* 1998 ; 208(3) : 831-832
- 6) Ho VB, Choyke PL, Foo TK, Hood MN, Miller DL, Czum JM, Aisen AM : Automated bolus chase peripheral MR angiography : initial practical experiences and future directions of this work-in-progress. *J Magn Reson Imaging* 1999 ; 10(3) : 376-388
- 7) Kruger DG, Busse RF, Johnston DL, Ritman EL, Ehman RL, Riederer SJ : Contrast-enhanced 3D MR breathhold imaging of porcine coronary arteries using fluoroscopic localization and bolus triggering. *Magn Reson Med* 1999 ; 42(6) : 1159-1165
- 8) Hennig J, Scheffler K, Laubenberger J, Strecker R : Time-resolved projection angiography after bolus injection of contrast agent. *Magn Reson Med* 1997 ; 37(3) : 341-345
- 9) Westenberg JJ, Wasser MN, van der Geest RJ, Pattynama PM, de Roos A, Vanderschoot J, Reiber JH : Scan optimization of gadolinium contrast-enhanced three-dimensional MRA of peripheral arteries with multiple bolus injections and *in vitro* validation of stenosis quantification. *Magn Reson Imaging* 1999 ; 17(1) : 47-57
- 10) Ho KY, Leiner T, de Haan MW, et al. : Peripheral vascular tree stenosis : evaluation with moving-bed infusion-tracking MR angiography. *Radiology* 1998 ; 206 : 683-692
- 11) Ruehm SG, Goyen M, Barkhausen J, et al. : Rapid magnetic resonance angiography for detection of atherosclerosis. *Lancet* 2001 ; 357 (9262) : 1086-1091
- 12) Goyen M, Quick HH, Debatin JF, et al. : Whole-body three-dimensional MR angiography with a rolling table platform : initial clinical experience. *Radiology* 2002 ; 224 : 270-277
- 13) Shetty AN, Bis KG, Duerinckx AJ, et al. : Lower extremity MR angiography : universal retrofitting of high-field-strength systems with stepping kinematic imaging platforms initial experience. *Radiology* 2002 ; 222 : 284-291

## **Whole Body MR Angiography**

Shinji HIROHASHI

*Department of Radiology, Nara Medical University  
840 Shijo-cho, Kashihara, Nara 634-8522*

Early diagnosis of atherosclerotic change is very important for diagnosis as well as interventional procedures and treatment. Digital subtraction angiography with intraarterial catheterization has been considered the best method for early diagnosis. Recently however, CT and MR angiography have become a new method of non-invasive angiography.

Initially, time of flight or phase contrast method was used in non-invasive MR angiography for the assessment of peripheral artery disease. This method takes at least several minutes for a single field of view. Three dimensional contrast enhanced MR angiography displays the arteries within 20 s in a single station.

For the diagnosis of atherosclerosis, the evaluation of the arteries in the whole body is necessary. In this article, the technique of MR angiography with and without contrast medium is reviewed. The method of whole body MR angiography, excluding the cerebral and coronary arteries, with a single intravenous injection of contrast medium is also reviewed.