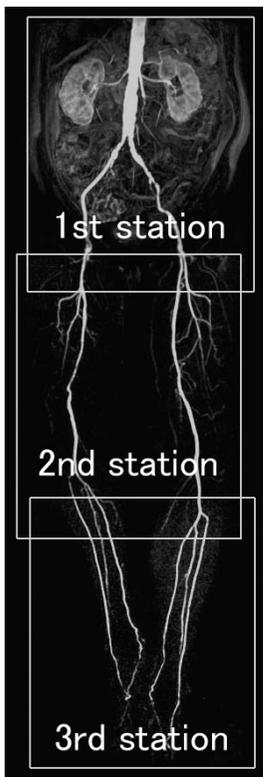


北 美保

*別項で扱われている「moving table imaging(テーブルの持続移動による imaging)」のことではなく、FOVの位置を変えて数回撮影する従来の意味合いを指す。

図1 MRAのシェーマ



下肢動脈全体の造影MRA Stepping-Table MRA が主流 (別名：Multi-Station MRA，テーブル移動MRA*)

本法は、1回の造影剤注入で、station毎にテーブルをステップ移動させて3 stations(2～4 stations)を一気に3D撮像する方法であり、下肢造影MRAの主流となっている。以下、これについて解説する。

● 良好な動脈像を下肢全体にわたって得るには

造影剤到達と撮像のタイミングの合致が重要！

- 第1 stationの撮像開始のタイミングをうまくとる。
- 最終station(下腿)においても良好な選択的動脈像が得られるように、造影方法と撮像方法を工夫する。

いずれのstationにおいても動脈相を捉えねばならないが、特に最終station(下腿)で良好な選択的動脈像を得るのは難しく、深部静脈の重なりや動脈の造影不良が生じることが多い。これは、症例ごとに造影剤の移動速度が異なり、造影剤の移動速度と撮像速度を一致させることが難しいからである。

このため、①～④に述べる種々の方法が行われている。それぞれの施設で施行可能なものを選択するとよい。

なお、最初(第1)と最後(第3)のstationの撮像を動脈相にうまく一致させることができれば、中間(第2)のstationでは、ほぼ必然的に動脈相を捉えることができる。

● 造影剤注入速度と造影効果の関係

高速注入：動脈の造影効果は高いが、静脈が濃く描出される危険性がある。

造影剤の注入持続時間が短く、造影効果の持続も短い。
→撮像時間を短くする(高速撮像)

低速注入：動脈の造影効果はやや低いが、静脈が濃く描出される危険性は低い。

造影剤の注入持続時間が長く、造影効果の持続も長い。
→撮像時間を長くする。

高速注入において、注入持続時間を長くするには、造影剤の投与量を増やすしかなく、欧米では30～50 mlの多量の造影剤が使用されることが多い。しかし、我が国では、Gd造影剤の保険適用は現在0.2 ml/kgまでとなっており、20 ml以下の投与量が一般的である。

撮像開始タイミング(第1 stationにおいて)

- ① 経験的 scan delay (30 ~ 60 秒) を用いる。
- ② test bolus 法
- ③ 自動モニタリング(自動ボールス検出法, MR 透視法)

①は、決定するまでに試行錯誤が必要である。一度決めてしまえば簡便ではあるが、症例によってはタイミングが合わないことも多い。

②は、少量(1~2 ml)の造影剤を本番と同じ注入速度で test bolus して、目的血管への造影剤到達時間を測定する方法であるが、やや煩雑である。注入速度が遅い場合や血流の遅い症例などでは、造影剤到達をうまく確認できないことがある。また、k-space ordering の違いなどによって delay time を計算し直すことが必要であり、全体で約数分の時間を要する。

③は、目的血管内に ROI を設定して、造影剤全量を注入開始後、信号強度をくり返し測定し、あらかじめ設定した閾値を超えた時点で自動的に本番の撮像を開始する方法である。しかし、目的血管以外の信号変化を誤認することがある。また、息止めの指示に工夫が必要である。

MR 透視法は、造影剤全量を注入開始後、目的血管を含む領域の画像をリアルタイムにくり返し画像化して、目的血管への造影剤到達をオペレーターが確認した直後に本番の撮像を開始させる方法である。この MR 透視法が最も簡便で確実な方法であるが、オペレーターの主観が入ることや、息止めの指示に工夫が必要である。

造影方法と撮像方法の実際

1) rapid infusion 法(あまり使われない)

これは、造影剤を 1~2 ml/sec の一定速度で高速注入して高速撮像する方法である。高速撮像可能な装置で、多量の造影剤が使用可能な場合に、行える方法である。1 症例当たり 50 ml 前後の多量の造影剤が必要で、主として米国で行われている。

高速注入は、動脈の高い造影効果を得ることが目的である。しかし、高速注入を行うと、高速撮像が必要となるが、現在の装置では、造影剤の移動速度に撮像速度が追いつかないことも多い。下腿部と大腿部の 2 箇所において 2D-MRDSA をテスト撮像して造影剤の注入方法を計算する方法¹⁾などが試みられているが、やや煩雑で、第 3 station における深部静脈の重なりや動脈の造影不良が生じることがある。

我が国ではほとんど施行されていないので、詳細については割愛する。

1) Wang Y. et al.: Contrast-enhanced peripheral MR angiography from the abdominal aorta to the pedal arteries: Combined dynamic two-dimensional and bolus-chase three-dimensional acquisitions. Invest Radiol. 36:170-177, 2001.

2 slow infusion 法

高速撮像できない装置向きの手法である。

2) Ho KY, et al.:Peripheral vascular tree stenoses: evaluation with moving-bed infusion-tracking MR angiography. Radiology, 206: 683-692, 1998.

この方法は、長い撮像時間の間、動脈内に造影剤を補充し続けるため、造影剤を0.3～0.7 ml/secの低速で注入持続時間を長くするものである²⁾。撮像時間が長いほど、造影剤の注入速度を遅くする。充分量の造影剤の到達に時間がかかるため、scan delayは長めに設定する。

■ slow infusion 法のプロトコール

造影剤：18 or 20 ml*(18～40 ml), at 0.3 ml/sec*(0.3～0.7 ml/sec)

scan delay：

①(test bolus [2 ml at 1 ml/sec]のピーク時間)+(20～50秒)

② test bolusを行わずに経験的に、30～60秒に設定

撮像時間(1 station当たり)：18～42 sec(長くてよい)

造影剤の使用量は、欧米では多く、我が国(*印)では少ない傾向がある。

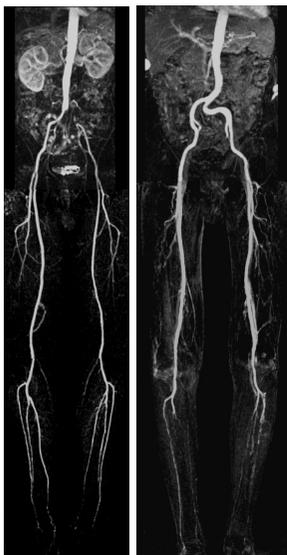
scan delayについては、test bolusを行う①の方が、第1 stationの画質は良好である。test bolusは本番と同じ注入速度で行うのが原則であるが、本法では注入速度がきわめて遅いため、造影ピークを観測しやすいように注入速度は本番よりも速くしてある。したがって、本番のMRA撮像開始は、test bolusのピーク時間よりもかなり遅らせる必要がある。

①②ともにscan delayは、動脈狭窄の強い症例や高齢者などでは長めに設定した方がよいが、事前に適正な値を予測することは難しく、良好な動脈像が得られないことも多い。

撮像時間が長いほど、造影剤の注入速度を遅くする方がよい。

図2 slow infusion 法

いずれもGd-DTPA 18mlを0.3ml/secの注入速度でslow infusionし、scan delay = test bolusのピーク時間+40秒で撮像開始した。1 station当たりの撮像時間は18秒である。



a

b

■ slow infusion 法の特徴

利点：高速撮像のできないMRI装置でも可能。

造影剤の投与が簡便で、自動注入機がなくても可能。

欠点：動脈の造影効果がやや低い。

下腿部での造影不良や静脈の重なりがみられることがある。

最適なscan delayの決定が困難。

a 良好な像の例

動脈全体がほぼ良好に描出されている。

b 不良な像の例

軟部組織も造影され、下腿の動脈のコントラストは不良である。また、深部静脈の重なりのため、動脈の輪郭が不明瞭な部分もある。

③ 2相注入法

- 3) Kubo H, et al.: Clinical usefulness of contrast enhanced 3D-MR angiography using automated stepping table method (abstr). In: Proceedings of the 9th Meeting of the ISMRM. Glasgow, 2001.
- 4) Czum JM, et al.: Bolus-chase peripheral 3D MRA using a dual-rate contrast media injection. J Magn Reson Imaging, 12: 769-775, 2000.

これは、造影剤注入の前半部を高速注入し、後半部を低速注入する方法³⁾で、**slow infusion**と**rapid infusion**の**両者の長所を生かしたものである**。すなわち、第1相の高速注入で動脈の造影効果を高め、第2相の低速注入で動脈内への造影剤補充の時間を長くするのが目的である。この方法が汎用されつつある。逆に、第1相を低速、第2相を高速注入する報告もある⁴⁾。

■ 2相注入法のプロトコール

造影剤：18 or 20ml*(20～40ml)

第1相：10ml*(10～20ml), at 1.0ml/sec*(0.8～2.0 ml/sec)

第2相：8 or 10ml*(8～20ml), at 0.5ml/sec*(0.3～1.2 ml/sec)

scan delay：

①(test bolusのピーク時間) + (5～15秒) - (k-space center までの撮像時間)

②自動モニタリングによる撮像開始ソフトの使用
撮像時間(1 station 当たり)：18～28 sec

*印は、我が国でよく用いられている値

図3 2相注入法

造影剤 18 mlを、第1相 10 ml at 1.0 ml/sec、第2相 8 ml at 0.5 ml/secと、2相注入した。1 station 当たりの撮像時間は 18 秒である。
scan delay = (test bolus のピーク時間) + 13 秒 - (k-space center までの撮像時間)。
全体にほぼ良好な画像が得られているが、下腿部の動脈の造影能はやや低い。



■ 自動注入機の設定(2相注入法)

(造影剤の第1チャンネルの注入量)

= (第1相の注入量) + (チューブ容量)

(造影剤の第2チャンネルの注入量)

= (第1相の注入量) - (チューブ容量)

(後続する生食のチャンネルの注入速度)

= (第2相の注入速度)

自動注入機が必要であるが、注入機のチューブ容量(生食で満たされている)を前もって調べておく必要がある。なぜなら、チューブがかなり長いために、チューブ容量が5ml近くになる場合も多く、無視できない量だからである。

■ 2相注入法の特徴

利点：scan delay の決定が比較的容易。

欠点：患者の血流動態による画質の差がやや大。

下腿部での造影不良や静脈の重なりが見られることがある。
自動注入機が必要。

④ velocity-dependent法(3相注入法)

本法は、造影剤を3相注入(①高速→②低速→③高速)とし、第1相(高速注入)の造影剤の第1 station到達と第1 station撮像のタイミングを一致させ、かつ、第3相(高速注入)の造影剤の第3 station到達と第3 station撮像のタイミングを一致させることにより、第3 stationにおいても良好な選択的動脈像が得られるように工夫した手法である⁹⁾。造影剤の動脈内移動速度が動脈の血流速度に等しいと仮定して、**下肢の平均血流速度**(膝窩動脈の値で近似；phase contrast法で測定する)に**合わせて造影剤の注入速度や撮像タイミングを変化させる**。血流速度の遅い症例ほど、注入速度は速く、撮像時間は長く設定する。

なお、自動注入機の造影剤の設定は2チャンネルのみ可能(①高速→②低速と設定)であるが、後続する生理食塩水のフラッシュの注入速度を再び高速とすると、付属の延長チューブ内に残存する造影剤(Medrad社製の場合は4.6ml)が再び高速(第3相)で注入され、実際に静脈内に注入されるのは3相となる。

5) Kita M, et al: Moving-table reduced-dose gadolinium-enhanced three-dimensional magnetic resonance angiography: Velocity-dependent method with three-phase gadolinium infusion. J Magn Reson Imaging 14: 319-328, 2001.

表1 velocity-dependent法のプロトコール

平均血流速度 (膝窩動脈) V (cm/sec)	膝窩動脈の平均血流速度に合わせたプロトコール								肘静脈内での注入プロフィール					
	MR装置		自動注入機の設定						Gd 第1相		Gd 第2相		Gd 第3相	
	撮像タイミング		Gd チャンネル1		Gd チャンネル2		生食チャンネル		速度 量		速度 量		速度 量	
	Ta (sec)	Td (sec)	速度 (ml/sec)	量 (ml)										
1 (-1.4)	36	Tp + 6	2.0	10	2.0	8	2.0	10	2.0	5.4	2.0	8.0	2.0	4.6
1.5 (1.5-1.9)	25	Tp + 5	1.5	10	1.5	8	1.5	10	1.5	5.4	1.5	8.0	1.5	4.6
2 (2.0-2.9)	20	Tp + 5	1.0	10	1.0	8	1.0	10	1.0	5.4	1.0	8.0	1.0	4.6
3 (3.0-3.9)	18	Tp + 2	1.0	10	0.5	8	1.0	10	1.0	5.4	0.5	8.0	1.0	4.6
4 (4.0-4.9)	18	Tp	1.0	10	0.4	8	1.0	10	1.0	5.4	0.4	8.0	1.0	4.6
5 (5.0-5.9)	18	Tp - 1	1.0	10	0.3	8	1.0	10	1.0	5.4	0.3	8.0	1.0	4.6
6 (6.0-6.9)	18	Tp - 2	1.0	10	0.3	8	1.0	10	1.0	5.4	0.3	8.0	1.0	4.6
7 (7.0-7.9)	18	Tp - 2	0.8	10	0.3	8	0.8	10	0.8	5.4	0.3	8.0	0.8	4.6
8 (8.0-8.9)	18	Tp - 2	0.8	10	0.2	6	0.8	10	0.8	5.4	0.2	6.0	0.8	4.6
9 (9.0-9.9)	18	Tp - 2	0.8	10	0.2	6	0.8	10	0.8	5.4	0.2	6.0	0.8	4.6
10 (10.0-)	18	Tp - 3	0.8	10	0.2	6	0.8	10	0.8	5.4	0.2	6.0	0.8	4.6

V = 膝窩動脈の平均血流速度(PC法で測定する。左右差がある場合は遅い方を採用する。)

Ta = 1 station当たりの撮像時間 Td = 第1 stationのscan delay

Tp = 腹部大動脈末端におけるtest bolusの造影ピーク時間

症例毎のVの測定値(左右差がある場合は遅い方)に応じたプロトコールが、この表より直ちに決定できる(この表を操作卓の近くに掲示しておくことよい)。

肘静脈内の注入プロフィールは、V ≥ 3 cm/secの症例では3相注入となるが、V < 3 cm/secの症例では高速の1相注入に等しい。

なお、このプロトコール表は、k-space orderingがすべてlinear、FOV = 45 cm、1ステップあたりのテーブル移動距離が38 cm、1ステップあたりのテーブル移動時間が5 sec、自動注入機のチューブ容量が4.6 ml、の場合のプロトコールである。これ以外の条件下(k-space orderingや、FOV、テーブル移動距離、自動注入機のチューブ容量等が上記と異なる場合)では、各施設の条件に合ったプロトコール表を計算により作成し直す必要がある。

図4 velocity-dependent法

いずれも、造影剤 18mlを用いて、膝窩動脈の平均血流速度に合わせたプロトコールで、注入と撮像を行った。血流速度の多寡にかかわらず、下腿部においても良好な画像が得られている。



a 血流速度が遅い症例 ($V = 1.5 \text{ cm/sec}$)

Gd : 18 ml at 1.5 ml/sec.

Ta = 25 sec.

Td = Tp + 5 = 30 + 5 = 35 sec.

下腿部においても、動脈の造影能は良好である。

b 血流速度が速い症例 ($V = 6.2 \text{ cm/sec}$)

Gd 第1相 : 5.4 ml at 1.0 ml/sec

第2相 : 8.0 ml at 0.3 ml/sec

第3相 : 4.6 ml at 1.0 ml/sec

Ta = 18 sec.

Td = Tp - 2 = 25 - 2 = 23 sec.

下腿部においても、静脈の重なりはなく、動脈の輪郭は鮮明である。

■ velocity-dependent法の特徴

利点：患者の血流動態による画質の差が小。

下腿部においても、動脈の造影能は良好で、静脈の重なりが少ない。

欠点：膝窩動脈の血流速度測定(PC法)に10数分かかり、やや煩雑。

血流速度の測定不能な症例が存在する*。

施設毎にプロトコール表の作成が必要

(k-space ordering, FOV, テーブル移動距離, 自動注入機のチューブ容量などが異なれば、計算してプロトコール表を作成し直す必要がある)

※：膝窩動脈の平均血流速度がphase contrast法でうまく測定できない症例については、前述のslow infusion法や2相注入法を行う。

● 下肢造影MRAの利点・欠点

利点：閉塞部より末梢の動脈描出も良好。

側副血行路の描出が良好。

動脈壁の全周性の石灰化が存在しても、内腔の描出が可能。

欠点：狭窄が過大評価される。

血流速度の個人差や左右差による、深部静脈の重なりや動脈の造影不良が生じることがある。

壁石灰化の検出ができない。

ステント留置部の評価ができない。

これらは、各手法にほぼ共通の特徴である。

改善策の併用

併用することにより，下肢造影MRAの改善が望めるもの

- ①大腿圧迫
- ② station 毎の可変撮像プロトコール
- ③ parallel imaging による高速撮像・高空間分解能
- ④ 脂肪抑制の併用

- ①最近のISMRMでは，大腿に非磁性のマンスレットや駆血帯を用いて，おおむね50mmHg程度の圧をかけると下腿の静脈混入が減ることが報告されている⁶⁾。狭窄の程度に大きな左右差がなければ，かなり有効な方法と思われる。
- ②撮像プロトコールがstation毎に可変であれば，第1・第2 stationの撮像方法をできる限り撮像時間の短いものにするこゝで，静脈描出を抑え，造影剤の注入速度を上げて造影効果を高めることができる。そして，第3 stationの撮像を高い空間分解能にする(1mm以下の分解能が望ましい)こゝで，下腿の細かい血管の描出能が向上する⁷⁾。さらに，第3 stationにおいて，k-space orderingをcentricにして静脈描出を抑えたり，バンド幅を狭くしてS/N比を上げたりすることも，画質の向上につながる。phased array coilは特にこの部において効果が高い。
- ③Parallel imagingが可能であれば，高速撮像により，静脈の描出を防ぎ，造影剤の注入速度を上げて造影効果を高めることができる。また，短い撮像時間で高い空間分解能を得るこゝでできる⁸⁾。
- ④脂肪抑制により，造影前後の体動等による脂肪組織のmisregistrationが防げ，安定したsubtraction MRA像が得られる。しかし，撮像時間が若干延長することが多い。

6) ISMRM 2004 Proceeding: 231, 232.

7) Maki JH, et al.: Utilizing SENSE to achieve lower station submillimeter isotropic resolution and minimal venous enhancement in peripheral MR angiography. J Magn Reson Imaging, 15: 484-491, 2002.

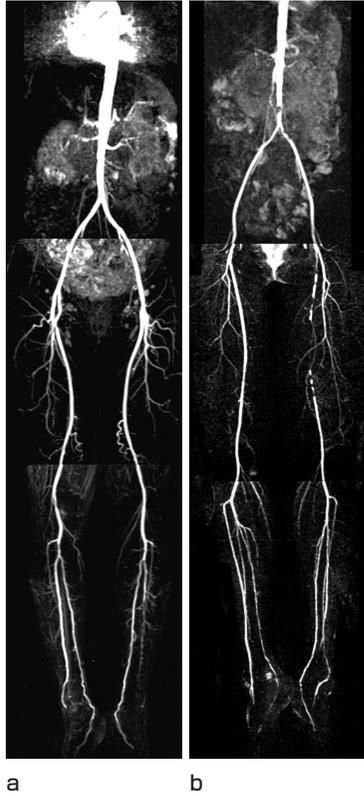
8) Weiger M, et al.: Contrast-enhanced 3D MRA using SENSE. J Magn Reson Imaging, 12: 671-677, 2000.

表2 改善策を併用した撮像プロトコールの例

station (部位)	撮像時間 (sec)	TR (msec)	TE (msec)	空間分解能： 位相方向×周波数方向 ×スライス方向(mm)	parallel imaging	k-space ordering	脂肪抑制
1st (骨盤)	11～13	2.4～4.7	1.0～1.5	(1.0～2.0)×(0.7～1.0) ×(1.5～3.0)	+	centric	+
2nd (大腿)	7～14	2.4～4.7	1.0～1.8	(1.0～2.0)×(0.7～1.0) ×(1.5～3.0)	+	centric	+
3rd (下腿)	10～22	2.9～6.1	1.1～1.9	(0.9～1.6)×(0.7～1.0) ×(1.0～2.0)	+	centric	- or +

(2相注入法，phased array coil，MR透視法を使用)

図5 改善策を併用したMRA像



- a phased array coil・stationごとの可変撮像プロトコール・MR透視による撮像開始・脂肪抑制を併用。造影は2相注入法
下腿部の動脈も鮮明に描出され、細い分枝も描出されている。
- b aに加えて、SENSEを併用。造影は2相注入法
静脈の重なりはなく、細い動脈枝も明瞭に描出されている。しかし、狭窄の過大評価は避けられない。

● 今後の展望

さらなる高速撮像の進歩
→さらなる高空間分解能化
造影剤の動脈内移動速度への追従
造影剤の倍量投与の保険適用化
血管内貯留型造影剤の臨床応用化
新しい手法の開発

ただし、これらには下記のような問題点もある。

高速撮像の進歩により撮像時間がさらに短くなると、造影剤の移動速度を超えて撮像が先に進み過ぎる症例が出現してくる可能性がある。このような症例には撮像時間を少し長くすべきであるが、事前予測は難しい。

血管内貯留型造影剤は、動脈の高いコントラスト増強効果が長く持続するが、静脈に還流すると静脈も動脈同様に濃く描出されてしまう、という問題点がある。

このような問題点が克服されつつ進歩していくことや、全く新しい手法が開発されることが期待される。