

## 頸部頸動脈のMRA

百島 祐貴 藤原 広和

**要 旨：**頸部頸動脈の低侵襲性画像診断法として、MRAは広く用いられている。現状では、まだMRA単独では血管造影(DSA)を置換することはできないが、造影MRAはCTAなど他の検査法と組み合わせることで、これに匹敵する精度を得ることが可能となりつつある。不安定プラークの検出を目的とするMRIプラークイメージングには、最適な撮影法の選択が重要である。また、プラークに集積する造影剤にも期待が寄せられている。(J Jpn Coll Angiol, 2004, 44: 721-726)

Key words: MR angiography, plaque imaging, carotid artery

## はじめに

血管内手術の適応拡大に伴い、頸動脈の画像診断がますます重要となっている。以下、magnetic resonance angiography(MRA)の動向と、頸動脈プラークイメージングについて概説する。

## MRA

## (1) 血管造影(DSA)を置き換えることができるか

数ある臨床検査の中で、動脈穿刺を必要とするdigital subtraction angiography(DSA)は、最も侵襲の大きな部類であり、MRA、CTA、超音波検査などの非侵襲的な画像検査法により、血管撮影をこれで置き換えることができれば理想的である。MRAとDSAの比較については多くの研究があるが、MRAを含めいずれの検査も、単独でDSAを、特に術前検査としてのDSAを置換できる成績は得られていない<sup>1,2)</sup>。特にMRAでは、高度閉塞と完全閉塞の鑑別が難しいことがある。しかし、このうちのいくつかを組み合わせることで、DSAに匹敵する、あるいはこれに優る精度が得られることが報告されている<sup>1,3)</sup>。外来でMRA、CTAを施行し、治療適応の最終判断には、DSAを行う施設が大部分であるのが現状であろう(Fig. 1)。

## (2) CE-MRAかTOF法か

頸部頸動脈MRAの手法としては、以前はtime-of-

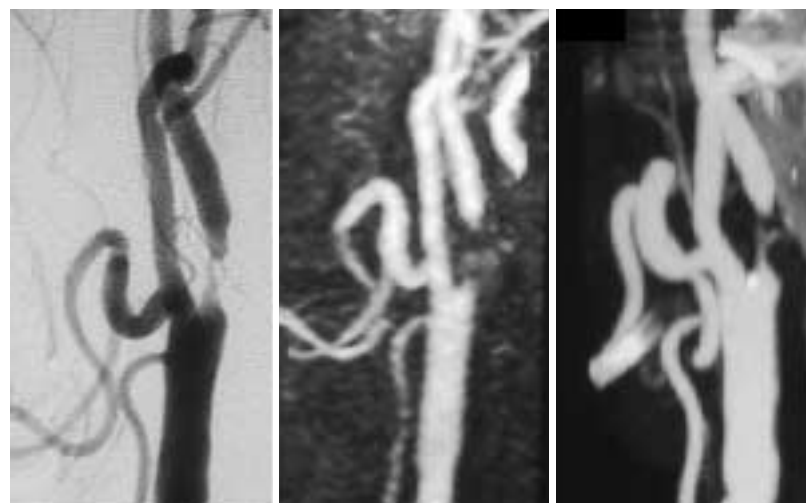
flight(TOF)法が広く行われていたが、現在では造影MRA(contrast-enhanced MRA: CE-MRA)が主流となっている。主たる理由は、TOF法は2D法、3D法いずれも撮影時間が数分~10分と長く、また拍動による画像の劣化が避けられないが、CE-MRAは15~30秒で撮影可能であり、SN比も良好であることが挙げられる。

CE-MRAとTOF法の精度は同等であるとする報告<sup>4)</sup>がある一方、CE-MRAはしばしば狭窄病変を過大評価する傾向があるとする報告も多く<sup>5)</sup>、これは日常診療でもしばしば経験されることである。また2D-TOF法について検討した報告では、狭窄性病変に対する感度、特異度は2D-TOF法が最も高く、CE-MRA法の狭窄率に食い違いがある場合も、最も正確な狭窄率は2D-TOF法で得られるとしている<sup>6)</sup>。これらの結果は、原理的にも容易に予想できることである。

現状では、CE-MRAは狭窄率の計測には必ずしも適当とはいえないが<sup>2)</sup>、次に述べるようにCTAが容易に利用できる環境では、あえて検査時間の長いTOF法で撮影することは現実的ではない。CE-MRAは、その限界を承知したうえでスクリーニング手段として用いるべきであろう。

## (3) CE-MRAかCTAか

頸動脈狭窄病変に対するCE-MRA、CTAの精度については多くの報告があり、CE-MRAが優れるとするも



A | B | C

**Figure 1** Stenosis of the left internal carotid artery.

A: DSA.

B: Contrast-enhanced MRA.

C: CTA.

Internal carotid stenosis is noted on each image, but the vascular lumen at the severe stenosis is poorly visualized on MRA.

の<sup>7)</sup>、同等とするもの<sup>8)</sup>、CTAの優位を示すもの<sup>9)</sup>があり必ずしも一致がみられない。その理由は、報告者による撮影法、画像処理法の差異も一因であるが、動脈壁の石灰化をいかに考えるかという点にも問題がある。石灰化の検出にはもちろんCTAが優れるが、狭窄率の計測に際して、後処理の方法により精度が変化する。例えば、Alvarez-Linera<sup>7)</sup>らは、石灰化の存在がCTAにおける狭窄率の精度を低下させるとしているが、これは適当な再構成 (multiplanar reformation) を行えば避けられる問題である。またMRAにおいては、大きな石灰化は磁化率効果による信号強度の低下の原因となりうるが、2ms以下のエコー時間が実現されている撮影法では、この影響もほとんど無視しうることが多い。

ここで引用したものを含め、CTAとMRAあるいはDSAの比較報告の多くが一列検出器CT (single detector-row CT: SDCT) のデータをもとに行われており、多列検出CT (multidetector-row CT: MDCT) によるまとまった報告はまだ少ない<sup>10)</sup>。MDCTでは、SDCTで避けられなかった血管拍動によるアーチファクトをほぼ払拭できる。現状では、CE-MRA、CTAのいずれかが優れていると結論できないが、X線被曝の問題を除けば、動脈壁、内腔をいずれも直接的に描出でき、乱流や磁化率の影響を考慮する必要がないICTAの安心感はやはり大きなものであるといえよう (Fig. 1)。

#### (4) 造影剤投与のタイミングをどのように決めるか

CE-MRAでは、撮影領域の血管内造影剤濃度が最大となるタイミングで撮影することがSN比の最適化に重要である。このためには、少量 (1~2ml) の造影剤を事前に投与してテスト撮影を行う方法、大動脈など撮影領域の上流の造影剤をモニタして、最適なタイミングを自動的あるいは目視にて判断して撮影する方法がある<sup>11)</sup>。しかし、最近はKeyhole imagingの一つであるTRICKS (time-resolved imaging of contrast kinetics) 法が使用可能となり、撮像時間が10~15秒と短縮した結果、造影剤を注入しながら撮影を繰り返すことにより、ことさらタイミングを測らなくても、適当な時相の画像を得ることができる<sup>12)</sup>。TRICKS法による画像は、従来法に比較すればSN比は劣るが、撮影の手間が大幅に節約できることから、われわれの施設ではスクリーニング目的の頸部MRAにはもっぱらこれを用いている (Fig. 2)。

#### (5) 時相情報は得られるか

DSAなど従来の血管造影法に対するMRAの最大の短所は、動脈相、静脈相などの時相情報が得られないことであった。しかし、TRICKS法では、高速3D撮像を繰り返すことで、造影剤の流れを経時的に観察することが可能となる<sup>13)</sup>。ただし、TRICKS法は、早期の時相の画像データを流用する (view sharing) ため、動脈相、静脈相が完全に分離できるわけではない。頸動脈狭窄

性病変の評価にはあまり有用性はないが、腫瘍の評価には有用な場合がある( Fig. 3 )。

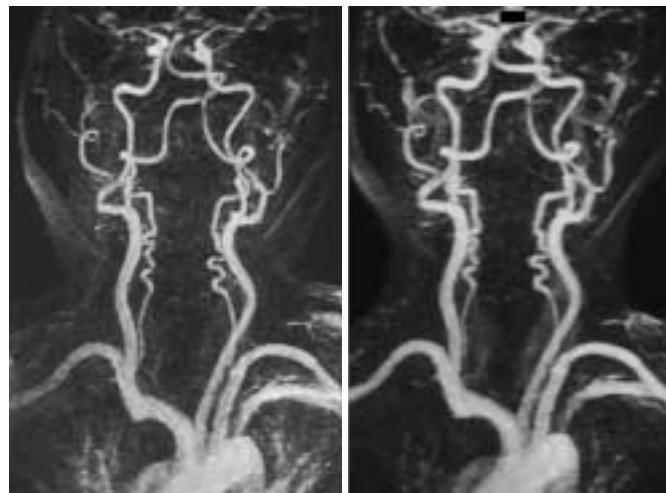
### プラークイメージング

#### ( 1 )最適な撮像法は何か

MRAをはじめとする血管撮影は、血管内腔を描出することにより、内腔の状態から血管の状態を推定する方法であった( luminology )。しかし、内腔の異常を来す原因は血管壁にある。そこで、血管壁そのものを描出す

る方法の一つがプラークイメージング( plaque imaging )である<sup>14)</sup>。特に冠動脈領域において血管内超音波( intravascular ultrasound: IVUS )の有用性が高く評価されているが、侵襲性も高い。より非侵襲的にプラークを画像化する方法として、MRIやCTが注目されている。

頸動脈壁を観察するには、血管内腔が均一な濃度であることが望ましい。内腔を均一な高輝度にするwhite blood法、均一な低信号( 無信号 )とするblack blood法<sup>15)</sup>があるが、フローによるアーチファクトが少ない、壁

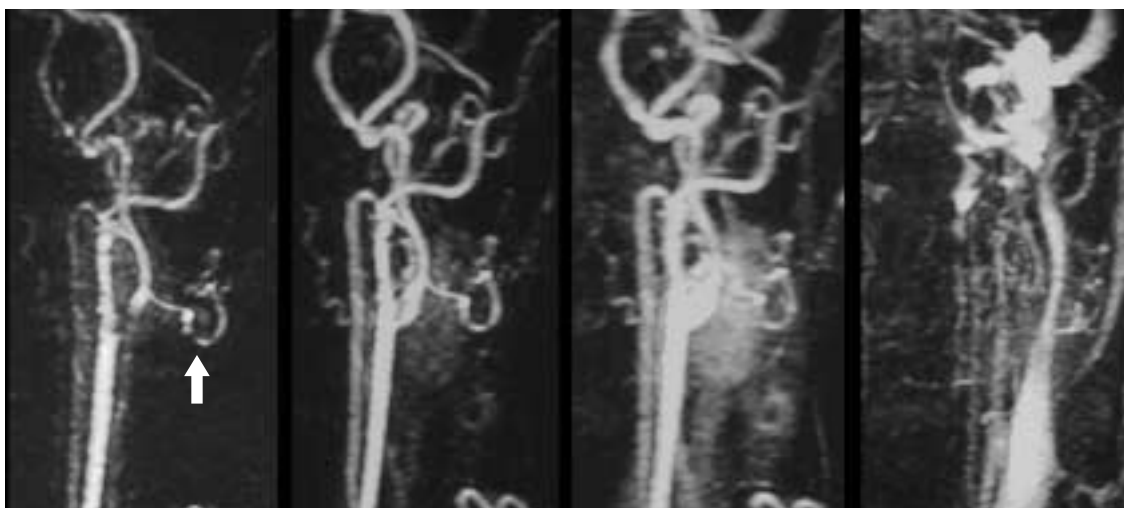


**Figure 2** Normal cervical arteries.

A: Contrast-enhanced MRA with TRICKS.

B: Contrast-enhanced MRA without TRICKS.

The signal-to-noise ratio is slightly higher on TRICKS MRA, but it is far easier to optimize imaging time window with the TRICKS technique.



**Figure 3** Cervical tumor.

Contrast-enhanced MRA with TRICKS (1 frame per 10 seconds). Dilated tumor vessels (arrow) and rapid increase and decrease of contrast enhancement in the tumor are noted. The tumor was surgically resected and was diagnosed as Castleman disease.

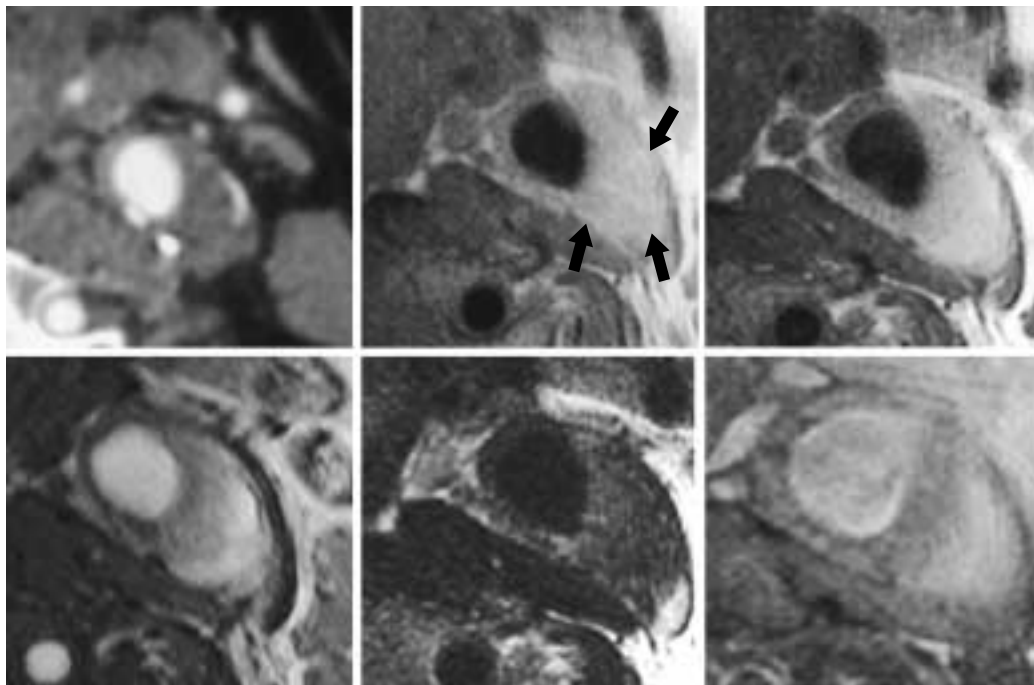
の造影効果を観察しやすいなどの理由で、後者が最も適しており広く用いられる。血流を無信号化する方法としては、spin echo法のフローボイドの利用、presaturationの併用などもあるが、積極的に無信号化する目的で開発されたdouble inversion recovery( DIR )法が広く用いられており、現状ではこれが最も安定している。われわれが使用しているDIRはシングルスライス撮影で、撮影時間は1~2分/スライスであるが、マルチスライス可能なDIRも開発されている<sup>16)</sup>。これに加えて、プラークの線維被膜( fibrous cap )の観察にはT2\*強調画像が最も感度が高く、この目的のためにはTOF法MRA用のwhite blood法を流用できる。

## (2) 不安定プラークを示唆するMRI所見は何か

プラークイメージングの目的は、動脈プラークの性

状評価、特に不安定プラーク( vulnerable plaque )の診断である。不安定プラークの本態は、肥厚した内膜の中にコレステロールエステルが凝集した脂質コア( lipid core )、およびそれを取り囲む線維性被膜である。脂質コア内には、マクロファージ、リンパ球などの炎症性細胞の浸潤と血管新生があり、病理組織学的には炎症性変化が認められる。不安定プラークでは、脂質コアが線維性被膜を破って血管内腔に露出し、これが血栓形成を誘発すると考えられる。不安定プラークは、脂質コアが大きい、線維性被膜が薄い、炎症性細胞浸潤が多いなどの特徴があり、これらの特性をとらえることがプラークイメージングのアプローチである( Fig. 4 )。

の脂質コアの診断については、DIR法T1 強調画像、プロトン密度強調画像などで脂質コアが高信号と



**Figure 4** Carotid plaque.

A: Contrast-enhanced CT.

B: T1-weighted MRI.

C: Proton density-weighted MRI.

D: T2\*-weighted MRI.

E: T2-weighted MRI.

F: Contrast-enhanced T1-weighted MRI.

A thick plaque (arrows) on the posterior wall of the internal carotid artery is shown. The plaque is bright on T1-weighted MRI and proton density-weighted MRI indicating the presence of lipid core. Fibrous cap is partially obliterated over the plaque on T2\*-weighted MRI, suggesting the vulnerable nature of the plaque.

A	B	C
D	E	F

なることを利用する<sup>17)</sup>。同じく高信号を示すものにブ  
ラーク内の出血があり、注意を要する。の線維性被  
膜は、T2\*強調画像で血管壁に沿う低信号帯として認  
められ、ブラーク表面での菲薄化、不連続が不安定を  
示唆する重要な所見である<sup>18)</sup>。線維性被膜の描出に  
は、short TI inversion recovery (STIR) のほうが優れてい  
るとする報告もある<sup>19)</sup>。の炎症性細胞浸潤について  
は、現状では細胞浸潤に付随する血管新生の状態をガ  
ドリニウム造影MRIによる造影効果により評価してい  
る<sup>20)</sup>。造影効果とブラーク不安定性に相関があるとす  
る報告もあるが、実際には程度の差はあれかなり多く  
の症例で造影効果が認められ、その意義については不  
詳である。

さらに、マクロファージの存在そのものを診断する  
目的で、超微小超磁性酸化鉄 (ultra-small superpara-  
magnetic iron oxide: USPIO) による分子イメージング  
(molecular imaging) が注目されている。USPIOはマク  
ロファージに取り込まれ、マクロファージが豊富なブ  
ラークほど信号が低下する。まだ臨床応用が始まった  
ばかりであるが、ブラークの性状を知るうえで有用な  
情報を得ることが期待できる<sup>21)</sup>。このほか、ブラーク  
に特異的に集積するガドリニウム製剤 (gadofluorine) も  
開発されている。集積機序は十分解明されておらず、  
まだ動物実験の段階であるが、今後の臨床応用が待た  
れる<sup>22)</sup>。

## 文 献

- 1) Patel SG, Collie DA, Wardlaw JM et al: Outcome, observer reliability, and patient preferences if CTA, MRA, or Doppler ultrasound were used, individually or together, instead of digital subtraction angiography before carotid endarterectomy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2002, **73**: 21–28.
- 2) Hathout GM, Duh MJ, El-Saden SM: Accuracy of contrast-enhanced MR angiography in predicting angiographic stenosis of the internal carotid artery: Linear regression analysis. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2003, **24**: 1747–1756.
- 3) Borisch I, Horn M, Butz B et al: Preoperative evaluation of carotid artery stenosis: Comparison of contrast-enhanced MR angiography and duplex sonography with digital subtraction angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2003, **24**: 1117–1122.
- 4) Nederkoorn PJ, Elgersma OE, van der Graaf Y et al: Carotid artery stenosis: Accuracy of contrast-enhanced MR angiography for diagnosis. *Radiology*, 2003, **228**: 677–682.
- 5) Townsend TC, Saloner D, Pan XM et al: Contrast material-enhanced MRA overestimates severity of carotid stenosis, compared with 3D time-of-flight MRA. *J Vasc Surg*, 2003, **38**: 36–40.
- 6) DeMarco JK, Huston J 3rd, Bernstein MA: Evaluation of classic 2D time-of-flight MR angiography in the depiction of severe carotid stenosis. *AJR Am J Roentgenol*, 2004, **183**: 787–793.
- 7) Alvarez-Linera J, Benito-Leon J, Escribano J et al: Prospective evaluation of carotid artery stenosis: Elliptic centric contrast-enhanced MR angiography and spiral CT angiography compared with digital subtraction angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2003, **24**: 1012–1019.
- 8) Randoux B, Marro B, Koskas F et al: Carotid artery stenosis: Prospective comparison of CT, three-dimensional gadolinium-enhanced MR, and conventional angiography. *Radiology*, 2001, **220**: 179–185.
- 9) Lev MH, Romero JM, Goodman DN et al: Total occlusion versus hairline residual lumen of the internal carotid arteries: Accuracy of single section helical CT angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2003, **24**: 1123–1129.
- 10) Chen CJ, Lee TH, Hsu HL et al: Multi-slice CT angiography in diagnosing total versus near occlusions of the internal carotid artery: Comparison with catheter angiography. *Stroke*, 2004, **35**: 83–85.
- 11) Ho VB, Foo TK, Czum JM et al: Contrast-enhanced magnetic resonance angiography: Technical considerations for optimized clinical implementation. *Top Magn Reson Imaging*, 2001, **12**: 283–299.
- 12) Naganawa S, Koshikawa T, Fukatsu H et al: Contrast-enhanced MR angiography of the carotid artery using 3D time-resolved imaging of contrast kinetics: Comparison with real-time fluoroscopic triggered 3D-elliptical centric view ordering. *Radiat Med*, 2001, **19**: 185–192.
- 13) Turski PA, Korosec FR, Carroll TJ et al: Contrast-Enhanced magnetic resonance angiography of the carotid bifurcation using the time-resolved imaging of contrast kinetics (TRICKS) technique. *Top Magn Reson Imaging*, 2001, **12**: 175–181.
- 14) Rapp JH, Saloner D: Current status of carotid imaging by MRA. *Cardiovasc Surg*, 2003, **11**: 445–447.
- 15) Jara H, Barish MA: Black-blood MR angiography. Techniques, and clinical applications. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 1999, **7**: 303–317.

- 16 Song HK, Wright AC, Wolf RL et al: Multislice double inversion pulse sequence for efficient black-blood MRI. *Magn Reson Med* 2002, **47**: 616–620.
- 17 Cai JM, Hatsukami TS, Ferguson MS et al: Classification of human carotid atherosclerotic lesions with in vivo multicontrast magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2002, **106**: 1368–1373.
- 18 Mitsumori LM, Hatsukami TS, Ferguson MS et al: In vivo accuracy of multisequence MR imaging for identifying unstable fibrous caps in advanced human carotid plaques. *J Magn Reson Imaging*, 2003, **17**: 410–420.
- 19 Trivedi RA, U-King-Im J, Graves MJ et al: Multi-sequence in vivo MRI can quantify fibrous cap and lipid core components in human carotid atherosclerotic plaques. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2004, **28**: 207–213.
- 20 Yuan C, Kerwin WS, Ferguson MS et al: Contrast-enhanced high resolution MRI for atherosclerotic carotid artery tissue characterization. *J Magn Reson Imaging*, 2002, **15**: 62–67.
- 21 Kooi ME, Cappendijk VC, Cleutjens KB et al: Accumulation of ultrasmall superparamagnetic particles of iron oxide in human atherosclerotic plaques can be detected by in vivo magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2003, **107**: 2453–2458.
- 22 Barkhausen J, Ebert W, Heyer C et al: Detection of atherosclerotic plaque with Gadofluorine-enhanced magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2003, **108**: 605–609.

## MR Angiography and Plaque Imaging of the Carotid Artery

Suketaka Momoshima and Hirokazu Fujiwara

Department of Diagnostic Radiology, Keio University School of Medicine, Tokyo, Japan

**Key words:** MR angiography, plaque imaging, carotid artery

MR angiography (MRA), one of the mainstays of imaging modalities for preoperative carotid evaluation, evolved from recent advances in technology. MRA and conventional angiography do coexist, and MRA is gaining in reliability to the level of contrast angiography, especially when combined with other noninvasive modalities such as ultrasonography or CT angiography. MR plaque imaging is expected to screen vulnerable plaques by utilizing multi-sequence MRI, and there have been some promising preliminary results with plaque-specific, MR contrast media.

(*J Jpn Coll Angiol*, 2004, **44**: 721–726)