

総説

MRA

三木 均

愛媛大学医学部放射線医学教室

MRA

Hitoshi Miki MD

Department of Radiology, Ehime University School of Medicine

abstract

As the result of the recent development of MR techniques, the image quality of MRA have made rapid progress. Time-of-flight(TOF) MRA, phase contrast(PC) MRA, and contrast enhanced MRA are now being examined clinically as main MRA methods for evaluating cerebrovascular diseases. The purpose of this paper is to explain the technical development and the clinical indication of these MRA. It is necessary for radiologists to understand the development of MRA technique, because the frequency of clinical use of MRA has been increasing rapidly.

抄録

近年のMR技術の進歩によりMRA画像は飛躍的に改善された。現在、TOF MRA、PC MRAおよび造影MRAが頭部や頸部の血管性病変の検出に利用されている。本論文ではこれらMRA法の技術進歩と臨床適応について解説する。急速にMRAが普及するなか、放射線科医にとってMRAの技術進歩を理解しておくことは重要と考えられる。

はじめに

MR angiography(MRA)は現在ではMRI装置における必須機能と言えるだろう。しかし、MRAが日常臨床に頻用されるようになったのは最近のことであり、まだ10年にも満たない。このように急速に普及したのは、頭部MRAの標準的な撮像法である3D time-of-flight法の登場と、その後の飛躍的な技術進歩による。本稿では頭部MRAの最近の進歩と臨床応用の現状について解説する。

撮影法

頭部、および頸部血管病変を検出するためにいくつかのMRAが使用されている。MR技術は進歩の過程に

あり撮像方法は確立したとは言えないが、現在一般に普及している撮像方法について説明する。

撮像方法として第1にtime-of-flight (TOF)法¹⁾、第2にphase contrast (PC)法²⁾があげられ、それぞれに2D法と3D法が可能である。第3の撮像法として高速撮像法と造影剤を利用する造影MRAが開発され、主に頸部領域に使用されるようになった。以下、各撮像法を中枢神経領域に適応する際の特徴や注意点について説明する。MRAの原理については紙面の都合上、割愛するので引用文献などを参考にして頂きたい。

1. 3D TOF MRA³⁾⁴⁾

本法は動脈など速い血流の描出に優れているため頭蓋内動脈系(図4)の描出に適している。静脈などの遅い血流の描出は不十分である。脳動脈瘤、脳動脈狭窄・閉塞、モヤモヤ病などの血管病変が適応となる。現在、頭部MRAの第一選択となる方法であるので、画質改善のために知っておくべき重要なポイントを説明する。

◆重要な撮像条件：空間分解能の向上

高分解能化によって小さな病変が検出できるだけでなくflow artifactも軽減できる。筆者の施設ではスライス面のピクセルサイズを約0.5×0.7mm、スライス方向(Z軸)は補間法を使用して0.4-0.5mm(実際の撮像は0.8-

1.0mm)に設定している。ただし、診断に耐えられるだけのSNRを保つことも重要である。そこで、筆者の施設では100-140mmの小さな撮像視野⁴⁾を用いて、pixel sizeを小さくする方法を選択している。

◆flow compensation(FC)法^{5),6)}

flow(血流)の存在により起こる位相ズレを補正する方法で、flow artifactを抑制する。通常のMRAでは必須機能である。

◆エコー時間(TE)短縮

血流によって発生するflow artifactを軽減できる。近年ではエコープラーナ対応MRI装置の普及で傾斜磁場強度が高くなり、2-3msecのTEも可能になった。この程度になると前述のFC法を使用しなくてもflow artifactはかなり軽減できる。

◆脂肪信号への対策

3D TOF法では脂肪信号が再構成(MIP⁷⁾)画像において高信号となり読影に悪影響を及ぼすことがある。そこで、1.5T装置においては、TEをout-of-phase(6.9msec)に設定することで脂肪信号を抑制する。しかし、前述したTE短縮によるflow artifact改善の効果が大きいいため脂肪信号抑制は無視して2-3msecのTEが使用されることが多くなった。目的に応じたTEの選択が必要である。

◆TONE:tilted optimized non-saturation excitation⁸⁾

末梢血流のスピン飽和を改善する。これは流入部のフリップ角を小さくし、末梢部はフリップ角を大きくする方法である。結果として流入部の信号は少し低下するが、流入部と末梢の信号差が少なくなり末梢の血流信号の上昇が期待できる。

◆マルチスラブ法⁹⁾

3D TOF法のpartition数を通常の単一スラブの設定よりも少なくし、末梢血流のスピン飽和による血流信号の低下を防ぐのが目的である。そのため、撮像時間はスラブ数に依存して延長するが末梢血流のスピン飽和のない広範囲のMRAが可能になる。最近開発されたSLINKY(sliding interleaved ky)法¹⁰⁾は、マルチスラブ法で問題となるスラブ間の信号差をなくし、つなぎめのないスムーズな画像を提供してくれる(図1)。

2. 2D TOF MRA

2D TOF法は強い流入効果が期待できるため遅い血流の描出が可能であり、頭蓋内においては静脈系、特に静脈洞の描出に適している。頭蓋外においては頸

部動脈系の描出に適している。主に頸部内頸動脈の狭窄や閉塞の検出に利用される(図10)。

3. 3D PC MRA

PC法²⁾は、血流感度を任意に設定することが可能で、血流速度に依存した血流画像を得ることができる。速い血流に設定すると動脈系を中心とした画像が描出され、遅い血流に設定すると静脈系を中心とした画像が描出されることになる。3D PC法は複雑な血管走行の描出に優れてるが、最近は使用されることが少なくなった。

4. 2D PC MRA

2D PC法は比較的厚いスライス厚(5-10cm)でも短時間に鮮明な血流画像が得られ、3D PC法同様に血流速度に依存した血流画像が得られる(図7)。位相画像が得られることから、血流の速度を測定することも可能である。

5. 造影剤MRA

造影剤を使用すると血管腔が造影されるため、TOF法においてinflow効果の弱い条件下でも血流の描出が可能となる。そのため、通常のTOF法よりもTR(繰り返し時間)を短く設定することが可能であり撮像時間は短縮される。また、TRを短くすることで静止部信号は低下し、造影される血管との信号差も大きくなる。時間分解能を重視する2D法¹¹⁾¹²⁾と、空間分解能を重視する3D法¹³⁾¹⁴⁾に大別できる。前者は2D MRDSA(MR digital subtraction angiography)として、血流動態(図2)を観察することが可能であるが適応疾患は限られる。3D法では頸部動脈系(図3)のMRA画像を短時間で得ることが可能で、頸動脈の狭窄や閉塞の検出に利用される。頭蓋内においては、3D TOF MRAに比



図1
正常頸部3D TOFMRA像
SLINKY法を使用しているため血管の連続性は保たれている。頸部のような広範囲の血管系のスクリーニングに有用である(松山南病院提供)。

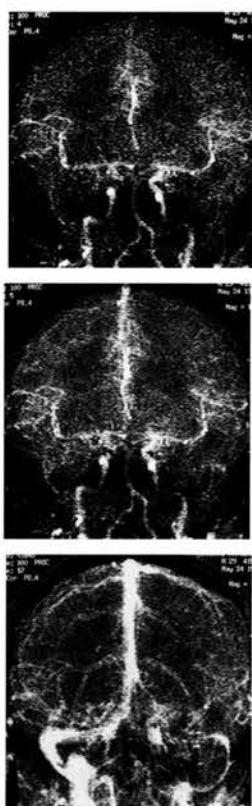


図2 正常頭部2D MRDSA像

2D法で短いTRを選択するため1回1秒程度で連続撮影が可能である。各画像は動脈相から静脈相までの連続画像から抜粋した。血管造影検査のような異なる位相の画像が得られることから、ある程度の血行動態を観察することが可能である(貞本病院提供)。



図3 正常頭部造影MRA像
冠状断撮影も可能で広範囲のMRA画像を得ることができる(西条中央病院提供)。

べれば分解能が低下するため、現時点では適応は限られる。

臨床例

1. 脳動脈瘤

脳動脈瘤破裂によるクモ膜下出血が予後不良であることは良く知られている。そこで動脈瘤が破裂する前に発見できる非侵襲的検査法として頭部MRAが普及してきた。現在、未破裂脳動脈瘤のスクリーニング検査法として使用される場合が多く、頭部領域で最もMRAの対象となる疾患である。1cm以上の脳動脈瘤は通常のMRIで指摘できるため、MRAの意義は1cm以下の動脈瘤検出にある。

撮像法の第一選択は3D TOF法である。撮像条件



図4 前交通動脈瘤(3D TOF MRA)

(a)横断像からは動脈瘤(矢印)と前大脳動脈の関係は理解できない。

(b)選択的MIPによって、動脈瘤(矢印)と前大脳動脈の関係が容易に把握できる。

のなかでは、撮影法の項で説明したように空間分解能の設定(高分解能化)に留意する必要がある。

分岐部や屈曲部で動脈が重なる部位の小さな動脈瘤は全データからのMIP画像では診断が困難なことがあるので注意しなくてはならない(図4a)。疑問のある部位では元画像を丁寧に観察したり選択的MIPにより詳細な観察が必要となる。好発部位の中大脳動脈分岐部や前交通動脈部では、選択的MIP法で観察することが有用である(図4b)。後交通動脈分岐部では、後交通動脈が細くてMIP画像には描出されないことがあり、infundibular dilatationと動脈瘤を区別できないこともある。この部位では元画像の観察が必須である(図5)。MIP画像や元画像だけでなく、volume rendering法¹⁵⁾による三次元画像により病変の具体的な位置情報を知ることにも可能である(図6)。

装置、撮像方法、読影医などの条件が十分揃えば3mm以上の動脈瘤は検出可能と考える。しかし使用機種、磁場強度、撮像方法などの違いによって検出能に差が認められることは否定できない。なお、2mm以下の動脈瘤の判定は部位によっては可能な場合もあるが、確定は困難なことが多い。

2. 動脈閉塞・狭窄病変

頭蓋内外の脳動脈閉塞や狭窄の検出にもMRAは威力を発揮する。頭蓋内においては3D TOF法(図7a)や、比較的短時間に撮像できる2D PC法が有用である(図7b)。ただし、狭窄例では狭窄が過大評価されやすく、高度の狭窄例では閉塞と狭窄の鑑別が困難なこともある(図8a)。閉塞性脳血管障害に対してMRAは過大評価される傾向にあるが、逆にfalse negativeが少なく、スクリーニング検査法として期待できる。また、経皮的血管形成術(PTA)などのIVRやバイパス術後の

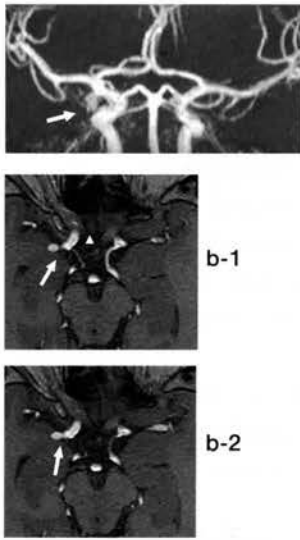


図5 右後交通動脈瘤(3D TOF MRA)
(a)MIP画像：動脈瘤(矢印)は指摘できるが後交通動脈との関係はMIP画像では理解しにくい。
(b)元画像：右後交通動脈(矢頭)、内頸動脈、動脈瘤(太矢印)および動脈瘤のネック(細矢印)の関係がよく理解できる。右後交通動脈に、この程度の信号強度が認められても全データのMIP画像では描出されないことに注意してはならない。

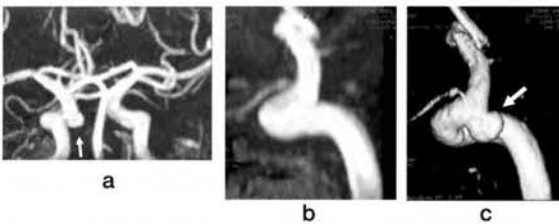


図6 右内頸動脈瘤(3D TOF MRA)
(a)MIP画像：動脈瘤(矢印)は指摘できるが内頸動脈との関係はMIP画像では理解しにくい。
(b)選択的MIP画像：観察方向によっては動脈瘤の指摘が困難である。
(c)volume rendering画像：1枚の画像だけでも、位置情報を有するため内頸動脈と動脈瘤の関係が理解しやすい(矢印)。
※カラー印刷P50参照

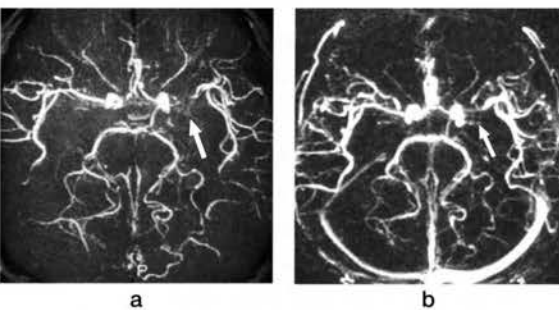


図7.左中大脳動脈狭窄
(a)3D TOF MRA像：左中大脳動脈狭窄部は信号欠損として描出される(矢印)。
(b)2D PC MRA像：3D TOF法と同様の所見が約2分で得られる。MRAは形態診断だけでなく血流という機能情報も加味されていることを認識してはならない。

経過観察にもMRAは有用である(図8b)。

モヤモヤ病では、3D TOF法にて内頸動脈や中大脳動脈の閉塞や狭窄を描出することが可能である。また、元画像にて容易にモヤモヤ血管が同定でき、確定診断がMRIにて可能となる(図9)。

頭部内頸動脈の閉塞や狭窄の描出には2D TOF法が有用である(図10)。しかし狭窄が検出できても正確な狭窄率を判定するほどの信憑性がないこともあるので注意を要する。一方、最近開発された造影MRAが頸部動脈系の診断に使用されるようになった(図11)。2D TOF法よりも短時間でflow artifactの少ない高分解能画像を得ることが可能である。造影剤を使用することでスクリーニングとしては問題を残す。目的を考えて撮像法を選択する必要がある。

おわりに

頭部MRAの撮像法について、第一選択として使用されている3D TOF MRAを中心に最近の進歩や適応、注意点について解説した。現時点で頭部MRAの最終的手法を確定することはできないが、すでに臨床的

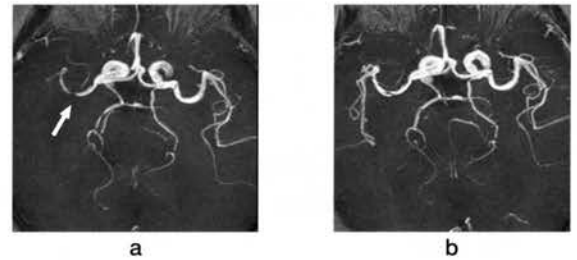


図8.右中大脳動脈狭窄(3D TOF MRA像)
(a)PTA前：右中大脳動脈の狭窄(矢印)とM2以降の末梢血流信号の低下を認める。強い血流量の低下が予想できる。
(b)PTA後：末梢血流信号の改善を認める。

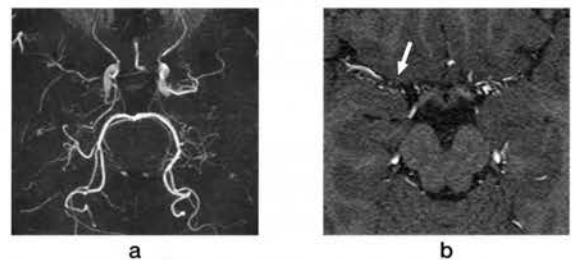


図9.もやもや病(3D TOF MRA像)
(a)MIP像：中大脳動脈起始部の閉塞と中大脳動脈や前中大脳動脈血流の低下を認める。
(b)元画像：もやもや血管が微細な点状・線状の高信号(矢印)として描出されている。



図10.左内頸動脈狭窄(2D TOF MRA像)
狭窄部位が容易に同定できる(矢印)。



図11.大動脈炎症候群(造影MRA像)
左右の総頸動脈の拡張と狭窄を容易に確認できる。造影MRAにより大動脈弓から頸部動脈が一度に観察できるので広範囲の病変に有用である(西条中央病院提供)。

有用性は確立している。MRI診断に携わる放射線科医にとって、MRA撮像法やその適応について理解することは重要と考える。

参考文献

- Wehrli FW. Time-of-flight effects in MR imaging of flow. *Magn Reson Med* 14; 187-193, 1990.
- Dumoulin CL, Hart Jr. HW. Magnetic resonance angiography. *Radiology* 161; 717-720, 1986.
- Sevic RJ, Tsuruda JS, Schmalbrock P. Three-dimensional time-of-flight MR angiography evaluation of cerebral aneurysms. *J Comput Assist Tomogr* 14; 874-881, 1991.
- 三木 均: MR angiographyによる脳動脈瘤診断精度の検討、*日磁医誌* 16; 33-48, 1996.
- Haacke EM, Lenz GW. Improving MR image quality in the presence of motion by using rephasing gradient. *AJR* 148; 1251-8, 1987.
- Pattany M, Phillips J, Chiu L. et al. Motion artifact suppression technique for MR imaging. *J Comput Assist Tomogr* 11; 369-377, 1987.
- Siebert JE, Rosenbaum TL. Image presentation and post-processing. In: Potchen EJ, Haacke EM, Siebert JE, Gottschalk A, editors. *Magnetic Resonance Angiography*. Saint Louis: Mosby, 1993: 220-245.
- Atkins D, Brantz-Zawadzki M, Gillan G. et al. Improved MR Angiography: Magnetization transfer suppression with variable flip angle excitation and increased resolution. *Radiology* 190; 890-894, 1994.
- Parker DL, Yuan C, Blatter DD. MR angiography by multiple thin slab 3D acquisition. *Magn Reson Med* 17; 434-451, 1991
- Liu K, Rutt BK: Sliding interleaved ky (SLINKY) acquisition. a novel 3D MRA technique with suppressed slab boundary artifact. *J Magn Reson Imaging* 8; 905-911, 1998.
- Aoki S, Yoshikawa T, Hori M, et al. Two-dimensional thick-slice MR digital subtraction angiography for assessment of cerebrovascular occlusive diseases. *Eur Radiol* 10; 1858-1864, 2000.
- Yoshikawa T, Aoki S, Hori M, et al. Time-resolved two-dimensional thick-slice magnetic resonance digital subtraction angiography in assessing brain tumors. *Eur Radiol* 10; 736-744, 2000.
- Levy RA, Prince MR. Arterial-phase three-dimensional contrast-enhanced MR angiography of the carotid arteries. *AJR* 167; 211-215, 1996.
- Isoda H, Takehara Y, Isogai S, et al. Technique for arterial-phase contrast-enhanced three-dimensional MR angiography of the carotid and vertebral arteries. *AJNR Am J Neuroradiol* 19; 1241-1244, 1998.
- Cline HE, Dumoulin CL, Lorensen WE, et al. Volume rendering and connectivity algorithms for MR angiography. *Magn Reson Med* 1991; 18: 384-394.

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619