

3T MRIにおける脳のルーチン撮像プロトコル

平井俊範, 山下康行

熊本大学大学院医学薬学研究部放射線診断学分野

はじめに

脳に対する3T MRI撮像におけるルーチン撮像法は施設により異なるが、本稿では30分以内に撮像でき、日常よく用いる撮像法をルーチン撮像法として述べる。患者への検査の侵襲性や病院経営の点からも一患者当たりの検査時間は30分以内に終わることが望ましい。一般的な脳MRI撮像プロトコルは、三木ら¹⁾が本誌で以前記載しており参照されたい。疑われる疾患に応じてルーチン撮像プロトコルを決めておくことは、必要な撮像の未実行防止や撮像の円滑化などに有用と思われる。本稿ではルーチン撮像法を大きく基本撮像法と追加撮像法に分けて解説する。基本撮像法で部位診断やある程度の質的診断を行い、追加撮像法を施行することでさらに脳病変の病態に迫ることができる。3T MRIは高い信号雑音比のため短時間に画像収集が可能であり、1.5T MRIではルーチン撮像にはできなかったものが、ルーチン撮像に組み入れることが可能である。本稿では当院におけるルーチン撮像プロトコルについて簡単に述べる。

ルーチン撮像プロトコル (基本撮像法)

疑われる疾患により基本撮像法も異なるが、一般にT₁強調画像、T₂強調画像、T₂-FLAIR、拡散強調画像を行う。撮像方向、撮像幅、撮像範囲は疑われる疾患に応じて選択する。これら

の基本撮像法で、脳における局在診断やある程度の質的診断も行える。3T MRIは高い信号雑音比のため短時間に画像収集が可能であり、基本撮像法も短時間に行える。当院ではこれらを10分程度で撮像している。

T₁強調画像

スピンエコー法によるT₁強調画像は、3Tにおいて脳のコントラストが低下し、灰白質と白質の境界が不明瞭化するが、磁場上昇に伴う組織のT₁緩和延長や誘電率効果による信号の不均一性との関連が指摘されてきた^{1),2)}。そのため、施設によってはT₁強調画像の代わりに三次元 gradient-echo 法やT₁ FLAIRなどのIR法が用いられている^{2),3)}。Fushimiらの脳の信号雑音比を3Tと1.5Tで比較した検討では、single sliceにおいては3Tの方が皮髄コントラストは高いが、multi-sliceでスライスギャップを少なくするとコントラストの低下は3Tの方が著しかった⁴⁾。脳のT₁コントラストが悪くなる理由として、multi-sliceの影響も考えられ、それにはmagnetization transfer (MT)効果も関与している可能性がある。我々の施設では、分割スキャン (concatenation) を使用することで、比較的よいT₁コントラストが得られている (Fig. 1)。このように3Tでも工夫すればスピンエコー法のT₁強調画像も良好なT₁コントラストが得られる可能性がある。

キーワード MRI, brain, imaging protocols, 3T

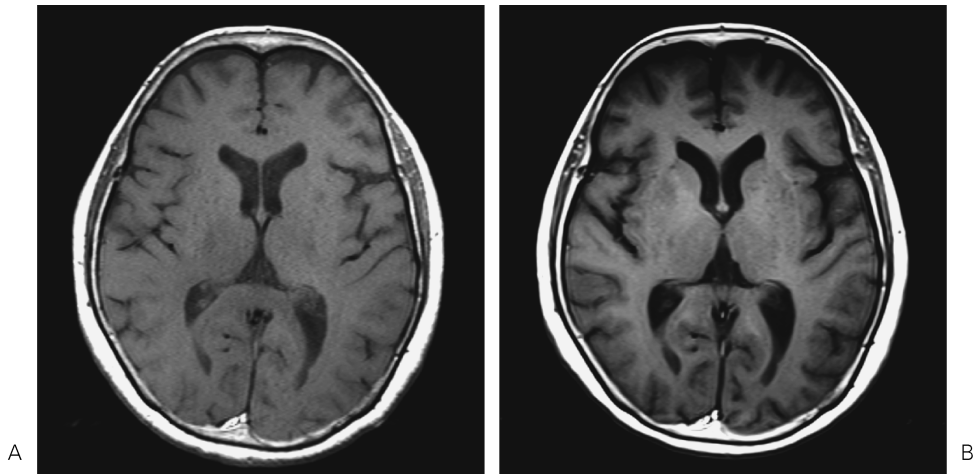


Fig. 1. A 70-year-old man with meningitis
 A : Axial T1-weighted image without concatenation shows poor contrast between gray matter and white matter.
 B : Axial T1-weighted image with concatenation shows relatively good contrast between gray matter and white matter.

T₂強調画像

3T においては、高速スピネコー法を使用する T₂強調画像は、比吸収率 (specific absorption rate : SAR) による制限が問題となる。Hyperecho 法や flip angle sweep 法などの再収束パルスをもつ 51 症例に通常の高速度スピネコー T₂強調画像と hyperecho 法を用いた高速スピネコー T₂強調画像を施行し、両者の画質や信号雑音比が同等であることを示した⁵⁾。当院では flip angle sweep 法を用い、echo train length や turbo factor を調節し 512 マトリックスの T₂強調画像を 2 分程度で撮像しているが、SAR の制限がかかることは少ない。

T₂-FLAIR

3T においても、T₂-FLAIR はルーチン基本撮像法に欠かせない。日常の MRI 検査で頻度が多いものに無症候性脳梗塞や大脳深部白質病変があり、その両者の鑑別は患者の治療方針等に重要である。Sasaki らの検討では、T₁強調画像、T₂強調画像に T₂-FLAIR を加えることで両者を鑑別する診断能が向上することが明らかになっている⁶⁾。当院では、パラレルイメージング法や flip angle sweep 法を用い、380 マトリックスの画像を 2 分 40 秒ほどで撮像している。

拡散強調画像

1 分以内に撮像可能であり、当院ではルーチンの基本撮像法である。3T では磁化率効果の影響で画像のゆがみが問題になるが、パラレル

2008 年 9 月 1 日受理

別刷請求先 〒860-8556 熊本市本荘 1-1-1 熊本大学大学院医学薬学研究部放射線診断学分野 平井俊範

イメージング法の併用がその解決法となる⁷⁾。本撮像法は脳梗塞の診断のほか、脳炎、プリオン病、脳腫瘍や脳腫瘍類似病変など様々な脳病変の診断や鑑別に欠かすことはできない。3Tでは信号雑音比が高いため、薄いスライスや高いb値を用いた画像を良好な画質で得ることができる。3000 s/mm²のb値を用いた拡散強調画像はb=1000 s/mm²のものに比べ白質の信号がやや目立ってくるが、T₂ shine throughの影響が少なく様々な疾患への応用が期待される^{8),9)} (Fig. 2)。

ルーチン撮像プロトコル (追加撮像法)

追加撮像法を行うことで診断により寄与する付加情報が得られる。追加撮像法の時間は20分以内が目安である。例えば、脳梗塞が疑われる場合には、基本撮像法にMR angiography (MRA)を追加撮像することで、脳梗塞の臨床病型と機序の把握に有用である。また、灌流画

像も虚血の病態把握に新たな情報を提供し得る。Tableに疑われる疾患別の当院におけるルーチン撮像プロトコルの追加撮像法を示す。

MR angiography

3Tの性能を最もよく活かしている撮像法の一つがtime-of-flight MR angiography (TOF MRA)である。TOF MRAにおいては、信号雑音比の上昇、T₁緩和の延長によるバックグラウンドである脳実質信号の抑制と血管のinflow効果の増強が血管のコントラストを向上させる。またパラレルイメージング法を用いることで、撮像時間が短縮され、高分解能のMRAを日常ルーチンに撮像することができる。

脳動脈瘤、脳動脈閉塞性変化などの脳血管の3T MRAによる評価は1.5Tより精度が向上するものと思われる^{10),11)}。また1.5Tでは評価が難しかった外頸動脈系の評価にも3Tは有用性がみられる¹²⁾。

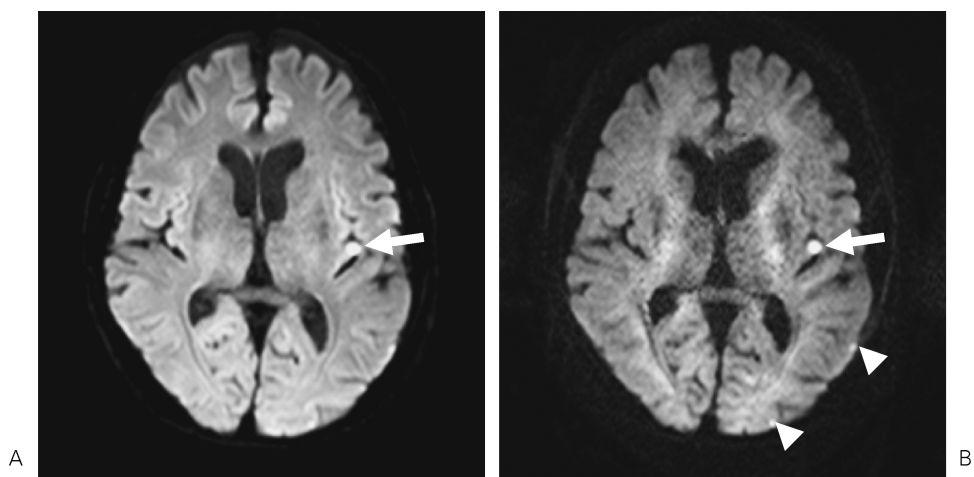


Fig. 2. A 76-year-old man with multiple early infarctions

A : Axial diffusion-weighted image at b=1000 s/mm² shows hyperintense area in the left insula cortex (arrow).

B : Axial diffusion-weighted image at b=3000 s/mm² more clearly shows the insula lesion (arrow) because of decreased signal of the cortices. There are other cortical lesions in the left temporooccipital region (arrowheads).

我々が診療で用いている撮像パラメータは、
TR=30 ms, TE=3.5 ms, flip angle=20°, マ
トリックス数=512×206, ボクセルサイズ=

0.25×0.25×0.5 で、パラレルイメージング法
(reduction factor=2) を用い4分48秒で撮像
している。3Tの脳MRAでは、多くのslabを
用いて撮像することが多く、静脈が高信号とし
て目立つことも少なくない (Fig. 3)。そのた
め、硬膜動静脈瘻の診断には注意が必要である
と思われる。

Table. Additional Imaging in Our Routine MR Proto-
cols

Suspected Disease	Additional imaging
• Brain infarction	MRA, T ₂ *WI, Perfusion imaging
• AVM/DAVF	MRA, MR-DSA, CE 3DMRI
• Cavernous angioma/ Venous malformation/ Capillary telangiectasia	T ₂ *WI, SWI
• Primary brain tumor	MRS, Perfusion imaging, CE 3DMRI
• Metastatic brain tumor	CE 3DMRI
• Meningitis	CE 2D T ₂ -FLAIR, CE 3D T ₂ -FLAIR
• Metabolic disorder	MRS

AVM: arteriovenous malformation, AVF: arteriovenous fistula, MRA: MR angiography, T₂*WI: T₂-weighted imaging, CE: contrast-enhanced, 3D: three-dimensional, 2D: two-dimensional, SWI: susceptibility-weighted imaging, MRS: MR spectroscopy

MR-DSA

時間分解能を最優先させた造影MRAをMR-DSAもしくはtime-resolved contrast-enhanced MRAと呼び、血管造影のように血行動態に関する情報が得られる。1.5Tでは2D高速gradient echo法を用い時間分解能を上昇させる工夫もされていたが、3Tにおいては、3D高速gradient echo法にパラレルイメージング法、Keyhole法、HalfScan法、洗練されたk空間へのデータ充填法などを組み合わせ、1秒未満の時間分解能をもつMR-DSAも可能となってきている。本法は4D造影MRAとも称される。3D画像のため、多方向からの観察

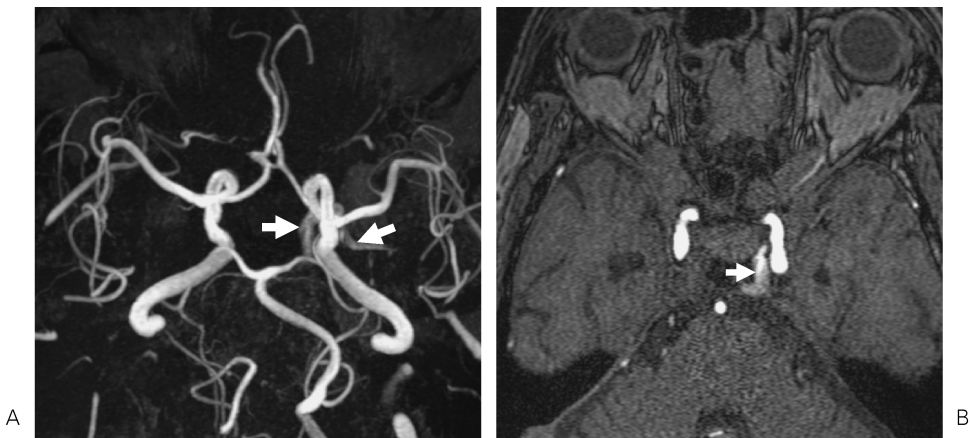


Fig. 3. A 66-year-old man with headache
A : Axial projection of MRA shows a hyperintense area adjacent to the left internal carotid artery (arrows).
B : Source image of MRA demonstrates a hyperintense area in the left cavernous sinus (arrow). This hyperintense area was a physiologic finding from MR-DSA.

もでき診断への有用性が高い。

経時的な情報が必要となる脳動静脈奇形や硬膜動静脈瘻などのシャント性病変の診断に有用である¹³⁾。当院で用いるMR-DSAは4D-TRAKと呼ばれ、ボクセルサイズ=0.9×0.9×1.5 mm, マトリックス数=256×256の造影3D MRAを1.9秒おきに撮像している(Fig. 4)。

造影 3D MRI

一般的な脳MR撮像のスライス厚は5 mm程度であるため、径5 mm未満の小さな病変はこの基本撮像法では見逃す可能性がある。小さな脳転移は通常の造影T₁強調像では髄質静脈や皮質静脈との区別がつかない場合もあり、グラジエントエコー法の造影3D MRIがその検

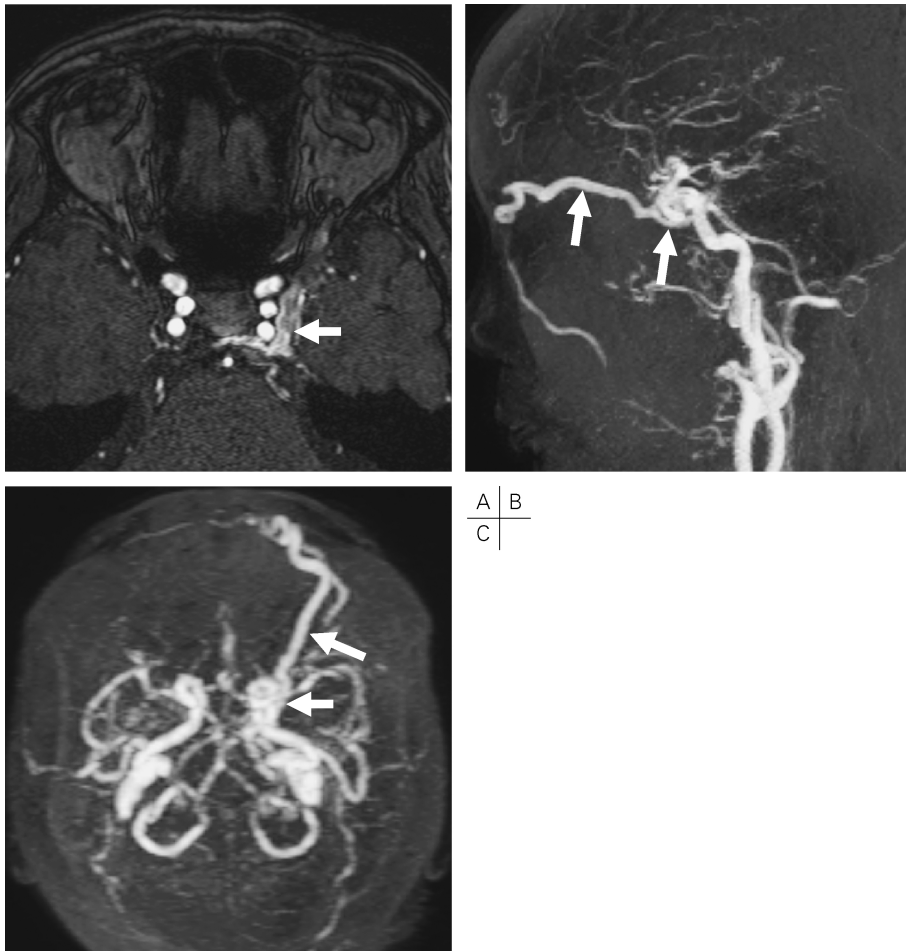


Fig. 4. A 62-year-old woman with dural arteriovenous fistula at the left cavernous sinus
A : Source image of MRA shows hyperintense area in the left cavernous sinus (arrow).
B/C : Lateral (B) and axial projection (C) at arterial phase of MR-DSA show early visualization of the left cavernous sinus and superior ophthalmic vein (arrows). The diagnosis of dural arteriovenous fistula at the left cavernous sinus is confirmed.

出に役立つ¹⁴⁾。我々の脳転移検出に関する撮像プロトコルには、magnetization prepared rapid gradient echo (MPRAGE) や three-dimensional turbo field echo (3D TFE) を用いた造影 3D MRI も追加している。本法は、脳静脈系の情報が得られること、ナビゲーション手術に利用できることから当院では脳外科手術の術前評価に必須になっている。

Arterial spin labeling

Arterial spin labeling (ASL) は 3T において、期待される撮像法の一つである。灌流画像 (perfusion imaging) の一つで、血液中のスピンに RF で磁化を与えること (ラベリング) によって、血液そのものを内因性トレーサーとして灌流を評価する手法である。造影剤は使用せずに灌流情報が得られるため、汎用性が広いものと思われる。ASL は撮像時間が長いことが欠点であったが、3T MRI では信号雑音比の上昇、血液の T_1 緩和時間の延長により感度が上昇するため、比較的短時間に撮像可能である。当院では、pulsed ASL で多断面での灌流評価が可能な QUASAR (quantitative star labeling of arterial regions) 法を用いている¹⁵⁾ (Fig. 5)。

グリオーマの灌流評価において、ASL と造影剤を用いる dynamic susceptibility contrast による灌流画像はほぼ同等の情報が得られる¹⁶⁾。ASL に ADC 値や MR spectroscopy の情報を加えることで、グリオーマ悪性度の診断能が向上する^{17),18)}。腫瘍のほか血管障害、炎症など様々な疾患への応用が期待される。

Susceptibility-weighted imaging

Susceptibility-weighted imaging (SWI) は Haacke らによって考案された新しい MR 撮像法で、位相情報を用いて磁化率の異なる組織のコントラストを強調する三次元高分解能画像である。単に磁化率効果による信号減衰を画像化

したものではない。1.5T ではやや長い撮像時間が必要であるが、3T では信号雑音比が高く、比較的短時間に撮像され、日常ルーチンに使用できる。3D FLASH (fast low angle shot) を用い、脳組織のスピンと静脈血のスピン有位相分散を強調するためにその 2 種類のスピンが out of phase となる TE (通常 40 ms) を設定し、強度 (magnitude) 画像と位相 (phase) 画像の両方を得る。位相画像に high-pass filter をかけて低周波数成分の除去を行い、均一な位相画像を得る。位相差を強調するために、信号を除去したい位相の部分が 0 になるようなマスク画像を作成し、その位相マスク画像と強度画像を複数回掛け合わせることで、画像のコントラストを最適化する。

静脈系の描出を向上させるためには、ある程度のボリュームを最小値投影法 (minimum intensity projection : mIP) 処理することで、脳静脈を明瞭に描出できる (Fig. 6)。脳血管奇形の診断のほか、様々な原因による脳内微小出血の評価に有用である^{19),20)}。脳腫瘍においては悪性グリオーマの評価への有用性も報告されている²¹⁾。

MR spectroscopy

MR spectroscopy (MRS) においても 3T は有利に働く。3T では信号雑音比が高く、化学シフトの上昇、周波数分解能の上昇を認め、比較的短時間に良質のスペクトルの取得が可能である。1.5T では時間を要し日常ルーチンには使用できなかったが 3T MRI では施行可能である。

MR spectroscopy (MRS) は通常プロトンターゲットとして組織内の代謝を観察する。最も使われているのはマルチボクセルでデータを収集する chemical shift imaging (CSI) 法で、N-アセチルアスパラギン酸 (NAA)、コリン (Cho)、クレアチニン (Cr)、乳酸 (Lac) が主に観察される。CSI 法では代謝物の濃度マップ

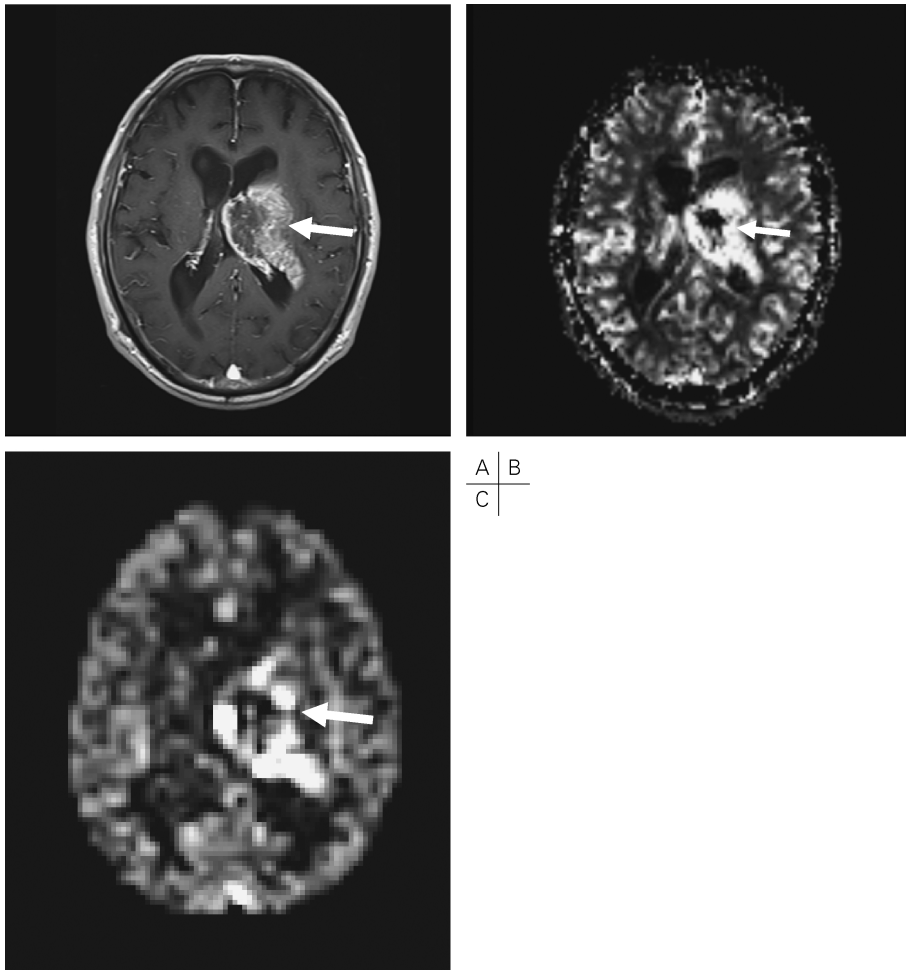


Fig. 5. A 81-year-old man with glioblastoma
A : Contrast-enhanced T₁-weighted image shows irregular ring enhancement in the left basal ganglia (arrow).
B : Perfusion image with dynamic susceptibility contrast (DSC) shows a hypervascular area in the left basal ganglia (arrow).
C : Perfusion image with ASL shows a hypervascular area similar to perfusion image with DSC (arrow).

を作成することもでき、視覚的に説得力のある画像を提供し得る。短いTEを用いシングルボクセル法で施行することで、ミオイノシトール(MI)、グルタミンやグルタミン酸(Glx)などの代謝物も観察可能となる。

ミトコンドリア脳筋症などの代謝性疾患のほ

か腫瘍性疾患等にルーチンに撮像できる。神経膠腫においては悪性度が高いほどChoが高値を示す²²⁾。膠芽腫と脳転移の鑑別(Fig. 7)や放射線治療後の再発と放射線壊死の鑑別などにおいて有用性が報告されている^{23),24)}。

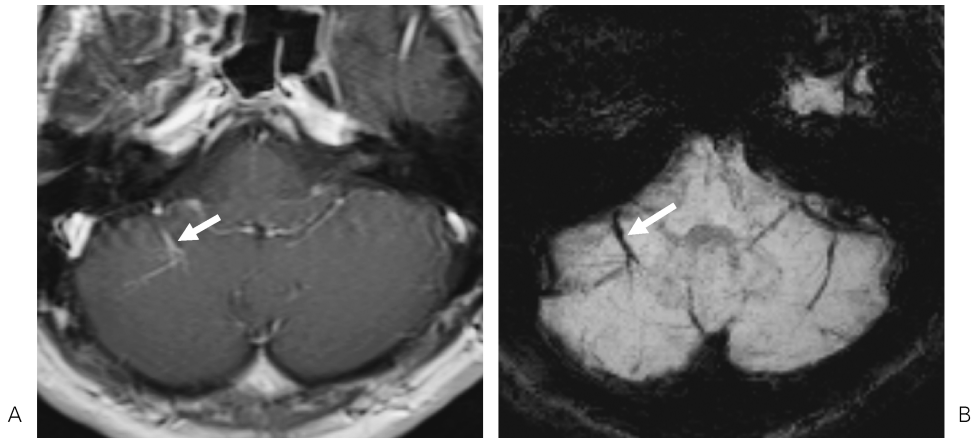


Fig. 6. A 28-year-old man with venous malformation

A : Contrast-enhanced T1-weighted image shows linear enhancement in the right cerebellar hemisphere (arrow).

B : Minimum intensity projection of SWI shows a large hypointense vessel with fine vessels in the right cerebellar hemisphere (arrow). The diagnosis of venous malformation can be made without administration of contrast material.

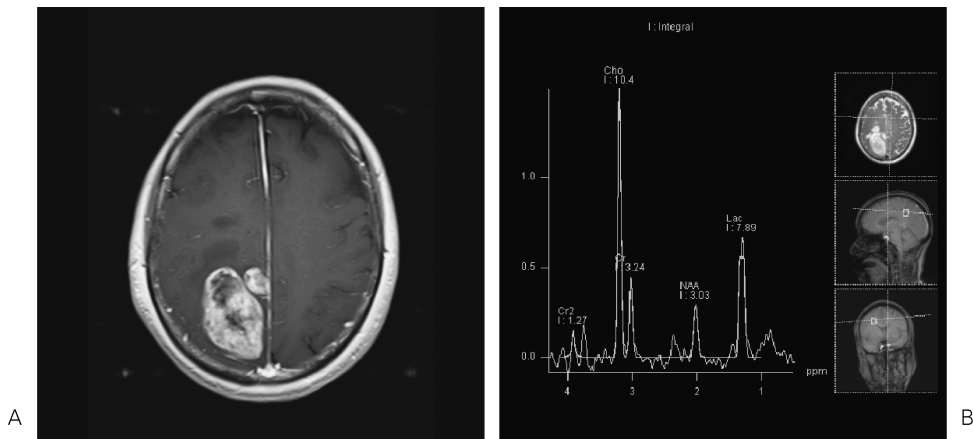


Fig. 7. A 78-year-old woman with glioblastoma

A : Contrast-enhanced T1-weighted image shows enhancement mass lesions in the right parietal lobe (arrow).

B : MRS with chemical shift imaging (TE = 270 ms) shows increase of cholin and lactate peaks and decrease of NAA in the mass lesion.

3D T₂-FLAIR

Three-dimensional T₂-fluid-attenuated inver-

sion recovery (3D T₂-FLAIR) は、1 mm 等方型ボクセルの三次元高分解能 FLAIR である。長い TE、長いエコートレインを用いるため、

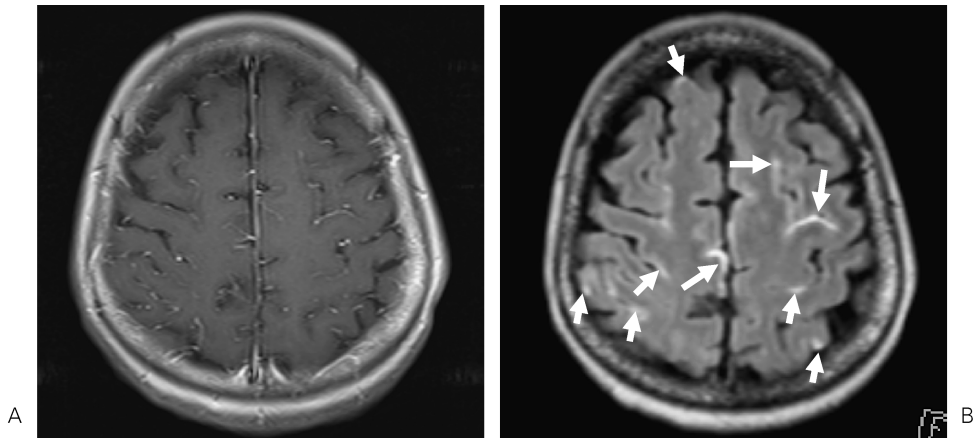


Fig. 8. A 57-year-old woman with encephal meningitis
A : Contrast-enhanced T1-weighted image does not clearly show meningeal lesion.
B : Contrast-enhanced 3D T₂-FLAIR image reveals leptomeningeal enhancement in the cerebral sulci (arrows).

単位時間当たりの RF 照射量が増加する。SAR 制限が問題になるが、リフォーカスパルスフリップ角をエコートレイン中に変化させる方法 (variable flip angle 法) を用いることで解決している。

3D T₂-FLAIR は 2D T₂-FLAIR と比べて長い TE, 長いエコートレインを使用するため、血管からの信号がさらに抑制される可能性も考えられる。我々の 3D T₂-FLAIR を用いたファントム実験の結果からは、通常量の造影剤投与では血管内からの信号はほとんどみられなかった。脳脊髄液の流れによるアーチファクトは 3D T₂-FLAIR の方が 2D T₂-FLAIR と比べて少ない²⁵⁾。造影 3D T₂-FLAIR は、髄膜病変や脳脊髄液への造影剤の染み出しを有する脳病変の評価に有用な可能性がある²⁶⁾ (Fig. 8)。

ま と め

当院における脳 3T MRI のルーチン撮像プロトコルを基本撮像法と追加撮像法に分けて簡単に解説した。疑われる疾患に応じてルーチン撮像プロトコルを用意することは円滑に、かつ

確実に撮像するのに役立つものと思われる。

文 献

- 1) 三木幸雄, 谷口正洋, 平賀 顯, 富樫かおり : 頭部 MRI : 撮像プロトコルおよび 3T MRI の最新知見. 日磁医誌 2007 ; 27 : 156-165
- 2) Schmitz BL, Aschoff AJ, Hoffmann MHK, Grön G : Advantages and pitfalls in 3T MR brain imaging : a pictorial review. AJNR Am J Neuroradiol 2005 ; 26 : 2229-2237
- 3) Willinek WA, Kuhl CK : 3.0T neuroimaging : technical considerations and clinical applications. Neuroimaging Clin N Am 2006 ; 16 : 217-228
- 4) Fushimi Y, Miki Y, Urayama SI, et al. : Gray matter-white matter contrast on spin-echo T1-weighted images at 3T and 1.5T : a quantitative comparison study. Eur Radiol 2007 ; 17 : 2921-2925
- 5) Tetzlaff RH, Mader I, Küker W, et al. : Hyper-echo-turbo spin-echo sequences at 3T : clinical application in neuroradiology. AJNR Am J Neuroradiol 2008 ; 29 : 956-961
- 6) Sasaki M, Hirai T, Taoka T, et al. : Discriminating between silent cerebral infarction and deep white matter hyperintensity using combinations

- of three types of magnetic resonance images : a multicenter observer performance study. *Neuroradiology* 2008 Jun 12. [Epub ahead of print]
- 7) Kuhl CK, Gieseke J, von Falkenhausen M, et al. : Sensitivity encoding for diffusion-weighted MR imaging at 3.0T : intraindividual comparative study. *Radiology* 2005 ; 234 : 517-526
 - 8) Toyoda K, Kitai S, Ida M, et al. : Usefulness of high-b-value diffusion-weighted imaging in acute cerebral infarction. *Eur Radiol* 2007 ; 17 : 1212-1220
 - 9) Seo HS, Chang KH, Na DG, Kwon BJ, Lee DH : High b-value diffusion ($b = 3000 \text{ s/mm}^2$) MR imaging in cerebral gliomas at 3T : visual and quantitative comparisons with $b = 1000 \text{ s/mm}^2$. *AJNR Am J Neuroradiol* 2008 ; 29 : 458-463
 - 10) Kakeda S, Korogi Y, Hiai Y, et al. : MRA of intracranial aneurysms embolized with platinum coils : a vascular phantom study at 1.5T and 3T. *J Magn Reson Imaging* 2008 ; 28 : 13-20
 - 11) Choi CG, Lee DH, Lee JH, et al. : Detection of intracranial atherosclerotic steno-occlusive disease with 3D time-of-flight magnetic resonance angiography with sensitivity encoding at 3T. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007 ; 28 : 439-446
 - 12) Lohan DG, Barkhordarian F, Saleh R, et al. : MR angiography at 3T for assessment of the external carotid artery system. *AJR Am J Roentgenol* 2007 ; 189 : 1088-1094
 - 13) Hadizadeh DR, von Falkenhausen M, Gieseke J, et al. : Cerebral arteriovenous malformation : Spetzler-Martin classification at subsecond-temporal-resolution four-dimensional MR angiography compared with that at DSA. *Radiology* 2008 ; 246 : 205-213
 - 14) Kakeda S, Korogi Y, Hiai Y, et al. : Detection of brain metastasis at 3T : comparison among SE, IR-FSE and 3D-GRE sequences. *Eur Radiol* 2007 ; 17 : 2345-2351
 - 15) Petersen ET, Lim T, Golay X : Model-free arterial spin labeling quantification approach for perfusion MRI. *Magn Reson Med* 2006 ; 55 : 219-232
 - 16) Warmuth C, Günther M, Zimmer C : Quantification of blood flow in brain tumors : comparison of arterial spin labeling and dynamic susceptibility-weighted contrast-enhanced MR imaging. *Radiology* 2003 ; 228 : 523-532
 - 17) Kim HS, Kim SY : A prospective study on the added value of pulsed arterial spin-labeling and apparent diffusion coefficients in the grading of gliomas. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007 ; 28 : 1693-1699
 - 18) Chawla S, Wang S, Wolf RL : Arterial spin-labeling and MR spectroscopy in the differentiation of gliomas. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007 ; 28 : 1683-1689
 - 19) de Souza JM, Domingues RC, Cruz LC Jr, et al. : Susceptibility-weighted imaging for the evaluation of patients with familial cerebral cavernous malformations : a comparison with T2-weighted fast spin-echo and gradient-echo sequences. *AJNR Am J Neuroradiol* 2008 ; 29 : 154-158
 - 20) Akter M, Hirai T, Hiai Y, et al. : Detection of hemorrhagic hypointense foci in the brain on susceptibility-weighted imaging clinical and phantom studies. *Acad Radiol* 2007 ; 14 : 1011-1019
 - 21) Pinker K, Noebauer-Huhmann IM, Stavrou I, et al. : High-resolution contrast-enhanced, susceptibility-weighted MR imaging at 3T in patients with brain tumors : correlation with positron-emission tomography and histopathologic findings. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007 ; 28 : 1280-1286
 - 22) Stadlbauer A, Gruber S, Nimsy C, et al. : Preoperative grading of gliomas by using metabolite quantification with high spatial resolution proton MR spectroscopic imaging. *Radiology* 2006 ; 238 : 958-969
 - 23) Rabinov JD, Lee PL, Barker FG, et al. : *In vivo* 3-T MR spectroscopy in the distinction of recurrent glioma versus radiation effects : initial experience. *Radiology* 2002 ; 225 : 871-879
 - 24) Ricci R, Bacci A, Tugnoli V, et al. : Metabolic findings on 3T 1H-MR spectroscopy in peritumoral brain edema. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007 ; 28 : 1287-1291
 - 25) Naganawa S, Koshikawa T, Nakamura T, et al. : Comparison of flow artifacts between 2D-FLAIR and 3D-FLAIR sequences at 3T. *Eur Radiol* 2004 ; 14 : 1901-1908
 - 26) Okuda T, Hirai T, Fukuoka H, et al. Depiction of

meningeal lesions on contrast-enhanced 3D FLAIR imaging : comparison with contrast-enhanced T1-weighted and MPRAGE imaging. In :

RSNA Scientific Assembly and Annual Meeting Program, 2007 : 903

Routine MR Imaging Protocols of the Brain at 3T

Toshinori HIRAI, Yasuyuki YAMASHITA

*Department of Diagnostic Radiology, Graduate School of Medical Sciences, Kumamoto University
1-1-1 Honjo, Kumamoto 860-8556*

Our routine magnetic resonance (MR) imaging protocols of the brain at 3T are divided into basic and additional imaging protocols. Basic imaging mainly provides morphologic information about the brain, and additional imaging provides clinically useful and functional information, such as that related to perfusion and metabolism. Appropriate protocols should be chosen according to suspected disease.