

— Open MRIにおける血流動態の描出と観察 —

大日方 研¹⁾ Ken Obinata
 松嶋 民夫²⁾ Tamio Matsushima
 松田 幸夫³⁾ Yukio Matsuda

高橋 義一¹⁾ Yoshikazu Takahashi
 立花 美紀³⁾ Miki Tachibana

¹⁾大日方医院(木更津市)

²⁾彩のクリニック

³⁾株式会社日立メディコ アプリケーション部

1. はじめに

今回は、基本シーケンスに加えて機能的シーケンスとして使用頻度の高い脂肪抑制法の種類や選択、取り扱い上の注意点等について述べた。

今回は、「Open MRIにおける血流動態の描出と観察」と題して、頭頸部MRAと造影MRAとしての3D contrast-enhanced MR angiography(以下3D CE MRA)およびDynamic MRIと造影MRIサブトラクション法を取り上げる。かかりつけ医の臨床の場でOpen MRIを用いて血管の走行、局所所見としての狭窄や拡張、血管壁の評価、腫瘍の栄養血管等の血管画像情報がどれだけ得られるか、限界はあるもののOpen MRIの実際について、ルーチン検査や造影検査法も含めて説明する。

2. MRA(Magnetic Resonance Angiography)

現在のMRAでは、部位に制限はあるものの比較的容易に主要動脈の走行や血管径・内腔・壁の評価が可能である。MRAには、造影剤を使用しない非造影MRA(代表はTOFを用いた頭頸部MRA)と造影剤急速静注して多相にわたって撮像し

MIP処理を行う3D CE MRAが存在する。両者は検査目的や撮像部位によって使い分けられている。

2.1 TOF(Time of Flight)

非造影MRAの代表的な方法として、血液の流入効果を利用したTOF(Time of Flight)法と血液(スピン)が傾斜磁場中を移動するときの位相シフトを利用したPC(phase contrast)法がある。ここでは一般的なTOF法について述べる。非侵襲的に血管像を得ることができるTOFは、流入効果を利用した撮像法で血流に対して垂直な撮像断面でデータ収集を行うため、スライスに対して平行に走行する血管の描出能は不良となるので注意が必要である。

3D CE MRAとの比較を表1に示す。

(1) 頭部MRA

TOFを用いた頭部MRAは、頭部スクリーニングや小さな脳動脈瘤や脳動脈奇形などの脳血管病変検出に適している(図1)。

表1: TOFと3D CE MRAの比較¹⁾

撮像部位	TOF法	3D CE MRA法
侵襲性	なし 造影剤(-)	軽度 造影剤(+)
コントラストの原理	流入効果 スライスに対して平行に走行する血管の描出能は不良である。	造影効果 造影剤が血中に存在する時のみ撮影が可能であり撮影タイミングが重要となる。TOF法で描出不良な症例(動脈瘤等の乱流を有するもの)に有用。
撮像面 データ収集方向	血流に垂直	血流に平行

(駒崎敏郎、大日方研: 臨床家のためのOpen MRI, デジタルメディソン社: P159.より改編)

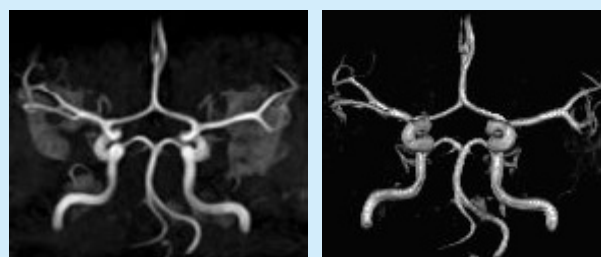


図1: 脳血管MRA(TOF)のMIPとVR

TR: 30/TE: 11.0/FA: 30/FOV: 160/
matrix: 200×128 thickness: 1.2mm

内頸動脈と椎骨脳底動脈を意識した撮像範囲の設定が求められ、Open MRIでは良好な画像が得られている。MIP表示で、血管が重複して前後の位置関係や走行の判定に苦慮することがある。そのようなときはVR表示併用が有効である。

また、めまいの原因のひとつである椎骨脳底動脈循環不全の診断の手がかりや除外診断として、頭蓋底部から頸部側の内頸動脈や椎骨脳底動脈を描出・観察可能とするMRAが求められており、両側椎骨動脈・後下小脳動脈まで網羅した撮像と観察を勧める。

(2) 頸部MRA(図2)

頭部MRAでも述べたように、めまいを主訴としたMRI検査の依頼が増えている。その大半はBPPV(benign paroxysmal positional vertigo、良性発作性頭位性めまい症)であるが、他の原因疾患として椎骨脳底動脈循環不全、CP angle tumor(聴神経鞘腫、髄膜腫、他)、小脳梗塞やラクナ梗塞等の脳血管障害、副鼻腔炎、乳突蜂巣炎などをあげることができる。これらの鑑別疾患に対して除外診断の際に頸部MRAが用いられることが増えてきている。

また、背景に頸椎症を有した頸椎性めまいやBarre-Lieou症候群の診断・除外診断に際して、頸部MRA検査が必要なが多い。

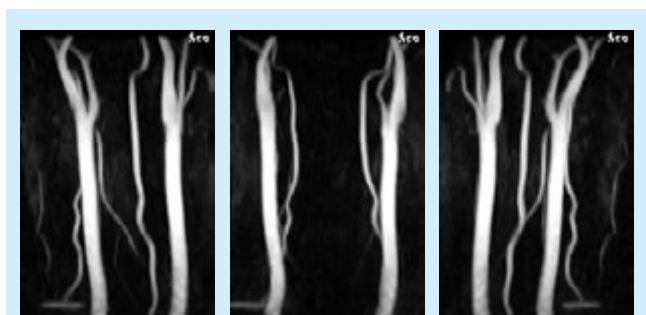


図2：頸部MRA(TOF)

第6頸椎レベルで両側椎骨動脈に軽度の屈曲が認められる。また、両総頸動脈から内頸動脈・外頸動脈の描出は良好である。

参考：flow voidについて

・flow voidとはSE系シーケンスで血液などの流速をもつ物質が無信号になる現象である。AIRIS II^{※1} 0.3T version5.0Mでは以下の計算式で各パラメータの値を代入すると血流が消える流速が計算できる。

AIRISの撮像条件で血流を信号として捉えることができる範囲を算出してみた。

スライス厚 ΔZ ：0.4cm、TE：120ms、TR：3750msで撮像する場合、0.1cm/s～6.6cm/sの流速において血管の描出が可能である。6.6cm/sを超えると血流信号が消失し、flow voidとなる。計算式を以下に示す。

信号増強効果が最大となる血流速度：Vmax

$$V_{max} = \Delta Z / TR$$

血流信号が消失する血流速度：Vmin

$$V_{min} = \Delta Z / (TE/2)$$

MRAで良い画像を得るポイントを(アプリコメント)に示す。

(アプリコメント)

【より良いMRA画像を得るために】

TOF法は、流入してくる血流がそのスライスから抜け出る流入効果を利用して血流像を描出しています。つまり、設定断面と血流が垂直であれば最も描出が良く、並行になればなるほどそのスライス断面から抜け出ないこととなりますので、結果として描出が悪くなります。また、血流速度が遅かったり動脈瘤などで乱流を起こしてしまう場合にも、抜けが悪くなり、描出も悪くなります。目的とする血流になるべく垂直になる角度でスライス面を設定してください。また、上記の理由により、大きな動脈瘤は3D TOFのMRA像では描出が難しい場合もありますので、T2強調像やプロトン密度強調像などと合わせて、確認することも重要です。その他、3D TOF MRAに関するパラメータと画質の変化について表2に示します。

表2：3D TOFにおけるパラメータと画質の関係

	コントラスト向上	血流捕捉	S/N向上	撮像時間短縮
TR	↓	—	↑	↓
TE	↓ (Out of Phase)	↓	適値 (BW、T2)	—
FA	↑	—	適値 (T1依存)	—
Thickness	↓	適値 (管径依存)	↑	—
SSP	↑	—	—	—
MTC	↓	—	↓	↑

(本表の見方の例)

コントラストの向上を図るためには、TRを↓=短くする。

2.2 造影MRA

造影MRAでは形態に加え血流動態も画像として得られる。Gd製剤は著明なT1短縮効果を有し、造影剤分布域の自由水はT1強調像で著明な高信号に描出される。Gd製剤は細胞外液性造影剤であり、濃度勾配にしたがって血管内から組織内間質へと分布するが、細胞内には取り込まれない。このため、経静脈的に造影剤を急速注入し経時的に撮像するダイナミックスタディ(dynamic study)では、病変の血流の多寡(vascularity)や間質の多寡を推定することが可能である。Gd製剤のコントラスト増強能はCTでのヨード製剤のそれに比べて明らかに高い。このため、微小病変の検出や遅延性濃染の描出においてもdynamic MRIは有用である。肝細胞癌などの多血性腫瘍の診断においては適切な動脈優位相を得ることが肝要と

なる。従来からの組織非特異性(細胞外液性)造影剤や組織特異性造影剤である超常磁性酸化鉄製剤(super paramagnetic iron oxide, SPIO)に加えて、肝細胞特異性造影剤(Gd-EOB-DTPA)が臨床導入され、核医学検査に代表される細胞機能検査としても新たな展開がみられている²⁾という記載がある。中低磁場Open MRIにおいても限界はあるものの同様の考え方ができると思われる。

ガドリニウム造影剤を急速静注して多時相撮像・画像処理によって得られたMRA画像を3D CE MRAという。全身を対象としたインパクトのある3D CE MRAについて、検査法を中心に述べる。

(1) 3D CE MRA法

ガドリニウム造影剤を急速静注して、3次的にデータを収集し得られた元画像からMIP処理をして血管像を描出する手法である。造影剤のT1短縮効果により血管が高信号に描出される。

胸頸部MRAでは、大動脈弓部から分岐する①腕頭動脈－右鎖骨下動脈・右総頸動脈、②左総頸動脈、③左鎖骨下動脈と両側鎖骨下動脈から分岐する両側椎骨動脈(中枢側)の観察をすることができる(図3)。

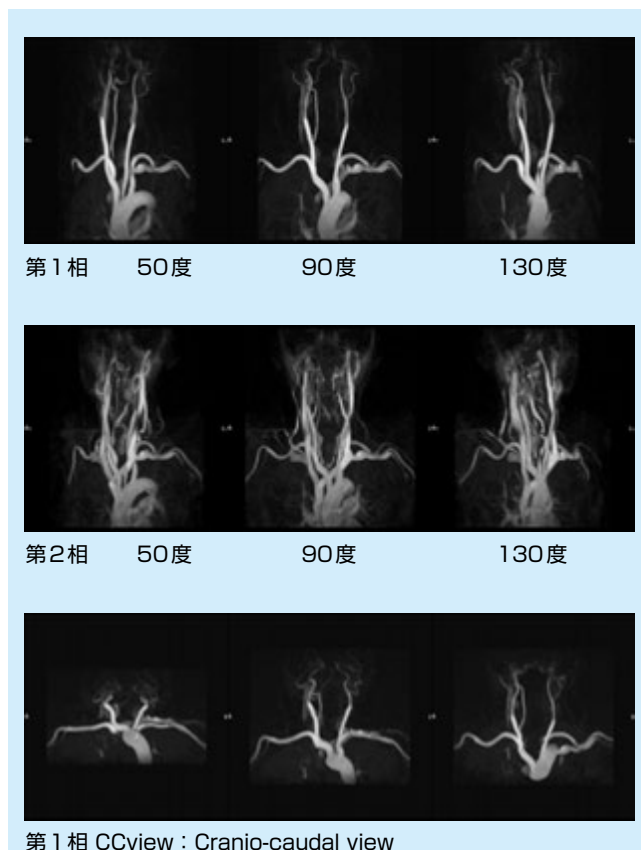


図3：頸部3D CE MRA

大動脈弓より分岐する3本の枝も明瞭に描出されている。観察する角度を40度ずつ変化させており、重なった血管像は他のviewで補っている。

腹部MRAでは、右腎動脈分岐下レベルでの腹部大動脈瘤が認められる。横断像で壁肥厚や内腔の状態が観察できる(図4)。

下腿部MRAでは、右下腿に拡張・蛇行した血管の分布が確認できる(図5)。

3D CE MRAの部位別撮像タイミングを表3に示す。ここで示す症例の撮像タイミングを第1相が早期相(動脈優位相)、第2相が門脈相(門脈優位相)、第3相が後期相(静脈優位相)、第4相が平衡相、第5相が超後期相(super delayed)として表記する。

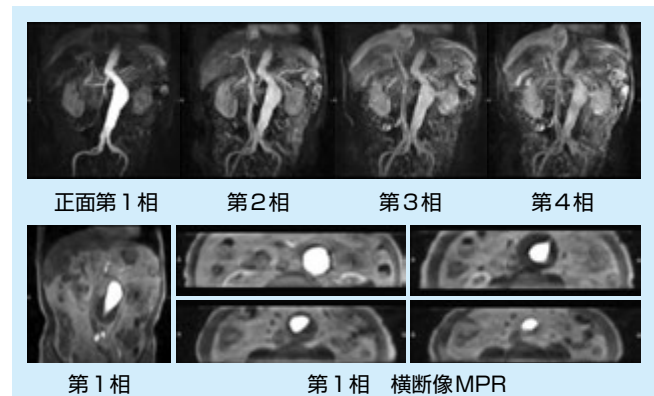


図4：腹部大動脈3D CE MRA

腹部大動脈の蛇行と拡大を認める。横断像では動脈壁の肥厚が確認できる。

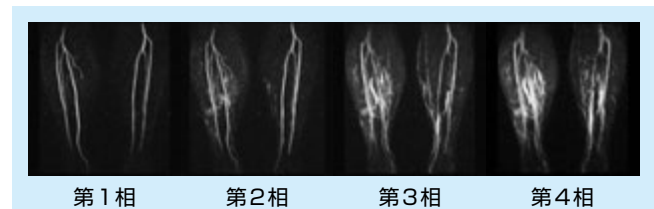


図5：下腿動脈3D CE MRA

表3：3D CE MRAの部位別撮像タイミング表¹⁾

撮像部位	撮像タイミング(造影剤投与開始より)
頸部、胸部大動脈	15秒/35秒/55秒/180秒
上腹部、門脈および脈管系	15秒/45秒/75秒/180秒
下腹部、骨盤腔	25秒/55秒/85秒/145秒

a. 3D CE MRAの造影剤注入法

- ・MRI用ガドリニウム造影剤15mlシリンジ、生理食塩水20ml入ったシリンジ、三方活栓、22G翼状針を接続する。
- ・造影剤ボラス後、素早く三方活栓を切り替えて生理食塩水20mlで急速静注する。
- ・投与速度は2.0ml/s程度で行う。造影剤使用量の目安は造影剤使用量[ml] = 体重[kg] × 0.2 [ml/kg]である。
例) 体重50kgの場合造影剤使用量は原則として10mlとなる¹⁾。

b. 3D CE MRAの注意点

・動脈に狭窄部が疑われた場合は、壁・内腔の評価を目的に必ず狭窄部を含むT1強調画像横断像を撮像する。MPR作成が有効なことがある。

c. サブトラクションの活用

3D CE MRAにおいて撮像タイミングが合わないことが多々ある。各時相の画像から判断して動静脈混在・重複像が診断の妨げになるときは、重複の強い時相像から引きたい時相像(大半は静脈相像)を差し引きする差分法を用いると良い。

①サブトラクション画像の必要性

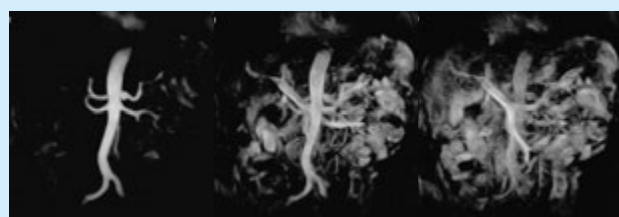
撮像タイミングが合わないときや脈管の分離が困難な場合に画像処理(サブトラクション)で時相の分解が可能である。例えば、門脈相から動脈相を差し引くことで動脈を消し門脈のみを描出させることができ、食道静脈瘤の症例に有用である。

サブトラクションの目的には次の3つがある。

- 造影されている部位は明確だが、サブトラクションでより明確にしたい場合
- 造影されている部位がわかりにくいいため、サブトラクションで明確にしたい場合
- 血管の重なりが多く、観察に苦勞する場合(その代表が門脈である)

②サブトラクションの注意点

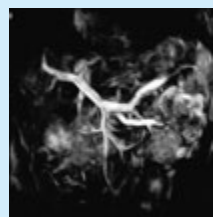
- ・早い時相を狙ったにもかかわらず静脈の描出が著しい場合は、第1時相の画像から第3時相の画像をサブトラクションした画像を作成する。
- ・静脈を観察したい場合は、第3時相から第1時相の画像をサブトラクションする(胃静脈瘤は第2時相から第1時相をサブトラクションした画像を主画像とし、第3時相から第1



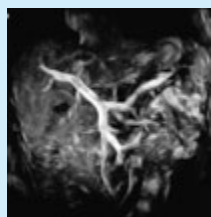
A. 第1相

B. 第2相

C. 第3相



D. サブトラクション
(D=B-A)



E. サブトラクション
(E=C-A)

図6：サブトラクションの方法

時相をサブトラクションした画像も作成)。

- ・マスク画像と造影画像に著しい差が生じた場合、造影剤注入後10分以上経過した時点で追加撮像する。

サブトラクション画像作成においては、装置で画像の位置の微調整には限界があり、時相間で画像のずれが無いように撮像する必要がある。ここは技師の腕の見せ所である。門脈のMRAでは、動脈と静脈が重なるためサブトラクションが必須となる。その症例を図6、図7に示す。

3. 造影MRI

3.1 造影MRI(通常法)

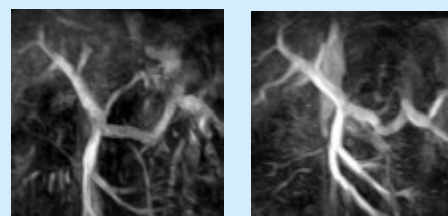
一般に行われるガドリニウム剤を使用した造影MRIにおいて、「造影されたか否かがよくわからない」「造影MRIがうまく撮像できない」という声をよく耳にする。このような場合、以下に示すルーチン造影MRI法に従って検査を施行することを勧める。データの処理としてサブトラクション法が有効である。サブトラクションをするには単純T1強調画像とその後の造影T1強調画像の位置がずれないように注意をはらうことが大切である。ソフトウェア上での微調整が不可能なため、位置のずれが無い撮像をするためには、患者のポジショニング・固定をしっかりと行い、患者へ十分説明して協力を得ながら撮像することが必須である。

a. 造影MRIの造影剤注入法

3D CE MRA(2.2(1)項)の造影剤注入法と同様に行う。

b. 造影MRIの注意点

撮像断面は病変部全体が含まれるように各断面(横断、矢状断、冠状断)の撮影が望ましいが、位置や形状により不可能な場合は、病変部の撮りこぼしのないよう撮影位置を決定する(最低2断面は撮影する)¹⁾。骨腫瘍、脂肪肉腫等が疑われる場合は、造影効果の有無を明確にする目的でサブトラクション画像を作成する。



治療前 門脈相

治療後 門脈相

図7：食道静脈瘤の治療前後の3D CE MRA像

治療前では門脈の描出はともに良好で門脈本幹部より分岐する食道静脈の著明な拡張を認める。治療後では食道静脈瘤の消失と改善が確認できる。

c. サブトラクションの画像の作成法

造影検査において造影効果の有無を明確にする目的でサブトラクション画像を作成することがある。

T1強調画像(Gd) - T1強調画像 = サブトラクション画像

造影T1強調画像から単純のT1強調画像を差し引くことで、造影された部位が明瞭な高信号として現れたサブトラクション画像が得られる。ずれの少ないきれいなサブトラクション画像を得るためには、

- ・ポジショニング時のコイルと被検者の体の固定が重要である。
- ・造影時の呼吸法や体を動かさないよう患者へ説明し、患者へ

検査への協力要請を行うことが大変重要であり、必須である。

- ・マスク像としての単純を撮像してから造影撮像までの時間をできるだけ短くすること等があげられる。

d. 骨盤部造影MRIの撮像順への工夫

婦人科領域骨盤部造影MRI検査における各シーケンスの撮像順とサブトラクション画像作成の注意点について症例を用いて説明する。

非造影および造影MRI撮像時の通常の撮像順番を示す(表4、図8)。

表4：骨盤部MRIルーチン撮像

順番	シーケンス	撮像断面	TR	TE	TI	スライス厚
①	T2強調画像	矢状断像	3500	120	—	7mm
②	T1強調画像	矢状断像	600	24	—	7mm
③	T2強調画像	横断像	3500	120	—	7mm
④	STIR像	横断像	3800	20	110	7mm
⑤	T1強調画像	横断像	600	24	—	7mm
⑥	T1強調画像(Gd)	横断像	600	24	—	7mm
⑦	T1強調画像(Gd)	矢状断像	600	24	—	7mm
⑧	WFS(水脂肪分離：T1 base)水画像&脂肪画像(Gd)	横断像	700	25	5	7mm
⑨	サブトラクション画像 ⑥-⑤	横断像	—	—	—	—

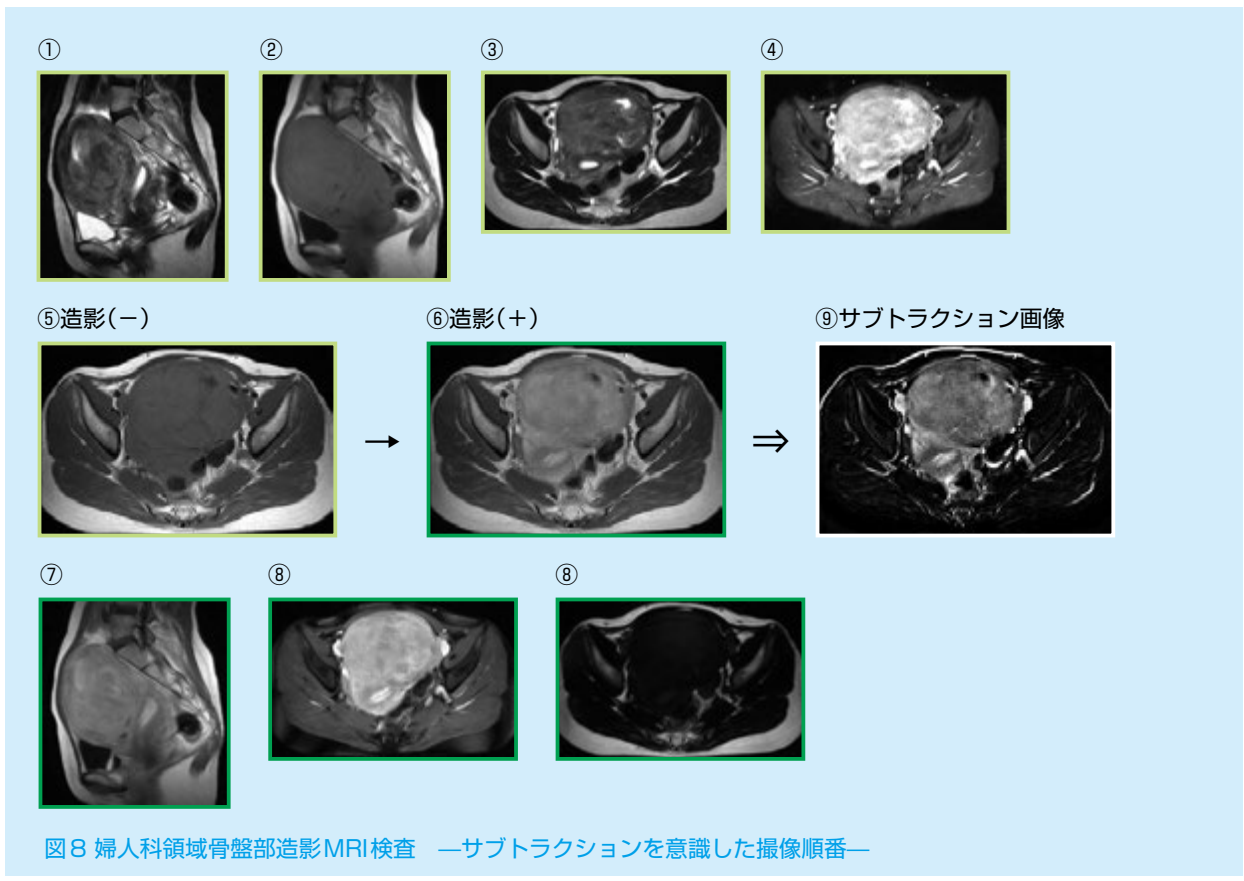


図8 婦人科領域骨盤部造影MRI検査 —サブトラクションを意識した撮像順番—

この順で撮像すると①T2強調画像矢状断像から⑤T1強調画像横断像の非造影撮像時間は約22分間である。その後、速やかに造影検査が行われると、⑤T1強調画像撮像開始から⑥T1強調画像(Gd)横断像撮像終了までの所要時間は約12分間である。一般に、1分間尿量は約1mlなので⑤T1強調画像から⑥T1強調画像(Gd)までの膀胱内増加尿量は12ml程度と考えられ、骨盤部臓器の偏位・移動を最小限に抑えることができる。造影検査中の膀胱内尿量の増加を最小限に抑えることで、ずれの少ない良好なサブトラクション画像が得られる。T1強調画像から造影までの所要時間の目標を12分としている。ここでは横断像を重視しているためサブトラクションに使用するT1強調画像(横断像)を最後に撮像し、その直後T1強調画像(Gd)(横断像)を撮像して良好なサブトラクション画像を得るために撮像順番を工夫している。横断より矢状断が有用な場合には、症例に応じて非造影の最後と造影の最初にT1強調画像矢状断を撮像し、サブトラクション画像を作成する。OpenMRIでは横断像と矢状断像の2方向での良好なサブトラクション画像を得ることが困難なことがある。骨盤部においては尿量増加に着眼して撮像順番を工夫することを、胸部腹部においては呼吸の仕方への注意やコイルの固定設定時のタオルの使用等を工夫することを勧める。

3.2 Dynamic MRI

MRIにおいてもダイナミックスタディは、多時相撮影による造影パターンから質的診断へ活用することができるため、Dynamic CT同様に有用である。Dynamic MRIでの撮影例を図9、図10、図11に示す。

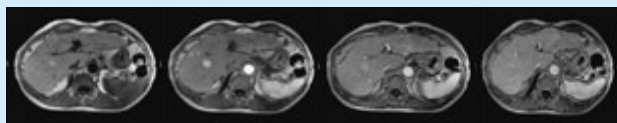
Dynamic MRIのルーチン検査法における撮像タイミングを表5に示す。



第1相 第2相 第3相

図9：腎Dynamic MRI

腎皮質の染まり方でダイナミック性の良さがわかる。



単純 第1相 第2相 第3相

図10：肝細胞癌(HCC)のダイナミックMRI

造影パターンより古典的肝細胞癌を考える。

a. Dynamic MRIの造影剤注入法

- ・MRI用Gd造影剤15ml、生理食塩水20mlが入ったシリンジ、三方活栓、22G翼状針を接続する。
- ・造影剤を入れ、その後、素早く三方活栓を切り替えて生理食塩水20mlで急速静注する。
- ・投与速度は2.5～3.0ml/s程度で行う¹⁾。
- ・ダイナミック検査では造影剤を一つの塊として一気に注入することが大切である。そのため、造影剤を入れた後に生理食塩水で後押しをして、ダイナミック性を良くしている。

b. Dynamic MRIの注意点

- ・HCCを疑う場合(他の腫瘍性病変時も同様)
造影剤投与開始より20秒/50秒/80秒/150秒の4時相を撮像する¹⁾。
- ・血管腫を疑う場合
造影剤投与開始より30秒/70秒/150秒の3時相を撮像後、肝臓全体のT1強調画像を撮像する¹⁾。その後、静注後6～10分後の超後期相(Super delayed)を撮像する。

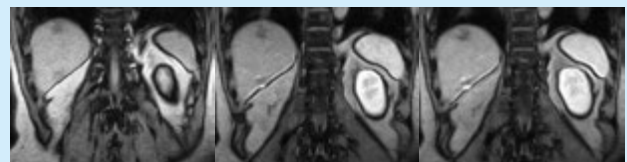
4. 新しいソフトウェア・シーケンスの紹介

最近、造影剤を用いた新しい技術が適用されている。その事例をアプリから紹介してもらう。

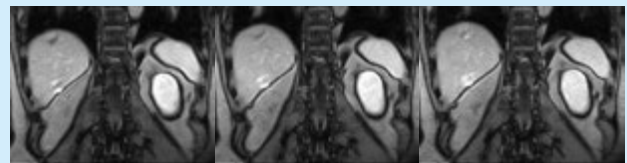
(アプリコメント)

【MR perfusion³⁾】

MR灌流画像(MR perfusion:MRP)は、造影剤を急速静注しながら連続撮像し信号の経時変化から脳循環を解析す



単純 第1相 第2相



第3相 第4相 第5相

図11：肝血管腫のDynamic MRI

表5：Dynamic MRIの撮像タイミング¹⁾

撮像部位	撮像タイミング(造影剤投与開始より)
頸部、心大血管	15秒/35秒/55秒/180秒
上腹部、門脈	15秒/45秒/75秒/180秒
下腹部、骨盤腔	25秒/55秒/85秒/145秒

る方法で、その信号変化から脳血流量(cerebral blood flow : CBF)、脳血液量(cerebral blood volume : CBV)、平均通過時間(mean transit time : MTT)などのパラメータを算出し解析するものです。このMR灌流画像を用いることにより、発症早期に脳虚血域を診断可能といわれています。

日立メディコでは茨城県立中央病院・県地域がんセンター放射線科と共同で、0.4T MRI装置APERTO^{※2}でGRE-EPI法を用いたMR灌流画像を脳主幹動脈高度狭窄症ないしは閉塞症を有する慢性期脳梗塞患者に対して画像評価および臨床的評価を行いました。

代表的な症例を図12に示します。左内頸動脈高度狭窄の症例であり(図12-a、b)、SPECTでは安静時に患側内頸動脈領域に広範な血流低下が認められ、Diamox^{※3}負荷後には血流は負荷前より低下し左右差が明瞭化しています(図12-c、d)。MTT画像ではSPECTでの血流低下領域とほぼ一致する領域で延長が確認され(図12-g)、CBFも前頭葉を中心に患側半球で軽度の低下を示しています(図12-e)。

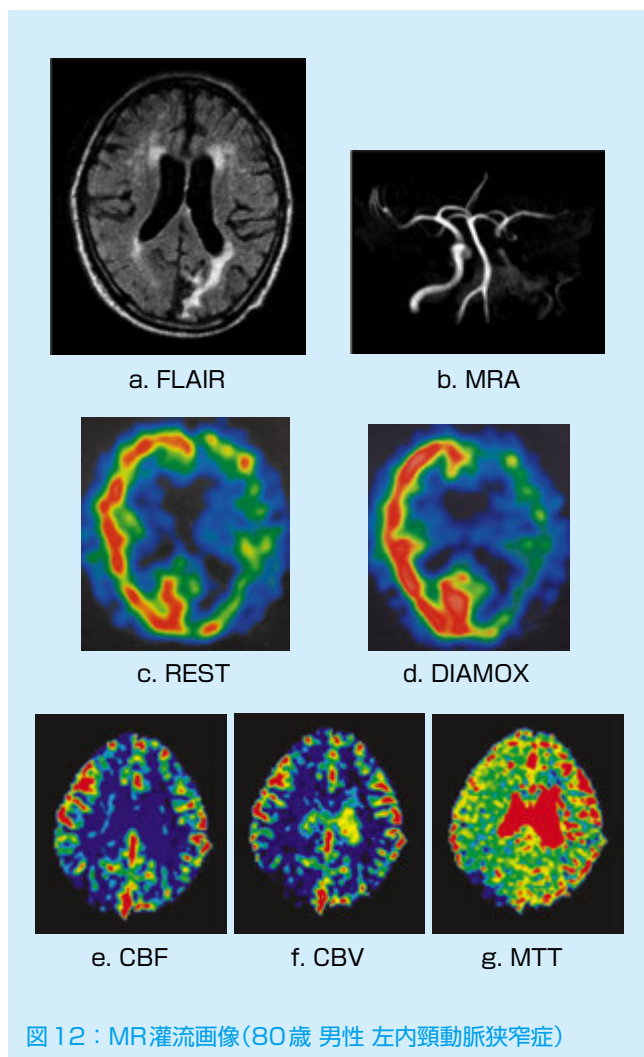


図12 : MR灌流画像(80歳 男性 左内頸動脈狭窄症)

4. まとめ

今回は、「Open MRIにおける血流動態の描出と観察」と題して実際にOpenMRIを用いてMRAや造影検査を施行する上での手技や注意点を中心に述べた。かかりつけ医にとって血管の走行、内腔の評価、栄養血管の分布等をMRIで知ることができるのは大変意味のあることである。これらに注意して、ルーチン検査法の見直し、コメディカルとの協力体制づくりなどMRI検査環境の整備が必要である。

Open MRIでも末梢血管まで描出可能となり、狭窄や動脈瘤等の血行動態を容易に観察できるようになった。造影MRAを成功させるためには、確実なボラス注入が大切で、やむを得ず撮像タイミングが合わなかったときは、どのように対処するか対策を準備しておき「失敗させないMRA検査、造影MRI検査」を心がけて欲しい。かかりつけ医の日常診療の場に、MRA検査、造影MRIを今まで以上に役立てていただきたい。

謝辞

多大な協力をいただいた彩のクリニック(所沢市)、岡村記念クリニック(日高市)、圏央所沢病院(所沢市)の諸先生方、診療放射線技師の方々に深謝します。

※1 AIRIS、※2 APERTOは株式会社日立メディコの登録商標です。

※3 Diamoxは株式会社三和化学研究所の登録商標です。

参考文献

- 1) 駒崎敏郎, 大日方研: 臨床家のためのOpen MRI, デジタルメディスン: 25-31, 159, 2003.
- 2) 山田哲, ほか: MRI, 臨床放射線 Vol.54: 345-349, 2009.
- 3) 佐藤始広, ほか: 永久磁石0.4TMRI装置“APERTO”でのGRE-EPIシーケンスを用いたMR灌流画像の臨床評価. MEDIX, 46: 41-44, 2007.