

胸部疾患における MR : 効率的にガドリニウム造影剤を用いた検査法

氏田万寿夫¹, 井田正博², 福田国彦¹, 多田信平¹

¹東京慈恵会医科大学放射線医学講座 ²都立荏原病院放射線科

はじめに

MR 検査におけるガドリニウム造影剤の適応疾患は幅広く、腫瘍性疾患をはじめとした種々の病変の診断には不可欠な薬剤である。一方、MR の技術革新により高速・高画質の三次元グラディエントエコー (3D GRE) 法が開発され、本法によるガドリニウム造影剤を用いた造影 MR angiography (MRA) の臨床的有用性は飛躍的に進歩した。技術的に大きな要因である TE の短縮化は、乱流による phase shift や微小な motion artifact の抑制、胸部領域で重要な磁化率の影響の低減に効果的である。現在では造影 3D MRA が頭部領域を除く MRA の主流になっており、ダイナミック MRI の汎用とともにガドリニウム造影剤を用いた MR 検査の増加をもたらしている。息止め検査が不可欠な胸部領域においても、高速撮像が可能になったことによりダイナミック MRI を用いて腫瘍の血流や進展範囲の評価や造影 MRA により肺塞栓等の肺血管性病変の診断に臨床応用されている^{1)~4)}。また造影剤の倍量投与は脳転移の検索に用いられており^{5),6)}、ガドリニウム造影剤の使用法は撮像技術の進歩とともに多様化している。

本稿では、ガドリニウム造影剤の使い方の側面から、日常我々が施行している胸部疾患の効率的な MR 検査について概説する。

胸部の造影 MRA

造影 MRA のパルス系列には 3D と 2D の FLASH (fast low angle shot) 法を用いている。MRA は空間および時間分解能共に高めれば理想的であるが、空間分解能 (実効スライス厚と matrix 数)、スラブ厚 (partition 数)、時間分解能はそれぞれ相対的な関係にあり、時間分解能を上げれば空間分解能やスラブ厚に制限を受けるため、MIP 像のなめらかさが失われ立体視可能な角度が限られる。我々は症例や病態に応じて、空間分解能を優先したもの (512 matrix)、時間分解能を優先したもの (スキャン時間約 3 秒) およびその中間型の撮像条件を選択している。撮像時間の短縮化には slew rate の向上による TE の短縮、撮像後のデータ補間技術 (zero-filling interpolation processing: ZIP)、選択的脂肪抑制法 (CHES 法) の改良が寄与している。2D 法では最小の TR、TE を用いるシングルスライスで、echo sharing 法を併用し撮像時間は 1 秒の連続高速撮像

この総説は、第 27 回日本磁気共鳴医学会大会シンポジウム「効率的な MR 検査法をもとめて—造影を中心に—」での講演をまとめたものである。

キーワード gadolinium contrast agent, MR angiography, lung neoplasms, pulmonary vascular diseases

が可能である (MRDSA). スライス厚を大きくすることで撮像範囲を確保するが、シングルスライスのためステレオ画像は作成できず空間分解能に制限がある. 我々が用いている造影MRAの代表的パルス系列は以下のとおりである.

- ①高空間分解能 MRA (3D turbo FLASH 法) :
TR/TE/FA ; 4.6/1.8/25, matrix ; 200×512,
撮像時間 21 秒.
- ②高時間分解能 MRA (3D turbo FLASH 法) :
TR/TE/FA ; 3.8/1.4/25, matrix ; 100×256,
撮像時間 3 秒.
- ①, ②ともスラブ厚 (mm) ; 96~72, 実効厚
(mm) ; 4(2)~9(4.5), partitions ; 24(48)~8
(16), FOV ; 450 mm. サブトラクション法
併用. ほぼ全例で脂肪抑制を行っている.
- ③MRDSA (2D FLASH 法) : TR/TE/FA =
6.5/2.2/60, matrix ; 200×256, FOV ; 300~
400 mm, echo sharing 法併用.

造影剤投与は肘静脈に20G留置針を穿刺固定し、二筒式自動注入器を用い2~4 ml/秒で急速注入後、生理食塩水20 mlを造影剤と等しい速度で注入している. 後述するが1回の造影剤注入量は個々の症例において異なる. 至適撮像開始時間は高画質のMRAを得るために重要な因子である. 撮像時間が5秒以下の短時間の繰り返し撮像では問題とならないが、撮像時間20秒程度の造影MRAではk空間の低周波領域に標的血管内のポーラス性の高い造影剤のピークがくる撮像タイミングが必要である. 本法ではcentric orderingを用いており撮像時間の先頭部分でコントラストが決定されるため、標的血管内の造影剤濃度がピークとなる撮像タイミングをとらえやすい. 経験的に造影剤投与開始7秒後から撮像を開始すると高画質の肺動脈優位の画像が得られる. 撮像開始タイミングの決定にはtest injection法⁷⁾やtriggering softwareを用いた方法⁸⁾が知られてい

る.

胸部領域のMRAでは背景が肺のため肺実質のガドリニウム濃度は平衡相でわずかであり、血管外拡散粒子であるガドリニウム造影剤の影響をほとんど受けない. サブトラクションにより大血管や胸壁組織の増強効果を抑制できれば、造影MRAを繰り返し施行することができる. 例えば1回目の造影剤注入で高時間分解能のMRA, 2回目の造影剤注入で高空間分解能のMRAを撮像できる利点がある.

我々は得られたデータから各時相ごとのpartition画像, MIP画像を作成し病変自体の評価およびMRAによる診断を行っている. なお使用機種は1.5T装置(シーメンス社製MAGNETOM Vision)で, cp body array coilを使用している.

MR 検査法

1. 肺癌患者における検査

肺癌患者において、腫瘍による大血管侵襲の評価は病期や治療方針を決定するのに重要である. 一方、肺癌は最も脳転移を来しやすい疾患であり、原発巣が切除可能な無症候性患者においても潜在的に既に転移していることもあるため肺癌患者における術前の脳転移検索の臨床的意義は高い⁹⁾. 脳転移の検出には造影T₁強調画像が最も鋭敏な検査法であり、ガドリニウム造影剤の通常量の2~3倍量投与は病変の検出能を向上させることが知られている^{5),6)}. また造影MRAにおける信号強度は標的血管内のT₁値に依存するため、通常ガドリニウム投与量の倍量(0.2 mmol/kg)投与は造影MRAのS/Nや肺動脈末梢の描出能を向上させると考えられる¹⁰⁾. これらの事実から、我々は倍量のガドリニウム造影剤を用いた胸部の造影MRAを施行して血管侵襲の評価を行い、受信コイルを交換して頭部のMRIを撮像し脳転移

2000年4月26日受理

別刷請求先 〒105-8461 東京都港区西新橋3-25-8 東京慈恵会医科大学放射線医学講座 氏田万寿夫

の検索を行うことで、1回のガドリニウム造影剤投与により肺癌患者に必要な術前のMR検査が可能となるため、造影剤使用の観点から効率的な検査になると考えた。造影MRA以外にも腫瘍の組織性状や縦隔、胸壁など周囲臓器浸潤の評価を目的として幾つかのパルス系列による造影前後のMRIを撮像したのちに造影MRAを撮像しているが、検査時間の都合や患者の状態によって胸部のMRIや頭部のT₂強調画像などは省く場合もある。検査の主軸は胸部の造影MRAと頭部の造影T₁強調画像であり、胸部大血管の評価と脳転移検索を目的とした検査を行っている。

肺癌患者の場合、造影MRAの主な目的は腫瘍による血管侵襲の評価であるため、時間分解能よりも空間分解能を重視したMRAのパルス系列を選択している。実際には512

matrixで撮像時間が20秒前後のパルス系列を用いることが多いが(Fig. 1)、肺癌患者の多くが高齢患者であり、息止めが困難な患者によっては撮像時間を短縮したMRAを選択せざるを得ない場合もある(Fig. 2)。造影剤投与量は基本的に0.2 mmol/kg(通常20 ml)を1回投与して造影MRAを撮像するが、0.1 mmol/kgを用いて高時間分解能MRAを撮像した後、更に0.1 mmol/kgを投与して高空間分解能MRAを得て、腫瘍と肺実質の血行動態と血管構造の評価を行うことも可能である(Fig. 3)。

1998年10月～1999年8月に胸部造影MRAと造影頭部MRIの同時検査を施行した肺癌患者は49例(34～85歳、平均70.3歳、男/女=33/16)であった。組織型は腺癌26(手術施行例10、以下同じ)、扁平上皮癌13

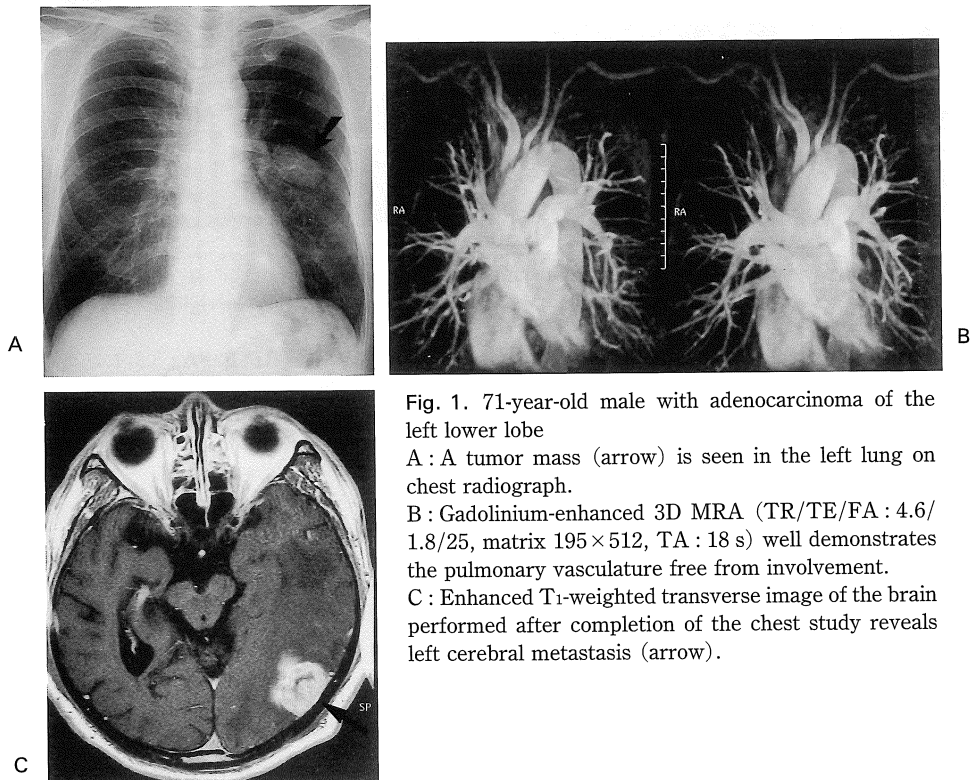


Fig. 1. 71-year-old male with adenocarcinoma of the left lower lobe
 A : A tumor mass (arrow) is seen in the left lung on chest radiograph.
 B : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.6/1.8/25, matrix 195×512, TA : 18 s) well demonstrates the pulmonary vasculature free from involvement.
 C : Enhanced T₁-weighted transverse image of the brain performed after completion of the chest study reveals left cerebral metastasis (arrow).



Fig. 2. 83-year-old male with adenocarcinoma of the right upper lobe

A : T₁-weighted transverse image of the thorax shows a tumor obstructing the right upper bronchus (arrow).

B : Pulmonary artery phase of gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 3.8/1.4/25, matrix : 100 × 160, TA : 12 s) demonstrates the involvement of the truncus (arrowhead).

C, D : MRI of the brain following the pulmonary MRA. Enhanced T₁-weighted transverse image (C) reveals multiple cerebral metastases (arrowheads) with higher conspicuity than T₂-weighted image (D).

(7), 小細胞癌 6(0), 転移性腫瘍 2(2), 大細胞癌 1(0), カルチノイド 1(1) 例であった。49 例のうち腺癌の 5 例 (Figs. 1, 2), 小細胞癌の 2 例, 大細胞癌の 1 例の計 8 例 (16.3%) に脳転移が検出された。肺門側の血管浸潤の描出は良好で, T₂ 強調画像で不明瞭な小さな転

移巣も造影剤 (0.2 mmol/kg) によって明瞭に描出された (Fig. 2)。

造影剤 2 倍量投与による高空間分解能 MRA は肺門部血管のみならず末梢肺癌と血管との関係の評価にも有効であり (Figs. 1, 3), S/N の高い MRA 画像の獲得にも寄与したと



Fig. 3. 66-year-old male with adenocarcinoma of the right upper lobe
 A : Sequential images of gadolinium-enhanced 2D MRDSA (TR/TE/FA : 6.5/2.2/60, matrix : 165×256, TA : 1 s). Early phase images demonstrate a slightly decreased perfusion area in the right upper lobe (arrow). Late phase images show an enhancing lesion in the right apical region (arrowhead), indicating the tumor is fed by the bronchial artery.
 B : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.6/1.8/25, matrix : 195×512, TA : 17 s) depicts rat-tail obstruction of the truncus anterior (arrow).

考えられる。対象患者 49 症例での脳転移検出率は 16.3%と決して低くなく、肺癌患者において造影剤 2 倍量投与後の頭部 MR 検査の重要性が再認識された。肺癌患者における胸部造影 MRA と頭部造影 MRI の同時検査は 1 回のガドリニウム造影剤投与により、原発巣と血管侵襲の有無と脳転移の検出の両者が評価可能であり、検査効率のみならず造影剤の節約という経済的効果の観点からもガドリニウム造影剤の効率的な使用法と思われる。

2. 肺血管性病変における検査

Lossefら¹¹⁾によって最初に報告され、Prince¹²⁾によって臨床の場に導入された造影 MRA はその後急速に進歩し、現在では末梢肺血管の描出更に肺実質血流の画像化(灌流画像)が可能になった^{1)~4)}。

血管性病変の造影 MRA による評価には、ガドリニウム造影剤の分割投与により肺灌流画像を得る高時間分解能 MRA と、血管の形態や解剖学的構造を評価する高空間分解能

MRA の両者を施行している。具体的には 15 あるいは 20 ml のガドリニウム製剤を 2 度に分け、1 回目に 5 ml の造影剤注入で高時間分解能の造影 MRA により肺の血行動態の評価を行い、2 回目に 10 ml を投与し高空間分解能造影 MRA を撮像し肺動脈の途絶や血管描出能を評価している (Figs. 4, 5)。更に残り 5 ml を用いて再度高時間分解能の MRA を撮像することも可能である。サブトラクション法併用により、1 回目の造影剤投与によるバックグラウンドの濃度上昇の影響が取り除かれて 2 回目の造影 3D MRA の画質低下はみられなかった。

肺塞栓症における造影 3D MRA の診断率は、血管造影による診断を gold standard とした際、sensitivity は平均 87.3%、specificity は平均 96.3%と良好な結果が得られている³⁾。肺塞栓症の診断に汎用されている ^{99m}Tc-MAA による肺血流スキャンは空間分解能に乏しく、それのみでは正診率は低く肺換気検査と併用して

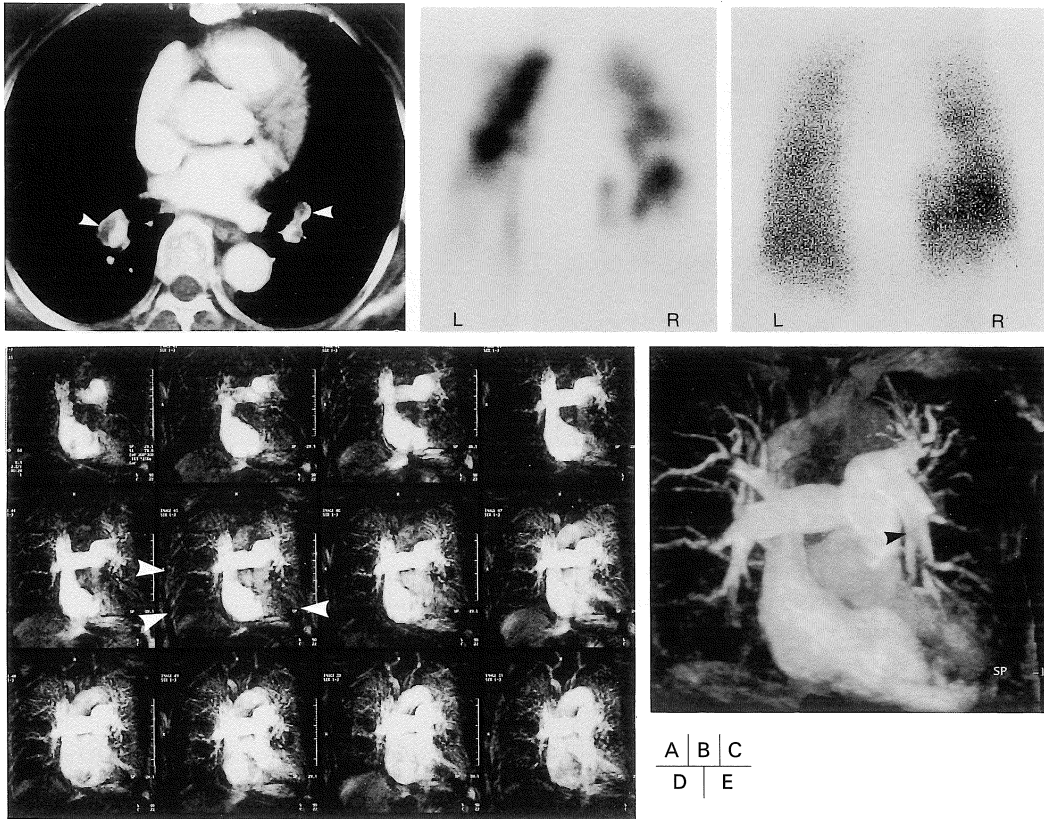


Fig. 4. 71-year-old female with pulmonary embolism
 A : Enhanced CT of the thorax demonstrates multiple clots (arrowheads) in lower pulmonary arteries bilaterally.
 B : Perfusion scan with ^{99m}Tc -MAA depicts defects in both lungs, particularly lower lobes.
 C : Normal ventilation image by ^{99m}Tc -gas. Perfusion defects are compatible with pulmonary embolism.
 D : Sequential images of gadolinium-enhanced 2D MRDSA (TR/TE/FA : 6.5/2.2/60, matrix : 165×256, TA : 1 s). Perfusion defects (arrowheads) are observed in the pulmonary artery phase. Note good time-resolution of the images and similarity with perfusion of the lung scan (B).
 E : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.6/1.8/25, matrix : 200×512, TA : 21 s) shows poor visualization of the distal portion of the pulmonary arteries of the lower lobes due probably to emboli (arrowhead) within the proximal portion.

も確診を得られない症例も多い。ヘリカルCTを用いたダイナミックCTは肺動脈内血栓の描出に優れるが、亜区域以下の末梢分枝内血栓の描出には限界がある¹³⁾。以前は肺塞栓症の診断におけるgold standardとされていた肺動脈造影はまれに重篤な合併症を起こし得る侵襲的な検査であり、急性塊状型血栓塞栓症に対する

IVRや外科的治療の術前評価のみに適応が限られてきている。ガドリニウム造影剤はCTで使用されるヨード造影剤と比べ腎毒性やアナフィラキシーなどの副作用が少ないという利点を有し、造影MRAは非侵襲的な方法で肺灌流画像と肺血管描出を描画可能である点で肺塞栓症の診断に有用と考えられる (Fig. 4)^{1),3)}。



Fig. 5. 60-year-old female with pulmonary sequestration

A, B : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 3.8/1.4/25, matrix : 100 × 256, TA : 3 s). Vascular structures are poorly visible in the basal aspect of the left lower lobe in pulmonary artery phase (A). Anomalous vascular structures and lung perfusion (arrowheads) are observed in the corresponding left lower lobe in aortic phase (B). Spotty contrast enhancement is visible in the liver (arrow). Diagnosis of cavernous hemangioma can be made (B).

C : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.0/1.6/25, matrix : 160 × 256, TA : 16 s) depicts a tortuous, anomalous vessel derived from the descending aorta into the left lower lobe (arrows). Stereoscopic observation of the MIP images is possible because of 3D data acquisition.

D : DSA of the thoracic aorta proves an anomalous vessel originating from the descending aorta. Note similarity of the anatomical recognition of with MRA (B).

2D 法による MRDSA は細かな血管の描出能は劣るが、撮像時間が 1 秒と高速なためより正確な血行動態（肺灌流）を描出できる利点を有する (Fig. 4D)。

肺分画症 (Fig. 5) の診断は体循環系から肺内へ流入する異常動脈を描出することである。高時間分解能の造影 MRA では異常血管の灌

流領域は肺動脈相で血流低下、大動脈相で染まるいわゆる reperfusion を示す (Fig. 5A, B)。灌流静脈（肺静脈か奇静脈か）の同定も可能である。高空間分解能 MRA では異常流入血管が明瞭に描出され、partial MIP 画像やステレオ視により病変部の血管の位置関係がより明瞭である。DSA と対比しても異常動脈描出能に

遜色ない結果が得られている (Fig. 5C, D).

肺動静脈瘻 (Fig. 6) は MRA の早期相で肺静脈が描出されるため、特に high flow の動静

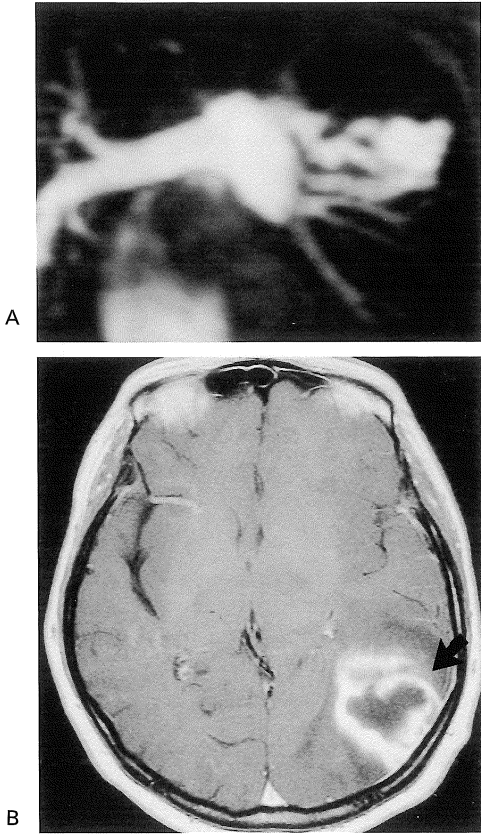


Fig. 6. 44-year-old female with pulmonary arteriovenous fistula (AVF)

A : Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.0/1.6/25, matrix : 100×256, TA : 3 s) shows a nidus of AVF and an abnormal vascular structure in the left lung. Because of the limited temporary resolution, it is difficult to differentiate feeding arteries from draining veins. However, stereoscopic observation of MIP images may add the information on the anatomical relationship around the nidus.

B : Enhanced T₁-weighted axial image of the brain following the pulmonary MRA discloses a ring-enhanced lesion in the left temporoccipital region (arrow). Brain abscess was proved surgically.

脈瘻の血流の動的評価には現時点の高時間分解能の MRA でも限界がある。しかし造影 MRA は非侵襲的に nidus とその周囲の流入・流出血管を三次元的に描出でき、IVR を念頭に置いた血管解剖や血管径の評価に役立つ。肺動静脈瘻の 1/3 は多発性であるが肺を大範囲をカバーするために同時に複数の病変を描出できる利点を有する (Fig. 7)。更に造影 MRA 検査施行後に頭部 MRI を施行することで、脳膿瘍 (Fig. 6C) や脳血管障害など頭蓋内合併症が検出できれば、より効率的な MR 検査といえるだろう。非侵襲的方法であり放射線被曝のない造影 MRA 検査は、これら血管性病変の治療効果判定や経過観察にも多用できる。

以上述べたように、造影 MRA の肺血管性病変に対する臨床的有用性は高い。1 回の MR 検査においてガドリニウム造影剤を分割投与し異なる時相の造影 MRA を得ることで血行動態と血管構造の両者を評価可能であり、効率的に造影剤を用いた肺血管性病変の MR 検査法といえる。

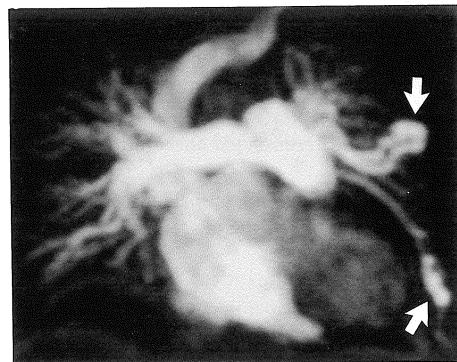


Fig. 7. 65-year-old female with multiple pulmonary AVFs

Gadolinium-enhanced 3D MRA (TR/TE/FA : 4.0/1.6/25, matrix : 100×256, TA : 3 s) depicts simultaneously two single-type AVFs (arrows) of the left lung. A large FOV in the coronal plane covers the entire lung.

おわりに

肺癌および肺血管性病変患者におけるガドリニウム造影剤を用いた MR 検査法について、ガドリニウム造影剤の効率的な使い方の観点から述べた。Fig. 8 と Fig. 9 に検査法の概要を示す。医療費との関連において画像診断におけるコストの一括化の時代が間もなく訪れると考えられる。コストパフォーマンスの高い画像診断の decision tree の確立の中で、決して安価で

はなく、しかし多様な使い方が可能なガドリニウム造影剤を有効に使用して、患者にとって効率良い MR 検査を行うことは放射線科医の果たすべき役割でもあると思われる。

文 献

- 1) Hatabu H, Gaa J, Kim D, Li W, Prasad PV, Edlman RR : Pulmonary perfusion and angiography : evaluation with breath-hold enhanced

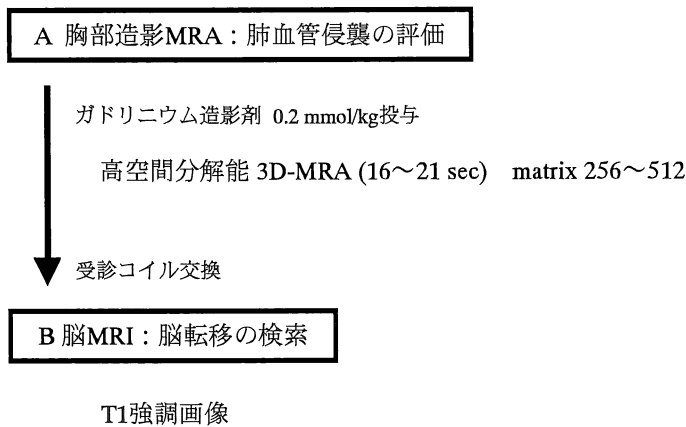


Fig. 8. 肺腫瘍性疾患におけるガドリニウム造影剤を用いた MR 検査法

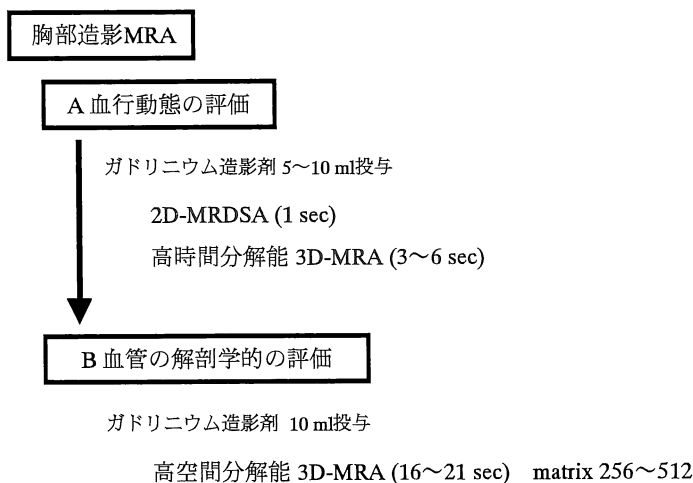


Fig. 9. 肺血管性病変におけるガドリニウム造影剤を用いた MR 検査法

- three-dimensional fast imaging steady-state precession MR imaging with short TR and TE. *AJR* 1996 ; 167 : 653-655
- 2) Isoda H, Ushimi T, Masui T, et al. : Clinical evaluation of pulmonary 3-D time of flight MRA with breast holding using contrast media. *JCAT* 1995 ; 19 : 911-919
 - 3) Meaney JF, Weg JG, Chenevert TL, Stafford-Johnson D, Hamilton BH, Prince MR : Diagnosis of pulmonary embolism with magnetic resonance angiography. *N Engl J Med* 1997 ; 336 : 1422-1427
 - 4) Leung DA, McKinnon GC, Davis CP, Pfammatter T, Krestin GP, Debatin JF : Breath-hold, contrast-enhanced, three-dimensional MR angiography. *Radiology* 1996 ; 201 : 569-571
 - 5) Davis PC, Hudgins PA, Peterman SB, Hoffman JC : Diagnosis of cerebral metastases : double-dose delayed CT vs contrast-enhanced MR imaging. *AJNR* 1991 ; 12 : 293-300
 - 6) Yuh WTC, Tali ET, Nguyen HD, Simonson TM, Mayr NA, Fisher DJ : The effect of contrast dose, imaging time, and lesion size in the MR detection of intracranial metastasis. *AJNR* 1995 ; 16 : 373-380
 - 7) Earls JP, Rofsky NM, DeCorato DR, Krinsky GA, Weinreb JC : Breath-hold single-dose gadolinium-enhanced three-dimensional MR aortography : usefulness of a timing examination and MR power injector. *Radiology* 1996 ; 201 : 705-710
 - 8) Foo TKF, Saranathan M, Prince MR, Chenevert TL : Automated detection of bolus arrival and initiation of data acquisition in fast, three-dimensional, gadolinium-enhanced MR angiography. *Radiology* 1997 ; 203 : 275-280
 - 9) Earnest F, Ryu JH, Miller GM, Luetmer PH, Forstrom LA, Burnett OL, Rowland CM, Swensen SJ, Midthun DE : Suspected non-small cell lung cancer : incidence of occult brain and skeletal metastases and effectiveness of imaging for detection-pilot study. *Radiology* 1999 ; 211 : 137-145
 - 10) Hany TF, Schmidt M, Hilfiker PR, Steiner P, Bachmann U, Debatin JF : Optimization of contrast dosage for gadolinium-enhanced 3D MRA of the pulmonary and renal arteries. *Magn Reson Imaging* 1998 ; 16 : 901-906
 - 11) Lossef SV, Rajan SS, Patt RH, Carvlin M, Calcagno D, Gomes MN, Barth KH : Gadolinium-enhanced magnetic contrast MR angiography of popliteal and tibial arteries. *Radiology* 1992 ; 184 : 349-355
 - 12) Prince MR : Gadolinium-enhanced MR aortography. *Radiology* ; 1994 : 155-164
 - 13) Goodman LR, Curtin JJ, Mewissen MW : Detection of pulmonary embolism in patients with unsolved clinical and scintigraphic diagnosis : helical CT versus angiography. *AJR* 1995 ; 164 : 1369-1374

**Practical MR Examination for Chest Diseases :
How to Use Gadolinium Contrast Agents**

Masuo UJITA¹, Masahiro IDA², Kunihiro FUKUDA¹,
Shimpei TADA¹

¹*Department of Radiology, Jikei University School of Medicine
3-25-8 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8461*

²*Department of Radiology, Tokyo Metropolitan Ebara Hospital*

We presented how to use effectively gadolinium contrast agent for neoplastic and vascular diseases in the lung. For patients with pulmonary neoplasms, MR imaging of the brain following gadolinium-enhanced pulmonary MR angiography (MRA) with a single injection of the contrast agent in double dose is useful to evaluate the vascular involvement of the lesion and brain metastasis simultaneously. For vascular diseases, the hemodynamics and anatomical information of the lesions can be examined with different contrast MRA sequences by multi-injection of the contrast agent at one MR examination. The practical use of the gadolinium contrast agent can promise effective MR examinations to the patients with various lung diseases.