

Subtraction 法による骨盤，四肢領域の 3D 造影 MR angiography —血管描出能の検討—

肥合康弘¹，山下康行²，船間芳憲¹，丸山雅人¹，
池田龍二¹，永末望¹，洞田貫誠志¹，高田卓雄¹，
満崎克彦²，湯毅²，高橋陸正²

¹熊本大学医学部附属病院中央放射線部 ²同医学部放射線医学教室

はじめに

近年，Gd-DTPA の静注により血管を高信号に描出させる，MR angiography（以下造影 MRA）が行われるようになった^{1)~3)}。この方法は，time of flight 効果よりもむしろ，血液中に Gd-DTPA が流入することにより血液の T₁ 値を短縮させ，血流を高信号に描出する。そのため，time of flight 法では困難であった血管と平行な面の撮像を設定できる。さらに gradient echo の 3D 高速撮像法を用いることにより，短時間での撮像ができるようになった。この撮像法では，血管と周囲組織のコントラストが血管の描出能に大きく影響を与える。特にサーフェイスコイルである phased array coil を用いた場合，体表面の脂肪が著明に高信号になるので，MIP（maximum intensity projection）法で画像処理を行うと，血管信号が不明瞭となることがある。この欠点を除くため，造影剤注入前と注入後の画像を subtraction することにより，周囲組織の信号強度を低下させ，血管の描出能を向上させる方法が報告されている^{4)~7)}。

今回の報告の目的は，ファントムを用いた実験で撮像に適したパルス系列およびパラメータを決定し，そのパラメータを用いた造影 MRA に subtraction 法を用いてファントムおよび臨床例で画質の評価を行うことである。また，subtraction 法における画像マトリックス数と末梢血管の検出能の検討も行った。

方 法

使用した MR 装置は，Magnetom Vision 1.5 T で，phased array coil を使用した。

Table 1 に撮像に用いたパルス系列を示す。パルス系列は FLASH 法，FISP 法および MP-

Table 1. Pulse Sequences and Parameters Used for Imaging

	Echo time (ms)	Repetition time (ms)	Band width (Hz/pixel)
FLASH 3D	5.0	11.8	244
MP-RAGE	7.0	15	195
FISP 3D	6.0	15	195

FOV 400 mm, Slab thickness 60 mm

キーワード MR angiography, Gd-DTPA, 3D imaging, subtraction

RAGE である。TR はそのパルス系列における最短時間を採用した。なお、本施設の MRI 装置では、TE およびバンド幅は幾つかの固定された値の中から選択するようになっており signal-to-noise ratio (SNR)、ケミカルシフトアーチファクトおよび撮像時間の関係から、Table 1 に示すパルス系列を選択した。

撮像は、骨盤、四肢領域に造影剤が流れてくるタイミングで撮像することを考慮すれば短い方が良いが、動脈と静脈相の分離できる約 1 分間とした。なお撮像時間を統一するため、FLASH 法では撮像枚数を増やして調整した。加算はすべて一回にて行った。

1) ファントム実験

a) Background と模擬血管の CNR が最大となるフリップ角を決定する目的で、模擬血管として 0.1 mmol/l から 2 mmol/l に希釈した Gd-DTPA 溶液と、background としては脂肪（オリーブ油）を円筒状のプラスチック容器に封入したファントム（以下ファントム 1）を撮像し信号強度を測定した^{8),9)}。

脂肪および Gd-DTPA 各溶液の信号強度をバックグラウンドノイズの SD で割ったものを SNR, 2 mmol/l（我々の施設で施行された MR angiography の大動脈の Gd-DTPA の濃度に相当）に薄めた Gd-DTPA 溶液と脂肪の信号強度の差をバックグラウンドノイズの SD で割ったものを contrast-to-noise ratio (CNR) として計算した。この結果より CNR および SNR の大きい撮像条件を選択した。

b) ファントム 1 の実験により決定した撮像条件を用いて、C-D (contrast-detail) ファントムを撮像して、その画像の視覚評価を行った。なお撮像 FOV は、すべてのパルス系列で 400 mm とした。

C-D ファントムは、血管を模したテフロンチューブの内径を 0.5, 0.68, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

mm と 6 段階的に変化させ、また各チューブ径ごとに、チューブに入れる Gd-DTPA 濃度を 0 から 2.0 mmol/l までの 9 段階に変化させ、濃度分解能と空間分解能を評価するファントムである^{10),11)} (Fig. 1)。今回は、組織中で最も高信号であると予想される脂肪が同一スラブ内に重なるように撮像し、脂肪だけの像との subtraction を行った。

評価は subtraction 法を行った場合と行わなかった場合および、マトリクス数についてファントムを撮像した画像により、各チューブ径における識別できる最低の造影剤濃度を視覚的に評価した。

2) 臨床例による検討

ファントムによる検討で最適化された MRA のパルス系列 (FISP 法 TR/TE/flip angle=15/6/30°) を用いて、30 例（男性 13 名、女性 17 名、7 歳～73 歳）の造影 MRA を行い評価を行った。症例の内訳は閉塞性動脈硬化症 21 例、骨盤内腫瘍 6 例、腹部大動脈瘤 3 例である。FOV は 360 mm から 450 mm にて 256 (位相) × 512 (周波数), 256 × 256, 128 × 256 のマトリクスでそれぞれ 10 例ずつ行った。Gd-DTPA は 15 ml を MRI 用の injector にて 1 秒間に 2 ml の速度で静注した¹²⁾。撮像はあらかじめテスト造影を行い、それを参考に決定した。

視覚評価は、ファントム、臨床例共に放射線科医 3 名、放射線技師 6 名により行った。評価方法は、最も優れていると評価した写真を 5 点、やや良い 4 点、普通 3 点、やや悪い 2 点、最も悪かった写真を 1 点として 5 段階に分け 1 枚ずつ観察した。評価対象は末梢血管の描出、大血管の辺縁のシャープさおよび全体の画質の 3 つである。画像評価は subtraction 法の有無と撮像マトリクス数による画質の違いについて Wilcoxon 検定を用いて検討した。

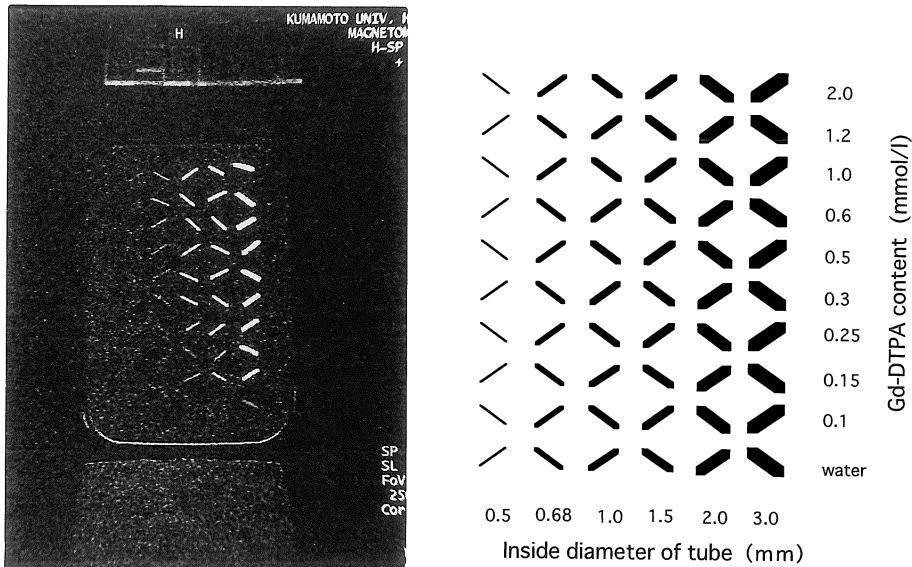


Fig. 1. Phantoms were prepared from plastic tubes with diameters of 0.5, 0.68, 1, 1.5, 2, 3 mm arranged in an order from the left to the right, in which aqueous solutions were filled with different concentrations of gadolinium chelates : 1/125, 1/200, 1/250, 1/400, 1/500, 1/700, 1/1000, 1/1600 and 1/2500 mmol/l, and were arranged in an order from the bottom to the top.

結 果

1) ファントム実験の結果

a) 最適な撮像条件の選択

Fig. 2 にファントム 1 により測定した 2 mmol/l における SNR の測定結果を示す。FLASH 法で最も SNR が高くなり最適と考えられるフリップ角は 30 度から 40 度であった。同様に FISP 法では 40 度，MP-RAGE についても 40 度であった。

CNR の測定結果を Fig. 3 に示しているが、ほぼ SNR の測定と同様の角度で最大値を示した。

通常の subtraction を用いない方法では CNR が高いフリップ角が、subtraction 法については SNR の高いフリップ角が最適であるが、結果的に同一のフリップ角となった。また、この 3 つのパルス系列の中で最も SNR の高かったパルス系列は、FISP 法であった。

b-1) Subtraction 法の検討

Fig. 4 に subtraction 前後での C-D ファントムによる視覚評価の結果を示す。

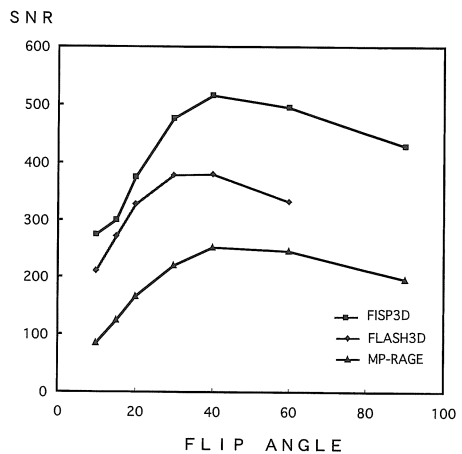


Fig. 2. The SNR measurement of Gd-DTPA solution of 2 mmol/l with Phantom 1.

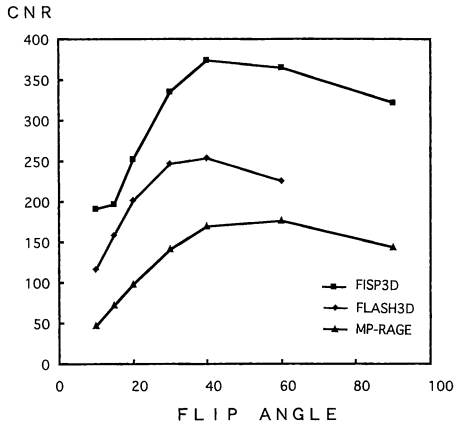


Fig. 3. The CNR measurement of Gd-DTPA solution of 2 mmol/l with Phantom 1.

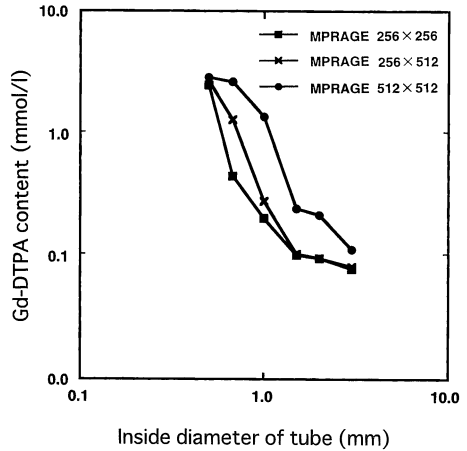


Fig. 5. The effect of image matrix on the C-D phantom.

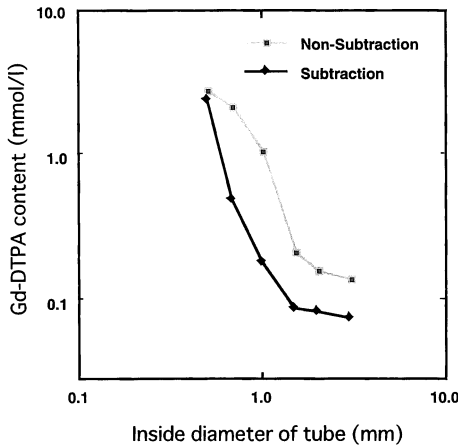


Fig. 4. The effect of subtraction on the C-D phantom.

Subtraction を行うと 3 mm から 0.68 mm までそれぞれの内径の血管で識別可能な造影剤濃度が向上していた。0.5 mm の内径で、同じ値を示しているのは、どちらも見えなくなっているためである。

b-2) マトリックス数の検討

Fig. 5 は、C-D フェントムを用い、subtraction 法でマトリックス数を変えたときの MP-RAGE の検出能を比較したものである。512

(位相)×512 (周波数) マトリックスは、256 (位相)×512 (周波数) マトリックスと比較して、全体的に検出能が低下していた。

256×512 と 256×256 マトリックスについて比較すると、256×512 マトリックスの方が、細い内径のチューブの検出能が低下した。なお、FISP および FLASH 法においても同一の傾向を示していた。

2) 臨床例における評価

Fig. 6 に subtraction 前後の臨床写真の例を示す。Fig. 7 はその観察結果を視覚評価した結果であるが、subtraction 法が末梢血管の描出、大血管辺縁の描出で有意に ($P < 0.05$) 高い得点を示した。

マトリックスの違いによる臨床例の比較では、全項目について最もピクセルサイズの大きい 128×256 マトリックスが最も悪くなっている (Fig. 8)。しかし、それよりピクセルサイズの小さい画像については、ファントムの結果と同様に、末梢血管の描出については 256×256 マトリックスも 256×512 マトリックスもほぼ同じ得点を獲得している。また、大血管の辺縁および全体の印象では、256×512 マトリックスが高得点であった。



Fig. 6. The clinical examples before (a) and after (b) subtraction.

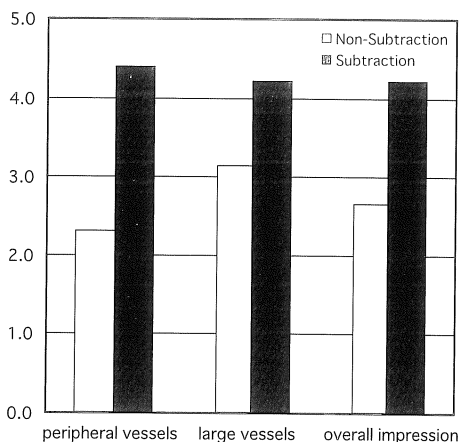


Fig. 7. Visual evaluation of subtraction versus nonsubtraction on clinical studies.

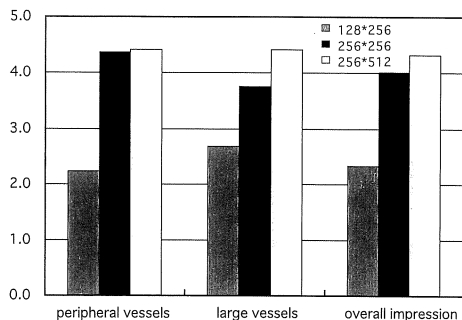


Fig. 8. Effect of image resolution on clinical studies.

考 察

造影剤を用いたMRAでは、脂肪の信号が血液中の造影剤のT1短縮効果による高信号を上回り、血管描出能を低下させることがある。それを防ぐために、これまでに幾つかの報告がある。1つは脂肪抑制法を用い撮像し検出能を向上させる方法であるが^{13)~15)}、脂肪抑制法は、磁場の均一性等の条件により、うまく抑制されなかったり、撮像時間が長くなる等の欠点があった。今回報告したsubtractionによる方法は、これまで2D法を用い、臨床的に画質を評価した報告がされている^{4)~7)}。

今回我々は、2種類のファントムと臨床写真を用いてsubtraction法の画像評価および撮像条件の最適化を行った。

血管の描出能は、血管と組織のコントラストと空間分解能およびSNRの3つの要素により決定される。その関係を総合的に評価するファントムとしてC-Dファントムを用いた。

Subtraction法を用いることは、上の3つの要素のうちコントラストの増加に最も大きく寄与すると考えられる。しかし、画像Aと画像Bのsubtractionを行うとし、それぞれの画像の信号強度をaとb、バックグラウンドノイズの標準偏差をそれぞれσa、σbとすると、

$$(a \pm \sigma_a) - (b \pm \sigma_b) = a - b \pm \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}$$

となり、バックグラウンドノイズの標準偏差は大きくなり、SNR が劣化する。コントラストの増加は、検出能を増加させるが、SNR の劣化は検出能の低下につながる。したがって C-D ファントムは、視覚的な総合画像評価を行うため使用した。

Subtraction 法の有意性については、ファントム実験および臨床例の両方ともに subtraction 法が好成績であった。特に骨盤および四肢の撮像においては、呼吸による体動のアーチファクトが少なく有用であり、血管が体表面近くを通るときには、体表面の脂肪が同一スラブ内に入ってくるので、効果が大いのではないかと考えられる。

空間分解能に影響を与えるマトリックス数も、SNR と相対する要素である。マトリックス数を多くすればピクセル当たりの信号が減少し SNR が悪化し検出能低下の要因となる。しかし、ピクセルサイズが小さくなると、パーシャルボリューム効果が少なく、またピクセル内での位相の分散が少なくなるので、検出能の向上が考えられる。

C-D ファントムの結果では、ピクセルサイズが小さいほど検出能は低下していた。これは、細いチューブの造影剤の信号がノイズに埋もれたためで、ピクセルサイズを小さくすることが、細い血管の検出能の向上にはつながらなかったことを示している。

小さいピクセルサイズを生かした高分解能撮像には、高い SNR、もしくは高いコントラストが必要であり、コイルの高感度化やパルス系列の更なる最適化ができれば、血管の検出能向上に役立てることができると考えられる。

臨床例による評価は、ファントム実験の結果と異なり、末梢血管については、 256×256 マトリックスと 256 (位相) $\times 512$ (周波数) マトリックスはほぼ同等の評価で、血管の辺縁および全体の印象に関しては、 256×512 マトリックスが好結果だった。

これは、 256×256 マトリックスでは、ピク

セルサイズが約 1.4 mm であり、C-D ファントムの 0.5 mm のチューブも実際はそれだけ拡大して見えていたことになる。 256×512 マトリックスでは、短辺はその半分になり実サイズに近づいており、それにより辺縁のなめらかな画像になっているためではないかと考えられる。

結 論

a) ファントム実験により造影剤を用いた subtraction MRA の、最適パルス系列および撮像条件を決定した。

b) Subtraction を行うことにより、骨盤、四肢領域の MIP による MRA の細い血管の描出能が著しく向上した。

c) 高分解能の撮像を行うためには、高い SNR と高コントラストが必要であり、単純にピクセルサイズを小さくすることは、末梢血管の描出能の向上に寄与しない。しかし、マトリックス数が多くなると像のボケが少なくなるので拡大が少なくなり、狭窄等の評価には有用と考える。

文 献

- 1) Lossef SV, Rajan SS, Patt RH, et al. : Gadolinium-enhanced magnitude contrast MR angiography of popliteal and tibial arteries. *Radiology* 1992 ; 184 : 349-355
- 2) Prince MR : Gadolinium-enhanced MR aortography. *Radiology* 1994 ; 191 : 155-164
- 3) Prince MR, Narashimham DL, Stanley JC, et al. : Breath-hold gadolinium-enhanced MR angiography of the abdominal aorta and its branches. *Radiology* 1995 ; 197 : 785-792
- 4) Adamis MK, Li W, Wielopolski PA, et al. : Dynamic contrast-enhanced subtraction MR angiography of the lower extremities : initial evaluation with a multisection two-dimensional time-of-flight sequence. *Radiology* 1995 ; 196 : 689-695
- 5) 天野康雄, 弦間和仁, 榎 利夫, 他 : 大腿動脈

- の閉塞性動脈硬化症に対する造影2次元 subtraction MRA の有用性. 日磁医誌 1996; 16(4): 159-163
- 6) Douek PC, Revel D, Chazel S, et al.: Fast MR angiography of the aortoiliac arteries and arteries of the lower extremity: value of bolus-enhanced, whole-volume subtraction technique. AJR 1995; 165: 431-437
- 7) 渡辺祐司, 道家雅子, 天羽賢樹, 他: ハーフフーリエ法とサブトラクション処理を併用した Gd 造影 3D MRA. 日医放誌 1997; 1: 61-63
- 8) 加藤丈司, 伊藤公一郎, 田島なつき, 他: Gd-DTPA 造影 3D MR angiography における血管描出能と撮像パラメータの実験的検討. 日磁医誌 1995; 15: 115-125
- 9) 加藤丈司, 川村義彦, 伊藤公一郎, 他: IR preparation Fast SPGR を用いた Gd-DTPA 持続静注 3D MR angiography の撮像パラメータの検討. 日放技誌 1996; 52: 747-752
- 10) 土井邦雄: X 線画像の信号検出と視覚特性の重要性. 日放技誌 1987; 43(6): 694-729
- 11) 洞田貫誠志. C-D ダイアグラムによる DSA の低コントラスト分解能の評価. 藤田広志編, デジタルラジオグラフィの画像評価. 日本: 日本放射線技術学会, 1994; 41-42
- 12) Earls JP, Rofsky NM, DeCorato DR, et al.: Breath-hold single-dose gadolinium-enhanced three-dimensional MR aortography: usefulness of a timing examination and MR power injector. Radiology 1996; 201: 705-710
- 13) 天野康雄, 弦間和仁, 榎利夫, 他: 脂肪抑制併用造影 3 次元 MR angiography による閉塞性動脈硬化症の診断と治療効果判定. 日磁医誌 1996; 16(7): 316-321
- 14) 高原太郎, 大西毅, 笠原利之, 他: 非神経放射線領域の MRA における最新の動向. 新医療 1996; 6: 68-71
- 15) 笠原利之, 高原太郎, 中島康雄, 他: 骨盤部の高速脂肪抑制付加 3D 造影ダイナミック MRA を用いた選択的動脈, 静脈撮像. 日磁医誌 1997; 17(3): 149-156

3D Contrast-enhanced MR Angiography of the Pelvis and Lower Extremities with Subtraction Method: Study of Vascular Delineation

Yasuhiro HIAI¹, Yasuyuki YAMASHITA², Yoshinori FUNAMA¹,
Masato MARUYAMA¹, Ryuji IKEDA¹, Nozomu NAGASUE¹,
Seishi DOUDANUKI¹, Takao TAKADA¹, Katsuhiko MITSUZAKI²,
Yi TANG², Mutsumasa TAKAHASHI²

¹Department of Radiology, Kumamoto University Hospital
1-1-1 Honjo, Kumamoto 860-8556

²Department of Radiology, Kumamoto University School of Medicine

By the application of dynamic contrast enhanced MR imaging with use of a phased-array multi-coil, excellent angiographic images can be obtained. With use of a phased-array coil, however, increased signal from subcutaneous fat may obscure the visualization of vessels. Subtraction is an effective method to suppress signals from background tissue. We evaluated the value of contrast enhanced three-dimensional high-speed gradient echo subtraction magnetic resonance angiographic imaging on a 1.5 T MR unit with evaluation of clinical data. The effect of image resolution on vessel visualization by phantoms was also evaluated. With the subtraction technique, smaller peripheral vessels were clearly visualized in comparison with the results of non-subtraction techniques. In order to obtain high resolution images, a higher signal-to-noise ratio was required.