

# 肺腫瘍性病変における高分解能ダイナミック MRI —ファントム実験による 3D-VIBE の至適撮像条件の検討—

瀧本輝生<sup>1</sup>, 長野伸也<sup>1</sup>, 戸崎光宏<sup>2</sup>, 植月勇雄<sup>2</sup>,  
福田 安<sup>2</sup>, 福田国彦<sup>2</sup>, 村田勝俊<sup>3</sup>, 井村千明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京慈恵会医科大学放射線部 <sup>2</sup>同放射線医学講座

<sup>3</sup>シーメンス旭メディテック(株)メディカルソリューションマーケティング

## はじめに

肺腫瘍性病変の画像診断における CT の果たす役割は大きい。特に高分解能 CT の進歩により、腫瘍の存在診断並びに形態診断における CT の役割は揺るぎないものとなっている。一方、胸部領域に対する MRI は、低い空間分解能、プロトン密度の低さによる低い信号強度、呼吸や心拍動による体動アーチファクト、さらに空気存在による局所性磁場の不均一などの欠点がある。しかし、MRI の優れた組織分解能を利用して、肺腫瘍性病変の質的診断<sup>1)~5)</sup>や肺癌の病期診断の報告がみられる<sup>6),7)</sup>。特に肺腫瘍性病変の質的診断には、腫瘍の時間信号強度曲線の解析<sup>1)~4)</sup>と形態診断<sup>3)~5)</sup>が有用と考えられるが、詳細な形態評価を行うには十分な空間分解能とはいえない。

近年、three-dimensional (3D) spoiled gradient-echo 法を改良し、zero filling interpolationにより高速撮像を可能にしたパルスシーケンス(three-dimensional volumetric interpolated breath-hold examination: 3D-VIBE)が報告された<sup>8),9)</sup>。上腹部領域で、一回の息止めで 2 mm スライス厚の 3D ダイナミック撮像が可能となった。Semelka らは同様の撮像法を用い

て、4 mm スライス厚で肺野病変に適した撮像条件を報告した<sup>10)</sup>。その中で正常例を中心に、縦隔臓器、肺組織および肺血管の形態評価に有用と報告している。さらに臨床例を追加し、肺野病変の形態診断の可能性を報告している<sup>11)</sup>。これらの研究は、腫瘍性病変および非腫瘍性肺野病変を含む広いスペクトルを対象としており、脂肪抑制は併用していない。しかし、縦隔や縦隔リンパ節の評価には脂肪抑制の併用が必要であることも指摘している<sup>10),11)</sup>。

今回我々は、肺腫瘍性病変の質的診断や肺癌の病期診断への臨床応用のためにファントム実験を行い、至適撮像条件を検討した。特に、Semelka らの検討していない、コントラスト雑音比 (contrast-to-noise ratio: CNR) を中心に以下の実験を行った。

実験 1: 肺腫瘍の質的診断にダイナミック MRI の時間信号強度曲線を利用することを前提として<sup>1)~4)</sup>、濃度の異なる Gd 溶液を 3D-VIBE を含む 4 種類の撮像法で撮像し、それぞれの CNR から最も安定した撮像法を検討した。

実験 2: 続いて 3D-VIBE の至適撮像パラメータを検討した。

方 法

濃度の異なる gadolinium-DTPA (Gd) 溶液を封入した胸部ファントム (Fig. 1) を作成して実験に用いた。ポリプロピレン製容器に植物油を入れ凝固剤にて固化し、中心に 10 cm の正円筒形の穴を穿ち、その空間に 2.5×3.5×1.5 cm の 6 個のカプセルを試料として固定した。カプセル内には、体液成分に近いとされるアイソトニック飲料を溶媒とした Gd 溶液を封入し、それぞれ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 5 mM とした。ポリプロピレン製容器内の固化された植物油を体脂肪、正円筒形内を肺野、その中に封入された Gd 溶液を造影後の腫瘍性病変と想定した。Gd 濃度溶液は、上腹部のダイナミック MRI における大動脈と肝実質の推定濃度<sup>12)</sup>を参考にし、最大濃度を 5 mM として 6 種類の希釈溶液を用いた。

撮像には MAGNETOM Symphony (Siemens 社製, Erlangen, Germany, 1.5T 装置) を用いた。

信号強度の測定は、関心領域 (region of interest : ROI) を約 1.0 cm<sup>2</sup> に固定し、試料外の ROI は位相エンコード方向に設定した。ま

た、CNR は試料外の空気の信号強度平均値 (SI<sub>0</sub>)、試料内の信号強度平均値 (SI<sub>1</sub>)、およびファントム外の信号の標準偏差 (SD<sub>noise</sub>) から、 $CNR = (SI_1 - SI_0) / SD_{noise}$  と定義した。

実験 1 ; 各撮像法の評価

検討に用いた撮像法は spin echo (SE) (TR/TE/FA=511/14/90), 2D-FLASH (fast low-angle shot) (88/4.8/70), 3D-FLASH (3.9/1.6/25), および 3D-VIBE (4.5/1.9/12) である。撮像パラメータは FOV 300×206 mm, スライス厚 3 mm, マトリックス 256×176 (ピクセル面積 1.17×1.17 mm<sup>2</sup>) に固定し、脂肪抑制法を併用した。撮像時間は SE が 89 秒要したが、残りはすべて 15 秒以内に設定した。フィルターは raw filter のみを使用した。

各撮像法で得られた画像について、関心領域の信号強度を測定し、それぞれの撮像法での CNR を求めた。

実験 2 ; 3D-VIBE の至適パラメータの検討

上腹部で適正化された 3D-VIBE の撮像条件<sup>8)</sup>を基礎として、肺野病変に適したフリップ角とバンド幅を検討した。まず、バンド幅 490 Hz (腹部用 3D-VIBE) を固定し、フリップ角を 10° から 25° まで変化させて CNR を測定し

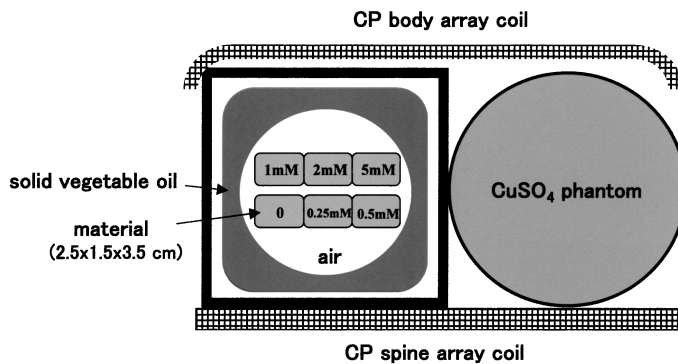


Fig. 1. Phantom experiment set up

2002年11月19日受理 2002年12月13日改訂  
 別刷請求先 〒201-0003 東京都狛江市和泉本町 4-11-1 東京慈恵会医科大学附属第三病院放射線部  
 瀧本輝生

た. 次に, その結果に基づきフリップ角を固定し, バンド幅を 290 Hz から 570 Hz まで変化させて CNR を測定した. 至適のフリップ角とバンド幅を胸部用 3D-VIBE と設定し, 腹部用 3D-VIBE (バンド幅 490 Hz) との比較を行った.

脂肪抑制 3D-VIBE の基本撮像条件は (4.5/1.9/12) である. 撮像パラメータは FOV 350 × 262 mm, スライス厚 3 mm, マトリックス 256 × 192 (ピクセル面積 1.36 × 1.36 mm<sup>2</sup>) に固定し, 臨床での息止め撮像を考慮して撮像時間は 15 秒以内に設定した. なお, 胸部単純撮影用フィルム サイズを参考にして FOV を拡大した.

## 結 果

4 種類の撮像法で得られた画像の特性曲線を示す (Fig. 2). SE 法は約 1 mM の Gd 溶液濃度にピークをもち, それ以上の濃度になると著明な CNR の低下を示す. 3D-FLASH では低濃度 Gd 溶液で CNR が低下し, 1 mM 以上の高濃度で急激な上昇を示す. 2D-FLASH と 3D-VIBE の特性曲線は類似し, すべての Gd

溶液濃度に対し比較的安定した CNR の上昇を示す. 3D-VIBE と 3D-FLASH で撮像されたファントム画像を比べると, 3D-FLASH では 0~0.25 mM の Gd 溶液の輝度が非常に低く, また 2~5 mM の Gd 溶液が高輝度に描出される (Fig. 3). 3D-VIBE では全試料で安定した輝度諸調を維持している. いずれも特性曲線による性状をよく表している.

バンド幅を 490 Hz に固定しフリップ角を変化させて撮像した画像の特性曲線を示す (Fig. 4). 0~1 mM の Gd 溶液ではフリップ角 10°~15° で CNR が高く, 1~5 mM の Gd 溶液ではフリップ角 15°~25° が高値を示す. フリップ角 15° は, 全濃度域で安定した高値を保つ. 一方, フリップ角 15° に固定しバンド幅を変化させて撮像した画像の特性曲線を示す (Fig. 5). バンド幅の変更にかかわらず Gd 溶液の濃度上昇に伴い CNR が上昇する傾向がみられるが, 唯一 290 Hz では 2 mM 付近から低下傾向を示す. これらのバンド幅の中では, 390 Hz が最も安定して CNR が上昇する傾向がみられた.

以上の結果により, フリップ角 15°, バンド幅は腹部よりも狭い 390 Hz 前後が胸部用 3D-VIBE の至適パラメータと考えられた. この撮

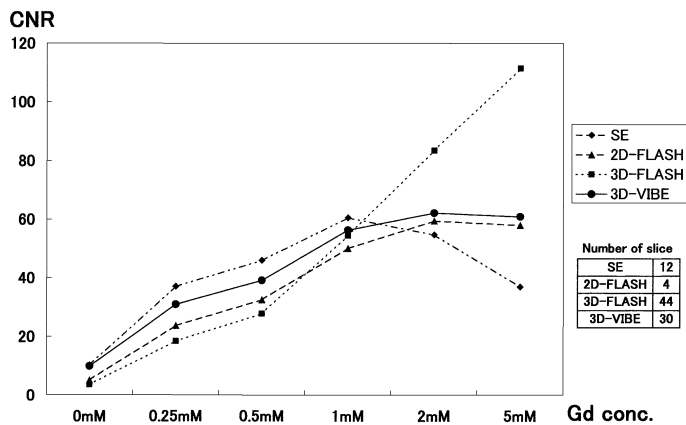


Fig. 2. Contrast-enhancement ratio (CNR) of SE, 2D-FLASH, 3D-FLASH, and 3D-VIBE as a function of gadolinium (Gd) concentration.

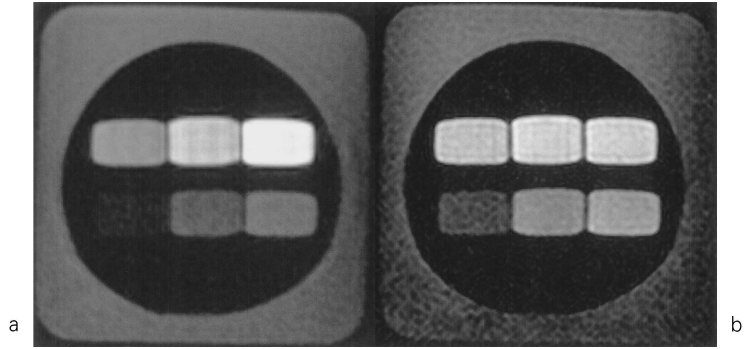


Fig. 3. Phantom image of 3D-FLASH(a) and 3D-VIBE(b).

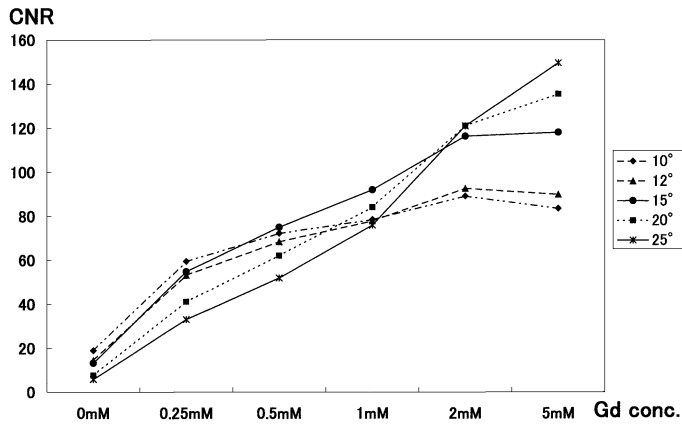


Fig. 4. Contrast-enhancement ratio (CNR) of 3D-VIBE (bandwidth of 490 Hz per pixel) with various flip angles as a function of gadolinium (Gd) concentration.

像パラメータを用いることで、胸部の 3D-VIBE は腹部用 3D-VIBE (バンド幅 490 Hz) と比べて、CNR が 14%~36% 向上できることが確認された (Fig. 6)。

### 考 察

胸部領域における MRI は、呼吸や心拍動による動きのアーチファクト、空気存在による局所性磁場の不均一性など、他の領域に比べて大きな制限がある。肺腫瘍性病変の質的診断や

肺癌の病期診断には、息止め撮像と詳細な形態診断が要求される。しかし、息止め撮像という時間分解能の優先が余儀なくされることで、詳細な形態診断を行うには空間分解能が犠牲にされ十分ではなかった。

近年、上腹部で適正化された 3D-VIBE の撮像条件を修飾して、肺野病変に応用する報告がみられる<sup>10),11)</sup>。これらの報告では、肺実質の画像化に重要な高い信号/雑音比 (signal-to-noise ratio : SNR) を得るためにバンド幅を狭く設定したり、肺野病変は無信号の空気を背景

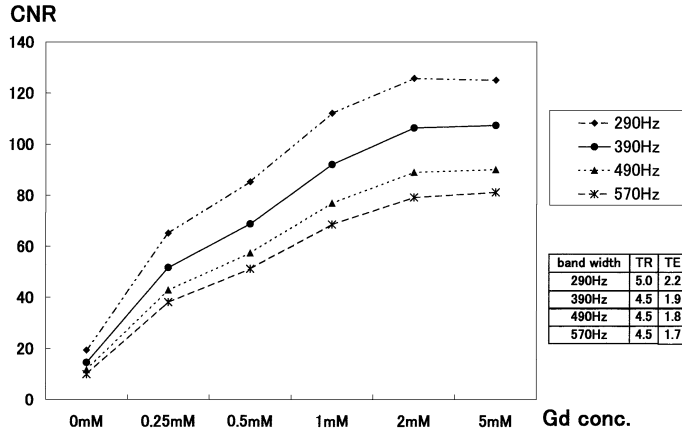


Fig. 5. Contrast-enhancement ratio (CNR) of 3D-VIBE (15° flip angle) with various bandwidth as a function of gadolinium (Gd) concentration.

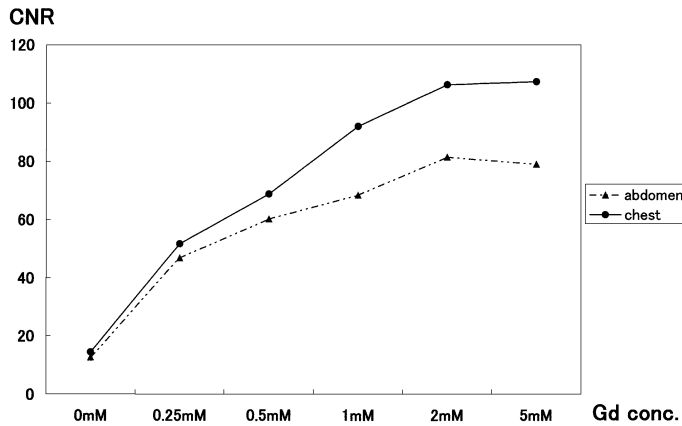


Fig. 6. Contrast-enhancement ratio (CNR) of 3D-VIBE with a bandwidth of 490 Hz per pixel and 12° flip angle, and 3D-VIBE with a bandwidth of 390 Hz per pixel and 15° flip angle as a function of gadolinium (Gd) concentration.

としコントラストが高いことを利用して、フリップ角を 12° から 15° に上げて肺実質の信号を得る工夫がなされており、アーチファクトの少ない高分解能撮像が可能となった<sup>10),11)</sup>。

対象とする撮像法の選択には、使用する受信系がフェーズドアレイ型ボディーコイルであることを考慮し、腹部検査用 T<sub>1</sub> 強調撮像法の中

から、磁化率アーチファクトの影響の少ない SE 法、時間分解能を優先した gradient echo 法、スライス厚に対する信号効率の高い 3D 撮像法を選択した。SE 法と 2D-FLASH は、将来の平行イメージングの導入も考慮して対象とした。しかし、SE 法は TR と TE がそれぞれ造影剤濃度に対して信号強度がピークを

もっており (Fig. 2), これを回避するために TR/TE を短縮すると, スライス枚数が制限を受ける. また, 2D-FLASH は 3D-VIBE と類似した CNR 特性曲線を示すものの, 脂肪抑制併用による TR の延長はスライス枚数に対する時間分解能が低下し (Fig. 2), 肺野病変の診断には不適切と考えられた. 3D-FLASH は, 1 mM 以上で CNR が急激な上昇を来すが (Fig. 2), 本来腎動脈用 MRA の至適化を受けており, 高濃度域の信号が強調される特徴を有している. また, 3D-VIBE と 3D-FLASH の測定試料画像を視覚的に評価すると, 試料の形状, 試料間隙の描出に関して, 3D-VIBE が優れており (Fig. 3), 低濃度 Gd 溶液の CNR の高さは, 血流の乏しい腫瘍の形態評価にも有用であると考えられた. したがって, 肺腫瘍性病変に対する高分解能ダイナミック MRI には, 3D-VIBE が有用な撮像法であると考えられる.

3D-VIBE は腹部撮像用の最適化を受けており, 肝臓と脾臓の CNR に基づきフリップ角  $12^\circ$ , バンド幅 490 Hz が採用されている<sup>8)</sup>. しかし, 胸部領域では無信号である空気と病変部との CNR から撮像条件を決定する必要があると考え, フリップ角とバンド幅の至適化を検討した. バンド幅 490 Hz (腹部用 3D-VIBE) に固定して, フリップ角変更による信号強度の影響を検討した結果, 大きなフリップ角度は  $T_1$  緩和の影響を強く反映するが, 非常に短い TR の場合, 縦磁化の回復が間に合わず信号強度は低下する. 小さな角度では縦磁化の回復は補償されるが  $T_2$  緩和の信号成分が信号強度を支配する (Fig. 4). すなわち, 3D-VIBE の極度に短い TR と Gd 造影剤濃度差による  $T_2$  短縮効果により撮像法の信号特性が変わり, フリップ角  $15^\circ$  が最も安定した信号特性を示した. フリップ角  $15^\circ$  に固定しバンド幅を変化させて撮像すると, バンド幅 290 Hz で Gd 溶液 2 mM 以上から低下傾向を示す (Fig. 5). その理由は, 信号収集時間が長くなり, TR/TE が延長されたことによる. しかし, 現状の MR 装置

ではバンド幅の変更に伴い, 信号収集時間の補償を行うことで, TR/TE は最短に自動設定される. このことから, 最適なバンド幅を厳密に決定することは不可能であり, 390 Hz を選択した.

以上から, フリップ角  $15^\circ$ , バンド幅は 390 Hz 前後が胸部用 3D-VIBE の至適パラメータと考えられた. これは, Semelka らの報告する撮像条件と同一である<sup>10),11)</sup>. しかし, Semelka らは 4 mm スライス厚を用いて, 画質およびアーチファクトの程度をスコア化する視覚的評価法で判定しており, 至適撮像条件に対する実験は行っていない. さらに, 脂肪抑制を併用したダイナミック MRI は念頭にしておらず, CNR に対する検討はなされていない. 今後, 肺腫瘍性病変の質的診断や肺癌の病期診断を目的とした脂肪抑制併用高分解能ダイナミック MRI には, 胸部用の撮像条件での 3D-VIBE が有用と考える.

## 結 論

肺腫瘍性病変の質的診断や肺癌の病期診断を目的とし, 脂肪抑制を併用した高分解能ダイナミック MRI に対する 3D-VIBE の有用性を検討した.

1. ファントム実験において, 3D-VIBE は spin echo (SE), 2D-FLASH, 3D-FLASH よりもコントラスト雑音比 (CNR) に優れる撮像法であった.
2. フリップ角  $15^\circ$ , バンド幅 390 Hz 前後が胸部用 3D-VIBE の至適パラメータと考えられた.
3. 今後, 胸部用 3D-VIBE における臨床的な有用性を検討する必要がある.

## 文 献

- 1) Hittmair K, Eckersberger F, Klepetko W, Helbich T, Herold CJ: Evaluation of solitary pul-

- monary nodules with dynamic contrast-enhanced MR imaging – a promising technique. *Magn Reson Imaging* 1995 ; 13 : 923–933
- 2) Ohno Y, Hatabu H, Takenaka D, Adachi S, Kono M, Sugimura K : Solitary pulmonary nodules : potential role of dynamic MR imaging in management initial experience. *Radiology* 2002 ; 224 : 503–511
  - 3) 楠本昌彦 : 肺癌における Gd-DTPA enhanced MRI の有用性に関する臨床的研究. *日医放会誌* 1992 ; 52 : 358–371
  - 4) Guckel C, Schnabel K, Deimling M, Steinbrich W : Solitary pulmonary nodules : MR evaluation of enhancement patterns with contrast-enhanced dynamic snapshot gradient-echo imaging. *Radiology* 1996 ; 200 : 681–686
  - 5) Chung MH, Lee HG, Kwon SS, Park SH : MR imaging of solitary pulmonary lesion : emphasis on tuberculomas and comparison with tumors. *J Magn Reson Imaging* 2000 ; 11 : 629–637
  - 6) Webb WR, Gatsonis C, Zerhouni EA, Heelan RT, Glazer GM, Francis IR, McNeil BJ : CT and MR imaging in staging non-small cell bronchogenic carcinoma : report of the Radiologic Diagnostic Oncology Group. *Radiology* 1991 ; 178 : 705–713
  - 7) Ohno Y, Adachi S, Motoyama A, Kusumoto M, Hatabu H, Sugimura K, Kono M : Multiphase ECG-triggered 3D contrast-enhanced MR angiography : utility for evaluation of hilar and mediastinal invasion of bronchogenic carcinoma. *J Magn Reson Imaging* 2001 ; 13 : 215–224
  - 8) Rofsky NM, Lee VS, Laub G, Pollack MA, Krinsky GA, Thomasson D, Ambrosino MM, Weinreb JC : Abdominal MR imaging with a volumetric interpolated breath-hold examination. *Radiology* 1999 ; 212 : 876–884
  - 9) Lee VS, Lavelle MT, Rofsky NM, Laub G, Thomasson DM, Krinsky GA, Weinreb JC : Hepatic MR imaging with a dynamic contrast-enhanced isotropic volumetric interpolated breath-hold examination : feasibility, reproducibility, and technical quality. *Radiology* 2000 ; 215 : 365–372
  - 10) Semelka RC, Cem Balci N, Wilber KP, Fisher LL, Brown MA, Gomez-Caminero A, Molina PL : Breath-hold 3D gradient-echo MR imaging of the lung parenchyma : evaluation of reproducibility of image quality in normals and preliminary observations in patients with disease. *J Magn Reson Imaging* 2000 ; 11 : 195–200
  - 11) Bader TR, Semelka RC, Pedro MS, Armao DM, Brown MA, Molina PL : Magnetic resonance imaging of pulmonary parenchymal disease using a modified breath-hold 3D gradient-echo technique : initial observations. *J Magn Reson Imaging* 2002 ; 15 : 31–38
  - 12) 吉満研吾, 本田 浩 : 上腹部のダイナミック MRI : 撮像タイミングの最適化とパルスシークエンスの選択. *日医放会誌* 2001 ; 61 : 408–413

## Dynamic MR Imaging with High Spatial Resolution of Pulmonary Nodules: Phantom Study for Optimization of 3D-VIBE

Teruo TAKIMOTO<sup>1</sup>, Shinya NAGANO<sup>1</sup>, Mitsuhiro TOZAKI<sup>2</sup>,  
Takeo UETSUKI<sup>2</sup>, Yasushi FUKUDA<sup>2</sup>, Kunihiko FUKUDA<sup>2</sup>,  
Katsutoshi MURATA<sup>3</sup>, Chiaki IMURA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Radiological Division, <sup>2</sup>Department of Radiology, The Jikei University School of Medicine  
3-25-8 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8461*  
<sup>3</sup>*Siemens-Asahi Medical Technologies Ltd.*

Our study objective was the selection of types and parameters of moderate pulse sequence, for dynamic high-spatial-resolution MR imaging of individual pulmonary lesions. By using phantom experiments with contrast-to-noise ratio (CNR) of SE, 2D-FLASH, 3D-FLASH, and 3D-VIBE as a function of gadolinium (Gd), lesion concentration was measured. The CNR of 3D-VIBE was the most stable of the sequences at all Gd concentrations.

The CNR of 3D-VIBE (with a bandwidth of 490 Hz per pixel) with various flip angles as a function of Gd concentration was highest with a flip angle of 15 degrees. The CNR of 3D-VIBE at a flip angle of 15 degrees had the highest Gd concentration at a bandwidth of 390 Hz per pixel. We found that the CNR of 3D-VIBE with a bandwidth of 390 Hz per pixel and a 15 degree flip angle was superior to abdominal 3D-VIBE with a bandwidth of 490 per Hz per pixel and a 12 degree flip angle. In conclusion, 3D-VIBE with a 390 bandwidth and 15 degree flip angle, is a promising sequence for dynamic high-spatial-resolution MR imaging of individual pulmonary lesions.