

ECG triggered k-space segmentation を併用した fast SPGR による肺 MRA

福田 浩¹, 粟井和夫¹, 鈴木孝之¹, 中村 進¹,
藤川光一¹, 山口裕之², 本山貴志²

¹広島総合病院画像診断部 ²同 放射線技師室

はじめに

MR angiography (以下 MRA) は現在頭頸部, 四肢, 腹部などの血管病変の診断に広く応用されているが, 近年では胸部領域にも応用されるようになり, その臨床的有用性に関する情報も蓄積されつつある^{1)~9)}. 一般に胸部領域の MRA には TE を短縮した高速 gradient echo 法が用いられているが, 共通の問題点として心拍動に伴う artifact による中葉や舌区血管の描出能の低下が挙げられる⁹⁾.

今回我々は心拍動に伴う artifact の軽減と流入効果の増強を目的として, ECG triggered k-space segmentation を併用した高速 gradient echo 法を肺 MRA に応用し, 良好な結果を得たので報告する.

対象・方法

1) 対象および撮像方法

装置は GE 社製 Signa Advantage 1.5 T を用い, 正常ボランティア 10 名および中葉あるいは舌区に腫瘍性病変を有する 5 症例を対象に, 同一断面を ECG triggered k-space segmentation を併用した fast RF-spoiled gradient

recalled acquisition in the steady state (以下 ET-FSPGR), ECG triggered k-space segmentation を併用しない FSPGR (以下 FSPGR), および multiplanar mode の FSPGR (以下 FMPSPGR) の 3 通りの方法で撮像し, 得られた画像を比較することで ET-FSPGR の有用性を検討した.

正常ボランティアは男性 10 名で年齢分布は 22~33 歳, 平均 26.8 歳である. coil は body coil を使用し, ET-FSPGR の撮像パラメータは, TR 6.7 ms, TE 2.2 ms, flip angle 15°, NEX 1, 撮像 matrix 256×128, FOV 38 cm, slice 厚 10 mm とした. また TE の短縮を優先するためバンド幅は 32 kHz を用い, gradient moment nulling は使用していない. データの採取は, 心電モニターの R 波を trigger として, 150 ms の delay を置いて開始し, 1 心拍あたり k-space の 32 lines を centric view order で取り込み, 4 心拍で 1 画像分のデータ採取が完了するように設定した (Fig. 1). FSPGR 撮像パラメータは ET-FSPGR と同様で, FMPSPGR のパラメータも TR を 32 ms (4 slice/acquisition), flip angle を 20° としている以外は ET-FSPGR と同様である. 撮像断面には心拍動の影響を受けやすい右中葉および左舌区を含む冠状 8 断面を選び, それらを最大吸

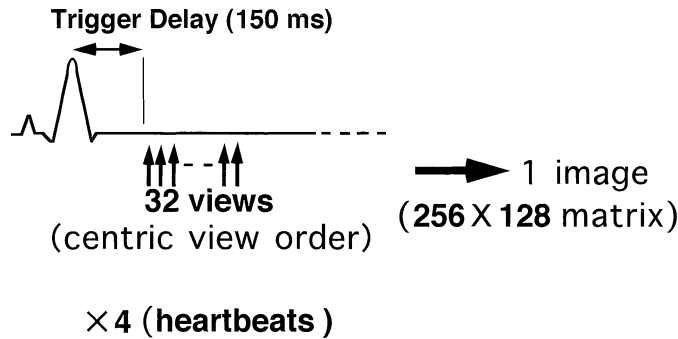


Fig. 1. Schematic diagram of segmented k-space data acquisition with ECG trigger. Thirty-two lines of k-space are collected with centric view order in a cardiac cycle with 150 ms trigger delay from the R wave of ECG. An image with 256 × 128 matrices is created from data obtained in four heartbeats.

気位にて一回の息止め下に取得した。

症例の年齢分布は22～75歳，平均57.4歳，男性1例，女性4例で，その内訳は原発性肺癌2例，肺過誤腫2例，器質性肺炎1例である。症例では，より詳細な情報を得るために骨盤用 phased array coilsを用い，FOV 34 cm，slice厚7 mmとした。それに伴いET-FSPGRの撮像パラメーターは，TR 7 ms，TE 2.5 msとなるが，trigger delayをはじめその他のパラメーターは正常者における撮像の場合と同様である。FSPGRの撮像パラメーターはET-FSPGRと同様で，FMPSPGRにおいてはTR 32 ms，flip angle 20°とした以外はET-FSPGRと同様である。撮像断面は腫瘤を充分含む冠状8断面を選択し，これらを一回の息止め下に取得した。

2) 画像評価の方法

正常ボランティアから得られた画像については，まず左右のA^{5b}の描出能に注目し，4段階に分けて視覚的評価を行った。すなわち，元画像およびmaximum intensity projection像(以下MIP像)でA^{5b}よりもさらに末梢分枝まで認識可能な場合をA，A^{5b}まで明瞭に認識可能な場合をB，A^{5b}起始部がかろうじて認識

可能な場合をC，A^{5b}の同定が困難な場合をDとし，ET-FSPGRとFSPGRおよびFMPSPGRによって取得された像を比較した。なお判定は4名の放射線診断医の合議により行った。

次にいずれの正常肺でも冠状断面に対してほぼ垂直に走行する右A^{5b}起始部の信号強度を測定し，それを心臓近傍の右肺野の信号強度の標準偏差で除した値(以下vascular SI/lung field SD)を，心臓近傍における血管描出能の客観的指標と考え，各撮像法の間で比較した。通常，雑音に対する信号強度の指標としては測定された信号強度をbackgroundの標準偏差で除した値SNRが使用されるが，高速gradient echo法で心を含む領域を撮像した場合のartifactは胸郭外にはほとんど及ばず，心の周囲に局限し，これが肺野血管の良好な描出を妨げる。したがって高速gradient echo法で得られた心近傍の画像を評価するにはSNRは不相当と考え，vascular SI/lung field SDを肺血管描出能の客観的指標とした。

右A^{5b}の信号強度については，正確なROIの設定が困難なため，動脈を充分含む領域のvoxelの信号強度のうち最大値を示すものと，それに隣接する8個のvoxelから2番めと3

番目に大きなものを選び、それら 3 つの voxel の信号強度の平均値を動脈の信号強度を代表するものとした。肺野信号強度の標準偏差の測定は、右 A^{5b} 起始部が描出されている断面にて、右横隔膜上 3 cm の位置で、可視血管を含まず、心臓になるべく近い部位に 1×1 cm の ROI を設定して行った。

症例を対象に各撮像方法で得られた画像は、血管の巻き込みや血管の圧排など、腫瘍と周囲血管の関係の描出の良否に注目し、3 段階の評価を行った。すなわち腫瘍と周囲血管の関係が明瞭に把握できる場合を A、腫瘍と周囲血管と

の関係がかりうじて把握可能な場合を B、腫瘍と周囲血管との関係が把握困難な場合を C とし、ET-FSPGR, FSPGR, および FMPSPGR の間で比較を行った。

結 果

Table 1 は正常ボランティアにおける左右 A^{5b} の 描 出 能 を , ET-FSPGR と FSPGR, FMPSPGR それぞれにつき視覚的に評価した結果である。ET-FSPGR では右側で 10 例中 8 例が、また左側で 10 例中 5 例が A と評価さ

Table 1. Comparison of visibility of middle lobe and lingular arteries in ten healthy volunteers. Visibility of both A^{5b}'s and their tributaries are evaluated by observing original and MIP images obtained by three different techniques.

Degree of visibility	rt. A ^{5b}				lt. A ^{5b}			
	A	B	C	D	A	B	C	D
ET-FSPGR	8	2			5	3	2	
FSPGR	1	3	6		2	5	3	
FMPSPGR		3	7				2	8

- A : visualization of arterial branches distal to A^{5b}
- B : clear visualization of A^{5b}
- C : poor visualization of A^{5b}
- D : no visualization of A^{5b}

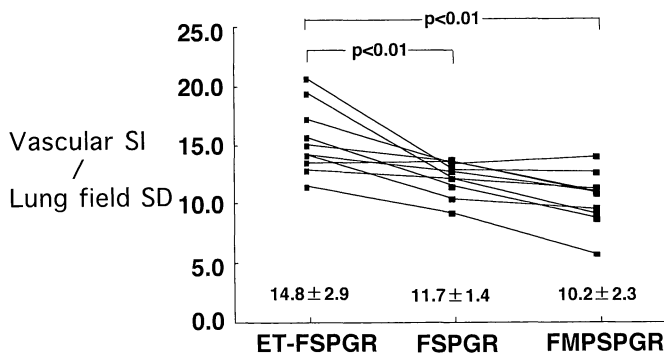


Fig. 2. Comparison of “vascular signal intensity/lung field SD” measured in rt. lobe of ten normal volunteers. All values are mean ± SD. The mean of “vascular signal intensity/lung field SD” was significantly higher in ET-FSPGR images than in the images obtained by other two pulse sequences.

れたのに対し、FSPGR では右側で1例、左側で2例がAと評価されたのみで、FMPSPGRでは左右ともAと評価されたものはなかった。FMPSPGRにおいては、とくに左側で心臓か

らの artifactが目立ち、Dと評価されたものが8例あった。以上、視覚的な評価においてET-FSPGRが他の二法よりも優れるとの結果が得られた。

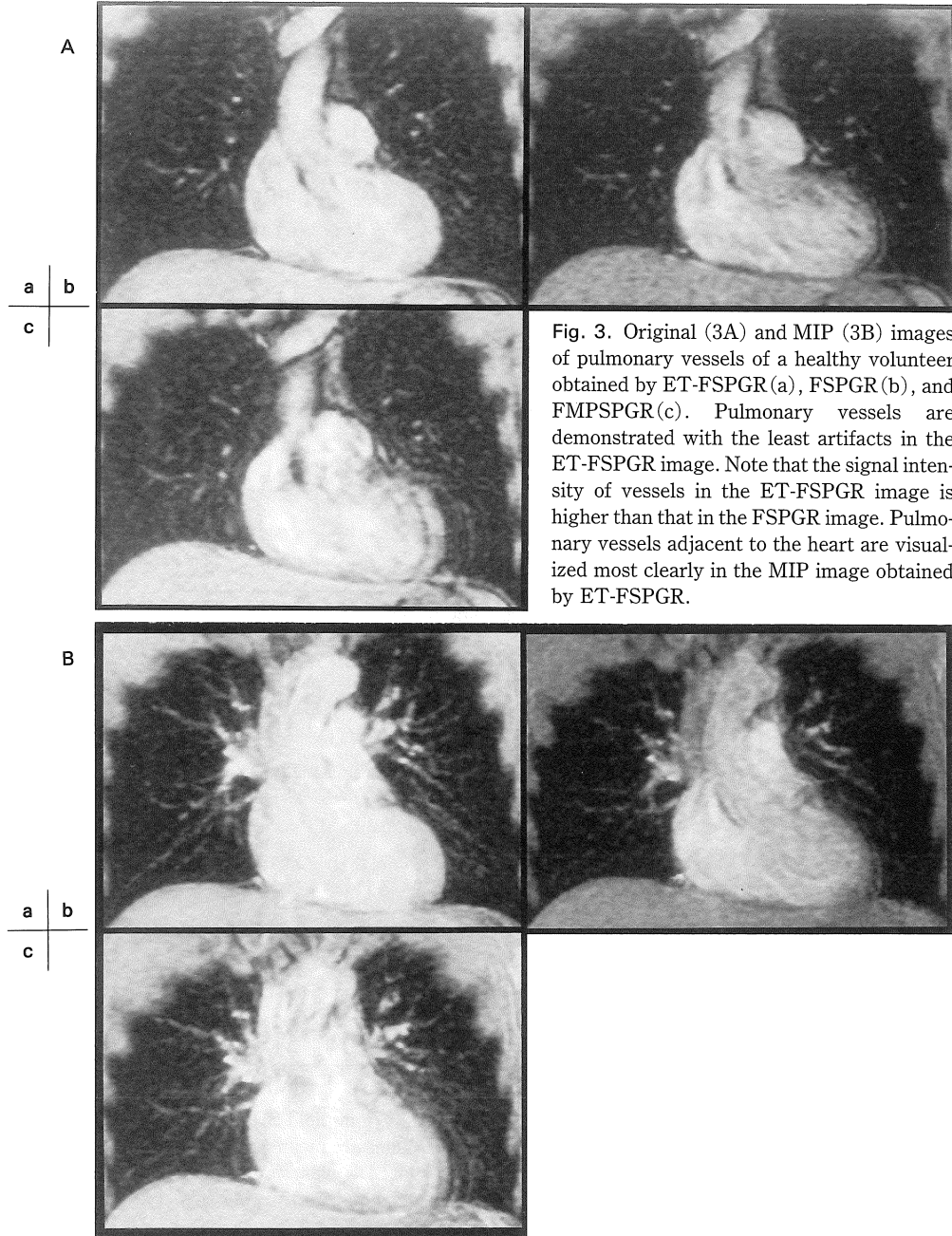


Fig. 3. Original (3A) and MIP (3B) images of pulmonary vessels of a healthy volunteer obtained by ET-FSPGR (a), FSPGR (b), and FMPSPGR (c). Pulmonary vessels are demonstrated with the least artifacts in the ET-FSPGR image. Note that the signal intensity of vessels in the ET-FSPGR image is higher than that in the FSPGR image. Pulmonary vessels adjacent to the heart are visualized most clearly in the MIP image obtained by ET-FSPGR.

Table 2. Comparison of MRA's obtained from five patients by ET-FSPGR, FSPGR and FMPSGR in the demonstrability of the anatomical relationship between pulmonary nodule and surrounding vasculature.

Degree of demonstrability	A	B	C
ET-FSPGR	5		
FSPGR	3	2	
FMPSGR	1	3	1

A : clear demonstration of nodule-vasculature relationship

B : poor demonstration of nodule-vasculature relationship

C : no demonstration of vasculature adjacent to the nodule

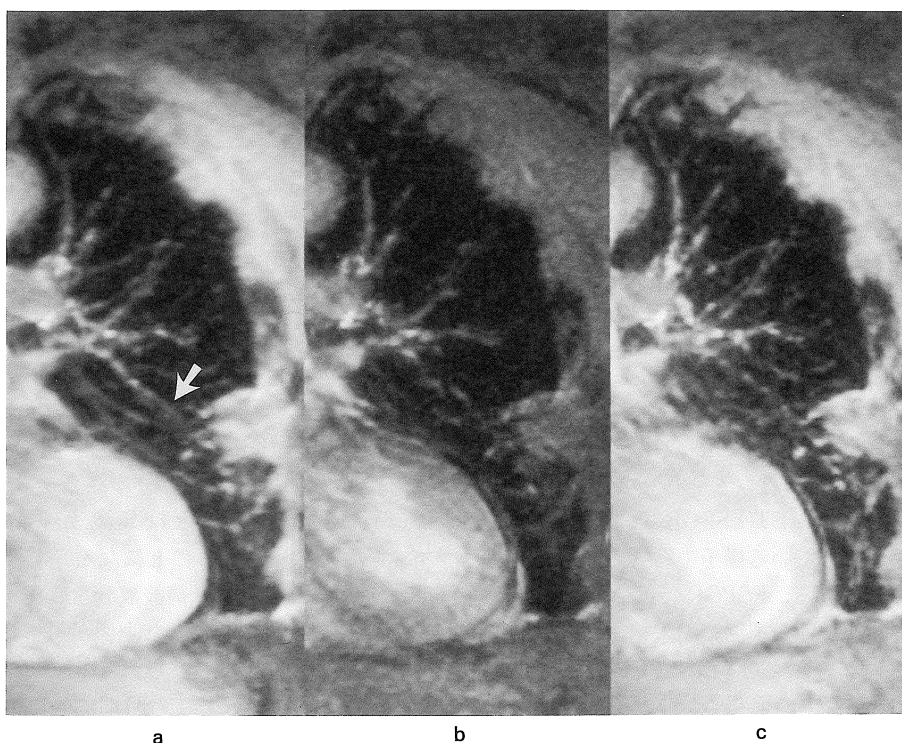


Fig. 4. A case of organizing pneumonia in lingular segment. MIP images obtained by ET-FSPGR (a), FSPGR (b), and FMPSGR (c). Lingular vessels are most clearly visualized on the MRA created from ET-FSPGR images, and the relationship between A^a (arrow) and the nodule is easily recognized. The MIP image obtained by FSPGR is degraded by poor vascular intensity, and the MIP image by FMPSGR is heavily stained with artifact from the heart.

Fig. 2 に各撮像法で計測された vascular SI/lung field SD の値を示す。同一被検者から各方法で得られた値を線で連結して示しているが、いずれの被検者においても ET-FSPGR に

よる値が最も高かった。また ET-FSPGR で撮像された画像から得られた vascular SI/lung field SD の平均値は他の二法で得られた平均値よりも有意に高く (Wilcoxon 検定)、これら

の結果は前述の視覚的な評価の結果と一致するものであった。

Fig. 3に33歳男性の例を示す。元画像 (Fig. 3A) を比較するとET-FSPGRでは心大血管の輪郭が鮮明で、心臓のmotion artifactが少なく、右中葉や左舌区の血管影も明瞭に描出されている。それに対し、FSPGRやFMPSPGRでは心臓辺縁に沿ったartifactがみられ、とくにFMPSPGRでは心臓に近接する肺血管の同定が困難である。またET-FSPGRとFSPGRを比較するとET-FSPGRの方がより強い血管信号が得られている。MIP像 (Fig. 3B) においてもET-FSPGRではartifactが少なく、かつ血管も読影に十分な信号強度で描出され、他の撮像法よりも明瞭な画像となっている。

Table 2は症例において腫瘍と周囲血管との関係が良好に描出されているか否かにつき3段階に分け、各撮像法で検討した結果である。ET-FSPGRでは5例全例においてAと評価されたのに対し、FSPGRでは3例、FMPSPGRでは1例でしかAと評価されず、ET-FSPGRが最も優れるとの結果が得られた。

Fig. 4に65歳男性。左舌区の器質化肺炎の症例を呈示する。ET-FSPGRでは左A^{5a}が腫瘍に巻き込まれている様子や病変の形状が鮮明に描出されている。FSPGRではA^{5a}の信号が弱く血管の連続性が不明瞭で末梢まで十分に描出されていない。またFMPSPGRでは心臓からの強いartifactが生じており、腫瘍近傍の血管影が不明瞭である。

考 察

心電信号を指標としてk-spaceのdataを分割採取するk-space segmentation法は、大血管や冠動脈の評価に使用されているが^{10)~14)}、この方法を肺のMRAに応用した報告は、我々の検索しえた範囲ではみあたらない。我々はET-FSPGRを肺MRAに応用するにあたり、

心拍動に起因するartifactを軽減し、かつ流入効果を最大限に利用することを目的として、一心拍中に採取するk-space上のline数、trigger delay、およびview acquisition order等の撮像条件の最適化を行った。TR、TEはFOV、slice厚に応じて決定される最短値を、flip angleは従来用いてきた角度を使用した^{1)~3),6),9)}。

1心拍中に採取するk-space上のline数は、少ないほどartifactを低減できるが、限られた呼吸停止時間内で撮像可能な断面数とはtrade offの関係にあり、その点を勘案して決定する必要がある。心周期において心の動きの比較的緩やかな時期は、機械的収縮期の後半および機械的拡張期の後半で、artifactを抑制するにはこれらの時期にデータを収集することが肝要である。しかしこれらの持続時間はいずれも短く、どちらの時期にデータを収集するにせよ、200~250ms程度のデータ収集時間しか許されず、TRが6.7~7msの場合一心拍あたり32linesが限度と判断される。

SostomanやKitabatakeらは主肺動脈~左右の肺動脈の流速のpeakはR波からRR間隔の15~20%程度後に存在すると報告しており^{15),16)}、心拍数60~70/分の場合を考えると、肺動脈の流速のpeakはR波より140~200ms程度後に存在することになる。したがって心周期のこの時期に低周波成分を収集すれば流入効果を最大限に利用した画像が得られることになるが、一般に用いられているsequential view orderによってこの時期に低周波成分を取得するように設定すると心臓の動きが最も激しいR波直後からデータ収集を開始しなければならず、motion artifactの抑制が不十分となる。そこで血流速度がpeakになるまでの時間すなわち140~200msをtrigger delayとし、そこからcentric view orderで一心拍あたり32linesずつデータ収集を行うように設定することによって、流入効果を最大限に利用し、かつmotion artifactを可及的に抑制した画像を得ることが可能となる。Trigger delayについ

ては 140~200 ms の間で正常者 5 名を対象に行った予備実験の結果、全例で 150 ms とした画像で最も強い血管信号強度が得られたため、実際の撮像では 150 ms に統一した。

今回我々は上述の撮像条件を用いた ET-FSPGR と、従来より使用してきた FSPGR, FMPSPGR によって得られた肺 MRA を比較した結果、正常ボランティアでは左右 A^{5b} の視覚的描出能の改善、心臓近傍領域での vascular SI/lung field SD の向上がみられ、ET-FSPGR が心臓近傍領域の肺 MRA において従来法よりも優れた撮像法であることが示された。

症例については、その数も不十分でさらに検討を要すと思われるが、今回対象とした 5 症例においては、ET-FSPGR によって心臓近傍領域に存在する肺腫瘍と周囲血管の立体関係の把握が従来法よりも容易となることが示された。FMPSPGR では TR が長いこと、全体に強い信号強度が得られるが、心臓の motion artifact を被りやすく、心臓近傍領域の肺血管の評価が困難となるという問題点があるが、また FSPGR では TR が短いこと心臓からの artifact は比較的少ないが、血管信号強度が弱いという問題点があったが、我々が用いた撮像条件による ET-FSPGR はこれらの問題点を同時に解決し得るものと考えられた。なお今回は造影剤を用いた検討は行っていないが、ET-FSPGR は心拍動に基づく artifact の軽減に有効であることを考慮すると、造影剤を併用した ET-FSPGR によっても良好な結果が期待される。この点については、症例の蓄積とともに今後検討する予定である。

結 語

1. ECG triggered k-space segmentation を併用した fast SPGR (ET-FSPGR) により肺 MRA を撮像し、心臓近傍領域の肺血管描出能を従来用いてきた FSPGR および FMPSPGR と比較

した。

2. ET-FSPGR の撮像条件は、artifact を充分抑制し、かつ inflow 効果を最大に利用するため、trigger delay を 150 ms とし、centric view order で一心拍あたり 32 lines を採取するように設定した。

3. 正常ボランティア 10 例を対象に、両側 A^{5b} の信号強度の肺野信号強度標準偏差に対する比 (vascular SI/lung field SD) を調べた結果、ET-FSPGR において有意に高値を示し、また視覚的にも ET-FSPGR が従来法より優れているとの結果が得られた。

4. 右中葉や左舌区に腫瘍を有する 5 症例を対象とした検討の結果、ET-FSPGR では全例で腫瘍と周囲肺血管との関係が明瞭に把握可能で、あきらかに従来法を上回る質的診断に関する情報が得られた。

5. ET-FSPGR は、従来法では artifact のため鮮明な画像が得られない心臓近傍領域の肺 MRA に積極的に利用すべき方法である。

文 献

- 1) 中村 進, 小川洋介, 福田 浩, 藤川光一: 高速グラディエントエコー法の臨床応用. 日独医報, 37: 655-681, 1993.
- 2) 粟井和夫, 福田 浩, 中村 進, 藤川光一, 他: Phased array coils 併用 FAST SPGR による pulmonary MR angiography. 臨放, 40: 73-82, 1995.
- 3) 福田 浩, 粟井和夫, 鈴木孝之, 中村 進, 藤川光一: Pulmonary MR angiography の肺血管描出能および末梢肺腫瘍への応用. 日本医放会誌, 55: 885-889, 1995.
- 4) Foo TKF, MacFall JR, Hayes CE, Sostman HD, Slayman BE: Pulmonary vasculature: single breath-hold MR imaging with phased-array coils. Radiology, 183: 473-477, 1992.
- 5) Hatabu H, Gefter WB, Listerud J, et al.: Pulmonary MR angiography utilizing phased-array surface coils. J Comput Assist Tomogr, 16: 410-417, 1992.
- 6) Gefter WB, Hatabu H: Evaluation of pulmonary

- vascular anatomy and blood flow by magnetic resonance. *Journal of Thoracic Imaging*, 8 : 122-136, 1993.
- 7) Link KM, Loehr SP, Lesko NM : Cardiopulmonary vascular imaging. *Investigative radiology*, 27 : 72-79, 1992.
 - 8) 粟井和夫, 福田 浩, 中村 進, 藤川光一, 他 : ECG Triggered k-space Segmentation 併用 FAST SPGR による肺MRA. *日磁医誌*, 14(supplement) : 169, 1994.
 - 9) 中村 進, 藤川光一, 小川洋介, 福田 浩, 他 : FAST SPGR と表面コイルによる肺血管の描出. *日磁医誌*, 12(supplement-2) : 371, 1992.
 - 10) Edelman RR, Manning WJ, Burstein D, Paulin S : Coronary arteries : Breath-hold MR angiography. *Radiology*, 181 : 641-643, 1991.
 - 11) Atkinson DJ, Edelman RR : Cineangiography of the heart in a single breath hold with a segmented turboFLASH sequence. *Radiology*, 178 : 357-360, 1991.
 - 12) Sakuma H, Fujita N, Foo TK, et al. : Evaluation of left ventricular volume and mass with breath-hold cine MR imaging. *Radiology*, 188 : 377-380, 1993.
 - 13) Manning WJ, Li W, Edelman RR : A preliminary report comparing magnetic resonance coronary angiography with conventional angiography. *The New England Journal of Medicine*, 328 : 828-832, 1993.
 - 14) Hernandez RJ, Aisen AM, Foo TK, Beekman RH : Thoracic cardiovascular anomalies in children : Evaluation with fast gradient-recalled-echo sequence with cardiac-triggered segmented acquisition. *Radiology*, 188 : 775-780, 1993.
 - 15) Sostman HD, MacFall JR, Foo TKF, et al. : Magnetic resonance angiography. 1st edition, ed. by Potchen EJ, Haacke EM, Siebert JE, Gottschalk A, Mosby, St. Louis, 1993, pp546-572.
 - 16) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, et al. : Noninvasive evaluation of pulmonary hypertension by pulsed Doppler technique. *Circulation*, 68 : 302-309, 1983.

Pulmonary MR Angiography Using Fast SPGR with ECG Triggered k-Space Segmentation

Hiroshi FUKUDA¹, Kazuo AWAI¹, Takayuki SUZUKI¹,
Susumu NAKAMURA¹, Koichi FUJIKAWA¹, Hiroshi YAMAGUCHI²,
Takashi MOTOYAMA²

¹*Department of Medical Imagings, Hiroshima General Hospital
1-3-3 Zigozen, Hatsukaichi-shi, Hiroshima 738*
²*Radiological Technology, Hiroshima General Hospital*

Fast SPGR with ECG triggered k-space segmentation (ET-FSPGR) was applied to pulmonary MR angiography (MRA) in order to improve the demonstration of pulmonary vessels neighboring the heart. 10 healthy volunteers and 5 patients with pulmonary nodule in middle lobe or lingular segment were scanned by ET-FSPGR, fast SPGR (FSPGR) and fast multiplanar SPGR (FMPSPGR), and obtained images were compared with one another to evaluate the efficacy of ET-FSPGR.

The ET-FSPGR images were obtained with a TR of 6.7–7 ms, TE of 2.3–2.5 ms, flip angle of 15°, imaging matrix of 256 × 128, FOV of 34–38 cm, and slice thickness of 7–10 mm. Thirty-two views in a cardiac cycle were acquired in centric view order with trigger delay of 150 ms in order to utilize the flow related enhancement to the utmost. Scan parameters for FSPGR and FMPSPGR were the same as those in the ET-FSPGR imaging, except for TR of 32 ms and flip angle of 20° in FMPSPGR sequence. For each scan, eight coronal planes were determined to include middle lobe and lingular segment.

In visual assessment, middle lobe and lingular vessels of healthy volunteers were depicted most clearly in the images obtained by ET-FSPGR. The mean of “vascular signal intensity/lung field SD” was significantly higher in ET-FSPGR images than in the images obtained by other two pulse sequences. In the patients with pulmonary nodules, the anatomical relationship between the nodule and surrounding vasculature was most clearly demonstrated in MIP images obtained by ET-FSPGR.

Pulmonary MRA using ET-FSPGR proved to be a useful technique for demonstrating vasculature neighboring the heart, and was thought to be helpful for diagnosing pulmonary diseases involving middle lobe or lingular segment.