

原著論文

3D-グラディエントエコー法を用いた胎児MRI による腸管評価：正常腸管描出における初期検討

佐藤宏朗, 稲岡 努, 高橋康二, 山田有則, 長沢研一, 平沼初音, 八巻利弘
杉森博行¹⁾, 佐々木禎仁²⁾, 中村英記³⁾, 油野民雄
旭川医科大学 放射線科, 同 放射線部¹⁾, 同 産婦人科²⁾, 同 周産母子センター³⁾

Assessment of the Normal Gastrointestinal Tract of Fetal MRI Using 3D-Gradient Echo Sequence : A Preliminary Study

Hiroaki Sato, Tsutomu Inaoka, Koji Takahashi, Tomonori Yamada
Kenichi Nagasawa, Hatsune Hiranuma, Toshihiro Yamaki, Hiroyuki Sugimori¹⁾
Yoshihito Sasaki²⁾, Eiki Nakamura³⁾, Tamio Aburano
Department of Radiology, Section of Radiology¹⁾, Obstetrics and Gynecology²⁾
Center for Maternity and Infant Care³⁾, Asahikawa Medical College

Abstract Fetal magnetic resonance (MR) imaging of normal gastrointestinal (GI) tract was evaluated using fat-suppressed T1-weighted images (FS-T1WI) with volumetric interpolated breath-hold examination sequence (VIBE), which is a kind of fast low-angle shot (FLASH) contained in 3D-GRE. VIBE provides many imaging slices in a shorter time, higher spacial resolution, and better T1 contrast than conventional 3D sequences. In addition, it allows us to make high quality three-dimensional images. Compared to 2D-GRE in previous reports, 3D-GRE (VIBE) more consistently visualizes GI tract by high signal meconium. We believe that 3D-GRE is useful in depicting the fetal GI tract.

Keywords *Fetal MRI, Gastrointestinal tract, T1-weighted imaging, 3D-gradient echo sequence, MR colonography*

はじめに

胎児MRI T1強調画像(以下T1WI)において胎便は著明な高信号を呈するため同定が容易であり、腸管脱出や腸管閉鎖の部位診断に役立つといわれている¹⁻⁵⁾。胎児の腸管は通常2D-グラディエントエコー法(以下GRE法)を用いて評価されることが多かったが、近年においては、高速撮像法の進歩

に伴い、3D-GRE法の利用が検討されている^{5,6)}。

3D-GRE法の中でもvolumetric interpolated breath-hold examination sequence(以下VIBE法)は高速撮像法であるFLASH法の一つであるが、通常の3Dシークエンスよりも、さらに短時間で多スライスを撮像し、高い空間分解能、良好なT1コントラストを得ることができる。またmaximum intensity projection(以下MIP)等の3次元画像の作成も可

原稿受付日：2006年9月28日，最終受付日：2007年1月11日

別刷請求先：〒210-0013 川崎市川崎区新川通12-1 川崎市立川崎病院 放射線診断科 佐藤宏朗

能となる。そのため現在は、ガドリニウム造影剤を用いたMR angiographyや腹部領域のdynamic MRIなどに汎用されている。上腹部領域においては、2D-GRE法と比較して、3D-GRE法(VIBE法)の方が高いクオリティーの画像が得られると報告されているが^{7,8)}、胎児腸管MRIや胎便を用いて2D-GRE法と3D-GRE法とを比較検討した英文もしくは邦文による報告は、検索し得た範囲において認められない。

われわれは胎児MRI検査において3D-GRE法(VIBE法)を用いた脂肪抑制T1WI(以下FS-T1WI)を撮像し、胎便による胎児腸管の描出率を胎児週数、腸管領域別に調べた。さらに2D-GRE法での過去の報告¹⁾と比較し、その有用性について検討した。腸管領域の決定には、3D再構成画像であるmeconium-based three-dimensional MR colonography(以下3D-MMRC)を元画像と併せて利用した。

対象と方法

基礎実験では、まず満期で出生した正常新生児の胎便を入手し、その胎便10gと生理食塩水を用いて、希釈胎便を作成した。希釈には乳鉢、乳棒を用い、濃度10~100%の希釈胎便を試料として作成した。試料は底面積 $\pi \times 1 \times 1$ cmの円柱型プラスチック容器に注入後、蓋をして密閉状態とした。撮像は2D-GRE法(2D-FLASH法)と3D-GRE法(VIBE法)でおのおの3回ずつ行い、SNR(signal to noise ratio)の平均値を算出した。SNRは胎便

の信号強度をバックグラウンドの標準偏差で割った値とした。なお胎便の利用に際しては、新生児の家族にインフォームドコンセントを得て実験を行った。

臨床例の検討では、2004年1月から2006年2月の26ヵ月間に施行した胎児MRI40症例のうち、3D-GRE法によるFS-T1WIを撮像し、MRI所見にて①消化管(口腔~直腸)に閉鎖、狭窄や腫瘍といった異常がない、②腹壁破裂や横隔膜ヘルニアでみられるような腸管の腹腔外への脱出がない、③水腎症等の腹部腫瘍が腸管を圧排していない、以上3項目を満たし、かつ生後に正常腸管と判断された25症例を対象とした。胎児週数は19週4日から40週5日(平均32週4日)であった。なお胎児MRI40症例における最終診断の内訳は、正常児6例、中枢神経系異常11例(キアリII型奇形4例、全前脳胞症2例、水無脳症2例、孔脳症1例、脳梁形成不全症1例、Galen静脈瘤1例)、尿路奇形3例(両側性水腎症1例、片側性水腎症2例)、消化管奇形7例(食道閉鎖(VACTERL連合)1例、十二指腸閉鎖/狭窄4例、回腸閉鎖1例、総排泄腔奇形1例)、腹壁異常4例(腹壁破裂3例、膀胱外反症1例)、先天性横隔膜ヘルニア2例、皮下腫瘍(血管腫/リンパ管腫)3例、骨形成不全症1例、原因不明の胎児水腫1例、子宮内胎児死亡2例(無脾症1例、原因不明1例)であった(Table 1)。

使用MR装置はSiemens社製Magnetom Sonata 1.5Tを使用し、撮像シーケンスおよび条件は以下の通りである。まず基礎実験で用いた2D-FLASH

Table 1 Clinical diagnosis of 40 cases in fetal MR examination

Central nervous system		Abdominal wall	
Chiari type II malformation	4	gastroschisis	3
holoprosencephaly	2	bladder extrophy	1
hydroanencephaly	2	Diaphragmatic wall	
porencephaly	1	congenital diaphragmatic herniation	2
agenesis of the corpus callosum	1	Soft tissue	
vein of Galen aneurysm	1	hemangioma/lymphangioma	3
Genitourinary system		Others	
hydronephrosis	3	osteogenesis imperfecta	1
Gastrointestinal system		fetal hydrops	1
esophageal atresia (VACTERL association)	1	Intrauterine fetal death	
duodenal atresia/stenosis	4	asplenia	1
ileal atresia	1	etiology unknown	1
cloacal malformation	1		
		Normal case	6

法は、TR/TE：16.1/4.75 msec、フリップ角：90°、スライス厚：5.0 mm、gap：0.5 mm、matrix：256 (ZIP使用)、バンド幅：350 Hz/pixel、加算回数：1回であり、3D-FLASH法 (VIBE法) は臨床例での条件を利用した。次に臨床例で用いた3D-FLASH法 (VIBE法) は、TR/TE：4.45/1.34 msec、フリップ角：15°、スライス厚：3.0 mm、スラブ厚：120 mm、FOV：400 mm、matrix：256 (ZIP使用)、バンド幅：490 Hz/pixel、加算回数：1回であった。撮像時間は25 secであり、母体の呼吸停止下に撮像を行った。撮像断面は原則的に胎児冠状断とした。胎児の鎮静法は、検査直前の母体の食止めと10分の歩行運動であり、鎮静剤および造影剤は使用しなかった。

画像評価は、対象となったFS-T1WIにおける腸管の高信号域を、1名の放射線科医が視覚的に行い、胎児週数別に腸管各領域の描出率を算出し

た。3D-MMRCはMIPを用いて作成し、元画像と併せて視覚的評価に利用した。

結果

基礎実験では胎便濃度20%以上において3D-GRE法 (VIBE法) のSNRが2D-GRE法に比べ、高値を示した (Fig.1)。胎便濃度10%ではSNRは同等の値であった。

臨床例の検討では、下行結腸から直腸は週数に関係なく100%の描出が認められ、横行結腸より近位側では週数が満期に近くなるほど近位側の腸管の描出率が低下する傾向があった (Table 2)。週数毎の代表的な3D-MMRCをFig.2に示す。

考察

胎児MRIに関する報告は1980年代からみら

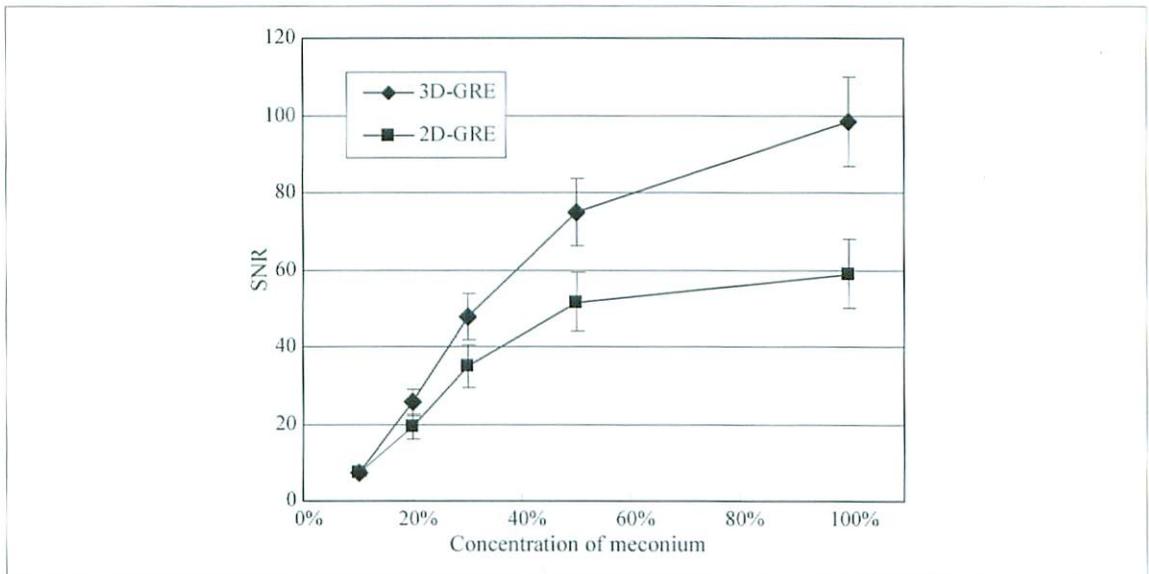


Fig.1 Relationship between SNR and the concentration of the meconium using 2D-GRE (2D-FLASH, TR/TE/FA=16.1/4.75/90) and 3D-GRE (VIBE, TR/TE/FA=4.45/1.31/15)

Table 2 The rate of recognition in the normal gastrointestinal (GI) tract at different gestational ages in fetuses using 3D-GRE (VIBE, TR/TE/FA=4.45/1.34/15)

Weeks of gestation (n=25)	Rectum	Sigmoid colon	Descending colon	Transverse colon	Ascending colon	Distal ileum	Proximal ileum	Jejunum
19-24w (2)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%
25-31w (7)	100%	100%	100%	100%	100%	86%	71%	43%
32-40w (16)	100%	100%	100%	91%	81%	69%	44%	0%

Table 3 The rate of recognition in the normal gastrointestinal (GI) tract at different gestational ages in fetuses using 2D-GRE (FLASH, TR/TE/FA=137/40/90) reported by Saguintaah et al.¹³

Weeks of gestation (n=36)	Rectum	Sigmoid colon	Descending colon	Transverse colon	Ascending colon	Distal ileum	Proximal ileum	Jejunum
19-24w	100%	100%	25%	0%	0%	58.6%	55.1%	34.4%
25-31w	100%	100%	76.1%	57.1%	57.1%			
32-40w	100%	100%	100%	96%	90%	40%	40%	0%

**Fig.2** Normal appearance of meconium-based three-dimensional MR colonography (3D-MMRC) in fetuses at 28(a), 33(b), 36(c), and 40(d) weeks gestational age.

- a : Meconium-like high signal intensity is distributed over the entire bowel from the jejunum to the rectum.
- b : High signal intensity in the small intestine has decreased. That in the colon has increased, but a little in the rectum. Note the high signal in the umbilical vein due to in-flow effect (arrow).
- c : Meconium accumulates chiefly in the entire colon and rectum. Small areas of meconium in the distal ileum are visible superimposed on the ascending colon.
- d : The diameter of the colon has increased. Meconium accumulates in the left colon and the rectum.
- Note that the liver shows faint signal intensity in all images.

れ⁹⁻¹¹⁾、高速撮像法の発展と積極的な臨床応用に伴って、90年代後半から急速に増えてきている。対象とされる臓器は中枢神経系が主であったが、徐々に胸部や腹部といった他領域へと拡大している^{2,12)}。撮像シーケンスでは、T2WI系列の高速撮像法から、ここ数年はT1WI、fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR) 画像、拡散強調画像といったT2WI系列以外のシーケンスへと広がっている^{13,14)}。

胎児腸管のMRI診断についても報告が増えており、T2WIで高信号を呈する腸管内容(主に嚥下された羊水)とT1WIで高信号を呈する胎便の両者を併せて評価することが重要といわれている^{1,3,5,15,16)}。胎便がT1WIにて高信号を呈する理由としては、その高蛋白濃度や含有する常磁性体金属(鉄、銅、マンガン)によるともいわれている¹⁾、正確なところは現在も不明である⁴⁾。

胎児腸管MRIの正常像を理解するには、胎児腸管の発達に伴う生理学的な知識が必要である。胎生初期(1~13週)に胎児腸管は形態的な発達があり、次いで、蠕動運動、吸収・分泌といった機能的な発達が胎生中期(14~26週)にみられる¹⁾。胎便は13週を過ぎると腸管内に認められるようになり、小腸から結腸、直腸へとゆっくり移動が始まる¹⁾。20週になると、肛門括約筋が収縮し、肛門管が閉じるため、胎便が大腸内に蓄積されていく¹⁾。小腸は当初胎便を含んでいるが、嚥下した羊水によって次第に満たされていく¹⁾。このように、胎便の分布は胎児週数によって変化することがいわれており、Saguintaahらは胎児MRI T2WI、T1WIそれぞれで週数別に腸管内容の信号強度を評価している¹⁾。Saguintaahらの報告した2D-GRE法での描出率(Table 3)とわれわれの3D-GRE法(VIBE法)の結果(Table 2)を比較すると、①直腸およびS状結腸では、両者とも描出率は100%であり、同等であった。②下行結腸、横行結腸および上行結腸では、週数の早い19~24週および25~31週において3D-GRE法の方が描出率が高値であった。逆に32~40週では2D-GRE法の方が描出率はやや高値か、ほぼ同等であった。③遠位回腸、近位回腸および空腸での描出率は、同等か3D-GRE法の方が高値であった。特に19~24週および25~31週での遠位回腸および近位回腸において差が

みられた。

以上の比較検討により、われわれの3D-GRE法(VIBE法)を用いた胎児腸管の描出は、2D-GRE法による過去の報告と比較し、良好である可能性が推測された。その原因のひとつとして、まず高いSNRが考えられる。特に32週前の下行結腸から上行結腸において描出率の差が認められたが、これは胎便の濃度が比較的低いためではないかと推論している。Saguintaahらは早い週数では胎便が結腸内に十分蓄積されていないために描出率が低くなると推測しているが¹⁾、このような状況でも3D-GRE法では高いSNRにより、良好な描出率が得られたと推察される。今回の基礎実験においても、胎便濃度20%以上においては、3D-GRE法の方が2D-GRE法に比してSNRは高く、この推察を支持する結果と思われる。もうひとつの原因としては、優れた空間分解能が挙げられる。32週前の胎児においては、小腸の径が非常に細く、その認識は結腸に比べると容易ではないことも多いが、3D-GRE法で得られる高分解能画像では比較的認識しやすく、かつ3D-MMRCも併用すると、より腸管の分布が把握しやすい。以上をまとめると、3D-GRE法(VIBE法)は2D-GRE法と比較し、SNRが高く、かつ空間分解能も高いために、良好な腸管描出能が得られると考えることができる。

胎児MRI T1WIの3D-GRE法での撮像に関しては、Sasakiらが報告している¹⁷⁾。3Dシーケンスは、2Dシーケンスに比べて空間分解能の高い画像が得られ、スライス間のgapがないため、良好な再構成画像が作成できる。一般に3Dシーケンスは撮像時間およびスライス枚数に制限があるが、VIBE法はthree-dimensional spoiled gradient-echo法を改良し、zero fillingおよび脂肪抑制法の高速化により高速撮像を可能にしたパルスシーケンスであり、空間分解能を低下させずに撮像時間を短縮することが可能となる。TRを非常に短く設定するため、T1値が非常に短いものの描出は良好であるが、T1値が比較的長いものは信号が十分に得られない。そのため、上腹部、乳腺、子宮等のガドリニウム造影ダイナミック検査や造影MR angiographyといった造影MRI検査に適しており、現在汎用されている。Rofskyら、およびKimらは上腹部領域において2D-GRE法と3D-GRE法

(VIBE法)とを比較検討し、3D-GRE法の方が高いSNR、CNR(contrast to noise ratio)が得られると報告している^{7,8)}。本検討においても、基礎実験、臨床例ともに3D-GRE法(VIBE法)の高い描出能が推測され、過去の報告に一致する結果が得られた。また胎便のT1値は十分に短いと推定されるが、胎便の濃度が20%以下に低下すると、2D-GRE法とのSNRの差がなくなった。これはT1値が長くなり、縦磁化の回復が遅くなるためと思われる。

3D-MMRC(Fig.2)は胎児腸管全体を3次元的に把握するのに有用であり、胎便の分布領域が容易に認識される。胎児の正常腹部FS-T1WIにおいて高信号を呈するのは胎便のみであるため、3次元画像の作成は比較的容易で、日常検査でMRIを撮像する放射線技師の負担も少ない。また右上腹部に肝臓が淡く描出されるため、位置関係を理解する目印となる。現時点では、胎児MRI T1WIを用いた3D colonographyについては、SasakiらとBruggerら(meconium-based colonography)の報告のみである^{5,17)}。

今後の展望としては、さらなるSNRおよび描出率の向上を目指して、撮像条件の改良を試みたい。さらに、腸管脱出や腸管閉鎖といった胎児異常腸管の診断においては、胎便を基にしたMRI T1WIとくに3D-GRE法を胎児MRI検査に組み込むことにより、よりの確な腸管評価が行えるようになると期待される。3D-MMRCに関しては、T2WIを基にした上部消化管の3次元画像と併せて表示することにより、胎児腸管全域の3次元的な評価に、また水腎水尿管症がある場合には、3D-MR urographyとの重ね合わせ表示により、総排泄腔奇形等の診断に応用できるかもしれない。いずれにおいても、胎児超音波検査に付加する情報が得られる可能性があり、今後、症例の蓄積が望まれる。

結 論

3D-GRE法(VIBE法)による胎児正常腸管の描出能は、2D-GRE法と比較し、小腸、結腸ともに良好であり、胎児腸管を評価する際のMRI撮像法として有用性が示唆された。

本論文の要旨は第42回日本医学小児放射線学会(2006、東京)で発表した。

●文献

- 1) Saguintaah M, Couture A, Veyrac C, et al : MRI of the fetal gastrointestinal tract. *Pediatr Radiol* 2002 ; 32 : 395-404.
- 2) Shinmoto H, Kashima K, Yuasa Y, et al : MR imaging of non-CNS fetal abnormalities : a pictorial essay. *Radiographics* 2000 ; 20 : 1227-1243.
- 3) Veyrac C, Couture A, Saguintaah M, et al : MRI of fetal GI tract abnormalities. *Abdom Imaging* 2004 ; 29 : 411-420.
- 4) Dialani V, Mehta T, Levine D : MR imaging of the fetal abdomen and pelvis. In : Levine D, ed. *Atlas of fetal MRI*. Florida, FL : Taylor & Francis, 2005, p113-138.
- 5) Brugger PC, Prayer D : Fetal abdominal magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol* 2006 ; 57 : 278-293.
- 6) Prayer D, Brugger PC, Prayer L : Fetal MRI : techniques and protocols. *Pediatr Radiol* 2004 ; 34 : 685-693.
- 7) Rofsky NM, Lee VS, Laub G, et al : Abdominal MR imaging with a volumetric interpolated breath-hold examination. *Radiology* 1999 ; 212 : 876-884.
- 8) Kim MJ, Mitchell DG, Ito K, et al : Hepatic MR imaging : comparison of 2D and 3D gradient echo techniques. *Abdom Imaging* 2001 ; 26 : 269-276.
- 9) Smith FW, MacLennan F, Abramovich DR, et al : NMR imaging in human pregnancy : a preliminary study. *Magn Reson Imaging* 1984 ; 2 : 57-64.
- 10) Weinreb JC, Lowe TW, Santos-Ramos R, et al : Magnetic resonance imaging in obstetric diagnosis. *Radiology* 1985 ; 154 : 157-161.
- 11) Weinreb JC, Lowe T, Cohen JM, et al : Human fetal anatomy : MR imaging. *Radiology* 1985 ; 157 : 715-720.
- 12) Coakley FV, Lopoo JB, Lu Y, et al : Normal and hypoplastic fetal lungs : volumetric assessment with prenatal single-shot rapid acquisition with relaxation enhancement MR imaging. *Radiology* 2000 ; 216 : 107-111.
- 13) Zizka J, Elias P, Hodik K, et al : Liver, meconium, haemorrhage : the value of T1-weighted images in fetal MRI. *Pediatr Radiol* 2006 ; 36 : 792-801.
- 14) Brugger PC, Stuhr F, Lindner C, et al : Methods of fetal MR : beyond T2-weighted imaging. *Eur J Radiol* 2006 ; 57 : 172-181.
- 15) Farhataziz N, Engels JE, Ramus RM, et al : Fetal MRI of urine and meconium by gestational age for the diagnosis of genitourinary and gastrointestinal abnormalities. *AJR Am J Roentgenol* 2005 ; 184 : 1891-1897.
- 16) Shinmoto H, Kuribayashi S : MRI of fetal abdominal abnormalities. *Abdom Imaging* 2003 ; 28 : 877-886.
- 17) Sasaki Y, Miyamoto T, Hidaka Y, et al : Three-dimensional magnetic resonance imaging after ultrasonography for assessment of fetal gastro-schisis. *Magn Reson Imaging* 2006 ; 24 : 201-203.