

**技 術**

radial scan 法による非心電図同期頸動脈血管壁  
イメージング

中村麻名美\* 真壁 武司\* 宇野 弘幸\*  
丹羽 潤\*\* 古明地孝宏\*\* 對馬 州一\*\*  
福田 友美\*\*\* 坂田 元道\*\*\*\*

Non-gated vessel wall imaging at internal carotid artery  
using radial scan method

Manami NAKAMURA, Takeshi MAKABE, Hiroyuki UNO  
Jun NIWA, Takahiro KOMEICHI, Syuichi TSUSHIMA  
Tomomi FUKUDA, Motomichi SAKATA

**Key words :** radial scan — vessel wall imaging —  
flow void effect — carotid stenosis — 3.0tesla MRI

はじめに

頸動脈分岐部では、解剖学的形態から血行力学的負荷を有するため、動脈硬化が促進し粥腫病変（プラーク）が生じやすい<sup>1, 2)</sup>。この頸動脈におけるプラークが破綻すると、血管内腔の狭窄や閉塞を引き起こす塞栓源となり、脳梗塞や一過性脳虚血発作の脳血管障害をきたす原因となる。プラークの破綻はプラークの性状に大きく関与するため、無侵襲で再現性のある magnetic resonance imaging (MRI) を使用した頸動脈プラーク性状評価が現在広く用いられている<sup>3-8)</sup>。従来行われていた double inversion recovery (DIR) 法は、血管壁の拍動や血管内腔の血流による信号強度を抑制するため、心電図同期を併用している。しかし、repetition time (TR) が変動してプラークや筋肉などの固定組織の信号強度が不安定となり、プラークの性状評価を行うには問題がある<sup>9, 10)</sup>。

radial scan 法は、従来の cartesian 法と k-space 充填法が異なり、モーションアーチファクトが改善され、非同期で頸動脈拍動によるアーチファクト抑制が期待できる。頸動脈血管壁イメージングでは、プラークと血管内腔のコントラストを高くするため、血管内腔の信号強

度を低下させることが重要となる<sup>11-14)</sup>。寺内ら<sup>15)</sup>によると、radial scan 法は、フローアーチファクトを360度方向に分散させることができフローアーチファクトを抑制することが可能であるとの報告をしており、線維性被膜やプラークが明瞭に描出できる可能性がある。しかし、小倉ら<sup>16)</sup>による位相分散 (dephase) 効果が少ない fast spin echo (FSE) 法の初期の echo が k-space 中心に集まるため flow void 効果が低下するという報告や、後藤ら<sup>17)</sup>による spin echo (SE) 法や FSE 法では flow void として描出できない低流速があるという報告から、非心電図同期で施行する radial scan 法では、血管内腔が flow void とならないことが予想される。

本研究では、頸動脈プラーク評価を目的とした血管壁イメージングにおいて、3.0T 装置による radial scan 法を使用したとき、流速と血管内腔信号強度の関係を明らかにし、高磁場である3.0Tにおける頸動脈血管壁イメージングの有用性を報告する。

1. 方 法

1-1. 使用機器及び撮像条件

使用機器は1.5TMRI 装置 (MAGNETOM Symphony, SIEMENS, Erlangen, Germany), 装置付属の circular polarized (CP) 型 Head コイルを使用し, 3.0TMRI 装置 (MAGNETOM Skyra, SIEMENS, Erlangen, Germany), 装置付属の phased array 型 20ch Head

\*市立函館病院 中央放射線部  
\*\*市立函館病院 脳神経外科  
\*\*\*市立函館病院 中央検査部  
\*\*\*\*北海道大学大学院保健科学研究所

Neck コイルを用いた。検討で使用した1.5Tにおける radial scan 法の撮像条件は以下の通りである。T<sub>1</sub> weighted image (T<sub>1</sub>WI) では、TR 500ms, echo time (TE) 32ms, phase oversampling (OS) 100%, coverage 166.7%, bandwidth (BW) 355Hz/pixel, echo train length (ETL) 9, field of view (FOV) 180mm, matrix 256×256, であり、T<sub>2</sub> weighted image (T<sub>2</sub>WI) では、TR 2200ms, TE 109ms, OS 100%, coverage 150.6%, BW 355Hz/pixel, ETL 33, FOV 180mm, matrix 256×256, 縦磁化強制回復パルスである fast recovery (FR) パルスを印加した。撮像時間は T<sub>1</sub>WI : 3分2秒, T<sub>2</sub>WI : 3分24秒でスライス枚数 11枚, 横断像を得た。また、DIR 法の撮像条件は、T<sub>1</sub>WI では、TR 1R-R 間隔, TE 32ms, OS 100%, BW 355Hz/pixel, ETL 9, FOV 180mm, matrix 256×256, であり、T<sub>2</sub>WI では、TR 2R-R 間隔, TE 109ms, OS 100%, BW 355Hz/pixel, ETL 33, FOV 180mm, matrix 256×256, FR パルスを印加した。撮像時間は T<sub>1</sub>WI, T<sub>2</sub>WI ともに心拍数に依存し、1 スライス当たりの撮像時間は 1分30秒から 2分, 横断像を得た。

3.0T における radial scan 法の撮像条件は、T<sub>1</sub>WI では、TR 500ms, TE 32ms, OS 50%, coverage 150%, BW 355Hz/pixel, ETL 9, FOV 180mm, matrix 256×256, であり、T<sub>2</sub>WI では、TR 3500ms, TE 97ms, OS 50%, coverage 123.8%, BW 349Hz/pixel, ETL 29, FOV 180mm, matrix 256×256, FR パルスを印加した。撮像時間は T<sub>1</sub>WI : 2分35秒, T<sub>2</sub>WI : 1分35秒でスライス枚数 11枚, 横断像を得た。なお、すべてのシーケンスは、スライスの上下に presaturation pulse を印加し、スライス厚を 3.5mm とした。

超音波装置 (SSD- $\alpha$  10, 日立アロカメディカル, 三鷹, 日本) は、装置付属のリニアプローブを使用し、パルスドプラ法にて内頸動脈の流速測定を行った。また、狭窄率は、computed tomography (CT) 装置 (Brilliance 64, Philips, Amsterdam, Holanda) を使用し撮像した画像を ziostation (ザイオソフト株式会社, 東京, 日本) にて、North American Symptomatic Carotid Endarterectomy trial (NASCET) 法<sup>18)</sup> に基づき狭窄率を測定し、狭窄率が 0~29% を軽度狭窄, 30~69% を中等度狭窄, 70~99% を高度狭窄とした。

### 1-2. 対象症例

対象症例は、当院倫理規定に則り研究計画および倫理内容を確定した上で、研究内容を十分に説明し、同意を得た頸動脈狭窄症の患者34症例 (A 群: 59歳から88歳, 平均72.9歳, 男性17名, 左右比 5 : 12, B 群: 58歳から87歳, 平均72.5歳, 男性15名, 女性 2 名, 左右比 5 :

12) とした。すべての症例は内頸動脈に狭窄があり、平均狭窄率は A 群で 56.9% (軽度狭窄 1 例, 中等度狭窄 12 例, 高度狭窄 4 例), B 群で 67.5% (軽度狭窄 2 例, 中等度狭窄 7 例, 高度狭窄 8 例) であった。また、A 群においては、保存的治療 11 例, carotid artery stenting (CAS) 6 例, B 群においては、保存的治療 8 例, CAS 8 例, carotid endarterectomy (CEA) 1 例であった。A 群は 1.5T 装置を用いた DIR 法にて T<sub>1</sub>WI, T<sub>2</sub>WI を撮像, B 群は 3.0T 装置を用い radial scan 法にて T<sub>1</sub>WI, T<sub>2</sub>WI を撮像した。

### 1-3. 臨床患者における血管内腔信号強度の検討

対象症例における A 群と B 群の得られた画像において、それぞれ内頸動脈の狭窄部位における血管内腔の信号強度を計測した。A 群における血管内腔の信号強度を DIR 法と radial scan 法にて比較し t 検定にて有意差検定を行った。さらに radial scan 法を使用したときの 1.5T と 3.0T を比較するため、A 群と B 群の血管内腔の信号強度を測定し、Welch 検定にて有意差検定を行った。また、B 群における超音波検査にて内頸動脈の流速の測定を行った 7 症例について、peak systolic velocity, (PSV) : 収縮期最高血流速度と血管内腔信号強度の比較を行った。

## 2. 結 果

A 群において、1.5T 装置を用いたときの血管内腔信号強度の比較では、DIR 法による T<sub>1</sub>WI では 123.36 ± 67.06, T<sub>2</sub>WI では 94.43 ± 45.15, radial scan 法による T<sub>1</sub>WI では 36.37 ± 16.88, T<sub>2</sub>WI では 44.77 ± 15.64 となり、T<sub>1</sub>WI, T<sub>2</sub>WI ともに radial scan 法で有意に低くなった (p < 0.05) (figure 1)。また、A, B 群における radial scan 法による血管内腔信号強度の比較では、1.5T 装置による T<sub>1</sub>WI では 41.76 ± 21.73, T<sub>2</sub>WI では 36.37 ± 14.61, 3.0T 装置による T<sub>1</sub>WI では 28.73 ± 11.94,

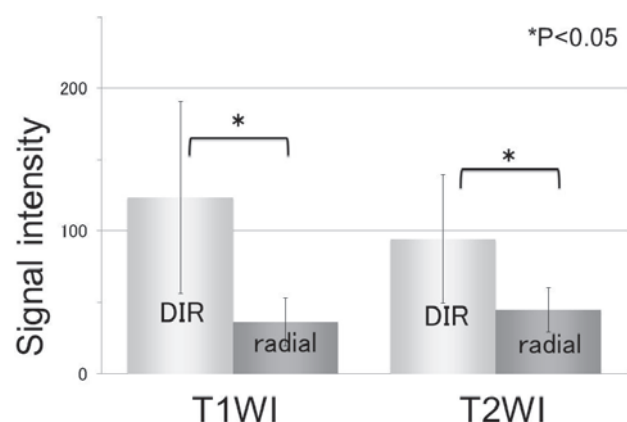


figure 1 DIR 法と radial scan 法における血管内腔信号強度の比較

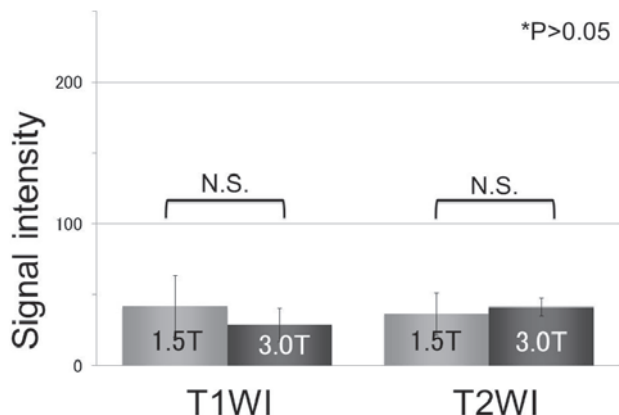


figure 2 radial scan 法における1.5Tと3.0Tの血管内腔信号強度の比較

table 頸動脈における健側部と狭窄部の血流速と血管内腔の信号強度の比較

		(n=7)	
		健側部	狭窄部
血流速 (cm/s)		109.44 ± 99.42	135.73 ± 103.24
		N.S. (P=0.49)	
信号強度	T1WI	34.84 ± 17.17	23.15 ± 12.91
			N.S. (P=0.17)
信号強度	T2WI	42.41 ± 4.22	34.51 ± 17.17
			N.S. (P=0.61)

T<sub>2</sub>WIでは41.15 ± 6.49となり、T<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WIともに有意差は認められなかった (p>0.05) (figure 2)。

また、B群7症例における超音波を用いた内頸動脈における平均PSVは、狭窄部で135.73 ± 103.24cm/sec、健側部で109.44 ± 99.42cm/secとなり、内頸動脈における血管内腔信号強度は狭窄部でT<sub>1</sub>WI 23.15 ± 12.91、T<sub>2</sub>WI 34.51 ± 17.17、健側部でT<sub>1</sub>WI 34.84 ± 17.17、T<sub>2</sub>WI 42.41 ± 4.22となった (table)。

### 3. 考 察

MRIによる頸動脈血管壁イメージングでは、血管内腔の信号強度を低下させ、プラークとのコントラストを高くする必要があります。radial scan 法では血流抑制パルスを使用しないため、流速が遅くなると血管内腔の信号強度が高くなり<sup>19)</sup>、偽プラークとなる可能性がある。臨床画像において、radial scan 法にて血管壁イメージングを行うと、頸静脈の血管内腔の血流信号が上昇していることがある (figure 3)。頸動脈においても流速が遅くなると、血流信号が上昇する可能性があるため、臨床患者における頸動脈血管内腔の信号強度を計測しDIR法と同等となるかを検討した。1.5T装置を使用したとき、DIR法よりもradial scan 法を使用し血管内腔の信号強度がT<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WIともに低くなった。DIR法では、心電図同期を併用し、R-R間隔にてRFパルスを印加する。これは、心臓の拡張期でデータを収集する

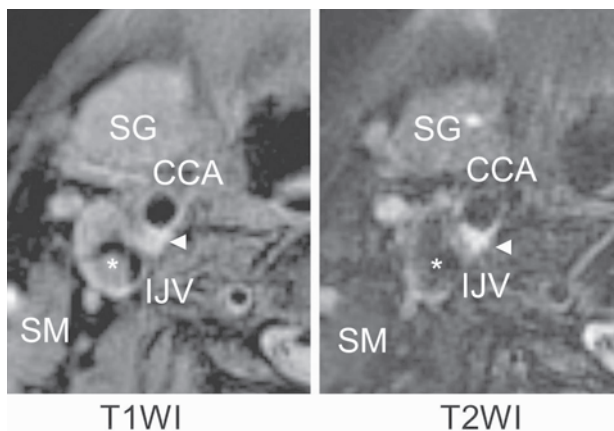


figure 3 臨床画像

- CCA : common carotid artery
- IJV : internal jugular vein
- SG : submandibular gland
- SM : sternocleidomastoid muscle
- \* : carotid plaque
- ▲ : pseudo plaque

ためであるが、心拍が不安定になると流入する血流の信号抑制が不十分となるだけでなく、心電図同期不良によるモーションアーチファクトが原因となり血管内腔の信号強度が上昇した可能性がある。頸動脈の流速領域においてradial scan 法を使用した場合、十分な血管内腔信号強度低下となることでプラークと血管内腔のコントラストが保たれるため、血管壁イメージングとして有用である。

静磁場強度や撮像条件の違いは信号強度に影響を与える。radial scan 法を使用したときのflow void効果は1.5T装置と3.0T装置にて差異があるかどうか臨床患者における血管内腔の信号強度を測定し比較した。1.5Tと3.0Tの頸動脈血管壁イメージングにおけるflow void効果は、T<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WIともに有意差はなかった。3.0T装置では、静磁場が高くなることによりT1値が延長しコントラストが変化することが知られている<sup>20, 21)</sup>、高磁場における頸動脈血管内腔の信号強度低下に変化はなく1.5Tと同等の血管内腔の信号強度低下となった。

超音波による頸動脈の評価において、健常者におけるPSVは、29~39歳で72 ± 18cm/s、40~59歳で65 ± 10cm/s、60~85歳で58 ± 11cm/sとなっている<sup>22)</sup>。内頸動脈起始部狭窄の診断にはPSVの明らかな上昇が有用であり、PSV ≥ 200cm/secでNASCET狭窄 ≥ 70%以上の内頸動脈狭窄を示唆しているとの報告もある<sup>23)</sup>。3.0Tにて撮像した症例のうち7症例にて、内頸動脈における狭窄部と健側部での血流速度と血管内腔信号強度の比較を行った。平均PSVは健側部よりも狭窄部で高く、血管内腔信号強度は健側部よりも狭窄部で低くなる結果となった。内頸動脈における狭窄部の血管内腔信号強度が

健側部に比べ低くなるのは、狭窄部で血流速度が上昇することで、さらに flow void となっているためである。今回の症例においては、健側部における血管内腔信号強度の上昇もわずかであり、頸動脈血管壁イメージングとしては問題ない。これは、高度狭窄を伴わない血管壁イメージングへの有用性も示唆される。

以上の結果から、radial scan 法では、DIR 法同様、十分な血管内腔の信号強度低下となった。しかし、dephase に影響する k-space 充填のタイミングや撮像条件により flow void 効果が十分とならない可能性もある。実際の臨床では拍動流であるため、拡張末期血流速度も考慮しなければならない。さらに3.0T においては、高分解能・高 SNR の短時間撮像が可能であり、プラーク評価に有用となる可能性がある。しかし、高磁場の影響による T1 値の延長により血液信号強度やプラーク自体の信号強度にも影響を与える可能性もあり、今後の検討を要する。

#### 4. ま と め

radial scan 法を用いた頸動脈血管壁イメージングでは、DIR 法よりも血管内腔の信号強度が低下した。さらに3.0T radial scan 法においても1.5T radial scan 法と同様に血管内腔の信号強度が十分に低下した。radial scan 法では、頸動脈領域の流速領域においてプラークと血管壁のコントラストが高くなることが予想され、頸動脈血管壁イメージングに有用となる可能性がある。

#### 文 献

- 1) 羽尾裕之, 廣田誠一, 松田育男, 他: 頸動脈プラークの病理組織学的特徴. 日独医, 2008; 58: 174-183.
- 2) Golledge J, Greenhalgh RM, et al.: The Symptomatic carotid plaque. Stroke, 2000; 31: 774-781.
- 3) Yuan C, Mitsumori LM, Ferguson MS, et al.: In vivo Accuracy of multispectral magnetic resonance imaging for identifying lipid-rich necrotic cores and intraplaque hemorrhage in advanced human carotid plaques. Circulation, 2001; 104(17): 2051-2056.
- 4) Yamada N, Higashi M, Otsubo R, et al.: Association between signal hyperintensity on T1-weighted MR imaging of carotid plaques and ipsilateral ischemic events. AJNR Am J Neuroradiol, 2007; 28: 287-292.
- 5) Watanabe Y, Nagayama M, Suga T, et al.: Characterization of atherosclerotic plaque of carotid arteries with histopathological correlation: Vascular wall MR imaging vs. color Doppler ultrasonography [US]. J Magn Reson Imaging, 2008; 28(2): 478-485.
- 6) Yoshida K, Narumi O, Chin M, et al.: Characterization of carotid atherosclerosis and detection of soft plaque with use of black-blood MR imaging. AJNR, 2008; 29: 868-874.
- 7) 山田直明, 東将浩, 長束一行, 他: MRI による不安定プラークの描出の現状について. - 頸動脈を中心に - 脈管学, 2006; 46: 523-529.
- 8) 渡邊佑司, 永山雅子, 他: 頸動脈プラークの MR イメージング. 脈管学, 2010; 51(1): 89-94.
- 9) Narumi S, Sasaki M, Ohba H, et al.: Altered carotid plaque signal among different repetition times on T1-weighted magnetic resonance plaque imaging with self-navigated radial-scan technique. Neuroradiology, 2009; 28: 285-290.
- 10) Saito A, Sasaki M, Ogasawara K, et al.: Carotid plaque signal differences among four kinds of T1-weighted magnetic resonance imaging techniques: A histopathological correlation study. Neuroradiology, 2012; Nov. 54(11): 1187-1194.
- 11) 中孝文, 佐々木雄哉, 川口征悟, 他: 2D SE 系シーケンスを用いた頸動脈プラーク検査における T<sub>1</sub>WI 撮像条件の検討. 日放技学誌, 2012; 68(1): 85-94.
- 12) 浦田哲弥, 山本英孝, 生田尚明, 他: 頸動脈プラーク MRI における 3D-TSE 法 (SPASE 法) の有用性. 日放技学誌, 2012; 68(7): 871-879.
- 13) 井上裕二, 米山正己, 中村理宣, 他: Inversion Recovery 併用 T<sub>1</sub>強調 -3D Variable refocus flip angle turbo spin echo (SPACE) black-blood imaging の頸動脈プラーク検査への応用. 日放技学誌, 2012; 68(7): 880-888.
- 14) Yoneyama M, Nakamura M, Tabuchi T, et al.: Optimization of 3D-variable refocusing flip angle RARE imaging for high resolution volumetric black-blood angiography. Radiol Phys Technol, 2012; 5: 270-276.
- 15) 寺内香澄, 上山毅, 福西康修: Radial scan 法のフローアーチファクト抑制効果について. 日放技学誌, 2011; 68(5): 554-562.
- 16) 小倉明夫, 前田富美恵, 佐伯文人, 他: BLADE 画像の k-space trajectory が画像特性に及ぼす影響. 日磁医誌, 2009; 29(1): 12-19.
- 17) 後藤政実, 青木茂樹, 林直人, 他: 頭部血管における閉塞と低流速の識別における PROPELLER DWI の有用性. 日放技学誌, 2004; 60(11): 1519-1525.

- 18) Ferguson GG, Eliasziw M, Barr HW, et al. : The North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial : surgical results in 1415 patients. *Stroke*, 1999 ; 30 : 1751-1758.
- 19) Ray HH, William GB, Christopher JL, et al. : MRI の基本 パワーテキスト第2版. メディカルサイエンスインターナショナル, 東京, 2006 : 306-323.
- 20) Al-Kwif O, Emery DJ, Wilman AH, at al. : Vessel contrast at three Tesla in time-of-flight magnetic resonance angiography of the intracranial and carotid arteries. *Magn Reson Imaging*, 2002 ; 20(2) : 181-187.
- 21) de Bazelaore CM, Duhamel GD, Rofsky NM, et al. : MR imaging relaxation times of abdominal and pelvic tissues measured in vivo at 3.0T : preliminary results. *Radiology*, 2004 ; 203(3) : 652-659.
- 22) 松本昌泰, 長東一行, 堤由紀子, 他 : 頸部血管超音波検査ガイドライン. *Neurosonology*, 2006 ; 19(2) : 46-67.
- 23) Koga M, Kimura K, Minematsu K, at al. : Diagnosis of Internal Carotid Artery Stenosis Greater than 70% with Power Doppler Duplex Sonography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2001 ; 22 : 413-417.