臨床技術

論文受付
2013年8月21日

論文受理
2014年5月17日

Code No. 261

3.0 T MRI を用いた頸椎椎間孔部神経根描出における 三次元収集撮像シーケンスの比較

宍戸博紀¹ 高島弘幸¹ 竹林庸雄² 赤塚吉紘¹
今村 壘¹ 長濱宏史¹ 白勢竜二¹

¹ 札幌医科大学附属病院放射線部

² 札幌医科大学医学部整形外科学講座

緒言

頸椎症は単純 X 線写真で椎体骨の扁平化、骨棘形成、硬化、椎体間の狭小化の所見がみられた場合の診断は確定的であるが、椎間板の後方突出、くも膜下腔の狭小化や消失、脊髄や神経根の圧迫の状態および変形は magnetic resonance imaging (MRI) 検査が有用である。特に椎間孔部の骨棘、椎間板ヘルニアによる神経圧迫では強い症状となる例や、ほかの神経筋疾患との鑑別が困難な例があり、同定に正確さと迅速さが要求される¹⁾。

頸椎椎間板ヘルニアや頸椎症性神経根症は、理学所

見および画像診断によって、責任高位を同定している¹⁾が、X 線写真や computed tomography (CT)、CT ミエログラフィ (CT myelography: CTM) では、責任高位における神経根と圧迫因子を同定することが困難であり、MRI はこれらの画像診断法として広く用いられている。MRI においても、通常撮像されている二次元撮像 (2-dimensional: 2D) 法では、スライス厚が三次元撮像 (3-dimensional: 3D) 法と比べ厚くスライス間でのギャップが必要で、神経根の圧迫所見をとらえることが困難な場合²⁾があり、3D 法による詳細な撮像法の確立が望まれる。これまで MRI による椎間孔部神経根描出に関する報告^{2, 3)}がある

Visualization of the Foramen Intervertebral Nerve Root of Cervical Spine with 3.0 Tesla Magnetic Resonance Imaging: A Comparison of Three-dimensional Acquisition Techniques

Hiroki Shishido,^{1*} Hiroyuki Takashima,¹ Tsuneo Takebayashi,² Yoshihiro Akatsuka,¹ Rui Imamura,¹ Hiroshi Nagahama,¹ and Ryuzi Shirase¹

¹Division of Radiology and Nuclear Medicine, Sapporo Medical University Hospital

²Department of Orthopaedic Surgery, Sapporo Medical University School of Medicine

Received August 21, 2013; Revision accepted May 17, 2014

Code No. 261

Summary

Identification of the compression factor in cervical disc herniation and cervical spondylotic radiiculopathy is often problematic when using two-dimensional magnetic resonance imaging (MRI). This prompted us to compare and examined three-dimensional sequences, coherent oscillatory state acquisition for the manipulation of image contrast (COSMIC), fast imaging employing steady state acquisition (FIESTA) and T₂ star weighted MR angiography (SWAN) with 3.0-Tesla (T) MRI to visualize the foramen intervertebral nerve root for the cervical spine. Fat-suppressed COSMIC (FS-COSMIC) sequence gave the highest signal intensity ratio (1.85±0.06) of the nerve root and vertebral arch. A significant difference in signal intensity ratio of the nerve root was found between FS-COSMIC and FIESTA sequences. No significant difference was found between the FS-COSMIC and FIESTA sequences in the cerebrospinal fluid and the spinal cord. The FS-COSMIC sequence proved to be the most suitable sequence for intra and extra dura matter.

Key words: balanced sequence, coherent oscillatory state acquisition for the manipulation of image contrast (COSMIC), nerve root, 3.0 Tesla (T)

*Proceeding author

Table 1 Imaging parameters for FIESTA, COSMIC, fat-suppressed (spec-IR) COSMIC and SWAN

Parameter	COSMIC	FS-COSMIC	FIESTA	SWAN
Slice orientation		axial		
TR/TE (ms)	6.4/3.1	6.4/3.1	5.6/2.1	40/24
Flip angle (°)	45	45	30	30
Fat suppression	—	spec IR	—	—
k-space sampling	Radial fan beam centric and elliptical centric		centric	centric
Thickness (mm)		1.0		
FOV (cm)		10		
Matrix		192×192		
Spatial resolution		0.625×0.625		
NEX		1		
Time (min: s)	4:12	4:28	4:54	8:28

が、頸椎における3D撮像シーケンスの比較を行った報告は少ない。

本研究の目的は、balanced sequence法の一つで、3D収集が可能なcoherent oscillatory state acquisition for the manipulation of image contrast(COSMIC)、fast imaging employing steady state acquisition(FIESTA)、T₂ star weighted MR angiography(SWAN)を用いた椎間孔部神経根の描出について比較検討することである。

1. 使用機器と評価方法

本研究は、本大学の倫理委員会の承認を得て、すべての被検者から書面でのインフォームドコンセントを得て行われた。また、非連結匿名化を行い、個人情報の保護に配慮した。

対象は、頸椎疾患のない健常ボランティア10名(平均36.3歳、幅:26~35歳)である。使用装置は、GE社製Signa HDxt 3.0 Tで、コイルは8 channel CTL phased array coil、画像解析にはGE社製Advantage Workstation version 4.4(AW)を用いた。COSMIC、脂肪抑制併用COSMIC(fat-suppressed COSMIC: FS-COSMIC)、FIESTA、SWANの4種のシーケンスをマトリックス:192×192、撮像範囲(field of view: FOV):10 cm、スライス厚:1.0 mmを一定とし、第4、5椎間板腔に並行に第3頸椎から第6頸椎までの3椎間板を含めた軸位断像を撮像した。なお、本検討ではFOVが10 cmであるが、位相方向からの折り返しアーチファクトは、コイルの感度が到達しない腹背方向として肩方向からの折り返しアーチファクトを抑制した。また、array coilを用いた撮像であるが、パラレル撮像は使用不可であるため、パラレル撮像は行っていない。撮像条件をTable 1に示す。なお、撮像日時は統一被験者においてはすべてのシーケンスを続けて撮像し、array coilによる位置依

存性はない。

FIESTAを用いたシーケンスはこれまでに、腰椎神経根および総胆管腫瘍、胸部大動脈瘤、深部静脈血栓症、腎動脈狭窄症、膝窩動脈狭窄症において、病態描出などの有用性にて報告⁴⁻⁶⁾があるbalanced sequenceであり、T₂強調画像の代用として用いられ、水成分やcystなど、T₂値が長いものや脂肪が高信号となる。

COSMICはFIESTAをベースとしたシーケンスである。FIESTAのように定常状態のデータを使用する場合、T₂値とT₁値に近い水や血液は高信号となり、T₂値がT₁値に比べ小さい肝臓や筋肉は低信号となる。逆に移行期のデータを使用する場合は、後者は比較的高信号となる。COSMICはradial fan beam centricによるk-space充填方式を採用している⁷⁾。そのため縦磁化を安定させ定常状態になるのを抑え、有効に移行期データを収集するように工夫されている。この方式を用いることでT₂/T₁値の小さな組織のコントラストを改善することが可能とされている。

SWANは、3DのT₂ star強調像をベースとした高速グラディエントエコー法にマルチエコーの収集を組み合わせたパルスシーケンスである。微小出血や虚血などで起こる磁化率の変化を鋭敏に捉える。また、従来から行われている3D高速グラディエントエコー法でエコー時間(echo time: TE)を長めに設定したT₂ star強調像に比べても、短時間で高い信号強度比の画像を得られる。TEの異なる複数のデータを取得し、それらを加算平均することで最終的に1枚の画像として再構成を行っている。近年では、主に頭部領域に用いられ、その有用性が報告^{8,9)}されている。

1-1 脳脊髄液と脊髄のコントラスト比

得られた画像をAWに転送し、頸椎4/5椎間板腔中

Fig. 1 (a) ROI setting of cerebral spinal fluid and spinal cord
(b) Line profile setting of foramen intervertebral entrance

中央における軸位断面にて、脳脊髄液と脊髄に関心領域 (region of interest: ROI)を設定し、ROI内の信号値を計測した (Fig. 1a)。また、脳脊髄液は in-flow の影響を抑制するために ROI を二つ用いてその信号の平均値とした。そして、脳脊髄液と脊髄の contrast-to-noise ratio (CNR)を European Union (EU)提唱法¹⁰⁾による以下の式にて求めた。

$$CNR = [(Ms1 - Ms2) / (SDs1^2 + SDs2^2)]^{1/2}$$

$Ms1$, $SDs1$ はそれぞれ ROI 内における脳脊髄液の信号値と標準偏差とし、 $Ms2$, $SDs2$ はそれぞれ ROI 内における脊髄の信号値と標準偏差とした。ROI の大きさは脳脊髄液、脊髄でそれぞれ 14 ピクセル、22 ピクセルとした。

1-2 椎間孔部の神経根と椎弓の信号強度比

上記と同一断面にて、椎間孔部における神経根およびその周囲組織となる椎弓の信号値を line profile を用いて計測した (Fig. 1b)。Line profile は、神経根と周囲組織の信号値の 3 ピクセル分の平均値とし、それらの信号強度比を算出した。計算式を下記に示す。

$$\text{信号強度比} = \frac{\sum_{n=1}^3 Xn / 3}{\sum_{m=1}^3 Tm / 3}$$

n および m はそれぞれ line profile で得られた信号値とした。

1-3 視覚的評価

次に、得られた画像を用いて椎間孔入口部に対する経験年数 5, 8, 15 年の診療放射線技師 3 名による視覚評価を行った。観察者には、結果公表についての承諾

を得ている。視覚評価の評価対象として、1. 脳脊髄液と脊髄の描出能、2. 頸椎神経根描出能とした。また、有用性が多数報告されている FIESTA を基準とし、FIESTA よりも優れている (3 点)、同等 (2 点)、劣っている (1 点)、として評価した。視覚評価を行うにあたり、結果の偏りを防ぐため、観察者は無作為に同一画像を 2 回観察し、得られた結果の平均点を用いた。

1-4 統計学的処理

1-1, 1-2 の検討における CNR および信号強度比は、各シーケンス間で analysis of variance (ANOVA) を用いた有意差検定を行い、有意差が認められた場合、Dunnett 法による 2 群間比較を行った。1-3 の視覚的評価においては、Kruskal-Wallis 法による検定を行った。すべての有意差検定において、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。統計解析ソフトは SPSS Statistics (IBM) version 20 を用いた。

2. 結果

2-1 脳脊髄液と脊髄の CNR

各シーケンスにおける脳脊髄液と脊髄の CNR の結果を Fig. 2 に示す。また、それぞれのシーケンスで得られた画像を Fig. 3 に示す CNR は FIESTA, COSMIC, FS-COSMIC, SWAN の順に高く、平均値および標準偏差はそれぞれ 4.29 ± 0.05 , 3.92 ± 0.07 , 3.35 ± 0.10 , 0.77 ± 0.02 であった。SWAN を除いた FIESTA, COSMIC, FS-COSMIC では統計的有意差を認めなかった。

2-2 椎間孔部における神経根と椎弓の信号強度比

椎間孔部における神経根と椎弓の信号強度比の結果を Fig. 4 に示す。すべてのシーケンス間で有意差を認め、信号強度比は FS-COSMIC, COSMIC, FIESTA, SWAN の順に高く、平均値および標準偏差はそれぞれ

Fig. 2 Result of CNR of cerebral spinal fluid and spinal cord in a volunteer scan image.

1.85±0.06, 1.20±0.06, 0.57±0.04, 0.25±0.02 であった。

2-3 脳脊髄液と脊髄および椎間孔部における視覚的評価

各シーケンスにおける脳脊髄液と脊髄および椎間孔部における神経根の視覚的評価の結果を Table 2 に示す。脳脊髄液と脊髄では、FIESTA シーケンスと比較し、COSMIC, FS-COSMIC および SWAN のそれぞれのシーケンスの視覚評価は 1.3±0.6, 1.0±0 となり、FIESTA シーケンスがよく描出した。また、脂肪抑制の有無による結果にも変化は認められなかった。これらの結果における統計的有意差は認められなかった。椎間孔部における神経根と椎弓の視覚的評価では FIESTA シーケンスと比較し、COSMIC, FS-COSMIC および SWAN のそれぞれのシーケンスの視覚評価は 2.3±0.6, 2.7±0.6, 1.0±0 となり、脂肪抑制を追加した FS-COSMIC シーケンスが最もよく描出した。統計的有意差においては、SWAN で得られた視覚評価の結果が、すべての撮像シーケンスと有意差を認めたが、FIESTA, COSMIC, FS-COSMIC 間での有意差は認められなかった。

3. 考 察

頸椎症性神経根症は、急激な疼痛で発症する場合や慢性的な進行をきたす場合など多彩な臨床経過があり、診断および治療方針決定に関してもさまざまな報告がある¹¹⁾。さらに、診断に関しては、画像所見または症候学的な身体所見および理学所見のいずれかを重視するかは一定の見解が得られていない^{12~14)}。症候学的な

Fig. 3 Cervical spine images for each sequence.

The sequences were

- (a) COSMIC
- (b) FIESTA
- (c) FS-COSMIC
- (d) SWAN.

a	b
c	d

Fig. 4 Result for signal intensity ratio of foramen intervertebral entrance in a volunteer scan image. A significant difference in signal intensity ratio of nerve root was found all sequences.

身体所見は、多椎間神経根症や脊髄症の混合例や末梢の神経絞扼症候群との鑑別が困難な例があり、画像所見と合わせて診断されることが多い^{15~18)}。

椎間孔部神経根障害の画像診断はX線撮影、CTM, MRIなどを総合して行うことが多いが、神経根の描出は困難であると報告されている¹²⁾。また、脊髄病変の診断にはMRIが、椎間孔部の診断にはCTMが優れているが、CTMでは神経根の圧迫を直接所見として捉えることが困難であると報告¹⁹⁾されている。さらに、Goodmanらの報告²⁰⁾では、低磁場装置における神経根描出に関しては限界があるとされている。本検討では、これらの先行研究をもとに臨床で多く利用されている高

Table 2 Results of visual evaluation of each sequence image in a volunteer scan

	COSMIC	FS-COSMIC	SWAN
Visualization of spinal canal	1.3±0.6	1.3±0.6	1.0±0
Visualization of spinal nerve roots	2.3±0.6	2.7±0.6	1.0±0

Significant difference in the visual evaluation scores ($p=0.05$).

FS-COSMIC sequence has the highest score and SWAN sequence has the lowest score.

磁場臨床装置の 3.0 T MRI を用いた検討を行った。さらに、3.0 T MRI を用いた椎間孔部撮像における 3D シーケンスの比較に関しては、これまでに報告がない。

脳脊髄液と神経根の CNR では、FIESTA が最も高値を示した。FIESTA および COSMIC、FS-COSMIC は、balanced steady state free precession(b-SSFP)シーケンスであるため、 T_2/T_1 値が高い脳脊髄液は高信号となる。これらは脳脊髄液周囲の病変の評価に優れていると考えられるが、FIESTA および軟部組織のコントラストを改善させた COSMIC、FS-COSMIC との間に有意差は認められず、視覚評価の結果でも同様に有意差はなかった。したがって、これらのシーケンスはいずれも硬膜管内の病変検出に有用であることが示唆された。

T_2 star 強調画像の 3D 収集方法である SWAN は、長めの TE を設定することによって、磁化率強調シーケンスとして脳における微小出血の描出に適している²¹⁾。また、Ryan らは頸椎神経を描出する撮像シーケンスとして、 T_2 star weighted image が鮮明に描出されたと報告²²⁾している。さらに、3D 収集が可能なマルチエコーシーケンスが、当院の装置では SWAN のみであった。したがって、現状における 3D 撮像シーケンスで最も T_2 star に近いシーケンスとして SWAN を選択した。しかしながら、本検討では、FOV が 10 cm と小さいために、Ryan らが報告²²⁾した実効 TE である 17 ms から 24 ms と若干の延長があり、加算回数の増加に伴う撮像時間の延長などの要因によって、検討シーケンスの中で視覚評価 SNR、および CNR が有意に低い結果となり、本検討における神経根描出に関する有用性は認められなかったと考える。

椎間孔部における神経根と椎弓の信号強度比の結果では、FS-COSMIC および COSMIC の信号強度比が高値を示し、前述した CNR と異なる結果となった。COSMIC は、定常状態移行期のデータを k-space の中心に充填させるシーケンスであるために、組織の T_2/T_1 値の低い筋肉などの軟部組織の信号強度が FIESTA に比べて上昇する¹⁹⁾。したがって、水成分が乏しい椎間

孔部の神経根を評価することが可能になったと考える。

本検討では、COSMIC における脂肪抑制の有無での比較を行った。椎間孔部における神経根は、周囲に脂肪組織および脳脊髄液などの水組織が存在するが、その周囲が脂肪で囲まれているために、第 2 の化学シフトアーチファクト²³⁾が発生し、椎体周囲境界が低信号となり、COSMIC で得られた画像では、椎間孔内の神経根が細く描出されたように捉えられたと考える。視覚評価による結果では、統計的に有意差は認められなかったが、FS-COSMIC を用いた撮像方法は、脂肪抑制を付加しない撮像と比べ、アーチファクトを抑制し、神経根を描出するうえで臨床的にも有用であると考えられる。FS-COSMIC は良好に椎間孔部神経根を描出可能なシーケンスであり、前述した脳脊髄液と脊髄の CNR および視覚評価の結果でも FIESTA との有意差は認められなかった。したがって、脊柱管内および椎間孔内・外での評価が可能であると考えられる。さらに、3D 収集の利点を生かした薄いスライスの高ボリュームデータを取得することによって、診断および手術前のナビゲーションや治療計画に有用である。しかしながら、撮像枚数が最大で 60 枚と制限があるため、広範囲を観察することは不可能である。今後はパラレルイメージングを用いることができるコイルや、ソフトウェアおよびハードウェアの発展によって、これらの限界点が解決されることを期待する。

4. 結 語

3D シーケンスを用いて、椎間孔部神経根描出における比較、検討を行った。椎間孔部においては、脂肪抑制を付加した FS-COSMIC が最も信号強度比が高く、神経根走行が描出可能であり、頸椎神経根描出に有用なシーケンスであることが示唆された。

平成 22 年 38 回日本磁気共鳴医学会大会にて発表した。

参考文献

- 1) Shedid D, Benzel EC. Cervical spondylosis anatomy: pathophysiology and biomechanics. *Neurosurgery* 2007; 60(1 Suppl 1): S7-13.
- 2) 犬飼千景, 犬飼 崇, 松尾直樹, 他. 頸椎神経根診断における curved coronal MPR imaging の有用性. *脳神経外科* 2010; 38(3): 251-257.
- 3) Koga H, Oishi T. 3.0 T MR imaging of cervical nerve root in the intervertebral foramen. *Spinal Surgery* 2008; 22(2): 80-85.
- 4) 尾崎正則, 秦 博文, 杉山雄一郎, 他. 脂肪抑制 FIESTA の原理と臨床応用. *GE today 総集編* 2007; (2): 21-26.
- 5) Tanitame K, Tanitame N, Tani C, et al. Evaluation of lumbar nerve root compression using thin-slice thickness coronal magnetic resonance imaging: three-dimensional fat-suppressed multi-shot balanced non-steady-state free precession versus three-dimensional T1-weighted spoiled gradient-recalled echo. *Jpn J Radiol* 2011; 29(9): 623-629.
- 6) 釘宮慎次郎, 川崎久充, 金子景子, 他. 脊椎・脊髓領域における 3D-COSMIC の基礎的検討. *日放技学誌* 2012; 68(7): 865-870.
- 7) 天河卓也, 四戸 徹, 富永 聡, 他. 膝関節軟骨における脂肪抑制 three-dimensional coherent oscillatory state acquisition for the manipulation of image contrast (3D-COSMIC) シーケンスの基礎的検討. *日放技学誌* 2010; 66(9): 1221-1228.
- 8) Gupta RK, Tomar V, Awasthi R, et al. T2*-weighted MR angiography substantially increases the detection of hemorrhage in the wall of brain abscess: implications in clinical interpretation. *Neuroradiology* 2012; 54(6): 565-572.
- 9) Jing Z, Lang C, Chen-Yuan W, et al. Haemorrhagic shearing lesions associated with diffuse axonal injury: application of T2 star-weighted angiography sequence in the detection and clinical correlation. *Br J Neurosurg* 2011; 25(5): 596-605.
- 10) EEC Concerted Research Project. Identification and characterization of biological tissues by NMR. Concerted research project of the European Economic Community. IV. Protocols and test objects for the assessment of MRI equipment. *Magn Reson Imaging* 1998; 6(2): 195-199.
- 11) Boyce RH, Wang JC. Evaluation of neck pain, radiculopathy, and myelopathy: imaging, conservative treatment, and surgical indications. *Instr Course Lect* 2003; 52: 489-495.
- 12) Shah KC, Rajshekhar V. Reliability of diagnosis of soft cervical disc prolapse using Spurling's test. *Br J Neurosurg* 2004; 18(5): 480-483.
- 13) Sasso RC, Macadaeg K, Nordmann D, et al. Selective nerve root injections can predict surgical outcome for lumbar and cervical radiculopathy: comparison to magnetic resonance imaging. *J Spinal Disord Tech* 2005; 18(6): 471-478.
- 14) Roth C, Papanagiotou P, Krick C, et al. Imaging cervical myelo- and radiculopathy. *Radiologe* 2006; 46(11): 993-1000.
- 15) Abbed KM, Coumans JV. Cervical radiculopathy: pathophysiology, presentation, and clinical evaluation. *Neurosurgery* 2007; 60(1 Suppl 1): S28-34.
- 16) Kaiser MG. Multilevel cervical spondylosis. *Neurosurg Clin N Am* 2006; 17(3): 263-275.
- 17) Chang H, Park JB, Hwang JY, et al. Clinical analysis of cervical radiculopathy causing deltoid paralysis. *Eur Spine J* 2003; 12(5): 517-521.
- 18) Ozgur BM, Marshall LF. Atypical presentation of C-7 radiculopathy. *J Neurosurg* 2003; 99(2 Suppl): 169-171.
- 19) Serrano Castro PJ. Diagnosis of cervical spondylitis disease: an evidence based review. *Rev Neurol* 2001; 33(12): 1185-1193.
- 20) Goodman BS, Geffen JF, Mallempati S, et al. MRI images at a 45-degree angle through the cervical neural foramina: a technique for improved visualization. *Pain Physician* 2006; 9(4): 327-332.
- 21) Hu XY, Ge ZF, Zee CS, et al. Differentiation of white and red thrombus with magnetic resonance imaging: a phantom study. *Chin Med J* 2012; 125(11): 1889-1892.
- 22) Ryan AG, Morrissey BM, Newcombe RG, et al. Are T₁ weighted images helpful in MRI of cervical radiculopathy? *Br J Radiol* 2004; 77(915): 189-196.
- 23) Shriki JE, Surti KS, Farvid AF, et al. Chemical shift artifact on steady-state free precession cardiac magnetic resonance sequences as a result of lipomatous metaplasia: a novel finding in chronic myocardial infarctions. *Can J Cardiol* 2011; 27(5): 664.

問合先

〒060-8543 札幌市中央区南1条西16丁目291番地
札幌医科大学附属病院放射線部 宍戸博紀