

3D T₂-weighted turbo field echo (3D T₂ TFE) を用いた頸椎神経根描出能の検討

3D T₂-weighted turbo field echo (3D T₂ TFE) sequences for evaluation of cervical nerve roots

川上 浩二¹⁾, 橘川 薫²⁾, 木村 裕介²⁾, 米山 正己³⁾, 福地 博史¹⁾, 吉川 達生¹⁾

1) 聖マリアンナ医科大学病院画像センター
2) 聖マリアンナ医科大学放射線医学講座 (医師)
3) 株式会社フィリップスジャパン (臨床検査技師)

Key words: MRI, cervical spine, nerve root, neurography, 3D T₂ TFE

【Abstract】

Evaluation of cervical nerve root abnormalities using magnetic resonance imaging is less straightforward for cervical spondylosis than for spinal cord compression. For better visualization of cervical nerve roots, a three-dimensional T₂-weighted turbo field echo (3D T₂ TFE) sequence may be useful, due to the increased signal intensity of nerve bundles, as well as the rapid black blood imaging. In this study, 3D T₂ TFE and 3D T₂ volume isotropic turbo spin echo acquisition (3D T₂ VISTA) sequences were compared for visualization of nerve roots. Images from 10 volunteers were visually evaluated and statistically analyzed. The 3D T₂ TFE sequence was able to show nerve roots with a significantly higher signal than the surrounding structures. In statistical analysis, 3D T₂ TFE provided significantly higher nerve root visualization in C3-C7 vertebrae than did 3D T₂ VISTA. Concordance between observers was high. 3D T₂ TFE may be helpful in diagnosing nerve root compression in patients with cervical radiculopathy.

【要旨】

頸椎性神経根症において、MRIで神経根の走行や形態変化について詳細に評価した報告は少ない。3D T₂ TFE法は神経線維を高信号に描出可能な撮像法とされている。本研究では、3D T₂ TFE法と3D T₂ VISTA法で神経根描出能について検討を行った。10人のボランティア画像を視覚評価し、統計学的解析を行った。その結果、3D T₂ TFE法は周囲構造物と比較し神経根を高信号に描出可能であった。統計学的解析においても、3D T₂ TFE法は3D T₂ VISTA法と比較し第3～第7頸椎レベルで神経根描出能が高く、観察者間の一致率も高い結果であった。以上より、3D T₂ TFE法は頸椎神経根描出に有用である。

緒 言

頸椎性神経根症は、椎間板膨隆や鈎椎関節、椎間関節の骨棘などにより、椎間孔レベルで頸神経が圧迫されることで発症する。腰椎では脊柱管狭窄症や腰椎椎間板ヘルニアなどにおいて、神経根描出を目的としたMRI検査が行われ、圧迫を受けている神経根を同定することが可能であり診断の一助となっている。しかし、頸椎では椎間孔内神経根の走行や形態変化についてMRIを用いて詳細に評価した報告は少なく^{1)~5)}、通常のMRI撮像法では障害を受けている神経根を同定し、その責任病変を捉えることが困難な場合がある⁶⁾。その

要因として、椎間孔が腰椎に比べ解剖学的に小さい構造であること、体軸に対し斜め方向に存在することなどが挙げられる^{5), 7)}。頸椎性神経根症における画像診断では、外科的治療を選択する上で病変部の正確な同定が重要で、スライス厚が薄く、スライス間ギャップのない3次元撮像3-dimensional (3D)法が有利と考えられる⁶⁾。頸神経を描出する撮像方法として、3D-Volume Isotropic Turbo Spin Echo Acquisition (3D T₂ VISTA)法を用いた方法⁸⁾や、主に椎間孔外以遠の末梢神経描出を目的として、拡散強調画像やHigh-Resolution 3D Volumetric Nerve-Sheath Weighted RARE Imaging (3D SHINKEI)を用いたMR Neurographyが報告・臨床応用されている^{9)~13)}。前述の3D T₂ VISTA法は、基本的にT₂強調画像であるため脳脊髄液(CSF)・脂肪組織が高信号に、正常な神経根、変性椎間板や黄色靭帯が低信号に描出される撮像法で、2D T₂強調像と比較しCSFのflow artifactが少なく、脊柱管内神経根と椎間孔の描出が良好であったとの報告がある⁸⁾。しかし、椎間孔内神経根の描出能は2D法と比較し有意差がなかったとされ、頸椎性神経根症で重要とされる椎間孔内神経根

KAWAKAMI Koji¹⁾, KITSUKAWA Kaoru²⁾,
KIMURA Yusuke²⁾, YONEYAMA Masami³⁾,
FUKUCHI Hirofumi¹⁾, YOSHIKAWA Tatsuo¹⁾

- 1) Imaging Center, St. Marianna University School of Medicine Hospital
- 2) Department of Radiology, St. Marianna University School of Medicine
- 3) Philips Japan

Received March 7, 2021; accepted October 16, 2021

を観察するという点では難しい。脊髄から前根・後根、後根神経節、椎間孔外神経根にわたる広い範囲を連続して観察するためには、神経根周囲にある血管・CSF・脂肪組織の信号を抑制し、神経根自体を強調する撮像方法が効果的であるとされている¹⁰⁾。3D-T₂ Turbo Field Echo (3D T₂ TFE) 法は神経線維を高信号に描出することが可能であり、短時間で3次元のT₂強調 black-blood imagingが取得できると報告されている^{13), 14)}。3D T₂ TFE法は、Gradient echo (GRE) 法でありながら spin echo (SE) 信号を収集する撮像法で、エコー信号を発生させるため2つのRFパルスが必要となる。原理的に設定Echo Time (TE) が Repetition Time (TR) より長く、TR・TEが長いほど動きへの感度が上がり、流体組織を低信号に描出することが可能な撮像法とされている。そこで本研究の目的は、3Dシーケンスで自由再構成可能な3D T₂ TFE法と3D T₂ VISTA法における神経根描出能について比較検討することである。

1 方法

1-1 3D T₂ TFE法の検証

健常ボランティア10人に対し3D T₂ TFE法を用いて撮像を行い、3D T₂ TFE法の頸椎神経根部描出能について検証した。本研究は当院倫理委員会より承認を受け、全てのボランティアには本研究の趣旨を説明し同意を得て実施した(承認番号3418号)。使用装置はAchieva 1.5T(株式会社フィリップス・ジャパン)、受信coilはNeuro Vascular coilを使用した。撮像パラメーターをTable 1に示す。3D T₂ VISTA法は先行研究より⁸⁾、3D T₂ TFE法はファントム検証を基にした。計測位置は第5頸椎レベルの横断像を用い、関心領域(ROI: Region of Interest)を4.0mmとし、誤差が最小限になるように画像を十分に拡大し、両側神経根・傍脊柱筋・CSF・左椎骨動脈の各部位の信号強度を算出した(Fig.1)。一元配置分散分析を行った後、各群に対しSteel-Dwass検定を行い有意差を求めた。信頼区間99%($p < 0.001$)とした。統計解析ソフトはJMP Pro[®] 13 (SAS Institute Inc.)を用いた¹⁵⁾。

1-2 画像評価

健常ボランティア10人に対し、3D T₂ TFE法と3D T₂ VISTA法を用いて撮像を行い、神経根描出能について視覚評価を行った。

ボランティアには頸椎神経根症の症状はなく、平均

Table 1 3D T₂ TFE and 3D T₂ VISTA scan parameters for volunteer imaging

	3D T ₂ TFE	3D T ₂ VISTA
TE (msec)	5.9	150
TR (msec)	12	1200
Flip angle (degree)	35	90
TFE (TSE) factor	30	40
Startup echoes	default	0
Shot interval (msec)	439	
DRIVE		yes
Uniformity	CLEAR	CLEAR
Profile order	Centric	Sequential
Fat sat	ProSet 121	no
Band width [Hz]	271	315
Field of view [FOV] (mm)	180	180
Rectangular FOV (%)	65.9	66.6
Matrix [matrix×phase]	174×116	180×120
Reconstruction matrix	432×432	432×432
Number of signals averaged	4	1
Slice thickness (mm)	1	1
Slice	50	50
Scan time (min)	5.37	4.40

ProSet: Principle of Selective Excitation Technique

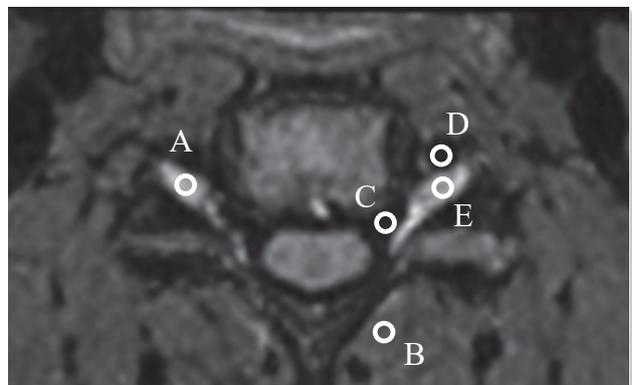


Fig.1 ROI placement for the axial 3D T₂ TFE images

The reformatted axial image of the originally acquired 3D T₂ TFE image shows the locations of the ROIs used for measuring the signal intensity of the right nerve root (A), paraspinal muscle (B), cerebrospinal fluid (C), left vertebral artery (D), and left nerve root (E).

年齢29.4歳(25~40歳)、男性7人、女性3人であった。撮像パラメーターをTable 1に示す。得られた画像より2mmの横断像、椎間孔に直交する2mmの斜矢状断像を作成した。2人の放射線科医(放射線診断歴4年と30年)がそれぞれ独立して、両側第1頸椎~第1胸椎神経根の描出能についてスコア化を行った。評価方法は硬膜囊内から椎間孔外まで、前根・後根・後

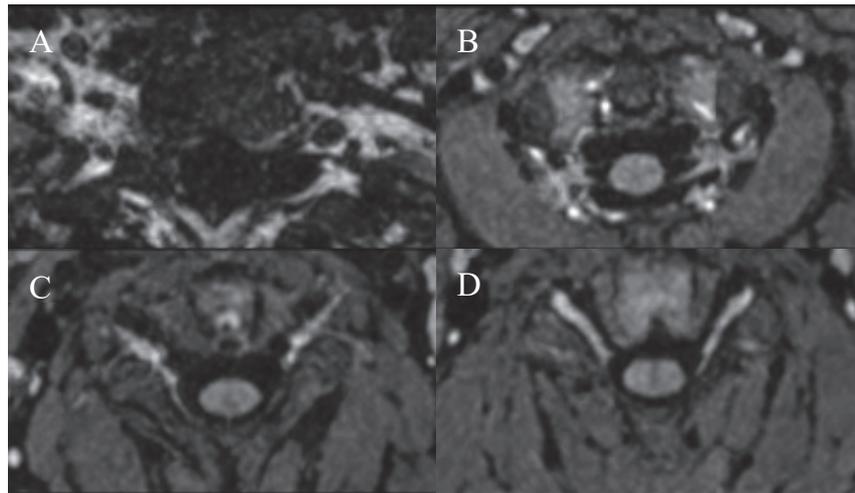
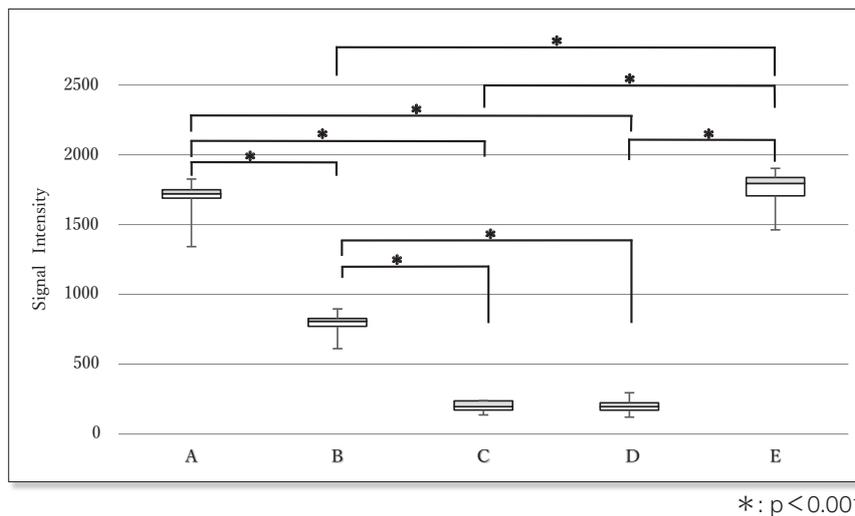


Fig.2 Examples of image quality scoring

MR imaging examples of the 4 grades used for qualitative evaluation of the cervical nerve from the intradural to extraforaminal regions. The reformatted axial images of the originally acquired 3D T₂ TFE image show examples of the following: not visible (score 0; A), partly visible (score 1; B), visible (score 2; C), and clearly visible (score 3; D).

Fig.3 Signal intensity of various structures in 3D T₂ TFE images

(A): right nerve root, (B): paraspinal muscle, (C): cerebrospinal fluid, (D): left vertebral artery, (E): left nerve root
The average signal value from 10 healthy volunteers was highest in the bilateral nerve roots, which was significantly higher than the average signal values of the other structures.

根神経節を含めた頸神経が明瞭に観察可能な場合をスコア3, 一部不明瞭だが観察可能な場合をスコア2, 一部のみ観察可能をスコア1, 観察不可をスコア0として4段階評価を行った¹⁶⁾ (Fig.2).

1-3 画像評価に対する統計学的検討

ボランティア10人の3D T₂ TFE法と3D T₂ VISTA法の神経根描出能についてWilcoxon Signed-Rank Testを用い, 観察者間の一致率についてはkappa値を用いて解析を行った. 信頼区間はそれぞれ95% ($p < 0.05$) として有意差検定を行った.

2 結果

2-1 3D T₂ TFE法の検証

健常ボランティア10人の第5頸椎レベルにおける信号値は, 両側神経根の信号値が最も高く, 左椎骨動脈およびCSFなどの流体組織における信号値と比較し有意に高い値であった. 左右神経根部および, 左椎骨動脈とCSF間では信号値に対して有意差は得られなかった (Fig.3).

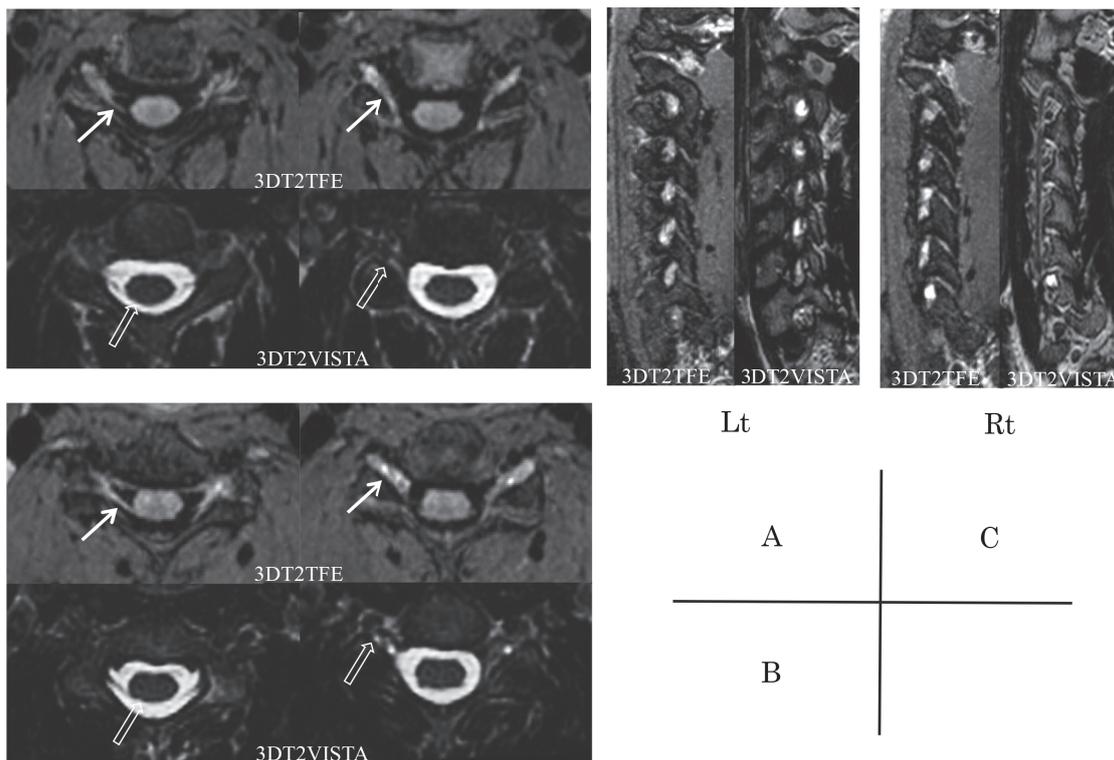


Fig.4 3D T₂ TFE and 3D T₂ VISTA images

- (A) 3D T₂ TFE and 3D T₂ VISTA axial reformatted images at the level of C3.
- (B) 3D T₂ TFE and 3D T₂ VISTA axial reformatted images at the level of C5.
- (C) 3D T₂ TFE and 3D T₂ VISTA oblique sagittal reformatted images.

(A) - (C) Reformatted acquired 3D T₂ TFE images demonstrating that the nerve roots and spinal cord have the highest signal intensity within the thecal sac through the extraforaminal region (white arrow). The structures surrounding the nerve root, such as blood vessels and CSF, are visualized as areas of low signal intensity. Thus, the 3D T₂ TFE sequence provides high contrast images between the cervical nerve root and surrounding structures. In contrast, the 3D T₂ VISTA images show the nerve root and spinal cord as having low signal intensity (open arrow). Moreover, the extradural region of the cervical nerve root is not as well visualized as with the 3D T₂ TFE sequence.

Table 2 Nerve root scores and Wilcoxon signed-rank test results for each of the two readers

	Reader 1		p-value	Reader 2		p-value
	3D T ₂ TFE	3D T ₂ VISTA		3D T ₂ TFE	3D T ₂ VISTA	
	right nerve root (mean ± SD)			right nerve root (mean ± SD)		
	left nerve root (mean ± SD)			left nerve root (mean ± SD)		
C1	0.7 ± 0.15	0.1 ± 0.10	0.015	1.2 ± 0.15	1.1 ± 0.10	n.s
	0.7 ± 0.15	0.1 ± 0.10		1.2 ± 0.15	1.1 ± 0.10	
C2	1.3 ± 0.21	2.2 ± 0.29	n.s	2.4 ± 0.18	1.6 ± 0.24	0.009
	1.3 ± 0.21	2.2 ± 0.29		2.6 ± 0.18	1.7 ± 0.24	
C3	2.7 ± 0.15	2.1 ± 0.23	0.029	2.3 ± 0.16	1.8 ± 0.22	0.038
	2.7 ± 0.15	2.1 ± 0.23		2.2 ± 0.15	1.6 ± 0.24	
C4	2.7 ± 0.21	1.8 ± 0.20	0.006	2.6 ± 0.18	1.9 ± 0.26	0.03
	2.9 ± 0.10	1.8 ± 0.20		2.3 ± 0.17	1.8 ± 0.28	
C5	3.0 ± 0	1.8 ± 0.20	0.004	2.9 ± 0.10	1.9 ± 0.26	0.009
	3.0 ± 0	1.9 ± 0.18		2.9 ± 0.10	1.9 ± 0.30	
C6	3.0 ± 0	1.9 ± 0.18	0.004	3.0 ± 0	1.8 ± 0.20	0.006
	3.0 ± 0	2.0 ± 0.21		3.0 ± 0	1.8 ± 0.30	
C7	3.0 ± 0	2.2 ± 0.25	0.016	2.9 ± 0.10	2.0 ± 0.29	0.009
	2.9 ± 0.10	2.2 ± 0.25		2.8 ± 0.15	1.9 ± 0.31	
C8	2.3 ± 0.26	2.4 ± 0.34	n.s	1.9 ± 0.31	2.0 ± 0.24	n.s
	2.4 ± 0.34	2.4 ± 0.27		2.1 ± 0.28	1.9 ± 0.31	
Th1	0.6 ± 0.22	2.3 ± 0.26	n.s	1.7 ± 0.29	1.2 ± 0.15	n.s
	0.6 ± 0.22	2.0 ± 0.26		1.9 ± 0.31	1.3 ± 0.17	

n.s. : not significant

2-2 画像評価

3D T₂ TFE法では両側神経根が高信号に、血管やCSFは低信号に描出されていた。一方、3D T₂ VISTA法ではCSFや脂肪組織などは高信号、神経根は低信号であった (Fig.4)。3D T₂ TFE法・3D T₂ VISTA法で撮像したボランティア10人の画像評価の結果、3D T₂ TFE法において2人の評価者共に両側の第3～第7頸椎レベルで高いスコアとなった (Table 2)。

2-3 画像評価に対する統計学的検討

神経根描出能の統計解析結果をTable 2に示す。2人の放射線科医で第3～第7頸椎レベルにおいて3D T₂ TFE法における神経根描出能が有意に高い結果であった。kappa値を用いた観察者間における一致率は、3D T₂ TFE法でk値0.68 (0.56-0.80)、3D T₂ VISTA法でk値0.34 (0.25-0.52) となり、3D T₂ TFE法の方が高い一致率を示した。

3 考察

3D T₂ TFE法で撮像したボランティア10人の第5頸椎レベルのROI内の信号強度は、両側神経根の信号値が最も高く、左椎骨動脈およびCSFなどの流体組織の信号値と比較し、有意に高い値であった。米山の報告では、MRIで神経を選択的に描出するためには神経そのものを強調するか、周囲組織の信号を抑制することが効果的であると述べられており¹⁰⁾、3D T₂ TFE法における頸椎神経根と周囲構造物の信号強度の違いを確認することができた。

放射線科医による視覚評価では第3～第7頸椎レベルでスコアが高く、3D T₂ VISTA法と比較し有意に3D T₂ TFE法の神経根描出能が高い結果であった。これは、3D T₂ TFE法がCSF・骨・血管など神経根周囲の信号を低下させ、神経根自体を高信号に描出できる撮像法であるため、高コントラストで神経根の走行を描出したことで視認性が向上し、脊柱管内から椎間孔外まで連続的に観察可能であったためと考えられる。一方、3D T₂ VISTA法は神経根自体が低信号に描出されるため、CSFが存在する脊柱管内ではCSFと神経根とのT₂コントラストにより神経根の走行を観察することは可能であるが、CSFの信号がなくなる脊柱管外ではコントラストが低下し、神経根の視認性が悪くなることにより走行が十分追えなかったと推察される⁸⁾。また頸椎症性神経根症における画像診断では、先行研究からもスライス厚が薄くスライス間ギャップのない、3D

法による高分解能撮像が求められている⁶⁾。今回、検討した3D T₂ TFE法は任意断面での再構成が可能で、脊髄～椎間孔外の神経根自体を高コントラストで描出することが可能であり、頸椎症性神経根症において神経根圧迫の描出能を向上させる可能性がある。

第8頸椎・第1胸椎神経根では、3D T₂ TFE法に対する優位性が認められなかった。その理由として、肺などによる磁化率の影響や、呼吸・体動に起因する位相分散、コイル形状に伴う信号低下の影響によるものと考えられる。本法で用いているT₂ TFE法はGRE法でありながら、信号としてはSE信号を収集する撮像法であり、RF直後にgradient spoilingを行うことでFID成分の信号を低下させている¹⁷⁾。またマルチショット化することにより定常状態をいったん切ってデータ収集を行うので、CSFや血管などの流れている組織をさらに低信号にすることが可能な反面、体動や呼吸などの動きの影響が鋭敏に反映されてしまい、第8頸椎や第1胸椎レベルにおいて有意差が得られなかったと推察される。しかし、頸椎症性神経根症の好発部位は第4～第7頸椎とされており、3D T₂ TFE法が本疾患の診断に有用な可能性があると考えている。

観察者間一致率は3D T₂ TFE法で高い結果であった。これは、本撮像法が脊髄から椎間孔内・外を走行する神経根自体を高コントラストで描出可能であったためと考えられる。一方、3D T₂ VISTA法では脊髄～椎間孔外までの神経根の全走行を評価することが難しく、観察者間一致率が低下したと推察する^{18), 19)}。

本研究の限界としては健常ボランティアの検討であり、頸椎疾患を対象にした描出能の検討ではないことが挙げられる。今後は、臨床症状を有する症例において神経根症状と狭窄部位が一致するかなどの検討を行うことが必要と考える。

4 結論

3D T₂ TFE法と、自由再構成が可能な3Dシーケンスとして頸椎神経根描出の報告がなされている3D T₂ VISTA法における神経根描出能について検討を行った。3D T₂ TFE法は、周囲構造物と比較し有意に神経根を高信号に描出することが可能であった。また第3～第7頸椎レベルでは統計学的に有意に脊柱管内から椎間孔外まで神経根描出能が高く、観察者間の一致率も高い結果であった。今後、本法が頸椎MRIにおける神経根評価の標準的撮像法として普及していくことを期待する。

5 利益相反

本研究に関して開示すべき利益相反事項はない。

【謝辞】

本研究に際して、ご指導を頂きました当院画像センター諸姉諸兄に深く感謝申し上げます。

なお、本論文の一部を第45回日本磁気共鳴医学会大会（宇都宮）で発表した。

表の説明

Table 1	ボランティア撮像における3D T ₂ TFEと3D T ₂ VISTAのスキャンパラメーター
Table 2	2人の評価者それぞれの神経根スコアおよびウィルコクソン符号順位検定結果

図の説明

- Fig.1 3D T₂ TFE法における横断像のROI配置図
冠状断3D T₂ TFE画像を横断像に再構成し、(A) 右神経根、(B) 傍脊柱筋、(C) 脳脊髄液、(D) 左椎骨動脈、(E) 左神経根の信号計測に用いたROIの配置図
- Fig.2 画像スコア例
硬膜囊内から椎間孔外までの視覚評価における画像スコア例。
観察不可（スコア0；A）、一部のみ観察可能（スコア1；B）、一部不明瞭だが観察可（スコア2；C）、明瞭に観察可能（スコア3；D）。
- Fig.3 3D T₂ TFE法における各部位の信号強度
(A) 右神経根、(B) 傍脊柱筋、(C) 脳脊髄液、(D) 左椎骨動脈、(E) 左神経根
10人の健常ボランティアの信号値は両側神経根が最も高く、他の構造物の信号値よりも有意に高い。
- Fig.4 3D T₂ TFEおよび3D T₂ VISTA画像
(A) C3のレベルでの3D T₂ TFE、3D T₂ VISTA再構成横断画像
(B) C5のレベルでの3D T₂ TFE、3D T₂ VISTA再構成横断画像
(C) 3D T₂ TFEおよび3D T₂ VISTA再構成斜矢状断画像
再構成3D T₂ TFE画像は、神経根と脊髄が硬膜囊内から椎間孔外領域まで高信号に描出されている（→）。また血管やCSFなどの神経根の周囲構造は低信号に描出されており、3D T₂ TFEシーケンスは神経根と周囲構造物を高コントラストに描出することができている。対照的に、3D T₂ VISTA画像は、神経根と脊髄が低信号で描出されており（⇔）、頸椎神経根の硬膜外領域は、3D T₂ TFEシーケンスの場合ほど描出されていない。

参考文献

- 1) 穴戸博紀, 他: 3.0T 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. 日放技学誌, 70(7), 670-675, 2014.
- 2) Park HJ, et al.: A practical MRI grading system for cervical foraminal stenosis based on oblique sagittal images. Br J Radiol, 86 (1025), 20120515, 2013.
- 3) Park HJ, et al.: The clinical correlation of a new practical MRI method for grading cervical neural foraminal stenosis based on oblique sagittal images. AJR, 203 (2), 412-417, 2014.
- 4) Park HJ, et al.: Clinical correlation of a new practical MRI method for assessing cervical spinal canal compression. AJR, 199: 197-201, 2012.
- 5) 岡村尚泰, 他: 3D T₂強調SPACE法による頸椎病変の描出. Spinal Surgery, 34(1), 59-65, 2020.
- 6) 犬飼千景, 他: 頸椎神経根診断におけるCurved Coronal MPR imagingの有用性. Neurological Surgery 脳神経外科, 38(3), 251-257, 2010.
- 7) 古賀久伸, 他: 3.0T MRIによる頸椎椎間孔部神経根の撮影. Spinal Surgery, 22(2), 80-85, 2008.
- 8) Kwon JW, et al.: Three-dimensional isotropic T₂-weighted cervical MRI at 3T: Comparison with two-dimensional T₂-weighted sequences. Clinical Radiology, 67, 106-113, 2012.
- 9) 沖永修二, 他: 拡散強調MRIによる腕神経叢疾患の描出. 日本手外科学会雑誌, 26(6), 616-621, 2010.
- 10) 米山正己: MR Neurographyの有用性. 神経治療, 32, 201-204, 2015.
- 11) Tsuchiya K, et al.: Visualization of cervical nerve roots and their distal nerve fibers by diffusion-weighted scanning using parallel imaging. Acta Radiol, 47, 599-602, 2006.
- 12) Yoneyama M, et al.: Rapid High Resolution MR Neurography with a Diffusion-weighted Pre-pulse. Magn Reson Med, 12, 111-119, 2013.
- 13) Yoneyama M, et al.: Reevaluation of T₂-weighted fast field echo (T₂FFE): application to rapid volumetric black-blood imaging. Radiol phys Technol, 6(2), 305-312, 2013.
- 14) Marielle E.P. Philippens, et al.: TRACING THE CRANIAL NERVE PATHWAYS NV AND NVII WITH 3D T₂-FFE. Mag. Reson. Med, 20, 1059, 2012.
- 15) 内田 治, 他: JMPによる医療系データ分析. 東京図書, 96-99, 2012.
- 16) 三浦真弘, 他: 脳脊髄液における最新の知見. 脊髄ジャーナル, 28(8), 694-703, 2015.
- 17) Yoneyama M, et al.: Differentiation of hypointense nodules on gadoteric acid-enhanced hepatobiliary-phase MRI using T₂ enhanced spin-echo imaging with the time-reversed gradient echo sequence: An initial experience. EJR, 95, 325-331, 2017.
- 18) Harold L Kundel, et al.: Measurement of Observer Agreement. Radiology, 228, 303-308, 2003.
- 19) 西浦 博: 観察者間の診断の一致性を評価する頑健な統計量AC₁について. 日放技学誌, 66(11), 1485-1491, 2010.