

原著

手根管 MRI における 3D-FFE 法による正中神経描出の検討

別所貴仁¹⁾ 赤坂正明¹⁾ 山下勝¹⁾ 山口健二¹⁾ 三味篤¹⁾ 林圭子¹⁾ 場合美奈子¹⁾ 泉安香莉¹⁾

森下毅¹⁾ 丑谷健次²⁾ 島啓介³⁾ 角弘論⁴⁾

¹⁾恵寿総合病院放射線部・放射線課 ²⁾臨床工学部・臨床工学課 ³⁾脳神経センター・神経内科 ⁴⁾放射線部

【要約】

手根管症候群 (Carpal tunnel syndrome : CTS) は、手根管内で正中神経が何らかの原因によって圧迫障害を起こす末梢神経障害として知られている。近年、手根管内の病態を把握するための画像診断として Magnetic resonance imaging (MRI) を用いて評価を行うケースが増えてきている。その MRI 所見では、T2* (T2 スター) 強調画像にて正中神経の腫大と高信号化、横手根靭帯の掌側への張り出しなどが見られる。Three-dimensional fast field echo (3D-FFE) 法では薄いスライスでの T2*強調撮像が可能であり、有効と考えられるが、2D 撮像に比べて正中神経の信号強度が弱く、正中神経の同定が困難な場合がある。そこで今回、手根管への 3D-FFE 法の適用における正中神経の描出に最適な撮像条件 {繰り返し時間 (Repetition time : TR), エコー時間 (Echo time : TE), フリップ角度 (Flip angle : FA) } の検討を寒天ファントムおよび健常ボランティア 5 名の右手を対象として行った。

最適 TR=30 ms, 最適 TE=15 ms としたとき、小さな FA ほど T2*が強調され正中神経の信号強度が上がったが、FA が小さすぎると雑音成分が目立つ画像となった。そこで、FA=15° に設定することで、正中神経および手根管部を良好なコントラストで描出することができた。また、3D-FFE 法での薄いスライスは部分容積効果の影響が軽減されるため、手根管内部を高分解能に描出できた。さらに、ワークステーションにて正中神経を 3D 表示し、プレート画像を挿入することで、正中神経の走行と形態が把握できるので CTS の診断支援につながると考える。

Key Word : 手根管, MRI, 正中神経

【はじめに】

手根管は背側を手根骨、掌側を屈筋支帯で囲まれた管腔構造をしており、その中を正中神経と 9 本の屈筋腱が走行している。手根管症候群 (Carpal tunnel syndrome : 以下 CTS と略す) は、手根管内で正中神経が何らかの原因によって圧迫障害を起こす末梢神経障害として知られている。CTS の診断には神経伝導速度検査が一般的に行われるが、ガングリオンなどによる正中神経圧迫要因の特定や障害部位の病態を推測することは困難である¹⁾。そこで近年、手根管内の病態を把握するための画像診断として核磁気共鳴画像 (Magnetic resonance imaging : MRI) を用いて評価を行うケースが増えてきている^{1, 2)}。CTS の MRI 所見では手根管近位部において正中神経の横断面積および T2* (T2 スター) 強調画像での信号強度の増大や横手根靭帯 (Transverse carpal ligament : TCL) の掌側への張り出しが認められる^{2, 3)}。また、神経障害により血液-神経関門が破綻し、

正中神経に造影効果が現れるため、造影 MRI が有用であることが報告されている^{4, 5, 6)}。CTS の手術では TCL を全長にわたり切離して正中神経への圧迫を解除する。術式には、前腕から手掌部に至る長い皮切で手術を行う開放式手根管開放術 (Open carpal tunnel release : OCTR) や小さな皮切から内視鏡を用いて手根管を観察しながら CTL を切開する鏡視下手根管開放術 (Endoscopic carpal tunnel release : ECTR) が行われるようになってきた⁷⁾。OCTR や ECTR の際に神経が損傷されて術後に痛みが残る可能性があるため、事前に正中神経の形態や走行および TCL との位置関係を把握しておくことが重要である。矢状断にて正中神経の長軸に沿った画像を撮像することが有用という報告⁸⁾と拡散テンソル画像 (Diffusion tensor imaging : DTI) を利用して正中神経を描出するという報告^{9, 10)}はあるが、T2*強調による正中神経の高信号化を生かして正中神経を 3D 表示するという報告はされていない。3D 表示に有

効なシーケンスには、三角線維軟骨複合体損傷 (Triangular fibrocartilage complex : TFCC) 時に用いられるグラジエントエコー (Gradient echo : GRE) 系シーケンスの Three-dimensional fast field echo (3D-FFE) 法がある。3D-FFE 法では 2D の T2*強調撮像より薄いスライス厚での撮像が可能となり、より精密な評価が可能となり得る。また、この 3D-FFE 法は自由に多断面再構成画像 (Multi planar reformat : MPR) を作成できるので、正中神経の長軸画像を容易に得ることができるという利点もある。通常 TFCC では冠状断にて撮像を行うが、CTS では手根管内部をより明瞭に描出するために横断面での撮像が必要である。しかしながら、3D-FFE 法では繰り返し時間 (Repetition time : TR) が短いため、2D 撮像に比べて正中神経の信号強度が弱く、正中神経の同定が困難な場合がある。そこで本研究では、手根管への 3D-FFE 法の適用における正中神経描出のための最適な撮像条件をファントム撮像および健常ボランティア撮像の画像解析により検討した。そして、得られた最適撮像条件で CTS 患者の撮像を行った。

【対象と方法】

使用した MRI 装置は東芝メディカル株式会社製 EXCELART Vantage XGV F2-Edition 1.5 T であり、コイルは 70 mm 径 circular coil である {図 1 (a), (b)}。3D 画像再構成に用いたワークステーションは株式会社 AZE 製 Virtual Place Fujin を使用した。

ファントム撮像では、ファントムとして生体組織に近い寒天を用いた。寒天ファントムは水 500 g に対し寒天粉末 4 g を溶かしたものを 2.5 ml シリンジにつめ、12 時間程度冷蔵庫で冷やして作成した。70 mm 径 circular coil の上に寒天ファントムシリンジを乗せて撮像を行った。スライス面はシリンジの長軸に対し垂直方向に設定した。撮像条件は、GRE 系シーケンスの 3D-FFE 法を基に、FOV 50 mm×50 mm、マトリクス 176×176、スライス厚 1.5 mm、加算回数 1 回、撮像枚数 30 枚、バンド幅 122 Hz/pixel とし、TR、エコー時間 (Echo time : TE)、フリップ角度 (Flip angle : FA) を変化させて撮像を行った。メーカー基準の初期撮像条件は TR=30 ms、TE=15 ms、FA=25° であるため、これを基に次のような 3 パターンにて撮像条件を変化させた。

① TE=15ms, FA=25° に固定し、TR を 26 ms (最小 TR)、31 ms、36 ms、41 ms の 4 段階に変化。

② TR=26 ms, FA=25° に固定し、TE を 15 ms、17.5 ms、20 ms の 3 段階に変化。

③ (①と②の検討より) TR と TE を決定して、FA を 5° 刻みで 5° ~90° の 18 段階に変化。

得られた各画像の中心部にファントム断面積の 75% 程度の円形関心領域 (Resion of interest : ROI) を設定し {図 1 (c)}、寒天ファントムの信号の平均値 (S_{AVE})、バックグラウンドである空気中の信号値の標準偏差 (SD_{BG}) を測定し、信号雑音比 (Signal-to-noise ratio : SNR) を以下のように算出した。

$$SNR = S_{AVE} / SD_{BG} \dots (1)$$

健常ボランティアの撮像では、本研究に同意が得られた健常ボランティア 5 名 (平均年齢 : 36.2±16.3 歳) の右手を対象とした。撮像体位は被験者の負担軽減のため、仰臥位で肘関節を軽度屈曲し両手を下ろした状態とした。撮影範囲は手根管部を十分に含むように横断面で遠位橈尺関節レベルから手根中手関節レベルとした。撮像条件は、GRE 系シーケンスの 3D-FFE 法を基に、FOV 90 mm×90 mm、マトリクス 176×176、スライス厚 1.5 mm、加算回数 1 回、撮像枚数 30 枚、バンド幅 122 Hz/pixel とし、TR、TE、FA を変化させて横断面にて撮像を行った。TR、TE、FA 変化の撮像条件はファントム撮像で示した①、②、③のパターンに従った。

① TE=15ms, FA=25° に固定し、TR を 26 ms (最小 TR)、31 ms、36 ms、41 ms の 4 段階に変化。

② TR=26 ms, FA=25° に固定し、TE を 15 ms、17.5 ms、20 ms の 3 段階に変化。

③ (①と②の検討より) TR と TE を決定して、FA を 5° 刻みで 5° ~40° の 8 段階に変化。

図 2 に手根管計測レベルと計測方法を示した。計測は多断面での評価が望ましいため^{2, 9)}、得られた手根管画像の有鉤骨鉤レベルと豆状骨レベルにおいて、正中神経の信号値を測定し、5 回測定による平均値を求めた。また、SNR は S_{AVE} を正中神経の信号値、 SD_{BG} を空気中でアーチファクトのない領域から求め、(1)式のように算出した。

また、これと手根管の描出能について、MRI 検査に携わった経験のある臨床経験 3 年以上の診療放射線技師 5 名による 4 段階 (1 : poor, 2 : moderate, 3 : good, 4 : excellent) 視覚評価を行った。評価は、横断面画像を連続的に観察してもらい、正中神経の高信号化および手根管部の明瞭化で判断を行った。

【結果】

図3の(a), (b)に, パターン①, ②の寒天ファントムのSNR平均値のTR, TEによる変化, (c), (d)にパターン③の寒天ファントムの信号平均値 S_{AVE} のFAによる変化とSNR平均値のFAによる変化を示した。TR, TEが変化しても寒天ファントムのSNRはほぼ一定であった。①のTEと②のTRを他の値に設定しても, SNRが変化しないという性質はほぼ同等であった。これらの結果からパターン③のTRとTEについては, TRは撮像時間を考慮し最小TRの26msとし, TEはTE変化によるSNRがほぼ一定であったためメーカー初期設定値の15msとし撮像を行った。パターン③のFA変化による S_{AVE} はFA=5°で最大となり, FAが大きくなるにつれて小さくなる傾向がみられた。FA変化によるSNRの値はFAが小さいうちは上昇し, FA=30°付近をピークにそれ以降は減少していく傾向がみられた。これらの結果より, 健常ボランティアの撮像パラメータの設定は, FAを8段階に限り, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°とした。

図4の(a), (b)に健常ボランティア5人の正中神経のSNR平均値のTR, TEによる変化を示した。TR

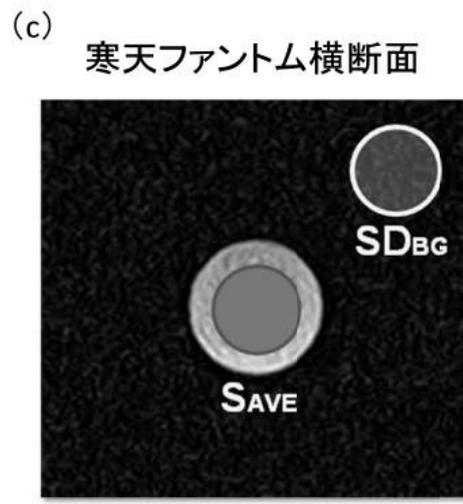
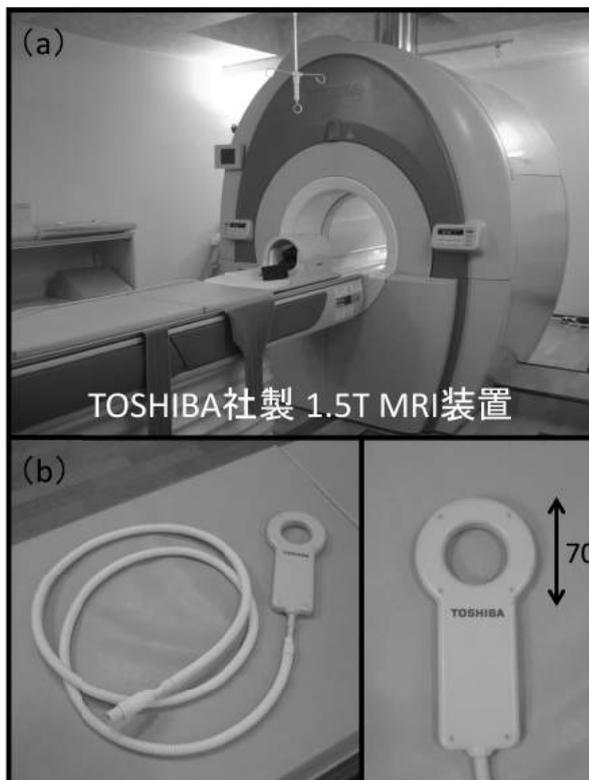
の延長でSNRの増加傾向, TEの延長でSNRの低下傾向がみられた。よって, TRとTEについて, TRはSNRおよび撮像時間を考慮して30msとし, TEはSNRが高い15msとした。図4の(c)に健常ボランティア5人の正中神経の信号平均値 S_{AVE} のFAによる変化, (d)に正中神経のSNR平均値のFAによる変化を示した。 S_{AVE} はFA=5°で最大となり, FAの増加とともに小さくなった。FA変化によるSNRの値はボランティア間による個人差はあったが, 平均値では, 有鉤骨鉤レベル, 豆状骨レベルともにFA=15°で最大値となり, それ以降は減少傾向がみられた。

図5に診療放射線技師5名による手根管の視覚評価基準画像と結果を示した。視覚評価において, TR, TEが延長してもポイントはほぼ横ばいとなり明らかな変化は認められなかったが, FA変化による画像ではFA=15°で最もポイントが高くなった。

今回の検討で得られた最適撮像条件 (TR=30ms, TE=15ms, FA=15°) で臨床撮像 (69歳女性の左手) を行った。図6にCTS患者の横断面画像と画像処理ワークステーションにて作成した3D画像を示した。有鉤骨鉤レベルにおいて正中神経の扁平化, 豆状骨レベルにおいて正中神経の腫大がみられた。

図1 使用装置と寒天ファントムのSNR測定画像

S_{AVE} を寒天ファントムの信号値, SD_{BG} を空気中でアーチファクトのない領域から求め SNR を算出した。



$$SNR = S_{AVE} / SD_{BG}$$

S_{AVE} : 正中神経の平均信号値
 SD_{BG} : バックグラウンドの標準偏差

70 mm径circularコイル

図2 手根管計測レベルと正中神経の SNR 測定画像

S_{AVE} を正中神経の信号値, SD_{BG} を空気中でアーチファクトのない領域から求め, SNR を算出した。

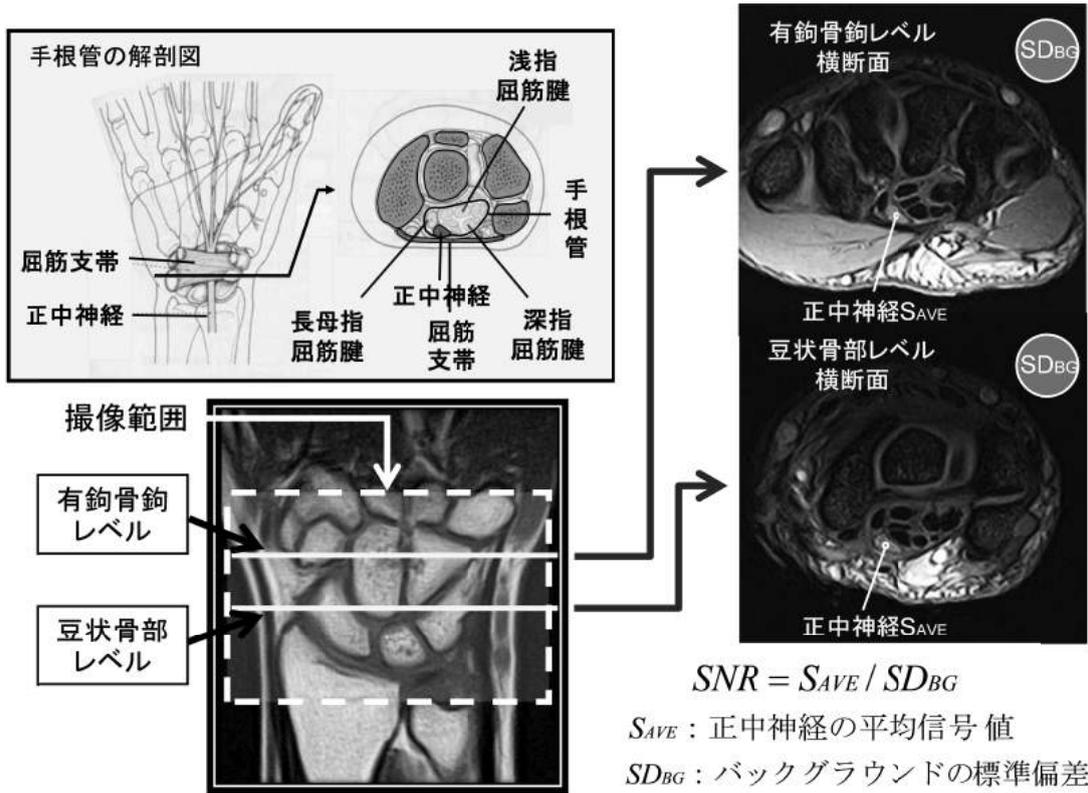


図3 寒天ファントムの SNR 平均値の各パラメータによる変化

- (a) 寒天ファントムの SNR 平均値の TR による変化 (b) 寒天ファントムの SNR 平均値の TE による変化
 (c) 寒天ファントムの平均信号値 S_{AVE} の FA による変化 (d) 寒天ファントムの SNR 平均値の FA による変化

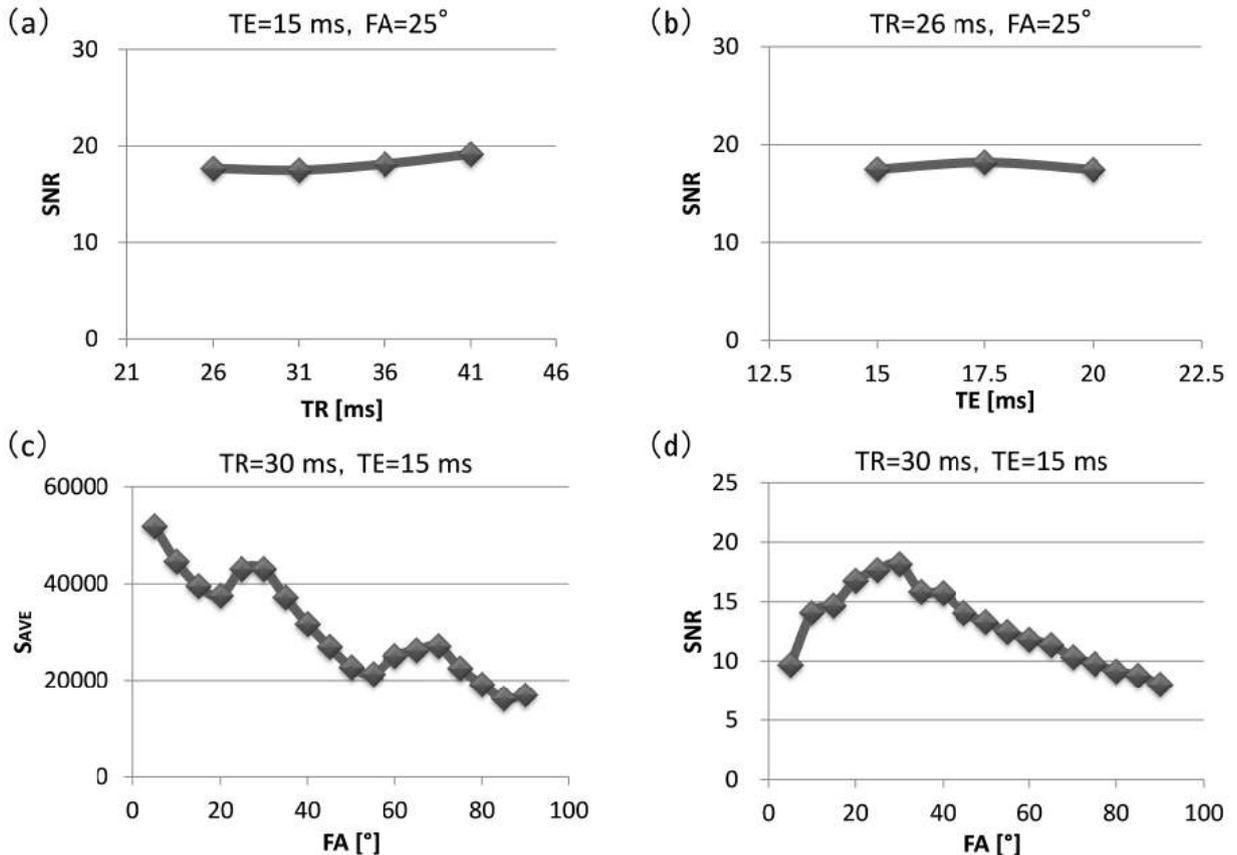


図4 正常ボランティア5人のSNR平均値の各パラメータによる変化

- (a) 正中神経のSNR平均値のTRによる変化
- (b) 正中神経のSNR平均値のTEによる変化
- (c) 正中神経の平均信号値 S_{AVE} のFAによる変化
- (d) 正中神経のSNR平均値のFAによる変化

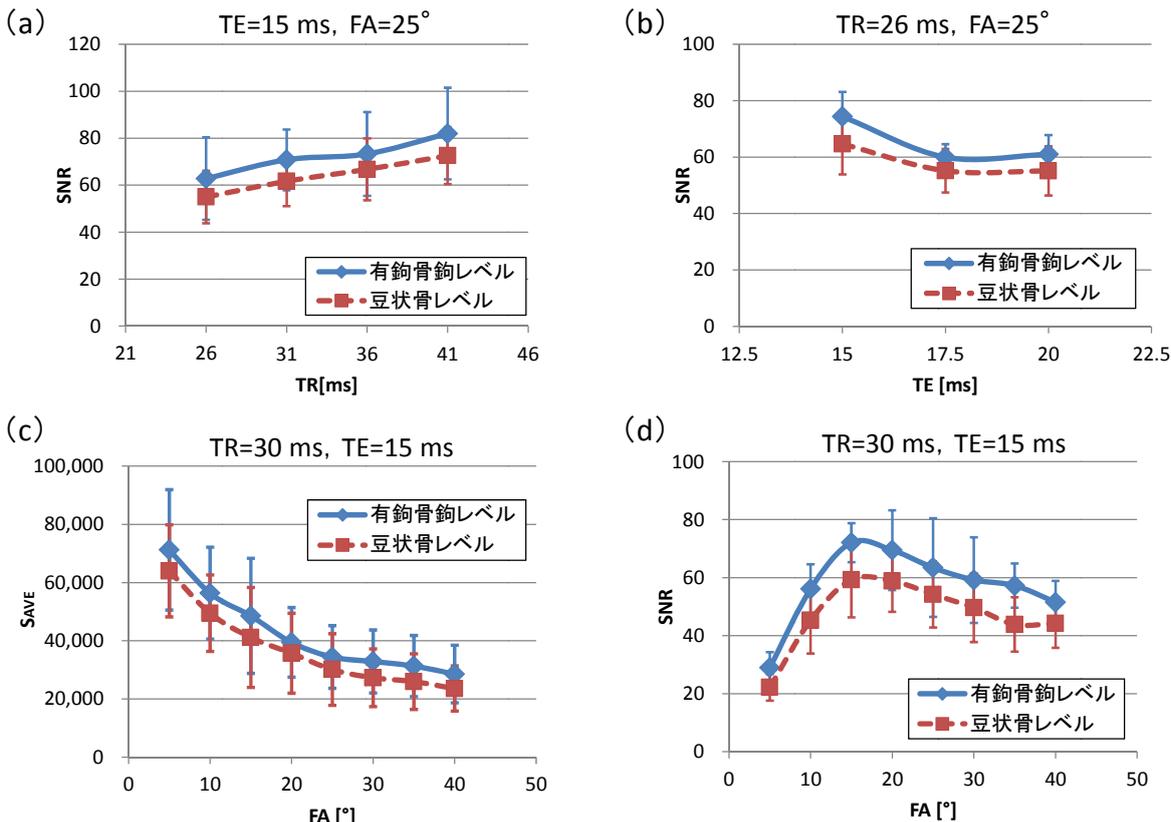
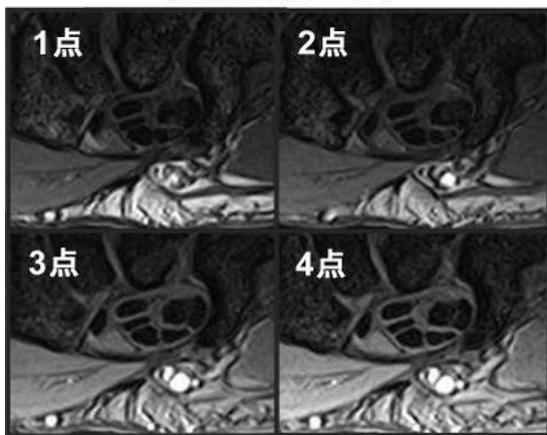


図5 手根管の視覚評価基準画像と視覚評価結果

正中神経の高信号化, 手根管部の分離の明瞭さ, 画像全体の信号雑音比, 手根管部全体のコントラストで判断し, 視覚評価を行った。

視覚評価基準画像
(有鉤骨鉤レベル)

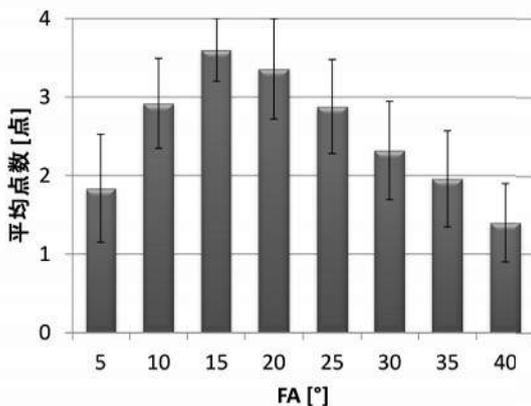


視覚評価基準

- ・ 正中神経の高信号化
- ・ 手根管部の分離の明瞭さ
- ・ 画像全体の信号雑音比
- ・ 手根管部全体のコントラスト



取得横断面画像を連続で観察
(ウィンドウ幅, ウィンドウレベルは
観察者が任意に調整)



FA変化における手根管画像の視覚評価結果

【考察】

3D-FFE 法を用いて手根管部および正中神経を明瞭に描出する最適パラメータの検討を行った。3D 表示には正中神経の高信号化が必要だと考え、今回は正中神経の信号平均値および SNR を測定した。視覚評価においては、正中神経の高信号化および手根管部の明瞭化に観点を置き、判断を行った。

健常ボランティアにおいて、TR を長くするほど横磁化が緩和され、神経の信号が回復するので、SNR が高くなったと考えた。TR の延長は臨床での撮像時間が長くなるため（例えば、TR=26 ms から TR=30 ms にすると約 40 秒撮像時間が延長する）、これを考慮したうえで、できるだけ長く設定することが望ましいと考える。そこで、TR は最低値から一段階長い 30 ms とした。TE を延長すると T2* がより強調されるため、コントラストのついた画像となる反面、ノイズも大きくなるため SNR は低下したと考えた。また、TE を 15 ms より短くすると撮像枚数の制限がかかるため、TE = 15 ms が本装置においては最適 TE と考える。正中神経の信号値は小さい FA ほど高かったが、正中神経の SNR は、有鉤骨鉤レベル、豆状骨レベルともに FA=15° で最大値となった。これは小さい FA (=5°) では T2* がより強調され正中神経が高信号になったが、全体的にノイズも大きいため極度に SNR が低下したからである。大きな FA (=40°) ではノイズは小さいが、正中神経の信号が弱くなるため、正中神経の SNR が低下した。よって、正中神経の信号値と SNR および視覚評価による手根管部全体のコントラストを考慮すると、FA=15° が最適 FA と考える。しかし GRE 系シーケンスでは、信号強度が最大となる FA (エルンスト角: α) は、 $\cos \alpha = \exp(-TR/T1)$ で表わされるため、TR を延長して撮像する場合には FA を少し大きくした方が良いと考える。

今回使用した撮像コイルは感度が高い反面、感度領域が狭いため、撮像コイルのポジショニングの位置が信号強度に影響を与えた可能性があり、それが測定精度に影響したものとする。ゆえに、70 mm 径の circular coil を用いて手根管を撮像する場合には、撮像コイルの正確なポジショニングが必要だと考える。

3D-FFE 法の撮像時間は、約 5 分要するが、3D の薄いスライス (スライス厚 1.5 mm) は部分容積効果の影響が軽減されるため、手根管内部を高分解能に描出できた。また、得られたデータからリフォーマットすることにより任意の断面を得ることができる。

さらに、3D 画像処理ワークステーションにて正中神経を 3D 表示し、プレート画像を挿入することで、正中神経の形態および走行が把握でき、CTS の診断支援につながると考える。

【文献】

- 1) Jarvik JG, Yuen E, Kliot M, et al : Diagnosis of carpal tunnel syndrome : electrodiagnostic and MR imaging evaluation. Neuroimag Clin N Am 14 : 93-102, 2004
- 2) 内山茂晴 : 手根管症候群の MRI 診断のポイント. MB Orthop, 19, 78-82, 2006
- 3) 内山茂晴, 加藤博之, 中村恒一, 他 : 手根管症候群の MRI 評価でわかってきたこと. Peripheral nerve, 19 : 149-152, 2008
- 4) 田山信敬, 菊地臣一 : 手根管症候群の MRI-除圧前後の Gd-DTPA 造影効果. 日手会誌, 12 : 357-359, 1995
- 5) 早川克彦, 中根高志, 和田邦央, 他 : 手根管症候群の術後変化 - 造影 MRI での検討 -. 日手会誌, 17 : 439-443, 2000
- 6) 池田純 : 手根管 MRI 画像から考察する特発性手根管症候群の成因について. 昭和医会誌, 63 : 174-182, 2003
- 7) 池田和夫 : 手根管症候群に対する手術療法. Peripheral nerve, 19(2) : 153-156, 2008
- 8) 有野浩司, 根本孝一 : 手根管症候群の MR neurography. 整形・災害外科, 51 : 709-713, 2008
- 9) Yao L, Gai N : Median nerve cross-sectional area and MRI diffusion characteristics : normative values at the carpal tunnel. Skeletal Radiol, 38 : 355-361, 2009
- 10) Khalil C, Hancart C, Thuc V, et al : Diffusion tensor imaging and tractography of the median nerve in carpal tunnel syndrome preliminary results. Eur Radiol 18 : 2283-2291, 2008

図 6 CTS 患者の横断面画像と正中神経の 3D 表示画像

横断面の有鉤骨鉤レベルにおいて正中神経の扁平化，豆状骨レベルにおいて正中神経の腫大がみられた。画像処理ワークステーションにて，正中神経の長軸画像および 3D 画像を作成した。

