

腰椎斜位MRI検査における被写体の 限界角度評価についての検討 ～患者の負担軽減を目的とした腰椎MRI検査への試み～

*A Study on Evaluation of the Subject's Limiting Angle in Oblique Lumbar MRI Examination
～A trial of lumbar MRI examination for the purpose of reducing the burden on patients～*

須賀 龍也

医療法人 風早会 外科野崎病院

Key words: magnetic resonance imaging, oblique position imaging, evaluation of limit angles, claustrophobia

【Abstract】

Lumbar spine MRI examinations are usually performed in the supine position, but some may be performed in another position to avoid interruption or prolongation of the examination due to physical or emotional distress or pain. Although there are reports of lumbar spine MRI examinations in the lateral recumbent position, there are no detailed reports of lumbar spine MRI examinations in the oblique position. The results of physical evaluation using a self-made phantom and image evaluation using volunteer photography indicate that the maximum tilt angle of the subject that can guarantee a certain image quality is 30°.

The present study has made it possible to perform examinations in the oblique position instead of only in the supine position, and the increased examination options have alleviated physical and mental distress until the completion of the examination, suggesting that it can contribute to reducing patient burden.

【要 旨】

腰椎MRI検査は通常、仰臥位で行われるが、中には身体的・精神的苦痛や疼痛による検査の中断や延長を避けるため、別体位で行う場合がある。側臥位での腰椎MRI検査の報告は存在するが、斜位での腰椎MRI検査についての詳細な報告はない。

今回、自作ファントムとボランティア撮像による画像評価結果から、一定の画質を担保できる被写体の可能な限界傾斜角度は30°であった。

本検討により、仰臥位のみで行っていた検査を斜位で行うことも可能になり、体位の選択肢が増えたことで検査終了までの身体的・精神的苦痛や疼痛を緩和できたことから、患者への負担軽減に寄与できることが示唆された。

緒 言

当院で行った過去5年間(2015年～2019年)における腰椎MRI検査件数の動向をFig.1に示す。腰椎MRI検査の全件数は毎年横ばいであるが、高齢者と定義される65歳以上の腰椎MRI検査件数は、2015年は290件、2016年は303件、2017年は315件、2018年は327件、2019年は新型コロナウイルスの影響により317件と全体的に検査件数は減少した。また後期高齢者とされる75歳以上では、2015年は204件、2016年は208件、2017年は219件、2018年は227件、2019年は225件と、毎年、年間半数以上の高齢者の検査が増加しており、地域の医療機関として腰椎疾患に不安を抱えている高齢者を支えている。

SUGA Tatsuya

Medical Corporation Kazahayakai Surgical Nozaki Hospital

Received November 15, 2022; accepted June 3, 2023

一般的にMRI検査では高い画質を担保するため、受信コイル(以下:コイル)と被写体間において、密接するような距離と安定した配置での撮像が望ましいのは周知の通りである。しかし、痛みを伴った部位が直接コイルに触れる、また円背や前傾位など、仰臥位が困難な患者に対しては磁場方式を問わず、非常に苦痛である。当院で使用している垂直磁場方式のオープン

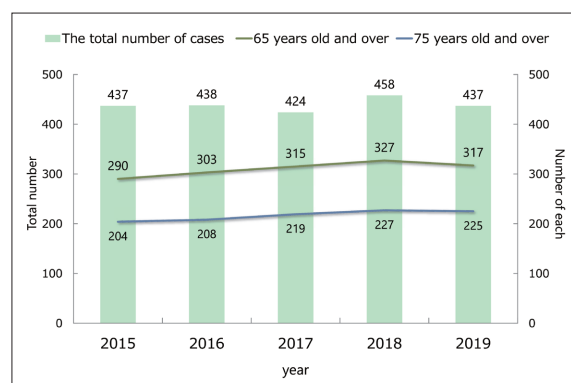


Fig.1 Changes in lumbar spine MRI scans at our hospital (2015-2019)

タイプMRI装置の左右方向はフルオープンであるが、前後方向はスペース上の問題から側臥位で撮像する場合、細長体型に限定される。低磁場のMRI装置は高磁場MRI装置に比べて撮像時間が比較的長く、撮像パラメーターで調整するにはコントラストへの影響もあるため、安易な撮像時間の短縮は実用的ではない。さらに強い痛みに加え、精神的苦痛を抱えたままの検査は、検査の中断や延長につながり、十分な画像提供や患者サービスができていないと言え難い。

本研究では、極力画質を低下させず斜位による検査を行い、患者の負担軽減ができないかを検証したので報告する。

1. 方 法

1-1 使用機器およびファントム

MRI装置は富士フイルムヘルスケア株式会社製のAIRIS II comfort 0.3T V 3.6A, RFコイルは受信型のQD Body Coil, ファントムは自作ファントム (内容物: 粉寒天, 製造元: 朝日, 寒天粉末の量: 水4.0 Lに対し30 g), ファントム溶液を入れる容器の名称およびサイズは、耐熱性4点ロック保存容器4.5 L (アスペル社) 幅23.0 cm × 奥行31.5 cm × 高さ15.0 cm, 画像解析ソフトはフリーソフトのImageJ, 統計解析ソフトにはKy Plot 6.0 (KyensLab Inc.) を使用した。

1-2 ファントムの作製

- 1) 4.5 Lの水に30 gの寒天粉末を入れ、加熱しながら沸騰するまで大容量の鍋で溶解させた。
- 2) 出来上がった溶液は、粗熱を取った後に冷蔵庫で一晩かけて冷却させると固化した。
- 3) 完成後のファントムはMRI室内の室温に合わせるため、12時間以上放置した。完成したファントムの写真と均一に充填されたファントム画像をFig.2に示す。

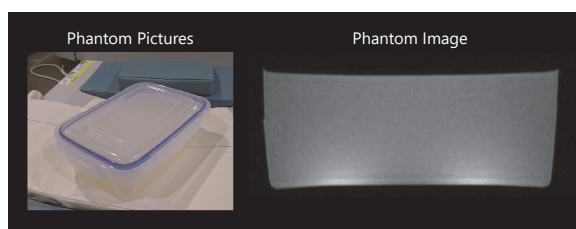


Fig.2 Homemade agar phantom and phantom image

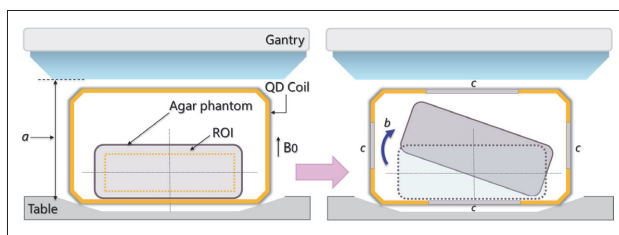


Fig.3 Geometric layout of physical evaluation measurements

- a) Table-Gantry Distance : 36 cm
- b) Measured while tilting the phantom in 10° increments
- c) coil element

Table 1 Physical evaluation measurement formula

SNR and Uniformity Measurement Formulas
SNR = SI Image1 / SD sub / $\sqrt{2}$
U Image1 (%) = $100 \times (S_{\max} - S_{\min}) / (S_{\max} + S_{\min})$

1-3 ファントム測定による物理評価

1-3-1 ファントムによる信号雑音比 (signal-to-noise ratio, 以下: SNR) 測定と均一性測定

被写体がコイル内で傾斜することによる画質への影響を検証するため、ファントムによるSNRおよび均一性 (Uniformity) 測定を行った。ファントムの撮像条件は、TR : 800 ms, TE : 15 ms, Band width : 74.2 Hz/pixel, slice thickness: 10.0 mm, Matrix size (Frequency × Phase) : 256 × 256, FOV : 300 mm, NSA : 2, Slice orientation : 横断像 (以下: Ax) とした。物理評価測定の幾何学的配置図およびファントム傾斜の模式図をFig.3に示す。コイル、ファントムを磁場中心にセットし、設定角度は0°を基準として、コイル内で傾斜可能となる最大角度50°まで10°刻みで角度を変えながら、Axで1sliceの2回連続撮像 (Image1, Image2) を計5回行い、その平均値を実測値とした。

得られた画像よりImageJを用いて差分画像 (Sub) を作成、ファントム画像中心に75%となる矩形の関心領域 (region of interest: ROI) を配置、得られた値をSignal Intensity (以下: SI), ROI内の最大信号値をSmax, 最小信号値をSminとし、NEMA法^{2,3)}に準じてTable 1の計算式でSNRおよび均一性を求めた。

1-3-2 統計学的検定

0°の値を対照群、ファントムの傾斜角度の値を処理群とし、スティーラの多重比較検定¹⁾ (Steel's multiple comparison test) を行い、 $p < 0.05$ で統計的に有意とした。

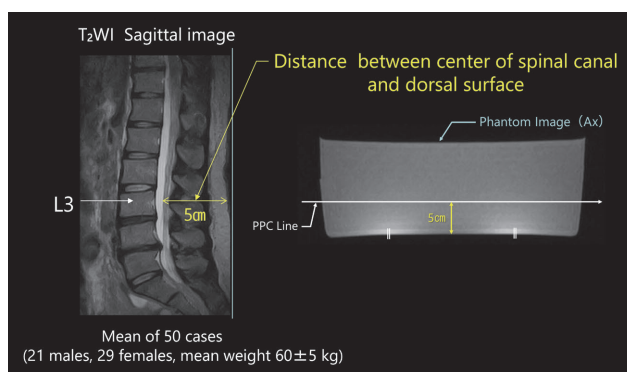


Fig.4 Comparative verification of PPC at each angle

1-3-3 各傾斜角度における感度特性 (Plot profile curve, 以下: PPC) による比較検証

方法1-3-1で得られたファントム画像を用いて、ファントム背面中心から5 cmの所に寝台に平行なラインを描き、コイルの各傾斜角度5回分の測定データを平均化し、画像解析ソフトImageJおよびMicrosoft Excel 2010を使用してPPCを作成した。なお、5 cmとした基準は、腰椎MRI T₂強調画像 (以下: T₂WI) 矢状断像 (以下: SAG像) で第3腰椎レベルの脊柱管中心-背面までの距離計測による50例 (男性21例, 女性29例, 平均体重60 ± 5 kg) の平均値とした (Fig.4)。

1-3-4 物理評価測定によるファントムの限界傾斜角度の設定

方法1-3-1, 2, 3で得られた結果より、ファントムの傾斜角が40°を超えるとSNR値は約12%, 均一性評価では約23%の低下を認めた。また感度特性においてもファントム傾斜40°以上で著明な感度低下を認めており、SNR値は10%, 均一性評価では20%以上低下すると、視覚的に影響を及ぼすことが当院での性能評価測定で確認できている。よって許容できるファントム傾斜の限界角度は30°とした。

1-4 ボランティア撮像による画像評価

1-4-1 Pixel Shift法 (以下: PS法) によるSNR測定

対象は本研究に同意を得た健常ボランティア3人 (男性: 2人, 女性1人) で行った。方法は、肋骨弓下縁 (第3腰椎) がコイルの中心に来るように位置合わせを行い撮像。比較角度は通常体位 (基準) の0°と1-3-4で決定した30°で、同一撮像条件 (Table 2) で撮像した。30°の撮像では、腰椎斜位X線単純撮影と同様、肩部と腰部のラインが平行になるようにポジショ

Table 2 Volunteer imaging parameters

	T ₂ WI
Slice orientation	Axial
Sequence	Fast Spin echo
TR (ms)	3000
TE (ms)	110
Flip Angle (°)	90
Slice thickness (mm)	4.5
Matrix (Frequency × Phase)	256 × 200
FOV (mm)	220
NSA	6
ETL	12
Scan time (min)	5 : 40

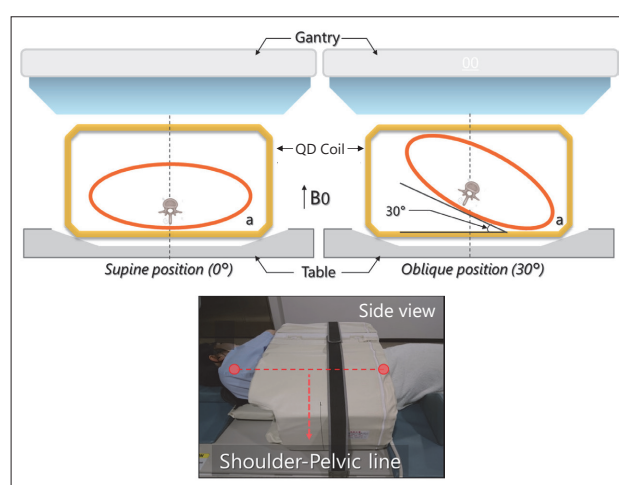


Fig.5 Schematic diagram of volunteer imaging
a) Volunteer

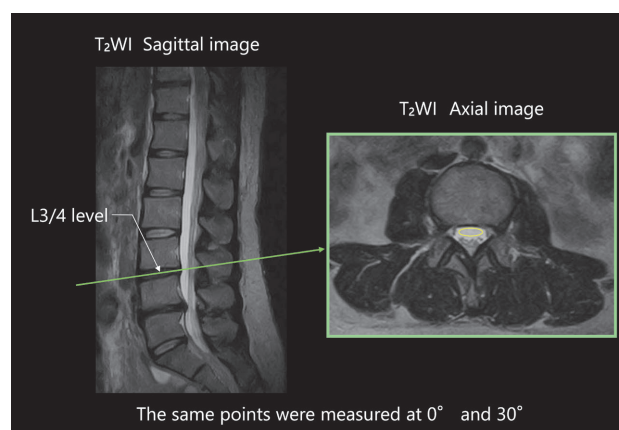


Fig.6 Measured slice plane

ニングを行った (Fig.5)。なお、当該施設において倫理承認 (承認番号201911501) を得て実施した。

解析に使用する撮像断面とコントラストは、診断に多用し基準にしているT₂WI-Axとし、スライス面は腰椎の中心となる第3腰椎と第4腰椎の椎間1枚 (Fig.6) とした。臨床画像では同じ条件で撮像するこ

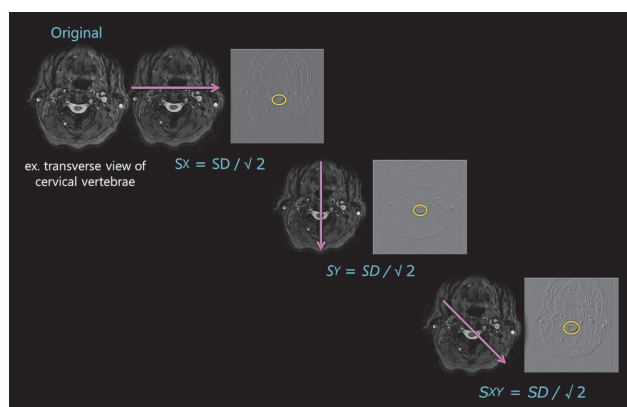


Fig.7 Pixel Shift Method

$$Noise = \sqrt{Sx^2 + Sy^2 - Sxy^2} \dots (1)$$

$$SNR = SI_{original} / Noise \dots (2)$$

Table 3 5-point scale

5-point scale	
5	Excellent
4	Good
3	Fair
2	Poor
1	Undetectable

とが難しいため、Fig.7のように、撮像された1枚の画像からImageJで読み取り方向、位相エンコード方向、斜め方向に1ピクセルシフトさせ²⁾、撮像された画像とシフト画像から差分画像を計算、脊柱管に楕円形ROIを配置、ノイズは各差分画像の標準偏差から算出し、(1)の式でNoiseを、(2)の式でSNRを求めた。なお、解析の測定位置は、0°と30°で同じ点を測定した。

1-4-2 視覚評価および統計学的検定

視覚評価は、MRI経験年数5年以上の診療放射線技師5人で行った。方法は0°と30°の画像2枚を左右で比較、評価方法は通常照明下で時間無制限、評価者には撮像した被写体の傾斜角度は明らかにせず、観察領域の視覚的雑音、画像全体のコントラスト、脊柱管（馬尾）の描出能を総合的に観察した。3点以上を診断可能とし、2枚の画像に対しての5段階評価（Table 3）を平均値±SDで表記、統計学的検定にはMann-Whitney's U test¹⁾を用いて危険率5%未満を有意差ありとした。

2. 結果

2-1 ファントム測定による検証

2-1-1 SNRおよび均一性

SNR測定結果および均一性測定結果のグラフをFig.8、Fig.9に示す。横軸がファントムの傾斜角度、Fig.8の縦軸がSNR、Fig.9の縦軸が不均一度として表記した。基準の0°でのSNRは60.2、均一性評価では23.5%であった。ファントムの傾きが大きくなるほど、SNRおよび均一性がそれぞれ有意に低下した。

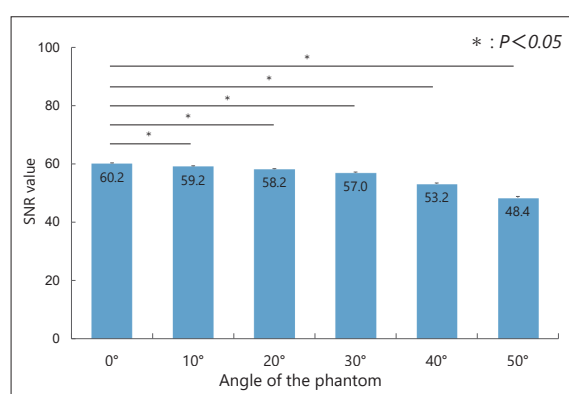


Fig.8 SNR measurement result

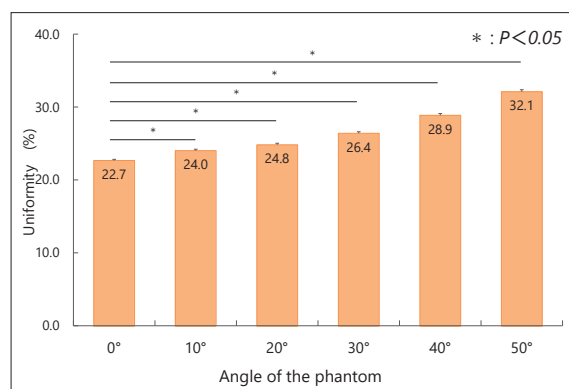


Fig.9 Uniformity measurement result

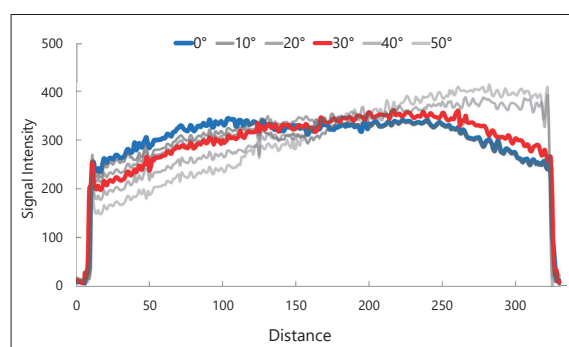


Fig.10 PPC at each angle

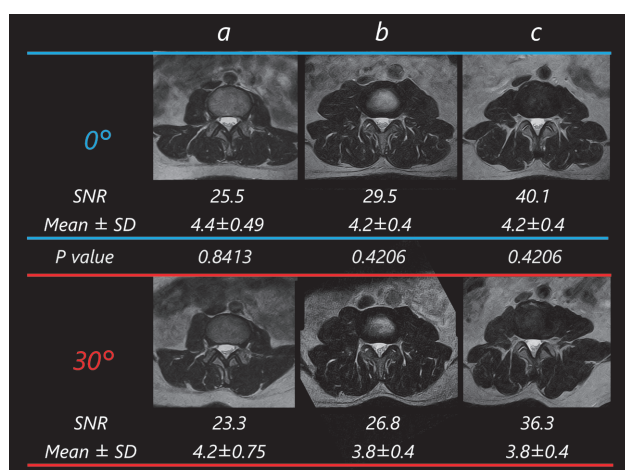


Fig.11 Image evaluation results

2-1-2 感度特性

感度特性の結果をFig.10に示す。横軸が距離、縦軸をSignal Intensityとして表記した。ファントムの傾斜角10°～30°までは視覚的に顕著な差は認めず、ほぼ左右対称に感度を捉えているが、40°以上で不均一を認めた。

2-2 ボランティア撮像による画像評価

2-2-1 PS法によるSNR値

ボランティア撮像によるSNR値は、〔ボランティアa：0°は25.5、30°は23.3〕、〔ボランティアb：0°は29.5、30°は26.8〕、〔ボランティアc：0°は40.1、30°は36.3〕となり、斜位30°においては全て低下した。

2-2-2 視覚評価および統計学的検定

0°と30°の両角度間において30°では全て平均値は下がったが、有意な差は見られなかった (Fig.11)。

3. 考 察

FOV中心が最もSNRが良いのはどのMRI装置も同じであり、大きなFOVになればなるほど端は不安定である。その保証できる限界はメーカーによって規定FOVは決まっており、それを超えると当然ながら臥位、側臥位、斜位でのポジショニングに関わらず、頭尾方向のSNRは不足する。よって横断像での検証が必要であった。前述しているように、最適な画質を得るにはコイルと被写体間において「密接するような距離と安定した配置」での検査をしなければならない。ファントム傾斜角40°において、極端にSNRおよび均一性が低下した原因としては、低磁場装置は磁束自体がも

Table 4 Lumbar Oblique MRI Test Completion Status

Lumbar Oblique MRI Test Completion Status (n=10)	
Number of completed sequences	the number of people
End in 5 sequences	9
End in 4 sequences	1
End in 3 sequences	0
End in 2 sequences	0
End in 1 sequences	0

ともと「租」であり、さらにコイルの感度表面から傾斜がつく（コイルの感度表面から離れる）ことで、感度と被写体との距離依存の関係が崩れ、信号値が不均一になったことが、直接的な原因と考えられる。

椎体圧迫骨折、脊柱管狭窄症、腰椎ヘルニアといった腰椎領域疾患は、通常の仰臥位で検査を行った場合、痛みや痺れを伴うことが多く、比較的短時間でできるX線撮影でも、中には苦慮する場面に遭遇する。MRI検査は長時間になりやすいため、整形外科医や読影医から依頼されるシーケンス全てを撮像できない場合がある。当院での腰椎MRI検査のプロトコルは、位置決め画像を除くと、T₂強調画像矢状断像、T₁強調画像矢状断像、非周波数選択的脂肪抑制法（STIR法）の矢状断像、T₂強調画像横断像、T₁強調画像横断像の5シーケンスを撮像している。Table 4は仰臥位では撮像できない患者を、（今検討後）斜位で撮像した患者10人（男性：2人、女性8人）の検査終了状況を、医療画像管理システム（PACS）で確認した結果である。5シーケンスで終了していた割合は90%であった。このことから、検査開始から終了まで耐えられる姿勢であることが示唆された。なお、胸腰椎移行部から第4腰椎にかけての急性期椎体圧迫骨折を伴っていた症例が9割であった。

斜位にすることで視野角がフルオープンになり、痛みはそれほど感じなくても、「圧迫感や狭い空間が苦手」と訴える閉所恐怖症の患者に対しても有効であると考えられる。

腰背部痛や歩行困難で来院される患者に対して行われる画像診断検査はまずX線単純撮影であるが、椎体圧迫骨折が急性期であれば、骨折の状態が不明瞭なことが多いのをこれまで何度も経験してきた。MRI検査のポジショニング時の段階で仰臥位が取れなければ、検査を行うことができず、入院加療が遅れる。椎体骨折評価の新しい基準（2012年度改訂版）にも、「骨折症状のある椎体骨折には骨折治療を行わなければならない

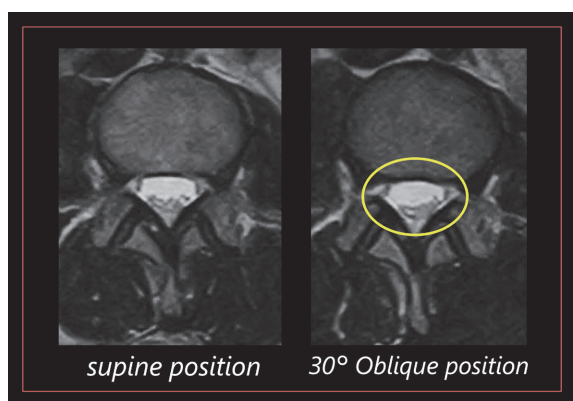


Fig.12 Differences in cauda equina nerve delineation at different angles

い。臨床症状があっても X線検査で形態変化がない早期の椎体骨折の診断や椎体骨折の新旧の判定に MRI 検査が有用である。MR 矢状面像の T₁ 強調画像で、椎体に局限してその一部が帯状、あるいはほぼ全部が低信号の場合 (STIR 像では同領域にほぼ一致して高信号を認める場合) を椎体骨折とする。」と明記⁴⁾されており、MRI 検査は非常に重要な役割を担っている。斜位で撮像する際の画像診断上への影響は、神経根が重力により体が傾いた方にシフトした画像になるが、脊髄の硬膜内血腫の場合は馬尾神経が腹側にシフトするので、主目的が腰椎ヘルニアや脊柱管狭窄症の場合は問題ないと考える (Fig.12)。ただし、斜位で撮像していることを読影医、主治医が分かるようにしておく必要はある。

斜位で腰椎 MRI 検査をする際に懸念される点として、「椎体のねじれ」が挙げられる。今後は安定した斜位でのポジショニングでの検査ができるように、固定具を使用したさらなる検討が必要と考えられる。

4. 結 語

本研究より、当院垂直磁場装置において斜位による腰椎検査が可能となり、患者に対して愛護的であり、検査の選択肢が増えたことで、患者の負担軽減に寄与できる可能性が示唆された。

5. Abbreviations

FOV : Field of View

ETL : エコートレイン

NSA : number of sample averaged

STIR : Short TI inversion Recovery

PACS : Picture Archiving and Communication System

NEMA : National Electric Manufacturers Association

6. 謝 辞

本研究に際し、ご協力いただきました当施設の諸氏、ならびにご教授いただきました市立角館総合病院 千葉大志さま、本論文の作成にご指導いただいた昭和大学保健医療学部大学院 保健医療学研究科診療放射線領域 加藤京一教授に感謝申し上げます。なお、本研究の一部要旨は第35回日本診療放射線技師学会大会 (2019年, 埼玉) で発表した。

7. 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。

表の説明

Table 1	物理的評価測定 of 計算式
Table 2	ボランティア撮像条件 (横断像)
Table 3	5段階の視覚評価
Table 4	腰椎斜位MRI検査の検査完了状況 (n=10)

図の説明

Fig.1	当院における腰椎MRI検査の推移 (2015年~2019年)
Fig.2	ファントムの写真と画像
Fig.3	物理評価測定 of 模式図
a)	寝台-ガントリー間距離 : 36 cm
b)	ファントムを10°刻みで傾けながら測定
c)	コイルの感度部分 (エレメント部)
Fig.4	各角度における感度特性の比較検証
Fig.5	ボランティア撮像 (画像評価) の模式図
a)	ボランティア
Fig.6	測定に使用したスライス面
Fig.7	Pixel Shiftの方法
Fig.8	SNR測定の結果
Fig.9	均一性測定結果
Fig.10	PPCの結果 (感度特性)
Fig.11	画像評価の結果
Fig.12	斜位撮像における馬尾神経の描画の違い

参考文献

- 1) 並木昭義, 他 : コ・メディカルのための統計学入門 第1版, 日本放射線技師会出版会, p36-38, p45-49, p70, 2005.
- 2) 宮地利明, 今井 広, 他 : 標準 MRI の評価と解析, 日本放射線技術学会, p35-37, 2012.
- 3) 笠井俊文, 土井 司 : MR撮像技術学 改訂2版, 株式会社オーム社, p85, 2008.
- 4) 椎体骨折評価委員会 (日本骨形態計測学会, 日本骨代謝学会, 日本骨粗鬆症学会, 日本医学放射線学会, 日本整形外科学会, 日本脊椎脊髄病学会, 日本骨折治療学会) 編 : 椎体骨折評価基準 (2012年度改訂版).