

〔総説〕

腰椎椎間孔狭窄の診断

江 口 和¹⁾ 大 鳥 精 司¹⁾ 山 下 正 臣¹⁾ 山 内 かづ代¹⁾
鈴 木 宗 貴¹⁾ 折 田 純 久¹⁾ 鴨 田 博 人¹⁾ 新 井 玄¹⁾
石 川 哲 大¹⁾ 宮 城 正 行¹⁾ 梶 田 喜 正²⁾ 木 川 隆 司²⁾
越 智 茂 博²⁾ 高 橋 和 久¹⁾

(2009年9月3日受付, 2009年10月29日受理)

要 旨

整形外科診療において診断に難渋することの多い腰椎椎間孔狭窄について文献的考察を行った。腰椎椎間孔狭窄は脊椎退行性変化により脊柱管より外側の椎間孔内外で神経根・腰神経が絞扼を受ける状態と定義される。頻度は腰椎変性疾患の中で8-11%と報告されており, まれな病態ではない。臨床症状では, 安静時下肢痛, 腰椎後屈制限が高率に認められる。90%は保存加療可能だが, 78%は遷延化すると報告されている。画像診断では, 単純X線, CT, MRIが有用だが, false positiveが多く, 選択的神経根造影・ブロックを組み合わせ総合的に診断する。最近では3D-CT, MR myelography, 3D-MRI, 電気生理学的診断などが有用との報告がある。しかし, Macnabらがhidden zoneと紹介したごとく, 画像診断法が進歩した現代でも見落とされやすく, Failed back surgery syndromeの約60%を占め, 手術成績を悪化させる一因となり, 画像診断の進歩が期待される。われわれは最近, 腰椎椎間孔狭窄診断に対する新たな試みとして拡散強調MRIを用いた検討を行っており, あわせて報告する。

Key words: 腰椎椎間孔狭窄, 画像診断法, 拡散強調MRI

はじめに

椎間孔狭窄はすでに1927年puttiらによって仙椎化における腰椎L5神経障害を起こす病態として報告されていた[1,2]。その後, 1954年Verbiestにより腰部脊柱管狭窄症の概念が導入され[3], 椎間孔狭窄の概念は1976年Arnoldiら[4]が腰部脊柱管狭窄症国際分類の中で外側型狭

窄の範疇の一つとして記載したのに始まる。頻度は腰椎変性疾患の中で8-11%と報告されており[5,6], まれな病態ではない。しかし, Macnabら[7]がHidden zoneと紹介したごとく, この部の病態は見落とされやすく, Failed back surgery syndromeの約60%を占め[8], 手術成績を悪化させる一因となる。画像診断法が進歩した現代においても腰椎疾患の診断に際して常に念頭に置く

¹⁾ 千葉大学大学院医学研究院整形外科

²⁾ 千葉大学医学部附属病院放射線部

Yawara Eguchi¹⁾, Seiji Ohtori¹⁾, Masaomi Yamashita¹⁾, Kazuyo Yamauchi¹⁾, Munetaka Suzuki¹⁾, Sumihisa Orita¹⁾, Hiroto Kamoda¹⁾, Gen Arai¹⁾, Tetsuhiro Ishikawa¹⁾, Masayuki Miyagi¹⁾, Yoshitada Masuda²⁾, Takashi Kikawa²⁾, Shigehiro Ochi²⁾ and Kazuhisa Takahashi¹⁾: Diagnosis of Lumbar foraminal stenosis.

¹⁾ Department of Orthopedic Surgery, Graduate School of Medicine, Chiba University, Chiba 260-8670.

²⁾ Department of Radiology, Chiba University Hospital, Chiba 260-8677.

Tel. 043-226-2117, Fax. 043-226-2116, E-mail: yawara_eguchi@yahoo.co.jp

Received September 3, 2009, Accepted October 29, 2009.

要旨は第12回ちば脊椎カンファレンスで研究発表として講演した。

べき疾患である。今回、本疾患について診断を中心に文献的考察を行ったので報告する。さらにわれわれは最近、腰椎椎間孔狭窄診断に対する新たな試みとして、拡散強調MRIを用いた検討を行っており、あわせて報告する。

椎間孔部の解剖

腰椎脊柱管外側および神経根の解剖については諸家により様々な報告がある。Bose[9]やCrockら[10]は硬膜管から分岐し、上下椎弓根に挟まれた椎間孔に至る管状構造を神経根管 (nerve root canal) と呼んでいる。Leeら[11]は3つのzoneに区分し、手前よりentrance zoneあるいはlateral recess zone (外側陥凹), mid zone, exit zoneとした。一方、Jenisら[12]は椎弓根を中心に区分し、椎弓根の内側を脊柱管内あるいは外側陥凹 (lateral recess zone), 椎弓根内縁から外側縁の間を椎間孔 (vertical interpedicular zone), 外縁から外側を椎間孔外 (extraforaminal zone) と分類し、現在、この分類が広く用いられている (図1)。

椎間孔は矢状面でみると洋梨型をしており高さは10-19mm, 面積は40-160mm²である[13]。椎間孔は

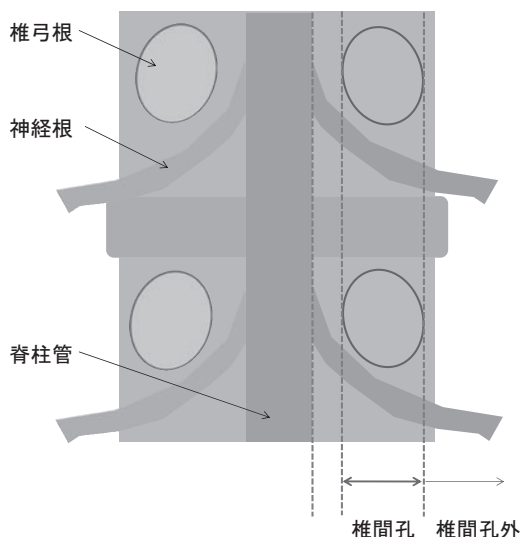


図1 椎間孔部の解剖

椎弓根を中心に区分し、椎弓根の内側を脊柱管内あるいは外側陥凹、椎弓根内縁から外側縁の間を椎間孔、外縁から外側を椎間孔外と分類される。

上下が椎弓根、前方は上位・下位の椎体もしくは椎間板、後方は椎間関節、黄色靱帯により囲われている。またこれらは加齢性変化に伴い椎体孔狭窄の要素となり得る[14,15]。

一方、腰仙椎神経根の走行については、冠状面で腰椎L1-5神経根は約40度、仙椎S1神経根は約20度の角度で脊柱管から分岐して下行する。また後根神経節の大きさは下位ほど大きくなり、S1で最大 (長さ13mm, 幅6mm) である[16]。後根神経節の位置についてS1では脊柱管内に約85%, L5では約35%存在し、S1神経根はL5神経根に比べ脊柱管内に多く存在する[17]。

椎間孔狭窄の病態

椎間孔狭窄は脊椎の退行性変化の進行に伴って、椎間板高の狭小化が起こり、下位腰椎の上関節突起が上前方に垂脱臼し、さらに黄色靱帯肥厚、骨棘形成が加わり、生じると考えられる。Hasegawaら[18]は椎間孔の高さ15mm以下 (正常: 約20mm), 椎間板高さ4mm以下 (正常: 6-7mm) が椎間孔狭窄の指標としている。椎間孔狭窄では頭側から椎弓根、前下方から膨隆椎間板、椎体骨棘、後下方から上関節突起先端、黄色靱帯などにより3方向から圧迫を受ける[14,15]。久野木らは、圧迫形態により3群に分類した。すなわち、前後型絞扼、上下型絞扼、全周型絞扼に分類し、手術例の多くは全周型絞扼であると報告した[15]。一方、Inufusaら[19]による腰椎動因子の関与に関する検討では、椎間孔面積は腰椎屈曲位では12%拡大するが、伸展位では15%縮小することを示し、さらに神経絞扼は屈曲位で15.4%に対し伸展位では33.3%と増加し、腰椎伸展位により椎間孔狭窄が増強することを報告した。

椎間孔狭窄の好発高位について、Jenisら[12]はL5神経根が75%と最も多く、続いてL4神経根が15%, L3神経根が5.3%, L2神経根が4.0%と報告している。Hasegawaら[20,21]は椎間孔の高さ (椎弓根間の距離) と後根神経節の高さ (頭尾方向の径) の比を検討し、椎間孔の高さはL1/2からL5/S1までほぼ同様であるが、後根神経節の高さはL5神経根にて最大 (8.3mm) であり、椎間孔頭尾径に占める後根神経節の割合はL5神経根

で最大 (51.2%) であった。また椎弓根の幅も L5 で 16.9mm と最大であり, L5 神経根は頭尾方向に余裕なく, 椎間孔内の走行も長く, 骨性要素により椎間孔狭窄を来しやすいことを示した。また神経根の局在について, Kikuchi らは神経根が頭側に位置するほど狭窄を受けやすく, 神経根には疼痛伝達に関与する後根神経節が存在するため, 神経根症状として痛みを来しやすいと報告している [22]。

臨床症状

Porter ら [6] は, 1) 激しい根性下肢痛, 2) 安静時下肢痛, 3) SLR (straight leg raising) テスト等の tension sign に乏しいこと, 4) 年齢 40 歳以上を椎間孔狭窄の特徴としている。また感覚低下や運動麻痺等の神経学的所見に乏しく, 腰椎後屈制限いわゆる Kemp 徴候を高頻度認め [23], 90.4% は保存的加療可能だが, 78% は下肢痛が慢性化すると報告している。一方, 佐藤ら [24] は脊柱管内狭窄の臨床症状と比較検討し, 椎間孔部狭窄で有意差を認めたのは安静下肢痛であり, 特に座位や仰臥位, 患側下の側臥位でも下肢痛を訴える際, 椎間孔狭窄を疑い得ると報告した。

画像診断

臨床症状から椎間孔狭窄が疑われた場合, 障害神経根高位を念頭に置きながら, 各種画像診断を駆使して病態把握をする。単純 X 線では椎間腔狭小化や椎体後方骨棘, 後方すべり, 椎間板楔状化などが疑わせる所見である [6,25,26]。単純 CT では骨棘など骨性圧迫要素の確認に有用であり, 特に傍矢状面における椎間孔部の上関節突起骨棘形成や椎体後下縁の骨棘形成に着目する [26-28]。MRI は有用であり, 特に T1 強調画像の傍矢状断像における椎間孔部の脂肪像消失は sensitivity が高いが, 高齢者では false positive が多く, 水平断像, 冠状断像を併用した病態把握が必要である [29,30] (図 2)。選択的神経根造影・ブロックでは椎間孔部における神経根の横走化や途絶に着目する。またブロック効果による一時的な根性疼痛

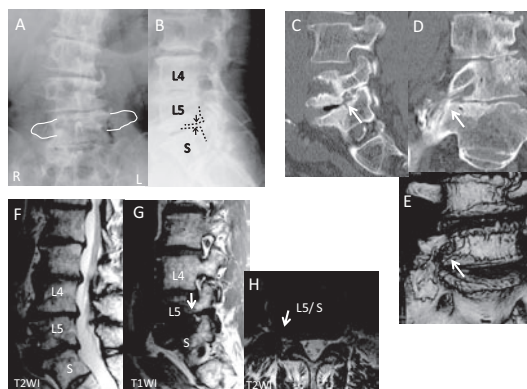


図 2 画像所見 (症例: 61 歳男性 右 L5 椎間孔狭窄)

A, B) 単純 Xp: 正面像 (A) では右 L5 横突起と仙骨翼の間が狭く, 側面像 (B) では L5-S1 椎間板高狭小化を認める (矢印) C, D, E) 神経造影後 CT: 矢状断像 (C) で椎間孔狭小化 (矢印), 冠状断像 (D) では椎間孔出口部で骨棘により神経根圧迫 (矢印), 3D-CT (E) では椎間孔出口部で神経根圧迫像を認める (矢印) F, G, H) MRI: T1 強調正中矢状断像 (F) では脊柱管狭窄を認めない, T1 強調傍矢状断像 (G) では脂肪消失像あり (矢印), T2 強調横断像 (H) では健側に比し椎間孔出口狭窄を認める (矢印)

の消失は障害神経の機能的診断として有用である [31,32]。また最近では, MRI myelography や 3 次元 MRI の登場により神経根の横走化や神経浮腫が視覚化できるようになり, 椎間孔狭窄の診断法が向上してきている [33-35]。また機能的診断として, 岩崎らは電気生理学的手法を用い, 椎間孔出口部に刺入した針電極から電気刺激を行い, 前脛骨筋から複合筋活動電位をとり, 遠位潜時延長 (15.2ms 以上) を診断基準として報告している [36]。

久野木ら [31] は椎間孔狭窄について診断の難易度から, 脊柱管内には病変のないもの, 脊柱管内の病変が障害神経高位と一致しないもの, 脊柱管内病変が障害神経高位と一致するもの, の 3 つのカテゴリーに分類している。安静時下肢痛があり座位でも下肢痛が増強するような症例で, MRI や脊髓造影にて脊柱管内に病変がない場合は椎間孔狭窄を疑い神経根ブロックにより診断する。このように脊柱管内に病変がない症例が手術例の半数を占める。一方, 脊柱管内に病変があるが, 障害神経高位と一致しない場合も少なくない。最も診断に苦慮するのは, 脊柱管内病変と障害神経高位が一致する場合であり, たとえば L4/5 の中心

性狭窄とL5/Sの椎間孔狭窄の合併した場合、L5神経障害の責任特定は困難である。

拡散強調MRIの臨床応用

MRIを用いて、水分子の移動（拡散）を強調し画像化したものが拡散強調画像（diffusion weighted image; DWI）であり、プロトンの拡散運動に対して一定方向から運動検出傾斜磁場（motion problem gradient: MPG）を引加して作成される[37-40]。2つの異なる磁場強度（gradient b factor; b値）のDWIからみかけの拡散係数（apparent diffusion coefficient; ADC）が計算され、組織特異的な数値を示す。急性期脳梗塞の診断において、拡散強調画像が必要不可欠であり、現在臨床現場で広く用いられている[41]。組織内の有髄神経ではミエリン鞘により水分子拡散が神経線維に平行な方向に制限されるが、神経損傷に伴う脱髄変性により拡散運動が亢進し、ADC値の上昇が報告されている[42-44]。しかし、これまで腰部神経根におけるDWIの報告は少なく、ADC値の変化をとらえることにより腰部神経障害の評価ができる可能性がある。また末梢神経はミエリン鞘により神経線維方向に拡散が制限されるため、Takaharaら[45]はDWIを用いて全身末梢神経を描出（neurography）できることを報告した。本研究ではDWIを用いて、椎間孔狭窄を指摘された腰部神経根病変のADC値を計測し、さらにneurographyによる腰神経病変評価を行った[45,46]。

PHILIPS社1.5T MRIを使用した。またDWIは全身腫瘍病変検索として有用性が報告されているDiffusion Weighted Whole Body Imaging with Background Body Signal Suppression (DWIBS; 全身拡散強調背景抑制法)を用いた[47]。Motion probing gradient (MPG; 拡散強調のための傾斜磁場)は3軸同時引加型を用い、シーケンスはb-value (s/mm²) = 1000, TR/TE/TI (ms) = 7130/66/170, slice orientation = axial, slice thickness/gap (mm) 4/-1, field of view (FOV) (mm) = 400, Matrix = 160, scan time = 9 min 18s.とした。Neurographyはb = 1000のaxial画像からMaximum intensity projection (MIP; 3

次元データを2次元データに投影する最大値投影法)を用いて、2次元coronal画像を再構築した。ADC値はT2 coronal像とT2 sagittal像からADC axial画像上で位置情報を設定し、神経横断面にROI (region of interests)を設定して計測した。なお各神経において2ヵ所、すなわち硬膜管から分岐した後根神経節に至る神経根; nerve rootとさらに後根神経節より遠位の腰神経; spinal nerveにROIを設定して計測した。

症例はMRI上、脊柱管内病変を認めず、片側のみ神経根性下肢痛を有する椎間孔狭窄と診断された患者14例（男性8、女性6）、年齢62歳である（表1）。臨床所見と各種画像診断および選択的神経根ブロックにて診断した。最終的な診断は椎間孔狭窄11例、腰椎椎間板ヘルニア（外側型）2例、外側陥凹狭窄1例であった。障害神経根はL4: 4例、L5: 10例、S1: 0例であった。また対照として、健常者14例（男性6、女性4）を検討した。除外項目として、過去の腰椎手術歴、脊髄症、高度腰部脊柱管狭窄症は除外した。なお、本研究は千葉大学の倫理審査で承認され、患者の同意のもと行った。

検討項目として、健常者および椎間孔狭窄症患者群の腰椎（L4, L5, S1）神経根および腰神経の左右のADC値、neurographyによる神経根走行の検討を行った。また術前後の下肢痛評価をVisual analog scale (VAS)を用いて評価した（0: 痛みなし、100: 最も激しい痛み）。なお検定はpost hoc testを用いて行い、 $P < 0.05$ を有意差ありとした。

DWIBSにより、約10分で腰部神経根画像を取得可能であった（図3）。健常群における神経根と尾側の腰神経のADC値（ $\times 10^{-3}$ mm²/s）（神経根、腰神経）はL4（1.228, 1.059）、L5（1.249, 1.144）、S1（1.294, 1.174）であり、左右差を認めなかったが、同一神経では神経根の方が遠位腰神経よりADC値が有意に高値であった（ $P < 0.05$ ）。一方、患者群におけるADC値（ $\times 10^{-3}$ mm²/s）は患側では神経根1.387、腰神経1.507と高値だったが、健側では神経根1.206、腰神経1.154と神経根、腰神経ともに患側でADC値の有意な上昇を認めた（図4、 $P < 0.001$ ）。またneurographyでは狭窄部において神経の腫脹（100%）、横走化・途

表1 患者群のサマリー

No.	年齢	診断	障害神経	ADC ($\times 10^{-3}$ mm ² /s)				神経走行異常		VAS (術前)	VAS (術後)	治療
				神経根 (患側)	神経根 (健側)	腰神経 (患側)	腰神経 (健側)	横走化	神経腫脹			
1	76	椎間孔狭窄	L4 (右)	1.735	1.157	1.52	1.321	+	+	60	20	Facetectomy+TLIF
2	61	椎間孔狭窄	L5 (右)	1.366	1.306	1.441	1.064	+	+	100	0	Facetectomy+TLIF
3	40	椎間孔狭窄	L5 (右)	1.125	1.155	1.812	1.159	+	+	100	0	Facetectomy+TLIF
4	71	外側陥凹狭窄	L5 (左)	1.436	1.20	1.465	1.125	-	+	70	10	Medial fenestration
5	76	椎間孔狭窄	L5 (左)	1.444	1.180	1.432	1.056	-	+	60	10	神経根ブロック
6	65	椎間孔狭窄	L5 (右)	1.339	1.236	1.711	1.118	+	+	80	0	Facetectomy+TLIF
7	54	外側腰椎椎間板ヘルニア	L4 (右)	1.568	1.278	1.421	1.183	+	+	40	0	神経根ブロック
8	65	Foraminal stenosis	L4 (右)	1.305	1.028	1.355	1.038	+	+	90	0	神経根ブロック
9	47	外側腰椎椎間板ヘルニア	L5 (左)	1.342	1.074	1.712	1.090	-	+	80	0	神経根ブロック
10	68	椎間孔狭窄	L5 (左)	1.232	1.261	1.319	1.252	+	+	80	15	Facetectomy+TLIF
11	56	椎間孔狭窄	L5 (左)	1.641	1.326	1.311	1.149	-	+	60	10	神経根ブロック
12	66	椎間孔狭窄	L5 (右)	1.443	1.278	1.740	1.414	+	+	90	0	Facetectomy+TLIF
13	61	椎間孔狭窄	L4 (右)	1.102	1.033	1.360	0.954	+	+	75	20	Facetectomy+TLIF
14	64	椎間孔狭窄	L5 (左)	1.345	1.378	1.505	1.230	+	+	90	15	Facetectomy+TLIF
Mean	62			1.387	1.206	1.507	1.154	71.50%	100%	76.8	7.1	

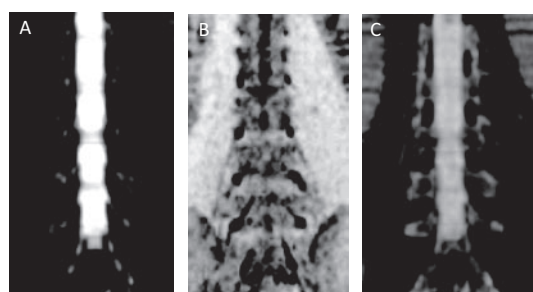
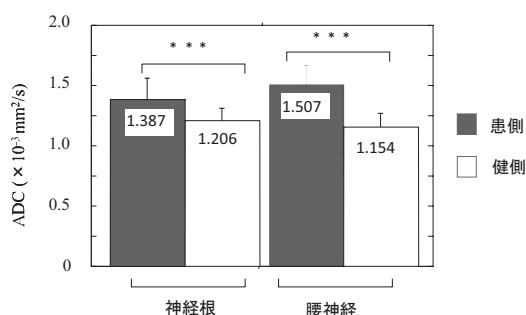


図3 健常者における腰部神経根の拡散強調画像 (冠状断像)

A) 拡散強調画像 (b値 = 0) B) Neurography (b値 = 1000): 白黒反転し、神経根が黒く描出される C) ADCマップ

絶 (71.5%) を高率に認めた (図5, 表1)。最終的に手術をしたのが9例 (Medial fenestration: 1例, total facetectomy+経椎間孔的椎体間固定 (TLIF): 8例) であり, 全例, DWIで指摘された椎間孔狭窄部に神経根圧迫病変を認め, 除圧術により, 術後下肢痛VAS76.8点から7.1点に著明に改善した (表1)。

DWIBSはSENSE-STIR-EPI法を用いることにより, 確実な脂肪抑制効果が得られ, 呼吸停止なしに長時間撮影できるので, 十分な信号雑音比を確保することができる。これにより薄いスライスを得て任意方向断層像の作成が可能



*** $P < 0.001$

図4 患者群における神経根と腰神経のADC値 (患側と健側の比較)

神経根, 遠位の腰神経ともに椎間孔狭窄側で健側に比べ有意にADC値が高値であった ($P < 0.001$)。

であり, 3次元的な全身腫瘍検索としてPET (Positron Emission CT) に匹敵する有用性が報告されている [47]。腫瘍や神経組織は他の組織に比べ拡散制限を受けDWI上強調・描出できる。またTakaharaら [45] はDWIBSを用いて, 世界初となる全身末梢神経画像の描出に成功した。今回, DWIBSを用いることにより, 約10分で腰部神経根のNeurography画像を取得可能であり, 椎間孔狭窄部において神経横走化・途絶など走行異常を認めた。Olmakerら [48] は豚の馬尾慢性圧迫モデルにおいて, 圧迫部位の頭尾側にわたり

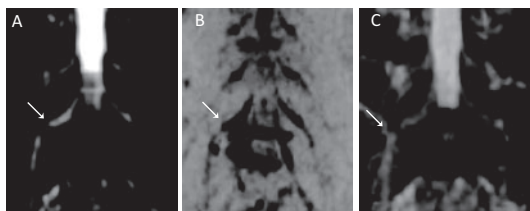


図5 椎間孔狭窄における腰部神経根の拡散強調画像 (図2と同一症例)

A) 拡散強調画像 (b 値 = 0): 右L5 神経根が一部途絶している (矢印) B) Neurography (b 値 = 1000): 神経根が膨隆椎間板により上方に圧迫され、横走化・腫脹している (矢印) C) ADCマップ: 健側に比べ神経根～腰神経が腫脹している (矢印)

神経根浮腫、脱髄変性が起こることを報告した。またChristineら[49]は脳外傷モデルを用いて急性期(0-4日)では軸索損傷によりADCは低下するが、亜急性期(1-4週)では浮腫と脱髄変性が起こり、ADCは上昇すると報告した。今回、椎間孔狭窄ADC上昇を認めたが、神経慢性圧迫を受け、脱髄性変化が起こり、プロトン拡散運動の増大を数値としてとらえた可能性がある。しかし、これまで諸家の報告では脊髄損傷や手根管症候群など末梢神経損傷に関するADC値について一定した見解は得られていない[42-44,49-51]。神経損傷の急性期・慢性期による神経損傷の差異や中枢、末梢神経による差異が考えられる。本研究から、DWIを用いて、Neurographyから神経横走化と浮腫を視覚的に評価でき、さらにADC値により神経圧迫による神経浮腫を定量化できた。DWIは椎間孔狭窄など神経根圧迫病変の新たな診断法となり得る可能性がある。

結 語

1. 椎間孔狭窄の診断について文献的考察を行った。
2. 安静時下肢痛が強く、脊柱管内圧迫が軽度な場合、椎間孔狭窄を念頭において診断を行う必要がある。
3. 画像所見ではfalse positiveの頻度が多く、臨床症状、神経根ブロックなどから総合的に診断することが重要である。
4. 拡散強調MRIを用いた検討では、神経横走化と浮腫を視覚的に評価でき、さらにADC値

により神経圧迫部を定量化でき、椎間孔狭窄の新たな診断法となりうる可能性がある。

SUMMARY

Lumbar foraminal stenosis is a condition in which a nerve root or spinal nerve is entrapped in the narrowed lumbar foramen in degenerative lumbar spinal disorders. The incidence of nerve root entrapment has been reported to be between 8% and 11% in degenerative lumbar disease. A higher incidence of foraminal stenosis is found in the lower lumbar segments (the L5 root (75%), followed by the L4 root (15%), the L3 root (5%), and the L2 root (4%). In its clinical presentation, severe leg pain at rest and limited lumbar extension to the painful side (Kemp's sign) were observed at high frequency. Although imaging studies including radiography, CT, and MRI provide an effective means for evaluating the foraminal stenosis, these conventional imaging techniques do not detect foraminal stenosis with any certainty because false positive findings may be frequently observed. Evaluation of clinical findings and selective nerve root infiltration and block are necessary to make a correct diagnosis. This condition unfortunately results in failed back surgery syndrome because it is difficult to make a correct diagnosis, for which advanced neuroimaging techniques are required.

We investigated clinical applications of diffusion-weighted imaging (DWI) of the lumbar foraminal nerve root entrapment using 1.5-tesla magnetic resonance (MR) imaging. Apparent diffusion coefficient (ADC) values were significantly higher in entrapped roots and distal spinal nerve than in intact ones. Neurography also showed abnormalities such as nerve indentation, swelling and running transversely in their course through the foramen. We believe that DWI is a potential tool for diagnosis of lumbar nerve entrapment.

文 献

- 1) Putti V. New conceptions in the pathogenesis of sciatic pain. Lancet 1927; 2: 53-60.
- 2) Mitchell CL. Lumbosacral facetectomy for relief of sciatic pain. J Bone Joint Surg 1934; 16: 706-8.
- 3) Verbiest H. A radicular syndrome from developmental narrowing of the lumbar vertebral canal. J Bone Joint Surg Br 1954; 36-B: 230-37.
- 4) Arnoldi CC, et al. Lumbar spinal stenosis and root entrapment syndromes. Definition and classification. Clin Orthop 1976; 115: 4-5.
- 5) Kunogi J, Hasue M. Diagnosis and operative treatment of intraforaminal and extraforaminal nerve root decompression. Spine 1991; 16: 1312-20.
- 6) Porter R, Hibbert C, Evans C. The natural history of root entrapment syndrome. Spine 1984; 9: 418-21.

- 7) MacNab I. Negative disc exploration: An analysis of the causes of nerve root involvement in sixty-eight patients. *J Bone Joint Surg* 1971; 53: 891-903.
- 8) Burton R, Kirkaldy-Willis W, Yong-Hing K, Heithoff K. Causes of failure of surgery on the lumbar spine. *Clin Orthop* 1981; 157: 191-7.
- 9) Bose K, Balasubramaniam P. Nerve root canals of the lumbar spine. *Spine* 1984; 9: 16-8.
- 10) Crock H. Normal, pathologic anatomy of the lumbar spinal nerve root canals. *J Bone Joint Surg* 1981; 63: 487-90.
- 11) Lee C, Rauschning W, Glenn W. Lateral lumbar spinal canal stenosis: Classification, pathologic anatomy, surgical decompression. *Spine* 1988; 13: 313-20.
- 12) Jenis LG, An HS. Spine Update. Lumbar foraminal stenosis. *Spine* 2000; 25: 389-94.
- 13) Stephens M, Evans J, O'Brien J. Lumbar intervertebral foramina: An in vitro study of their shape in relation to intervertebral disc pathology. *Spine* 1991; 16: 525-9.
- 14) Nowicki B, Haughton V, Schmidt T, et al. Occult lumbar lateral spinal stenosis in neural foramina subjected to physiologic loading. *Am J Neuroradiol* 1996; 17: 1605-14.
- 15) 久野木順一 椎間孔狭窄の病態 脊椎脊髓 2008; 21: 278-84.
- 16) Cohen M, Wall E, Brown R, Rydevik B, Garfin S. Cauda equina anatomy: II. Extrathecal nerve roots and dorsal root ganglia. *Spine* 1990; 15: 1248-51.
- 17) Hasue M, Kunogi J, Konno S, Kikuchi S. Classification by position of dorsal root ganglia in the lumbosacral region. *Spine* 1989; 14: 1261-4.
- 18) Hasegawa T, An H, Haughton V, Nowicki B. Lumbar foraminal stenosis: Critical heights of the intervertebral discs and foramina. *J Bone Joint Surg* 1995; 77: 32-8.
- 19) Inufusa A, An H, Lim T, Hasegawa T, Haughton V, Nowicki B. Anatomic changes of the spinal canal and intervertebral foramen associated with flexion-extension movement. *Spine* 1996; 21: 2412-20.
- 20) Hasegawa T, et al. Morphometric analysis of the lumbosacral nerve roots and dorsal root ganglia by magnetic resonance imaging. *Spine* 1996; 21: 1005-09.
- 21) Hasegawa T, An H, Haughton V. Imaging anatomy of the lateral lumbar spinal canal. *Semin Ultrasound CT MRI* 1993; 14: 404-13.
- 22) Kikuchi S, Sato K, Konno S, Hasue M. Anatomic, radiographic study of dorsal root ganglia. *Spine* 1994; 19: 6-11.
- 23) 内田研造, 前澤靖久, 馬場久敏【腰部脊柱管狭窄(症)】特殊な病態に対する治療法 椎間孔狭窄 NEW MOOK 整形外科 2001; 9: 289-95.
- 24) 佐藤栄修, 星野政俊, 百町貴彦, 吉本 尚, 柳橋寧, 椎間孔部～椎間孔外狭窄による再手術とその対策脊椎 2004; 21: 509-14.
- 25) Kirkaldy-Willis W, Wedge J, Yong-Hing K, Tchang S, de Krompay V, Shannon R. Lumbar spinal nerve lateral entrapment. *Clin Orthop* 1982; 169: 171-8.
- 26) 中小路拓, 濱 裕, 比佐健二ほか 腰椎椎間孔部狭窄の診断と治療. 整形外科 2002; 53: 898-905.
- 27) 犀川 勲, 齊藤太一, 入江 努, 田中哲也, 吉田喜策 第5腰椎後方すべりに伴う椎間孔狭窄症 マルチスライスCTを使用した再構成矢状断像による評価 整形外科 2005; 56: 209-15.
- 28) Vanderlinden R. Subarticular entrapment of the dorsal root ganglion as a cause of sciatic pain. *Spine* 1984; 9: 19-22.
- 29) 久野木順一 腰下肢痛に関する画像診断 腰椎外側型ヘルニアと腰椎椎間孔狭窄 ペインクリニック 2006; 27: 1031-36.
- 30) 久野木順一, 蓮江光男, 浜中一輝 腰椎椎間孔部神経根障害におけるMRIの有用性と限界 臨整外 1992; 27: 503-11.
- 31) 久野木順一 椎間孔狭窄の病態 第18回腰痛シンポジウム講演記録集 2007; 11-18.
- 32) Herron L. Selective nerve root block in patient selection for lumbar surgery: Surgical results. *J Spinal Disord* 1989; 2: 75-9.
- 33) 山田 宏, 吉田宗人, 木戸義照, 玉置哲也 脊髓神経根の3次元MRI 脊椎脊椎 2008; 21: 115-21.
- 34) Aota Y, Niwa T, Yoshikawa K, Fujiwara A, Asada T, Saito T. Magnetic resonance imaging and magnetic resonance myelography in the presurgical diagnosis of lumbar foraminal stenosis. *Spine* 2007; 32: 896-903.
- 35) Krudy AG. MR myelography using heavily T2-weighted fast spin-echo pulse sequences with fat presaturation. *AJR Am J Roentgenol* 1992; 159: 1315-20.
- 36) 岩崎 博, 山田 宏, 吉田宗人, 遠藤 徹, 中尾慎一, 南出晃人, 中川幸洋, 河合将紀 電気生理学的手法を用いた腰椎椎間孔外狭窄病変の新しい診断法 臨整外 2008; 43: 1193-98.
- 37) Bassar PJ, Jones DK. Diffusion tensor MRI: theory, experimental design and data analysis-a technical review. *NMR Biomed* 2002; 15: 456-67.
- 38) Beaulieu C, Allen PS. Determinants of anisotropic water diffusion in nerves. *Magn Reson Med* 1994; 31: 394-400.
- 39) Beaulieu C, Does MD, Snyder RE, et al. Changes in water diffusion due to Wallerian degeneration in peripheral nerve. *Magn Reson Med* 1996; 36: 627-31.
- 40) Bassar PJ, Pierpaoli C. Microstructural and physiological features of tissues elucidated by quantitative-diffusion-tensor MRI. *J Magn Reson B* 1996; 111: 209-19.
- 41) Minemitsu K, Li L, Fisher M, et al. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging: rapid and quantitative detection of focal brain ischemia. *Neurology* 1992; 42: 235-40.
- 42) Ohgiya Y, Oka M, Hiwatashi A, Liu X, Kakimoto N, Westesson PA, Sven E, Ekholm SE. Diffusion tensor MR imaging of the cervical spinal cord in patients with multiple sclerosis. *Eur Radiol* 2007; 17: 2499-504.

- 43) Lin X, Tench CR, Morgan PS, Constantinescu CS. Use of combined conventional and quantitative MRI to quantify pathology related to cognitive impairment in multiple sclerosis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2008; 79: 437-41.
 - 44) Kabakci N, Gürses B, Firat Z, Bayram A, Uluğ AM, Kovanlıkaya A, Kovanlıkaya İ. Diffusion tensor imaging and tractography of median nerve: normative diffusion values. *Am J Roentgenol* 2007; 189: 923-27.
 - 45) Yamashita T, Kwee TC, Takahara T. Whole-Body Magnetic Resonance Neurography. *N Engl J Med* 2009; 361: 538-9.
 - 46) Tsuchiya K, Imai M, Tateishi H, Nitatori T, Fujikawa A, Takemoto S. Neurography of the spinal nerve roots by diffusion tensor scanning applying motion-probing gradients in six directions. *Magn Reson Med Sci* 2007; 6: 1-5.
 - 47) Takahara T, Imai Y, Yamashita T, Yasuda S, Nasu S, Cauteren MV. Diffusion Weighted Whole Body Imaging with Background Body Signal Suppression (DWIBS): Technical Improvement Using Free Breathing, STIR and High Resolution 3D Display. *Radiation Medicine* 2004; 22: 275-82.
 - 48) Olmarker K, Rydevik B, Holm S. Edema formation in spinal nerve roots induced by experimental, graded compression: an experimental study on the pig cauda equina with special reference to differences in effects between rapid and slow onset of compression. *Spine* 1989; 14: 569-73.
 - 49) Mac Donald CL, Dikranian K, Bayly P, Holtzman D, Brody D. Diffusion tensor imaging reliably detects experimental traumatic axonal injury and indicates approximate time of injury. *J Neurosci* 2007; 27: 11869-76.
 - 50) Hiltunen J, Suortti T, Arvela S, Seppä M, Joensuu R, Hari R. Diffusion tensor imaging and tractography of distal peripheral nerves at 3 T. *Clinical Neurophysiology* 2005; 116: 2315-23.
 - 51) Khalil C, Hancart C, Le Thuc V, Chantelot C, Chechin D, Cotton A. Diffusion tensor imaging and tractography of the median nerve in carpal tunnel syndrome: preliminary results. *Eur Radiol* 2008; 18: 2283-91.
-