

特集

脊髄腫瘍

伊藤 定之*

はじめに

脊髄腫瘍は発生頻度こそ高くないが、進行すると不可逆的な神経障害を引き起こす可能性があり、早期の正確な診断と適切な治療方針の選択が極めて重要である。近年、MRIをはじめとした画像診断技術の飛躍的な進歩や、術中モニタリング技術の導入により、脊髄腫瘍に対する外科的治療の安全性・確実性は大きく向上している。さらに、人工知能(AI)を活用した画像解析や予後予測モデルの研究も進展しており、診断から治療までを支援する新たな技術として期待されている。本稿では、無症候性腫瘍に対する経過観察の意義、腫瘍の性状に応じた手術適応の判断、術式の選択と術後合併症対策、さらにAI技術の臨床応用の展望について最新の知見を基に解説し、脊髄腫瘍診療の現在地と今後の方向性を提示する。

I. 臨床症状と画像診断の基本

脊髄腫瘍はその発生部位や腫瘍の種類に応じて多様な臨床症状を呈する。もっとも一般的な初発症状は局所の疼痛であり、特に夜間痛が特徴的である。腫瘍が脊髄実質や神経根を圧迫することにより、感覚障害や運動麻痺、膀胱直腸障害が進行性に出現することが多い。腫瘍の増大や浮腫、脊髄空洞症(syrinx)の形成により、神

経症状が急速に悪化する症例も存在する¹⁾。

画像診断としては、MRIが最も有用であり、T1強調像、T2強調像、Gd造影T1像の3系列を基本とする。腫瘍の部位、脊髄実質への浸潤、脊髄周囲の浮腫や嚢胞性変化、造影効果のパターンなどから腫瘍の性質をある程度推定することが可能である。神経鞘腫は、T2強調像では高信号を示すことが多く、病変の約58%が均一な高信号として描出される一方、約34%は等信号を呈する。また、造影T1強調像ではrim enhancement(腫瘍の周囲の縁が造影剤によって濃染される)が高頻度に認められ(58.5%)、均一な造影効果を示す場合はT2等信号である傾向がある。腫瘍は椎間孔を通じて硬膜外に進展し、ダンベル型の形態を呈することが多く、特に硬膜外側に明瞭な境界を持つ腫瘍像が特徴的である^{2,3)}(図1)。髄膜腫はT1等信号、T2低～等信号で、造影により強く均一に染まり、dural tail sign(髄膜腫の周囲の硬膜が、造影MRIで腫瘍から尾のように連続して濃染される所見)(図2)。

上衣腫は髄内腫瘍のなかで最も頻度が高く、中心性に存在し、T2高信号で脊髄膨大や末梢のcyst, syrinxを伴いやすい^{1,4)}。粘液乳頭状上衣腫(myxopapillary ependymoma: MPE)は、主に馬尾部や髄円錐部のfilum terminale(脊髄終糸)から発生するWHO Grade Iの腫瘍であり、T1強調像で等信号、T2強調像で均一な高信号を呈することが多く、Gd造影T1強調像では高率に均一な造影効果を示す。一方、神経鞘腫では、T2強調像で均一な高信号像を呈する症例ではrim enhancementを示す傾向があり、T1造影像

— Key words —

脊髄腫瘍, 神経鞘腫, 髄膜腫, 髄内腫瘍

*Sadayuki Ito: 名古屋大学 医学系研究科 障害児(者)医療学寄附講座 特任助教

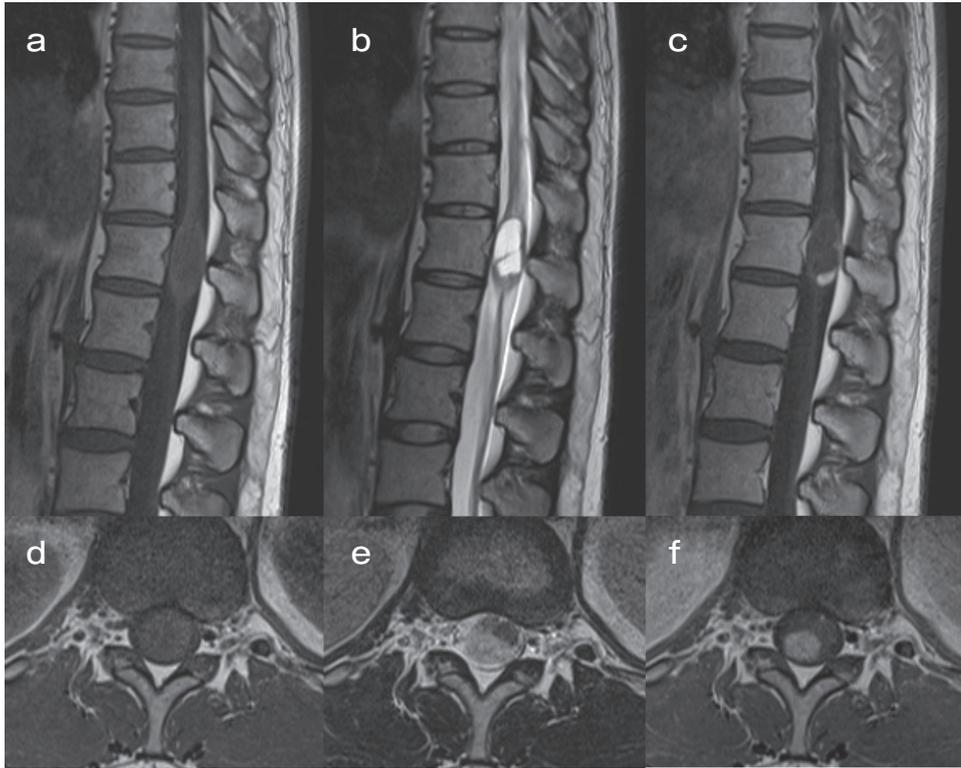


図1 神経鞘腫のMRI画像

a. Sagittal T1WI b. Sagittal T2WI c. Sagittal 造影 T1WI d. axial T1WI e. axial T2WI f. axial 造影 T1WI
 sagittal 造影 T1WI (c)で rim enhancement を認める

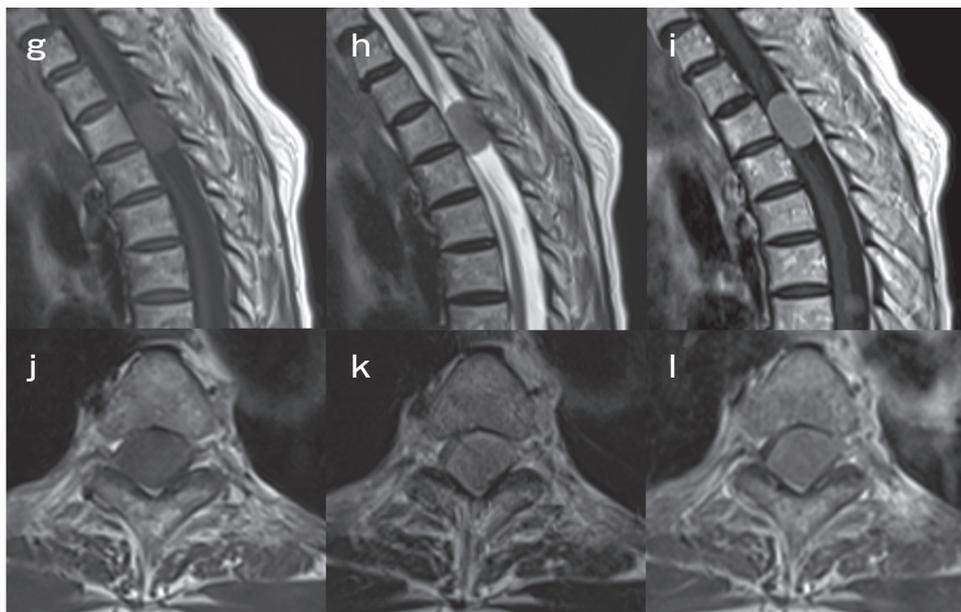


図2 髄膜腫のMRI画像

g. Sagittal T1WI h. Sagittal T2WI i. Sagittal 造影 T1WI j. axial T1WI k. axial T2WI l. axial 造影 T1WI
 sagittal 造影 T1WI (i)で dural tail sign を認める

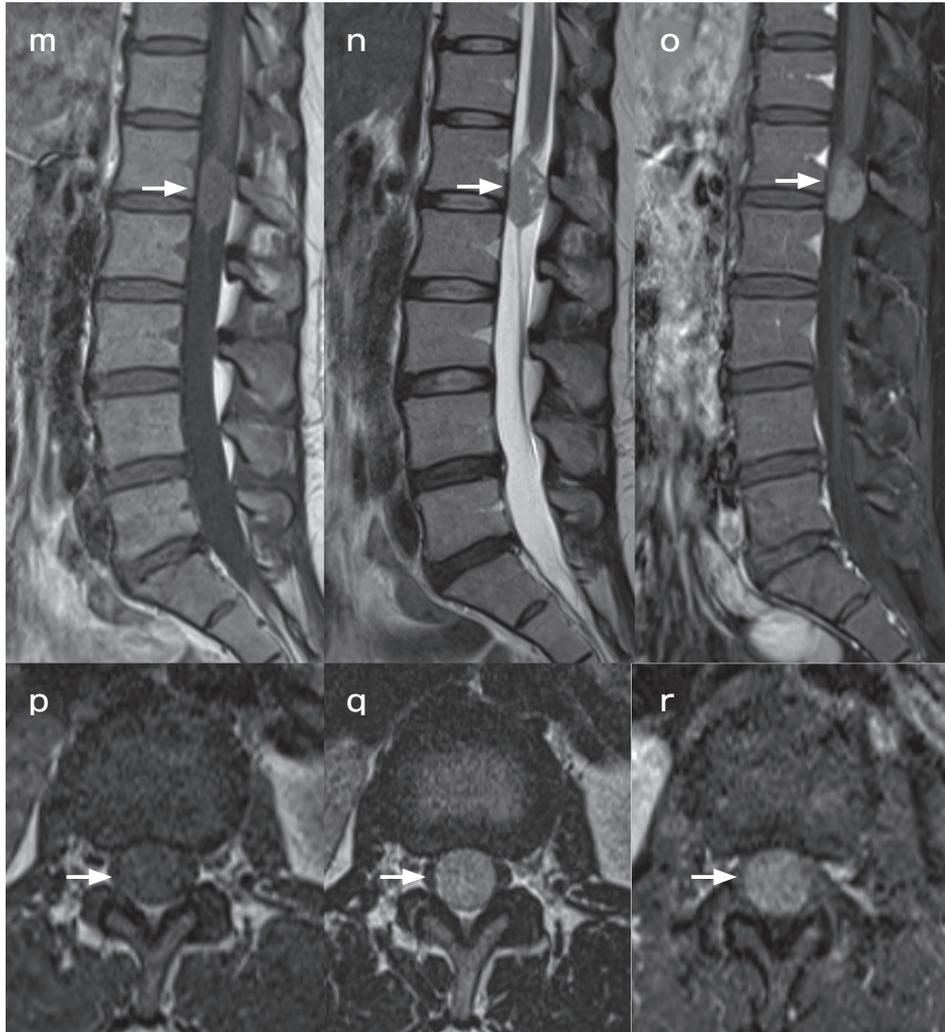


図3 粘液乳頭上上衣腫のMRI画像

m. Sagittal T1WI n. Sagittal T2WI o. Sagittal 造影 T1WI p. axial T1WI q. axial T2WI r. axial 造影 T1WI axial 画像(a, b, c)で脊柱管の中央に腫瘍を認める

での造影パターンが鑑別に有用となる。MPEは腫瘍が中央に位置し、周囲の神経根を外方へ圧排する傾向があるのに対し、神経鞘腫では神経根由来で偏心性の圧排像を呈することが多い(図3)。MRI上のT2WIおよび造影T1WIの信号パターンを総合的に評価することで、両者の鑑別が可能となる可能性がある²⁾。

星細胞腫(astrocytoma)は小児に多く、脊髄に沿って広範囲に浸潤し、T2高信号で境界不明瞭な造影不均一病変として描出される。血管芽腫(spinal hemangioblastoma)は小型の強く造影される結節と周囲の浮腫が特徴で、周囲に広がる

syrinxが目立つことが多い。造影効果が強く、腫瘍内にflow void(流速効果による信号欠損)が認められることもある⁵⁾。

小児例では、成人とは異なる臨床経過を示すことが多く、髄内腫瘍の頻度が高く、進行も速い傾向がある。初発症状が非特異的なことも多く、歩行障害、姿勢異常、運動のぎこちなさ、成長障害などから発見されることがある。MRIではependymomaやastrocytomaにおいて嚢胞やsyrinxを伴う例が多く、腫瘍の悪性度や術後の機能回復に影響を与えるため、早期発見と定期的な画像フォローが極めて重要である。

II. 経過観察の意義とその判断基準

脊髄腫瘍の中でも、神経鞘腫や髄膜腫などの良性腫瘍は、無症候性の状態で偶発的に発見されることが多い。これらの腫瘍に対しては、症状がない限り、定期的な画像フォローアップによる経過観察が選択されることがある。名古屋大学の安藤らによる報告では、無症候性の神経鞘腫に対して平均5年以上の経過観察を行い、腫瘍の有意な増大や症候の出現は限定的であった⁶⁾。一方で、画像上 T2 強調像での不均一な信号、腫瘍径の大きさ、脊髄圧迫の程度などは、進行性の指標となり得るとされている。特に、MRI において造影不均一性(hetero/hetero pattern)や T2WI での高信号が認められる症例では、腫瘍の増殖性が高い可能性があり、慎重な判断が求められる。

さらに、神経鞘腫の画像所見における造影パターンと臨床症状との関連を調査した研究では、腫瘍の内部構造が不均一な場合に運動障害をきたすリスクが高くなる傾向があることが報告されている⁷⁾。このような知見は、経過観察中に「どの症例で治療介入をすべきか」という判断において極めて有用である。また、小児例や中高年における稀な腫瘍では自然歴が異なる可能性があるため、年齢や病歴も含めた慎重な個別対応が必要である。

神経鞘腫の経過観察における判断基準の詳細

神経鞘腫においては、以下の MRI 所見が経過観察中の注意点として挙げられる。

腫瘍径の増大：定期的な画像フォローアップにおいて、腫瘍径が増大傾向を示す場合は、症状の有無に関わらず、手術適応を再評価する必要がある。

T2 強調像での高信号域の拡大：腫瘍内部の T2 高信号域が拡大する場合、腫瘍の増殖や変性が進行している可能性がある。

造影効果の変化：造影 MRI において、腫瘍の造影効果が不均一になる、または新たな造影効果が出現する場合、腫瘍の性状変化が疑われる。

これらの所見が認められた場合、無症候性であっても、神経症状の出現リスクを考慮し、治療介入のタイミングを慎重に検討する必要がある。

髄膜腫の経過観察における考慮点

髄膜腫においても、無症候性で偶発的に発見されることが多いが、以下の点に留意する必要がある。

石灰化の有無：CT で石灰化が認められる場合、腫瘍の成長速度は遅い傾向があるが、逆に石灰化がない場合は増殖性が高い可能性がある⁸⁾。

腫瘍の位置と大きさ：脊髄前方に位置する大きな腫瘍は、脊髄圧迫のリスクが高く、症状が出現しやすいため、経過観察中も注意が必要である。
造影効果の変化：造影 MRI での造影効果に変化する場合、腫瘍の性状変化や増殖が疑われる。

これらの所見が認められた場合、症状の有無に関わらず、手術適応を再評価することが推奨される。

小児例や中高年における特異性

小児例では、腫瘍の自然歴が成人と異なる場合があり、特に髄内腫瘍の頻度が高く、進行も速い傾向があるため、より頻回な画像フォローアップが必要である。また、中高年においては、他の脊椎疾患との鑑別が難しい場合があり、症状の出現や進行に注意を払う必要がある。

III. 手術適応と術式の最適化

脊髄腫瘍における手術適応の決定は、腫瘍の病理学的性質、局在、症候の有無・進行度、患者背景など多岐にわたる因子を総合的に評価して行われる。

良性腫瘍と悪性腫瘍における手術適応

良性腫瘍：脊髄を圧迫する良性腫瘍では手術による完全摘出が第一選択となることが多い。これらの腫瘍は脊髄との境界が比較的明瞭で、適切な時期に手術を行えば腫瘍を全摘出でき、神経症状の改善や悪化予防が期待できる。特に神

経鞘腫や髄膜腫は全脊髄腫瘍の中で頻度が高く、多くは良性であるため、症状が出現した段階で手術適応とするケースが一般的である。無症状で小さい腫瘍の場合は経過観察も選択されるが、脊髄圧迫の兆候があれば可逆的なうちに摘出する方針が推奨される。完全摘出できれば術後の放射線療法や化学療法は不要で、再発もほとんどなく予後は良好である。

悪性腫瘍：脊髄の悪性腫瘍では、手術の目的や適応の判断がより慎重になる。脊髄内の星細胞系腫瘍は浸潤性に発育するため正常脊髄組織との境界が不明瞭で、完全摘出は難しい場合が多い。このため、高グレードの星細胞腫や悪性上衣腫では、手術は腫瘍組織からの診断目的の生検や減圧を主目的とし、必要に応じて可能な範囲で腫瘍量を減じるにとどめる戦略がとられる。術後は放射線療法や化学療法など集学的治療が検討されるが、脊髄内の高悪性度グリオーマでは依然予後不良であり、治療方針は個別に慎重判断される⁹⁾。一方、低グレードの髄内腫瘍では、患者の神経学的予後や生存期間の延長を図るため可能な限りの摘出を目指すことがある。実際、小児から若年成人の髄内腫瘍164例の大規模報告では、低グレード病変に対する積極的摘出は受容し得るリスクで機能転帰も許容範囲であったと報告されている¹⁰⁾。

総じて症状をきたす脊髄腫瘍は良性・悪性を問わず手術適応となりうるものの、悪性例では手術が治癒的というより診断確定と症状緩和の役割となり、摘出範囲の判断には腫瘍の悪性度と術後補助療法の計画を踏まえた戦略が求められる。

髄内腫瘍における治療戦略

脊髄髄内腫瘍では、腫瘍摘出による治癒の可能性と神経機能温存とのバランスをとった戦略が求められる。基本的な目標は可能な限り腫瘍を摘出しつつ神経機能を温存することであるが、腫瘍の性状によって最適解は異なる。

境界明瞭で良性の髄内腫瘍：血管芽腫や一部の上衣腫では腫瘍と脊髄実質との境界が明瞭で、

顕微鏡下で正常組織との分離が比較的容易である¹¹⁾。このような場合、術中モニタリングで安全が保たれる範囲で可能な限りの全摘出(Gross Total Resection: GTR)を目指すことが推奨される¹²⁾。例えば脊髄上衣腫は髄内腫瘍の約40%を占め多くが良性であり、手術摘出による症状改善や進行防止が期待できる。実臨床でも上衣腫に対しては全摘が可能な症例が多数報告されており、摘出度が高いほど無増悪生存期間(Progression Free Survival: PFS)が延長するとの知見がある。Safaeiらの研究では脊髄上衣腫において摘出範囲が予後規定因子となることが示され¹¹⁾、他の報告でも上衣腫では90%以上の症例で全摘達成が可能であったとされる¹⁰⁾。

脊髄血管芽腫(hemangioblastoma)は比較的稀な腫瘍であるが、特に髄内と髄外にまたがるタイプ(IE型)では、症状の急速な悪化が報告されている。当グループにおける研究では、IE型腫瘍では髄内単独病変に比べて明らかに短期間で麻痺が進行し、平均3.5ヶ月で重篤な運動障害をきたすことが示された。また、Ki-67による細胞増殖能評価においても、IE型では約15%と高い値を示し、病理学的にも進行性病変であることが裏付けられている。こうした腫瘍では、診断後できるだけ早期に手術を行うことが推奨される¹³⁾。

浸潤性で悪性度の高い髄内腫瘍：星細胞腫に代表されるグリオーマ系腫瘍は脊髄組織内に広がるように増殖し、明確な境界がなく正常組織との判別が困難である。特に退形成性星細胞腫や膠芽腫(WHO III, IV)は脊髄内にびまん性に広がりやすく、積極的に摘出を試みても一部の腫瘍残存が避けられないことが多いのが現状である。そのため術前画像や術中所見で明らかに浸潤性が強いと判断される場合、無理な全摘出は行わず生検に留めて確定診断を得るか、脊髄を圧迫している一部を減圧的に部分摘出するにとどめる戦略がとられる。浸潤性腫瘍では神経機能温存を優先し、残存腫瘍に対しては術後の放射線・化学療法で補完するアプローチが現実的といえる^{14,15)}。

神経機能温存と長期予後：髄内腫瘍手術では術後の神経学的状態が患者の QOL に直結するため、たとえ腫瘍が残存しても神経機能を守ることが重視される。実際、術後の機能転帰は術前状態に強く相関し、重篤な術前麻痺のある患者では術後に大きな改善を得ることが難しい一方、術前に軽症であればたとえ一時的に症状が悪化してもリハビリ等で改善し最終的に自立度を保てるケースが多いとされている^{9,10)}。したがって手術タイミングとしては、患者の神経症状が不可逆的な障害に至る前に行うことが望ましいが、同時に術者は「機能温存のためには腫瘍を一部残す勇氣」も持つ必要がある。特に既に完全対麻痺となつて久しい患者では手術による改善が見込めないため適応は慎重に検討される¹⁶⁾。

IV. 術中モニタリングの役割と課題

脊髄腫瘍の手術においては、術中モニタリング、特に Tc-MEP (運動誘発電位) を用いた神経機能のリアルタイム監視が重要な役割を果たしている。神経鞘腫に対する手術成績を検討した大規模研究では、術後の運動障害発生率は 13.1%、感覚障害は 20.5% であり、術前の運動麻痺、歩行障害、ダンベル型腫瘍 (Eden type II)、亜全摘 (STR)、手術時間の延長がリスク因子として同定されている¹⁷⁾。

さらに、Tc-MEP による術中異常が術後の運動麻痺と強く相関する一方で、感覚障害に関しては予測が困難であることも示されており、術前評価や腫瘍特性に応じたリスク層別化が必要とされる。

腫瘍の位置によっては Tc-MEP の導出が困難となることがあり、特に胸椎前方病変ではその傾向が顕著である。このような場合、術前の筋電図や CMAP 波形の予備評価、導出困難時の代替筋 (例：母趾外転筋) の使用など、モニタリング精度を高めるための工夫が重要である。とくに、術前に歩行不能であった症例においては、通常の下肢筋での MEP 導出が困難なことが多く、母趾外転筋の使用が有効であったという報告もある¹⁸⁾。

近年では、CMAP (複合筋活動電位) の変化に注目することで、Tc-MEP 導出困難例でも術後麻痺の予見が可能になるという知見もあり、モニタリングにおける多角的評価の重要性が増している。

V. AI 画像診断への期待と将来展望

AI 技術は近年、画像診断の分野で急速に応用が進んでおり、脊髄腫瘍に対してもその可能性が模索されている。特にディープラーニングを活用した MRI 画像解析により、腫瘍の自動検出、良悪性の識別、腫瘍周囲の脊髄変化 (浮腫や cyst, syrinx など) の評価が可能となりつつある^{19,20)}。

当教室では、T2 強調像や Gd 造影 T1 強調像における特徴量抽出に AI を応用し、腫瘍の位置や病理学的性質の推定、さらには経過観察中の腫瘍成長パターンの分類を試みている。AI は特に、画像読影の属人性を補い、診断の再現性や精度の向上に貢献することが期待される。将来的には、術前の画像診断において AI が外科医の判断を補助し、手術適応の判断や術式選択において質の高い意思決定を支援するツールとして期待される。

さらに、AI を用いたりアルタイムの腫瘍分類支援モデルや、術中ナビゲーションとの統合、臨床予後予測モデルの構築など、多岐にわたる応用が模索されている。今後、国内外の多施設データベースを活用した大規模学習モデルの開発が進めば、診療の質を飛躍的に高める可能性がある。

おわりに

脊髄腫瘍の診療は、画像・病理・臨床症状の総合的な情報に基づいた的確な判断に加え、最新技術を積極的に取り入れた柔軟な診療戦略の構築が求められる。特に、無症候性腫瘍に対する経過観察、髄内腫瘍を含む各種腫瘍の病理に応じた手術適応の適正化、術中モニタリングによる神経機能温存の最大化、そして AI を用いた画像診断や予後予測といった技術革新が、診療の質と安全性を大きく高めつつある。今後は、多施設共同研究によるエビデンスの蓄積と標準化

プロトコルの構築を通じて、より質の高い個別化医療の実現を目指すことが重要である。患者QOLの最大化と医療資源の適正配分の両立を図りながら、脊髄腫瘍診療のさらなる発展が期待される。

利益相反

本論文に関して筆者に開示すべき利益相反はない。

文献

- 1) Kobayashi K, et al. : Variety of preoperative MRI changes in spinal cord ependymoma of WHO grade II: a case series. *Eur Spine J.* 2019 ; 28 : 426-433.
- 2) Ando K, et al. : Differentiation of spinal schwannomas and myxopapillary ependymomas: MR imaging and pathological features. *Clinical Spine Surgery.* 2014 ; 27 : 105-110.
- 3) Ito K, et al. : Differentiation of spinal myxopapillary ependymomas from schwannomas by contrast-enhanced MRI. *J Orthop Sci.* 2018 ; 23 : 908-911.
- 4) Kobayashi K, et al. : Postoperative syrinx shrinkage in spinal ependymoma of WHO grade II. *Clin Spine Surg.* 2021 ; 34 : E100-e6.
- 5) Imagama S, et al. : Differentiation of localization of spinal hemangioblastomas based on imaging and pathological findings. *Eur Spine J.* 2011 ; 20 : 1377-1384.
- 6) Ando K, et al. : How do spinal schwannomas progress? The natural progression of spinal schwannomas on MRI. *J Neurosurg Spine.* 2016 ; 24 : 155-159.
- 7) Kobayashi K, et al. : Contrast MRI findings for spinal schwannoma as predictors of tumor proliferation and motor status. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017 ; 42 : E150-e5.
- 8) Kobayashi K, et al. : Characteristics of cases with and without calcification in spinal meningiomas. *J Clin Neurosci.* 2021 ; 89 : 20-25.
- 9) Özkan N, et al. : Surgical management of intradural spinal cord tumors in children and young adults: A single-center experience with 50 patients. *Surg Neurol Int.* 2015 ; 6 : S661-667.
- 10) Constantini S, et al. : Radical excision of intramedullary spinal cord tumors: surgical morbidity and long-term follow-up evaluation in 164 children and young adults. *J Neurosurg.* 2000 ; 93 : 183-193.
- 11) Safaee M, et al. : Surgical outcomes in spinal cord ependymomas and the importance of extent of resection in children and young adults. *J Neurosurg Pediatr.* 2014 ; 13 : 393-399.
- 12) 高見 俊, 黒川 龍, 関 俊, 小柳 泉, 日本脊髄外科学会学術委員会. 脊髄神経膠腫の外科治療に関する指針(解説). *Spinal Surgery.* 2016 ; 30 : 25-40.
- 13) Imagama S, et al. : Rapid worsening of symptoms and high cell proliferative activity in intra- and extramedullary spinal hemangioblastoma: A need for earlier surgery. *Global Spine J.* 2017 ; 7 : 6-13.
- 14) Babu R, et al. : Outcomes of percutaneous and paddle lead implantation for spinal cord stimulation: a comparative analysis of complications, reoperation rates, and health-care costs. *Neuromodulation.* 2013 ; 16 : 418-426; discussion 26-27.
- 15) Fisher PG, et al. : Outcome analysis of childhood low-grade astrocytomas. *Pediatr Blood Cancer.* 2008 ; 51 : 245-250.
- 16) Hersh AM, et al. : Treatment of intramedullary spinal cord tumors: a modified Delphi technique of the North American Spine Society Section of Spine Oncology. *J Neurosurg Spine.* 2024 ; 40 : 1-10.
- 17) Ando K, et al. : Surgical outcomes and factors related to postoperative motor and sensory deficits in resection for 244 cases of spinal schwannoma. *J Clin Neurosci.* 2020 ; 81 : 6-11.
- 18) Kobayashi K, et al. : Poor derivation of Tc-MEP baseline waveforms in surgery for ventral thoracic intradural extramedullary tumor: Efficacy of use of the abductor hallucis in cases with a preoperative non-ambulatory status. *J Clin Neurosci.* 2021 ; 84 : 60-65.
- 19) Ito S, et al. : Automated detection of spinal schwannomas utilizing deep learning based on object detection from magnetic resonance imaging. *Spine (Phila Pa 1976).* 2021 ; 46 : 95-100.
- 20) Ito S, et al. : Automated detection and diagnosis of spinal schwannomas and meningiomas using deep learning and magnetic resonance imaging. *J Clin Med.* 2023 ; 12 : 5075.