

図 4 正常例
シネMRI頸椎、頸髓の動態が観察できた。

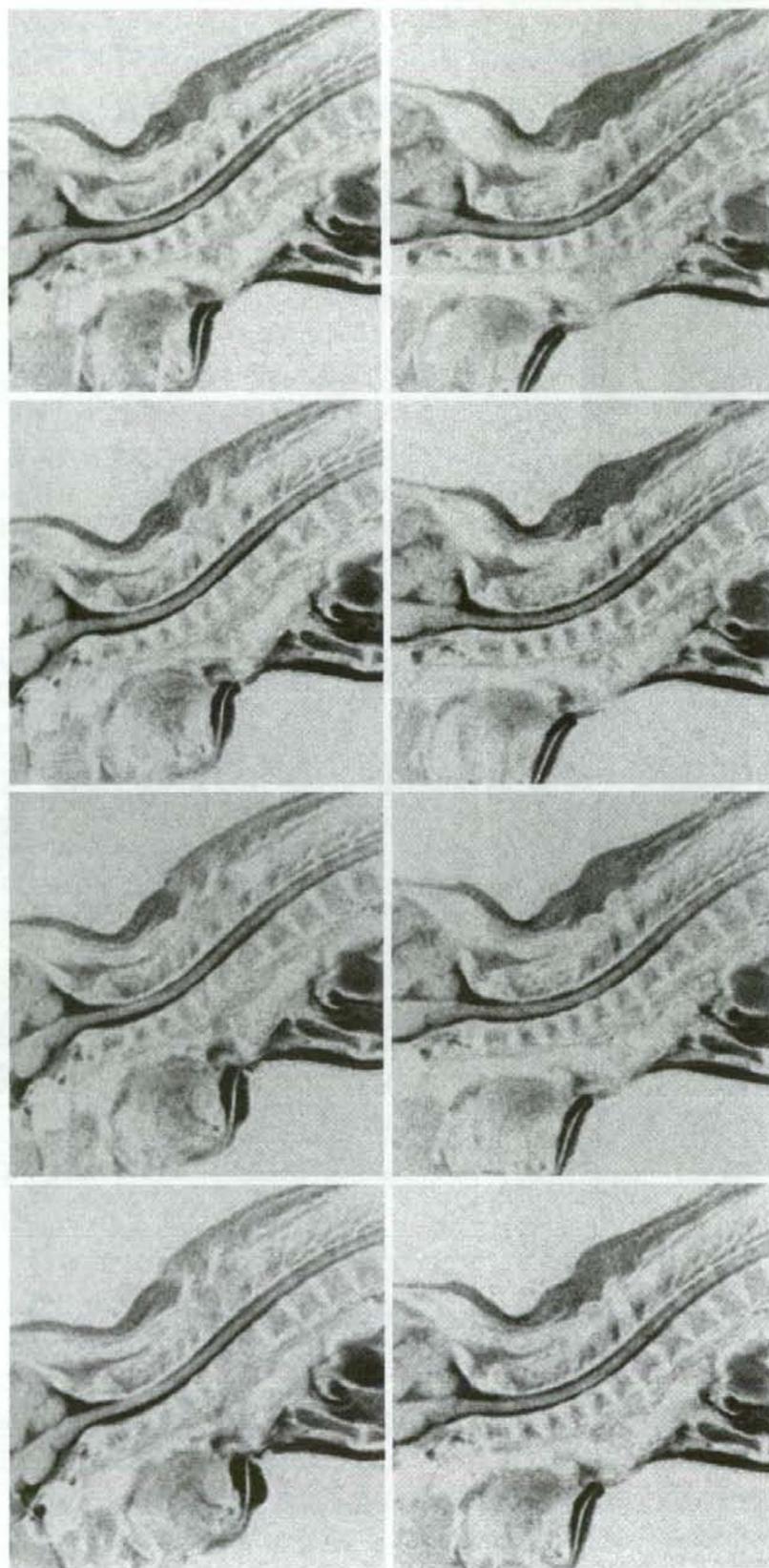


図 5 正常例：反転画像
シネ MRI 反転画像では脊柱管内での脊髓の動きが明瞭に示された。



図 6 29歳, 男性: 上肢筋力低下例
MRI T2強調画像。C5/6レベルの脊髄に高信号領域を認めたが、前方から脊髄への強い圧迫を認めなかった。

挟んで使用している (図 1)。

ポジショニングデバイス

力を抜いた状態で左右ぶれなく無理なく頸椎を伸展、屈曲させるために、クッションの上に直径50 cmのビーチボールに少量の空気を入れ、背部、頸部、頭部を包み込むように置き、被験者を仰臥位に寝かせた (図 2)。後頭部が床に当たらずに最大限に頸椎を伸展でき、かつ最大屈曲までできるようにボールの空気量を調節した。まず、頸椎中間位で力を抜いた状態で撮像面の決定を行った。頸椎最大屈曲位を指示し、約25秒かけて最

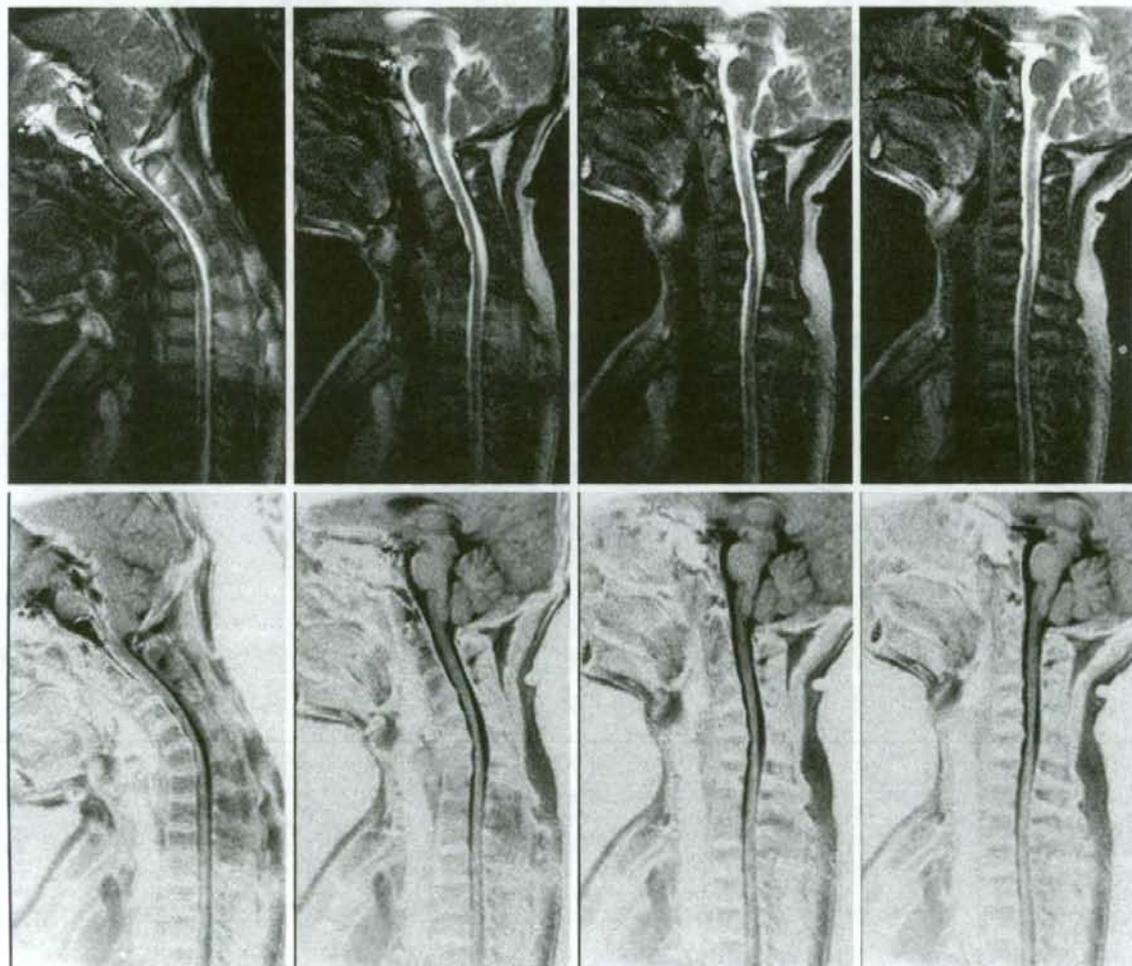


図 7 29歳, 男性: 上肢筋力低下例, シネMRI
頸椎前屈時に下位頸髄が椎体に強く圧迫され、後弯となった。

大伸展位となるよう同一スピードでゆっくり頸椎を自動運動で伸展させた(図3)。頸椎運動の間にスライス面がずれないようにするため、MRI装置内部の天井部正中にテープを貼り(図1)、テープが顔面の正中を通過して動くよう指示した。この間、約25枚、つまり1秒あたり約1枚ずつ頸椎正中矢状断MRIを連続的に撮像した。撮像した連続データをつなげて動画(cine loop view)を作製した。

結果

MRI撮像は10分程度で可能であった。正常例

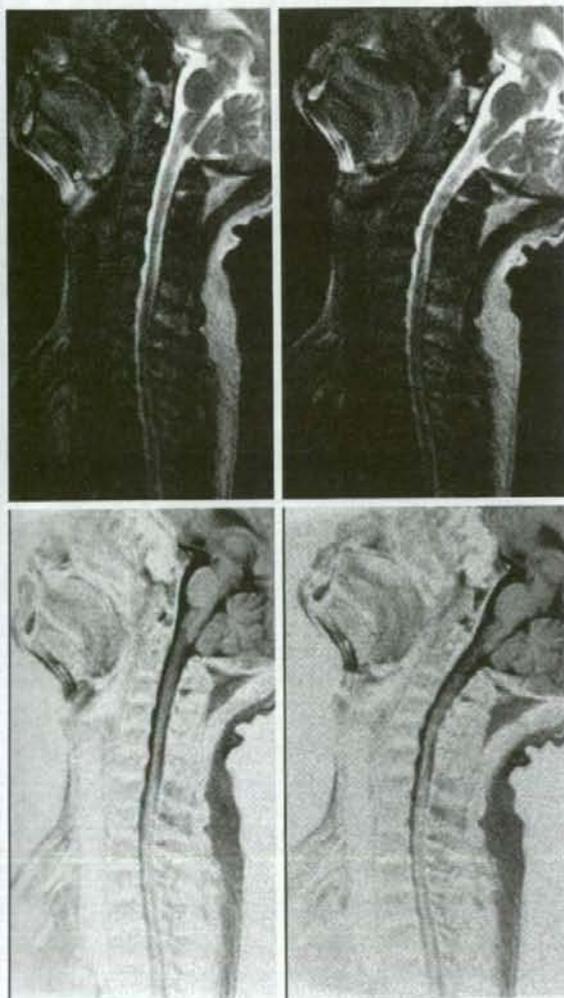


図7 つづき

を示す。Cine loop viewでは、静止画をつなぎあわせて動画を作り出すstep法ではなく、ビデオカメラのようにsteplessに撮像しているため、頸椎、頸髄の運動が観察できた(図4)。さらに反転画像では脊柱管内で頸椎の位置により脊髄が前後に動く様子を明瞭にとらえることができた(図5)。誌面では静止画像でしか表せないが、動画として観察するとよりよく理解できた。

【症例】

患者：29歳、男性

主訴：上肢筋力低下としびれ

症状は徐々に増悪したが、頸椎MRI静止画では頸髄の明らかな圧迫所見はなく(図6)、神経内科の疾患の合併もなく病因は不明であった。そこでシネMRIを施行したところ、頸椎前屈時に下位頸椎が椎体に強く圧迫され後弯となりT2高信号域とも一致し(図7)、頸椎前屈位による下位頸髄の形態的变化により脊髄症が生じる頸椎屈曲性脊髄症(cervical flexion myelopathy: CFM)と考えられた⁸⁾。本症例ではMRI中間位静止画像では診断できず、屈曲、伸展位を保持しながら撮像する従来のkinematic MRIでは長時間の同一体位の保持のため、神経学的症状を増悪させる危険があった。そのため自動運動で短時間に撮像可能であるシネMRIは病態の解明に有用であった。

シネMRIの利点

近年、MRIを用いて頸椎、頸髄の動態を解析した報告がある。これらは、前屈位、中間位、伸展位や角度を細かく調節しながら静止画を撮像(step法)しているものであり、真の意味の動態画像でなく、操作が煩雑で時間を要する^{1,3,7,9)}。また、頸椎の位置により神経症状がある症例で、同一姿勢を保持することは神経合併症の危険や患者の苦痛を伴う。Nakamuraら¹²⁾はUltra-Fast FR-Spoiled GRASS法を用いてsteplessに頸椎動態を観察した報告を行っているが、当時の画質の問題のためか頸髄運動については言及していない。われわれの行ったFIESTAを用いたシネMRI撮

像法は、kinematic MRI に広く用いられている^{11,14)} open MRI 装置ではなく、通常の MRI 装置を用いて非侵襲的に低コストで頸髓の運動を明瞭に評価することができる。さらに、自動運動で行い、同一姿勢を長時間とる必要がないため、神経症状を有する例でも安全に行えると考える。従来の step 法に比べると実際に頸椎を動かしながらの撮像であるために、頸椎、頸髓の生理的な動きをより正確に観察できる。

馬場ら²⁾は頸椎と頸髓の生体力学的 motion analysis と simulation が進歩すれば最良の解析が行えるようになり、病態解析が正確にできれば治療手段と手術に一層の改善が得られるであろうとのべている。われわれのシネ MRI はこれらの頸椎頸髓の motion analysis に有効と考える。

シネ MRI の問題点

よい画像を得るためには正確に断面を決めて一定のスピードで頸椎を自動運動させる必要があり、これは被験者の理解力に依存し、再現性の問題がある。また、画質に関してはかなり改善してきているとはいえ、step 法に及ばない。頸髓運動を動画で撮像した後の基準となる線や点を新たに定義し、解析するための評価法を考案する必要がある。

おわりに

本法は簡便で短時間で可能で、日常診療でもルーチン検査に加えて追加可能である。本法は今後、頸髓症の病態の解明、動的因子の評価、治療方針の決定に有用な検査法になりうると考えた。

文 献

- 1) 安藤哲朗, 柳 務, 伊藤高行: 頸椎症および頸椎後縦靭帯骨化症の頸椎動態 MRI Dynamic compression の意義. 臨床神経学 32: 30-36, 1992
- 2) 馬場久敏, 内田研造, 小林 茂, 他: Flexion stress が頸椎部脊髄症の病態に及ぼす影響. 臨整外 39: 467-474, 2004
- 3) 原田 敦, 見松健太郎, 中村 滋: 頸椎 MRI 機能写の検討 (第一報) 前後屈における頸髓の動態について. 中部整災会誌 31: 1182-1184, 1988
- 4) 東野 博: Cine MRI による心機能の評価. 心臓 37: 821-824, 2005
- 5) 日野浩之, 鏡 邦芳, 金山雅弘: シネラジオグラフィによる頸椎の連続的動態解析 In vivo における正常及び不安定頸椎の評価. 日本臨床バイオメカニクス会誌 17: 135-138, 1996
- 6) 石田義博, 鈴木和広, 大森和夫: 頸椎の動的 CT 脊髄造影法. 中部整災会誌 29: 303-305, 1986
- 7) 岩橋俊幸, 浜崎広洋, 寺尾賢秀: MRI の脊椎外科への応用 dynamic MRI の試み. 中部整災会誌 29: 305-307, 1986
- 8) 菊地誠志, 田代邦雄, 北川まゆみ: 若年性限局性手前腕筋萎縮症 (平山病) の発生機序に関する一考察 Tight dural canal in flexion を伴う flexion myelopathy. 臨床神経学 27: 412-419, 1987
- 9) Koschorek F, Jensen HP, Terwey B: Dynamic studies of cervical spinal canal and spinal cord by magnetic resonance imaging. Acta Radiol Suppl 369: 727-729, 1986
- 10) Kotani T, Minami S, Takahashi K, et al: An analysis of chest wall and diaphragm motions in patients with idiopathic scoliosis using dynamic breathing MRI. Spine 29: 298-302, 2004
- 11) 村井正和, 岩橋武彦, 坂口義博, 他: 手術支援ロボティクシステム オープン MRI による運動器解析. 臨整外 37: 1319-1327, 2002
- 12) Nakamura S, Fujikawa K, Ogawa Y, et al: Dynamic motion study of the cervical spine using ultra-fast gradient echo with RF-spoiled GRASS—evaluation of cervical instability. Nippon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi 52: 405-407, 1992
- 13) Niitsu M, Akisada M, Anno I, et al: Moving knee joint: technique for kinematic MR imaging. Radiology 174: 569-570, 1990
- 14) 大泉尚美, 末永直樹: Open MRI を用いた肩関節キネマティクス解析. 関節外科 23: 804-810, 2004
- 15) Sheehan FT, Zajac FE, Drace JE: Using cine phase contrast magnetic resonance imaging to non-invasively study in vivo knee dynamics. J Biomech 31: 21-26, 1998
- 16) 高原太郎, 桜田愛音, 今井 裕, 他: 消化管の MRI cine MRI, MR hydrography を中心に. 胃と腸 39: 1597-1614, 2004
- 17) 鶴岡広, 岡島行一, 藤田隆一: 側面透視像における頸椎柱動的解析の試み. 整形外科バイオメカニクス 10: 247-251, 1989
- 18) Yamamuro M, Tadamura E, Kubo S, et al: Cardiac functional analysis with multi-detector row CT and segmental reconstruction algorithm: comparison with echocardiography, SPECT, and MR imaging. Radiology 234: 381-390, 2005

上位頸椎インストゥルメンテーション手術における椎骨動脈の骨外・骨内走行の術前評価* 3次元CT血管造影法の有用性

山崎 正志*¹⁾ 大河 昭彦*¹⁾ 国府田正雄*¹⁾
高橋 和久*¹⁾ 梁川 範幸*²⁾

The Usefulness of 3-dimensional CT Angiography for Surgeries at the Craniovertebral Junction

Masashi Yamazaki*¹⁾, Akihiko Okawa*¹⁾, Masao Koda*¹⁾, Kazuhisa Takahashi*¹⁾,
Noriyuki Yanagawa*²⁾

臨整外 43: 875~881, 2008

Key words: 椎骨動脈(vertebral artery), 3次元CT血管造影法(3D-CT angiography), 上位頸椎(upper cervical spine)

上位頸椎インストゥルメンテーション手術例 77 例に対し、術前に 3 次元 CT 血管造影法(3D-CTA)を施行し、椎骨動脈の骨外・骨内走行を評価した。骨外走行では、椎骨動脈が環椎後弓の尾側から脊柱管内に侵入する異常が 10 例(13.0%)に存在した。骨内走行では、high-riding vertebral artery(VA)を 21 例(27.3%)で確認した。歯突起骨などの骨奇形を伴う例では高頻度に椎骨動脈の骨外・骨内走行異常が存在した。3D-CTA の所見から術中の椎骨動脈損傷の危険性を事前に把握することが可能であり、手術プランニングを的確に行うことができた。結果として術中の椎骨動脈損傷は 1 例もなく、3D-CTA の有用性が示された。

We preoperatively examined 77 patients for VA anomalies by 3-dimensional computed tomography angiography(3D-CTA) in order to avoid intraoperative vertebral artery(VA) injury during instrumentation surgery at the craniovertebral junction. An abnormal course of the VA in the extraosseous region was detected in 10 patients(13.0%), and a high-riding VA was identified in 21 patients(27.3%). The incidence of VA anomalies in the extraosseous and intraosseous regions was higher in patients with a congenital skeletal anomaly at the craniovertebral junction. Preoperative 3D-CTA allowed precise identification of anomalous VAs and reduction of the risk of intraoperative injury of the VA.

はじめに

環軸関節貫通スクリューに代表される上位頸椎インストゥルメンテーション手術の進歩により、強固な固定性の獲得、後療法 of 簡略化が可能となった⁴⁾。しかし、合併症としての椎骨動脈損傷のリスクが問題となっている。米国で行われた環軸関節貫通スクリュー刺入例についての大規模調

査では、4.1%の例で椎骨動脈損傷が生じたとされ、中には、小脳梗塞や脳幹虚血による死亡例の報告もある¹⁰⁾。したがって、椎骨動脈走行の術前評価の重要性が強調されている。

上位頸椎における椎骨動脈の走行異常は、骨外および骨内の走行異常に大別される。骨外走行異常としては、persistent 1st intersegmental artery および fenestration が代表的な走行異常として報告

* 2008 年 3 月 27 日受稿

*¹⁾ 千葉大学大学院医学研究科整形外科学 [〒260-8677 千葉市中央区亥鼻 1-8-1] Department of Orthopaedic Surgery, Chiba University Graduate School of Medicine

*²⁾ 千葉大学医学部附属病院放射線部 Department of Radiology, Chiba University Hospital

されている^{7,9)}。骨内走行に関して、C2 椎弓根最狭部で椎骨動脈が内側・頭側・背側に偏位する、いわゆる high-riding vertebral artery (VA) では、環軸関節貫通スクリュー刺入時に椎骨動脈損傷を生じる危険性が高い^{2,3,5,6)}。また、椎骨動脈の径に明らかな左右差が存在する場合、有意側の椎骨動脈を損傷すると重篤な合併症に至る可能性が増す¹⁵⁾。

そこで、今回は、上位頸椎インストゥルメンテーション手術に際し、術中の椎骨動脈損傷を回避する目的で、術前に3次元CT血管造影法(3D-CTA)を施行し、椎骨動脈の骨外および骨内走行を評価した。特に、先天的な骨の形態異常と、椎骨動脈の骨外走行異常、径の左右差、high-riding VAとの関連を解析した。

対象

1998年7月から2007年8月までの期間に、当院でC2およびその頭側にインストゥルメンテーション手術を行った77例全例を対象とした。内訳は、C1-C2不安定性を有する50例(先天奇形20例、関節リウマチ9例、歯突起骨折6例、成因不明6例、歯突起骨を伴うダウン症候群5例、脳性麻痺3例、外傷1例)、C2を含めた中下位頸椎固定を要する25例(脊椎腫瘍8例、頸椎症6例、脳性麻痺5例、OPLL4例、先天奇形1例、神経線維腫症1例)、脊髄腫瘍2例であった。症例を頸椎の先天性骨奇形(歯突起骨、癒合椎、環椎後頭骨化)を有する26例(奇形有群)と奇形を伴わない51例(奇形無群)に分類した。

術式は後頭骨頸椎後方固定術33例、C1-C2後方固定術19例、C2を含めた頸椎後方固定術25例であった。後頭骨頸椎後方固定術におけるC2アンカーとしては、1998年7月から2000年2月までは椎弓下ワイアリング、2000年3月から2005年10月まではC1-C2関節貫通スクリュー、2005年11月以降はC2椎弓根スクリューを原則的に使用した。C1-C2後方固定術におけるC2アンカーとしては、1998年7月から2005年10月まではC1-C2関節貫通スクリュー、2005年11月以降はC2椎弓根スクリューを原則的に使用した。C2

を含めた頸椎後方固定術では、全期間を通じてC2椎弓根スクリューをC2アンカーとして使用した。

3D-CTAを用いてvolume rendering法で立体的な3次元像を構築し、椎骨動脈の骨外走行異常および径の左右差を解析した。続いて、multiplanar reconstruction(MPR)法でC2椎弓根最狭部を含んだ矢状断再構築画像を作成し、high-riding VAを解析した^{11,14)}。

統計解析はFisher's exact probability testを用いて行った。

結果

今回検討した77例において、3D-CTA施行時、造影剤注入に伴う副作用は生じなかった。また、術中の椎骨動脈損傷および神経損傷は1例もなかった。

1. 椎骨動脈の骨外走行異常

77例中10例(13.0%)で、椎骨動脈がC1後弓の尾側から脊柱管内に侵入する走行異常が存在した。8例がpersistent 1st intersegmental artery(図1)、2例がfenestration(図2)であった。9例は後頭骨頸椎後方固定術例、1例はC1-C2後方固定術例であり、術中はドップラーで椎骨動脈を確認しつつ慎重に展開を行った。注目すべきことに、10例全例が奇形有群であった($p < 0.01$)。奇形有群26例に限ると38.5%と高頻度に椎骨動脈の骨外走行異常が存在した。

2. 椎骨動脈の骨内走行異常

77例中21例(27.3%)では、C2椎弓根最狭部でhigh-riding VAを確認した(図3)。21例中12例が奇形有群であった($p < 0.01$)。奇形有群では46.2%と高頻度にhigh-riding VAが存在した。

3. 椎骨動脈の径の左右差

77例中18例(23.4%)では、一側の椎骨動脈の径が他側の2倍以上と左右差が著しかった(図4)。18例中7例が奇形有群であった($p = 0.79$)。奇形有群では26.9%に椎骨動脈径の左右差が存

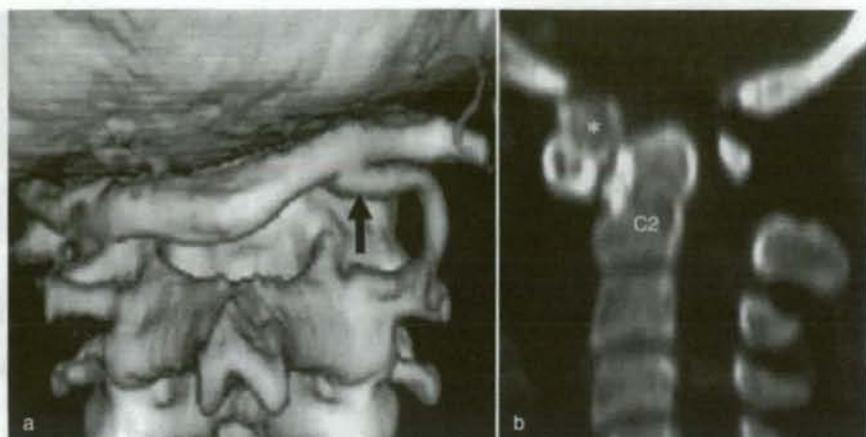


図1 Persistent 1st intersegmental artery 例

先天奇形に伴う環軸椎亜脱臼の成人例。

- a : 3D-CTA で右椎骨動脈は C2 骨孔を出た後、C1 横突起孔を通過せずに C1 後弓の尾側から脊柱管内へ侵入している(矢印)。
 b : CT 正中矢状断再構築画像で歯突起骨を認める(*)。

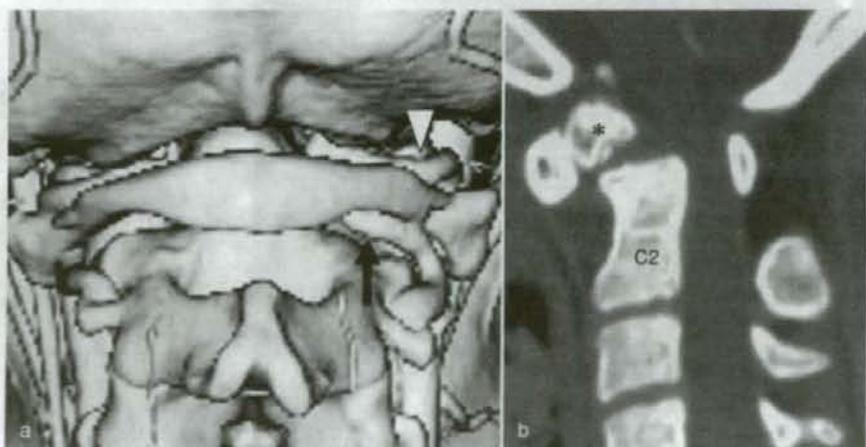


図2 Fenestration 例

ダウン症候群に伴う環軸椎亜脱臼の小児例。

- a : 3D-CTA で右椎骨動脈は C2 骨孔を出た後に分岐し、1本は C1 後弓の尾側から(矢印)、他の1本は C1 横突起孔を通過し C1 後弓の頭側から脊柱管内へ侵入している(矢頭)。
 b : CT 正中矢状断再構築画像で歯突起骨を認める(*)。

在した。

4. C1-C2 関節貫通スクリュー刺入困難の要因と変更術式

当初、38例76側にC1-C2関節貫通スクリュー刺入を予定した。しかし、14例18側では刺入困

難と判断し、術式を変更した。7例8側では high-riding VA(図3-c)、4例6側ではC1-C2関節の整復不良、3例4側ではC2の骨性形態異常が刺入困難の要因であった。

変更術式として、6例7側ではC2の刺入困難側をアンカーとして使用しなかった。4例6側では

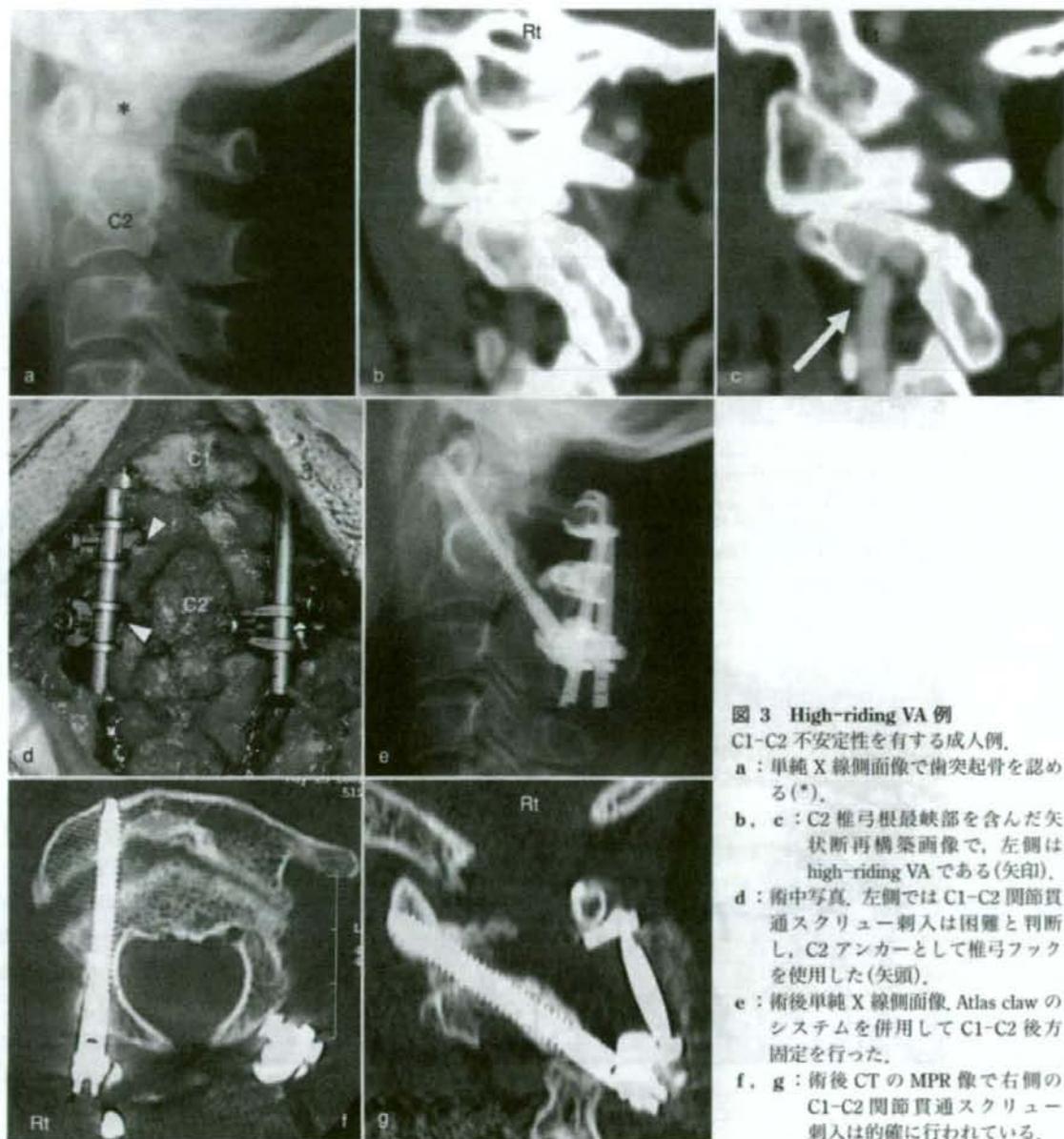


図3 High-riding VA 例
 C1-C2 不安定性を有する成人例。
 a : 単純 X 線側面像で歯突起骨を認める (*).
 b, c : C2 椎弓根最狭部を含んだ矢状断再構築画像で、左側は high-riding VA である (矢印).
 d : 術中写真、左側では C1-C2 関節貫通スクリュー刺入は困難と判断し、C2 アンカーとして椎弓フックを使用した (矢頭).
 e : 術後単純 X 線側面像、Atlas claw のシステムを併用して C1-C2 後方固定を行った。
 f, g : 術後 CT の MPR 像で右側の C1-C2 関節貫通スクリュー刺入は的確に行われている。

C2 椎弓根スクリュー、2 例 2 側では C2-C3 椎間関節貫通スクリュー、1 例 2 側では椎弓下ワイアリング、1 例 1 側では C2 椎弓フックを使用した (図 3-d)。

5. C2 椎弓根スクリュー刺入困難の要因と変更術式

C2 椎弓根スクリューの刺入は当初、36 例 72 側

で予定したが、10 例 14 側では刺入困難と判断した、9 例 12 側では high-riding VA、1 例 1 側では C2 骨性形態異常が刺入困難の要因であった、1 例 1 側では C2 椎弓根スクリューの刺入は可能であったが、他側が high-riding VA のためアンカーが C3 椎弓根スクリューに変更になり、C2 には椎弓下ワイアリングを行った。

変更術式として、5 例 6 側では C2 の刺入困難側

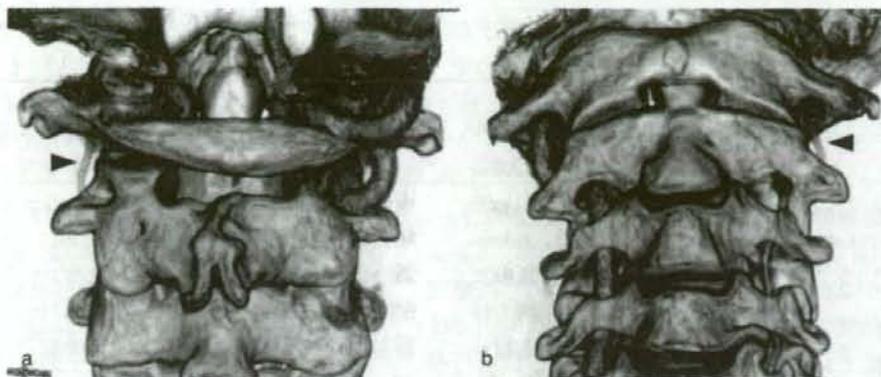


図4 椎骨動脈径の左右差

頸椎後縦靭帯骨化に伴う頸髄症例。歯突起骨をはじめとする先天骨奇形の合併はない。

a, b: 3D-CTA で左側の椎骨動脈(矢頭)の径が右側に比して著しく小さい。本例では、脊髓最大圧迫高位での椎間可動性が明瞭であったため、後方除圧に加えて C2 を含めた頸椎後方固定術を行った。C2 アンカーとしては、椎弓根スクリューを両側で刺入した。

をアンカーとして使用しなかった。4例7側では椎弓下ワイアリング、1例1側ではC2椎弓スクリュー(intralaminar screw)を使用した。

考察

1. 3D-CTA の精度と安全性

椎骨動脈走行の術前評価として、従来は侵襲的な選択的椎骨動脈造影が行われていた。しかし、近年、造影剤を使用せず、さらに被曝の心配がないMR angiography が広く行われるようになった。MR angiography では、無侵襲で検査が可能である。しかし、その弱点として、

- 1) 椎骨動脈と隣接する脊椎の骨要素を描出できないため、相互の位置関係を解析することが不可能、
- 2) 画像描出能力に劣り、特に、細い椎骨動脈ではその解析に難渋する、
- 3) 内頸動脈と椎骨動脈の像がしばしば重なり、両者の見分けに難渋する、
- 4) 検査時間が長いため、脳性麻痺などの不随運動を伴う例では鎮静を必要とする、

などがあげられる。3D-CTA を用いることにより、MR angiography における上述の問題点をほぼ解決することができる。特に、骨性要素と椎骨動脈の相互関係を詳細に評価できる利点は大きく、

上位頸椎インストゥルメンテーション手術の術前プランニングにおいては、その有用性は顕著である。

3D-CTA の侵襲は、選択的椎骨動脈造影と比べると著しく小さい。今回われわれが検討した症例でも、3D-CTA 施行に伴う副作用は生じなかった。しかし、3D-CTA では経静脈的に造影剤を投与するため、腎機能が低下している例では、特に慎重に検査を行う必要がある。

2. 椎骨動脈の骨外走行異常

脳疾患の精査を目的として行われた、すなわち頸椎疾患を対象としていない選択的椎骨動脈造影所見の解析では、1.0~2.3%で環軸椎高位での椎骨動脈走行異常が確認されている^{7,9)}。さらに、その走行異常は3群に細分され、第一は、椎骨動脈が軸椎の骨孔を出た後、環椎の横突起孔を通過せずに、環椎後弓の尾側から脊柱管内へ侵入するもので、頻度は0.60~0.67%であった。この走行異常は、現在では胎生期の1st intersegmental arteryの遺残と考えられており、persistent 1st intersegmental artery と呼称されている¹⁸⁾。第二は、椎骨動脈が軸椎の骨孔を出た後に分岐し、1本は環椎後弓の尾側から、他の1本は環椎横突起孔を通過し環椎後弓の頭側から脊柱管内へ侵入するもので、頻度は0.24~1.0%であった。これは、fenes-

tration と呼称されている^{12,13}。第三は、後下小脳動脈が軸椎高位で椎骨動脈から派生するもので、0.36~0.67%に認められた¹⁶。

今回、3D-CTA を用いて上位頸椎インストゥルメンテーション施行例の解析を行ったが、13.0%で椎骨動脈の骨外走行異常を認めた。内訳は、persistent 1st intersegmental artery が 10.4%、fenestration が 2.6%であり、上述の報告に比し高頻度に椎骨動脈の走行異常を確認できた。自験例では上位頸椎インストゥルメンテーション手術を行った例を対象として検討しており、対象群の違いが、従来の報告と異なる結果をもたらした最大の要因であろう。さらに、椎骨動脈の骨外走行異常を検出するうえで、3D-CTA の精度が高いことも、もう一つの要因と考えられる。

頸椎領域の血管系の発生では、胎生期の節間動脈が再配列して椎骨動脈が形成されるが、脊柱要素に関しても、胎生期の椎板の分節化・再配列が生じることで椎体椎間板が形成される。したがって、椎骨動脈の走行異常と、歯突起骨などの先天的な骨の形態異常は重複して発生する可能性が考えられる^{1,9}。

頭蓋頸椎移行領域に骨形態異常を有する疾患を対象に行われた選択的椎骨動脈造影所見の解析では、19.0%と高率に persistent 1st intersegmental artery が確認された⁹。特に環椎後頭化、癒合椎との関連が強かったことから、胎生期椎板の分節異常と椎骨動脈走行異常との関連が推測された。今回の検討では、先天性骨奇形(歯突起骨、癒合椎、環椎後頭骨化)26例に限ると、10例(38.5%)と、これまでの報告以上に椎骨動脈の骨外走行異常の頻度が高かった。この結果は、上述の椎板分節異常と椎骨動脈走行異常に関する仮説を強く支持するものである。

3. High-riding VA

High-riding VA では、C1-C2 関節貫通スクリューの刺入路に椎骨動脈が位置することから、椎骨動脈損傷の危険性が高い。また、high-riding VA では、C2 椎弓根スクリューの刺入が、C1-C2 関節貫通スクリュー刺入と同等に危険であるとの報告がある¹⁹。High-riding VA の頻度に関しては、

晒骨あるいは剖検例での解析で、10~22.5%と報告されている^{2,3,5}。臨床例では、C1-C2 後方固定術を予定した 27 例を CT 再構築画像で解析した報告で、26%が high-riding VA であった⁸。

今回の上位頸椎インストゥルメンテーション手術例 77 例の解析では、3D-CTA の再構築画像を解析した結果、21 例(27.3%)が high-riding VA であった。特に、先天性骨奇形を有する例では 26 例中 12 例と高率(46.2%)に high-riding VA が存在した。この結果から、胎生期の椎板の分節異常が、high-riding VA の形成に関わっていることが推察される。

従来の CT 再構築画像では、椎骨動脈の骨孔のみを評価するため、椎骨動脈が実際にスクリュー刺入路に位置するかを正確に評価しているとは言えない。これに対し、3D-CTA では骨孔内に存在する椎骨動脈そのものを評価できるため、椎骨動脈損傷の危険性を診断するうえでは精度が高い。今回の 21 例ではいずれも、C1-C2 関節貫通スクリューおよび C2 椎弓根スクリューの刺入路に椎骨動脈が存在することが確認され、スクリュー刺入は危険と判断することができた。いずれの例も、適切な術式変更およびスクリュー刺入手技の工夫がなされ、椎骨動脈損傷を避けることができた。

4. 椎骨動脈径の左右差

今回の検討では、椎骨動脈動脈径の左右差は 23.4%の頻度で認められた。しかし、先天性骨奇形を有する例に限っても、その頻度は 26.9%とほぼ同程度であった。これまでに、頸椎外傷例で片側の椎骨動脈が閉塞することが報告されている^{8,17}。今回の結果とあわせて、椎骨動脈の左右差を生じる因子としては、先天骨奇形との関連よりも、後天的な頸椎の構築学的な変化と関連があると推察された。

5. 3D-CTA の有用性

今回の検討で、上位頸椎手術例のうち、特に先天的な骨の形態異常があり、後頭骨頸椎後方固定術を要する例では、高頻度に椎骨動脈の走行異常を伴っていた。これらの症例では、術中操作、特に C1-C2 関節貫通スクリュー刺入に伴う椎骨動

脈損傷の危険性が、少なからず存在すると考えられる。3D-CTA の所見から、これらの危険性を事前に把握することが可能であり、3D-CTA は術野の展開、スクリュー刺入のプランニングを行ううえで有用な検査法であると考えられる。

結 論

上位頸椎インストゥルメンテーション手術に際しては、3D-CTA で椎骨動脈走行を術前に評価することにより、術中の椎骨動脈損傷を可及的に回避することが可能である。

謝 辞

本研究にご協力いただいた千葉大学整形外科教室頸椎脊髄診療班の諸先生に感謝する。

要旨は第 36 回日本脊椎脊髄病学会において発表した。

文 献

- 1) Currarino G : Segmentation defect in the midodontoid process and its possible relationship to the congenital type of os odontoideum. *Pediatr Radiol* **32** : 34-40, 2002
- 2) Kazan S, Yildirim F, Sindel M, et al : Anatomical evaluation of the groove for the vertebral artery in the axis vertebrae for atlanto-axial transarticular screw fixation technique. *Clin Anat* **13** : 237-243, 2000
- 3) Madawi AA, Casey AT, Solanki GA, et al : Radiological and anatomical evaluation of the atlantoaxial transarticular screw fixation technique. *J Neurosurg* **86** : 961-968, 1997
- 4) Magerl F, Seemann PS : Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation. In Kehr P, Weidner A (eds) : *Cervical Spine I*. New York : Springer-Verlag, pp322-327, 1987
- 5) Mandel IM, Kambach BJ, Petersilge CA, et al : Morphologic considerations of C2 isthmus dimensions for the placement of transarticular screws. *Spine* **25** : 1542-1547, 2000
- 6) Neo M, Matsushita M, Iwashita Y et al : Atlantoaxial transarticular screw fixation for a high-riding vertebral artery. *Spine* **28** : 666-670, 2003
- 7) Sato K, Watanabe T, Yoshimoto T, et al : Magnetic resonance imaging of C2 segmental type of vertebral artery. *Surg Neurol* **41** : 45-51, 1994
- 8) Taneichi H, Suda K, Kajino T, et al : Traumatically induced vertebral artery occlusion associated with cervical spine injuries : prospective study using magnetic resonance angiography. *Spine* **30** : 1955-1962, 2005
- 9) Tokuda K, Miyasaka K, Abe H, et al : Anomalous atlantoaxial portions of vertebral and posterior inferior cerebellar arteries. *Neuroradiology* **27** : 410-413, 1985
- 10) Wright NM, Laurysen C : Vertebral artery injury in C1-2 transarticular screw fixation : results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves. *J Neurosurg* **88** : 634-640, 1998
- 11) 山崎正志, 国府田正雄, 米田みのり, 他 : 上位頸椎手術における三次元血管造影法(3D-CTA)の有用性 *整形外科* **55** : 101-106, 2004
- 12) Yamazaki M, Okawa A, Aramomi M, et al : Fenestration of vertebral artery at the craniovertebral junction in Down syndrome : a case report. *Spine* **29** : E551-E554, 2004
- 13) Yamazaki M, Koda M, Yoneda M, et al : Anomalous vertebral artery at the craniovertebral junction in a patient with Down syndrome : a case report. *J Neurosurg Spine I* : 1514-1517, 2004
- 14) Yamazaki M, Koda M, Aramomi M, et al : Anomalous vertebral artery at the extraosseous and intraosseous regions of the craniovertebral junction : analysis by three-dimensional computed tomography angiography. *Spine* **30** : 2452-2457, 2005
- 15) Yamazaki M, Akazawa T, Koda M, et al : Surgical simulation of instrumented posterior occipitocervical fusion in a child with congenital skeletal anomaly. *Spine* **17** : E590-E594, 2006
- 16) Yamazaki M, Koshi T, Mannoji C, et al : Traumatic C6-7 subluxation with anomalous course of vertebral arteries treated with pedicle screw/rod fixation. Case report. *J Neurosurg Spine* **7** : 65-70, 2007
- 17) Yamazaki M, Okawa A, Akazawa T, et al : Usefulness of 3-dimensional full-scale modeling for preoperative simulation of surgery in a patient with old unilateral cervical fracture-dislocation. *Spine* **32** : E532-E536, 2007
- 18) Yamazaki M, Okawa A, Hashimoto M, et al : Abnormal course of the vertebral artery at the craniovertebral junction in patients with Down syndrome visualized by 3-dimensional CT angiography. *Neuroradiology* **50** : 485-490, 2008
- 19) Yoshida M, Neo M, Fujibayashi S, et al : Comparison of the anatomical risk for vertebral artery injury associated with the C2-pedicle screw and atlantoaxial transarticular screw. *Spine* **31** : E513-E517, 2006

上位頸椎インストゥルメンテーション手術における椎骨動脈走行の術前評価

—三次元CT血管造影法による解析—

山崎正志

千葉大学大学院医学研究院整形外科

梁川範幸

千葉大学医学部附属病院放射線部

C1-C2関節貫通スクリュー、C2椎弓根スクリュー、C1外側塊スクリューなどの上位頸椎インストゥルメンテーション手術の進歩は、強固な固定性の獲得、後療法の簡略化を可能とした。反面、合併症としての術中の椎骨動脈損傷のリスクが大きな問題として浮上してきた¹⁾。したがって、椎骨動脈走行の術前評価の重要性が強調されている。

上位頸椎における椎骨動脈の走行異常は、骨外および骨内の走行異常に大別される^{2),3)}。骨外走行異常としては、persistent 1st intersegmental artery, およびfenestrationが代表的な異常である(図1)。前者は、椎骨動脈がC2の骨孔を出たのち、C1の横突起孔を通過せずにC1後弓尾側から脊柱管内へ侵入するもので⁴⁾、胎生期の1st intersegmental

arteryの遺残と考えられている。後者は、椎骨動脈がC2の骨孔を出たのちに分岐し、1本はpersistent 1st intersegmental artery, ほかの1本は通常の走行(C1横突起孔を通過しC1後弓頭側から脊柱管内へ侵入)を呈する^{5),6)}。

骨内走行に関しては、C2椎弓根最狭部で椎骨動脈が内側・頭側・背側に偏位する、いわゆるhigh-riding VAがとくに問題となる。high-riding VAでは、C1-C2関節貫通スクリュー、C2椎弓根スクリュー刺入時に椎骨動脈損傷を生じる可能性が高い(図2)^{1),2),7)}。

椎骨動脈径の左右差に関しては、有意側の椎骨動脈を損傷すると脳虚血を引き起こす危険性が増すことから、臨床的に問題となる^{1),2),8)}。

各種検査法の比較

椎骨動脈走行の術前評価として、従来は侵襲的な選択的椎骨動脈造影が行われていた⁹⁾。しかし、近年、造影剤を使用せず、さらに被曝の心配がないMR angiography(MRA)が広く行われるようになった。しかし、MRAでは、血管と隣接する骨要素を描出できないため、椎骨動脈と脊椎の相互の位置関係を解析することが困難である。さらに、画像描出能力に劣るため椎骨動脈が細い場合は解析に難渋する、内頸動脈と椎骨動脈の像がしばしば重なり両者の見分けに難渋する、検査時間が長いため不随運動を伴う例では鎮静を必要とする、などの問題点がある。

三次元CT血管造影法(3D-CTA)では、経静脈的に造影剤を使用するという点ではMRAと比べて侵襲的だが、その侵襲度は選択的椎骨動脈造影と比べると著しく小さい。また、MRAにおける上述の問題点を、ほぼ解決できるという利点がある。とくに、骨性要素と椎骨

動脈の相互関係を詳細に評価できる利点は大きく、上位頸椎インストゥルメンテーション手術の術前プランニングにおいて、その有用性は顕著である(図3^{23,24})。

当院では1998年以降、上位頸椎インストゥルメンテーション手術

図1 上位頸椎領域における椎骨動脈の骨外走行異常のシエマ

- ①: persistent 1st intersegmental artery
②: fenestration

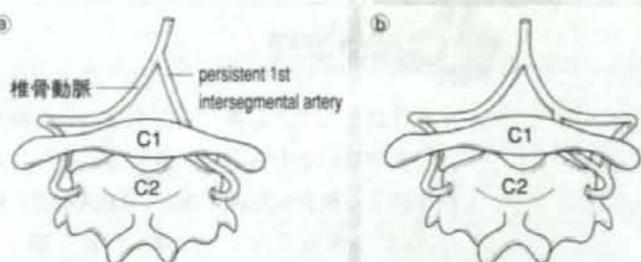


図2 椎骨動脈の骨内走行異常 (high-riding VA) と術中動脈損傷のリスク

- ①: 左側high-riding VA例に対してC1-C2関節貫通スクリーを刺入する際の椎骨動脈損傷のリスクをシエマで示す。
②: スクリュー刺入路の3D-CTA矢状断面構築像。矢印: スクリュー刺入方向, ★: 椎骨動脈損傷の発生が予測される部位

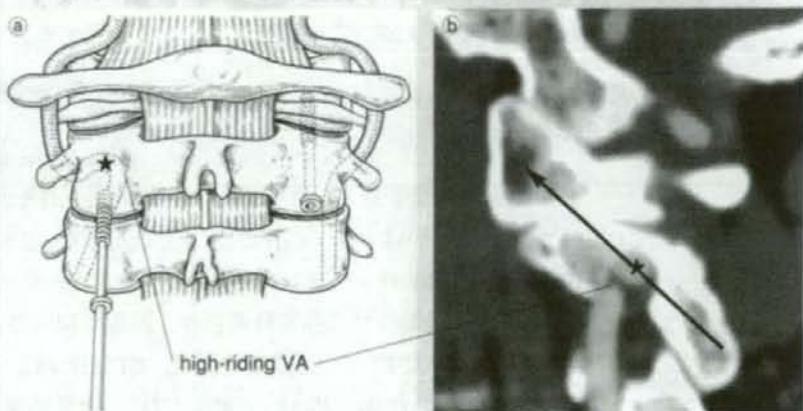
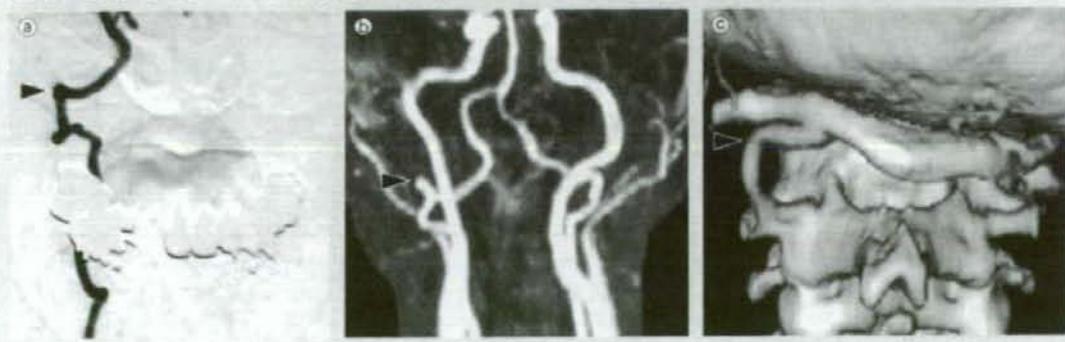


図3 各種検査法によるpersistent 1st intersegmental arteryの描出

- ①: 選択的椎骨動脈造影, ②: MRA, ③: 3D-CTA。
矢頭印がpersistent 1st intersegmental arteryの部位に相当する。
3D-CTAを用いることにより、椎骨動脈とそれに隣接する脊椎骨要素の相互関係を詳細に評価できる。



に際しては、腎機能低下例などの特殊例を除いた全例に対し、術前に3D-CTAを施行し、椎骨動脈の骨外および骨内走行を評価している。以下、3D-CTAの撮影法および診断、とくに、上位頸椎の先天的な骨の形態異常と、椎骨動脈の骨外走行異常、径の左右差、high-riding VAとの関連について記す。

撮像準備

既往歴として、以前に造影剤を用いた検査で、アナフィラキシーショックを起こしたことがないかを入念に問診する。また、重度の腎機能障害を有する例では、造影剤投与による検査は危険であり、MRAなどの侵襲のない検査で診断を行うべきである。

3D-CTA検査のみであれば、特殊な場合を除き入院の必要はない。検査が午前中に行われる場合には、朝食で固形物を摂取しないようにし、水分のみ可とする。検査が午後に行われる場合は、朝食の摂取は可とするが、それ以降は固形物を摂取しないようにする。前投薬の投与は、通常行わない。検査直前に、比較的太めの針(18Gあるいは20G)で末梢静脈ラインを確保する。

撮像

末梢静脈から造影剤(イオメプロール350mgI/ml)を3ml/秒で90~100ml注入し、ヘリカルCTあるいはマルチヘリカルCTを撮影した。2001年12月までの期間、CT機種はSomatom Plus4(シーメンス社)、ワークステーションは3D Virtuoso(シーメンス社)であり、撮影条件は遅延時間15秒、撮影時間30秒、スライス幅2mm、ピッチ1.5であった。2002年1~12月までの期間、CT機種はLightSpeed Ultra(GE社)、ワークステーションはVirtual Place(アゼモト社)、遅延時間25秒、撮影時間10秒、スライス幅1.25mm(1.25mm×8列)、ピッチ0.875であった。2003年1月にLightSpeed Ultra16(GE社)を導入し、現在では16例CTによる撮影を行っている(表1)。

ワークステーションにて、脊椎骨と動脈を同時に描出可能な閾値を設定、

表1 頸椎領域椎骨動脈のCT血管造影撮影プロトコル(2008年6月現在 千葉大学医学部附属病院)

CT機種	LightSpeed Ultra16 (GE社)
造影剤投与量	100ml (350mgI/ml)
注入速度	3.0ml/秒, 100ml
ダブルインジェクター	生理食塩水3.0ml/秒, 30ml
撮影タイミング	ポーラストラッキング法
スキャン条件	140kv, 0.5秒/rot
slice thickness	1.25mm
detector row Configuration	16×0.625mm
beam pitch	1.375 (collimation pitch : 13.75)
画像再構成間隔	0.625mm
撮影方向	足→頭

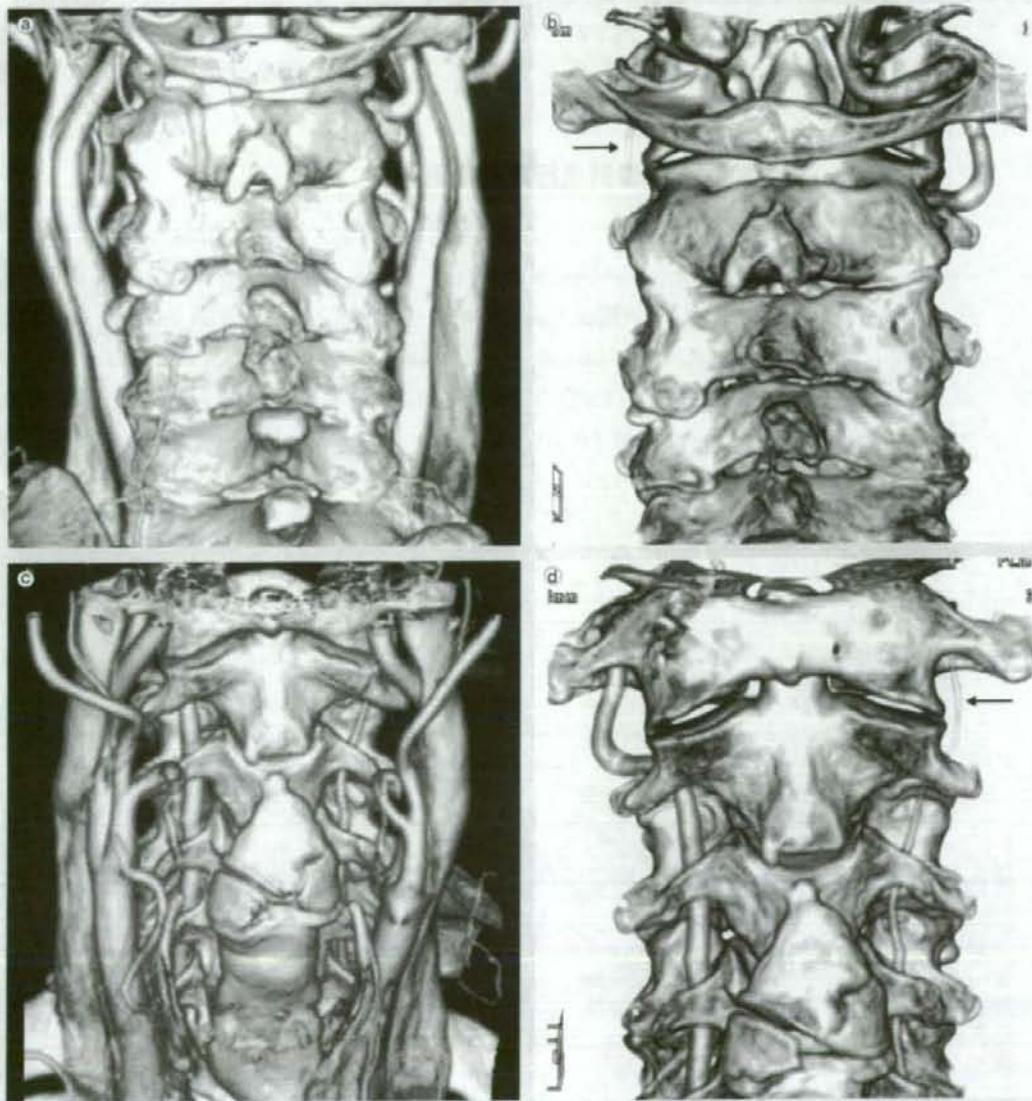
volume rendering法 (VR法) にて立体的な三次元像を構築し、C1-C2高位における椎骨動脈の骨外走行を解析した。

ここにワザあり!

椎骨動脈以外の血管を消去する処理を行うことにより、椎骨動脈走行の詳細な評価が可能となる(図4)。

図4 ワークステーションによる椎骨動脈の選択的描出

①~④: C2-C7後方除圧固定術施行例の術前3D-CTA立体像。頸椎を背側(①, ②)および腹側(③, ④)から観察した像を示す。ワークステーションによる処理前の画像(①, ③)では、椎骨動脈走行の評価は困難であるが、椎骨動脈以外の血管を消去する処理を行うことにより(②, ④)、詳細に椎骨動脈走行を評価することが可能となる。本例では、左側椎骨動脈の径が右側の1/2以下であり(矢印)、明らかな椎骨動脈径の左右差を認める。骨外走行異常は認めない。



続いて、multiplanar reconstruction (MPR)法にてC2高位におけるスクリーナー刺入路の矢状断、水平断再構築像を作成し、椎骨動脈の骨内走行を解析した。

◎ 診断

＊ 当院での結果

1998年7月～2007年8月までの10年間に77例の上位頸椎インストゥルメンテーション手術が行われた。術式は後頭骨頸椎後方固定術33例、C1-C2後方固定術19例、C2を含めた頸椎後方固定術25例であった。症例は頸椎の先天性骨奇形(歯突起骨、癒合椎、環椎後頭骨化)を有する26例(奇形有群)と奇形を伴わない51例(奇形無群)に分類された。全例で術前に3D-CTAが行われたが、3D-CTA施行時、造影剤注入に伴う副作用は生じなかった。また、術中の椎骨動脈損傷および神経損傷は1例もなかった。

＊ 椎骨動脈の骨外走行異常をみる

77例中10例(13.0%)で、椎骨動脈がC1後弓の尾側から脊柱管内へ侵入する走行異常が存在した。8例がpersistent 1st intersegmental artery(10.4%) (図5)、2例がfenestration(2.6%) (図6)であった。注目すべきことに、10例全例が奇形有群であった。奇形有群26例に限ると38.5%と高頻度に椎骨動脈の骨外走行異常が存在した。

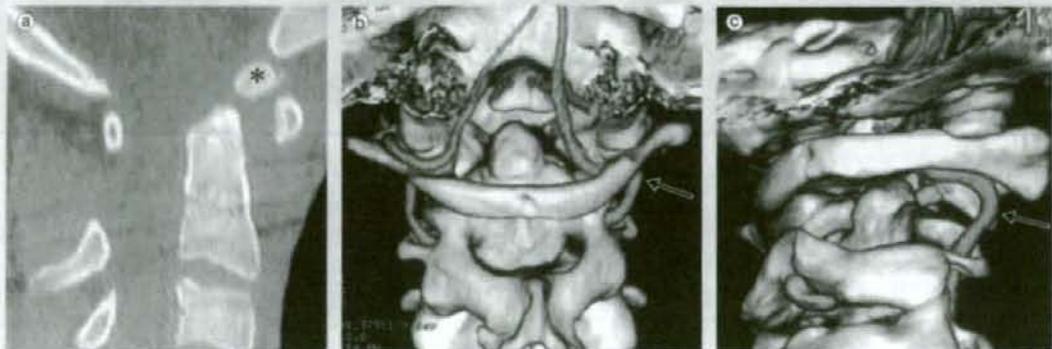
これまでに行われた選択的椎骨動脈造影所見の解析では、頸椎疾患を有しない例におけるpersistent 1st intersegmental artery、およびfenestrationの頻度は、それぞれ0.60～0.67%、0.24～1.0%であった^{10),11)}。また、上位頸椎奇形を有しない例を3D-CTAにて解析した研究では、それぞれの走行異常の頻度は4.7%および0.6%であった¹²⁾。

図5 persistent 1st intersegmental artery例

C1-C2不安定性を有するDown症候群成人例。

①: CT正中矢状断再構築像にて歯突起骨を認める(*印)。

②, ③: 3D-CTA立体像にて、右側椎骨動脈はC2の骨孔を出たのち、C1の横突起孔を通過せずにC1後弓尾側から脊柱管内へ侵入するpersistent 1st intersegmental arteryである(矢印)。



今回の著者らの検討では、これまでの報告に比して高頻度に椎骨動脈の走行異常が確認された。したがって、上位頸椎インストゥルメンテーション手術の対象となる例では、椎骨動脈の骨外走行異常の頻度が高いと考えられる。

頸椎領域の血管系の発生では、胎生期のintersegmental arteryが再配列して椎骨動脈が形成されるが、脊柱要素に関しても、胎生期の椎板の分節化・再配列が生じることで椎体椎間板が形成される。したがって、椎骨動脈の走行異常と、歯突起骨などの先天的な骨の形態異常は重複して発生する可能性が考えられる^{10),11)}。

今回の検討で、先天性骨奇形に限ると、きわめて高頻度に椎骨動脈の骨外走行異常が存在したが、この結果は、上述の仮説を強く支持するものである。

＊ 椎骨動脈の骨内走行異常をみる

77例中21例(27.3%)で、high-riding VAが確認された(図7)。奇形有群では26例中12例(46.2%)と高頻度にhigh-riding VAが存在した。

high-riding VAの頻度に関しては、これまでの屍骨、剖検例、臨床例での解析で、10~26%と報告されている^{13),14)}。

今回の検討では、先天性骨奇形を有する例で高率にhigh-riding VAが存在した。この結果から、胎生期の椎板の分節異常が、high-riding VAの形成にかかわっていることが推察される。

＊ 椎骨動脈の径の左右差をみる

77例中18例(23.4%)で椎骨動脈径の左右差が存在した(図7)。奇形有群の椎骨動脈径の左右差は26例中7例(26.9%)であり、奇形無群とはほぼ同じ頻度であった。

これまでに、頸椎外傷例で片側の椎骨動脈が閉塞することが報告されている¹⁵⁾。今回の結果と併せて、椎骨動脈の左右差を生じる因子としては、先天骨奇形との関連よりも、後天的な頸椎の構築学的な変化との関連が推察される。

図6 fenestration例

C1-C2不安定性を有するDown症候群小児例。

①：CT正中矢状断像にて歯突起骨を認める(＊印)。

②、③：椎骨動脈がC2の骨孔を出たあとに分岐し、1本はpersistent 1st intersegmental artery(矢印)、ほかの1本は通常の走行(矢頭印)を呈するfenestrationである。

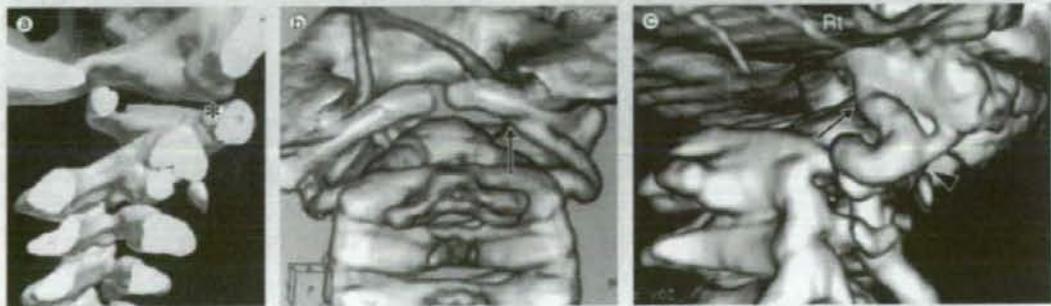


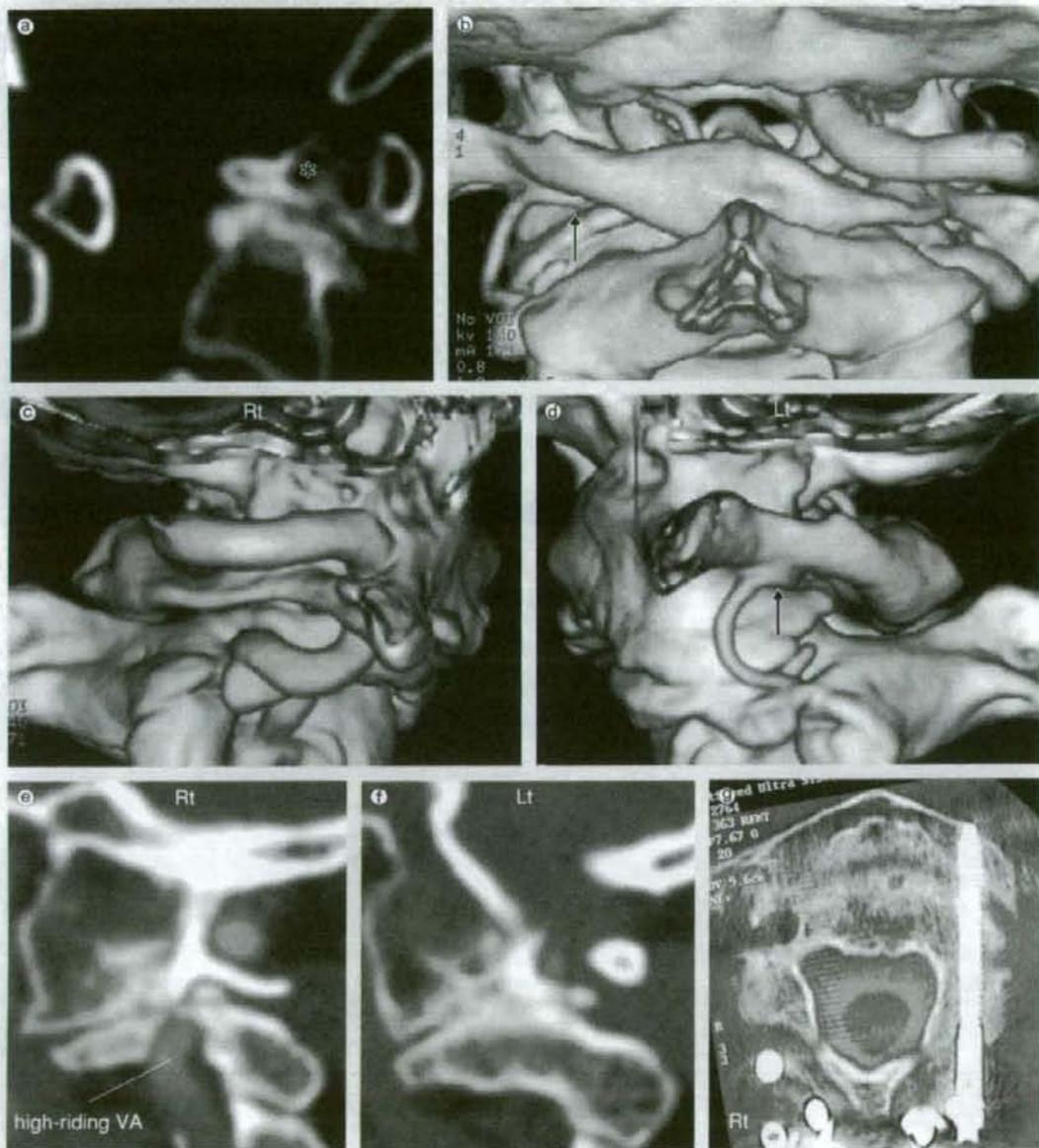
図7 persistent 1st intersegmental artery, 椎骨動脈径の左右差およびhigh-riding VA合併例
C1-C2不安定性を有する成人例。

①: CT正中矢状断再構築像にて歯突起骨を認める(*印)。

②~④: 左側椎骨動脈はpersistent 1st intersegmental artery (矢印), 右側椎骨動脈は通常の走行を呈しているが、径が左側に比して著しく大きい。

⑤, ⑥: C2椎弓根最狭部を含んだ矢状断再構築像で, 優位側の右側椎骨動脈がhigh-riding VAである。本例では, 右側のC1-C2関節貫通スクリュー刺入は危険と判断し, 左側のみの刺入とした。

⑦: 術後CTのMPR像にて, 左側のC1-C2関節貫通スクリュー刺入は的確に行われている。



● 三次元CT血管造影法の有用性 ●

今回の検討で、上位頸椎手術例のうち、とくに先天骨奇形を有する例では高頻度に椎骨動脈の骨外および骨内走行異常を伴っていた。これらの症例では、術中操作、とくにスクリュー刺入に伴う椎骨動脈損傷の危険性が少なからず存在すると考えられる。3D-CTAの所見から、これらの危険性

を事前に把握することが可能であり、3D-CTAは術野の展開、スクリュー刺入のプランニングを行ううえできわめて有用な検査法である。

謝辞

本研究に御協力いただいた千葉大学整形外科教室頸椎脊髓診療班の諸先生に深謝する。

文献

- 1) 山崎正志：環軸椎固定：Magerl法・C1外側塊スクリュー。関節外科, 27: 877-888, 2008.
- 2) Yamazaki M, et al: Anomalous vertebral artery at the extraosseous and intraosseous regions of the craniovertebral junction: analysis by three-dimensional computed tomography angiography. Spine, 30: 2452-2457, 2005.
- 3) 山崎正志ほか：上位頸椎手術における三次元血管造影法(3D-CTA)の有用性。整形外科, 55: 101-106, 2004.
- 4) Yamazaki M, et al: Abnormal course of the vertebral artery at the craniovertebral junction in patients with Down syndrome visualized by 3-dimensional CT angiography. Neuroradiology, 50: 485-490, 2008.
- 5) Yamazaki M, et al: Anomalous vertebral artery at the craniovertebral junction in a patient with Down syndrome: a case report. J Neurosurg Spine, 1: 1514-1517, 2004.
- 6) Yamazaki M, et al: Fenestration of vertebral artery at the craniovertebral junction in Down syndrome: a case report. Spine, 29: E551-554, 2004.
- 7) Yoshida M, et al: Comparison of the anatomical risk for vertebral artery injury associated with the C2-pedicle screw and atlantoaxial transarticular screw. Spine, 31: E513-E517, 2006.
- 8) Yamazaki M, et al: Surgical simulation of instrumented posterior occipitocervical fusion in a child with congenital skeletal anomaly. Spine, 17: E590-E594, 2006.
- 9) Yamazaki M, et al: Traumatic C6-7 subluxation with anomalous course of vertebral arteries treated with pedicle screw/rod fixation. Case report. J Neurosurg Spine, 7: 65-70, 2007.
- 10) Tokuda K, et al: Anomalous atlantoaxial portions of vertebral and posterior inferior cerebellar arteries. Neuroradiology, 27: 410-413, 1985.
- 11) Sato K, et al: Magnetic resonance imaging of C2 segmental type of vertebral artery. Surg Neurol, 41: 45-51, 1994.
- 12) Hong JT, et al: Analysis of anatomical variations of bone and vascular structures around the posterior atlantal arch using three-dimensional computed tomography angiography. J Neurosurg Spine, 8: 230-236, 2008.
- 13) Neo M, et al: Atlantoaxial transarticular screw fixation for a high-riding vertebral artery. Spine, 28: 666-670, 2003.
- 14) Madawi AA, et al: Radiological and anatomical evaluation of the atlantoaxial transarticular screw fixation technique. J Neurosurg, 86: 961-968, 1997.
- 15) Yamazaki M, et al: Usefulness of 3-dimensional full-scale modeling for preoperative simulation of surgery in a patient with old unilateral cervical fracture-dislocation. Spine, 32: E532-E536, 2007.