

総説

Review

脊髄・脊椎の機能血管解剖*

小宮山 雅樹**

Key words embryology, functional vascular anatomy, spinal cord, spine

No Shinkei Geka 41 (6) : 481 - 492, 2013

I. はじめに

脊髄・脊椎の血管解剖の研究の歴史は19世紀後半に始まった^{1,4)}。近年、脊髄の血管病変に対する血管内治療や外科的治療の進歩とともに、脊髄の血管解剖の理解が以前にもまして重要となってきた。CT angiography や MR angiography などの technology の進歩も目覚ましいものがあるが、今でもカテーテル血管撮影が、脊髄の血管病変診断の gold standard であることには違いはない。カテーテル血管撮影の施行や読影は簡単ではないものの、脊髄の血管構築そのものは比較的単純であるため、発生を含めた血管機能解剖の理解が、脊髄血管病変の病態理解や、より安全な治療に重要である。

II. 脊髄・脊椎とその血管系の発生

脊髄・脊椎発生の分子レベルでの解明は進んでいるが、その血管系に関する研究はほとんどない。脳と異なり脊髄は比較的単純な構造を繰り返

す body plan で形成されるため、脊髄の血管系も基本は単純な構築をしている。胎生3週になると神経管 (neural tube) が形成され、この時期に血管系も形成される。脊髄の発生において、前後軸に沿った領域化は重要なプロセスであり神経管の第4体節より頭方から脳が形成され、その後方から脊髄が形成される。最終的には脊髄では椎体の数と同じ脊髄分節 (myelomere) が形成される。繰り返す体節 (somite) [分節 (metamere)] は、最も尾部の未分化の未分節中胚葉 (presomitic mesoderm) の細胞が、後方に伸びていくと同時に、前方が一定時間ごとにくびれ切られることにより形成される。この周期的な体節形成は、転写因子の発現振動 (oscillation) が関係しており、分節時計 (segmentation clock) と呼ばれる¹²⁾。発生初期には、末梢神経、骨、筋肉と同様に、血管系も分節性に形成される。このような body plan は、種により細かい点は異なるものの、その基本的なプロセスは脊椎動物間で共通している。

*Functional Vascular Anatomy of the Spine and Spinal Cord

**大阪市立総合医療センター脳血管内治療科, Masaki KOMIYAMA, M.D., Department of Neuro-Intervention, Osaka City General Hospital

[連絡先] 小宮山雅樹 = 大阪市立総合医療センター脳血管内治療科 (☎ 534-0021 大阪市都島区都島本通 2-13-22)

Corresponding author : Masaki KOMIYAMA, M.D., Department of Neuro-Intervention, Osaka City General Hospital, 2-13-22 Miyakojima-hondori, Miyakojima-ku, Osaka-city, Osaka 534-0021, JAPAN

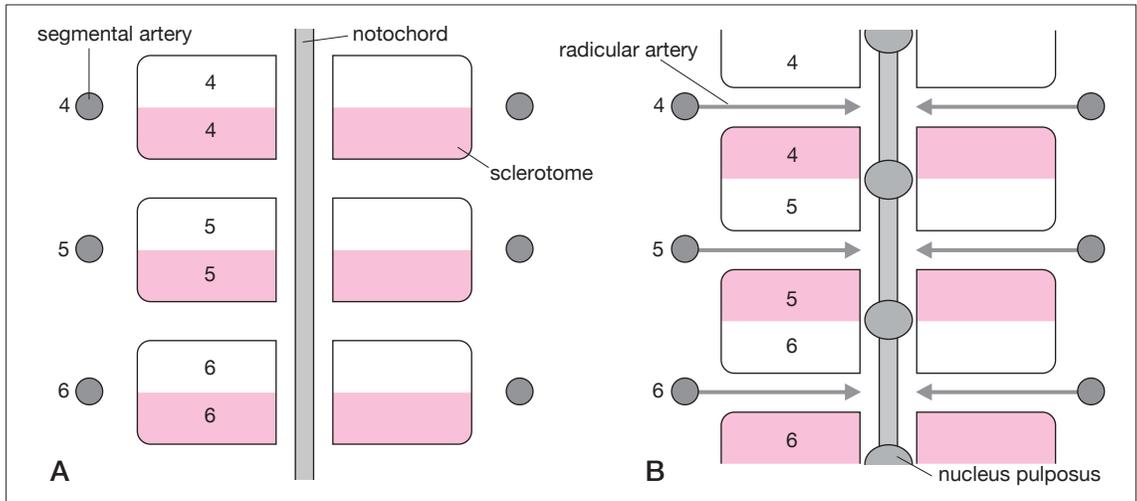


Fig. 1 Embryology of the vertebral body. Embryologically, hemi-vertebral body is formed by the fusion of the lower half of the given sclerotome and the upper half of the sclerotome immediately caudal to the former one (A). Fusion of bilateral hemivertebral bodies results in the formation of the vertebral body (B). With regression of the notochord, its remnant becomes the nucleus pulposus. Segmental arteries are located at the levels of intervertebral foramina. Initially, each segmental artery enters the intervertebral foramen and feeds the spinal cord metamericly. Numbers indicate the numbers of the somites.

III. 脊椎の発生

胎生 5~6 週に各体節レベルで脊索 (notochord) の左右に中胚葉から遊走し、形成される硬節 (sclerotome) が椎体の原基となる。両側にある硬節は、その上下の部分に分かれ、あるレベルの硬節の下半分が、その次のレベルの上半分の硬節と癒合して左右に半分の椎体 (hemivertebra) を形成し、そして左右の hemivertebra が癒合して、そのレベルの椎体が完成する。下半分の椎体の細胞が密で、上半分の椎体の細胞が疎である。脊索はやがて退縮し髄核 (nucleus pulposus) として椎間板内に遺残する。この頃、椎弓・棘突起・肋骨も形成される。椎体は内軟骨性骨化 (endochondral ossification) で形成され、椎弓・棘突起は膜性骨化 (intramembranous ossification) で形成される。分節動脈 (segmental artery) と末梢神経は、発生学的には上下の椎体の間の椎間孔 (intervertebral foramen) のレベルに存在する (Fig. 1)。

IV. 脊髄の動脈

1. 腹側縦走神経動脈 (ventral longitudinal neural artery)

31 対、62 個の体節が頭側から尾側に向かい形成され、一対の背側大動脈の左右から分節動脈が分岐し、体節ごとの一側の椎体、椎弓・棘突起、筋肉、硬膜、神経根、脊髄を栄養する^{2,10)}。つまりおのおの分節動脈から、これらを栄養する動脈が基本的に別々に分岐する。椎体を背側から栄養する retrocorporeal artery、椎弓・棘突起を栄養する prelaminar artery、筋肉を栄養する muscular branch、硬膜を栄養する神経根髄膜動脈 (radiculomeningeal artery)、神経根を栄養する神経根動脈 (radicular artery)、脊髄を栄養する神経根髄質動脈 (radiculomedullary artery) や神経根軟膜動脈 (radiculopial artery) である。このような動脈の分岐パターンは、胸腰椎レベルで残されているが、頸椎レベルでは発生過程でこのパターンは崩れ、分節動脈が縦方向で再構築され上行頸動脈、椎骨動脈、深頸動脈が、腹背方向に順に並び、上記構造物を栄養するようになる。同様に、仙椎レベルでも、分節動脈が外側・内側仙骨動脈に再構築され

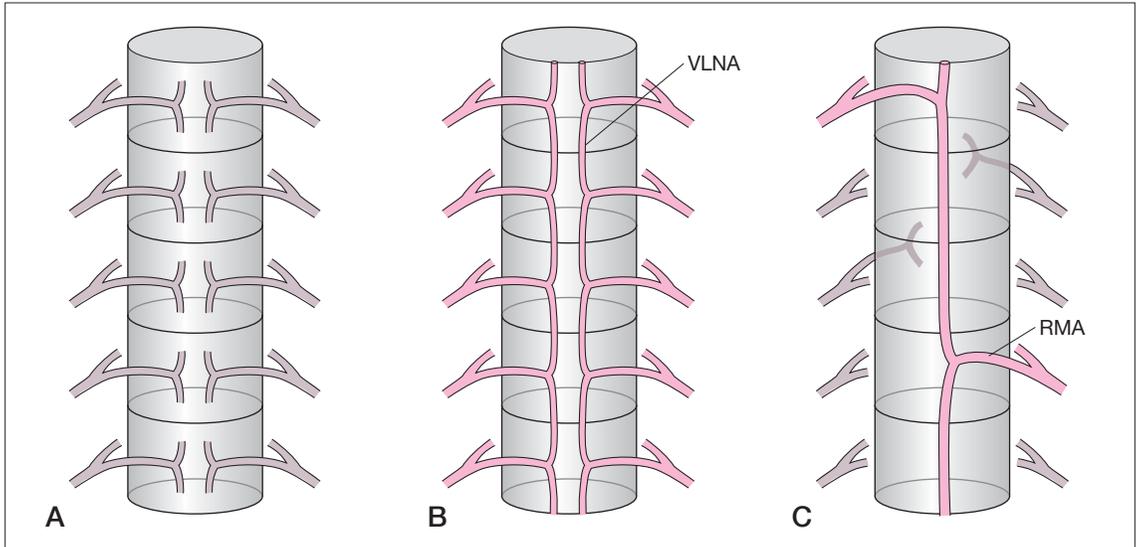


Fig. 2 Embryology of the anterior spinal artery. Each segmental artery gives rise to the ventral radicular artery, which bifurcates into the upper and lower branches (A). On the ventral surface of the spinal cord, paired ventral longitudinal neural arteries (VLNA) are formed by the anastomoses of the upper and lower branches of the radicular arteries (B). Paired VLNA fuse in the midline to become the anterior spinal artery. Many radicular arteries supplying the spinal cord regress subsequently, and the remaining ones, radiculomedullary arteries (RMA), continue to supply the spinal cord (C).

る。

脊髄への栄養は、各髄節レベルで腹側神経根動脈が上行枝と下行枝に分かれ、それらが上下で吻合し、連続する2本の腹側縦走神経動脈 (ventral longitudinal neural artery) が形成される。次いで左右の縦走神経動脈が正中で癒合し、1本の前脊髄動脈 (anterior spinal artery) が形成される。脊髄の動脈構築は、はじめ体節単位の軸面を基軸に形成されるが、発生の進行とともに縦方向優位のパターンに変わっていく (desegmentation)。前脊髄動脈の癒合不全により duplication や fenestration が形成されるが、これらは anomaly ではなく、腹側縦走神経動脈の maturation failure である (Fig. 2)。

各分節動脈により、椎体、椎弓、筋肉、硬膜、神経根は必ず栄養されるが、脊髄への枝 (前根枝と後根枝がある) の多くは退縮するため (特に上位胸髄レベルで)、残存する神経根髄質動脈や神経根軟膜動脈が脊髄を栄養することになる。神経根軟膜動脈は plexiform な形態の軟膜動脈叢 (pial arterial network, vasa corona) を栄養し、脊髄の背側に向かう神経根軟膜動脈は一对の後脊髄動脈を

栄養する^{5-7, 9, 14, 16)}。

2. 分節動脈 (segmental artery)

分節動脈の基本分岐パターンは、大動脈から分岐後、椎体の前方・側方を栄養する短い枝 (椎体枝: vertebral body branch) を出し、椎体の表面に沿って左分節動脈は後方に向かい、また右分節動脈は右側後方に向かう。次いで分節動脈は、椎体外側で3枝に分岐する。(1) ventral branch は、肋間動脈 (intercostal artery) と腰動脈 (lumbar artery) になる、(2) dorsal branch は、筋肉や皮膚へ分布する、(3) spinal branch は、椎間孔を通り椎管内へ入り、さらにいくつかの枝に分岐する。(2) と (3) の枝は、共通管を形成することもあり dorsospinal branch と呼ばれる。Spinal branch は、椎体・椎弓 (骨・靭帯成分)、神経根、硬膜、脊髄を栄養する動脈に分かれる。(3a) 主に骨・靭帯成分を栄養する枝は、硬膜外枝であり、椎体を後面から栄養する retrocorporeal artery と椎弓・棘突起を栄養する prelaminar artery に分かれ、一部硬膜も栄養する。(3b) 神経根・硬膜・脊髄を栄養する動脈も分

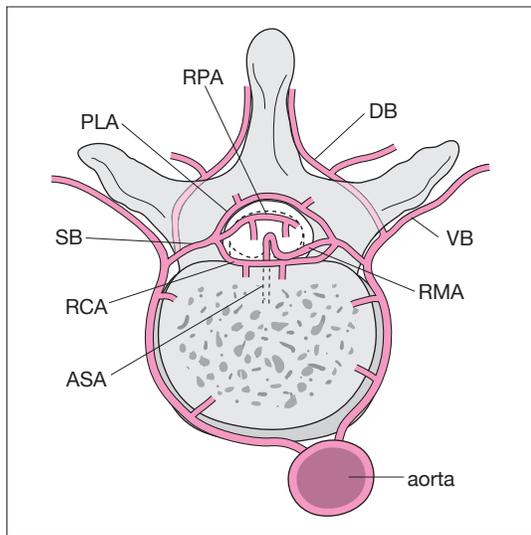


Fig. 3 Segmental artery and its branches. Segmental artery gives rise to small arteries supplying the vertebral body in its proximal portion, and is divided into three branches: ventral (VB), dorsal (DB), and spinal branches (SB). Spinal branch is further divided into epidural branch (retrocorporeal and prelaminar arteries), dural branch (not shown), radicular branch (not shown) and spinal cord branches (radiculomedullary, and radiculopial arteries).
[Abbreviations] ASA: anterior spinal artery, PLA: prelaminar artery, RCA: retrocorporeal artery, RMA: radiculomedullary artery, RPA: radiculopial artery

岐し、神経根を栄養する神経根動脈、神経根と硬膜を栄養する神経根髄膜動脈、さらに前神経根や後神経根に沿って前脊髄動脈や後脊髄動脈・軟膜動脈叢まで到達する動脈は、それぞれ神経根髄質動脈、神経根軟膜動脈と呼ばれる (Fig. 3)。

頸部の分節動脈は大部分が退縮し、残った部分が縦方向に連続して、上行頸動脈、椎骨動脈、深頸動脈を形成する。椎骨動脈は、頸椎の横突孔 (transverse foramen) を通る。これらの動脈は、各分節レベルでの吻合がある。このような吻合は、動脈の狭窄・閉塞や動静脈シャントがある場合に顕在化する。頸部以下の分節動脈は肋間動脈、肋下動脈 (subcostal artery)、腰動脈となり、下行大動脈から分岐する。肋間動脈の最上位は、鎖骨下動脈の肋頸動脈 (costocervical trunk) から分枝する最上肋間動脈 (supreme intercostal artery) で2枝に分かれ、第1および第2肋間動脈となる。

3. 縦方向と横方向の吻合

分節動脈は、原則的に脊髄を除く、その単一レベルの体節に属するすべての組織を栄養するが、椎体内外で左右の吻合を形成し、また上下の分節動脈とも縦方向の吻合を形成する¹⁰⁾。この豊富な側副路のため、1本の分節動脈がそのレベルのみで閉塞しても症状は出にくい。1つの分節動脈を選択的に造影した場合に、その上下などいくつかの分節動脈が描出されるのはこのような側副路を介して造影されることによる。

脊髄と椎体の成長速度の差から椎体レベルと脊髄レベルに差が出てくる。尾側になるほどその差は大きくなり、脊髄レベルのほうが、椎体レベルよりも吻側にくる。この差にもかかわらず変化しない神経根動脈の固定点が椎間孔と神経根が脊髄に移行する脊髄の表面である。

分節動脈の基本構造は、胸・腰椎では肋間動脈 (9対の肋間動脈と1対の肋下動脈) と4対の腰動脈として残り、第3肋間動脈から第4腰動脈までの14対の動脈が下行大動脈から分岐する。第1・2胸椎の分節動脈である最上肋間動脈は肋頸動脈から分岐し、第5腰動脈は正中仙骨動脈 (medial sacral artery) や腸腰動脈 (iliolumbar artery) から分岐する。分節動脈は大動脈の脊髄に面した壁から分岐するため、下行大動脈と脊髄の位置関係から、左分節動脈は、胸腰椎レベルでは大動脈の背側から分岐するが、右分節動脈は、上位胸椎レベルでは大動脈の内側から、下位腰椎レベルでは大動脈の背側から分岐する。また上位胸椎レベルでは、分節動脈は、大動脈の分岐部から約2椎体分上行してその支配領域に到達するが、下位胸椎や上位腰椎レベルでは、支配領域のすぐ下のレベルの大動脈から分岐する。血管撮影時の実際のレベルの確認は、撮影側の椎体半分の濃染像 (hemi-vertebral blush) が最も確実である。

椎体外の吻合は縦方向が優勢であり、胸髄・腰髄レベルでは椎体の傍または横突起の前部に位置する。頸髄・上部胸髄と仙髄レベルでのその吻合はさらに発達し、頸髄レベルでは上行咽頭動脈や後頭動脈以外に、椎骨動脈、上行頸動脈、深頸動脈が縦方向の吻合を形成し、上部胸髄では最上肋間動脈が、仙髄レベルでは内側・外側仙骨動脈と

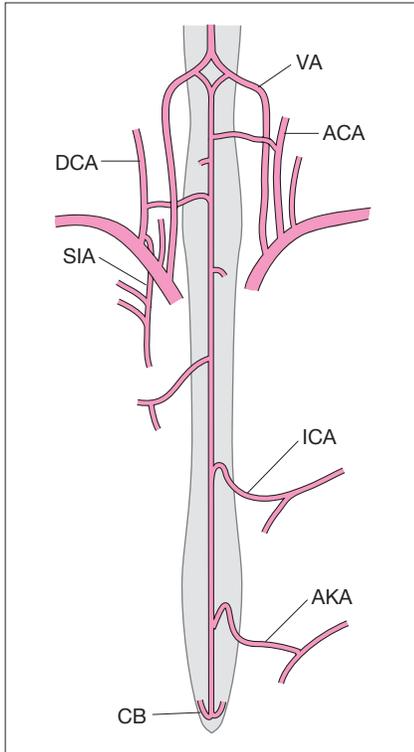


Fig. 4 Blood supply of the spinal cord. Cervical spinal cord is supplied by vertebral, ascending cervical, deep cervical arteries as well as occipital and ascending pharyngeal arteries. Thoracic spinal cord is supplied by supreme intercostal arteries (branch of costocervical trunk), intercostal arteries, and subcostal arteries. Lumbar spinal cord is supplied by lumbar arteries, and sacral cord is supplied by median and lateral sacral arteries. Radiculomedullary artery to the lumbar enlargement is called Adamkiewicz artery.

[Abbreviations] ACA: ascending cervical artery, AKA: Adamkiewicz artery, CB: conus basket, DCA: deep cervical artery, ICA: intercostal artery, SIA: supreme intercostal artery, VA: vertebral artery

腸腰動脈が縦方向の吻合を形成する。腸腰動脈と外側仙骨動脈は内腸骨動脈から分岐する (Fig. 4)。椎管内・硬膜外の吻合は、横方向が優勢であり、椎体背面を走る retrocorporeal artery や椎弓前面を走る prelaminal artery を介して左右の分節動脈は吻合する。これらの動脈は硬膜外腔を走行し、椎体・椎弓を栄養する動脈と考えられる。一

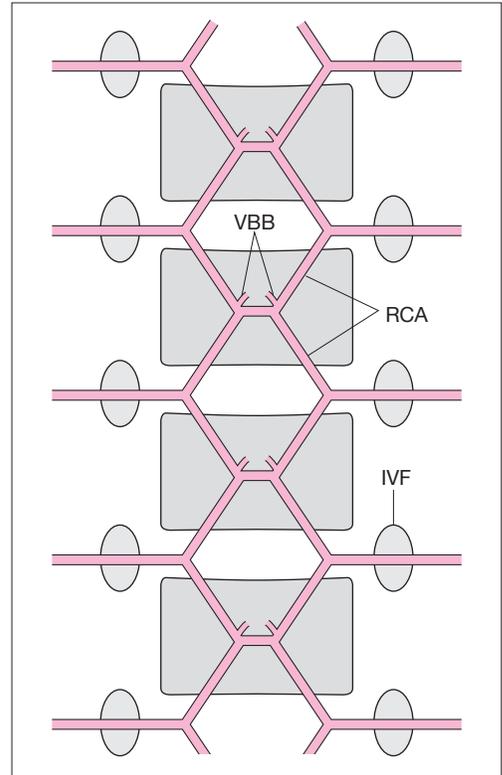


Fig. 5 Retrocorporeal anastomoses in the ventral epidural space. Each retrocorporeal artery gives rise to upper and lower branches. These branches show the characteristic hexagonal appearance. These anastomoses are located in the ventral epidural spaces from the clivus to the sacrum. These longitudinal anastomoses are connected to the segmental arteries at each metameric level, contributing to the right and left anastomoses. Vertebral body branches of the retrocorporeal arteries at the mid-vertebral levels supply vertebral bodies.

[Abbreviations] IVF: intervertebral foramen, RCA: retrocorporeal artery, VBB: vertebral body branch

側の retrocorporeal artery は上枝と下枝に分岐し、それぞれ左右の上枝と下枝が arch を形成するため、retrocorporeal artery は、全周が造影されれば、特徴的な六角形 (hexagon) の形状を呈する。椎管内・硬膜外を斜台から仙椎までこの六角形が連続して存在する。C2/3 レベルの椎骨動脈から分岐する anterior meningeal artery は、歯突起の後面を上行し、対側の同じ動脈と odontoid arch を形成する。これは、第1・2頸椎レベルでの retrocorporeal

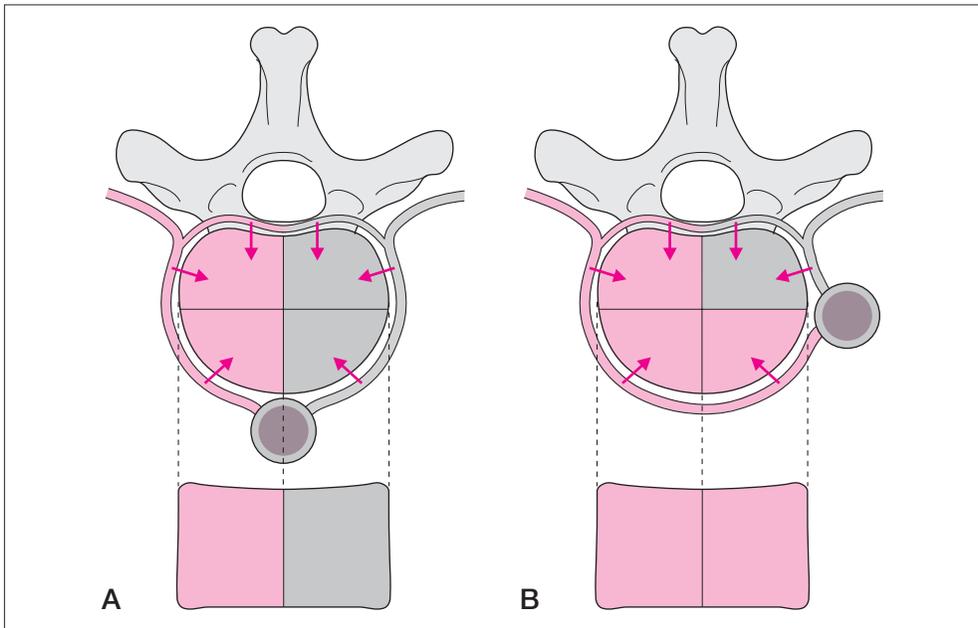


Fig. 6 Angiographic blush of the vertebral body. Angiographic vertebral blush is differently demonstrated at the different vertebral levels. In the lower thoracic level where the aorta is located in the midline, hemivertebral blush is demonstrated in AP view (A). However, in the upper thoracic level where the aorta is located laterally, the right segmental artery injection demonstrates the entire vertebral blush in AP view (B).

eal anastomosis であり，meningeal artery の名称がつくが，硬膜外の動脈である (Fig. 5)。

4. 椎骨動脈

椎骨動脈の第6頸椎の横突孔に入るまでを V1 segment，横突起内の部分を V2 segment (transversary segment と呼ばれる)，第1頸椎の横突孔から出た後の硬膜外の部分を V3 segment，硬膜内を V4 segment を呼ぶ。椎骨動脈の入る横突孔のレベルは，C6 が最も多く 93% であり，C3, C4, C5, C7 では，それぞれ 0.2%，1.0%，5.0%，0.8% である。したがって，椎骨動脈は通常，6 個の椎体の横突孔で形成される transversary canal を通過する。椎骨動脈は，各椎間レベルで後頭動脈，上行咽頭動脈，上行頸動脈，深頸動脈との吻合の可能性があり，側副血行路になり得る。椎骨動脈が分岐する鎖骨下動脈は，発生学的には第7頸椎の分節動脈であり，後頭動脈は，第1・2頸椎の分節動脈と関係が深い。さらに頭側の分節動脈の舌下神経動脈は，魚類や両生類では脊髄の動脈であり，

上行咽頭動脈の hypoglossal branch と相同である。

上位頸髄 (C1~4) レベルにおける後脊髄動脈は，lateral spinal artery と呼ばれ，頭側では後下小脳動脈や硬膜内の椎骨動脈と吻合する。また上位頸髄の神経根動脈とも吻合し，脊髄後根と歯状靭帯の間を副神経の脊髄部分に沿って走行する⁸⁾。そしてこの部位での，椎骨動脈の duplication や硬膜内走行に関与する。

5. 椎体の血管構築

椎体は，その上下・左右にある4分節動脈によって栄養される。大動脈から分岐した分節動脈は椎間レベルにあり，椎体に直接入る椎体枝 (ventral branch, ventrolateral branch) をまず分岐する。次いで椎間孔から椎管内へ入り椎体後面を走行する retrocorporeal artery が形成する六角形の上下の2辺からも椎体枝 (dorsal branch) が椎体に侵入する¹³⁾。これらの椎体枝は椎体内でお互い吻合しており，脊髄のように左右の血管構築の明確な分離はない。

血管撮影の晩期像で椎体は vertebral blush として認められる。通常、1つの分節動脈の造影で、左右の半椎体の濃染像 (hemivertebral blush) が認められる。椎体と大動脈が前後に並び、左右の肋間動脈が対称的に椎体を栄養する場合は、それぞれの肋間動脈の造影で同側の hemivertebral blush が認められるが、上位胸椎レベルでは、大動脈は椎体の左側にあり、右肋間動脈は左前 1/4 と右 1/2 の椎体を栄養するため、血管撮影の前後像では椎体全体の blush として認められる (Fig. 6)。逆に左肋間動脈は左後 1/4 のみの椎体を栄養するため、前後像では左 1/2 の椎体の blush として認められる。

6. 神経根動脈, 神経根髄膜動脈, 神経根髄質動脈, 神経根軟膜動脈

各分節動脈には必ず神経根動脈が存在する。体節の数と同じで、左右に 31 対、計 62 本の神経根動脈がある。頭蓋底と通過する脳神経は外頸動脈の枝が栄養するのと同様に、脊髄レベルでの神経根の栄養は神経根動脈が行う。前根および後根の腹側に沿って走行する前神経根動脈と後神経根動脈がある。硬膜を栄養する動脈は、単独で分節動脈から分岐する場合や、神経根動脈、神経根髄質動脈や神経根軟膜動脈から分岐する場合などがある。神経根動脈が、硬膜も栄養する場合、神経根髄膜動脈と呼ばれる。脊髄を栄養する分節動脈の多くは退縮するが、残る分節動脈には 2 種類あり、腹側の前脊髄動脈につながる場合は、神経根髄質動脈と呼ばれる。軟膜動脈叢につながる場合は、神経根軟膜動脈と呼ばれる。神経根髄質動脈は前根に沿い、後根近くの 2 本の後脊髄動脈を栄養する背側神経根軟膜動脈 (dorsal radiculopial artery) は後根に沿って脊髄に達する。前根に沿って脊髄に向かうが、前脊髄動脈にはつながらず、脊髄表面の軟膜動脈叢にだけつながる場合は腹側神経根軟膜動脈 (ventral radiculopial artery) と呼ばれる (Fig. 7)。

神経根髄質動脈と後根に沿う神経根軟膜動脈が同じ横突孔のレベルから分岐することがあり、起始部で共通幹を形成することもあれば、分節動脈から別々に分岐することもある。腹側と背側に向

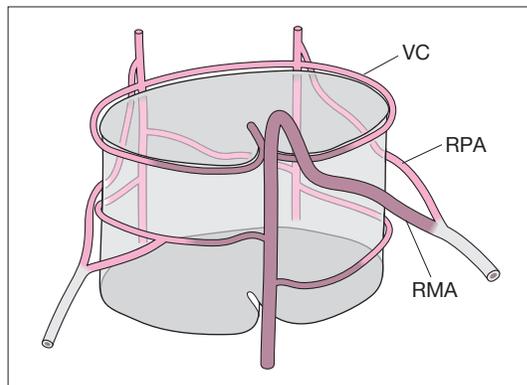


Fig. 7 Radiculomedullary and radiculopial arteries. Radiculomedullary artery (RMA) supplies the anterior spinal artery, and contributes the blood supply to the ventral 2/3 of the spinal cord. RMA supplies the long segment of the spinal cord longitudinally. Radiculopial artery (RPA) supplies the vasa corona (VC) on the surface of the spinal cord, and contributes the blood supply to the dorsal 1/3 of the spinal cord. RPA contributes the limited length of the spinal cord longitudinally.

かう硬膜枝も同様のことが言え、硬膜枝のほうが、神経根枝よりも近位で分岐することが多い。硬膜枝は、腹側よりも背側のほうが発達している¹¹⁾。この背側の硬膜動脈は、後方から到達する外科的手術時に硬膜上に観察される。通常、神経根髄質動脈は 4~8 本、平均 6 本、神経根軟膜動脈は 11~16 本ある。つまり、神経根髄質動脈のほうが、神経根軟膜動脈よりも退縮する動脈が多い。

前脊髄動脈の頭側は、大後頭孔レベルで両側の椎骨動脈の V4 部から 1 対の下行枝が分岐後に 1 本になることで形成されるが、これら左右の下行枝の径に違いがあることが多い。脊髄の前正中裂の中を縦走する前脊髄動脈は、脳幹から脊髄下端までの ventral longitudinal vascular axis を形成する。後脊髄動脈は、posterolateral sulcus に沿って、脊髄の後面の傍正中に 1 対存在するが、常に 2 本の動脈があるのではなく、脊髄表面に動脈叢があると考えたほうがよい。この後脊髄動脈は脊髄の後根の背腹どちら側に来てよいが、後根の腹側を走行することが多い。神経根髄質動脈と神経根軟膜動脈は、神経孔から入り神経根に沿って上行し、hairpin bend を呈しながら、前脊髄動脈または

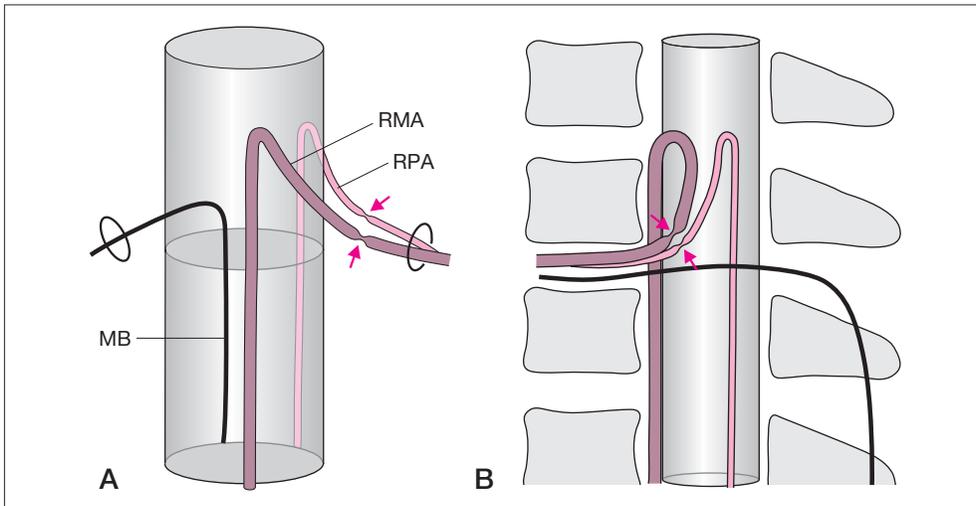


Fig. 8 Radiculomedullary artery (RMA), radiculopial artery (RPA) and dorsal muscular branch (MB). Differentiation of the RMA, RPA and MB is important in the angiographic AP view since all of them descend near the midline (A). Knowledge of their characteristic courses and configurations allows their differentiation. Although both RMA and RPA have hairpin bend configuration, their angles at the tips are different. RPA has sharper angle than does RMA due to their different distance from the midline. MB does not show a hairpin bend configuration. Their courses in the lateral view help us to understand the vascular anatomy in AP view (B). RMA and RPA have physiological stenoses where they cross the dura mater (arrows).

後脊髄動脈になり、さらに上行枝と下行枝に分岐するが、下行枝のほうが太く優勢である。Hairpin bendを呈するのは、脊髄と脊椎との成長の差のためで、これら動脈が硬膜に入る部位では生理的な狭窄が存在する。前脊髄動脈の閉塞は脊髄梗塞になることが多いが、後脊髄動脈は、閉塞しても軟膜動脈叢が側副路になるため梗塞を起こしにくい。前脊髄動脈は頭尾方向の血流供給に重要であるが、後脊髄動脈は、基本的には横方向への血液供給であり、脊髄の背側を栄養するが、頭尾方向にはその役割は大きくない。棘突起とそれに付着する筋肉は、各分節動脈のdorsal muscular branchに栄養される。これらの筋肉枝は、縦方向に吻合し、血管撮影の前後像では正中を下行する。神経根髄質動脈や神経根軟膜動脈とは異なりhairpin bendを描かず、ほぼ水平またはやや下向きで正中に達し、さらに下行するので鑑別可能である (Fig. 8)。

Adamkiewicz artery (artery of the lumbar enlargement) は、脊髄の下位半分の前脊髄動脈を栄養す

る動脈で、Th9 と L1 の間のレベルで (稀に、L2-3 から)、左側から分岐することが多い。左 Th10 からの分岐が最も多く、右側からの分岐は 17~30% である。頸髄での太い神経根髄質動脈は、artery of the cervical enlargement と呼ばれ、椎骨動脈よりも上行頸動脈や深頸動脈から分岐することが多いため、この動脈を描出するためには、甲狀頸動脈 (thyrocervical trunk) や肋頸動脈の造影も必須である。前脊髄動脈と後脊髄動脈は、最も尾側の脊髄円錐でお互い吻合し、W 字を呈する conus arcade を形成する。この arterial basket より尾側の終糸動脈 (artery of the filum terminale) の塞栓術は、機能する脊髄・神経根がないので安全に行うことができる (Fig. 9)。

7. 髄内の動脈

前脊髄動脈は、各分節レベルで、両側に中心溝動脈 (sulcal artery, sulcocommissural artery) と軟膜動脈叢への外側枝を分岐し、脊髄の腹側の 2/3 の主に灰白質を遠心性 (centrifugal) に栄養する。発

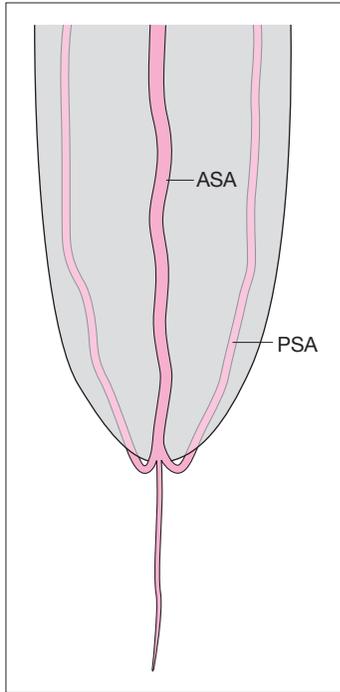


Fig. 9 Arterial basket of the conus medullaris. At the conus medullaris, anterior spinal artery (ASA) and two posterior spinal arteries (PSA) configure the conus arcade (arterial basket). In AP view, they show a W-shaped configuration.

生学的に一对の腹側縦走神経動脈にそれぞれ左右の中心溝動脈が属するため、一側のみを栄養する。この基本構造が、longitudinal artery が正中線上で癒合した後も残される。中心溝動脈の頭尾方向の密度は、生下時には全脊髄で一定であるが、その後の胸髄は他の部位より成長するため、中心溝動脈の密度は低くなる。このため胸髄が虚血などに弱いとされる (Fig. 10)。

前脊髄動脈は中心溝動脈のみを分岐するのではなく、軟膜動脈叢へも pial branch を分岐する。前脊髄動脈は、正中線上の前正中裂内で、軟膜下にあり、340~1,122 μm の太さがある。中心溝動脈は、各髄節に6~7本、総数約200本あり、その太さは、60~72 μm で、さらに先の穿通枝は24~60 μm の太さである¹⁴⁾。中心溝動脈は、脊髄実質に入る前に上行枝と下行枝を分岐し、同側の上下の

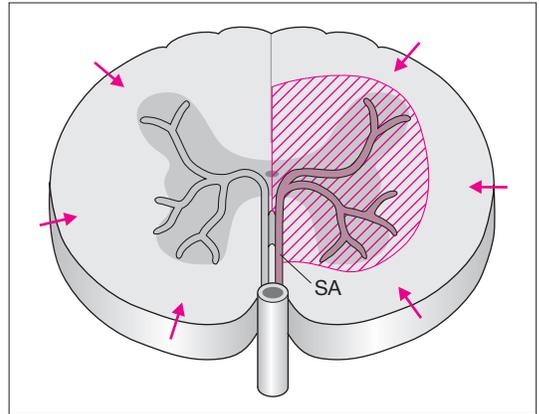


Fig. 10 Sulcal artery (SA) and peripheral perforating artery. SA strictly supplies unilateral spinal cord centrifugally. Hatched area (ventral 2/3 of the hemi-spinal cord) is supplied by the unilateral sulcal arteries. There are no anastomoses between the sulcal arteries in the cord. Perforating arteries of the vasa corona supply the remaining dorsal 1/3 of the cord centripetally (arrows).

中心溝動脈と吻合する。必ずしも同じレベルからとは限らないが、2本の中心溝動脈が前脊髄動脈から直接分岐し、左右の脊髄を栄養する。前脊髄動脈から1本の共通幹が分岐し、前正中裂内の矢状面で、左右の2本の中心溝動脈に分岐する場合もある¹⁷⁾。一方、前脊髄動脈と後脊髄動脈を結び脊髄の全周を取り囲む軟膜動脈叢から分岐する多数の穿通枝 (10~50 μm) が、白質を求心性 (centripetal) に貫き脊髄の背側の1/3を栄養する。中心溝動脈と脊髄表面からの穿通枝の間には吻合がある。

V. 脊髄静脈

1. 脊髄静脈, 神経根髄質静脈, 神経根静脈

胎生3週に中胚葉から脊索が形成され、脊索は血管系の動脈・静脈の決定にも関係する。神経管が胎生4週末には完成し、脊髄の導出静脈も形成される。脊髄表面に前脊髄静脈 (anterior spinal vein) と後脊髄静脈 (posterior spinal vein) が脊髄の前後、正中に1本ずつ形成される。この前脊髄静脈と後脊髄静脈は頸部と腰部では通常1本ずつ存在するが、胸椎レベルでは1本ではなく、2~3

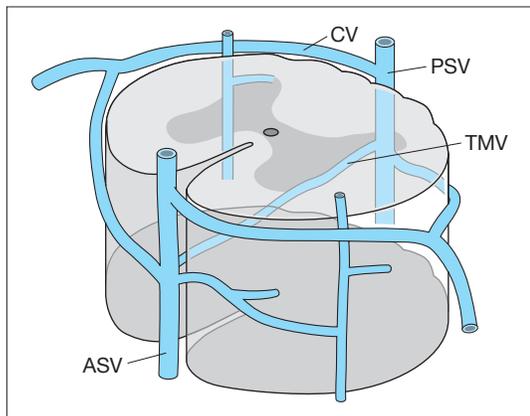


Fig. 11 Spinal cord veins. Venous blood in the spinal cord is collected centrifugally by the coronal veins (CV) on the surface of the spinal cord. Then, it is further collected by both anterior spinal vein (ASV) and posterior spinal vein (PSV) in the midline. In addition, sulcal veins collect central venous blood centripetally, and they are connected either to ASV or PSV. Transmedullary vein (TMV) is located between ASV and PSV.

本の縦方向の脊髄静脈が腹側または背側に存在することがある。正中ではこのように縦方向の静脈が形成されるが、脊髄の側方ではこのような静脈は形成されない。脊髄からの静脈血は、後頭蓋窩への導出を除き、前脊髄静脈または後脊髄静脈につながる導出静脈 (emissary bridging vein) を介してのみ導出され、神経根静脈 (radicular vein) は関与しない。この導出静脈は、神経根髄質静脈 (radiculomedullary vein) や神経根脊髄静脈 (radiculospinal vein) とも呼ばれる。神経根静脈は総数 30~70 本、平均 50 本以上あり、腹側と背側にその数の差はなく (平均それぞれ 23 本)、左右差もなく分布している。神経根動脈よりも神経根静脈の数は多い。神経根静脈は、神経根の近傍の硬膜を神経根とは関係なく貫通する場合 (40%) と神経根に伴行して硬膜を貫通する場合 (60%) とがある。つまり導出静脈 (神経根髄質静脈) は metameric pattern をとらない。この神経根髄質静脈には逆流防止弁はないが、硬膜貫通部で生理的狭窄と蛇行があり、これが弁機能をはたしている¹⁵⁾。通常、神経根髄質静脈は、9~10 本あり、腰部の静脈が最も太い。神経根髄質静脈は、神経根髄質動脈と同じように hairpin bend を描くため、

動静脈の短絡がある場合には、動脈と静脈の鑑別が重要である (Fig. 11)。

2. 髄内の静脈

脊髄内の静脈血は、多くは細い radial perforating vein を介して、左右対称・放射状に、脊髄周囲の辺縁静脈系に導出されるが、腹側・背側正中部分にある sulcal vein も灰白質からの血流を集める。これらはともに前後の正中脊髄静脈に導出される。また別に太さ 300~700 μm の transmedullary anastomosis は髄内を前後方向に腹側から背・頭側に向け斜めに走行し、前脊髄静脈と後脊髄静脈を結んでいるが、脊髄実質からの静脈血の受け皿にはなっていない。

3. 硬膜外と椎体外の静脈

前脊髄静脈は、前脊髄動脈のすぐ背側の軟膜下腔 (subpial space) で前正中裂内にある。後脊髄動脈・静脈は、軟膜で被われているが、くも膜下腔 (subarachnoid space) に突出している。前脊髄静脈と後脊髄静脈は、頭蓋底で脳静脈洞と連続し、尾側では前脊髄静脈が終糸静脈 (vein of the filum terminale) に連続する場合と仙髄神経根に沿って仙骨静脈叢へ連続する場合がある。前後の脊髄動脈が円錐部で arterial basket を形成して交通性をもつように、静脈系も同部で venous basket を形成する。

脊椎管内、硬膜外の静脈叢は、概念的に ventral, lateral, dorsal space の 3 つの compartment に分けることができ、それぞれ椎体 (脊索と関連が深く、内軟骨性骨化で形成される)、脊髄 (中枢神経系)、椎弓と棘突起 (膜性骨化で形成される) からの静脈の導出を受ける³⁾。Ventral epidural space の硬膜外静脈叢は、retrocorporeal artery が作る六角形 (epidural hexagon) と同様に、この動脈よりも、より椎体側にほぼ同じ大きさの静脈の hexagon を同じレベルに形成する。硬膜動静脈瘻 (dural arteriovenous fistula) は lateral epidural space を介して leptomeningeal reflux を起こすことがある。椎体後面に形成される硬膜外動静脈瘻 (epidural arteriovenous fistula) は、ventral epidural space の血栓化や閉塞が伴う場合には、lateral epidural space を

介して leptomeningeal reflux を起こす。

脊髄・脊椎からの静脈の流出は、椎管内・硬膜外の静脈叢から椎管外の静脈叢へ、さらに分節静脈を介して、頸髄レベルでは無名静脈に、胸髄レベルでは右側では奇静脈 (azygos vein, 第3胸椎レベルで腹側へ向い上大静脈に流入する) に、左側では半奇静脈 (hemiazzygos vein, 第9胸椎レベルで斜めに椎体前面を横切り、奇静脈に流入する) につながる。左側で半奇静脈より頭側の静脈は副半奇静脈 (accessory hemiazzygos vein) と呼ばれる。発生学的には奇静脈や半奇静脈は、胎生期の主静脈 (cardinal vein) に対応する静脈で左右対称であるが、その後の変化で、半奇静脈や副半奇静脈は、奇静脈の枝と見なすことができる。肋間静脈 (intercostal vein) や最上肋間静脈 (supreme intercostal vein) は、右側ではすべて奇静脈に流入するが、左側では頭側では副半奇静脈に、ほかは半奇静脈に流入する。腰部の分節静脈は、上行腰静脈 (ascending lumbar vein) を介して、上記の奇静脈、半奇静脈につながる。脊髄からの静脈灌流は心臓との位置関係、呼吸 (呼気と吸気)、心拍 (収縮期と拡張期)、体位などが複雑に関係している (Fig. 12)。

文 献

- 1) Adamkiewicz A : Die Blutgefäße des menschlichen Rückenmarkes. II. Teil. Die Gefäße der Rückenmarksoberfläche. S Ber Akad Wiss Wien Math-Naturw K1 (Abt III) **85** : 101-130, 1882 (論文15で引用)
- 2) Evans HM : The development of the vascular system. In : Keibel F, Mall FP (eds) : Manual of human embryology, vol 2, JB Lippincott, Philadelphia, 1912, pp 570-708
- 3) Geibprasert S, Pereira V, Krings T, Jiarakongmun P, Toulgoat F, Pongpech S, Lasjaunias P : Dural arteriovenous shunts. A new classification of craniospinal epidural venous anatomical bases and clinical correlations. *Stroke* **39** : 2783-2794, 2008
- 4) Kadyi H : Über die Blutgefäße des menschlichen Rückenmarkes. Gubryniewicz u Schmidt, Lemberg, 1889 (論文15で引用)
- 5) 小宮山雅樹, 松阪康弘 : 脊髄の血管解剖と血管病変. *脊椎脊髄* **17** : 580-587, 2004
- 6) 小宮山雅樹 : 脊髄血管の機能解剖. *脊椎脊髄* **2** : 972-981, 2008
- 7) 小宮山雅樹 : 脊髄血管, 脳脊髄血管の機能解剖. *メデ*

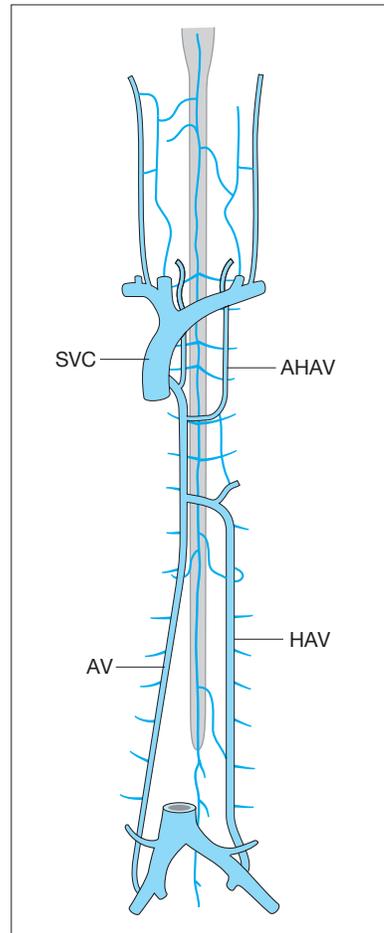


Fig. 12 Venous drainage of the spinal cord. Venous blood of the spinal cord is drained to the epidural venous plexuses by several radiculomedullary veins, which are further connected to the vertebral venous plexus or the azygos venous system. Ascending lumbar veins are connected to the azygos vein (AV) on the right side, and to the hemiazzygos vein (HAV) on the left side. Both hemiazzygos veins and accessory hemiazzygos veins (AHAV) on the left side are connected to the azygos vein, which finally enters the superior vena cava (SVC) at the third thoracic vertebral level.

イカ出版, 大阪, 2011, pp 507-548

- 8) Lasjaunias P, Vallee B, Person H, Ter Brugge K, Chiu M : The lateral spinal artery of the upper cervical spinal cord. *J Neurosurg* **63** : 235-241, 1985

- 9) Lasjaunias P, Berenstein A, ter Brugge KG : 2. Spinal and spinal cord arteries and veins, Surgical Neuroangiography. Vol 1. Clinical Vascular Anatomy and Variations. Springer Verlag, Berlin, 2001, pp 73-164
- 10) Lazorthes G, Gouza A, Zadeh JO, Santini JJ, Lazorthes Y, Burdin P : Arterial vasculization of the spinal cord. Recent studies of the anastomotic substitution pathways. *J Neurosurg* **35** : 253-262, 1971
- 11) Manelfe C, Lazorthes G, Roulleau J : Artères de la dure-mère rachidienne chez l'homme. *Acta Radiol Diag* **13** : 829-841, 1972
- 12) Pourquie O : The vertebrate segmentation clock. *J Anat* **199** : 169-175, 2001
- 13) Ratcliffe JF : The arterial anatomy of the adult human lumbar vertebral body : a microarteriographic study. *J Anat* **131** : 57-79, 1980
- 14) Suh TH, Alexander L : Vascular system of the human spinal cord. *Arch Neurol Psychiatry* **41** : 659-677, 1939
- 15) Tadie M, Hemet J, Freger P, Clavier E, Creissard P : Morphological and functional anatomy of spinal cord veins. *J Neuroradiol* **12** : 3-20, 1985
- 16) Thron A : Vascular anatomy of the spinal cord. *Neuroradiological investigations and clinical syndromes*. Springer-Verlag, Wien, 1988
- 17) Turnbull IM : Microvasculature of the human spinal cord. *J Neurosurg* **35** : 141-147, 1971