

Anatomy of spinal arteries and veins……revisited

久留米大学医学部放射線医学講座 田上秀一

Key words: spinal artery, spinal vein, spinal cord, cauda equina, neural tube, somite

1. 発生概要

a. 脊髄の発生

脊髄は比較的シンプルな構築が頭尾方向に連続した構造を示し、その発生に伴って形成される脊髄動脈も比較的単純な構造の繰り返しで形成される。

脊髄の発生は、大きく3つのステージに分けることができる (Acharya UV).

- ① 原腸 (胚) 形成 (gastrulation)
- ② 一次神経胚形成 (primary neurulation)
- ③ 二次神経胚形成 (secondary neurulation)

gastrulation は胎生 2-3 週, primary neurulation は 3-4 週, secondary neurulation は 5-6 週で起こる。吻側の頸髄から S2 レベルまでは primary neurulation で, S2 より尾側は secondary neurulation で形成され, このレベルでは中心管形成と退行性分化が関与してくる(1)。 (図 1)

① 原腸 (胚) 形成 (gastrulation)

原腸 (胚) 形成は、原始線条(primitive streak)によって開始される胚盤の三胚葉構造への変化を指す。原始線条の頭側端にある陥凹である原始結節(primitive node)には、胚軸を形成するための重要な細胞が含まれている。内部細胞塊から発生するエピブラスト細胞は原始線条と原始結節に向かって移動し、残りのエピブラストの腹側に二層の新しい層を分離して形成する。原始線条を通過した最初の細胞は元の胚盤葉下層(hypoblast)を置換して内胚葉(endoderm)を形成し、後に移動する細胞は新しい中間層である中胚葉(mesoderm)を形成する。エピブラスト細胞の非遊走細胞は外胚葉(ectoderm)を形成する。いくつかの細胞は正中線で頭側に移動し、脊索前板(prechordal plate)と脊索(notochord)を形成する。これらが上にある外胚葉細胞から神経板(neural plate)の形成を誘導することにより、神経形成が始まる。従って神経板は外胚葉に由来し、この上層の中央部分に形成される。神経板を取り囲む外胚葉の残りが表皮を形成する。

② 一次神経胚形成 (primary neurulation)

胎生神経板の側縁は隆起して神経ひだ(neural fold)となり、後に正中線で融合して神経管(neural tube)を形成する。両側の神経ひだは体軸中央部分から zippering によって閉じていく。神経管の両端は最後まで開口し残って神経孔(neuropore)と呼ばれ cranial neuropore は胎生 25 日頃, caudal neuropore は胎生 28 日頃に閉じるとされる(2)。この神経形成過程は一次神経胚形成(primary neurulation)と呼ばれ、脳と脊髄の領域を仙骨レベル (S2 まで) を構築する役割を果たす。神経管の腹側では脊索中胚葉(chordamesoderm)から脊索が形成されていき、神経管の両側では沿軸中胚葉(paraxial mesoderm)[あるいは前体節中胚葉(presomitic mesoderm)]が増殖伸長する。伸長した沿軸中胚葉は一定間隔でくびれを有する細胞塊を形成し、これが体節(somite)となる。ヒトでは 5 時間ごとに 1 つの体節が形成される

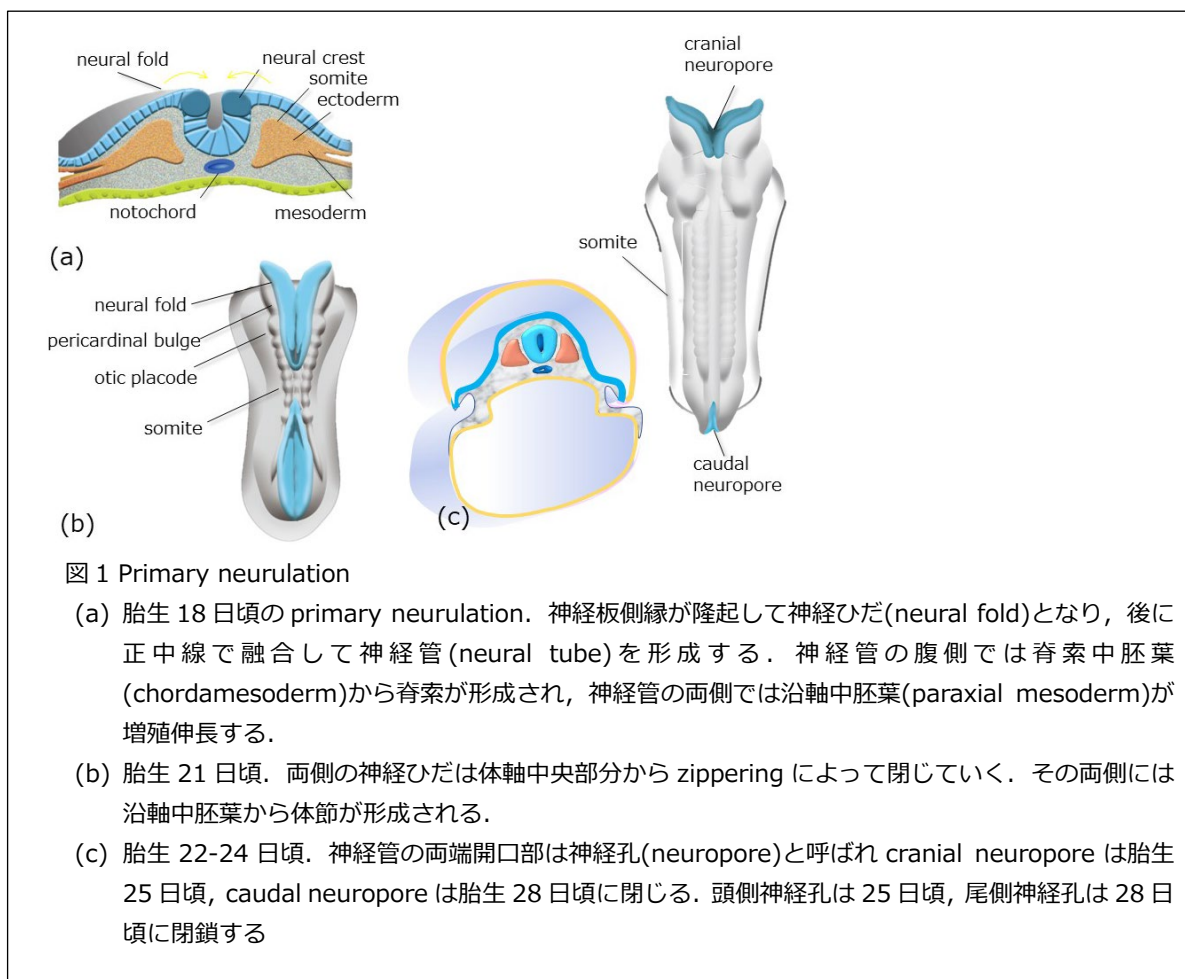
(3).

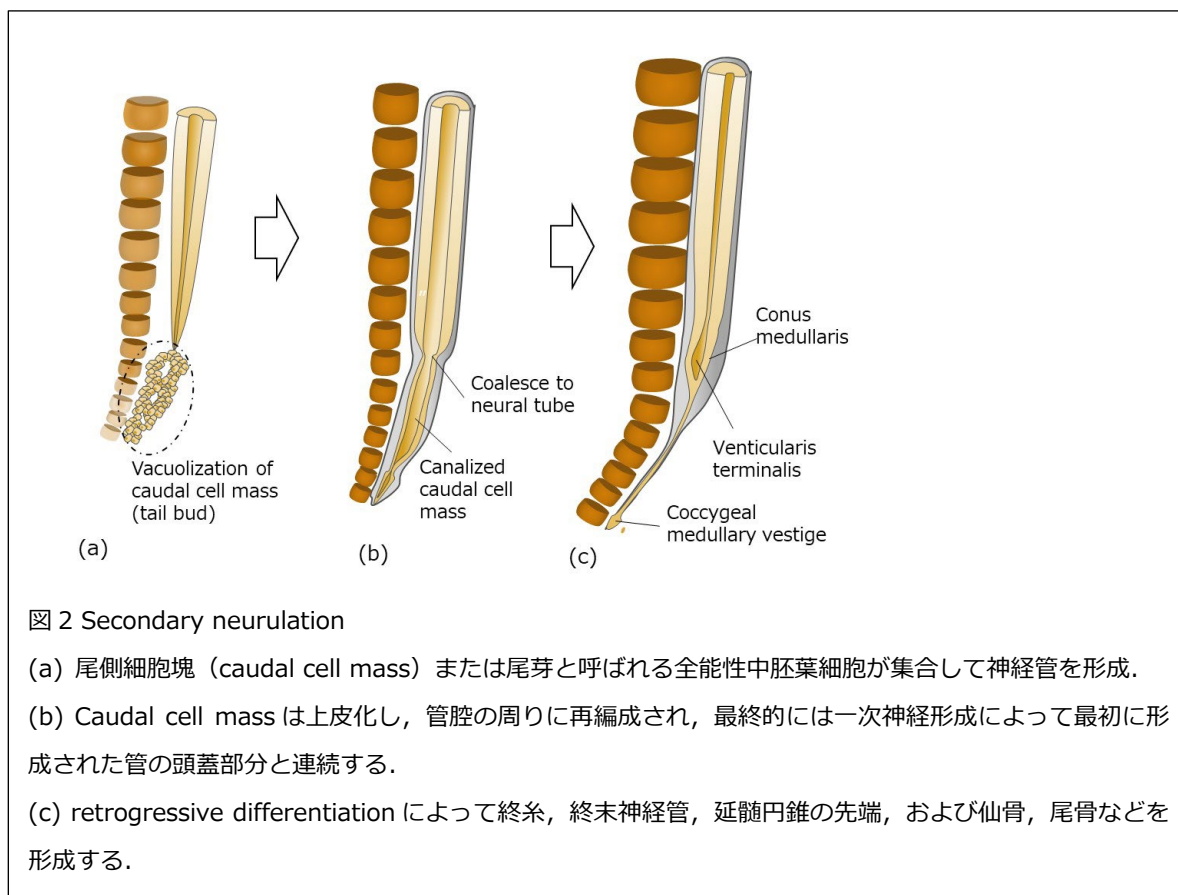
体節は脊索や神経管底盤からのシグナルによって皮節(dermatome), 筋節(myotome), 硬節(sclerotome)の3領域に分化し, 皮節の分化には神経管・表皮からのNT3, Wntが関与して背側の真皮を形成し, 硬節は骨格筋を形成し, 硬節の分化には神経管底板や脊索からのSonic Hedgehog(SHH)が関与して椎骨や肋骨を形成する(4).

神経管が閉鎖すると, その上にある非神経表皮細胞が皮膚の外胚葉層を形成する. 正常な神経管閉鎖は25日から27日までに完成する. その間, 神経管は上にある外胚葉から分離する.

③ 二次神経胚形成 (secondary neurulation)

この段階でS2より尾側のレベルが形成される. 尾側細胞塊 (caudal cell mass) または尾芽と呼ばれる全能性中胚葉細胞が集合して神経管を形成し, その後上皮化し, 管腔の周りに再編成され, 最終的には一次神経形成によって最初に形成された管の頭蓋部分と連続するようになる. 尾側細胞塊の一部は退行と分化 (退行性分化 retrogressive differentiation と呼ばれるプロセス) の両方を受けて, 終糸, 終末神経管, 延髄円錐の先端, および仙骨, 尾骨などを形成する (1). 胎生3か月までに脊髄は発達中の脊柱の全長に伸びる. 胎生期の残りの期間で, 脊柱と硬膜の急速な伸長により, 脊髄円錐は生後すぐに成人のレベルになる (図2).





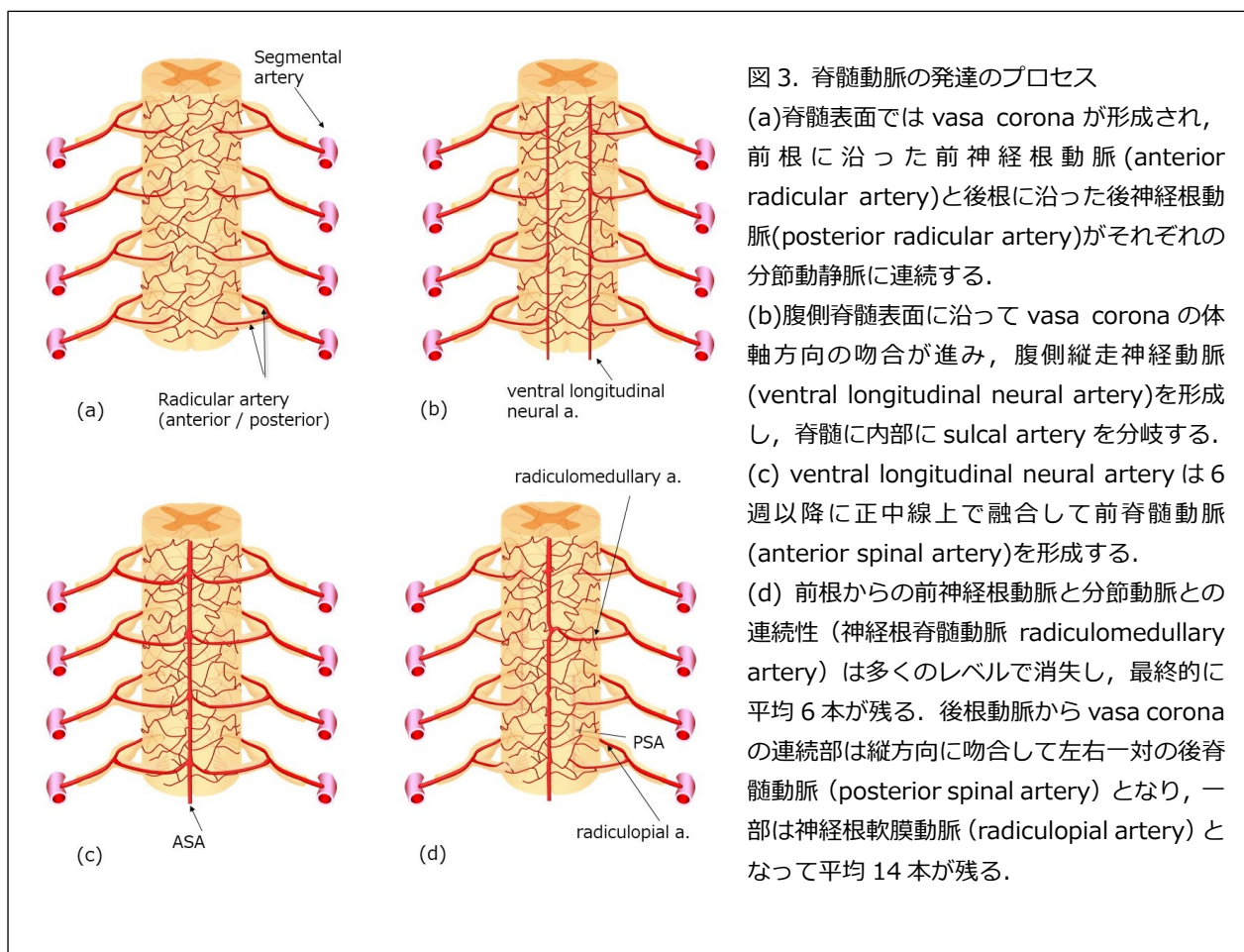
b. 脊髄血管の発生

血管新生のプロセスは中枢神経の発達に付随して起こり、血管系と神経系との緊密な連携によって成り立っているとされる。上記体節構造が形成され始めて間もない (CRL 2-5mm 期, 6 体節の時期) には分節間血管(intersegmental artery)が出現し始める。初期は原始背側大動脈(primitive dorsal aorta)と後主静脈 (posterior cardinal vein) 間に形成される capillary network である (5)。neural fold が閉鎖してすぐの初期の神経管は avascular であり、この capillary network からの diffusion によって栄養を受けている。神経管の閉鎖と体節形成が体軸方向に発達し、各体節では遊走した神経堤細胞(neural crest cell)からの後根神経節と前根神経が形成され、徐々に各体節間の intersegmental artery/vein が分化するとともに、神経管周囲では隣接する沿軸中胚葉から血管内皮細胞前駆体(angioblast)が神経管によって周囲に動員され、神経周囲血管叢 (perineural vascular plexus: PNVP)と呼ばれる毛細血管床を形成する(6)。これには vascular endothelial growth factor (VEGF)-A が作用していることが近年証明されている (6,7,8)。

続いて神経管内で神経組織の分化が始まると (neural stem cells→progenitors→neuron/glia), PNVP からの血管芽(sprout)が一定の間隔をおいて神経管に侵入し、神経管内の血管叢 (intraneural vascular plexus: INVP) を形成する (8)。これには progenitor cell からの Wnt7 が深く関わっている。Wnt7 は INVP の発達と内皮細胞の BBB 安定化, glucose transporter-1 の発現に関わり、また platelet derived growth factor(PDGF)- β の pathway を介して血管集皮細胞(pericyte)が動員され、内皮細胞から生成

される neurophilin-1 は調節因子として働き、神経内の血管が成熟していく (9). INVP はその後の中心溝動脈(sulcal artery)への発達していく構造である.

脊髄表面では PNVP から動脈の血管網である vasa corona, それより遅れて発達する coronal venous plexus が形成され, 前根に沿った前神経根動静脈(anterior radicular artery/vein)と後根に沿った後神経根動静脈(posterior radicular artery/vein)が, それぞれの分節動静脈に連続する. CRL 11-14mm(胎生 5-6 週)の頃には前根の近傍で腹側脊髄表面に沿って vasa corona の体軸方向の吻合が進み, 腹側縦走神経動脈(ventral longitudinal neural artery)を形成し, 脊髄に内部に sulcal artery を分岐する. この ventral longitudinal neural artery は 6 週以降に正中線上で融合して前脊髄動脈(anterior spinal artery)を形成する. 前根からの前神経根動脈と分節動脈との連続性(神経根脊髄動脈 radiculomedullary artery) は多くのレベルで消失し, 最終的に平均 6 本が残る. 後根動脈から vasa corona の連続部は胎生 15 週ころから縦方向の吻合が始まり, 左右一対の後脊髄動脈 (posterior spinal artery) となり, 分節動脈からの連続部は多くが退縮し, 一部は神経根軟膜動脈 (radiculopial artery) となって最終的に平均 14 本が残る (10) (図 3).



2. 脊髄動脈解剖

a. 分節動脈とその分枝

各分節動脈は、基本構造として大動脈から分岐したのちに椎体前面から側面に沿って走行し、その間に椎体への栄養枝 (vertebral body branch/ventral somatic branch) を分岐する。椎体外側の椎弓根近傍に至ると、腹側枝 (ventral branch), 背側枝 (dorsal branch), 脊柱管枝 (spinal branch) に3分岐する。Ventral branch は横突起や肋骨に沿って走行し, dorsal branch は横突起根部を横切って棘突起に沿って走行し, それぞれ近傍の骨や筋組織, 皮膚を栄養する。Spinal branch は脊柱管に入り, 椎体後面と硬膜囊前面を栄養する前脊柱管枝 (anterior dural branch/dorsal somatic branch/retrocorponeal artery) と椎弓前面と硬膜囊後面を栄養する後脊柱管枝 (posterior dural branch/prelaminar artery), 神経根・硬膜・脊髄を栄養する中間枝 (medial branch) が分岐する。Retrocorponeal artery は上行・下行枝に分岐して上下左右の吻合を有し, 特徴的な六角形の形態を示す。中間枝は神経根を栄養するものが神経根動脈 (radicular artery), 神経根と硬膜を栄養するものが神経根髄膜動脈 (radiculomeningeal artery) と呼ばれ, 神経根前根から脊髄前面に至って ASA に連続するものが神経根脊髄動脈 (radiculomedullary artery), 後根から脊髄後面に至って後脊髄動脈 (posterior spinal artery: PSA) や周囲の vasa corona に供血するものが神経根軟膜動脈 (radiculopial artery) と呼ばれる(図 4a)。それぞれの分岐形態, 発達の様子はレベルによって様々である。

各分節動脈は本幹の傍椎体部, ventral branch, dorsal branch のレベルで上下の隣接する segmental artery との吻合を有する, 頸椎レベルでは分節動脈は, 原始大動脈・大動脈弓の退縮とともに segmental artery の近位部も退縮し, 頭尾方向の吻合が発達して椎骨動脈や上行頸動脈, 深頸動脈, 最上肋間動脈を形成し, 椎体, 脊髄, 神経根, 筋肉を栄養するようになる。同様に尾側の仙尾部レベルでは外側仙骨動脈や腸腰動脈が頭尾方向の吻合から形成される。原始背側動脈の caudal end が正中仙骨動脈とされる(11)。仙尾部では正中仙骨動脈や外側仙骨動脈からの分節動脈が椎体, 神経根や筋肉を栄養する。

b. 脊髄表面・脊髄内の動脈

ASA は脊髄前面正中裂の pia intima より浅部, epipial tissue の内部に存在し, 前脊髄静脈 (anterior spinal vein: ASV) より浅部を走行する(12)(図 4b)。この PSV との前後関係は動静脈シャントで両者が描出される際の区別にも役立つ。ASA は頭尾方向に上位頸髄から脊髄円錐まで全長にわたって存在し, 尾側端の脊髄円錐部では ASA と PSA 下端が W 字状に吻合し, arterial basket を形成している。Arterial basket より尾側では ASA は終糸動脈 (artery of filum terminale) に移行する。

PSA は脊髄後面のやや外側寄りから側面にかけて存在し, vasa corona を頭尾方向に連結する。ASA と比べて短く断続的である。走行部位によって, posterolateral sulcus に沿う posterolateral spinal artery, 上位頸髄レベルで後根の前方, 歯状靭帯の後方を走行して後下小脳動脈に連続する外側脊髄動脈 (lateral spinal artery) もある(13-16)。

ASA は中心溝から中心溝動脈 (sulcal artery/sulcocommissure artery) と呼ばれる穿通枝を分岐し, 脊髄を中心側から遠心性に栄養する (centrifugal distribution)。また脊髄表面に沿った vasa corona と連続がみられる。Sulcal artery は ASA が一対の segmental artery が正中で吻合して形成される発生過程を反映し, 一側の灰白質を栄養する。また脊髄実質に入る前に同側上下の sulcal artery と吻合を有する。

Vasa corona (pial arterial plexus) は脊髄表面を網目状に覆う微細な動脈網であり, radiculopial artery

から供血される。脊髄表面から微細な穿通枝を分岐し、脊髄表面から求心性に栄養する (centripetal distribution)。

脊髄円錐より尾側では終糸が硬膜内正中を下行(filum terminale internum)して S2-3 レベルの硬膜囊下端を貫通し、硬膜外を走行(filum terminale externum)して coccygeal ligament 部に至る。Filum terminale 前面に沿って下行するのが前述の artery of filum terminale である。また arterial basket や近傍の vasa corona から神経根に沿って下降する proximal radicular artery があり、神経根に沿って下行して神経根の頭側 1/3 を栄養する。神経根の尾側 2/3 は正中仙骨動脈や外側仙骨動脈から分岐して上行する distal radicular artery によって栄養される。L5-S1 レベルから分岐して神経根に沿って上行し、脊髄円錐まで至る最大の radicular artery が artery of Desproges-Gotteron と呼ばれる (17)。また artery of filum terminale は隣接する radicular artery との交通枝の存在も報告されている (18)。

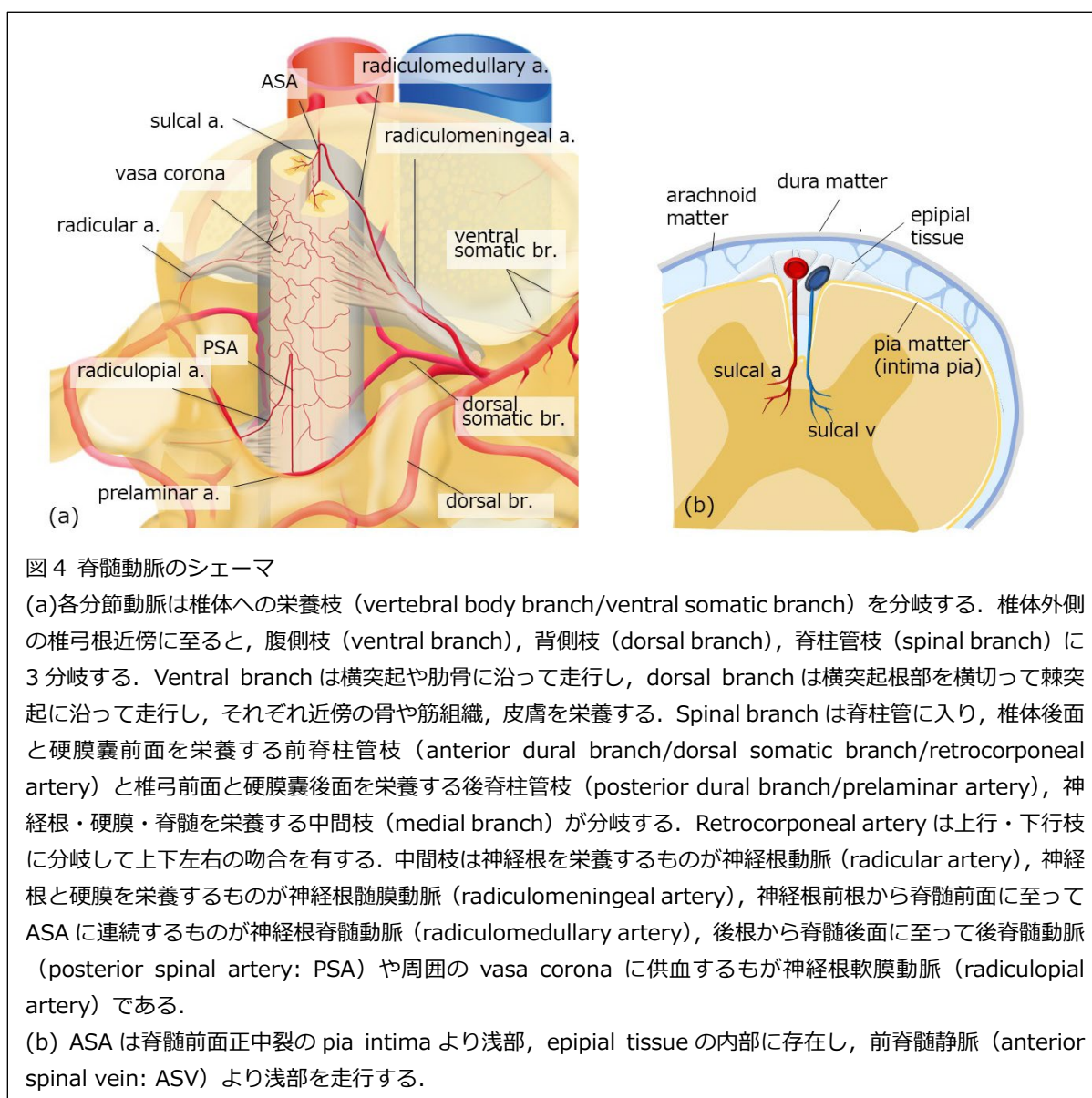


図4 脊髄動脈のシエーマ

(a)各分節動脈は椎体への栄養枝 (vertebral body branch/ventral somatic branch) を分岐する。椎体外側の椎弓根近傍に至ると、腹側枝 (ventral branch), 背側枝 (dorsal branch), 脊柱管枝 (spinal branch) に3分岐する。Ventral branch は横突起や肋骨に沿って走行し、dorsal branch は横突起根部を横切って棘突起に沿って走行し、それぞれ近傍の骨や筋組織、皮膚を栄養する。Spinal branch は脊柱管に入り、椎体後面と硬膜囊前面を栄養する前脊柱管枝 (anterior dural branch/dorsal somatic branch/retrocorponeal artery) と椎弓前面と硬膜囊後面を栄養する後脊柱管枝 (posterior dural branch/prelaminar artery), 神経根・硬膜・脊髄を栄養する中間枝 (medial branch) が分岐する。Retrocorponeal artery は上行・下行枝に分岐して上下左右の吻合を有する。中間枝は神経根を栄養するものが神経根動脈 (radicular artery), 神経根と硬膜を栄養するものが神経根髄膜動脈 (radiculomeningeal artery), 神経根前根から脊髄前面に至ってASAに連続するものが神経根脊髄動脈 (radiculomedullary artery), 後根から脊髄後面に至って後脊髄動脈 (posterior spinal artery: PSA) や周囲の vasa corona に供血するものが神経根軟膜動脈 (radiculopial artery) である。

(b) ASA は脊髄前面正中裂の pia intima より浅部, epipial tissue の内部に存在し, 前脊髄静脈 (anterior spinal vein: ASV) より浅部を走行する。

3. 脊髄静脈解剖

a. 脊髄内・脊髄表面の静脈

脊髄内からは、白質からの静脈血は遠心性の微細な放射状の radial perforating vein が脊髄辺縁の静脈である coronary venous plexus (pial venous plexus) に流出し、灰白質からは中心溝静脈 (ventral sulcal vein) を介して前正中裂を頭尾方向に走行する前脊髄静脈 (anterior spinal vein: ASV) に流出する。後索領域の perforating vein は後正中溝に沿って走行する後脊髄静脈 (posterior spinal vein: PSV) に流出する。また脊髄内を貫通して ASV・PSV を連続する transmedullary anastomosis も存在する。ASV, PSV は頭側では頭蓋頸椎移行部で硬膜静脈洞に流出する。脊髄レベルでは神経根脊髄静脈 (radiculomedullary vein) を介して神経根に沿って dural sleeve を通過して硬膜外に導出されるものが 60-70%, 神経根に沿わずに bridging vein を介して導出されるものが 30-40%程度と報告されている (19)。

仙尾部では filum terminale に沿う静脈は vein of filum terminale である。artery との前後関係は ASA/ASV の関係と同様である。Vein of filum terminale は仙骨の先端部から filum terminale に沿って脊髄円錐部で ASV まで連続する (20)。仙尾部で神経根に沿う静脈は radicular vein であり、頭側は脊髄円錐部の coronal venous plexus や PSV と連続し、尾側では sacral epidural venous plexus に連続して lateral sacral vein に流出する。

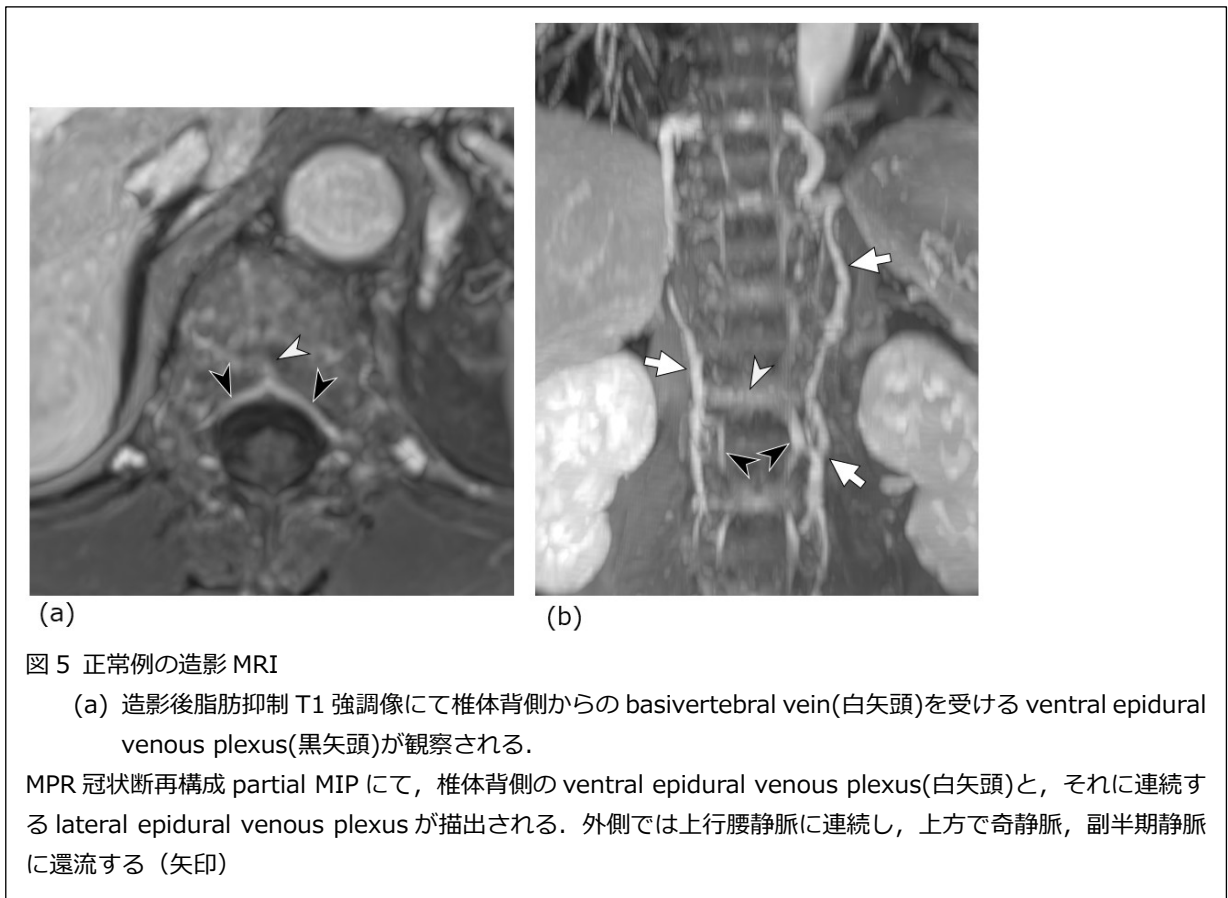
b. 硬膜外、脊柱管外の静脈と分節静脈

硬膜外には前・外側・後部に静脈叢が存在する (ventral/lateral/dorsal epidural venous plexus)。Ventral epidural venous plexus は頭尾方向に縦走する左右 2 対が存在し、動脈同様に椎体背側で左右の吻合 (retrocorponeal vein) が存在して梯子状を呈し、basivertebral vein を介して椎体からの静脈血を受けている(図 5a)。Ventral epidural venous plexus の外側に lateral epidural venous plexus が存在し、radiculomedullary vein や、やや正中寄りでは bridging vein からの血流を受け、脊柱管外の静脈に流出する(図 6,7)。Dorsal epidural vein は硬膜囊背側で椎弓からの静脈血を受け、lateral epidural vein と連続している。

仙骨レベルでは ventral-lateral epidural venous plexus は頸胸腰椎と比べて発達が不良となり、左右非対称になる。Dorsal epidural venous plexus は非常にまばらとなる (16)。

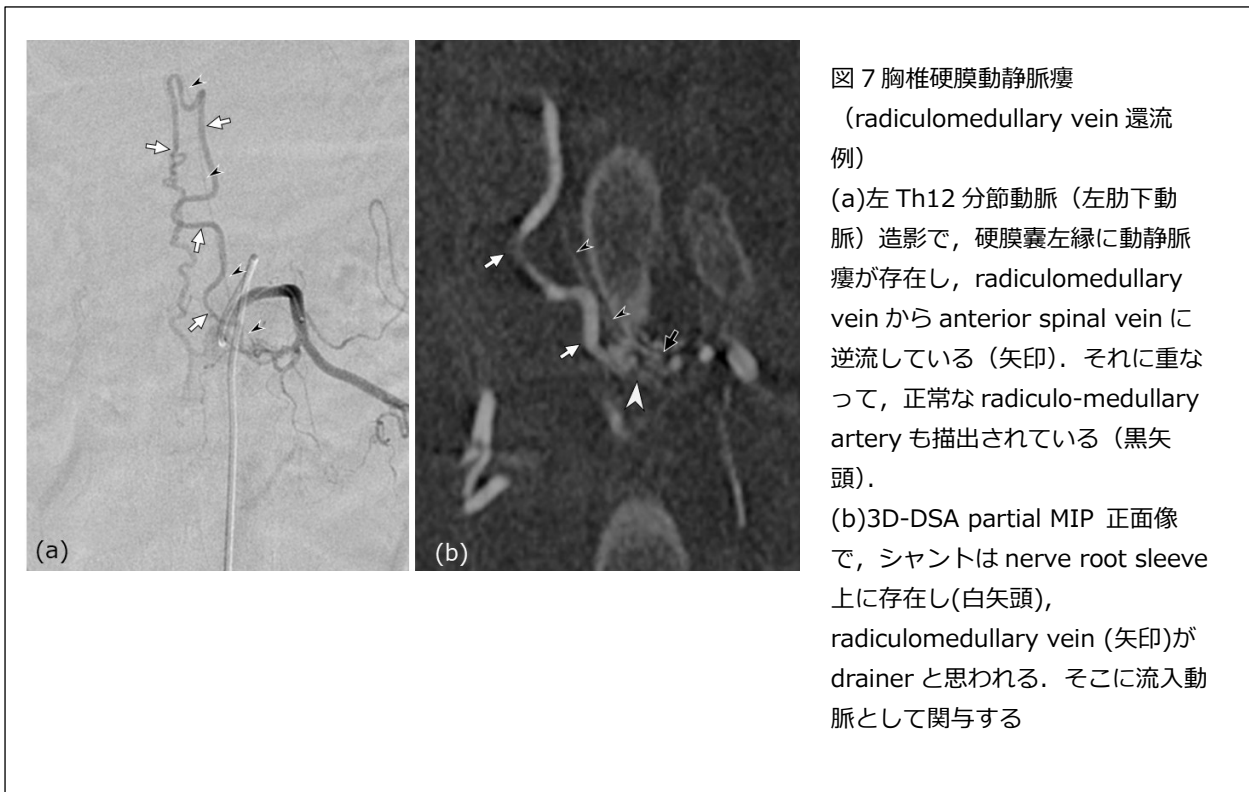
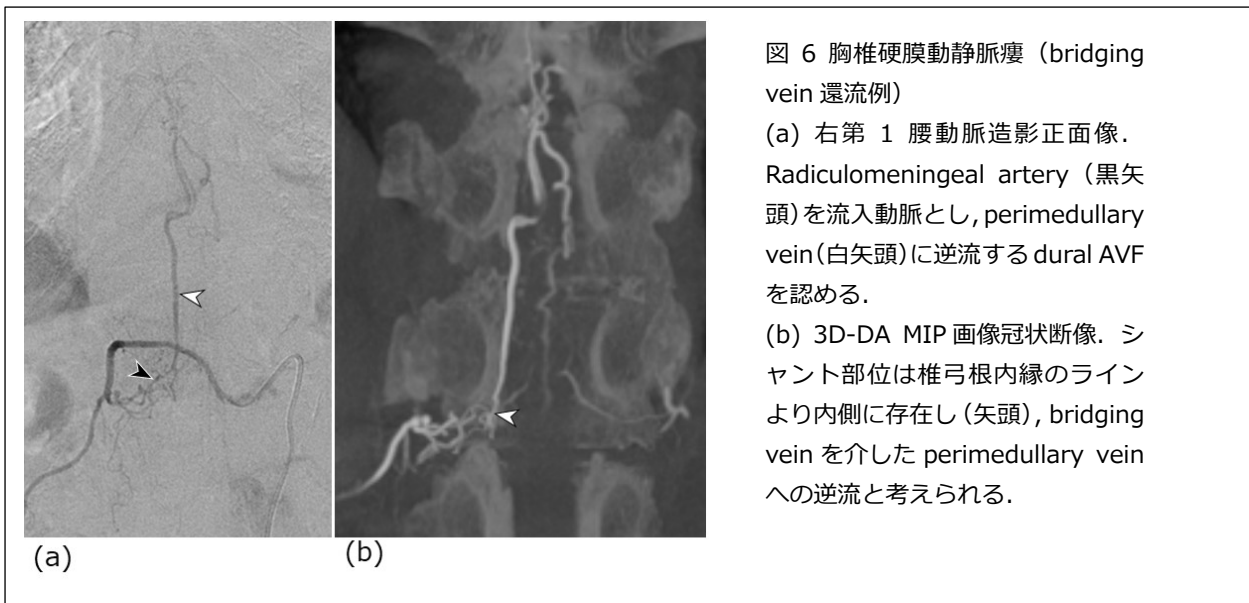
脊柱管外では分節静脈を介して奇静脈や半奇静脈、副半奇静脈、上行腰静脈に流出する(図 5b)。奇静脈は上大静脈、副半奇静脈は左鎖骨下静脈、上行腰静脈は腸骨静脈と最終的に連続している。頸部では epidural venous plexus は suboccipital cavernous sinus に連続している。さらに頸部では脊柱管外の静脈は静脈叢様の構築を示し、paravertebral venous plexus を形成する。これらは体幹部側では vertebral vein となって鎖骨下静脈に合流する。このような静脈環流路は硬膜外静脈叢への経静脈的塞

栓術の際にアプローチルートとなりうるため、その解剖の理解は重要である。



4. 結語

脊髄の血管解剖は分節ごとに基本的には共通のパターンを有し、それが各分節の違いに応じてアレンジされた構造を示す。また血管構築の理解には発生学知識も役立つ。それらの理解は脊椎・脊髄血管病変を診断、治療する上で重要である。



5. 参考文献

1. Acharya UV, Pendharkar H, Varma DR, Pruthi N, Varadarajan S. Spinal dysraphism illustrated; Embryology revisited. *Indian J Radiol Imaging*. 2017 Oct-Dec;27(4):417-426. doi: 10.4103/ijri.IJRI_451_16. PMID: 29379236; PMCID: PMC5761168.
2. O'Rahilly R, Müller F. The two sites of fusion of the neural folds and the two neuropores in the human embryo. *Teratology*. 2002 Apr;65(4):162-70. doi: 10.1002/tera.10007. PMID: 11948562.
3. Yoshioka-Kobayashi K, Matsumiya M, Niino Y, Isomura A, Kori H, Miyawaki A, Kageyama R. Coupling delay controls synchronized oscillation in the segmentation clock. *Nature*. 2020 Apr;580(7801):119-123. doi: 10.1038/s41586-019-1882-z. Epub 2020 Jan 8. PMID: 31915376.
4. Gilbert, Scott F. (2006). *Developmental Biology*. 8th ed. Sunderland (MA). ISBN 087893250X
5. Egginton S, Syeda F. Capillaries, Capillarity, and Angiogenesis. Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2017. ISBN 9780128096338. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.03143-5>.
6. James JM, Gewolb C, Bautch VL. Neurovascular development uses VEGF-A signaling to regulate blood vessel ingression into the neural tube. *Development*. 2009 Mar;136(5):833-41. doi: 10.1242/dev.028845. Epub 2009 Jan 28. PMID: 19176586; PMCID: PMC2685948.
7. Hogan KA, Ambler CA, Chapman DL, Bautch VL. The neural tube patterns vessels developmentally using the VEGF signaling pathway. *Development*. 2004 Apr;131(7):1503-13. doi: 10.1242/dev.01039. Epub 2004 Mar 3. PMID: 14998923.
8. James JM, Mukoyama YS. Neuronal action on the developing blood vessel pattern. *Semin Cell Dev Biol*. 2011 Dec;22(9):1019-27. doi: 10.1016/j.semcdb.2011.09.010. Epub 2011 Sep 29. PMID: 21978864; PMCID: PMC3230733.
9. Gu C, Rodriguez ER, Reimert DV, Shu T, Fritsch B, Richards LJ, Kolodkin AL, Ginty DD. Neuropilin-1 conveys semaphorin and VEGF signaling during neural and cardiovascular development. *Dev Cell*. 2003 Jul;5(1):45-57. doi: 10.1016/s1534-5807(03)00169-2. PMID: 12852851; PMCID: PMC3918747.
10. Lasjaouias P, ter Brugge KG, Berenstein A. *Surgical Neuroangiography*, vol 1, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
11. Meignan P, Binet A, Cook AR, Lardy H, Captier G. Fetal median sacral artery anatomy study by micro-CT imaging. *Surg Radiol Anat*. 2018 Jul;40(7):735-741. doi: 10.1007/s00276-018-2032-2. Epub 2018 Apr 30. PMID: 29713738.
12. Mizutani K, Rodesch G. Anatomical disposition of the anterior spinal artery and vein: Subpial or subarachnoid? *Interv Neuroradiol*. 2020 Dec;26(6):706-707. doi: 10.1177/1591019920928628. Epub 2020 Jun 23. PMID: 32576068; PMCID: PMC7724610.
13. Lasjaouias P, Vallee B, Person H, Ter Brugge K, Chiu M. The lateral spinal artery of the upper cervical spinal cord. Anatomy, normal variations, and angiographic aspects. *J Neurosurg*. 1985 Aug;63(2):235-41. doi: 10.3171/jns.1985.63.2.0235. PMID: 4020445.
14. Miyasaka K, Asano T, Ushikoshi S, Hida K, Koyanagi I. Vascular anatomy of the spinal cord and classification of spinal arteriovenous malformations. *Interv Neuroradiol*. 2000 Nov 30;6 Suppl 1(Suppl 1):195-8. doi: 10.1177/15910199000060S131. Epub 2001 May 15. PMID: 20667247; PMCID: PMC3685918.
15. 小宮山雅樹 脊髄・脊椎の機能血管解剖 *No Shinkei Geka* 41(6):481-492, 2013.
16. Thron A. *Vascular Anatomy of the Spinal Cord: Radioanatomy as the Key to Diagnosis and Treatment*. Springer International Publishing. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27440-9>.
17. Crock HV, Yamagishi M, Crock MC. *The conus medullaris and cauda equina in man*. Wien-New York:Springer-Verlag;1986.
18. Djindjian M, Ribeiro A, Ortega E, Gaston A, Poirier J. The normal vascularization of the intradural filum terminale in man. *Surg Radiol Anat*. 1988;10(3):201-9. doi: 10.1007/BF02115238. PMID: 3147533.