

Caudal spinal cord: Vascular anatomy and diseases

自治医科大学 血管内治療センター 脳血管内治療部

Center for Endovascular Therapy, Division of Neuroendovascular Surgery
Jichi Medical University

難波 克成

Katsunari Namba

Key words: spinal cord, lumbosacral, cauda equina, filum terminale, vascular supply

はじめに

腰仙髄領域の脊髄（脊髄神経）には少ない頻度ながら血管奇形が認められる。しかし、仙髄神経、終糸の血管解剖は詳説が少なく、血管奇形の分類も混乱が多い。今回は、脊髄尾側、馬尾および終糸の血管解剖をレビューし、解剖に基づいた血管奇形の成り立ちを考察した。

Caudal spinal cordの発生

中枢神経は発生初期に一次神経形成（primary neurulation）と二次神経形成（secondary neurulation）と呼ばれる過程を経て形成される（図1）。Primary neurulationでは神経板の両側が隆起癒合し、一次神経管（primary neural tube）が形成される。一次神経管の後神経孔の閉鎖に続き、杯の尾部（tail bud）において中胚葉性間葉細胞の上皮化による神経管の形成が起こり、二次神経管（secondary neural tube）が形成される。この過程はsecondary neurulationと呼ばれる。

Tail budは未分化中胚葉性間葉細胞の集合体で、尾側消化管、体腔、血管、脊索、体節、脊髄など、さまざまな組織に分化する能力を有する。

腰仙髄の形成は神経管尾側（posterior neural tube）の発達、特にsecondary neurulationと関連する¹。Posterior neural tubeは将来的に腰髄、仙髄、尾髄、馬尾、終糸に分化する。

終糸の発生についてはStreeterにより、次のように報告されている²。胎児早期のcoccygeal cordはependymal、mantleおよびmarginal layerを有する。成長に伴いlower coccygeal cordのmantle layerは消退し、marginalあるいはfiber layerに覆われたependymal layerが残される。つまりcoccygeal cordはdedifferentiationを起こし、残存した部分は終糸としてsecond coccygeal segmentより尾側の脊髄を現す。以上より、発生的には終糸は脊髄の一部と考えられ、解剖的には上部に中心管を残し（図2）、組織学的にはglial cellやependymal cellを含み、この方面からも脊髄のレムナントといえる。

Caudal spinal structureの解剖

仙骨

はじめ分離していた第1-5仙骨は成人以降癒合し、1つの仙骨となる（図3、4、5、6）。仙骨では本来椎骨間に左右1つずつ存在するはずの椎間孔が前仙骨孔、後仙骨孔に2分される。このため、片側に8つの仙骨孔を有し、前仙骨孔は仙髄神経前枝、後仙骨孔は仙髄神経後枝が通過することが特徴である。

馬尾

腰、仙、尾髄神経前根、後根および終糸からなる神経束。硬膜内では前根線維と後根線維はそれぞれ薄い軟膜に包まれ、1つの根に対し単独か複数の神経束として走行し³、root sleeveで1つの神経根にまとまる（図7）。

終糸

終糸は硬膜内に存在するfilum terminale internumと硬膜外のfilum terminale externumとに分類される(図8)。

Filum terminale internumは脊髄円錐部とS2レベルのdural sac下端とを繋ぐ構造物で前述のように脊髄レムナントと考えられる。

Filum terminale externumはdural sacから続くfilum terminaleの硬膜外の部分で仙骨あるいは尾骨の後面に付着する。Tubbsらは詳細な組織学的検討によりfilum terminale externumには平滑筋細胞、脂肪、神経、骨、軟骨が含まれることを示し、secondary neurulationのレムナントである可能性を報告した⁴。また、報告中にfilum terminale externumに併走する血管と、coccygeal nerve fiberの癒着を観察した。

Caudal spinal structureの血管解剖

腰髄神経根は腰動脈から起始するradicular、radiculomedullaryあるいはradiculopial arteryからの血流を受ける。仙髄神経根はmedian sacral arteryあるいは内腸骨動脈より起始するiliolumbarまたはlateral sacral arteryより血流を受ける。Sacral arteryは前仙骨孔を通り、脊椎脊髄枝を分岐する(図9)。

馬尾の血管解剖

Crockらはinjectionとdissectionを用いて馬尾、脊髄円錐部の血管構築を詳細に検討した⁵。

Sacral arteryより分岐した根動脈は前根動脈、後根動脈となり前神経根あるいは後神経根に沿って途切れることなく上行し、脊髄円錐部の脊髄動脈に合流する(図10、11、12)。これらの動脈のうち、特に大きなものがartery of Desproges-Gotteronであると考えられる。根動脈はそれぞれの根神経に軟膜で緩やかに結合し、隣接する動脈と吻合を形成する(図13左下)。以上、検討の結果以下の結論を得た。

1. 前、後神経根線維はそれぞれ全長を前、後神経根動脈に栄養される。
2. 神経根動脈は以下のいずれかに合流する。
 - (a) 前脊髄動脈
 - (b) 後脊髄動脈
 - (c) vasa corona
3. 馬尾、脊髄円錐部の血流はsegmentalである。

一方、Parkeらは同じようにinjectionの手法を用い、injectionの加減を調整することで馬尾神経根尾側2/3は神経根動脈より、頭側1/3は脊髄円錐部の脊髄動脈より血流を受けることを報告した³(図14)。

静脈解剖について、Crockらは、脊髄静脈は脊髄根静脈を介してcentrifugalに流出すると想定する⁵。脊髄腹側、背側にそれぞれ1本のlongitudinal venous trunkが存在し、そこから直接、あるいはcoronal veinを介して根静脈に流出する。Anterior longitudinal venous trunkよりは前根神経に沿った根静脈、posterior longitudinal venous trunkよりは後根神経に沿った根静脈に流出する(図15)。

終糸の血管解剖

Djindjianらによる詳細な報告がされている⁶。Filum terminale internumは前脊髄動脈から続くartery of filum terminaleが終糸腹側を縦走する。静脈はvein of filum terminaleがarteryの背側、終糸前面に存在し、頭側はanterior spinal veinと交通し、尾側は硬膜を貫通してsacral venous plexusと交通する。Vein of filum terminaleはposterior spinal veinと全く交通しない。終糸背側に血管は存在しなかった。

動脈解剖は終糸が脊髄のレムナントであることを考えると納得できる所見である。また、終糸以下に神経根は存在しないため、終糸に神経根動脈は存在しないはずである⁷。ただし、Djindjianらの観察によ

るとartery of filum terminale近位よりcoccygeal nerve rootへの動脈枝を認めた。これは一般的に言われる脊髄根動脈とは別のものである。

Filum terminale externumの血管解剖に関する報告はほとんど存在しなかった。Tubbsらの報告でこの組織に縦走する血管の存在は示されたが⁴、起源についての言及はなかった。また、filum terminale externumのdissectionでcoccygeal nerveの付着についてのわずかに言及した。HsuらはS2 仙骨背面の終糸硬膜動静脈瘻が推測される症例でmedian sacral arteryを栄養血管と同定した⁸。Jinらは手術的にL5レベルの終糸動静脈瘻が証明された症例でartery of filum terminaleとともにlateral sacral arteryを流入血管と同定した⁹。仙骨内神経枝は前仙骨孔を介したmedian sacral arteryあるいはlateral sacral arteryが主要な栄養血管で、硬膜動静脈瘻がS2レベルのdural sac下端のfilum terminale externum起始部に生じるとすれば、これらの血管が栄養血管となると想定される。また、Jinらの症例はL5レベルの硬膜内動静脈瘻であるため、筆者は終糸に付着したcoccygeal nerveの神経根動脈が硬膜内でvein of filum terminaleと何らかの原因で吻合し、流入血管となったのではないかと想像する。

Implication of vascular anatomy on vascular lesions in the caudal spinal structure

脊髄円錐部より尾側に発生する血管奇形について考察する。以下の3通りとなる。

1. Filum terminale AVF

発生学的にpial AVFと同等であり、filum terminaleはいかなる神経根よりも下位の構造物のため、radicular arteryからの流入血管はあり得ない。しかし、上述のように非常に特殊な場合、median sacral artery、iliolumbar artery、lateral sacral arteryから流入血管が認められる。流出静脈はvein of filum terminaleでsacral venous plexusあるいはanterior spinal veinに続く。

2. Radicular AVF

神経根上でAVFが形成される。流入動脈は尾側よりの神経根動脈となる。脊髄円錐部の吻合から、前脊髄動脈あるいは後脊髄動脈が頭側より神経根動脈に血流を供給しAVFに関与する場合がある。流出は根静脈を介して尾側あるいは頭側のperimedullary veinとなる。神経前根上にAVFが存在する場合、前脊髄動脈より血流を受け、anterior spinal veinに流出することがあるため、filum terminale AVFとの鑑別が難しい場合がある。しかし、radicular arteryの関与がある場合は上述の理由より、ほとんどradicular AVFであると考えられる。

3. Dural AVF

Median sacral artery、iliolumbar artery、lateral sacral arteryの硬膜枝いずれかが流入血管となり、root sleeveにシャントを形成し、神経根静脈が流出路となる。Radicular AVFとはシャント部位の違いで鑑別可能である。非常に特殊な形としてDAVF of filum terminaleが存在し得る。この際、流出静脈は正中のvein of filum terminaleとなり、sacral venous plexusあるいはanterior spinal veinに続くはずである。

DAVFの垂形としてepidural AVFはしばしば認められる。

Figure legends :

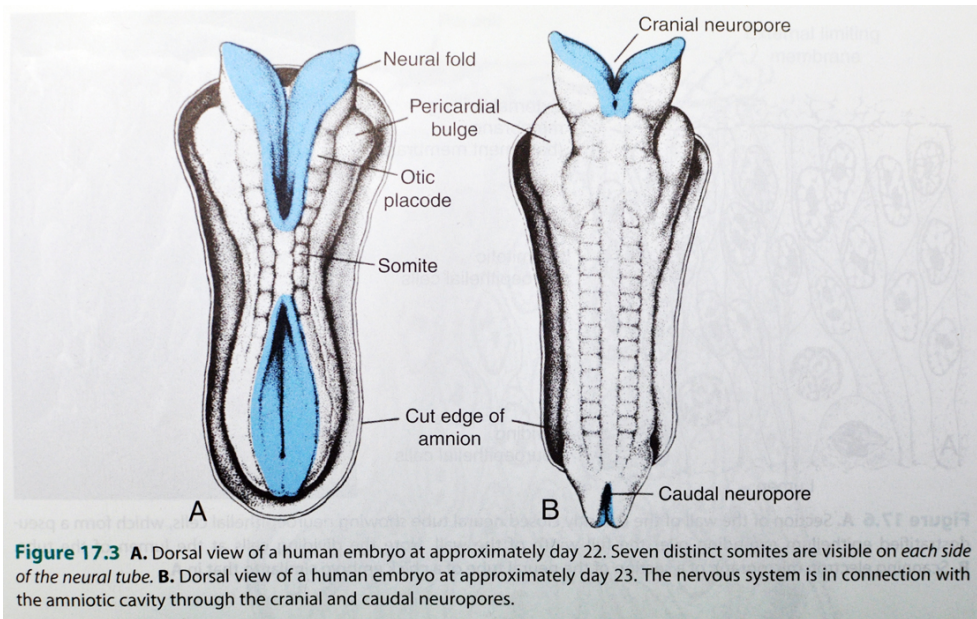


図1 Primary neurulation

両側の神経板が隆起癒合し、1次神経管を形成する。頭側と尾側に神経管が癒合していない部分が存在し、それぞれcranial、caudal neuroporeと呼ばれる。

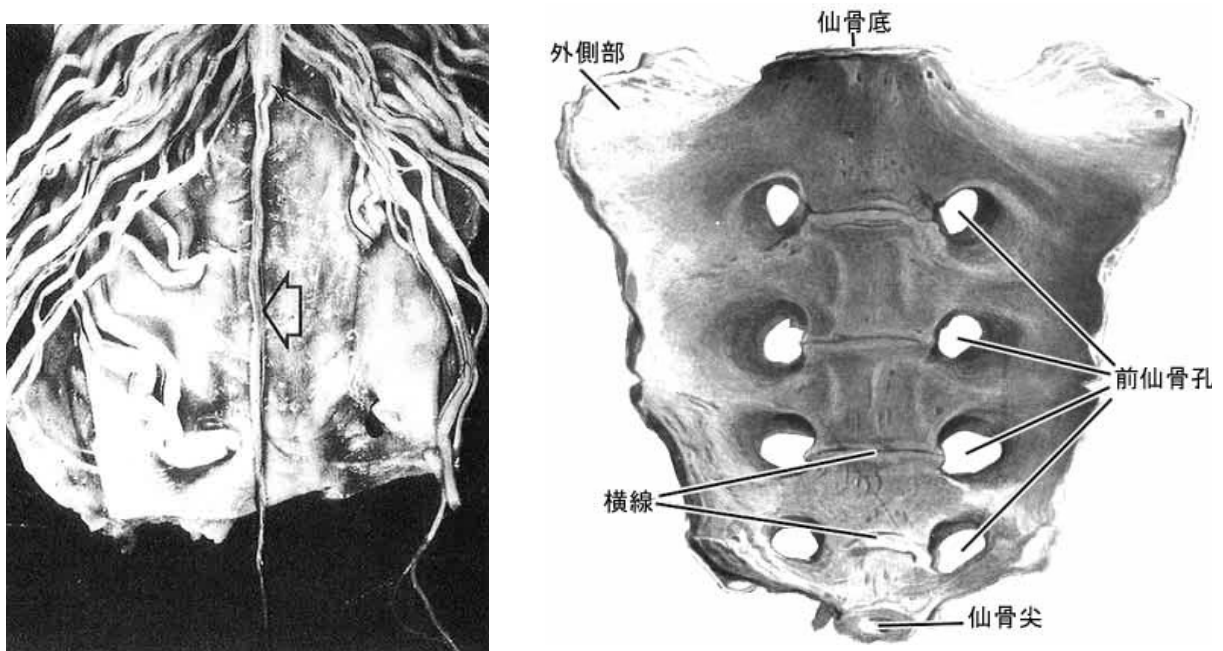


図2 (左) 終糸

終糸頭側に神経管が認められる (矢印)。

図3 (右) 仙骨前面

5つの仙骨が癒合し1つの仙骨となる。癒合した仙骨間に4つの前仙骨孔を認める。

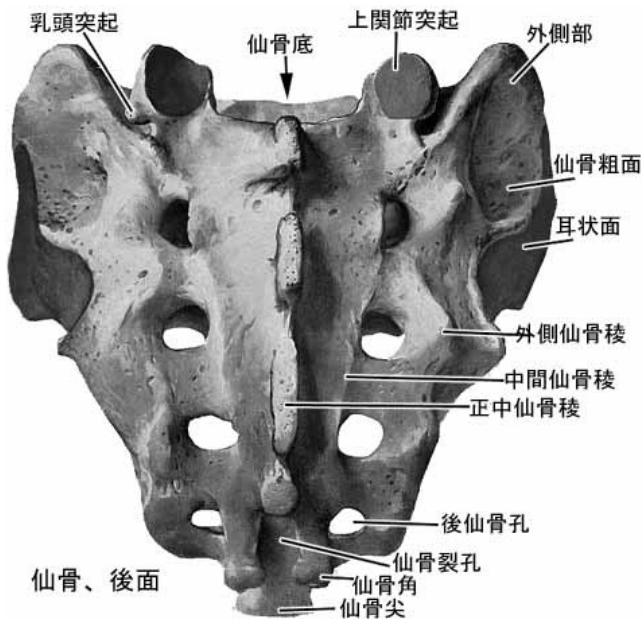


図4 (左) 仙骨後面
4つの後仙骨孔を認める。



図5 (右上) 仙骨上面
前仙骨孔と後仙骨孔は仙骨内ではつながる。

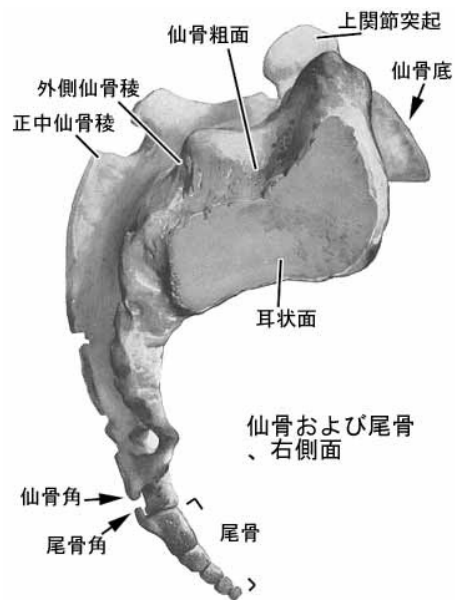


図6 (右) 仙骨側面

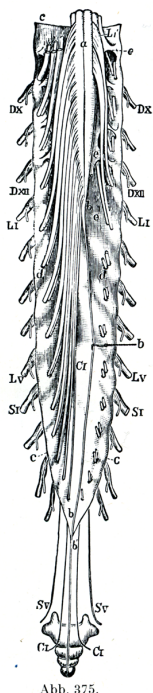


Abb. 375.

図7 馬尾

腰、仙、尾髄神経前根、後根神経線維は1つの根に対し単独か複数の神経束として走行し、root sleeveで1つの神経根となる。

Abb. 375. Kaudaler Teil des Rückenmarkes mit Cauda equina und der beide umgebenden Dura mater. 1:3. Dorsale Fläche. (AUS QUAIN.)

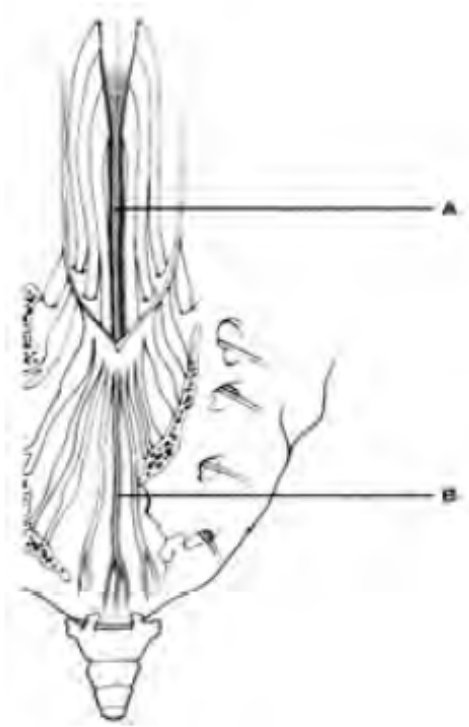


図8 Filum terminale internumとexternum
 Filum terminale internumはS2レベルのdural sac下端に付着する。Filum terminale externumはdural sac下端より仙骨あるいは尾骨後面に付着する。Filum terminale externumのdissection中にcoccygeal nerve fiberの癒着を認めた。

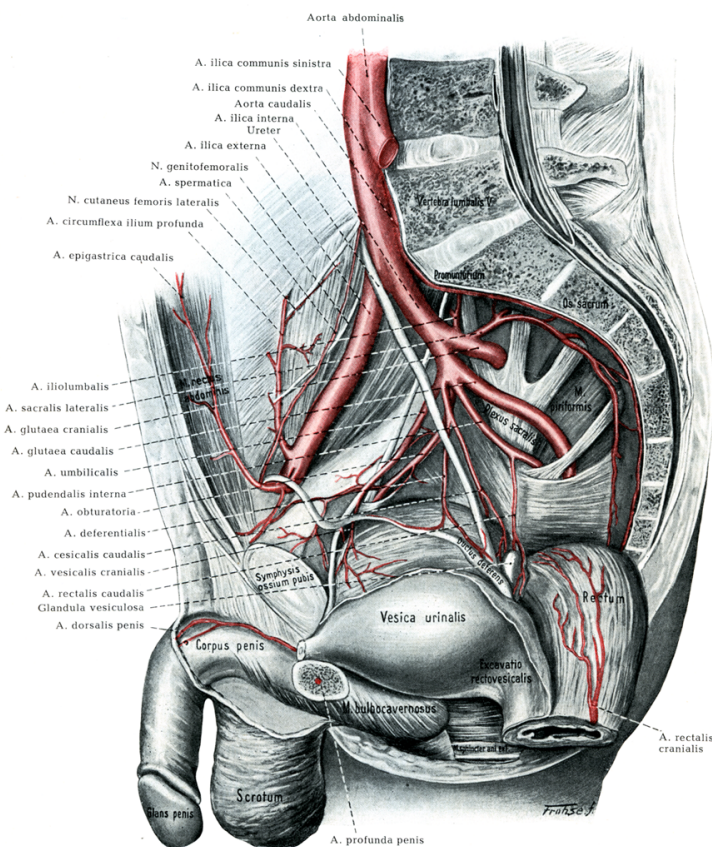


図9 内腸骨動脈、iliolumbar artery、lateral sacral artery
 Iliolumbar arteryとlateral sacral arteryは内腸骨動脈より起始する。Iliolumbar arteryは腰筋の内側縁で腰枝を分岐し、この枝は第5腰椎と第1仙椎の間の椎間孔に脊髓枝を送る。Lateral sacral arteryは仙骨前面で前仙骨孔の内側を下方に走行する。その際、内外側に向かって直角にそれぞれ5本の枝を分岐する。外側枝より脊椎枝が分岐し、前仙骨孔を通り仙骨管に続く。

Abb. 669. Verzweigung der Arterien in der rechten Beckenhälfte (von links gesehen).
 Die Beckeneingeweide sind herausgeklappt.
 (FR. KORSCH praep.; FR. FROUSZ del.)

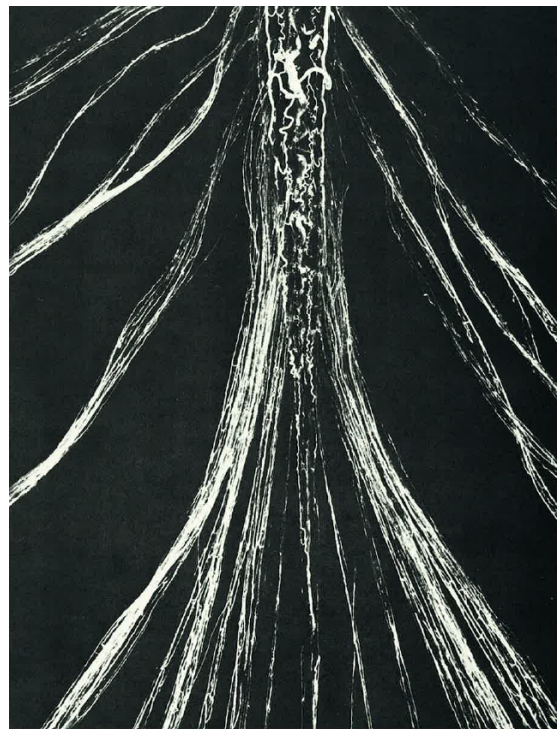
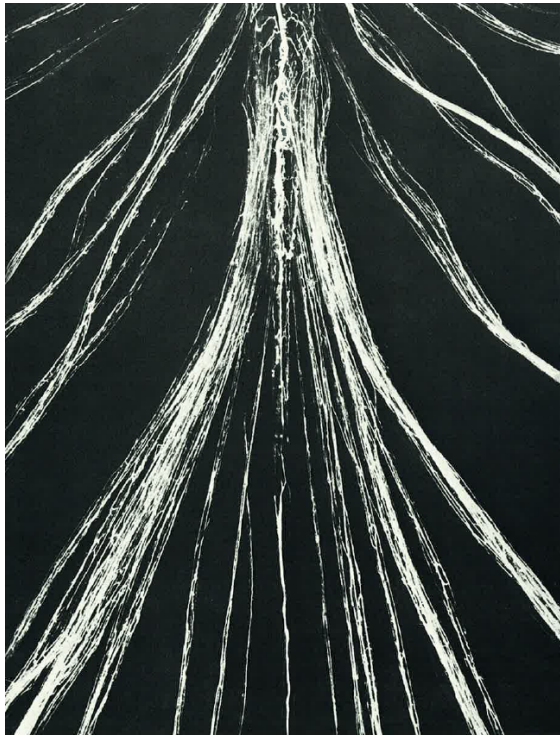


図10 (左) 脊髓円錐部、馬尾前面動脈、前後像前神経根動脈と脊髓動脈との吻合が確認される。

図11 (右) 脊髓円錐部、馬尾後面動脈、前後像後神経根動脈と脊髓動脈との吻合が確認される。

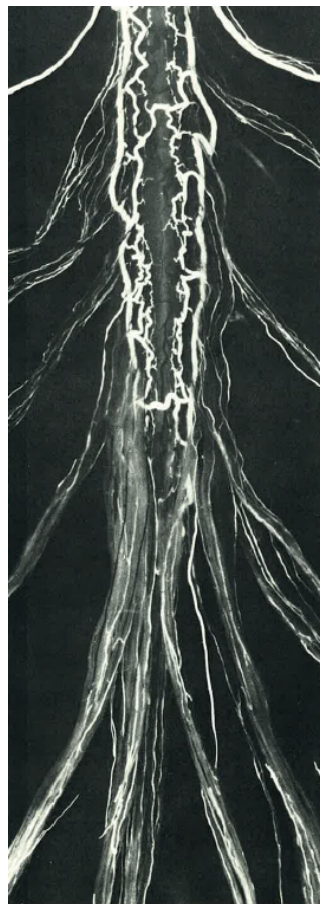


図12 (左) 脊髓円錐部、胸腰髄、側面像

図の左が腹側。前神経根動脈 (2) と後神経根動脈 (3) がそれぞれ脊髓動脈と吻合を形成する様子が確認される。

図13 (右) 脊髓円錐部、胸腰髄後面、前後像

図の左下に後神経根同士の吻合が確認される。

FIG. 9. Radiogram, lateral view, showing the lumbar enlargement of the human spinal cord. Note, on the left, the pathway of the anterior spinal artery and the anterior branches of the lumbar enlargement (1) and the spinal artery (2) from the roots of the cauda equina. Note, on the right, the pathway of the posterior spinal artery and its posterior branches (3) from the roots of the cauda equina. Note also, on the bottom, the anastomotic loop of the *conus medullaris* (4).

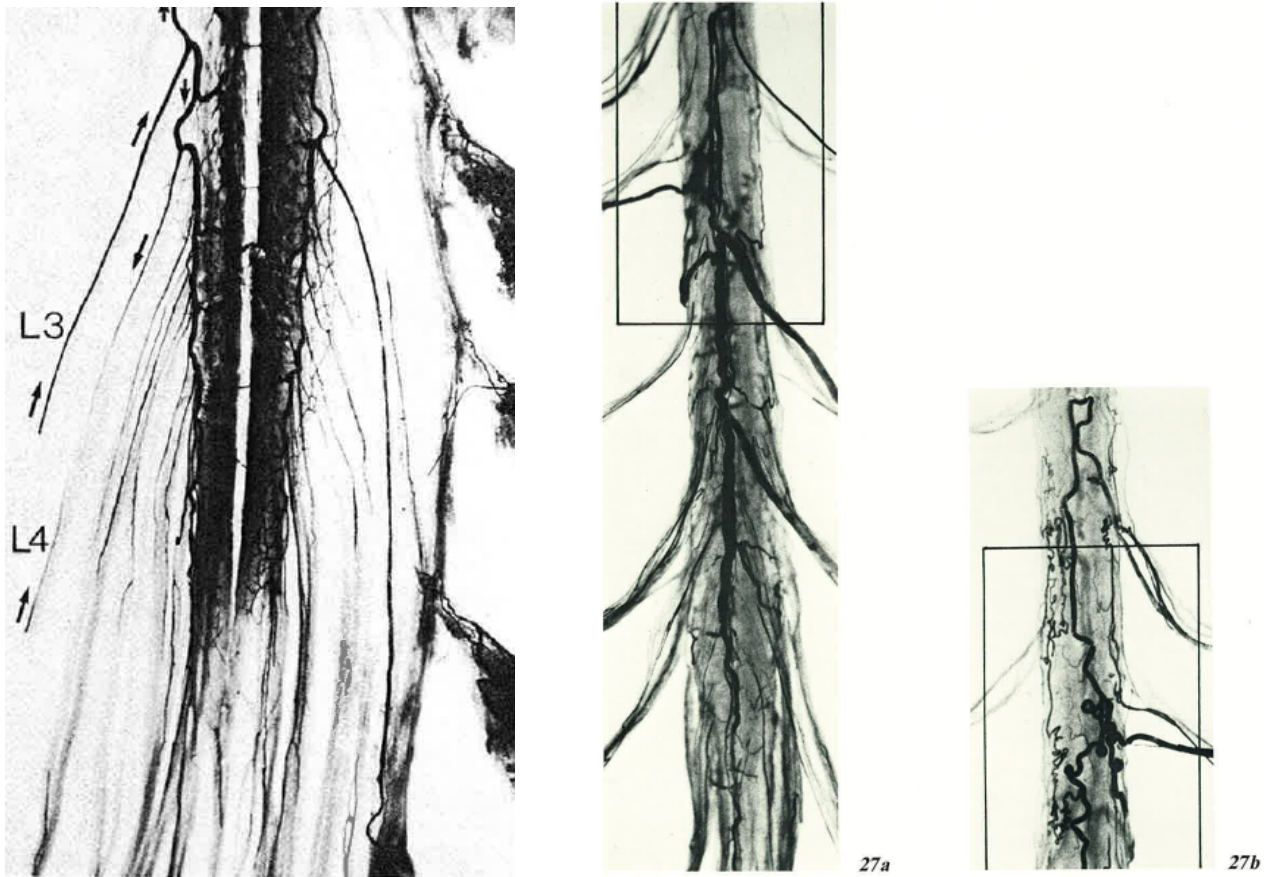


図14 (左) 脊髓円錐部、胸腰髄後面、前後像

L3後神経根動脈より後脊髄動脈が灌流され、さらにL4後神経根動脈近位に続く。L4後神経根動脈遠位は末梢より灌流されつつある。矢印は血液の灌流方向を示す。

図15 (右)

左図は脊髓前面、右図は四角内を後面より観察したもの。前、後脊髄静脈よりそれぞれ、前、後根静脈に続く。右図ではcoronal veinを介して後根静脈へと続く様子が観察される。

References:

1. Saitsu H, Yamada S, Uwabe C, et al. Development of the posterior neural tube in human embryos. *Anat Embryol* 2004;209:107-117.
2. Streeter GL. Factors involved in the formation of the filum terminale. *Am J Anat*. 1919;25:1-21.
3. Parke WW, Gammell K, Rothman RH. Arterial vascularization of the cauda equina. *J Bone Joint Surg Am*. 1981;63:53-62
4. Tubbs RS, Murphy RL, Kelly DR et al. The filum terminale externum. *J Neurosurg: Spine* 2005;3:149-152.
5. Crock HV, Yamagishi M, Crock MC. The conus medullaris and cauda equina in man. *Wien-New York:Springer-Verlag*;1986.
6. Djindjian M, Ribeiro A, Ortega E, et al. The normal vascularization of the intradural filum terminale in man. *Surg Radiol Anat* 1988;10:201-209.

Niche Neuro-Angiology Conference 2015

7. Lasjaunias P, Berenstein A, Ter Brugge KG. Surgical Neuroangiography. Berlin Heidelberg New York:Springer-Verlag;2001.
8. Hsu SW, Rodesch G, Luo CB, et al. Concomitant conus medullaris arteriovenous malformation and sacral dural arteriovenous fistula of the filum terminale. *Interventional Neuroradiology* 2002;8:47-53.
9. Jin YJ, Kim K-J, Kwon OK, et al. Perimedullary arteriovenous fistula of the filum terminale. *Neurosurgery* 2010;66:E219-E220.