

## 脊髄血管解剖

### Vascular anatomy of the spinal cord

石黒友也

Tomoya Ishiguro

大阪市立総合医療センター 脳血管内治療科

Department of Neuro-intervention, Osaka City General Hospital

Key word: spinal cord, spine, vascular anatomy

#### 【はじめに】

脊髄・脊椎の血管解剖の発生および基本的な部分は昨年のカンファレンスで検討している。そこで本稿では脊髄・脊椎の各部位における血管解剖をより詳細に述べる。

#### 【脊髄】

脊髄 (spinal cord)は脳と同様にその周囲を軟膜 (pia matter)に覆われているが、脊髄軟膜は脳よりも厚く、組織学的には脊髄表面を覆っている薄い結合組織からなる内層と厚い膠原繊維からなる外層で構成されている。硬膜内で脊髄を支えている歯状靭帯 (dentate ligament)は脊髄側面 (前根と後根の間)の軟膜外層が左右に三角形にのびたもので、外側は脊髄硬膜と癒合している<sup>10,14)</sup>。また脊髄の前正中裂の腹側の軟膜外層は肥厚しており、linea splendensとも呼ばれ、前脊髄動脈・静脈はその内部 (すなわち軟膜下)を走行している<sup>8,14)</sup>。脊髄のくも膜 (arachnoid matter)は硬膜を裏打ちする様に認められ、結合組織を介して硬膜と緩く結合している。電子顕微鏡レベルの検討では、くも膜の内側でさらにintermediate leptomeningeal layerを認め、これは歯状靭帯より背側でより発達している。Intermediate leptomeningeal layerは背側正中でdorsal sagittal septum (septum posticum of Schwalbe)を形成して脊髄の背側表面のintermediate leptomeningeal layerとつながっている。このlayerは窓構造を呈し、その間隙を後脊髄動脈・静脈や神経根などが走行している<sup>8,10,14)</sup>。

脊髄表面の動脈の基本構築は腹側正中を縦方向に走行する1本の前脊髄動脈 (anterior spinal artery)と脊髄表面の動脈であるvasa coronaからなる (Fig.1A-D)。Vasa coronaは発生学的に見ると各分節レベルで横方向の吻合を認めているが、左右の後外側溝 (posterolateral sulcus)周囲では縦方向の吻合が発達しており、これが後脊髄動脈 (posterior spinal artery)である。後脊髄動脈は脊髄の背側1/3を栄養しているが、前脊髄動脈とは異なりvasa coronaの縦方向の吻合であるため、その灌流域は個体および脊椎レベルによって大きく異なる。また全脊髄レベルで連続する左右1本の動脈として認められるわけではなく、vasa coronaの横方向の吻合を介して互いに補完しながら認められる。後外側溝 (後根)の内側 (背側)を走行するものを後脊髄動脈、後根の外側 (腹側)を走行するものを後外側脊髄動脈 (posterolateral spinal artery)と呼び、頭蓋頸椎移行部では後外側脊髄動脈がさらに外側寄りに走行することが多く、外側脊髄動脈 (lateral spinal artery)と呼ばれることもあるが、いずれも本質的にはvasa coronaの縦方向の吻合で同じものを見ている。外側脊髄動脈は頭蓋内の椎骨動脈や後下小脳動脈から分岐しており、頭蓋頸椎移行部では外側脊髄動脈と後脊髄動脈の左右2対の縦方向の吻合を認めることがある<sup>1,9,18)</sup>。前脊髄動脈は頭蓋内の椎骨動脈から分岐して脊髄下端まで続く1本の縦走動脈であるが、発生学的には左右の前神経根動脈の縦方向の吻合 (腹側縦走神経動脈 (ventral longitudinal neural artery)が脊髄の腹側正中で癒合したものである。したがって癒合不全によるduplicationやfenestrationといったvariationがあり、特に頸椎レベルで認めることが多い<sup>1,9,18)</sup>。前脊髄動脈と左右の後脊髄動脈は脊髄の尾側端である脊髄円錐 (conus medullaris)で吻合を認め、W字状を呈するconus basketを形成する。脊髄円錐より尾側の終糸 (filum terminale)は発生学的には脊髄の一部で、その腹側には前脊髄動脈から続く終糸動脈 (artery of filum terminale)が縦走している<sup>9,18)</sup>。前脊髄動脈は左右交互に中心溝動脈 ((central) sulcal artery)を分岐し、これは前正中裂を通過して脊髄の内部

に到達して、脊髄の腹側2/3 (主に灰白質を)を遠心性 (centrifugal)に栄養している。一方、背側1/3 (主に白質)はvasa corona (後脊髄動脈を含む)からの穿通枝 (perforating branch)が求心性 (centripetal)に栄養している。中心溝動脈は約250-300本認められ、発生学的には左右の腹側縦走神経動脈から分岐するので、各動脈は脊髄の片側のみを栄養している。前正中裂および灰白質内で同側の中心溝動脈と縦方向の吻合を認め、また前角や後角ではvasa coronaからの穿通枝との吻合を認める<sup>1,9,18)</sup>。

脊髄実質を還流する静脈は辺縁の白質から脊髄表面のcoronal venous plexusに向かって放射状に走行するradial perforating veinと、灰白質から脊髄表面の前・後脊髄静脈 (anterior/posterior spinal vein)へ向かう腹側・背側溝静脈 (ventral/dorsal sulcal vein)からなる。Radial perforating veinは白質へ向かう動脈であるperforating branchよりもその数は少ないが、灰白質の一部も還流しており径は太い<sup>5,9,18)</sup>。腹側溝静脈は径が100-200 $\mu$ mで、その数は脊髄1cmあたり頸髄から上位胸髄レベルでは4-8本、下位胸髄以下では4-12本程度認められる。背側溝静脈の径は100-300 $\mu$ mと腹側とほぼ変わらないが、数は少なく、脊髄1cmあたり頸髄レベルでは4-6本、胸腰髄では1-4本となっている。Radial perforating veinと溝静脈は脊髄内で互いに交通しており、これは胸髄レベルで最も発達している。また両者は脊髄内で縦方向の吻合も認め、腹側溝静脈は中心溝動脈と同様に前正中裂内でも縦方向の吻合をもつ。脊髄内の動脈は腹側優位であるが、静脈はradial perforating veinが均等に分布しており、胸腰髄レベルのみが腹側優位のdrainage patternを呈している<sup>5,9)</sup>。また脊髄内には実質は還流していないが表面の前脊髄静脈と後脊髄静脈とを結ぶtransmedullary venous anastomosis (TMVA)を認める。TMVAは径が100-700 $\mu$ mと太く、数は脊髄1cmあたり1-2本で、下位胸髄レベル以下ではさらに少なくなる。正中を走行するmedian anteroposterior TMVAと中心から背側から傍正中を走行するcentrodorsolateral TMVAがある<sup>4,5,9,18)</sup>。脊髄表面のcoronal venous plexusは縦方向の吻合も認めるが、主に横方向に走行して脊髄の腹側および背側を縦方向に走行する前脊髄静脈と後脊髄静脈に還流される (Fig.2A,B)。頸髄・腰仙髄レベルでは腹側でより発達しており、逆に頭蓋頸椎移行部や胸髄レベルでは背側で発達している<sup>5,9)</sup>。前脊髄静脈は脊髄の腹側正中のlinea splendens内で、前脊髄動脈の背側 (脊髄側)をこれと平行に走行している。Coronal venous plexusのほかに腹側溝静脈も受けており、頭側では延髄の静脈であるmedian anterior medullary veinと、尾側では終糸の静脈である終糸静脈 (vein of filum terminale)と連続している。前脊髄静脈は腰髄レベル以下で最も発達しており、逆に頸髄から上位胸髄レベルでは前脊髄静脈の他に前外側溝の周囲にcoronal venous plexusの縦方向の吻合を左右に認めることがあり、これらは胸椎レベルで前脊髄静脈に合流していく。後脊髄動脈は動脈と同様にcoronal venous plexusの縦方向の吻合で、後脊髄動脈とは伴走していない。また必ずしも背側正中を走行しているわけではなく、左右の後外側溝周囲に認めることもある。正中を走行するものは後正中脊髄静脈 (posteromedian spinal vein)とも呼ばれ、頸髄・腰髄レベルに多く認められる。一方、胸髄レベルでは後正中脊髄静脈のほかに後外側溝周囲に後外側脊髄静脈 (posterolateral spinal vein)を認めることが多い。後脊髄静脈も腰髄レベル以下で最も発達している<sup>5,9,18)</sup>。前脊髄静脈と後脊髄静脈は脊髄円錐で動脈と同様にbasketを形成するが、静脈系はTMVAがあるため常に認められるわけではない<sup>18)</sup>。

### 【神経根】

31対からなる脊髄神経は椎間孔内で前根 (anterior root)と後根 (posterior root)が脊髄神経節 (後根神経節)の末梢で合流して形成される。遠心性神経線維である前根は脊髄の前外側溝 (anterolateral sulcus)の近傍から細い糸状の神経線維束である前根糸 (anterior nerve rootlet)として散在性に出現し、それが硬膜内で数本ずつ集まって前根となり、椎間孔へ向かっている。求心性神経線維である後根は椎間孔から脊髄に向かって走行し、脊髄の近くで後根糸 (posterior nerve rootlet)に分かれ、後外側溝より脊髄内に入る。報告によって異なるが、C1レベルでは後根糸が約50%で消失しており、その場合は副神経の脊髄根 (spinal accessory nerve)やC2後根がその役割を果たす<sup>11,19)</sup>。また脊髄の長さは脊椎より短いため、神経根 (根糸)は頭側ではより水平に走行するが、尾側にいくにつれて下方に斜走する。したがって神経根の長さは尾側ほど長くなる。

神経根の動脈は神経根動脈 (radicular artery)で、前根を栄養するのが前神経根動脈 (anterior radicular artery)、後根が後神経根動脈 (posterior radicular artery)である。神経根動脈は分節動脈のspinal branch

から分岐する神経根髄膜動脈 (radiculomeningeal artery)から認められ、神経根髄膜動脈が硬膜貫通部で硬膜動脈と神経根動脈とに分かれる。同じ分節動脈から分岐する前神経根動脈と後神経根動脈の発達の程度は互いに相補的な関係にある<sup>1)</sup>。馬尾神経はその長さのためか、分節動脈からの神経根動脈 (distal radicular artery)は神経根の尾側2/3までしか栄養しておらず、頭側1/3は脊髄表面の動脈 (conus basket)から分岐する神経根動脈 (proximal radicular artery)が栄養しており、両者は互いに吻合している<sup>12)</sup>。また馬尾神経は終糸とつながっていることがあり<sup>3)</sup>、そのため終糸の動静脈瘻では腰椎・仙骨レベルの神経根動脈も栄養動脈となることがある。神経根動脈は発生の初期段階では全てのレベルで脊髄表面を栄養しており、脊髄表面の動脈が縦方向に吻合していく過程で多くの分節レベルで脊髄表面との連続性が失われる。連続性が残ったものが前脊髄動脈へつながる神経根髄質動脈 (radiculomedullary artery)と後脊髄動脈 (またはvasa corona)への神経根軟膜動脈 (radiculopial artery)である (Fig.1A, C)。したがってこれらの動脈も神経根へ向かう小枝を認める<sup>1)</sup>。神経根動脈は神経根のみを栄養する動脈であるが、上記のような発生学的背景を考慮すると、全てのレベルで脊髄表面のvasa coronaとの交通が残っている可能性がある。神経根髄質動脈は前根に沿って走行し、径は400-1200 $\mu$ mで、特に脊髄の頸膨大や腰膨大に分布するものは太くなる。前者はC5-7レベルの神経根髄質動脈でartery of cervical enlargementとも呼ばれ、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。腰膨大に分布する神経根髄質動脈は最も太く、artery of Adamkiewiczと呼ばれ、Th9からL1レベルのいずれかの分節動脈から分岐し、また70%以上で左側に認められる。上位頸椎レベルの前脊髄動脈は頭蓋内の椎骨動脈から分岐しており、したがって神経根髄質動脈は上位頸椎レベルには認めず、下位頸椎および中下位胸椎レベルを中心に4-8本、平均6本認められる。一方、神経根軟膜動脈は前根または後根の腹側を走行して、脊髄表面へ到達する。すなわち前根に沿って走行するものは脊髄の腹側のvasa corona、後根に沿って走行するものは脊髄の背側の後脊髄動脈へつながるが、大部分は後者である。神経根軟膜動脈の径は150-500 $\mu$ mで、第1-8胸椎レベルでは細く、逆に頸椎や第9胸椎以下の胸腰椎レベルでは太くなる。その数は報告によって異なるが11-16本認められ、胸椎レベルで多く認める<sup>1,9,18)</sup>。L5またはS1レベルからconus basketに向かって神経根軟膜動脈を認めることがあり、これはDesproges-Gotteron artery (またはconus artery)と呼ばれる<sup>9)</sup>。

神経根の静脈は神経根静脈 (radicular vein)で、軸索周囲をうず巻くように走行する細静脈が、神経根と平行に走行するradicular veinに流入している。発達の程度は様々であるが、神経根動脈と同様に各神経根に必ず1本は認められる<sup>5,20)</sup>。馬尾神経、特に後根においては下位の神経根静脈が上位のものと同流を認めることがある<sup>20)</sup>。神経根静脈は硬膜外静脈叢 (のlateral component)へ流入している。動脈と同様に神経根静脈も脊髄表面の静脈 (前脊髄静脈または後脊髄静脈)とつながっているものがあり、神経根髄質静脈 (radiculomedullary vein)と呼ばれる。神経根髄質静脈は神経根と脊髄の静脈還流を担っているが、他に脊髄の静脈を還流するものとして架橋静脈 (bridging vein)がある。神経根髄質静脈は椎間孔へ向って走行して神経根とともに硬膜を貫通しているのに対して、架橋静脈は椎間孔から離れた位置で硬膜を貫通している (Fig.3)。神経根髄質静脈と架橋静脈を合わせて30-70本 (平均50本)認められ、そのうち60-70%が神経根髄質静脈で、残りの30-40%が架橋静脈である<sup>5,9,18)</sup>。神経根髄質静脈や架橋静脈の径は250-1000 $\mu$ mで、左右や腹背側でその数に大きな差はないが、Th11からL3レベルを還流するものは発達していることが多く、稀に太さが2000 $\mu$ mまで達するものもあり、great radiculomedullary veinとも呼ばれる<sup>5,18)</sup>。頭蓋頸椎移行部では腹側に神経根髄質静脈を高頻度に認め<sup>9)</sup>、これは頭蓋内の静脈還流にも関与する。神経根髄質静脈と架橋静脈の硬膜貫通部は組織学的にslit typeとbulge (or nodular) typeとに分けられる<sup>17,18)</sup>。Slit typeは静脈が硬膜内を蛇行しながら斜めに走行しており、神経根髄質静脈はすべてslit typeである。一方、bulge typeは硬膜の途中に形成された結節上の結合織内を屈曲しながら走行している。架橋静脈はbulge type, slit typeのいずれも認められる。どちらのtypeも静脈の径は走行中に狭小化していき、最終的には静脈壁構造を失って周囲を硬膜組織などに覆われるようになる。脊椎レベルによる神経根髄質静脈と架橋静脈との違いを詳細に検討した報告はないが、架橋静脈が流出静脈となることが多い脊髄硬膜動静脈瘻の好発部位や神経根の長さなどを考慮すると、頸椎レベルでは架橋静脈よりも神経根髄質静脈を多く認め、下位胸椎レベルになるにつれて架橋静脈の頻度が高くなると思われる。逆に脊髄円錐より下位では馬尾神経と終糸のみとなるため、架橋静脈の頻度は下がり、大部分は神経根髄質静脈と考えられる。

【硬膜・硬膜外腔】

硬膜は内層 (inner (membranous) layer)と外層 (outer (periosteal) layer)からなり、頭蓋では両者は静脈洞やvenous channelの部位以外では互いに癒合している。一方、脊椎では内層と外層が明確に分かれており、内層は脊髄を覆い、外層は脊柱管の内面を裏打ちする骨膜となっているため、(狭義の)脊髄硬膜といえはこの内層だけを指す。このような構造の違いは脊椎の豊富な可動性によるためと考えられている<sup>15)</sup>。脊髄硬膜は頭側では大後頭孔の硬膜内層から連続しており、尾側では仙椎 (多くは第2仙椎)レベルで硬膜嚢を形成している。それ以下のレベルでは外終糸 (filum terminale externum)とともに尾骨靭帯 (coccygeal ligament)となり、最終的には尾骨背側の骨膜に連続する<sup>13)</sup>。外側へは前根と後根を覆いながら椎間孔へ向かい、脊髄神経節のレベルで脊髄神経の神経上膜 (epineurium)に移行している<sup>14)</sup>。

脊髄硬膜は脊椎の各分節動脈のspinal branchから分岐する神経根髄膜動脈 (radiculomeningeal artery)からの硬膜動脈 (dural artery)によって栄養されるが、全体的に血流は乏しい。硬膜動脈は神経根に沿った硬膜を栄養する枝を5-10本、神経根から脊髄周囲の硬膜に移行する部位を栄養する枝を2-3本、脊髄周囲の硬膜を栄養する枝を1-2本認める。各分節レベルで横方向の吻合を認めるが、腹側では発達が少ない。また神経根から脊髄周囲の硬膜への移行部 (椎間孔の内側)では頭尾側に縦方向の吻合を認める<sup>9,14)</sup> (Fig.4)。このような横方向や縦方向の吻合は胸椎レベル以下で発達している<sup>6)</sup>。硬膜動脈は硬膜のみではなく、硬膜外腔の組織も栄養しており、逆に硬膜外腔を走行する動脈であるdorsal somatic branchやprelaminar arteryは硬膜も栄養している<sup>6,9,18)</sup>。硬膜の静脈に関しては硬膜外静脈叢へ還流されると考えられるが、血管構築の詳細は明らかではない。

硬膜外腔 (epidural space)は(狭義の)脊髄硬膜と脊柱管壁 (骨膜)との間隙で、内部に脂肪組織、結合組織、後縦靭帯、黄色靭帯、動脈、リンパ管、静脈叢などを含み、頭側は大後頭孔のレベルから、尾側は仙椎裂孔 (sacral hiatus)まで認められる<sup>6)</sup>。発生学的には胎生6-7週頃に脊髄と脊柱管 (椎体、椎弓)との間に認める原始髄膜 (meninx primitiva)は頸椎レベルから尾側に向かって軟膜・くも膜の原基となる層 (endomeninx)と硬膜の原基となる層 (ectomeninx) とに分かれる。(広義の)脊髄硬膜は胎生7-9週間に頸椎レベルから尾側に向かって、最初に外側部分から、次いで腹側、背側の順に形成される。その過程で外側部分では(狭義の)硬膜と脊柱管壁との間にprimary epidural spaceを認めるようになる。Primary epidural spaceは脊柱管の外側から前外側にかけて左右に認められ、内部は疎な間葉組織や硬膜外静脈叢 (lateral epidural venous plexus)の原基、脊髄神経節を含んでいる。また腹側でも(狭義の)硬膜と椎体背側との間に間隙を認めるようになり、ここにも硬膜外静脈叢 (anterior epidural venous plexus)の原基を認める。胎生9-10週にかけては脊髄が発達して脊柱管の大部分を占めるようになるためprimary epidural spaceのサイズは一旦減少するが、その後は椎体や椎弓の一次骨化の進行に伴って血管系が発達し、また胎児の動きが活発になることなどから、胎生13週の終わりまでには(狭義の)硬膜と脊柱管の骨膜とが結合組織によって全周性に離れて硬膜外腔 (secondary epidural space)が形成される<sup>13)</sup>。したがって硬膜外腔は頸椎レベルから外側、腹側、背側の順に形成される。

硬膜外腔の動脈には分節動脈のspinal branchから分岐するdorsal somatic branch (retrocorporeal artery)とprelaminar arteryがある。前者は硬膜嚢の腹側 (椎体の背側)を走行し、椎体を栄養している。一方、後者は硬膜嚢の背側 (椎弓の腹側)を走行し、椎弓や棘突起を栄養している。いずれも硬膜外腔の組織や硬膜も栄養している<sup>6,18)</sup>。分節動脈のspinal branchはdorsal somatic branch、神経根髄膜動脈、prelaminar arteryからなり、dorsal somatic branchやprelaminar arteryは硬膜動脈と同様に横方向および縦方向の吻合を認めるが、これらの吻合は硬膜動脈とは逆に腹側に位置するdorsal somatic branchの方が発達している。椎体は発生学的に隣接する分節の頭尾側が癒合して形成されたため、dorsal somatic branchの横方向・縦方向の吻合は椎間板を囲むように六角形 (hexagon shape)を呈している (retrocorporeal anastomosis) <sup>1,9,18)</sup> (Fig.5)。

硬膜外腔には硬膜外静脈叢 (epidural venous plexus)を認める。硬膜外静脈叢は内椎骨静脈叢 (internal vertebral venous plexus)とも呼ばれ、硬膜嚢の腹側から椎間孔周囲までのventral epidural venous plexusと、それより背側のdorsal epidural venous plexusに分けられ、前者の方が発達している<sup>2,7)</sup>。さらに我々は発生学的な観点も考慮して、ventral epidural venous plexusをmedial componentとlateral componentに分けると理解しやすいと考えている (Fig.6A,B)。Medial componentは椎体からの静脈を受

けており、頭側は斜台のbasilar venous plexusと連続し、尾側にいくほど発達し、L4,5レベルが最大で、仙椎レベルではそのサイズは急速に減少する<sup>7)</sup>。C1レベル以外では椎体の背側正中で左右が吻合しており (retrocorporeal vein)、そこには椎体からのbasivertebral veinが合流している。後縦靭帯の外側で縦方向に吻合を認め、これは椎間孔レベルのlateral componentに向かってやや外側に走行しており、dorsal somatic branchと同様に椎間板を囲むように六角形を呈している。横方向の吻合は頸椎レベルでは後縦靭帯の深層 (椎体骨膜側)の間隙に認められ、胸椎以下では同部位の壁が薄くなることから後縦靭帯と椎体との間に認めている。一方、縦方向の吻合は後縦靭帯と脊髄硬膜との間を走行している<sup>2,7,16)</sup>。Lateral componentは頭側ではsuboccipital cavernous sinusへとつながり<sup>16)</sup>、medial componentやdorsal epidural venous plexusだけではなく、脊髄からの静脈を還流する神経根髄質静脈も合流する。これらの血流は椎間孔内で神経根の頭側・尾側に2本ずつ認めるintervertebral veinを介して、傍脊柱静脈叢 (paraspinal venous plexus (または外椎骨静脈叢 (external vertebral venous plexus))とともに分節静脈へと還流される<sup>9,14,18)</sup>。Intervertebral veinは互いに吻合を認め、叢状構造を呈している<sup>14)</sup>。Lateral componentは椎間孔の手前で縦方向の吻合を認め、後縦靭帯と脊髄硬膜との間で、medial componentの縦方向の吻合の外側をこれと平行に走行している。血管撮影では腰椎レベルではmedial componentとlateral componentは分離して確認できることが多いが、頸椎レベルでは後縦靭帯の幅が広いこともあり境界が不明瞭であることが多い<sup>16)</sup>。Ventral epidural venous plexusは全脊椎レベルで一定の形態で認められるのに対して、dorsal epidural venous plexusは部位によって発達の違いがあり、また個体差も大きい<sup>7)</sup>。頭側はsuboccipital cavernous sinusやmarginal sinusへとつながり、脊柱管内の後外側に縦方向の吻合を左右1対認め、椎弓の腹側で横方向の吻合している。また正中 (傍正中)でも細い縦方向の吻合を認めている。発達の程度は報告によって異なるが、Groenらのcadaver injectionでの検討では胸椎 (特に上位胸椎)、腰椎レベルで発達していることが多く、頸椎レベルではC1,6,7レベル以外では横方向の吻合の発達は乏しく、また仙椎レベルでは横方向の吻合を認めなかった<sup>7)</sup>。硬膜外静脈叢はこのようにventral epidural venous plexusのmedial componentとdorsal epidural venous plexusが主に骨を還流し、lateral componentがこれらと脊髄を還流していることになる。また頭蓋頸椎移行部の硬膜外静脈叢は頭蓋内の静脈還流にも関与している。

#### 【おわりに】

脊髄・脊椎の血管解剖は脳血管ほど理解されていないのが現状であるが、その基本構築は比較的単純で、同じ構築を繰り返している部位が多い。横方向・縦方向の吻合を含めた基本構築を知れば、脳血管よりも理解しやすいはずである。

#### 参考文献

1. Bosmia AN, Hogan E, Loukas M: Blood supply to the human spinal cord: part 1. Anatomy and hemodynamics. Clin Anat 28: 52-64, 2015
2. Chaynes P, Verdié JC, Moscovici J, et al: Microsurgical anatomy of the internal vertebral venous plexus. Surg Radiol Anat 20: 47-51, 1998
3. Gaddam SS, Santhi V, Babu S, et al: Gross and microscopic study of the filum terminale: does the filum contain functional neural elements?. J Neurosurg Pediatr 9: 86-92, 2012
4. Gregg L, Gailloud P: Transmedullary venous anastomosis: anatomy and angiographic visualization using flat panel catheter angiography. AJNR Am J Neuroradiol 36: 1381-1388, 2015
5. Griessenauer CJ, Raborn J, Foreman, P, et al: Venous drainage of the spine and spinal cord: a comprehensive review of its history, embryology, anatomy, physiology, and pathology. Clin Anat 28: 75-87, 2015
6. Groen RJM, Ponsse H: Vascular anatomy of the spinal epidural space: Consideration on the etiology of the spontaneous spinal epidural hematoma. Clin Anat 4: 413-420, 1991

7. Groen RJM, Groenewegen HJ, van Alphen HA, et al: Morphology of the human internal vertebral venous plexus: a cadaver study after intravenous Aradite CY 221 injection. *Anat Rec* 249: 285-294, 1997
8. Lasjaunias P, Maillot C, Ter Brugge K: Pial relations with spinal cord veins explain MRI occult spinal AV shunts. *Interv Neuroradiol* 22: 333-336, 2000
9. Lasjaunias P, ter Brugge KG, Berenstein A: *Surgical Neuroangiography*, Vol. 1. Springer-Verlag, Berlin, 2001
10. Nicholas DS, Weller RO: The fine anatomy of the human spinal meninges. A light and scanning electron microscopy study. *J Neurosurg* 69: 276-282, 1988
11. Oh CS, Chung IH, Koh KS, et al: Morphologic study of the connection between the accessory nerve and the posterior root of the first cervical nerve. *Clin Anat* 15: 267-270, 2002
12. Parke WW, Gammell K, Rothman RH: Arterial vascularization of the cauda equina. *J Bone Joint Surg Am* 63: 53-62, 1981
13. Rodionov AA, Asfandiyarov RI: Morphogenesis of the epidural space in humans during the embryonic and early fetal periods. *Neurosci Behav Physiol* 40: 137-142, 2010
14. Sakka L, Gabrillargues J, CollG: *Anatomy of the spinal meninges*. Oper Neurosurg (Hagerstown) 12: 168-188, 2016
15. Sensenig EC: The early development of the meninges of the spinal cord in human embryos. *Contr Embryol* 34: 145-157, 1951
16. Théron J, Moret J: *Spinal phlebography*. Springer-Verlag, Berlin, 1978
17. Thron A, Krings T, Otto J, et al: The transdural course of radicular spinal cord veins- a microangiographical and microscopical study. *Clin Neuroradiol* 25: 361-369, 2015
18. Thron AK: *Vascular anatomy of the spinal cord. Radioanatomy as the key to diagnosis and treatment*. 2<sup>nd</sup> ed. Springer International Publishing, Switzerland, 2016
19. Tubbs RS, Loukas M, Slappey JB, et al: Clinical anatomy of the C1 dorsal root, ganglion, and ramus: a review and anatomical study. *Clin Anat* 20: 624-627, 2007
20. 牛山 隆: 馬尾根静脈に関する解剖学的検討. *東医大誌* 54: 120-130, 1996

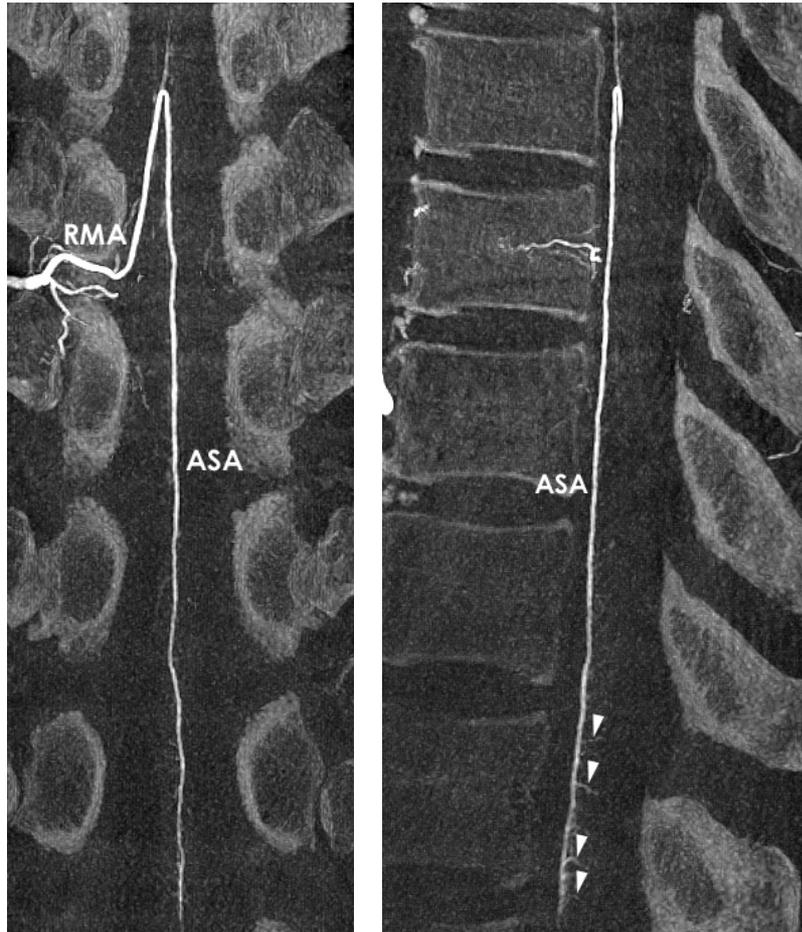
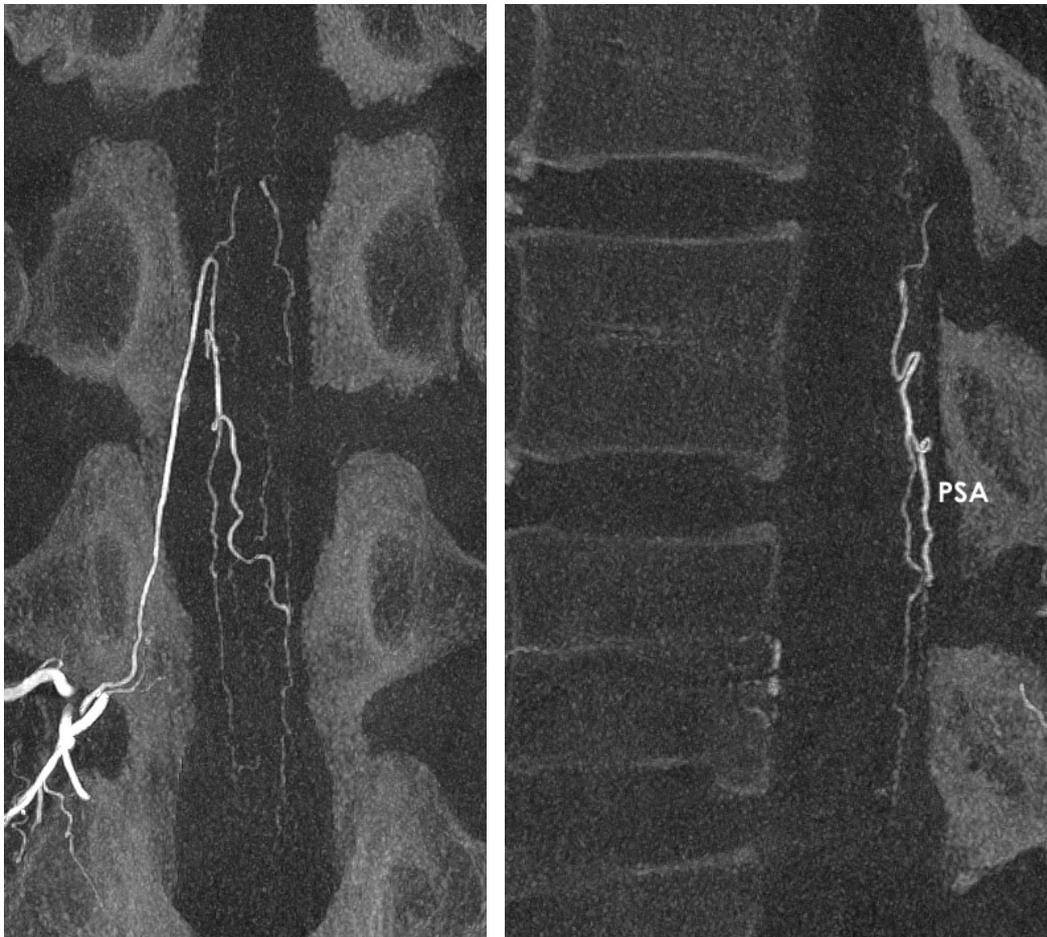


Fig.1: 前脊髄動脈, 神経根髄質動脈と後脊髄動脈, vasa corona, 神経根軟膜動脈

1A,B: 右Th9肋間動脈からの回転撮影のslab MIP冠状断像 (A)と矢状断像 (B). 右Th9レベルの神経根髄質動脈 (artery of Adamkiewicz) が前脊髄動脈へつながっている. 前脊髄動脈から脊髄内部に向かって中心溝動脈 (矢頭)を認める.

1C,D: 右L1腰動脈のからの回転撮影のslab MIP冠状断像 (C)と矢状断像 (D). 右L1レベルの神経根軟膜動脈が右後脊髄動脈へつながっている. 左右の後脊髄動脈はvasa corona (矢印)を介して交通している.

ASA: anterior spinal artery,  
PSA:posterior spinal artery,  
RMA: radiculomedullary artery,  
RPA: radiculopial artery



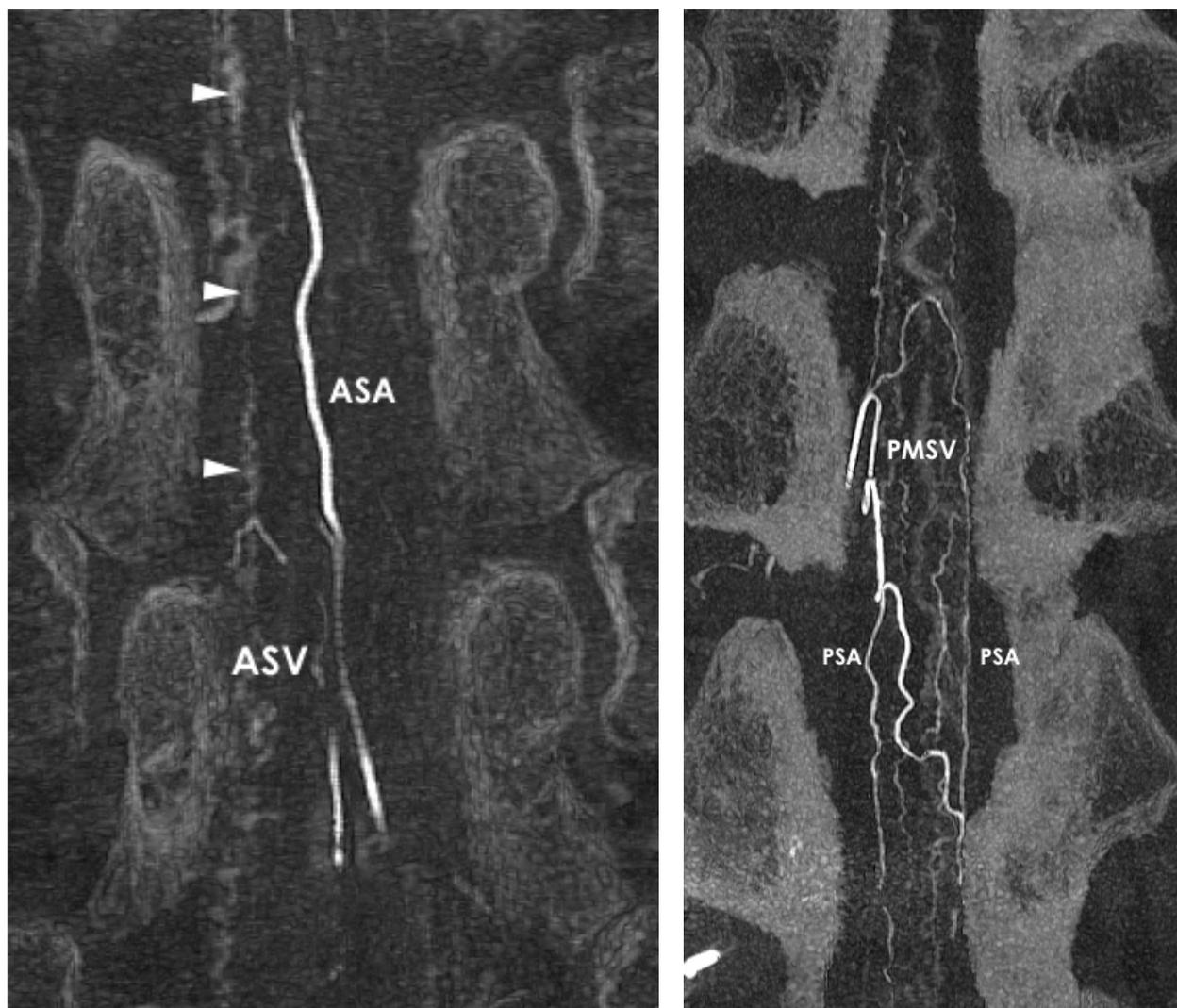


Fig.2: 前脊髄静脈, 後脊髄静脈, coronal venous plexus

2A: 左Th8肋間動脈からのcone beam CT冠状断像. 前脊髄動脈と平行して前脊髄静脈が走行している. またcoronal venous plexusの縦方向の吻合 (矢頭)も認める.

2B: 右L1腰動脈のからのcone beam CT冠状断像. 左右の後脊髄動脈の間に発達した後正中脊髄静脈を認める.

ASV: anterior spinal vein, PMSV: posteromedial spinal vein

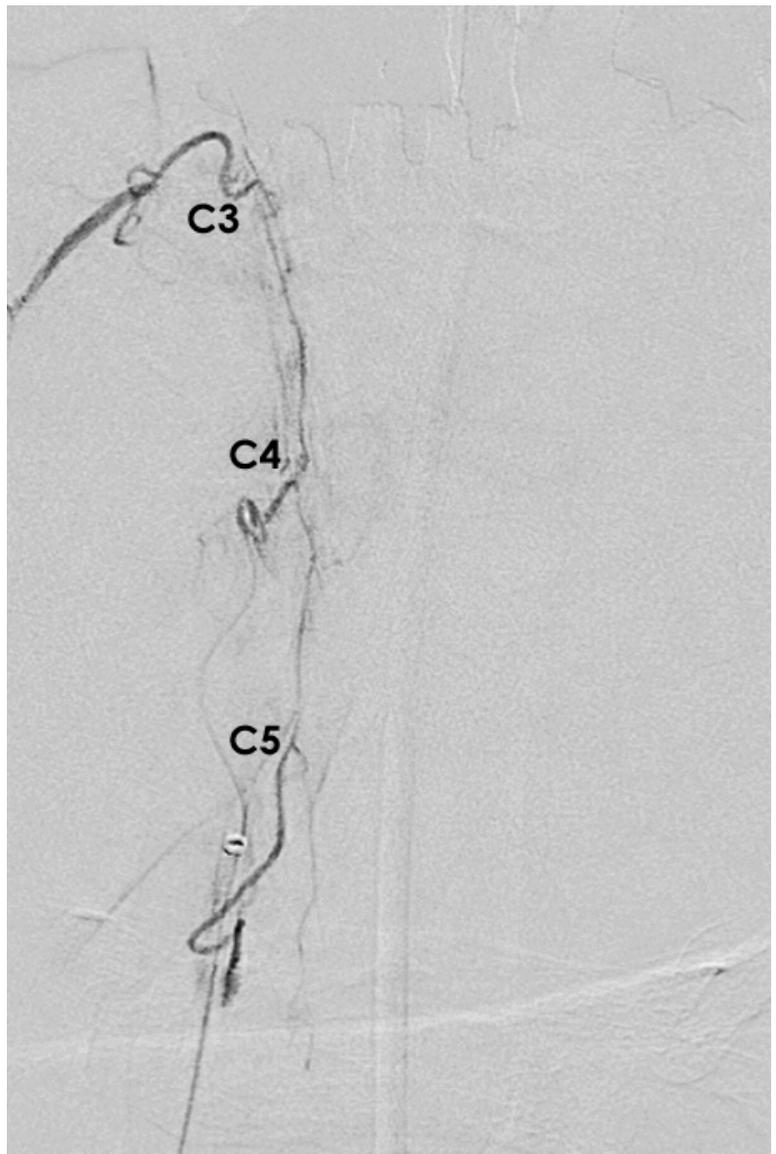
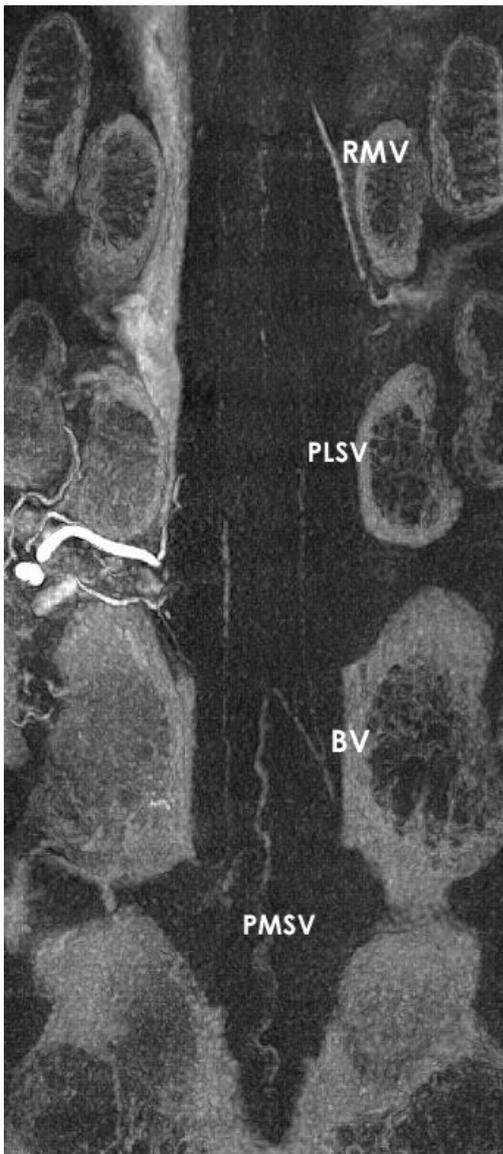


Fig.3: 神経根髄質静脈と架橋静脈 (左の図)

右Th9肋間動脈からのcone beam CT冠状断像。神経根髄質静脈は椎間孔内まで走行しているのに対し、架橋静脈は椎間孔の手前までとなっている。

BV: bridging vein, PLSV: posterolateral spinal vein, RMV: radiculomedullary vein

Fig.4: 硬膜動脈の縦方向の吻合 (右の図)

右C4硬膜動脈からの選択造影の正面像。硬膜動脈は椎間孔の内側で縦方向の吻合を認める。

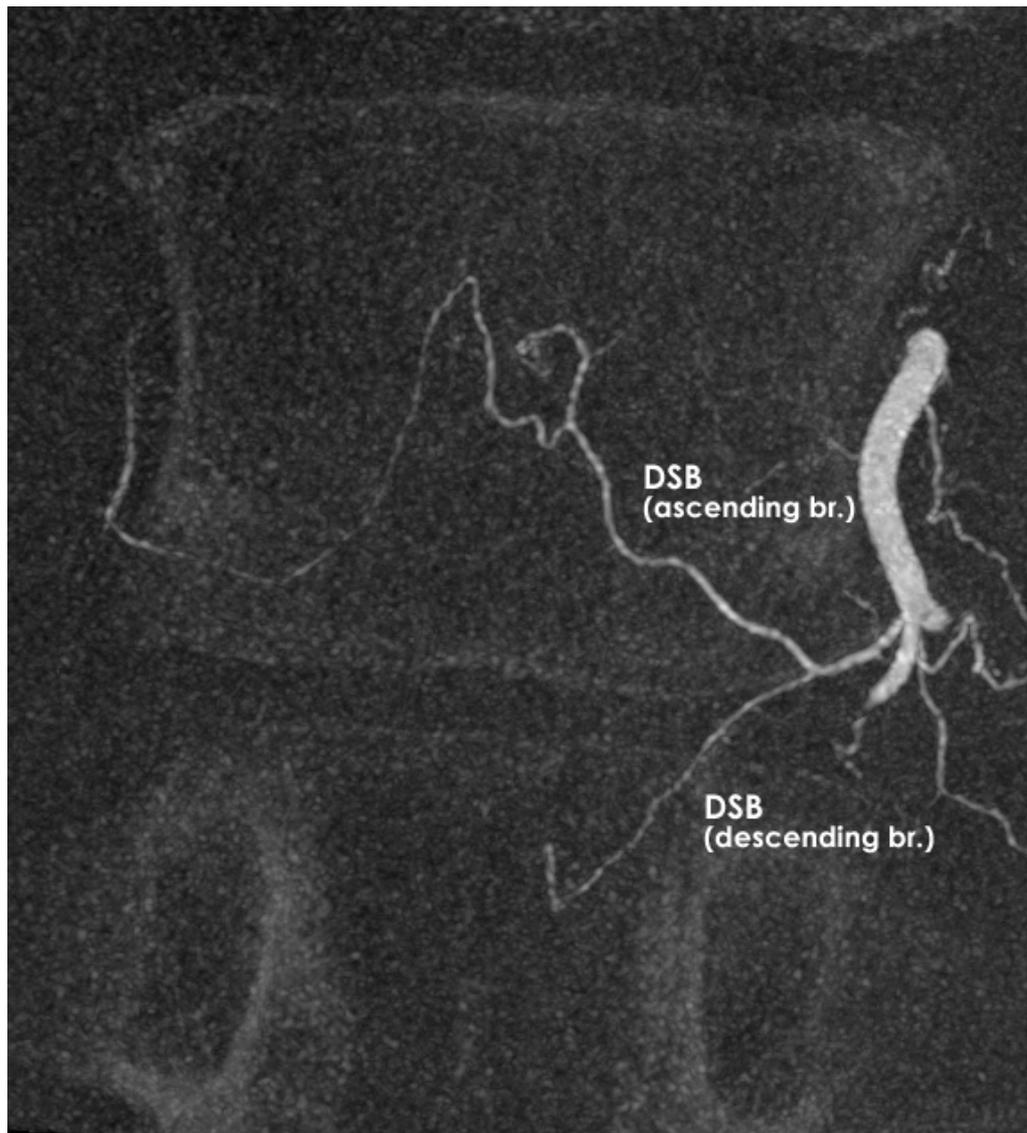


Fig.5: Dorsal somatic branchとretrocorporeal anastomosis

左L1腰動脈からの回転撮影のslab MIP冠状断像、Dorsal somatic branchの上行枝がL1椎体の背側で横方向の吻合を認める。

DSB: dorsal somatic branch

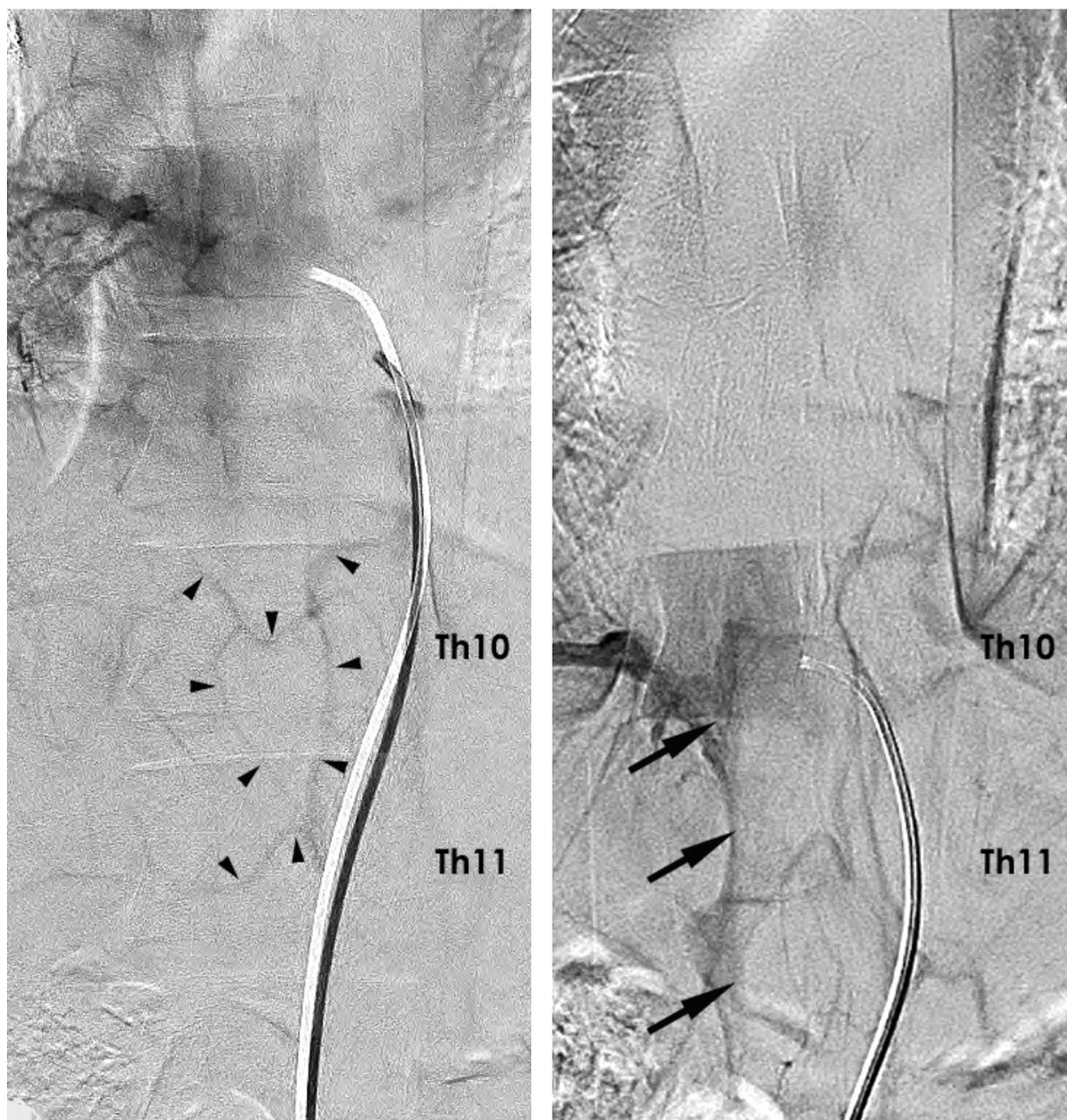


Fig.6: 硬膜外静脈叢

6A: 右Th8肋間動脈撮影の正面像. Th10,11レベルにventral epidural venous plexusのmedial componentが描出されている (矢頭). 椎体正中で横方向の吻合を認め, その外側に縦方向の吻合を認める.

6B: 右Th10肋間動脈撮影の正面像. 右Th8肋間動脈撮影で描出されたmedial componentの外側にlateral componentが描出されている (矢印).