

脳脊髄血管の基本構築

Basic structure of the vessels of the brain and spinal cord

大阪市立総合医療センター 脳神経外科
小宮山雅樹

Masaki Komiyama
Department of Neurosurgery, Osaka City General Hospital

Key words: angioarchitecture, body plan, brain, embryology, spinal cord

1. 脊髄・脳レベルでの構築

1.1 動脈

脊髄は、発生過程において、その分節単位（横方向の単位）に（metamere）、動脈支配されるが、発生の進行とともに、desegmentationが起こり、縦方向（longitudinal anastomosis）のつながりが形成されていく。その中心は、腹側にあるventral spinal artery（anterior spinal artery）である。分節単位での血管構築は、軸位面では（axial plane）、正中・腹側のsulcal arteryが同側（片側）の中心2/3を支配し、脊髄周囲を取り囲むpial networkであるvasa coronaが周囲の1/3を支配する。このvasa coronaから脊髄の中心に向けcentripetal arteryが脊髄表面に直角に髄内に放射状に入っていく（centripetal supply）。sulcal arteryは同側支配であるが、しばしば前脊髄動脈から共通幹が分岐し、median fissure内で、分岐し左右のsulcal arteryに分岐する。脳幹においては、medial perforatorが脊髄のsulcal arteryに相当し、前内側部と後外側部の脳神経のentry/exit zoneにはそれぞれ脳幹を表面から栄養するshort/long circumferential arteryが存在し、さらにより小さな穿通枝も存在し、これらは脊髄のvasa coronaに相当する。小脳を栄養する動脈は、long circumferential arteryにさらに外側の動脈が追加された構築である。終脳に於いても、正中に於ける同側支配のperforator（striatal arteryやthalamo-perforator）と、大脳表面の皮質動脈cortical arteryから中心に向けて栄養するperforatorも同様な血管構築と考えられる。このように脊髄に於ける動脈構築の基本パターンは、脳幹・大脳・小脳についても共通のパターンであり、相同性homologyが認められる。Fig. 1.

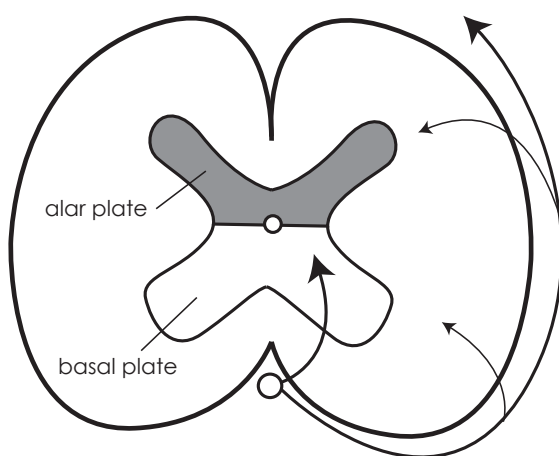
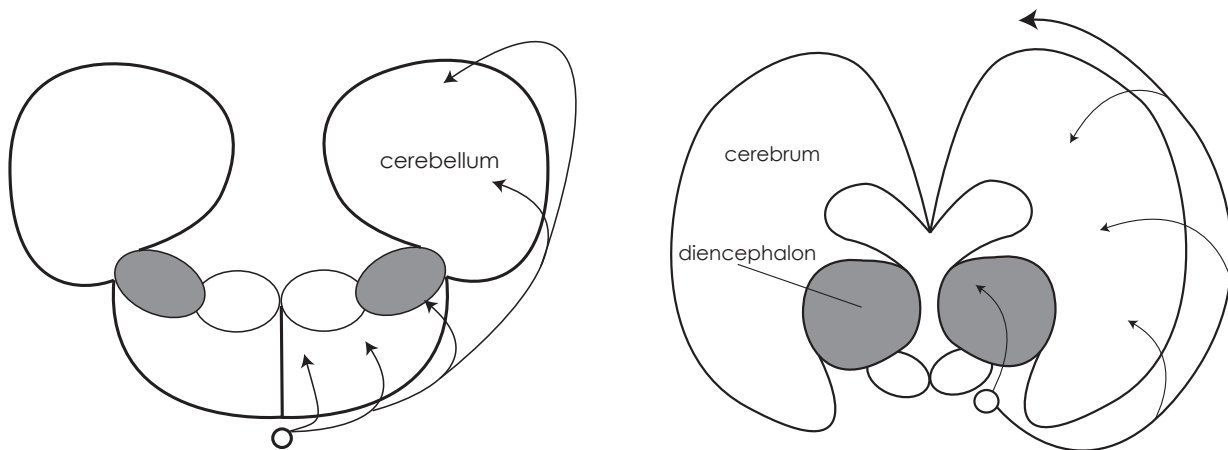


Fig. 1. 脊髄、脳幹、大脳レベルでの動脈構築
A: 脊髄レベルで、同側正中に穿通動脈が入り、脊髄周囲は、vasa coronaが取り囲む構築をしている。



B：脳幹レベルでは、同側正中線で 穿通動脈が、前外側部と後外側部に、short/long circumferential arteryがそれぞれ脳幹部に入る。小脳へはさらに外側の皮質動脈が向かう。C：大脳レベルでも、同側正中線から穿通動脈（striatal arteryや thalamoperforating artery）が入り、大脳にはさらに外側の皮質動脈が栄養する構築をしている。どのレベルに於いても、穿通動脈は、脊髓・脳幹・小脳・大脳の表面に直角に入り、脳室・中心管に向かう（centripetal pattern）。

脳幹ではmedian perforatorとshort circumferential artery、long circumferential artery が上述のように脊髓の動脈（sulcal arteryとvasa corona）に相当する。橋を背側で取り囲む小脳や間脳を取り囲む大脳の構造は、脊髓に於ける基本構造の背側に、神経管のalar plateの外側から形成される小脳・大脳が追加された構築であり、long circumferential arteryのさらに外側に皮質動脈 cortical artery が追加形成された構築と考えられる。小脳の皮質動脈は、superior cerebellar arteryとinferior cerebellar arteryであり、大脳のそれは、anterior/middle/posterior cerebral arteryである。従って、これら皮質動脈は、end arteryではなく、互いに吻合した動脈（leptomeningeal anastomosis）で、重要な大脳・小脳の表在性の側副路となる。

中脳レベルと延髄・上位脊髓レベルでは、小脳・大脳のような背側に追加された脳構造がないためlong circumferential arteryが、脳幹の背側でより高密度に存在し、それぞれcollicular arteryやposterior inferior cerebellar artery・lateral spinal arteryがその役割を果たす。これらの動脈は、左右の動脈が脳幹背側で吻合することもあり（例えばbihemispheric cerebellar artery）、また稀に脳幹背側を廻り正中を超え、反対側まで栄養することがあるのは、このような血管構築と関係がある。恐らく、この部位では末梢での左右の動脈のaffinityが高いためであろう。

脊髓レベルで、脊髓表面から脊髓を取り囲み、髄質に放射状に向う穿通枝が入る様に、脳幹・大脳レベルでも同様に、centripetal patternが認められる（centripetal = toward the center）。脊髓では灰白質が白質に取り込まれる構造であり、大脳では、基底核を除き、白質を灰白質が取り囲んでいるが、表面から脳室に向かって穿通枝が入って行くパターンは同様に、striatal /non-striatal な部位に関わらずこの構築をしている。脳室から脳表に放射状に向う動脈centrifugal artery（または、ventriculofugal artery：centrifugal = away from the center）の報告がある [2,10]。van den Berghは、ventriculopetal arteryを、cortical branch, medullary branch, striatal branchの3つに分類し、この分類によるcortical branchは脳表から短い距離を栄養し、medullary branchは、脳室近傍まで栄養し、striatal branchは、深部灰白質を栄養するとした。さらに脳室側から脳表に向け放射状にventriculofugal artery が存在するとし、その血流は、脈絡叢動脈 choroidal arteryやstriatal branchの末梢からなるsubependymal artery（この動脈が実際存在するか不明）とした。Fig. 2A. その後のいくつかの報告では、脈絡叢動脈の末梢で脳室内の脈絡叢から脳室壁を通り穿通枝が脳実質に入りventriculofugal artery となるとの記載もあるが

[9]、van den Bergh のoriginalの論文には脳室内に入る前に分岐した小動脈が脳室周囲に向かい ventriculofugal artery を形成すると記載されている。このような構築は、trigonum ventriculi の周囲に多く認められるとされる。de Reuckは脳室周囲のborder zoneを3つのtypeに分類した。Type 1は脳室壁そのものに向うmedullary arteryによりsubependymaにborder zoneが形成され、type 2は脈絡叢動脈が脳室壁を越えて、つまりependymaを貫通し脳実質に入り、medullary artery との間にborder zone が形成され、type 3は脳室壁の近傍でmedullary artery 間にborder zone が形成されるとしている。Fig. 3. van den Berghとde Reuck の論文は、大脳はcentripetal artery に栄養されているというそれまでの基本概念 [1]を覆すことになった [5]。 (Fig. 2A)。 van den Berghの原典 (Fig. 2B) とYasargil のtextに紹介された図 (Fig. 2C) との違いが興味深い [11]。1970年頃に行われた研究は、periventricular cerebromalacia (leukomalacia) や新生児のgerminal matrix hemorrhage などの原因検索を目的とし、ventriculopetal arteryとventriculofugal arteryのwatershed zoneにそのような血管源性の病的変化がくることを結論付けている。実際、論文に記載されているventriculofugal artery の支配領域は、ventriculopetal arteryのそれとは比較にならないほど、ependyma直下の狭い領域である。このような injection studyの作成方法と解釈に問題がありventriculofugal artery の有無は判然としない。静脈側にまで注入されたinjection materialをventriculofugal artery と解釈されている可能性が指摘され、脳室体部外側のsubependyma で (pars centralis ventriculi lateralisに多いとされる)、striatal arteryが走行を変え、脳表方向に向かうとされる血管は、動脈ではなくsubependymal veinに入るmedullary veinであるとされる [6,7]。このようにventriculofugal arteryのような構造は無く、脊髄と同様にcentripetal artery (または、ventriculopetal artery) だけが存在するとされる [4,7]。結局は血管の組織標本の解釈の問題だと思われるが、いまだcontroversialである [5,11]。仮に、ventriculofugal arteryが存在するとしても、その灌流領域の狭さを考えると、基本的に大脳に於ける動脈構築のパターンは、脊髄のそれと同様に古典的に考えられて来たventriculopetal patternとしてもよいであろう。

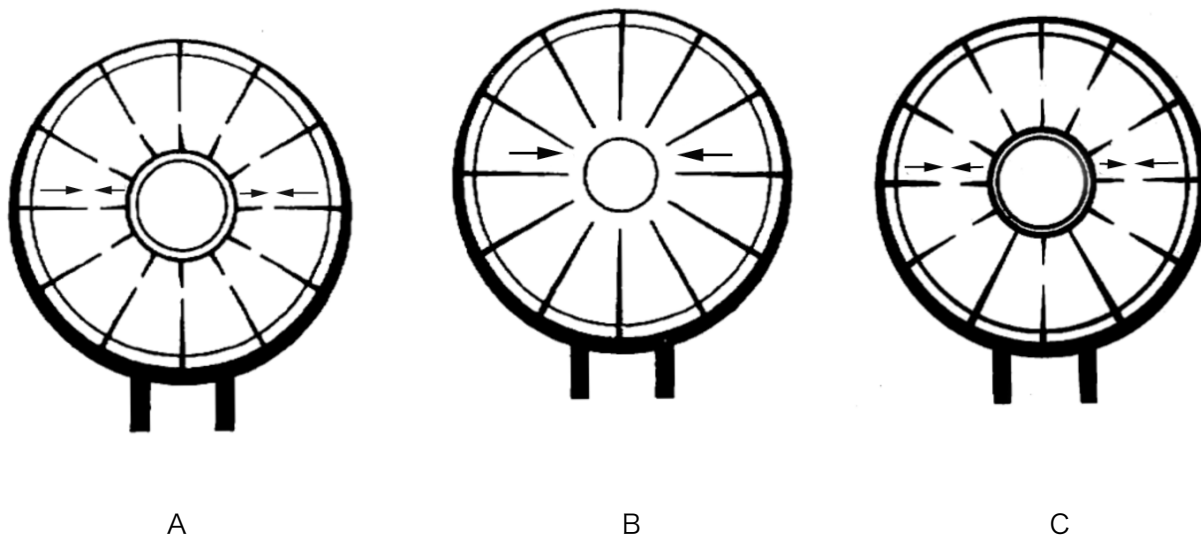


Fig. 2. 大脳の動脈系の基本構築. A: 古典的な考え方で、ventriculopetal arteryが脳表から栄養する。 B: van den Bergh によって提唱されたdual supplyの考え方で、ventriculopetal arteryが脳表から、ventriculofugal artery が脳室側から栄養する。 C: Yasargilのtextに載った図で、Bとの違いは、ventriculofugal artery が頸動脈の枝 (striatal arteryとchoroidal artery) から来ていることは記載されていない。 A, Cは、論文1 2より、Bは 論文2より転載。

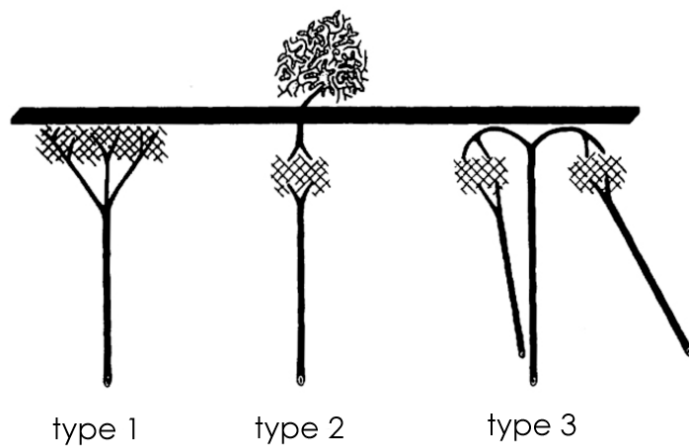


Fig. 3. de Reuckによる脳室周囲の border zoneの3 type. [論文2より 転載]

type 1: medullary arteryによる subependymaに形成される。
 type 2: 脈絡叢動脈が脳室壁を越え脳実質に入り、medullary arteryとの間にborder zone が形成される。
 type 3: 脳室壁の近傍でmedullary artery間でborder zone が形成される。

このような基本血管構築を理解するためには、神経管の形成過程を考えると理解しやすい。神経板neural plateの左右が盛り上がり、neural foldが正中で融合し、神経管 neural tubeとして閉じられる。anterior neuroporeは、閉塞しlamina terminalisになる。左右の脳半球 (telencephalic vesicle) を結ぶ構造は、このlamina terminalisのみである。始め薄い一層であった神経管は、やがて神経細胞の分裂により3層構造 (germinal layer, mantle layer, marginal layer) になっていく。これら3層構造は、さらに上衣ependymaと脈絡叢上皮からなるependymal layer, 灰白質であるmantle layer, 白質であるmarginal layerになる。この3層構造は、脊髄の軸位面で見ると、蝶型のmantle zoneは背側のalar plateと腹側のbasal plateに分けられ、その境界はsulcus limitansである。alar plateとは知覚機能に関係し、basal plateは運動機能に関係する。このような基本構造が脊髄から中脳まで認められる。後脳では第4脳室が背側に形成されるため、basal plateの外側にalar plateが形成される。終脳 telencephalon、間脳 diencephalon、上丘・下丘 (superior/inferior colliculi, tectum)、小脳 cerebellumがalar plateから形成されるのは興味深い。血管の基本構築は、腹側の神経管表面から脳室または中心管に向けて穿通動脈が入り、神経管周囲を走る短・長の回旋動脈が表面に直角に髄質に向けて髄質動脈として入っていく。終脳では、新皮質、線条体、視床が発達するため、これらのcentripetal vesselの走行が、修飾され、複雑になるが、基本は脳表から脳室壁に向う [4].

穿通動脈だけではなく、穿通静脈・神経細胞の遊走は同じルートを取り、その構築に当たりradial glial cellの存在やguidance signalの役割が重要とされる。脳幹では、脳室が背側に移動するため、穿通動脈の走行は、脳幹中心に向かうのではなく、背側の脳室に向かい、また穿通静脈はこれと逆方向を走行する。このことは大脳、小脳に於いても同じ脳室中心の血管構築であることには変わりはない。Fig. 2. 脳室穿孔を行う場合、大脳のどの部位からも脳表に向けて直角に穿孔すれば、必ず脳室に入るのは、血管構築を考えれば、理にかなった方法である。

大脳に於ける正中の穿通動脈が、両側支配のことがあるのは、実質に入る前の共通幹の存在にあり、実質内に入れば同側支配しか起こらない (sulcal artery, thalamoperforating artery, artery of Pacheron) . 上記の基本構築の中で、少し特異的な役割を果たすのが、前脈絡叢動脈anterior choroidal artery (Acho a) である。Acho aには、diencephalic branch, choroidal branch, telencephalic branch があり、穿通動脈の役割と皮質動脈の役割を持つ。つまり、Acho aの近位部は、大脳の内側に分岐するため、穿通動脈はmedial centripetal arteryであるが、末梢の皮質枝は、distal centripetal arteryを分岐する。神経管が

閉鎖していない発生初期には、脈絡叢は神経管の背側にあり、これに続く神経管の閉鎖、大脳の発達 (folding) によりAcho aの近位はleptomeningeal arteryのままであるが、choroidal fissure が形成され、Acho aの末梢部はchoroid plexusを栄養するchoroidal branchとなる。この発生過程で、広い範囲の大脳を栄養していた皮質枝telencephalic branch (distal centripetal artery) は椎骨脳底動脈系へ annexationされ、残る海馬、扁桃核、内包、中脳などを栄養するAcho aは通常、小さな枝 (medial centripetal artery) となる。いずれにせよAcho aは、distal annexationの程度に関わらず、centripetal patternをとる動脈と考えられる。

動脈狭窄や閉塞、または動静脈シャントといったlocal stressがかかった場合に、潜在的な吻合が側副路や栄養動脈として働く。皮質動脈のleptomeningeal anastomosisは理解しやすいが、centripetal artery が実質内で、吻合を形成した場合、centrifugal arteryが存在する様に見えるが、基本的には穿通動脈間の potential anastomosisが顕在化した側副路である。穿通動脈はend artery であるが、どのような状況でもend arteryのまま存在するのではなく、互いに吻合する形態変化が可能である。もやもや病や中大脳動脈閉塞症で認められるstriatal arteryから中大脳動脈の皮質枝への側副路は、rete構造に見えることもあるが、このような経路をとっている。もやもや病で、硬膜外から皮質動脈へangiogenesisが働いて形成される側副路duro-pial anastomosisとは形成機序は異なる。

1.2. 静脈

脳静脈や脳硬膜静脈洞の発生学的な研究は、古くから行なわれているが、脊髄静脈のそれは無い。完成した脊髄の静脈は、腹側と背側の正中にventral/dorsal spinal veinがあり、その両者間を、脊髄髓内を前後に結ぶtransmedullary veinが存在する。腹側・背側に導出静脈の太さ・方向には優劣は無いとする報告や背側がやや優性とする報告がある。このtransmedullary veinは脊髄の前後の (背腹の) 静脈圧のバランスを保っている。また、脊髄の前後だけでなく、中心管を含めた脊髄内部の圧の均一化を図っているとも考えられる。髓内の軸位面での静脈は、基本構造は、動脈の走行に類似している。つまり脊髄を前後方向に走る transmedullary veinを除くと、centrifugalに放射状に脊髄表面に向うmedullary veinが存在し、脊髄表面のvenous plexusと一部transmedullary veinに導出され、最終的にはventral/dorsal spinal veinから、emissary draining veinを介して硬膜外に導出される。脊髄表面の静脈の方が、動脈のvasa corona よりも脊髄表面側にある。動静脈奇形の脊髄動脈撮影の側面像で、sulcal artery が分岐する前脊髄動脈よりも、sulcal veinが導出する前脊髄静脈の方が、脊髄表面側にあるのが観察される。脊髄から硬膜外への導出静脈の60%が神経根に沿って走行するが、残る40%は、硬膜内から硬膜外に出る部位では、神経根とは関係なく硬膜を貫通し、硬膜外静脈叢に導出され、さらに椎間孔から椎体外に出る。つまり脊髄静脈 (radiculomedullary vein) は脊髄動脈 (radiculomedullary artery) のように強いmetameric patternをとらない。これは脊髄からの導出静脈の40%がbridging veinとしてmetameric patternをとらず、硬膜内を走行し硬膜外の静脈叢に導出されると考えられる。硬膜内の短い距離を走行することにより静脈血の硬膜内への逆流を防いでいる。

脳幹レベルの静脈は、腹側正中にある脳底動脈の両側の傍正中に2本、または脳底動脈と同様に正中に1本の静脈 (anterior ponto-mesencephalic vein, anterior medullary vein) がある。横断面では、脊髄でおけると同様に、穿通動脈と同様の走行をとる [3]。つまり背側にある脳室に向いて走行するcentripetal patternの穿通動脈と同様に、脳室から腹側・前外側に向けて走行するcentrifugal patternの穿通静脈が走行する。正中部には、脳幹の前後方向に走行するtransmedullary veinも脊髄と同様に存在する。脊髄レベルでの背側にあるposterior spinal veinの脳幹での相同構造と考えられるのは小脳の導出静脈が該当する、小脳のdevelopmental venous anomalyにおいて、lateral recess vein of the 4th ventricle に導出される場合、transmesencephalic veinやtranspontine veinを介して、脳幹の背側から腹側正中に導出される。このルートは本来の脳幹の前後を結ぶtransmedullary veinを使っているものと考えられる。また正中ではなく、脳幹背側から脳幹前・側方に導出される場合も同様に前・側方に向かうmedullary veinを使って

いると考えられる。

大脳・小脳の静脈系の基本パターンは、表面側にsuperficial medullary veinがあり、深部側にdeep medullary veinがあり、表在性静脈と深部静脈にそれぞれ導出される。また、表面から脳室下のsubependymumまで貫く、transmedullary vein（脊髄でも同じ名称の静脈があり、脊髄正中の前後方向にventral/dorsal spinal veinを結ぶが別構造である）も存在する。テント上の深部静脈には、内大脳静脈internal cerebral veinとbasal veinであり、テント下の深部静脈系は、小脳と延髄間のfussure内を走行するlateral recess vein of the 4th ventricle (vein of cerebello-medullary vein) と小脳と中脳間のfussure内を走行するprecentral cerebellar vein (vein of cerebello-mesencephalic vein) であるが、basal veinとprecentral cerebellar veinは、表在性の静脈導出の役割も担っている。striatal/non-striatal structureに関係なくmedullary veinの導出パターンは共通である。側脳室の外側上方に前後方向に走行するsubependymal veinは、longitudinal caudate vein of Schledingerとも呼ばれ [8]、thalamostriate veinに導出される。動脈構築の項で述べた側脳室外側部のinjection modelで観察されるventriculofugal arteryはここに集まるdeep medullary veinを見ている可能性がある [6]。

2. 頭部・体幹レベルでの構築

2.1 体幹レベル

脊椎動物では、体幹レベルで、軸位面で腹側から背側に向けて、消化管、大動脈、神経系の順に並び、節足動物である昆虫では、これとは逆に神経系、血管系、消化管の順に並び、並び順序は逆転しているが、脊椎動物と昆虫の間に於いても、共通のbody planが働いているのは興味深い。Fig. 4.

神経系は中枢神経と末梢神経に分けられ、体幹レベルでは、脊髄と脊髄神経が該当し、脊髄知覚神経節の形成には神経堤neural crestが関係している。体節単位で筋肉、骨、皮膚が栄養されている。つまり大動脈から分岐する各segmental arteryがその体節レベルの脊髄metamere、脊髄神経radicular nerve、硬膜、筋肉、骨、皮膚を栄養する。消化管には、このような明確な体節制の支配はない。

体幹レベルでの動脈構築は、中枢神経系では脊髄レベルの動脈構築であり、体節metamere/somite単位の構築をしており（metamerism）、segmental arteryを基本に軸位方向の構築（centripetal pattern）があり、それらが縦方向の動脈構築により連続するように構築に変化していく。

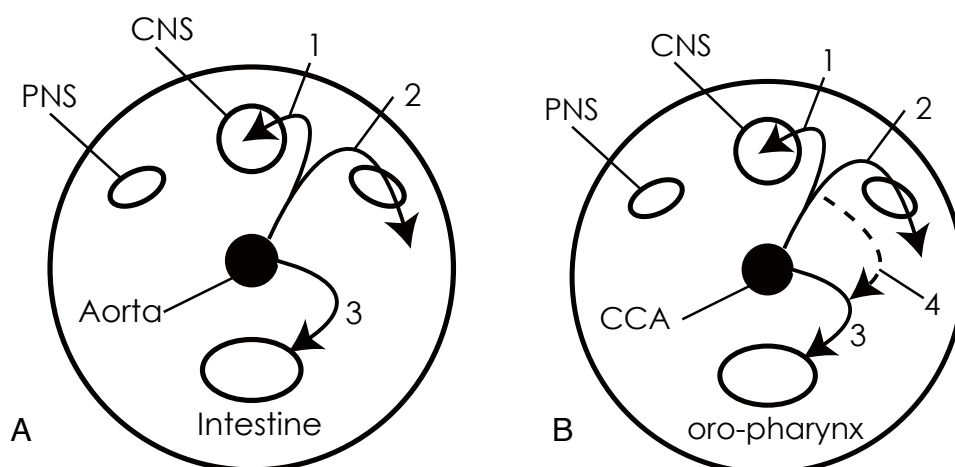


Fig. 4. 体幹部と頭部の軸位面での動脈系のbody plan

A: 体幹レベル. 1: radiculomedullary artery, 2: intercostal artery, lumbar artery, 3: digestive artery.

B: 頭部レベル. 1: Internal carotid artery, ophthalmic artery, basilar artery, 2: trigeminal artery, hypoglossal

artery, proatlantal artery, 3: ventral pharyngeal artery, 2 + 3: external carotid artery (facio-linguo-thyroidal system), 4: stapedia artery (annexed to ventral pharyngeal artery).

CCA: common carotid artery, CNS: central nervous system, PNS: peripheral nervous system.

2.2 頭部レベル

頭部レベルでも体幹レベルと同様のbody planがあるが、体節単位とはいえない。体幹レベルと異なり咽頭弓pharyngeal archの存在があり複雑である。菱脳レベルでは神経堤細胞に対する菱脳分節rhombomereが存在する。体幹に於ける消化管は、頭部では、咽頭、舌、(甲状腺)などが該当し、血管は総頸動脈が該当し、神経組織は、大脳・嗅神経・視神経・小脳・脳幹などが中枢神経であり、三叉神経、顔面神経、舌咽神経、迷走神経、副神経、舌下神経などが末梢神経に該当する。大脳・嗅神経・視神経の栄養には、主に内頸動脈やophthalmic arteryが関係し、小脳・脳幹のそれには椎骨・脳底動脈も関係する。末梢神経の栄養は、trigeminal artery, hypoglossal artery, proatlantal arteryに加え、第2大動脈弓の背側から発生するstapedial arteryが関係し、その中枢側が退縮し、外頸動脈に移行する(stapedial annexation)。消化管は、発生学的には第1・2咽頭弓の動脈弓の腹側から形成されるventral pharyngeal arteryが関係する。ventral pharyngeal arteryは最終的には外頸動脈のfacio-linguo-thyroidal systemとなる。

頭部レベルでの動脈構築は、中枢神経系では大脳から脳幹レベルの動脈構築であり、脊髄におけるsegmental arteryを基本にしたmetamerismよりは複雑な構築をしている。鰓弓を基本にした動脈形成(brachiomerism)がなされ、これには菱脳のrhombomereの構築や神経堤細胞の移動migrationが鰓弓構築に強く関与している。鰓弓構築自身、吻側のmetamerismのgrouping(tagmatization)とも考えられる。このように内頸動脈に関連する動脈形成(つまり前方循環の動脈)には、鰓弓構築を基本とし、神経堤細胞が関連している。逆に脊髄血管の構築を残す中脳より近位の動脈系である椎骨脳底動脈系(つまり後方循環の動脈)の動脈形成には、metamerismが主体であり、神経堤細胞は関与していないとされる。

文献

1. Cohnhelm J: Untersuchungen über die embolischen Prozesse. Berlin: Hirschwald. 1872 cited in [12]
2. de Reuck J: The human periventricular arterial blood supply and the anatomy of vertebral infarctions. Eur Neurol 5:321-334, 1971
3. Hassler O: Venous anatomy of human hindbrain. A stereomicroangiographic study of the venous angio-architecture of the venous areas of drainage. Arch Neurol 16:404-409, 1967
4. Kuban KCK, Gilles FH: Human telencephalic angiogenesis. Ann Neurol 17:539-548, 1985
5. Mayer PL, Kier EL: The controversy of the periventricular white matter circulation: a review of the anatomic literature. AJNR 12:223-226, 1991
6. Moody DM, Bell MA, Challa VR: Features of the cerebral vascular pattern that predict vulnerability to perfusion or oxygenation deficiency: an anatomic study. AJNR 11:431-439, 1990
7. Nelson MD, Gonzalez-Gomez I, Gilles FH: The search for human telencephalic ventriculofugal arteries. AJNR 12:215-222, 1991
8. Schlesinger B: The venous drainage of the brain with special reference to the Galenic system. Brain 62:274-291, 1939
9. Takashima S, Tanaka K: Development of cerebrovascular architecture and its relationship to periventricular leukomalacia. Arch Neurol 35:11-18, 1978
10. van den Bergh R: Centrifugal elements in the vascular pattern of the deep intracerebral blood supply. Angiology 20:88-94, 1969
11. Van den Bergh R: The ventriculofugal arteries. AJNR 13:413-415. 1992 (letter)
12. Yasargil MG: Microneurosurgery. Vol 3A. New York: Thieme Medical, 1987