

脳脊髄静脈の機能解剖

(Functional Anatomy of the Cerebral and Spinal Veins)

大阪市立総合医療センター 脳神経外科 小宮山雅樹

要 旨

脊髄の神経根静脈 radicular veinは分節性 metameric に形成されるが、脊髄からの静脈導出を担う脊髄神経根静脈 radiculomedullary veinは、必ずしも分節性の導出をしない。脳静脈は、脳動脈とは異なる発生過程を経る。神経管の両側に形成される primary head veinを基本に脳の発達とともに形を変えながら脳硬膜静脈洞 dural sinus や脳静脈 pial veinが形成される。神経管の閉鎖により脈絡叢からの導出は一本の medial vein of prosencephalon が担うようになり、これは一対の内大脳静脈に移行され、さらに great vein of Galen に導出される。大脳の重さを支えるべく発達する tentorium cerebelli 内にある primitive tentorial sinus の導出を basal vein が担うようになり (basal vein capture)、内大脳静脈とともにテント上の深部静脈系が形成される。大きく発達する大脳の表在性静脈 (Sylvian, Trolard, and Labbe veins) の間には、互いに十分な吻合が形成される。Tentorial sinus へ流入していた superficial middle cerebral vein は、tentorial sinus の遠位部の退縮により海綿静脈洞に流入するようになり (cavernous sinus capture)、その程度により paracavernous drainage や cavernous drainage の形をとるようになる。Basal vein capture や cavernous sinus capture、脳表静脈と subependymal vein の間の吻合 (transcerebral anastomosis)、脳表静脈間の吻合や脳底部の静脈輪 (Trolard circle) の variation は、動静脈シャント疾患や脳静脈系の病的状態での様々な臨床像に反映される。これら脳脊髄静脈の機能解剖の理解は、病態の把握や安全な治療に重要である。

1. はじめに

脳血管内治療において脳脊髄血管の機能解剖の理解は重要であり、脳動脈や脊髄動脈の動脈系に関しては注目されてきた^{11,13,14,16}。しかし、脳脊髄静脈系の機能解剖も同様に重要である¹⁵。脳動脈系と同じように個体発生 ontogeny^{20,25} や系統発生 phylogeny^{4,8} の知識はその機能解剖の理解を助ける。CT/MR の普及とともに脳血管撮影で病変の局在診断をする古典的な手法は必要では無くなり、より機能的な解剖の読影が要求されるようになった¹⁰。これらの知見は、新しいものではなく1960-70年代の脳血管撮影の知見の焼き直しである^{6,7}。種々の脳脊髄の静脈構築の variation、静脈系の狭窄・閉塞や動静脈シャントの存在下で、そこを順行性・逆行性に流れる正常

な静脈血流やシャント血流の理解、つまり脳脊髄静脈の機能解剖の理解が重要となってきた。今回、より安全な脳血管内治療を行なうための脳脊髄静脈の機能解剖について概説したい。

2. 脊髄静脈の発生

脊髄の血管は、脊椎の頭尾方向の metameric な構造から分かるように、脊髄では脊髄分節 myelomere 単位で、まず血管が構築される (segmental structure)。発生の初期には、背側大動脈 dorsal aorta の dorsal branch の枝である segmental artery が、脊髄の腹外側を中心に脊髄周囲を取り囲む capillary plexus (後の vasa corona) を栄養し、segmental vein が coronal venous plexus から、cardial vein に導出する。同時に脊髄内部には、腹側正中部に sulcal vein や centrifugal pattern の radial vein も形成される⁵。Fig. 1. 脊髄静脈は coronal venous plexus を頭尾方向に結ぶ静脈網から形成される。脊髄の腹側と背側の正中部に、anterior/posterior spinal vein が形成される。神経根静脈 radicular vein は、すべての神経根に存在し、metameric pattern を残すが、脊髄の導出静脈である radiculomedullary vein (emissary draining vein) は、神経根静脈ほど metameric pattern をとらず、多くが退縮し (regression)、限られた (選択された) radiculomedullary vein が、神経根と必ずしも併走せず、硬膜外静脈叢 epidural venous plexus につながる。

3. 脳硬膜静脈洞 dural sinus (vein) の発生

発生初期の脳の表在性の毛細血管叢の導出は、一対の primary head vein (vena capita lateralis) が担い、神経管の両側に頭側は中脳から、尾側は心臓に流入する duct of Cuvier (common cardinal vein) まで形成される²⁵。この primary head vein は神経管の表層に形成される毛細血管叢からの血液を導出し、以下の3つの plexus がある: anterior dural plexus (anterior group)、middle dural plexus (cerebellar group)、posterior dural plexus (occipital group)。これらはそれぞれ telencephalon + diencephalon + mesencephalon、metencephalon、myelencephalon の毛細血管叢に相当し、初期には telencephalon は発達していない。Fig 2A. 次に聴胞 otic vesicle と三叉神経節 trigeminal ganglion が急速に発達するため、聴胞の外側と三叉神経節の内側を走行する primary head vein はその初期走行の変更を迫られ、otic

vesicleの背側に新たな流出路の吻合が形成され、middle dural plexusは、posterior dural plexusへ導出されるようになる。**Fig2B.** anterior dural plexusとmiddle dural plexusが融合し、新たに形成されたotic vesicleの背側のルートを通り導出されるようになる。脳の発達とともにprimary head sinusが神経根を跨ぎながら、内側から側方(外側)への移動する(lateral migration)。三叉神経節と聴胞間のprimary head veinは閉塞し、海綿静脈洞部と内頸静脈 internal jugular veinとなる部分のみが残る。眼胞 optic vesicleからは眼静脈orbital veinを介して海綿静脈洞に導出されるようになる。anterior dural plexusの基部(stem)は、middle cerebral veinsと海綿静脈洞の間の吻合として残る。(Padgetはこの部は消退し、その役割は、小さなdural sinusで、後に発達するprimitive tentorial sinusへ移行するとしている)。海綿静脈洞からは当初のmiddle dural plexusの基部を逆流する上錐体静脈洞superior petrosal sinusが形成され(Padgetはこの部をpro-otic sinusと記載し、血流方向は同様に逆転するとしている)、聴胞の背側に形成された横静脈洞transverse sinus(sigmoid sinusは横静脈洞の尾側部と考える)へ流入するようになる。**Fig.2C.** さらに下錐体静脈洞inferior petrosal sinusが形成される。終脳が大きく拡大するためanterior dural plexusから前方に向けsagittal plexus(上矢状静脈洞superior sagittal sinus)が形成され、さらにその腹側には直洞straight sinusが形成され、torcular Herophiliに集まる。**Fig.2D.** Posterior dural plexusは最終的にoccipital sinusになる。(Padgetによるとposterior dural plexusはmarginal sinusになり、occipital sinusはmiddle dural plexusとposterior dural plexus間の吻合の遺残とされる)。上矢状静脈洞は左右にある2つの静脈channelから形成されるが、一方が拡大し、他方が退縮する様式(Padget)と両者が融合する様式(Streeter)が考えられている。

横静脈洞は、胎生3ヶ月の頃は、まだ小さく、大脳半球の発達とともにその位置はさらに下降していく。その径は胎生4.5ヶ月まで一律であるが、この頃、外側から拡張(ballooning)を始め、1-1.5ヶ月間に正中のtorcular Herophiliに達する。このballooningは上矢状洞の遠位部や上錐体静脈洞にも及び、横静脈洞の拡張は胎生7ヶ月には停止する。横静脈洞は、出生後1歳までに径が減少し、大人の形態に近づく¹⁸⁾。この硬膜静脈洞の形成過程での異常によりdural sinus malformation(硬膜動静脈瘻の一種)が起り、その一部にmeningeal arteryが著明に拡張した静脈洞にAV shuntを作る。横静脈洞からtorcular Herophiliの部位に起こることが多く、出生前に診断されることも多い¹²⁾。

4. 小脳テントとprimitive tentorial sinus

小脳テントtentorium cerebelliは、大脳cerebral hemisphereと小脳cerebellar plate(大脳より発達が遅れる)を分ける構造で、小脳を上からカバーするとともに、後頭葉を下から支持し、大脳半球の重量を支えるために発達する。小脳テントは、脳幹周囲のcerebro-cerebellar fissureの両側に硬膜の折れ込みとして系統発生的には比較的新しく出現した構造であり、その後、脳幹の背側

で融合し、さらに直洞により延長する経過を辿る⁹⁾。Tentorial hiatusの前半分には中脳があり、後半には脳梁膨大部 splenium of corpus callosumがある。この小脳テントは、鳥類と哺乳類には認められるが、魚類、両生類、爬虫類には認められない。大脳鎌 falx cerebriの後方がtentoriumにつながって初めて直静脈洞が発達することや哺乳類の中でネコだけにtentoriumの骨化が認められるのは興味深い。下等動物では、頭蓋骨の底面全体で脳の重さを支えているが、立位歩行をする動物では、脳底全体で支えることが出来ず、小脳テントによる支えを必要とし、哺乳類では後頭葉の発達も小脳テントの発達に関連している³⁾。

Tentorium cerebelliの発生は脳静脈の発生を理解する上で重要である。発生初期にその中を走るprimitive tentorial sinusがanterior dural plexusの重要な導出路であり、それがbasal veinに移行されるため、その過程でのvariationがそのままbasal veinを中心とする深部静脈系のvariationとなる。またtentorial sinusとsuperficial telencephalic veinの関係も、その後の大脳の表在静脈系の導出パターンのvariationに関係してくる。ヒトのtentorial sinusは、他の哺乳動物での嗅球からの静脈や中大脳静脈を集め、横静脈洞に導出する後嗅脳静脈posterior rhinencephalic veinに相当する。

5. 脳静脈 pial veinの基本構築

テント上の静脈系は、表在性脳静脈と深部脳静脈に分類できる。前者は新皮質 neocortexからの静脈を集めるともいえる。テント下の静脈系は、上方(superior Galenic drainage)、前方(anterior petrosal drainage)、後方(posterior tentorial drainage)に導出する3系統の静脈に分類できるが、発生学的にanterior drainageが基本型である。また、テント上、テント下ともに、表在性脳静脈と深部脳静脈の間には、髄質静脈 medullary veinがあり、脳表と深部の静脈間の重要な側副路となり得る。

5-1. テント上の表在性脳静脈

終脳は哺乳類の発生過程で外側後方に向け大きく体積を増すため、superficial(lateral)telencephalic veinとdeep(medial)telencephalic veinの2静脈を介し血流を導出するようになる。Deep telencephalic vein(deep middle cerebral vein)は、fetal Sylvian fissure内のpial veinでありbasal veinのfirst segmentに流入する。Superficial telencephalic veinは、dural originの脳表の静脈として、superficial Sylvian vein (superficial middle cerebral vein) を介して脳静脈洞に導出される。さらに拡大する大脳の静脈還流を行なうためにanterior anastomotic vein of Trolard (frontoparietal vein or precentral vein)とposterior anastomotic vein of Labbe (temporooccipital vein)が発達し、上矢状静脈洞や横静脈洞に導出される。後二者の静脈は、great anastomotic veinと呼ばれるように、superficial Sylvian veinと大脳半球の表面でreciprocalな関係を保ちながら吻合している。**Fig3.** Anterior dural plexusの基部は退縮し、その領域からの還流の一部を担うようになるsuperficial middle cerebral veinは、primitive

tentorial sinusに流出するようになるが、その退縮とともに導出パターンが変化し、cavernous sinus drainageやparacavernous sinus drainage(superior petrosal sinus, transverse sinus, pterygoid plexus へのdrainageを合わせたもの)の形をとる。つまり個体によりその海綿静脈洞への導出の度合いやパターンが異なる。superior petrosal sinusに向かう場合、sphenopetrosal veinとも呼ばれ、transverse sinusに向かう場合、sphenobasal veinとも呼ばれる。これらの静脈の呼称は出典により異なるため注意が必要である。

superficial middle cerebral veinの導出パターンは、1. middle meningeal veinの流出路であるsphenoparietal sinus of Brechetに流入し、さらに海綿静脈洞に流入するmedial type, 2. 海綿静脈洞に直接流入せず、海綿静脈洞の外側の硬膜間のlaterocavernous sinusに流入するintermediate type, 3. 全く海綿静脈洞の外側を走行するlateral typeに分けられる²³⁾。これらの導出静脈のpatternの混合型も存在する。これは発生学的には、superficial middle cerebral veinが、そのままtentorial sinusに流入する古いパターンが残存するか(図のroute 1), それともより新しいパターンである海綿静脈洞に取り込まれる” cavernous sinus capture” が起こるか(図のroute 4)で説明される。眼静脈からの導出はmedial routeが使われ、大脳半球からの導出は、基本はlateral routeが使われる。このcavernous sinus captureは出生後に発達するとされるが、実際はより早い時期に発達する可能性が高い。中頭蓋窩からの流出路は、sphenoid emissary vein (of the foramen ovale)やaccessory sphenoid emissary vein (of the foramen of Vesalius)を経由し頭蓋外に出て、顔面や頭蓋外の静脈と一緒に外頸静脈 external jugular veinを形成する。多くの哺乳類ではこの外頸静脈が主な流出路となり、内頸静脈が相対的に小さいため、前者はspurious jugular veinとも呼ばれる。(spurious: 偽の)。幼児の硬膜動静脈瘻infantile dural arteriovenous fistulaは、横静脈洞の閉塞が起こりやすく、静脈還流は上矢状静脈洞からsuperficial middle cerebral veinを逆流し、海綿静脈洞に入り、大半がさらに眼静脈への導出ルートをとることがあり重要な側副路となる。これにより精神発達の遅延だけでなく、眼球突出や鼻出血が認められる。

5-2. 髄質静脈 medullary vein

大脳のparenchymaにおける脳室から大脳皮質へ続くmedullary venous patternの形成は、germinal layerから大脳皮質までの神経細胞移動 neuronal migrationと強く関連している。この神経細胞移動は、胎生8週に始まり、概ね16週ごろに終了するが、その後も僅かであるが25週まで続くことされる。大脳のmedullary veinは、白質内に存在し、その部位と血流の方向によりsuperficial groupとdeep groupに分けることができる。Fig4. Superficial medullary veinは灰白質の1-2cm下から始まり、脳表のpial veinに導出する。Deep medullary veinは、前者より太くsuperficial groupをほぼ同じ部位から始まり、側脳室に向い、subependymal veinに流入する。脳表のpial

veinから傍脳室のsubependymal veinまで連続する場合は、intracerebral anastomotic veinやtranscerebral veinとも呼ばれる⁶⁾。

Medullary veinのextreme variationが、developmental venous anomaly, いわゆるvenous angiomaであり、abnormalityではないとされる¹⁷⁾。動静脈シャント疾患でのleptomeningeal refluxや静脈洞閉塞などの病的状態の時に、このmedullary veinが深部静脈系と脳表静脈の間の側副路になることがある。病態によってどちらの方向にも流出が可能である。例えば、硬膜動静脈瘻に両側横・S状静脈洞閉塞が合併した症例では、直静脈洞 → 内大脳静脈 → 上衣下静脈 → medullary vein → 側頭葉内側の皮質静脈 → 海綿静脈洞 → 眼静脈のルートが認められることがあり、海綿静脈洞部の硬膜動静脈瘻に皮質逆流が合併した症例では、海綿静脈洞 → 深中大脳静脈 → 前大脳静脈 → medullary vein → 上衣下静脈 → septal vein → 内大脳静脈のルートが認められることがある。

5-3. テント上の深部脳静脈

脳深部の静脈系は、脳表の静脈よりもその走行にはvariationは少なく、中心に向け、その太さを増しながら、subependymal veinに集まり、さらに内大脳静脈または基底静脈に集まり、最終的にvein of Galenから直静脈洞へ導出される。内大脳静脈系と基底静脈系に分類でき、これらは発生初期の脳室内の脈絡叢からの流出路として、内大脳静脈系がsuperior choroidal veinの静脈系流出路として、また基底静脈系がinferior choroidal veinからの静脈流出路と考えることができる。deep medullary veinは傍側脳室に向かい、subependymal veinに直接入るが、そうでない場合は、脳室の上外側のlongitudinal caudate vein of Schlesingerに入り、さらにthalamostriate veinに入る。subependymal veinは、脈絡裂choroidal fissureを境に内側群medial groupと外側群lateral groupに分けることができる。

5-3-1. 内大脳静脈系

神経管が閉塞する胎生26日以降は、神経管の表面のmeninx primitivaと神経管の内部(神経管閉塞後は脳室)のchoroidal plexusが重要な栄養の供給ルートとなり、後者の栄養はanterior choroidal arteryが行い、そのdrainageには、当初inferior choroidal veinからventral diencephalic veinへ流出するが、その後(CRL40mmの頃)inferior choroidal veinからsuperior choroidal veinへその役割を移し、間脳の背側に形成される一本のmedian vein of prosencephalon of Markowski (primitive internal cerebral vein)が血流を集めるようになる。Fig.5A. さらにbasal gangliaの発達とともに、そこからの血流が増え、一対の内大脳静脈internal cerebral veinが発達し、median vein of prosencephalonの後方につながり、第11週までには内大脳静脈がmedian vein of prosencephalonに置き換わり、脈絡叢の還流は内大脳静脈を介することになる(choroidal drainageのinternal cerebral vein capture)。内大脳静脈のmedian vein of prosencephalonへの接合点より前方は退縮し(cranial regression)、後方

が残存しvein of Galenとなり、直静脈洞につながる。**Fig.5B**. 内大脳静脈系の静脈であるthalamostriate vein, septal vein, superior choroidal veinは、interventricular foramen of Monroで集まり、内大脳静脈に流入するのに見えるが、発生学的には脈絡叢からの還流がsuperior choroidal veinとそれに連続する内大脳静脈に流出すると見ることが出来る。

内大脳静脈の形成過程でmedian vein of prosencephalonが遺残した場合、vein of Galen aneurysmal malformation (VGAM)となる²²⁾. そのAV shuntはchoroidal fissure内のクモ膜下腔に存在し、多数の栄養動脈が一度、集まり静脈瘤に流入するchoroidal typeと数本の栄養動脈が直接、静脈瘤の壁に流入するmural typeがあり、前者の方がより未熟な血管構築とされ、その移行型も存在する。基本的にその導出路与正常な深部静脈系とのつながりはない。直静脈洞の無形成やfalcine sinusの遺残が認められることが多い。正常なガレン静脈系に脳動静脈奇形や動静脈瘻のシャント血流が流入し、ガレン大静脈が拡張するvein of Galen aneurysmal dilation (VGAD)との鑑別は重要である。Pial AV shuntが深部静脈系につながる事がVGAMとの鑑別点であるが、falcine sinusの存在は鑑別点にならない。

5-3-2. 基底静脈系

Basal veinの発生は、他の脳静脈の形成より遅れ胎生3ヶ月の頃に始まる。それまで主にprimitive tentorial sinusから横静脈洞に導出していた静脈(primary transverse cerebral veins)が、縦方向(頭尾方向)につながり、2次的に形成される静脈(secondary longitudinal anastomosis)である。Tentorial sinusのbasal vein captureといえる。primary transverse cerebral veinsには、deep middle cerebral veinやanterior cerebral veinなどのtelencephalic veinや脈絡叢からのventral diencephalic vein, dorsal diencephalic vein, posterior mesencephalic veinなどがある。大脳半球がC字型に拡大し、tentorial sinusは延ばされ、遠位部が閉塞すると、basal veinにその導出が委ねられる。この時点で、残存するtentorial sinusはsuperficial middle cerebral veinからの血液を主に導出することになる。

基底静脈は、3つの発生学的に異なる部分から形成される。first portionは、telencephalic segment, second portionはdiencephalic segment, third portionはmesencephalic segmentとも呼ばれ、その名称にちなむ部位からの静脈流出路になる。**Fig6A**. 発生学的に異なる部位の連続から形成されるため、variationがあり、telencephalic segmentとdiencephalic segmentの間は不連続になることが時々認められ、より頻度は減るが、diencephalic segmentとmesencephalic segmentの間の不連続も認められる。これを形成不全と呼ぶことがあるが、variation(fragmentation)であり形成不全ではない。telencephalic segmentとdiencephalic segmentの間は不連続の場合は、telencephalic segmentと近傍の静脈(petrosal veinやpeduncular vein・anterior pontomesencephalic vein)との間に側副路が存在する²⁾。

重症の頭部外傷・脳出血や脳腫瘍によるtentorial herniationは、単にmass effectによる脳幹部の圧迫症状だけでなく、tentorial incisuraの近傍を走行するbasal veinの圧迫による静脈の還流障害も重要な要因である¹⁾。

系統発生学的には、ヒトのbasal veinは、テント上の内大脳静脈やvein of Galenに導出するのが、最も進化した形(medial drainageまたはsupratentorial drainage:図のpattern 1で、より原始的な導出パターンは、bridging veinからtentorial sinusに導出し、さらにtorcular近傍や横静脈洞に流入する(tentorial drainage:図のpattern 2,3. 最も原始的な導出パターンは、テント下へlateral mesencephalic veinから、petrosal veinを介して導出される(lateral drainageまたはinfratentorial drainage:図のpattern 4. **Fig6B**. このようにtransverse veinsが、新しく形成されるlongitudinal veinに集まり、新しい血管構築が形成されるステップの原型は脊髄におけるsegmental veinsが分節性を失い(de-segmentation), anterior/posterior spinal veinsが形成されるステップと同様であり、脳幹のそれと同様である。横静脈洞やsuperior petrosal sinusへ導出される場合、basal veinは一般的な3つのsegmentからなる形態ではなく、disconnectionのvariationを伴い、first segment-second segment間か、second segment-third segment間のdisconnectionが存在する。このvariationがあるためfirst segmentに流入した血流が、vein of Galenに流出する場合もあれば、lateral mesencephalic veinを介してか、それ以外に直接petrosal veinに流出し、小脳の静脈やpetrosal sinusへ流出する場合もある。Basal veinにvariationが多いのは、primary transverse veinsよりも発生時期が遅く、secondary longitudinal anastomosisを形成するためである。

VGAMにおいて治療により動静脈シャントが消失した場合の深部静脈系の導出路や脳静脈洞血栓症や幼児の硬膜動静脈瘻などで両側の横静脈洞が閉塞し、直静脈洞を逆流した場合、深部静脈系の流出パターンには別の深部静脈経由と髄質静脈経由の2通り考えられる。前者にも2通りあり、VGAMのシャントが治療により閉塞した場合、ガレン静脈部がないため、internal cerebral vein- superior/posterior thalamic veins-second segment of the basal vein-lateral mesencephalic vein-上錐体静脈洞またはsecond segment of the basal vein - tentorial sinusを利用して横静脈洞に導出される。右側面像での形状がε(イプシロン)に似るので、ε signと呼ばれる。また深部静脈系の側副路を逆流する場合もあり、例えば、直静脈洞閉塞の症例では、ガレン静脈 → precentral cerebellar vein → collateral → petrosal vein → 上錐体静脈洞やガレン静脈 → internal occipital vein → 上矢状静脈洞などの流出路がある。髄質静脈経由は、硬膜動静脈瘻でよく認められ、深部静脈系が直接transcerebral veinを介し、表在脳静脈系に導出される場合やstriatumの transcerebral vein(髄質静脈とはいえないか)anastomotic vein)を介して、internal cerebral veinからdeep middle cerebral vein さらに海綿静脈洞に導出される場合がある。

5-3-3. Trolardの静脈輪とmesencephalic heart

脳動脈にWillis動脈輪があるように、脳静脈にも前後、左右の脳底部の静脈を結ぶTrolard静脈輪(venous circle of Trolard)がある²⁴⁾。その発達には、個体差があるが、側副路として重要である。前交通静脈-前大脳静脈-深中大脳静脈-basal veinのfirst segment - peduncular vein - 後交通静脈で半周する。Fig7. Willis動脈輪との関係は、動脈輪の方が、静脈輪よりも、より脳底側にある。つまり静脈輪の方が、脳実質に近い側にある。(脳動脈は、脳静脈よりも表層に形成されるのが原則である)。Trolard静脈の前後像では、脳幹を取り囲むハート形の側副路(mesencephalic heart)がある。後交通静脈 - peduncular vein - basal veinのfirst and second segments - great vein of Galenでハートの半分が描かれる。こちらも重要な側副路となる。このように静脈系では側副路が発達しており病変部位と異なる部位の症状を呈することがあり(pseudo-localizing sign)、注意が必要である。例えば、前頭蓋底の硬膜動静脈瘻で、後頭蓋窩にクモ膜下出血が起こったり、海綿静脈洞の硬膜動静脈瘻で、前頭葉や側頭葉に脳出血が起こったりする。

5-4. 後頭蓋窩の脳静脈

後頭蓋窩の静脈の形成もtransverse veinsが、より後で形成される両側のlongitudinal veinsに移行されるpatternをとる。つまり当初、多数あるtransverse veins (metencephalic, myelencephalic veins)が最終的に3本の静脈、つまりtrigeminal, vagal, hypoglossal veinsになり、basilar arteryの両側を並走するventral longitudinal veinsに移行される¹⁹⁾。Basal veinにdisconnectionのvariationがあったように、ventral longitudinal veinsにduplicationやdisconnectionのvariationが起りやすいのも、この静脈系の発生様式や時期が遅いことから明らか説明できる。

後脳の翼板 alar plateから形成される小脳の発達は大脳より遅れ、その基本の導出静脈は、ventral metencephalic veinが担い、これは脊椎動物のtrigeminal veinに相当する。前方に導出されるためanterior cerebellar veinと呼ばれるpetrosal (petrous) veinで、最も安定した小脳の静脈で上錐体静脈洞に流入する。また遅れて小脳とともに発達する残る小脳の導出路であるposterior cerebellar group (superior/inferior/lateral tributaries)は、横静脈洞に直接流入せず、intratentorial sinusを介してtorcular Herophili近傍の横静脈洞に入る構造をとる。

後頭蓋窩を縦方向に結ぶ静脈が、腹側のanterior pontomesencephalic veinとanterior medullary veinであり、側方にanastomotic lateral mesencephalic veinがある。後者は、発生学的には、ventral mesencephalic veinとventral metencephalic veinの間の吻合で、basal veinとpetrosal vein間を結ぶ重要な吻合である。またanterior pontomesencephalic veinとanterior medullary veinは、縦方向にはanterior spinal veinにつながり、横方向にはtransverse pontine veinやbridging veinなどのanastomosesを介して海綿静脈洞、上錐体静脈洞、下錐体

静脈洞、suboccipital cavernous sinusなどと交通性を持ち、その吻合にはvariationが多い⁸⁾。

6. 導出静脈 emissary vein

発生初期の導出静脈 emissary veinは、頭蓋外の組織から内側へ向かい原始静脈洞への静脈還流を担い、その基部に軟骨性頭蓋chondrocraniumが形成されるため、emissary foramenを通るようになり、その後、血流方向が逆転し、頭蓋内から頭蓋外に向けて流れるようになる。Hypoglossal emissary veinは、上位頸髄からventral myelencephalic veinへの導出を担い、condylar emissary veinは、深頸静脈や椎骨静脈などの上位頸髄のより表層からS状静脈洞への導出を担い、mastoid emissary veinは後頭部の筋肉から前者のちょうど頭側のS状静脈洞への導出を担う。これらhypoglossal, condylar, mastoid emissary veinsは、頭蓋内静脈と椎体周囲の静脈を結ぶ側副路として重要である。Primary head veinの枝であるdorsal pharyngeal veinは、primary head veinが閉塞するためpro-otic sinusの枝となる。Pterygoid plexusを形成する深顔面静脈deep facial veinの枝とpharyngeal veinの外側枝が吻合することでsphenoid emissary vein (of the foramen ovale)が形成される。これら導出静脈は、正常脳静脈の流出路になる場合以外に、病的なシャントの流出路になることがある。また硬膜静脈洞のない部位であるemissary veinやその周囲に硬膜動静脈瘻が起こることがあり、舌下神経管部の硬膜動静脈瘻もhypoglossal emissary veinに関連しており、これらの疾患を同じような視点で捉えることができる²¹⁾。

Abstract: Spinal radicular veins develop in a metameric fashion whereas spinal radiculomedullary veins (emissary draining veins) are not always formed in such a manner. Development of the cerebral veins does not parallel to that of the cerebral arteries. Paired primary head veins developed at both sides of the neural tube collect blood from the primitive dural plexuses. After the closure of the neural tube, initial choroidal drainage to the median vein of prosencephalon is transferred to the paired internal cerebral veins and the great vein of Galen. Dorsolateral enlargement of the cerebrum requires development of tentorium cerebelli. Tentorial sinus within the tentorium initially receives blood transversely from telencephalon, diencephalon, and mesencephalon, and transfers its role to the longitudinally formed basal vein (basal vein capture). Subsequently, superficial Sylvian vein draining to the tentorial sinus is captured to the cavernous sinus to a variable degree following distal regression of the tentorial sinus. Superficial cerebral veins (Sylvian, Trolard, and Labbe) establish enough cortical anastomoses each other. Variations of drainage patterns of the basal vein, cavernous sinus capture, collateral at the base of

the brain (Trolard circle), development of transcerebral medullary veins provide various clinical pictures in cerebral venous pathologies. Understanding of the functional anatomy of the cerebral and spinal veins is essential for the interpretation of the pathophysiology of the cerebral and spinal (arterio-)venous diseases and for the safer treatment.

Key Words: cerebral vein, spinal vein, dural sinus, embryology, functional anatomy

参考文献

- 1) Andeweg J: Consequences of the anatomy of deep venous outflow from the brain. *Neuroradiology* 41:253-241, 1999
- 2) Babin E, Megret M: Variations in the drainage of the basal vein. *Neuroradiology* 6:154-161, 1973
- 3) Bull JW: Tentorium cerebelli. President's address. Section of radiology. *Proc R Soc Med* 62:1301-1310, 1969
- 4) Daniel PM, Dawes JDK, Prichard MML: Studies of the carotid rete and its associated arteries. *Phil Trans Roy Soc London, Ser B*, 237:173-208, 1953
- 5) Evans HM: The development of the vascular system. In: Keibel F, Mall. Eds, *Manual of human embryology*, vol 2, Philadelphia, JB Lippincott, 1912, pp 570-708.
- 6) Huang YP, Wolf BS: Veins of the white matter of the cerebral hemispheres (the medullary veins). Diagnostic importance in carotid angiography. *Am J Roentgenol Rad Ther* 92:739-755, 1964
- 7) Huang YP, Wolf BS: The basal cerebral vein and its tributaries, in Newton TH, Potts DG (eds): *Radiology of the Skull and Brain*, Vol II, St Louis: CV Mosby, 1974, Book 3, pp 2111-2154
- 8) Kiyosue H, Tanoue S, Sagara Y, Hori Y, Okahara M, Kashiwagi J, Nagatomi H, Mori H: The anterior medullary – anterior pontomesencephalic venous system and bridging veins communicating to the dural sinuses: normal anatomy and drainage routes from dural arteriovenous fistulas. *Neuroradiology* 50:1013-1023, 2008
- 9) Klintworth GK: The comparative anatomy and phylogeny of the tentorium cerebelli. *Anat Rec* 160:635-642, 1968
- 10) 久保道也, 堀江幸男, 林 央周, 桑山直也, 遠藤俊郎: 頭蓋底静脈の読影, Venous cross roadの重要性を中心に. *脳外誌* 17:745-753, 2008
- 11) 小宮山雅樹: 脳血管内治療に必要な解剖学的知識: 機能的脳血管解剖. *脳外誌* 13:116-125, 2004
- 12) Komiyama M, Ishiguro T, Kitano S, Sakamoto H, Nakamura H: Serial antenatal ultrasound observation of cerebral dural sinus malformation. *AJNR Am J Neuroradiol* 25:1446-1448, 2004
- 13) 小宮山雅樹: 脳血管の機能解剖. *脳外* 33:213-224, 2005
- 14) 小宮山雅樹: 脊髄血管の機能解剖. *脊椎脊髄* 21:972-981, 2008
- 15) 小宮山雅樹: 脳静脈の機能解剖. *脳外誌* 18:821-829, 2009
- 16) 小宮山雅樹: 脳脊髄血管の機能解剖. 詳細版, メヂィカ出版, 大阪, 2011
- 17) Lasjaunias P, Burrow P, Planet C: Developmental venous anomalies (DVA): the so-called venous angiomas. *Neurosurg Rev* 9: 233-244, 1986
- 18) Okudera T, Huang YP, Ohta T, Yokota A, Nakamura Y, Maehara F, Utsunomiya H, Uemura K, Fukasawa H: Development of posterior fossa dural sinuses, emissary veins, and jugular bulb: morphological and radiological study. *AJNR Am J Neuroradiol* 15: 1871-1883, 1994
- 19) Padget DH: The development of the cranial arteries in the human embryo. *Contrib Embryol* 32: 205-261, 1948
- 20) Padget DH: The development of the cranial venous system in man, from the viewpoint of comparative anatomy. *Contrib Embryol* 36: 79-140, 1957
- 21) Piske RL, Lasjaunias P: Extrasinusal dural arteriovenous malformations. *Neuroradiology* 30:426-432, 1988
- 22) Raybaud CA, Strother CM, Hald JK: Aneurysms of the vein of Galen : embryonic considerations and anatomical features relating to the pathogenesis of the malformation. *Neuroradiology* 31:109-128, 1989
- 23) San Millán Ruiz D, Gailloud P, de Miquel Miquel MA, Muster M, Dolenc VV, Rufenacht DA, Fasel JH: Laterocavernous sinus. *Anat Rec* 254:7-12, 1999
- 24) Shane TR, Loukas M, Shoja MM, Salter EG, Oakes WJ: The venous circle of trolard. *Bratisl Lek Listy* 109:180-181, 2008
- 25) Streeter GL: The development of the venous sinuses of the dura mater in the human embryo. *Am J Anat* 18:145-178, 1915

Figure Legends

Fig 1. Embryology of the spinal vessels.

A: Paired dorsal aortas (DA) have the ventral (VB), lateral (LB), and dorsal branches (DB), which supply the GI tract, Wolffian bodies (kidneys) and the neural tube (NT), respectively. NC, notochord.

B: Initial spinal vessels are formed in a metameric fashion. Paired aortas fuse into one aorta. Primitive capillary plexus (CP) is formed in the ventro-lateral aspects of the spinal cord, which drains into the

paired posterior cardinal veins(PCV).

Fig. 2. Embryology of the cerebral dural sinuses.

A: At the stage of Crown-Rump Length(CRL)4 mm. Three primitive dural plexuses drain into the primitive head vein.

B: At the stage of CRL 18 mm. Due to the outgrowth of the otic vesicle and trigeminal ganglion, the course of the primitive head vein becomes unfavorable, leading to the new anastomosis formation dorsal to the otic vesicle(future transverse-sigmoid sinus). The middle dural plexus drains into the posterior one. The anterior dural plexus fuses with the middle one and drains into it.

C: At the stage of CRL 21mm. After segmental occlusion of the primary head sinus between the trigeminal ganglion and otic vesicle, the original stem of the middle dural plexus(now superior petrosal sinus)receives the retrograde flow from the cavernous sinus to the newly formed transverse sinus.

D: At the stage of CRL 50 mm. Inferior petrosal sinus appears. From the anterior dural plexus, sagittal plexus develops forming the superior sagittal sinus. Straight sinus is also formed from the sagittal plexus.

ADP: anterior dural plexus, CS: cavernous sinus, IJV: internal jugular vein, IPS: inferior petrosal sinus, MDP: middle dural plexus, OpV: optic vesicle, OrV: orbital vein, OtV: otic vesicle, PDP, posterior dural plexus, PHV: primary head vein, SigS: sigmoid sinus, SP: sagittal plexus, SPS: superior petrosal sinus, SSS: superior sagittal sinus, StS: straight sinus, TG: trigeminal ganglion, TH: torcular Herophili, TS: transverse sinus.

Fig.3. Superficial cerebral veins and drainage patterns of the superficial middle cerebral vein.

Vein of Trolard(Tro, frontoparietal vein), superficial Sylvia vein(Sy, superficial middle cerebral vein) and vein of Labbe(La, temporooccipital vein) have enough anastomoses each other. Drainage patterns of the superficial middle cerebral vein are toward the paracavernous sinuses: transverse sinus(TS) through the sphenobasal vein(route1), pterygoid plexus (PP) through the basal foramina(route2), superior petrosal sinus(SPS) through the sphenopetrosal vein (route 3), or the cavernous sinus(CS)(route4). Basal foramina for route 2 include foramen ovale and foramen Vesalius. Route 4 is the most mature form (cavernous sinus capture).

Fig. 4. Medullary veins

Two types of medullary veins are shown: superficial medullary vein (SMV) and deep medullary vein (DMV).

In addition, anastomotic medullary vein (AMV) intervenes between SMV and short DMV, and transcerebral vein (TCV) connects the pial vein (PV) of the brain surface to the subependymal vein at the supero-lateral corner of the lateral ventricle (longitudinal caudate vein). Arrows indicate basic flow patterns of the medullary veins. Ep: Ependyma, IC: intracerebral vein, ICV: internal cerebral vein, TSV: thalamostriate vein, Vent: ventricle.

Fig. 4. Medullary veins

Two types of medullary veins are shown: superficial medullary vein (SMV) and deep medullary vein (DMV). In addition, anastomotic medullary vein (AMV) intervenes between SMV and short DMV, and transcerebral vein (TCV) connects the pial vein (PV) of the brain surface to the subependymal vein at the supero-lateral corner of the lateral ventricle (longitudinal caudate vein). Arrows indicate basic flow patterns of the medullary veins. Ep: Ependyma, IC: intracerebral vein, ICV: internal cerebral vein, TSV: thalamostriate vein, Vent: ventricle.

Fig. 5. Embryology of the internal cerebral vein.

A: Initial choroidal drainage to the ventral diencephalic vein through the inferior choroidal vein (Inf Chor V) is converted to the superior choroidal vein (Sup Chor V), which is drained to the median vein of Prosencephalon. Illustrations is a vertex view.

B: Blood from the basal ganglia to the internal cerebral vein (ICV) increases, and ICV captures the superior choroidal vein after cranial regression of the median vein of Prosencephalon. Remnant of the median vein becomes the vein of Galen.

Fig. 6. Embryology of the basal vein of Rosenthal and its drainage patterns.

Telencephalic(Tel), diencephalic(Di) and mesencephalic (MES) veins drain initially to the anterior dural plexus, which subsequently drain into the primitive tentorial sinus (Tent S) in the tentorium cerebelli, and then to the transverse sinus (TS). Due to outgrowth of the prosencephalon, stretched distal portion of the tentorial sinus is obliterated. Thus, the venous return from the telencephalon, diencephalon and mesencephalon are transferred to the newly formed longitudinal anastomoses: the basal vein (BV). Three transverse veins correspond to the telencephalic, diencephalic, and mesencephalic segments of the basal vein. Distal portions of the basal vein indicate the variable drainage patterns: 1, to the vein of Galen or internal cerebral vein (ICV), 2, to the straight sinus (SS) or torcular Herophili, 3, to the transverse sinus, 4, to the superior petrosal sinus (SPS). CS: cavernous sinus, SMCV: superficial

middle cerebral vein.

Fig. 7. Venous circle of Trolard and three segments of the basal vein

Similar to the arterial circle of Willis, there is a venous circle of Trolard at the base of the brain. This circle provides transverse and longitudinal anastomoses at the skull base. Venous circle is shown by thick lines. Three segments of the basal vein are shown on the left side. Peduncular veins, the second and third segments of the basal veins form “mesencephalic heart”. AcomV:anterior communicating vein, ACV: anterior cerebral vein, APMV: anterior

pontomesencephalic vein, BV: basal vein, DMCV: deep middle cerebral vein, IVV: inferior ventricular vein, LMV: lateral anastomotic mesencephalic vein, OV: olfactory vein, PComV: posterior communicating vein, PV: peduncular vein.

Masaki Komiyama

Department of Neurosurgery Osaka City General Hospital

Address:2-13-22, Miyakojima-Hondori, Miyakojima, Osaka City, Osaka.

Mail: komiyama@japan-mail.com

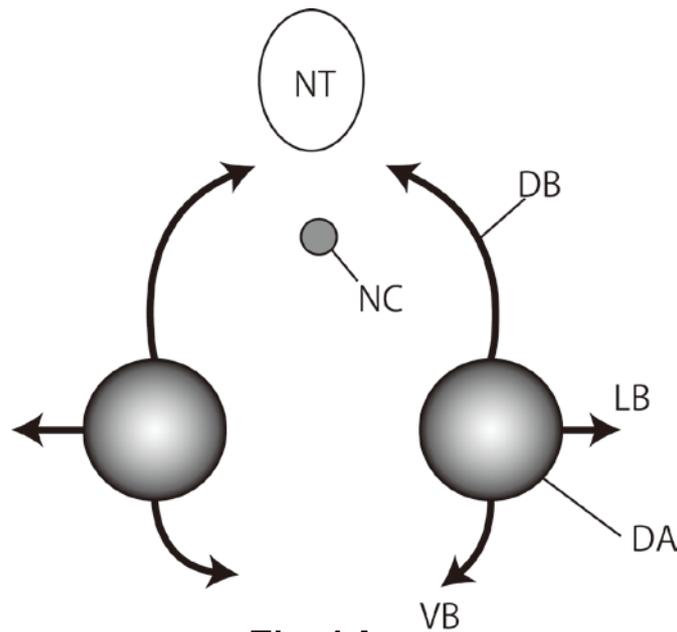


Fig. 1A

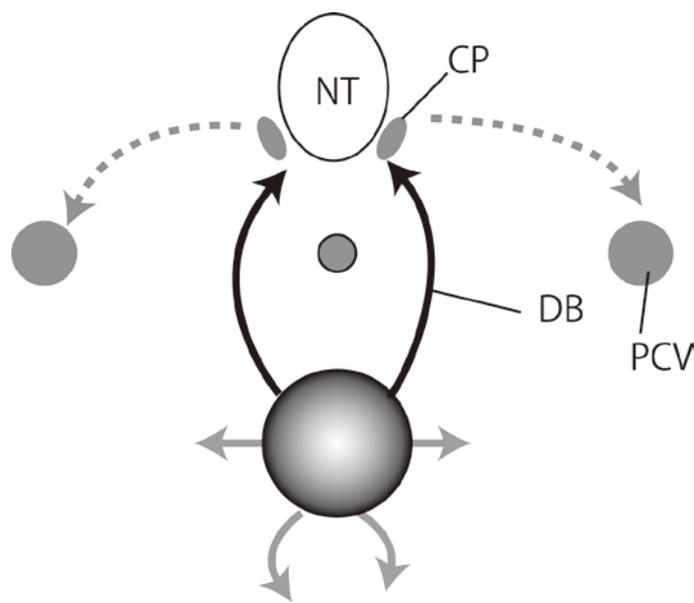
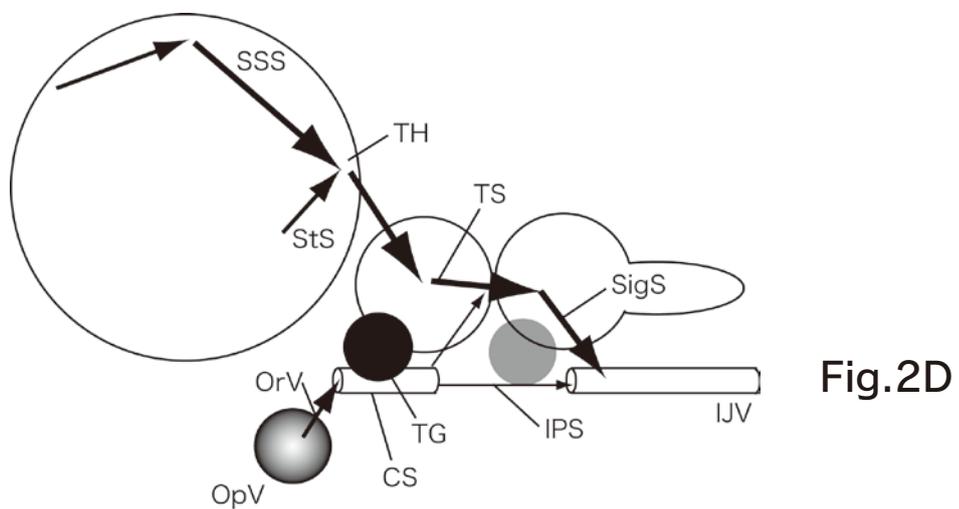
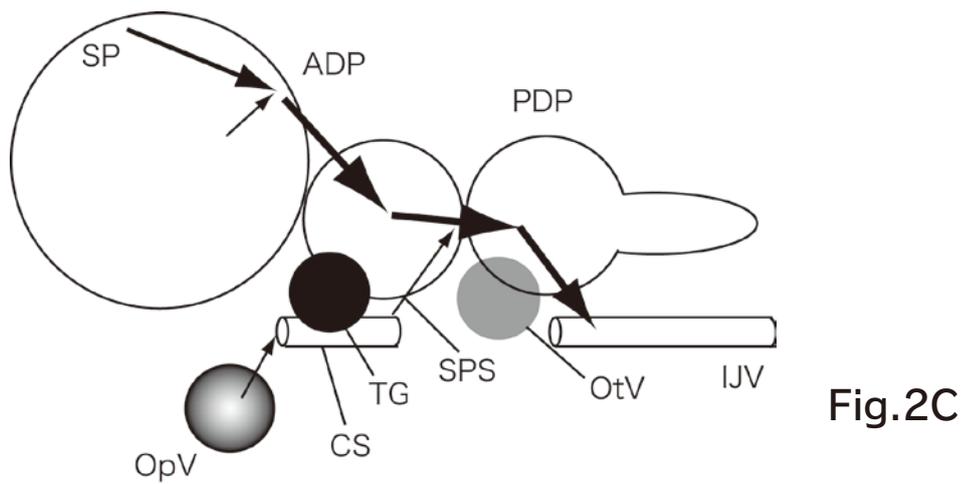
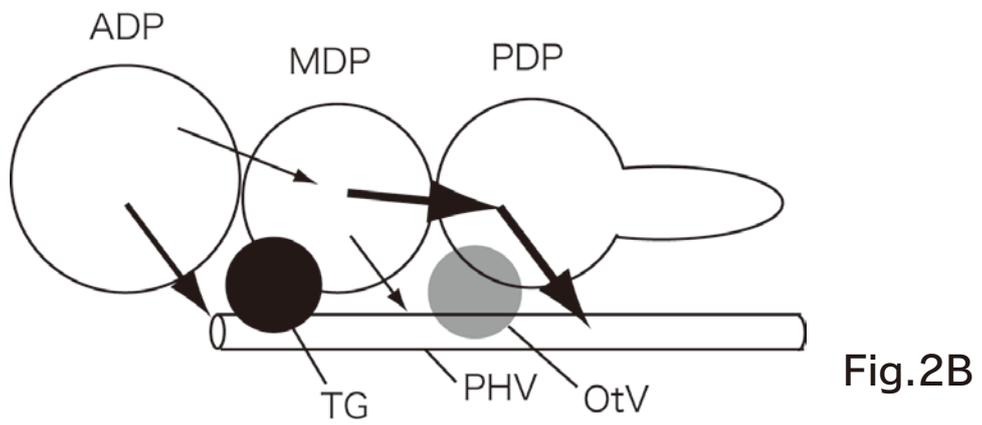
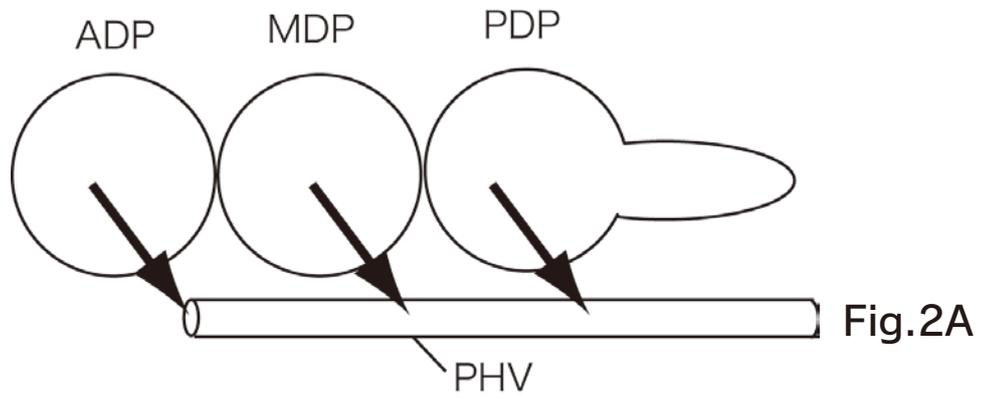


Fig. 1B



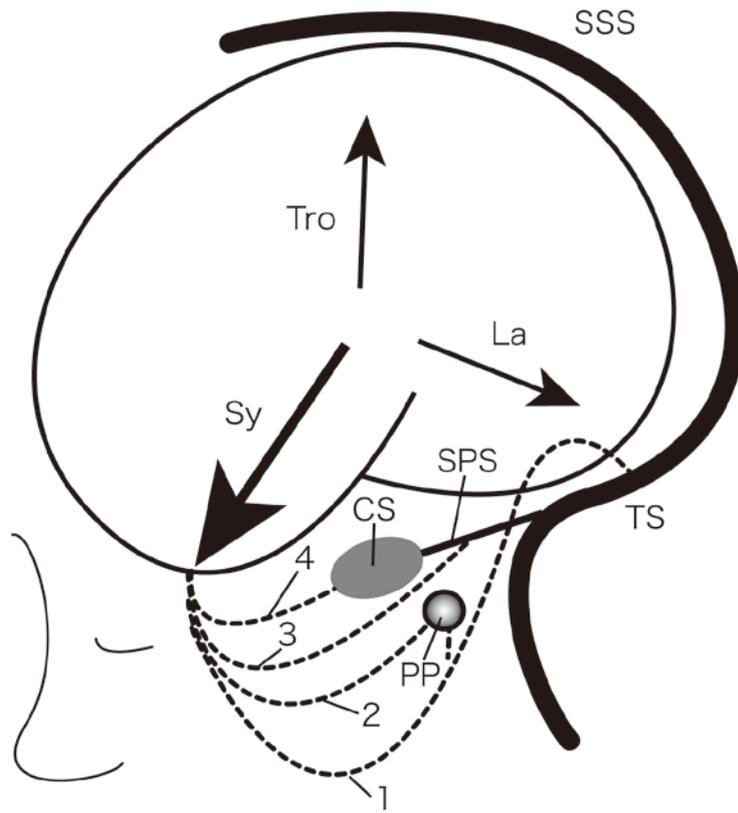


Fig.3

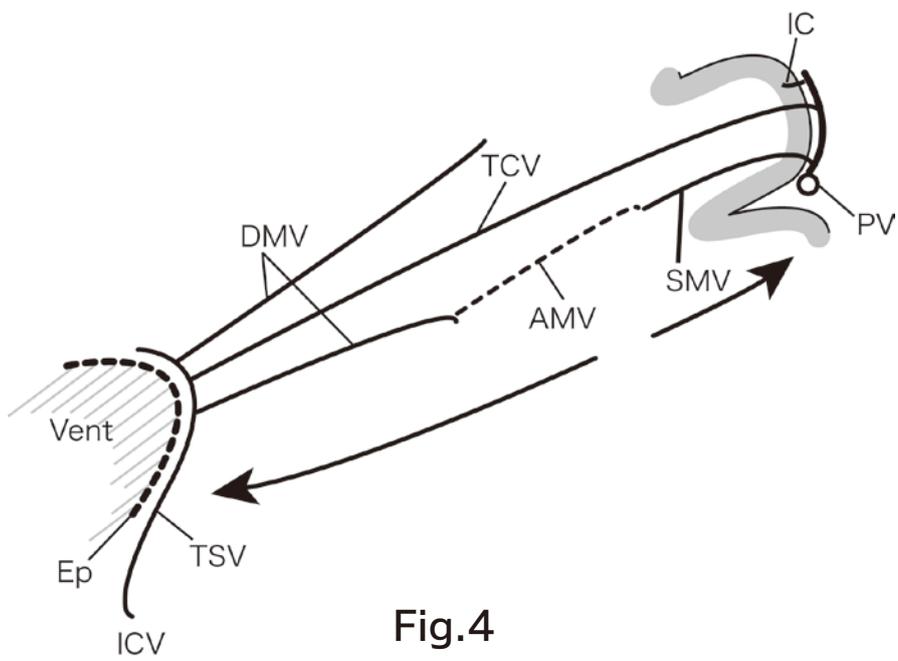


Fig.4

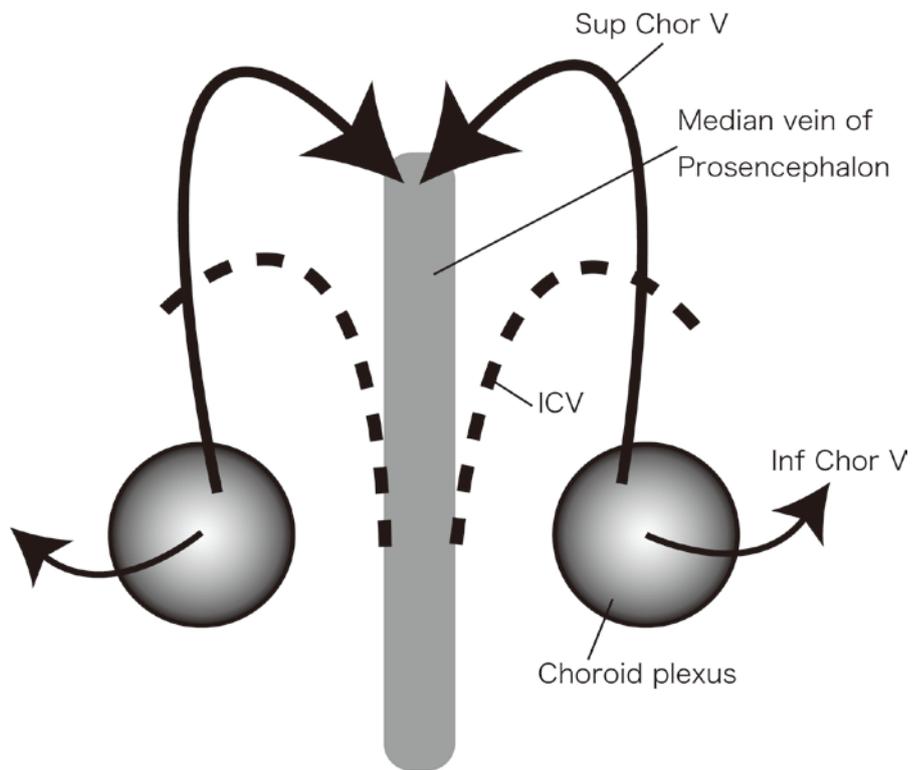


Fig.5A

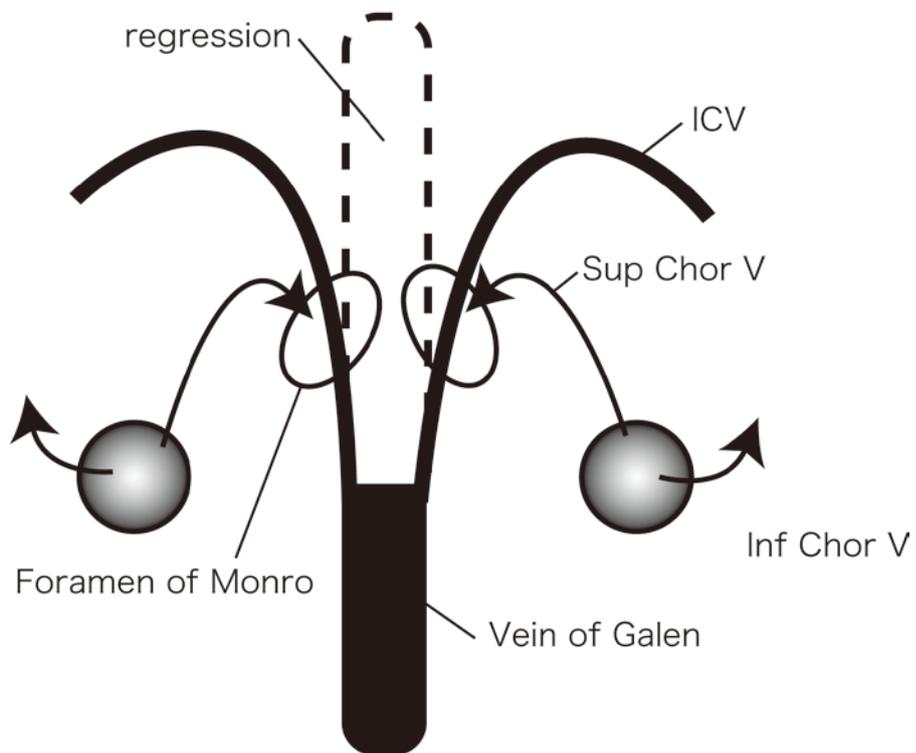


Fig.5B

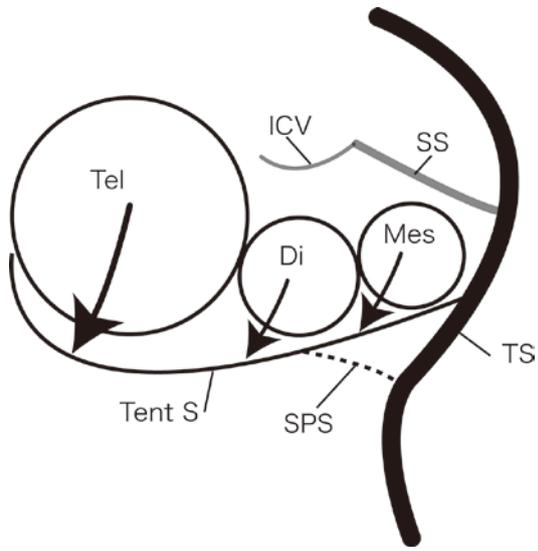


Fig.6A

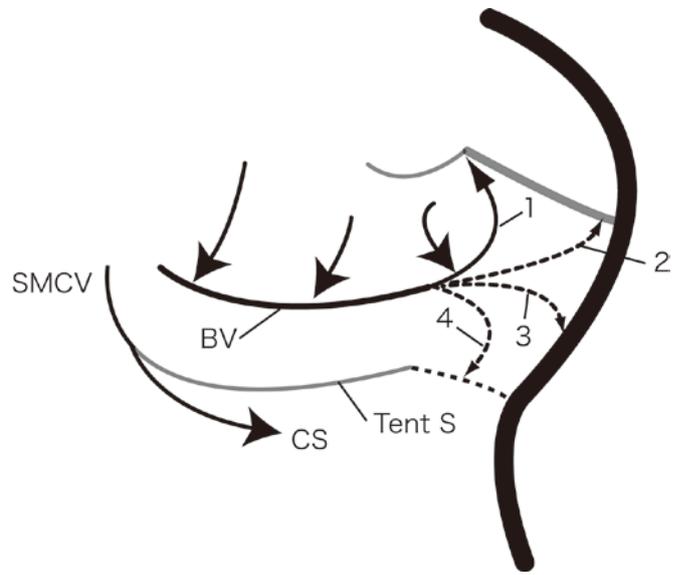


Fig.6B

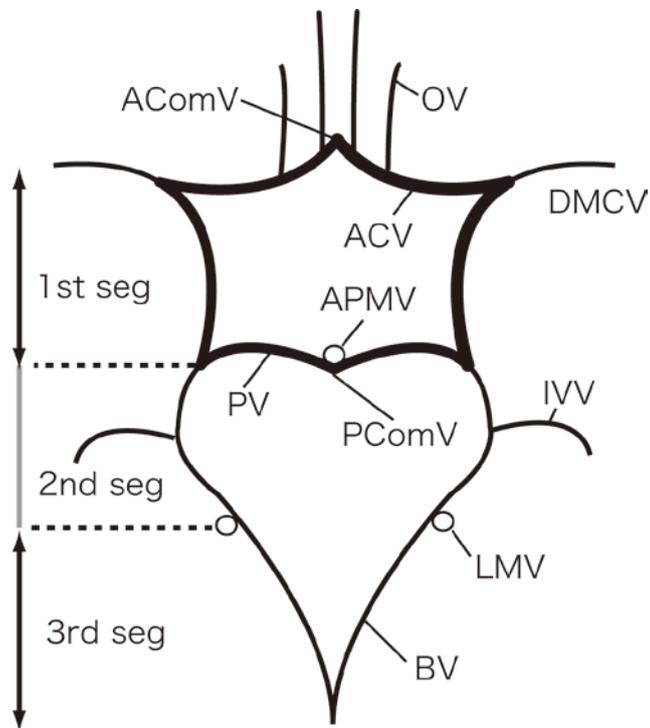


Fig.7