

Cerebral venous drainage

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: cerebral venous system, comparative anatomy, neopallium, archipallium, paleopallium

【はじめに】

脳静脈系の解剖は動脈と比べ個体差が大きく、様々なvariationを認めている。それは脳静脈系の発生がある一定のパターンを保ちながら、脳や周囲の髄膜の発達などの外的な環境の変化に合わせて退縮、融合、吻合、偏移などのプロセスを経てflexibleに形成されてくるためである。脳静脈系に限らず脳血管のvariationを理解するためには個体発生 (ontogeny)だけではなく系統発生 (phylogeny)の知識も役立つが、脳静脈系の系統発生に関する報告は限られている。2007-2008年にAurboonyawatらが脳静脈系の系統発生についてまとめた報告をしており、本稿ではこれをもとに脳静脈、特に大脳の静脈の系統発生を考察する。

【大脳の系統発生】

中枢神経系の原基である神経管 (neural tube)はホヤやナメクジウオなどの原索動物 (protochordata)ですで見られ、これは脊椎動物 (vertebrate)の発生の初期段階に見られるものと相同である。脊椎動物ではさらに神経管の頭側が膨らんで脳胞 (brain vesicle)が形成される。まず前脳 (prosencephalon)、中脳 (mesencephalon)、菱脳 (rhombencephalon)の3つの一次脳胞 (primary brain vesicle)が形成され、その後、前脳は終脳 (telencephalon)と間脳 (diencephalon)に、菱脳は後脳 (metencephalon)と髄脳 (myelencephalon)に再分割し、中脳を加えて5つの二次脳胞 (secondary brain vesicle)が形成される。終脳からは左右の大脳半球 (cerebral hemisphere)が、間脳からは視床上部、視床、視床下部が形成される。中脳、後脳、髄脳はそれぞれ中脳、橋、延髄となり、後脳からは小脳が形成される。下等脊椎動物では間脳や中脳、橋、延髄が脳の大部分を占めるが、高等脊椎動物になるにつれて大脳や小脳が発達し、さらに脳溝、小脳溝を認めることで、その表面積は大きくなる。大脳はその表面を覆う灰白質 (gray matter)である大脳皮質 (cerebral cortex)と、その直下の皮質下白質 (subcortical white matter) (大脳髄質 (cerebral medulla))、深部の灰白質である大脳基底核 (cerebral basal ganglia)からなる。大脳皮質と皮質下白質を合わせて外套 (pallium)と呼び、ヒトでは皮質が6層構造を持たない paleopallium, archipalliumと6層構造を持つneopalliumに分けられる。系統発生学的には paleopalliumが最も早期に発達し、次いでarchipallium、そして高等脊椎動物でneopalliumが発達する。言語学的にはarch- (原始)がpaleo- (古)よりも古いことを示すが、大脳皮質の発生に関しては慣習的に逆に使用されている。Paleopalliumはヌタウナギなどの円口類 (cyclostomes)以上の全ての脊椎動物に認められ、いわゆる嗅脳系 (olfactory system)に相当する。Archipalliumはヒトでは海馬体 (hippocampal formation)、小帯回 (fasciolar gyrus)、梁上回 (supracallosal gyrus)などが含まれ、生命維持や本能行動、情動行動に関与する。魚類 (fishes)の大脳皮質の大部分はpaleopalliumで形成され、archipalliumは種によってpaleopalliumの内側に認められる。両生類 (amphibians)ではarchipalliumが発達し、それとともにヒトの淡蒼球 (globus pallidus)に相当するpaleostriatumも発達してくる。爬虫類 (reptiles)ではpaleopalliumとarchipalliumとの間にprimitiveなneopalliumを認めるようになり、大脳基底核でもヒトの尾状核、被殻に相当するneostriatumを認めるようになる。鳥類 (birds)や哺乳類

(mammals)になるとneopalliumが急速に発達し、それとともにneostriatumや視床も発達してくる。発達するneopalliumによってpaleopalliumとarchipalliumは大脳半球の腹側面や内側正中へと位置を変え、大脳で両者の占める領域は相対的に小さくなる (Fig.1).

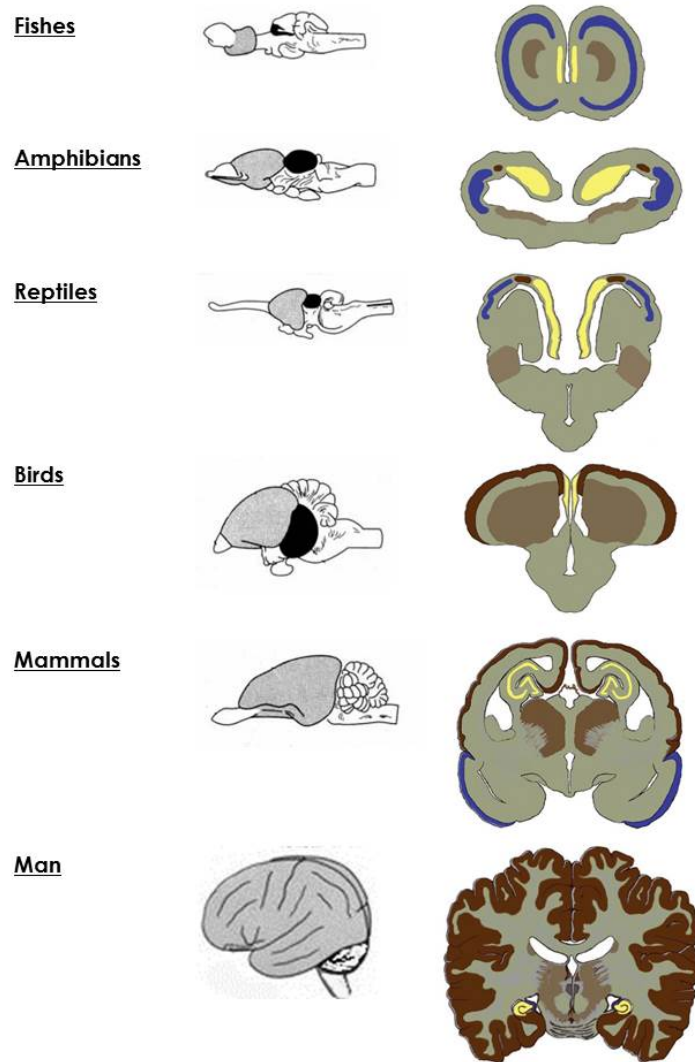


Fig.1: 脊椎動物の脳の側面図と大脳の冠状断図 (文献1より改変).

大脳の冠状断図で青色がpaleopallium, 黄色がarchipallium, 濃い茶色がneopallium, 薄い茶色がstriatumを示している.

【脊椎動物の脳静脈解剖】

脳静脈は発生の初期段階に限ると全ての脊椎動物で類似の構造を認めており、すなわち脳胞を覆う原始髄膜 (meninx primitive)内の原始毛細血管叢 (primitive capillary plexus)から脳胞の背側で前後軸に沿って並ぶ3つの静脈またはdural plexus stemを介してより表層のprimary head veinへ流出している (Fig.2). しかし進化の過程で脳や髄膜が発達するとともに、その後の脳静脈の還流パターンも変化していく。種 (species)によって異なる点もあるが、魚類、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類の脳静脈解剖は以下の通りである.

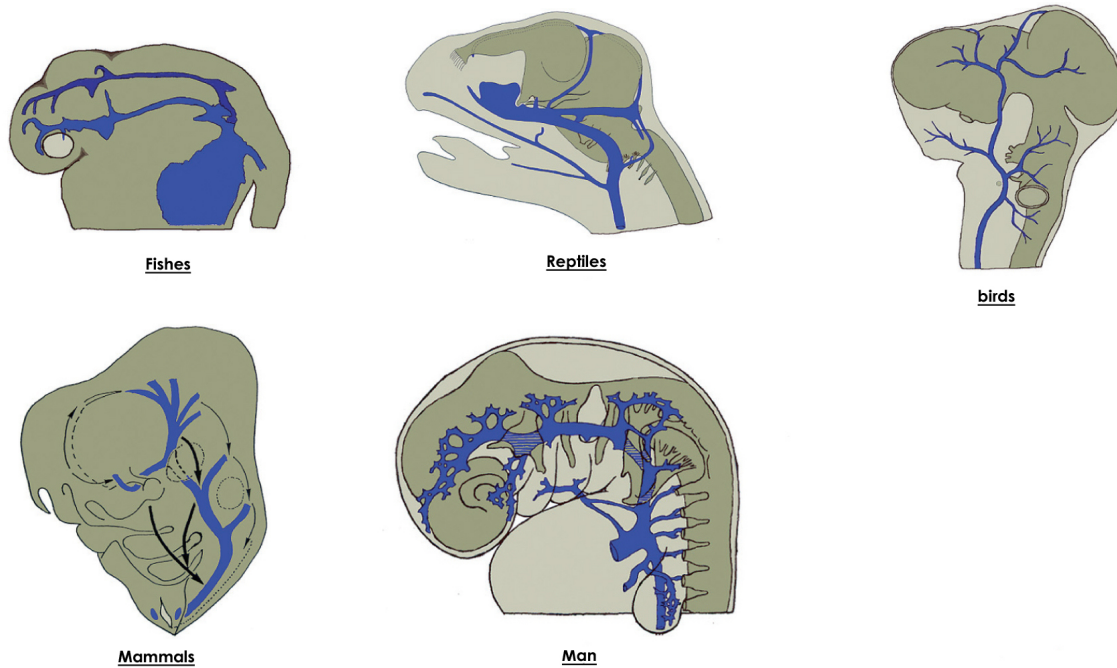


Fig.2: 脊椎動物の発生初期の脳静脈 (文献1より改変).
発生の初期段階では脳静脈は全ての脊椎動物で類似の構造をしている。

魚類：

魚類は原始髄膜から硬膜への分化が十分ではないため、硬膜静脈は認めない。そのため全ての脳静脈は背側に向かって走行して、間脳から延髄の背側正中を走行する1本の大きな脳表静脈であるsagittal veinへ流入し、そこから延髄下端で左右に分かれて下位脳神経に沿って頭蓋外へ流出している (Fig.3A)。大脳半球の大部分を占めるpaleopalliumからの血流は腹側から外側面を走行するanterior cerebral veinによって、背内側面にあるarchipalliumからの血流はmiddleおよびlateral olfactory veinによって、いずれもsagittal veinへ還流される。またanterior cerebral veinは間脳の静脈も還流している。中脳および橋・延髄からの静脈はmiddle cerebralおよびrhombencephalic veinを介してsagittal veinへ還流され、両者はanterior cerebral veinと同様に腹側から外側面を走行して背側に向かっている。

両生類：

両生類になると原始髄膜は外層と内層に分かれ、外層から硬膜が形成される。それとともに大脳半球の背側正中に細い硬膜静脈を認めるようになるが、大脳の静脈還流の役割はほとんどない。大脳半球の外側面に認めるpaleopalliumや線条体、間脳、中脳の上丘 (視蓋 (optic tectum))からの血流は、背外側面を走行する脳表静脈であるvena prosencephalic lateralisが受け、脳幹の背側から外側面にかけて認められる脳表の静脈網であるrete of endolymphatic sacへ還流される。また脳幹の静脈も腹側から外側面を背側に向かって走行してrete of endolymphatic sacへ流入している。大脳半球の背内側面に位置するarchipalliumからの血流は、大脳と間脳との間で背側正中に位置する脳表の静脈網であるnodus vasculosusへ還流される (Fig.3B)。Nodus vasculosusは他に大脳や間脳の脈絡叢静脈 (choroidal vein)も受ける。Nodus vasculosusおよびrete of endolymphatic sacからは左右一対の硬膜静脈であるoblique sinusを介して頭蓋外へ還流される。

爬虫類：

爬虫類も両生類と同様に大脳の背側正中に硬膜静脈を認めるが発達はしておらず、したがって脳静脈のほとんどは魚類と同様に間脳から延髄の背側正中を走行する1本のdorsal longitudinal veinによって還流される。Dorsal longitudinal veinは延髄下端で左右に分かれて頭蓋外の静脈へ連続しているが、それ以外に三叉神経と顔面神経との間を走行するanastomotic veinを介しても頭蓋外の静脈と交通している (Fig.3C)。Paleopalliumからの血流は背外側面を走行するanteriorおよびposterior lateral cerebral veinによって、archipalliumからは室間孔の上方から内側面を走行するanteriorおよびintermediate medial cerebral veinによって、いずれもdorsal longitudinal veinへ還流される。また大脳の脈絡叢静脈はsepal veinとcommon choroidal veinを形成して、内側面を上行してdorsal longitudinal veinへ流入する。間脳、中脳、橋・延髄の静脈も魚類と同様に、外側面を背側に向かって走行してdorsal longitudinal veinが還流している。

鳥類：

鳥類になると分化した硬膜に静脈洞を認めるようになり、発達してきたneopalliumの還流路として機能する。ヒトの上矢状洞、横静脈洞に相当する静脈洞としてmid-dorsal sinusおよびanterior cerebral veinを認めている (Fig.3D)。大脳半球や間脳からの血流の大部分は両者を介して後頭静脈洞から椎骨静脈(叢)経由で頭蓋外へ還流されるが、一部は側頭部で頭蓋外の静脈叢であるtemporal reteへ流出している。ヒトの内頸静脈に相当する静脈としてposterior cephalic veinがあるが、椎骨静脈の方が発達しており、脳静脈の還流路は内頸静脈系ではなく椎骨静脈系が優位となっている。鳥類から小脳テントが発達するが、大脳鎌とは癒合していないため直静脈洞は認められない。

哺乳類 (ヒトを除く)：

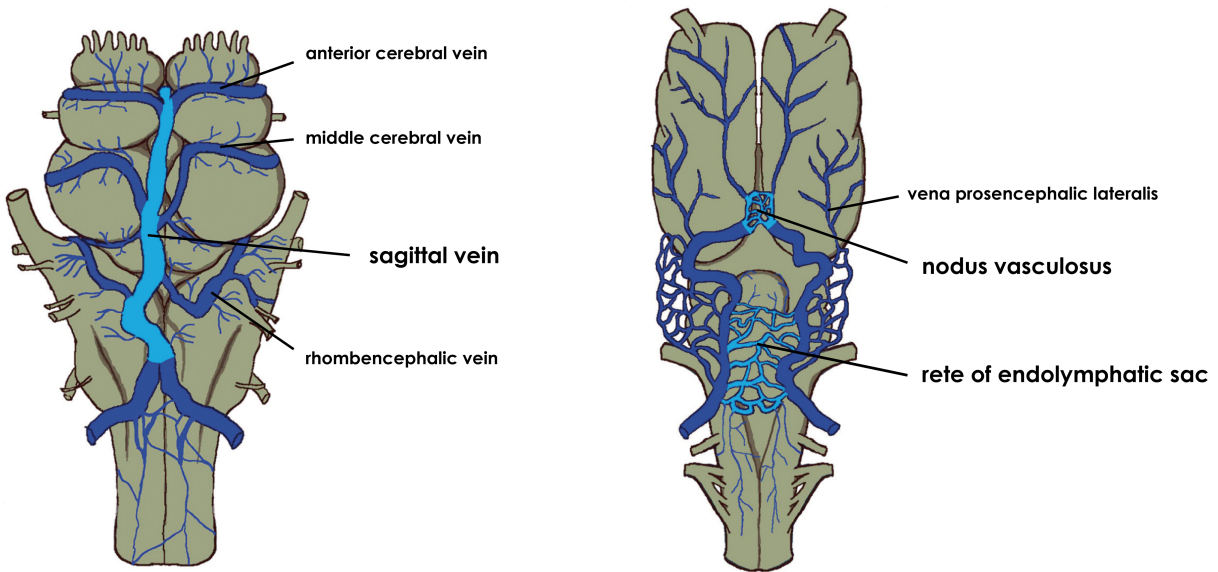
哺乳類になると直静脈洞を認めるようになり、上矢状洞、横静脈洞とともに静脈洞交會を形成する。静脈洞交會はヒトと異なり頭蓋底よりも頭側に位置しており、したがって横静脈洞はより斜め縦方向に走行している。ラットでは横静脈洞からの血流の多くは、petrosquamous fissureに沿って走行するpetrosquamous sinusを介して外頸静脈へ流出しているが、進化が進むにつれてS状静脈洞が骨内を走行する静脈として認められるようになり、椎骨静脈叢へも還流されるようになる。脳静脈の還流路は外頸静脈系・椎骨静脈系優位であったものが、サルになると内頸静脈系・外頸静脈系が優位となってくる。また霊長類でも特に二足歩行が開始されると後頭静脈洞・辺縁静脈洞が発達して、その血流は椎骨静脈叢へ還流される。

Paleopalliumはneopalliumが発達するにつれて大脳半球の外側から腹側面に位置が変わっていくため、その静脈も外側面を走行していたものが、より腹側を走行するようになる。Paleopalliumからの血流は、モルモットでは外側面を走行するsuperior lateral cerebral veinが (Fig.3E)、ラットでは腹外側面を走行するsuperficial cerebral veinが、それぞれ横静脈洞に流入している。イヌでは腹外側面を走行するventral cerebral veinと腹側面 (脳底部) を走行する脳底静脈 (basal vein) がその役割を担っている (Fig.3F)。Ventral cerebral veinはdorsal petrosal sinusへ流入しており、両者はそれぞれヒトの中大脳静脈とテント静脈洞に相当する。脳底静脈はpaleopalliumだけではなく、間脳、中脳 (腹側および外側面) からの血流も受け、一部はガレン大静脈へ向かうが、大部分は外側へ走行してdorsal petrosal sinusへ流入する。またarchipalliumはneopalliumの発達とともに大脳半球の内側面を背側から腹側方向に位置を変えるため、その静脈も脳底静脈に向かうようになる。進化の過程で脳底静脈は、外側に走行してヒトのテント静脈洞に相当する静脈洞から横静脈洞へ還流されていたものが、徐々に内側へと位置を変えて、霊長類になるとガレン大静脈に流入するようになる。

Neopalliumからの血流は鳥類と同様に硬膜静脈洞へ還流される。大脳半球の背外側面や内側面の静脈は主に上矢状洞に流入している。一方、外側面の静脈は横静脈洞や上錐体静脈洞、テント静脈洞へ流入しており、海綿静脈洞には向かわない。

哺乳類では大脳の脈絡叢、脳室壁、線条体からの血流を受ける静脈としてヒトと同様に内大脳静脈 (internal cerebral vein) を認めており、背側に走行してガレン大静脈に流入している。

Fig.3: 脊椎動物の脳静脈 (文献1-3より)

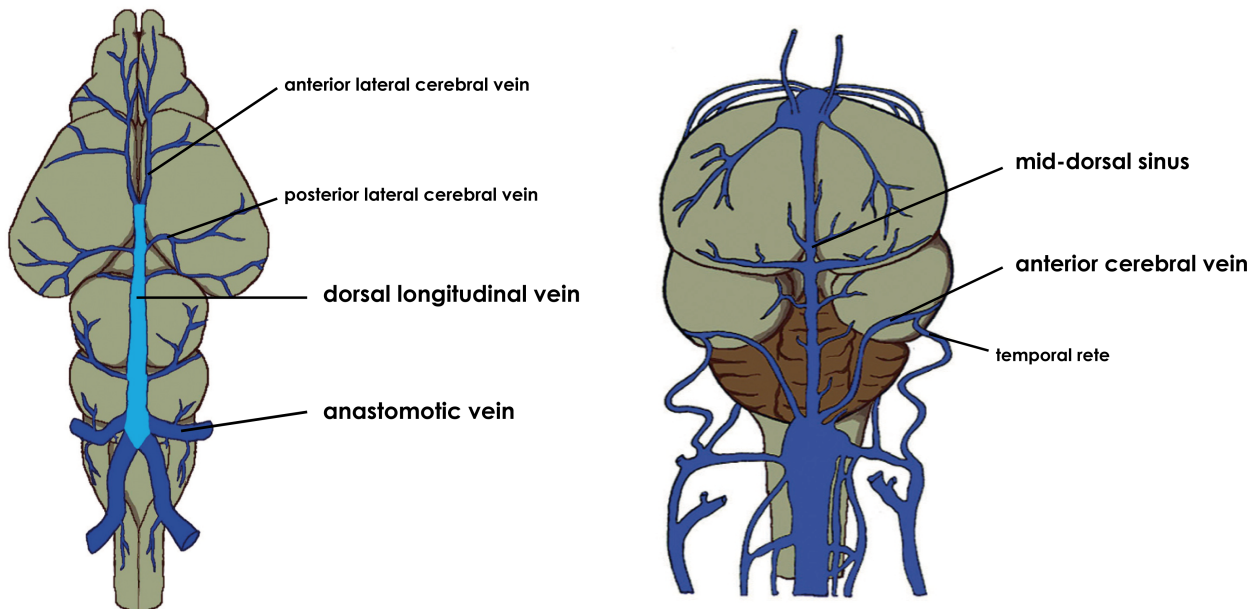


3A: ヌタウナギの脳静脈 (背側から見た図).

脳静脈は全て間脳から延髄背側正中を走行する1本のsagittal veinによって還流される.

3B: タイガーサラマンダーの脳静脈 (背側から見た図).

脳静脈は全て間脳背側の静脈網であるnodus vasculosusと脳幹背側の静脈網であるrete of endolymphatic sacによって還流される.

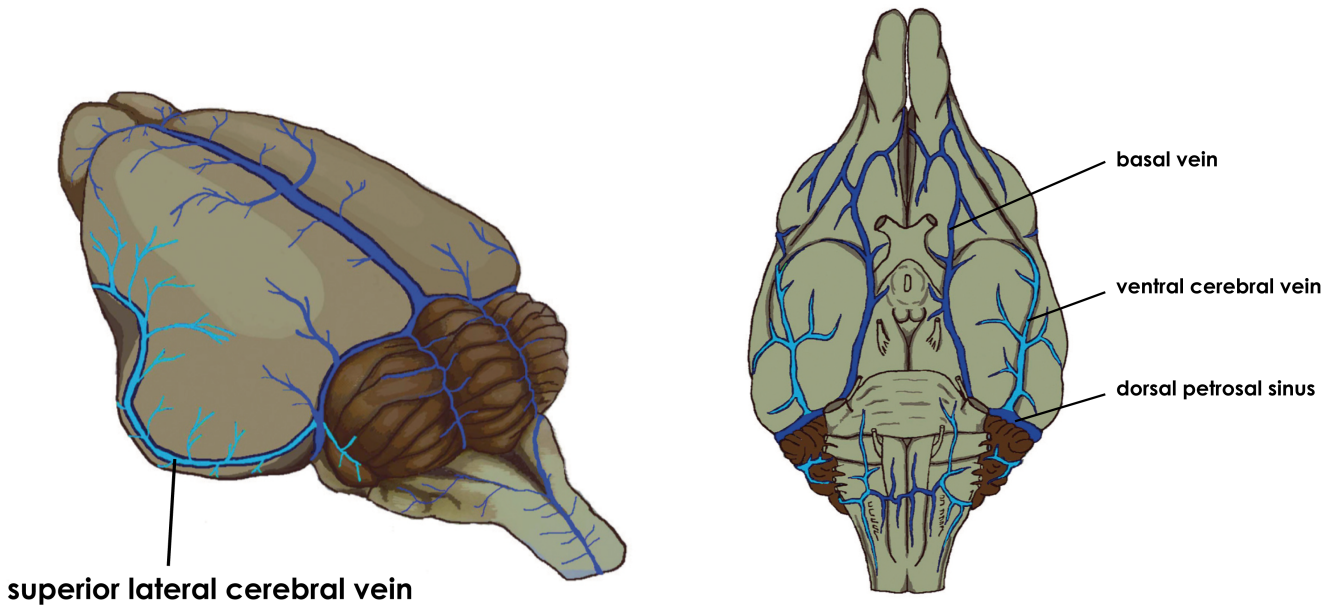


3C: ホシヤブカメの脳静脈 (背側から見た図).

脳静脈は全て間脳から延髄背側正中を走行する1本のdorsal longitudinal veinによって還流される

3D: ライトサセックスの脳静脈 (後方から見た図).

大脳半球や間脳からの血流の大部分は硬膜静脈洞であるmid-dorsal sinusおよびanterior cerebral veinによって還流される。



3E: モルモットの脳静脈 (斜め上方から見た図).

Paleopalliumからの血流は大脳半球の外側面を走行するsuperior lateral cerebral veinによって横静脈洞へ還流される。

3F: イヌの脳静脈 (腹側から見た図) .

Paleopalliumからの血流は腹側面を走行するventral cerebral veinや脳底静脈によってdorsal petrosal sinusへ還流される。

【ヒトの大脳の静脈発生】 (Fig.4A-E)

胎生5週頃に形成される終脳、間脳、中脳、後脳、菱脳の5つの二次脳胞はその表面を原始髄膜に覆われ、脳胞からの血流は原始髄膜内で内層にある原始毛細血管叢から外層のdural plexus (硬膜静脈叢)へ向かう。Dural plexusは脳胞の背外側に位置し、そこからanterior, middle, posteriorの3本のdural plexus stemを介してより表層 (将来の硬膜外に相当)のprimary head sinusに流入し、将来の内頸静脈であるanterior cardinal veinへ還流される。Anterior dural plexusは終脳、間脳、中脳の領域を、middle dural plexusは後脳の領域を、posterior dural plexusは菱脳の領域を灌流している。三叉神経節や耳胞の発達に伴ってprimary head sinusは一部を残して退縮し、それに伴ってdural plexus間に吻合が発達する。Middle dural plexusとposterior dural plexusとの吻合およびposterior dural plexus stemからS状静脈洞が、middle dural plexusとanterior dural plexusとの吻合により横静脈洞のS状静脈洞側が形成される。また大脳半球、特にneopalliumの発達によってanterior dural plexusの前方部分は正中側へ移動し、左右が融合して上矢状洞や下矢状洞、直静脈洞が形成される。静脈洞交会やそれにつながる横静脈洞は上矢状洞や直静脈洞の尾側およびS状静脈洞側の横静脈洞のdural plexusの融合や退縮によって形成される。

大脳ではまず胎生6-8週の間に脈絡叢が発達する。脈絡叢からの血流は当初はventral diencephalic veinから原始横静脈洞へと腹側方向に還流されている。しかし胎生8週頃には間脳背側を走行する1本のmedian prosencephalic vein (of Markowski)を認めるようになり、脈絡叢からの血流の大部分はmedian prosencephalic veinから半球間裂の硬膜に形成されるdorsal interhemispheric marginal venous sinusへと向かう背側方向の還流パターンとなる。その後、側脳室およびその周囲の視床、線条体

が発達するにつれて、その還流路として左右1対の内大脳静脈が形成され、前方では脈絡叢からの静脈も受けるようになり、後方ではmedian prosencephalic veinへとつながる。内大脳静脈の形成とともにmedian prosencephalic veinは前方から退縮していき、胎生11週頃には内大脳静脈の接合部より後方部分のみ遺残してガレン大静脈となる。

脳底静脈は元々、anterior dural plexusへ流入している終脳、間脳、中脳からの静脈が前後方向に吻合して2次的に形成される静脈であり、その発生は内大脳静脈よりも遅れる。胎生9週頃にはprimary head sinusの退縮に伴ってtelencephalic vein (superficial, deep)とdiencephalic vein (ventral, dorsal)はanterior dural plexusから形成されるprimitive tentorial sinusに、mesencephalic veinはanterior/middle dural plexusから形成されるtentorial plexusに流入して、いずれも原始横静脈洞へ還流されるようになる。胎生11週頃にはmesencephalic veinはprimitive tentorial sinusへ流入するようになる。尾状核や被殻、視床、大脳脚、赤核などが発達する胎生12週頃には、primitive tentorial sinusは大脳半球の発達によって尾側へ延ばされ、遠位部が網状となって徐々に閉塞していく。それに伴ってdeep telencephalic vein, ventral diencephalic vein, mesencephalic veinとの間に前後方向の吻合が発達し、脳底静脈が形成され始める。胎生13週には脳底静脈は内大脳静脈のdorsal diencephalic tributaryやガレン大静脈のsuperior mesencephalic tributaryと吻合して、ガレン大静脈へ流入するようになる。脳底静脈は脳底部を走行する表在静脈で大脳半球では主にpaleopallium, archipallium, 基底核、島を還流している。

Neopalliumは発生の初期には脳溝はなく、その外側面にくぼみ (sylvian fossa)を認める程度である。終脳のtelencephalic veinは脳表を還流するsuperficial telencephalic veinとsylvian fossa内を還流するdeep telencephalic veinとに分けられ、将来、前者は浅中大脳静脈に、後者は深中大脳静脈になる。Deep telencephalic veinは上述のように脳底静脈の前方部分を形成する。胎生4ヵ月頃以降になると大脳半球の外側面に上矢状洞や横静脈洞へ向かう表在静脈が発達し、superficial telencephalic veinとの間に吻合を認めるようになる。胎生6ヵ月頃に脳溝の形成が始まるとこれらの表在静脈は脳溝の周囲またはそれに沿って走行するようになる。大脳半球の発達とともに表在静脈も発達していくが、superficial telencephalic veinは胎生5-6ヵ月頃に弁蓋部が急速に発達してくると、その数、サイズともに減少していき、最終的にシルビウス裂周囲の表在静脈とともに浅中大脳静脈を形成する。浅中大脳静脈は胎生期ではprimitive tentorial sinusへ還流されているが、側頭葉の発達とともにprimitive tentorial sinusは内側へと偏位していき、出生前後から数か月の間に海綿静脈洞の前外側へ流入するようになる。

【大脳の静脈の系統発生】

大脳の静脈を系統発生学的に見ると、neopalliumの発達によりpaleopalliumやarchipalliumの還流パターンが変化している。Paleopalliumやarchipalliumからの血流は、魚類、両生類、爬虫類といった下等脊椎動物では間脳の背側にある1本の静脈または静脈網へと向かう背側方向の還流パターンをとっている。ヒトでは大脳内部の構造物を還流する最初の静脈として胎生8-11週の間の間脳背側を走行する1本のmedian prosencephalic veinが認められ、大脳の脈絡叢や脳室周囲の脳組織からの血流はこの静脈によって還流され、背側方向の還流パターンをとっている。Aurboonyawatらは下等脊椎動物で認められる間脳背側の静脈(網)は、ヒトではmedian prosencephalic veinに相当すると考えている。Median prosencephalic veinの後方部分の遺残であるガレン大静脈には内大脳静脈が下等脊椎動物で認められた背側方向の還流パターンを保ったまま流入している。大脳半球の発達に伴ってその還流パターンは変化していくが、室間孔周囲の構造物は脳半球が発達してもその位置が変化しにくいいため、進化の過程を経ても背側方向の還流パターンを保っているのかもしれない。

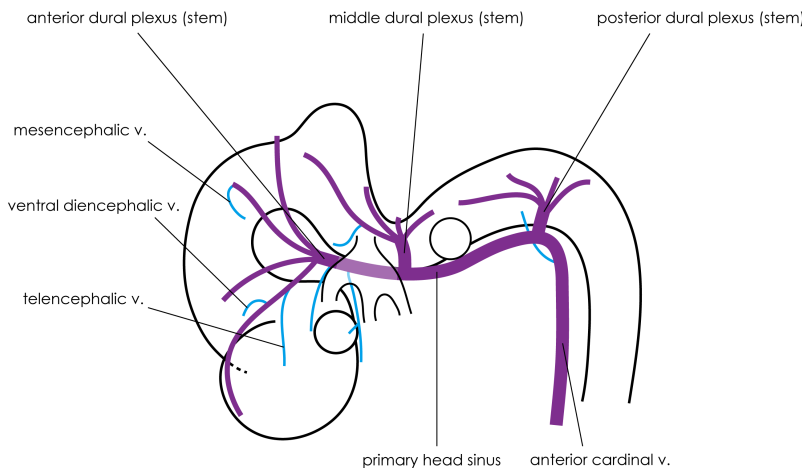
Paleopalliumとarchipalliumとの間にneopalliumが発達するにつれてpaleopalliumの位置は外側から腹側面へと変化していき、その静脈も外側、腹外側、腹側面を走行するようになる。流入する静脈(洞)も、背側の静脈(網)から横静脈洞、上錐体静脈洞やテント静脈洞と変化していく。進化が進むにつれて尾状核や被殻、視床、大脳脚、赤核などが発達し、paleopalliumの静脈はこれらの静脈と吻合して脳底静脈を形成するようになる。脳底静脈は哺乳類ではテント静脈洞へ流入しているが、進化が進むにつれてその位置は内側へと移動していき、ヒトでは下等脊椎動物の見られた背側の静脈(網)と相同と考えら

れるmedian vein of prosencephalonの後方部分の遺残であるガレン大静脈に戻ってきている。このような脊椎動物のpaleopalliumの静脈の進化の過程は、ヒトの胎生期の脳底静脈の発生でも見てとれる。

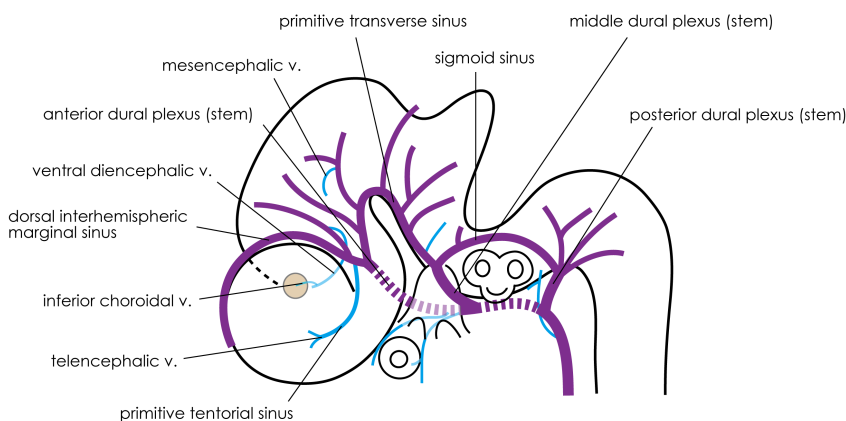
一方、archipalliumの静脈は下等脊椎動物では間脳背側の静脈(網)へ向かっていたものが、neopalliumや脳梁の発達とともにその位置が内側面の背側から腹側へと変化することで、腹側方向の還流パターンに変わり、主にinferior ventricular veinを介して脳底静脈へ還流されるようになる。ヒトではarchipalliumの中でもneopalliumの発達によって位置があまり変化しない小帯回、梁上回は背側方向の還流パターンを保っている内大脳静脈に還流され、neopalliumによって腹側に移動する海馬体は主に脳底静脈に還流されている。

Neopalliumは鳥類や哺乳類から急速に発達し、その静脈は下等脊椎動物では認められない上矢状洞や横静脈洞といった硬膜動静脈洞へ還流される。これらの静脈洞は全て膜性神経頭蓋に関連する静脈洞であり、軟骨性神経頭蓋に関連した海綿静脈洞は系統発生学的にはneopalliumを還流する静脈洞ではない。大脳半球の外側面は下等脊椎動物ではpaleopalliumであるが、進化が進むにつれてneopalliumとなり、外側面の静脈はneopalliumを還流するものとなる。ヒトで外側面のneopalliumを還流する静脈の1つである浅中大脳静脈は、発生の過程でprimitive tentorial sinusから海綿静脈洞へ流入するようになるが、これは側頭葉の発達とともにprimitive tentorial sinusが内側へと偏位していくため、ヒト以外ではテント静脈洞や上錐体静脈洞へ流入している。

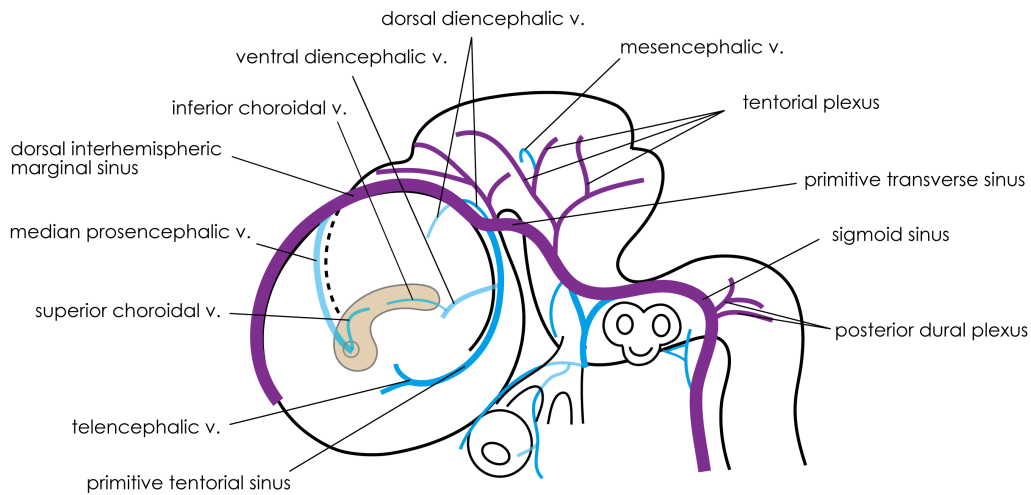
Fig.4: ヒトの脳の静脈発生.



4A: 胎生6-7週 (頭殿長 7-12mm).
脳胞からの血流はanterior, middle, posterior dural plexusへ向かい、それぞれのdural plexus stemを介してprimary head sinusへ還流される。

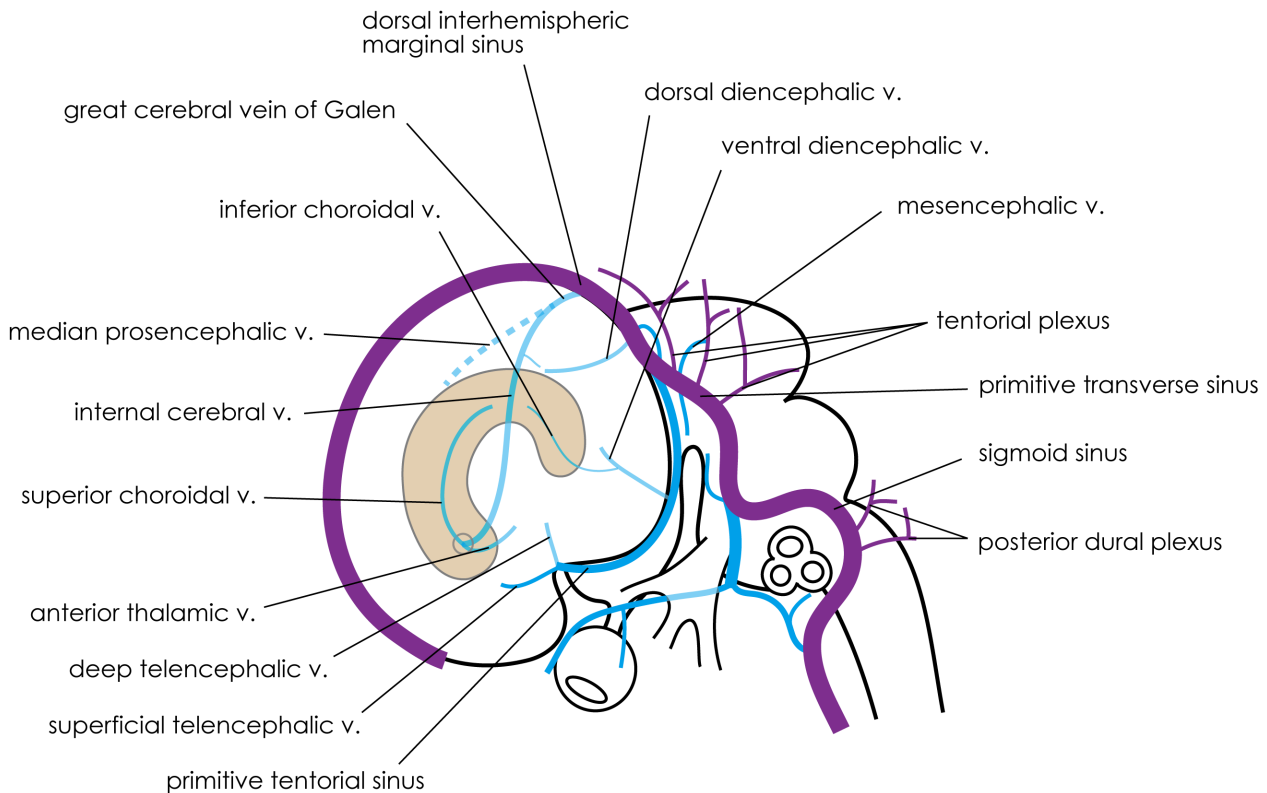


4B: 胎生 7-8週 (頭殿長 16-21mm).
Primary head sinusは退縮していき、それに伴って横静脈洞やS状静脈洞が形成される。



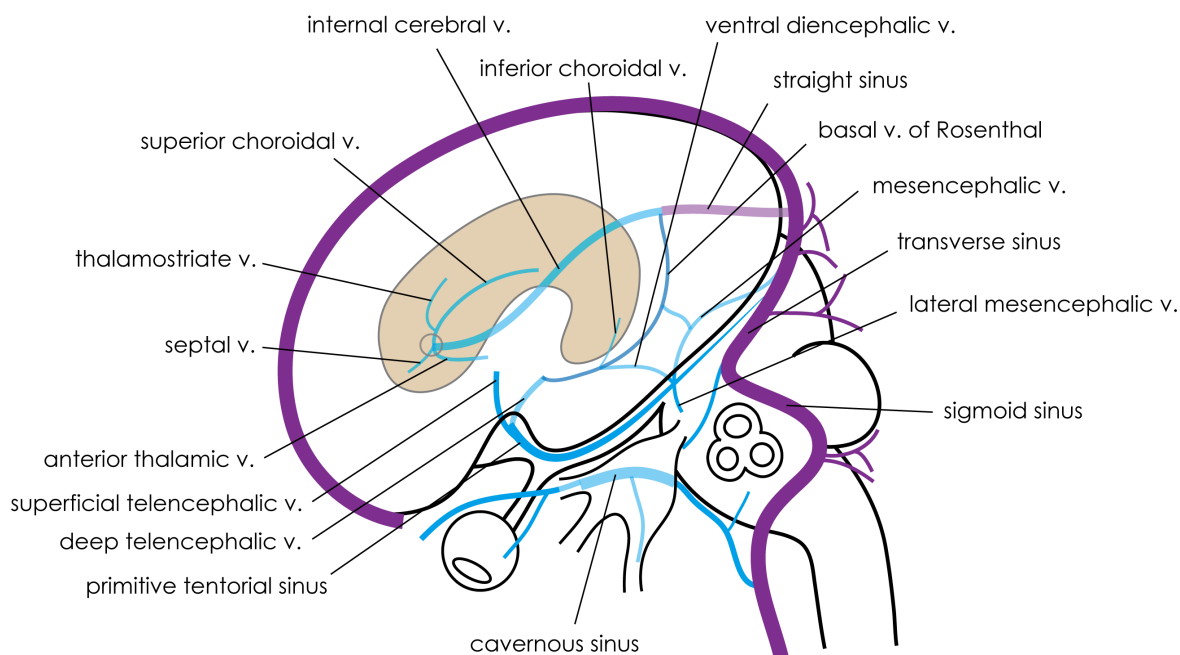
4C: 胎生 8-9週 (頭殿長 20-24mm).

大脳の脈絡叢の導出静脈として間脳背側に1本のmedian prosencephalic veinが形成される。



4D: 胎生 11-12週 (頭殿長 40-60mm).

左右1対の内大脳静脈が形成され, median prosencephalic veinの後方へつながる. それとともに median prosencephalic veinは前方から退縮していき, 内大脳静脈の接合部より後方がガレン大静脈となる.



4E: 胎生 12-13週 (頭殿長 60-80mm).

Primitive tentorial sinusの遠位部が閉塞するにつれてdeep telencephalic vein, ventral diencephalic vein, mesencephalic veinとの間に前後方向の吻合が発達して脳底静脈が形成される。将来の浅中脳静脈であるsuperficial telencephalic veinはprimitive tentorial sinusに流入している。

【最後に】

ヒト以外の脊椎動物で脳静脈系に関して細かく記述している論文は乏しいため、脳動脈系のような詳細な比較検討は困難であるが、脳静脈系の個体発生は動脈と同様に系統発生と似た道筋を辿っていると考えられる。個体発生に系統発生の知識を加えることで、脳静脈系の機能解剖の理解をより深めることが出来る。

1. Aurboonyawat T, Suthipongchai S, Pereira V, et al: Patterns of cranial venous system from the comparative anatomy in vertebrates. Part 1, Introduction and the dorsal venous system. Interv Neuroradiol 13: 335-344, 2007
2. Aurboonyawat T, Pereira V, Kring T, et al: Patterns of the cranial venous system from the comparative anatomy in vertebrates. Part 2, The lateral-ventral venous system. Interv Neuroradiol 14: 21-31, 2008
3. Aurboonyawat T, Pereira V, Kring T, et al: Patterns of the cranial venous system from the comparative anatomy in vertebrates. Part 3, The ventricular system and comparative anatomy of venous outlet of the spinal cord and its homology with the five brain vesicles. Interv Neuroradiol 14: 125-136, 2008
4. 清末一路 編: 血管内治療のための血管解剖 脳静脈. 秀潤社, 東京, 2017
5. Okudera T, Ohta T, Huang YP, et al: Developmental and radiological anatomy of the superficial cerebral convexity vessels in the human fetus. J Neuroradiol 15: 205-224, 1988

Niche Neuro-Angiology Conference 2017

6. Padgett DH: The development of the cranial venous system in man, from the viewpoint of comparative anatomy. *Contrib Embryol* 36: 81-140, 1957