

頭蓋頸椎移行部の血管の発生と解剖

Vascular supply of craniocervical junction

東京大学医学部附属病院 脳神経外科

Department of Neurosurgery, The University of Tokyo Hospital

小泉聡 清藤哲史

Satoshi KOIZUMI Satoshi KIYOFUJI

Keywords: vertebral artery, lateral spinal artery, posterior inferior cerebellar artery, ascending pharyngeal artery, occipital artery, proatlantal artery, primitive hypoglossal artery, primitive lateral basilovertbral anastomosis

はじめに

脊椎動物の系統発生の学習においては頭尾方向にならぶ分節構造の理解が重要である。頭蓋頸椎移行部腹側における分節は大動脈弓を基盤とする鰓弓 branchial arch であり、鰓弓ごとに発生した血管がその後吻合・消退していく外頸動脈の血管発生は複雑に見える。一方で背側構造である後頭蓋及び上位頸椎は椎間板や椎体を基盤とする体節 somite にしたがって構成され、骨や血管は整然と配列し、脳幹や後頭蓋を脊髄脊椎と相同な組織と捉えるとその理解は比較的容易である。頭蓋頸椎移行部の血管解剖の学習においてはこの鰓弓構造と体節構造両者の理解が必要となるが、まず体節構造に着目するとその理解は容易になると考える。本稿ではまず椎骨脳底動脈の血管発生、次いで後頭・咽頭動脈系、最後に上部頸部動脈と anterior/posterior meningeal artery の発生について、過去の文献や本研究会で得られた知見をまとめ、自験例で見られた破格などの画像提示を交えつつ概説する。

① 椎骨動脈(VA)^{1,2}

胎児長 3mmn の時期に第1大動脈弓より原始内頸動脈と原始三叉神経動脈の2つの分枝が認められる。後者は原始内頸動脈の背側に存在する primordial hindbrain channel (hindbrain 上に最初に形成される血管叢)と吻合する。胎児長 4mm の時期には primordial hind brain channel から左右一対の longitudinal neural arteries(LNA)が形成されこれはのちに正中で吻合して脳底動脈となるが、成人型の VA が形成される前、後方循環は左右の内頸動脈と LNA をつなぐ横方向の原始血管吻合 primitive carotid-basilar anastomosis によって供血される。これらの横方向の吻合には、尾側より頭側に向かう順に以下があげられる。

- ・ proatlantal artery type 1 (PAA 1, C1 segmental artery)
- ・ primitive hypoglossal artery (PHA)
- ・ primitive trigeminal artery (PTA)
- ・ posterior communicating artery(Pcom)

このうち PHA および PTA は通常妊娠5週までに退縮する。のちに詳述するが、PHA の遺残は上行咽頭動脈 ascending pharyngeal artery(APA)の hypoglossal br.と考えられ、この点から APA と VA が潜在的な吻合を持つことが理解できる。Pcom は成人においても遺残し、PAA1 が VA の V3 および V4 portion の形成に

関わる。体節構造に着目すると PAA1 は第 1 頸神経に伴走する動脈である。VA の V1 および V2 portion は、頸部分節動脈が頭尾方向に吻合することによって形成され、PAA 1 を起源とする V3 および V4 portion とはその発生起源が異なる。頸部より上行する V1 および V2 portion の発達に伴い、PAA1 の腹側は妊娠第 6 週には退縮し内頸動脈との連絡はなくなるが背側部分は遺残し V2 portion より血流を受け V3 portion となる。V3 より上方に伸びて硬膜内に入り最終的に脳底動脈につながる V4 portion は PAA1 の神経根前枝の上行枝と考えられる。頭蓋頸椎移行部を中心としてみると脳底動脈と前脊髄動脈 anterior spinal artery (ASA) はそれぞれ PAA1 の神経根前枝が上行及び下行して形成されるものと捉えられる。³

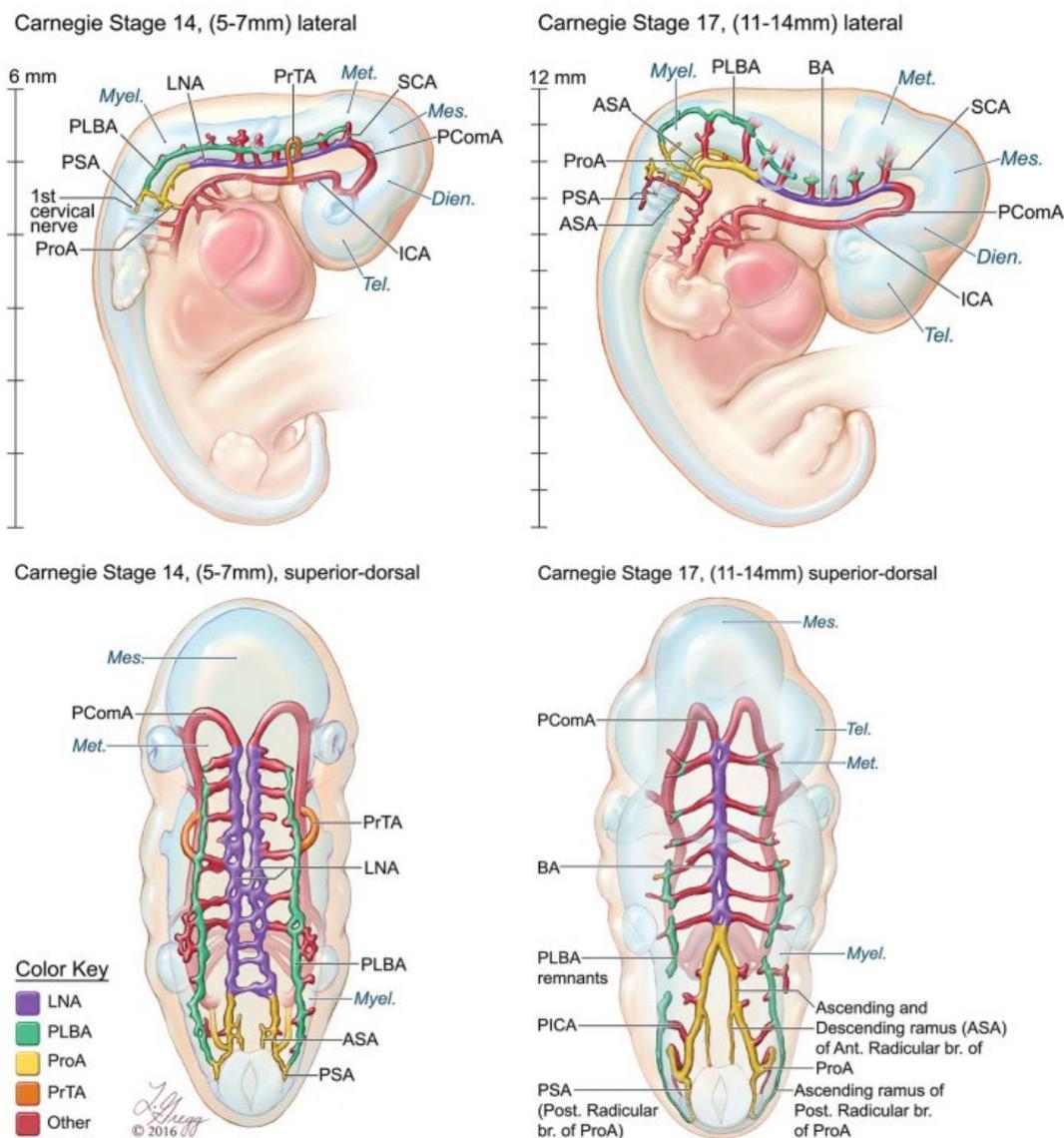
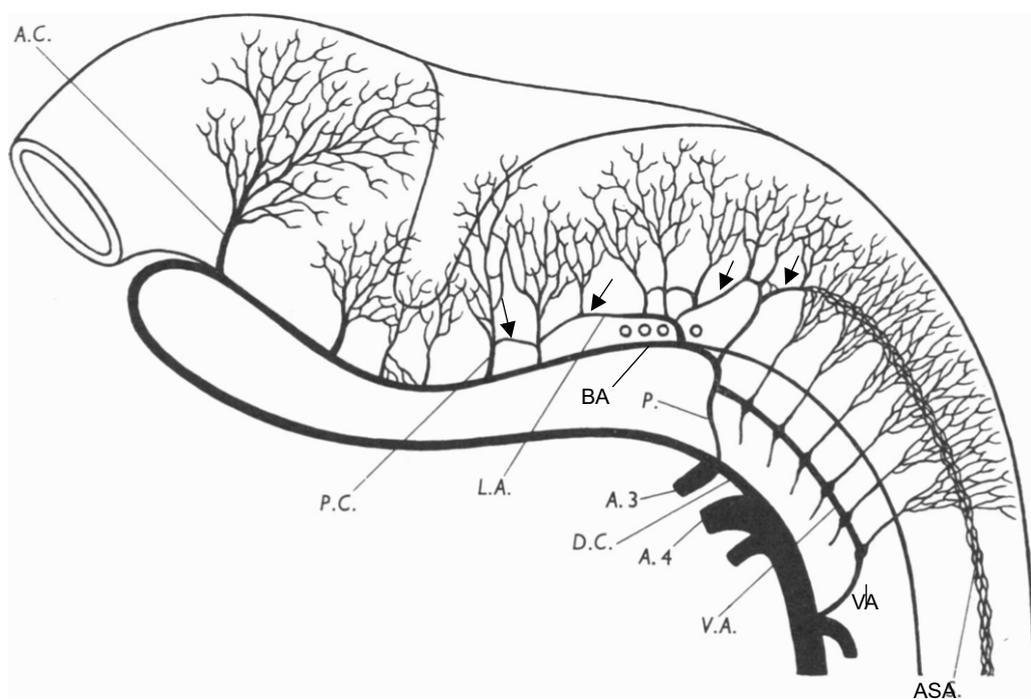


Figure 1. Padgett と Moffat の観察をまとめた PLBA の発達のシエーマ(Gregg 2017)。図の ProA は本文中の PAA1 に相当する

② primitive lateral basilovertbral anastomosis^{1,2}

前述の如く PAA1 から神経根前枝に相当する血管が脳幹前面に向かうように発達し V4 portion を形成することで頭蓋外 VA と脳底動脈がつながるようになるが、胎生初期にはこの V4 portion は未発達であり、この

時期には PAA1 と LNA を結ぶ動脈として、より外側に primitive lateral basilovertbral anastomosis(PLBA)が存在する(Figure1)。PLBA は V4 portion の発達に伴い早期より相補的に退縮するためか、従来 Padget らによりその存在は指摘されていたものの多くの発生学者には注目されてこなかった。¹ その一方で、ラットにおいて Moffat らの報告では PLBA に相当する lateral longitudinal artery が成体においても遺残し、ヒト胎児と同様に PAA1 の背側分枝(神経根後枝に相当する)が PLBA と連続している(Figure 2)。⁴ PLBA はヒトでは早期に退縮するが、その遺残は頭側で後下小脳動脈 posterior inferior cerebellar artery(PICA), 尾側で外側脊髄動脈 lateral spinal artery (LSA)の形成に関わる。体節動脈としての PAA1 (VA V3 portion) を中心に捉えて頭蓋頸椎移行部を見ると、その神経根後枝と潜在的な連続性を持つ PICA および LSA は頭尾方向に連続する同一の vascular channel に起源を持つ相同な血管であることがわかる(脳底動脈と ASA の関係と同様である)。このように PAA1 を体節方向の軸となる血管、PLBA を頭尾方向の軸となる血管と捉える機能解剖的な視点は、頭蓋頸椎移行部における VA, PICA および LSA に関わる破格を理解する上で非常に有用であることが近年多くの報告によって示されている。^{2,5-7}



Text-fig. 4. A 9.5 mm. embryo at stage 3 (semi-diagrammatic). The vertebral artery has now formed and the dorsal parts of the intersegmental arteries have become branches of that artery. The intersegmental arteries, except for the pro-atlantal, have lost their origin from the aorta. The intracranial portion of the vertebral artery gives off the posterior spinal artery and the lateral longitudinal artery, the latter passing between the hypoglossal rootlets.

Figure2: ラット胚における中枢神経血管の発生。Moffat 1957 より改変。VA から脳底動脈への連絡ができたあともその外側後方では PLBA(図中では lateral longitudinal artery[L.A.]と呼称されている)の頭尾方向の連絡が保たれている(黒矢印)。

自験例における頸髄 C1-C2 背面の血管芽腫の術前血管撮影を Figure4 に示す。左右の椎骨動脈撮影で頭蓋内 VA より分岐する LSA が下行して腫瘍に入るのが確認できるが、回転撮影の MIP slab 画像では右 LSA は右 VA より直接、左 LSA は PICA (lateral medullary segment)より分岐していることがわかる。加えて、右 LSA からは lateral medullary segment を上行して AICA-PICA の尾側に吻合する細かいチャンネルがみられ、PLBA の痕跡的な遺残と考えられる。

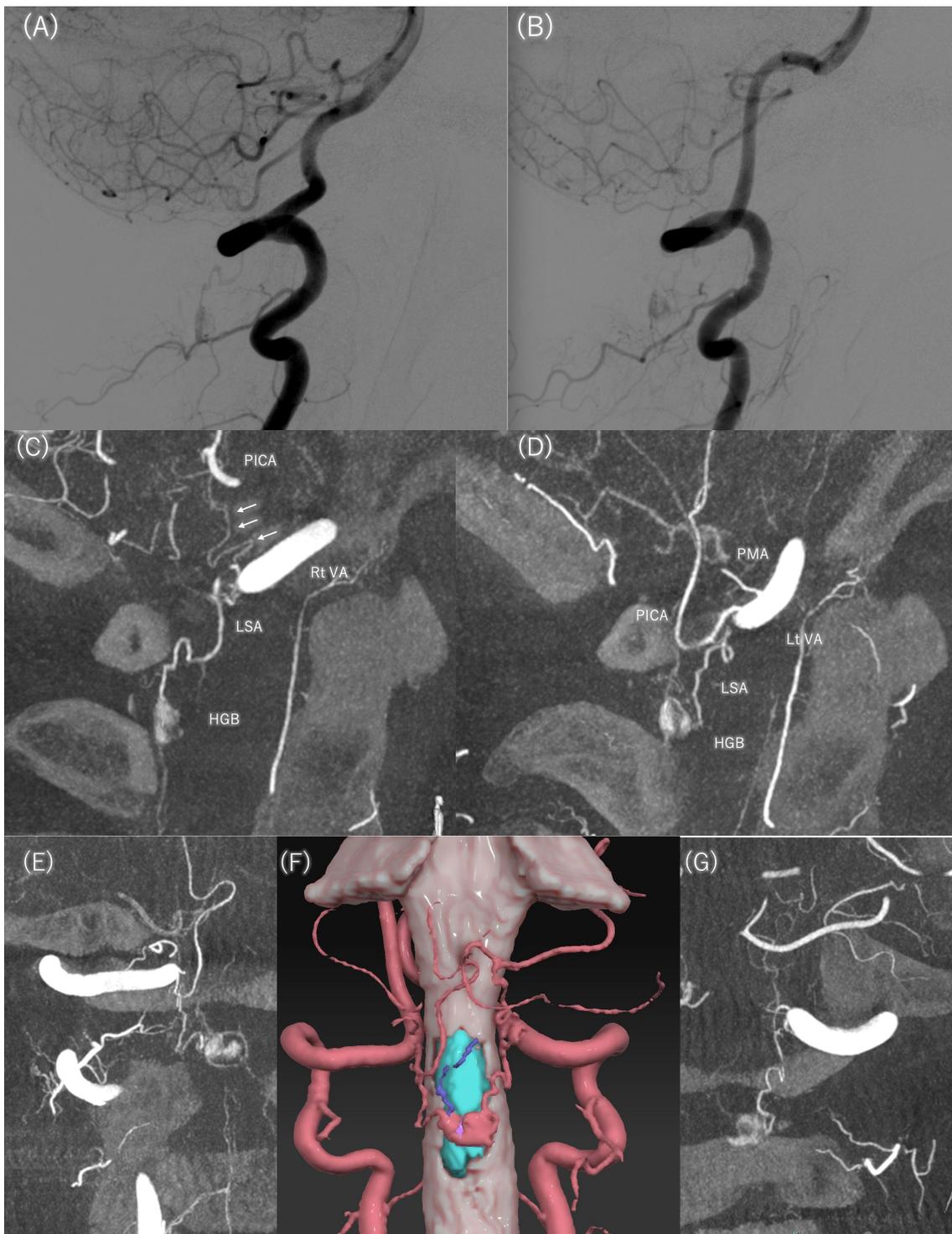


Figure 3: 40 代女性。感覚低下を主訴に指摘された上位頸髄血管芽腫。左右椎骨動脈撮影で大孔部より下行する LSA が主要の主な feeder となっている(A: 右, B: 左)。3DRA の矢状断 MIP slab では右 LSA は右 VA からでる一方, 左 LSA は PICA の caudal loop より起始している。C において LSA と PICA を結ぶ細い longitudinal vascular channel が確認できる(白矢印)。E-G: 後方より見た 3 次元回転撮影 MIP slab (E: 左, G: 右) および thin slice MRI より描出した脳腫瘍, 頸髄を重ねた融合 3 次元画像(F)。LSA と頸髄の関係がより認識しやすい。

自験例における VA fenestration に形成された未破裂脳動脈瘤を Figure4A,B に示す。本例では V4 に形成された fenestration のうち内側の division からは ASA が、外側の division からは PICA が分岐しており、脳底動脈と V3 portion を結ぶ2つの vascular channel (神経根前肢としての V4 portion と神経根後枝としての PLBA system)が両方とも遺残していると捉えることができる。俗にいう VA V4 portion の fenestration には、本例のような PLBA system の遺残によるものと狭義の fenestration の両者が混在している。Figure4C にしめす VA fenestration にできた脳動脈瘤に対するコイル塞栓術の症例報告では、通常の走行を示す VA V4 が頭蓋内で PICA を分岐したのちに窓形成をしており、こちらは狭義の fenestration である。⁸

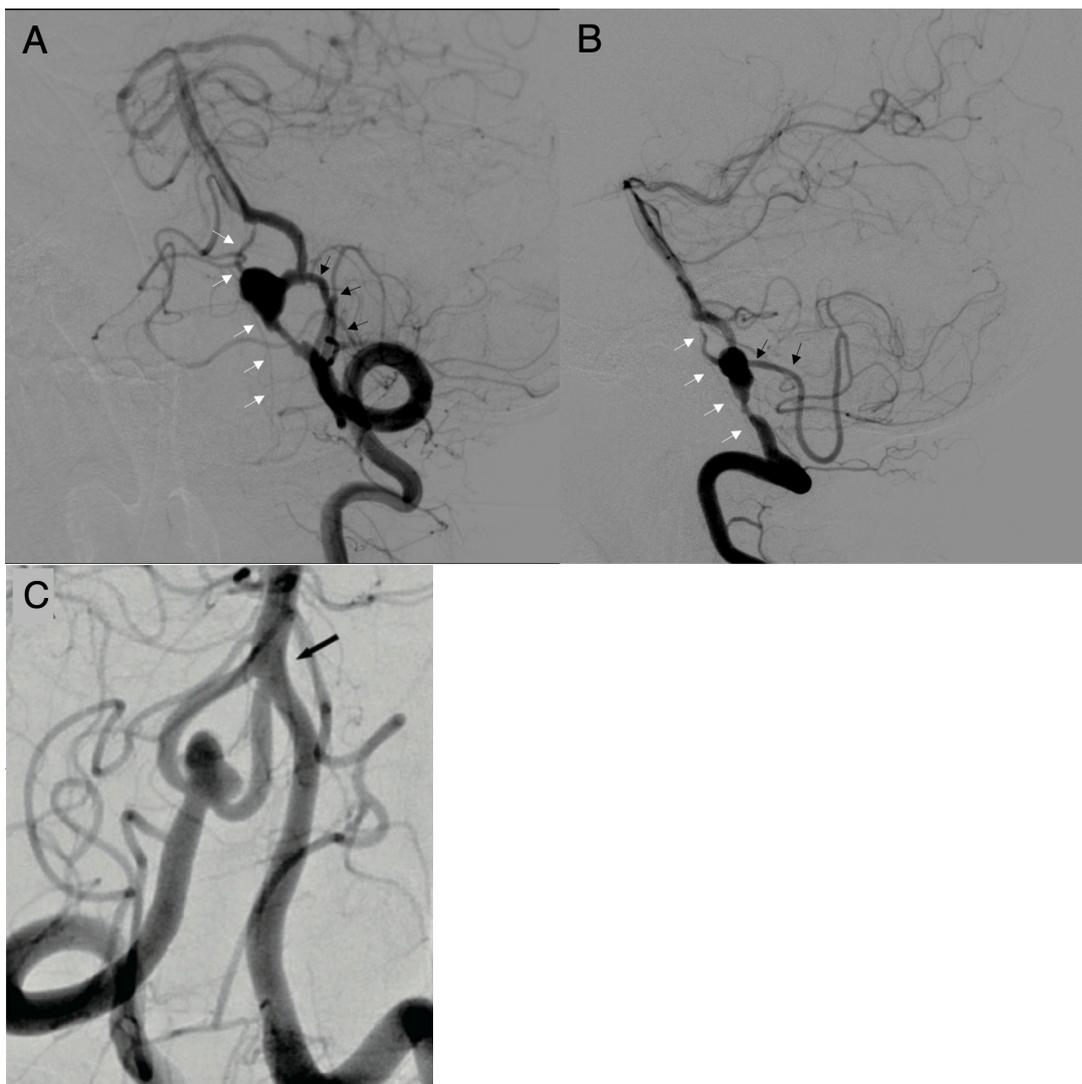


Figure 4: VA V4 portion の”fenestration”の2 亜型。

A,B: 自験例。70 代男性。弁膜症精査にて incidental に VA の解離性脳動脈瘤を指摘された。動脈瘤遠位の V4 に窓形成がみられるが、内側の細い分枝からは ASA(白矢印)、外側の太い分枝からは PICA (黒矢印) がでている。本態は PLBA の遺残と考えられる。

C: Hirata 2023 より。同様に VA fenestration の分岐部に形成された動脈瘤だが、V4 は通常と同様に延髄前面を走行し fenestration の近位から PICA が分岐している。狭義の V4 の窓形成と捉えられる。

③ 後頭・咽頭動脈系 occipito-pharyngeal system

VA 系や同じく外頸動脈の枝である顎動脈系に比べると、APA 及び後頭動脈 occipital artery (OA)の発生に

関してはヒト胚を対象とした詳細な報告は乏しい。本稿では Lasjaunias らのより概念的な発生のシエーマをもとに説明する。⁹

APA は体節構造を有する神経頭蓋(頭蓋頸椎移行部)と鰓弓構造を有する内蔵頭蓋(咽頭)の境界に位置し、体節血管であると同時に鰓弓血管であるとされる。そのため APA は体節神経(neuromeningeal br.および inferior tympanic br.)と内臓神経(pharyngeal br.)の双方を栄養する。体節を基本構造ととらえて神経頭蓋の神経血管解剖に着目すると APA の neuromeningeal br.と OA はそれぞれ原始舌下動脈 primitive hypoglossal artery(PHA)と PAA 1/2 (1st and 2nd cervical segmental artery)をその主な発生原器としており、その後縦方向に吻合することで後頭・咽頭動脈系が完成していると考えられる。原始血管吻合が発生起源となっていることから、成人においても椎骨脳底動脈系や内頸動脈系と豊富な吻合を有することが理解できる。

PHA は前述のごとく VA の発達に伴い早期に退縮し、その遺残は APA neuromeningeal br.となり頭蓋頸椎移行部の硬膜及び頸静脈孔・舌下神経管を栄養する。斜台下部では中硬膜動脈の petrosquamous br.や OA の mastoid br, 内頸動脈 meningo-hypophyseal trunk の枝である medial clival artery と吻合を持つほか、後述するように尾側では odontoid artery との吻合も見られる。

PHA が完全に遺残した遺残舌下動脈は 0.027-0.29%の頻度で見られるとされ、遺残動脈吻合の中では遺残三叉動脈に次ぎ 2 番目に頻度が高い。頸部内頸動脈背側より起始し、舌下神経管を通過し、椎骨脳底動脈と吻合する。この場合通常同側の VA は低形成となるが、VA V4 portion および PLBA の発達の程度に応じて部分的に退縮すれば、APA neuromeningeal br.と PICA,LSA が吻合を有する破格となる。¹⁰ Figure5 に自験例の遺残舌下動脈症例を示す。

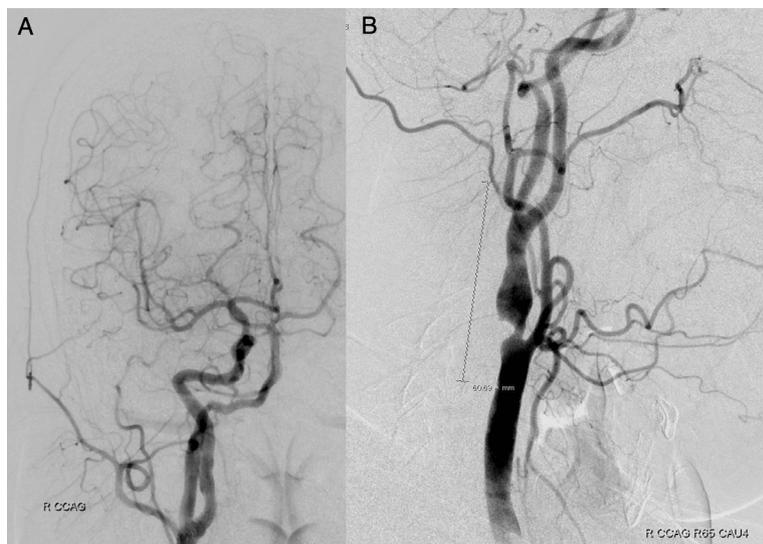


Figure 5: 遺残舌下動脈の自験例。60代男性。糖尿病、高血圧ありスクリーニングの頸動脈エコーにて頸部内頸動脈の高度狭窄を指摘され紹介。精査で遺残舌下動脈を認めた。頭部正面像(A)と頸部の斜位像(B)では外頸動脈起始の OA が確認できるが、APA 咽頭枝は認めない。大後頭孔ではなく舌下神経管を通過していることが、persistent proatlantal artery との鑑別に有用である。典型的な V3,V4 portion の形成は見られないため、頭蓋内で脳底動脈に合流する手前の部位から PICA は分岐しておらず、AICA-PICA となっている。

についての詳細な報告は乏しい。そもそも Padget のヒト胚を用いた報告では APA,OA の発生に関する記述はほとんど見られず, ventral pharyngeal artery と後頭・咽頭動脈系との発生学的な関係はその後も詳細に検討されてはいない。¹¹ Lasjaunias らは APA,OA が外頸動脈からのみではなく内頸動脈や ascending cervical artery から起始する破格があることを根拠に, 後頭・咽頭動脈系は ventral pharyngeal artery とは本来独立した血管系であると考えている。⁹ マウス胚の血管構築を電子顕微鏡を用いて観察した報告では, 妊娠 10 日(Figure 7A)では第 3 大動脈弓の背側より分岐していた PHA と第 4 大動脈弓の背側より分岐していた PAA1 が, 背側大動脈の消退とともに妊娠 13 日(Figure 7B)で primitive external carotid artery から血流を受けるように変化していることが確認できる。¹² ヒトでも基本的にはこのような併合が起きているものと思われる。Padget の報告では当初 hyoid artery より供血されていた stapedia artery system が hyoid artery の退縮とともに ventral pharyngeal artery と連絡し internal maxillary artery を形成していく様子が詳細に述べられているが, これと同様な変化が後頭・咽頭動脈系でも起きていると捉えると理解しやすい(ただし, マウスでは stapedia artery は成体でも残存し, 顎動脈系の ventral pharyngeal artery への併合は起こらない)。

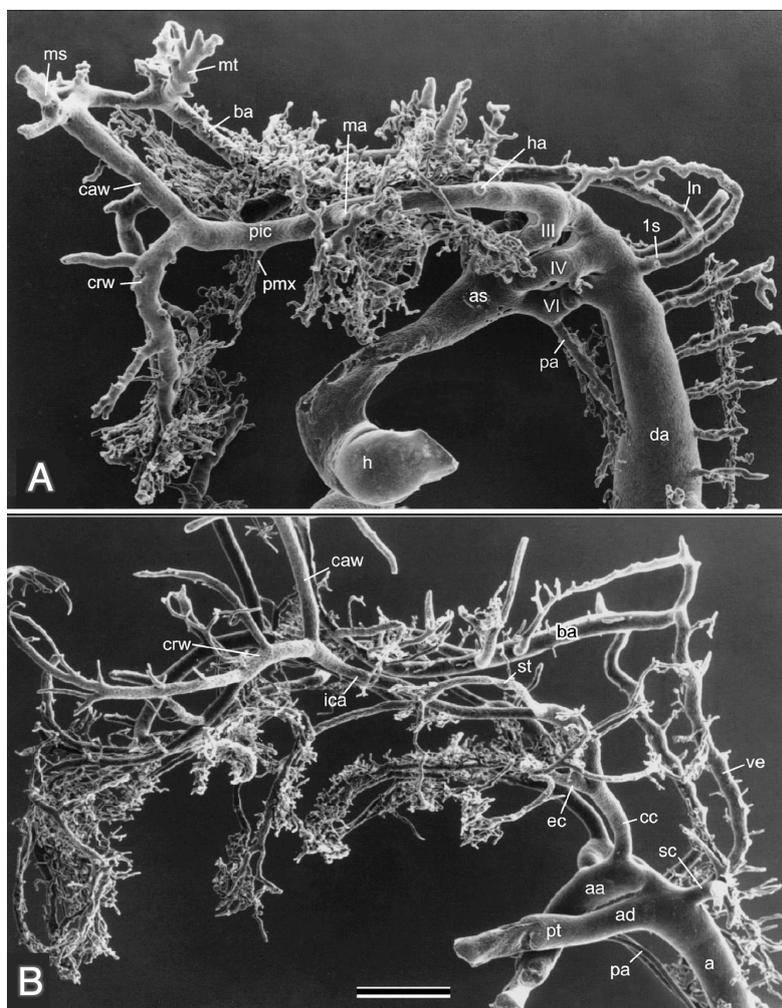


Figure7: マウス胚における咽頭弓動脈及び咽頭・後頭動脈系の発生(Hiruma 2002,一部改編)。A: 妊娠 10 日。1s(1st segmental artery)が PAA1 を指しており, この頭側で脳底動脈と原始内頸動脈を結ぶ血管が PHA に相当する(白矢印)。これが Figure5 に示されている APA (neuromeningeal br.)の元器と考

えられる。B: 妊娠13日。原始内頸動脈と上述のPHA(白矢印)および1s(白矢頭)の連絡は失われ、両者は共通幹を形成して外頸動脈 ec より供血されるようになりヒト成人と同様の咽頭・後頭動脈系が形成されるが、この時点ではまだAPA,OAのいずれも末梢で椎骨動脈との吻合が見られている。

Figure 8 に示すのは Figure 2 にあげた血管芽腫症例の右椎骨動脈撮影の 2D 撮影及び 3 次元回転撮影の矢状断 MIP slab である。VA の腹側に注目すると、C2 および C3 segmental artery が APA の musculospinal br. を介して APA の全域を供血していることがわかる。今回文献を渉猟した限りでは VA 起始の APA の報告はみられなかったが、後述する上行頸動脈が APA の起始となる稀なケースが報告されており、VA と上行頸動脈の潜在的吻合を考慮すればこのような連絡もあり得るものと思われる。一方で、本症例を VA 起始の APA と呼ぶか、APA 起始部の後天的な閉塞などに伴い VA からの吻合が二次的に開いたものかは判断が難しい。なお、本患者の左総頸動脈撮影では左 OA は通常の走行で認めたものの、APA の描出は見られなかった。

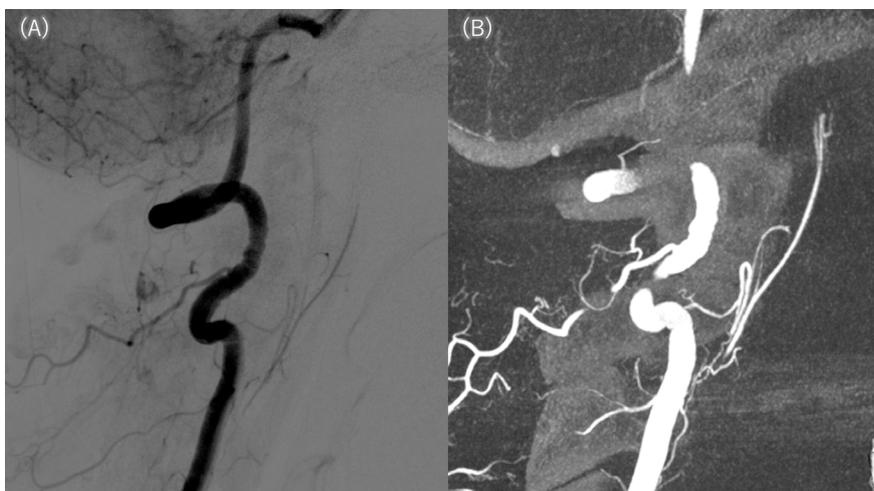


Figure 8: VA 起始?の APA. Figure 2 と同一患者の右椎骨動脈撮影

なお、後頭・咽頭動脈系と咽頭弓との頭尾方向の位置関係については、Padgett の観察と Lasjaunias のシエーマで細かい相違があることには注意が必要である。Lasjaunias によれば PHA は第 3 咽頭弓動脈のやや近位でその背側から分岐するとしているが、Padgett によれば PHA は第 4 咽頭弓動脈よりもさらに尾側から分岐している(Figure 9)。¹¹ この点は過去の本研究会でも言及されてきているが、PHA や PAA1 の遺残と考えられる後頭・咽頭動脈系が成体で多くの場合外頸動脈から供血される点を考慮すると、Lasjaunias のシエーマの方が理解しやすい。前述のマウス胚における観察(Figure 7)も Lasjaunias のコンセプトを支持するものとする。

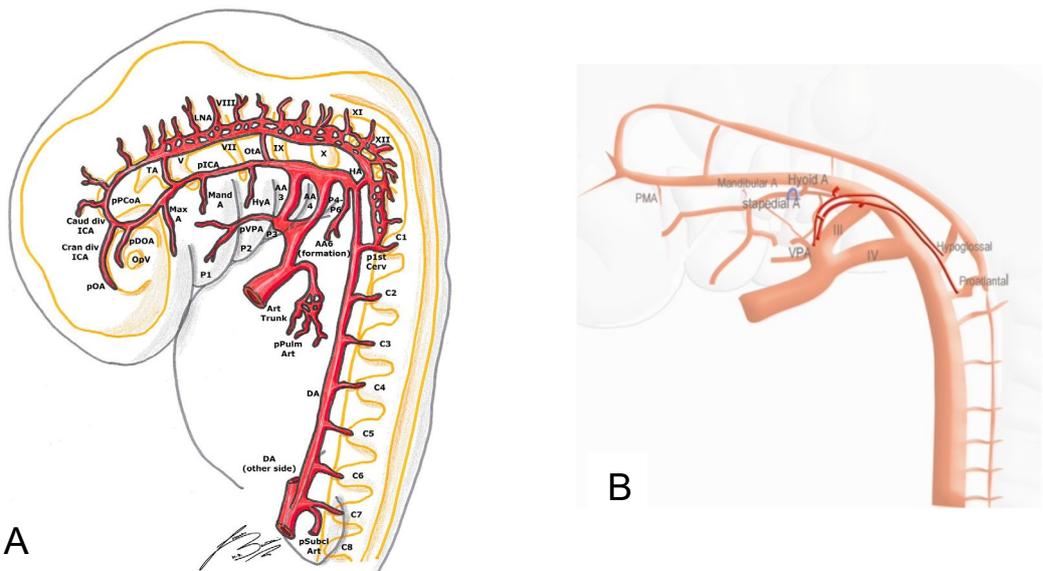


Figure 9: Padgettの観察を元にした咽頭・後頭動脈の発生。Padgettの観察(をもとにした pictorial review, Bertulli, 2021)では HA(舌下動脈)が第4咽頭弓動脈よりも尾側から分岐している(A¹¹)が、外頸動脈との位置関係を考えると発生過程でやや頭尾方向に距離のある吻合が形成されることになる(B)。Bは2009年ニッチの会、清末先生の proceeding より。

⑤ C3 segmental artery

C3/4 神経である横隔神経の分節動脈 C3 segmental artery は脊髓型の分節性の血管構築と脳型の血管構築の移行部の動脈と考えられている。¹³ VA の C3 segment でその内側に分岐する odontoid artery は C3 segmental artery に由来する血管と捉えられる。Odontoid artery は歯突起周辺で APA の hypoglossal br. と吻合している。¹⁴ このほかにも C3 segmental artery は LSA を使った intradural course を呈したり、fenestration を形成したりといった PHA, PAA 1/2 に見られるのと同様な破格を呈することがある。Figure 10 に自験例の斜台部髄膜腫術前塞栓術における APA の選択的撮影を示す。通常の 3DRA 画像では認識できていなかったが、Forced injection を行うと APA は腫瘍血管床の外側でも odontoid artery と吻合していることがわかる。

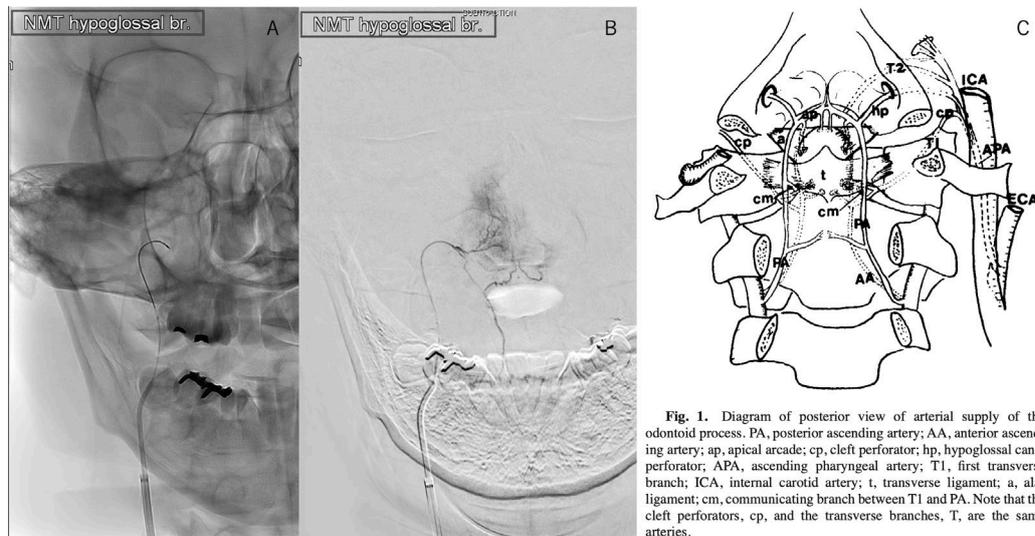


Fig. 1. Diagram of posterior view of arterial supply of the odontoid process. PA, posterior ascending artery; AA, anterior ascending artery; ap, apical arcade; cp, cleft perforator; hp, hypoglossal canal perforator; APA, ascending pharyngeal artery; T1, first transverse branch; ICA, internal carotid artery; t, transverse ligament; a, alar ligament; cm, communicating branch between T1 and PA. Note that the cleft perforators, cp, and the transverse branches, T, are the same arteries.

Figure10: APA と Odontoid artery の吻合。A,B:自験例の斜台部髄膜腫。40 台女性。経鼻内視鏡下手術の前に塞栓術を行った。右 APA hypoglossal br.にマイクロカテーテルを誘導し forced injection を行うと逆行性に同側(わずかではあるが対側も)の odontoid artery が造影された。カテーテルをさらに末梢まで進めて塞栓を行った。Figure 4A における PHA の走行と本例のマイクロカテーテルの走行が相同であることがわかる。C: 同部の血管吻合を示したシエーマ(Haffajee, 1997)。

なお、後述する posterior meningeal artery との関係で、odontoid artery を anterior meningeal artery と称することもある。胸腰椎レベルの脊椎動脈との対比から推察すると、odontoid artery は胸腰椎レベルにおいて椎体後面を走る dorsal somatic branch に相当すると考えられる。上行頸動脈 Ascending cervical artery は発生学的には VA の前方を頭尾方向に走る longitudinal artery であるが、その吻側端は segmental artery の遺残と捉えられ、C3+C4 segmental artery と考えると理解しやすい。頸髄は椎骨動脈のみから栄養されるのではなく OA(C1+2 segmental artery), ascending cervical artery(C3+4 segmental artery), deep cervical artery (C5+C6 segmental artery)からも血行を受ける。後頭部から頸部にかけてのこのような動脈の吻合を suboccipital (anastomotic) arterial crossroad と呼ぶことがあり、VA 近位の閉塞、狭窄があるときに側副血行路となりうる(Figure 11)。¹⁵

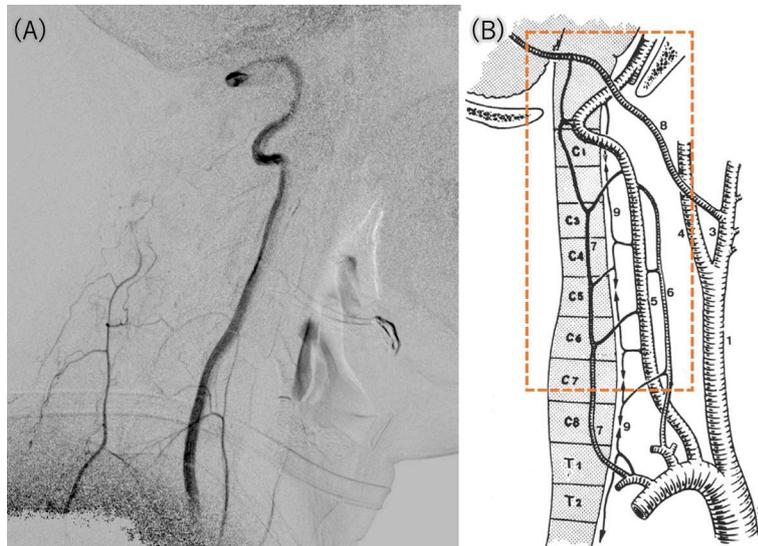


Figure 11: Suboccipital arterial crossroad. A: Figure 2, Figure 8 と同一症例の右鎖骨下動脈撮影。VA の腹側を走行する上行頸動脈、背側を走行する深頸動脈が確認できる。B: Lazorthes, 1971 より引用したシエーマ。頸髄への血流には椎骨動脈(5)のみならず ascending cervical artery(6), deep cervical artery(7), OA(8)がかかわり、これらが豊富な吻合を持っている。

⑥ Posterior meningeal artery (PMA)

PMA は通常 VA の V3 segment より起始した後、VA の背側を上行し、大後頭孔の後外側縁を通り頭蓋内に入る。その後小脳窩を内背側に進み傍正中または正中を走行して小脳テントとの接合部に達する。PMA が正中で小脳鎌附着部を走行する場合には artery of falx cerebelli と呼ばれる。PMA の起始としては V3 portion が最多だが、そのほか比較的頻度の高い破格として、APA や OA, PICA から起始するものが多く (Figure 12)¹⁶、より稀ではあるが odontoid artery や LSA との吻合も指摘されている。これらの破格の存在については本稿で述べてきた頭蓋頸椎移行部における PLBA system および PHA,PAA1/2 からなる APA,OA,PICA と VA の発生様式を考えれば理解がしやすい。

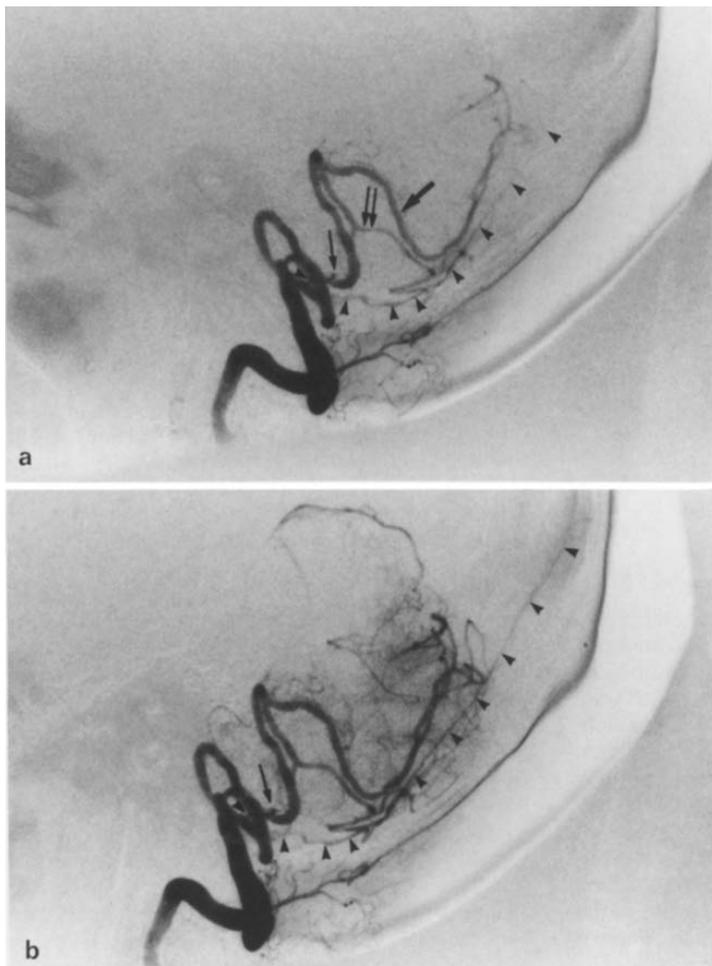


Fig. 1 a and b. Case 1. Left vertebral arteriogram. Lateral subtraction prints. The PMA (arrowheads) arises anomalously from the lateral medullary segment of PICA (small arrow). The tonsillohemispheric branch of PICA (double small arrows) and the vermian branch of PICA (large arrow) course anterior to the PMA

Figure12: PICA の lateral medullary segment より起始する PMA(Tanohara, 1987)。

Odontoid artery と同様に脊椎動脈と対比すると、PMA は脊椎背側の硬膜外腔を追及の前面を横走する prelaminar artery に相当すると考えられる。胸腰椎部の segmental artery ではその分岐を腹側から背側に見ていくとその構造が把握しやすい¹⁷が、頭蓋頸椎移行部でも (完全な segmental pattern ではないものの) それぞれに相同な血管が指摘できる(Table)。

分節動脈	脊髄・脊椎部	頭蓋頸椎移行部
Radiculomeningeal a. (Anterior br.)	Dorsal somatic branch	Odontoid artery (C3) (Anterior meningeal artery)
Radicullomedullary A.	ASA	VA(V4)/ BA
Radiculopial artery	LSA/PSA	PICA
Radiculomeningeal a. (Posterior br.)	Prelaminar artery	Posterior meningeal artery
	Dorsal spinal artery	OA 3 rd segment

Table: 胸腰椎の脊髄脊椎動脈と頭蓋頸椎移行部との相同性

Streeter によると胎生期の脳胞は原始血管網に覆われており、これらの血管網は動脈及び静脈に分化する。硬膜や骨が形成されていくとともにこれらの血管も脳表血管と硬膜血管、体表血管へと3層に分離されていくが、その際に幾つかの吻合が遺残するとされる。¹⁸ 発生が進むにしたがい脳表血管と硬膜血管の距離は離れていき、それに伴い潜在的な duro-pial anastomosis はほとんど消退していくと思われるが、PMA, PICA, LSA などの存在する頭蓋頸椎移行部、正中近傍の部位は比較的成長による変化が少なく、これらの遺残が起こりやすい可能性があると推測できる(2020年ニッチの会、清末先生)。頭蓋頸椎移行部の硬膜動静脈瘻は脊髄及び小脳脳幹の pial artery からの feeding が多く複雑な血管構築を取ること、故に血管内治療による治癒率が低く直達手術が有用であることが指摘されているが、この血管発生の特殊性が反映されていると思われる。¹⁹⁻²¹

おわりに

頭蓋頸椎移行部の血管解剖につき概説した。VA V3 portion (PAA1) と PLBA system を中心にとらえることで同部位の血管の発生の理解は容易になると考えるが、これまで概説してきたように原始血管吻合を介した内頸動脈系の関与、外頸動脈分枝である(ことの多い)後頭・咽頭動脈系の関与、上部頸部動脈の関与も見られる頭蓋頸椎移行部の血管解剖の理解には中枢神経系の血管発生の包括的な知識が必要である。学習の難しい分野であり本稿にも理解・説明が不完全な点が多々見受けられると思うが、このまとめが今後学習を進めていくためのプラットフォームとなれば幸いである。

参考文献

1. DH P. Development of cranial arteries in human embryo. *Contrib Embryol.* 1948;32:205-262.
2. Gregg L, Gailloud P. The Role of the Primitive Lateral Basilovertbral Anastomosis of Padget in Variations of the Vertebrobasilar Arterial System. *The Anatomical Record.* 2017;300:2025-2038.
3. Sabin FR. *Origin and Development of the Primitive Vessels of the Chick and of the Pig.* Carnegie Institution of Washington; 1917.
4. MOFFAT DB. The development of the hind-brain arteries in the rat. *J Anat.* 1957;91:25-39.
5. Siclari F, Burger IM, Fasel JH, Gailloud P. Developmental anatomy of the distal vertebral artery in relationship to variants of the posterior and lateral spinal arterial systems. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2007;28:1185-1190.
6. Ota T, Dofuku S, Sato M. Persistence of Primitive Lateral Basilovertbral Anastomosis with a Ruptured Posterior Inferior Cerebellar Artery Aneurysm: A Case Report. *NMC Case Rep J.* 2022;9:69-72. doi: 10.2176/jns-nmc.2021-0386
7. Ota T, Komiyama M. Vascular supply of the hindbrain: Basic longitudinal and axial angioarchitecture. *Interv Neuroradiol.* 2022;28:756-764.
8. Miyata H, Ninomiya F, Fujita T, Nonoyama Y, Nakazawa T, Fukao S. A Case of Horizontal Stent-assisted Coiling for an Aneurysm Arising from Fenestration of the Vertebral Artery: A Technical Case Report. *Neurol Med Chir (Tokyo).* 2023.
9. Lasjaunias P, Berenstein A, Brugge KT. *Clinical Vascular Anatomy and Variations.* Springer Berlin Heidelberg; 2001.
10. Namba K. Carotid-vertebrobasilar Anastomoses with Reference to Their Segmental Property.

Neurol Med Chir (Tokyo). 2017;57:267-277.

11. Bertulli L, Robert T. Embryological development of the human cranio-facial arterial system: a pictorial review. *Surg Radiol Anat*. 2021;43:961-973.
12. Hiruma T, Nakajima Y, Nakamura H. Development of pharyngeal arch arteries in early mouse embryo. *J Anat*. 2002;201:15-29.
13. 小宮山雅樹. 詳細版脳脊髄血管の機能解剖. メディカ出版; 2011.
14. Haffajee MR. A contribution by the ascending pharyngeal artery to the arterial supply of the odontoid process of the axis vertebra. *Clin Anat*. 1997;10:14-18.
15. Lazorthes G, Gouaze A, Zadeh JO, Jacques Santini J, Lazorthes Y, Burdin P. Arterial vascularization of the spinal cord. *Journal of Neurosurgery*. 1971;35:253-262.
16. Tanohata K, Maehara T, Noda M, Katoh H, Sugiyama S, Okazaki A. Anomalous origin of the posterior meningeal artery from the lateral medullary segment of the posterior inferior cerebellar artery. *Neuroradiology*. 1987;29:89-92.
17. Kiyosue H, Matsumaru Y, Niimi Y, Takai K, Ishiguro T, Hiramatsu M, Tatebayashi K, Takagi T, Yoshimura S. Angiographic and Clinical Characteristics of Thoracolumbar Spinal Epidural and Dural Arteriovenous Fistulas. *Stroke*. 2017;48:3215-3222.
18. Streeter GL. The Developmental Alterations in the Vascular System of the Brain of the Human Embryo. *Contrib Embryol*. 1918;8:5-38.
19. Hiramatsu M, Sugiu K, Ishiguro T, Kiyosue H, Sato K, Takai K, Niimi Y, Matsumaru Y. Angioarchitecture of arteriovenous fistulas at the craniocervical junction: a multicenter cohort study of 54 patients. *J Neurosurg*. 2018;128:1839-1849.
20. Fujimoto S, Takai K, Nakatomi H, Kin T, Saito N. Three-dimensional angioarchitecture and microsurgical treatment of arteriovenous fistulas at the craniocervical junction. *J Clin Neurosci*. 2018;53:140-146.
21. Takai K, Endo T, Seki T, Inoue T, Koyanagi I, Mitsuhashi T, Ito K, Iwasaki M, Uchikado H, Umehayashi D, et al. Neurosurgical versus endovascular treatment of craniocervical junction arteriovenous fistulas: a multicenter cohort study of 97 patients. *Journal of Neurosurgery*. 2022;137:373-380.