Niche Neuro-Angiology Conference 2024

### 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 basilovertebral 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。頭蓋頚椎移行部 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・消退していく外頚動脈の血管発生は複雑にみえる。一方で背側構造である後頭蓋及び上位頚椎 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。頭蓋頚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,最後に上部頚部 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)<sup>1,2</sup>

胎児長 3mmn の時期に第1大動脈弓より原始内頚動脈と原始三叉神経動脈の2つの分枝が認められ る。後者は原始内頚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頚動脈と LNA をつなぐ横方向の原始血管吻合 primitive carotid-basilar anastomoses 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

### Koizumi S

1

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 頚神経に伴走する動脈である。VA の V1 および V2 portion は, 頚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。頚部より上行する V1 および V2 portion の発達に伴い, PAA1 の腹側は妊娠第6週には退縮し内頚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。頭蓋頚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。<sup>3</sup>



Figure1. Padget と Moffat の観察をまとめた PLBA の発達のシェーマ(Gregg 2017)。図の ProA は本文中の PAA1 に相当する

## 2 primitive lateral basilovertebral anastomosis<sup>1,2</sup>

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 LNA より外側に primitive lateral basilovertebral 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。<sup>1</sup> 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)。<sup>4</sup> PLBA はヒトでは早期に退縮するが, その遺残は頭側で前下小脳動脈(AICA) 後下小脳動脈 (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頚椎移行部を見ると, 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, 頭蓋頚椎移行 部における VA, AICA/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。<sup>25-7</sup>



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)。

自験例における頚髄 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。







Figure3: 40 代女性。感覚低下を主訴に指摘された上位頚髄血管芽腫。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, 頚髄を重ねた融 合 3 次元画像(F)。LSA と頚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例を Figure4A,B に示す。本例では V 4 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。<sup>8</sup>





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), 外速の太い分枝からは 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ており, 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 系や同じく外頚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 発生のシェーマをもとに説明する。<sup>9</sup>

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(1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> 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える。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頚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 頭蓋頚椎移行部の硬膜及び頚静脈孔・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, 内頚動脈 meningohypophyseal 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%の頻度でみられるとされ、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。頚部内頚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。<sup>10</sup> Figure5 に自験例の遺残舌下動脈症例を示す。

### Niche Neuro-Angiology Conference 2024



Figure5: 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頚動脈エコーに て頚部内頚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)と頚部の 斜位像(B)では外頚動脈起始の 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 神経管を通っていることが,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。

ー方で APA は hypoglossal br.のみではない。胎生 3-4 週ごろ, 胚子の腹側には特徴的な 6 対の鰓 弓構造が発生し, 頚部・顔面が形成される。この鰓弓構造に対応する動脈は, ventral aorta と dorsal aorta を結ぶ 6 つの大動脈弓である。各鰓弓にはそれぞれ固有の脳神経, 筋肉が入り, それぞれの鰓 弓動脈が栄養する。第 1 鰓弓(顎骨弓)には V2 及び V3, 第 2 鰓弓(舌骨弓)には VII, 第 3 鰓弓に は IX, 第 4-6 鰓弓には X 神経が入る。第 3 大動脈弓は内頚動脈の近位部になるが, その基部から PHA が起始する。PHA からは第 1, 第 2 大動脈弓と連絡する血管も分岐しており, これがのちの APA pharyngeal br.になると考えられている(Figure 6)。Lasjaunias らは著書で PHA と APA の関 係を重視し, "The ascending artery is the artery of the third branchial arch"と述べているが, 現時点での知見をまとめればより厳密には"The neuromeningeal branch of the APA is the artery of the third branchial arch"とするべきであろう。<sup>9</sup>



Figure 6: Lasjaunias による咽頭・後頭動脈系の発生のシェーマ。<sup>9</sup> 印刷資料では白黒になってしまうが,色付けは 2018 年ニッチの会,宮本先生の proceeding より。PHA をその主な発生起源とする APA および OA(オレンジ)が,体節血管である LNA,PLBA system(黄緑)と鰓弓血管である大動脈弓 (ピンク) との間を走る血管であり,いずれとも豊富な吻合を持ちうることが理解できる。

OA は外頚動脈から分岐して上方に向かう 1st portion (digastric segment), CO-C1 space で mastoid の内側を水平に走行する 2nd portion (horizontal segment), これより末梢の 3rd portion (distal segment) に分けられる。特に CO-C1 space を横走する 2nd portion は PAA1 の遺残で あることがイメージしやすい。1<sup>st</sup> portion では APA や stylomastoid a.を分岐し, これらは頚静脈 孔へ向かう。2<sup>nd</sup> portion では, mastoid br.が mastoid foramen を通って頭蓋内に入り, 中硬膜動 脈の petrosquamous br.や APA の neuromeningeal br.と吻合する。このほか posterior meningeal artery や artery of tentorium cerebelli を分岐することがあり, ここでも VA V3 portion との吻合 がありうる (⑥参照)。PAA1/2 の完全な遺残は PHA よりもさらに少ないが, OA が VA V3 portion のほか PICA などの頭蓋内血管と潜在的な吻合を持ちうるのはこのような発生機序による(Figure 6)。

## ④ 外頚動脈と咽頭・後頭動脈系の吻合

OA,APA は最終的に第2大動脈弓の腹側の遺残である primitive external carotid artery (ventral pharyngeal artery)より血流を受けるようになり成人型の外頚動脈が完成すると考えられるが、この 発生過程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。<sup>11</sup> Lasjaunias らは APA,OA が外頚動脈からのみで

はなく内頚動脈や 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。<sup>9</sup> 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。<sup>12</sup>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 stapedial 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 stapedial 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(1<sup>st</sup> segmental artery)が PAA1 を指しており, この頭側で脳底動脈と原始内頚動脈を 結ぶ血管が PHA に相当する(白矢印)。これが Figure6 に示されている APA (neuromeningeal br.) の源器と考えられる。B: 妊娠13日。原始内頚動脈と上述の 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頚動脈 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、後述する上行頚動脈が APA の起始となる稀なケ ースが報告されており、VA と上行頚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、本患者の左総頚動脈撮影では左 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 と同一患者の左椎骨動脈撮影

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,Padgetの観察とLasjaunias のシェ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,Padget 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)。<sup>11</sup>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頚動脈から供血され る点を考慮すると,Lasjaunias のシェ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考える。



Figure 9: Padget の観察を元にした咽頭・後頭動脈の発生。Padget 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(A<sup>11</sup>)が, 外頚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 は脊髄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。<sup>13</sup> 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。<sup>14</sup>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。



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ェーマ(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える。 上行頚動脈 Ascending cervical artery は発生学的には VA の前方を頭尾方向に走る longitudinal

## Niche Neuro-Angiology Conference 2024

artery であるが, その頭側端は 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。頚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。後頭部から頚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)。<sup>15</sup>



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頚動脈, 背側を走行する深頚動脈が確認できる。B: Lazorthes, 1971 より引用したシェーマ。頚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 が正中で小脳鎌付着部を走行する場合には artery of falx cerebelli とも呼ばれる。 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)<sup>16</sup>,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頚椎移行部における 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<sup>17</sup>が, 頭蓋頚椎移行部でも(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.	Dorsal somatic branch	Odontoid artery (C3)
(Anterior br.)		(Anterior meningeal artery)
Radicullomedullary A.	ASA	VA(V4)/ BA
Radiculopial artery	LSA/PSA	PICA
Radiculomeningeal a.	Prelaminar artery	Posterior meningeal artery
(Posterior br.)		
	Dorsal spinal artery	OA 3 <sup>rd</sup> 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。<sup>18</sup>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頚椎移行部,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)。頭蓋頚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。<sup>19-21</sup>

## おわりに

頭蓋頚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 合を介した内頚動脈系の関与,外頚動脈分枝である(ことの多い)後頭・咽頭動脈系の関与,上部頚部動 脈の関与も見られる頭蓋頚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。

## References

- 1. DH P. Development of cranial arteries in human embryo. *Contrib Embryol.* 1948;32:205-262.
- Gregg L, Gailloud P. The Role of the Primitive Lateral Basilovertebral 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.
- Ota T, Dofuku S, Sato M. Persistence of Primitive Lateral Basilovertebral Anastomosis with a Ruptured Posterior Inferior Cerebellar Artery Aneurysm: A Case Report. *NMC Case Rep J*. 2022;9:69-72.
- 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.
- 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.
- Streeter GL. The Developmental Alterations in the Vascular System of the Brain of the Human Embryo. *Contrib Embryol.* 1918;8:5-38.
- 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.
- Takai K, Endo T, Seki T, Inoue T, Koyanagi I, Mitsuhara T, Ito K, Iwasaki M, Uchikado H, Umebayashi 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.