

大脳穿通枝の解剖

Anatomy of cerebral perforators

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: superficial perforator, deep perforator, perforated substance

1. はじめに

大脳実質に分布する動脈は大脳皮質を貫通する表在穿通枝 (superficial perforator)と大脳底部から貫通する深部穿通枝 (deep (basal) perforator)とに分けられる。表在穿通枝は主幹動脈の末梢である皮質動脈から分岐した pial branch から起始して、大脳皮質や皮質下白質、深部白質を灌流している²⁾。一方、深部穿通枝は主幹動脈の近位部から起始して多くは前・側・後有孔質を貫通して基底核、内包、視床などを灌流している^{4,12)}。両者はいずれも脳室壁に向かって centripetal に走行している。一般には穿通枝は終動脈 (end artery)で側副血行路の形成はほとんどないとされているが^{2,13)}、ウイリス動脈輪閉塞症などでは穿通枝間の側副血行路が認められ、また high flow の動静脈シャント疾患でも認められることがある。本稿では表在穿通枝と深部穿通枝について概説する。

2. 穿通枝の発生

穿通枝の発生に関する論文は限られているが、Marín-Padilla は表在穿通枝の 1 つである髄質動脈の発生を詳細に検討している¹⁸⁾。そこではヒトの脳動脈の発生を大きく extracerebral meningeal compartment と intracerebral microvascular compartment の 2 つに分けて、後者はさらに extrinsic と intrinsic に分けている。Extracerebral meningeal compartment からは脳表の動脈が形成され、穿通枝は intracerebral microvascular compartment から形成されていくが、これらは互いに独立したものではなく、密接に関係している (Table)。

Table: ヒトの脳血管の発生 (文献 18 を改変)

1. Extracerebral meningeal compartment (= meninx primitiva)
(a) outer dural lamella: main venous sinus
(b) middle arachnoid lamella: main arteries and veins
(c) pial lamella: pial capillary anastomotic plexus

2. Intracerebral microvascular compartment
2-A. Intracerebral extrinsic microvascular compartment
(a) perforating capillaries (→arterioles and venules)
(b) Virchow-Robin space
2-B. Intracerebral intrinsic microvascular compartment
intrinsic capillary anastomotic plexus between contiguous perforators

Extracerebral meningeal compartment はいわゆる原始髄膜 (meninx primitiva)に相当し、外側から静脈洞を含む outer dural, 脳表の動静脈を含む middle arachnoid, そして pial capillary anastomotic plexus (PCAP) (superficial leptomeningeal vascular meshwork)を含む pial の 3 つの薄層 (lamellae)からなる¹⁸⁾。これまで Padget を代表とする脳動脈や静脈・静脈洞の発生はいずれも extracerebral meningeal compartment のもので、穿通枝が形成される intracerebral microvascular compartment に関しては触れられていない。静脈洞や主幹動脈は胎生 8 週までに概ね形成されるが^{23,24)}、穿通枝の発生は灰白質の発達とともに進行し、終脳の表面では皮質の形成が始まる胎生 8 週以降から起こる。

大脳皮質の発生は脳室に沿った脳室帯 (ventricular zone)で形成された神経幹細胞が伸長して軟膜直下に辺縁帯 (marginal zone)を、その深部にサブプレート (subplate)を形成するところから始まる。その後、脳室帯で神経幹細胞からニューロンが産生され、脳の表面側へと移動して、辺縁帯とサブプレートとの間に皮質板 (cortical plate)を inside-out 様式に構築する。その後、脳室帯とサブプレートの間には皮質板に出入りする軸索が走行している中間帯 (intermediate zone)を認めるようになり、さらに発生が進むと脳室帯と中間帯との間に脳室下帯 (subventricular zone)が形成され、ニューロンの産生はここで行われるようになる^{1,19)}。なお辺縁帯と皮質板が成人の大脳皮質に、中間帯が白質となる。

穿通枝の発生は extracerebral meningeal compartment の最も脳表側である pial lamellae に認められる PCAP から始まる。発生の初期段階では脳表は無数の密に連なった PCAP に覆われており、ここから大脳を貫通する全ての動静脈が発生し、大脳の発達とともに胎生期から生後にわたってこれらも発達していく。PCAP の血管径は 3-7 μm で、大脳皮質の層形成が始まる胎生 6-7 週頃には大脳表面全体に認められ、middle arachnoid lamellae の脳表の動静脈の発達とともにこれらと結合していく。皮質形成が始まる胎生 8 週以後になると、PCAP から発達した脳表の毛細血管 (pial capillary)がまず大脳表面と接して、sprouting により内皮細胞から糸状仮足 (filopodia)を大脳皮質内に伸ばしていく。これにより脳表の毛細血管は漏斗状に脳内へ伸展していくが、その周囲は脳表の薄層に覆われた形となっており、伸展した毛細血管との間隙が Virchow-Robin 腔である (Fig.1)。貫通した毛細血管の多くは大

脳皮質までに留まるが、一部は白質まで伸びていく。これらは最終的に循環動態や周囲の環境に応じて、動脈または静脈へと分化していく¹⁸⁾。穿通枝の内、周囲を Virchow-Robin 腔に囲まれている部分が intracerebral extrinsic microvascular compartment となり、これらは上述の通り脳表側から発達する。

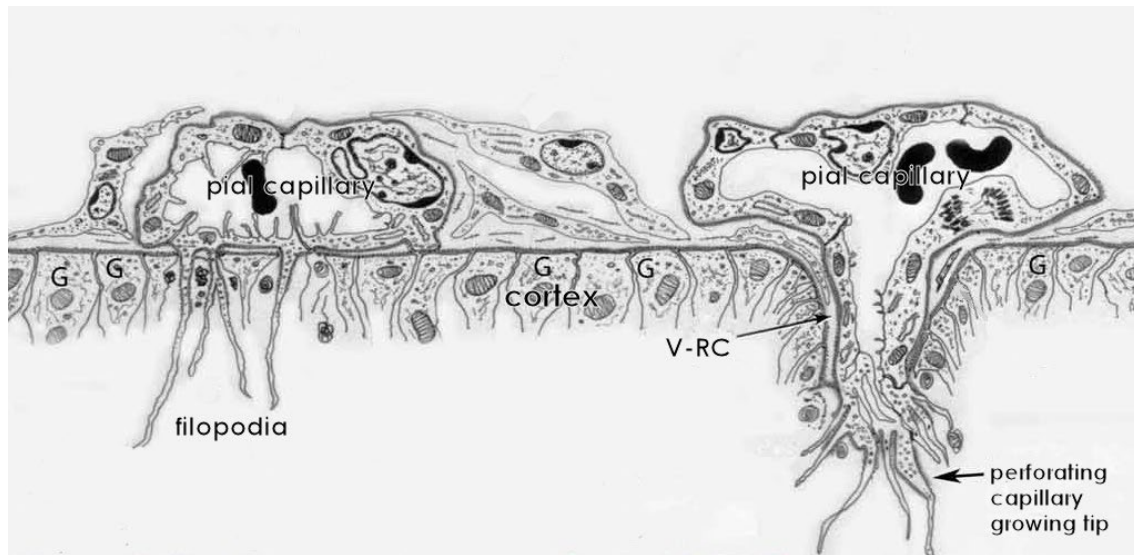


Fig.1: 穿通枝の発生 (文献 18 より改変)

脳表の毛細血管 (pial capillary)の内皮細胞から皮質内に糸状仮足 (filopodia)を伸ばし、そこから脳表の毛細血管は漏斗状に脳内へ伸展していく。伸展した毛細血管と脳表との間隙が Virchow-Robin 腔である。略語: V-RC: Virchow-Robin compartment

一方、脳内での穿通枝間の intrinsic capillary anastomotic plexus である intracerebral intrinsic microvascular compartment は、まず脳室下帯の深部 (脳室側)で認められる。すなわち Virchow-Robin 腔内の毛細血管が、その外に出て周囲の神経組織に分布するようになる。その後、脳室下帯から中間帯、サブプレートでも intracerebral intrinsic microvascular compartment の形成が認められるようになり、大脳皮質の錐体細胞層の形成が完成する胎生 15 週頃になると皮質にまで及ぶ。その内皮細胞はグリア細胞からの突起に覆われ、これは血液脳関門 (blood-brain barrier)として機能する。大脳の発達とともに脳内の毛細血管叢は再構築 (active angiogenesis, reabsorption)され、最終的に脳表から貫通してきた毛細血管とつながるようになる¹⁸⁾。

穿通枝の形成は大脳の腹側 (底部)から始まり、背側 (表面)へと広がっていき、背側では上述の通り胎生 8 週以後となるが、底部では胎生 7 週頃より認められる^{6,18)}。底部の穿通枝は線条体や視床へ向かうが、胎生 7 週頃は視床が大きく発達する時期で、さらに尾状核の形成が始まる時期でもある²¹⁾。この時期に extracerebral meningeal compartment では primitive olfactory artery から外側に向かって embryological lateral striate artery が形成される²¹⁻²³⁾。Recurrent artery of Heubner (RAH)やレンズ核線条体動脈 (lenticulostriate artery: LSA)はこの embryological lateral striate artery が脳表の PCAP とつながり形成されると考えられる。

3. 表在穿通枝 (Fig.2)

脳表を穿通して大脳皮質や白質に分布する表在穿通枝は皮質動脈 (cortical artery), 皮質下動脈 (subcortical artery), 深部白質動脈 (deep white matter artery)の3つに分けられ^{2,20)}, 深部白質動脈がいわゆる髄質動脈 (medullary artery)である。これらは主幹動脈の末梢となる皮質動脈から直接分岐しているわけではなく, 脳表には皮質動脈から分岐した pial branch が互いに吻合しながら走行しており, そこから分岐して脳表を垂直に貫通する^{20,28)}。数本 (1-8 本)の表在穿通枝が1本の髄質静脈 (medullary vein)を取り囲むような構造となっており, 穿通枝の貫通部間の距離は400-600 μm と一定で, これは出生前後で変わらない¹⁸⁾。3つの中では皮質動脈の数が最も多く, したがって皮質の方が白質よりも血管密度が高い^{13,20,28)}。

皮質動脈は大脳皮質を灌流しており, 血管径は20-90 μm で, 貫通する距離(深さ)で superficial (short), middle, deep (long) branch の3つに分けられる。大脳皮質の厚さは部位により異なるが平均3mm程度で, short branch は脳表から350-1200 μm まで (superficial zone)を灌流しており, 3つのうち最も細く, 枝分かれも少ない。Middle branch は脳表から1200-2000 μm の部位 (middle zone)を灌流している。Deep branch が最も発達しており, middle zone より深部で皮質下白質の手前まで (deep zone)灌流している。Middle および deep branch はいずれも走行の途中で反回枝 (recurrent branch)を分岐し, その手前の領域も灌流している^{20,28)}。したがって皮質内では middle zone と deep zone の血管密度が高い。

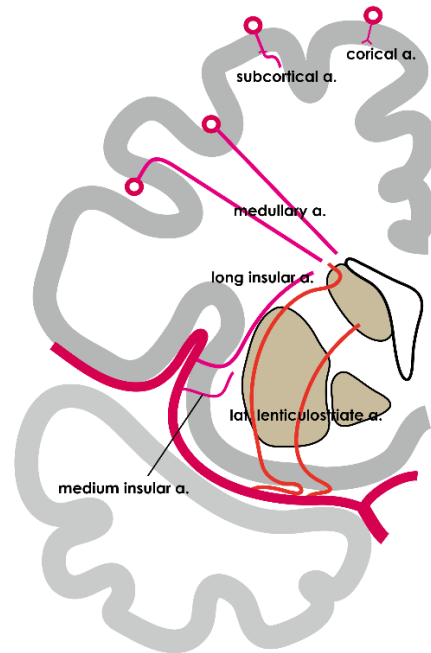
皮質下動脈は血管径が40 μm 前後で, 皮質下白質 (主に U-fiber)を灌流しており, 走行の途中で皮質の deep zone への枝を数本分岐している^{2,20)}。脳回の山の部分を貫通するものは皮質内を直線状に走行してそのまま皮質下へと向かうが, 脳溝内で貫通するものは皮質内を直線状に走行した後に皮髄境界で脳室方向に直角に向きを変える。いずれも皮髄境界を越えたところで蛇行 (coil, loop, spiral)を認め, 皮質下白質内では枝分かれをしながら徐々に径が細くなる²⁰⁾。

髄質動脈は深部白質を灌流しており, 側脳室の外側近傍に到達するまであまり枝分かれすることなく直線状に走行する^{2,20,28)}。血管径は100-200 μm と皮質動脈や皮質下動脈よりも太く, 走行の途中でその径はほとんど変わらない²⁾。

中大脳動脈の島部 (M2 segment)から起始する表在穿通枝は insular artery とも呼ばれ, short insular artery が皮質動脈に, medium insular artery が皮質下動脈に, そして long insular artery が髄質動脈に相当する。Long insular artery はレンズ核の外側にある島皮質下 (外包 (external capsule), 前障 (claustrum), 最外包 (extreme capsule))を通り, 最終的により末梢 (M3-4 segment)の軟膜動脈から起始する髄質動脈と同様に側脳室の外側近傍, すなわち半卵円中心・放線冠の付近まで到達する²⁾。

Fig.2: 表在穿通枝 (正面から見た図)

表在穿通枝は皮質動脈, 皮質下動脈, 髓質動脈に分けれる. 髓質動脈は枝分かれをほとんどせずに側脳室の外側近傍に到達する. また中大脳動脈の島部から起始する表在穿通枝は insular artery と呼ばれる.



皮質動脈, 皮質下動脈, 髓質動脈を分岐する pial branch は隣接するものとの吻合が密接に認められる. しかし表在穿通枝は脳内では隣接するものでも吻合は毛細血管レベルで, さらにその範囲は非常に限局しており, 側副血行路としての機能は乏しい^{2,28)}. しかし髓質動脈は脳室壁周囲では細動脈レベルで隣接するものとの吻合を認めることがある²⁰⁾. また髓質動脈は側脳室の外側近傍にある放線冠まで到達するが, そこでは深部穿通枝との吻合を毛細血管レベルで認めることがある³⁾. このような放線冠での表在穿通枝と深部穿通枝の吻合は, 尾状核へ向かう深部穿通枝の一部が側脳室外側角のレベルで外側へ向きを変えて深部白質に向かい, それが髓質動脈と毛細血管レベルで吻合を認めたものと考えられる. 同様に視床のレベルでも表在穿通枝と深部穿通枝の吻合は存在する³⁾.

4. 深部穿通枝 (Fig.3A,B)

大脳の深部穿通枝のほとんどは脳底部の主幹動脈から分岐し, くも膜下腔を走行した後に, 有孔質を貫通して脳内に入り, 尾状核, 被殻, 淡蒼球, 内包や視床を灌流している. 有孔質には前, 側, 後有孔質がある.

前有孔質 (anterior perforated substance)はシルビウス裂の深部に位置し, 前方は内・外側嗅索, 後方は視索および側頭葉に囲まれた菱形の領域で, 内側は半球間裂に, 外側は島限に続いている²⁹⁾. 前有孔質を貫通するのは前脈絡叢動脈, 内頸動脈, 前大脳動脈, 中大脳動脈からの穿通枝で, 前大脳動脈からの穿通枝には水平部 (A1 segment)からのものと RAH があり, 両者を合わせて内側線条体動脈 (medial striate artery)と呼ぶこともある. また中大脳動脈からの穿通枝は LSA である. 前脈絡叢動脈および内頸動脈からの穿通枝はそれぞれ 1-10 本 (平均 2-3 本), 前大脳動脈の水平部からの穿通枝は 0-17 本 (平均 2-6 本), RAH は 1-2 本, LSA は 1-17 本 (平均 7-10 本)認められ, くも膜下腔を走行

する間にさらに枝分かれをして前有孔質に到達する^{4,10,12,14,15,17,29,31}。多少の overlap はあるが、前有孔質の貫通部位および脳内の灌流領域はほぼ決まっている。前有孔質を下から見ると逆三角形を呈しており、その底辺に沿って RAH が、頂点周囲で前脈絡叢動脈と内頸動脈からの穿通枝が貫通しており、これらの間の内側を前大脳動脈の水平部からの穿通枝が、外側を LSA が貫通している²⁹。前有孔質を貫通する深部穿通枝の灌流領域は尾状核、被殻、淡蒼球、内包となり、尾状核、被殻、淡蒼球へは前大脳動脈の水平部からの穿通枝、RAH、LSA が関与している。いずれの領域も前方内側から後方外側にかけて前大脳動脈水平部、RAH、LSA の順に灌流している。ただし尾状核に関しては前大脳動脈の水平部からの穿通枝の灌流領域は頭部内側に限られる。内包前脚も前大脳動脈の水平部からの穿通枝、RAH、LSA が関与しており、この領域も overlap は認めるが基本的には前内側から後外側に向かって先ほどの順番通りに灌流している^{4,5,12,13,15,29,31}。また LSA は内包膝部や後脚前方も灌流している^{5,12,29,31}。前脈絡叢動脈と内頸動脈からの穿通枝の灌流領域はいずれも内包膝部と後脚前方、淡蒼球の内側であるが、前脈絡叢動脈の方がより後方部分まで灌流している^{4,5,11,29,31}。また前脈絡叢動脈からは側脳室下角に入る手前で内包視床動脈 (capsulothalamic artery) を認めることがあり、これは前有孔質を貫通せずに、視床枕、外側膝状体、内包後脚、尾状核尾部を灌流する⁴。

側有孔質 (lateral perforated substance) は傍正中有孔質 (paramedian perforated substance) と呼ばれ、外側が視索、内側が下垂体柄および乳頭体 (mamillary body)、後方が大脳脚 (cerebral peduncle) に囲まれた正三角形を呈しており、その下方を後交通動脈が走行している^{8,27}。後交通動脈からの穿通枝が貫通しており、これは 1-18 本 (平均 7-8 本) 認められ、後交通動脈の形態 (adult type, fetal type, 低形成) に関係なくほぼ一定である^{8,9,27,30,31}。この穿通枝の内、最大のものが前視床穿通動脈 (anterior thalamoperforating artery) で、視床灰白隆起動脈 (thalamotuberal artery) と呼ばれる。前視床穿通動脈は 1-3 本認められ、くも膜下腔を走行する間にさらに枝分れをするが、側有孔質を貫通して最終的に視床の前方を灌流している^{8,25,27,30,31}。また側有孔質に入る手前で視索、乳頭体、視床下部 (後方および側方部)、大脳脚などへ向かう pial branch や neural branch も認める^{25, 27,30}。

後有孔質 (posterior perforated substance) は中脳の左右の大脳脚間にある凹みである脚間窩 (interpeduncular fossa) の上壁から後壁をなしており、前方には乳頭体が、下方には中脳橋移行部があり、大脳底面から中脳前面にかけて下方に曲がった逆三角形を呈している。前半部は脚間窩の上壁で大脳灰白質からなり、後半部は中脳被蓋 (mesencephalic tegmentum) からなる²⁶。後有孔質を貫通する穿通枝にはテント上に向かうものと中脳に向かうものがあり、後者は上傍正中中脳動脈 (superior paramedian mesencephalic artery) で後有孔質の後半部を貫通する。テント上に向かうものは後有孔質の前半部を貫通する後視床穿通動脈 (posterior thalamoperforating artery) で、これは傍正中視床動脈 (paramedian thalamic artery) と呼ばれる。後視床穿通動脈は 1-4 本以内であることが多く、また後視床穿通動脈同士または上傍正中中脳動脈と共通幹を呈することが多い^{4,16,26,31}。他の深部穿通枝と同様にくも膜下腔内で枝分かれをして、後有孔質を貫通する。主に視床の下内側および傍正中領域を灌流しているが、視床下部の後方や視床下域なども灌流する^{4,16,26,31}。

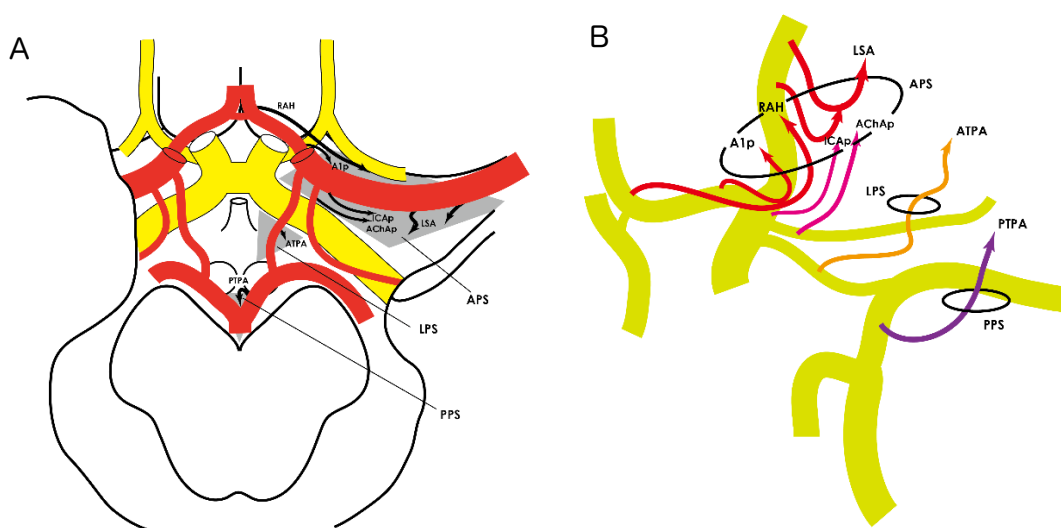


Fig.3: 有孔質を貫通する深部穿通枝

3A: 底部からみた図. 前有孔質の前方は内・外側嗅索, 後方は視索および側頭葉に囲まれた菱形の領域である. 側有孔質は外側が視索, 内側が下垂体柄および乳頭体, 後方が大脳脚に囲まれた正三角形を呈している. 後有孔質は脚間窩の上壁から後壁をなしており, 前方には乳頭体がある.

3B: 後上方から見た図. 前有孔質には内頸動脈, 前脈絡叢動脈, 前大脳動脈, 中大脳動脈からの穿通枝が向かっている. 側有孔質には後交通動脈からの前視床穿通動脈が, 後有孔質には後大脳動脈から後視床穿通動脈がそれぞれ向かっている.

略語: A1p; A1 perforator, AChAp; anterior choroidal artery perforator, APS; anterior perforated substance, ATPA; anterior thalamoperforating artery, ICAp; internal carotid artery perforator, LSA; lenticulostriate artery, LPS; lateral perforated substance, RAH: recurrent artery of Heubner, PPS: posterior perforated substance, PTPA; posterior thalamoperforating artery

深部穿通枝の血管径は 60-1300 μ m と様々であるが, それは灌流領域の広さだけでなく, 穿通枝が時に共通幹を形成して主幹動脈から分岐することも関係している. Djulejić らによる 24-32 半球の cadaver の検討では, 前交通動脈や後交通動脈を除く深部穿通枝全てに共通幹起始を認め, 特に後視床交通動脈では 75%, LSA では 40.6% と高頻度であった⁴⁾. 深部穿通枝でも膜下腔を走行する部位では他にも特徴があり, まず穿通枝間の吻合が挙げられる. これは正中部のもので頻度が高く, 後視床穿通動脈では 53.2% で認められる. 逆に前大脳動脈水平部からの穿通枝や RAH, LSA は 6-9% 程度である⁴⁾. またくも膜下腔では pial branch や neural branch を認めることがあり, 例えば前脈絡叢動脈からの穿通枝からは側頭葉内側部や視神経などへの^{4,11)}, RAH からは終板傍回, 直回の後方, 眼窩回の後内側や嗅索・嗅三角への^{10,12,15)}, LSA から眼窩回, 島限や外側嗅条・嗅三角などへの枝を認めることがある¹⁴⁾ (Fig.4).



Fig.4: レンズ核線条体動脈の共通幹起始および pial branch

77 歳 男性. 内頸動脈瘤. 左内頸動脈からの回転撮影の slab-MIP 冠状断. レンズ核線条体動脈は中大脳動脈水平部から共通幹で起始し (矢頭), そこから複数本に分かれている (2 重矢頭). また途中から眼窩回への orbitofrontal branch (矢印)も認めている.

脳内での穿通枝間の吻合は表在穿通枝と同様に深部穿通枝でも通常, 毛細血管レベルまで認めないが^{2,13)}, 細動脈レベルで認めた報告もある¹⁶⁾. 上述の通り放線冠のレベルでは深部穿通枝の一部は側脳室外側角のレベルで外側へ向きを変えて深部白質に向っており, それが髄質動脈と毛細血管レベルで吻合を認めることがある³⁾.

5. おわりに

表在穿通枝と深部穿通枝には共通する特徴と深部穿通枝のみが認める特徴がある. 共通する特徴は脳内での穿通枝間の吻合で, 毛細血管レベルだけではなく, 細動脈レベルでも脳室壁周囲の髄質動脈間や基底核内の深部穿通枝間で認めることがある. また放線冠部では毛細血管レベルで表在穿通枝と深部穿通枝との間に毛細血管レベルの吻合を認めている. また表在穿通枝は主幹動脈から分岐する pial branch から起始しており, 言い換えると表在穿通枝は常に脳を貫通する手前で pial branch を有していることになる. 深部穿通枝は常にではないが pial branch を分岐することがあり, これも共通の特徴として挙げられる. 逆に深部穿通枝のみが認める特徴としてはくも膜下腔での variation が挙げられ, これには共通幹起始や穿通枝間の吻合などがある.

参考文献

1. Agirman G, Broix L, Nguyen L: Cerebral cortex development; an outside-in perspective. *FEBS Lett* 591: 3978-3992, 2017
2. Akashi T, Takahashi S, Mugikura S, et al: Ischemic white matter lesions associated with medullary arteries: Classification of MRI findings based on the anatomic arterial distribution. *AJR Am J Roentgenol* 3: W160-W168, 2017
3. Cole FM: A variation in the course and distribution of the lateral striate artery. *J Anat* 102: 125-125, 1967
4. Djulejić V, Marinković S, Milić V, et al: Common features of the cerebral perforating arteries and their clinical significance. *Acta Neurochir (Wien)* 157: 743-754, 2015
5. Djulejić V, Marinković S, Georgievski B, et al: Clinical significance of blood supply to the internal capsule and basal ganglia. *J Clin Neurosci* 25: 19-26, 2016
6. Duckett S: The establishment of internal vascularization in the human telencephalon. *Acta Anat (Basel)* 80: 107-113, 1971
7. Feekes JA, Hsu SW, Chaloupka JC, et al: Tertiary microvascular territories define lacunar infarcts in the basal ganglia. *Ann Neurol* 58: 18-30, 2005
8. Gabrovsky S, Laleva M, Gabrovsky N: The premamillary artery-a microanatomical study. *Acta Neurochir (Wien)* 152: 2183-2189, 2010
9. Gibo H, Lenkey C, Rhoton AL Jr: Microsurgical anatomy of the supraclinoid portion of the internal carotid artery. *J Neurosurg* 55: 560-574, 1981
10. Gomes FB, Dujovny M, Umansky F, et al: Microanatomy of the anterior cerebral artery. *Surg Neurol* 26: 129-141, 1986
11. Marinković S, Gibo H, Brigante L, et al: The surgical anatomy of the perforating branches of the anterior choroidal artery. *Surg Neurol* 52: 30-36, 1999
12. Marinković S, Gibo H, Marinković M, et al: Anatomic and clinical correlations of the lenticulostriate arteries. *Clin Anat* 14: 190-195, 2001
13. Marinković S, Gibo H, Nikodijević I: Anastomoses among the perforating arteries. *Surgery for Cerebral Stroke* 25: 339-343, 1997
14. Marinković SV, Kovačević MS, Marinković JM: Perforating branches of the middle cerebral artery. Microsurgical anatomy of their extracerebral segments. *J Neurosurg* 63: 266-271, 1985
15. Marinković S, Milisavljević M, Kovačević M: Anatomical bases for surgical approach to the initial segment of the anterior cerebral artery. Microanatomy of Heubner's artery and perforating branches of the anterior cerebral artery. *Surg Radiol Anat* 8: 7-18, 1986
16. Marinković S, Milisavljević M, Kovačević M: Interpeduncular perforating branches of the posterior cerebral artery. Microsurgical anatomy of their extracerebral and intracerebral segments. *Surg Neurol* 26: 349-359, 1986
17. Marinković SV, Milisavljević MM, Marinković ZD: The perforating branches of the internal carotid artery: The microsurgical anatomy of their extracerebral segments. *Neurosurgery* 26: 472-479, 1990

18. Marín-Padilla M: The human brain intracerebral microvascular system: development and structure. *Front Neuroanat* 6: 38.doi:10.3389/fnana.2012.00038. eCollection 2012
19. 仲嶋一範: 大脳皮質の層構造の形成におけるニューロンの移動およびその意義. *領域融合レビュー*, 6, e004 (2017) DOI: 10.7875/leading.author.6.e004
20. Nonaka H, Akima M, Hatori T, et al: The microvasculature of the cerebral white matter: Arteries of the subcortical white matter. *J Neuropathol Exp Neurol* 62: 154-161, 2003
21. Nunta-aree S, Ohata K, Soares Jr SB, et al: The morphological development of human basal ganglia. *Congenital Anomalies* 41: 177-186, 2001
22. Ota T, Komiyama K: Embryological lateral striate artery variants: Revised concept of recurrent artery of Heubner, the perforators to the anterior perforated substance and middle cerebral artery variants. *Clin Neuroradiol* 31: 73-78, 2020
23. Padget DH: The development of the cranial arteries in the human embryo. *Contrib Embryol* 32: 205-261, 1948
24. Padget DH: The development of the cranial venous system in man, from the viewpoint of comparative anatomy. *Contrib Embryol* 36: 81-140, 1957
25. Pedroza A, Dujovny M, Artero JC, et al: Microanatomy of the posterior communicating artery. *Neurosurgery* 20: 228-235, 1987
26. Pedroza A, Dujovny M, Ausman JI, et al: Microvascular anatomy of the interpeduncular fossa. *J Neurosurg* 64: 484-493, 1986
27. Pedroza A, Dujovny M, Cabezudo-Artero JC, et al: Microanatomy of the premamillary artery. *Acta Neurochir (Wien)* 86: 50-55, 1987
28. Reina-De La Torre F, Rodriguez-Baeza A, Sahuquillo-Barris J: Morphological characteristics and distribution pattern of the arterial vessels in human cerebral cortex: A scanning electron microscope study. *Anat Rec* 251: 87-96, 1998
29. Rosner SS, Rhoton AL Jr, Ono M, et al: Microsurgical anatomy of the anterior perforating arteries. *J Neurosurg* 61: 468-485, 1984
30. Saeki N, Rhoton AL Jr: Microsurgical anatomy of the upper basilar artery and the posterior circle of Willis. *J Neurosurg* 46: 563-578, 1977
31. Vogels V, Dammers R, van Bilsen M, et al: Deep cerebral perforators: Anatomical distribution and clinical symptoms. An overview. *Stroke* 52: e660-e674. 2021