穿通枝・髄質動脈の解剖

Anatomy of perforators and medullary arteries

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: perforator, perforated substance, medullary artery

1. はじめに

大脳実質に分布する動脈は大脳底部から貫通する深部穿通枝 (deep (basal) perforator)と軟膜動脈から大脳皮質を貫通する表在穿通枝 (superficial perforator)に分けられる ¹⁾. 深部穿通枝は主に主幹動脈の近位側から起始して,多くは前・側・後有孔質を貫通して視床や基底核,内包を灌流している ^{4,5)}. 一方,表在穿通枝は主幹動脈の末梢である軟膜動脈 (pial artery)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 ¹⁾. これらの穿通枝は終動脈 (end artery)であり,毛細血管レベルになるまで側副血行路の形成はほとんどないとされている ^{1,18)}. 穿通枝は脳梗塞や脳出血の責任血管となるだけでなく,ウイリス動脈輪閉塞症では側副血行路として重要な働きを持つ.また大脳深部の動静脈シャント疾患では栄養動脈となる.本稿では有孔質を貫通する深部穿通枝と表在穿通枝について概説する.

2. 穿通枝の発生

ヒトの脳動脈の発生は extracerebral meningeal, intracerebral extrinsic microvascular, intracerebral intrinsic microvascular compartment の 3 つの要素に分けられ、これらが互いに密接に関係しながら脳動脈が形成されていく。Extracerebral meningeal compartment は原始髄膜 (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)を含む pial の 3 つの薄層 (lamellae)からなる ²¹⁾ (Fig.1A)。静脈 洞や主幹動脈は胎生 8 週までに概ね形成されるが ^{25,26)}、intracerebral microvascular compartment で血管 形成が始まるのはその後である。これまで Padget を代表とする脳動脈や静脈・静脈洞の発生の検討はいず れも extracerebral meningeal compartment のもので、穿通枝や髄質動脈などが形成される intracerebral microvascular compartment に関しては触れられていない ²¹⁾・

PCAP は extracerebral meningeal compartment の最も脳表側である pial lamellae に認められ、無数の密に連なった毛細血管が脳表を覆っている。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の動静脈も発達していく。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。Intracerebral extrinsic microvascular compartment の発達、すなわち穿通枝の発達は大脳皮質の錐体細胞層の形成が開始する胎生 8 週以後から起こる。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 Vircho-Robin 腔である

(Fig.1B). 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²¹⁾. 脳内の毛細血管叢 (intrinsic capillary plexus)である intracerebral intrinsic microvascular compartment は脳室周囲から認められ,その後に深部白質,皮質下白質へと進展していき,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²¹⁾.

穿通枝の形成は大脳から腹側 (大脳半球の底部)から始まり、背側 (大脳半球の表面)へと広がっていく ²¹⁾. 表面では上述の通り胎生 8 週以後に開始されるが、底部では胎生 7 週頃より認められる ^{6,21)}. 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 ²³⁾. またこの時期は脳動脈では primitive olfactory artery から外側に向かって embryological lateral striate artery を認める ²³⁻²⁵⁾. Embryological lateral striate artery は脳表の PCAP とつながって前有孔質を貫通する穿通枝を形成するとともに、自身も融合・退縮していくことで recurrent artery of Heubner、次いで中大脳動脈の近位部が形成されていく ^{24,25)}.

3. 前有孔質

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 (medial/lateral olfactory tract),後方は視索 (optic tract)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 (limen insula)に続いている ³²⁾ (Fig.2A). 内頚動脈、前脈絡叢動脈、前大脳動脈、中大脳動脈から起始する穿通枝が貫通し (Fig.2B)、主に放線冠、尾状核、内包、被殻・淡蒼球などを灌流している。Rosner らは嗅索に沿って後方に仮想線を引いて内側を medial territory と、外側を lateral territory とし、それぞれの血管分布を検討したところ、前大脳動脈の水平部からの穿通枝は medial territory を、中大脳動脈からの穿通枝は lateral territory を貫通しており、内頚動脈や前脈絡叢動脈からのものは仮想線上を跨るように両方の領域を、recurrent artery of Heubner は両方の領域の前方を広範囲にわたって貫通していた。これらの領域は互いに overlap を認めており、したがって内頚動脈、前脈絡叢動脈、前大脳動脈、中大脳動脈からの穿通枝は互いに reciprocal な関係にあると報告している ³²⁾.

3-1. 内頚動脈からの穿通枝 (Fig.3A)

内頚動脈から起始する穿通枝には眼動脈と後交通動脈の分岐部間や後交通動脈と前脈絡叢動脈の分岐部間からも下垂体・下垂体柄や視神経・視交叉、視床下部などに向かうものを認めるが、前有孔質へ向かうものは前脈絡叢動脈の分岐部以遠の内頚動脈より起始する $^{8.32}$. これはほぼ常に認められ、その数は平均 $^{2.6-3.9}$ 本 $^{1-9}$ 本 $^{1-9}$ 本)で、血管径は平均 $^{237-243}$ 24 $^$

幹の血管径は平均 177 μ m (70-420 μ m)で,大小様々 (40-300 μ m)な枝を分岐しながら,最終的に内包膝部と後脚の前方,淡蒼球内側を主に灌流している 4,5,32 .

3-2. 前脈絡叢動脈からの穿通枝 (Fig.3A)

前脈絡叢動脈から前有孔質へ向かう穿通枝は認めないこともあるが、存在する場合には cisternal segment の中でも内側に向かう部位の、主に上面から起始する 34). 本数は平均 2.2 本 (1-10 本)で、後上方へ走行して、前有孔質の手前で平均 6.2 本 (2-19 本)に枝分かれしている 32). 血管径は平均 317 μ m (90-600 μ m)で、稀に穿通枝同士で短い共通幹を認めることや neural branch (特に uncal branch や parahippocampal branch)から起始することがある。また逆に前有孔質を貫通する手前で穿通枝から小さい pial vessel (uncus, parahippocampal, temporopolar) や視神経への枝を認めることもある 4,19). 前有孔質では medial territory の内側から lateral territory の外側にかけて貫通しており、多くは内頚動脈からのものと overlap しているが、より後方部分でも貫通している 32). 前脈絡叢動脈から前有孔質への穿通枝は最終的に内包膝部と後脚の前方,淡蒼球内側を主に灌流しており 4,5,19,32 , これは内頚動脈からのものと同じ領域である.

3-3. 前大脳動脈からの穿通枝

前大脳動脈からの穿通枝には水平部 (A1 segment)からのもの,前交通動脈からのもの,recurrent artery of Heubner がある.前交通動脈からの穿通枝は視交叉や視床下部などを灌流しており,前有孔質へ向かうものは水平部からの穿通枝と recurrent artery of Heubner である.両者を合わせて内側線条体動脈 (medial striate artery)と呼ぶこともあり,proximal が水平部からの穿通枝で,distal medial striate artery が recurrent artery of Heubner となる.

3-3-a. 水平部 (A1 segment) からの穿通枝 (Fig.3B)

水平部からの穿通枝は常に認められ、視神経や視交叉を栄養するものもあるが、前有孔質へ向かうものの大部分は水平部の近位側 (平均 9.5 mm (6.4-12.7 mm)の後面から上面の間から起始する。本数は平均 1.7-6.6 本 (1-12 本)で、血管径は平均 306-325 μ m (210-710 μ m)である $^{4,10,15,32)}$ 。水平部が低形成の場合には前交通動脈から前有孔質へ向かう穿通枝を認めることもある 15)。また Marinković らの剖検例によると水平部が窓形成を呈している症例では両方の leg から穿通枝が起始していた 15)。背面から上面にかけて起始し、外側に走行した後に、前有孔質の手前で内側に急峻に向きを変えて貫通する。貫通する手前では平均 21.9 本 (4-49 本)に枝分かれしている 32)。前有孔質の medial territory を貫通し、前方は recurrent artery of Heubner と、外側はレンズ核線条体動脈と、後外側は内頚動脈や前脈絡叢動脈からの穿通枝と overlap している 32)。脳内では recurrent artery of Heubner の灌流領域の下方、レンズ核線条体動脈の灌流領域の前下方を枝分かれしながら走行し、主に内包膝部、淡蒼球の前方を灌流している 4,5,32)。

有孔質の手前で穿通枝同士の吻合は通常認めないが¹⁸⁾, Djulejić らは前大脳動脈水平部からの穿通枝とレンズ核線条体動脈との間に吻合を認めた例を報告している⁴⁾.

3-3-b. recurrent artery of Heubner (Fig.3B)

Recurrent artery of Heubner も常に認められる動脈で、前大脳動脈の水平部に沿うようにシルビウス槽に向かって外側向きに走行し、最終的に中大脳動脈水平部の近位側 (起始部から約 5mm (0.5-9.1mm))に至る 15 . 前有孔質に向かう穿通枝の中で最も太く、平均 662-668 μ m (200-1100 μ m)で、また走行距離も長い $^{4.15,32}$. 本数は報告により異なり、約 70%では 1 本で、ほとんどが 2 本以内であるが、その場合でも短

い共通幹から2本に分かれていることが多い ^{4,10,15)}. Marinković らは recurrent artery of Heubner が2本認められる場合には常に同側の水平部の低形成や窓形成, 前交通動脈の窓形成や走行距離が長い, triple ACA などの variation が合併していると報告している ¹⁵⁾. 60-80%で梁下部 (A2 segment)の近位側 (5mm以内)から前交通動脈にかけての外側面から起始し, 他は水平部の遠位側 (多くは前交通動脈の 5mm 手前まで)の後上面から起始する ^{10,15,32)}. 梁下部の近位側から起始する場合には稀に cortical branch (orbitofrontal, frontopolar artery)との共通幹や, cortical branch からの起始を認めることもある ^{15,32)}. 水平部から起始する場合には水平部の穿通枝と同じ部位から認めることがある ¹⁵⁾. また水平部に窓形成 (fenestration)を認める場合には前有孔質に近い上側の枝から起始する ¹⁵⁾.

Recurrent artery of Heubner からは前有孔質へ平均 9.6 本 (1-28 本)の枝を認め,これらはさらに前有孔質の手前で平均 20.5 本 (1-44)に枝分かれしている。また走行の途中で終板傍回 (paraterminal gyrus),直回 (rectus gyrus)の後方,眼窩回 (orbital gyrus)の後内側への pial vessel や嗅索・嗅三角への枝を高率に認める 5,10,15 . 前有孔質は medial から lateral territory の前方を根範囲に貫通しており,これは水平部からの穿通枝やレンズ核線条体動脈と広い overlap を認める 32 . 脳内では後述するレンズ核線条体動脈と同様に大小様々な $(50-290~\mu\text{m})$ 枝分かれをしながら,正面から見て外側に凸のカーブを描くように走行する。最終的に血管径は $100-200~\mu\text{m}$ 程度となり,主に尾状核頭部,内包前脚,被殻の前下方,淡蒼球の外側などを灌流する 4,5,15,32 .

Recurrent artery of Heubner は有孔質の手前で他の穿通枝との吻合は認めないが、梁下部起始のものと水平部起始とのもので吻合を認めることが稀にある³²⁾.

3-4. 中大脳動脈からの穿通枝 (Fig.3C)

中大脳動脈からの穿通枝はレンズ核線条体動脈 (lenticulostriate artery)と呼ばれ、平均 7-10 本 (1-21 本)認められる。血管径は平均 470 μ m (80-1400 μ m)で、本数が少ないほど血管径は太くなる $^{4,12,20)}$. レンズ核線条体動脈は近位側から遠位側にかけて玉ねぎの皮様に層状に認められ、起始部および灌流領域から medial、intermediate (middle)、lateral group の 3 つに分類される 12)。それぞれ水平部 (M1 segment)の内 1/3,中 1/3,外 1/3 から起始しており、内側では前有孔質に直接向かうものもあるが、外側になるほど 急峻な角度をなして水平部の血流と逆方向、すなわち内側に一旦走行した後に外側へ向い、さらに前有孔質 を貫通する手前で後方へと向きを変えるといった S 字状の走行をする $^{4,12,13,32)}$. レンズ核線条体動脈のほとんどは水平部の後面から上面の間から起始するが、intermediate から lateral group になるにつれて early cortical branch (orbitofrontal, prefrontal and temporopolar, anterior & middle temporal arteries) の近位側や起始部からの起始も認めるようになる $^{4,12,20,32)}$. Early cortical branch は中大脳動脈水平部から腹側向きに分岐していることが多く、そこから起始するレンズ核線条体動脈は水平部の腹側または背側を縦に横切るように走行して前有孔質へ向かうため、その走行距離は水平部から起始するものよりも長くなる 12).

Medial group は 14-50%で認められないことがあるが,存在する場合には本数は平均 2.1 本 (1-5 本)で,その径は 3 つの group の中で最も細い.また medial group が early cortical branch から起始することは稀である $^{12,32)}$.他の group よりも枝分かれが少なく,平均 4 本 (1-9 本)が前有孔質の lateral territory の内側を貫通する 32 .

Intermediate group は 90%前後に認められ、その数は平均 3 本 (1-10 本)である。血管径は様々であるが、lateral group より細いことが多い。1/3 以上で共通幹を形成しており、前有孔質を貫通する前の枝分かれが多いことが特徴で、平均 14.4 本 (3-37 本)となり、前有孔質の lateral territory の外側前方を貫通する 12.32)。また稀に pial vessel や外側嗅条・嗅三角への枝、島限への枝を認めることがある 12. Early cortical

branch からの起始を 15-25%で認め、また水平部の長さが 5 mm 以下の early bifurcation (short M1)では分岐部より起始することがある ^{12,32)}.

Lateral group は常に認められるレンズ核線条体動脈で,その数は平均 4-4.8 本 (1-9 本)である ^{12,32}. 血管径は他の group よりも太いが,lateral group 内では外側のものほど細くなる ¹²⁾. 前有孔質の手前では平均 8.3 本 (2-21 本)となり, lateral group の外側後方を貫通する.20-66%の例で early cortical branch や中大脳動脈の分岐部,島部 (M2 segment)の近位部 (大部分が分岐部から 5mm 以内)からも起始しており,水平部が短いほど島部からの起始が多くなる ^{12,32)}. 逆に分岐部が中大脳動脈の起始部から 25 mm 以上遠位であれば島部からレンズ核線条体動脈は認めない ³²⁾. 島部からの起始は superior trunk,inferior trunk のいずれからも認められるが,inferior trunk からの方が多い ³²⁾. Intermediate group と同様に lateral group も共通幹を認めることがあり,時に 1 本の共通幹から lateral group の全ての枝が分岐している ^{12,13,20)}

各 group 間での吻合は基本的には認めない。しかし非常に稀であるが,水平部の 2 か所から同じ穿通枝が起始するもの (dual origin)や前大脳動脈 (A1 segment)の穿通枝との吻合を認めた例も報告されている 12,321. 前有孔質の貫通部位は各 group 間で互いに overlap を認めており,さらに medial group は内側では 内頚動脈,前脈絡叢動脈,前大脳動脈水平部からの穿通枝と overlap しているところがある 12,20,321. また 3 つの group はいずれも前方で recurrent artery of Heubner のものと overlap を認める 321.

レンズ核線条体動脈は前有孔質を貫通した後に前後方向へ扇状に広がるが、内側部では主に前方に傾き、外側部では主に上後方に向かって走行している。 Medial group は内側部に、intermediate group は外側部の前方、lateral group は外側部の後方に分布する 13,20 . これらの血管走行は正面から見ると脳内で一旦外側に向かって走行した後に、内側へと向きを変えており、Marinković らは前者を proximal portion、後者を distal portion としている 13 . 脳内の proximal portion の血管径は内側部の本幹は平均 280 μ m (90-480 μ m)であるのに対して、外側部では平均 510 μ m (120-840 μ m)と 2 倍ほど太い。本幹からは縦方向に走行する枝 (longitudinal branch)と横方向に走行する枝 (transverse branch)が分岐しており、いずれも proximal portion 周囲の組織を灌流し、前者の血管径は平均 155 μ m (90-300 μ m)で,後者は平均 105 μ m (50-200 μ m)である。Proximal から distal portion にかけては比較的緩やかなカーブを呈するが、移行部では loop 形成を認めることもある。Distal portion の血管径は内側部の本幹は平均 260 μ m (80-470 μ m)で,外側部では平均 470 μ m (115-800 μ m)と proximal portion よりやや細くなった程度であるが、走行の途中で大小様々な (50-350 μ m)枝分かれをしていき、最終的に 100-200 μ m 程度となり、多くは外側後方へと向きを変える 13 。 また最も外側のものの中に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到達するものが稀に認められる 3

レンズ核線条体動脈はレンズ核 (淡蒼球と被殻)内を走行し、その後内包を通って、最終的に尾状核や放線 冠へ到達する。Medial group は主に尾状核頭部の一部、内包前脚の一部と後脚の前下部、淡蒼球の後方、被 殻の内側部を灌流しており、この領域の一部は内頚動脈や前脈絡叢動脈、前大脳動脈水平部からの穿通枝と reciprocal な関係にある。一方、intermediate と lateral group の灌流域は重複しており、その領域は主に 尾状核頭部と体部、放線冠、内包前脚から膝部・後脚前方にかけての上部、淡蒼球の外側、被殻全体で、前 方部分を intermediate group が、後方部分を lateral group が担っている。一部は recurrent artery of Heubner や前脈絡叢動脈からの穿通枝と reciprocal な関係にあり、血管径が 20-30 μm の末梢レベルでは 互いに吻合を認める 5,18,20,32)。

4. 側有孔質

側有孔質 (lateral perforated substance)は傍正中有孔質 (paramedian perforated substance)とも呼ばれ、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 7,30 、その下方を後交通動脈が走行している (Fig.2A). 後交通動脈の穿通枝はその上面から外側面かけて起始し、上方へ走行する。血管径は $100-1000~\mu$ m で、平均 7.8 本 (2-14 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 7,8,30,33 、穿通枝の内、最大のものが前視床穿通動脈 (anterior thalamoperforating artery)で、側有孔質へ向かう 7,8,29,33 (Fig.2B). 後交通動脈の穿通枝の半数以上はその前半部から起始するが、前視床穿通動脈は後半部から起始するものが多い 9,30,33 . 前視床穿通動脈より前方から起始する穿通枝は主に視索や下垂体柄・灰白隆起へ、後方から起始するものは乳頭体や視床下部、大脳脚、後有孔質へ向かう 9,29 .

4-1. 前視床穿通動脈 (Fig.4)

前視床穿通動脈は前乳頭動脈 (premamillary artery)や視床灰白隆起動脈 (thalamotuberal artery)とも呼ばれ,後交通動脈の最大の穿通枝で,後交通動脈の中 1/3 または後 1/3 から起始することが多い $^{7,9,30)}$. ただし fetal type の後交通動脈の場合は前 1/3 または中 1/3 からの起始が多くなる $^{7)}$. 後交通動脈の形態に関係なくほぼ常に認められ,血管径は平均 $493-600~\mu$ m ($280-1000~\mu$ m) で,本数は 1-3 本であるが,60-70%は 1 本で,fetal type の後交通動脈の場合は半数近くで 2 本認める $^{4,7,9,29,30,33)}$. 後上方に走行しながら 1-9 本に枝分かれをするが,これらの何本かは視索,乳頭体,視床下部 (後方および側方部),大脳脚などへ向かう $^{29,30,33)}$. また前視床穿通動脈の約 30%は枝分かれなく側有孔質を貫通する $^{29,30)}$. 脳内での血管径は平均 $430~\mu$ m ($280-490~\mu$ m)で,背側方向に走行し,末梢で枝分かれをして,視床の前方から外側領域にかけて灌流している $^{7,29,30,33)}$.

前視床穿通動脈は側有孔質に入るまでに約 25.0-35.9%で穿通枝間 (前視床穿通動脈の枝同士まだは他の枝と)の吻合を認める 4,18,29).

5. 後有孔質

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 (Fig.2A). 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 ²⁸⁾. 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とがあり、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が後視床穿通動脈 (posterior thalamoperforating artery で、これは後有孔質の前半部を貫通する ²⁸⁾ (Fig.2B).

5-1. 後視床穿通動脈 (Fig.5)

後視床穿通動脈は傍正中視床動脈 (paramedian thalamic artery)とも呼ばれ、そのほとんどは後大脳動脈近位部 (脳底動脈分岐部から後交通動脈との合流部まで (P1 segment))の上面から後面にかけて起始する。後視床穿通動脈同士または上傍正中中脳動脈との共通幹を呈することが多いのが特徴で、本数は 1-4 本以内であることが多く、共通幹の血管径は平均 562-612 μ m (400-1000 μ m)と太い ^{4,14,28)}. 共通幹の場合には必ず後大脳動脈近位部でも脳底動脈分岐部寄りで起始するが、複数本認める場合や後大脳動脈近位部が低形成の場合には後大脳動脈の回旋枝、内側後脈絡叢動脈、後大脳動脈の遠位部 (後交通動脈の合流部直後)、後交通動脈の後方から起始することもある ^{14,28,33)}. 後視床穿通動脈は特に共通幹の場合は起始した後に一旦、内側へ走行し、その後に後上方へと向きを変えてS字状に走行する。途中で平均 4.5 本 (2-10 本)に分かれる

が,他に乳頭体への枝も認めることがある.最終的に血管径が平均 321 μ m (100-750 μ m)となり,後有 孔質の前半部を貫通する $^{14,28,33)}$.脳内に入ったところでは左右の後視床穿通動脈は近接しており,視床下部 (hypothalamus)の後方などへの小さな枝を出しながら視蓋前域 (pretectal region)や視床下域 (subthalamic region)内を平行に上行し,その後に外側へと向きを変え,最終的に血管径は平均 189 μ m (50-510 μ m)となり,視床の下内側および傍正中領域を灌流している $^{4,11,14,28)}$.

後視床穿通動脈が左右対称に起始するのは約半数程度で,反対側を栄養するものも多く認められる.また後有孔質を貫通する手前では約 50-80%で穿通枝間の吻合を認め,稀に後視床穿通動脈が両側の後大脳動脈近位部間で arterial arcade を形成することもある $^{2.4,14,16,18,28)}$. Percheron は後視床穿通動脈の variation を以下の 4 つに分類している 27 .

Type 1: 左右の後視床穿通動脈がそれぞれ同側の後大脳動脈近位部から起始

Type 2a: 左右の後視床穿通動脈が片側の後大脳動脈近位部から別々に起始

Tape 2b: 左右の後視床穿通動脈が片側の後大脳動脈近位部から共通幹を形成して起始

Type 3: 左右の後視床穿通動脈が arterial arcade から起始

これらの内, type 2b がいわゆる artery of Percheron で 10%前後に認められる ¹¹⁾ (Fig.6). また後視床穿通動脈は脳底動脈先端部の形態 (cranial, caudal fusion)との関連も知られている。 すなわち cranial fusion (上小脳動脈が脳底動脈から直接分岐する場合)でも caudal fusion (上小脳動脈が後大脳動脈から分岐する場合)でも左右対称 (symmetrical)の場合は穿通枝も両側から対称に起始するが,非対称 (asymmetrical)の場合には caudal fusion 側の後大脳動脈近位部からは同側への細い穿通枝を認め,cranial fusion 側からは artery of Percheron(SPMA と共通幹の)を認めることが多い ²⁾.

6. 表在穿通枝

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 $^{1,22)}$,深部白質動脈がいわゆる髄質動脈 (medullary artery)である (Fig.7A,B).これらは主幹動脈の末梢となる軟膜動脈から起始し,脳表に沿って少し走行した後に向きを変えて,脳表を垂直に貫通するが $^{22,31)}$,髄質静脈 (medullary vein)を数本 (1-8 本)の動脈が取り囲むような構造となっている $^{21)}$.また貫通部間の距離は $400-600~\mu$ m と一定であり,これは出生前後で変わらない $^{21)}$ (穿通枝の数や大脳のサイズ、ボリュームが大きくなっても).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 $^{21,22,31)}$.

皮質動脈は大脳皮質を灌流しており、血管径は 20-90 μ m 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。 Short branch は脳表から 350-1200 μ m 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 μ m 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)を分枝し、その手前の領域も灌流している 22,31 。 したがって皮質内では middle zone と deep zone の血管密度が高い 31 。

皮質下動脈は血管径が 40 μ m 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 $^{1,22)}$. 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 22 .

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 ^{1,22,31)}. 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 ¹⁾. 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 ¹⁾

皮質動脈,皮質下動脈,髄質動脈はいずれも脳表に沿って走行している部位では隣接する枝と吻合を認めるが,脳内では認められない.毛細血管レベルでは隣接するものと吻合するが,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^{1,31)}.髄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稀にある³⁾.このよう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ごく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うものと髄質動脈のとの毛細血管レベルでの吻合と考えられる.同様の理由で視床のレベルでも表在穿通枝と深部穿通枝との吻合は存在すると考えられる³⁾.

7. おわりに

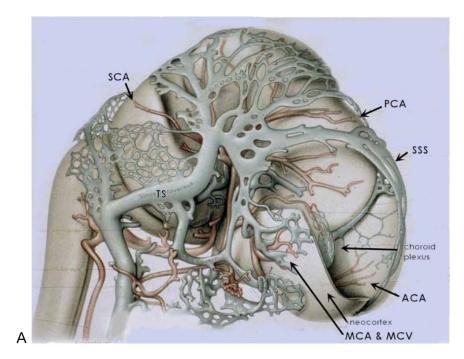
穿通枝は大きく深部穿通枝と表在穿通枝とに分けれらる。深部穿通枝の起始のパターンは個別,共通幹, cortical branch からのいずれかで,レンズ核線条体動脈と前・後視床穿通動脈は共通幹が多い 4). 血管径は 概ね 250-600 μ m であるが,共通幹や recurrent artery of Heubner では 1000 μ m 近くになることがある。深部穿通枝は脳内では血管径が 20-30 μ m となる毛細血管レベルでは互いに吻合を認めるが,正中部の穿通枝である前・後視床穿通動脈を除いて,有孔質に入る手前で穿通枝同士の吻合を認めることは稀である 18 1. しかし穿通枝から pial vessel や周囲の神経への枝を認めることがあり,これらを介して穿通枝同士や 他の pial artery との吻合は認められる 18 1. 正中部の穿通枝,特に後視床穿通動脈では対側との吻合も認められ、片側が欠損している場合もある 4,11 1.

表在穿通枝の血管径は 20-200 μ m で,最も深部まで到達する髄質動脈になるほど太くなる.表在穿通枝は脳表では互いに吻合を認めるが,脳内では毛細血管レベルになるまで隣接する枝との吻合は認められない 1,22,31)。最も深部まで到達する髄質動脈は尾状核や視床への深部穿通枝のうち深部白質まで枝を伸ばしたものと毛細血管レベルでの吻合を認めることがある.

参考文献

- 1. 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
- 2. Campos C, Churojana A, Rodesch G, et al: Basilar tip aneurysms and basilar tip anatomy. Interv Neuroradiol 4: 121-125, 1998
- 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. Gabrovsky S, Laleva M, Gabrovsky N: The premamillary artery-a microanatomical study. Acta Neurochir (Wien) 152: 2183-2189, 2010
- 8. Gibo H, Lenkey C, Rhoton AL Jr: Microsurgical anatomy of the supraclinoid portion of the internal carotid artery. J Neurosurg 55: 560-574, 1981
- 9. Gibo H, Marinković S, Brigante L: The microsurgical anatomy of the premamillary artery. J Clin Neurosci 8: 256-260, 2001
- 10. Gomes FB, Dujovny M, Umansky F, et al: Microanatomy of the anterior cerebral artery. Surg Neurol 26: 129-141, 1986
- 11. Griessenauer CJ, Loukas M, Tubbs RS, et al: The artery of Percheron: An anatomic study with potential neurosurgical and neuroendovascular importance. Br J Neurosurg 28: 81-85, 2014
- 12. 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
- 13. Marinković SV, Marinković JM, Kovačević MS, et al: Perforating branches of the middle cerebral artery. Microanatomy and clinical significance of their intracerebral segments. Stroke 16:1022-1029, 1985
- 14. 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
- 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 SV, Milisavljević MM, Kovačević MS: Anastomoses among the thalamoperforating branches of the posterior cerebral artery. Arch Neurol 43: 811-814, 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. Marinković S, Gibo H, Nikodijević I: Anastomoses among the perforating arteries. Surgery for Cerebral Stroke 25: 339-343, 1997
- 19. 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
- 20. Marinković S, Gibo H, Marinković M, et al: Anatomic and clinical correlations of the lenticulostriate arteries. Clin Anat 14: 190-195, 2001
- 21. Marín-Padilla M: The human brain intracerebral microvascular system: development and structure. Front Neuroanat 6: 38.doi:10.3389/fnana.2012.00038. eCollection 2012
- 22. 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
- 23. Nunta-aree S, Ohata K, Soares Jr SB, et al: The morphological development of human basal ganglia. Congenital Anomalies 41: 177-186, 2001
- 24. 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
- 25. Padget DH: The development of the cranial arteries in the human embryo. Contrib Embryol 32: 205-261, 1948
- 26. Padget DH: The development of the cranial venous system in man, from the viewpoint of comparative anatomy. Contrib Embryol 36: 81-140, 1957
- 27. Percheron G: Arteries of the human thalamus. II. Arteries and paramedian thalamic territory of the communicating basilar artery. Rev Neurol (Paris) 132: 309-324, 1976
- 28. Pedroza A, Dujovny M, Ausman JI, et al: Microvascular anatomy of the interpeduncular fossa. J Neurosurg 64: 484-493, 1986
- 29. Pedroza A, Dujovny M, Artero JC, et al: Microanatomy of the posterior communicating artery. Neurosurgery 20: 228-235, 1987
- 30. Pedroza A, Dujovny M, Cabezudo-Artero JC, et al. Microanatomy of the premamillary artery. Acta Neurochir (Wien) 86: 50-55, 1987
- 31. 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
- 32. Rosner SS, Rhoton AL Jr, Ono M, et al: Microsurgical anatomy of the anterior perforating arteries. J Neurosurg 61: 468-485, 1984
- 33. Saeki N, Rhoton AL Jr: Microsurgical anatomy of the upper basilar artery and the posterior circle of Willis. J Neurosurg 46: 563-578, 1977
- 34. Tanriover N, Kucukyuruk B, Ulu MO, et al: Microsurgical anatomy of the cisternal anterior choroidal artery with special emphasis on the preoptic and postoptic subdivisions. J Neurosurg 120: 1217-1228, 2014



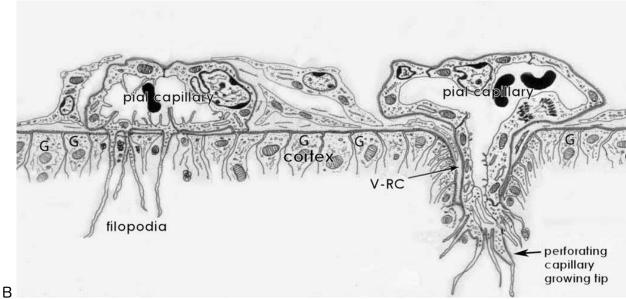


Fig.1: 胎生期の血管発生 (文献 21 より改変)

A: 胎生 8 週の初め頃の脳動脈,静脈・静脈洞.これらは全て extracerebral meningeal compartment に属する.

B: 穿通枝の発生. 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: ACA; anterior cerebral artery, MCA; middle cerebral artery, MCV; middle cerebral vein, PCA: posterior cerebral artery, SCA; superior cerebellar artery, SSS: superior sagittal sinus, TS: transverse sinus, V-RC: Virchow-Robin compartment

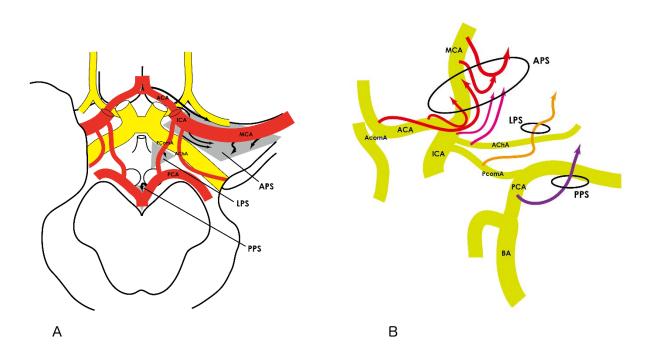


Fig.2: 有孔質を貫通する深部穿通枝

A: 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.

B: 後上方から見た図. 前有孔質には内頚動脈, 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: AChA; anterior choroidal artery, AcomA; anterior communicating artery, APS; anterior perforated substance, BA; basilar artery, LPS: lateral perforated substance, PcomA: posterior communicating artery, PPS: posterior perforated substance

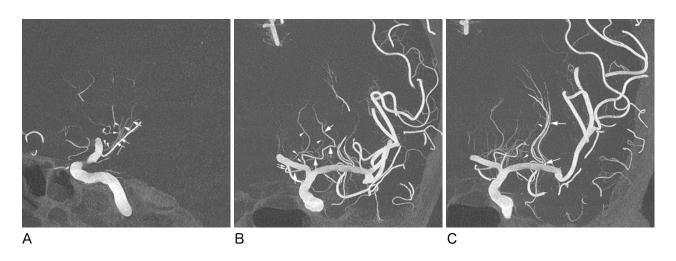


Fig.3: 前有孔質へ向かう穿通枝

55歳 女性. 中大脳動脈瘤. 左内頚動脈からの回転撮影の slab-MIP (A: 矢状断, B,C: 冠状断).

A: 内頚動脈からの穿通枝 (矢頭)と前脈絡叢動脈からの穿通枝 (矢印). 両者はほぼ同様の走行をしているが,

前脈絡叢動脈のものの方がより後方に向かっている.

B: 前大脳動脈水平部からの穿通枝 (矢頭)と recurrent artery of Heubner (矢印). 本症例の recurrent artery of Heubner は orbitofrontal artery の近位部から起始している (2 重矢印).

C: 中大脳動脈からの穿通枝 (レンズ核線条体動脈). Intermediate group (矢頭)と lateral group (矢印)が描出されており、lateral group の大部分は共通幹から起始している.



Fig.4: 側有孔質へ向かう穿通枝

77歳 男性. 内頚動脈-前脈絡叢動脈分岐部動脈瘤. 左内頚動脈からの回転撮影の slab-MIP (矢状断). 低形成 (径 1 mm 以下)の後交通動脈 (矢頭)から前視床穿通動脈 (矢印)が起始している.



Fig.5: 後有孔質へ向かう穿通枝

63 歳 女性. 脳底動脈先端部動脈瘤. 左椎骨動脈からの回転撮影の slab-MIP (冠状断). 脳底動脈先端部の形態は symmetrical caudal fusion で、両側の後大脳動脈近位部から後視床穿通動脈 (矢印)が起始している.



Fig.6 artery of Percheron

77歳 男性. 小脳腫瘍. 左椎骨動脈からの回転撮影の slab-MIP (冠状断). 左後大脳動脈近位部は低形成で,右側から起始した 1 本の後視床小脳動脈 (矢印)が両側の視床へ向かっている.

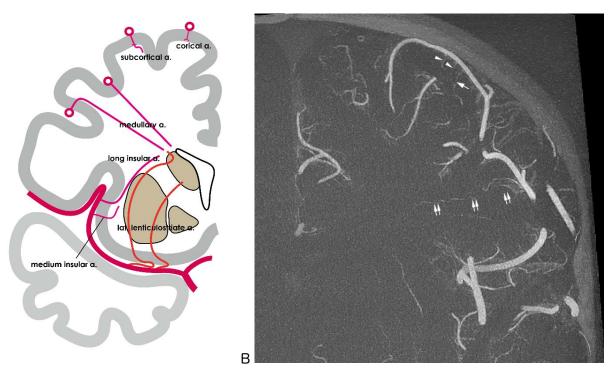


Fig.7: 表在穿通枝

Α

7A: 正面からみた図. 表在穿通枝は皮質動脈,皮質下動脈,髄質動脈に分けれる. 髄質動脈は枝分かれをほとんどすることなく,側脳室の外側近傍に到達する.

7B: 6歳 男児. 前頭葉の micro-AVM. 左内頚動脈からの回転撮影 (冠状断). 中大脳動脈の末梢の軟膜動脈 から皮質動脈 (矢頭),皮質下動脈 (矢印),髄質動脈 (2重矢印)を認めている. 髄質動脈は側脳室の外側近傍 へほぼ直線状に走行している.

Ishiguro T