

Meningeal artery

東海大学八王子病院

青木吏絵

Key words: microanatomy of the dura mater, dural arterial venous fistula, dural vasculature of the periosteal layer, arterial network in the walls of sinuses

【はじめに】

1800 年代に Gray's anatomy の執筆で知られる Dr. Henry Gray が、剖検から得た肉眼的解剖所見で、硬膜はほぼ無血管であると報告した。それから時代の変遷とともに、技術の発達により、血管の染色など他様々な手段でより血管を詳細に観察できるようになっていき、その考えが間違っているということに人類はたどり着いた。

硬膜を栄養する”meningeal artery”は、血管内治療の分野では、脳腫瘍の栄養血管や硬膜動静脈瘻の feeder、また近年では慢性硬膜下血腫の原因血管として、治療に関わることが多い血管の一つである。よって”meningeal artery”の理解を深めることは、病態の理解や治療の strategy を立てる上でも非常に重要である。今回は”meningeal artery”を、発生から、構造、走行、anastomosis についてまとめたので報告する。

【硬膜, meningeal artery の発生】

CRL 12-20mm の時期に、原始髄膜 (meninx primitiva) は、頭蓋冠、硬膜、くも膜、軟膜に分化し始める。Streeter によると原始血管網も同時期に、頭蓋外、硬膜、脳の 3 層に分化し始めるが、分化していく前の段階では、この 3 つの層の間には anastomotic channel が存在している。¹⁾ 深層から表層までのこの anastomosis は次第に退縮し、脳周囲の血管と硬膜の血管は別々に分かれていく。さらに、この硬膜の血管網が後述する, primary anastomosis artery, secondary anastomosis artery, penetrating vessel に分かれていく。¹⁾²⁾ (Fig.1)

【microanatomy of the cranial dural vessels】

硬膜は 3 層に分かれているとされている。表層側から順に、①periosteal layer(PL), ②meningeal layer(ML), ③border zone layer(BCL)から成ると言われ、それぞれに対応した血管網がある。²⁾³⁾⁴⁾ (Fig.1 2 3)

頭蓋冠や頭蓋底、円蓋部など骨組織の直下に接する硬膜は periosteal layer を持つのだが、嗅窩部、大脳鎌、テント、小脳鎌では meningeal layer が二つに折りたたまれ、2 層の meningeal layer から成る。ちなみに大孔レベルではそのまま periosteal layer は折り返し、頭蓋骨表面の骨膜へ移行する。脊柱管内では periosteal layer とは密着しないため、meningeal layer から構成されている。

なお、dural sinus は periosteal layer と meningeal layer の間に発生する。

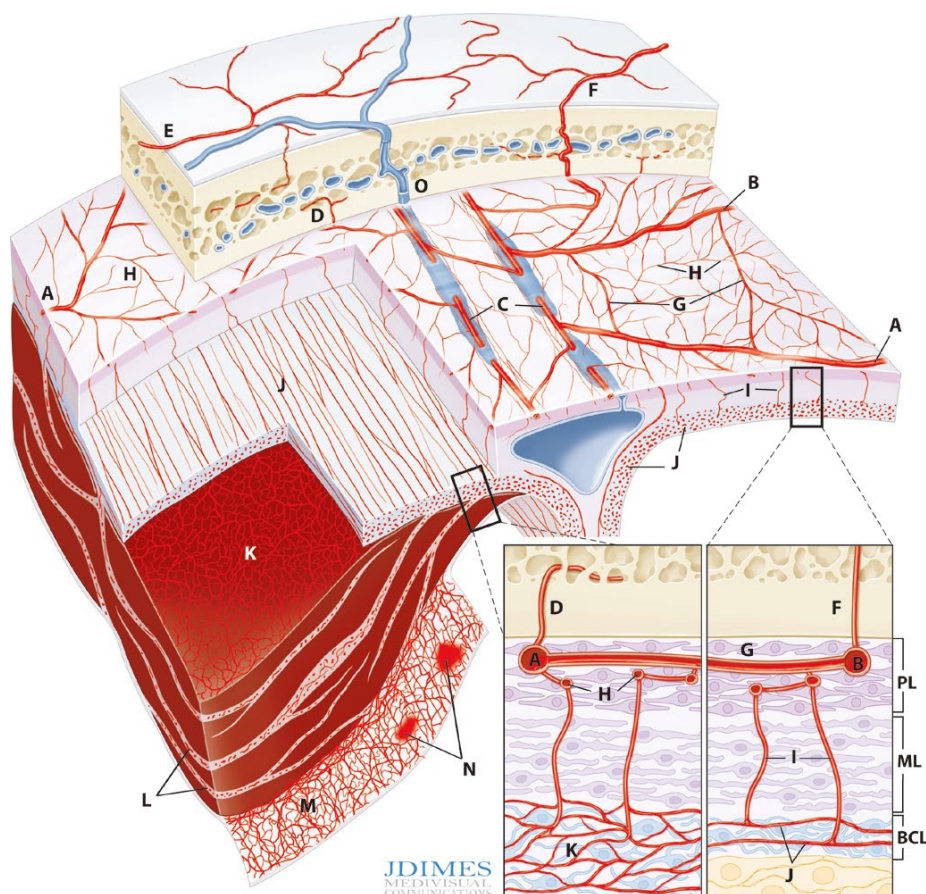


Figure 1 文献 2より引用Normal and pathologic dural vasculature of the periosteal layer (PL), meningeal layer (ML), and border cell layer (BCL). (A, B) Main middle meningeal artery (MMA) branches such as frontal (~400–800 μm). (C) Arterial network in the walls of sinuses (variable size). (D)Meningeal branch supplying the skull. (E) Cutaneous branch supplying the skull. (F) Cutaneous branch supplying the skull and meninges. (G)Primary anastomotic network of the outer layer, connecting larger dural branches (100–300 μm). (H) Secondary anastomotic network of the outer layer (20–40 μm). (I) Penetrating vessels in the relatively avascular ML. (J) Normal inner capillary network in the BCL layer. (K) Proliferating border zone/inner network vessels in a subdural hematoma—the vessels are located within membranes (L) and on the inner surface of the hematoma (M), which is also frequently covered by a membrane. (N) Areas of leakage/extravasation. (O) Dural venous drainage into the diploic vein.

*Outer arterial dural network in the periosteal layer

A B: MMA に代表される major な dural artery (principal artery)

C: Arterial networks in the wall of sinus

(sinus 付近を走行 sinus への供血路 硬膜動静脈瘻に関与しているとされる)

D: Artery to supply of the skull (頭蓋冠を栄養する)

G: Primary anastomosis arteries (100-300 μm 程度, major な dural artery と連絡)

DSA で確認できる

Straight / corkscrew 型がある (理由はわかっていない)

H: Secondary anastomosis arteries (20-40 μm 程度, primary anastomosis 同士を連絡)

DSA では確認されることはなく、 DYNA CT など視認できることがある

なおこれらの arteries は、 平行に vein が伴走している。 (Fig.3,5)

生理的な AV shunt (50-90 μ m 程度、 硬膜動静脈瘻の成因と関連するとされる(Fig.4)

*I: penetrating vessels (outer periosteal network から meningeal layer を貫通し、 border zone layer の capillary network に向かって縦に貫く血管)

*J: inner capillary network (10 μ m 程度 border zone layer に位置し、慢性硬膜下血腫の発生に関与しているとされる)

Fig.2 文献 3 より引用

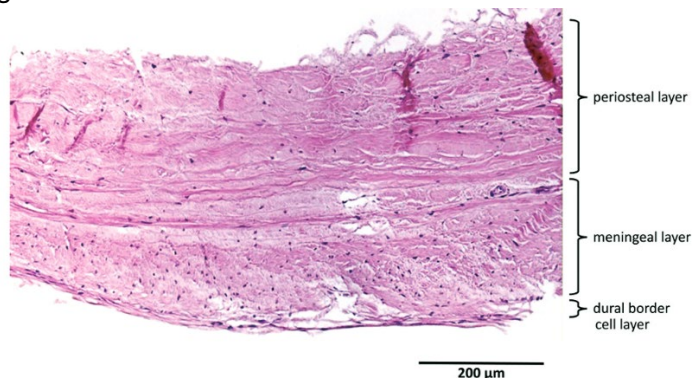
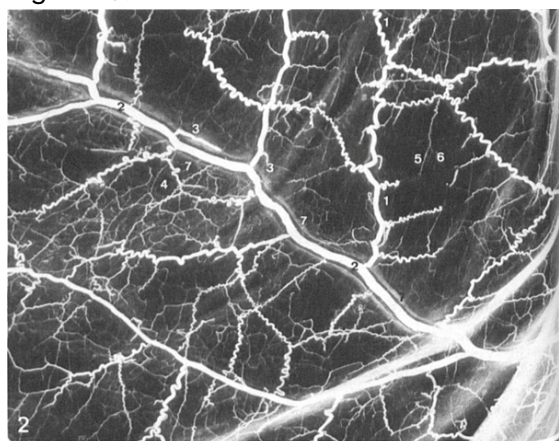


Fig.3 文献 4 より引用



Microangiogram of the dura mater of the vault.

1. principal superficial arteries.
2. Meningeal arterial trunk
3. Avulsed osseous branch
4. Anastomotic network of secondary superficial arteries.
5. Deep artery
6. Precapillary arteries.
7. Satellite veins of arteries trunk

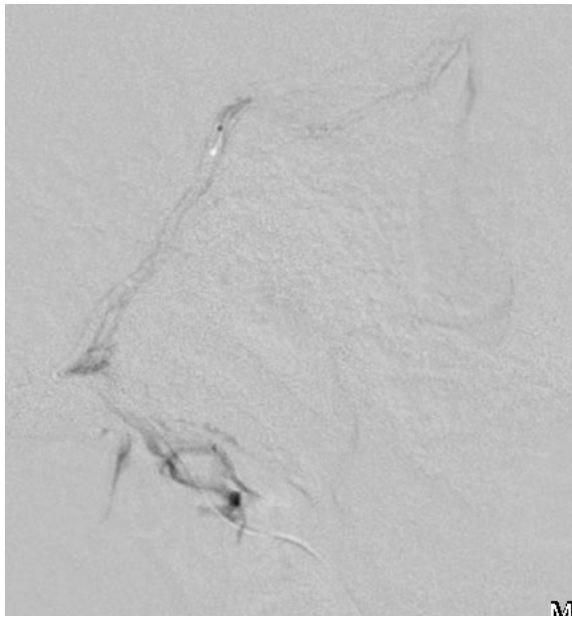
Fig.4 文献 5 から引用



Arteriovenous anastomosis in the mid-parietal human dura.

Here the arteries have been injected with red gelatin and the veins with blue gelatin, showing a primary anastomosis artery flanked by its associated veins. The short arm exiting from the right connects directly with venous "U" shaped tributary and has allowed the red gelatin to enter the proximal venous limb. The arrow points to the direct communication.

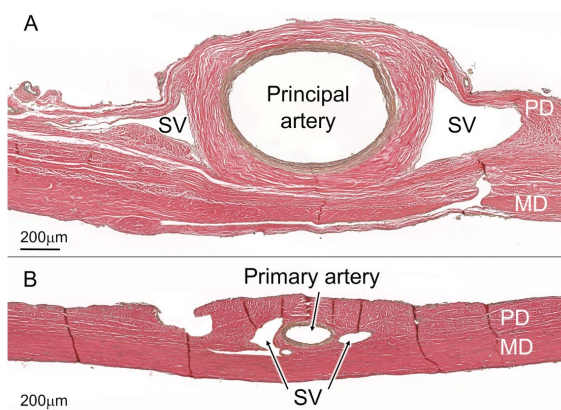
Fig.5 58 歳男性 AVM



Magic 1.5FM を挿入し、MMA から選択撮影を行った。
(側面像)

MMA から AVF となり、伴走する MMV(tram-tracking appearance)が造影されている。

Fig.6 文献 6 から引用

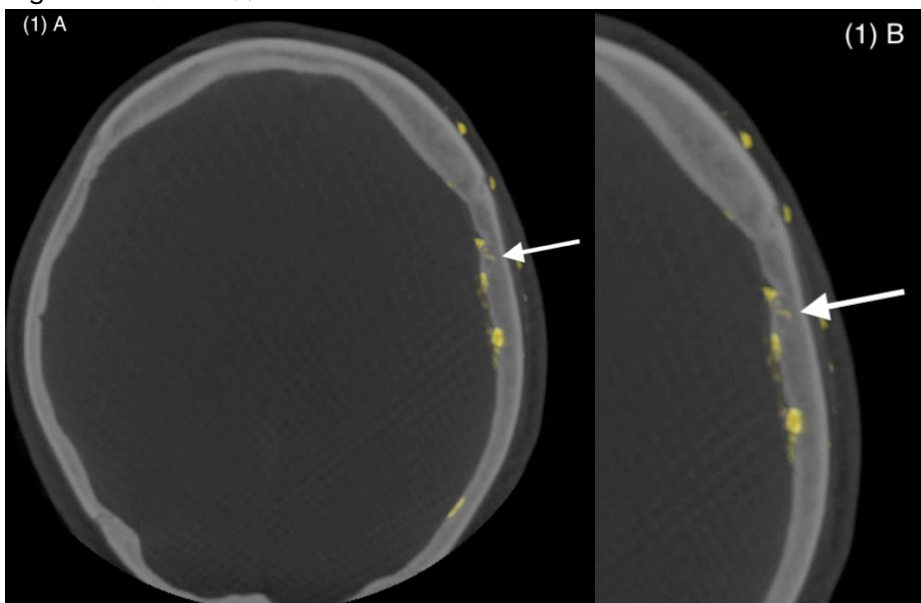


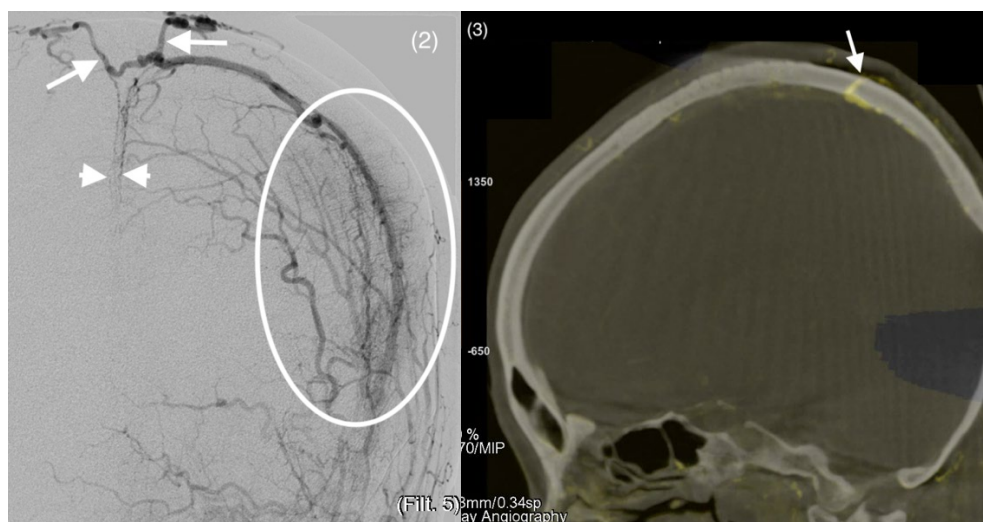
Dura sections stained with the Van Gieson's stain

MD: meningeal dura PD:periosteal dura

SV: satellite vein

Fig.7 45 歳 左片側肥大症





(1) A: Axial MIP image 左外頸動脈撮影 B: 拡大図

MMA から Artery to supply of the skull が分岐し頭蓋冠を栄養している (矢印)

この症例では左の片側肥大症があるため、全ての左側の骨軟部組織が右に比べ異常発達を見せており、このため血管も左で全体的に拡張していることから、このような従来血管撮影で簡単には視認できない血管が確認され则认为る。

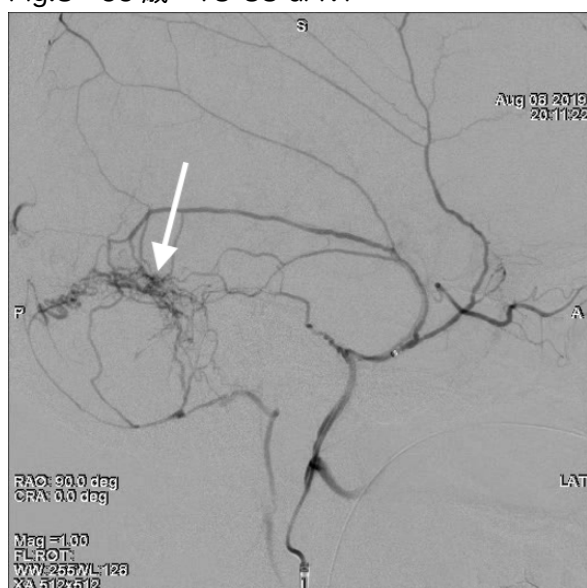
(2) 左外頸動脈撮影 正面像

MMA から Artery to supply of the skull が骨に向かって線状に走行している (画像の円内) SSS の Arterial network in the walls of sinuses (矢頭) も確認され, emissary foramen を通じて MMA と STA が連絡している (矢印)

(3) Sagittal MIP image 左外頸動脈撮影

頭蓋骨を貫通し頭皮の血管と連絡している

Fig.8 55 歳 TS-SS dAVF

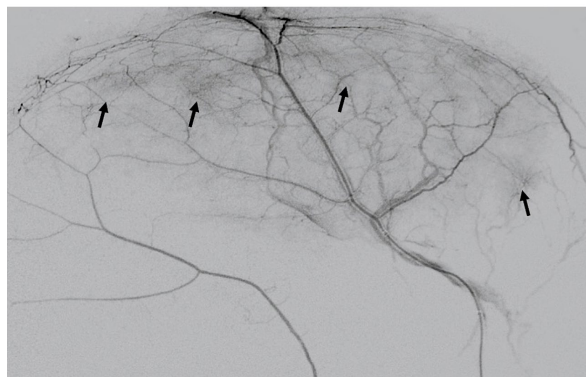


Isolated sinus TS-SS dAVF の症例。

sinus を NBCA を用いた TAE で塞栓した直後の左 MMA 選択撮影 (側面像)

Arterial networks in the wall of sinus のみが残って描出されている。(矢印)

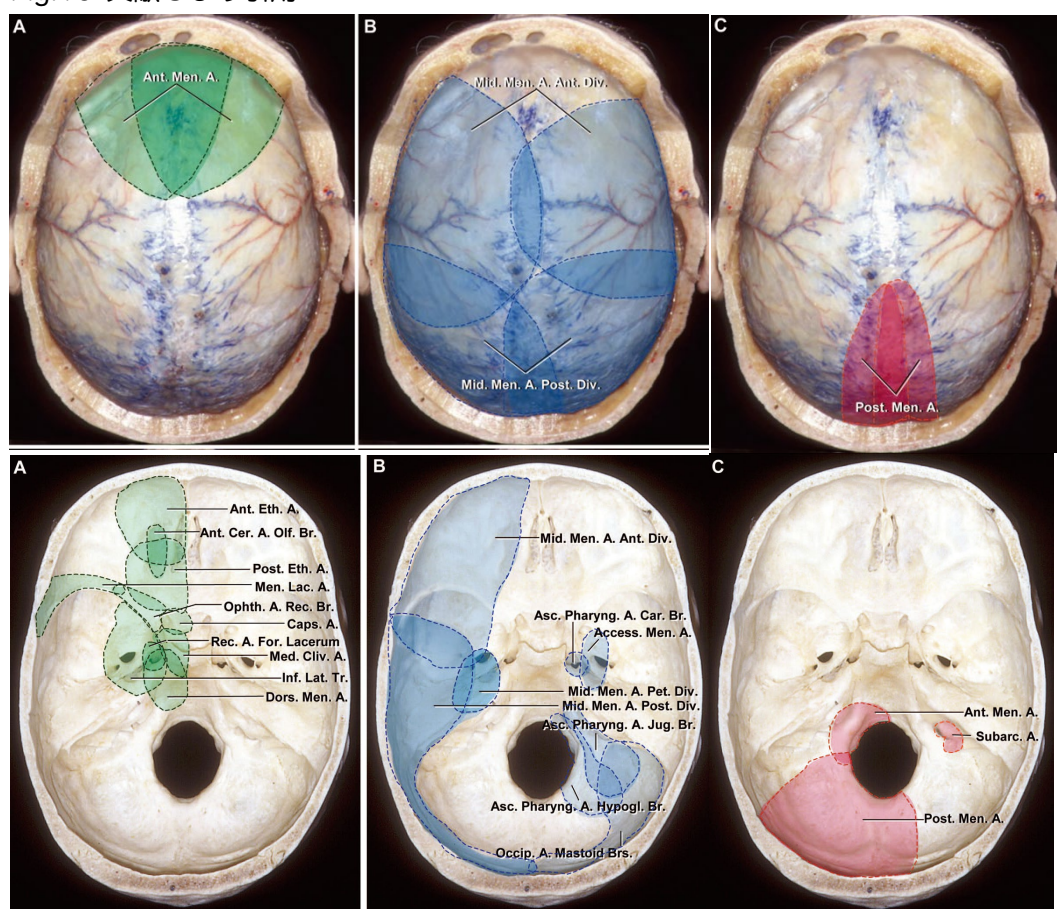
Fig.9 慢性硬膜下血腫 文献 7 より引用

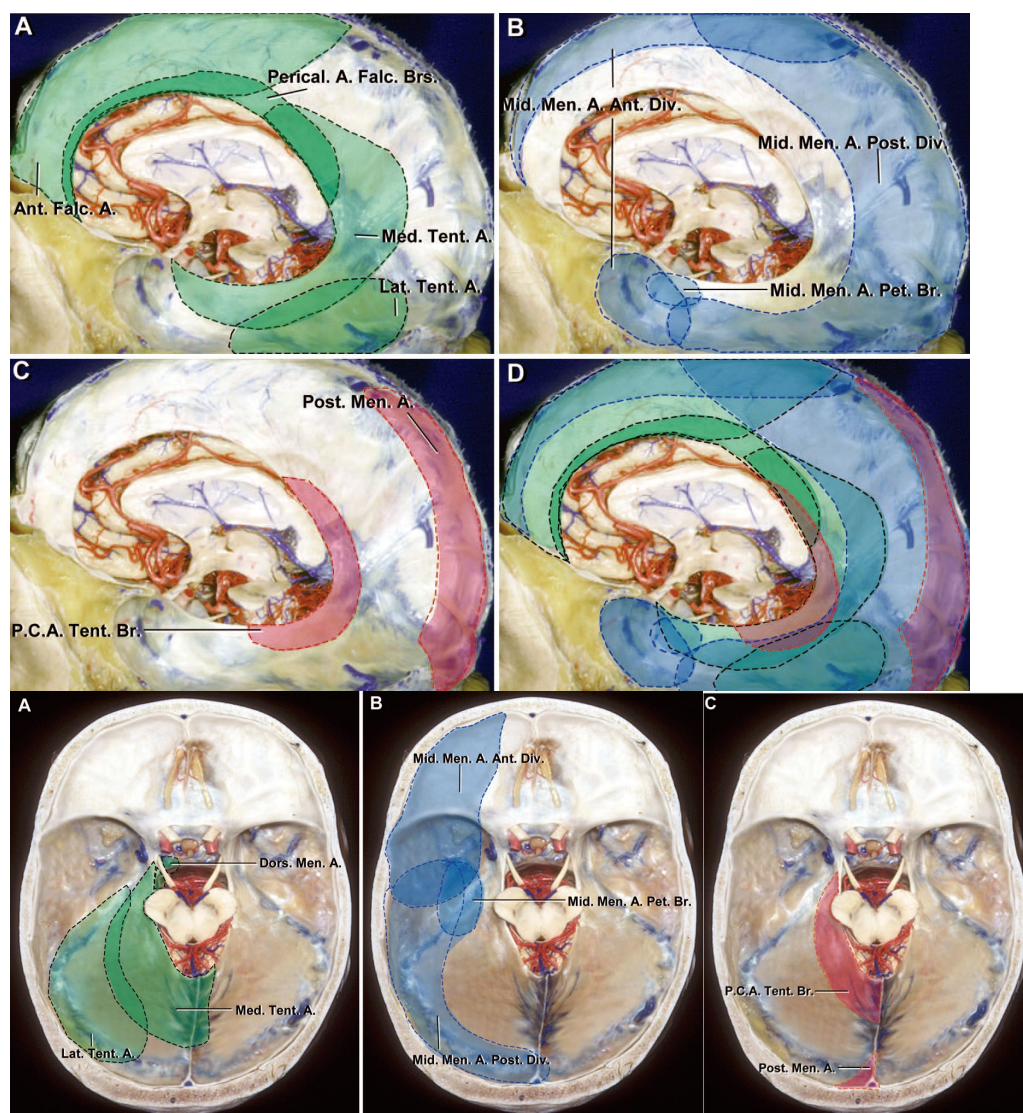


Inner capillary network は通常 DSA では確認されない。
CSDH が存在する場合、様々な程度の造影剤の pooling が見られることがある。(矢印)

【overview of dural supply】

Fig.10 文献 8 より引用





文献 9 より抜粋

Table 5.12. Possible origins of the artery of the free margin of the tentorium

Vertical portion of the carotid siphon
 Horizontal portion of the carotid siphon (ILT)
 Accessory meningeal artery
 Infraorbital ophthalmic artery
 Intraorbital lacrimal artery
 Middle meningeal artery (frontal branch)

ILT, Inferolateral trunk.

The basal tentorium arterial arcade

テントの外側 2/3 は下記の 2 つの arcade によって供給されている⁹⁾

- ・ petrosal arcade Lateral tentorial artery, lateral clival artery
 MMA petrous branch and petrosquamous branch
- ・ occipital arcade MMA petrosquamosal trunk and posterior meningeal artery

内側 1/3 は medial tentorial artery から供給

Shapiro はこれを Marginal tentorial arcade としている。

【The pio-dural arterial supply】

硬膜を栄養する主要な血管は MMA を中心に、様々な血管が関わっている。

頭蓋底では多彩な anastomosis が見られ、特に注意が必要なのは、正中に見られることの多い内頸動脈や ACA, PCA, SCA, 椎骨動脈などの脳血管に anastomosis を持つ部位である。^{9) 10)} 脳腫瘍の術前塞栓や、硬膜動静脈瘻の治療の際の TAE など、これらを把握していないと塞栓物質が脳血管へ迷入する可能性があるため、この anastomosis の把握、潜在的な anastomosis の存在しうる部位についてはよく理解しておくべきである。

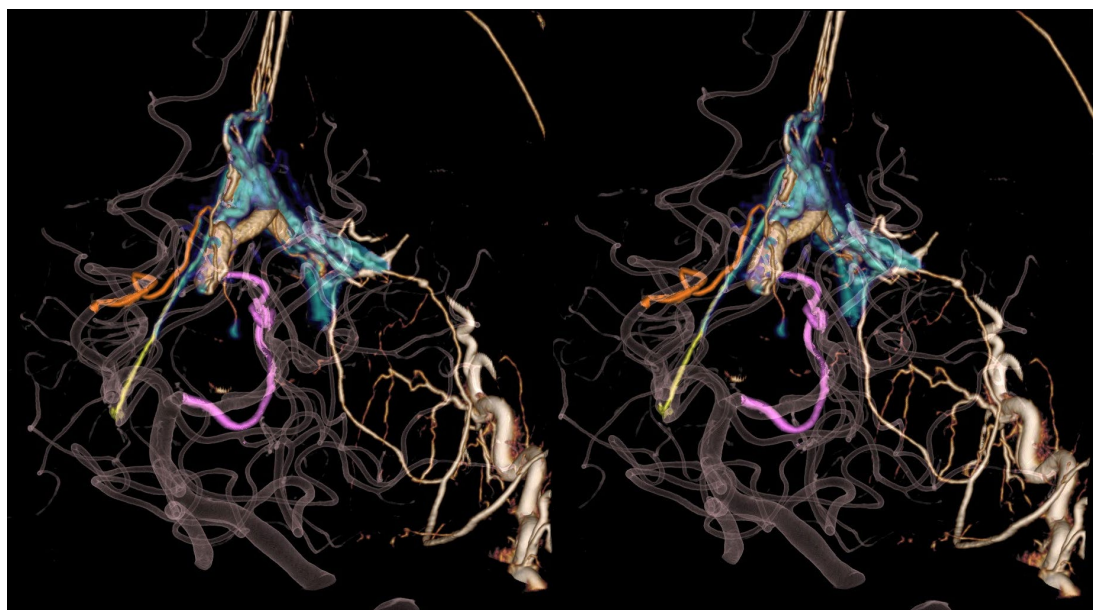
発生の部分で、前述した通り、もともと原始髄膜 (meninx primitiva) から硬膜、くも膜、軟膜へと分化し、その際に原始血管網もそれぞれの領域へ後から別れていくが、この前段階では特に隔たりがなく互いに anastomotic channel があるため、そう考えると、くも膜下腔に存在する pial artery が硬膜の血管を出していても、anastomotic channel が残ったものと考えればそう不自然な話ではない。必ずしも shunt などの病的状態でのみ secondary に発生するというのではなく、cadaver などでも確認されることもあるのも、合点がいく。¹⁰⁾

- *ACA-olfactory branches and pericallosal branches
- *ACA-anterior falcine artery
- *PCA-the artery of Davidoff and Schechter
- *SCA-the medial dural tentorial branch
- *AICA-the subarcuate artery
- *PICA-posterior meningeal artery

Fig.11 小脳テント正中部の硬膜動静脈瘻

椎骨動脈撮影の 3D 画像 (ステレオ)

右 PCA 遠位(オレンジ), 右 SCA 近位(黄色), 左 PCA 近位 (ピンク) より, the artery of Davidoff and Schechter および the medial dural tentorial branch を認める。



【臨床的考察】

前述の”meningeal artery”の構造に着目し、血管内治療に応用する。例として、硬膜動静脈瘻の症例で、自験例を提示する。

一見、diffuse な shunt を形成しているように見える TS-SS dAVF であるが、基本的な構造としては、正常でも見られる sinus wall の arterial network が shunt の形成に関わったことで拡張し、目立って見えているものを見ている可能性がある。こういった場合では、この arterial network が common collector として収束してから最終的に1箇所ないしは数カ所に fistula を形成していることがある。その場合、理論上はその common collector を限局的に塞栓することで根治を得ることができる。

Fig.12 75 歳男性 出血発症 isolated sinus TS-SS dAVF

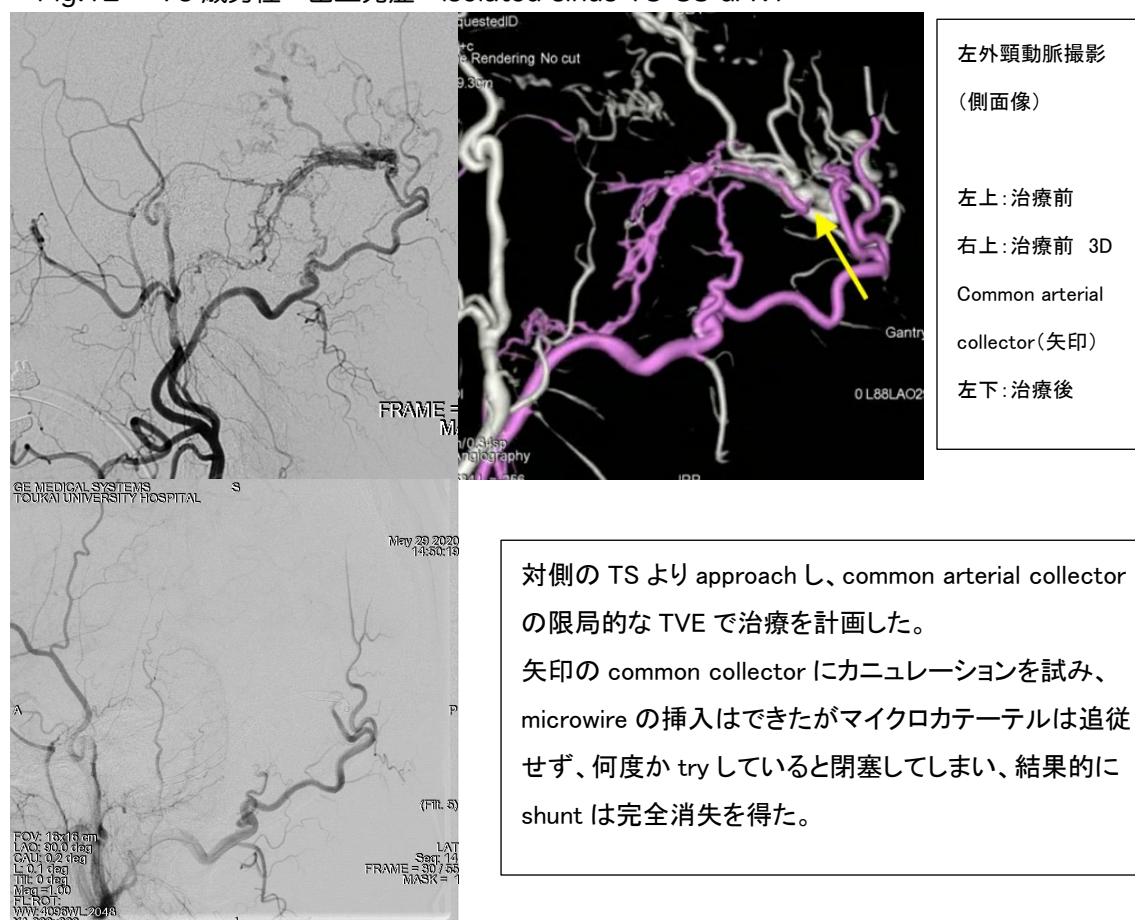
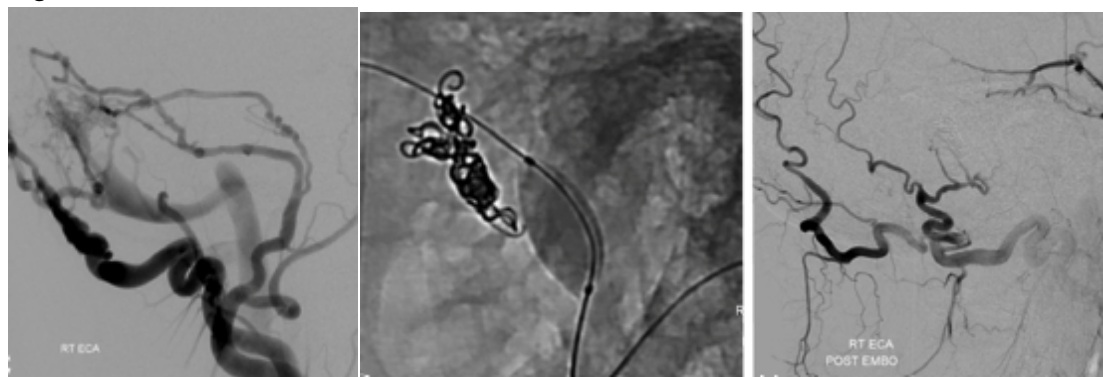
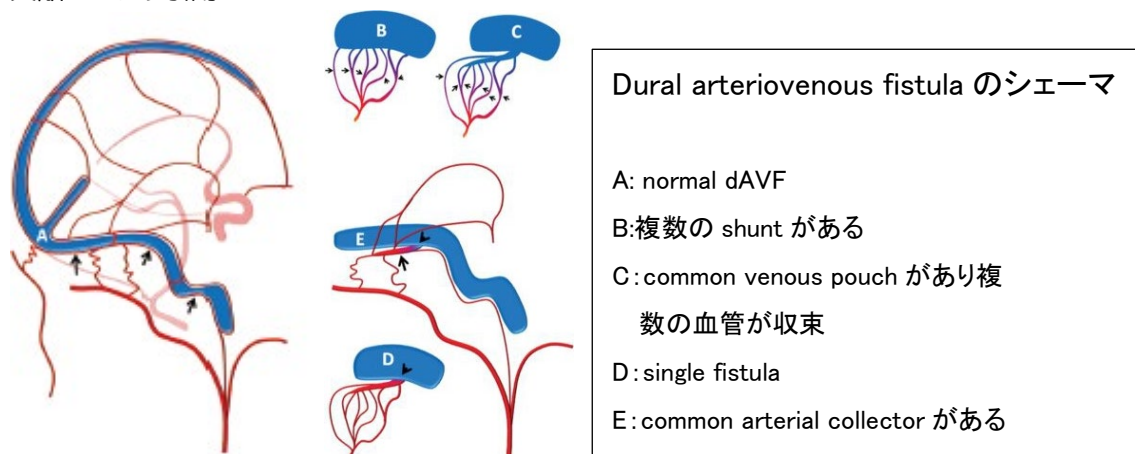


Fig.13 文献11より引用



Arterial common collector を coil するのみの target embolization で根治を得た症例。

文献 11 より引用



【結語】

硬膜を栄養する“meningeal artery”を，microanatomy を中心にそれぞれ血管撮影に対比させながら検討した．“meningeal artery”は互いに領域が overlap したり，吻合したりして走行している．さらに，pial artery との吻合も多く見られることから，扱いには十分注意が必要であり，実際に血管内治療中などでマイクログラフ撮影時に視認できない場合でも，その時の条件次第で「見えにくいだけ」であることもあるため，潜在的に吻合を持ちうることを知っておく必要がある．また，構造の理解は，安全で効率的にかつ有効な治療を行うには必要不可欠である．

【参考文献】

1. Streeter G: The developmental alterations in the vascular system of the brain of the human embryo. Contrib Embryol 24:5-38, 1918
2. Shapiro M, Walker M, Carroll KT, et al: Neuroanatomy of cranial dural vessels : implications for subdural hematoma embolization. J Neurointervent Surg 13: 471-477, 2021
3. A.Kinaci, W.Bergmann, R.Law Bleys et al : Histologic comparison of the dura mater among species. Comp Med 70(2) :170-175, 2020
4. J Roland,C Brernard, :Microvascularization of the intracranial dura mater. Sug Radiol Anat 9:43-49 1987
5. C.W.Kerber and T.H.Newton : The macro and microvasculature of the dura mater Neuroradiology 6,175-179 1973
6. Q.Pearcy, M Jeejo, M Scholze et al: Biomechanics of vascular areas of the human cranial dura mater. J Mech Behav Biomed Mater, 125: 104866, 2022
7. A.Petrov, A. Ivanov , L . Rozhchenko : Endovascular treatment of Chronic subdural hematomas through embolization : A pilot study with a non-adhesive liquid embolic agent of minimal viscosity. J.clin.Med. (10), 2021
8. Martines C, Yasuda A, Campero A et al: Microsurgical anatomy of the dural arteries. Neurosurgery (56) 211 – 251 2005
9. Lasjaunias P, Berenstein A, Ter Brugge et al: Surgical Neuroangiography, New York: Springer Verlag, 1987
10. P.Bhogai, H LD Makalanda, P.A.Brouwer et al: Normal pio-dural arterial connections. Interv Neuroradiol. 21(6):750-758, 2015
11. Shapiro M, Raz E, Litao et al: Toward a Better Understanding of Dural Arteriovenous Fistula Angioarchitecture: Superselective Transverse Embolization of a Sigmoid common Arterial Collector. AJNR Am J Neuroradiol, 39 (9):1682-1688:2018