

眼動脈の発生と顎動脈との吻合
三重大学 脳神経外科
当麻直樹

Embryology and anatomy of the ophthalmic artery
Department of Neurosurgery, Mie University Hospital
Naoki Toma MD

Key words: ophthalmic artery, embryology, stapedia artery, primitive maxillary artery

はじめに

眼動脈ophthalmic artery (OA)は、いくつかの原始動脈の吻合、退縮により形成され、その起始部や周囲の動脈との吻合には多くのvariationが存在する¹⁾。OAは視神経や網膜を栄養するocular branchと眼窩内の外眼筋や涙腺や眼瞼などを栄養するorbital branchからなるが、ヒト胚子においては、原始背側眼動脈primitive dorsal ophthalmic arteries (PDOA)と原始腹側眼動脈primitive ventral ophthalmic artery (PVOA) がocular branchを、アブミ骨動脈stapedial artery (SA)のsupraorbital division がorbital branchを形成する²⁾。ocular branchとorbital branchの吻合によって形成される眼動脈は、結果として内頸動脈internal carotid artery (ICA)系と外頸動脈external carotid artery (ECA)系を連絡し、塞栓術において危険な吻合路にもなり得る³⁾。本稿では、発生学的な観点からOAの複雑な解剖を考察する。

眼動脈の発生

OAのocular branchは眼胞optic vesicleが形成される頃に出現し、眼杯optic cupと眼茎optic stalkが形成される時期に発達する。一方、orbital branchは三叉神経のophthalmic divisionとともに発達しocular branchと吻合する。その結果、OAの解剖は複雑なものとなり、われわれはOA起始部のさまざまなvariationやOAを介したICA系とECA系の吻合に遭遇することになる。1948年にpublishされたPadgetの記述²⁾に基づき、OAの発生を概説する(Fig.1)。

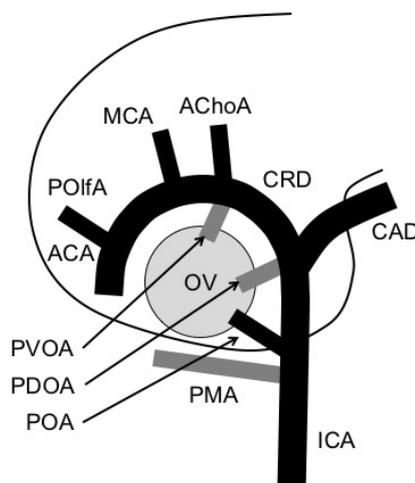


Fig. 1

頭殿長 (crown-rump length) 4-5 mmの胚子において、前脳から突出してきた眼胞は、その背側から取り囲むように走行するprimitive ICAやその近位から分岐する原始顎動脈primitive maxillary artery (PMA) からの plexiform capillary networkを介して供血される。PMAは将来のICAのcavernous segmentから分岐する。5-6 mmの時期には、眼杯と眼茎の形成が始まり、PDOAが出現する。PDOAは primitive ICAのcranial divisionとcaudal divisionのjunction、すなわち将来のposterior communicating arteryのレベルから分岐する。7-12mmの時期には、PDOAは眼杯へのcapillary plexusに供血しており、PVOAがanterior choroidal arteryのレベルから出現する。この時点ではoptic tissueへの供血はまだplexiformである。12-14 mmの胚子においては、PDOAはcommon temporal ciliary artery (将来のlateral posterior ciliary artery) と hyaloid artery (将来のcentral retinal artery) に、PVOAはcommon nasal ciliary artery (将来のmedial posterior ciliary artery) に供血している。16-18 mmの時期には、OAのstemは将来の部位に確認されるようになり、PDOAとPVOAはその分枝となる。時を同じくして、将来のICAのpetrous segmentから分岐するstapedial arteryは maxillomandibular divisionと supraorbital divisionに分かれる。20-24 mmの時期には、supraorbital divisionがprimitive OAに吻合して視神経を取り囲むarterial ringを形成し、PDOAとPVOAからの3本のocular branchが分岐する。40 mmの時期には、adult OAの形態を獲得する。

眼動脈の解剖

OAの解剖について概説する¹⁾。

眼動脈の走行

OAは通常distal dural ringの直上でICAから分岐する。OAは視神経管内を視神経の下外側を走行する。OAは眼窩内で3つのsegmentに分けられる。1st segmentではOAは視神経の下外側を前方に走行し、視神経の内側へと方向を変えて2nd segmentとなる。2nd segmentの視神経の内側への走行は83%がcross overで17%がcross underである。3rd segmentでは、OAは視神経の内側を前方へと走行し眼窩内側壁に沿って走行し、眼窩の上内側に向かう。

眼動脈の分枝

OAの分枝にはvariationが多く一定のpatternはない。ocular branch (central retinal artery, lateral posterior ciliary artery, medial posterior ciliary artery)の分岐は多くは1st segmentと2nd segmentのjunctionの近傍であり、2nd segmentより遠位からはocular branchは出ないとされているが、lateral posterior ciliary artery, medial posterior ciliary arteryがmuscular branchと共通幹で3rd segmentから出ることもあり塞栓術のときに注意が必要である (personal communication, Dr.Kiyosue)。central retinal arteryはciliary arteryの近傍から分岐するため、ciliary arteryにより描出されるchoroidal brushはcentral retinal arteryのlandmarkとなる。orbital branchおよびextra-orbital branchにはlacrimar artery, muscular artery, posterior ethmoidal artery, anterior ethmoidal artery, supraorbital artery, medial palpebral artery, dorsal nasal artery, frontal arteryが含まれる。これらOAのdistal branchと顎動脈maxillary artery (MA)のbranchと間には多くの吻合が存在する。infraorbital arteryは眼窩下壁を走行し、OAのmedial muscular branchやlateral muscular branchと吻合する。anterior deep temporal arteryはlacrimar arteryと吻合する。sphenopalatine arteryのseptal branchはanterior ethmoidal arteryやposterior ethmoidal arteryと吻合する。cutaneous collateralとしては、superficial temporal artery, transverse facial artery, facial arteryとOAのdistal branchとの吻合がある。

眼動脈の起始

文献上これまでに多くのOAのanomalous originが報告されている。中硬膜動脈middle meningeal artery (MMA)起始がもっとも多く (Fig.2)、上眼窩裂あるいは蝶形骨大翼の小孔を通して眼窩内に入る。このvariantはICAから通常の小さいOAとともに存在して ECA系からとICA系からのdouble originにもなり得る。Hayrehの170標本の観察によると、4例 (2.4%) にMMAとICAからのdouble origin、2例 (1.2%) に完全MMA だけから分岐するOAが認められた¹⁾。次に多いOA起始のvariantは内頸動脈のcavernous segmentからのもので上眼窩裂を通して眼窩内に入る。多くの文献においてこのvariant はpersistent PDOAと呼ばれてきたがそれは誤った名称である。UchinoらはMRAにて826 例1652 本の眼動脈のvariationを評価し、24例 (1.45%) にMMAから分岐するOA、7例 (0.42%) にcavernous segmentから分岐するOAを認めたと報告している⁴⁾。OAのdouble originの多くはICAとMMAからであるが、まれにICAのcavernous segmentとsupraclinoid segmentからのdouble originも報告されている。その他にも稀なvariantとして、anterior cerebral artery (ACA), posterior communicating artery, ICA bifurcation, basilar artery, marginal tentorial arteryから分岐するOAや、OA origin MMA, infraoptic course ACAが報告されている。

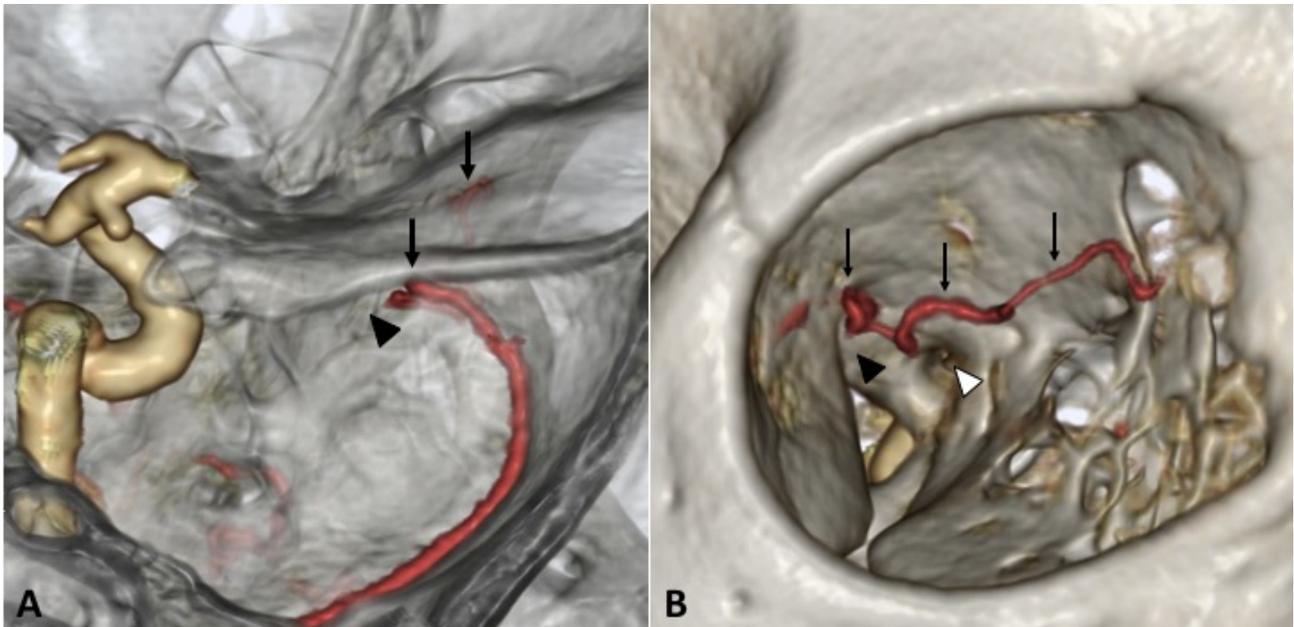


Fig. 2

MMAとOAとの吻合枝

MMAのanterior divisionとlacrimal arteryとの吻合はよく知られているが、この吻合動脈の名称はやや理解しにくい (Fig.3)。MMAからの吻合枝は上眼窩裂あるいは蝶形骨大翼の小孔

(foramen meningo-orbitale, Hyrtl's canal, cranio-orbital foramenなどと呼ばれる) を通って眼窩内に入る。この小孔を通る吻合枝はmeningolacrimal arteryと呼ばれる。meningolacrimal variantでは、上眼窩裂を通るMMAとOAの吻合はmeningo-ophthalmic arteryと呼ばれる。OAからlacrimal arteryが分岐するlacrimal variantでは、上眼窩裂を通る分枝はrecurrent meningeal arteryあるいはsphenoidal arteryと呼ばれる^{5,6)}。

GeorgiouとCassellによると、蝶形骨大翼の小孔は約半数に認められ、頭殿長20-24mmの時期にSAのsupraorbital divisionが眼窩に入る時点では蝶形骨大翼はまだ骨化されておらず、この小孔の位置は stapedial arteryのsupraorbital divisionの通路によって決定されるため多様であると説明されている⁷⁾。

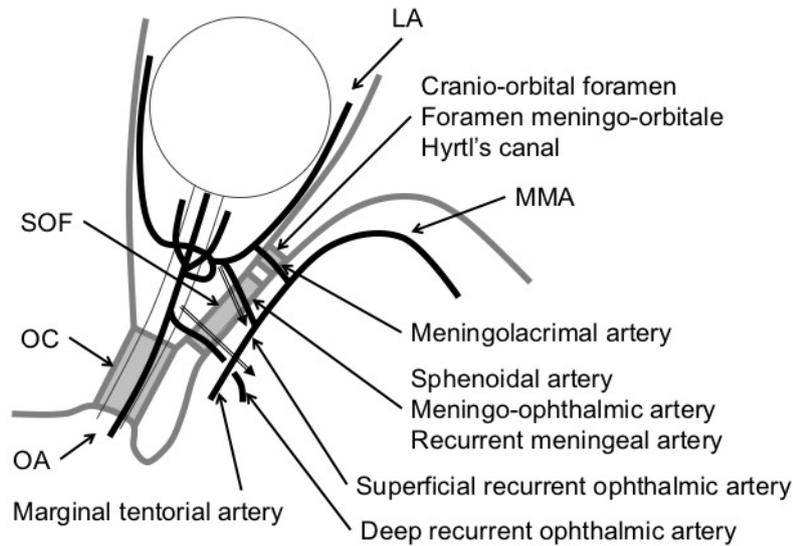


Fig. 3

OAの反回枝とinferolateral trunk

OAから海綿静脈洞部へは2つの反回枝が記述されている⁸⁾。deep recurrent ophthalmic arteryはOAの1st segmentから分岐してtendon of Zinnを通過して上眼窩裂の内側部を走行しinferolateral trunk (ILT)のanteromedial branchと吻合する。superficial recurrent ophthalmic arteryは眼動脈あるいはlacrimal arteryから分岐して上眼窩裂の外側部を走行し海綿静脈洞のdural roofに到達し、marginal tentorial arteryと吻合することもある (Fig.4)。ILTは4つの分枝、superior branch, anteromedial branch, anterolateral branch, posterior branchに分かれる。superior branchはmarginal tentorial arteryおよびmeningohypophyseal trunkと吻合する。anteromedial branchはdeep recurrent ophthalmic artery、anterolateral branch anastomosesはartery of foramen rotundum、posterior branchはaccessory meningeal arteryとそれぞれ吻合する⁹⁾。KiyosueはMAのdistal segmentから分岐してILTのanteromedial branchと吻合するartery of superior orbital fissure (ASOF)を報告した¹⁰⁾。ASOFはdeep recurrent ophthalmic arteryとも吻合し眼動脈と連絡している。

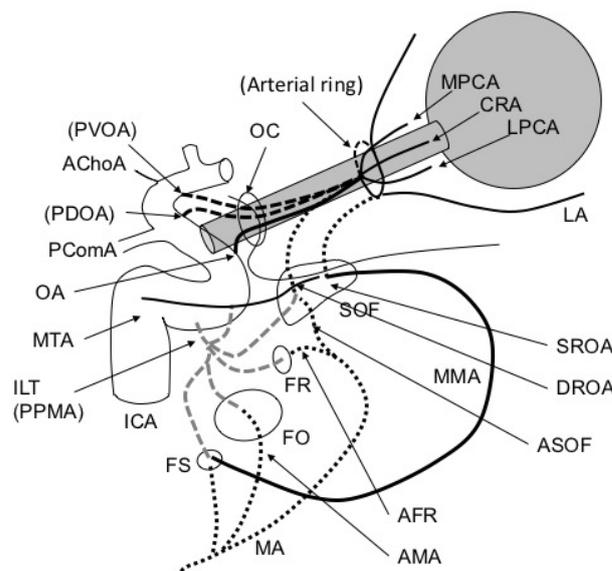


Fig. 4

考察

Padgetのヒト胚子の観察によるとPDOAはcavernous segmentではなくsupraclinoid segmentから起始しており、orbital branchではなく視神経、網膜に供血するocular branchである²⁾。しかしながら、過去の文献では、内頸動脈のcavernous segmentから分岐し上眼窩裂を通過して眼窩内に入る眼動脈は、persistent PDOAと広く誤って解釈されている^{5,9)}。

2015年にpublishされた Greggらの論文によると、cavernous origin OAはPMAに由来し、ACA origin OAやinfraoptic course ACAはprimitive olfactory arteryの部分的な遺残であると考察されている¹¹⁾。頭殿長4-5mmのヒト胚子においては、ICAのcranial divisionが眼胞のcaudal aspectからolfactory regionにかけて取り囲むように走行し視覚器に供血している。したがって、primitive olfactory arteryもperiocular capillary plexusを介してACA origin OAやinfraoptic course ACAに関係していると説明されている。

イヌにおいては、OAはACAから分岐するinternal ophthalmic arteryとMAから分岐するexternal ophthalmic arteryから構成されている¹²⁾。ヒトにおけるACA origin OAはイヌのinternal ophthalmic arteryと相同であると考えられる。イヌはICA系とECA系の豊富な吻合動脈を持ち、なかでもMAからICAのcavernous segment への吻合動脈が最大であり、この吻合動脈はexternal ophthalmic arteryとcommon trunkを形成する。イヌにおけるMAからのexternal ophthalmic arteryとICAの吻合はヒトにおけるMMAやILTからの上眼窩裂を通る眼動脈との吻合枝と相同であると考えられる。

De La TorreとNetskyはヒト胎児におけるOAを含む頭蓋底動脈を観察しヒトとイヌの解剖の類似性を検討して報告した¹³⁾。彼らが観察した胎生5~9ヶ月の胎児6例すべてにおいてICAのcavernous segmentにPMAから分岐するsmall medial branchとlarge lateral branchが確認された。small medial branchはinferior hypophyseal arteryであり、large lateral branchは近傍の硬膜や眼窩内に供血するpersistent PMAと命名された。persistent PMAはイヌにおける吻合枝の近位部のhomologueであり、ヒトにおけるILTはpersistent PMAに相当すると考えられる。Padgetによる頭殿長4~40mm、すなわち胎生3.5~7週のヒト胚子の観察によるとPMAはほとんど一時的にしか存在しない動脈である。初期の胚子においてPMAはoptic resionを供血する役割をもっているが、primitive OAが発達するにつれて、PMAは退縮し唯一のremnantがinferior hypophyseal arteryとなる。この胚子期と胎児期の所見の違いはいまだ明らかではないが、眼動脈の多くのanatomical variationは胚子形成期におけるSAとPMAとの豊富な吻合の部分的な遺残によるものと推測される。

血管系は、脈管形成vasculogenesisと血管新生angiogenesisの2つの過程で発達する。脈管形成はendothelial precursor cellであるangioblastによるde novoの管腔形成である。vascular endothelial growth factor (VEGF) は内皮細胞の増殖、遊走を促進する。血管新生はmigration, sprouting, pruningという複雑なremodeling processであり、primary vascular networkからfunctional vascular systemを構築する¹⁴⁾。

近年の研究によると、中枢神経系および末梢神経系はprimary capillary plexusからのblood vessel patterningに影響を与えていることが分かってきている^{15,16)}。網膜血管の発達においては、視神経の先端から出現し網膜に広がっていくastrocyteのmigrationが先行している¹⁵⁾。sensory neuronあるいはSchwann cellは内皮細胞におけるarterial markerの発現を誘導し、動脈形成にはVEGFが不可欠である¹⁶⁾。

このように分子生物学の進歩からも、中枢神経である視神経や網膜、末梢神経の三叉神経の発達とOAのocular branchおよびorbital branchの発達が密接に関係していることは容易に推測できる。頭殿長5-6mmの時期に眼杯と眼茎の形成にともなって出現するPDOAはocular branchであり視神経とともに視神経管を通るはずであり、頭殿長16-18mmの時期に三叉神経のophthalmic

divisionの末梢枝とともに発達するstapedial arteryのsupraorbital division(はorbital branchで上眼窩裂を通るはずである。

サマリー

胚子形成期の初期に出現する眼胞はprimitive ICAとその分枝であるPMAから供血される。眼杯と眼蓋が形成される時期にposterior communicating arteryのレベルから分岐するPDOAとanterior choroidal arteryのレベルから分岐するPVOAが出現しocular branchを出す。三叉神経のophthalmic divisionと併走するSAのsupraorbital divisionは上眼窩裂を通してocular branchとともに視神経を取り囲むarterial ringを形成し、adult OAの形態になっていく。MMAとOAあるいはlacrimal arteryとの吻合はSAのsupraorbital division由来する。ICAのcavernous segmentから分岐し上眼窩裂を通るOAは、MAとICAの cavernous segmentとの間の潜在的な吻合によるもので、persistent PMAに由来すると考えられる。

References

- 1) Hayreh SS: Orbital vascular anatomy. Eye 20: 1130-1144, 2006
- 2) Padgett DH: The development of the cranial arteries in the human embryo. Contrib Embryol 32: 205-261, 1948
- 3) Geibprasert S, Pongpech S, Armstrong D, Krings T. Dangerous external and internal anastomoses and supply to the cranial nerves: Vessels the neurointerventionalist needs to know. Am J Neuroradiol 30: 1459-1468, 2009
- 4) Uchino A, Saito N, Takahashi M, Kozawa E, Mizukoshi W, Nakajima R, Okano N. Persistent dorsal ophthalmic artery and ophthalmic artery arising from the middle meningeal artery diagnosed by MR angiography at 3 T. Surg Radiol Anat 35: 775-782, 2013
- 5) Lasjaunias P, Berenstein A, ter Brugge K: Surgical Neuroangiography. Vol.1. Clinical Vascular Anatomy and Variations. Springer-Verlag, 2001
- 6) Gailloud P, Gregg L, San Millan Ruiz D. Developmental anatomy, angiography, and clinical implications of orbital arterial variations involving the stapedial artery. Neuroimaging Clin N Am 19:169-179, 2009
- 7) Georgiou C, Cassell MD. The foramen meningo-orbitale and its relationship to the development of the ophthalmic artery. J Anat 180: 119-125, 1992
- 8) Lasjaunias P, Brismar J, Moret J, Theron J. Recurrent cavernous branches of the ophthalmic artery. Acta Radiol Diagn (Stockh) 19:553-560, 1978
- 9) Lasjaunias P, Moret J, Mink J. The anatomy of the inferolateral trunk (ILT) of the internal carotid artery. Neuroradiology 13: 215-220, 1977
- 10) Kiyosue H, Tanoue S, Hongo N, Sagara Y, Mori H. Artery of the superior orbital fissure: An undescribed branch from the pterygopalatine segment of the maxillary artery to the orbital apex connecting with the anteromedial branch of the inferolateral trunk. AJNR Am J Neuroradiol 36:1741-1747, 2015
- 11) Gregg L, San Millan D, Orru E, Tamargo RJ, Gailloud P. Ventral and dorsal persistent primitive ophthalmic arteries. Neurosurgery, 2015, published ahead of print.
- 12) Jewell PA. The anastomoses between internal and external carotid circulations in the dog. J Anat 86: 83-94, 1952
- 13) De La Torre E, Netsky MG. Study of persistent primitive maxillary artery in human fetus: Some homologies of cranial arteries in man and dog. Am J Anat 106: 185-195, 1960

Niche Neuro-Angiology Conference 2016

- 14) Coultas L, Chawengsaksophak K, Rossant J. Endothelial cells and VEGF in vascular development. *Nature* 438: 937-945, 2005
- 15) Fruttiger M. Development of the retinal vasculature. *Angiogenesis* 10: 77-88, 2007
- 16) Mukoyama YS, Shin D, Britsch S, Taniguchi M, Anderson DJ. Sensory nerves determine the pattern of arterial differentiation and blood vessel branching in the skin. *Cell* 109: 693-705, 2002