

Stapedial artery の発生と variation Embryology and variation of stapedial artery

重松秀明

Hideaki Shigematsu

東海大学医学部 脳神経外科

Department of Neurosurgery, Tokai University

Key words: stapedial artery, embryology, variation

はじめに

Stapedial artery は、眼窩内血管、硬膜血管、internal maxillary artery の一部となる胎生期の動脈である。その発生および変化は複雑であるが、眼動脈や中硬膜動脈の多様な解剖学的変異を理解するためには不可欠である。本稿では、stapedial artery の発生とそのバリエーションについて述べる。

歴史

Stapedial artery は、1836 年に剖検例から Joseph Hyrtl によって報告された。Hyrtl は、アブミ骨の閉鎖孔を横切る動脈に注目し、これが冬眠動物にみられる血管といくつかの類似性を有することを指摘した¹⁾。1948 年にヒト胚 22 例の解剖に基づく Padget の報告により、頭蓋顔面動脈の発生、特に hyo-stapedial 系の発生に関して多くの知見がもたらされた²⁾。1970 年代後半には、Lasjaunias らが stapedial artery に関連する anomaly について包括的な説明を行った^{3, 4)}。比較解剖学の研究は、stapedial artery の発生を理解する上で重要な役割を果たしてきた。20 世紀初頭、Tandler はラットにおける stapedial artery の発生を研究し、stapedial artery の退縮および中硬膜動脈の形成における外頸動脈の役割を説明した。ラットはヒト胚とは異なり、stapedial artery の supraorbital division が主に第 1 大動脈弓に依存している点が特徴である⁵⁾。Fuchs はウサギにおいて、第 1 および第 2 大動脈弓がヒト胚と同様に外頸動脈の形成に関与することを示した⁶⁾。Diamond は主に大型類人猿との比較解剖に基づく研究を発表し、stapedial artery の理解をさらに深めた⁷⁻⁹⁾

Stapedial artery の発生

Stapedial artery は hyoid artery から発生し、アブミ骨原基を通過することでその名称が付けられる胎生期の動脈である。ヒト胚において、アブミ骨原基を貫く stapedial artery から下顎部・上顎部・眼窩部への分枝が発達することを初めて記述したのは、Padget である。stapedial artery は Padget の発生段階 III~VI 期（胚長 9~24 mm）の間に存在する。ここから硬膜動脈、眼窩内動脈、および internal maxillary artery が発生する。

hyoid artery は第 2 大動脈弓の遺残であり、第 2 大動脈弓は胎生初期（胚長 4~5 mm、Padget 第 I 期）に早期退縮を開始する。この大動脈弓の退縮後、胚長 5~6 mm の段階（Padget 第 II 期）において、hyoid artery は舌骨弓レベルに存在する。妊娠 7 週から 19 週の間、mandibular artery（第 1 大動脈

弓の遺残)と吻合を形成する。Padget 第 III 期 (胚長 7~12 mm) では、hyoid artery は顕著に発達し、頭側へ伸びてアブミ骨脚を通過し、stapedial artery として認識される。一方、mandibular artery は短く、同定が困難である。この段階では、stapedial artery の 2 つの主要分枝 (supraorbital division および maxillomandibular division) の原型が観察されるが、これらが明確に形成されるのは Padget 第 IV 期 (12~14 mm) である。胚長 16~18 mm (Padget 第 V 期) では、stapedial artery はさらに伸長し、ガッセル神経節へ到達する。この際、将来の鼓室腔内を通過し、特にアブミ骨脚を通過することで最大の発達段階に達する。

trigeminal nerve の ophthalmic root(V1)に沿って走行する supraorbital artery は、眼窩内分枝 (眼窩上動脈、涙腺動脈、篩骨動脈、前頭動脈) および中硬膜動脈の形成に寄与する。一方、maxillomandibular artery は棘孔を通過して頭蓋外へ出て、infraorbital artery および mandibular artery (将来の infraorbital artery および inferior alveolar artery) を分枝する。

Stapedial artery は、成人型 MMA の形成に至る過程として、Padget 第 VI 期 (胚長 20~24 mm) に 2 つの annexation と 2 つの regression が生じる。頭蓋内では、眼窩内分枝は primitive ophthalmic artery に取り込まれ、眼窩上枝の経蝶形骨部分は退縮する。その結果、MMA 前枝と lacrimal artery との間に吻合動脈 (sphenoidal artery) が残存し、これは上眼窩裂を通過して眼窩内へ進入する。頭蓋外では、ventral pharyngeal artery が stapedial artery の maxillomandibular artery を取り込み、MMA の近位を形成するとともに、外頸動脈へと発展する。その結果、stapedial artery への血流逆転が生じ、鼓室内部分は退縮し、内頸動脈由来の caroticotympenic artery および MMA 錐体枝由来の superior tympanic artery が遺残として残る。

眼動脈の発生

ophthalmic artery の発生は、いくつかの段階において stapedial artery と関連している。ophthalmic artery の形成は、dorsal ophthalmic artery と ventral ophthalmic artery が関与する。

ophthalmic artery の発生については、一定の見解がないのが現状であるが、本稿ではまず、Lasjaunias の説から説明する¹¹⁾。Lasjaunias によると dorsal ophthalmic artery は primitive internal carotid artery の cavernous segment から分枝し、ventral ophthalmic artery は primitive internal carotid artery の anterior division から発生する。dorsal ophthalmic artery は上眼窩裂を通過して眼窩内へ進入し、ventral ophthalmic artery は視神経管を通過して眼窩内へ進入する。続いて、これら 2 つの動脈の間に 2 つの主要な吻合が形成される。1 つ目は、視神経周囲において両動脈から供給される眼窩内の網状 (plexiform) 吻合であり (将来の眼動脈 second segment に相当)、2 つ目は、ventral ophthalmic artery と primitive internal carotid artery との間に形成される硬膜内吻合で、これにより supraclinoid 部の眼動脈の起始が形成される。その後、ventral ophthalmic artery の近位部は退縮し、成人における眼動脈の幹部が形成される。2 つ目は、dorsal ophthalmic artery の近位部が退縮し、その遺残が原始 ICA の inferolateral trunk となる。前述の通り、stapedial artery は同時期 (胚長 7~24 mm、Padget 第 III~VI 期) に錐体部 ICA の hyoid artery から発生する。stapedial artery から分枝した supraorbital artery は眼窩内へ進入し、眼窩枝を分岐する。この枝はさらに ethmoidonasal artery と lacrimal artery の 2 枝に分かれる。ethmoidonasal artery は、前述の視神経周囲の動脈輪において primitive ophthalmic artery と吻合する。その後、supraorbital artery の trans-sphenoidal part は退縮し、その眼窩枝は primitive ophthalmic artery に取り込まれて成人型の ophthalmic artery が形成される。

Stage	Embryo size (mm)	Major evolutions	Graphic Illustration
I	4-5	<ul style="list-style-type: none"> - Regression of the second aortic arch - Hyoid artery (HA) formation (dorsal remnant of the 2nd aortic arch) 	
II	5-6	<ul style="list-style-type: none"> - Elongation of the hyoid artery (HA) - Annexation of the mandibular artery (MA) territory (1st aortic arch) by the hyoid artery (2nd aortic arch) 	
III/ IV	7-12 12-14	<ul style="list-style-type: none"> - Cranial growing of the hyoid artery (stapedial artery) passing into the middle ear (crus of the stapes) - Extension of the two branches of the stapedial artery: Supraorbital (SOA) and Maxillomandibular (MxMA) 	
V	16-18	<ul style="list-style-type: none"> - Maximal development of the stapedial artery - Annexation of the supraorbital branch (SOA) by the ophthalmic artery (PDOA, PVOA) - Regression of the trans-osseous (superior orbital fissure) segment of the supraorbital branch 	
VI	20-24	<ul style="list-style-type: none"> - Annexation of the maxillomandibular branch by the ventral pharyngeal artery - Regression of the intratympanic segment of the stapedial artery 	

Table 1 (stapedial artery 発生過程 文献 10 より引用¹⁰⁾)

一方、Padget らは dorsal ophthalmic artery は primitive internal carotid artery の後交通動脈起始部近傍より分岐すると報告した²⁾。その後 dorsal ophthalmic artery の起始部は caudal migration と

呼ばれる尾側（成人型眼動脈の起始部）への移動を行う。また ventral ophthalmic artery は primitive internal carotid artery の前脈絡叢動脈分岐部近傍から起始するとし、ventral ophthalmic artery の近位部が退縮すると同時期に stapedia artery が supraorbital artery と maxillomandibular artery を分岐し、supraorbital artery は上眼窩裂を通過して眼窩内に入り、dorsal ophthalmic artery は ventral ophthalmic artery と吻合し、視神経周囲で arterial ring を形成し、Arterial ring の腹側が退縮した後、成人の眼動脈が完成するとしている。

Padget の報告では dorsal ophthalmic artery は ILT の precursor と述べられていないが、Lasjaunias らは dorsal ophthalmic artery が inferolateral trunk の起源と考えている。この眼動脈が関わる発生過程には小宮山が異を唱えている¹²⁾。小宮山は発生学的に三叉神経第 2、3 枝は第 1 咽頭弓（mandibular arch）由来であるが、第 1 枝は第 1 咽頭弓由来ではなく、premandibular arch 由来の可能性があると説明している。内頸動脈からの分岐の順番を考慮すると maxillary artery（将来の inferior hypophyseal artery）が三叉神経第 2 枝、mandibular artery（将来の vidian artery）が第 3 枝由来で、ILT が第 1 枝、すなわち premandibular arch 由来の可能性があるとし、dorsal ophthalmic artery と inferolateral trunk は独立した血管であるとしている。

内頸動脈の発生

大動脈弓部とその分枝は胎生期における大動脈囊と背側大動脈を結ぶ 6 対の鰓弓動脈及び背側大動脈より分岐する分節動脈が系統的に形成・退縮することで形成される²⁾。このうち、頸部内・外頸動脈、総頸動脈の発生には第 1-3 鰓弓動脈と背側大動脈が関与するが、6 対の鰓弓動脈が同時期に存在することはなく、第 1 から第 6 鰓弓動脈まで順次形成され、退縮する。胎生 6 週までに第 1-2 鰓弓動脈は退縮する。第 1 鰓弓動脈の背側動脈側は primitive mandibular artery となり、この遺残が Vidian artery となる。第 2 鰓弓動脈も退縮するが、その背側大動脈側より hyoid artery（近位部が carotico tympanic artery として遺残）が形成され、第 2-3 鰓弓動脈間の腹側大動脈側より ventral pharyngeal artery が形成される。前述の通り、Hyoid artery からは stapedia artery が発達し、supraorbital artery と maxillomandibular artery が分岐する。ventral pharyngeal artery が maxillomandibular artery と吻合し、stapedia artery の近位部が退縮することで ventral pharyngeal artery から外頸動脈本幹が形成される。ventral pharyngeal artery の起始部は第 3 鰓弓動脈となるが、その起始部が背側動脈側に migration する。第 3-4 鰓弓動脈間の背側大動脈（ductus caroticus）が消退することで、第 3 鰓弓動脈の ventral pharyngeal artery の近位部は総頸動脈となり、遠位部は背側大動脈とともに内頸動脈の近位部を形成する。

内頸動脈の segmental concept に関して、臨床的な内頸動脈の分類には Fischer 分類が最も多く使用されているが、内頸動脈を発生学的に分類する segmental concept が Lasjaunias らによって提唱されている¹³⁾。Lasjaunias による内頸動脈の 7 つの segment とその境界を形成する血管は以下のとおりである。segment 1; Cervical（起始部から ductus caroticus まで）、segment 2; ascending intrapetrous（ductus caroticus から hyoid artery の分岐部まで）、segment 3; horizontal intrapetrous（hyoid artery から primitive mandibular artery の分岐部まで）、segment 4; ascending foramen lacerum（primitive mandibular artery から primitive trigeminal artery の分岐部まで）、segment 5; horizontal intra-cavernous（primitive trigeminal artery から dorsal ophthalmic artery/ inferolateral trunk の分岐部まで）、segment 6; clinoid（dorsal ophthalmic

artery/inferolateral trunk から ophthalmic artery の分岐部まで)、segment 7; termination (ophthalmic artery から posterior communicating artery の分岐部まで)。Lasjaunias は発生学的な内頸動脈の定義を後交通動脈の分岐部までとしており、それよりも末梢の内頸動脈は rostral division と caudal division に分岐し、rostral division には前大脳動脈、中大脳動脈、前脈絡叢動脈が含まれ、caudal division には後大脳動脈や脳底動脈の一部が含まれるとしている。

一方、Gailloud らは後交通動脈より遠位の内頸動脈の agenesis の例を報告し、後交通動脈から前及び中大脳動脈の分岐までを segment 8 とする概念を提唱した¹⁴⁾ (Figure1)。内頸動脈近位部が agenesis を起こした場合、proatlantal artery が側副路として機能することを考察しており、agenesis が proatlantal artery の分岐より遠位に及んだ場合は、intratympanic type の aberrant ICA となると考察している。小宮山は、内頸動脈近位部からは proatlantal artery の他に hypoglossal artery が分岐する可能性があり、segment 1 は proatlantal artery や hypoglossal artery によってさらに3つに分けられ、さらに Segment 7 から superior hypophyseal artery が分岐する可能性を挙げ、少なくとも 10 segments とする概念を提唱した(Figure2)。

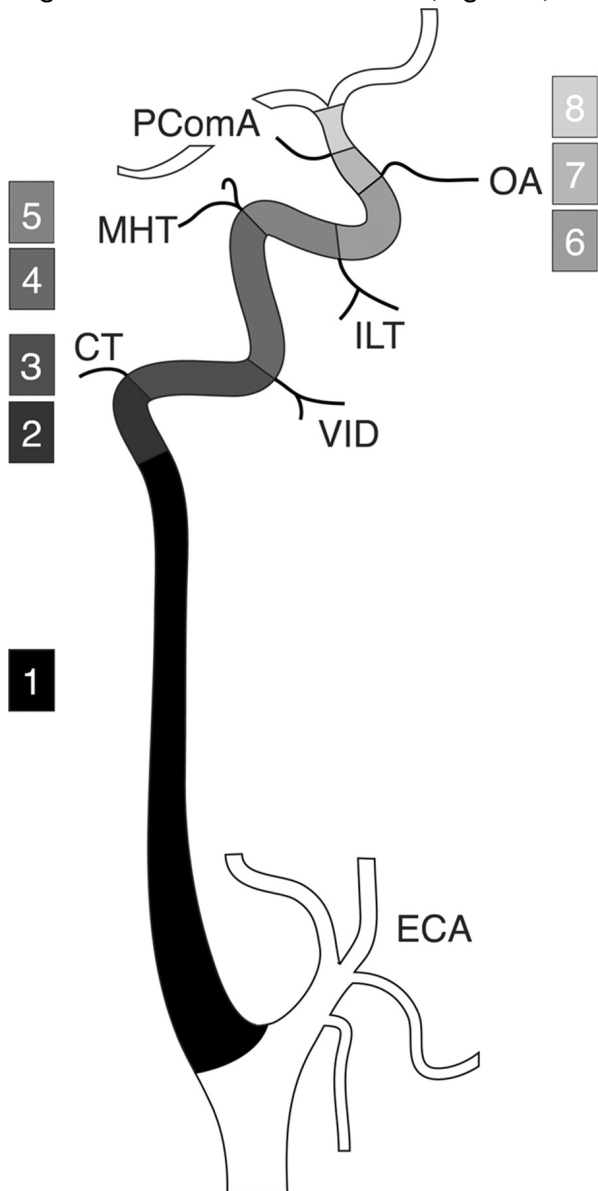


Figure. 1 (Gailloud らの ICA 分類 文献 14 より引用¹⁴⁾)

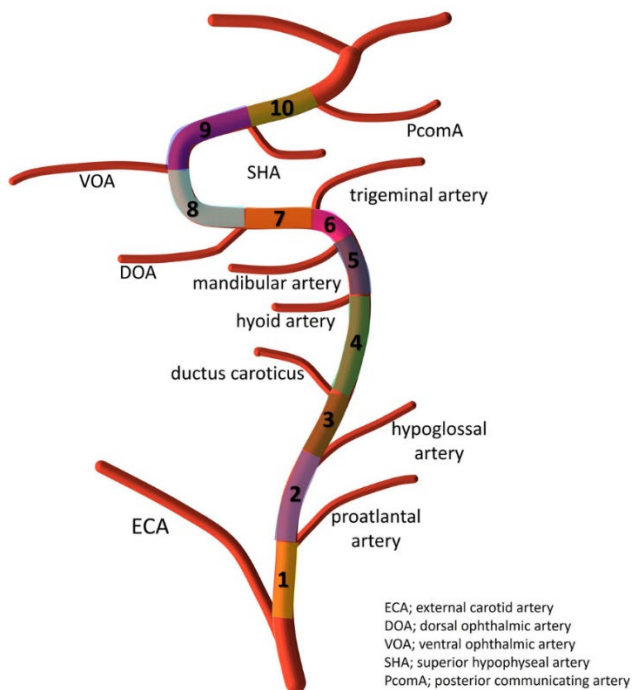


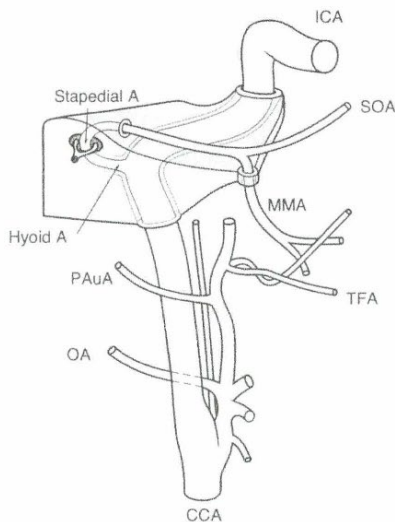
Figure. 2 (島田 隆一 ら Niche Neuro-Angiology Conference 2018 より)

Variations

Complete Persistence of the Stapedial Artery

stapedial artery の complete persistence は非常に稀であり、これまでに内頸動脈瘤や PHACE 症候群に関連して報告された症例が報告されている¹¹⁾。これらの症例では、stapedial artery は胎生期と同様の形態を呈し、錐体部 ICA から起始して中耳を通過し、2 つの branch に分枝する。すなわち、intracranial branch は中硬膜動脈に相当し、もう一方の extracranial branch は棘孔を通過して頭蓋外へ出る。その結果、棘孔は拡大し、蝸牛隆起 (cochlear promontory) は侵食され、internal maxillary artery は外頸動脈ではなく stapedial artery から起始するようになる。stapedial artery の maxillomandibular branch が ventral pharyngeal artery に取り込まれないことに起因すると考えられる。その結果、stapedial artery への血流の逆転が生じないため、その近位部 (鼓室内部分) は退縮せずに残存する。

Fig. 4.19. Schematic representation of the complete hyostapedial persistence.
SOA, Supraorbital artery;
ICA, internal carotid artery;
TFA, transverse facial artery;
MMA middle meningeal artery;
CCA common carotid artery;
PAuA, posterior auricular artery



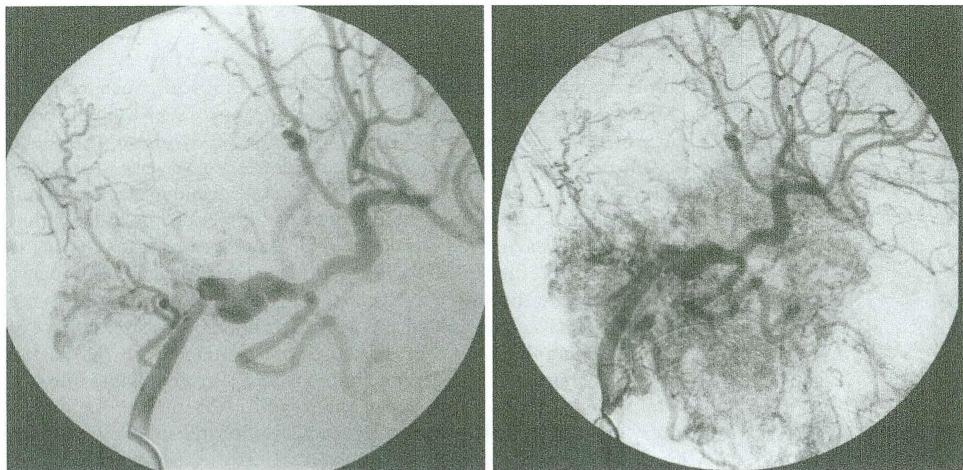


Fig. 4.20. Early (A) and late (B) “internal carotid artery” angiograms in an infant who presented with a PHACES syndrome. The complete persistence of the hyostapedial system is associated with a cervical agenesis of the internal carotid artery and subsequent ascending pharyngeal artery flow through the tympanic cavity (so-called aberrant course of the internal carotid artery)

Figure. 3 complete persistence of the stapedial artery の症例 文献 11 より引用 ¹¹⁾

Partial persistence of the stapedial artery

stapedial artery の intracranial branch のみが錐体部 ICA から起始する。棘孔は欠如するか、あるいは縮小しており、中硬膜動脈は internal maxillary artery ではなく stapedial artery から起始する。この anomaly は stapedial artery の近位部ではなく、maxillomandibular artery の近位部の退縮によって説明される。なお、complete persistence よりも partial persistence の方がはるかに多いという点は興味深い。この現象の理由は未だ明らかではなく、おそらく maxillomandibular artery が ventral pharyngeal artery に取り込まれる発生過程に関連していると考えられる。

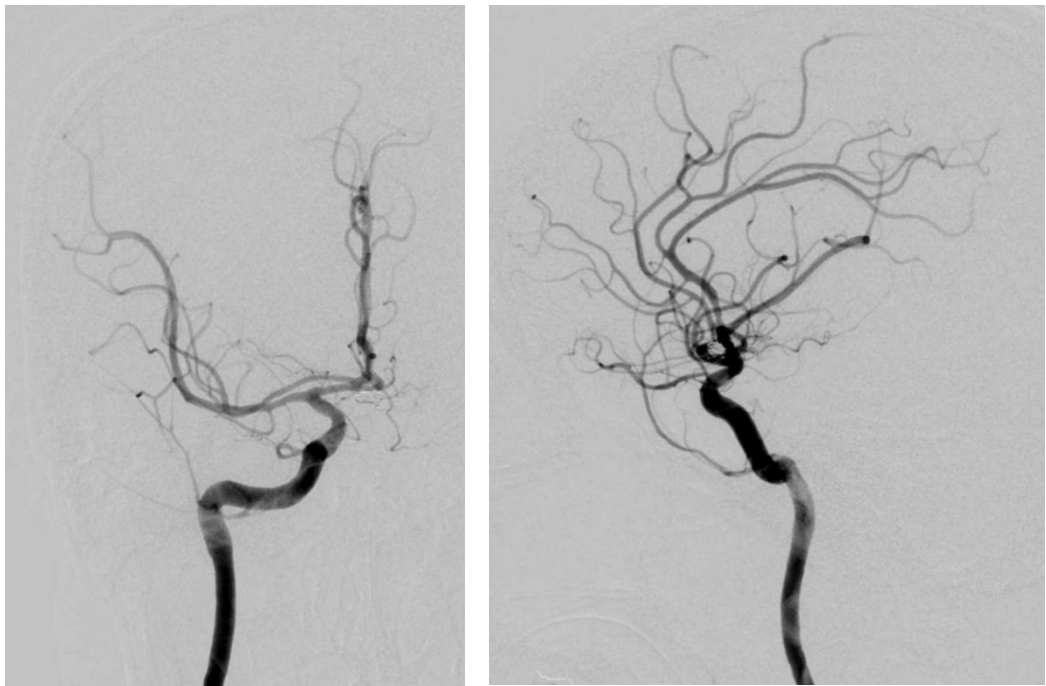


Figure. 4 右 ICA 撮影の正面像・側面像
stapedial artery の intracranial branch のみ(MMA)が錐体部 ICA から起始する。

Persistent Hharyngo-Hyo-Stapedial Artery

上行咽頭動脈の下鼓室枝が Jacobson canal を通って鼓室内へ進入し、通常は退縮して caroticotympanic 動脈となる hyoid artery と吻合し、さらに ICA と吻合する。^{15, 16)}

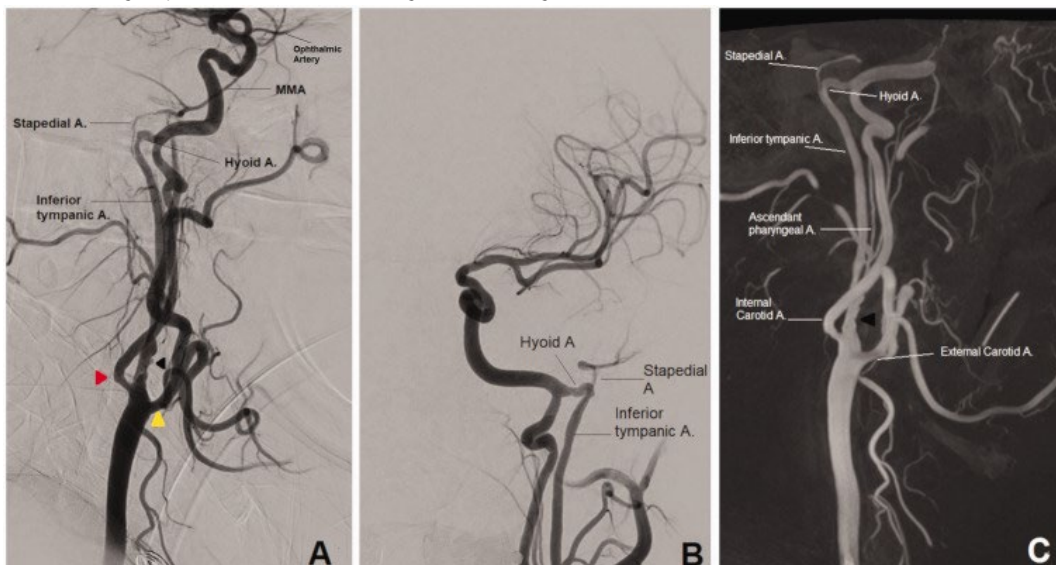


Figure. 5 persistent pharyngo-hyo-stapedial artery (文献 16 より引用)¹⁶⁾

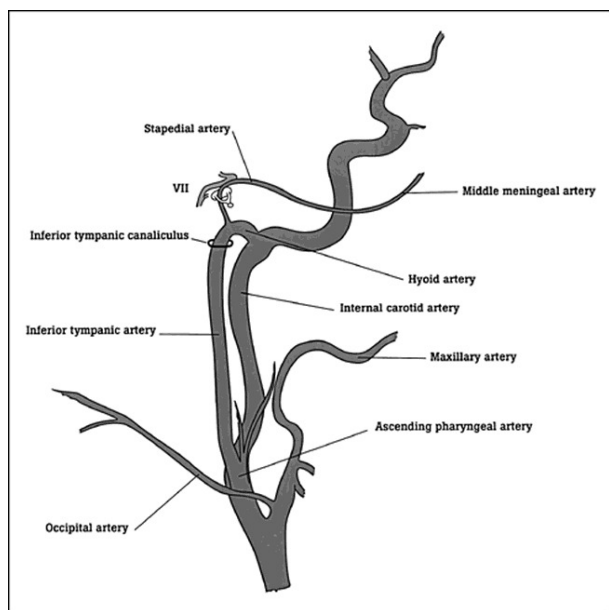


Figure. 6 persistent pharyngo-hyo-stapedial artery のシエーマ(文献 15 より引用)¹⁵⁾

Pharyngo-Tympano- Stapedial Artery

1977 年に Lasjaunias ら²³⁾によって初めて報告された。この変異では、中硬膜動脈は頸部内頸動脈から起始し、頸部 ICA に沿って上行した後、下鼓室管を通して鼓室内に入り、stapedial artery と同様の走行をとる。この変異は、下鼓室動脈(上行咽頭動脈の枝)による stapedial artery の取り込みと、stapedial artery 近位部の退縮によって説明される。

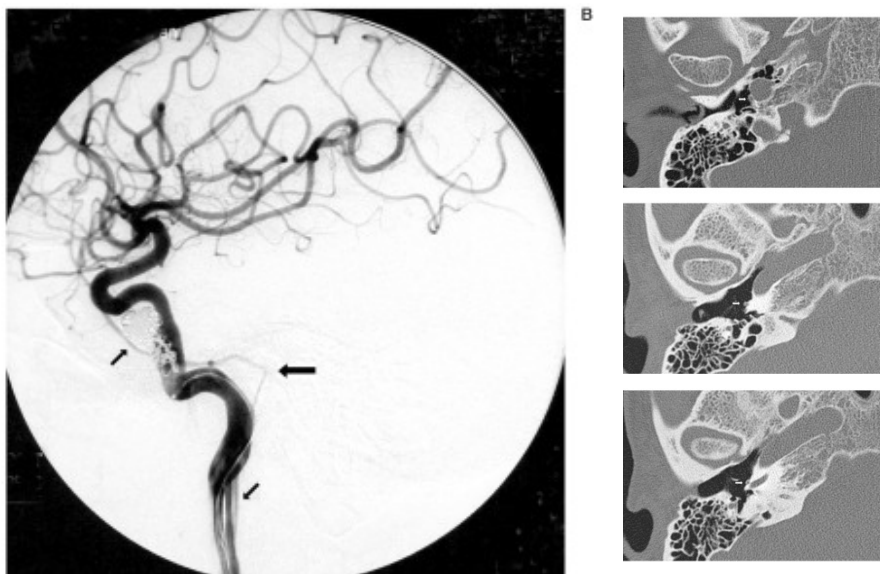


Figure. 7 Pharyngo-Tympano- stapedial artery (文献 17 より引用)¹⁷⁾

Persistence of the stapedial artery associated with aberrant flow of the ICA (aberrant ICA)

ICA は拡大した inferior tympanic canal (Jacobson canal) を通って頭蓋底へ進入し、鼓室内へ入り前方に屈曲したのち、通常の頸動脈管へ到達する。中硬膜動脈は鼓室内を走行する ICA から分岐し、アブミ骨を通過して前述と同様の走行をとる。そのため、このような症例では頸動脈管の頭蓋外開口部は欠如している。ICA の鼓室内走行は、第 1-2 総弓動脈の無形成によって説明される。すなわち、頸部の segment は実際には上行咽頭動脈であり、下鼓室動脈が鼓室内で caroticotympanic 動脈との吻合を維持している。

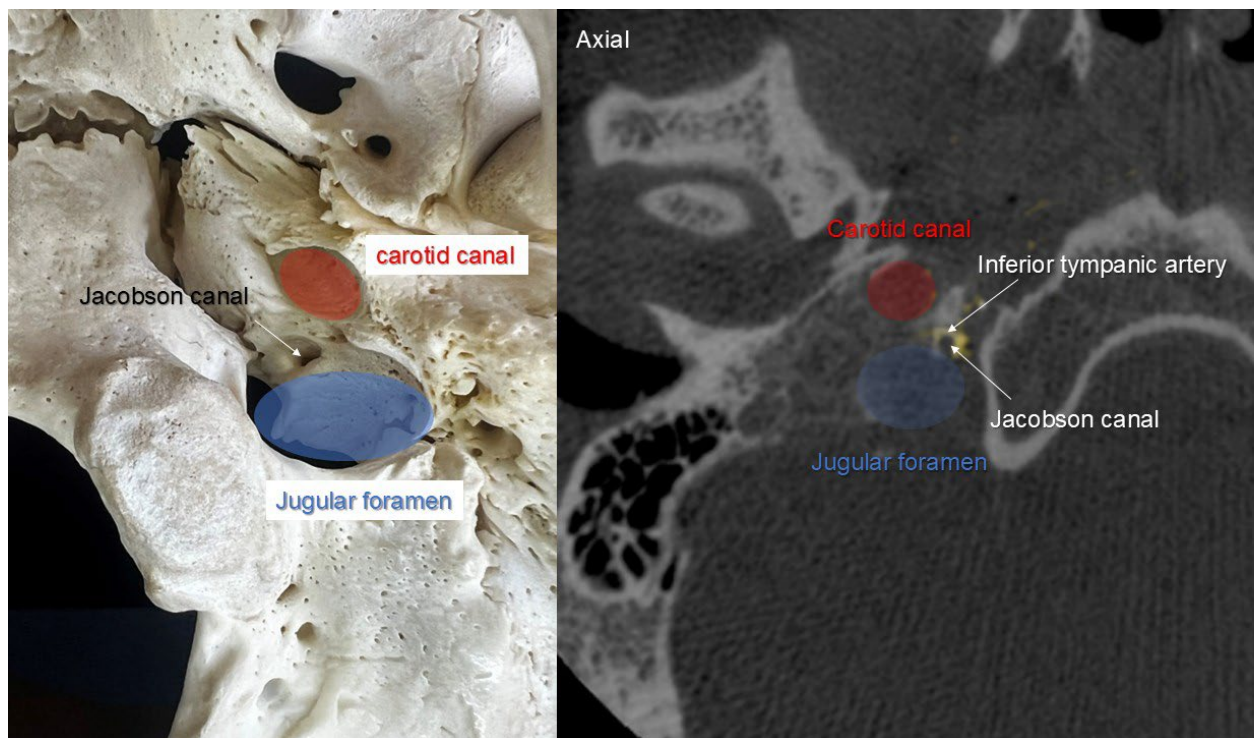


Figure. 8 Jacobson canal を通る inferior tympanic artery

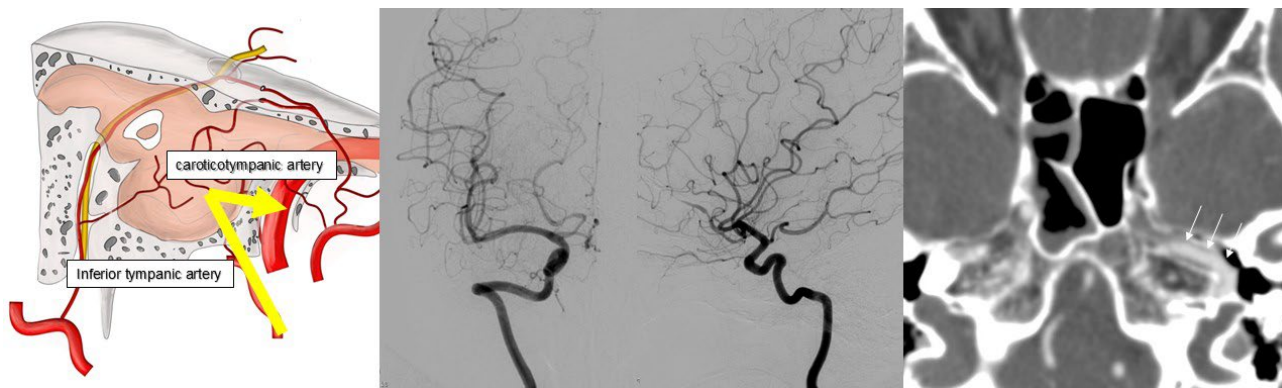


Figure. 9 Aberrant ICA

MMA 起始の眼動脈

眼窩枝が中硬膜動脈から分岐するという最初の報告は、1872年にCurnowによってなされた¹⁸⁾。彼は剖検例において、網膜中心動脈を除くすべての眼窩枝が中硬膜動脈から供給され、網膜中心動脈のみがICAから起始していることを報告した。これは、胚長20mmの段階でstapedial arteryのsupraorbital divisionとprimitive ophthalmic arteryとの間に形成されるべき吻合が成立しないことによって生じるとされる¹⁹⁾。Musgroveは、眼動脈がMMAから起始する症例を報告し、この例では中心網膜動脈もMMAから供給され、ICAからは眼動脈が分岐していなかったと報告した²⁰⁾。眼動脈起始の中硬膜動脈の形成には、以下の2つの過程が関与する。1) stapedial arteryの近位分枝が退縮せずに残存し、その結果、中硬膜動脈のintracranial segmentが眼窩内のstapedial arteryの分枝と連続したままとなる。2) stapedial arteryのmaxillomandibular divisionの退縮が不完全であるため、中硬膜動脈のextracranial segmentが形成されない。その結果、internal maxillary arteryと中硬膜動脈のintracranial segmentとの間に連結が形成されなくなる¹⁹⁾。HayrehとDassは、170例の剖検例のうち6例（完全型：2例、部分型：4例）において、MMAが眼窩内の血流に関与していたことを報告した²¹⁾。MMAから起始し、上眼窩裂を通して眼窩へ入る眼動脈の発生頻度は約1.4~2.5%と報告されている²¹⁾。

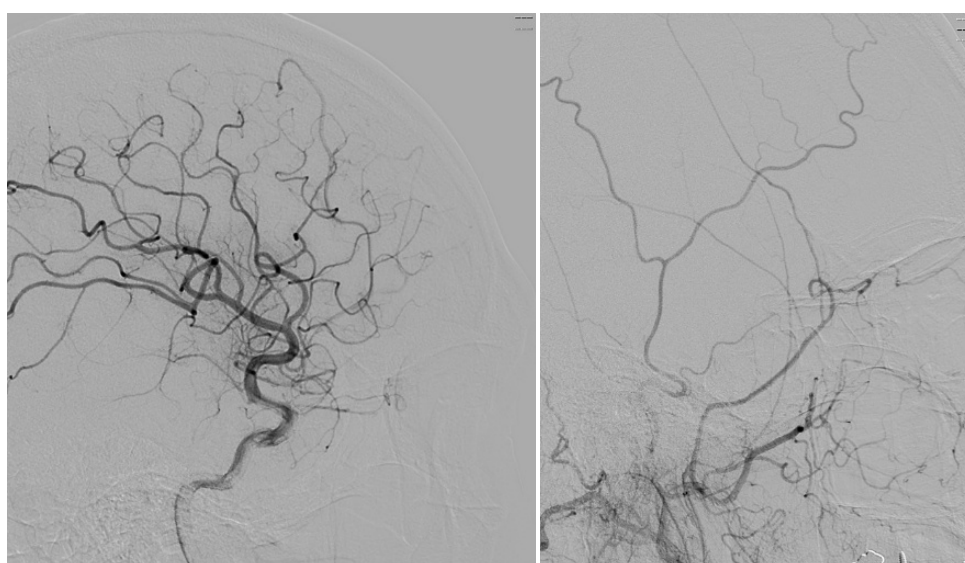


Figure. 10 MMAのOA起始（部分型）：網膜中心動脈を除くすべての眼窩枝が中硬膜動脈から供給され、網膜中心動脈のみがICAから起始する。

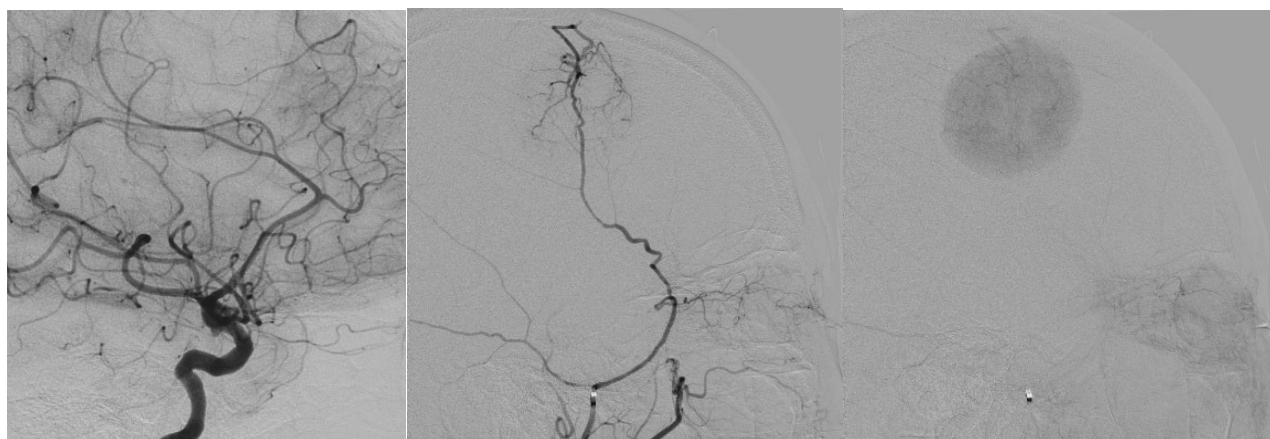


Figure. 11 MMA の OA 起始（完全型）：網膜中心動脈を含むすべての眼窩枝が中硬膜動脈から供給され、ICA から眼動脈は分岐しない。

【Reference】

- 1) Hyrtl J: Several human analogies of of the artery Otto discovered running through the stapes in several hibernators. New observations from the field of human and comparative anatomy. *Neue beobachtungen aus dem gebieteder menschlichen und vergleichenden anatomie* 1836; 457-66.
- 2) Padget DH: The development of cranial arteries in the human embryo. *Contrib Embryol Carneg Instrn* 1948; 32: 205-261.
- 3) Lasjaunias P, Moret J: Normal and non-pathological variations in the angiographic aspects of the arteries of the middle ear. *Neuroradiology* 1978; 15: 213-219.
- 4) Lasjaunias P, Moret J, Manelfe C, et al: Arterial anomalies at the base of the skull. *Neuroradiology* 1977; 13: 267-272.
- 5) Tandler J: Zur Entwicklungsgeschichte der Kopfarterien bei den Mammalia. *Morphol Jahrbuch* 1902; 30: 275-373.
- 6) Fuchs H: Zur Entwicklungsgeschichte des Wirbeltierauges. I. Über die Entwicklung der Augengefäße des Kaninchens. *Anat Hefte* 1905; 28: 1-251.
- 7) Diamond MK: Unusual example of a persistent stapedia artery in a human. *Anat Rec* 1987; 218: 345-354.
- 8) Diamond MK: Homologies of the meningeal-orbital arteries of humans: a reappraisal. *J Anat* 1991; 178: 223-241.
- 9) Falk D: Meningeal arterial patterns in great apes: implications for hominid vascular evolution. *Am J Phys Anthropol* 1993; 92: 81-97.
- 10) Bonasia S, Smajda S, Ciccio G, et al: Stapedial Artery: From Embryology to Different Possible Adult Configurations. *AJNR Am J Neuroradiol* 2020; 41: 1768-1776.
- 11) Lasjaunias P, Berenstein A, Brugge KGt: *Surgical Neuroangiography*. . 1. Springer-Verlag. Berlin, 2001.
- 12) Komiyama M: Letter to the editor - embryology of the ophthalmic artery: a revived concept. *Interv Neuroradiol* 2009; 15: 363-368.
- 13) Lasjaunias PL: Segmental identity and vulnerability in cerebral arteries. *Interv Neuroradiol* 2000; 6: 113-124.
- 14) Gailloud P, Clatterbuck RE, Fasel JH, et al: Segmental agenesis of the internal carotid artery distal to the posterior communicating artery leading to the definition of a new embryologic segment. *AJNR Am J Neuroradiol* 2004; 25: 1189-1193.
- 15) Lefournier V, Vasdev A, Bessou P, et al: A persistent pharyngo-hyostapedial artery: embryologic

Niche Neuro-Angiology Conference 2026

- implications. *AJNR Am J Neuroradiol* 1999; 20: 271-274.
- 16) Cagnazzo F, Zannoni R, Lefevre PH, et al: A symptomatic atherosclerotic persistent pharyngo-hyo-stapedial artery: Treatment management and embryological considerations. *Interv Neuroradiol* 2020; 26: 675-680.
 - 17) Jehl J, Jeunet L, Berraiah M, et al: Bilateral Persistent Pharyngo-Stapedial Arteries Revealed during Evaluation of a Carotid-Cavernous Fistula. 3 Tesla MR Angiographic Aspects. *Interv Neuroradiol* 2006; 12: 327-334.
 - 18) Curnow J: Two instances of Irregular Ophthalmic and Middle Meningeal Arteries. *J Anat Physiol* 1873; 8: 155-156.
 - 19) Dilenge D, Ascherl GF, Jr.: Variations of the ophthalmic and middle meningeal arteries: relation to the embryonic stapedial artery. *AJNR Am J Neuroradiol* 1980; 1: 45-54.
 - 20) Musgrove J: Origin of Ophthalmic Artery from Middle Meningeal. *J Anat Physiol* 1893; 27: 279-281.
 - 21) Hayreh SS, Dass R: THE OPHTHALMIC ARTERY: I. ORIGIN AND INTRA-CRANIAL AND INTRA-CANALICULAR COURSE. *Br J Ophthalmol* 1962; 46: 65-98.