

Comparative anatomical studies on the bony orbital socket and cranial basal foramina.

SAWANO Keiichi

Department of Anatomy, Kanagawa Dental College

お椀型骨性眼窩壁と頭蓋底神経血管孔の比較解剖学的研究

澤野啓一

神奈川歯科大学人体構造学講座（解剖学）

-[1] 序論

-[2] 骨性眼窩壁（bony orbital socket）とその来歴

-[3] 頭蓋底神経血管孔（cranial basal foramina）の変遷

-[4] 引用文献

-[1] 序論

-[1-a] 個体発生、系統発生、進化、分類

チャールズ・ダーウィン博士（Charles Darwin）による進化論の提唱（1858年抄録、1959「種の起源」刊行）から間もなくして、その進化論を強力に支持し、「生物発生原則（Die Biogenetische Grundregel）」を提唱したのはヘッケル博士（Ernst Haeckel）であった。そのヘッケル博士は1866年に音叉型の（簡略化すれば音叉型となる）系統樹を提唱した。それは進化の頂点の一方に節足動物を配し、他方の進化の頂点に脊椎動物、中でも特に哺乳類を配する系統樹であった。これにより、リンネ博士（Carl von Linné, Carolus Linnaeus, 1707-1778）の創設した近代生物分類学と、ダーウィン博士の進化論・系統論は、相互に密接な関連性を持つものとして把握されるようになった。

（図1）ヘッケルの生物発生原則（Ernst Haeckel's Biogenetische Grundgesetz）

しかしここで注意すべき点は、個体発生の研究が、実験発生学のような、物理学や化学に近い「再現可能性」の有る実験科学を基礎とすることが可能であるのに対して、進化論・系統論が対象とする進化は、「再現可能性」を持たない、一回限りの歴史的事象であると言う点である。

ヘッケル博士以来、「生物分類学は系統に基づいて行われるべき」であるという指摘が、あたかも当然の如く認識されがちである。しかし進化という現象が、実験によって再現することが不可能な一回限りの歴史的事象である以上、万人を納得させ得る系統論の樹立は不可能であり、時々の議論によって大きく揺れ動くのが系統論の実態である。従って正しくは、「生物分類学は系統に基づいて行われるべき」のではなく、「生物分類学は系統論の成果を出来るだけ反映すべき」なのである。

生物分類学の方法論には、基本的に時間軸は入っては居らず、同時比較を前提としている。他方、系統論は、「著しく形質の異なる個体間を親子関係の連続で繋ぐ」ものである。従って、進化の実態が明らかにならない限り（つまり形質は異なっても親子関係の連続で繋がっているということが証明されない限り）、生物分類学と系統論が整合的に接続されることは不可能である。ところが、「形質は異なってい

Ernst Haeckel's Biogenetische Grundgesetz (Grundregel), 1866 (Rekapitulationstheorie)
Die Ontogenese rekapituliert die Phylogenese.

ヘッケルの生物発生原則（反復説）
個体発生は系統発生を繰り返す

⇒⇒⇒ 非常に重要なテーゼであるが、
細部にまで適用可能なのではない

でも親子関係の連続で繋がっている」ということを実験的に証明することは、少なくとも現状では不可能なのである。

従来この点あまり注目されなかったのは、化石の発見例が比較的少なかったからである。発見された化石が少なければ、時代差が大きく異なる点と点を任意に繋いで系統論の出来上がりとなった。しかし化石の発見例が相対的に多く成って来ると、線で結ぼうとする二つの点の間に、同時代的で比較的似てはいるものの、明らかに異なる形質を持つ化石が複数存在するという事態が、様々な分野で生じて来ている。

こういう事態の中で、強引に系統論を優先させようとする、研究の僅かな進展で、系統が度々入れ替わるという事態が生ずるのである。これが現代の生物分類学と系統論の関係の到達点なのである。

もう一つ注意すべき点は、ヘッケルの生物発生原則が個体発生の全ての部分に関して適用可能という訳ではないことである。特に哺乳類は、胎生というシステムを採用したことが、進化史に於ける成功の大きな役割を果たしているから、胎児の発生成長は「子宮内での発生」というシステムに二次的に適応している部分が多いはずである。胎生への二次的な適応に限らず、個体発生の早期から心臓や身体の頭側が優先的に発生する点、消化器官・呼吸器官などが出生まで機能していない点など、個体発生が系統発生を必ずしも忠実に再現していない事例が多いことにも注目すべきである。つまり「胎児形質を直ちに祖先型と断定しては行けない」という点を十分に留意すべきである。

-[1-b] 進化史における構造物の新生、消失、復活の判定

進化史＝系統発生の観点から、人体の構造と機能を考察する際に、化石、つまり古生物学の成果は大変重要である。ただ古生物学の成果には、確実性と不確実性とが併存している点には十分に注意する必要がある。

即ち、化石として残された情報は非常に確実なものである。他方で、「化石が発見されていない」という情報は非常に不確実なものである。かつて生存した動植物が、化石として遙かに後の時代まで残されるのは非常に稀な事例であるはずで、しかもその稀に残された化石が、掘り出されて、もしくは自然現象の過程で地表面に露出し、研究者に発見され注目されるのは、これまた稀な事例であるはずだからである。

従って、注目すべき化石が発見されているという情報は確実なものであるが、「仮想上の化石が発見されていない」という情報の評価は非常に難しい。

もう一つ根本的な問題として、大きな時間間隔が存在した場合に、進化の過程で変化し得る範囲というものを、我々は限定しにくいという点がある。

狭義の物理学・化学・生理学・個体発生学では、実験的な検証が可能である（個体発生学に関しては現時点では検証可能な範囲は非常に限られてはいるが）。

しかし進化史の過程での構造上の（解剖学的）変化、例えば、先祖において一度消失した「骨性眼窩輪の外側弧（弓）（Arcus lateralis of the bony orbit）＝（Columna orbitae arcuata眼窩弓状柱）」が子孫において復活し得るか（この部位に関しては後に再度論ずる）。

あるいは、祖先において成立した「左上大静脈から右上大静脈への懸け橋（注1）」は、一度消失した後に、子孫に置いて再び復活し得るのか、というような問題は、少なくとも現時点においては実験的に検証することは不可能である。

（注1）：ここで問題とする「左上大静脈から右上大静脈への懸け橋」は、人体解剖学で「左腕頭静脈（Vena brachiocephalica sinistra）」もしくは「左無名静脈（Vena anonyma sinistra）」と呼ばれている構造物の、下方（尾側）の約半分を指す。詳しくは、拙著「テベシウス弁と左上大静脈（Valvula sinus coronarii Thebesii and Vena cava superior sinistra）（Sawano, 1994）」を参照されたい。

この小論では、「骨性眼窩輪（Bony orbital ring）」「お椀型眼球ソケット（Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket）」（Sawano et al., 2012）の進化史から検討を始めることにしたい。

-[2] 骨性眼窩壁（bony orbital socket）とその来歴

-[2-a] 眼窩、特にヒトの骨性眼窩壁の概観

-[2-a-1] 眼窩の壁

頭蓋を正面から眺めると、先ず目に付くのは、左右の眼窩（Orbita）と、中央の鼻腔（Cavum nasi）である。眼窩は、眼球と動眼筋を収容する窪みで、ヒトや高等霊長類、ウマ、反芻類などでは、その周囲は薄い骨で囲まれている。これを骨性眼窩輪（Bony orbital ring）と呼ぶことが多い。

先ず最初に、ヒトの眼窩の壁を構成する骨について、教科書的な記述から始めよう。ヒトでは、眼窩の壁を構成する骨は、通常7種類存在する。上部（頭側）は、前面上面から奥まで前頭骨（Os frontale）と、その窪みである前頭骨眼窩面（Facies orbitalis ossis frontalis）から成る。外側面は、頬骨（Os zygomaticum）と、その窪みである頬骨眼窩面（Facies orbitalis ossis zygomatici）から成る。

眼窩の奥の中央部は、蝶形骨（Os sphenoidale）の突起である二つの部分、すなわち蝶形骨大翼（Ala major ossis sphenoidalis）と蝶形骨小翼（Ala minor ossis sphenoidalis）から成っている。

より内側がわの小翼には、後述のように視神経管が穿たれているし、小翼と大翼の間には、上眼窩裂と呼ばれる骨の隙間が存在する。

眼窩の内側壁の構成はやや複雑である。頭蓋の中央部に走る二本の細い骨は鼻骨（Os nasale）である。生きている状態での「鼻の先端の皮膚の裏側の堅い部分」は、皮膚の上から触るとあたたかも骨（硬骨）をよに感ぜられるが、実際は軟骨（鼻軟骨Cartilagine nasale）であり、ボクサーのように始終打撃を加えられているヒトでは、砕けてしまって居たり、普通の人でも晒せば鼻軟骨の部分は全て溶けてしまう存在である。

ヒトの頭骨（頭蓋）だけを見ていると、鼻骨や涙骨（Os lacrimale）のような小さい骨が何で独立の骨なのだろうと疑問に感ずる。しかしこの疑問は、ウマ（馬）やウシ（牛）のように馬面（うまづら）の動物の頭骨（頭蓋）を見れば氷解する。特別に馬面の動物と限定しなくても、ヒトを含むサル類（真猿類）とネコ類を除けば、大部分の動物は基本的に吻（上顎と下顎の前方への突出部分）の長い構造を持つ。それらの動物では、鼻骨や涙骨は幅広く面積の大きな骨である。ただし鼻骨や鼻軟骨の詳細については、別の機会に詳しく述べることにしたい。

眼窩の内側の縁を形成しているのは、上顎骨の上方に向かう細い突起である上顎骨前頭突起（Processus frontalis）である。その外側寄りに隣接しているのは、先に言及したように、ヒトでは小さな涙骨（Os lacrimale）で、その小さな骨の中に涙嚢窩・鼻涙管が穿たれている。更にその涙骨の外側には、眼窩中央の蝶形骨と接して、篩骨（Os ethmoidale）の篩骨眼窩板（Lamina orbitalis ossis ethmoidalis）が存在する。

眼窩の奥の壁面を構成するのは、内側が小さな蝶形骨小翼（Ala minor ossis sphenoidalis）で、外側がより大きな蝶形骨大翼（Ala major ossis sphenoidalis）で、両者の間は上眼窩裂（Fissura orbitalis superior）と呼ばれる隙間を形成して、頭蓋内腔と眼窩の間の交通路に成っている。蝶形骨小翼には視神経の通る視神経管（Canalis opticus）が穿たれている。

眼窩の下方の縁は上顎骨で、その上部は窪んで眼窩に入り込み、上顎骨眼窩面（Facies orbitalis maxillae）を形成している。この部分と、蝶形骨の大翼と小翼の間には、極く狭い面積であるが、口蓋骨

眼窩突起 (Processus orbitalis ossis palatini) が存在する。以上、名称の羅列に成ってしまい、恐縮である。

(図 2) ヒトの骨性眼窩壁 (bony orbital socket)

頭部を覆う骨である頭蓋が、眼球の部分で欠けている、つまり眼球の前面を、概略円形に開放する構造に成っているのは、脊椎動物の進化史の中でも古くからの構造である。陸棲四足脊椎動物の祖先型と見なされている古生代デボン紀のエウステノプテロン (Eusthenopteron)、ティクターリク (Tiktaalik)、イクチオステガ (Ichthyostega)、アカントステガ (Acanthostega) などは、少なくともその点に関しては共通の構造を有している。



こうした祖先の構造は、少なくとも頭蓋の表層に関しては両生類・爬虫類・鳥類までは基本的に保たれているが、哺乳類は事情が異なっている。

ここで注意すべきは、鳥類までの共通点は、あくまで頭蓋の表層が、眼球部分で概略円形にくり抜かれているという点であって、これらの動物 (鳥類は除外) では眼球の裏側には骨は何も無いのである。

(図 3) ワニ (Crocodylia) の骨性眼窩縁 (Margo orbitalis, Orbital margin)



(図 4) ウミガメ (Cheloniodea) の骨性眼窩縁 (Margo orbitalis, Orbital margin)



(図 5) オオトカゲ (Varanus) の骨性眼窩縁 (Margo orbitalis, Orbital margin)



実は甚だ残念なことであるが、現行の医学系の解剖学、つまり人体解剖学では、対象を人体に限局してしまい、比較解剖学的視点を放棄してしまっている為、他の動物と比較して人体に特有の（もしくはヒトの近縁種を含めての特有の）構造物について、特別に注目するという状況には無い。

実は前述のヒトの骨性眼窩壁 (bony orbital socket) の構造と基本的に共通する骨性眼窩壁は、ヒトや類人猿、それにニホンザルなどの世間によく知られたオナガザル類を含めた真猿類 (Simiiformes, Anthroipoidea) には存在するが、それ以外の動物種には見られない、真猿類特有の構造なのである。しかし比較解剖学的視点を放棄してしまうと、真猿類に特有な構造物に、特別な名称すら付けられて居ないのが現状である。そこで筆者は、後に詳述するような理由で、真猿類に特有な骨性眼窩壁の構造を「お椀型骨性眼窩壁 (Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket) 」と命名した (Sawano et al. 2012) 。

他の動物種、例えばイヌ（犬Canis）・ネコ（猫Felis）・クマ（熊Ursus）・ライオン（Panthera leo）などの食肉目（Carnivora）、あるいは貧歯目（Edentata）などでは骨性眼窩輪（Bony orbital ring）そのものが完全では無く、ましてや、内側を除けば、後方側方の骨性の壁は全く存在しない。骨格標本で観察すれば明瞭であるが（図2）、そもそも窪みと呼べるような周囲の壁は、大部分が存在せず、ほとんど開けっ放しの状態である。勿論、生きている状態では、その部分に丈夫な結合組織や筋肉が存在する訳であるから、それらの動物の眼球が側方に落ちてしまう心配は無いのであるが、何故そのように大きな差異が存在するのかは大きな疑問である。

（図6） 食肉目（Carnivora）の眼窩



（図7） 貧歯目（Edentata）の眼窩



-[2-a-2] 眼窩縁（Margo orbitalis, Orbital margin）の比較と、お椀型骨性眼窩壁の成立

眼窩という名称は、学名（ラテン語名）「Orbita」の翻訳語であるが、「Orbita」の原義は(図3) に示すように「リング、輪」であって、キツネザル類やロリス類のような原猿類の骨性眼窩輪（Bony orbital ring）を表現するには適当な用語である。

(図8) キツネザルの骨性眼窩輪 (Bony orbital ring)



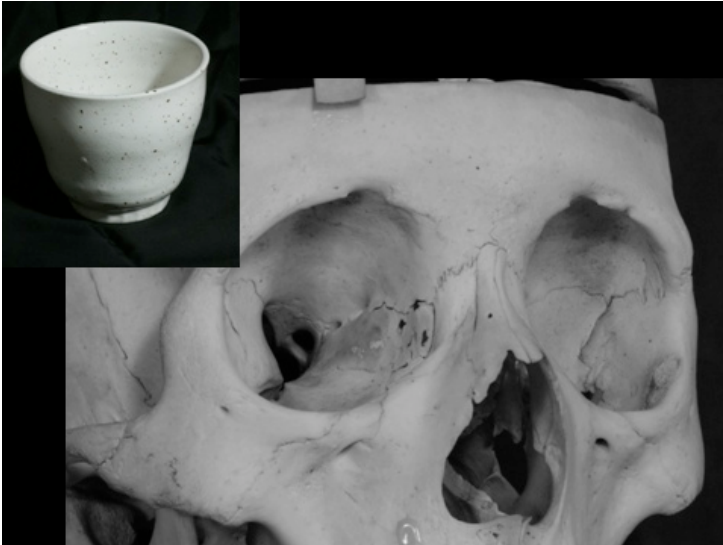
それに対して、ヒトを含む高等霊長類（真猿類）に見られる「眼球の周囲を、前方を除き、他は全て骨組織で囲んでしまう骨性眼窩壁」の形式を指し示すには、「Orbita」という用語は適当では無い。眼球の後方の眼窩後壁（postorbital bar）の存在は、系統発生的には新しいもので、真猿亜目（Simiiformes, Anthropeidea）の基本的な特徴の一つとされ、キツネザル類やロリス類のような原猿類では発達しないことが知られている（Conroy 1990, Key et al.1997, など）。

（注記）近年頻用される「直鼻亜目（＝単鼻亜目, Haplorhini）」という分類群にはメガネザル科（Tarsiidae）が含まれるが、メガネザル類には骨性眼窩輪（Bony orbital ring）は存在するが、「お椀型骨性眼窩壁（Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket）」は存在しない。

なおConroy 氏(1990)は、曲鼻類（Strepsirhini＝原猿類Prosimia）が直鼻類（Haplorhini＝単鼻類＝真猿類）と異なる頭蓋形態の特徴として、眼窩後壁（postorbital bar）が存在しないこと、下顎骨の正中縫合が存在することと共に、前頭骨の正中縫合（前頭縫合）が存在することを挙げているが、前頭縫合に関しては現生人類でもしばしば見られる形態であり、この三番目の特徴は適切では無い。

何れにせよ、ヒトを含む高等霊長類（真猿類）に見られる「眼球の周囲を、前方を除き、他は全て骨組織で囲んでしまう骨性眼窩壁」の形式（構造）を指し示す適切な解剖学用語は現状では存在しない。そこで筆者は、このような構造物に対して、「お椀型骨性眼窩壁」もしくは「ワイングラス状骨性眼窩壁」（Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket）」という用語を提唱した（Sawano et al. 2012）ことは前述の通りである。このような構造物は、真猿類に特有な物である。

(図9) ヒトのお椀型骨性眼窩壁 (Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket)



(図10) ウマの眼窩 (正中矢状断Craniumの左後方) Bony orbital ringは存在するが、眼窩の後壁と下壁は存在しない。Bony orbital ringの外側部が柱状に補強する構造と成っている。このような構造物は「眼窩弓状柱 (Columna orbitae arcuata) 」と呼ぶべきである (Sawano, 2012) 。



(図11) フタコブラクダ (Camelus bactrianus = C. ferus = two-humped) の眼窩。ウマと同様。



(図12) トナカイ (*Rangifer tarandus*) の眼窩。ウマやラクダよりも「眼窩弓状柱 (*Columna orbitae arcuata*) 」が細くなっている。



(図13) マレーバク (*Tapirus indicus*) の眼窩。「眼窩弓状柱 (*Columna orbitae arcuata*) 」は消失している。



-[2-b] 眼球と眼窩の直接の裏側に脳が存在するのは高等霊長類だけの特徴である

多くの哺乳類では、眼球は頭部の左右の側方に配置されている。それに対して霊長類では、左右の眼球は顔の前面に配置されている。これは、霊長類が樹上生活に適應する為、両眼で同一の対象を見て、その映像の差から距離を測定する「両眼視」を発達させたという理由が広く支持されている。食肉目

(*Carnivora*) のネコ類、イヌ類、クマ類、イタチ類なども、捕食者として獲物との距離を正確に知る必要がある為、同様に顔の前面に左右の両眼が配置される傾向が強い。

以上の事柄は比較的良く知られた事象であるが、これは実は、飽くまで軟部組織としての顔面と眼球との位置関係に限られる現象である。

つまり眼球と脳との位置関係という観点から見ると、高等霊長類と食肉類とでは、実は全く事情が異なるのである。

(図14) ヒトの眼球・眼窩と脳の位置関係

高等霊長類では左右の眼球の直ぐの裏側にbony orbital socketを挟んで脳（特に大脳）が存在する。眼窩内腔と脳頭蓋との間の隔壁には上眼窩裂（Fissura orbitalis superior）と視神経管（Canalis opticus）が穿孔されている。この隔壁には、ヒトと類人猿ではその他に硬膜眼窩孔（Foramen meningo-orbitale）が穿孔されている（Sawano, 2009, 2012）。

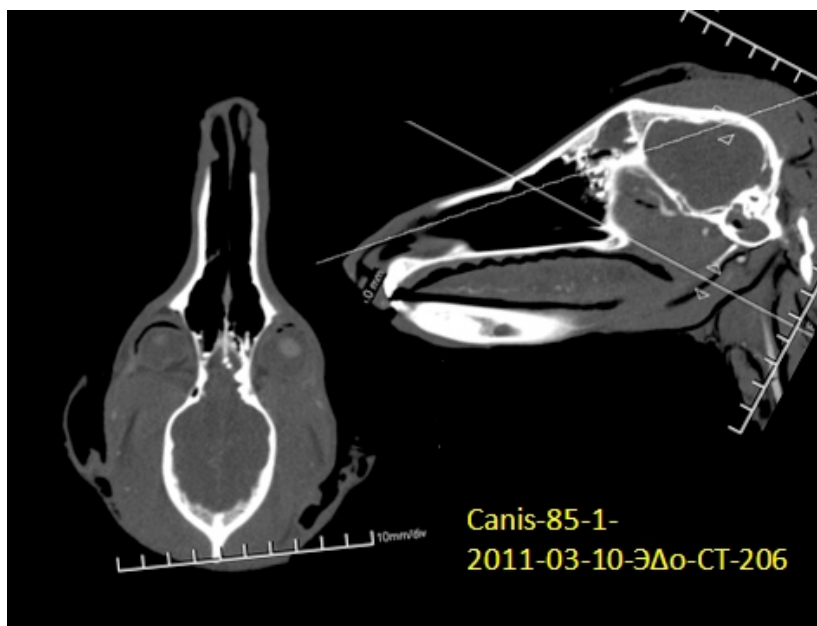


(図15) Chimpanzee (Pan) の眼球・眼窩と脳の位置関係

ライオンやトラを含めた広義のネコ類では、生体では眼球は顔の前面に有るように見える。しかし実際にはCarnivolaではFelidaeでさえ、左右の眼球の後方に有るのは咀嚼筋であって、脳ではない（Sawano, 2012）。このことは視覚を論ずる多くの学者が見落としている点である。



(図16) イヌ (Canis) の眼球・眼窩と脳の位置関係



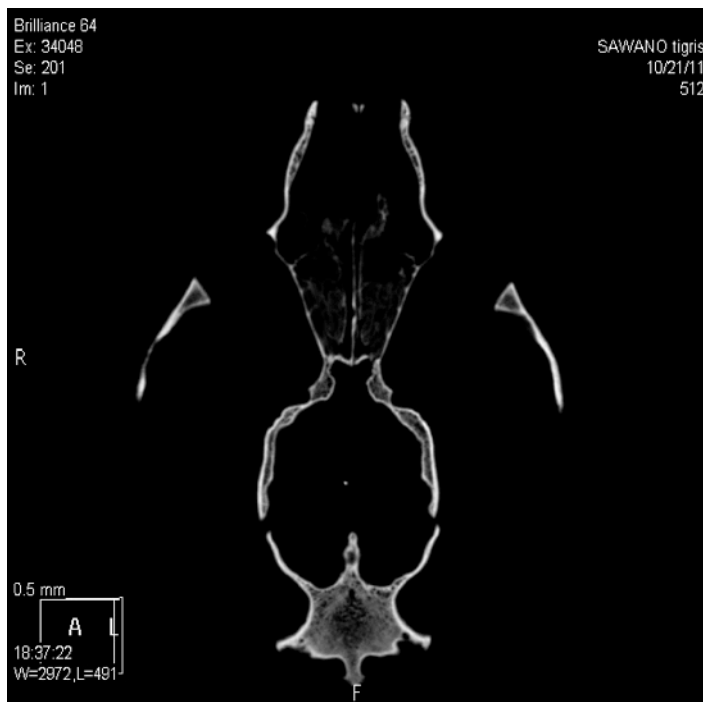
(図17) ライオン(Panthera leo) (left) とトラ (Panthera tigris) (right) の眼窩



(図18) トラ (Panthera tigris) の眼窩と脳頭蓋の位置関係

高等霊長類ではbony orbital socketを形成して動眼筋に固定した付着面を与え、それによって精密な眼球運動を可能にしている。同時にbony orbital socketに幾つもの穴を穿孔して、眼球と脳との連絡を至近距離に保っているのである。この点に関しては、具体的なメカニズムについてはまだ不明の点が多いが、高等霊長類が視覚を最大限に有効に活用するための構造であると推測できる。

いずれにせよ、眼窩の骨による縁取りの起源は、原始四足動物の段階まで遡るもので、哺乳類の多くに見られる眼窩外側後方の骨が消失した状態は、二次的なものと考えられる。消失の主要な原因は、咀嚼筋の起始・付着面の拡大に有ると思われるが、具体的な検討は別に述べることにする。

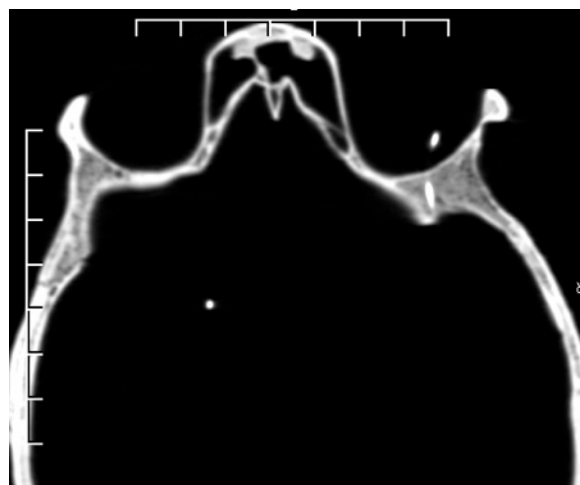


-[2-c] お椀型眼窩骨壁の機能的意義

ヒトや類人猿の「お椀型骨性眼窩壁」もしくは「ワイングラス状骨性眼窩壁」(Bowl-shaped (or wine glass type of) bony orbital socket - eyeball bony socket) には、視神経管 (Canalis opticus) と上眼窩裂 (Fissura orbitalis superior) の他にも、それよりは口径の小さい穴が穿孔されている。硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) はその代表的な存在である。

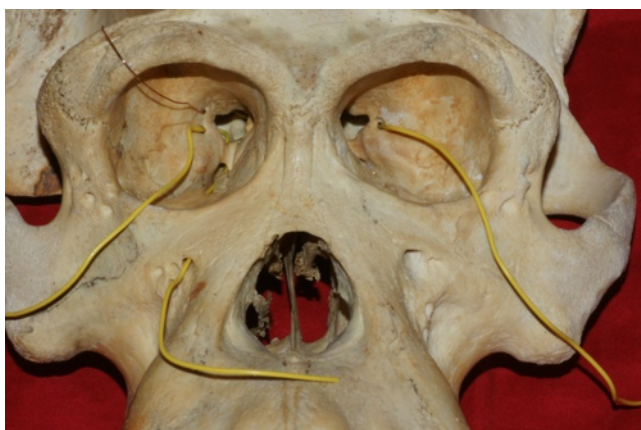
(図19) ヒトの硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) 写真

(図20) ヒトの硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) 上図 (19) のCT像



(図21左) Orang-utan (Pongo) の硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) 写真

(図22 右) Orang-utan (Pongo) の硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) 上図 (21) のCT像



(図23) Gorilla (Gorilla) の硬膜眼窩孔 (Foramen meningo-orbitale) 写真



[Bony orbital socket の役割とForamen meningo-orbitaleの意義]

-(1) 「真猿類Simiiformes」における、眼窩の後壁・下壁の発達は、咀嚼筋の起始部としては機能して居ないし、「頬骨弓Arcus zygomaticus」の発達とも連動して居ないので、咀嚼能の発達には寄与していない。

-(2) 「骨性眼窩輪Bony orbit」の上部及び外側の「底壁無しのみき出しの柱」には、既存の名称は無い。しかしその柱は、眼球の保護だけでは無く、「Arcus zygomaticus 頬骨弓」を力学的に支えるという特別な役割が有ると考えられる。そこで筆者は「Columna orbitae arcuata 眼窩弓状柱」という新しい用語を提唱した (Sawano, 2012)。

-(3) 類人猿化・人類化に伴い絶対的に大型化した脳と眼球 (眼窩内軟部組織) は、これまた大型化した遮蔽性の強いドーム状の眼窩骨壁によって、相互の血液交流が大きな制約を受けるように成った。そこで、吻合性の大きい側副血流路が必要と成り、その為の孔として「Foramen meningo-orbitale 硬膜眼窩孔」が新設されたと考えられる。ただし、まだ安定な構造物では無い。

-(4) 脳の絶対的大きさが小さいヒト科以外の真猿類では、Foramen meningo-orbitaleは発達しない。

-(5) 眼窩の後壁・下壁が発達しない動物では、当然ながらForamen meningo-orbitaleは存在しない。

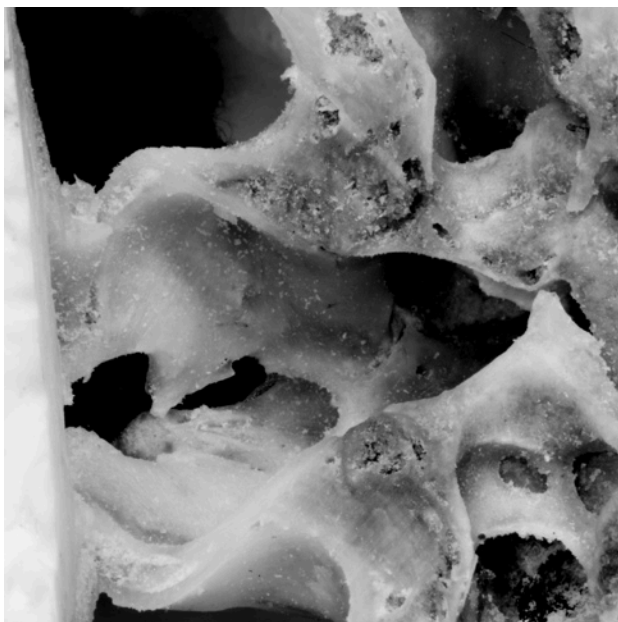
-[3] 進化史における頭蓋底神経血管孔 (cranial basal foramina) の変遷

ヒトの頭蓋底を見慣れている人は、脳頭蓋は骨に囲まれ、所々に小さな穴が開いている状態を正常な状態と考える。しかしヒト以外の哺乳類の頭蓋底を比較してみると、異なるタイプの形態も多いことに気付く。

特に爬虫類の脳頭蓋は、容積が相対的に非常に小さい割には、相対的に大きな窓が開いている。

(図24 左) ワニ (Crocodilia) の脳頭蓋。左が吻側 (rostralis) 、右が尾側 (caudalis) 。

(図25 右) オオトカゲ (Varanus) の前方に開け放たれた脳頭蓋



(図26) トッケイヤモリ (Gekko gecko) の前方に開け放たれた脳頭蓋。吻側 (rostralis) やや下方より見る。



-[3-a] Quadrangulus ovalo-jugularis (卵円孔頸静脈孔四角形)

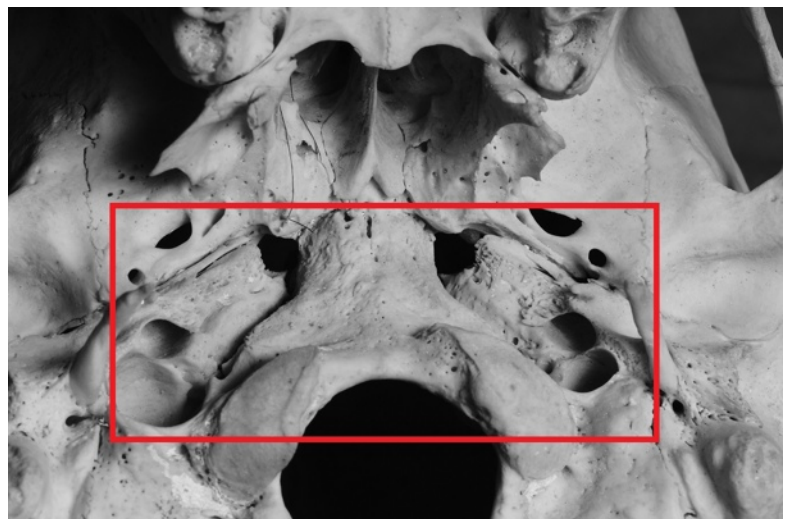
哺乳類では、爬虫類のように前方に開け放たれた脳頭蓋は存在しない。その代わりに、頭蓋底には幾つものForaminaが存在して、神経や血管の通路と成っている。大後頭孔 (Foramen magnum) を別とすれば、頭蓋底に多くのForaminaが集中するのは、吻側 (rostralis) では左右のForamen ovaleから、尾側 (caudalis) では左右のForamen jugulareに至る概略四角形の中の領域である。そこで筆者はこの領域を便宜上Quadrangulus ovalo-jugularisと呼ぶことにした (Sawano 2010)。Foramen jugulare は比較解剖学的にはForamen vagumと呼ぶべきであろうが、ここでは取り敢えずhuman anatomy, mammalian anatomy を優先させることにする。

(図27) Quadrangulus ovalo-jugularis (Homo sapiens , 24J-♀-Japaner)

ただしどの動物でもForamen ovale、Canalis caroticus、Foramen jugulare などが、それぞれ独立して開口しているという訳では無い。

最も普遍的に常在しているのは (やや意外の感があるかも知れないが) 舌下神経管 (Canalis hypoglossi) である。

下顎神経Nervus mandibularis の通過するForamen ovale は進化史上の来歴は古いが、哺乳類 (有胎盤類) の中でも、奇蹄目Perissodactyla、偶蹄目Artiodactyla などでは通常は独立して開口せず、他の Foramen と共通の開口部と成っている。



ヒトに見られるような「Foramen ovaleの前後にベサリウス孔 (ForamenVesalii) と棘孔 (Foramen spinosum) 、それにCanalis hypoglossiの後方に顎管 Canalis condylarisがそれぞれ独立に開口する状態」は、最も多数のForaminaが併存する形式である。

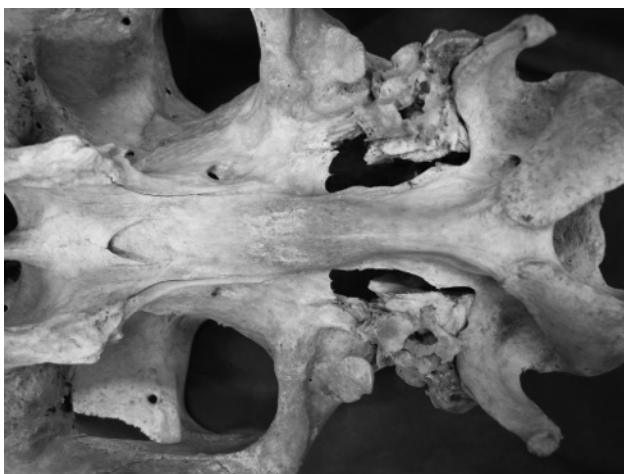
ヒトではForamen spinosumを中硬膜動脈 (Arteria meningea media, AMM, MMA) が通過するので、ニホンザルなどのオナガザル類にはForamen spinosumが存在せず、類人猿でもかなりバラツキがあると言うと、中硬膜動脈 (Arteria meningea media) が無いのか、と驚かれるかも知れない。Foramen spinosumが独立して開口しない場合には、AMM (MMA) はForamen ovaleを通過するのである。

後に述べるように、これらの点は Gorilla, Chimpanzee, Orangutan 等の類人猿と比較してもヒトの顕著な特徴である。

他方で、哺乳類（有胎盤類）の中で、最も集約された大きな頭蓋底Foraminaを持つのは、筆者が調査した限りでは、ウマ（*Equus*）であり、サイ（*Rhinocerotidae*）もそれに非常に近く、バク（*Tapiridae*）はそれよりも遠ざかる。これら三つの分類群は、分類学上Perissodactylaに分類されている。ウマとサイでは、ヒトのForamen jugulare, Foramen ovale, Foramen lacerum, Canalis caroticus が全て連絡した状態に相当する大きな穴が開いている。

(図28 左) ウマ（*Equus caballus*）の頭蓋底Foramina。左が吻側（rostralis）、右が尾側（caudalis）。

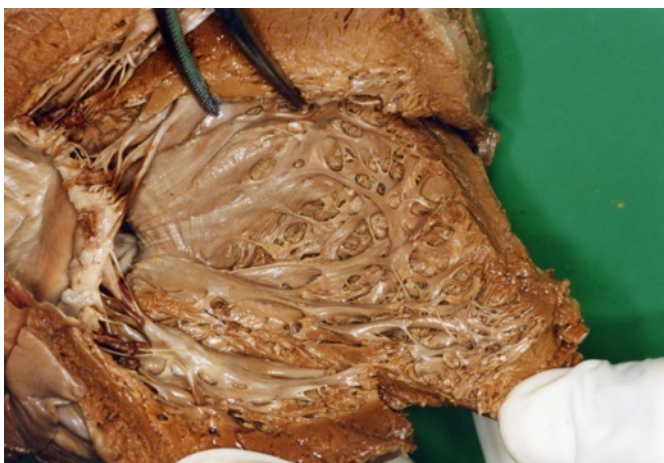
(図29 右) 毛深サイ（*Coelodonta antiquitatis*）の頭蓋底Foramina。左が吻側（rostralis）、右が尾側（caudalis）。



筆者が注目している点の一つは、ウマが（サイも）疾走することに非常に適応した動物である点である。もうひとつ関連性が注目されるのは、心臓の心室の内壁面の構造である。ヒトや他の霊長類では、心室の内壁面、特にその心尖寄りの部分に多数の肉柱（*Trabeculae carneae*）が網目状に発達している。それに対して、ウマの心臓では、少なくとも表面的には肉柱（*Trabeculae carneae*）の発達は最も少なく、心室の内壁面は比較的凹凸が少なく非常にスベスベしている。まさに正反対の状態であると言える。

(図30 左) ヒト（*Homo sapiens*）の左心室内壁面

(図31 右) ウマ（*Equus caballus*）の左心室内壁面



頭蓋底のForaminaと、心室の内壁面の肉柱Trabeculae carneaeの発達とが、相互に関連性を持つという直接的な証拠はまだ見出せてはいない。しかしその全く異なる二つの領域において、ヒトとウマとが両極端の位置を占めていることは注目すべき現象であると思う。

-[3-b] 頸動脈管 (Canalis caroticus) の走行と口径、輸送効率と安全策

頭蓋底Foraminaの中で、頸動脈管 (Canalis caroticus) は口径が大きく走行距離も長い。これは脳を栄養する内頸動脈の通路である。ヒトに限らず、新生代後期型の哺乳類は、進化の過程で脳が相対的に大きくなるように進化してきているものが多い。脳が大きくなれば、それを栄養する血液の量も多く必要に成るから、内頸動脈は相対的に大きくなる。

ところが、注目すべき現象が存在する。進化史の上では比較的新型の動物に属するArtiodactyla や Felidaeの動物では、内頸動脈が脳頭蓋に侵入する際に、一旦網目状に細い多数の動脈に分岐するのである。そしてそれらの細い多数の動脈は、再び統合されて、その後は他の動物と似たような内頸動脈の走行を示す。この奇妙な網目状の動脈は怪網 Rete mirabileと呼ばれている。

(図32) ブタ (Sus scrofa domesticus) の怪網 Rete mirabile



もし血液の流れがハーゲン・ポワズイユの法則Hagen-Poiseuille's Lawに従うとするならば、血流は血管半径の4乗に比例することになり、動脈の口径が大きいほど効率的なはずである。一旦網目状に細い動脈に分かれることは、最も輸送効率の悪いことである。

(図33) ハーゲン・ポワズイユの式

進化史の上で、比較的新型の動物である偶蹄類Artiodactyla やネコ科Felidaeが内頸動脈の途中に<Rete mirabile>の構造を持っていることは、流体の輸送効率の減少をおぎなって余りのある何らかのメリットが有ると考えられる。恐らくそれは、太い内頸動脈から一気に細い脳内動脈に移行することによって、血管壁の薄い脳内の細い動脈が破裂すること防ぐための、減圧という安全策ではないかと思われる。

Hagen-Poiseuille equation

$$\Phi = \frac{dV}{dt} = v\pi R^2 = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left(\frac{-\Delta P}{\Delta x} \right) = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{|\Delta P|}{L}$$

$\Phi = Q$ is the volumetric flow rate
 V is a volume of the liquid poured (cubic meters)
 t is the time (seconds)
 v is mean fluid velocity along the length of the tube (meters/second)
 x is a distance in direction of flow (meters)
 R is the internal radius of the tube (meters)
 ΔP is the pressure difference between the two ends (pascals)
 η is the dynamic fluid viscosity (pascal-second (Pa·s)),
 L is the total length of the tube in the x direction (meters).

身体全体の大きさに対する脳の大きさが相対的に非常に大きいのがヒトの特徴であり、それに次ぐのが類人猿である。Cranial basal foraminaに関して、ヒトと類人猿とを比較してみると、二つの大きな相違点が発見された。一つめは頸動脈管 (Canalis caroticus) の口径と走行である。

類人猿では、チンパンジー、ゴリラ、オランウータンの三者間に多少の違いは存在するが多くの点で共通している。つまり類人猿の頸動脈管 (Canalis caroticus) は、入り口と出口はそれなりに口径が大きい、緻密な頭蓋底の骨質の中を屈曲蛇行して進行する過程で途中の口径が狭くなる。

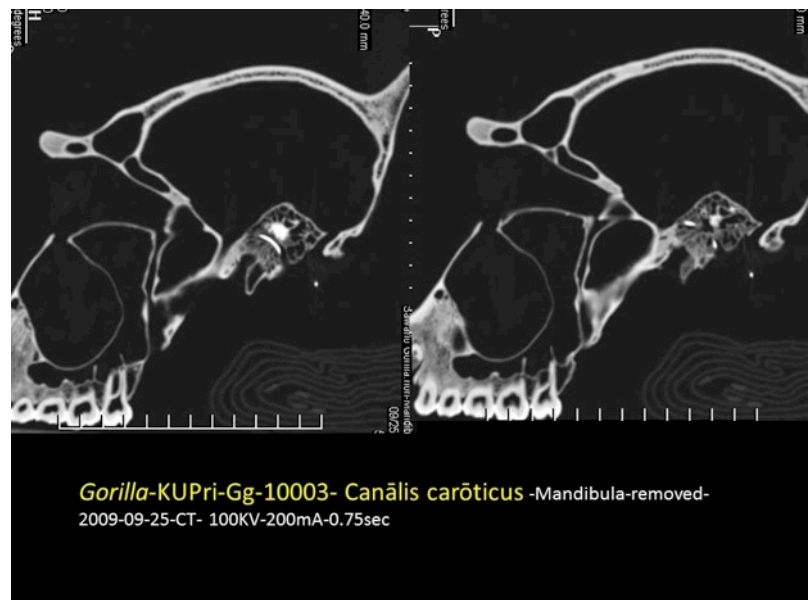
(図34) Orangutan (Pongo) の頸動脈管 (Canalis caroticus)

画面下段中央の針金はForamen ovaleに入れたもので、Canalis caroticusから連続したものではない。

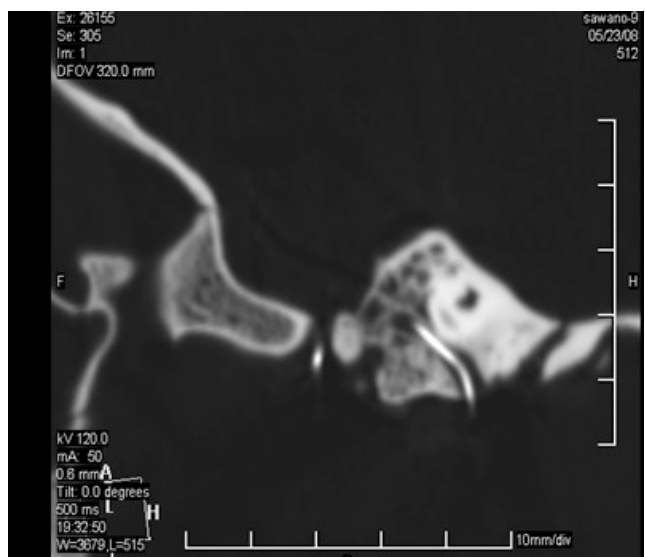


(図35) Gorilla (Gorilla) の頸動脈管 (Canalis caroticus)

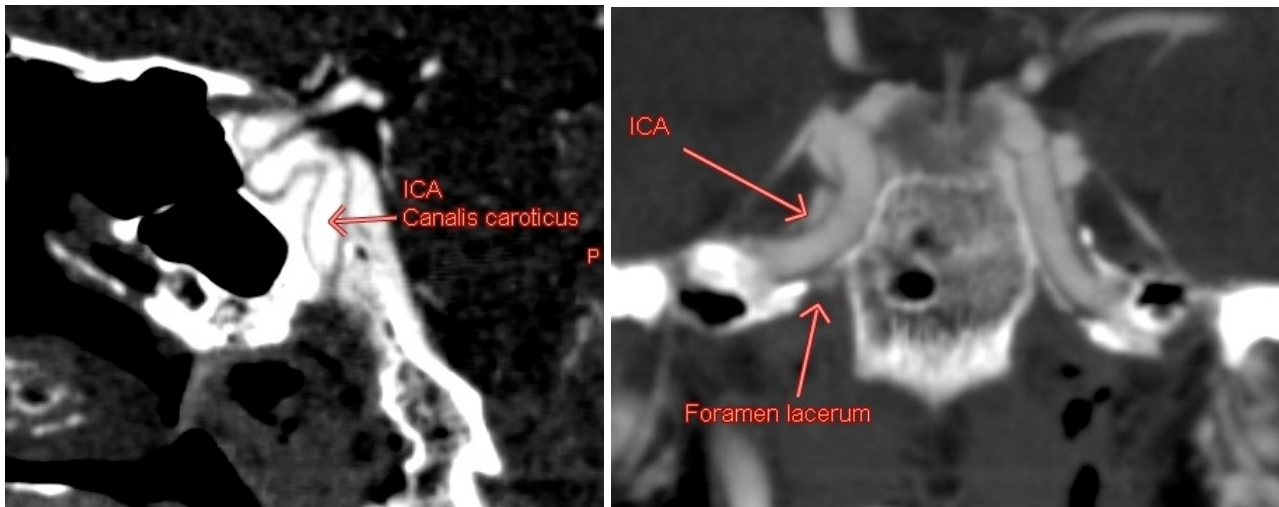
それに対してヒトでは、頸動脈管 (Canalis caroticus) は、入り口から出口まで口径が太いままで、屈曲の角度は大きい、全体として太く短い存在である。こうしたヒトの頸動脈管 (Canalis caroticus) の構造は、類人猿段階まで保存されていた減圧装置を、大幅に撤去することによって、急速に増大する脳の血液要求に答えたものと思われる。それなりのリスクの増加も当然考えられるものと思われる。



(図36) Chimpanzee (Pan) の頸動脈管 (Canalis caroticus)



(図37) ヒトの頸動脈管 (Canalis caroticus)



-[3-c] Cranial basal foramina と導出静脈emissary vein

Foramen ovale は Nervus mandibularis の、Canalis caroticus は ICA (Arteria carotis interna) の、Canalis hypoglossi は舌下神経(Nervus hypoglossus) の、それぞれが通過する所である。

Canalis caroticus に関しては、ICA (Arteria carotis interna) の周囲に海綿静脈洞 (Sinus cavernosus) が発達することはよく知られている。しかし Foramen ovale における Nervus mandibularis の周囲にも、またCanalis hypoglossiの周囲にも、Sinus cavernosus程ではないが静脈叢Plexus venosus が発達する。

ベサリウス孔Foramen Vesalii と顎管 Canalis condylarisは専ら導出静脈emissary veinの通路である。

哺乳類化・人類化に際しての脳の急速な増大は、当然血液供給量の飛躍的な増大を必要とした。哺乳類化に際しては、それまでの左右のICA (Arteria carotis interna) からの血液供給に加えて、左右の椎骨動脈 (Arteria vertebralis) からの供給が加わることで解決された。

(注記) 爬虫類以下の動物にもArteria vertebralisと名付けられた動脈が存在して甚だ紛らわしいが、それらの動物における同名動脈は、ICA (Arteria carotis interna) からの血液を尾方 (Caudalis) に導く物であるから、心臓から脳への直接的な血液供給路なのでは無い。

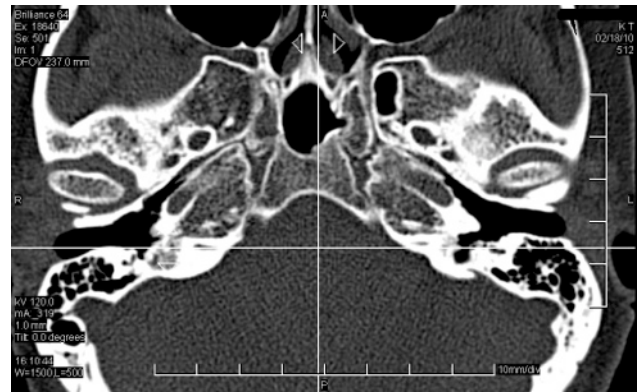
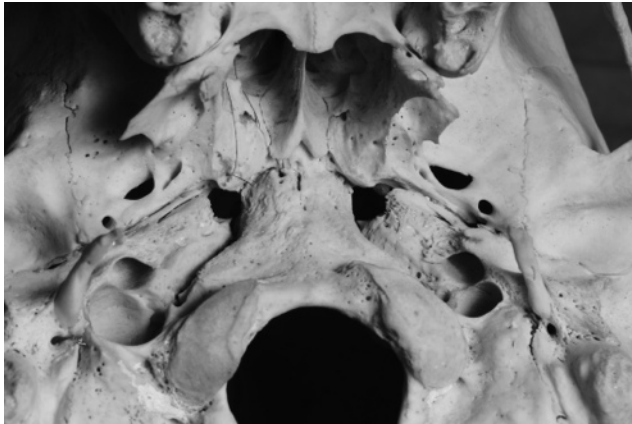
動脈は高圧で血液を脳へ送るが、脳からの還流血は低圧であるから急速な排出には必ずしも適さない。四肢や体幹、消化管などではその運動が静脈血の還流を促進するが、動きのない頭蓋内ではそうした還流促進作用は期待できない。そこで大きなForaminaの静脈叢Plexus venosusと共に、Foramen Vesaliiや Canalis condylarisを通過する導出静脈emissary veinの役割も非常に重要になって来る。

進化的には、本来はNervus vagusを通過させるForamen vagumであったものが、脳還流血の増大によって大型化したSinus sigmoideus から Vena jugularis interna を通過させる役割の方が大きくなり、Foramen jugulare と呼ばれるように成ると類似の現象は、他のForaminaやCanales でも起こりつつあると考えるべきである。

実はヒトと類人猿におけるCranial basal foraminaの違いの二つめは、Foramen Vesalii と Canalis condylarisのような導出静脈専用のForamina (Canales) の存在である。ヒトではベサリウス孔Foramen Vesalii と顎管 Canalis condylarisはかなり頻繁に見られる。ただしその形態は変異が多く、必ずしも安定した存在では無い。ところが類人猿では、ベサリウス孔Foramen Vesalii と顎管 Canalis condylarisの存在は少ない。このことは、増大する脳からの還流血を流すためにForamen VesaliiやCanalis condylarisが人類化の過程で発達した為であると思われるのである。

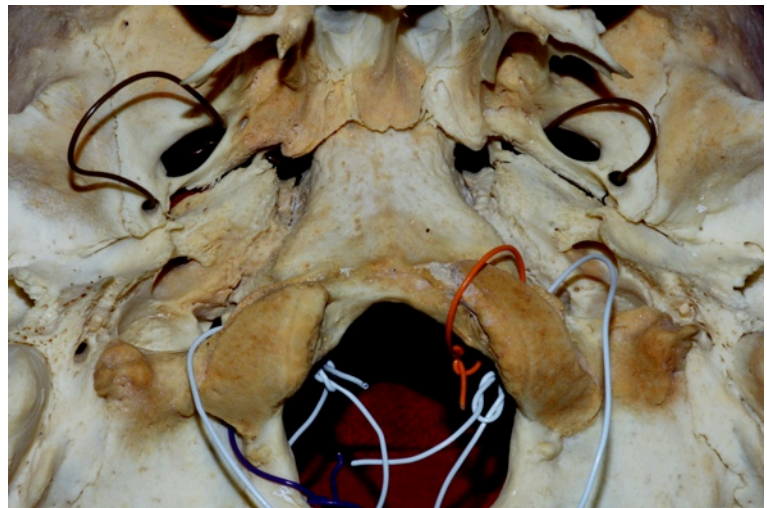
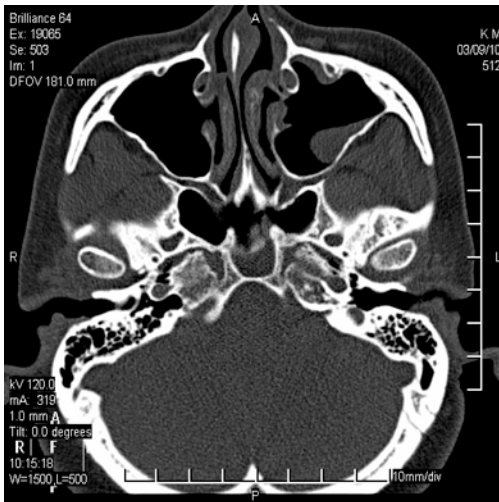
(図38 左) ヒトのベサリウス孔Foramen Vesalii. 24J- 女-Japaner. 左右両側に明瞭に存在する。

(図39 右) ヒトのベサリウス孔Foramen Vesalii. 骨格標本で見付けにくい例でも、生体のCT画像では発見しやすい。

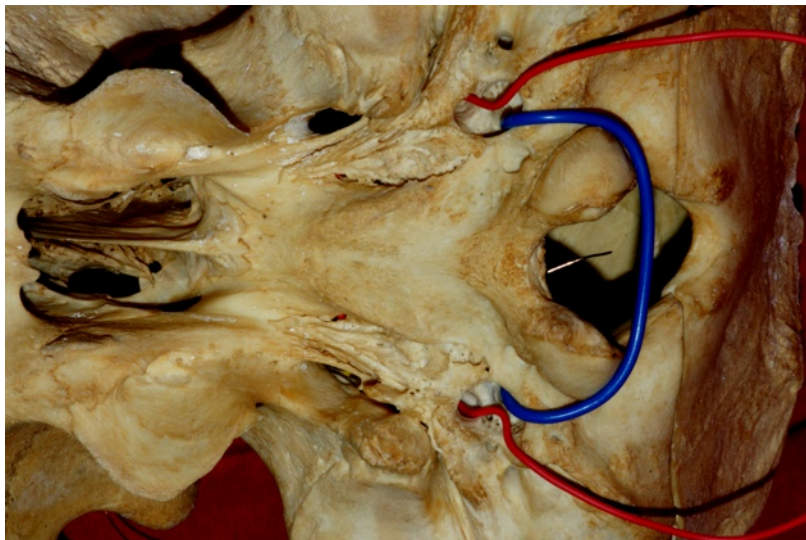


(図40左) ヒトのベサリウス孔Foramen Vesalii. 同上。

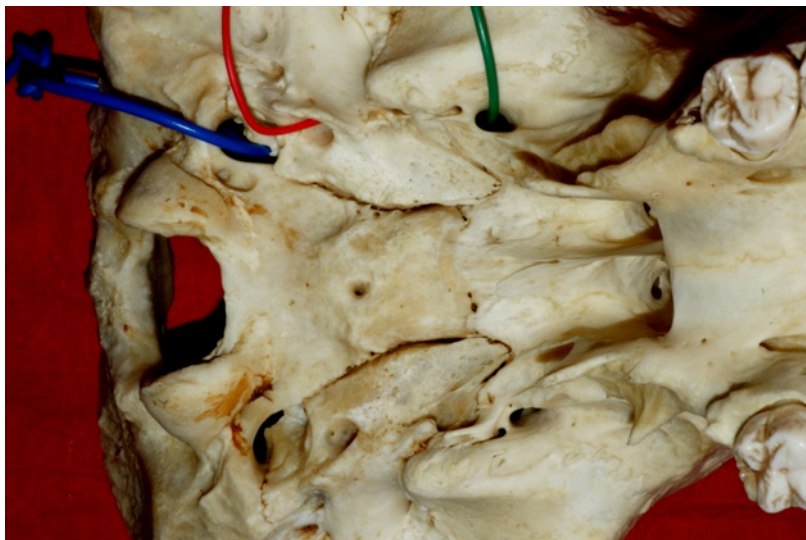
(図41右) ヒトの顎管 Canalis condylaris. 左 (画面右) の舌下神経管Canalis hypoglossi 二分と、右 (画面左) のCanalis condylarisとCanalis hypoglossi.



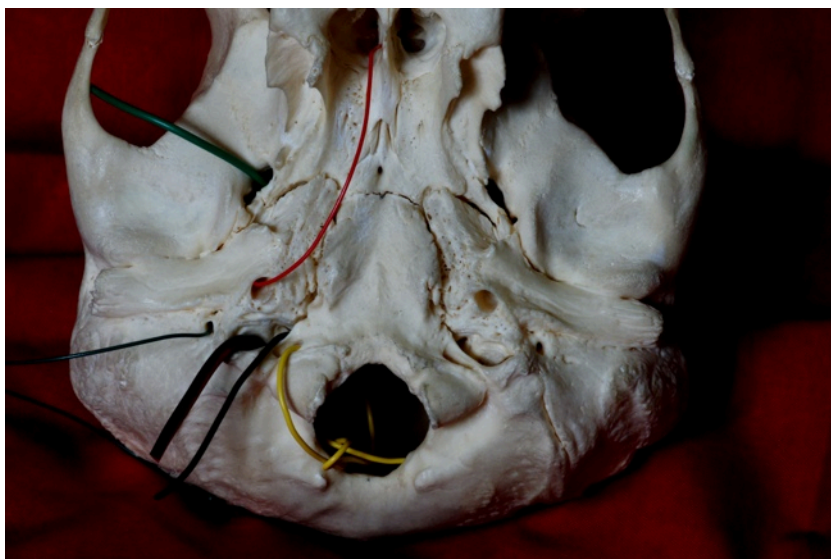
(図42) Orngutan (Pongo) のCranial basal foramina



(図43) Gorilla (Gorilla) のCranial basal foramina



(図44) Chimpanzee (Pan) のCranial basal foramina



-[4] 引用文献 References

- (1) Ankel-Simons, Friderun (2007) : Primate Anatomy, An Introduction, Third Edition. Elsevier.
- (2) de Beer GR (1926) : Studies on the Vertebrate Head. II. The orbito-temporal region of the skull. *Quart. J. Micr. Sci.* 70 : 263-370.
- (3) de Beer GR (1937/1985) : The Development of the Vertebrate Skull. University of Chicago Press, Chicago & London.
- (4) Borsuk-Bialynicka M (1969) : Lower Pliocene Rhinocerotids from Altan Teli, Western Mongolia. *Palaeontologia Polonica*, No.21 : 73-101.
- (5) Conroy GC (1990) : Primate Evolution. WW Norton & Company, New York, London.
- (6) Fleagle JG (1999) : Primate Adaptation and Evolution, Second Edition. Academic Press San Diego.
- (7) Haines RW (1950) : The interorbital septum in mammals. *Journal of Linnean Society of London*, 41 : 585-593.
- (8) Isomura G (1981) : Comparative anatomy of the extrinsic ocular muscles in vertebrates. *Anat. Anz.* 150 : 498-515.
- (9) Jarvik, E (1980) : Basic structure and evolution of vertebrates. London ; New York : Academic Press.
- (10) Kaas JH & Preuss TM (1993) : Archontan affinities as reflected in the visual System,. In Szalay-Novacek-McKenna (ed) *Mammal Phylogeny, Placentals*. Springer-Verlag, New York, 115-128.
- (11) Kay, R. F. & Cartmill, M. (1977). Cranial morphology and adaptations of *Palaechthon nacimienti* and other *Paromomyidae* (*Plesiadapoidea*, ? *Primates*), with a description of a new genus and species , *Journal of Human Evolution* , 6:19-35.
- (12) Kay RF, Ross C, Williams BA (1997) *Anthropoid origins*. *Science* 275 : 797-804.
- (13) Kay, R.F. and E.C. Kirk (2000): *Ostological evidence for the evolution of activity pattern and visual acuity in primates*. *American Journal of Physical Anthropology*, 2000. 113: p. 235-262.
- (14) Kirk, E.C. and R.F. Kay (2004): *The Evolution of High Visual Acuity in the Anthroidea*, in *Anthropoid Origins: New Visions*, C.F. Ross and R.F. Kay, Editors. 2004, Kluwer/Plenum Publishing: New York. p. 539-602.
- (15) Kuratani S (1999) : Development of the chondrocranium of the Loggerhead turtle, *Caretta caretta*. *Zoological Science* 16 : 803-818.
- (16) Neto HS, Penteado CV, & Carvalho VC de (1984) : Presence of a groove in the lateral wall of the human orbit. *Journal of Anatomy*, 138 : 631-633.
- (17) Perrini P, Cardia A, Fraser K, & Lanzino G (2007) : A microsurgical study of the anatomy and course of the ophthalmic artery and its possibly dangerous anastomoses. *Journal of Neurosurgery*, 106 : 142-150.
- (18) Romer AS (1956/1976) : *Osteology of the Reptiles*. University of Chicago Press.
- (19) Romer AS & Parsons TS (1977) : *The Vertebrate Body*. Saunders.
- (20) Ross Callum F (2001) : In vivo function of the craniofacial haft: The interorbital pillar. *American Journal of Physical Anthropology* ,Volume 116, Issue 2 , Pages 108 - 139.
- (21) Ross, C. F. (1995). Allometric and Functional Influences on Primate Orbit Orientation and the Origins of the Anthroidea, *Journal of Human Evolution* 29:201-227.
- (22) Royle, Gavin (1973) : A groove in the lateral wall of the orbit. *Journal of Anatomy*, 115 : 461-465.
- (23) SAWANO Keiichi (1994) : The Valvula venae cavae inferioris Eustachii, Torus intervenosum Loweri, the Minimization of the Vena cava inferior in the Thoracic cavity, and "the Functional Unit of the Atrium dextrum - Vena cava - Complex" in Humans. Part 1. *Bulletin of Yokohama Morphological and Hygienic Society (Bulletin of Y.M.H.S.)* Volume 7. No. 1. pp.21-39.
- (24) SAWANO Keiichi, Prapan Jutavijittum, Nirush Lertprasertsuke (2000) : Anatomical studies on the cardiovascular system of the asplenia. Preliminary report of the left-right asymmetry in mammalian hearts. *Acta anatomica Nipponica* Vol. 75, (1) : 75.
- (25) SAWANO Keiichi, Kiyoshi KISHI, Prapan Jutavijittum, Nirush Lertprasertsuke (2001) : Origin of the left-right asymmetry in mammalian heart. Relationships among normal humans, asplenia, and other mammals. *Anthropological Science* Vol. 109 (1) : 110.

Niche Neuro-Angiology Conference 2013

- (26) SAWANO Keiichi, Kiyoshi KISHI (2002) : The left-right asymmetry in the mammalian heart structure, large vessels, and thoracic viscera. The abstract booklet of the 2002 regular convention of the Mammalogical Society of Japan. p. 90.
- (27) SAWANO Keiichi, KISHI K, Baba M, Boeadi (2003) : Changes in the structure of the heart and great vessels in the phylogeny and adaptive radiation of mammals. The abstract book of the 2003 Annual Meeting of the Mammalogical Society of Japan. p.87.
- (28) SAWANO Keiichi and TAKAHASI Tsuneo (2009) : Studies on the foramina of the cranial base. Part 1. The foramen rotundum, f. ovale, canalis caroticus, and f. jugulare in the Hominoidea. Anthropological Science Volume 117, Number (3) : p. 205.
- (29) SAWANO K, TAKAHASI T, HAGIWARA H, INOUE T (2010) : The relationship between quadrangulus ovalo-jugularis and two foramina emissaria (foramen vesalii and canalis condylaris) in the Hominoidea. Acta Anatomica Nipponica, Vol.85 , Supplement: p.118.
- (30) SAWANO K, TAKAHASI T, KATO M, HAGIWARA H, INOUE T, YOKOYAMA T, SATO M, KANNO H, KAWAHARA N (2010) : Anatomical relationships between the foramen ovale and foramen lacerum. Anthropological Science Volume 118, Number (3) : p. 233.
- (31) SAWANO K, TAKAHASI T, KATO M, HAGIWARA H, INOUE T, YOKOYAMA T, SATO M, KANNO H, KAWAHARA N (2011) : The unitas carotico-jugularis and its relative structure in the human evolution. The Journal of Physiological Sciences, Volume 61, Supplement 1 : S162.
- (32) SAWANO K, TAKAHASI T, KATO M, HAGIWARA H, INOUE T, YOKOYAMA T, SATO M, KANNO H, KAWAHARA N (2011) : Neurovascular tunnels in the midcranial base and their relative structure in the evolution of the cerebral blood supply. Anthropological Science Vol.119 (3) : 314.
- (33) SAWANO K, YOKOYAMA T, TANAKA T, KATO M, TAKAHASHI T., HAGIWARA H, INOUE T, SATO M, TATEISHI K, KAWAHARA N (2012) : On the relationship between the internal surface of the left ventricle and blood flow. Anthropological Science Vol.120
- (34) SAWANO K, YOKOYAMA T, TANAKA T, KATO M, TAKAHASHI T., HAGIWARA H, INOUE T, SATO M, TATEISHI K, KAWAHARA N (2013) : Comparison between humans and other animals on the trabeculae carneae in the left ventricle and their role in blood flow. The Abstracts Book of the 118th Annual Meeting of the Japanese Association of Anatomists : p.101.
- (35) SAWANO K, YOKOYAMA T, TANAKA T, KATO M, TAKAHASHI T., HAGIWARA H, INOUE T, SATO M, TATEISHI K, KAWAHARA N (2013) : Comparison of the running and caliber of the Canalis caroticus in humans and great apes. The Abstracts Book of the 118th Annual Meeting of the Japanese Association of Anatomists : p.109.
- (36) Schultz AH (1940) : The size of the orbit and of the eye in primates. American Journal of Physical Anthropology 26 : 389-408.
- (37) Schwartz, Jeffrey R (1987) : The Red Ape --- Orang-utans and Human Origins. Houghton Mifflin Company, Boston.
- (38) Shoshani J, Groves CP, Simons EL, & Gunnell GF (1996) : Primate Phylogeny : Morphological vs Molecular Results. Molecular Phylogenetics and Evolution, 5 (1) : 102-154.
- (39) TANOUE S, KIYOSUE H, KASHIWAGI J, SHIMADA R, et al. (2012) : The emissary venous drainages from cavernous sinus: imaging anatomy and variations evaluated by contrast-enhanced MR imaging at 3.0-Tesla. The 71st Annual Meeting of the Japan Radiological Society.
- (40) Wood-Jones F. (1931) : The Non-metrical Morphological Characters of the Skull as Criteria for Racial Diagnosis : Part I: General Discussion of the Morphological Characters Employed in Racial Diagnosis. J Anat. 1931 Jan ; 65 (Pt 2) : 179-195.
- (41) Zamboni P, Consorti G, Galeotti R, Gianesini S, et al. (2009) : Venous Collateral Circulation of the Extracranial Cerebrospinal Outflow Routes. Current Neurovascular Research. 6 : 204-212.