原著

海綿静脈洞部手術に必要な解剖を理解するための 3次元立体海綿静脈洞モデル

森 健太郎 山本拓史 大山一孝 中尾保秋

Three-dimensional Cavernous Sinus Model for understanding Cavernous Sinus-related Surgical Anatomy

by

Kentaro Mori, M. D., Takuji Yamamoto, M. D., Kazutaka Oyama, M. D., and Yasuaki Nakao, M. D.

from

Department of Neurosurgery, Juntendo University, Shizuoka Hospital

Experience with dissection of the cavernous sinus (CS), one of the most complicated structures in the brain, is essential for understanding its anatomy and training in CS-related skull base surgery, but only a limited number of neurosurgical residents have the opportunity of cadaver dissection. A three-dimensional (3D) skull model is proposed for such surgical training which incorporates artificial dura mater, the CS, and the cranial nerves. The 3D skull model was produced by a selective laser sintering method. The CS and double-layer dura mater were modeled with silicone, cranial nerves with rubber fibers or sponge, and the internal carotid artery with vinyl tube. The model could be dissected, and the anterior clinoidectomy and peeling of the meningeal dura (dura propria) from the lateral wall of the CS were performed in almost the same way as in actual surgery. The process of making the skull model with CS-related structures and observation of the dissected CS model facilitate further understanding of the stereoscopic anatomy of the CS.

(Received March 17, 2008 ; accepted April 22, 2008)

Key words : cavernous sinus, anatomy, three-dimensional model, skull base surgery

Jpn J Neurosurg (Tokyo) 17 : 940-945, 2008

はじめに

海綿静脈洞は蝶形骨体部外側部に位置する硬膜の内外層に囲まれた部分であり、各種の脳神経のほか内頸動脈が存在するために、脳動脈瘤や脳腫瘍などが発生すると治療が困難となる。近年の血管内治療や定位放射線治療の発達によって、海綿静脈洞開放を含む頭蓋底外科の頻度は少なくなったものの、依然として海綿静脈洞の解剖や頭蓋底外科テクニックの習得は脳神経外科の必須項目の一つである。海綿静脈洞はそれ自体の3次元解剖が複雑なことに加え、周辺の骨組織である視神経管、前

床突起、上眼窩裂などと密接な関係があり、軟部組織と周辺骨組織を含めた3次元解剖の知識が必要となる。そのためには教科書的知識に加え、いわゆる cadaver dissection が必須である。しかしながら、日本では cadaver dissection の機会はきわめて限られているのが現状である。近年、コンピュータ科学の発達を背景にレーザー溶融粉末積層造形法 (selective laser sintering ; SLS) の開発によって内部構造を含む立体コピー技術が開発された⁷⁾。この技術によって CT による頭蓋骨の画像データを基に頭蓋骨表面の微細な構造とともに、頭蓋骨の内部構造の再現も可能となった¹¹⁾¹²⁾。以前にわれわれは、SLS

順天堂大学医学部附属静岡病院脳神経外科 / 〒410-2295 伊豆の国市長岡 1129 (連絡先: 森 健太郎)

Address reprint requests to : Kentaro Mori, M.D., Department of Neurosurgery, Juntendo University, Shizuoka Hospital, 1129 Nagao-ka, Izunokuni-shi, Shizuoka 410-2295, Japan

Fig. 1 Process of making the 3D CS model

A : Skull base view of the 3D skull base model.

B : The periosteal layer of the dura mater was modeled with yellow silicone.

C : The periorbita of the orbit was modeled with yellow silicone.

Note the periorbita that forms the periosteal bridge (open circle) with periosteal layer in the superior orbital fissure.

FR ; foramen rotundum, FO ; foramen ovale, FS ; foramen spinosum, ROC ; roof of optic canal, OC ; optic canal, CP ; cribriform plate, TS ; tuberculum sellae, PCP ; posterior clinoid process, CL ; clivus, OS ; optic strut, ACP ; anterior clinoid process, SOF ; superior orbital fissure, FL ; foramen lacerum, LWS ; lesser wing of sphenoid, GWS ; greater wing of sphenoid, IOF ; inferior orbital fissure.

法で作製された市販の削開練習用側頭骨モデル (OMeR model: 大野興業, 東京) に人工物で作製した硬膜, 神経, 静脈洞などを再現し加えたモデルを用い, 側頭骨を中心とした頭蓋底外科のシミュレーション手術法を開発し報告した⁸⁾.

今回, われわれは SLS 法で作製された前頭蓋底部を含めた頭蓋底モデルを土台にして, シリコンなどを用いて海綿静脈洞を再現した. 特に, 海綿静脈洞では硬膜の 2 層構造 (periosteal layer と meningeal layer) が解剖学および手術テクニックの習得に重要な要素となるので, 人工硬膜は 2 色のシリコンを用いることによって再現した. 立体的な理解が困難な海綿静脈洞の解剖を自分の手で作製するというプロセスでもって体感するという新しい方法について報告する.

なお, 今回作製するモデルは, 頭蓋骨を除いては, 個々の患者データから作製された 3 次元立体モデルではなく, 既知の海綿静脈洞などの解剖学的知識から作製された基本的モデルである.

方 法

① 材 料

診断用に施行した頭蓋底部の bone density CT の DICOM data を基に SLS 法を用いて, 大野興業 (東京) にて正常と思われる 3 次元立体頭蓋底モデル (craniocervical junction から orbita 上縁 5 cm まで) を作製した. 人工骨は, 実際の手術用の high speed drill にて骨削開が可

能となるように同社が製法特許を持つ粉末材料 (合成樹脂ナイロンとガラスビーズよりなる) を用いて作製された. この 3 次元立体頭蓋底モデルでは, 眼窩, 上および下眼窩裂, 前床突起, 後床突起, 鞍結節, 視神経管, optic strut, 正門孔, 卵門孔, 棘穴など, 海綿静脈洞周辺の骨構造が正確に再現されている (Fig. 1A). 人工硬膜の材料として, 2 色の歯科用ゴム質弾性印象剤 (親水性付加重合型ビニルシリコン) を用意し, 硬膜の periosteal layer には黄色のシリコン (EXAFINE® HARD TYPE: 株式会社 GC, 東京) を用い, meningeal layer には茶色のシリコン (EXAFINE® INJECTION TYPE: 株式会社 GC, 東京) を用いた. 各種脳神経の材料として, 嗅神経, 視交叉を含む視神経, Gasserian ganglion を含む三叉神経は厚さ 2 mm のスポンジシートを用いて作製するとともに, その他の脳神経は黄色のゴムひも (Vesseloops™, Argon, Athens, TX, USA) を用いた. 内頸動脈 (C1 から C6 まで) は直径 4 mm のビニルチューブを熱で曲げた後に赤の着色をして作製した. 中硬膜動脈には赤色のゴムひも (Vesseloops™, Argon) を用いた. 人工の海綿静脈洞やその他の静脈洞の材料として, 青色のシリコン (EXAFINE® REGULAR TYPE: 株式会社 GC, 東京) を用いた.

② 作製方法

親水性付加重合型ビニルシリコンはベースペーストとキャタリストペーストの 2 種類のゲルからなり, これらの等量を練和して使用するが, このままではシリコー

Fig. 2 Process of making the 3D CS model (continued)

A : The cavernous sinus and other sinuses were modeled with blue silicone.

B : The optic nerve and chiasm were modeled with yellow sponge, and the internal carotid artery with red vinyl tube, and the meningeal layer of the dura mater was partially reconstructed with brown silicone.

Note the additional blue silicone on the intra-cavernous portion of the internal carotid artery (C4) (arrow).

PS; sphenoparietal sinus, CS; cavernous sinus, SPS; superior petrosal sinus, IPS; inferior petrosal sinus, BP; basilar plexus, ACP; anterior clinoid process, PCP; posterior clinoid process, II; optic nerve, OC; optic chiasm, ICS; inter-cavernous sinus, ICA; internal carotid artery.

Fig. 3 Process of making the 3D CS model (continued)

A : All cranial nerves were modeled with either yellow rubber strings or sponges.

B : The meningeal layer of the dura mater (dura propria) in the lateral wall of the cavernous sinus was modeled with brown silicone. The meningeal layer of the dura mater in the frontal and temporal fossae was also modeled with brown silicone.

II; optic nerve, III; oculomotor nerve, IV; trochlear nerve, V1; ophthalmic division of the trigeminal nerve, V2; maxillary division of the trigeminal nerve, V3; mandibular division of the trigeminal nerve, VI; abducens nerve, GG; Gasserian ganglion, ICA; internal carotid artery, MMA; middle meningeal artery, SPS; superior petrosal sinus, IPS; inferior petrosal sinus, LW; lateral wall of the CS (dura propria), ACP; anterior clinoid process, SOF; superior orbital fissure, SW; sphenoid wing, FD; frontal fossa dura, TD; temporal fossa dura, MC; Meckel's cave.

ンがすぐに固まってしまうので、硬化を遅らせるためのリターダーを少量加えてからすばやく練和する。まず、海綿静脈洞の内側壁となる蝶形骨体部外側面を含めて頭蓋骨内側面全体に絵筆を用いて黄色のシリコンを薄く塗布することで、硬膜の periosteal layer を再現する (Fig.

1B)。この場合、可能なかぎり薄くかつ均一となるように塗布することが重要である。さらに、眼窩内も同様に黄色のシリコンを塗布して periorbita を再現する (Fig. 1C)。中頭蓋窩の硬膜 (temporal fossa dura) の periosteal layer と orbital apex の periorbita は上眼窩裂の外側部で

Fig. 4 Skull base view of the 3D CS model

癒合し2層となり、いわゆる“periosteal bridge”(=orbito-temporal periosteal fold)を形成する。黄色のシリコンを上眼窩裂の外側部と orbital apex に塗布する際には、この periosteal bridge を作製するようにする。次に、青色のシリコンを用いて海綿静脈洞、inter-cavernous sinus、上および下錐体静脈洞、basilar plexus、sphenoparietal sinus などの静脈洞を再現する (Fig. 2A)。その際、静脈洞としての厚さを持たせるように青色シリコンを厚めに塗布する。ビニルチューブで作製した内頸動脈を留置して、その海綿静脈洞部 (C4) の上に青色のシリコンを追加して海綿静脈洞を再現する (Fig. 2B)。前床突起および後床突起部の黄色のシリコンによる periosteal layer の上に茶色のシリコンを上塗りして meningeal layer を再現してから、スポンジシートで作製した視神経を視神経管内に留置する (Fig. 2B)。三叉神経の ophthalmic division (V1) は上眼窩裂、maxillary division (V2) は正円孔、mandibular division (V3) は卵円孔にそれぞれ留置して、神経根部は錐体骨先端の trigeminal impression に瞬間接着剤にて固定した (Fig. 3A)。動眼神経と滑車神経を上眼窩裂に留置するとともに、外転神経は内頸動脈近くになるように留置した。その他の脳神経もそれぞれの神経孔に留置した。中硬膜動脈を棘孔に留置した。次に、茶色のシリコンを前頭蓋窩および中頭蓋窩の periosteal layer の上に塗布することによって meningeal layer を再現し、これらの部位における硬膜の2重構造を再現した。最後に海綿静脈洞の外側面を構成する meningeal layer すなわち dura propria を再現するために、茶色のシリコンを動眼神経、滑車神経、三叉神経の上に塗布した (Fig. 3B)。

Fig. 5 Observing the dissected 3D CS model

After anterior clinoidectomy and peeling the dura propria of the lateral wall of the CS. Open triangles indicate Dolenc's triangle and Glasscock's triangle.

PO; periorbita, PB; periosteal bridge, C2; supraclinoid segment of the ICA, C3; clinoid segment of the ICA (anterior loop), C6; intrapetrous portion of the ICA, DR; distal dural ring, MMA; middle meningeal artery, II; optic nerve, III; oculomotor nerve, IV; trochlear nerve, V1; ophthalmic division of the trigeminal nerve, V2; maxillary division of the trigeminal nerve, V3; mandibular division of the trigeminal nerve, VI; abducens nerve, GG; gasserian ganglion, OS; optic strut, CS; venous plexus in CS.

結果

Fig. 4 に3次元立体頭蓋底モデルに人工物で作った硬膜、神経、血管付の海綿静脈洞を再現したモデルを提示する。硬膜の2重構造を色の違うシリコンを用いて再現することによって、海綿静脈洞が硬膜の periosteal layer と meningeal layer とに囲まれた空間であることが理解しうるとともに、海綿静脈洞外側壁が中頭蓋窩の2重の硬膜と違って、一層の meningeal layer である dura propria によって構成されていることが理解しうる。また、上眼窩裂外側部が眼窩側の periorbita と中頭蓋窩側の periosteal layer からなる periosteal bridge を形成することなどが、海綿静脈洞を自作することによって3次的に体感し理解しうる事が判明した。

この作製した海綿静脈洞モデルの前床突起を摘出し (anterior clinoidectomy), clinoid space を開放し antero-medial triangle (Dolenc's triangle) を確認した (Fig. 5)。その際に、視神経管の下外側を構成する optic strut も確認できた。Dolenc's triangle には distal dural ring と内頸動脈の anterior loop (C3) と海綿静脈洞内の静脈叢が観察できた。また、眼窩の一部と上眼窩裂を開放して、periosteal bridge が確認できた。海綿静脈洞外側壁の dura

propria を剥離 (peeling) して、海綿静脈洞内の各神経や Gasserian ganglion を観察した。また、posterolateral triangle (Glasscock's triangle) 上の骨を除去して内頸動脈の C6 部分が確認できた。以上、海綿静脈洞を自作し、それを dissect することで複雑な海綿静脈洞の 3 次元的解剖の理解の手助けになることが判明した。

考 察

海綿静脈洞への直達手術を目的とした頭蓋底手術は、Dwight Parkinson, 白馬 明, Vinko V. Dolenc などがパイオニアといってよいであろう^{1)~3)5)10)}。Dolenc technique の基本手技は、硬膜外からのアプローチによる前床突起の削除 (extradural anterior clinoidectomy), Glasscock's triangle の骨削除による内頸動脈 (C6) の開放、上眼窩裂の開放による periosteal bridge の露出と切開により海綿静脈洞外側部における dura propria を inner cavernous membrane から剥離 (peeling) し、海綿静脈洞を開放することである。血管内手術や定位放射線治療の発達で海綿静脈洞まで開放する手術は減少してはいるが、前床突起の削除は前床突起近傍の脳動脈瘤や傍鞍部の脳腫瘍の手術には必須の手技であることに変わりはない。Dolenc technique の変法として、periosteal bridge を切開し、dura propria を一部のみ剥離 (mini-peeling) し前床突起の外側部を露出してから削除する方法も報告されている⁴⁾⁹⁾。いずれにしても、海綿静脈洞の 3 次元的解剖を周辺骨構造をも含めて理解することが必要となる。そのためには、一般の解剖書による 2 次元的理解だけでは不十分である。今回われわれが提示した海綿静脈洞を自分の手で作製する方法は、作りながらその立体的構造を理解するとともに、海綿静脈洞手術に重要な複雑な硬膜構造を自作するという過程を経て理解を深めるものである。また、今回 high speed drill による骨削開が可能な人工骨でできた頭蓋底モデルを使用した。この骨モデルの利点は、SLS 法による頭蓋骨表面や内部構造の再現のみならず、実際の手術器具を用いて骨削開が可能なことである¹¹⁾¹²⁾。自分で作製したモデルを実際の手術のシミュレーションにも使えることは、複雑な Dolenc technique の習得にも役立つものと考えられる。

今回のモデルでは海綿静脈洞外壁 (dura propria) の下に存在すると考えられる薄い inner cavernous membrane⁶⁾の再現は行わなかったが、今後はこの膜を再

現したり、人工硬膜の材質の改善を試みる予定である。

結 語

骨削開が可能な人工骨を用いて SLS 法にて作製された 3 次元立体頭蓋底モデルを土台にシリコンなどを用いて、硬膜、脳神経、海綿静脈洞内静脈叢、内頸動脈など海綿静脈洞構造物を再現した。海綿静脈洞を自作する過程と、作製したモデルを dissection することによって、海綿静脈洞に関係した頭蓋底手術に必要な 3 次元的解剖を理解することが可能となる。

文 献

- 1) Dolenc V: Direct microvascular repair of intracavernous vascular lesions. *J Neurosurg* 58: 824-831, 1983.
- 2) Dolenc VV: Frontotemporal epidural approach to trigeminal neuromas. *Acta Neurochir (Wien)* 130: 55-65, 1994.
- 3) Dolenc VV, Roger L: *Microsurgical Anatomy and Surgery of the Central Skull Base*. Wien, Springer-Verlag, 2003.
- 4) Froelich SC, Aziz KM, Levine NB, Theodosopoulos PV, van Loveren HR, Keller JT: Refinement of the extradural anterior clinoidectomy: Surgical anatomy of the orbitotemporal periosteal fold. *Neurosurgery* 61 (Suppl 2): 179-186, 2007.
- 5) 白馬 明, 西村周郎, 白方誠弥, 塚本政志: 海綿静脈洞への直達手術 19 例の経験. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 22: 295-308, 1982.
- 6) Kawase T, van Loveren H, Keller JT, Tew JM: Meningeal architecture of the cavernous sinus: Clinical and surgical implications. *Neurosurgery* 39: 527-536, 1996.
- 7) McAlea K, Forderhase P, Hejmadi U, Nelson C: Materials and applications for the SLS selective laser sintering process. in Chartoff R (ed): *Proceedings of the 7th International Conference on Rapid Prototyping*. Dayton, University of Dayton, 1997, pp.23-33.
- 8) 森 健太郎: 3 次元立体側頭骨モデルを用いた頭蓋底手術練習法の開発. *脳外誌* 17: 615-621, 2008.
- 9) Noguchi A, Balasingam V, Shiokawa Y, McMenomey SO, Delashaw JB Jr: Extradural anterior clinoidectomy. Technical note. *J Neurosurg* 102: 945-950, 2005.
- 10) Parkinson D: A surgical approach to the cavernous portion of the carotid artery. Anatomical studies and case report. *J Neurosurg* 23: 474-483, 1965.
- 11) Suzuki M, Ogawa Y, Kawano A, Hagiwara A, Yamaguchi H, Ono H: Rapid prototyping of temporal bone for surgical training and medical education. *Acta Otolaryngol* 124: 400-402, 2004.
- 12) Suzuki M, Ogawa Y, Hagiwara A, Yamaguchi H, Ono H: Rapidly prototyped temporal bone model for otological education. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 66: 62-64, 2004.

要 旨

海綿静脈洞部手術に必要な解剖を理解するための 3 次元立体海綿静脈洞モデル

森 健太郎 山本 拓史 大山 一孝 中尾 保秋

複雑な海綿静脈洞部の 3 次元解剖的理解と海綿静脈洞を含む頭蓋底部の手術手技の習得には cadaver dissection が必要であるが、その機会は少ない。そこで、cadaver dissection の代用となりえる人工の硬膜や海綿静脈洞や脳神経などを含む 3 次元頭蓋骨モデルを提唱する。骨削開が可能な人工骨を用いてレーザー溶融粉末積層造形法にて作製された 3 次元立体頭蓋底モデルに、シリコンやゴムひもやビニルチューブなどを用いて、2 層構造からなる硬膜、脳神経、海綿静脈洞内静脈叢、内頸動脈など、海綿静脈洞構造物を再現した。このモデルを用いて、anterior clinoidectomy や海綿静脈洞外側壁を構成する dura propria を peeling することが、ほぼ実際の手術と同様に再現できた。海綿静脈洞を自作する過程と、作製したモデルを dissection することによって、海綿静脈洞に関係した頭蓋底手術に必要な 3 次元解剖的理解することが可能となる。

脳外誌 17 : 940-945, 2008