

型取りによる透明恐竜頭骨模型の開発

河部壮一郎¹・北山浩生²・服部創紀³

¹ 福井県立恐竜博物館 福井県勝山市村岡町寺尾 51-11

² 株式会社 岩崎総合研究所 岐阜県郡上市美並町白山 1580

³ 岐阜県博物館 岐阜県関市小屋名 1989

要 旨

低コストで恐竜頭骨内部の様子を観察できる模型の製作を目指し、型取り手法による脳などの内部構造の見える恐竜頭骨透明模型を試作した。型取り手法では、はじめに型をつくることから、二度目以降は短時間・低コストで透明模型を作ることが可能となる。複数の模型を安価に製作できることから、多くの場所での利用・展示が可能となり、透明模型の使用範囲も広がると期待できる。さらに、様々な角度から頭骨内部の様子を観察することが可能となり、恐竜頭骨の解剖学的な理解を促進するものとなる。

キーワード：透明模型, 恐竜, 頭骨, 脳エンドキャスト

KAWABE, Soichiro, Kosei KITAYAMA and Soki HATTORI (2016) Development of transparent dinosaur skull models by resin molding. Mem. Fukui Pref. Dinosaur Mus. 15 : 85-92.

We attempted to produce the transparent dinosaur skull models by resin molding at low cost, which allows us to see the internal structure of the skull. Since multiple transparent models can be made in a short time after the production of the mold, it holds promise for expanding range of application of the transparent model in research and educational purposes. Additionally, because we can see the inside of the skull from different angles, it will promote our anatomical understanding of the dinosaur skull.

はじめに

3DスキャナやCTスキャナの普及により、近年では手軽に博物館資料等の3Dデジタルデータを取得することができるようになり、それに伴い多くの人がこのようなデジタル情報にアクセスできる環境が整ってきた。学術雑誌においても3Dデジタルデータの公開は一般的になりつつあり(Orliac, 2015; Martínez et al., 2016; Ramdarshan and Orliac, 2016)、また博物館等の資料に関しても公開が進んでいる(例えば山階鳥類研究所, 京都大学霊長類研究所, 九州大学総合研究博物館, Smithsonian Institution, American Museum of Natural History)。古脊椎動物の研究でもCTスキャナの利用は日常的になってきており、中

でも頭骨内部に着目した例は多い(Witmer and Ridgely, 2009; Luo et al., 2011; Nishimura et al., 2014; Bever et al., 2015)。脳の収まっている頭蓋腔の型のことを脳エンドキャスト(brain endocast)と呼ぶが、そこには古脊椎動物の脳に関する数多くの情報が記録されており、CTスキャナを利用したデジタル脳エンドキャストの研究は飛躍的に増加している(Witmer and Ridgely, 2009; Kawabe et al., 2014)。それに伴い古脊椎動物の頭骨内部、特に神経系に関する理解もより深まっている(Walsh and Knoll, 2011; 河部, 2015)。そのため、脳エンドキャストに関する3Dデジタルデータも広く公開され始めている。しかし多くの場合、頭骨や脳エンドキャストのデジタルデータはパソコンの画面上で閲覧されるに留まり、実際にそのモデルを手にする機会は稀である。3Dデータであっても、画面上で観察する場合は二次元情報になってしまうことから、3Dデータの持つ情報の大部分は失われることになる。脳がどのように頭蓋の中に位置し、どれくらいの大きさであったか等の情報を直感的に理解するには、やはり実際に出力された模型を用いて頭骨と脳の位置関係を確認することが重要であり、こ

2016年8月2日受付, 2016年11月24日受理.

Corresponding author—Soichiro KAWABE

Fukui Prefecture Dinosaur Museum

51-11 Terao, Muroko, Katsuyama, Fukui 911-8601, Japan

E-mail : kawabe_soichiro@yahoo.co.jp

のためには特に透明化された頭骨模型が有用である。

デジタル 3D データを造形するには 3D プリンタを用いるのが便利である。実際にデータを 3D プリンタにより出力することで、直接手にとることのできるモデルを造形することが可能で、出力された 3D モデルは学校や博物館教育 (Rahman et al., 2012; Lautenschlager and Rücklin, 2014; 有田, 2015; Mitsopoulou et al., 2015; 新村ほか, 2016) だけでなく、医療教育での利用も進んでいる (McMenamin et al., 2014; Mahmoud and Bennett, 2015)。最近では透明インクを用いた造形が可能となってきたことから、内部構造までも見ることのできる透明模型を作ることができ、医療現場での応用例も多く見られるようになってきている (秋葉ほか, 2016; Oshiro et al., 2016)。透明模型は、例えば医療現場では立体的観察や診断、あるいは手術シミュレーションや患者への説明など多くの状況での用途例が想定されるが (Sugimoto et al., 2012; 秋葉ほか, 2016; Kurenov et al., 2015)、博物館においても来館者らの興味関心、展示内容に関する理解の向上に大きく寄与するものと期待される。例えば、恐竜の頭骨内部に脳などが収まっている様子を可視化した透明模型を用いることで、研究者だけでなく博物館来館者といった一般の人々にも直感的に頭骨内部の様子をわかりやすく提示することが可能となり、博物館展示の幅も広がる。しかし 3D プリンタで透明模型を造形する場合、一般的な材料押出堆積法 (FDM) による造形と比較すると、造形にかかる材料代が割高になり、大型あるいは複数の模型を製作する場合かなりの費用がかかると考えられる。例えば型取りによる石膏造形と商業用 3D プリンタによる造形を比較すると、3D プリンタの方が約 10 倍の製造コストがかかるという結果もある (Kasparova et al., 2013)。さらに現時点では、透明素材での出力が可能な 3D プリンタを用いた場合、1000 cm³ の造形に対しおよそ 40 万円近くのコストがかかる。デジタルデータとの相性の良さ、造形の再現性の高さや様々な素材を用いることができるといった多くの利点が 3D プリンタにはあるものの、単価がまだ比較的高いこの方法による造形は、例えば限られた予算による博物館展示等には不向きである。このようなことから、透明模型を低コストで製作することを目指し、3D プリンタを用いつつ、型取り手法を組み合わせた、脳が見える恐竜頭骨模型の製法を開発し、実際に岐阜県博物館の平成 28 年度夏季特別展で展示利用したので、その内容を詳述する。

透明模型の製作

はじめに 3D 編集ソフト Sculptris (Pixologic, Los Angeles, CA) 等を用いて、文献を参考に *Tyrannosaurus* (Witmer and Ridgely, 2009) および *Euoplocephalus* (Witmer and Ridgely, 2008) の頭骨及び頭骨内部構造 (脳エンドキャスト、鼻腔嗅部、鼻腔呼吸部) の 3D デジタルモデルを製作した。

その後、FDM の 3D プリンタでこれら頭骨及び内部構造のモデルを出力した (Fig. 1)。プリンタの出力サイズ限界から、*Tyrannosaurus* は実際の標本サイズの 0.15 倍、*Euoplocephalus* は 0.4 倍に縮小した。素材は ABS 樹脂を用い、印刷時間はそれぞれ約 100 時間、約 120 時間を要した。出力後、アクリル樹脂で作成されたサポート材の除去を行ったが、当初はシンナー系の溶剤を用いたため時間がたつと

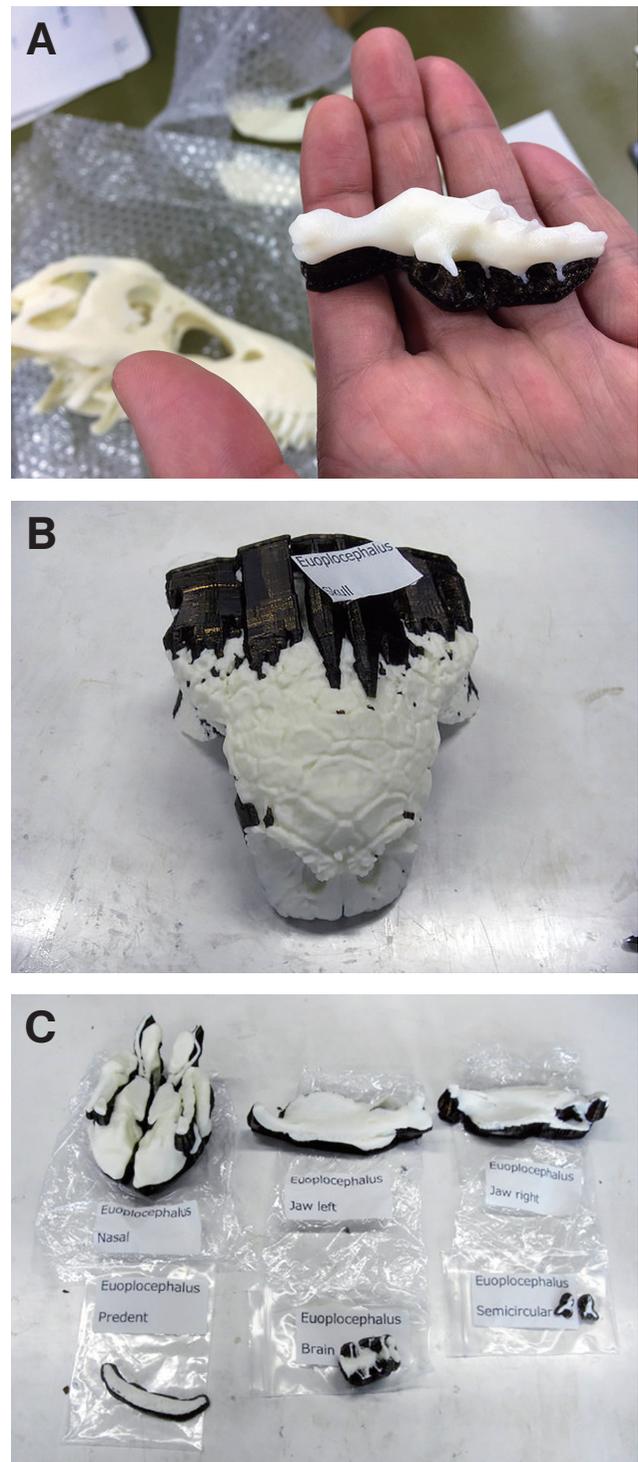


FIGURE 1. Rapid prototypes, produced by a 3D printer, of brain endocast of *Tyrannosaurus* (A), skull of *Euoplocephalus* (B), and internal structures and lower jaw of *Euoplocephalus* (C).

出力モデルに変形が生じた。改めて、アルカリ水溶液を用いたところ大きな変形等なくサポート材を除去することができた。

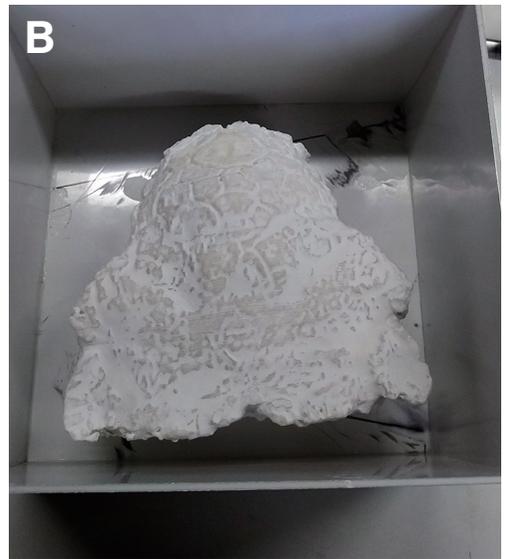


FIGURE 2. Urethane master prototypes of *Tyrannosaurus* (A) and *Euoplocephalus* (B).

3Dプリンタによって造形された頭骨モデルは、粘土で外鼻孔や前眼窩窓、眼窩、側頭窓、外下顎窓といった孔を埋め、内部に空洞がないようにした。また、オーバーハングも修正した。頭骨モデル表面を貫くこのような孔やオーバーハングは、型取りを行う際に都合が悪く、このような処置をとった。ただし、頭骨の印象を大きく左右する孔等の構造を全て埋め、平にしてしまうと、恐竜の頭骨とは全く異なる印象を与えてしまうため、若干の窪みを残し凹凸で表現した。その後、サーフェーサーを用いて鏡面仕上げを行い、ウレタン樹脂（ソルベントナフサ）に置き換えてマスター原型とし（Fig. 2）、高透明シリコン（AXSON ESSI L297 Catalyst）で型を作った（Figs. 3, 4）。

一方、頭骨内部構造は、粘土等による補正を加えることなく、そのまま鏡面仕上げを行い、頭骨モデルと同様に高透明シリコンの型を作製した。内部構造に関してはこの透明シリコン型を用いて、トナー絵の具によって練りこみ着



FIGURE 3. Master prototypes of *Tyrannosaurus* skull (A), *Euoplocephalus* skull (B), and internal structures of *Euoplocephalus* (C) in boxes for making silicon molds.



FIGURE 4. Silicon molds of *Tyrannosaurus* skull (A) and *Euoplocephalus* skull (B).



FIGURE 5. An epoxy model of internal skull structure of *Tyrannosaurus*. The brain endocast, olfactory region of nasal cavity, and respiratory region of nasal cavity are colored by red, yellow, and green, respectively.



FIGURE 6. Epoxy resins poured into the silicon mold of *Tyrannosaurus* skull. The internal structure model has already been in the mold.

色を施したエポキシ樹脂により型取りを行った (Fig. 5).

頭骨部は、真空槽中で上述のシリコン型を用いて樹脂封入の要領で作製した。植物や動物などの樹脂封入標本 (例えば増田・小倉, 1978) では、直方体といった単純な形状の樹脂に標本を封入する機会が多いが、今回は頭骨形状の樹脂の中に内部構造モデルを封入することになる。頭骨背側を底面 (およそ鼻骨から頭頂骨にかけての面が底面) にし、まず内部構造モデルの背側に達しない深さまでエポキシ樹脂を入れた (Fig. 6)。その後、内部構造の位置を固定し数回に分けて樹脂封入を行った。できあがったモデルは、アクリル素材による支えで固定し、最終的な透明模型に仕上げた (Fig. 7)。

考 察

型取り手法ではその性質上、内部に広がる空洞やオーバーハングを造形することができないことから、マスター原型の精度を元のデータよりも落とさざるを得なかった (Fig. 2)。ただし、こういった部分を観察者に理解してもらいたいかについての的を絞る、適切にマスター原型を加工することで、本来のデータの持つ情報量を大きく欠落させないですむ。

エポキシ樹脂の屈折率 (およそ 1.5~1.6) の関係から、見る角度によっては内部構造の観察が非常に難しくなる場合がある。屈折や反射の程度により、本来は内部構造のない部位に内部構造モデルの色が映ることもある (Fig. 7)。これはパソコンなどでのデジタル像の観察では起こり得ず、樹脂造形による欠点の一つと言える。ただしフッ素樹脂などは比較的屈折率が低い (四フッ化エチレン樹脂で 1.35 程度。ただし透明度は低い) (垣内, 1994; 安田, 2001) ことから、材料を工夫することで内部構造の見え方に関しては今後改善することができるかもしれない。

近年では 3D プリンタは急速に普及してきており、また透明素材等によって造形できる機種も少しずつ増えてきている。しかし、まだ特殊な素材を多色出力できる 3D プリン

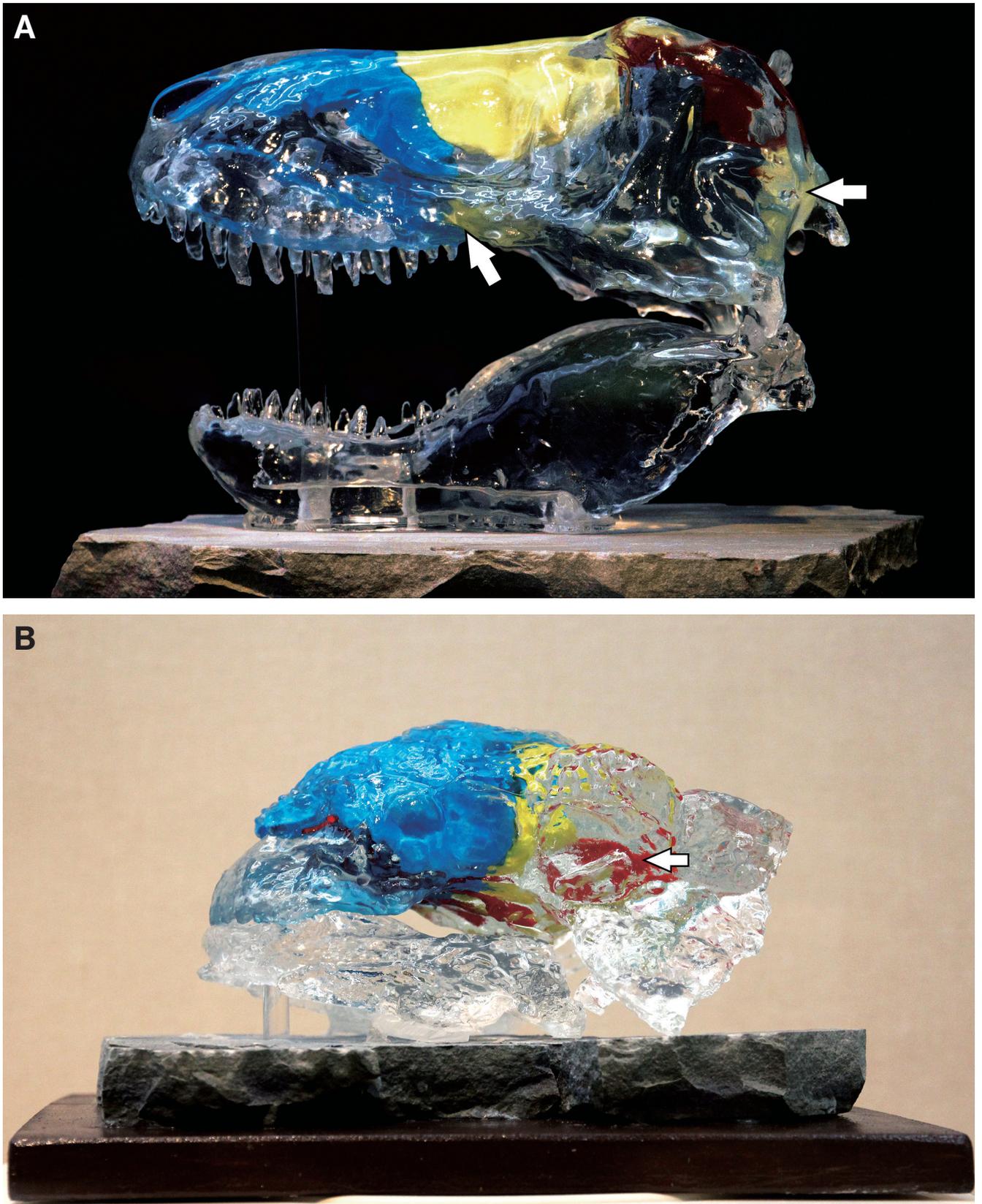


FIGURE 7. Transparent skull models of *Tyrannosaurus* (A) and *Euoplocephalus* (B). White arrows indicate reflections which are produced by refraction of light.



FIGURE 8. Display of the transparent skull model during the special exhibition at the Gifu Prefectural Museum in 2016.

タは価格も非常に高く、また造形のための材料費も高いため、複数の透明模型を3Dプリンタにより自前で造形するにはコスト的な問題点が残る。本来3Dプリンタは商品開発の段階でプロトタイプ等を製作するのに用いられることが一般的で、直接的に製品あるいは完成品を作るということに主眼は置かれていない(東京都立産業技術研究センター, 2014)。上述の透明素材を用いて造形できる3Dプリンタでの製作コストを概算したところ、型取りによる今回の造形にかかったコストのおよそ2.5倍となった。さらに、3Dプリンタでの造形と異なり型取りによる造形では、一度シリコン型をつくってしまえば、二度目以降は短時間・低コストで透明模型を作ることが可能となり、複数の模型も比較的安価に製作可能となる。そのため、多くの場所での利用・展示することができ、透明模型の活用範囲も広がるも期待できる。

実物標本と比較すると、模型は観察者に実際に手に取ってもらいやすい。このように観察者が自身で触ることのできる標本を教育に用いた場合、触察で得られる理解は特に子供にとっては非常に大きい(Dunn and Dunn, 1992)ことから、より効率的かつ本質的な教育効果が期待される(大西, 1999; Rahman et al., 2012)。今回作製した透明頭骨模型は、実際の標本よりも小さく手に取りやすい大きさや重

量であり、さらにエポキシ樹脂で作られていることから、手軽に持ち上げ観察することができる。上述のように、造形精度は実物標本よりも劣るが、大きく重量のある標本では簡単に見ることのできない部位の観察などを行うには大変有用である。見る角度を自由にかえることができるため、頭骨内部の構造を様々な方向から観察することができ、内部構造の相対的な位置関係やサイズなどをより直感的に理解することが可能である。

近年では3Dデータを、一般的なパソコンだけでなく、タッチパネル型テレビやタブレット情報端末で閲覧、観察する機会が多い(例えば中ほか, 2013)。三次元空間の表現や直観的な理解には、三次元コンテンツやタッチパネル端末は優れているものの、観察者に提示されるものは二次元ディスプレイ上であるため、タッチパネル等の操作という面ではわかりづらく(中ほか, 2013)。また本来の三次元的データを漏れなく理解できるというわけでもない(Sugimoto et al., 2012)。一方で透明模型は、自身の手で触れ、好きな角度から頭骨外部だけでなくその内部構造をも観察することができ、内部構造の位置や大きさなどを直観的に理解することができる。

そこで、実際に出来上がった透明模型を、岐阜県博物館の平成28年度夏季特別展にて展示した(Fig. 8)。今回はガ

ラスケースの中に展示したため、観覧者らがこの模型を手にはすることはなかったが、回転台の上に設置し模型を側面から背側にかけて様々な角度で観察できるようにした。また実寸化石レプリカ等とともに展示をすることで、実際のスケール感を理解できるようにした。その結果、観覧者からは「脳や鼻腔の大きさがどの程度異なるかわかった」、「脳の小ささに驚いた」といった意見が寄せられ、透明頭骨模型により観覧者の恐竜頭部に対する理解が大きく促進されたものと考えられる。古生物の専門家にも観察してもらったところ、ディスプレイ上では認識することのなかったスケール感を強く理解することができたという意見が多く寄せられた。このことから、3Dデジタルデータの観察から既に多くのことを理解している専門家であっても、透明模型を実際に手に取って観察して得られる情報は非常に多く残されていることがわかる。

以上のように、透明頭骨模型は様々な教育や展示の現場において、観察者らの理解を大きく助けるものとなることが期待される。さらに、専門家であっても実際に手に触れ観察することで理解を深めることのできる点で、透明模型は非常に有用であることが示唆された。

謝 辞

株式会社岩崎 イワサキ・ビーアイ新潟工場の水落康明氏には、模型の製作段階から大変お世話になった。糸魚川淳二博士および大橋智之博士には丁寧な査読をいただき、本稿は大幅に改善された。後藤道治博士、佐野晋一博士及び本紀要編集幹事の一鳥啓人博士には、原稿を改善するにあたり有益な助言をいただいた。以上の方々に記して感謝申し上げます。

引用文献

- 秋葉直志・仲田健男・矢部三男. 2016. 3Dプリンターで作成した臨床教育用肺縦隔モデル. 日本呼吸器外科学会雑誌 30 : 123-126.
- 有田寛之. 2015. 博物館資料に関する三次元デジタルデータの活用について. 日本教育情報学会第31回年会論文集 31 : 126-129.
- Bever, G. S., T. R. Lyson, D. J. Field and B. A. S. Bhullar. 2015. Evolutionary origin of the turtle skull. *Nature* 525 : 239-242.
- Dunn, R., and K. Dunn. 1992. Teaching elementary students through their individual learning styles : practical approaches for grades 3-6. Allyn and Bacon, Boston, 529 pp.
- 垣内 弘. 1994. エポキシ樹脂 — 最近の進歩. 熱硬化性樹脂 15 : 149-173.
- Kasparova, M., L. Grafova, P. Dvorak, T. Dostalova, A. Prochazka, H. Eliasova and S. Kakawand. 2013. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomedical Engineering OnLine* 12 : 49.
- Kawabe, S., T. Ando and H. Endo. 2014. Enigmatic affinity in the brain morphology between pterosaurs and penguins, with a comprehensive comparison among water birds. *Zoological Journal of the Linnean Society* 170 : 467-493.
- 河部壮一郎. 2015. 地球科学入門講座「CTを用いた化石研究～古神経学入門～」地球科学 69 : 241-248.
- Kurenov, S. N., C. Ionita, D. Sammons and T. L. Demmy. 2015. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 149 : 973-979.
- Lautenschlager, S., and M. Rücklin. 2014. Beyond the print—virtual paleontology in science publishing, outreach, and education. *Journal of Paleontology* 88 : 727-734.
- Luo, Z. X., I. Ruf, J. A. Schultz and T. Martin. 2011. Fossil evidence on evolution of inner ear cochlea in Jurassic mammals. *Proceedings of the Royal Society of London B : Biological Sciences* 278 : 28-34.
- Mahmoud, A., and M. Bennett. 2015. Introducing 3-dimensional printing of a human anatomic pathology specimen : potential benefits for undergraduate and postgraduate education and anatomic pathology practice. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine* 139 : 1048-1051.
- Martínez, R. D. F., M. C. Lamanna, F. E. Novas, R. C. Ridgely, G. A. Casal, J. Martínez, J. R. Vita and L. M. Witmer. 2016. A basal lithostrotian titanosaur (Dinosauria : Sauropoda) with a complete skull : implications for the evolution and paleobiology of Titanosauria. *PLoS ONE* 11 : e0151661.
- 増田 游・小倉義郎. 1978. 教材用耳小骨封入標本の作製. 臨床耳科 5 : 102-103.
- McMenamin, P. G., M. R. Quayle, C. R. McHenry and J. W. Adams. 2014. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anatomical Sciences Education* 7 : 479-486.
- Mitsopoulou, V., D. Michailidis, E. Theodorou, S. Isidorou, S. Roussiakis, T. Vasilopoulos, S. Polydoros, G. Kaisarlis, V. Spitas, E. Stathopoulou, C. Provatidis, C. Provatidis and G. Theodorou. 2015. Digitizing, modelling and 3D printing of skeletal digital models of *Palaeoloxodon tiliensis* (Tilos, Dodecanese, Greece). *Quaternary International* 379 : 4-13.
- 中 貴俊・遠藤 守・山田雅之・宮崎慎也・岩崎公弥子・安田孝美. 2013. スマートデバイスによる3DCGを用いた電子教材の提示・操作に関する研究 : タブレット端末3DCGコンテンツ開発に向けたフレームワーク構築. 情報文化学会誌 20 : 19-26.
- Nishimura, T. D., T. Ito, W. Yano, J. O. R. Ebbestad and M. Takai. 2014. Nasal architecture in *Procynocephalus wimani* (Early Pleistocene, China) and implications for its phyletic relationship with *Paradolichopithecus*. *Anthropological Science* 122 : 101-113.
- 大西万知子. 1999. 視覚に障害を持つ人に配慮された触れる展示の発達比較 — 日本と英国の博物館 —. 博物館学

- 雑誌 24 : 81-90.
- Orliac, M. 2015. The endocranial cast of *Microchoerus erinaceus* (Euprimates, Tarsiiformes). Morpho Museum 1 : M3#15_UM-PRR1771.
- Oshiro, Y., J. Mitani, T. Okada and N. Ohkohchi. 2016. A novel three-dimensional print of liver vessels and tumors in hepatectomy. Surgery Today.
- Rahman, I. A., K. Adcock and R. J. Garwood. 2012. Virtual fossils : a new resource for science communication in paleontology. Evolution : Education and Outreach 5 : 635-641.
- Ramdarshan, A., and M. Orliac. 2016. Endocranial morphology of *Microchoerus erinaceus* (Euprimates, Tarsiiformes) and early evolution of the Euprimates brain. American Journal of Physical Anthropology 159 : 5-16.
- 新村龍也・田中嘉寛・甲能直樹・山田一孝・佐々木基樹.
2016. 北海道産鱗脚類化石のデジタル生体復元：フォト
グラメトリーおよび3D CGソフトによる制作. 化石 99 :
85-92.
- Sugimoto Y, M. Tanaka, R. Nakahara, H. Misawa, T.
Kunisada and T. Ozaki. 2012. Surgical treatment
for congenital kyphosis correction using both spinal
navigation and a 3-dimensional model. Acta Medica
Okayama 66 : 499-502.
- 東京都立産業技術研究センター 編. 2014. 3Dプリンタによ
るプロトタイプング. オーム社, 東京, 200 pp.
- Walsh, S. A., and M. A. Knoll. 2011. Directions in
palaeoneurology. Special Papers in Palaeontology 86 :
263-279.
- Witmer, L. M., and R. C. Ridgely. 2008. The paranasal
air sinuses of predatory and armored dinosaurs
(Archosauria : Theropoda and Ankylosauria) and their
contribution to cephalic structure. The Anatomical
Record 291 : 1362-1388.
- Witmer, L. M., and R. C. Ridgely. 2009. New insights into
the brain, braincase, and ear region of tyrannosaurs
(Dinosauria, Theropoda), with implications for sensory
organization and behavior. The Anatomical Record
292 : 1266-1296.
- 安田武夫. 2001. プラスチック材料の各動特性の試験法と
評価結果 (19). プラスチックス 52 : 98-101.