

解説

空洞を持つ化石の新しい型取り技法—植物食恐竜プロトケラトプスの頭蓋を例に—

松本 幸英*・橋本 龍**

* 林原生物化学研究所古生物学研究センター・** 東京都港区南麻布 3-5-49-603

A new molding technique for fenestrated parts of fossils — A case of herbivorous dinosaur *Protoceratops* skull —

Yukihide Matsumoto* and Ryo Hashimoto**

*Center for Paleobiological Research, Hayashibara Biochemical Laboratories, 1-2-3 Shimoishii, Okayama 700-0907, Japan (y-mts@hayashibaramuseum.jp); **3-5-49-603 Minamiazabu, Minato-ku, Tokyo 106-0047, Japan

はじめに

頭蓋化石は、その化石動物の特徴を最もよく表す重要な標本である。そのため、頭蓋化石は、研究・教育・展示など、広範囲から必要とされ、複製が作られる。しかし、頭蓋は一般に形状が複雑で壊れやすく、その複製を得ることは容易ではない。特に頭蓋の表面にあるいくつかの開口部（鼻孔・眼窩口・側頭窓・後頭孔など）や、その奥の空間（鼻腔・眼窩・側頭窩・頭蓋腔など）を複製することは技術的に難しく、型取りの際に標本を損なう危険性が高くなる。そのため必要でない限り通常は粘土等で開口部を塞いで内部構造の型取りを省略することが多い（Goodwin and Chaney, 1994）。こうした理由から、頭蓋の窪みや中空構造を複製する試みは多くはない（Quinn, 1940; Murrill and Wallace, 1971; Parsons, 1973; Schrimper, 1973; Waters, 1983; Smith and Latimer, 1989）。

著者らは、植物食恐竜 *Protoceratops andrewsi* の保存のよい頭蓋化石を得て、研究および展示の目的で、実物により忠実な複製を試みることになった。しかし、本頭蓋は、内部の中空構造が大きく扁平で壊れやすいため、従来の技法で複製することが難しいと思われた。そこで、著者らは、本頭蓋の複製における技術上の問題点が標本への負荷と型の形状の再現性にあると考え、これらを克服する技法を考案して複製に成功した。本解説では、この新しい技法を紹介し、従来の技法と比較する。

プロトケラトプス頭蓋の特徴とその複製に
求められる技法の条件

植物食恐竜 *Protoceratops andrewsi* は、成体でも全長 1.8 m 程の小さな恐竜である。しかし、その頭蓋は、体の大きさ

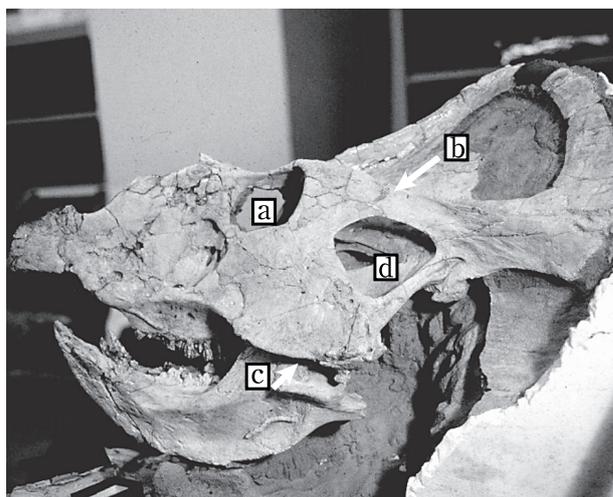


図1. *Protoceratops andrewsi* の頭蓋標本の左側面。鼻骨の一部が欠損している。(a) 眼窩、(b) 上側頭窓、(c) 下側頭窓、(d) 外側側頭窓。

に比べて極めて大きく、本解説に使用した標本の頭蓋では全長の約 1/3 を占め、60 cm 程にもなる。この極端な大きさは、頭蓋を構成する各骨が、成長過程でその他のどの骨よりも大きく成長し、巨大化したことにより生じたものである。そのため、プロトケラトプスの頭蓋は、他の脊椎動物のものとは比べて、表面に開口する骨と骨の間の穴（上側頭窓・外側側頭窓・下側頭窓・眼窩口）が小さくなり（図1）、相対的に頭蓋内部の中空構造が深く大きくなって、著しいオーバーハングを形成している。そして、その中空構造は、全て内部でつながり、左右合わせて8つの開口部を持つ扁平で複雑な形をなしている。また、本頭蓋は、サイズが大きい上にたいへん壊れやすいという特徴を持っている。

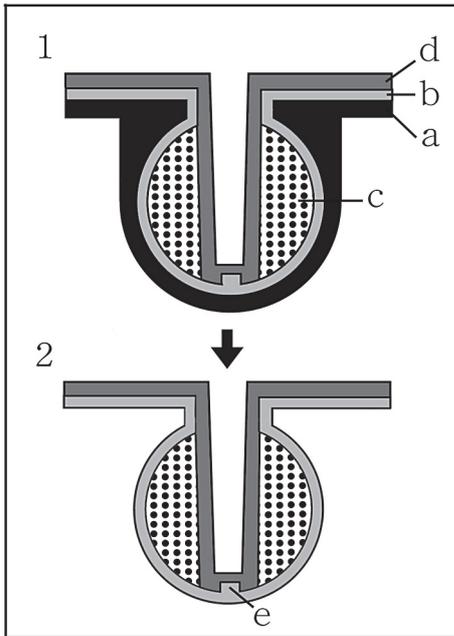


図2. 新しい型取り技法による型の基本モデル。(1) 型取り時、(2) 脱型後、(a) 中空構造を持つ標本の断面、(b) ゴム型、(c) プラグ、(d) 支持型、(e) ゴム型のキー。

このような標本を頭蓋内部まで正確に複製しようとするとき、まず、中空構造から型を取り外す際に狭い開口部に負担が掛かり標本を損傷させることになる。そして、もし標本に負担なく型を取り外すことができたとしても、今度は型の形状が元に戻らず正確な複製が得られないという結果となる。したがって、本頭蓋の複製には、開口部に負担を掛けず、型の形状を再現できる型取り技法が条件として求められる。

新しい技法による型の基本的な構造と機能

新しい型取り技法では、開口部に負担を掛けないために、開口部から取り出される型の部品を開口部より小さなサイズにした。そして、型の形状を再現するために、小さくした部品を開口部から取り出された後に、元の形に組み立てられるようにした。この型の基本的な構造と機能は次のようになる。

この型を構成する部品は、3つからなる。それらは、ゴム型・支持型・プラグである(図2. 基本モデル)。

ゴム型(図2のb)は、主に標本表面を型取りする柔らかい印象剤でできている。中空構造の内側面を型取りした中空状のゴム型は、これを取り出す際に開口部に最も負担を掛けやすい。そのため、この部分のゴム型の厚さは、開口部に負担が掛からない程度に薄くされる。これにより標本の破損が避けられる。

支持型(図2のd)は、柔らかいゴム型の形状を保持する硬い支持体である。これまで支持型は、ゴム型の外面

のみを支持していたが、新技法では外面に加え中空構造内にも支持型から枝を伸ばして、中空状のゴム型を直接・間接的に連結固定する。この仕組みは従来の技法と大きく異なる点である。この連結はゴム型につけたキー(図2のe)と枝の先端の間で行われる。これにより、中空状のゴム型の形状を再現し正確な複製を可能にする。ただし、この枝は、取り外しの際に開口部サイズよりも小さくしなければならないので、この枝が直接連結固定できるゴム型の面積は開口部の面積より小さくなる。

プラグ(図2のc)は、前の2つの部品の間を埋める支持体である。上述したように、支持型の枝が直接連結固定できる中空状のゴム型の面積は小さいので、残りの部分をこのプラグが補助的に支持する。この共同作業により、中空状のゴム型はしっかりと定位置に固定され形状が再現され正確な複製が可能になる。更にこのプラグは、取り外す際に標本に負担を掛けないように開口部よりも小さくしてあり、中空状のゴム型の中に複数設置される。これらは、隣り同士が互いに組み合い一つの連結体を作る。

以上3つの部品の互いの連結は、隣り合う部品同士の表面の凹凸によってなされ、それぞれの部品を定位置に固定する。

プロトケラトプス頭蓋への適用

型設計と完成した型の構造

新技法を実際の標本に適用するにあたり、最初に行うことは、具体的にどのような型の構造にするのかという型設計である。本頭蓋の中空構造は、上述したように、上側頭窓、眼窩口、外側側頭窓、下側頭窓に開口する扁平で深い内部空間となっており、新技法の基本モデルがそのままそっくり適用できるほど単純ではない。そのため、この内部空間の深さや形状、開口部の形状や位置などのさまざまな条件を考慮して、具体的な型の構造を決める。

本頭蓋の場合、検討の結果、左右とも中空構造を3分割し、それぞれ上側頭窓、眼窩口、下側頭窓の3つの開口部から型取りするのが適当であると判断された(図3-1)。したがって、この型の構造は、基本モデルの型を3つ組み合わせ合わせたものとなる。一般に、型の数が多くなると、型全体を組み立てた時に型同士でずれが生じ、複製の精度が落ちやすい。そのため、この型においては、3つの型が定位置に固定されるように、互いに組み合う仕組みを加えた。この型の構造を図で示すと図4のような応用モデルとなる。以上のようにして型設計ができあがり、実際の型取りが行われる。

完成した頭蓋の型は、全部で11の型となった(図3-2)。問題の中空構造は、型設計通り左右それぞれ3つの型で型取りした(図3-3)。これら3つの型は、3つのゴム型が互いに連結する仕組み(図3-4、矢印)により、定位置に固定される。更に、これら3つのゴム型は、それぞれ硬い支持型から延長された枝により、直接あるいはプラグを

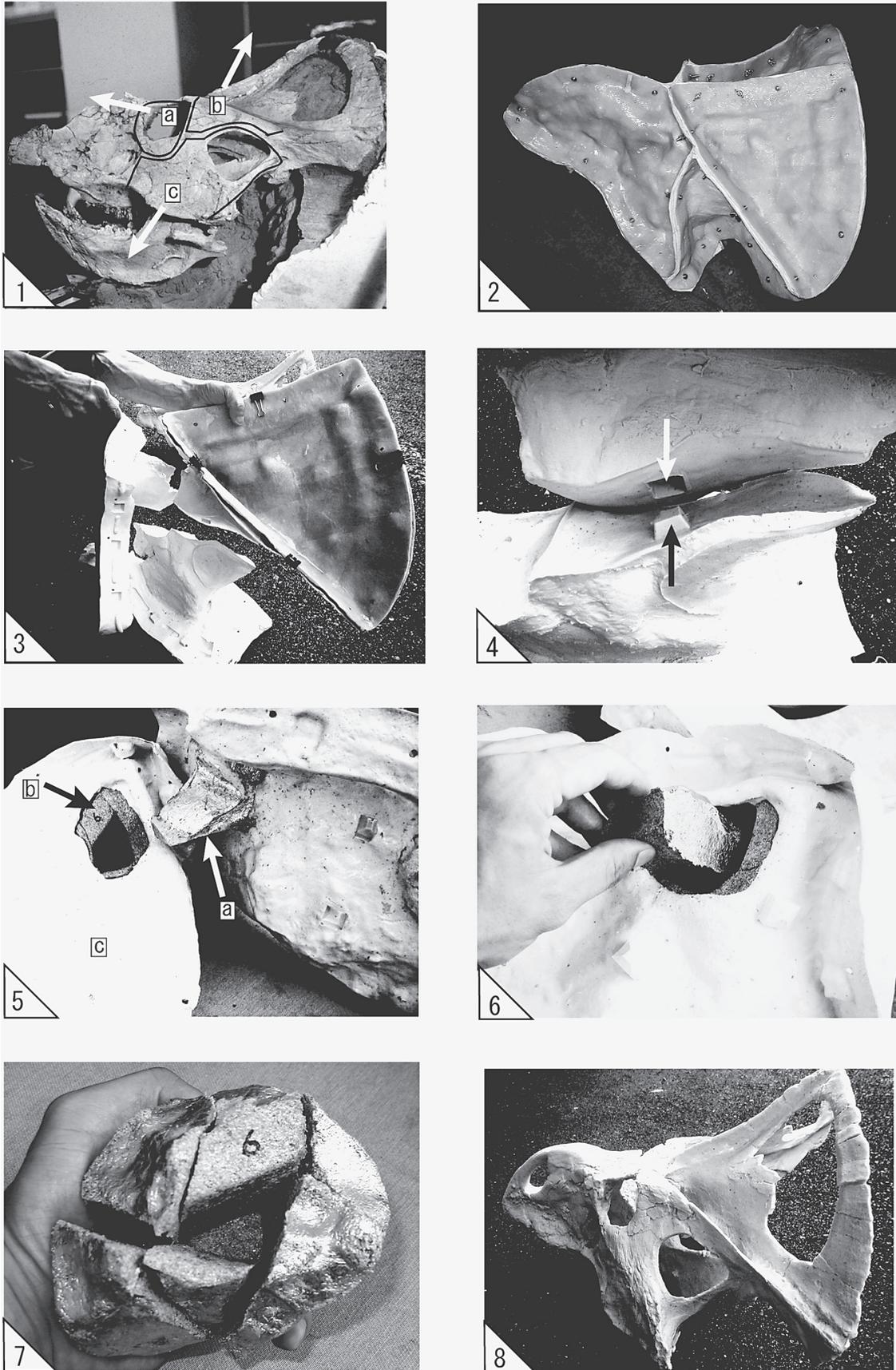


図3. 新技法の *Protoceratops andrewsi* 頭蓋標本への適用. (1) 型設計. 標本の左側の中空構造を a・b・c の3つの空間に分けて, それぞれ眼窩口・上側頭窓・下側頭窓から型取りする, (2) 完成した型, (3) 中空構造を型取りした3つの型, (4) ゴム型間の連結の仕組み(矢印), (5) 中空構造のゴム型の固定, (a) 支持型から伸びた枝, (b) プラグ, (c) ゴム型, (6) 中空構造内から取り外されるプラグ, (7) プラグの連結体, (8) 新技法により複製されたプロトケラトプス頭蓋レプリカ標本.

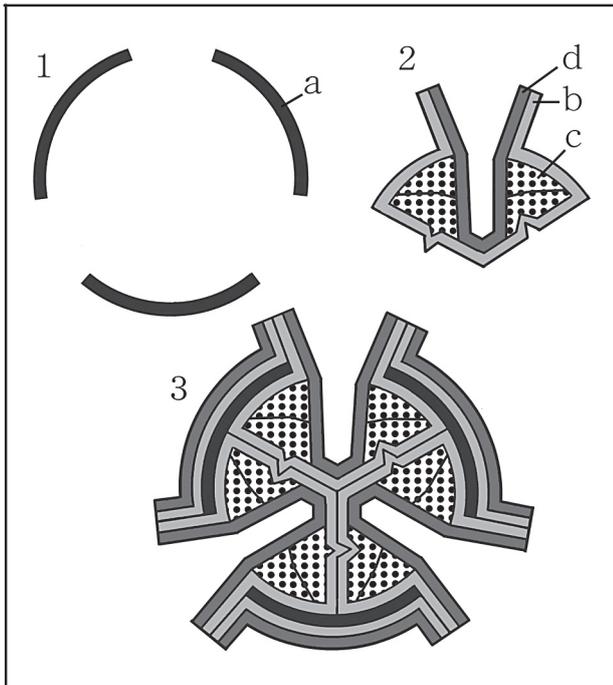


図4. 新技法の応用技法。(1) 型取り前, (2) 脱型後の型の1つ (基本モデル), (3) 3つの型による型取り (応用モデル), (a) 3つの開口部を持つ中空構造の断面, (b) ゴム型, (c) プラグ, (d) 支持型。

介して間接的に定位置に固定される。図3-5では、支持型の枝は、ゴム型に間接的に連結している。そして、支持型の枝とゴム型の間に連結する複数のプラグは、ゴム型の開口部から取り出せる大きさで (図3-6)、中空構造内で分解・組み立てが可能である (図3-7)。

型取りの手順

新技法による型取り手順は、おおまかに、標本処理→ゴム型作成→プラグ作成→支持型作成の順で行われ、従来の型取り技法と全く同じであるが、新しい型の仕掛けを作るための細かな手順がゴム型とプラグの作成時に加わっている。

ゴム型作成の最初の段階では、型設計にしたがい頭蓋の内部空間を粘土の壁により分割する。そして、この分割面にキーを刻印して3つのゴム型が頭蓋の内部で連結するようにする。分割面と標本表面をワセリン等で離型処理し、シリコンゴムとガーゼを積層してゴム型を作る。ゴム型の内部空間と開口部の形や大きさを十分に考慮し、プラグの連結体を設計する。この際、支持型の枝の形も考慮に入れながら行う。プラグとゴム型の連結をより強くしたい場合には、ゴム型の内部表面にキーなどを取り付ける。ワセリンと錫箔によりゴム型の内部表面を離型処理し、パテ状にしたシリコンゴムとパーミキュライトの混合物を設計通りに盛ってプラグを作る。プラグは複数作ることになるので、一つずつ離型処理を行う。最後に作るプラグは、脱型時に最初に外すプラグになるので、外しやすい形になるように

作る。プラグ表面の離型処理後、樹脂剤と強化材を積層して支持型を作る。以上の作業を繰り返す。

型の材料

支持型：主剤として不飽和ポリエステル樹脂リゴラック (昭和高分子株式会社)、硬化触媒としてパーメックN (日本油脂株式会社)、強度強化材としてガラスマットを使用している。増粘するために副資材のアエロジル (日本アエロジル株式会社) も使用している。

ゴム型：主剤シラスコンRTV 8600、硬化剤キャタリスト (東レダウコーニング株式会社)、補強材にガーゼを使用している。このシリコンゴムは、伸縮性に優れており破損もしにくいので、狭い開口部から引き抜くことが容易である。

プラグ：パーミキュライト A-1 (ひる石、旭工業株式会社) とシリコンゴム (シラスコンRTV 8600) の混合物をパテ状にして使用する。硬化後は、ある程度の柔軟性を残しながらも支持体として十分な強度になる。

離型方法：錫箔 (厚さ7mμ) とワセリンを使用している。

適用結果

新技法の適用の結果、標本にほとんど負担を掛けることなく、安全に型取りすることができた。そして標本から外されたゴム型は、再び組み上げた時にもしっかりと固定され、形状も復元されて、自重による変形もみられなかった。そのため、複製も元の標本とほぼ同じといえる精度のものができるようになった (図3-8)。元の標本と複製のサイズの違いを前頭骨の厚さ、後眼窩骨の厚さ、頭蓋全長でみるとそれぞれ100 : 92.6, 100 : 98.2, 100 : 99.6 という値となった。使用した樹脂剤の収縮率が6~9%もあるため (昭和高分子株式会社, 1997)、複製が収縮することは避けられないが、副資材などの使用により複製の収縮率はそれよりも小さく押さえられた。

従来の技法との違い

頭蓋の奥まった空間や中空構造を複製するための技法は、これまでにいくつかが紹介されている (Quinn, 1940; Murrill and Wallace, 1971; Parsons, 1973; Schrimper, 1973; Waters, 1983; Smith and Latimer, 1989)。それらの技法は新技法も含めて、奥まった空間を複製するという点で同じであるが、それぞれ異なる特徴を持ち、その特徴に応じて適用対象も若干異なっている。したがって、それらの適用範囲は重なるところもあればそうでないところもある。そのため、従来の技法と新技法の違いは、両者の適用範囲が重ならない新技法のみの適用例を対象に両者を比較するとより明確になる。以下は従来の技法と新技法の違いである。

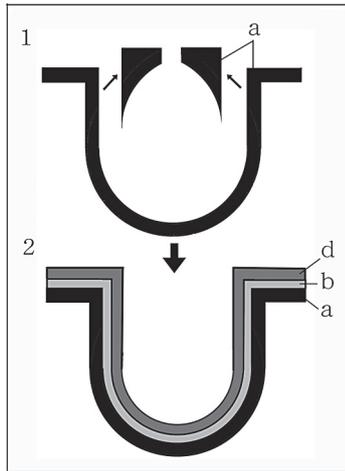


図5. 技法1. (1) 型取り前, (2) 型取り時, (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型, (d) 支持型.

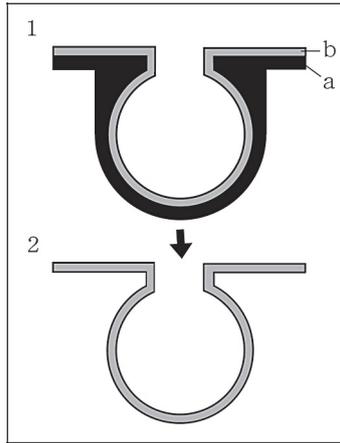


図6. 技法2. (1) 型取り時, (2) 脱型後, (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型.

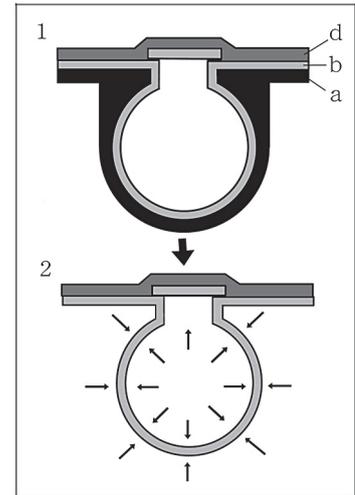


図7. 技法3. (1) 型取り時, (2) 脱型後, (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型, (d) 支持型. 小さい矢印は空気圧の方向を示す.

技法1 (図5)

Quinn(1940)は、大型走鳥類 *Mesembriornis* の頭蓋化石の型取りに際して、型取りの障害となる開口部のオーバーハング(頬骨弓と方形骨)を頭蓋から外して、別々に型取りした。この技法は、複雑な頭蓋を単純な形に分解して型取りするので、より簡単に正確な複製が行える。しかし、この技法を適用する場合、標本の分離が前提である。型取りの障害となる部分がたまたま初めから分離している特殊な場合でなければ、結果として標本を損傷させることになる。これに対し、新技法ではオーバーハングしている部分を分離させる必要はない。

技法2 (図6)

Murrill and Wallace(1971)は、ヒトの頭蓋の小さな後頭孔から、印象剤のみを頭蓋腔に薄く塗布して型取りした。しかし、支えのない柔軟なゴム型はそのサイズがプロトケラトプス頭蓋の場合のように大きくなると、自重のために形状を維持することができなくなり、正確な複製が得られにくい。これに対し、新技法ではゴム型を支持型の枝とプラグが支えているので、自重によるゴム型の形状の変化を防ぐことができる。

技法3 (図7)

Schrimper(1973)は、ゴム型の内部に空気が閉じ込められたエアポケットを作り、パンダの側頭窩を型取りした。この技法は、パンダの側頭窩のようなオーバーハングの小さい比較的浅い窪み構造の型取りに適している。しかし、プロトケラトプス頭蓋のように開口部のオーバーハングが大きくなると、このゴム型を取り外す際に、化石に大きな負担を掛けることになる。また、このエアポケッ

トのサイズが大きくなれば、エアポケット状のゴム型は自重による変形や気圧の変化による変形を免れ得ず、正確な複製が期待できない。これに対し、新技法ではゴム型を小さくして取り外した後に、自重や気圧の変化に影響されずゴム型の形状を復元する。

技法4 (図8)

Parsons(1973)は、ヒトの頭蓋腔を型取りするために、ゴム型内に空気穴付きのエアポケットを作った。ゴム型を外す際には、空気穴から空気を抜いて、ゴム型を小さくし、標本への負担を小さくして取り出した。型を復元する際には逆に空気穴から圧縮空気を送り、空気圧によってゴム型の形状を保持し、これにより極めて精密な複製を可能にした。しかし、この技法は圧縮空気を送り込む装置を必要とするため、大掛かりでコスト高となる。また、ヒトの頭蓋腔のように、ゴム型がほぼ球状であるならば、これを圧縮空気により再現することは難しくない。しかし、プロトケラトプス頭蓋のゴム型のような扁平なゴム型は、ところどころに平面や凹面になる部分を持っており、自重を支えられるだけの圧縮空気を送る前に、この平面や凹面が凸面に変形して形状の再現が不可能となる。これに対し、新技法ではゴム型は支持型の枝とプラグにより支えられるため、ゴム型の平面や凹面は容易に再現される。

技法5 (図9)

Smith and Latimer(1989)は、雄のテナガザルの頭蓋の型取りに際して、眼窩を覆うゴム型の窪みに石膏のプラグを埋め込んだ。この技法は、支持型では支えきれないゴム型の小さな凹凸を支持するためによく使用されている。しかし、プロトケラトプス頭蓋のような、オーバーハング

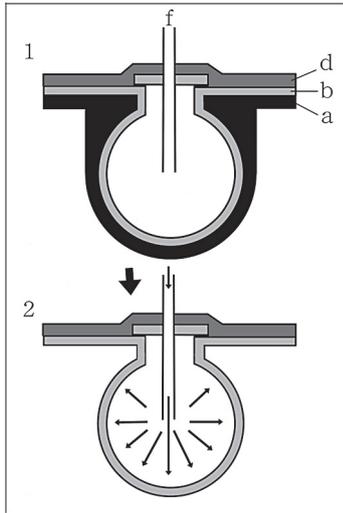


図8. 技法4. (1) 型取り時, (2) 脱型後. (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型, (d) 支持型, (f) 空気穴. 小さい矢印は空気圧の方向を示す.

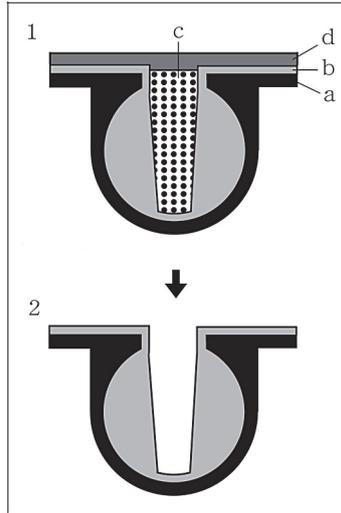


図9. 技法5. (1) 型取り時, (2) 標本からゴム型が外れなくなった脱型時. (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型, (c) プラグ, (d) 支持型.

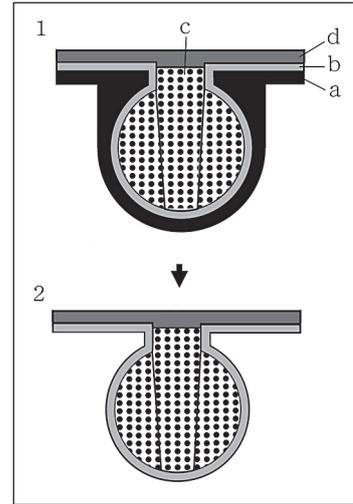


図10. 技法6. (1) 型取り時, (2) 脱型後. (a) 中空構造を持つ標本の断面, (b) ゴム型, (c) プラグ, (d) 支持型.

が大きく奥行きのある中空構造を型取りするためには、この技法は不向きである。まず、石膏プラグは柔軟性がないので、これでオーバーハングを埋めるとプラグが外せなくなる。それを避けてゴム型をオーバーハングが無くなるまで分厚くすると、今度はゴム型が標本から取り外せなくなり(図9-2)、標本に大きな負担を掛けることになる。また、支えのない大きなプラグは、その重さがゴム型の変形を招きやすくなる。これに対し、新技法で使用されるプラグは、バーミキュライトとシリコンゴムの混合物で支持体として必要な強度を持ちながら柔軟性がある上、開口部より小さなサイズからできているので、標本に負担を掛けない。また、プラグは支持型の枝により定位置に固定されるので、その重さによりゴム型の変形が起りにくい。

技法6 (図10)

Waters(1983)は、組み合わせ複数のプラグの使用について述べた。これは、よく使われる技法で、ある程度の深さやオーバーハングを持った窪みでも、標本に負担なく型取りすることができる。しかし、プロトケラトプス頭蓋のように極端に深い窪みや大きな中空構造に対しては、複数のプラグの連結体は、それら自身が大きく重くなり支えも無いので、その自重がゴム型を変形させる。これに対し、新技法では支持型から枝を伸ばしてプラグの構造体を支える。

以上のように、従来の型取り技法は、プロトケラトプス頭蓋のような開口部サイズよりも大きく深く扁平な中空構造に対して、標本に大きな負担を掛けてしまったり、ゴム型の形状の再現性が得られなかったりする。一方、新技法はこれらを解決する構造と機能を持っており、これまでの技法では複製が困難な深くぼみや中空な内部構造

を持った化石をより正確により安全に複製できる技法である。

おわりに

本技法には従来の技法と同様に適用限界がある。たとえば、内部空間が開口部に対し側方方向に大きく広がって著しいオーバーハングになっている場合がその一例である。本頭蓋で示すなら、広く扁平な中空構造を眼窩口だけから型取りするような場合である。

本技法では、支持型とゴム型の分離を容易にするため、支持型本体とその枝がオーバーハングしないように作られている。このような構造的な制限があるため、内部空間が開口部に対し側方方向に大きく広がっている場合には、支持型の枝を側方に広がったゴム型へ伸ばすことができない。そうすると、プラグによる間接的な支持に頼ることになるが、側方へのオーバーハングが大きければ大きい程プラグの自重も増すため、ゴム型を十分に支持できなくなる。これまで実際にそのような型取りが必要な頭蓋に出会ったことはないが、この場合には、支持型とその枝を脱着可能な別々の部品に分けるとすることが必要となるであろう。

このように、本技法には改良の余地がある。今後も、これらの技法をベースにして更に適用範囲の広い技術が開発され、現在では困難と思われる複製が将来可能になることを期待したい。

謝辞

原稿をまとめるにあたり、林原自然科学博物館の石井健

一館長と石垣 忍副館長，林原生物化学研究所，古生物学研究センターの鈴木 茂所長と渡部真人博士には，有意義なご指摘を頂いた。以上の方々に御礼を申し上げます。

文献

- Goodwin, M. B. and Chaney, D. S., 1994. Molding and casting: techniques and materials. In Leiggi, P. and May, P., ed., *Vertebrate paleontological techniques*, **1**, 235-271. Cambridge University Press.
- Murrill, R. I. and Wallace, D. T., 1971. A method for making an endocranial cast through the foramen magnum of an intact skull. *American Journal of Physical Anthropology*, **34**, 441-446.
- Parsons, K. C., 1973. Precision casting: A new method in museum technology. *American Journal of Physical Anthropology*, **38**, 789-802.
- Quinn, J. H., 1940. Rubber molds and plaster casts in the paleontological laboratory. *Field Museum of Natural History, Technique Series*, **6**, 3-21.
- Schrimper, G. D., 1973. Hollow casting of fossil skulls in epoxy plastic. *Curator*, **16**, 286-305.
- 昭和高分子株式会社. 1997. Rigolac 不飽和ポリエステル樹脂.
- Smith, J. A. and Latimer, B. M., 1989. A method for making three-dimensional reproductions of bones and fossils. *Kirtlandia*, **44**, 3-16.
- Waters, P. H., 1983. A review of the moulding and casting materials and techniques in use at the Palaeontology Laboratory. *Conservator*, **7**, 37-43.

