恐竜ハドロサウルス類の教育用頭蓋骨模型

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・**林原美術館

An educational cast of hadrosaurid dinosaur skull

Yukihide Matsumoto* and Ryo Hashimoto**

*Center for Paleobiological Research, Hayashibara Biochemical Laboratories, Inc., 1-2-3 Shimoishii, Kita-ku, Okayama 700-0907, Japan (y-mts@hayashibaramuseum.jp); **Hayashibara Museum of Art, 2-7-15 Marunouchi, Kita-ku, Okayama 700-0823, Japan (gakugei@ hayashibara-museumofart.jp)

はじめに

本解説は恐竜ハドロサウルス類の頭蓋骨の構造と機能 について学習するための頭蓋骨模型の紹介である.この 模型は一般向けの教育用標本として製作されたもので, 精巧な模型をそのまま使用しており,研究にも使える精 度の骨格標本である.

ハドロサウルス類やイグアノドン類などの鳥脚類の頭 蓋骨は、多くの骨が癒着しないで互いに動けるように関 節しているため、咀嚼の際に変形することが可能である (Weishampel, 1983; Alexander, 1989). この特徴を説明 するために、これまでは、頭蓋骨の概念図や骨格の一部 分を示した模式断面図などの平図面が使われてきており、 立体的な骨格標本が利用された例は著者らの調べた範囲 では見当たらない.しかし,二次元で示したこれらの図 でハドロサウルス類の頭蓋骨の実際の三次元の構造や動 きを理解することは簡単ではない. 例え頭蓋骨そのもの を用いても平面図にすればそれは同じである.実際,ハ ドロサウルス類の頭蓋骨を関節した状態とばらばらになっ た状態の2つを一緒に並べて二次元で図示して見せても (図1),その特徴を説明しきれない.それどころか,個々 の骨が関節した状態では骨と骨が重なり合う部分が生じ るため、各骨がそれぞれ関節面をむき出しにした状態で 図示したものから得られるイメージとは随分と異なる. そのため、2つが同じものであることさえすぐに納得で きるものではない.ましてやこれらの骨の関節の仕方や 相対的な動き・機能の理解は更に難しい.

こうした問題は、三次元の模型を作製することで随分 解消される.ジグソーパズルをする時の様にばらばらの 骨を1つ1つよく観察しながら組み立ててみると、2つの イメージが1つに結びつき、それまで気付かなかった骨 の細部の役割までよく理解できるためである.そこで、 著者らは誰にでもハドロサウルス類の頭蓋骨の特徴が学 べるように、組立・解体が自在な頭蓋骨模型を考案した. 以下にその特徴と作り方を記した.

なお、本模型は特許出願され2006年3月16日に国際公



図1. ハドロサウルス類の頭蓋骨の模型. 奥は組み立て骨格,手前 は組み立て前のばらばらな骨格. 全部で27個の部分からなる.

開されている(国際公開番号WO 2006/027991 A1).また,本模型は表1に示す展示会で実際に使用された.

表1. 展示実績.

展示会名称	展示会場	展示期間
ダイノソアファクトリー	東京都江東区有明パナソニックセンター東京	2002年9月14日~2006年5月14日
ダイノパーツラボ	長野県佐久市こども未来館	2010年3月13日~5月5日
特別展示ダイノパーツラボ	岡山県高梁市文化交流館	2010年6月5日~6月13日
特別展示ダイノパーツラボ	岡山県立児童会館	2010年6月19日~6月27日
ダイノパーツラボ	広島市こども文化科学館	2010年7月17日~8月31日
ダイノパーツラボ	新潟県立自然科学館	2010年9月11日~10月11日
有明恐竜WEEKS!	東京都江東区有明パナソニックセンター東京	2010年12月11日~2011年1月9日
ダイノパーツラボ	東京都西東京市多磨六都科学館	2011年3月5日~4月17日
ダイノパーツラボ	栃木県さくら市ミュージアム	2011年7月16日~9月4日

期待される教育効果

本模型の組み立て体験を通じて期待される効果には, 以下のようなものが挙げられる.

- (1) 爬虫類の頭蓋骨が沢山の骨で構成されていることが 理屈としてだけでなく実感できる.
- (2) 頭蓋骨全体の中での各骨の位置付けや方向が空間的 にとらえられ、これにより組み立てられた時とばらば らの時の2つの状態が同じ頭蓋骨としてイメージでき る.
- (3)関節の仕組みが分かり、1つ1つの骨を見るだけで は判別できなかった各骨の関節面とそれ以外の面の区 別がはっきりとする.
- (4) 関節面の形状から,可動の関節やほぼ不動の関節な どがあることが分かり,これにより動きの仕組みも分 かる.
- (5) 外側に位置する着脱自在の骨が外された状態では, 外された骨はもちろん, 頭蓋骨の内側にある固定され た骨もよく観察できる.
- (6)各骨が様々な角度から詳細に観察でき,骨の厚さな どの三次元的な構造が分かるため,頭蓋骨のどこが弱 くどこが強化されていたのかがよく分かる.
- (7)限られた研究者や技術者にしか体験できない恐竜復 元の追体験ができる.
- (8)研究用の模型を使用していることから,研究者に とっても新たな気付きや発見が期待できる.

模型の概要と材料

本模型は磁力により着脱自在な頭蓋骨部品からなる樹 脂製の組み立て式頭蓋骨模型である(図2-A).本模型の 大きさは型取りした原標本と同一で,全長26 cm,高さ 15 cm,幅15 cmであり,重さは570 グラムである.頭蓋 骨の外側表面を形成する骨のうち,合計10 個の骨,8つ の部位(前歯骨,右下顎骨,左右の涙骨&前前頭骨,左 右の後眼窩骨,左右の頬骨)が着脱可能である(図2-B). その他の骨は関節させた状態で固定してある.全ての骨 を着脱自在にしなかった理由は,初心者に対し組み立て が難しくなりすぎないように着脱部位を最小限度にとど めたためである.

着脱させる骨に強力な磁石あるいは一部相手方に金属 薄片を装着し,骨の繰り返しの着脱を可能にした.関節 する2つの骨の関節位置が正しい場合にのみ関節が固定 されるよう磁石や金属薄片が装着されている.

原標本

模型製作に使用した原標本は,1995年7月にモンゴル 中央ゴビ東部のBayshin Tsavで発見された全長3mのハ ドロサウルス類の亜成体である(林原自然科学博物館標 本番号96-12-82,83,84)(Matsumoto, et al.,2000). 骨格 全体の約95%が保存されたほぼ完全な全身骨格標本で, 頭蓋骨もほとんどの骨が保存されており,鋤骨と左後眼 窩骨が欠損しているだけであった.その上,本頭蓋骨は 各骨の関節が外れ散在して産出したため(図3),各骨の 詳細な記載が可能で,より完全な頭蓋骨模型が得られる 大変貴重な標本であった.これがもし関節していたら, 骨のもろさや形の複雑さから複製できる部分が頭蓋骨の 外側表面の一部分に限られてしまっていたが,本標本に おいては全ての骨がそれぞれ別々に複製できるため,個々 の骨の形状に至るまでほぼ完全に復元した模型を作製す ることができた.

型取りと模型の材料

原標本の型取りと模型に使用した材料を以下に記した. なお,型取り材料の使い方は松本(2009)に従っている.

- 型の材料:主剤シラスコンRTV8600,硬化剤キャタ リスト(東レダウコーニング株式会社).
- (2)型の離型処理:パラロイドB-72(アセトン溶液で使用),ワセリン.
- (3) 模型の材料:主剤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),樹脂硬化触媒パーメックN(日本油脂株式会社),増粘材アエロジル(日本アエロ



図2. ハドロサウルス類の頭蓋骨模型の仕組み.(a)関節が固定されたベース骨格.(b)右涙骨&右前前頭骨.(c)右後眼窩骨.(d)右下顎 骨.(e)右頬骨.(f)前歯骨.(+1~7,+1*~7*)磁石の装着位置とその番号を示し,同じ数字同士は関節する関係である.ただし,(+ 4*)には磁石でなく金属薄片が封入されている.(A)組み立てられた頭蓋骨模型.(B)Aから着脱自在な8つの部位を外して頭蓋骨の上方 から見た状態.(C)ベース骨格の右側面.(D)右涙骨&右前前頭骨の内側面.(E)右後眼窩骨の内側面.(F)右下顎骨の内側面.(G)右 頬骨の内側面.(H)前歯骨の内側面.



図3. Bayshin Tsav での原標本の頭蓋骨の産出状態. 左から右下顎 骨,右頬骨,右上顎骨,右涙骨と右前前頭骨,前上顎骨,左上顎 骨,前歯骨.

ジル株式会社),粉絵具(株式会社サクラクレパス), 焼石膏,丸型ネオジウム磁石NE032・角型異方性フェ ライト磁石EFC20123・丸型コバルト磁石COB41(株 式会社下西製作所),金属薄片.

磁石の種類と個数

本模型に用いた磁石には、小さくて薄い骨の中に装着 する必要から、小さくても強力な磁力を持つ3種類の磁 石を合計20個使用した.磁石の種類、磁力、大きさそし て使用個数は以下のようになる:

- (1) 丸型ネオジウム磁石 NE032,磁力 300 mT,径3 mm
 × 厚2 mm,14 個.
- (2) 丸型コバルト磁石COB41,磁力150mT,径4mm× 厚1mm,4個.
- (3)角型異方性フェライト磁石 EFC20123,磁力90mT, 20mm×12mm×厚3mm,2個.

模型の作製法

頭蓋骨模型は、(1)一次模型の作製と組み立て、(2)二 次模型の作製と組み立て、の二段階を経て作製される.

一次模型の作製と組み立て

模型作製に先立ち,原標本に欠損していた2つの骨の うち,左後眼窩骨を産出した右側を参考に紙粘土で彫塑 した.一方,鋤骨は形状が不明であるために模型を作製 しなかったが,これは頭蓋骨全体の形状には大きく影響 しない.

欠損部を彫塑した後に型取りを行った.型取りには, Chaney (1989)のmultipiece moldと呼ばれる手法を用 いた.この技法による型(mold)は2つ以上の分厚いシ リコンゴムの板からなるが,これらのシリコン型には模 型の材料(樹脂)を流し込むための流し込み口と型内に 閉じ込められた空気を排出するための排出口がついてい ることから, pour mold (Goodwin and Chaney, 1994) に 分類することもできる.

頭蓋骨の全ての骨を型取りするために,全部で25個の 型を作製した.そして,その型に焼石膏やアエロジルな どを混合した不飽和ポリエステル樹脂を流し込んで一次 模型を作製した.

各骨の模型が完成したら頭蓋骨の復元が可能かどうか を実際に組み立てて確認した. 頭蓋骨は多くの骨が互い に複数の骨と隙間なく関節して立体的な形をなしている ので、化石化の過程で変形が生じるとお互いがうまく関 節できず、組み立てが困難になる、そのため、組み立て られるかどうかは実際にやってみないとわからないこと が多い.しかし、幸い、今回作製した模型はなんとか組 み立てることができた(松本,2006).原標本の頭蓋骨の 個々の骨は関節して産出した胴部の骨に比べて見た目の 変形が少ないが、これは関節が外れて互いが重なること なく埋没したことにより,変形が最小限にとどめられた ことを示すのかもしれない. もし骨の変形が著しく頭蓋 骨がうまく組み立てられない場合は、各骨の変形を修正 する必要がある.本模型の原材料である不飽和ポリエス テル樹脂のように熱可塑性の材料を使用していれば, ヒー トガンなどで過熱して曲げやすくすることである程度の 修正が可能である.

二次模型の作製と組み立て

前述の一次模型の組み立てに基づいて,二次模型の仕 組みや構造の詳細を決め,磁石の装着と着脱テストを行っ た(図4,5).磁石と金属薄片の装着位置は,骨同士を関 節で着脱させるために,関節部位とした.ただし,例外 的に右下顎骨と右上顎骨には関節以外の部分にも磁石を 装着した.その理由は下顎骨を正しい位置にしっかりと 固定するためである.また,頬骨の上顎骨との関節部位は 薄くて磁石を装着できないため,磁石の代わりに金属薄 片を装着することにした.その他の骨には全て磁石を装 着し,骨の関節部位の厚さ・大きさ・形状そして骨の重 量に応じて装着する磁石の種類を決めた.

一次模型の作製に用いたシリコン型を用いて各骨の模型を再び作製した.大きなフェライト磁石と金属薄片を 装着する骨の模型作製では,樹脂の流し込みと磁石・金 属薄片の装着を同時に行った(図4).その際,磁石や金 属薄片が模型の表面から見えないよう気を付けて装着した.その他の小さな磁石の装着は,模型の完成後に装着 位置に磁石の厚さ+約1mmの深さの小さな穴を作って 磁石を埋め込み樹脂で厚さ約1mmのふたをするという 方法で行った(図5).これらの磁石の大半は骨の関節部 位に装着されるが,関節の邪魔にならないように、かつ, 関節の形状ができる限り損なわれないように関節面下に 埋め込まれた.この際,磁石のN極とS極の対応に配慮



図4. 右上顎骨外側面下へのフィライト磁石の封入テスト.半透明 な樹脂を使用しているので、磁石が透けて見え、装着の状態が分 かる.矢印が埋め込み位置を示す.



図5. 右涙骨内側面への磁石の埋め込みテスト. 矢印が埋め込み位 置を示す.

が必要である.

なお,各骨に装着した磁石・金属薄片とその装着位置 などの詳細は以下のようになる.

- (1)右上顎骨:右頬骨との関節面にフェライト磁石(図 2-C-4),右涙骨との関節面にネオジウム磁石(図2-C-3),右下顎骨筋突起を固定するため右上顎骨外側面の 後方部にコバルト磁石(図2-C-5)を装着.
- (2) 右頬骨:重さ約22グラム.右上顎骨との関節面に金 属薄片長さ20mm×幅12mm×厚1mm(図2-G-4*)を 装着.
- (3)右涙骨&右前前頭骨:重さ約11グラム.右涙骨の右 上顎骨との関節面にコバルト磁石(図2-D-3*),右前前 頭骨の前頭骨右側との関節面にネオジウム磁石(図2-D-2*)を装着.
- (4) 右後眼窩骨:重さ約11グラム.前頭骨右側との関節 面にネオジウム磁石(図2-E-1*)を装着.

- (5)前頭骨右側:右前前頭骨との関節面にネオジウム磁石(図2-C-2),右後眼窩骨との関節面にネオジウム磁石(図2-C-1)を装着.
- (6) 右下顎骨:重さ約120グラム.前歯骨との関節面に ネオジウム磁石(図2-F-7),下顎骨筋突起(coronoid process)の内側面にコバルト磁石(図2-F-5*)を装着.
- (7) 前歯骨:重さ約11グラム. 左右の下顎骨との関節面 にネオジウム磁石(図2-H-6*,7*)を左右1個ずつ装 着.
- (8) 左上顎骨: 左頬骨との関節面にフェライト磁石, 左 涙骨との関節面にネオジウム磁石を装着.
- (9) 左頬骨:重さ約22グラム.左上顎骨との関節面に金 属薄片長さ20mm×幅12mm×厚1mmを装着.
- (10) 左涙骨&左前前頭骨:重さ約11グラム. 左涙骨の 左上顎骨との関節面にコバルト磁石,左前前頭骨の前 頭骨左側との関節面にネオジウム磁石を装着.
- (11) 左後眼窩骨:重さ約11グラム.前頭骨左側との関 節面にネオジウム磁石を装着.
- (12)前頭骨左側:左前前頭骨との関節面にネオジウム 磁石,左後眼窩骨との関節面にネオジウム磁石を装着.
- (13) 左下顎骨:前歯骨との関節面にネオジウム磁石(図 2-C-6)を装着.

全ての骨の模型製作と磁石・金属薄片の装着が終わったら,着脱自在の骨を除く全ての骨を組み立て,それぞれの関節を樹脂で接着固定して完成である.

模型作製の意義

今回紹介した模型作製に用いた原標本は, 頭蓋骨の関 節が外れた状態で産出したために各骨の特徴が細かく観 察でき,関節していては分からないハドロサウルス類の 頭蓋骨の特徴を検証できる数少ない貴重な標本であった. 骨化石としての学術的な重要性に加え,本稿で紹介した 模型の作製によって,教育的な価値も高められたのでは ないかと考える.恐竜を専門とする研究者など,文献等 でハドロサウルス類の頭蓋骨の構造と機能について一定 の知識がある人々であっても,本模型の組み立てを体験 した時に得られる情報には知的感動を覚えるに違いない. そのような貴重な標本であるが,同じものを複数作るこ とが可能で,本物の化石と違い軽くて扱いやすく,壊れ ても作り直せるので,一部の専門家や技術者だけでなく, 他の多くの人々にも役立てられることを期待している.

本模型は非専門家を対象に製作されたため、ハドロサ ウルス類の複雑な頭蓋骨構造を理解しやすくするために、 取り外せる骨を少な目に製作された.今後は更に深く理 解してもらうために、全ての骨を着脱自在にしたり、よ り幅広い年齢層に利用しやすいように壊れにくい樹脂を 模型の材料として使用したりするなどの改良が必要であ ろう.

謝辞

本解説は東京学芸大学の佐藤たまき氏に査読していた だいた.また,本解説で紹介した頭蓋骨模型を作製する ための材料は株式会社林原自然科学博物館から提供され た.以上の方ならびに関係者に深く感謝する.

文献

- Alexander, R. M., 1989. *Dynamics of Dinosaurs and Other Extinct Giants*. 164p., Columbia University Press, New York.
- Chaney, D. S., 1989. Mold making with room temperature vulcanizing silicone rubber. *In* Feldman, R. M., Chapman, R. E. and Hannibal, J. T., ed., Paleotechniques, Paleontological Society Special Publication

(4) , 284–304.

- Goodwin, M. B. and Chaney, D. S., 1994. Molding, casting, and painting : techniques and materials. *In* Leiggi, P. and May, P., *ed.*, *Vertebrate Paleontological Techniques, Volume 1*, 235–271. Cambridge University Press, New York.
- 松本幸英, 2006. 化石脊椎動物の骨格仮組み用支持システムの紹介. 化石, (80), 41-46.
- 松本幸英, 2009. 椎骨化石の型取り技法について (2). 化石, (85), 63-68.
- Matsumoto, Y., Hashimoto, R. and Sonoda, T., 2000. Report of preparation works for Mongolian specimens in HMNS from March 1994 to December 1998. *Hayashibara Museum of Natural Sciences Research Bulletin*, 1, 113–127.
- Weishampel, D. B., 1983. Hadrosaurid jaw mechanics. *Acta Palaeontologica Polonica*, **28**, 271–280.

(2011年3月30日受付, 2011年5月26日受理)

