

瑞浪市化石博物館研究報告 第 50 巻, 第 3 号, 99–108, 12 figs., 1 table.
Bulletin of the Mizunami Fossil Museum, vol. 50, no. 3, 99–108, 12 figs., 1 table.
©2024, Mizunami Fossil Museum
Manuscript accepted on January 17, 2024; published on March 29, 2024.

パレオパロドキシア瑞浪釜戸標本の 3D デジタルデータ化と デジタル骨格復元の制作

河部壮一郎¹⁾・佐野瑞穂²⁾・新村龍也³⁾

- 1) 福井県立大学恐竜学研究所 〒910-1195 福井県永平寺町松岡兼定島 4-1-1
- 2) 名古屋大学大学院環境学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
- 3) 足寄動物化石博物館 〒089-3727 北海道足寄郡足寄町郊南 1 丁目 29-25

3D digitization and generation of a digital skeletal model of “Paleoparadoxiid Mizunami-Kamado specimen”

Soichiro Kawabe¹⁾, Mizuho Sano²⁾, and Tatsuya Shinmura³⁾

- 1) Institute of Dinosaur Research, Fukui Prefectural University, 4-1-1 Matsuokakenjojima, Yoshida-gun, Eiheijicho, Fukui 910-1195, Japan <kawabe_soichiro@yahoo.co.jp>
- 2) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan
- 3) Ashoro Museum of Paleontology, 1-29-25 Konan, Ashoro, Hokkaido 089-3727, Japan

Abstract

Laser scanning and X-ray CT scanning were performed on “Paleoparadoxiid Mizunami-Kamado specimen” to determine the condition of the vertebrae, right hindlimb, and skull buried in rock, which are extremely difficult to extract due to their state of preservation, to observe the interior of the skull, and to create 3D digital reconstructions of the skeleton. In addition, not only bone elements but also changes in the specimen due to the preparation process were also digitized. The digitization of the bone elements of the specimen made it possible to easily create whole-body skeletal reconstruction models, which will be a precious resource for research and educational purposes.

Key words: Paleoparadoxiidae, laser scan, X-ray CT scan, digital restoration

1. はじめに

博物館資料のデジタルアーカイブ化への取り組みやその需要は、近年より増してきており、様々な取り組みが行われている (Hollinger et al., 2013; Mitsopoulou et al., 2015; Rogers, 2016; 新村・木村, 2020; Ellwood et al., 2018; Hedrick et al., 2020; Butcher et al., 2021; 木村, 2023). 技術の発達に伴い 3D デジタルデータの取得が容易になってきていることに加え、博物館法の一部改正 (令和 4 年法律

第 24 号) により「博物館資料に係る電磁的記録を作成し公開すること」が条文に加えられたことなどから、特に化石などの博物館標本の 3D デジタルデータ化は多くの状況で促進されている。このようなデータを用いることで、より効率的に標本を観察できるようになり、学術面だけでなく教育普及的にも有用である (Rahman et al., 2012; Mitsopoulou et al., 2015; 河部ほか, 2016; 吉田, 2019; Ziegler et al., 2020; Butcher et al., 2021). また、資料保存という観点からも 3D デジタルデータは実物標本を補うものとして非常に重要な位置づけとなってきており、

今後益々求められるものになるだろう(木村, 2018). 当然, パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本についても同様の観点から, その骨格などの 3D デジタルデータを取得することでその資料としての価値をより高めることができる. さらに, デジタルデータの操作性の高さは骨格の復元にも役立つもので(Ibrahim et al. 2014; 新村ほか, 2016; 新村・小西, 2020; 三枝, 2020), より効果的に本標本の全身骨格復元を可能にする.

一方で, これまでの化石資料の 3D デジタルデータ化は, 剖出を終えた状態のものに焦点を当てたものが多い. 既に博物館で保存されている資料については, これは当然のことではあるが, 化石資料は学術研究や博物館活動に伴いその状態が変化しうる. 例えば, 資料の破壊実験, 効果的な展示を目指した演習造作を施すといったことなどが想定できるだろう. このような資料状態の変化も 3D デジタルデータ化することは可能であり, その利用の可能性は高いと思われる. あるいは, 学術的な立場からは, 発掘現場での化石の産出状況の記録, 標本として持ち帰ることの難しい足印化石といった資料の記録のために 3D デジタルデータ化は頻繁に行われている(Belvedere and Mietto, 2010; Tsukiji et al., 2018, 2019). しかし, 時間経過に伴う資料の変化を 3D デジタルデータとして記録した事例は少ない.

パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本の場合, 非常に限られた期間での発掘であったために, その発掘現場の 3D デジタルデータ化は行えなかったが, 本格的な剖出作業が始まる前に 3D デジタルデータ化ができる時間的猶予があった(Fig. 1). 化石の剖出作業の過程で, その様子は刻々と変化していき, 特に脊椎動物化石の研究では多くの場合, 最終的には個々の骨は母岩から単離される. しかし, 剖出前の化石の状態を記録しておくことは, 例えばその標本のタフォノミー的研究に欠かせない. また, 論文執筆や展示までの間にどのような作業工程を経たのかを詳細に記録することは, 後の研究に大いに役立つものとなるはずである. これまでもスケッチや写真撮影による記録が適宜なされてきたが, このような手法では複雑な三次元構造を詳細に記述することは困難であった. しかし, 近年ではレーザーสキャンやフォトグラメトリーといったデジタル手法を用いることで, 標本の大小や標本が水中といった様々な状況下に置かれても 3D デジタルデータを取得することが可能になってきている(Yamafune et al., 2017; 安藤ほか, 2018). さらに, X 線 CT スキャナを用いれば, 化石内部構造がわかるだけでなく, 母岩表面には見えていない岩石中にどのような化石がどのように含有されているかまで観察すること

ができ(Imai et al., 2019), これは化石の剖出を効果的に進めるうえでも重要な情報をもたらすものになる.

本研究は, その保存状態から剖出が非常に困難な岩石に埋没した状態の椎骨, 右後肢および頭骨の状態把握, 頭骨内部の観察, 今後制作する予定の全身復元骨格のためのデジタルデータの取得を目的にパレオパラドキシア瑞浪釜戸標本のレーザースキャンおよび X 線 CT スキャンを行った. また, 展示や講座などの博物館活動に活用するため, 剖出した個々の骨要素のデータ化だけでなく, 剖出作業に伴う試料の変化もデータ化することとした. 研究に際し Artec Leo および X 線 CT スキャナによるデータ取得および解析を河部が, Revopoint によるデータ取得および解析を佐野が担当した. また復元モデル制作を新村が行った.

2. 3D デジタルデータの取得

本研究では 3D レーザースキャナおよび X 線 CT スキャナを用いて, 骨形態のデジタルデータを取得した. レーザースキャナは対象サイズに応じ, 2 機種を使い分けた(Table 1). 比較的大型の試料には Artec Leo (Artec 3D)を用いた. 本機種は 3D ポイント正確度が 0.1 mm, 3D 解像度(最大)が 0.2 mm で, 対象サイズが 1 m 以上でも 3D 精度が 0.03%ほどである. 重量は 2.6 kg と手持ち式 3D スキャナとしては比較的重いが, 完全ワイヤレス, スタンドアロン仕様であることから作業の制約が少ないというメリットがある. さらに, データ収集速度が最大で 3500 万点/秒と短時間でデータ取得が可能である. Artec Leo で得られたスキャンデータは Artec Studio 13 (Artec 3D)を用いてメッシュデータに変換した.

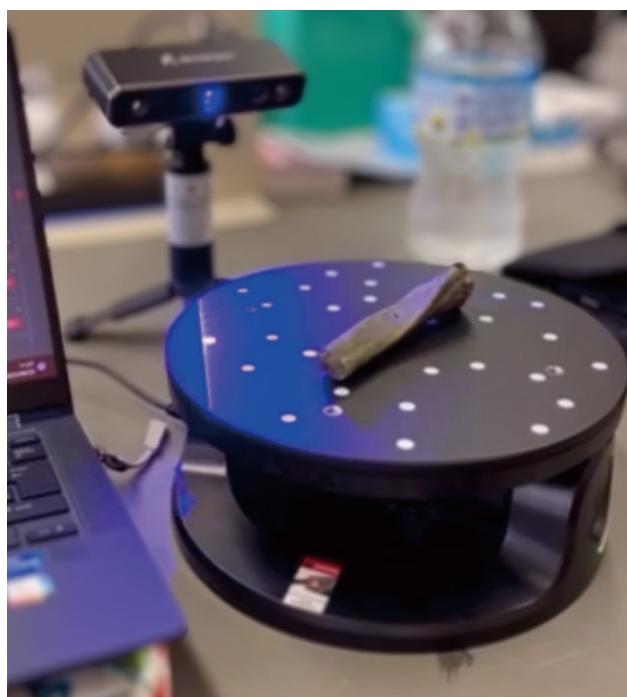


Fig. 1. パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本. 2022 年 10 月 13 日の様子.

Table 1. 3D レーザースキャンした部位と使用した機器.

部位	機器
頭骨	Artec Leo
椎骨(交連状態)	Artec Leo
胸骨(7パーツ)	Artec Leo
左肋骨	Artec Leo/ Revopoint MINI
右肋骨	Artec Leo/ Revopoint MINI
左寛骨	Artec Leo
右腸骨	Artec Leo
左大腿骨	Artec Leo
左脛骨	Artec Leo
左後足(種子骨)	Revopoint MINI
左後足(基節骨)	Revopoint MINI
右大腿骨	Artec Leo
右脛骨(近位部)	Artec Leo
右腓骨(近位部)	Revopoint MINI
右腓骨(骨幹部)	Artec Leo/ Revopoint MINI
右後足(全体)	Artec Leo
右後足(種子骨)	Revopoint MINI
尾椎	Revopoint MINI
尾椎(遠位部)	Revopoint MINI

化石の剖出過程を記録する目的で、母岩から各部位を分離する出作業が始まる前の 2022 年 10 月 13 日に最初のスキャンを行った。剖出作業が開始された後の同年 11 月 22 日に再度標本をスキャンした。さらに 2023 年 7 月 23 日に、剖出した各骨化石のデジタルデータ化のためのスキャンを実施した。この際、瑞浪釜戸標本の骨格復元の参考とするために、瑞浪市化石博物館で展示されている岐阜県土岐市泉町から産出した *Paleoparadoxia tabatai* (パレオパラドキシア泉標本) の組立て全身骨格のスキャンも併せて行った (Fig. 2)。

**Fig. 2.** パレオパラドキシア泉標本の 3D デジタル骨格モデル.**Fig. 3.** Revopoint MINI による瑞浪釜戸標本スキャンの様子.

剖出された小型試料には主に Revopoint (MINI 3D Scanner) を用いた。本機種はクラス 1 ブルーライトを照射することで、高解像度の 3D モデルを作成することができる。3D ポイント正確度は 0.02 mm, 3D 解像度(最大)は 0.05 mm で、スキャンスピードは fps10 である。スキャン対象サイズは、10×10×10 mm~500×500×500 mm. 重量は 160 g で非常に軽量である。Revopoint はパソコンやタブレット、スマートフォンを用いて Revo Scan 5 を起動し、Revopoint をワイヤレスおよび有線でそれらに接続することでスキャンを行うことができる。スキャンの進捗状況は接続したデバイスで確認する必要がある。Revopoint 本体を手持ち動かしスキャンする方法および Revopoint を三脚等で固定し、ターンテーブルを用いて標本を動かしスキャンする方法がある。前者は大きな対象物を撮影することができるが、データ取得の際の手振れにより、データ合成時にずれやノイズが生じることが多々ある。後者ではスキャン対象の大きさが直径 20 cm ターンテーブルに乗るものという制約はあるが、手振れが起こらず、より高精度なデータを得ること可能である。このため、本研究ではターンテーブルを用いてスキャンを行った (Fig. 3)。得られたスキャンデータは Revo Scan 5 (5.2.0) を用いてメッシュデータに変換した。また、メッシュデータの編集には CAD ソフト Rhinoceros (Robert McNeel & Associates) を用いた。上述の Artec Leo と共に、2023 年 7 月 23 日にスキャンを行うとともに、追加で 8 月 22 日にもスキャンを行った。

X線 CT スキャンは Aquilion Lightning (キャノンメディカルシステムズ株式会社) を用いて, 2023 年 5 月 17 日に福井大学医学部先進イメージングセンターで行った. 頭頸部, 右後肢, 胸椎部, 胴腰椎部をスキャンした (スライス厚: 0.5 mm; 電圧: 100–120 kV; 電流: 250–350 mA; ボクセルサイズ: 0.65–0.839 mm × 0.5–0.3 mm). CT データの編集およびセグメンテーションには Amira 3D Version 2023.1 (サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社) を用いた.

3. データ解析

3D レーザースキャナによるデータ取得では, 上述のように試料サイズに応じて機器の使い分けを行った. 例えば, 右腓骨の骨幹部は Artec Leo および Revopoint でスキャンを行ったが, 前者では限られた時間内で 3D データを制作できるだけの満足なスキャンが行えなかった. この試料は太さ 1.5 cm 程, 長さ 8 cm の棒状であり (Fig. 4), Artec Leo の仕様からはかならずしも小さすぎるものではない. しかし, 机などの平面に置きスキャンをする場合には, 試料とステージが同一化しやすくデータの分離が難しくなる. ある試料中の 1 cm 程度の凹凸を正確に記録することは難しくないが, 1 cm 程の物体をスキャンする場合は設置方法などを工夫する必要がある.



Fig. 4. 右腓骨の骨幹部の 3D デジタルモデル.
スケールは 1 cm.

一方で, 本格的な剖出前の状態スキャンでは Artec Leo の機能が大いに役立った. 完全スタンドアロンであることから, 試料に周りこみ様々な角度からスピーディーにスキャンできた (Fig. 5A). 右側肋骨が取り除かれる前後の様子を記録でき (Fig. 5B), 堆積物中における骨試料の三次元的な位置関係をより正確にデータ化することができた.

個々の骨要素のスキャンでも, 詳細な 3D 情報を取得できた. 例えば, 右肋骨には蔓脚類 (フジツボ)

化石が多数付着しているが, その様子も記録できた (Fig. 6). 胸骨要素の細かな凹凸も明瞭に見え (Fig. 7), 骨学的な研究においても十分に用いることのできる質のデータであると思われる.

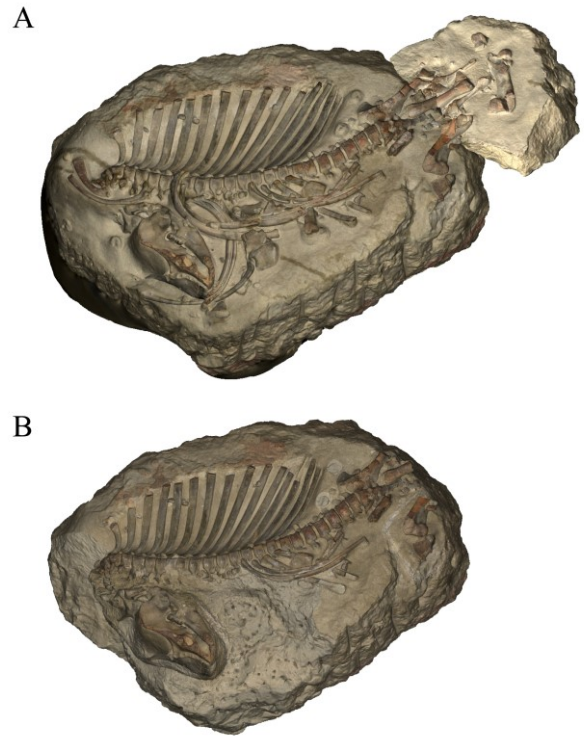


Fig. 5. Artec Leo (Artec 3D) を用いて撮影した瑞浪釜戸標本の 3D デジタルモデル. **A**, 2022 年 10 月 13 日の状況. 左後肢部が含まれているブロックはデジタル状態で本体部に組み合わせている. **B**, 2022 年 11 月 22 日の状況.



Fig. 6. 右第 6 肋骨の 3D デジタルモデル.

X線 CT スキャンでは、堆積物と骨部とのコントラスト差が十分に得られ、良好なデータを得ることができた。頭頸部をCTスキャンした際は、頭部腹側や口腔、鼻腔内は堆積物に充填されており、また頸部は堆積物により完全に覆われている状態であったが (Fig. 8A, B), セグメンテーションにより上顎, 左右下顎, 舌骨, それぞれの頸椎に分離することができた (Fig. 8C, D). 舌骨は, 左右のものがCTスキャンによってはじめて確認でき, ほぼ生前の位置に保存されていることが明らかになった. このように, CTスキャンにより頭部骨格の三次元的な位置関係を記録することができた. さらに鼻腔内には非常に薄い構造である鼻甲介がほとんど壊れることなく保存されていることも観察できた (Fig. 9). また, 脳函内部の頭蓋腔などの空洞構造も明瞭に認識できた (Fig. 9).

右後肢については脛骨および腓骨の遠位端, 踵骨, 距骨, 舟状骨, 立方骨, 外側楔状骨, 中間楔状骨, 4つの中足骨, 第4基節骨, 5つの種子骨にデジタル上で分離することができた (Fig. 10). 胸部から腰部にかけては, それぞれの椎骨, 仙椎, 左右の腸骨に分けられた (Fig. 11). 頭部や右後肢, 椎骨要素の多くは, 本章執筆時点で物理的な剖出による分離ができていないが, CT データを用いることでデジタル的に各々の形態を詳細に観察できるように

なった. 特に, 頭部の舌骨や右足部の種子骨は標本表面に露出しておらず肉眼で観察できないが (Figs. 8, 10), CT データからこれらの形態情報を得ることができた. なお, 頭骨及び椎骨剖出の際は本研究で得られたCTデータを参考に作業が進められた. 岩石中の骨格の状態を予測しながら作業を実施した結果, 骨格自体の破損がほとんどなく剖出を行うことができた.



Fig. 7. 胸骨の3D デジタルモデル.

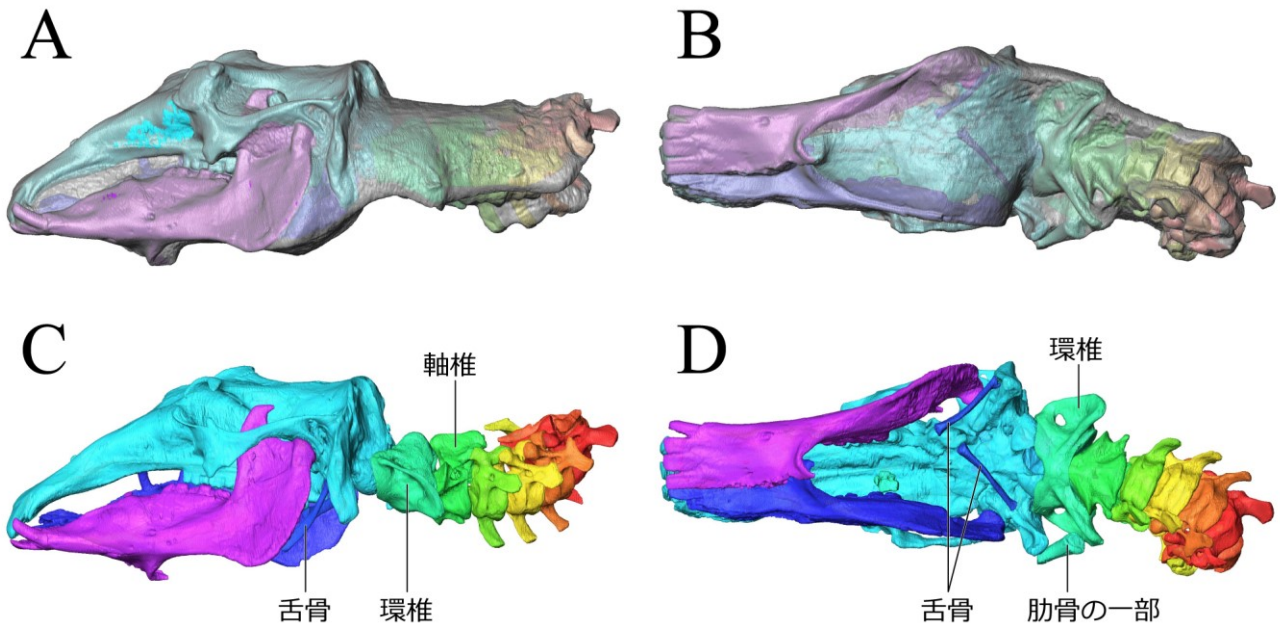


Fig. 8. 頭部の3D デジタルモデル. A, B, 堆積物が残っている状態. C, D, 堆積物をセグメンテーションにより取り除いた状態.

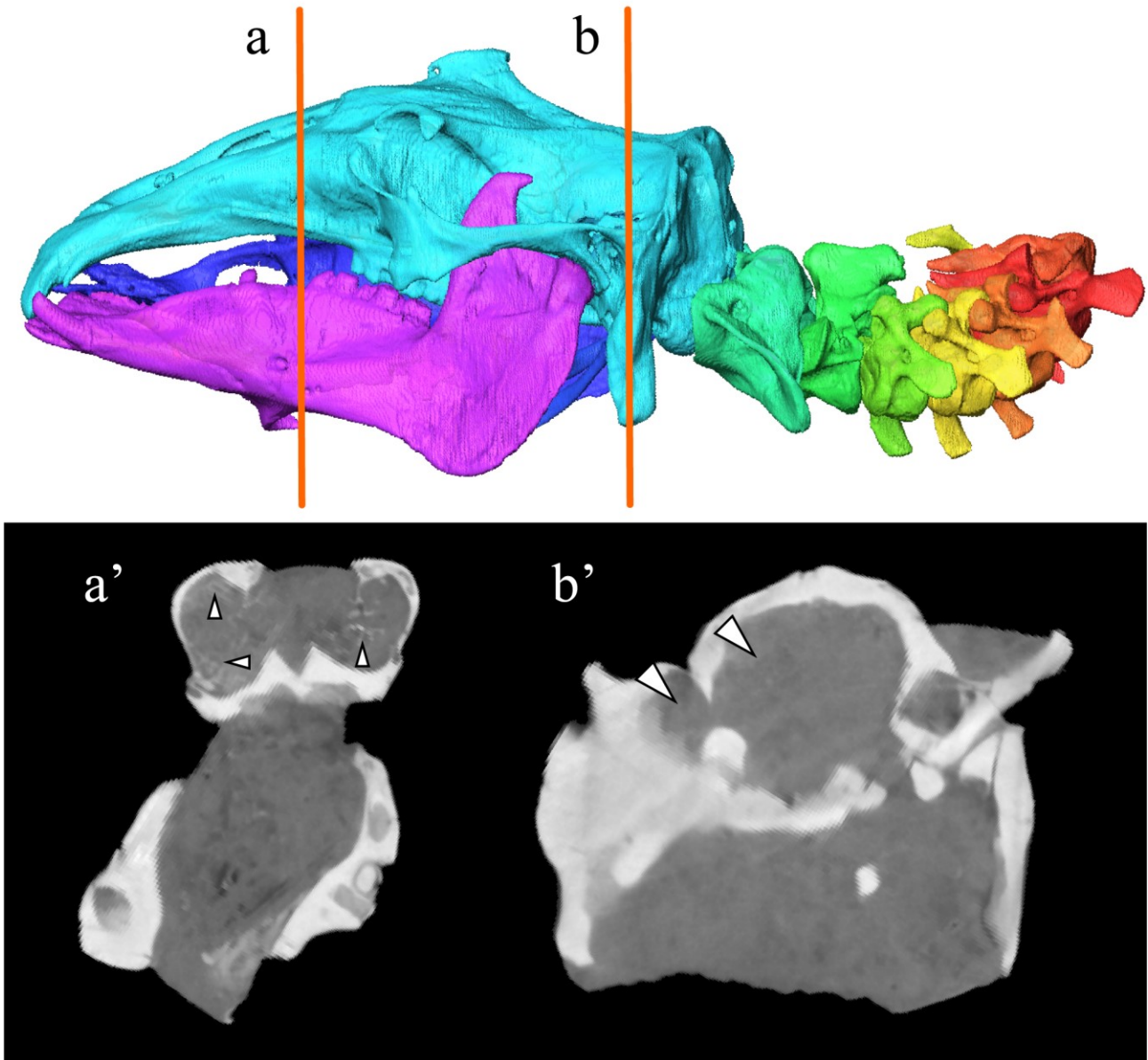


Fig. 9. X 線 CT スキャンで得た断層画像とその位置を示した頭部の 3D デジタルモデル. 小矢印: 鼻甲介; 大矢印: 頭蓋腔.

4. 骨格復元

デジタル上での骨格の組み上げ, 編集は ZBrush を用いた. 頭部は, 右上顎と右下顎骨の一部が欠損しているが, これは左側を複製・反転させることで補完した. 肋骨は右側の保存状態がよりよいことから, これを複製・反転させ左側の肋骨にあて, 欠損した遠位端は近傍の肋骨の遠位端を用いて補完した. 第 16 肋骨は左右を Revopoint MINI でスキャンし, 使用した. 足部においては, 構成する骨要素が小さかったことから Artec Leo での左足部のスキャン結果が芳しいものではなかったために, CT スキャンで得られた右足部のデータを反転させ補った. 肩帯およ

び前肢, その他指骨などは, 大腿骨の比較から 78%に縮小した土岐市産 *Paleoparadoxia tabatai* (泉標本)の全身骨格模型のデータを参考に制作した. 膝蓋骨は, 釜戸標本でも泉標本でも産出していなかったため, 同じパレオパラドキシア科に属する *Neoparadoxia repenningi* (スタンフォード標本)を 60%に縮小したデータを参考に制作した.

骨格組み立ての際は, 最近の束柱目の復元 (新村・松井, 2019)を参考に行い, あわせて国立科学博物館の甲能直樹博士と Zoom を使った打ち合わせを行い, 各部位の位置関係などについて検討を行った. そして, Fujiwara and Hutchinson (2012)などの機能形態学的な研究成果, 瑞浪釜戸標本の観

察から明らかになった胸骨の位置関係などの情報に加え、現生セイウチの坐骨結節などの情報を加味して大まかな点はZoom会議中にリアルタイムで、細かな点はその後修正したうえで完成した(Fig. 12)。これまでに、パレオパラドキシア科を含む束柱目に関して様々な復元がされてきているが(犬塚, 2013)、近年ではパレオパラドキシア科は水棲適応の進んだ哺乳類とみなされてきており(Hayashi et al., 2013; Ando and Fujiwara, 2016)、本復元ではそれを踏まえるとともに前述の情報を基に陸上および水中における姿勢の2パターンを制作した(Fig. 12)。

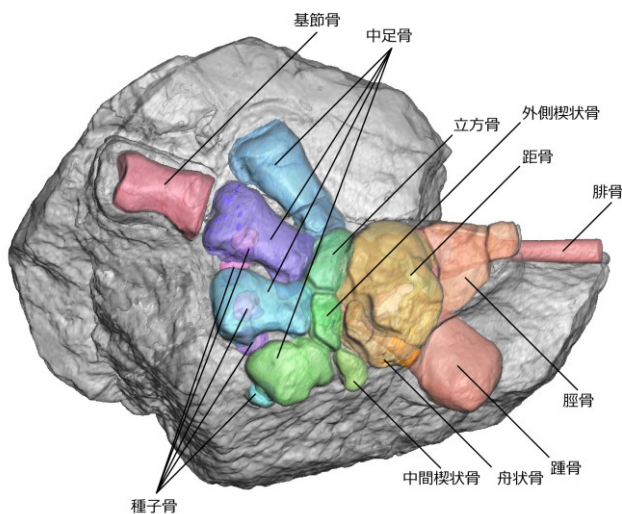


Fig. 10. 右後肢の3Dデジタルモデル。

5. まとめ

本研究では、パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本の剖出作業に伴う変化、剖出された化石試料を3DレーザースキャンおよびX線CTスキャンし、得られた3Dデジタルデータを基にデジタル全身骨格復元モデルを制作した。このように、化石資料をデジタル化することには、資料の保存という観点から大変意義のあるものである。本標本は、実際に剖出作業を進める過程で多少なりとも乾燥などによる損傷などが見られているが、これを今後実物のまま展示や研究に使い続けると損傷のリスクが上がる。今回、ほぼ全ての部位をデジタル化したことで、実物資料へのアクセス機会を減らすことに繋がり、これは長期にわたる標本の保存に貢献するだろう。また、骨要素をデジタル化したことで容易に全身骨格復元モデルを作ることができたが、これは研究や教育面からも利用価値の高い資料となる。さらに、これらのデータを今後オンラインなどで広く共有していけば、より多くの研究者や教育機関が本標本へアクセスできるようになるだろう。

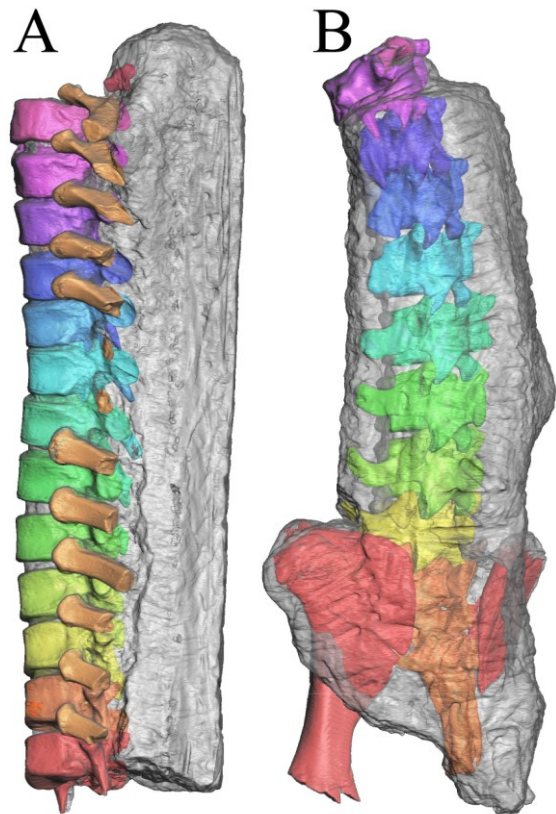


Fig. 11. 胸、腰部の3Dデジタルモデル。A, 胸部の左外側。B, 腰部の背側。

6. 謝辞

X線CTスキャナの利用にあたり、福井大学医学部の兵頭秀樹博士と診療放射線技師の皆さん、福井県立大学恐竜学研究所の服部創紀博士に大変お世話になった。筑波大学大学院の水野史博博士と岡山理科大学の浅井勇馬氏には復元に関するデータ提供に関してサポートいただいた。

長谷川善和博士(横浜国立大学名誉教授、群馬県立自然史博物館名誉館長)には原稿を査読していただいた。記して厚くお礼申し上げる。

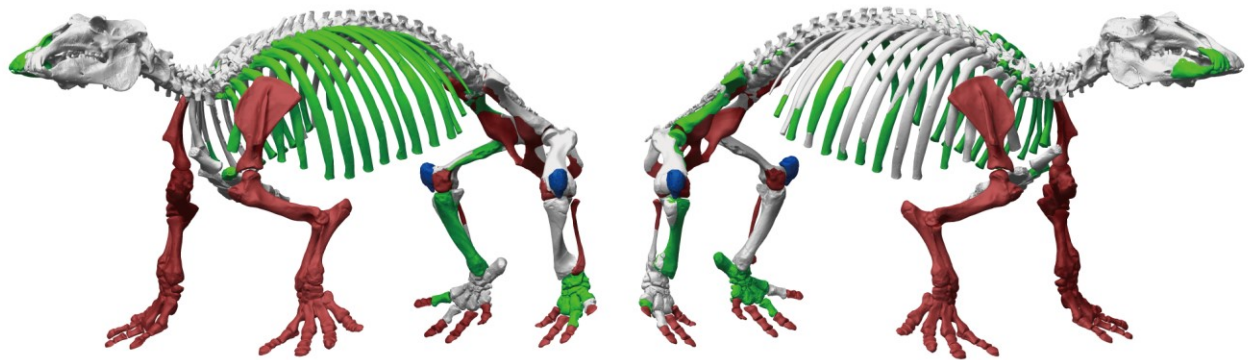
7. 引用文献

Ando, K., and S. Fujiwara. 2016. Farewell to life on land—thoracic strength as a new indicator to determine paleoecology in secondary aquatic mammals. *Journal of Anatomy* 229: 768–777.

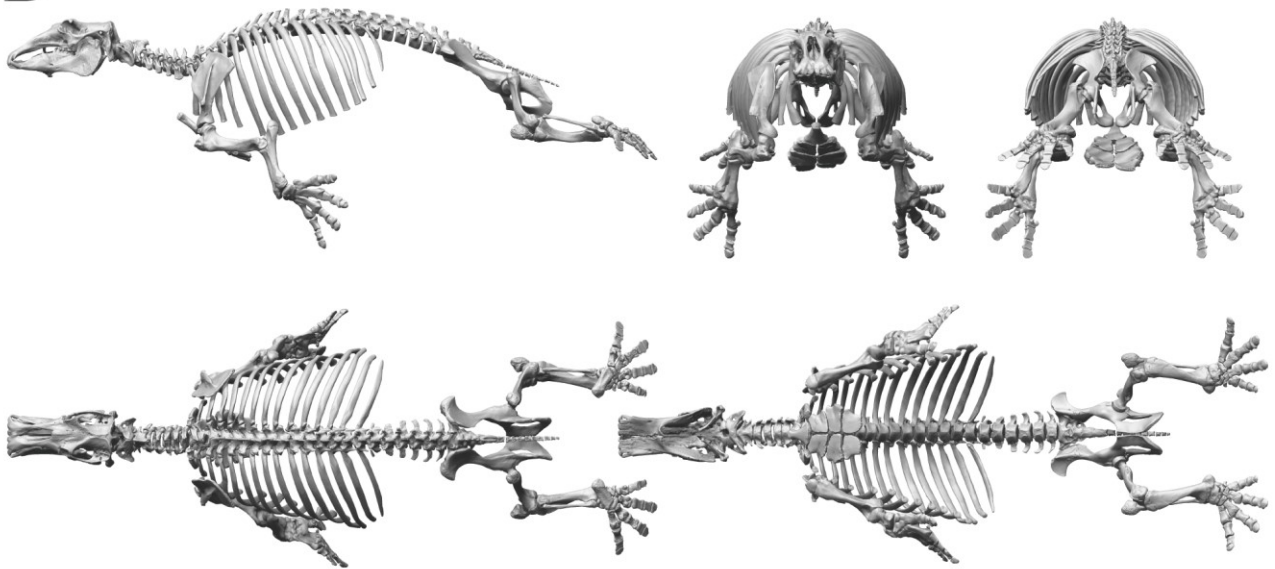
DOI: 10.1111/joa.12518

安藤佑介・藤原慎一・安藤瑚奈美. 2018. フォトグラメトリーを活用した瑞浪層群産 *Crenomytilus grayanus* (二枚貝綱: イガイ科) 群体(MFM16000)の三次元的な産状再現. 瑞浪市化石博物館研究報告 44, 特別号: 63–70.

A



B



C

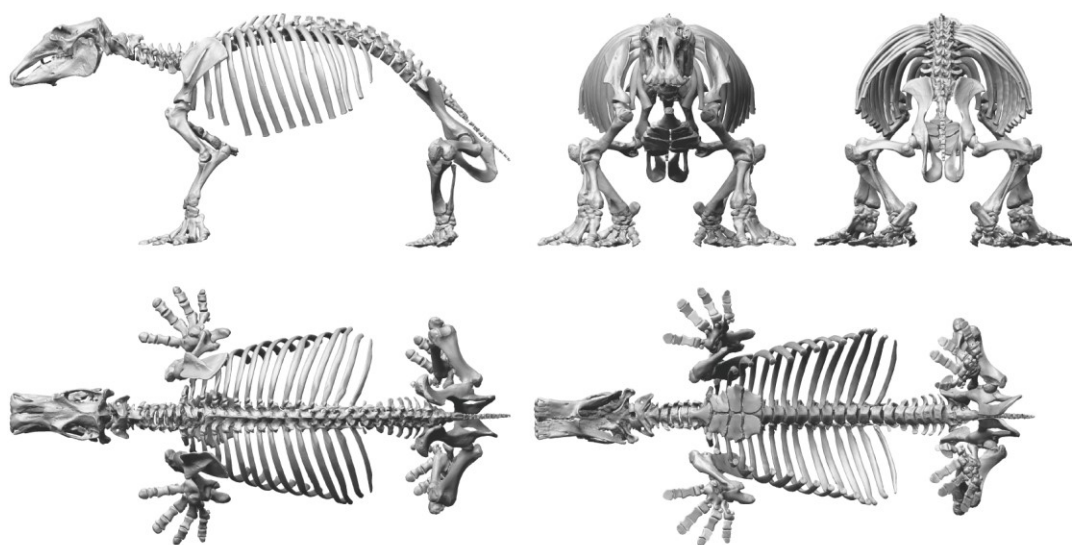


Fig. 12. 3D デジタル復元骨格モデル. **A**, 復元に用いた標本を色分けした骨格モデル; 白: 瑞浪釜戸標本オリジナル部位; 緑: 瑞浪釜戸標本の別部位を用いた部位; 赤: 泉標本を用いた部位; 青: スタンフォード標本を用いた部位. **B**, 水中姿勢の骨格モデル. **C**, 陸上姿勢の骨格モデル(後肢姿勢の復元には水野・甲能, 2024 の考察を加味した). **B, C** ともに甲能直樹博士監修.

- Belvedere, M., and P. Mietto. 2010. First evidence of stegosaurian *Deltapodus* footprints in North Africa (Iouaridène Formation, Upper Jurassic, Morocco). *Palaeontology* 53(1): 233–240.
DOI: 10.1111/j.1475-4983.2009.00928.x
- Butcher, K. R., M. J. Power, M. Larson, M. P. Orr, S. Velásquez-Franco, M. A. Hudson, and V. J. Bailey. 2021. Museum Leadership for Engaging, Equitable Education: The Transformative Potential of Digitized Collections for Authentic Learning Experiences. *Curator: The Museum Journal* 64(2): 383–402.
DOI: 10.1111/cura.12423
- Ellwood, E. R., P. Kimberly, R. Guralnick, P. Flemons, K. Love, et al. 2018. Worldwide engagement for digitizing biocollections (WeDigBio): the biocollections community's citizen-science space on the calendar. *BioScience* 68(2): 112–124.
DOI: 10.1093/biosci/bix143
- Fujiwara, S., and J. R. Hutchinson. 2012. Elbow joint adductor moment arm as an indicator of forelimb posture in extinct quadrupedal tetrapods. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279: 2561–2570.
DOI: 10.1098/rspb.2012.0190
- Hayashi, S., A. Houssaye, Y. Nakajima, K. Chiba, T. Ando, H. Sawamura, N. Inuzuka, N. Kaneko, and T. Osaki. 2013. Bone inner structure suggests increasing aquatic adaptations in *Desmostylia* (Mammalia, Afrotheria). *PLoS ONE* 8(4): e59146.
DOI: 10.1371/journal.pone.0059146
- Hedrick, B. P., J. M. Heberling, E. K. Meineke, K. G. Turner, C. J. Grassa, D. S. Park, J. Kennedy, J. A. Clarke, J. A. Cook, D. C. Blackburn, S. V. Edwards, and C. C. Davis. 2020. Digitization and the Future of Natural History Collections. *BioScience* 70(3): 243–251.
DOI: 10.1093/biosci/biz163
- Hollinger, R. E., E. John Jr., H. Jacobs, L. Moran-Collins, C. Thome, J. Zastrow, A. Metallo, G. Waibel, and V. Rossi. 2013. Tlingit-Smithsonian collaborations with 3D digitization of cultural objects. *Museum Anthropology Review* 7(1–2): 201–253.
- Ibrahim, N., P. C. Sereno, C. Dal Sasso, S. Maganuco, M. Fabbri, D. M. Martill, S. Zouhri, N. Myhrvold, and D. A. Iurino. 2014. Semiaquatic adaptations in a giant predatory dinosaur. *Science* 345(6204): 1613–1616.
DOI: 10.1126/science.1258750
- Imai, T., Y. Azuma, S. Kawabe, M. Shibata, K. Miyata, M. Wang, and Z. Zhou. 2019. An unusual bird (Theropoda, Avialae) from the Early Cretaceous of Japan suggests complex evolutionary history of basal birds. *Communications Biology* 2: 399.
DOI: 10.1038/s42003-019-0639-4
- 犬塚則久. 2013. *Desmostylus* と *Paleoparadoxia* の復元. 化石研究会会誌 45: 31–43.
- 河部壮一郎・北山浩生・服部創紀. 2016. 型取りによる透明恐竜頭骨模型の開発. 福井県立恐竜博物館紀要 15: 85–92.
- 木村敏之. 2018. 自然史系博物館資料のデジタル化とその活用について: スミソニアン国立自然史博物館・フロリダ自然史博物館での事例調査. 博物館研究 53(11): 28–31.
- 木村敏之. 2023. 自然史系博物館資料の3D デジタル標本化—現生クジラ類耳周骨・鼓室胞データベース作成を通して. 群馬県立自然史博物館研究報告 27: 211–216.
- 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.
DOI: 10.1016/j.quaint.2015.06.068
- 水野史博・甲能直樹. 2024. 現生四足歩行獣から導出された新基準に基づいたパレオパラドキシア類の後肢姿勢復元. 日本古生物学会第 173 回例会講演予稿集: 42.
- 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.
DOI: 10.1007/s12052-012-0458-2
- Rogers, N. 2016. Museum drawers go digital. *Science*, 352: 762–765.
DOI: 10.1126/science.352.6287.762
- 三枝春生. 2020. 3D モデリングによるミエゾウとタンバティタニスの骨格復元. 化石研究会会誌 52: 44–53.
- 新村龍也・木村敏之. 2020. 自然史系博物館資料におけるデジタル 3D 標本とその活用. 群馬県立自然史博物館研究報告 24: 81–86.
- 新村龍也・小西卓哉. 2020. *Phosphorosaurus* の等倍骨格復元の制作. むかわ町立穂別博物館研究報告 35: 33–38.

- 新村龍也・松井久美子. 2019. 3D CG による束柱類の生体復元. 化石 106: 1–2.
DOI: 10.14825/kaseki.106.0_1
- 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.
DOI: 10.14825/kaseki.99.0_85
- Tsukiji, Y., Y. Azuma, F. Shiraishi, M. Shibata, and Y. Noda. 2018. New ornithopod footprints from the Lower Cretaceous Kitadani Formation, Fukui, Japan: ichnotaxonomical implications. *Cretaceous Research* 84: 501–514.
DOI: 10.1016/j.cretres.2017.12.011
- Tsukiji, Y., Y. Azuma, F. Shiraishi, and M. Shibata. 2019. A diverse theropod footprint assemblage from the Lower Cretaceous Kitadani Formation, Tetori Group, central Japan. *Cretaceous Research* 97: 16–33.
DOI: 10.1016/j.cretres.2019.01.003
- Yamafune, K., R. Torres, and F. Castro. 2017. Multi-image photogrammetry to record and reconstruct underwater shipwreck sites. *Journal of Archaeological Method and Theory* 24: 703–725.
DOI: 10.1007/s10816-016-9283-1
- 吉田雅則. 2019. フォトグラメトリーにより作成した骨格標本レプリカの展示と活用事例/「動物のからだ展」を通して. 神戸芸術工科大学紀要「芸術工学」.
- Ziegler, M. J., V. J. Perez, J. Pirlo, R. E. Narducci, S. M. Moran, M. C. Selba, A. K. Hastings, C. Vargas-Vergara, P. D. Antonenko, and B. J. MacFadden. 2020. Applications of 3D paleontological data at the Florida Museum of Natural History. *Frontiers in Earth Science* 8: 600696.
DOI: 10.3389/feart.2020.600696