HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道産鰭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
Author(s)	新村, 龍也; 田中, 嘉寛; 甲能, 直樹 他
Citation	化石, 99, 85-92
Issue Date	2016-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64727
Type	journal article
File Information	Kaseki99 85-92.pdf



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

化石　99，85–92，2016

Fossils
The Palaeontological Society of Japan

解　説

北海道産鰭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―

新村龍也*・田中嘉寛**,***・甲能直樹****,*****・山田一孝******・佐々木基樹******

*足寄動物化石博物館・**沼田町化石館・***北海道大学総合博物館・****国立科学博物館・*****筑波大学・******帯広畜産大学

Digital life restoration of a fossil pinniped from Hokkaido, Japan — Generating a digital 3D model using photogrammetry and a 3D CG software —

Tatsuya Shinmura*, Yoshihiro Tanaka**,***, Naoki Kohno****,*****, Kazutaka Yamada****** and Motoki Sasaki******

*Ashoro Museum of Paleontology, Ashoro, Hokkaido 089-3727, Japan (shinmura@ashoromuseum.com); **Numata Fossil Museum, Numata, Hokkaido 078-2202, Japan; ***Hokkaido University Museum, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan; ****National Museum of Nature and Science, Tsukuba Ibaraki 305-0005, Japan; *****University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan; ******Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan.

はじめに

脊椎動物化石の多くは，埋没前の擾乱，続成作用による変形，風化などのため，全身が完全な状態で発掘される事は非常に稀である．この様に化石が不完全な場合，一般の人が生体をイメージすることは困難である．研究の成果に関しても，論文をそのまま理解するには専門的な知識が必要であり，論文またはその解説だけで研究成果を一般の人に浸透させることは難しい．そこで科学的な解釈に基づいた生体復元模型や復元画が，博物館などの教育研究機関や書籍による普及に有効であり，近年活発に古生物学分野の学術会議等で報告されるようになっている（徳川ほか, 2010; 小田・小西, 2010; 新村, 2010; 新村ほか, 2011; 新村, 2014a, b; 荻野, 2014; 小田ほか, 2014; 瑞浪市化石博物館展示室小規模改装グループ, 2014など）．

科学的な解釈に基づいた脊椎動物化石の生体復元模型は，①レジンや石膏などで作られた骨のキャストの上に粘土で軟組織を復元する伝統的な手法（例えば，Keillor, 2008; 新村, 2014b），および②3Dスキャナやコンピュータ断層撮影（CT）などによって得られた骨のデジタル3Dモデル（以下，3Dモデル）の上に，パーソナルコンピュータ上で軟組織を復元する手法，の二種類がある（例えば，Lautenschlager, 2014; Steyer *et al.*, 2010）．前者の粘土を用いる手法は制作に時間がかかる上に，作品のコピーや変更は容易ではない．一方，後者のデジタル的手法は，3Dモデルを得るために高価な機器が必要である．

しかしこの十数年で，写真を用いた3Dモデル制作技術（フォトグラメトリー）は急成長している（例えば，Koch *et al.*, 1998; Pollefeys *et al.*, 1999; Kersten and Lindstaedt, 2012）．最近では，古生物界での応用も見られる様になり，取り扱いが困難または不可能な標本の解析やアーカイブの作成などに使用する3Dモデルの簡便な制作方法として注目されている（例えば，Falkingham, 2012; Mallison and Wings, 2014; 越前谷, 2014; 芝原, 2014）．写真を用いた3Dモデルの生成は，色々な視点から撮影した複数枚の写真とパーソナルコンピュータがあればよく，3DスキャナやCTスキャナを必要としない．また，スキャナに入らないサイズ，例えば化石発掘現場なども3D化可能であり，残された写真から失われた足跡露頭を復元した例もある（Falkingham *et al.*, 2014; Lallensack *et al.*, 2015）．

著者らは，写真から3Dモデルをパーソナルコンピュータ上に合成できるフリーソフトウェア123D catchと，3Dモデル編集ソフトウェアZBrushを用いて，北海道石狩郡当別町の上部中新統一番川層から産出したセイウチ類化石の生体復元を行い，生態復元画を制作した．本稿ではその制作工程を紹介する．

本稿では，執筆と復元手法の検討を新村と田中が担当し，復元画制作を新村が，キャストの撮影を田中がそれぞれ行った．復元画制作における生物学的な議論は甲能，田中，新村が行い，現生種のCTスキャンは山田と佐々木が行った．

標本と方法

復元に用いた標本は，北海道当別町に分布する一番川層より産出した *Archaeodobenus akamatsui* Tanaka and Kohno 2015のホロタイプ（UHR 33282：北海道大学総合博物館）である．本標本は，左側の頭蓋骨と下顎骨が変形の少ない状態で産出している．そのため，左右反転させて欠損部位を補うことができるデジタル3D技術を用いた復元の対象として，本標本は好適である．

本標本は，セイウチ科の基幹群に含まれるセイウチ類であるが，現生セイウチのような巨大な上顎犬歯を持たず，頭蓋骨は前後に長い．大きさは現生セイウチよりも小さく，オタリアとトドの中間程度である．

生体復元に際して，研究用の頭蓋骨と下顎骨のキャストをNikon製デジタル一眼カメラ（D5000），レンズはAF-S DX NIKKOR 18–55 mm f/3.5–5.6G VRで撮影した．次に，123D catch（Autodesk社製）（Abate *et al.*, 2011）でデジタル写真を取り込み，3Dモデルを制作した後，ZBrush 4R6（Pixologic社製）上で計測を行った．その後3Dデータの編集と欠損部位の復元をZBrushで行った．復元された頭蓋骨と下顎骨を土台にZBrush上で軟組織を造形して生体を復元し，レンダリングをして2Dのイラストを制作した．軟組織の厚さなどは，帯広畜産大学に設置されている東芝製のAsteion Super4によって撮影された，現生の鰭脚類のCT画像を参考にした．CTの撮影条件は，管電圧135 kV，管電流150 mA，スライス厚1 mmで，ボリュームレンダリング法で三次元画像を構成した．その後，Adobe製の2D CGソフト（Photoshop CS5）上で生態復元画の制作を行った．パーソナルコンピュータ上での作業は，ワコム製ペンタブレット（Intuos 4）を使用した．制作工程は図1に示す．

なお，今回は復元した頭蓋骨と下顎骨を，十勝産業振興センターに設置されているキーエンス社製の3Dプリンタ（AGILISTA-3100）で出力した．

ちなみに，ZBrushの使用における推奨環境は，Windowsの場合，Vista以降のOSで，CPUはPentium D以降，システムメモリは2GB以上である．オーク社のウェブサイト（http://www.oakcorp.net/）に詳しい．

頭蓋骨の3Dモデル化

写真撮影

研究用キャストの写真を基に，123D catchを使って3Dモデルを制作した．当初，単色のキャストおよびホワイトニングを施しての撮影を試みたが，生成される3Dモデルの形態は大きく歪むことが多かった．そのためキャスト表面にランドマークとなるマスキングテープを貼って撮影することで，123D catchが写真同士のつなぎ合わせるポイントを判断しやすくした（図2）．撮影の際，当初幾何学模様の紙やチラシを標本の下に敷いて撮影したが，平らな台が再現され難かったため，木目が見える台に乗せて標本を撮影した．ライティングの条件を一定にし，標本を固定し，カメラを動かして連続的に撮影することで，上手く3D化される写真を得ることが出来た．撮影枚数は，当初8方向，2段，さらに真上からの1枚を加えた17枚で撮影したが，標本と生成された3Dモデルとでは，

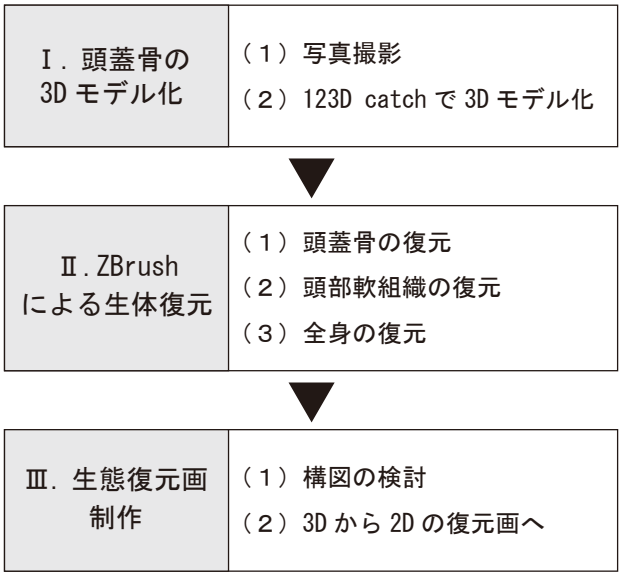


図1．生態復元画の制作工程のフローチャート．本文を参照のこと．
Fig. 1. Diagram showing the production process. I: Digital 3D modeling of the skull. (1), 49 photographs of the specimen were taken (Figs 2 and 3). (2) The photographs were imported into the free 3D model generator 123D catch to build the 3D model of the specimen (Figs 4 and 5). II: Life restoration using the 3D modeling program ZBrush. (1), Reconstruction of the skull. (2), Reconstruction of the soft tissue on the skull. (3), Reconstruction of the body with trunk and limbs (Figs 6 to 10). III: Production of the 2D illustration. (1), Consideration of the composition of 3D models reconstructed. (2), A 2D illustration rendered from 3D models was finished on Adobe Photoshop (Fig. 11).

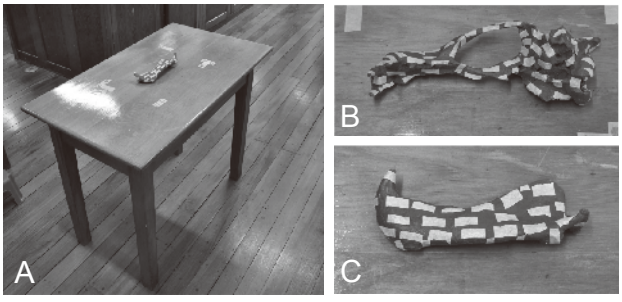


図2．標本撮影の様子．A：木目模様の台の上の標本，B：ランドマークとなるマスキングテープを貼り付けた頭蓋骨，C：下顎骨．
Fig. 2. Setting of the specimen. A: the specimen with landmarks placed on a wooden table with woodgrain patterns, B: the skull with landmarks, C: the mandible with landmarks. These landmarks help “123D catch”, which generates 3D models from photos. Masking tape is recommended to protect the specimens.

肉眼による観察で大きなずれを生じた．そこで，一段ずつ増やしていき，5段で肉眼的なずれがほぼなくなった．本復元では，さらに一段を加え，標本を8方向，6段，真上からの1枚を加えた合計49方向から撮影した（図3）．

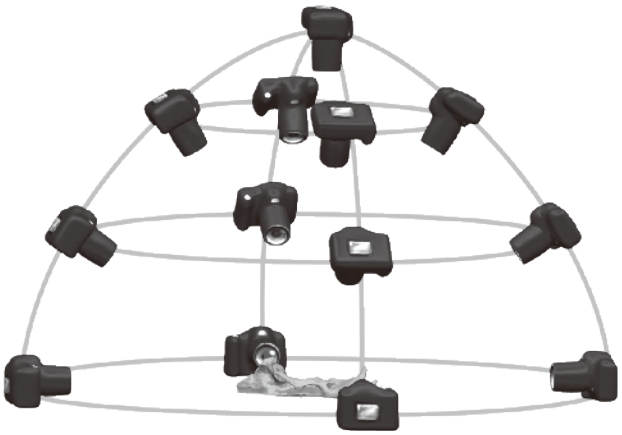


図3．3Dモデル作成用写真撮影法．本復元では8方向×6段，さらに真上からの計49方向から撮影した．図は4方向×3段に真上からを加えた撮影に簡略化している．

Fig. 3. Photograph taking for the 3D model building. In total, 49 photographs were taken from 8 views in 6 different levels, and one from the top in this reconstruction. This figure is simplified to 4 to show views in 3 different levels plus one from the top.

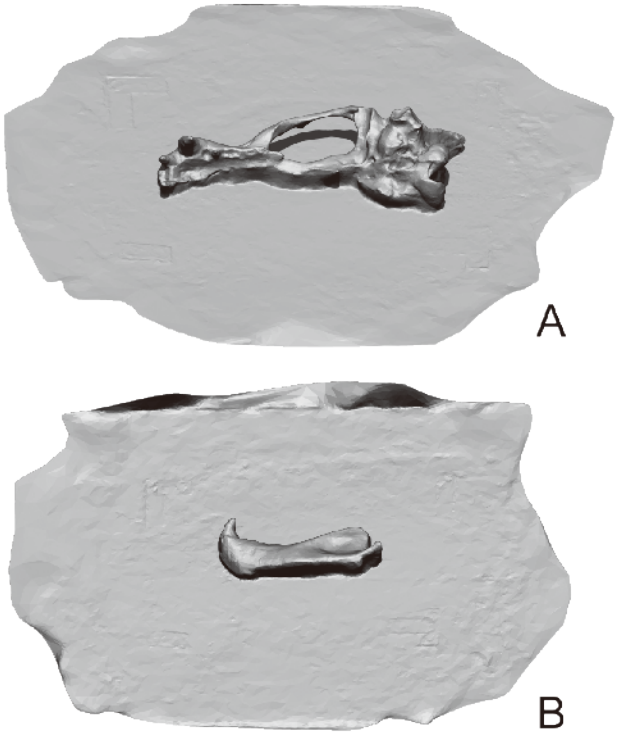


図4．123D catchで再現された3Dモデル．スケールは不同．A：頭蓋骨，B：下顎骨．

Fig. 4. 3D models generated with 123D catch. Not to same scale. A: skull, B: mandible.

123D catchで3Dモデル化

123D catchを使った3Dモデル化は，得られた写真を123D catchにまとめて送ることで自動的に行われる．次に，得られた3Dモデルをstl形式でエクスポートしてZBrushにインポートし（図4），台の部分をZBrush上で削除した．

得られた3Dモデルが実物の頭蓋骨と比べてどれくらい形態的な誤差が生じているか確認するため，標本から10 mの距離から，遠近法による歪みを抑えて撮影し，3Dモデルと比較した結果，両者の形態はよく一致した（図5）．また，標本と3Dモデルの間で計測しやすい点を選び出し，22カ所を計測して比較した（図6）．頭蓋骨と下顎骨のそれぞれの最大長を基準にして，3Dモデルの相対値から標本と比べた際の変形の割合を計算した結果，誤差は3%以内に収まっていた（表1）．これらのことから，形態は正確に再現されていると判断した．

ZBrushによる生体復元

頭蓋骨の復元

本標本の頭蓋骨は，左側が主に保存されているため，ZBrush上で左側の3D画像を複製・反転させ，左右共に産出している上顎第三切歯と後頭窩を基準に，欠損している右側を補完した．背側の欠損部位は同じセイウチ科の基幹群に含まれる *Pseudotaria muramotoi* Kohno 2006

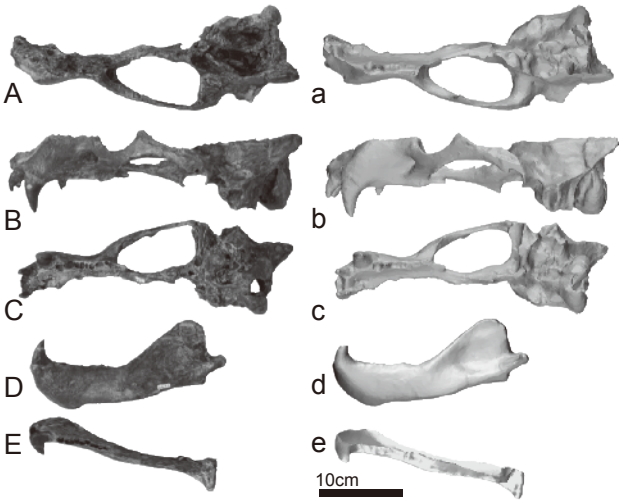


図5．本標本の写真（左）と123D catchで得られた3Dモデル（右）の比較．頭蓋骨背側面（A．a），頭蓋骨左外側面（B．b），頭蓋骨腹側面（C．c），下顎骨左外側面（D．d），下顎骨背側面（E．e）．標本の写真は，10 m離れた距離から撮影した．

Fig. 5. Comparison between photographs (left) and reconstructed 3D models (right) of UHR 33282, the holotype of *Archaeodobenus akamatsui*, in the same views. Dorsal views of the skull (A, a), Left lateral views of the skull (B, b), Ventral views of the skull (C, c), Left lateral views of the mandible (D, d), Dorsal views of the mandible (E, e). Photographs were taken 10 m from the specimen.

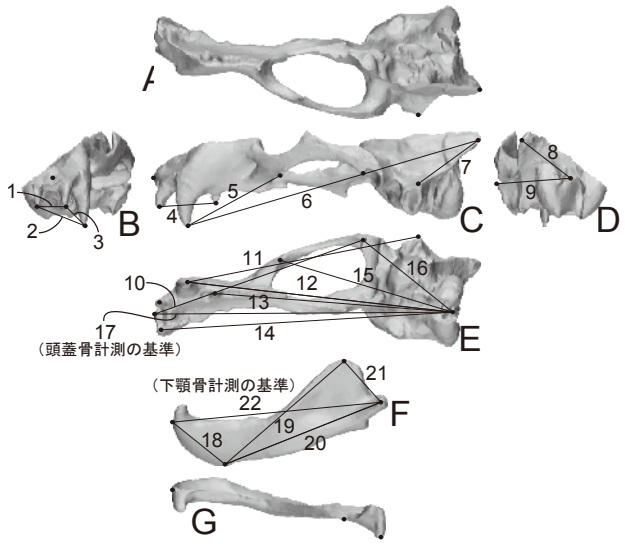


図6．再現された3Dモデルの計測箇所．値は表1に示す．A：頭蓋骨の背側面，B：頭蓋骨の前面，C：頭蓋骨の左外側面，D：頭蓋骨の後面，E：頭蓋骨の腹側面，F：下顎骨の左外側面，G：下顎骨の背側面．

Fig 6. Landmarks for measurement marked on generated 3D models. These numbers correspond to the measurements on Table 1. A: dorsal view of the skull, B: anterior view of the skull, C: lateral view of the skull, D: posterior view of the skull, E: ventral view of the skull, F: lateral view of the mandible, G: dorsal view of the mandible.

表1．実測値とデジタル計測値の誤差．計測場所は図6を参照．

Table 1. Difference of measurements between the actual and generated digital data in percentages. See Figure 6 for the points for measurement.

	計測場所	標本の実測値	3Dモデルの相対値	実測値に対する3Dモデルの計算値	実測値に対する計算値(%)
	Measurement points	Actual values of the specimen (mm)	Relative values of the 3D model	Calculated values of the 3D model to the actual values	The percentage of the calculated values to the actual values
頭蓋骨 Skull	1	29.3	1.9455	28.41914953	97.0
	2	59.6	3.972	58.02151731	97.4
	3	40.8	2.7719	40.49089724	99.2
	4	57.4	3.9787	58.11938845	101.3
	5	107.5	7.273	106.241313	98.8
	6	299.5	20.969	306.3074513	102.3
	7	80.9	5.3799	78.58760346	97.1
	8	65	4.8012	70.13416639	107.9
	9	81.9	5.456	79.69924432	97.3
	10	217.4	15.3046	223.5639763	102.8
	11	241.5	16.4761	240.676818	99.7
	12	270.5	18.6378	272.2541378	100.6
	13	240.6	16.5177	241.2844956	100.3
	14	295.5	20.2323	295.5460082	100.0
	15	186.8	12.4255	181.5071408	97.2
	16	113.2	7.9082	115.5200814	102.0
	17	300.2	20.5509	300.2	100.0
下顎骨 Mandible	18	72.3	4.9067	71.56102712	99.0
	19	163	11.0342	160.926628	98.7
	20	173.4	12.2386	178.4920184	102.9
	21	61.1	4.1182	60.06126763	98.3
	22	218.3	14.9681	218.3	100.0

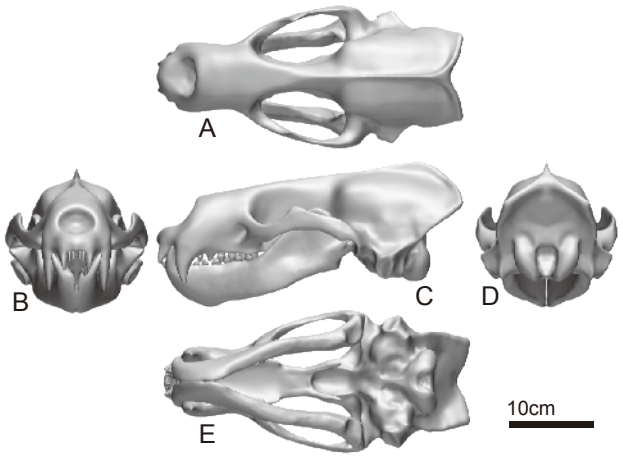


図7．欠損部位を造形し，Tanaka and Kohno（2015）の復元図に基づいて修復した頭蓋骨．A：背側面，B：前面，C：左外側面，D：後面，E：腹側面．

Fig. 7. The 3D model of the skull. Missing parts (i.e., dorsal and right sides of the skull) were modeled based on Tanaka and Kohno (2015). A: dorsal view, B: anterior view, C: lateral view, D: posterior view, E: ventral view.

を参考に造形した．*P. muramotoi*は*A. akamatsui*の姉妹群であり，上顎吻部や頬骨，歯，下顎骨は保存されていないものの，*A. akamatsui*で欠損している頭頂部が保存されており，補完させる素材としては最適であった．下顎骨は，産出している左下顎骨を頭蓋骨に関節させ，口を閉じた状態で，複製・反転し，欠損した右側を補った．歯は，脱落した状態で産出した同一個体の頬歯を参考に造形して歯槽に配置し，一般的な鰭脚類のかみ合わせを参考に，上下が交互になるように調整した．その後，骨表面を滑らかにして，標本の翼状骨突起の変形と，3Dモデル制作に用いた研究用キャストにみられる下顎犬歯先端部の欠損を修正した（図7）．

頭部軟組織の復元

頭部の筋は，井上（1994）を参考に，生体の頭部の概形に大きな影響を与える側頭筋と咬筋，また口腔の概形に影響を与える内側翼突筋をZBrush上で造形した（図8）．

今回復元した*A. akamatsui*はセイウチ科に属するが，頭蓋骨にはアシカ科と共通の原始形質が多く見られたことから，アシカ科のトドを参考に用いて，*A. akamatsui*の顔の軟組織の厚さを見積もった（図9）．セイウチ科はアシカ科と単系統（Otarioidea；アシカ上科）を組むことは形態・分子双方の研究から支持されており（Flynn and Nedbal, 1998; Bininda-Edmonds *et al.*, 1999; Delisle and Strobeck, 2005），貝食（吸引索餌）に特化した現生セイウチのように特殊化する前の化石セイウチ類を復元する際（甲能, 2005; Berta *et al.*, 2006），系統的にも形態的にも近いアシカ科は最も参考になるグループである．

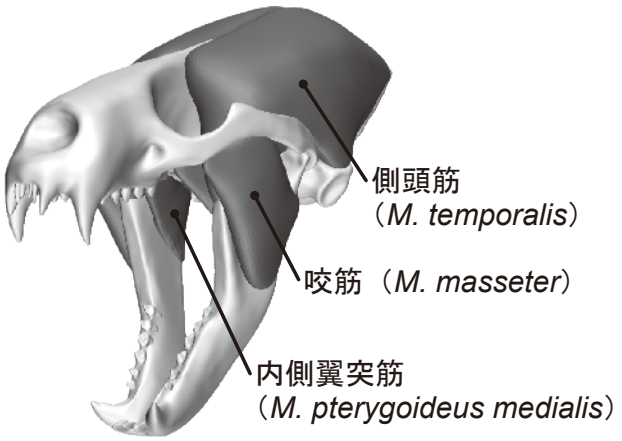


図8．ZBrush上で造形した咀嚼筋復元．
Fig. 8. Reconstructed masticatory muscles in ZBrush.

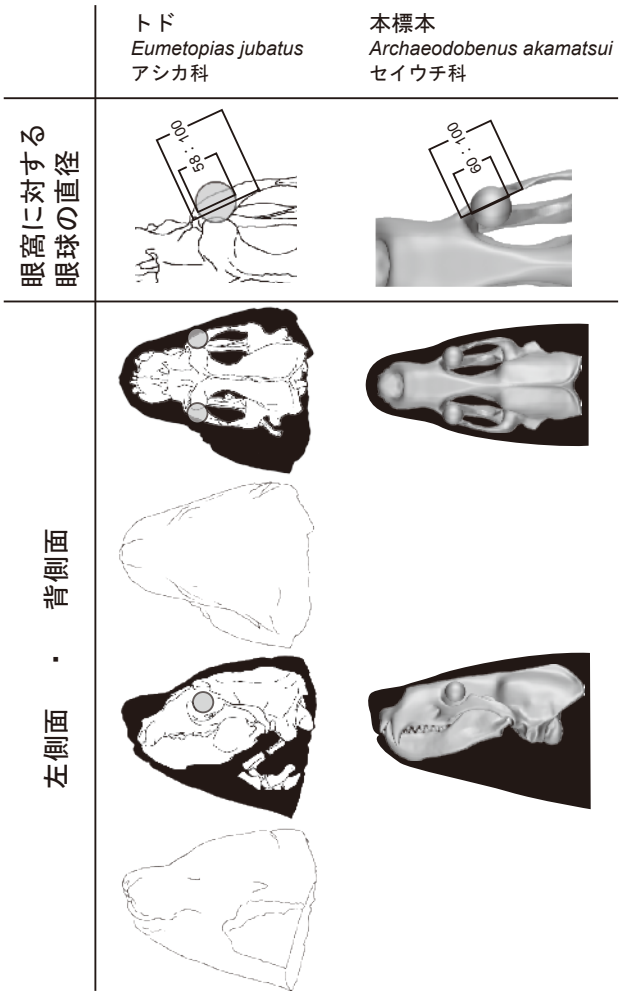


図9．現生種トドと*A. akamatsui*の眼窩と眼球サイズの関係および，CT画像に基づく眼球，頭蓋骨と頭部輪郭．*A. akamatsui*の眼球と頭部輪郭はトドを参考にした．スケールは不同．
Fig. 9. Eyeball size and head outlines of *E. jubatus* and *A. akamatsui*. Top; ratio of the eyeball diameter to the orbit. Middle and bottom; outlines of the eyeballs, heads and skulls in dorsal view (middle) and lateral view (bottom) based on CT images (for *E. jubatus*). Not to same scale.

眼球の大きさの推定は，鳥類・は虫類のような骨性の強膜輪を持たない哺乳類において難しい．そこで図9のトドを参考に，*A. akamatsui*の眼球を眼窩の横幅の60％に設定した．

化石種の耳介の復元は，系統的に近縁な現生種もしくは骨学的な類似から生態が近いと考えられる種からの類比以外からは困難である．現生鰭脚類では，セイウチ科とアザラシ科において耳介が消失しており，アシカ科では存在するものの，陸上食肉類と比べると著しく縮小している．耳介の消失は鰭脚類以外の多くの現生水生哺乳類で見られる．鰭脚類内では耳介の縮小が起こり，セイウチ科とアザラシ科で独立して消失が起こったと考えられるが，現生種が1属1種しかいないセイウチ科において系統上どの種から耳介が消失したか知ることは今のところできない．*A. akamatsui*の耳介復元において，現生セイウチに耳介がないこと，*A. akamatsui*は現生種を含むクレードへと到る多様化の開始を暗示する種（Tanaka and Kohno, 2015）と認識されたことから耳介は無かったものとした．軟組織としての外耳孔の位置も推測するしかないが，図9のトドを参考に，骨の外耳孔よりもやや背側前方に造形した（図10）．

全身の復元

*A. akamatsui*の体サイズはChurchill *et al.*,（2014）の式を用いて，体長2.8から3 m，体重は390から473 kgと推定されている（Tanaka and Kohno, 2015）．現生種の雄の体サイズはそれぞれ現生トド（3.3 m，1000 kg），現生オタリア（2.6 m，300から350 kg）であり（Jefferson *et al.*, 2008），*A. akamatsui*は両種の中間的な体サイズだったことから，プロポーションも両種に近いものだったと想定して造形した（図11）．

生態復元画制作

構図の検討

頭部と全身の復元を同時に示すため，2頭の*A. akamatsui*を配置することにした（図12）．頭部（右側の個体）は形状を確認しやすいように真横からのアングルを採用し，特徴的な短い犬歯を強調するため，口を大きく開き，咆哮する様子にした．左右対称で制作された3Dモデルをそのまま配置すれば不自然になるため，全身像（左側の個体）は，ZBrushで頸部を右側に曲げ，咆えられて怯んでいる様子にし，やや見上げるアングルを採用した．鰭脚類の写真は多く存在するが，見上げるアングルで撮影するには，野生の鰭脚類に極端に接近する必要があり困難である．このような現実的には難しいアングルを取り入れることで，復元画と写真作品との差別化を図った．立体の複製や変形作業をごく短時間で行えることは，デジタル3Dで行う利点の一つである．

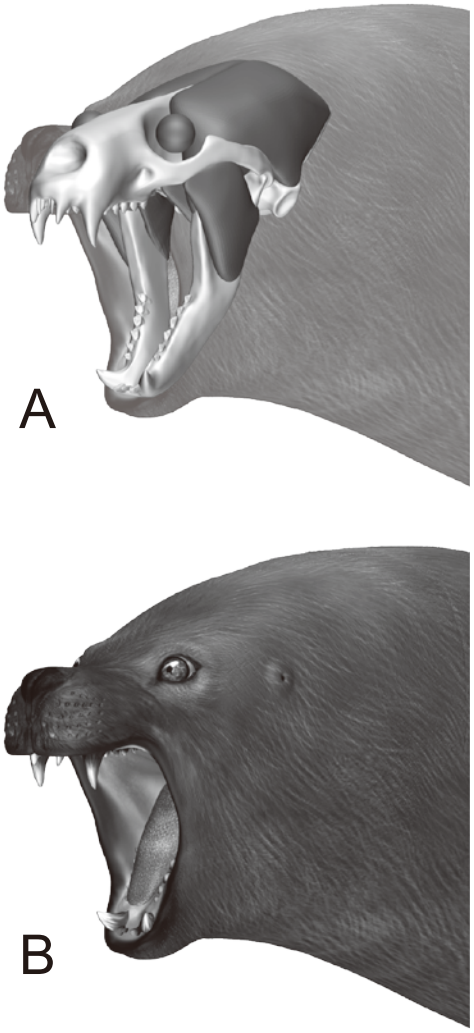


図10．ZBrush上で造形した咀嚼筋と眼球の復元（A）と生体復元（B）．
Fig. 10. Reconstructions of masticatory muscles and eyeballs (A) and life restoration (B) in ZBrush.

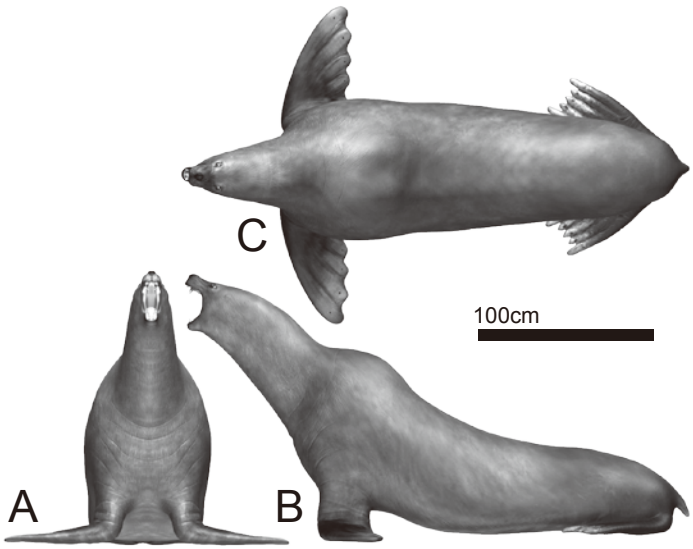


図11．トドとオタリアのプロポーションを参考にZBrush上で造形した*A. akamatsui*の生体復元．A：全面，B：左外側面，C：背側面．
Fig. 11. Life restoration of *A. akamatsui,* based on proportions of *Eumetopias* and *Otaria* in ZBrush. A: anterior view, B: left lateral view, C: dorsal view.

3Dから2Dの復元画へ

構図の検討で決定したアングルでレンダリングした後，Photoshopにデータを移し，レイヤーを作って背景を描き，ヒゲを加え，体毛やシワなどを部分的に修正した（図12）．

フォトグラメトリーの利点とデジタル3Dの活用例

本稿で紹介したフォトグラメトリーは，無償で提供されている123D catchと一般的なデジタルカメラを使用しており，3Dスキャナやコンピュータ断層撮影（CT）を利用して行う方法に比べ，以下の利点がある．①経済的また技術的にも容易である．②大型の標本の3Dモデルの制作ができる．③標本の移動・運搬を伴わないので，脆弱な標本にも使える．

また，得られた3Dモデルを使用して，デジタル3Dで古生物を復元することで，立体として矛盾のない復元が可能である．さらに，デジタル3Dで生体を復元することで，様々なポーズの復元画の制作が容易になり，かつ自前で制作することで迅速な修正が可能になる．この復元画を定期刊行物や展示パネルに使用することで（足寄動物化石博物館, 2014），一般の方の興味を引く情報発信がより容易なものになるものと期待される．

今回紹介したような3D CGソフトウェアは今後さらに増え，デジタル3Dによる復元と3Dプリンタによる出力は急速に普及するだろう（図13）．実際に，足寄動物化石博物館では，これまで時間をかけて手作りした古生物模型のレプリカを作る体験学習を行ってきたが（足寄動物化石博物館, 2011），3Dプリンタの活用で短時間での原型制作が可能になった．今後はこうした3Dモデルが展示や体験学習など様々な用途で活用されると考えられる．

謝辞

おびひろ動物園の杉本加奈子氏には，同動物園での飼育されている鰭脚類（ゴマフアザラシ・カリフォルニアアシカ）の近接撮影をしていただいた．おたる水族館の川尻孝朗氏にはセイウチの撮影を取りはからっていただいた．チャールストン大学（米国）のRobert Boessenecker氏には*Archaeodobenus akamatsui*の復元画について有益なコメントをいただいた．ミニチュアの復元頭蓋骨の3Dプリントは，十勝産業振興センターの3Dプリンタを使わ



図12．ヒゲや背景をPhotoshopで描き込み，完成した生態復元画．この復元画はTanaka and Kohno (2015)として出版された．
Fig. 12. Completed illustration of the restored *A. akamatsui* by adding the background and whiskers on Adobe Photoshop. This illustration is originally published in Tanaka and Kohno (2015).



図13．体験学習用に3Dプリンタ（AGILISTA-3100）で出力された2/5スケールの復元頭蓋骨と下顎骨．
Fig. 13. A 2/5 scale reconstructed skull and mandible model, printed out by the 3D printer (AGILISTA-3100) for museum education.

せていただいた．足寄動物化石博物館の安藤達郎氏には英文についてご意見をいただいた．二名の匿名査読者，編集長の九州大学総合研究博物館の前田晴良氏および東京学芸大学の佐藤たまき氏には，本稿を改善する上で有益なご意見をいただいた．以上の方々と機関にお礼申し上げる．

文献

Abate D., Furini G., Migliori S. and Pierattini S., 2011. Project photofly: new 3D modeling online web service (case studies and assessments). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38**, 319–396

Arnason U., Gullberg A., Janke A., Kullberg M., Lehman N., Petrov E.A., Väinölä R., 2006. Pinniped phylogeny and a new hypothesis for their origin and dispersal. *Molecular Phylogenetics and Evolution,* **41**, 345–354.

足寄動物化石博物館，2011．化石体験を楽しもう!!．博物館だより，**118**，2.

足寄動物化石博物館，2014．THE展示更新！②．博物館だより，**130**，1.

Berta A., Sumich J.L. and Kovacs K.M., 2015. Pinniped evolution and systematics. Marine mammals: evolutionary biology. 3rd ed,

Academic Press, 35–61.
Bininda-Emonds O.R., Gittleman J.L. and Purvis A., 1999. Building large trees by combining phylogenetic information: a complete phylogeny of the extant Carnivora (Mammalia). *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society,* **74**, 143–175.
Churchill M., Clementz M.T. and Kohno N., 2014. Predictive equations for the estimation of body size in seals and sea lions (Carnivora: Pinnipedia). *Journal of Anatomy,* **225**, 232–245.
Delisle I. and Strobeck C., 2005. A phylogeny of the Caniformia (order Carnivora) based on 12 complete protein-coding mitochondrial genes. *Molecular Phylogenetics and Evolution,* **37**, 192–201.
越前谷宏紀，2014．ぐるぐるダイナソー：写真に基づく標本等の3Dデータ構築と古生物学への応用. 北海道大学シンポジウム　絶滅動物化石の最新研究　Part2，9.
Falkingham P.L., 2012. Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica,* **15**, 15.
Falkingham P.L., Bates K.T. and Farlow J.O. 2014. Historical photogrammetry: Bird's Paluxy River dinosaur chase sequence digitally reconstructed as it was prior to excavation 70 years ago. *PLoS ONE,* **9**, e93247.
Flynn J.J. and Nedbal M.A., 1998. Phylogeny of the Carnivora (Mammalia): congruence vs incompatibility among multiple data sets. *Molecular Phylogenetics and Evolution,* **9**, 414–426.
井上貴央，1994．アシカ（*Zalophus*）属の頭部の骨学と筋学．地団研専報，**43**，78–90.
Jefferson T.A., Webber M.A. and Pitman R.L., 2008. Marine mammals of the world: a comprehensive guide to their identification. 592p., Oxford, UK, Academic Press.
Keillor T.，2008．最前線の復元現場から②－造形による復元，恐竜の復元．株式会社学習研究社，東京，18–23.
Koch R., Pollefeys M. and Van Gool L., 1998. Automatic 3D model acquisition from uncalibrated image sequences. Proceedings computer graphics international, 597–604.
甲能直樹，2005．鰭脚類における系統進化，食性の多様化，古環境変遷の連鎖．化石，**77**，34–40.
Kohno N., 2006. A new Miocene odobenid (Mammalia: Carnivora) from Hokkaido, Japan, and its implications for odobenid phylogeny. *Journal of Vertebrate Paleontology,* **26**, 411–421.
Lallensack J.N., Sander P.M., Knötschke N. and Wings O., 2015. Dinosaur tracks from the Langenberg Quarry (Late Jurassic, Germany) reconstructed with historical photogrammetry: Evidence for large theropods soon after insular dwarfism. *Palaeontologia Electronica,* **18**, 1–34
Lautenschlager S., 2014. Reconstruction of the Cretaceous therizinosaur *Erlikosaurus andrewsi*. *Journal of Vertebrate Paleontology,* **34**, Cover illustration.
Mallison H. and Wings O., 2014. Photogrammetry in paleontology – A practical guide. *Journal of Paleontological Techniques,* **12**, 1–31.
瑞浪市化石博物館展示室小規模改装グループ，2014．瑞浪市化石博物館が2012，2013年に設計・製作した束柱目の復元画および復元模型．日本古生物学会第163回例会講演予稿集，p.36.
小田隆・小西省吾，2010．修正した復元骨格に基づいたアケボノゾウ復元画．日本古生物学会第159回例会講演予稿集．p.45.
小田隆・三枝春生・荻野慎諧，2014．丹波竜復元画の制作過程とその意義．日本古生物学会第163回例会講演予稿集，p.36.
荻野慎諧，2014．脊椎動物化石の3D骨格復元．日本古生物学会第163回例会講演予稿集，p.37.
Pollefeys M., Koch R., Vergauwen M. and Van Gool L., 1999. An automatic method for acquiring 3D models from photographs: applications to an archaeological site. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing,* **32**, 76–80.
芝原暁彦，2014．化石観察入門．143p.，誠文堂新光社，東京.
新村龍也，2010．復元模型の発展．日本古生物学会第159回例会講演予稿集，p.45.
新村龍也，2014a．古生物復元作品制作入門：その1．アショロカズハヒゲクジラの復元模型（地球科学入門講座）．地球科学，**68**，127–133.
新村龍也，2014b．古生物復元作品制作入門：その2．束柱類の復元画（地球科学入門講座）．地球科学，**68**，135–136.
新村龍也・安藤達郎・前寺喜世子・森尚子・澤村寛，2011．歯のあるヒゲクジラ *Aetiocetus polydentatus* の復元．化石，**90**，1–2.
Steyer J.S., Boulay M. and Lorrain S., 2010. 3D external restorations of stegocephalian skulls using ZBrush: The renaissance of fossil amphibians. *Comptes Rendus Palevol,* **9**, 463–470.
Tanaka Y. and Kohno N., 2015. A new Late Miocene odobenid (Mammalia: Carnivora) from Hokkaido, Japan suggests rapid diversification of basal Miocene odobenids. *PLoS ONE,* **10**, e0131856.
徳川広和・荻野慎太郎・犬塚則久，2010．古生物模型への提言．日本古生物学会第159回例会講演予稿集，p.46.

（2015年3月9日受付，2015年11月20日受理）

