

3 DCG 技術をクジラの復元に活用する —札幌のセミクジラ類化石を例に—

新村龍也^{1, 2, *}・田中嘉寛³・古沢 仁⁴

Using 3D CG technology for the reconstruction of whale fossils

Tatsuya Shinmura^{1, 2, *}, Yoshihiro Tanaka³ and Hitoshi Furusawa⁴

Abstract

We introduce applications of 3D CG technology to create life reconstruction of fossil animals, especially a whale fossil found from Koganeyu, Sapporo, Japan, which is called Koganeyu Kujira. 3D CG technology facilitates the identification of separated fossils and the retrodeformation of large fossils, enabling precise reconstructions. 3D CG technology has an advantage for accurate life appearance reconstructions. This paper explains specific methods using 3D software such as ZBrush and Blender, and encourages taking photos for photogrammetry during fossil excavation.

Key words: Retrodeformation, Photogrammetry, Life appearance reconstruction.

1. はじめに

クジラ類の中には全長10mを超えるような超大型の種類も含まれる。このような超大型の動物化石は、一つの骨も大型であるため、手に取って観察し部位の判断をすることが困難な場合もある。近年3D CG技術の応用は、古脊椎動物の研究や教育でも進んでいる（例えば、新村・大石 2008；新村ほか 2023；三枝 2020；米山・馬場 2019；河部ほか 2024）。博物館活動においては標本の3Dデータの公開（木村 2023）や、標本の3Dプリントによる展示や独自のミニチュア商品の開発（足寄動物化石博物館 2022；新村ほか 2018；新村・小西 2020）、VRやMRと言った

ゴーグルやスマートフォンなどで体験できる拡張現実への応用などが考えられる（唐沢・松井 2020）。

“3D CG技術”と言えば、高価な機器の導入などの理由により敷居が高い分野のように感じられるかもしれないが、低価格または無料のフォトグラメトリソフトや3D CGソフトがあるので、誰でも意欲があれば気軽に活用できる。そこで本稿では、大型化石の研究やその復元に3D CG技術を応用したいと思っている方のために、札幌市小金湯産のクジラ類（以下、小金湯クジラ）化石への応用例を中心に紹介する。小金湯クジラとは、2008年に砥山層上部から産出した後期中新世のセミクジラ科化石である（古沢 2009；古沢

2024年7月7日受付, 2024年8月31日受理

¹ 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

Ashoro Museum of Paleontology, 29-25, Konan 1, Ashoro Town, Hokkaido 089-3727, Japan

² 北海道大学総合博物館 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8

Hokkaido University Museum, Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo City, Hokkaido 060-0810, Japan

³ 札幌市博物館活動センター 〒062-0935 北海道札幌市豊平区平岸5-15-16

Sapporo City Museum Activity Center, Hiragishi 5-15-6, Toyohira-Ku, Sapporo City, Hokkaido 062-0935, Japan

⁴ 故人, 元札幌市博物館活動センター

decedent, former Sapporo City Museum Activity Center.

*E-mail: shinmura@ashoromuseum.com

2017).

3D CG ソフトには、ZBrush, Blender, Maya, など多数あるが、本稿では新村が使い慣れている ZBrush の操作方法を主に紹介する。ZBrush は maxon 社の 3D CG ソフトであり、映画のモンスターを造形するソフトとしても良く使われ、古生物の復元にも頻繁に使われている（例えば、Steyer et al. 2010；新村ほか 2016；Matsui et al. 2018；佐藤ほか 2020；Sato et al. 2023）。高機能な 3D CG ソフトとしては価格も、2024年7月現在、月額5000円ほどと安価であり、その廉価版の ZBrush core は、月額1500円ほどで利用できる（<https://www.maxon.net/ja>）。一方 Blender は、ZBrush と同様に高機能な 3D CG ソフトだが無料で、3D CG ソフトに触れたことが無い初心者にはお勧めのソフトである。本稿では Blender についても触れるが、3D ソフトの使い方の詳細について紹介はしないので、興味がある方は出てくる単語などを検索してその手順を調べて欲しい。

2. 変形の補正

化石は地層中で少なからず続成作用による変形を被っている。そのため、変形が大きい場合は、化石を研究する際に頭の中で変形をある程度補正する必要がある。しかし、3D CG 技術はこの化石の変形補正をある程度可能にした（例えば、新村・木村 2020；Suarez et al. 2023）。本来、化石の変形補正は 3D モデルに設定したランドマークの移動距離を求め、数値的に行われるが（例えば、Ogihara et al. 2006；Schlager et al. 2018）、ここでは ZBrush の機能を使った簡易的な変形補正を紹介する。

変形には、「木を割り曲げるような変形」と「こんにゃくを曲げるような変形」がある。前者の変形では、パズルを組み合わせるようなものなので、正確に復元することができ、化石の逆変形“Retrodeformation”の対象になることはほとんどない。一方、後者の変形は、化石の逆変形のメインの対象であり、「脊椎動物は基本的に左右対称である」ということが利用され、ある程度元に戻すことができる。しかしながら、上下や左右に圧縮されているようなものについては、ゆがんでいない他の標本を参考に復元するしかない。

小金湯クジラの下顎骨は数個に分かれ、表面はブロック状に落ち込んでいるが（図1）、それぞれのブロックの表面は元の面を保っているように見える。ヒゲクジラ類の下顎骨の内側面と外側面は、連続的な面であるため、形を保っている面が連続的に接続するように、それぞれのブロックを移動させることで復元できる。具体的には、ZBrush 上でそれぞれのブロックをグループ化（Z プラグインの PolyGroupIt）し、動

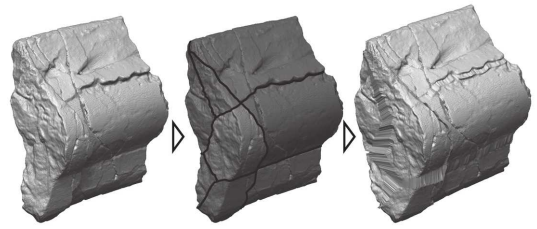


図1. 小金湯クジラの下顎骨の一部。「木が割れるよう」に変形している。ブロックをグルーピングした後に、それぞれのブロックの位置を動かして変形を補正した。

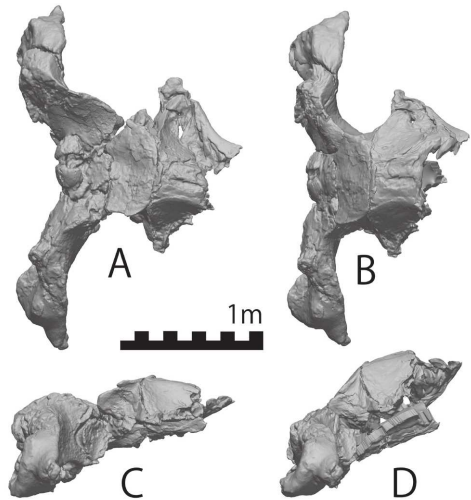


図2. 小金湯クジラの背側観(AB)、右側面観(CD)。右側の鱗状縫合が外れ、後頭骨と左側の側頭骨が「こんにゃくが曲がるように」変形している。ACは変形補正前、BDは変形補正後である。

かすブロック以外をマスクして、隣のブロックと調和的にするように配置し直す（図1）。頭蓋骨は右の鱗状縫合の部分が外れているため、上記と同様の方法で変形を補正した（図2）。これらが「木を割り曲げるような変形」の手法である。同様なマスクをかけて移動させる操作は、Blender でも可能である。

「こんにゃくを曲げるような変形」の一つの例として、小金湯クジラではないが、デスモスチルス歌登標本の頭蓋骨の例を挙げる。この標本を前方から見ると、箱が平行四辺形様にひしゃげるような変形をしている。この頭蓋骨は本来左右対称であり、この関係を復元するように頭蓋骨の変形を補正する。手法は ZBrush の Gizmo 3D の変形システム（ハードデフォーマやソフトデフォーマ）を使い、化石を覆うような格子を変形させることによって変形補正を行う（図3）。Blender でも同様の変形ができ、ラティス

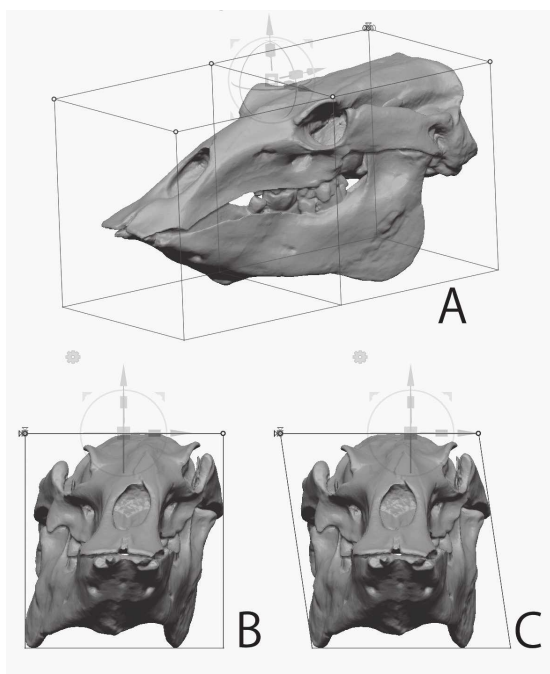


図3. ZBrushのGizmo 3Dを使った頭蓋の変形補正。A, 格子を表示させた頭蓋(左斜め前)。B, 変形補正前の頭蓋の前面観。C, 変形補正後の頭蓋の前面観。

変形と呼ばれている。小金湯クジラにおいては、頭蓋骨の左側が変形しており、比較的に変形していないと判断される右側を参考に、ムーブブラシで変形を元に戻した。Gizmo 3Dの変形システムを使ってはいない。小金湯クジラの頭部骨格は全体が大きく上下方向に圧縮されており、後頭部は陥没しているが、ほぼ左右対称の変形であるため変形補正の手掛かりがなく、現生のセミクジラ類の頭蓋を参考に上下方向にムーブブラシで膨らませた(図2)。Blenderのスカulptモードがほぼ同じ機能として使える。

3. 化石発掘の際はフォトグラメトリーを

産状の記録は、化石化過程の推定や教育普及にも効果があるが、部位が正確にわからない骨(例えば指骨や肋骨、激しい変形を被った骨)に関しても役立つ場合がある(北川2024)。発掘しやすい固結度の低い堆積岩中の化石なら、その場で部位の同定を行いながら発掘が可能であるが、固結した堆積岩中の化石である場合、異なるブロックに分けて掘り出した後にクリーニングを行うことがあり、隣接するブロックにまたがった化石の場合は、後から同じ骨だと判断しづらくなる。

化石発掘では従来から産状の真上からのスケッチや写真、レプリカを作るなどで記録されてきた。しかし

写真は、ピントが一部分にしかあっていなかったり、堆積岩と化石の色合いも似ていて何を撮ったかが分からなくなったり、スケールが写っていないと大きさが分かりづらくなることなどの問題がある。またレプリカの制作はそれだけで多額のコストや時間を要するなどの問題がある。近年は3Dスキャナーで産状のデータを取る方法も実践されているが(河部ほか2024)、高価な専用の機材や技術者が必要になるため、気軽にできるものではない。そこで産状をフォトグラメトリー用に写真を撮影することで、パソコン上で再現する方法を紹介したい。フォトグラメトリーでは、写真を一つの標本あたり100枚程度、焦点距離を一定に撮れば良いだけなので、高度なテクニックが必要なわけでも、多額のコストがかかるわけでもない(安藤ほか2018;新村・澤村2024)。もちろん、専用のソフトウェアやハイスペックのPC、写真撮影の技術はある程度必要となるが、他の手法と比べれば安価かつ安易に活用することができる。大型化石のクリーニングの過程を定期的に撮影すれば、最初は堆積物に覆われて見えなかった化石も3Dの産状に反映させていくことが可能であり、写真データとして残せば、3Dモデル化はいつでも可能となるなど多くの利点がある。よって今後大型動物化石発掘の際は、フォトグラメトリーによる3D化を見越した撮影を推奨する。

4. 科学的な生体復元画は3D活用が必須

科学的に正確な復元を行うためには、3D CGの骨格を埋め込むか(例えば、新村ほか2011;新村2014;新村・小西2018, 新村・松井2019)、2Dで作業する場合は、骨格の写真や3D CGの骨格の図をトレースするように描く必要がある(小田ほか2024)。筆者らは、3D CGの骨格を埋め込んで小金湯クジラの頭部の生体復元を行った。頭部骨格は、前述のとおり変形補正を行い、欠損部位を現生セミクジラ類のパーツで補い、それに軟組織を被せた(図4)。

クジラ類の化石標本に限らず、博物館には多くの化石がその動物の生体復元画、あるいは生態復元画とともに展示されており(安藤ほか2019)、来館者はそれを見て正しい姿だと思うだろう。もちろん、産出していない部位や解釈や考察の違いで、姿勢など、様々な復元が存在することは当然であるが、産出した頭蓋骨の形態がその生体復元と矛盾するのは問題である。つまり、3Dで見たときにその生体復元から骨が飛び出してしまったりは復元画の役割や意義を失ってしまっているといえる。しかしながら2Dで描かれているものは、交連骨格などの写真をトレースして描いたものでなければ、例え骨格に矛盾が無い絵だと制作者が主張したとしても、それを証明することは難しい。しば

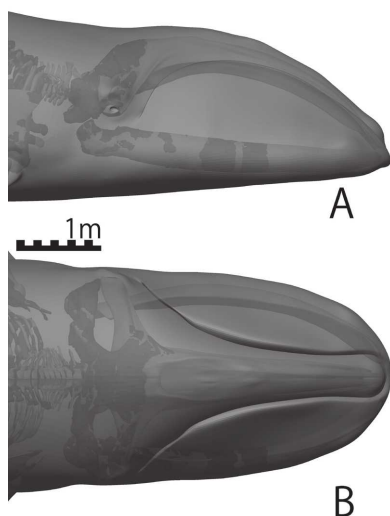


図4. 小金湯クジラ頭部骨格を透かせた生体復元. A, 左側面観. B, 上面観.

しばその分類群の研究者が監修についていることが正確な復元の根拠のように言われるが、その動物の研究者であっても、骨格標本に矛盾なく軟組織を復元した経験はほとんどないと思われるので、監修者がいることが、必ずしも矛盾しない生体復元とはならないだろう。つまり、骨格に矛盾しない復元を達成するには、専門家の監修よりも正確な3Dの骨格復元データが必要不可欠なのである。古生物の生体復元は、脊椎動物に限ったものではない。形態がもっと厳格なのは、アンモナイトなどの外骨格を持った生物である。例えば異常巻きアンモナイトを一から造形するのはかなり難しく、巻き方が不正確な復元画もしばしば目にする。博物館などでも3Dスキャナーやフォトグラメトリソフトの導入が進んでおり、様々な化石標本がネット上にアップロードされているなど、骨格データを得やすい環境はすでにできているため、復元には3D CG技術の活用が進むべきだと思う（唐沢ほか2024）。

その一方で、生体復元の魅力は科学的な正確性だけではない。制作者の表現方法によっては、正確性よりも作品としての魅力が重要視されることももちろんあるべきである。そう言った復元は、視覚的な効果を持ったイメージとしての復元として尊重されるべきであろう。

5. おわりに

筆者の一人である新村が小金湯クジラのプロジェクトに参加したのは2018年からである。その時にはすでに化石のクリーニングが終わり、次にバラバラに剖出

された骨の元の位置を決定する段階となっていた。そこで3D CGソフト上で復元を試みるために、新村に復元の依頼された。3D CGによる検討を進める中で、椎体から離れた胸椎の横突起の位置を特定し、元に戻すことができた。しかしながら椎体から離れてバラバラになった断片が、横突起か棘突起か分からないものもあり、一つの肋骨が数個の骨片になっており、その左右も前後の位置関係も特定が難しく、復元に難渋する場面も多くあった。

講演内容を検討する過程で、化石発掘時の産状のフォトグラメトリーの重要性についても広く伝える必要があると考えた。クジラ類などの超大型化石の発掘は人生において百年に一度あるか無いかのビッグイベントである。そうしたチャンスには後悔が無いように、3D CGの活用や産状のデータ保存にはフォトグラメトリーを勧めたい。本稿では3DCGやフォトグラメトリーに関して、化石の変形補正、化石の生体復元、化石のクリーニング、化石発掘時の産状記録などについての活用事例の概要について述べた。今後もこれらの技術による古生物学的な活用事例を蓄積しながら、より発展的な活用を検討したいと考えている。

2023年6月3日に開催された化石研究会第41回総会・学術大会シンポジウム「東北・北海道の鯨類化石研究の現在と展望」では新村・古沢が発表した。後に田中が加わり講演録の原稿をまとめた。

謝辞

本シンポジウムでは長澤一雄氏（山形県立博物館）をはじめ化石研究会の方々には発表の機会を与えていただき、厚く御礼申し上げます。安藤佑介氏および長澤一雄氏には原稿の査読を通して有益なコメントをいただきました。上記のみなさまに御礼申し上げます。最後に共著者の古沢氏は2023年9月2日に逝去されました。新村は学生時代から、古生物の復元について様々な議論をしていただき大きな影響を受けてきました。急なお別れが残念でなりません。

引用文献

- 足寄動物化石博物館（2022）足寄の化石3Dプリンターでグッズ化。博物館だより（159），1
- 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明世層産 *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），63-70
- 安藤佑介・木村敏之・小田 隆・府高航平・瀬尾和宏（2019）中新統ヒゲクジラ類 *Isanacetes*（イサナセタス）属の復元と瑞浪市化石博物館の展示への活

- 用. 瑞浪市化石博物館研究報告 (45), 99-120
- 古沢 仁 (2009) 骨を見る目〜クジラ化石発見の第一歩. 札幌市博物館活動センター情報誌 Muse Letter (36), 1
- 古沢 仁 (2017) 札幌のクジラはすごい!! 札幌市博物館活動センター情報誌 Muse Letter 67, 2-3
- 唐沢興希・松井久美子 (2020) 天然記念物に“触れる”: 地方博物館における貴重な標本のマルチメディア活用. 化石 108, 3-10
- 唐沢興希・相場大祐・新村龍也 (2024) 3D-CG を用いた白亜紀アンモノイド類の生体復元と, 博物館展示への活用. 三笠市立博物館紀要 (27), 1-14
- 河部壮一郎・佐野瑞穂・新村龍也 (2024) パレオパラ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. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3), 99-108
- 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
- 北川博道 (2024) パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本の産状と骨格. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3), 29-42
- Matsui K, Kimura Y, Nagata M, Inose H, Ikeda K, Beatty BL, Obayashi H, Hirata T, Otoh S, Shinmura T, Agematsu S and Sashida K (2018) A long-forgotten 'dinosaur' bone from a museum cabinet, uncovered to be a Japan's iconic extinct mammal, *Paleoparadoxia* (Desmostylia, Mammalia). Royal Society Open Science 5, <https://doi.org/10.1098/rsos.172441>
- 小田隆・安藤佑介・新村龍也・北川博道・甲能直樹 (2024) パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本復元画の制作. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3), 109-111
- Ogihara N, Makatsukasa M, Nakano Y, Ishida H (2006) Computerized Restoration of Nonhomogeneous Deformation of a Fossil Cranium Based on Bilateral Symmetry. American Journal of Physical Anthropology 130, 1-9
- 佐藤たまき・仲谷英夫・新村龍也 (2020) ホベツアラキリュウの肢帯の再解釈と復元骨格の改修. むかわ町穂別博物館研究報告 (35), 19-32
- Sato T, Nagai K, Echizenya H, Shinmura T, Hikida Y, Soeda Y (2023) Pliosaurid (Reptilia: Sauropterygia) remains from the Upper Cretaceous of Japan, and their biostratigraphic and paleogeographic significance. Cretaceous Research 150, <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105593>
- 三枝春生 (2020) 3D モデリングによるミエゾウとタシバティタニスの骨格復元. 化石研究会会誌 52, 44-53
- Schlager S, Profico A, Vincenzo FD, Manzi G (2018) Retrodeformation of fossil specimens based on 3D bilateral semi-landmarks: Implementation in the R package "Morpho". PlosOne, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194073>
- 新村龍也・大石雅之 (2008) シロナガスクジラの下顎骨挙上時のシミュレーション. 日本セトロロジー研究 18, 1-7
- 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 poludentatus* の復元. 化石 90, 1-2
- 新村龍也 (2014) *Aetiocetus polydentatus* の頭部復元と模型作製. 足寄動物化石博物館紀要 (7), 11-23
- 新村龍也・田中喜寛・甲能直樹・山田一孝・佐々木基樹 (2016) 北海道産鰐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
- 新村龍也・小西卓哉 (2018) *Phosphorosaurus* の3D CG による生体復元と骨格復元の制作: 3D CG ソフトによる古脊椎動物復元の有効性と将来性. むかわ町穂別博物館研究報告 (33), 37-44
- 新村龍也・澤村寛・安藤達郎・田中喜寛 (2018) 館内制作から生まれた戦略と連携. 小川義和・五月女賢司 (編著) 挑戦する博物館. ジダイ社, さいたま市, 90-103
- 新村龍也・松井久美子 (2019) 3D CG による東柱類の生体復元. 化石 106, 1-2
- 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—*Kentriodon nakajimai* (Odontoceti, Kentriodontidae) の復元画制作—. 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. むかわ町穂別博物館研究報告 35, 33-48
- 新村龍也・澤村 寛・安藤達郎・高島孝宗 (2023) 歌登から新たに発見された上腕骨と3D モデルを使った *Desmostylus* の体サイズ推定. 枝幸研究 (14), 51-56
- 新村龍也・澤村 寛 (2024) 北海道津別町から産出した中新統の鰐脚類化石のクリーニング. 日本古生物学会2024年年会講演予稿集, 34
- Suarez C, Forasiepi AM, Babot MJ, Shinmura T, Luque J, Vanegas RD, Cadena E-A and Goin FJ (2023) A sabre-tooth predator from the Neotropics: Cranial morphology of *Anachlysictis gracilis* Goin, 1997

- (Metatheria, Thylacosmilidae), based on new specimens from La Venta (Middle Miocene, Colombia). *Geodiversitas* 45, 497-572, <https://doi:10.5252/geodiversitas2023v45a18>
- Steyer JS, Boulay M, Lorrain S (2010) 3D external restorations of stegocephalian skulls using ZBrush: The renaissance of fossil amphibians. *Comptes Rendus Palevol* 9, 463-470
- 米山明男・馬場理香 (2019) 放射光イメージングと 3D プリンターを組み合わせた化石の高精細三次元再構成の試み. *化石研究会会誌* 51, 53-58

新村龍也・田中嘉寛・古沢 仁 (2024) 3 DCG 技術をクジラの復元に活用する—札幌のセミクジラ類化石を例に—. *化石研究会会誌* 57, 44-49

Tatsuya Shinmura, Yoshiriro Tanaka, Hitoshi Furusawa (2014) Using 3D CG technology for the reconstruction of whale fossils. *Journal of Fossil Research* 57, 44-49

要旨

本論文では、特に札幌市小金湯で発見されたクジラ化石（小金湯クジラ）に焦点を当て、化石動物の生体復元における 3D CG 技術の応用について紹介する。3D CG 技術は、単離した骨化石の部位特定や化石の逆変形を可能にし、正確な骨格復元を可能にした。また、3D CG 技術は正確な生体復元において優れた利点がある。本論文では、ZBrush や Blender といった 3D ソフトを用いた具体的な手法を紹介し、化石発掘時のフォトグラメトリー用写真撮影の推奨についても述べた。