

[特集・原著]

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

三枝春生*

Skeletal reconstruction of *Stegodon miensis* and *Tambatitanis amicitiae* by means of 3D modeling

Haruo Saegusa*

Abstract

3D modeling and printing were used to create the mounted skeleton of a Pliocene proboscidea, *Stegodon miensis* and an Early Cretaceous titanosauriform sauropod, *Tambatitanis amicitiae*. Both *S. miensis* and *T. amicitiae* are known only from partial skeletons, which preserve less than one third of the total number of skeletal elements. To reconstruct their skeletons, the unfound skeletal parts should be modeled, using the modification of 3D digital data of fossil bones (virtual bones) of closely related taxa.

In case of *S. miensis*, a complete skeleton of *S. huanghensis* is available as a template. The virtual bones of several individual of *S. miensis* replace the corresponding elements of the template. The virtual bones of *S. miensis* and those of *S. huanghensis* are modified so as to articulate each other.

T. amicitiae is known only from the holotype partial skeleton. As there is no titanosauriform known from a complete skeleton, partial skeletons of various titanosauriform dinosaurs were used in the modeling of unfound skeletal parts of *T. amicitiae*.

Completed virtual skeletons of *S. miensis* and *T. amicitiae* were finally printed in real size using 3D printers and mounted in museums.

Key words: virtual skeletal reconstruction, *Stegodon*, *Tambatitanis*

1. はじめに

絶滅した脊椎動物の多くの種では骨格の大部分が未発見であり、そのような種の化石は元来骨格復元には適さない。しかし、国内には部分的な骨格であるにも関わらず、その地方を代表する化石種であるために、博物館の展示物としてこうした化石種の復元骨格模型を作成してほしいという要望がある。本稿で紹介する長鼻類 *Stegodon miensis* (以下ミエゾウ) および兵庫県の下部白亜系篠山層群産の恐竜 *Tambatitanis amicitiae* (以下タンバティタニス) はこのような事例に当たる。

従来の手法では、部分骨格化石のレプリカと同種の別個体あるいは近縁種の骨格を参考に粘土等で造形した欠落部分の模型を組み合わせて復元骨格を作成する。欠落部分が多い場合、試作の回数は、より完全な

ものを扱った場合よりも多くなるが、従来の方法では試作の回数には制限があり、また試作品をすべて保存することは困難である。化石が死後変形 (postmortem distortion) している場合は、実物の化石は勿論、シリコン型から作成したレプリカも、それ自体の形状を変化させて死後変形を補正することはほぼ不可能なので、死後変形前の状態を、アーティストの直感にたよりにながら粘土等で造形せざるを得ない。

他方3Dモデリング (コンピュータ上で三次元の構造モデル (3Dモデル) を作ること) を骨格復元に適用すれば以下のことが可能となる。

- 1) 化石骨の表面形状の3Dモデル (以下仮想キャストとする) をコンピュータ上で変形させることにより化石表面の質感を残したまま死後変形の除

2019年8月14日受付, 2019年9月12日受理

*兵庫県立人と自然の博物館・兵庫県立大学自然・環境科学研究所 〒669-1546 兵庫県三田市弥生が丘6丁目
Museum of Nature and Human Activities, Institute of Nature and Environmental Sciences, University of
Hyogo, Yayoigaoka 6, Sanda, Hyogo 669-1546, Japan
E-mail: saegusa@hitohaku.jp

去（あるいは軽減）が可能。

- 2) 四肢骨や肋骨が左右の片方しか保存されていない場合、コンピュータ上で仮想カストの鏡像を作り、欠損部を補填することができる。
- 3) 完全に欠損した部位を近縁種の仮想カストを変形して作成した3Dモデルにより補填できる（仮想カストを変形したものも含め造形がなされた骨の3Dモデルは全て仮想骨モデルと呼ぶことにする）。
- 4) 復元骨格の3Dモデル（以下仮想復元骨格とする）の試作は何回も繰り返すことが出来、以前のバージョンに戻り試作をやり直すことも容易。
- 5) 試作の各バージョンをデータとして保存し公開すれば第三者による制作過程の検証も可能。
- 6) 仮想復元骨格から3Dプリント機器により様々な大きさのプリント品を作成できる。

このように多くの利点があるにも関わらず、3Dモデリングによる骨格復元は少なくとも国内ではまだ一般的でなく、また3Dモデリングを復元に使った事例の紹介も少ない（新村ほか 2016；など）。そこで本稿ではミエゾウとタンパティタニスの3Dモデリングによる骨格復元の事例を紹介する。なお本稿で述べる復元過程は概略でありその詳細は別稿で述べることにする。

2. ミエゾウの骨格復元

2.1 経緯

日本の鮮新統より産出するミエゾウは、そのホロタイプ（NSM-PV 2193）が三重県津市芸濃町林から産出しており（松本 1941；樽・甲能 2002）、同県を代表する古脊椎動物と言える。そこで、ミエゾウの復元骨格模型を三重県立総合博物館に展示するために、ミエゾウ全身骨格復元検討委員会（委員：亀井節夫（監修）、樽野博幸（委員長）、三枝春生、小西省吾）が2010年6月に設置された。ミエゾウの全身骨格化石は産出していないので、複数個体の部分骨格化石を組み合わせて骨格復元を行う必要があった。さらに、伊賀市平田の服部川河床産の足跡化石（服部川足跡化石調査団 1996）のレプリカと復元骨格模型を並べて展示するため、後者の大きさを前者から推定される体の大きさに合わせる必要があった。従来の方法ではこれらの条件を満たすことが困難なため、3Dモデリングにより仮想復元骨格を作成し、それから実物大の復元骨格模型を作るようになった。3Dモデリングは著者が行い、委員会で仮想復元骨格の問題点が討議され、修正が行われた。完成した仮想復元骨格から3Dプリント機器を用いて7分の1プリント品を作成し、そ

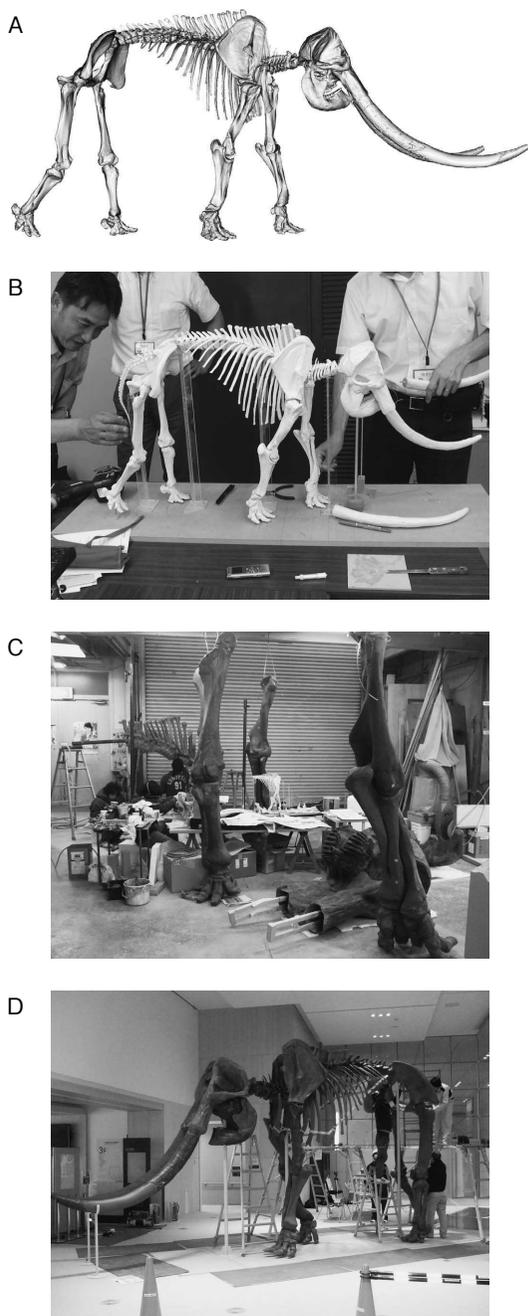


図1. ミエゾウの復元骨格模型の制作過程。

A: ミエゾウの仮想復元骨格。B: 3Dプリント機器で打ち出した7分の1骨格模型。C: 実物大骨格模型の作成。D: 三重県立総合博物館に設置されたミエゾウの復元骨格模型。

れを参照しながらに手作りで実物大の復元骨格模型を作成、同年12月に三重県立総合博物館に設置した（図1）。

2.2 材料と方法

部分骨格をもとに仮想復元骨格を作成するには、欠落部分作成の参考となる近縁種の3Dデータが必要である。そのためには近縁種との系統関係が明らかでなければならない。日本の鮮新世・前期更新世のステゴドン類は大陸から渡来したツダンスキーゾウ (*Stegodon zdansky*) からミエゾウが進化し、さらにミエゾウからアケボノゾウ (*Stegodon aurorae*) へと進化したと考えられている (Saegusa et al. 2005)。樽野 (1991) および樽野・亀井 (1993) は淡路島の大阪層群から産出するステゴドン臼歯が典型的なアケボノゾウからは形態的・年代的に異なることから *Stegodon* sp. cf. *aurorae* とし、ミエゾウからアケボノゾウへと進化する過渡的なものとした。一方、Aiba et al. (2010) は八王子市北浅川河床産のステゴドン類の部分骨格がこの過渡的な種であるとし *Stegodon protoaurorae* (ハチオウジゾウ) と命名した。しかし、ハチオウジゾウはアケボノゾウのシノニムであるとする異論がある (小泉 2017)。そこでミエゾウに近縁な種はツダンスキーゾウとアケボノゾウと考え、以下の標本の3Dデータを収集した。

コウガゾウレプリカ：中国甘肅省合水県板橋産 *S. huanghensis* (= *S. zdanskyi*) の全身骨格レプリカ (三重県総合博物館所蔵)

安心院標本：大分県宇佐市安心院町森の深見川産ミエゾウの部分骨格化石 (宇佐市教育委員会所蔵)

五日市標本：東京都あきるの市網代産ミエゾウの部分骨格化石 (八王子市教育委員会所蔵)

北黒田標本：三重県津市河芸町北黒田産ミエゾウの部分頭蓋化石 (三重県総合博物館所蔵)

椋川標本：三重県亀山市住山町椋川産ミエゾウの切歯化石 (三重県総合博物館所蔵)

明石標本：兵庫県明石市中八木産アケボノゾウの部分骨格化石 (大阪市立自然史博物館所蔵)

多賀標本：滋賀県犬上郡多賀町四手産アケボノゾウの部分骨格化石 (多賀町立博物館所蔵)

これら骨化石の3Dデータ (点群データ) はハンディ型の3Dスキャナー (Scanner 700, Z Corporation および Artec MH, Artec Group Inc) を用いて採取した。ポリゴンメッシュ欠陥の補正、ダウンサイジング等を Rapidform XOS2 (現在は Geomagic, INUS Technology) で行い、それを3Dモデリングソフトである Rhinoceros 4.0 (Robert McNeel & Associates) 上で組み立てた。変形の補正などの形状変更および欠損部分の作成は Rhinoceros および3Dモデリングソフトである Sculptris (Pixologic Inc.) で行った。

2.3 ミエゾウの仮想復元骨格の工程

体の大きさの異なる複数個体の骨を組み合わせる場合、アロメトリーによる骨のプロポーシオンの違いが問題となるが、安心院標本とコウガゾウレプリカの大腿骨のプロポーシオンに大きな差異はなかった (図2C)。そこで大型のステゴドン間では肢骨のプロポーシオンに大きな差はないと仮定し、形状を変えずに大きさだけを変更した仮想カストを組み合わせることにした。

前肢骨格の復元には、安心院標本で保存されている上腕骨、尺骨、橈骨 (高橋・北林 2001) とコウガゾウレプリカの肩甲骨と手骨格を組み合わせた (図2D)。安心院標本の上腕骨および橈骨は死後変形を補正して使用した。アケボノゾウの肩甲骨は複数産出しており (雨森ほか 1995; 小西 2000; 樽 1996)、コウガゾウのそれに類似している (樽 1996)。ミエゾウは系統的に両者の間にあることからこれらと同様の形態であったと考え、コウガゾウの肩甲骨の仮想カストを使うことにした。ミエゾウでは手骨格のいくつかの骨が発見されているが (宍岐島地学研究グループ 1973; 五日市ステゴドン調査団 1980; 高橋・北林 2001)、コウガゾウレプリカの手骨格は関節状態であり、ミエゾウの手骨格要素をその中に調和的にはめ込むのは難しい。そこでコウガゾウの手骨格の仮想カストは関節状態のまま使うことにした。ミエゾウの足骨格の骨もいくつか発見されているが、同じ理由でコウガゾウレプリカの関節状態の足骨格の仮想カストをそのまま使用した。

後肢骨格の復元には、安心院標本の大腿骨とコウガゾウの寛骨、脛骨、腓骨、足骨格を組み合わせた (図2C)。ミエゾウの脛骨は五日市標本で知られているが (五日市ステゴドン調査団 1980)、変形が強すぎるので使用しなかった。骨盤はミエゾウでは発見されていないが、アケボノゾウでは発見されている (樽野・紀川 1975; 雨森ほか 1995; 小西 2000)。しかしそれらは華奢であり体の小ささがプロポーシオンに反映していると考えられる。そこで、コウガゾウレプリカの骨盤を使用した。コウガゾウの骨盤は現生ゾウのそれに比べ扁平だが、コウガゾウの腸骨は腹側面を下にして埋蔵されていたので (黄河象研究小組 1975 中の図版)、扁平な形態は土圧による変形である可能性がある。そこで、コウガゾウの骨盤の仮想カストを現生ゾウやアケボノゾウの腸骨の湾曲度を参考に修正した (図2B)。

頭蓋の復元は北黒田標本 (図3A) とコウガゾウの頭蓋の仮想カスト (図3B) を組み合わせて行った。コウガゾウの頭蓋は全体が斜めにひしゃげており、さらに上顎骨から後頭骨にかけて走る小断層によるずれ

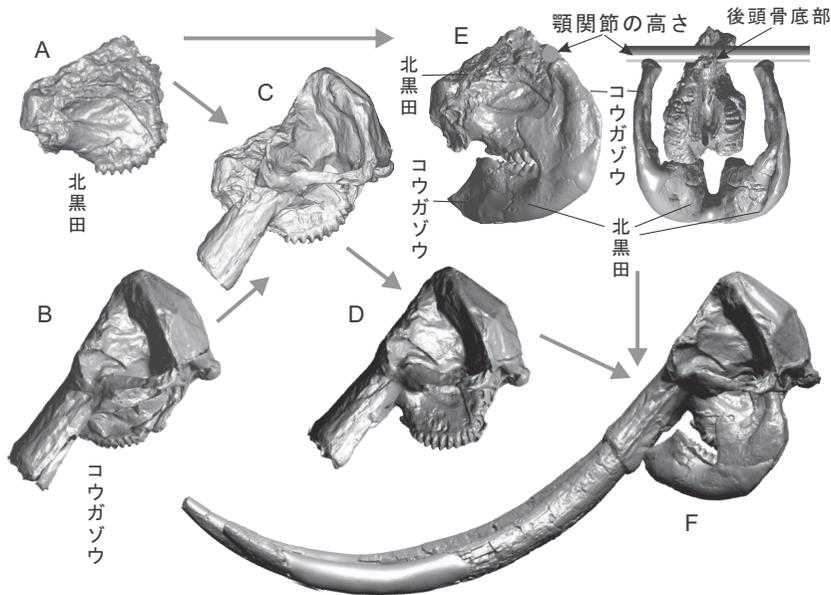


図3. ミエゾウの頭蓋の復元工程。

A: 三重県津市河芸町北黒田産ミエゾウ頭蓋破片骨モデル。B: コウガゾウ頭蓋レプリカ骨モデル。C: 北黒田標本とコウガゾウ頭蓋を重ね合わせると前者が突出。D: コウガゾウ頭蓋の死後変形の補正と位置関係の調整で北黒田標本の突出を解消。E: 北黒田標本とコウガゾウレプリカの下顎骨を組み合わせる。F: 三重県亀山市住山町椋川産切歯の仮想骨モデルも加えて完成。

がある。これら変形を修正したコウガゾウ頭蓋の仮想骨モデルに口蓋の前後長と幅を同スケールにした北黒田標本の頭蓋破片の仮想骨モデルを重ねると、北黒田標本がコウガゾウ頭蓋よりも前方に突出する(図3C)。コウガゾウの頭蓋は顔面を上にして埋蔵されていたので(黄河象研究小組 1975 中の図版による)、コウガゾウ頭蓋の顔面部が他の部分よりも強く圧平されていると解釈し、コウガゾウ頭蓋の仮想骨モデルの顔面部を前方向に膨らませ、さらに北黒田標本仮想骨モデルを背側後方に回転させることによりその前方への突出を解消した(図3D)。

下顎骨は北黒田標本の臼歯付き下顎体の破片にコウガゾウの下顎枝を組み合わせて復元した(図3E)。北黒田標本の上顎臼歯に下顎臼歯をかみ合わせて下顎体の位置を決め、次に後頭骨底部から下顎窩の高さを推定、この高さの下顎窩に下顎頭が関節可能かつ北黒田の下顎体と自然に連続する位置に下顎枝を置いた。こうして復元された下顎は、コウガゾウよりもむしろアジアゾウのそれに近い下顎枝が強く前傾した形態となった。切歯の復元は三重県椋川産の切歯の欠損部を補充して作成した(図3F)。

脊柱の復元には、安心院産のミエゾウの仮想キャストに加え多賀町産および明石市産アケボノゾウの仮想キャストを用いた(図2A)。環椎、第3~4、第6~7頸椎は安心院標本の仮想キャストを用い、第5頸椎の仮

想骨モデルは安心院標本第4頸椎の仮想キャストを変形させて作成した。軸椎は多賀標本の仮想キャストを使用した。他方、多賀町産アケボノゾウの胸椎は棘突起の傾斜が安心院産ミエゾウ、コウガゾウ両者とかなり異なるため用いなかった。胸椎と腰椎は安心院標本の第1、6、12、17~20胸椎、第1~3腰椎と明石標本の腰椎の仮想キャストを使った。安心院の胸椎と腰椎は変形を補正しさらに欠損部を作成、第4、5腰椎は明石と安心院から合成し、これらをコウガゾウレプリカ脊柱の該当部と入れ替えた。安心院の胸椎と腰椎の変形の補正では、左右対称かつ椎体が円柱形になるように変形を補正した。最後に脊柱に自然なカーブをつけるために関節の角度を微調整した。

胸郭の復元にはコウガゾウの肋骨は使わず、ミエゾウとアケボノゾウの肋骨のみを用いた。ミエゾウとアケボノゾウいずれにおいても発見されていない肋骨は隣接する肋骨を複製し、長さなどを変えながら作成した。肋骨の長さはアフリカゾウ(仙台市科学館所蔵標本)における第1肋骨とそれ以外の肋骨長の比率を参考にした。

上記の工程で作成したミエゾウの肋骨を椎骨と関節させると肋骨は乱雑に並んでしまう。これは個体、分類群の違い、死後変形に起因している。そこで多賀標本の復元骨格模型の胸郭における左右肋骨の遠位端の間隔を参考に、胸郭の形態に合うように肋骨と椎骨の

仮想骨モデルに修正を施した。完成した体幹に四肢を取り付け、肋骨と椎骨の関節角度を若干調節、これに頭蓋と切歯を接合、最後に骨格全体の大きさを、服部川の足跡化石（直径約60cm）から推定される体の大きさ（頭胴長7.6m、肩高3.6m）にあわせ、仮想復元骨格が完成した。

2.4 結果

骨格復元を始めた当初は、成果物はコウガゾウの骨格とそれほど変わらないものになると予想していた。しかし、実際にはコウガゾウのレプリカの仮想カストの形状を変化させないとミエゾウのそれらと組み合わせることは困難なことが判明し、結果としてミエゾウの骨形状を反映した仮想復元骨格となった。特に頭蓋および脊柱の形状はコウガゾウのそれらから大きく変更された。

ミエゾウの復元骨格模型は、服部川河床の足跡化石のレプリカとともに、三重県立総合博物館の代表的な展示物の一つとなった。ただし、経費の関係から、小型の3Dプリント機器で出力した7分の1模型（図1B）を参考に手作業で実物大模型を作製したため（図1C）、関節部の形状などに仮想復元骨格を反映していない部分があり、組み立て時に補正をする必要があった。

3. タンパティタニスの骨格復元

3.1 経緯

タンパティタニスは2006年に兵庫県東部に位置する丹波市山南町の下部白亜系篠山群層大山下層から発見され（三枝ほか 2008）、2014年に新属新種として記載された（Saegusa and Ikeda 2014）。2010年に丹波市の展示施設である「丹波竜化石工房ちーたんの館」がオープンし、剖出の完了した化石のレプリカを骨格の輪郭図上に順次追加するウォールマウントが設置された。

しかし、ウォールマウントは観客に対する訴求力が低い。そのため丹波市から復元骨格模型作成に対する要望が出てきた。しかし、タンパティタニスの化石はホロタイプである部分骨格のみであり、かつ変形している部分も多い。そこで復元骨格模型の作製に3Dモデリングを適用することになり、2014年～2015年度に丹波市はその作成を兵庫県立人と自然の博物館に委託した。

大型物は出力時間が掛かるため、プリント機器の台数を増やして、タンパティタニスの仮想骨モデル（図4A）を分割して部品化した小さいパーツを出力し（図4B）、それらを組み立てる工法とした。小さいパーツを組み立てたプリント品は、荷重に対する耐久

性が低いので、それを型取りし（図4C）、FRP成型で制作する（図4D）仕様とした。また骨格を交連するのに用いるフレームの耐震荷重シミュレーションを行い（図4E）、耐震設計基準を満たすフレームの設計を行った（三枝ほか 2016）。2016年4月、タンパティタニスの復元骨格模型が「タンパティタニス化石工房ちーたんの館」に設置された。

3.2 材料と方法

タンパティタニスの化石はホロタイプである丹波市山南町産の部分骨格（MNHAH D-1029280）のみ（Saegusa and Ikeda 2014）である。その仮想カストに近縁種を参考に作成した欠損部分を組み合わせて仮想復元骨格を作成した。

タンパティタニスは東アジアに固有のティタノサウルス形類竜脚類であるエウヘロプス科（Euhelopodidae）に属する（Saegusa and Ikeda 2014）。エウヘロプス科には全身骨格が発見されている種はなく、発見されている部位も種により異なり、エウヘロプス科で産出していない部位もある。そこで系統的に近くかつ保存部位の最も多い種の化石を参考に未発見部分を作成し、その種に保存されていない部位は、より系統的に離れた種の該当部位を参考にした。手および足骨格以外の体肢骨格と中軸骨格は *Phuwiangosaurus*（エウヘロプス科、タイの白亜系産）と *Euhelopus*（エウヘロプス科、中国の白亜系産）、足骨格は *Opisthocoelicaudia*（ティタノサウルス類、モンゴルの白亜系産）と *Gobititan*（エウヘロプス科、中国内モンゴルの白亜系産）、手骨格は *Giraffatitan*（ブラキオサウルス科、タンザニアのジュラ系産）、頭蓋は *Camarasaurus*（基盤的マクロナリア類、北米のジュラ系産）、*Giraffatitan*、*Tapuiasaurus*（ティタノサウルス類、ブラジルの白亜系産）を参考にした。

化石骨の3Dデータは、スキャナーZScanner 700で取得したもの（タンパティタニスと *Opisthocoelicaudia* のデータ）に加え、デジタルカメラ（Nikon CoolPix P7800）で撮影した写真からフォトグラメトリー用ソフトウェア（PhotoScan, Agisoft）で作成した3Dデータ（タンパティタニス、*Phuwiangosaurus*、*Giraffatitan* のデータ）も用いた。*Gobititan* の足骨格のステレオ写真、*Camarasaurus* 頭蓋の3Dデータ（Button et al. 2014）、*Tapuiasaurus*（Zaher et al. 2011）および *Euhelopus*（Wiman 1929）の記載論文とその中の図版も参考とした。3Dモデリングに使用したソフトウェアは *Rhinoceros*、*Sculptris*、*Rapidform XOS 2* の3種である。

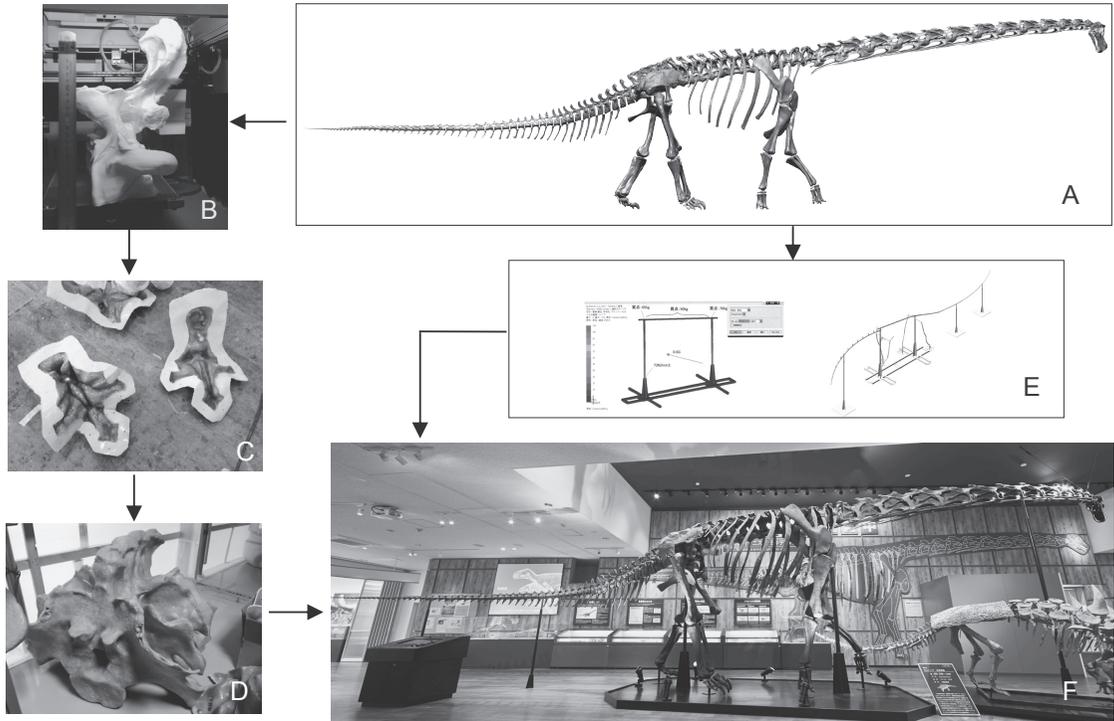


図4. タンパティタニスの復元骨格模型の制作過程。

A: タンパティタニスの仮想復元骨格. B: 3D プリント機器による打ち出し. C: プリント品の型. D: 型から作成したFRP 成型品. E: 交連用のフレームの設計と耐震荷重シミュレーション (西川工房提供). F: 「タンパティタニス化石工房ちーたんの館」に設置されたウォールマウントとタンパティタニスの復元骨格模型 (日展 (株) 提供).

3.3 タンパティタニスの仮想骨格の工程

頭蓋のモデルはタンパティタニスで保存されていた脳函、後眼窩骨、歯骨および歯の形態をティタノサウルス類、ディプロドクス類、基盤的ティタノサウルス形類のそれと比較し、それらから類推される特徴に合致するように *Giraffatitan* の頭蓋の仮想カストを変形させて作成した (図5C)。

タンパティタニスの頸部の骨は、環椎と後位の頸椎の椎体の破片および頸肋骨の破片数点が産出している。これら破片と整合的に重ねあうように *Phuwiangosaurus* の後位の頸椎の仮想カストを変形させ、タンパリュウの頸椎の仮想骨モデルとした。この仮想骨モデルを原型として、*Euhelopus* の頸椎のシリーズを参考に長さと幅を変えた複製をつくり、それらを交連させて頸部骨格全体を作成した (図5E)。

タンパティタニスの胴体の中軸骨格は肋骨11本と2個の胴椎椎体破片2個、椎弓の破片1個が保存されている。椎弓破片は椎弓の構造を復元するには断片的すぎるので、*Phuwiangosaurus* の胴椎の仮想カストを使うことにしたが、その前位胴椎にも欠落部分が多かった。そこで *Euhelopus* など他のティタノサウルス形類

を参考に側突起 (parapophysis)、横突起関節 (diapophysis) および棘突起の欠損部分を造形した。

11本の肋骨のうち、第6および第10肋骨は骨体の前縁を上向けて埋まっていたことと肋骨固有のらせん状のカーブを保存していることから変形が少ないと判断し、復元した胴椎の側突起と横突起関節に関節させた。その結果、第6および第10肋骨ともに強く外側に張り出す形となり、強く側方に膨らんだ体腔が示唆された (図5B)。他の肋骨はこの体腔の形に添うように遠位部分のカーブを調整した。

タンパティタニスの尾椎は、前位のものが12番までほぼ関節した状態で地層中に保存されていたが、11番以外はすべて死後変形しており、第1および第2尾椎は横突起および棘突起のみが保存されていた。椎体は元来円柱形をしていたと仮定し変形を補正し、第1および第2尾椎は第3尾椎の形態を参考に欠損部を造形した。中位以降の尾椎は後位の尾椎が地層中で散らばった状態で11個保存されていた。尾の長さを復元骨格の全長が15mになるように設定し、その先端に向かって椎骨のサイズが減少するように欠損している中位および遠位の尾椎を造形した (図5D)。

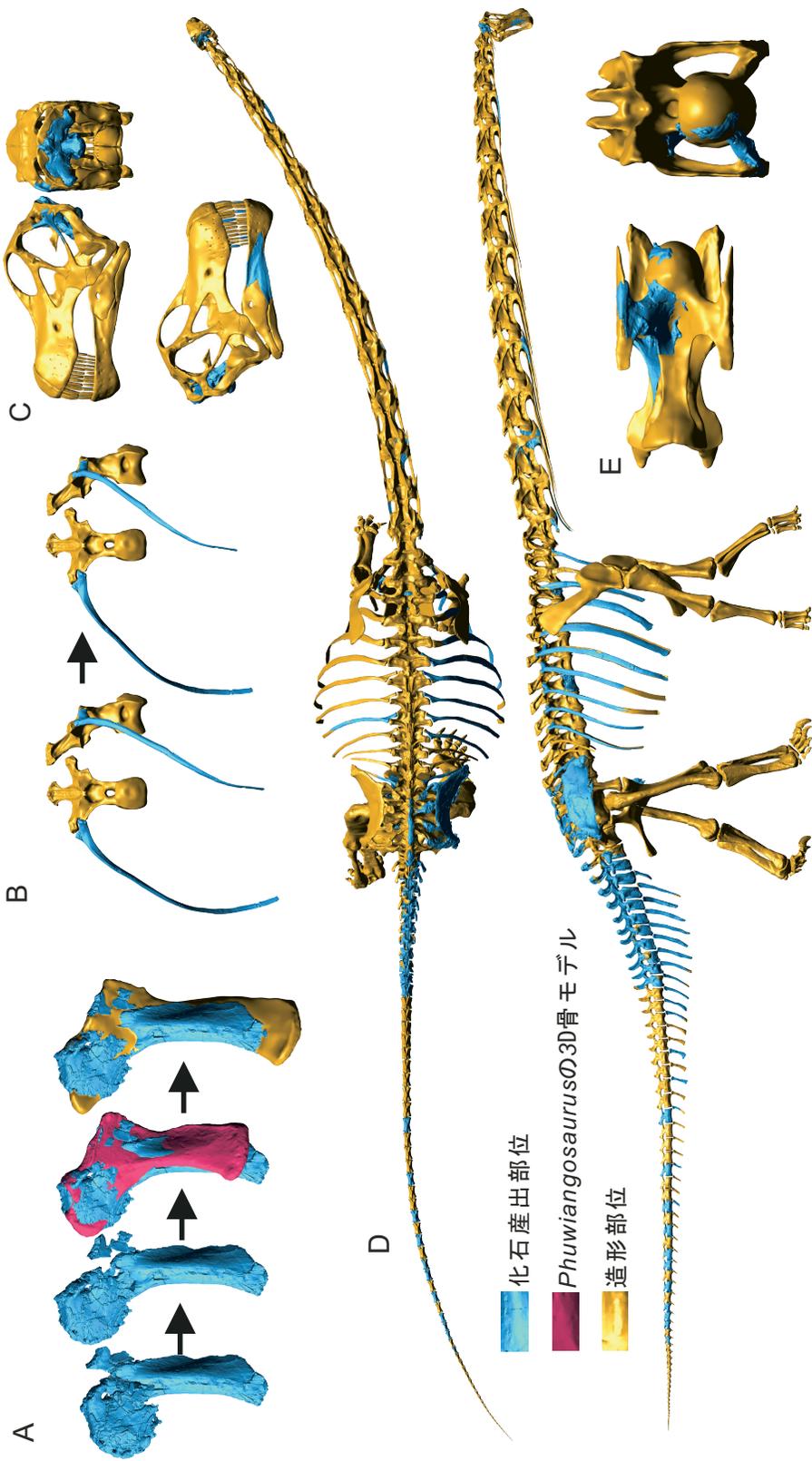


図5. タンパティタニスの仮想復元骨格の作成工程.

の仮想復元骨格. E: タンパティタニスの頸椎の復元.

タンパティタニスの骨盤で化石が産出しているのは、腸骨、恥骨、仙椎の棘突起、腸骨に一部癒合した形で残る仙肋骨である。タンパティタニスの仙椎の棘突起の形態は *Phuwiangosaurus* のそれと類似しているため、その骨盤を参考にタンパティタニスの仙椎、仙肋骨、腸骨を復元した。これに *Phuwiangosaurus* の座骨の仮想キャストとその恥骨を参考に欠損部分を作成したタンパティタニスの恥骨の仮想骨モデル (図5A) を組み合わせて骨盤を復元した (図5D)。その結果、腸骨が前方へ強く広がる形態となった。タンパティタニスでは産出していない後肢帯以外の肢骨は、種の固有派生形質を除去した *Phuwiangosaurus* の肢骨の仮想骨モデル、*Gobititan* の足骨格のステレオ写真を参考に *Opisthocoelicaudia* の足骨格の仮想キャストを變形して作成した仮想骨モデル、*Phuwiangosaurus* の中手骨のプロポーシオンに合わせて *Giraffatitan* の手骨格の仮想キャストを背腹に短縮して作成した仮想骨モデルを組み合わせた (図5D)。

3.4 結果

上記工程により制作されたタンパティタニスの復元骨格模型は、化石のレプリカが配置されているウォールマウントと並置された (図4F)。さらに、実物が出ている部分は実物化石になるべく似せて彩色し、実物が出ていない部分はやや明るい単調な色調にした。これらに加え観覧者が制作過程の映像資料を閲覧できるモニターを併置し、復元した部分と実際に化石の出ている部位を観覧者が知ることができるようにした。

この骨格復元の第一の目的は展示つまり普及教育であるが、その副産物としていくつかタンパティタニスの骨格の特性が明らかとなった。その詳細は別稿に譲るが、それらの中で最も興味深いのは胴体の形状である。上述のように肋骨の近位部の骨頭と結節の角度から推定された肋骨の側方への張り出し具合がその根拠である (図5B)。この推定が正しいとするなら、保存の良い胴体骨格の知られているディプロドクス類よりも強く横に膨らんだ胴体をタンパティタニスは持っていたことになる (図5D)。これは *Phuwiangosaurus* の骨盤を参考に復元した前方に強く広がる骨盤の特徴と整合的である (三枝・池田 2016; Saegusa and Ikeda 2016)。

4. 議論

ミエゾウとタンパティタニスの事例は、不完全な部分骨格から復元骨格を作るうえで3Dモデリングが非常に有効であることを示している。ただし、骨格欠損部の形状の推定や死後変形の補正は、最善のものであったかは議論の余地がある。今回の2つの事例では

仮想骨格の実質的な作成期間は半年ほどの短い期間内での作業であったため、共通の祖先種の形質状態の推定や死後変形の修正など、利用可能な技法、具体的にはソフトウェアの探索が不十分であったといえる。

3Dモデリングそのもの、あるいはそれを実物大の模型にするにあたって必要な人材・業者が日本ではまだまだ限られているという点も問題点として感じたことである。ミエゾウの場合は予算、時間、業者の関係から仮想復元骨格から直接実物大の模型を出力するのではなく、小型の3Dプリント機器で出力した7分の1模型を参考に手作業で実物の復元骨格模型を複製することになったが、一方タンパティタニスの場合は、業者の工夫により仮想復元骨格に忠実な復元骨格模型を作ることができた。

3Dモデリングの発注自体にも同様の問題がある。3Dモデリングをこなす人材は少なくないが解剖学的な知識を十分に持った人材は少なく、博物館の展示作成を受注した会社の下請けにそのような人がいる確率は低い。そのため、今回紹介した2つの事例では研究者である筆者自身が3Dモデリングをそれも一人でやることになった。そのため、他の研究や業務の時間が取れなくなるという問題が生じた。

しかしながら、研究者自身が、あるいはもし適切なアーティストがいるなら、そうしたアーティストと密接に連絡を取りながら骨格復元を行うことには2つの利点があるだろう。第一の利点は、研究者が骨格復元の細部にまで関与するので、復元骨格のどの部分がある根拠をもって造形したのかを解説できるという点である。このような解説がないと、観覧者に展示されている復元骨格がすべて本物と思われてしまうか、逆にすべてが単なる作り物と思われてしまうかの両極端になりかねない。

第二の利点は、普及目的の骨格復元であっても、その過程でバラバラの骨を見ていただけでは気付かない特徴に気付くという点である。上述のミエゾウの上・下顎骨の形態やタンパティタニスの胴体の形状がこれにあたる。これらは少数の要素からなる部分骨格からも、仮想骨格の作成により、分類群の特徴が見えてくる事例である。しかしながら、こうした特徴はあくまでキメラである仮想復元骨格の属性であり、それがその分類群の特徴であるかどうかは、多くの標本との比較により発見される指標により検証されなければならない。例えばタンパティタニスの仮想復元骨格で見られる側方に張り出す胴体の形状の場合は、保存良好な竜脚類の中軸骨格を多数観察し、肋骨や胴椎の形態と胴体の形状に何らかの関連性を見出す必要があるだろう。このように、新たな研究の萌芽をもたらすものと考えれば、普及目的の仮想復元骨格の作成にも一定の

学術的意義があると言えるだろう。

5. 謝辞

以下の方々には3Dデータの収集および仮想復元骨格作成において多大なご助力をいただいた(敬称略): 阿部勇治, 堀江真季子, 池田忠広, 亀井節夫, 川谷 浩, 小西省吾, 森本星史, 中川良平, 小川舞, 荻野慎譜, 奥岸明彦, 大橋正敏, 乙呷政巳, 関根輝, 関谷 学, S. Suteethorn, W. Suteethorn, 高橋啓一, 樽 良平, 樽野博幸, C. Tsogtbaatar, K. Tsogtbaatar, Xing Xu, 吉本知宏。

引用文献

- Aiba H, Baba K, Matsukawa M (2010) A new species of *Stegodon* (Mammalia, Proboscidea) from the Kazusa Group (Lower Pleistocene), Hachioji City, Tokyo, Japan and its evolutionary morphodynamics. *Paleontology* 53, 471-490
- 雨森 清・小早川隆・多賀町ゾウ化石発掘調査団 (1995) 滋賀県多賀町の古琵琶湖層群より発見されたアケボノゾウ(予報). *地質学雑誌* 101, 743-746
- Button DJ, Rayfield EJ, Barrett PM (2014) Cranial biomechanics underpins high sauropod diversity in resource-poor environments. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 281, 20142114
- 服部川足跡化石調査団 (1996) 古琵琶湖層群上野累層の足跡化石. 三重県立博物館, 122頁
- 黄河象研究小組 (1975) 黄河象. 科学出版社, 北京, 46頁, 20図版
- 沓岐島地学研究グループ (1973) 沓岐島の地質と化石—第三系層序, 象化石, 魚類化石について—. 金沢大学日本海域研究所報告 5, 89-114
- 五日市ステゴドン調査団 (1980) 東京都西多摩郡五日市町より産出したステゴドン象化石について. *文化財の保護* 12, 76-82
- 小泉明裕 (2017) 東京西部の300~100万年前頃にいた哺乳類や鳥類を探る. *多摩のあゆみ* 167, 385-396
- 小西省吾 (2000) アケボノゾウの骨格復元とその特徴—多賀標本を例として—. *地球科学* 54, 268-278
- 松本彦七郎 (1941) 陸中国東磐井郡松川村及其他本邦産ステゴドン及バラストゴドンに就いて. *動物学雑誌* 53, 385-396
- Saegusa H, Ikeda T (2014) A new titanosauriform sauropod (Dinosauria: Saurischia) from the Lower Cretaceous of Hyogo, Japan. *Zootaxa* 3848, 1-66
- Saegusa H, Ikeda T (2016) Some peculiar features of *Tambatitanis amicitiiae* (Sauropoda, Titanosauriforms) revealed by virtual skeletal reconstruction. Abstracts of Papers, 76th Annual Meeting, Society of Vertebrate Paleontology
- 三枝春生・池田忠広 (2016) *Tambatitanis amicitiiae* の骨格復元. 日本古生物学会2016年年会講演予稿集, 31
- 三枝春生・小川英樹・小野慎二・西川 巖 (2016) タンパティタニス (*Tambatitanis amicitiiae*) の全身骨格復元模型の作成—恐竜を生かした町づくり—. 第35回研究大会, 展示学会研究発表梗概集, 16-17
- 三枝春生・田中里志・池田忠広・松原尚志・古谷裕・半田久美子 (2008) 下部白亜系篠山層群からの竜脚類およびその他脊椎動物化石の産出. *化石研究会会誌* 41, 2-12
- Saegusa H, Thasod Y, Ratanasthien B (2005) Notes on Asian stegodontids. *Quaternary International* 126-128, 31-48
- 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
- 高橋啓一・北林栄一 (2001) 大分県安心院町森から産出したゾウ科およびその他の哺乳類化石. *琵琶湖博物館研究調査報告* 18, 126-163
- 樽 創 (1996) 東京都昭島前期更新統平山層から産出した *Stegodon* sp. の肩甲骨と上腕骨について. *神奈川県立博物館研究報告(自然科学)* 25, 59-70
- 樽 創・甲能直樹 (2002) 東京都あきる野市産 *Stegodon* 臼歯化石の再検討と日本の鮮新統産大型 *Stegodon* の種名について. *国立科博専報* 38, 33-41
- 樽野博幸 (1991) ステゴドン類3日本産ステゴドン科化石. 亀井節夫編著. *日本の長鼻類化石*. 築地書館, 東京, 82-99
- 樽野博幸・亀井節夫 (1993) 近畿地方の鮮新・更新統の脊椎動物化石. 市原実編著. *大阪層群*. 創元社, 大阪, 216-231
- 樽野博幸・紀川晴彦 (1975) 明石市中八木より発掘されたアカシゾウ化石について. *大阪自然史博物館研究報告* 45, 1-14
- Wiman C (1929) Die Kreide-Dinosaurier aus Shantung. *Palaeontologia Sinica Ser C* 6, 1-67
- Zaher H, Pol D, Carvalho AB, Nascimento PM, Roccomini C, Larson P, Juarez-Valieri R, Pires-Domingues R, da Silva NJ, Campos DA (2011) A complete skull of an Early Cretaceous sauropod and the evolution of advanced titanosaurians. *PLoS One* 6: e16663