

解 説

*Gallimimus*の産状レプリカ作製法

藤山佳人・実吉玄貴・河原康浩

(株)林原生物化学研究所古生物学研究センター

Reconstruction of *Gallimimus* as found in situ.

Yoshito Fujiyama, Saneyoshi Mototaka and Yasuhiro Kawahara

Center for Paleobiological Research, Hayashibara Biochemical Laboratories, Inc., 1-2-3 Shimoishii, Kita-ward, Okayama 700-0907, Japan
(fujiyama@hayashibara.co.jp)

はじめに

脊椎動物化石に関する展示を博物館で実施する場合、発掘現場でのみ得られる情報（骨格の関節状態、埋没姿勢、発見された状態など）も、発見の経緯や発見された標本の意義を示すためには重要である。このような情報を展示する場合、映像や写真といった画像や、キャスト標本やジオラマといった標本類が通常は用いられる。

特に産状レプリカは、発掘現場での情報を示す標本として用いられ、これまで多くの博物館や展示会において展示されてきた。このような標本の作製法は、マトリクス（化石が埋まっている堆積物）に埋まった化石をマトリクスごと型取りし、産状レプリカを作製する方法が一般的である（例えばAraújo *et al.*, 2009）。しかし、研究の過程において、化石の産状がそのまま残されないことが多く、すでに失われた化石の産状を復元することが難しかった。さらに、このような標本の作製に関する詳細な文章記録はなかった。

林原自然科学博物館では、2010年夏季に開催された特別展において、モンゴルゴビ砂漠の恐竜化石発掘現場を再現する展示を実施し、画像と標本を用いた現場の再現を試みた。ゴビ砂漠からは、保存状態の良好な恐竜化石が発掘されることから、恐竜が発見される状態を展示上再現することが必要であった。そこで、全身骨格の8割が関節した状態で発見された獣脚類 *Gallimimus* (Mongolian Paleontological Center (Ulaanbaatar, Mongolia) specimen no. D 100/121) の発掘当時の産状レプリカを作製し、より具体的な発掘現場の情報提供を試みた。なお、今回作製した標本は、他の移動展や展示会にも広く利用できるよう、運搬時の負担軽減を重視して設計・作製された。本論では、この産状レプリカの作製方法を紹介する。

本レプリカの作製は、骨格キャスト2種（シミュレーション用キャストおよび展示用キャスト）製作と、キャストを固定するベース部の作製を基本とする。主な工程

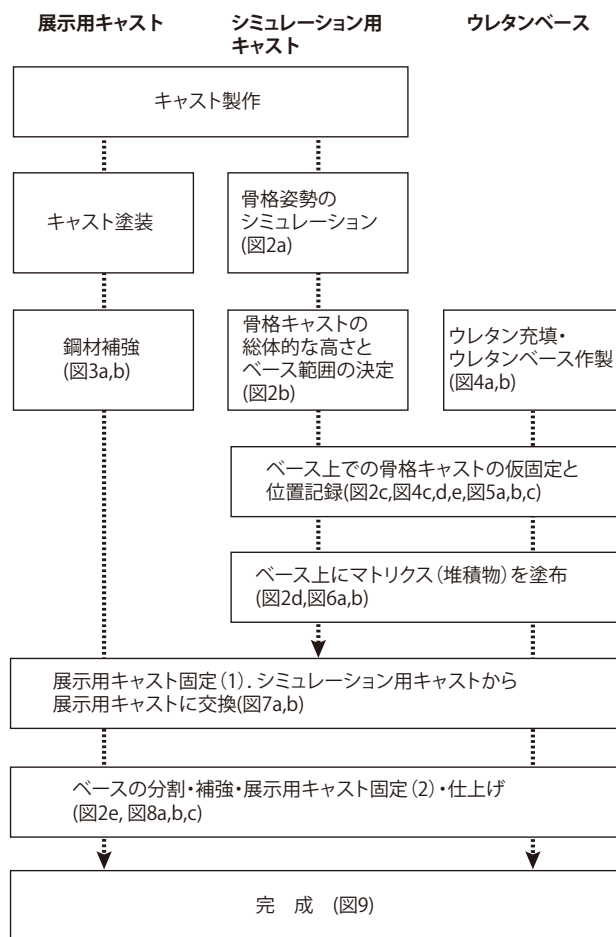


図1. 産状レプリカの作業工程。

を図1に示す。また作製過程の様子を図2に示す。それぞれの工程に関する詳細は後述する。さらに、本標本の作製に使用した材料の一覧を表1に示す。

表1. 産状レプリカの制作に使用された原材料.

品 名	型 番	製 造 元	使 用 方 法							
			キャスト材料	土台材料	土台下地樹脂	補強部材	塗料	樹脂接着剤A	樹脂接着剤B	樹脂接着剤C
チョップドストランド	CE-6E-227S	日東紡績(株)	●						●	
ガラスマット	MC-450-N	日東紡績(株)	●							
アエロジル200	—	日本アエロジル(株)	●							●
シラスパルーン	MSB-5021	浅間軽石(株)			●					
不飽和ポリエステル樹脂リゴ	M-10BN	昭和高分子(株)	●		●			●	●	●
ラックパーメックN	R-K04	日本油脂(株)	●		●			●	●	●
ハイブロックス	RP-5470	大日本インキ化学工業(株)		●						● ¹
ハイブロックス	SP-1225	大日本インキ化学工業(株)		●						● ¹
リキテックス	—	バニーコルアート(株)					●			
サクラ粉絵の具	FW700G	サクラクレパス(株)	●							
焼石膏	—	吉野石膏(株)	●							
合板	—	—				●				
アルミ鋼材(角形)	—	—				●				

その他: ビニールシート, トレース紙, アルミホイル, ラップフィルム, 爪楊枝.
 注: ●, ハイブロックスの粉碎物を使用.

骨格キャストの製作と塗装

作製当初, 発掘現場における複雑な埋没姿勢を再現するためには, 骨格の姿勢シミュレーションを繰り返す必要があることが予測された. しかし, この作業によって生じる塗装面の剥離や汚れが展示標本に残ることは望ましくない. そこで, 姿勢シミュレーション用と展示用の2種類のキャストを製作した. 姿勢シミュレーション用キャストは未塗装で, 埋没姿勢の確認からキャスト配置の決定において使用する(図1). 一方, 展示用キャストは産状レプリカの骨格部として実際に展示されるため, 実物化石の色を反映する塗装を行った. 展示用キャストの塗装工程は, 下地塗装, ベース色塗装, 墨入れ塗装の3段階に分業した. 実物化石には赤褐色に近い褐鉄鉱の色素沈着があるため, 当該部分を褐鉄鉱色に調合したアクリル絵の具で塗装した.

キャストを製作した骨格の部位は, 頭骨, 脊椎, 腰帯の体幹部分と右側の前後肢である(図2a). いずれのキャストも製作においては, 松本・橋本(2007), 松本(2008), 松本(2009)の方法を用いた.

骨格キャストの仮配置と補強

キャストの仮配置

作製する *Gallimimus* 産状レプリカの発掘当時の姿勢を確認するため, 発掘当時の写真データを参考にして, ビニール上に姿勢シミュレーション用のキャストを仮配置

し, キャストのアウトラインをビニールへ書き込む(図2a). その後, キャストを取り除いてからビニールを板上に敷き, アウトラインの範囲内にキャストを再度配置する. この段階では, 全キャストを平置きしているため, キャストのサイズや保存部の有無により, 高さが不均一である. そこで, 製作したキャストの中で, 最厚の腰帯部(腸骨とそれに挟まれた仙椎を含む)における正中部の床からの高さを基準として, キャストの他の部位の高さを調節した(図2b). 今回は, キャストの高さ調整を行うため, 木片・番重・発泡スチロール等を用いた(図2b). 腰帯部と後肢の各部位は交差するように発掘されたため, そのままの姿勢を復元しても, 各部位の観察が難しい. そこで, 大腿骨を腰帯部の大腿骨頭窩(腰帯部キャスト上)に関節させ, 脛骨・腓骨は中足骨に関節させた状態で, 大腿骨の遠位端と脛骨・腓骨の近位端を交点とし, 膝関節部分を浮かせた姿勢を採用した. この姿勢により, 恥骨の大部分が露出し, かつ腰帯部と後肢の関節状態を観察できる標本になる. 後肢の配置は, 作業の進展に伴って, 微調整を繰り返した. 最後に, 全キャスト位置を記録するため, トレース紙上に全キャストの輪郭を実寸で書き写した.

キャスト内部の鋼材補強

前述のように膝関節を浮かせた状態で固定するために, 大腿骨と脛骨・腓骨のキャストへ鋼材を内蔵させ補強する(図3a). また, 大腿骨の近位端と脛骨・腓骨の遠位端の内側は, 次に述べるベースとの接地部となることか

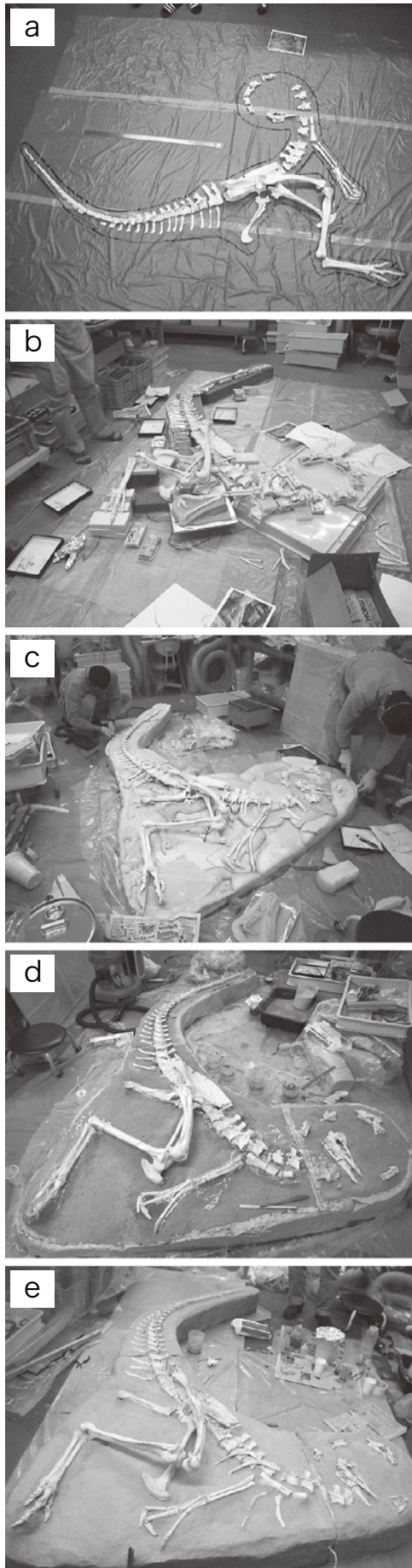


図2. 製作過程の様子. (a) 姿勢シミュレーション用キャストを用いて姿勢を決定し、アウトラインをビニールにトレースする. (b) キャストを配置し、部位の相対的な高さを決める. (c) ウレタンベース上へシミュレーション用キャストを配置する. (d) マトリクスを塗布し、展示用キャストの大部分を固定する. (e) ウレタンベースを分割し、キャストの残り部分を固定する.

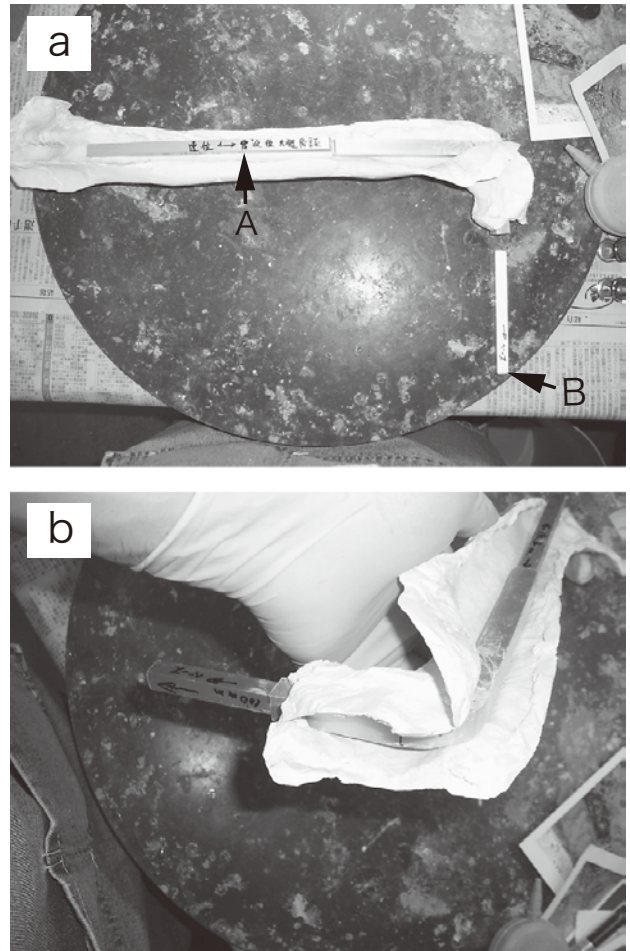
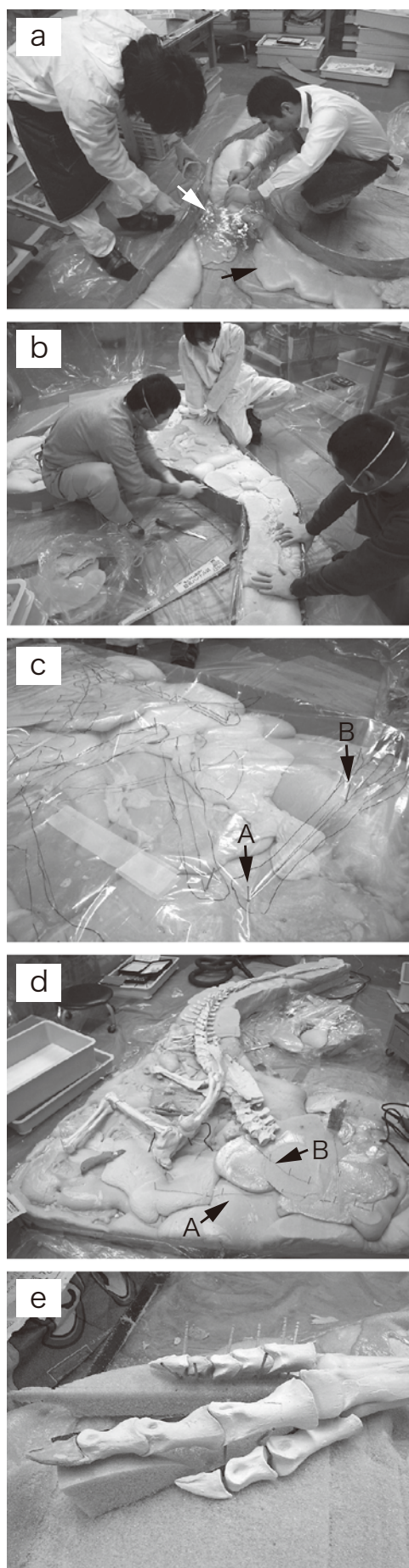


図3. キャスト内部の鋼材補強. (a) キャストに内蔵する鋼材 (矢印A) とベースとの連結部となる鋼材 (矢印B). (b) aで示した鋼材を連結させた様子.

ら、ここにキャストをベース上へ固定する基部を設ける.

補強用の鋼材には、加工が容易で軽量のアルミ材を用い、固定後にキャストの回転を防止できる角材12mm×12mm（中空）を使用する．鋼材を大腿骨と脛骨・腓骨のキャスト内に収まるサイズで切断し、キャストの形状に合わせて鋼材をL字型に屈曲させる（図3b）．キャストは2面で構成されるため、まずキャスト片側における大腿骨の近位端と脛骨・腓骨の遠位端に、鋼材の先端を貫通させる穴を設ける．次に、鋼材をキャスト内に配置し、先端をキャスト側の穴に挿し込んだ後、樹脂接着剤A（表1）で鋼材を固定する（図3a）．鋼材を内蔵したキャストの片側と、鋼材を設置していないキャストの片側を合致させ、キャスト材（表1）を用いて貼り合わせ



る。その後、鋼材の貫通した大腿骨の近位端と脛骨・腓骨の遠位端に、ベースに固定する基部になる9 mm×9 mm×100 mmのアルミ角材を挿し込み、樹脂接着剤Aで固定する。これにより、鋼材をキャスト内に内蔵させ、かつキャストをベースに固定する箇所を設けることができる。なお、キャスト内部の鋼材補強は展示用キャストのみに実施した。

ウレタンベース作製 (図2c)

今回は、発掘時における骨化石の配置を復元するため、骨格キャスト全体の外周10 cmまでを産状レプリカの面積とした。よって、レプリカの堆積物に相当する部分(ベース)はプロポーシジョンの輪郭に沿った、変形三角形(縦2.5 m×横3.0 m、高さ(厚さ)15 cm)の形状に作製した。ベースの内部素材は、ウレタンジャケットやサポートジャケットなどに使用される発泡ウレタンを使用した。発泡ウレタンは、加工が容易でヤスリやナイフで切削でき、かつ衝撃に強く、軽量であるため、ベースの内部素材として適している。さらに、標本移動を容易にするため、ベースの構造を3分割することとした。

ウレタンの充填

ベースは、型枠に発泡ウレタンを流し込み、成形することによって作製する。まず、型枠を作製する。前述した、アウトラインを書き写したビニールを合板上に敷き、一定の高さ(骨格キャストを埋め込む深さに底の厚さを加えた高さ、今回は15 cm)に切り揃えた段ボール紙を、アウトラインに沿って、粘着テープで垂直に固定してベースの型枠を作製する。また、粘着テープで、段ボール紙とビニールの間の目張りを行い、発泡ウレタン樹脂の充填時、段ボール紙とビニールの隙間からの樹脂漏れを防ぐ。

ハイプロックス(表1; 以下ウレタン樹脂)を混合攪拌し、型枠内へ充填する(図4a)。足の趾骨は他の部位に比べより低い場所に位置するため、この範囲におけるウレタン樹脂の充填を少量にし、ベースの高さを低く(薄く)する。

ベース整形

一般的にウレタンの発泡は不均質であり、表面に凹凸ができやすい。また、発泡ウレタン樹脂の反応時、発泡

図4. ウレタンベースの製作とキャストの配置. (a) 発泡したウレタン(矢印黒)と型枠内にウレタン樹脂(矢印白)を充填している様子. (b) ウレタン表面の成形. (c) 中足骨の近位端(矢印A)と遠位端(矢印B)における正中線の位置を爪楊枝でポイントを示した様子. (d) 正中線に沿ってキャストを配置した様子. 中手骨の正中線(矢印A)と胴椎の正中線(矢印B)の位置を油性ペンで記している. (e) ウレタン端材と爪楊枝を併用してキャストの足を仮固定したところ.

による体積の膨張で型枠内に圧力が生じるため、ベースの輪郭が変形する。こうして発生した、余分な厚みや変形した箇所は、刃物やヤスリを使用し切削除去する（図4b）。またベース周辺は、垂直に加工する。なお、前述したベースの3分割は、最終的なキャスト配置の決定後に行うため、この段階では行わない。

キャストの姿勢と位置の記録

トレース紙に記録したキャストの輪郭を、透明なビニールへ転写し、これをベース上に敷く。ビニールに記録したキャスト位置を用い、体幹と四肢の正中線に沿って、ビニールの上から爪楊枝をベースへ適当な間隔で直接挿し込んでいく（図4c）。その後、ビニールをベースから取り外し、ベース上に爪楊枝を挿し込んだポイントを油性ペンで書き繋ぐ（図4d）。このラインがベース上に骨格キャストを配置する際の目印になる。

次に、シミュレーション用骨格キャストをベースに配置する。まず、ベースを切削し、骨格キャストの高さの基準部位である腰部部の左側半分をベース内に埋設する。この腰部部を基準としてベース上の正中線に沿って、キャストを配置していく。キャストが定位置から移動しないよう、爪楊枝でキャストを仮固定する（図4e）。ベース表面が凹んで、キャスト配置が困難な部分は、ウレタン端材を入れて高さを調節する（図4e）。また、端材で対応できない箇所は、土台下地樹脂（表1）を塗布する。膝関節の屈曲角度は中足骨を配置する位置によって変わるため、再度、後肢の姿勢調整を行い、中足骨の固定位置を決定する。また、ベース上の中足骨近位端部分に、脛骨・腓骨の遠位端内側（キャストの固定基部）に装着した鋼材を差し込むための穴を空ける。なお頸椎・胴椎・尾椎と恥骨・座骨の左側に存在する骨格の突起部は、地中に埋没している面であるため切除した。

この段階で、ベース上におけるキャストの位置が決定するため、ベースを三分割する分割面を決定し、印をつける。

キャスト位置記録用モールド作製

仮固定した骨格キャストは固定点が少ないために不安定であることから、ベース上にキャストの形状とキャスト位置を詳細に記録する必要がある。ここでは、土台下地樹脂に用いるシラスバルーンをさらに増量して加え、増粘させた同樹脂を、キャスト形状とベース上での定位置を記録するモールド材として使用した。

小サイズのキャストの場合、モールド材をベース上へ適量塗布し、離型のために同材の表面を包装用ラップフィルムで覆う。そこへキャストを軽く押し付けることで、ベース上のモールド材にキャストの形状と定位置を記録する（図5）。大型キャスト（例えば腰部部や座骨など）の場合、キャストを一時的に仮固定位置から取り外し、

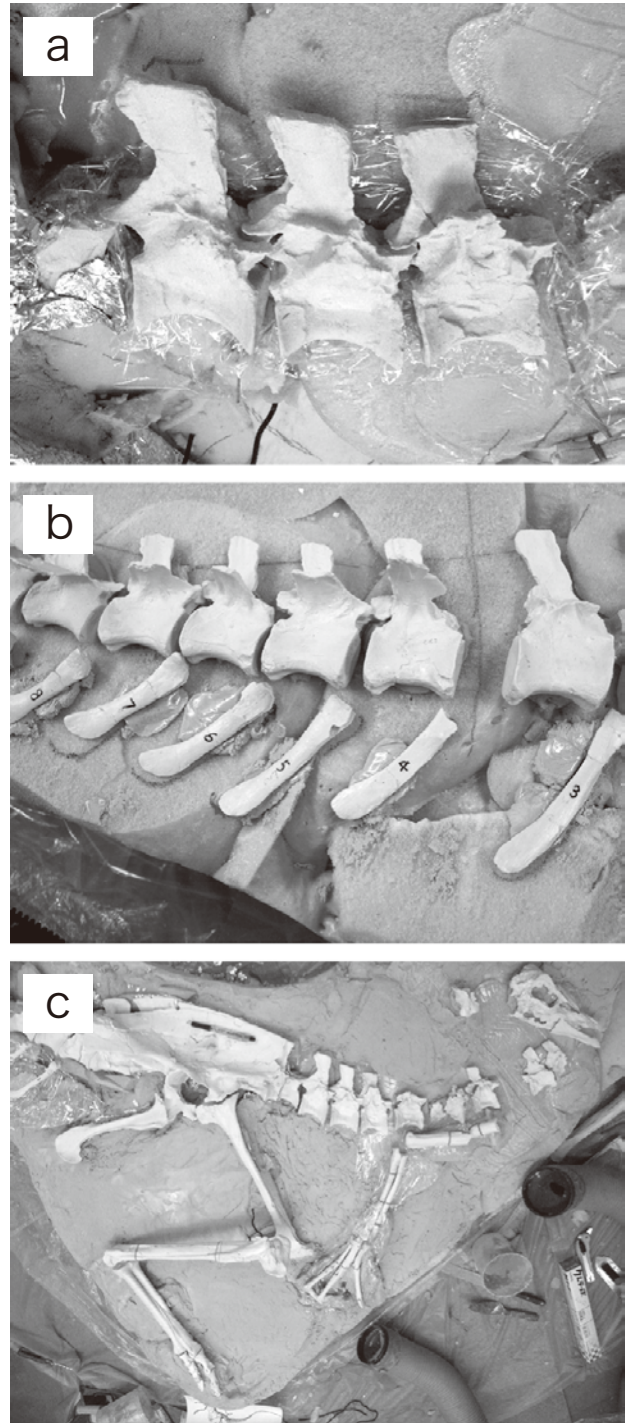


図5. キャスト位置記録用モールドの製作と土台下地材の塗布。(a) 包装用ラップフィルムでキャストの下面を覆い、位置記録用モールドを制作する。(b) キャスト位置記録用モールドの硬化後、キャストを配置。(c) 土台下地樹脂をベース表面に塗布して凹凸を補正。

離型のためにキャストの下面をアルミホイルで覆う。次に、前述した同材をベース上の該当部分に塗布し、キャストを元の位置に戻す。モールド材が硬化した後、キャストを脱型することで、ベース上のモールド材にキャストの形状と定位置が記録される。以上の作業をベースか

ら浮いている大腿骨と脛骨・腓骨を除く部位で実施することで、キャストの形状と定位置を詳細に記録したモールドがベース上に固定される。

全モールドの硬化後、不要な凹凸を電動工具で削除し、滑らかな面を成形する。その後、ベース表面に土台下地樹脂を塗布することで、ベース上の凹凸をなくし、後のマトリクス塗布に適した下地を作製した（図5c）。

マトリクス塗布

産状レプリカでは化石周辺のマトリクス（堆積物）も展示標本の構成要素であり、ベースの上に表現される必要がある。そこで、モンゴル産の砂とシラスバルーン、ポリエステル樹脂の混合物を本標本のマトリクスの復元に用いた。マトリクスに用いた材料の混合比率は、体積比で3:3:2（砂:シラスバルーン:接着剤としてのポリエステル樹脂）とした。

調製したマトリクスは、適量を木ベラ等で、軽く叩くようにして、ベース表面へ押し付けて定着させ塗布する（図6a）。この時点では、ベース上に姿勢シミュレーショ

ン用キャストを配置している。よって後に行う展示用キャストへの交換を考慮し、姿勢シミュレーション用キャストの周囲は数mmのマトリクス未塗布部分を残した（図6b）。さらに、後のベース切断も考慮し、ベース上に示した分割線の周囲約15mmまでをマトリクス未塗布部分とした。一方、ベースの周辺部は垂直面になっているため、ポリエステル樹脂の配合量を増加したマトリクス（ベース表面よりも、より粘性の高いマトリクス）を塗布する。

展示用骨格キャストの固定とベースの分割・補強

展示用キャスト固定（1）

ここで、姿勢シミュレーション用キャストと、塗装を施した展示用キャストを交換し、ベース上へ展示用キャストを固定する。高さ基準である腰部部から作業を実施することで、体幹部の作業を先行させ、全体的なキャスト配置の微調整も行う。キャスト固定は、まず樹脂接着剤C（表1）を、ベース上の凹み（腰部部を収めるために前段階で作製したベース上の凹み）へ充填する。次にキャストをモールドに合致させ、配置する。接着に用いた樹脂が硬化し、キャストがベース上に固定された後、キャスト周辺のマトリクス未塗布部分へマトリクスを塗布する。このマトリクス塗布によって、より自然な埋没状態を復元し、かつキャストの周囲をベースへ接着することもできる。なお、頭骨・頸椎・胴椎・尾椎・血道弓・前肢骨の固定は、ベース上のモールド表面に、樹脂接着剤B（表1）を適量塗布し（図7a）、キャストとベース上のモールドを合致させて固定する。固定後、腰部部と同様に、キャスト周辺へマトリクスを塗布する（図7b）。この後に行うベース切断の際、切断工具の接触や振動から展示用キャストを保護するため、切断面に近接する椎骨と肋骨、およびベースから浮かせた状態で固定させる後肢骨は、ベース分割後にベースへの固定を行う。

ベースの分割と補強

ベース上のマトリクス未塗布部分に示した分割線に沿って、鋸などの工具を用いてベースを切断する（図8a）。切断後、個々のベース表面の高さに違いが生じたが、これはウレタン樹脂の不均質な発泡により、ベースの厚みが多くなったこと、および発泡時の撓みが原因である。頭部と胴体部の高さの段差は1~1.5cm、胴体部と尾部の高さの段差は5mmとなり、ベースの補強と併せて高さの補正が必要になる。

ベースの補強部材として、合板をベースの裏面へ装着した。はじめに合板をベースの底面に敷き、ベースの輪郭を合板へ書き写す。書き写した輪郭線に沿って、電動鋸で合板を切断する。この時、補強部材である裏面の合板もベースと同形に3分割するが、組み合わせた際に生

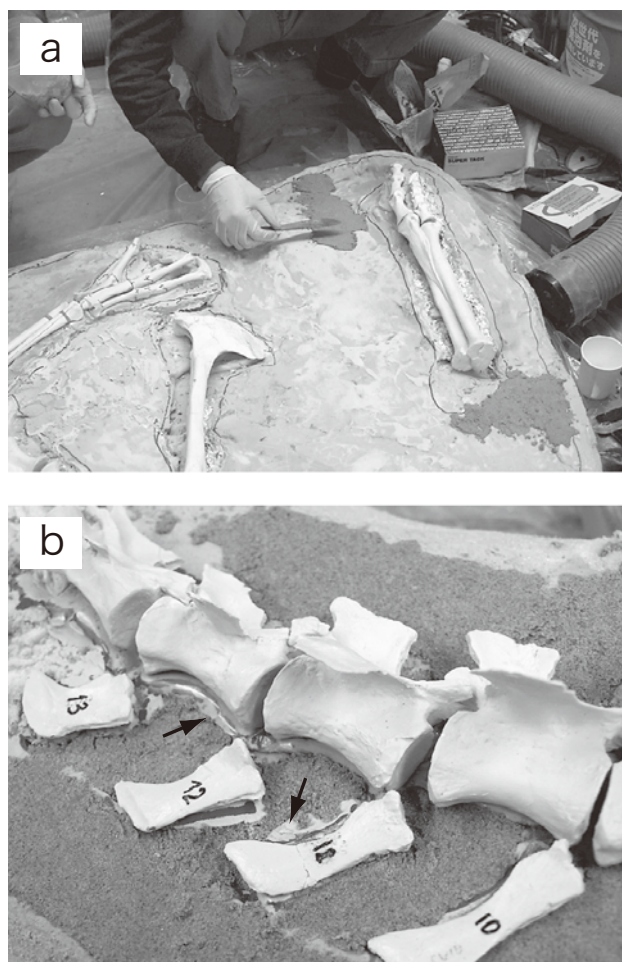


図6. マトリクスの塗布. (a) 木ベラを用いてマトリクスをベース上に塗布しているところ. (b) マトリクスを塗布する際、部分的にキャスト周囲に未塗布部分を残す。

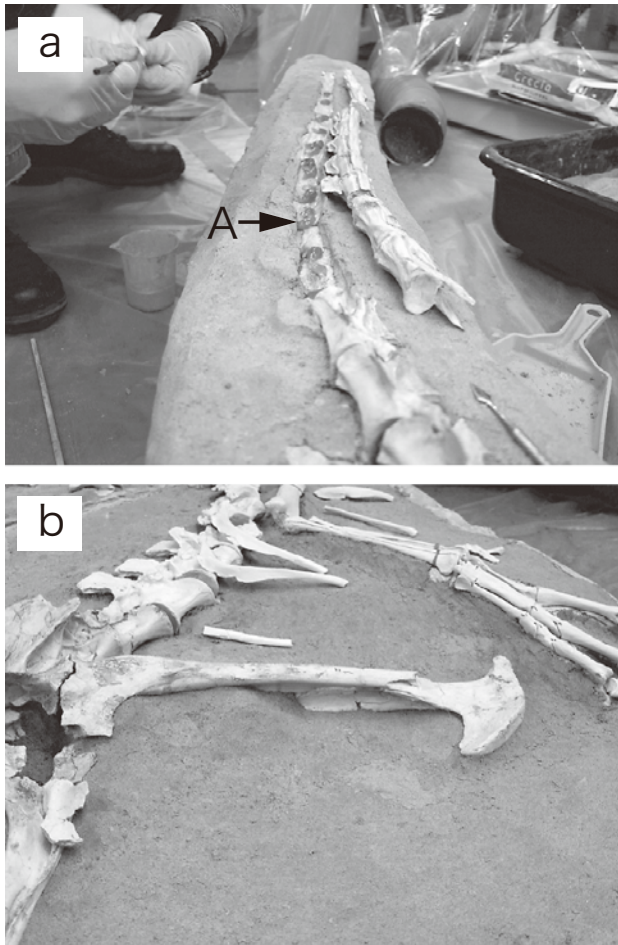


図7. 展示用骨格キャストの固定. (a) 樹脂接着剤B (矢印A) をモールド上に塗布する. (b) キャストの固定後、キャストの周囲にマトリクスを塗布する.

じるずれを防ぐため、裏面の合板の分割線は波状に切断する (図8b). 次に合板とベースを樹脂接着剤Aにより接着する (図8b). その際、合板とベース底面との間に必要に応じてウレタン端材を入れ、分割された各ベースの高さの補正を行う.

展示用キャスト固定 (2)

ベースの切断と補強の終了後、ベース分割面付近に位置する椎骨や、上腕骨周辺と胴椎の中間部分 (腹部) の胴椎上に位置する肋骨を上述の方法でベース上へ固定し、マトリクスを塗布する. 後肢骨の固定前の最後の姿勢調整を行い、ベースにちよくせつ接しない膝関節からベース表面までの距離を決定する. 腰帯部の大腿骨頭窩に樹脂接着剤AとCを充填し、そこに大腿骨の連結部鋼材を埋め込む. この時に膝関節部を空中に固定するため、ベース上にディスポーザルカップ (小) を配置して大腿骨遠位端と脛骨・腓骨の近位端を仮置きする. 次に、ベース上に設けた中足骨遠位端部分の穴へ脛骨・腓骨の連結部鋼材を挿し込み、樹脂接着剤Aを接合部へ充填する. 以

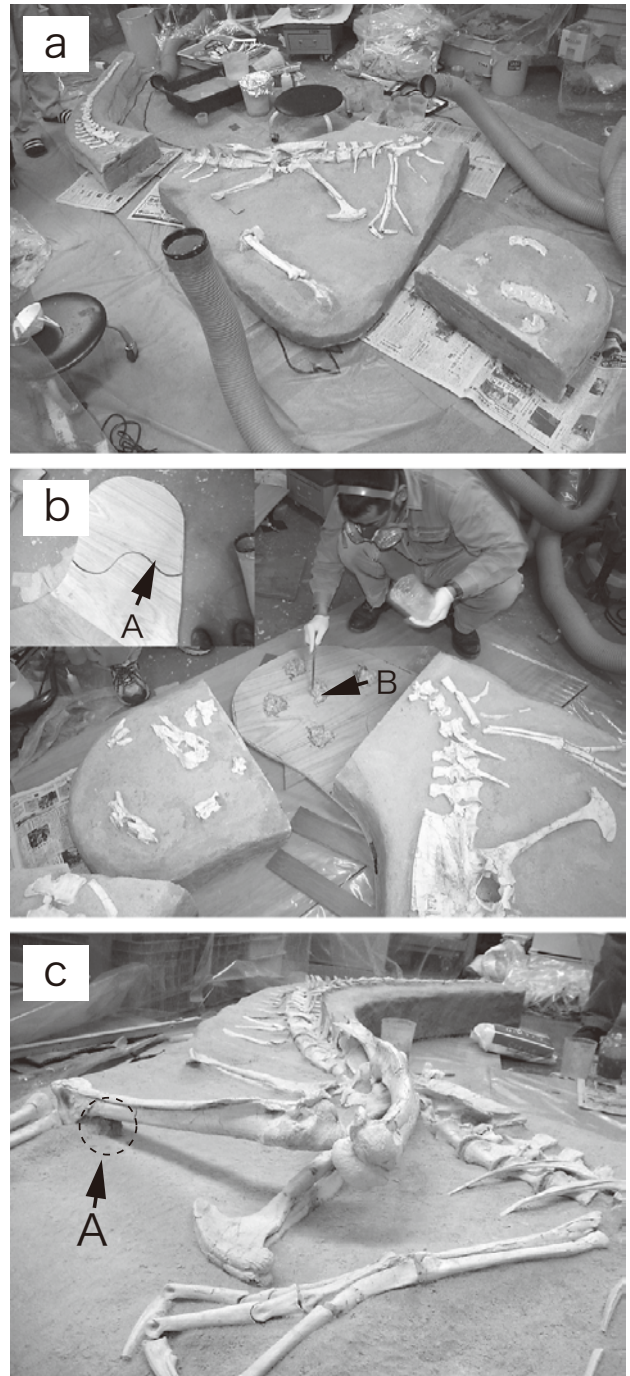


図8. ウレタンベースの分割と補強処理、及びキャストの最終的な固定. (a) 3分割されたウレタンベース. (b) 波状に切断された合板 (矢印A) と、合板上にベース接着用の樹脂接着剤A (矢印B) を塗布する様子. (c) 浮いている脛骨・腓骨をマトリクスで補強する (矢印A).

上の作業によって、ベースに接していない膝関節を含む大腿骨から脛骨・腓骨部キャストの固定が完了する.

次に樹脂接着剤Bを用いて、中足骨のキャストをベース上へ固定する. 中足骨より遠位の趾骨周囲のマトリクスは、趾骨キャストのサポートも兼ねており、キャストの輪郭を隠してしまわないよう塗布する. また、脛骨・

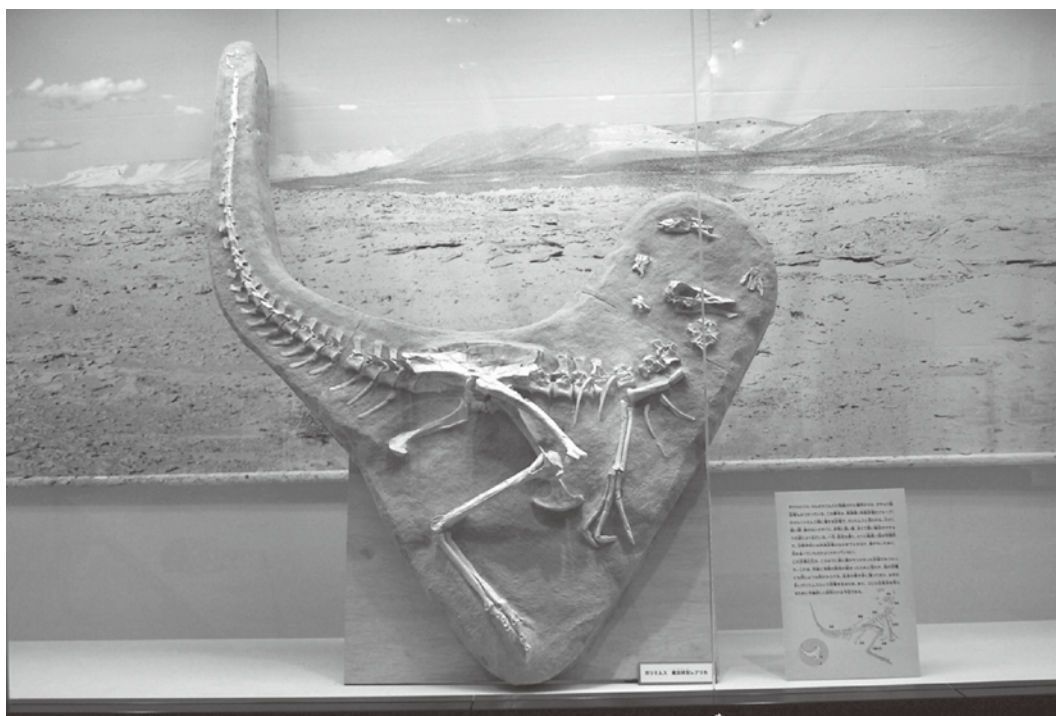


図9. 展示中の *Gallimimus* 産状レプリカ.

腓骨の遠位端の固定基部とベースとの間にあった空隙にマトリクスを充填し、脛骨・腓骨の固定部分を強化する(図8c)。また、大腿骨頭窩と脛骨・腓骨遠位端の固定基部に露出する樹脂接着剤面を覆うため、マトリクスの追加塗布も行う。

ベース分割面の保護と仕上げ

ベースの切断によって、分割面のウレタンは粗面になるため、露出したウレタンが摩耗により損傷する恐れがある。そのため、分割面に樹脂接着剤Bを塗布し、分割面を保護した。さらに、分割面を均一な平面にするため、樹脂接着剤Bの上から離型用のアルミホイルを貼り、ベースを連結して2日程度、安置する。最後に、合板の側面へ付着した樹脂接着剤を除去し、*Gallimimus*の産状レプリカが完成した。

おわりに

今回紹介した *Gallimimus* の産状レプリカは、2010年夏季、岡山市で開催された特別展「ようこそ恐竜ラボへ～化石の謎をとときあかす～」において展示公開された(図9)。産状レプリカを展示することにより、軟組織の萎縮によって起こる湾曲した椎体の配列や遊離した肋骨など、通常の骨格組み上げ標本では表現できない発掘現場の情報を来館者へ提供できた。

また、ベースを発泡ウレタンで作製することにより、衝撃に強く軽量のレプリカを作製できた。さらに、補強

部材として、合板をベース裏面に着装したことで、立て置きや平置きといった展示方法の自由度も確保し、様々な展示方法に対応することも可能となった。今回の作製法を応用することで、発掘現場の再現だけでなく、足跡化石の復元、ボーンベッドの再現、露頭の復元など、多様な発掘現場の情報を提供する標本作りに貢献できると考えられる。

謝辞

本稿で紹介した産状レプリカは、(株)林原生物化学研究所古生物学研究センターの研究費を用いて作製された。また、荻野慎太郎博士(現所属:株式会社ACTOW)に本産状レプリカ作製の作業協力を得た。この報告は、林原—モンゴル共同古生物学調査の貢献番号69番である。

文献

- Aratijo, R., Mateus, O., Walen, A. and Christiansen, N., 2009. Preparation techniques applied to a stegosaurian dinosaur from Portugal. *Journal of Paleontological Techniques*, 5, 1–23.
- 松本幸英・橋本 龍, 2007. 空洞を持つ化石の新しい型取り技法—植物食恐竜プロトケラトプスの頭蓋を例に一. 化石, (81), 79–85.
- 松本幸英, 2008. 椎骨化石の型取り法について. 化石, (83), 59–63.
- 松本幸英, 2009. 椎骨化石の型取り法について (2). 化石, (85), 63–68.

(2011年2月7日受付, 2011年3月23日受理)