

解 説

化石脊椎動物の骨格仮組み用支持システムの紹介

松本幸英

林原生物化学研究所 古生物学研究センター

A support system for mocking up skeletal models of fossil vertebrates

Yukihide Matsumoto

Center for Paleobiological Research, Hayashibara Biochemical Laboratories, 1-2-3 Shimoishii, Okayama 700-0907, Japan (y-mts@hayashibaramuseum.jp)

はじめに

化石脊椎動物の骨格復元を行うにあたり、3次元的に姿勢を検討するための骨格の支持装置（仮組み用支持システム）を開発した。その特徴について紹介する。

恐竜など現在生きた姿を見ることのできない化石脊椎動物の骨格復元は、現生脊椎動物からの類推や古生物学的な研究成果に基づいて行われている（Gilmore, 1905；Bakker, 1987；Paul, 1987；Leiggi and May, 1994；犬塚, 1995；Johnson and Ostrom, 1995）。それらの根拠のうち、主要なのは通常、骨・筋・靱帯などの運動器官の解剖学、特に骨の関節の仕方や関節の可動範囲であり、それらは脊椎動物の姿勢や動きを決定づけている。そのため、まだ良く分かっていない化石脊椎動物の骨格復元には、実際に全身骨格を3次元的に関節させて骨格がどのような姿勢になるのかを検討する必要がある。

しかし、従来行われてきた姿勢の検討方法は、脊柱を平面的に関節させるか（Leiggi and May, 1994；八谷・大泰司, 1994）、骨格をいくつかの部分に分けて、胸郭のみあるいは後肢骨のみとかいったようにある特定の部位だけを関節させて検討することがほとんどである（Madsen, 1973；Leiggi and May, 1994；化石研究会, 2000）。また、一度全身を3次元的に関節させても、従来の支持装置では汎用性に乏しいためその姿勢を大きく変更することが難しかった（化石研究会, 2000）。そのため、全身骨格を3次元的に関節させた状態で、その姿勢を検討・変更できるシステムを考案した。以下はその仕組みと使用方法についての解説である。

支持システムの構造と機能

この仮組み用支持システムは、支柱、ユニバーサルジョイントとフレキシブルアーマチュアの全て既存の3部品で構成される。

支柱は他の2つの構成部品の土台となり、システム全

体を支え、システムの幹の役割をする。ユニバーサルジョイントは2つのアームを持つ関節で、支柱とフレキシブルアーマチュアに連結して両者をつなぎ、フレキシブルアーマチュアを任意の位置に固定する。フレキシブルアーマチュアは多数の木片をつないだもので、標本を構成する個々の骨をつかんで任意の位置に固定する役割をになう。

以上のように3つの部品はそれぞれ別々の役割を持ち、これらの2つまたは3つが様々な形に連結することではじめて個々の骨を任意の位置に保持したり、位置を変更させたりすることができるシステムとなる。

このような仕組みにより、3次元的に組み上げられた骨格の姿勢を何度でも変更しながら、どのような姿勢が適当であるかまたは可能であるかを検討することができる。

本システムの3つの部品の構造、機能、連結方法などの詳細は以下のようになる。

支柱

支柱は、脊椎動物の骨格の組み立てに一般的に使用されているものと同じで（八谷・大泰司, 1994）、土台部分（図1-a）と支柱部分（図1-b）に分けられ、互いが連結・スライドすることで全体の高さが自由に調整される。土台部分は正方形のステンレス鋼板（300 mm × 300 mm × 5 mm）のベースに垂直のステンレス鋼管（外径14 mm, 高さ300 ~ 1000 mm）が溶接されている。

支柱部分は、大部分がステンレス丸鋼（径9 mm, 高さ300 mm ~ 1000 mm）でその先端にフレキシブルアーマチュア等が連結できるように穴の開いたステンレス平鋼（85 mm × 13 mm × 3 mm）が溶接されている。図1拡大2では、平鋼は90度ねじられ、その直交する2面上に1つずつ穴があり、先端の穴に丸鋼をつかむためのホルダー（図1-c）が取り付けられている。

支柱とフレキシブルアーマチュアを連結するときは、U字形に曲げた丸鋼（径6 mm）のツメを支柱の先のホルダーにつかませて、そのツメでフレキシブルアーマチュアを引っ掛けるか、ホルダーを使わず直接支柱の先端の穴

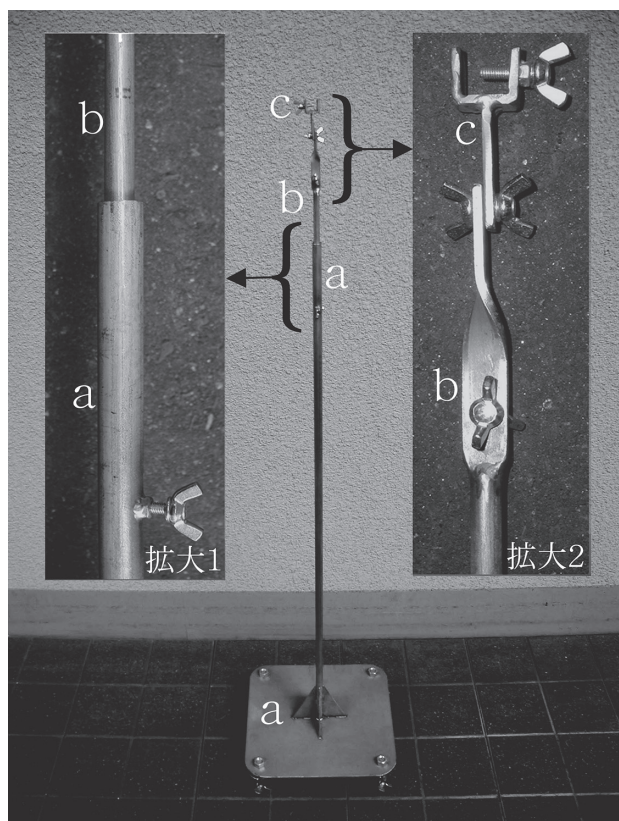


図1. 支柱。(a) 土台部分、(b) 支柱部分、(c) ホルダー。拡大1と2は、それぞれ土台部分－支柱部分間、および支柱部分－ホルダー間の連結部位を示している。

にフレキシブルアーマチュアのボルトを通して固定する。

ユニバーサルジョイント

このユニバーサルジョイントも様々な用途に使用されているものと基本的に同じものである。このユニバーサルジョイントは2つの球関節を持ち、それらから伸びた2本のアーム（丸鋼径5 mm × 28 mm）をどのような角度にも固定することができる関節である（図2）。

それぞれの球関節は、直径14 mmの金属球でこの球から1本のアーム（丸鋼径5 mm × 28 mm）（図2-a）が伸びている。アームはねじ切りがなされ、ナットとワッシャーで他のものに連結できるようになっている。本システムでは、このアームを延長したり、支柱に固定しやすくするために角鋼（9 mm × 9 mm × 50 ~ 300 mm）（図3-a, b）が取り付けられている。2つの金属球はこれより小さい径の穴（径12 mm）が2つある平鋼（5 mm × 22 mm × 52 mm）2枚（図2-b）によりはさまれ、更に2枚の平鋼は市販のノブ（雄ねじタイプと雌ねじタイプのセット）（図2-c）によってはさまれる。ノブを締めることで関節全体が締めつけられ、アームが固定される。

1つのアームの可動範囲はおおよそ0 ~ 270°であるので、2つのアームを組み合わせると、2つのアームは0 ~ 360°全ての角度を作ることができる。そのため、ノブを締めたり緩めたりすることで2つのアームはどのよう

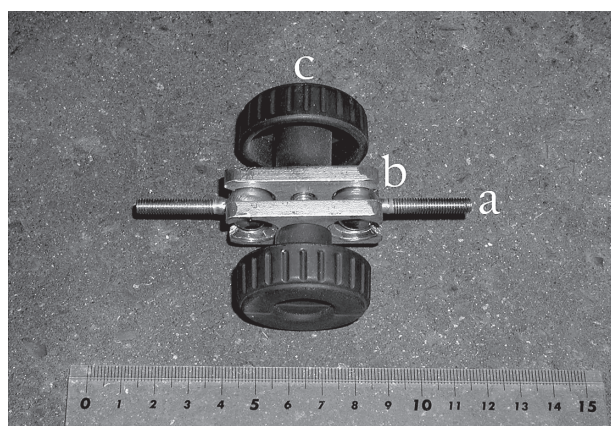


図2. ユニバーサルジョイント。(a) アーム、(b) 平鋼、(c) ノブ。

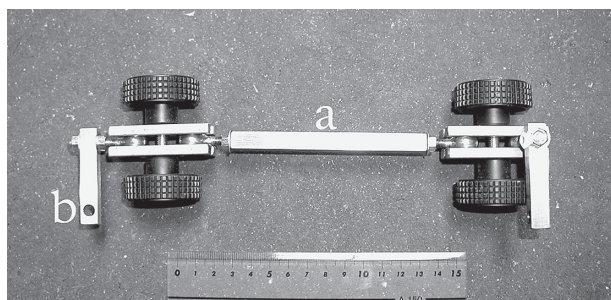


図3. アームに角鋼が取り付けられたユニバーサルジョイント。(a) アームに取り付けられた角鋼、(b) フレキシブルアーマチュアの木片の1つと置き代わる角鋼。

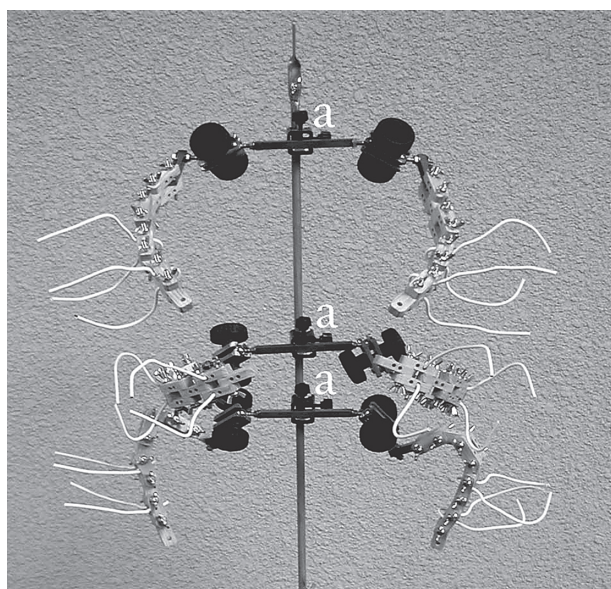


図4. 支持システムの基本セット。(a) アングルムフ。

な角度にも自由に固定される。

このジョイントの固定力は、200 mmに延長したアームの先に最大で約2 kgまでの荷重に耐えられる。したがって、おおよそ小型から中型サイズ（全長約1 ~ 6 m）の恐竜骨格の仮組みが可能である。

ユニバーサルジョイントと支柱の連結は、市販のアング

ルムッフ（図 4）で行われ、アームに取り付けられた角鋼（9 mm × 9 mm × 50 ~ 300 mm）（図 3-a）と支柱が直角に固定される。そしてユニバーサルジョイントとフレキシブルアーマチュアの連結は、連結用の特別な金具を使用せず、両者間で直接行われる。ユニバーサルジョイントのアームに取り付けられた角鋼（9 mm × 9 mm × 50 mm）（図 3-b）が、フレキシブルアーマチュアを構成する木片の 1 つと置き代わってボルトとナットで直接連結固定される。

フレキシブルアーマチュア

フレキシブルアーマチュアは、Besson (1963) が紹介したもので、多数の木片（本システムでは 40 mm × 15 mm × 9 mm）がボルトまたは蝶ネジ（径 4 mm × 40 ~ 100 mm）と蝶ナットでつながれたもので、構造上は自転車のチェーンや工事車両のキャタピラのようにつながっている。Besson (1963) は、アシカ化石の脊柱と胸郭を支えるガラス繊維の支持体を作るためにその原形となる粘土の土台としてフレキシブルアーマチュアを使用した。これにより自由な曲線を作ることができたので、脊柱の自然な湾曲が復元された。ここで紹介するフレキシブルアーマチュアは、Besson (1963) のものと基本的に同じであるが、厚い粘土に埋め込んで使用するのではなく、骨格姿勢を自由自在に変えるための調節機能を維持したまま標本を直接固定できるように針金などを取り付けて改良した（図 5）。これによりこのフレキシブルアーマチュアは固定したい標本の輪郭に沿って変形密着し、針金や蝶ネジにひっかけた輪ゴムなどでしっかりと標本を固定できる。そのため、脊柱のみならず四肢骨や肋骨をも自由に保持できるようになった。この脊柱以外への適用では、フレキシブルアーマチュアは標本をつかむ手の働きだけではなく、ユニバーサルジョイントとの相乗効果で、各骨を自由な位置に保持する腕としての働きもなしている。この 2 つの働きは本システムの最も重要な特徴となっている。

更にこのフレキシブルアーマチュアは、木片の列を増やし幅を大きくすることで、標本の大きさや重さにある程度対応することができる。市販の 4 mm 径のボルトでは、最小幅の 3 列（40 mm）から最大幅の 10 列（100 mm）が可能である（図 5）。

支持システムの使用方法

本システムの使用方法は、骨格のどの部位を支えるかで異なる。例えば、可動範囲の大きい四肢骨には支持範囲の大きい支持方法が使用され、そうでない脊柱などには支持範囲を大きくすることよりも、多くの骨をまとめて支持できる方法が使用される。

したがって、本システムでは、支える部位の形や性質に応じた支持方法を選択している。本システムの 3 つの部品は、その組み合わせと組み立て方で様々な使い方が可能な

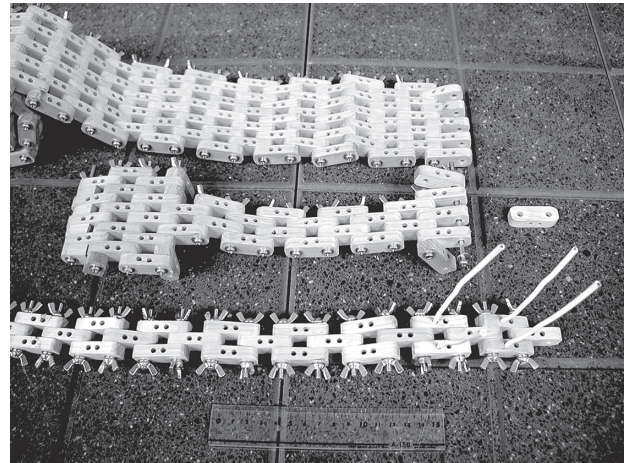


図 5. フレキシブルアーマチュア。組み立て方で様々な使用が可能である。

ので、骨格の部位ごとの特徴に応じた支持装置を用意できる。以下に具体的な例として、標準的な全身骨格仮組みと簡単な後肢骨の運動の再現を紹介する。

全身骨格の仮組み方法

全身骨格を仮組みするには、主に 3 種類の支持方法（装置）を使用する。それらは、それぞれ骨格の 3 つの部位、頭から尾の先までの脊柱・四肢骨・肋骨に対応している。

頭から尾の先までの脊柱の支持

頭から尾までを支えるためには、1 本の長いフレキシブルアーマチュアに複数の支柱が下から連結して支える支持装置を使用する（図 6-a）。支柱とフレキシブルアーマチュアの連結は支柱の説明の中で述べたように直接または間接的に行い、複数の支柱の先に 1 本のフレキシブルアーマチュアが連結される。そしてこのフレキシブルアーマチュアで脊柱の湾曲に沿った曲線を作り、頭から尾の先までの骨格を支える受けとする（図 7）。個々の骨とフレキシブルアーマチュアとの間の連結は、フレキシブルアーマチュアに取り付けられた針金や輪ゴムなどで行い、微妙な調節や遠位の小さな尾椎の固定には少量の粘土などを使用する。この連結方法は Besson (1963) のそれとは大きく異なる点で、Besson (1963) の連結方法による大量の粘土使用で、フレキシブルアーマチュアの姿勢調節機能が維持できなくなるのを避けるためにこの方法をとっている。そしてこの機能を活かし脊柱の姿勢を大きく変更したい時には、椎間板として薄い円板状のスポンジを椎体間にはさみ、脊柱管に針金やアルミ線を通して（Hangay and Dingley, 1985；八谷・大泰司, 1994）ゆるく固定すると姿勢の変更がしやすくなる。更に脊柱がレプリカでできている本組みの際に椎体の中心に穴を開ける予定がある場合は、スポンジの椎間板も含めて針金で貫き通され固定されていると一段と姿勢変更が容易になる。

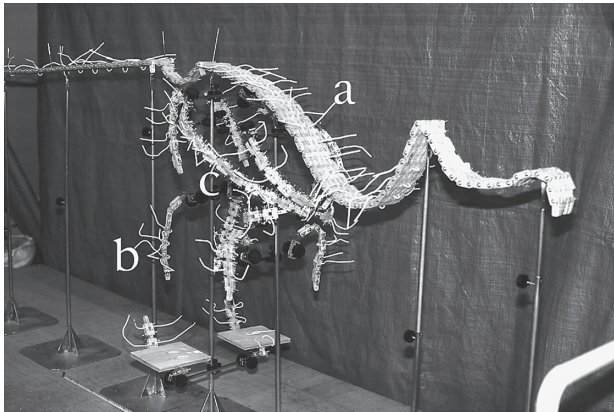


図6. バクトロサウルスの全身骨格レプリカを仮組みするシステム。(a) 頭から尾の先までを支える支持装置、(b) 四肢骨を支える支持装置、(c) 肋骨を支える支持装置。

図6-aの装置は脊柱の背腹方向（垂直方向）の湾曲を再現するために作られている。もし背腹方向の湾曲に加え横方向の大きな湾曲も再現したい場合には、長いフレキシブルアーマチュアを曲げたい部分で分断してユニバーサルジョイントを組み込むことで両方向の湾曲を同時に再現することができる。

四肢骨の支持

四肢骨を支えるためには、1本の支柱に左右それぞれユニバーサルジョイントとフレキシブルアーマチュアが1つずつ順に連結した支持装置を使用する（図4, 6-b, 7）。この装置1つにつき原則片側1つの骨を支持させる。

まず、この支持装置の先端にあるフレキシブルアーマチュアの遠位部分を、固定したい骨の輪郭に沿って固定に必要な長さだけ変形密着させ、取り付けられた針金や蝶ネジにひっかけた輪ゴムなどでしっかりと標本をつかませる。骨のどの部分をどちらから固定するかは、骨の形や支持装置と骨の可動範囲との位置関係など、様々な条件により異なるので、他の骨の固定方法も含めて総合的に判断する必要がある。また、骨の固定には、最低3点において骨と支持装置の間で接触されていけばよいが、しっかりと固定する場合には、できるだけ広い面積に渡ってフレキシブルアーマチュアを骨に沿わせる必要がある。

次に、骨の固定に参加しない近位のフレキシブルアーマチュアを、つかんだ骨の可動域を確保するに十分な長さにし、ユニバーサルジョイントとの相乗効果で、その骨を自由な位置に保持させる。

このように、全身の骨の中で最も可動範囲が大きい自由四肢骨を1つ1つ任意の位置に固定したり、大きく移動したりするためには、本システムの最も重要な特徴であるフレキシブルアーマチュアの標本をつかむ手の働きと、ユニバーサルジョイントとの相乗効果である各骨を自由な位置に保持する腕としての働きの両方を使う必要がある。

従来の四肢骨の仮組み方法では、ヒモやワイヤーで上

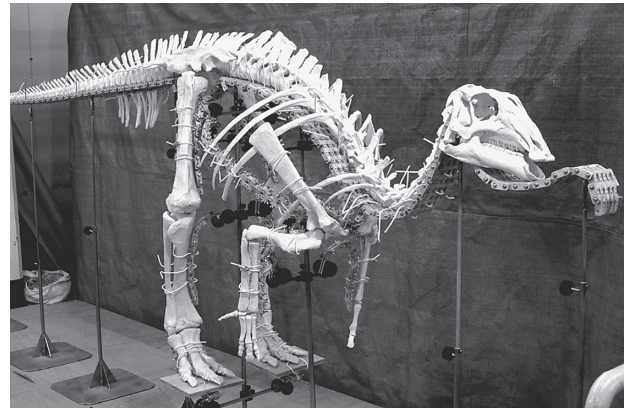


図7. 仮組みされたバクトロサウルスの全身骨格レプリカ。

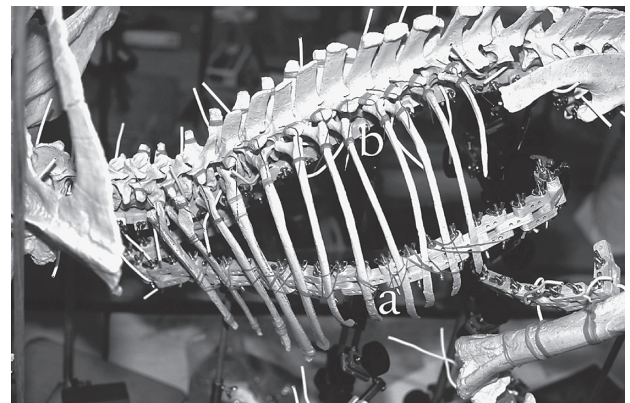


図8. プロトケラトプスの胸郭の仮組み。(a) 馬蹄形のフレキシブルアーマチュア外縁に輪ゴムで固定された肋骨、(b) への字の針金と輪ゴムで肋椎関節を仮留め。

からつるしたり、砂袋・支柱・板で支えたり、金具で仮留めしたりしていた（Camp and Hanna, 1937；Madsen, 1973；Leiggi and May, 1994；化石研究会, 2000）。これらの方法と本システムを比較すると、支持および姿勢の変更のしやすさ、支持装置の汎用性において本システムの方が支持装置として有利な点が多い。

肋骨の支持

肋骨を支え、胸郭を再現するためには、1本の支柱から左右に伸びた2つのユニバーサルジョイントに1本のフレキシブルアーマチュアの両端が連結した装置を使用する（図6-c, 7, 8）。

肋骨は椎骨の両側に規則正しく並び可動範囲の小さい胸郭を形成する。そのため、四肢骨のように1つ1つの骨を別々に固定するのではなく、肋骨をまとめて1本のフレキシブルアーマチュアに固定する。図8の例では、胸郭に沿って湾曲した馬蹄形のフレキシブルアーマチュアの外縁に左右両側の肋骨が蝶ネジに引っ掛けた輪ゴムで固定されている（図には左側面のみ写っている。図8-a）。

これまでよく行われている肋骨の固定方法では、薄い平鋼を必要な長さに切って胸郭に沿って湾曲させ、これに肋骨を固定させていた。そのため、平鋼の湾曲加工やその変

更の大変さ、輪ゴムなどを引っ掛けるところの無い滑りやすい平綱の上への肋骨固定の難しさ、一旦作った支持装置の汎用性の乏しさなど、様々な問題があった。他の肋骨の固定方法においても（化石研究会，2000），支持装置製作と同時並行の仮組み作業の大変さ、肋骨の固定の難しさ、一旦作った支持装置の汎用性の乏しさなど、ほぼ同様な問題が指摘できる。

一方、本システムではフレキシブルアーマチュアが容易に湾曲を作り変更もでき、蝶ネジや針金がついているためにこれらに引っ掛けた輪ゴムを使って簡単に肋骨を固定・移動でき、フレキシブルアーマチュアの長さを変えることで大きさの異なる骨格にも使用できるようになっている。

また、この例ではへの字に曲げた針金と輪ゴムにより肋骨と椎骨との間の肋椎関節が再現されているので（図 8-b），肋骨はふさわしい位置に整然と固定されている。

四肢骨の運動の再現

四肢骨の運動に関わる主要な関節には、肩関節・肘関節・手関節・股関節・膝関節・足関節などがある。手関節と足関節は解剖学用語ではないが、広く専門書や論文にそれぞれ手首の関節と足首の関節の意味として他の解剖学用語と並列で使用されているのでここでも便宜的に使用した。それらの関節の代わりをユニバーサルジョイントにさせることによって、四肢骨の運動を再現することができる。図 9 はプロトケラトプスの左後肢骨レプリカの膝関節への使用例である。膝関節の関節軸の延長にユニバーサルジョイントの関節軸が重なるように設置すれば、ユニバーサルジョイントが膝関節の代わりとなる。

ただし、本システムのユニバーサルジョイントは、2つの球関節を持つ多軸性関節であり、ヒトの関節可動式全身骨格の膝関節や足関節の関節金具として使われている蝶番関節のように、一旦装着すれば調整不要というものではない。そのため、姿勢を変えるたびに関節を構成する骨をふさわしい位置関係となるように調節する手間がかかる。

しかし、厳密にみると、実際の関節には関節軸が固定されて移動しない金属製の蝶番関節のように定規ではかったような動きをするものは少ない。膝関節は1軸性の蝶番関節とされているが（金子，1982），不完全な蝶番関節（加藤，1985），顆状関節（河野ほか，2003），車軸 - 蝶番関節（Sobotta, 2002）とも記述されていて、実際の膝関節の関節軸は屈伸の過程で移動し、回転までもする（Sobotta, 2002；金子，1982）。距腿関節においても1軸性の蝶番関節（Sobotta, 2002）とされているが、ラセン関節とも記述され（金子，1982；河野ほか，2003），実際には関節軸が移動する。このような理由から、1軸性の蝶番金具では膝関節や距腿関節の正確な運動は再現できない。

一方、本システムのユニバーサルジョイントは、2つの球関節を持つ多軸性関節であり、フレキシブルアーマチュアとの相乗効果で骨を任意の位置に固定・移動できるの

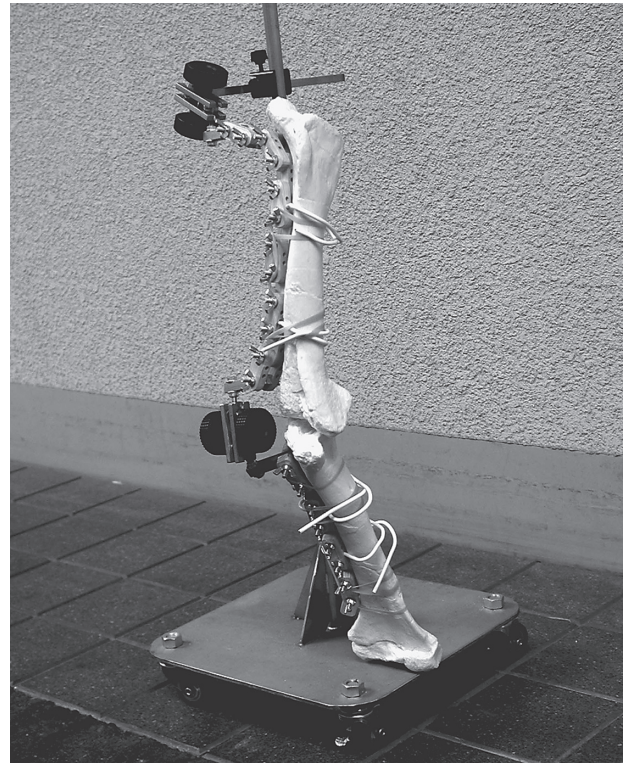


図 9. プロトケラトプスの左膝関節の運動を再現するための装置。

で、骨格の関節軸の移動や回転はほとんど影響しない。そのため、より正確な関節運動を再現するにはこのシステムの方が適している。更に、本システムを使用すれば関節可動式骨格を作るために標本を破損させるリスクもない。また、この支持方法を全身骨格においても使用すれば、姿勢の変更が一段と容易になり、全身の運動の検討も可能であろう。

支持システムの特徴のまとめ

本システムの特徴をまとめると以下ようになる。

- (1) 全身骨格を3次的に仮組みして何度でも姿勢を調整・変更しながら復元姿勢を検討できる。
- (2) 従来の方法と比べて、仮組みが容易に行える。
- (3) 汎用性があり、一旦システムが出来上がれば、仮組みする骨格の種類や大きさが変わっても、繰り返し使用できる。ただし、小型から中型の恐竜（全長約1～6m）程度の大きさの骨格に限られる。
- (4) 従来の方法よりも時間を要するが正確な骨格の関節運動の再現が可能である。

問題点と今後の展望

実際に使用してみて本システムには改善すべき点や適用限界があることが分かっている。今回紹介したフレキシブルアーマチュアには、安価で入手しやすいことからヒノキの木片を使用している。しかし、ヒノキの木片は長期間

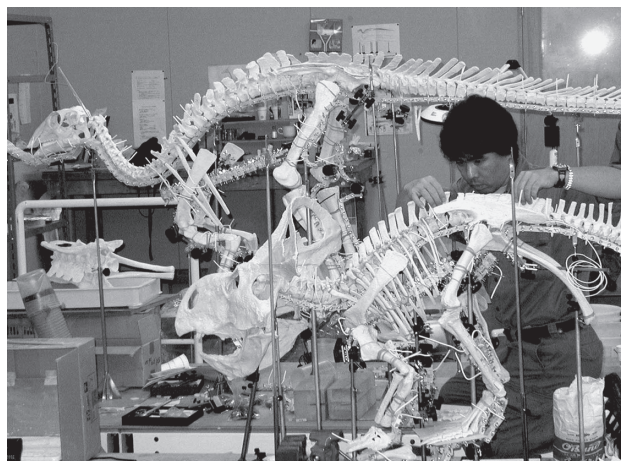


図 10. 仮組みされるプロトケラトプス（全長 2 m, 手前）とバクトロサウルス（全長 3 m, 奥）の全身骨格レプリカ。

放置するとボルトの締めつけが緩くなってしまうという欠点が生じた。したがって、変形の少ない素材を使用すべきである。

本システムを使用して実際に組み上げを行ったのは、全長 2 m と 3 m の小型の恐竜である（図 10）。システムの強度や部品のサイズから推測すると本システムは恐らくそれらの倍程度の中型までの恐竜に使用できると考えられる。更に大きな恐竜への適用は難しいので、より大きな部品からなるシステムを作る必要がある。また、本システムは、今回紹介した方法以外の使用方法や更に使いやすいシステムの開発が可能であり、本システムを土台として更に役立つものへと発展することを期待している。

謝辞

本システムの部品を製作するにあたり、林原グループの各社の方々にはいろいろと便宜していただいた。また、原稿をまとめるにあたって、林原自然科学博物館の石井健

一館長と石垣 忍副館長、林原生物化学研究所、古生物学研究センターの鈴木 茂センター長には、有意義なご指摘を頂いた。最後に東京大学の犬塚則久先生と早稲田大学の平山 廉先生には、本稿を査読していただき様々な点から貴重なご指摘を頂いた。以上の方々にこの場を借りて御礼を申し上げる。

文献

- Bakker, R. T., 1987. The return of the dancing dinosaurs. *In* Czerkas, S. J. and Olson, E. C. eds., *Dinosaurs Past and Present*, 1, 38-69, National History Museum of Los Angeles County, Los Angeles.
- Besson, L., 1963. A technique for mounting skeletons with fiberglass. *Curator*, **6**, 231-239.
- Camp, C. L. and Hanna, G. D., 1937. *Methods in Paleontology*. 153p., University of California Press, Berkeley, California.
- Gilmore, C. W., 1905. The mounted skeleton of *Triceratops prorsus*. *Proceedings of the United States National Museum*, **29**, 433-435.
- Hangay, G. and Dingley, M., 1985. *Biological Museum Methods*. 1, 379p., Vertebrates. Academic Press, Australia, Sydney.
- 犬塚則久, 1995. デスモスチルスの歩行機能に関する古生物学的研究. 平成 6 年度科研費研究成果報告書, 23 p.
- Johnson, R. E. and Ostrom, J. H., 1995. The forelimb of *Troosaurus* and an analysis of the posture and gait of ceratopsian dinosaurs. *In* Thomason, J. eds., *Functional Morphology in the Vertebrate Paleontology*, 205-218, Cambridge University Press, Cambridge.
- 金子丑之助, 1982. 日本人体解剖学, 第 1 巻. 594 p., 南山堂.
- 化石研究会, 2000. 化石の研究法. 388 p., 共立出版.
- 加藤嘉太郎, 1985. 家畜比較解剖図説, 上巻 297 p., 養賢堂.
- 河野邦雄・伊藤隆造・堺 章, 2003. 解剖学. 307 p., 医歯薬出版.
- Leiggi, P. and May, P. eds. 1994. *Vertebrate Paleontological Techniques*. 1, 344p., Cambridge University Press, New York.
- Madsen, J. H. 1973. On skinning a dinosaur. *Curator*, **16**, 225-266.
- Paul, G. S., 1987. The science and art of restoring the life appearance of dinosaurs and their relatives. *In* Czerkas, S. J. and Olson, E. C. eds., *Dinosaurs Past and Present*, 2, 5-49, University of Washington Press National History Museum of Los Angeles County, Los Angeles.
- Sobotta, J., 2002. 図説人体解剖学, 第 2 巻. 417 p., 岡本道雄監訳, 医学書院.
- 八谷昇・大泰司紀之, 1994. 骨格標本作製法. 129 p., 北海道大学図書刊行会.

