

哺乳類の手根の関節の比較機能形態学的解析*

犬塚則久¹✉

Ecomorphological analysis of the mammalian carpal joints

Norihiisa Inuzuka¹✉

Abstract

In order to infer the ecology of extinct animals, the morphology of the carpal joints of various extant species are compared and correlations with function are explored. In terms of lifestyle, graviportal and cursorial ungulates, fissiped and pinniped carnivores, and arboreal primates and xenarthra are compared. The radial head of primates is nearly circular, and the ulnar head is flat and has an articular disk between it and the triquetrum, allowing ulnar flexion. Carnivores need to supinate the hand to grasp prey. The ulnar head is conical, forming a trochoid joint with a bearing made up of the triquetrum and pisiform. The scaphoid and lunate are fused to form the scapholunar. In *Eumetpias*, the scapholunar has no stopper and their fins can be dorsi-palmar flexed. In graviportal ungulates, the increased width of the shoulder joints creates a carrying angle at the wrist, which in rhinoceros forms a trochoid joint and in hippos a spiral joint. Elephants have a unique midcarpal joint, which is a type I trochoid joint. In the desmostylian *Paleoparadoxia*, the distal surface of the radius is concave and the ulnar head is convex, which is thought to be a type II trochoid joint like rhinoceros.

Key words: antebrachial skeleton, carpal joint, carpus, ecomorphology, mammal

緒言

絶滅動物の骨格の姿勢を復元するには、運動の復元が必要で、骨から運動を知るには関節の形態から機能をよみとくことが不可欠である。哺乳類の前肢はロコモーションとマニピュレーションを兼ねるため、系統や生活型によって多様な形態をとる。「前肢は、食肉類、齧歯類、食虫類のように主に運動器として機能する場合でも、橈骨の回転可能性が保たれているため、他の目でもさまざまな機能を保持している (Gegenbauer 1898)。」手根骨の比較骨学では並列型と交互型の類型分類や、有蹄類の手根式による表現がなされてきた (Weber 1928)。束柱類では橈骨遠位関節面は凹面、尺骨頭関節面は凸面で、対する手根骨近位面は橈側に

ある舟状骨と月状骨が凸面、尺側にある三角骨が凹面である。この形態から可能な運動は車軸関節のみであることがわかり、現生で該当するのはサイで、重量型有蹄類独特の内転位の体肢による手首の担架角と理解できる。この結果、*Paleoparadoxia* の前腕は内転位に復元され、手首には、舟状骨の中心から尺骨頭の曲率中心を貫く軸まわりに回転できる金具が備えられた。また、車軸関節の定義を再検討することにより、ゾウの手根中央関節に新たな機能も見出された。腰に体の重心があり、前肢操舵の竜脚類に対して、胸に重心がある大型哺乳類のゾウは後肢操舵であることが明らかになった。

2025年2月7日受付, 2025年6月27日受理

¹古脊椎動物研究所 〒174-0034 板橋区幸町45-25-303

Palaeo-Vertebrate Laboratory 45-25-303 saiwaicho, Itabashi-ku, Tokyo, 174-0034, Japan

✉ e-mail: ashoroa@yahoo.co.jp

*2024年6月2日(日)に第42回(通算第159回)総会・学術大会の個人講演で発表。

手根の関節

手根の関節は姿勢と運動様式を反映している。手首は基本的に橈骨と尺骨からなる前腕骨格と近位3手根骨が関節を介して屈伸する。橈骨、尺骨および手根骨をふくむ手骨の記載は多くの比較解剖学の文献 (Owen 1866; Flower 1885; Lessertisseur and Saban 1967) に載っている。しかし、骨と骨をつなぐ関節について扱っている比較解剖学書は Bolk et al. (1938) のみである。ヒトの手首は背屈-掌屈と橈屈-尺屈ができる2軸性の楕円関節である (図1)。ヒトの手根骨は8個からなり、このうちの近位にある舟状骨・月状骨、橈骨との間で橈骨手根関節を形成する (図2)。この関節部位では、尺骨と三角骨の間は

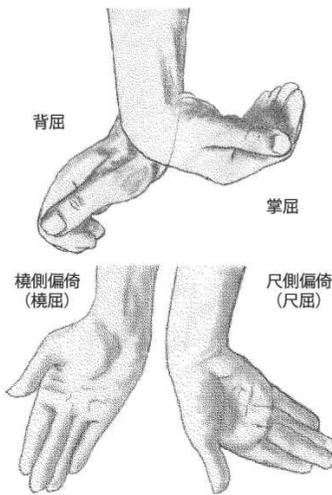


図1. ヒトの手首の運動. Backhouse and Hutchings (1986) を改変.

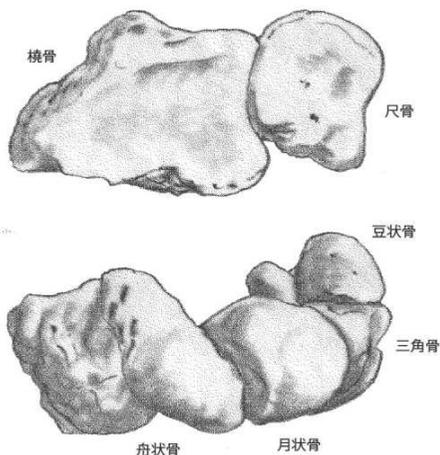


図2. ヒトの橈骨手根関節を構成する骨。橈骨は遠位面、手根骨は近位面。★本図から以降の図はすべて左側を示す。

関節円板で隔てられている (図3)。近位手根骨3個と遠位手根骨4個の間には手根中央関節が形成される。橈骨手根関節と手根中央関節はいずれも近位に凸面の関節面をもち、橈骨手根関節はおもに掌屈と尺屈、手根中央関節はおもに背屈と橈屈というように機能を分担している。このことは手首の掌側 (手のひら側) と背側 (手の甲側) にできる横じわの高さの違いによって確かめられる。

手のひらを伏せたり、上に向けたりする運動は、橈骨と尺骨の上橈尺関節と下橈尺関節の間の車軸関節によるもので、回内・回外という作用である。これらは基本的に樹上性の霊長類の特徴である。具体的には木の枝にぶら下がった状態で、肘を曲げたままで、進行方向を転換することができる。ヒトではこの回転範囲が最大である (Lessertisseur and Saban 1967)。

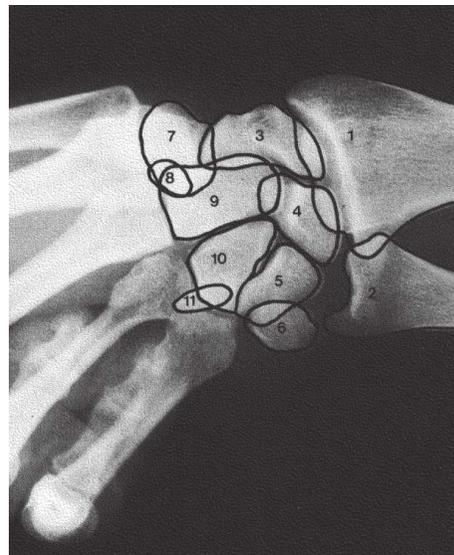


図3. ヒトの手根骨。1 橈骨, 2 尺骨, 3 舟状骨, 4 月状骨, 5 三角骨, 6 豆状骨, 7 大菱形骨, 8 小菱形骨, 9 有頭骨, 10 有鈎骨, 11 有鈎鈎, 尺骨 (2) と三角骨 (5) の間は関節円板で隔てられている。Backhouse and Hutchings (1986) を引用。

霊長類

霊長類は基本的に5指性で、食肉類では5~4本、有蹄類では5本から1本指までである。基本的に樹上性の霊長類は前肢をロコモーションと摂食に用いるため、前腕の回内、回外の可動範囲も広く、橈骨頭は真円に近い。この形質が系統によるものか、樹上性という生活型によるものかは、異節類のナマケモノとの比較から生活型によると判断できる (図4)。いっぽう、尺骨頭は尖らず扁平である。類人猿とヒトでは三角骨との間には関節円板を扶む (Bolk et al. 1938)。この

ことはそれ以外の狭鼻猿に比べて、類人猿では樹上での腕渡りと地上での拳歩行により、手首の尺屈機能が増えたためと考えられる。

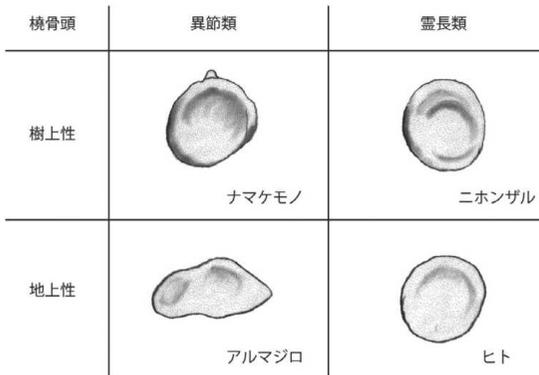


図4. 霊長類と異節類の橈骨頭の比較. 樹上性のナマケモノとニホンザルでは橈骨頭が円形に近く、回内・回外運動の範囲が広い。異節類のアルマジロでは円形でないので、ほぼ動かない。

食肉類

食肉類は基本的に捕食のため趾行性で走り、獲物を掴むために手を回外する必要があり、橈骨と尺骨は分かれている。橈骨は手根骨と蝶番関節し、尺骨頭は円錐形で、三角骨と豆状骨からなる軸受と車軸関節をなす(図5)。

鯨脚類の舟状骨と月状骨は癒合する (Owen 1866)。

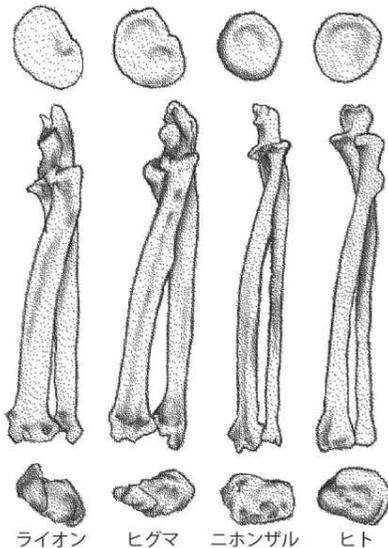


図5. 食肉類と霊長類の前腕骨格。食肉類では橈骨頭が楕円形(上段)で、尺骨頭が円錐形(下段)である。霊長類では橈骨頭が円形、尺骨頭は扁平である。

なお、月状骨と舟状骨さらに他の手根骨を含めて、これらの骨の癒合した骨の名称には以下のように異なる名称が使われている。食肉類でも舟状骨と月状骨がつねに癒合して1つの舟月骨 scapho-lunar bone となる (Flower 1885)。単孔類、草食性有袋類、大半の食虫類、齧歯類、食肉類、皮翼類、翼手類といった非常に多くの種類では、生活様式とは全く関係なく、月状骨は舟状骨と癒合して舟月骨 scapho-semilunar となる (Lessertisseur and Saban 1967)。食肉類の舟月骨 scapho-lunar には、中心骨もふくむ (Cornwall 1974)。

ネコ科の動物はネコからライオンまで体の大きさが何倍も異なる割には全身の体形が似ているため、体格因子を見いだすためによく比較対象として利用される。

ネコの手根は深く掌屈できるが、トラやライオンのような大型ネコはできない。ライオンでは舟月骨の掌側縁に隆起があり、手根の掌屈が妨げられている(図6)。趾行性のクマでは基本姿勢で手首が背屈しているので、舟月骨の近位関節面は近位よりも前に傾いている。このことから絶滅動物でも手根関節面の向きをみれば、趾行性かどうかの判断がつく。趾行性のクマではストップは舟月骨の前縁にある。

橈骨と尺骨で回内・回外運動ができる食肉類では舟月骨と三角骨が関節しない傾向がある。遠位の指にかかる力はみな舟月骨に集まり、とくに大型の鯨脚類では豆状骨と三角骨が尺骨頭の軸受けの役を果たしてい

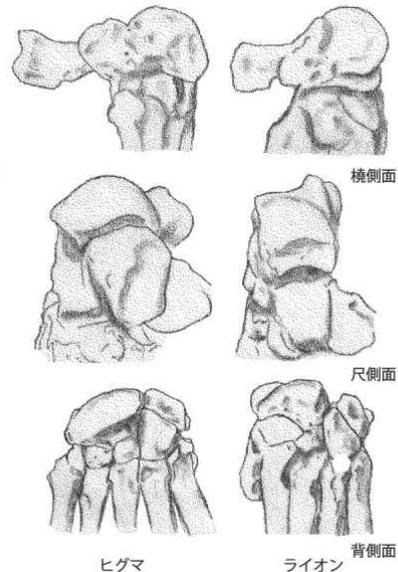


図6. 食肉類ライオンとクマの左手骨の比較。趾行性のクマのほうが舟月骨の近位関節面が前向きである。趾行性のライオンではストップが舟月骨の掌側にある。中手骨はライオンでは平行、クマでは放散する。

る。遊泳性のトドには舟月骨のストッパはなく、鰭は背屈・掌屈とも自由にできる（図7）。

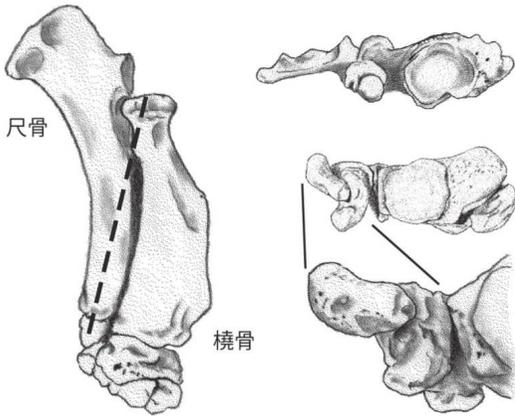


図7. 鰭脚類トドの前腕骨格と近位手根骨関節面 (Inuzuka 2024). 左: 外側面, 右上: 前腕骨格遠位面, 右中: 手根骨近位面, 右下: 三角骨と豆状骨の拡大.

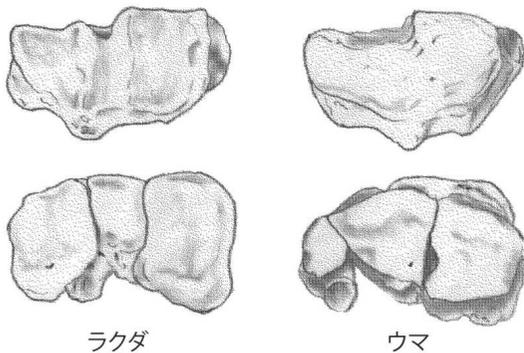


図8. 走行型有蹄類の手首の関節. 上: 橈骨遠位面, 下: 近位手根骨近位面.

有蹄類

骨で支えることができる荷重は骨の断面積に比例するので、動物の体は大型化するほど骨の比率が増し、肢骨の断面は円形に近づく。有蹄類は大型のものが多く、前腕骨格は橈骨に1本化するため回旋はできない。走行型有蹄類は指数が減少し、偶蹄類のラクダや奇蹄類のウマの前腕手根関節は蝶番関節で、関節面の背側縁にそって平面のストッパがあり、掌屈しかできない（図8）。重量型では左右の肩関節間の幅が広がるいっぽう、左右の手の接地点は正中に近づくので手根に担架角が生まれ（図9）、サイではII型車軸関節（Inuzuka 2024）、カバでは螺旋関節となる（図10）。

ウマでは手根中央関節の関節面は平面だが、前腕手根関節面は曲面なので屈伸でき、指節間関節も近位、遠位とも屈伸できる。いっぽうゾウの手は肉趾で円錐台形に固められ個々の指の関節はほとんど屈伸できない。このため指先を後向きになるまで曲げるのに必要な掌屈は手首だけで受けもっている（図11）。サイや

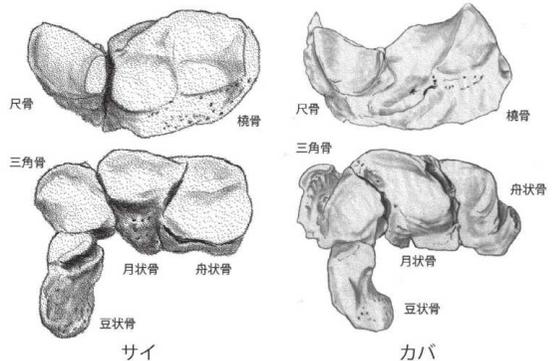


図10. 重量型有蹄類サイとカバの前腕骨格遠位面と近位手根骨近位面.

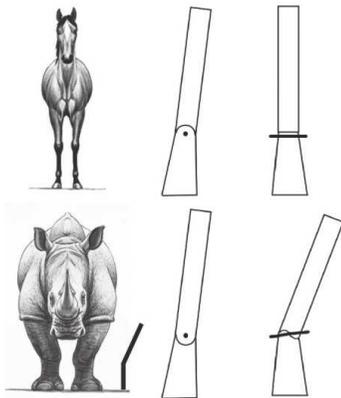


図9. 上段: ウマの手根の蝶番関節, 下段: サイの手根の担架角とII型車軸関節. 犬塚・廣野 (2023) を改変.



図11. 擬蹄行性ゾウの掌屈時の手根骨縦断面模式. 掌側に曲面, 背側に平面があり背屈ストッパとなる.

カバも手首が直角近くに曲がるように見えるのは肉趾による重量適応の1つとみられる。

長鼻類

長鼻類の手根骨について、Owen (1866) は「舟状骨では小さな橈骨関節面は大菱形骨や小菱形骨と関節する所から離れている。豆状骨のひとつの面には小さな面が2つある。その小さい方は尺骨と関節する。大菱形骨は第二中手骨の半分にそって伸びる。」と記している。

Flower (1885) の文献では「ゾウの手根骨は塊状で四角く、ごく平らな面で関節する。それは舟状骨、月状骨、三角骨、豆状骨と遠位列のふつうの4骨からなり、みな分かれていて中心骨はない。」とだけ記されていて、近位列と遠位列間の手根中央関節については記載されていない。

Gregory (1910) は「月状骨-有鈎骨の接触がきわめて退化もしくは欠如した主な目」の中に長鼻類を入れている。また、「尺骨の発達と橈骨の退化に関連して三角骨とくに月状骨は非常に広くなり、月状骨は小菱形骨に重なり、舟状骨退化の原因となる。」と手の進化の観点から手根骨を記述しており、関節面の形状は記載していない。

Reynolds (1913) の文献では「長鼻類の手は大きくて、ほぼ立方体の手根骨が平面で関節して、全然かみ合わない。」とだけ記されている。

Kingsley (1925) は、有蹄類の手根骨の構造を並列型 *taxeopodous* と交互型 *diplarthrous* の2型に分けている。長鼻類については「手根骨は完全に並列型、中心骨は若い時に橈側骨と癒合するが、他の手根骨は分離したままである。」とした。

Weber (1928) も手根骨の配置を「部分的に手根骨が直列に配置されている。これは一般に主張されているような二次的に獲得されたものではなく、一次的な並列型であることは、その全体の構造、特に若い動物の舟状骨とのみ癒合する手根中心骨の外観から明らかである。」と記している。

化石では、Cooper (1928) が Kent 州 Rochester 近郊の Upnor 産の *Elephas antiquus* を報告している。ここでは三角骨と有鈎骨以外の6手根骨を個別に記載、計測、作図し、アフリカゾウ、アジアゾウ、ケマンモスと比較している。

Cornwall (1974) は、長鼻類の手について次のように最も詳しく記載している。「豆状骨をふくむ8本の塊状の手根骨をもつ。中心骨はない。大菱形骨はその他の手根骨全体を越えて遠位に突出する。手の軸は橈骨から月状骨と有頭骨を通して第三中手骨に抜ける。第四中手骨は次に発生し、その軸は尺骨から三角骨、

有鈎骨を通る。」ただ、関節面の形や動きについての言及はない。

代表的な比較解剖学書のなかで手根関節について書いている文献は Bolk et al. (1938) しかないが、それにも長鼻類の手根間関節についての記載はない。

以上見たように長鼻類の手根骨の記載には書かれていないが、手根中央関節は独特である。遠位手根骨の近位面は中心部が高い陣笠のような形で、全体として軸椎の歯突起関節面に似ている(図12)。ふつうの有蹄類の掌屈に加えて、この関節で遠位手根骨の上で近位手根骨が回旋する。車軸関節は1軸性だが、ゾウの手根中央関節は掌屈と回旋の2軸性関節となる(図13)。この発見の契機となったのは、野尻湖でのナウマンゾウ発掘である。第5次野尻湖発掘では、ゾウの互に関節する手根骨、つまり小菱形骨、有頭骨、有鈎骨、三角骨が発見された。初めての産出だったので、現生のアジアゾウやアフリカゾウの骨と照合して同定し、比較も行った(図14)。

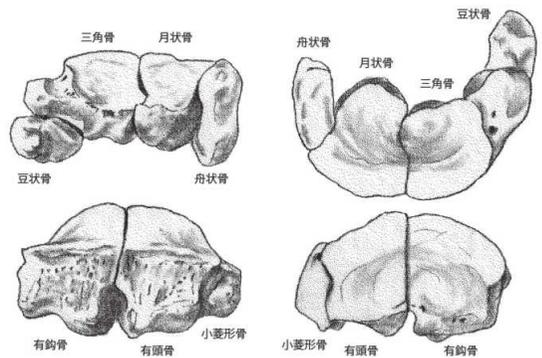


図12. ゾウの手根中央関節. 左: 近位手根骨後面と遠位手根骨前面, 右: 近位手根骨下面と遠位手根骨上面.

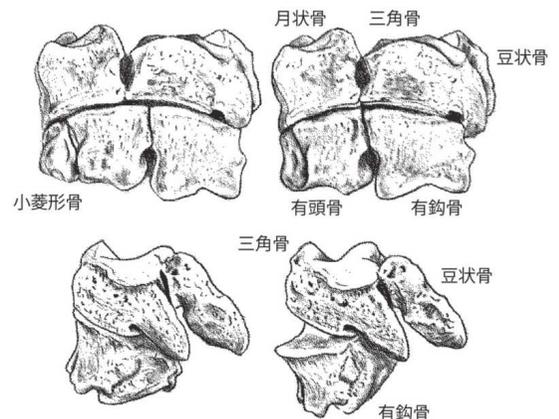


図13. ゾウの手根骨. 上: 背側面で回旋, 下: 外側面で掌屈を示す. 犬塚 (2017) を改変.

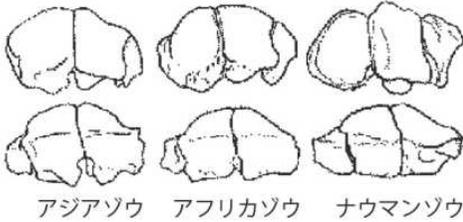


図14. 写真は野尻湖産ナウマンゾウの手根骨。近位前面。図はゾウ科3属比較図。上段；近位面，下段；前面。野尻湖哺乳類グループ（1980）を引用。

多くの有蹄類の手根は掌屈だけが可能で、背屈ストップパを備えた1軸性の蝶番関節である。なぜ長鼻類にかぎって手根中央関節で回旋するのか。この疑問は竜脚類恐竜の足跡化石から解明された。竜脚類の行跡には内軌道差が認められる（Ishigaki and Matsumoto 2009）。内軌道差とは車の内輪差にあたるもので、車が曲がる時に後輪が前輪の通ったあとよりも内側を通ることを言う。恐竜の足跡でも、前肢の行跡よりも後肢の行跡が内側を通っている。ゾウでは逆になること

から、曲がる時に前後どちらの足によるかがわかる。竜脚類は前肢で曲がるのに対し、ゾウはフォークリフトのように後肢で曲がっている。このことにより、有蹄類の肩甲骨関節窩が円形なのに対し、ゾウだけが前後に長いトラック形をしている訳が理解された（犬塚・半澤 2013）。肩関節は一般に球関節なのに対し、ゾウの前肢は前後に屈伸するだけで外転できないのである。たとえばゾウが右に曲がる時、右前肢を接地したあと、左後肢が前肢よりも体の正中（行跡軸）から離れた側に接地する。この時、右前肢は体ごと時計回りにねじれるが、肩関節も肘関節も回旋できないので、手根中央関節だけで担うと考えられる。

超大型のゾウでは肢骨が長いので、手首の担架角は小さく、前腕手根関節は蝶番関節である。ただし、左右の接地点は正中に近いので、前肢骨は全体として内転位にあり、手首での荷重は内側の方が大きいように見受けられる（図15）。橈骨の遠位内側端は舟状骨近位端の外側面と関節し、ほぼ矢状位なので橈骨が内側に脱臼するのを抑制するストップパの役割を果たすように見える。前腕手根関節面のなかで、尺骨内側面遠位前端にある楕円形の小関節面が月状骨の外側面近位前端と関節する点は、舟状骨と同様、矢状位にあるので前腕が内側にずれるのを抑制するストップパの役割を果たす。橈骨遠位面前端の凹面には月状骨近位面の前突起が挟まる。この背屈ストップパの形は、東柱目の *Desmostylus* や *Paleoparadoxia* に類似する（図16）。尺骨の遠位関節面は前後に凸面、内外側に凹面の鞍関節である。遊脚期には掌屈し、豆状骨近位端が尺骨遠位関節面（後面）の上側にあたり、ストップパとして働く。

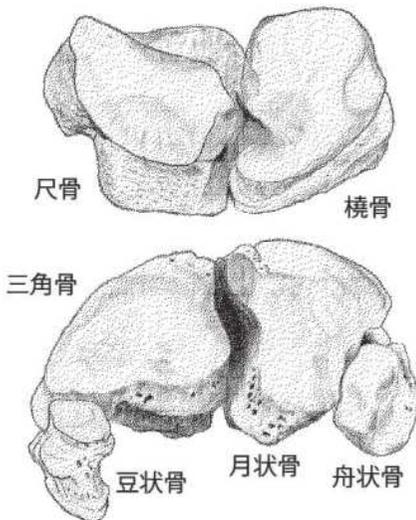


図15. ゾウの前腕骨格遠位面と近位手根骨関節面。

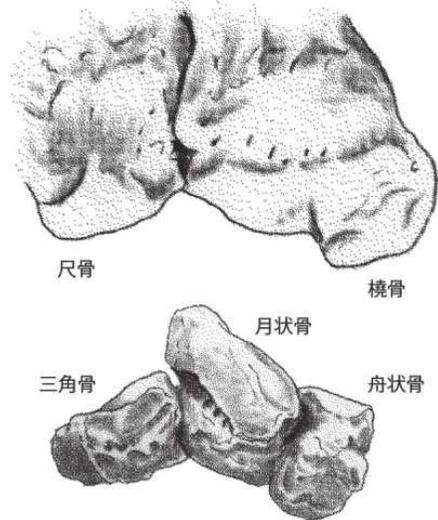


図16. *Paleoparadoxia* の前腕骨格と近位手根骨関節面。

先にサイで見たように、重量型有蹄類の前腕手根関節は多少ともこの形となる。なぜなら、前肢が体重支持と歩行に特化して、橈骨と尺骨の回旋が失われ、手足の接地点が体の重心に接近したために、前腕が内転位に傾いたからである。

じつは哺乳類の肢骨の関節の多くが、爬虫類の側方型から下方型への姿勢の転換に関わる。下方型の哺乳類では肘が外側から後に回ったため、手は前腕で180°回内することになった。前肢をマニピュレーションに使う霊長類や食肉類ではこの回旋運動が保存されている。いっぽう哺乳類の後肢では膝が前に回って足が前向きとなったので下腿の回旋機能が失われ、腓骨は膝関節からはずれて退化している。

束柱類

束柱類では一様に凹面の橈骨遠位面と凸面の舟状骨・月状骨が橈骨手根関節を作る。しかし月状骨の前端が橈骨遠位縁よりも前に突出し、強力な月状骨の背屈ストッパとなっている。

同じ前腕手根関節の中でも凸の尺骨頭は浅い凹面の三角骨近位面と尺骨手根関節を作る。1つの関節のなかに凹凸逆の2ヶ所の関節面をふくむので、ヒトの橈



図17. *Paleoparadoxia* の左手根のⅡ型車軸関節。足寄動物化石博物館蔵。Inuzuka (2024) を引用。

尺関節や距踵関節のようなⅡ型車軸関節 (Inuzuka 2024) となる。これは前腕軸が手の軸に対して外側に傾くことに対応している (図17)。

まとめ

様々な現生の種類や生活型の手根の関節を比較した結果、霊長類、食肉類、有蹄類では形態と生態との間に表1のような関係がみとめられる。

長鼻類の手根中央関節は掌屈する蝶番関節と手根の肢軸を中心に回旋するⅠ型車軸関節を兼ねている。竜脚類の行跡からは内軌道差が認められ、後重心の恐竜で前肢操舵するのに対し、前重心のゾウが後肢操舵することが明らかになった。この結果、ゾウが曲がる時に立脚期の前肢が手根のなかで回旋する訳が理解できた。

束柱類の *Paleoparadoxia* では橈骨遠位面が凹面、尺骨頭が凸面で、近位手根骨の舟状骨と月状骨の近位面は凸面、三角骨は凹面で、サイと同様のⅡ型車軸関節と考えられる。月状骨の前突起が背屈ストッパとなる点は長鼻類に類似し、アフリカ獣類の形質といえるかもしれない。多くの有蹄類で、手首の前面の丸い輪郭のなかに背屈ストッパ納めているのに比べれば、原始的な特徴であるといえる。

謝辞

ゾウ、カバ、トド、*Paleoparadoxia* の標本調査では足寄動物化石博物館の澤村 寛会員にお世話いただきました。恐竜の足跡化石については岡山理科大学恐竜研究所の石垣 忍所長と議論していただきました。

引用文献

- Backhouse KM, Hutchings RT (1986) A Color Atlas of Surface Anatomy Clinical and Applied. Wolfe Medical Publ. Ltd, Netherlands 310p
- Bolk L, Göppert E, Kallius E, Lubosch W (1938) Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere. Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien, 1106p

表1. 前腕手根関節の形態と生態との関係。

| | 霊長類 | 食肉類 | 偶蹄類 |
|-----------|-------------|---------|-------------|
| 生息地 | 樹上性～地上性 | 地上性～樹上性 | 地上性 |
| 歩行様式 | 蹠行性 | 趾行性 | 蹄行性 |
| 食性 | 雑食 | 肉食 | 草食 |
| 前腕骨の回内・回外 | 完全 | 可能 | 不可 |
| 橈骨頭 | 円形 | 楕円形 | 多角形 |
| 尺骨頭 | 関節円板 | 円錐形 | 平面～凸面 |
| 前腕手根関節 | 楕円関節 | 蝶番関節 | 蝶番関節～螺旋関節 |
| 近位手根骨 | 舟状骨・月状骨・三角骨 | 舟月骨・三角骨 | 舟状骨・月状骨・三角骨 |

- Cooper CF (1928) On a specimen of *Elephas antiquus* from Upnor. British Museum, London, 25p
- Cornwall IW (1974) Bones for the archaeologist. J. M. Dent & Sons Ltd, London, 259p
- Flower WH (1885) An introduction to the osteology of the Mammalia. MacMillan, London, 382p
- Gegenbaur C (1898) Vergleichende Anatomie der Wirbelthiere mit berucksichtigung der Wirbellosen. Erster Bd, 978p
- Gregory WK (1910) The Orders of mammals. Bulletin of American Museum of Natural History, 27: 1-524
- 犬塚則久 (2017) ゾウ (長鼻類). バイオメカニズム学会編『手の百科事典』, 朝倉書店, 東京, 255-257
- 犬塚則久・半澤紗由里 (2013) 哺乳類手根骨の形態とその機能的意義. 日本古生物学会2013年例会(横浜)講演予稿集, 12
- 犬塚則久・廣野研一 (2023) 恐竜の復元. 月刊たぐさのふしぎ, 465号, 福音館書店, 東京, 40p
- Inuzuka N (2024) Ecomorphological analysis of the trochoid joint and its evolutionary significance. American Journal of Biomedical Science & Research, 24, 187-195
- Ishigaki S, Matsumoto Y (2009) "Off-tracking" - like phenomenon observed in the turning sauropod trackway from the Upper Jurassic of Morocco. Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum 8, 1-10
- Kingsley JS (1925) The Vertebrate skeleton from the developmental standpoint. P. Blakiston's Son & Co. Philadelphia, 337p
- Lessertisseur J, Saban R (1967) Squelette appendiculaire. In: Traité de Zoologie, 16(1), Grassé ed., Masson, Paris, 709-1078
- Weber M (1928) Die Säugetiere Einführung in die Anatomie und Systematik der recenten und fossilen Mammalia. Verlag von Gustav Fischer, Jena, 898p
- 野尻湖哺乳類グループ (1980) 野尻湖層産のノウマンゾウ化石. 地質学論集 19, 167-192
- Owen R (1866) On the Anatomy of Vertebrates. Vol. 2 Birds and Mammals. Longmans, Green, and Co., London, 586p
- Reynolds SH (1913) The vertebrate skeleton. Cambridge University Press, 514p

犬塚則久 (2025) 哺乳類の手根の関節の比較機能形態学的解析. 化石研究会誌 58, 20-27

Norihisa Inuzuka (2025) Ecomorphological analysis of the mammalian carpal joints. Journal of Fossil Research 58, 20-27

要旨

絶滅動物の生態を推測するために現生各種の手根の関節形態を比較し, 機能との相関を探索する. 生活型については, 有蹄類は重量型と走行型, 食肉類は裂脚類と鱗脚類, 樹上性の霊長類と異節類を比較した. 霊長類は前腕の回内, 回外の可動範囲が広く, 橈骨頭は真円に近い. 尺骨頭は扁平で, 三角骨との間には関節円板を挟み, 尺屈できる. 食肉類は趾行性で, 獲物を掴むために手を回外する必要があり, 橈骨と尺骨は分かれている. 橈骨は手根骨と蝶番関節し, 尺骨頭は円錐形で, 三角骨と豆状骨からなる軸受と車軸関節をなす. 舟状骨と月状骨が癒合して舟月骨となる. トドには舟月骨のストッパがなく, 鱗は背掌屈できる. 有蹄類の前腕骨格は回旋できない. 走行型有蹄類は指数が減少し, 前腕手根関節は蝶番関節で, 掌屈しかできない. 重量型有蹄類では肩関節の幅の広がりから手首に担架角が生まれ, サイでは車軸関節, カバでは螺旋関節となる. ゾウは手根中央関節が独特で, I型車軸関節である. 束柱類の *Paleoparadoxia* では橈骨遠位面が凹面, 尺骨頭が凸面で, サイと同様のII型車軸関節と考えられる.