

## 第150回化石研究会例会講演要旨

(2018年11月10日, 鹿児島大学理学部101講義室にて開催)

シンポジウム

「3次元データとその解析に関する研究の最前線」

講演 1

### 哺乳類歯からの食性復元

山田英佑 (山梨県立博物館)

陸棲動物の食性は、生息する地域の気候や植生と密接に関連している。そのため、化石動物の食性を正確に復元できれば、単に特定の動物種の生態が明らかになるだけでなく、その時代・地域の植生景観（草原だったのか、森林だったのか）など、様々な手がかりが得られる。中でも哺乳類の歯は、化石、あるいは考古遺物としても保存されやすいことから、食性を復元する際の主な研究対象として注目されてきた。特に20世紀後半から盛んになったのが、歯の摩耗状態に関する研究である。

現代の動物では、エサの咀嚼時に混入した砂塵、植物体内のシリカなどによって、歯の表面に電子顕微鏡で観察できるレベルの微細なキズが形成される。そこで、化石資料を同様に観察し、キズの形状や数から生前の食性を推定する研究が行われ、初期人類の植生や生息環境など、多くの知見を生み出してきた。一方で、データ収集に要する膨大な労力、観察方法の不統一など、課題も指摘されるようになった。

そこで20世紀末ごろ、工業規格のひとつである「表面粗さ」を応用した方法が提唱された。「表面粗さ」とは、物体の表面がもつ微細な立体形状を、共焦点レーザー顕微鏡などの機器によって三次元座標に変換したのち、高低差の大きさや、へこみ部の体積など、国際標準化機構が提唱する規格（ISO25178）に準じて数値化したものである。この「表面粗さ」のデータを、生態が既知の現生動物と化石資料と比較することで、従来よりも高い精度で、簡便かつ客観的な分析ができるようになった。そこで今回は、この新手法を用いたニホンジカとイノシシの研究結果を報告する。

現在、ニホンジカは、日本の様々な植生環境に適応している。各地域集団の歯から「表面粗さ」のデータを収集して比較したところ、エサにしめるイネ科植物など草本の割合が高くなるのにもなって、「表面粗

さ」の値が一定の割合で変化していくことが明らかとなった。これにより、化石から得られた「表面粗さ」の値をシカのデータ式に代入することで、エサの組成を逆算推定できるようになり、今後、様々な研究分野への応用が期待される。一方、イノシシでは、シカと同様、野生集団で生息環境に対応した「表面粗さ」の変化がみられたのに加え、飼育された集団でも、歯の「表面粗さ」の値が異なることがあきらかとなった。考古学において、遺跡から出土した動物が家畜なのかどうかを判別することは、きわめて重要かつ困難な課題です。しかし今後は、出土した歯の「表面粗さ」を分析することで、家畜化個体の判別に役立つ新たな情報が得られるようになって期待される。

このように、歯の「表面粗さ」の研究によって、これまでにない性質のデータや、課題解決の手がかりが得られている。この手法は、分析の前後で、資料を物理学的・化学的に損なうことがほとんどない。そのため化石研究に特に有効と考えられ、出土例の多い「歯」という部位を対象とするという特性とも合わせ、今後ますます発展していくと考えられる。

講演 2

### オナガザルの咬耗正面から顎運動を復元する —化石資料への利用可能性を考える

清水大輔 (中部学院大学・看護リハビリテーション学部)

咀嚼運動中の顎運動は歯の機能やその動物の食性と密接にかかわっている。それゆえ、顎運動の理解は歯の機能の理解にとって重要である。しかしながら、顎運動の研究に対する実験的なアプローチでは、野生動物や絶滅動物を対象にすることが出来ず、利用できる動物が限定的である。もし、骨格・歯牙標本から顎運動を復元することが出来るならば、実験的なアプローチでは不可能であった野生動物や絶滅動物の顎運動を明らかにすることが出来るようになる。これより歯の形態や進化の理解に大きく貢献できるだろう。

Phase I の咬耗小面は上下の歯がお互いに接することで形成されるため、咬耗小面の傾きは Phase I 期間中の顎の運動方向を保存しているはずである。本研究では、咬耗小面の傾きを用いて Phase I 期間中の

顎運動の復元を試みる。オナガザル科のサルでは Phase I 期間中、咬頭と切痕がうまく噛み合い、隣り合う咬耗小面が同時に形成される。そのため、隣り合う咬耗小面の交線はその咬耗小面が形成された瞬間の顎運動を保存しているはずである。

本研究では京都大学霊長類研究所所蔵のアカコロブス（オス3、メス3）とサバンナモンキー（オス3、メス3）を用いた。これらは咬耗小面が明確に存在し、咬耗があまり進んでいない個体である。顎運動を復元するためには座標系の定義が不可欠である。また、コンピューターリソースには限りがある。そのため、頭骨全体（120 $\mu$ m）、上顎と下顎の歯槽部（60 $\mu$ m）、歯（10 $\mu$ m）を別個に計測し、その三次元データを重ね合わせることで、咬耗小面の計測に耐える精度と座標系を決定できる範囲のデータを得ることが出来た。オナガザルでは大臼歯1本で最大8つの咬耗小面が形成される。本研究では上顎と下顎の第一大臼歯から第三大臼歯に形成された咬耗小面を用いて、隣り合う咬耗小面の交線のベクトル（学運動ベクトル）を算出した。また、Phase I 期間中の顎の移動距離を求めるため、顎運動ベクトルに沿ってコンピューター上で下顎を動かし、歯が接してから咬頭嵌合位に移動するまでの距離を算出した。

隣接する顎運動ベクトルに大きな差が見られないため、本方法による顎運動方向の推定は妥当であると判断した。Phase I 時の顎運動方向は種間差が小さいが、下顎の移動距離には種間で顕著な差がみられた。上顎の大臼歯とそれに対応する下顎の大臼歯の咬耗小面から推定される顎運動方向に違いがみられない。つまり、Phase I の間、水平面での回転運動は起きていないと推測される。Phase I 時の顎運動の方向は M1 と M2 ではほぼ同じであるが、それらと M3 では異なる。M1、M2 では上下方向の成分が M3 に比べ大きく、側方向の成分が小さいことから、M1・M2 が先に接触し、M3 がその後接触すると推測される。上下の大臼歯の位置関係から、すべての大臼歯が同時に咬頭嵌合位に達しない。M1 は容易に咬頭嵌合位に達するが、遠心の歯は、近心の上下の歯が邪魔をして咬頭嵌合位に達することができない。サルにも主機能部位という考えが適応できるのであれば、近心の咬耗に伴い主機能部位が M1 から順に遠心に向かって移行しているのかもしれない。

### 講演3

## マクロ形態の発生： ヒトと大型類人猿の長骨形態とロコモーション

森本直記（京都大学理学部・自然人類学研究室）

ヒトの生物としての根源的な特徴は、直立二足歩行を行うことにあります。では、直立二足歩行をする前は、どのように運動していたのでしょうか。ヒトが立ち上がる前の姿を、類人猿から想像するかもしれませんが、しかし、必ずしもそれが正解ではないことを、我々はこの研究で示しました。

類人猿の中でも、ヒトに最も近縁な生き物はチンパンジー、次に近縁なのがゴリラです。ゴリラは約1000万年前、チンパンジーは約700万年前にヒトとの共通祖先から分化したと考えられています。チンパンジーとゴリラは両方とも、「ナックル歩行」という、指の背をつく四足運動をすることから、直立二足歩行の前段階はナックル歩行だったとする仮説があります。一方で、それに否定的な研究者もおり、共通祖先は「普通のサルのような四足歩行」をしていて、チンパンジーやゴリラのナックル歩行、ヒトの二足歩行はそれぞれの分化後に独自進化したと主張しています。これは、ヒトの直立二足歩行の起源を知るうえで最も重要な課題のひとつですが、化石記録が乏しく検証が困難なこともあり、いまだに議論が収束していません。

この状況で、非常に重要な手がかりを与えてくれるのが、個体発生のパターン、つまり、新生児から成体への成長パターンです。生物はそれぞれ種に特異的な形をもっていて、オトナを完成形とすれば、完成形に至る「道のり」もそれぞれの種で異なっています。この「道のり」が発生パターンです。生物が完成形というゴール地点を変える進化をするとき、発生パターンも必ず変わります。そこで、本研究では発生パターンに着目し、二つの問いに取り組みました。

- 1) チンパンジーとゴリラのナックル歩行は、我々ヒトからは似たように見えますが、本当に同じなのでしょうか？ ナックル歩行説によれば、両者は歩行に関わる部位に、共通祖先から受け継いだ発生パターンを保存しているはずですが。
- 2) ヒトとチンパンジーが共通祖先から種分化したとき、発生のパターンも分化したはずですが。ヒトは効率的な直立二足歩行のため、後肢が長いという特徴があります。長い後肢をもつために、ヒトはどのように個体発生を改変したのでしょうか？

これらの問いに答えるために、我々は、ヒトと、ヒトに近縁なチンパンジー・ゴリラ・オランウータン、

そして類人猿ではない「普通のサル」であるニホンザルの発生パターンを比較しました。具体的には、歩行機能の要である大腿骨を、X線CT（コンピューター断層）で撮影し、その三次元形態を分析しました。ここで、三次元の形を地図にして解析してしまう「形態地図法」という独自の新規手法を用い、個体発生という複雑な生物現象を定量化・可視化しました。その結果、以下のことが明らかになりました。

- チンパンジーとゴリラの大腿骨の発生パターンは著しく異なる。これは、チンパンジー・ゴリラのナックル歩行は共通祖先から分化した後、別々に獲得されたことを意味します。すなわち、ヒトの祖先はナックル歩行をしていなかった可能性が示唆されました。
- ヒトの発生パターンは他の霊長類に比べて特殊であり、ヒトは、脚を長くするために「成長を遅らせている」。ヒトは、大型類人猿に比べて成長期間が長いという特徴がありますが、それに対応して、大腿骨の形がオトナ型へ移行する時期が他の霊長類よりも遅くなっていることが示唆されました。

このように、ヒトの直立二足歩行の起源を明らかにするうえで、非常に重要な知見が得られました。

#### 講演 4

### 恐竜足跡研究と3D技術

石垣 忍 (岡山理科大学)

3D技術は、足跡化石研究を本質的に高めることができる。研究者の主観が入るアウトライン図や光線に左右される写真に比べ3Dデータは客観的で、正確で高度な科学的検討が可能だからである。足跡化石のTaxonomyや印跡動物の軟組織復元、運動や行動の復元において、3Dデータを活用することは大変有効である。近年3Dデータによる足跡化石の検討が広く行われている。

博物館標本などは手軽に分析できるので色深度画像や高精細等高線マップの作製とそれを用いた形態や分類の検討などが進んでいる。しかし、3D技術が最も必要なのは野外での足跡データ取得の場である。足跡化石は地層の一部なので物理的に標本採取が困難である。また、発見標本数が大変多くすべてのデータを取りきることができない。そして、標本はいずれ風化し浸食され滅失する。つまり野外での詳細な3Dデータ取得は「発掘作業・標本の保護」と同じ意義を持つ本質的で重要な課題である。そしてその作業に期待されることは、短時間で、解像度の高い正確なデータ

を、広範囲にわたって、なるべく人手と費用をかけずに効率よく取ることである。

現在野外で足跡化石の3D記録をとる方法は以下のような方法がある。

- ① ドローンによる空中写真をもとに行う方法。  
長所：記録取得が手軽で迅速。広範囲の処理も可能。  
短所：画像の精度が低い。ドローン運転に熟練要。天候に左右される度合いが高い。バッテリー充電が課題。運搬上の困難あり（特に国外）
- ② 3Dレーザースキャナーによる記録方法。  
長所：記録取得が手軽で迅速。短時間で広範囲のカバー可能。測量数値は正確。  
短所：画像の精度が低い。非常に高価。機器の保守が課題。運搬上の困難あり（特に国外）
- ③ 通常のカメラで足跡を多方向から撮影し、画像処理を行う方法。(Photogrammetry)  
長所：安価で手軽。特殊な機器は不要。広範囲を低精細で行うことも、狭い範囲を高精細で行うことも両方可能。  
短所：比較的時間がかかる。

それぞれの方法に一長一短があるが、大きな足跡化石産地で、全体を把握する方法としては①が最も適している。太陽光線が地層面に対して低角度で差し込む時間帯（一般に日出後一時間ぐらいと日没前一時間ぐらい）に、広範囲をドローン撮影することにより足跡化石をもとにした集団行動解析などに貢献できる。いっぽう、中規模以下の足跡印跡面の記録には②が便利である。特に数m～数十mの行跡のデータ取得などに向いている。迅速にたくさんの場所で実施できる。③の方法は価格が低く、持ち運びが手軽で、しかも高精細である。③は現場での大型恐竜足跡化石の3D記録システムとして最も適している。

近年の3D技術の進歩により、③の方法で撮った写真をPhotoscan<sup>®</sup>で画像処理し、そのデータを3Dプリンタで印刷することが大変簡単になった。足跡を3D模型化することは、手軽に色々な向きから足跡化石を検討することができる。特に足跡化石を凹凸反転させて3Dプリンタ印刷することにより、今までにない様々な、そして綿密な観察ができるようになった。これは大きな貢献である。

## 恐竜および長鼻類骨格の3D復元

三枝春生 (兵庫県立人と自然の博物館)

国内産の恐竜や長鼻類の部分骨格化石の多くは欠落部分が多く骨格復元には適さない。しかし、博物館の展示物としてこうした化石の交連された復元骨格(以下交連復元骨格)を作成してほしいという強い要望がある。日本各地の鮮新統から部分的な骨格化石が産出している長鼻類 *Stegodon miensis* (以下ミエゾウ) および兵庫県の下部白亜系篠山層群より産出している恐竜 *Tambatitanis amicitiae* (以下タンバティタニス) の交連復元骨格の作成はこうした事例に当たる。

従来の交連復元骨格作成法では、部分骨格化石から作成したレプリカに同種の別個体あるいは近縁種の骨格を参考にして粘土等で造形した欠落部分の模型を組み合わせて交連復元骨格を作成する。しかし、部分骨格化石が強く変形している場合、レプリカでは変形を補正することが出来ないで、その部分も粘土で造形することになり、交連復元骨格は粘土から作成された造形物の集合体になってしまう。

しかし、3Dモデリングソフトを用いるなら、化石骨の表面形状の3Dデータ(以下仮想骨とする)を自由に変化させることにより化石の変形の補正を容易に行え、その補正の過程をデータとして保存することも可能である。また近縁種の骨を参考にした欠損部分の作成、さらには仮想骨をくみ上げた復元骨格の3Dモデル(以下仮想交連骨格とする)の試作も容易に何回も行え、かつその過程をデータとして保存することが可能なため、その作成過程の検証も可能である。このようにして作成された仮想交連骨格は、3Dプリン

ターにより実物大も含め様々な大きさの交連復元骨格として打ち出すことが可能である。

不完全な部分骨格をもとに交連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骨格が必要である。ミエゾウの場合は最も近年な種である *Szdanskyi* (以下ツダンスキーゾウ) の全身骨格のレプリカから得られた仮想交連骨格に変形を補正したミエゾウの仮想骨をはじめ込むかたちで仮想交連骨格が作成された。

タンバティタニスの場合は近縁種に全身骨格が知られている種は無い。そこで系統的に近くかつ保存部位の最も多い種の骨化石をまず参考とし、その種に保存されていない部位に関してはより系統的に離れた種のそれらを参考とした。頸と胴体の骨および手首足首の先以外の四肢骨は *Phuwiangosaurus*、足首より先の骨は *Opisthocoelicaudia* と *Gobititan*、手首より先の骨は *Giraffatitan*、頭骨は *Camarasaurus*、*Giraffatitan*、*Tapuiasaurus* を参考にした。欠損部の仮想骨は、変形を補正したタンバティタニスの仮想骨と整合的に接合・関節するように、これら近縁種の仮想骨を変形させることにより作成した。

ミエゾウおよびタンバティタニスの仮想交連骨格は普及教育の素材として作成されたが、その作成過程でばらばらの骨を見ていただけでは気付かなかったこれらの骨格の特徴が見えてきた。たとえば、タンバティタニスの場合は、保存の良い胴体骨格の知られているディプロドクス類のそれらよりも強く横に膨らんだ胴体の形状、ミエゾウの場合は、ツダンスキーゾウよりもつよく前後短縮した頭蓋である。しかしながら、これらの特徴はあくまで他種を参考に作成された仮想交連骨格上に見られるものであり、これらの形質の存在を示唆する指標を探し出し検証しなければならない。