

足跡化石記録手法の発展と3-D 技術

石垣 忍^{*a}, 高津翔平^{**}, 真加部智大^{*}, 田部智大^{*}, 上杉雄大^{*},
西村龍太郎^{*}, 河島歩憂^{*}, 小平将大^{*}, 山本和雅^{*}, 能美洋介^{*}

Development of representation technique in ichnology and 3-D technology

Shinobu Ishigaki^a, Shohei Kozu^{**}, Tomohiro Makabe^{*}, Tomohiro Tanabe^{*}, Yudai Uesugi^{*},
Ryotaro Nishimura^{*}, Ayumu Kawabata^{*}, Shota Kodaira^{*}, Kazuma Yamamoto^{*} and Yousuke Noumi^{*}

Abstract

Paleontological specimens are three-dimensional in nature. However, certain characteristics cannot be represented by two-dimensional describing techniques. Body fossils have been collected and stored in the museums for research activity. However, fewer ichnological specimens have been collected compared to body fossils because of the difficulties associated with removing them from the site. This is problematic for comparative taxonomy in ichnology. Moreover, large tracksite documentation require huge amounts of time. Development in 3-D technology in last two decades is remarkable, solving many problems in ichnology. The authors review the basic and classic techniques of footprint study, and introduce new 3-D technology applicable to ichnological study. The authors also try to discuss the basic attitude to manage the ichnological data, because that attitude is still (or even more) important for using digital 3-D techniques.

Key words: ichnology, footprint, 3-D, photogrammetry, SfM

1. はじめに

化石標本の記載においては論文読者が三次元的な形態をできるだけ正確に把握できるようにする必要がある。一般に、化石が記載報告される場合は、その研究分野独自の記録方式に基づく計測値や、複数の方向からのスケッチと写真、ステレオ写真などの情報を紙に載せることで、読者が三次元的な形態の特徴を把握できるように努力がなされてきた。しかしながら、二次元媒体上の情報はおのずと限界があり、識者でもそれらの情報から正確に形態を認識することは困難である。

上記のようなことから、化石標本の詳細な研究においては論文等の情報だけでは十分とは言えず、原標本を観察し三次元的な情報を補完することが不可欠とさ

れる。この目的に対応するために、通常、多くの化石標本は、それらが記載される際、博物館等の研究施設に保管され、他の研究者が必要に応じてそれらを閲覧することが可能となっている。

ところが、足跡化石（あしあとかせき）標本は、地層ごと持ち帰ることが物理的に困難なことや、現場でのレプリカ取得作業に多大な費用を要することなどから、実物標本の採集保管が十分になされていない。また野外に露出状態でおかれた足跡化石は年月とともに風化侵食を受け、観察不可能になっている場合も多い。これらの理由から、他の研究者が足跡化石を比較検討しようとする、多くの場合、論文に書かれた数値と二次元情報のみに頼らざるを得ないのが実情であ

2019年9月19日受付, 2019年12月25日受理

^{*}岡山理科大学生物地球学部 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1
Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science.
Ridai-cho 1-1, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

^a E-mail (Corresponding Author): isgk-7591@wind.email.ne.jp

^{**}岐阜県博物館 〒501-3941 岐阜県関市小屋名1989

Gifu Prefectural Museum, Oyana 1989, Seki-city, Gifu 501-3941, Japan

る。従って、より効率的かつ効果的に足跡化石の三次元的情報を伝えるための技術開発が、他の化石以上に強く求められている。

このような状況下で、近年の3-D技術の発展は足跡化石の記録手法に大変革をもたらしている。これまで実物の足跡化石またはそのレプリカという媒体でしか伝達できなかった情報のいくつかを、3-D技術は伝達可能にしつつある。この流れは、技術革新と機器の低廉化とともに今後急発展すると考えられる。

もともと足跡化石の研究は、研究目標によって、1) 足印形態学的研究、2) 生態学的研究、3) 堆積学的研究、の三つに大別される。それぞれの目標に応じて記録手法が異なる。本論文では、足跡化石研究の三目標を解説し、それぞれに適した記録手法の発展史を概観するとともに、現在の3-D技術の適用について紹介する。最後に3-D技術の革新によって何が変化するのかを展望し、研究上留意すべきことを考察する。

なお、本論文で使用した足跡学の日本語用語は、石垣(1988)および「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会(1994)に従った。また、本論文で紹介した足跡化石の3-Dデータ取得作業や一般的な調査は著者それぞれの研究作業の一部として行ったものである。

2. 足印形態学的研究(足跡化石研究の目標①)

足印形態学的研究とは「一個の足跡」の呼称である「足印(そくいん)」の形態を記載し、その特徴に基づいて生痕化石としての分類(Ichnotaxonomy)、足跡動物(Trackmaker, Tracemaker)の大まかな分類群や体の大きさの推定などを行うものである。記載対象とする標本は変形が少なく保存良好なものを選ぶ必要がある。データ化する指標は、足印の大きさ(足印長、足印幅、指印長、指印幅)やそれらの間の比、指間角、指印の先端の形、指球痕の数と形態、足印壁に残る擦過痕、足印底に残る皮膚の印象などである。さらに、行跡(こうせき)として移動のあとが確認できる場合は最低三個の連続足印から成る行跡データを記録する。これらに関する方法と用語は、日本語文献では石垣(1988)と「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会(1994)に詳しく記されている。

足跡化石産地でのデータ取得法としては、目視によるスケッチとメジャーによる測定、自然光が斜め方向から入射する時刻を選びながら、あるいは人工照明のもとで、複数枚の写真を足印直上から撮影すること(以上をまとめて本論文では「基本記録法」と呼ぶ)が一般に行われてきた(図1a)。また、スケッチ作業を補助する方法として水糸を10cmごとに格子状にはった一辺1mの正方形木枠を使い、格子越しに位置を確かめながら行うスケッチ(以下「1m木枠

法」と呼ぶ)もよく使われた(図1b)。

1980年ごろから、欧米の研究者は農業用のビニールまたはポリエチレン製の薄いシートで足跡が印跡された地層面をおおい、フェルトペンで直接スケッチする方法(以下「ビニールスケッチ法」と呼ぶ)を取り入れていた(図1c)。この方法は様々なデータを直接実物大のビニールシートに書き込めるため、得られるデータは正確で「露頭にある足跡の実物大コピー」として測定や分析にも活用できる資料となる。また、簡易かつ経済的で、調査時間も短縮でき、保管にも場所をとらないという利点がある。

同方法は主に足跡の外縁を描くのみであったが、著者の一人(石垣)はこの方法に、深さの計測値や等高線に準じる線を描き、数色のフェルトペンでデータの種類を描き分ける改善をして、モロッコ国での恐竜足跡研究に利用した。1988年に滋賀県野洲川の哺乳類足跡化石群記録作業に著者の一人(石垣)が本手法を採用して以降、その正確さと簡便さが認められて日本の足跡化石調査に広く用いられるようになった。その後、野尻湖発掘調査団足跡古環境班によって、ポリエチレンシートのくもり防止にくもり止めスプレーを使うことや、シートを二枚重ねにしてデータを書き分けるなどさらなる工夫がなされている(「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会1994)。

基本記録法、1m木枠法、ビニールスケッチ法は、

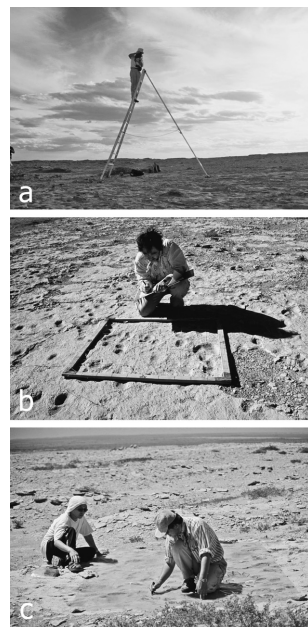


図1. 足跡化石産地でのデータ取得法。a: 園芸用大型三脚を用いた直上からの写真撮影。b: 1m四方の正方形の木枠に10cmごとの水糸をはったグリッド越しのスケッチ。c: ビニールスケッチ法。

最も簡易で、経済的で、確実にデータを取れる方法であるため、今も世界中の足跡化石研究現場で広く用いられている。しかし、スケッチによって描かれる線（例えば足跡と地層表面の境界線）は、記録者が主観的に解釈して描かれるため、データの正当性を客観的に評価できない。直上からの写真は光線状態などにより情報の質と内容が大きく変化し、それによって読者が解釈する標本の形態的なイメージも変化する。このような問題を克服するのが以下に述べる 3-D 記録法である。

足印形態学的研究に 3-D 記録法を導入することは古くからなされてきた。

最初に行われたのはステレオ写真による記録法である。同法は、足印の直上から少し左右にずらした位置で、それぞれ一枚、計二枚の写真を撮り、それらを左右に並べて記すことで、読者は両眼視差を利用して立体視することが可能となる（図 2 a, b）。この方法は理解を助ける一手段ではあるが、足印の深さの数値情報を得ることはできない。

立体物に格子状の光を当て、その影を別の格子をとうして撮影することで等高線に準ずる情報を得ることができるのがモアレ法である。これは筆者の一人（石垣）らによって世界で最初に足跡化石を対象に行われ、等高線に準じる線の自動描画にも成功した（Ishigaki and Fujisaki 1986, 1989）（図 3, 4）。しかしこの方法は、実物標本（またはレプリカ）を、室内の暗い環境でモアレカメラによって撮影する必要がある、野外での使用は困難である。また、モアレカメラの所持機関は限られていたため、3-D 記録法としてモアレ法が足跡学界に広く普及することはなかった。

このほかに、凸型足印を水盤に入れ、水を注ぎながら、水面と足印壁の交わる線を、ある水深に達するごとにトレースし、等高線として仕上げるという方法（水張り法）も試された（図 5）（Lim et al. 1989）。また、野尻湖発掘調査団の足跡古環境班によって、接触型の等高線描画装置による 3-D 記録法（「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会 1994）が考案された（図

6）。この装置は野外使用可能で、記録は高精度であった。しかし、水張り法等等高線描画装置も普及しなかった。データを得るために相当の時間と手間が必要になることがその理由であろう。

1980～90年代は接触式の三次元測定機などが開発され工業用に使用されていた。物体表面のある点からある点までの長さを即座に示すような、室内で使われる装置であった。高価で、足跡化石に応用されることはなかった。その後非接触型スキャナーの開発が進み、2010年以降は、光を使う非接触型 3-D スキャナーが

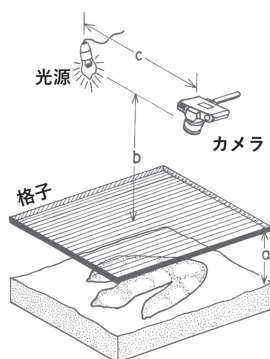


図 3. モアレ法の原理：点光源からの光を黒く塗った格子を通して対象物にあてる。生じた格子の影を、別の角度から同じ格子を通して撮影することでモアレ縞が生じる。これを利用して等高線を描くことができる（Ishigaki and Fujisaki 1989 を一部改変）。

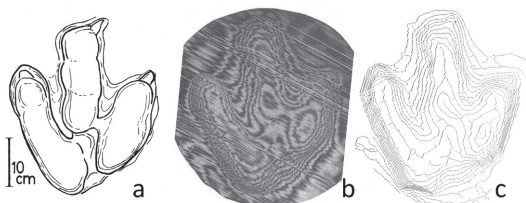


図 4. 足跡化石のモアレ法による等高線描画。a: 手書きスケッチ。b: モアレ法で撮影した原写真。c: 原写真をもとに画像処理で起こした等高線図。等高線間隔は 6 mm。対象となった足跡化石はアメリカ合衆国コネチカット州 Dinosaur State Park 産の *Eubrontes* sp. 等高線が必ずしも特徴を的確に表せるわけではない点に注意（Ishigaki and Fujisaki 1989 を一部改変）。

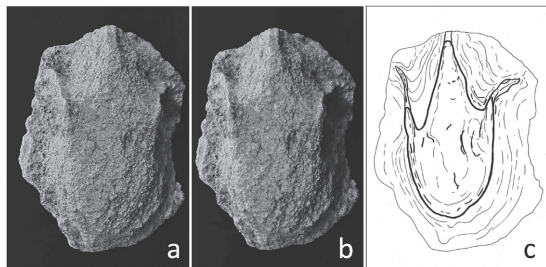


図 2. モンゴル国シャルツァフ産小型獣脚類足印（凸型、長さ 12cm）のステレオ写真（a, b）と線画スケッチ（c）。



図 5. 水張り法による鳥脚類足印の等高線図。等高線間隔は 2 mm。Scale Bar は 10cm。Lim et al. (1989) を一部改変。

急速に廉価になった。室内で対象物を固定してスキャンする室内据え置き型やデスクトップ型だけでなく、携行可能な3-D スキャナー（商品名：Artec EVA（数百万円）～Sense 3-D scanner（約7万円）など）が発売され、野外で足跡化石の3-D データを取得する研究者が増加している。これらの機器と画像処理ソフトを使えば、比較的短時間に高精度の3-D データをとることができ、俯瞰図、側面図、断面図の作成も容易である。データをもとに精度の高い等高線表示とカラー深度表示を行い、写真や手描きスケッチ図と合わせて論文に使用する例が増加している（図7；e.g. Belvedere et al. 2011）。

現状におけるこれらの機器の問題点は以下の点が挙げられる。1）以前より廉価になったとはいえ、精度の高い機器は高額であること、2）使用には電源または充電できる環境が要ること、3）高性能な電子機器であるため野外使用には衝撃や塵埃、温度湿度変化などによる故障リスクが伴うこと、4）単体の足印の記録には適するが、大型足印から成る一連の行跡や足跡化石産地全体のような広い範囲を記録することには不適で、データ取得すべき対象の大きさに応じて機種とスキャン方法を選択する必要があることなどである。

さらに、21世紀初めに足跡化石研究に導入されてから（Breithaupt and Matthews 2001; Bates et al.

2010; Remondino et al. 2010 ），2010年台中盤以降の普及が著しいのがSfM/MVS（Structure from Motion/Multi-View Stereo）＝Photogrammetry による3-D 画像処理である。民生品のデジタルカメラで、対象とする足印をあらゆる方向から撮影し、それらの数十枚～数百枚もの大量の写真データをAgisoftのMetashape[®]（2019年にPhoto Scan[®] から改称）などのSfm/VMSソフトウェアで処理して3-D 画像に加工できるようになった（図8c）。さらに3-D データをもとにCloud Compare[®] やPara View[®] などのソフトウェアを使ってカラー深度表示・等高線表示をすることが（図8d）、また、Maya[®] やMeshlab[®] を使って立体表示などの三次元的表現が可能になった。

SfM/MVSによる3-D 記録法は、記録作業に必要な機器が民生品のデジタルカメラだけであり、特別な機器は不要である。準備やデータ取得の作業も容易で技術習得に時間を要しない。特に野外調査に適した方法であるが、室内やそれに準じた環境での作業にも適している。Matthews et al. (2016) が指摘するように、現在、足跡研究においてこの方法は最も低廉かつ簡便である。今後はこの方法がさらに普及し標準化していくであろう（図9）。

ただ、こうしたデジタル記録手法と共に、現場観察記録として、デジタルデータのバックアップとして、

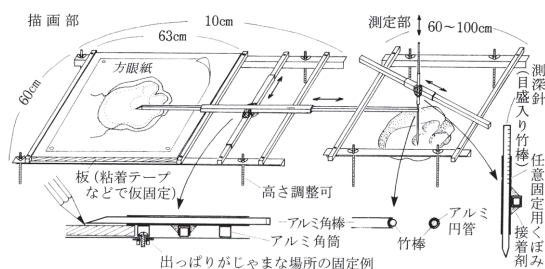


図6. 野尻湖発掘調査団足跡古環境班が作成した等高線描画装置（C型）。「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会（1994）より。

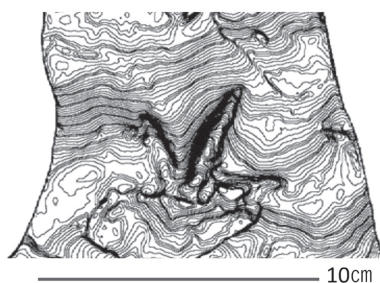


図7. モロッコ国ムッセムリール産小型獣脚類足印化石の等高線表示。等高線の間隔は0.2mm. Belvedere et al. (2011) Fig.3の一部を抜粋。

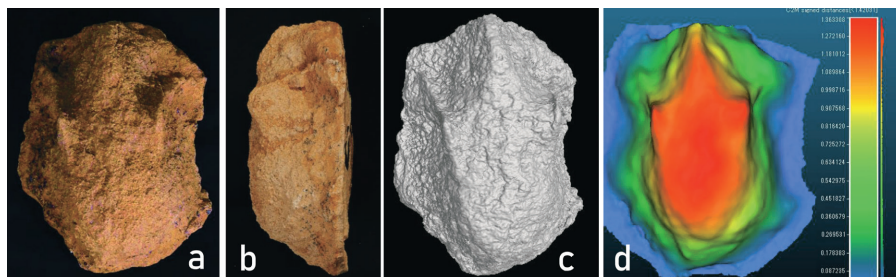


図8. モンゴル国シャルツァフ産小型獣脚類足印（凸型、長さ12cm）の a：俯瞰写真，b：右からの側面写真，c：X線CTスキャナーによる3-D画像，d：数十枚の写真をMetashape[®]（旧商品名Photo Scan[®]）で3-Dデータ化の後にCloud compare[®]で深度表示した画像。

基本的な記録法は相変わらず必要で重要である。特にビニールスケッチと、適切な陰影ができる光線状況下で直上から撮影した高解像度写真は時間がかからず、しかも3-Dデータと相互補完し合うデータであるため、併用が望ましい。

これらのデジタル3-D記録情報を受け取る側の利点は、2-Dから3-Dに翻訳する手間が不要なことである。特に、標本を手で持ってあらゆる方向から精緻な観察をするのと同様の行為を、画面上で行えることは画期的で、標本に関して欲しい情報を正確に得ることができる。電子出版普及に伴い、論文公表と同時に論文の図のデジタルデータを出版社のウェブにアップすることが行われている。ここに精緻な観察用のデータを載せることも可能になった。かつて隔靴搔痒の感があった論文の図の解釈がこれで大幅に改善されつつある。

もう一つ画期的なことは、3-Dプリンターの低廉化と普及によって、標本の3-Dデータから立体模型を作れるようになったことである(図10)。これには次のような利点がある。

- ① 標本の模型を作って手元に置き、常時観察できること：体化石ではよく行われることであるが、標本模型が手元にあることは重要で、新たに気付くことも多い。特に竜脚類などの大型足印標本の縮



図9. Metashape®での画像処理用の写真を撮影するには対象とする標本の周囲にマーカーを置いて撮影する。

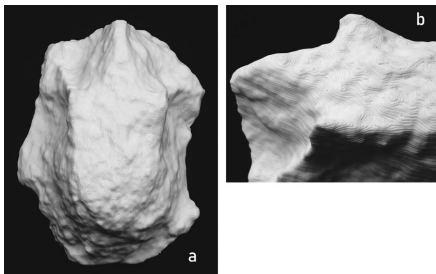


図10. a: 3-Dプリンターを使用して作成したモンゴル国シャルツァフ産小型獣脚類凸型足印の模型。b: 模型の細部の拡大写真。

小模型は形態を比較するうえで大変便利である。

- ② 標本の模型を作って公開できること：前述のように足印化石は主に物理的困難さから、記載の根拠となる標本または正確なレプリカの博物館保管が十分に行われてこなかった。今後は記載者が3-Dプリンターで作成した模型を博物館等で保管し、閲覧に供することができるほか、展示に使うこともできる。
- ③ 標本のデジタルデータを研究資料のやり取りに使える：対象化石の3-D情報をウェブ公開することによって、正確な三次元情報を提供できる。遠隔地の研究者はそのデータをもとにそれぞれの仕事場のプリンターで模型を打ち出して比較できる。

現在、足跡化石研究者の間でデジタルデータのアーカイブ化が議論されており、試行が始まっている(Falkingham PL et al. 2018)。これが充実すれば、博物館内の重要な足跡化石標本のデータはもとより、採集や保管が行われておらず、参照が困難な標本のデータも共有できる。実物・レプリカ・3-Dプリントアウト模型の博物館内での保管と合わせて進めれば研究進展に大いに役立つであろう。

そのいっぽう、どんなに技術が発達しても、保存の悪い実物化石から、正確な足印形態を推定また復元することはおよそ不可能なことである。3-D記録技術が進展するいっぽうで、データの解釈では以下の基本事項に留意が必要であることに変わりない。

- ① 足印は印跡動物の足部の複製ではなく、着地痕、支持痕、離脱痕の複合体である。
- ② 足印の形態は、支持基体の粒度や含水率、堆積環境、印跡時の印跡動物の行動、印跡後の変形、続成作用などで、さまざまに変化し、ある一個体が印跡した複数の足印を比較しても、全く同じものはない。

3. 生態学的研究(足跡化石研究の目標②)

生態学的研究の目標は印跡動物の姿勢・運動・行動を明らかにすることである。

個々の足印においては、深度分布にあらわれる体重負荷のかかり方の推定や、足印側壁に印跡される擦過痕から推定する足部の動きの推定などが研究テーマとなる。個々の足印のデータについては前述の足印形態学的研究で記した手法で行う。印跡動物の移動の記録である行跡においては、行跡幅、歩角、複歩長、単歩長、行跡幅(ゲージ)のタイプ、足印の行跡軸(=進行方向)に対する内旋または外旋、指先の支持基体への貫入状態と進行方向の関係、同一地層面状の他の足跡(群)との関係などが記載の主たるデータとなる。

恐竜の社会行動や運動を探るためには、一般に数 m^2

から数千 m^2 に至る広い範囲に印跡された足跡化石の情報が必要である。広範囲の足印分布図づくりには、主に「1 m 木杵法」や「ビニールスケッチ法」が採用されてきた。特にビニールスケッチ法は広い範囲の正確な記録を短時間で取得することに大変適していた。

地層面の二次元写真記録については、やや広角のレンズを装着したカメラで、足跡化石を含む地層面を直上から撮影することが行われてきた。地層面を基盤目状に区切り、一コマ一コマを同じ高さから、少しずつ重ねながら連続撮影することが基本である。フィルムカメラ時代はそれらを手作業でつなぎ合わせた(図11)。現在はデジタルカメラとPhotoshop®などの画像処理ソフトの発達によって、集成作業も簡便になりつつある。

広範囲の地層面撮影は、かつては、巨大な三脚やクレーンなどを使う陸上固定型の方法と、風や気球、ヘリコプターなどによる空中撮影が行われてきた。現在はドローン(商品名: DJI 社の PHANTOM シリーズ、MAVIC シリーズなど)の画像解像度が向上し、直上からの写真データとして使える精度になってきた。特に急傾斜の崖をなす地層面等、観察困難な露頭においても安全に撮影・観察が行え、調査の可能範囲が広がった。静止画及び動画のデータをもとに SfM/MVS 画像処理によって平面図や断面図の作成や測量も可能になった。

広範囲な足跡化石露出面の 3-D デジタルデータ取得においては現在 3 つの方法がある。

第一はドローンによる空中写真の撮影とそのデータを使った 3-D 画像処理である。ドローンの画像解像度は大型の足印化石や行跡データのように誤差 $\pm 2 \text{ mm}$ 程度の解像度が許容できる研究では使用可能で

ある。しかし、ドローンは操縦に熟練した技術が必要なことや風の影響を受けやすいこと、カメラのレンズ収差が大きいこと、電池の持続時間が短く飛行時間が限られること、電力供給と機器を故障から守る態勢が必要なこと、外国への持ち込み制限があること、などの難点がある。

第二は測量用の 3-D レーザースキャナー(商品名: FARO 社 FOCUS® など)(図12)である。この機器の使用によって、半径数メートルから数百メートルの範囲のきわめて正確な測定データと 3-D 画像を得られるようになった。測量用 3-D レーザースキャナーは、画像の解像度が粗いことや機器が重いこと、足印の深さが深い時や地層面のうねりが大きい時には影の部分が生じること、雨・風・高温・高湿・塵埃・振動・転倒に弱いこと、以前よりは低廉になったとはいえかなり高価であるなどの難点がある。これらの難点を克服できれば、極めて有用なので、今後の技術革新と共に使用が広がるであろう。

第三の方法はデジタルカメラを使った基盤目状の撮影である。広角レンズを装着したデジタルカメラで地層面を直上から、基盤目を順番につぶすように、66% 以上ずつ重ねながら連続撮影し画像処理する。現在のところ、最も簡便で、低コスト、解像度が高く、2~3 人以下の小さなグループでも実施可能な 3-D 記録方法である。ただ、足印形態学的研究の場合と異なり、以下に示す、独特の地層表面の撮影テクニックが必要である(e.g. Matthews et al. 2016)。

- ① 長い一脚(またはそれに準ずるもの)と、その先の雲台に取り付けた一眼レフカメラを用いる。カメラは感光面が地層面と平行になるようにする(図13)。レンズは 24mm などの広角が良い。F

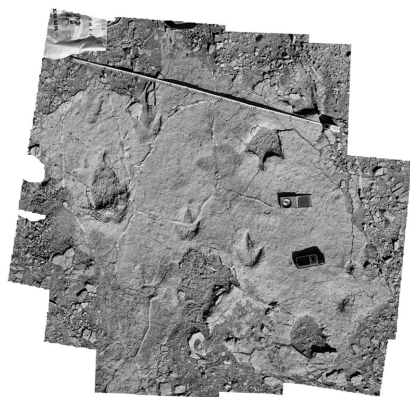


図11. 地層面の直上から撮影した写真を Photoshop で集成した地層面の画像。クリノメーターと GPS も写し込むことによってデータを記録する。これと、保存の良い足跡の接写画像とビニールシートスケッチがあれば基本データがそろろう。



図12. 足跡化石の密集する地層面の 3-D 記録を取得中の 3-D レーザースキャナー。場所を認識させるためのチェッカーボードを置き、一つの露頭面を数力所からレーザースキャンし、画像処理する(モンゴル国ゴビ砂漠シャルツァフ)。

値は8～11が良い。ISOは天候に合わせて200～2000の間で調整する。長時間撮影する場合は旗手ベルトやそれに準ずるもので、一脚の基部を撮影者の体に固定すると疲労が軽減される。

- ② 天気と撮影時刻は、薄曇りの日中が良い。一般に、直上からの足跡写真撮影に適していると言われる、「晴れた日の、日の出から1時間後や日没1時間前」は画面のコントラストが強すぎて3D画像処理用の写真撮影には不向きである。
- ③ 撮影は2～3人のチームで行う。1人はカメラを保持して、一歩ずつ移動する。ほかの1～2人はスマートフォン（またはiPadなど）を利用して画面に映し出されるファインダー画像や、カメラと地層面との位置関係を見ながら、カメラを保持する者に対して、立ち位置や、一脚の傾斜角の調整の指示を出し、適切な場所でもリモコンシャッターを切る（図13）。
- ④ 撮影面は隣接する画像と66%以上重なり合うように撮影する。これによってPhotogrammetryソフトによる3D画像処理が可能になる。合成の際には、使用レンズの仕様入力により自動ひずみ補正がなされる。

これら第一、第二、第三の方法は3-Dデータ取得の方法であると同時に、効果的かつ効率的に、地層面を直上から俯瞰した画像を取得し、平面図を作成する方法でもある。（図14）は、地層表面の直上約130cmの高さで連続撮影した画像の集成コラージュ、ドローンによる撮影、3-Dレーザースキャナーによるデータを示したものである。計測値を得るためには3-Dレーザースキャナーによるものが最も正確である。いっぽう精細な平面画像を得るには画像の集成コラージュが優れている。



図13. ウミガメ陸上行跡の、一脚を装着した一眼レフカメラによる撮影風景。①カメラ保持係と、②スマートフォンでカメラのファインダー画像を見ながらシャッターを押す係、③カメラの位置を見て保持係に指示する係（②と③は兼務可能）の2～3名がチームになるとよい。

ジュが優れている。

4. 堆積学的研究（足跡化石研究の目標③）

足跡化石は、堆積学的な見方をすれば生物擾乱による堆積構造である。足跡という堆積構造の生成環境と形成過程、化石化過程を明らかにするのが堆積学的研究である。いわゆる化石成因論（Taphonomy）的研究であるとともに、古環境解析にも関連する。

化石成因論的な研究では、足印の形はもとより、足印の上下および周囲の支持基体の質と変形状態や、足印内部を充填した堆積物の粒度、構造などの地質的データが必要である。現場で地質情報も含む三次元構造に関する情報を得るためには足印を含む支持基体にトレンチを掘り、横断面、縦断面を観察する（図15）。一個の足印の縦方向と横方向を同時に見るためには足印に十字型に切り込みを入れ、対角線上の部分（それぞれ1/4）の堆積物を取り除く。これらの手法については「ゾウの足跡化石調査法」（「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会 1994）に詳しくまとめられている。ただ、これらはどうしても選ばれた面での二次元的な

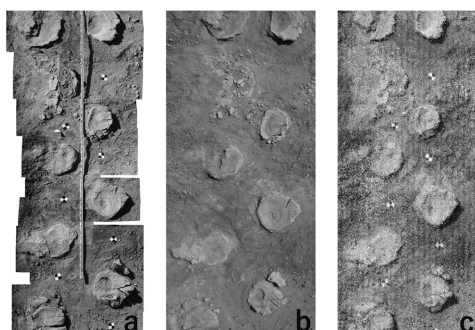


図14. 竜脚類行跡が印跡された地層面を直上から俯瞰した画像（3つの記録手法の比較）。a：地層表面の直上130cmの高さで連続撮影した画像をコラージュしたもの。b：ドローンによって真上から撮影した画像。c：3-Dレーザースキャナーによるスキャンデータ。



図15. モンゴル国ゴビ砂漠の風成層（砂丘成層）に印跡された獣脚類足印および直下の支持基体の横断面観察スケッチ風景（2015年8月）。モンゴル国ウディンサイール。

情報で、全体にわたる三次元構造は明らかにできない。

画期的な方法は、X線CTスキャナー（図16a）を使用した解析である。足跡化石下の支持基体中のラミナの変形や、凹型足印を充填して堆積・固化した凸型足印の内部ラミナ構造などを非破壊で3-D構造と堆積物の質が解析できる（図16b）。ボーリングコアなどはこの機器を利用して三次元的な構造を解析した論文がさかんに発表されている（e.g. 中島・中野 2013）。

足跡化石においては、足印が印跡された支持基体の岩石をX線CTにかけてラミナ変形を観察した結果が発表されている（Falkingham and Gatesy 2019）。足印形成時に支持基体中の粒子はどのように動くかをシミュレーションした実験と合わせて、支持基体上に足印が形成される過程という基本的なことの解明にこの手法が貢献できることは歴然としている。今後の足跡形成の四次元的な解析が期待される。

5. 今後の展望

デジタル3-D技術は、元来、地形図作成や建築、機械、工業製品開発などの分野で発達した。当初、機器類の価格は一千万円を超え、手軽に古生物学研究に応用できる状態ではなかったが、2010年代に入ってから技術の発達とともに急速に低廉化し、パソコンの処理能力向上とともに一気に普及しつつある。またPfM/MVS画像処理も2010年以降急速に普及しつつある。こちらもソフトウェアの低廉化が進み数万円の投資で精度の高い画像を得られるようになった。様々な3-D画像処理用のフリーソフトも公開されている。

こうした背景のもと、足跡化石研究はどのように変わってゆくのだろうか？以下、箇条書きにまとめる。

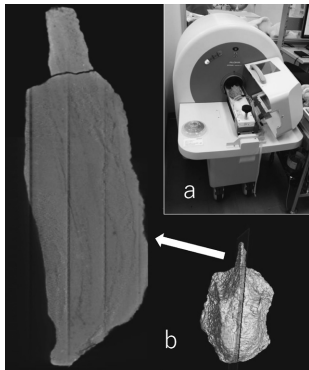


図16. X線CTスキャナーを使用した解析。a: X線CTスキャナー。写真は日立製の実験動物用X線CT装置。商品名: Latheta LCT-200。b: モンゴル国シャルツァフ産小型獣脚類凸型足印のX線CTによる断面（足印縦軸での縦断面）。VG STUDIO MAX 3.3 (Volume Graphics)で画像処理。下方向にたわんだラミナが確認される。

① 観察の仕方が変わる

3-Dデジタル技術は、野外における足跡化石の形態記録作業に要する時間を劇的に短縮した。今後、現地での観察は、「真にその場でしかできないこと」だけを最低限の時間で行い、あとは室内作業で3-Dデジタル情報中から情報を取捨選択するというスタイルに変わっていくだろう。しかし、前述したように古典的であるが基本的な技法は、バックアップデータとしても、3-Dデータを解釈する側の経験としても重要で、必要に応じてそういう技法でデータをとることや、研究者がそうした技術を身につけることの必要性は変わらない。

② 論文の図面が変わる

足跡化石の記載では足印・行跡のアウトラインスケッチと直上からの写真が掲載されてきた。この図における「線」は描画する個人が解釈した主観的なもので、客観性に欠ける。3-Dデータは、個人の解釈の違いによって生まれる齟齬を減らし、足印・行跡を正しく描くための強力な支援ツールとなる。

現在、3-DデジタルデータをもとにPEAKIT（読み方は「ピーキット」）画像（e.g. 横山・千葉 2017）という研究上重要なデータを選択的に強調した画像を作成する技術が開発され、考古学分野で使用されている。これを使えば、足跡化石として必要な情報を強調した処理が行えるようになるであろう（図17）。つまり、かつては図の作成者の頭の中で行い、手によって具現化していた画像編集作業の一部をコンピューターで行えるようになるということである。これは研究作業の一部の自動化・客観化と言えるだろう。考古学の世界ではこのPEAKIT画像を線画スケッチの代わりに論文の図として使用することが始まっている。PEAKIT画像は、足跡の印跡時に生じる足印壁の擦過痕や足底面に残される皮膚痕などのよ

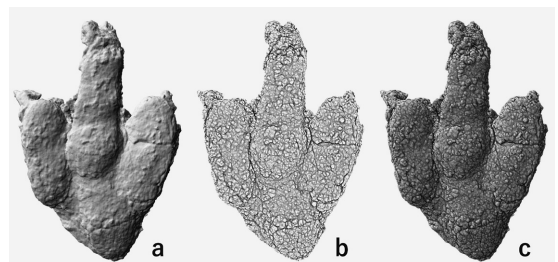


図17. モンゴル国シャルツァフ産の中型獣脚類足跡化石（凸型足印）の写真。a: 足跡化石にレリーフ処理を適用した画像。b: 地下開度処理を適用した画像。c: レリーフと地下開度を重ね表示したPEAKIT画像（処理実施: 株式会社ラング）。

うな、写真撮影においては照明が非常に困難な対象のレリーフの表現に大きな力を発揮する（図18）。いっぽう不要付着物、風化構造、クラックや破損部分などがあるのまま表現される課題があるのでそうした点に留意する必要があるだろう。

今後、3-D データを論文図に使用することは常識化するであろうが、基本的なアウトラインスケッチや直上からの写真掲載は必要と筆者らは考えている。なぜならそれは3-D データと相互に補完し合うデータであり、しかも、より客観性を持つ3-D データとともに提示することで、著者の考えを示す方法としての意義を持つからである。

③ 研究上の情報交換が簡単かつ正確になる

野外にしかない標本、滅失している標本、遠方の施設に保管中の標本などの3-D データを研究者どうしで相互に交換できるようになる。また、データのアーカイブ化とネット公開が進めば比較検討にかかる手間は相当軽減される。

④ 教育や展示普及の方法が変わる

かつては、レプリカを教育や展示普及に使うには、実物からシリコンなどで型を取り樹脂を流し込んで複製を作るしかなかった。今は「型どり」作業なしで3-D デジタルデータと3-D プリンターによるレプリカが製作可能である。今後はもっと手軽にハンズオン展示・教育ができるようになるであろう。

6. 結論

かねてから「足跡にしか残らない古生物学上の重要な証拠がある」ことを足跡研究者は主張してきた。足跡研究者がその言葉通りの成果を発表し、新しい観点からの古生物学への貢献を続けたことにより、古生物学界の足跡化石に対する認識は向上し、足跡学研究者は日本でも海外でも増加しつつある。今後さらなる3-D デジタル技術の導入により、使える足跡学上のデータは量的にも質的にも急速に発展することは間違

いない。これは「足跡にしか残らない古生物学上の重要な証拠」を増やすことである。

また、採集できなかった標本の3-D データから作った三次元画像を画面上で自由に回転させたり、3-D プリンターで打ち出した縮小模型を手の上で観察したりしていると、フィールドでは気付かなかった思いがけない特徴に気付くことがある。これは特徴の読み取りサポート、スケッチや記載の強力な補足機能を持っていることの証で、研究の精度を上げる重要な技術である。

現在、データベースの共有提案がなされ、そうした研究交流が開始された（Falkingham et al. 2018）。同じ3-D データを使いながら、遠隔地にいる複数の研究者が同じテーブルで議論できる時代が始まっている。これは画期的なことで研究の活性化が期待される。今後、思いがけない研究成果が出てくるのではないかと期待している。

そのいっぽう、3-D デジタル技術は、今までの古足跡学記録方法の根底にあった「あいまいさ」を改めて顕在化させるものでもある。そもそも足跡は堆積物という容易に変形するものに印跡された二次変形しやすい記録である。その特性への配慮が足りないと不正確なデータに基づく推論を積み重ねた、砂上の楼閣のような議論になる。前述したが、いくら3-D 技術が進歩してももとの標本の保存が悪ければ何のデータも取り出せない。「確かに使えるデータ、確実に言えることは何か」を検証し続ける必要がある。足跡化石がそうした記載に使えるレベルかどうかを数値評価して標準化する試みも発表されている（Belvedere and Farlow 2016）。また、繰り返しになるが、3-D データを十分に理解し、その長所を生かして十分に使いこなすためには、足跡学的な知識と経験が得られる古典的な手法の習得と実行が必須なことには変わりはない。2016年 Indiana University Press 刊行の Dinosaur Tracks, The Next Steps と2017年雄山閣刊行の季刊考古学第140号はこうした考察を深めるための示唆を与えてくれる。

7. 謝辞

3-D デジタル技術を、岡山理科大学における足跡化石研究に導入するにあたって、岡山理科大学卒業生の澤田健成、千田泰生、秋和昌樹、藤本大樹、加藤祐之助らと、4年生（2019年時点）の嶋田 翼、大内宙、坂井和敬、北野輝光、松山玲央、岡崎陽平の各氏はそれぞれの卒業論文・修士論文のための研究の一部として、あるいは研究協力者として、本稿の研究に参加し、研究進展に大きく貢献した。彼らの努力と工夫無しでは本稿に集約された結果を得ることはできな

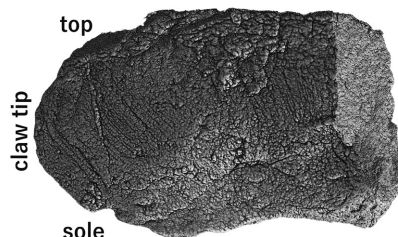


図18. モンゴル国シャルツァフ ウェスト産出の、獣脚類凸型足印の第3趾印（前後長25.4cm）の趾印左側の壁の表面（左側面）に見られる、印跡時に形成された擦過痕のPEAKIT画像。

かった。またゴビ砂漠でのフィールドワークにおいて Mongolian Academy of Sciences, Institute of Paleontology の Khishigjav Tsogtbaatar 博士と Buuvei Mainbayar 研究員、岡山理科大学の豊田 新、實吉玄貴、高橋亮雄、林 昭次、千葉謙太郎の各博士に大変お世話になった。Brent Breithaupt, Neffra Matthews, Jens Lallensack, 芝原暁彦、田中郁子の各博士には 3-D 技術の足跡化石への応用について、いろいろとご教示いただいた。株式会社ラングの横山 真、千葉史両氏には PEAKIT 画像の作成にご協力いただいた。平山廉博士と匿名の査読者は丁寧に原稿を見て下さり、貴重な助言をいただいた。以上の方々に深く感謝する。

本研究には文部科学省の私立大学研究ブランディング事業の補助金の一部を使用した。

参考文献

- Bates KT, Falkingham PL, Rarity F, Hodgetts D, Purslow A, Manning PL (2010) Application of high-resolution laser scanning and photogrammetric techniques to data acquisition, analysis and interpretation in paleontology. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, 2010, 68-73
- Belvedere M, Dyke G, Hadri M, Ishigaki S (2011) The oldest evidence for birds in Northern Gondwana?: Small tridactyl footprints from the Middle Jurassic of Msemrir (Morocco). *Gondwana Research*, 19(2), 542-549
- Breithaupt BH, Matthews NA (2001) Preserving paleontological resources using photogrammetry and geographic information systems, in Harmon, D., ed., *Crossing boundaries in Park management: Proceedings of the 11th Conference on research and resource management on parks and public lands*: Hancock, MI, The George Wright Society, 62-70
- Falkingham PL (2012) Acquisition of high resolution 3-D models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica* 15, Issue 1; 1T: 1-15 (<https://doi.org/10.26879/264>)
- Falkingham PL, Gatesy SM (2019) Track formation mechanisms elucidated by computer simulation and bi-planar X-ray. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, 46, 83-88
- Falkingham PL, Marty D, Richter A (eds) (2016) *Dinosaur Tracks, The Next Steps*. Indiana University Press, Bloomington, Indiana, USA, 413 p
- Falkingham PL, Bates KT, Avanzini M, Bennett M, Bordy EM, Breihaupt BH, Castanera D, Citton P, Diaz-Martinez I, Farlow JM, Fiorillo AR, Gatesy SM, Getty P, Hatala KG, Hornung JJ, Hyatt JA, Klein H, Lallensack JN, Martin AJ, Marty D, Matthews NA, Meyer CA, Milan J, Minter NJ, Razzolini NL, Romilio A, Salisbury SW, Sciscio L, Tanaka I, Wiseman ALA, Xing LD, Belvedere M (2018) A standard protocol for documenting modern and fossil ichnological data. *Palaeontology* 61, Part 4, 469-480
- 石垣忍 (1988) 足跡学の用語. *生物科学*, 40 (1), 31-38
- Ishigaki S, Fujisaki T (1985) Three dimensional representation of the dinosaur footprint by the method of moiré topography. *Journal of Fossil Research*, 18, 59-64
- Ishigaki S, Fujisaki T (1989) Three dimensional representation of Eubrontes by the method of moiré topography. In: *Dinosaur Tracks and Traces* (eds. Gillette DD and Lockley MG), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 422-425
- Lim SK, Yang SY, Lockley MG (1989) Large dinosaur footprint assemblages from the Cretaceous Jindong formation of Southern Korea. In: *Dinosaur Tracks and Traces* (eds. Gillette DD and Lockley MG), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 333-336
- Mallison H, Wings O (2014) Photogrammetry in paleontology –a practical guide. *Journal of Paleontological Techniques*, 12, 1-31
- Matthews N, Noble T, Breithaupt B (2016) Close-Range Photogrammetry for 3-D Ichnology: The Basics of Photogrammetric Ichnology. In: *Dinosaur Tracks, The Next Steps* (eds. Falkingham PL, Marty D, Richter A). Indiana University Press, Bloomington, Indiana, USA, 28-53
- 中島善人, 中野 司 (2013) X線CTによる地質試料の分析: これから始める人のために. *GSJ 地質ニュース*, 2, 86-90
- 中園 聡ほか (2017) 特集 3-D. 技術と考古学. *季刊考古学*, 140, 14-91
- Remondino F, Rizzi A, Girardi S, Petti FM, Avanzini M (2010) 3-D Ichnology –Recovering digital 3-D models of dinosaur footprints. *The Photogrammetric Record* 25(131), 266-282
- 横山 真, 千葉 史 (2017) PEAKIT による考古遺物の視覚表現. *季刊考古学*, 140, 26-29
- 「ゾウの足跡化石調査法」編集委員会 (1994) *ゾウの足跡化石調査法*. 地学ハンドブックシリーズ 9, 地学団体研究会. 東京, 128 p