

レーザースキャナを用いた多摩川流域上総層群化石群の
3次元構造データ保存法の確立

2022年

中島 保寿

目次

はじめに	1
地質概説	2
化石および化石産状の保存における諸問題	4
古生物学における3Dデータの活用	5
材料、方法および計画と実施内容の違い	6
結果と考察1：化石標本	9
結果と考察2：化石産出露頭	18
結論1：上総層群化石群の3Dデータ保存に向けての留意点	26
結論2：研究成果の社会還元に向けての取り組み	26
結論3：今後に向けての課題	27
謝辞	28
引用文献	29

はじめに

約 258 万年前から約 1 万 1700 年前までの更新世 (Pleistocene) は、地球の両極を中心とした大規模な氷床が発達した、いわゆる広義の「氷河期」であり、世界的にはメガフォーナ (Megafauna) とよばれる大型の哺乳類相が繁栄した時代でもあった (Martin and Klein, 1984). 更新世のメガフォーナはユーラシアの長鼻類マンモス属 (*Mammuthus*) やケブカサイ属 (*Coelodonta*), 南北アメリカの地上ナマケモノ (*Megatheriidae*), オーストラリアの巨大有袋類ディプロトドン (*Diprotodon*) 等に代表され、それらの殆どは更新世末期の気候変動およびヒトによる狩猟の影響で絶滅に追いやられたが、アフリカ大陸においてはその要素が現在の生態系にも受け継がれている (Barnosky et al., 2004).

東アジアにおいても、更新世にはウシ属のオーロックス (*Bos primigenius*), 大型のシカ科シノメガロケリス属 (*Sinomegaloceros*), ケブカサイ属, マンモス属, ステゴドン属 (*Stegodon*), パレオロクソドン属 (*Paleoloxodon*) などメガフォーナの発達が認められる (Turvey et al., 2013). 東アジアの植物相については、中新世にピークを迎えたヒマラヤの隆起に伴うアジアモンスーンの発達に起因し、スイセイジュ属 (*Tetracentron*), ハンカチノキ属 (*Davidia*), イチョウ属 (*Ginkgo*), メタセコイア属 (*Metasequoia*) などの、比較的湿潤な環境を好み、かつ起源の古い種子植物に代表される森林植物相が発達し、これが現在の大陸部でも存続している (Chen et al., 2018).

東アジアの中でも特に日本においては、更新世に地域特有の生物相が発達した. 例えば長鼻類としては、鮮新世には中国のズダンスキーゾウ (*Stegodon zdanskyi*) もしくはその近縁種を起源とするシンシュウゾウ (*Stegodon shinshuensis*, 約 5.2Ma), およびミエゾウ (*Stegodon miensis*, 約 4.3Ma) といった大型種が生息していたが、更新世には日本列島に固有と見られる小型種アケボノゾウ (*Stegodon aurorae*, 約 1.8Ma) が優勢となっていた (樽, 2003; 樽野, 2010). 日本固有の生物相が発達した要因の一つとしては、氷河性の海水準変動に連動した日本弧の島嶼化が挙げられる (樽野, 2010). 島嶼においては、大陸との餌資源の制限や捕食者相の違いにより大型植物食哺乳類の体サイズは大陸の近縁種と比べて小さく、また成長速度は遅く、繁殖サイクルは長くなる現象が知られており (Köhler et al., 2021), 日本列島におけるステゴドン属やパレオロクソドン属の矮小化もその一例であると考えられる.

東京都南部を流れる多摩川の中流域とその支流の河川敷・河床には、新第三紀～第四紀に堆積した上総層群が露出しており、地史・古生物学的には氷期・間氷期サイクルにともなう古環境の周期的変化を記録した重要な研究対象となっている (西田ほか, 2014). なかでも加住丘陵とその近傍の多摩川中流域・北浅川の河岸・河床の上総層群からはさまざまな化石資料が得られており、関東における鮮新世-更新世の生態系とその変遷を探る上で重要な材料として扱われているだけでなく、教育現場においては優れた教材として利用されている (e.g., 福嶋ほか, 2002; 小泉, 2003; 福嶋, 2017a,b; Kimura et al., 2018; 前田ほか, 2021).

地質概説

多摩川中流域およびその周辺の鮮新-更新統は下位より山田層・加住層・小宮層・福島層・小山田層・蓮光寺層に区分され、加住層の基底は不整合面をなし、山田層・加住層は非海成層を、小宮層・福島層・小山田層・蓮光寺層は海成層を主体とするが、上部4層はそれぞれに1周期以上の細粒化・粗粒化のサイクルを含み、それぞれが1回の海進・海退サイクルに伴う堆積シーケンスと考えられている(植木・酒井, 2007; 植木ほか, 2013)。

また関東の上総層群については、広域テフラ(火山灰)の鉱物組成による側方対比、絶対年代が決定されている石灰質ナンノ化石の対比基準面および古地磁気層序などから堆積年代を推定する試みがなされてきた(鈴木ほか, 2016)。小山田層中にみられる第二堀之内テフラ(HU₂, 1.60-1.65Ma; 町田, 1997)の年代、上総層群下部相当である多摩地域西部の飯能礫層下部層(植木, 酒井(2006)の山田層相当)にみられる友田2テフラ(TMD₂, 2.6Ma; 田村, 2006)の年代などから、多摩川中流域・北浅川に露出する化石群集はおよそ2.5Maから1.5Ma程度の時期に生息していた生物群集を保存したものであるといえる。

多摩川・北浅川の上総層群においては、明瞭な堆積相が観察されるだけでなく、豊富な動物化石・植物化石・生痕化石など多岐にわたる化石が得られ、古生態系の復元を可能にしている(e.g., 福嶋ほか, 2002; 松川ほか, 2008; Kimura et al., 2018; 西田ほか, 2017; 前田ほか, 2021)。昭島市拝島町の拝島橋付近には礫層を主体とする加住層上部(推定1.8Ma前後)が露出するが、その礫岩層に挟在する泥岩部からはイヌ科のファルコネリオオカミ(*Canis (Xenocyon) falconeri*)の頭骨やアケボノゾウの幼体頭骨化石、シカ科のカズサジカ(*Cervus (Nipponicervus) kazusensis*)・シフゾウ属(*Elaphurus*)、サンバージカ(*Rusa unicolor*)の骨格などが産出し、当時の大型哺乳類相の多様性を物語っている(小泉ほか, 2000; 樽・長谷川, 2002; 小泉, 2003; 小泉, 2017)。拝島橋付近の加住層の泥岩層からは脊椎動物の体化石だけでなく足跡化石も多く発見されており、その中にはアケボノゾウの推定足サイズとよく一致するサイズ(直径30-35cm)の足跡、現生ニホンジカの足印と近い形態の偶蹄類の足跡などが発見されている(福嶋, 2009)。これらのことは、加住層の堆積相から古環境として復元される扇状地の氾濫原がこれら古生物の「墓場」であっただけでなく、「生活の場」であったことも物語っている。また同じ多摩川本流で、拝島橋より下流の立川市栄町には加住層よりも上位の小山田層の泥岩層が露出しており、ここから長鼻類や偶蹄類の足跡化石の他に、ウヤコウノトリといった鳥類の足跡化石が発見されている(福嶋, 2017a)。また多摩川の支流であり八王子市檜原町を流れる北浅川の河岸に露出する下部加住層の泥岩層においても、長鼻類、偶蹄類、そしてワニ類とみられる足跡化石が見つかっている(福嶋, 2017a)。北浅川の加住層(寺田層、飯能層とも)からはステゴドン属の臼歯や切歯を含む頭部骨格が発見され、2010年にステゴドン属の一種ハチオウジゾウ(*Stegodon protoaurorae*)として新種記載された(Aiba et al., 2010)。

多摩川流域の上総層群からは、植物相に関する情報も多く得られている。北浅川河岸の加住層下部の泥岩層は「メタセコイア化石林」としても知られ、メタセコイア立木の株や倒

木、木片、球果、葉、そして樹脂の化石である琥珀などが多産する（福嶋，2017a）．さらに北浅川に露出する山田層，多摩川の加住層，小山田層などからも保存良好な大型植物化石および花粉化石が得られ，*Metasequoia disticha* やオオバタグルミ（*Juglans megaciner*e）などの絶滅種，ヒメバラモミ（*Picea maximowiczii*）やシキシマサワグルミ（*Pterocarya multistriata*）などの現生種を含む植物相が確認されている（植木・酒井，2007；相場ほか，2008；福嶋，2017a）．

多摩川流域の上総層群においては，海洋生物の化石記録も豊富である．昭島市宮沢町の小宮層からはコククジラ属の絶滅種アキシマクジラ（*Eschrichtius akishimaensis*）の全身骨格を含む海棲哺乳類化石が産出している（Kimura et al., 2018）．現生種コククジラ（*E. robustus*）は濾過摂食を行うヒゲクジラ亜目の中でも底生生物食に特化した種として知られており，アキシマクジラもコククジラに近い頭部形態を示すことから同様に底質の濾過摂食を行っていたことが示唆されている（Kimura et al., 2018）．現在のところアキシマクジラの生息環境が小宮層の堆積環境と一致するかどうかの直接的な証拠は知られていないが，小宮層からはミドリシャミセンガイ属の無関節腕足類（*Lingula* sp.）や絶滅種二枚貝のブラウンスイシカゲガイ（*Fusocardium braunsi*）などの内湾性・浅海性の動物化石が現地産出する（前田・松川，2003；福嶋，2019）ことに加え，底生生物の生痕化石である *Thalassinoides* isp. *Psilonichnus* isp., *Rosselia* isp. などが多く見られる（植木・酒井，2007；福嶋，2017a）ことから，アキシマクジラの餌場となっていたこと可能性は十分に高いと考えられる．また，アキシマクジラ化石には捕食者または屍食者とみられるサメ類の歯化石が多数付随していた（高桑ほか，2021）．さらに，同地域の小山田層からは保存良好な棘鱗上目の魚類化石，福島層からは科属種未定の鯨類化石などが，蓮光寺層からはマガキ（*Crassostrea gigas*）やヒメシラトリガイ（*Macoma incongrua*）などの軟体動物化石とヤマトオサガニ（*Macrophthalmus japonicus*）やガザミ（*Portunus trituberculatus*）をはじめとした甲殻類化石，そして潜水性のカモ科鳥類スズガモ（*Aythya marila*）の上腕骨などが得られている（福嶋，2019）．なお本研究の調査範囲からは外れるが，神奈川県川崎市・東京都狛江市市付近の飯室層（約 130Ma）からは，ステラーカイギウ比較種（*Hydrodamaris* cf. *gigas*）の大型海牛類，マイルカ科の小型鯨類や鰭脚類の骨格，板鰓類（サメ類およびエイ類）化石，軟体動物化石，甲殻類化石などが得られており，同地域は更新生の海洋生物化石の一大産地となっている（武田・増淵，1985；小泉，1990；甲能ほか，2007；馬場，2015；福嶋，2019；平本ほか，2015；田中・樽，2022）．

このように多摩川流域では，海成層においても，豊富に得られる体化石・生痕化石とその産状が古生態系の復元を可能にするといえる．これらはさらに陸成層の動物，植物および足跡化石に基づく陸上古生態系と統合されることで，世界的な気候変動に伴う地域的な環境変化，そして長期的な生態系の推移に関して総合的な理解を得る重要な資料となっており，今後の研究においてもその位置づけは変わらない．しかしその実践にあたっては，資料庫の標本はもちろんのこと，野外での露頭状況も合わせた包括的情報の保存が望まれる．

化石および化石産状の保存における諸問題

しかし多摩川流域の上総層群の化石およびその露頭状況を保存する上では、多くの問題点がある。まず上総層群の堆積岩は一般的に固結の程度が低く軟弱であり、含まれる化石も鉱物化が進んでいないため非常に脆く風化しやすいという点である。地質学的時間スケールで見ると堆積年代は比較的新しく、一部で形成されている石灰質コンクリーションなどの例外を除くと、一般的には碎屑粒子間のセメンテーションに乏しいと推測される。このような状態では、間隙水と天水や多摩川を流れる淡水が常に交換可能な状態にあり、化石を構成する炭酸塩やリン酸塩が溶解しやすいはずである。事実、多摩川河床や周囲の丘陵地では、脊椎動物化石は脱灰がすすんで灰褐色の粘土状に風化していることも多く(e.g., 小泉, 2003), また貝化石の多くは殻本体の溶解により、極めて脆い状態か、**natural cast** (化石本体が消失し、堆積物が化石の外形を保存した印象化石), あるいは **steinkern** (合弁の二枚貝や甲殻類の殻など空洞のある生体構造の内部に碎屑物や鉱物結晶が侵入し、のちに生物起源の組織が消失し固形化した内容物だけが保存されたもの) となっている(福嶋, 2019)。植物化石に関しても鉱物化は認められず、ある程度炭化が進んでおり非常に脆く、乾燥などによってすぐに崩壊してしまうため、樹脂・接着剤による補強か、エタノール等を用いた液浸標本としての保存が必要となっている(福嶋, 2019; 福嶋私信, 2020)。

さらに、多摩川の河床は常に水流によって削剥されており、露頭に対する物理的な侵食作用の進行も速い(福嶋, 2009)。多摩川流域の上総層群は下流側の東～南東方向に向かって傾斜しているが、その傾斜は緩やかで 10° に満たず、僅かな量の削剥によっても岩相境界が東側に大きく移動してしまう。特に大雨や洪水によって水位・流速が増すと、礫などが河床を削り短期間のうちに露頭の状況を変えてしまうことがある(中島, 個人的観察, 2019)。これによって、足跡露頭や立木化石のように層路面での観察が重要な露頭も、1年～数年も経過すれば消失してしまう。頻繁に河床に沈む露頭に関しては現地保存も困難であり、現状は写真やスケッチ、一部のみ発掘した標本や石膏レプリカなどの形で保存している(福嶋, 2009)が、これらの標本には産状に関する情報、たとえば足跡化石の例で言えば水平的分布や配置、方角、上下位の堆積相などの情報が付随しておらず、後の研究や教育への活用に制約を課している。

多摩川の化石群集を研究する上でのもう一つの問題点は、調査・研究、標本の収集・保存・管理といった役割を担う博物館的組織・設備の不足である。昭島市では近年、同市文化財保護審議会が中心の一端を担い、2020年3月に標本展示室(くじらホール)・郷土資料室・市民図書館・資料収蔵庫等が一体となった教育福祉総合センター「アキシマエンス」が開館し、常駐の学芸員がキュレーションを担う試みが開始された。それまで多摩川流域の上総層群産化石については、国立科学博物館、群馬県立自然史博物館、長野県の飯田市美術博物館、東京学芸大学、慶應義塾幼稚舎、川崎市青少年科学館、NPO むさしの化石塾などの研究者・化石愛好家がそれぞれ独自に、また時には協力しながら化石の収集・研究・保存管理を行ってきたが、標本や知識の集約がしにくいという課題があった。自治体の後援を受

けたアキシマエンシスの開館により、研究拠点や収蔵スペースの問題については解決の糸口が見えたが、それらも依然充足しているとはいえない。研究活動に関して言及すると、多摩川流域の上総層群の化石は、その第四紀学・古生物学分野における学術的重要性は高く、これらを扱った日本語での論文や報告書は膨大にあるものの、英文の学術論文は僅かであり (e.g., Aiba et al., 2010; Kimura et al., 2017), 海外の研究者が研究に携わったこともほとんどないために国際的な認知度については不明である。今後、多摩川流域の古生物学的資料の学術的重要性を高め、広めていくためには、外部研究者が新しいアイデアをもって上総層群の古生物学研究に携わり、学校組織が自由に化石標本や産地を教育に活用する環境を構築することが重要であろう。特に、情報を共有する媒体として、既存の博物館施設のもつ物理的・経済的制約からある程度開放されたものを準備する必要がある。

古生物学における 3D データの活用

化石における 3D データの取得法は、古くは石膏やゴム型を利用した型取り法に始まり、20 世紀初頭には内部形態情報の 3 次元的な把握を目的として研磨断面の連続画像を模型に出力する方法が開発され (Sollas, 1904), さらに後年には非破壊での内部形態データ取得を可能にしたマイクロ X 線 CT トモグラフィーの化石への応用 (Rowe, 1996), 収束イオンビーム加工と電子顕微鏡画像を利用し高分解能での 3 次元構築を可能にした FIB トモグラフィーの利用 (Schiffbauer & Xiao, 2011) など、年々技術的な進歩を遂げている。一方、内部形態情報を伴わない化石表面データのみの取得法も発達した。現在多く用いられている技術は、赤外線レーザーを用いた 3D スキャン (Bates et al., 2008) と、複数の 2 次元デジタル写真から 3 次元構築を行う写真計測法 (photogrammetry; Falkingham, 2012) に二分される。こうして構成された化石資料の 3D データについては教育への応用も期待されており、実際に活用される場面も増えている (e.g., Cunningham, 2021)。そして近年、博物館等に収蔵されている自然史資料の 3D データ化公開の取り組みが急速に広まっている。例えば 2001 年に開始した生物の形態情報を共有するデータベース MorphoBank は、系統分類に必要な形態情報の増大に対応することを主な目的として、ピアレビューを経た出版論文中で用いられた生物・化石の写真や 3D データ等を保存公開するアーカイブの役割を果たしている (O'Leary & Kaufman, 2011)。さらに、個々の博物館独自の取り組みとしても収蔵・展示標本の 3D モデルを含む形態データのデータベース化、ウェブサイトでの VR (仮想現実) コンテンツ公開などが実施されるようになり、研究・教育での 3D データの利用が高まっている (Zouboula et al., 2008)。博物館がアーカイブ化を目的として取得した研磨断面画像や X 線 CT データ、レーザースキャンおよび写真計測データは、研究の目的に合わせて意図的に選び取られた点群座標データなどよりも複雑な形態情報を含めることができ、共有されることによって全く別の視点に基づく研究のための計測や教育のための観察に利用しやすいが、データサイズが膨大であるために、個々の機関が固有のデータを保管するだけでなくクラウドサービスを利用した形態も模索されている (Leggio et al., 2010)。

材料、方法および計画と実施内容の違い

本研究では、化石露頭およびアキシマエンシス所蔵の化石群について、写真測量法 (Photogrammetry) による 3D 構築を行った。デジタル写真の 3D 構築に際してはフォトグラメトリーソフトウェア Agisoft Metashape® Professional (<https://www.agisoft.com/>) を、構築環境としては東京都市大学所蔵のマウスコンピュータ社製ノート PC・DAIV 7N-B intelCorei9-10900K プロセッサ-10 コア/ 20 スレッド/ 3.70GHz / TB 時最大 5.30GHz /20MB, 128GB メモリ, GeForce RTX 2080 SUPER/8GB グラフィックボード, Windows 10 Pro 64bit OS) 1 機, およびほぼ同等スペックの機種 (社団法人路上博物館所蔵, ただし 64GB メモリ) を用いた。3D モデルは.obj ファイルとして書き出しを行った。なお, 当初の研究計画ではレンタルのレーザースキャナーを使った 3D データ取得を計画していたが, 新型コロナウイルスの感染拡大によって多人数が共同してのスキャンが困難となったため, 調査計画を見直し, ここ数年で飛躍的に解析技術が進歩した写真計測法による研究計画へと変更した。比較的安価かつ一般的な撮影機材であるデジタルカメラとドローンを用いることで, 少人数でのデータ採取を可能にした。

室内での標本撮影は, デジタル一眼レフカメラ (Nikon D7000+NikonAF-S Zoom-Nikkor18-200 mm f/3.5-5.6 レンズ, 有効画素数約 1620 万画素, JPEG 撮影/Sony α 7III +Canon EF28mmF1.8 レンズ, 有効画素数約 2420 万画素, RAW 撮影) を用いた。室内で撮影した化石標本は, A) 多摩川本流加住層産の偶蹄類足跡化石 2 点 B) 北浅川加住層の幼体長鼻類足跡化石 1 点, C) 小山田層長鼻類足跡化石の石膏レプリカ 2 点, D) 多摩川本流の小山田層産中型鳥類足跡化石 1 点, E) 同産地大型鳥類行跡化石 1 点 (3 ブロックに分割して撮影), F) 北浅川の加住層産四足動物 (?ワニ類) 足跡化石 1 点, G) 多摩川本流蓮光寺層産アカガイ化石 1 点および H) 多摩川本流の小宮層産貝化石密集層ブロック 2 点である。各標本の撮影に用いたカメラは 1 機種のみで, B) E) F) G) に関しては Sony α 7III とスマートフォンで操作可能な回転式のステージ (Manfrotto Genie mini II およびプロダクトターンテーブル) を用い, 撮影台にスケールとともに固定した標本を 5~10° ずつ回転しながら全周囲等距離 (単焦点) で約 300 枚程度の画像を撮影した。この作業を, 死角が生じないように撮影俯角を 2 段階もしくは 3 段階変更して行い, さらに同様の工程を, 標本を上下反転させた状態で行った。撮影開始前の時点で標本に反射素材で作成したランドマークを添付しておくことより, 標本を上下反転させて撮影した画像同士の位置合わせをソフト上で行うことを可能にした。照明としてはレンズに取り付けるリングフラッシュ (RoundFlash リングフラッシュソフトボックス) を用いた。A) C) D) H) に関しては Nikon D7000 をもちいて最短撮影距離付近での簡易的な撮影を行った。照明としては通常の室内照明 (蛍光灯) 以外の特別には行わず, 固定式の撮影台上にスケールバーとともに安置し, 上下反転は行わず片面のみ上記と同様の要領で約 150 枚程度の写真撮影を行った。

野外では, デジタルカメラ (Sony α 7III+Canon EF28mmF1.8 レンズ, 有効画素数約 2420 万画素, RAW 撮影) およびカメラ付きドローン (DJI Mavic 2 Pro+操作用の iPad

mini, 有効画素数約 2000 万画素, MP4 形式動画) を用いて約 10 m 上空からの動画撮影を行った。ドローンで撮影した動画からは約 400 枚の写真をキャプチャーし, 3D 構築を行った。撮影範囲は, I) 昭島市の拝島水道橋より約 100 メートル上流の河床 (35.7038 N 139.337E) に露出する加住層の泥岩のアケボノゾウ産出地点, J) 同市拝島水道橋直下から約左岸に露出する加住層の泥岩に保存されたメタセコイア立木化石およびカズサジカ・ファルコネリオオカミ産出地点を含む一連の露頭, K) 同産地長鼻類足跡化石, L) 八王子市檜原町を流れる北浅川の左岸に露出する加住層のメタセコイア立木・倒木化石および哺乳類足跡化石を含む一連の露頭の 4 点に絞った (図 1)。

I) 地点での撮影は 2020 年 1 月 10 日 (晴れ, 中水位) に行った。長鼻類化石産出露頭は水深 10 cm ほどの河床に水没しているため, 化石の採掘跡や残存する化石を含む約 4 m×4 m の範囲を吸水土嚢で囲み, 排水ポンプで常時排水を行うことによって河床を露出させ, 約 2000 点のデジタル写真を撮影した。

J)K)地点の撮影はともに 2022 年 1 月 9 日 (晴れ, 低水位) に行った。J) 露頭 (N35.703, E139.339 周辺) ではドローンのみを用いて河岸露頭の撮影を行った。この露頭は多摩川の流向に沿って (北西-南東方向) 約 100m, 川幅方向に約 30m の範囲であり, ほぼ平坦である。撮影前には, 撮影領域内の地表に 3 点のランドマークを設定し, 各ランドマーク上に高さ 1 メートルのポールを垂直に立て, その上に標的を設置した。定点より 3 点の標的に対してレーザー距離計 (Leica DISTO X4) を用いて簡易測量を行い, 各ランドマークの座標を設定した。ドローンカメラを鉛直やや斜め前方に向け, 航行ルートをずらしながら上流-下流方向に 3 ないし 4 往復する過程で動画を撮影した。航行速度は 1 m/s で高度約 10m から鉛直やや斜め下方向 (角度は未計測) の動画を撮影し, 動画 1 秒につき 1 枚 (合計約 2000~3000 枚) の画像を切り出した。画面には約 9.5m (左右方向) ×5.25m (前後=航行方向) が収まるため, 隣り合う画像のオーバーラップ率は約 81%となる。計算上の解像度は約 2.5 mm/pixel だが, 撮影角度の影響などから実質は 5 mm/pixel 程度となる。K) 地点 (N35.703, E139.338 付近) は J) と同じ露頭の北端部に相当するが, 水道橋を挟んで北側に位置しており, 足跡は河川水が流れ下る斜面に露出していた。撮影にあたっては上流から流れる水を土嚢でせきとめ, 排水を行った。

L) 地点は 2022 年 1 月 23 日 (曇り, 低水位) に撮影を行い, さらにその約 2 ヶ月半後となる 4 月 10 日 (晴れ, 中水位) に追加の撮影を行った。追加撮影は基本的に J 露頭の撮影と同様の要領で行ったが, 1 回目の撮影時に露頭の観察を妨げていた表面の泥粒子や植物片などを, 2 回目の撮影開始前に充電式ブロワーを用いて可能な限り除去した。L は河岸露頭で, 北西-南東方向に流れる北浅川沿いの, 河道と中央道高架との交差点直下にある堰 (N35.672, E139.307) から城山川との合流地点 (N35.669, E139.310) までの約 350 m 区間の左岸に露出している。川幅方向の露出幅は 5 m 前後と狭いが, 足跡や立木化石が現在でも多く残されているほか, 下方浸食によって垂直断面が露出している点において, K 露頭とは違った特徴を観察可能である。

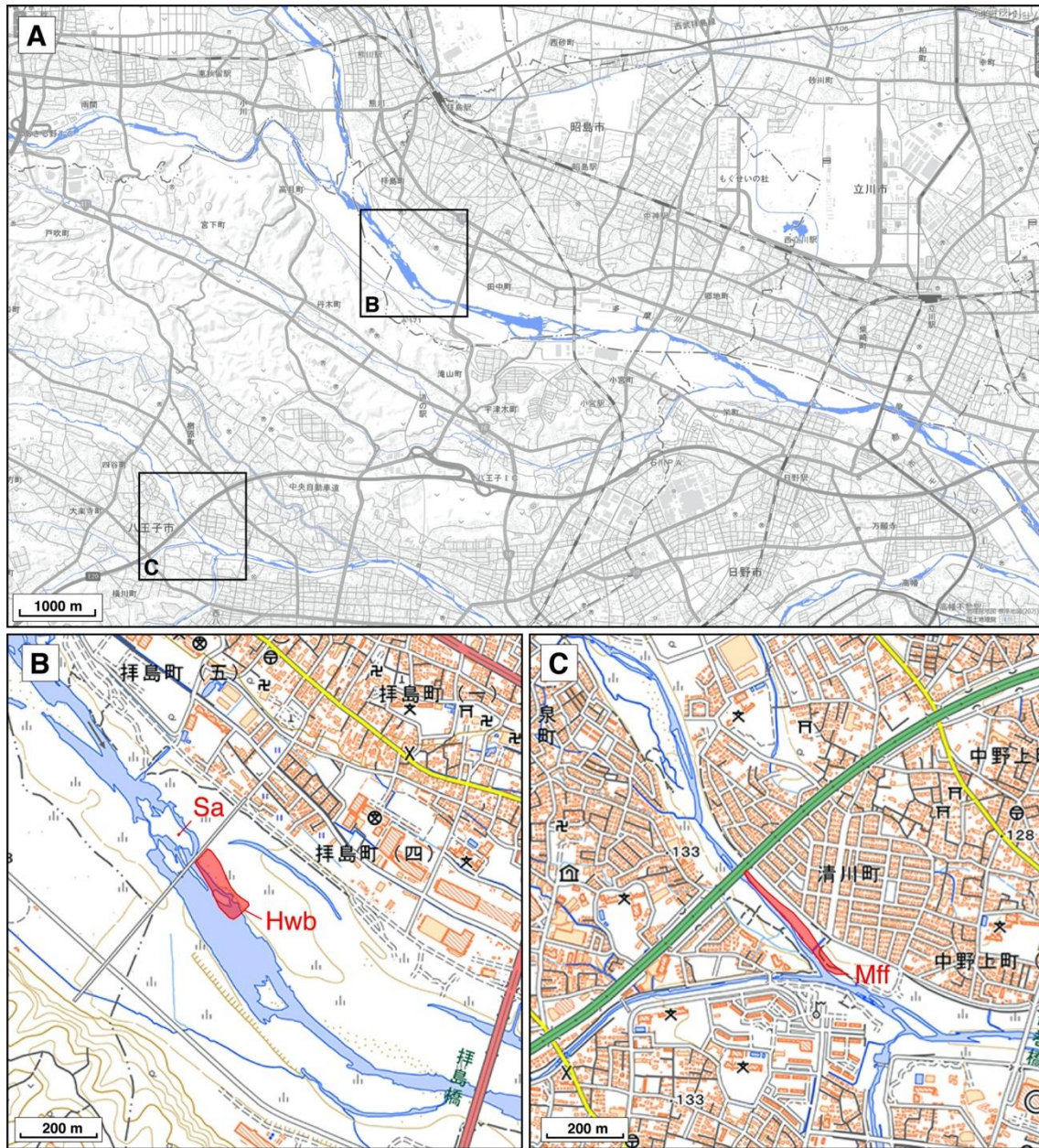


図1. 本研究における、多摩川中流域および支流の北浅川流域の野外調査地点。A, 広域図（昭島市、八王子市、立川市および日野市のそれぞれ一部を含む）。拡大図（B,C）の範囲を長方形にて示す。B, 八王子市檜原町の加住層露出地域（メタセコイア化石林, Mff）。C, 昭島市拝島町の加住層露出地域（拝島水道橋下流, Hwb）および長鼻類化石産出地（Sa）。原図は2万5千分の1国土地理院「地質図 Navi」（<https://gbank.gsj.jp/geonavi>）より出力。

結果と考察 1 : 化石標本

A) 加住層産偶蹄類足跡化石

偶蹄類の足印とみられる化石は昭島市拝島水道橋付近，八王子市檜原町を流れる北浅川河岸の加住層，および日野市栄町の小山田層で発見されており，前方を向く 2 つの蹄印もしくは H 字型の足印で特徴づけられる（福島，2009）. すでに報告されている加住層産の偶蹄類足印化石に注目し，多摩川拝島水道橋下流の“e 地区第 2 地点 A4 足印（福島，2009, p.64）”とされた LMA-F7-11 および“偶蹄類（シカの仲間）の足印（福島，2009, p.109 写真 19）”とされた LMA-F7-16 について，NikonD7000 を用いて簡易的な照明および撮影法によるフォトグラメトリーを行った.

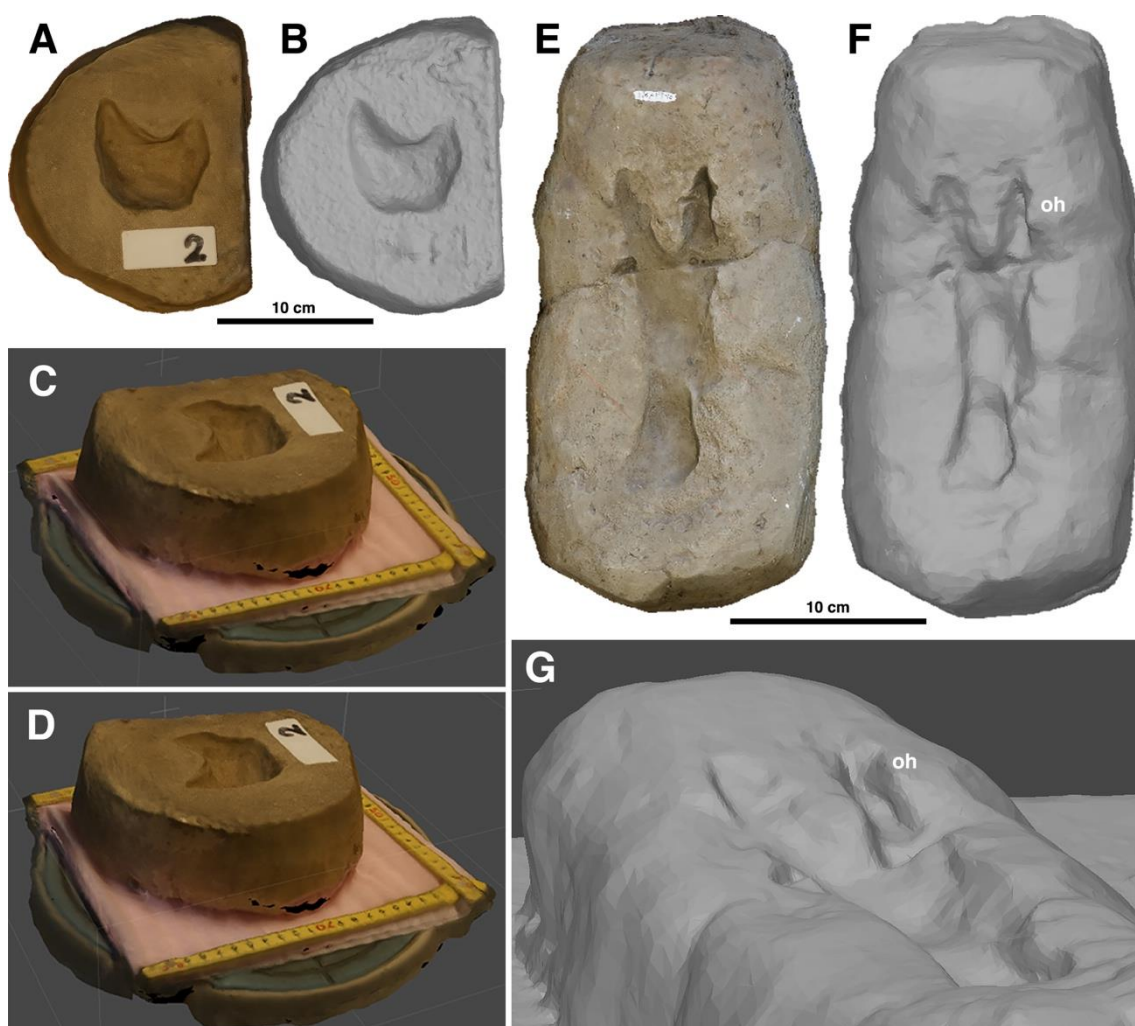


図 2-1. 加住層産偶蹄類足跡化石標本. A-D, LMA-F7-11 (昭島市多摩川本流拝島水道橋付近); E-G, LMA-F7-16 (八王子市北浅川河岸). A, B, E, F, 標本全体サーフェスモデルの正射投影図, テクスチャあり (A, E), およびなし (B, F). C, D, テクスチャありサーフェスモデルの俯瞰図, C は正射投影図であるのに対し D は 30° の透視投影図. G, 水平方向に潜り込んだ蹄印先端部とその上にオーバーハングした泥岩 (oh).

フォトグラメトリーの点群データの性質として、通常のカメラレンズによって撮影された画像のように遠近感のある透視投影図だけではなく、正射投影図を作成できる（図 2-1 A-D）。これにより像面歪曲収差による影響を排除した画像を作成することが可能となる。また、足跡化石のように基本的には一方向（垂直方向）から観察する標本については、堆積物下に指印や蹄印の凹窩が潜り込むような構造（オーバーハング）になっていた場合は二次元の画像では表現が難しい。また動画等を用いて表現したとしても観察したい角度からの視野が得られるとは限らない。LMA-F7-16 の例はそのような例にあたり、蹄印の片方が泥岩のオーバーハングの下に隠れていた。今回はフォトグラメトリーを行うにあたり、足印内面については完全な死角になる点が生じないよう様々な角度からの撮影を行った結果、オーバーハング部に隠れた蹄印の表面を完全に再現することに成功した（図 2-1 E-G）。

B) 北浅川河床・加住層産の幼体長鼻類足跡化石

本標本は、八王子市檜原町北浅川無構造のシルト岩からなる約 25 cm×20 cm（厚み約 10 cm 前後）のブロックである。表面中央には長径 11 cm、短径 9 cm ほどの半楕円球状の凹みが保存されており、辺縁部には 3 ないし 4 箇所の突出部（蹄印？）がみられ、長鼻類の幼体の足跡と同定される（図 2-2 A,B）。この足跡において底部が 2 段階に深くなっており、2 回の踏みつけの痕であることこのほか、層理面の辺縁部には別の足跡の一部とみられる凹みも保存されていることがわかる。これらの足跡は下位の泥岩層と上位に被覆した砂層との境界面に保存されたものであるとみられるが、採集時に砂層部がほとんど除去されているため、立体構造の観察が容易であった。テクスチャなしの 3D サーフェスモデル（図 2-2 B）で確認したところ、足跡部の凹凸の他、標本表面の細かな亀裂、破断痕なども再現されており、形態解析に用いることができる部分とそれ以外の判別も可能であった。

C) 多摩川本流・小山田層産成体長鼻類足跡化石の石膏型

本標本群は日野市栄町の多摩川左岸に露出していた小山田層の泥岩層から発見された足跡群について、現地で発掘・クリーニングを行い、石膏によって型を採取したものである。同産地からは長鼻類・偶蹄類・鳥類などの足跡が多数確認されており、そのほとんどは行跡として保存されていたが、現在その多くは失われ、スケッチや写真記録と一部の採集標本が残されるのみとなっている（福嶋，2009）。本研究で用いた石膏型はそのうち長鼻類のものとされる足印から直接型取りされたものであり、立体構造をよく保存している。しかし石膏標本は重く、脆く、乾燥に弱いため、長期の保存や計測などのハンドリング作業には向いていない。本研究では簡易的手法により写真測量を行い、3D データの構築を行った。サーフェスデータは細部の凹凸まで再現され、足跡の計測なども問題なく行えることがわかった。後述する河床足跡化石露頭の写真測量では水濡れや照明などの条件が 3D モデルの質に影響を与えていたことから、いずれはデジタルデータ化することが前提としても、野外で石膏やシリコン型を作成することは精密なデータ保存のために一定の意義があるといえる。

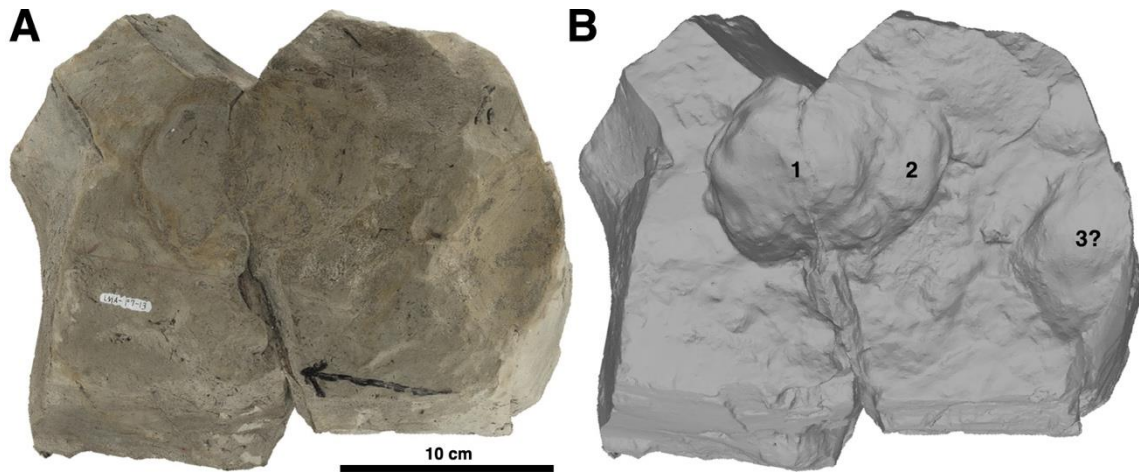


図2-2. 北浅川加住層産小型長鼻類足跡標本 (LMA-F7-13). A, B: 標本全体のサーフェスモデルの正射投影図, テクスチャあり (A), なし (B). 異なる足印を1-3の数字で示す. 1と2は重複し, 二重足印となっている. 3は不完全であるが, 足印底に僅かな段差があり, 二重足印の可能性もあるが, 離脱痕とも解釈できる.

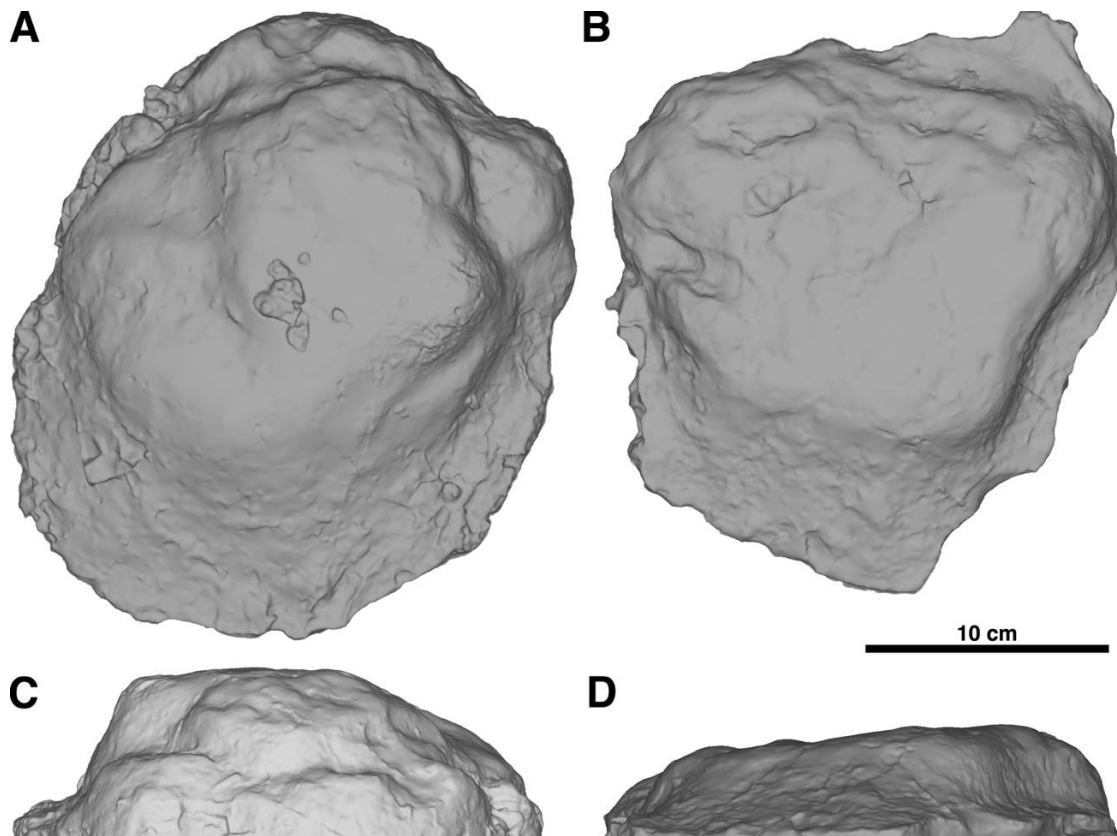


図2-3. 日野市栄町小山田層産長鼻類足跡化石の石膏レプリカ, テクスチャなしのサーフェスモデル正射投影図. A, C, 標本1; B, D, 標本2. A, B, 足底からのビュー, C, D, 底面を上方とした水平方向からのビュー. Aでは画面上方に明瞭な指印が観察できる.

D) 多摩川本流の小山田層産中型鳥類足跡化石

本標本 (LMA-F6-3) は C 標本群と同じく日野市栄町の多摩川左岸に露出していた小山田層の泥岩から発見された。足印幅約 4 cm の足跡化石で、福嶋 (2009, p.152 写真 43) では現生カワウ (*Phalacrocorax carbo*) が離陸する際に形成する足印と類似することからペリカン目のものとされている。足跡は採集された約 20 cm×約 20 cm×厚さ約 5 cm の泥岩スラブの層理面上に保存されている。本標本の場合、足跡の陥凹は上位に堆積した砂によって充填されており、立体形状は観察できない。実際、テクスチャ付きのサーフェスモデルでは砂質堆積物と泥質堆積物の色調の差異として明瞭に確認された足印の輪郭が、テクスチャなしでは全く視認できない (図 2-5)。本標本のように、観察に際して立体形状よりも色や粒度の情報が重要である上総層群の足跡化石標本などの場合においては、テクスチャ付きの 3D モデルは標本情報の共有に効果を発揮するものと期待される。

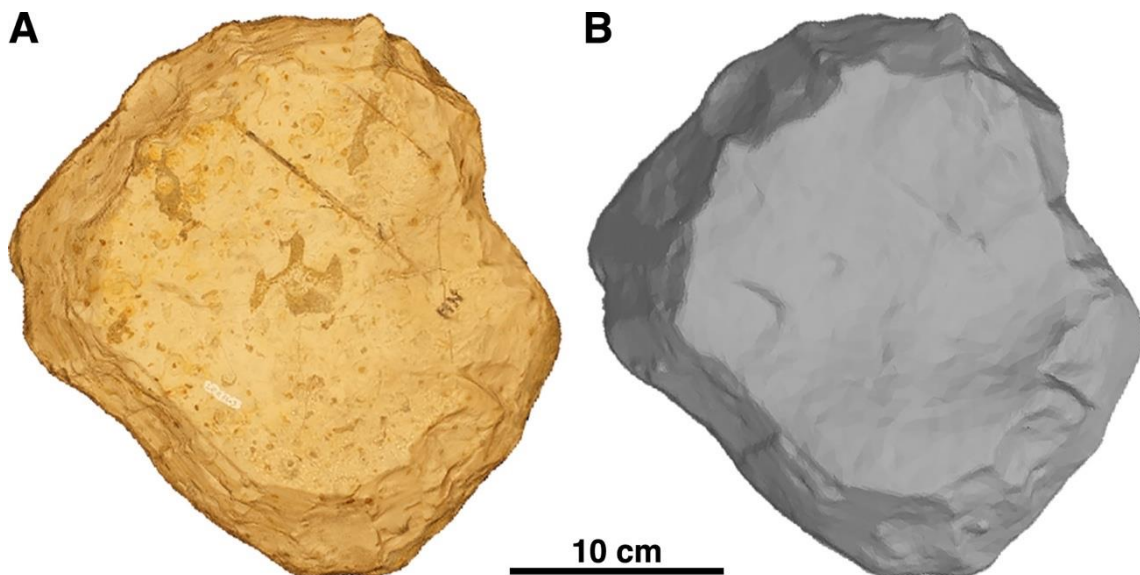


図 2-4. 小山田層産中型鳥類足印化石 (LMA-F6-3). A, B: 標本全体サーフェスモデルの正射投影図, テクスチャあり (A), およびなし (B). A においては泥岩表面に 3 点の指印およびそれらを繋ぐ水かきの痕跡 (蹠印) が砂質の充填物として観察されるが, B においては層理面上には僅かな凹凸が表現されているのみで, 足跡は認識できない。

E) 多摩川本流の小山田層産大型鳥類行跡化石

本標本は D 標本と同産地の小山田層において採集された足印化石で、福嶋 (2009) では予察的にコウノトリ目と同定されている。幅約 18 cm と大型の鳥類の足跡化石で、自然に露出した泥岩層の層理面上で 2 点の足印が行跡をなしている。足跡は約 40 cm×約 70 cm, 厚さ約 10 cm の大型の泥岩スラブとして採集された。スラブは 3 つのブロックに分割され、右足跡 (前方) と左足跡 (後方) はそれぞれ別のブロックに保存されている。

2 つの足跡は、第 II 趾印の方向を基準にするとほぼ一直線上に並ぶ。足根中足部の肉球の跡が明確ではなく、この点においてコウノトリ (*Ciconia boyciana*) の足印と特徴が一致

する (Tanaka, 2021). また, 後方の足印では正中よりも左側に, 前方の足印では正中よりも右側に第 I 趾印とみられる陥凹 (より正確には砂粒子に充填された陥凹) が観察されることから, 後方の足印は右足印, 前方の足印は左足印と同定される.

右足跡のサーフェスデータでは, テクスチャあり, なしの両方において足跡の凹凸が明瞭に表現され, 一部層理面のひび割れなども表現できた (図 2-5). また凹面には一部, 上位に堆積したとみられる細粒砂が付着していたが, テクスチャありのモデルでは色および模様の違いから堆積物の差異が十分識別可能であった (図 2-5 C). テクスチャなしのモデルにおいては表面の凹凸は認識可能であるものの, 堆積物の粒度に関しては認識不能であり, これだけでは砂粒子を完全に除去した場合に足跡形態に関する情報が変わりうることを伝えることができない. 高解像度の色・パターン情報をモデルに添付できることは写真を用いた 3D データ構築の特性であり, 化石標本の 3D データ化においては, 生物学的形態情報として利用すべき部分とそれ以外を識別しやすくする利点があるといえる.

3 点の 3D データの破断面は互いに接合できるため, 2 つの足印の距離や位置関係を正確に再現可能である. コウノトリ属の行跡については, 歩行速度によってその歩長や歩角が変化するほか, 重心位置の変化によって足印の形態が変化することが知られており (Tanaka, 2021), 3D データのから歩行速度を推定することが可能になると期待される.

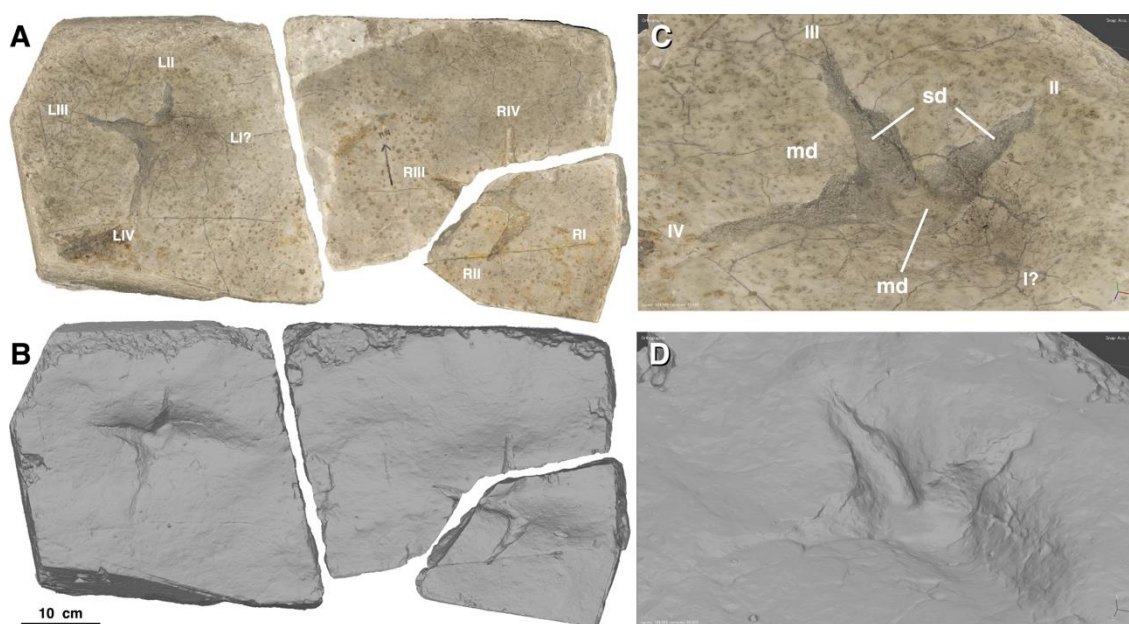


図 2-5. 小山田層産大型鳥類行跡化石. A, B: 標本全体サーフェスモデルの正射投影図, テクスチャあり (A), およびなし (B). B においては 1 歩目の右足跡 (画面右の 2 ブロック) と 2 歩目の左足跡 (左のブロック) で照明角度が異なることに注意. C, D: 右足跡とみられる 2 歩目の俯瞰図, テクスチャあり (C), なし (D). C においては第 II~IV 指の痕跡が明瞭に観察されるが, D においては, 第 II 趾の趾印は明瞭ではない. 略号: md, 泥岩層; sd, 砂層; R/L, 右/左; I~IV, 第 I~第 IV 趾印.

F) 北浅川の加住層産四足動物足跡化石

本標本 (LMA-F6-wani) は、福嶋 (2009, p.111, 写真 30) にて予察的に報告された北浅川のメタセコイア化石林足跡化石産地において採集された。本標本は本来凹凸に乏しい上、データ取得の際は特別な照明器具は用いず、ズームレンズ、オートフォーカスで撮影した画像を用いたが、結果として各元画像の画質は (E) 標本などの場合と比べるとフォーカスの点で劣っている。メッシュサイズは数 mm 程度と大きくなり、わずかな凹みからなる指印や足底印はほとんど再現できなかつた (図 2-6B)。同ロカリティからはワニ類が形成した足印とみられるものが発見されている (福嶋, 2009) が、本標本も 4~5 本の指印にあたる印象がかすかに確認される (図 2-6A) ことから、ワニ類の前肢もしくは後肢の足印である可能性はある。ただし、アメリカワニ (*Crocodylus acutus*) およびアメリカアリゲーター (*Alligator mississippiensis*) の足印 (Farlow et al., 2018 ; Farlow & Elsey, 2010) と比較すると、前肢としては足印幅に対する掌底から指印先端までの距離が異常に長く、また仮に第 5 指印がなく後肢趾印であったと仮定しても後肢としては指ごとの指印長の差が大きく、趾がすべて外側を向いている点で不自然である。以上の特徴は、現生半水生カメ類のマレーハコガメ (*Cuora amboinensis*) やアカスジャマガメ (*Rhinoclemmys pulcherrina*) が陸上の湿った泥質堆積物上を歩行した際の後足印 (Avanzini, 2005) と共通していることから、本標本がカメ類の足跡である可能性も考慮した今後の検討が望まれ、そのためにより精度の高い 3D データを作成する必要がある。

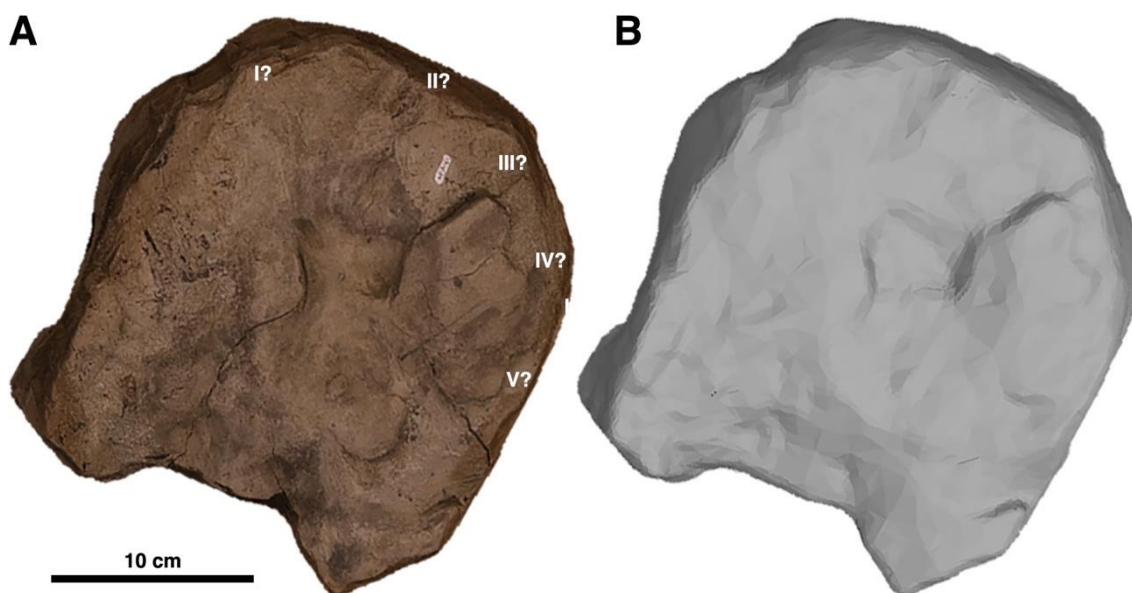


図 2-6. 北浅川河岸加住層産四足動物足跡化石 (LMA-F6-wani). A, B: 標本全体サーフェスモデルの正射投影図, テクスチャあり (A), およびなし (B). A においては第 I ~ IV 指印とも取れる印象が観察されるが, B においては, 第 III 指 (?) の指印以外は明瞭ではない. 略号: I~V, 第 I ~ 第 IV 指印.

G) 多摩川本流連光寺層産アカガイ化石

多摩川河床の連光寺層からは、浅海・内湾性の種を主体とする多様な軟体動物化石が産出する(福嶋, 2019)。特に二枚貝類は合弁かつ生息姿勢を保った現地性の状態で発見されることが多く、示相化石として、また古生態学的研究の対象として有用である。3Dデータ保存の方針としては、形態分類のための解析の過程で失われがちである産状の情報を可能な限り残すことが課題となる。二枚貝類の場合、合弁産状の3Dデータを保存し、クリーニング後も利用可能にするといった活用法が考えられる。

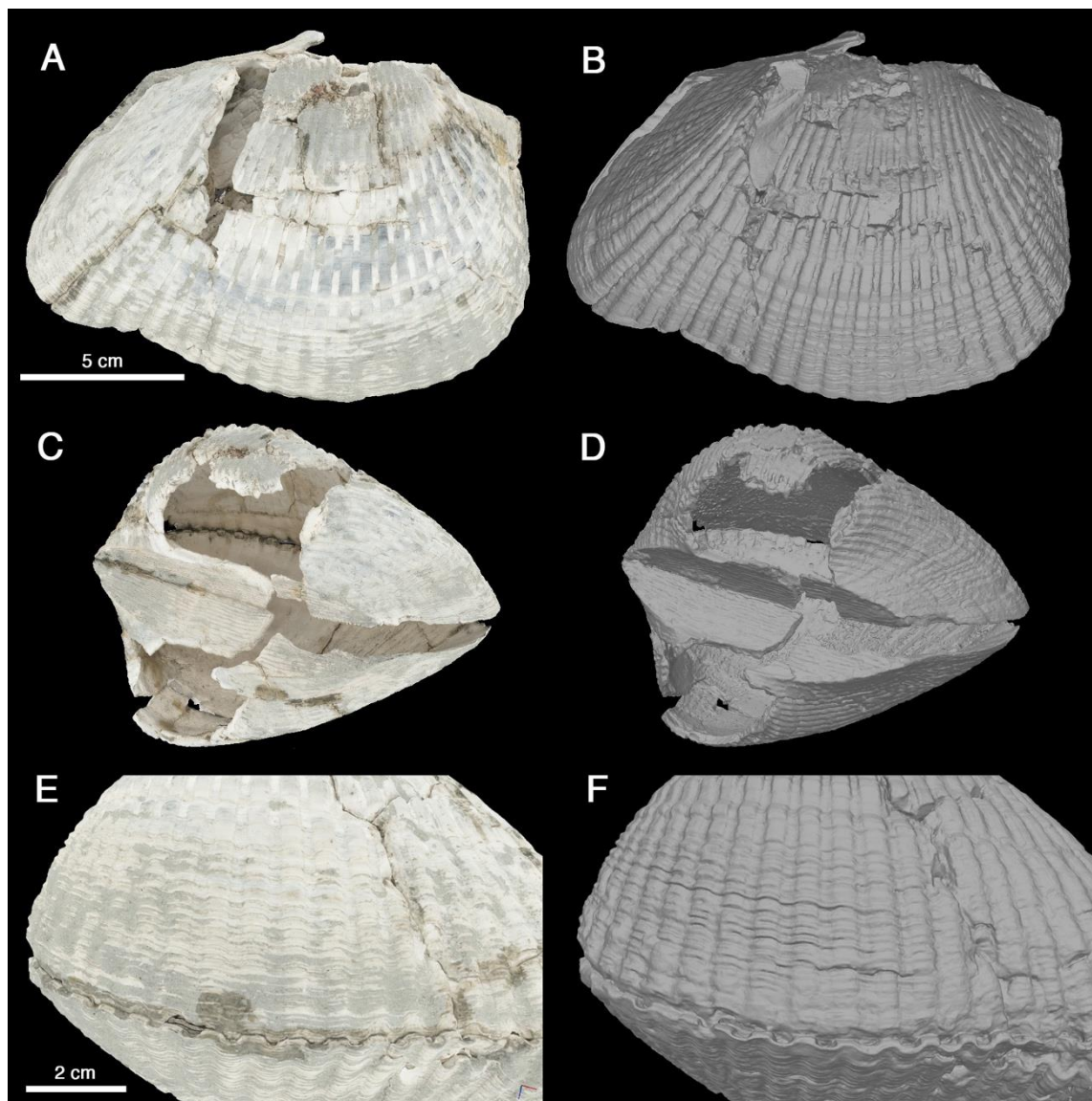


図2-7. 多摩川連光寺層産アカガイ化石, サーフェスモデルの右側面正射投影図 (A, B), 後方背側からの30°一点透視図 (C, D), および腹側縁の拡大30°一点透視図 (E, F), テクスチャあり (A, C, E), およびなし (B, D, F). CおよびDにおいては破損部からしか観察できない内面構造が再現されていること, EおよびFでは1-2mm周期の微細な殻装飾が再現されていることに注意.

本研究で標本は前後長 15 cm にも及ぶ大型のアカガイ (*Anadara broughtonii*) の殻化石である。合弁状態で発見された後、破損部分が補修され、一部欠損しているために殻の内部が観察可能な状態となっている (図 2-7 A, B)。精密手法で撮影した画像から立体構築を行った結果、殻表面の微細な放射肋・成長肋のサーフェスデータ上での再現に成功した (図 2-7 E, F)。また、破損部から内部を覗く形で撮影した画像からは殻内部の立体構造が再現された (図 2-7 C, D)。本標本の撮影結果、および次項目 H の簡易的な方法による貝殻標本のフォトグラメトリーの結果を比較すると、本標本においては照明の均質さと 1 枚の画像の画質 (焦点) を高めることで 3D データを高精度で取得することに成功したと言える。また、テクスチャありのサーフェスデータからは、白色の貝殻の表面に発達する成長肋間の溝に灰色の砂質堆積物が残存していることが確認でき、メッシュの凹凸がただちに形態情報として利用可能とは限らないこともわかるようになっている。

H) 小宮層産貝化石密集層ブロック

アキシマクジラが産出したことで知られる小宮層は、産出化石の群集組成から、連光寺層の示す内湾環境よりもやや外洋に面した環境で堆積したと考えられている (福島, 2017)。また小宮層から福島層にかけてはハンモック状斜交層理などのストーム性堆積物や生痕化石など、堆積相の情報も豊富である (西田ほか, 2014)。したがって小宮層から福島層の化石に関する研究に 3D データを活用する意義としては、堆積物を含む産状を記録できることが挙げられる。

本研究で用いるのは、ストームラグ堆積物 (ストーム時の吹き分けによる化石や礫の密集産状) とみられる小宮層の砂質貝殻密集層の一部を採集した標本 2 点 (ブロック 1, 2) である (図 2-8)。いずれのブロックにおいても貝殻は離産状もしくは破片化しており、強い営力によって攪乱された後に堆積したことが推測される。今回は簡易的な手法を用いて写真測量を行ったため、前項目のアカガイ化石 (G) のように微細な凹凸を取得することはできず、テクスチャなしのサーフェスデータでは貝殻片を形状から認識することは困難であった (図 2-8, B, D, F, H)。ただしテクスチャありのデータでは色調の差異から化石相当部位を認識することはでき、これを元に貝殻のおおまかなサイズや角度を計測することも可能であると考えられる。とくに層理面と垂直な方向からのファブリック (配列) の計測は古流行解析などに有効であり、平行な方向からの観察および計測とも合わせてタフォノミー相 (化石生成と関連した堆積相) 解析にも用いることができる。同様の手法は野外においても実施可能で、さらなる応用が期待される。

小宮層・福島層・連光寺層の化石産状は、堆積相や示相化石と合わせて古環境指標ツールとして有効である一方で、情報の質は複雑かつ多岐にわたり、写真やスケッチだけでは十分に記録することは難しい。また形態分類を目的とした化石発掘を行うと、情報の大部分は失われてしまう。本研究のような写真測量法を応用することで、同時的に露出している化石産状や堆積層の情報を一度に大量に取得することが可能となると期待される。

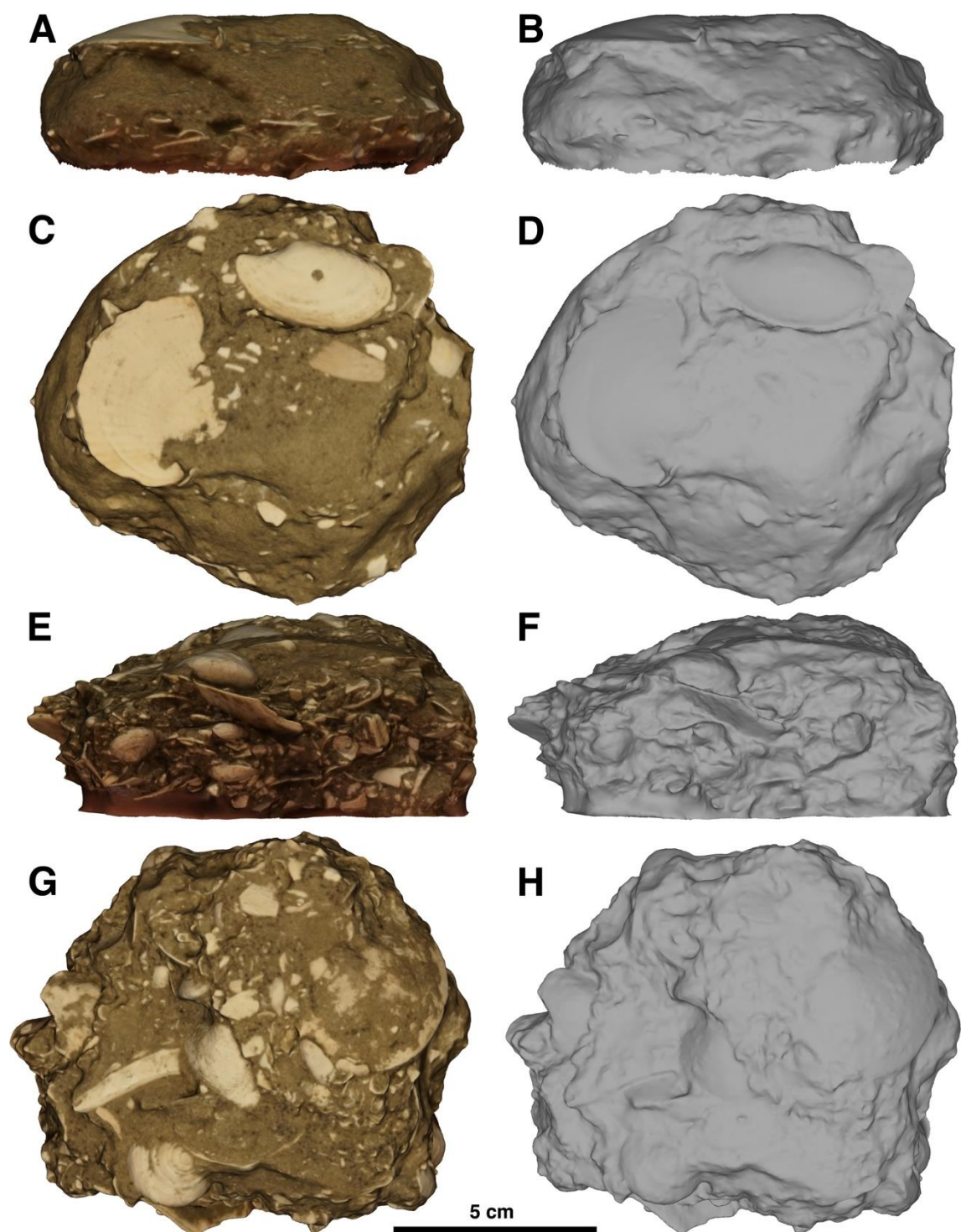


図2-8. 多摩川本流の小宮層産貝化石密集層のブロック標本, A-D, ブロック1 ; E-H, ブロック2. サーフェスモデルの正射投影図, 層理面と平行方向 (A, B, E, D) および層理面と垂直方向 (C, D, G, H) からのビュー, テクスチャあり (A, C, E, G) およびなし (B, D, F, H).

結果と考察 2 : 化石産地露頭

D) 昭島市の拝島水道橋上流・加住層の長鼻類化石産出地点

この化石産地は過去に長鼻類化石の大腿骨・臼歯が発掘された地点であるが、水位によっては完全に水没し、発掘調査が困難であるため追加の発掘調査は行われていない。またすでに採集された化石については福嶋（2009）において予察的な報告がなされ、現在アキシマエンシスに保管されている。今回過去の発掘地点を清掃・排水し撮影する過程で、最終地点は2層の泥岩層からなり、すでに採集された化石は上層の泥岩層（層厚約15 cm）中から露出していたことが確認されたほか、上層の泥岩層からは未採集骨2点の断面が露出していることが確認された（図2-9）。2つの骨断面は、2層からなる泥岩層の上層部分の断面上に露出し、周囲の暗灰色～灰緑色の泥岩層とは異なる灰白色～黄白色の緻密骨の色調によって識別された。

テクスチャありのサーフェスモデル上でも、泥岩中の骨化石は色調の差異として確認された。ただしフレームモデルで確認したところ、骨断面は凹凸としては確認されなかった。化石を含有する最上部の泥岩層は上流側から徐々に削剥されているとみられ、泥岩層の境界部において不連続な段差が生じてはいるが、全体として滑らかな曲面へと削られており、骨断面と泥岩部との境界には不連続的な境界が生じていない。これはおそらく加住層産の骨化石の硬度（耐摩耗性）がほぼ母岩である泥岩と等しい程度に低いためと考えられる。本来は酸性液に対する溶解性や物理的強度の差異から骨や歯化石と母岩の風化摩耗速度は異なるのが一般的だが、多摩川河床の加住層においてはそれがほぼ変わらないということである。多摩川河床のように物理的浸食が激しく、化石断面が母岩と連続する曲面の一部になるような化石産地においては、化石産状の3次元構造を保存する上では表面の立体形状のみのデータ（例えば色情報を取得しない方式でのレーザースキャン、シリコン型や石膏レプリカ）では不十分であり、今回用いたフォトグラメトリの手法や、テクスチャに色情報を含む方式でのレーザースキャンが有効である。またMetaShape上における各ポイントの信頼度（confidence）は、完全に排水できた高い位置の地層表面では高く、周囲から水が侵入しやすく常に排水を行っていた低い位置の地層表面では低いといった結果となった。元来、表面に水が張っている状態では、水面のゆらぎや水と空気の屈折率の差異により地形表面のデータを正確に取得することは難しいとされているが、今回のように積極的に排水を行っていても、水の濡れによる反射や屈折が強く影響するポイントについては、高い信頼度は得られないといえる。

なお本露頭およびその付近から過去に得られた標本（アケボノゾウ幼体頭骨、アケボノゾウ成体臼歯、大腿骨、切歯など）の一部は既に3Dモデルを作成済みであるが、記載論文を準備中であるため本報告では3Dモデルの公開は行わず、将来的に論文公表がなされた際に他のデータと同様の媒体（SketchFab）にて公開する予定である。

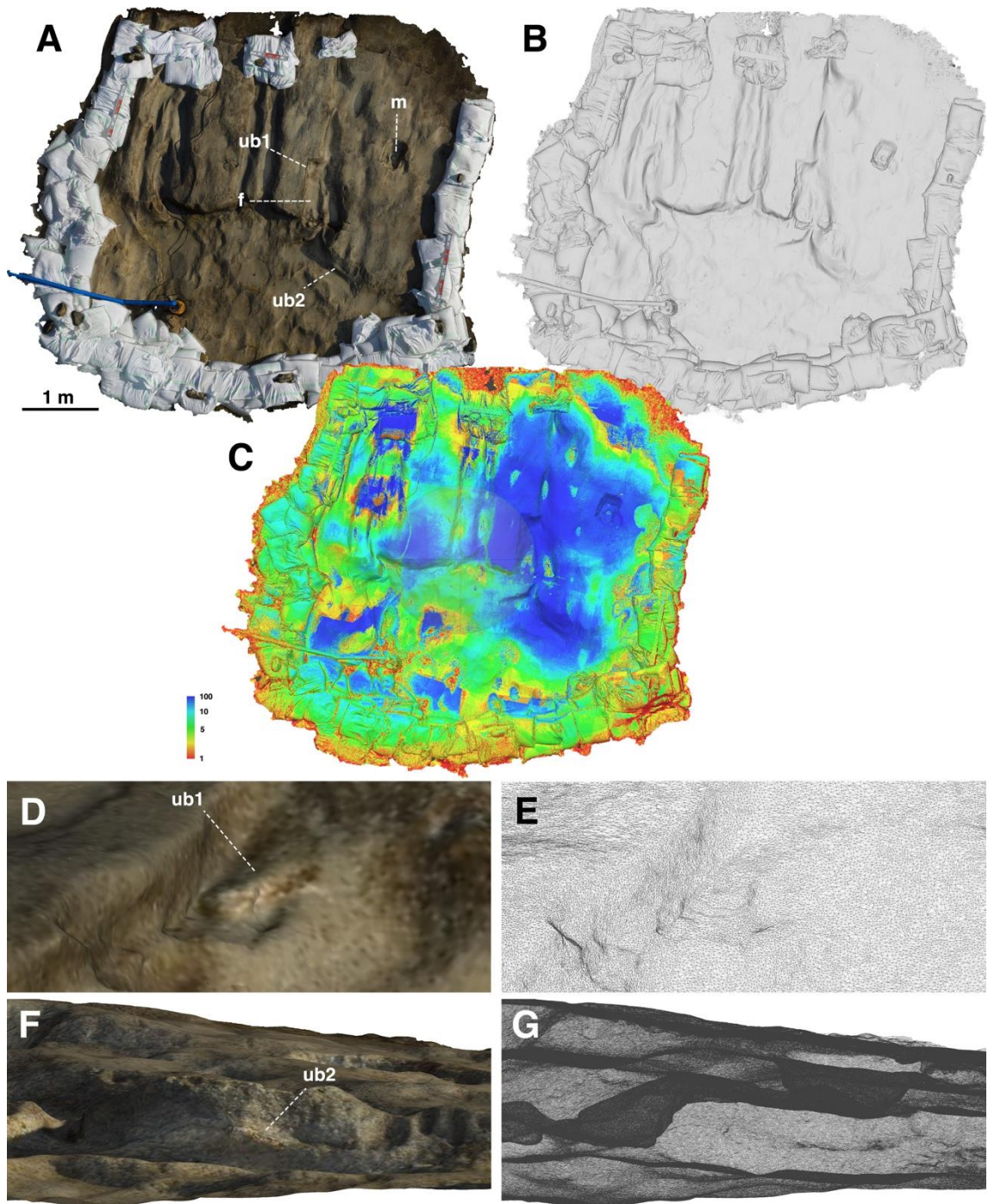


図2-9. 昭島市拝島水道橋付近, 長鼻類化石産出ロカリティの3Dモデル. A, B: ロカリティ全体の鉛直方向からの正射投影図, テクスチャありサーフェスモデル (A), およびワイヤーフレーム (B). 画面下が多摩川上流. 一部の区画では過去に臼歯 (m) および大腿骨 (f) が採取された. また, 未採集の未同定骨 (ub1, ub2) の断面が露出している位置も点線で示す. C, サーフェスモデル各ポイントの信頼度. D-G: 未採集の未同定骨 ub1 (D, E) および ub2 (F, G) の露出部位の俯瞰図, テクスチャあり (D, F) およびなし (E, G). 骨断面 (黄白色) はテクスチャありのモデルにおいてのみ, 周囲 (暗灰色) の泥岩との差異で見分けることができる.

J) 昭島市拝島水道橋下流・加住層泥岩の化石産地

本露頭は多摩川左岸の昭島水道橋直下から約 200m 続く大規模な加住層の泥岩露頭で、ここからはメタセコイアと見られる立木化石、カズサジカ、ファルコネリオオカミなどの骨格化石が発見されているほか、一部、化石の密集する泥岩層の拳大のコンクリーションの密集層、さらに泥岩層の下位にあたる礫層、砂層など複合的な堆積相が確認できる（図 2-10）。撮影を行った 2022 年 1 月 9 日は、天候は晴れ、露頭の状態は全体に乾いて比較的良好に思われたが、微小なスケールでは霜による風化が進み、堆積相を明瞭に観察出来なかった。

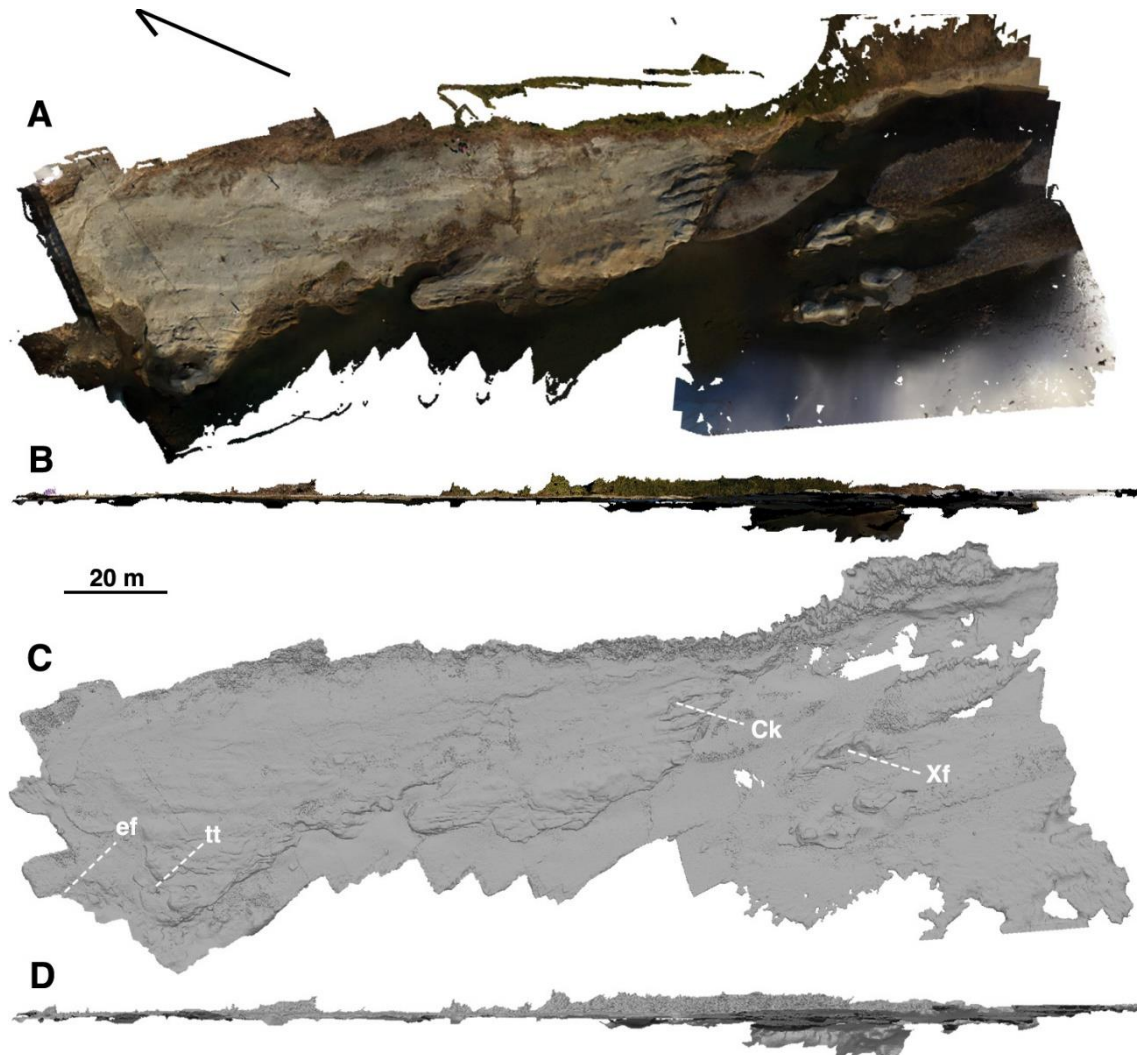


図 2-10. 昭島市拝島水道橋から下流の加住層化石産出露頭、3D モデルサーフェスデータからの出力画像。A, C, 鉛直上方からの正射投影図、矢印は北を示す；B, D, ほぼ水平、A, C における画面下方向（東南東方向）からの正射投影図、テクスチャあり（A, B）およびなし（C, D）。過去に化石採取された地点での掘削跡や削剥による凹凸に関しては、テクスチャのない凹凸のみの情報で示すと確認が容易である。略号：ef, 長鼻類足跡化石；tt, メタセコイア立木化石；Ck, カズサジカ産出地点；Xf, ファルコネリオオカミ産出地点。

現在本露頭には過去に発見された脊椎動物化石や植物化石、足跡化石などはほとんど残されていないが、一部メタセコイアとされる立木化石が残存しており、今回の3Dデータにも反映されている。3Dデータからは、脊椎動物化石産出層順はいずれもほぼ同層準であること、立木化石は撮影範囲最上部の泥岩層から下位の砂層・礫層を貫いてさらに下位の泥岩層から続いていることが確認・記録できた。

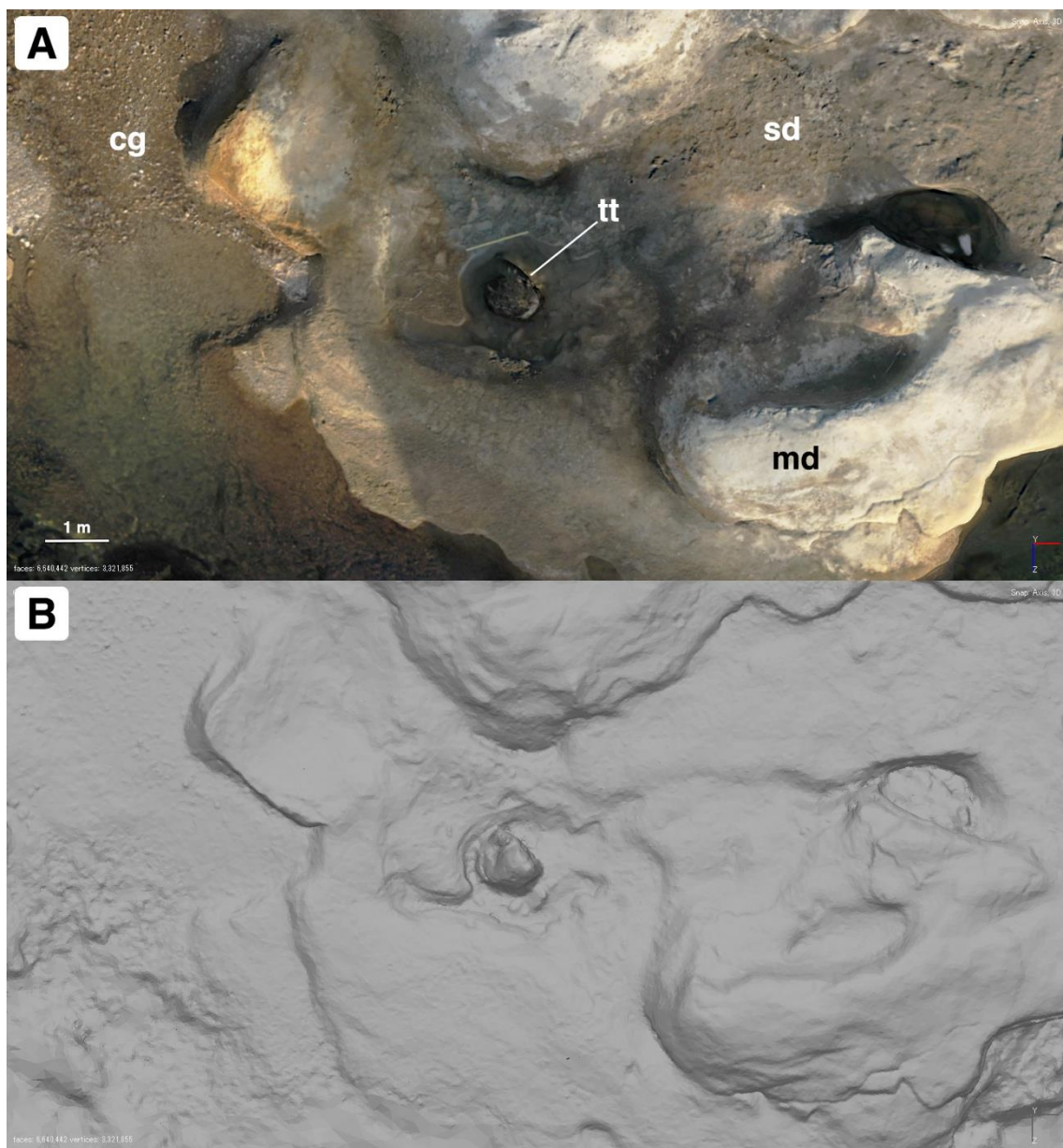


図2-11. 昭島市拝島水道橋直下、メタセコイア立木化石ロカリティの3Dモデル。図2-10で示したサーフェスモデルの正射投影図を拡大表示したもの、テクスチャあり(A)、およびなし(B)。画面左が多摩川上流。立木化石(tt)の立体形状が保存されているほか、テクスチャありの場合は、礫岩層(cg)・砂質堆積物(sd)、泥岩層(md)の差異など、テクスチャなしの場合には反映されていない堆積相が表現されている。

K) 昭島市拝島水道橋直下・加住層泥岩の長鼻類足跡化石

拝島橋直下付近の加住層泥岩層からは、これまで消失したものも含め、多数の哺乳類足跡化石が発見されている（福嶋，2009）．本調査期間においても長鼻類のものと思われる足跡化石が2点発見された．発見時は表面にわずかに河水が流れる状態にあったため，土嚢を使って水流を止め，その間に簡易的な方法で写真撮影を行った．Iロカリティと同様，地層表面が常に濡れていることによる画像の乱れは大きく，信頼度は低い，足跡の一つが2重に踏み込まれ泥岩が一部堤状に変形している様子を捉えることが出来た（図2-12）．

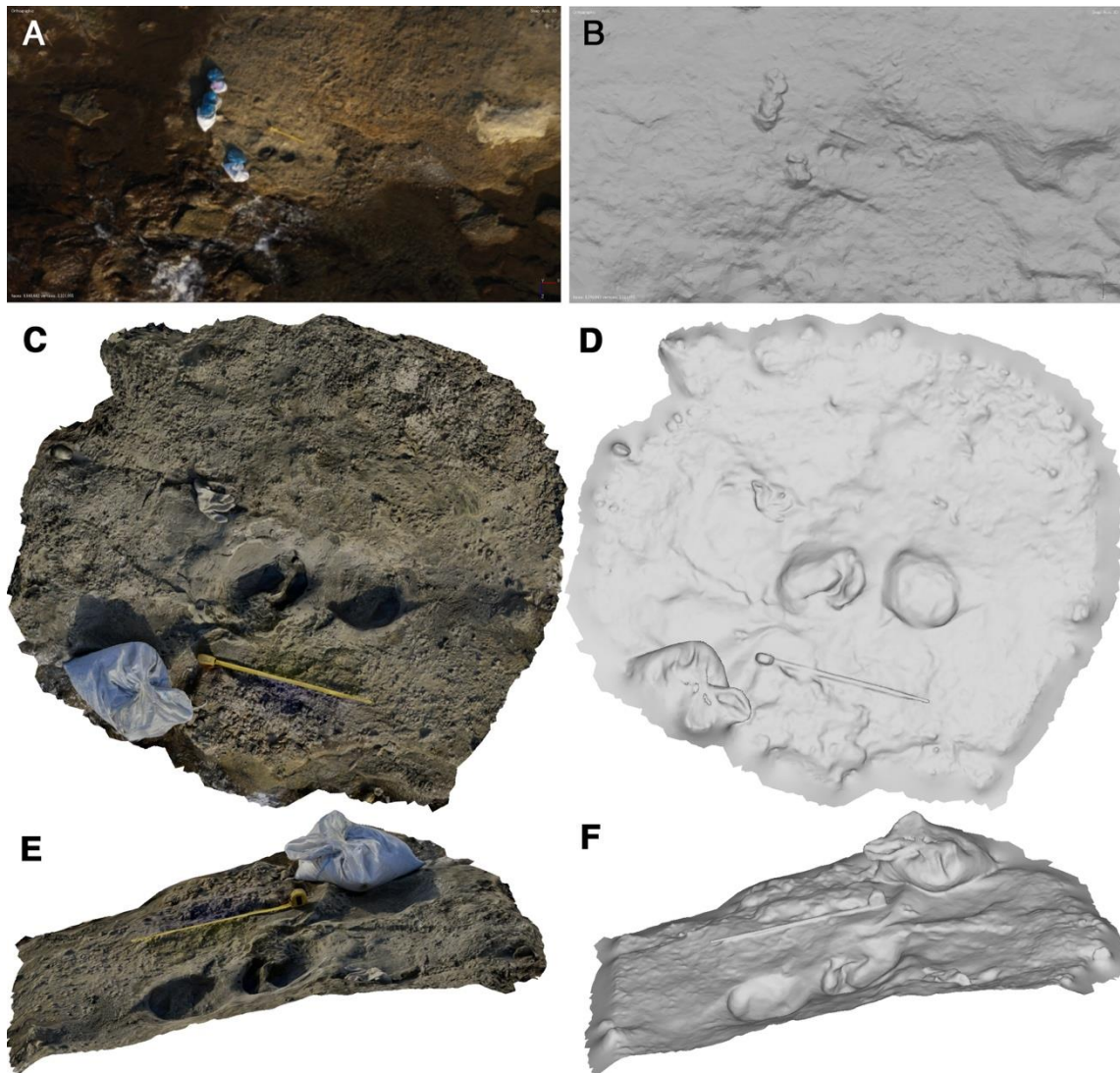


図2-12. 昭島市拝島水道橋直下，長鼻類化石ロカリティの3Dモデル．A, B, 図2-10で示したサーフェスモデルの正射投影図の一部を拡大表示したもの，テクスチャあり（A），およびなし（B）．C-F, 個別に撮影した写真を元に再構成した3Dサーフェスモデル，傾斜した層理面に対して直交する方向からの正射投影図（C, D）および水平に近い方向からの俯瞰図，正射投影（E, F），テクスチャあり（C, E）およびなし（D, F）．スケールバーは約60 cm．

L) 八王子市檜原町の北浅川河岸・加住層のメタセコイア化石林

かつて多数のメタセコイア立木化石や哺乳類の足跡化石が産出しており（福嶋，2009），ハチオウジゾウもこの区域の右岸から発見されている（Aiba et al., 2010）. 本研究では，現在も足跡や立木化石が残り，地層断面が多く露出する左岸側の露頭を重点的に撮影した．

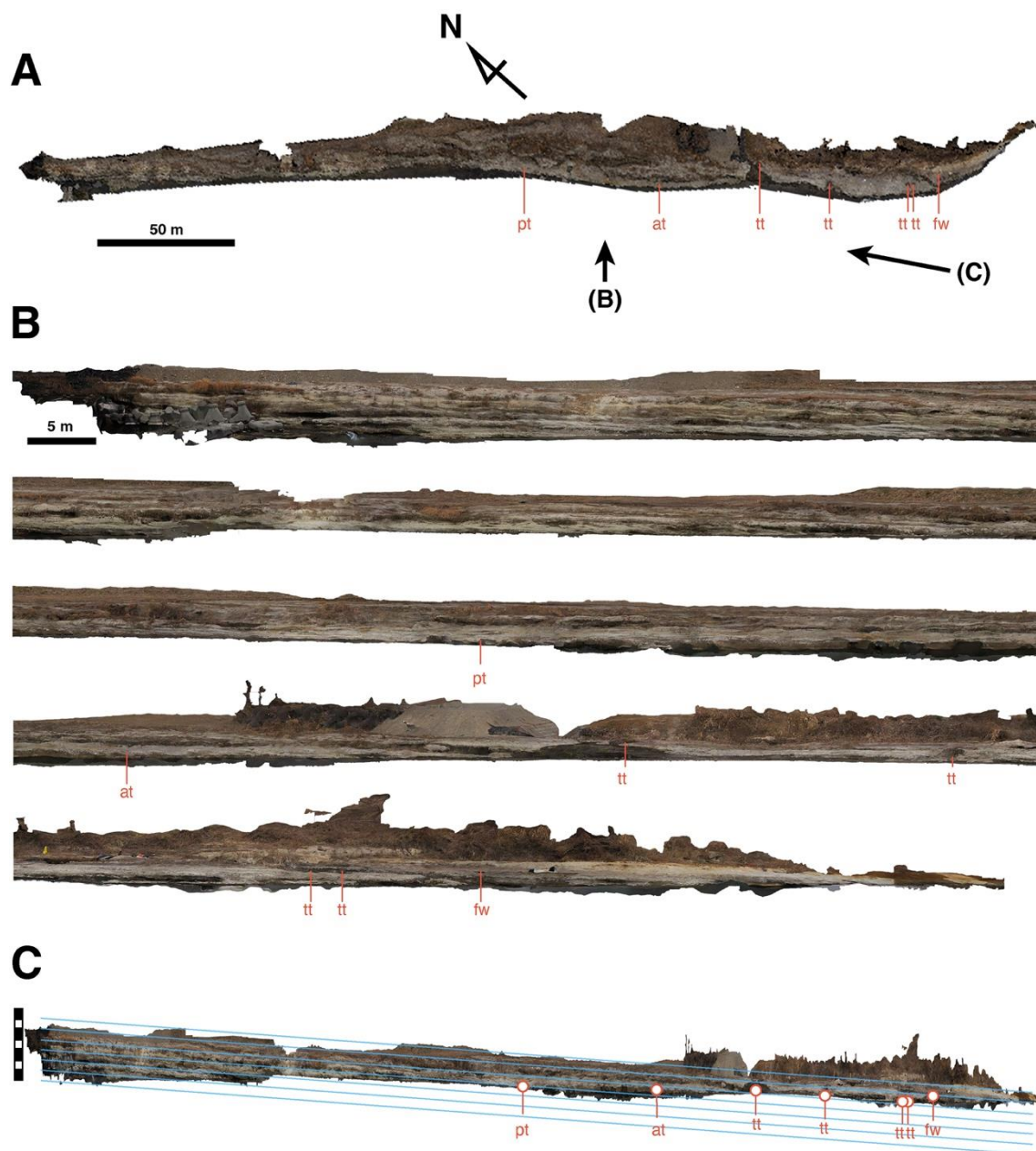


図2-13. 北浅川メタセコイア化石林のテクスチャ付き3Dサーフェスモデル. A, 鉛直上方からの正射投影図. B,Cにおける投影方向を矢印とアルファベットで，化石の産出を赤線で示す. Nは北. B, C, 河岸斜面の水平方向からの正射投影図，短軸方向からのビューを5分割にしたもの（B）およびほぼ長軸方向かつほぼ地層の走行方向（みかけの傾斜角が最大となる角度）からのビュー. Cには地層の層厚1m毎に青色補助線を表示する. At, 偶蹄類足跡化石；fw, 倒木化石；pt, 長鼻類足跡化石 tt, 立木化石.

今回の調査時（2022年1月23日・4月10日）および調査域（北浅川の国道20号線高架との交差点より下流約350 m区間の左岸）においては、メタセコイアと見られる立木化石4点（うち一つの周辺には琥珀を多量含む泥炭層が発達）、倒木化石1点、長鼻類とみられる足跡化石露頭2地点、多数の偶蹄類足跡が密集する露頭1地点が確認された（図2-13）。これまでの報告から、過去北浅川流域においては大量の足跡化石が露出していたことが知られている（福島，2009）が、それらは今回の観察時には河流による削剥や表土・植生の被覆等によって観察できなくなっていた。地層は東方向（下流やや左岸寄り）に向かって傾斜していることから、堆積環境が層理面上で側方に不変であると仮定すると下流に向かって少しずつ上位に変遷し、下刻によって水平露頭の高度が低下したとしても、過去の足跡化石多産層準は下流側に移動していると予想された（但しその傾斜角は緩やかであるため、河岸の水平露頭に露出する面は層理面に近い）。しかし実際に撮影範囲より下流域を調査したところ、河川礫による被覆や水没によって足跡化石の観察は困難であった。当然、足跡化石の保存される局所環境が水平的に連続しているという保証があるわけではなく、上記のような地形的な制約も加味すると、一時的に露出した化石の露頭記録は直ちに記録しておくことが望ましいといえる。過去の調査記録および今回の檜原町での調査結果からは、北浅川に露出する加住層の堆積環境は、河道とそれに付随する氾濫原に発達したメタセコイア林および泥炭湿地であり、多様な哺乳類が留まるような水辺であったと推定される。

今回の撮影においては、約10 m×約350 mの大規模露頭の全体像を約5 mm程度の解像度で記録され、構築された3Dサーフェスデータにはメタセコイアの立木化石の現在の形状、深さ5 cm未満の痕跡的な長鼻類の足跡化石とみられるものの凹凸、直径5~10 cm程度の足跡化石の分布などをある程度正確に保存できることが確認された（図2-13 B-F）。また、地層断面が観察できる本露頭に於いては、礫岩・砂岩・泥岩の選択的な浸食によって形成された微小な段丘地形と、岩相ごとの色調の違いにより、層理面およびその傾斜を3次元モデル化することができた（図2-13 B-F）。本研究で用いた手法は、作業を洗練させることができれば約半日の作業で該当する範囲の露頭を3次元データ化することを可能にすると期待され、傾斜が僅かで層序関係を認識しにくい多摩地域の上総層群について、地質学的・堆積学的データを記録する上で有用であると考えられる。たとえば、本露頭のようにカーブする河床に於いて同層準といえる3点のGPS座標を求めることができれば、地層の僅かな傾斜を正確に計測することも可能になる。従来の地質学において、地層の走行・傾斜の計測はクリノメーターと呼ばれる測量機器で行うが、多摩地域の上総層群のように傾斜が僅かである場合は微小領域での傾斜の揺らぎによって大きな誤差が生まれる。その他にも測量機材を用いて、広域にわたる同層準の3点を見通して傾斜を求める方法なども考えられるが、多摩川流域の場合は植生などの障害物も多く、この方法が採用できる地点は多くない。さらに測地点同士の間には断層や褶曲などの地質構造が発達している可能性も加味すると、地層の水平的連続性を3Dモデル上で確認した上で走行傾斜を決定できる写真測量法に優位性があると考えられる。

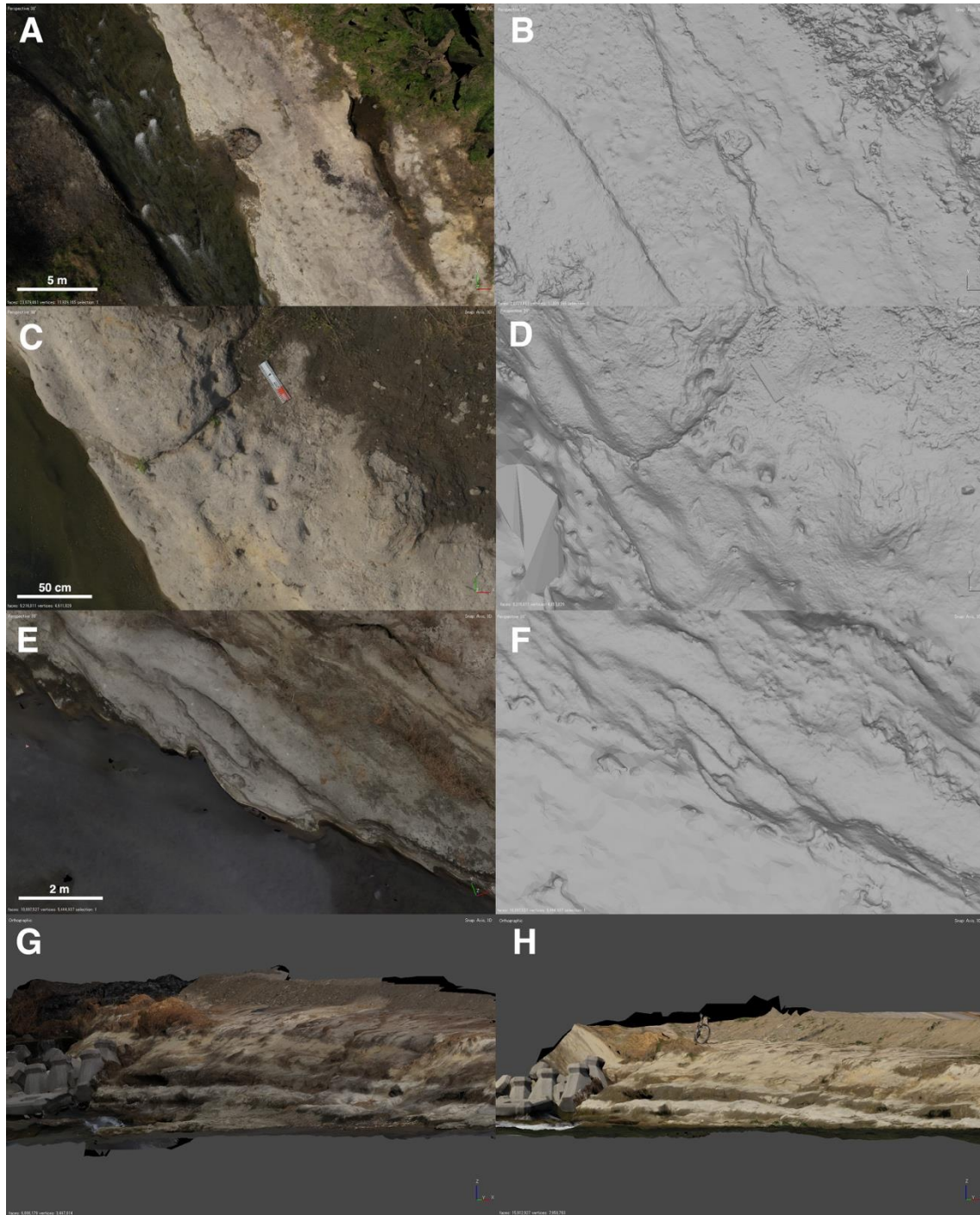


図2-13. 北浅川メタセコイア化石林の3Dサーフェスモデルのディテール. A-F, 鉛直上空方向からみた透視図法図 A, B, 大型のメタセコイア立木化石; C, D, 偶蹄類足印化石. 多数の足跡が密集している; E, F, 長鼻類足跡化石? (中央); E, F, G, 2022年1月23日(曇り)に撮影. A-DおよびH, 2022年4月10日(晴れ)に撮影. A, C, E, G, H, テクスチャあり; B, D, F, テクスチャなし. 天候が曇りの日に撮影したGでは間隙水を多く含む砂層が黒褐色に, 泥岩層が灰白色に発色するため層理面の認識が容易だが, 晴れの日撮影したHでは全体に乾燥しており, 色調から層理面を認識するのが困難となっている.

結論 1 : 上総層群化石群の 3D データ保存に向けての留意点

上記の通り、上総層群の化石標本や化石露頭は、基本的に軟弱で保存されにくいことから、3D データとして保存しておくことの意義は大きい。とくに河川露頭においては露頭の削剥と更新が顕著であり、化石の立体的分布を認知し解析可能な形で残しておくことには一定の価値があると考えられ、積極的に推進すべきである。

室内の標本撮影に関しては、標本を動かしたり固定したりする際に破損しやすいという点を除いては、通常の物体と同様の扱いで十分に利用可能な 3D データの作成が可能である。ただし、照明による陰影強度の調整、焦点距離の調整、写真の解像度、シャッタースピードの調整によるブレの矯正等にどれだけ配慮するかによって 3D モデルの品質は大きく左右される。全てにおいて最善の方法で撮影を行うことが理想ではあるものの、現実的には各個人・施設が持てる設備と、3D データの使用目的に合った精度での撮影を行っていく必要がある。近年はスマートフォン付属のカメラと専用のアプリケーションを用いた簡易的なフォトグラメトリーまでもが可能になっていることも参考までに記しておく。

野外での撮影に関しては、ドローンを用いた撮像法が広範囲・高精細の 3D データを短時間で作成することが十分に可能であることが示された。他方、野外での撮影に最適の条件（露頭に対する植物や土砂による被覆が少なく、河川の水位は低く、降水はなく、かつコントラストを強調しすぎる強い日照もない日中）が揃うことは極めて稀であり、僅かな機会を逃さず活用する必要がある。一方で、ドローンの航行に際しては航空法に則り飛行許可申請を行う必要があるため、計画的な実施が必須である。

結論 2 : 研究成果の社会還元に向けての取り組み

本研究で得られた化石・化石露頭の 3D データは、研究・教育目的の利用に限り、希望に応じてダウンロード可能とする予定である。2022 年 5 月 10 日現在、3D データおよび AR（仮想現実）コンテンツのプラットフォーム SketchFab (<https://sketchfab.com/>) において東京都市大学古生物学研究室公式のアカウントを開設し、随時テクスチャ付き 3D サーフェスデータの公開を進めている (<https://sketchfab.com/TCUPaleoEcoEvo>)。

また筆者は現在、足跡化石の STL データを 3D プリンターで出力することで、樹脂模型を作成中である。これらの模型は、東京都市大学世田谷キャンパスに開設される小規模展示スペース（新 6 号館で計画中）において公開する予定である。展示は常時内容を更新する予定で、大学生を中心とした市民に公開することで武蔵野の地域地質から地史古生物学、自然科学全般に関する興味関心を高める狙いがある。これらの媒体に関しては、現在進行中であるアキシマエンシスと東京都市大学の共同研究プロジェクトを基盤として、最新の研究成果に関する情報提供の場としても活用していきたいと考えている。

本研究を行う過程では化石の 3D 化手法の確立だけではなくその他多くの共同研究のアイデアも生まれた。これらを論文、学会発表、シンポジウム等の形で国内外に発信し、多摩川流域の自然の学術的重要性を社会的に認知せしめていくことも重要と考えている。

結論 3 : 今後に向けての課題

室内でのデータ収集は、特に高精度の撮影を行った場合において解像度の高い 3D メッシュデータを作成することに成功したが、その反面、多摩川流域から産出する膨大な化石資料の数を考慮すると、同様の撮影を全ての標本に対して行うことは時間的・予算的な制約から極めて難しいともいえる。他方、簡易的な手法による撮影は、メッシュ形状の解像度こそ高精度の撮影法に劣るものの、テクスチャデータと合わせて化石の形状や埋没の角度などを伝達するには十分な品質に達していたと言える。従って今後は、研究に直接用いる目的でのレプリカ作成や 3D データの交換、博物館展示作成などに際しては高精度の撮影を行い、コレクションを網羅的に 3D 化したカタログの作成などには簡易的な手法を用いる等、品質と時間・予算を総合的に考慮した手法の使い分けが必要になってくると思われる。標本データの帰属については今後も検討を重ねていく予定だが、自然物である限り、著作物の場合とは異なり解決すべき法的問題は少なく、標本の所蔵館や所蔵者である個人、現在研究中の研究者等との調整が主な課題となっていくであろう。

野外でのデータ収集にあたっては、研究開始前は夏季の撮影は植生の被覆や増水によって河床・河岸露頭の観察は困難であるとの予想から冬季における調査を計画するに至ったが、冬季～春季の露頭表面は河川による削剥が発生しない反面、雨水の浸透や霜の形成によって軟弱化した表層の堆積物が流出せずに露頭を被覆したままの状態となり、化石露頭を観察するには必ずしも良好ではないこともわかった。以上を踏まえると、多摩川流域の上総層群の露頭について撮影に最も適した時期は夏季・秋季の台風によって露頭がある程度削剥されたのち、水位が低下し植生による被覆が収束してから、冬季の霜や降水による風化が進行するまでの 10 月～12 月であると結論付けられる。

河川流域の環境下では常に化石露頭は露出と消失を繰り返すが、短期間のうちに観察できるものは河岸・河床の狭い領域に限定されている。一方で上総層群の古環境は内湾・外海・河川流路・氾濫原およびそれに付随するメタセコイア林や泥炭湿地など、側方への変化が激しく、全体像を把握するには少数回の調査では不十分である。そのためには今後、浸食によって変化する露頭状況を経時的に保存し、化石や堆積相の分布を空間的に積算していくことが必要となろう。今回施行したドローンによる撮影と写真測量法による露頭の 3 次元データ構築は、今後の露頭状況の変遷の記録法として有用であり、継続して行っていくことが望まれる。またそれにあたっては、異なる時刻のデータ同士を正確に位置合わせできるよう、不動のランドマークを立てておくことが必要となる。

今回の野外でのデータ採取は大型化石の産出状況が明瞭である加住層の陸成層に限定したが、室内での標本撮影の過程では海成層から産出する化石標本・堆積物に対しても調査研究に用いるのに必要な情報を保存可能であることが示唆された。特にアキシマクジラ産出露頭の付近の小宮層は貝殻の密集産状やストーム成堆積構造、多様な生痕化石といった古環境指標が多く観察可能であることから、アキシマクジラの生息環境を理解し、当時の生態系の全容を解明する上で露頭状況の経時変化を保存しておくことが重要であるといえる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、昭島市文化財保護審議会委員・福嶋徹氏（昭島市教育福祉総合センターアキシマエンス・むさしの化石塾）の全面的な協力により、多摩川河床や北浅川での野外調査、およびアキシマエンス収蔵標本や個人蔵標本の撮影が可能となった。福嶋氏に対しては著者よりここに深謝の意を表す。一般社団法人路上博物館の森健人氏には、本研究の核となる最新の写真測量法について、技術提供を賜った。森氏には深く感謝の意を表す。現在研究中の標本の撮影、長鼻類化石の産出露頭の調査にあたって詳細な情報の提供を賜った樽創氏（神奈川県立生命の星・地球博物館）および小泉明裕氏（飯田市美術博物館）に感謝申し上げます。昭島市教育福祉総合センター・アキシマエンスでの標本調査の際に格別のご対応を頂いた学芸員の尾崎 薫氏，昭島市教育委員会生涯学習部の伊藤雅彦社会教育課長に謝意を表す。野外でのドローン飛行にあたっては、東京都南多摩西部建設事務所，国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所ならびに在日米軍横田基地には飛行許可のご高配ならびに助言を賜った由，ここに感謝の意を表す。最後に、本研究助成の申請および計画変更に当たりご対応頂いた公益財団法人東急財団の越村敏昭理事長，同財団 函師真吾事務局長，ならびに審査評議委員の諸氏に深く御礼を申し上げます。

引用文献

- 相場博明・馬場勝良・松川正樹 (2008). 関東平野西縁の多摩川中流域から産出した鮮新-更新統産植物化石群の変遷. 東京学芸大学紀要 自然科学系 60: 77-93.
- Aiba, H., Baba, K., & Matsukawa, M. (2010). A new species of *Stegodon* (Mammalia, Proboscidea) from the Kazusa Group (lower Pleistocene), Hachioji City, Tokyo, Japan and its evolutionary morphodynamics. *Palaeontology* 53: 471-490.
- Avanzini, M., García-Ramos, J. C., Lires, J., Menegon, M., Piñuela, & Fernández, L. A. (2005). Turtle tracks from the Late Jurassic of Asturias, Spain. *Acta Palaeontologica Polonica* 50: 743-755.
- 馬場勝良 (2015) : 関東平野西縁部の下部更新統上総層群の貝化石群集と環境変動 -地学の野外実習教材開発の基礎として- 岐阜聖徳学園大学紀要. 教育学部編 54: 65-87.
- Bates, K. T. et al. (2008). Three-dimensional modelling and analysis of dinosaur trackways. *Palaeontology* 51: 999-1010.
- Barnosky, A. D., Koch, P. L., Feranec, R. S., Wing, S. L., & Shabel, A. B. (2004). Assessing the causes of late Pleistocene extinctions on the continents. *Science* 306: 70-75.
- Chen, Y. S., Deng, T., Zhou, Z., & Sun, H. (2018). Is the East Asian flora ancient or not? *National Science Review* 5: 920-932.
- Cunningham, J. A. et al. (2012). Distinguishing geology from biology in the Ediacaran Doushantuo biota relaxes constraints on the timing of the origins of bilaterians. *Proceedings of the Royal Society London B: Biological Sciences* 1737: 2369-2376.
- Falkingham, P. L. (2012). Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica* 15: 1T
- Farlow, J. & Elsey, R. (2010). Footprints and trackways of the American alligator, Rockefeller Wildlife Refuge, Louisiana. *Crocodyle tracks and traces: New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 51: 31-39.
- Farlow, J. O., Robinson, N. J., Kumagai, C. J., Paladino, F. V., Falkingham, P. L., Elsey, R. M., & Martin, A. J. (2018). Trackways of the American crocodile (*Crocodylus acutus*) in northwestern Costa Rica: implications for crocodylian ichnology. *Ichnos* 25: 30-65.
- 福嶋徹 (2009). 多摩川河床に見られる下部更新統上総層群の長鼻類・偶蹄類足跡化石群の分布調査—及び足跡化石群の露出から消滅までの経過と保存の検討—. とうきゅう環境浄化財団研究助成 No. 176, 297pp.
- 福嶋徹 (2017a) . 第四紀学の宝庫・多摩川の化石から復元できる古環境—楽しい化石の調べ学習とフィールドワーク—. 公益財団法人たましん地域文化財団 多摩のあゆみ 167: 4-17.

- 福嶋徹 (2017b). 第四紀学を基盤とした「むさしの化石塾」の生涯学習と社会貢献. 第四紀研究 56: 227–235.
- 福嶋徹 (2019). 多摩川産軟体動物化石を利用した環境教育実験と市民参加型・調べ学習による「第四紀学」の古環境復元の研究. とうきゅう環境財団研究助成 No.244, 141pp.
- 福嶋徹・向山崇久・増渕和夫・松田隆夫・曾原利満・多摩川サブ団研グループ (2002). 多摩川河床・上総層群小山田層産の長鼻類及び偶蹄類(シカ科)の足跡化石. 川崎市青少年科学館紀要 13: 29–32.
- 平本潤・指田勝男・上松佐知子・甲能直樹 (2016). 神奈川県川崎市の下部更新統飯室層より産出したイルカ類化石の古生物学的再検討. 日本古生物学会 2015 年年会講演予稿集, 75A.
- Kimura, T., Hasegawa, Y., & Kohno, N. (2018). A new species of the genus *Eschrichtius* (Cetacea: Mysticeti) from the Early Pleistocene of Japan. Paleontological Research 22: 1–19.
- 小泉明裕 (1990). 川崎市の上総層群飯室層(下部更新統)産アシカ科動物化石について. 神奈川県立博物館研究報告 自然科学 19: 45–66.
- 甲能直樹・薬師大五郎・小林英一, 2007. 東京都狛江市の下部更新統飯室層よりダイカイギュウの全身骨格化石の発見. 化石 82: 1–2.
- Köhler, M., Herridge, V., Nacarino-Meneses, C. et al. (2021). Palaeohistology reveals a slow pace of life for the dwarfed Sicilian elephant. Scientific Reports, 11: 1–17.
- 小泉明裕 (2003). 東京都昭島市多摩川の鮮新-更新統から産出した日本初記録の純肉食性オオカミ化石 *Canis (Xenocyon) falconeri*. 第四紀研究 42: 105–111.
- 小泉明裕 (2017). 東京西部の三〇〇～一〇〇万年前頃にいた哺乳類や鳥類を探る. 公益財団法人たましん地域文化財団 多摩のあゆみ, 167: 26–37.
- 小泉明裕, 福嶋徹, 長谷川善和 (2000). 東京西部の鮮新-更新統加住礫層産のアケボノゾウ, カズサジカおよびイヌ属(予報). 日本古生物学会 2000 年年会予稿集, 78A.
- Leggio, B., Laussu, J., Carlier, A., Godin, C., Lemaire, P., & Faure, E. (2019). MorphoNet: an interactive online morphological browser to explore complex multi-scale data. Nature Communications 10: 1–8.
- O’Leary, M. A., & Kaufman, S. (2011). MorphoBank: phylophenomics in the “cloud”. Cladistics 27: 529–537.
- Rowe T. (1996). Coevolution of the mammalian middle ear and neocortex. Science 273: 651–654
- Sollas W.J. (1904). A method for the investigation of fossils by serial sections. Philos. Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences 196: 257–263.
- 鈴木毅彦, 白井正明, 福嶋徹 (2016). 関東平野南部における上総層群のテフロクロノロジー. 地質学雑誌 122: 343–356.

- 前田大智, 樽創, 福嶋徹, 高栞祐司, 鏑本武久 (2021). 東京都昭島市の下部更新統加住層 (上総層群) から産出したシカ属の化石. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学) 50: 21–29.
- 前田由紀, 松川正樹 (2003). 多摩川昭島地域の第四系古環境の推定-地質の野外観察教材化のための基礎的研究-. 馬場勝良・松川正樹編「地質野外実習地としての多摩川中流域および狭山丘陵に分布する上総層群の露頭の現状とそれに基づく教材開発」, 財団法人とうきゅう環境浄化財団・一般研究助成成果報告書 No.137, p. 51–98.
- 町田 洋, 山崎晴雄, 新井房夫, 藤原 治 (1997). 大峰火砕流堆積物: 北アルプス形成史研究のための一指標テフラ. 地学雑誌, 106: 432–439.
- Martin, P. S., and R. G. Klein, (eds), 1984. Quaternary Extinctions: A Prehistoric Revolution. University of Arizona Press, Tucson, 892pp.
- 西田尚央, 松川正樹, 馬場勝良 (2014). 多摩川中流域の堆積相と堆積環境: 地質野外実習のための評価. 東京学芸大学紀要 (自然科学系) 66:133–14.
- Schiffbauer J.D. & Xiao S. (2011). Paleobiological applications of focused ion beam electron microscopy (FIB-EM): an ultrastructural approach to the (micro)fossil record. in: Laflamme M. Quantifying the Evolution of Early Life: Numerical Approaches to the Evaluation of Fossils and Ancient Ecosystems. Springer, p. 321–354.
- 高栞祐司, 木村敏之, 長谷川善和 (2021). 上総層群小宮層から産出したサメ類化石~ アキシマクジラとの共産標本~. 群馬県立自然史博物館研究報告 25: 49–58.
- 武田正倫・増渕和夫 (1985). 多摩川における飯室泥岩層産のヒラツメガニおよびエンコウガニ化石. 川崎市青少年科学館年報 3: 35–38.
- 田村糸子 (2007). テフロクロロジーを用いた多摩川流域における鮮新-更新世の古環境復元. とうきゅう環境浄化財団研究助成 No.250, 35 pp.
- Tanaka, I. (2021). Morphological variability of *Ciconia boyciana* (Aves: Ciconiidae) tracks in homogeneous sediment. Palaios 36: 141–154.
- 田中猛, 樽創 (2022). 東京都狛江市の下部更新統上総層群飯室層より産出した板鰓類化石. 神奈川自然誌資料 43: 147–156.
- 樽創, 長谷川善和 (2002). 加住丘陵から多摩丘陵にかけての鮮新-更新統産大型哺乳類化石 (関東平野および後背山地を中心とする地域の自然史科学的総合研究 (2)). 国立科学博物館専報 38: 43–56.
- Turvey, S. T., Tong, H., Stuart, A. J., & Lister, A. M. (2013). Holocene survival of Late Pleistocene megafauna in China: a critical review of the evidence. Quaternary Science Reviews, 76: 156–166.
- 植木岳雪, 酒井 彰 (2007). 青梅地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 189pp.

植木岳雪, 原英俊, 尾崎正紀 (2013). 八王子地域の地質. (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 137pp.

Zouboula, N., Fokides, E., Tsolakidis, C., & Vratsalis, C. (2008). Virtual reality and museum: an educational application for museum education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 3(2008).

レーザースキャナを用いた多摩川流域上総層群化石群の
3次元構造データ保存法の確立

(研究助成・学術研究 VOL. 5 1 - NO. 3 6 8)

著 者 中島 保寿

東京都市大学 知識工学部 自然科学科 准教授 (採択当時)

発行日 2022年10月

発行者 公益財団法人 東急財団

〒 150-8511

東京都渋谷区南平台町5番6号

TEL (03) 3477-6301

<http://foundation.tokyu.co.jp>