

# 〔報文〕 富山市大山地域の恐竜の足跡化石の経年変化評価

朽津 信明・酒井 修二\*・藤田 将人\*\*

## 1. はじめに

文化財の劣化を評価する際に、時間を置いて同じ対象物を二回測定することから、両者の形状変化を把握して行う方法が試みられる場合がある<sup>1)</sup>。近年の三次元計測技術の向上と計測の簡便化に伴い、複数回の三次元計測に基づいて文化財の劣化を詳細に認知することが可能となってきた。また、型取りによって過去に作成されていたレプリカの形状を現物の現状と比較することにより、レプリカ作成以後に生じた現物での劣化を評価する試みも報告されている<sup>2)</sup>。過去の三次元形状は、過去に複数方向から撮影されていた写真を用いることでも構築は可能であり<sup>3)</sup>、こうした方法によって近年の劣化だけでなく、過去数十年間に起きた劣化を定量的に評価することも可能となっている。ただしこれらでは、設定された二つの時点の間に起きた劣化を線形として評価しているに過ぎず、過去を含めた劣化の進行に関する時間的変化を議論することはできていない。当然のことながら時間軸上に二点設定したからと言って、その間に起きた劣化現象が一定速度で進行していた保証はなく、むしろ風化現象というものは、速くなったり遅くなったりしながらその時々で変化していたことも十分予想される。

これに対して、一つの対象について、過去に複数回の型取りによって作成された複数個のレプリカや、過去に多方向から撮影されていた写真が複数時点で存在すれば、過去の様々な時点での対象物の三次元形状を今からでも構築することが可能になると考えられ、それらを時系列で比較すれば、過去に起きた劣化の変遷を明らかにすることができると期待される。本研究では、富山市大山地域で発見された恐竜の足跡化石について、過去の複数時点の三次元形状を構築して比較することに基づいて、経年変化を検証することを試みたので、その結果を報告する。

## 2. 調査対象

本研究の対象は、富山市大山地域で発見された恐竜の足跡化石である（図1）。ここでは、1995年に道路工事に伴って中生代前期白亜紀の地層中から恐竜の足跡化石と見られる窪みが発見され<sup>4)</sup>、その後の調査によって別の足跡化石も新たに発見されながら今日に至っている露頭面である（図2）。

調査対象とするのはそのうちの竜脚類の足跡と見られる部分と鳥脚類の足跡と見られる部分の2カ所である（図2）。竜脚類の足跡化石と見られる部分（図3）は長辺約84 cmで、露頭中央下部で泥岩中に1995年に発見されてから、一時的にシートで覆われた時期もあったもののそれ以外は露出した状態で推移している。1997年にはシリコンで型取りが行われてレプリカが作成され（図4）、また2015年には型取り範囲が拡張されて改めてレプリカが作成されていた（図5）。レプリカはいずれもFRP製で、完成後は富山市科学博物館内で屋内保存されている。この他、竜脚類足跡化石部分が2007年8月に撮影されていたデジタル写真が富山市科学博物館に4枚存在する（図6に過去の写真の一例）。

\*凸版印刷株式会社、\*\*富山市科学博物館

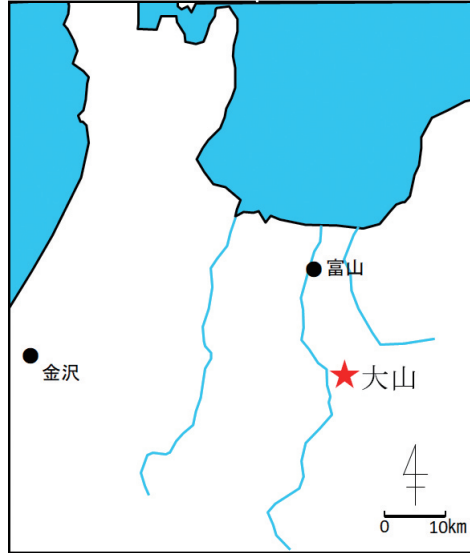


図1 富山市大山地域の恐竜の足跡化石露頭位置図

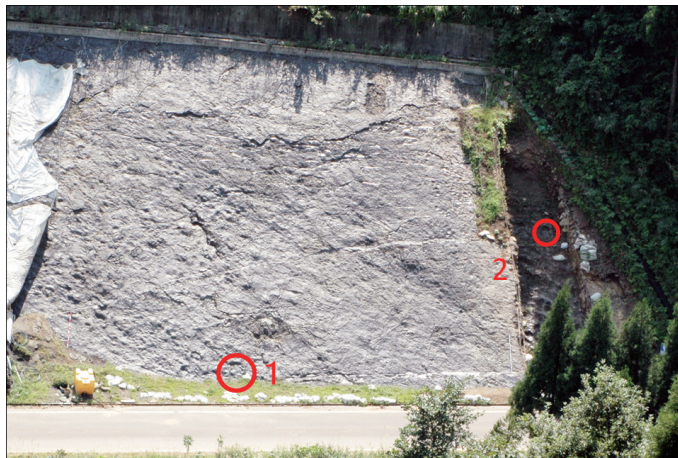


図2 恐竜の足跡化石を含む露頭全体（2009年撮影）  
 竜脚類足跡（1）は露頭中央下部に存在。  
 右（西）側は後年一段掘り下げられて、鳥脚類足跡化石（2）が発見された。

鳥脚類の足跡化石と見られる部分は、1995年に発見されていた足跡群が存在する地層面よりも層序的な下層に存在し、露頭の右（西）側部分で2003年に追加の発掘が行われた際に新たに掘り込んで確認された部分にある（図2）。このため、他の足跡化石群が確認されている面に比べて露頭面上で一段凹んだ面に位置しており、水分が常に滞留しやすく他の大半の足跡化石が存在する面と比べて植生が発達している。対象となる鳥脚類足跡は長辺約32 cmで、掘り下げられた面上で中央部の泥岩中に存在し（図7）、2004年にはシリコンで型取りが行われてFRPによってレプリカが作成されていた（図8）。レプリカは、完成後は富山市科学博物館内で屋内保存されている。化石部分は2005年には保護のためにシリコン-アクリル樹脂スリーロンジーA-9510（本剤）、スリーロンジーA-9585（硬化剤）によって表面コーティングが試



図3 竜脚類足跡化石（2019年撮影）



図4 1997年作成の竜脚類足跡レプリカ



図5 2015年作成の竜脚類足跡レプリカ

みられ、また一時的にシートで覆われた時期もあったものの、それ以外は処理もなく露出した状態で推移している。また、2009年と2014年に鳥脚類足跡化石部分が複数方向から撮影されたデジタル写真が、それぞれ3枚と6枚富山市科学博物館に残されている（図9に過去の写真の一例）。

本研究では、竜脚類、鳥脚類それぞれの足跡化石現地、そしてそれぞれのレプリカ、について2019年に計測調査を行うとともに、それぞれについて過去に撮影されていた写真も利用し、各時点における足跡の三次元形状を比較することを試みた（表1に調査対象の一覧）。

### 3. 計測方法と結果

#### 3-1. 写真撮影

それぞれの足跡化石現地とレプリカについては、デジタルカメラ Canon Powershot G1 X Mark III を用いて多方向から写真撮影を行った。竜脚類足跡に関しては1997年作成のレプリカで71枚、2015年作成のレプリカで77枚、現地の足跡化石で230枚を、鳥脚類足跡に関しては、





図6 2007年に撮影されていた竜脚類足跡の写真の一例

2004年作成のレプリカで160枚、現地の足跡化石で137枚を2019年にそれぞれ撮影した。なお、鳥脚類足跡周辺には植生が見られたが、足跡の範囲では形状計測に影響を与えるレベルには発達していないことを確認し、また水分の存在は表面反射を生み計測に支障を来す可能性があるため計測前に拭き取って反射の影響がないことを確認してから撮影した。また、過去の写真で反射の影響が認められる部分は三次元形状の構築範囲から除外した。

### 3-2. 各時点の三次元形状

2019年に撮影した各写真より、凸版印刷の TORESYS 3D<sup>®</sup> を用いて、多視点ステレオ技術<sup>5)</sup>に基づいてそれぞれの三次元形状モデルを構築した。また、2009年と2014年に撮影されていた鳥脚類足跡の写真については同様に TORESYS 3D<sup>®</sup> を用いて、また2007年8月に撮影されていた竜脚類足跡の写真については Agisoft 社の PhotoScan を用いて、それぞれソフト上の最高精度の条件で可能な範囲で三次元形状モデルを構築した。なお、過去の写真は計測目的で撮影されていた写真ではないため三次元形状を構築できた範囲はそれぞれで限定的となった。この作業により、竜脚類足跡については、1997年（レプリカの形状）、2007年（過去の写真に基づくため一部分のみ構築）、2015年（レプリカの形状）、2019年（現地写真）の時点の形状が、そして鳥脚類足跡については、2004年（レプリカの形状）、2009年（過去の写真に基づくため限定的に構築）、2014年（過去の写真に基づくため限定的に構築）、2019年（現地写真）の時点の形状が構築されたことになる（表1）。

### 3-3. 変位の検証

竜脚類足跡、鳥脚類足跡それぞれに関して、各時点の三次元形状モデルの中で相互に隣接する二つの時期のデータ同士で、Iterative Closest Point (ICP)<sup>6)</sup>にて各モデル間の偏差の総和（最近傍偏差）が最小になるように位置合わせを行った後、両者の間の最短距離を算出し、両モデル間の差分を求めた。この際、過去の写真に基づいて構築された形状は部分的だったため、比較は双方のデータが共に存在する箇所同士で行えず、片方の時代では形状が計測できていた場合でも空白となる部分が発生する場合があった。特に竜脚類足跡については2007年のデータは一部分のみしか構築できなかったため、例外的に1997年作成のレプリカの形状と2015年作





図7 鳥脚類足跡化石（2019年撮影）



図8 2004年作成の鳥脚類足跡レプリカ



図9 2009年に撮影されていた鳥脚類足跡の写真の一例

表1 構築された三次元形状が示す年代と、構築に使用した元情報

形状の年代	竜脚類足跡	鳥脚類足跡
1997年の形状	レプリカを今回写真撮影 (71枚)	
2004年の形状		レプリカを今回写真撮影 (160枚)
2007年の形状	現物のデジタル写真残存 (4枚)	
2009年の形状		現物のデジタル写真残存 (3枚)
2014年の形状		現物のデジタル写真残存 (6枚)
2015年の形状	レプリカを今回写真撮影 (77枚)	
2019年の形状	現物を今回写真撮影 (230枚)	現物を今回写真撮影 (137枚)

成のレプリカの形状とを直接比較することも行った。使用する写真の枚数やソフトの違いによる精度の違いを、過去の文献<sup>7)</sup>に基づいて計算した結果、2枚の写真から TORESYS 3D<sup>®</sup> で構築した場合の理論上の誤差は0.79 mm、5枚以上の写真から構築した場合の理論上の誤差は何枚の写真から構築しようが0.64 mm、さらに同条件で PhotoScan で構築した場合の誤差は1.03 mm と計算された。このことから、5 mm 以上の違いが検知された場合に「変異が生じた」と認識して議論を組み立てれば、写真枚数やソフトの違いは議論には影響を与えないと判断される。

竜脚類足跡に関しては、1997年と2015年の形状を比較した結果を図10に、2015年と2019年の形状を比較した結果を図11に示し、また2007年のデータを構築できた範囲について1997年と2007年とを比較した結果を図12に、2007年と2015年とを比較した結果を図13に示す。1997年と2015年との間に5 mm 以上の変異が検知された箇所は計測範囲内で20754ピクセルだったのに対し、2015年と2019年との間では717ピクセルだった。また、1997年と2007年との間に5 mm 以上の変異が検知された箇所は、計測範囲内で10572ピクセル、2007年と2019年との間では2016ピクセルだった。

鳥脚類足跡に関しては、2004年と2009年の形状を比較した結果を図14に、2009年と2014年の形状を比較した結果を図15に、2014年と2019年の形状を比較した結果を図16にそれぞれ示す。2004年と2009年との間に5 mm 以上の変異が認められた箇所は38910ピクセル、2009年と2014年との間では48751ピクセル、そして2014年と2019年との間では65911ピクセルの、それぞれ変異箇所がカウントされた。以上の結果に基づき、鳥脚類の足跡化石に関して2019年の三次元形状に正対する位置から見たオルソ画像上に、各年代で5 mm 以上の変異が検知されたかされなかったかの変遷状況を色分けで表した図を図17に示す。

#### 4. 考察

それぞれのレプリカの形状を、型取りした時点での足跡化石の形状と仮定すると、図10に示される竜脚類足跡化石の計測範囲内では、1997年から2015年までは平均すると一年あたり1153ピクセルずつ5 mm 以上の変異を示す領域が増えたことになり、これは同条件での2015年から2019年までの平均179.25ピクセルを遥かに上回る。また、2007年の形状が構築できた図12に示される計測範囲内では、1997年から2007年までは平均1057.2ピクセル、2007年から2015年までは平均252ピクセルと、これも古い時期の方が上回る結果となった。つまり竜脚類足跡化石は発見直後に急速に劣化が進行し、時間とともに徐々に劣化速度が遅くなってきている状況と解釈される。

一方の鳥脚類足跡化石に関しては、2004年～2009年、2009年～2014年、2014年～2019年のい

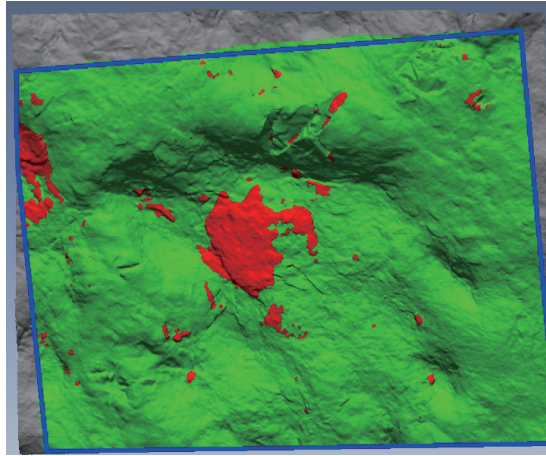


図10 1997年と2015年の竜脚類足跡の形状比較  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。  
青色線で示された範囲が、ピクセル数のカウント箇所。

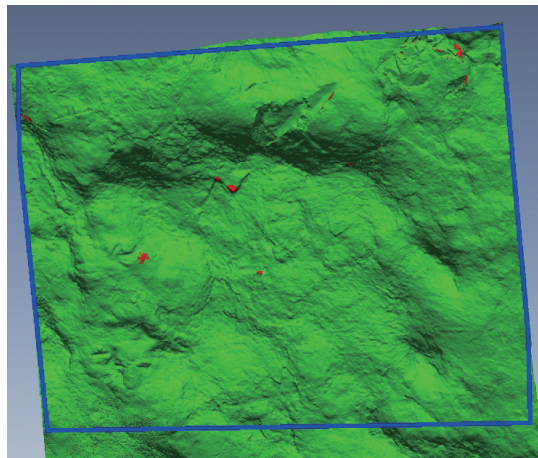


図11 2015年と2019年の竜脚類足跡の形状比較  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。  
青色線で示された範囲が、ピクセル数のカウント箇所。

ずれの期間においても、比較的広範囲で5 mm 以上の変異、すなわち化石面の風化が検知されたことになるが、それぞれのスパンを5年ごとと同様と考えれば、時間とともに劣化速度は徐々に増してきている傾向が見られたことになる。このことから、特に鳥脚類の足跡化石についてはこの先のさらなる劣化を軽減するための何らかの対策が望まれる。

竜脚類足跡と鳥脚類足跡とで発見後の経年変化パターンが異なっている原因として、竜脚類足跡は道路工事に伴う発見後には露頭面の存在状態に大きな変化なく推移してきているのに対して、鳥脚類足跡が存在する化石面はその後一段掘り下げた面に存在することが関係しているのではないかと考えられる(図2)。つまり、化石面は一般には発見直後に起きる急激な乾燥に伴って当初は劣化が進行しやすいと考えられるが、十分に乾燥が進んだ後には、その地層面の



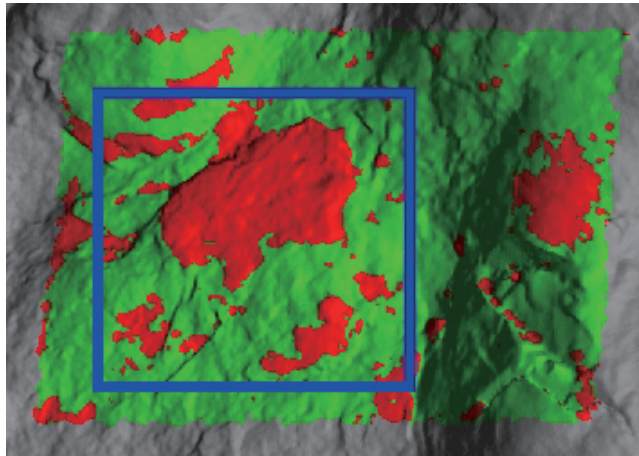


図12 1997年と2007年の竜脚類足跡の形状比較（2007年データがある部分のみ）  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。  
青色線で示された範囲が、ピクセル数のカウント箇所。

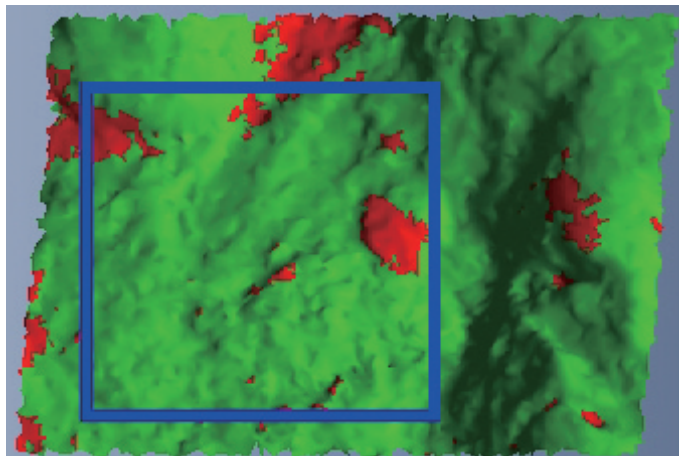


図13 2007年と2015年の竜脚類足跡の形状比較（2007年データがある部分のみ）  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。  
青色線で示された範囲が、ピクセル数のカウント箇所。

状態が安定していれば徐々に劣化速度は遅くなることが予想される。これに対して、後の発掘によって一段掘り下げられた鳥脚類足跡の存在する地層面では定常的な水分供給が認められ、このことから化石面の乾燥は収束せず、時間が経過しても劣化は進行し続けることが予想される。これに加えて豊富な水分の滞留によって、他の面に比べて掘り下げられた面には顕著な植生が認められ（図7）、もしも植生が劣化に寄与するのであればその繁茂は時間の経過とともに増していることから、むしろ劣化速度は増すことになるだろう。つまり、この先の鳥脚類の足跡化石のさらなる劣化を軽減するためには、現状の一段低い状態の化石面への水分供給条件を改善するなど、何らかの環境改善の方向性が要求されることになる。

さらに、鳥脚類足跡化石の中で各期間に劣化が検知された部位を比較すると（図17）、発見

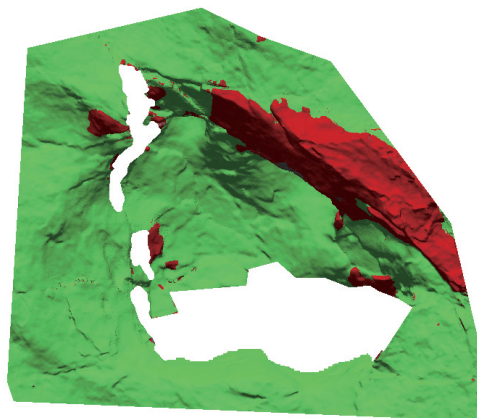


図14 2004年と2009年の鳥脚類足跡の形状比較  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。

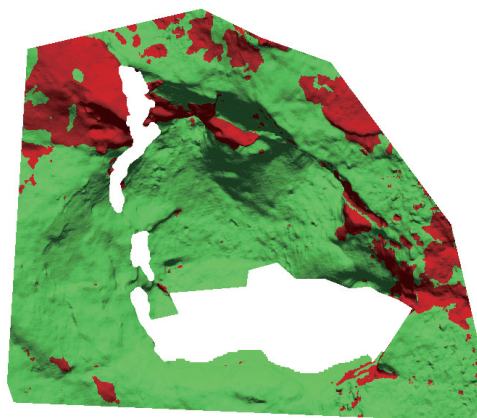


図15 2009年と2014年の鳥脚類足跡の形状比較  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。

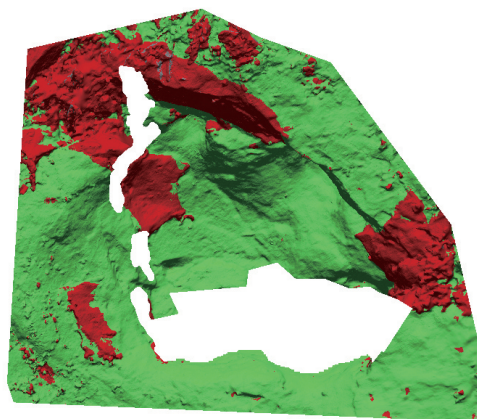


図16 2014年と2019年の鳥脚類足跡の形状比較  
赤色で示されている範囲で、5 mm 以上の変異を検知。

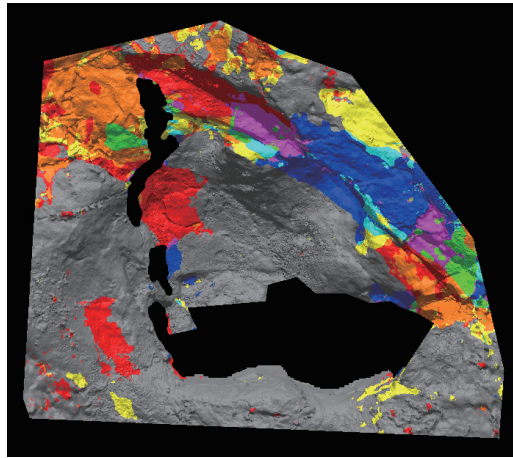


図17 時代ごとの鳥脚類の足跡化石の劣化パターン分布

色 (Color)	2004-2009	2009-2014	2014-2019
灰色 (grey)	×	×	×
赤 (red)	×	×	○
黄色 (yellow)	×	○	×
オレンジ (orange)	×	○	○
青 (blue)	○	×	×
ピンク (pink)	○	×	○
シアン (cyan)	○	○	×
緑 (green)	○	○	○
黒 (black)	対象外 (not measured)		

直後は右上部分の劣化が進行したがその後は収まる傾向が見られ、その後左上部分の劣化が始まって現在に至るまで継続しており、右下部分や一部の輪郭部分は発見以後継続して劣化が進行していると判断される。こうした部位ごとの経年変化の特徴は、露頭面における水の供給状況などに起因している可能性が考えられ、例えば劣化によって表層流の流路条件が変わるなど、劣化に関するさらに細かい検証を可能とするデータとなる可能性が期待される。こうしたデータの蓄積により、化石の保存を見通した場合の環境改善の具体的な方向性について、示唆的な情報が与えられることが期待される。

このように、過去の複数の時点の三次元形状を構築できれば、対象物の過去における経年変化についても議論が可能になると期待される。それは、文化財の現状を正確に理解し、今後の劣化を軽減する方法を検討する際にも有効に寄与する情報を与えることに繋がるだろう。

## 5. まとめ

富山市大山地域で発見された恐竜の足跡化石について、型取りによって過去に作成されていたレプリカや、過去に複数方向から撮影されていた写真に基づいて、過去の複数の時点での三次元形状を構築し、それぞれの時点の形状を比較することから過去における足跡化石の経年変



化について議論を行った。その結果、道路工事に伴って発見された大露頭面に位置する竜脚類足跡については、発見直後に劣化が進み、その後徐々に劣化速度が遅くなっている傾向が認められた。一方、後年に一段掘り下げられた面で発見された鳥脚類足跡については、むしろ発見後徐々に劣化速度が増してきている傾向が認められた。このようにして過去の劣化速度の変遷を知ることができれば、今後の保存方法を検討する際にも有効に寄与できるだろう。

**謝辞** 大山地域の露頭現地での計測に際して、富山大学の佐野晋一氏にご協力いただいた。記して御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Masuda, T., Kuchitsu, N., Yamada, Y., and Ikeuchi, K.: Aged Shape Deterioration Visualization Based upon 3D Shape Measurement -Observing Brick Wall in Ayutthaya relic-, Conservation of Monuments in Thailand III, 29-34, The Fine Arts Department of Thailand, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan (2004)
- 2) 朽津信明・森井順之・酒井修二・運天弘樹：多視点ステレオ技術に基づく磨崖和霊石地蔵の劣化状況評価, 保存科学, 57, 1-9 (2018)
- 3) 二神葉子：尾高鮮之助撮影パーミヤーン西大仏の写真による三次元空間画像の作成, 保存科学, 60, 131-144 (2022)
- 4) 平澤聡・柏木健司・藤田将人：富山県に分布する上部ジュラ～下部白亜系手取層群の海成層と恐竜足跡化石, 地質学雑誌, 116, 103-121 (2010)
- 5) 酒井修二・伊藤康一・青木孝文・増田智仁・運天弘樹：多視点ステレオのための位相限定相関法に基づく画像マッチングの高精度化, 情報処理学会報告, 186, 1-8 (2013)
- 6) Besl, P. J. and McKay, N. D., A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, pp. 239-256 (1992)
- 7) 酒井修二：高精度ウインドウマッチングに基づく多視点3次元復元に関する研究, 東北大学情報科学研究科博士学位論文 (2015)

キーワード：三次元計測 (three-dimensional measurement)；レプリカ (replica)；風化速度 (weathering rate)；過去の形状 (past shape)；古写真 (old photographs)

## Inspection of the Aging of the Dinosaur Footprints Found in the Oyama District, Toyama City

KUCHITSU Nobuaki, SAKAI Shuji\* and FUJITA Masato\*\*

Past degradation of the footprint fossils of dinosaurs in the Oyama district in Toyama City is discussed by constructing and comparing the past 3D shapes of the fossils. The 3D shapes of the fossils that appeared in different times in the past were estimated based on the replicas made by taking a mold in the past and the old photographs taken from various directions in different occasions in the past. The change in the degradation rate in the past was argued by comparing the established 3D shapes in the past. As a result, it was established in the present study that soon after the original outcrop was found by a road construction, a *sauropod* footprint located in this outcrop started to degrade, but that the rate is getting smaller as time passes. On the other hand, the degradation of the *ornithopod* footprint, newly found on the one-step lower outcrop in an additional excavation, seems to be getting larger. This study, an examination of the tendency of the degradation fluctuation in the past, will contribute to the discussion of how to conserve such fossils.

---

\*Toppan Printing Co., Ltd.

\*\*Toyama Science Museum