

# フォトグラメトリーと 3D プリンターを利用した露頭モデル展示物の制作と評価

柴田健一郎 \*

## Development and evaluation of outcrop model exhibits using photogrammetry and 3D printing

Kenichiro SHIBATA \*

キーワード: フォトグラメトリー, 3D プリンター, 展示物開発, 地層, 閲覧行動

Key words: **photogrammetry, 3D printer, development of exhibit, outcrop, viewing behavior**

本研究では、複数視点から撮影した写真をもとに三次元デジタルモデルを生成するフォトグラメトリーを用いて、3D デジタル露頭モデル 8 点を構築し、3D コンテンツ公開・共有プラットフォームにて公開した。さらに、そのうち 6 点を 3D プリンターで出力し、露頭模型として博物館展示物を開発した。これらの展示物は、地層の積み重なり様式を立体的に理解しやすい点や、大規模な露頭を縮小して展示できる点が利点である。露頭模型および 3D デジタル露頭モデルを閲覧するための QR コードを、横須賀市自然・人文博物館のトピックス展示で展示した。聞き取り調査の結果、露頭模型に関心を示す見学者は多かったが、3D デジタル露頭モデルへの関心は限定的であった。また、本展示ブースに立ち止まる来館者の割合や見学時間は、他の展示ブースのそれらと比べて多くなかった。今後は、来館者が 3D デジタル露頭モデルをより容易に閲覧できる装置の整備や、地層の形成過程などを探究できる仕組みの構築といった改良が求められる。

The present study constructed eight 3D digital outcrop models using photogrammetry, a technique that generates three-dimensional digital models from photographs taken from multiple viewpoints, and published them on a 3D content sharing platform. Furthermore, six of these models were produced using a 3D printer, and developed as physical outcrop models for museum exhibits. These exhibits offer advantages such as allowing visitors to understand the three-dimensional structures of geological strata easily, and enabling the display of large-scale outcrops at reduced scale in the exhibition hall. Both the physical outcrop models and QR codes for accessing the 3D digital outcrop models were presented in a special exhibition at the Yokosuka City Museum. According to interviews, many visitors showed interest in the physical outcrop models, while interest in the 3D digital outcrop models was limited. In addition, the proportion of visitors who stopped at this exhibition and the amount of time they spent viewing were lower than those at other exhibitions. In the future, improvements such as providing devices that allow visitors to access the 3D digital outcrop models easily, as well as developing systems that facilitate inquiry-based learning about geological processes, are required.

---

\* 横須賀市自然・人文博物館 〒 238-0016 神奈川県横須賀市深田台 95

原稿受付 2025 年 11 月 29 日 横須賀市博物館業績 第 806 号

Corresponding author: Kenichiro SHIBATA, kenichirou-shibata@city.yokosuka.kanagawa.jp

## はじめに

地層の積み重なり様式を理解するためには、地層の縞模様を線構造や面構造として認識し、立体的に把握することが必要である。しかし、児童・生徒や一般の方が地層を学習する場合、野外で地層を実際に観察する場合であっても、地層の積み重なり様式を立体的に把握することが困難な場合が多く見受けられる。博物館における地層の展示は、これまで、地質図や露頭写真のパネル展示、地層のはぎ取り標本(山下ほか, 2017)や模型、レプリカ(及川, 2012)の展示などが主体であった。これらのうち、地層の剥ぎ取り標本は固結した地層では作成が難しく、平面的な展示となるため地層を立体的に把握させることが困難と考えられる。また、地層のレプリカや模型は、地層の特徴を来館者に立体的に伝えることができるが、型取りや造形の技術と費用を必要とすること、大規模な露頭は博物館の展示室に収めることができないなどの課題があった。一般的にこれらの地層の展示は静的、受動的な展示物であるため、来館者を誘引し、学習を促すことが難しいと考えられる。この研究ではこれらの課題を解決するため、地層の露頭写真とフォトグラメトリーに基づいて3Dデジタル露頭モデルを構築し、それらを3Dプリンターで出力することにより、デジタル露頭モデルならびに露頭模型を用いた博物館展示物を開発した。さらにその展示物を用いて横須賀市自然・人文博物館で展示会を開催し、見学者の閲覧行動を調査した。本稿では、開発した展示物とその利点・課題について、見学者の閲覧行動調査に基づいて述べる。

## 展示物開発

### 1) 露頭の撮影

3D デジタル露頭モデル構築のため、三浦半島に露出し、堆積構造や地質構造が観察しやすい露頭8点を選定した(第1図, 第1表)。横須賀市荒崎の中新-鮮新統三浦層群三崎層の凝灰岩鍵層 So を含むスコリア凝灰岩泥岩互層(第1図A)(柴田ほか, 2024)、横須賀市観音崎の中新-鮮新統三浦層群逗子層のカレントリップル(第1図B)と引きずりを伴う逆断層(第1図G)、三浦市三崎町小網代油壺の鮮新統三浦層群初声層のトラフ型斜交層理(第1図C)、三浦市城ヶ島の三崎層のスランプ構造(第1図D)(Ogawa and Mori, 2021)と火炎状構造(第1図

E)、三浦市海外町の三崎層のタービダイト(第1図F)、三浦市三崎町諸磯字黒鯛込の三崎層のデュープレックス構造(第1図H)(Yamamoto *et al.*, 2009)である。コンパクトデジタルカメラ(OLYMPUS Tough TG-5)、ミラーレスカメラ(Nikon, Z-50)、またはドローン(DJI JAPAN, DJI AIR2S)を用いて、各露頭で37~94枚の写真撮影した。露頭は複数視点から撮影するとともに、撮影範囲が複数の写真でオーバーラップするように撮影した。撮影対象とした露頭の大きさは、最小で1.9×0.9 m、最大で60.9 m×16.7 mである。

### 2) 3D デジタル露頭モデルの作成と公開

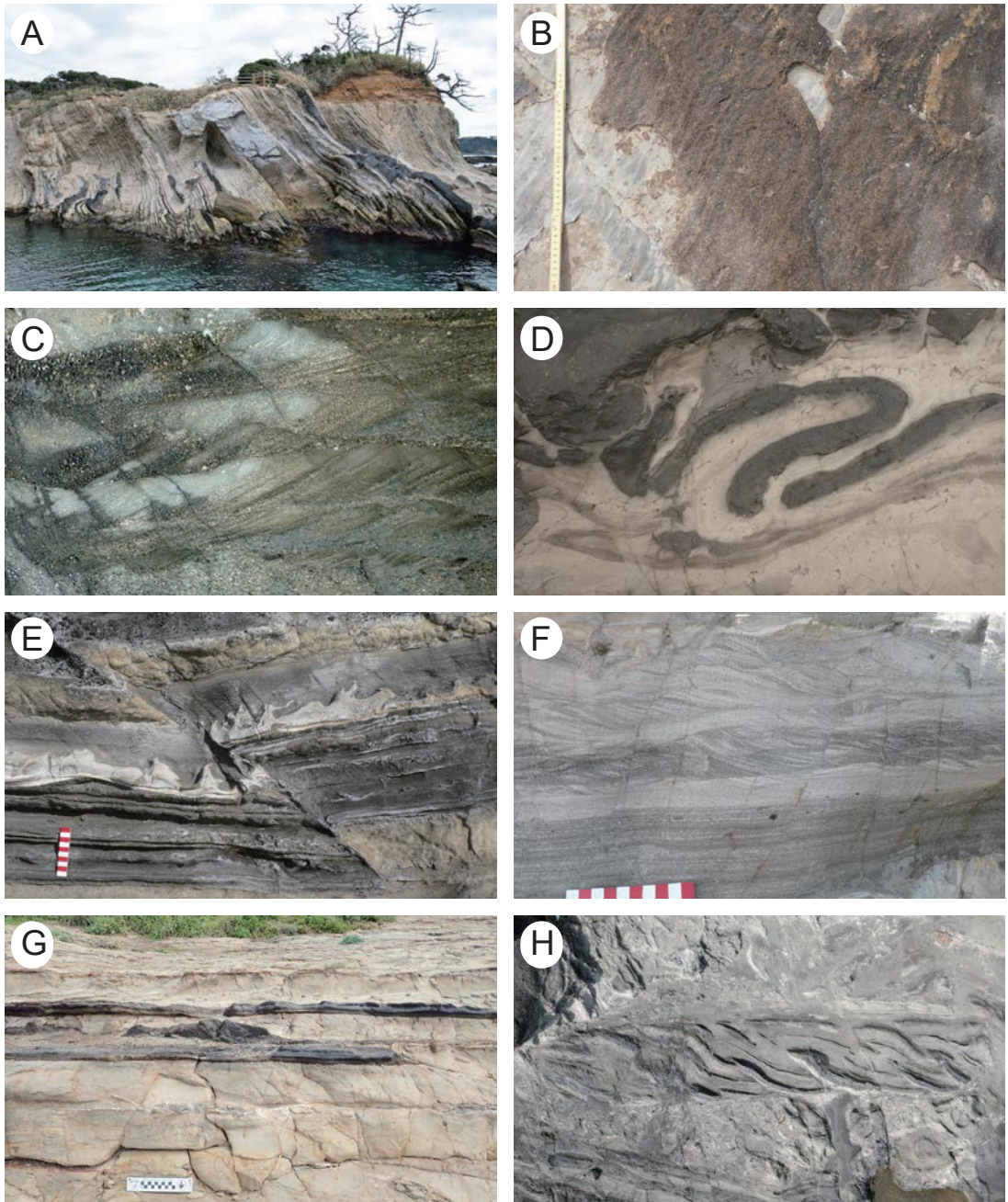
3D デジタル露頭モデルの作成は柴田ほか(2024)と同様の手法で、フォトグラメトリーソフトウェア Agisoft Metashape Professional v1.5.4 を使用した。露頭写真をソフトウェアに読み込み、各写真のカメラ位置を解析させて三次元空間上の点群であるポイントクラウドを構築した(第2図A)。ポイントクラウド上で復元対象とする範囲を設定し、頂点、辺、面の集合であるポリゴンメッシュモデルを構築した。そのモデルに写真データであるテクスチャを張り付けて3D デジタル露頭モデルとした。構築した3D デジタル露頭モデル8点は3D コンテンツの公開・共有プラットフォームである Sketchfab にアップロードした(<https://sketchfab.com/kshibata/models>)(第2図B)。

### 3) 露頭モデルの造形

構築した3D デジタル露頭モデル8点のうち、6点をFFF/FDM方式(熱溶解積層方式)の3Dプリンター(QIDI TECH, X-MAX II)で造形して露頭模型とした(第2図C)。フィラメントはPLA(ポリ乳酸)樹脂を用いた。モデルは展示に適するように原寸大で、または縮小して出力した(第1表)。3Dプリンターで造形可能な物体のサイズや形状には制限があるため3DCG制作アプリケーションである Blender で3Dモデルの一部を切り出して出力した。また、一部のモデルは2分割して造形した。造形したモデルは水性塗料で着色した(第2図D)。

### 4) トピックス展示の開催

2025年4月26日(土)から7月6日(日)にトピックス展示「三浦半島のきれいな地層~堆積構造と地質構造~」を横須賀市自然・人文博物館1階のトピックス展示コーナーで開催した(第3図A)。展示ケースは幅180 cm、奥行き100 cm、高さ120 cmである。三浦半島の地層に観察されるさまざまな堆積構造や



第1図 検討対象とした地層の露頭写真. A, スコリア凝灰岩泥岩互層. B, カレントリップル. C, トラフ型斜交層理. D, スランプ構造. E, 火炎状構造. F, タービダイト. G, 逆断層(引きずり). H, デュープレックス構造. 露頭の詳細は第1表を参照.

地質構造を紹介し、それらから理解される碎屑物の運搬や堆積過程、堆積後の未固結変形や地殻変動による変形などを紹介することを目的とした。この展示では、解説パネルに加え、3Dプリンターで出力

した露頭模型6点(第3図B~D)と、地層の剥ぎ取り標本1点(第3図E)を展示した。さらに、見学者が所持するモバイル端末を用い、3Dデジタル露頭モデルをSketchfab上で閲覧するためのQRコー

ドを掲示した(第3図F)。露頭模型, 3D デジタル露頭モデル, 剥ぎ取り標本の各展示物から学習させたい展示の意図については第2表に示した。また, それぞれの展示物にはマスコットキャラクター「すかぞう」の吹き出しを使って, 探究を促すコメントを掲示した(第3図B, C)。

## 展示物の評価

### 1) 方法

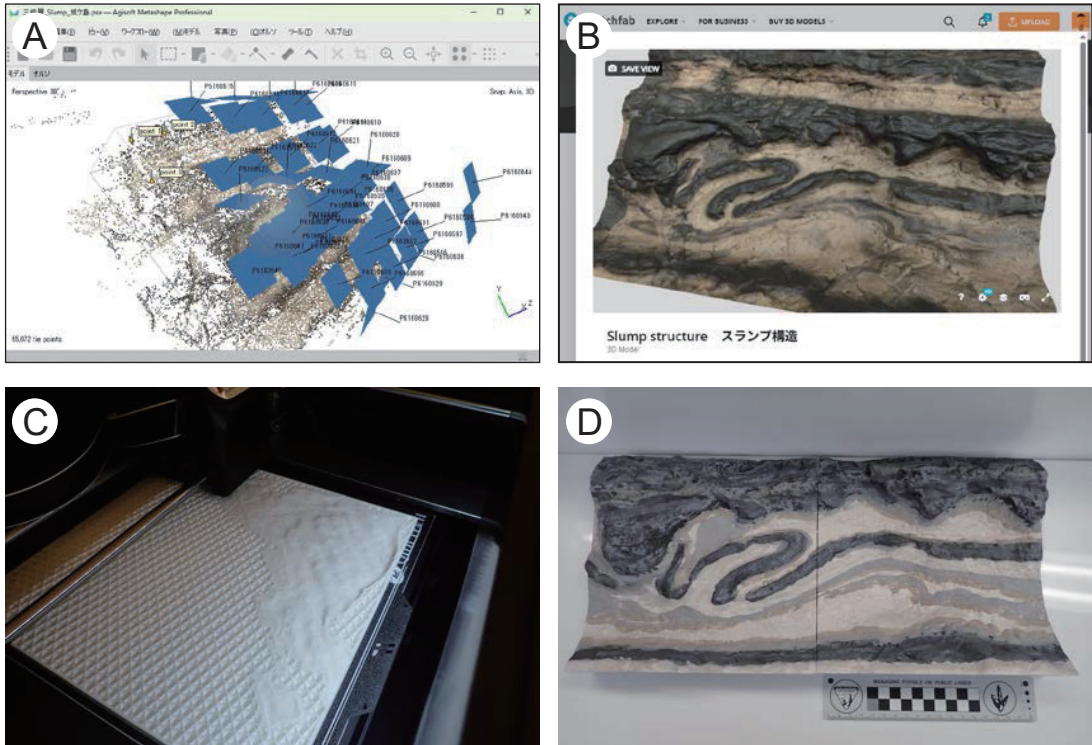
**閲覧行動調査** トピックス展示を開催した自然館1階で, 見学者閲覧行動調査を実施した。トピックス展示, ならびに比較対象として隣接する「海の生物」と「生命の歴史」の3つの展示ブースを調査対象とした(第4図A)。「海の生き物たち」には多数の展示コーナーがあるため, 「干潟の生きものたち」「砂浜の生きものたち」「波打ちわの生きものたち」をまとめて1つの展示ブースとして調査対象とした。「海の生きものたち」は各環境で観察される軟体動物, 甲殻類, 棘皮動物などの標本を展示し(第4図B), 展示ケースは幅480 cm, 奥行き80 cm, 高さ60 cmである。「生命の歴史」は, 三葉虫やアンモナイト, 始祖鳥, ビカリヤなど地質時代の化石を展示し(第4図C), ウォールケースは幅580 cm, 奥行き80 cm, 高さ120 cmである。2025年4月29日(火・祝)の10:00から16:00にトピックス展示のみを, 6月8日(日)の10:00から16:00, ならびに6月14日(土)の13:00~16:00に3つすべての展示ブースを調査した。

それぞれの展示ブースを通過する見学者を被験者として行動を観察した。観察内容は, (1)被験者の年齢, (2)被験者が展示に2秒以上立ち止まったか, (3)立ち止まった場合は立ち止まった時間(秒), (4)立ち止まった場合はQRコードを通して3Dデジタル露頭モデルを閲覧したか, である。年齢は被験者の外見から12歳以下(乳児は除く), 13歳以上に区分し, 立ち止まった時間はストップウォッチで計測した。得られたデータから, 被験者全体に対する各展示ブースの「立ち止まり率」と「立ち止まり時間(中央値)」「立ち止まり時間(最大値)」を求めた。

**聞き取り調査** 閲覧行動調査において, トピックス展示に2秒以上立ち止まった被験者に対し, 任意で聞き取り調査を実施した。聞き取り調査では, トピックス展示の展示物のうち, 「解説パネル」, 「露頭模型」, 「剥ぎ取り標本」, 「3D デジタル露頭モデル(QR

第1表 検討対象とした地層の堆積構造/地質構造, 地質時代・地層名, 露頭の場所, 緯度経度, フォトグラトメトリでデジタル化した露頭の大きさ, 撮影枚数, 造形した露頭模型の縮尺。

堆積構造/地質構造	地質時代・地層名	場所	緯度経度	露頭の大きさ	撮影枚数	模型の大きさ	模型の縮尺
スコリア凝灰岩泥岩互層	中新一鮮新統三浦層群三崎層	横須賀市荒崎	35°11'39.2"N, 139°36'04.3"E	60.9×16.7 m	94	出力せず	-
カレントリップル	中新一鮮新統三浦層群逗子層	横須賀市観音崎	35°15'07.1"N, 139°44'36.5"E	1.9×0.9 m	37	23.5×23.0×2.6 cm	1/1
トフラ型斜交層理	鮮新統三浦層群初声層	三浦市油壺	35°09'46.4"N, 139°36'42.5"E	2.6×1.1 m	52	39.0×17.0×9.0 cm	約1/5
スランブ構造	中新一鮮新統三浦層群三崎層	三浦市城ヶ島	35°08'08.5"N, 139°36'41.0"E	1.9×2.2 m	50	41.0×21.0×5.5 cm	約1/5
火炎状構造	中新一鮮新統三浦層群三崎層	三浦市城ヶ島	35°08'03.6"N, 139°36'36.1"E	2.0×0.8 m	57	50.5×21.5×5.5 cm	約1/2
タービダイト	中新一鮮新統三浦層群三崎層	三浦市海外町	35°08'47.2"N, 139°36'53.9"E	0.6×0.5×0.4 m	53	出力せず	-
逆断層(引きずり)	中新一鮮新統三浦層群逗子層	横須賀市観音崎	35°15'06.1"N, 139°44'35.7"E	2.9×1.7 m	77	36.0×22.0×3.0 cm	約1/8
デューブレイクス構造	中新一鮮新統三浦層群三崎層	三浦市黒鯛込	35°09'01.1"N, 139°36'48.7"E	8.9×3.1 m	71	50.5×18.5×6.5 cm	約1/16



第2図 A, 写真のアラインメントによって算出されたカメラの位置 (青色の長方形) と生成されたポイントクラウド, B, Sketchfab にアップロードした 3D デジタル露頭モデル, C, 3D プリンターで造形中の露頭模型, D, 着色した露頭模型。A, B, D はスランプ構造, C はカレントリップル。

コード)」のいずれに興味を持ったか、また展示の所感を尋ねた。さらに、2025年5月10日(土)にトピックス展示の解説を学芸員が行った。この展示解説の参加者にも、同様の聞き取り調査を実施した。

## 2) 結果

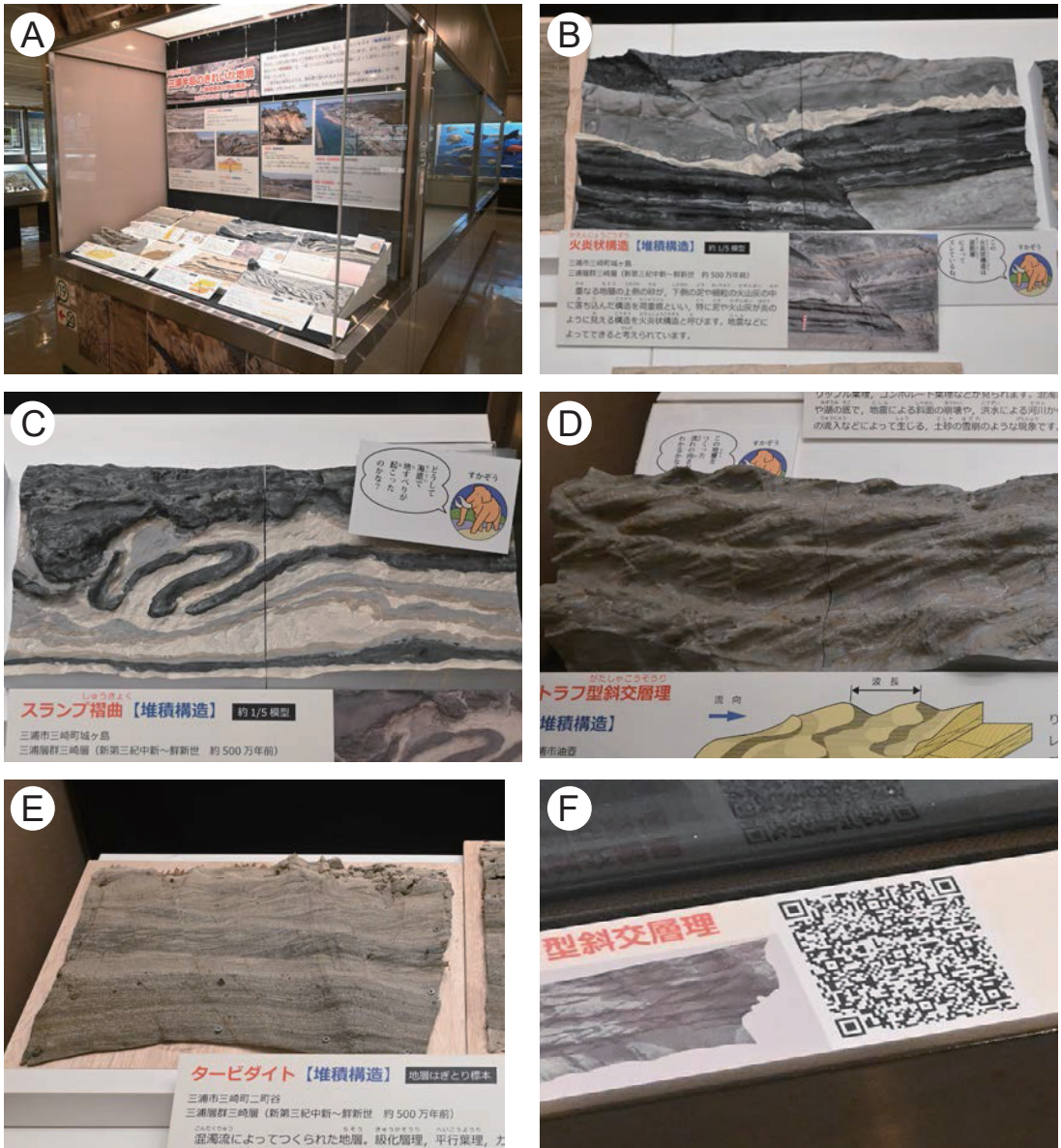
**閲覧行動調査** トピックス展示では208人(0～12歳59人, 13歳以上144人, 年齢不明5人)、「生命の歴史」と「海の生き物たち」では99人(0～12歳24人, 13歳以上70人, 年齢不明5人)の被験者を調査した。年齢不明の5人を除外すると、0～12歳と13歳以上のいずれも「生命の歴史」と「海の生き物たち」で「立ち止まり率」と「立ち止まり時間(中央値)」が高く、トピックス展示でのそれらは低い傾向が見られた(第5図)。「立ち止まり時間(最大値)」は0～12歳でトピックス展示が最も高く、13歳以上で「生命の歴史」と「海の生き物たち」が高かった(第5図)。被験者全体として「立ち止まり時間(最大値)」はいずれの展示でも大きな差は認められなかった。QRコードをモバイル端末でスキャンして3Dデジタル露頭モデルの開

覧を試みた被験者は2人だったが、回線状況が悪いため閲覧できなかった。

**聞き取り調査** 閲覧行動調査と展示解説において、それぞれ18人の見学者に聞き取り調査を行った。いずれの調査でも「地層の解説パネル」と「露頭模型」に興味を持った割合が高く、次いで地層の剥ぎ取り標本の割合が高かった。それらと比較してQRコードを用いた3Dデジタル露頭モデルに興味を持った見学者は少なかった(第6図)。聞き取り調査による所感では、展示物に好意的な意見が4件、否定的または展示の不備を述べたものが3件、それ以外のコメントが2件寄せられた(第3表)。

## 3) 考察

「立ち止まり率」は、展示物の前で被験者が立ち止まって閲覧した割合を示す指標であり、展示物に対する「誘引度」を表す。一方、「立ち止まり時間」は展示物の前での閲覧時間の長さを意味し、「魅了度」と解釈できる(坪山・佐藤, 1998; 柴田, 2023)。本稿では、「立ち止まり時間(中央値)」を被験者全体の展示に対する魅了度の中央値、すなわち「中央

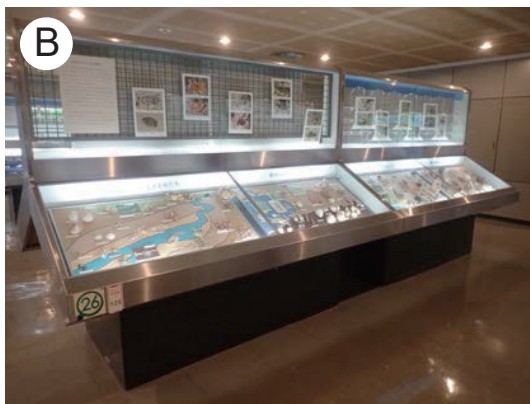
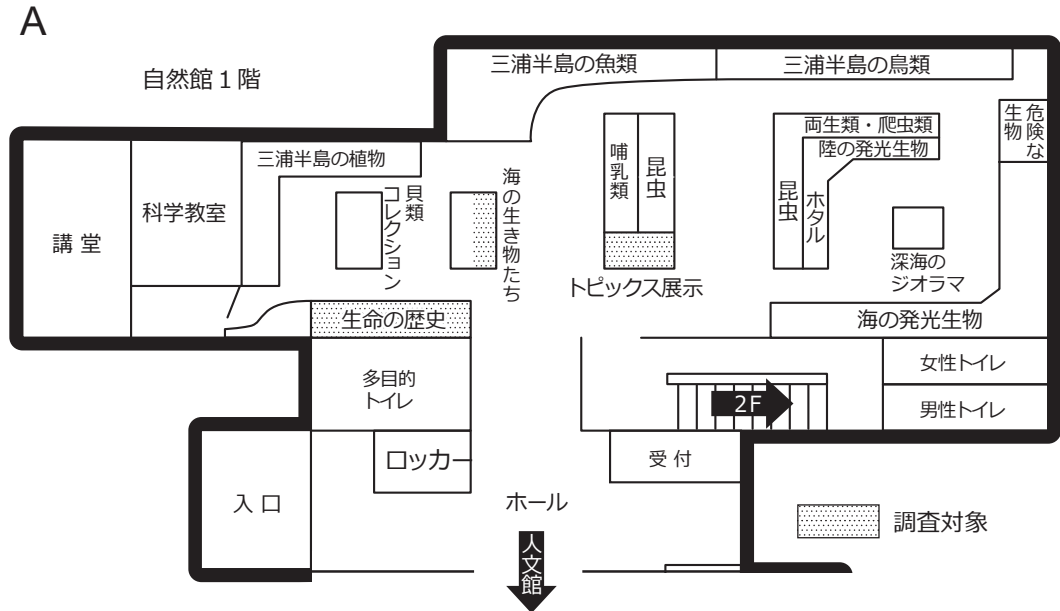


第3図 トピックス展示「三浦半島のきれいな地層～堆積構造と地質構造～」。A, トピックス展示外観。B, 露頭模型「火山状構造」。C, 露頭模型「スランプ褶曲」。D, 露頭模型「トラフ型斜交層理」。E, 地層の剥ぎ取り標本「タービダイト」。F, 3D デジタル露頭モデルを閲覧するためのQRコード。

魅了度」と定義し、「立ち止まり時間(最大値)」をその展示に最も興味を示した被験者の魅了度である「最大魅了度」と定義する。

今回実施したトピックス展示では、他の2つの展示と比較して「誘引度」および「中央魅了度」が高くなかった(第5図)。その要因として、トピックス展示の展示ケースがほかの展示よりも小さかった

こと、実物資料が少なかったこと、大型資料が展示されていなかったことなどが考えられる。一方で、「最大魅了度」はいずれの展示においても同程度であった。このことは、「誘引度」が低い展示であっても、強い関心を抱いた来館者は長時間閲覧する傾向があることを示唆している。また、来館者が自身のモバイル端末で3D デジタル露頭モデルを閲覧し



第 4 図 A, 横須賀市自然・人文博物館, 自然館 1 階の平面図。B, 「生命の歴史」, C, 「海の生き物」。

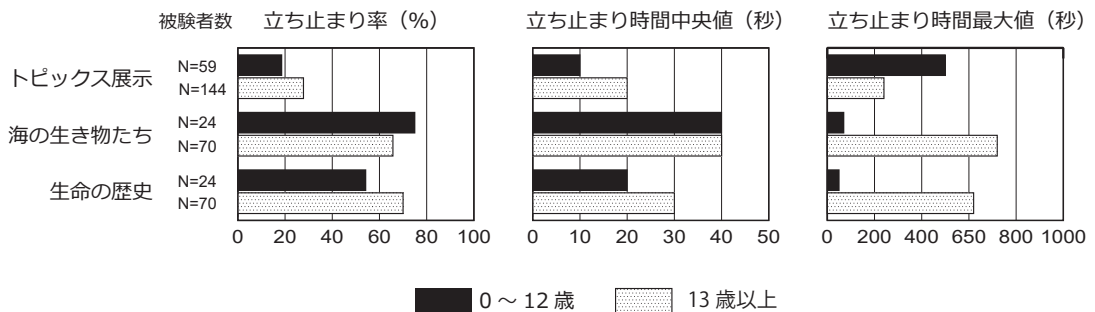
た事例は少なかった。これは、来館者自身の端末で通信費用を負担しながらデジタルコンテンツを利用させることの困難さを示していると考えられる。比較として、化石の 3D モデルを備え付けのタブレット端末で閲覧可能とした特別展示「足跡化石から探る太古の世界」では、タブレット端末による展示の誘引度および魅了度が、他の解説パネルや展示資料に比べ著しく高い値を示す結果が得られている(柴田, 2024)。

聞き取り調査は、展示解説に参加した来館者およびトピックス展示に立ち止まった被験者を対象に実

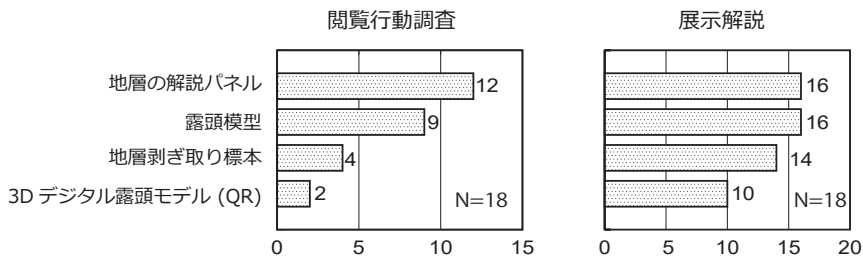
施したため、調査対象者はもともと地層に関心を持つ層に偏っていたと考えられる。したがって、「地層の解説パネル」に興味を示した被験者の割合が高かったと解釈できる。露頭模型に対する関心が高かった理由としては、立体的に地層の積み重なり様式を把握できる点、大規模な露頭を縮小スケールで観察できる点、室内にしながら野外地層観察を疑似体験できる点などが挙げられる。また、次いで関心が高かった地層の剥ぎ取り標本については、実物の地層を展示室で直接観察できることが、見学者の興味を惹きつける主要因であると考えられる。一

第2表 トピックス展示の展示資料における展示の意図。

展示物	展示の意図
スコリア凝灰岩泥岩互層 (3Dデジタル露頭モデル)	地層の空間的な広がりや積み重なりを理解させる。
カレントリップル (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	一方向流によって水底にベッドフォームがつくられることを理解させる。
トラフ型斜交層理 (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	一方向流による堆積構造を理解させ、斜交層理の傾きから古流向を計測させる。
タービダイト (3Dデジタル露頭モデル, 剥ぎ取り標本)	一方向流による堆積構造を直交する2つの断面から理解させる。混濁流によって土砂が深い水底へ運搬されて堆積し、タービダイトがつくられることを理解させる。
スランブ構造 (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	海底地すべりによって地層が変形することを理解させ、海底地すべりが起こる理由を考えさせる。
火炎状構造 (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	未固結の地層が変形する現象を理解させ、その理由を考えさせる。逆断層による地層の食い違いを理解させる。
逆断層(引きずり) (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	逆断層による地層の食い違いを理解させる。引きずりの様子から断層の運動方向を推定させる。
デュブレックス構造 (3Dデジタル露頭モデル, 露頭模型)	断層に複雑に変形した地層があることを理解させ、複雑に変形した理由を考えさせる。



第5図 展示閲覧行動調査の結果。年齢不明の被験者のデータは除外した。



第6図 聞き取り調査による見学者が興味を持った展示物。

第3表 聞き取り調査における展示への所感やコメント。

- 
- ・全体的におもしろかった。
  - ・露頭模型は児童に触らせることができるので魅力的。(教員)
  - ・模型がよかった。
  - ・地元の地層が展示されていて興味を持った。
  - ・QRコードによる3Dデジタル露頭モデルは、電波が悪くて閲覧できなかった。
  - ・QRコードの掲示に気づいたが、読み込もうとは思わなかった。
  - ・地層の専門用語が多くて難しい。
  - ・授業で今後学習する内容なので見学した。
  - ・マスコットキャラクターによるクイズを考えている人がいた。
- 

方、QRコードを利用した3Dデジタル露頭モデルの閲覧は、利用者が極めて限定的であるという課題が残った。より多くの見学者に利用してもらうためには、QRコードや解説パネルの視認性を向上させることや、備え付け端末で容易に露頭モデルを閲覧可能とする工夫が必要である。聞き取り調査からは、マスコットキャラクターの吹き出しによって、一部の見学者に露頭模型から読み取れる事象について探究を促すことができたと考えられる(第3表)。3Dデジタル露頭モデルについても、地層の積み重なり様式の理解や、地層の形成過程を推定する探究的活動の仕組みを導入し、知的好奇心を刺激する工夫が求められる。

### おわりに

本稿では、フォトグラメトリーを用いて3Dデジタル露頭モデルを作製し、そのモデルを3Dプリンターで出力して、それらを博物館に展示した事例を示した。展示物としての利点は、地層を立体的に把握できる点、および大規模な露頭をデジタル化することでの縮小出力やデジタル閲覧が可能となる点にある。展示解説に参加した教員からは、児童・生徒に実際に触れさせられることが魅力であり、授業でも活用したいという意見が得られた。さらに、聞き取り調査からは、今後の授業に向けて興味を持って展示を閲覧していたという回答も得られている。これらのことから、学校教育や移動博物館での活用も期待できる。一方、展示閲覧行動の調査結果からは、露頭模型や3Dデジタル露頭モデル展示を用いたトピックス展示の「誘引度」および「魅了度」が低いという課題が明らかになった。今後は、来館者が3Dデジタル露頭モデルをより容易に閲覧できる装置の整備や、地層を科学的に探究できる仕組みの

導入など、更なる工夫が必要である。

### 謝 辞

本研究はJSPS科研費21K01010の助成を受けたものです。

### 引用文献

- 及川輝樹 2012. 地質屋の視点. GSI 地質ニュース, 1(1): 26.
- Ogawa Y. and Mori S. 2021. Gravitational sliding or tectonic thrusting?: Examples and field recognition in the Miura-Boso subduction zone prism. *The Geological Society of America Special Paper*, (552): 197–232.
- 柴田健一郎 2023. 米国カリフォルニア科学アカデミーの展示の特徴と来館者の展示閲覧行動. 神奈川県博物館協会会報, (94): 15–21.
- 柴田健一郎 2024. 視線計測を用いた博物館見学者の展示閲覧行動調査: 特別展示「足跡化石から探る太古の世界」の例. 神奈川県博物館協会会報, (95): 35–43.
- 柴田健一郎・西田尚央・松川正樹 2024. ドローン撮影とフォトグラメトリーによる地質柱状図の作成. 横須賀市博研報(自然), (71): 1–12.
- 坪山幸王・佐藤信治 1998. 水族館の観覧空間における展示水槽・展示物に対する入館者の観覧行動に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, (511): 107–114.
- Yamamoto Y., Nidaira M., Ohta Y. and Ogawa Y. 2009. Formation of chaotic rock units during primary accretion processes: Examples from the Miura-Boso

accretionary complex, central Japan. *The Island Arc*,  
**18**: 496–512.

山下浩之・石浜佐栄子・笠間友博 2017. 神奈川県立  
生命の星・地球博物館における剥ぎ取り標本の展  
示. 神奈川博調査研報(自然), (15): 35–42.