

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

柴田健一郎 * ・ 西田尚央 ** ・ 松川正樹 **

Drone-based photogrammetry for the documentation of geologic columnar sections

Kenichiro SHIBATA*, Naohisa NISHIDA** and Masaki MATSUKAWA **

キーワード: ドローン, フォトグラメトリー, 地層, 地質柱状図, 三崎層, 平井賀層

Key words: **drone, photogrammetry, geologic strata, columnar section, Misaki Formation, Hiraiga Formation**

急崖や島など直接アクセスできない露頭では、ドローンを用いた地質調査法の活用が期待される。本研究では、ドローン写真とフォトグラメトリーに基づいて3-D デジタル露頭モデルを構築し、露頭モデルの観察と計測によって地質柱状図を作成して、それらを露頭観察に基づき描かれた地質柱状図と比較した。検討対象としたのは神奈川県横須賀市荒崎に露出する中新–鮮新統三浦層群三崎層と、岩手県下閉伊郡岩泉町茂師海岸の松島に露出する下部白亜系宮古層群平井賀層である。3-D デジタル露頭モデルに基づき作成された地質柱状図において、単層の数、泥岩層、砂岩層、礫岩層の区別、地層の厚さは概ね信頼できる結果が得られた。また、3-D デジタル露頭モデルには、平行層理やトラフ型斜交層理 (フォーセット層理)、ハンモック状斜交層理などの堆積構造が記録されることが示された。この方法によってアクセスが困難な露頭においても信頼できる地質柱状図が作成できると考えられる。

Geological investigation methods utilizing unmanned aerial vehicles (drones) are expected in cases where direct access to outcrops is limited, such as steep cliffs and offshore islands. This study used drone-based photogrammetry to construct three-dimensional (3-D) digital outcrop models, and to measure geological columnar sections (sedimentary logs). In addition, these sections were compared with those measured in the field. This study examined the Mio–Pliocene Misaki Formation of the Miura Group at Arasaki, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, and the Lower Cretaceous Hiraiga Formation of the Miyako Group at Matsushima Island, Moshi Coast, Iwaizumi Town, Iwate Prefecture, Japan. The results indicate that the numbers and thicknesses of beds, as well as the distinction of mudstones, sandstones, and conglomerates can be accurately derived from the sections obtained from the 3-D digital outcrop models. In addition, sedimentary structures such as parallel stratification, trough cross-stratification (foreset bedding), and hummocky cross-stratification were identified in the outcrop models. This method is indicated to be useful for measuring geological columnar sections at outcrops that are difficult to access.

* 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

** 東京学芸大学 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1

原稿受付 2023 年 12 月 1 日 横須賀市博物館業績 第 787 号

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

はじめに

地質柱状図は地層の岩相や堆積構造、産出化石、単層の厚さなどのデータを柱状に表したもので、ある地域の地質情報を視覚的に表現することができる。また、離れた場所に分布する地層の対比や、地層の空間的な広がりを表すためにも用いられ、堆積環境や古気候の変遷、堆積盆の発達過程などを解釈するための基礎資料となる。露頭の緻密な地質調査によって詳細な地質柱状図が描かれるが、切り立った崖や河川・海峡の対岸など直接アクセスできない場所に露出する地層の場合は、地質柱状図の作成が困難となる可能性が高い。一方、ドローン（小型無人機）による撮影と、複数視点から撮影された写真を基に撮影物の三次元的な形状を復元する SfM 多視点ステレオフォトグラメトリーを組み合わせた地質調査法が近年進展してきた (Chesley *et al.*, 2017)。この手法は通常はアクセスできない場所から露頭を撮影できること、構築した 3-D デジタル露頭モデルから地質情報を正確に計測できるなどの利点があり、主に大規模な露頭の三次元的な特徴を記録するために用いられている (Nesbit *et al.*, 2018; Bilmes *et al.*, 2019; Thomas *et al.*, 2021; Shahtakhtinskiy and Khan, 2022; 佐藤・成瀬, 2023)。3-D デジタル露頭モデルの観察と計測は、直接アクセスできない露頭の地質柱状図の作成にも応用が期待されるが、これまでこの手法を用いた地質柱状図の作成例は少なく (Nesbit *et al.*, 2018)、作成した柱状図の精度について十分に検討されていない。

筆者らは神奈川県横須賀市荒崎の中新-鮮新統三浦層群三崎層と岩手県下閉伊郡岩泉町茂師海岸の下部白亜系宮古層群平井賀層を検討対象として、ドローンによる撮影とフォトグラメトリーに基づく 3-D デジタル露頭モデルの観察と計測から地質柱状図を作成した。本研究ではそれらの地質柱状図と、従来の地質調査で得られた地質柱状図を比較し、3-D デジタル露頭モデルに基づいた地質柱状図の精度について検討した。

地質概略

1) 三浦層群三崎層

三崎層は三浦半島南部に分布する中新-鮮新統三浦層群の下部を構成する地層で、主に白色の泥岩と黒色のスコリア凝灰岩の互層からなる (江藤ほか,

1998; 柴田ほか, 2021)。泥岩層は一般的に半遠洋性泥岩 (Soh *et al.*, 1989; Stow *et al.*, 1998)、スコリア凝灰岩層はタービダイトまたは降下火砕堆積物 (Lee and Ogawa, 1998; Stow *et al.*, 1998) と解釈されている。三崎層には衝上断層やデュープレックス構造などの剪断構造、スランブ構造、注入構造などが発達するため、伊豆・小笠原弧の前弧域に堆積した後、フィリピン海プレートが本州弧に沈み込む際に形成された付加体であると解釈されている (Hanamura and Ogawa, 1993; Yamamoto *et al.*, 2000)。三崎層下部に挟まれる鍵層 Mk は $9.90 \pm 0.10 - 0.22$ Ma、三崎層上部に挟まれる鍵層 So は $4.7 \pm 0.18 - 0.16$ Ma の U-Pb 年代が見積もられている (柴田ほか, 2008)。

横須賀市荒崎の海岸には、泥岩とスコリア凝灰岩の互層からなる三崎層がよく露出し (Lee and Ogawa, 1998)、地層は東南東-南東に 40° から 60° 傾く。三崎層上部の鍵層 So, Mr, Bs が挟まれ (三梨・矢崎, 1968; 蟹江ほか, 1991; 森, 2019) (第 1 図)、三崎層上部の模式的なサクセッションとなっている。地層には層理面に平行な断層やデュープレックス構造、インプリケート衝上断層がよく発達するため (Hanamura and Ogawa, 1993)、これらの剪断構造による地層の繰り返しが顕著に認められる。森 (2019) は荒崎海岸の三崎層について厚さ 435 m の地質柱状図を描き、柱状図上に Ar-1 から Ar-177 の火砕岩層を示した。本研究では、森 (2019) の Ar-98 から Ar-106 にほぼ相当し、鍵層 So (Ar-104) を含む厚さ約 30 m の層準を検討対象とした。

2) 宮古層群平井賀層

平井賀層は陸中海岸に点在して分布する下部白亜系宮古層群の中部から上部を構成し、主に砂岩と泥岩の互層から構成され、一部では大型有孔虫であるオルビトリナを多量に含む生砕物砂岩を含む (花井ほか, 1968)。宮古層群が模式的に露出する岩手県田野畑地域の平井賀層の細粒砂岩にはハンモック状斜交層理が発達し、下部外浜から内側陸棚の環境が解釈されている (Fujino and Maeda, 2013)。宮古層群の年代はアンモナイト化石から Aptian-Albian とされ、平井賀層には Aptian-Albian 境界が含まれると考えられている (Obata and Matsukawa, 2018)。

岩泉町茂師海岸とその沖の小島には宮古層群田野畑層と平井賀層が露出し、平井賀層は主に松島、平島、長磯、大島などの小島に分布する (村井ほか, 1983) (第 2 図)。本研究で検討する松島はアンモナイト化石が多産し、宮古層群のアンモナイト

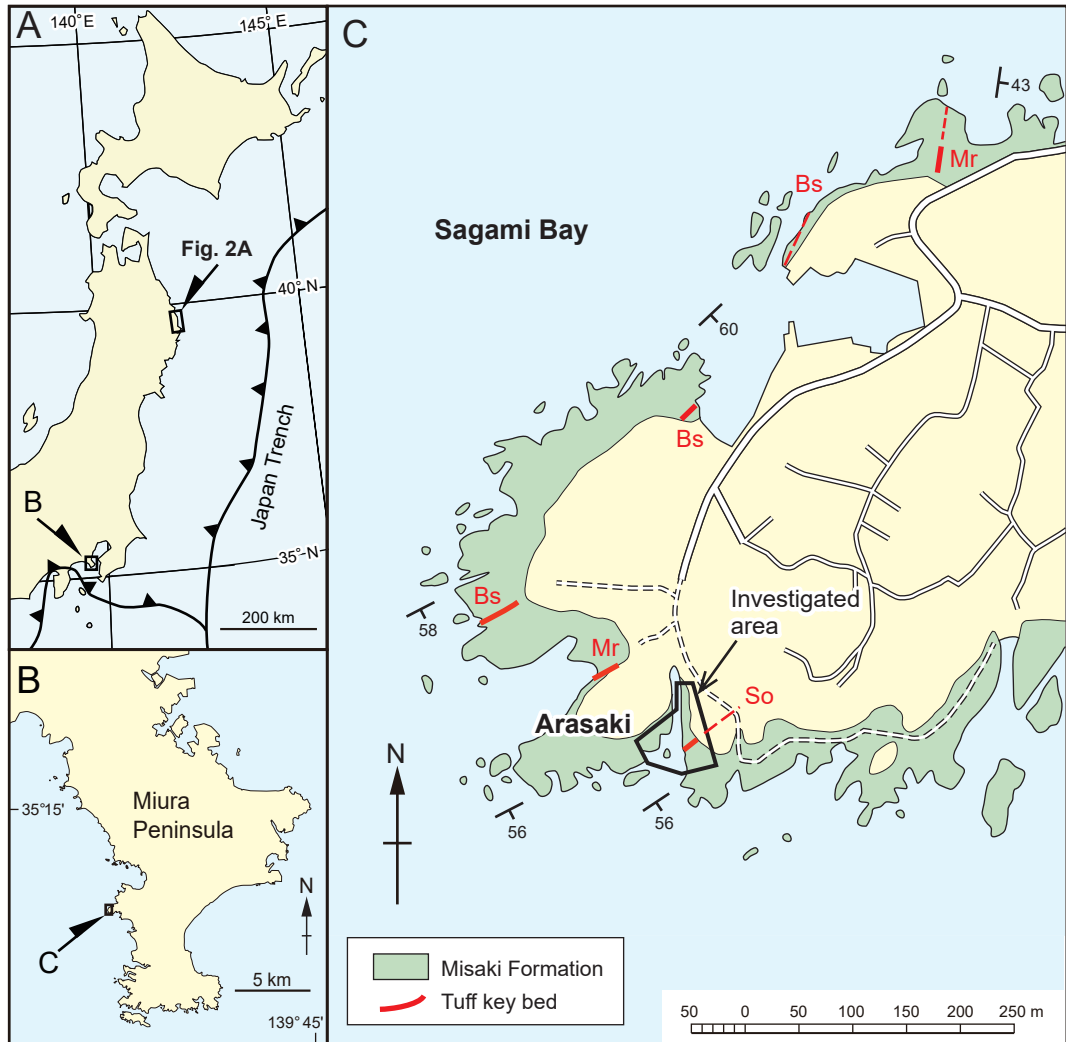


Fig. 1 A: Index map of the Miura Peninsula and the Rikuchu Coast. B: Index map of Arasaki, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture. C: Investigated area of the Misaki Formation at Arasaki. Tuff key beds are after Mori (2019).

第1図 A: 三浦半島と陸中海岸のインデックスマップ。B: 神奈川県横須賀市荒崎のインデックスマップ。C: 荒崎における三崎層の調査地。鍵層の位置は森(2019)に基づく。

生層序の模式的なサクセッションである (Obata and Matsukawa, 2018)。松島は海岸線から約 70 m 離れた周囲長約 250 m の小島で、渡船がなく、徒歩でのアクセスも困難であるため、2023 年現在では直接の露頭観察が非常に困難となっている。

方法

1) 露頭観察

3-D デジタル露頭モデルの構築に先立ち、検討対

象地域の露頭観察に基づく地質調査を行った。岩相、碎屑物の粒径、堆積構造、単層の厚さ、含有化石などを記録し、地質柱状図に示した。単層の厚さはメジャーとヤコブスタッフによって計測した。

2) ドローン撮影

ドローン(小型無人機)は DJI JAPAN 株式会社の DJI AIR2S を使用した。レンズの焦点距離は 35 mm フィルム換算で 22 mm である。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。構築する 3-D デ

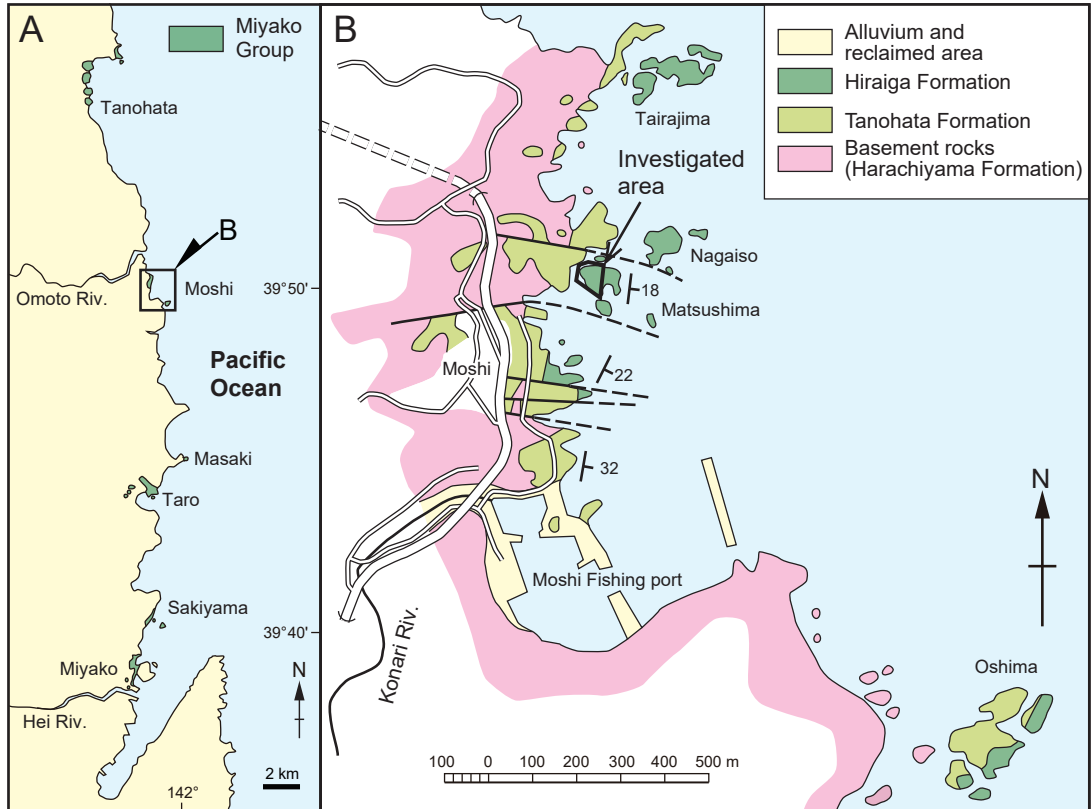


Fig. 2 A: Index map of the Moshi Coast, Iwaizumi Town, Iwate Prefecture. B: Investigated area of the Hiraiga Formation at Matsushima Island, off Moshi Coast. Geologic map was modified from Murai *et al.* (1983).

第2図 A: 岩手県岩泉町茂師海岸のインデックスマップ。B: 茂師海岸沖の松島における平井賀層の調査地。地質図は村井ほか(1983)を改変。

ジタル露頭モデル1点あたり、100枚以上の写真を撮影した。

3) 3-D デジタル露頭モデルの作成

撮影した写真から、フォトグラメトリソフトウェア Agisoft Metashape Professional v1.5.4 を使用して 3-D デジタル露頭モデルを作成した。まず、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。荒いポイントクラウド(第3図A)を構築したのちに復元対象とする範囲を設定し、高密度ポイントクラウドを構築した。次に、高密度ポイントクラウドから頂点、辺、面の集合であるポリゴンメッシュモデルを構築し、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 3-D デジタル露頭モデルとした(第3図B)。

4) 座標の設定

今回検討した露頭はいずれも海岸に位置し、波食

棚が発達する。構築したポイントクラウドまたは 3-D デジタル露頭モデル上で、標高がほぼ同じとみなせる波食棚上に任意の基準点を3点から5点設定し、それらの基準点にマーカーを配置した(第3図C)。基準点の緯度経度を Google map (<https://www.google.co.jp/maps>) で調べ、マーカーの緯度経度として入力した。基準点は波食棚上に設定したため、マーカーの標高は 1.0 m と仮定して入力した。

5) 地質柱状図の作成

構築した 3-D デジタル露頭モデルの観察と露頭写真から単層を識別し、岩相を推定した。露頭モデル上で単層の境界にマーカーを配置し、マーカー間の距離を単層の厚さとして測定した(第3図D)。一般的には、露頭面は地層の層理面に直交しないため、露頭モデル上で計測される地層の厚さは見かけの厚さとなる。したがって、真の厚さを見積もるために、露頭面と層理面のなす角度を用いて厚さを補正する

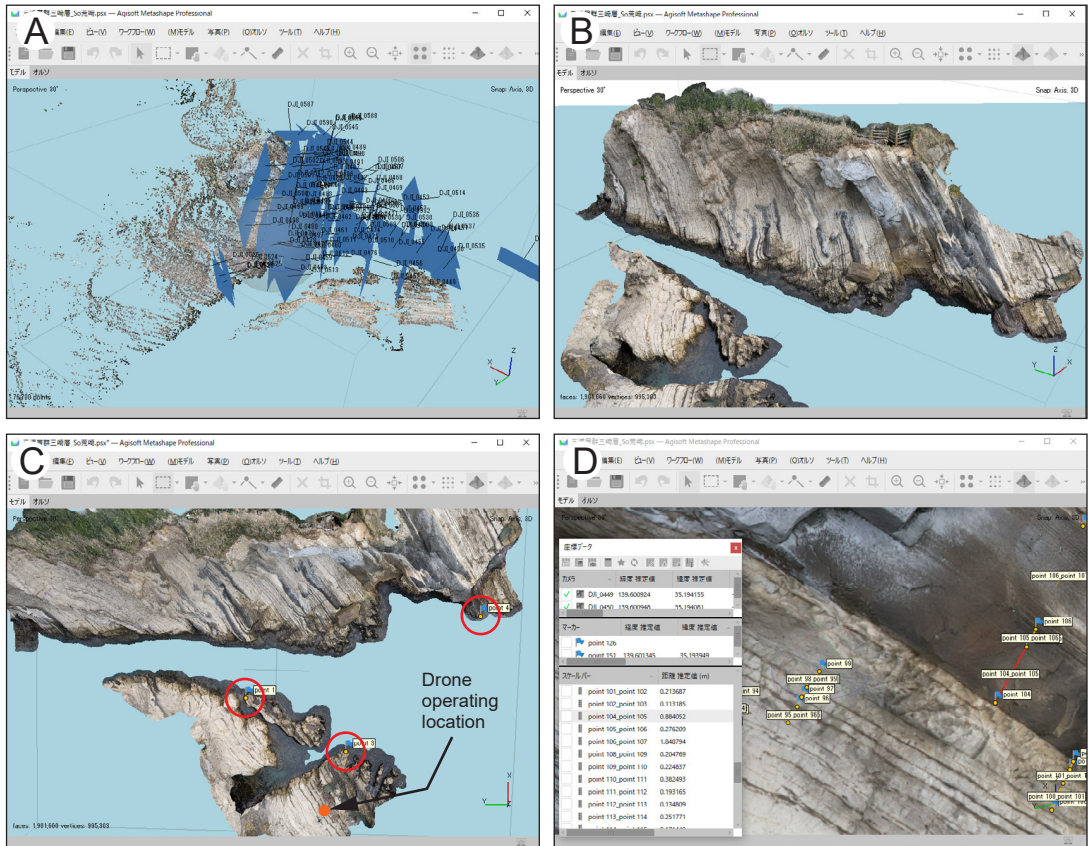


Fig. 3 Process of reconstruction and measuring of a 3-D digital outcrop model as an example of the Misaki Formation at Arasaki. A: Locations of cameras (blue rectangles) and sparse point cloud. B: Outcrop model with texture. C: Markers on shore platforms of the outcrop model (red circles). D: Measurements of thicknesses of beds on the outcrop model. All images were captured from Agisoft Metashape Professional.

第3図 荒崎の三崎層を例とした3-Dデジタル露頭モデルの復元と計測の過程。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)と生成された荒いポイントクラウド。B: テクスタチャを貼った露頭モデル。C: 露頭モデルの波食棚上に設定した基準点(赤丸)。D: 露頭モデル上での単層の厚さの計測。いずれの画像もAgisoft Metashape Professionalをキャプチャーしたもの。

必要がある (Shahtakhtinskiy and Kahn, 2022)。本研究で検討した露頭では、層理面にほぼ直交する露頭面が観察でき、マーカーは単層の境界となる2枚の層理面の垂線上に配置するよう努めたため、補正は行わず、計測した厚さを真の厚さとした。露頭モデルや露頭写真から堆積構造が識別できる場合は記録した。以上のデータに基づき地質柱状図を作成した。

結果

1) 三崎層

露頭観察に基づく地質柱状図の作成は、著者の1人西田が行った。荒崎に露出する三崎層のうち、鍵

層 So (Ar-104) を含む火砕岩層 Ar-98 から Ar-106 周辺の層準の露頭(第1図)を観察し、厚さ 30.4 m の地質柱状図を作成した(第4図A)。地質柱状図には 97 の泥岩層、スコリア凝灰岩や酸性凝灰岩からなる 99 の凝灰岩層、合計 196 の単層が含まれる。スコリア凝灰岩層は中礫から極細粒の火山砕積物から構成され、泥岩層にはしばしば生痕化石が認められた。スコリア凝灰岩層にはセット高 40 cm のトラフ型斜交層理(フォーセット層理)(Ar-103)、平行層理とカレントリップル斜交葉理(Ar-100)が認められる場合があり、酸性凝灰岩層(鍵層 So)には平行層理が発達する。

ドローン撮影と3-Dデジタル露頭モデルの構築、

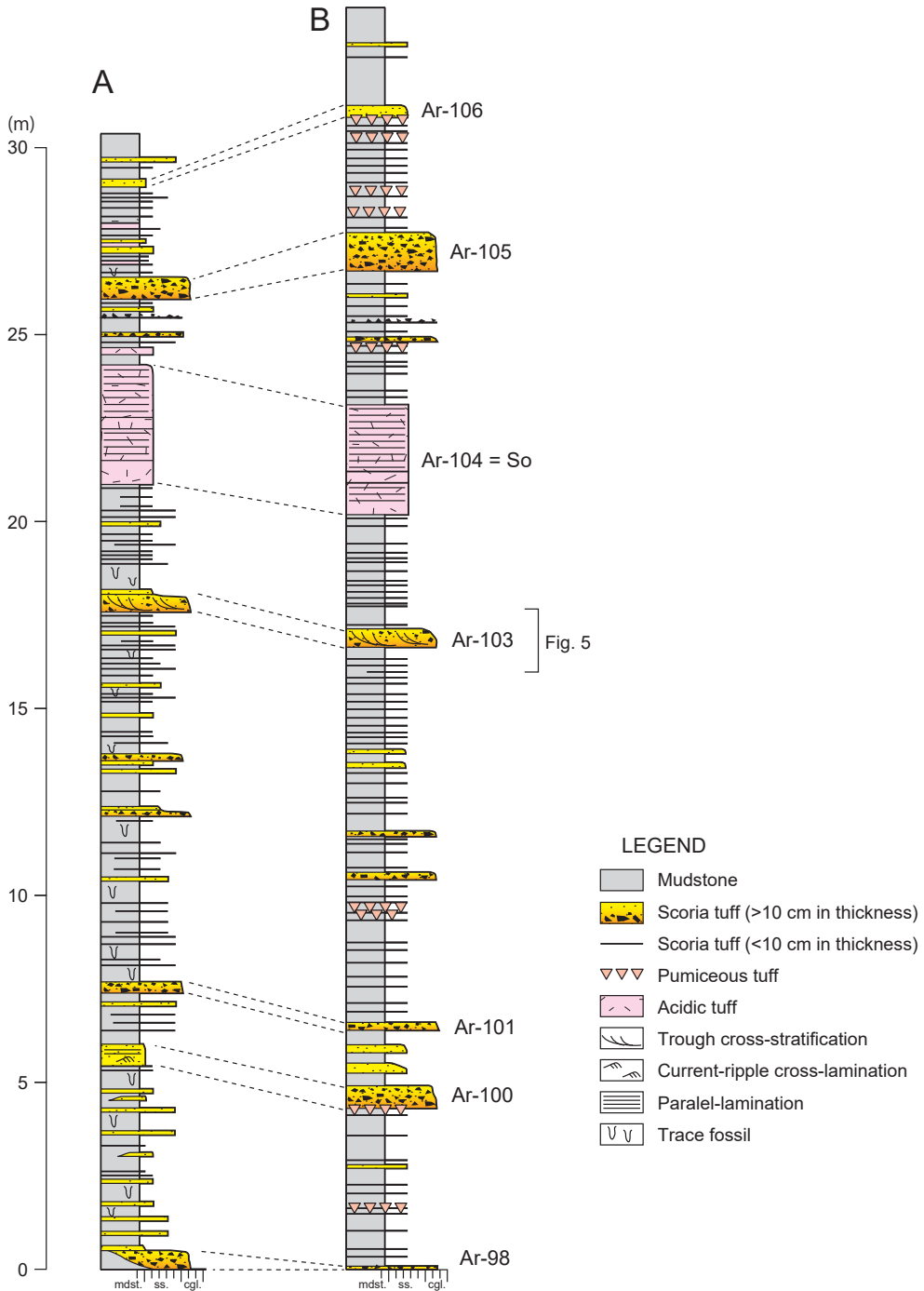


Fig. 4 Measured sections of the Misaki Formation at Arasaki. A: Section based on outcrop observation. Measured by N. Nishida. B: Section based on 3-D digital outcrop model produced by drone-based photogrammetry. Measured by K. Shibata. Tuff key beds are after Mori (2019).

第4図 荒崎に露出する三崎層の地質柱状図。A: 露頭観察に基づく地質柱状図。西田作成。B: ドローン撮影とフォトグラメトリーによる3-Dデジタル露頭モデルに基づく地質柱状図。柴田作成。火砕岩層の名称は森(2019)に基づく。

それに基づく岩相の認定と地質柱状図の作成は、著者の1人柴田が行った。柴田は荒崎を含む三浦半島南部に露出する三崎層の調査経験があり、荒崎において鍵層 So の位置と外観的特徴を把握していたが、今回撮影した露頭について詳細な地質調査は実施していなかった。荒崎に露出する三崎層のうち、鍵層 So (Ar-104) を含む火砕岩層 Ar-98 から Ar-106 周辺の層準の露頭について、ドローンを用いて露頭から 10 ~ 25 m 離れた距離から 104 枚の写真を撮影した。ドローンは海峡を挟んだ露頭対岸の波食棚上から操縦した。撮影した写真から露頭モデルを構築し (第 3 図 B)、波食棚上の 3 つの基準点の緯度経度からスケールを設定した (第 3 図 C)。露頭モデルから単層を識別して厚さを計測した。厚さ 10 cm 未満の単層は厚さを計測する分解能がなかったため、厚さ 10 cm の単層とした。白色の岩相は泥岩、黒色の岩相はスコリア凝灰岩、オレンジ色の岩相は軽石質凝灰岩、褐色の岩相は酸性凝灰岩 (鍵層 So) と判断した。火山砕屑物の粒径は、露頭モデルまたは露頭写真から礫が識別できる場合は中礫とし、それ以外は中粒砂とした。その結果、97 の泥岩層、スコリア凝灰岩や酸性凝灰岩からなる 96 の凝灰岩層、合計 193 の単層が識別された。露頭モデルと露頭写真から、スコリア凝灰岩層 (Ar-103) にセット高 50 cm のトラフ型斜交層理 (フォーセット層理) (第 5 図) と、酸性凝灰岩 (鍵層 So) に平行層理が認められた。これらのデータから厚さ 32.6 m の地質柱状図が作成された (第 4 図 B)。以下、ドローン撮影、フォトグラメトリー、3-D デジタル露頭モデルに基づく地質柱状図作成法を DP 法 (Drone-based Photogrammetry Method) と呼ぶ。

露頭観察と DP 法に基づく地質柱状図を比較すると (第 4 図), 泥岩層はいずれの方法でも 97, 凝灰岩層は露頭観察で 99, DP 法で 96 の単層が記録された。火砕岩層 (Ar-99 ~ Ar106) の基底面間の厚さについて検討すると、露頭観察に基づく地質柱状図の厚さに対して、DP 法に基づく地質柱状図の厚さの相対誤差は -22.2 % ~ 107.1 %, 地質柱状図全体の相対誤差は 7.2 % であった (第 1 表)。泥岩層, 砂質のスコリア凝灰岩層, 礫質のスコリア凝灰岩層

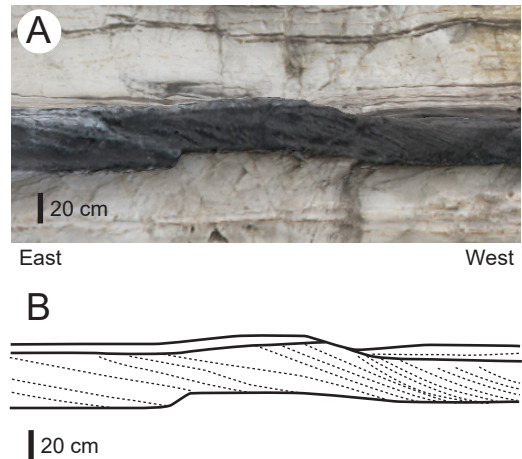


Fig. 5 A: Trough cross-stratification (foreset bedding) on scoriaceous sandstone (Ar-103) of the Misaki Formation at Arasaki. Captured from 3-D digital outcrop model. B: Trace of the trough cross-stratification.

第 5 図 三崎層のスコリア凝灰岩層 (Ar-103) に認められるトラフ型斜交層理 (フォーセット層理). 3-D デジタル露頭モデルからキャプチャーしたもの。B: トラフ型斜交層理のトレース。

Table 1 Thicknesses between pyroclastic beds of the Misaki Formation at Arasaki measured from the outcrop and the 3-D digital outcrop model (DP method), and their relative errors. Thicknesses were measured between basal surfaces of the pyroclastic beds.

第 1 表 露頭観察と DP 法に基づく三崎層の火砕岩層間の厚さとそれらの相対誤差。各火砕岩層の基底面間の厚さを計測した。

	Outcrop (m)	DP Method (m)	Relative Error (%)
Ar-99–Ar-100	5.4	4.2	-22.2
Ar-100–Ar-101	2.0	2.1	5.0
Ar-101–Ar-103	10.2	9.2	-9.8
Ar-103–Ar-104	3.4	3.5	2.9
Ar-104–Ar-105	5.0	6.6	32.0
Ar-105–Ar-106	3.0	4.1	36.7
Ar-106–top	1.4	2.9	107.1
Total (Ar-99–top)	30.4	32.6	7.2

の識別は、露頭観察とほぼ同様になされた。しかし、極細粒砂からなる火砕岩層 Ar-100 は、DP 法では中礫からなると判断された。セット高 40 ~ 50 cm のトラフ型斜交層理 (フォーセット層理) (Ar-103) や平行層理 (So=Ar-104) は DP 法でも記録されたが、生痕化石は露頭観察でのみ記録された。

2) 平井賀層

平井賀層が露出する松島には上陸できなかったため、本研究で直接の露頭観察は行っていない。なお、村井ほか (1983) は松島の露頭観察に基づき細粒～中粒砂岩からなる厚さ 29.4 m の平井賀層の地質柱状図を示した (第 6 図 A)。

ドローン撮影と 3-D デジタル露頭モデルの構築、それに基づく岩相の認定と地質柱状図の作成は、三崎層と同様に著者の 1 人柴田が行った。柴田は茂師海岸や田野畑地域、崎山地域 (Matsukawa and Shibata, 2023) で野外調査に基づく宮古層群の地質柱状図の作成経験を有していた。ドローンは海峡を挟んだ松島の対岸の波食棚上から操縦した。松島西側の高さ約 22 m の急崖を中心に、露頭より 9 ~ 100 m の距離から 105 枚の露頭写真を撮影した。三崎層と同様の手法により露頭モデルを作成し (第 7 図)、波食棚上の 5 つの基準点の緯度・経度から露頭モデルにスケールを与え、露頭モデルの計測に基づき地質柱状図を作成した (第 6 図 B)。茂師海岸や田野畑地域の平井賀層の岩相を参考に、層理の発達する灰白色～褐色の岩相を細粒砂岩、塊状もしくは層理の発達が弱い灰白色の岩相を極細粒砂岩と判断した。地層に含まれる球形もしくは不定形の突起物はノジュールとした。その結果、30 の単層が識別され、厚さ 22.3 m の地質柱状図が作成された。砂岩には平行層理やハンモック状斜交層理 (第 8 図) が認められた。

議 論

Nesbit *et al.* (2018) は、カナダ・アルバータ州に分布する上部白亜系ベリーリバー層群の河川堆積物について、ドローン撮影とフォトグラメトリーによって 3-D デジタル露頭モデルを作成し、三次元的な露頭の記載と地質柱状図の作成を行った。この研究では 10 地点で厚さ 5.1 m から 10.7 m、全体として厚さ 78.0 m の地質柱状図が DP 法に基づき作成され、各地質柱状図は露頭観察に基づく地質柱状図と比較された。ベリーリバー層群は白色～灰白色の泥岩と

細粒～中粒砂岩の互層からなる。その結果、DP 法によって砂岩層と泥岩層の区別は概ね適切に判断されたが、露頭観察では 250 の単層が識別されたのに対し、DP 法では 109 の単層のみが識別された。露頭観察による地層の厚さに対して、DP 法による地層の厚さの相対誤差を Nesbit *et al.* (2018) の地質柱状図から計算すると、各地質柱状図で -8.6 ~ 10.7 %、全体で -0.2 % である。露頭観察で記録されたトラフ型斜交層理、リップル、泥岩礫、有機物片は、DP 法で記録されなかった。これらから、Nesbit *et al.* (2018) は 3-D デジタル露頭モデルから作成された地質柱状図が、岩相レベルで信頼できると判断した。ベリーリバー層群の結果と、本研究で検討した三崎層 (第 4 図) と平井賀層 (第 6 図) の例を比較しながら、DP 法で描かれる地質柱状図の精度について考察する。

DP 法と露頭観察で識別された単層の数の比は、三崎層で 0.98 (193/196)、平井賀層で 30.0 (30/1)、ベリーリバー層群で 0.44 (109 /250) である。三崎層では白色の泥岩層と黒色のスコリア凝灰岩層のコントラストが明瞭で、単層の識別が容易であったため、2 つの手法においてほぼ同数の単層が識別されたと考えられる。すなわち、条件によっては DP 法によって単層の識別が高精度で可能であることを示している。

三崎層では、DP 法によって露頭観察と同程度の精度で泥岩層、砂質の凝灰岩層、礫質の凝灰岩層を識別できたが、細粒や極粗粒といった砂質の火山碎屑物の詳細な粒径は判定できず、中粒砂とした。また、松島の平井賀層は細粒・中粒砂岩からなるが (村井ほか, 1983)、本研究では DP 法によって主に極細粒・細粒砂岩からなる地質柱状図が描かれ、やや粒度が異なる。ベリーリバー層群の例でも、地層を構成する砂岩の粒度が DP 法と露頭観察による地質柱状図で若干異なる (Nesbit *et al.*, 2018)。したがって、DP 法によって泥岩層、砂岩層、礫岩層の区別は高精度で可能であるが、砂岩の粒度の判定は難しいと考えられる。

露頭観察と DP 法で計測された地質柱状図全体の厚さの相対誤差は、三崎層では 7.2 % であったのに対し、ベリーリバー層群では -0.2 % であった (第 1 表)。この理由は、付加体堆積物と解釈される三崎層には多数の断層が発達するため、露頭観察と DP 法で、断層を挟んだ単層の追跡に相違があった可能性が考えられる。特に、三崎層の火砕岩層 Ar-106

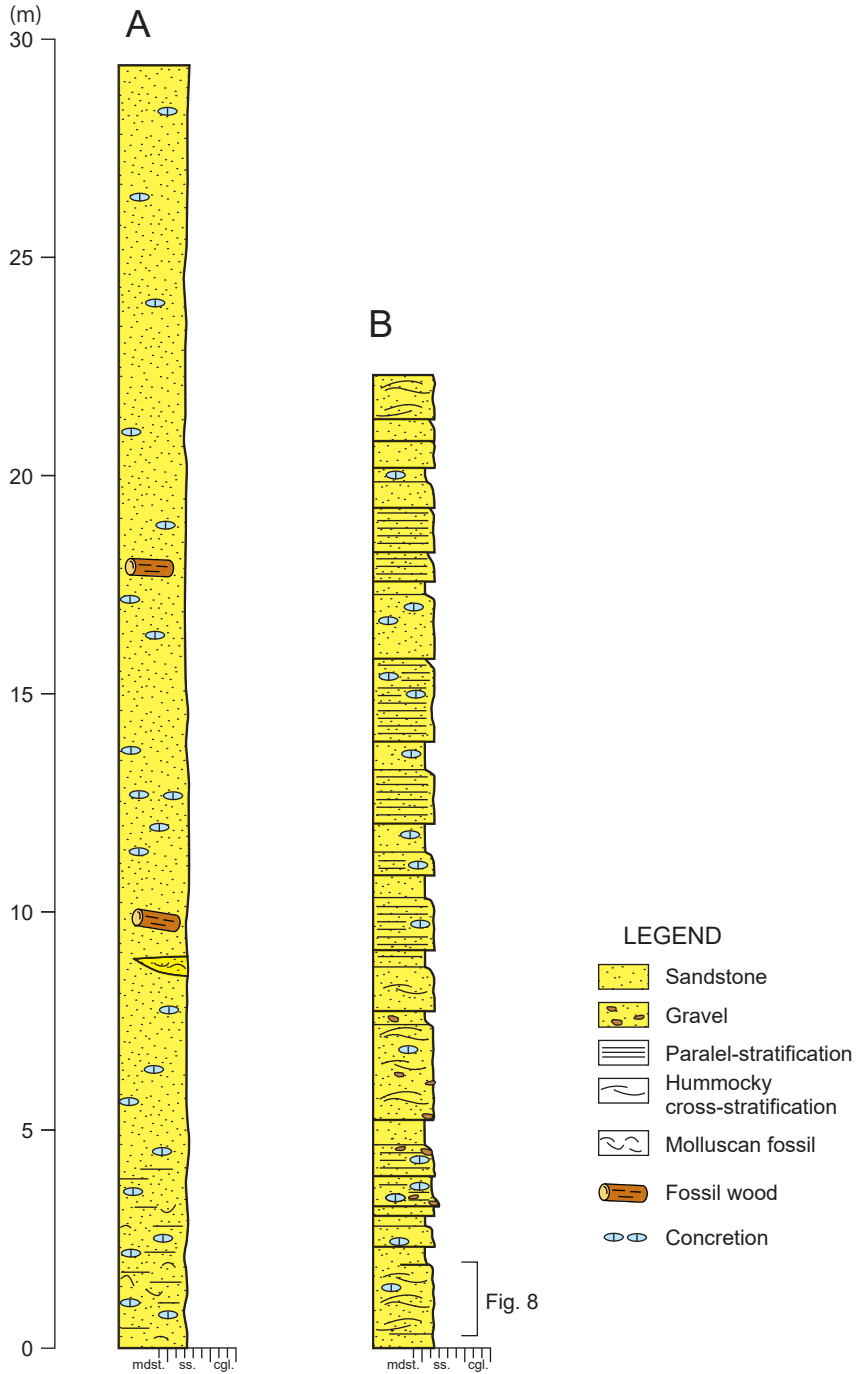


Fig. 6 Measured sections of the Hiraiga Formation at Matsushima Island, Moshi Coast. A: Section based on outcrop observation. Modified from Murai *et al.* (1983). B: Section based on 3-D digital outcrop model produced by drone-based photogrammetry. Measured by K. Shibata.

第6図 茂師海岸松島に露出する平井質層の地質柱状図。A: 露頭観察に基づく地質柱状図。村井ほか(1983)を改変。B: ドローン撮影とフォトグラメトリーによる3-Dデジタル露頭モデルに基づく地質柱状図。柴田作成。

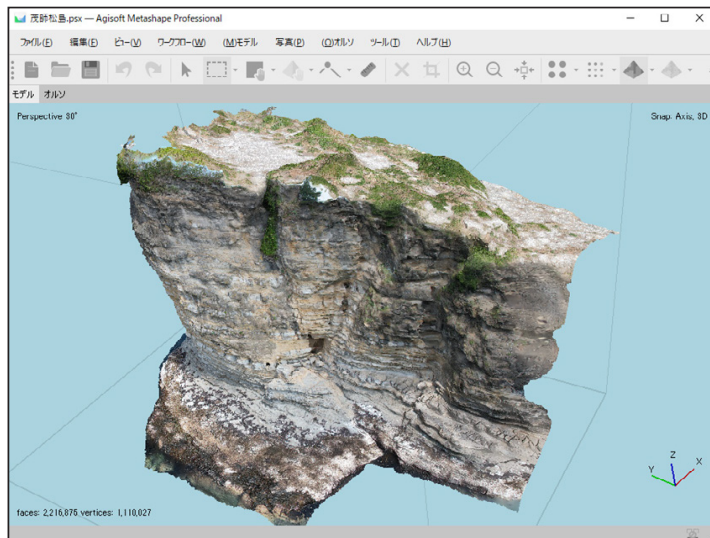


Fig. 7 3-D digital outcrop model of the Hiraiga Formation of the Miyako Group at Matsushima, Moshi Coast.

第7図 茂師海岸松島に露出する宮古層群平井賀層の3-Dデジタル露頭モデル。

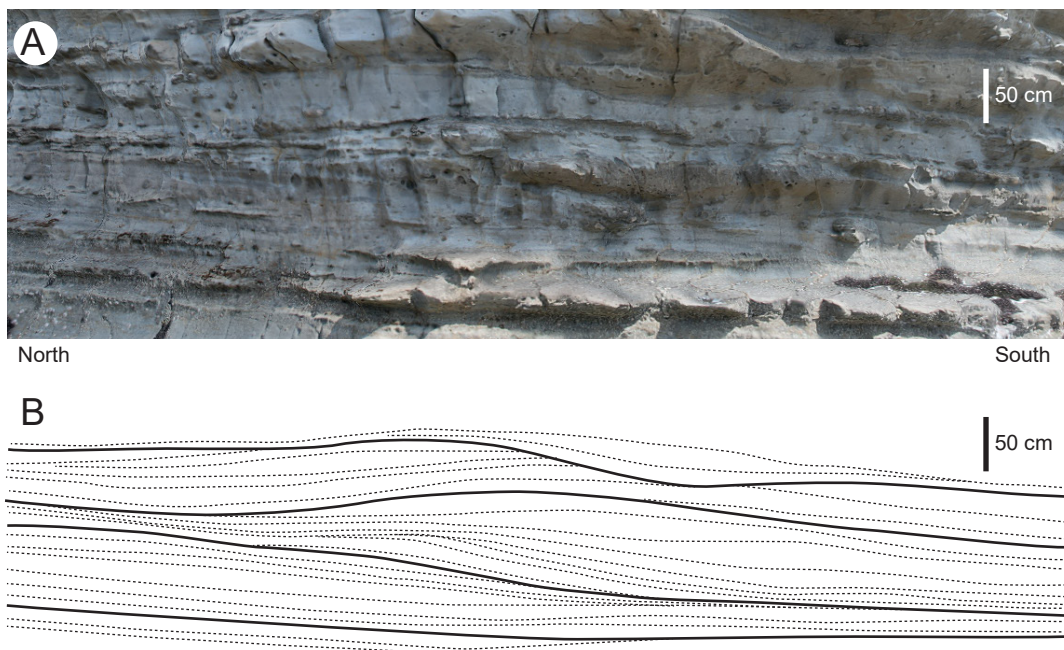


Fig. 8 A: Anisotropic hummocky cross-stratification on fine-grained sandstones of the Hiraiga Formation. Captured from 3-D digital outcrop model. B: Trace of the hummocky cross-stratification.

第8図 A: 平井賀層の細粒砂岩に認められる異方性ハンモック状斜交層理。3-Dデジタル露頭モデルからキャプチャーしたもの。B: ハンモック状斜交層理のトレース。

から柱状図最上部までは、多数の断層が認められ、相対誤差は107.1%に達した。三崎層のような剪断構造が顕著に発達する地層では、DP法によって岩相の認定と単層の追跡が難しい場合、地層の厚さの誤差が大きくなる可能性を示している。松島の平井賀層では、DP法で作成した地質柱状図の厚さが22.3 m、村井ほか(1983)が示した地質柱状図の厚さが29.4 mである(第6図)。村井ほか(1983)は地層の見かけ上の厚さが厚くなる松島の波打ち際、または松島東側の緩やかな斜面に露出する平井賀層の露頭観察に基づき地質柱状図を作成した可能性が高い。本研究と村井(1983)の地質柱状図の厚さの相違は、村井ほか(1983)が波打ち際もしくは緩斜面に露出する地層を観察したため地層の厚さを過大に見積もった可能性と、村井ほか(1983)が本研究で検討対象とした層準より上位の層準までを対象として地質柱状図を作成した可能性を示している。また、今回のDP法は10 cm以下の厚さの単層を計測する分解能は有していないことが示された。これらから、DP法による数十センチメートル以上の厚さの地層の計測結果は、概ね信頼できると考えられる。

ベリーリバー層群ではDP法で記録されなかったトラフ型斜交層理が、三崎層では記録された(第5図)。また、三崎層や平井賀層で平行層理が識別できたのに加え、平井賀層ではハンモック状斜交層理も記録された(第8図)。一方、三崎層やベリーリバー層群の露頭観察で認められたカレントリップル斜交層理はDP法では識別できなかった。したがって、DP法によってカレントリップル斜交層理のような微細な堆積構造の識別は困難であるが、露頭条件によってはトラフ型斜交層理や平行層理、ハンモック状斜交層理などの堆積構造を記録できると考えられる。

三崎層では泥岩層に生痕化石(Fig. 4A)、平井賀層では砂岩に材化石や軟体動物化石(村井ほか, 1983)、ベリーリバー層群では砂岩に有機物片が含まれるが、これらはいずれもDP法で識別されなかった。DP法に基づく化石の産出の認定は難しいと考えられる。

以上を総合すると、DP法で描かれた地質柱状図において、単層の数、泥岩層、砂岩層、礫岩層の区別、地層の厚さは概ね信頼できると考えられ、露頭条件によってはトラフ型斜交層理やハンモック状斜交層理などの堆積構造を記録することもできる。しかし、詳細な砂岩の粒径の判定、カレントリップル斜交層

理のような微細な堆積構造や化石の産出の認定は困難である。したがって、欠点はあるものの、DP法によって、アクセスが困難な露頭においても信頼できる地質柱状図が作成できると考えられる。

結 論

- ・三浦層群三崎層と宮古層群平井賀層において、ドローン撮影とフォトグラメトリーによって3-Dデジタル露頭モデルを構築し、露頭モデルの観察と計測から地質柱状図を作成した。
- ・単層の数、泥岩層、砂岩層、礫岩層の区別、地層の厚さは、露頭観察とほぼ同様の結果が得られた。
- ・平行層理、トラフ型斜交層理(フォーセット層理)、ハンモック状斜交層理が識別された。
- ・砂岩の粒径の判定、カレントリップル斜交層理の識別、化石の認定はできなかった。
- ・ドローン撮影とフォトグラメトリーによって、概ね信頼できる地質柱状図が作成できると考えられる。

謝 辞

環境省宮古自然保護官事務所、国土交通省東北地方整備局三陸国道事務所、神奈川県横須賀土木事務所、岩手県沿岸広域振興局水産部宮古水産センター水産振興課、横須賀市建設部公園管理課、岩泉町教育委員会、岩泉町地域整備課、小本浜漁協にはドローン調査について配慮いただいた。本研究はJSPS科研費JP21K01010の助成を受けた。

引用文献

- Bilmes A., D'Elia L., Lopez L., Richiano S., Varela A., Alvarez M. P., Bucher J., Eymard I., Muravchik M., Franzese J. and Ariztegui D. 2019. Digital outcrop modelling using "structure-from-motion" photogrammetry: Acquisition strategies, validation and interpretations to different sedimentary environments. *Journal of South American Earth Sciences*, **96**: 102325.
- Chesley J. T., Leier A. L., White S. and Torres R. 2017. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation,

- Utah, USA. *Sedimentary Geology*, **354**: 1–8.
- 江藤哲人・矢崎清貫・ト部厚志・磯部一洋 1998. 横須賀地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 128 ページ. 地質調査所.
- Fujino S. and Maeda H. 2013. Environmental changes and shallow marine fossil bivalve assemblages of the Lower Cretaceous Miyako Group, NE Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **64**: 168–179.
- 花井哲郎・小島郁生・速水 格 1968. 白亜系宮古層群概報. 国立科博専報, (1): 20–28.
- Hanamura Y. and Ogawa Y. 1993. Layer-parallel faults, duplexes. Imbricate thrusts and vein structures of the Miura Group: Keys to understanding the Izu forearc sediment accretion to the Honshu fore arc. *The Island Arc*, **2**: 126–141.
- 蟹江康光・岡田尚武・笹原由紀・田中浩紀 1991. 三浦・房総半島新第三紀三浦層群の石灰質ナノ化石年代および対比. 地質学雑誌, **97**: 135–155.
- Lee I. T. and Ogawa Y. 1998. Bottom-current deposits in the Miocene-Pliocene Misaki Formation, Izu forearc area, Japan. *The Island Arc*, **7**: 315–329.
- Matsukawa M. and Shibata K. 2023. Aptian–Albian (Lower Cretaceous) ammonite assemblages of the Miyako Group in the Sakiyama region, Miyako City, Iwate Prefecture, northeast Japan. *Science Report of the Yokosuka City Museum*, (79): 1–38.
- 三梨 昂・矢崎清貫 1968. 2 万 5 千分の 1 日本石油・ガス田図 6 三浦半島. 地質調査所.
- 村井貞允・大上大良・大石雅之 1983. 岩泉町文化財報告集第 6 集“茂師竜”発見地付近の地質. 36 ページ + 図版 I–XVII. 岩泉町教育委員会.
- 森 慎一 2019. 三浦半島荒崎にみられる三浦層群三崎層の火山砕屑岩層序. 神奈川地学, (83): 11–21.
- Nesbit P. R., Durkin P. R., Hugenholtz C. H., Hubbard S. M. and Kucharczyk M. 2018. 3-D stratigraphic mapping using a digital outcrop model derived from UAV images and structure-from-motion photogrammetry. *Geosphere*, **14**(6): 2469–2486, <https://doi.org/10.1130/GES01688.1>.
- Obata I. and Matsukawa M. 2018. Aptian and Albian ammonites of the Miyako Group, Japan (Lower Cretaceous ammonites of the Miyako Group, Part 11). *Cretaceous Research*, **88**: 227–272.
- 佐藤瑠晟・成瀬 元 2023. 露頭の 3 次元点群データに対する ResUNet を用いた岩相自動判定. 日本地質学会第 130 年学術大会講演要旨: T6-P-5.
- Shahtakhtinskiy A. and Khan S. 2022. 3D stratigraphic mapping and reservoir architecture of the Balakhany Suite, Upper Productive Series, using UAV photogrammetry: Yasamal Valley, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, **145**: 105911.
- 柴田健一郎・野崎 篤・高橋直樹・笠間友博・西澤文勝・田口公則 2021. 三浦半島の新第三系と第四系: 付加体 - 外縁隆起帯 - 前弧海盆堆積物. 神奈川博調査研報 (自然), (16): 69–106.
- 柴田伊廣・折橋裕二・山本由弦・木下正高 2008. U-Pb 年代測定法の現世付加体への適用へ向けて. 日本地質学会第 115 年学術大会講演要旨: 104.
- Soh W., Taira A., Ogawa Y., Taniguchi H., Peckering K. T. and Stow D. A. V. 1989. Submarine depositional processes for volcanoclastic sediments in the Mio-Pliocene Misaki Formation, Miura Group, central Japan. In Taira A., and Masuda F. eds., *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*: 619–630. TERRAPUB, Tokyo.
- Stow D. A. V., Taira A., Ogawa Y., Soh W., Taniguchi H. and Pickering, K. T. 1998. Volcanoclastic sediments, process interaction and depositional setting of the Mio-Pliocene Miura Group, SE Japan. *Sedimentary Geology*, **115**: 351–381.
- Thomas H., Brigaud B., Blaise T., Saint-Bezar B., Zordan E., Zeyen H., Andrieu S., Vincent B., Chirol H., Portier E., and Mouche E. 2021. Contribution of drone photogrammetry to 3D outcrop modeling of facies, porosity, and permeability heterogeneities in carbonate reservoirs (Paris Basin, Middle Jurassic). *Marine and Petroleum Geology*, **123**: 104772.
- Yamamoto Y., Ohta Y. and Ogawa Y. 2000. Implication for the two-stage layer-parallel faults in the context of the Izu forearc collision zone: examples from the Miura accretionary prism, Central Japan. *Tectonophysics*, **325**: 133–144.