日本最大の連続露頭：屏風ヶ浦の断層フリー領域

千木良雅弘

深田地質研究所

The largest continuous outcrop in Japan: Fault-free domains at Byobugaura, Chiba

CHIGIRA Masahiro

Fukada Geological Institute

要旨：高レベル放射性廃棄物の地層処分にあたっては，地下水による核種の移行が評価困難な課題として最後まで残る可能性が高い．それは，地下水の移行経路である割れ目，特に断層の分布を正確に把握することが難しいからである．本研究では，地殻変動の著しい日本列島において，断層のない領域，つまり断層フリー領域として，どの程度の範囲があるのか，実例を示すため，おそらく我が国最大の連続露頭である千葉県屏風ヶ浦において，UAV を用いて露頭の徹底的な調査を行った．ここでは，鮮新世から更新世の地層が 10° ± 4°と極めて緩く傾斜しており，後生的な変形を受けていない．屏風ヶ浦に沿う 6.9 ㎞区間には，癒着型の断層が 2 条含まれるのみで，開離型の断層，つまり水みちとなりうる断層はなかった．我が国でも，緩傾斜で後生的な変形を受けていない堆積岩では，この程度の範囲の断層フリー領域があることが期待できる可能性があると言える．

キーワード：高レベル放射性廃棄物，地層処分，地下水，断層

Abstract: Transportation of radioactive nuclides by the groundwater would remain as a difficult issue to evaluate for the geological disposal of high-level radioactive wastes, because fractures, particularly faults, as water pathways are difficult to precisely detect. If so, even sophisticated modeling and calculation of groundwater flow and radionuclide migration, cannot guarantee the long-term safety of radioactive wastes. Therefore, technologies and theories to find fault-free domains is indispensable to achieve the waste disposal. In order to demonstrate a scale of fault-free domains in tectonically active Japan, thorough geological mapping was made using UAV and 3-D modeling in the largest continuous outcrops in Japan, Byobugaura coast in Chiba Prefecture. Plio-Pleistocene beds underlie the coast with very gentle dips of 10° ± 4° with limited local deformation of submarine sliding. The beds along a 6.9-km long coast section were essentially fault-free and had only two closed faults, which suggests that such a scale could be expected as a fault-free domain in sedimentary rocks that dip gently and avoided subsequent deformation, even in tectonically active Japan.

Keywords: high-level radioactive wastes, geological disposal, groundwater, sedimentary rocks, faults

1. はじめに

2011 年の東京電力福島第 1 発電所の事故を経て，原子力政策そのものの見直しが続けられてきたが，2021 年 3 月に公表された政府のエネルギー基本計画では，2030 年のエネルギー需給割合の見通しとして，原子力エネルギーは 20－22%とされている．一方で，原子力利用の最も大きな問題の一つである高レベル放射性廃棄物地層処分場については，いまだ見通しがたっていない．

我が国では，1999 年の核燃料サイクル開発機構による「第 2 次取りまとめ」，2000 年の最終処分法制定と NUMO 設立，2010 年の NUMO「処分事業の安全確保 2010」，2017 年の経産省「科学的特性マップ」，2020 年の NUMO「包括的技術報告」公表と，処分実施への準備が着実に進んできたように見える．一方で，2011 年の東日本大震災以降，地球科学における不確実性の問題が衆目を浴びるようになった．2012 年には内閣府原子力委員会からの処分場立地に関する審議依頼に対して，日本学術会議（2012）は「処分場立地選定は，いかにして国民の合意を得るか，という段階には未だいたっておらず，処分場の長期安定性を確保できる地域を社会的合意をもって探せる科学技術的信頼性が高まるまで待つべきであり，それまでは処分を急ぐことなく、暫定保管および総量管理を行うべきである」と回答した．また，それを受け，「高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」が出された（日本学術会議，2014）．後者の報告では，地下水による放射性核種の移行の評価が困難な問題として最後まで残る可能性が高いと指摘されており，暫定保管中に進めるべき研究として，「岩盤内の割れ目を探す技術－特に非破壊の物理探査－の高度化と適用限界の明示が必要であり，さらに，地質履歴から割れ目の少ない岩盤を探す論理立てを確立することが必須である.」と記述された．しかし，この点についての研究成果が明示的に示されているとは言い難い.

本研究は，地殻変動の活発な日本列島において，地下水の通路として最も重要な断層のない領域がどの程度広がっている場合があるのか，実証的に示すことを目的としたものである．そのために，我が国でおそらく最大の連続露頭である千葉県の屏風ヶ浦において調査を行った（Fig. 1）.

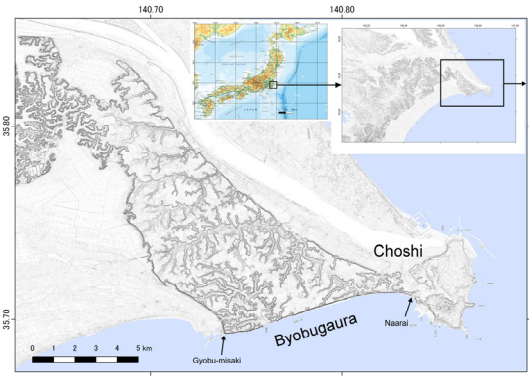


Fig.1 Index map of Byobuga-ura. The map is a slope image made from GSI Map.

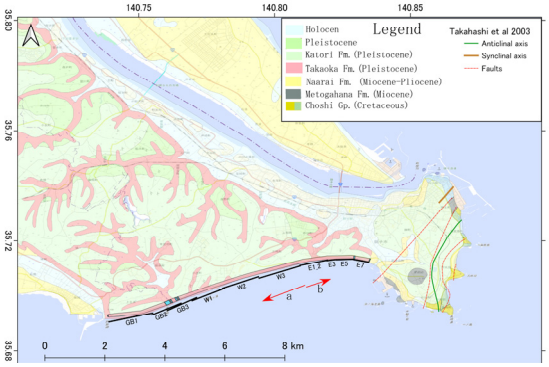


Fig. 2 Geological map around Byobugaura (Reproduced from Seamless Digital Geological Map of Japan). A and b show the locations of photographs of Fig. 3. GB1, GB2, through E7 show the zones for 3D models.

2. 地質概要

屏風ヶ浦は，刑部岬から名洗浜まで西南西－東北東に約 10 km にわたってのびる海岸であり，高さ 20～80 m の海食崖の岩壁となっている (Figs. 1, 2, 3). 以下は，上野他（2010）による地質の記述である．屏風ヶ浦東縁付近には名洗層が分布し，その西側には広く高岡層が分布している (Figs. 2, 3). これらの地層は崖の下半部を構成しており，上半部にはこれらの地層を覆って香取層がほぼ水平に堆積し，さらに関東ロームに覆われている．名洗層は 500-200 万年前の粗粒砂岩を主とし，軽石凝灰岩層を挟む．飯岡層は，200－70 万年前の主にシルト岩からなり，砂岩・凝灰岩を

挟む．香取層は，10 万年前の砂岩からなる．

香取層基底の不整合面はかつての海食台と考えられており，また，屏風ヶ浦から北西に広がる台地は飯岡台地と呼ばれ，平坦面を良く残している（八田・川崎，1983）．飯岡台地は北東方向の利根川に向けて緩く傾斜している．屏風ヶ浦の東側は銚子の高台となっており，ここには白亜紀から中新世の地層が分布している(Fig. 2).

Fig. 3 Photographs of Byobugaura. Brownish beds in the upper parts of the cliff are of the Katori Formation and Kanto Loam. Photo angles for a and b are shown in Fig. 2.

3. 方法

UAV（DJI Mavic 2 Pro）を用いて写真を撮影し，その画像を Agisoft Metashape Professional Edition version 1.6.3 を用いて処理して，3D モデルを作成した．Mavic 2 Pro は，L1D-20c カメラ（焦点距離 10.26 ㎜，1 インチセンサー）を搭載している．フライトは 3 回に分けて行い，南西側からそれぞれ 164 枚，111 枚，114 枚の画像を用いて 3D モデルを作成した．撮影においては UAV を崖からの距離 50－200m で崖に正対させて横に移動し，30 から 50%画像が重なるよう，写真を撮影した．グランドコントロールポイントは設置しておらず，UAV 搭載の GPS データを用いて解析を行った．なお，精度の厳密な検証は行っていないが，Appendix 3 に後述するように，崖を斜めに横断する道路の路面標識ライン間隔 3 m が，3D モデルでは，2.96±0.04 m と計測されたので，十分な精度があるものと考える．

作成した 3D モデルから，崖面にほぼ平行する面に画像を投影したオルソフォトを作成した．このオルソフォトを観察し，断層と特徴的な地層の判読を行った（例えば Fig. 4）．これらの断層と地層は現地調査によって検証し，見かけ上断層に見えたものの実際には断層ではなかったもの 5 条を削除し，また，3D モデルでは抽出されなかった断層 9 条（後述の Table 1 で Note 番号が 95 および 3 桁番号の断層）を新たに追加した．スマートフォンアプリケーションの CLINO（FieldMove 社）を用いて，断層および地層の走向傾斜を計測し，また，各断層の写真を撮影した．CLINO は，走向傾斜の記録とともに，位置を緯度・経度として記録できる．これらのデータを Evernote に csv ファイルとして保存し，それを QGIS version 3.1 に読み込んだ．3D モデルからは，水平面に投影したオルソフォトも作成し， QGIS 上で地理院地図に重ね，断層の走向傾斜の分布図を作成した．

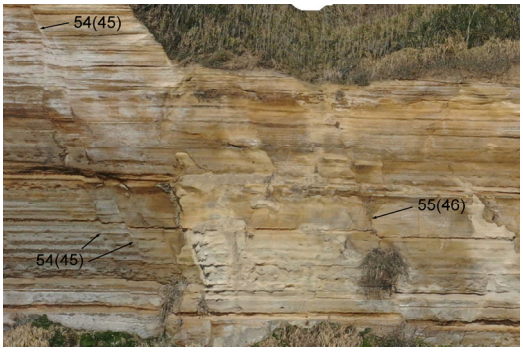


Fig. 4 An example of faults observed on a 3D model made from UAV images. Numbers correspond to those in Fig. 5.

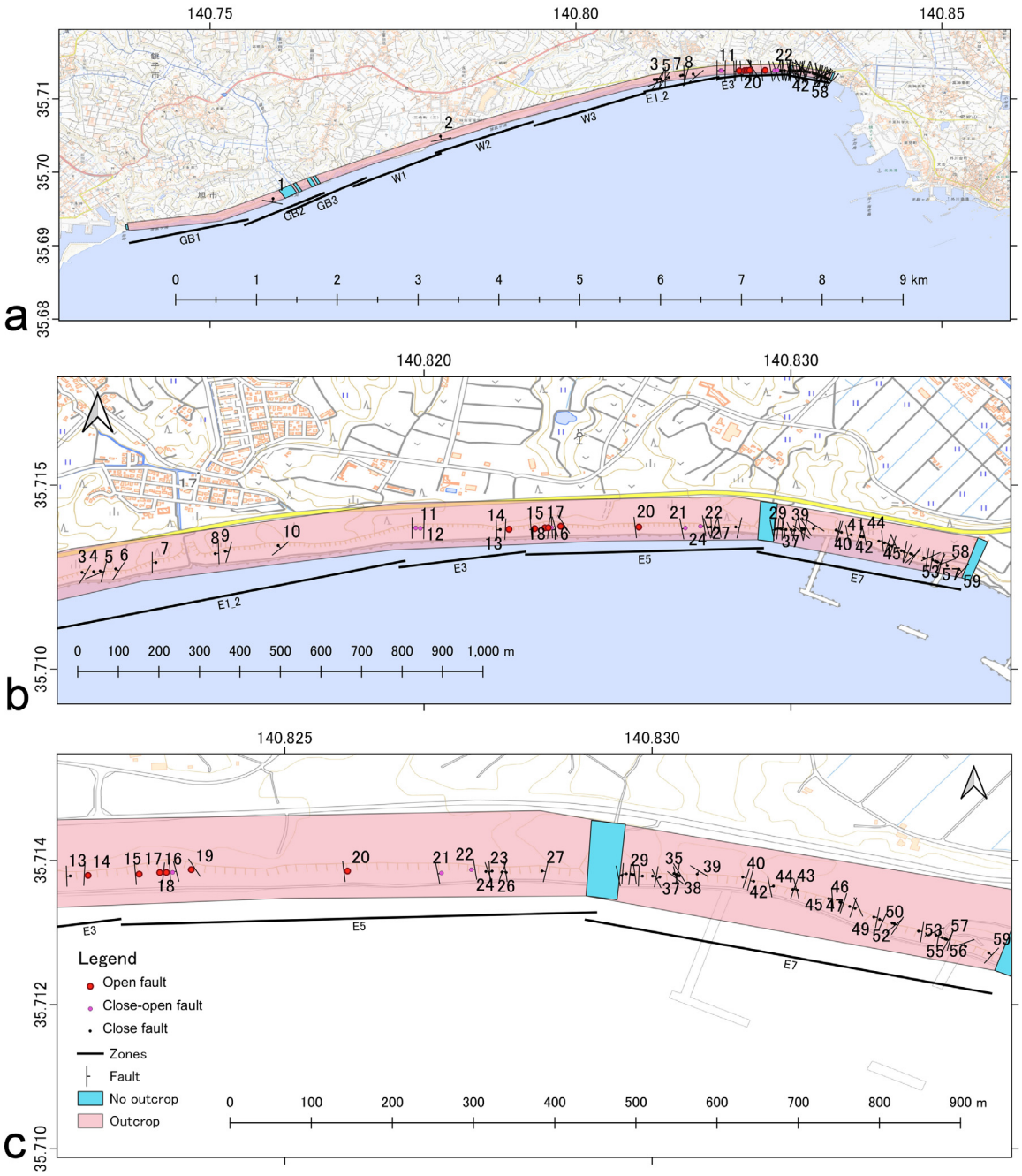


Fig. 5 Distribution of faults along Byobugaura. A is for the whole area, and b and c are close-up areas.

４．結果

屏風ヶ浦の岩壁の高さは，刑部岬近くで 80 m，東部の名洗町付近で 20 m から 30 m である．崖の下部 3 分の 2 程度に名洗層または飯岡層が分布し，崖上部には，これらの地層を不整合に覆って香取層が分布する（Figs. 2, 3）．この不整合面は極めて平面的で，飯岡台地面と同様にゆるく名洗漁港方向に高度を下げている．

屏風ヶ浦の岩壁の長さは 9,047 m で，その内露頭欠如区間が 5 か所あり(Fig. 5)，その合計長さは 326 m であった．つまり，露頭欠如の割合は 3.6%であった．屏風ヶ浦の岩壁の写真とスケッチを Appendix 1 に添付した．

調査区間には断層が 59 条認められた(Figs. 5 a, b, c; Table 1)．これらは断層面が癒着していて分離できないもの（癒着型），断層面にそって地層が分離できるもの（開離型），一つの断層で癒着している部分と開離している部分とがあるもの（癒着－開離型）に分けられた（衣笠他，1969）．59 条の断層の内 48 条は癒着型，6 条は開離型，5 条は癒着－開離型であった．また，これらの内 12 条は露頭上方あるいは下方に消滅するもので，すべて癒着型であり，これら以外の 47 条は露頭全体を切断していた．開離－癒着型は，癒着型が後生的に開離したものと考えて癒着型に含めると，露頭全体を切断する癒着型は 36 条＋5 条で，41 条となる．すなわち，露頭全体を切断する断層全体の 41/47＝87%が癒着型であった．

屏風ヶ浦沿いに距離をとると，西端の刑部岬からは，7.8 km（内 4%の 288 m 区間は露頭欠如）にわたって開離型断層がなく癒着型の断層もわずかに 12 条あるのみで，刑部岬から 6.9 km 間には癒着型断層がわずか 2 条存在するのみであった（Figs. 5a, 6）．

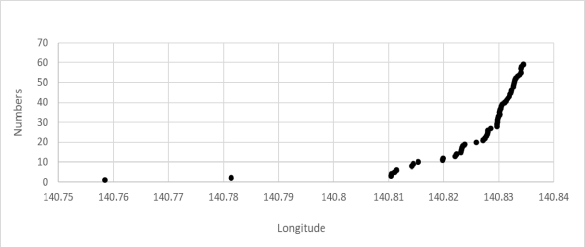


Fig. 6 Cumulative numbers of faults along Byobugaura.

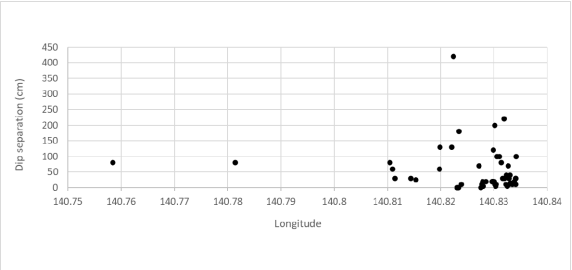


Fig. 7 Dip separations plotted along Byobugaura from the west to east.

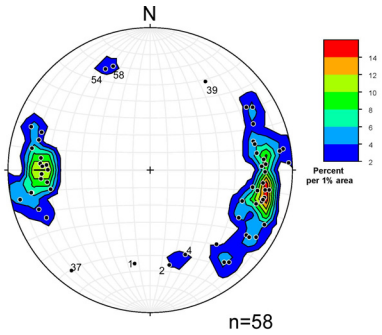


Fig. 8 Stereonet's projections of all observed faults. Outliers are numbered, which are not clustered in a map as shown in Fig. 4.

断層のセンスは，後に述べるように地層が非常に緩傾斜で，すべて断層の上盤側の地層が下降するようにずれていることから，正断層と判断される．断層の変位は，傾斜セパレーションで最大約 4 m，大部分は 2 m 以下であった（Fig. 7，Table 1）．断

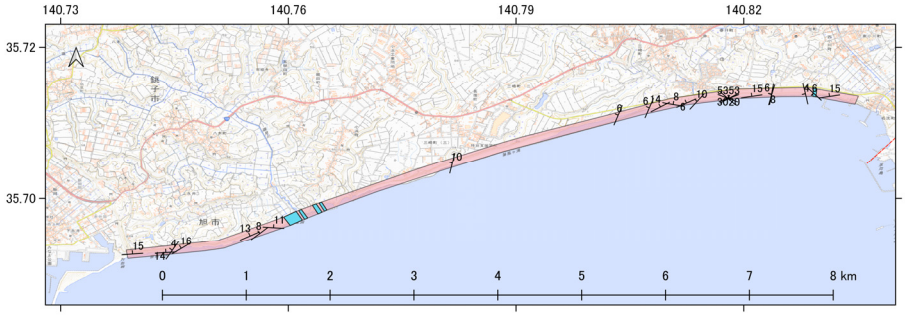


Fig. 9 Distribution of the attitudes of bedding planes.

層の方向は，Fig. 8 に示すように，南北方向で東または西に 60～70 度傾斜する方向が卓越する．これらの断層は，東西方向の伸長場で形成された正断層と推定される．Fig. 8 で極の集中領域からずれた位置にプロットされる極を持つ断層の空間的位置は，Fig. 8 と Fig. 5 とを比較してわかるように，特定領域にあるわけではない．

地層の層理面は，Fig. 9 に示したように，おおむね E-W から NNE-SSW 走向であり，北から北西に緩傾斜している．層理面をステレオ投影した結果，20 個の面の極の平均に対応する面は，N59E/8NW と非常に緩傾斜であった（Fig. 10）．また，方向を考慮しない傾斜角だけの平均は 10° ±4° であった．

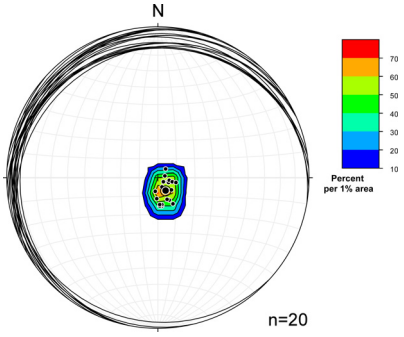


Fig. 10 Stereonet's projections of bedding planes, which do not include those in the submarine slide. Mean attitude is denoted by a large solid circle, which shows a plane striking N59° and dipping 8°NW.

付録 1 に示したように，飯岡層の最下部には厚さ 14.5 m の海底地すべり堆積物が存在する（上野他，2010）．その上下境界は地層の層理面に平行であり，上面は，付録 1 の E1_2 断面のポイント 3 および 4 で観察され，下面は E3 断面のポイント 2 で観察された．

５．考察

屏風ヶ浦に分布する鮮新－更新統の構造的特徴は，一部層間に挟まれる海底地すべり堆積物以外，極めて緩傾斜で，ほとんど後生的な変形を受けずに軽微な傾斜不整合を介して後期更新世の地層におおわれていることである．また，この不整合面の上の現在の地形面（飯岡台地面）は不整合面にほぼ平行であり，この地形面は屏風ヶ浦から北西に広がっている(Fig. 1)．屏風ヶ浦に発達する断層群は南北性であり，それは東西に延びる屏風ヶ浦の東縁付近にのみ発達することから，おそらく飯岡台地面の下にはこのような断層群は存在しない可能性が高い．

屏風ヶ浦の中央部と西部には東西方向の断層 1 と断層 2 が認められたが，いずれも癒着型であり，水みちとはなり難い．また，両者の断層の走向を東西として，それぞれの位置を考慮すると，両者の水平面上の最短距離は 800 m で，少なくともこの距離の間には断層はないものと推定される．

屏風ヶ浦に露出する地層と同時代の地層は房総半島東部の一之宮から勝浦にかけて分布し，そこ

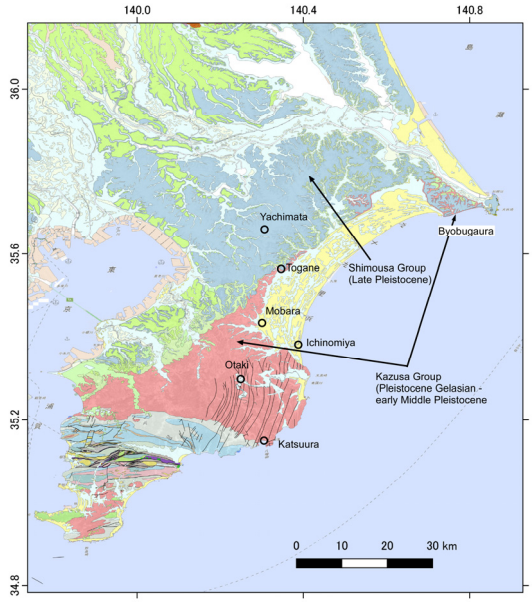


Fig. 11 Geologic map in the Boso area. Reproduced from Seamless Digital Geological Map of Japan.

ではNNE－SSW走向の正断層が発達する（Fig. 11）．両地域での断層の発達の違いの原因は明らかではないが，次のような特徴が関連している可能性がある．上総層群の傾斜は屏風ヶ浦から一之宮，大多喜付近までは10度に満たない緩傾斜であり，そこから南方ではもっと急傾斜になる．この上総層群の地層の傾斜が急になるあたりから，縮尺20万分の1地質図「千葉」「大多喜」には南北方向の断層が多く描かれている．つまり，地層の傾斜が10度よりも緩い範囲では断層の分布がごく限られているように見られる．これらの断層は，衣笠・垣見（1969），七山他（2016）によれば，いずれも正断層である．

関東平野では，新第三紀中新世中ごろから沈降が継続していると考えられており，関東造盆地運動と呼ばれている（三梨他，1980）．鮮新世から前期更新世には，その範囲の内，高崎や丹沢，房総半島南端部の盆地縁では，沈降が隆起に転じたが，盆地内では上総層群が引き続き堆積した．更新世前期から中期にかけては，上総層群と下総層群とを境する長沼不整合が形成され，この時期に南北性の隆起帯の形成と南北性の正断層群が形成されたと考えられている．

上記のような地質構造から，上総層群の傾斜が緩く，下総層群に覆われる範囲は，屏風ヶ浦と同様に，断層密度が極めて小さい可能性があると考えられる．

文献

上野宏共・地下まゆみ・安藤生大・坂本尚史（2010）： 屏風ヶ浦の地形と地質．千葉科学大学紀要, **3**, 75-86.

衣笠善博・垣見俊弘・平山次郎（1969）：房総半島東海岸の小断層．地調月報, **74**, 13-38.

高橋雅紀・須藤斎・大木淳一・柳沢幸夫（2003）： 千葉県銚子地域に分布する中新統の年代層序．地質学雑誌, **109**, 345-360.

七山太・中里裕臣・大井信三・中島礼（2016）：茂原地域の地質，産業技術総合研究所　地質総合センター.

日本学術会議（2012）回答「高レベル放射性廃棄物の処分について」.

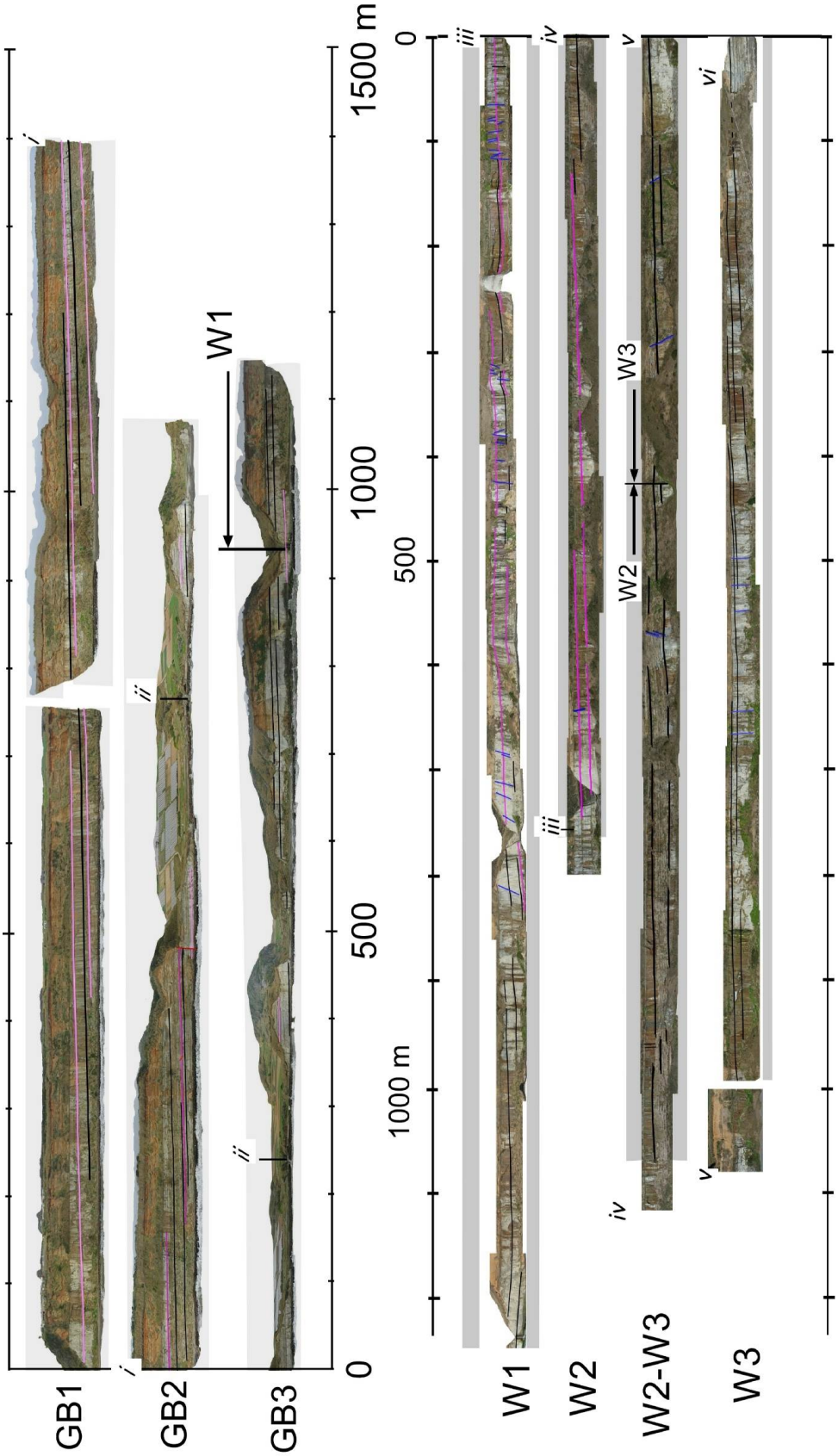
日本学術会議（2014）報告「高レベル放射性廃棄物問題への社会的対処の前進のために」.

八田明夫・川崎逸郎（1983）：飯岡台地の地形学的研究．地学雑誌, **92**, 17-31.

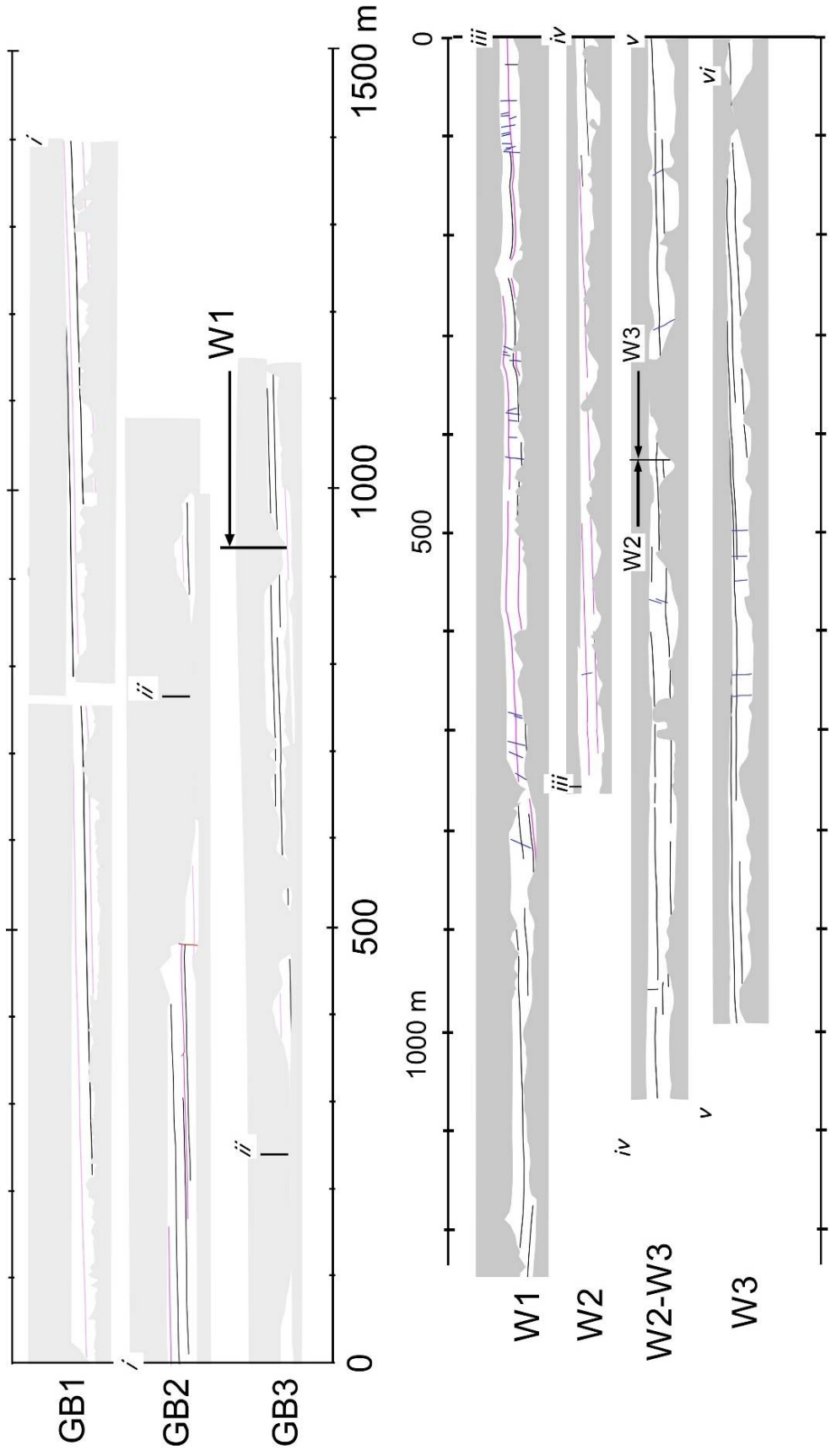
三梨昇・菊池隆男・児玉喜三郎・堀口万吉（1980）：関東堆積盆地．アーバン久保田．**18**, 36-41.

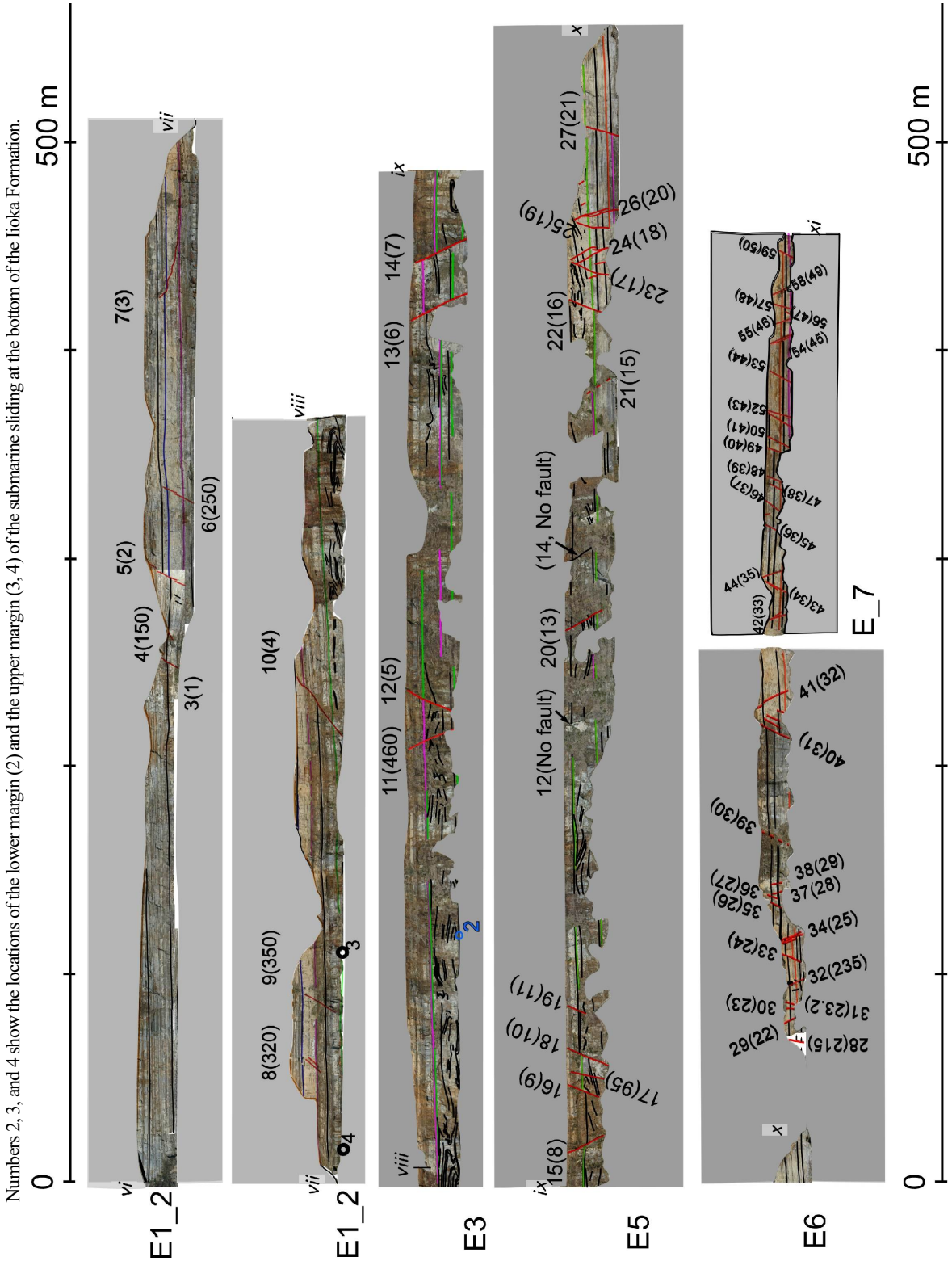
Table 1. A list of faults observed in the study area. Numbes are the final designated numbers and notes are working

Number	notes	strike	dip (°)	latitude	longitude	disappears up	disappears down	Close	Close/open	Open	Separation (cm)
1	52	279.6096	56.35852	35.69639	140.7584			1			80
2	53	258.5079	57.46377	35.70496	140.7814			1			80
3	1	212.2532	76.86685	35.71245	140.8105			1			80
4	150	247.6513	54.11478	35.71258	140.8105		1	1			
5	2	194.6883	70.1536	35.71253	140.811		1	1			60
6	250	214.0868	70.26283	35.71251	140.8114	1		1			30
7	3	Listric					1	1			
8	320	178.0172	67.26547	35.71295	140.8142	1	1	1			
9	350	195.9357	70.34221	35.71294	140.8144	1	1	1			30
10	4	231.0482	71.6931	35.71323	140.8154			1			25
11	450	0.139244	61.19181	35.71354	140.8198				1		60
12	5	180.9427	69.64223	35.71358	140.8199				1		130
13	6	357.9465	65.4063	35.71366	140.8221			1			130
14	7	2.906502	62.01913	35.71361	140.8224					1	420
15	8	355.2764	65.98342	35.71368	140.8231					1	?
16	9	186.3235	68.77397	35.7137	140.8232					1	?
17	95	177.0779	70.27394	35.71368	140.8233					1	?
18	10	164.5636	64.28571	35.71369	140.8235				1		180
19	11	146.7115	69.71252	35.71369	140.8238					1	10
20	13	353.4812	62.20781	35.71372	140.8259					1	
21	15	349.1053	60.56152	35.7137	140.8272				1		70
22	16	170.9731	64.83752	35.71377	140.8275				1		?
23	17	176.932	87.38027	35.71379	140.8278			1			10
24	18	340.6613	71.67393	35.71378	140.8279			1			20
25	19	170.8654	84.04543	35.71378	140.828			1			5
26	20	20.15746	77.87032	35.71377	140.828			1			5
27	21	193.3494	71.37724	35.7138	140.8285			1			20
28	215	349.1937	73.5387	35.71371	140.8296			1			20
29	22	3.598686	66.65381	35.71373	140.8297			1			20
30	23	171.7372	81.05978	35.71373	140.8297			1			20
31	232	6.445732	66.302	35.71375	140.8298			1			20
32	235	1.890144	64.78439	35.71369	140.8298			1			20
33	24	189.5937	73.63114	35.71374	140.8299			1			120
34	25	335.2438	68.95604	35.71371	140.8301			1			200
35	26	189.8629	70.88765	35.71373	140.8301			1			20
36	27	148.4216	73.26318	35.71372	140.8302			1			10
37	28	308.1028	78.88695	35.71371	140.8303			1			5
38	29	347.3224	82.87925	35.71369	140.8304			1			10
39	30	121.8714	62.23137	35.71367	140.8306			1			100
40	31	197.5224	66.81413	35.71369	140.831			1			100
41	32	15.07802	70.09953	35.71359	140.8314			1			80
42	33	349.2297	74.13687	35.71357	140.8317			1			30
43	34	165.9189	64.94854	35.71352	140.8319			1			220
44	35	19.19922	69.72359	35.71349	140.832			1			30
45	36	174.5101	69.07516	35.71334	140.8323	1		1			10
46	37	198.4857	57.75764	35.71334	140.8323			1			40
47	38	198.4857	57.75764	35.71327	140.8325	1		1			5
48	39	155.7478	68.35142	35.7132	140.8327			1			70
49	40	190.8026	65.88679	35.71315	140.8328	1		1			30
50	41	205.3625	78.0321	35.71311	140.8329			1			10
51	42	229.4391	73.81682	35.71306	140.833			1			40
52	43	214.1794	72.68791	35.71304	140.8332			1			15
53	44	189.3772	62.08178	35.71296	140.8335	1	1	1			10
54	45	66.22403	66.77245	35.71285	140.8338			1			20
55	46	10.32817	73.33165	35.71278	140.8341			1			30
56	47	208	60	35.71279	140.8341	1		1			10
57	48	194.6776	71.00133	35.71281	140.8341	1		1			30
58	49	70.30064	66.6434	35.71278	140.8342			1			100
59	50	228.2357	59.20786	35.71271	140.8345			1			75
59				Total number		9	6	48	5	6	

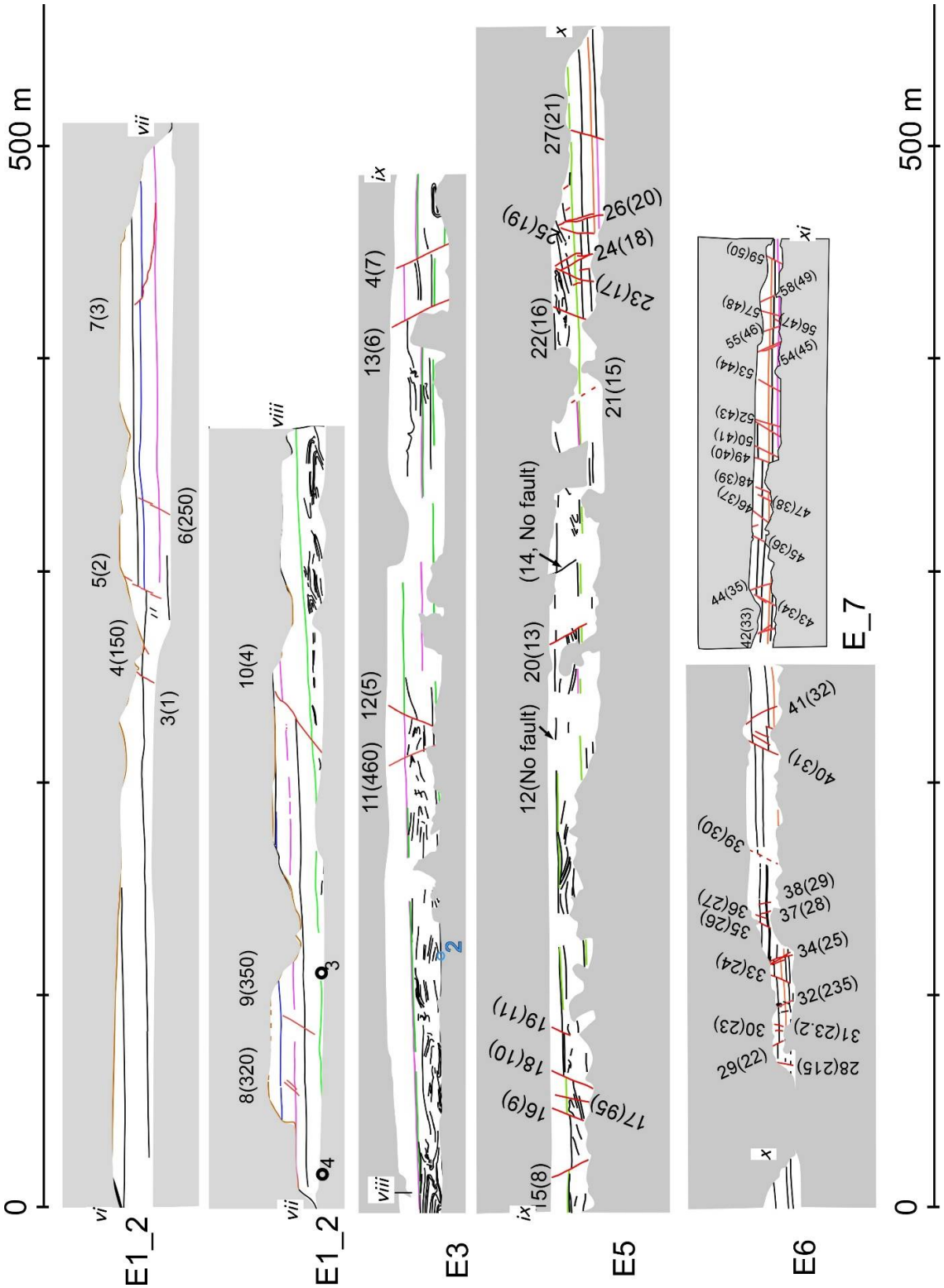


Appendix 1: Photographs of outcrops and their sketches. Faults are red, joints are blue, tuffs are pink and green lines. Black lines are other beds easily traced.

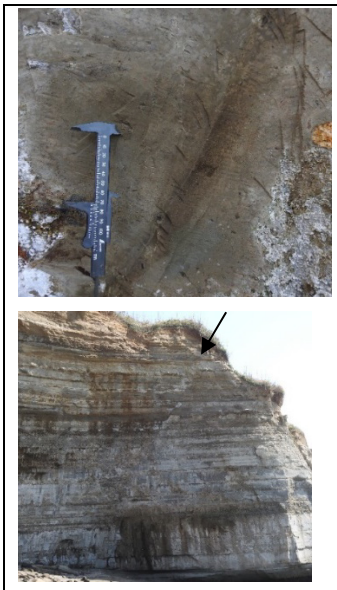

GB1
GB2
GB3
W1
W2
W3
W2-W3
W3
0
500
1000
1500 m
1000 m
i
ii
iii
iv
v
vi



Numbers 2, 3, and 4 show the locations of the lower margin (2) and the upper margin (3, 4) of the submarine sliding at the bottom of the Iioka Formation.


0
500 m
E1_2
E1_2
E3
E5
E6
E_7
vi
vii
viii
ix
x
xi
7(3)
5(2)
4(150)
3(1)
6(250)
10(4)
9(350)
8(320)
13(6)
4(7)
11(460)
12(5)
27(21)
26(20)
25(19)
24(18)
23(17)
22(16)
21(15)
(14, No fault)
20(13)
12(No fault)
19(11)
18(10)
16(9)
17(95)
15(8)
41(32)
40(31)
39(30)
38(29)
37(28)
36(27)
35(26)
34(25)
33(24)
32(235)
31(23.2)
30(23)
29(22)
28(215)
59(50)
58(49)
57(48)
56(47)
55(46)
54(45)
53(44)
52(43)
50(41)
49(40)
48(39)
46(37)
47(38)
45(36)
44(35)
43(34)
42(33)

Appendix 2. Photographs of all the faults. Numbers with green color are the fault numbers. The other numbers are working numbers.



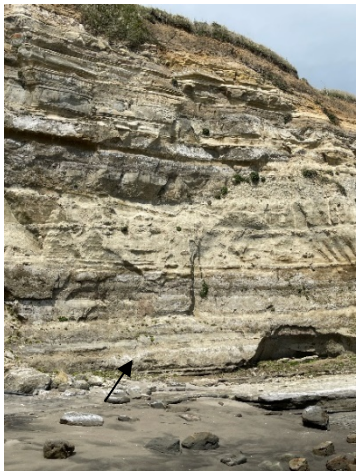
52 Nikon	1

53 Nikon	2

1	3

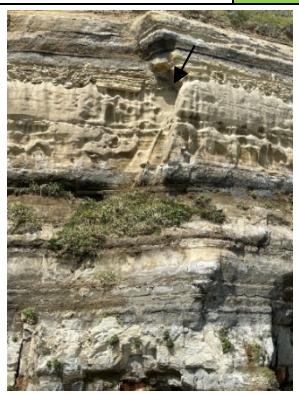
150	4

2 5096	5



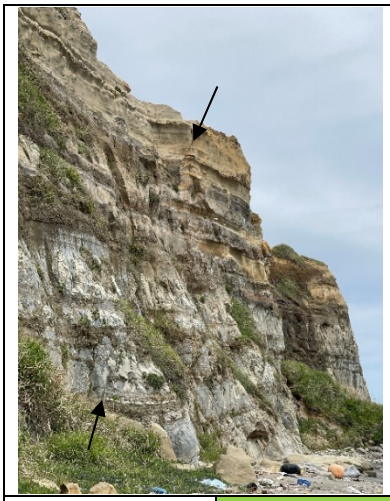
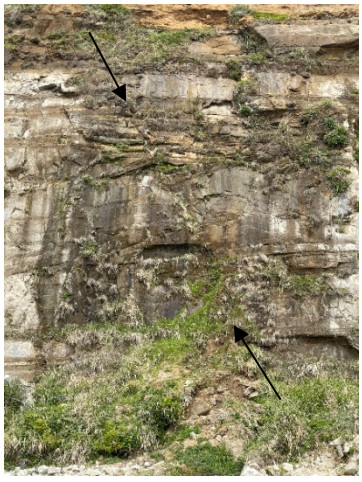
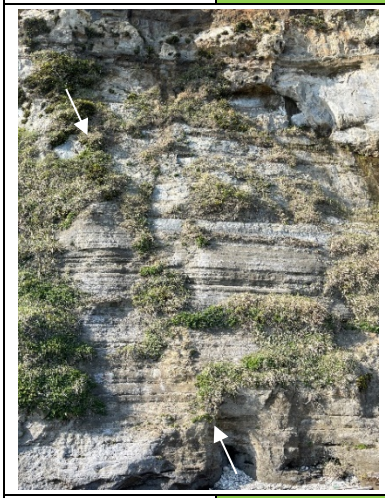
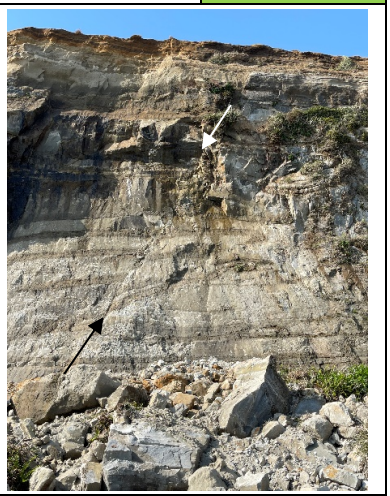
250 5095	6

3 5094	7



320 5092	8

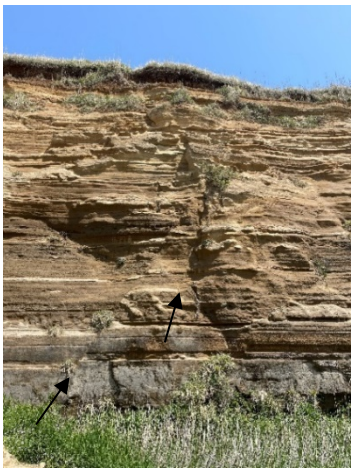
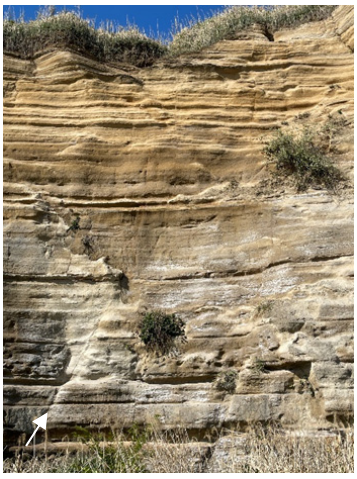
350 5091	9

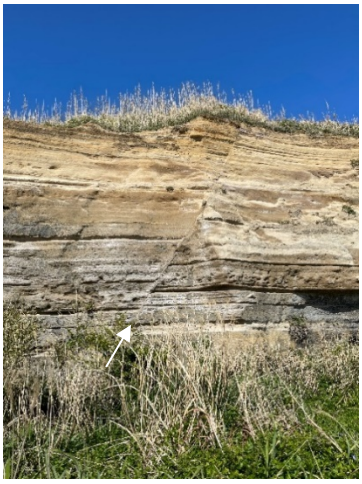
					
4 5090	10	450 5076	11	5 5075	12
					
6	13	7	14	8	15
					
9	16	95	17	10	18

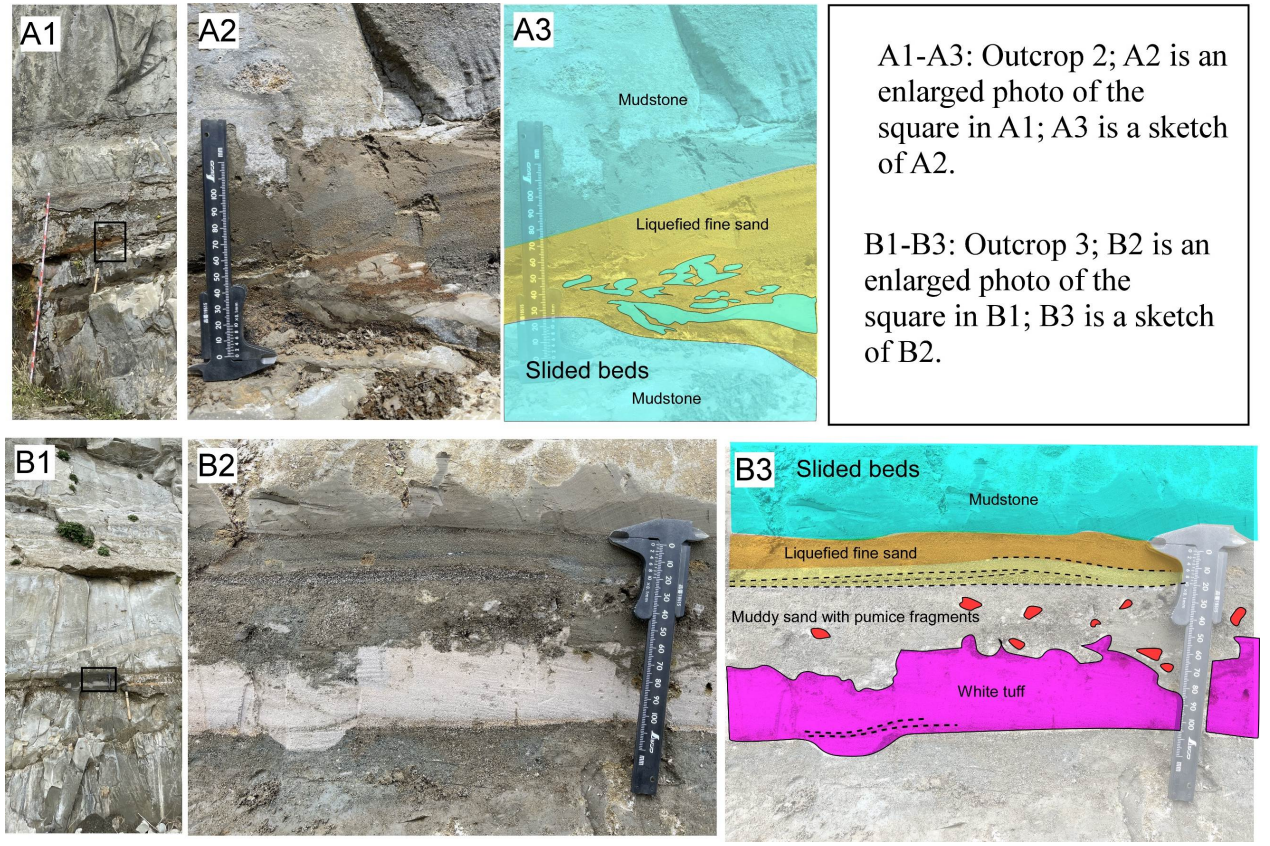
11	19	13	20	15	21
16	22	17	23	18	24
19	25	20 5043	26	21 5042	27

215　5040　28	22　5039　29	23　5038　30
23.2　5037　31	23.5　5036　32	24　5035　33
25　5034　34	26　5033　35	27, 28, 29　5032　36,　37,　38

30 5031 39	31 5029 40	32 5028 41
33 5027 42	34 5026 43	35 5025 44
36 5024 45	37 5023 46	38Nikon disappear upward 47

39 5022 48	40 Nikon disappears upward 49	41 5021 Left most: 40 5021 50
		
42, 43 5020; 43 disappears up 51,52	44 5019 53	45 5006 54
		
46 5005 55	47 Nikon, splays up 56	48 5004 splays upward 57

			
49 5003	58	50 5002	59

Appendix 3. Road stripe signs on a 3D model made from UAV data. The interval was measured approximately 3 m, which is consistent with the actual interval measured at the site. This image was captured from the model at *vi* in the profile of W3 in Appendix 1.

Appendix 4. Upper and lower margins of the submarine sliding at the bottom of the Iioka Formation. A is the upper margine and B is the lower margine. Liquefaction of fine sand seems to be the mechanism of this submarine sliding.