

## 房総半島南部見物海岸における精密地形測量と $^{14}\text{C}$ 年代測定

### Detailed topographic measurement and $^{14}\text{C}$ dating for the marine terraces in the Kenbutsu coast, the southern part of the Boso Peninsula, central Japan

宍倉正展<sup>1</sup>・行谷佑一<sup>1</sup>・小野尚哉<sup>2</sup>・神田広信<sup>2</sup>

Masanobu Shishikura<sup>1</sup>, Yuichi Namegaya<sup>1</sup>, Naoya Ono<sup>2</sup> and Hironobu Kanda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Earthquake and Volcano Geology, m.shishikura@aist.go.jp)

<sup>2</sup> 国際航業株式会社 (Kokusai Kogyo Co. Ltd.)

**Abstract:** Monitoring the erosion process of rocky shoreline topography is important to evaluate the erosional effect on the coastal geomorphological evolution quantitatively. Such evaluation is a key to reconstruct the history of paleoearthquake in the Boso Peninsula. To obtain the basic data of rocky coastal topography, we conducted detailed measurement by ground based 3D laser scanning and sounding in the Kenbutsu coast where two levels of marine terrace were identified, and made DTM (Digital Terrain Model) with resolution of 0.05 m mesh size. From elevation data of DTM and 5 samples of  $^{14}\text{C}$  age, we discussed the emergent process of marine terraces with respect to the 1923 Taisho Kanto earthquake and the 1703 Genroku Kanto earthquake. Two kinds of paleoshoreline indicator as emerged shoreline topography and uplifted sessile assemblage are observed in each level of marine terraces, but only the latter can be correlated with the historical earthquakes due to the  $^{14}\text{C}$  ages and its height distribution.

**キーワード:** 房総半島, 1923 年大正関東地震, 1703 年元禄関東地震, 海岸段丘, 地上レーザスキャン,  $^{14}\text{C}$  年代測定

**Keywords:** Boso Peninsula, 1923 Taisho Kanto Earthquake, 1703 Genroku Kanto Earthquake, marine terrace, ground based 3D laser scanning,  $^{14}\text{C}$  dating

#### 1. はじめに

最近, 首都直下地震に関する国の想定 (内閣府, 2013) や相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (地震調査委員会, 2014) が相次いで公表され, 首都圏における将来の大地震に対する社会の関心が高まっている. その中で, M8 クラスのいわゆる関東地震については, 当面は発生の可能性は低いとみなされている. 一方で近年, 相模トラフ沿いにおいて歴史上知られている 1923 年大正関東地震 (以下, 大正地震) や 1703 年元禄関東地震 (以下, 元禄地震) 以外に, 房総半島南東沖を震源とする未知の関東地震が存在する可能性も指摘されるようになった (Shishikura, 2014). また GNSS 観測による房総半島南部周辺の滑り欠損速度は, およそ 30 mm/年と推定されており (西村, 2012), この速度で長期にわたり歪みが蓄積しているとすれば, 次の地震が切迫している可能性もある. このため, 相模トラフ沿いの地震の履歴解明とそれに基づく多様性の評価が重要な課題となっている.

これまで相模トラフ沿いにおける地震の履歴は, おもに南関東沿岸に発達する海岸段丘の調査結果にもとづいた検討が行われてきた (Sugimura and

Naruse, 1954 など). 房総半島南部の海岸段丘には, 過去約 7200 年間に少なくとも 15~16 回分の関東地震が記録されており, そのうち 4 回は特に隆起の大きい「元禄型」と考えられてきた (宍倉, 2003 など). しかし, 海岸段丘の証拠は, あくまで現在観察できる地形の情報のみに基づいており, 侵食等によって痕跡が失われたイベントがある可能性は否定出来ない.

地形・地質学的な手法によって過去のイベントを復元する上で, 侵食による記録の欠損の可能性は避けて通れない課題である. しかし過去の侵食の評価というのは非常に難しく, 基本的には現在起こっている現象の観察に基づいた推定に頼らざるをえない. そこで本研究では, 房総半島南部沿岸において, 現在進行しつつある海岸侵食の定量的な評価を行い, そこから過去の履歴復元における侵食の影響を考えるため, まず長期的なモニタリングの基本となる地形精密測量を実施した.

対象としたのは東京湾側に面する千葉県館山市の見物海岸である (第 1 図). この海岸では, 明確な 2 段の海岸段丘が特徴である (第 2 図). これらは宍倉 (2003) によって高位の段丘が元禄地震, 低位の段丘が大正地震に関連していると報告されている. 一方

で、周辺住人の証言などから、低位の段丘は、1923年より前の時点ですでに存在していたことが指摘され、むしろ元禄地震に関連しているという見解もある（松田時彦私信）。そこで段丘地形と地震との関係を確認することも本研究の目的の一つとし、かつての海岸線付近（旧汀線）で形成されたと推定される波食棚やノッチなどの離水海岸地形やそこに固着した生物遺骸も含めて地形計測を行った。また同時に、隆起生物遺骸群集について試料を採取し、 $^{14}\text{C}$ 年代測定も行った。

本稿では精密地形測量や $^{14}\text{C}$ 年代測定の実施内容を報告するとともに、そこで得られた現成および離水海岸地形、隆起生物遺骸群集の高度分布と $^{14}\text{C}$ 年代のデータに基づいて、歴史地震による隆起との関係や、離水過程について考察を行った。

## 2. 精密地形計測の調査内容

地形精密測量は千葉県館山市見物海岸において実施した（第2図、第3図）。陸域では地上型レーザスキャナ等を用いた90m×60m程度の範囲の測量、海域では90m×30m程度の範囲の深淺測量を行った。

海岸地形の測量は、潮位の影響を大きく受ける。このため陸域の計測の場合、より広域で波食棚が露出する干潮の時間帯で、なるべく潮位が低くなる大潮の時期に実施する必要がある。逆に海域の計測の場合は、満潮時の方が適している。そこでこれらの測量は、年間で最も潮位差が大きくなる時期を狙い、2013年5月21～22日の満潮時に深淺測量、2013年5月23～26日の干潮時に陸域の地上レーザ計測を行った。以下にそれぞれの調査内容を記す。

### 2.1 地上レーザ計測

地上レーザ計測では、まず海岸地形の位置と形状の概略を把握すること、および植生分布域の地形を把握することを目的として概略計測を実施した。使用する地上型レーザスキャナ（リーグル社製LMS-Z420i）の精度は、測距精度：8mm以内、レーザ拡散能：100m先で3cm径以内（位置精度約1.5cm）である。

次に現在の波打ち際に形成されている波食棚、ノッチ、海食溝等、入り組んだ地形の形状を詳細に把握するため、146地点で詳細計測を行った（第4図）。使用する地上型レーザスキャナ（Faro社製Focus3D）の測距精度は2mm以内である。

これらの計測では、概略、詳細とも、カラー画像の取得も同時に実施し、地上レーザスキャナ計測点との一体化を図るものとした。また地上レーザスキャナ計測による測量が難しい箇所（波食棚上のタイドプールなど）についてはトータルステーションによる補備測量を行った。さらに概略計測と詳細計測の合成、座標変換を行い世界測地系に変換するため、

トータルステーションによる基準点測量を実施した。最寄りに既設基準点がなかったため、GNSS測量によってオリジナルの簡易基準点を5点設けた。これらの簡易基準点は、今後、長期的な侵食のモニタリングを行う上でも基準とするため、土地管理者の了解のもとで残置した。

### 2.2 深淺測量

見物海岸は、海面下でも比較的浅い水深に岩礁が分布するため、通常の船舶による測深は困難である。このため測深機を搭載したラジコンボート（以下RCボート）を用い、地上から遠隔操作によって深淺測量を行った（第5図）。深淺測量に使用したRCボート（コデン社製RC-S2）は、全長1.06m、重量13kg、測深分解能1cm、測深範囲0.5～80mである。

深淺測量の測線は、海岸線に対して直交方向に37測線で計画した（幅90mの範囲内を2.5m間隔で設定）。現地では地形変化等の状況に応じて補測し、結果的に海岸線に直交する方向で60測線（幅120mの範囲内を平均2.0m間隔）、海岸線に平行する方向で20測線の高密度データを取得した（第6図）。

## 3. 測量データの処理

地上型レーザスキャナ測量（概略・詳細）および補備測量により取得された地形・地物点群データを基に、陸域のDTM (Digital Terrain Model) を作成した。まず複数のスキャンデータを一つの座標系に変換、合成し、ノイズ等の分離後、3次元座標データを用い、近接する測点座標同士を結線し、三角網モデル (TINモデル) を発生させた。

陸域におけるDTMのグリッドサイズはおよそ0.05m (5cm) 以下程度とし、波打ち際の地形については、今後の侵食によるcmオーダーの地形変化が把握可能な分解能とした。なお、このDTMは完全3Dモデルとし、オーバーハング部や急傾斜部分を再現するものとした。

深淺測量で取得した水深データは、第7図のフローに示す通り、音速度、潮位データはよって補正等を行い、位置と標高の三次元データに変換処理した。変換処理したデータを地形データとして構築するために、水中の気泡等によって生じるノイズの除去処理を行うものとした。ノイズ除去はフィルタリング処理（統計処理的手法）や目視確認によるマニュアル除去処理を用い、異常値を除去するものとした。

フィルタリングしたデータは、TINモデルを用いた内挿補間により2m×2m格子のメッシュデータに変換し、海域地形モデリングを行った。さらに、処理ソフトウェア上必要となる十分なデータ密度を確保するために、この海底地形モデルに対し0.05m間隔の3次元等高線を発生させ、そのコンタに対し内挿補間で0.05m×0.05m格子のメッシュデータを生

成することで海域のDTMを再構築した。これを前述の陸域におけるDTMと統合、合成し、ハイブリッドDTMを作成した。

#### 4. 地形断面図の作成とその観察

構築したハイブリッドDTM等を用い、海岸地形について、その地形・形状の特徴を可視化するために、標高の色相や傾斜のレンジを選択させて微小な凹凸の表現した図(ELSAMAP)と任意3D鳥瞰図および等高線平面図等を作成した。これらのうち鳥瞰図を第8図に、等高線平面図を第9図に示した。

また海岸地形の形状を把握する上で必要な縦横断面図を作成した。測線の位置は、作業において基準とし易い道路縁を基線方向として縦断面の測線(B測線)を設定し、その直角方向として横断面の測線(A測線)を設定した。縦断面は3m毎に30測線、横断面は1m毎に90測線の計120測線となる断面図を作成した。測線の位置を第10図、横断面図を第11図、縦断面図を第12図にそれぞれ示す。なお、これらの縦横断面図の作成には、急斜面、オーバーハング部を再現した完全3DハイブリッドDTMを用いた。

これらの地形断面図に基づいて現成の地形の高度分布を観察すると、波食棚がおおよそ標高 $-1.0\sim 0.1\text{ m}$ に分布していることがわかる。その陸側内縁の遷急点(汀線アングル)やノッチの最も窪んだ部分(リトリートポイント)は、標高 $-0.24\sim 0.82\text{ m}$ の範囲に分布しているが、おおよそ標高 $0.2\sim 0.5\text{ m}$ に集中している。気象庁の潮位統計(<http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/gaikyo/nenindex.php>)に基づく、本地域の最寄りの験潮所である布良では、2006~2010年の5年間における平均海面が、ほぼ標高値とみなすことができ、満潮位と干潮位の平均値がそれぞれ標高 $0.73\text{ m}$ と $-0.90\text{ m}$ であることから、これらの地形がおおよそ潮間帯で形成されていることがわかる。

次に2段ある段丘の形状についてみると、まず低位の段丘の地形断面から、離水波食棚の高度はおおよそ標高 $1.5\sim 2.4\text{ m}$ の範囲内に分布していることがわかる。また離水したノッチおよび汀線アングルの地形は、標高 $2.12\sim 2.79\text{ m}$ の範囲に分布するが、標高 $2.2\sim 2.3\text{ m}$ に集中しているように見える。高位の段丘面は、一部土壌や植生などに被覆されているが、基盤岩の露出部分について見ると、離水波食棚の高度はおおよそ標高 $4.7\sim 5.6\text{ m}$ である。なお、高位の段丘面に関連したノッチは、地形計測した範囲内には分布していない。

#### 5. 隆起生物遺骸群集の試料の採取と処理

本研究で対象とした見物海岸は、前述のとおり、明確な2段の海岸段丘が特徴である(第2図)が、それぞれの段丘崖周辺には、離水した生物遺骸群集

も固着していることが確認される。これらの試料を採取し、 $^{14}\text{C}$ 年代測定を実施した。

まず隆起、離水の過程を考察する上で、基本となる現成の生物群集について観察した。房総半島や三浦半島では、従来から平均海面の指標としてヤッコカンザシ(*Pomatoleios kraussii*)の有効性が指摘されている(茅根ほか, 1987)。本地域においても、現成の波食棚周辺にヤッコカンザシやマガキ(*Crassostrea gigas*)などの群集が観察され、おおよそ標高 $-0.4\sim 0.3\text{ m}$ に分布していることを確認した(第13図)。

離水した生物遺骸群集については、まず低位の段丘と現成の波食棚とを境する海食崖およびノッチの上部、標高 $1.0\sim 1.7\text{ m}$ の間に、おもにマガキおよびヤッコカンザシからなる生物遺骸群集が固着している様子が観察された(第14図)。そこで、この群集のうち、上部からヤッコカンザシ(L1: 標高 $1.7\text{ m}$ )とマガキ(L2: 標高 $1.6\text{ m}$ )、下部からヤッコカンザシ(L3: 標高 $1.0\text{ m}$ )をそれぞれ採取した。

高位の段丘と低位の段丘とを境する海食崖にも、海食洞状の窪みの壁面に、隆起、離水したヤッコカンザシやマガキが固着している様子が観察される(第15図)。分布高度は標高 $4.0\sim 4.6\text{ m}$ の範囲にあり、このうち標高 $4.3\text{ m}$ 付近から、ヤッコカンザシ(H1)とマガキ(H2)の試料をそれぞれ採取した。

各レベルで採取した合計5点の試料については、実験室において、小型ドリルを用いて新鮮な石灰殻を抽出し、表面に付着した藻類や泥を除去した後、 $0.1$ 規定の塩酸でエッチングした。さらに実体顕微鏡による観察で溶解や生成物の付加など試料の変質がないか確認した。 $^{14}\text{C}$ 年代測定は株式会社地球科学研究所を通じてベータアナリティック社に依頼した。

#### 6. 隆起生物遺骸群集の $^{14}\text{C}$ 年代測定結果

前章で得られた試料の $^{14}\text{C}$ 年代測定結果を第1表に示す。規定の $^{14}\text{C}$ 年代は、低位から得られた試料がL1:  $410\pm 30\text{ yBP}$ , L2:  $430\pm 40\text{ yBP}$ , L3:  $440\pm 30\text{ yBP}$ , 高位から得られた試料がH1:  $550\pm 30\text{ yBP}$ , H2:  $570\pm 40\text{ yBP}$ であった。これらについて、暦年較正曲線IntCal 13およびMarine 13(Reimer *et al.*, 2013)を用いて較正した。その際、海洋リザーバ効果については $\Delta R=0$ とした。その結果、L1: AD 1839~post 1950年, L2: AD 1766~1785年, 1804~post 1950年, L3: AD 1819~post 1950年, H1: AD 1678~1870年, H2: AD 1656~1876年となった(第16図)。これらの値は、誤差の幅はあるものの、低位の試料は大正地震の年代(AD1923年)、高位の試料は元禄地震の年代(AD1703年)が、それぞれの年代幅の中に収まっている。

なお $\Delta R$ に関しては、Shishikura *et al.* (2007)が、本地域に近い三浦半島において $82\pm 33$ という値を提案している。これを採用すると、いずれの較正年代

値も誤差幅が広がり、全体的に数十年若くなる。しかし本研究ではこの  $\Delta R$  は使用せず、世界平均である  $\Delta R=0$  を用いた値で議論を進める。三浦半島の  $\Delta R$  を採用しなかった理由は第 8 章で説明する。

## 7. 隆起量の推定

### 7.1 離水海岸地形からみた隆起量

地形断面の観察に基づいて、現成の地形と離水地形とを比較すると、現成の波食棚内縁およびノッチのリトリートポイントといった汀線を示す地形の高度がおおよそ 0.2~0.5 m にあるのに対し、低位の段丘でそれらに類似した離水海岸地形の高度は 2.2~2.3 m にあり、1.7~2.1 m 程度高い。したがって両者を対応させると、離水以降、現在までの残留隆起量はおおよそ 2 m 程度となる。

低位の段丘は、従来大正地震に関連しているとされていた(宍倉, 2003)。本地域の大正地震時における隆起量は、陸地測量部(1926)によれば、見物海岸の最寄りの一等三角点(房大山)で 1.57 m と報告されている。したがって低位の離水海岸地形からみた残留隆起量は、大正地震時の隆起量より大きいことになる。この点については第 9 章で議論する。

高位の段丘については、本研究で実施した計測範囲内に、直接的に旧汀線を示す地形は認められないため、厳密な議論はできない。しかし離水波食棚は観察される範囲で標高 4.7~5.6 m にあり、低位の段丘の離水波食棚(標高 1.5~2.4 m)とは 2.3~4.1 m (平均的に見て 3 m 程度)の高度の差がある。すなわち高位の離水海岸地形が離水以降、低位の離水海岸地形が離水するまでの間の残留隆起量は 3 m 程度と推定される。

### 7.2 隆起生物遺骸群集からみた隆起量

平均海面付近に生息する現成のヤッコカンザシやマガキの生物群集の高度は、標高 -0.4~+0.3 m に分布している。これに対し、低位の隆起生物遺骸群集の高度は、標高 1.0~1.7 m にある。ヤッコカンザシ群集は上限高度がよく揃っており、基準面として認識しやすい(茅根ほか, 1987)ことから、上限高度の比高を見ると、1.4 m である。したがって低位の群集離水以降、現在までの残留隆起量はおおよそ 1.4 m で、低位の離水海岸地形からみた値に比べておおよそ 0.6 m 程度小さく、大正地震時における隆起量と比べると、0.2 m 程度小さい。

房総半島南端に位置する布良の験潮データによれば、1931 年以降の年平均潮位は年間 3 mm 以上の速度で沈降傾向にある(国土地理院, 2014a, b)。これを考慮すると、低位の隆起生物遺骸群集の大正地震時の高度は現在より 0.3 m 程度高かったことになる。したがって推定される隆起量は 1.7 m となり、測地で報告された大正地震時の隆起量とおおむね一致す

る。第 6 章で示した  $^{14}\text{C}$  年代値と併せて考えると、低位の隆起生物遺骸群集は、大正地震で隆起、離水したものと考えて間違いないだろう。

高位の隆起生物遺骸群集の高度は標高 4.0~4.6 m であり、低位の群集と上限高度で比べると、2.9 m の比高がある。すなわち高位の群集が離水以降、低位の群集の離水までの間の残留隆起量は 2.9 m 程度である。第 6 章で示した  $^{14}\text{C}$  年代値からみて、高位の群集は元禄地震時に隆起、離水した可能性が高い。1703 年の離水以降、1923 年の大正地震までの 220 年間に、年間 3 mm の速度で沈降したと仮定すると、累積で約 0.7 m 沈降したことになる。この分を考慮すれば、元禄地震時の隆起量は、3.6 m と推定される。

## 8. 隆起生物遺骸群集の $^{14}\text{C}$ 年代と海洋リザーバ効果について

第 6 章で示した隆起生物遺骸群集の  $^{14}\text{C}$  年代は、低位、高位とも、海洋リザーバ効果を  $\Delta R=0$  とした場合に、較正值が大正地震と元禄地震の年代(AD1923 年と AD1703 年)とそれぞれ誤差範囲で一致した。特に低位の群集に関しては、7.2 章で述べたように、推定される隆起量が測地データとほぼ一致し、大正地震で離水したことが明らかである。Shishikura *et al.* (2007) は三浦半島において、測地による大正地震時の隆起量と一致する高度の隆起生物遺骸群集について、AD1923 年に離水して死滅した試料とみなし、その  $^{14}\text{C}$  年代から  $\Delta R$  を評価している。この手法を本地域でも用いるのであれば、本来は 7.2 章での議論に基づいて、低位の群集の  $^{14}\text{C}$  年代から逆に  $\Delta R$  を評価することになる。この場合、本地域の  $\Delta R$  は 0 に近い値になり、三浦半島の値 ( $82\pm 33$ ) とは若干ずれることを意味する。しかしながら本稿でこの議論を進めると、循環論になるおそれがあることから、ここでは世界平均の  $\Delta R=0$  で代表することにした。

いずれにせよ、本研究で得られた年代値は非常に新しく、高位、低位ともに最近 300~400 年以内に、間欠的な隆起によって離水した生物遺骸群集であることは確実であり、それぞれ元禄地震、大正地震に対比されると考えられる。本地域と三浦半島との間の  $\Delta R$  のずれとその原因については、別稿で改めて議論することとしたい。

## 9. 低位の離水海岸地形の成因に関する議論

本研究で海岸地形を詳細に計測した結果、高位の段丘、低位の段丘とも、離水海岸地形と隆起生物遺骸群集とは、旧汀線と思われるレベルが異なり、そこから推定される隆起量も異なることが明らかになった。特に低位の段丘に関しては、両者の間におおよそ 0.6 m の差がある。測地データとの関係からみると、隆起生物遺骸群集の方が、大正地震時の汀線をより正確に示していることがわかる。この場合、

残された低位の離水海岸地形の方が、いつどのよう  
に離水したのかが問題となる。そこでいくつかの可  
可能性について以下で議論する。

### 9.1 大正地震より前の隆起イベントの可能性

もし低位の離水海岸地形が、大正地震より前の地  
震で隆起、離水していた場合、まず元禄地震の可能  
性が挙げられる。しかしおよそ2 m高い位置にある  
高位の隆起生物遺骸群集の方が、<sup>14</sup>C年代値からみて  
元禄地震時の汀線を示すと考えられるため、この可  
可能性は否定される。一方、例えば低位の離水海岸地  
形が、元禄地震よりも前にすでに形成されており、  
何らかの理由で2 m程度沈水した後、元禄地震時に  
一気に隆起、離水したとすれば、これらの位置関係  
が説明可能である。ただし2 mもの沈水の原因も同  
時に説明する必要があり、あまり現実的な考えでは  
ない。

次に元禄と大正の地震との間の時期に生じた別の  
地震による隆起の可能性について考える。関東にお  
ける江戸時代中期以降の地震は、比較的豊富に残さ  
れており、房総半島南部の海岸が隆起するような地  
震であれば、地変だけでなく揺れや津波の記録も南  
関東で広く記録されていてもおかしくない。しかし  
今のところ該当するイベントが見当たらないことか  
ら、この可能性は低いと言える。

また非地震性の隆起や海面自体の変動など、比較  
的緩慢な変動の可能性もありうる。一般的にはプレ  
ート間地震の場合、地震間は沈降するセンスであり、  
実際に大正地震後は沈降傾向にあることが測地でわ  
かっている(国土地理院, 2014a, b)。しかし、実際  
に1サイクル分の変動がすべて観測されているわけ  
ではないことや、緩慢な現象が歴史記録に残りにく  
い可能性も考慮すると、元禄地震以降、大正地震ま  
での間のある時点で非地震性の隆起や海面自体の低  
下があった可能性は否定できない。

しかしいずれにせよ、元禄、大正の地震時以外の、  
ある時期の汀線が離水したのであれば、この低位の  
離水海岸地形のレベル(標高2.2~2.3 m付近)に対  
応する生物遺骸群集が同時に残っていても良いはず  
であるが、それが見当たらないというのは不自然で  
ある。

### 9.2 高潮位で形成された波食地形の可能性

このほかの可能性として、低位の離水海岸地形が、  
平均海面を示した地形ではなく、大正地震の頃にも  
とも高潮位のレベルで形成されたものが隆起、離  
水したという考え方もできる。低位の隆起生物遺骸  
群集の高度を基準にすれば、低位の離水海岸地形は、  
大正地震時の平均海面からおよそ0.6 m高かったこ  
とになる。本地域の高潮位の平均値(2006~2010年  
の平均)が標高0.73 mであることを考えると、当時  
は高潮位時に海面下に没していたことになり、完全

には離水していなかったと考えられる。波食地形は、  
必ずしも平均海面付近のみに形成されるとは限らず、  
低潮位や高潮位、さらには波浪時にのみ波をかぶる  
ようなレベルに作られる波食棚やノッチもある(Bird,  
2008など)。本地域の現成の地形を見ても、第11図  
の測線A-38から測線A-35の水平距離35~40 m付  
近において、部分的に高潮位のレベルに対応すると  
思われる波食棚が観察され(第17図)、その汀線ア  
ングルやノッチは標高1.07~1.14 mにある。したがっ  
てこの可能性は十分ありうる。またこの考えに立て  
ば、低位の離水海岸地形のレベルに対応した生物遺  
骸群集がないことの説明もつく。また大正地震前か  
らすでに低位の段丘が存在していたという周辺住人  
の証言についても、高潮位時以外は常に露出して  
いた波食棚について述べたもの、と解釈できる。しかし、  
大正地震に関連した波食地形が、高潮位に対応した  
ものしか残っていないというのは疑問が残るところ  
である。

同様に高位の段丘における離水波食棚も、高位の  
隆起生物遺骸群集の高度に比べて0.7~1.0 m高く、  
元禄地震時の平均海面に対応した波食地形は、こ  
こでは見られない。ただし周辺の海岸地形の調査で  
は、標高4.5~4.7 m付近に汀線アングルを持つ段丘が観  
察されており(宍倉, 2000)、高位の隆起生物遺骸群  
集と同レベルで、元禄地震時の平均海面に対応した  
地形は確認されている。

このように、現時点では見物海岸の離水海岸地形  
の成因に関して、必ずしも有効な考えを示すことは  
できていない。潮位と地形形成との関係は、今後の  
地形の再計測によるモニタリングに基づいて、侵食  
過程の評価の中から解明していく必要があるだろう。

## 10. まとめと今後の課題・展望

本研究では、房総半島南部見物海岸における地形  
の詳細な形状と高度を把握し、現成の海岸地形の侵  
食過程のモニタリングおよび離水海岸地形の形成過  
程を解明するため、地上レーザ計測および深淺測量  
による精密地形計測を実施した。その結果、現成の  
汀線付近の地形が標高0.2~0.5 mにあり、平均海面  
の指標となるヤッコカンザシ等の生物群集が標高  
-0.4~0.3 mに分布することが明らかになった。

これに対し、2段ある段丘の、低位の離水海岸地  
形は標高2.2~2.3 m、隆起生物遺骸群集は標高1.0~  
1.7 mであり、高位についてはそれぞれ標高4.7~  
5.6 m、4.0~4.6 mと、同じ段丘に関連していても、  
離水海岸地形と隆起生物遺骸群集との間で高度差が  
あることが明らかになった。

隆起生物遺骸群集については、<sup>14</sup>C年代測定を実施  
した結果、低位が大正地震、高位が元禄地震に対比  
される。これらの年代と、測地による大正地震時の  
隆起量や地震後の沈降速度を考慮すると、大正地震

時の旧汀線高度は、隆起生物遺骸群集が示す標高 1.0～1.7 m であり、元禄地震の旧汀線高度も同様に標高 4.0～4.6 m である。一方、離水海岸地形については、別の地震性隆起や非地震性の変動によって離水した可能性、高潮位で形成された地形の可能性など、いくつかの考え方があがるが、現時点ではまだ明確な成因は不明である。今後は本地点だけでなく、周辺地域で同様の離水海岸地形と隆起生物遺骸群集との関係を調べて検証していく必要がある。

また、本研究の大きな目標である長期的モニタリングによる海岸地形の侵食過程の評価のため、今後 5 年、10 年といった長いスパンで、定期的に精密地形測量を続けていかなければならない。その中で、本研究で課題となった離水海岸地形と潮位との関係なども明らかになっていくことが期待される。

ところで本研究では、取得した高解像度の地形データを使用し、3D プリンタによって約 1/200 スケールの立体模型も製作している。芝原・宍倉 (2014) は、これに RGB の画像データなど様々な情報を上方から投影してプロジェクションマッピングを行い、地震による隆起と海岸の離水の状況が視覚的に理解できるようにした (第 18 図)。これは博物館等での展示により、広くアウトリーチに役立てることが期待され、すでに国立歴史民俗博物館企画展示「歴史にみる震災」(2014 年 3 月 11 日～5 月 6 日開催) や地質標本館 2014 年夏の特展「地質アナログ模型の世界」(2014 年 7 月 15 日～10 月 13 日開催) などにて展示実績がある。

**謝辞** 本稿は丸山 正博士の査読によって改善された。記して謝意を表します。本研究における地上レーザースキャンおよび深淺測量は、平成 23 年度第 3 次補正予算「複合地質リスク評価プロジェクト」の一部として実施した。一部の図は Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel and Smith, 1998) を利用して作成した。

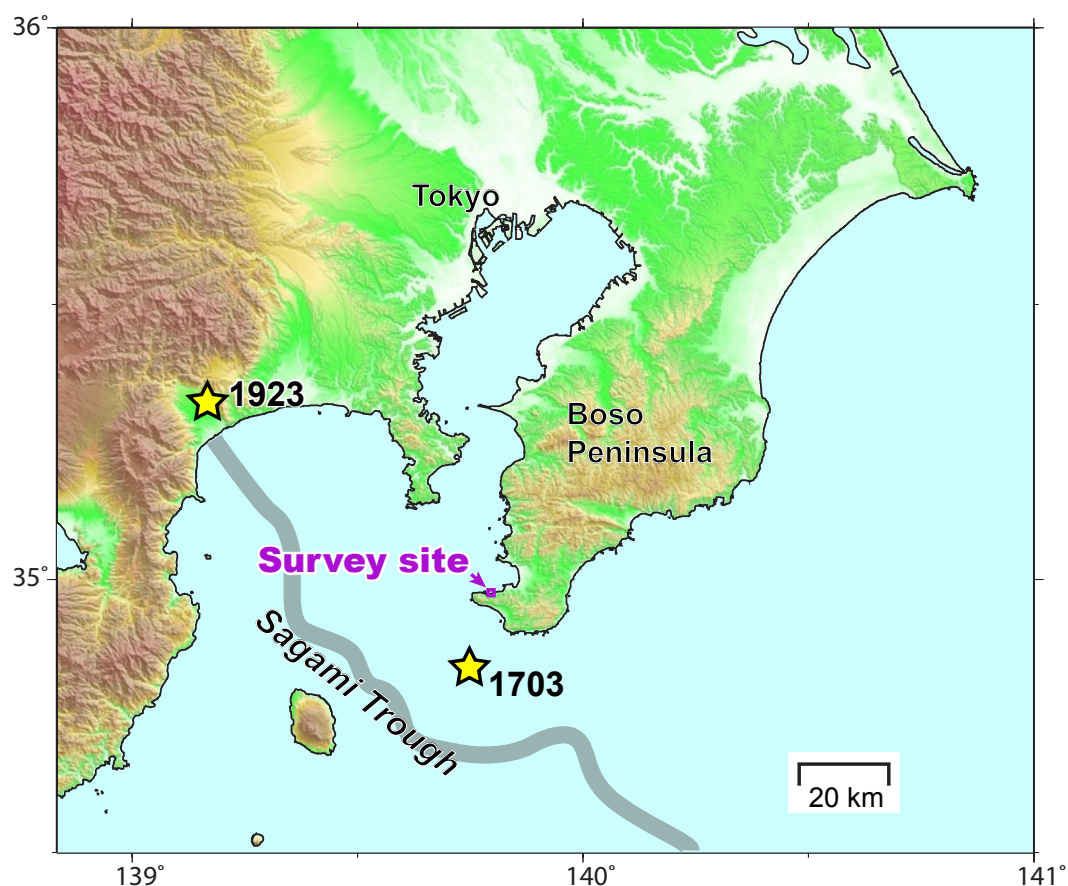
## 文 献

- Bird, E. (2008) Coastal Geomorphology: An Introduction, second edition. Wiley, 436p.
- 地震調査委員会 (2014) 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (第二版) について. 81p.
- 茅根 創・山室真澄・松本英二 (1987) 房総半島南東岸における旧汀線の指標としてのヤッコカンザシ. 第四紀研究, 26, 47-57.
- 国土地理院 (2014a) 日本列島沿岸の年平均潮位一海域 III. <http://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/graph/kaiiki3.html>
- 国土地理院 (2014b) 日本全国の地殻変動. 地震予知連絡会会報, 91, 8-23.
- 内閣府 (2013) 首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書. 45p.
- 西村卓也 (2012) 関東南部の地震間地殻変動とプレート間カップリング. 地震予知連絡会会報, 88, 521-525.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. Radiocarbon, 55, 1869-1887.
- 陸地測量部 (1926) 関東震災地一帯に於ける土地の隆起及沈下状態. 地震研究所彙報, 1, 65-68.
- 芝原暁彦・宍倉正展 (2014) 海岸段丘レーザースキャン計測データの 3D プリンタによる立体造形と、国立歴史民俗博物館でのプロジェクションマッピング展示について. GSI 地質ニュース, 3, 225-227.
- 宍倉正展 (2000) 離水海岸地形からみた 1703 年元禄関東地震における房総半島の地殻上下変動. 歴史地震, 16, 113-122.
- 宍倉正展 (2003) 変動地形からみた相模トラフにおけるプレート間地震サイクル. 東京大学地震研究所彙報, 78, 245-254.
- Shishikura, M. (2014) History of the paleo-earthquakes along the Sagami Trough, central Japan -Review of coastal paleoseismological studies in the Kanto region-. Episodes, 37, 246-257.
- Shishikura, M., Echigo, T., Kaneda, H. (2007) Marine reservoir correction for the Pacific coast of central Japan using  $^{14}\text{C}$  ages of marine mollusks uplifted during historical earthquakes. Quaternary Research, 67, 286-291.
- Sugimura, A. and Naruse, Y. (1954) Changes in sea level, seismic upheavals, and coastal terraces in the Southern Kanto Region, Japan (I). Jap. Jour. Geol. Geogr., 24, 101-113.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子 (2013) 日本被害地震総覧 599-2012. 東京大学出版会, 724p.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. EOS Trans. AGU, 79, 579.

(受付: 2014 年 8 月 26 日, 受理: 2014 年 9 月 25 日)

第 1 表.  $^{14}\text{C}$  年代測定結果.  
Table 1.  $^{14}\text{C}$  dating result.

location	sample name	altitude (m)	species	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	conventional $^{14}\text{C}$ age (yr BP)	calendar age $2\sigma$	lab. Code
	L1	1.7	<i>Pomatoleios kraussii</i>	-2.4	410 ± 30	AD 1839 - post 1950	Beta-312403
Lower terrace	L2	1.6	<i>Crassostrea gigas</i>	-0.7	430 ± 40	AD 1766 - 1785 AD 1804 - post 1950	Beta-293997
	L3	1.0	<i>Pomatoleios kraussii</i>	-3.5	440 ± 30	AD 1819 - post 1950	Beta-312405
Higher terrace	H1	4.3	<i>Pomatoleios kraussii</i>	-0.2	550 ± 30	AD 1678 - 1870	Beta-312402
	H2	4.3	<i>Crassostrea gigas</i>	+2.3	570 ± 40	AD 1656 - 1876	Beta-293996



第 1 図. 調査地域の位置. 星印は宇佐美ほか (2013) による歴史地震の震央の位置を示す.  
Fig. 1. Location map of the surveyed area. Stars represent the epicenter of historical earthquakes after Usami *et al.* (2013).



第2図. 見物海岸における精密地形測量の様子.  
Fig. 2. Working scene of detailed measurement in the Kenbutsu Coast.

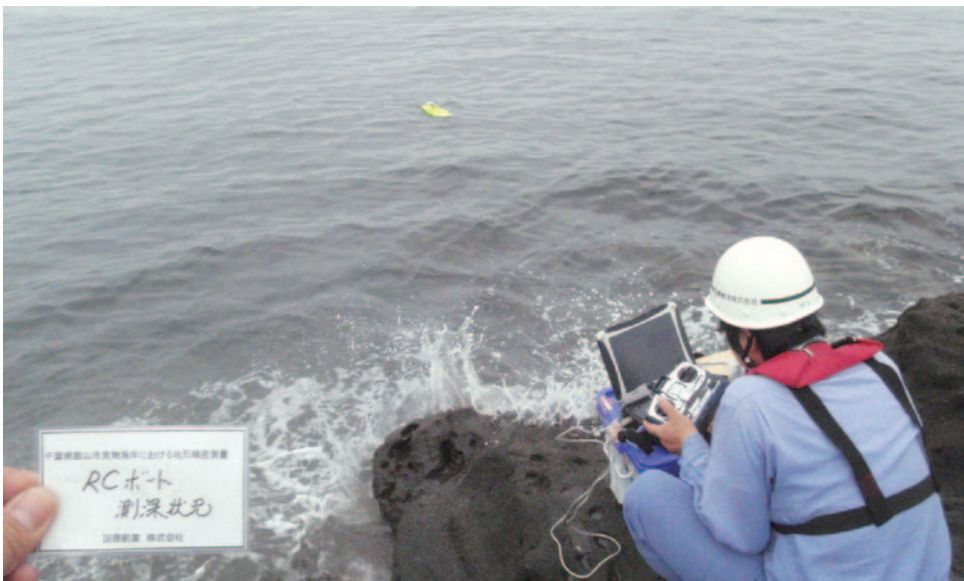


第3図. 精密地形測量を実施した範囲. 黄色の枠は深淺測量も含めた全体の計測範囲. 水色の枠は地上型レーザスキャナによる概略計測の範囲. 紫色の枠は地上型レーザスキャナによる詳細計測の範囲. Google Earth 使用.  
Fig. 3. Survey area of detailed measurement. Yellow frame encloses whole of survey area including sounding. Light blue frame encloses rough scanning area by ground based 3D laser scanner. Purple frame encloses detailed scanning area by ground based 3D laser scanner. Base map is Google Earth.

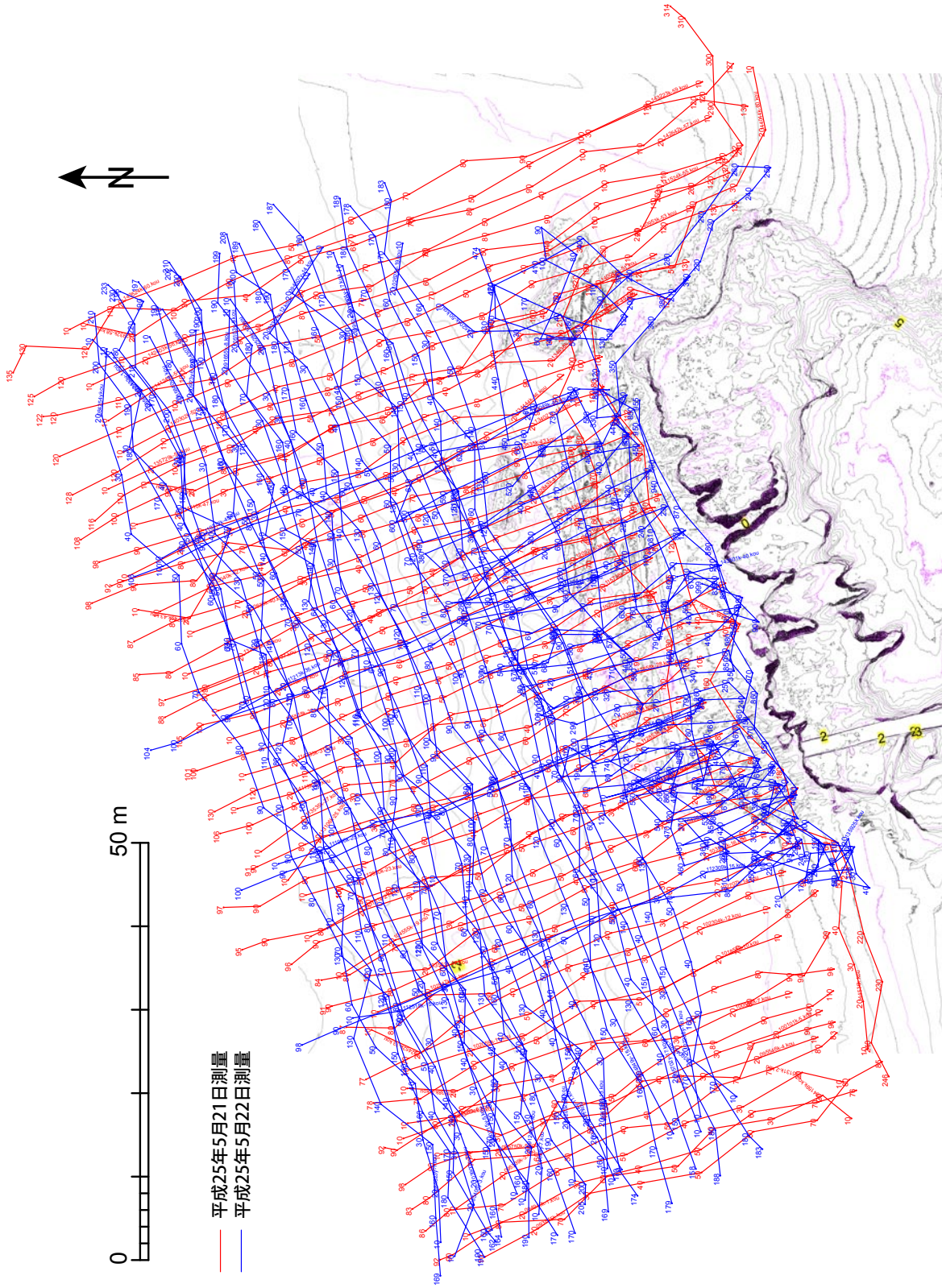




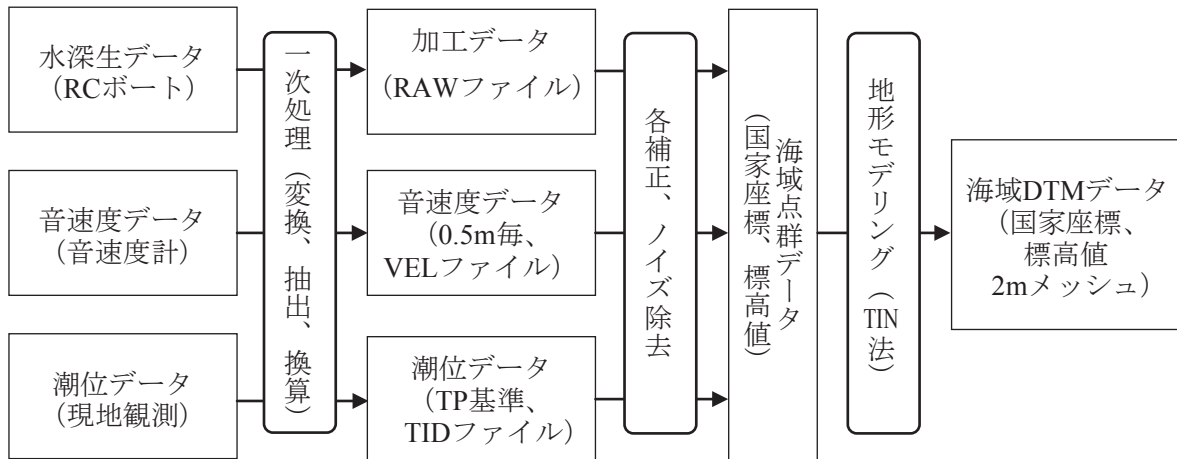
第4図. 地上レーザ測量における詳細スキャンの様子.  
Fig. 4. Working scene of detailed scanning by ground based 3D laser scanner.



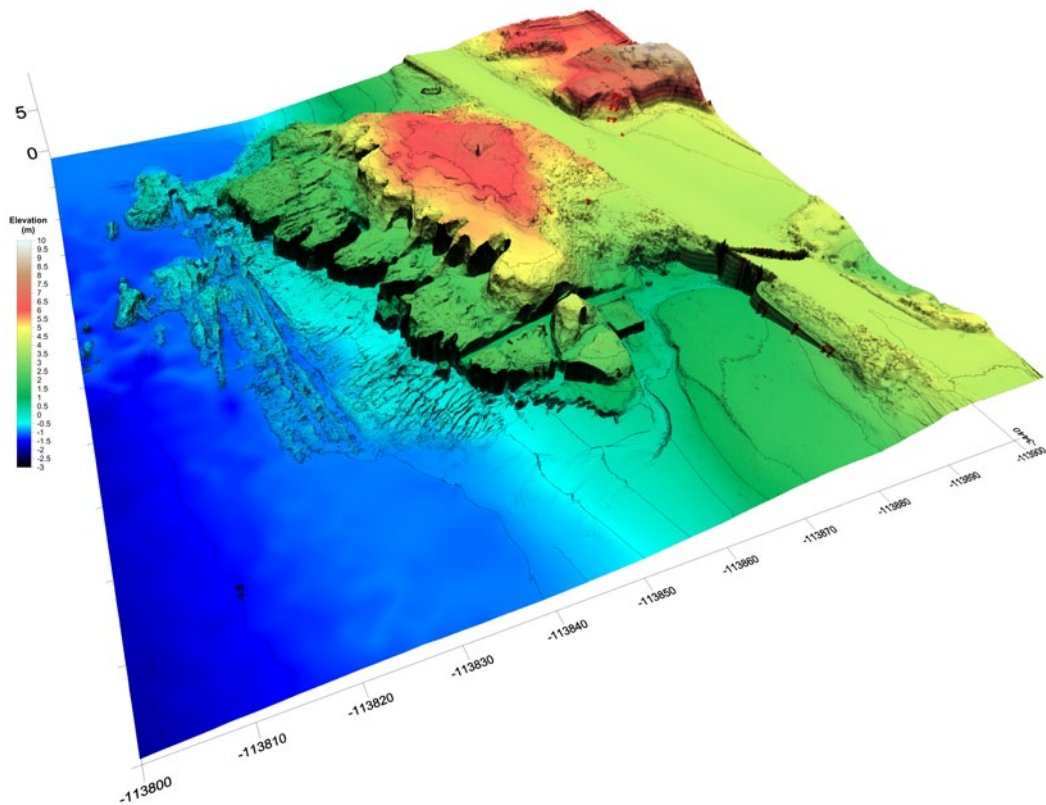
第5図. ラジコンボートを使用した深淺測量の様子.  
Fig. 5. Working scene of sounding using radio-control boat.



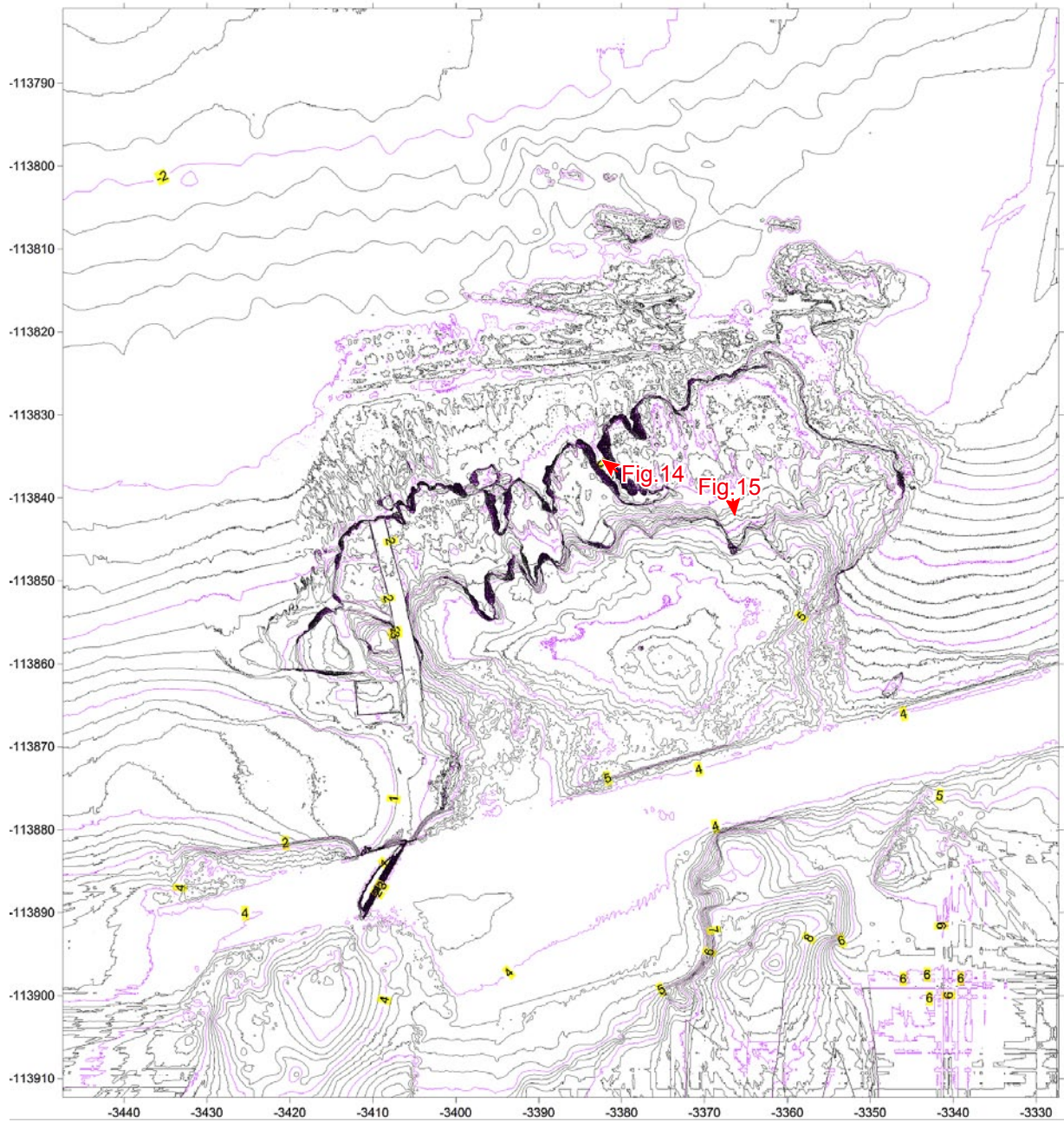
第6図. 深淺測量を実施した測線. 基図の等高線は、第9図に示すハイブリッドDTMを用いた等高線平面図.  
Fig. 6. Survey lines of sounding. Base map is the contour map described by hybrid DTM shown in Fig. 9.



第7図. 深浅測量データの処理フロー.  
Fig. 7. Working flow of sounding data analysis.

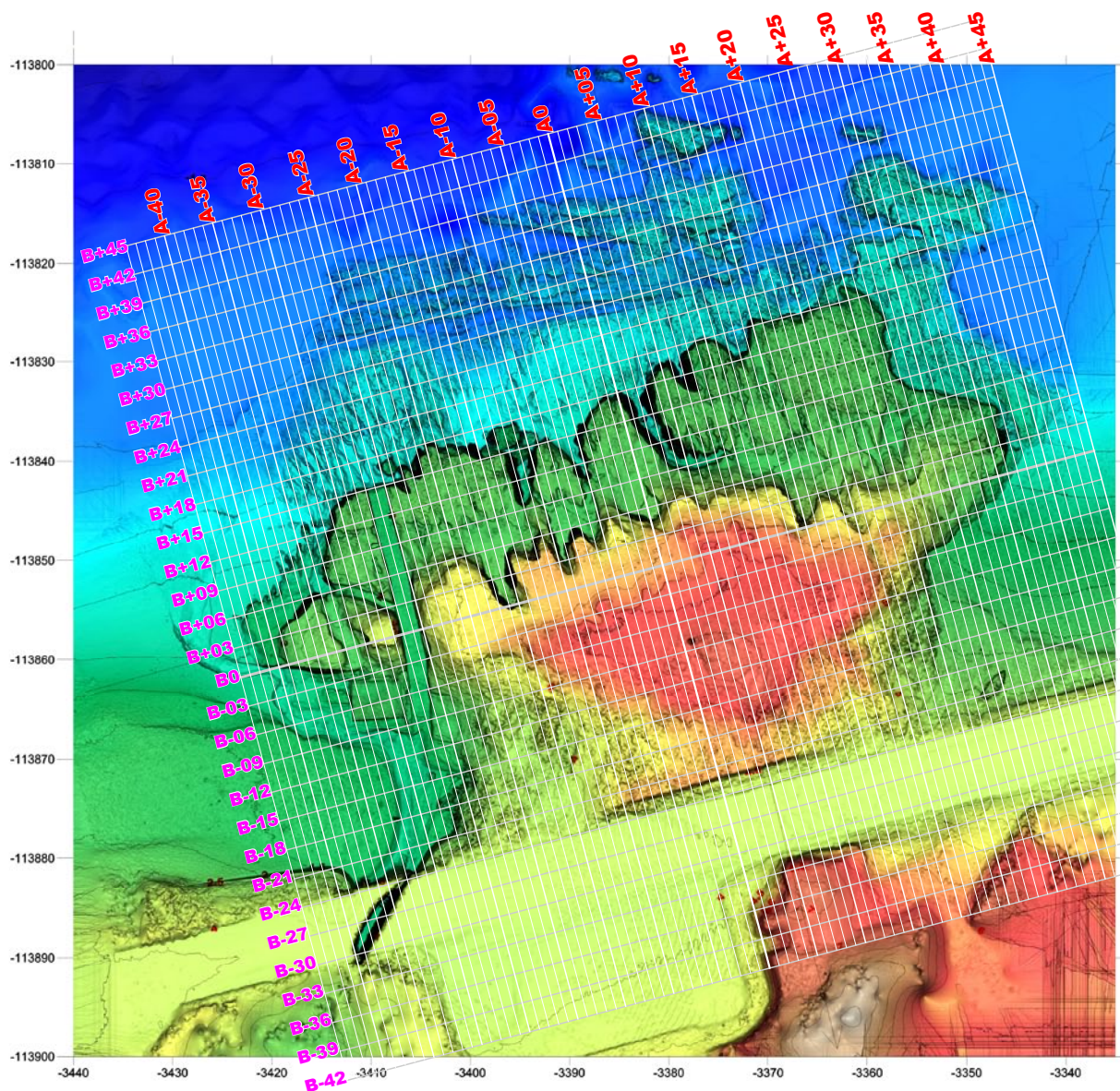


第8図. ハイブリッドDTMをELSAMAPにより可視化した鳥瞰図. Z方向1.5倍強調.  
数字の単位はメートル. 等高線間隔は0.5 m.  
Fig. 8. Bird-eye's view visualized by hybrid DTM using ELSAMAP. Z axis 1.5 times emphasis.  
Numerals are in meters. Contour interval is 0.5 m.



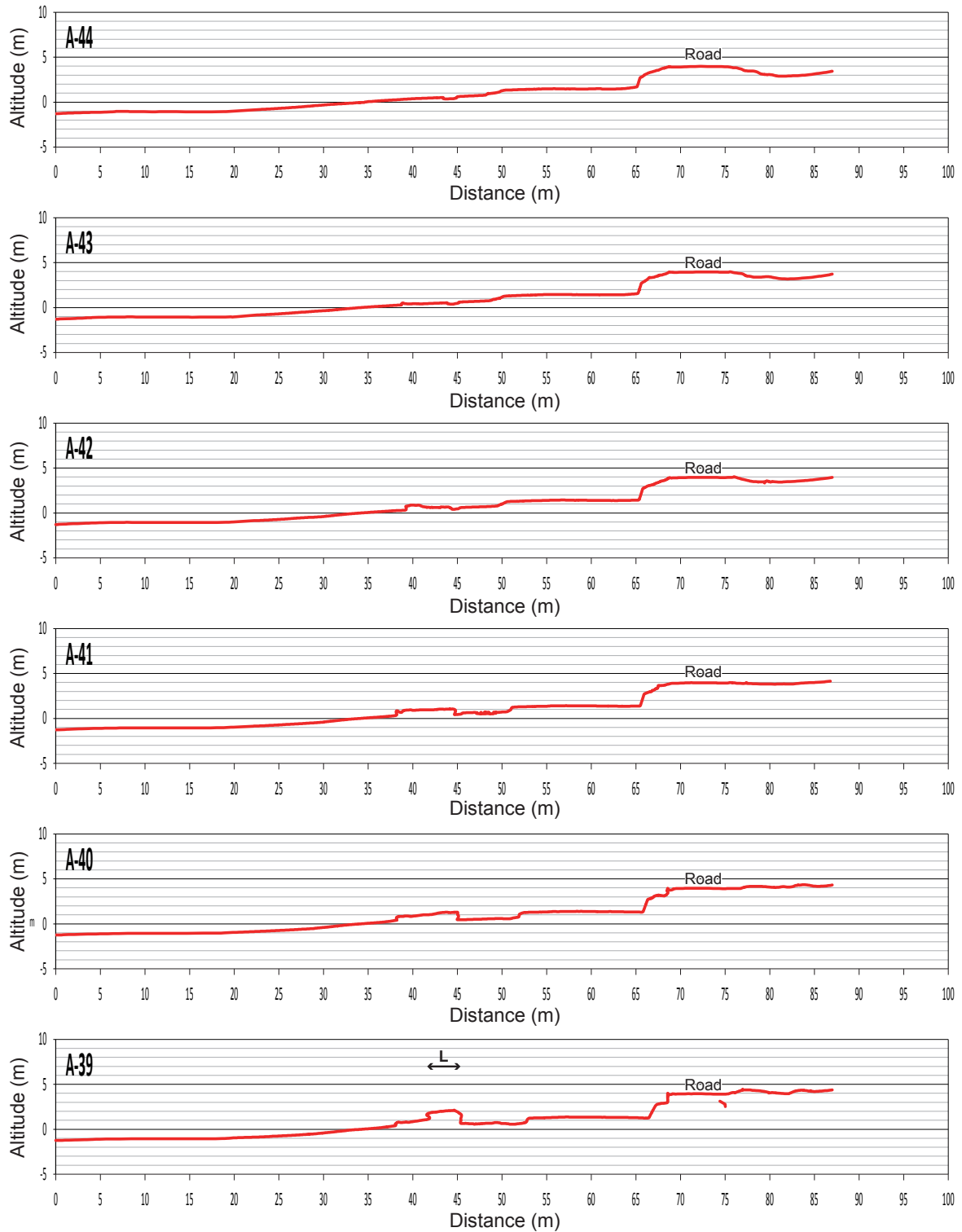
第9図. ハイブリッドDTMを用いた等高線平面図. 数字の単位はメートル. 等高線間隔0.2mで表示(計曲線1m, 主曲線0.2m). 赤い矢印は第14図および第15図の写真撮影方向を示す.

Fig. 9. Contour map described by hybrid DTM. Numerals are in meters. Contour interval is 0.2 m. Red arrows represent the direction of photos in Fig. 14 and 15.



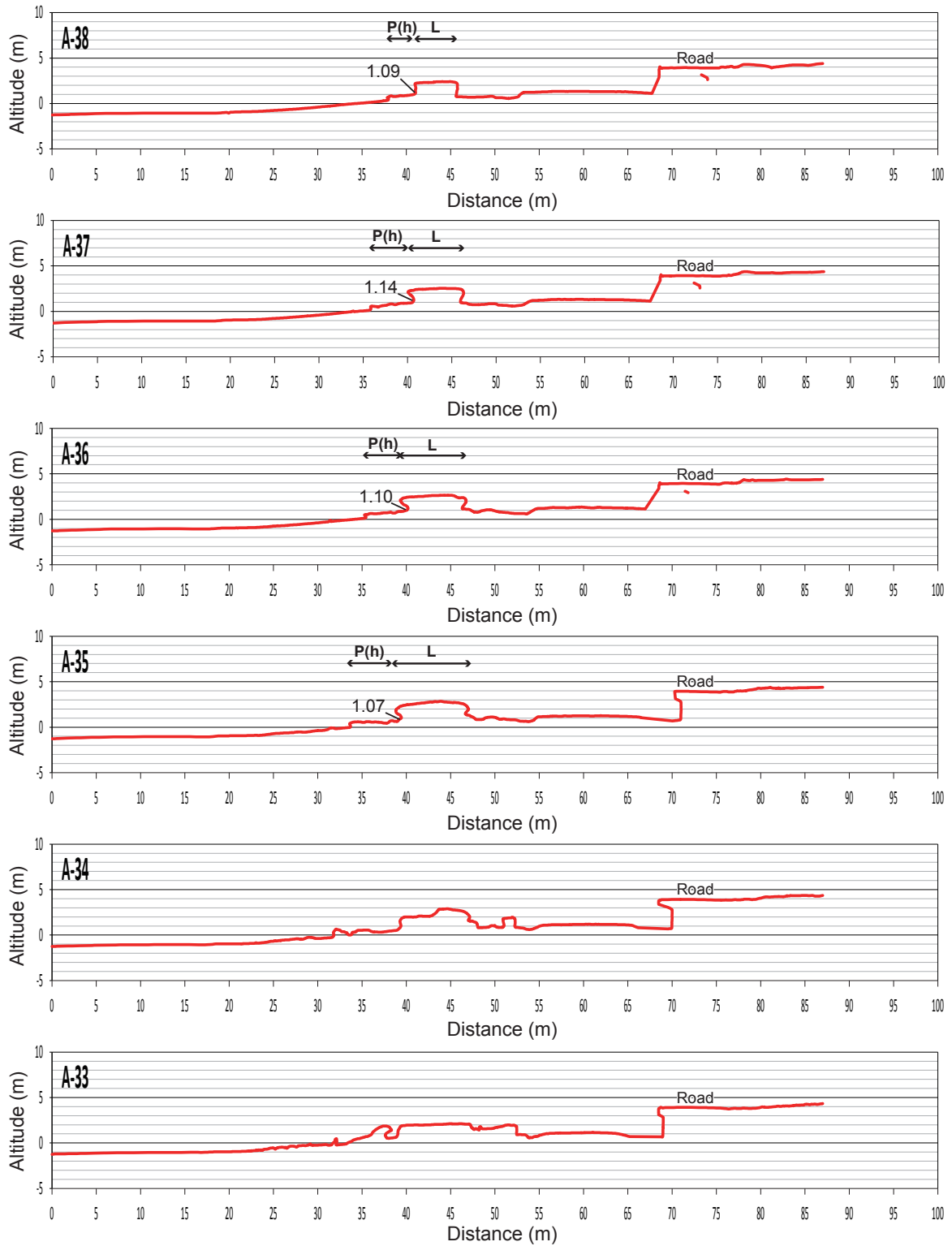
第 10 図. 地形縦横断面の測線位置図.

Fig. 10. Position of survey lines for topographic cross section.

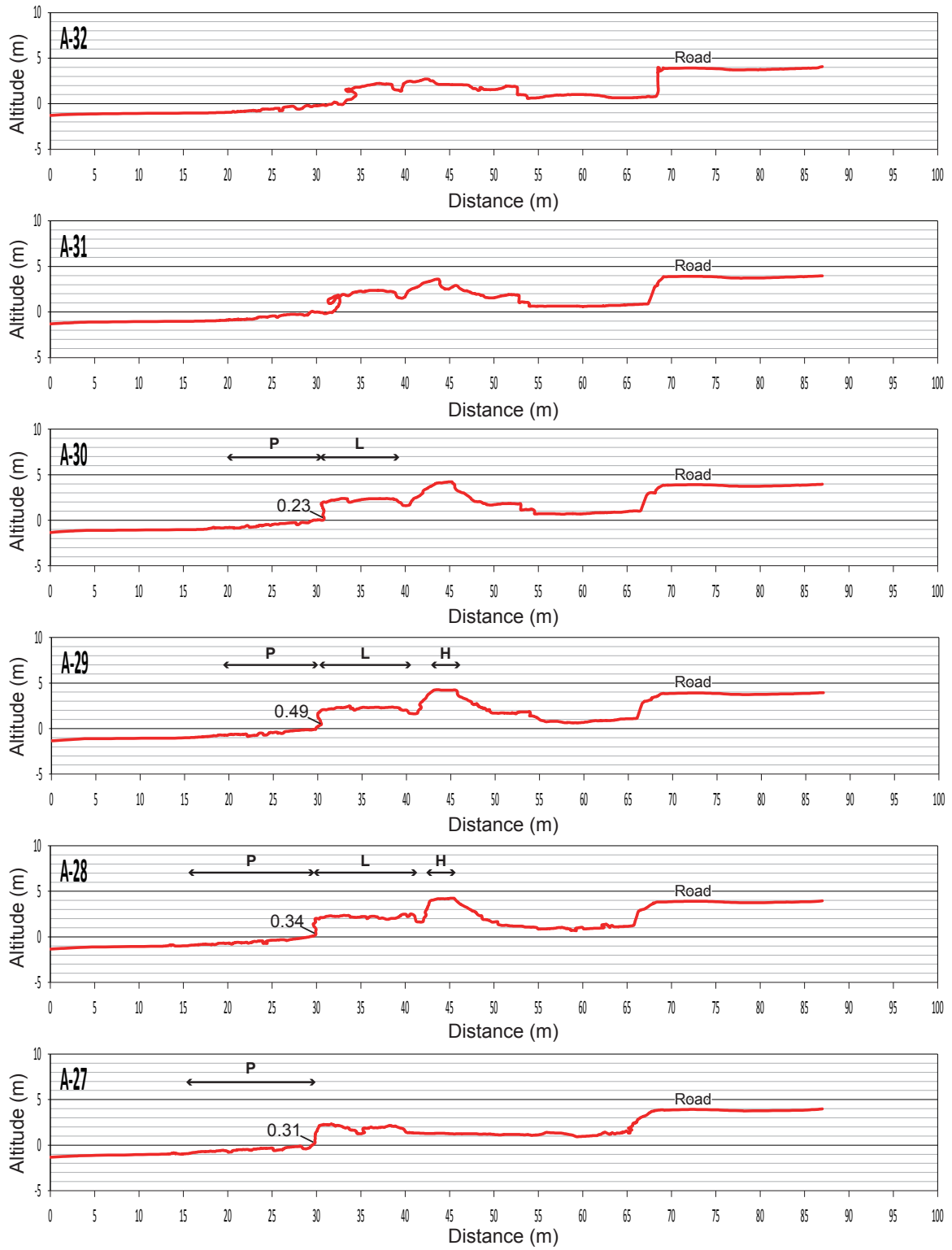


第 11 図. 地形横断面図 (A 測線). 断面図の左が北北西方向を示す. 地形断面に付した数値と文字はノッチ最奥部または波食棚の陸側内縁部の位置と標高, および P: 現成波食棚, P (h): 現成高潮位波食棚, L: 低位の段丘, H: 高位の段丘をそれぞれ意味する. 数値の単位はメートル.

Fig. 11. Topographic cross sections (A-line). Left side of the figure turns to NNW. Numerals and capital letters added on the topographic cross sections indicate the retreat point of the wave-cut notch or the inner edge of wave-cut bench, and P: present wave-cut bench, P (h): present high water wave-cut bench, L: Lower terrace and H: Higher terrace respectively. Numerals are in meters.

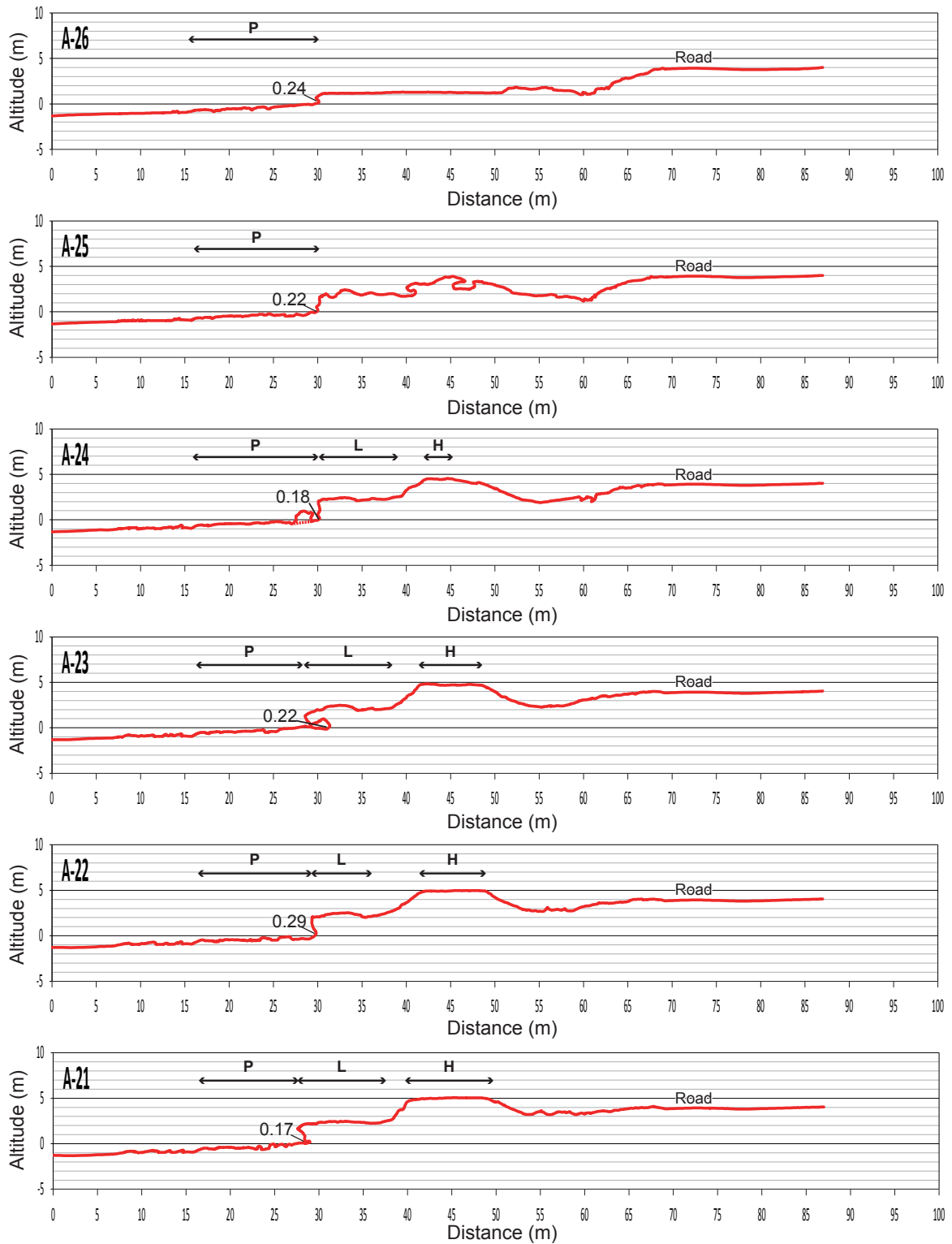


第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.

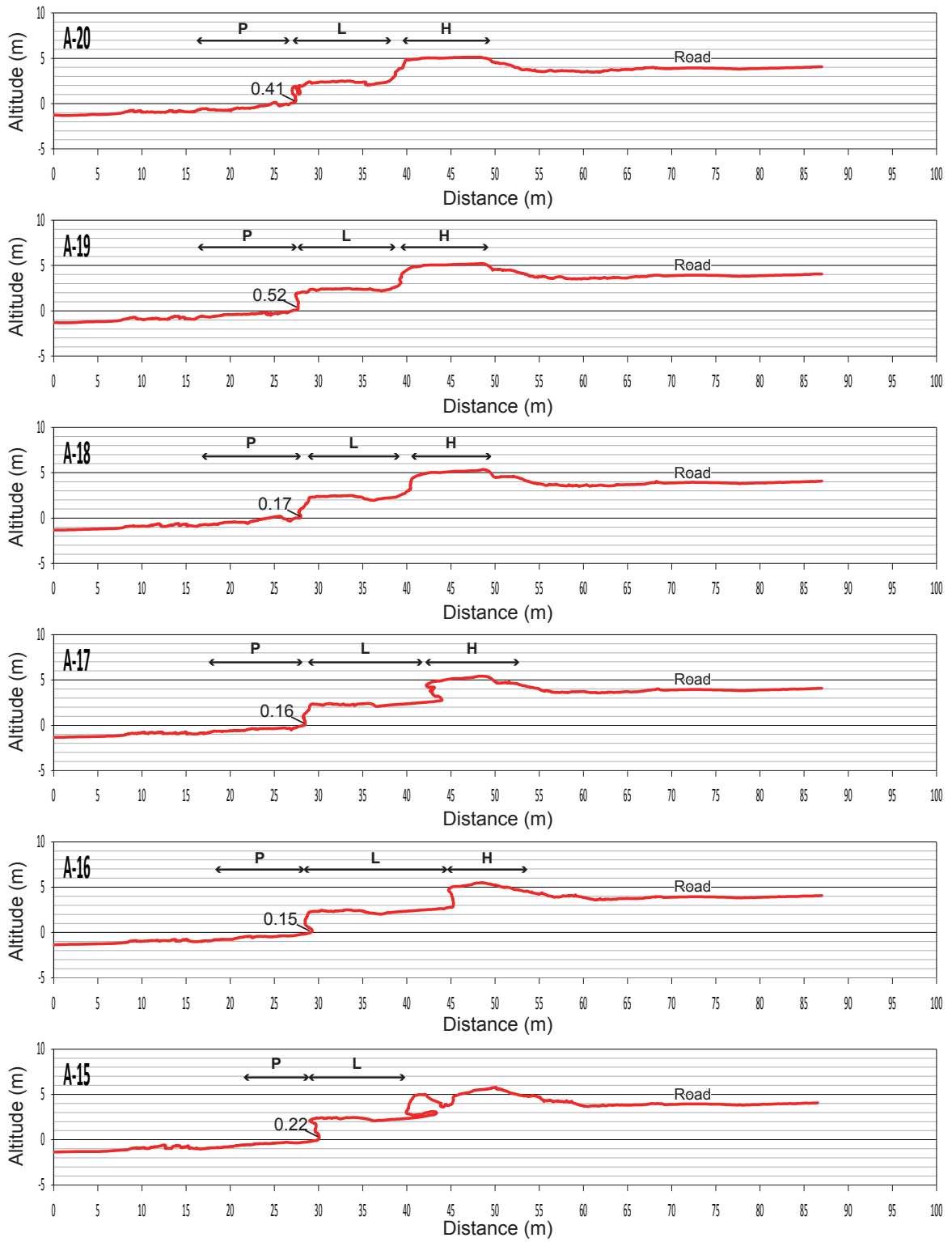


第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continuc.

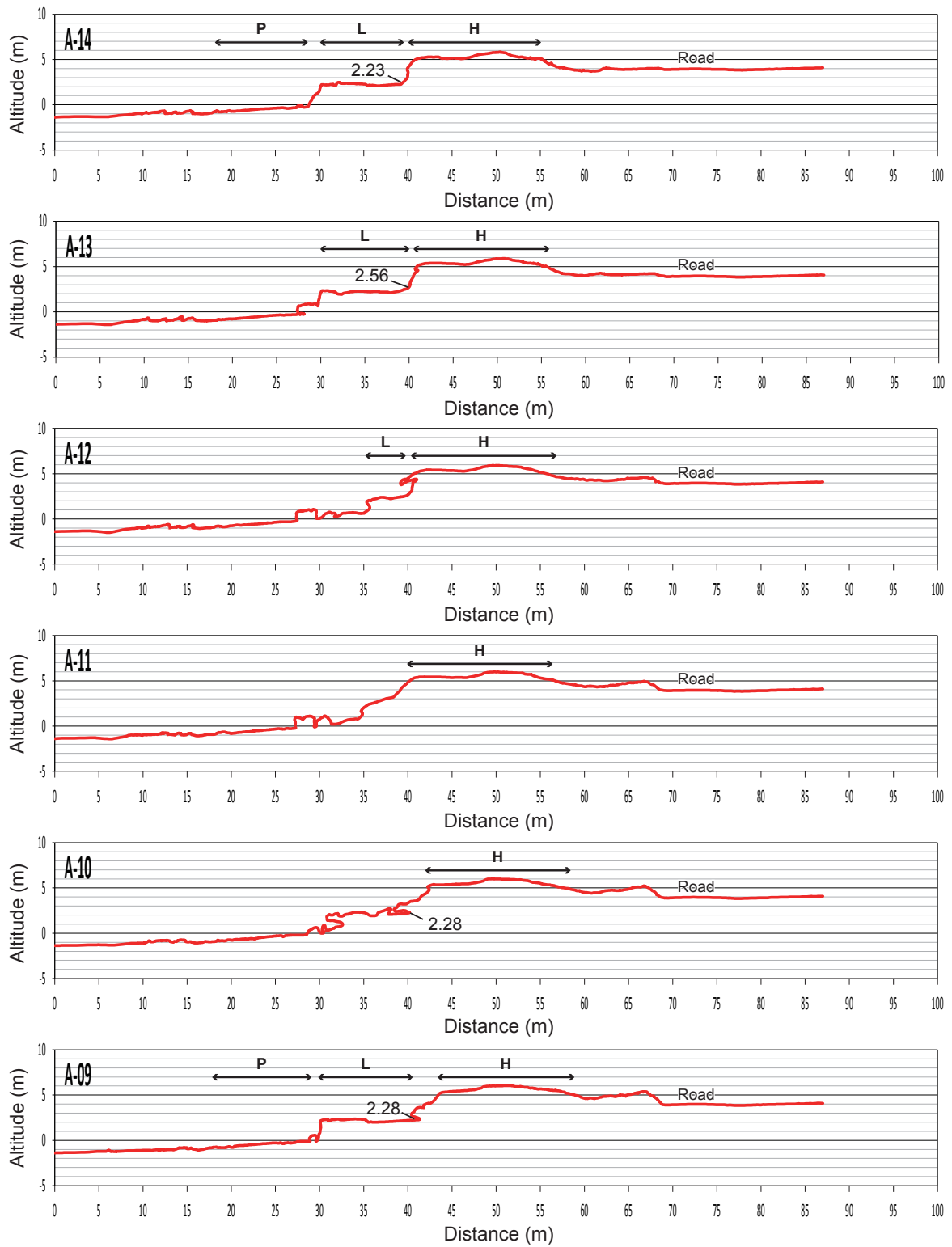




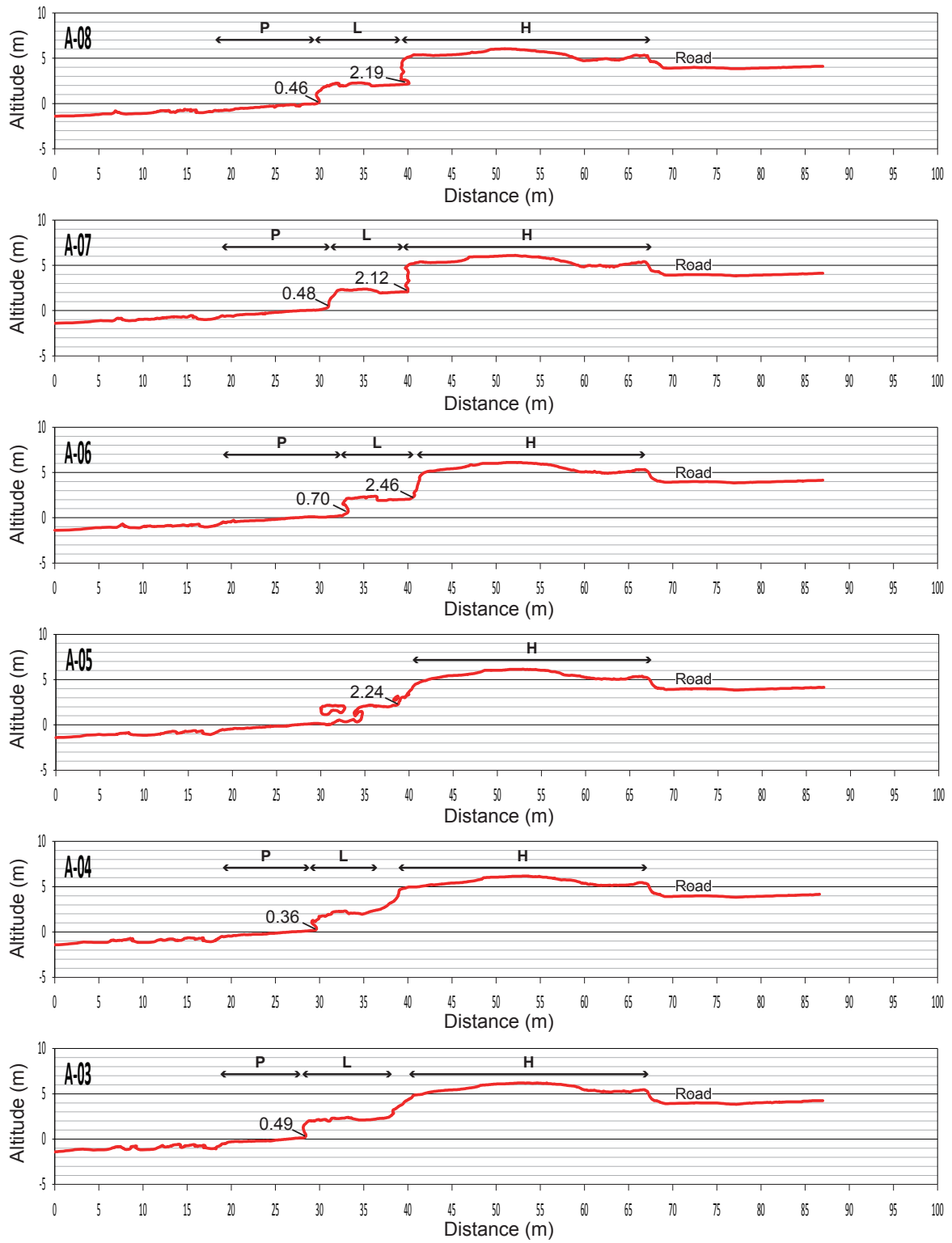
第11図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



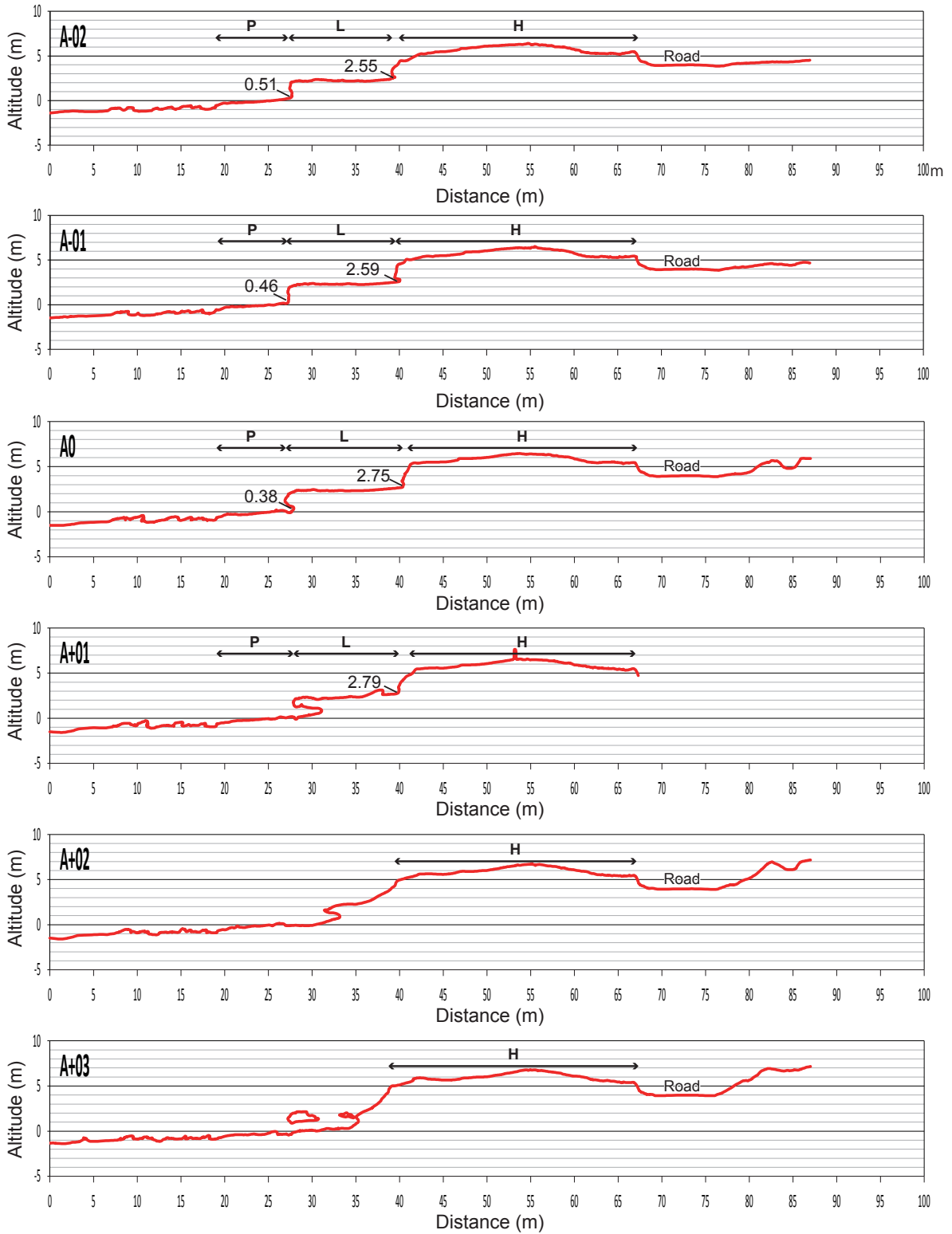
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



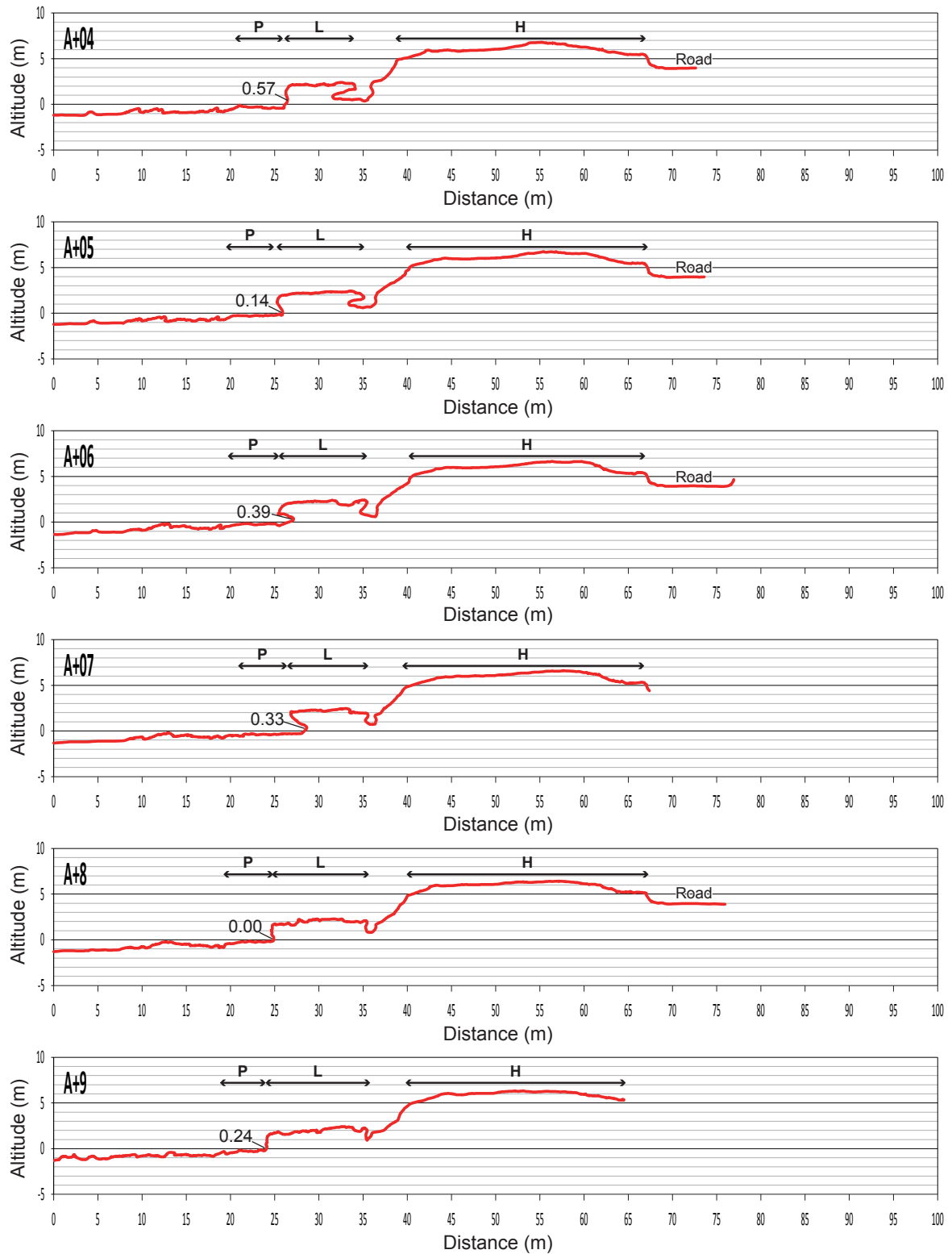
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



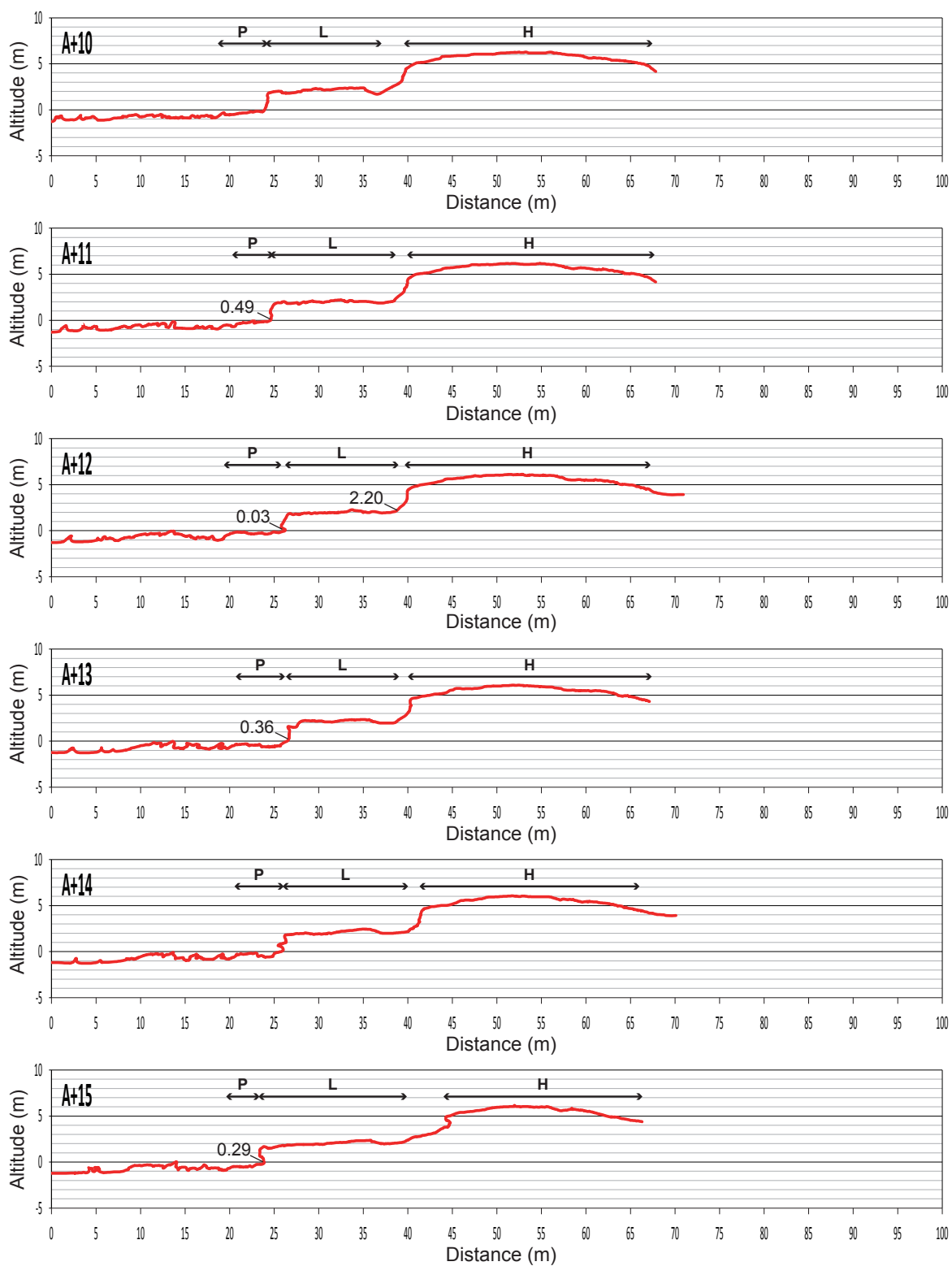
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



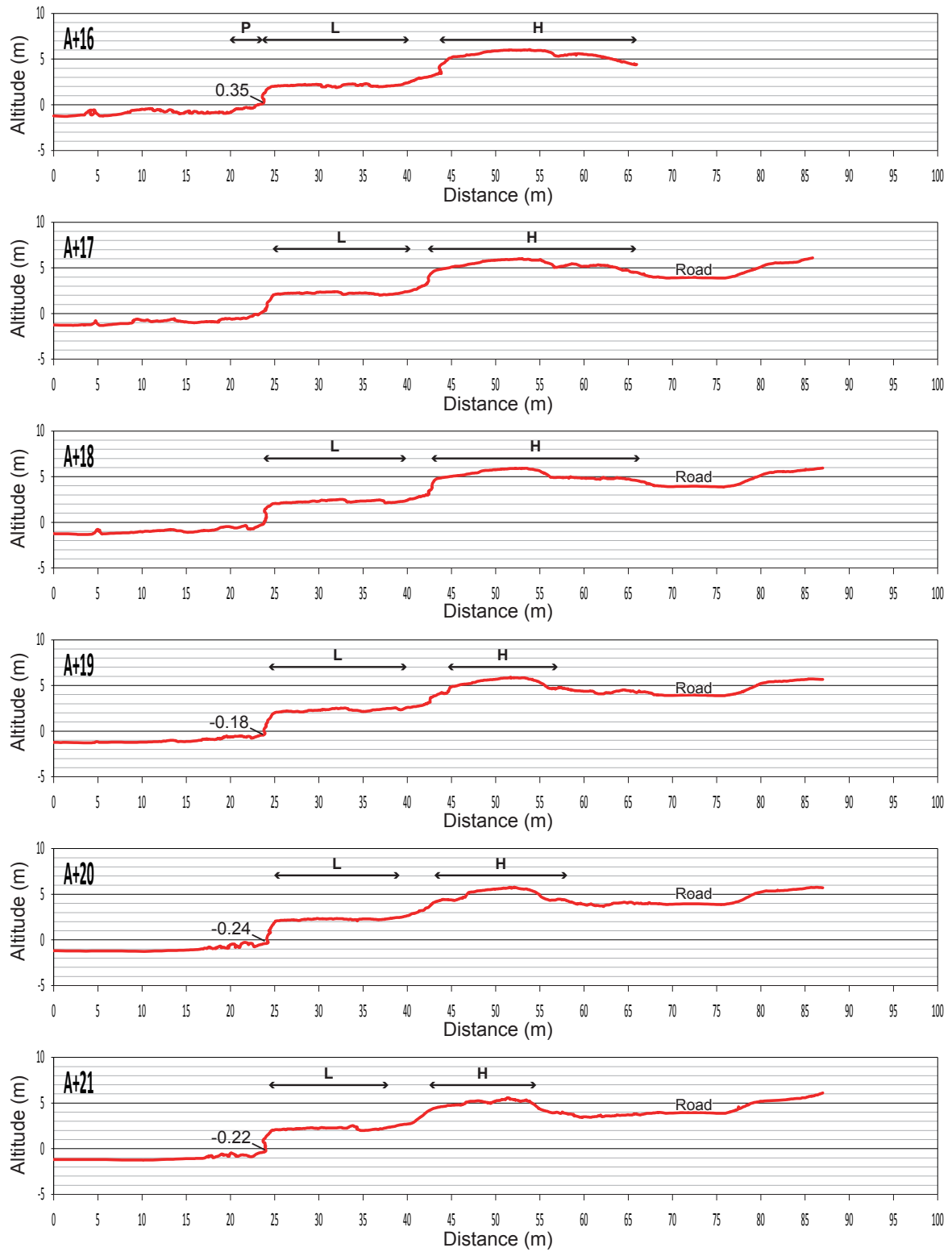
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.

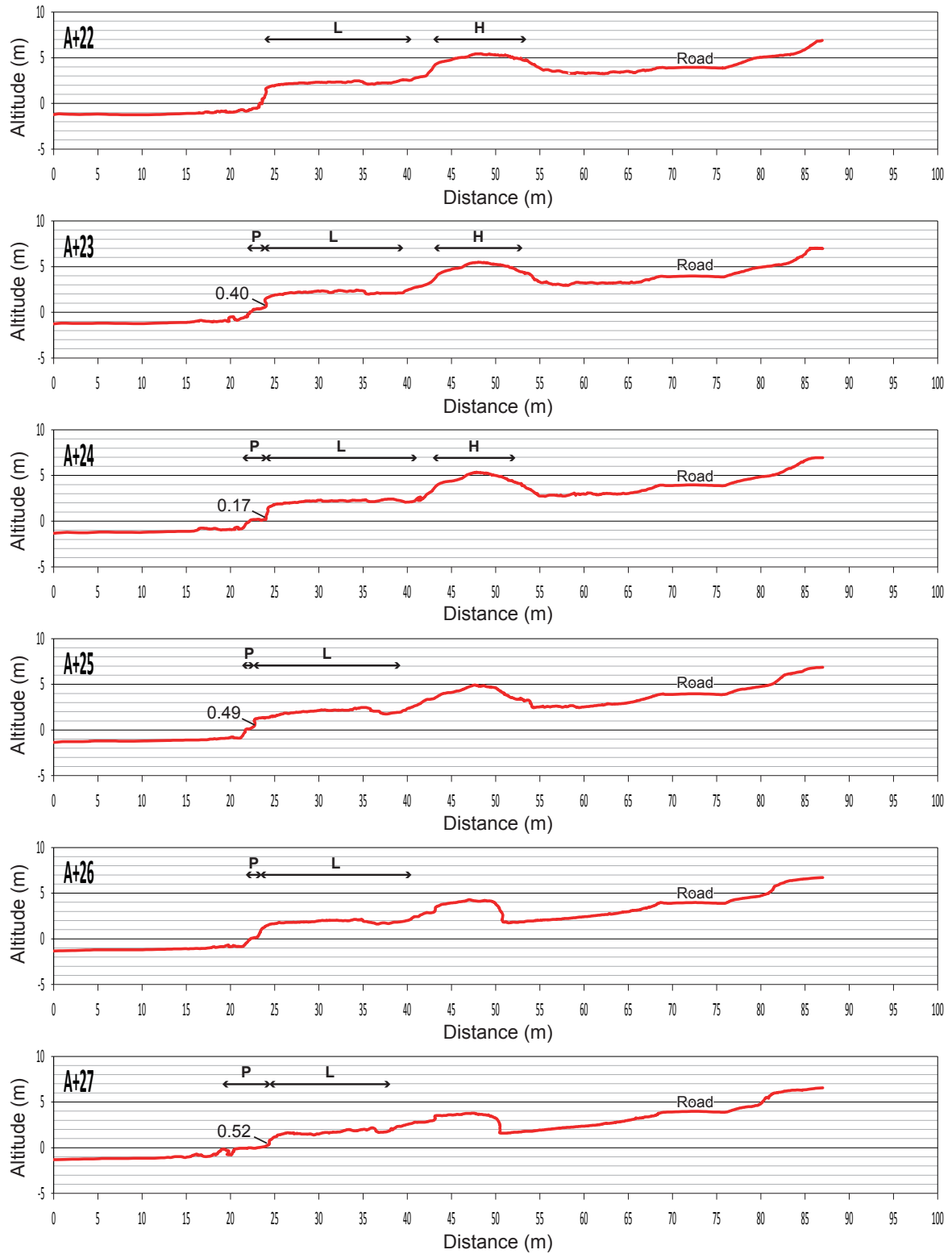


第11図. 続き.  
Fig. 11. Continue.

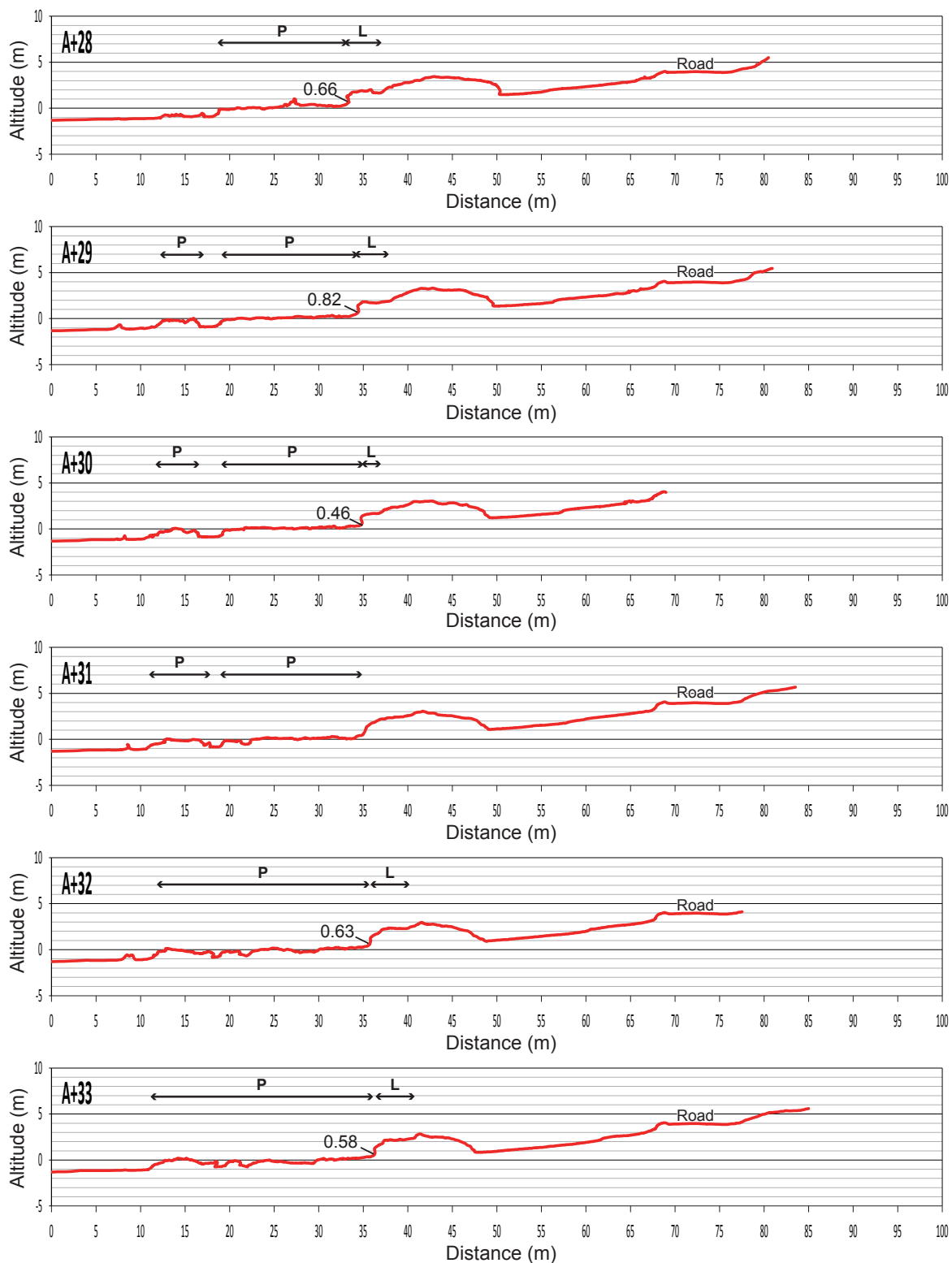


第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.

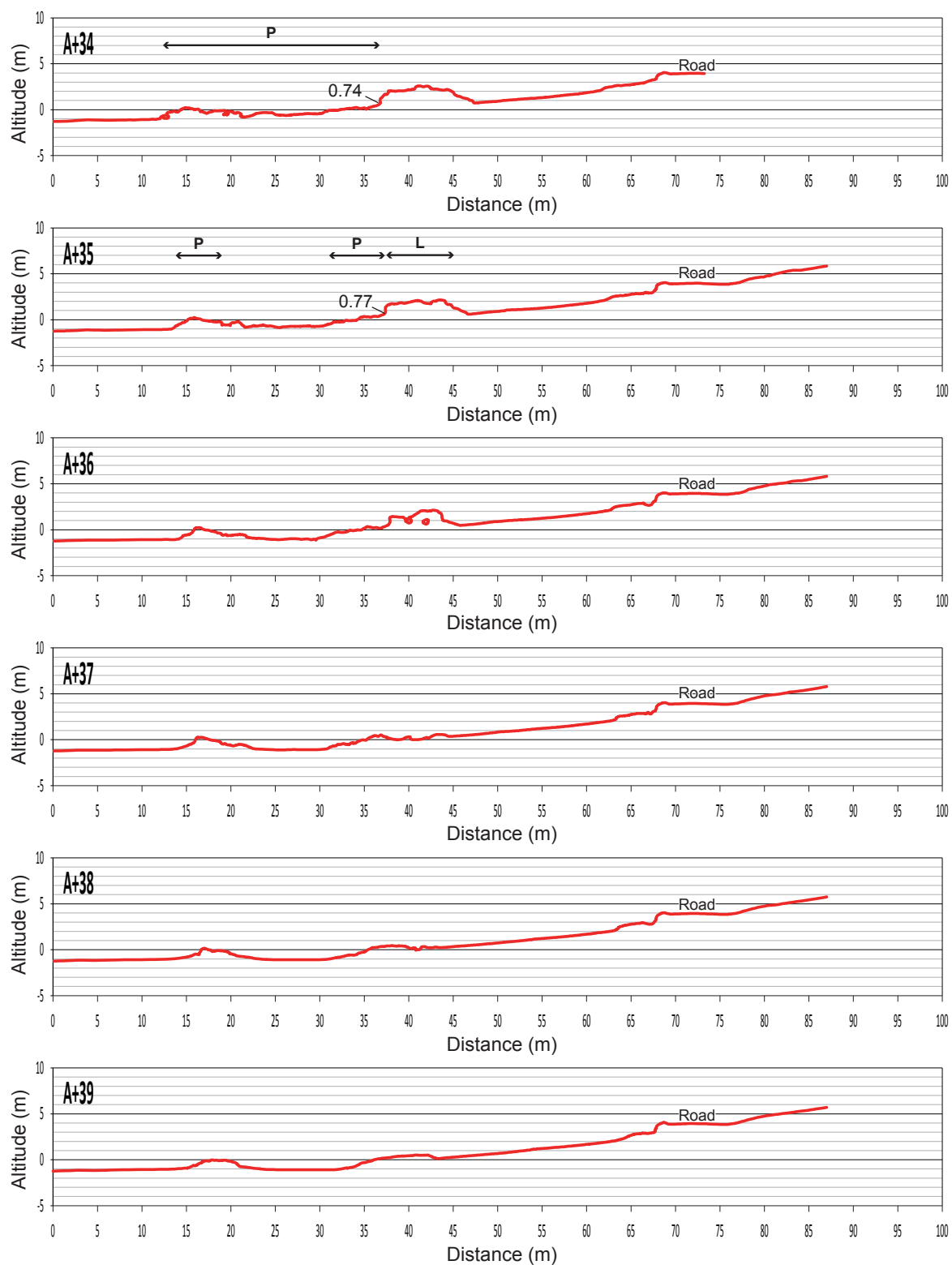




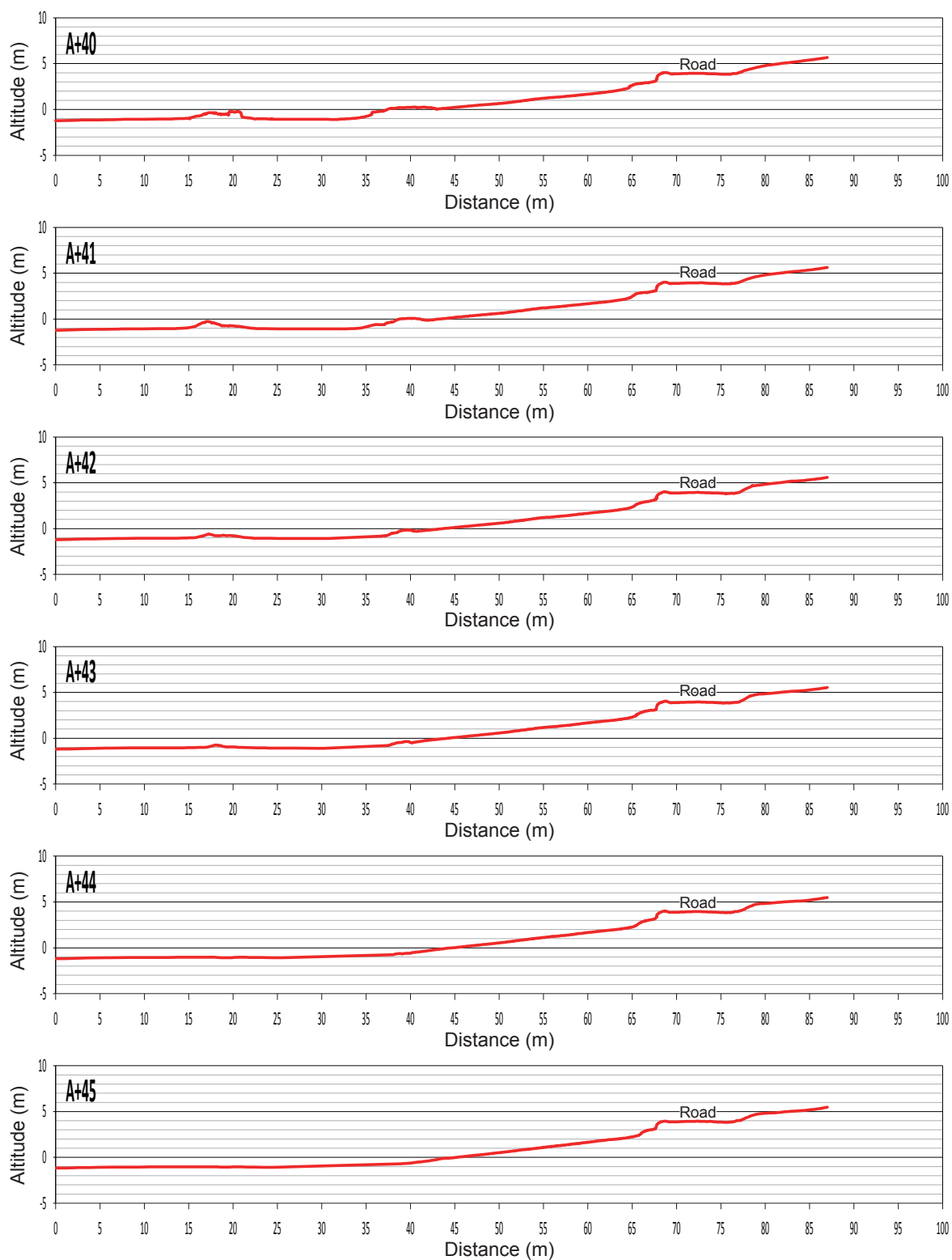
第11図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



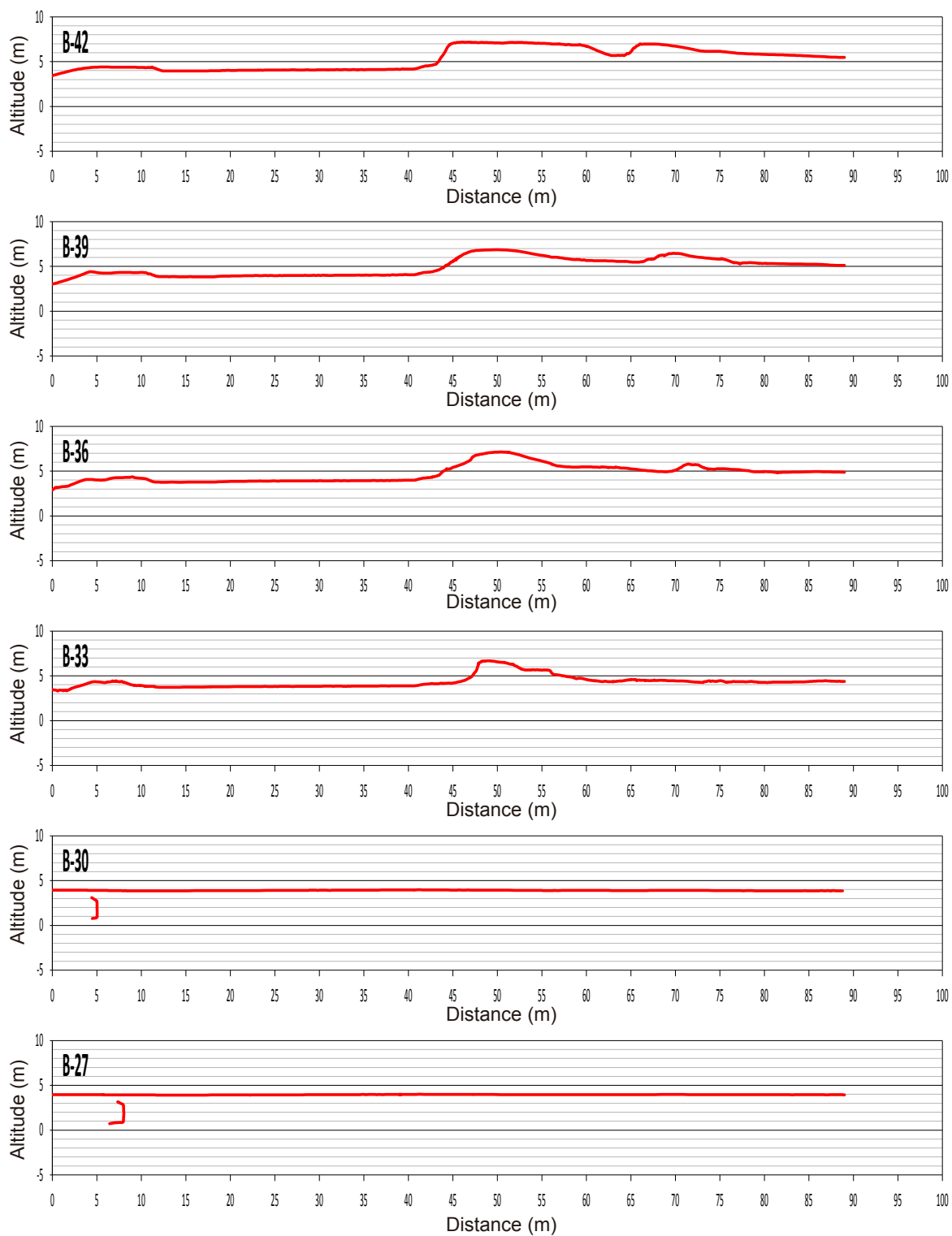
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



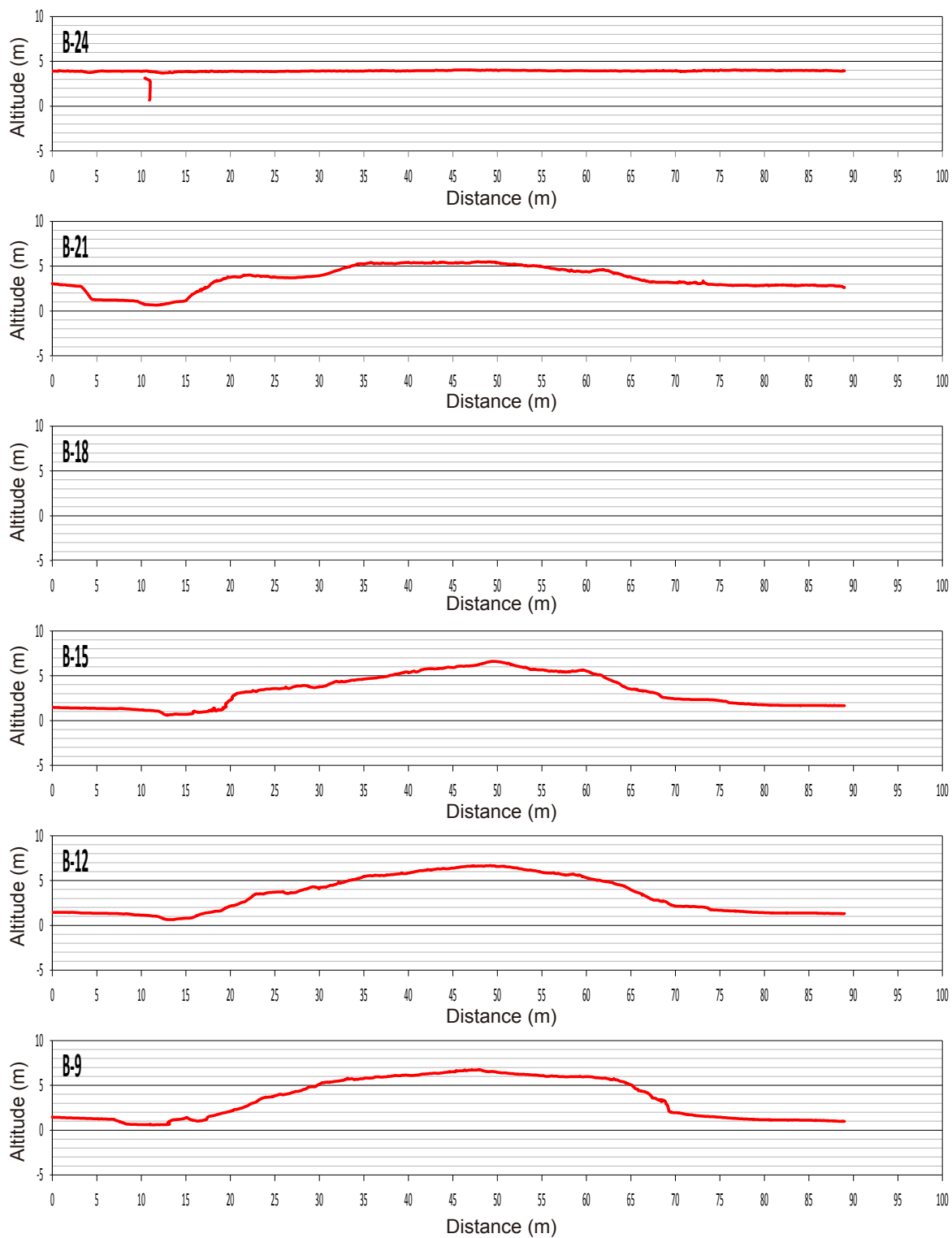
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



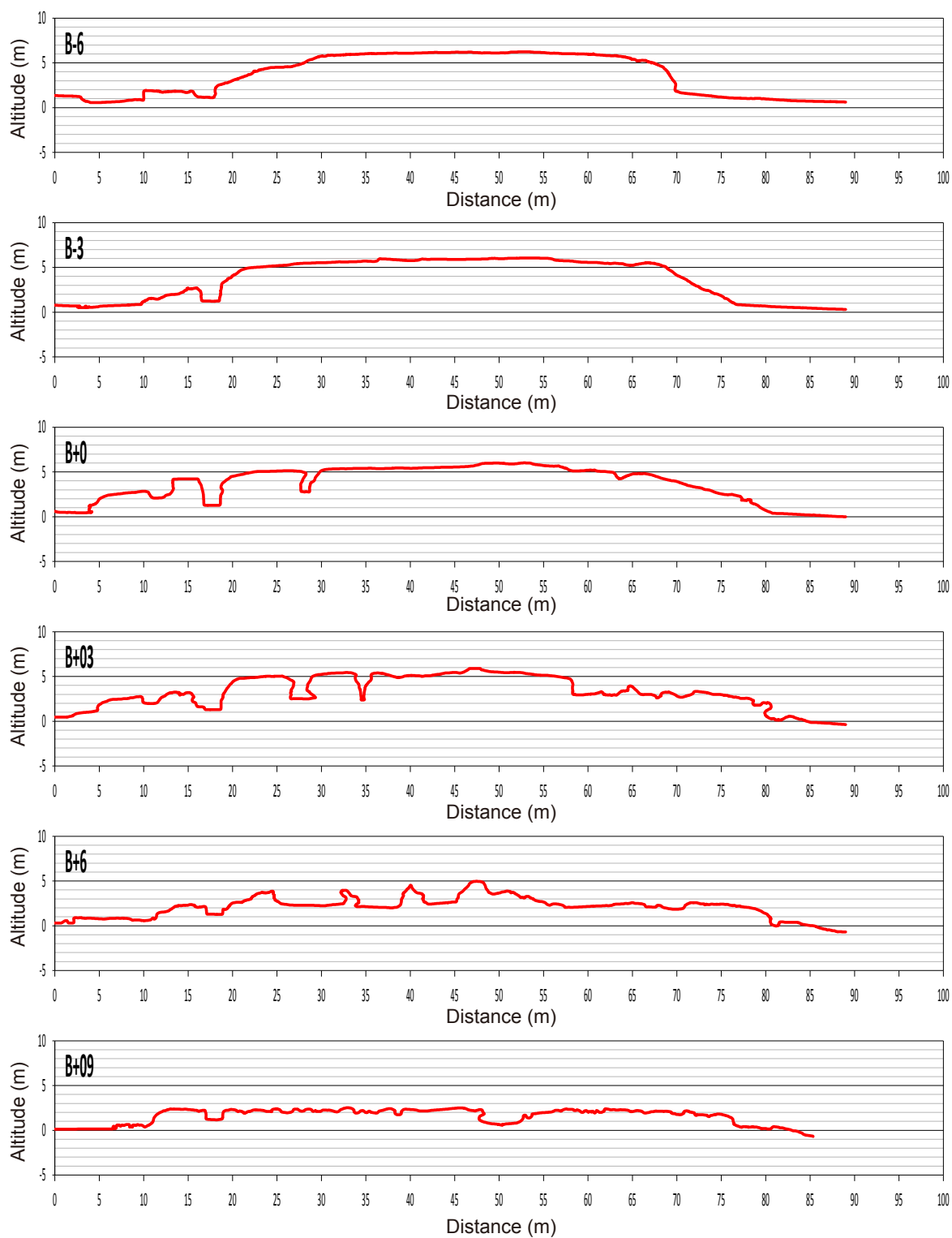
第 11 図. 続き.  
Fig. 11. Continue.



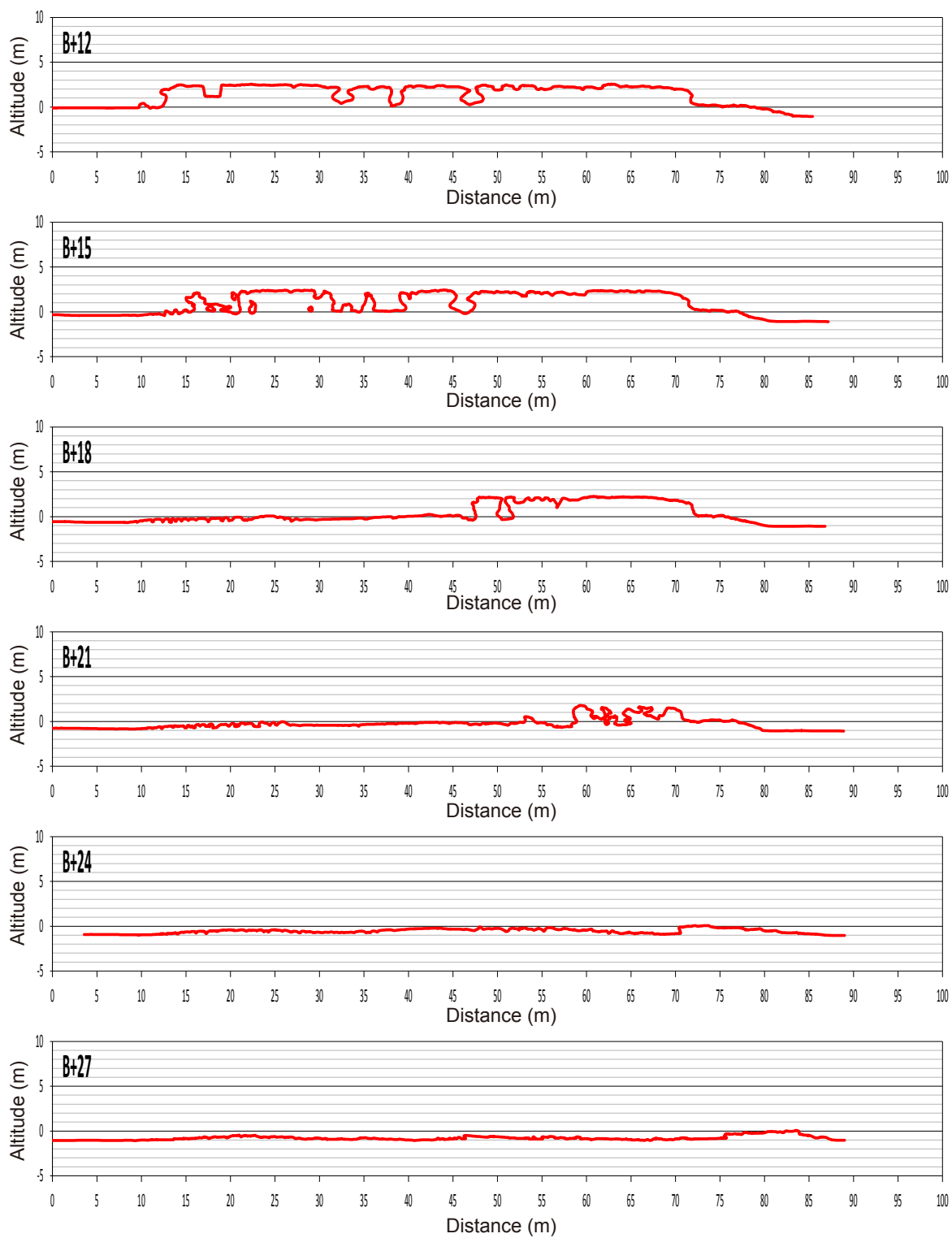
第 12 図. 地形縦断面図 (B 測線). 断面図の左が西南西方向を示す.  
 Fig. 12. Topographic cross sections (B-line). Left side of the figure turns to WSW.



第 12 図. 続き.  
Fig. 12. Continue.

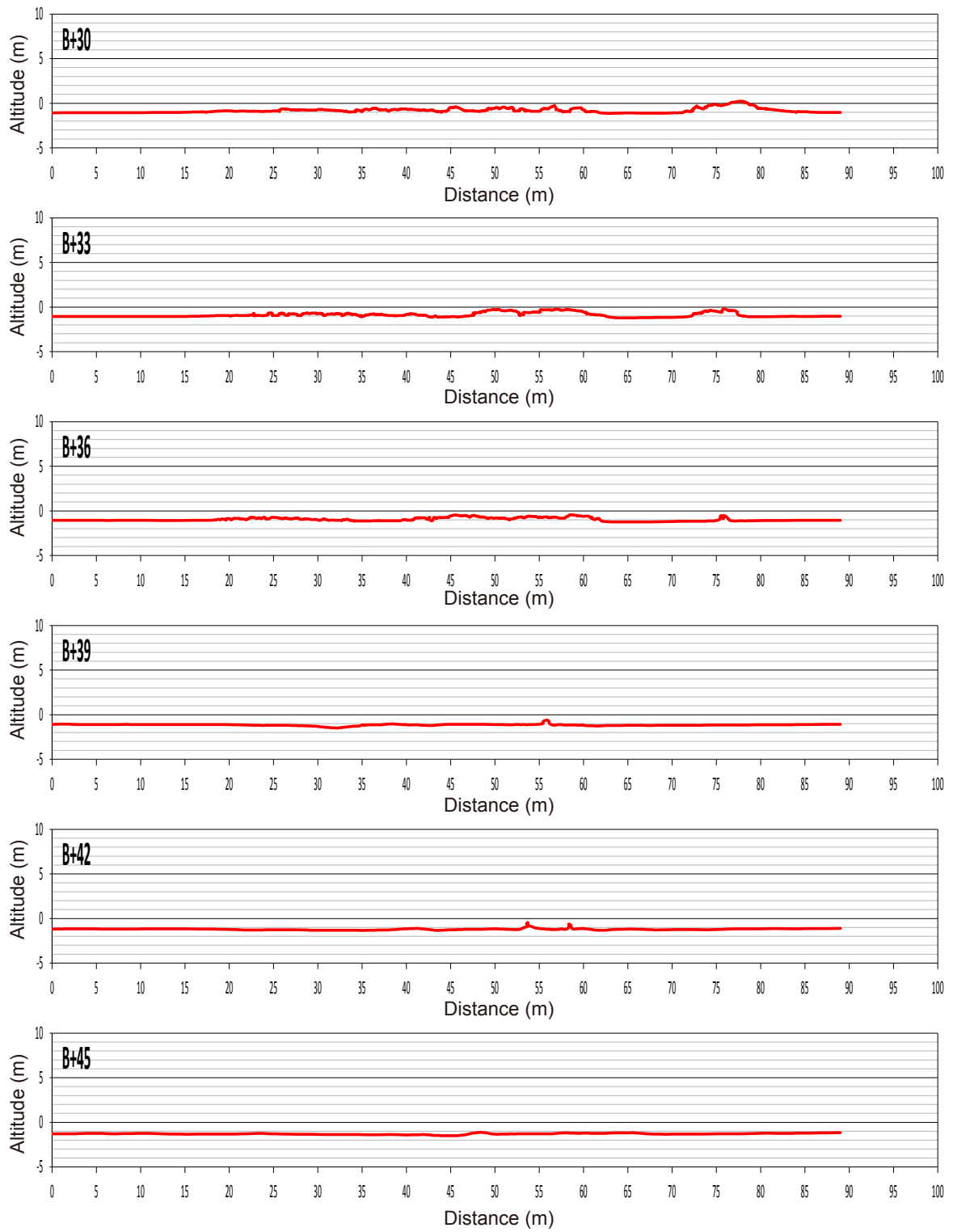


第12図. 続き.  
Fig. 12. Continue.



第 12 図. 続き.  
Fig. 12. Continue.





第12図. 続き.  
Fig. 12. Continue.

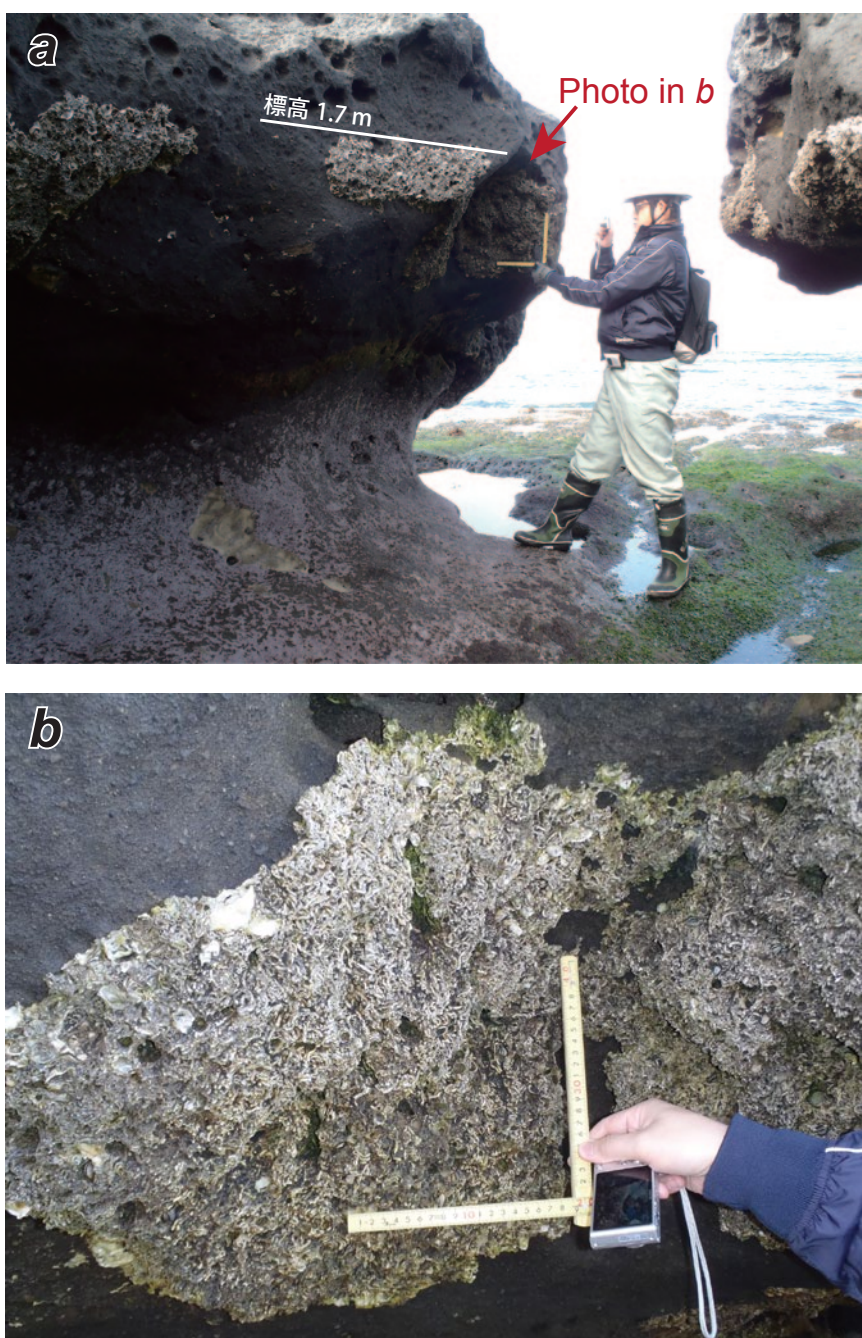
**a**



**b**

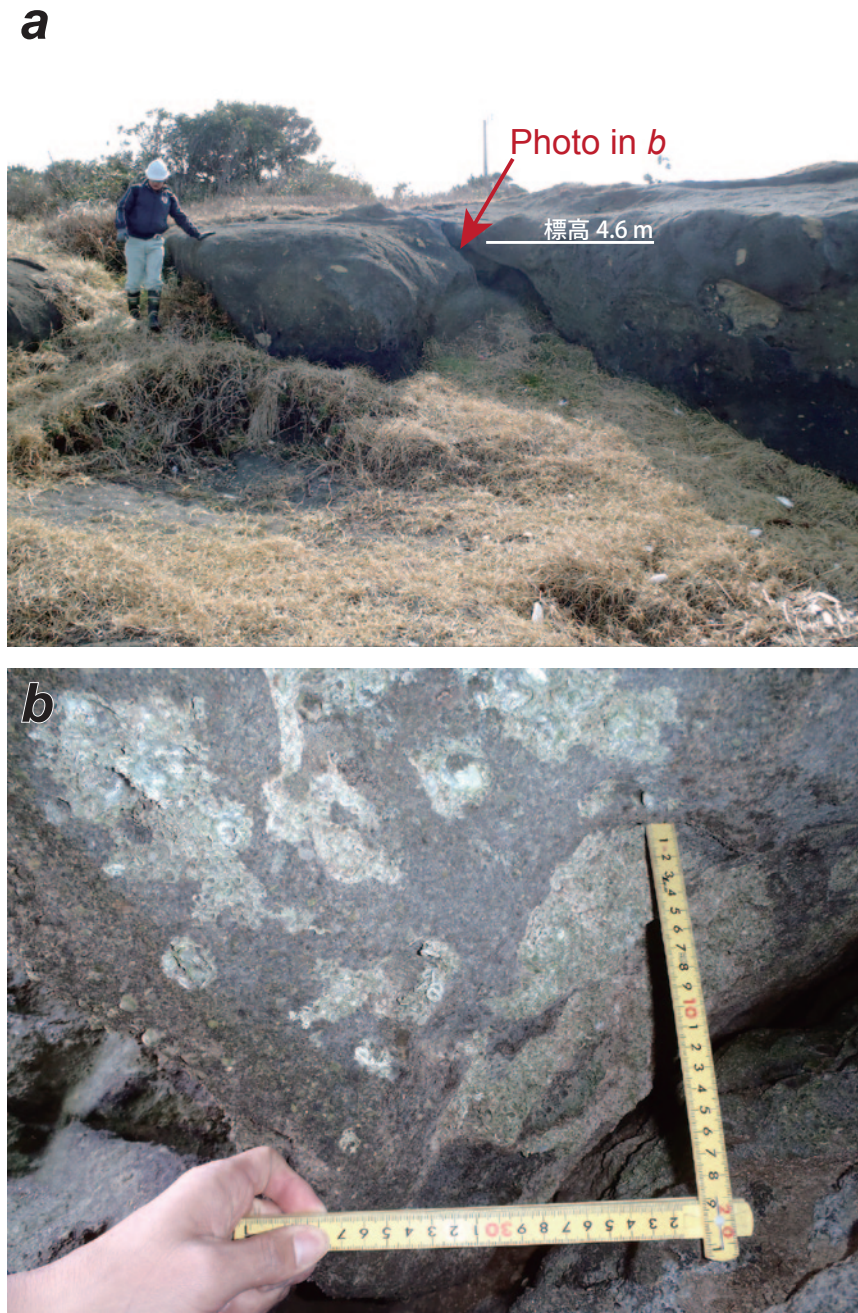


第 13 図. 現成の汀線付近における波食地形 (a) と生物群集 (b).  
Fig. 13. Present littoral wave-cut topography (a) and sessile assemblage (b).



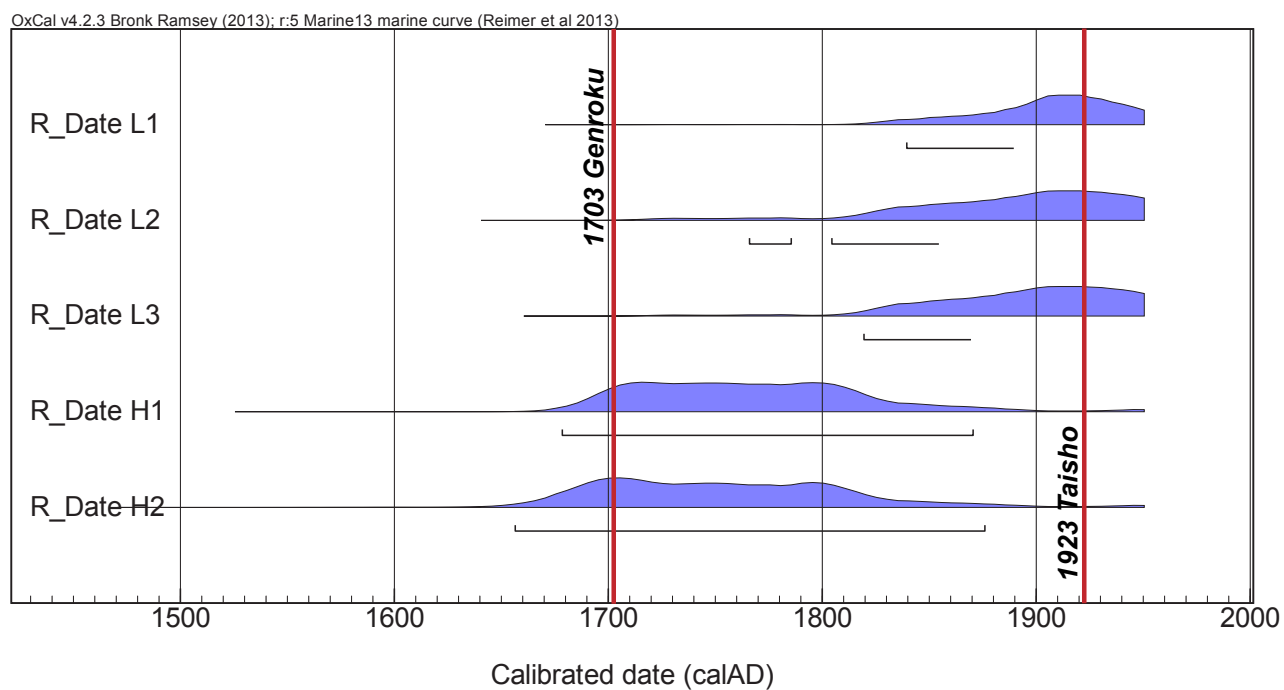
第 14 図. 1923 年大正関東地震に関連すると推定される隆起生物遺骸群集 (a) とその拡大写真 (b) 撮影方向は第 9 図に示す。

Fig. 14. Uplifted sessile assemblage related to the 1923 Taisho Kanto Earthquake (a) and its zoom up photo (b). Photography direction is represented in Fig. 9.



第 15 図. 1703 年元禄関東地震に関連すると推定される隆起生物遺骸群集の位置 (a) とその拡大写真 (b). 撮影方向は第 9 図に示す.

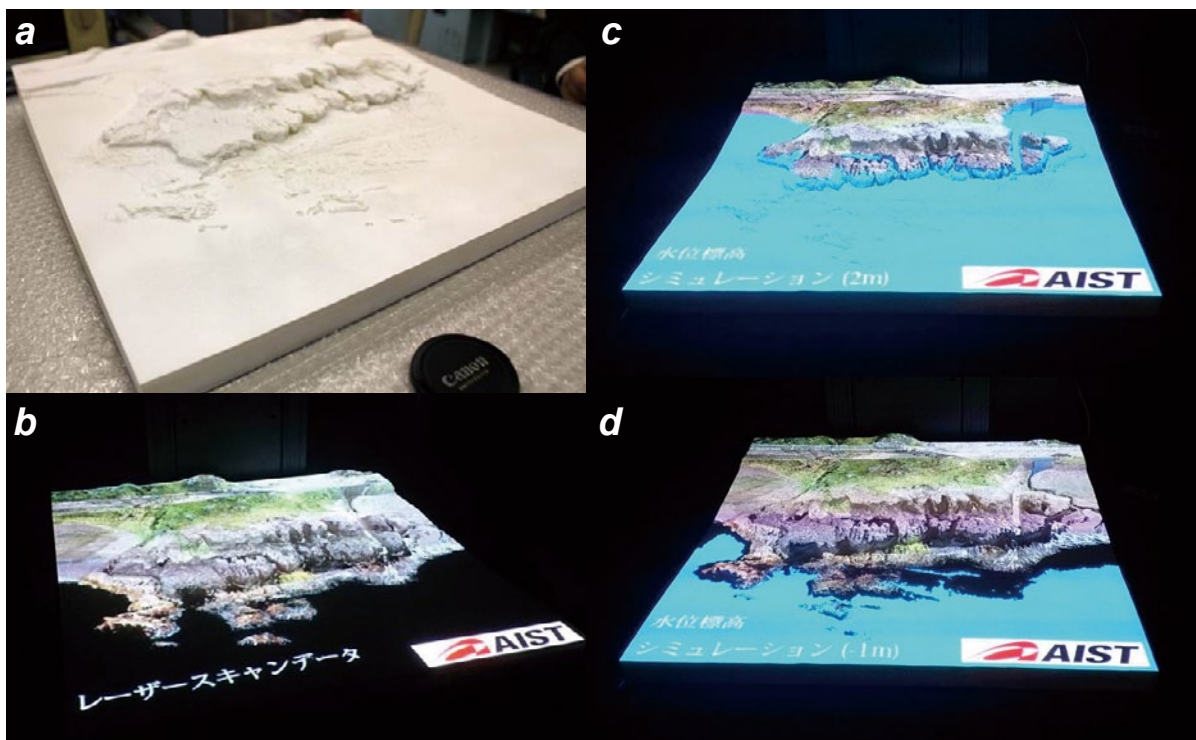
Fig. 15. Position of uplifted sessile assemblage related to the 1703 Genroku Kanto Earthquake (a) and its zoom up photo (b). Photography direction is represented in Fig. 9.



第 16 図.  $^{14}\text{C}$  年代測定の較正結果と歴史地震との対比. OxCal ver. 4.2 使用.  
 Fig. 16. Calibration result of  $^{14}\text{C}$  ages and correlation with historical earthquakes, using OxCal ver. 4.2.



第 17 図. 高潮位付近に分布する現成波食地形. HWL : High Water Level (高潮位レベル).  
 Fig. 17. Wave-cut topography formed around present high water level (HWL).



第 18 図. DTM データから作製した立体模型の投影マッピング (芝原・宍倉, 2014 を一部改変).  
a : 3D プリンタで出力した立体地形模型 (1 辺がおよそ 50 cm). b : RGB 画像を投影した様子. c :  
海面が現在より 2 m 高い場合の地形の様子. d : 海面が現在より 1 m 低い場合の地形の様子.

Fig. 18. Projection mapping of solid topographic model based on DTM data (revised from Shibahara and Shishikura, 2014). a: Solid topographic model made by 3D printer. Approximately 50 cm square. b: Projection scene of RGB image. c: Simulation of sea level change in the case of 2 m higher than present. d: Simulation of sea level change in the case of 1 m lower than present.