

令和6年(2024年)能登半島地震で石川県珠洲市若山町の若山川沿いに 出現した地表変状の特徴

Characteristics of surface deformation along the Wakayama River in Wakayama Town, Suzu City, Ishikawa Prefecture, appeared during the 2024 Noto Peninsula earthquake

丸山 正¹・吉見 雅行¹・吾妻 崇¹

MARUYAMA Tadashi¹, YOSHIMI Masayuki¹ and AZUMA Takashi¹

¹ 活断層・火山研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, tadashi-maruyama@aist.go.jp)

Abstract: The 2024 Noto Peninsula earthquake (Mj7.6) resulted in widespread uplift of the northern coast of the peninsula due to displacement along submarine active reverse faults off the peninsula. Moreover, onshore surface deformation has been reported at several sites on the peninsula. Among them, a narrow uplift zone accompanied by distinct scarps with heights on the order of meters that extend for about 5 km in length and ~0.2 km in width appeared in an area where tectonically active structures were previously not recognized in Wakayama Town, Suzu City. To understand the nature of uplift zone, we mapped and surveyed the surface deformation in the field, in addition to examination of the high-resolution topography using post-earthquake data from a LiDAR drone survey and a publicly available pre-earthquake airborne LiDAR data. In the Naka area of Wakayama Town, a series of ENE–WSW to WNW–ESE-trending, subparallel, and closely spaced scarps with a maximum height of 2.2 m appeared in the rice paddies and roads intermittently along the east-flowing Wakayama River. Scarp morphology and deformation of structures such as concrete gutters and paved roads suggest that those scarps were formed by N–S shortening. The scarps face north near the right bank of the Wakayama River and south near the left bank, and both facing each other. The rice paddies on the upthrown (south) side of the north-facing scarps are tilted to the south, whereas those on the upthrown (north) side of the south-facing scarps are tilted to the north. Based on the field observations and comparison of topographical data before and after the earthquake, it is possible that activity accompanied by surface deformation similar to that of the 2024 earthquake occurred in the past. In the Munesue area to the west of Naka area, a rice paddy on the left bank is tilted to the northwest and a series of rice paddies on the right bank are tilted to the southeast, with the northeastward flowing Wakayama River as the axis of uplift, as in the Naka area. Considering that the surface deformation occurred along an anticlinal axis that deformed Miocene rocks along the Wakayama River, the presence of landforms indicative of past activity with similar pattern to the 2024 event, and the morphological and geometric characteristics of the surface deformation of the 2024 event, the surface deformation might be an expression of growth of the active anticline in response to horizontal shortening.

キーワード: 令和6年(2024年)能登半島地震, 若山町, 地表変状, 褶曲, 現地調査, 高解像度地形データ

Keyword: 2024 Noto Peninsula earthquake, Wakayama Town, surface deformation, folding, onsite survey, high-resolution topography

1. はじめに

令和6年(2024年)能登半島地震(Mj7.6)は、能登半島北東部を震源として発生した(気象庁, 2024b)(第1図)。本震の発震機構は、第四紀後半における北陸地域の応力場(尾崎, 2010)と調和的な北西–南東方向に圧力軸を持つ逆断層型を示した(気象庁, 2024a)(第1図)。この地震に伴い、半島沖で

事前に海底活断層として認定されていた北東–南西方向に延びる逆断層に沿って海底面を変位させる地震断層が出現した(例えば, 海上保安庁, 2024; 岡村ほか, 2024)ほか、半島北部の海岸が広域にわたって隆起した(例えば, 石山ほか, 2024; 宍倉, 2024; 宍倉ほか, 2024a, bなど)。一方、半島陸域の複数の地点において、この地震に伴う地表地震断層

の可能性がある地表変状が報告された（例えば、白濱ほか, 2024；鈴木・渡辺, 2024；吉田, 2024；Yoshida *et al.*, 2024 など）。そのうち、半島北東部の珠洲市若山町では、東～東北東に流下する若山川中流部の谷底低地において、概ね同川に沿うようにメートルオーダーの崖高を示す明瞭な崖を伴う長さ約 5 km, 最大幅 200 m 程度の隆起帯が従来活断層や活褶曲が認められていない場所に出現した（白濱ほか, 2024；吉田, 2024；Yoshida *et al.*, 2024）。このように活構造が知られていない場所で地表変状が出現したことの事態を把握することは、活構造と非活構造との識別や活構造と地質構造との関係を理解するうえで重要である。そこで、筆者らは国土地理院により 2024 年 1 月 2 日に撮影された若山川沿いの空中写真（国土地理院, 2024c）を判読するとともに、既往報告を参照して地表変状の出現位置を予察的に検討したうえで、2024 年 2 月 11 日から同月 13 日にかけて、若山町を中心として現地で地表変状の記載と簡易計測を行い、その結果を速報した（吉見・丸山, 2024）。その後、地表変状の詳細を把握することを目的として、同年 3 月 28 日から同月 30 日までと同年 6 月 18 日から同月 20 日までの 2 回現地を訪れ、地表変状のマッピング及び VRS (Virtual Reference Station) 方式ネットワーク型 RTK-GNSS (以下、RTK-GNSS) を用いた地形測量調査を実施した（第 2～9 図）。また、中央開発株式会社により 2024 年 3 月 13 日に若山町中地区で取得されたドローン搭載 LiDAR による詳細な数値標高モデル (0.1 m DEM) および朝日航洋株式会社が公開している石川県が地震発生前に実施した「令和 4 年度 森林情報整備業務」で取得した地震前の数値標高モデル (0.5 m DEM, 朝日航洋株式会社, 2024) を用いて地表変状の地形計測を行った。ここでは、中地区とその西隣の同町宗采地区での調査結果を報告し、最後に地表変状の形成機構について若干考察する。

2. 地形・地質概要

若山町が位置する能登半島北東部の地質は、主として第三紀堆積岩・火山岩および第四紀堆積物からなる（吉川ほか, 2002）。顕著な地表変状が出現した若山川中流部付近には、中期～後期中新世の海成層で、主に珪質シルト岩および珪藻質シルト岩からなる飯塚層が広く分布する（吉川ほか, 2002）（第 2 図）。若山川上～中流域では、東北東～西南西方向に軸をもつ褶曲（北から若山川向斜、岡田背斜、熊谷向斜）がほぼ平行するように発達し、飯塚層が変形を受けている（吉川ほか, 2002）（第 2 図）。これらの褶曲の東方延長部では、平床台地周辺（第 1 図）に中期更新世から後期更新世に堆積した中位段丘堆積物や低位段丘堆積物が分布しているが、それらが褶曲による変形を受けているとの報告はない。今回の

地震で地表変状が出現した範囲では、若山川の流下方向は、湾曲しながらも全体的には褶曲軸の延びと平行しており、その位置は概ね岡田背斜の位置と一致している（第 2 図）。

一連の褶曲の南方には、能登半島北部の陸域において地質断層として最大の変位が認められている白米坂断層が分布する（第 2 図）。尾崎（2010）は、ほぼ東西方向に延びるこの断層を境とした海洋酸素同位体ステージ 5e の旧汀線の標高分布の差から、宗末地区以東の区間については後期更新世以降に南側が相対的に少なくとも 20 m 以上隆起する実在活断層としている（第 1 図）。なお、これまでのところ、令和 6 年能登半島地震で白米坂断層沿いに地表変状が出現したとの報告はない。

3. 地表変状

ここでは、中地区および宗末地区のうち、中地区ではドローン搭載 LiDAR による詳細な数値標高データが取得された範囲（第 2～4 図）について、宗末地区では水田面の傾動が認められた範囲（第 2, 8 図 a）について、現地写真（第 5 図）および地震前後の地形断面図（第 6, 7 図）を多数用いて地表変状を報告する。写真撮影位置と向きを第 3 図に、地形断面図の測線位置を第 4 図にそれぞれ示す。中地区の地形断面図（第 6, 7 図）には、地震前の空中写真や航空レーザ DEM から作成した地形図の判読に基づく地震前の土地状況を各図の下部に示した。これにより、例えば地震前は一枚の水田であった場所に崖が出現したことや、水平の水田面が傾動している状況がわかるようにした。地震後に取得したドローン搭載 LiDAR による数値標高データと RTK-GNSS を用いた測量結果を比較したところ、断面形状はいずれの断面図においても類似しており、ドローン搭載 LiDAR による数値標高データから作成した地形断面図は地表変状の形態的特徴の詳細を検討するうえで十分な正確性を持ち合わせていると判断した（第 6 図）。一方でドローン搭載 LiDAR の標高値が RTK-GNSS 測量のそれに対してほぼ一様に 60 cm 程度低い値を示すことが確認された（第 6 図）。その原因としては、両測量実施期間内に基準点の改測が行われたことなどが考えられるが、現段階では正確な理由の解明には至っていない。また、第 6, 7 図の作成に際しては、地震に伴う水平方向の変動の影響は考慮していない。そのため、ここでは RTK-GNSS 測量、ドローン搭載 LiDAR 計測、地震前の航空レーザ DEM の 3 つのデータの標高差分を用いた変位量の検討は行わない。

3.1 若山町中

第 3, 4 図の東端付近では、蛇行する若山川左岸の低地において水田および農道を切断する東北東～西

南西に延びる1条の明瞭な北向きの崖が出現した(第4図, 第5図 a). この顕著な北向きの崖をここでは崖Aと呼ぶ. 崖Aは第3, 4図の範囲内において最も明瞭であり, 図の東端から西に約420mにわたって連続する. この農道の東隣の水田における崖Aの崖高は1.2mである(第7図のP1). 農道の縁は見かけ上左ずれを示す(第5図 a). この崖の西方延長において, 一部崩壊しているものの, 急傾斜する新鮮なすべり面が露出した(第5図 b). 崖Aの背後(南側)では, 第6図のPiおよび第7図のP1が示すように, 1枚の水田全体が南に傾動している状況が認められる.

崖Aにより切断された農道の南方付近から西では, 崖Aの背後(南側)において, 短い間隔で並走する崖高の小さい北向きの崖が3条生じた(第4図, 第7図のP2). これらの崖はいずれも背後の水田面の南への傾動を伴う. そのうち崖Aに最も近接し, 崖高の大きい崖の出現状況を第5図 c, dに示す. 崖高0.2mのこの崖の出現位置と地形との関係(いわゆる3点問題; 塩野, 2007)および直線的なトレースから, すべり面は南に高角度で傾斜していると推定される(第5図 d).

崖Aおよびその背後の複数の並走する崖高の小さい崖は若山川を横断して西に続き, 右岸側の低地に出現する. ここでは崖Aは水田を切断する北向きの明瞭な崖として認められ, 上に凸状の崖の断面形態から, 水平短縮によって形成されたことが示唆される(第5図 e). この付近の崖Aの崖高は1.9~2.2m(第6図のPii, 第7図のP4~P7)と計測され, 第3, 4図の範囲内で最大を示す(第5図 e). ただし, その背後では複数の並走する崖高の小さい北向きの崖を伴いながら少なくとも長さ約90~120mの範囲にわたって南に傾動し, とりわけ傾動区間の南端付近では著しく南に傾斜している(第6図のPiii~Pv, 第7図のP3, P5, P7). この顕著な南への傾動が生じた区間の南端付近の水田では, 第5図 f, gに示すように湛水している. 崖Aの北では変位を受けた水田がわずかに北に傾動しているように見える(第6図のPii, 第7図のP4~P7).

北向きの崖Aは, 西に向かってさらに蛇行する若山川を越えて南北に細長い左岸側の低地に出現している. ここでの崖Aは, もともと1枚の水田を切断している(第5図 h). 撓曲状の崖の形態的特徴に加えて, 相対的に盛り上がった南側ブロックの水田が崖の基部で北側ブロックの水田に押し被さっている様子から, 崖Aは水平短縮により形成されたと考えられる(第5図 i). 崖Aの背後の南への傾動は, 上述した地域と同様にここでも生じているが, ここでは地震前の地形断面図に示されている南への傾斜部分が今回の活動でさらに傾斜を増したような形態を示している(第7図のP8). また, 地震前後の地形断面図の比較からは, 崖Aとその南の傾動部分から

なる区間全体が上に凸状に隆起しているように見える.

ここまで顕著な崖として現れていた崖Aは, 西方で若山川を横切り右岸側の低地に出現すると1条の西北西-東南東走向の北向きの崖とその南側で東北東-西南西に延びる北向きの崖に分岐し, さらにその南側では少なくとも2条の東北東-西南西走向の北向きの崖が生じている(第4図, 第5図 j~l 図, 第7図のP9~P11). これらの崖は, 先端部の地表面に皺が生じていることと, 崖の部分でU字溝が跳ね上がっていること(第5図 j), 撓曲崖の断面形態を示すこと(第5図 k), 崖の北側のブロックに南側のブロックが衝上していること(第5図 l, m)から, いずれも水平方向の短縮により生じたものと考えられる. このうち, 西北西-東南東走向の北向きの崖は, 地震前から存在した北向きの崖の基部付近に出現しており, 既存の崖が成長したことが認められる(第5図 n, o, 第7図のP10, P11). 北向きの崖の背後の水田や畑の南への傾動はここでも認められる(第5図 m, 第7図のP9~P11). 西北西-東南東走向の北向きの崖は第5図 oの西方で北北西-南南東走向に湾曲し, 舗装道路に明瞭な東向きの段差として認められる(第6図のPvi, 第7図のP12). この北~東向きの崖と南への傾動は, 後述するように若山川を跨いでさらに北西の低地に続く.

これまでの区間では, 出現した地表変状は北向きの崖とその背後の南への傾動であったが, これより西の区間では北向きの崖の北側に南向きの崖とその背後(北側)での北への傾動が出現するようになる. 例えば, 第7図のP10で示されるように, 北向きの崖と向かい合うように南向きの崖が生じている. この南向きの崖の伸びは東西(第7図のP10, P13)から西に向かって北北西-南南東に湾曲し, 舗装道路に明瞭な西向きの段差として現れている(第6図のPvii, 第7図のP14).

南~西向きの崖は若山川を跨いで左岸側低地の水田に出現する(第4図). ここでは複数の南向きの崖が短い間隔で並走し, 各崖の背後(北側)では水田面が北に傾動している(第7図のP15, P16). この崖は西に向かって断続しながら北西-南東から東西に向きを変える.

さらに崖を西に追跡すると, 1条の南向きの崖と複数の並走する北向きの崖が互いに向かい合うようにして水田を切断している(第5図 p, q, 第7図のP17). 南向きの崖の背後の水田面は北に傾斜するのに対して, 北向きの崖の背後の水田面は南に傾斜し, 全体的に上に凸状に隆起している(第7図のP17).

地表変状はさらに蛇行する若山川を越えて, 右岸側のやや広い低地に出現する(第4図). ここでも1条の南向きの崖(第5図 r, s)と複数の並走する北向きの崖が互いに向かい合うようにして水田を切断し, 細長い凹地を形成している(第5図 t, 第6図の

Pviii~Px, 第7図のP19, P20). ここでは南向きの崖がより明瞭となり, 崖高も南向きの崖で1.3 mであるのに対して, 北向きの崖では0.3~0.4 mと計測された. 南向きの崖は見かけ上右ずれを示す. また, この崖を横切る部分でU字溝が水平短縮を受けて跳ね上がっている様子が認められた(第5図s). ここでも南向きの崖の背後の水田および旧水田は北に傾動している(第5図u)のに対して, 北向きの崖の背後は系統的に南に傾動している(第7図のP18, P19).

これより西方で若山川が北に凸のヘアピン状に蛇行する区間では地表変状は見出せないが, 低地に出現した西端から約170 m西方で砂利敷の駐車場とその東の舗装道路に崖高0.3~0.4 mの北向きの崖が出現した(第4図, 第5図v, 第7図のP21, P22). この付近では, 東方の低地で見られたような, これと向かい合う明瞭な南向きの崖は認められないものの, 若山川から約150 m北方において, もともと水田だったと見られる畑地が北に傾動している状況が認められた(第4図, 第7図のP23, P24).

3.2 若山町宗末

宗末地区では, 北東に流れる若山川の両岸に水田が分布している(第8図a). 2024年2月11日に現地を観察したところ, 左岸(北岸)側の水田面が北西に, 右岸側(南岸)の水田面が南東にそれぞれ傾動している様子が水田の湛水状況から認められた(第8図b, c). また, 付近の若山川に建設されている砂防堰堤に短縮変形が生じていた(第8図aの地点A).

若山川の両岸の傾動の状況を把握するため, もともとほぼ水平と考えられる水田の縁や内部を対象として2024年6月19日にRTK-GNSS測量を行い, 地形断面図を作成した(第9図). 北西(N45°W)方向に投影した地形断面図からは, 水田面には部分的に顕著な落差を伴う崖(例えば, 断面Pa1, Pd1, Pd2など)が見られるなど複雑な変形を示すものの, 全体としては左岸側の水田面が北西に, 右岸側の水田面が南東にそれぞれ傾動する様子が確認された(第9図). なお, 右岸側の水田は1980~1990年代の圃場整備により地形が改変されているため, 水田面に認められる変形の一部は整備前の地形や表層の地質の影響を受けている可能性は否定できない.

4. 地表変状の形成機構についての若干の考察と今後の課題

今回の地震に伴い, 中地区に出現した地表変状は次のように特徴付けられる. 1) 地表変状は, 東北東-西南西~西北西-東南東走向でほぼ並走し, 互いに短い間隔で出現する複数の明瞭な崖からなる. 2) 崖は, その逆断層状の断面形態や近傍のU字溝の変形などから, 南北方向の水平短縮に伴い形成された

と考えられる. 3) これらの崖は, 若山川を境にして, その右岸側(と左岸側の河川寄り)に北向きの崖が, 左岸側に南向きの崖が分布する傾向が見られ, 両者は互いに向かい合うように分布している. 4) 崖はその背後にあたる相対的隆起側に傾動を伴っているが, 北向きの崖の背後(南側)の水田面はいずれも南に傾動しているのに対して, 南向きの崖の背後(北側)の水田面(旧水田を含む)はいずれも北に傾動している. 5) 地表変状は, 崖や傾動を伴いながらも, 全体的には狭い帯状の隆起帯の形状を示す. 宗末地区においても水田面の傾動から帯状の隆起帯の形状が示唆される.

こうした崖の向きと背後の地形面の傾動の向きとが異なる一組の地表変状が互いに向かい合うように分布し, 全体的には隆起する地質構造は, 東西方向に軸を持つ背斜の南北両翼部の層理面に沿って逆断層型のずれと傾動が生じる層面すべり断層(Flexural-slip faults, 例えば, Yeats, 1986; 吉岡, 1989など)を伴いながら全体として褶曲が成長するFlexural-slip foldingの地表変形パターンと調和的である(第10図). 中地区では, 若山川の谷底低地が形成されて以降, 過去にも背斜状の地表変状が出現した可能性を示す地形が認められること(第7図のP8, P10, P11)と, 若山川に沿って中期~後期中新世の飯塚層を変形させる岡田背斜が認められていること(第2図)を合わせると, 能登半島地震によりこの地域が南北に圧縮され, 岡田背斜が活褶曲として成長したことを示している可能性がある. ただし, 今のところ, 実際に地層が層理面に沿ったすべりを生じるような姿勢や力学的異方性を示しているのかについては不明である. また, 明瞭な崖Aが出現した区間では, 崖Aを境に傾動の向きが異なるものの, その北方で崖Aに向い合うような明瞭な崖は認められず, 必ずしも第10図と一致していない. なお, Yoshida *et al.* (2024)は, 第7図のP17, P19, P20で示される凹地および崖Aについて, それぞれ岡田背斜のヒンジ付近に局所的に生じた伸長場で形成された正断層および熊谷向斜のヒンジ付近に局所的に生じた圧縮場で形成された逆断層によるものとし, 中地区の地表変状の形成機構として曲げモーメント断層(Bending-moment faults, 例えば, Yeats, 1986; Li *et al.*, 2018など)の可能性を示している. 地表変状の形成機構の実像を解明するためには, 今後地表変状出現範囲とその周辺での詳細な地質踏査や地下構造探査などの地質構造調査の実施が待たれる.

謝辞 細矢卓志氏をはじめとする中央開発株式会社が中地区で取得したドローン搭載LiDARの数値標高データは, 同地区における地表変状の特徴を把握するのに役立ちました. 地震前の地形断面図は, 朝日航洋株式会社(2024)が公開している, 石川県が実施した「令和4年度 森林情報整備業務」で取得し

た地震前の数値標高データを用いて作成しました。中地区の地表変状については、白濱吉起氏（東京大学地震研究所）と堤 浩之氏（同志社大学）に現地情報で情報をいただきました。宗末地区の方々には、被災されているなか若山川沿いの地表変状について貴重な情報を提供していただきました。杉山雄一氏（元産業技術総合研究所）、白濱吉起氏、今西和俊氏には、原稿を丁寧に読んでいただき、原稿を改善する上で重要なコメントをいただきました。宮下由香里氏には編集の労をとっていただきました。以上の皆様には厚く御礼申し上げます。このたびの地震によりお亡くなりになられた方に哀悼の意を表します。また、被害に遭われた方々、避難を余儀なくされている方々に心よりお見舞いを申し上げます。

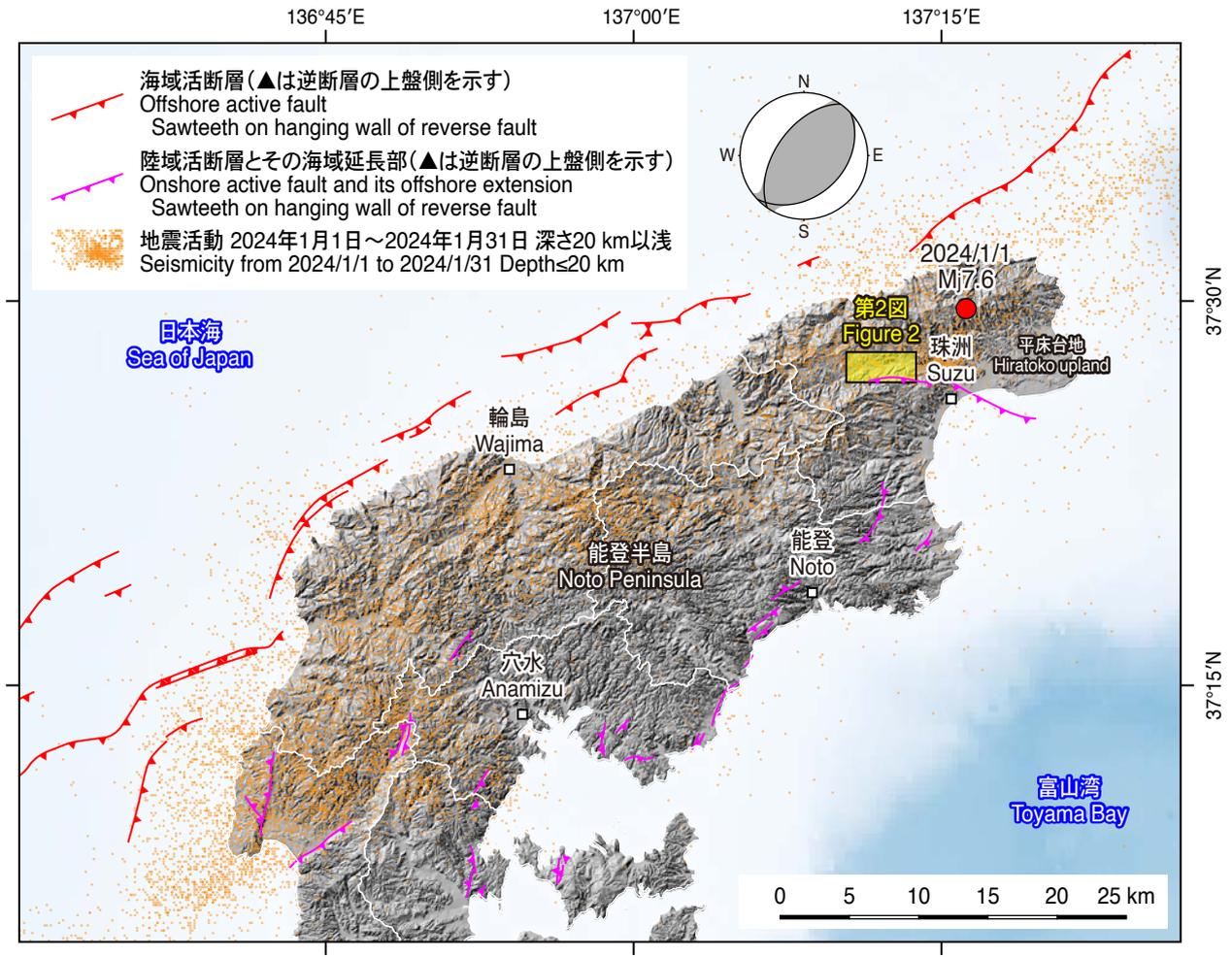
文 献

- 朝日航洋株式会社(2024) 令和6年度能登半島地震(能登東部発災前DEM). <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/aac-disaster-20240101-dem> (2024年7月1日閲覧)
- GEBCO (2024) GEBCO Gridded Bathymetry Data Download. <https://download.gebco.net/> (2024年7月1日閲覧)
- 井上卓彦・岡村行信(2010) 能登半島北部周辺20万分の1海域地質図説明書。海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図S-1, 産総研地質調査総合センター, www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_DGM_S1_2010_01_b.pdf (2024年7月1日閲覧)
- 石山達也・立石 良・安江健一(2024) 令和6年能登半島地震(M7.6)で生じた海岸隆起【速報その4】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/> (2024年7月1日閲覧)
- 海上保安庁(2024) 能登半島沖の海底で約3メートルの隆起を確認. <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r6/k240208/k240208.pdf> (2024年7月1日閲覧)
- 気象庁(2024a) 発震機構解(精査後). <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/mech/index.html> (2024年7月1日閲覧)
- 気象庁(2024b) 震源リスト. https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/daily_map/index.html (2024年7月1日閲覧)
- 国土地理院(2024a) 地理院地図. <https://maps.gsi.go.jp/#5/36.104611/140.084556/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1> (2024年7月1日閲覧)
- 国土地理院(2024b) 基盤地図情報ダウンロードサービス. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2024年7月1日閲覧)
- 国土地理院(2024c) 令和6年(2024年)能登半島地震に関する情報, 2. 空中写真(垂直写真)(1月3日公表、1月18日更新). https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html#3-2 (2024年7月1日閲覧)
- Li, T., Chen, J., Thompson Jobe, J. A., Burbank, D. W., Cheng, X., Xu, J., Li, Z., Zheng, W. and Zhang, P. (2018) Active bending-moment faulting: geomorphic expression, controlling conditions, accommodation of fold deformation. *Tectonics*, **37**, 2278–2306.
- 岡村行信・井上卓彦・佐藤智之・大上隆史・有元純(2024) 2024年(令和6年)能登半島地震の想定と想定外. *科学*, **94**, 620–626.
- 尾崎正紀(2010) 能登半島北部20万分の1地質図. 海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図S-1, 産総研地質調査総合センター, www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_DGM_S1_2010_02_b.pdf (2024年7月1日閲覧)
- 塩野清治(2007) 地質情報の数値計算入門—走向・傾斜に関する諸問題—. *情報地質*, **18**, 195–218.
- 白濱吉起・石山達也・立石 良・安江健一(2024) 令和6年能登半島地震(M7.6)に伴い若山川沿いに生じた地表地震断層【速報】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/> (2024年7月1日閲覧)
- 宍倉正展(2024) 沿岸の隆起痕跡からわかる能登半島地震の履歴. *科学*, **94**, 608–614.
- 宍倉正展・越後智雄・行谷佑一・立石 良・後藤玲奈・前杵英明(2024a) 令和6年能登半島地震に伴う隆起で生じた海岸の離水と海成段丘. *第四紀研究*, **63**, 169–174.
- 宍倉正展・行谷佑一・越後智雄(2024b) 第四報 2024年能登半島地震の緊急調査報告(海岸の隆起調査). <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-04.html> (2024年7月1日閲覧)
- 鈴木康弘・渡辺満久(2024) 令和6年能登半島地震をめぐる予測の課題. *科学*, **94**, 638–645.
- Yeats, R. S. (1986) Active faults related folding. In Wallace R. E. ed., *Active Tectonics*, Washington D.C., National Academy Press, 63–79.
- 吉田一希(2024) 石川県珠洲市若山町に出現した上下変位を伴う線状の地表変状(速報). www.gsi.go.jp/common/000254854.pdf (2024年7月1日閲覧)
- Yoshida, K., Endo, R., Iwahashi, J., Sasagawa, A. and Yurai, H. (2024) Aerial SfM–MVS visualization of surface deformation along folds during the 2024 Noto Peninsula earthquake (Mw7.5). *Remote Sensing*, **16**, 2813.

吉川敏之・鹿野和彦・柳沢幸夫・駒澤正夫・上嶋正人・木川栄一 (2002) 珠洲岬, 能登飯田及び宝立山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 76 p.
 吉見雅行・丸山 正 (2024) 第九報 2024 年能登半島地震の緊急調査報告 (陸域に出現した地表変

状の現地調査). 産総研地質調査総合センター, <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-09.html> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
 吉岡敏和 (1989) 褶曲に伴う層面すべり断層. 活断層研究, 7, 5-12.

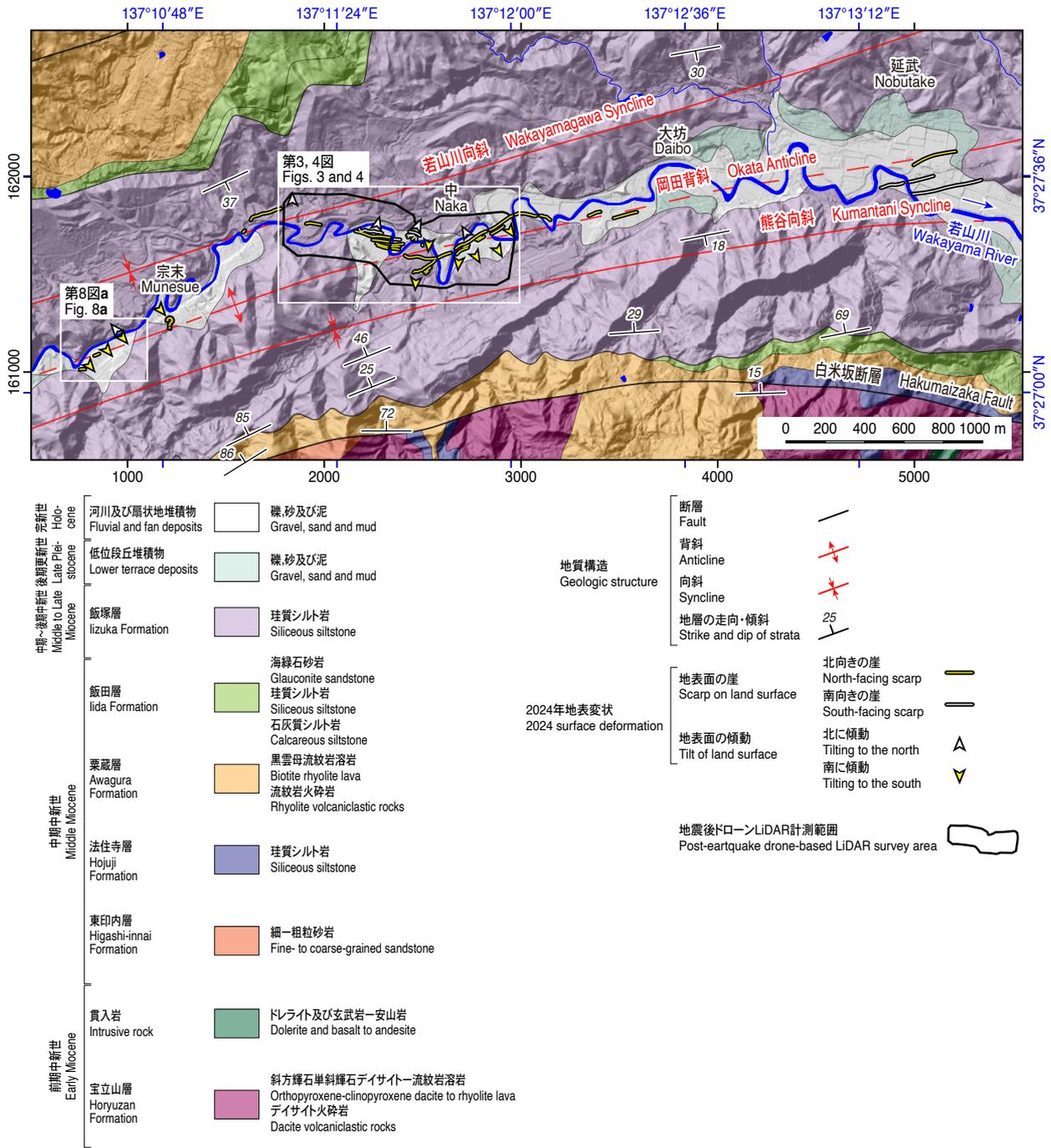
(受付: 2024 年 9 月 17 日, 受理: 2024 年 12 月 5 日)



第 1 図. 能登半島北部とその周辺海域の活構造と地震活動. 地震活動は気象庁一元化震源 (気象庁, 2024b) のうち, 2024 年 1 月 1 日から同年 1 月 31 日までに深さ 20 km 以浅で発生したものを橙色の丸で示す. 令和 6 年能登半島地震の本震を赤丸で示す. 発震機構解は気象庁 (2024a) による本震の CMT 解. 海域および陸域の活構造は, それぞれ井上・岡村 (2010) および尾崎 (2010) による. 第 2 図の範囲を黄色四角で示す. 陰影図および海底地形図は, それぞれ地理院地図 (国土地理院, 2024a) および GEBCO 2023 (GEBCO, 2024) を使用.

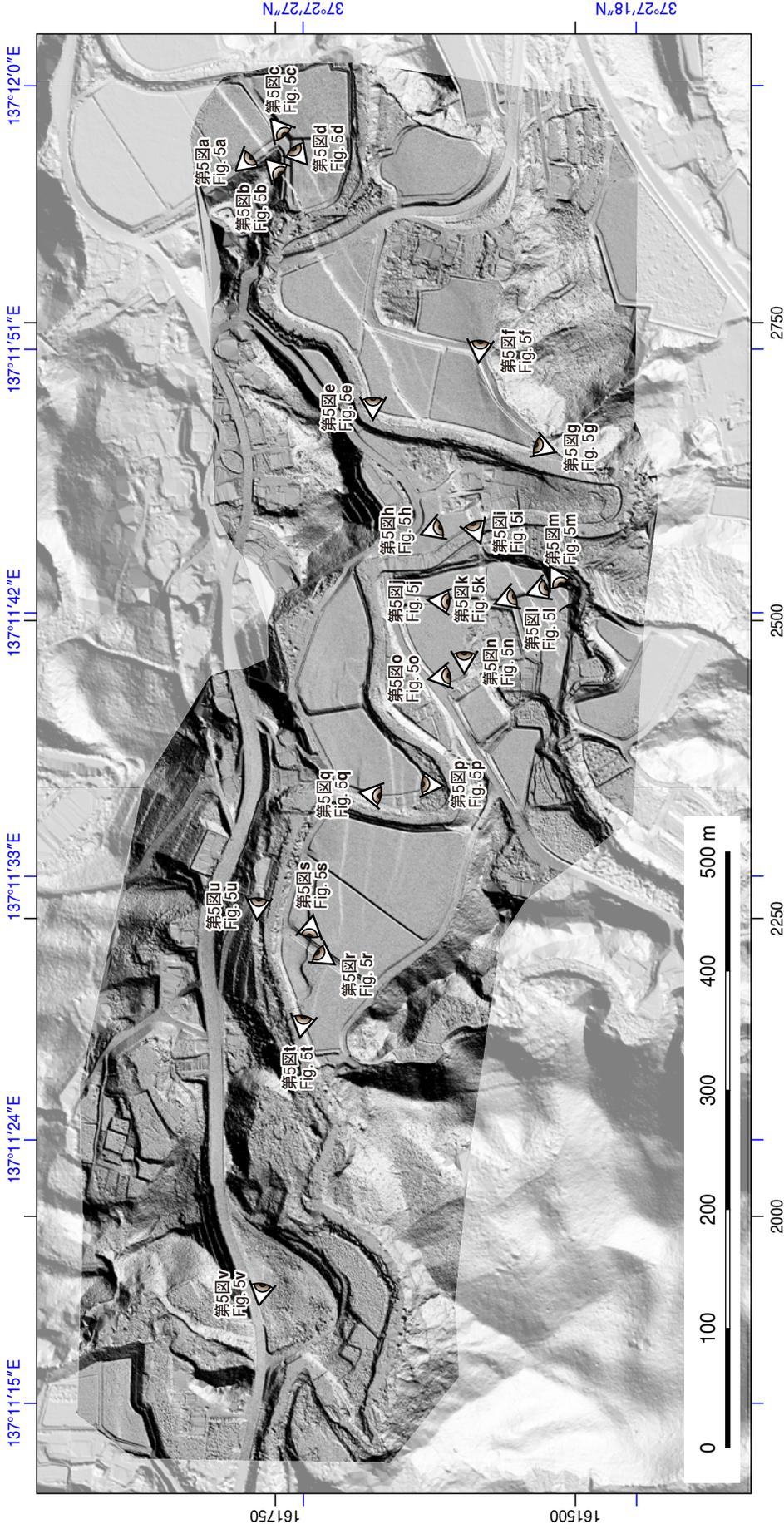
Fig. 1. Active structure and seismic activity in the northern Noto Peninsula and surrounding areas. Seismicity is indicated by orange circles for those that occurred at depths shallower than 20 km from January 1, 2024 to January 31, 2024, using JMA unified earthquake catalog (Japan Meteorological Agency, 2024b). The mainshock of the 2024 Noto Peninsula earthquake is indicated by a red circle. Focal mechanism solution is the CMT solution for the mainshock by Japan Meteorological Agency (2024a). The offshore and onshore active structures are after Inoue and Okamura (2010) and Ozaki (2010), respectively. The area of Fig. 2 is indicated by yellow rectangle. Hillshading and bathymetry are from GSI Maps (Geospatial Information Authority of Japan, 2024a) and GEBCO 2023 (GEBCO, 2024), respectively.

令和6年能登半島地震で石川県珠洲市若山町の若山川沿いに出現した地表変状



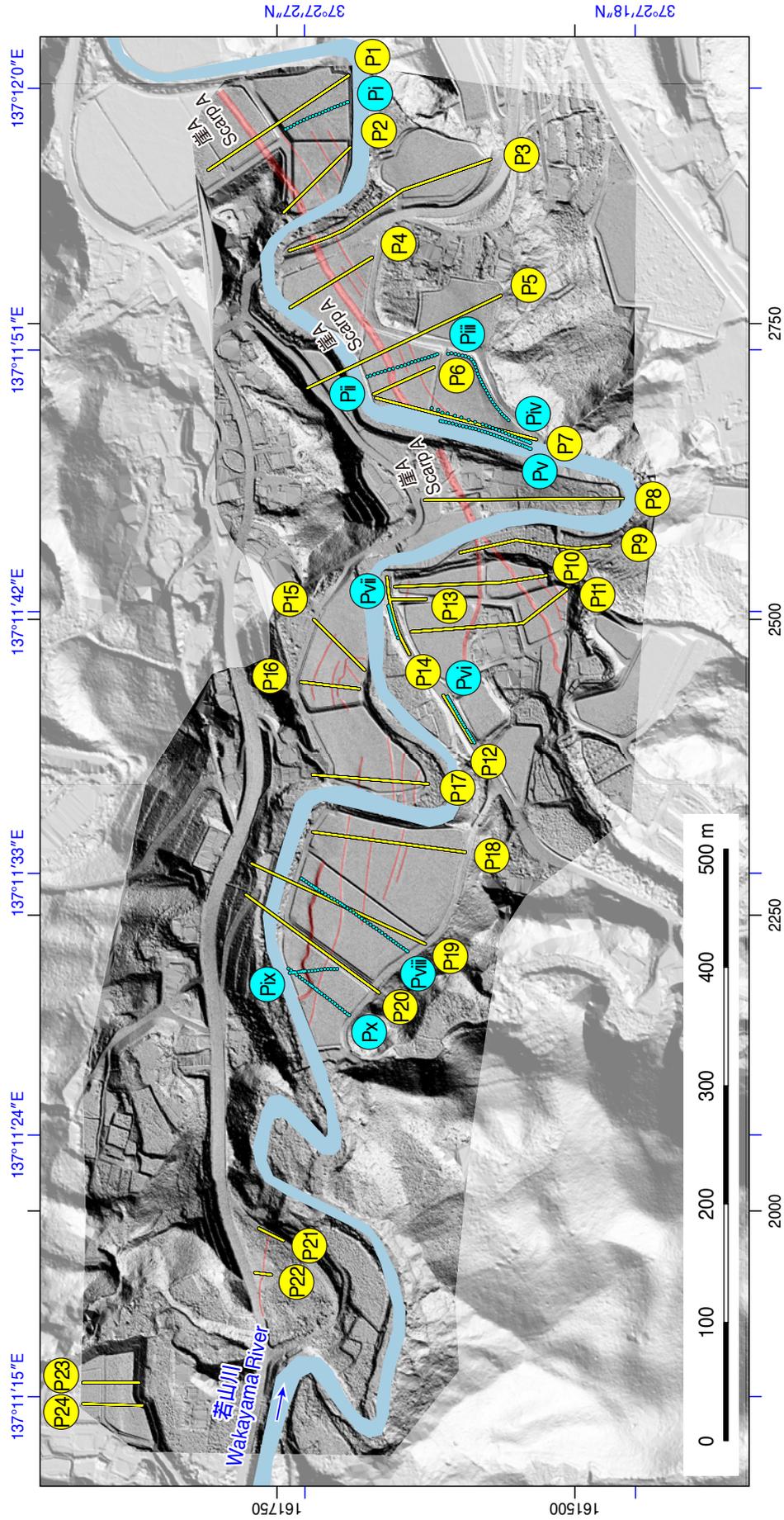
第2図. 令和6年能登半島地震に伴い珠洲市若山町に出現した地表変状の出現位置と地質構造との関係。地表変状の分布は、国土地理院により2024年1月2日に撮影された空中写真(国土地理院, 2024c)の判読, 2024年3月13日に中央開発株式会社実施したドローンLiDAR計測により取得された細密地形データの解析および現地調査に基づく。背景図は、吉川ほか(2002)の地質図と朝日航洋株式会社(2024)を用いて作成した陰影図を重ね合わせて表示。第3, 4図および第8図aの範囲を白枠で示す。黒枠の左と下にある黒い目盛りは、平面直角座標系VIIによるメートル単位の座標を示す。

Fig. 2. Map showing the relationship between the location of surface deformation that appeared in Wakayama Town, Suzu City, following the 2024 Noto Peninsula earthquake and pre-existing geologic structures. The distribution of the surface deformation is based on the examination of aerial photographs taken on January 2, 2024, by Geospatial Information Authority of Japan (GSI) (Geospatial Information Authority of Japan, 2024c), analysis of ultra-fine-scale topographic data from a drone LiDAR measurement acquired by Chuo Kaihatsu Corporation on March 13, 2024, and field investigation. Background map is the geologic map by Yoshikawa *et al.* (2002) overlaying the hillshade map created using Aero Asahi Corporation (2024). The areas in Figs. 3, 4 and 8a are indicated by white frames. Black tick marks on the left and bottom of the black frame are coordinates in meters from the Japan Plane Rectangular Coordinate System VII.



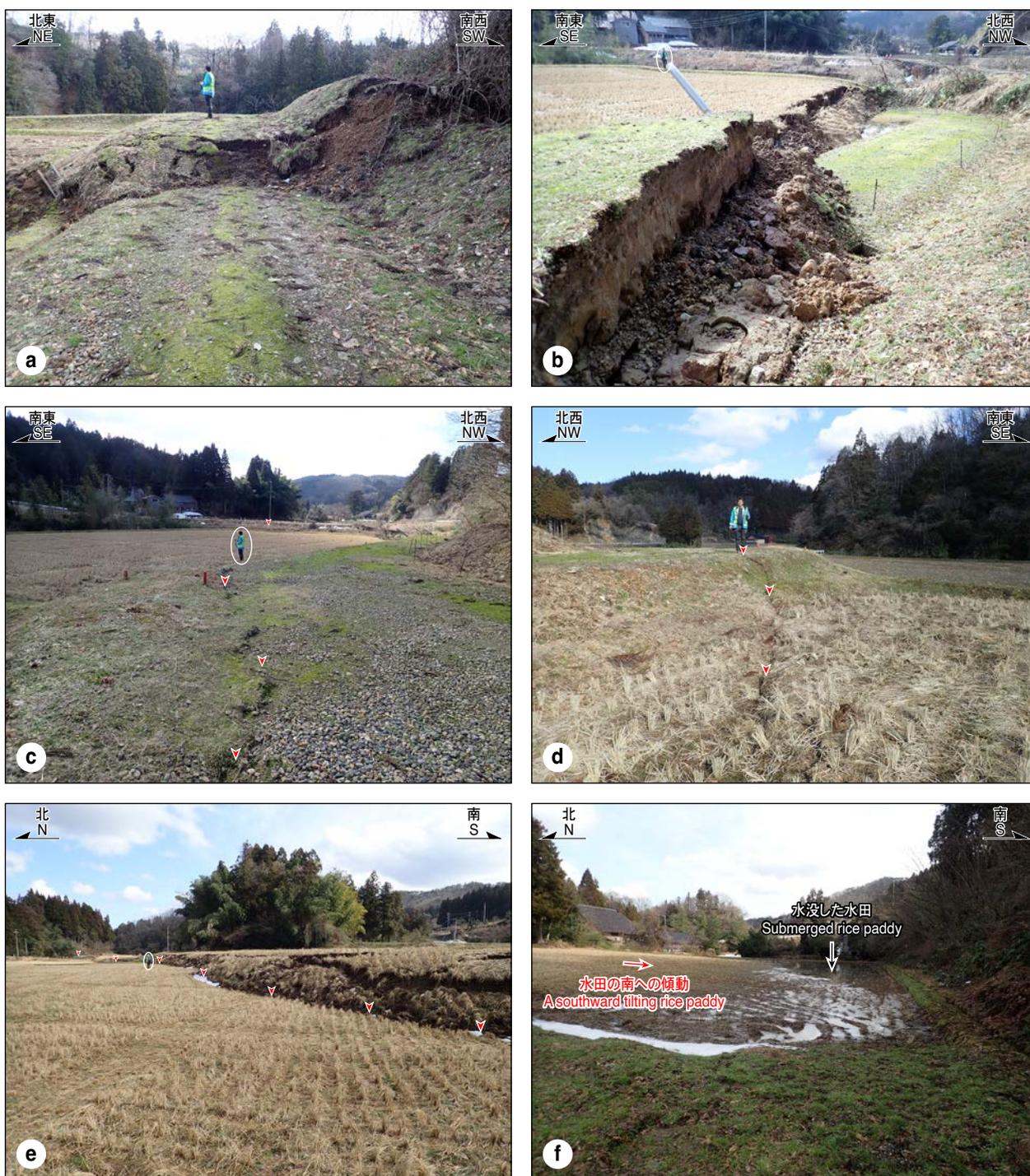
第3図 若山町中地区の地表変状の写真撮影位置。目玉の向きが撮影方位を示す。写真を第5図に示す。背景図は、中央開発株式会社により取得されたドローンLiDAR計測0.1mDEMデータから作成した陰影図(北西光源)と朝日航空株式会社(2024)を用いて作成した陰影図(北西光源; 透明度50%)を重ね合わせて表示。

Fig. 3. Map showing locations where surface deformation at Naka of Wakayama Town were photographed. The direction of the eyeballs indicates the direction in which the photographs were taken. The photographs are shown in Fig. 5. The background image is shaded relief map created from drone LiDAR-derived post-earthquake 0.1 m DEM data (illuminated from northwest) acquired by Chuo Kaihatsu Corporation and that from pre-earthquake airborne LiDAR data provided by Aero Asahi Corporation (2024) (illuminated from northwest; transparency is 50%).



第4図. 若山町中地区の地表変状の地形断面図測線 (断面図 P_i~P_x, 断面図 P_i~P₂₄) を第6図に、断面図 P_i~P_x を第7図にそれぞれ示す。令和6年能登半島地震で出現した崖を赤線で示す。線の太さは概ね崖高に比例している。若山川の位置は国土地理院 (2024b) からダウンロードして使用。河川の位置が令和6年能登半島地震に伴う地殻変動の影響等により、地震後の陰影図とずれていることに注意。背景図は第3図と同様。

Fig. 4. Map showing locations of the topographic profiles of surface deformation along the Wakayama River in Naka, Wakayama Town. Topographic profiles P_i to P_x and profiles P₁ to P₂₄ are shown in Fig. 6 and Fig. 7, respectively. Red lines indicate scarps that appeared during the 2024 earthquake. The thickness of the lines is generally proportional to the scarp height. The location of the Wakayama River was downloaded from the Geospatial Information Authority of Japan (2024b). Note that the location of the river has shifted from the post-earthquake map due to crustal deformation caused by the 2024 earthquake. The background topographic image is the same as Fig. 3.



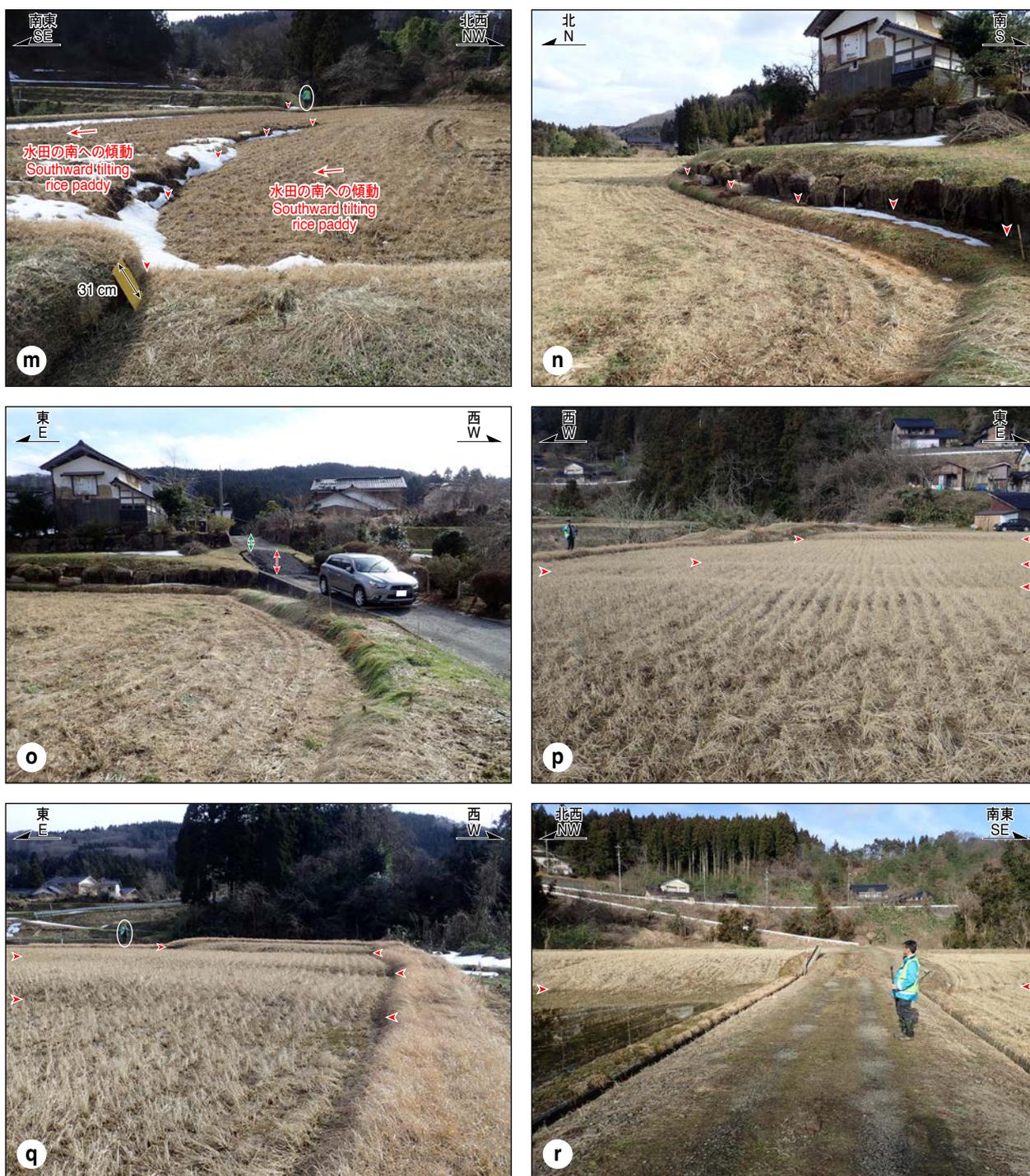
第 5 図. 11 ページ参照

第5図. 若山町中地区の地表変状. 撮影位置を第3図に示す. (a) 農道に生じた崖高が大きい明瞭な北向きの崖 (崖 A). 農道の縁は見かけ上左ずれを示す. 人物の身長は約 180 cm. 以降の写真中の人物は同じ. (b) 第5図 a の崖の西方延長に見られる急傾斜したすべり面. (c) 第5図 a の崖の背後 (南側) において並走する崖高の小さい北向きの崖 (赤矢印で示す). (d) 第5図 c の崖 (赤矢印で示す) と地形の関係から, すべり面は南に高角度で傾斜していると推定される. (e) 水田に生じた北向きの明瞭な崖 (崖 A). 第5図 a, b の崖の西方延長に位置する. 崖の基部を赤矢印で示す. 中地区における最大の崖高 (約 2.2 m) は写真の手前付近で測定された. 上に凸状の崖の断面形態は, 水平方向の短縮によって形成されたことを示唆している. (f) 第5図 e の崖 (崖 A) の背後 (南側) で認められる水田の南への傾動. (g) 第5図 e の崖 (崖 A) の背後 (南側) の南への傾動による水田の南縁の水没. (h) 水田に生じた北向きの崖 (崖 A). (i) 第5図 h の崖 (崖 A) を西から見た様子. 崖の形態的特徴に加えて崖の基部で水田が押し被さっていることから, 水平短縮で形成されたと推定される. 標尺の長さは 2 m. (j) 若山川東岸に生じた西北西-東南東に延びる明瞭な北向きの崖. 水平方向の短縮により白楕円で囲んだ U 字溝が跳ね上がるとともに, 崖の先端部では地表面に皺が生じている. (k) 若山川東岸に生じた東北東-西南西に延びる北向きの崖のうち最も北の崖. (l) 若山川東岸に生じた東北東-西南西に延びる北向きの崖のうち最も南の崖. (m) 第5図 l の崖の西方を望む. 崖を赤矢印で示す. 崖の両側で水田が南へ傾動している. (n) 第5図 j の崖の西方延長部. 既存の北向きの崖に沿って新たに崖が生じた (赤矢印で示す). (o) 第5図 n の崖の西方延長部. 既存の北向きの崖 (緑矢印) に沿って新たに崖 (赤矢印) が生じた. (p) 若山川左岸に出現した短い間隔で東西方向に延びる複数条の崖 (それぞれの崖を一对の赤矢印で示す). 手前の 2 条の崖は北向きであるのに対して, 最も奥の崖は南向きを呈する. (q) 若山川左岸の水田に生じた 3 条の短い間隔で並走する北向きの崖 (それぞれの崖を一对の赤矢印で示す). (r) 若山川右岸の水田と農道に生じた南向きの崖. 崖の基部を赤矢印で示す. (s) 第5図 r の崖を西に望む. 水平方向の短縮により崖を横切る部分で U 字溝が跳ね上がっている. (t) もともと一枚の水田に南向き (左側) の崖と北向き (右側) の崖が生じ, それらの間で水を湛えている様子. 南向きの崖は第5図 r のそれに対応. (u) 若山川左岸の旧水田の北への傾動. (v) 砂利敷駐車場に生じた北向きの崖. (a)~(d) および (v) は 2024 年 2 月 12 日に, (e)~(u) は 2024 年 2 月 11 日に撮影.

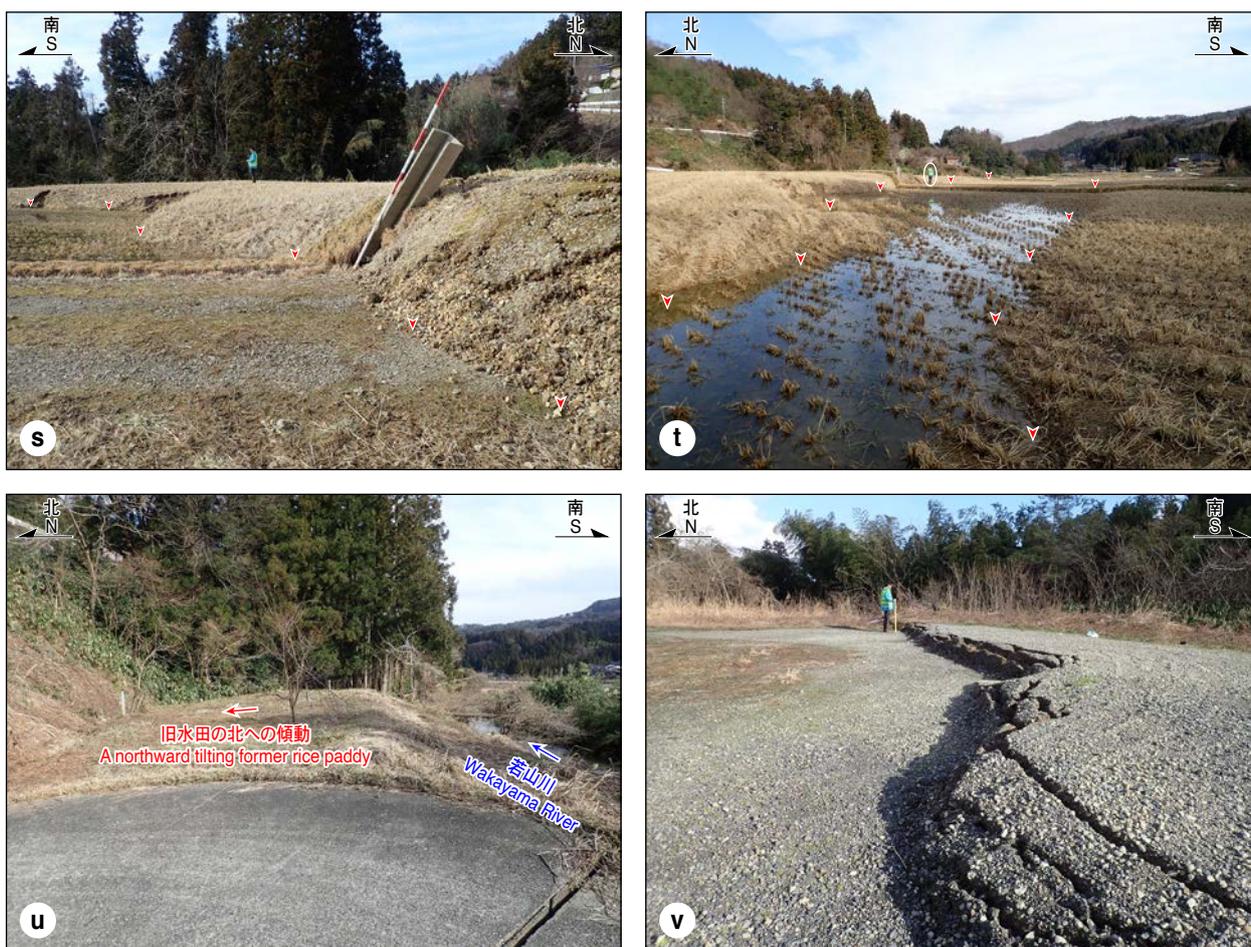
Fig. 5. Photographs showing surface deformation at Naka, Wakayama Town. The location of the photographs is shown in Fig. 3. (a) A farm road disrupted by a north-facing distinct scarp with a large scarp height (Scarp A). The edges of a farm road show left-lateral offset apparently. The person is approximately 180 cm tall. The person in subsequent photographs is the same. (b) A steeply dipping slip surface observed on the western extension of the scarp (Scarp A) in Fig. 5a. (c) A north-facing scarp with a smaller scarp height (pointed by red arrowheads) located behind (south of) the scarp in Fig. 5a. (d) Based on the relationship between the scarp in Fig. 5c and the topography (pointed by red arrowheads), the slip surface is estimated to dip to the south with a high angle. (e) A distinct north-facing scarp (Scarp A) in a rice paddy at the western extension of the scarp in Figs. 5a and 5b. The base of the scarp is indicated by red arrowheads. Maximum scarp height (approximately 2.2 m) was measured near the foreground of the photograph. The morphology of the scarp, characterized by convex upward, suggests that the scarp was formed by horizontal shortening. (f) Southward tilt of a rice paddy that occurred on the upthrown (south) side of the northwest-facing scarp (Scarp A) in Fig. 5e. (g) Submerged southern edge of a rice paddy due to tilting to the south behind (south of) the scarp (Scarp A) in Fig. 5e. (h) A distinct north-facing scarp in a rice paddy at the western extension of the scarp (Scarp A) in Fig. 5e. (i) View of the scarp in Fig. 5h looking from the west. The overlap of a rice paddy at base of the scarp as well as morphological feature of the scarp suggest that it was formed by horizontal shortening. The length of the leveling rod is 2 m. (j) A WNW-ESE-trending distinct north-facing scarp on the east bank of the Wakayama River. Due to horizontal shortening, a U-shaped gutter (circled by white oval) stands, and ground surface was wrinkled at the base of the scarp. (k) The northernmost scarp of a series of ENE-WNW-trending north-facing scarps on the east bank of the Wakayama River. (l) The southernmost scarp of a series of ENE-WNW-trending north-facing scarps on the east bank of the Wakayama River. (m) View of the west side of the scarp in Fig. 5l. The scarp is pointed by red arrowheads. Both sides of the originally single rice paddy separated by the north-facing scarp are tilted to the south. (n) Westward extension of the scarp in Fig. 5j. A new scarp (pointed by red arrowheads) was created along the existing north-facing scarp. (o) Westward extension of the scarp in Fig. 5n. A new scarp (red double arrow) was created along the existing north-facing scarp (green double arrow). (p) Closely spaced, multiple east-west oriented scarps (red arrow pairs) on the left bank of the Wakayama River. The two scarps in the foreground face north, whereas the one in the background faces south. (q) Three subparallel, closely spaced north-facing scarps (red arrow pairs) in a rice paddy on the left bank of the Wakayama River. (r) A south-facing scarp on rice paddies and farm road on the right bank of the Wakayama River. The base of the scarp is indicated by a pair of red arrowheads. (s) View to the west of the scarp in Fig. 5r. A U-shaped gutter stands where it crosses the scarp due to horizontal shortening. (t) A south-facing scarp (left side) and a north-facing scarp (right side) occurred facing each other in an originally single rice paddy, creating a shallow depression between them filled with water. Two scarps are shown in red arrowheads. The south-facing scarp corresponds to that in Fig. 5r. (u) Northward tilt of former rice paddy on the left bank of Wakayama River. (v) A north-facing scarp formed in the gravel parking. (a) to (d) and (v) were taken on February 12, 2024, whereas (e) to (u) were taken on February 11, 2024.



第 5 図. (続き)
Fig. 5. (continued)

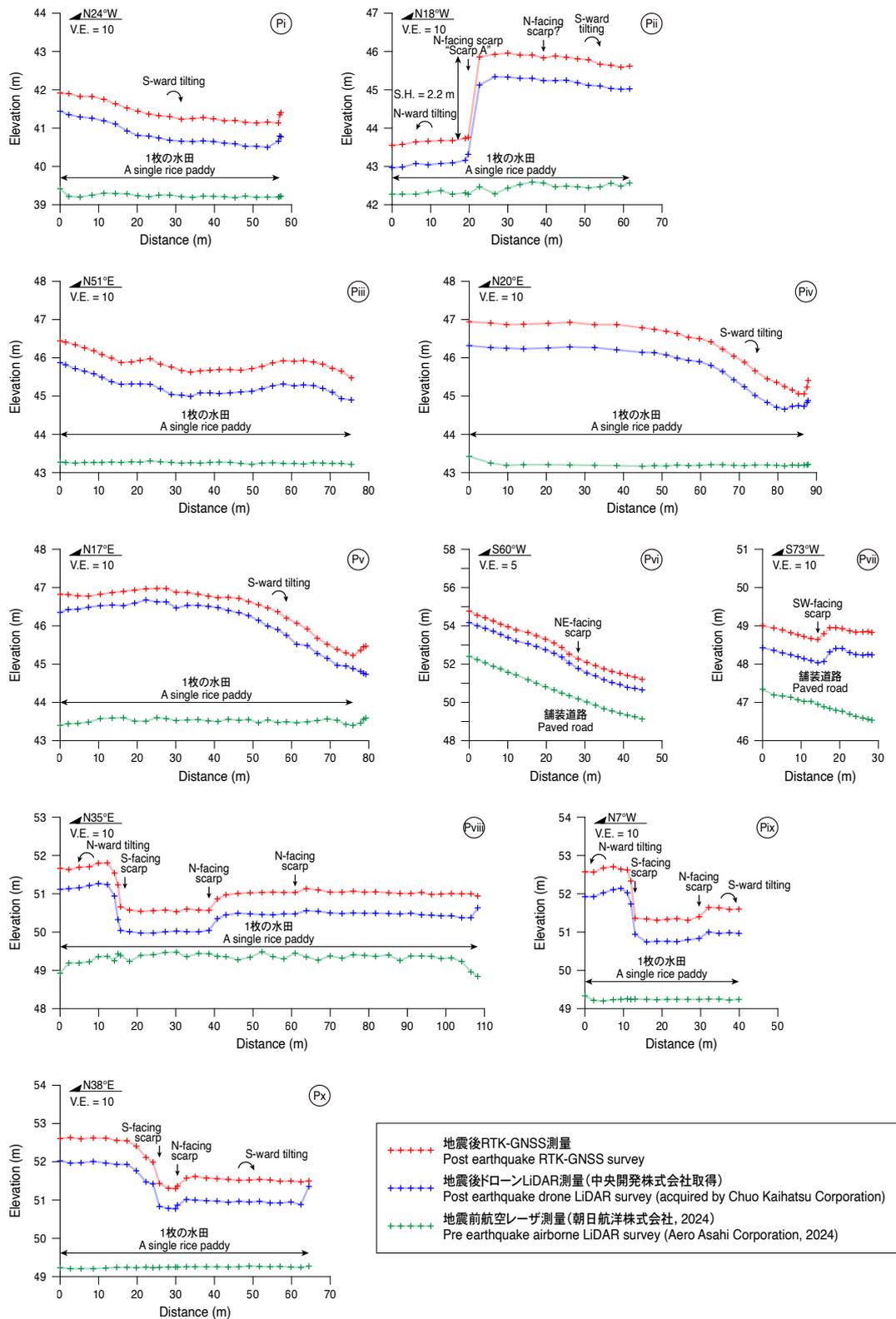


第5図. (続き)
Fig. 5. (continued)



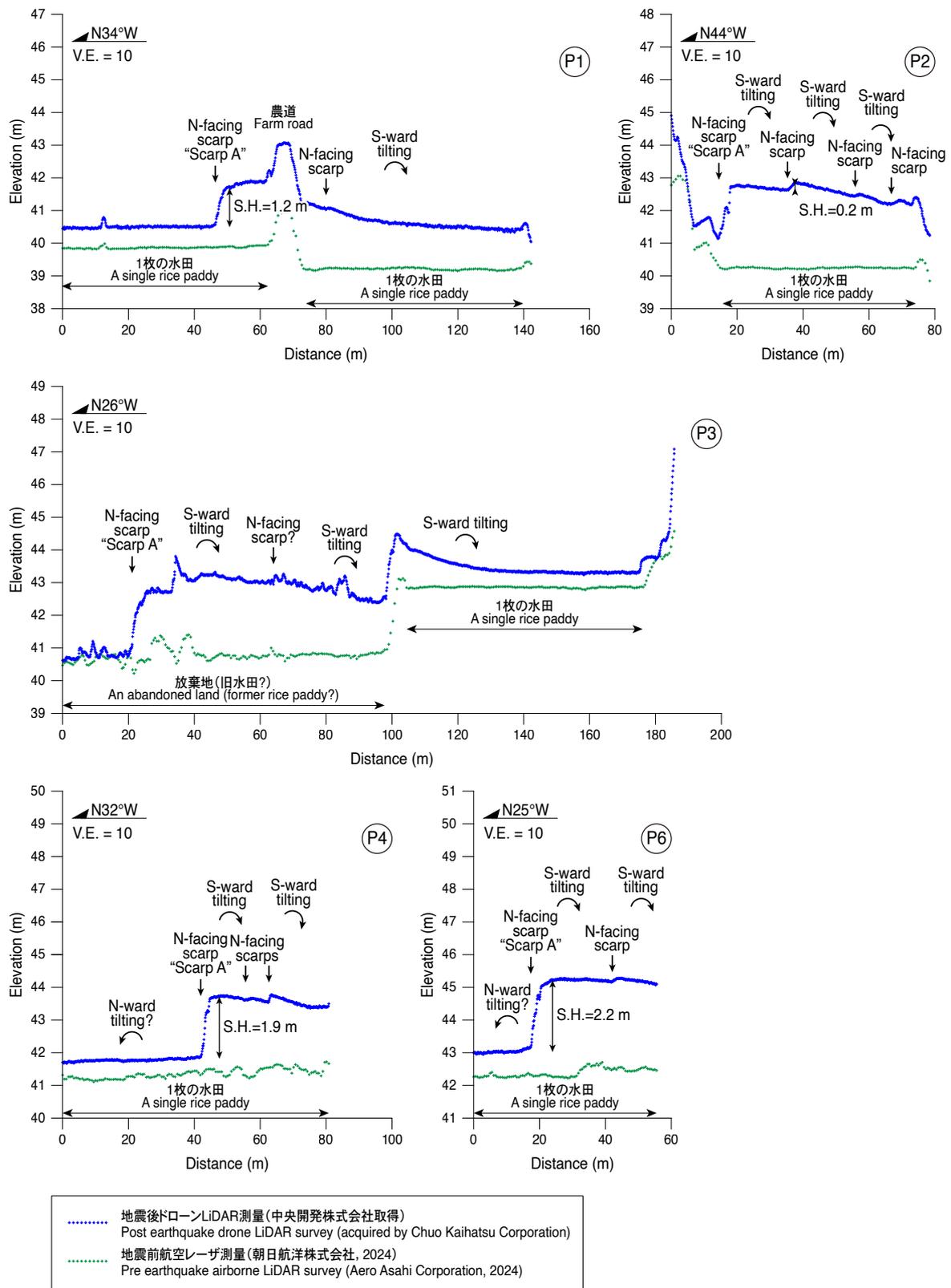
第5図. (続き)
Fig. 5. (continued)

令和6年能登半島地震で石川県珠洲市若山町の若山川沿いに出現した地表変状



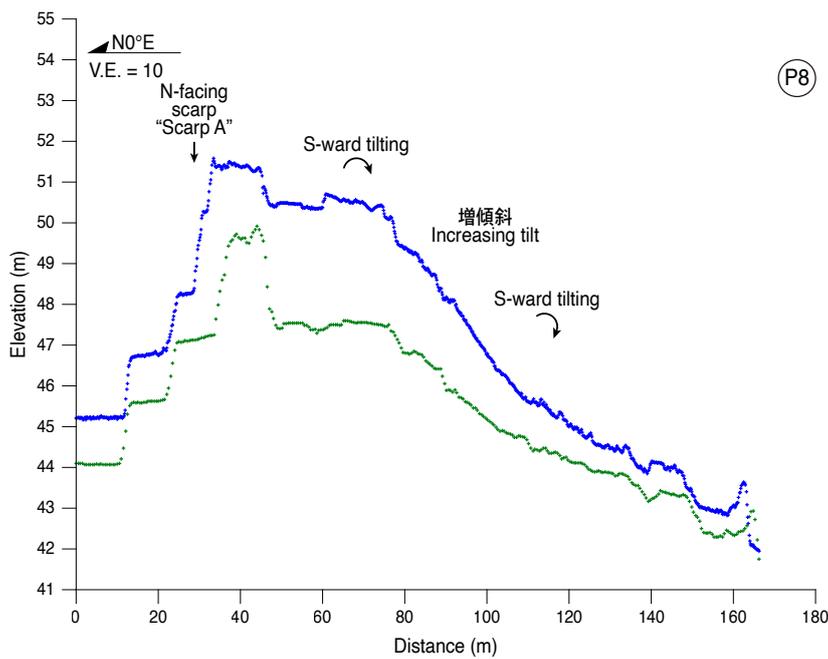
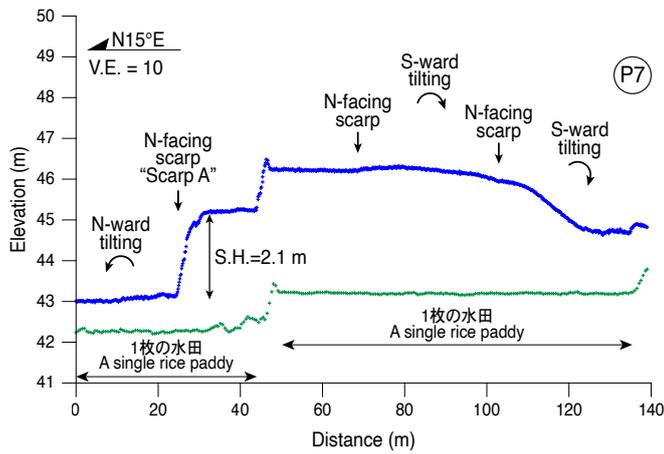
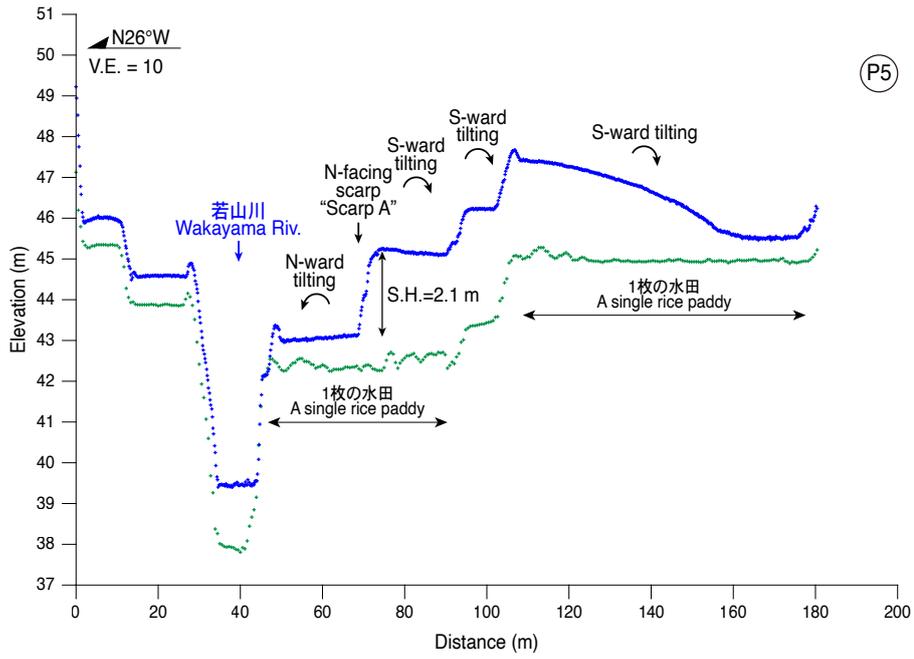
第6図. 若山町中地区の地表変状の地形断面図 Pi~Px. S.H.; 崖高. V.E.; 鉛直誇張. 図中のドローン LiDAR および航空レーザによる地形断面図は, RTK-GNSS 測位地点の標高を抽出して作成した.

Fig. 6. Topographic profiles (Pi to Px) of the surface deformation in the Naka area of Wakayama Town. S.H.; scarp height. V.E.; vertical exaggeration. The drone LiDAR- and airborne LiDAR-derived topographic profiles in the figure were created by extracting the elevations of the points where RTK-GNSS measurements were taken.

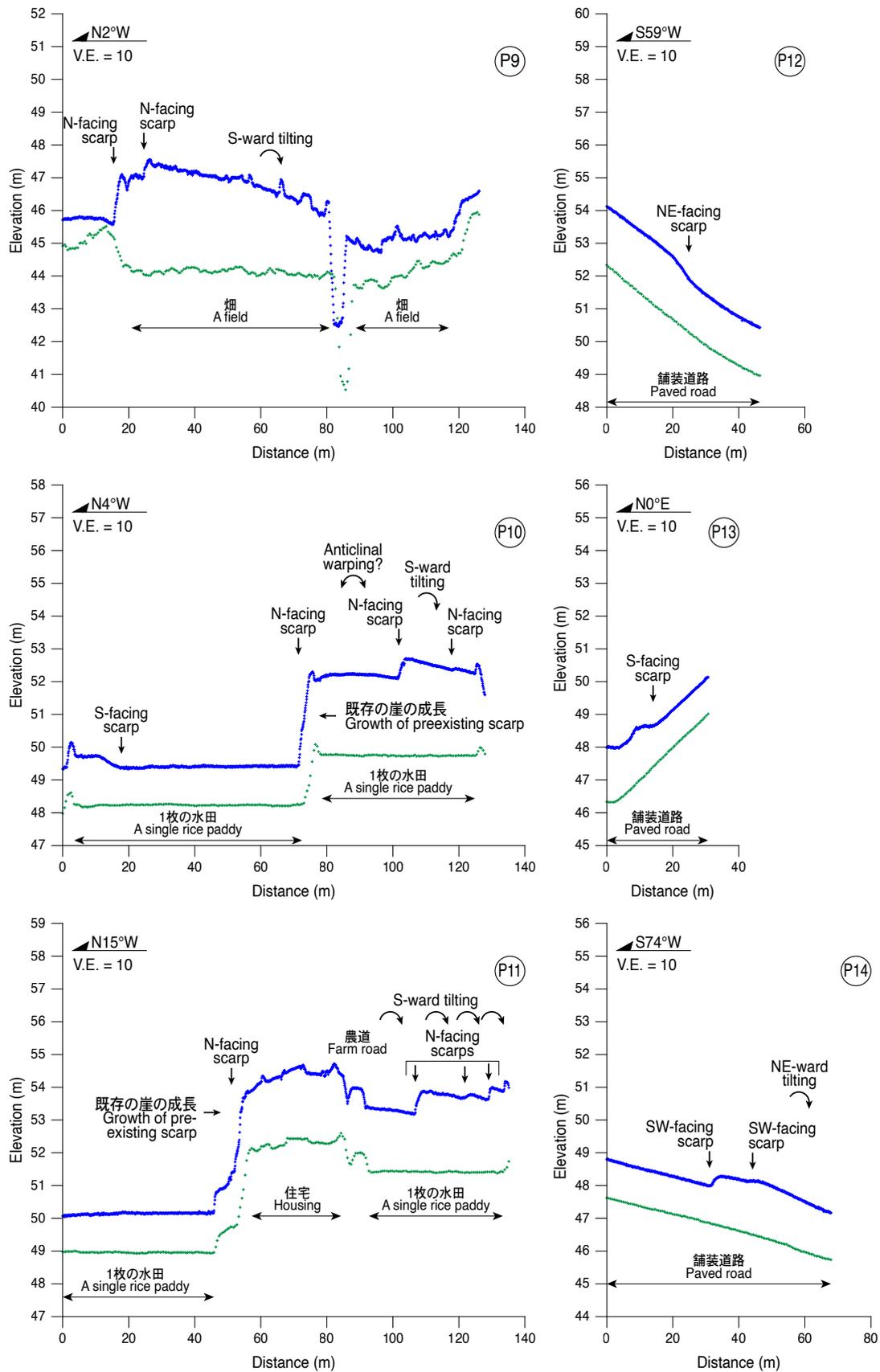


第 7 図. 若山町中地区の地表変状の地形断面図 P1~P24. S.H.; 崖高. V.E.; 鉛直誇張.

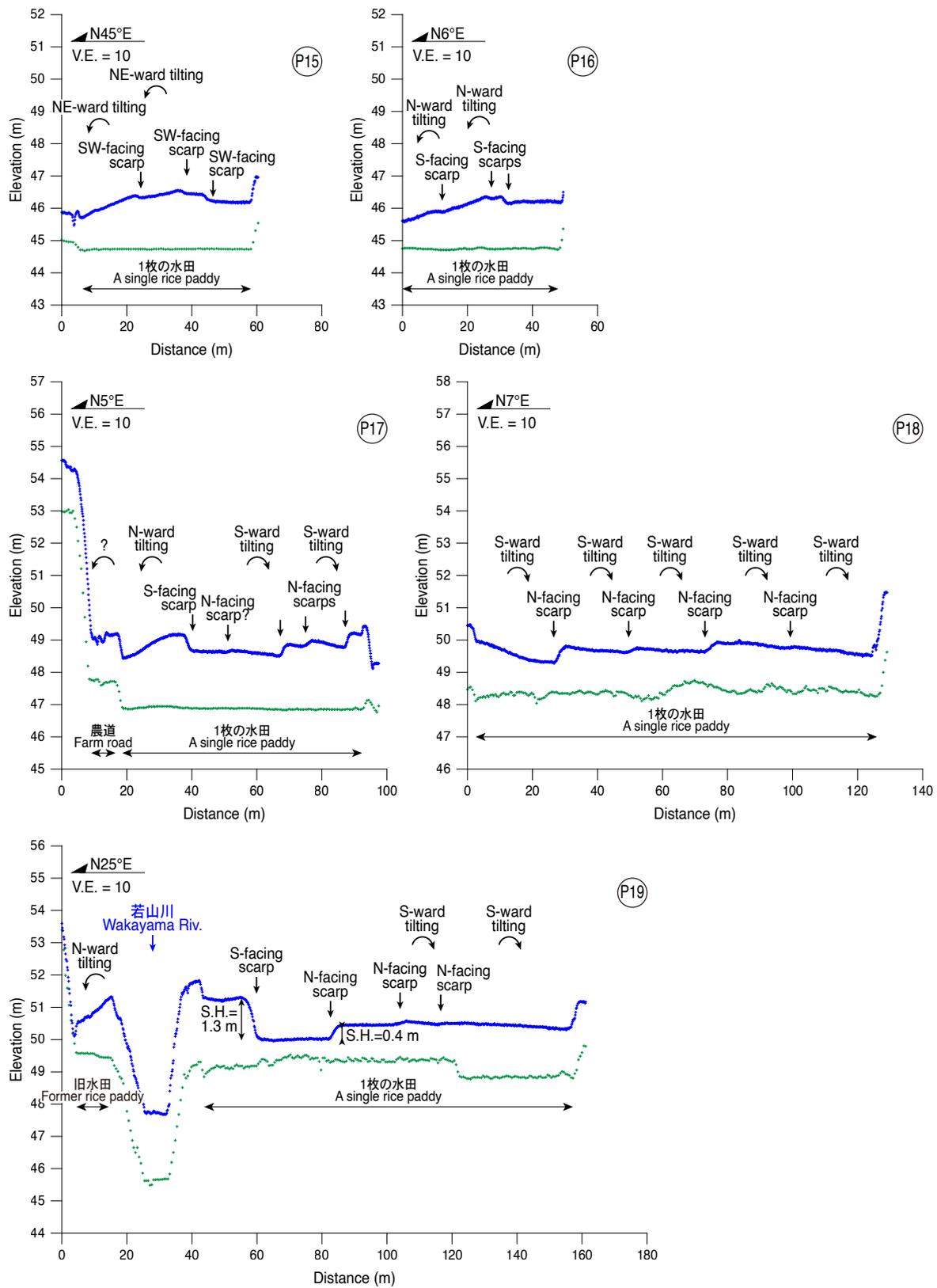
Fig. 7. Topographic profiles (P1 to P24) of the surface deformation in the Naka area of Wakayama Town. S.H.; scarp height. V.E.; vertical exaggeration.



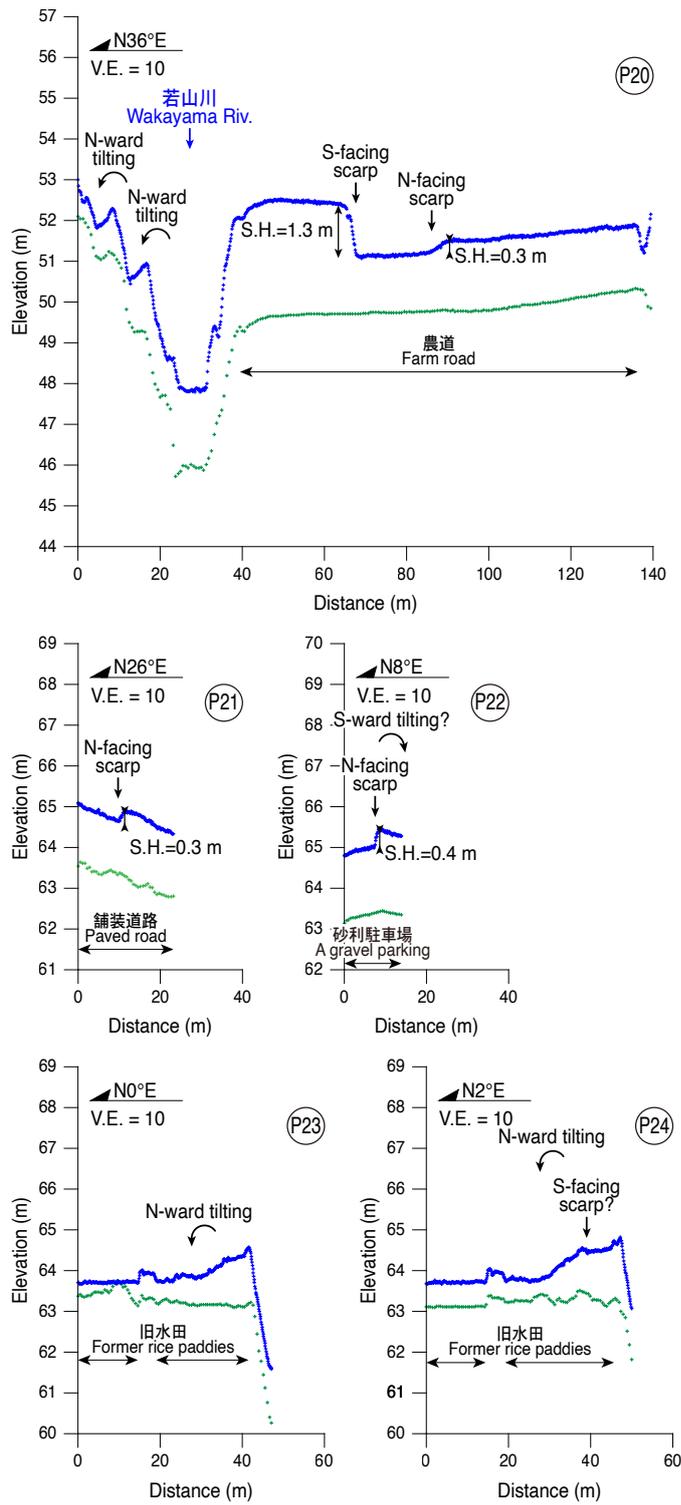
第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)



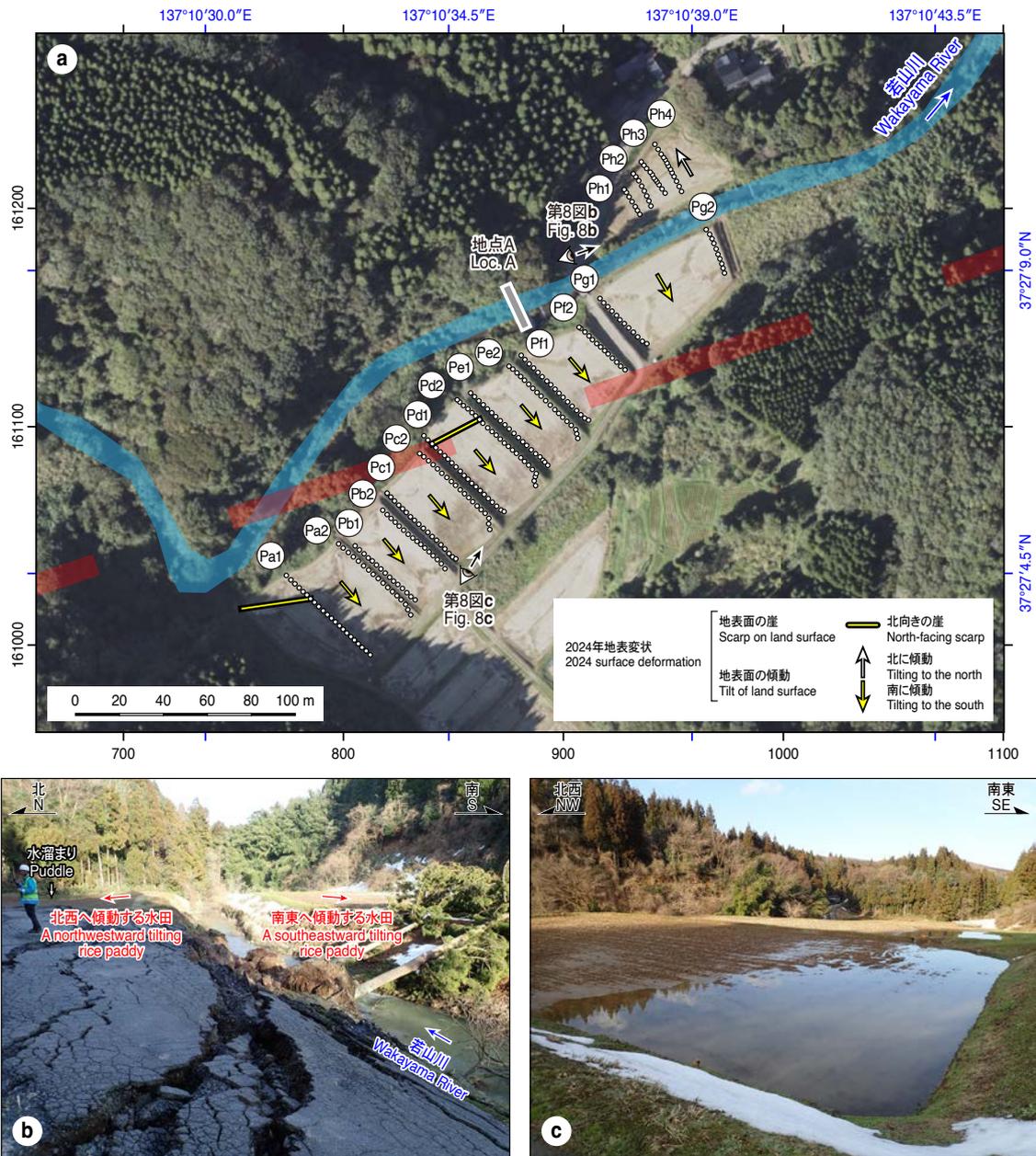
第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

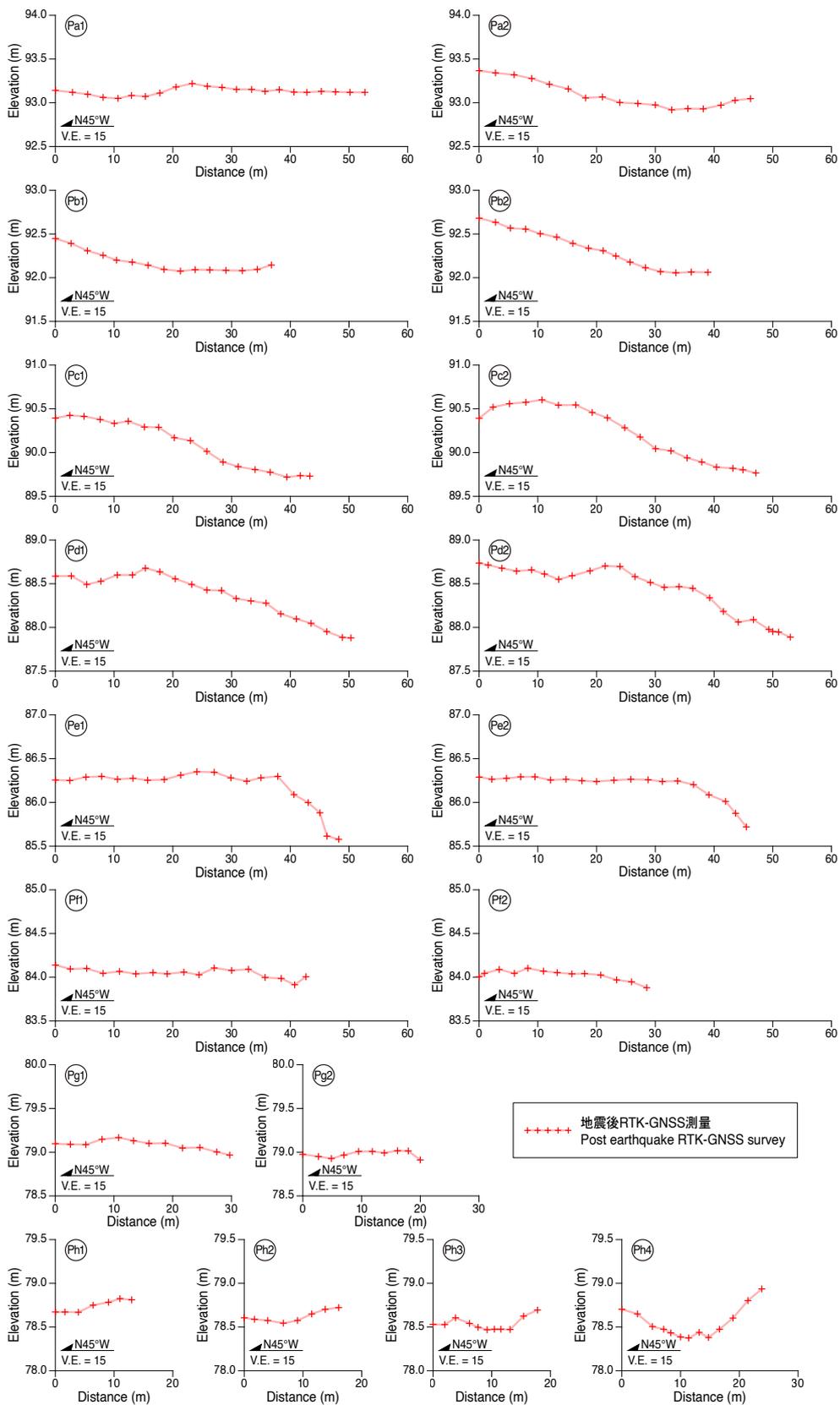


第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

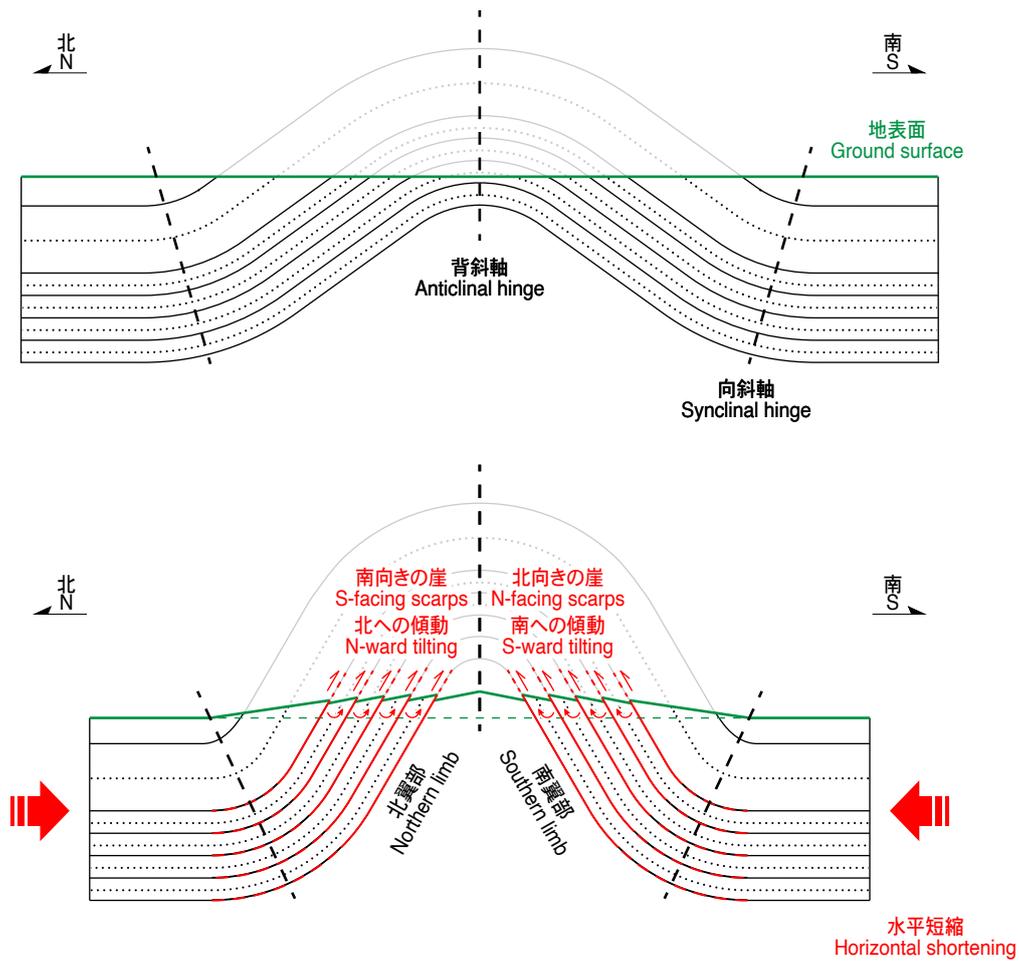


第8図. (a) 若山町宗末地区における若山川沿いの地表変状. Ph4などの番号を付した白丸はRTK-GNSS測量地点を示す. 地点Aは短縮変形した砂防堰堤の位置を示す. 幅広の赤線は吉川ほか(2002)による岡田背斜の伏在背斜軸を示す. 基図は地理院地図写真(国土地理院, 2024a)を用いた. 第8図b, cの撮影地点を第8図aに示す. 目玉の向きが撮影方位を示す. (b) 若山川左岸の北西に傾く水田と右岸の南東に傾く水田. 左岸側の水田は傾動に伴い北部が水没している. (c) 若山川右岸に認められる水田の南東への明瞭な傾動.

Fig. 8. (a) Surface deformation along the Wakayama River in the Munesue area of Wakayama Town. The white circles with numbers such as Ph4 indicate the RTK-GNSS survey points. Loc. A indicates location of a deformed check dam. The wide red line shows the axis of the concealed Okata anticline after Yoshikawa *et al.* (2002). The aerial photograph is from GSI Maps (Geospatial Information Authority of Japan, 2024a). The locations where Figs. 8b and 8c were taken are shown. The direction of the eyeballs indicates the direction in which the photographs (Figs. 8b and 8c) were taken. (b) A rice paddy tilting to the northwest on the left bank and that tilting to the southeast on the right bank of the Wakayama River. The northern part of the rice paddy on the left bank is submerged due to the northwestward tilting. (c) A distinct tilt to the southeast of the rice paddies observed on the right bank of the Wakayama River.



第9図. 宗末地区における若山川兩岸の水田面の地形断面図. 各断面の計測地点を第8図 a に示す.
 Fig. 9. Topographical profiles of the rice paddies on both sides of the Wakayama River in the Munesue area.
 The survey points for each profile are shown in Fig. 8a.



第10図. 若山町中および宗末地区で認められた地表変状の形成メカニズムを示す地形・地質概念図（吉岡, 1989; Li *et al.*, 2018 を参考にして作成). 地層の傾斜および褶曲のヒンジの角度は正確ではないことに注意.
 Fig. 10. A schematic topographic and geologic section showing possible formation mechanism of surface deformation observed at the Naka and Munesue areas of Wakayama Town (based on Yoshioka, 1989 and Li *et al.*, 2018). Note that the dip angles of strata and angles of fold hinges are not exact.