

3. 研究報告

3. 1 変位履歴に基づく連動性評価のための地形地質調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 変位履歴に基づく連動性評価のための地形地質調査

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 |
|--------------------|-------|-------|
| 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | 主任研究員 | 近藤 久雄 |
| 一般財団法人 電力中央研究所 | 主任研究員 | 木村 治夫 |

(c) 業務の目的

過去の地震時変位量を複数回復元する調査を複数地点で実施し、連動時と非連動時の変位量がどのように変化したかを明らかにする。それらの変位履歴から連動確率を算出する評価手法を考案する。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 29 年度：

北部区間において変位履歴調査を実施し、過去の地震時変位量を明らかにした。その結果と既存の情報を整理し、過去に周辺断層と連動した地震イベントについて検討し、その発生頻度を明らかにした。

2) 平成 30 年度：

中北部区間の松本盆地東縁断層及び牛伏寺断層等において変位履歴調査を実施し、過去の地震時変位量を明らかにする。その結果と既存の情報を整理し、過去に周辺断層と連動した地震イベントについて検討し、その発生頻度を明らかにする。

3) 平成 31 年度：

中南部区間の茅野断層及び釜無山断層群等において変位履歴調査を実施し、過去の地震時変位量を明らかにする。その結果と既存の情報を整理し、過去に周辺断層と連動した地震イベントについて検討し、その発生頻度を明らかにする。さらに、北部区間から中南部区間までの変位履歴を整理して、過去の連動型地震の頻度を明らかにし、連動型地震の発生確率を算出する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

北部区間を構成する神城断層及び松本盆地東縁断層北部において変位履歴調査を実施するため、トレンチ調査、群列ボーリング調査、S波反射法地震探査を実施した。その結果、池田町会染地区において過去3回の上下変位量を復元し、安曇野市明科七貴地区において最新活動に伴う上下変位量を復元した。また、地震時変位量と断層長の経験

式から地震イベント毎の活動範囲を推定した。その結果と既存の情報を整理し、過去に周辺の断層と連動した地震イベントを検討し、その発生頻度を明らかにした。さらに、神城断層の変位履歴と比較検討し、両断層が連動したと考えられる地震イベントを抽出した。

(b) 業務の成果

1) 神城断層・大町市平青木地点におけるボーリング調査

本地点は、2014年長野県北部の地震では活動しなかった神城断層付近に位置し、青木湖と中綱湖の間に位置している(図1, 図2, 図3)。周辺では湖成段丘面及び河成段丘面が神城断層の上盤側に分布しており、湖成層に基づき平均変位速度を従来よりも高精度に推定するため、断層の低下側で深さ20mまでのボーリング調査を実施した。断層の隆起側においても調査を計画・検討したものの、積雪により調査資材の搬入ができなかったため、次年度以降に実施することとした。

ボーリング調査の結果、下位から花崗岩からなる基盤岩、深度12m以浅に湖沼性堆積物とみられる砂層、腐植質シルト層と泥炭層との互層、人工攪乱土層が分布することが明らかとなった(図4)。人工攪乱土層は深度3.36mまでであり、ビニール片等の人工物が含まれる。深度3.5m以深の腐植質シルト層及び泥炭層から採取した放射性炭素同位体年代測定の結果、基盤岩を不整合に覆う湖沼性堆積物は少なくとも約1.3万年前以降に堆積したと推定される。これらの湖沼性堆積物には最大45°程度で傾斜した砂層も含まれており(例えば深度7~8m)、層序と矛盾する年代測定値も含まれている。深度3.8m付近から深度7.1m付近までは概ね層序と整合的な年代値を示すが、さら下位では腐植質シルト層や砂層の層理面を切断する剪断面もみられることから、コア内に数条の断層を識別した。

暫定的な上下変位速度として次の見積もりをおこなった。約5千年前の層準は深度4.6mと9.8mに層序と矛盾して認められ、その間に数条の断層が識別される。この5.3mの高度差が4690±30y. B. P.以降の逆断層変位で生じたと仮定した場合、平均的な上下変位速度は1.1mm/yrとなる。ただし、このコアは神城断層の地表トレースよりも数十m西側に位置しており、幅広い撓曲変形帯ないし分岐した断層の一部である可能性があるため、1.1mm/yrの上下変位速度は現段階では最小値と考えられる。

今後、断層の隆起側でも追加のボーリング調査等を実施し、今回の断層低下側の層序との対比を検討することによって神城断層の平均変位速度を高精度に推定する。その結果を基に、2014年長野県北部の地震では活動しなかった、神城断層南半区間の活動性を明らかにし、変位履歴から推定される連動型地震と非連動型地震が長期間にどの程度繰り返したかを検討する資料としていく。

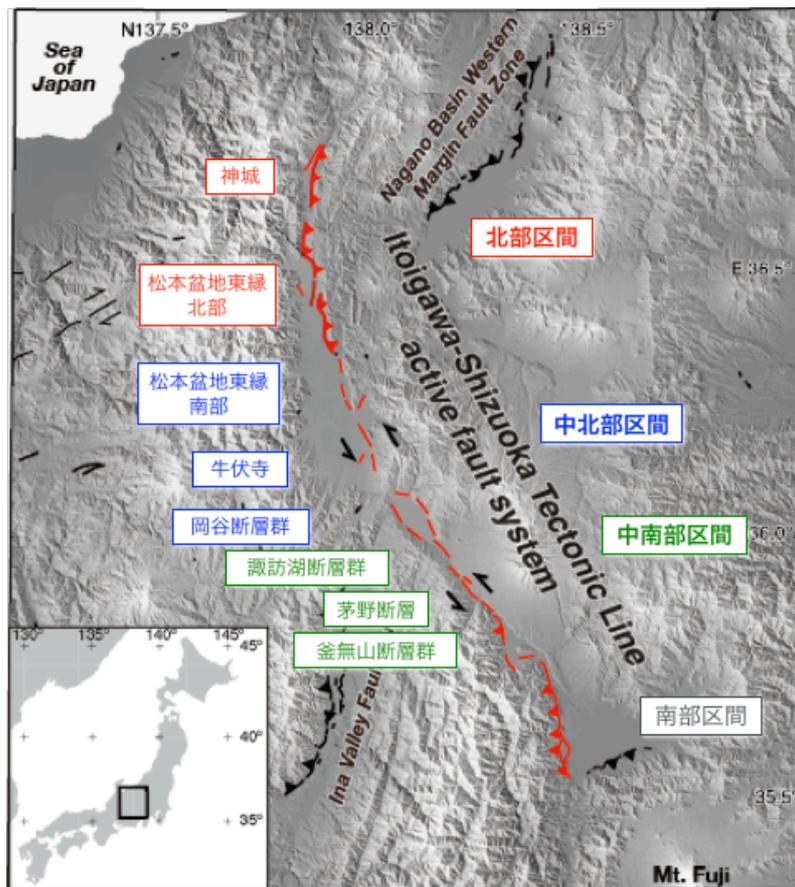


図1 糸魚川-静岡構造線断層帯の活動区間
 活動区間は地震調査研究推進本部地震調査委員会（2015）による。Kondo
 et al.（2008）に加筆。

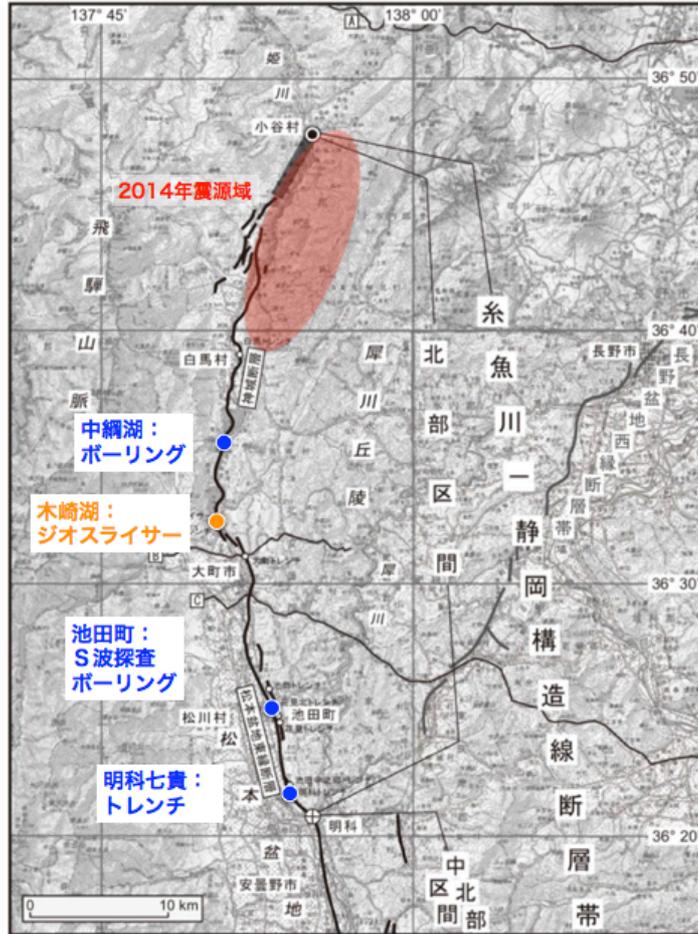


図2 糸魚川-静岡構造線断層帯北部区間と調査位置
地震調査研究推進本部地震調査委員会（2015）に加筆。

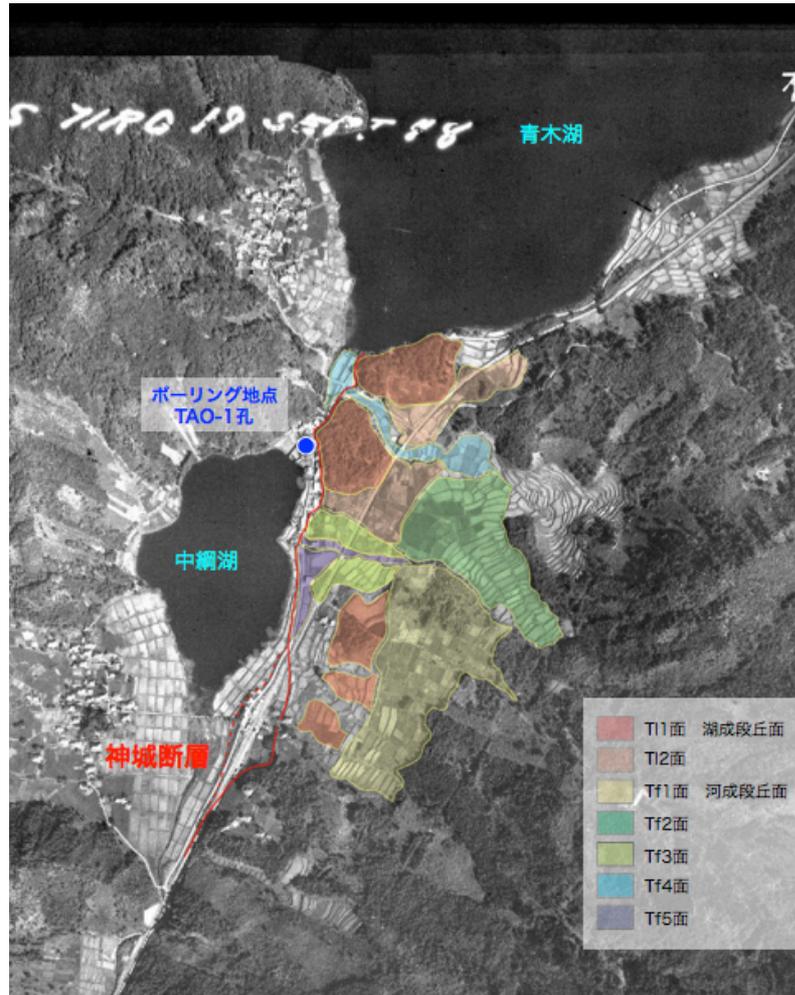


図3 中綱湖周辺（大町市平）の神城断層と地形の分布、ボーリング調査位置
 国土地理院発行の米軍撮影空中写真 R1785-39 に加筆。

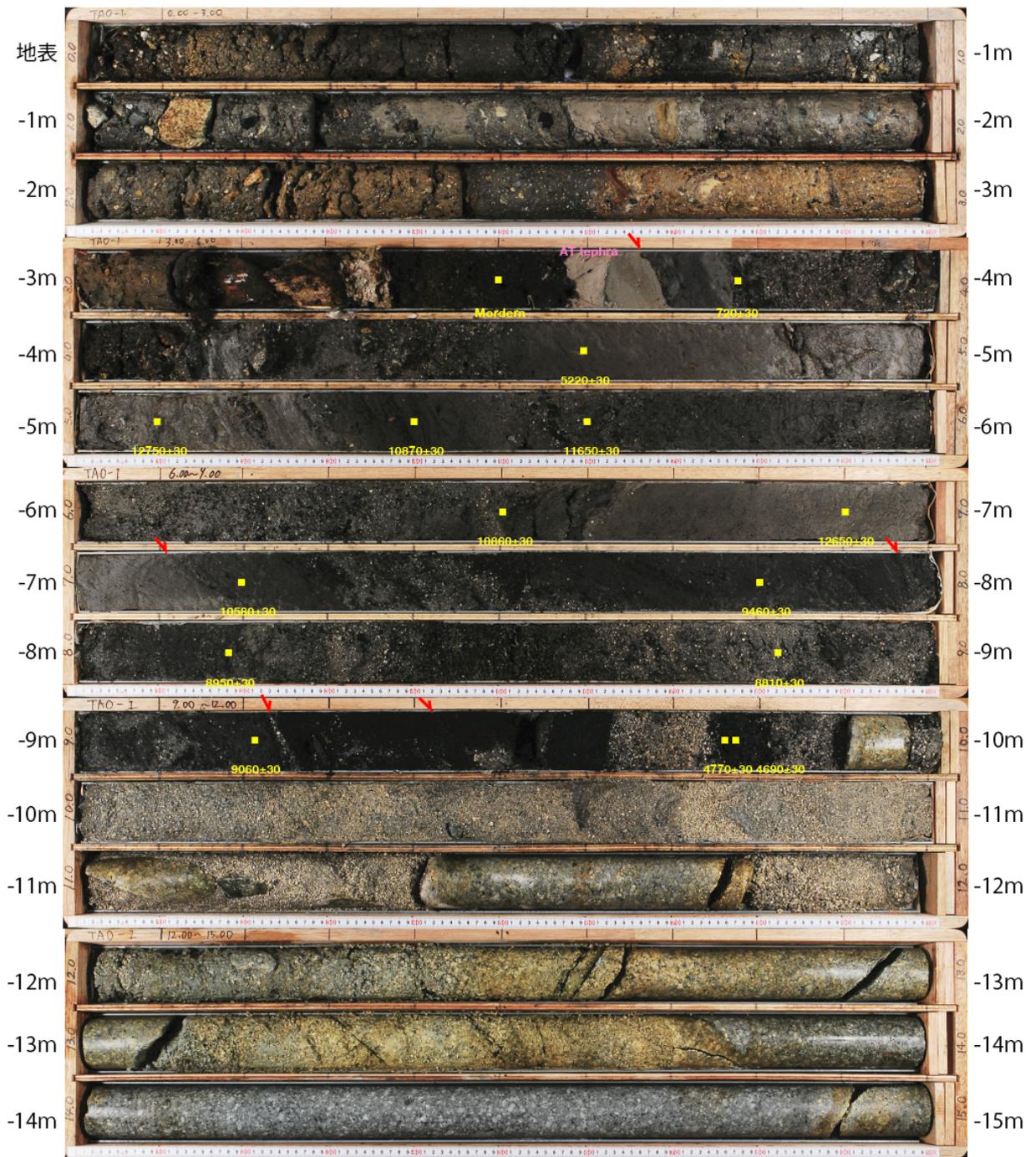


図4 大町市平青木におけるボーリングコア (TA0-1 孔)
 赤矢印は断層、黄色の数字は放射性炭素同位体年代測定値 (y. B. P.) を示す。AT は始良-丹沢火山灰。深度 15m から 20m まで花崗岩が続くが、ここでは省略した。

2) 神城断層・木崎湖南方地点における変位履歴の再検討

木崎湖南方地点は神城断層の南端付近に位置する(図2, 図5)。産業技術総合研究所は同地点で2006年にジオスライサー・ボーリング調査を実施した。その成果の概略は奥村・他(2007)で速報として報告されている。今回、2006年当時に復元された地形地質断面を仔細に再検討し、過去の活動時期と地震時上下変位量を復元した。ボーリングの密度が少なく地層の分布が不明な場所については、現状で得られるコアの地層の傾斜や変形の累積性を考慮して、地層の分布を外挿した。

特に、コア写真や地層の年代、対比を再検討することにより、調査当時は重視しなかった東傾斜の低角逆断層をあらためて認定した(図6)。撓曲変形の上盤側のボーリングコアでは、砂層とシルト層の互層からなる湖沼性堆積層が $40\sim 70^\circ$ で傾斜している。この傾斜は一般的な砂の安息角と内部摩擦角を越えていることから、コアで認められていた傾斜 $20\sim 30^\circ$ の逆断層を神城断層の本体として判断した。このように逆断層の存在を再検討し傾斜を求めた結果、地震時上下変位量をネットスリップに換算することが可能となった。約9千年前から約1.2万年前の層準が11~12mの累積変位を生じていることから、平均的な上下変位速度は $0.9\sim 1.3$ mm/yrであることが明らかとなった。

今回の再検討の結果、約1.2万年前以降に少なくとも4回、不確かな活動を含めて6回の地震イベントを認定し、それらの活動時期と地震時上下変位量を元に予察的な時間-変位ダイアグラムを作成した(図7)。現時点ではいずれのケースにおいても3m程度の地震時上下変位量が2回ずつ復元され、最新活動に伴う変位量は共通して3.1mである。本地点の南約300mで実施されたトレンチ調査とGPR探査の結果では、最新活動時の上下変位量が3.0m以上と求められており(丸山・他, 2010; 木村・他, 2013)、本研究の上下変位量と矛盾しない。3.1mの上下変位量は傾斜 $20\sim 30^\circ$ の逆断層で6.2~9.1mのネットスリップに相当するため、変位量と地震断層長のスケーリング則(松田・他, 1980)によれば約60~90kmの活動範囲に相当する。よって、最新活動では本地点を含む長さ26kmの神城断層単独の活動ではなく、少なくとも南隣の松本盆地東縁断層北部と連動したイベントと判断出来る。

さらに、イベントを6回認定したケースでは、最近4回の活動が時間的なクラスタリングを生じ、それに先行して2千年以上の長い休止期間が生じている可能性がある。約7~9千年前に地層が欠落する期間があるものの、クラスタリング内のイベントは変位予測モデル的な繰り返しになっており、この期間では約2 mm/yrの上下変位速度であった可能性もある。今後、補足の調査を実施して、断層構造と地層の対比、年代、イベント識別回数、地震時変位量を改良して変位履歴を精緻化し、これらの課題を検討していく。



図5 木崎湖南方地点におけるジオスライサー・ボーリング調査の位置
 本研究で再検討した木崎湖南方地点は、奥村・他（2007）の位置。
 Taira siteは丸山・他（2010）によるトレンチ・ボーリング地点。
 基図は丸山・他（2010）を引用。

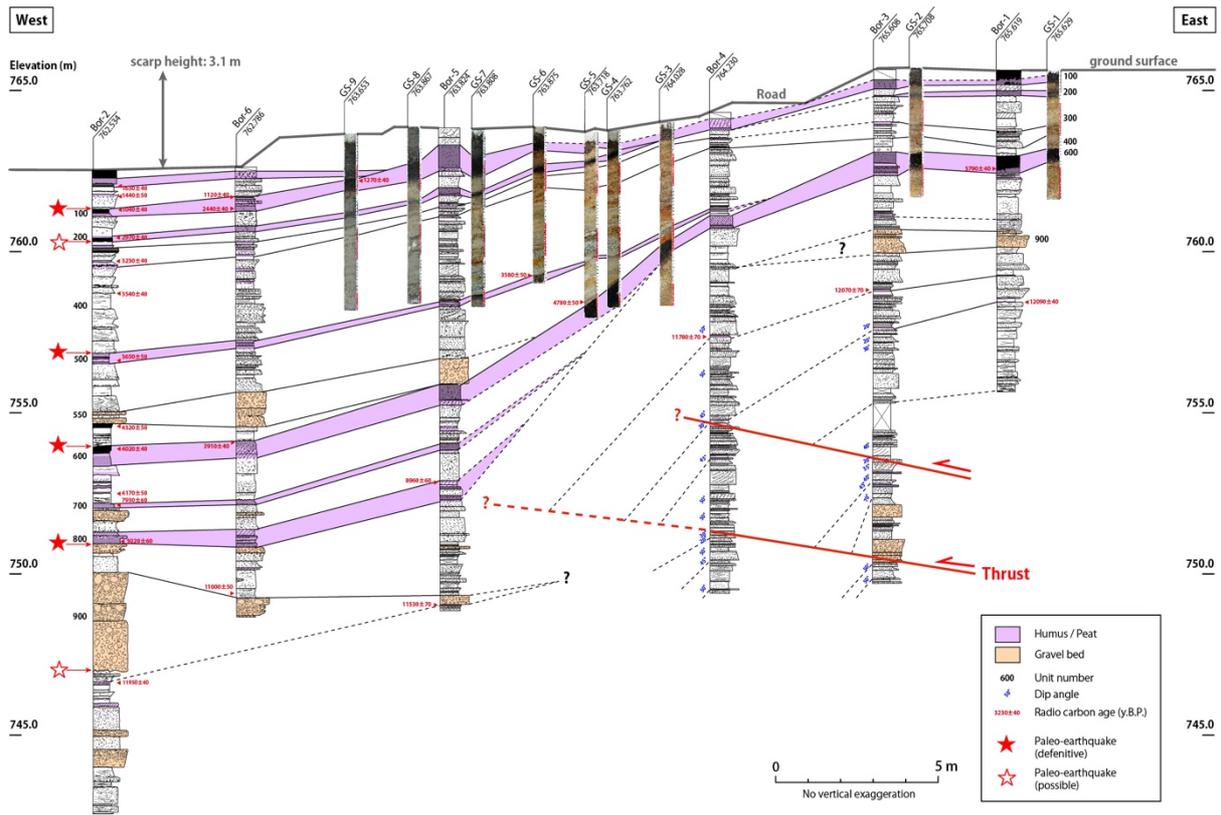


図6 木崎湖南方地点におけるジオスライサー・ボーリング調査の再検討に基づく地形地質断面図

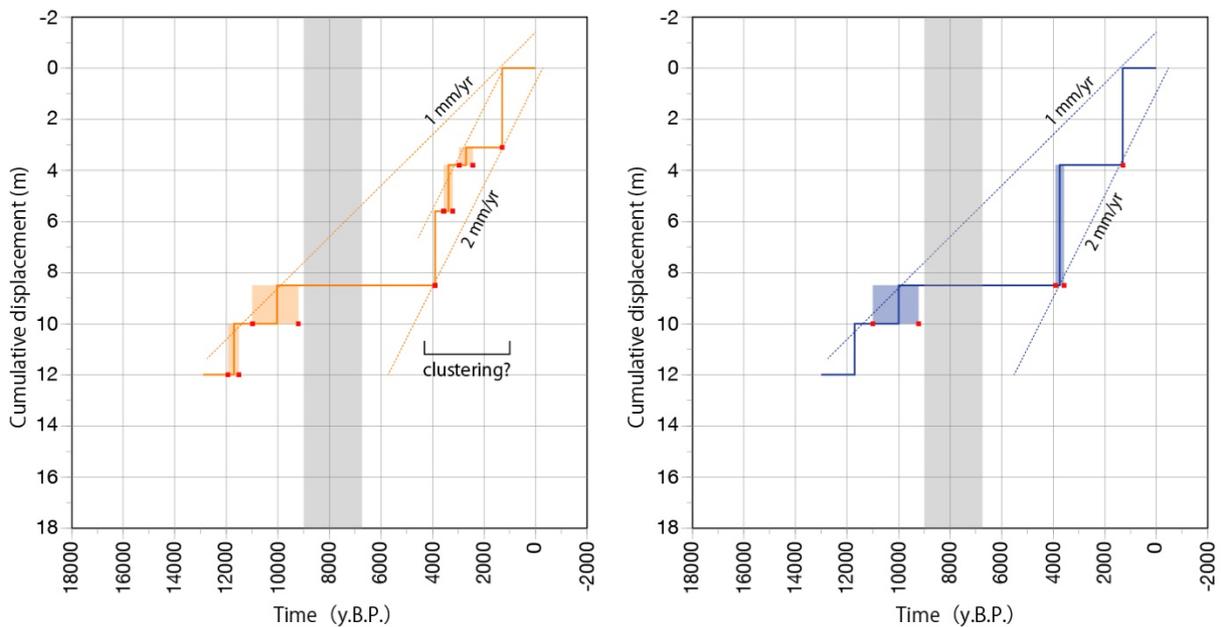


図7 木崎湖南方地点における予察的な時間-変位ダイアグラム
 (左) イベントを6回認定したケース、(右) イベントを4回認定したケース。
 灰色の年代区間は、地層が欠落する期間。カラーのボックスはイベント年代の推定幅 (1σ)。

3) 松本盆地東縁断層北部・池田町会染地区における反射法地震探査・ボーリング調査

本地区は、糸魚川-静岡構造線断層帯北部区間を構成する松本盆地東縁断層北部のほぼ中央付近に位置する(図2, 図8)。周辺では、東側隆起の低角逆断層が大峰山地から西流する扇状地面群を切断し、東側隆起の低断層崖および撓曲崖を生じている。既往の調査研究では、トレンチ・ボーリング調査が実施され、過去2~3回の活動時期が推定されている(丸山・他, 2010; 近藤・谷口, 2014)。本調査では、それらの活動に伴う地震時上下変位量を明らかにすること、断層変位に横ずれ成分を伴うかを検討することを目的として、S波反射法地震探査及びボーリング調査を実施した。以下にそれらの結果を述べる。

a) 池田町会染地区におけるS波反射法地震探査

i) 探査測線、探査データの取得

長野県北安曇郡池田町の会染花見地点において、合計6本の測線でS波反射法地震探査を実施した。探査測線の配置状況を図9に示す。本地点では推定される断層構造にできるだけ直交するEW-1測線(測線長: 334m)、EW-2測線(同: 430m)、EW-3測線(同: 130m)を設定した。また、断層に平行な方向での地下地質構造の変化を把握するために、断層に平行かつEW-1測線、EW-2測線に直交するNS-1測線(測線長: 330m)、NS-2測線(同: 500m)、NS-3測線(同: 430m)を設定した。NS-2測線とEW-1測線の交差点およびNS-2測線とEW-2測線の交差点については、共通反射点重合法による反射法探査において重合数が低下し結果断面の信頼性がやや低下する測線端部付近で交差するため、交差点近傍においてボーリング掘削調査を実施し、交差する両測線(両断面)の反射面の対比の信頼性向上を期した。

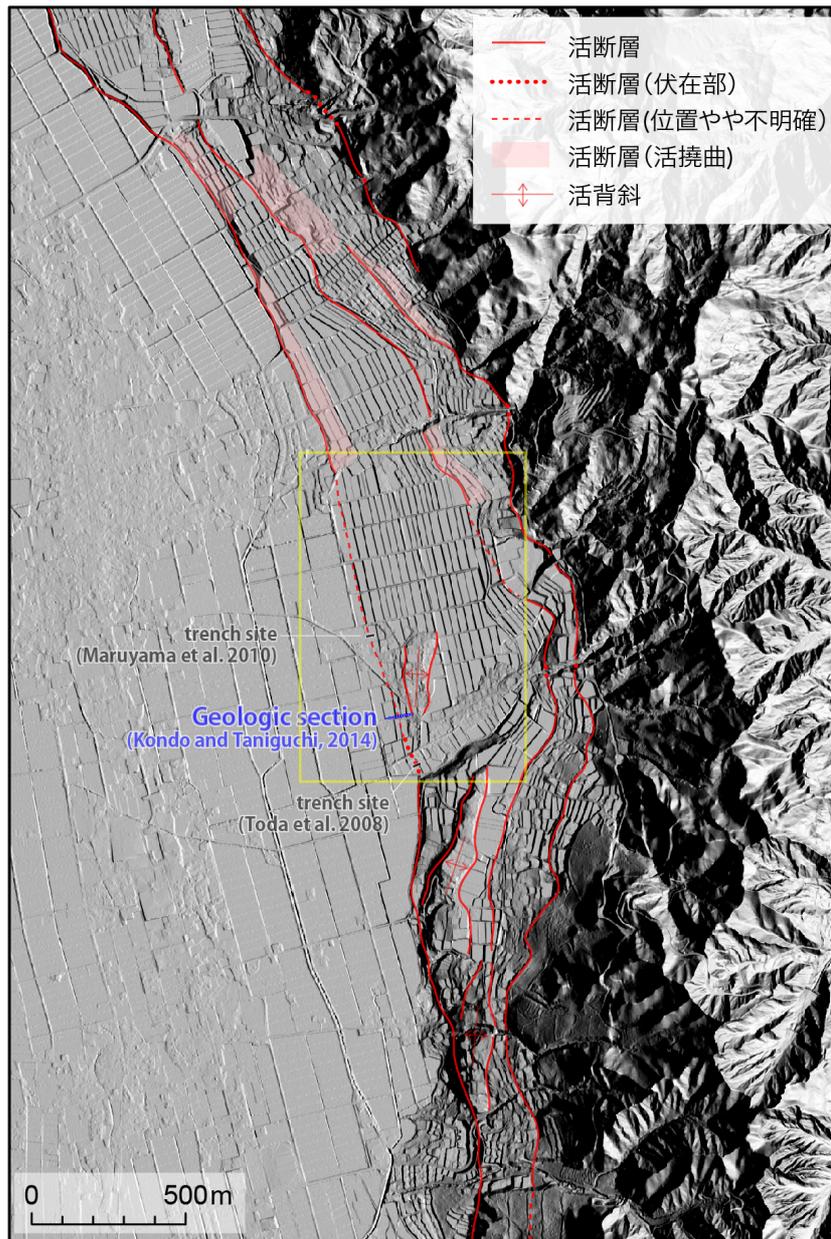


図8 松本盆地東縁断層北部と池田町会染地区における調査位置
黄色の枠は図9の範囲を示す。近藤・谷口（2014）に加筆。

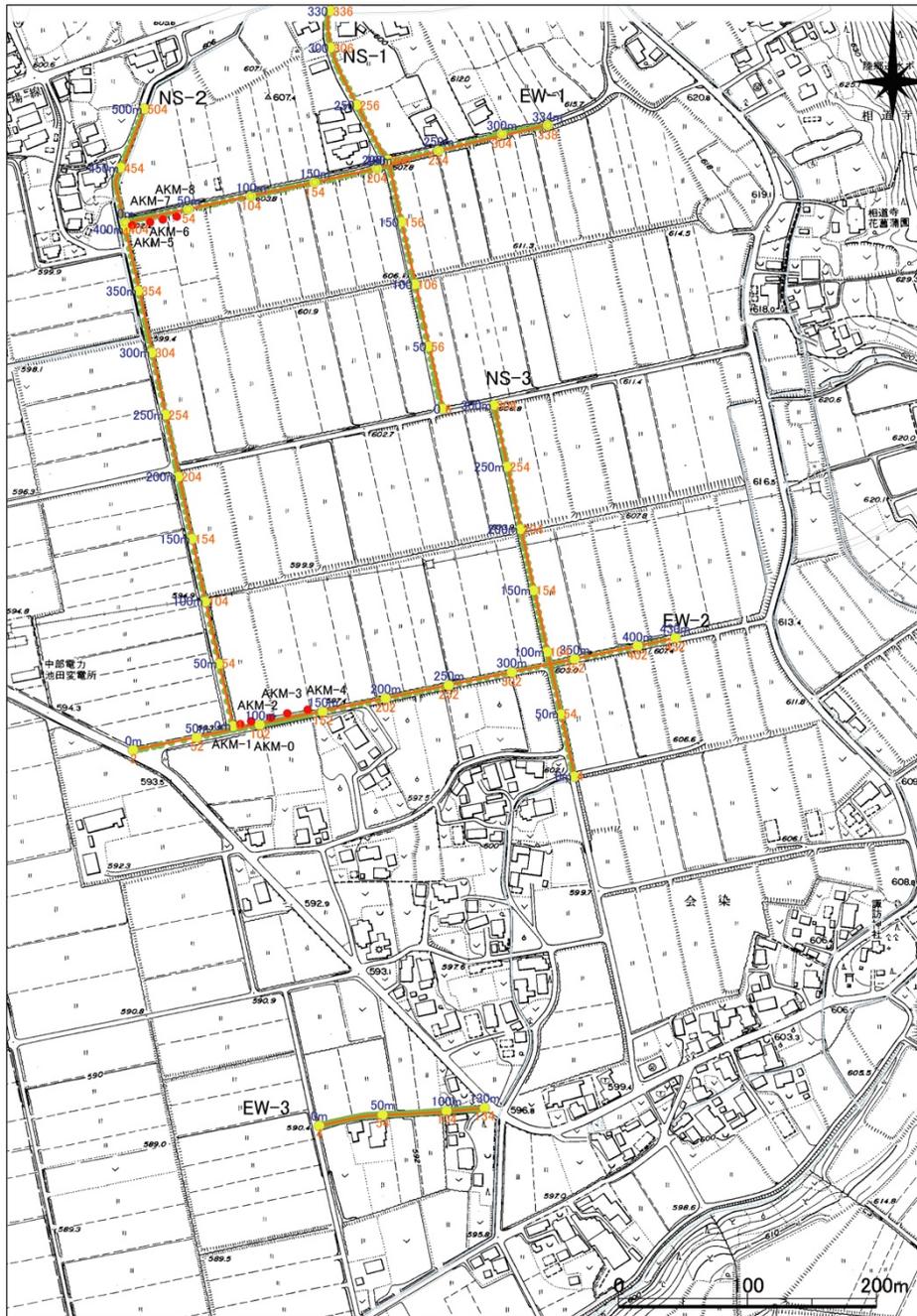


図9 反射法地震探査測線配置図（会染花見調査地点）

基図は池田町発行 1:2,000 地形図を使用。各測線に付した青色の数字は測線端からの距離（単位：m）、オレンジ色の数字は CDP（CMP）番号を示す。

ii) 探査データの取得

一般的な共通中間点重合法による反射法地震探査（例えば、物理探査学会，2016）の現場データ取得作業の模式図を図10に示す。反射法地震探査は、地表で人工的に発生させた地震波が地下に伝播し、地下の地質・土質境界・断層等で反射されて再び地表に戻ってく

る現象を利用し、地下構造を断面像として描き出す手法である（例えば、物理探査学会，2016）。

池田町会染花見地点および後述する安曇野市明科七貴地点で実施した探査の主なデータ取得仕様をまとめて表1に、本探査で使用した機材の仕様を表2に示す。本探査では極浅部構造の把握を目的とするため、分解能の高いS波探査を実施した。S波震源には、積雪状況・道路状況から振源設置が確実にできるような高周波な波の発生が可能なポータブルバイブレータを使用した(図11)。

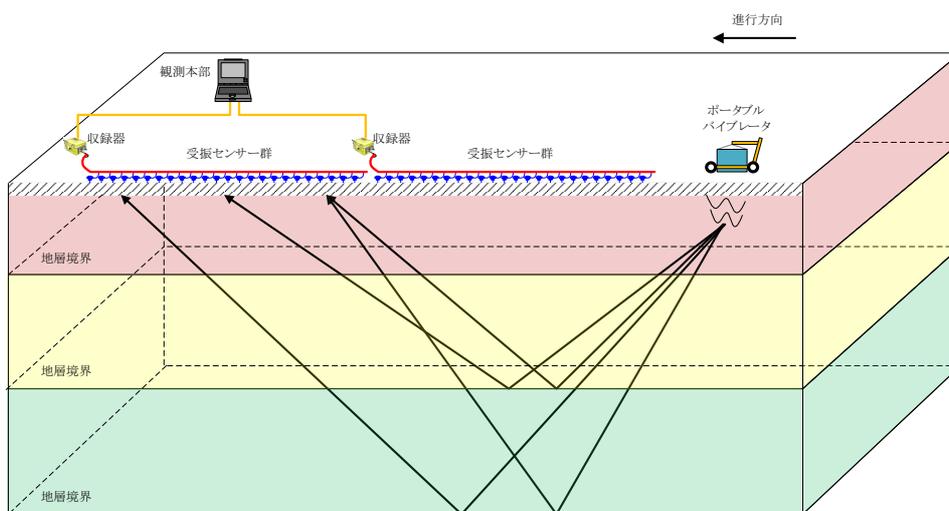


図10 S波反射法地震探査測定模式図

表1 主な探査データ取得仕様

| 測線名 | NS-1 | NS-2 | NS-3 | EW-1 | EW-2 | EW-3 | 明科七貴 |
|-----------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|------|--------------|
| 測線長 | 330m | 500m | 300m | 334m | 430m | 130m | 58m |
| 受振点間隔 | 2m | | | 2m | | | 1m |
| 発振点間隔 | 2m | | | 2m | | | 1m |
| 展開方式 | エンドオン, 固定展開 | エンドオン, 固定展開 | エンドオン, 固定展開 | エンドオン, 固定展開 | エンドオン, 固定展開 | 固定展開 | 固定展開 |
| 振源 | ポータブルバイブレータ | | | ポータブルバイブレータ | | | ポータブルバイブレータ |
| 起振周波数 | 10-100Hz | | | 10-100Hz | | | 10-100Hz |
| スイープ長 | 8秒 | | | 8秒 | | | 8秒 |
| 収録時間 | 2秒(コリレーション後) | | | 2秒(コリレーション後) | | | 2秒(コリレーション後) |
| サンプリングレート | 0.5ms | | | 0.5ms | | | 0.5ms |
| 垂直重合数 | 4~8回 | 4~6回 | 4~8回 | 4~8回 | 4~8回 | 4回 | 4回 |

表 2 測定機器 仕様一覧

| | | | |
|----------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 振源 :S波 (ポータブルバイブレータ) | 最大出力荷重 | 500N | OYO CAG(オランダ) 製 |
| | 発振周波数帯 | 10Hz~500Hz | |
| | 総重量 | 100kg | |
| 受振器 :S波 (GS-20DM) | 固有周波数 | 14Hz | OYO Geospace(米国) 製 |
| | 波種 | 水平動用地震計 | |
| 受振ケーブル :浅部探査用 (CDPケーブル) | テイクアウト数 | 12ch/本 | OYO Geospace(米国) 製 |
| | テイクアウト間隔 | 2m | |
| | 最大接続成分 | 48ch | |
| データ収録器 (GEODE) | システム構成 | 24chフィールドモジュール システムコントローラ ラップトップコンピュータ | Geometrics, Inc.(米国) 製 |
| | チャンネル数 | 24ch/モジュール | |
| | サンプリング間隔 | 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125msec 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0msec | |
| | サンプリング数 | 64,000サンプル | |
| | A/Dコンバータ | 24ビット シグマ・デルタコンバータ | |
| | プリアンプ | 0dB, 12dB, 24dB, 36dB | |
| データフォーマット | SEG-2 | | |



図 11 ポータブルバイブレータ

iii) 探査データの処理

取得した探査データに対して、一般的な共通中間点重合法(例えば、物理探査学会, 2016)による各種のデータ編集・フィルタ処理を施した。通常データ取得時に得られた記録には周囲を通過する車両や工場などの施設に起因する振動、および送電線等から発生される電磁波によるノイズが含まれる。また、反射法探査の解析を実施する上で不要とされる表面波などの波も定常ノイズとして含まれる。そのため、反射法探査のデータ処理によって、上記のノイズ成分を含んだ収録記録から反射波を抽出して解析することにより、地質および構造解釈に資する探査結果断面を得た。これらの探査データ処理作業は反射法探査解析システムSeisSpace ProMAX (Halliburton Energy Services社製)を用いて、図12に示す過程によって行った。

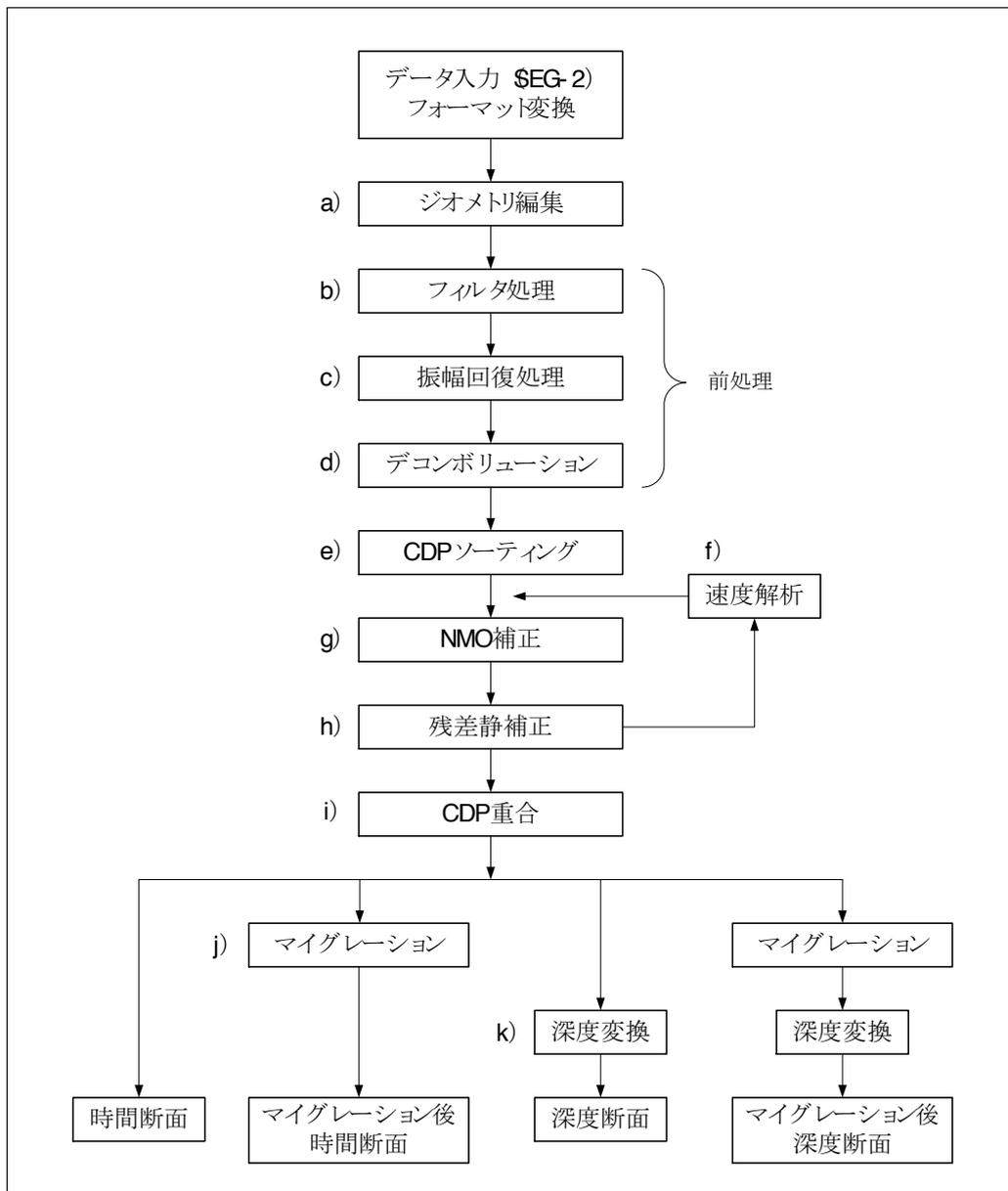


図 12 反射法探査の解析処理フローチャート

iv) 探査結果

図 13 に EW-3 測線でのオリジナルの発振記録例を示す。測線端部まで初動を追跡でき、おおむね良好な記録が取得できている。

取得記録に対してバンドパスフィルタを適用した。パラメータテストの結果、スイープ周波数 10-80Hz において有意な信号が含まれていると判断し、スイープ周波数に近い帯域にフィルタの通過帯域を設定した。その後、振幅回復処理、デコンボリューション処理を適用した。デコンボリューション適用後、反射断面の波形の連続性向上のため低周波を強調する目的でバンドパスフィルタを適用した。上記処理適用後の発振記録例を図 14 に示す。オリジナルの発振記録と比較して波形が整理され、S/N が向上した記録であることを確認した。

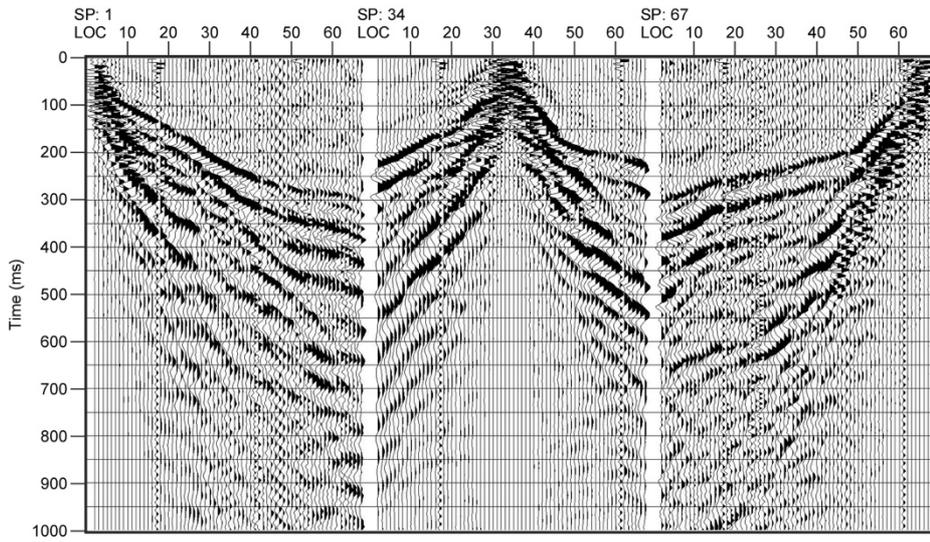


図 13 EW-3 測線におけるオリジナルの発振記録例
SP は震源の位置を示す。

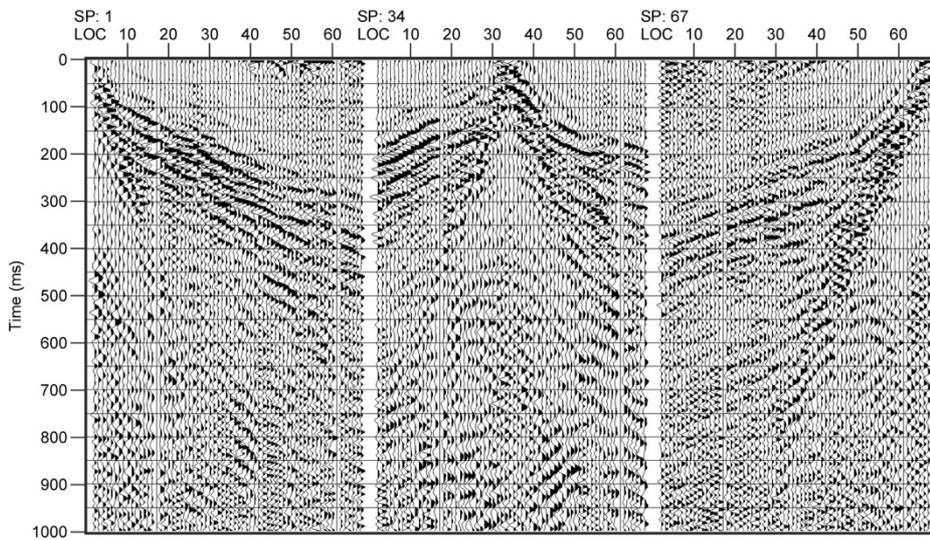


図 14 EW-3 測線における各種処理適用後の発振記録例
SP は震源の位置を示す。

上記処理後、速度解析により構築した速度構造に基づいて NMO 補正を行い、残差静補正処理を実施した。残差静補正により起振点・受振点近傍の不均質に起因すると思われる反射波走時のずれが補正され、反射面の連続性が向上したことを確認した。その後、CMP 重合処理を実施した。得られた重合断面（図 15～図 20）に、FK マイグレーションを適用した。使用した速度構造は、マイグレーションのパラメータテストにより、速度解析で得られた速度構造を 80% にスケーリングしたものである。マイグレーション処理を施した時間断面（図 21～図 26）に対して、平滑化した速度構造を用いて深度変換を行い、それぞれ深度変換断面を作成した（図 27～図 32）。ここで、各種のデータ処理に適用したパラメータを表 3 に示す。

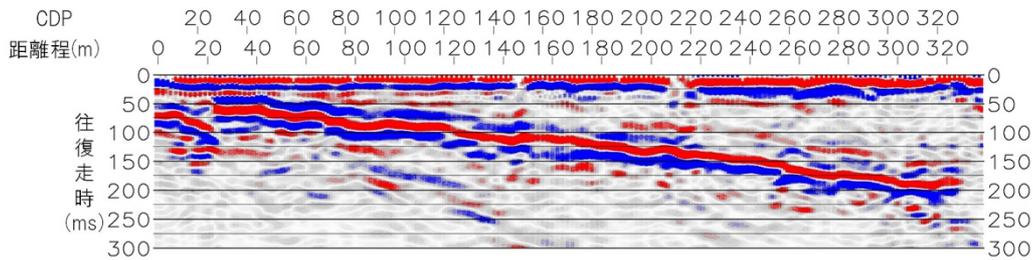


図 15 EW-1 測線の重合断面図

相対振幅表示の色は赤を正とする。以下、図 16～32 も同様。

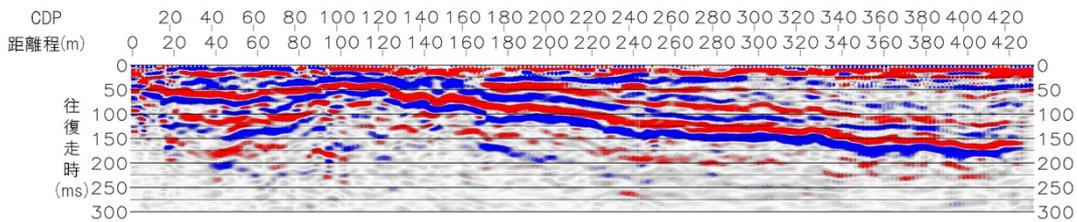


図 16 EW-2 測線の重合断面図

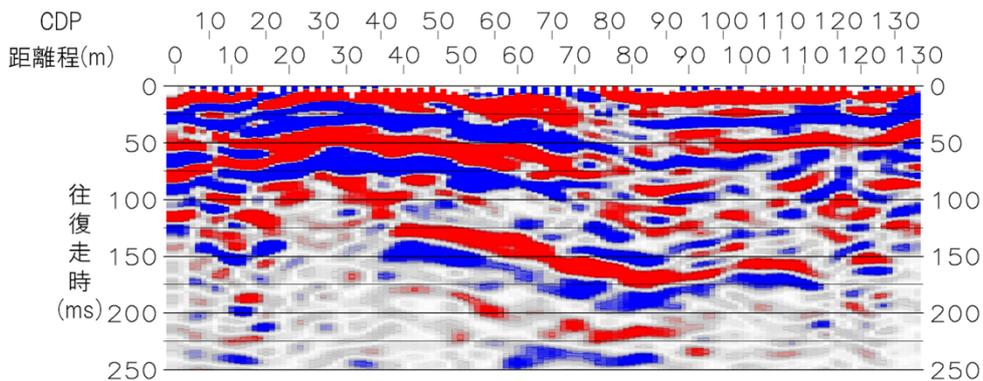


図 17 EW-3 測線の重合断面図

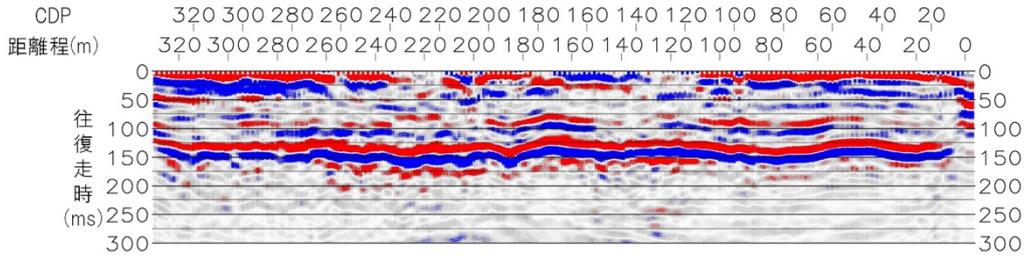


図 18 NS-1 測線の重合断面図

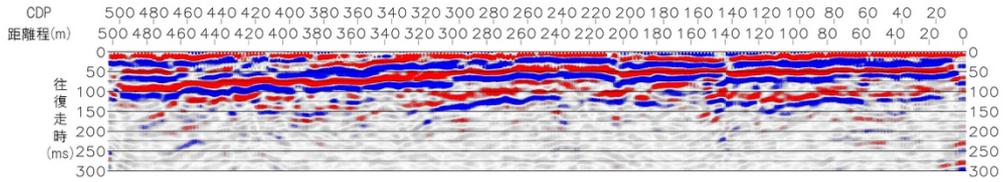


図 19 NS-2 測線の重合断面図

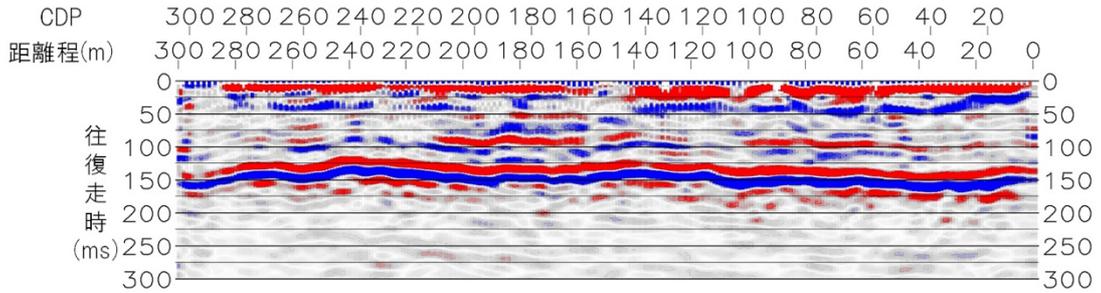


図 20 NS-3 測線の重合断面図

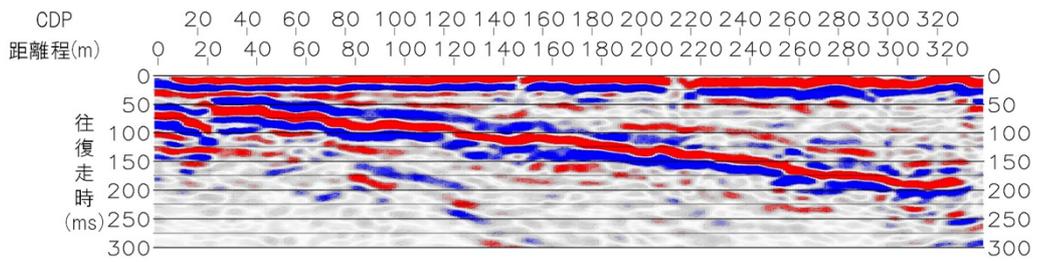


図 21 EW-1 測線のマイグレーション時間断面図

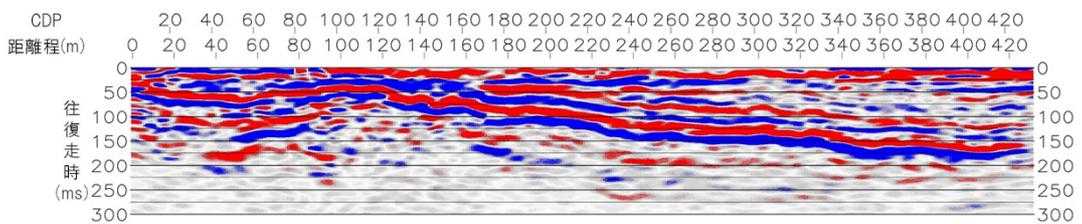


図 22 EW-2 測線のマイグレーション時間断面図

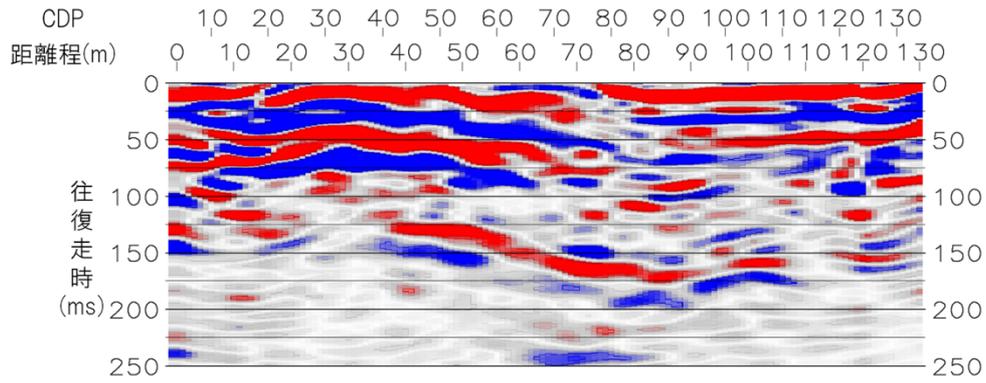


図 23 EW-3 測線のマイグレーション時間断面図

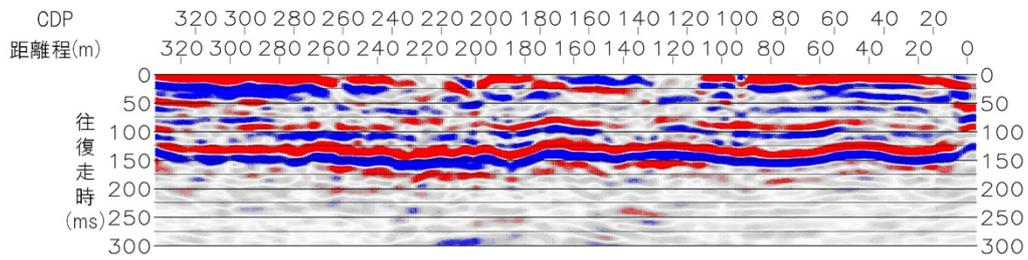


図 24 NS-1 測線のマイグレーション時間断面図

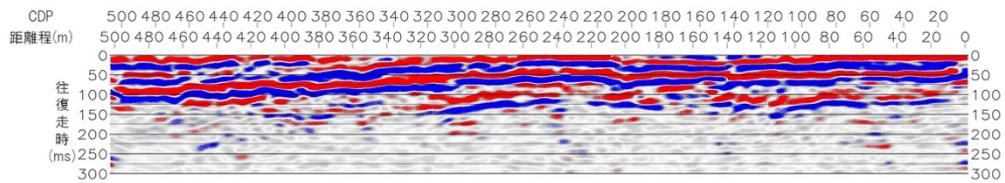


図 25 NS-2 測線のマイグレーション時間断面図

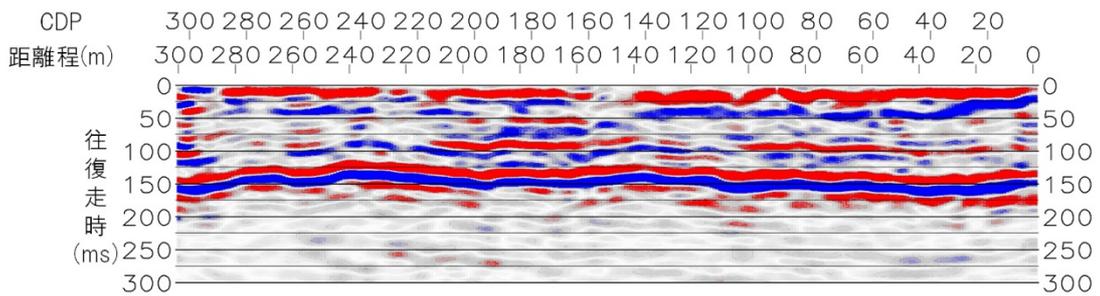


図 26 NS-3 測線のマイグレーション時間断面図

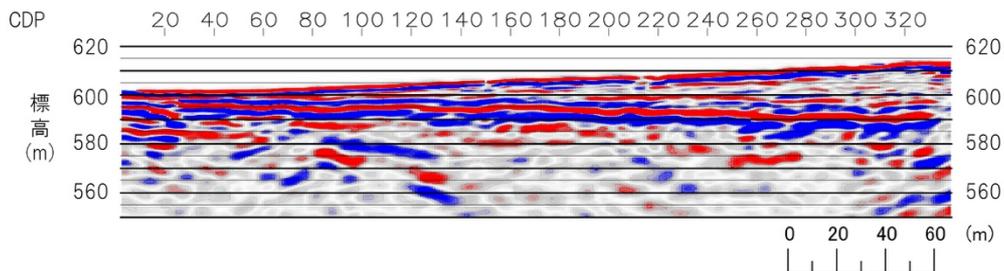


図 27 EW-1 測線のマイグレーション深度変換断面図

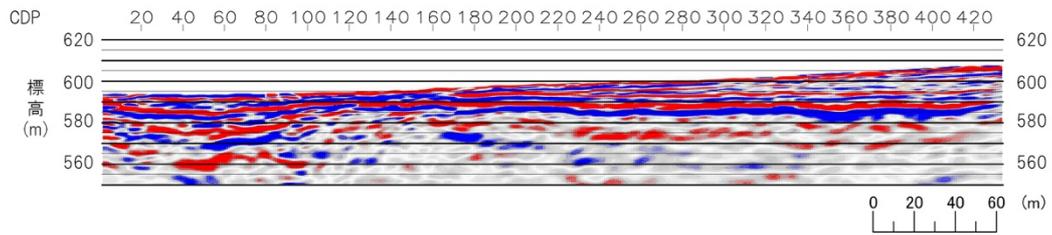


図 28 EW-2 測線のマイグレーション深度変換断面図

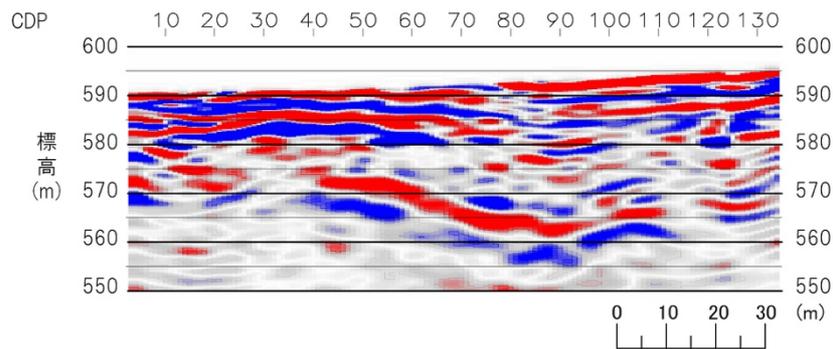


図 29 EW-3 測線のマイグレーション深度変換断面図

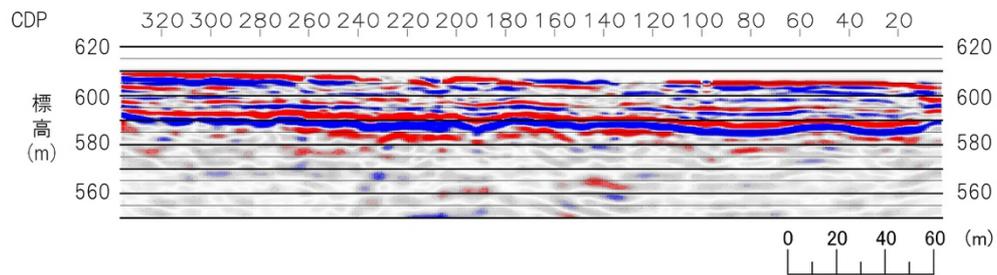


図 30 NS-1 測線のマイグレーション深度変換断面図

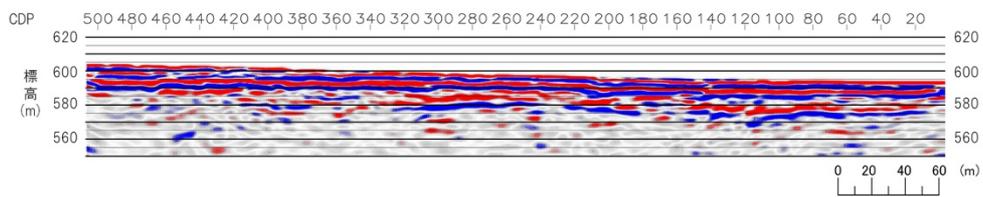


図 31 NS-2 測線のマイグレーション深度変換断面図

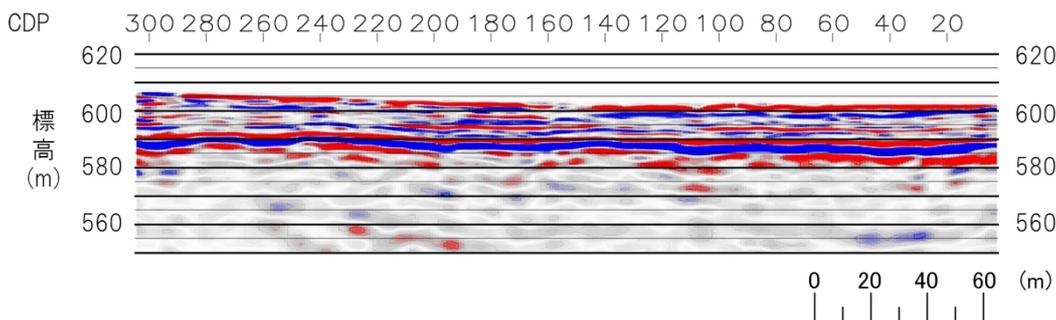


図 32 NS-3 測線のマイグレーション深度変換断面図

表 3 池田町会染花見地区の反射法地震探査データの処理に適用したパラメータ表

| | NS-1 | NS-2 | NS-3 | EW-1 | EW-2 | EW-3 |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| ジオメトリ情報 | | | | | | |
| CDP間隔 | 1m | 1m | 1m | 1m | 1m | 1m |
| CDP範囲 | 3-336 | 3-506 | 3-304 | 3-338 | 2-433 | 3-134 |
| バンドパスフィルタ | | | | | | |
| 周波数帯域 | 20/25-70/80 Hz | 20/25-90/100 Hz | 20/25-90/100 Hz | 20/25-90/100 Hz | 20/25-70/80 Hz | 20/25-90/100 Hz |
| 振幅回復処理 | | | | | | |
| 真振幅回復 | - | - | - | - | - | - |
| AGCゲート長 | 500ms | 300ms | 400ms | 400ms | 400ms | 500ms |
| デコンボリューション | | | | | | |
| アルゴリズム | Zero phase spiking |
| ゲート長 | 200ms(ゼロオフセット) | 200ms(ゼロオフセット) | 300ms(ゼロオフセット) | 300ms(ゼロオフセット) | 300ms(ゼロオフセット) | 200ms(ゼロオフセット) |
| オペレータ長 | 20ms | 10ms | 20ms | 10ms | 10ms | 10ms |
| デコン後BPF | 5/10-90/100 Hz | 0/10-70/80 Hz | 0/10-70/80 Hz | 0/10-70/80 Hz | 0/10-70/80 Hz | 0/10-70/80 Hz |
| デコン後AGC | - | 300ms | - | - | 500ms | - |
| その他処理 | | | | | | |
| | ノッチフィルタ(40Hz) | ノッチフィルタ(40・60Hz) | ノッチフィルタ(40Hz) | - | ノッチフィルタ(40Hz) | ノッチフィルタ(40Hz) |
| 速度解析 | | | | | | |
| 間隔 | 20CDP | 20CDP | 20CDP | 20CDP | 20CDP | 10CDP |
| 残差補正 | | | | | | |
| アルゴリズム | - | - | - | - | - | Max. Power Autostatics |
| 最大許容量 | - | - | - | - | - | 10ms |
| CDP重合処理 | | | | | | |
| NMO-ストレッチミュート | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| マイグレーション | | | | | | |
| アルゴリズム | FK | FK | FK | FK | FK | FK |
| 速度スケール | 100% | 100% | 100% | 80% | 100% | 100% |

得られたマイグレーション深度変換断面（図 27～図 32）を見ると、すべての断面において最大深度 20～30m程度まで明瞭な反射面が見られ、とくに断層の低下側にあたる EW-2 断面（図 28）の距離 0m～50m程度の範囲では深度 40m程度まで確認できる。また、これらの断面内で浅部から深部に至るまで極端に振幅の小さい領域は見られない。したがって、こうした反射波が到達した深度までの地下構造を検討するに足りる断面であると言える。一方で、EW-1 断面（図 27）の距離約 180m～330m、EW-2 断面（図 28）の距離約 320m～430m、NS-1 断面（図 30）の距離約 130m～280m、NS-3 断面（図 32）の距離約 210m～290mなどでは地表付近から深度 10mないし 15m程度までの間で周辺よりも反射波の振幅が小さくなる領域が存在する。これらの領域はすべて断層の上盤側に分布しているが、極浅部の現象であり、測線設置状況や人工改変の影響の可能性もあることから、地下地質構造の解釈の際には注意を要する。逆に、EW-1 断面（図 27）、EW-2 断面（図 28）、NS-1～NS-3 断面（図 30, 31, 32）では標高 590m前後に振幅が強くて連続性の良い反射面が見られる。これらの 5 断面はお互いに交差しているので、反射面が断面相互でどのように連続す

るかについて検討することが可能である。しかし、この反射面が5断面とは独立したEW-3断面(図29)でのどの標高の反射面に連続するかについては本探査結果のみだけでは判断はできず、掘削結果もあわせて検討する必要がある。

断層にほぼ直交するEW-1~EW-3断面(図27~29)では地表断層トレース位置に対応した部分に明瞭な反射面の途切れや曲がりが見られ、これらは断層変形構造を示していると考えられる。以下、それぞれの断面における断層位置の解釈(図33, 34, 35)について述べる。

EW-1断面(図33)では標高590m~600m・距離約20m~330mに非常に連続性の良い反射面群が見られ、その下位でも比較的連続性の良い反射面が多く見られる。また、断面の西端付近の距離0m~20mでは地表から深度約30m付近に至るまで明瞭で水平な反射面群が見られる。こうした反射面は地表付近では距離20m付近で途切れたり食い違ったりしており、その途切れ・食い違いの位置は断層面の形状を反映しており、東方に20度~30度程度で傾斜する(図33)。

EW-2断面(図34)では断面中央から断面東端では反射面はほぼ水平であるのに対して、断面の西側の距離約50m~200mにかけての反射面は東側が上昇するような曲がりの形状を呈している。これは本探査地点における逆断層運動に伴う地層の変形を示すものと考えられる。こうした反射面の曲がりの形状から、距離約50m~80mの間に、逆断層にともなう変形フロントが位置していると考えられる。ただし、地下の詳細な断層面形状を求めるためには今後さらなる検討が必要である。

EW-3断面(図35)の標高575mより上方では、断面の西側の距離0m~70mにはほぼ水平で連続性の良い反射面が卓越するのに対して、断面の東側の距離80m~130mでは緩やかに西側へ傾斜する反射面が多く見られる。断面西側のほぼ水平な反射面群と断面東側の緩やかに西へ傾斜する反射面群の間には途切れや食い違いが見られ、その部分が断層面のおおよその位置であるとして解釈した(図35)。また、EW-3断面の距離35m~90m・標高575m~555mの領域では、明瞭な東傾斜の反射面が見られる。この反射面は他の反射面群と比べて明らかに異質なものであり、その実体の把握のためには、掘削調査の結果なども含めて今後慎重に検討する必要がある。

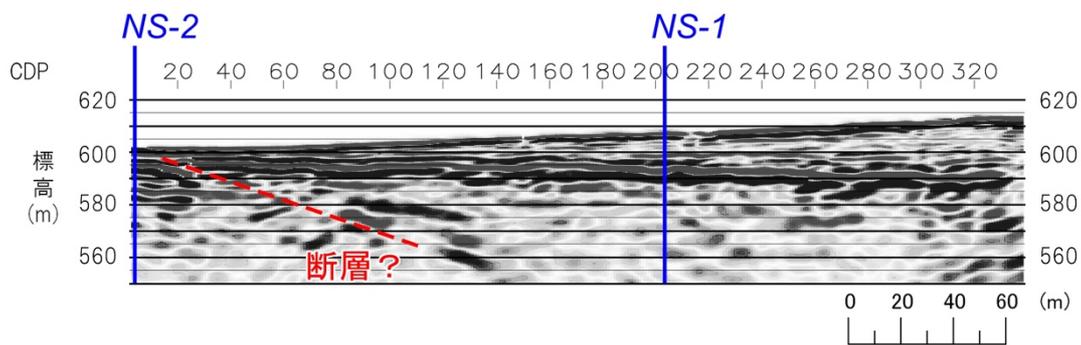


図 33 EW-1 測線の深度変換断面図における断層位置の解釈

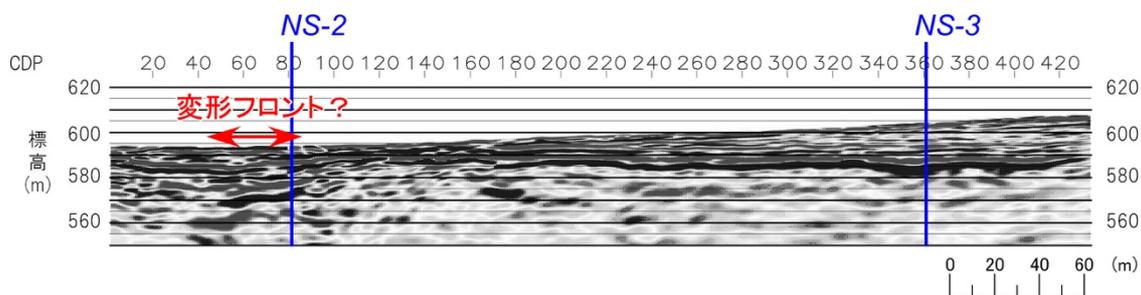


図 34 EW-2 測線の深度変換断面図における断層変形フロント位置の解釈

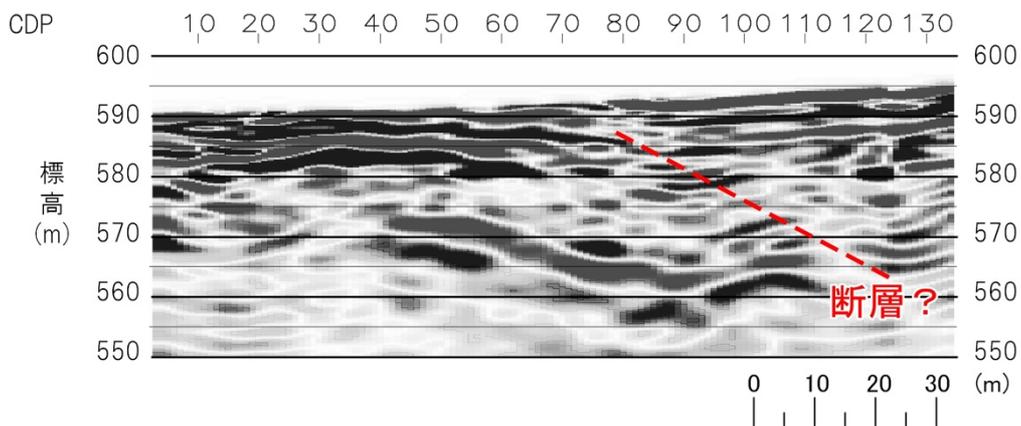


図 35 EW-3 測線の深度変換断面図における断層位置の解釈

b) 池田町会染地区における変位履歴調査

池田町会染地区ではS波反射法地震探査断面でみられる反射面の対比と層序や年代を明らかにするため、群列ボーリング掘削調査（AKM-0～8）をおこなった。以下では、本研究によるS波反射法地震探査と既存のトレンチ・ボーリングによる地形地質断面図との対比と再検討をおこなった、EW-3 測線の結果について記述する。図9に池田町会染地区におけるボーリング掘削位置、探査測線の配置図、図36～図42に各ボーリングコアの写真を示す。なお、EW-1 測線およびEW-2 測線では年代測定結果が不足しているため、ここでは暫定的な推定地質断面図のみを図43および図44に提示するに留める。ただし、AKM-3 孔およびAKM-4 孔は文科省委託「内陸及び沿岸海域の活断層調査・糸魚川-静岡構造線断層帯（北部区間）」で掘削されたため、ここではコア写真の掲載を省略した。

EW-3 測線では、平成24年および25年に産業技術総合研究所によりトレンチ・ボーリング調査が実施され、地形地質断面図が作成されている（図45）。当時の調査結果は、近藤・谷口（2014）にまとめられ、不確実なイベントや既存のトレンチ調査結果を含めて3回の活動時期が推定されている。今回、同じ測線上で高分解能S波反射法地震探査を実施し、地層境界に対応する反射面や東傾斜約 20° の逆断層をイメージングした。大局的な地質構造は従来の見解と変わらないが、地層境界の傾斜に関する空間解像度がボーリングよりも上がったため、より正確な地層の対比に基づく地形地質断面図を作成することができた。

今回の再検討によって、従来から推定されていた活動時期には変更がなく、最新活動時期が $1029 \pm 29 \sim 1217 \pm 30$ y. B. P. ($1217 \sim 928$ CalBP)、1つ前が $3741 \pm 30 \sim 3939 \pm 30$ y. B. P. ($4436 \sim 4005$ CalBP)、2つ前が $6540 \pm 30 \sim 8310 \pm 40$ y. B. P. ($9410 \sim 7427$ CalBP)である（図46）。各イベントの上下変位量は、3回の累積として5.1m（⑩層の上面）、最近2回の累積として3.4m（⑧層の上面）である。1つ前のイベントは⑦層堆積中に生じたとみられるが、その層準は正確に特定できないため、正確な地震時上下変位量が計測できない。ただし、近藤・谷口（2014）と同様に最近2回の上下変位が同程度とみなせば、最近3回のイベントの地震時上下変位量はいずれも1.7m程度である。これらの1.7mの上下変位を逆断層の傾斜 20° でネットスリップに換算すると5.0mとなる。今後、EW-1 測線やEW-2 測線においても地震時変位量の検討を詳細におこない、池田町会染地区での変位履歴をより正確に明らかにする必要がある。

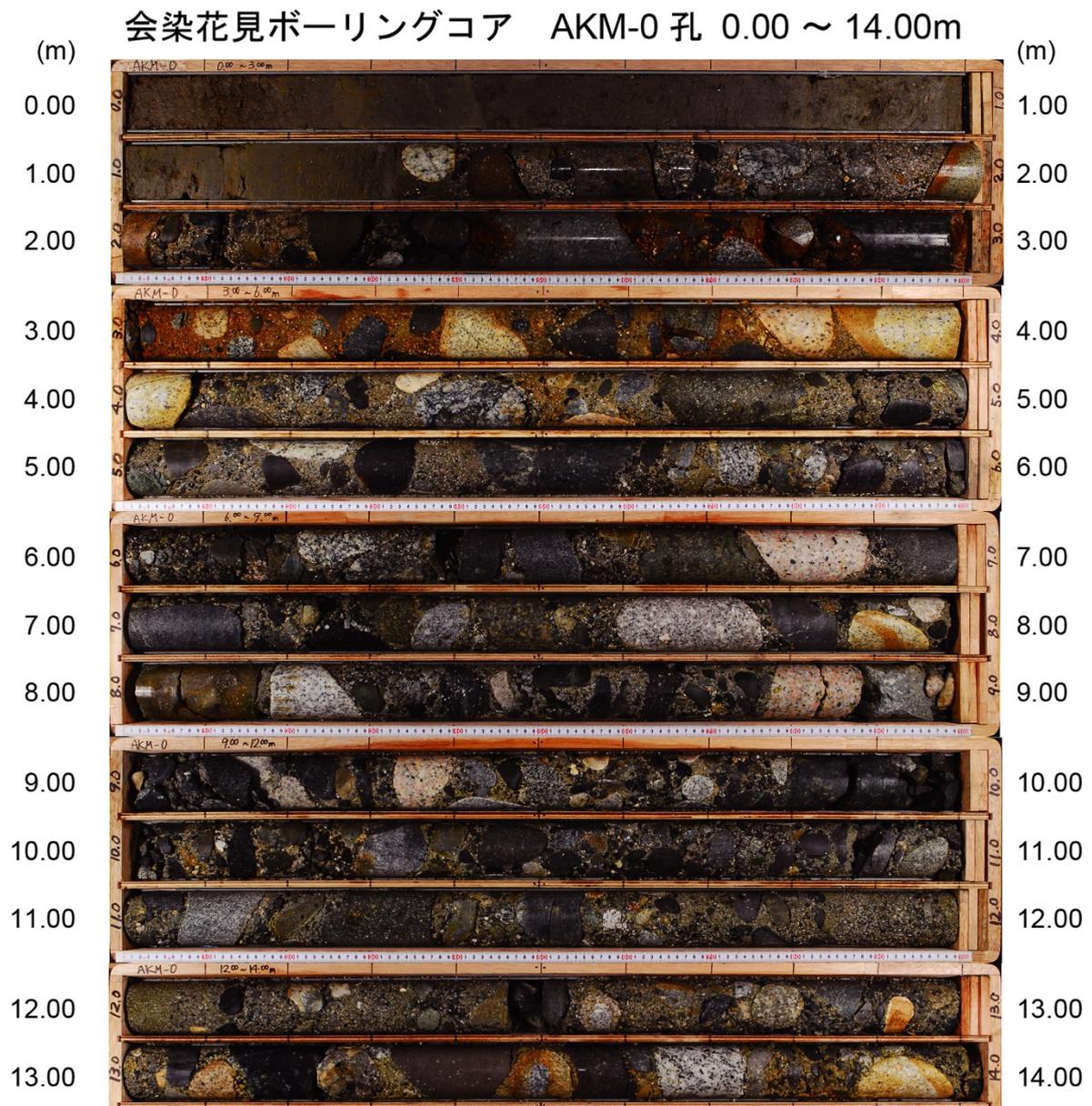


図 36 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-0 孔)

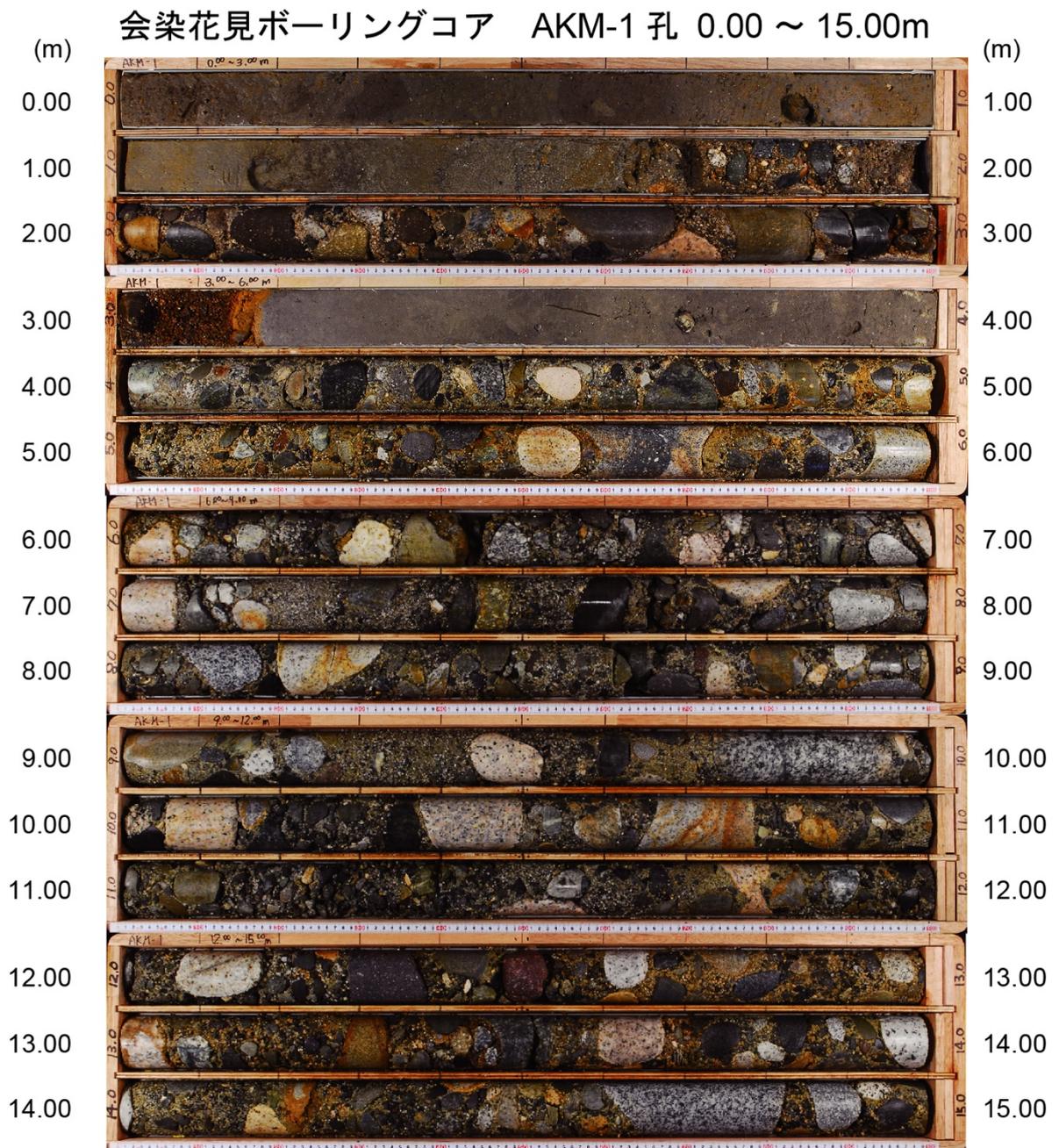


図 37 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-1 孔)

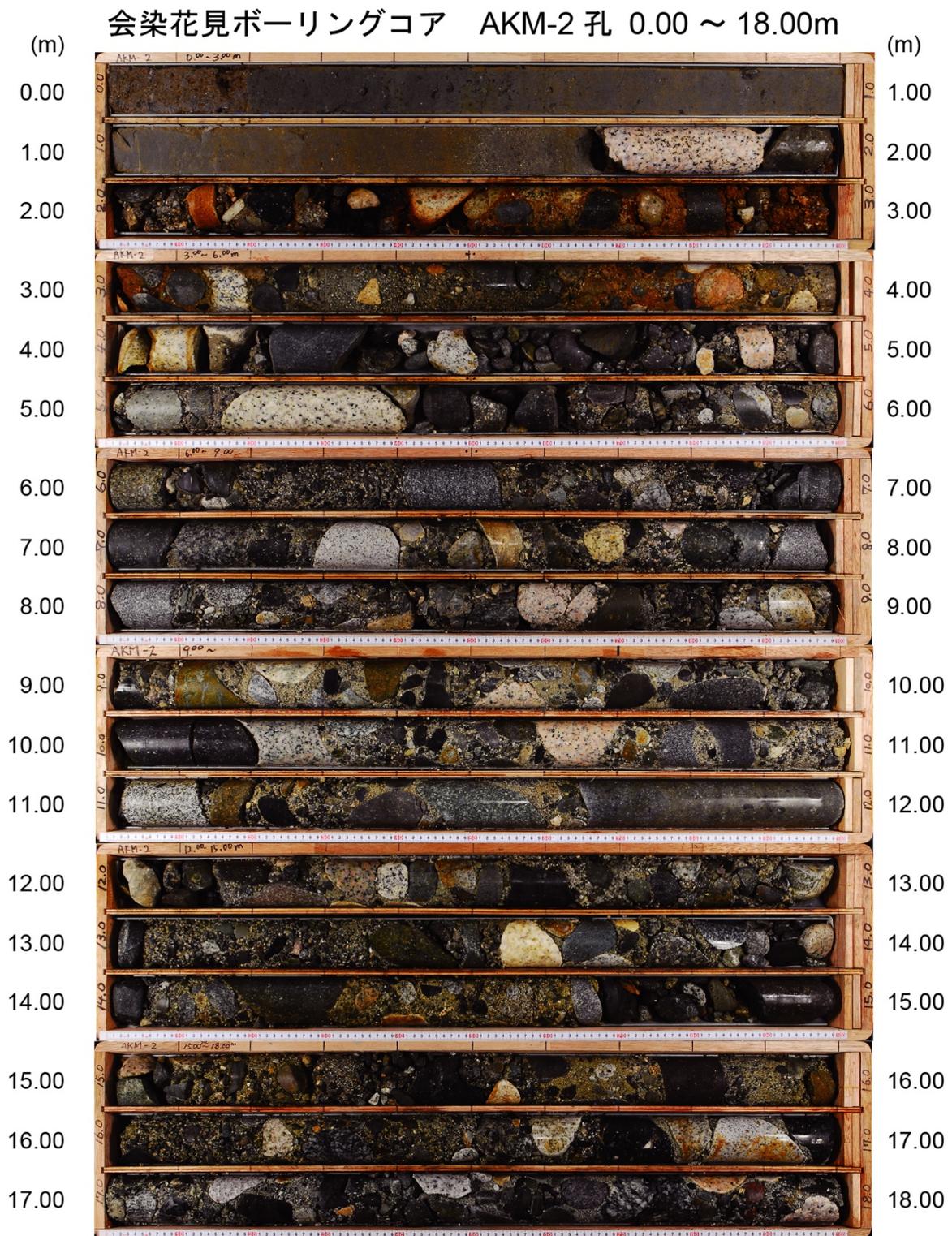


図 38 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-2 孔)

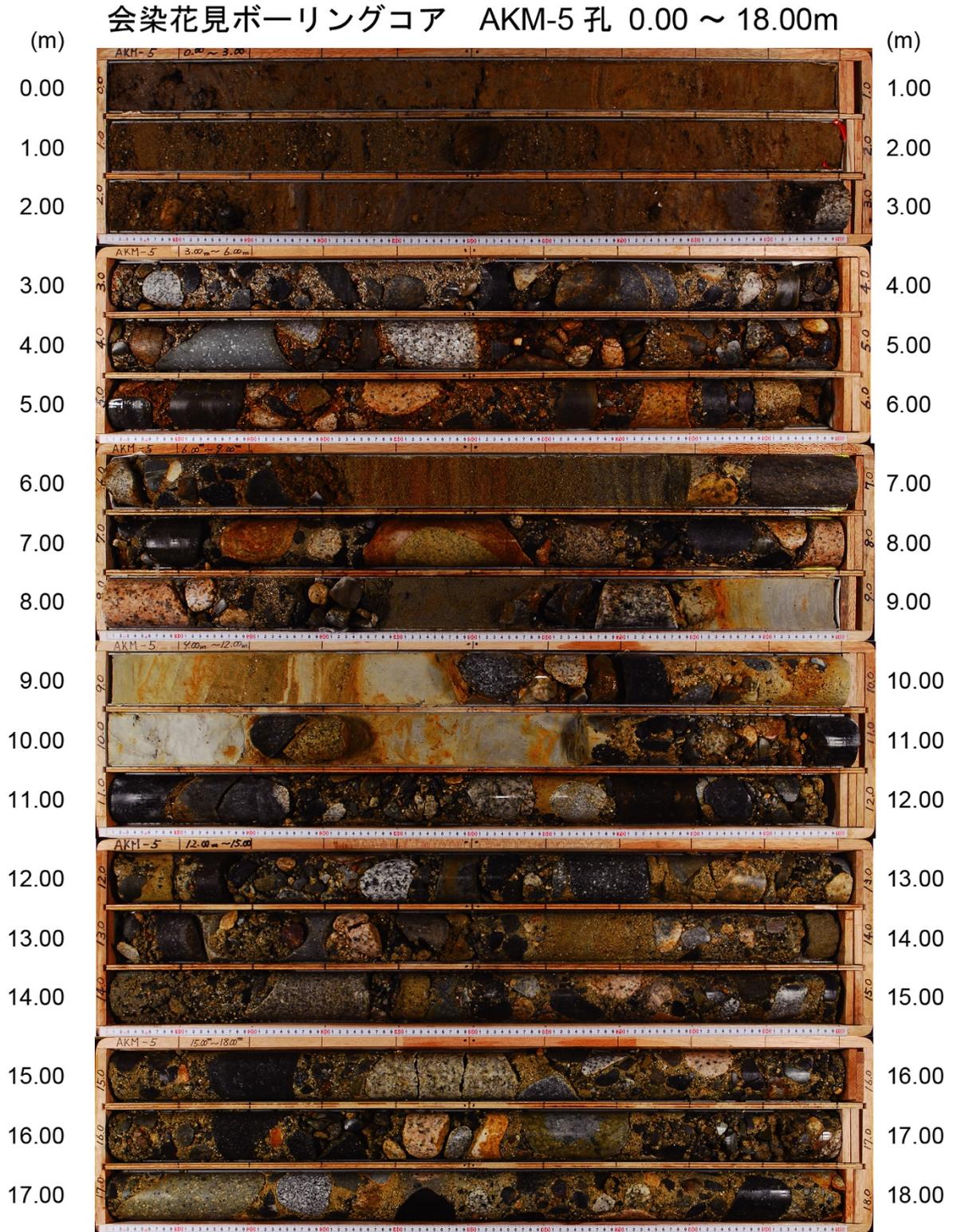


図 39 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-5 孔)

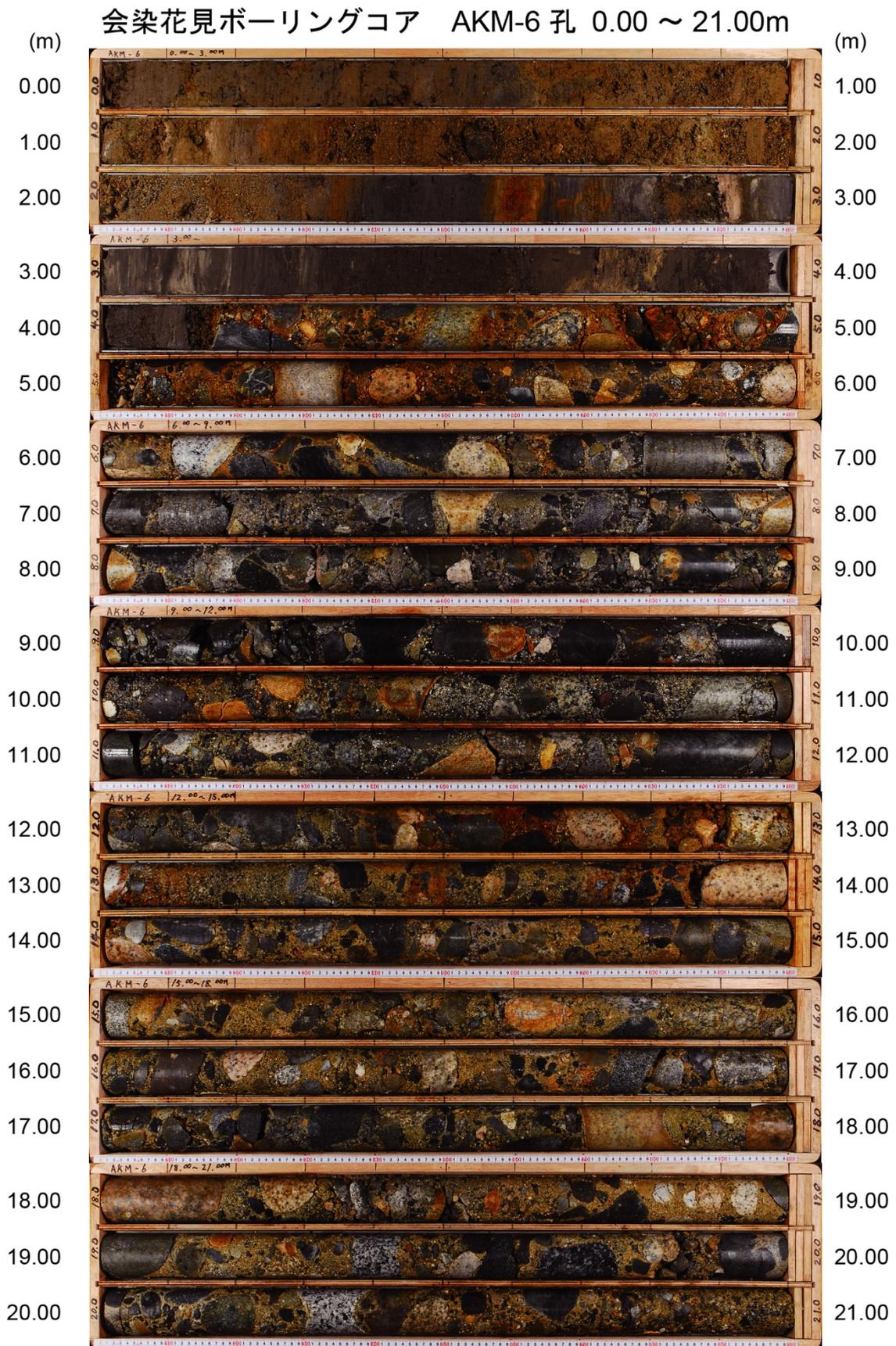


図 40 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-6 孔)

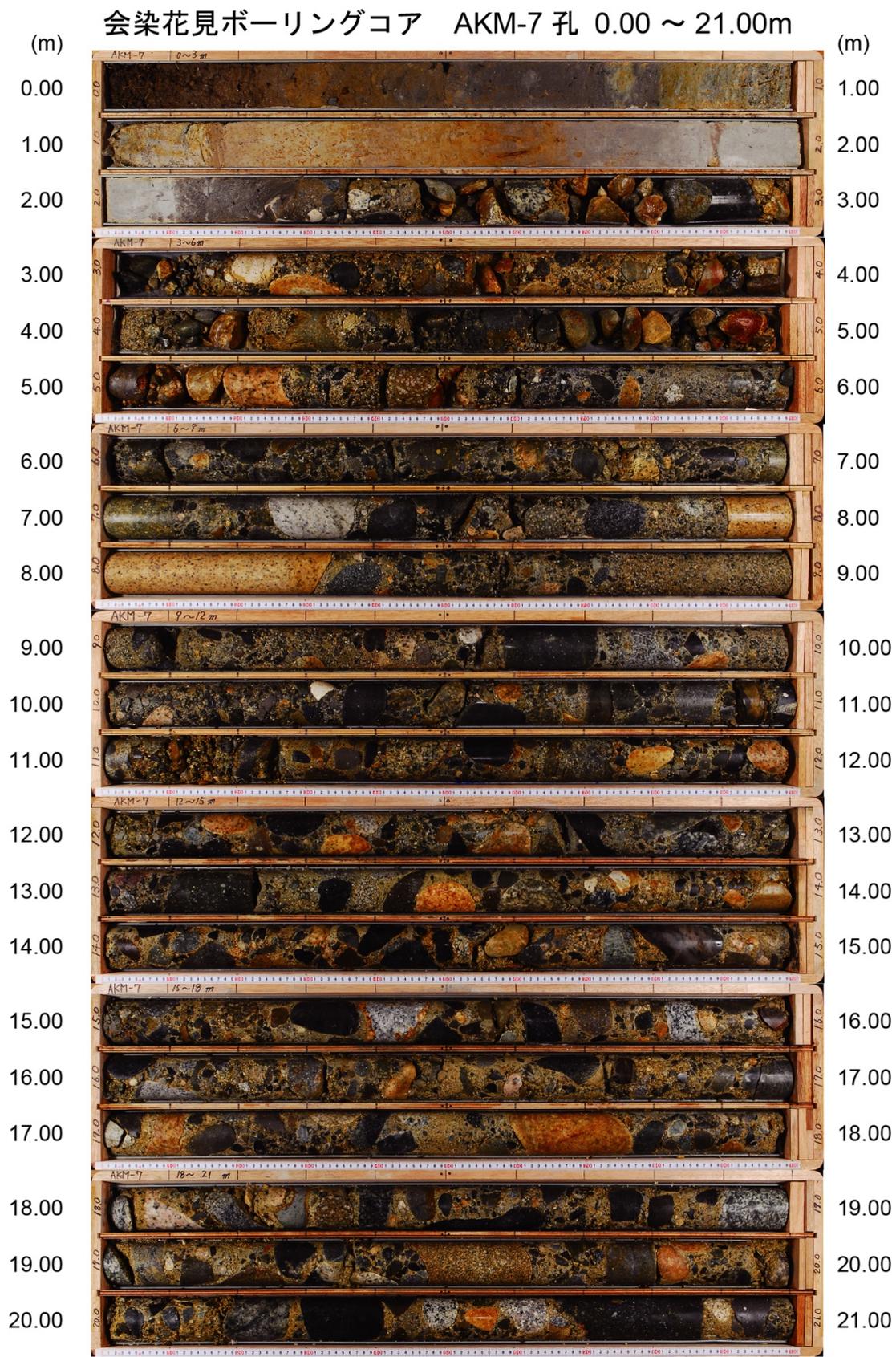


図 41 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-7 孔)

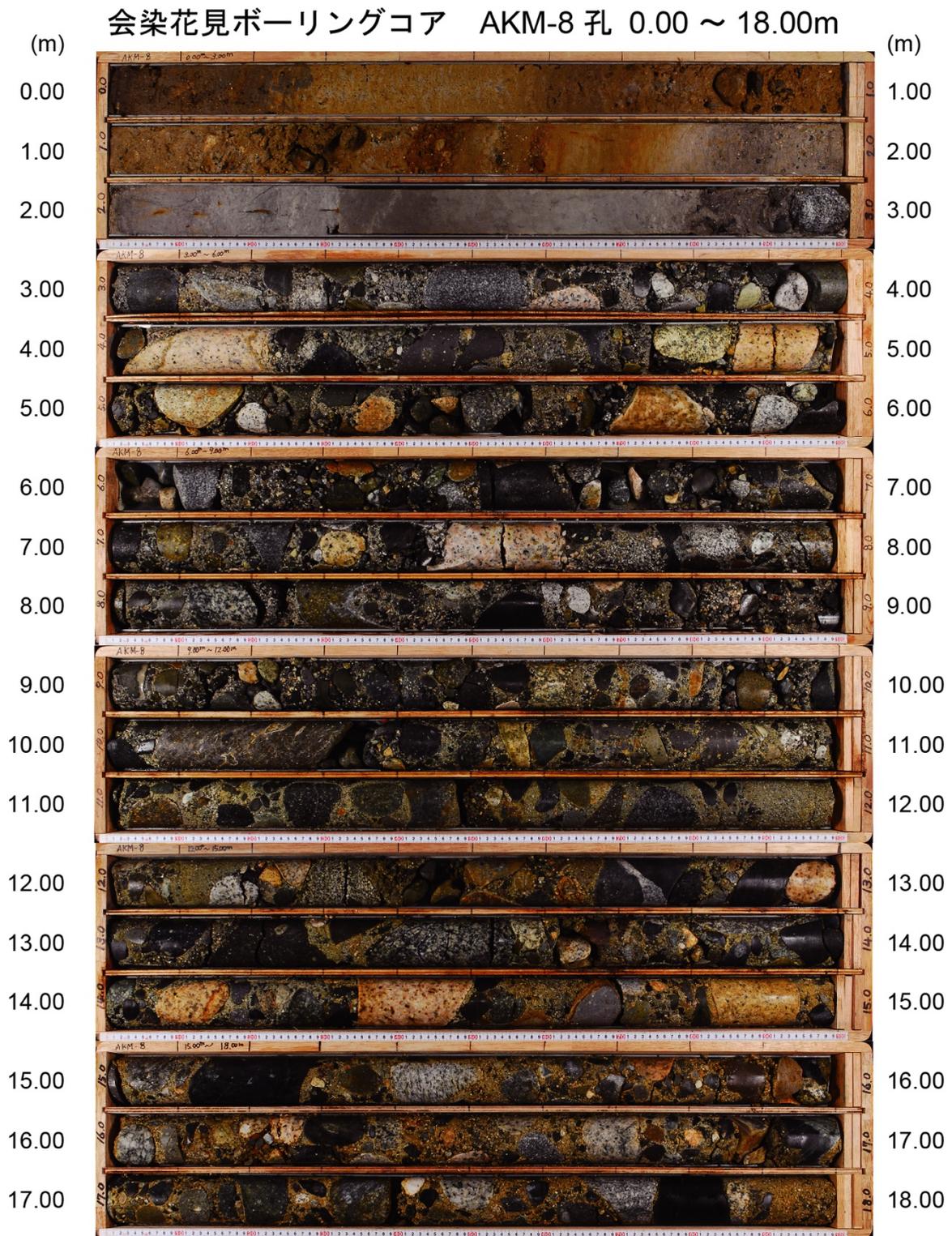


図 42 池田町会染地区におけるボーリングコア (AKM-8 孔)

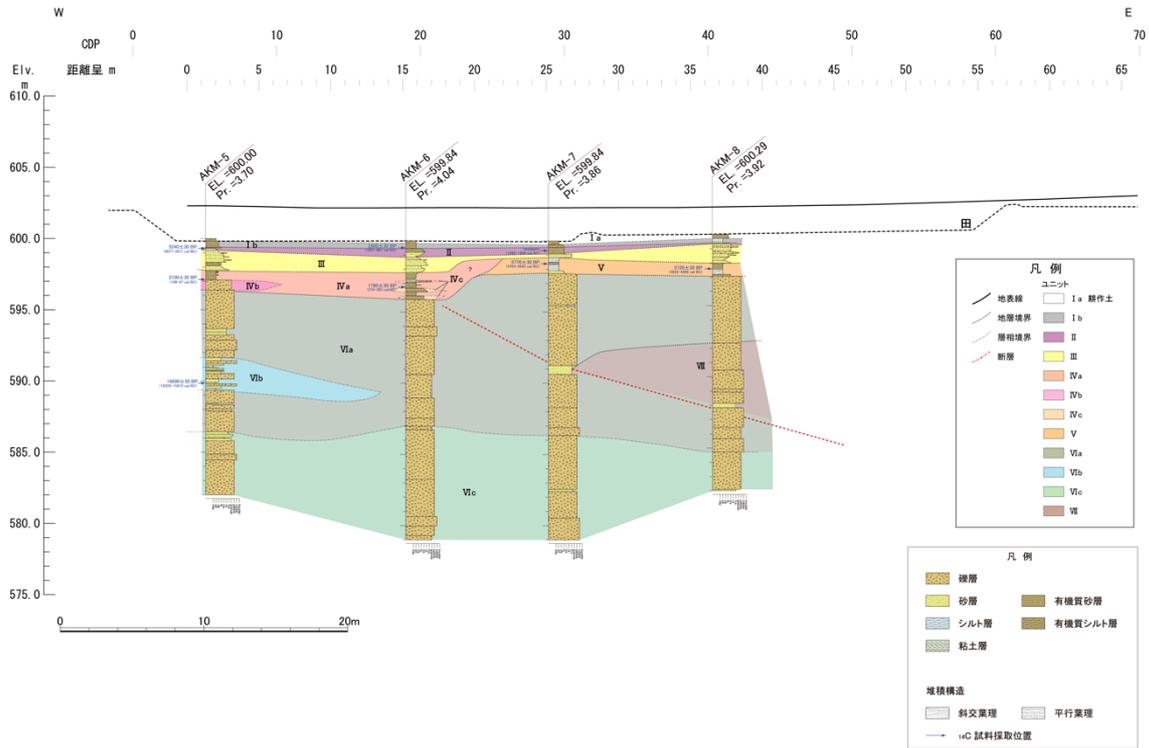
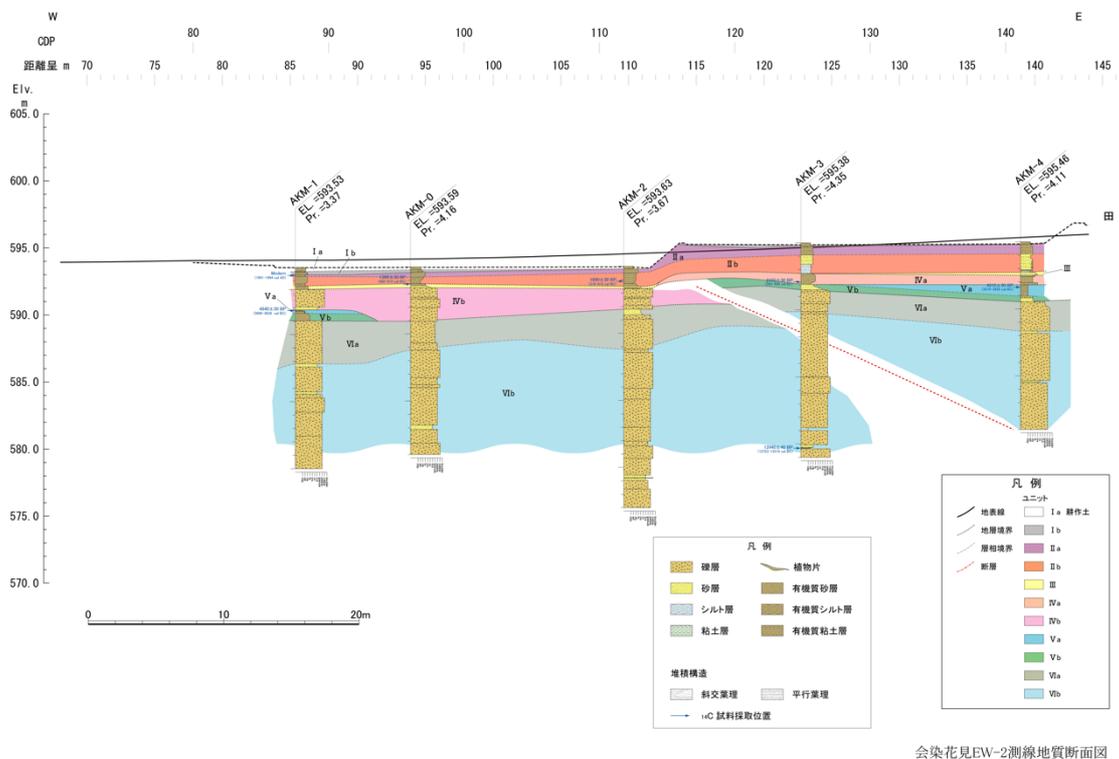


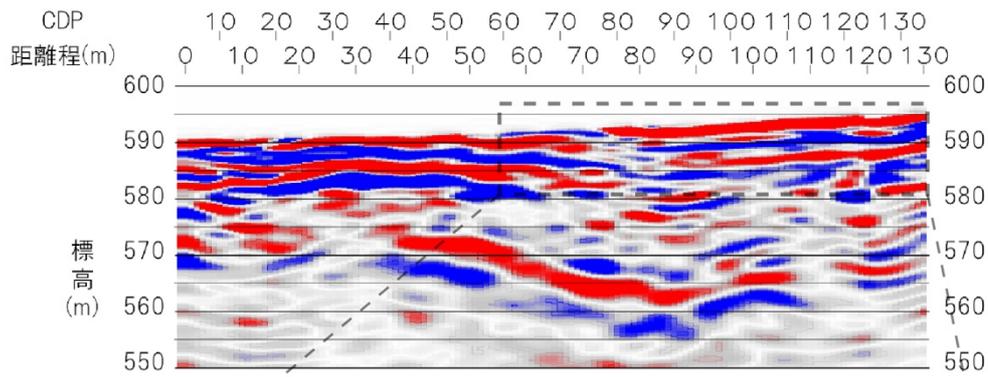
図 43 池田町会染地区 EW-1 測線における推定地質断面図



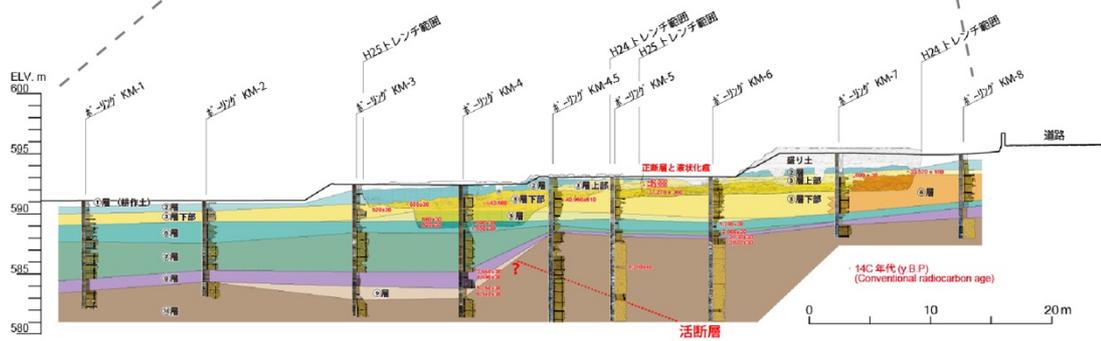
会染花見EW-2測線地質断面図

図 44 池田町会染地区 EW-2 測線における推定地質断面図

(A)



(B)



(C)

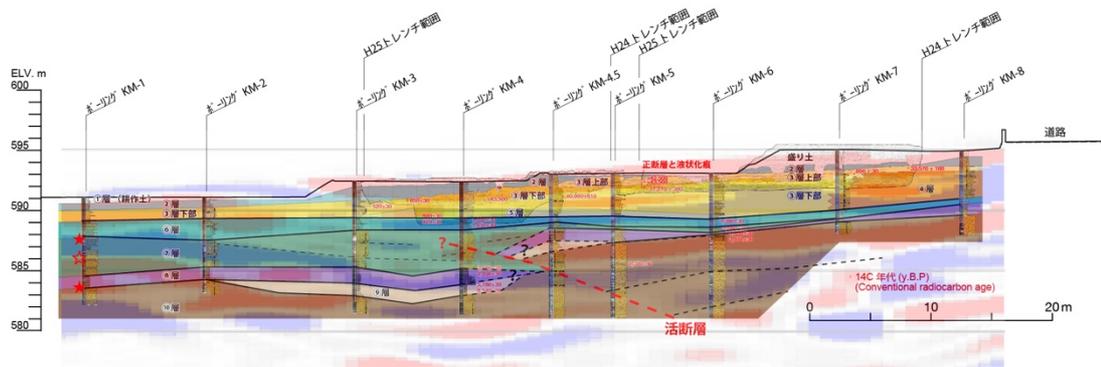


図 45 池田町会染地区 EW-3 測線における地形地質断面図

(A) EW-3 測線の S 波反射法地震探査、(B) 近藤・谷口 (2014) によるトレンチ・ボーリング調査に基づく地形地質断面図、(C) トレンチ・ボーリング・S 波探査結果を統合した地形地質断面図。

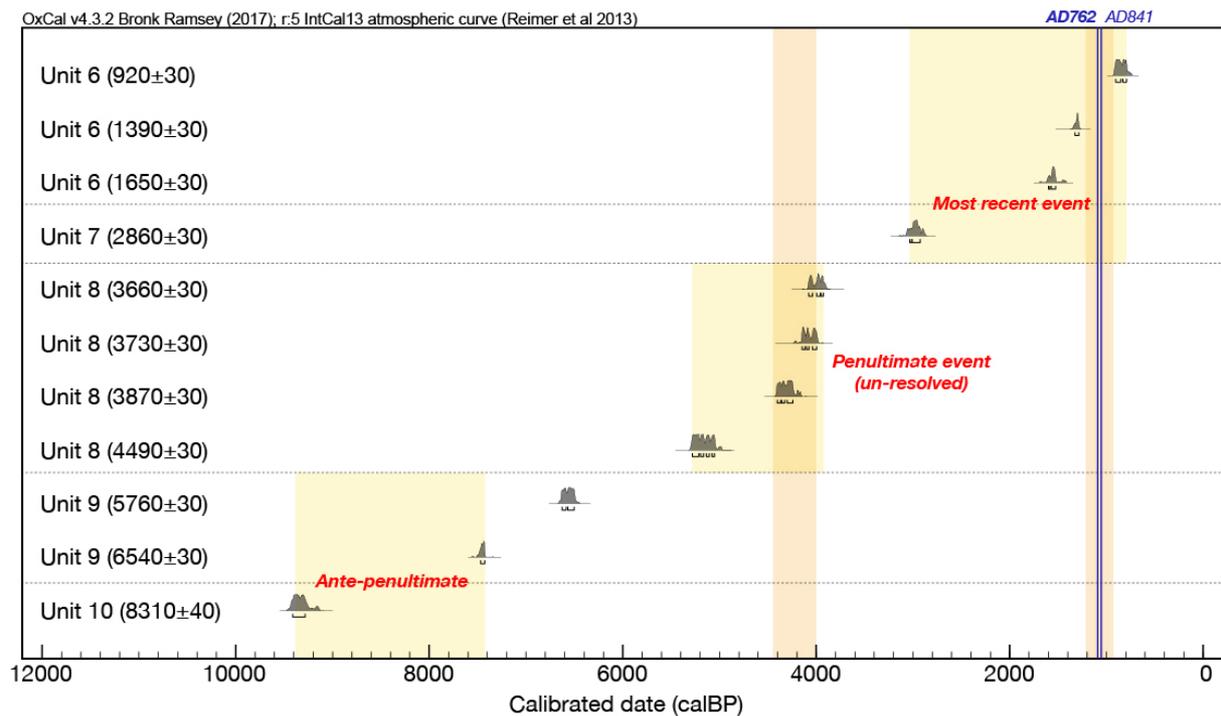


図 46 EW-3 測線の地形地質断面における古地震イベントの較正暦年代
 年代測定結果は近藤・谷口（2014）に基づく。オレンジ色の推定幅は、丸山・他（2010）
 による花見北地点の活動時期。OxCal v. 4. 3. 2（Ramsey, 2017）を基に暦年較正し、 1σ
 に対応する確率分布を示した。較正曲線は IntCal13（Reimer et al., 2013）を使用し
 た。

c) 池田町会染地区における変位履歴と連動範囲の推定

本調査と既往の調査結果を総合し、池田町会染地区における過去活動時期は、新しいものから $1029 \pm 29 \sim 1217 \pm 30$ y. B. P. (1217~928 CalBP)、 $3741 \pm 30 \sim 3939 \pm 30$ y. B. P. (4436~4005 CalBP)、 $6540 \pm 30 \sim 8310 \pm 40$ y. B. P. (9410~7427 CalBP) と推定された (図 46)。さらに、それぞれの活動に伴う地震時変位量は、いずれも 1.7m 程度と推定された。S 波反射法地震で推定された傾斜角は約 20° であり、これに基づき上下変位量をネットスリップに換算すると変位量は 5.0m となる。ただし、横ずれ成分は現段階では不明のため、ここでは加味していない。

これらの地震時変位量は、松田・他 (1980) による地震断層長と変位量のスケーリング則に基づけば、50km の地震断層区間に相当する。一方、松本盆地東縁断層北部の断層長さは約 21km である (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2015)。すなわち、松本盆地東縁断層北部が単独で活動し固有規模の地震を生じた場合には、地震時変位量は最大で約 2m と推定されるため、上述の変位履歴調査による実測値はこの推定値を明らかに上回っている。そのため、変位履歴調査によって復元された地震時変位量から判断すれば、過去 3 回のいずれの活動でも松本盆地東縁断層北部の単独ではなく、隣接した断層区間と連動したと判断できる。

また、池田町会染地区は断層のほぼ中央付近にあたり (図 1)、地震時変位量は最大値に近いと期待されるため、松本盆地東縁断層北部を含む少なくとも 50km 程度の断層区間が一度に連動したことになる。なお、神城断層と松本盆地東縁断層北部により構成される北部区間の長さは約 50km であり (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2015)、上記の 3 回の活動は北部区間全体が連動した地震イベントであった可能性もある。今後、池田地区の地震時変位量をより正確に復元するとともに、南隣の松本盆地東縁断層南部の変位履歴を総合して検討すれば、それぞれの活動に伴う連動範囲がより正確に復元できるものと期待される。

4) 松本盆地東縁断層北部・明科七貴地区におけるトレンチ調査

安曇野市明科七貴地区では、松本盆地東縁断層北部の活動時期と地震時変位量を明らかにするため、トレンチ調査を実施した。同地区は、既存の活断層図では伏在断層が指摘されているものの、断層の正確な地表位置が不明であった（図 47）。本調査により米軍撮影の空中写真の再判読と地表踏査を実施した結果、調査地周辺には河成段丘面と沖積低地を限り相対的に東側が隆起する低崖がみいだされた。段丘面は南東へ流下する高瀬川によって形成され南東から南方向へ緩やかに傾斜するが、段丘面上には不明瞭ながら西側低下の撓曲変形と背斜状変形が新たに認められた（図 48, 49 : EW-2 測線）。そのため、この低崖地形を松本盆地東縁断層北部によって形成された低断層崖と判断し、トレンチ調査を実施した。トレンチは長さ 24m、幅 4m、深さ 3.5m程度で低崖を横断して掘削した。トレンチ壁面の写真およびスケッチを図 50、図 51 にそれぞれ示す。

a) トレンチ壁面の層序と層相

トレンチ壁面には人工改変土層、河川性砂礫層及び砂質シルト層、砂礫層を切断する高角東傾斜の断層が露出した。これらの地層を層相に基づき上位からⅠ層～Ⅴ層に区分した。以下に各地層の層相と特徴を略述する。

Ⅰ層：粘土化した畦畔土（Ⅰa層）と、田畑耕作土（Ⅰb層）からなる。褐～暗灰褐色を呈し、塊状の不淘汰な有機質礫混り礫混じりシルトからなる。植物根（菜野菜）やビニール片などの人工物を含み、下位のⅡ層との境界は明瞭である。植物根や人工物を含むことから、耕作土と判断される。

Ⅱ層は細～中粒砂からなるⅡa層と、シルト～中粒砂からなるⅡb層に区分される。

Ⅱa層：暗灰～灰褐色を呈し、淘汰が悪い有機質分を含む細～中粒砂からなる。植物根を含む。下位のⅡb層との境界は漸移的である。有機質分や植物根を含み、下位のⅢ層と明瞭に境することから、旧耕作土と判断される。

Ⅱb層：灰褐～灰色または黄褐色を呈し、淘汰は悪いシルト～中粒砂からなる。分布はN08付近及びS08付近と、N09～N18及びS09～S22にみられる。下位のⅢ層との境界は明瞭である。N08付近及びS08付近の黄褐色のシルト～中粒砂は、下位の礫層を浸食するような弧状の分布を示すこと、分布が局所的であることから、旧耕作土に沿った旧水路の堆積物と判断される。

Ⅲ層はシルト分を含む極細～細粒砂からなるⅢa層、礫からなるⅢb層、細礫からなるⅢc層に区分される。

Ⅲa層：灰褐～灰色を呈し、淘汰は悪いシルト分を含む極細～細粒砂からなる。薄層またはレンズ状のシルトを挟む。一部に細礫が散在し、断層周辺のN05～N08付近またはS05～S08付近において、本層基底部に細～中礫サイズの礫層を挟む。下位のⅣ層との境界は明瞭で、傾斜不整合の関係を示す。

Ⅲb層：褐色を呈し、淘汰の悪い礫からなる。基質支持で、基質は淘汰が悪くシルトを含む黄褐色極細～細粒砂からなる。礫は径約4cmの円～亜円礫を主体とし、最大約30cmである。分布はN05～N08付近またはS05～S08付近に限られる。上位のⅢa層と下位のⅣa層が混ざった岩相を示し、分布はⅣa層からなる崖下のみ分布することから、Ⅳa層堆積後のⅢa層由来の崩積土と判断される。

IIIc 層：褐色を呈し、淘汰の悪い細礫からなる。概ね基質支持で、基質は極細～細粒砂からなる。分布は N23～N24 付近または E00～E02 付近に限られる。

IV層は礫からなる IV a 層、極細～細粒砂およびシルトからなる IVb 層と礫からなる IVc 層に区分される。

IVa 層：灰白～灰褐色を呈し、比較的淘汰の良い礫からなる。礫は径約 3～20cm の円～亜円礫を主体とし、最大約 40cm である。概ね礫支持であるが、一部にレンズ状にシルト層または砂層を挟む。基質は極粗粒砂からなる。礫種は主として、礫種は主として、花崗岩類（花崗岩・花崗閃緑岩）、閃緑岩、閃緑斑岩、アプライト、斑岩、安山岩、溶結凝灰岩、ホルンフェルス、砂岩、チャートからなる。本層は上位下位の地層に比べ、圧砕岩（カタクレサイト・マイロナイト等）の礫を多く含む。N02～N06 付近または S03～S06 付近、N11～N15 付近または S08～S16 付近において、それぞれ下位の V 層または VI 層を著しく削り込み下位層が欠如する。

IVb 層：断層の東側と西側で岩相がやや異なる。東側の IVb 層は黄褐色を呈し、淘汰が良い極細～細粒砂からなる。分布は N19～N24 付近または S16～S24 付近にみられる。

西側の IVb 層は緑灰～青灰色を呈し、淘汰は良いシルトからなる。本層上部にシルト質極細粒砂層、一部に砂層をレンズ状に挟み、植物片、木片、細礫を含む。本層は、断層の東側で IVa 層の礫層と指交状に接し西側では IVc 層の礫層と指交状に接することから、それぞれ同時異相の関係にあると判断される。

IVc 層：黄灰色を呈し、比較的淘汰は良い礫からなる。礫は径約 5～20cm の円～亜円礫を主体とし、最大約 40cm である。概ね礫支持であるが、一部にレンズ状にシルト層または砂層を挟む。その砂層に弱い斜交葉理や平行葉理が認められる。基質は粗～極粗粒砂からなる。礫種は主として、花崗岩類（花崗岩・花崗閃緑岩）、閃緑岩、アプライト、斑岩、安山岩、ホルンフェルス、砂岩、チャートからなる。

V 層：黄灰色を呈し、淘汰は良く、極細～粗粒砂からなる。分布は断層の上盤のみに認められる。本層は上部から、極細～細粒砂、細粒～中粒砂、細～極粗粒砂、極細粒砂、粗～極粗粒砂からなる。最下部の粗～極粗粒砂は礫をレンズ状に挟み、弱い斜交葉理や平行葉理が認められる。北壁面では N06～N11 付近においては平行葉理を有する砂層が上に凸の形状を示す。一方、南壁面では S08 付近で断層近傍の引きずり剪断を受けており、ほぼ直立した変形を生じている。下位の VI 層との境界は明瞭で、傾斜不整合で接する。

VI 層：橙褐～灰褐色を呈し、淘汰はやや悪い礫からなる。礫は一部で酸化し、全体として橙色を呈する。礫は径約 3～40cm の円～亜円礫を主体とし、最大径約 40cm である。概ね礫支持であるが、一部にレンズ状にシルト層または砂層を挟む。その砂層に弱い斜交葉理や平行葉理が認められる。基質は粗粒砂からなる。礫種は主として、花崗岩類（花崗岩・花崗閃緑岩）、閃緑斑岩、アプライト、斑岩、安山岩、溶結凝灰岩、ホルンフェルス、礫岩、砂岩、チャートからなる。カタクレサイトも少量含む。

b) イベント層準の認定と年代、変位量

断層と地層の切断・被覆関係、上下変位量の差異に基づき、本調査では最近 2 回のイベントを認定した。断層は IVa 層以下の地層を切断し、走向は N40° W、傾斜 45～86° E である。ここでは新しいものからイベント 1、イベント 2 と呼称し、その認定根拠について記

載する。北壁面の断層近傍の拡大図を図 52、放射性炭素同位体年代測定の結果を表 4、各イベントの暦年較正年代を図 53 に示す。

イベント 1：北壁面及び南壁面において、IVa 層を切断する断層は上端をⅢ層に覆われる。IVa 層中の断層は剪断による礫の再配列を伴う（図 52）。砂礫層は高瀬川の本流性堆積物であり、初生的なインブリケーションはトレンチに対して直交方向の南東方向であるが、断層直近の礫は長軸がほぼ鉛直に再配列する。断層を挟んだIVa 層上面の比高は 1.2m である。断層上端を覆うⅢa 層およびⅢb 層は断層の低下側にのみ分布し、IVa 層に生じた高度差や上に凸の変形構造に対してアバットして分布する。Ⅲb 層は断層直上付近にのみ分布するIVa 層由来の崩積土とみられる。以上から、IVa 層に生じる断層変位及び変形構造と被覆層であるⅢ層の分布状況から、最新活動のイベント 1 はIVa 層堆積後、Ⅲb 層堆積前に生じたと考えられる。

IVa 層からは年代試料が採取できなかったものの、下位のIVb 層から 1240 ± 30 y. B. P. (1261~1091 CalBP : AD689~860 年) と 1280 ± 30 y. B. P. (1269~1184 CalBP : AD681~767 年)、Ⅲa 層からは 810 ± 30 y. B. P. (735~690 CalBP : AD1215~1261 年) の放射性炭素同位体年代測定値が得られた（表 4、図 53）。よって、最新活動時期は西暦 689~1261 年ないし約 1300~700 年前に特定される。この年代は、従来のトレンチ調査で推定された松本盆地東縁断層北部の最新活動時期（例えば、奥村・他、1998；遠田・他、2008）や、従来から対比されてきた歴史地震である西暦 762 年の地震 ($M > 7.0$ 程度: 宇佐美・他、2013) とも調和的である。また、IVa 層上面を変位基準として、最新活動に伴う上下変位量は 1.2 m と計測される。

イベント 2：北壁面の N07-N08 で認められる断層は、VI 層内部で上方へ不明瞭となり、V 層の砂層に明瞭な上下変位を与えていない。また、VI 層は断層の低下側では露出しておらず、最新活動に伴う 1.2m よりも大きな上下変位を受けている。さらに、断層より東側でVI 層は上位のV 層と明瞭な傾斜不整合の関係にあり、VI 層がより多くのイベントを記録している可能性が高い。よって、VI 層はイベント 1 に伴う変位だけでなく、それに先行するイベント 2 により累積的な変位と変形を生じていると考えられる。以上から、イベント 2 は、VI 層堆積以降、V 層堆積前に生じた。

VI 層からは年代測定試料が採取できなかったものの、V 層からは 2380 ± 30 y. B. P. (2434~2349 CalBP : BC485~400 年) の年代値が得られた（表 4、図 53）。よって、イベント 2 の発生年代は、約 2400 年前以前に限定される。なお、 2020 ± 30 y. B. P. の年代値も得られたが、試料に含まれる炭素量が少なく $\delta^{13}\text{C}$ が測定できなかったため、イベントの発生年代推定や暦年較正の対象からは除外した。

これらのイベントの発生年代から、最近 2 回の活動間隔の最小値は約 1100 年であると推定される。

以上から、明科七貴地区における変位履歴調査の結果、西暦 689~1261 年に生じた最新活動に伴い 1.2m の地震時上下変位が生じたことが明らかとなった。最新に先行する活動は、約 2400 年前以前に限定される。トレンチ壁面に露出した断層の傾斜は最大で 86° E であり、横ずれ断層に特徴的である礫の再配列も認められるため、実際の地震時変位には横ずれ成分が含まれている可能性がある。よって、今回計測した最新活動に伴う上下変位量 1.2m は最小値である可能性がある。この点については平成 30 年度に補足調査を実施し、

横ずれ成分の有無や上下変位成分と横ずれ成分との比率などを明らかにしていく。その結果をもとに中南部区間の松本盆地東縁断層南部との連動性についてさらに詳細に検討する。

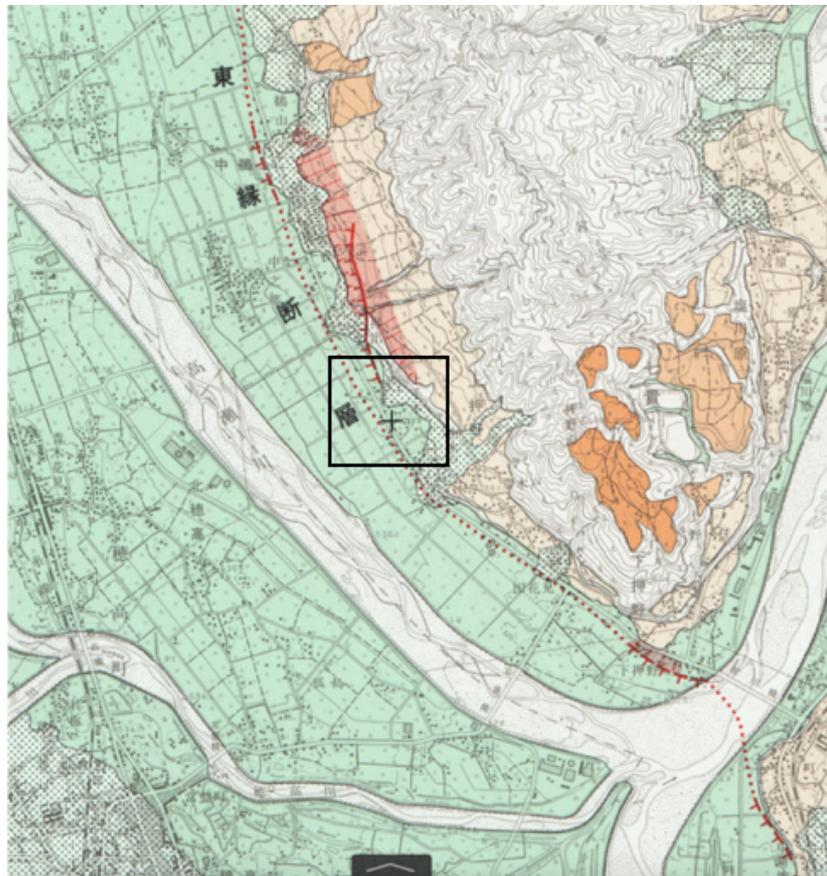


図 47 松本盆地東縁断層北部と明科七貴地区における調査位置
国土地理院発行都市圏活断層図「信濃池田」(東郷・他, 1999)に加筆。

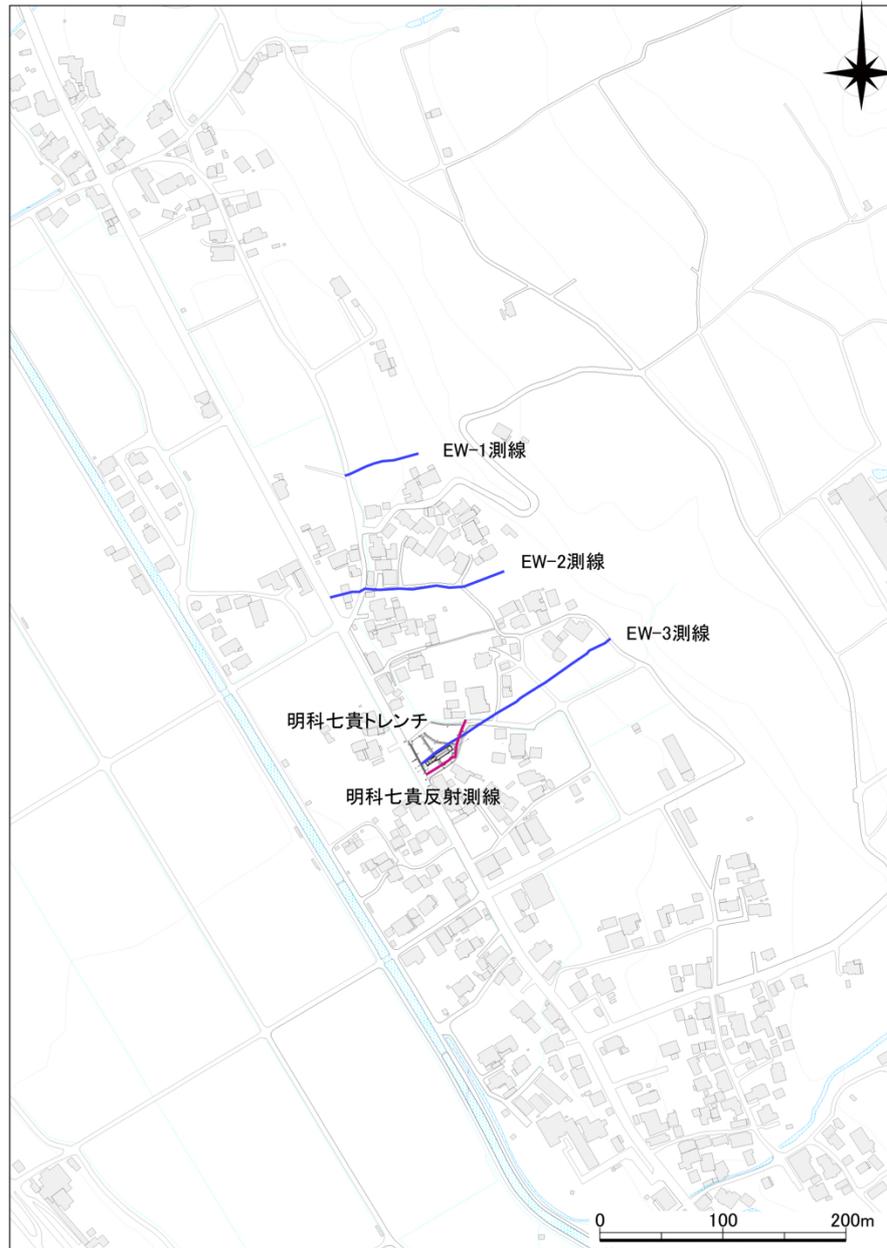


図 48 明科七貴地区におけるトレンチ掘削位置と測量図面
EW-1～EW-3 測線は地形断面測量の測線。

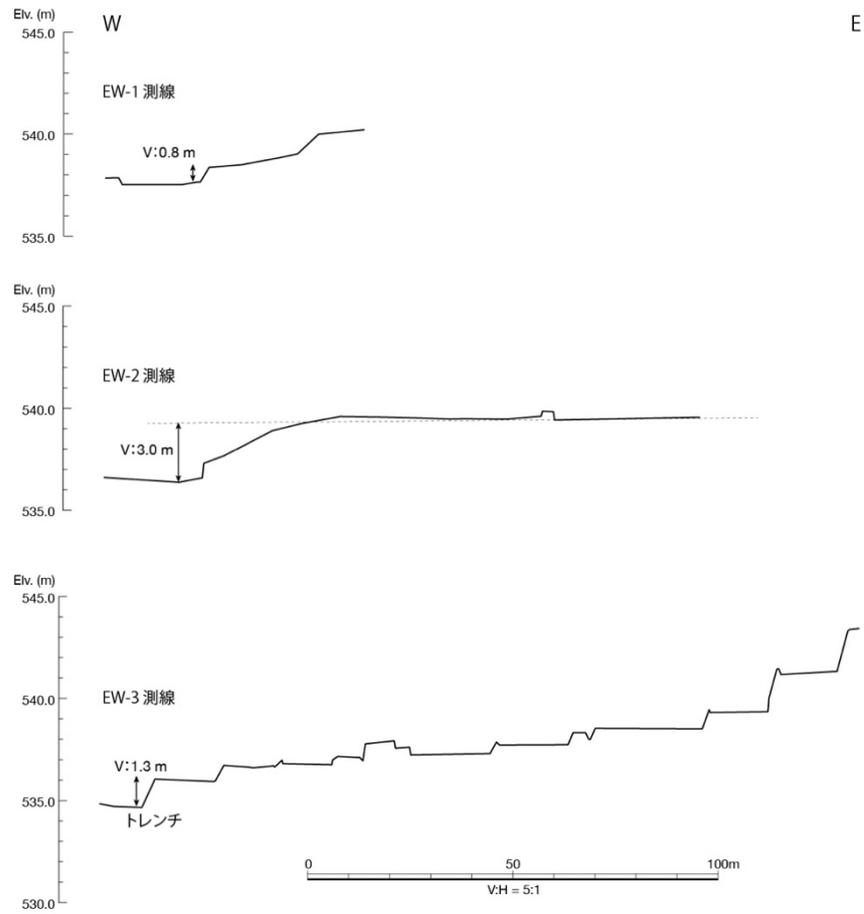


図 49 明科七貴地区における地形断面
縦軸は 5 倍強調。EW-1～EW-3 測線の位置は図 52 に示す。

明科七貴地区 トレンチ壁面展開写真 縮尺：25分の1



図 50 明科七貴トレンチ壁面の写真
グリッドは1 m間隔。

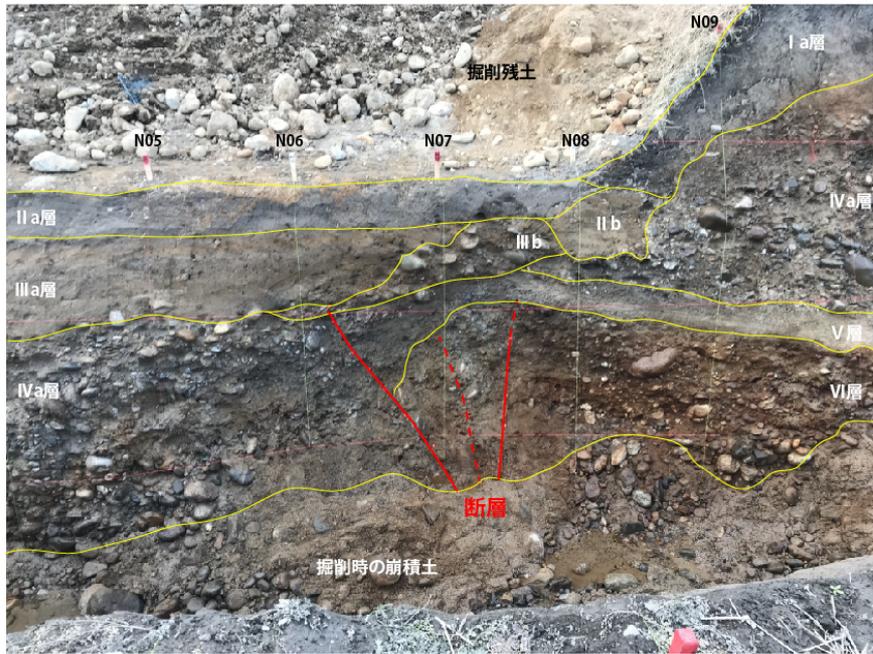


図 52 明科七貴トレンチ北壁面における断層近傍の拡大写真

表 4 明科七貴トレンチにおける放射性炭素同位体年代測定の結果
ここでは暦年較正年代として 2σ の範囲を示している。

| geo ID | beta ID | sample | type of material | Measured Radiocarbon Age | | Conventional Radiocarbon Age | | cal | d13C | Pretreatment |
|--------|---------|-----------|------------------|--------------------------|-----|------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|
| 55557 | 488337 | AKN-S01-1 | wood | 1260 | 30 | 1240 | 30 | 95.4% probability (61.3%) 684 – 780 cal AD (1266 – 1170 cal BP) (34.1%) 787 – 876 cal AD (1163 – 1074 cal BP) | -26.4 | acid/alkali/acid |
| 55558 | 488338 | AKN-S02-1 | wood | 1300 | 30 | 1280 | 30 | 95.4% probability (95.4%) 662 – 774 cal AD (1288 – 1176 cal BP) | -26.3 | acid/alkali/acid |
| 55643 | 489161 | ANN-W2-2 | organic sediment | 730 | 30 | 810 | 30 | 95.4% probability (95.4%) 1169 – 1270 cal AD (781 – 680 cal BP) | -20.3 | acid washes |
| 55742 | 490076 | ANN-N05-1 | organic sediment | 490 | 30 | 500 | 30 | 95.4% probability (94.7%) 1398 – 1449 cal AD (552 – 501 cal BP) (0.7%) 1333 – 1336 cal AD (617 – 614 cal BP) | -24.3 | acid washes |
| 55749 | 490181 | ANN-N16-1 | organic sediment | 2350 | 30 | 2380 | 30 | 95.4% probability (93.6%) 541 – 393 cal BC (2490 – 2342 cal BP) (1%) 704 – 695 cal BC (2653 – 2644 cal BP) (0.7%) 727 – 720 cal BC (2676 – 2669 cal BP) | -23.2 | acid washes |
| 55750 | 490182 | ANN-N20-1 | organic sediment | NA | *** | 2020 | 30 | 95.4% probability (95.4%) 107 cal BC – 58 cal AD (2056 – 1892 cal BP) | NA | acid washes |

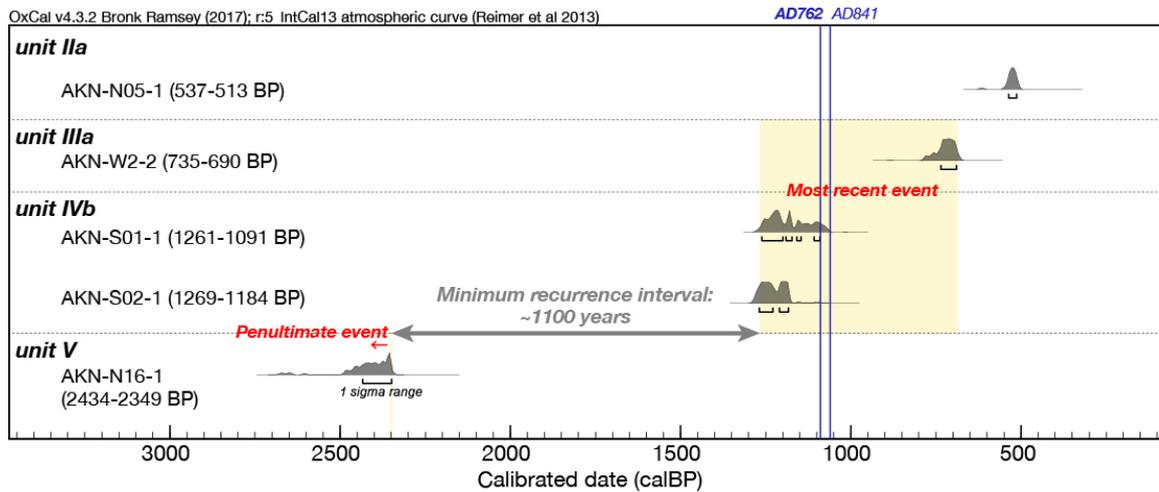


図 53 明科七貴トレンチにおける最近 2 回の活動の歴年代
年代測定結果は OxCal v. 4. 3. 2 (Ramsey, 2017) を基に暦年較正し、 1σ に対応
する確率分布を示した。較正曲線は IntCal13 (Reimer et al., 2013) を
使用した。

c) 明科七貴地区における S 波反射法地震探査

i) 探査測線

長野県安曇野市の明科七貴地点において実施した S 波反射法地震探査の詳細測線位置を図 54 に示す。本地点においては、トレンチ掘削調査地点の近傍で、かつ、推定される断層構造にできるだけ直交する長さ約 50m の測線を設定した。本測線はトレンチ調査地に隣接する南側の舗装道路上に設定しており、道路形状に沿って測線中央部分で折れ曲がる平面形態を呈する（図 54）。

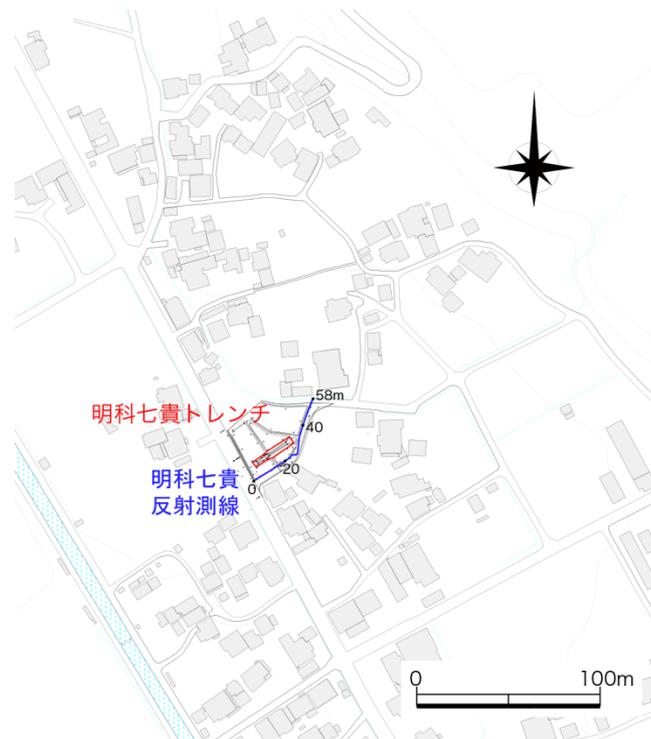


図 54 反射法地震探査測線配置図（明科七貴調査地点）

青色線が S 波反射法地震探査測線を示す。赤線はトレンチ掘削調査地点を示す。

安曇野市発行 1/2500 安曇野市基本図「No. 26」、「No. 36」を使用。

ii) 探査データの取得

本地点における探査データの取得についても一般的な共通中間点重合法による反射法地震探査（例えば、物理探査学会，2016）の現場データ取得作業に基づき、池田町会染地区における S 波反射法地震探査と同様にして行った。本地点で実施した探査の主なデータ取得仕様は表 1 に、本探査で使用した機材の仕様を表 2 に示す。

iii) 探査データの処理

取得した探査データに対して、一般的な共通中間点重合法（例えば、物理探査学会，2016）に基づいて、池田町会染地区における S 波反射法地震探査のデータ処理とほぼ同様の、各種

のデータ編集・フィルタ処理を施し、地質および構造解釈に資する探査結果断面を得た。これらの探査データ処理作業では池田町会染地区の探査データ処理と同様に、反射法探査解析システムSeisSpace ProMAX（Halliburton Energy Services社製）を用いて、図12に示す過程によって行った。

iv) 探査結果

データ処理によって得られた重合断面図を図 55 に、マイグレーション処理を施した時間断面図を図 56 に、マイグレーション処理を施した深度変換断面図を図 57 に示す。ここで、各種のデータ処理に適用したパラメータを表 5 に示す。

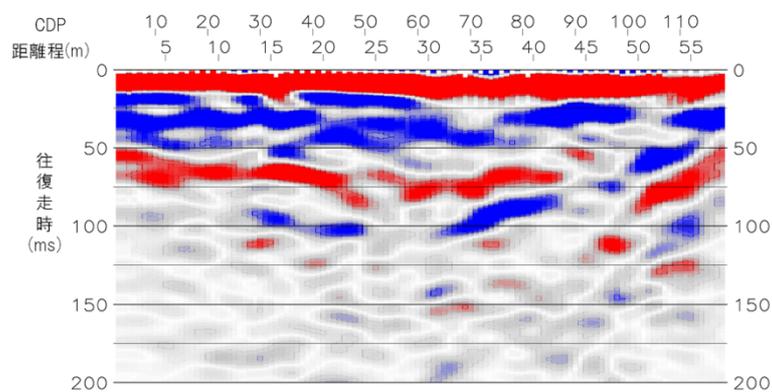


図 55 明科七貴測線の重合断面図

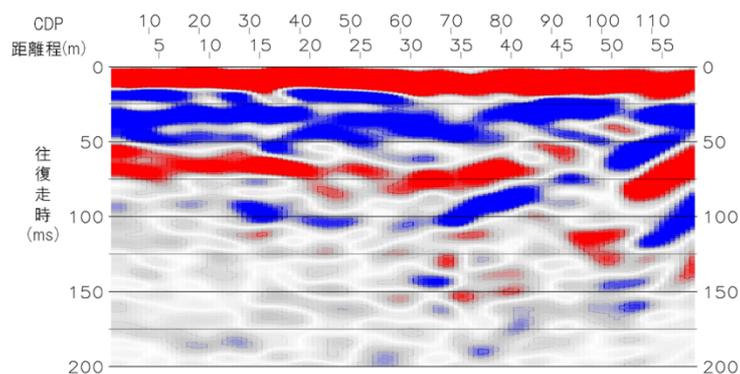


図 56 明科七貴測線のマイグレーション時間断面図

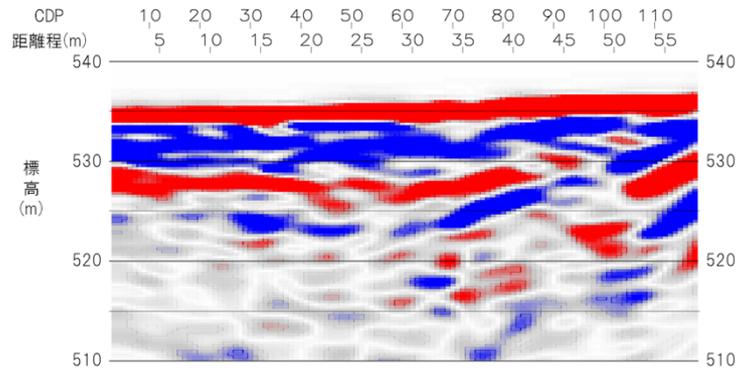


図 57 明科七貴測線のマイグレーション深度変換断面図

表 5 安曇野市明科七貴地区の反射法地震探査データの処理に適用したパラメータ表

| 安曇野市 明科七貴 | |
|---------------|--------------------|
| 測線名 | 明科七貴 |
| ジオメトリ情報 | |
| CDP間隔 | 0.5m |
| CDP範囲 | 3-118 |
| バンドパスフィルタ | |
| 周波数帯域 | 5/10-90/100 Hz |
| 振幅回復処理 | |
| 真振幅回復 | - |
| AGCゲート長 | 500ms |
| デコンボリューション | |
| アルゴリズム | Zero phase spiking |
| ゲート長 | 250ms(ゼロオフセット) |
| オペレータ長 | 10ms |
| デコン後BPF | 0/10-70/80 Hz |
| デコン後AGC | - |
| その他処理 | - |
| 速度解析 | |
| 間隔 | 10CDP |
| 残差静補正 | |
| アルゴリズム | - |
| 最大許容量 | - |
| CDP重合処理 | |
| NMO-ストレッチミュート | 100% |
| マイグレーション | |
| アルゴリズム | FK |
| 速度スケール | 70% |

5) 連動イベントの発生頻度と確率の試算

神城断層・木崎湖南方地点では予察的な変位履歴に基づけば、約1.2万年前以降に識別された活動回数が4回もしくは6回と現時点で確定的ではないものの、いずれのケースでも地震時上下変位量が3 m程度の活動が2回認められ、これらを連動型地震とみなすことができる。したがって、神城断層における連動型地震の平均再来間隔は5400年程度と見積もられる。仮に、これらの連動イベントがポアソン過程に従うとした場合、神城断層全体と松本盆地東縁断層北部との連動確率は、30年で0.6%と試算される。ただし、現時点での変位履歴からみて、当該地点の神城断層では連動型地震と非連動型地震が時間的なクラスタリング(集中期)を生じつつ、バイモーダルとなっている(頻度分布に2つのピークがある)可能性もあり、これらを考慮した発生確率の評価方法も考案していく必要がある。

松本盆地東縁断層北部を含む連動イベントについて、現時点で中南部区間にデータの制約があるため、詳細な連動範囲については現段階では言及できない。しかし、北隣の神城断層との連動イベントについては、従来から最新活動に対応するとされた西暦762年の歴史地震に伴い、少なくとも北部区間全体が連動した可能性を指摘することができる。これは、従来から推定されていた最新活動時期が重なるという指標だけではなく、1) 上記の神城断層南端付近の木崎湖南方において3 m程度の地震時上下変位量が確認されたこと、2) 池田町会染地区においても最新活動に伴い1.7 m程度の地震時上下変位量が生じた可能性があることによる。

さらに、連動範囲は特定できないが、松本盆地東縁断層北部を含む連動イベントの発生頻度については、現時点で次のように推定可能である。既述のように、松本盆地東縁断層北部では過去約1000年前から約8300年前までに3回の活動が生じ、いずれも少なくとも50 kmの断層区間が活動した連動型の地震イベントの可能性が指摘された。この場合、松本盆地東縁断層北部を含む連動型地震の平均再来間隔は2400年程度と見積もられる。仮に、これらの連動イベントがポアソン過程に従うとした場合、松本盆地東縁断層北部の連動確率は、30年で1.2%と試算される。

(c) 結論ならびに今後の課題

北部区間を構成する神城断層のうち2014年長野県北部の地震では活動しなかった中綱湖周辺において平均変位速度を高精度に推定するため、断層の低下側でボーリング調査を実施した。その結果、約1.3万年以降の湖沼堆積物を切断する複数の断層をコアに認め、上下平均変位速度の最小値が1.1 mm/yrであることを明らかにした。今後、断層の隆起側でもボーリング調査を実施し、より正確な累積上下変位量と年代に基づく平均変位速度を明らかにする必要がある。

また、神城断層の南端付近に位置する、木崎湖南方地点における既往のジオスライサー・ボーリング調査結果を再検討した。その結果、湖沼性堆積層の撓曲変形だけでなく東傾斜20~30°の逆断層を認定し、約1.2万年前以降に4回もしくは6回の地震イベントを識別した。平均的な上下変位速度は0.9~1.3 mm/yrと求められる。いずれのイベント回数のケースでも地震時上下変位量が3 m程度の活動が2回認められ、変位量と地震断層長のスケーリング則から判断して、これらは少なくとも神城断層全体と松本盆地東縁断層北部の連動型地震と判

断できる。その平均再来間隔は5400年程度であり、ポアソン過程では同断層の連動確率は30年で0.6%と試算した。

松本盆地東縁断層北部の池田町会染地区において、S波反射法地震探査及びボーリング調査を実施し、断層の変位・変形構造を詳細に明らかにした。その結果と既存の活動時期等を総合して、同地区では過去約1000年前から約8300年前までに3回の活動が生じ、それぞれ5.0mの地震時変位量を伴っていたと推定した。これらは50km程度の地震断層長に相当し、松本盆地東縁断層北部が単独で活動したとは考えられないため、いずれのイベントも周辺の断層と連動したものと判断した。この場合、連動イベントの平均再来間隔は2400年程度であることから、ポアソン過程の場合、同断層の連動確率は30年で1.2%と試算した。今後、各イベントの正確な変位履歴や長期間の挙動を明らかにする必要がある。

松本盆地東縁断層北部の明科七貴地区でトレンチ調査を実施し、高瀬川の本流性砂礫層を切断する高角東傾斜の断層をみいだした。最新活動は7～13世紀に生じ、1.2mの上下変位を伴う。さらに先行する活動は約2400年前以前に限定され、最近2回の活動間隔は最短で1100年と算出される。今後、横ずれ成分の有無等を検討し、より正確な地震時変位量を復元して、中北部区間との連動性を検討する必要がある。

以上の連動確率の試算は変位履歴の信頼性に大きく依存することから、当該地点の補足調査を実施して、地震時変位量とイベントの認定をさらに精緻に復元する必要がある。さらに、神城断層の木崎湖南方地点では現時点での変位履歴から判断して、時間的クラスタリングや連動型地震と非連動型地震がバイモーダルで生じている可能性もあり、それを考慮した発生確率の評価方法も考案していく必要がある。

謝辞：野外調査の実施にあたり長野県危機管理防災課、大町市消防防災課、池田町総務課、安曇野市危機管理課の各位にご協力を頂きました。掘削調査地の地権者及び耕作者の方々には、調査の趣旨をご理解頂き、土地の使用と掘削にご快諾頂きました。明科七貴トレンチでは、法政大学・杉戸信彦氏、信州大学・原山 智氏、大塚 勉氏、小坂共栄氏、株式会社ダイヤコンサルタント・高瀬信一氏に壁面の解釈について有益な議論を頂きました。野外調査は応用地質株式会社に協力頂きました。以上の皆様に記して御礼申し上げます。

(d) 引用文献

- 物理探査学会, 物理探査ハンドブック 増補改訂版, 公益社団法人 物理探査学会, 東京, 1045p, 2016.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「糸魚川-静岡構造線断層帯の長期評価(第二版)」, 60p, 2015.
- 木村治夫・中西利典・丸山 正・安藤亮輔・堀川晴央, 糸魚川-静岡構造線活断層系神城断層における地中レーダー探査, 活断層研究, 38, 1-16, 2013.
- Kondo, H., S. Toda, K. Okumura, K. Takada, T. Chiba, A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: a case study on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan, *Geomorphology*, 101, 731-739, 2008.
- 近藤久雄・谷口薫, 糸魚川-静岡構造線活断層系中部の諏訪湖周辺における古地震調査. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 66, 147-158, 2014.
- 丸山 正・遠田晋次・奥村晃史・三浦大助・佐々木俊法・原口 強・都司嘉宣, より詳しい地震活動履歴解明のための地震学および史料地震学的研究, 糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測平成 17-21 年度成果報告書, 文部科学省開発局・国土交通省国土地理院・国立大学法人東京大学地震研究所, 230-254, 2010.
- 松田時彦・山崎晴雄・中田 高・今泉俊文, 1896 年陸羽地震の地震断層, 東京大学地震研究所彙報, 55, 795-855, 1980.
- 奥村晃史・井村隆介・今泉俊文・東郷正美・澤祥・水野清秀・苅谷愛彦・斉藤英二, 糸魚川-静岡構造線活断層系北部の最近の断層活動-神城断層・松本盆地東縁断層トレンチ発掘 調査. 地震 第 2 輯, 50, 35-51, 1998.
- 奥村晃史・近藤久雄・遠田晋次・高田圭太・木下博久, 糸魚川-静岡構造線断層系神城断層南端, 木崎地区における古地震調査, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, S141-004, 2007.
- Ramsey, B. C., Methods for Summarizing Radiocarbon Datasets. *Radiocarbon*, 59(2), 1809-1833, 2017.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatt, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., 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., IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 2013.
- 遠田晋次・奥村晃史・三浦大助・佐々木俊法・原口 強・都司嘉宣, より詳しい地震活動履歴解明のための地震学および資料地震学的研究. 糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測平成 20 年度成果報告書, 糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測, 文部科学省研究開発局, 国土交通省国土地理院, 国立大学法人東京大学地震研究所, 84-95, 2008.
- 東郷正美・池田安隆・今泉俊文・澤 祥・松多信尚, 1:25,000 都市圏活断層図「信濃池田」,

国土地理院技術資料 D. 1-No. 368, 1999.

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, 東京, 694p.