

浦底一柳ヶ瀬山断層帯の形状・規模と過去の活動に関する検討

Examination on geometry, size and rupturing history of the Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone

杉山雄一¹・坂本 泉²・滝野義幸²・宇佐見琢哉³・岸本弘樹⁴・永田高弘⁴

Yuichi Sugiyama¹, Izumi Sakamoto², Yoshiyuki Takino², Takuya Usami³,
Hiroki Kishimoto⁴ and Takahiro Nagata⁴

¹ 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, sugiyama-y@aist.go.jp)

² 東海大学海洋学部 (School of Marine Science and Technology, Tokai University)

³ 総合地質調査株式会社 (Sogo Geophysical Exploration Co., Ltd.)

⁴ 株式会社ダイヤコンサルタント (Dia Consultants Co., Ltd.)

Abstract: We examined geometry, size and rupturing history of the Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone in and around Tsuruga Bay, Fukui Prefecture, based on the existing data inclusive of our own high-resolution sonic and coring survey results. The examination has verified that the fault zone consists of 5 geometrical fault segments, as proposed by Japan Atomic Power Company in 2008, including the 12-km-long Urazoko segment in Tsuruga Bay and a 16-km-long onshore segment to the east of Tsuruga City. We have newly identified the northward extensions of the fault zone, and the result leads to modification of the fault-zone length from previously evaluated 25 km to 35 or 32 km. The average vertical slip rate of the fault zone is estimated to be 0.45 m/ky based on the 12.7-m vertical offset of 28-ka AT tephra. Our examination also concluded that two rupturing events occurred on the fault zone after the fall of 7.3-ka K-Ah tephra and no event took place in the period between 10 ka and 7.3 ka. The average recurrence interval and vertical displacement per event of the fault zone are estimated at 5000 years and 2.2 m, respectively. An excavation survey of the Urazoko fault by Japan Atomic Power Company in 2006 suggests that the latest faulting event occurred 4500 years ago or later. There is a possibility that the fault zone underwent multi-fault ruptures involving the southern part of the Yanagase Fault and the Kajiya Fault to the north of Lake Biwa.

キーワード: 浦底一柳ヶ瀬山断層帯, 浦底断層, 敦賀湾, 活断層, セグメント, 変位量

Keywords: Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone, Urazoko Fault, Tsuruga Bay, active fault, fault segment, fault displacement

1. はじめに

著者らは、本研究報告の別稿(杉山ほか, 2012)において、浦底一柳ヶ瀬山断層帯(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2004; 第1図)の浦底断層を対象として実施した採泥調査結果について報告した。その中で指摘したように、2004年1月の地震調査研究推進本部地震調査委員会(以下、地震調査委員会と呼ぶ)による本断層帯の長期評価公表時には、同断層帯の平均変位速度、過去の活動時期、1回のずれの量(単位変位量)、平均活動間隔などの過去の活動に関するデータは得られていなかった。

一方、日本原子力発電株式会社(以下、日本原子力発電と呼ぶ)は、敦賀発電所原子炉設置許可申請(3号炉及び4号炉の増設)のため、本断層帯の詳細な調査を行っている(日本原子力発電, 2004)。2005年2月には、原子力安全・保安院より日本原子力発

電に対して、同発電所周辺の活断層の追加調査が指示され、2006年9月には、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改定された。これを受けて、日本原子力発電は、海・陸にわたる詳細な追加調査を実施している(日本原子力発電, 2008a, 2010a; 第2図)。また、原子力安全・保安院(2009a, b)は、電力事業者による調査結果のチェックを目的として、敦賀湾内と若狭湾東部の音波探査を実施している。更に、岡田(2009)は地域地盤環境研究所(2000)の成果を再検討し、池見断層の存在を提唱している。また、吉岡ほか(2011)は柳ヶ瀬断層を挟んで本断層帯の南東方に分布する鍛冶屋断層のトレンチ調査を行い、完新世における活動を報告している。

本稿では、浦底一柳ヶ瀬山断層帯の長期評価の改訂に資するため、2004年の同断層帯の長期評価には取り入れられていない最近の調査・研究結果を加えて、同断層帯の形状・規模と過去の活動について検討

する。なお、本稿の内容は、文部科学省の平成 23 年度「沿岸海域における活断層調査」のうち、「柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯／浦底－柳ヶ瀬山断層帯（海域部）」の結果の一部である。

本調査に際して、日本原子力発電から貸与を受けた資料、並びに原子力安全基盤機構から開示を受けた資料については、5. まとめの後にリストを示した。

2. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の形状・規模の検討

本章では、浦底－柳ヶ瀬山断層帯を構成する断層（セグメント）、各セグメントのトレース、変位の向き、位置関係、並びに断層帯の端点と全長について検討する。

2.1 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の構成断層、トレース、変位の向き

日本原子力発電（2008a）は、地震調査委員会（2004）の浦底－柳ヶ瀬山断層帯に対応する断層を、北西側から浦底セグメント（長さ約 10 km）、田結・内池見セグメント（長さ約 10 km）、ウツロギ峠北方セグメント（長さ約 11 km）、ウツロギ峠・池河内セグメント（約 13 km）に区分している。また、浦底セグメントと田結・内池見セグメントを合わせたものを浦底－内池見断層（長さ約 18 km）、ウツロギ峠北方セグメントとウツロギ峠・池河内セグメント（約 13 km）を合わせたものをウツロギ峠北方－池河内断層（長さ約 23 km）と呼んでいる。これらのセグメントは、断層の幾何学的形状に着目して区分された「形状セグメント」に対応する。

本稿では、上述の日本原子力発電（2008a）による形状セグメント区分を踏襲するが、ウツロギ峠・池河内セグメントについては、本節の（4）及び次章の 3.6（5）で述べる検討結果に基づき、これに柳ヶ瀬山断層を加え、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントと呼ぶ。また、（5）で述べるように、南越前町大谷沖～甲楽城沖に分布する一連の断層を甲楽城沖セグメントと呼ぶ（第 3 図）。これらのセグメント・断層は全体として、北西－南東の方向に配列する。但し、ウツロギ峠北方セグメントと田結・内池見セグメントは、より南北に近い走向を有する。

（1）浦底セグメント

浦底セグメントには、立石岬の北西側若狭湾内の F-21 断層、F-23・24 断層、敦賀半島北端部の陸上断層（浦底断層）及び敦賀湾内の F-39・40 断層などが含まれる。長さは約 14 km である。従来、白木－丹生断層（第 2, 3 図）の北方延長の一部と考えられてきた F-21 断層を本セグメントの構成要素とした根拠については、2.2 で述べる。

これらの断層は、全体として、北西－南東の走向を持ち、北東側が相対的に隆起している。浦底断層に沿っては、小河谷の系統的な左屈曲（屈曲量 10～

20 m 程度）が認められ、F-39・40 断層の沈降側（南西側）には、横ずれ成分の存在を示唆するグラーパーン状の構造が伴われる。また、北部の F-21 断層の中～南部は、グラーパーン状ないし V 字状の撓み下がり構造で特徴付けられ、横ずれ成分が卓越することが示唆される。

（2）田結・内池見セグメント

田結・内池見セグメントには、敦賀市色浜沖で F-39・40 断層から南方へ Y 字状に分岐する F-41 断層、同様に敦賀市手沖で F-39・40 断層から南方へ Y 字状に分岐する F-N6 断層及び F-44 断層とその南側の F-44b 断層など、並びに敦賀湾南岸陸域の田結リニアメント及び内池見リニアメント（岡田・東郷編、2000）が含まれる。なお、岡田（2009）は、内池見リニアメントを池見断層と呼んでいる。

これらの断層・リニアメントは南北から北北西－南南東の走向を持ち、東側隆起を示す。また、これらの断層・リニアメントは左雁行状に配列し、長さは約 10 km である。

（3）ウツロギ峠北方セグメント

ウツロギ峠北方セグメントは、敦賀市杉津西方の岡崎の沖合を北北西－南南東方向に延びる F-32・45 断層から構成される。F-32・45 断層は西側隆起を示し、海上保安庁水路部（1980）の堆積層基底図や堆積層等層厚線図上でも、明瞭な東下がり構造として南北ないし北北西に追跡される。本セグメントの長さは約 11 km である。

（4）ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント

日本原子力発電（2008a）のウツロギ峠・池河内セグメントは、地震調査委員会（2004）のウツロギ峠（断層）と池河内断層を合わせたものに概ね対応し、同委員会の柳ヶ瀬山断層については、その北端部を除いて、後期更新世以降の活動はないとして、同セグメントに含めていない。しかし、柳ヶ瀬山断層については、3.6（5）で述べるように、その中～南部についても、粘土状の破碎物質を伴う断層が複数地点で確認され、これらが活断層であることを明確に否定できるデータは得られていない。

ウツロギ峠、池河内、柳ヶ瀬山の各断層は、北部は北西－南東の走向をもち、南部は南北に近い走向となる。但し、柳ヶ瀬山断層の南端部は北西－南東走向であるため、全体として、逆 S 字状の屈曲を三つ連ねた形のトレースを示す（第 3 図）。柳ヶ瀬山断層を含めた本セグメントの長さは約 16 km である。

ウツロギ峠断層と池河内断層は北西－南東方向に連なり、断層と交わる小河谷及び尾根には、系統的な左屈曲が認められる。また、地形的には南西側の相対的隆起が推定されるところが多いが、北東側の相対的隆起を示す活断層露頭が報告されている（日本原子力発電、2010a など）。柳ヶ瀬山断層については、地形的には北東側の相対的隆起が推定されるが、北端部では南西側の相対的隆起を示す断層露頭や AT

降下層準の南西側上がりの変位を示すボーリング調査結果が報告されている(同上)。また、同断層中～南部で確認された粘土状破碎物質を伴う断層面は、鉛直ないし北東へ急傾斜する。柳ヶ瀬山断層については、横ずれを示唆する明瞭な地形学的証拠は認められない。

(5) 甲楽城沖セグメント

日本原子力発電(2010a)の断層分布データによると、上記のセグメント・断層の他に、ウツロギ峠北方セグメント(F-32・45断層)の西約2～3 km、浦底セグメント北部(F-23・24断層)の東約3～4 kmには、F-28断層(南越前町大谷沖：北北西－南南東走向)が存在する。また、この断層から約2 kmの間隔を置いて、その北西にはF-19断層(南越前町甲楽城沖：北西－南東走向)が分布し、その北西側には、F-17・18断層が左雁行配列する(第3図)。松田(1990)の起震断層の基準に基づくと、これらの断層は浦底一柳ヶ瀬山断層帯の一部と見なすことができ、同時に、越前海岸沿いに分布する甲楽城断層を主構成要素とする起震断層の一部と見なすこともできる。これら3断層は、断層に伴う変形ゾーンと図示された断層端の不確実性(断層の証拠が認定された測線と認定されなかった測線の間地点が断層端として図示されている)を考慮すると、2 kmに満たない距離を置いて分布している可能性がある。このため、本稿では、これら3断層を1つの形状セグメントと見なし、甲楽城沖セグメントと呼ぶ(第3図)。本セグメントの長さは約11 kmである。

日本原子力発電(2010a)及び原子力安全・保安院(2009b)の資料によると、甲楽城沖セグメントを構成する3断層はいずれも北東～東側の相対的隆起を示す。原子力安全・保安院(2009b)によるF-17・18断層を横切る音波探査断面(JNT-13測線のブーマー探査及びウォーターガン探査の結果)では、断層の東側(隆起側)に背斜状の変形が認められ、これらの断層が北東傾斜の逆断層の要素を有することが示唆される(第4図)。

日本原子力発電(2010a)は、本セグメントを構成するF-28断層、F-19断層、F-17・18断層の活動は、後期更新世に及ぶとしている。日本原子力発電ほか(2012)のF-19断層とF-28断層をそれぞれ横切る音波探査断面でも、上部更新統に明瞭な変位・変形が認められる(第5,6図)。

(6) 各セグメントの関係

以上の5つの形状セグメントの相互の関係をみると、北西－南東に延びる横ずれ断層の性格が強い浦底セグメント及びウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントに対して、ウツロギ峠北方セグメントと田結・内池見セグメントは、より南北に近い走向をもち、音波探査結果(日本原子力発電, 2010a)やボーリング調査結果(岡田, 2009など)から、逆断層的な性格が示唆される。浦底セグメントとウツロギ峠北方

セグメントに挟まれた地域、及びウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントと田結・内池見セグメント、に挟まれた地域は隆起域となっている。逆断層的な性格を持つ甲楽城沖セグメントは、この相対的隆起域の北部から北西に延びており、越前海岸沿いに存在する甲楽城断層の前縁断層としての性格を併せ持っている。

2.2 浦底一柳ヶ瀬山断層帯の北西端・南東端と断層帯全体の長さ

日本原子力発電(2010a)は、浦底セグメント(F-23・24断層)の北西端を立石岬の北西約2.9 kmとしている(第3図)。しかし、日本原子力発電ほか(2012)の音波探査断面を検討すると、F-23・24断層の北西延長は、JNT-06BM測線の測位点1250付近、NEGM 8測線の測位点10～11間、NEGM 7測線の5～6間、NEGM 6測線の測位点5付近まで追跡され、NEGM 5測線では認められなくなる。更に、F-23・24断層の東側約350～700 mには、上部更新統までを変位・変形させている別の断層が右雁行配列する。この断層は、NEGM 9測線の測位点10～11間から、JNT-06BM測線の測位点850付近、NEGM 8測線の測位点8付近(第7図)、NEGM 7測線の測位点8付近、NEGM 6測線の測位点8付近(第8図)、NEGM 5測線の測位点8付近、及びNEGM 4測線の測位点7～8間を通過して、NXGM 1-2のF-21断層に連続する。

F-21断層は、従来、白木一丹生断層の北方延長とされているが、断層の連続からは浦底セグメントの延長と考えられる。この断層は、NEGM 6以南の測線ではグラーベン状～V字状の撓み下がり構造で特徴づけられ(第7, 8図)、殆ど純粋な横ずれ断層であることが示唆される。NEGM 5測線以北では、東上りの上下変位が明瞭に認められるようになる。

以上から、浦底セグメントの北西端を本断層帯の北西端と見なす場合には、F-21断層と日本原子力発電(2010a)のNEGM 1測線との交点(北緯35°49', 東経135°59': 立石岬の北北西(N27°W)約7 km)を浦底一柳ヶ瀬山断層帯の北西端とする(第3図)。

また、前節で述べたように、甲楽城沖セグメントを浦底一柳ヶ瀬山断層帯に含めた場合には、同断層帯の北西端はF-17・18断層の北西端となる。日本原子力発電ほか(2012)によると、F-17・18断層による上部更新統の変位・変形は、B-1以南の測線で認められ、No. 20測線以北では認められない。このため、甲楽城沖セグメントを浦底一柳ヶ瀬山断層帯に含めた場合には、F-17・18断層のトレースとNo. 20測線との交点(北緯35°51', 東経135°58': 干飯崎の南南西(S30°W)約4 km)を同断層帯の北西端とする(第3図)。

日本原子力発電(2008a)の調査結果によれば、椿坂峠の南方約2 km(敦賀市杉箸と長浜市余呉町椿坂

間)が浦底-柳ヶ瀬山断層帯の南東端となる(第3図)。しかし、2.1で述べたように、柳ヶ瀬山断層の中~南部が活断層であることを明確に否定する証拠はない。従って、本稿では、地震調査委員会(2004)と同様に、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の南東端を長浜市余呉町柳ヶ瀬西方の北緯35°35'、東経136°11'(柳ヶ瀬山の南東約1km)とする(第3図)。本稿の浦底-柳ヶ瀬山断層帯の南東端と日本原子力発電(2010a)の同断層帯南東端は、いずれも、柳ヶ瀬断層のトレースから1km未満の距離にある。

浦底-柳ヶ瀬山断層帯の長さは、その北西端を甲楽城沖セグメントの北西端とした場合には約35kmとなる。また、浦底セグメントの北西端とした場合には約32kmである。

3. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の活動履歴と活動性の検討

本章では、2011年に実施した高分解能音波探査、採泥調査、地形地質調査の結果(産総研・東海大学、2012)と、日本原子力発電の既存調査データの検討結果に基づき、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の活動履歴と活動性について考察する。

ここでは、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の活動履歴と活動性に関する重要な情報が得られている敦賀半島~若狭湾内の5地点・地域について、北西側から順に記述する。その後、敦賀湾東岸・南岸地域で得られている本断層帯の活動履歴と活動性に関する既往データについて概説する。

3.1 敦賀発電所敷地近傍の浦底断層(トレンチ調査地点)

日本原子力発電は、敦賀発電所の敷地近傍(日本原子力研究開発機構原子炉廃止措置研究開発センター敷地内)において、浦底断層のトレンチ調査を実施している(第9図)。

(1) 南側トレンチ壁面のスケッチに基づく断層活動

南側のトレンチ壁面では、アプライトを主とする基盤岩が浦底断層によって、下部にAT火山灰層を挟む砂礫層(B層)に衝上するのが確認された(第10図)。AT降下層準の見かけの上下変位量は9m以上に達する。

浦底断層に確実に切られるB層からは12600-70 yBP及び8400-50 yBPの $\delta^{13}\text{C}$ 補正年代が得られており、本地点の浦底断層は確実に完新世に活動している。B層の上部にはK-Ah火山灰の降下層準が確認され、同層最上部からは、3960-50 yBP、4020-40 yBPの ^{14}C 年代($\delta^{13}\text{C}$ 補正済み)が得られている。K-Ah降下層準及び上記炭素同位体年代が得られているB層最上部の層準と浦底断層との直接的な関係は不明であるが、上述の浦底断層に確実に切られているB層と一続きの構造をなしているようにも見える。

このように考えた場合には、日本原子力発電(2008b)の指摘のように、本地点の浦底断層の最新活動は、上記2つの年代値の暦年代(4518~4299 cal yBP及び4525~4435 cal yBP:いずれも 1σ の値)より、約4500年前頃以降となる。一方、K-Ah降下層準と上記炭素同位体年代が得られているB層最上部は、現在の斜面を形成するA層とほぼ平行であり、浦底断層の最新活動後に斜面に堆積した可能性もある。

(2) 北側トレンチ壁面のスケッチに基づく断層活動

日本原子力発電貸与資料5による北側壁面(現在は観察できない)のスケッチによると、浦底断層は明らかにK-Ah降下層準を切っている(第11図)。浦底断層によるK-Ah降下層準の上下変位量は2.2m以上、断層面に沿う縦ずれ変位量は2.6m以上と計測される。また、第11図のスケッチには、K-Ahを含む砂層を覆う砂礫層を切る分岐断層が認められ、そのうちの一つの先端は主断層(太い線で示された断層)に切られるように描かれている。これは、K-Ah降下以降、少なくとも2回の断層活動があった可能性を示唆する。

(3) 南側トレンチ壁面の観察に基づく断層活動

著者らは、2011年10月に、南側壁面のトレンチ壁面に露出する浦底断層の観察を行い、B層上部を切る浦底断層は、新・旧2条の断層面からなることを確認した(第12図)。この観察結果は、浦底断層が完新世に少なくとも2回の活動を行ったことを示す。

(4) 断層条線の計測に基づく縦ずれ・横ずれ比とP軸の方位

日本原子力発電貸与資料5は、南側のトレンチ壁面に露出した浦底断層について、断層面の走向・傾斜、断層面上の条線(スリッケンライン)の方位とプランジ、条線のレイク(すべり角)を、それぞれ独立に計測している(第13図の左上表)。この表によると、計測された条線のレイクの平均は 16° であり、横ずれ成分が卓越する(横ずれが縦ずれの約3.5倍)。但し、全22のデータセットのうち、条線のレイクがプランジより小さいケース(実際にはレイクがプランジより小さくなることはない)が17あり、計測にかなりの誤差を伴うと判断される。断層面及び条線の計測では、条線のレイクの計測において誤差が最も大きくなると判断される。

そこで、断層の傾斜と条線のプランジから、計算によってレイクを求めた。得られたレイクの平均は 27° となり、横ずれは縦ずれの約2倍となる(第13図)。また、最大主圧縮応力軸(P軸)は断層面と 45° の角度をなし、且つ条線は断層面上へのP軸の正射影に平行に形成されると仮定して、断層面の走向・傾斜と計算によって求めた条線のレイクから、P軸の方位とプランジを求めた。求められたP軸の方位は平均 $\text{N}106^\circ\text{E}$ 、プランジは平均西傾斜 2° となった(第13図の右下図)。この結果は、東西から東南東-西

北西方向のほぼ水平な圧縮応力場において、左斜めずれの条線の形成を伴う断層運動が生じた可能性を示唆する。

(5) 小括

敦賀発電所敷地近傍の浦底断層（トレンチ調査地点）の検討結果は、以下のようにまとめられる。

- ・浦底断層の最新活動は K-Ah 降下以降であり、約 4500 cal yBP 以降の可能性が高い。
- ・本断層は完新世に少なくとも 2 回の活動を行っている判断され、これら 2 回の活動は K-Ah 降下以降の可能性はある。
- ・K-Ah 降下層準の上下変位量は 2.2 m 以上、縦ずれ変位量は 2.6 m 以上である。
- ・AT 降下層準の見かけの上下変位量は 9 m 以上であり、AT 降下（約 28000 cal yBP）以降の浦底断層の見かけの平均上下変位速度は、0.3 m / 千年以上である。
- ・浦底断層では左横ずれ変位が卓越し、縦ずれ変位の 2 倍程度に達した可能性がある。

3.2 浦底湾の F-39b 断層及び F-39・40 断層

(1) ボーリング調査地点からの K-Ah 降下層準の追跡

明神崎南方の浦底湾内には、日本原子力発電が実施した音波探査によって、F-39b 断層と呼ばれる分岐断層が確認されている（第 14 図）。F-39b 断層が確認される NFWSX3-2 測線は、後述するボーリング調査地点を通過する NFWS7 測線と交差する（第 14 図）。このため、ボーリング調査地点の K-Ah 降下層準を F-39b 断層の位置まで追跡することができる（第 15 図）。NFWSX3-2 測線の反射断面では、上位より、 α 、 β 、 γ 、 δ の 4 つの顕著な反射面が認められる。このうち、反射面 γ が概ね K-Ah 降下層準に対応し、反射面 δ は沖積層の基底に当たると推定される（第 15 図）。

(2) F-39b 断層の活動層準の認定と上下変位量

F-39b 断層による β 、 γ 、 δ の 3 つの反射面の上下変位量はいずれも約 1.8 m と見積もられ、3 反射面間に変位・変形の累積は認められない（第 16 図）。一方、反射面 α も F-39b 断層による上下変位を被っているが、その上下変位量は β 以下の反射面のほぼ半分（0.9 m 程度）である。また、反射面 α と反射面 β に挟まれる地層の厚さは、沈降側（北西側）で厚くなっており、この部分に反射面 β が認められる。反射面 β は、断層活動によって生じた沈降部を埋積したイベント堆積物と考えられる。以上より、F-39b 断層は K-Ah 降下以降に 2 回（反射面 β の形成直前と反射面 α の形成後に）活動し、それぞれの活動に伴う上下変位量は 0.9 m 程度であったと推定される。

(3) F-39・40 断層の上下変位量

日本原子力発電は、NFWSX3-2 測線にほぼ直交し、浦底湾を北東—南西方向に横断する音波探査を

実施している（第 14 図）。第 17 図に示す U-3.5 測線と NFWB5 測線の断面では、北東側隆起の撓曲状を呈する F-39b 断層が明瞭にイメージされており、NFWB5 測線の断面では、その背後の半島状の高まりと浦底湾底との地形境界に F-39・40 断層（主断層）の存在が推定される。2011 年の高分解能音波探査（東海大学、2012）でも、L-1 測線（U-3.5 測線とほぼ同じ位置）において、F-39b 断層の撓曲状変形が捉えられたが、F-39・40 断層の存在が想定される部分については反射波データが得られていない（第 18 図）。

F-39・40 断層の上下変位量に関する確定的なデータはないが、第 17 図に示すような基盤岩上面の解釈を行った場合、F-39・40 断層による上下変位量は、F-39b 断層の上下変位量の 1.5 倍程度と見積もられる。このように考えた場合、F-39・40 断層と F-39b 断層の変位量を足し合わせた浦底断層全体の K-Ah 降下層準の上下変位量は 4.5 m 程度となる。

(4) 小括

浦底湾の F-39b 断層と F-39・40 断層の検討結果は以下のようにまとめられる。

- ・F-39b 断層は、K-Ah 降下以降に 2 回活動している。
- ・F-39b 断層の 1 回の活動に伴う上下変位量は約 0.9 m、K-Ah 降下層準の累積上下変位量は約 1.8 m（活動 2 回分）である。
- ・F-39b 断層近傍の F-39・40 断層は、F-39b 断層の 1.5 倍程度の上下変位量をもつ可能性がある。
- ・このように考えた場合、F-39・40 断層と F-39b 断層からなる浦底断層全体の K-Ah 降下層準の累積上下変位量は 4.5 m 程度と推定される。

3.3 敦賀市色浜沖の F-39・40 断層（ボーリング調査地点）

(1) K-Ah 降下層準、AT 降下層準、沖積層基底の高度差と上下変位量

敦賀市色浜沖の F-39・40 断層（ここでは断層は 1 条のみ）については、日本原子力発電によって、断層の隆起側で深度 65 m、沈降側で深度 90 m のボーリングが掘削されている（第 19、20 図）。ボーリング調査の結果（第 20 図）から、K-Ah 降下層準に 4.4 m、AT 降下層準に 12.7 m の高度差があることが明らかにされている。

ボーリング柱状図（第 20 図）によると、両火山灰が挟まれる層準及びその上下の層準の層相は、2 つの掘削地点間で良く類似している。また、ボーリング掘削地点を横断する音波探査（NFGM7-2 測線等）の結果（第 21 図）にも、両火山灰の降下時期に、掘削地点間に大きな環境の違いが存在したことを示す証拠は認められない。更に、海成沖積層の基底及び K-Ah 降下層準に対応する反射面の高度分布から、F-39・40 断層による変位・変形は、ほぼ完全に 2 つのボーリング孔間に収まっていると判断される。従って、これらのテフラ降下層準の高度差は、F-39・40

断層による両者の累積上下変位量にほぼ対応すると考えられる。

また、ボーリング調査結果から、海成沖積層の基底から K-Ah 降下層準までの厚さは隆起側で 7.1 m、沈降側で 7.9 m と求められており、両側で 0.8 m の違いしかない。従って、海成沖積層の堆積開始以降 (^{14}C 年代データから、少なくとも約 10600~10800 cal yBP 以降)、K-Ah 降下 (約 7300 cal yBP) までの期間には、顕著な上下変位を伴う断層活動はなかったと推定される。

(2) 平均上下変位速度

AT 降下層準 (約 28000 cal yBP) を基準として、本地点の浦底断層の平均上下変位速度を求めると、0.45 m / 千年となる。一方、K-Ah 降下層準 (約 7300 cal yBP) を基準として平均上下変位速度を求めると、0.60 m / 千年となる。しかし、上述のように、約 10600~10800 cal yBP 以降、K-Ah 降下期までは断層活動がなかったと考えると、過去 1 万年間の平均上下変位速度は 0.44 m / 千年となり、AT 降下層準を基準とする平均変位速度と同等となる。

(3) 小括

敦賀市色浜沖の F-39・40 断層 (ボーリング調査地点) の検討結果は以下のようにまとめられる。

- ・ K-Ah 降下層準と AT 降下層準の累積上下変位量は、それぞれ 4.4 m、12.7 m である。
- ・ 約 1 万年前の海成沖積層の堆積開始以降、K-Ah の降下までの期間には、顕著な上下変位を伴う断層活動はなかったと推定される。
- ・ AT 降下以降の本地点における浦底断層の平均上下変位速度は 0.45 m / 千年である。

3.4 敦賀市手沖の F-39・40 断層と F-41 断層

敦賀市手沖の F-39・40 断層と F-41 断層は 2011 年の高分解能音波探査の調査対象であり、前者は採泥調査の対象断層でもある (産総研・東海大学, 2012)。日本原子力発電も、ソノプローブ等を音源として、両断層を横断する音波探査を実施している (第 22 図)。

(1) 既存音波探査断面上での K-Ah 降下層準の追跡

本研究報告中の別稿 (杉山ほか, 2012) で述べたように、採泥調査では、隆起側の UA-5 コアと沈降側の DA-7 コア間で、対比基準面 1 (a 層 / b 層境界) に 1.9 m の高度差が認められ、隆起側では残っていない K-Ah 降下層準の分布高度の見積もりから、K-Ah 降下層準には本来、約 2.1 m の高度差があったと推定される。しかし、高分解能音波探査の結果では、採泥調査地点付近の K-Ah 降下層準には明瞭な反射面が認められないため、この高度差が断層変位に対応するものなのか、断層活動後の埋積過程を示すものなのか、断定できない。

そこで、日本原子力発電の NFWM10-2 測線の断面上に、DA-7 コアと UA-5 コアの分析結果を重ねた図

を作成した (第 23 図)。この断面でも、コア採取地点付近では、K-Ah 降下層準 (a 層 / b 層境界の直下) は海底下のリンギングゾーンに含まれるが、この層準を南西に追跡すると、測位点 7~8 間及び測位点 9 付近のほぼ同じ層準に、反射面が認められる。これらの反射面は、概ね、コア採取地点の K-Ah 降下層準に対応すると考えられ、本稿ではこの層準を推定 K-Ah 降下層準と呼ぶ。

(2) F-41 断層及び F-39・40 断層による K-Ah 降下層準の上下変位

推定 K-Ah 降下層準は、測位点 9~10 間の F-41 断層の位置において、対比基準面 2 にほぼ対応する反射面及び沖積層基底に対応する反射面と平行に南西側へ撓み下がっている (第 23 図)。この事実は、推定 K-Ah 降下層準が沖積層基底に対応する反射面等と共に、F-41 断層による断層変位を被っていることを示唆する。これら 3 つの反射面の上下変位量はいずれも約 1.7 m と見積もられ、3 つの反射面間に変位・変形の累積は認められない。

以上のような F-41 断層と推定 K-Ah 降下層準との関係から、F-39・40 断層の両側における K-Ah 降下層準の約 2.1 m の高度差は、K-Ah 降下後の F-39・40 断層の断層活動に起因するものと推定される。また、杉山ほか (2012) で指摘したように、沖積層堆積開始以降、K-Ah 降下期まで、F-39・40 断層及び F-41 断層では、顕著な上下変位を伴う活動はなかったと判断される。

(3) 浦底一柳ヶ瀬山断層帯による K-Ah 降下層準の上下変位量

敦賀市手沖では、F-39・40 断層 (日本原子力発電, 2010a の浦底セグメント) から、F-41 断層 (田結・内池見セグメント) が分岐しているため、断層帯全体の変位量は、両断層の変位量を足し合わせて求める必要がある。

杉山ほか (2012) で述べたように、隆起側の UA-5 コアと沈降側の DA-7 コア間の K-Ah 降下層準の高度差は約 2.1 m であるが、DA-7 コアはグラーベン状部に位置しているため、この高度差にはグラーベン状部の局所的な沈降による寄与も含まれていると考えられる。しかし、DA-7 コアを採取地点に近接する C-10 測線に垂直投影した図 (杉山ほか, 2012 の第 21 図) では、同コアはグラーベン状部内のやや盛り上がったところに位置し、局所的な沈降の影響は殆ど無い様に見える。そこで、本調査では、採泥調査地点付近の F-39・40 断層による K-Ah 降下層準の西下がりの上下変位量を約 2 m と見なす。なお、杉山ほか (2012) で述べた反射面の高度差分布 (杉山ほか, 2012 の第 28 図) から、F-39・40 断層による K-Ah 層準の上下変位量は採泥調査地点付近で最も大きく、ここから南・北両側へ小さくなっていると推定される。

F-41 断層については、2011 年の高分解能音波探査

によって、日本原子力発電 NFWM10-2 測線で認められた推定 K-Ah 降下層準に対応する反射面が明瞭に認められた (第 24 図)。F-41 断層による同層準の上下変位量は 1.2~1.8 m (データ数 8, 平均 1.4 m) であり、断層の中央部で大きくなる傾向が認められる。このため、両断層の変位量の合算には、DA-7 コアの採取地点近傍と F-41 断層の中央部を通過する NFWM10-2 測線上で計測された推定 K-Ah 降下層準の上下変位量 (約 1.7 m) を用いる。この値に、採泥調査地点付近の F-39・40 断層による K-Ah 降下層準の西下がり上下変位量 (約 2 m) を加え、敦賀市手沖の浦底一柳ヶ瀬山断層帯による K-Ah 降下層準の上下変位量は約 3.7 m と見積もられる。

(4) K-Ah 降下後の複数回の活動の可能性

今回の高分解能音波探査結果を詳細にみると、F-41 断層の周辺では、推定 K-Ah 降下層準より上位に、複数の反射面 (W-i, W-ii, W-iii) が認められる。測線 L-5.3~同 L-7.15 の各断面では、これらの反射面が F-41 断層の位置で、北東側に撓み上がっている (第 24 図)。これらの反射面の撓みは、明らかに推定 K-Ah 降下層準の撓みより小さく、K-Ah 降下以降、F-41 断層が 2 回活動した可能性を示唆する。

(5) 小括

敦賀市手沖の F-39・40 断層と F-41 断層の検討結果は以下のようにまとめられる。

- ・ F-39・40 断層を挟む K-Ah 降下層準の高度差は同断層の活動に起因するものと考えられ、DA-7 コア採取地点近傍の同断層による上下変位量は約 2 m と見積もられる。
- ・ DA-7 コア採取地点近傍を通過する音波探査測線に沿って計測した F-41 断層による推定 K-Ah 降下層準の上下変位量は約 1.7 m である。
- ・ 両者を合計した敦賀市手沖の浦底一柳ヶ瀬山断層帯による K-Ah 降下層準の上下変位量は、約 3.7 m となる。
- ・ 敦賀市手沖の浦底一柳ヶ瀬山断層帯は、K-Ah 降下後、2 回活動した可能性がある。また、沖積層の堆積開始以降、K-Ah 降下期までの間には、顕著な上下変位を伴う活動はなかったと考えられる。

3.5 敦賀市杉津沖の F-32・45 断層

北北西-南南東走向で、断層西側の相対的隆起を示す F-32・45 断層 (ウツロギ峠北方セグメント) の存在は、最初、海上保安庁水路部 (1980) によって、伏在推定断層として指摘された。その後、日本原子力発電の音波探査によって、その全体像が明らかにされ、完新世の活動が認定されている (日本原子力発電, 2008a)。

2011 年の高分解能音波探査の結果、本断層に伴う変形ゾーンの幅が狭い部分を横切る測線 (FC-14 測線, FC-16 測線等) において、2 回の断層活動が識別

された (産総研・東海大学, 2012)。

(1) 断層活動層準の認定と上下変位量

第 25 図に、FC-16 測線の断面を示す。断面中の反射面 E-ii 及び E-iii と反射面 E-i 及び E-i との間では明らかに上下変位量が異なり、前者の上下変位量は約 2.6 m、後者の上下変位量は約 1 m である。反射面 E-i と反射面 E-ii に挟まれる地層の厚さは、沈降側 (東側) で厚くなっており、この部分に反射面 ω が認められる。反射面 ω は、断層活動によって生じた沈降部を埋積したイベント堆積物に対応すると考えられる。

その上位の E-i と E-i の 2 つの反射面に挟まれた層準は、碎屑物の供給源である東から西に向かって、徐々に厚さを減じるが、断層の西側まで追跡され、撓曲部で厚さが急減する状況は認められない。これは、これら 2 つの反射面に対応する地層が、現海底面のように西へ緩く傾斜する海底で形成されたことを示す。これに対して、反射面 E-i と海底面に挟まれた層準は、断層の低下側 (東側) が 2 倍以上の厚さがある。これは、反射面 E-i 形成後の断層運動によって断層の東側が相対的に低下し、碎屑物によって埋積されたことを示す。

従って、F-32・45 断層 (ウツロギ峠北方断層) は、反射面 E-ii の形成後に 2 回 (反射面 ω の形成直前と反射面 E-i の形成後に) 活動し、それぞれの活動に伴う上下変位量は約 1.6 m 及び約 1 m であったと推定される。また、反射面 E-ii と反射面 E-vi との間では、変位・変形の累積は認められない。

(2) 反射面の対比に基づく断層の活動時期

F-41 断層, F-39・40 断層及び F-32・45 断層を横切る L-7 測線 (第 24 図) を用いて、上記の反射面 E-ii ~ E-vi を西方に追跡すると、反射面 E-v ~ E-vi の層準は、採泥調査地点付近の反射面 A~②~③の層準に対応すると推定される。また、反射面 E-ii ~ E-iii の層準は、確定的ではないが、反射面①の層準に概ね対応する。反射面①はほぼ K-Ah 降下層準に当たることから、反射面 E-ii ~ E-iii は K-Ah 降下層準に近いと推定される。このように考えた場合、F-32・45 断層は、K-Ah 降下以降に、2 回活動したことになる。

(3) 小括

敦賀市杉津沖の F-32・45 断層の検討結果は以下のようにまとめられる。

- ・ F-32・45 断層について、2 回の完新世活動が認定された。
- ・ これら 2 回の活動は、K-Ah 降下以降に生じた可能性が高い。
- ・ 2 回の活動のうち、先行活動に伴う上下変位量は約 1.6 m、後発活動に伴う上下変位量は約 1 m と見積もられる。

3.6 敦賀湾東岸・南岸域の浦底一柳ヶ瀬山断層帯

本節では、敦賀湾東岸及び南岸陸域の浦底一柳ヶ

瀬山断層帯を構成する断層の活動履歴及び活動性に関連する既存データについて概説する。

(1) ウツロギ峠断層沿いの Loc. U-1 及び同峠～敦賀市田尻付近の変動地形

日本原子力発電 (2010a) によると、ウツロギ峠の南西約 200 m の Loc. U-1 (第 26 図) では、走向 N51°W (偏角未補正)、傾斜 78°SW のシャープな断層によって、南西側の角礫層が北東側的美濃一丹波帯中・古生層と接する (第 27 図)。角礫層に挟まれる腐植質シルト層からは、5060 ± 110 yBP の ¹⁴C 年代 ($\delta^{13}\text{C}$ 補正済み) (約 5900~5700 cal yBP) が得られている。

2011 年に実施した現地調査では、この断層露頭の北西側の尾根上に、北東側の相対的隆起を示す比高 1~2 m 程度のバルジ状の高まりを確認し (第 26 図)、北西方向に約 50 m にわたって追跡した。

また、日本原子力発電 (2010a) によると、ウツロギ峠～敦賀市田尻付近では、約 10 万年前の鬼界葛原火山灰 (K-Tz) (町田・新井, 2003) に覆われる河成高位段丘を開析する河谷に系統的な左屈曲が認められる (第 26 図)。屈曲量は 25~75 m 程度である。

(2) 池河内断層沿いの Loc. U-2, その東方の溝状地形, 池河内付近の変動地形

池河内断層の北部は、後述する溝状地形などの地形的証拠から、敦賀市樞曲の東方約 1.5 km を北東に流下し、木の芽川に合流する河谷の北東側斜面に沿うと推定される (第 28 図)。日本原子力発電 (2008a) によると、この推定断層トレースから 30 m 程度西側に位置する Loc. U-2 (南西側斜面基部) には、美濃一丹波帯の中・古生層中に最大幅約 2 m の粘土化した破碎部が認められる (第 29 図)。この破碎部には、走向 N48°W (偏角未補正)、傾斜 83°NE の断層が見られ、断層の上部は下位より、角礫層、円礫層、砂質礫層からなる第四紀堆積物に北東側上がりの累積的な上下変位を与え、堆積物基底の上下変位量は約 1 m である。砂質礫層は AT 起源の火山ガラスを含み、スケッチによると、30 cm 程度の上下変位を被っている。

日本原子力発電 (2008a) によると、砂質礫層を覆う礫質砂層には K-Ah 起源の火山ガラスが含まれ、同砂層には上下変位は及んでいない (第 29 図)。

日本原子力発電貸与資料 5 によると、Loc. U-2 の約 300 m 及び 400 m 北東側 (上流側) では、河谷の北東側斜面の下部に、北西一南東に延びる溝状ないし断層凹地状の地形が認められる (第 28, 30 図)。溝状地形の南西側 (斜面下部側) には、比高 1~3 m のバルジ~リッジ状の細長い高まりが存在し、南西側の相対的隆起が示唆される。2011 年の現地調査でも、この溝状地形とその南西側のバルジ状の高まりを確認した。

敦賀市池河内では、池河内断層を横切って北へ流れる河谷に、75~100 m 程度の系統的な左屈曲が認

められる。また、主断層トレースの北側約 200 m には、北西一南東方向に延びる左横ずれを示す閉塞丘が見られ、並走する断層の存在が示唆される (第 28 図)。

(3) 柳ヶ瀬山断層北端の Loc. U-3

日本原子力発電 (2008a) によると、敦賀市杉箸の北東約 1.5 km の Loc. U-3 では、美濃一丹波帯中・古生層の砂岩・泥岩混在岩中に、最大幅約 1 m の粘土状破碎部が認められ、破碎部の南西縁に沿って、走向 N70°W (偏角未補正)、傾斜 88°S の連続性のよい断層が認められる (第 31, 32 図)。日本原子力発電 (2008a) は、この断層は茶褐色の角礫層に覆われているとしているが、第 32 図の露頭スケッチをみると、角礫層は南西側の砂岩・泥岩混在岩と断層で接し、30 cm 程度の南西側上がりで上下変位を被っている可能性があると思われる。2011 年の現地調査では、この露頭にアクセスすることができず、上記の可能性を検証することはできなかった。

(4) 柳ヶ瀬山断層沿いの Loc. Ut-3

日本原子力発電 (2008a) は、上記 Loc. U-3 の約 30 m 東方にある南北に延びる尾根上の西北一東南東方向の鞍部を横断して、群列ボーリング調査を実施している (第 33 図)。その結果によると、鞍部直下には最大層厚約 2 m の砂礫混じりの砂質シルト層が存在し、その下位には最大層厚が 3 m に達し、鞍部の南側で急激に厚さを減じるローム質の礫混じりシルト層が分布する。その下位には、鞍部の南側で最大 12 m に達し、美濃一丹波帯中・古生層の砂岩優勢岩を覆う角礫層が分布する。複数のボーリングで基盤岩中に確認された破碎帯の位置及びローム質礫混じりシルト層の層厚が急変する位置から、南に急傾斜する南側上がりの断層を推定している。しかし、角礫層 (c 層) 及びローム質礫混じりシルト層 (b 層) の層厚の南北への変化を見ると、北落ちの正断層群に南縁を限られるハーフグラバーベン状の構造が存在する可能性も考えられる。

ローム質礫混じりシルト層の中部は AT 起源の火山ガラスを挟み、同ガラスの夾在層準は南側上がりに引きずり上げられている (第 33 図)。一方、ローム質礫混じりシルト層の最上部からは K-Ah 起源の火山ガラスが検出され、その夾在層準には断層運動による変位・変形は認められないとし、この地点における池河内断層の最新活動時期は AT 降下以降、K-Ah 降下前と推定している。しかし、第 33 図によると、K-Ah 起源の火山ガラスの検出層準は最上位の砂礫混じり砂質シルト層の基底に沿っており、再堆積した火山ガラスの可能性も考えられる。この地点の池河内断層の最新活動時期と K-Ah 降下時期との関係については、更に検討が必要と思われる。

(5) 柳ヶ瀬山断層沿いの Loc. Ut-5~Ut-8

日本原子力発電 (2008a) は、柳ヶ瀬山断層沿いの Loc. Ut-5~Ut-8 の 4 地点 (第 31 図) で断層露頭を確認・記載している。これらの地点では、いずれも美

濃-丹波帯中・古生層中に幅 1~2 m 程度の破碎部が認められ、破碎部中、特に破碎部とその外側の非破碎~弱破碎部との境界近傍に沿って、数 cm~10 cm 程度の幅の粘土状破碎部からなる断層が確認されている。

これらの断層は「湾曲・分岐し」、もしくは「不明瞭で湾曲し」、「平面的な断層面は見られない」とされている。日本原子力発電(2008a)は、このような断層と破碎部の性状を主な理由として、柳ヶ瀬山断層の後期更新世の活動を否定している。

しかし、日本原子力発電貸与資料5によるスケッチ及び2011年に実施したLoc. Ut-6の現地調査によると、各地点において、白色や灰白色等の還元色を呈する粘土状の破碎物質を伴い、柳ヶ瀬山断層の推定トレースと調和する走向を持つ平面的な断層が認められる(第34図)。最終間氷期以前の第四紀層による被覆が確認されていないことから、これらの断層の第四紀もしくは後期更新世以降の活動を完全に否定することはできないと考える。

(6) 池見断層(内池見リニアメント)沿いの中池見地区

敦賀平野の北東部には、東流する河谷の上流部が埋積され、袋状の形を示す3つの低地が南北に並び、北側から、内池見、中池見、余座池見と呼ばれている(第35図)。これら3低地の東縁に沿って、東側隆起の内池見リニアメント(岡田・東郷編, 2000)、池見断層(岡田, 2009)が推定されている。

3つの低地のうち、中池見については、地域地盤環境研究所(2000)によって、詳細なボーリング調査、反射法地震探査などが実施されている。岡田(2009)は、主にその調査結果に基づき、低地下に伏在する東傾斜の逆断層(池見断層)を推定し、東側の基盤岩ブロックが西側の基盤岩を覆う礫層に楔状に突き刺さる関係を提示している(第36図)。岡田(2009)は、池見断層による上下変位量を、AT降下層準で1.5 m、K-Tz降下層準で10 mと見積っている。また、断層面に沿う累積変位量は100 m程度以下と推定し、最近の地質時代に活動を始めた断層と推定している。

4. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の活断層データの総括

過去の活動に関する重要なデータが得られた浦底セグメント4地点及びウツロギ峠北方セグメント1地点の活動履歴、活動性、1回のずれの量(単位変位量)等に関するデータを第1表と第37図にまとめた。

また、浦底-柳ヶ瀬山断層帯を構成する断層の位置と分布は第38図のようにまとめられ、活断層パラメータは第2表のように総括される。

4.1 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の形状・規模に関するデータの総括

(1) 断層帯を構成する断層

日本原子力発電(2010a)の調査データと2011年の現地調査結果に基づく、地震調査委員会(2004)の浦底-柳ヶ瀬山断層帯に対応する断層は、浦底セグメント(長さ約12 km)、田結・内池見セグメント(長さ約10 km)、ウツロギ峠北方セグメント(長さ約11 km)、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント(約16 km)から構成される。

また、南越前町沖に存在する甲楽城沖セグメント(長さ約11 km)も、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の構成要素と見ることができる。

(2) 断層帯の北西端・南東端と全長

浦底-柳ヶ瀬山断層帯の北西端は、甲楽城沖セグメントの北西端(北緯35°51', 東経135°58': 干飯崎の南南西約4 km)もしくは浦底セグメントの北端(北緯35°49', 東経135°59': 立石岬の北北西約7 km)である。

本断層帯の南東端は、長浜市余呉町柳ヶ瀬西方の柳ヶ瀬山断層の南端(北緯35°35', 東経136°11': 柳ヶ瀬山の南東約1 km)である。

浦底-柳ヶ瀬山断層帯の長さは、甲楽城沖セグメントの北西端を本断層帯の北西端とした場合には約35 km、浦底セグメントの北端とした場合には約32 kmとなる。

(3) 断層帯のずれの向き・傾斜方向・相互関係

浦底セグメントとウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントの北~中部(ウツロギ峠断層と池河内断層)では、左横ずれ変位地形が明瞭である。また、浦底セグメントでは、北東側の相対的な隆起がほぼ全域にわたって認められる。ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントについては、地形から、北~中部では南西側隆起、南部では北東側隆起が示唆される。

ウツロギ峠北方セグメントは西側隆起の上下変位を示し、田結・内池見セグメントは東側隆起の上下変位を伴う。これら2つのセグメントでは、横ずれ変位地形は明瞭ではない。また、甲楽城沖セグメントは、北東側隆起を示す。

各セグメントのずれの向き及び地形・地質調査や音波探査の結果から、浦底セグメントはほぼ鉛直ないし高角北東傾斜、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントの北~中部はほぼ鉛直、同南部は高角北東傾斜と考えられる。また、ウツロギ峠北方セグメントは西傾斜(逆断層)、田結・内池見セグメントは東傾斜(逆断層)である。甲楽城沖セグメントは高角北東傾斜と考えられる。

浦底セグメントと田結・内池見セグメントに挟まれた地域、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントとウツロギ峠北方セグメントに挟まれた地域は、相対的隆起域となっている。甲楽城沖セグメントは、前者の相対的隆起域北部から北西に延びる。同セグメントは、隆起側に背斜状の変形を伴い、逆断層的な性格をもつと共に、甲楽城断層の前縁断層としての性格を有する。

4.2 断層帯の過去の活動に関するデータの総括

(1) 平均変位速度

敦賀市色浜沖で実施されたボーリング調査の結果、AT 降下層準は 12.7 m の上下変位を被っている。このデータから、AT 降下以降における色浜沖の本断層帯の平均上下変位速度は 0.45 m / 千年と見積もられる。また、ここでは K-Ah 降下層準に 4.4 m の上下変位が認められることから、単純に K-Ah 降下後の経過時間（約 7300 年）で除して、平均上下変位速度を求めると、0.60 m / 千年となる。約 1 万年前以降、K-Ah 降下期までは断層活動がなかったと考えられることから、過去 1 万年間の平均上下変位速度を求めると、0.44 m / 千年となる。この値は、AT 降下層準を基準とする平均変位速度と同等である。他の調査地点における K-Ah 降下層準の上下変位量から、ボーリング調査地点で得られた平均上下変位速度 (0.45 m / 千年) は、本断層帯全体の平均上下変位速度の代表値と見なして大きな問題はないと判断される。

横ずれ成分の平均変位速度を直接示すデータは得られていないが、敦賀原子力発電所敷地近傍のトレンチ調査地点で得られた断層条線の方位及びプランジのデータから、同地点では、横ずれ成分が縦ずれ成分と同等以上と判断され、2 倍に達する可能性がある。浦底セグメントの横ずれ量が縦ずれ量と同等の場合には、同セグメントの平均横ずれ変位速度は 0.45 m / 千年、平均総変位 (ネットスリップ) 速度は 0.64 m / 千年となる。また、横ずれ量が縦ずれ量の 2 倍と仮定すると、同セグメントの平均横ずれ変位速度は 0.9 m / 千年、平均総変位 (ネットスリップ) 速度は 1.0 m / 千年となる。

(2) 活動時期

日本原子力発電による浦底湾内における音波探査断面貸与資料 2 の解析の結果、K-Ah 降下層準より上位の層準に、2 回の断層活動が認定された。また、2011 年に実施したウツロギ峠北方セグメント (F-32・45 断層) の高分解能音波探査の結果、K-Ah 降下層準と推定される反射面よりも上位の層準に、2 回の断層活動が認定された。これら 2 つの地点における調査結果から、本断層帯では K-Ah 降下後に 2 回、明瞭な上下変位を伴う活動があったと考えられる。日本原子力発電のトレンチ調査結果 (貸与資料 5) 及び敦賀市手沖の田結・内池見セグメント (F-41 断層) の高分解能音波探査の結果 (東海大学, 2012) は、K-Ah 降下後、本断層帯が 2 回活動したという結論と矛盾せず、整合的である。

日本原子力発電によるトレンチ調査データによると、本断層帯の最新活動は約 4500 年前以降に生じたと判断される。なお、2011 年の著者らの現地調査では、本断層帯の最新活動時期に関する新たなデータを得ることはできなかった。

また、既存及び 2011 年に取得した音波探査断面の解析から、約 1 万年前以降、K-Ah 降下期までの約 3

千年間には、明瞭な上下変位を伴う活動は無かったと判断される。

(3) 1 回のずれの量

既存調査データの検討と 2011 年の調査の結果を総合することにより、浦底セグメントによる K-Ah 降下層準の上下もしくは縦ずれ変位量として、次の値を得た。

1) トレンチ調査地点の浦底断層: 上下変位量 2.2 m 以上、縦ずれ変位量 2.6 m 以上。

2) 浦底湾の F-39b 断層と F39・40 断層: 信頼性が高い F-39b 断層の上下変位量は約 1.8 m。F-39・40 断層はその 1.5 倍程度の変位量をもつと仮定すると、上下変位量は 2.7 m 程度、両者を合わせた上下変位量は 4.5 m 程度。

3) ボーリング調査地点の F39・40 断層: 上下変位量 4.4 m (最も信頼性が高い値)。

4) 敦賀市手沖の F39・40 断層と F-41 断層: DA-7 コア採取地点近傍の F39・40 断層の上下変位量は約 2 m。F-41 断層の上下変位量は約 1.7 m、両者を合わせた上下変位量は約 3.7 m。

既述のように、本断層帯は K-Ah 降下後、2 回活動したと考えられることから、各地点における浦底セグメントの 1 回の活動に伴う平均上下もしくは縦ずれ変位量は、上記の値の半分となる。即ち、トレンチ地点: 1.3 m 以上 (縦ずれ)、浦底湾: 2.3 m 程度 (上下)、ボーリング調査地点: 2.2 m (上下)、手沖: 約 1.9 m (上下) となる。

本調査では、最も信頼性の高いボーリング調査地点で得られた値を重視し、浦底セグメントの 1 回の活動に伴う上下変位量を 2.2 m と見なす。

浦底セグメントについては、上下/縦ずれ変位と同等以上の横ずれ変位を伴うと考えられることから、1 回の活動に伴う横ずれ変位は 2.2 m 以上、ネットスリップは 3.1 m に達する可能性が高い。また、トレンチ調査地点の条線データからは、同セグメントでは横ずれ成分が縦ずれ成分の 2 倍に達する可能性があり、この場合、1 回の活動に伴う横ずれ変位は 4.4 m、ネットスリップは 4.9 m に達する。

浦底セグメント (長さ約 12 km) を単独の活動セグメントと見なし、1 回のずれ量 (最頻値) とセグメント長との経験的關係 (栗田, 1999; 松田, 1975) から 1 回のずれ量を求めると、約 1~1.4 m となる。この値は、上述した浦底セグメントの 1 回のずれ量 (3.1 m, 4.9 m) よりもはるかに小さい。この事実は、浦底セグメントで得られた 1 回ずれ量が、同セグメントを主要構成要素とする活動セグメントの 1 回のずれ量を示していることを強く示唆する。

本稿では、上述した浦底セグメントの 1 回のずれ量を浦底-柳ヶ瀬山断層帯全体を代表する 1 回のずれの量と見なす。

(4) 平均活動間隔

日本原子力発電 (2008a) のボーリング調査地点で

は、AT 降下以降の平均上下変位速度 (0.45 m / 千年) と 1 回の活動に伴う平均変位速度 (2.2 m) が得られている。これらの値から、平均活動間隔を求めると 4.9 千年となる。

また、(2) で述べたように、本断層帯は、K-Ah 降下後に 2 回活動し、最新活動は約 4500 年前以降に生じたと考えられる。また、約 1 万年前以降、K-Ah 降下期までの約 3 千年間には、明瞭な上下変位を伴う活動は無かったと推定される。これらのデータからは、本断層帯の活動間隔はだまかに 3 千~7 千年程度と推定される。

以上のように、異なるデータセットから推定される断層の活動間隔は整合的である。本報告では、本断層帯の平均活動間隔を約 5 千年 (5 千年 2 千年程度) と見なす。

(5) 活動区間

松田 (1975) による 1 回のずれの量と断層の長さ (1 つの地震で活動した断層の全長、地震セグメント長に相当) との経験的関係によると、本断層帯の 1 回の活動によるネットスリップ (約 3.1 m または 4.9 m, (3) 参照) に対応する断層 (地震セグメント) の長さは、約 39 km または約 62 km となる。また、栗田 (1999) による 1 回のずれの量 (最頻値) と地震セグメント長に関する経験的関係によれば、対応する地震セグメント長は約 48 km または 75 km となる。この事実は、過去の地震時に、浦底-柳ヶ瀬山断層帯 (長さ約 35 km もしくは約 32 km) が一度に活動した可能性を強く示唆する。また、同断層帯に隣接する活断層が連動した可能性を示唆する。

栗田 (1999) による 1 回のずれの量 (最頻値) と活動セグメント長との経験的関係によると、本断層帯の 1 回の活動によるずれの量 (約 3.1 m または 4.9 m) に対応する活動セグメント長は、約 27 km または約 42 km となる。この事実は、本断層帯全体もしくはこれに隣接する断層を加えた断層帯が一つの活動セグメントを形成している可能性を示唆する。

浦底-柳ヶ瀬山断層帯と連動した断層、もしくは同断層帯と共に一つの活動セグメントを形成している断層の最有力候補としては、地表での離間距離が 1 km に満たない柳ヶ瀬断層の南部 (長浜市余呉町椿坂付近~同市木之本町古橋付近) が挙げられる。

柳ヶ瀬断層については、椿坂付近 (本断層帯柳ヶ瀬山断層の東方約 1 km) において、4180 ± 140 yBP 及び 4180 ± 150 yBP の未補正 ¹⁴C 年代が得られた堆積物を切る断層が報告されている (武藤ほか, 1981)。また、その約 1 km 北方の地点で行われたトレンチ調査では、西暦 1200 年代後半~1400 年代初頭の最新活動が推定されている (杉山ほか, 1993)。これに対して、このトレンチ地点の約 4 km 北の椿坂峠の北側 (本断層帯池河内断層の東方約 1.2 km) で行われたトレンチ調査では、柳ヶ瀬断層の最新活動は K-Ah 降下直前と推定される (吉岡ほか, 1998)。

さらに、柳ヶ瀬断層北部の調査結果 (福井県, 1998 ; 日本原子力発電, 2010a など) によると、同断層南部よりも活動性が低いことが示唆され、AT 降下以降の活動を明確に示すデータは得られていない。

これらの事実は、後期更新世頃以降、柳ヶ瀬断層南部を北上する断層破壊が柳ヶ瀬断層北部へ伝播する頻度が低下し、浦底-柳ヶ瀬山断層帯へ伝播する頻度が高まっている可能性を示唆する。また、浦底-柳ヶ瀬山断層帯を南下する断層破壊が柳ヶ瀬断層南部へ伝播する頻度が高まっている可能性も考えられる。柳ヶ瀬断層の南東に連なる鍛冶屋断層については、約 1000 年前以降の最新活動と約 7200~6700 年前のそれに先立つ活動が推定されており (吉岡ほか, 2011)、柳ヶ瀬断層南部、浦底-柳ヶ瀬山断層帯と連動した可能性がある。

5. まとめ

本調査の主な結果は、以下のようにまとめられる。

(1) 浦底-柳ヶ瀬山断層帯は、浦底、田結・内池見、ウツロギ峠北方、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山の、4 つの形状セグメントから構成される。甲楽城沖形状セグメントも浦底-柳ヶ瀬山断層帯の構成要素と見ることができる。

(2) 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の長さは、甲楽城沖セグメントの北西端を本断層帯の北西端とした場合には約 35 km、浦底セグメントの北端とした場合には約 32 km である。

(3) 浦底セグメントとウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントは左横ずれ成分を主体とし、ウツロギ峠北方セグメントは西傾斜の逆断層、田結・内池見セグメントは東傾斜の逆断層である。甲楽城沖セグメントは高角北東傾斜の断層であり、逆断層的な性格と左横ずれ成分を有する甲楽城断層の前縁断層としての性格も併せ持つ。

(4) 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の平均上下変位速度は、日本原子力発電による海上ボーリング調査地点における AT 降下層準の上下変位量から、0.45 m / 千年と求められる。

(5) 浦底-柳ヶ瀬山断層帯では、K-Ah 降下後に 2 回、明瞭な上下変位を伴う活動があったと考えられる。日本原子力発電のトレンチ調査データによると、本断層帯の最新活動は約 4500 年前以降に生じたと考えられる。また、音波探査の結果から、約 1 万年前以降、K-Ah 降下期までの約 3 千年間には、明瞭な上下変位を伴う活動は無かったと推定される。

(6) 浦底セグメントの 1 回の活動に伴う上下変位量は 2.2 m と見積もられ、横ずれ変位量は上下変位量と同等以上と推定される。本調査では、この浦底セグメントの 1 回の活動に伴う変位量を、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の 1 回の活動に伴う上下変位量と見なす。

(7) 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の平均活動間隔は、上

述の AT 降下以降の平均上下変位速度と 1 回の活動に伴う推定上下変位量，並びに約 1 万年前以降の活動履歴から，約 5 千年（5 千年 2 千年程度）と見積もられる。

(8) 浦底一柳ヶ瀬山断層帯は，その全長と 1 回の活動に伴う変位量から，断層帯全体が一つの活動セグメントを形成している可能性がある。また，柳ヶ瀬断層南部，鍛冶屋断層と連動した可能性がある。

貸与・開示を受けた資料

本調査に際しては，日本原子力発電株式会社から下記の資料の貸与を受けた。

- 1 浦底断層周辺の海底地形調査データ。
- 2 浦底断層周辺の音波探査データ（ウォーターガン・マルチチャンネル探査記録，ジオパルス・マルチチャンネル探査記録，ソノプローブ・シングルチャンネル探査記録ほか）。
- 3 海上ボーリング調査データ（ボーリングコア写真，同柱状図，炭素同位体年代測定結果，テフラ分析結果，花粉分析結果，珪藻化石分析結果ほか）。
- 4 海域調査データの整理結果（海底地層上面の等深線図，浦底一内池見断層の累積変位量分布ほか）。
- 5 陸域調査データ（トレンチ壁面写真，同スケッチ，トレンチ壁面試料の炭素同位体年代測定・テフラ分析結果，ボーリングコア写真，同柱状図ほか）。

また，独立行政法人原子力安全基盤機構からは，下記の資料の開示を受けた。

- 1 総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ C サブグループ第 11 回会合資料，合同 C11-3-1-1（敦賀湾における海上音波探査について）。
- 2 総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ C サブグループ第 15 回会合資料，合同 C15-2-1（若狭湾東部海域における海上音波探査について）。

なお，本稿中では，独立行政法人原子力安全基盤機構から開示を受けた資料 1 については原子力安全・保安院（2009a）として，また，同資料 2 については原子力安全・保安院（2009b）として引用した。

謝辞 本調査の実施に際しては，福井県安全環境部の危機対策・防災課と原子力安全対策課，及び同県農林水産部水産課，敦賀市の市民生活部市民防災課と企画政策部原子力安全対策課の関係者の皆様には，本調査の計画段階からご協力・ご指導を戴いた。また，日本原子力発電株式会社，経済産業省原子力安全・保安院，独立行政法人原子力安全基盤機構には，既存調査データの貸与・開示について，全面的なご協力を戴いた。

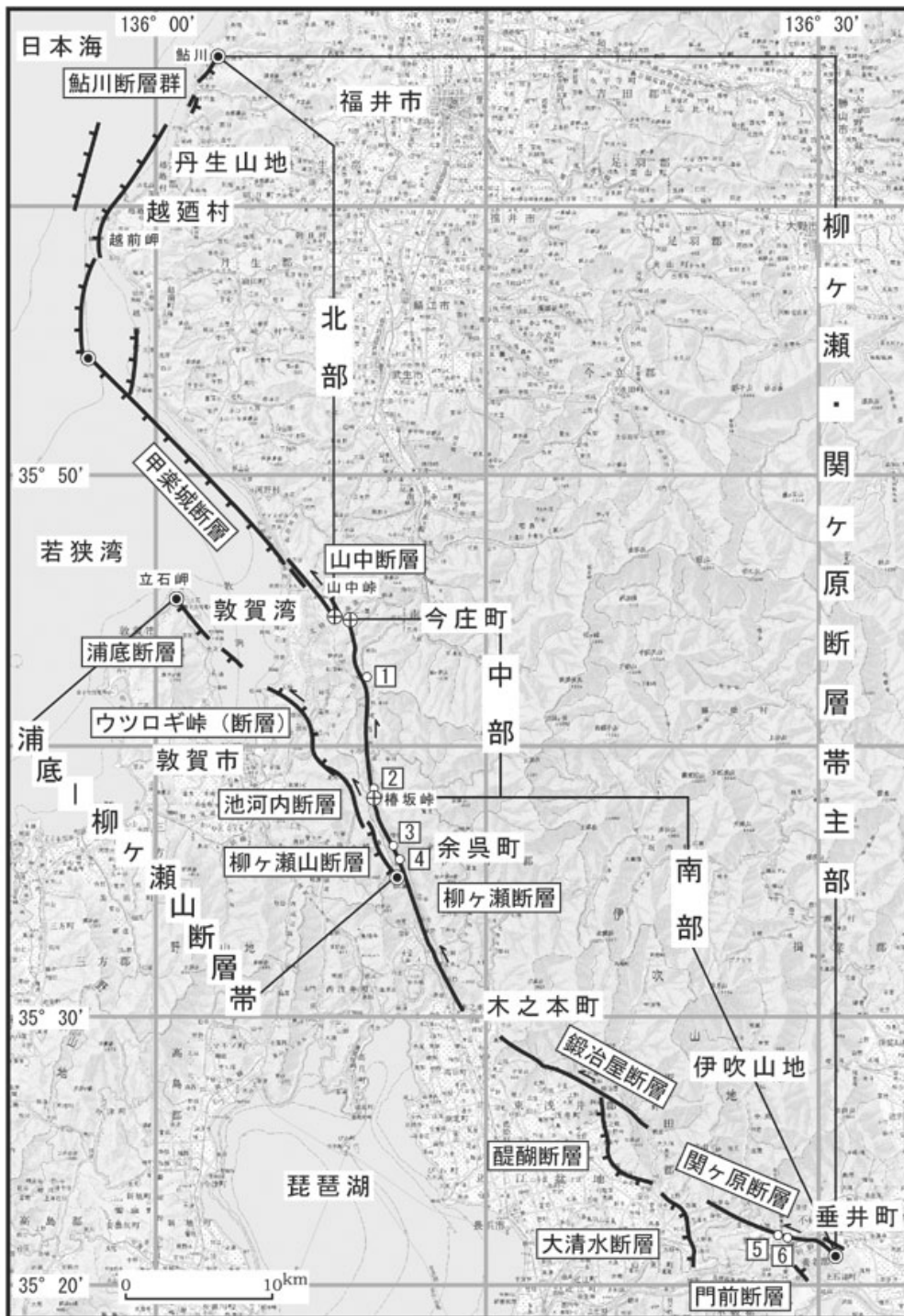
ここに記して，以上の皆様に篤く御礼申し上げます。

文 献

- 栗田泰夫（1999）日本の地震断層におけるセグメント構造とカスケード地震モデル（試案）．地質調査所速報，EQ/99/3（平成 10 年度活断層・古地震研究調査概要報告書），地質調査所，275-284．
- 地域地盤環境研究所（2000）中池見低地の調査報告書．福井県（1998）「平成 9 年度地震関係基礎調査交付金柳ヶ瀬断層帯（柳ヶ瀬断層，山中断層，甲楽城断層）に関する調査」．福井県，48p．
- 原子力安全・保安院（2009a）敦賀湾における海上音波探査について．総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ C サブグループ第 11 回会合資料，合同 C11-3-1-1．
- 原子力安全・保安院（2009b）若狭湾東部海域における海上音波探査について．総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ C サブグループ第 15 回会合資料，合同 C15-2-1．
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2004）柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯の長期評価について．http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04jan_yanagase/index.htm
- 海上保安庁水路部（1980）沿岸の海の基本図（5 万分の 1）若狭湾東部．1 海底地形図，2 海底地質構造図，3 調査報告書（5 万分の 1 沿岸の海の基本図海底地形地質調査報告書若狭湾東部），海図第 6363 号 8．
- 町田 洋・新井房夫（2003）新編 火山灰アトラスー日本列島とその周辺．東京大学出版会，336p．
- 松田時彦（1975）活断層から発生する地震の規模と周期について．地震第 2 輯，28，269-283．
- 松田時彦（1990）最大地震規模による日本列島の地震分帯図．地震研究所彙報，65，289-319．
- 武藤 章・豊蔵 勇・松浦一樹・池戸正行（1981）活断層調査の例ー柳ヶ瀬断層．応用地質，22，32-51．
- 日本原子力発電株式会社（2004）敦賀発電所原子炉設置変更許可申請書（3 号及び 4 号原子炉の増設）．
- 日本原子力発電株式会社（2008a）敦賀発電所 3 号及び 4 号炉の安全審査に係る追加調査報告書．
- 日本原子力発電株式会社（2008b）敦賀発電所，もんじゅ及び美浜発電所のバックチェック中間報告等に係る現地調査実施結果概要．総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ C サブグループ第 2 回会合資料，合同 C2-2-1．

- 日本原子力発電株式会社 (2009) 敦賀発電所 3, 4 号機原子炉設置変更許可申請書に係る補正書の提出について. (<http://www.japc.co.jp/news/press/2009/pdf/211016.pdf#search='日本原子力発電補正書概要'>), 2012年3月5日参照.
- 日本原子力発電株式会社 (2010a) 敦賀発電所原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号原子炉の増設)(平成21年10月一部補正, 平成22年12月一部補正).
- 日本原子力発電株式会社 (2010b) 新耐震指針に照らした耐震安全性評価-敦賀発電所敷地の地質・地質構造について. 総合資源エネルギー調査会原子力安全保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波, 地質・地盤合同ワーキンググループCサブグループ第24回会合資料, 合同C24-9.
- 日本原子力発電株式会社・独立行政法人日本原子力研究開発機構・関西電力株式会社 (2012) 若狭地域における活断層の運動に関する検討結果について【コメント回答】. 地震・津波に関する意見聴取会(活断層関係)第4回会合資料, 地震・津波(活断層)4-2-1.
- 岡田篤正 (2009) 敦賀平野東縁部の変動地形-内池見・中池見・余座池見・高野低地の特徴と関連する地殻運動-. 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震2周年シンポジウム・日本活断層学会2009年度秋季学術大会講演予稿集, 33-34.
- 岡田篤正・東郷正美編 (2000) 「近畿の活断層」. 東京大学出版会, 408p.
- Saito, Y. (1994) Shelf sequence and characteristic bounding surfaces in a wave-dominated setting: latest Pleistocene-Holocene examples from Northeast Japan. *Marine Geology*, 120, 105-127.
- 産業技術総合研究所・東海大学 (2012) 平成23年度沿岸海域における活断層調査 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯/浦底-柳ヶ瀬山断層帯(海域部) 成果報告書. 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, 本文 39p., 図表 88p.
- 杉山雄一・栗田泰夫・佃 栄吉・吉岡敏和 (1993) 1992年柳ヶ瀬断層(椿坂地区) トレンチ調査. 活断層研究, 11, 100-109.
- 杉山雄一・坂本 泉・滝野義幸・宇佐見琢哉・永田高弘 (2012) 敦賀湾における浦底断層(浦底-柳ヶ瀬山断層帯) の採泥調査. 活断層・古地震研究報告, No.12, 103-148.
- 東海大学 (2012) 平成23年度 沿岸海域における活断層調査 浦底-柳ヶ瀬山断層帯(海域部) 報告書. 301p.
- 吉岡敏和・佐護浩一・山根 博 (2011) 柳ヶ瀬-養老断層系, 鍛冶屋, 関ヶ原および宮代断層の古地震調査. 活断層・古地震研究報告, No.11, 177-195.
- 吉岡敏和・杉山雄一・細矢卓志・逸見健一郎・渡辺俊一・田中英幸 (1998) 柳ヶ瀬断層の最新活動-滋賀県余呉町椿坂峠におけるトレンチ発掘調査-. 地震第2輯, 51, 281-289.

(受付: 2012年7月26日, 受理: 2012年9月27日)



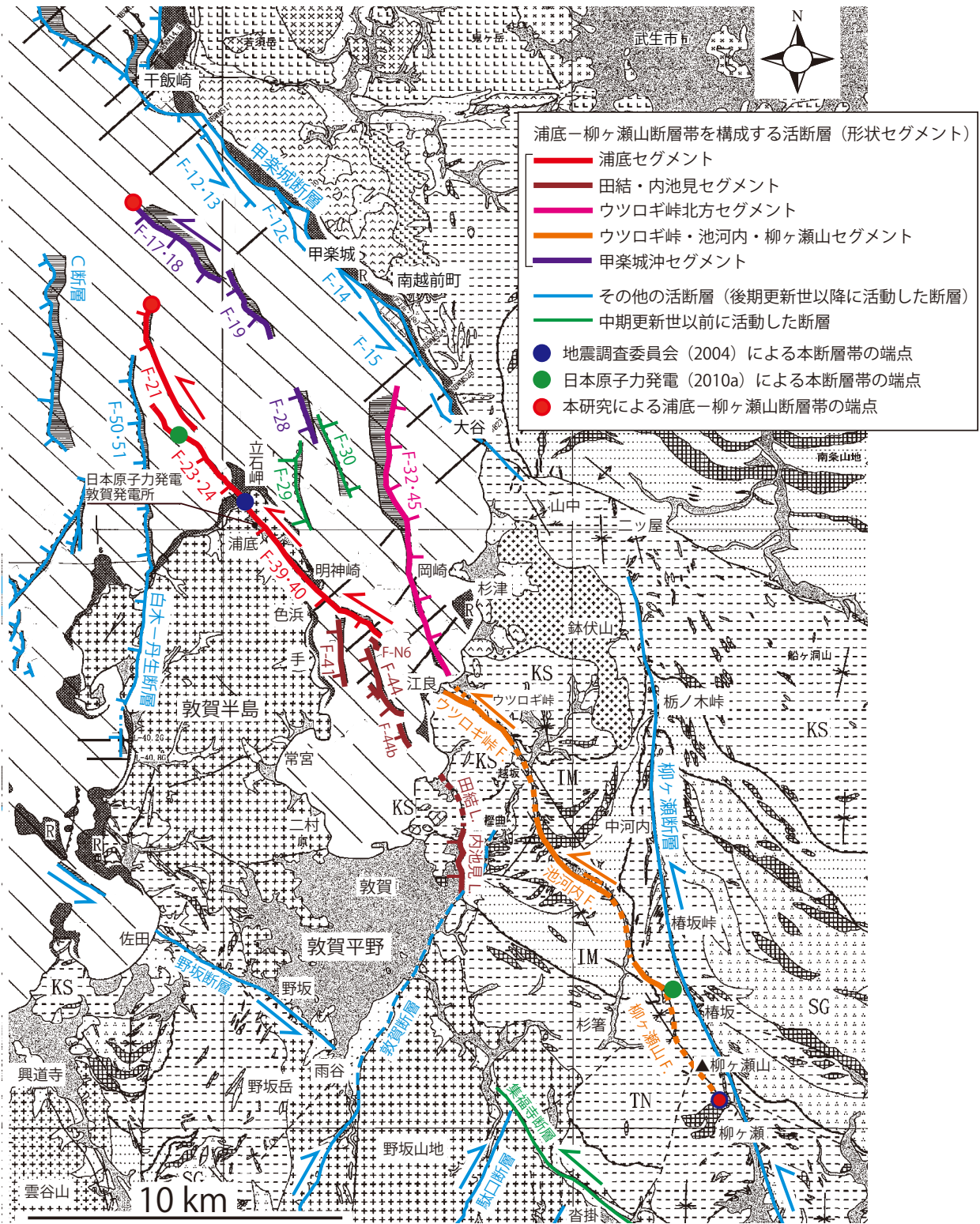
第1図. 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯と浦底-柳ヶ瀬山断層帯の位置と構成断層. 1: 清水洞地点, 2: 椿坂峠地点, 3: 椿坂地点, 4: 雁ヶ谷地点, 5: 丸山地点, 6: 秋葉地点. ◎: 断層帯の両端と屈曲点, ⊙: 断層帯の北部・中部・南部の境界. 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004).

Fig. 1. Location and constituent faults of the Yanagase・Sekigahara and Urazoko-Yanagaseyama Fault Zones. After the Earthquake Research Committee, Headquarters for Earthquake Research Promotion (ERC/HERP, 2004).



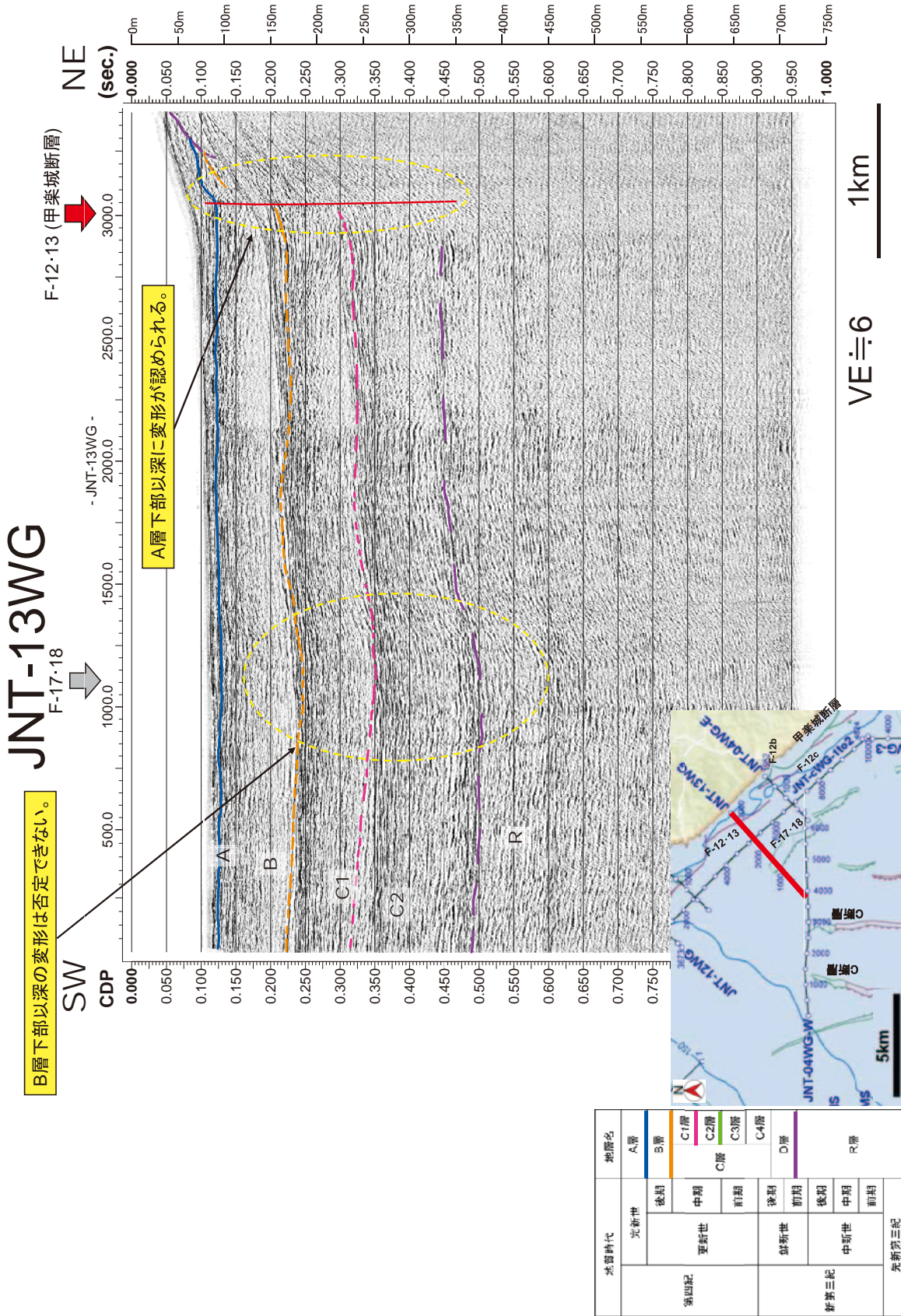
第2図. 地震調査委員会(2004)による柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯の長期評価公表後に、日本原子力発電によって行われた活断層の調査・評価の主要結果。日本原子力発電(2009)による。

Fig. 2. Main results on the active fault survey and evaluation conducted by the Japan Atomic Power Company (JAPC), after the publication of long-term evaluation of the Yanagase-Sekigahara Fault Zone (ERC/HERP, 2004). After JAPC (2009).



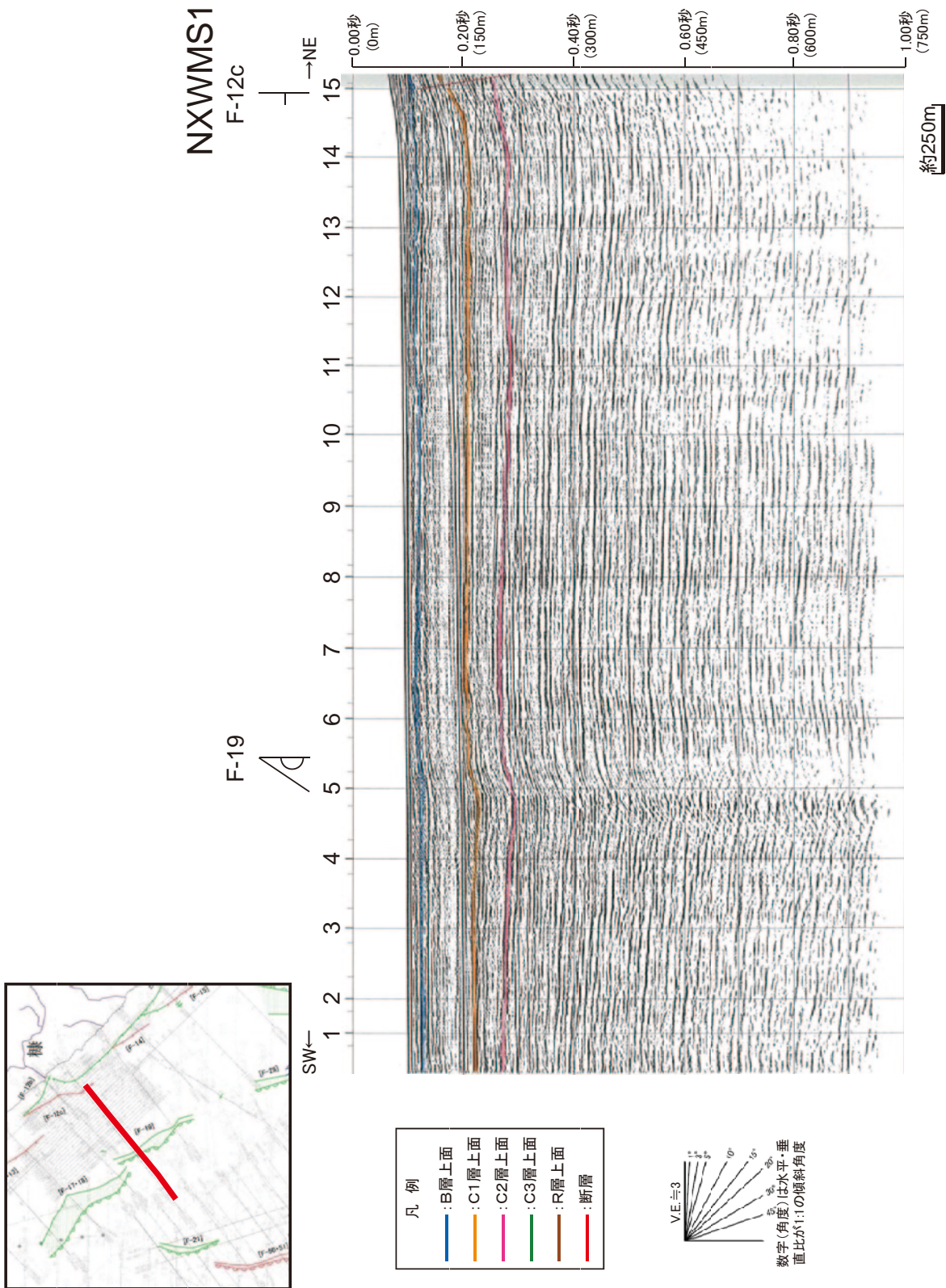
第3図. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯とその周辺の活断層. 基図は日本原子力発電 (2008a).

Fig.3. Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone and nearby faults. Base map is after JAPC (2008a).



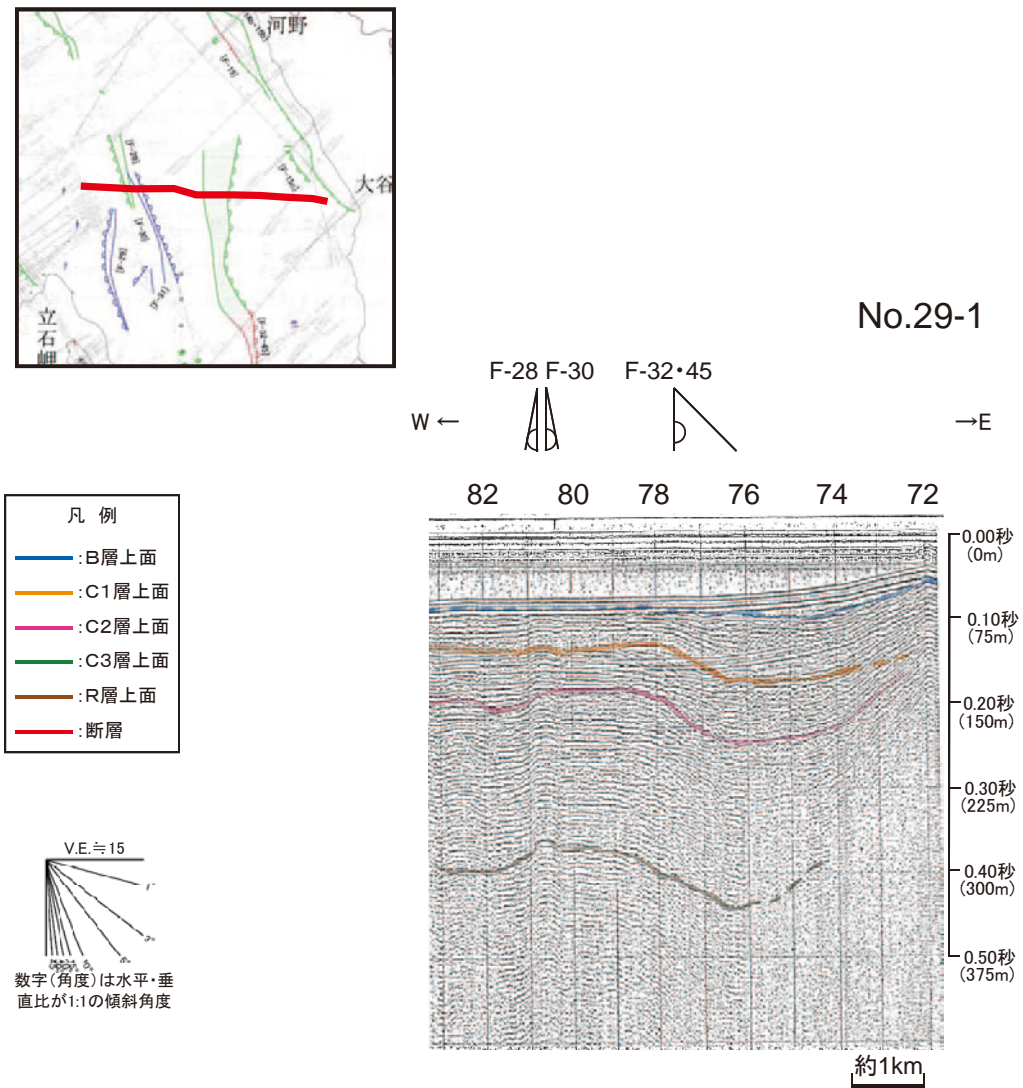
第4図. F-17-18断層(甲楽城沖セグメント)を横断するウォーターガンによる音波探査断面. 隆起側(北東側)に背斜状の変形を伴い, 変形はB層(上部更新統)に及んでいる. 原子力安全・保安院(2009b).

Fig. 4. Acoustic profile across the F-17-18 fault of the Kaburagioki segment. After Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA, 2009b).



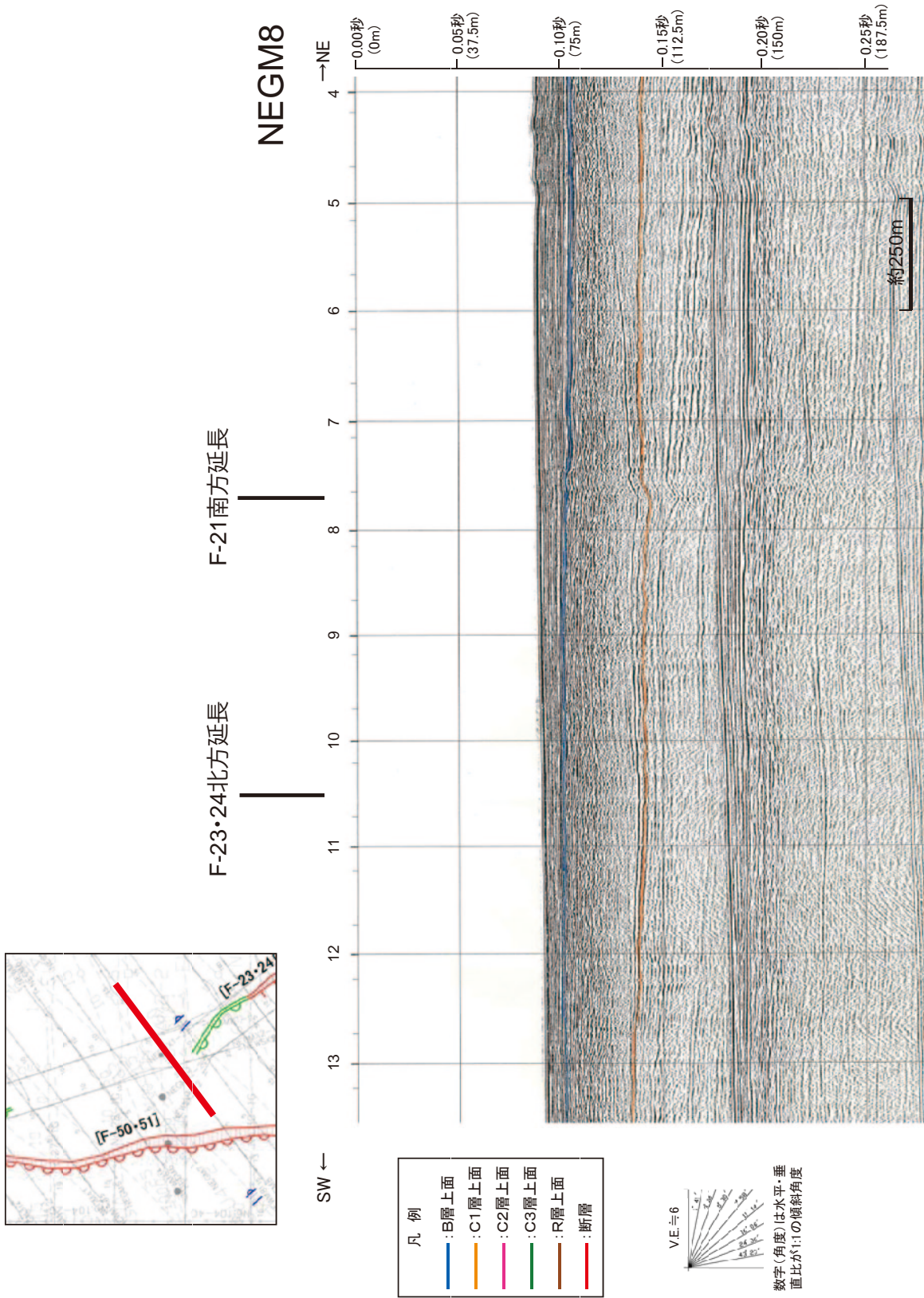
第5図. F-19断層(甲斐川沖セグメント)を横断するウォーターゲートによる音波探査断面. 変形は上部更新統に及んでいる. 日本原子力発電ほか, (2012).

Fig. 5. Acoustic profile across the F-19 fault of the Kaburagioki segment. After JAPC *et al.* (2012).



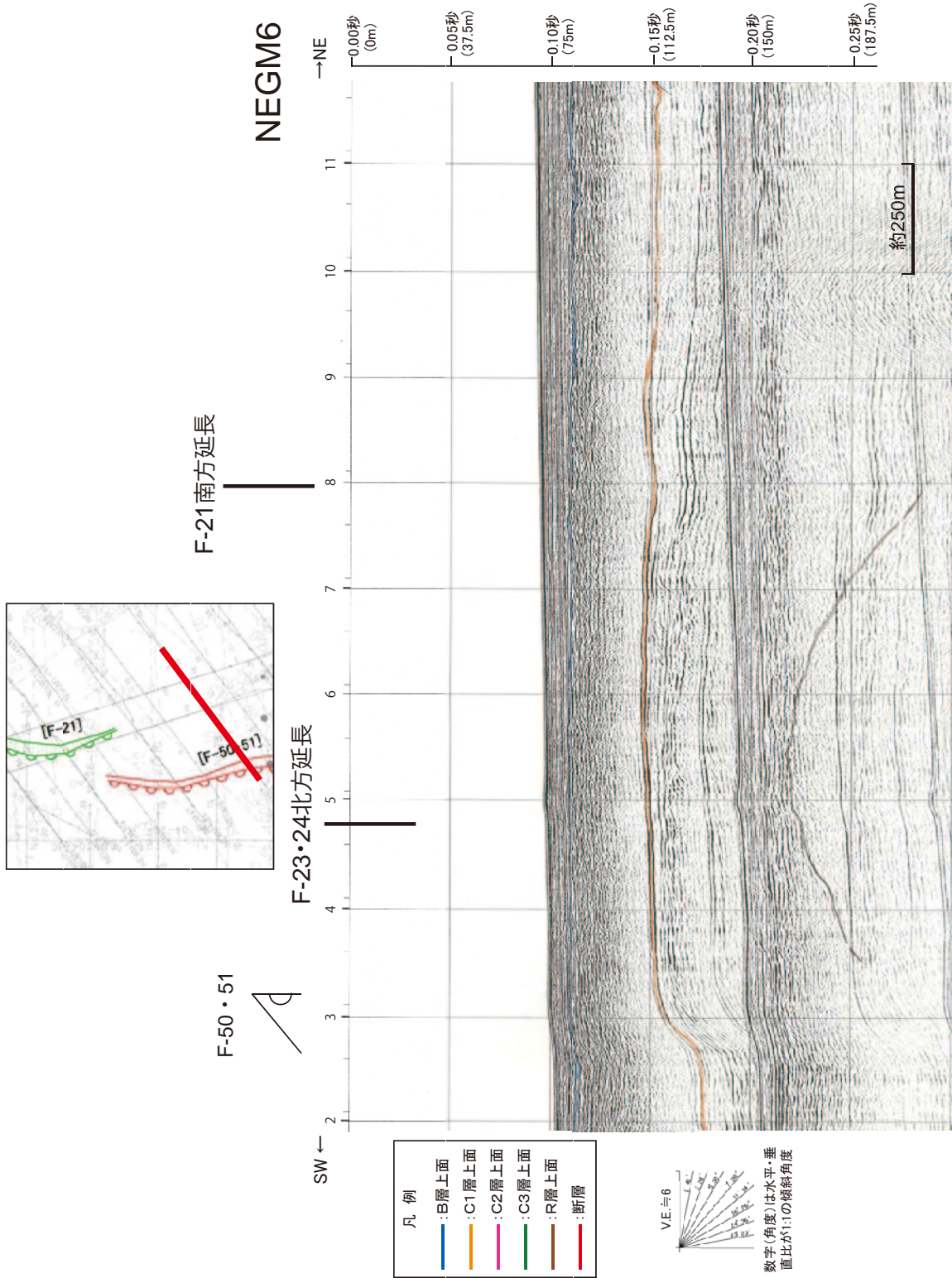
第 6 図. F-28 断層 (甲楽城沖セグメント) を横断するウォーターガンによる音波探査断面。変形は上部更新統に及んでいる。日本原子力発電ほか (2012)。

Fig. 6. Acoustic profile across the F-28 fault of the Kaburagioki segment. After JAPC *et al.* (2012).

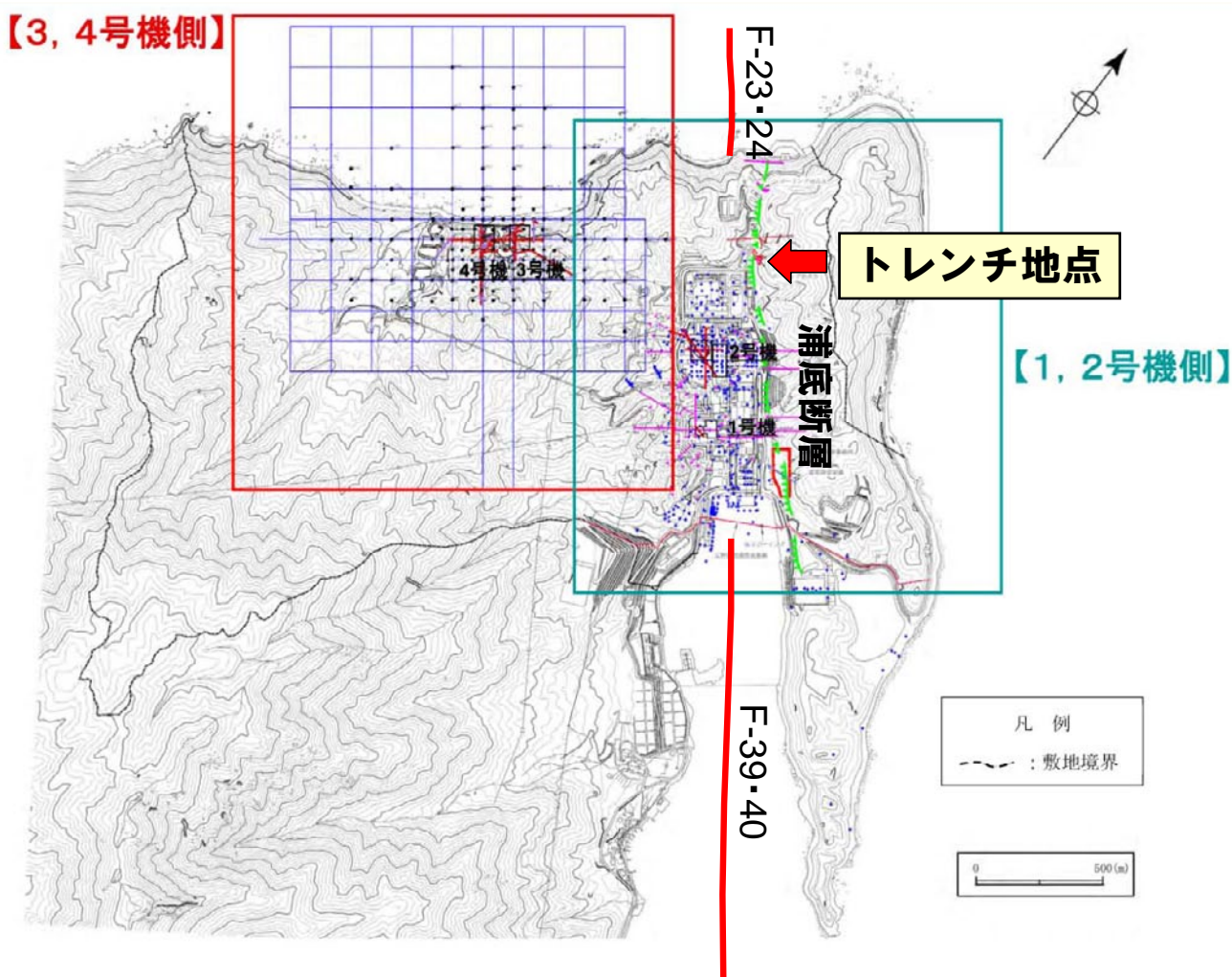


第7図. F-23・24断層(浦底セグメント)の北方延長とF-21断層(従来、白木-丹生断層)の南方延長を横断するジオパルスマ音源による音波探査断面. 変形は上部更新統に及んでいる. F-21断層の南方延長は、V字状の撓み下がり構造を示し、横ずれ成分が卓越することを示唆する. 日本原子力発電ほか(2012).

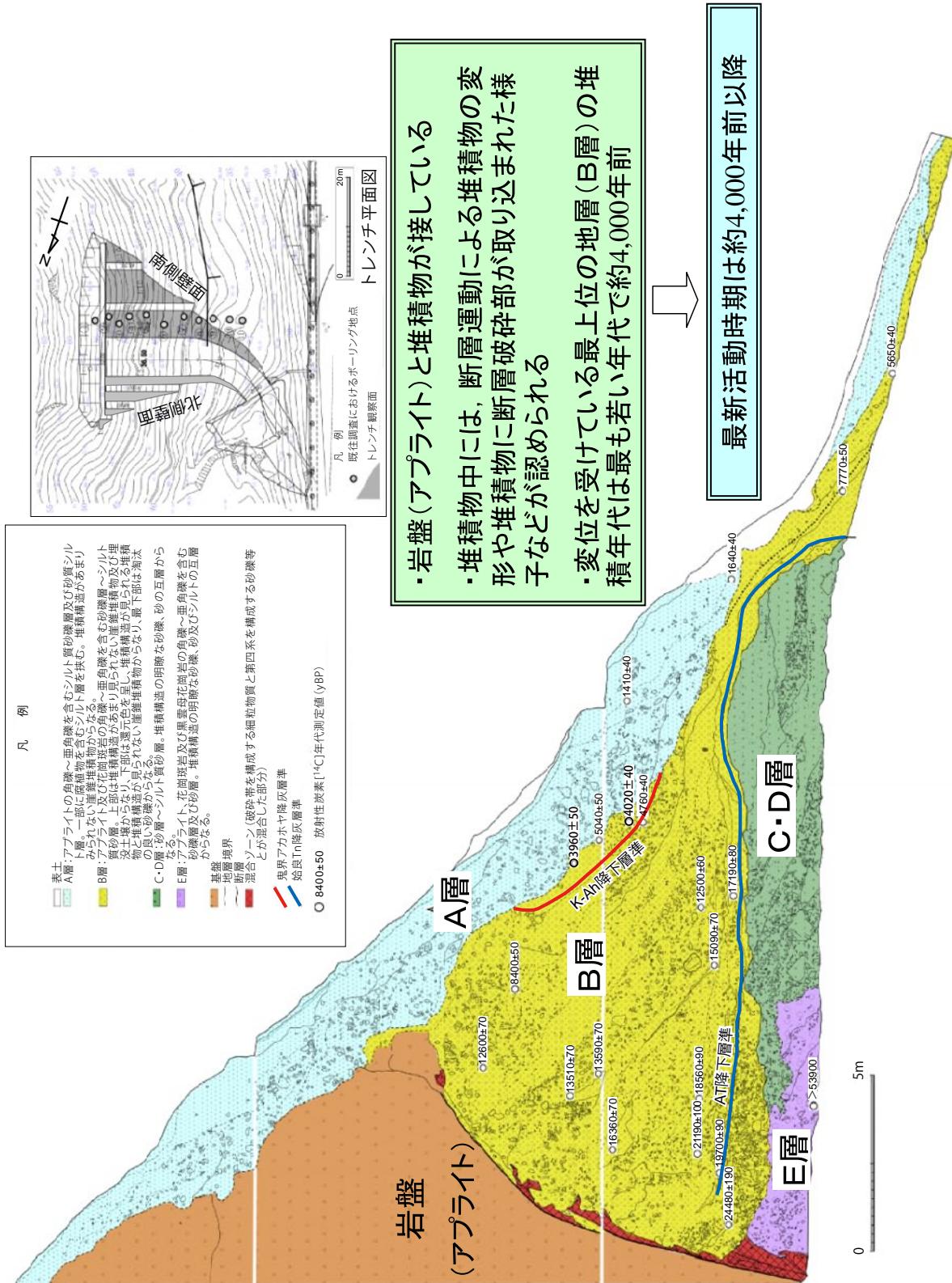
Fig. 7. Acoustic profile across the northern extension of the F-23·24 fault and the southern extension of the F-21 fault. After JAPC *et al.* (2012).



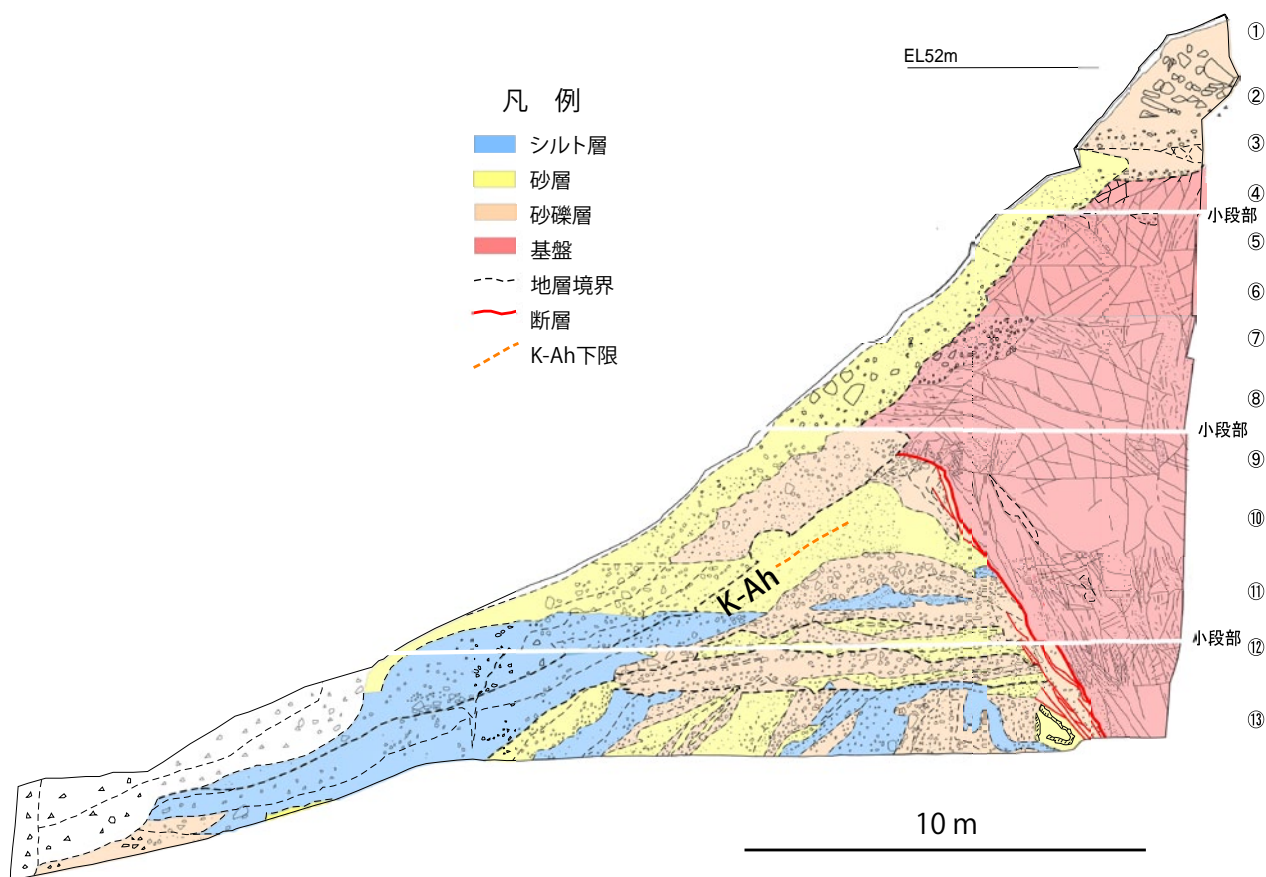
第8図. F-23・24断層(浦底セグメント)の北方延長とF-21断層(従来, 白木-丹生断層)の南方延長を横断するジオパルス音源による音波探査断面. 変形は上部更新統に及んでいる. F-21断層の南方延長は緩やかな撓み下がり構造を示す. F-23・24断層の北方延長は測位点5の南西側にわずかに認められ, これより北の測線では認められない. 日本原子力発電ほか(2012). Fig. 8. Acoustic profile across the northern extension of the F-23・24 fault and the southern extension of the F-21 fault. After JAPC *et al.* (2012).



第9図. 日本原子力発電によるトレンチ調査実施地点位置図. 日本原子力発電 (2010b) による.
Fig. 9. Location of an excavation survey by JAPC. After JAPC (2010b).



第10図. トレンチ南側壁面のスケッチと日本原子力発電の解釈. 日本原子力発電 (2008b) による.
 Fig. 10. Log of the south wall of the trench and interpretation by JAPC. After JAPC (2008b).



第 11 図. 北側壁面のスケッチ. 浦底断層は K-Ah が挟まれる層準を切っている. 日本原子力発電貸与資料 5 による. トレンチの位置については第 10 図右上のトレンチ平面図を参照.

Fig. 11. Log of the north wall of the trench and interpretation by JAPC. After materials no. 5 borrowed from JAPC.

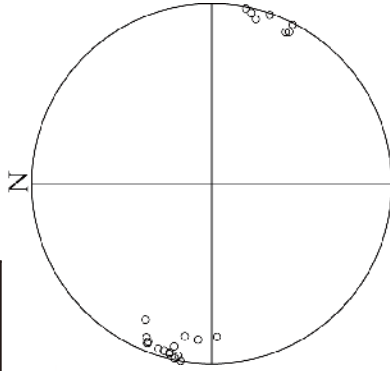
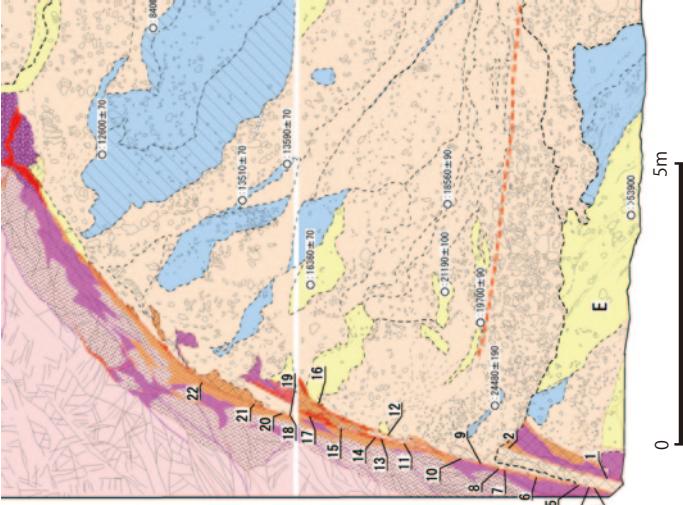
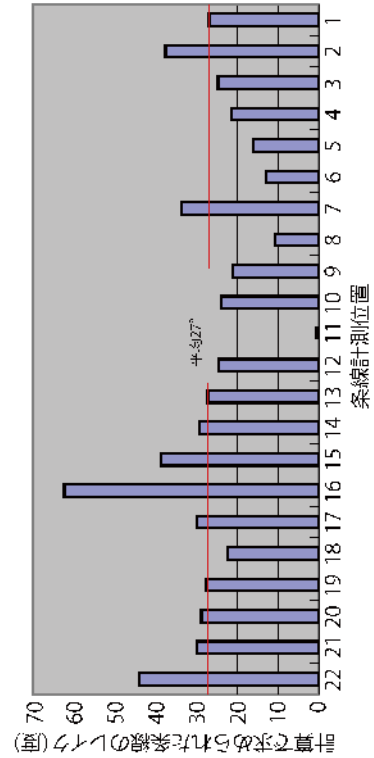


第 12 図. トレンチ南側壁面の断層上部の様子. 12600 ± 70 yBP 及び 8400 ± 50 yBP の ¹⁴C 年代が得られている堆積物にのし上げる断層 (古い断層) を, 更に新しい断層が切っている. 2011 年 10 月 27 日撮影.

Fig. 12. Photo of the upper part of the south wall of the trench.

断面面の走向・傾斜 実測値	条線の方位とプランジ 実測値	条線レイク実測値	計測 位置	断面面の傾斜と 条線のプランジから 計算したレイク
N 18 W	N 41 W	31 S	22	44
N 20 W	N 32 W	23 S	21	30
N 27 W	N 31 W	10 S	20	29
N 20 W	N 28 W	19 S	19	28
N 25 W	N 30 W	12 S	18	22
N 34 W	N 42 W	12 S	17	30
N 22 W	N 25 W	3 S	16	62
N 20 W	N 26 W	9 S	15	39
N 12 W	N 23 W	35 S	14	29
N 12 W	N 20 W	24 S	13	27
N 32 W	N 40 W	13 S	12	25
N 22 W	N 22 W	0 S	11	0
N 30 W	N 23 W	18 S	10	24
N 14 W	N 24 W	30 S	9	21
N 22 W	N 24 W	8 S	8	11
N 21 W	N 32 W	29 S	7	34
N 22 W	N 24 W	6 S	6	13
N 21 W	N 26 W	18 S	5	16
N 29 W	N 29 W	0 S	4	21
N 29 W	N 34 W	11 S	3	25
N 20 W	N 32 W	21 S	2	38
N 26 W	N 33 W	24 S	1	27
平均値			16	27

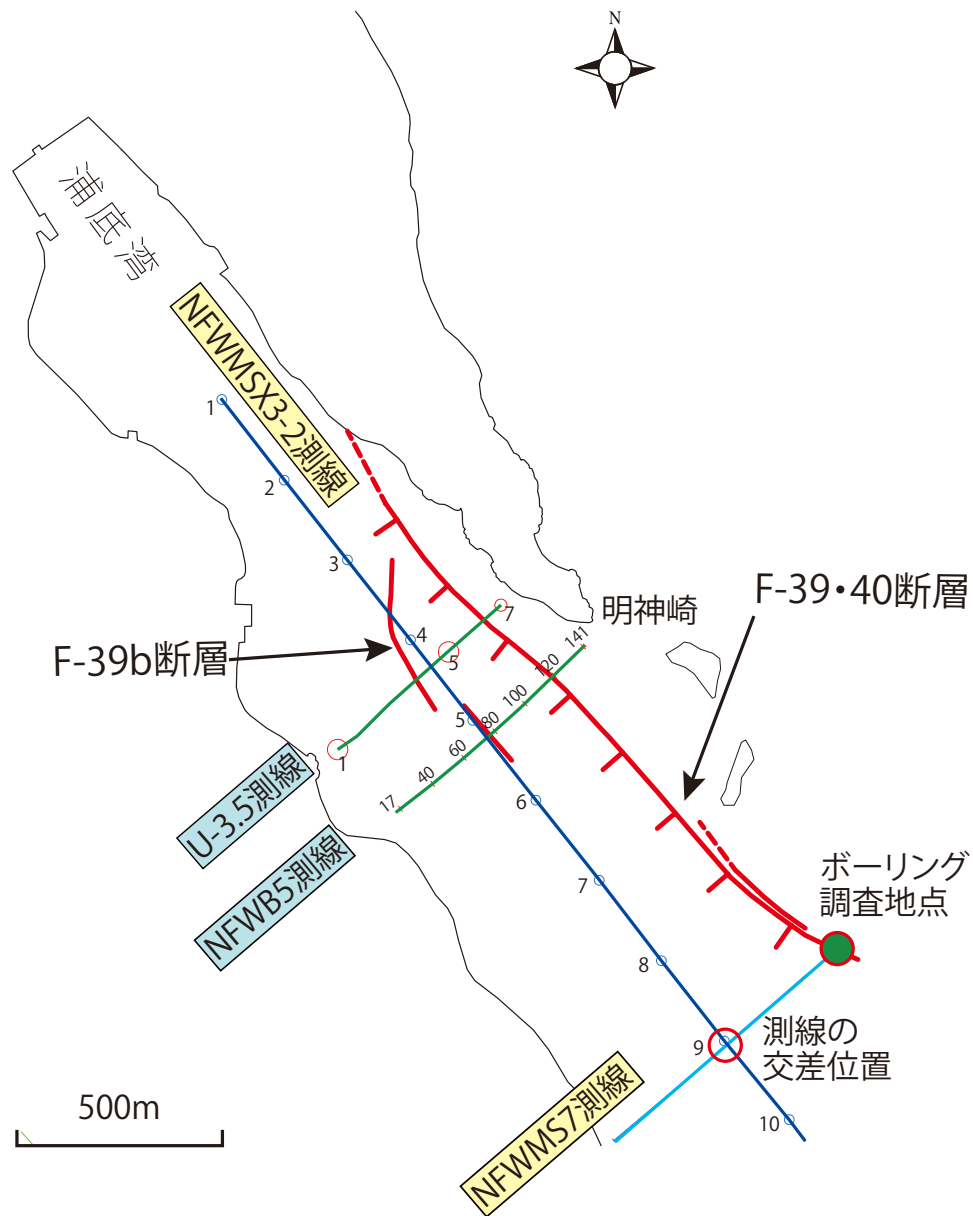
条線のプランジ実測値は22データ中17データ。正確なら、レイクはプランジとなるはず。
 ⇒レイク測定時の誤差が大きかったと推察される。プランジ計測はプロセスで済むが、レイクの計測には
 ⇒プロセスが必要。計測者への問い合わせでも、レイクの誤差が大きいと証言を得ている。
 ⇒測定時の誤差がより少ないと判断される断面面の傾斜と条線のプランジから、
 $\sin(\text{plunge}) = \sin(\text{dip}) \times \sin(\text{rake})$ の関係を用いて、レイクを求めた。
 求められたレイクの平均値は27° となった。tan 27° は約0.5なので、横ずれは縦ずれの約2倍となる。
 なお実測されたレイクの平均値16° のtangentは約0.3なので、横ずれは縦ずれの約3倍となる。



条線のプランジの実測値から
 計算したレイクより求めたP軸
 (シュミットネット下半球投影)

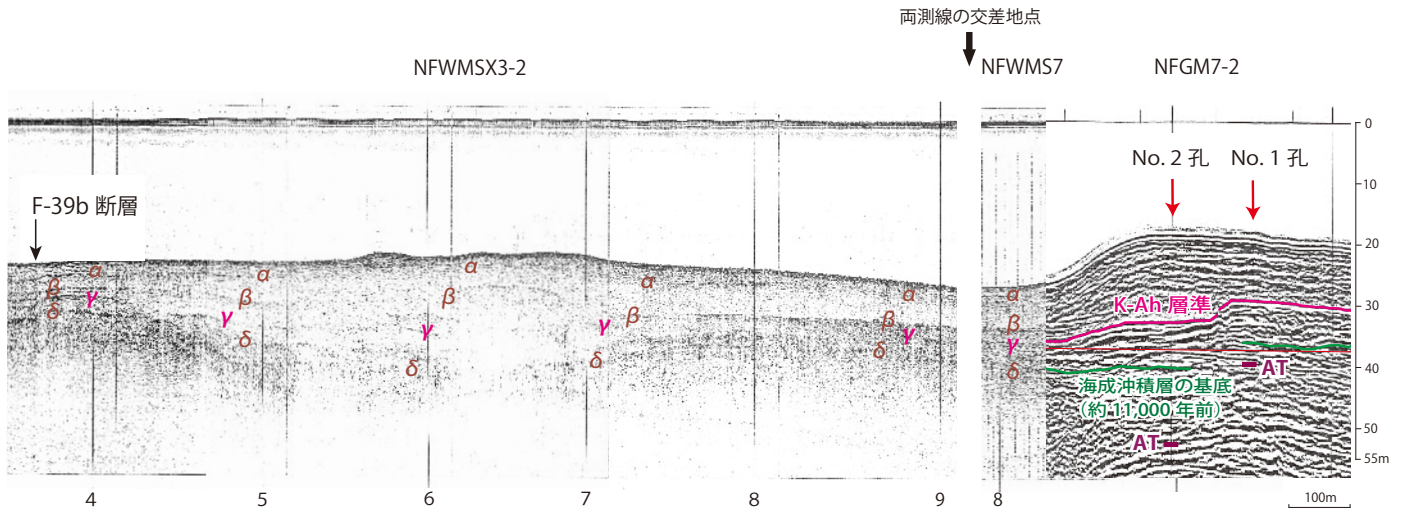


第13図. トレンチ地点の浦底断層で観察された条線の計測データ (日本原子力発電貸与資料5) と解析結果. 上左: 断面面と条線の計測・
 計算結果, 上右: 条線の計測位置, 下左: 計算で求めた条線のレイク分布, 下右: 計算から求めたP軸方位.
 Fig. 13. Data of striations on the Urazoko fault at the trench site and results on analysis of striation rake and P-axis orientation. Data are from materials no.
 5 borrowed from JAPC.



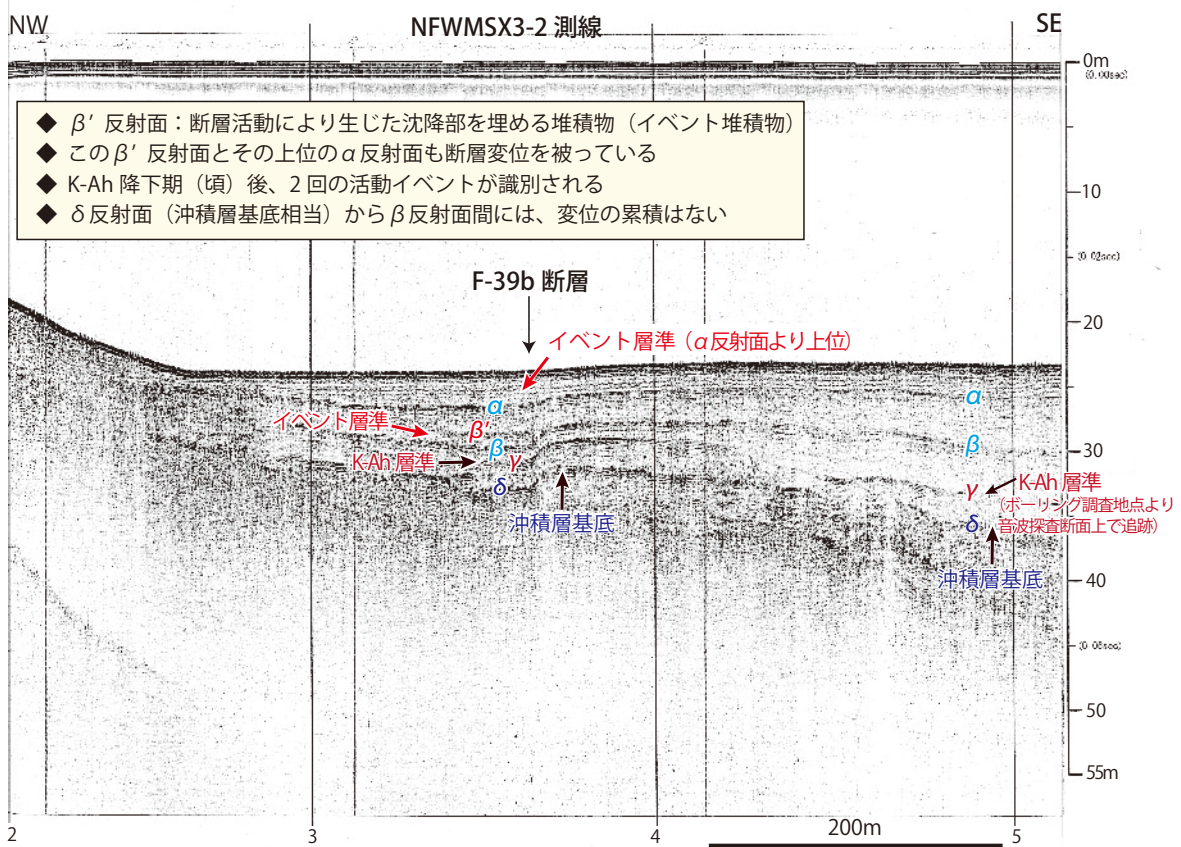
第 14 図. 浦底湾の F-39b 断層及び F-39・40 断層を横断する音波探査測線 (NFWMSX3-2, U-3.5, NFWB5 測線) 及びボーリング調査地点から K-Ah 降下層準の追跡に利用した測線 (NFWMS7, NFWMSX3-2 測線). 日本原子力発電貸与資料 2.

Fig. 14. Acoustic profiling lines across the F-39b and F-39/40 faults and the lines used for tracking the K-Ah tephra horizon from the drilling site to the area of F-39b fault. Retouched after materials no. 2 borrowed from JAPC.



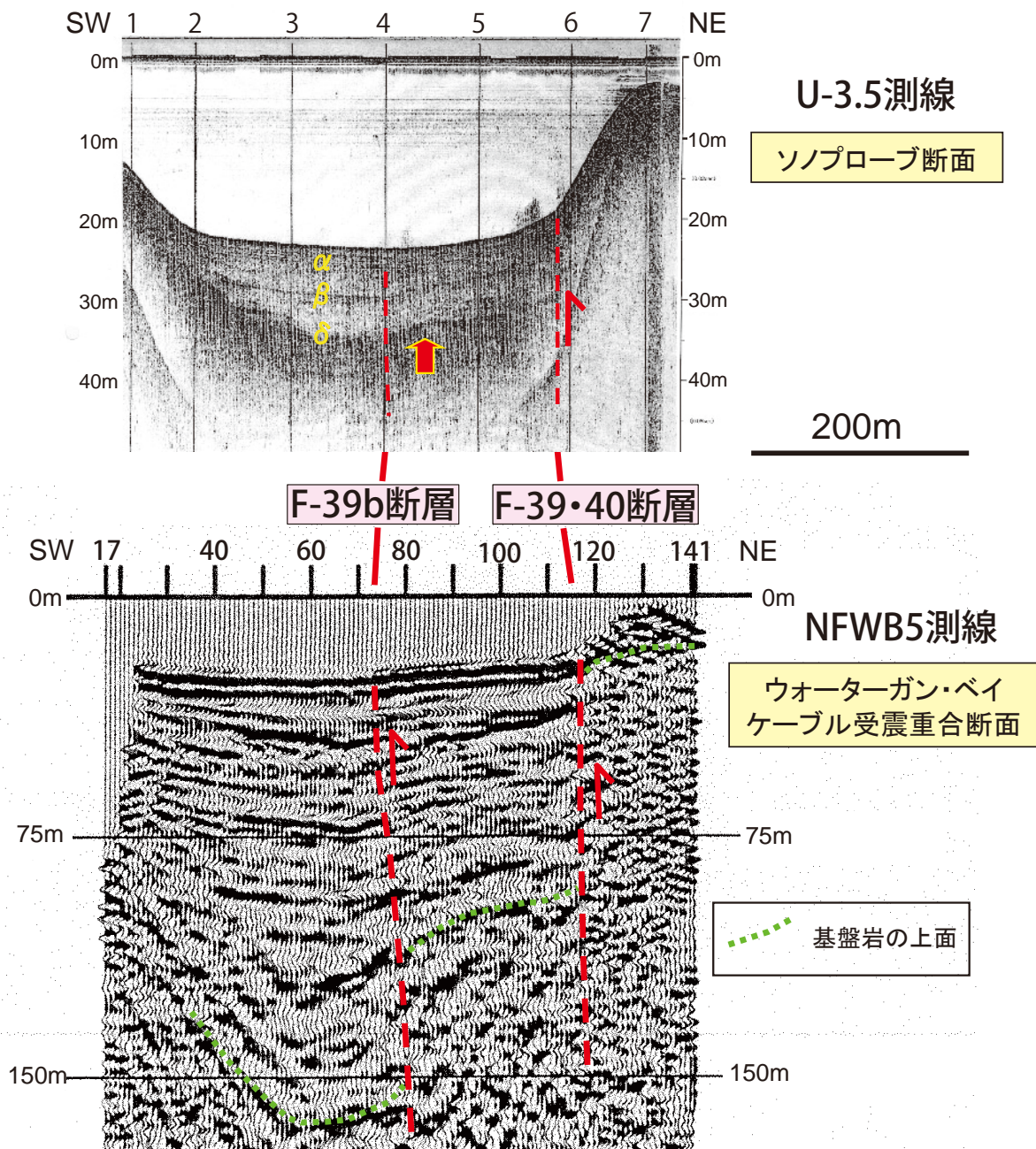
第 15 図. ボーリング調査地点から浦底湾の F-39b 断層周辺への K-Ah 層準の追跡. NFGM7-2 測線及びボーリング調査地点 (No. 1 孔・No. 2 孔) の位置については第 19 図参照. 日本原子力発電貸与資料 2.

Fig. 15. Pursuit of the K-Ah tephra horizon from the drilling site to the area of F-39b fault on the acoustic profiles. See Fig. 19 for the location of profile line NFGM7-2 and drilling sites Nos. 1 and 2. The profiles are after materials no. 2 borrowed from JAPC.



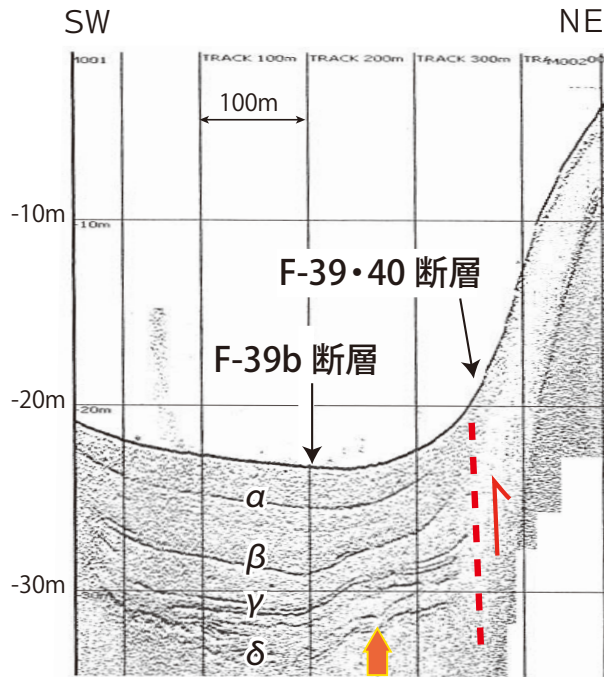
第 16 図. NFWMSX3-2 測線のソノプローブ音波探査断面. 日本原子力発電貸与資料 2.

Fig. 16. Acoustic profile across the F-39b fault. The profile is after materials no. 2 borrowed from JAPC.

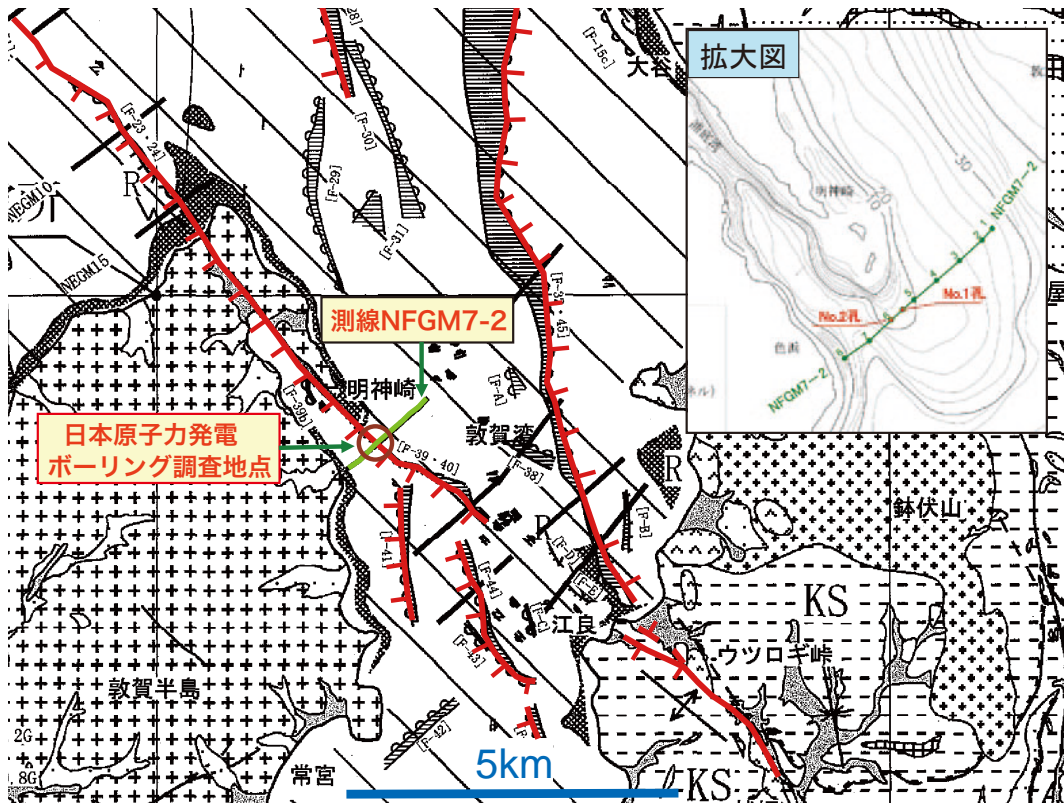


第 17 図. U-3.5 測線のソノプローブ音波探査断面と NFWB5 測線のウォーターガン・ベイケーブル受震の音波探査断面. 日本原子力発電貸与資料 2.

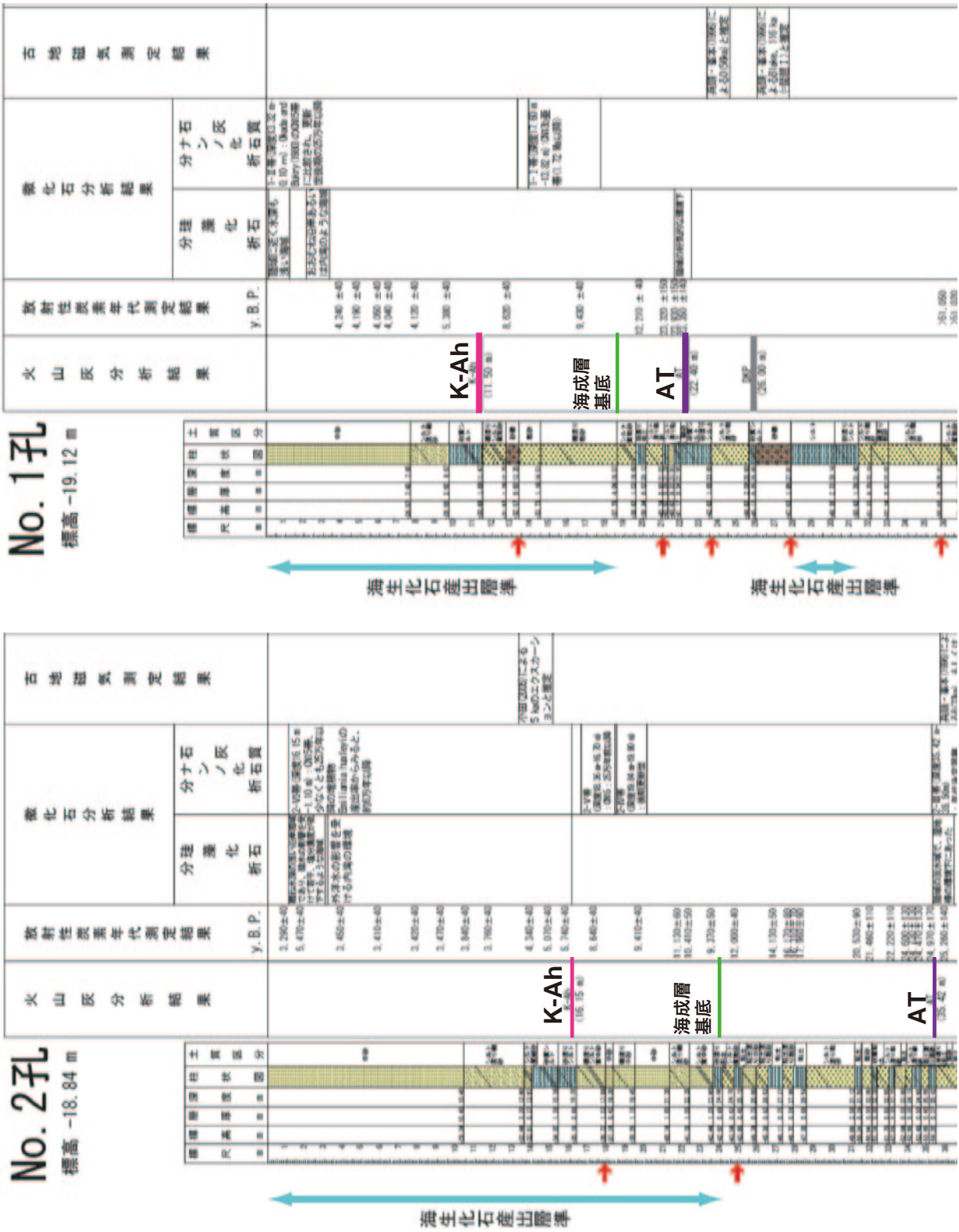
Fig. 17. Acoustic profiles across the F-39b and F-39·40 faults. The profiles are after materials no. 2 borrowed from JAPC.



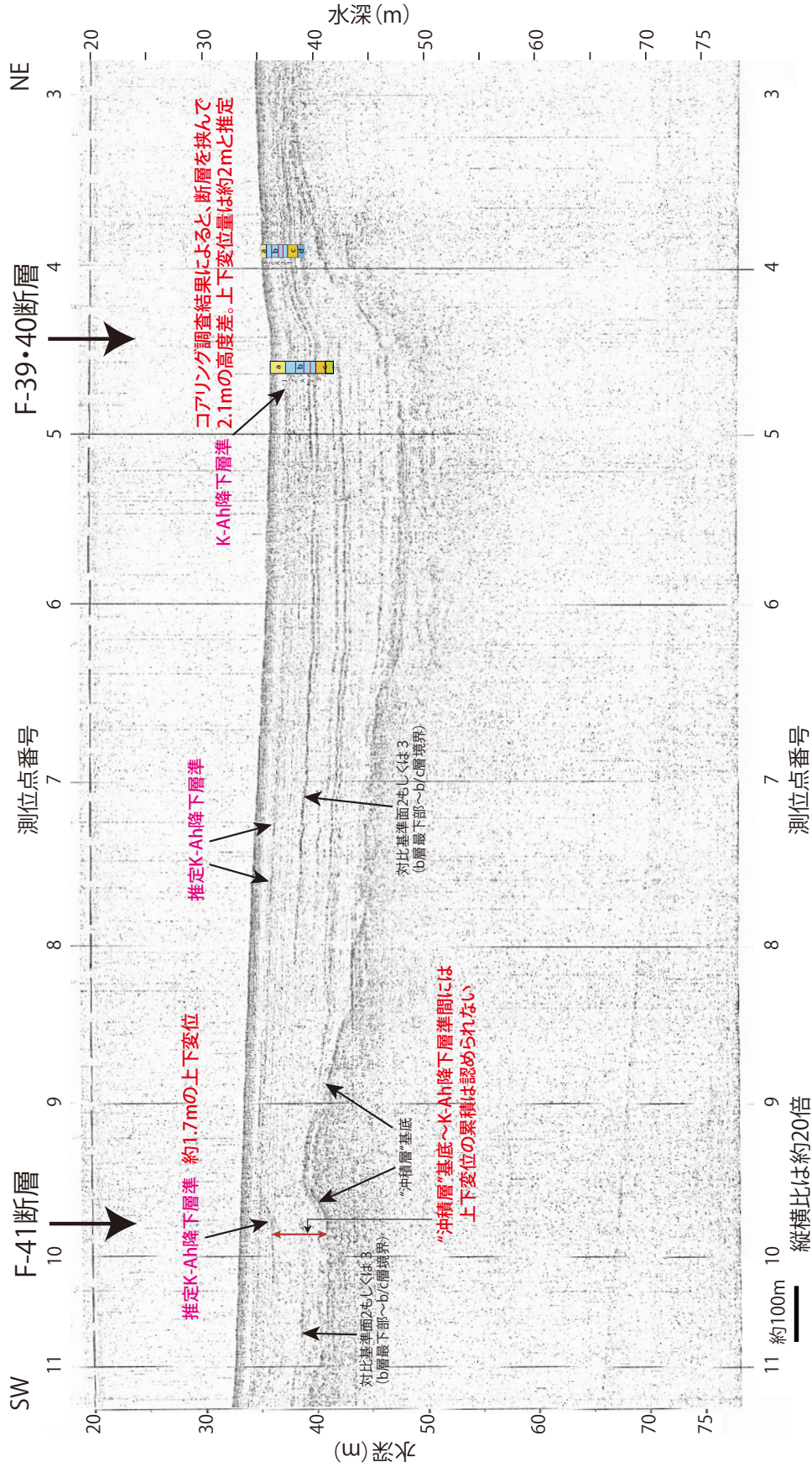
第 18 図. L-1 測線の音波探査断面. L-1 測線の位置はほぼ U-3.5 測線に沿っている(本研究報告中の杉山ほか, 2012 の第 27 図参照). 東海大学 (2012) に加筆.
 Fig. 18. High-resolution acoustic profile across the F-39b and F-39·40 faults. Retouched after Tokai Univ. (2012).



第 19 図. 日本原子力発電によってボーリング調査が行われた地点の位置図. 日本原子力発電 (2008a) に加筆.
 Fig. 19. Location of two drilling sites and acoustic profile line NFGM7-2. Retouched after JAPC (2008a).

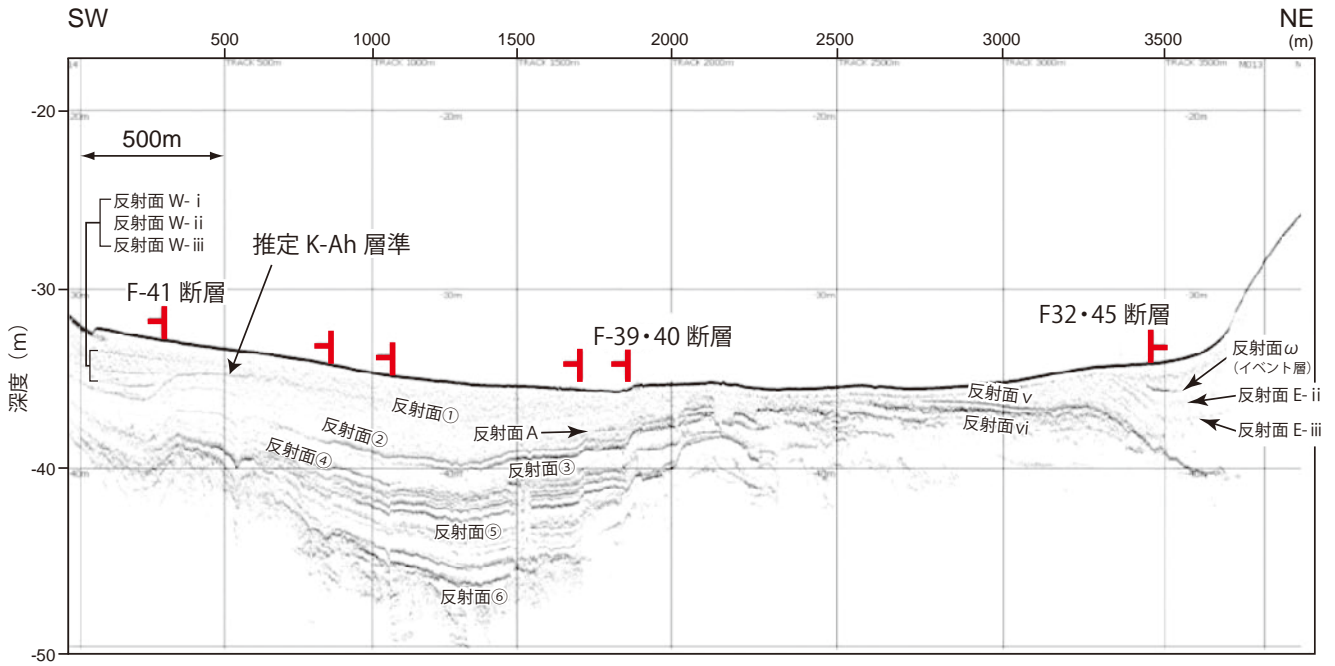


第 20 図, ボーリング柱状図, 日本原子力発電 (2008a) に加筆。
Fig. 20. Geological columns of two cores extracted from No. 1 and No. 2 sites by drilling. Retouched after JAPC (2008a).

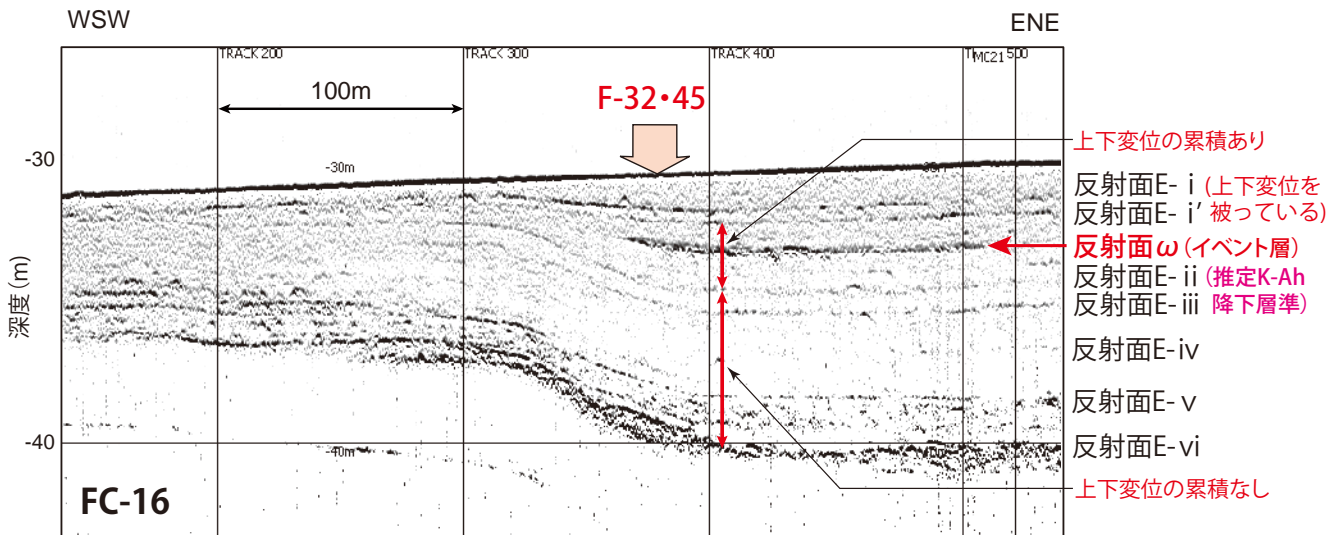


第23図. F-39・40断層(コアリング調査地点近傍)及びF-41断層を横切るNFWM10-2測線の音波探査断面. 日本原子力発電貸与資料2に加筆. 測線位置は第22図を参照.

Fig. 23. Acoustic profile of line NFWM10-2 across the F-39-40 and F-41 faults. Retouched after materials no. 2 borrowed from JAPC. See Fig. 22 for the location of line NFWM10-2.



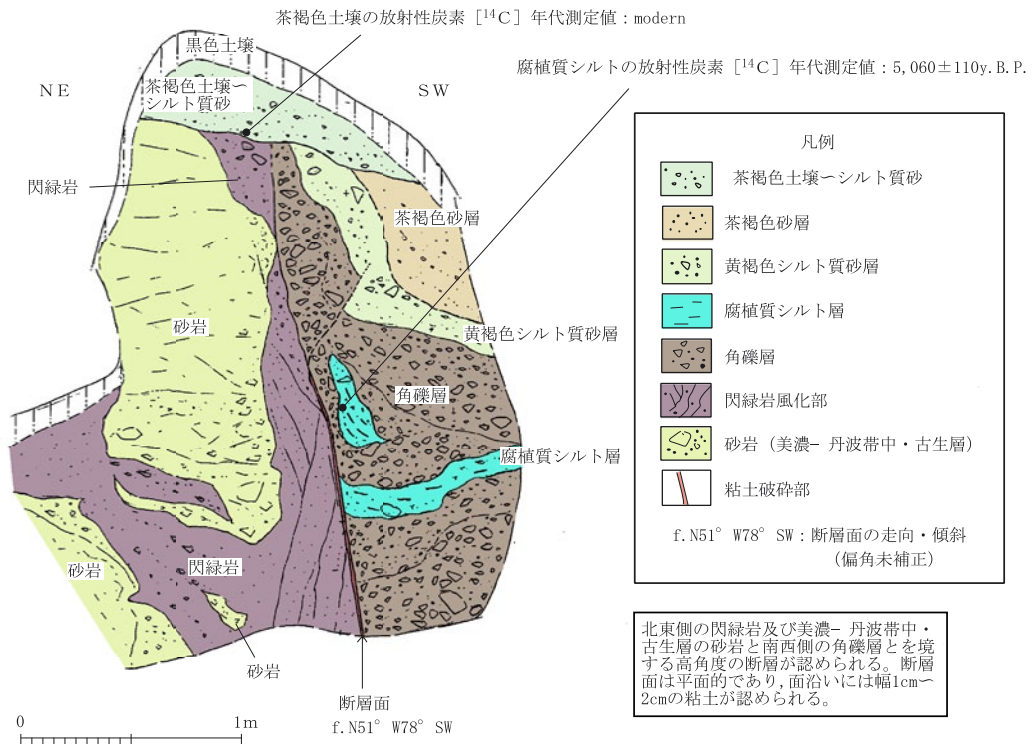
第 24 図. L-7 測線の音波探査断面. 産総研・東海大学 (2012) による. 測線の位置は第 22 図を参照.
 Fig. 24. Acoustic profile of line L-7. After AIST and Tokai Univ. (2012). See Fig. 22 for the location of line L-7.



第 25 図. FC-16 測線の音波探査断面. 産総研・東海大学 (2012) による. 測線の位置は第 22 図を参照.
 Fig. 25. Acoustic profile of line FC-16. After AIST and Tokai Univ. (2012). See Fig. 22 for the location of line FC-16.



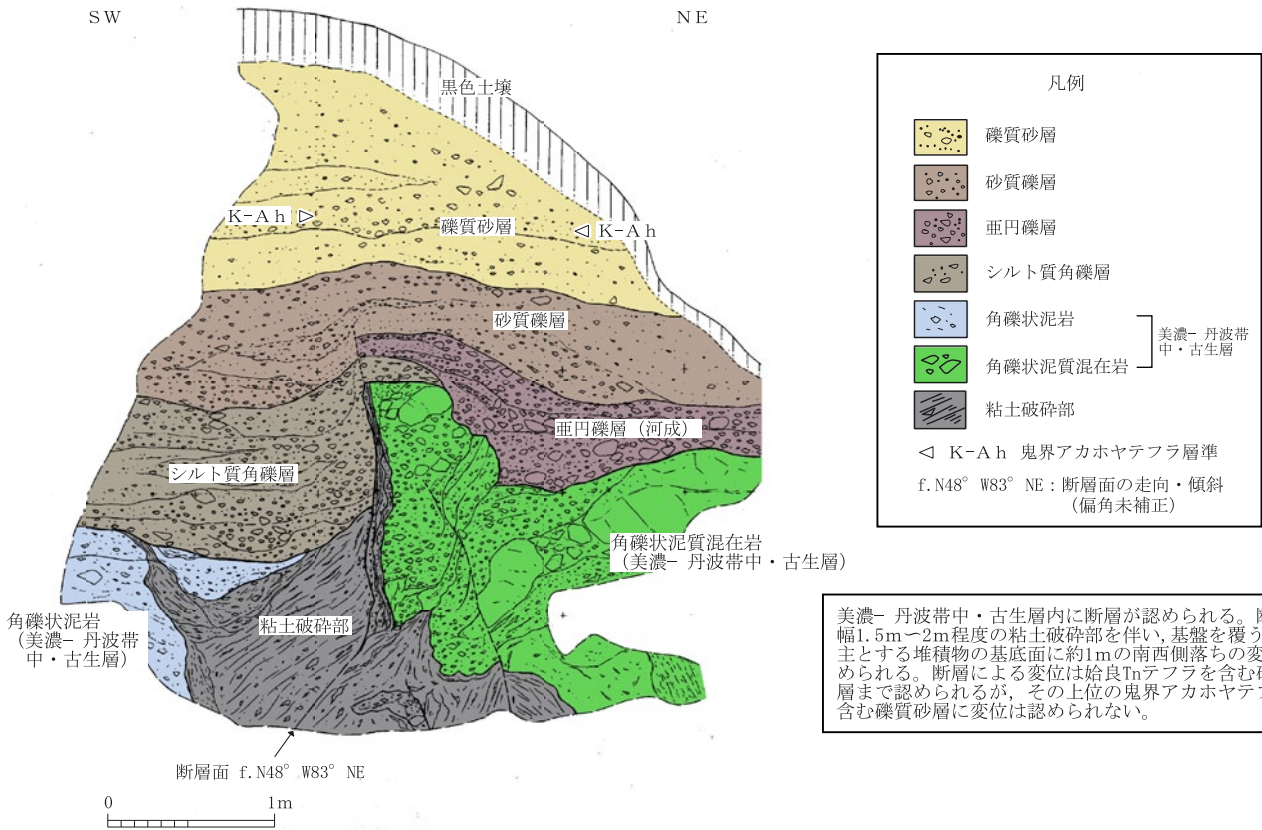
第 26 図. ウツロギ峠断層のトレースと変動地形. 国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「杉津」.
 Fig. 26. Trace of the Utsurogi Pass fault and associated geomorphic features indicating fault displacement or deformation.



第 27 図. ウツロギ峠南西 Loc. U-1 の断層露頭スケッチ. 日本原子力発電 (2010a) による.
 Fig. 27. Sketch of a fault exposure at Loc. U-1, southwest of Utsurogi Pass. After JAPC (2010a).



第 28 図. 池河内断層のトレースと変動地形. 国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「敦賀」及び「中河内」.
 Fig. 28. Trace of the Ikenogouchi fault and associated geomorphic features indicating fault displacement or deformation.



第 29 図. 池河内北西方 Loc. U-2 の断層露頭スケッチ. 日本原子力発電 (2010a) による.
 Fig. 29. Sketch of a fault exposure at Loc. U-2, northwest of Ikenogouchi. After JAPC (2010a).

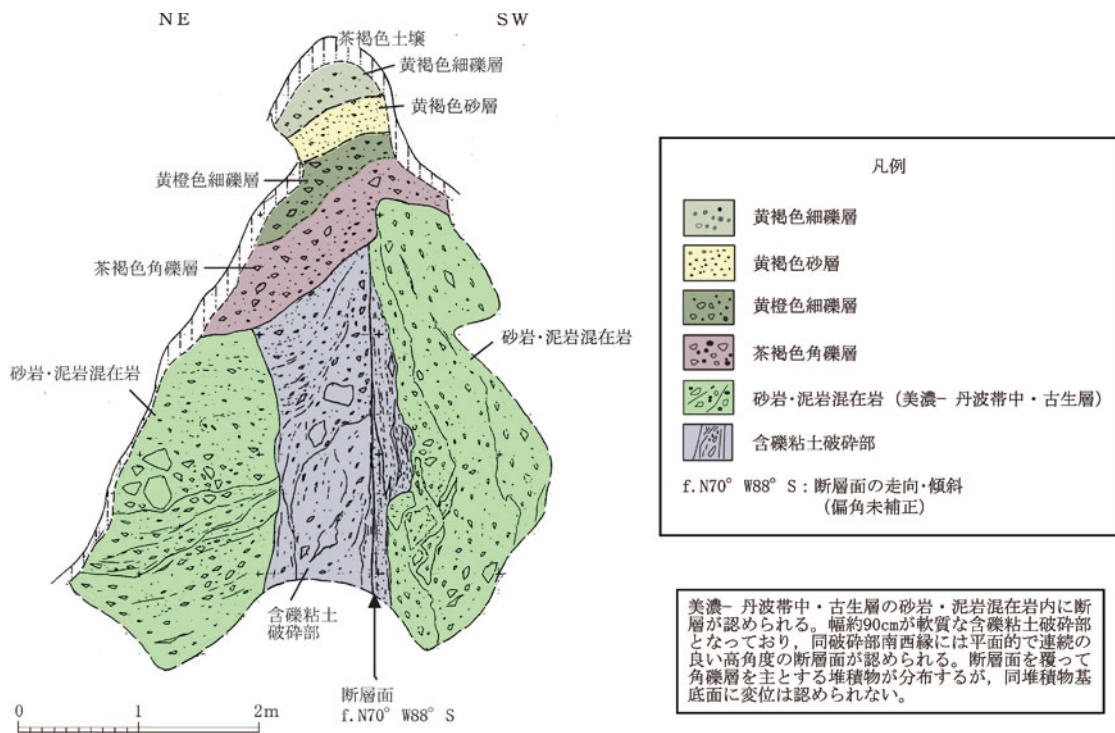


第 30 図. 池河内北西方の溝状～断層凹地状の地形とバルジ状～リッジ状の高まり.
日本原子力発電開示資料 5 による.

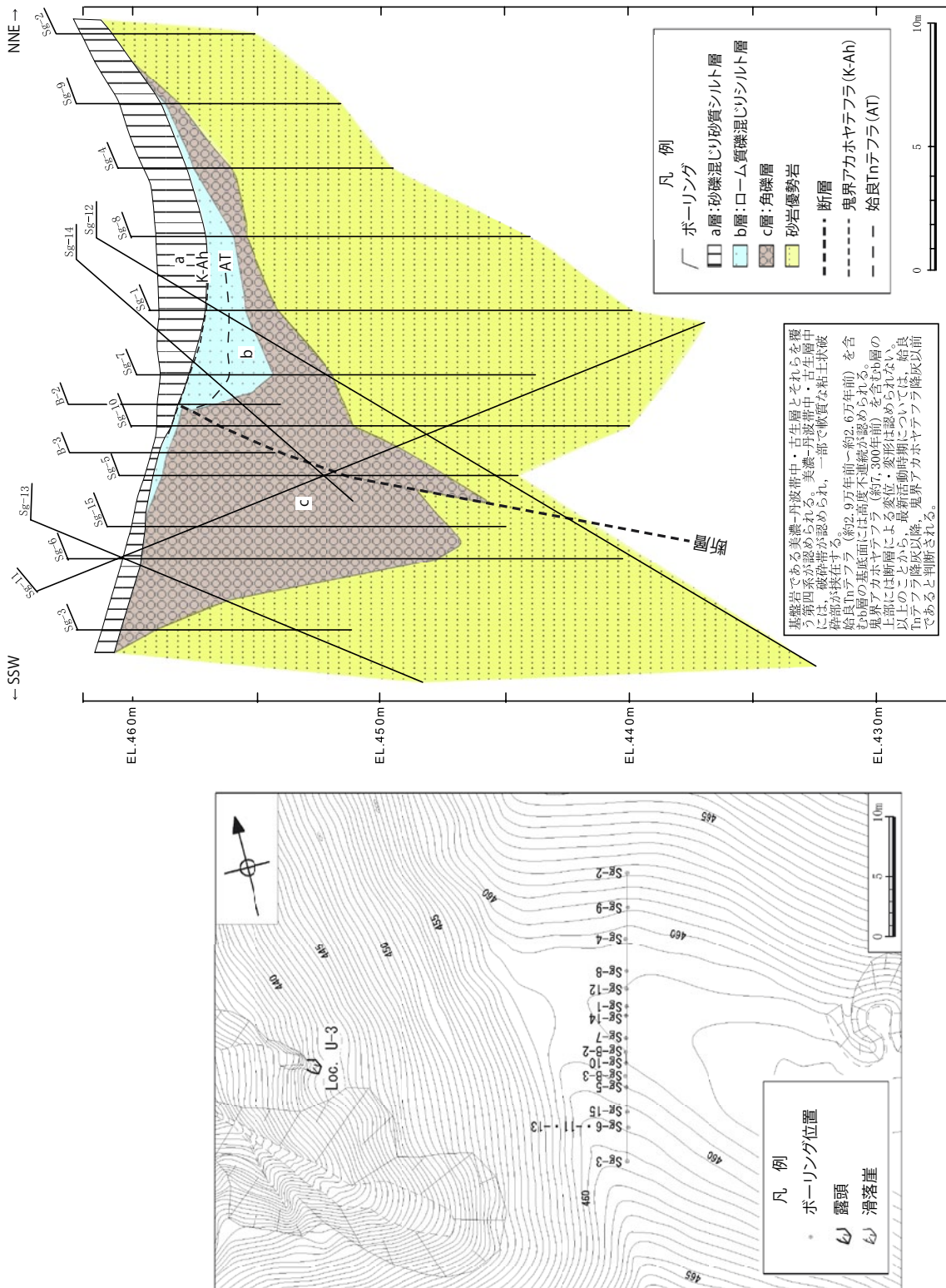
Fig. 30. Probable fault sag and tectonic bulge or ridge on the trace of the Ikenogouchi fault,
about 2 km northwest of Ikenogouchi. After materials no. 5 borrowed from JAPC.



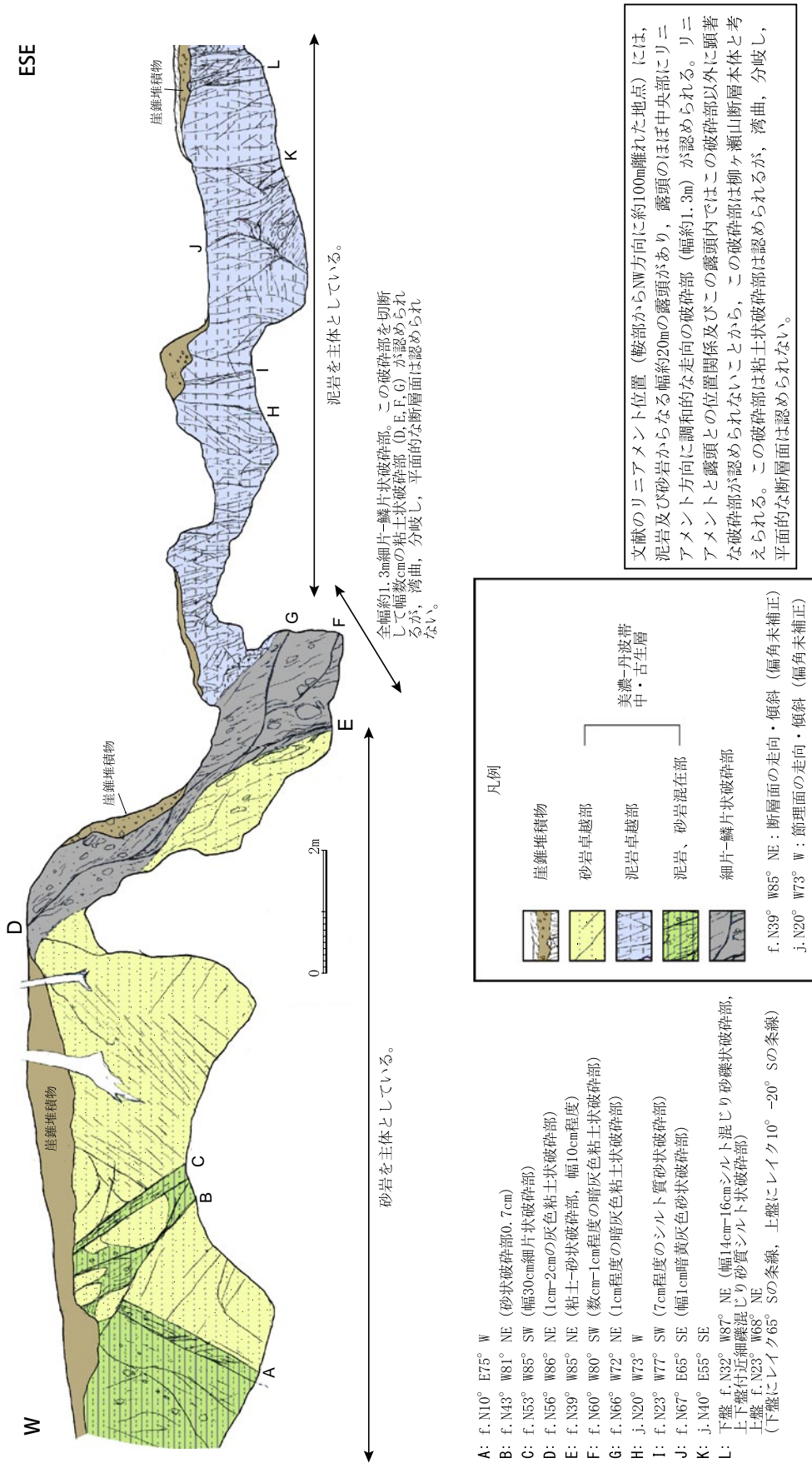
第 31 図. 柳ヶ瀬山断層及び柳ヶ瀬断層のトレースと既往調査地点. 国土地理院発行 2万 5 千分の 1 地形図「中河内」.
Fig. 31. Trace of the Yanagaseyama and Yanagase faults and location of sites where precise survey has been conducted already.



第 32 図. 杉箸北東方 Loc. U-3 の断層露头スケッチ. 日本原子力発電 (2010a) による.
Fig. 32. Sketch of a fault exposure at Loc. U-3, northeast of Sugihashi. After JAPC (2010a).



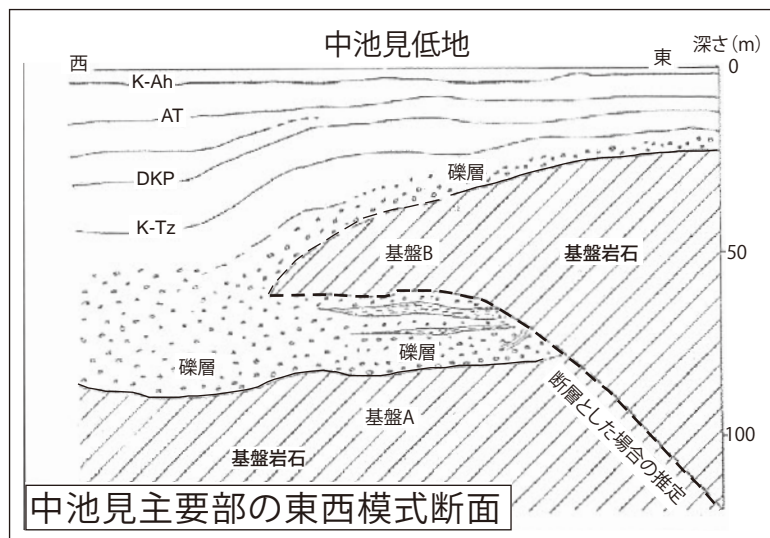
第33図. 杉箸北東方 Loc. U-3 におけるボーリング調査結果. 日本原子力発電 (2010a) による.
Fig. 33. Drilling survey result at Loc. U-3, about 1.5 km northeast of Sughashi. After JAPC (2010a).



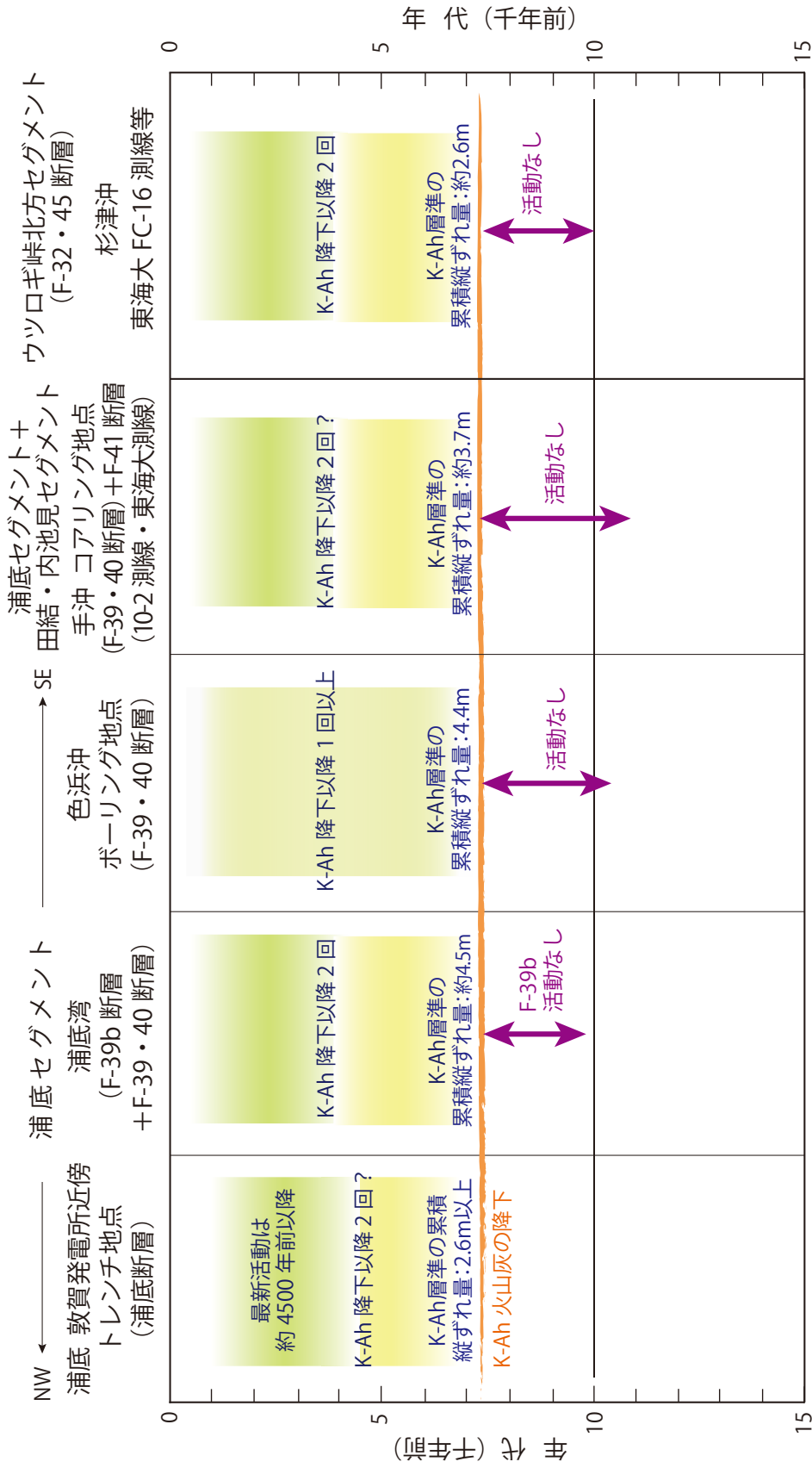
第34図. 柳ヶ瀬山近傍 Loc. Ut-6 の断層露頭スケッチ. 日本原子力発電 (2010a) による.
Fig. 34. Sketch of a fault exposure at Loc. Ut-6 close to Yanagaseyama (Mt. Yanagase). After JAPC (2010a).



第 35 図. 池見断層（内池見リニアメント）及び敦賀断層北部のトレース. 国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「杉津」及び「敦賀」.
 Fig. 35. Trace of the Ikemi fault (Uchiikemi lineament) and northern part of the Tsuruga fault.

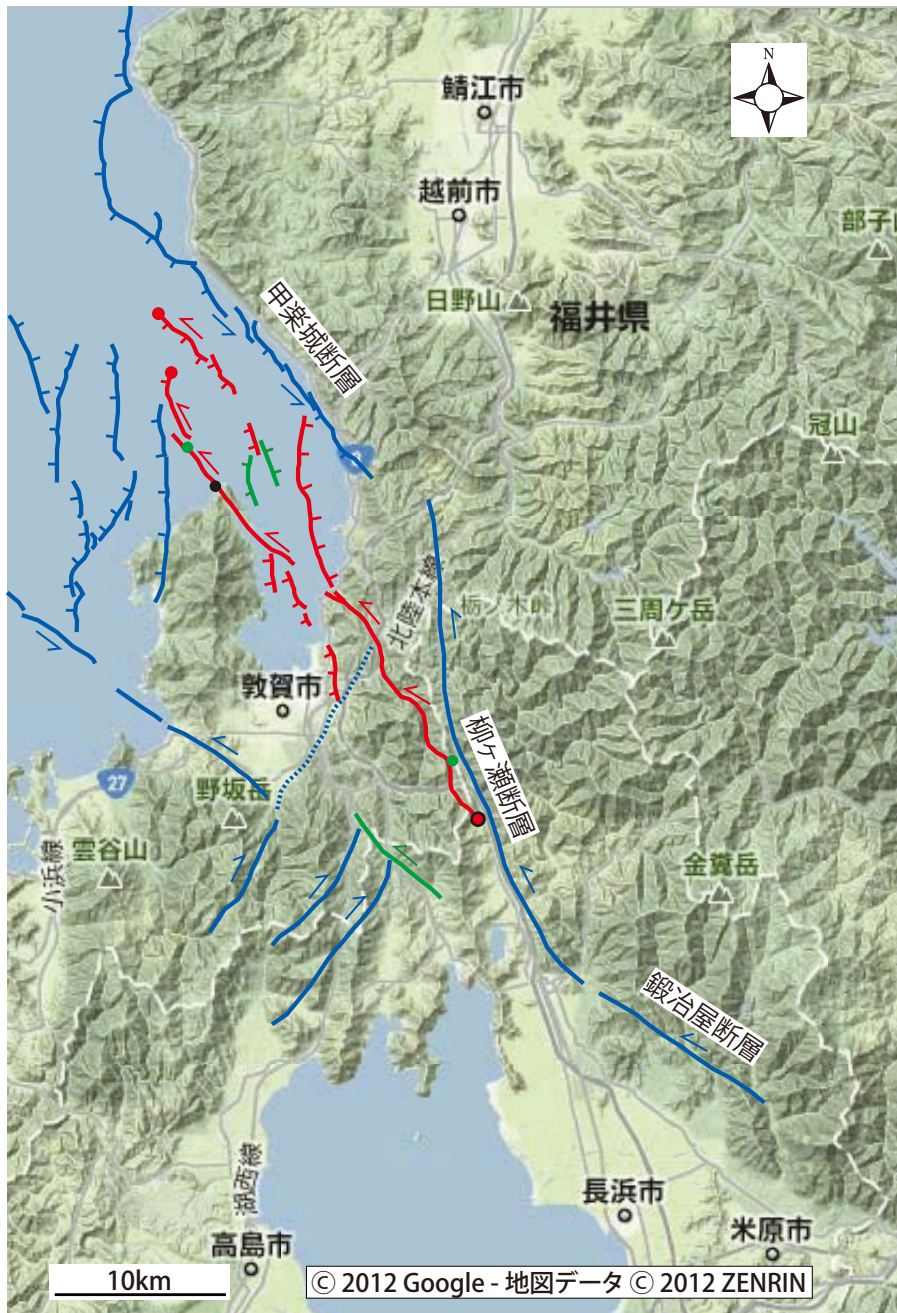


第 36 図. 中池見の東西模式断面. 岡田 (2009) による.
 Fig. 36. Schematic E-W geologic profile of Nakaikemi lowland. After Okada (2009).



第 37 図. 浦底セグメント, 田結・内池見セグメント及びウツロギ峠北方セグメントの完新世活動と K-Ah 層準の累積縦ずれ (上下ずれ) 量, 「活動なし」の年代範囲を示す矢印の下限年代は, 各地点における 沖積層 (後氷期海進に伴う堆積物) の基底深度と日本近海における最終間氷期末期以降の海水準変化 (Saito, 1994) から推定した。

Fig. 37. Holocene faulting events and cumulative vertical (dip-slip) displacement of the K-Ah horizon on the Urazoko, Tai-Uchiikemi and Utsurogito-
hoppo fault segments.



- 地震調査委員会(2004)の浦底-柳ヶ瀬山断層帯の北端と南端
- 日本原子力発電(2010a)の浦底セグメントの北端とウツロギ峠-池河内セグメントの南端
- 本調査による浦底-柳ヶ瀬山断層帯の端点
- 浦底-柳ヶ瀬山断層帯を構成する活断層
- その他の活断層(後期更新世以降に活動した断層)
- 中期更新世以前に活動した断層

第 38 図. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯を構成する断層の位置と分布。「活動なし」の年代範囲を示す矢印の下限年代は、各地点における 沖積層 (後氷期海進に伴う堆積物) の基底深度と日本近海における最終間氷期末期以降の海水準変化 (Saito, 1994) から推定した。

Fig. 38. Location and distribution of faults forming the Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone.

第1表. 浦底セグメント, 田結・内池見セグメント及びウツロギ峠北方セグメントの活断層パラメーター一覧.
Table 1. Active fault parameters of the Urazoko, Tai-Uchiikemi and Utsurogitoge-hoppo fault segments.

地点 活動時期・活動性	浦底セグメント			浦底セグメント+ 田結・内池見セグメント	ウツロギ峠北方セグメント (F-32・45断層)
	敦賀原発近傍 トレンチ地点 (浦底断層)	浦底湾(F-39b断層 +F-39・40断層)	色浜沖ボーリング地点 (F-39・40断層)		
平均上下ずれ速度			0.45m/千年 (AT降下層準)		
平均横ずれ速度			0.45m/千年以上		
最新活動時期	約4.5千年前以降				
(推定)K-Ah降下層準以降の活動	2回?	2回	1回以上	2回?	2回
約11~10 ka以降, K-Ah降下層準以前の活動	不明	なし	なし	なし	なし
活動の間隔		3千年~7千年	4.9千年 (1回変位量と変位速度より)		3千年~7千年
K-Ah層準の累積横ずれ量	2.6m以上	約4.5m	4.4m	約3.7m	約2.6m
K-Ah降下以降2回と仮定した場合の 1回横ずれ変位量(平均値)	1.3m以上	約2.3m	2.2m	約1.9m	約1.3m
横ずれ量=縦ずれ量と仮定した場合 の1回横ずれ変位量とネット変位量	1.3m以上 1.8m以上	約2.3m 約3.3m	2.2m 3.1m	約1.9m 約2.7m	?(縦ずれ卓越) 約1.3m以上
栗田(1999)による上記ネット変位量 に対応する活動セグメント長	15km以上	約28km	27km	約23km	約11km以上
栗田(1975)、栗田(1999)による上記 ネット変位量に対応する地震セグメン ト長(運動する可能性が高い範囲)	22.7km以上 28km以上	約42km 約51km	39km 48km	約34km 約42km	
横ずれ量=縦ずれ量の2倍と仮定し た場合の1回横ずれ変位量とネット変 位量	2.6m以上 2.9m以上	約4.5m 約5.1m	4.4m 4.9m	約3.7m 約4.2km	
栗田(1999)による上記ネット変位量 に対応する活動セグメント長	25km以上	約44km	42km	約36km	
栗田(1975)、栗田(1999)による上記 ネット変位量に対応する地震セグメン ト長(運動する可能性が高い範囲)	37km以上 45km以上	約64km 約79km	62km 75km	約53km 約65km	

第2表. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の活断層パラメーター一覧.
Table 2. Active fault parameters of the Urazoko-Yanagaseyama Fault Zone.

	従来評価	本調査の結果
1. 断層帯の構成, 位置・形状, 規模		
(1) 断層帯を構成する断層	浦底断層, ウツロギ峠(断層), 池河内断層及び柳ヶ瀬山断層	以下の形状セグメント ・浦底セグメント(F-21断層, F-23・24断層, 浦底断層, F-39・40断層) ・田結・内池見セグメント(F-41断層, F-44断層, F-44b断層等, 田結リニアメント, 内池見リニアメント) ・ウツロギ峠北方セグメント(F-32・45断層) ・ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント(ウツロギ峠断層, 池河内断層, 柳ヶ瀬山断層) ・甲楽城沖セグメント(F-17・18, F-19, F-28断層)
(2) 断層帯の位置・形状と規模		
1) 地表における断層帯の位置・形状と規模		
断層帯の位置(北端と南端)	(北端) 立石岬の南(北緯35°45' 東経136°01')	(北端) 干飯崎の南南西約4km(北緯35°51', 東経135°58') もしくは立石岬の北北西約7km(北緯35°49', 東経135°59'; 甲楽城沖セグメントを含まない場合)
	(南端) 柳ヶ瀬山の南東約1km(北緯35°35' 東経136°11')	(南端) 柳ヶ瀬山の南東約1km(北緯35°35' 東経136°11')
長さ	約25km	・約35kmもしくは約32km(甲楽城沖セグメントを含まない場合) ・1回のずれの量から, 活動区間は40km以上に達する可能性がある
2) 地下における断層面の位置・形状	地表での位置・長さと同じ	浦底セグメントとウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントについては, 地表・海底での位置・長さとはほぼ同じ
上端の深さ	0km	0km
一般走向	N40°W	N32°WもしくはN38°W(甲楽城沖セグメントを含まない場合)
傾斜	ほぼ垂直(地表近傍)	・浦底セグメントとウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント: ほぼ鉛直 ・ウツロギ峠北方セグメント: 西傾斜 ・田結・内池見セグメント: 東傾斜 ・甲楽城沖セグメント: 北東傾斜~ほぼ鉛直
幅	約15km	約15km

第2表. 続き.
Table 2. Continued.

(3) 断層のずれの向きと種類	左横ずれ断層	<ul style="list-style-type: none"> ・浦底セグメントとウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント: 逆断層成分を伴う左横ずれ断層 ・ウツロギ峠北方セグメントと田結・内池見セグメント: 逆断層成分が卓越する ・甲楽城沖セグメント: 逆断層成分と左横ずれ成分を持つと推定される
2. 断層帯の過去の活動		
(1) 平均的なずれの速度	不明 (活動度B-C級)	<ul style="list-style-type: none"> ・上下成分: 0.45m/千年(AT層準の12.7mの上下変位量による) ・横ずれ成分: 0.45m/千年以上(上下成分と同等以上で、2倍(0.9m/千年)に達する可能性がある) ・ネット: 0.64/千年以上
(2) 過去の活動時期	不明 (本断層付近では、いくつかの被害地震の記録があるが、いずれも本断層帯の活動との関係は不明)	<ul style="list-style-type: none"> ・約7300年前のK-Ah降下後に2回 ・最新活動は約4500年前以後(既存のトレンチ調査結果による) ・約1万年前~K-Ah降下時期までは顕著な上下変位を伴う活動はない ・付近の歴史地震との関係は不明
(3) 1回のずれの量と平均活動間隔		
1) 1回のずれの量	約2m (松田の経験式から)	<ul style="list-style-type: none"> ・上下成分: 2.2m(K-Ah層準の4.4mの上下変位量による) ・横ずれ成分: 2.2m以上(上下成分と同等以上で、2倍(約4m)に達する可能性がある) ・ネットスリップ: 3.1m以上
2) 平均活動間隔	不明	<ul style="list-style-type: none"> ・約5千年(5千年±2千年程度) ・ボーリング調査地点のAT以降の平均上下変位速度(0.45m/千年)と上下方向の1回のずれの量(2.2m)からは4.9千年 ・1万年前以降の活動履歴からは3千~7千年程度
(4) 過去の活動区間	断層帯全体で1区間	<ul style="list-style-type: none"> ・断層帯全体 ・1回のずれの量から、柳ヶ瀬断層南部等が本断層帯と一つの活動区間をなすか、本断層帯と連動した可能性がある