

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
成果報告書

平成 24 年 5 月

産業技術総合研究所
東海大学

目 次	頁
1. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の概要	1
1.1 断層帯の概要と研究史	1
1.2 地震調査委員会による長期評価の概要と残された課題	1
2. 調査目標と調査項目	2
2.1 調査目標	2
2.2 調査項目と各項目の主な目標	2
3. 高分解能音波探査	2
3.1 探査機器及び探査測線	2
3.2 概査結果	3
3.3 精査結果1－音響層序	4
3.4 精査結果2－断層海域の地質構造	5
4. 柱状採泥調査	6
4.1 調査海域	6
4.2 海上調査の方法	6
4.3 コアの観察・記載及び測定・分析の方法	7
4.4 採泥調査結果	8
4.5 コア観察結果	8
4.6 コア間の地層対比と層序区分	10
4.7 各層の層相記載	10
4.8 測定・分析結果	12
4.9 ¹⁴ C 年代測定及び火山灰分析結果に基づく各層・各対比基準面の年代	15
5. 地質層序と音響層序の対応付け、及びコア採取深度の補正	16
5.1 地質層序と音響層序の対応付け	16
5.2 コア採取深度の補正	16
6. 各反射面及び対比基準面の断層両側での高度差分布と断層活動	17
6.1 各反射面の高度差分布と断層活動性の場所による変化	17
6.2 コアの対比基準面の高度差分布	18
6.3 反射面の高度差と反射断面から推定される断層活動の層準	18
6.4 コア解析結果に基づく K-Ah 降下層準の高度差の見積もり	18
7. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の位置・形態の概要－今回の調査結果と既存調査データに基づく検討(1)	19
7.1 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の構成断層、トレース、変位の向き	19
7.2 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の北西端・南東端と断層帯全体の長さ	21

8. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の活動履歴と活動性－今回の調査結果と既存調査データに基づく検討（2）	22
8.1 敦賀発電所敷地近傍の浦底断層（トレンチ調査地点）	22
8.2 浦底湾の F-39b 断層	23
8.3 敦賀市色浜沖の F-39・40 断層（ボーリング調査地点）	24
8.4 敦賀市手沖の F-39・40 断層と F-41 断層	25
8.5 敦賀市杉津沖の F-32・45 断層	27
8.6 敦賀湾東岸・南岸域の浦底－柳ヶ瀬山断層帯	28
9. 結論	30
9.1 断層帯の位置及び形状	30
9.2 断層帯の過去の活動	31
10. その他の資料	34
10.1 地元（都道府県、市町村）等への説明	34
10.2 既存調査資料の開示請求	34
10.3 マスコミ等の取材への協力状況	35
10.4 成果の公表等	36
謝辞	36
文献	37
図表等のキャプション	39

1. 浦底-柳ヶ瀬山断層帯の概要

1.1 断層帯の概要と研究史

浦底-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）は、福井県敦賀市の立石岬付近から敦賀湾を南東方向へ横切り、滋賀県長浜市余呉町柳ヶ瀬に至る一連の断層であり、柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯の一部をなす（図 1）。

2004 年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以前には、活断層研究会編（1980、1991）、岡田・東郷編（2000）、中田・今泉編（2002）等によって、本断層帯陸域の変動地形学的調査が行われている。また、海域（敦賀湾内及び若狭湾東部）については、海上保安庁（1980）によって、音波探査などが実施されている。また、地域地盤環境研究所（2000）は、本断層帯の活動に関連して谷の上流部が埋積されて形成された可能性がある中池見低地（敦賀市街北方）の調査を実施している。

その後、浦底-柳ヶ瀬山断層帯については、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、日本原子力発電株式会社（以下、日本原子力発電と呼ぶ）によって調査された（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。これらを受けて、日本原子力発電は、海域・陸域にわたって詳細な調査を実施した。これらの調査の結果は、2008 年 3 月に提出された「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、2008a）や 2010 年 12 月に提出された「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、2010a）などに取りまとめられている（図 2）。

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をチェックすることを目的として、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。

1.2 地震調査委員会による長期評価の概要と残された課題

2004 年に公表された地震調査委員会の長期評価によると、本断層帯は、北西側から、浦底（うらぞこ）、ウツロギ峠、池河内（いけのごうち）、柳ヶ瀬山（やながせやま）の 4 つの断層から構成される（図 1）。地震調査委員会（2004）は、本断層帯をほぼ垂直な断層面を持つ左横ずれ断層と考え、その全長を約 25km と評価し、全体が一度に活動した場合にはマグニチュード 7.2 程度の地震が発生すると推定している。しかし、2004 年 1 月の長期評価公表時点では、浦底-柳ヶ瀬山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。

このため、浦底-柳ヶ瀬山断層帯の過去の活動に関するデータの取得が最重要の課題として残された。また、地震調査委員会の長期評価公表後に日本原子力発電などによって実施された膨大な調査データを整理・再検討し、本断層帯の長期評価に取り入れるこ

とも課題として残されている。

2. 調査目標と調査項目

2.1 調査目標

上述の残された課題を踏まえ、本調査では、浦底断層の過去の活動に関する新たなデータの取得を第一の目標とした。さらに、既存の調査データを再検討し、新たなデータと統合することによって、本断層帯の位置・形態と過去の活動を明らかにすることを最終的な目標とした。

2.2 調査項目と各項目の主な目標

上述の目標を達成するため、本調査では、1) 敦賀湾の高分解能音波探査、2) 敦賀湾内での採泥調査、及び3) 既存調査データの検討を行った。

1) 高分解能音波探査では、高分解能の探査装置を用いて敦賀湾の音波探査を行い、本断層帯の詳細な分布・位置情報を得ると共に、沖積層の堆積・浸食構造及び本断層帯による変位・変形構造を詳細に解明することを目標とした。

2) 採泥調査では、断層両側の適切な場所でコアを採取し、肉眼観察・年代測定・火山灰分析などを行って地層の層序を明らかにし、音波探査断面との対比を通じて、断層変位を抽出し、断層活動時期を特定することを目標とした。

3) 既存調査データの検討では、音波探査や海上ボーリング調査の結果、トレンチ調査や地形地質調査の結果を検討すると共に、検討結果確認のための現地調査を行い、1)、2)の結果と合わせて、本断層帯の位置・形態と過去の活動の解明を目標とした。



3. 高分解能音波探査


3.1 探査機器及び探査測線

3.1.1 探査機器

本調査では、断層の最新活動時期と海成沖積層堆積開始以降の詳細活動履歴情報の取得を目的とするため、音波の指向角が狭く、動揺補正により波の影響を軽減することができるパラメトリック音響技術を採用した高分解能地層探査機（Innomar 社製 SES2000）を使用した。

3.1.2 探査測線

浦底断層は浦底湾より明神崎に沿って南東に延び、湾の中央底部を経て、敦賀市鈴ヶ崎沖で南に向かい分岐する（ 3）。このため、第1段階の概査では、断層にほぼ直交する北東 - 南西方向の主測線（L 測線）を 50～500m 程度の間隔で湾全域に設定し、これら測線の関係を把握するため、これらと直交する検測線（K 測線）を設けた。更に、敦賀湾奥と湾東部に EX 測線を設けた。概査の延べ探査距離は約 133km である（ 3）。

また、概査結果に基づき、湾中央部の柱状採泥予定地点周辺に C 及び CA 測線、湾東部に分布する F-32・45 断層（日本原子力発電、2008a）を対象として FC 測線を設け、精査を実施した（ 4）。精査の測線間隔は約 20m、延べ探査距離は約 64km である。

探査時の船速については、良好な記録を取得するために一定とし、進行方向のデータ量を増やすために低速走行に努めた。概査測線と精査測線では実施時の船速は多少異なる

るが、概ね 2~4 ノットで航走し、測線の総本数は長・短含めて 148 本、探査距離は合計 197km 程度となった。

(1) 概査測線 (L・K・EX 測線)

L 測線は、地質構造を効率よく把握するため、湾全域を網羅するように設定し、断層に直交する北東 - 南西方向の測線を主体とする。概査主測線の測線番号の頭文字を L とし、測線 L-1~L-14 の計 43 測線を設定した (図 3)。測線の間隔は、概ね 500m 間隔を基本としたが、観測時に本域の地質構造を反映する特徴的な記録が認められた地域に関しては、50m~150m の間隔で測線を適宜追加して調査を実施した。

K 測線は検測線であり、主測線 (L 測線) に直交する北東 - 南西方向に設定し、記録の状況等を考慮して適宜調査を行った。検測線番号の頭文字を K とし、測線 K-1~5 の計 5 測線で調査を実施した。

EX 測線は、既存の音波探査で実施されていない海域や敦賀湾東部の底質把握のために実施した測線である。測線の本数 (EX-1~EX-4) は長短を含めての 4 本で、これらを含め、概査測線の調査距離は合計約 132.8km である。

(2) 精査測線 (C・CA 測線)

C 及び CA 測線は、柱状採泥調査の実施予定地域を中心に、概査で得られた探査記録から、表層部における詳細断層形状の解明が期待される地域に設定した。測線の方向は既存の断層分布に直交する北東 - 南西方向を基本とし、測線の間隔は概ね 20m、高密度の測線設定 (C-1~26、CA-1~38) とした (図 4)。

検測線 (C-K1~K11、CA-K1~K9) は、主測線に直交する北西 - 南東方向とし、測線の間隔は 50m 程度とした。測線の本数は長短含めて 84 本となり、調査距離は合計約 57km となった。

(3) 精査測線 (FC 測線)

FC 測線は、敦賀湾東部に分布する F-32・45 断層に沿う地域の表層堆積物及びその内部反射面の形状把握を目的として、北東 - 南西方向に設定した。測線の間隔は、FC-1~8 測線については概ね 50m、FC-8 測線以降 (FC-10、12、14、16) は概ね 100m 間隔である (図 4)。測線の本数は 12 本、探査距離は合計約 6.8km である。

3.2 概査結果

敦賀湾全域における代表的な反射記録を図 5 に示す。記録は左が南西、右が北東で、各記録断面を北から順に並べている。湾の東西及び南の沿岸部の表層堆積物が厚く堆積している地域、並びに明神崎から南東に発達する砂堆部 (図 5 の L-5.3 測線) を除き、音響基盤より上位の堆積物とその内部反射面が明瞭に認められる。

浦底断層 (F-39・40 断層) は、砂堆の末端部 (L-5.3 測線) より認められ、湾中央部 (L-7 測線) まで確認できる。L-7 測線では、F-39・40 断層の南西側 (左側) に、表層堆積物の階段状変位として表現される断層が確認でき、ここより南の測線ではこの断層が F-44 断層として南へ延び、湾奥部の L-14 測線で不明瞭となる。

湾東西の沿岸部には、湾中央部では確認できなかったより新しい堆積物が認められ、これらを変位させる F-41 断層 (湾西側) と F-32・45 断層 (湾東側) が認められる。

3.3 精査結果1－音響層序

調査地域の音響層序の解釈を図6と図7に示す。記録から得られた反射断面の音響パターンおよび堆積物中の顕著な反射面から、音響基盤より上位の大陸棚堆積物をⅠ層～Ⅳ層に区分した。また、これらの各層を分ける4つの反射面とⅠ層中に認められる3つの内部反射面を、上位のものから、反射面①・反射面A・反射面②（以上、Ⅰ層中の内部反射面）及び反射面③～反射面⑥（Ⅰ層～Ⅳ層及び音響基盤各層の境界）とした。

（1）Ⅰ層

Ⅰ層は、調査海域の最上位層であり、ほぼその全域に分布する。湾西部や東部の沿岸部では表層部に顕著な反射面が認められるが、湾中央部では全体に層理が不明瞭で、内部反射強度が比較的強い上部から弱い下部へと反射パターンが変化する。

湾中央部では、本層上部に断続的に認められる反射面を反射面①とし、Ⅱ層との境界の反射面（反射面③）の上位に平行に認められる2つの反射面を、採泥調査の結果を考慮して、上位から反射面A、反射面②とした。断層の東側（隆起側）では、これらの反射面が一部消失しており（図6、7）、局所的な侵食が生じたことが示唆される。

また、沿岸域の表層部に発達する内部反射面については、断層変位量確認のため、湾西部ではW-i～iiiの3反射面、湾東部ではE-i～viの6反射面を設定した（図11）。これらの反射面は局地的に分布するため、湾中央部に見られる反射面との厳密な対比は困難である。層厚は湾西部の沿岸部で約5m、湾東部の江良沖沿岸域では約10mと厚く、湾中央に向かい薄くなる傾向が認められる。

（2）Ⅱ層

Ⅱ層は、Ⅰ層直下に分布する層であり、ほぼ調査海域全域に認められる。局地的に内部反射が見られるものの、全体に反射に乏しい無層理の堆積物で、Ⅰ層下部と同様の反射パターンを示すが、強反射面である反射面③によってⅠ層と区分される。層厚は、沿岸域に向かって薄くなる傾向が若干認められるものの、ほぼ一定で3m未満である。

（3）Ⅲ層

Ⅲ層は、Ⅱ層直下に分布する層で、平行に連続する内部反射によって特徴付けられる。本層は、成層構造が発達することから、浅海域の堆積物と推定され、層厚は2m未満である。本層基底の反射面⑤は、F-39・40断層より東側の基盤が浅い地域ではその連続が不明瞭となり、代わって局地的な強反射が認められる測線が多い。この強反射面は下盤側へは連続せず、断層東側の浅海域に堆積した粗粒な堆積物と推定される。

（4）Ⅳ層

Ⅳ層は、Ⅲ層直下に分布する層で、Ⅲ層同様、平行に連続する内部反射によって特徴付けられるが、無反射の透明層を内部に挟む点でⅢ層とは異なる。本層も成層構造が発達することから、浅海域の堆積物と推定され、層厚は3m未満である。本層の基底をなす反射面⑥は、連続した強い反射として特徴付けられ、それより下位の堆積物の内部反射面が傾斜していることから、顕著な不整合面と推定され、海成沖積層の基底を示す反射と考えられる。

（5）無層理層

無層理層は、今回の調査海域内では断層末端部周辺に局地的に分布する層で、内部の反射が乏しい、あるいは断続的な反射を特徴としている。図6では、Ⅲ層上面付近より

IV層下部にかけて確認される。一般的な音波散乱層とは異なり、深部の反射面が確認できることから、液状化の痕跡と考えられる。

(6) 音響基盤

調査海域のほぼ全域に認められ、(4)で述べた起伏に富む反射面⑥を上限とする。本層内には部分的に強い反射面が認められ、その一部は大きく傾斜し、断層活動による変形や陸上での堆積が示唆される。本層は、後氷期海進が本調査海域に及ぶ前に堆積した上部更新統と推定される。

3.4 精査結果2－断層海域の地質構造

F-39・40 断層海域の精査航跡と代表的な反射記録の位置を図 8 に示し、代表的な反射記録を図 9～図 10 に北から順に示す。記録は左が南西、右が北東である。また、敦賀湾東部の F-32・45 断層海域での精査による反射記録とその位置を図 11 に示す。更に、概査と精査によって確認された断層変位の位置を図 12 に、それらの連続性を検討して得た断層の分布（トレース）を図 13 に示す。

3.4.1 F-39・40 断層海域

精査海域北西端の CA-1・C-4 測線（図 9 上段）では、音響基盤は記録中央を軸とする凹地状の断面を示す。CA-7・C-10 測線（図 9 中段）以南では、凹地の西半は平坦化し、F-39・40 断層と後述する F-N4 断層に両側を限られた地溝状（グラベン状）の構造に変化している。

F-39・40 断層は、CA-1・C-4 測線では、短波長の変形を受けた反射面を切るほぼ鉛直な断層として表現されている。断層による変位は、海底下約 1.5m の I 層下部まで確認される。それより浅い部分では、連続した反射面が認められないため、変位の有無は確認できないが、海底の顕著な地形変換点として表現されている。深部の反射面は、無層理層や、局地的な粗粒堆積物の存在のため、全体的に断層の北東側では不明瞭であるが、CA-12・C-15 測線（図 9 下段）では、断層の北東側へ連続する様子が確認できる。

F-39・40 断層の約 100～200m 南西には、F-39・40 断層に並走する北東落ちの断層が確認される。これを F-N4 断層と呼ぶ（図 13）。F-N4 断層は海成沖積層の基底と考えられる反射面⑥から、I 層下部までに変位を与えている。本断層は精査海域中央の CA-17・C-20 測線（図 10 上段）まで連続する。

F-39・40 断層は、精査海域中央部の CA-22・C-25 測線付近で消滅する。代わって、L-7 測線（図 5）で認められた階段状の変位として、既知の F-39・40 断層とその南西約 100～200m を並走する新たな断層が確認された。これを F-N6 断層と呼ぶ（図 13）。F-N6 断層による変位は、IV層上部から I 層下部で認められる（図 10 中・下段の CA-27 測線と CA-37 測線）。F-N6 断層は、調査海域南東部の CA-30 測線付近（図 8）で、その走向を南西から南に変え、概査測線 L-8.2（図 13）まで連続する。

F-N6 断層の約 400m 西には、既知の F-44 断層が確認される。F-44 断層は、CA-17・C-20 測線（図 10 上段）や CA-27 測線（図 10 中段）では、緩やかな西傾斜の撓曲として表現され、その南の CA-37 測線（図 10 下段）では、反射面を剪断するほぼ鉛直な断層として表現されている。F-44 断層による変位は、海成沖積層の基底と考えられる反射面⑥から、I 層上部の内部反射面まで確認できる（図 10 下段）。

3.4.2 F-32・45 断層海域

敦賀湾東部の F-32・45 断層海域と湾中央部の F-39・40 断層海域との間には隆起部が存在するため、本海域浅部の反射面は湾中央部に連続しない。このため、局地的な層序として、顕著な内部反射面を反射面 E-i ~ E-vi とした (図 11)。下部の反射面 E-vi は、CA-12・C-15 測線 (図 6) や C-10 測線 (図 7) の I 層下部の反射面 (反射面 A ~ 反射面③)、もしくは音響基盤上面 (反射面⑥) に対比される可能性がある。

F-32・45 断層は、東下がりの撓曲構造として表現される。北側の多くの測線の反射記録では、撓曲部の幅が広く、ごく緩やかな変形を示す (図 11 上段)。一方、調査地域南端の FC-16 測線の反射断面 (図 11 下段) では、撓曲部の幅が狭く、東下がりの撓曲が極めてシャープに認められ、変位・変形の累積が確認できる。

4. 柱状採泥調査

4.1 調査海域

日本原子力発電が 2005 年に実施したソノプロブを音源とするシングルチャンネル音波探査の結果 (日本原子力発電貸与資料 2-3) を参照し、F-39・40 断層 (浦底断層の南東延長の断層) による上下変位もしくはこれに起因する高度差が海底にまで達する敦賀湾中央部 (北緯 35° 43' 18~28"、東経 136° 03' 30~42") の南北約 300m、東西約 300m の範囲 (図 14、15) を調査計画海域に選定した。

さらに、前章で述べた今回の高分解能音波探査の結果に基づき、図 16 に示す C-7 測線 ~ C-12 測線において確認された F-39・40 断層の相対的隆起側 (北東側) と相対的沈降側 (南西側) を調査対象海域とした。

4.2 海上調査の方法

4.2.1 柱状採泥

柱状採泥では、既述のように、F-39・40 断層の相対的隆起側と沈降側の両側において、長さ 7m の柱状 (コア) 試料 [以下、コアと呼ぶ] を採取することを目標としたことから、長さ 8m の採泥管を装着したピストン式柱状採泥器を用いて実施した。ピストン式柱状採泥器の規格を表 1 に、模式図を図 17 に示す。

ピストン式柱状採泥器による採泥は、調査船から海中に投下された採泥器が海底から 2~5m 程度の高さに達した時点で自由落下させ、海底の地層に貫入させる方法である (図 17)。この際、ワイヤーロープの先端に取り付けられたピストンは海底面に固定され、採泥管のみが海底下の地層に貫入する。ピストンは採泥管に真空部を作り、試料が入りやすくすると共に、引き上げ時に試料の抜け落ちを防止する機構になっている。また、保存・運搬のため、ポリカーボネート製のインナーチューブを使用した。

4.2.2 船位測量

柱状採泥調査地点の位置測量は、静止軌道上にある 2 機の運輸多目的衛星 MTSAT の電波を使用したディファレンシャル方式 GPS (DGPS: SBAS) 法により行った。また、今回の調査では、上記の位置データの他に、方位データも取得可能な GPS コンパスによって、試料採取地点の位置を測定した。また、船舶を固定 (アンカリング) する際には、採取予定地点に目印となるブイを投入し、採取位置の精度向上に努めた。

DGPS の規格・性能を表 2 に、DGPS 法の概念図を図 18 に示す。

4.2.3 水深測量

水深測量には、単素子型音響測深機を使用した。取得したデータは、デジタルデータとして GPS 測位データと共に数値データとして保存されるほか、アナログ出力によりモニター記録として感熱紙に出力される。本調査の音響測深では、各コア採取地点において、採泥器の投入から揚収まで連続してデータを取得した。なお、音波の水中伝播速度は海水の温度や塩分濃度などにより変化するため、バーチェックによる実測水深と音響測深機が示す水深との差を求め、音速度補正を行った。また、潮位基準面は敦賀港基準 (D.L.) を使用し、国土交通省港湾局がネット公開しているリアルタイムナウファス (全国港湾海洋波浪情報網) のデータから潮位補正を行った。

音響測深機の規格・性能を表 3 に示す。

4.3 コアの観察・記載及び測定・分析の方法

柱状採泥により採取した 16 コアのうち、隆起側・沈降側それぞれにおいて長さが大きな 3 コア (隆起側の UA-5、UA-7、UA-8、沈降側の DA-5、DA-6、DA-7)、合計 6 コアについて、観察・記載と各種測定・分析を行った。

作業手順は、まず帯磁率を測定し、次にコアを切断・半割してラップで包み、色調測定を行った。その後、ラップを取り外して写真撮影を行い、次いでコアの観察・記載を行った。最後に、 ^{14}C 年代測定用試料と火山灰分析用試料を採取し、 ^{14}C 年代測定と火山灰分析に供した。

4.3.1 帯磁率測定

帯磁率測定は、Bartington 社製 MS2 型を用いて行った。センサーには内径 90mm のループ型センサー (Core Logging Sensor MS2C) を用い、長さ 4m、外径 80mm のポリカーボネート製インナーチューブに収納されたコアをループに通して、2cm 間隔で帯磁率を測定した。測定は気温がほぼ一定な室内で行い、測定に際してはセンサーを周辺の金属から約 70cm 以上離れた。また、測定の前に、較正用試料を用いて試験測定を行い、測定器の正常動作を確認した。補正については、diameter correction と drift correction を行った。なお、計測値の信頼度を確かめるため、10cm 間隔で全てのコアの再計測を行い、計測値に再現性があることを確認した。帯磁率計の規格・性能を表 4 に示す。

4.3.2 コアの切断・半割と色調測定

帯磁率測定が終了したコアは 1m 毎に電動丸ノコで切断した。切断したコアはまず小型の電動丸ノコを用いてチューブを半割し、次いでステンレスワイヤーと金属ヘラを用いてコア本体を半割した。次に、半割面を薄く金属ヘラで削り、霧吹きで表面を洗浄した後、ラップで覆った。半割コアの一方は観察・試料採取用、もう一方は保存用とした。

色調測定は、ミノルタ製の SPAD-503 型分光測色計を用いて、明度 (L^*) と色相 (a^* 及び b^*) を測定した。測定は、半割コアをラップで覆った状態で、2cm 間隔で行った。

4.3.3 写真撮影

ラップを外したコアをコア箱に入れ、室内の蛍光灯下においてデジタル一眼レフで三脚を用いて撮影した。撮影に際しては色見本を同時に撮影した。

4.3.4 コアの観察・記載

写真撮影を行ったコアを肉眼で詳細に観察し、粒度、色、固結度、堆積構造、層厚、火山ガラス、軽石粒等の火山起源物質、植物片や貝などの動植物遺体、礫形・礫種、マトリックス、含水の程度などについて記載した。観察・記載の結果に基づき、各コアについて、縮尺 10 分の 1 の柱状図を作成した。

4.3.5 ^{14}C 年代測定

^{14}C 年代測定用の試料として、植物片、貝、ウニの殻を採取した。貝とウニの殻については、再堆積の可能性が低いと考えられる合弁の二枚貝、全体が保存された薄い殻の二枚貝、全体形状が保存されたウニの採取に努めた。6 コア全体の採取試料数は植物片 40、貝 27、ウニ殻 1 である。このうち、主として UA-5 コアと DA-7 コアから選択した植物片 12、貝 15、ウニ殻 1 の合計 28 試料を AMS 法による ^{14}C 年代測定に供した。暦年代の算出に当たっては、IntCal09 及び Marine09 (Heaton et al., 2009; Reimer et al., 2009) を用いた。

4.3.6 火山灰分析

火山灰分析用の試料として、UA-5 コアの全層準から 18、DA-7 コアの上部・中部・下部より、それぞれ 9、5、6、UA-8 コアの下部から 6、DA-5 コアの下部から 1 の、合計 45 の堆積物試料を採取した。これらの試料は、堆積物中の火山ガラス含有量、火山ガラスの屈折率測定、火山ガラスの主成分化学分析などからなる火山灰分析に供した。

4.4 採泥調査結果

採泥調査では、F-39・40 断層の隆起側と沈降側の両側で長さ 7m のコアを採取することを目標として、調査初日 (2011 年 8 月 8 日) と 2 日目の午前中には、採泥器の自由落下長を 4~5m としてコア採取を試みた。しかし、底質等の影響により、採取できたコアの長さは隆起側で 1.50~2.94m、沈降側で 0~3.22m にとどまり、目標の 7m に遠く及ばなかった。このため、調査 2 日目の午後と 3 日目 (調査最終日) には採泥器の自由落下長を 7m に変更して、コア採取を行った。その結果、隆起側では最長 3.78m、沈降側では最長 6.13m のコアを採取することができた。

コアの採取地点位置図を図 19 に、コアの採取状況を表 5 に示す。3 日間の調査によるコアの採取地点/本数は、隆起側で 9 ヶ所/9 本、沈降側で 7 ヶ所/7 本、合計 16 ヶ所/16 本 (うち 2 本は採取コア長 0m) であった。このうち、既述のように隆起側・沈降側において長さが大きな各 3 コア (隆起側の UA-5、UA-7、UA-8、沈降側の DA-5、DA-6、DA-7)、合計 6 コアを観察・記載及び測定・分析に供した。

4.5 コア観察結果

以下に各コアの観察結果を略記する。また、各コアの写真を図 20 と図 21 に、柱状図を図 22 と図 23 に示す。

(1) UA-5 コア (コア長 : 378cm)

- ・深度 0~8cm : 細粒砂。
- ・深度 8~44.5cm : シルト混じりの細粒砂。
- ・深度 44.5~213cm : 細粒砂混じりのシルト。全体に暗緑黒色を帯びるが、深度 186~

193cm は褐色を呈する。

- ・深度 213～229.5cm：明暗の縞模様が認められるシルト混じりの粘土。
- ・深度 229.5～233cm：オリーブ黒色を呈するシルト混じり粘土。
- ・深度 233～321cm：シルト質細粒砂。
- ・深度 321～378cm：やや赤褐色を帯びるシルト質粘土。

(2) UA-7 コア (コア長：341cm)

- ・深度 0～48.5cm：シルト混じりの細粒砂。
- ・深度 48.5～210cm：細粒砂混じりのシルト。深度 187～194cm には褐色のシルトがまだら状に混じる。
- ・深度 210～234cm：明暗の縞模様が見られるシルト混じりの粘土。
- ・深度 234～238cm：オリーブ黒色を帯びたシルト混じりの粘土。
- ・深度 238～329cm：シルト質の細粒砂。
- ・深度 329～341cm：シルト質粘土。

(3) UA-8 コア (コア長：323cm)

- ・深度 0～7.5cm：シルト混じりの細粒砂。
- ・深度 7.5～78cm：細粒砂混じりのシルト。深度 65cm には褐色のシルトが挟まれる。
- ・深度 78～91cm：明暗の縞模様が認められるシルト混じり粘土。
- ・深度 91～93cm：オリーブ黒色を帯びたシルト混じり粘土。
- ・深度 93～178cm：シルト質細粒砂。
- ・深度 178～273cm：やや赤褐色を帯びるシルト質粘土。
- ・深度 273～323cm：極細粒砂混じりのシルト。コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれるように変形している。

(4) DA-5 コア (コア長：350cm)

- ・深度 0～14cm：細粒砂。
- ・深度 14～70cm：シルト混じりの極細粒砂。
- ・深度 70～300cm：細粒砂混じりのシルト。深度 275～279cm に褐色のシルトを挟む。
- ・深度 300～315cm：明暗の縞模様が認められるシルト混じり粘土。
- ・深度 315～318cm：オリーブ黒色のシルト混じり粘土。
- ・深度 318～350cm：シルト質極細粒砂。

(5) DA-6 コア (コア長：400cm)

- ・深度 0～20cm：シルト混じりの細粒砂。
- ・深度 20～56cm：シルト混じりの極細粒砂。
- ・深度 56～273cm：細粒砂混じりのシルト。深度 251cm に褐色のシルトが挟まれる。
- ・深度 273～289cm：明暗の縞模様が認められるシルト混じりの粘土。
- ・深度 289～291cm：オリーブ黒色のシルト混じり粘土。
- ・深度 291～370cm：シルト質極細粒砂。
- ・深度 370～400cm：極細粒砂混じりのシルト～粘土。コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれるように変形している。

(6) DA-7 コア (コア長：613cm)

- ・深度 0～24cm：シルト混じりの極細粒砂。

- ・ 深度 24～80cm：シルト混じりの細粒砂。
- ・ 深度 80～139cm：シルト混じりの極細粒砂。
- ・ 深度 139～385cm：細粒砂混じりのシルト。深度 361～363cm に褐色シルトを挟む。
- ・ 深度 385～405cm：明暗の縞模様が認められるシルト混じりの粘土。
- ・ 深度 405～412cm：オリーブ黒色を呈するシルト混じりの粘土。
- ・ 深度 412～497cm：シルト質極細粒砂。
- ・ 深度 497～570cm：極細粒砂混じりのシルト～粘土。コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれるように変形している。
- ・ 深度 570～613cm：軟質な極細粒砂混じりシルト。

4.6 コア間の地層対比と層序区分

上述した各コアの観察結果より、6つのコアには、次のような共通な層相とその累重関係が認められる。すなわち、最上位の砂質堆積物の下位に、隆起側では最大約 170cm、沈降側では最大約 245cm に達するシルト層が存在し、その下部に褐色を呈する厚さ数 cm のシルト層が挟まれる。また、シルト層の下位には、明暗の縞模様が見られる厚さ 15～20cm 程度の粘土層が存在し、その直下には厚さ数 cm の暗い色調の粘土層が認められる。更に、暗色の粘土層の下位には、細粒ないし極細粒の砂を主体とする堆積物が存在する。

以上のような特徴的な層相とその累重関係に基づき、F-39・40 断層の隆起側と沈降側に亘る対比基準面 1～3 を設定し、6つのコアを図 24 のように対比した。また、隆起側の 3つのコアについては、対比基準面 3 より下位の砂主体の堆積物とその下位のシルト質粘土層との境界が対比可能と判断し、この層相境界を対比基準面 4 とした。

- ・ 対比基準面 1：最上位の砂質堆積物とその下位の厚いシルト層との境界。
- ・ 対比基準面 2：上記シルト層の下部に挟まれる褐色シルト層の下底。
- ・ 対比基準面 3：暗色粘土層とその下位の細粒砂を主とする堆積物との境界。
- ・ 対比基準面 4：上記細粒砂主体の堆積物とその下位のシルト質粘土層との境界。

さらに、これらの対比基準面を用いて、今回採取された堆積物を上位から a 層～d 層に区分した (図 24)。

- ・ a 層：対比基準面 1 より上位の堆積物。
- ・ b 層：対比基準面 1 と 3 に挟まれる堆積物。
- ・ c 層：対比基準面 3 と 4 に挟まれる堆積物。
- ・ d 層：対比基準面 4 より下位の堆積物。

4.7 各層の層相記載

(1) a 層

隆起側では主としてシルト混じりの細粒砂からなり、貝片とウニ殻片を含む。沈降側ではシルト混じりの細粒砂及びシルト混じりの極細粒砂からなり、貝片、ウニ殻片、炭質物片を含む。b 層以下の各層に比べて、水分が多く、固結度が低い。層厚は上盤側の UA-5 コアと UA-7 コアではそれぞれ約 45cm 及び 49cm、下盤側の最も厚い DA-7 コアでは 139cm に達する。

(2) b層

隆起側、沈降側とも主に細粒砂混じりのシルト層からなり、最下部にシルト混じりの粘土層を伴う。シルト層の厚さは、上盤側の UA-5 コアと UA-7 コアでは約 169cm と 162m、下盤側の DA-5、DA-6、DA-7 の 3 コアではそれぞれ 230cm、217m、246m に達する。下盤側の b 層とその上位の a 層との境界付近は激しい生物擾乱を受けている。シルト層中には貝、ウニ殻、炭質物片が散在し、まだら状に砂質部が認められる。シルト層の基底（粘土層との境界）から 15~25cm ほど上位のシルト層下部には、5YR3/1 程度の黒みを帯びた褐色のシルト層が 1~7cm の厚さで挟まれる。b 層最下部のシルト混じり粘土層は 15~27cm の厚さがあり、数 cm 間隔の明暗の縞模様が認められる。粘土層の最下部は 7.5Y3/1~5Y3/1 程度のオリーブ黒色の暗色帯をなす。

(3) c層

隆起側では厚さ約 90cm のシルト質の細粒砂からなり、貝、ウニ殻、炭質物片が散在する。沈降側ではシルト質の極細粒砂を主体とし、隆起側より細粒である。隆起側と同様に、貝、ウニ殻、炭質物片が散在する。DA-6 コアではコアの下底まで約 110cm の厚さがあるが、最下部 30cm は極細粒砂混じりのシルト~粘土からなり、コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれるように変形している。DA-7 コアでは対比基準面 3 の下位 158cm までを c 層と判断した。このうち下部 70cm は、極細粒砂混じりのシルト~粘土を主体とし、コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれる変形を被っている。

(4) d層

本層は主として 2.5Y3/1 程度の赤みを帯びた黒褐色のシルト質粘土からなり、隆起側の 3 つのコアの最下部に認められる。UA-8 コアでは少なくとも 95cm の厚さがある。UA-5 コアでは、c 層との境界から 10cm ほど下位に厚さ約 10cm のシルト質の極細粒砂が挟まれる。各コアとも、貝や炭質物片の産出は上位の a, b, c 各層に比べて少ない。

UA-8 コアの最下部約 50cm は、10Y3/1 程度の黒灰色の極細粒砂混じりのシルトからなり、コア中央部の堆積物が下方へ引き込まれるように変形している。このシルト層は、次の 4.8 測定・分析結果の項で述べるように、d 層構成層ではなく、採泥器を引き抜く際に取り込まれた上位層準由来の地質試料の可能性が高い。

(5) UA-8、DA-6、DA-7 コア下部の変形と DA-7 コア最下部の軟質シルト層

海底下に貫入した採泥器を引き抜く際、インナーチューブ内に取り込まれた堆積物（コア）は、採泥器先端のコアキャッチャーによって外部の堆積物（地層）から切り離される。この際、堆積物の粘性が高いとコアに下方への引張力が働く。また、採泥器を調査船に揚収するまでの間に、コアキャッチャーからコアの一部が漏出・落下する場合にも、コアに下方への引張力が働く。UA-8、DA-6、DA-7 の各コア下部に認められる、下方へ引き込まれるような変形は、上記のいずれかを原因として生じたと推定される。

DA-7 コアでは、下方へ引き込まれる変形を被っている c 層の下位に、45cm にわたって、水分を多く含み、軟質な極細粒砂混じりのシルト層が認められる（[図 21](#)、[23](#)）。後述するように、このシルト層からは c 層よりも若い ^{14}C 年代が得られ、b 層上部に挟まれる鬼界アカホヤ火山灰が検出された。従って、DA-7 コア下端の軟質シルト層は、採泥器を引き抜く際に上位の層準から取り込まれた地質試料と考えられる。

4.8 測定・分析結果

以下に、帯磁率測定、色調測定、¹⁴C年代測定、火山灰分析の結果について、対比基準面1～4及びa層～d層との関係に重点をおいて記載する。

4.8.1 帯磁率測定結果

(1) 隆起側及び沈降側の帯磁率変化

各コアの測定結果を図25及び図26に示す。隆起側のUA-5、UA-7、UA-8の3コアでは、帯磁率の変化パターンがよく似ており、図25に示すような山・谷の対応が推定される。対比基準面2ないしその直上の褐色シルト部は低帯磁率部（帯磁率の谷）に対応し、b層下部の粘土層は高帯磁率部（帯磁率の山）に当たる。また、対比基準面3（b層/c層境界）の直上に小さな谷が認められる。これより下位のc層では下位に向かって帯磁率が漸増し、対比基準面4（c層/d層境界）の直上からd層上部にかけては下位に向かって帯磁率が急減している。

沈降側のDA-5、DA-6、DA-7の3コアの測定結果を比べると、対比基準面1付近からその下位約150cm付近までのb層上～中部の帯磁率の変化パターンはよく似ており、図26に示すような帯磁率の山・谷の対応が推定される。b層下部では、DA-5コアとDA-7コアに、隆起側のコアと同様に、褐色シルト部に谷、粘土層に山、対比基準面3（b層/c層境界）直上に小さな谷が認められる。しかし、DA-6コアではこのような山・谷は認められず、b層下部全体が顕著な低帯磁率帯（大きな谷）となっている。各コアとも、c層上部では下位に向かって帯磁率が徐々に高くなっているが、DA-6コアとDA-7コアの変形部に至ると帯磁率が低下している。

(2) 対比基準面Z、A、B、及びYの設定

コア観察に基づく対比基準面と対応する帯磁率の変化以外で、隆起側と沈降側に跨って認められる帯磁率変化パターンとして、b層中の帯磁率の谷（Z）と急変部（A）、c層中の山（B）が挙げられる（図25、26）。本調査では、これらを帯磁率変化に基づく対比基準面Z、A、Bと呼び、コア観察に基づく対比基準面1～4と同様に、隆起側と沈降側のコアの対比に用いる。また、沈降側の3つのコアでは、コア観察に基づく対比基準面1の約25cm下位に、対比可能な帯磁率の山が認められる。本調査では、これを対比基準面Yと呼ぶ。

4.8.2 色調測定結果

各コアの測定結果を図27～図29に示す。L*（明度）については、各コアとも、a層においてb層以下の各層準に比べて相対的に低い値を示す特徴が認められる（図27）。

a*については、全体として帯磁率と逆相関の関係が見られ、いずれのコアでも、対比基準面2ないしその直上の褐色シルト部に鋭いピーク（緑に対して赤が強い部分）が認められる（図28）。

b*については同様に、いずれのコアでも、対比基準面2ないしその直上の褐色シルト部にピーク（青に対して黄が強い部分）が認められる（図29）。また、DA-6コアを除いて、b層最下部の粘土層に対応して、深さ方向に幅のあるb*の山が認められる。

色調測定結果については、対比基準面の設定は行わなかった。

4.8.3 ¹⁴C年代測定結果

測定結果を表 6 に示す。a 層からは、DA-7 コアと同層中部と下部からそれぞれ産出した貝の暦年代 (2σ ; 海洋リザーバー効果を考慮) として、3880–3710 cal yBP と 5560–5430 cal yBP の値が得られた。

隆起側の b 層からは、UA-5 コアと同層上部、中部、下部より産出した貝について、それぞれ、9390–9190 cal yBP、9420–9240 cal yBP、9510–9400 cal yBP の暦年代が得られた。また、UA-5 コアと同層最上部、中部 (2 試料)、下部より採取した植物片からは、それぞれ、9010–8650 cal yBP、9400–9030 cal yBP と 9550–9480 cal yBP、9550–9500 cal yBP の年代が得られた。

沈降側の b 層からは、DA-7 コアと同層最上部から産出した貝の暦年代として、7670–7550 cal yBP の値が得られた。また、同コアの b 層中部からは、9000–8650 cal yBP から 9450–9280 cal yBP にわたる 5 つ (貝 3、植物片 2) の年代が得られ、b 層下部より採取した植物片からは 9250–9010 cal yBP の年代が得られた。更に、DA-5 コアの b 層中部と下部から産出した貝からは、それぞれ 9420–9240 cal yBP と 9440–9260 cal yBP の年代が得られた。

隆起側の c 層からは、UA-5 コアと同層上部と下部から採取した植物片の年代として、層位と逆転した 10160–9700 cal yBP、9770–9550 cal yBP の値がそれぞれ得られた。また、同コアの c 層中部より産出した貝からは、9620–9480 cal yBP の年代が得られた。

沈降側の DA-7 コアの c 層からは、変形を被っていないコア長約 90cm 区間の中央部から産出したウニ殻と最下部から採取した植物片の年代として、それぞれ 9620–9450 cal yBP、9660–9530 cal yBP の値が得られた。また、その下位の変形を被った部分から採取した植物片からは、10190–9900 cal yBP の年代が得られた。

隆起側にのみ認定された d 層のシルト質粘土からは、¹⁴C 年代測定に適した試料が採取できず、年代データは得られていない。一方、UA-8 コア最下部の変形を被ったシルト層より産出した貝からは、9510–9390 cal yBP の値が得られた。この年代は、隆起側・沈降側双方の c 層から得られたいずれの年代よりも若く、貝を産したシルト層が c 層以上の層準に由来する可能性を強く示唆する。

DA-7 コア最下部の軟質シルト層からは、貝の年代として 9000–8780 cal yBP と 9080–8940 cal yBP、植物片の年代として 9400–9020 cal yBP の、いずれも c 層より若い値が得られた。

4.8.4 火山灰分析結果

分析結果を表 7、8 及び図 30 に示す。火山灰分析の結果、沈降側の b 層最上部に鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah) の降下層準が確認された。また d 層中に鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki) の二次堆積層準が検出された。更に、沈降側では DA-7 コアの最下部に至るまで鬱陵隠岐火山灰に由来する火山ガラスは検出されず、同コア最下部の軟質シルト層からは K-Ah に由来する火山ガラスが検出された。

(1) 鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah) の降下層準

沈降側の DA-7 コアの a 層から採取した 4 試料からは、堆積物を構成する 3000 粒子に対する個数比で、上位より 0.5/3000、12/3000、25/3000、51/3000 のバブルウォール

型火山ガラスが検出された（表 8）。さらにその下位の b 層最上部の試料（DA-7-140-145）からは、314/3000 の極めて高い含有量のバブルウォール型火山ガラスと 12/3000 の含有量のパミス型火山ガラスが検出された。その下位の試料（DA-7-150-165）では、バブルウォール型及びパミス型火山ガラスの含有量はそれぞれ 33/3000、0/3000 と急減し、さらにその下位の b 層上部から採取した 3 試料からは、0~0.5/3000 の極めて微量の火山ガラスしか検出されなかった。

DA-7-100-110 から DA-7-150-165 までの 5 試料の屈折率測定を行った結果、いずれの試料でも、火山ガラスの 95%以上が K-Ah の屈折率レンジに含まれる 1.509~1.516 を示した。以上の分析結果から、沈降側の b 層最上部が K-Ah の降下層準に当たると判断される。

隆起側の UA-5 コアの b 層からは、2.2/3000 の含有量を超える火山ガラスは検出されず、極めて微量に含まれる火山ガラスの大部分も、その屈折率から始良丹沢火山灰（AT）起源である可能性が高いことがわかった。同コアの b 層最上部試料（UA-5-46）では、火山ガラスの含有量は 1/3000 であり、屈折率測定を行った 9 個の火山ガラスのうち、8 個の屈折率は AT の屈折率レンジに含まれる。一方、UA-5 コアの a 層下部試料（UA-5-30-40）からは、2.7/3000 の含有量の火山ガラスが検出され（表 7）、屈折率測定を行った 13 個の火山ガラスのうち、10 個の屈折率は K-Ah の屈折率レンジに含まれる。以上の分析結果から、断層隆起側では、K-Ah 降下層準は欠如していると判断される。

（2）鬱陵隠岐火山灰（U-Oki）の二次堆積層準

隆起側の UA-5 コア最下部の d 層から採取した 3 試料のうち、下位の 2 試料（UA-5-360 及び UA-5-376）から、それぞれ 2.1/3000、1.2/3000 の含有量のパミス型火山ガラスが検出された。また UA-8 コアの下部から採取した 6 試料のうち、d 層（シルト質粘土）から採取した 3 試料から、それぞれ 5.8/3000、1.8/3000、6.1/3000 の含有量のパミス型火山ガラスが検出された。これらのパミス型火山ガラスは 1.520~1.525 程度の高い屈折率を示し、アルカリ（Na₂O 及び K₂O）に富む粗面岩質の化学組成を有する（表 9、表 10）。この屈折率と化学組成は、約 10700 cal yBP に噴出・降下した鬱陵隠岐火山灰（U-Oki）（福沢、1995；町田・新井、2003）の屈折率・化学組成と一致する。従って、パミス型火山ガラスは U-Oki に由来し、d 層中に同火山灰の二次堆積層準があると判断される。

一方、シルト質粘土層の下位の、変形を被った極細粒砂混じりのシルト層からは、パミス型火山ガラスは全く検出されなかった。この火山灰分析結果も、同シルト層が上位層に由来する可能性を示唆する。

（3）DA-7 コアの c 層下部及び軟質シルト層から検出された火山灰

沈降側の DA-7 コアの c 層下部（変形を被っている部分）より採取した 4 試料からは、2/3000~5/3000 の含有量のバブルウォール型火山ガラスが検出された。パミス型の火山ガラスは全く検出されなかった。火山ガラスの屈折率測定の結果から、バブルウォール型の火山ガラスは AT 起源であることが分かった。

その下位に分布する軟質シルト層については 2 試料の火山灰分析を行い、上位の試料から 6/3000、下位の試料から 3/3000 の含有量のバブルウォール型の火山ガラスを検出した。上位の試料からは、1/3000 の含有量のパミス型火山ガラスも検出された。上位の

試料の火山ガラスについて屈折率測定を行った結果、パミス型火山ガラスも含めて、約 66%が K-Ah 起源、約 33%が AT 起源であることが判明した。

4.9 ¹⁴C 年代測定及び火山灰分析結果に基づく各層・各対比基準面の年代

¹⁴C 年代測定と火山灰分析の結果に基づき作成した隆起側と沈降側の深度－年代関係を図 31 と図 32 にそれぞれ示す。UA-8 コア最下部の極細粒砂混じりのシルト層と DA-7 コア最下部の軟質シルト層は、両層から得られた ¹⁴C 年代が全体的な深度－年代関係から大きく外れることから、既述のように、上位層由来の地質試料と判断される。それ以外の ¹⁴C 年代データについては、UA-5 コアの c 層から得られた 10160–9700 cal yBP を除いて、各試料の採取深度の堆積年代を大まかに示すと考えられる。この深度－年代関係から、a～d 層及び各対比基準面の年代は次のように推定される。

(1) a 層

a 層からは隆起側、沈降側とも、二次堆積の K-Ah が検出されたことから、a 層は約 7300 cal yBP の同火山灰降下後の堆積物と考えられる。沈降側の DA-7 コアから得られた ¹⁴C 年代 (図 32) もこの結論と整合する。

(2) b 層最上部と対比基準面 1

隆起側の b 層最上部からは K-Ah が検出されず、9010–8650 cal yBP の ¹⁴C 年代が得られている。また、対比基準面 Z よりも上位の b 層の厚さは、隆起側で有意に (約 40cm) 薄い。従って、隆起側では、K-Ah 降下層準を含む、沈降側の b 層最上部に相当する層準が欠如していると考えられる。隆起側のこの層準は、堆積後に侵食・削剥された可能性が高い。この場合、隆起側の対比基準面 1 は侵食面と考えられ、2000 年程度以上の時間間隙が存在する可能性がある (図 31)。

一方、沈降側の DA-7 コアの b 層最上部には、約 7300 cal yBP の K-Ah の降下層準がある。降下層準の直下からは 7670–7550 cal yBP の年代が得られており、火山灰分析の結果と極めてよく対応する。更に、4.8.4 (1) で述べた a 層下部の火山灰分析結果と図 32 の深度－年代関係から、沈降側の a 層/b 層境界での侵食・堆積中断は無いか、ごく小さいと推定される。従って、本調査では、沈降側の対比基準面 1 (a 層/b 層境界) の年代を K-Ah 降下年代 (約 7300 cal yBP) と見なす。

(3) b 層と対比基準面 Z、A、2、3

b 層から得られた ¹⁴C 年代は、隆起側・沈降側とも概ね下位のものほど古く、逆転は少ない。しかし、図 31 及び図 32 から推定される各対比基準面の年代は、対比基準面 Z については隆起側の約 9300 cal yBP に対して沈降側では約 8900 cal yBP、以下同様に、同 A : 約 9400 cal yBP / 約 9100 cal yBP、同 2 : 約 9500 cal yBP / 9300 cal yBP、同 3 : 約 9500 cal yBP / 9400 cal yBP と、いずれも隆起側の方が古く、上位の対比基準面ほど年代差が大きい。これは、隆起側では、¹⁴C 年代測定に供した貝や植物片の中に、二次的に堆積したものが多いことを示唆する。従って、本調査では、b 層の年代については沈降側のデータセットを重視し、b 層の堆積開始年代 (対比基準面 3 の年代) を約 9400 cal yBP とする。また、対比基準面 Z、A、2 の年代をそれぞれ約 8900 cal yBP、約 9100 cal yBP、約 9300 cal yBP とする (図 33)。

(4) c 層及び d 層と対比基準面 4、B

c層からは、隆起側・沈降側とも、 2σ の範囲で、おおよそ 9500 cal yBP から 10200 cal yBP に亘る年代が得られており、沈降側では逆転も見られない。一方、d層からは、4.8.3で述べたように ^{14}C 年代データは得られていないが、約 10700 cal yBP の鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki) の二次堆積層準が認められる。また、DA-7 コアの c 層下部 (10190–9900 cal yBP の年代が得られ、変形を被っている部分) は、シルト～粘土質の層相と隆起側の c 層の厚さから、d 層に対比される可能性も考えられるが、d 層に含まれている U-Oki 起源の火山ガラスは全く検出されない。

以上から、本調査では、沈降側における c 層の堆積開始時期 (対比基準面 4 の年代) を、約 10700 cal yBP の U-Oki 降下後の約 10200 cal yBP とする (図 33)。隆起側の対比基準面 4 (c 層/d 層境界) には、堆積間隙が存在する可能性があるが、データが十分ではないため、詳細は不明である。c 層中の対比基準面 B の年代は、沈降側の年代データによれば、約 9600 cal yBP となる。d 層が堆積を始めた時期は、U-Oki の降下期に遡る可能性がある。

5. 地質層序と音響層序の対応付け、及びコア採取深度の補正

5.1 地質層序と音響層序の対応付け

採泥調査結果に基づく地質層序と高分解音波探査に基づく音響層序との対応を検討するため、C-10 測線の近傍で採取された UA-5 コアと DA-7 コアの地質層序を C-10 測線の音響断面に垂直に投影した (図 34)。その結果、浦底断層の隆起側 (UA-5 コア) 及び沈降側 (DA-7 コア) とともに、b 層/c 層境界 (対比基準面 3: 粘土層/砂層境界) は、音響層序における I 層/II 層境界の反射面③に対応することが判明した。また、対比基準面 2 (褐色シルト層基底) は、隆起側・沈降側とも、上記の反射面③の上位に認められる反射面②とほぼ同じ深度に位置する。更に、隆起側 (UA-5 コア) では、c 層/d 層境界 (対比基準面 4: 砂層/粘土層境界) は、反射面③の約 1m 下位にある反射面④とほぼ同じ深度に位置する。対比基準面 2、3、4 と反射面②、③、④との対応は、C-8 測線の音響断面への UA-7 コアの投影でも認められる (図 35)。

以上から、地質層序と音響層序は、図 36 のように対応付けられる。

5.2 コア採取深度の補正

UA-8 コアは UA-7 コアから 1m 程度以内の距離で採取されたにも拘わらず、その対比基準面 2、3、4 の位置は、図 24 に示すように、UA-7 コアのそれよりも各々 129cm、145cm、151cm 高い。また、近接する C-8 測線の音響断面の反射面②、③、④の海底面からの深度よりも約 136cm、約 142cm、約 158cm、それぞれ浅い。これは、作業の安全確保のために行った採泥器のワイヤー長の調整や海底直下の極軟質堆積物の影響等で、採泥管内への試料の収納が採泥器の海底への着底時ではなく、採泥管が海底下 130～140cm 程度にまで貫入した時点で始まったためと推定される。UA-8 コアの厳密な試料収納開始深度は不明なため、最も顕著な反射面③とこれに対応する対比基準面 3 との深度の差約 142cm を試料収納開始深度と見なした。

沈降側の DA-5 コアと DA-6 コアについても、対比基準面 2 と 3 の深度 (図 24) は、近接する C-12 及び C-11 測線の音響断面 (図 37 及び図 38) の反射面②と③の海底面か

らの深度よりも有意に浅い。これら両コアでも、UA-8 コアと同様に海底直下における試料が収納されなかったと推定される。

以上の検討に基づき、採取深度の補正を行ったコア対比図（**図 39**）では、UA-8 コアの上端を海底から 142cm 下方へシフトさせた。また、DA-5 コアと DA-6 コアの上端については、近接する音波探査測線の反射面③と対比基準面 3 との深度差に基づき、それぞれ海底から 76cm 及び 100cm 下方へシフトさせた。

6. 各反射面及び対比基準面の断層両側での高度差分布と断層活動

6.1 各反射面の高度差分布と断層活動性の場所による変化

敦賀市手沖において測線間隔約 20m で実施した音波探査断面群より、隆起側と沈降側で計測された各反射面の高度差の分布を**図 40**と**図 41**に示す。各反射面の高度差の読み取りに当たっては、隆起側・沈降側ともに局地的な凹凸部を避け、できるだけ平坦な地点を基準とした。また、緩やかな撓みとして表現される断層に関しては、広域に観察してその高度差を求めた。

図 40は、横軸に測線、縦軸に高度差を取り、各反射面の高度差の断層走向方向への変化（空間変化）を示している。横軸の左側が北西、右側が南東である。F-39・40 断層、F-N4 断層、F-N6 断層では、高度差が南東に向かって減少する傾向がみられる。これは、断層両側の反射面の高度差が減少することを示している。F-39・40 断層では C-10 測線付近、F-N4 断層では C-11 測線付近、F-N6 断層では CA-26 測線付近で高度差が最も大きく、断層の活動性の場所による変化を示唆している。

図 41は、横軸に反射面（深さ・年代に対応）、縦軸に高度差を取り、反射面の高度差の深さ方向への変化を示している。F-39・40 断層では、反射面⑤で約 2.6～1.5m（平均 2.0m）、反射面④で約 2.4～1.0m（平均 1.8m）、反射面③で約 2.3～0.8m（平均 1.7m）、反射面②で約 2.2～0.8m（平均 1.6m）、反射面 A で約 1.9～0.6m（平均 1.4m）である。反射面①については、計測測線数は 4 と少ないが、約 1.5～1m（平均 1.3m）の高度差が計測された。

F-44 断層では反射面⑥で約 1.6～0.7m（平均 1.0m）、反射面⑤で約 1.4～0.1m（平均 0.9m）、反射面④で約 1.4～0.2m（平均 0.8m）、反射面③で約 1.4～0.6m（平均 1.0m）、反射面②で約 1.6～0.6m（平均 1.0m）、反射面 A は認められず、反射面①で約 1.0～0.1m（平均 0.6m）の高度差が計測された。

F-N4 断層では、反射面⑥で約 0.8～0.04m（平均 0.4m）、反射面⑤で約 0.6～0.04m（平均 0.2m）、反射面④で約 0.5～0.04m（平均 0.2m）、反射面③で約 0.4～0.04m（平均 0.1m）、反射面②で約 0.3～0.04m（平均 0.1m）、反射面 A では約 0.3～0.08m（平均 0.1m）、の高度差が計測された。反射面①は確認できなかった。

F-N6 断層では、反射面⑤で約 1.2～0.2m（平均 0.9m）、反射面④で約 1.0～0.3m（平均 0.7m）、反射面③で約 0.6～0.2m（平均 0.4m）、反射面②で約 0.3～0.04m（平均 0.1m）の高度差が計測された。反射面 A 及び反射面①、⑥は確認できなかった。F-N8 断層では検出数が少ないが、反射面⑤で約 1.0～0.4m（平均 0.7m）、反射面④で約 0.8～0.2m（平均 0.5m）、反射面③で約 0.6～0.2m（平均 0.4m）、反射面②で約 0.6～0.2m（平均 0.4m）の高度差が計測された。反射面 A 及び反射面①、⑥は確認できなかった。

以上から、全体として、上位の反射面ほど高度差が小さくなる傾向が認められる。このような傾向の原因については、6.3 で検討する。

6.2 コアの対比基準面の高度差分布

隆起側の UA-5 コア及び沈降側の UA-7 コアの採取地点における各対比基準面の海面からの深度と両コア間での高度差を表 11 に示す。各対比基準面の両コア間での高度差は、反射面③に対応する対比基準面 3 で 2.7m、反射面②にほぼ対応する対比基準面 2 で 2.6m、反射面 A にほぼ対応する対比基準面 A で 2.4m、反射面①に概ね対応する対比基準面 1 で 1.9m である。

2 つのコア採取地点間の対比基準面の高度差は、反射断面上で求めた反射面の高度差の最大値に比べて、0.4~0.5m ほど大きくなっている。これは、両コアが図 40 に示すように最も高度差が大きい C-10 測線沿いにあることに加えて、DA-7 コアが図 34 に示すように、断層前縁のグラーパーベン状部に位置するため、各対比基準面の深度が反射断面上で求めた対応する反射面の深度（グラーパーベン状部の外側の深度で代表）よりも大きいためと推定される。

6.3 反射面の高度差と反射断面から推定される断層活動の層準

図 41 に示す測線ごとの各反射面の高度差の変化を見ると、特定の 2 つの反射面の間で、各測線に共通して高度差が急変する状況は認められない。これは、反射面の高度差の違い（全体としては、上位の反射面ほど高度差が小さくなる）が断層変位の累積によるものではないことを示唆している。一方、反射面③、②、A は、これらより下位の反射面と共に、断層変位を被っている。また、各測線の断面をみると、F-39・40、F-44、F-N6、F-N8 の各断層の位置において各反射面間の厚さが急変する状況は認められない。

以上から、これらの断層は、反射面⑥の形成後、反射面 A の形成までは上下変位を伴う活動を行わず、反射面 A の形成後に上下変位を伴う活動を行ったと判断される。上位の反射面及び対比基準面ほど、高度差が小さくなっているのは、図 42 に模式的に示すように、隆起側に比べて、沈降側の堆積速度が大きいためと考えられる。

6.4 コア解析結果に基づく K-Ah 降下層準の高度差の見積もり

4 章で述べたように、採泥調査を行った敦賀市手沖の F-39・40 断層の隆起側では、K-Ah 降下層準は欠如している。断層隆起側においても、K-Ah 降下層準を含む b 層最上部までが一旦堆積し、その後、b 層上部が侵食された可能性がある。隆起側と沈降側における b 層上部の堆積速度を、帯磁率測定結果に基づく対比基準面 A と Z 間の層厚を基準として比較すると、隆起側の堆積速度は沈降側の堆積速度の約 80% である。隆起側においても、この堆積速度の比率で、K-Ah 降下層準まで b 層が堆積したとすると、隆起側における K-Ah 降下層準の海面からの深度は 36.5m と見積もられる。このように考えた場合、隆起側と沈降側における K-Ah 降下層準の高度差は約 2.1m となる。

K-Ah 降下層準の約 2.1m の高度差が断層運動によるものなのか、断層崖部の埋積の過程を示しているのかは、今回・既往の音波探査とも、この層準の反射面を捉えていないため、断定できない。この問題については、8 章 8.4 節において、K-Ah 降下層準以下の

各層準と F-41 断層との関係に基づいて考察する。

7. 浦底 - 柳ヶ瀬山断層帯の位置・形態の概要—今回の調査結果と既存調査データに基づく検討 (1)

本章では、主として既存の調査データの検討結果と今回実施した調査の結果に基づいて、浦底—柳ヶ瀬山断層帯の構成断層、全体のトレース、変位の向き、断層帯の端点、全長などの位置・形態に関するデータを整理する。

7.1 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 10km)、田結・内池見セグメント (長さ約 10km)、ウツロギ峠北方セグメント (長さ約 11km)、ウツロギ峠・池河内セグメント (約 13km) 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 18km)、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 13km) を合わせたものをウツロギ峠北方—池河内断層 (長さ約 23km) 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。

本調査では、上述した日本原子力発電 (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 8.6 (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 (図 43)。

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の断層 (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 14km である。従来白木—丹生断層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、7.2 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 10~20m 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ベン状の構造が伴われる。また、北部の F-21 断層の中～南部は、グラーパーベン状ないし 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 断層やとその南側の 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。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 10km 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、明瞭な東下がりの構造として南北ないし北北西へ追跡される。本セグメントの長さは約 11km 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、8.6 (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、それらの北部は北西 - 南東走向の走向をもち、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、Z 字状の屈曲を 3 つ連ねた形のトレースを示す (図 43)。柳ヶ瀬山断層を含めた本セグメントの長さは約 16km 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。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。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 2~3km、浦底セグメント北部 (F-23・24 断層) の東約 3~4km 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 2km 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 (図 43)。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 - 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、2km に満たない距離を置いて分布している可能性が高いと判断される。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 (図 43)。本セグメントの長さは約 11km 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 測線沿いのブーマー探査及びウォータガン探査の結果）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（[図 44](#)）。

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（[図 45](#)、[46](#)）。

（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）から逆断層的な性格が示唆される。ウツロギ峠北方セグメントと田結・内池見セグメントは、それぞれ浦底セグメント、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントのバックスラスト的な性格をもち、それぞれの断層ペア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。

7.2 浦底－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 2.9km としている（[図 43](#)）。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、NEGM8 測線の測位点 10－11 間、NEGM 7 測線の 5－6 間、NEGM6 測線の測位点 5 付近まで追跡され、NEGM5 測線では認められなくなる。更に、F-23・24 断層の東側約 350～700m 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、NEGM9 測線の測位点 10－11 間から、JNT-06BM 測線の測位点 850 付近、NEGM8 測線の測位点 8 付近（[図 47](#)）、NEGM7 測線の測位点 8 付近、NEGM6 測線の測位点 8 付近（[図 48](#)）、NEGM5 測線の測位点 8 付近、及び NEGM4 測線の測位点 7－8 間を通過して、NXGM1-2 の F-21 断層に連続する。

F-21 断層は、従来、白木－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、NEGM6 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（[図 47](#)、[48](#)）、殆ど純粹な横ずれ断層であることが示唆される。NEGM5 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 NEGM1 測線との交点（北緯 35° 49′、東経 135° 59′：立石岬の北北西（N27° W）約 7km）を浦底－柳ヶ瀬山断層帯の北西端とする（[図 43](#)）。

また前節で述べたように、甲楽城沖セグメントを浦底―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、本調査では、F-17・18 断層のトレースと No. 20 測線との交点 (北緯 $35^{\circ} 51'$ 、東経 $135^{\circ} 58'$: 干飯崎の南南西 ($S30^{\circ} W$) 約 4km) を、甲楽城沖セグメントを浦底―柳ヶ瀬山断層帯に含めた場合の同断層帯北西端とする (図 43)。

日本原子力発電 (2008a) の調査結果によれば、椿坂峠の南方約 2km (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 (図 43)。しかし、7.1 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、本調査では、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 $35^{\circ} 35'$ 、東経 $136^{\circ} 11'$ (柳ヶ瀬山の南東約 1km) とする (図 43)。本調査の浦底―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 となる。

8. 浦底―柳ヶ瀬山断層帯の活動履歴と活動性―今回の調査結果と既存調査データに基づく検討 (2)

本章では、本稿のまとめとして、今回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と、日本原子力発電から開示を受けた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性に関する既往データについて概説する。

8.1 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 (図 49)。

(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 (図 50)。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 $\delta^{13}C$ 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 $\delta^{13}C$ 補正年代が得られている。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、K-Ah 降下以降、4500 年前頃となる。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

今回開示された北側壁面（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（図 51）。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。

（3）南側トレンチ壁面の観察に基づく断層活動

今回更に、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った。その結果、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が確認された（図 52）。この観察結果は、浦底断層が完新世に複数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 5-1 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（図 53 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（図 53）。また、最大主圧縮応力軸（P 軸）は断層面と 45 度の角度をなし、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 $N106^\circ E$ 、プランジは平均西傾斜 2° となった（図 53 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）まとめ

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。
- ・K-Ah 降下層準の上下変位量は 2.2m 以上、縦ずれ変位量は 2.6m 以上である。
- ・AT 降下層準の見かけの上下変位量は 9m 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、0.3m/千年以上である。
- ・浦底断層は、完新世に複数回、活動した可能性が高い。
- ・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。

8.2 浦底湾の F-39b 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(図 54)。F-39b 断層が確認される NFWMSX3-2 測線は、後述するボーリング調査地点を通過する NFWMS7 測線と交差する(図 54)。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(図 55)。NFWMSX3-2 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 K-Ah 降下層準に当たり、反射面 δ は沖積層の基底に当たると推定される(図 55)。

(2) 断層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 1.8m 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(図 56)。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(0.9m 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に対応すると考えられる。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 0.9m 程度であったと推定される。

(3) F-39・40 断層(主断層)の上下変位量

日本原子力発電は、NFWMSX3-2 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(図 54)。図 57 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。今回の高分解能音波探査でも、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(図 58)。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、図 57 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 4.5m 程度となる。

(4) まとめ

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 0.9m、K-Ah 降下層準の累積上下変位量は約 1.8m(活動 2 回分)である。
- F-39b 断層近傍の F-39・40 断層(主断層)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 4.5m 程度と推定される。

8.3 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 65m、沈降側で深度 90m のボーリングが掘削されている（図 59、60）。ボーリング調査の結果（図 60）から、K-Ah 降下層準に 4.4m、AT 降下層準に 12.7m 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（図 60）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（図 61）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。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判断される。

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 7.1m、沈降側で 7.9m と求められており、両側で 0.8m の違いしかない。従って、海成沖積層の堆積開始以降（¹⁴C 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、0.45m/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、0.60m/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）まとめ

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 4.4m、12.7m 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 0.45m/千年である。

8.4 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、本調査による高分解能音波探査の調査対象であり、F-39・40 断層は採泥調査の対象断層である。また、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（図 62）。

（1）既存音波探査断面上での K-Ah 降下層準の追跡

既述のように、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 1.9m 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 2.1m の高度差があったと推定される。しかし、今回の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 (図 63)。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) は海底下のリング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 (図 63)。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 1.7m 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 2.1m 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、6.3 でも述べたように、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-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。

既述のように、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 2.1m 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 コアの採取地点に近接する C-10 測線に垂直投影した図 34 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 2m と見なす。なお、6 章で述べた反射面の高度差分布 (図 40) 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、今回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 (図 64)。F-41 断層による同層準の上下変位量は 1.2~1.8m (データ数 8、平均 1.4m) 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 1.7m) 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の上下変位量 (約 2m) を加え、敦賀市手沖の浦底-柳ヶ瀬山断層帯による K-Ah 降下層準の上下変位量は約 3.7m と見積

もらえる。

(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 (図 64)。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 断層が少なくとも 2 回活動した可能性を示唆する。

(5) まとめ

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 2m 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 1.7m である。
- ・ 両者を合計した敦賀市手沖の浦底-柳ヶ瀬山断層帯による K-Ah 降下層準の上下変位量は、約 3.7m となる。
- ・ 敦賀市手沖の浦底-柳ヶ瀬山断層帯は、K-Ah 降下後、少なくとも 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。

8.5 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)。

今回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断する測線 (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。

(1) 断層活動層準の認定と上下変位量

図 65 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 2.6m、後者の上下変位量は約 1m 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。従って、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 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 1.6m 及び約 1m 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 (図 64) 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) まとめ

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 1.6m、後発活動に伴う上下変位量は約 1m と見積もられる。

8.6 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位置、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 200m の Loc. U-1 (図 66) 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の美濃 - 丹波帯中・古生層と接する (図 67)。角礫層に挟まれる腐植質シルト層からは、5060±110 yBP の $\delta^{13}\text{C}$ 補正年代 (約 5900–5700 cal yBP) が得られている。

本調査の一環として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 1~2m 程度のバルジ状の高まりを確認し (図 66)、北西方向に約 50m 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 (図 66)。屈曲量は 25~75m 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、敦賀市樫曲の東方約 1.5km 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 (図 68)。日本原子力発電 (2008a)によると、この推定断層トレースから 30m 程度西側に位置する Loc. U-2 (南西側斜面基部) には、美濃 - 丹波帯の中・古生層中に最大幅約 2m の粘土化した破砕部が認められる (図 69)。この破砕部には、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 1m 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、30cm 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 (図 69)。

日本原子力発電の開示資料 5によると、Loc. U-2 の約 300m 及び 400m 北東側 (上流側) では、河谷の北東側斜面の下部に、北西 - 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 (図 68、70)。溝状地形の南西側 (斜面下部側) には、比高 1~3m 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。本調査の一環として実施した現地調査でも、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、75〜100m 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 200m には、北西―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 (図 68)。

(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 1.5km の Loc. U-3 では、美濃 - 丹波帯中・古生層の砂岩・泥岩混在岩中に、最大幅約 1m 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 (図 71、72)。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るとしているが、図 72 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、30cm 程度の南西側上りの上下変位を被っている可能性があると思われる。本調査では、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 30m 東方にある南北に延びる尾根上の西北西 - 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 (図 73)。その結果によると、鞍部直下には最大層厚約 2m 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 3m 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 12m に達し、美濃 - 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りの断層を推定している。しかし、角礫層及びローム質礫混じりシルト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―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りに引きずり上げられている (図 73)。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、図 73 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 (図 71) 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 1~2m 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~10cm 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、開示されたスケッチ及び本調査の一環として実施した 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（[図 74](#)）。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以上、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（[図 75](#)）。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（[図 76](#)）。岡田（2009）は、池見断層による上下変位量を、AT 降下層準で 1.5m、K-Tz 降下層準で 10m と見積っている。また、断層面に沿う累積変位量は 100m 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。

9. 結論

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 [表 12](#) と [図 77](#) にまとめた。

また、本調査結果に基づく浦底－柳ヶ瀬山断層帯の位置は [別図 1](#) のようにまとめられ、活断層パラメータは [別表 1、2](#) のように総括される。

9.1 断層帯の位置及び形状

（1）断層帯を構成する断層

日本原子力発電（2010a）の調査データと本調査の現地調査結果に基づくと、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 12km、若狭湾内の F-21 断層、F-23・24 断層、浦底断層、敦賀湾内の F-39・40 断層）、田結・内池見セグメント（長さ約 10km、敦賀湾内の F-41、F-44、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（長さ約 11km、敦賀湾内の F-32・45 断層）、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメント（約 16km、ウツロギ峠（断層）、池河内断層、柳ヶ瀬山断層）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 11km、若狭湾内の F-28、F-19、F-17・18 断層）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 4km) 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 7km) 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 1km) 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 35km、浦底セグメントの北端とした場合には約 32km 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)については、左横ずれの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(ウツロギ峠断層と池河内断層)では南西側隆起、南部(柳ヶ瀬山断層)では北東側隆起が示唆される。但し、断層露頭やボーリング調査の結果からは、逆センスの上下変位が確認された地点がある。

ウツロギ峠北方セグメントについては西側隆起の上下変位が明瞭であり、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、若狭湾内の甲楽城沖セグメントは、北東側隆起を示す。

以上の各セグメントのずれの向き及び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。更に、甲楽城沖セグメントは高角北東傾斜と考えられる。

ウツロギ峠北方セグメントと田結・内池見セグメントは、それぞれ浦底セグメント、ウツロギ峠・池河内・柳ヶ瀬山セグメントのバックスラスト的な性格をもち、各断層ペア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この相対的隆起域の北部から北西に延び、隆起側に背斜状の変形を伴うことから、逆断層的な性格をもつと考えられ、甲楽城断層の前縁断層としての性格も併せ持つ。

9.2 断層帯の過去の活動

(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 12.7m 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 0.45m/千年と見積もられる。また、ここでは K-Ah 降下層準に 4.4m 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、0.60m/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(0.45m/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 0.45m/千年、平均総変位（ネットスリップ）速度は 0.64m/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 0.9m/千年、平均総変位（ネットスリップ）速度は 1.0m/千年となる。

（2）活動時期

日本原子力発電から開示された浦底湾内における音波探査断面の解析の結果、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、本調査の一環として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。日本原子力発電から開示されたトレンチ地点の調査結果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。

日本原子力発電から開示されたトレンチ調査データを検証した結果、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、今回の調査では、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、既存及び今回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今回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 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 2.2m 以上、縦ずれ変位量 2.6m 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 1.8m。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 2.7m、両者を合わせた上下変位量は 4.5m 程度。
- 3) ボーリング調査地点の F39・40 断層：上下変位量 4.4m（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 2m。F-41 断層の上下変位量は約 1.7m、両者を合わせた上下変位量は約 3.7m。

上述のように、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：1.3m 以上（縦ずれ）、浦底湾：2.3m 程度（上下）、ボーリング調査地点：2.2m（上下）、手沖：約 1.9m（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 2.2m 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 2.2m 以上、ネットスリップは 3.1m 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4.4m、ネットスリップは4.9mに達する。

浦底セグメント（長さ約12km）を単独の活動セグメントと見なし、1回のずれ量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1~1.4m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（3.1m、4.9m）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。

ウツロギ峠北方セグメント（約11km）による、K-Ah 降下層準と推定される反射面の上下変位量は約2.6mである。1回の活動に伴う上下変位量は平均で約1.3mとなるが、2回の活動に伴う変位量は異なり、先行活動では約1.6m、後発活動では約1mと見積もられる。この値は、浦底セグメントのバックスラストとしてのウツロギ峠北方セグメントの1回の活動に伴う変位量と見なすことができる。

（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（0.45m/千年）と1回の活動に伴う平均変位速度（2.2m）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、（5）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大まかに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）との経験的關係によると、本断層帯の1回の活動によるずれの量（約3.1m及び4.9m）に対応する断層（地震セグメント）の長さは、約39km及び約62kmとなる。また、栗田（1999）による1回のずれの量と地震セグメント長に関する経験的關係によれば、対応する地震セグメント長は約48km及び75km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35kmもしくは約32km）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回のずれの量と活動セグメント長との経験的關係によると、本断層帯の1回の活動によるずれの量（約3.1m及び4.9m）に対応する活動セグメント長は、約27km及び約42km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、地表における距離が1km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 1km）において、 4180 ± 140 yBP 及び 4180 ± 150 yBP の未補正 ^{14}C 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 1km 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 4km 北の椿坂峠の北側（本断層帯池河内断層の東方約 1.2km）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。

10. その他の資料

10.1 地元（都道府県、市町村）等への説明

- 1) 2011 年 4 月 13～14 日に、福井県安全環境部危機対策・防災課、同部原子力安全対策課、農林水産部水産課、敦賀市市民生活部市民防災課、企画政策部原子力安全対策課、福井県漁業協同組合連合会、敦賀市漁業協同組合への事前説明を実施した。
- 2) 2011 年 11 月 15～16 日に、日本活断層学会 2011 年度秋季学術大会において、浦底－柳ヶ瀬山断層帯の調査結果を公表する旨、講演要旨を添えて、福井県安全環境部危機対策・防災課、同部原子力安全対策課、敦賀市市民生活部市民防災課、企画政策部原子力安全対策課に連絡した。
- 3) 2012 年 2 月 16 日に、調査結果の取りまとめ資料を福井県安全環境部危機対策・防災課、同部原子力安全対策課、敦賀市市民生活部市民防災課、企画政策部原子力安全対策課に送付した。また、地元関係自治体の窓口になって頂いた福井県安全環境部危機対策・防災課研究成果の説明に出向く用意があることを伝えたが、具体的な日程調整には至らなかった。
- 4) 2012 年 3 月 2 日に、調査結果を更に吟味し、取りまとめた資料を地元関係自治体の窓口の福井県安全環境部危機対策・防災課に送付し、同課から、福井県及び敦賀市の関係部課へ配布した。

10.2 既存調査資料の開示請求

本調査に際しては、平成 23 年 5 月 9 日付独立行政法人産業技術総合研究所第 20262000-A-20110509-001 号文書により、日本原子力発電株式会社に対して、下記調査資料の開示請求（「地質調査資料の借用依頼」）を行い、平成 23 年 5 月 13 日付日本原子力発電株式会社開室発第 1 号文書により、請求通り（不開示無し）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
 - 2-1 ウォーターガン・マルチチャンネル探査記録
 - 2-2 ジオパルス・マルチチャンネル探査記録
 - 2-3 ソノプローブ・シングルチャンネル探査記録他
- 3 海上ボーリング調査データ
 - 3-1 ボーリングコア写真
 - 3-2 柱状図
 - 3-3 炭素同位体年代測定結果
 - 3-4 テフラ分析結果、花粉分析結果、珪藻・ナノ化石分析結果他
- 4 海域調査データの整理結果
 - 4-1 海底地層上面（C層上面及びR層上面）の等深線図
 - 4-2 浦底－内池見断層の累積変位量分布（鉛直方向）
 - 4-3 浦底－内池見断層の断層傾斜角（音波探査記録からの読み取り）
- 5 陸域調査データ
 - 5-1 トレンチ調査データ（トレンチ壁面写真、同スケッチ、炭素同位体年代測定結果、テフラ分析結果他）
 - 5-2 ボーリング調査データ（ボーリングコア写真、柱状図他）

また、平成23年8月18日に、独立行政法人等の保有する情報の公開に関する法律第4条第1項の規定に基づき、独立行政法人原子力安全基盤機構に対して、下記調査資料（法人文書）の開示請求を行い、平成23年9月16日付独立行政法人原子力安全基盤機構11管理受-0029文書により、請求通り（不開示無し）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）

10.3 マスコミ等の取材への協力状況

- 1) 2011年7月28～29日、福井新聞から、本調査についての取材要請があり、電話で取材に応じた。
- 2) 2011年8月9日、福井新聞から、採泥調査の現場取材要請があり、作業と記者の安全を考慮して、警戒船上からの取材を許可した。
- 3) 2011年11月25日以降、共同通信から、本調査の結果についての取材要請が再三あり、文部科学省及び関係自治体等への調査結果の周知完了後の2012年3月5日に、つくば市内の産総研内で取材に応じた。

以上の取材への協力の結果、本調査については、下のような報道がなされた。

- ・福井新聞7月30日朝刊3面（別紙1）

- ・福井新聞 8 月 11 日朝刊 5 面 (別紙 2)
- ・共同通信 3 月 6 日共同ニュース午前 2 時 6 分
- ・福井新聞 3 月 6 日朝刊 1 面
- ・北陸中日新聞 3 月 6 日朝刊 1 面 (別紙 3)
- ・京都新聞 3 月 6 日朝刊 1 面及び 3 面
- ・岐阜新聞 3 月 6 日朝刊 1 面
- ・大分合同新聞 3 月 6 日朝刊 1 面
- ・神戸新聞 3 月 6 日朝刊 1 面及び 2 面
- ・新潟日報 3 月 6 日朝刊 1 面及び 2 面
- ・毎日新聞 (大阪) 3 月 6 日朝刊 2 面

10.4 成果の公表等

本調査については、以下の成果公表等を行った。

- ・杉山雄一・宇佐見琢哉・島崎裕行・武田伸勝・永田高弘・下釜耕太・松山和馬：福井県敦賀湾における浦底断層のコアリング調査 (速報). 日本活断層学会 2011 年度秋季学術大会、2011 年 11 月 26 日。
(http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/jsafr/pdfs/2011fallmeeting_jsaf.pdf)
- ・杉山雄一・坂本 泉・滝野義幸：浦底断層の完新世活動. 第 114 回活断層・地震研究センターセミナー、2012 年 1 月 20 日。
(<http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/katsudo/seminar/index.html>)
- ・杉山雄一：浦底断層に関する新知見. 経済産業省原子力安全・保安院地震・津波に関する意見聴取会 (活断層関係) 第 4 回、2012 年 3 月 12 日。
(http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/26/2_004/sankou4-1.pdf)
- ・杉山雄一・坂本 泉・滝野義幸・宇佐見琢哉・岸本弘樹・永田高弘：福井県・浦底断層の完新世活動. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 22 日。
(<http://www2.jpгу.org/meeting/2012/session/PDF/S-SS35/SSS35-14.pdf>)
- ・坂本 泉・根元謙次・大貫裕志・木村信太・滝野義幸・藤巻三樹雄・杉山雄一：敦賀湾における浦底断層の高分解能地層探査. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 22 日。
(<http://www2.jpгу.org/meeting/2012/session/PDF/S-SS35/SSS35-P20.pdf>)
- ・杉山雄一・坂本 泉・滝野義幸・宇佐見琢哉・島崎裕行・武田伸勝・永田高弘・下釜耕太・松山和馬：敦賀湾における浦底断層のコアリング調査. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 22 日。
(<http://www2.jpгу.org/meeting/2012/session/PDF/S-SS35/SSS35-P21.pdf>)

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、並びに福井県漁業協同組合連合会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、調査船の借り上げと音波探査測線及び採泥地点の設定に

際しては、敦賀市漁業協同組合のご関係の皆様にご協力・ご尽力を賜った。更に、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。

調査担当：杉山雄一（産業技術総合研究所）

坂本 泉・滝野義幸（東海大学海洋学部）

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.
- 福沢 (1995) : 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物. 第四紀研究, 34, 135-149.
- 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.
- Heaton, T.J., Blackwell, P.G., Buck, C.E. (2009): A Bayesian approach to the estimation of radiocarbon calibration curves: the INTCAL09 methodology. Radiocarbon, 51, 1151-1164.
- 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.
- 活断層研究会編 (1980) : 「日本の活断層一分布図と資料一」. 東京大学出版会, 363p.
- 活断層研究会編 (1991) : 「新編日本の活断層一分布図と資料一」. 東京大学出版会, 437p.
- 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) : 活断層調査の例一柳ヶ瀬断層. 応

- 用地質, 22, 32-51.
- 中田 高・今泉俊文編 (2002): 「活断層詳細デジタルマップ」. 東京大学出版会, DVD-ROM 2 枚・付図 1 葉・60p.
- 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連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.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E. (2009): IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51, 1111-1150.
- 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.
- 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*, 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．

図表等のキャプション

- 図 1. 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。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2004）。
- 図 2. 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。
- 図 3. 高分解能音波探査測線位置図。
- 図 4. 精査測線位置図。UA-7、DA-7 等は採泥調査地点。
- 図 5. 概査によって得られた代表的な反射記録。
- 図 6. 音響層序と反射面（CA-12 測線及び C-15 測線）。
- 図 7. 音響層序と反射面（C-10 測線）。
- 図 8. 敦賀湾中央部の精査域の詳細測線位置図。
- 図 9. 敦賀湾中央部の精査によって得られた代表的な反射記録（1）。
- 図 10. 敦賀湾中央部の精査によって得られた代表的な反射記録（2）。
- 図 11. 敦賀湾東部の F-32・45 断層を横断する反射記録。
- 図 12. 高分解能音波探査によって確認された完新統の断層変位の位置。
- 図 13. 連続性の検討の結果得られた最終的な活断層の分布（断層トレース）。F-N4、F-N5、F-N6 及び F-N8 は、今回新たに認定された活断層。
- 図 14. 採泥調査の計画海域。日本原子力発電貸与資料 2-3 のうち、「敦賀湾におけるソノプローブ音源による音波探査の測線と断層・撓曲分布」を基図として用い、採泥調査計画海域、次図の音響断面の位置、立石岬付近における浦底断層のトレースを加筆。
- 図 15. 採泥調査計画海域の既存音波探査断面と採泥調査計画地点。基図は日本原子力発電貸与資料 2-3 のうち、NFWM10-2 測線の一部。
- 図 16. 採泥調査の対象海域。
- 図 17. ピストン式柱状採泥器の模式図と試料採取概念図。
- 図 18. DGPS 法による船位測定の概念図。
- 図 19. コア採取点位置図。
- 図 20. 断層の隆起側（北東側）で採取された UA-5、UA-7、UA-8 コアの写真。
- 図 21. 断層の沈降側（南西側）で採取された DA-5、DA-6、DA-7 コアの写真。
- 図 22. UA-5、UA-7 及び UA-8 コアの柱状図。
- 図 23. DA-5、DA-6 及び DA-7 コアの柱状図。
- 図 24. 肉眼観察の結果に基づく 6 つのコアの対比。
- 図 25. 隆起側の 3 コアの帯磁率測定結果。沈降側の DA-7 コアの結果を併せて示す。
- 図 26. 沈降側の 3 コアの帯磁率測定結果。隆起側の UA-8 コアの結果を併せて示す。

- 図 27. 色調測定結果（その 1） 明度 (L^*)。
- 図 28. 色調測定結果（その 2） 色相（緑－赤） (a^*)。
- 図 29. 色調測定結果（その 3） 色相（青－黄） (b^*)。
- 図 30. 火山灰分析結果。
- 図 31. 隆起側の深度－年代関係。
- 図 32. 沈降側の深度－年代関係。
- 図 33. 各層・各対比基準面の推定年代。
- 図 34. UA-5 コア及び DA-7 コアの地質層序と C-10 測線の音波探査断面との対応。
- 図 35. UA-7 コア及び UA-8 コアの地質層序と C-8 測線の音波探査断面との対応。
- 図 36. 地質層序と音響層序との対応。
- 図 37. DA-5 コアの地質層序と C-12 測線の音波探査断面との対応。
- 図 38. DA-6 コアの地質層序と C-11 測線の音波探査断面との対応。
- 図 39. 採取深度の補正を行った最終的なコア対比図。
- 図 40. 各反射面の断層を挟んだ高度差の断層走向方向への変化。各断層の位置は図 13、各測線の位置は図 8 及び図 13 を参照。
- 図 41. 各反射面の断層を挟んだ高度差。測線ごとに表示。各断層の位置は図 13、各測線の位置は図 8 及び図 13 を参照。
- 図 42. 隆起側と沈降側における堆積速度の違いに起因する高度差の変化（模式図）。
- 図 43. 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）。
- 図 44. 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）。
- 図 45. F-19 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）。
- 図 46. 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）。
- 図 47. 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、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）。
- 図 48. 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）。
- 図 49. 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。
- 図 50. 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。
- 図 51. 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 5-1 による。トレンチの位置については図 50 右上のトレンチ平面図を参照。

- 図 52. トレンチ南側壁面の様子。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(旧い断層)を、更に新しい断層が切っている。2011 年 10 月 27 日撮影。
- 図 53. 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 5-1)と解析結果。上左:断層面と条線の計測・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、下中:観察された条線、下右:計算から求めた P 軸方位。
- 図 54. 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)。
- 図 55. 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。日本原子力発電貸与資料 2-2 及び 2-3。
- 図 56. 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 2-3。
- 図 57. 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 2-1 及び 2-3。
- 図 58. L-1 測線の音波探査断面。測線の位置はほぼ U-3.5 測線に沿っている。
- 図 59. 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。
- 図 60. ボーリング柱状図。日本原子力発電(2008a)に加筆。
- 図 61. ボーリング調査地点を横切る音波探査断面。日本原子力発電(2008a)及び日本原子力発電貸与資料 2-2 及び 2-3 に加筆。
- 図 62. 採泥調査地点、L-7 測線、FC-16 測線及び NFWM10-2 測線の位置図。日本原子力発電(2008a)に加筆。
- 図 63. 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 2-3 に加筆。測線位置は図 62 参照。
- 図 64. L-7 測線の音波探査断面。測線の位置は図 62 参照。
- 図 65. FC-16 測線の音波探査断面。測線の位置は図 62 参照。
- 図 66. 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」。
- 図 67. 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。
- 図 68. 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」。
- 図 69. 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。
- 図 70. 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。
- 図 71. 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」。

- 図 72. 杉箸北東方 Loc. U-3 の断層露頭スケッチ。日本原子力発電（2010a）による。
- 図 73. 杉箸北東方 Loc. Ut-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。
- 図 74. 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。
- 図 75. 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」。
- 図 76. 中池見の東西模式断面。岡田（2009）による。
- 図 77. 浦底セグメント及びウツロギ峠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。

- 表 1. 柱状採泥器の規格
- 表 2. DGPS の規格・性能
- 表 3. 音響測深器の規格・性能
- 表 4. 帯磁率計の規格・性能
- 表 5. コアの採取状況一覧
- 表 6. ¹⁴C 年代測定結果
- 表 7. UA-5 及び UA-8 コア（隆起側）の火山灰分析結果
- 表 8. DA-7 コア（沈降側）の火山灰分析結果
- 表 9. UA-5 コアの d 層中に含まれるパミス型火山ガラスの主成分分析結果
- 表 10. UA-8 コアの d 層中に含まれるパミス型火山ガラスの主成分分析結果
- 表 11. DA-7 コア（沈降側）及び UA-5 コア（隆起側）採取点における各対比基準面の海面からの深度と両コア間での高度差
- 表 12. 浦底セグメント及びウツロギ峠セグメントの活断層パラメーター一覧

- 別図 1. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の位置
- 別表 1. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の活断層パラメーター一覧（1）
- 別表 2. 浦底－柳ヶ瀬山断層帯の活断層パラメーター一覧（2）

- 別紙 1 福井新聞 7 月 30 日朝刊 3 面
- 別紙 2 福井新聞 8 月 11 日朝刊 5 面
- 別紙 3 北陸中日新聞 3 月 6 日朝刊 1 面