

平成 25 年度 沿岸海域における活断層調査

野坂・集福寺断層帯／野坂断層帯(海域部)

成果報告書

平成 26 年 5 月

独立行政法人産業技術総合研究所

学校法人東海大学

目 次

	頁
1. 野坂断層帯の概要	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	2
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	3
3. 高分解能シングルチャンネル音波探査	3
3.1 探査機器及び探査測線	3
3.1.1 探査機器	3
3.1.2 探査測線	3
3.2 代表的な反射記録	4
3.3 音響層序	4
3.3.1 野坂断層帯精査海域の層序	4
3.3.2 沖合の断層収斂部の層序	5
3.4 精査結果及び断層周辺の表層堆積物	5
3.4.1 野坂断層帯精査海域	5
3.4.2 沖合の断層収斂部	5
3.5 反射面Bnの高度差分布と断層活動性の場所による変化	5
4. マルチチャンネル音波探査	6
4.1 調査海域及び探査測線	6
4.1.1 調査海域	6
4.1.2 探査測線	6
4.2 使用機器、データ取得諸元及びデータ処理	7
4.2.1 音波探査	7
4.2.2 音響測深	7
4.2.3 船位測定・誘導	7
4.2.4 データ処理	8
4.3 調査結果	8
4.3.1 音響層序	8
4.3.2 野坂断層帯海域部における変形	9

5. ボーリング調査	10
5.1 調査地点の選定	10
5.2 海上調査の方法	10
5.2.1 海上ボーリング調査	10
5.2.2 磁気探査	11
5.2.3 位置測量	11
5.2.4 水深測量	11
5.3 コアの観察・記載及び測定・分析の方法	12
5.3.1 帯磁率測定	12
5.3.2 色調測定	12
5.3.3 コアの観察・記載	12
5.3.4 写真撮影	12
5.3.5 ¹⁴ C 年代測定	12
5.3.6 火山灰分析	13
5.3.7 花粉及び珪藻分析	13
5.4 海上調査の経緯及び結果	13
5.5 コア観察結果	14
5.5.1 層序区分	14
5.5.2 各層の記載	14
5.6 測定・分析結果	16
5.6.1 帯磁率及び色調測定結果	16
5.6.2 ¹⁴ C 年代測定結果	16
5.6.3 火山灰分析結果	17
5.6.4 花粉及び珪藻分析結果	17
6. 測定・分析結果及び音波探査結果との照らし合わせによるコア観察結果の検証	18
6.1 測定・分析結果とコア観察結果の照らし合わせ	18
6.2 音波探査結果とコア観察結果との照らし合わせ	19
6.2.1 A3 層/B1 層境界の照らし合わせ	19
6.2.2 B1 層の照らし合わせ	20
6.2.3 B2 層/C 層境界	20
6.3 音波探査結果との照らし合わせに基づく層境界及びコア間対比の修正	20
7. 調査結果から推定される野坂断層帯海域部の活動性と過去の活動	21
7.1 野坂断層帯海域部の平均変位速度	21
7.2 野坂断層帯海域部の過去の活動	21
7.2.1 活動イベントの認定	22
7.2.2 活動時期及び活動間隔	22

7.2.3	1 回の活動に伴う上下変位量	22
7.2.4	15～17 世紀の活動の有無	22
7.3	陸上の野坂断層帯の活動履歴との比較及び今回の調査の意義	23
8.	まとめ	23
9.	その他の資料	24
9.1	地元等への説明	24
9.2	貸与・開示資料	24
9.3	成果の公表等	25
	謝辞	25
	文献	25
	図表等のキャプション	28

1. 野坂断層帯の概要

1.1 断層帯の概要と研究史

野坂断層帯（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2003）は、若狭湾から福井県三方郡美浜町を経て敦賀市に至る活断層帯であり、野坂・集福寺断層帯の一部をなす（**図1**）。野坂・集福寺断層帯は全体として北西 - 南東方向に延びているが、敦賀市南部で約4kmの不連続が認められる。この不連続部には、北東 - 南西方向に湖北山地断層帯北西部（敦賀断層）が延び、野坂・集福寺断層帯を北西側の野坂断層帯と南東側の集福寺断層帯に二分している。野坂断層帯は、敦賀平野南部から若狭湾に至る野坂断層と若狭湾内のB断層系（小松原ほか、2000）を主な構成要素とする長さ約31kmの活断層帯であり、左横ずれ成分と北東側隆起の逆断層成分を有する。その最新活動は、トレンチ調査結果から、15～17世紀と推定されている（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2003）。

2003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）による長期評価公表前の本断層帯に関する主な研究としては、山崎・多田（1927）、東郷（1974）、杉山ほか（1998）などがある。山崎・多田（1927）は、野坂岳の北東方、敦賀平野の南西縁に北西 - 南東方向に延びる断層崖の存在を示し、黒河川断層崖と呼んだ。東郷（1974）は、野坂山地の変動地形から活断層の分布を示し、黒河川断層崖を野坂断層と呼び、集福寺断層も含めてこれらの断層が左横ずれの活断層であることを明らかにした。杉山ほか（1998）は、野坂断層のトレンチ調査を行い、本断層帯が1千年前以降に活動したことを示すデータを得ている。このほか、Huzita（1962）、伊藤・藤田（1971）、藤田・岸本（1972）、東郷・仲川（1973）、村井・金子（1975）、松田ほか（1976）、岡田（1978）、Okada（1978）、杉山（1997）、栗本ほか（1999）、中江ほか（2002）などが本断層帯及びその近傍の活断層、地殻変動、地形発達、地質構造等の調査若しくは考察、データの総括等を行っている。また、活断層研究会編（1991）、岡田・東郷編（2000）、池田ほか編（2002）、中田・今泉編（2002）は、本断層帯に関するデータを総括すると共に、陸域の詳細位置情報を提供している。

海域部については、海上保安庁（1980）及び小松原ほか（2000）によって、音波探査などが実施されている。小松原ほか（2000）は、野坂断層の海域部で反射面の上下変位とその累積性を認め、完新世に少なくとも2回の断層活動があった可能性を指摘している。また、水野・島崎（2002, 2003）は海上保安庁（1980）及び小松原ほか（2000）の結果を再検討し、本断層帯海域部の完新世の活動を推定している。

地震調査委員会（2003）による長期評価公表後の野坂断層帯の研究としては、岡田ほか（2005, 2012）による変動地形学的研究（都市圏活断層図「敦賀」及び「三方」の刊行）がある。また、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、野坂断層帯の調査を行っている（日本原子力発電、2004）。2005年2月には、原子力安全・保安院（現原子力規制庁）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、関西電力、日本原子力発電及び日本原子力研究開発機構は、野坂断層帯の再調査・再評価を行っている（関西電力、2008；日本原子力発電、2008、2010；日本原子力研究開発機構、2008）。このうち、関西電力と日本原子力発電は、野坂断層帯（若狭湾内の野坂断層及びB断層系）を横切る音波探査を実施している。更にこれら3社は2011～2012年に、若狭湾における津波痕跡に関するデータの拡充を目的として久々子湖・菅湖及び中山湿地（三方断層帯の沈降側）、久々子湖東方陸域（三方断層帯の隆起側、野坂断層帯の沈降側）などで津波堆積物調査を実施し、これら2地域については完新世堆積物中に津波を示唆する痕跡は認められなかったとしている（関西電力、2012など）。

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

2003年に公表された地震調査委員会の長期評価によると、野坂断層帯は、北西側から、若狭湾内のB断層系、若狭湾から敦賀平野の南部に至る野坂断層、野坂断層南東部の南側を並走する野坂南方断層の3つの断層から構成される（図1）。B断層系と野坂断層の海域部との間は、約4kmにわたって断層の存在が確認されていない。地震調査委員会（2003）は、本断層帯を左横ずれ成分と北東側隆起成分をもつ断層と考え、その全長を約31km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7.3程度の地震が発生すると推定している。また、同委員会は、旧地質調査所が平成10年度に敦賀市内で実施したトレンチ調査結果（杉山ほか、1998）から、同断層帯の最新活動を15～17世紀と推定している。

2003年6月の長期評価公表時点では、15～17世紀と推定される最新活動に先立つ活動としては、約2万年前から9千年前の活動しか明らかにされておらず、断層帯の活動間隔に関するデータは十分ではない。また、野坂断層帯の海域部が陸域の最新活動と同時に活動したか否かを示すデータは得られていない。このため、海域部において過去の活動時期、平均変位速度及び1回の活動に伴う変位量などに関するデータを得ることが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、野坂断層帯海域部の過去の活動時期、平均変位速度及び1回の活動に伴う変位量に関するデータの取得を第一の目標とした。その上で最新活動の年代を特定し、海域部の最新活動と15～17世紀とされる陸域の最新活動との同時性及び歴史地震との関係の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) 高分解能シングルチャンネル音波探査、2) マルチチャンネル音波探査、及び3) ボーリング調査を実施した。

1) 高分解能シングルチャンネル音波探査では、高分解能の探査装置を用いて音波探査を行い、詳細な断層分布・位置情報を得ると共に、完新統（“沖積層”）の堆積・浸食構造及び断層変位・変形構造を詳細に解明することを目標とした。

2) マルチチャンネル音波探査では、ブーマーを音源とする 12 チャンネルの音波探査を行い、重合処理を施すことによって、詳細な断層分布・位置情報を得ると共に、完新統及び上部更新統の断層変位・変形構造を解明することを目標とした。

3) ボーリング調査では、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・火山灰分析等を行って地層の層序と年代を明らかにし、1) 及び2) の音波探査結果と合わせて、断層活動の層準と時期、特に最新活動時期の解明を目標とした。

なお、これらの調査に際しては、高分解能シングルチャンネル音波探査を東海大学が担当し、マルチチャンネル音波探査とボーリング調査は産業技術総合研究所が担当した。

3. 高分解能シングルチャンネル音波探査

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

野坂断層帯は陸域の野坂断層、野坂南方断層、若狭湾内の B 断層系よりなり、北西 - 南東方向に連続する。大陸棚水深 75m 付近で、三方断層帯（A 断層系）が南方から B 断層系へ収斂する（**図 1**）。**図 2** に若狭湾内で実施した探査の航跡図を示す。第 1 段階の概査では、断層にほぼ直交する北東 - 南西方向の測線を湾全域に設定した。また、概査結果に基づき、城ヶ崎沖合水深 30m 以浅の採泥予定地点周辺において精査を実施した。

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が、概ね 2~4 ノットで航走し、後述する検測線を含めた測線の総本数は 47、探査距離は合計 146km 程度となった。

3.1.2.1 概査測線（G・K・EX 測線）

G 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 G と

し、測線 G-1~G-18 の計 18 測線を設定した (図 3)。測線の間隔は、沖合の断層収斂部で 200m、海域中央部及び沿岸域では約 1km とした。探査距離は約 74km である。

K 測線は検測線であり、主測線 (G 測線) に直交する北西 - 南東方向に設定し、記録の状況等を考慮して適宜調査を行った (図 4)。GK-1~6、GK-9、NK-1~2 の長短 9 測線で、調査距離は合計約 39.7km である。

EX 測線は、既存の音波探査で実施されていない海域や底質把握のために実施した測線である (図 5)。測線は、EX-1、2、4、5 の 4 測線で、調査距離は合計約 8km である。

3.1.2.2 精査測線 (N 測線)

N 測線は、野坂断層帯 B 断層系 (日本原子力発電、2004 の F-81 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、断層に直交する北東 - 南西方向に設定した (図 6)。精査の測線間隔は約 200m を基本としたが、極浅海域では底質が粗粒で明瞭な記録の取得が困難なため、約 400m 間隔で観測を行った。測線の本数は長短含めて 16 本、調査距離は合計約 24.5km である。

3.2 代表的な反射記録

若狭湾内における代表的な反射記録 (G-16 測線) を図 7 に示す。記録の左が南西、右が北東で、横軸は距離、縦軸は深度である。断層は海底面上の段差や堆積物と露岩域との構造境界として表現される。記録上では、全域にわたり表層第一層である淡い反射を呈する透明層の連続を確認することができる。これを An 層とし、その基底をなす連続性に富み、強い反射で特徴づけられる反射面を反射面 Bn (反射面 VI) とした。反射面 Bn は広域にわたってその連続を追跡できることから、断層の活動性解析に使用する基準面とした。また An 層は、沖または西に向かって層厚が薄くなる傾向が認められる。

構成される堆積物の組成によると考えられるが、若狭湾内での調査海域全域にわたり、表層堆積物中での明瞭な内部反射面が乏しく、断層の最新活動時期の特定に使える明瞭な反射面の抽出には至らなかった。しかしながら、三方断層帯精査海域、野坂断層帯精査海域、及び沖合の断層収斂部の各海域において、An 層やその下位層内に数条の内部反射面を確認できた。各海域の代表的な反射記録を図 8~図 10 に示す。なお、同時に探査を行った日向湖では、湖底下約 5m までの表層堆積物が確認され、約 20cm 間隔の明瞭な成層構造を示す記録が得られた (図 11)。

3.3 音響層序

3.3.1 野坂断層帯精査海域の層序

野坂断層帯精査海域における断層を横断する反射記録断面 (N-3.5 測線) の層序解析を図 12 に示す。An 層内部に 3 条の反射面が認められ、これらを上位から反射面 In~III n とした。末尾の n は野坂断層帯精査部の頭文字で海域を示す。An 層は城ヶ崎沖では小松原ほか (2000) の a 層に対比され、上部完新統と推定される (図 13)。

3.3.2 沖合の断層収斂部の層序

野坂断層帯・三方断層帯の収斂海域において、野坂断層帯海域部（B断層系）の西側（沈降側）を断層とほぼ平行に延びる GK-6_3 測線の反射記録の層序解釈を図 14 に示す。An 層とその基底をなす反射面 Bn の連続は確認できるものの、明瞭な内部反射面は確認できない。反射面 Bn の下部に、見かけ上、不連続な 3 条の反射面が認められる。これらを上位から反射面 I g~III g とした。これらの反射面は、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内に形成された反射面の可能性があるが、詳細は不明である。

3.4 精査結果及び断層周辺の表層堆積物

3.4.1 野坂断層帯精査海域

野坂断層帯精査海域の精査航跡と代表的な反射記録の位置を図 15 に示し、代表的な反射記録を図 16~18 に北から順に示す（図 17 は図 12 の再掲）。記録は左が南西、右が北東である。いずれの反射断面でも北東側の露岩域に沿って海底面に凹地が認められる。

精査海域北端部の N-0 測線（図 16）では、北東側の露岩域と接する堆積物内に南西側へ傾斜する反射面群が見られ、この付近を断層が通過すると推定されるが、地質構造の詳細は不明である。N-3.5 測線（図 17）では断層による反射面の明瞭な変位は認められないが、断層部の反射面に緩い向斜状の傾斜変化が見られる。浅海域の N-5 測線（図 18）では、記録中央を軸とした堆積物による高まりを形成しているが、海底面付近に音波が散乱し、内部の構造は不明瞭である。

3.4.2 沖合の断層収斂部

三方断層帯が野坂断層帯へ収斂する沖合の航跡と代表的な反射記録の位置を図 19 に示し、代表的な反射記録を図 20~22 に北から順に示す。記録は左が南西、右が北東である。

沖合の断層収斂部では、野坂断層帯（B断層系）は海底の顕著な地形変換点として表現されている。An 層は層厚 1.5m 程（G-7 測線；図 20）と薄く、An 層内には顕著な反射面は認められないが、An 層より下位の層内に、見かけ上、断続的な反射面が認められる。これらの反射面は断層の沈降側では南西へ、隆起側では北東に傾斜する。このような反射面の傾斜は、断層活動による傾動ないし撓曲変形によるものと考えられる。また、断層の隆起側では、An 層を欠く海底面からの強反射域が認められ、碎屑物の供給が極めて少ないか、碎屑物が通過するだけで堆積しない環境が推定される。強反射域は西の三方断層の隆起側（G-11 測線；図 22）の海底にも認められ、隆起量が最も大きい断層近傍に分布が限定されることから、低海水準時の波食面を示すものと推定される。

3.5 反射面 Bn の高度差分布と断層活動性の場所による変化

野坂断層帯精査海域では、断層が明瞭な高度差として確認できる反射面の変位は認められなかった。野坂・三方両断層帯が収斂する沖合では、断層を挟む隆起側と沈降側の海底面及び反射面 Bn に数 m の高度差が認められた。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。

隆起側と沈降側で計測された各反射面の高度差の平面的な分布を図 23 に示す。沈降側の高度差抽出地点を赤丸で示し、各赤丸の上の数値はメートル単位の高度差である。野坂断層帯では、G-1 測線の約 5.9m が最大であるが、計測できた記録断面が少ないため、平面的な高度差の変化の傾向は不明である。

また断層が海底面上の顕著な地形変換点として記録上で表現されているため、反射面 Bn の高度差を抽出した地点の直上の海底面の高度差も同時に抽出し、両者の高度差を図 24 にグラフで示した。図の青線が海底面を、茶色線が反射面 Bn を示し、横軸は測線名、縦軸は高度差を示す。なお、G7~G11 測線では、隆起側の反射面 Bn が不明瞭なため、高度差の抽出ができなかった。このグラフから、海底面よりも反射面 Bn の高度差の方が大きいことが確認される。

4. マルチチャンネル音波探査

4.1 探査海域及び探査測線

4.1.1 探査海域

野坂断層帯海域部の調査は、隣接する三方断層帯海域部の調査と一体的に実施した。本調査海域では、これまで海上保安庁（1980）や小松原ほか（2000）がユニブームを音源とした音波探査を実施しており、断層の分布が示されている。また、日本原子力発電（2010）でも更に詳細な音波探査が行われており、北東側隆起の変位を伴う断層が確認されている。

以上の探査結果に基づき、野坂断層帯海域部の調査では、福井県城ヶ崎西方沖及び黒崎北方沖の東西約 4km（東経 135 度 56.5 分から東経 135 度 58.8 分）、南北約 4km（北緯 35 度 37.6 分から 35 度 39.5 度）を調査海域とした（図 25）。

4.1.2 探査測線

探査測線の設定に当たっては、ボーリング調査に適した地点の選定のため、小松原ほか（2000）及び日本原子力発電（2010）の音波探査記録を参考に、シングルチャンネル音波探査の測線に沿って、北東 - 南西方向に 11 測線、これらの測線に直交する北西 - 南東方向の測線を 1 本設定した。また、反射記録の検討から、ボーリング調査候補測線とした N-5B 測線及び N-5.5B 測線については、調査機器の設定、船速、発信間隔等を

変えて、N-5B 測線で 5 回、N-5.5B 測線で 4 回の航走観測を実施した（表 1）。

野坂断層帯の探査は、三方断層帯海域部と合わせて、平成 25 年 8 月 6 日から 8 月 8 日に実施した。両海域の延べ測線長は 55.7km で、このうち野坂断層帯海域部の測線長は 28.45km である。測線名はシングルチャンネル探査測線と同じ番号を付け、その後に B の文字を加えている。

探査測線の位置を図 25 に、探査測線の一覧を表 1 に示す。

4.2 使用機器、データ取得諸元及びデータ処理

4.2.1 音波探査

音源には公称最大送振出力 300J の Applied Acoustic Engineering 社製 AA300 型ブーマーを用い、エネルギーソース（送信器）には同社製の CSP-P を使用した。受振には 5 ハイドロフォン素子／チャンネル、チャンネル間隔 2.5m、チャンネル数 12 の総合地質調査社製ストリーマーを使用し、データの収録（デジタル変換）にはティアック社の LX110 を用いた。

計 12 測線で行ったマルチチャンネル探査は、ブーマー音源の発振出力 200J、音源深度 0.3m、発振間隔約 1.25m、収録時間 0.6 秒、サンプリング周波数 10 kHz、船速 3～4 ノットで実施した。更に、ボーリング調査候補測線とした N-5B 測線及び N-5.5B 測線では、表層のより詳細な記録を得るため、発振出力を 50J、100J 及び 300J に変えた探査を実施した。この探査では、音源深度 0.3m、発振間隔約 0.625m とし、収録時間 0.3 秒、サンプリング周波数 10 kHz に設定し、船速は 3～4 ノットとした（表 2）。

探査実施中は、反射データの船上モニター用として、EPC Laboratories 社製の GSP-1086-2 サーマルプロッターを使用して探査記録（反射断面）の出力を行った。また、調査中の事故の回避を最優先するとともに、調査船のエンジン音のノイズレベルテストの結果を参照して、ブーマー及びストリーマーの第 1 チャンネルを、それぞれ、船尾後方 25m と 30m に配置した（図 26）。

4.2.2 音響測深

音響測深には千本電気社製の PDR-1300 を用い、調査船の舷側に取りつけて測深を行った。測深機の吃水は 1m とした。測定された水深は用紙にアナログ出力すると共に、デジタルデータとしてログファイルに取り込んだ。潮位の補正には、国土交通省北陸地方整備局所管の敦賀検潮所のデータを使用し、基準面は T. P.（東京湾平均海面）とした。

4.2.3 船位測定・誘導

船位の測定は Trimble 社製の DSM 232 を用いて、SBAS（Satellite-Based Augmentation System）補正情報を用いたディファレンシャル GPS（DGPS）によって行い、計画測線上を調査船が進むように誘導を行った。船位、ブーマーなどの曳航体の位置（船位と進行方向から計算）、時刻のデータはログファイルに記録した。また、約 100

ショット毎に、測位座標と音波探査データとを対応させる測位点（イベント点）を記録に記入した。これは 200J での調査時は 125m 毎、100J 及び 50J の調査時は 62.5m 毎に相当する。

4.2.4 データ処理

収録したマルチチャンネル探査データの処理は産業技術総合研究所で行った。使用したソフトウェアは Parallel GeoScience 社製 SPW である。デコンボリューション処理、ゲイン回復、帯域通過フィルタリング処理などを行った。速度解析を行った後、CMP 重合法により 12 重合の反射断面を得た。水深が浅く、直達波と海底面が分離しづらい記録については海底面上のミュート処理は行っていない。また各層序の連続性を確認する際には反射法音波探査解釈ソフト SeisVision2D（Geographix 社製）を使用した。

ボーリング調査地点近傍の探査データに関しては、地球科学総合研究所に依頼して、断層活動による反射面の変形に注目した高度処理を行った。処理を行ったのは N-4B、N-4.5B、N-5B、N-5B（50J 発振）、N-5B（100J 発振）、N-5.5B、N-6B、N-103B の 6 測線・8 断面であり、合計測線長は 8km である。データ処理では、波浪の影響の補正、ケーブル深度補正、フィルタリング処理、振幅補償、デコンボリューション、重合速度解析、残差静補正等を行い、重合後、ポストスタックデコンボリューション及びマイグレーションを実施した。処理には地球科学総合研究所が所有する地震探査処理ソフトウェアパッケージ「SuperX」を用いた。

4.3 調査結果

図 27～図 38 に、各測線の反射断面（音波探査記録）を示す。野坂断層帯海域部周辺では、明瞭な連続的な反射面があまり認められない。これは海底面に分布する堆積物が比較的粗く、締まっているためと考えられる。この中で判別できる音響層序について以下に記載する。

4.3.1 音響層序

本調査海域の反射断面には、海底下約 5～20ms（深度約 4～15m）に比較的連続性の良い反射面が認められる。それより下位の地層には一部で反射面が認められるものの、連続性は良くない。また、調査海域北東部及び北西部には露岩域が分布する。本稿ではこれらの反射断面の特徴と地層分布に基づき、野坂断層帯海域部周辺の地層を 3 層に区分した。以下に下位層からそれぞれの特徴を記す。

（1）III 層

III 層は調査海域北東部及び南西部に分布する。両海域の III 層が同じものである確定的なデータは得られていないが、III 層内部の反射面はほとんどなく、音響基盤を形成している。III 層は上位層とは明瞭な不整合で接し、海底面に露出する III 層は北東側では比較的平坦な地形を示し、南西側の III 層は明瞭な凹凸を示す。III 層の下限は本調査で

は得られなかったため、両海域ともに層厚は不明である。

III 層は、小松原ほか (2000) の I 層 (先新第三系) に対比される。

(2) II 層

II 層は調査海域全域で認められる音響層である。比較的明瞭な反射面を境界として、上位層と区分される。内部反射は不明瞭なものの、ボーリング調査を実施した N-5B 測線の反射断面では IIa、IIb 及び IIc に区分できる。II 層の上面及び内部反射面には撓曲状の変位が認められる。II 層については詳細な対比は困難であるが、概ね小松原ほか (2000) の c~k 層 (完新統~鮮新統) に対比される。また、N-5B 測線では、5 章で述べるように、II 層はほぼ小松原ほか (2000) の c~f 層 (完新統~上部更新統) に当たり、このうち IIa 層は、その堆積体の特徴から小松原ほか (2000) の c 層に対比される。

(3) I 層

I 層は本調査域で認められる最表層の堆積物で、その厚さは 16 ミリ秒 (12m) 以下である。調査海域全体に広く認められ、上面は現在の海底面である。その内部には比較的連続性のよい反射面が認められ、下位の II 層をオンラップ不整合で覆う。I 層は沖合まで広く連続的に認められることから、完新世後期から現在に至る安定した高海水準期に堆積したと考えられる。特に N-4.5B 測線及び N-5B 測線の記録では、東西に堆積層が薄くなり、上に凸の形状を呈しており、底層流などの影響が推定される。

I 層は、ボーリング調査を実施した N-5B 測線では、Ia 層と Ib 層の上下 2 層に区分される。これらはそれぞれ、小松原ほか (2000) の a 層、b 層に対比されると推定される。

4.3.2 野坂断層帯海域部における変形

今回の調査で得られた野坂断層帯海域部を横切る反射断面には、断層活動によると考えられる変形が認められる。以下に調査海域を北部、中部、南部に分けて、測線ごとに反射断面に認められる変形について述べる。

(1) 調査海域北部 : N-2.5B~N4B 測線 (図 27~図 30)

調査海域北部の野坂断層帯に直交する断面には、I~III 層が認められる。探査断面の東端及び西端には III 層が分布している。東端部に分布する III 層の上面は比較的平坦で緩やかに上に凸の形状を呈する。この III 層の西縁に断層が存在すると推定され、この位置を挟んで東側では内部反射が認められず、西側では内部反射が認められ、I 層及び II 層が分布する。この断層に関しては、沖合の N2.5B 及び N-3B 測線では堆積層に明瞭な変位が認められないことから、断層の活動性は低い可能性がある。一方、陸側 (南側) の N-3.5B 及び N-4B 測線では I 層の反射面の変形は不明瞭なものの、II 層の内部反射面には変形が認められ、下位の反射面ほどその変位量が大きくなる。このことから II 層堆積以降、複数回のイベントがあったことが示唆される。

(2) 調査海域中部 : N-4.5B~N-6B 測線 (図 31~図 35)

本海域では、野坂断層帯に直交する断面に I 層及び II 層が認められる。N-5B 測線 (図 32) の断面では、II 層内部に特徴的な反射面が認められ、上述のように IIa 層、IIb 層

及び IIc 層に区分できる。また、I 層は Ia 層、Ib 層の上下 2 層に区分される。

野坂断層帯海域部の断層部には、IIb 層の内部反射面と基底面、さらに I 層の基底面に相対的に西に落ちる明瞭な変形構造が認められる (図 33、34)。IIb 層の基底面については、沈降側の反射面が不明瞭なため、断層部を挟む変位量は明らかではないが、I 層基底面の変位量よりも大きい。また、I 層の基底面には、N-4.5B 及び N-5B 測線においては 1~2m の変位が認められる。このことから、少なくとも IIb 層堆積中に 1 回、I 層の堆積開始以降に 1 回の、計 2 回以上の断層活動があったことが示唆される。

(3) 調査海域南部：M-7B~N-9B 測線 (図 36~図 38)

調査海域南部は水深が浅いため、音源の直達波や多重反射が強く、音響層序区分は困難である。海底面は、断面中央が低い、緩やかな下に凹の地形を示す。N-8B 測線 (図 37) 及び N-9B 測線 (図 38) の断面では、海底直下の反射面も東方と西方へ浅くなる同様の傾向を示す。特に N-9B 測線では、西部 (測位点 No.1~2) の海底下に比高約 1m の谷地形が埋積されており、東部 (測位点 No.11~13) には、西側に傾斜するプログラデーションパターンを示す堆積体が確認される。今回の調査では本海域中に海底谷のような谷地形は認められず、調査海域の堆積環境が比較的最近に変わった可能性を示唆する。

5. ボーリング調査

5.1 調査地点の選定

ボーリング調査地点の選定に当たっては、今回の高分解能シングルチャンネル音波探査とマルチチャンネル音波探査の結果に加えて、小松原ほか (2000) による音波探査結果及び日本原子力発電株式会社より貸与を受けた既往音波探査結果を利用した。選定に際しての主な基準として、1) 深度 15m 程度より浅い層準に認められる反射面の断層両側への連続性、2) 断層による変位・変形の明瞭さ、3) 変形ゾーン (撓曲ゾーン) の幅の広さ (狭い方が断層両側で層相対比が容易でボーリング調査に適している) を考慮した。このような基準に従って検討した結果、完新世の活動履歴解明を目的とするボーリング調査には、マルチチャンネル音波探査の N-5B 若しくは N-5.5.B 測線沿いが最適と判断した。最終的には、N-5B 測線上の撓曲構造 (=野坂断層帯海域部) の西側 (沈降側) の GS-NSO-1 地点 (図 39; 北緯 35° 38' 53.03"、東経 135° 57' 47.06"、水深 12.0m) と北東側 (隆起側) の GS-NSO-2 地点 (図 39; 北緯 35° 38' 54.98"、東経 135° 57' 48.83"、水深 11.7m) をボーリング調査地点に選定した。

5.2 海上調査の方法

5.2.1 海上ボーリング調査

5.2.1.1 工法及び仮設

海上ボーリングは、傾動自在型試錐工法（**図 40**）により実施した。この工法では、クレーン台船にボーリング檣（やぐら）、試錐機、発電機などを仮設すると共に、クレーン台船の外側に、掘削ロッド、サンプラー及びケーシングパイプなどを通す鉄製の案内管（ガイドパイプ）を独立に仮設する。掘削時には、試錐機をガイドパイプの真上に移動させて作業を行い、掘削作業休止時及び夜間の係留時には、台船が波浪で大きく動揺してもガイドパイプと台船が接触しないように、両者を適切な距離（通常 10m 程度）に隔離することができる（**図 41**）。また、荒天で台船の係留が困難と判断される場合には、ガイドパイプを掘削地点に残置して、台船を港に避難させることができる。

クレーン台船は、各 1 トンのアンカーで 4 方向、海底での離間距離 300m に張ったワイヤーで固定した。ガイドパイプは、同じく各 1 トンのアンカーで 4 方向、海底での離間距離 100m に張ったワイヤーで鉛直に固定した（**図 42**）。合計 8 つのアンカー設置地点の海面には、安全対策として、灯浮標と玉ブイを設置し、ガイドパイプを残置した際には、その頂部に赤旗、標識灯及びレーダー反射板を取り付けた。

5.2.1.2 試錐機、サンプラー、及び掘削コア径

海上ボーリングには、油圧駆動型のロータリー式傾動自在型試錐機 CTM-10（**図 43**）を用いた。サンプラーには、固定ピストン式シンウォールサンプラー（水圧式）、打込み式二重管サンプラー、及びロータリー式二重管サンプラーの 3 種類を用意し、堆積物の硬軟・締まり具合によってこれらを使い分けた（**表 3**）。掘削時にはスライム除去と孔壁崩壊防止のため、ケーシングパイプを挿入し、必要に応じて泥水を使用した。

掘削コア径は直径 86mm とした。

5.2.2 磁気探査

海上でのボーリング調査に先立ち、機雷や不発弾などの危険物が掘削予定の海底下に存在しないことを確認するため、磁気探査を実施した。野坂断層帯海域部の掘削地点は水深が約 12m と比較的浅いため、潜水士が磁気探査機（DTM - I 型磁気傾度計）を操作して、掘削予定地点を中心とする半径 5m の範囲に危険物がないことを確認した。

5.2.3 位置測量

ボーリング掘削地点の位置測量は、誤差 1m 以下のディファレンシャル方式 GPS 測位システムを用いて実施した。移動局をクレーン台船の舷側に設置したガイドパイプに置き、掘削地点の位置を測定した。

5.2.4 水深測量

ボーリング掘削地点の水深は、誤差約 3cm 以下の音響測深器を用いて測定した。潮位データは国土交通省北陸地方整備局所管の敦賀検潮所のデータを用い、基準面は T.P.（東京湾平均海面）とした。

5.3 コアの観察・記載及び測定・分析の方法

野坂断層帯海域部の海上ボーリング調査では、5.4 で詳述するように、断層帯海域部の南西側（沈降側）で深さ 27m のコア（以下、GS-NSO-1 コアと呼ぶ）、北東側（隆起側）で深さ 12m のコア（以下、GS-NSO-2 コアと呼ぶ）を採取した。両コアについて、以下の観察・記載と各種測定・分析を実施した。作業手順は、まず帯磁率を測定し、次に色調測定を行った。その後、コアの観察・記載を行い、次いで写真撮影を行った。最後に、 ^{14}C 年代測定用試料、火山灰分析用試料、及び花粉・珪藻分析用試料を採取し、それぞれ ^{14}C 年代測定、火山灰分析、及び花粉・珪藻分析に供した。

5.3.1 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 1m の半割塩ビ管に載せ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 50cm 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。帯磁率計の規格・性能を表 4 に示す。

5.3.2 色調測定

色調測定は、コニカミノルタ社製の 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、コアをラップで覆った状態で、2cm 間隔で行った。

5.3.3 コアの観察・記載

コアの性状・堆積学的特徴を肉眼で明瞭に捉えられるように、観察に先立ち、コアの表面を金属ヘラで薄く削り、霧吹きなどで表面を洗浄した。その上でコアを詳細に観察し、層相、粒度、色調、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、縮尺 10 分の 1 の柱状図を作成した。

5.3.4 写真撮影

コアをコア箱に収納した状態で、室内の蛍光灯下においてデジタル一眼レフカメラ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。

5.3.5 ^{14}C 年代測定

GS-NSO-1 コアについては、上部（後述するコア観察結果による A 層）から貝 10、

植物片 1 の計 11 試料、同コア中部 (C 層) から貝 3、木片・腐植など 5 の計 8 試料、同コア下部 (D 層) から木片・腐植各 1 の計 2 試料、合計 21 試料を採取し、AMS 法による年代測定に供した。その結果、A 層上部について一部に年代の逆転が見られ、スライム起源の試料が含まれる可能性が出てきたため、貝 5 試料を追加で採取・測定した。

GS-NSO-2 コアについては、上部 (A 層及び B 層最上部) から貝 6、ウニ 1、腐植混じり粘土 1 の計 8 試料、下部 (B 層最下部及び C 層) から貝 1、腐植混じり粘土 2 の計 3 試料、合計 11 試料を採取し、AMS 法による年代測定に供した。その後、A 層最上部の年代データを補強する目的で、同層最上部の深度 0.8m と 1.3m から貝片を採取し、これら 2 試料の年代測定を追加で実施した。

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。

5.3.6 火山灰分析

コア観察の結果、GS-NSO-1 コア下部の礫が卓越する層準 (D 層) に挟まれるシルト層 (深度約 20.5~20.75m) 中に、火山ガラスが検出された。このため、まず、深度 20.63m、20.69m 及び 20.745m から採取した試料について、粒子組成分析、火山ガラスの屈折率測定及び火山ガラスの主成分化学組成分析を実施した。後述するように、この火山ガラスは始良 Tn 火山灰 (AT ; 町田・新井, 2003) に対比された。このため、GS-NSO-1 コア中部の粘土卓越層 (C 層) について、約 10,700 年前の鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki ; 町田・新井, 2003) の検出を目的として、10~20cm 間隔で採取した試料の火山ガラス含有量を測定し、代表的な火山ガラスについて屈折率測定を実施した。

5.3.7 花粉及び珪藻分析

コア観察の結果、C 層は河口や干潟などの汽水域に生息するヤマトシジミやアラムシロガイを多産し、植物片や炭質物を頻繁に挟むことが分かった。また、¹⁴C 年代測定の結果、C 層は完新世前期 (約 1 万年前~8 千年前) の堆積物であることが分かった。このため、C 層の堆積環境の変遷を明らかにすることを目的として、同層の花粉及び珪藻分析を実施した。分析試料は GS-NSO-1 コアの C 層から 10 試料、GS-NSO-2 コアの C 層から 2 試料を採取した。また、比較のため、GS-NSO-2 コアの B 層最下部の細~中粒砂と B 層最上部に挟まれる極細粒砂~シルト混じり粘土についても試料を採取し、花粉と珪藻の分析を行った。

5.4 海上調査の経緯及び結果

海上調査では、まず、GS-NSO-1 地点 (図 39) において、2013 年 9 月 22 日からコアの掘削を開始した。24 日には厚さ 3m 以上の砂礫卓越層となったため、深さ 12m で堀止とした。続いて、GS-NSO-2 地点において、9 月 28 日よりコアの掘削を開始した。コアの深度約 9~11m には、粘土を主とする細粒堆積物が確認され、その下位 1m は砂

礫層となったため、9月30日に深度12mで掘止とした。GS-NSO-2地点で採取したコアの下部に細粒堆積物が確認されたため、沈降側における相当層を確認し、野坂断層帯海域部による上下変位量を解明することを目的として、10月1日より沈降側の追加掘削を行った。掘削は、前回の掘削とほぼ同一の地点（北緯35°38′52.97″、東経135°57′46.96″、水深11.9m）で行い、前回のコアと深度3m分を重複させるように、深度9mからコアを採取した。深度14～19mに粘土を主とする細粒堆積物が確認され、その後、砂礫を主体とする堆積物となったため、10月6日に深度27mで掘止とした。

海上ボーリング調査期間中には、9月26、27日、10月3日、4日の計4日間は荒天のため作業を中止し、作業並びに海上交通の安全の確保に努めた。

以上の海上ボーリング調査によって、断層帯の隆起側で深度27m、沈降側で深度12mの連続コアが得られた。

5.5 コア観察結果

GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの写真をそれぞれ図44と図45に示す。また、両コアの柱状図を図46に示す。

5.5.1 層序区分

両コアには、上位から下位に向かって、大きく、1) 砂が卓越する層準、2) 砂礫と礫混じりの砂が卓越する層準、3) 粘土が卓越する層準、4) 砂礫が卓越する層準の、4つの層準が共通して認められた。このため、これら4つの層準をそれぞれA層、B層、C層、D層とした。さらに、より詳細な層相の特徴に基づいて、A層を上位からA1層、A2層、A3層に、B層を上位からB1層とB2層に細分した。図47に、コア観察に基づくGS-NSO-1 コアとGS-NSO-2 コアの層序区分とコア間対比を示す。なお、6.2で述べるように、図47に示した層序区分と対比は、今回及び既往の音波探査記録（反射断面）との照らし合わせの結果に基づいて一部修正され、最終的な層序区分とコア間対比は図60となる。

ボーリング調査による地質層序区分と3～4章で述べたシングル及びマルチチャンネル音波探査による音響層序区分、小松原ほか（2000）による音響層序区分との対比を表5に示す。A層はシングルチャンネル探査によるAn層、マルチチャンネル探査によるI層に対比される。また、ボーリング調査地点付近では、小松原ほか（2000）のa層及びb層に対比される。B層はマルチチャンネル探査のII層上部（IIa層及びIIb層上半部）に対比され、概ね小松原ほか（2000）のc層及びe層上部に当たる。C層はII層中部（IIb層下半部）に対比され、概ね小松原ほか（2000）のe層下部に当たる。D層はII層下部（IIc層）に対比され、概ね小松原ほか（2000）のf層に当たる。

5.5.2 各層の記載

(1) A1層

A1層は、主に粗粒砂と極細粒砂からなり、両者は厚さ数10cm～数cmの互層状を呈することが多い。砂層には貝及び貝片が多量に含まれ、極細粒砂で充填された生痕が多い。沈降側のGS-NSO-1コアでは、A1層は深度0～3.5mを占めるが、隆起側のGS-NSO-2コアでは深度0～2mに当たり約1.5mの層厚の違いがある。GS-NSO-1コアでは、深度2.4～3.5mに、極細粒～細粒砂からなる偽礫が粗粒～中粒砂中に散在する層相が発達するが、GS-NSO-2コアでは深度1.75～1.9mに類似の層相が認められるに過ぎない（深度1.9～2mはコア欠落）。

（2）A2層

A2層は、主として葉理があまり発達しない、淘汰の良くない中粒砂～極粗粒砂からなり、沈降側のGS-NSO-1コアの方が隆起側のGS-NSO-2コアよりも粒度がやや粗い。GS-NSO-1コアでは深度3.5～5mが典型的な層相（極粗粒～粗粒砂）を示すが、コア観察では中粒～粗粒砂主体の深度6.05mまでを本層に含めた。GS-NSO-2コアでは2.1m（2.0～2.1mはスライム）から3.95mをA2層とした。

（3）A3層

A3層は、厚さ5～25cm程度の極細粒～細粒砂層と細粒～粗粒砂層の互層からなり、A2層と同じく、GS-NSO-1コアの方がGS-NSO-2コアよりも粒度がやや粗い。粗粒～極粗粒砂層中（特にその下部）には、細礫（granule）～細中礫（fine pebble）が含まれる。GS-NSO-1コアでは深度6.05mから、礫混じり砂層とその下位の砂礫層の境界に当たるコア欠落部（深度8.45～9.1m）中央までをA3層とした。GS-NSO-2コアでは深度3.95mから厚さ20cmの砂礫層の直上（深度5.62m）までをA3層とした。

（4）B1層

B1層は、砂礫層及び砂礫混じりの粗粒～極粗粒砂層からなる。砂礫層中の礫は、細中礫サイズの頁岩及びチャートの円～亜円礫を主体とし、花崗岩や砂岩の礫を伴う。GS-NSO-1コアでは上述のコア欠落部直下から深度約11.5mまで、2m以上にわたってほぼ連続的に砂礫層が認められ、深度11mには長径63mmの円礫が含まれる。GS-NSO-2コアでは、同様の層相が深度5.62mから同6.15mに認められる。このため、厚さは0.5mと薄いですが、この層準をB1層とした。

（5）B2層

B2層は、中粒～極粗粒砂層と細～粗粒砂層の互層からなり、数cm～10cm程度の間隔の上方細粒化を示す成層構造や葉理が発達する。下位層の削り込みや傾斜した層境界も認められ、粗粒砂には礫が含まれ、一部は砂礫層状を呈する。GS-NSO-1コアでは深度約11.5mから同13.96mまで、GS-NSO-2コアでは深度6.15～9.1mをB2層とした。

（6）C層

C層は、一部にシルト～砂、礫、腐植・炭質物を含む粘土を主体とする。GS-NSO-1コアでは、深度13.96mから同18.5mまで約4.5mの厚さがあり、粘土層には腐植や砂～シルトの含有量の違いを反映した厚さ数mm～10cm程度の互層状の構造が見られる。中部の深度15～16.5mと最下部の18～18.5mでは、シルト混じりの極細粒～細粒砂が

卓越する。GS-NSO-2 コアでは、深度 9.1m から同 10.84m まで約 1.7m の厚さがあり、深度 9.1～10.2m の上部は部分的に葉理が発達する粘土からなる。深度 10.2～10.84m はシルト混じりの細粒～中粒砂からなり、最下部は礫混じりとなる。

(7) D 層

D 層は、GS-NSO-1 コアの最下部約 8m 及び GS-NSO-2 コアの最下部約 1m を占め、主として砂礫層からなる。砂礫層の基質は極粗粒～粗粒砂からなり、礫は主に中礫サイズの頁岩、砂岩、チャート、花崗岩（強風化したものを含む）、細粒閃緑岩（ひん岩）、主にアプライト起源と推定される石英岩などの円～亜円礫と亜角礫からなる。GS-NSO-1 コアでは、深度 20.4～21.45m に腐植・炭質物を含むシルト層、及びシルト層と細粒～粗粒砂層の細互層（厚さ数 cm）が挟まれ、深度 24.1～24.5m にはシルト混じり砂層が挟まれる。

5.6 測定・分析結果

5.6.1 帯磁率及び色調測定結果

帯磁率と色調の測定結果をそれぞれ図 48 と図 49～51 に示す。

帯磁率に関しては、 $10 \times 10^{-5} \text{SI}$ を下回る負のピーク（谷部）はコアの欠落部に対応する。また、 $100 \times 10^{-5} \text{SI}$ を超える正のピーク（山部）の多くは、掘削記録を参照するとコアの継目（各回の掘削時のコア最上部）に当たり、スライムに含まれる鉄片の影響と推定される。これらを除くと、GS-NSO-1 コアでは、深度 3.5～4m 付近を底とする谷部（帯磁率は約 $10 \times 10^{-5} \text{SI}$ ）が認められ、深度 14～14.5m 付近で、帯磁率のレベルが約 $300 \times 10^{-5} \text{SI}$ から、約 $100 \times 10^{-5} \text{SI}$ に、下位に向かって急激に低下している（図 48）。同様の変化は GS-NSO-2 コアでも認められ、深度 2.5m 付近を底とする谷部（帯磁率は約 $10 \times 10^{-5} \text{SI}$ ）があり、深度 8.8m 付近において、帯磁率のレベルが $500 \times 10^{-5} \text{SI}$ 前後から、 $100 \times 10^{-5} \text{SI}$ 前後まで、下位に向かって急激に低下している（図 48）。

色調に関しては、GS-NSO-1 コアの a^* （緑－赤）と b^* （青－黄）について、B2 層下部に当たる深度 13m 付近で下位に向かって緑と青（青み）が強まる変化が見られる（図 50、51）。GS-NSO-2 コアでは、これに対応すると考えられる a^* と b^* の変化が B2 層/C 層境界に当たる深度 9m 付近に見られる（図 50、51）。

5.6.2 ^{14}C 年代測定結果

^{14}C 年代測定結果を表 6 と表 7 に、 ^{14}C 年代 - 深度関係を図 47 に示す。

これらの表・図から明らかなように、GS-NSO-1、GS-NSO-2 両コアから得られた年代と層序区分・対比は整合している。全体的な年代－深度関係から古い側にずれる GS-NSO-1 コア 1 試料と GS-NSO-2 コア 2 試料は、再堆積と判断した（図 47）。また、GS-NSO-1 コアの A1 層から採取した、全体の傾向より若い方に年代がずれる 4 試料は、いずれもコアの継目部（各回の掘削時のコア最上部）に当たることから、上位層に由来する試料がスライムとして混入した可能性が高いと考えられる（図 47）。

A1層からは、 2σ の範囲の暦年代で、約 6,000 cal yBP 以降の年代が得られた。図 47 を見ると、A1 層上部では同層下部以下の各層に比べて堆積速度が遅いと考えられる。A2 層と A3 層からは、それぞれ、7,000 cal yBP 前後と 7,500 cal yBP 前後の年代が得られた。

B 層からは堆積年代を直接示す年代は得られなかった。C 層からは約 8,000 cal yBP から約 10,500 cal yBP の年代が得られた。C 層の堆積速度は 1.6~1.9m/ky と算出される。

D 層の深度 21m 前後に挟まれるシルト質層からは、約 29,000 cal yBP の年代が得られ、次に述べるようにこの層準から AT に由来する火山ガラスが検出されたことと整合する。

5.6.3 火山灰分析結果

D 層の深度 21m 付近から採取した試料の火山灰分析結果を表 8 と表 9 に示す。表 8 の粒子組成分析結果に示すように、深度 20.745m の試料は 50 粒/300 粒の高い出現率でバブルウォール型の火山ガラスを含む。3 試料の火山ガラスの屈折率は 1.4980 - 1.5005 であり、表 9 に示す主成分化学組成と合わせて、始良 Tn 火山灰 (AT ; 町田・新井、2003) 起源と判断される。

GS-NSO-1 コアの C 層の火山灰分析の結果、深度 14.35 - 14.40m の試料から、1.521 - 1.524 の屈折率を示し、鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki) 起源と推定される軽石型の火山ガラスが 11.1 粒/3,000 粒の出現率で検出された。また、C 層最下部の深度 18.63~18.80m からは、1.658 - 1.666 の屈折率を示すカミングトン閃石と 1.497 - 1.501 の屈折率を示す軽石型火山ガラスが検出された。これらの屈折率は、約 2 万年前の阪手テフラ (三瓶浮布火山灰、SUK ; 町田・新井、2003) のカミングトン閃石及び火山ガラスの屈折率 (中村ほか、2011) と一致することから、C 層最下部には阪手テフラ起源の粒子が混入していると推定される。このほか、C 層のほぼ全層準から、最高 202 粒/3,000 粒の出現率の AT 起源の火山ガラスが検出された。

5.6.4 花粉及び珪藻分析結果

5.6.4.1 花粉分析結果

花粉分析結果を図 52 に示す。この図に示すように、GS-NSO-1 コアの C 層及び GS-NSO-2 コアの C 層と B 層から、試料の採取層準に拘わらず、類似した組成の花粉群集が検出された。落葉広葉樹のブナ属とコナラ亜属、針葉樹のスギ属が多少の消長はあるものの、全体的に 20%前後の出現率を示す。次いで、マツ属、エノキ属-ムクノキ属、ニレ属-ケヤキ属が 10~20%程度の出現率を示す。際だって優占する分類群がみられないのが特徴であり、湿地性のサワグルミ属-クルミ属、クマシデ属-アサダ属、ハンノキ属などを伴うことを考え合わせると、様々な場所から花粉が集まってくる河口付近や内湾などの環境が示唆される。また、低率ながら、常緑広葉樹のアカガシ亜属やシイ

ノキ属が検出される。このような花粉群集の特徴は、安田（1982）による三方湖の R 帯 Sub-zone 2 の上部に相当し、縄文海進最盛期に向かう温暖化期を示唆する。

5.6.4.2 珪藻分析結果

珪藻の分析結果を図 53 と図 54 に示す。図 53 に示すように、GS-NSO-1 コアの C 層中には、海水の影響の消長を示唆する群集の変遷が認められる。C 層最下部からは珪藻を産出しない（おそらく酸化環境下で殻が溶解した）ため、その堆積環境は不明であるが、C 層の下部（深度約 18m）から中部（深度約 16.5m）にかけては、上位に向かって海水生種、海～汽水生種、汽水生種が減少し、淡水生種が増加している。構成種の特徴から、海水の流入があった潟湖から海水の影響が弱い池沼への移り変わりが示唆される。その上位の深度 15.5～14.5m では、再び海水生種、海～汽水生種、汽水生種が優占するようになり、海水がコア掘削地点周辺に再侵入したことを示唆する。その上位の深度 14.3m の試料では淡水生種が卓越し、海水の影響が弱まるが、C 層最上部の深度 13.95m では再び海水生種と汽水生種が優占し、海水の影響が強くなっている。GS-NSO-2 コアでは C 層の 2 層準のみから珪藻が検出されたため、環境変遷の詳細は不明であるが、GS-NSO-1 コアと同様の潟湖及び池沼環境の存在が示唆される（図 54）。

6. 測定・分析結果及び音波探査結果との照らし合わせによるコア観察結果の検証

6.1 測定・分析結果とコア観察結果の照らし合わせ

帯磁率測定結果については、GS-NSO-1 コアの深度 3.5～4m 付近の帯磁率の谷と GS-NSO-2 コアの深度 2.5m 付近の帯磁率の谷は、いずれも A2 層の上部に対応する（図 48）。また、GS-NSO-1 コアの深度 14～14.5m 付近と GS-NSO-2 コアの深度 8.8m 付近の帯磁率の急変（下方への帯磁率の急減）は、両コアとも、B2 層/C 層境界若しくはその直上の B2 層最下部に当たる（図 48）。このような帯磁率測定結果は、コア観察に基づく A1 層/A2 層区分、B 層/C 層区分、及び両コア間でのこれら境界層準の対比と整合的である。

色調測定結果については、GS-NSO-1 コアの B2 層下部の深度 13m 付近、GS-NSO-2 コアの B2 層/C 層境界に当たる深度 9m 付近で、下位に向かって緑と青が強まる変化が見られる（図 50、51）。このような色調変化は、粘土が卓越する C 層の還元環境を反映したものと推定され、コア観察に基づく B 層/C 層区分及び両コア間でのこの境界層準の対比と調和的である。

¹⁴C 年代測定結果については、図 47 に示すように、A1 層～A3 層上部及び C 層から、GS-NSO-1、GS-NSO-2 両コアの層序区分及びコア間対比と整合する結果が得られた。一方、A3 層中部～B2 層からは年代値が得られておらず、年代測定結果から、この層準の層序区分及びコア間対比の妥当性を直接的に検証することはできない。

火山灰分析では、D 層中のシルト質層の挟みから、AT 起源の火山ガラスが高い出現率で検出され、約 3 万年前の ^{14}C 年代値が得られたことと合わせて、砂礫を主とする D 層が最終氷期の堆積物であることを証拠立てた。

花粉及び珪藻分析の結果は、GS-NSO-1、GS-NSO-2 両コアの C 層が同様の潟湖・池沼環境で堆積したことを示しており、 ^{14}C 年代測定結果と合わせて、コア観察に基づく両コア間での C 層の対比を支持する結果と言える。

6.2 音波探査結果とコア観察結果との照らし合わせ

図 55 に、今回の N-5B 測線、日本原子力発電の DU11 測線（ブーマー、シングルチャンネル探査）、小松原ほか（2000）の NE6 測線（ブーマー、シングルチャンネル探査）の位置を示す。また、図 56 に N-5B-50J 測線（ブーマー50J、発振間隔 0.625m、受振間隔 2.5m、12 チャンネル探査）の重合処理時間断面にボーリング調査結果を重ねた図を示す。図 57～59 には、それぞれ N-5B-200J 測線（ブーマー200J、発振間隔 1.25m、受振間隔 2.5m、12 チャンネル探査）、日本原子力発電の DU11 測線、小松原ほか（2000）の NE6 測線の時間断面に、ボーリング調査結果を投影した図を示す。

ボーリング調査結果の重ね合わせに際しては、水中及び堆積物中の音速を 1500m/秒と仮定して、往復走時 13.33 ミリ秒が深度 10m に対応するものとした。また、GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの掘削地点の深度差（0.25m）も考慮に入れた。

6.2.1 A3 層/B1 層境界の照らし合わせ

N-5B-50J 測線の反射断面（図 56）では、隆起側（北東側）の GS-NSO-2 コアの A3 層/B1 層境界（柱状図中の厚さの薄い赤色部の上端）ないしその直上に、連続性のよい反射面（音響層序の I 層基底面）が認められる。この反射面は A3 層下部の砂層（柱状図の黄色部）と B1 層最上部の砂礫層（同赤色部）との音響インピーダンスの差によるものと考えられ、GS-NSO-2 コアの A3 層/B1 層境界に相当すると推定される。この反射面は、GS-NSO-2 コア掘削位置から南東側へ 50m ほど水平に連続した後、断層部で約 1.8m 南西側へ撓み下がっている（図 56）。沈降側の GS-NSO-1 コアの掘削位置付近では、この反射面はごく緩い傾斜で南東側へ浅くなっている。GS-NSO-1 コアの柱状図との比較では、この反射面は同コアの A3 層/B1 層境界（柱状図の橙色部・赤色部間の空白部）よりも約 2.5m 高い位置にあり、A3 層の上部（柱状図の黄色卓越部と橙色卓越部の境界）に重なる。

隆起側の A3 層/B1 層境界に相当すると推定される反射面（音響層序の I 層基底面）は、N-5B-200J 測線（図 57）、DU11 測線（図 58）及び NE6 測線（図 59）でも認められる。いずれも、野坂断層海域部による約 1.5m ないし 2m の上下変位（撓曲変形）を示し、沈降側では GS-NSO-1 コアの A3 層/B1 層境界（柱状図の橙色部・赤色部間の空白部）よりも 2.5m ほど高い位置にあり、A3 層の上部（柱状図の黄色卓越部と橙色卓越部の境界）に重なる。

6.2.2 B1層の照らし合わせ

コア観察では、沈降側、GS-NSO-1 コアの B 層上半の厚さ約 2.5m の砂礫卓越部を B1 層とし、隆起側の GS-NSO-2 コアの深度 6m 前後にある厚さ約 0.5m の砂礫層に対比した。しかし、N-5B-50J 測線の反射断面（図 56）では、GS-NSO-1 コアの B1 層（柱状図の赤色部）に相当する深度に見られる複数の反射面は、断層部で撓み上がっているものの、隆起側では GS-NSO-2 コアの B1 層の深度よりも明らかに低く、B2 層相当の深度に対応する。このほかの音波探査記録では、測線 N-5B-200J（図 57）の反射断面において、やや明瞭さは落ちるが、同様の関係が窺える。

6.2.3 B2層/C層境界

N-5B-50J 測線の反射断面（図 56）では、GS-NSO-2 コアの B2 層/C 層境界（柱状図の青色部の上端）付近に、南西に傾斜する反射面がみられる。この反射面は、GS-NSO-2 コア掘削地点の南西側で一旦傾斜が緩くなった後、断層の位置で大きく撓み下がっている。この反射面の撓み下がり、は、上述の A3 層/B1 層境界に相当する反射面の撓み下がりより明らかに大きく、断層変位の累積を示すと共に、両コアの B2 層/C 層境界の深度差（5.5m）と概ね整合する。このほかの音波探査記録では、日本原子力発電の DU11 測線（図 58）において、B2 層/C 層境界若しくは B1 層/B2 層境界と推定される顕著な反射面が野坂断層海域部によって、5m 程度の上下変位（撓曲変形）を被っており、両コア間の B2 層/C 層境界の深度差と調和的である。

6.3 音波探査結果との照らし合わせに基づく層境界及びコア間対比の修正

上述のコア観察結果と測定・分析結果及び音波探査結果との照らし合わせによって、A1 層/A2 層境界と B2 層/C 層境界の設定及び両コア間での対比については、妥当と判断される。一方、音波探査結果との照らし合わせによって、A3 層/B1 層境界及び B1 層/B2 層境界については、修正が必要と判断される。そこで、本調査では、縮尺 10 分の 1 のコア柱状図の見直しを行い、この結果に基づいて、上記 2 つの境界層準などを以下のように修正する。この修正に基づく GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの対比を図 60 に示す。

A3 層/B1 層境界については、断層隆起側の GS-NSO-2 コアにおける位置をそのままとし、沈降側の GS-NSO-1 コアにおける位置を深度 6.9m の細粒砂層（上位）と礫混じり粗粒砂層（下位）との境界に変更する（図 60）。これによって、沈降側の A3 層/B1 層境界はコア観察単独による深度よりも約 2m 上方に移動する。

A3 層/B1 層境界（A3 層基底）をこのように修正し、A3 層の上限（A2 層/A3 層境界）を変更しない場合には、沈降側の A3 層の厚さは約 0.9m と極めて薄くなる。このため、本研究では A2 層/A3 層境界についても、コア柱状図の見直しによって修正を検討したが、単一の深度・層準に絞り込むことはできなかった。このため、本報告では、沈降側

の A2 層/A3 層境界を、GS-NSO-1 コアの深度 6.05m から深度 5.1m~5.7m に、幅を持たせて変更する (図 60)。

B1 層/B2 層境界については、B1 層の層相上の特徴をより強く有する沈降側の GS-NSO-1 コアにおける位置をそのままとし、隆起側の GS-NSO-2 コアにおける位置を深度 8.3m の含礫率 10~15% の礫混じり粗粒砂層 (上位) と細粒~中粒砂層 (下位) との境界に変更する (図 60)。これによって、隆起側の B1 層/B2 層境界はコア観察単独による深度よりも約 2m 下方に移動する。

7. 調査結果から推定される野坂断層帯海域部の活動性と過去の活動

ここでは、前章までの調査結果の総合的な検討により得られた、野坂断層帯海域部を挟んだ各層の層厚変化及び各層基底の高度差 (≒上下変位量) の変化を指標として、同断層帯海域部の活動性と活動履歴について考察する。考察に当たっては、適宜、コア観察結果、測定・分析結果及び音波探査結果に立ち戻って検討する。

表 10 に、野坂断層帯海域部を挟んだ各層の層厚及びその上下方向への変化と各層基底の高度差及びその上下方向への変化を示す。同表には、 ^{14}C 年代測定結果から推定された各層の年代を合わせて示す。なお、C 層については、 ^{14}C 年代測定結果に基づき、9,000 cal yBP の年代と推定される層準を境界として、上部と下部に二分した。

7.1 野坂断層帯海域部の平均変位速度

表 10 から、野坂断層帯海域部を挟んだ B2 層、C 層上部、C 層下部の基底の高度差は、それぞれ、5.0m、5.5m、8.2m である。図 56 に示す音波探査記録を参照すると、B2 層及び C 層上部の野坂断層帯海域部を挟んだ基底高度差は、同断層帯海域部の累積上下変位量と見なして大きな問題はないと考えられる。C 層下部の基底については、音波探査記録上では対応する深度の反射面の連続性が良くないため、基底高度差をそのまま上下変位量と見なしてよいか、幾分疑問が残る。即ち、沖積層堆積開始時の基底面に初生的な傾斜や凸凹があった可能性を完全には否定できない。

これら 3 層の基底の高度差を野坂断層帯海域部の累積上下変位量と見なした場合、各層の堆積年代から、平均上下変位速度は、それぞれ、約 0.6m/ky (B2 層基底)、約 0.6m/ky (C 層上部基底)、約 0.8m/ky (C 層下部基底) となる。上述のように、C 層下部基底については、音波探査記録による初生水平性の裏付けが十分ではない。したがって、本報告では、野坂断層帯海域部の完新世における平均上下変位速度を約 0.6m/ky (約 0.8m/ky に達する可能性もあるが、今後の検証が必要) とする。横ずれ方向の変位速度については、直接的なデータは得られなかった。北西 - 南東の走向から、陸上の野坂断層帯と同様に、上下成分を上回る左横ずれ方向の変位速度を有する可能性がある。

7.2 野坂断層帯海域部の過去の活動

7.2.1 活動イベントの認定

表 10 に示すように、A1 層下部、B2 層及び C 層下部では、隆起側（野坂断層帯海域部の北東側）の層厚が沈降側（南西側）の層厚に比べて著しく小さくなっており、これら 3 層の堆積中～それぞれの被覆層の堆積以前に断層活動があったことが示唆される。本報告では、これら 3 つの活動を、新しい方から、活動 1、活動 2、活動 3 と呼ぶ。このうち、活動 3 については、7.1 で述べたように、C 層下部の隆起側・沈降側間の層厚の違いは、C 層下部基底（沖積層基底）の初生傾斜・凹凸に起因する可能性がある。

また、断層帯海域部を挟んだ各層基底の高度差の変化からは、上記 3 層準に加えて、B1 層の堆積中～A3 層堆積以前にも、断層活動が生じた可能性が示唆される。本報告では、この活動を活動 2' と呼ぶ。B2 層堆積中～B1 層堆積以前に活動 2 が起き、B1 層堆積中～A3 層堆積以前に活動 2' が生じたとすると、各層の推定年代から、約 500 年以内に 2 回の活動があったことになる。A3 層～B2 層の基底高度差については、活動 2' を想定するほかに、活動 2 に伴う上下変位量が後述するように約 3.5m と大きく、B2 層だけでは活動 2 によって形成された高度差を埋め切れなかった可能性がある。担当者はこの可能性の方がより高いと考えるが、活動 2' の存否の検証は今後の課題である。

7.2.2 活動時期及び活動間隔

表 10 に示す各層の推定年代から、活動 1、活動 2、活動 3 の発生時期は、それぞれ約 4,000～6,000 cal yBP、約 8,000 cal yBP、約 9,000～10,500 cal yBP と見積もられる。また、活動 2' の発生時期は約 7,500～8,000 cal yBP と推定される。

野坂断層帯海域部の活動間隔は、活動 3 が発生し、活動 2' は発生しなかったとした場合、3 回の活動の間隔は最短約 1,000 年、最長約 4,000 年、平均の活動間隔は約 1,500～3,300 年となる。活動 2' も発生したとした場合、4 回の活動の間隔は最短約 0～500 年、最長約 4,000 年、平均の活動間隔は約 1,000～2,200 年となる。また、活動 1 と活動 2 の 2 回の活動だけに絞った場合には、活動の間隔は約 2,000～4,000 年である。

7.2.3 1 回の活動に伴う上下変位量

A1 層基底の初生傾斜をほぼゼロと考えた場合、活動 1 に伴う上下変位量は、最大で約 1.7m であったと考えられる。また、B2 層基底（B 層/C 層境界）の初生傾斜もほぼゼロと見なし、活動 2' は発生しなかったと仮定した場合、活動 2 に伴う上下変位量は約 3.3m であったと考えられる。一方、活動 2' も発生したと考えた場合には、活動 2 と活動 2' に伴う上下変位量はいずれも 1.7m 前後であったと推定される。更に、C 層下部基底（沖積層基底）の初生傾斜もほぼゼロと仮定した場合、活動 3 に伴う上下変位量は 3.2m 程度であったと考えられる。

7.2.4 15～17 世紀の活動の有無

今回の調査では、野坂断層帯海域部が陸域部と共に、15～17 世紀に活動したか否かに

ついて、確定的なデータを得ることはできなかった。断層部を挟んだ A1 層上部の基底高度の差は 0.8m であることから、約 4,000 年前以降に（活動 1 以降に）、0.8m 程度の上下変位を伴う断層活動が生じた可能性が残っている。

7.3 陸上の野坂断層帯の活動履歴との比較及び今回の調査の意義

陸上の野坂断層帯については、敦賀市長谷地区におけるトレンチ調査（杉山ほか、1998）によって、15～17 世紀の最新活動が明らかにされている（地震調査委員会、2003）。しかし、最新活動に先立つ完新世の活動については、情報が全く得られていなかった（図 61）。今回の海域部の調査は、この情報空白期間を埋める情報が得られた点で大きな意義がある。今回の調査結果によると、野坂断層帯の活動性と活動頻度は、地震調査委員会（2003）の評価を上回る可能性があり、1 回の活動に伴う変位量も従来の推定よりも大きい可能性がある。一方、15～17 世紀の活動とされ（地震調査委員会、2003）、1662 年寛文地震に対応する可能性も指摘されている最新活動（杉山ほか、1998）については、前項でも触れたように、この活動が海域まで及んだか否かについて、明確なデータは得られなかった。これについては、野坂断層帯における地震発生の切迫性と多様性（分割放出型地震の可能性など）を明らかにするため、更なる調査の実施が期待される。

8. まとめ

野坂断層帯海域部のシングルチャンネル及びマルチチャンネル音波探査とボーリング調査の結果、同断層帯の過去の活動について、以下のことが明らかになった（表 11）。

（1）平均変位速度

ボーリング調査地点付近の野坂断層帯海域部の完新世における平均上下変位速度は、8～9ka の層準の累積上下変位量から、約 0.6m/ky と算出される。約 10ka の沖積層基底の断層帯を挟んだ高度差からは約 0.8m/ky と算出されるが、現時点では同層基底の初生水平性の検証が十分ではない。横ずれ方向の変位速度については、上下成分を上回る変位速度を有する可能性が高いが、直接的なデータは得られなかった。

（2）断層活動の層準・時期

断層帯を挟んだ各層の層厚変化から、A1 層下部堆積中 - A1 層上部堆積前（活動 1）、B2 層堆積中 - B1 層堆積前（活動 2）、C 層下部堆積中 - C 層上部堆積前（活動 3）の、3 回の断層活動が推定される。但し、活動 3 については、C 層下部の層厚の違いは沖積層基底の初生傾斜・凹凸に起因する可能性があり、確度が落ちる。このほか、断層帯を挟んだ各層基底の高度差の変化から、B1 層堆積中 - A3 層堆積前にも、断層活動（活動 2'）が生じた可能性がある。

得られた年代データから、各活動の時期は、活動 1：約 4,000～6,000 cal yBP、活動 2：約 8,000 cal yBP、活動 3：約 9,000～10,500 cal yBP と見積もられる。また、活動 2' の発生時期は約 7,500～8,000 cal yBP と推定される。

（3）15～17 世紀の活動の有無

今回の調査では、野坂断層帯海域部が陸域部と共に、15～17世紀に活動したか否かについて、確定的なデータを得ることはできなかった。断層部を挟んだA1層上部の基底高度の差は0.8mであることから、約4,000年前以降（活動1以降）に、0.8m程度の上下変位を伴う断層活動が生じた可能性が残る。

（４）1回変位量と平均活動間隔

各層基底の初生傾斜をほぼゼロと考えた場合、活動1に伴う上下変位量は最大約1.7m、活動3に伴う上下変位量は3.2m程度であったと考えられる。また、活動2'は発生しなかったと仮定した場合、活動2に伴う上下変位量は約3.3mと考えられる。一方、活動2'も発生したと考えた場合には、活動2と活動2'に伴う上下変位量は各1.7m前後であったと推定される。

活動間隔については、活動2'は発生しなかったとした場合、3回の活動の間隔は最短約1,000年、最長約4,000年、平均の活動間隔は約1,500～3,300年となる。活動2'も発生したとした場合、4回の活動の間隔は最短約0～500年、最長約4,000年、平均の活動間隔は約1,000～2,200年となる。活動1と活動2の2回の活動だけに絞った場合には、活動の間隔は約2,000～4,000年である。上述の平均変位速度と1回変位量（約1.7～3.3m）からは、平均変位速度を0.6m/kyとした場合には平均活動間隔は約2,800～5,500年、0.8m/kyとした場合には約2,100～4,100年と計算される。

9. その他の資料

9.1 地元等への説明

1) 2013年6月17日に福井県安全環境部危機対策・防災課及び福井県漁業協同組合連合会を訪問し、調査内容などについて説明を行うと共に、調査への協力を要請した。

2) 2013年6月18日に美浜町漁業協同組合を訪問し、調査内容と実施予定時期などについて説明し、調査船及び警戒船の傭船をはじめ、調査への協力をお願いした。

3) 2013年7月1日に福井県農林水産部水産課を訪問し、調査内容などの説明を行った。同課からは、岩礁破碎等許可申請について指示があった。岩礁破碎等許可については、7月5日付で申請を行い、7月22日に許可された。

4) 2013年7月1日に美浜町役場を訪問し、調査内容などの説明を行い、調査への協力を要請した。

9.2 貸与・開示資料

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。

・福井県三方郡美浜町沖のジオパルス・マルチチャンネル音波探査記録（29測線）及び測線図

・福井県三方郡美浜町沖のブーマー・シングルチャンネル音波探査記録（15測線）及

9.3 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。

- 1) 井上卓彦・杉山雄一・坂本 泉・滝野義幸・村上文敏・細矢卓志・宇佐見琢哉：高分解能音波探査からみた福井県三方断層帯及び野坂断層帯海域部における活断層分布及び活動履歴. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (ポスター発表), 2014 年 4 月 29 日.
- 2) 八木雅俊・坂本 泉・滝野義幸・藤巻三樹雄・田島智子・井上智仁・杉山雄一・井上卓彦：沿岸海域における活断層調査「三方断層帯および野坂断層帯」－高分解能地層探査結果－. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (ポスター発表), 2014 年 4 月 29 日.
- 3) 杉山雄一・井上卓彦・村上文敏・坂本 泉・滝野義幸・永田高弘・細矢卓志・宇佐見琢哉：福井県美浜町沖における三方断層帯及び野坂断層帯海域延長部のボーリング調査. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (ポスター発表), 2014 年 4 月 29 日.

謝 辞

本調査の実施に際しては、福井県安全環境部危機対策・防災課、同県農林水産部水産課、福井県漁業協同組合連合会、及び美浜町漁業協同組合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、調査船及び警戒船の借り上げに際しては、美浜町漁業協同組合の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には、既存調査データの開示・借用について、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る。

調査担当：井上卓彦・杉山雄一・村上文敏（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

- Heaton, T.J., Blackwell, P.G. and Buck, C.E. (2009): A Bayesian approach to the estimation of radiocarbon calibration curves: the INTCAL09 methodology. *Radiocarbon*, 51, 1151-1164.
- Huzita, K. (1962): Tectonic development of the Median Zone (Setouti) of Southwest Japan, since Miocene. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, 6, 103-144.
- 藤田和夫・岸本兆方 (1972) : 近畿のネオテクトニクスと地震活動. *科学*, 42, 422-430.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編 (2002) : 「第四紀逆断層アトラス」. 東京大学出版会, 254p.

- 伊藤英文・藤田和夫（1971）：西南日本の第四紀地殻変動から導かれた地殻の流動．材料．209, 190-196.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2003）：野坂・集福寺断層帯の長期評価について．http://www.jishin.go.jp/main/chousa/03jun_nosaka/index.htm
- 海上保安庁（1980）：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」．33p.
- 金田平太郎・岡田篤正・小松原琢（2000）：若狭湾沿岸・三方五湖周辺における1662年寛文地震時の地殻変動．月刊地球，号外28, 119-126.
- 関西電力株式会社（2008）：美浜・高浜・大飯発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書．
- 関西電力株式会社（2012）：平成23年東北地方太平洋沖地震の知見等を踏まえた原子力施設への地震動及び津波の影響に関する安全性評価のうち完新世に関する津波堆積物調査の結果について．265p.
- 活断層研究会編（1991）：「新編日本の活断層—分布図と資料—」．東京大学出版会，437p.
- 栗本史雄・内藤一樹・杉山雄一・中江 訓（1999）：敦賀地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，73p.
- 小松原琢・水野清秀・寒川 旭・山崎晴雄（1999）：三方断層のトレンチ調査と寛文地震時の地殻変動に関する検討．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），187-195.
- 小松原琢・杉山雄一・水野清秀（2000）：若狭湾中部，三方断層および野坂断層北方延長部の音波探査．地質調査所速報，EQ/00/2（平成11年度活断層・古地震研究調査概要報告書），89-118.
- 町田 洋・新井房夫（2003）：新編 火山灰アトラス—日本列島とその周辺．東京大学出版会，336p.
- 松田時彦・岡田篤正・藤田和夫（1976）：日本の活断層分布図およびカタログ．地質学論集，no. 12, 185-198 及び付図．
- 水野篤行・島崎哲也（2002）：若狭湾東部の海底活断層．第12回環境地質学シンポジウム講演論文集，219-224.
- 水野篤行・島崎哲也（2003）：若狭湾東部の海底活断層．「沿岸海域活断層調査」研究成果報告書．地震予知総合研究振興会，20p.及び付図等．
- 村井 勇・金子史朗（1975）：琵琶湖周辺の活断層系．地震研究所彙報，50, 93-108.
- 中江 訓・小松原 琢・内藤一樹（2002）：西津地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），産業技術総合研究所地質調査総合センター，90p.
- 中村千怜・安江健一・石丸 恒存・梅田浩司・古澤 明（2011）：緑色普通角閃石中のガラス包有物の主成分化学組成を用いた広域テフラの対比—阪手テフラを例として—．地質学雑誌，117, 495-507.
- 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，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 (2008) : 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 (2010) : 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).
- 日本原子力研究開発機構 (2008) : 高速増殖原型炉もんじゅ「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果報告書.
- 岡田篤正 (1978) : 若狭湾岸地域における主に最終氷期以降の海水準変動と地形発達. 地理学評論, 51, 131-146.
- Okada, A. (1978): Structure of the waste-filled valley and associated crustal movements at the eastern part of the Tsuruga Plain, north of Lake Biwa. *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, 6, 6-80.
- 岡田篤正・今泉俊文・熊原康博・千田 昇・東郷正美・中田 高 (2005) : 1: 25,000 都市圏活断層図「敦賀」. 国土地理院技術資料, D・1 - No. 449.
- 岡田篤正・金田平太郎・杉戸信彦・鈴木康弘・中田 高 (2012) : 1: 25,000 都市圏活断層図 三方断層帯とその周辺「三方」. 国土地理院技術資料, D1 - No. 602.
- 岡田篤正・東郷正美編 (2000) : 「近畿の活断層」. 東京大学出版会, 395p.
- 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. and 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 (1997) : 敦賀断層系の活動性調査. 地質調査所研究資料集 No.303 (平成8年度活断層研究調査概要報告書), 1-11.
- 杉山雄一・寒川 旭・吉岡敏和・佐竹健治 (1998) : 野坂断層の活動履歴調査. 地質調査所速報, EQ/98/1 (平成9年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 113-124.
- 東郷正美 (1974) : 琵琶湖北岸・野坂山地の変動地形. 地理学評論, 47, 669-683.
- 東郷正美・仲川信一 (1973) : 湖北における河川争奪. 法政大学地理学集報, 2, 9–19.
- 山崎直方・多田文男 (1927) : 琵琶湖附近の地形とその地體構造につきて. 地震研究所彙報, 2, 85-108.
- 安田喜憲 (1982) : 福井県三方湖の泥土の花粉分析的研究—最終氷期以降の日本海側の乾湿の変動を中心として—. 第四紀研究, 21, 255-271.

図表等のキャプション

- 図1 三方・花折断層帯の活断層位置と主な調査地点
地震調査研究推進本部地震調査委員会（2003）。
- 図2 高分解能シングルチャンネル探査の航跡図
- 図3 概査測線（G測線）航跡図（青太線）
- 図4 検測線（GK及びMK測線）航跡図（青太線）
- 図5 EX測線航跡図（青太線）
- 図6 野坂断層帯精査測線（N測線）航跡図
- 図7 G-16測線の記録断面と解釈
- 図8 M-3.5測線の記録断面
- 図9 N-3.5測線の記録断面
- 図10 G-7測線の記録断面
- 図11 H-7測線の記録断面及び表層部の拡大図
- 図12 N-3.5測線の記録断面と層序解析
- 図13 NK-2測線（上図）とNE5測線（下図；小松原ほか、2000）との対比
- 図14 GK-6_3測線の記録断面と層序解析
- 図15 野坂断層帯精査海域の代表的な測線（青太線）
- 図16 N-0測線の記録断面
- 図17 N-3.5測線の記録断面
- 図18 N-5測線の記録断面
- 図19 野坂断層帯・三方断層帯収斂部の代表的な測線（青太線）
- 図20 G-7測線の記録断面
- 図21 G-8測線の記録断面
- 図22 G-11測線の記録断面
- 図23 反射面 B_n の高度差分布及び各地点における値（左表）
G7～G11測線では隆起側の反射面 B_n が不明瞭なため、高度差の抽出ができなかった。
- 図24 海底面及び反射面 B_n の高度差の比較
- 図25 マルチチャンネル音波探査の調査海域及び測線位置図
- 図26 音源及びストリーマー配置図
- 図27 N-2.5B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図28 N-3B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図29 N-3.5B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図30 N-4B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図31 N-4.5B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図32 N-5B測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図33 N-5B-100J測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）

- 図 34 N-5B-50J 測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図 35 N-6B 測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図 36 N-7B 測線の音波探査断面（上：原記録、下：解釈付記録）
- 図 37 N-8B 測線の音波探査断面
- 図 38 N-9B 測線の音波探査断面
- 図 39 ボーリング調査地点（コア採取地点）位置図（上図）及び GS-NSO-1・GS-NSO-2 コア採取地点拡大図（下図）
断層及び撓曲の分布は日本原子力発電（2004）による。
- 図 40 傾動自在型試錐工法
この工法では、クレーン台船にボーリング櫓、試錐機、発電機などを仮設し、クレーン台船の外側に、掘削ロッド、サンプラーなどを通すガイドパイプを独立に仮設する。
- 図 41 ガイドパイプを台船から隔離した様子
掘削作業休止時及び夜間の係留時には、台船が波浪で大きく動揺してもガイドパイプと台船が接触しないように、両者を適切な距離に隔離することができる。
- 図 42 台船及びガイドパイプの固定方法（アンカリング）
- 図 43 油圧駆動型のロータリー式傾動自在型試錐機（CTM-10）の概要
- 図 44 GS-NSO-1 コアの写真
- 図 45 GS-NSO-2 コアの写真
- 図 46 GS-NSO-1 及び GS-NSO-2 コアの柱状図
- 図 47 コア観察に基づく GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの層序区分・コア間対比と¹⁴C年代 - 深度関係
- 図 48 GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの帯磁率測定結果
- 図 49 GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの色調測定結果（L*）
- 図 50 GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの色調測定結果（a*）
- 図 51 GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの色調測定結果（b*）
- 図 52 GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの花粉分析結果
- 図 53 GS-NSO-1 コアの珪藻分析結果
- 図 54 GS-NSO-2 コアの珪藻分析結果
- 図 55 N-5B 測線、日本原子力発電の DU11 測線及び小松原ほか（2000）の NE6 測線の位置図
海域の断層・撓曲及び既往探査測線の位置は日本原子力発電（2004）による。野坂断層の位置は日本原子力発電（2004）及び杉山の未公表資料による。日向断層と三方断層の位置は小松原ほか（1999, 2000）と金田ほか（2000）による。
- 図 56 N-5B-50J 測線（ブーマー50J、発振間隔 0.625m、受振間隔 2.5m、12 チャンネル探査）の重合処理時間断面にボーリング調査結果を重ねた図
- 図 57 N-5B-200J 測線（ブーマー200J、発振間隔 1.25m、受振間隔 2.5m、12 チャン

ネル探査)の重合処理時間断面にボーリング調査結果を重ねた図

図 58 日本原子力発電の DU11 測線 (ブーマー、シングルチャンネル探査) の反射断面にボーリング調査結果を投影した図

図 59 小松原ほか (2000) の NE6 測線 (ブーマー、シングルチャンネル探査) の反射断面にボーリング調査結果を投影した図

図 60 音波探査結果との照らし合わせに基づき修正した GS-NSO-1 コアと GS-NSO-2 コアの対比

図 61 野坂断層帯の陸域及び海域の活動履歴データ総括図

表 1 マルチチャンネル音波探査測線一覧表

表 2 マルチチャンネル音波探査観測条件一覧表

表 3 海上ボーリングに使用したサンプラーと主な対象堆積物

表 4 帯磁率計の規格・性能

表 5 ボーリング調査による地質層序と音波探査による音響層序の対比

表 6 GS-NSO-1 コア及び GS-NSO-2 コアの A 層の ^{14}C 年代測定結果

表 7 GS-NSO-1 コア及び GS-NSO-2 コアの B 層、C 層、D 層の ^{14}C 年代測定結果

表 8 D 層深度 21m 付近から採取した火山灰試料の粒子組成分析結果

表 9 D 層深度 21m 付近から採取した火山灰試料の主成分化学組成分析結果

表 10 野坂断層帯海域部を挟んだ各層の層厚変化及び各層基底の高度差変化とこれらから推定される断層活動

表 11 野坂断層帯の過去の活動