

# 共同研究成果報告書

## 断層の成因評価に関する基礎的研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立大学法人新潟大学

令和7年4月

## 1. 研究目的

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(原規技発第 1306193 号 (平成 25 年 6 月 19 日 原子力規制委員会決定)) 別記 1 第 3 条第 3 項では、「将来活動する可能性のある断層等」について「後期更新世以降 (約 12~13 万年前以降) の活動が否定できない断層等」と定義されている。また、将来活動する可能性のある断層等の認定については、「その認定に当たって、後期更新世 (約 12~13 万年前) の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降 (約 40 万年前以降) まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。」と定められている。さらに、将来活動する可能性のある断層等については、「震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面を含む。」ことも定められている。

将来活動する可能性のある断層等には、上記説明に包含される様々な成因の断層、地すべり面があり、その区別は容易ではない。例えば、新第三紀~第四紀更新世に発生した海底地すべりが、その後の隆起によって地表に現れ、あたかも陸上で活動した断層のように見えるものもある (以下「古海底地すべり」という)。

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」(原管地発第 1306191 号 (平成 25 年 6 月 19 日 原子力規制委員会決定)) では、「調査結果や地形発達過程及び地質構造等を総合的に検討して評価が行われていることを確認する。」との記載がある。それを踏まえると、多様な将来活動する可能性のある断層等の活動性評価に当たっては、総合的な成因の評価が、活動性評価の根拠及び考え方を示す上で重要な要素になると考えられる。しかしながら、将来活動する可能性のある断層等の成因評価については調査結果に対する解釈に不確かさが含まれる場合が多く、総合的な構造的断層の成因評価に資することができる汎用的な識別手法が適用されることが望ましい。

そこで本研究では、将来活動する可能性のある断層等の成因評価手法の整備の一環として、汎用的な断層の成因識別手法の適用に係る知見を収集することを目的とする。

## 2. 研究内容

上記の目的のため、本研究では、主として古海底地すべり起因と考えられる断層面 (以降「古海底地すべり面」と言う) 及び地震活動に伴って永久変位が生じる断層面を対象に野外調査及び岩石試料の採取を実施し、これらの断層面を含む近傍の地質構造 (露頭規模~微細構造) の観察、化学組成等の分析及び解析を行う。そして、断層面の形成時期、形成環境、形成条件等の考察を踏まえ、分析及び解析結果に基づいて断層種別ごとの差異を抽出する。

さらに、これら断層種別ごとの差異が、成因が異なる構造性断層<sup>1</sup>と非構造性断層<sup>2</sup>の識別にとって有効な指標となり得るか把握する。

### 3. 実施方法

#### (1) 地表踏査及び試料採取

阿部ほか(2005)等で古海底地すべり露頭が報告されている秋田地域において、古海底地すべり面及びそれに付随する小断層並びに近傍に位置する構造性断層を対象に、地表踏査、露頭記載<sup>3</sup>及び試料採取を行う。また、構造性断層と非構造性断層の混在が示唆される新潟地域において、新津丘陵中に多数発達する小断層を対象として地表踏査、露頭記載及び試料採取を行う。

#### (2) 試料の観察、分析及び解析

(1) で得られた試料について、X線 $\mu$ CT観察装置及びSEM(走査型電子顕微鏡: Scanning Electron Microscope)により断層面の三次元形状、破碎された岩片の特徴、条線<sup>4</sup>等を観察し、すべり方向を推定する。次に得られたデータを基に多重逆解法<sup>5</sup>による古応力解析<sup>6</sup>を行い、断層の運動方向を説明することが可能な最適応力解を得る。

また、各種断層面及び断層面近傍の整然層<sup>7</sup>のそれぞれについて構成物質(破碎された岩片、粘土鉱物<sup>8</sup>、微化石<sup>9</sup>等)の化学組成、構成物質の安定同位体組成、鉱物の結晶構造等に関する分析を行い、海底地すべり及び断層活動に伴う温度・圧力、流体組成等の変化に関する情報を得る。本分析結果は古応力解析の結果と比較し、各断層面の形成時期や広

---

<sup>1</sup> 構造性断層: プレートの運動等に伴う、広域的にかかる応力によって活動した断層。特に最近活動した断層は、活断層と呼ばれる。

<sup>2</sup> 非構造性断層: 構造性断層と異なり局所的な応力で活動した断層。地すべり性の断層等(本研究で扱う古海底地すべりも含む)が該当する。

<sup>3</sup> 露頭記載: 露頭を観察し、露頭の構造等の特徴を定性的又は定量的に記録・図示すること。

<sup>4</sup> 条線: 断層の活動によって断層面上に作られる擦痕。

<sup>5</sup> 多重逆解法: 多数の断層スリップデータを解析することで、それぞれのスリップデータが活動しうる応力解を複数求める手法。複数の応力解(軸)が算出され、それらの集中(クラスタリング)の度合いで古応力を推定する。

<sup>6</sup> 古応力解析: 断層の形成または活動当時の応力を推定すること。本報告では「多重逆解法」と呼ばれる手法を利用している。

<sup>7</sup> 整然層: 断層等の地質構造により乱されていない地層。

<sup>8</sup> 粘土鉱物: 既に存在している岩石や地層に由来する岩石片や鉱物片(碎屑粒子)が $5\mu\text{m}$ 以下のものを粘土といい、粘土を構成する鉱物を粘土鉱物と呼ぶ。

<sup>9</sup> 微化石: 同定に顕微鏡の使用を必要とする微小な化石のこと。

域応力場の影響、断層面の形成に伴う環境変化等に関する情報として取りまとめる。

(3) 形成メカニズム及び地震を引き起こす断層との識別に関する検討

(2) で得られたデータを基に、各調査地域における断層の形成時期、形成環境、形成条件等について考察する。これらの情報から、地震を引き起こす断層との識別に関する今後の検討課題を抽出し、断層の成因評価に係る技術的知見として取りまとめる。

#### 4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	新潟大学
(1) 地表踏査及び試料採取		
秋田地域 (7.1①及び 7.2①)	◎	○
新潟地域等 (7.1②及び 7.2②)	○	◎
(2) 試料の観察、分析及び解析		
構造観察・古応力解析 (7.1)	○	◎
構成物質の化学分析等 (7.2)	◎	○
(3) 形成メカニズム及び地震を引き起こす断層との識別に関する検討 (7.1 及び 7.2)	◎	○

(◎：主担当、○：副担当)

#### 5. 共同研究参加者

氏名	所属部局	本研究における役割
林 宏樹	原子力規制庁 技術基盤グループ	研究統括、研究計画の立案、 試料採取・調製・分析、構造観察、古応力解析
林 茉莉花	地震・津波研究部門	研究計画の立案、試料採取・調製・分析、 構造観察、古応力解析
千葉 響		試料採取・調製・分析、構造観察、古応力解析
小林 健太	新潟大学理学部 理学科	研究統括、研究計画の立案、 試料採取・調製、構造観察、古応力解析

## 6. 研究実施工程

項目	令和3年度		令和4年度		令和5年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
(1) 地表踏査及び試料採取						
秋田地域 (7.1①及び7.2①)	■	■		■		
新潟地域等 (7.1②及び7.2②)	■	■	■	■	■	
(2) 試料の観察、分析及び解析						
構造観察・古応力解析 (7.1)		■	■	■	■	■
構成物質の化学分析等 (7.2)		■	■	■	■	■
(3) 形成メカニズム及び地震を引き起こす断層との識別に関する検討 (7.1 及び 7.2)						■

## 7. 成果概要

### 7. 1 古応力解析を用いた構造的断層と非構造的断層の識別

#### ① 古海底地すべり面と構造的断層との識別

非構造的断層の1つである古海底地すべり面と構造的断層の識別指標に関する技術的知見の収集のため、活断層と古海底地すべり由来の構造を持つ露頭が同一層準<sup>10</sup>中に報告されている(阿部ほか, 2005等)秋田県横手市において、地表踏査を実施した。当該地域には後期中新世～鮮新世の珪質泥岩と白色凝灰岩の互層からなる海成層<sup>11</sup>である山内層(女川層相当層)及び相野々層(船川層相当層)が分布する。地表踏査の結果、未報告の断層露頭を6つ確認した。うち1露頭は、周辺に分布する活断層の分岐断層又は副断層であると考えられる。残りの5露頭は、それぞれの露頭同士がごく近傍にあるにも関わらず、地質構造が連続しない。地質構造の連続性が悪いことは、各露頭が局所的な力で形成されたことを示唆する。すなわち、5露頭は非構造的断層である可能性が高いと考えられる。また、非構造的断層の特徴を抽出する為に、非構造的断層の可能性が高い5露頭と成因が明瞭な断層とを比較する目的で、細矢ほか(2018)によって報告されている活断層露頭の観察も実施した。

非構造的断層の可能性が高い5露頭の断層活動時の応力を検討するため、多重逆解法による古応力解析を前述の5露頭及び細矢ほか(2018)の活断層露頭に対して行った。多重逆解法の結果、細矢ほか(2018)の活断層露頭からは600万年前～現在にかけて本地域にかかる広域応力と整合的な $\sigma_1$ 東西、 $\sigma_3$ 鉛直の逆断層性の応力解<sup>12</sup>が得られた。一方で、非構

<sup>10</sup> 同一層準：同時期に形成された地層。

<sup>11</sup> 海成層：海底で堆積した堆積層。

<sup>12</sup> 応力解：仮想的な立方体にかかる剪断応力が全て0であった場合、応力場は垂直応力のみで表現できる。この垂直応力を構造地質学の分野では、最大圧縮応力軸( $\sigma_1$ )、中間圧縮

造性断層の可能性が高い5露頭からは広域応力と整合的な応力解が得られなかった。また、この5露頭の断層は、共通する応力解が $\sigma_1$ 鉛直・ $\sigma_3$ 大円ガードル分布<sup>13</sup>の地すべり性の応力解のみであること、傾動補正をかけた方が解の集中が良いこと、露頭を構成する地層が海成層であることから、地層が傾動する前、かつて海中に位置していた時代の地すべりによって活動した古海底地すべり起因の断層であると解釈できた。

## ② 褶曲形成に伴う層面すべりと構造性断層との識別

古海底地すべり起因以外の非構造性断層と構造性断層との識別を目的に、褶曲構造<sup>14</sup>に伴う構造性断層と非構造性断層の混在が指摘されている(富田・山路, 2001等)新潟県新津地域において地表踏査を実施した。地表踏査の結果、80条の断層スリップデータを取得した。また、断層面を観察したところ、傾斜隔離量<sup>15</sup>ごとに条線の形態に差があることがわかった。これらの断層を構造性断層と非構造性断層に分類するため、多重逆解法を用いた古応力解析を実施した。本研究では、古応力解析の実施にあたり条線の形態に基づいて断層の傾斜隔離量が(i)1cm未満のグループ、(ii)1cm以上1m未満のグループ、(iii)1m以上の3グループに分類し解析を実施した。その結果、(i)からは構造性応力解が得られなかった。(ii)からは新津地域の背斜<sup>16</sup>形成時、地殻浅部において生じる応力場と整合的な $\sigma_1$ 鉛直・ $\sigma_3$ 北西-南東の応力解が得られた。(iii)からは地下約4000m以深の広域応力である北東南西～東西圧縮の横ずれ型の応力解(今村・岩田, 2004)が得られ、これは大局的な地質構造を作る応力と整合的である。(ii)及び(iii)は、いずれも構造性応力によって多くの断層が活動したと考えられる。また、全てのグループから副次的な応力解として、地すべり性を示す $\sigma_1$ 鉛直・ $\sigma_3$ 大円ガードル分布の応力解が得られた。これらは、新津丘陵には構造性断層と非構造性断層が混在するという先行研究(富田・山路, 2001等)を支持する結果である。以上から、古海底地すべり起因以外の非構造性断層であっても多重逆解法を用いた識別が可能である事を確認した。

---

応力軸( $\sigma_2$ )、最小圧縮応力軸( $\sigma_3$ )の3軸で表現される。これら応力軸のうち、 $\sigma_1$ と $\sigma_3$ の組み合わせで表現したものを応力解と呼ぶ。

<sup>13</sup> 大円ガードル分布：複数の応力軸を下半球投影した際、応力軸が大円に沿って散点的に分布すること。また、応力軸の方向が定まらないことは、方向の定まっていない応力軸と $\sigma_2$ 軸の応力比に差が少ないことを示す。

<sup>14</sup> 褶曲構造：地層が途切れることなく波状に変形している状態。

<sup>15</sup> 傾斜隔離量：断層の傾斜方向に沿って計測した地層の変位量。

<sup>16</sup> 背斜：褶曲構造の上に凸の部分。

## 7. 2 断層破碎物質の性状から比較する断層の発達過程

### ① 古海底地すべりと活断層との比較

古海底地すべりと活断層との間に化学・鉱物学的な差異があるか検討するため、断層ガウジ<sup>17</sup>と断層周辺の整然層から採取した試料を対象に XRD 分析 (X 線回折測定: X-ray diffraction)、XRF 分析 (蛍光 X 線分析: X-ray Fluorescence)、SEM-EDS 分析 (SEM 下で行うエネルギー分散型 X 線分光法: Energy dispersive X-ray spectroscopy) を実施した。XRD 分析では両者の鉱物組成に差が見られなかったが、XRF 及び SEM-EDS 分析において活断層ガウジ中のマグネシウム (Mg) 量比が古海底地すべりガウジよりも高いことがわかった。Mg 富化の理由として考えられるのは、(a) 出発物質の差、(b) 外部からの付加の 2 つである。横手地域の活断層ガウジと古海底地すべりガウジは母岩が同質かつ、活断層周辺の整然層中に Mg が含まれないことから、(a) ではなく (b) の理由により Mg の量比に差が生じたと考えられる。

上記 (b) は、地質構造の違い、すなわち古海底地すべりと活断層の相違点として、断層が地下深部まで延長するかどうかには要因があると考えられる。本地域の活断層は東～南東傾斜主体であり、活断層の東側には周辺地質と比較して Mg に富む真昼山地が存在する。活断層の深部が真昼山地まで達し、真昼山地を構成する地質由来の Mg を含む流体が封圧下に置かれている状況で、地表との短絡経路となる断層に沿って上昇することで、その経路上に Mg が付加され、活断層のみ Mg の富化が生じたものと推定できる。

### ② 石英粒子の表面形態から識別可能なこと

断層の活動性評価指標として、かつて石英の表面形態に注目した評価が試みられた (金折ほか, 1982) が、現状では積極的に断層の活動性評価に用いられているとは言い難い。金折ほか (1982) では、石英粒子の表面は、活動時期が新しいほど溶食・風化による凹凸が少なく滑らかであるとしている。

本研究では、歪速度の違いの指標として本手法が有用となる可能性を考え、同一層準中にあり風化の程度に大きな差が無く、断層形成時の歪速度が異なると予想される 2 つの露頭を対象に、その適用可能性を検証した。一般に、引きずりを伴う断層変位は歪速度が遅いと予想されるのに対して、直線性に優れる断層面を持つ断層は歪み速度が速いと考えられる。ここから、傾斜隔離量 10 cm 程度の引きずり変形を伴う断層と傾斜隔離量 2m 程度の直線性に優れる断層面を持つ断層のそれぞれから、断層ガウジを採取しガウジ中の石英粒子の表面形態を観察した。SEM を用いた観察の結果、引きずり変形を伴う断層の石英粒子の表面形態は整然層と差異が無い。対して、直線性に優れる断層面を持つ断層からは整然層よりも滑らかな表面形態の石英粒子が多く観察された。歪速度が速く破断の影響が強いと考えら

---

<sup>17</sup> 断層ガウジ: 断層運動に伴う破碎によって生じた細粒・未固結の断層破碎物質。断層粘土や単にガウジと呼ぶこともある。

れる断層の石英粒子表面は凹凸が少なく、歪速度が遅く破断の影響が弱いと考えられる断層の石英粒子表面は整然層とほぼ同じ風化度合いの表面形態が観察できた。このことから、活動様式（歪速度）の違いが石英の表面形態に影響を及ぼす可能性が示唆される。

## 8. まとめ

本共同研究では、断層等の汎用的な成因識別手法の適用に係る知見を収集することを目的に、古海底地すべり面及び地震活動に伴って永久変位が生じる断層面を対象に野外調査及び岩石試料の採取を実施し、これらの断層面を含む近傍の地質構造の観察（露头規模～微細構造）、化学組成等の分析及び解析を行った。いずれの断層も野外調査の後、多重逆解法による古応力解析を実施し、断層活動時の運動方向を推定した。また、化学組成による識別可能性や運動様式による石英粒子の表面形態の差を確認した。

古海底地すべりと活断層の識別においては、断層ガウジ中の Mg の量比が異なることが判明した。活断層における Mg の増加は、Mg を含む周辺地質から、断層面を通じて流体が上昇し、Mg が断層ガウジに付加されたことが理由であると考えられる。他地域においても活断層は古海底地すべり面と比較して、断層が深部まで延長するため周辺地質の化学組成を有する流体の影響を受けやすいと考えられることから、周辺地質を反映した他の元素でも、両者を識別する指標になり得る可能性がある。

褶曲形成に伴う小断層には、富田・山路（2001）等で指摘されているとおり、構造的断層と非構造的断層が混在していることを、多重逆解法による古応力解析によって再確認した。また、構造的断層のうち歪速度の異なる断層間で石英粒子の表面形態を観察した。その結果、少なくとも新津丘陵においては歪速度の違いが石英粒子の表面形態に影響を与えている可能性が示唆された。

## 9. 公表成果一覧

- 1 林宏樹、「秋田県横手市の古海底地すべり露头とシリカ鉱物相」、日本地質学会第128年学術大会、R19-P-3、2021、[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2021.0\\_314](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2021.0_314)
- 2 林宏樹、林茉莉花、田中宗一郎、「秋田県横手市の古海底地すべり及び活断層の断層破砕物質の地球化学的性質」、日本地質学会第129年学術大会、G8-P-1、2022、[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2022.0\\_378](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2022.0_378)
- 3 林茉莉花、林宏樹、田中宗一郎、小林健太、「秋田県横手市古海底地すべり露头の古応力解析」、日本地質学会第130年学術大会、T8-P-5、2023、[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2021.0\\_314](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2021.0_314)
- 4 小林健太、石井拓也、馬寅瀚、林宏樹、林茉莉花、「応力逆解析と性状比較による断層の区分と成因評価」、日本地質学会第130年学術大会、T8-O-6、2023、[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2023.0\\_118](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2023.0_118)
- 5 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、「断

層の活動性評価に関する研究」、RREP-2024-4001、pp.15-19、2024、  
<https://www.nra.go.jp/data/000473305.pdf> (2025年2月13日確認)

## 10. 参考文献

- 1 阿部真郎、森屋洋、金子勝比古、米田哲朗、「東北地方における珪質泥岩層の異常堆積構造と地すべり」、日本地すべり学会誌、41巻、5号、p. 447-457、2005、  
[https://doi.org/10.3313/jls.41.5\\_447](https://doi.org/10.3313/jls.41.5_447)
- 2 細矢卓志、橋本智雄、加賀匠、平井孝明、西川治、「横手盆地東縁断層帯、金沢断層の副断層に関する考察」、日本地質学会第125年学術大会、R22-O-11、2018、  
[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2018.0\\_309](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2018.0_309)
- 3 林宏樹、林茉莉花、田中宗一郎、「秋田県横手市の古海底地すべり及び活断層の断層破砕物質の地球化学的性質」、日本地質学会第129年学術大会、G8-P-1、2022、  
[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2022.0\\_378](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2022.0_378)
- 4 小林健太、石井拓也、馬寅瀚、林宏樹、林茉莉花、「応力逆解析と性状比較による断層の区分と成因評価」、日本地質学会第130年学術大会、T8-O-6、2023、  
[https://doi.org/10.14863/geosocabst.2023.0\\_118](https://doi.org/10.14863/geosocabst.2023.0_118)
- 5 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、「断層の活動性評価に関する研究」、RREP-2024-4001、pp.15-19、2024、  
<https://www.nra.go.jp/data/000473305.pdf> (2025年2月13日確認)
- 6 富田智、山路敦、「共役断層による小断層解析はすべて誤りか？新潟県新津丘陵における多重逆解法と共役断層法との比較」、地質学雑誌、107巻、11号、pp. 711-721、2001、  
<https://doi.org/10.5575/geosoc.107.711>
- 7 今村哲己、岩田尊夫、「新潟地域における深部探鉱」、石油技術協会誌、69巻、pp.155-166、2004、  
<https://doi.org/10.3720/japt.69.155>
- 8 金折裕司、宮腰勝義、角田隆彦、佐竹義典、「断層粘土中の石英粒子の表面構造による断層活動性評価の試み (その1)表面構造の分類と形成過程」、応用地質、23巻、1号、pp. 18-32、1982、  
<https://doi.org/10.5110/jjseg.23.18>