

# 地震及び断層活動による二次的影響に関する知見の整理 (受託研究)

Compilation of Previous Studies on Secondary Effects Induced  
by Earthquake and Fault Activity  
(Contract Research)

後藤 翠 村上 雅紀 酒井 隆太郎 照沢 秀司  
末岡 茂

Akira GOTO, Masaki MURAKAMI, Ryutaro SAKAI, Shuji TERUSAWA  
and Shigeru SUEOKA

核燃料・バックエンド研究開発部門  
東濃地科学センター  
地層科学研究部

Geoscientific Research Department  
Tono Geoscience Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

# JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

## 地震及び断層活動による二次的影響に関する知見の整理 (受託研究)

日本原子力研究開発機構  
核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター  
地層科学研究部

後藤 翠<sup>\*</sup>、村上 雅紀<sup>\*</sup>、酒井 隆太郎<sup>\*</sup>、照沢 秀司<sup>\*</sup>、末岡 茂

(2020年1月10日受理)

地層処分システムに影響を及ぼす可能性がある天然現象の一つに、地震及び断層活動が挙げられる。地震及び断層活動では、断層変位による直接的な影響に加え、地震動に伴う湧水の発生や泥火山の活動、地震断層の活動により引き起こされる流体の移行経路の変化や副断層の形成のような二次的な影響も考慮する必要がある。本稿では、これらの二次的な現象による地層処分システムへの影響の理解を目的として、水理学的影響（湧水・泥火山）、力学的な影響（副断層）を対象に、既往研究を収集し取りまとめた結果を報告する。関連するキーワードを各国語で検索することで、国内外の142編の文献を収集することができた。その結果、それぞれの二次的影響の研究事例を概観し、地層処分の観点で今後の評価技術の高度化に必要な課題を抽出した。地震等の影響による湧水については、湧出機構、影響範囲、活動履歴に関する事例の蓄積を課題として示した。泥火山については、形成の要因となる異常間隙水圧のメカニズムの検討及び予測手法の高度化を課題として示した。副断層については、詳細な分布の把握と形成機構の検討の蓄積が課題であると示した。

---

東濃地科学センター：〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

本稿は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」で得られた成果の一部を利用した研究成果である。

※ 技術開発協力員

\* 応用地質株式会社

**Compilation of Previous Studies on Secondary Effects Induced by Earthquake and Fault  
Activity  
(Contract Research)**

Akira GOTO\*, Masaki MURAKAMI\*, Ryutaro SAKAI\*, Shuji TERUSAWA\*  
and Shigeru SUEOKA

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received January 10, 2020)

One of the natural phenomena that may affect the geological disposal system are earthquake and fault activity. Fault displacement due to the earthquake and fault activity will be considered the direct effects. In addition to it, it is necessary to consider the secondary effects include secondary faults formed by the seismic fault activity as well as spring water and mud volcanoes that are generated by fluid movement attributed to the fault activity. This report introduces previous studies performed focused on the hydraulic effects (spring water and mud volcanoes) and mechanical effects (secondary faults) in order to understand the effects of these secondary phenomena on the geological disposal system. We were able to collect 142 literatures from Japan and overseas by searching for related keywords in Japanese and English. As a result, we compiled case studies of each secondary impact. From the viewpoint of geological disposal, we extracted the following issues for future research and development. As for the sump water induced by earthquakes and faulting, accumulation of information related to its mechanism, affected area, and activity history is required. As for the mud volcanoes, reviewing of the mechanism of anomalous pore water pressure that causing the formation, also development of estimation technique are required. And for the secondary faults, accumulation of the detailed spatial distribution and reviewing of formation mechanism are required.

Keywords: Secondary Effects, Earthquake, Fault Activity, Sump Water, Mud Volcano, Secondary Fault

---

This report was carried out under a contract with METI as part of its R&D supporting program for developing geological disposal technology.

※ Collaborating Engineer

\* OYO Corporation

目 次

1. はじめに .....	1
2. 文献収集の概要 .....	2
2.1 収集対象 .....	2
2.2 収集・整理方法 .....	3
3. 地震及び断層活動による水理学的な二次的影響 .....	4
3.1 湧水の報告・湧出機構の検討事例 .....	4
3.1.1 国内の事例 .....	5
3.1.2 海外の事例 .....	7
3.1.3 まとめ .....	10
3.2 泥火山の報告・噴出機構の検討事例 .....	12
3.2.1 国内の事例 .....	12
3.2.2 海外の事例 .....	17
3.2.3 まとめ .....	26
4. 地震及び断層活動による力学的な二次的影響 .....	31
4.1 副断層の報告・調査手法の検討事例 .....	31
4.1.1 国内の事例 .....	34
4.1.2 海外の事例 .....	35
4.1.3 まとめ .....	37
5. まとめ .....	43
謝辞 .....	43
参考文献 .....	44
付録 収集文献リスト（地震・断層活動による二次的影響） .....	56

Contents

<b>1. Introduction</b> .....	1
<b>2. Overview of document collection</b> .....	2
2.1 Collection target .....	2
2.2 How to collect and organize .....	3
<b>3. Hydraulic Secondary effects due to earthquakes and faults</b> .....	4
3.1 Report and mechanism of spring water .....	4
3.1.1 Cases studies in Japan .....	5
3.1.2 Cases studies from overseas .....	7
3.1.3 Summary .....	10
3.2 Report and mechanism of mud volcanoes .....	12
3.2.1 Cases studies in Japan .....	12
3.2.2 Cases studies from overseas .....	17
3.2.3 Summary .....	26
<b>4. Mechanical secondary effects due to earthquakes and faults</b> .....	31
4.1 Report and survey methods of Secondary faults .....	31
4.1.1 Cases studies in Japan .....	34
4.1.2 Cases studied from overseas .....	35
4.1.3 Summary .....	37
<b>5. Conclusion</b> .....	43
<b>Acknowledgment</b> .....	43
<b>References</b> .....	44
<b>Appendix Literature list (Secondary Effects Induced by Earthquake and Fault Activity)</b> .....	56

## 1. はじめに

地層処分事業では、地層処分サイトの放射性物質の閉じ込め機能に影響を与える天然現象の把握や評価が重要である。このような天然現象として、火山・火成活動の発生、深部流体の移動・流入、地震及び断層活動、隆起・侵食等が挙げられる（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG, 2014<sup>1)</sup>）。地層処分研究開発に関する全体計画（地層処分研究開発調整会議, 2018<sup>2)</sup>）では、自然現象の影響に係る研究開発のうち、地震・断層活動の活動性及び影響の調査・評価技術の高度化において「地震及び断層活動による水理的・力学的影響を把握するための技術の高度化」が課題として示されている。

地震及び断層活動に関しては、断層のずれにより、岩盤の破断・破碎を伴う他、岩盤の透水性等の地下水環境に影響を与える可能性がある。したがって、将来の断層の活動により断層が地層処分サイトを貫いた場合、廃棄体そのものやオーバーパック等の人工バリアの破壊を招き、閉じ込め機能を喪失させる可能性がある。

このような直接的な影響の他に、地震及び断層活動に起因する二次的な地質現象にも、地層処分システムへの影響が懸念されるものが指摘されている。例えば、水理的な項目では、大規模な地震が発生すると、新たな湧水や泥火山の形成、地下水の噴出量や噴出物の成分変化が確認される事例が知られている。これらは地下深部の水や泥等が地表へ移動し局所的に噴出する自然現象であり、地下の岩盤（天然バリア）中の核種移行の評価に著しい影響を与える可能性がある。そのため、地層処分の観点からはこれらの分布や規模、発生可能性や継続期間等に関する情報把握が重要となる。

力学的な二次的影響の例としては、副断層の形成（エンジニアリング協会地下開発利用研究センター（2017）<sup>3)</sup>）などが挙げられる。断層活動では、地震を発生させた主断層の活動に伴い、周辺に主断層と直接連続しない副断層と呼ばれる断層も活動する場合がある。副断層は主断層と比べて小規模であるものの、地層処分システムの近傍に位置する場合、処分場の破壊や周辺岩盤の地下水流動特性の変化等に影響を与える可能性が否定できない。主断層による変位・変形が及ぶ範囲については複数の研究事例があるが（緒方・本荘, 1981<sup>4)</sup>；稲垣, 2015<sup>5)</sup>など）、副断層については未解明な部分が多く、分布範囲と形成機構の把握が課題である。

本稿は、地震及び断層活動に関する調査・評価技術の高度化のための基礎情報とするため、地震等による二次的な影響として国内外の「湧水」、「泥火山」、「副断層」を対象とした文献を収集し、内容を取りまとめたものである。

## 2. 文献収集の概要

### 2.1 収集対象

地震及び断層活動（以下、地震等）による水理学的・力学的な二次的影響に関する既往の調査・研究に関し、以下の①～③の観点で文献を収集した。

- ① 国内外における、地震等が影響した「湧水」の報告・湧出機構の検討事例
- ② 国内外における、「泥火山」の報告・噴出機構の検討事例
- ③ 国内外における、「副断層」の報告・調査手法の検討事例

①の「湧水」は、地下水が地表に湧出する現象であり、地震等に伴い活動が活発化する事例が知られている。本稿では二次的影響の観点から、地震等に伴い新たに湧出したものに加え、湧出状況に変化がみられた温泉を扱う文献も対象とした。なお、地震に伴う地下水位（水圧）や水質の変化についての事例報告や成因の解析に係る研究は既に多数知られているが（Wang and Manga, 2010<sup>6</sup> など）、本稿では湧水に影響を与えた事例のみを収集対象とした。地層処分事業の観点から、地震に伴う液状化現象による浅部の地下水の噴出事例、主に地熱地帯や火山周辺に分布している間欠泉は対象に含めなかった。

②の「泥火山」は、地下深部からガスや石油等を伴い地表に噴出した泥により形成された円錐状の地形的高まりであり、地震等に伴い噴出活動が活発化する事例が知られている。地層処分事業の観点では、地層処分システム近傍の泥火山活動による泥の噴出は、岩盤中の核種移行速度の評価に対して著しい影響を与える可能性がある。したがって、主に陸上及び沿岸部の事例を対象とし、地震等の影響と関係なく活動している泥火山の事例も収集対象に含めた。

③の「副断層」は、地震を発生させた震源断層の活動に伴い二次的に形成された断層のうち、震源断層と連続せず離れた位置に形成されたものである。副断層の用語は文献により用例が異なることがあり、主断層から分岐した分岐断層に対して使われる場合がある。また、「副」次的な断層の意味で、二次的に形成された断層を総称して指すこともある。英語では震源断層と異なる二次的に形成された断層を指す語に「secondary fault」「bending moment fault」「distributed fault」などがあり、副断層の訳語は統一されていない。したがって、収集する事例は「副断層」を対象としたが、文献により副断層が指す断層の種類が異なる場合がある。二次的影響の観点から、分岐断層を扱った事例に加え、断層活動が周辺の既存の断層に影響して変位が生じた事例も対象に含めた。

## 2.2 収集・整理方法

文献収集は、上記①～③に関連するキーワードを用いたインターネットの文献検索サイト（J-STAGE、CiNii Articles、Google Scholar 等）による検索、主要な論文・図書の引用・被引用文献の参照により行った（図 1）。キーワードによる検索は日本語と英語で行った。③の副断層は、英語の統一した訳語が無いいため一般的に二次的な断層に使われる「secondary fault」で検索した。海外の事例は、各国で発行されている地域地質学会誌、機関報告書、特集号等も対象とし、比較的近年発表されたものを重視した。英文要旨を対象とした検索により、一部イタリア語やロシア語の文献も収集した。収集した文献の要旨又は結論を確認して地震・断層活動による二次的影響と関連性が高いものを選定し、文献リストを作成した。本稿の 3 章及び 4 章で選定した文献の内容に基づき、個別の事例について整理した。新聞やウェブページの関係する報道等の記事は、情報源が明示されていないものがあるため文献リストに含めなかった。個別事例で示した地震のマグニチュードの表記については、M<sub>w</sub> をモーメントマグニチュード、M を気象庁マグニチュードとし、大きさは引用文献の値を用いた。

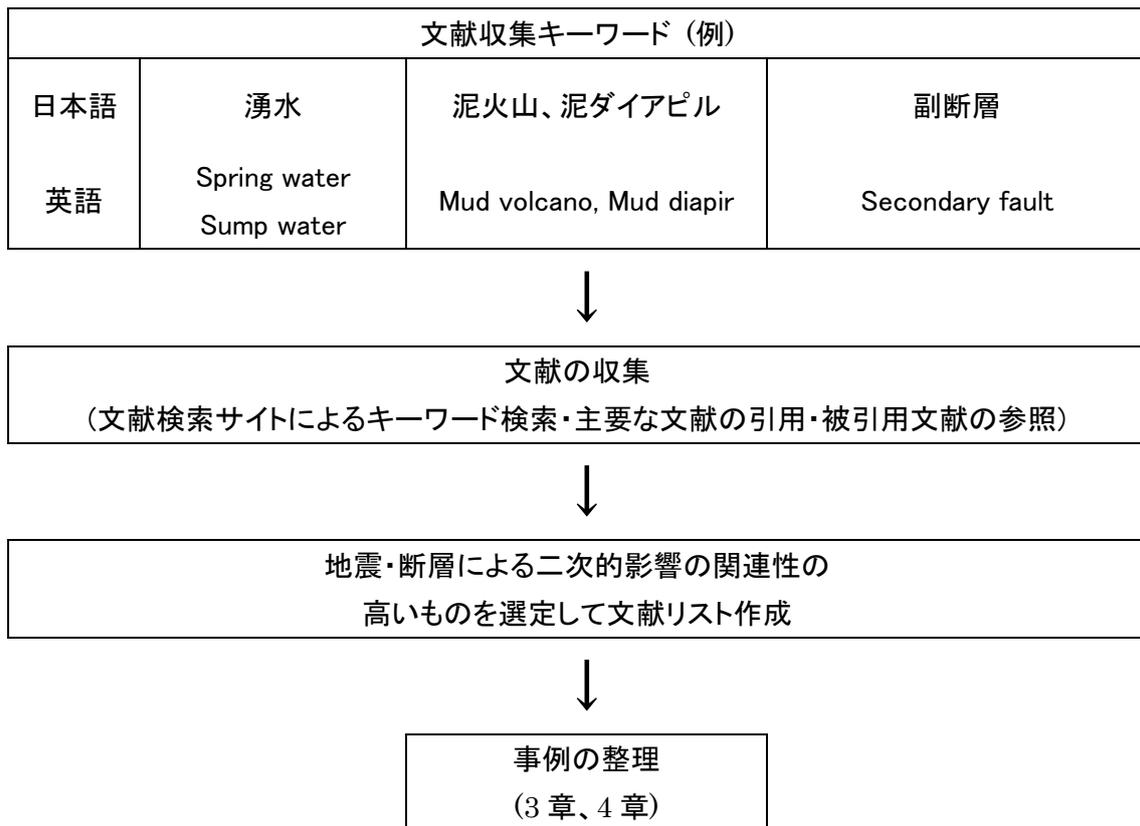


図 1 文献収集・整理フロー

### 3. 地震及び断層活動による水理学的な二次的影響

#### 3.1 湧水の報告・湧出機構の検討事例

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、「地下水流動が緩慢であること」が、放射性物質の閉じ込め機能の観点から好ましい地質環境特性の一つに挙げられている（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG, 2014<sup>1)</sup>）。地下水は、緩衝材及び岩盤中での核種の移行に係る重要な要素であり、動水勾配に従って岩盤中の透水性の高い部分を移動する。一般的には地下深部ほど地形の影響は小さく動水勾配は緩やかで、地下水の動きは緩慢と考えられている。

湧水は、地下水の水頭が地表面より高い場所でみられ、多くは谷頭や扇状地の末端、台地の崖線等において湧出している。一方、地震等の影響により、地表に現れた亀裂等から湧水や温泉水として深部の地下水が湧き出ることがある。これは緩慢とされる深部の地下水が急に流動した現象であり、閉じ込め機能の観点から好ましくない。

地層処分研究開発第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999<sup>7)</sup>）では、地震前後の地下深部の地下水流動や水質の変化が、季節変化等の経時変化に比べて小さいこと、また仮に大きな地震があったとしてもその変化は一時的であり、数カ月後には元の水位に戻ること示している。しかしながら、2011 年東北地方太平洋沖地震の誘発地震である 2011 年 4 月 11 日の福島県浜通り地震では、いわき市内の数ヶ所で多量の温泉水の湧出が始まり、少なくとも 4 年以上の長期間、地表へ湧出した事例が報告された（佐藤, 2015<sup>8)</sup>）。

福島県浜通り地震の湧水事例により、地震の影響で突発的に湧出、あるいは活発化した湧水が放射性廃棄物の閉じ込め機能に影響を与えると認識された。その結果、調査・解析事例の蓄積が望まれるようになった（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG, 2014<sup>1)</sup>）。ただし国内では、地震の影響で長期間異常な湧水が継続した報告事例は少ない。そのため、地震等が湧水の発生又は活動を誘発する条件は明確ではなかった。

環境省水・大気環境局土壌環境課地下水・地盤環境室（2010）<sup>9)</sup> のガイドラインでは、「地下水が自然状態で地表に流出したもの、もしくは地表水に流入するもの」を湧水の定義としている。また、ポンプアップした地下水や温泉水は湧水の対象外としている。一方、「自噴もしくは掘削面から自然に湧出したものは広義の湧水に含まれるものとする。」と記述がある。本稿では地震等による二次的影響を対象とすることから、地震等が影響した温泉水の湧出又は水質変化の事例も収集対象とした。

### 3.1.1 国内の事例

#### (1) 松代群発地震に関連した湧水事例

長野県長野市の皆神山から松代地震断層周辺では、松代群発地震のうち最も活発である第三活動期にあたる 1966 年 9 月中旬に、扇状地の一帯で大小多数の地下水湧出が起きた。

岸本 (1969)<sup>10)</sup> は、地下水観測及びボーリング調査により湧水の状況と経過を記録した。主に湧水は地震で発生した地割れ周辺等の特定地点から湧出した。その後、地下水圧は減少傾向にある。

鶴見 (1979)<sup>11)</sup> は、湧水及び温泉水の水質分析を実施した。その結果 Na/Mg 比の高低、または中間のパターンにより、松代地域の湧水を 3 地域に区分した。中間のパターンのうち、地震に伴い Na/Mg 比が遷移する加賀井地区の湧水がグリーンタフ型の塩水的な水の傾向と類似していることから、これを湧水の起源と推定している。

奥澤・塚原 (2001)<sup>12)</sup> は、松代湧水に関する既往の研究の概説及び水質分析を行った。湧出機構は、松代地域の地下 2 km 以深に高圧の深層高濃度塩水が何らかの原因で供給され、断層帯を含む岩盤中のクラックを抜け、浅層地下水と混合した湧水が伴い地震を引き起こされた説を有力としている。松代湧水は採水地点で溶存イオン濃度が異なる場合があるが、これは混合の度合いによるものと説明した。

吉田ほか (2002)<sup>13)</sup> は、湧水と溶存ガスの炭素、酸素、水素の安定同位体比を測定した。溶存ガスの炭素同位体比から、主成分である CO<sub>2</sub> はマグマ起源、メタンは熱分解起源であるとしている。深層地下水の起源は、酸素・水素同位体比から安山岩マグマ水と推定した。地震との関係については、既往研究で地下に電気良導体や地震波反射面が確認されていることを踏まえて地震発生モデルを提案した。それによると、地震発生は深度 15 km 付近に滞留していた安山岩マグマ水が、上面の不透水層が破れて上昇し地盤を弱化したことが影響している。

#### (2) 兵庫県南部地震に関連した湧水事例

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震 (M<sub>w</sub> = 6.9) では、地震後に淡路島北部を中心とする広い範囲で地下水の変化が起きた。野島断層や淡路島北部の地質境界付近では、新たな湧水の出現や、噴出量及び水質の変化が起きたことが知られている (遠田ほか, 1996<sup>14)</sup>; 高村・河野, 1996<sup>15)</sup>)。

佐藤・高橋 (1997)<sup>16)</sup> は、淡路島で湧水の自噴量および主要化学組成の変化を観測した。うち一箇所では系統的な陰イオンのバランスの変化がみられた。深度の異なる複数の帯水層モデルを想定し、複数の地下水混合の結果イオンのバランスが変化したと推定した。花崗岩中の地下水は、中央構造線沿いの湧水の特徴と合致した。これにより、深部の地下水が多く混入したと推定している。また、地震直後に自噴量の増加した場所があった。これは帯水層内の透水係数の増加の影響としている。

佐藤ほか (1999)<sup>17)</sup> は、湧水及び浅井戸水の酸素・水素同位体比を測定し、新たな湧水の涵養域を推定するため地下水平均標高を検討した。それによると、野島断層、野田尾断層、楠本断層沿いの異常湧水の涵養域の平均標高は、湧出地点の標高より 100 m 以上高いと推定している。また、これが地震後に発生した湧水と地下水低下の原因として考えられている透水性増加の可能性を強く支持するとした。

田中ほか (2000)<sup>18)</sup> は、本地域の地震時の応力一歪解析を実施した。その結果、震源域直上に位置する南淡町 (現南あわじ町) の温泉でみられた湧出地点の移動、付近の沖積低地における多数の突発的な地下水噴出は、地震時の著しい間隙水圧の上昇が原因の可能性があると指摘した。また、地層処分の観点では、地震時の広域の地下水変動が処分場周辺の地下水挙動に与える影響は小さいとした。また、断層周辺数十 km の地下水挙動は地盤の透水係数の変化で説明が可能で、地下水異常が数カ月から数年で回復したことから、長期にわたる地下水環境変化は無く、総合して地層処分場に与える影響は少ないと予想している。一方野島断層沿いでは地下水湧出が 1 年以上も継続したことから、断層沿いでは深部地下水の上昇に注意を要すると指摘している。

### (3) 岩手・宮城内陸地震に関連した湧水事例

2008 年 6 月 14 日に岩手県南西部で岩手・宮城内陸地震 (M = 7.2) が発生した。この地震は、震央から南東 12 km 程度に位置する餅転一細倉構造帯と称される断層の活動と関連が指摘されている (佐藤ほか, 2008<sup>19)</sup>)。

村岡ほか (2018)<sup>20)</sup> は、鬼首カルデラ周辺の調査において、既往記録のないオイル臭を伴う自然湧出泉を発見し、これを江合川上流噴泉と称した。この噴泉について、当該範囲の撮影時期が異なる空中写真を比較し、湧出時期を検討した。噴出位置の植生は時期により変化しており、岩手・宮城内陸地震の影響であると推定した。また、岩手・宮城内陸地震の本震を含むその後 1 年間の周辺の震源空間分布を検討した。その結果、東北東側の岩手・宮城内陸地震本震に関連する断層の逆断層運動に整合的な分布を示す部分、西南西の異例に浅く分布する部分に分けられることを指摘した。西南西の震源分布は、鬼首カルデラ等に分布するマグマ性熱源近傍の脆性帯一塑性帯の遷移範囲が規制している。江合川上流噴泉は塑性帯リッジより北側の脆性帯に位置する。噴泉の成因は、本震の逆断層南端のせん断歪を蓄積した脆性帯における間隙水圧上昇と推定している。

### (4) 福島県浜通り地震に関連した湧水事例

2011 年 4 月 11 日の福島県浜通り地震 (M<sub>w</sub> = 6.6) では、直後より福島県いわき市内の数カ所で新しく温泉が湧出し、4 年以上の長期にわたり継続した。

佐藤 (2015)<sup>8)</sup> は、湧出現象の経過を既往の検討事例とともに紹介し、湧出が続く原因について 2 つの可能性を挙げた。一つは湧出量に降水量との関係が認められることから、浅部の地下水帯水層の異常が長期間をかけて緩和している可能性である。これは、兵庫県南部

地震の事例とも類似した過程であると指摘している。もう一つは、湧出が継続し一部では水温上昇もみられることから、地震をきっかけとして深層地下水が上昇し、いわき市周辺の地下水圧が長期的に上昇した可能性である。

Togo et al. (2014)<sup>21)</sup> は、浜通りと常磐<sup>じょうばん</sup>地域の温泉井で、深層地下水の起源と推定される深度 350～1600 m の白亜紀花崗岩の基盤岩と上位の堆積岩から採取した地下水の酸素、水素、塩素、ヨウ素同位体比の測定、ヨウ素年代測定を行った。得られた年代は約 40 Ma で、地下水温は常磐地域の地熱勾配から推定される堆積岩中の水温より高い。深層地下水は堆積岩中の地下水由来ではなく、基盤の花崗岩も白亜紀よりも古いことから、ヨウ素の供給源ではないとしている。このことから、ヨウ素の起源を深部に分布する日本海溝の沈み込み帯の堆積物と推定している。

#### (5) 熊本地震に関連した湧水事例

2016 年 4 月 14 日から発生した熊本県熊本地方の地震 ( $M = 7.3$ ) では、河川水位の変化(一柳・安藤, 2017<sup>22)</sup>)、温泉水中のヘリウム同位体比の変化(柴田ほか, 2017<sup>23)</sup>)などの水文環境の変化に関する報告がある。

環境省九州地方環境事務所 (2016)<sup>24)</sup> は、阿蘇くじゅう国立公園内の既知の湧水地点及び温泉施設の一部でみられた地震後の湧出量の減少や濁り等の変化を報告した。

細野ほか (2017)<sup>25)</sup> は、熊本市内の水前寺成趣園<sup>すいぜんじじょうじゆえん</sup>内の湧水湖で地震直後から水枯れしたこと、その湧水地点から南東約 3 km の広木公園<sup>ひろき</sup>内では新たな湧水の発生が認められたことを報告している。

Parvin et al. (2014)<sup>26)</sup> は 2000 年に発生した熊本地震 ( $M = 5.0$ )、2001 年芸予地震 ( $M = 6.7$ )、2005 年福岡県西方沖地震 ( $M = 7.0$ )、中国の 2008 年 Sichuan 地震 ( $M_w = 7.9$ ) の 4 つの地震について、井戸で観測した地下水応答とそれを反映する SH 波の多重反射法を用いて地震が地下水に影響するメカニズムを検討している。それによると、深部の帯水層は、地震により大きな歪を受け透水性が上昇し、その結果地下水水位が上昇した。浅部帯水層で歪が大きい部分では、間隙水圧の開放とともに地下水水位の低下が引き起こされたとしている。

### 3.1.2 海外の事例

#### (1) ニュージーランド、Christchurch 地震に関連した湧水事例

ニュージーランド、南島の Christchurch 市周辺で 2010 年 9 月 4 日に Darfield (Canterbury) 地震 ( $M_w = 7.1$ )、2011 年 2 月 22 日に Christchurch (Lyttelton) 地震 ( $M_w = 6.2$ ) が起こった。Darfield 地震は、Christchurch 市の西方に地表地震断層として現れた Greendale 断層の活動により起こったとされる。一方 Christchurch 地震は、Christchurch 市の南方に位置する Banks 半島の Port Hills の地下に存在する衝上断層の活動で起こったとされる。

Cox et al. (2012)<sup>27)</sup> は、周辺の多数の水位観測孔データを開析し、Darfield 地震による水文学的影響を検討した。その報告の中で、Christchurch 市を中心とした一帯で新しい湧水の発生地点が示されている。その一部は、地震に伴い不透水層の破壊又は液状化により、被圧地下水が上昇したことにより湧出したものと推測している。

Brownie et al. (2015)<sup>28)</sup> は、地震後に Port Hills の Hillsborough Valley で確認された亀裂を報告し、付近で新たに湧出した水を分析した。Hillsborough Valley は、安山岩質と玄武岩質の溶岩とそれを覆う更新世のレス堆積物で構成される。北向きの谷において、谷筋に堆積する崩積土と斜面側のレス及びその再堆積物の境界に沿って亀裂が確認された。また、亀裂の分布位置より谷側で、地震動による圧縮が想定される区域に複数の湧水地点が確認された。水質及び酸素同位体比の検討の結果、湧水の起源は主に火成岩岩盤を由来とする地下水と判断している。推定された湧出機構では、地震動の影響で地下水圧と地盤の透水性が上昇して経路が形成された結果湧出する。

## (2) アメリカ、San Simeon 地震に関連した湧水事例

2003 年 12 月 22 日にアメリカ、カリフォルニア州で San Simeon 地震 ( $M_w = 6.5$ ) が発生した。震源は San Simeon の町から北東に約 11 km の地点とされている。San Simeon から Santa Lucia 山脈を挟んで位置する Paso Robles 盆地は、第三紀以降のテクトニクスで形成された盆地で、雨季以外は概ね乾燥している Salinas 川が流れる。また、Santa Lucia 山脈の温泉で知られる Arroyo Grande 近くに、Lopez Creek が位置する。これら Salinas 川と Lopez Creek において、地震後に河川流量の増加が記録された。

Wang et al. (2004)<sup>29)</sup> は、河川の流量計データを解析し、地震に伴う水系の変化と増えた水の起源を検討した。最初の増加は地震後 15 分以内に発生し、約 1 時間継続した。2 番目の増加は数時間後に起こり、長期間継続したとされる。それぞれの流量の自然対数と時間のグラフをみると、類似がみられる。したがって 2 つの流量増加は同様のメカニズムで起こったものと推測している。Paso Robles 盆地では、既往調査で深度約 100 m に熱水貯留層が確認されている。地震前 Sakinas 川は乾燥しており、地下水位は大幅に低下している状態であった。このことから、流量の増加は地震により熱水貯留層の透水性が上がった結果、湧水が上昇して起こったと推定している。

## (3) アメリカ、南 Napa 地震に関連した湧水事例

2014 年の 8 月 24 日にアメリカ、カリフォルニア州で南 Napa 地震 ( $M_w = 6.0$ ) が発生した。Napa 地震は 1989 年の Loma Prieta 地震以降、San Francisco bay 沿岸で起こった最も大規模な地震で、北北西走向の西 Napa 断層帯の地下約 11 km が震源とされる。本地域の Napa 川とその支流、Napa valley と Sonoma valley の間に点在するいくつかの泉は、乾季のため乾燥しているかほとんど流れがなかったが、地震後に水が湧出した。

Wang and Manga (2015)<sup>30)</sup> は、湧水の流量データの解析と水質分析を行い、水の起源を検討した。地震による新たな湧水の B と Li の平均濃度は、Napa と Sonoma の深部の熱水の特徴と異なる。また、湧水の水素と酸素の同位体比のグラフは天水線 (GMWL) と平行にプロットされることから、深部地下水ではなく天水を主として涵養された浅部の地下水と想定された。このことから、降雨により周囲の山脈に貯留された地下水が、地震により地盤の透水性が上昇したことで地表に湧出したと推定している。

#### (4) カナダ、Haida Gwaii 地震に関連した湧水事例

2012 年 10 月 28 日に、カナダ西部太平洋側の Hida Gwaii 諸島近傍は、北アメリカと太平洋プレート境界縁辺で平行する Hecate 盆地に位置し、北西走向の多数の高角断層が分布する。この地域で発生した Hida Gwaii 地震 (Mw = 7.8) では、震源から 30 km 離れた Gwaii Hannas 国立公園の Gandll K'in Gwaay.yaay 温泉の湧出量に変化した。地震後に湧出量は減少し、その後回復した。

Grasby et al. (2019)<sup>31)</sup> は Gandll K'in Gwaay.yaay の温泉水を用いて、地震が地下水の循環システムに与えた影響を検討した。酸素・水素同位体比の分析の結果、温泉水は天水と深部地下水が混合した水である。カルセドニー地化学温度計を用いて推定した温泉水の最高温度は 117 °C である。温度計データと局所地熱勾配の検討により、循環システムによる温泉水の形成深度は 3.6 km と計算している。このことから、深部で混合した地下水が地温上昇により加熱されて浅部まで連続する断層や亀裂系を通して上昇することで循環するシステムであると推測している。地震後の流量の変化は、涵養地の地下水位が地震により下がり、循環システムの推進力が減少したことによるものと推定している。これによれば、地震後に通常の涵養過程で地下水位が復元すると湧出量は回復する。一方、地震前にサンプリングした水の水質分析結果を比較すると、地震後に大きな変化が認められなかった。したがって地震による流路や水源の変化はなかったとしている。

#### (5) トルコ、Van 地震に関連した湧水事例

2011 年 10 月 23 日にトルコ、Anatolia 地方東部 Van 地域で Van 地震 (Mw = 7.2) が起こった。この地域は中新世中期以降、アラビアプレートとユーラシアプレートの衝突により収縮と隆起を受けており、E-W 走向の衝上断層が発達する。また、古くから豊富な湧水が利用されている地域である。

Inan et al. (2012)<sup>32)</sup> は、震源地から約 20 km 離れた Van 市近傍で飲用にボトリングされる市販の湧水を分析し、地震による影響を検討した。地震前の 9 月 8 日の試料から地震発生までに  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$  が増加し、 $\text{Na}^{+}$  及び  $\text{SO}_4^{2-}$  が減少する異常がみられた。地震後はそれらの傾向が逆転し、一か月後に安定したことを報告している。この結果から、湧水の化学的異常が、地震発生前の化学的指標となること可能性があることを指摘している。

### (6) イタリア中部地震に関連した湧水事例

2016年8月24日から始まったイタリア中部地震のうち、10月30日のUmbria州Norciaで発生した地震 ( $M_w = 6.5$ ) は、帯水層の水文学的なバランスに大きな影響を与えたとされる。

Checucci et al. (2017)<sup>33)</sup> は、Norcia から 40 km 程度南東の Terni 周辺を流れる Nera 川の流量が、夏の平均の流量と比べ地震後に 50%増加したことを報告している。このとき、地震前後に流量に影響しうる気象変化は観測されなかった。したがって集水域の湧水の湧出量増加が河川流量に影響したと判断している。また、報道記事を用いて地震後に近郊の Piana di Norcia で確認された新しい湧水を示している。

#### 3.1.3 まとめ

地震等による水理学的な二次的影響の観点において、国内外の湧水の事例を整理した。これらの事例から、主に地震等の影響による湧出機構、影響範囲、湧水の活動履歴の情報が乏しいことがわかった。

湧水はその報告状況から、地震等に伴い新たに湧出したもの (佐藤, 2015<sup>8)</sup>) と、既知の湧水が地震等に伴い湧水量や水質に変化が確認されたものに分けられる。前者は地震等により新たに水みちが形成され、それを経路として湧出が始まったものである。地震時に形成された亀裂から湧出したもの (岸本, 1969<sup>10)</sup>; Brownie et al., 2015<sup>28)</sup>)、噴泉を形成しているもの (村岡ほか, 2018<sup>20)</sup>; 細野ほか, 2017<sup>25)</sup>) などがある。本稿で収集された湧水は、概ね  $M = 6.0$  以上の地震に伴う事例であり、地表への経路の一つとなる地表地震断層が出現しないような小規模な地震による水理学的影響はほとんどないと考えられる。既知の湧水に関する影響では、Grasby et al. (2019)<sup>31)</sup> や Wang et al. (2004)<sup>29)</sup> 等がある。地震等の影響による水質の変化は、断層や割れ目等の経路が形成されることにより異なる水質 (起源) の水が混合した結果と推定されている。

地層処分の観点からは、数 100m 以深に存在する化石海水等の深部地下水由来のものを含む湧水 (奥澤・塚原, 2001<sup>12)</sup>; Togo et al., 2014<sup>21)</sup>) は、塩分濃度が高く、緩衝材の膨潤性能の低下させる可能性がある。したがって、これらの湧水は処分システム周辺の岩盤の核種移行速度に影響する可能性がある。一方、Wang and Manga (2015)<sup>30)</sup> のように、天水起源を含む比較的浅部の地下水が湧出する事例もある。また大規模な地震では、軟弱な砂地盤等で液状化が発生し、浅部の地下水が噴出することがある。したがって、湧水の起源を把握し閉じ込め機能に影響するものか判断が必要である。湧水の起源は、水質分析、同位体比の測定等で検討されている。

#### 1) 湧出機構

本稿で収集した事例では、概ね水の分析結果と岩盤に対する地震の影響から湧出機構が検討されている。例えば、分析により起源となる地下水を推定した結果に基づき、地震動が

地盤の地下水圧、あるいは透水性の上昇等をもたらし、起源となる地下水が上昇したとする機構である。湧出経路については、深部流体と呼ばれる高塩濃度の地下水を、比抵抗探査により検討したもの（西山ほか、2016<sup>34</sup>）や、トンネル等の工事に伴う湧水（村山ほか、2000<sup>35</sup>）、断層の成長を仮定したモデルによる地下水流動解析（高井ほか、2017<sup>36</sup>）など、既存の断層破砕帯を経路とする湧水の研究がある。ただし、湧水の移動経路に対する地震等の影響を調査又は解析で示した事例は確認されなかった。

## 2) 影響範囲

地震等が湧水に影響する範囲では、地震と同時期に震源から 20 km 離れた湧水地点で水質の変化（Inan et al., 2012<sup>32</sup>）や 40 km 離れた地域で湧水量の変化（Checcucci et al., 2017<sup>33</sup>）が観測されている。これらは震源断層の活動の影響を受けたと推定される範囲の概念であるプロセスゾーン（金折, 2001<sup>37</sup>）よりもはるかに断層から離れた地点の事例である。これらの報告は、断層周辺によらず既知の湧水が遠方の地震の影響を受けることを示している。ただし、震源あるいは断層との距離と湧水への影響の関係は不明瞭である。

## 3) 活動履歴

地震等による湧出履歴に関する情報は乏しい。地震等により影響を受けた湧水は、地震後短期間で水量や水質が復元、あるいは枯れる場合がある。その場合、泥火山等の地質現象と比べ湧出の痕跡が不明瞭になる。そのため、継続的に観測が行われている地下水観測孔と比べ、特に採水して分析されない限り検討するデータが少ない。本稿で収集された事例はいずれも歴史地震に関連するものであり、有史以前の地震等の影響による湧水を評価した事例は見つからなかった。

活断層の影響で過去に湧水が噴出した地点は、現在活動がみられない場合でも地震等の影響により将来再び湧出が始まる可能性がある。ある地震等に伴い発見された湧水は、新規に湧出したものではなく、過去に湧出した後に枯れた湧水の再活動の可能性がある。

上記のように、地震等による湧水への影響では、1) ～3) の情報が十分ではないことが明らかとなった。地層処分システム周辺において、地震等により閉じ込め機能に影響する未知の湧水（地下水の流動）が将来形成される可能性の評価のためには、さらなる情報が必要である。処分システム周辺においては過去に活動した湧水の履歴及び湧出機構の把握が重要である。それらの有無及び湧出経路になりうる地質構造の分布の把握に関する技術の高度化が課題であると考えられる。

### 3.2 泥火山の報告・噴出機構の検討事例

泥火山は地下深部から地下水、ガス、時には石油を伴い地表へ噴出した泥により形成された微地形であり、地下深部における異常に高い間隙水圧が成因として指摘されている（千木良・田中, 1997<sup>38)</sup>）。泥火山にはさまざまな成因が提唱されているが、活動を誘発する要素の一つに地震等の影響が考えられている。一部の泥火山分布地域では、周辺で起こった大規模な地震の後、新しく泥の噴出地点が確認されることや既知の泥火山で噴出物の量が変化することが知られている。

産業技術総合研究所深部地質環境研究センター（2007<sup>39)</sup>は概要調査の調査・評価項目の設定において、地層処分システムの安全性評価に関連する要素を整理した国際 FEP リスト（OECD/NEA, 2000<sup>40)</sup>）を元に、地層処分システムの領域に影響を与える要因の一つとして泥火山を挙げた。また、噴出活動が物質の移行経路として機能すること、あるいは廃棄体を直接破損または地表へ放出しうることから、泥火山自体を避けるべき対象としている。一方、日本に分布する場所は限られることから、将来泥火山の出現が予想される地域は、異常に高い間隙水圧の検知により避けることが可能であるとした。産業技術総合研究所深部地質環境研究コア（2012<sup>41)</sup>は、概要調査段階で必要となる調査項目で泥火山を挙げた。評価にあたって残された課題として、調査地区が「異常に高い間隙水圧が形成されやすい場所（例えば、油田・ガス田地帯）」になる可能性と、泥火山の出現との関係を詳細に検討する必要があると指摘した。総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG（2017<sup>42)</sup>は、「地下施設の建設・操業に関する検討対象として抽出した事象」の項目の一部に泥火山を挙げた。しかし、高間隙水圧が形成されやすい範囲を特定することが難しいことから、地層処分の安全性の確保に対する「好ましくない範囲」及び「好ましい範囲」の設定は難しいとしている。

活動時に泥水が地表面に到達しなかった貫入体を泥（マッド）ダイアピルという。成因は泥火山と共通すると考えられることから、本稿では泥ダイアピルの事例も対象に含む。一方、「泥火山」と呼ばれる泥の噴出現象としては、国内では八幡平のはちまんたい後生掛温泉、阿寒湖畔のごしょうがけ「ボッケ（泥火山）」、雲仙温泉のほか、別府温泉等の熱水地域で火山ガスを伴い小規模に泥を噴出するものも知られている。千木良・田中（1997<sup>38)</sup>、高橋ほか（2018<sup>43)</sup>はこれらを火山活動あるいは温泉に関連したものであり、高間隙水圧を主な成因とする多くの泥火山とは異なる成因の地質現象として区別している。地層処分の観点では、熱水地域で知られる泥火山の発生・活動範囲は火山・マグマ活動の項目で検討される影響範囲内と考えられるため、本稿では文献収集の対象としない。

#### 3.2.1 国内の事例

日本に分布する泥火山は、田中ほか（2009<sup>44)</sup>；田中（2009<sup>45)</sup>；産業技術総合研究所深部地質環境研究コア（2012<sup>41)</sup>に概説があり、高橋ほか（2018<sup>43)</sup>は陸域に分布する泥火山の位置をデータベースとしてまとめている。データベースでは国内の泥火山について、北海道

新冠地域の泥火山、遠別・幌延地域の泥火山、新潟県の松代地域の泥火山の3地域の泥火山を挙げている。そのほか、露頭で観察される陸域の泥ダイアピルは、紀伊半島南部に事例がある。海域の泥火山及びダイアピルは、熊野海盆、琉球トラフ、南海トラフ、日本海溝など、主にプレート収束域縁辺に分布する。これらはガスハイドレートの分布・形成と関連があると考えられており、近年多くの研究がなされている。

### (1) 北海道新冠

北海道新冠町では古くから北西-南東走向の新冠背斜の周辺で油徴・ガス徴が認められ、複数の噴泥を伴う円錐状地形が分布することが知られている。

千木良・田中 (1997)<sup>38)</sup> はこれらの現地調査により、9カ所の泥火山と、その周辺で地表まで噴泥が到達しなかった泥ダイアピルの露頭を確認した。また、周囲の段丘堆積物と泥火山活動が影響した地形変状から活動史を検討した。泥火山の成因は、地質条件から褶曲を形成した横圧力による異常高圧と有機物の分解によるメタン発生の複合によるものと推定している。また、褶曲の形成は鮮新世以降、最終間氷期前とされている。現在まで泥火山が異常高圧の開放を通じて活動しているとすると、異常高圧は最終氷期から10万年以上持続していることになると指摘した。一方、メタンガスの生成が異常高圧の原因と仮定すると、ガスの生成速度が泥火山活動の周期と関係している可能性があるとした。

田近ほか (2009)<sup>46)</sup> は、2003年十勝沖地震時に認められた変状記録の整理とレーザ測量を実施した。一部の泥火山では、地震に伴い亀裂の発生、泥塊の盛り上がり等の変状があったとしている。

倉田ほか (2013)<sup>47)</sup> は、泥火山から複数箇所噴出した水及び周辺の湧水について、水質分析と酸素・水素同対比の測定を行った。その結果、採取された水の同位体比とイオン型が泥火山の南北側で異なった。これにより泥火山の地下構造に違いがあると推定している。また、泥火山噴出物露頭でユニット区分を行い、採取した木片の炭素14法年代測定とテフラ対比から各ユニット活動履歴を検討している。

### (2) 北海道遠別・幌延

北海道遠別町の南部に位置する遠別旭温泉周辺は、ガスの噴出や油徴が確認されることで知られる。高橋ほか (2006)<sup>48)</sup> はガスの放出を伴う円形池（陥没地形）の場所を歌越別泥火山として紹介している。また、幌延町において、宗谷丘陵内のペンケオポッペ川沿いにメタンガスと砂泥を伴う湧水で知られる湿地について報告している。

酒井ほか (2010)<sup>49)</sup> は上幌延泥火山と名付け、砂泥、ガス、地下水の性状を報告した。地質は砂岩、泥岩、礫岩からなる新第三系で、新冠泥火山の地質条件と類似する。また、湧水の水質は化石塩水タイプで、新潟県松代地域の室野泥火山との類似を指摘している。

宮川ほか (2016)<sup>50)</sup> は、上幌延泥火山において二次元比抵抗電気探査を行い、泥火山噴出物の分布領域を示した。また、泥火山で掘削したボーリング試料の分析を行い、噴出物の組

成から白亜紀の<sup>ほこぶち</sup>函淵層以浅に由来すると指摘した。

### (3) 新潟県<sup>まつだい</sup>松代

新潟県十日町市松代周辺は新潟堆積盆地の南部で、新第三紀～第四紀の堆積岩に北北東-南南西方向に軸を持つ複数の褶曲構造がみられる。

新谷・田中 (2005)<sup>51)</sup> は、松代地域のうち室野地区と<sup>かきもう</sup>蒲生地区で、それぞれガス、地下水、石油を伴う泥が噴出する泥火山を報告した。また、蒲生地区の泥火山噴出物を含む露頭を確認し、非活動的なものとして<sup>しょうせんじ</sup>松泉寺泥火山と名付けた。これら室野泥火山、蒲生泥火山と松泉寺泥火山を総称して松代泥火山としている。そのほか、現地調査で周辺にすり鉢状の陥没地形を記載し、泥水の水質を分析した。松代地域には、<sup>なべたちやま</sup>鍋立山トンネルの掘削工事で問題となった細粒な粘土を伴う膨張性地山が存在する。この粘土について、泥火山活動が成因である可能性を指摘している。

横田ほか (2008)<sup>52)</sup> は、室野泥火山で地中レーダ探査を実施した。得られた反射の深度プロファイルについて、噴出経路により地下水が上昇している部分、噴出物が表層に厚く堆積している部分、噴出泥以外に相当する部分の区分を行った。

松代泥火山については、2009年の地学雑誌特集号「泥火山—その実体と応用地球科学的意義—」において多数の研究報告がなされた。新谷・田中 (2009)<sup>53)</sup> は水素及び酸素同位体比の検討と、泥水中の石炭片を用いたビトリナイト反射率の検討により室野泥火山の噴出物起源を検討した。石原・田中 (2009)<sup>54)</sup> は、蒲生地区で掘削されたボーリングコアの検討により、泥火山周辺の地質・地質構造の検討を行った。鈴木ほか (2009)<sup>55)</sup> は、泥火山周辺の地形・地質調査、岩石試料の室内実験、電磁探査法による地下構造調査により、鍋立山トンネル周辺の膨張性地山と泥火山の関係を検討した。尾西ほか (2009)<sup>56)</sup> は室野泥火山で表面波探査を実施し、泥火山の浅部構造様式を検討した。加藤ほか (2009)<sup>57)</sup> は、噴出物から採取した原油・ガスと周辺の坑井で掘削されたコア試料から得られたガスを分析し、原油、ガスの起源を検討した。田中・石原 (2009)<sup>58)</sup> は、近傍のボーリングコアから得られた泥火山周辺の地下構造、粘土鉱物組成や間隙水の地化学特性、鍋立山トンネルの掘削情報を用いて膨張性地山の成因を検討した。林ほか (2009)<sup>59)</sup> は、近傍のボーリング孔を用いた連続地下温度観測を実施し、地下水温度変化と泥火山活動の関係を検討している。

田中 (2009)<sup>44)</sup> は、国内外の泥火山の報告をレビューし、特集号の研究事例から松代泥火山について総括した。それによると、松代泥火山は背斜軸周辺のすり鉢状地形に沿って分布し、2～3 万年前に陥没を伴う活動があった。噴出する地下水は、深度 3400 m より深部の<sup>ななたに</sup>七谷層に由来する可能性がある。形成過程は、泥火山周辺のすり鉢状地形の地下において、脱ガスによる泥岩の水圧破砕に起因するマッドブレッチャーと、上昇してきた高塩分濃度の地下水との反応により泥状化した過程が考えられている。

#### (4) 紀伊半島南部

紀伊半島南部、和歌山県白浜町田野井地域と袋地域では、下部中新統田辺層群に成層角礫岩からなる厚い泥火山噴出物が知られている。

中屋・浜田 (2009)<sup>60</sup> は噴出物に挟在する浅海性堆積物の岩相解析を実施した。その結果、層序により田野井泥火山及び袋泥火山は田辺層群堆積時に形成されたと推定している。また、田辺層群朝来層中の北部に分布するファンデルタ堆積体及び南部に分布する泥岩を形成した高堆積速度場と、海洋プレートの沈み込みに伴う地震動を泥火山形成の高間隙水圧の要因として指摘した。

宮田ほか (2009)<sup>61</sup> は、田辺層群の砂岩泥岩互層からなる白浜累層で見られる泥ダイアピルについて、泥水圧入によるモデル水槽実験を用いて貫入過程を検討した。実験では模擬地層の砂泥互層比と、注入する泥の濃度を変えることで異なる貫入構造が再現された。その結果と白浜層中の泥ダイアピルの形態を比較し、泥ダイアピルの上昇機構と破壊過程を推定している。

紀州四万十体団体研究グループ (2011)<sup>62</sup> は、下部中新統熊野層群中に見られる泥基質角礫岩の岩体のうち、和歌山県那智勝浦町と太地町に分布するものを泥ダイアピルと認定した。形成過程は、内部の角礫の岩種構成から基盤の牟婁付加体を起源としたスラストによる流体供給を推定している。また、背斜構造の形成に伴う圧縮を高間隙水圧の原因としている。

#### (5) 熊野海盆

南海トラフの熊野海盆は南海付加体最大の前弧海盆である。音響探査や海底地形探査により、これまで海盆内の背斜構造沿い等の 13 カ所で熊野海丘 (Kumano knoll) として泥火山 (KK#1~KK#13) が確認されている (Morita et al., 2004<sup>63</sup>; Kopf et al., 2013<sup>64</sup>)。泥火山周辺の地下には複数のダイアピルが確認されている。

森田ほか (2003)<sup>65</sup>、Morita et al. (2004)<sup>63</sup> は、熊野泥火山群の構造解析と、採取された碎屑性噴出物を分析した。その結果、碎屑岩の年代が田辺層群及び熊野層群とほぼ同時代であるとした。また、前弧海盆堆積物としての田辺層群との堆積環境の類似性を指摘した。

森田ほか (2004)<sup>66</sup> は、熊野海盆の泥火山及びダイアピルについて形成過程を検討するため、反射法地震探査で構造を確認した。その結果、数 km オーダーの幅を持つダイアピル全体と比べ、泥火山直下の噴出経路が極めて細いことが確認された。この経路の形態から、ガス成分が膨張し、急激な異流により形成されるダイアトリムであると指摘した。これらの泥ダイアピルはメタンハイドレート BSR に到達した地点からダイアトリムに転換している。これにより、温度の高い流体が貫入時にメタンハイドレートの分解を誘発し、急激な堆積膨張を引き起こしたとする噴出機構を推定している。

Tsunogai et al. (2012)<sup>67</sup> は、2004 年の紀伊半島南東沖地震 (Mw = 7.5) の直後に KK#5 において 2 カ所のメタンブルームを確認し、堆積物中から採取したメタンの炭素同対比を測定した。このブルームはメタンの大量放出によるものであり、既往の地震による泥火山の

影響と比較して地震により形成されたものと結論している。

土岐ほか (2013)<sup>68)</sup> は、第八熊野海丘 (KK#8) から得られた間隙水を分析し、含まれる粘土鉱物の脱水反応温度を推定した。地温勾配を考慮すると、海底下 3.5 km 以深が流体の起源である可能性を示唆した。

井尻ほか (2015)<sup>69)</sup> は、海底泥火山の噴出物に含まれる流体に共通する化学的特徴は、イライト-スメクタイト反応に代表される粘土鉱物の脱水反応の影響を受けていること、熱分解起源のメタンを含むこととしている。また、これらの流体の移動が海底下の生命活動に重要な栄養等の供給源であると示唆した。KK#5 の掘削調査による堆積物コアに微生物細胞の分析結果から、泥火山深部の流体移動経路に微生物生態系が存在する可能性を示した。

Nishio et al. (2015)<sup>70)</sup> は、リチウム同位体による噴出物貯留層の温度検討に基づき、深部からの噴出物湧昇過程が地震と関連している可能性を検討している。

井尻ほか (2018)<sup>71)</sup> は、うち 2 つの泥火山の噴出物について組成を分析した。その結果、海盆内の更新統堆積物と粘土鉱物の組成が異なることから、より深部に泥の起源があることを示唆した。

#### (6) 琉球海溝

Ujiie (2000)<sup>72)</sup> は、琉球海溝北部、種子島の東でサイドスキャンソナーにより確認された泥ダイアピルについて、採取したピストンコアの分析を行った。ダイアピルを覆う海底堆積物の酸素同位体層序、テフラ対比、C<sup>14</sup>年代測定により、ダイアピルの活動が停止した時期を示した。

Nakayama et al. (2010)<sup>73)</sup> は、琉球海溝、種子島沖の間に確認された泥火山付近の 4 地点で採取した間隙水を分析し、その組成についてメタンハイドレートを含む複数の混合モデルを検討した。

#### (7) 南海トラフ

芦ほか (1990)<sup>74)</sup> は、四国沖、南海トラフの変形フロント付近で実施されたイメージングソナーで付加体前縁部の微細・中規模地形を検討した。そのなかで、円錐状の泥火山とみられる地形について報告している。四国沖の泥火山は変形フロントの 5 km 以内に発達し、トラフ軸に直交するリニアメント軸に沿って分布している。生成過程については、沈み込みに伴う構造的な弱線に沿って高間隙水圧下の泥質物質が噴出したと指摘している。

Kobayashi et al. (1992)<sup>75)</sup> は、KAIKO-NANKAI 計画における南海トラフの調査のうち、深海底画像撮影調査で確認された泥ダイアピルについて分布と性状を報告している。

#### (8) 日本海溝

Ogawa and Kobayashi (1993)<sup>76)</sup> は、日本海溝東でマルチビーム音響測探により確認されたマウンドについて泥火山の可能性を指摘した。成因は、プレート運動に関連した付近の

断層活動（例えば、1933 年昭和三陸地震）に伴い間隙水圧が上昇した結果、地下の流動体が移動したものと推定している。

#### (9) 別府湾

Allis et al. (1989)<sup>77)</sup> は、別府湾内において音響測探により得られた音響反射断面を解析した。その結果、反射断面で海底下にリストリック断層と複数地点のガス含有層の存在が推定された。周辺に泥火山が分布する可能性を指摘している。

### 3.2.2 海外の事例

海外の泥火山は、陸域、海域のものを含め、世界全体の分布及び泥火山の性状を概説した研究が数多くなされている（小松・菊池, 1973<sup>78)</sup>; Kopf, 2002<sup>79)</sup>; Milkov, 2000<sup>80)</sup>; Dimitrov, 2003<sup>81)</sup>など）。また、各地の地震データを用いた地震と泥火山噴火の関係も検討されている。

Manga et al. (2009)<sup>82)</sup> は、地震に対する泥火山噴出の応答結果を整理し、誘発メカニズムを検討した。また、解析により噴出を誘発する地震の規模と距離の閾値を示した。これまで、噴出の誘因は地震による地盤の液状化や強度の低下、透水性の上昇、流体の気泡形成等、いくつかの地震による変化が誘因として考えられている。泥サンプルについて地震周波数と振幅を設定した振動せん断の応答を検討すると、強度の低下する値が既往の噴火を引き起こした地震の動的ひずみのピークより大きい。したがって地震による地盤の強度低下の関係は小さいとしている。

Zoporowski and Miller (2009)<sup>83)</sup> は、地下貯留層から噴出物が地表に噴出する量と噴出周期を表す数式モデルを提案している。

Bonini et al. (2016)<sup>84)</sup> は、日本を含む世界各地の泥火山で、地震による地域的な応力変化を解析し、噴泥を誘発する要因を検討した。それによると、地域により主な動的応力変化である地震に対する噴出の応答は大小異なり、地震が泥火山噴出の唯一の要因ではないことを示している。例えば、アゼルバイジャンの大部分の泥火山では、静的応力変化による供給路の広がりや噴出に影響している地域もあることを指摘している。

Baloglanov et al. (2018)<sup>85)</sup> は既往の研究を整理し、世界 42 の地域に分布する 2508 箇所  
の泥火山について、地域別の分布数を表としてまとめている。

#### (1) 台湾及び周辺海域

台湾では古くから、主に陸上では西南部、海域では南西沖に多くの泥火山が分布することで知られ、多数の調査がなされている。陸域に分布するものは、高橋ほか (2018)<sup>42)</sup> に位置がデータベースに取りまとめられている。既往の研究については、2009 年までのものを浜田ほか (2009)<sup>86)</sup> が概説している。

浜田ほか (2009)<sup>86)</sup> は、泥火山が多く分布する南西部の小滾水 (Hsiaokunshui) 地域から古亭坑 (Gutingkeng) 地域にかけて地表踏査と地下水の水質分析を実施し、泥火山の形

態分類を行った。小滾水地域では、NE-SW 方向の古亭坑背斜軸に沿って 13 カ所泥火山が分布している。形成過程は、地殻変動の圧縮による高間隙水圧により深部流体が上昇することで、地表付近で泥チャンバーを形成し、噴出に至ったと推定している。また、旗山 (Chishan) 断層沿いに分布する泥火山から噴出する地下水は、塩分濃度が低く酸素同位体比が大きい。噴出過程は、深部で粘土鉱物の脱水により化石海水が希釈され、旗山断層沿いに一気に上昇したものと推定している。

森田ほか (2009)<sup>87)</sup> は、台湾南西沖、パッシブマージンの中国大陸棚斜面周辺でマルチチャンネル反射法地震探査と探査機の潜航調査を行い、海底地質構造を検討した。化学合成生物群集を伴うガスブルームが確認され、その海底下の構造には反射法地震探査でメタンハイドレート BSR を確認している。そのほか、下位にガス貯留が推定されるマウンド地形について泥火山の可能性を指摘している。

Sun et al. (2010)<sup>88)</sup>、Chao et al. (2010)<sup>89)</sup> は、西南部の泥火山群で噴出するメタンを主とするガスの組成、炭素同位体比の分析及びガスフラックスを検討している。

Sun et al. (2010)<sup>88)</sup> は、ガスの分析結果から、古亭坑地域の泥火山の一部に生物分解由来の炭化水素ガスが見られるものの、その他の大多数の泥火山は熱分解性の炭化水素ガスからなるとしている。また、堆積物のビトリナイト反射率とナンノ化石分析からガスの熟成度を推定し、これらのガスが貯留している堆積物よりも深い層から生成したものと推定している。

Chen et al. (2014)<sup>90)</sup> は、台湾南西沖の泥火山群について、マルチビーム音響測探、マルチチャンネル反射法地震探査、深海牽引サイドスキャンソナーの結果を検討し、13 カ所の泥火山及びダイアピルについて構造を明らかにした。得られた構造と分布を元に、泥火山とダイアピルの成因は、急速な堆積による層内の過剰圧力、ユーラシアプレート収束域の圧縮、泥密度の減少および浮力の増加に伴う流体の移動と推定している。

頭島ほか (2015)<sup>91)</sup> は、台湾南部、旗山断層近傍の萬丹 (Wandan) 泥火山群について、活動記録から噴出位置と休止期間の傾向を分析した。これにより発生確率、被害額を予測し噴出時のリスク評価を行っている。

## (2) サハリン (ロシア)

ロシア極東のサハリン島では、高橋ほか (2018)<sup>42)</sup> により泥火山の分布がデータベースにまとめられている。

Mel'nikov and Ershov (2010)<sup>92)</sup> は既往研究をレビューした。地震による影響と資源の観点から泥火山研究の重要性について考察するとともに、サハリンの泥火山を紹介している。その紹介のうち、サハリン南部に位置する Yuzh-no-Sakhalinsk 泥火山 (YMV) は、中央サハリン断層付近に位置し、2011 年に泥の噴出が知られている。

Prytkov et al. (2014)<sup>93)</sup> は YMV の噴出による表面変位を GPS 観測データにより解析し、有限球状の噴火源のモデルを提案した。解析の結果、噴火源は中央サハリン断層の断層面か

ら 700 m 離れた場所に位置するとした。また、噴火源モデルの半径は 130~370 m 程度と推定している。

Shakirov et al. (2018)<sup>94)</sup> は、サハリン南部に位置する YMV 及び Pugachevo 泥火山 (PMV) と、北部に位置する Darginskie gas hydrothermal springs (DGHS : Darginskie 泥火山) の泥噴出物の組成、ガス中の炭素同位体比を分析した。その結果、南部の泥火山を二酸化炭素-メタン系泥火山とし、北部の泥火山をメタン系泥火山と区分している。

Korzniakov (2017)<sup>95)</sup> は、YMV と PMV において、泥火山噴出物上に広がる植生動態調査、複数地点の泥水の水質分析を行った。それによると、泥水中の pH と全固形分が低下すると、植生の  $\alpha$  多様性及び被覆量が増加するとしている。

### (3) モンゴル

Rukavickova and Hanzl (2008)<sup>96)</sup> は、モンゴルの Gobi-Altay 県北西部における 2006 年の地質調査で、高さが 0.8 m 程度の小規模な泥火山及び湧水地点を確認し、噴出した泥水を分析した。その結果、 $\text{HCO}_3^-$  を多く含んでいることから、溶存している塩分による粘土粒子の結合力の低下が泥水噴出に関係していると指摘した。成因については、1957 年の Gobi-Altay 地震 ( $M_L = 8.3$ ) で深部の間隙水圧が上昇したことにより、泥火山が噴出したと推定している。

### (4) Jungger 盆地 (中国)

中国北西部の Jungger 盆地の南端には多くの泥火山が分布する。この地域は中国で開発された最初期の油田が位置する地域である。そのうち Dushanzi 地域の泥火山は、Dushanzi 背斜の軸上にあり最も活動的とされている。

Zheng et al. (2017)<sup>97)</sup> は、Dushanzi 泥火山から放出するガスの組成と炭素同位体比、ガスマフラックスを測定した。ガスは主にメタンからなる。また、炭素同対比の検討により、炭化水素ガスは盆地の南部に堆積するジュラ紀中下部の石炭を含む厚い泥岩層に由来すると推測している。

### (5) Java 島 (インドネシア)

2006 年 5 月 29 日、インドネシアの Java Timur (東ジャワ州)、Sidoarjo 市で突如泥火山が発生し、蒸気を伴う大量の泥が噴出した。この LUSI (Lumpur Sidoarjo) と呼ばれる泥火山は、他に知られている泥火山とは規模が大きく異なる。泥の噴出は現在も継続しており、周辺住民及び環境に大きな影響を与えている。泥の噴出経緯とその後の影響及び対策は、高橋 (2013)<sup>98)</sup> が解説している。噴出量は最大で 180,000  $\text{m}^3/\text{day}$  に達し、現在は堤防、貯水池の建設、近隣に位置する Porong 川への排泥により対策しているものの、被害地域の面積は約 7.28  $\text{km}^2$  にも達したとされている。

Davies et al. (2007)<sup>99)</sup> は、噴出位置が民間企業により行われていたガスの採掘現場付近だったことから、掘削が泥噴出の原因となったと指摘した。最初の噴出は、ボーリングにより深度 2839 m まで高間隙水圧の層と石灰岩を掘削した際に、石灰岩中の帯水層とその上の高間隙水圧の泥層が連続したことがきっかけだったとしている。そして、民間会社がこの地区において噴出が発生する直前の採掘時にケーシングを用いていなかったことから、孔内に送り込んだ掘削用流体が孔壁の破碎をもたらし、その結果岩盤の亀裂が拡大し地表まで到達したことが噴出の原因であるとした。一方、泥火山の発生の 2 日前の 6 月 27 日には約 250 km 離れた位置で Yogyakarta 地震 (Mw = 6.3) が発生しており、泥火山の発生がこの地震によるものか検討された。

Mazzini et al. (2007)<sup>100)</sup> はガス、水、泥の組成を測定し、噴出した泥が深部由来であることを示し、掘削流体とは関係がないとしている。そして、地震が影響を与えたことによる既存の断層による深部破碎及び、それに続く加圧された泥が垂直移動することによる噴出機構を提案し、Davies et al. (2007)<sup>99)</sup> と異なり掘削の影響だけでは噴出を説明できないとした。

当時地震計が稼働していなかったことから、Sidoarjo 市周辺で Yogyakarta 地震の地球物理学的データは得られていない。Mori and Kano (2009)<sup>101)</sup> は、2004 年の新潟県中越地震のうち同程度の地震 (Mw = 6.3) の地震データを用いて、Yogyakarta 地震による震源から Sidoarjo 市の距離で想定される応力変化を検討した。それによると、応力変化の大きさは Manga and Brodsky (2006)<sup>102)</sup> で複数の観測事例から示された泥火山発生時の閾値と比べ小さい。一方、周辺のガス採掘地のボアホールにおいても地震直後に流体圧力変化が観測されていることから、地震がこの地域の局所的な地下流体に影響を与えたと推測している。ただ、これらのわずかな流体圧の変化が泥火山の形成を引き起こす要因となったか評価するのは困難であると指摘した。この泥火山の発生原因が地震による天災か掘削による人災かについては議論が続いているものの、高橋 (2013)<sup>98)</sup> は掘削による影響が大きいと考える専門家の割合が多いとしている。

また、周辺に甚大な被害をもたらしている現象であることから、噴出した泥に対する工学的対策・研究、周辺の環境評価も数多くなされている。呉ほか (2013)<sup>103)</sup> は堆積・貯蔵限界により導水路により排泥された Porong 川における泥の堆積状況を河道横断面形状データから調べ、経年的な変化を論じている。

## (6) ニューージーランド

1994 年 9 月 21 日、北島の Hawkes 湾南部 Waimarama 周辺、Brookby ガス湧出部近傍で泥火山が噴出し、その経過が記録された (Pettinga, 2003<sup>104)</sup>)。Brookby 泥火山は白亜紀後期と古第三紀層の粘性岩ブロックを伴うメラングジュ帯に位置し、新生代後期の衝上断層による変形の影響を受けている。噴出は数週間続き、周辺に分布するガス噴出も活発化した。また、噴出物のうち泥の大部分は数時間のうちに噴出したとされている。

Hayward and Francis (2013)<sup>105)</sup> は、ニュージーランドに分布する泥火山について自然遺産及びその保護の観点から紹介している。それによると 2 つのタイプに分けられ、それぞれ Rotorua 周辺に分布する火山の酸性ガスが岩石を粘土化させて形成された地熱活動によるタイプと、カンタベリーを含む北島の East Coast Basin 及び Northland 地方に分布する炭酸水素ガスと粘土を含む塩水が噴出するタイプとしている。地震との関連は、2008 年に Gisborne 地方で発生した地震後に付近の泥火山が活動したことを挙げている。このほかに、Gisborne 近郊の Hangaroa 泥火山が 1931 年の Napier 地震の直後に噴出したことが知られている。

#### (7) アンダマン諸島 (インド)

インド南東に位置するアンダマン諸島には 11 地点の泥火山が知られている。

Chaudhuri et al. (2012)<sup>106)</sup> はそのうちアンダマン諸島中央の Baratang 島、Jarwa Creek 付近の泥火山 (MV-1) にガスの継続観測施設を設置しモニタリングを行った。この泥火山は 2004 年 12 月 26 日のインド洋地震 ( $M_w = 9.3$ ) に伴い噴出が活発化したことが知られている。Baratang 島はインドプレートとビルマプレートの収束域に位置し、アンダマン付加体および衝上断層が分布している。Jarawa Creek 泥火山の真下には、Jarawa 衝上断層が位置する。モニタリングの結果、噴出ガスに含まれる  $^{222}\text{Rn}$  の濃度が 2010 年 1 月 19～20 日に低下しており、これが 1 月 16 日に発生した  $M_w = 4.9$  の地震、あるいは 2 月 2 日の  $M_w = 4.7$  の地震による可能性があるとして指摘した。

Ray et al. (2013)<sup>107)</sup> は、MV-1 と北部の泥火山 (MV-2) でガス及び泥水を採取し分析した。泥水中の酸素同位体比が低いことと、微量元素の検討から泥水が古海水と粘土鉱物の脱水に伴う混合水であるとしている。また、酸素及び水素の同位体地熱計から導出された噴出物の形成温度は、50～120 °C の範囲であり、アンダマン前弧沈み込み帯の深度 2～6 km の位置に相当する。これにより、泥火山噴出物はプレート境界部のデコルマ帯付近の堆積物と、変質したインドプレートの海洋地殻に由来すると指摘している。

#### (8) パキスタン

パキスタンを含む Makran 付加体地域には多数の泥火山が分布し、Makran 泥火山群 (MZAMV) として知られている。MZAMV はアラビア海の大陸棚上で 1945 年以降に複数回活動のある沖合泥火山の Malan 島も含む。

Kassi et al. (2014)<sup>108)</sup> は、高解像度衛星画像により既知の数より多い 70 以上の泥火山を判別した。これら泥火山は周辺の背斜構造に伴う衝上断層に平行して分布しており、付加体の継続的な圧縮を成因として指摘している。また、MZAMV の北側地域に古い泥火山堆積物が帯状に広がっており、その分布を示している。この堆積物は周辺山地で見られる灰色から緑色の泥岩で構成されており、泥岩の層序から泥火山の噴出が鮮新世頃に始まったものと推測している。

## (9) イラン

イラン南部 Makran 沿岸には、30 もの泥火山が分布する。Dehghanian et al. (2015)<sup>109</sup> は、ホルムズ海峡に面する Gatan 村近傍に位置する泥火山 (G1, G2, G2a, G2b) について、現地調査と採取した泥の組成を分析した。粘土には石英、曹長石、イライト、方解石とドロマイトが含まれている。泥火山形成のメカニズムは、アラビアプレートが沈み込む収束帯に位置し、ユーラシアプレートが座屈することによる高間隙水圧が原因であるとしている。

## (10) アゼルバイジャン

アゼルバイジャンは世界の泥火山のうち、最も多く分布する地域の一つで、カスピ海を含めて 400 以上もの泥火山が分布する世界有数のガス、石油開発地域である。Aliyev (2009)<sup>110</sup> は 1810 年から 2007 年までの泥火山噴出記録をカタログ化している。

Planke et al. (2003)<sup>111</sup> は、4 カ所の活動的な泥火山について現地調査を実施し、うち 2 カ所で泥水の分析を行った。その結果、泥水は深部の地下水と浅部の天水起源水が混合するモデルを推定している。Baku 市南に位置する Lokbatan 泥火山では、混合モデルにより地下構造が推定された。これによると直下浅部に泥チャンバーが存在し、噴出前及び噴出中の膨張及び収縮により、上載層の沈下及び破砕による地溝を形成している。また、泥は、深部の泥岩を含む Maikop 層に由来するとしている。

Etiopie et al. (2004)<sup>112</sup> は、アゼルバイジャン東部 Baku 市近郊の Everlasting Fire 泥火山でメタンフラックスを測定した。年間少なくとも 1400 t のメタンが放出され、その他の泥火山も保守的に見積もっても年間  $0.3 \sim 0.9 \times 10^6$  t のメタンを放出すると推定している。

Mellors et al. (2007)<sup>113</sup> は、アゼルバイジャンを中心として  $M_w > 5$  以上の地震に伴い噴出した泥火山の記録を整理し、地震と泥火山噴火の関係を検討した。地震と噴火の時期が一致する数を統計的に解析した結果、大地震が独立したポアソン過程で想定されるよりも高い確率で泥火山の噴火と連動していることを示唆した。泥火山噴火を誘発する地震は泥火山近傍でメルカリ震度 6 以上を発生させる地震波の通過の場合に関係し、泥火山までの距離が 100 km 未満の場合影響が顕著であると推定している。

## (11) カスピ海

Yusifov and Rabinowitz (2004)<sup>114</sup> は、過去の 2 次元地震探査データを使用し、カスピ海南で 99 の泥火山を確認した。それによると、起伏の小さい泥火山は調査地域の北東部、大きい泥火山は南西部に集中している。70 %は断層と複背斜上に位置し、その他は背斜の側面または向斜に位置する。表面形態で凹型、凸型、平坦型、埋没型の 4 種類に分けられるが、規模、分布との相関は認められない。また、南カスピ海盆地の泥火山活動には堆積速度、構造収縮、炭化水素ガス形成の時期に関連した周期性が認められるとしている。

Feyzullayev (2012)<sup>115</sup> は、既往の報告に基づき泥火山流体の発生深度や深部構造のモデル化を行った。南カスピ海の泥ダイアピル形成の要因は、鮮新世～第四紀における速い堆積

速度、厚く主に泥で構成される堆積物、低い地温勾配、高い間隙水圧、石油地帯の地質構造等の条件が関係するとしている。噴出物を構成する流体、ガス、泥の発生深度はそれぞれ異なる。ガスは地下 7~15 km で最も深く、泥は地下 3~4 km である。主にメタンからなるガスのヘリウム、アルゴン、炭素の同位体比からは、噴出物が堆積岩起源であり、ガスは一部が生物起源のものを含むとしている。

#### (12) ルーマニア

ルーマニアの Buzau 州 Berca 地域に分布する泥火山群は、東カルパチア山脈前面の背斜及び活発な地震帯である Vrancea 地域の近傍に位置する。また、周辺は Buzau・Land・ジオパークとして地質的に重要な地域に指定されている。

Etiope et al. (2004)<sup>116)</sup> は、Berca 地域の泥火山についてガス組成とヘリウム同位体比を測定し、ガスフラックスを検討した。

Schniukov et al. (2009)<sup>117)</sup> は、Paclele Mari と Paclele Mici と呼ばれる断層沿いの 2 か所に分布する泥火山群について、噴出物の角礫岩の鉱物組成を分析した。噴出物はクリミア半島東部の Kerch・Taman 地域の泥火山のものと類似し、ホウ素を含むことを特徴としている。

Brustur et al. (2015)<sup>118)</sup> は、それらの泥火山群で噴出流体の分析及び 100 以上の泥火山を記録し、GPS により位置座標を整理した。形態はアゼルバイジャンの泥火山と類似するとした。供給路の構造は、15 cm 以下の細いものと、泥流入で径が拡大するもの、漏斗状を呈するものとして 3 タイプに分けている。

噴出するガスは主にメタンであり、深度約 3000 m で掘削されたコアとの対応から、泥は当該深度の中期中新世堆積物から褶曲部を抜けて地表へ移動していると推定している。

#### (13) クリミア半島

クリミア半島の東端に突き出た Kerch 半島に分布する Boulganack 泥火山を対象に、Herbin et al. (2008)<sup>119)</sup> は現地調査により泥水及びガスを採取し分析を行った。ガスの組成は 90%程度がメタンであり、Andrusov 噴出孔では数%の重炭化水素を含む。また、泥中の有機物のビトリナイト反射率を分析した。結果から、炭化水素が上部始新統泥岩の Maikop 層の有機物を起源とする黒海周辺の石油産出地域のものではなく、陸域に堆積した有機物を起源とする、ガス産出地域のものに属していることを示唆した。

Ershov and Levin (2016)<sup>120)</sup> は、Kerch 半島に分布する 20 以上の泥火山のうち、9 つの泥火山から採取した泥水を分析した。それらは低塩分で、塩化物、炭化水素、ナトリウムが豊富で、<sup>18</sup>O 比が高いことが特徴と報告している。

#### (14) イタリア

イタリアには本土とシチリア島を含む全域の複数地域において、集中して泥火山が分布

している。

Martinelli and Judd (2004)<sup>121)</sup> はそのうち 61 の泥火山について位置、規模を整理し、アドリア海の泥ダイアピルについても記載した。これらの分布は、アフリカプレートとユーラシアプレート間のアドリアプレートの活動に伴う圧縮場における厚い堆積層に対応する。泥火山から放出されるガスは主にメタンであり、火山地域において主に二酸化炭素を放出するものとは異なるとしている。

Etiopie et al. (2002)<sup>122)</sup> は、シチリア島の東部、南西部に位置する 5 つの泥火山でガスフラックスを測定した。これらの泥火山は非活動時、1 ヶ所で噴出メタン量は 0.01~6.8 kg/day と見積もられている。

Bonini (2009)<sup>123)</sup> は、噴出記録と地震のデータを元に、地震が引き起こす泥火山活動の関係について論じた。それによると火山の中には地震に伴い噴火や活動の活発化をしているものがあり、それらは観測された水文学的応答とも関連している。しかし大部分の噴出は地震活動とは無関係に起こっており、経験的に想定される適切な距離とマグニチュードで地震が起こってもしばしば泥火山が活発化しない。例えば Montegibbio 泥火山では、噴出と地震頻度の分析により噴出に 70~90 年のサイクルが見られる。これについて、地震が影響する泥火山の活動は、泥火山の内部流体圧力が特定の臨界状態に達していることが条件であると指摘している。

Tassi et al. (2012)<sup>124)</sup> は、イタリアの泥火山のうち北 Apennines 山脈とシチリア島の複数の泥火山から噴出するガスを分析した。最も豊富なメタンは生物起源の炭素同位体の特徴とし、熱流体が影響するエトナ火山のガスとは異なると判断している。

Cuffaro et al. (2019)<sup>125)</sup> はイオニア海の更新統付加体に位置する Bortoluzzi 泥火山 (BMV) について、マルチビーム海底測探、地震反射プロファイルの取得、コア分析を実施した。それによると BMV で採取した塩水のイオン含有量は、蒸発岩型の水と一致する。このことから、BMV 及びその他の泥火山に供給されている流体は、地中海の後期中新統メッシニアン蒸発岩の内部または下位に由来すると推測している。これらの泥火山は活動が停止しているように見えるが、反射プロファイルでは 3000 m 以深から地中の塩水を移動させる内部経路が確認できる。これは付近の活断層帯よりも効率的な移動経路として機能すると推測している。また、泥火山のモニタリングにより活断層の地震サイクルを把握する試みについて、可能性を指摘している。

#### (15) アラスカ州 (アメリカ)

アラスカ州中南部の Copper 川流域には、噴出物の分析により 2 グループに分けられる泥火山が分布する (Motyka et al., 1989<sup>126)</sup>)。それぞれ、メタン、窒素ガスとカルシウムが少ない塩水泥が噴出する Copper 川西側に位置する Tolsona 泥火山群と、二酸化炭素ガスとカルシウムが多い塩水泥を噴出する Copper 川東側に位置する Drum 泥火山群に分けられている。Drum 泥火山群の二酸化炭素ガスは、火山性ものか、マグマの炭酸塩堆積物との接触

変成作用に伴う熱水性のものと推測されている。

Patrick et al. (2017)<sup>127)</sup> は、10～40 °Cの温泥が噴出し、温度衛星観測に適する Drum 泥火山群について、ランドサット 7 号の ETM+画像解析により活泥火山の温度モニタリングを実施した。

#### (16) カリフォルニア州 (アメリカ)

Rudolph and Manga (2010)<sup>128)</sup> は、2010 年 4 月 4 日に発生した El Mayor-Cucupah 地震の前後に Davis-Schrimpf 泥火山のガス測定を実施し、ガスフラックスの増加とその後の地震前の値への回復を確認している。これらのメカニズムについて、想定されていた地震動による気泡の上昇と、ガス浸透率の増加のうち、ガス浸透率の増加の結果であると推定している。

#### (17) コロンビア海盆 (パナマ北)

Reed et al. (1990)<sup>129)</sup> は、パナマ北、カリブ海のコロンビア海盆縁部においてマルチビーム音響測探及び反射法地震探査を実施した。探査の結果、付近の緩やかな衝上断層帯沿いの背斜隆起部に泥火山が集中して分布していることを示した。背斜嶺の間には厚いタービダイトが堆積し、ガスハイドレートと関係する海底模擬反射面 (BSR) が確認された。変形前線に沿った褶曲と、タービダイト堆積物による荷重差、背斜におけるメタンの移動と貯留、ガスハイドレートの形成が本地域の泥火山の発達において重要であるとしている。

#### (18) ベネズエラ

東ベネズエラの Orinoco デルタ北西縁には、カリブプレート南東境界と並行し、北東-南西方向に伸びる Pedernales 背斜軸上に複数の泥火山が分布する。

Aslan et al. (2001)<sup>130)</sup> は、そのうち La Plata 泥火山、El Cedral 泥火山、Pedernales 泥火山、ほか 2 つの泥火山について現地踏査の実施及び既往の研究を整理し、地形の特徴、泥火山の形成とデルタの関係について検討を行った。それによると Orinoco デルタの泥火山群は、標高 15 m 以下の泥山をなす。一部はデルタの河川による砂礫の堆積、波の浸食を受け堤防状を呈するものや、面状を呈している。また、既往の泥火山の文献整理を行った結果、噴出した泥は鮮新～更新統の Las Piedras 層を貫く泥ダイアピルであり、中新統～更新統を由来としている。Orinoco デルタの泥火山は、噴出時に地震の記録が少ない。したがって泥火山の形成において地震は主要な原因ではないとしている。既知の泥火山の多くは、プレート境界又はその沖合に位置している。多くのデルタ地域において、急速な堆積とデルタフロントの前進に伴う圧力により発生する泥ダイアピルはデルタ直上ではなく沖合に位置する。一方、オリノコデルタ上に泥火山が分布している理由は、プレート境界縁辺の背斜による構造的圧縮の影響によるものと考察している。

### (19) トリニダード・トバゴ

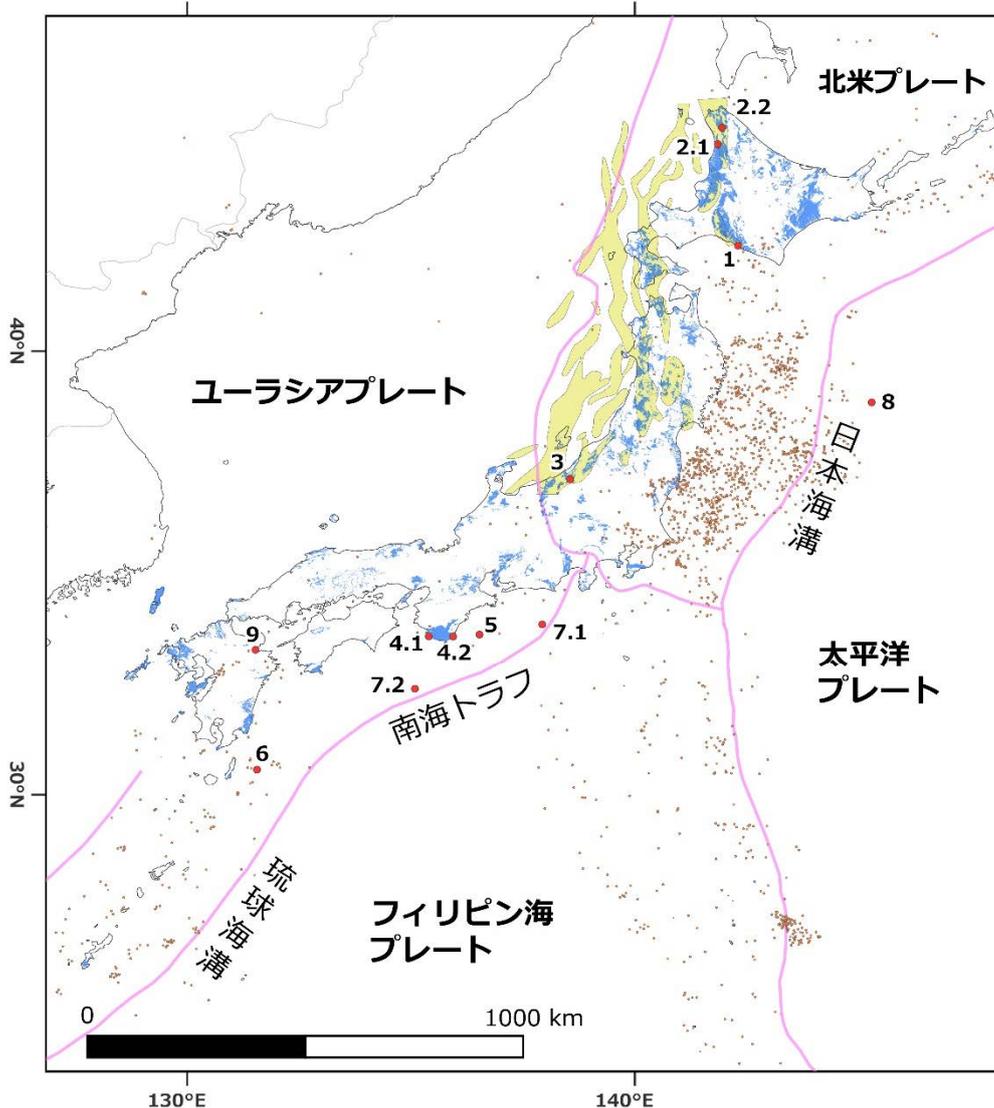
トリニダード・トバゴのトリニダード島及び周辺海域にはガス・石油分布地域と泥火山が点在する。Battani et al. (2010)<sup>131)</sup> は、泥火山の噴出ガスと石油貯留層から得られたガスの組成、炭素同位体比を測定した。その結果、島の泥火山及び石油貯留層からのガスはほとんど熱分解起源のものであると指摘している。

### 3.2.3 まとめ

地震等による水理学的な二次的影響の観点において、国内外の泥火山の事例を整理した。泥火山の分布は岩盤の地質及び構造的な歪を受ける地域と関係が大きく、成因となる異常間隙水圧のメカニズムの検討及び予測手法の高度化を課題として抽出した。

国内又は海外で報告されている泥火山及び泥ダイアピルの主な分布地域を、図 2 及び図 3 に示した。それぞれ、本稿で収集した文献における泥火山の分布地域を赤丸、M=5 以上の地震震源を橙点でプロットしている。また、図 3 では世界の泥火山分布を図示している文献から引用し、複数の泥火山位置をプロットした。これらを見ると、震源の集中する地域外にも泥火山が分布していることがわかる。国内の陸域の泥火山（北海道・新潟・紀伊半島）は、新生代の堆積岩分布地域で確認されている。周辺海域で確認された泥火山は、南海トラフ、琉球海溝、日本海溝等のプレート収束域縁辺に位置している。また、海外の泥火山は主にプレートの収束域の縁辺、あるいは新生代の褶曲帯に位置している。日本も活動中のもの（北海道・新潟）は歪集中帯の分布域に重なっている。活動中の多くの泥火山は地表で明瞭な地形として観察されるため、湧水と比べて存在を確認することは容易である。また地中においても、泥火山下で泥質物質を蓄えている泥チャンバーや泥ダイアピルは物理探査等の手法で分布や形態が調査されている。

泥火山の形成には噴出物を構成する泥質物の供給源が必要である。例えば千木良・田中(1997)<sup>38)</sup> は、北海道新冠地域の泥火山の泥質物の供給源について、主に泥岩を含む中期中新統のフラヌイ層の可能性を指摘した。新潟県松代の泥火山群は、主に塊状黒色泥岩が構成している須川層<sup>すがわ</sup>の分布域に位置している（新谷・田中, 2005<sup>51)</sup>）。海外では、例えばニュージーランドの Brookby 泥火山は白亜紀後期と古第三紀層の粘性岩ブロックを伴うメラングジュ帯に位置する(Pettinga, 2003<sup>104)</sup>）。アゼルバイジャンやクリミア半島に位置する泥火山の泥質物の供給源は泥岩を含む上部始新統の Maikop 層と考えられている(Planke et al., 2003<sup>111)</sup>; Herbin et al., 2008<sup>119)</sup>）。このように、一部の泥火山噴出物は主に泥質岩を含む堆積岩層が噴出物の起源として推定されている。泥質物質の起源となる岩盤は地下に位置するため地表地質図の堆積岩分布と必ずしも一致しないが、国内の陸域における泥火山位置(図 2) はそれらを反映した分布であると考えられる。



- 新第三系中新統の堆積岩 (産総研地質調査総合センター, 2018<sup>132)</sup>)
- 日本海東縁の地質学的歪み集中帯の分布 (大竹ほか, 2002<sup>133)</sup>)
- 泥火山、泥ダイアピル
- 2010~2019年に発生した M = 5 以上の震源位置 (USGS)
- プレート境界 (USGS)

図2 国内及び周辺の泥火山分布

収集した事例に基づき作成。赤丸は文献の主な泥火山及び泥ダイアピルの分布地域。

- 1: 北海道新冠, 2.1: 北海道遠別・幌延 (高橋ほか, 2006<sup>48)</sup>),
- 2.2: 北海道遠別・幌延 (酒井ほか, 2010<sup>49)</sup>, 3: 新潟県松代,
- 4.1: 紀伊半島南部 (中屋・浜田, 2009<sup>60)</sup>,
- 4.2: 紀伊半島南部 (紀州四万十体団体研究グループ, 2011<sup>62)</sup>),
- 5: 熊野海盆, 6: 琉球海溝, 7.1: 南海トラフ (Kobayashi et al., 1992<sup>75)</sup>),
- 7.2: 南海トラフ (芦ほか, 1990<sup>74)</sup>), 8: 日本海溝, 9: 別府湾

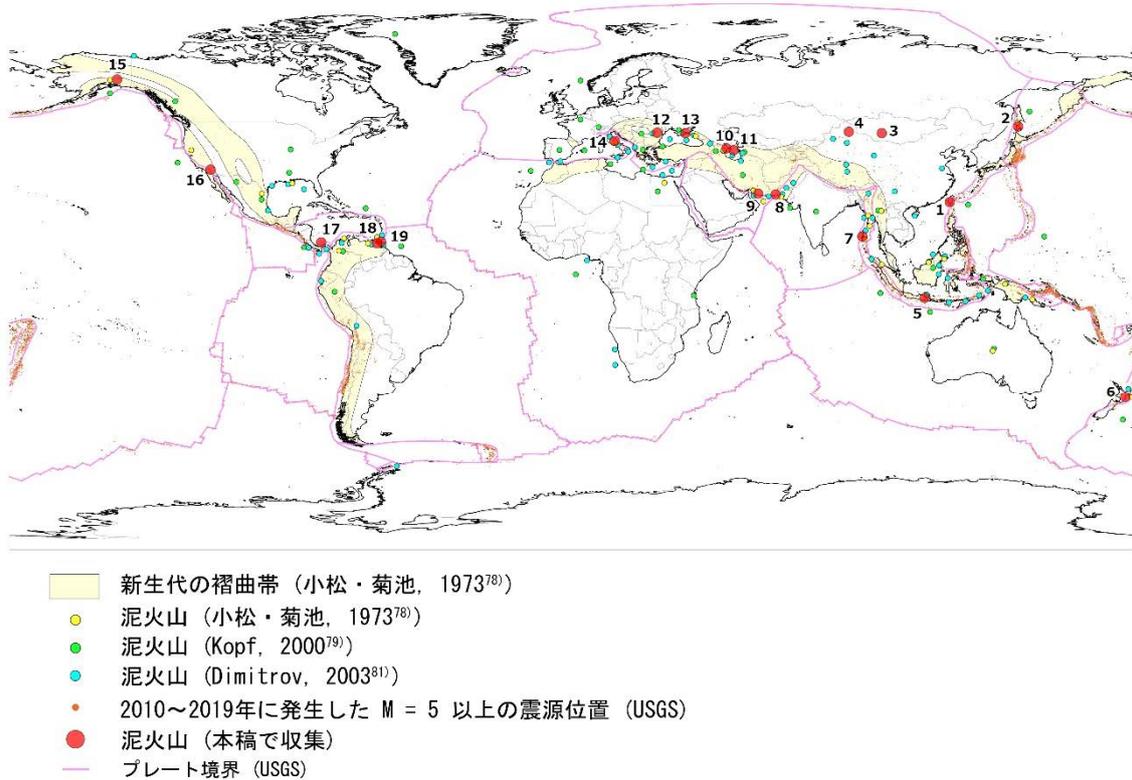


図3 世界の泥火山分布

収集した事例に基づき作成。赤丸は本稿で収集した文献における泥火山の分布。

- 1:台湾及び周辺海域, 2:サハリン (ロシア), 3:モンゴル, 4: Jungger 盆地 (中国),  
 5: Jawa 島 (インドネシア), 6: ニュージーランド, 7: アンダマン諸島 (インド),  
 8: パキスタン, 9: イラン, 10: アゼルバイジャン, 11: カスピ海, 12: ルーマニア,  
 13: クリミア半島, 14: イタリア, 15: アラスカ州 (アメリカ),  
 16: カリフォルニア州 (アメリカ), 17: コロンビア海盆 (パナマ北), 18: ベネズエラ,  
 19: トリニダード・トバゴ

主な泥火山の形成機構については、千木良・田中 (1997)<sup>38)</sup>が指摘している。それによると、泥質物を含む岩盤において間隙水圧が上昇し、静岩圧以上になった場合 (異常間隙水圧)、泥質物が間隙水中に浮いた状態になる。その状態で間隙水圧の開放が起こると泥質物が流動化し、地表へ至った結果噴泥する。その条件として、1) 急激な堆積作用による下位の未固結層の圧縮、2) 衝上断層の発達などによる構造的な圧縮、3) 粘土鉱物の相転移などによる脱水、4) 泥質堆積物中の有機物からのガスの発生を挙げた。

異常間隙水圧の原因として挙げられた 1) 「高堆積速度による未固結層の圧縮」では、例えばデルタ堆積物 (中屋・浜田, 2009<sup>60)</sup>; Aslan et al., 2001<sup>130)</sup>、海域でのタービダイト堆積物の荷重差 (Reed et al., 1990<sup>129)</sup>) のある地域で見られる。2) 「衝上断層の発達などによる構造的な圧縮」では、褶曲による背斜軸周辺 (千木良・田中, 1997<sup>38)</sup>; Yusifov and

Rabinowtiz, 2004<sup>114)</sup>、プレート収束域の圧縮 (Dehghanian et al., 2015<sup>109)</sup>; Martinelli and Judd, 2004<sup>121)</sup>) などがある。これらの地域的な原因と、泥質岩で発生する 3) の「粘土鉱物の脱水」、4) の「泥岩中の有機物によるガスの発生」などの局所的な原因について、一つまたは複数の条件が重なった結果噴泥していると考えられる。一部の泥火山の分布する地域は、石油又はガスが産出する地域と重なっている (高橋ほか, 2006<sup>48)</sup>; Aliyev, 2009<sup>110)</sup>)。

異常間隙水圧の分布域は、主にボーリング孔での現場観測による推定されている。そのほかの手法では、例えば堆積作用による一次圧密に伴う間隙水圧上昇を対象とした室内実験による間隙水圧分布の推定 (谷川ほか, 2003<sup>134)</sup>) などがある。

大規模な地震及び断層活動は、間隙水圧の上昇、あるいは噴出経路の形成に影響し泥火山の噴泥を誘発することがある (田近ほか, 2009<sup>46)</sup>; Rukavickova and Hanzl, 2008<sup>96)</sup>)。一方現在みられる泥火山活動の多くは地震と関係なく継続しており (Bonini, 2009<sup>123)</sup>)、地震等は泥火山の活動を活発化させる誘因の一つとして考えられている (Bonini et al., 2016<sup>84)</sup>)。しかし、国内で地震の影響を受けない地域は存在しないことから、震源分布を元に将来の泥火山分布域を想定することは適切ではない。

日本の泥火山の活動時期と噴火の特徴、規模を表 1 及び表 2 に示す。松代泥火山の活動は 25,000~38,000 年と推定されている (石原・田中, 2009<sup>54)</sup>) ことから、<sup>まつだい</sup>泥チャンバーの形成が万年スケール以内の現象の可能性はある。過去の噴出履歴は、継続的に活動しているものは泥火山堆積物を対象として噴出活動履歴を検討している研究もある。一方小規模な活動では、その後侵食により消失している場合が考えられ、活動の詳細は不明瞭である。

地層処分の観点からは、現在泥火山が分布していない地域においても、噴出物の起源となる堆積岩の岩盤と異常間隙水圧の原因となる地質的条件が重なる地域であれば将来泥火山が形成される可能性が考えられる。堆積岩が分布するひずみ集中帯、プレート収束域周辺において、上記の 1) ~4) を対象とした異常間隙水圧の要因に関するメカニズム及び予測手法の高度化が今後の課題と考えられる。

表 1 国内の泥火山の活動時期と噴出の特徴

泥火山	地質・地質構造	泥チャンバー、ベント（泥脈）の深度、幅	活動時期	水圧、水質	特徴、噴出形態	文献
北海道新冠	中新世泥岩～砂岩、礫岩 NW-SE背斜軸付近	泥チャンバー：不明 泥脈：幅10m前後 背斜軸に沿って9ヶ所 地表の噴出物の範囲の最大は750m×330m	最終間水期（12万年前）～現在まで、間欠的	不明、12万年間異常高圧が継続	岩脈中は、数10cm以下の砂岩・泥岩の角礫（一部モザイク状に分離→水圧破碎の特徴）、鱗片状粘土、未固結粘土からなる。噴出は地震時に泥水とともにメタンガスが噴出。地震時に上昇する高圧地下水の流路は一定。	千木良・田中（1997 <sup>28)</sup> 田近ほか（2009 <sup>40)</sup>
北海道幌延	第三紀泥岩（増幌層） NS背斜軸部	泥チャンバー、泥脈：不明 地表の噴出物の範囲：40m×20m	不明～現在	Cl=7,000ppm pH=7 ORP=-62mV	泥火山生成プロセスは不明、噴泥中のガスの90%はメタン	酒井ほか（2010 <sup>49)</sup>
北海道達志別	—	泥チャンバー、泥脈：不明 地表の噴出物の範囲：9m×9m	—	塩水（組成は不明）	噴出孔のある池からは常時可燃性ガスが噴出	高橋ほか（2006 <sup>48)</sup>
新潟県松代（蒲生地区）	新第三系～第四紀の泥岩～砂泥互層、ENE-WSW方向の背斜、向斜軸	泥チャンバー：深度300～800m、幅400～500m 泥脈：深度300m以下	2万5千年～3万8千年前以降現在まで、間欠的	泥チャンバー：ガス圧1.6MPa Cl：2,000ppm、pH=8～9 深度2,000mで過剰間隙水圧/Δb=5MPa	地下3500mから異常間隙水圧を持つ地下水が上昇、泥チャンバーを形成、一部が上昇、泥脈を通じて地表に噴出。噴出物は2～10mmの垂鉛礫～角礫の泥岩岩片と還元的な環境を示す淡青色粘土	田中・石原（2009 <sup>45)</sup> 鈴木ほか（2009 <sup>45)</sup> 宮川ほか（2016 <sup>60)</sup>

表 2 国内の泥火山事例の活動規模

項目	規模
泥脈幅	10m程度
泥チャンバー深度	300～800m程度
泥チャンバー直径	300～750m程度
噴出範囲	噴出点を中心に数100m
噴出ガス	主にメタンガス

## 4. 地震及び断層活動による力学的な二次的影響

### 4.1 副断層の報告・調査手法の検討事例

高レベル放射性廃棄物の地層処理事業においては、「岩盤の変形が小さいこと」が放射性物質の閉じ込め機能の観点から好ましい地質環境特性の一つとして挙げられている（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG, 2014<sup>1)</sup>）。地下深部では地下水の水圧や緩衝材の変形、断層変位やクリープ変形等の外力がオーバーパックに作用することが考えられる。そのうち、活断層は繰り返し活動することにより処分場自体やオーバーパックの破損を招き、閉じ込め機能の喪失につながる可能性が高い。そのため、地下深部から処分深度を経て地表まで達する断層のずれを生じさせた活断層については、詳細な調査に基づき処分場を活断層から離す、断層近傍に廃棄物を埋設しない等の対策が必要である。既知の活断層は、詳細な調査により分布や活動形式が検討されている。そのなかで、地震を引き起こしたと考えられる主断層（震源断層）の活動に伴い、地下で主断層と連続しない断層（副断層）が離れた位置で確認される場合がある（図 4）。副断層は主断層の活動の影響で二次的に形成された断層と考えられ、小規模で必ずしも断層変位地形を伴わない。平松ほか（2018）<sup>135)</sup> は主断層の詳細な調査前には小規模な副断層の存在が確認されない場合があるとしている。そのため、主断層及び主断層から分岐した断層（分岐断層）と比べて副断層を対象とした研究は少なく、形成範囲や変位量、形成機構が十分に検討されていなかった。

上記の副断層に関する用語は、個々の文献で呼び方が異なることがある。例えば、「副次断層（Nakamura et al., 2010）<sup>136)</sup>」や「二次的な断層（藤田ほか, 2016）<sup>137)</sup>」である。平松ほか（2018）<sup>135)</sup>、株式会社構造計画研究所（2017）<sup>138)</sup> は、エネルギー関連の施設の評価・研究報告における、副断層の用語・定義について整理している（表 3）。これらの定義では、副断層は主断層と連続しない二次的な断層を指し、分岐断層と区別される。一方、副断層の用語について分岐断層を指すか、分岐断層を含めて用いている文献も多い。主な要因は、多くの報告では二次的あるいは副次的に形成される断層について、地下の主断層との連続性を露頭・トレンチ調査や物理探査により直接確認しておらず、分岐断層と副断層の区別がされていないことである。その場合、副断層の「副」は、主断層の「主」に対する意味で、主断層以外の断層を指している。

加藤（2014）<sup>139)</sup> は、地表地震断層を主断層、副断層、二次的断層、測地学的地震断層に区分している。「副断層」は主断層から分岐または並走した小規模な地震断層で、平松ほか（2018）<sup>135)</sup> の分岐断層に相当する。「二次的断層」は地震に伴う変動で破壊され、重力作用による変位をしたもので、平松ほか（2018）<sup>135)</sup> では副断層に相当する。「測地学的地震断層」は地表で明瞭な断層が認められないものの、測量によって地表の変位が確認されるものである。逆断層運動に伴うバックスラストを副断層とする文献もある（杉山ほか, 2001）<sup>140)</sup>。このように、文献により「副断層」が指す断層の種類が異なる。

英語では、副断層を含む二次的に形成された断層に対して主に「secondary fault」が使われている（原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会（2013）<sup>141)</sup>；澤田，2019<sup>142)</sup>など。「副断層」の訳語は統一して定まっていない。例えば、secondary fault 以外で副断層に相当する用語として「subsidiary fault (小出・櫻井, 1996)<sup>143)</sup>」、「distributed fault (高尾ほか, 2013)<sup>144)</sup>」、「Subordinate fault (Nakamura et al., 2010)<sup>136)</sup>」や「bending moment fault (Livio et al, 2019)<sup>145)</sup>」などがある。bending moment fault は成因を含む用語で、断層活動の影響も関係する地層の褶曲による変状である。

本稿では、「副断層」及び一般的に二次的な断層を指す「secondary fault」をキーワードで検索して文献を収集した。4.1.1 項と 4.1.2 項の個別事例では、文献中の「副断層」が分岐断層などの別の断層を指す場合は、種類を記載した。

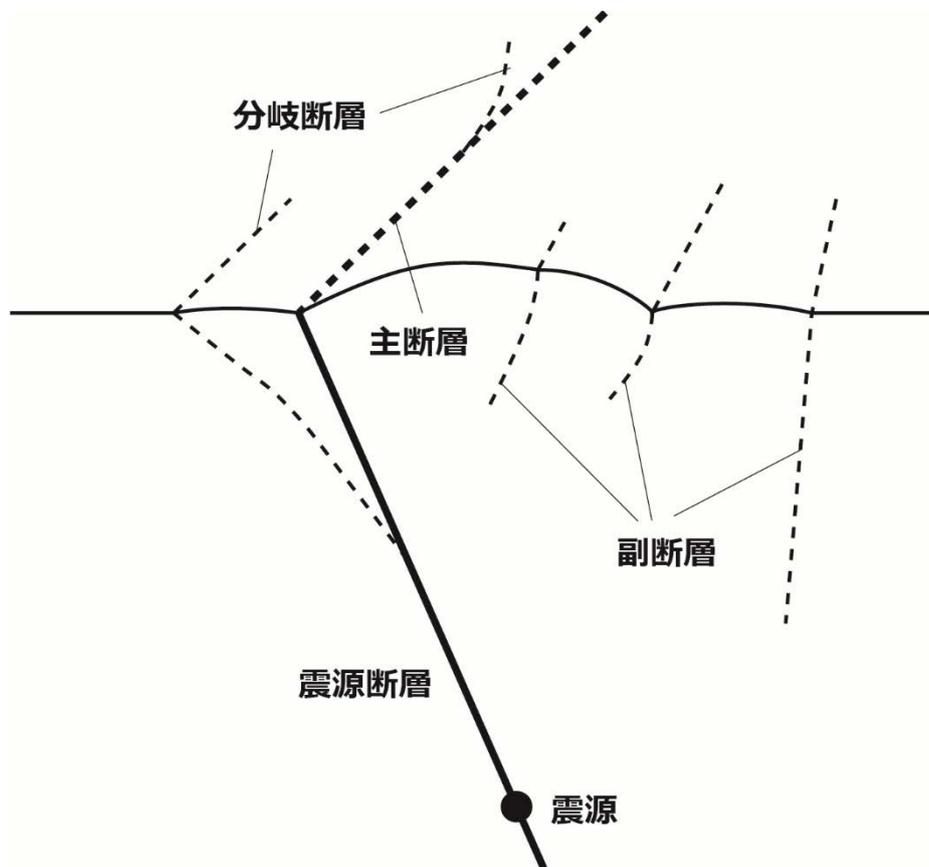


図 4 力学的な二次的影響に係る断層の模式図

表 3 力学的な二次的影響に係る断層用語の定義

用語	定義	
	平松ほか (2018) <sup>135)</sup>	株式会社構造計画研究所 (2017) <sup>138)</sup>
断層	岩石の破壊により生じた不連続面で、その面に沿って相対的変位のあるもの。	—
地表地震断層	地震時に地表に現れた断層	—
震源断層	地震を発生させたと考えられる断層。	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。
主断層	地下の地震発生層内の震源断層の地表延長部、又は密接に関連する断層。	
分岐断層	主断層から分岐して形成された断層で、今後も震源断層の活動により活動する可能性も含む断層。	主断層が活動することにより、その断層面から分岐して形成された断層。
副断層	主断層の近くの地表に出現するが主断層とは直接的な関連を持たない地震断層。	主断層が活動したことを契機として、二次的に、また受動的に地表に形成された断層。主断層の活動に伴い周辺の応力状態が変化し形成されるもの。

#### 4.1.1 国内の事例

##### (1) 国内の副断層に係る報告事例

国内の副断層は、主に大規模な歴史地震の事例を対象として、整理されている。

原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会 (2013)<sup>141)</sup> は原子力発電所の敷地内断層の変位に対する安全評価方針の検討を行った。その中で、1891年濃尾地震から2008年岩手・宮城内陸地震までの  $M = 6.5$  以上の14地震を対象に、文献の報告から主断層、分岐断層、副断層を認定した上で地表変位量を整理している。

エンジニアリング協会地下開発利用研究センター (2018)<sup>146)</sup> は、1974年伊豆半島沖地震から2016年熊本地震までの27地震に関する文献を整理し、副断層の有無と分布、変位量と主断層からの距離を整理した。その結果、副断層の変位量は概ね1 mを超えないと判断している。整理の対象とした個別の文献は、著者により副断層の定義や認定の方法が異なっている。したがって、それぞれの文献で示されている地表地震断層を平松ほか (2018)<sup>135)</sup> の同様の定義に基づき再区分した上で、副断層を認定し変位量を整理している。評価された副断層は変位量の記載はあるが、破碎帯の性状について言及がないことから、多くの副断層は明瞭な破碎帯を伴うものは少ないと考えられる。整理結果のうち1995年兵庫県南部地震の事例では、主断層である野島断層の活動に伴い淡路島北東岸で変位が現れた楠本断層を副断層と評価している。楠本断層は既存の活断層であるが、現れた地表地震断層の向きが地形的に推定される楠本断層の変位の向きと異なる。したがって、これを広域圧縮応力場のもとで、断層面に沿って副断層として動いた二次的な地殻の隆起と推定している。

佐々木ほか (2015)<sup>147)</sup> は、主断層と比較して、分岐断層や副断層は空中写真判読のような従来の判読法では位置の把握が困難であると指摘した。そのため、既知の副断層の出現位置の事例から出現範囲の把握手法を提案した。この手法では、空中写真判読で確認できない規模の副断層把握に必要な組織地形の確認範囲について、平行するものは主断層から2 kmの距離、端部から先にあるものは端部から2.2 kmの範囲と設定している。また、2011年福島県浜通り地震の地表地震断層が発生した範囲を対象に、時期の異なる2 m DEMデータを用いた差分解析を実施した。その結果、空中写真判読結果を概ね同様の結果が得られ、断層判読に対して有効であるとしている。

Niwa et al. (2011)<sup>148)</sup> は、跡津川断層の周辺地域で確認された破碎帯の分布、断層ガウジの幅を調査し、破碎帯の発達過程や性状を検討した。跡津川断層近傍(断層トレースから両側500 mの範囲内)に破碎帯が集中している。個々の破碎帯幅は2 m以下で、断層ガウジの幅は1 m未満である。また、新しい断層活動に伴う破碎帯の発達が古い破碎帯に沿って起こる傾向があることを指摘している。これらは「副断層」として調査されたものではないが、主断層の活動に伴う別の断層への影響や周辺の変状を調査したものである。

##### (2) 国内の副断層に係る調査手法の検討事例

高尾ほか (2013)<sup>144)</sup> は、地表地震断層の変位量が特定の値を超過する頻度を評価する手

法である確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) について、国内の 107 地震のデータを用いて副断層の断層変位評価式を策定している。また、高尾ほか (2014)<sup>149)</sup>、高尾ほか (2016)<sup>150)</sup> で評価式の見直しを行っている。

澤田 (2019)<sup>142)</sup> は、主断層において地震が発生した際に、周辺に分布する副断層の変位を推定するため、数値解析手法を検討し、試解析を行った。

解析対象は、近年発生した 2011 年福島県浜通り地震 (正断層)、2014 年長野県北部地震 (逆断層)、2016 年熊本地震 (横ずれ断層) である。使用した手法はブロック体の個別要素法 (DEM) の解析プログラムを拡張し、上記の実地震に適用したシミュレーションである。このシミュレーションでは既知の副断層を含む断層をモデル化したものを用いている。算出される副断層の変位はモデル化された副断層の値である。これらの解析では、主断層に近い規模の大きなものは数十 cm から 1.5 m の地表ずれ変位が生じ、規模の小さいものや主断層から離れたものについては破壊が生じたもののごく小さい結果としており、一定の再現性があるとした。

#### 4.1.2 海外の事例

各文献で表 3 と副断層の定義が一致しないか、不明確な場合がある。特に文献での標記を示す場合、鉤括弧を用いた。

##### (1) サハリン、Neftegorsk 地震の副断層事例

1995 年 5 月 28 日、サハリン北部で Neftegorsk 地震 ( $M_w = 7.0$ ) が発生した。

嶋本ほか (1996)<sup>151)</sup> は、地震直後に地表地震断層の調査を行い、結果を報告した。地震断層は、ボーリング調査に基づく既知の活断層である Upper Pil'tun 断層と一致し、北北東-南南西方向に約 35 km にわたって出現した。走向は  $N15^\circ E$  であり、北端部では  $N30^\circ E$  に方向を転じていた。主断層は  $5\sim 15^\circ$  程度屈曲した数個のセグメントからなり、地震断層の北端部付近では 4 本の「副断層」が確認されたとしている。「副断層」の変位は 1 m を超えるものもあり、走向は主断層から  $10\sim 20^\circ$  程度 NE 方向に振れている。また、右横ずれ変位を示す主断層とはリーデル剪断面  $R_1$  の関係にあると報告した。上記の「副断層」の位置は図示されておらず、主断層との距離は不明である。

Arefiev et al. (2000)<sup>152)</sup> は、Neftegorsk 地震による断層の分布図で、北端部に主断層付近で概ね  $R_1$  方向に延びる 4 本の断層トレースを図示している。東側に分布する 2 本は主断層と分岐し、西側に分布する 2 本は主断層から離れている。これらは嶋本ほか (1996)<sup>151)</sup> の指す副断層と判断され、後者の 2 本は主断層と連続しない可能性がある。

堤ほか (2000)<sup>153)</sup> は Upper Pil'tun 断層の空中写真判読を行い、判読結果から断層を南へ延長している。断層の地表トレース図では北端部の途中で一本の分岐 (長さ 4 km 程度) と主断層と並走する断層 (長さ 8 km 程度) が図示されている。これらの断層は本文で言及はない。

## (2) トルコの副断層事例

トルコ北部に分布するアナトリア断層で 1999 年 8 月 17 日に Izmit 地震 ( $M_w = 7.4$ )、同年 11 月 22 日に Duzce 地震 ( $M_w = 7.1$ ) が発生した。

栗田ほか (2001)<sup>154)</sup> は、Izmit 地震で現れた地表地震断層について、現地調査及び空中写真の解析により分布を詳細に追跡するとともに、変位量を一定間隔毎に正確かつ精密に計測した。それらの主な走向は東西であり、右ずれで約 1~5 m 程度の変位を伴うとしている。主要な地表地震断層のセグメント (東から、Golcuk・Tepetalra・Arifye・Karadere 及び Aksu セグメント) の周辺では、「副次的な地震断層」として長さ数 km 以下で、変位量数 10cm 以下の小規模な地表地震断層が孤立して現れた。その一つとして、Aksu セグメントの北北東約 10 km に長さ 1.5 km、右ずれ南東落ちの、変位量 20 cm の地表地震断層が確認されている。これらの「副次的な地震断層」は主要な地表地震断層と並列して離れた位置に出現していることから、副断層と考えられる。

## (3) フィリピンの副断層事例

1990 年 7 月 16 日にフィリピンの Luzon 島中部で地震 ( $M_w = 7.7$ ) が発生した。

中田・堤 (1990)<sup>155)</sup> は、この地震で形成された長さ約 120 km の地震断層の分布と変位量の調査を実施した。それによると、既知のフィリピン断層のうち、最北部の Luzon 島に分布する一部である Digdig 断層に沿って発生したものであり、最大変位量は 6 m に達する。地表地震断層は新鮮な割れ目として追跡され、道路、水路、畦、フェンス等に変位を与えている。主な走向は北西-南東走向、変位様式は左横ずれが卓越し、上下変位は既存の活断層センスと一致している。

断層の変位量から地震断層は 5 つのセグメントに分けられている。セグメントの一つ、Rizal 周辺の南東端では地震断層が分岐し発生した「副断層」が緩やかに屈曲しながら北へ伸びるとしている。「副断層」は長さ 2 km 程度で、Rizal の市街地中で主断層から 500 m 程度離れて並走する。Rizal 周辺では主断層が東上がり、「副断層」が西上りの変位を受けており、挟まれた区間が地塁状に隆起する。この「副断層」の成因は検討されていない。本事例の「副断層」は、主断層との分岐の記載があることから、分岐断層の可能性がある。

## (4) 台湾の副断層事例

1999 年 9 月 21 日に、台湾中部の車籠埔 (Chelungpu) 断層による集集 (Chi-Chi) 地震 ( $M_w = 7.6$ ) が起こり、長さ約 100 km の地震断層が出現した。

杉山ほか (2001)<sup>140)</sup> は、車籠埔断層の活動性調査を目的として変位を受けた河成段丘の変位量計測、トレンチ調査を実施した。その中で、車籠埔断層の東側約 2 km で並走する「副断層」が確認されている。副断層はバックスラストとしており、段丘のⅢ面では 25 m、Ⅳ面では 6~8 m 程度の変位があると見積もられている。集集地震における副断層の変位量は 1.0~1.5 m 程度である。太田 (2000)<sup>156)</sup> によると、主断層、副断層両方の変位量の割合が、

地表地震断層でも新旧の段丘を切っている部分でもほぼ同様としている。このことから、「副断層」が常に主断層と連動して活動していると指摘した。

#### (5) 中国の副断層事例

Li et al. (2018)<sup>157)</sup> は、中国北西部の Kunlun 地域と Tian Shan 地域の 4 地点において、褶断層褶曲の形態と **bending moment normal fault (BMnF)** の分布の関係を調査した。BMnF は褶曲により地表面に形成される変状で副断層に相当し、主に鮮新統～更新統の礫層上に分布している。調査地点の一つである Slik 地点は BMnF の分布する範囲が最も広く、幅が 4～7 km である。調査の結果、断層に対して変状が分布する幅と間隔は、褶曲する層の厚さ、翼間角と形状に依存すると指摘している。

#### (6) その他の海外の事例

Boncio et al. (2018)<sup>158)</sup> は、確率論的断層変位ハザード解析の世界で発生した 11 の衝上断層 ( $5.4 \leq M_w \leq 7.9$ ) で主断層周辺に発生した地表の変状の距離を整理した。地表の亀裂のうち、離れた場所で振動によりずれた変位を指す **Symathetic fault ruptures (Sy)** の主断層からの最大距離は上盤側で 3,100 m、下盤側で 2,150 m である。**bending moment faults (B-M)** は、上盤側に分布し最大距離は 1,600 m 程度としている。これらを含む断層の影響するゾーン (**Width of the rupture zone (WRZ)**) には、地震のマグニチュードと正の相関が見られること、主断層の垂直変位と WRZ には明確な相関が見られないと指摘している。

#### (7) 海外の副断層に係る調査手法の検討事例

株式会社構造計画研究所 (2017)<sup>138)</sup> は、1999 年の台湾集集地震の主断層である車籠埔断層と、その西側に確認された断層崖を含む領域で FEM 解析を試み、断層崖のきっかけとなるような一部の破壊状況を再現している。

Livio et al. (2019)<sup>145)</sup> は、**bending moment faults (BMF)** について、徐々に曲がる背斜の外弧に沿って発達する BMF の形成過程を検討した。砂箱による実験と、その結果を反映した 3D モデルを用いた検討により、BMF の形成過程を再現している。

### 4.1.3 まとめ

地震等による力学的な二次的影響では「副断層」を挙げた。地震を発生させた主断層の研究と比べて副断層を対象とした研究は乏しく、事例の蓄積が必要である。

#### 1) 副断層の特徴と識別

副断層は、平松ほか (2018)<sup>135)</sup> によれば、主断層の近くの地表に出現するが主断層とは直接的な関連を持たない地震断層である。多くの文献では、主断層の調査結果に比べ副断層

に関する記載は乏しい。変位量と計測位置は概ね記載があるものの、副断層の長さ、主断層との関係、破砕部の記載は乏しく、性状は不明瞭である。

株式会社構造計画研究所 (2017)<sup>138)</sup> は、副断層の特徴について、いわゆる根無しの構造であり、直接震源断層の特徴を示さないと指摘している。また、主断層と変位が不連続であり主断層から数mから数kmの範囲で発生すること、主断層の変位が地表まで達しないことによる表層の歪みの結果であることを挙げた。原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会 (2013)<sup>141)</sup> は、副断層について地震時に変位が認められたが、変動地形に対応していない断層としている。副断層の記載の情報は少なく、ノンテクトニックな要因の変位を含む可能性があるとしている。Li et al. (2018)<sup>157)</sup>、Boncio et al. (2018)<sup>158)</sup> など扱われている **bending moment faults** は、地震等による褶曲の背斜上に形成された二次的な変形である。断層活動に伴い形成されたものは、副断層に相当すると考えられる。

確率論的断層変位ハザード解析などの解析事例 (高尾ほか, 2013)<sup>144)</sup> では、解析モデルの作成にあたり想定する断層が主断層と連続するかは重要であり、副断層は分岐断層と区別して用いられる。一方、実際の調査に基づき副断層と報告されている変位の多くは、詳細な調査はなされず主断層との地下における連続性を露頭やトレンチ調査で直接確認されていない。したがって、副断層との記載があっても、実際は分岐断層である可能性がある。株式会社構造計画研究所 (2017)<sup>138)</sup> は、確率論的断層変位ハザード解析に用いる断層のモデル化にあたり、副断層の概念として、①変位の分布が断続的で短い、②表層におけるストレス変化により生じる変位、③プロセスゾーンよりもさらに離れた部分の3つを挙げ、副断層を主断層と区別している。

## 2) 副断層の分布範囲と変位量

本稿で収集した副断層の事例は、いずれもマグニチュードが 6.5 以上の地震に伴うものである。表 4 に収集した文献中にデータが記載されている副断層を整理した。主断層から最も遠い事例では、1891 年の濃尾地震 ( $M = 8.0$ ) において報告された副断層の一部が主断層から約 28 km 離れた位置で確認されている。藤田ほか (2016)<sup>137)</sup> が分析した人工衛星による干渉 SAR 解析を用いた 2016 年熊本地震 ( $M = 7.3$ ) の観測結果では、主断層から最大 20 km 程度離れた場所で断層に伴う変位を検出している。1927 年北丹後地震 ( $M = 7.3$ ) では、

表 4 副断層の一覧表 (1/2)

地震	マグニチュード(M) [Mw]	主断層の長さ (km)	タイプ	主断層 最大変位量 (m)	副断層の長さ(km) [ ]は図から読み取り	主断層との最大距離 (km) [ ]は図から読み取り	副断層の 変位量 (cm) [ ] は不確実と表記しているもの 数10 cm	引用
2016年熊本地震(布田川-日奈久断層帯) ※干渉SAR解析	7.3	28(布田川断層帯) 6(日奈久断層帯)	右横	-	[6.7]	1.5	-	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
2014年長野県北部地震(神城断層)	6.7	9	逆	0.9	0.3	0.2	2	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
					0.3	0.2	22	
					0.3	0.2	8	
					0.3	0.2	8	
					0.3	0.2	32	
					0.3	0.2	22	
					0.3	0.2	10	
					0.87	0.51	42	
					0.87	0.51	72	
					0.87	0.51	82	
					0.87	0.51	42	
					0.87	0.51	10	
					0.87	0.51	27	
					0.87	0.51	43	
0.51	1.13	45						
0.51	1.13	47						
2011年福島県浜通り地震(湯ノ岳断層)	7.0	15	正	0.8	[0.3]	0.1	45	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
					[0.35]	0.25	20	
2009年岩手-宮城内陸地震	7.2	20	逆	3.5	[0.2]	4	30	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
2004年新潟県中越地震	6.8	-	逆	-	-	-	20	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
2000年鳥取県西部地震	7.3	20	横	0.4	-	0.7	12	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	1	15	
					-	0.9	16	
1995年兵庫県南部地震(野島断層)	7.3	10.5	横	2.1	-	0.05	20	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	0.1	10	
					-	0.1	20	
					-	0.25	30	
					-	0.62	12	
					-	0.16	10	
					-	4.4	15	
					-	4.4	20	
					-	4.4	20	
					-	0.01	15	
					-	0.03	33	
					-	0.1	8	
					-	0.02	70	
					-	0.08	25	
					-	0.4	9	
					-	0.08	11	
					-	0.02	10	
					-	0.04	30	
					-	4.5	5	
					-	4.5	8	
					-	4.5	15	
					-	4.5	15	
					-	4.5	20	
					-	4.5	12	
					-	4.5	15	
					-	4.5	25	
					-	4.5	18	
					-	4.5	11	
-	4.5	20						
-	4.5	13						
-	4.5	11						
-	4.5	11						
-	4.5	14						
-	4.5	14						
-	4.5	10						
1978年伊豆大島近海地震(稲取断層帯)	7.0	23	右横	1.2	-	0.05	20	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	0.08	15	
					-	0.06	[5]	
					[0.1]	1	10	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
1974年伊豆半島沖地震(石廊崎断層)	6.9	20	横	0.5	0.1	[5]	2	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
					-	0.005	1	
					-	0.1	10	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	0.02	5	
					-	0.9	1	
					-	2.6	2	
1945年三河地震(深溝断層, 横須賀断層)	6.8	28	横・逆	2.6	-	0.6	5	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	1	[30]	
					-	0.8	30	
					-	0.6	[50]	
					0.07	0.86	30	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
					0.07	0.86	30	
					0.07	0.86	30	
					0.07	0.43	20	
					0.23	0.43	80	
					0.23	0.43	80	
					0.23	0.43	90	
					0.23	0.43	80	
					0.23	0.43	100	
					0.07	0.43	30	
1943年鳥取地震(鹿野断層, 吉岡断層)	7.2	33	横	1.5	-	[70]	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>	
					-	0.125	20	
					-	0.16	25	
					-	0.05	30	
					-	0.2	50	
					-	0.1	70	

文献中に記載がない項目は(-)で示した。

表 4 副断層の一覧表 (2/2)

地震	マグニチュード(M) [Mw]	主断層の長さ (km)	タイプ	主断層 最大変位量 (m)	副断層の長さ(km) []は図から読み取り	主断層との最大距離 (km) []は図から読み取り	副断層の 変位量(cm) []は不確実と表記しているもの	引用
1930年北伊豆地震(丹那断層)	7.3	7	横	3.0	-	0.4	[60]	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	0.6	[50]	
					-	0.2	26	
					-	0.6	30	
					-	0.8	20	
					-	1.2	10	
					-	0.6	30	
					-	1.5	25	
					-	1.2	[30]	
					-	0.6	17	
					-	0.36	20	
					-	0.36	90	
					-	0.36	60	
					-	0.54	54	
					-	0.45	75	
					-	0.09	60	
					-	0.05	24	
					-	0.05	117	
					-	1.56	20	
					-	1.16	14	
					-	0.8	36	
					-	0.8	15	
					-	0.67	18	
					-	0.67	25	
					-	0.67	25	
					-	0.67	18	
					-	0.67	40	
					-	0.06	30	
					-	0.07	15	
					-	0.31	20	
					-	0.71	30	
					-	0.71	75	
					-	0.71	30	
					-	1.79	5	
					-	0.58	45	
					-	2.24	20	
					-	1.61	5	
					-	2.5	33	
					-	3.93	28	
					-	6.43	100	
					-	6.43	20	
-	8.93	33						
-	8.93	30						
-	8.93	30						
-	6.52	20						
-	3.21	21						
-	0.54	25						
-	0.54	20						
-	0.71	15						
-	0.36	60						
-	0.36	10						
-	0.36	120						
-	0.54	67						
-	0.49	30						
-	0.27	40						
-	0.54	10						
-	0.54	10						
-	1.07	35						
-	0.18	5						
-	1.16	50						
-	6.7	110						
-	0.63	17						
-	0.63	30						
-	3.75	100						
-	3.75	30						
-	3.75	45						
-	3.04	60						
1927年北丹後地震(郷村断層帯)	7.3	18	横	3.7	-	1.6	19	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	0.13	12	
					-	2.8	30	
					-	0.21	64	
					-	0.21	30	
1896年陸羽地震(樽手盆地東縁断層帯)	7.2	-	逆	3.6	-	-	[1.5]	原子力安全推進協会(2013) <sup>[41]</sup>
					-	-	45	
					-	0.5	15	
					-	-	-	
					-	-	1.3	
1891年濃尾地震(濃尾断層帯)	8.0	-	横	8.0	0.05	8	45	エンジニアリング協会(2018) <sup>[46]</sup>
					-	28	15	
					-	-	-	
1995年サハリン・Neftegorsk地震 ※主断層の西側の断層トレース ※主断層の西側の断層トレース	[7.0]	35	右横	8.1	-	-	1.3	橋本ほか(1996) <sup>[51]</sup> Arefiev et al.(2000) <sup>[52]</sup>
					[1.2]	[1.7]	-	
					[0.7]	[0.7]	-	
1999年トルコ・Izmit地震 ※Aksuセグメント付近 ※Hendek市付近 ※Sapanca付近 ※Hersekセグメント南方	[7.4]	140	右横	5.0	-	-	-	栗田ほか(2001) <sup>[54]</sup>
					1.5	10	20	
					4	10	30	
					[3]	[3.5]	60	
					-	50	20	
1990年フィリピン・Luzon島の地震	[7.7]	120	左横	6.0	[1.5]	0.6	1.7	中田・塚(1990) <sup>[55]</sup>
1999年台湾・集集地震(車籠埔断層)	[7.6]	100	逆	10.0	2	[2.5]	150	杉山ほか(2001) <sup>[40]</sup>

文献中に記載がない項目は(-)で示した。

主断層との距離が最大 1.6 km である。このように、同程度の規模の地震でも副断層の主断層からの出現距離は大きく異なる。図 5 は副断層の変位量と主断層との距離の関係である。多くの副断層は主断層から 10 km 以内の範囲に位置し、2 km 以内に集中している。

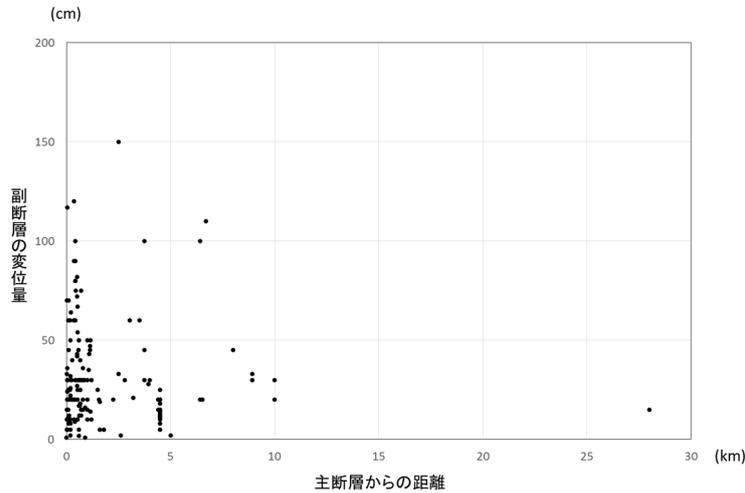


図 5 副断層の変位量と主断層からの距離の関係

図 6 にマグニチュード (M) と副断層の距離との関係を示した。概ね M が大きくなると主断層からの最大距離は大きくなる傾向がある。一方同じ規模の地震でも個々の副断層の主断層からの距離にはばらつきがある。特定の活断層の活動に対して副断層の具体的な形成位置を推定することは難しく、それらを対象とした研究はみられなかった。

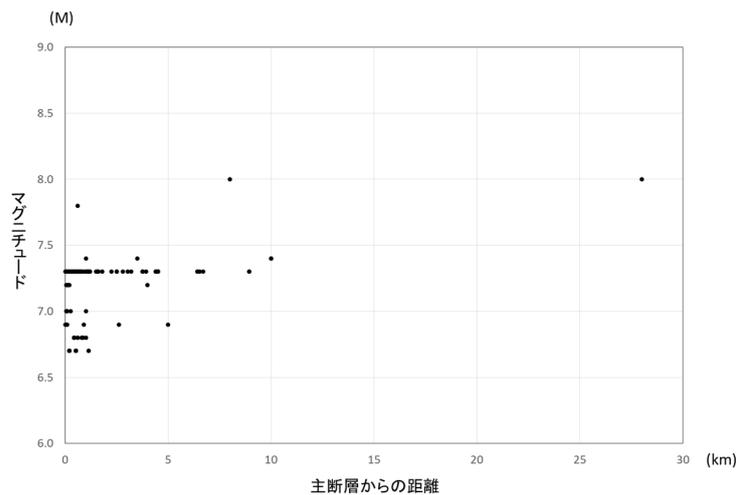


図 6 マグニチュードと副断層の主断層からの距離の関係

副断層の長さや変位量は主断層と比べて小さい。表 4 の副断層の変位量は最大 150 cm であり、多くは 100 cm 以下である。エンジニアリング協会地下開発利用研究センター (2018)<sup>146)</sup> は文献調査の結果、副断層の変位量を概ね 1 m 以下とした。副断層は変位量が小さいため空中写真で有無を確認できない場合があり、主断層の調査に伴う現地調査範囲外にも小規模な未確認の副断層が存在する可能性がある。干渉 SAR 解析を用いた高精度の地形変動の観測手法 (藤田ほか, 2016)<sup>137)</sup> は、広範囲に分布する副断層を含む微小な変状の把握に有効であると考えられる。副断層の深度方向の長さは情報が乏しく、処分場の深度に達するかは不明瞭である。副断層が処分システムに影響する可能性の評価のためには、副断層の深度に関する情報の蓄積が必要である。

副断層の解析は、高尾ほか (2013)<sup>144)</sup> の確率論的断層変位ハザード解析、澤田 (2019)<sup>142)</sup> などの事例があり、これらは主断層・副断層をモデル化して解析し、変位量を検討している。副断層の形成機構について検討事例は少なく、主断層のバックスラストと推定している事例 (杉山ほか, 2001)<sup>140)</sup> や、**bending moment fault** について褶曲と副断層の形成との関係を検討 (Livio et al., 2019)<sup>145)</sup> している事例があるものの、多くの副断層は形成機構が明らかにされておらず、出現範囲を予測する技術は不十分である。

エンジニアリング協会地下開発利用研究センター (2018)<sup>146)</sup> は、副断層の出現を事前に想定できない場合が多いとして、重要構造物の安全性を議論する上で副断層が出現した場合の工学的な対応を検討する意義を強調している。今後は干渉 SAR 解析等を用いた詳細な副断層の分布把握と、形成機構の検討事例の蓄積が課題であると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、地震及び断層活動による二次的影響について、力学的・水理学的な影響のうち「地震等の影響で活発化した湧水」、「泥火山」、「副断層」を対象として、基礎情報の拡充を目的として文献を収集し事例を整理した。収集した文献は 142 件で、一覧を文献リストに示した。

その結果、それぞれの二次的影響の研究事例を概観し、地層処分の観点で今後評価技術の高度化に必要な課題を抽出した。地震等の影響による湧水については、湧出機構、影響範囲、活動履歴に関する事例の蓄積を課題として示した。泥火山については、形成の要因となる異常間隙水圧のメカニズムの検討及び予測手法の高度化を課題として示した。副断層については、詳細な分布の把握と形成機構の検討の蓄積が課題であると示した。

一方、地震及び断層活動による二次的影響は本稿で収集した地質現象に限られない。さらなる評価技術の高度化のためには、本稿で収集した項目以外の二次的影響においても事例を整理することが必要である。

## 謝辞

本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。日本原子力研究開発機構の川村淳氏には取りまとめにご助力いただいた。ここに記して御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG: 最新の化学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—, 61p., 2014.
- 2) 地層処分研究開発調整会議: 地層処分研究開発に関する全体計画 (平成 30 年度～平成 34 年度), 44p., 2018.
- 3) エンジニアリング協会地下開発利用研究センター: 平成 28 年度 エネルギー関連施設に関する活断層の工学的研究会 報告書, エンジニアリング協会, 208p., 2017.
- 4) 緒方正彦・本荘静光: 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, vol.22, no.1, pp.67-87, 1981.
- 5) 稲垣秀輝: 活断層からの距離とマスムーブメントの規模との関係, 応用地質, vol.56, no.1, pp.15-20, 2015.
- 6) Wang, C.Y., Manga, M.: Earthquakes and Water, Lecture Notes in Earth Sciences 114, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 225p., 2009.
- 7) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 1 わが国の地質環境—, JNC TN1400 99-021, 559p., 1999.
- 8) 佐藤努: 地震に伴って発生し四年以上も継続する温泉湧出, IEVG ニュースレター, vol.2, no.3, pp.1-4, 2015.
- 9) 環境省水・大気環境局土壌環境課地下水・地盤環境室: 湧水保全・復活ガイドライン, 125p., 2010.
- 10) 岸本良次郎: 松代地震により発生した地すべりと湧水, 地すべり, vol.6, no.2, pp.1-9, 1969.
- 11) 鶴見実: 松代湧水の化学的特徴, 地球化学, vol.13, no.1, pp.18-23, 1979.
- 12) 奥澤保・塚原弘昭: 松代群発地震に湧出する深層地下水, 地震 第 2 輯, vol.53, no.3, pp.241-253, 2001.
- 13) 吉田則夫・奥澤保・塚原弘昭: 同位体比から見た松代群発地震地域の深部流体の起源, 地震 第 2 輯, vol.55, no.2, pp.207-216, 2002.
- 14) 遠田晋次・田中和広・千木良雅弘・宮川公雄・長谷川琢磨: 1995 年兵庫県南部地震に伴うコサイスマミックな地下水挙動, 地震 第 2 輯, vol.48, no.4, pp.547-553, 1996.
- 15) 高村弘毅・河野忠: 淡路島における兵庫県南部地震後の湧水・地下水の挙動, 地下水学会誌, vol.38, no.4, pp.331-338, 1996.
- 16) 佐藤努・高橋誠: 淡路島の異常湧水の化学組成変化—1995 年兵庫県南部地震による影響—, 地球化学, vol.31, no.2, pp.89-98, 1997.
- 17) 佐藤努・酒井隆太郎・大澤英昭・古屋和夫・児玉敏雄: 淡路島で地震後異常に湧出した

- 地下水の酸素・水素同位体比, 日本水文科学会誌, vol.29, no.1, pp.13-24, 1999.
- 18) 田中和広・馬原保典・中田英二・長谷川琢磨・宮川公雄・遠田晋次・千木良雅弘: 兵庫県南部地震の地下水挙動, 電力中央研究所報告, U99066, 21p., 2000.
  - 19) 佐藤比呂志・加藤直子・阿部進: 2008年岩手・宮城内陸地震の地質学的背景, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/TOPICS\\_OLD/Iwate2008/geol/](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/TOPICS_OLD/Iwate2008/geol/), (参照: 2020年3月4日).
  - 20) 村岡洋文・井岡聖一郎・鈴木陽大: 2008年岩手・宮城内陸地震の余震起源と推定される鬼首カルデラ東部内縁における沸騰噴泉の発見, 日本地熱学会誌, vol.40, no.3, pp.175-191, 2018.
  - 21) Togo, Y.S., Kazahaya, K., Tosaki, Y., Morikawa, N., Matsuzaki, H., Takahashi, M., Sato, T.: Groundwater, possibly originated from subducted sediments, in Joban and Hamadori areas, southern Tohoku, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.66, Article number.131, 12p., 2014.
  - 22) 一柳錦平・安藤昭太郎: 熊本地震による河川水位の変化, 日本水文科学会誌, vol.47, no.1, pp.11-15, 2017.
  - 23) 柴田智郎・高橋直人・佐野有司: 2016年熊本地震に伴う別府温泉水中のヘリウム同位体比の変化, 2017年度日本地球化学会第64回年会講演要旨集, 1B12, p.33, 2017.
  - 24) 環境省九州環境事務所: (別添2) 湧水・温泉影響把握調査 結果概要, 環境省九州地方環境事務所報道発表資料 (2016年07月28日), 11p., 2016.
  - 25) 細野高啓・山田千聡・橋本美穂: 熊本地震による地下水環境変化, 日本水文科学会誌, vol.47, no.2, pp.127-130, 2017.
  - 26) Parvin, M., Tadakuma, N., Asaue, H., Koike, K.: Delineation and interpretation of spatial coseismic response of groundwater levels in shallow and deep parts of an alluvial plain to different earthquakes: A case study of the Kumamoto City area, southwest Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.83, pp.35-47, 2014.
  - 27) Cox, S.C., Rutter, H.K., Sims, A., Manga, M., Weir, J.J., Ezzy, T., White, P.A., Horton, T.W., Scott, D.: Hydrological effects of the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, 4 September 2010, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol.55, no.3, pp.231-247, 2012.
  - 28) Brownie, C.S., Green, M., Bell, D.: Earthquake-Induced Ground Fissuring and Spring Formation in Foot-Slope Positions and Valley Floor of the Hillsborough Valley, Christchurch, New Zealand, 6<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper Number.548, 2015.
  - 29) Wang, C.Y., Manga, M., Dreger, D., Wong, A.: Streamflow increase due to rupturing of hydrothermal reservoirs: Evidence from the 2003 San Simeon, California, Earthquake, *Geophysical Research Letters*, vol.31, no.10, 2004.
  - 30) Wang, C.Y., Manga, M.: New streams and springs after the 2014 Mw 6.0 South Napa

- earthquake, *Nature communications*, 6:7597, doi: 10.1038/ncomms8597, 2015.
- 31) Grasby, S.E., Ferguson, G., Bartier, P., Neville, L.: Seismic induced flow disruption of Gandll K'in Gwaay.yaay thermal springs, Gwaii Haanas National Park Reserve, Canada, *Applied Geochemistry*, vol.103, pp.118-130, 2019.
  - 32) Inan, S., Balderer, W.P., Leuenberger-West, F., Yakan, H., Ozvan, A., Freund, F.T.: Springwater chemical anomalies prior to the Mw = 7.2 Van Earthquake (Turkey), *Geochemical Journal*, vol.46, no.1, pp.e11-e16, 2012.
  - 33) Checcucci, R., Mastrorillo, L., Valigi, D.: Acque sotterranee e terremoti: alcune considerazioni sugli effetti della sismicità sulla disponibilità della risorsa idrica in Valnerina, *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, vol.5, no.1, pp.75-77, 2017.
  - 34) 西山成哲・田中和広・鈴木浩一: 電磁探査および地質・地下水探査による深部流体の移動経路の可視化—山口県東部徳佐盆地によける適用—, *応用地質*, vol.57, no.3, pp.102-112, 2016.
  - 35) 村山秀幸・岩田広己・奥田勉・望月齋也・岡村浩孝: 多量湧水を賦存する活断層周辺の地下水対策と水理特性について, *トンネル工学研究論文・報告集*, vol.10, pp.203-208, 2000.
  - 36) 高井静霞・武田聖司・酒井隆太郎・島田太郎・宗像雅弘・田中忠夫: 派生断層の成長による地層処分システム周辺の地下水流動への影響評価, *日本原子力学会和文論文誌*, vol.16, no.1, pp.34-48, 2017.
  - 37) 金折裕司: 断層の影響はどこまで及んでいるか, *応用地質*, vol.41, no.6, pp.323-332, 2001.
  - 38) 千木良雅弘・田中和広: 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, *地質学雑誌*, vol.103, no.8, pp.781-791, 1997.
  - 39) 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター: 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, *地質調査総合センター研究資料集*, no.459, 191p., 2007.
  - 40) OECD/NEA: Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste An International Database, 92p., 2000.
  - 41) 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア: 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—, *地質調査総合センター研究資料集*, no.560, 112p., 2012.
  - 42) 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術 WG: 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果 (地層処分技術 WG とりまとめ), 89p., 2017.
  - 43) 高橋正明・大丸純・風早康平・塚本斉: 日本及び周辺地域の泥火山データベース (第 2

- 版), 地質調査総合センター研究資料集, no.651, 2p., 2018.
- 44) 田中和広・宮田雄一郎・徳永朋祥・森田澄人・笠原順三: 特集号「泥火山—その実体と応用地球科学的意義—」—はしがき—, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.335-339, 2009.
- 45) 田中和広: 泥火山および泥火山の生成に係る地質・地下水現象の応用地球科学的意義, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.578-586, 2009.
- 46) 田近淳・中迎誠・石丸聡・原口強・中田賢・志村一夫: 2003年十勝沖地震に伴う新冠泥火山の変動の記録, 北海道立地質研究所報告, vol.80, pp.147-156, 2009.
- 47) 倉田重紀・田中和広・新川剛生: 北海道新冠泥火山の噴出物の地質学的研究, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.155-156, 2013.
- 48) 高橋正明・森川徳敏・戸丸仁・高橋浩・大和田道子・竹野直人・風早康平: 遠別旭温泉・歌越別泥火山について, 地質ニュース, no.627, pp.48-53, 2006.
- 49) 酒井利彰・井岡聖一郎・石岡洋二・伊藤成輝: 北海道北部幌延町で見いだされた泥火山, 地質ニュース, no.676, pp.63-67, 2010.
- 50) 宮川和也・宮良信勝・柴田健二・徳安佳代子・清水麻由子: 上幌延泥火山における電気探査とボーリング調査—泥火山噴出物の ESR 年代測定に向けて—, 2016年度日本地球化学会第63回年会講演要旨集, 1P05, p.56, 2016.
- 51) 新谷俊一・田中和広: 新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質, 自然災害科学, vol.24, no.1, pp.49-58, 2005.
- 52) 横田俊之・尾西恭亮・真田佳典: 地中レーダによる新潟県十日町市松代における泥火山の浅部構造調査, 地質ニュース, no.644, pp.25-32, 2008.
- 53) 新谷俊一・田中和広: 新潟県十日町市における泥火山噴出物の起源, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.340-349, 2009.
- 54) 石原朋和・田中和広: 泥火山周辺の地質構造と地下水の地科学特性—新潟県十日町市蒲生における検討—, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.350-372, 2009.
- 55) 鈴木浩一・徳安真吾・田中和広: 電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の深部地下構造, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.373-389, 2009.
- 56) 尾西恭亮・真田佳典・横田俊之・徳永朋祥・茂木勝郎・Safani, J., O'neill, A.: 表面波探査による松代室野地区の泥火山の浅部 S 波速度構造調査, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.390-407, 2009.
- 57) 加藤進・早稲田周・西田英毅・岩野裕継: 新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原油・ガスの地球化学, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.455-471, 2009.
- 58) 田中和広・石原朋和: 鍋立山トンネル周辺の泥火山の活動と膨張性地山の成因, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.499-510, 2009.
- 59) 林武司・徳永朋祥・茂木勝郎: 地下温度の長期観測による泥火山の活動度評価の試み—新潟県松代での事例—, 地学雑誌, vol.118, no.3, pp.533-542, 2009.
- 60) 中屋志津男・浜田好弘: 紀伊半島南部の下部中新統田辺層群の古期泥火山, 地学雑誌,

vol.118, no.3, pp.472-491, 2009.

- 61) 宮田雄一郎・三宅邦彦・田中和広: 中新統田辺層群にみられる泥ダイアピル類の貫入構造, 地質学雑誌, vol.115, no.9, pp.470-482, 2009.
- 62) 紀州四万十帯団体研究グループ: 紀伊半島, 中新統熊野層群の泥ダイアピル, 特に前弧海盆南縁の巨大分岐断層群との関係について—紀伊半島四万十帯の研究 (その 15) 一, 地球科学, vol.65, pp.1-16, 2011.
- 63) Morita, S., Ashi, J., Aoile, K., Kuramoto, S.: Evolution of Kumano Basin and Sources of Clastic Ejecta and Pore Fluid in Kumano Mud volcanoes, Eastern Nankai Trough, Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates and Fluid Flow in Upper Accretionary Prisms (Prism Fluid 2004), Kyoto, Japan, pp.92-99, 2004.
- 64) Kopf, A., Asshoff, K., Belke-Brea, M., Bergenthal, M., Bohrmann, G., Bräunig, A., Düssmann, R., Feseker, T., Fleischmann, T., Franke, P.D., Geprägs, P., Hammerschmidt, S., Heesemann, B., Herschelmann, O., Hüpers, A., Ikari, M.J., Kaszemaik, K.M., Kaul, N., Kimura, T., Kitada, K., Klar, S., Lange, M., Madison, M., Mai, A.H., Noorlander, C., Pape, T., Rehage, R., Reuter, C., Reuter, M., Rosiak, U.D., Schmidt, W., Seiter, C., Spiesecke, U., Stachowski, A., Steiner, A., Takanori, O., Tryon, M., Vahlenkamp, M., Wei, J., Wintersteller, P., Zarrouk, M.K.: Report and preliminary results of R/V SONNE cruise SO222. MEMO: MeBo drilling and in situ Long-term Monitoring in the Nankai Trough accretionary complex, Japan. Leg A: Hong Kong, PR China, 09.06.2012—Nagoya, Japan, 30.06.2012. Leg B: Nagoya, Japan, 04.07.2012— Pusan, Korea, 18.07.2012, Berichte, MARUM —Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, no.297, 121p., 2013.
- 65) 森田澄人・芦寿一郎・佐伯龍男・青池寛・澤田拓也・倉本真一: O-36 熊野海盆及び熊野泥火山群の形成過程, 日本地質学会第 110 年学術大会 (2003 静岡) 講演要旨, p.19, 2003.
- 66) 森田澄人・芦寿一郎・青池寛・澤田拓也・倉本真一: P-144 熊野泥火山群の形成プロセス, 日本地質学会第 111 年学術大会 (2004 千葉) 講演要旨, 2004.
- 67) Tsunogai, U., Maegawa, K., Sato, S., Komatsu, D.D., Nakagawa, F., Toki, T., Ashi, J.: Coseismic massive methane release from a submarine mud volcano, Earth and Planetary Science Letters, vol.341-344, pp.79-85, 2012.
- 68) 土岐知弘・比嘉良作・棚原朗・井尻暁・角皆潤・芦寿一郎: 熊野泥火山における間隙水の起源, 地球化学, vol.47, no.4, pp.221-236, 2013.
- 69) 井尻暁・稲垣史生・JAMSTEC Expeditions 903・906 研究者一同 (海洋研究開発機構): 熊野海盆海底泥火山における深部流体・ガスの供給と起源および生物地球科学プロセスについて, 2015 年度日本地球化学会第 62 回年会講演要旨集, 3D08, 2015.

- 70) Nishio, Y., Ijiri, A., Toki, T., Morono, Y., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Inagaki, F.: Origins of lithium in submarine mud volcano fluid in the Nankai accretionary wedge, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.414, pp.144-155, 2015.
- 71) 井尻暁・飯島耕一・角皆潤・芦寿一郎・稲垣史生: 熊野海盆海底泥火山噴出堆積物の粘土鉱物組成から推定される泥火山堆積物の起源, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会講演予稿, SGL29-08, 2018.
- 72) Ujiie, Y.: Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean, *Marine Geology*, vol.163, issues1-4, pp.149-167, 2000.
- 73) Nakayama, N., Ashi, J., Tsunogai, U., Gamo, T., Tanahashi, M.: Sources of pore water in a Tanegashima mud volcano inferred from chemical and stable isotopic studies, *Geochemical Journal*, vol.44, pp.561-569, 2010.
- 74) 芦寿一郎・徳山英一・平朝彦: 南海トラフ付加体の微細・中規模地形: 海底イメージングソナーIZANAGI を用いた研究, 堆積学研究会報, no.33, pp.43-48, 1990.
- 75) Kobayashi, K., Ashi, J., Boulegue, J., Cambaray, H., Chamot-Rooke, N., Fujimoto, H., Furuta, T., Iiyama, J.T., Koizumi, T., Mitsuzawa, K., Monma, H., Murayama, M., Naka, J., Nakanishi, M., Ogawa, Y., Otsuka, K., Okada, M., Oshida, A., Shima, N., Soh, W., Takeuchi, A., Watanabe, M., Yamagata, T.: Deep-tow survey in the KAIKO-Nankai cold seepage areas, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.109, pp.347-354, 1992.
- 76) Ogawa, Y., Kobayashi, K.: Mud ridge on the crest of the outer swell off Japan Trench, *Marine Geology*, vol.111, pp.1-6, 1993.
- 77) Allis, R.G., Yusa, Y., Taishi, H.: Gas in Beppu Bay Inferred from Acoustic Reflection Anomalies, *The Quaternary Research (Daiyonki-kenkyu)*, vol.28, no.3, pp.185-197, 1989.
- 78) 小松直幹・菊池芳朗: 泥火山とシェールダイアピル, 石油技術協会誌, vol.38, no.6, pp.367-378, 1973.
- 79) Kopf, A.J.: Significance of mud volcanism, *Reviews of Geophysics*, vol.40, issue.2, pp.2-1-2-52, 2002.
- 80) Milkov, A.V.: Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, *Marine Geology*, vol.167, issues1-2, pp.29-42, 2000.
- 81) Dimitrov, L.I.: Mud volcanoes—a significant source of atmospheric methane, *Geo-Marine Letters*, vol.23, issue.3-4, pp.155-161, 2003.
- 82) Manga, M., Brumm, M., Rudolph, M.L.: Earthquake triggering of mud volcanoes, *Marine and Petroleum Geology*, vol.26, pp.1785-1798, 2009.
- 83) Zoporowski, A., Miller, S.A.: Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes,

- Marine and Petroleum Geology, vol.26, pp.1879-1887, 2009.
- 84) Bonini, M., Rudolph, M.L., Manga, M.: Long- and short-term triggering and modulation of mud volcano eruptions by earthquakes, *Tectonophysics*, vol.672-673, pp.190-211, 2016.
- 85) Balolglanov, E.E., Abbasov, O.R., Akhundov, R.V.: Mud volcanoes of the world: Classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review), *European Journal of Natural History*, no.5, pp.12-26, 2018.
- 86) 浜田好弘・田中和広・宮田雄一郎: 台湾泥火山の地質構造と地化学特性, *地学雑誌*, vol.118, no.3, pp.408-423, 2009.
- 87) 森田澄人・Liu, C.S.・Ku, C.Y.・町山栄章・Lin, S.・徐垣・清水賢: 台湾南西沖, 海底マウンド分布域の流体循環—大陸棚斜面上のリッジにおける高精度地震探査について—, *地学雑誌*, vol.118, no.3, pp.424-434, 2009.
- 88) Sun, C.H., Chang, S.C., Kuo, C.L., Wu, J.C., Shao, P.H., Oung, J.N.: Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.37, pp.105-116, 2010.
- 89) Chao, H.C., You, C.F., Sun, C.H.: Gases in Taiwan mud volcanoes: Chemical composition, methane carbon isotopes, and gas fluxes, *Applied Geochemistry*, vol.25, pp.428-436, 2010.
- 90) Chen, S.C., Hsu, S.K., Wang, Y., Chung, S.H., Chen, P.C., Tsai, C.H., Liu, C.S., Lin, H.S., Lee, Y.W.: Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.92, pp.201-214, 2014.
- 91) 頭島菜津子・田中和広・陳仁徳: P.20 台湾南部における泥火山の最新の活動履歴とリスク評価, *日本応用地質学会平成 27 年度研究発表会講演論文集*, pp.173-174, 2015.
- 92) Mel'nikov, O.A., Ershov, V.V: Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history results and prospects in research, *Vestnik DVO RAN*, vol.6, pp.87-93, 2010, (in Russian).
- 93) Prytkov, A.S., Vasilenko, N.F., Ershov, V.V.: Simulation of the 2011 South Sakhalin Mud Volcano Eruption Based on the GPS Data, *Russian Journal of Pacific Geology*, vol.8, no.3, pp.224-231, 2014.
- 94) Shakirov, R.B., Sorochinskaja, A.V., Syrbu, N.S., Tsoy, I.B., Hoang, N., Anh, L.D.: Geochemical features of Sakhalin Island mud volcanoes, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol.40, no.1, pp.56-69, 2018.
- 95) Korznikov, K.A.: Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences, *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*, vol.6, no.2, pp.13-20, 2017.
- 96) Rukavickova, L. Hanzl, P.: Mud volcanoes in the Khar Argalantyn Nuruu, NW Gobi

- Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity, *Journal of Geosciences*, vol.53, pp.181-191, 2008.
- 97) Zheng, G., Ma, X., Guo, Z., Hilton, D.R., Xu, W., Liang, S., Fan, Q., Chen, W.: Gas geochemistry and methane emission from Dushanzi mud volcanoes in the southern Junggar Basin, NW China, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.149, pp.184-190, 2017.
- 98) 高橋衛: インドネシア・東ジャワ州シドアルジョ県の泥噴出事故 —東南アジアの経済大国インドネシア発展の陰に隠れた悲劇—, *石油・天然ガスレビュー*, vol.47, no.2, pp.35-50, 2013.
- 99) Davies, R.J., Swarbrick, R.E., Evans, R.J., Huuse, M.: Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006, *GSA Today*, vol.17, no.2, pp.4-9, 2007.
- 100) Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G.G., Aloisi, G., Planke, S., Malthe-Sørenssen, A., Istadi, B.: Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.261, Issues 3-4, pp.375-388, 2007.
- 101) Mori, J., Kano, Y.: Is the 2006 Yogyakarta Earthquake Related to the Triggering of the Sidoarjo, Indonesia Mud Volcano?, *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, vol.118.no.3, pp.492-498, 2009.
- 102) Manga, M., Brodsky, E.: Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and Geysers, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol.34, pp.263-291, 2006.
- 103) 呉修一・Winarta, B.・武田百合子・有動恵子・梅田信・真野明・田中仁: インドネシア・ポロン川における泥火山噴出物の流出・堆積状況, *土木学会論文集 G (環境)*, vol.69, no.5, pp.I\_183-I\_190, 2013.
- 104) Pettinga, J.R.: Mud volcano eruption within the emergent accretionary Hikurangi margin, southern Hawke's Bay, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, vo.46, no.1, pp.107-121, 2003.
- 105) Hayward, B.W., Francis, D.: New Zealand's Small Mud Volcano Heritage, *Geoscience Society of New Zealand Newsletter*, issue 9, pp.8-13, 2013.
- 106) Chaudhuri, H., Ghose, D., Bhandari, R.K., Sen, P., Sinha, B.: A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.46, pp.52-60, 2012.
- 107) Ray, J.S., Kumar, A., Sudheer, A.K., Deshpande, R.D., Rao, D.K., Patil, D.J., Awasthi, N., Bhutani, R., Bhushan, R., Dayal, A.M.: Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs, *Chemical Geology*, vol.347, pp.102-113, 2013.
- 108) Kassi, A.M., Khan, S.D., Bayraktar, H., Kasi, A.K.: Newly discovered mud volcanoes

- in the Coastal Belt of Makran, Pakistan—tectonic implications, *Arabian Journal of Geosciences*, vol.7, issue 11, pp.4899-4909, 2014.
- 109) Dehghanian, M., Abedpour, Z., Mirhosseini, S.M.: Gatan Mud Volcanoes, Oman Sea Coast in Southwestern Hormozgan, Iran, *Iranian Journal of Earth Sciences*, vol.7, pp.37-45, 2015.
- 110) Aliyev, A.A., Guliyev, I.S., Rahmanov, R.R.: Catalogue of Recorded of Mud Volcano Eruptions of Azerbaijan (1810–2007), Second Edition, ‘Nafta-Press’ Publishing-House, Baku, 109p., 2009.
- 111) Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D.A., Jamtveit, B.: Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan, *Geo-Marine Letters*, vol.23, issue.3-4, pp.258-268, 2003.
- 112) Etiope, G., Feyzullayev, A., Baciú, C.L., Milkov, A.V.: Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan, *Geology*, vol.32, no.6, pp.465-468, 2004.
- 113) Mellors, R., Kilb, D., Aliyev, A., Gasanov, A., Yetirmishli, G.: Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions, *Journal of Geophysical Research*, vol.112, 2007.
- 114) Yusifov, M., Rabinowitz, P.D.: Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan, *Marine and Petroleum Geology*, vol.21, pp.965-975, 2004.
- 115) Feyzullayev, A.A.: Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products, *Natural Science*, vol.4, no.7, pp.445-453, 2012.
- 116) Etiope, G., Baciú, C., Caracausi, A., Italiano, F., Cosma, C.: Gas flux to the atmosphere from mud volcanoes in eastern Romania, *Teera Nova*, vol.16, pp.179-184, 2004.
- 117) Schniukov, E.F., Panin, N.S., Dinu, C., Kutniy, V.A., Maslakov, N.A.: Mud-volcanoes of Romania. Preliminary data on the mineralogy of Paclele Mari and Paclele Mici Mud-volcanoes, *Geo-Eco-Marina*, no.15, pp.131-137, 2009.
- 118) Brustur, T., Stanescu, I., Macalet, R., Melinte-Dobrinescu, M.C.: The mud volcanoes from Berca: a significant geological patrimony site of the Buzău Land Geopark (Romania), *Geo-Eco-Marina*, no.21, pp.1-22, 2015.
- 119) Herbin, J.P., Saint-Germes, M., Maslakov, N., Shnyukov, E.F., Vially, R.: Oil Seeps from the “Boulganack” Mud Volcano in the Kerch Peninsula (Ukraine—Crimea), Study of the Mud and the Gas: Inferences for the Petroleum Potential, *Oil & Gas Science and Technology—Revue d’IFP Energies nouvelles*, vol.63, no.5, pp.609-628, 2008.
- 120) Ershov, V.V., Levin, B.V.: New Data on the Material Composition of Mud Volcano Products on Kerch Peninsula, *Doklady Earth Sciences*, vol.471, part 1, pp.1149-1153,

- 2016.
- 121) Martinelli, G., Judd, A.: Mud volcanoes of Italy, *Geological Journal*, vo.39, pp.49-61, 2004.
- 122) Etiope, G., Caracausi, A., Favara, R., Italiano, F., Baciù, C.: Methane emission from the mud volcanoes of Sicily (Italy), *Geophysical Research Letters*, vol.29, no.8, pp.561-564, 2002.
- 123) Bonini, M.: Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy, *Tectonophysics*, vol.474, pp.723-735, 2009.
- 124) Tassi, F., Bonini, M., Montegrossi, G., Capecchiacci, F., Capaccioni, B., Vaselli, O.: Origin of light hydrocarbons in gases from mud volcanoes and CH<sub>4</sub>-rich emissions, *Chemical Geology*, vol.294-295, pp.113-126, 2012.
- 125) Cuffaro, M., Billi, A., Bigi, S., Bosman, A., Caruso, C.G., Conti, A., Corbo, A., Costanza, A., D'anna, G., Doglioni, C., Esestime, P., Fertitta, G., Gasperini, L., Italiano, F., Lazzaro, G., Ligi, M., Longo, M., Martorelli, E., Petracchini, L., Petricca, P., Polonia, A., Sgroi, T.: The Bortoluzzi Mud Volcano (Ionian Sea, Italy) and its potential for tracking the seismic cycle of active faults, *Solid Earth*, vol.10, pp.741-763, 2019.
- 126) Motyka, R.J., Poreda, R.J., Jeffrey, A.W.A: Geochemistry, isotopic composition, and origin of fluids emanating from mud volcanoes in the Copper River basin, Alaska, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.53, Issue.1, pp.29-41, 1989.
- 127) Patrick, M., Dean, K., Dehn, J.: Active mud volcanism observed with Landsat 7 ETM+, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.131, pp.307-320, 2004.
- 128) Rudolph, M.L., Manga, M.: Mud volcano response to the 4 April 2010 El Mayor - Cucapah earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol.115, 2010.
- 129) Reed, D.L., Silver, E.A, Tagudin, J.E., Shipley, T.H., Vrolijk, P.: Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama, *Marine and Petroleum Geology*, vol.7, pp.44-54, 1990.
- 130) Aslan, A., Warne, A.G., White, W.A., Guevara, E.H., Smyth, R.C., Raney, J.A., Gibeaut, J.C.: Mud volcanoes of the Orinoco Delta, Eastern Venezuela, *Geomorphology*, vol.41, pp.323-336, 2001.
- 131) Battani, A., Prinzhofer, A., Deville, E., Ballentine, C.J.: Trinidad Mud Volcanoes: The Origin of the Gas, *Shale tectonics: AAPG Memoir*, American Association of Petroleum Geologists, vol.93, pp.225-238, 2010.
- 132) 産総研地質調査総合センター: 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, 産業技術総合研究所, 2018 年 1 月 10 日更新, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>, (参照:2020 年 1 月 6 日).
- 133) 大竹政和・平朝彦・太田陽子: 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版

- 会, 218p., 2002.
- 134)谷川亘・嶋本利彦・Wey, W.K.・Wu, W.Y.・Lin, C.W.・Lai, W.C.:1999年集集地震震源域の浸透率構造と異常間隙水圧発生メカニズムの推定, 地学雑誌, vol.112, no.6, pp.939-952, 2003.
- 135)平松晋一・塩崎功・松浦一樹: 活断層の見方・捉え方—エネルギー関連施設等における主断層・分岐断層・副断層の考え方—, 応用地質, vol.59, no.1, pp.37-40, 2018.
- 136)Nakamura, Y., Tamura, T., Kikuchi, T., Furuta, T.: Activity Evaluation of Fukaya Fault Zone Based on a Study of a Subordinate Fault, Bulletin of geo-environmental science, vol.12, pp.69-76, 2010.
- 137)藤田智・矢来博司・小林知勝・森下遊・中埜貴元・宇根寛・宮原伐折羅・仲井博之・三浦優司・上芝晴香・攪上泰亮: だいち2号干渉SARによる熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出, 国土地理院時報, no.128, pp.147-162, 2016.
- 138)株式会社構造計画研究所: 断層変位評価手法の検討, 平成27年度原子力規制庁委託成果報告書, 321p., 2017.
- 139)加藤碩一: 地質現象における「活」の諸問題, 応用地質技術年報, no.33, pp.39-58, 2014.
- 140)杉山雄一・李元希・関口春子・宍倉正展・太田陽子・吾妻崇・荻谷愛彦・渡辺満久・斎藤英二・渡辺和明・佐々木俊法: 車籠埔断層の活動性及び集集地震時変位量と台湾西部のアクティブテクトニクスに関する研究, 活断層・古地震研究報告, no.1, pp.301-313, 2001.
- 141)原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会: 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書, JANSI-FDE-01r1, 2013.
- 142)澤田昌孝: 断層の破壊進展解析による地表断層変位予測手法—実地震への適用—, 電力中央研究所報告, O18008, 23p., 2019.
- 143)小出仁・櫻井孝: 地震断層・活断層関係の用語について, 応用地質, vo.37, no.4, pp.115-119, 1996.
- 144)高尾誠・土山滋郎・安中正・栗田哲史: 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学会論文集, vol.13, no.1, pp.17-36, 2013.
- 145)Livio, F., Kettermann, M., Reicherter, K., Urai, J.L.: Growth of bending-moment faults due to progressive folding: Insights from sandbox models and paleoseismological implications, Geomorphology, vol.326, pp.152-166, 2019.
- 146)エンジニアリング協会地下開発利用研究センター: 平成29年度エネルギー関連施設に関する活断層の工学的研究会 報告書, 142p., 2018.
- 147)佐々木靖人・阿南修司・品川俊介・江口貴弘: 山地部活断層の地形的把握方法に関する研究, 平成26年度土木研究所成果報告書, 16p., 2015.
- 148)Niwa, M., Kurosawa, H., Ishimaru, T.: Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: A field-based study for understanding

- changes in underground environment caused by long-term fault activities, *Engineering Geology*, vol.119, issues 1-2, pp.31-50, 2011.
- 149)高尾誠・上田圭一・安中正・栗田哲史・中瀬仁・京谷孝史・加藤準治: 確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, *日本地震工学会論文集*, vol.14, no.2, pp.2\_16-2\_36, 2014.
- 150)高尾誠・谷智之・大島貴充・安中正・栗田哲史, 確率論的断層変位ハザード解析における副断層の変位量評価に関するパラメータの最尤推定, *日本地震工学会論文集*, vol.16, no.2, pp.2\_96-2\_101, 2016.
- 151)嶋本利彦・渡辺満久・鈴木康弘・Kozhurin, A.I.・Streltsov, M.I.・Rogozhin, E.: 1995年ネフチェゴルスク地震の地震断層と被害, *地質学雑誌*, vol.102, no.10, pp.894-907, 1996.
- 152)Arefiev, S., Rogozhin, E., Tatevossian, R., Rivera, L., Cisternas, A.: The Neftegorsk (Sakhalin Island) 1995 earthquake: a rare interplate event, *Geophysical Journal International*, vol.143, issue 3, pp.595-607, 2000.
- 153)堤浩之・Kozhurin, A.I.・Strel'tsov, M.I.・植木岳雪・鈴木康弘・渡辺満久: サハリン北東部の活断層と古地震, *地学雑誌*, vol.109, no.2, pp.294-301, 2000.
- 154)栗田泰夫・吉岡敏和・佃栄吉・Emre, O., Duman, T.Y., Dogan, A.: 北アナトリア断層系 1999年 Izmit 地震に伴う地震断層のセグメント構造, *活断層・古地震研究報告*, no.1, pp.325-338, 2001.
- 155)中田高・堤浩之・Punongbayan, R.S.・Rimando, R.E.・Daligidig, J.・Daag, A.: 1990年フィリピン地震の地震断層, *地学雑誌*, vol.99, no.5, pp.515-532, 1990.
- 156)太田陽子: 1999年 921 集集地震による地震断層は何を語るか, *地学雑誌*, vol.109, no.5, pp.799-804, 2000.
- 157)Li, T., Chen, J., Jobe J. A. T., Burbank, D.W., Cheng, X., Xu, J., Li, Z., Zheng, W., Zhang, P.: Active Bending-Moment Faulting: Geomorphic Expression, Controlling Conditions, Accommodation of Fold Deformation, *Tectonics*, vol.37, issue 8, pp.2278-2306, 2018.
- 158)Boncio, P., Liberi, F., Caldarella, M., Nurminen, F.C.: Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.18, pp.241-256, 2018.

付録 収集文献リスト (地震・断層活動による二次的影響)

No.	引用文献	言語	分類	地域	著者	年	タイトル	文獻情報	関連する特定の地震
1	6	E	湧水	-	Chi-Yuen Wang, Michael Manga	2009	Earthquakes and Water	Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 225p	-
2	8	J	湧水	井戸沢断層、湯ノ岳断層	佐藤努	2015	地震に伴って発生した四年以上も継続する温泉湧出	IEV(2)ニューレター、vol.2, no.3, pp.1-4	2011年福島県浜通り地震
3	9	J	湧水	長野県菅神山周辺	理保名水・天然理保島土壌環境課地下水・地盤環境課	2010	湧水発生・復活カイトライン	125p	-
4	10	J	湧水	長野県菅神山周辺	岸本良次郎	1989	松代地震により発生した地すべりと湧水	地すべり、vol.6, no.2, pp.1-9	松代群発地震(1986年)
5	11	J	湧水	長野県菅神山周辺	鶴見実	1979	松代湧水の化学的特徴	地球化学、vol.13, no.1, pp.18-23	松代群発地震(1986年)
6	12	J	湧水	長野県菅神山周辺	奥澤博・塚原弘昭	2002	松代群発地震に湧出する深層地下水	地震、第2巻、vol.53, no.3, pp.241-253	松代群発地震(1986年)
7	13	J	湧水	長野県菅神山周辺	吉田剛夫・風澤源・塚原弘昭	2001	同位体比から見た松代群発地震地域の浸透流体の起源	地震、第2巻、vol.55, no.2, pp.207-216	松代群発地震(1986年)
8	14	J	湧水	野島断層	遠田晋次・田中和広・千木良雅弘・宮川公雄・長谷川琢郎	1996	1995年兵庫県南部地震に伴うコウサイミク地下地下水挙動	地震、第2巻、vol.48, no.4, pp.547-553	1995年兵庫県南部地震
9	15	J	湧水	野島断層	高村弘毅・河野忠	1996	淡路島における兵庫県南部地震後の湧水・地下水の挙動	地下水学要誌、vol.38, no.4, pp.331-338	1995年兵庫県南部地震
10	16	J	湧水	野島断層	佐藤努・高橋誠	1997	淡路島の異常湧水の化学組成変化—1995年兵庫県南部地震による影響—	地球化学、vol.31, no.2, pp.89-98	1995年兵庫県南部地震
11	17	J	湧水	野島断層	佐藤努・酒井隆太郎・大澤英昭・古原和夫・児玉敏雄	1999	淡路島で地震後異常に湧出した地下水の酸素・水素同位体比	日本水文科学会誌、vol.29, no.1, pp.13-24	1995年兵庫県南部地震
12	18	J	湧水	野島断層	田中和広・高橋真典・中田良二・長谷川琢郎・宮川公雄・遠田晋次・千木良雅弘	2000	兵庫県南部地震の地下水挙動	電力中央研究所報告、U99066, 21p	1995年兵庫県南部地震
13	20	J	湧水	鬼首カルデラ	村岡洋文・井岡聖一郎・節本陽大	2018	2009年岩手・宮城内陸地震の赤倉起源と推定される鬼首カルデラ東部内縁における湧出現象の発見	日本地球科学会誌、vol.40, no.3, pp.175-191, 2018	2008年岩手・宮城内陸地震
14	21	E	湧水	井戸沢断層、湯ノ岳断層	Yoko S. Togo, Kohei Kazahaya, Yuki Tosaki, Noritoshi Morikawa, Hiroyuki Matsuzaki, Masaaki Takahashi and Tsutomu Sato	2014	Groundwater, possibly originated from subducted sediments, in Joban and Hamadori areas, southern Tohoku, Japan	Earth, Planets and Space, vol.66, Article number, 131, 12p	2011年福島県浜通り地震
15	22	J	湧水	布田川—日奈久断層帯	一柳錦平・安藤昭太郎	2017	熊本地震による地下水環境変化	日本水文科学会誌、vol.47, no.1, pp.11-15	2016年熊本地震
16	23	J	湧水	布田川—日奈久断層帯	柴田智郎・高橋重人・佐野有司	2017	2016年熊本地震に伴う別府温泉水中へのヘリウム同位体比の変化	2017年度日本地球化学会第64回年会講演要旨集、1812, p.33	2016年熊本地震
17	24	J	湧水	布田川—日奈久断層帯	環境省九州環境事務所	2016	(別表2) 湧水・温泉影響把握調査 結果概要	環境省九州地方環境事務所所報調査資料(2016年07月28日), 11p	2016年熊本地震
18	25	J	湧水	布田川—日奈久断層帯	細野高啓・山田千穂・橋本美穂	2017	熊本地震による地下水環境変化	日本水文科学会誌、vol.47, no.2, pp.127-130	2016年熊本地震
19	26	E	湧水	-	M. Parvin, N. Tadokuma, H. Asaue, K. Kolke	2014	Delineation and interpretation of spatial seismic response of groundwater levels in shallow and deep parts of an alluvial plain to different earthquakes: A case study of the Kumamoto City area, southwest Japan	Journal of Asian Earth Sciences, vol.83, pp.35-47	熊本で発生した2000~2008年の4地震
20	27	E	湧水	Christchurch (ニュージーランド)	SC Cox, HK Rutter, A. Sims, M Manga, JJ Weir, T. Ezzzy, PA White, TW Horton and D Scott	2012	Hydrological effects of the Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake, 4 September 2010, New Zealand	New Zealand Journal of Geology and Geophysics, vol.55, no.3, pp.231-247	2010年Darfield地震
21	28	E	湧水	Christchurch (ニュージーランド)	C. S. Brownie, M. Green and D. Bell	2015	Earthquake-Induced Ground Fracturing and Spring Formation in Foot-Slope Positions and Valley Floor of the Hillsborough Valley, Christchurch, New Zealand	6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper Number, 548	2010, 2011年Christchurch地震
22	29	E	湧水	カリフォルニア州 (アメリカ)	Chi-Yuen Wang, Michael Manga, Douglas Dregler, and Alexander Wong	2004	Streamflow increase due to rupturing of hydrothermal reservoirs: Evidence from the 2003 San Simeon, California, Earthquake	Geophysical Research Letters, vol.31, no.10	2003年San Simeon地震
23	30	E	湧水	カリフォルニア州 (アメリカ)	Chi-Yuen Wang, and Michael Manga	2015	New streams and springs after the 2014 Mw 6.0 South Napa earthquake	Nature Communications, 6:7587, doi: 10.1038/ncomms8597	2014年南Napa地震
24	31	E	湧水	Haida Gwaii群島 (カナダ)	Stephen E. Grasby, Grant Ferguson, Patrick Bartier, Lisa Neville	2019	Seismic induced flow disruption of Gandli K'in Gwaayayay thermal springs, Gwaii Haanas National Park Reserve, Canada	Applied Geochemistry, vol.103, pp.118-130	2012年Haida Gwaii地震
25	32	E	湧水	Vanuatu (トルコ)	Sedat Inan, Werner Paul Bolders, Fanny Lourenberger-West, Hakan Takan, Ali Ozvan and Friedemann T. Freund	2012	Springwater chemical anomalies prior to the Mw = 7.2 Van Earthquake (Turkey)	Geochemical Journal, vol.46, no.1, pp.811-816	2011年Van地震
26	33	I	湧水	Umbria州 (イタリア)	Roberto Checucci, Lucia Mastrorillo, Daniela Valigi	2017	Acque sotterranee e terremoti: alcune considerazioni sugli effetti della sismicità sulla disponibilità della risorsa idrica in Valnerina	Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, vol.5, no.1, pp.75-77	2016年Norcia地震
27	38	J	泥火山	北海道遠別	千木良雅弘・田中和広	1997	北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴	地質学雑誌、vol.103, no.8, pp.781-791	-
28	41	J	-	-	産業技術総合研究所深部地質構造研究コア	2012	深部地質調査-評価項目に関する技術資料—立地条件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—	地質調査総合センター研究資料集、no.580, 112p	-
29	43	J	泥火山	-	斎藤正朝・本丸隆・風見康平・塚本幸	2018	日本及び周辺地域の泥火山データベース(第2版)	地質調査総合センター研究資料集、no.651, 2p	-
30	44	J	泥火山	-	田中和広・宮田健一・徳永朋祥・森田湧人・笠原三三	2009	特異な泥火山—その実態と応用地球科学的意義—はしがき—	地質学雑誌、vol.118, no.3, pp.335-339	-
31	45	J	泥火山	-	田中和広	2009	泥火山および泥火山の生成に係る地質・地下水現象の応用地球科学的意義	地質学雑誌、vol.118, no.3, pp.578-586	-
32	46	J	泥火山	北海道新冠	田中和広・中野謙・石丸聡・原口達・中田賢・森村一夫	2009	北海道立地質研究所報告、vol.80, pp.147-156	日本応用地質学研究会発表会講演論文集、	2003年十勝沖地震
33	47	J	泥火山	北海道新冠	倉田亜紀・田中和広・新川剛生	2013	北海道新冠泥火山の噴出物の地質学的研究	pp.155-156	-

付録 収集文献リスト (地震・断層活動による二次的影響)

No.	引用文献	書籍	地殻	分類	年	タイトル	文獻情報	関連する特定の地震
34	48	J	泥火山	北海道遠別	2006	遠別地温泉、歌穂別泥火山について	地質ニュース, no.627, pp.48-53	-
35	49	J	泥火山	北海道遠別	2010	北海道北部緯延町で発見された泥火山	地質ニュース, no.676, pp.63-67	-
36	50	J	泥火山	北海道遠別	2016	上幌泥火山における電気探査とボーリング調査-泥火山噴出物のESR年代測定に向けて	2016年度日本地球化学会第60回年会講演要旨集, DP05, p.56	-
37	51	J	泥火山	新潟県松代	2005	新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質	自然災害科学, vol.24, no.1, pp.49-58	-
38	52	J	泥火山	新潟県松代	2008	地中レーザによる新潟県十日町市松代における泥火山の浅部構造調査	地質ニュース, no.644, pp.25-32	-
39	53	J	泥火山	新潟県松代	2009	新潟県十日町市における泥火山噴出物の起源	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.340-349	-
40	54	J	泥火山	新潟県松代	2009	泥火山周辺の地質構造と地下水の地質学特性-新潟県十日町市発生における検討	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.350-372	-
41	55	J	泥火山	新潟県松代	2009	電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の深部地下構造	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.373-389	-
42	56	J	泥火山	新潟県松代	2009	表面探査による松代聖野地区の泥火山の浅部S波速度構造調査	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.390-407	-
43	57	J	泥火山	新潟県松代	2009	新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原油・ガス地球化学	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.455-471	-
44	58	J	泥火山	新潟県松代	2009	新潟県十日町市における泥火山の活動と膨張性泥山の成因	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.499-510	-
45	59	J	泥火山	新潟県松代	2009	地下温度の長期間測定による泥火山の活動度評価の試み-新潟県松代での事例-	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.533-542	-
46	60	J	泥火山	新潟県松代	2009	紀伊半島南部の下部中新統田辺層群の古湖泥火山	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.472-491	-
47	61	J	泥火山	新潟県松代	2009	中新統田辺層群にみられる泥ダイヤル堆積物の再入構造	地質学雑誌, vol.115, no.9, pp.470-482	-
48	62	J	泥火山	新潟県松代	2011	紀伊半島、中新統熊野層群の泥ダイヤル、特に前部海成帯の巨大分岐断層群との関係について-紀伊半島四万十景帯の研究(その15)-	地球科学, vol.65, pp.1-16	-
49	63	E	泥火山	熊野海盆	2004	Evolution of Kumano Basin and Sources of Oligetic Electra and Pore Fluid in Kumano Mud volcanoes, Eastern Nankai Trough	Proceedings of the International Symposium on Methane Hydrates and Fluid Flow in Upper Accretionary Prisms (Prism Fluid 2004), Kyoto, pp.92-99	-
50	64	E	泥火山	熊野海盆	2013	Report and preliminary results of R/V SONNE cruise SO222 MEMO, MeBo drilling and in situ Long-term Monitoring in the Nankai Trough accretionary complex, Japan, Leg A: Hong Kong, PR.China, 09.06.2012-Nagoya, Japan, 30.06.2012, Leg B: Nagoya, Japan, 04.07.2012-Pusan, Korea, 18.07.2012	Berichte, MARUM-Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, no.297, 121p	-
51	65	J	泥火山	熊野海盆	2003	O-36 熊野海盆及び熊野泥火山群の形成過程	日本地球化学会第110回年学術大会 (2003静岡)講演要旨, p.19	-
52	66	J	泥火山	熊野海盆	2004	P-144 熊野泥火山群の形成プロセス	日本地球化学会第111年学術大会 (2004千葉)講演要旨	-
53	67	E	泥火山	熊野海盆	2012	Coseismic massive methane release from a submarine mud volcano	Earth and Planetary Science Letters, vol.341-344, pp.79-85	-
54	68	J	泥火山	熊野海盆	2013	熊野泥火山における間隙水の起源	地球化学, vol.47, no.4, pp.221-236	-
55	69	J	泥火山	熊野海盆	2015	熊野海盆海底泥火山における深部流体・ガスの供給と起源および生物地球化学プロセスについて	2015年度日本地球化学会第62回年会講演要旨集, 3D08	-
56	70	E	泥火山	熊野海盆	2015	Origins of lithium in submarine mud volcano fluid in the Nankai accretionary wedge	Earth and Planetary Science Letters, vol.414, pp.144-155	-
57	71	J	泥火山	熊野海盆	2018	熊野海盆海底泥火山噴出堆積物の粘土鉱物組成から推定される泥火山堆積物の起源	日本地球化学会第118回年会講演要旨集, SGL29-08	-
58	72	E	泥火山	琉球海溝	2000	Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean	Marine Geology, vol.163, issues 1-4, pp.149-167	-
59	73	E	泥火山	琉球海溝	2010	Sources of pore water in a Tanegashima mud volcano inferred from chemical and stable isotopic studies	Geochemical Journal, vol.44, pp.561-569	-
60	74	J	泥火山	南海トラフ	1990	南海トラフ付加体の微細・中規模地形・海底メーキング/ナー・ZANAGIを用いた研究	堆積学研究会報, no.33, pp.43-48	-

付録 収文献リスト (地震・断層活動による二次的影響)

No.	引用文献	言語	分類	地域	著者	年	タイトル	文献情報	関連する特定の地震
61	75	E	泥火山	南海トラフ	K. Kobayashi, J. Ashi, J. Boulegue, H. Combray, N. Chamot-Rooke, H. Fujimoto, T. Furuta, J.T. Iiyama, T. Koizumi, K. Mitsuizawa, H. Nomma, M. Mureyama, J. Nakai, M. Nakashiki, Y. Ogawa, K. Otsuka, M. Okada, A. Oshida, N. Shima, W. Soth, A. Takeuchi, M. Watanabe, and T. Yamagata	1982	Deep-tow survey in the KAIKO-Nankai cold seepage areas	Earth and Planetary Science Letters, vol.109, pp.347-364	-
62	76	E	泥火山	日本海溝	Y. Ogawa and K. Kobayashi	1983	Mud ridge on the crest of the outer swell off Japan Trench	Marine Geology, vol.111, pp.1-6	-
63	77	E	泥火山	別府湾	Richard G. ALLIS, Yuki YUSA and Hirokazu TASHI	1989	Gas in Bappu Bay Inferred from Acoustic Reflection Anomalies	The Quaternary Research (Dayonki-kenkyu) vol.28, no.3, pp.185-197	-
64	78	J	泥火山	-	小松重敏・菊池秀明	1973	泥火山とシェールガス	石油技術協会誌, vol.38, no.6, pp.367-378	-
65	79	E	泥火山	-	Achim J. Kopf	2002	Significance of mud volcanism	Reviews of Geophysics, vol.40, issue 2, pp.2-12-52	-
66	80	E	泥火山	-	Milkov A. V.	2000	Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates	Marine Geology, vol.167, issues 1-2, pp.29-42	-
67	81	E	泥火山	-	L. I. Dimitrov	2003	Mud volcanoes—a significant source of atmospheric methane	Geo-Marine Letters, vol.23, issue.3-4, pp.155-161	-
68	82	E	泥火山	-	Michael Manga, Maria Brumm, Maxwell L. Rudolph	2009	Earthquake triggering of mud volcanoes	Marine and Petroleum Geology, vol.26, pp.1785-1798	世界の複数の地震データ
69	83	E	泥火山	-	Anna Zaporowski, Stephen A. Miller	2009	Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes	Marine and Petroleum Geology, vol.26, pp.1879-1887	-
70	84	E	泥火山	-	Marco Bonini, Maxwell L. Rudolph, Michael Manga	2016	Long- and short-term triggering and modulation of mud volcano eruptions by earthquakes	Tectonophysics, vol.672-673, pp.190-211	世界の複数の地震データ
71	85	E	泥火山	-	Baloganov E.E., Abbasov O.R., Akhundov R.V.	2018	Mud volcanoes of the world: Classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review)	European Journal of Natural History, no.5, pp.12-29	-
72	86	J	泥火山	台湾	浜田好弘・田中和広・菅田謙一郎	2009	台湾泥火山の地質構造と地化学特性	地学雑誌, vol.119, no.3, pp.408-423	-
73	87	J	泥火山	台湾 (周辺海域)	森田遼人・Char-Shine LIU・Chia-Yen KU・町山栄華・Saulwood LIN・徐星・清水賢	2009	台湾南西部・海底マウンド分布域の流体循環—大陸棚斜面上のリッジにおける高圧性地震発生をめぐって—	地学雑誌, vol.118, no.3, pp.424-434	-
74	88	E	泥火山	台湾	Chih-Hsien Sun, Sen-Chi Chang, Cheng-Lung Kuo, Jong-Chang Wu, Ping-Hua Shao, Jung-Nan Chung	2010	Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry	Journal of Asian Earth Sciences, vol.37, pp.105-116	-
75	89	E	泥火山	台湾	Hung-Chun Chiao, Chen-Feng You, Chih-Hsien Sun	2010	Gases in Taiwan mud volcanoes: Chemical composition, methane carbon isotopes, and gas fluxes	Applied Geochemistry, vol.25, pp.428-436	-
76	90	E	泥火山	台湾 (周辺海域)	Song-Chuen Chen, Shu-Kun Hsu, Yunshuen Wang, San-Hsiung Chung, Po-Chun Chen, Ching-Hui Tsai, Char-Shine Liu, Hsiiao-Shan Lin, Tuan-Wei Lee	2014	Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan	Journal of Asian Earth Sciences, vol.92, pp.201-214	-
77	91	J	泥火山	台湾	頭島菜津子・田中和広・陳仁徳	2015	P.20 台湾南部における泥火山の最新の活動履歴とリスク評価	日本応用地質学会平成27年度研究発表会講演論文集, pp.173-174	-
78	92	R	泥火山	サハリン (ロシア)	O.A.MELNIKOVA, V.V.ERSHOV	2010	Mud (gas-water-lithoclastic) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research	Vestnik DVO RAN, vol.6, pp.87-93	-
79	93	E	泥火山	サハリン (ロシア)	A. S. Prytkov, N. F. Vasilenko, and V. V. Ershov	2014	Simulation of the 2011 South Sakhalin Mud Volcano Eruption Based on the GPS Data	Russian Journal of Pacific Geology, vol.8, no.3, pp.224-231	-
80	94	E	泥火山	サハリン (ロシア)	Shakhov R.B., Sorochinskaja A.V., Syrbu N.S., Tsoy I.B., Nguyen Hoang, Le Duc Anh	2018	Geochemical features of Sakhalin Island mud volcanoes, Vietnam Journal of Earth Sciences	Vietnam Journal of Earth Sciences, vol.40, no.1, pp.69-69	-
81	95	E	泥火山	サハリン (ロシア)	Kirill A. Korznikov	2017	Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences	Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation, vol.8, no.2, pp.13-20	-
82	96	E	泥火山	モンゴル	Lenka Rukevickova, Pavel Hanzi	2008	Mud volcanoes in the Khir Agalantyn Nuruu, NW Gobi Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity	Journal of Geosciences, vol.53, pp.181-191	-
83	97	E	泥火山	Jungger盆地 (中国)	Guodong Zheng, Xiangqian Ma, Zhengfu Guo, David R. Hilton, Wang Xu, Shouyun Liang, Qiaohui Fan, Wenxing Chen	2017	Gas geochemistry and methane emission from Dushanzi mud volcanoes in the southern Jungger Basin, NW China	Journal of Asian Earth Sciences, vol.149, pp.184-190	-
84	98	J	泥火山	Java島 (インドネシア)	高橋 徹	2013	インドネシア・東ジャバ島の泥噴出事故—東南アジアの経済大動向と火山活動の関連性について—	石油・天然ガスレビュー, vol.47, no.2, pp.35-50	-
85	99	E	泥火山	Java島 (インドネシア)	Richard J. Davies, Richard E. Swarbrick, Robert J. Evens, Madis Huuse	2007	Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006	GSA Today, vol.17, no.2, pp.4-9	-
86	100	E	泥火山	Java島 (インドネシア)	A. Mazzini, H. Svensen, G.G. Akhmanov, G. Alaisi, S. Planke, A. Malthre-Sørensen, B. Istadi	2007	Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia	Earth and Planetary Science Letters, vol.261, Issues 3-4, pp.375-388	-
87	101	E	泥火山	Java島 (インドネシア)	Jim MORI and Yasuyuki KANO	2009	Is the 2006 Yogyakarta Earthquake Related to the Triggering of the Sibajir, Indonesia Mud Volcano?	Journal of Geography (Chigaku Zasshi), vol.118, no.3, pp.492-498	2006年 Yogyakarta地震
88	102	E	泥火山	-	Michael Manga and Emily Brodsky	2006	Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and Geysers	Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol.34, pp.263-291	-

付録 収文献リスト (地震・断層活動による二次的影響)

No.	引用文献	著者	地域	分類	年	タイトル	文獻情報	関連する特定の地震
89	103	J	泥火山	Java (インドネシア)	2013	インドネシア・ボロン川における泥火山噴出物の流出・堆積状況	土木学会論文集G (環境), vol.69, no.5, pp.1, 183-1, 190	-
90	104	E	泥火山	ニュージーランド	2003	Mud volcano eruption within the emergent accretionary Hkuranui margin, southern Hawke's Bay, New Zealand	New Zealand Journal of Geology & Geophysics, vol.46, no.1, pp.107-121	-
91	105	E	泥火山	ニュージーランド	2013	New Zealand's Small Mud Volcano Heritage	Society of New Zealand Newsletter, issue 9, pp.8-13	-
92	106	E	泥火山	アンダマン諸島 (インド)	2012	A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands	Chemical Geology, vol.347, pp.102-113	-
93	107	E	泥火山	アンダマン諸島 (インド)	2013	Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs	Arabian Journal of Geosciences, vol.7, issue 11, pp.4899-4909	-
94	108	E	泥火山	パキスタン	2014	Newly discovered mud volcanoes in the Coastal Belt of Makran, Pakistan—tectonic implications	Iranian Journal of Earth Sciences, vol.7, pp.37-41	-
95	109	E	泥火山	イラン	2015	Gatan Mud Volcanoes, Oman Sea Coast in Southwestern Hormozgan, Iran	'Nafte-Press' Publishing-House, Baku, 109p.	-
96	110	E	泥火山	アゼルバイジャン	2009	Catalogue of Recorded Mud Volcano Eruptions of Azerbaijan (1810-2007). Second Edition	Geo-Maine Letters, vol.23, issue.3-4, pp.258-26	-
97	111	E	泥火山	アゼルバイジャン	2003	Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan	Geology, vol.32, no.6, pp.465-468	-
98	112	E	泥火山	アゼルバイジャン	2004	Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan	Journal of Geophysical Research, vol.112, B04304, doi:10.1029/2006JB004489	-
99	113	E	泥火山	アゼルバイジャン	2007	Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions	Marine and Petroleum Geology, vol.21, pp.965-9	-
100	114	E	泥火山	カスピ海	2004	Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan	Natural Sciences, vol.4, no.7, pp.445-453	-
101	115	E	泥火山	カスピ海	2012	Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products	Teera Nova, vol.16, pp.179-184	-
102	116	E	泥火山	ルーマニア	2004	Gas flux to the atmosphere from mud volcanoes in eastern Romania	Geo-Eco-Marina, no.15, pp.131-137	-
103	117	E	泥火山	ルーマニア	2009	Mud-volcanoes of Romania. Preliminary data on the mineralogy of Paclale Mari and Paclale Mici Mud-volcanoes	Geo-Eco-Marina, no.21, pp.1-22	-
104	118	E	泥火山	ルーマニア	2015	The mud volcanoes from Berca: a significant geological patrimony site of the Buzău Land Geopark (Romania)	Oil & Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies nouvelles, vol.63, no.5, pp.609-628	-
105	119	E	泥火山	クリミア半島	2008	New Data on the Material Composition of Mud Volcano Products on Kerch Peninsula	Doklady Earth Sciences, vol.471, part 1, pp.1149-1153	-
106	120	E	泥火山	クリミア半島	2016	Oil Seeps from the "Boulganack" Mud Volcano in the Kerch Peninsula (Ukraine—Crimea). Study of the Mud and the Gas. Inferences for the Petroleum Potential	Geological Journal, vol.39, pp.49-61	-
107	121	E	泥火山	イタリア	2004	Mud volcanoes of Italy	Geophysical Research Letters, vol.29, no.8, pp.86-1-56-4	-
108	122	E	泥火山	イタリア	2002	Methane emission from the mud volcanoes of Sicily (Italy)	Tectonophysics, vol.474, pp.723-735	イタリアの複数の地震ゾーン
109	123	E	泥火山	イタリア	2009	Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy	Chemical Geology, vol.294-295, pp.113-128	-
110	124	E	泥火山	イタリア	2012	Origin of light hydrocarbons in gases from mud volcanoes and CH <sub>4</sub> -rich emissions	Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.53, Issue.1, pp.29-41	-
111	125	E	泥火山	イタリア	2019	The Bortoluzzi Mud Volcano (Ionian Sea, Italy) and its potential for tracking the seismic cycle of active faults	Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.131, pp.307-320	イタリアの複数の地震ゾーン
112	126	E	泥火山	アラサカ州 (アメリカ)	1989	Geochemistry, isotopic composition, and origin of fluids emanating from mud volcanoes in the Copper River basin, Alaska	Journal of Geophysical Research, vol.115, B12211, doi:10.1029/2010JB007737	2010年 El Mayor-Cucapah地震
113	127	E	泥火山	アラサカ州 (アメリカ)	2004	Active mud volcanism observed with Landsat 7 ETM+	Marine and Petroleum Geology, vol.7, pp.44-54	-
114	128	E	泥火山	カリフォルニア州 (アメリカ)	2010	Mud volcano response to the 4 April 2010 El Mayor-Cucapah earthquake	-	-
115	129	E	泥火山	カリブ海 (ハナマ北)	1990	Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama	-	-

付録 収文献リスト (地震・断層活動による二次的影響)

No.	引用文献	書籍	分類	地域	年	タイトル	文獻種別	関連する特定の地震
116	130	E	泥火山	ベネズエラ	2001	Mud volcanoes of the Orinoco Delta, Eastern Venezuela	Geomorphology, vol.41, pp.323-338	-
117	131	E	泥火山	トリニダード・トバゴ	2010	Trinidad Mud Volcanoes: The Origin of the Gas	Shale tectonics: AAPG Memoir, American Association of Petroleum Geologists, vol.93, pp.225-238	-
118	135	J	副断層	-	2018	活断層の見方・捉え方—エネルギー—関連施設等における主断層・分岐断層・副断層の考え方—	応用地質, vol.59, no.1, pp.37-40	-
119	136	E	副断層	-	2010	Activity Evaluation of Fukaya Fault Zone Based on a Study of a Subordinate Fault	Bulletin of geo-environmental science, vol.12, pp.69-76	-
120	137	J	副断層	布田川—日奈久断層帯	2016	たいちゅう号干渉SARIによる熊本地震で生じた小変位の地震断層群の抽出	国土地理情報誌, no.128, pp.147-162	2016年熊本地震
121	138	J	副断層	-	2017	断層変位評価手法の検討, 平成27年度原子力規制庁委託成果報告書	321p	-
122	139	J	副断層	-	2014	地震現象における「活」の問題	応用地質技術年報, no.33, pp.39-58	-
123	140	J	副断層	台湾	2001	東部構造断層の活動性及び集集地震時変位量と台湾西部のアクティブクワースに関する研究	活断層・古地震研究報告, no.1, pp.301-313	1999年台湾集集地震
124	141	J	副断層	-	2013	原子力安全推進協会断層評価手法検討委員会, 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書	JANSI-FDE-01r	-
125	142	J	副断層	-	2019	断層の破壊進展履歴に関する断層評価手法の適用—	電力中核研究所報告, O18008, 23p	-
126	143	J	副断層	-	1996	断層断層・活断層断層の目録について	応用地質, vol.37, no.4, pp.115-119	-
127	144	J	副断層	-	2013	確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用	日本地震工学会論文集, vol.13, no.1, pp.17-36	-
128	145	E	副断層	-	2019	Growth of bending-moment faults due to progressive folding. Insights from sandbox models and paleoseismological implications	Geomorphology, vol.326, pp.152-166	-
129	3	J	副断層	-	2017	平成28年度 エネルギー—関連施設に関する活断層の工学的研究委員会 報告書	203p	-
130	146	J	副断層	-	2018	平成29年度 エネルギー—関連施設に関する活断層の工学的研究委員会 報告書	142p	-
131	147	J	副断層	-	2015	山地部活断層の地形地層学的手法に関する研究	平成26年度土木研究所成果報告書, 16p	-
132	148	E	副断層	跡津川断層帯	2011	M. Niwa, H. Kurosawa, T. Ishimaru	Engineering Geology, vol.119, issues 1-2, pp.31-50	-
133	149	J	副断層	-	2014	確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上	日本地震工学会論文集, vol.14, no.2, pp.2, 16-2, 36	-
134	150	J	副断層	-	2016	確率論的断層変位ハザード解析における断層の変位量評価に関するハラメータの算定	日本地震工学会論文集, vol.16, no.2, pp.2, 96-2, 101	-
135	151	J	副断層	サハリン(ロシア)	1996	1995年ネフチエコルスク地震の地震断層と被害	地質学雑誌, vol.102, no.10, pp.894-907	1995年ネフチエコルスク地震
136	152	E	副断層	サハリン(ロシア)	2000	The Neftegorsk (Sakhalin Island) 1995 earthquake: a rare interplate event	Geophysical Journal International, vol.143, issue 3, pp.595-607	1995年ネフチエコルスク地震
137	153	J	副断層	サハリン(ロシア)	2000	サハリン北東部の活断層と古地震	地質学雑誌, vol.109, no.2, pp.294-301	1995年ネフチエコルスク地震
138	154	J	副断層	トルコ	2001	北アナトリア断層系1999年Luzon地震に伴う地震断層のセグメント構造	活断層・古地震研究報告, no.1, pp.325-338	1999年Luzon地震
139	155	J	副断層	フィリピン	1990	1990年フィリピン地震の地震断層	地質学雑誌, vol.99, no.5, pp.515-532	1990年フィリピン地震
140	156	J	副断層	台湾	2000	1999年921集集地震による地震断層は何か	地質学雑誌, vol.109, no.5, pp.799-804	1999年台湾集集地震
141	157	E	副断層	中国	2018	Active Bending-Moment Faulting, Geomorphic Expression, Controlling Conditions, Accommodation of Fold Deformation	Tectonics, vol.37, issue 8, pp.2278-2306	-
142	158	E	副断層	-	2018	Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning, Natural Hazards and Earth System Sciences	Natural Hazards and Earth System Sciences, vol.18, pp.241-256	-

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクタ	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

