

特集号「泥火山—その実体と応用地球科学的意義—」

— はしがき —

田中 和 広* 宮田 雄 一 郎* 徳 永 朋 祥**
森 田 澄 人*** 笠 原 順 三****

Preface for the Special Issue on “Mud Volcanoes: Their Nature and Significance in Applied Earth Sciences”

Kazuhiro TANAKA*, Yuichiro MIYATA*, Tomochika TOKUNAGA**,
Sumito MORITA*** and Junzo KASAHARA****

I. 本特集号の目的と意義

2007年6月にインドネシア、シドアルジョにおいて泥火山が噴火し、多くの人的、物的被害がでたことが伝えられ、多くの人が「泥火山」という言葉を聞くこととなった。泥火山とは、*Glossary of Geology* (Bates and Jackson, 1987)によれば「一般的には火山ガスの噴出を伴う円錐形をした泥や岩石の堆積体」とあり、さらに続いて「また、原油を伴う天然ガスの噴出により形成された堆積体」とされている。本特集号では後者の、堆積岩分布地域において天然ガス、地下水、石油を伴い噴出した泥により形成された地形高まりを「泥火山」と呼びその応用地球科学的意義について議論を行ったものである。

泥火山は古くより、堆積岩地域にその存在が知られており、特に陸上において石油の産出や火山活動、地震活動などに関連した現象であることが認識され、泥火山活動と炭化水素ガス、テクトニ

クスとの関連性に関する研究がなされた（例えば、Kopf (2002)による詳細なレビューを参照のこと）。特に、石油資源探査に関連しては多くの研究、調査がなされた（例えば、Higgins and Saunders, 1974）。その後、海上からの詳細な物理探査法の開発と海底下での資源開発に伴い、多くの泥火山の存在が明らかとなった（Kopf, 2002）。例えば、地学雑誌において企画された「ガスハイドレート」特集号（松本ほか, 2009）に見られるように最新の物理探査法により詳細な海底地質断面が得られており、Higgins and Saunders (1974)が報告した時点の倍に達する泥火山が発見されその数は今でも増え続けている（Kopf, 2002）。泥火山研究の多くは古くよりメタンなど資源探査の観点からなされており、泥火山活動に伴われる自然災害などに関する報告は、あまりなされてこなかった。陸上はさまざまな人間活動の場であり、泥火山の活動やそれに伴われる地質・地下水現象に起因する人間社会への影響が

* 山口大学大学院理工学研究科

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

*** 独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

**** 静岡大学理学部地球科学教室

* Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

** Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

*** Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

**** Faculty of Science, Institute of Geosciences, University of Shizuoka

予想される。

わが国では、千木良・田中（1997）により北海道新冠町の新冠泥火山に関する先駆的研究がなされ、泥火山の活動史に関する知見が得られ、同時に応用地球科学的問題点が指摘された。さらに、膨張性地山であるために工事の難航した新潟県十日町市の北越急行鉄道鍋立山トンネルの地表部に泥火山が分布することが明らかとなり（新谷・田中, 2005）、これを契機として、新潟県十日町市蒲生地区の泥火山研究がはじめられ、あわせて露頭条件のよい台湾南西部においても現地調査が開始された。その後、新潟県の泥火山分布地点でボーリング調査や物理探査などが実施され地下構造が明らかにされる（石原・田中, 2009）とともに鍋立山トンネルの膨張性地山との関連性などに関する検討が行われた。また、台湾においても、泥岩の急速劣化現象に関する研究などが開始された。一方、比較的堆積体が保存されやすい海域では、日本近海の熊野灘などにおいて詳細な海底地下構造探査が実施され泥火山の形態や活動史などに関する新たな情報が得られてきた（森田ほか, 2007）。また、紀伊半島では第三紀堆積物中に泥ダイアピルや泥火山噴出物が報告された（中屋・浜田, 2009）。2007年には地球惑星科学連合大会の特別セッション「泥火山と泥噴出現象およびその応用地球科学的評価」において、それまでに得られた陸上泥火山研究の成果と、日本列島近海の海底下に分布する泥火山の最新の研究成果もあわせ合計 18 編の発表がなされ、泥火山の活動およびそれに関連する地質・地下水現象および応用地球科学的観点からの評価、検討に関する議論がなされた。泥火山の活動およびそれに伴われるさまざまな地質・地下水現象は堆積岩分布地域における資源探査を含めたインフラ整備や重要地下構造物の立地・建設などにおいて、今後ますますその評価が求められる可能性が高い。このため、本特集号では、その後得られた新たなデータに基づき、わが国周辺に分布する泥火山の実体を明らかとするとともに、応用地球科学的な視点より評価を試み、泥火山研究の重要性について指摘することを目的としている。

II. 本特集号の構成と概要

1) 新潟県十日町市松代地域における泥火山

新潟県十日町市松代地域には室野地区と蒲生地区において泥火山が分布することが本州ではじめて報告され、さまざまな検討がなされた。

新谷・田中（2009）は室野地区の泥火山から噴出する地下水の水素酸素同位体比、ビトリナイトの光学的反射率の検討を行い、周辺地域で測定された地層水の水素酸素同位体比やボーリングコアのビトリナイト反射率との比較検討を行った。その結果、室野泥火山より噴出する地下水やビトリナイトは地下 3,400 ~ 4,000 m の深度からもたらされたことを明らかにし、地下水は間隙中の古海水が粘土鉱物の脱水により希釈され、異常間隙水圧層を形成したと結論づけた。

石原・田中（2009）は、泥火山の分布する蒲生地区において全長 120 m の鉛直ボーリング掘削を行い、地質構造や地下水の地化学特性を明らかにした。その結果、50 m 以深では高塩分濃度地下水に飽和したマッドブレッチャーが分布することを明らかとし、地表の陥没地形の形成と泥火山活動との関係について考察を行っている。陸上泥火山分布域におけるこのようなボーリング調査はこれまでに例が少なく、地表付近における泥火山の活動のメカニズムを知る上で重要な報告と考えられる。

鈴木ほか（2009）は、レーザー測量により蒲生地区の尾根部にすり鉢状地形を見出すとともに、CSAMT 法により地下数 100 m までの比抵抗分布を得た。その結果、400 m 以深に直径約 500 m の 1 Ω m 以下の低比抵抗体を見出し、それらが高塩分濃度地下水で満たされており、この低比抵抗体はトリニダードにおいて報告されたマッドチャンバー（Deville *et al.*, 2003）と同様の地質構造に対比される可能性を指摘した。さらに、陥没構造の壁面沿いに数 Ω m の低比抵抗体がマッドチャンバーからチューブ群状に上昇し、地表の泥火山に連続していることを明らかとした。

尾西ほか（2009）は室野地区において表面波

探査を行い、室野泥火山周辺において10数m深度までの浅部S波速度分布を明らかとし、その結果に基づき泥火山の地下構造を解明した。さらに、キネマチックGPS測位による標高の変動測量を行い室野泥火山周辺において隆起傾向が認められ、特に泥火山分布域から北部にかけての範囲において中越沖地震を含む約2年間に40cm程度の高い隆起変動を示すことを明らかとした。

2) 台湾および台湾近海に分布する泥火山

浜田ほか(2009)は台湾南西部高雄懸小滾水地域において野外地質調査を行い、泥火山周辺の地質構造を明らかとし、泥火山が背斜軸近傍に群をなし分布しており、形態の特徴から3つのタイプに分類されることを明らかとした。また、露頭する泥岩の粘土鉱物分析の結果に基づき、泥火山を胚胎する地層の堆積速度は著しく大きかったことを明らかとした。一方、南方の旗山断層沿いに分布する泥火山群から噴出する地下水の同位体比や水質と小滾水地域のそれらとの比較から、異常間隙水圧層の上昇過程は地質構造により規制されることを示した。

森田ほか(2009)は2007年に実施した日台合同海洋調査において、台湾南西沖、中国大陸棚斜面の高精度反射法地震探査などを行い、泥火山など海底マウンドの存在するリッジ海底地質構造を明らかにした。さらに、顕著な冷湧水活動や化学合成生物群集の存在から地質構造やメタンハイドレートの集積に規制された特異な流体循環が起り、砕屑物を伴って泥火山を形成していることを明らかとした。

3) 泥火山噴出物の地質・地化学特性

井尻(2009)は海底泥火山から噴出する流体やガスの起源を明らかとするために実施された地化学特性に関する研究についてレビューを行い、流体の形成には粘土鉱物の脱水の寄与が大きく、生物起源の有機物の熱分解により生成した炭化水素ガスを含むことを明らかとした。さらに、流体は2km以深からもたらされ、活動的な大陸縁辺ではさらに深部より断層沿いに移動したものとされる。

加藤ほか(2009)は新潟県東頸城地域の泥火

山およびその周辺から放出される原油や天然ガスの地化学特性を検討し、泥火山に伴って上昇してきた石油・天然ガスの根源岩の推定を行うとともに、上昇過程における微生物分解の程度について議論している。その結果から、石油・天然ガスの上昇速度に関する検討を行っている。

中屋・浜田(2009)は和歌山県白浜町田野井地域および袋地域の下部中新統田辺層群中に泥質基質および砂基質の成層角礫岩からなる厚い堆積物を記載し、岩相、層序、堆積構造およびその連続性などの検討により、これらが、かつて海底に噴出した泥火山からもたらされた噴出物であり、田辺層群堆積時の浅海域には径数km規模の田野井泥火山と袋泥火山が形成されていたことを明らかにし、噴出時の堆積環境や噴出のメカニズムなどに関して考察している。最近、紀伊半島沖で実施されている海洋調査で発見されている多くの海底泥火山(森田ほか,2007)の発達過程を考える上で重要な知見を与えるものと期待される。

4) 応用地球科学的評価

2006年にインドネシア、シドアルジョにおいて活動を開始したLUSI泥火山は周辺環境やインフラ等に甚大な被害を与え、陸上泥火山への関心を高めるきっかけとなった。

Mori and Kano(2009)は2006年5月26日に発生したジョグジャカルタ地震がこの泥火山(論文中ではシドアルジョ泥火山)の活動を誘発した可能性について検討を行った。地震波による流体圧の変化に関する検討により、ジョグジャカルタ地震がLUSI泥火山で小さな流体圧の変化を引き起こした可能性があるとしながらも、地震波の伝搬による圧力変動が小さすぎることから、これが泥火山の噴出に直接関与しているかどうかについては評価が難しいとしている。現在でも、この問題について、原因を地震による自然現象に起因とする自然説とボーリング掘削時のトラブルとする人為説とがあり、議論が続いている。

田中・石原(2009)は新潟県十日町市松代地区のほくほく線鍋立山トンネル掘削時に遭遇した膨張性地山の成因について、泥火山の活動とそれに伴われる地下水流動の観点から、近傍で掘削さ

れたボーリングコアの鉱物学的検討や間隙水の地化学的検討を行い、地下構造探査の結果とあわせて評価することにより検討を行った。その結果、当地域では、泥火山活動に伴われて上昇した地下水による岩盤の破壊・粘土化と粘土の膨潤が発生しており、岩盤を掘削することによる Na-スメクタイトの湿潤乾燥による急速な劣化に伴う地山強度比の低下、脱ガスによる異常なガス圧などが膨張性地山としての挙動を生じた主たる原因であることを指摘した。わが国の堆積岩分布域においては、トンネル掘削時に膨張性地山に遭遇しトラブルの原因となったことが知られている（土木学会原子力土木委員会地下環境部会, 2006）。これらの中には、上記のような成因によるものが含まれている可能性があり、膨張性地山の成因に新たな知見をくわえるものとして注目される。

中田・千木良（2009）は台湾南西部において泥火山近傍のバッドランドにおける泥岩斜面の急速劣化・侵食のメカニズムに関する地化学的検討を行った。乾燥による表面からの蒸発により間隙水が表層に移動し、それに伴い間隙水中の溶存成分も表層に移動することになる。この結果、元素が斜面の岩石表層に濃集し、そこで雨水と接触することで粒子間に斥力が働き、泥状化する。その結果、斜面は急速な侵食を受け、乾燥、雨水との接触繰り返しにより、バッドランドを形成したものと結論づけている。急速な侵食は斜面の安定性に大きな影響を与えることが予想され、斜面防災の観点から重要な知見を与えるものと考えられる。

林ほか（2009）では新潟県十日町市室野地区の泥火山近傍に掘削されたボーリング孔を利用した、熱電対による連続温度観測システムとこれまでに得られたデータを紹介している。泥火山はそれ自体が自然のひずみ計とする考え方も提案されており（Martinelli and Dadomo, 2005）、今後の観測結果が期待される。

渡部ほか（2009）は地すべり多発地帯である新潟県東頸城地域において地すべり活動に関与する地下水の地化学的データの整理を行った。その結果、十日町市松之山地域に分布する地すべりを

はじめとして、調査地域内に分布する地すべりから採取した地下水には高塩分濃度を示すものが含まれ、これらは化石海水を起源とする地下深部の異常高圧熱水と天水起源の地下水の混合で説明できるとした。地表部から涵養した天水や雪解け水が原因で地すべりは活動するという従来の考え方に新しい視点を与えるものとして注目される。

宮崎（2009）は泥火山を含むメタン冷湧水帯における化学合成微生物に関する研究のレビューを行っている。特に、化学合成の中心となる微生物は光合成に依存しない嫌氣的メタン酸化アーキア（ANME）（Archaea 古細菌）であり、メタンから始まる炭素循環で重要な役割を果たしていることを指摘した。ANME は現在、ゲノム解析が進められているが、今後は生化学的検討が必要と指摘している。

III. 泥火山研究の今後の展開

2007年にインドネシア、シドアルジョにおいて噴出した LUSI 泥火山のもたらした被害はわれわれの記憶に新しいところである。泥火山の活動は頻繁に起こるものではないことはこれまでの経験から次第に明らかとなってきている。泥火山が地下構造の安定性に及ぼす影響や災害発生など、応用地球科学的観点から泥火山の活動や関連する地質・地下水現象を調査、評価しようとする試みはまだ始まったばかりである。泥火山活動を引き起こした異常間隙水圧はどのような深度で、どのようなメカニズムで発生したか？ 地表へどのようにして上昇移動したか？ 地表付近でどのようなメカニズムで、どのような噴出を繰り返したのか、その場はどのように特定されるのか？ 泥火山の活動により地下深部よりもたらされた高塩分濃度地下水の上昇は地表付近の地質環境にどのような影響を与えたのか？ といったさまざまな課題に対する検討が進められている。

堆積岩分布地域における地質・地下水現象の一部は、泥火山の活動という新しい視点から評価することで、これまで解決できなかったさまざまな課題に対して何らかの答えを見出すことができる可能性がある。紀伊半島では第三紀層中に周囲の

地層と不調和な泥ダイアピルや泥火山噴出物が報告されており、付加体においても同様の堆積物が発見され地質構造解釈が変わる可能性もある。

最後に、田中（2009）は泥火山にはいろいろな側面（破壊的活動、広域地下水流動、岩盤劣化、地すべり、地殻歪としての適用、そしてメタンガスの放出）があることを指摘し、これらを図にまとめた。これらの側面は互いに複雑に絡み合っているが、現時点では明確にその関係を示すことは難しいであろう。

本特集号はさまざまな視点から泥火山の実体に迫るとともに、その応用地球科学的問題の解決に向けてのアプローチを試みた。まだ、当初の目的は十分達成されているとはいえないが、本特集号により、今後、少しでも泥火山研究が進展すれば幸いである。

文 献

- Bates and Jackson (1987): *Glossary of Geology*. American Geological Institute, 788p.
- 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, **103**, 781-791.
- Deville, E., Battani, A., Griboulard, R., Guerlais, S., Herbin, J.P., Houzay, J.P., Muller, C. and Prinzore, A. (2003): The origin and processes of mud volcanism: New insights from Trinidad. in *Subsurface Sediment Mobilization* edited by Rensbergen, P., Hillis, R.R., Maltman, A.J. and Morley, C.K., *Geological Society Special Publication*, **216**, 475-490.
- 土木学会原子力土木委員会地下環境部会 (2006): 精密地区選定段階における地質環境と評価の基本的考え方. 144p.
- 浜田好弘・田中和広・宮田雄一郎 (2009): 台湾泥火山の地質構造と地化学特性. 地学雑誌, **118**, 408-423.
- 林 武司・徳永朋祥・茂木勝郎 (2009): 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, **118**, 533-542.
- Higgins, G.E. and Saunders, J.B. (1974): Mud volcanoes-their nature and origin. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel*, **84**, 101-152.
- 井尻 暁 (2009): 海底泥火山堆積物中の間隙水の起源. 地学雑誌, **118**, 435-454.
- 石原朋和・田中和広 (2009): 泥火山周辺の地質構造と地下水の地化学特性—新潟県十日町市蒲生における検討—. 地学雑誌, **118**, 350-372.
- 加藤 進・早稲田 周・西田英毅・岩野裕継 (2009): 新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原油・ガスの地球化学. 地学雑誌, **118**, 455-471.
- Kopf, A.J. (2002): Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, **40**, 2-1-2-51.
- Martinelli, G. and D'Adamo, A. (2005): Mud volcano monitoring and seismic events. *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity* edited by Martinelli, G. and Panahi, B., *NATO Science Series*, **51**, 187-200.
- 松本 良・長久保定雄・奥田義久・棚橋 学・村松康行・稲崎富士・笠原順三編 (2009): 特集号: メタンハイドレート (Part I): 産状, 起源と環境インパクト. 地学雑誌, **118**, 231p.
- 宮崎淳一 (2009): 泥火山を含む冷湧水帯における微生物の生態系およびその代謝活動. 地学雑誌, **118**, 564-577.
- Mori, J. and Kano, Y. (2009): Is the 2006 Yogyakarta earthquake related to the triggering of the Sidoarjo, Indonesia mud volcano? *Journal of Geography*, **118**, 492-498.
- 森田澄人・中村恭之・芦 寿一郎・佐伯龍男・林 雅雄・月岡 哲 (2007): 海洋泥火山群の活動史を探る. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, Y239-003.
- 森田澄人・Liu, C., Ku, C., 町山栄章・Lin, S., 徐垣・清水 賢 (2009): 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, **118**, 424-434.
- 中田英二・千木良雅弘 (2009): バッドランド斜面における侵食プロセスに関する地化学的検討—台湾南部, 泥火山が分布する古亭坑層での調査—. 地学雑誌, **118**, 511-532.
- 中屋志津男・浜田好弘 (2009): 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, **118**, 472-491.
- 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. (2009): 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, **118**, 390-407.
- 新谷俊一・田中和広 (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, **24**, 49-58.
- 新谷俊一・田中和広 (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, **118**, 340-349.
- 鈴木浩一・徳安真吾・田中和広 (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, **118**, 373-389.
- 田中和広 (2009): 泥火山および泥火山の生成に係わる地質・地下水現象の応用地球科学的意義. 地学雑誌, **118**, 578-586.
- 田中和広・石原朋和 (2009): 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, **118**, 499-510.
- 渡部直喜・佐藤壽則・古谷 元 (2009): 新潟地域の大規模地すべりと異常高圧熱水系. 地学雑誌, **118**, 543-563.