世界の海底泥火山の分布と山体形態に関する一考察

Geological occurrence and morphological feature of submarine mud volcanoes: A brief review

Abstract

喜岡 新*

Arata Kioka*

2017年9月17日受付.

2019年1月10日受理.

* レオポルト・フランツェンス大学インスブルック地球惑星科学研究科地質学専攻
Institut für Geologie, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innrain 52f, 6020 Innsbruck, Austria.

Corresponding author: A. Kioka,
Arata.Kioka@uibk.ac.at

Mud volcanism is tied closely to subsurface cycling of sediment, fluid and carbon, and thus plays an important role in the whole earth system. Yet, our understanding of mud volcanism falls far behind that of “magmatic” volcanism. This paper briefly overviews fundamental topics of submarine mud volcanoes, including their geological distribution and morphological features. The compilation of distribution represents that submarine mud volcanoes are found widely in most plate subduction margins, except for those in subpolar regions. The morphological study suggests that the shapes of submarine mud volcanoes are highly variable and likely related to geological properties of the proximal subduction margins. All the fundamental studies reviewed here lead to an increase in our understanding of mud eruption dynamics, as well as the dynamic interplay between mud volcanism and subsurface material cycling in plate subduction margins.

Keywords: submarine mud volcanoes, mud eruptions, plate subduction margins

はじめに

泥火山に対する関心は半世紀前以上に遡られる。1970年代からは陸上泥火山の分布の研究が本格的に進み(Higgins and Saunders, 1974), これまで海陸の様々なテクトニクス場で泥火山が発見されてきた。海底に発達する泥火山に限れば, 世界中で数千あるいはそれ以上の存在が示唆されている(Milkov, 2000; Dimitrov, 2002)。泥火山は「日本の地質学100年」以降の過去25年間で理解が飛躍的に進んだ一研究分野であり, ここ四半世紀の研究成果により, 発達分布だけでなく, 地表下表層の堆積物循環, 流体移動, 炭素循環, 化学合成生物群集や微生物活動における泥火山活動の重要性が明らかになってきた(Kopf, 2002; Kioka and Ashi, 2015; Mazzini and Etiope, 2017; 浅田, 2020; 井尻, 2020)。また, 泥火山はメタンなどの炭化水素ガスを多量に放出することが考えられ, メタンガスのフラックスの推定なども試みられてきた(Kopf, 2003; Milkov et al., 2003; Feseker et al., 2014; Kioka et al., 2019)。

泥火山の噴出活動は, 地下での異常間隙水圧によって形成されると考えられている(例えば, 山縣・小川, 1989; Kopf, 2002)。泥火山活動を理解する上で重要な山体の内部構造は, 様々な構造探査によって理解が進んでいる。特に, 高分解能反射法地震探査記録などによって, 深部から上昇する噴出物の通路や, 流動化した噴出泥が高透水層に沿って貫入して形成されるクリスマスツリー構造を見ることができる(Somoza et al., 2003)。クリスマスツリー構造を層序学的に見る

と, 泥火山の複成的な噴出活動(活動の時期や規模)とテクトニクス(断層運動など)の関連性も推定することができる。そして, 様々な地球化学的手法を用いることによって, 山体を形成する噴出物の給源や流体の起源の推定も行われてきた(井尻, 2009; 土岐ほか, 2013; Nishio et al., 2015)。また, 地震活動と泥火山活動の関連性についても, 特にインドネシアの「Lusi」泥流体噴出の活動以降, 活発な議論が行われてきた(例えば, 千木良・田中, 1997; Mellors et al., 2007; Manga et al., 2009; Wang and Manga, 2010; Tsunogai et al., 2012; Bonini et al., 2016; Maestrelli et al., 2017; Menapace et al., 2017)。なお, Lusiの噴出活動については, 近隣の天然ガス掘削あるいは自然地震のどちらが誘発したかについて議論が続いていることを注釈しておきたい(例えば, Davies et al., 2008; Lupi et al., 2013; Tingay et al., 2015, 2018)。

一方で, 泥火山と類似の泥流動を伴う地質的現象であるボックマークは, 径50~100 m, 深さ1~3 mのものが多く, その分布密度はオーダーにして 10^1 km^{-2} 前後であることが知られている(Judd and Hovland, 2007)。山体形態に関しては, マグマ性の火山の山体形態の違いはマグマの粘性の違いから定性的に議論されることが多いが, 泥火山に関する研究例は非常に乏しく, 研究例のほとんどが陸上泥火山に限られている(例えば, Shih, 1967; 千木良・田中, 1997; Bonini, 2008, 2012)。特に, 山体形態に関する考察が少ないのは, 風化・侵食に左右される陸上泥火山の保存状態だけでなく, 給源深部から地表への泥火山噴出物の上昇機構の多

様性(例えば, Manga et al., 2009; Kioka et al., 2015; 田中ほか, 2020)や噴出物のレオロジーの複雑性(例えば, Kopf, 2002; Kioka and Ashi, 2015)などに起因するからであろう。しかしながら, 山体分布と形態の考察は, 泥火山現象の物理を理解する上で不可欠であり, 泥火山活動を考察する上で重要な役割を果たす事が期待される。さらに, 泥火山の発達分布を知ることは, 各々の泥火山フィールドにおいて根となる主要な噴出物給源(ここでは泥チャンパーと呼ぶ)のサイズ推定に役立つ。なぜなら, 泥チャンパーが深部にある場合, そのイメージングは現状として困難であるが, 例えば噴出物の上昇機構としてダイアピル上昇を仮定すると, 分布密度の情報と流体力学的不安定性の応用から泥チャンパーのサイズのオーダー的議論が可能となるからである(Kioka, 2016)。また, 仮に泥火山の山体形態と噴出量の間にスケーリング則が存在すれば(Kioka and Ashi, 2015), 泥火山活動の時空間分布などの理解が進むであろう。

以上より, 地球上の泥火山の分布および山体形態という極めて基礎的な研究は, 本稿執筆時で最新の国際誌の総説論文(Mazzini and Etiope, 2017)でもあまり考察されていないが, 泥火山のダイナミクスを理解する上で最重要トピックであるといっても過言ではないであろう。本論では, 現在確認されている世界中の海底泥火山の分布や山体形態の特徴を, 海底泥火山カタログ(Kioka and Ashi, 2015)に水深情報を加えたデータセットを用いて簡単に概説する。ただし, 考察に必要な山体情報が既知である地中海, カディズ湾, 日本, 台湾, コスタリカ・ニカラグア沖に限定して考察する。また, マリアナ前弧域などで見られる蛇紋岩泥火山は, 他の海底泥火山と性質が異なると考えられているため(例えば, Fryer, 2012; 浅田, 2020), 本論の考察対象としていない。

世界中の海底泥火山の分布と山体形態

世界中の海底泥火山の分布を見ると, Kopf(2002)によるレビューや Kioka and Ashi(2015)のコンパイルーションにもあるように, 海底泥火山は様々なテクトニクス環境で発達していることがわかる(Fig. 1a)。特に, 東地中海やカディズ湾(次節を参照), アラビア海マクラン地方沖(例えば, Wiedicke et al., 2001), 小アンティル諸島縁辺(例えば, Henry et al., 1996)では, 他の海域よりも数多くの海底泥火山が確認されている。これは, これら海域が低尖形角で厚い低透水性の堆積層で構成された付加複合体から成るプレート沈み込み縁辺であり, 堆積層から海底へ排水されにくいいため, 泥火山噴出物の上昇の要因となる過剰間隙水圧を発生しやすい場であることが要因の一つだと考えられる(Kioka and Ashi, 2015; Kioka et al., 2015)。

次に, 山体情報が既知である海底泥火山のサイズを見てみる(Fig. 1c)。既知の海底泥火山の山体の高さ H は最大で 350 m, 平均径 D_{mean} は最大で約 8 km である。海底では観測能力のために小さい山体の観測が難しいが, 海底泥火山は陸上泥火山(例えば, Bonini, 2012)と比べて総じて大きい。なお, これらの値から楕円錐形を仮定して山体の体積を見積もると, $10^7 \sim 10^8 \text{ m}^3$ オーダーの海底泥火山が多いことがわ

Fig. 1. (a) Occurrence of submarine mud volcanoes on Earth. Stars show known mud volcano fields of submarine mud volcanoes, while circles represent other inferred occurrence of submarine mud volcanism and known mud fields of onshore mud volcanoes. Modified from Kioka and Ashi (2015). (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of known submarine mud volcanoes, where the diameter D_{mean} denotes the mean diameter, defined as $D_{mean} = (D_{min} + D_{max})/2$, if both the maximum diameter D_{max} (km) and minimum diameter D_{min} (km) are available for the given mud volcano, otherwise denotes a representative diameter of one available from the literature. Data are from Kioka and Ashi (2015). Large serpentine mud volcanoes in the Izu-Bonin (Ogasawara)-Mariana (IBM) Arc are excluded here.

かる。そして, 平均径 D_{mean} と山体高さ H の間には強い相関は見られず, 山体形態が多様であることがわかる。マグマ性火山の場合は, 15 オーダー以上もレンジがあるマグマ粘度 ($10^{-1} \sim 10^{14} \text{ Pa s}$; Giordano et al., 2008)による流動性の違いから山体形態(楕状, 成層, 鐘状火山など)を議論することが多い。一方で, 泥火山の噴出物の粘度のレンジは4 オーダー程度に限られる ($10^3 \sim 10^6 \text{ Pa s}$; Kopf and Behrmann, 2000; Manga et al., 2009)にもかかわらず, 泥火山の山体勾配は $0 \sim 28$ 度と大きく火山と匹敵するレンジをもつ。また, 海底泥火山の山体勾配 (H/D_{mean}) の平均値は, 標本数に大きな差異があるものの, 衛星重力データから算出される海底火山(Kim and Wessel, 2011)の山体勾配平均値とほぼ等しく(Kioka and Ashi, 2015), 異なったレオロジーの観点からも興味深い。なお, 東地中海では, 本論で紹介するものより大きな海底泥火山の発達が推定されているが(Kopf et al., 2001), 詳細が不明なため, 本論では扱わなかった。

さらに, 海底泥火山が発達している水深に着目してみる。

Fig. 2. (a) Scatter plot of water depth (m) at the base of a given submarine mud volcano versus mean diameter of the mud volcano D_{mean} (km). (b) Scatter plot of water depth (m) at the base of a given submarine mud volcano versus the ratio of height to mean diameter of the mud volcano H/D_{mean} . The present-day range of water depth at which gas hydrate stability can be present is also shown. Most submarine mud volcanoes are found above the subseafloor sediment columns where the gas hydrate stability zones are present. The mean water depth of occurrence of submarine mud volcanoes is $\sim 1,500$ m.

イタリア・カタンザーロ沖の Catanzaro 泥火山 (Ceramico et al., 2014), 台湾・高屏陸棚に発達する泥火山群 (例えば, Chiu et al., 2006; 森田ほか, 2009) およびメキシコ湾ミシシッピ海底谷・グリーン海底谷に発達する泥火山群 (例えば, Neurauder and Roberts, 1994; Roberts, 2001) を除き, 海底泥火山はハイドレート安定領域が分布する地域 (例えば, Kretschmer et al., 2015) に発達している (Fig. 2). したがって, 泥火山活動は多かれ少なかれガスの影響を受けていることが推測される. そこで, 噴出物に含まれるガスの体積が水深で異なることを考えると, 水深が泥火山形態に何らかの影響を及ぼしていることが予想される. 実際に, 平均径 D_{mean} が 2 km 以上の大きな海底泥火山は, ハイドレート安定領域が存在する水深でのみ発達している (Fig. 2a). また, 大規模な海底泥火山は, 水深 2000 m 前後に集中している. 一方で, 現在の温度条件ではハイドレート安定領域が存在しない水深でも平均径 D_{mean} が 2 km 程度の中規模の泥火山が発達していたり, ハイドレート安定領域が存在する水深であっても平均径 D_{mean} が 0.3 km 以下の小さな泥火山が

Fig. 3. (a) Scatter plot of height H (m) versus aspect ratio (D_{min}/D_{max}) of known submarine mud volcanoes, where D_{max} and D_{min} (km) are the maximum and minimum diameters of the mud volcano, respectively. (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus aspect ratio (D_{min}/D_{max}) of known submarine mud volcanoes, where $D_{mean} = (D_{min} + D_{max})/2$. Serpentine mud volcanoes in the IBM Arc are excluded here. Data from Kioka and Ashi (2015).

いくつか見られる. よって, 水深と平均径 D_{mean} の関係性は明瞭ではない. 同様に, 水深と海底泥火山の山体勾配 (H/D_{mean}) の間にも明瞭な関係性は見られない (Fig. 2b).

また, 山体の底の長径 D_{max} と短径 D_{min} から, 山体の径方向の形態についてアスペクト比 D_{min}/D_{max} を用いて考察する. ここでは, アスペクト比 D_{min}/D_{max} が 1 に近いほど山体底面が円形に近いことを意味する. 一見すると, アスペクト比 D_{min}/D_{max} は高さ H が 250 m までは, 高さ H が大きくなるほどアスペクト比 D_{min}/D_{max} が小さくなっているような傾向がやや見える (Fig. 3a). よって, 海底面の起伏の影響を無視すると, 噴出活動を繰り返して泥火山が成長するに従って噴出物の排出通路となる「泥火道」が径方向に移動している可能性や, マグマ性の火山で見られるような応力方向の山体型 (Nakamura, 1977) を反映している可能性を考えることができる (Bonini, 2012). しかしながら, アスペクト比 D_{min}/D_{max} と平均径 D_{mean} の関係性に注目すると, 平均径 D_{mean} が大きくなるに従ってアスペクト比 D_{min}/D_{max} が小さくなるといった相関は全く見られない (Fig. 3b). したがって, 山体形態は, 先述したような噴出活動に伴う泥火道の移動や応力方向だけでなく, 他の諸要因にも左右されていることが示唆される.

Fig. 4. (a) Distribution of submarine mud volcanoes in the Eastern Mediterranean. ETOPO1 grid data (Amante and Eakins, 2009) are used to illustrate the bathymetric map. (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes in the Eastern Mediterranean Sea, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding large serpentine mud volcanoes in the IBM system. The mean diameters D_{mean} are moderate to large in the Eastern Mediterranean. Despite the range of diameter D_{mean} , the mud volcanoes have relatively lower heights H . Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

各沈み込み縁における海底泥火山の分布と山体形態の特徴

地中海東部(東地中海)

東地中海では、地中海海嶺と呼ばれる長さ 1500 km・幅 300 km 程度の弓状の付加複合体が、ヘレニック弧に沿うヌビアプレートのエーゲ海プレート下への沈み込みによって発達している (Emery et al., 1966). まず、泥火山の分布を見ても、地中海海嶺の上やナイルコーンと呼ばれる海底扇状地に泥火山は発達しており (Fig. 4a), 既知の海底泥火山の数は東地中海が最も多い (例えば, Kioka and Ashi, 2015). 特に、東地中海の海底泥火山の多くは、地中海海嶺内のエーゲ海側でベルト状に分布していることが以前から知られている (Limonov et al., 1996). そして、地中海海嶺西部で推定される泥火山や泥ダイアピル構造の 95% 以上が、付加複合体とエーゲ海側のバックストップの境界周辺で見られる (Rabaute and Chamot-Rooke, 2007). 一方で、地中海海嶺東部では、変形フロント寄り 20 km 径の泥火山様地形の存在が示唆されている (Kopf et al., 2001). 地中海海嶺

では、最大層厚 2 km のメッシニアン塩分危機 (Hsü et al., 1973; 黒田ほか, 2014) に起因する岩塩層が海底数百メートルで堆積しており (例えば, Chaumillon et al., 1996; Polonia et al., 2002), 岩塩層の存在はウェッジ全体での排水性を大きく低下させることが予想される (例えば, Davis and Engelder, 1985). 実際に、反射法および屈折法地震探査記録や掘削データから、大部分の泥火山は、泥噴出の経路が確保されやすい岩塩層が非常に薄い場あるいは未発達な場で発達していることがわかっている (Camerlenghi et al., 1995; Chamot-Rooke et al., 2005). さらに、地中海海嶺では泥火山が塩水湖に隣接して発達している場所もあり (例えば, Woodside and Volgin, 1996; MEDINAUT/MEDINETH Shipboard Scientific Parties, 2000), これらの場所で発達する泥火山は隣接の塩水湖と流路を共有している可能性が示唆されている (徳山ほか, 2007; Kioka et al., 2015). このように、泥火山の噴出活動とメッシニアン岩塩層のリンケージには興味深いものがある. また、泥火山フィールドに隣接するヘレニック弧はヨーロッパで地震活動が最も活発なプレート沈み込み帯であり、噴出活動が近くの中〜大規模の地震の影響を受けている可能性も考えられている (Kioka et al., 2015).

次に、山体の形態を見てみる (Fig. 4b). 泥火山の径 D_{mean} は 700 m 以上のものが大半であり、東地中海では径の大きい泥火山が多いことがわかる (東地中海の泥火山の D_{mean} の平均: 2.0 km). なお、最も調査されている地中海海嶺中部の Milano 泥火山は、1.5 Ma に活動が始まり現在も活動中で (Robertson and Ocean Drilling Program Leg 160 Scientific Party, 1996), その径 D_{mean} は 2.4 km (Camerlenghi et al., 1995; Hieke et al., 1996) に及ぶが、東地中海の泥火山では平均的な大きさである. 一方で、他の海域の海底泥火山と比べると、径が大きい割に山体の高さ H は小さい. 即ち、東地中海では他海域よりも、山体勾配の小さい海底泥火山が多いことがわかる.

カディズ湾

カディズ湾は東地中海同様、数多くの海底泥火山の発達を確認されている (Fig. 5). カディズ湾は、ユーラシアプレートとアフリカプレートの境界に位置するが、テクトニクスが非常に複雑である. モロッコ北部のリフ帯とスペイン南部のベティック帯による伸張も伴い、カディズ湾下のプレート境界は広く変形され、東西方向約 400 km、南北方向に約 200 km にわたり弓状の付加複合体が発達している (例えば, Zitellini et al., 2009). カディズ湾付加複合体は、地中海海嶺付加複合体と同様に、低尖形角で堆積層の厚いウェッジから成っている. 本海域の特徴は、海底泥火山が水深 400~4000 m の幅広い水深域で発達していることである. そして、現在、少なくとも 60 以上の海底泥火山が発見されているが、そのほぼ全てが付加複合体上で発達している (Fig. 5a). また、海底泥火山の分布は、スラスト、正断層、横ずれ断層に沿って分布しているものが多い. 特に水深 2000 m 以浅では、海底泥火山の分布が、付加複合体北側の北東-南西、南側の北西-南東方向のレンチ断層に左右されているようにみ

Fig. 5. (a) Distribution of submarine mud volcanoes in the Gulf of Cádiz. Bathymetry, major thrusts and wrench systems are from the SWIM compilation (Zitellini et al., 2009). (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes in the Gulf of Cádiz, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding serpentine mud volcanoes in the IBM system. The mean diameters D_{mean} are moderate to large in the Gulf of Cádiz. Despite the range of diameter D_{mean} , the mud volcanoes have relatively higher heights H . Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

える (Pinheiro et al., 2003; Medialdea et al., 2009). また、山体形態 (Fig. 5b) を見ると、泥火山の径 D_{mean} は 500 m 以上のものが大半であり、カディズ湾では径の大きい泥火山が多い。さらに、他の海域の海底泥火山と比べると、径 D_{mean} の割に山体の高さ H が大きい、即ち、カディズ湾では他海域よりも、山体勾配の大きいコーン状の山体形態をした海底泥火山が多いといえる。

地中海西部～地中海中部

地中海西部では、ジブラルタル弧の内側でリフ帯とベティック帯の間に位置するアルボラン海において海底泥火山が見られる (Fig. 6a)。アルボラン海の中でも、特に堆積層が最も厚い西アルボラン海盆 (例えば, Comas et al., 1992) で最も多くの海底泥火山が見つっている (Blinova et al., 2011; Somoza et al., 2012; Gennari et al., 2013)。

一方、地中海中部では、イオニア海とティレニア海で海底泥火山が見られる (Fig. 6b)。イオニア海では、ヌビアプレ-

Fig. 6. (a) Distribution of submarine mud volcanoes in the Western Mediterranean and (b) the Central Mediterranean. Bathymetric data from the GEBCO_2014 Grid (Weatherall et al., 2015). (c) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes in the Western and Central Mediterranean, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding serpentine mud volcanoes in the IBM system. One of the largest mud volcanoes, Pythagoras Mud Volcano, ~8 km in diameter and ~350 m height, is located in the inner pre-Messinian Calabrian accretionary prism in the Ionian Sea (Praeg et al., 2009). Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

ートのユーラシアプレートへの非常に遅い沈み込みに伴い、北西傾斜のカラブリア付加プリズムが発達している。その内側では、アペニン＝マガリビデ帯を挟んで、背弧海盆とみなせるティレニア海が広がる (Jolivet and Faccenna, 2000)。イオニア海では、地形的特徴に由来して名付けられた泥火山群 Madonna dello Ionio (イタリア語で「イオニアのマドンナ」の意) が有名である (例えば, Foucher et al., 2009)。本海域での泥火山の分布の特徴としては、メッシニアン期以前に発達したカラブリア付加プリズム内帯よりも内側で見られ、メッシニアン岩塩層が発達しているカラブリア付加プリズム外帯では泥火山は未発達である。これは、東地中海と同様に、岩塩層が泥火山分布に影響を及ぼしていることを示唆する。また、イタリア・カタンザーロ沖の Catanzaro 泥火山 (Ceramicola et al., 2014) は、メタンハイドレート安定領域よりも浅水域で発達している。

イオニア海では、様々なサイズの海底泥火山が確認されている (Fig. 6c)。本論で紹介する泥火山で最も山体が大きい Pythagoras 泥火山は、メッシニアン期以前に発達したカラブリア付加プリズム内帯に存在する (Praeg et al., 2009)。

Fig. 7. (a) Distribution of submarine mud volcanoes in the Kumano basin of the Nankai margin. (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes in the Kumano basin, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding serpentine mud volcanoes in the IBM system. Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

Pythagoras 泥火山は、長径 9 km、短径 7 km であるが高さは 350 m で山体勾配が比較的緩やかな泥火山である (Fig. 6c)。山頂付近では比較的新しいマッドブレッチャが確認されており現在も活動的な泥火山であることが示唆される。

日本

日本では南海トラフ (Fig. 7a) や琉球海溝で海底泥火山が発見されている。南海トラフでは多くの海底泥火山が熊野海盆内に集中しており (Kuramoto et al., 2001; Morita et al., 2004; Muraoka et al., 2011; Pape et al., 2014)、現在その数は十数個程度だと推定されている。熊野海盆の海底泥火山は、他の地域の泥火山と比較すると、中規模のサイズが多い (Fig. 7b)。熊野海盆北西部では、2 つの泥火山が隣接した「双子泥火山」が見られている。これは、同じ泥火道を共有している可能性や、泥火道の移動に関連した泥火山発達時期の違いを反映している可能性などが考えられる。熊野海盆の泥火山の詳細は Kuramoto et al. (2001) や Morita et al. (2004) などを参照されたい。一方で、海底泥火山は熊野海盆内に限らず、熊野沖の外縁隆起帯 (浅田ほか, 2016; 浅田, 2017) でも確認されている。外縁隆起帯での泥火山の発達は、3 次元反射法地震探査データを用いたハイドレート濃集層とガス貯留層の高解像度マッピングによって、フラクチャの発

Fig. 8. (a) Distribution of submarine mud volcanoes in the southwest Taiwan. Deformation front is from Liu et al. (1997). ETOPO1 grid data (Amante and Eakins, 2009) are used to illustrate the bathymetric map. (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes in the southwest Taiwan, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding serpentine mud volcanoes in the IBM system. Most of the mud volcanoes in the southwest Taiwan are located at water depths of <1000 m (e.g., Chen et al., 2014), and some of them are situated above the seafloor sediment columns where the gas hydrate stability zones are absent. Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

達に伴うガス流体供給が関係していることが考えられている (Jia et al., 2016; Chhun et al., 2018)。同様に、室戸沖でも泥火山が確認されており、バルバドス海嶺付加複合体でも見られるように、変形フロント近傍でトラフ軸に直交したリニアメントに沿って泥火山が発達している (芦ほか, 1990; Ashi and Taira, 1992)。また、琉球海溝沿いでは、10 以上の海底泥火山が種子島沖の前弧海盆内を中心に確認されており (Ujiié, 2000; Nakayama et al., 2010; Hoshino et al., 2017)、その分布は周辺の断層に制約されていることが示唆されている (例えば、泉ほか, 2016)。

台湾

台湾では、台湾南西沖の付加複合体上で泥火山が数多く発見されている。現在、100 個近くの海底泥火山の存在が示唆されており (例えば、Tseng and Liu, 2007)、その多くが水深 1000 m 以浅の上部斜面で発達している (Fig. 8a)。特

Fig. 9. (a) Distribution of submarine mud volcanoes off Costa Rica and Nicaragua Pacific margins. ETOPO1 grid data (Amante and Eakins, 2009) are used to illustrate the bathymetric map. (b) Scatter plot of mean diameter D_{mean} (km) versus height H (m) of submarine mud volcanoes. Gray triangles are the submarine mud volcanoes offshore Costa Rica and Nicaragua, while open circles are other known submarine mud volcanoes, excluding serpentine mud volcanoes in the IBM system. Data of submarine mud volcanoes are from Kioka and Ashi (2015).

に、高雄沖の高屏陸棚(例えば, Chiu et al., 2006; Chen et al., 2014)や琉球嶼周辺で発達する泥火山群については、現在のハイドレート安定領域よりも浅水域で発達している点で興味深い。本海域の泥火山については、森田ほか(2009)など日文誌も参照されたい。また、台湾の海底泥火山は、サイズにバリエーションがある(Fig. 8b)。他の海域の海底泥火山と比べると、径 D_{mean} の割に山体の高さ H が大きく、台湾南西沖では山体勾配の大きい海底泥火山が多いことがわかる。

コスタリカおよびニカラグア

これまで紹介してきた海域は主に付加型のプレート沈み込み縁辺であったが、コスタリカ太平洋側およびニカラグア南西沖はココスプレートの速い沈み込みに伴う侵食型の沈み込み縁辺である(Ranero and von Huene, 2000)。コスタリカ沖の泥火山は、すでに80年代に3次元反射法地震探査によって発見されていた(例えば, Shipley et al., 1990)。本海域では、多くの泥火山が変形著しい中部斜面で発達しており

(Fig. 9a)、泥火山周辺では数多くの冷湧水活動が確認されていることから(例えば, Bohrmann et al., 2002; Sahling et al., 2008)、噴出活動に必要な流体が十分存在していることが推測される。そして、連続的なカーボネートで覆われている泥火山がいくつか見られるのも特徴である(例えば, Mörz et al., 2005; Bürk, 2007)。また、本海域の泥火山は、小～中サイズの径 D_{mean} で山体勾配の大きいコーン状の山体をもつものが多い(Fig. 9b)。

その他

これまで見てきたように、海底泥火山はほとんどのプレート沈み込み縁辺で確認されている。しかしながら、南部アラスカや南部チリ縁辺といった亜極域沈み込み縁辺では海底泥火山の存在の報告例はない。亜極域沈み込み縁辺において他の沈み込み縁辺に匹敵する有機炭素量が Ocean Drilling Program Leg 202 (Shipboard Scientific Party, 2003) や Integrated Ocean Drilling Program Expedition 341 (Jaeger et al., 2014) の掘削試料から確認されている。以上から、泥火山噴出活動の誘発材料となり得るガスは亜極域でも十分存在すると考えられており、泥火山の未発達は、泥火山および亜極域沈み込み縁辺コミュニティでは謎となっている(Wallmann et al., 1997; Kopf, 2002)。一方で、カナダのノースウエスト/ユーコン沖のボフォート海(Paull et al., 2015)、中部ブリティッシュコロンビア沖(Berkowitz, 2015)、オホーツク海浅海陸棚(Shakirov et al., 2004)、南極半島サウスシェトランド縁辺(Tinivella et al., 2008)等では海底泥火山が確認されている。亜極域沈み込み縁辺で海底泥火山が未発達であるのは、過去の気候変動に伴う大規模な氷河作用が海底下層の排水環境に影響を及ぼしたことが要因として考えられている(喜岡ほか, 2015)。

まとめと今後の課題

本論では、現在確認されている世界中の海底泥火山の分布や山体形態の特徴について簡単な考察を行った。本論の考察は以下の2点に要約される：

1. 海底泥火山の分布密度は海底下の排水環境に左右される。例えば、排水が行われにくい場では泥火山の産出頻度が高い。
2. 海底泥火山の山体形態を決める要因は多様であるため、山体の径方向・高さ方向の形態にはバリエーションがある。一方で、プレート沈み込み縁辺ごとに共通した山体形態の特徴が見られる。例えば、低尖形角で厚い堆積層で構成された付加複合体に発達する海底泥火山の山体勾配は、他の沈み込み縁辺の泥火山に比べて、総じて小さい。

本論ではわずか250程度の海底泥火山の考察にとどまったが、世界中には数千の海底泥火山が存在することが推定されている(Milkov, 2000; Dimitrov, 2002)。今後、海底泥火山の発見数は海洋調査能力の向上により増加することが見込まれるため、既存の海底泥火山カタログ(Kioka and Ashi, 2015)等を更新することによって、その他の地質学的背景との関連性を考察できるであろう。また、今回は海底に発達す

る泥火山のみ対象としたが、バイカル湖といった湖底でも泥火山が多数発見されており(例えば, Van Rensbergen et al., 2002; Khlystov et al., 2013), 保存性が期待される湖底泥火山についても含めて今後議論する必要がある。さらに, 地球に限らず, 泥火山様地形が火星で多数確認されていることにも注目したい(例えば, Skinner and Mazzini, 2009; Komatsu et al., 2011; 宮本ほか, 2016; 野口・栗田, 2016)。火星の泥火山様地形から直接山体試料を採取するのは現状困難だが, 山体分布と山体地形であれば, High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) 等の高解像度画像によって, 地球の海底泥火山よりも詳細なデータを取得することができる(例えば, Oehler and Allen, 2010; Pondrelli et al., 2011; Hemmi and Miyamoto, 2017)。よって, 泥火山の物理および泥火山活動と地球システムの関係性, ならびに火星の泥火山様地形および表層環境・地下深部を理解する上でも, 高分解能 DEM 解析などを駆使した効率の良い陸上泥火山のデータベース構築が今後期待される。

謝 辞

大学院在学中に, 芦寿一郎氏ならびに徳山英一氏が泥火山の世界へいざなってくださり, 本論の内容をまとめることができた。そして, 本特集号への投稿機会を与えてくださった担当編集委員の浅田美穂氏と2名の査読者から建設的なコメントをいただき, 本稿は改善された。また, 本稿ではほとんど触れていないが Akhmanov 氏, Isaev 氏(モスクワ大学), Huang 氏(国立台湾大学)とのロシア, ウクライナ, 黒海周辺, 台湾の泥火山の議論は有用であった。以上の方々に厚く御礼申し上げます。著者は Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF-P29678) の支援を得た。

文 献

- Amante, C. and Eakins, B. W., 2009, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, data sources and analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, National Geophysical Data Center, NOAA, doi: 10.7289/V5C8276M.
- 浅田美穂, 2017, 熊野海盆泥火山における活動拘束条件を探る。日本地球惑星科学連合 2017 年大会予稿集, SGL34-P04. [Asada, M., 2017, Why and where submarine mud volcanoes existing? A case study of the Kumano Basin, Nankai Trough subduction zone. *Japan Geosci. Union Meet. 2017, Abstr.*, SGL34-P04.]
- 浅田美穂, 2020, 「泥火山」定義, 概念, 成因, および最近の研究動向。地質雑, **126**, 3–16. [Asada, M., 2020, Definition, concept, occurrence, and recent developments in the study of mud volcanoes. *J. Geol. Soc. Japan*, **126**, 3–16.] (本特集号)
- 浅田美穂・木村俊則・野口拓郎・Moore G. F., 2016, 熊野海盆外縁隆起帯における泥火山活動報告。日本地球惑星科学連合 2016 年大会予稿集, SGL40-P01. [Asada, M., Kimura, T., Noguchi, T. and Moore, G. F., 2016, Mud volcano activity confirmed at the Kumano Basin Edge Fault Zone. *Japan Geosci. Union Meet. 2016, Abstr.*, SGL40-P01.]
- Ashi, J. and Taira, A., 1992, Structure of the Nankai accretionary prism as revealed from IZANAGI sidescan imagery and multichannel seismic reflection profiling. *Isl. Arc*, **1**, 104–115.
- 芦寿一郎・徳山英一・平 朝彦, 1990, 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, **33**, 43–48. [Ashi, J., Tokuyama, H. and Taira, A., 1990, Structure of the Nankai Trough accretionary prism revealed by IZANAGI oceanfloor imaging sonar system. *J. Sediment. Soc. Japan*, **33**, 43–48.]
- Berkowitz, R., 2015, Active mud volcano field discovered off southeast Alaska. *Eos*, **96**, doi: 10.1029/2015EO040447.
- Blinova, V. N., Comas, M. C., Ivanov, M. K., Poludetkina, E. N. and Matveeva, T. V., 2011, Active mud volcanism in the West Alboran Basin: Geochemical evidence of hydrocarbon seepage. *Mar. Pet. Geol.*, **28**, 1483–1504.
- Bohrmann, G., Heeschen, K., Jung, C., Weinrebe, W., Baranov, B., Cailleau, B., ... Trummer, I., 2002, Widespread fluid expulsion along the seafloor of the Costa Rica convergent margin. *Terra Nova*, **14**, 69–79.
- Bonini, M., 2008, Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pedemontane margin, northern Italy). *Geology*, **36**, 131–134.
- Bonini, M., 2012, Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth Sci. Rev.*, **115**, 121–152.
- Bonini, M., Rudolph, M. L. and Manga, M., 2016, Long- and short-term triggering and modulation of mud volcano eruptions by earthquakes. *Tectonophysics*, **672–673**, 190–211.
- Bürk, D., 2007, *Geoacoustic Investigations of Cold Vents and Sedimentary Processes at the Active Continental Margin Offshore Nicaragua*. Ph. D. thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany, 163p.
- Camerlenghi, A., Cita, M. B., Vedova, B. Della, Fusi, N., Mirabile, L. and Pellis, G., 1995, Geophysical evidence of mud diapirism on the Mediterranean Ridge accretionary complex. *Mar. Geophys. Res.*, **17**, 115–141.
- Ceramicola, S., Praeg, D., Cova, A., Accettella, D. and Zecchin, M., 2014, Seafloor distribution and last glacial to postglacial activity of mud volcanoes on the Calabrian accretionary prism, Ionian Sea. *Geo-Mar. Lett.*, **34**, 111–129.
- Chamot-Rooke, N., Rabaute, A. and Kremer, C., 2005, Western Mediterranean Ridge mud belt correlates with active shear strain at the prism-backstop geological contact. *Geology*, **33**, 861–864.
- Chaumillon, E., Mascle, J. and Hoffmann, J., 1996, Deformation of the western Mediterranean Ridge: importance of Messinian evaporitic formations. *Tectonophysics*, **263**, 163–190.
- Chen, S.-C., Hsu, S.-K., Wang, Y., Chung, S.-H., Chen, P.-C., Tsai, C.-H., ... Lee, Y.-W., 2014, Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan. *J. Asian Earth Sci.*, **92**, 201–214.
- Chun, C., Kioka, A., Jia, J. and Tsuji, T., 2018, Characterization of hydrate and gas reservoirs in plate convergent margin by applying rock physics to high-resolution seismic velocity model. *Mar. Pet. Geol.*, **92**, 719–732.
- 千木良雅弘・田中和弘, 1997, 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴。地質雑, **103**, 781–793. [Chigira, M. and Tanaka, K., 1997, Structural features and the history of mud volcanoes in southern Hokkaido, northern Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **103**, 781–793.]
- Chiu, J. K., Tseng, W. H. and Liu, C. S., 2006, Distribution of gassy sediments and Mud volcanoes offshore southwestern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 703–722.
- Comas, M. C., García-Dueñas, V. and Jurado, M. J., 1992, Neogene tectonic evolution of the Alboran Sea from MCS data. *Geo-Mar. Lett.*, **12**, 157–164.
- Davies, R. J., Brumm, M., Manga, M., Rubiandini, R., Swarbrick, R. and Tingay, M., 2008, The East Java mud volcano (2006 to present): An earthquake or drilling trigger? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 627–638.
- Davis, D. M. and Engelder, T., 1985, The role of salt in fold-

- and-thrust belts. *Tectonophysics*, **119**, 67–88.
- Dimitrov, L. I., 2002, Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth Sci. Rev.*, **59**, 49–76.
- Emery, K. O., Heezen, B. C. and Allan, T. D., 1966, Bathymetry of the eastern Mediterranean Sea. *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, **13**, 173–192.
- Feseker, T., Boetius, A., Wenzhöfer, F., Blandin, J., Olu, K., Yørgensen, D. R.,...de Beer, D., 2014, Eruption of a deep-sea mud volcano triggers rapid sediment movement. *Nat. Commun.*, **5**, 5385, doi: 10.1038/ncomms6385.
- Foucher, J. P., Westbrook, G., Boetius, A., Ceramicola, S., dupré, S., Mascle, J.,...Praeg, D., 2009, Structure and drivers of cold seep ecosystems. *Oceanography*, **22**, 92–109.
- Fryer, P., 2012, Serpentinite mud volcanism: Observations, processes, and implications. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **4**, 345–373.
- Gennari, G., Spezzaferri, S., Comas, M. C., Rüggeberg, A., Lopez-Rodriguez, C. and Pinheiro, L. M., 2013, Sedimentary success of the mud-breccia and mud volcanic activity in the Western Alboran Basin. *Mar. Geol.*, **339**, 83–95.
- Giordano, D., Russell, J. K. and Dingwell, D. B., 2008, Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **271**, 123–134.
- Hemmi, R. and Miyamoto, H., 2017, Distribution, morphology, and morphometry of circular mounds in the elongated basin of northern Terra Sirenum, Mars. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **4**, 26, doi: 10.1186/s40645-017-0141-x.
- Henry, P., Le Pichon, X., Lallemand, S., Lance, S., Martin, J. B., Foucher, J.-P.,...Castrec, M., 1996, Fluid flow in and around a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge: Results from Manon cruise. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **101**, 20297–20323.
- Hieke, W., Werner, F. and Schenke, H.-W., 1996, Geomorphological study of an area with mud diapirs south of Crete (Mediterranean Ridge). *Mar. Geol.*, **132**, 63–93.
- Higgins, G. E. and Saunders, J. B., 1974, Mud volcanoes – Their nature and origin. In Jung, P., Bolli, H. M., Panchaud, R., Saunders, J. B., Schaefer, H. and Wiedenmayer, F., eds., *Contributions to the Geology and Paleobiology of the Caribbean and Adjacent Areas: Dedicated to the 80th birthday of Hans G. Kugler*. Verh. Naturforsch. Ges. Basel, **84**, 101–152.
- Hoshino, T., Toki, T., Ijiri, A., Morono, Y., Machiyama, H., Ashi, J.,...Inagaki, F., 2017, Atribacteria from the subseafloor sedimentary biosphere disperse to the hydrosphere through submarine mud volcanoes. *Front. Microbiol.*, **8**, 1135, doi: 10.3389/fmicb.2017.01135.
- Hsü, K. J., Ryan, W. B. F. and Cita, M. B., 1973, Late Miocene desiccation of the Mediterranean. *Nature*, **242**, 240–244.
- 井尻 暁, 2009, 海底泥火山堆積物中の間隙水の起源. 地学雑, **118**, 435–454. [Ijiri, A., 2009, Origin of fluid in submarine mud volcanoes. *J. Geogr. (Chigaku-Zasshi)*, **118**, 435–454.]
- 井尻 暁, 2020, 泥火山における生物地球化学過程とその意義. 地質雑, **126**, 29–37. [Ijiri, A., 2020, Significance of biogeochemical processes in mud volcanoes. *J. Geol. Soc. Japan*, **126**, 29–37.] (本特集号)
- 泉 紀明・西澤あずさ・堀内大嗣・木戸ゆかり・後藤秀昭・中田 高, 2016, 南西諸島海溝周辺の 3D 海底地形. 海洋情報部研究報告, **53**, 133–149. [Izumi, N., Nishizawa, A., Horiuchi, D., Kido, Y., Goto, H. and Nakata, T., 2016, 3D bathymetric image of Nansei-Shoto Trench and its vicinity. *Rep. Hydrogr. Oceanogr. Res.*, **53**, 133–149.]
- Jaeger, J. M., Gulick, S. P. S., LeVay, L. J., Asahi, H., Bahlburg, H., Belanger, C. L.,...Worthington, L. L., 2014, Expedition 341 summary. In Jaeger, J. M., Gulick, S. P. S., LeVay, L. J. and the Expedition 341 Scientists, eds., *Proc. IODP*, **341**, College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program), doi: 10.2204/iodp.proc.341.101.2014.
- Jia, J., Tsuji, T. and Matsuoka, T., 2016, Gas hydrate saturation and distribution in the Kumano Forearc Basin of the Nankai Trough. *Explor. Geophys.*, **48**, 137–150.
- Jolivet, L. and Faccenna, C., 2000, Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, **19**, 1095–1106.
- Judd, A. G. and Hovland, M., 2007, *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 475p.
- Khlystov, O., De Batist, M., Shoji, H., Hachikubo, A., Nishio, S., Naudts, L.,...Kalmaychikov, G., 2013, Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties. *J. Asian Earth Sci.*, **62**, 162–166.
- Kim, S.-S. and Wessel, P., 2011, New global seamount census from altimetry-derived gravity data. *Geophys. J. Int.*, **186**, 615–631.
- Kioka, A., 2016, *Submarine Mud Volcanism from a Standpoint of Subseafloor Material Cycling*. Sc.D. Thesis, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 243p.
- 喜岡 新・朝日博史・Worthington L. L.・Davies-Walczak, M.・小嶋孝徳・Jaeger J. M.,...芦寿一郎, 2015, アラスカ南部プレート沈み込み帯ウェッジ内の物質循環と氷河作用. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会予稿集, SCG63-02. [Kioka, A., Asahi, H., Worthington, L. L., Davies-Walczak, M., Ojima, T., Jaeger, J. M.,...Ashi, J., 2015, Glaciation and material cycling within the overriding plate wedge: Climate-tectonics interaction in the southern Alaska. *Japan Geosci. Union Meet. 2015*, Abstr., SCG63–02.]
- Kioka, A. and Ashi, J., 2015, Episodic massive mud eruptions from submarine mud volcanoes examined through topographical signatures. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 8406–8414.
- Kioka, A., Ashi, J., Sakaguchi, A., Sato, T., Muraoka, S., Yamaguchi, A.,...Tokuyama, H., 2015, Possible mechanism of mud volcanism at the prism-backstop contact in the western Mediterranean Ridge Accretionary Complex. *Mar. Geol.*, **363**, 52–64.
- Kioka, A., Tsuji, T., Otsuka, H. and Ashi, J., 2019, Methane concentration in mud conduits of submarine mud volcanoes: A coupled geochemical and geophysical approach. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **20**, 792–813.
- Komatsu, G., Ori, G. G., Cardinale, M., Dohm, J. M., Baker, V. R., Vaz, D. A.,...Matsui, T., 2011, Roles of methane and carbon dioxide in geological processes on Mars. *Planet. Space Sci.*, **59**, 169–181.
- Kopf, A. J., 2002, Significance of mud volcanism. *Rev. Geophys.*, **40**, 1005, doi: 10.1029/2000RG000093.
- Kopf, A. J., 2003, Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate. *Int. J. Earth Sci.*, **92**, 806–816.
- Kopf, A. and Behrmann, J. H., 2000, Extrusion dynamics of mud volcanoes on the Mediterranean Ridge accretionary complex. In Vendeville, B. C., Mart, Y. and Vigneresse, J.-L., eds., *Salt, Shale and Igneous Diapirs in and around Europe*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **174**, 169–204.
- Kopf, A., Klaeschen, D. and Mascle, J., 2001, Extreme efficiency of mud volcanism in dewatering accretionary prisms. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **189**, 295–313.
- Kretschmer, K., Biastoch, A., Rüpkke, L. and Burwicz, E., 2015, Modeling the fate of methane hydrates under global warming. *Global Biogeochem. Cycles*, **29**, 610–625.
- Kuramoto, S., Ashi, J., Greinert, J., Gulick, S., Ishimura, T., Morita, S.,...Tomosugi, T., 2001, Surface observations of subduction related mud volcanoes and large thrust sheets in the Nankai subduction margin; Report on YK00-10 and YK01-04 cruises. *JAMSTEC, J. Deep Sea Res.*, **19**, 131–139.
- 黒田潤一郎・吉村寿紘・川幡徳高・Jimenez-Espejo, F. J.・Lugli, S.・Manzi, V.・Roveri, M., 2014, 海盆の蒸発：蒸発岩の堆積学とメッシニアン期地中海塩分危機. 地質雑, **120**, 181–200.

- [Kuroda, J., Yoshimura, T., Kawahata, H., Jimenez-Espejo, F. J., Lugli, S., Manzi, V. and Roveri, M., 2014, Evaporation of marine basins: a review of evaporite formation and Messinian Salinity Crisis. *J. Geol. Soc. Japan*, **120**, 181–200.]
- Limonov, A. F., Woodside, J. M., Cita, M. B. and Ivanov, M. K., 1996, The Mediterranean Ridge and related mud diapirism: a background. *Mar. Geol.*, **132**, 7–19.
- Liu, C.-S., Huang, I. L. and Teng, L. S., 1997, Structural features off southwestern Taiwan. *Mar. Geol.*, **137**, 305–319.
- Lupi, M., Saenger, E. H., Fuchs, F. and Miller, S. A., 2013, Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves. *Nat. Geosci.*, **6**, 642–646.
- Maestrelli, D., Bonini, M., Delle Donne, D., Manga, M., Piccardi, L. and Sani, F., 2017, Dynamic triggering of mud volcano eruptions during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **122**, 9149–9165.
- Manga, M., Brumm, M. and Rudolph, M. L., 2009, Earthquake triggering of mud volcanoes. *Mar. Pet. Geol.*, **26**, 1785–1798.
- Mazzini, A. and Etiope, G., 2017, Mud volcanism: An updated review. *Earth Sci. Rev.*, **168**, 81–112.
- Medialdea, T., Somoza, L., Pinheiro, L. M., Fernández-Puga, M. C., Vázquez, J. T., León, R.,...Vegas, R., 2009, Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cádiz. *Mar. Geol.*, **261**, 48–63.
- MEDINAUT/MEDINETH Shipboard Scientific Parties, 2000, Linking Mediterranean brine pools and mud volcanism. *Eos*, **81**, 625–632.
- Mellors, R., Kilb, D., Aliyev, A., Gasanov, A. and Yetirmishli, G., 2007, Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **112**, B04304, doi: 10.1029/2006JB004489.
- Menapace, W., Völker, D., Sahling, H., Zoellner, C., dos Santos Ferreira, C., Bohrmann, G. and Kopf, A., 2017, Long-term in situ observations at the Athina mud volcano, Eastern Mediterranean: Taking the pulse of mud volcanism. *Tectonophysics*, **721**, 12–27.
- Milkov, A. V., 2000, Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Mar. Geol.*, **167**, 29–42.
- Milkov, A. V., Sassen, R., Apanasovich, T. V. and Dadashev, F. G., 2003, Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1037, doi: 10.1029/2002GL016358.
- 宮本英昭・小松吾郎・Dohm, J.・逸見良道・白井寛裕・山岸明彦, 2016, 地形学からみた火星の表層環境史と生命探査. 地学雑誌, **125**, 171–184. [Miyamoto, H., Komatsu, G., Dohm, J., Hemmi, R., Usui, T. and Yamagishi, A., 2016, Geomorphological view of the environmental history of Mars and candidate habitable environments. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **125**, 171–184.]
- Morita, S., Ashi, J., Aoike, K. and Kuramoto, S., 2004, 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*, Engineering Geology Laboratory, Department of Civil & Earth Resources Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan, 92–99.
- 森田澄人・Liu, C.-S.・Ku, C.-Y.・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. [Morita, S., Liu, C.-S., Ku, C.-Y., Machiyama, H., Lin, S., Soh, W. and Shimizu, S., 2009, Fluid circulation in a region of submarine mounds off southwest Taiwan: High-resolution seismic records from the continental slope ridge. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **118**, 424–434.]
- Mörz, T., Fekete, N., Kopf, A., Brueckmann, W., Kreiter, S., Huehnerbach, V.,...Ranero, C. R., 2005, Styles and productivity of mud diapirism along the Middle American Margins: Part II. Mound Culebra and Mounds 11 and 12. In Martinelli, G. and Panahi, B., eds., *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, NATO Sci. Ser. IV, **51**, Springer, Dordrecht, Netherlands, 49–76.
- Muraoka, S., Ashi, J., Kanamatsu, T., Sakaguchi, A. and Aoike, K., 2011, Geological study of deposits and rocks in the deep underground used by samples of mud volcanoes developed in Kumano Trough, SW Japan. *Am. Geophys. Union Fall Meet.*, T21B–2353.
- Nakamura, K., 1977, Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation—Principle and proposal. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 1–16.
- Nakayama, N., Ashi, J., Tsunogai, U., Gamo, T. and Tanahashi, M., 2010, Sources of pore water in a Tanegashima mud volcano inferred from chemical and stable isotopic studies. *Geochem. J.*, **44**, 561–569.
- Neurauter, T. W. and Roberts, H. H., 1994, Three generations of mud volcanoes on the Louisiana continental slope. *Geo-Mar. Lett.*, **14**, 120–125.
- Nishio, Y., Ijiri, A., Toki, T., Morono, Y., Tanimizu, M., Nagaiishi, K. and Inagaki, F., 2015, Origins of lithium in submarine mud volcano fluid in the Nankai accretionary wedge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **414**, 144–155.
- 野口里奈・栗田敬, 2016, 火星におけるコーン地形—とくに火山起源のコーン地形の特徴について—. 地学雑誌, **125**, 35–48. [Noguchi, R. and Kurita, K., 2016, Cones on Mars with special reference to volcanic cone morphology. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **125**, 35–48.]
- Oehler, D. Z. and Allen, C. C., 2010, Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars. *Icarus*, **208**, 636–657.
- Pape, T., Geprägs, P., Hammerschmidt, S., Wintersteller, P., Wei, J., Fleischmann, T.,...Kopf, A. J., 2014, Hydrocarbon seepage and its sources at mud volcanoes of the Kumano forearc basin, Nankai Trough subduction zone. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 2180–2194.
- Paull, C. K., Dallimore, S. R., Caress, D. W., Gwiazda, R., Melting, H., Riedel, M.,...Côté, M., 2015, Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **16**, 3160–3181.
- Pinheiro, L., Ivanov, M., Sautkin, A., Akhmanov, G., Magalhães, V., Volkonskaya, A.,...Cunha, M., 2003, Mud volcanism in the Gulf of Cadiz: results from the TTR-10 cruise. *Mar. Geol.*, **195**, 131–151.
- Polonia, A., Camerlenghi, A., Davey, F. and Storti, F., 2002, Accretion, structural style and syn-contractual sedimentation in the Eastern Mediterranean Sea. *Mar. Geol.*, **186**, 127–144.
- Pondrelli, M., Rossi, A. P., Ori, G. G., van Gasselt, S., Praeg, D. and Ceramicola, S., 2011, Mud volcanoes in the geologic record of Mars: The case of Firsoff crater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **304**, 511–519.
- Praeg, D., Ceramicola, S., Barbieri, R., Unnithan, V. and Wardell, N., 2009, Tectonically-driven mud volcanism since the late Pliocene on the Calabrian accretionary prism, central Mediterranean Sea. *Mar. Pet. Geol.*, **26**, 1849–1865.
- Rabaute, A. and Chamot-Rooke, N., 2007, Quantitative mapping of active mud volcanism at the western Mediterranean Ridge-backstop contact. *Mar. Geophys. Res.*, **28**, 271–295.
- Ranero, C. R. and von Huene, R., 2000, Subduction erosion along the Middle America convergent margin. *Nature*, **404**, 748–752.
- Roberts, H. H., 2001, Fluid and gas expulsion on the northern Gulf of Mexico continental slope: Mud-prone to mineral-prone responses. In Paull, C. K. and Dillon, W. P., eds.,

- Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*, Geophys. Monogr., **124**, Am. Geophys. Union, 145–161.
- Robertson, A. and Ocean Drilling Program Leg 160 Scientific Party, 1996, Mud volcanism on the Mediterranean Ridge: Initial results of Ocean Drilling Program Leg 160. *Geology*, **24**, 239–242.
- Sahling, H., Masson, D. G., Ranero, C. R., Hühnerbach, V., Weinrebe, W., Klauke, I.,...Suess, E., 2008, Fluid seepage at the continental margin offshore Costa Rica and southern Nicaragua. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q05S05, doi: 10.1029/2008GC001978.
- Shakirov, R., Obzhairov, A., Suess, E., Salyuk, A. and Biebow, N., 2004, Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area. *Geo-Mar. Lett.*, **24**, 140–149.
- Shih, T.-T., 1967, A survey of the active mud volcanoes in Taiwan and a study of their types and the character of the mud. *Petrol. Geol. Taiwan*, **5**, 259–311.
- Shipboard Scientific Party, 2003, Leg 202 summary. In Mix, A. C., Tiedemann, R., Blum, P., Abrantes, F. F., Benway, H., Cacho-Lascorz, I.,...Wei, W., eds., *Proc. ODP Init. Rep.*, **202**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), doi: 10.2973/odp.proc.ir.202.101.2003.
- Shipley, T. H., Stoffa, P. L. and Dean, D. F., 1990, Underthrust sediments, fluid migration paths, and mud volcanoes associated with the accretionary wedge off Costa Rica: Middle America Trench. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **95**, 8743–8752.
- Skinner, J. A. and Mazzini, A., 2009, Martian mud volcanism: Terrestrial analogs and implications for formational scenarios. *Mar. Pet. Geol.*, **26**, 1866–1878.
- Somoza, L., Díaz-del-Río, V., León, R., Ivanov, M., Fernández-Puga, M. C., Gardner, J. M.,...Fernández-Salas, L. M., 2003, Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cádiz mud volcano area: acoustic imagery, multi-beam and ultra-high resolution seismic data. *Mar. Geol.*, **195**, 153–176.
- Somoza, L., Medialdea, T., León, R., Ercilla, G., Vázquez, J. T., Farran, M.,...Fernández-Puga, M. C., 2012, Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea). *Mar. Geol.*, **332–334**, 4–26.
- 田中和広・浅野慶治・渡辺征稔・小松原大・鈴木浩一, 2020, 泥火山研究の最前線—陸上泥火山研究における最近8年の進展. 地質雑, **126**, 39–51. [Tanaka, K., Asano, K., Watanabe, M., Komatsubara, D. and Suzuki, K., 2020, Forefront of studies on mud volcanoes—Advances in studies on inland mud volcanoes in the last 8 years. *J. Geol. Soc. Japan*, **126**, 39–51.] (本特集号)
- Tingay, M. J., Manga, M., Rudolph, M. L. and Davies, R. P., 2018, An alternative review of facts, coincidences and past and future studies of the Lusi eruption. *Mar. Petrol. Geol.*, **95**, 345–361.
- Tingay, M. R. P., Rudolph, M. L., Manga, M., Davies, R. J. and Wang, C.-Y., 2015, Initiation of the Lusi mudflow disaster. *Nat. Geosci.*, **8**, 493–494.
- Tinivella, U., Accaino, F. and Della Vedova, B., 2008, Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. *Geo-Mar. Lett.*, **28**, 97–106.
- 土岐知弘・比嘉良作・棚原 朗・井尻 暁・角皆 潤・芦寿一郎, 2013, 熊野泥火山における間隙水の起源. 地球化学, **47**, 221–236. [Toki, T., Higa, R., Tanahara, A., Ijiri, A., Tsunogai, U. and Ashi, J., 2013, Origin of pore water in Kumano mud volcanoes. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, **47**, 221–236.]
- 徳山英一・芦寿一郎・中村恭之・白井正明・亀尾 桂・渡辺正晴..... KH-06-4 レグ 6 一同, 2007, 東地中海の塩水湖. 日本地質学会第114年学術大会講演要旨, 187. [Tokuyama, H., Ashi, J., Nakamura, Y., Shirai, M., Kameo, K., Watanabe, M.,...onboard scientists of KH-06-4 Leg6), 2007, Brine Lake in the eastern Mediterranean Sea. *114th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 187.]
- Tseng, W.-H. and Liu, C.-S., 2007, Submarine mud volcanoes offshore southwest Taiwan. *Sci. Dev.*, **412**, 18–25. (in Chinese)
- Tsunogai, U., Maegawa, K., Sato, S., Komatsu, D. D., Nakagawa, F., Toki, T. and Ashi, J., 2012, Coseismic massive methane release from a submarine mud volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **341–344**, 79–85.
- Ujiié, Y., 2000, Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean. *Mar. Geol.*, **163**, 149–167.
- Van Rensbergen, P., De Batist, M., Klerkx, J., Hus, R., Poort, J., Vanneste, M.,...Krinitsky, P., 2002, Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal. *Geology*, **30**, 631–634.
- Wallmann, K., Linke, P., Suess, E., Bohrmann, G., Sahling, H., Schlüter, M.,...von Mirbach, N., 1997, Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 5209–5219.
- Wang, C.-Y. and Manga, M., 2010, Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*, **10**, 206–216.
- Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E.,...Wigley, R., 2015, A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth Space Sci.*, **2**, 331–345.
- Wiedicke, M., Neben, S. and Spiess, V., 2001, Mud volcanoes at the front of the Makran accretionary complex, Pakistan. *Mar. Geol.*, **172**, 57–73.
- Woodside, J. M. and Volgin, A. V., 1996, Brine pools associated with Mediterranean Ridge mud diapirs: an interpretation of echo-free patches in deep tow sidescan sonar data. *Mar. Geol.*, **132**, 55–61.
- 山縣 毅・小川勇二郎, 1989, 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割. 地質雑, **95**, 297–310. [Yamagata, T. and Ogawa, Y., 1989, Role of mud diapirism for the formation of chaotic rocks. *J. Geol. Soc. Japan*, **95**, 297–310.]
- Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., DeAlteriis, G.,...Diez, S., 2009, The quest for the Africa–Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **280**, 13–50.

(著者プロフィール)

喜岡 新 インスブルック大学地球惑星科学研究科地質学専攻オーストリア科学財団ポスドク研究員(兼レクチャラ). 16年 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了(博士(理学)), 16年から現職.

(要 旨)

喜岡 新, 2020, 世界の海底泥火山の分布と山体形態に関する一考察. 地質雑, **126**, 17–28. (Kioka, A., 2020, Geological occurrence and morphological feature of submarine mud volcanoes: A brief review. *J. Geol. Soc. Japan*, **126**, 17–28.)

泥火山は表層下の堆積物循環, 流体移動および炭素循環と強く関わっており, 表層現象の中で重要な地質現象の一つである. しかしながら, 普通のマグマ性火山とは異なり, 泥火山に関する知見は乏しい. 本論では, 海底に発達する泥火山に着目し, 海底泥火山の発達分布と山体地形について地質学的に簡単な概説を行った. まず, 海底泥火山の分布を見ると, 亜極域のプレート沈み込み縁辺を除いたほとんどの沈み込み縁辺で泥火山が発達していることが確認できた. そして, 海底泥火山の山体形態に注目すると, 山体形態の特徴が沈み込み縁辺の特性で分類できることが示唆された. 本論で概観した山体分布や形態といった基礎研究は, 今後, 泥火山ダイナミクス全体の理解だけでなく, 表層下物質循環の包括的理解にもつながることが期待される.