北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴

Structural features and the history of mud volcanoes in southern Hokkaido, northern Japan

Abstract

千木良雅弘^{*†}・田中和広^{*}

Masahiro Chigira^{*†} and
Kazuhiro Tanaka^{*}

1996年11月1日受付.

1997年3月5日受理.

^{*} (財)電力中央研究所地質地盤部.

Geology and Geotechnology Department of
Central Research Institute of Electric Power
Industry 1646 Abiko-shi Abiko, Chiba 270-11

[†] 現在の所属: 京都大学防災研究所地盤災害研究部
門.

Present address: Disaster Prevention
Research Institute, Kyoto University

There are nine mud volcanoes in Niikappu and Shizunai Towns in southern Hokkaido, northern Japan, with the maximum size of 330-m short axis, 750-m long axis, and 50-m height, aligning in a line for 12.5 km along the Niikappu anticline of Miocene formations where the anticline is tight. These mud volcanoes were active after the latest interglacial age: severe mud volcanism made a caldera-like depression with a diameter of 1 km in the north of Niikappu Town, and four mud volcanoes were subsequently made in the depression. The mud volcanoes were made by releasing abnormal high pore pressures in the depth generated by probable lateral compression accompanied folding and methane formation. The mud volcanism is relatively weakened during the last 100 years, but weak eruption of mud and gas has been continuing in some of the mud volcanoes during large earthquakes with over 5th degree of seismic intensity of the Japan Meteorological Agency. Mud diapir showing a "flame structure" was also observed with the mud volcanoes.

Key words: mud volcano, Miocene, anticline, oil, methane gas, earthquake, non-tectonic structure

はじめに

泥火山は、その名の通り地下から泥が噴出してできた火山のような小山であり、深部の高間隙水圧の開放によって形成されるものである。泥火山は、一般に円錐形の形状をしており、高さ数mから数十mであるが、中には500mに達するものもある。また、海底下で形成され、流体に比べて泥の量が少ない場合には、円錐形の火山ではなくボックマークと呼ばれる円形の窪みとなる。噴泥が地表にまで到達せずに止まったものがマッドダイアビルと呼ばれている。なお、地熱地域にも小規模な泥火山が認められているが(たとえば秋田県の後生掛温泉)、本論で対象とするものは堆積岩地域のものである。

泥火山の存在は古くから知られていたが、本格的な研究対象にされるようになったのは最近である(山縣・小川, 1989; 千木良・中田, 1994)。1970年代までは主に陸上の泥火山について研究が進められ、それらが油田地域に多く分布すること、油田地帯で生成したメタンが泥火山形成と密接に関係することが明らかになってきた。Higgins and Saunders (1974)は、トリニダッドの泥火山を中心に、それ以前に行われた研究のレビューを含めて、世界の泥火山の特徴などをとりまとめた。これ以前には、まとめ的な研究は少なくとも英語圏では公刊されていないようである。また、旧ソビエト連邦には泥火山が多く分布し、Ali-Zade et al. (1984)は、これ

らを中心に世界の泥火山の分布の概略を報告した。1980年代に入るとサイドスキャンソナーや音波探査などの海洋底調査技術が進み、それとともに海洋底、特にプレート収束域に数多くの泥火山が分布していることが知られるようになった(Biju-Duval et al., 1982; Stride et al., 1982; Westbrook and Smith, 1983; Brown and Westbrook, 1987など)。そして、泥火山の生成の原因として、プレート収束域特有の間隙水の異常高圧が考えられるようになった。また、陸上に現れた泥火山やマッドダイアピルの構成物質の特徴から、従来オリストストロームと認定されてきた混在岩の中に泥火山あるいは泥ダイアビル形成時に作られたものが多く含まれていると考えられるようになった(Barber et al., 1986; Orange, 1990)。

わが国と周辺における泥火山は、陸上には唯一北海道のにいかっぶ新冠町に知られ(筒浦, 1952; 佐々, 1954; 松野・山口, 1958; 黒沢ほか, 1996)、海域では5か所から報告されている(Fig. 1, Le Pichon et al., 1987; Allis et al., 1989; Ogawa et al., 1989; 芦ほか, 1990; Ogawa and Kobayashi, 1993)。日本海側の油田・ガス田地域では泥火山の存在は知られていない。陸上での泥火山からは、その形成メカニズムなど多くの情報が得られると考えられるが、新冠町の泥火山は1952年十勝沖地震の時に噴泥して人々の目をひいたものの、その後は、大地震の度に小規模な噴泥が繰り返されることを少数の人々が認めている程度で、ほとんど研究の対象とはされて

Fig. 1. Mud volcanoes found in and around Japan (Chigira and Nakata, 1994). Data derived from Ogawa et al. (1989), Le Pichon et al. (1987), Ashi and Taira (1992), Ogawa and Kobayashi (1993), Sassa (1954), and Allis et al. (1989).

こなかった。

本論文では、新冠町周辺に從來知られていたもの以外にも泥火山が存在することを示し、それらの特徴、周辺の地質構造、活動の歴史について明らかにし、それらのもつ新たな意義を指摘する。調査にあたっては、新冠町から静内町にかけて地表踏査を行うとともに、約2万分の1のスケールの空中写真（国土地理院撮影）を用いた地形調査を行った。しかしながら、静内町周辺は露頭状況が悪く、地質の詳細調査を行えたのは、新冠町の新冠川以北の地域である。

調査にあたって、新冠町教育委員会の乾 芳宏氏には、泥火山について色々な情報を教えていただき、北海道電力(株)の阿部英夫課長、三戸貞史課長ほかには便宜をはかっていただいた。また、東京大学工学部の徳永朋祥氏には泥火山について色々議論していただいた。

地形と地質

1 地形

調査地には、大河川として新冠川と静内川が南西の海に向かって流下し、さらに、これらに平行に小河川が同様に南西に流下している。すなわち、北から大節婦川、節婦川、高江川（別名 トキシベツ）である（Fig. 2）。ベツはアイヌ語で川を示す。これらのうち、節婦川と高江川は後述する泥火山の活動を反映した形態を示している。すなわち、節婦川は Fig. 3 と Plate II 上に示すように、河口から1.5 km 上流で支流を

右岸側に分けているが、この支流は本流と同様の上流長さを持っているにもかかわらず、本流よりも高い河床標高を持っている。この合流部には泥火山が位置しており（Fig. 2 の Mv 2）、後述するように、この河床標高の差は泥火山の活動に起因していると考えられる。また、高江川は南西に流下した後、南東に大きく屈曲し、新冠川に至っているが、これも後述するようにこの屈曲部に存在する泥火山の活動と関連している。新冠川も河口から1.5 km の位置で大きく屈曲しているが、これは沖積低地内の蛇行であり、泥火山の活動と関連しているか不明である。

これらの河川の間は標高80 m から170 m の丘陵地となっており、そこには数段の段丘が発達している。また、海岸線沿いにも段丘が発達している。新冠川から大節婦川にかけては、段丘が大きく見て2つ認められる（Fig. 3）。ここでは上位と下位の段丘をそれぞれ段丘ⅠとⅡと呼び、それぞれの堆積物と段丘面を段丘堆積物Ⅰ、Ⅱ、段丘面Ⅰ、Ⅱと呼ぶ。段丘面Ⅰは削削のために、ほとんど残されておらず、標高80 m から170 m 程度の定高性の尾根として認められるのみである。これとはほぼ同様の標高の河成段丘面が新冠川と静内川との間にあり、これは馬歌山面と呼ばれている（松野・山口, 1958）。日本第四紀地図（日本第四紀学会, 1987）によれば、これは更新世中期の段丘面である。下位の段丘は、段丘堆積物Ⅱからなり、海岸沿いに分布し、標高50 m から60 m に段丘面を持つ。この段丘面を段丘面Ⅱと呼ぶ。これは、松野・山口（1958）の豊畑面にあたり、第四紀地図によれば、最終間氷期（13万年前から6万年前）の海成段丘面である。この段丘面は、大節婦川と節婦川に挟まれた部分で局所的に4°と大きく西に傾斜し、標高60 m から90 m にわたっている。この段丘面の急勾配は、後述するように、おそらく泥火山の活動に起因している。

2 地質

(1) 層序

調査地域には中新世の受乞層と元神部層（松野・山口, 1958）、それらを覆う第四紀の堆積物、および泥火山が分布している。私たちの詳細調査の結果、松野・山口（1958）とは多少異なる地質分布が明らかになった（Fig. 3）。

調査地の中新統は、上部が泥岩主体の泥岩・砂岩互層、下部が砂岩、礫岩、泥岩からなる地層である。この下部の地層には二枚の連続的な泥岩主体の泥岩・砂岩互層が挟まれ、この内上位の互層の下面が松野・山口（1958）の受乞層と元神部層との境にほぼ一致する（Figs. 2, 3）。ここでは、この境を受乞層と元神部層との境とすることにする。

受乞層は、当調査地に露出する最下位の地層であり、礫岩、砂岩、泥岩からなり、これらはしばしば互層する。全体の厚さは、1,000 m 以上である。礫岩は、主に細礫岩および中礫岩からなり、砂岩、頁岩、チャートの礫を主体とするが、角閃岩礫や泥岩の同時礫を含むこともある。礫岩は、後述する新冠背斜の南西翼部（新冠河口付近）では約500 m の厚さで分布するが、その北東翼部では薄い。砂岩は中粒から粗粒の石質砂岩で、30 m 程度の厚さの単層をなすこともあるが、多くの場合数 cm から1 m 程度の厚さの泥岩を頻りに挟む。本層

Fig. 2. Structural outline and the locations of mud volcanoes in the studied area. Mv indicates mud volcanoes. Hatched areas near the mud volcanoes 3 to 6 indicate gravitational fault scarps (Fig. 3).

の中央部には泥岩主体で砂岩の薄層から葉層を規則的に挟み、まれに礫岩も挟む泥岩・砂岩互層（厚さ 100~150 m）がある。本累層の泥岩は硬質頁岩となっている場合もある。

元神部層は、上部と下部とに分かれる。下部は、厚さ約 600 m で、受乞層とほとんど同じ層相からなるが、それに比べて礫岩中の角閃岩と花崗岩の比率が高い。上部は、厚さ 800 m 以上で、主に、泥岩優勢で数 cm から 1 m 程度の厚さの砂岩を挟む泥岩・砂岩互層からなるが、調査地北西端ではこの互層に砂岩優勢の砂岩・泥岩互層や礫岩が頻繁に挟まれている。本累層の泥岩もしばしば硬質頁岩となっている。

段丘堆積物 I は、露頭状況が悪いために、その詳細は明確ではないが、転石から判断すると、この層には角閃岩、緑色岩、花崗質岩、砂岩、チャートなどが含まれ、最大礫径は 30 から 50 cm である。また、転石の分布と地形から判断すると、堆積物の厚さは 20 m 程度で、基底の高さは海岸付近から北東に向けて高度を上げ、標高 70 m から 150 m にある。段丘堆積物 II については断片的に礫を確認している程度であるが、節婦の北西では、これは厚さ 5 m の砂礫からなり、段丘面から 50 cm 下に厚さ 15 cm の白色火山灰を挟在する。

(2) 構造

調査地の地質構造は北西-南東方向の新冠背斜（松野・

山口, 1958）で特徴づけられる（Fig. 2）。背斜軸は、新冠町大節婦川付近から北西では北西に緩やかにブランチしている。このため、ここでは地層のトレースは北西に凸に向けた馬蹄形を示す。褶曲は大節婦川付近では開いた形態を示しているが、新冠川の両岸では閉じた形態を示し、地層は一部でほとんど直立している。新冠町の市街地から静内町の市街地にかけては露出が不良のため詳細の地質構造は不明確であるが、背斜構造は同様に閉じた形態を示し、その南西翼は逆転している。静内町市街地の南東方では、褶曲軸は南東にブランチしている。松野・山口（1958）は褶曲軸を不自然に屈曲させた地質図を示したが、これは、おそらく地層の逆転を見逃したためである。この褶曲軸は前述の段丘堆積層 I と II を随所で横断しているが、これらの段丘堆積層あるいは段丘面を変形させていないことから、この褶曲を形成した運動は少なくとも最終間氷期以降は継続していない。

地質図上で地層のずれを伴うような大規模な断層は、後述する高江川下流の重力性の推定断層を除いて認められなかった。佐々（1954）や松野・山口（1958）は、大部分で新冠背斜に沿う節婦断層を推定したが、その存在を積極的に支持する証拠は認められなかった。なお、新冠背斜の軸部に沿って鱗片状の粘土および塑性変形した砂岩がしばしば認められた

Fig. 3. Geologic map and cross sections of the studied area. The locations of abandoned oil well, gas bubbling, and oil smell or filtration are from Matsuno and Yamaguchi (1958). See Fig. 1 for the number of mud volcanoes.

が (Fig. 3), これらは後述するマッドダイアビルに認められるものと良く似た構造を持つことから, マッドダイアビルあるいは泥火山の“フィーダー”であると推定される。

(3) 油兆・ガス兆

調査地周辺には古くから油兆・ガス兆が知られ, いずれも新冠背斜の軸部あるいは南西翼部にあった (松野・山口, 1958). 私たちの調査では, 明確な油兆が認められたのはわずかであるが, 大節婦川南側の尾根上の水井戸 (深さ 1.5 m の水槽, その下のボーリング孔の有無は不明) で, 可燃性ガスが湧出していることが認められた。また, この尾根の下部の大節婦川沿いでも可燃性ガスの湧出が認められた。

調査地周辺は, 古くから石油産出候補地として注目され, 大正から昭和初期にかけて採油を目的として少なくとも 8 本のボーリングが掘削された (松野・山口, 1958). 最も深いものは 475.6 m で, 高江川下流の泥火山西方のものである。しかしながら, いずれも多量の産油はなかったようである。

泥火山の分布と特徴

調査地には, 9 個の泥火山が認められ, これらに北から南に向けて 1 から 9 まで番号付けをした (Fig. 2, Table 1). これらの内, 新冠町の市街地北方の 4 個 (3, 4, 5, 6) は 1952 年の十勝沖地震の時に噴泥しており, 泥火山であることが確実である (筒浦, 1952; 佐々, 1954; 松野・山口, 1958). いずれも洗面器を伏せたような形態を持っている (Plate I-2). また, 泥火山 3 と 5 の頂部はクレーター状の円形凹地となっており, 現在も湿地となっている。湿地の存在は, 噴泥時の水が抜けきらない, 低透水性のために雨水がたまる, あるいは定常的に少しずつ水の供給が地下からある, などの理由によると考えられる。泥火山 3, 4, 5, 6 以外の 5 個の泥火山は, 形態の特徴がこれらに似ていることや, 頂部に湿地や噴泥が存在することによって, 泥火山であると認定した。ただしクレーター状の凹地は泥火山 3 と 5 で明瞭であるものの, 他の

泥火山では認められなかった。各泥火山のサイズおよび特徴を Table 1 に示す。佐々 (1954) によって, 泥火山 3, 4, 5, 6 の近傍にさらに 4 つの小さな泥火山が報告されているが, 後に人工的地形改変もあり, 現在はこれらの小規模な泥火山は認められない。当調査地域で最大の泥火山は泥火山 1 であり, これは段丘面 II の上に比高 50 m の高さに成長しているものであるため, 遠くからも非常に良く目立つものである (Plate I-1).

これらの泥火山は, いずれも新冠背斜の軸に沿っており, さらに詳細に見ると, 背斜軸の北東翼側に並んでいることがわかる (Fig. 2). また, 節婦北の泥火山 1 と節婦川の泥火山 2 が一塊, 泥火山 3, 4, 5, 6 が一塊, 浦里川の泥火山 7, 8 が一塊となっているとみなすと, 泥火山は 2.5 から 6 km の間隔をおいて成長しているように見える。

泥火山の噴出物は, 直接的には泥火山 6 の頂部で見られるのみである (Plate I-3). ここでは, 噴出物は, 主に鱗片状になった粘土およびヘドロ状の粘土からなり, 最大径 20 cm の石質中粒砂岩 (赤いチャートの破片を特徴的に含む), 最大径 5 cm の硬質頁岩の破片, および黒色チャートの細円礫を含む。噴泥の後には, 乾燥して塊になった粘土が地割れし, 地割れの中にヘドロ状の粘土が埋めている様子が観察される。鱗片状粘土の中には鏡肌を持つものも多いが, 鏡肌は後述するマッドダイアビルほど普遍的ではない。泥火山 4 の頂部でも最大礫径 30 cm の石質砂岩, 硬質頁岩の破片が認められた。

今まで述べた泥火山のほかにも, 新冠川の北西側約 9 km を南西に流下する厚別川中流の元神部川合流部付近に, 泥火山の疑いのある地形が認められる。この合流部南東方には標高 126.2 m のなだらかなピークがあり, 前述した節婦川泥火山に似たサイズと形態を有していることから, 泥火山である可能性が高い。このなだらかなピークは, オクリカッパ背斜沿いにあり (松野・山口, 1958), その軸部には受圧層の下位

Table 1. A list of the mud volcanoes in the study area. See Fig. 2 for the locations.

Number	Size	Features
1	Long axis 750m, short axis 330m, height 50m	Marsh at the top (200m x 150m)
2	Diameter 380m, height 50m	Marsh at the top (150m x 150m), mud eruption
3	Long axis 175m, short axis 110m, height 6m	Crater-like Marsh at the top (145m x 70m)
4	Long axis 210m, short axis 110m, height 16m	Dry
5	Diameter 250m, height 20m	Crater-like Marsh at the top (50m x 60m)
6	Diameter 250m, height 15m	Top is covered by erupted mud
7	Diameter 200m, height 20m	Dry
8	Long axis 200m, short axis 150m, height 20m	Dry
9	Diameter 150m, height 10m	Dry

Fig. 4. Sketch showing a mud diapir with "flame structure" (See Plate I-4).

のフラヌイ層が分布している。仮に、このなだらかなピークが泥火山であるならば、その起源はフラヌイ層にあるものと考えられる。

マッドダイアピル

従来、おそらく確実にマッドダイアピルであると認定された地質構造は Barber et al. (1986) がチモールで記載し、また、Orange (1990) が米国ワシントン州の Olympic 半島で記載している程度であったが、今回、新冠市街北方の泥火山 6 の西側の小山の切り取り法面にマッドダイアピルが現れた (Figs. 3, 4, Plate I-4, 5)。ここでは、砂岩泥岩互層の中に砂および泥が「火炎状」の構造をなして貫入していた。認められたダイアピルの幅は 10m、高さは 10m で、ダイアピルの内部の岩石は塑性変形し、特に「砂岩」のほとんどは粒子状に分解し、粒子の相互の動きによって変形しており、現在も砂の状態を保っていた。また、「泥岩」も軟質な粘土の状態を保つものが多く、また、不規則な方向のせん断面によって幅数 mm 以下の細片に分離し、破片の表面は鏡肌となっていた (Plate I-6)。このように泥岩は細片状になっているものの、全体としては鱗片状粘土であった。なお、この露頭では

油兆は認められなかった。

ダイアピルは外側の地層とは明確な境を有していた。ダイアピルの外側は砂岩泥岩の互層からなり、スケッチに示されている範囲のこれらの地層は脆性破壊を伴って変形し、ダイアピルに引きずられたような形態を示していた。細かく見ると、これらの砂岩・泥岩は大部分でさしわたし数 10 cm 以下の角礫に割れ、モザイク状に分離していることから、一種の水圧破壊が起こったと考えられる。ダイアピル自体の大部分は暗灰色を保っており、これは、その外側の砂岩泥岩互層が酸化して黄褐色を示すのと好対照であった。この色の違いは、ダイアピルが砂岩泥岩互層と比べて、極めて低い透水性を持っているとして説明できる。

これらのマッドダイアピルの産状は、ダイアピルは未固結状態で砂岩泥岩互層中に注入され、自らは塑性変形して周辺岩石をおし広げるように変形させて、高水圧下で脆性破壊させたことを示している。また、火炎状の構造はダイアピルが高含水状態で流動性に富んでいたことを示すが、鱗片状の構造は、ダイアピル全体が流体であったのではなく、高含水状態から脱水が進みつつ変形が起こったことを示している。この鱗片状粘土は Barber et al. (1986) がチモールのマッドダ

イアピルに特徴的に見られるとしたものと酷似しており、それと似たプロセスで形成されたことを示している。彼らもまた、鱗片状粘土は脱水過程での塑性変形によって形成されたと考えた。この鱗片状粘土は、粘土が強くせん断変形したものである。ダイアピル中で形成されたと考えられる。しかしながら、その粘土が未固結堆積物に由来するのか、あるいは一旦固結した泥岩が破碎されたものなのかは不明である。

泥火山の活動の歴史

有史前の泥火山の活動の歴史は、地形から読みとることができ、有史後の活動の歴史はアイヌの言い伝え、1952年十勝沖地震以降の新冠教育委員会の記録、文献資料などから明らかにすることができる。

1 有史前

(1) 泥火山 1

泥火山 1 の両側には段丘堆積物があり (Fig. 3), それらの変形が泥火山 1 の活動を示している。その西側では段丘面 II が 4° 西へ傾斜し、これは他の一般的段丘面 II よりも急傾斜である。東側では、段丘堆積物 I の層理面が、段丘堆積物 I の一般的傾斜方向である西とは反対の東へ局所的に 10° 傾斜している。これらの傾斜異常は、いずれも局所的で泥火山側の地盤上昇を示していることから、泥火山 1 が 2 つの段丘堆積物をめくり上げるようにして形成した結果であると推定される。泥火山 1 は新冠背斜上に位置しているが、近傍の新冠背斜上の段丘面に傾動が認められないことから、この段丘堆積物の傾動は活褶曲によるものではなく、局所的な泥火山の活動によるものである。そして、泥火山 1 は少なくとも段丘堆積物 II の堆積以降、つまり最終間氷期以降に活動したことになる。ただし、この泥火山の頂上には、亀裂状の不規則方向の溝が多数認められるものの、現在は樹林となっており、最新の活動は活発ではないと判断される。

(2) 泥火山 2

泥火山 2 の活動は、節婦川の谷幅と河床標高に残されている。節婦川は河口から 1.5 km 上流で右岸から支流を合流しており、泥火山 2 はこの合流部の直下流右岸に位置している (Fig. 3)。そして、空中写真で明瞭に認められるように、節婦川本流および支流ともに、この泥火山と接する位置で谷幅を狭めていることから (Plate II)、かつて泥火山が川の侵食に打ち勝つ程度の噴出量を持っていた時期に、川幅を狭めたものと判断される。また、この支流は南西に流下して泥火山にぶつかった位置で大きく南東に屈曲した後本流に合流していることと、この支流は本流の上流側と同程度の長さを持っているものの、河床標高が本流よりもかなり高く、合流部から同一距離でも支流の河床の方が本流の河床よりも 10 から 30 m 高いことから、泥火山は一時的に節婦川の支流をせき止めて、その下刻を妨げたと判断される。これらの活動の時代は、現在の河川に活動の影響が及んでいることから、最終氷期以降の極めて新しい時代であると考えられる。

(3) 泥火山 3, 4, 5, 6

新冠北方の泥火山 3, 4, 5, 6 の活動の歴史は高江川および

Fig. 5. The change of landform around the Takae-gawa (river) and the formation of mud volcanoes 3, 4, 5, and 6. Upper: before the collapse. Lower: after the collapse.

近傍の地形的特徴、特に風隙と遷急線の分布から読みとることができる。高江川は南西に流下した後、その下流部で大きく南東に屈曲して、新冠川に合流している (Figs. 2, 5)。この屈曲部から新冠川までの高江川沿いは泥火山 3~6 が並んでいる部分である。高江川を屈曲させないで南西方向に延長した部分は、現在は最高標高約 30 m の広い風隙となっており、この風隙は海に続いている。屈曲部よりも上流の高江川に流入する支流の大部分には、本流河床から 10 から 20 m 高い位置に遷急点が存在し (Fig. 5, Plate II)、ある時期に本流の下刻が加速されたことを示している。これらの遷急点を連ねて南西方向に延長すると、現在の泥火山の並んでいる位置を越えて風隙に至る河川縦断面を描くことができ、下刻が加速される以前には、高江川が屈曲せずに海に流下していたことがわかる (Fig. 5)。つまり、高江川の屈曲は下刻の加速とともに生じたことになる。

高江川が屈曲せずに南西に流下していた時には、その北西側および南東側ともに丘陵であったはずであり、高江川が屈

Table 2. Recent activity of four mud volcanoes in the north of Niikappu Town.

Earthquake	Mud volcano 3	Mud volcano 4	Mud volcano 5	Mud volcano 6	Other features
1894 Nemuro Earthquake 4th degree*	?	The volcano separated to two blocks?	?	?	
1952 Tokachi-Oki Earthquake 5th degree*	Cracks, mud eruption, and gas bubbling	Cracks, weak mud eruption, and gas bubbling	Cracks	Cracks, mud eruption, and the upheaval of the top by 50 to 70 cm	Cracks aligning NW-SE were made to the south of mud volcano 6
1968 Tokachi-Oki Earthquake 5th degree*	---	---	---	Cracks and mud eruption	
1982 Urakawa Earthquake 6th degree* (Urakawa)	Cracks	---	Cracks	Cracks, mud eruption, and the top upheaval	Cracks to the south of mud volcano 6
1993 Kushiro-Oki Earthquake 5th degree* (Urakawa)	Cracks	Cracks, weak mud eruption, and the upheaval of the top by 50 to 100 cm	?	?	
1994 Hokkaido-Toho-Oki Earthquake 5th degree* (Urakawa)	Cracks, weak mud eruption and the upheaval, and gas bubbling	Cracks and weak mud eruption	---	Cracks, mud eruption to the height of 2 m, and the upheaval of the top by 50 cm	

Data were compiled from Tsutsuura (1952), Sassa (1954), Kurosawa et al. (1996), news papers, and our hearing survey.

*: Seismic intensity on the scale of J. M. A. before 1996. The intensities with (Urakawa) were reported from Urakawa Town 40 km southeast from Niikappu Town. Other intensities are those in Niikappu Town read from the isoseismals provided by Usami (1975).

曲して南東に流下するためには、この南東側の丘陵が低くならなければならない、この原因がおそらく泥火山の活動にある。南東側の丘陵が高江川に横断される部分では、北東から続いてきた丘陵の端と、南西から続いてきた丘陵の端が、いずれも北西-南東方向の平面的で断層崖様の急崖となっており、その間が泥火山の並ぶ低地となっている (Fig. 3, Plate I-1, Plate II)。これらの急崖は、その形態から、高江川の侵食によって形成されたとは考え難く、断層崖と考えるのが自然である。そして、これら2つの断層が重力性のものであり、両者に挟まれた部分が陥没したと考えると、南東側の丘陵が低くなったことを最も合理的に説明できる (Fig. 5)。この陥没低地は、おそらく、地下の未固結砂泥が噴出して、火山のカルデラのようにして形成したと考えられる。今の泥火山3, 4, 5, 6は、陥没の後に、いわばカルデラの中の中央火口丘のようにして生成したのであろう。この陥没によって、高江川は新冠川と直結することになり、その河床勾配は増加し、下刻が加速されたものと推定される。そして、高江川の下流部は上流を争奪され、結果的に風隙が残されたと推定される。この陥没以前の高江河の河口付近の標高は段丘面Ⅱよりも低いことから、陥没は最終間氷期以降に起こったと推定される。そして、泥火山3, 4, 5, 6は、現在の高江川とほとんど同じ標高の地盤上にあることから、おそらく最終氷期以降の極めて新しい時代に形成されたものと推定される。

(4) その他

泥火山7, 8, 9については、詳しい調査を行っていない。泥火山7, 8は、松野・山口 (1958) の御園段丘堆積層の上に成長しているようである。この段丘は、第四紀地図によれば最終間氷期の段丘である。また、泥火山9も最終間氷期のもの

のと考えられる海成段丘の上に成長している。

2 有史後

上述の泥火山は、最近では大きな地震の時に小規模な活動を繰り返している。宇佐見 (1975) の日本被害地震総覧と新聞報道により、また新冠町の南東40kmの浦川町の震度を新冠町の震度とみなすと、新冠町は1894年から今までに震度4の地震を5回、震度5を4回、震度6を1回経験している。そして、泥火山3, 4, 5, 6の内いずれかの泥火山は震度5以上の地震時に噴泥を繰り返してきた。最近100年の活動の状況を、筒浦 (1952)、佐々 (1954)、黒沢ほか (1996)、新冠町教育委員会の乾芳宏氏の記録、および私たちの現地での聞き取り調査から整理してTable 2に示した。これによれば、泥火山の活動としては、亀裂の発生、噴泥、ガス湧出があったが、爆発的なものはなかった。また、泥火山の山体が全体的に盛り上がるような変形もなかった。亀裂は、同心円状、放射状、あるいは泥火山の配列方向に平行な場合があった。また、頂部に亀の子状に亀裂が生成する場合もあった。実際に噴泥の状況が目撃されたことは極めて少ないが、1994年の北海道東方沖地震の際には泥火山6で、泥水が高さ2m程度まで噴き上がったのが谷川保貞氏によって目撃された。その他、わずかな噴泥が認められた場合もあるが、泥の飛散状況から見てこれよりも小規模な噴泥であったと考えられている。ガスの湧出は、水たまりの中にブツブツと泡がわき上がることににより認定された。1952年十勝沖地震の後の泥火山4から湧出したガスはメタン86.2%、二酸化炭素0.6%、酸素1.5%、窒素ほか11.7%であった (佐々, 1954)。

噴泥のメカニズム

1 異常高圧の原因と泥火山活動の継続

泥火山の噴泥は、一般に、間隙水圧が静岩圧以上になった場合に（異常間隙水圧あるいは異常高圧）泥質物が間隙水中に浮いた状態となり、次いで間隙水圧の開放が起こると泥質物が流動化して生ずると考えられている。そして、異常高圧をもたらす原因として、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) 粘土鉱物などの相転移による脱水、4) 泥質堆積物中の有機物からのガスの発生などが考えられている（山縣・小川, 1989; 千木良・中田, 1994）。プレート収束域では主に1)や2)、4)による異常高圧が考えられ、油田地帯では主に4)によるものが考えられている。

泥火山の活動の継続性を評価するためには、異常高圧の供給と逸散とを定量的に見積もらなければならないが、調査地域の泥火山については活動の継続性や周期性などについて詳しい点はほとんど明らかになっていないため、それは現在のところ困難である。以下には現在までに得られているデータから、異常高圧と泥火山の活動について定性的な考察を行う。本調査地の場合には、噴泥をもたらしてきた異常高圧の原因は、上述の内2)と4)が複合したもの、すなわち、以下に述べるように褶曲に伴う構造的な圧縮とメタンガス生成であると考えられる。本調査地の泥火山は背斜軸部にならび、特に大部分は閉じた形態の背斜軸部に分布していることから、褶曲を形成した横圧力が異常高圧の一因になっている可能性がある。ただし、泥火山の活動が最終間氷期以降今も引き続いているのに対して、この褶曲の生成は鮮新世以降で（松野・山口, 1958）、また、前述のように最終間氷期以前である。したがって、最終間氷期以降の泥火山の活発な活動に褶曲運動が影響しているにしても、それは、最終間氷期以前に蓄積した異常高圧の開放を通じてということになる。その場合、泥火山2と泥火山3, 4, 5, 6では前述のように極めて新しい時代にも山体を形作るような活動があったことから、最終間氷期以前の異常高圧が10年以上持続していると考えなくてはならない。

新冠背斜軸付近にガス兆が見られ、また、泥火山の活動史の項で述べたように噴泥とともにメタンガスを主成分とするガスが湧出したことも多いことから、Brown and Orange (1993) が議論したようにメタンガスの生成も異常高圧の一因になっていると推定される。メタンガスが現在も生成されつつあるかどうかは不明であるが、そうでないとなると、過去に生成されたメタンガスがどこかに貯留されており、それが地表に泥水とともに吹き上げていることになる。そして、活動の継続とともにガス圧が低下すると想定されることから、泥火山は次第に活動を弱めてゆくと考えられる。メタンガスが現在も地下で生成を続けているとすれば、これを異常高圧継続の原因と考えることができる。そして、おそらく、メタンガス生成の速度が泥火山の活動の周期に関係していると考えられる。すなわち、ガス圧の蓄積、ガス圧による噴泥通路の開放とガス圧の低下が繰り返し起こり、結果的に泥火

山は周期的に活動すると考えられる。

松野・山口 (1958) によれば、受乞層の下位には主に泥岩からなるフラヌイ層が分布し、フラヌイ層に比べて、上位の受乞層、元神部層、厚賀層は礫岩に富み、大きな堆積速度を持っていると推定されている。今回調査した泥火山の噴出源が仮にフラヌイ層であるとすれば、この堆積速度の変化が異常高圧の一因となっている可能性もあるが、中新世に生じた異常高圧が現在まで引き続いていることは考えにくい。

活動の原因である異常高圧が弱まれば、泥火山は爆発的には活動しなくなるが、地殻歪みによって小規模な活動を続ける場合もあると考えられる (Martinelli and Ferrari, 1991)。すなわち、地震と地震の間の期間に地殻が徐々に歪んで次第に流体圧を高め、地震時に振動で噴泥の通路が開く、あるいは一時的な流体圧急上昇のために有効応力が減少して噴泥の通路が開く、などして噴泥が起こることがあると考えられる。いわば泥火山の起源の領域が地球歪み計の働きをしている場合である。最近100年間の泥火山の弱い活動は、異常高圧の継続原因はすでになく、地殻歪みや地震に対応した噴泥が起こっていることを示唆しているが、有史前の極めて新しい時代の泥火山活動があったことを考えると、活動周期が100年以上であって未だに活動的な寿命が尽きていない可能性もある。

2 噴泥のエネルギーと活動様式

有史以前の活動のエネルギーや様式については、1回あたりの活動の規模や活動の頻度が不明であり、結果的に形成された泥火山の形状のみが残されているだけなので、活動のエネルギーについて明確には知り得ない。しかしながら、泥火山2では、河川に容易には流されず、一時的に河川をせきとめる程度の量の噴泥があったことは事実である。また、泥火山3, 4, 5, 6のある場所では、結果的に丘陵の陥没を引き起こす程度の大規模の活動があったこともおそらく事実である。ただし、最近100年間は、物質が高く放出されることもないし、噴出物の中に巨大なブロックが含まれることもないことから、噴泥のエネルギーは大きなものではない。

Ali-Zade et al. (1984) によれば泥火山には成層火山のように山頂がとがった形を示すものもあるが、本調査地に認められる泥火山はいずれも洗面器を伏せたような形をしている。このような形態の違いは、噴出物の性質や噴泥の様式に起因すると考えられる。本調査地の泥火山においては、定性的には、爆発的な噴泥が少なく、噴出物の含水量が多いため、洗面器を伏せたような広くて低い泥火山の形態ができたものと考えられる。

3 噴泥の起源と通路

調査地では、泥火山の活動の原因と考えられる異常高圧の領域が地下どの程度の深さにあるのか、現在のところ不明である。泥火山6の噴出物のヘドロ状の粘土からは年代の手がかりになるような微化石は見いだされなかったし、噴出物に含まれる砂岩は赤いチャートの破片を含むので特徴的ではあるが、厚別川右岸での予察調査によれば、受乞層の下部の砂岩はいたるところの層準にこのような砂岩を含んでいることから、これも決め手にはならない。また、同様に噴出物に含

まれる硬質頁岩と黒色チャート細円礫の起源も特定できない。しかしながら、同じような性状の泥火山が10 km以上にわたって点々と分布することから、その原因、つまり泥火山の起源は10 m程度のような浅部ではなく、100 mからkmオーダーの深さにあるものと考えられる。千木良・中田(1994)の従来の泥火山の研究のレビューによれば、泥火山の起源として一般的なのは数百メートルから数キロメートルである。

泥火山を作った泥や水の通路は、本調査地では背斜軸沿いにあることになる。地表踏査の結果では、背斜軸に沿って断層は認められなかったが、これらの泥火山は背斜軸が閉じた形態を示す部分に並んでいることから、軸部の地層が破碎され、これらの通路となっているものと考えられる。そして、マッドダイアビルや泥火山が点々と認められることは、マッドダイアビルの上昇がいたるところにあり、それらが地表に至って、かつ、侵食に打ち勝つ程度の量を持っていた部分に泥火山が形成したことを示している。従来世界の油田地帯やプレート収束域に知られている泥火山も、ほとんどの場合、断層沿いあるいは背斜軸沿いに分布しており、断層あるいは、おそらく背斜軸に沿う破断を通路として泥水が噴出したものと考えられる(千木良・中田, 1994)。

新冠周辺の泥火山およびマッドダイアビルの意義

泥火山やマッドダイアビルは、すでに指摘されているように混在相の成因の1つとして構造地質学的に重要であるだけでなく、地震予知あるいは地震防災の面からも重要である。新冠町周辺の泥火山は、前述したように最近100年間は大地震に呼応して活動しており、ここでは泥火山の下に想定される異常高圧領域が1種の地球歪み計の役割をしている可能性が高いからである。つまり、この歪みを反映するものの一たとえば異常高圧領域での流体圧やその地上への出口である泥火山の変動あるいはガス・水などの組成を継続的に監視していれば、地球の歪みをとらえることができる可能性がある。これは、「異常高圧領域」がかつての高圧を維持していなくてもいえることである。この歪み計の精度や指向性は、異常高圧領域のサイズや形態、向きに依存しているはずであるが、今のところ、それに関する情報は少ない。新冠周辺での異常高圧の開放は新冠背斜に沿って、つまり、北西-南東方向で長さ約12.5 kmにわたる範囲の中で起こっていることから、異常高圧の領域の北西-南東方向のサイズはこの程度のものであると推定できるが、深さと形態については情報が得られていない。

マッドダイアビルや泥火山は、地質工学的にも重要である。たとえば、新冠周辺で認められた鱗片状粘土は、含水比が高く、軟質で剥離しやすいものであることから、そこにトンネルを掘削したとすると、膨圧が深刻な問題になると考えられる。従来、わが国の新第三紀地域のトンネルには膨圧が問題となって難工事となったものも多いが、それらの中にはこのようなマッドダイアビルに伴う鱗片状粘土が含まれている可能性がある。今後のトンネル建設のための地質調査にあたっては、鱗片状粘土は単なる断層破碎ではなく、マッドダ

イアビルに伴うものであるかも知れないと考えることが重要であろう。それによって、鱗片状粘土の分布や性状について判断してゆくことができる。例えば、マッドダイアビルは、閉じた背斜構造に沿って、あるいは、断層に沿って侵入している場合が多く、また、その輪郭は直線的であるとは限らず、不規則に枝を分岐したようなものになっている可能性が高い。一方、断層破碎帯の場合には、その輪郭は直線的であることが多い。マッドダイアビルにトンネルを掘削する場合には、膨圧と同様に、ガスの異常突出や突発出水についても注意が必要であろう。

近年地下深部を積極的に利用しようという傾向にあるが、この場合にも、マッドダイアビルや泥火山の有無に注意を払う必要がある。また、これらが無い場合にも、油兆やガス兆のある地域においては、閉じた背斜構造の軸部や断層に沿って地下の流体が上昇している可能性があることに注意する必要がある。

わが国の陸域の泥火山は、新冠町周辺にしか知られていないが、その原因である異常高圧は日本海側の油田地域に多く知られている(Magara, 1978など)。したがって、この地域には、地下にマッドダイアビルがあったり、地表まで泥水が噴出している場所もある可能性がある。泥火山の認定には、本論で示した泥火山の形態、山頂の湿地、河川のせき止めや流路の屈曲などの地形異常が鍵になる。ただし、噴泥があったとしても、その量が顕著な泥火山を形作るほどでなければ、降雨や河川によって速やかに侵食され、痕跡を残さないものと考えられる。

結 論

1. 北海道の新冠町から静内町にかけて9個の泥火山が分布する。これらの内最大のものは、短径330 m、長径750 m、高さ50 mである。
2. これらの泥火山は中新世の地層が参加した新冠背斜に沿って、背斜構造が閉じている12.5 kmにわたってならんでいる。
3. これらの泥火山の活動は、最終間氷期以降に川を一時的にせきとめたり、流路を大きく変えたりした。また、過去の大規模な泥火山の活動は、直径約1 kmのカルデラ様の凹地を生じ、その中に後に4個の泥火山が生じた。
4. これらの泥火山の活動は、最近100年間は弱く、震度5以上の地震の時にわずかに噴泥を繰り返している程度である。
5. 泥火山活動を引き起こした異常高圧の原因は、調査地域の場合、背斜構造形成時の構造的な圧縮および、メタンガスの生成であると推定される。
6. 泥火山の変動、あるいは噴出ガスや水の組成は、地球の歪みを反映している可能性がある。
7. マッドダイアビルは、混在岩の成因として重要なだけでなく、主に軟質な鱗片状粘土からなるためトンネル掘削の障害となり、地質工学的にも重要である。

文 献

- Ali-Zade, A. A., Shnyukov, E. F., Grigoryants, B. V., Aliyev, A. A., and Rakhmanov, R. R., 1984, Geotectonic conditions of mud volcano manifestation in the world and their role in prediction of gas and oil content in the earth's interior. In *27th International Geological Congress*, VNU Science Press, **13**, 377-393.
- Allis, R. G., Yusa, Y. and Taishi, H., 1989, Gas in Beppu Bay inferred from acoustic reflection anomalies. *Quatern. Res.* **28**, 185-197.
- Ashi, J. and Taira, A., 1992, Structure of the Nankai accretionary prism as revealed from IZANAGI sidescan imagery and multichannel seismic reflection profiling. *The Island 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. 堆積研会報, **33**, 43-48.
- Barber, A. J., Tjokrosapoetro, S. and Charlton, T. R., 1986, Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults and melanges in accretionary complexes eastern Indonesia. *AAPG Bull.*, **70**, 1729-1741.
- Biju-Duval, B., Le Quellec, P., Mascle, A., Renard, V. and Valery, P., 1982, Multibeam bathymetric survey and high resolution seismic investigations on the Barbados Ridge Complex (Eastern Caribbean): A key to the knowledge and interpretation of an accretionary wedge. *Tectonophysics*, **80**, 275-304.
- Brown, K. M. and Orange, D. L., 1993, Structural aspects of diapiric melange emplacement: the Duck Creek Diapir. *Jour. Struct. Geol.*, **15**, 831-847.
- Brown, K. M. and Westbrook, G. K., 1987, The tectonic fabric of the Barbados Ridge accretionary complex. *Mar. Petrol. Geol.*, **4**, 71-81.
- 千木良雅弘・中田英二, 1994, 堆積岩の続成作用 (その 1) — 圧密・脱水と水理地質特性 —. 電中研報告, U94026, 1-45.
- Higgins, G. E. and Saunders, J. B., 1974, Mud volcanoes, their nature and origin. *Verh. Naturforsch. Ges. Basel*, **84**, 101-152.
- 黒沢邦彦・乾 芳宏・丸谷 薫, 1996, 新冠泥火山に発生した亀裂および噴泥. 北海道立地下資源調査所調査研報, **25**, 98-105.
- Le Pichon, X., Iiyama, T., Chamley, H., Charvet, J., Faure, M., Fujimoto, H., Furuta, T., Ida, Y., Kagami, H., Lallemand, S., Legget, J., Murata, A., Okada, H., Rangin, C., Renard, V., Taira, A. and Tokuyama, H., 1987, The eastern and western ends of Nankai Trough: results of Box 5 and Box 7 Kaiko survey. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **83**, 199-213.
- Magara, K., 1978, *Compaction and fluid migration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 319 p.
- Martinelli, G. and Ferrari, G., 1991, Earthquake forerunners in a selected area of Northern Italy: recent developments in automatic geochemical monitoring. *Tectonophysics*, **193**, 397-410.
- 日本第四紀学会, 1987 編, 日本第四紀地図. 東京大学出版会.
- 松野久也・山口昇一, 1958, 5 万分の 1 地質図幅説明書「静内」. 北海道開発庁.
- Ogawa, Y. and Kobayashi, K., 1993, Mud ridge on the crest of the outer swell off Japan Trench. *Mar. Geol.*, **111**, 1-6.
- Ogawa, Y., Seno, T., Akiyoshi, H., Tokuyama, H., Fujioka, K. and Taniguchi, H., 1989, Structure and development of the Sagami trough and the Boso triple junction. *Tectonophysics*, **160**, 135-150.
- Orange, D. L., 1990, Criteria helpful in recognizing shear-zone and diapiric melanges: Examples from the Hoh accretionary complex, Olympic Peninsula, Washington. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **102**, 935-951.
- 佐々保雄, 1954, 新冠泥火山とその十勝沖地震による変動. 十勝沖地震調査委員会 (編集), 十勝沖地震調査報告, 243-259.
- Stride, A. H., Belderson, R. H. and Kenyon, N., 1982, Structural gain, mud volcanoes and other features on the Barbados Ridge Complex revealed by GLORIA long range side-scan sonar. *Mar. Geol.*, **49**, 187-196.
- 筒浦 明, 1952, 十勝沖地震によって変動した石油ガス性の“泥火山” 日高高山の研究—地震による地表付近の変化—. 石油技協誌, **17**, 295-301.
- 宇佐美龍夫, 1975, 日本被害地震総覧. 東京大学出版会, 327 p.
- Westbrook, G. K. and Smith, M. J., 1983, Long décollements and mud volcanoes: Evidence from the Barbados Ridge Complex for the role of high pore-fluid pressure in the development of an accretionary complex. *Geology*, **11**, 279-283.
- 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.

(要 旨)

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. 地質雑, **103**, 781-791. (Chigira, M. and Tanaka, K., 1997, Structural features and the history of mud volcanoes in southern Hokkaido, northern Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 781-791.)

北海道南部の新冠町から静内町にかけて, 9 個の泥火山が分布する. これらのうち最大のものは, 短径 330 m, 長径 750 m, 高さ 50 m である. これらは, 中新世の地層が参加した新冠背斜に沿って, 背斜構造が閉じた形態を示す 12.5 km の区間にわたってならんでいる. これらの泥火山は, いずれも最終間氷期以降に活動し, 激しい活動は新冠町の北西部で直径約 1 km のカルデラ様の窪みを生じ, そこに後に 4 個の泥火山が生成した. これらの泥火山は, おそらく地下の高間隙水圧の開放によって生成し, 高間隙水圧は褶曲に伴った横圧力とメタンガスの発生とによってもたらされた. 泥火山の活動は最近 100 年間は弱まっているが, いくつかの泥火山で, 気象庁震度階の震度 5 以上の地震の時に泥やガスのわずかな噴出が繰り返し起こっている. 泥火山とともにマッドダイアピルも認められ, これは「火炎状構造」を示していた.

Plate I

1. Mud volcanoes 1 and 6 seen from the southeast in 1995.
2. Mud volcanoes 5 and 6 seen from the south in 1995.
3. The top of mud volcano 6 having cracks and erupted materials at the time of the Hokkaido-Toho-Oki Earthquake on October 4th, 1994. The picture was taken at October 21st, 1994. A hammer is in the middle.
4. Mud diapir showing "flame structure". See Fig. 3 for its location and Fig. 4 for its sketch. Black part in the diapir is sandstone and the white part is scaly clay. The picture was taken at October 19th, 1995.
5. Close up of the mud diapir.
6. Scaly clay of the mud diapir.

Plate II

Upper : Stereo pairs showing mud volcanoes 1 and 2 and the Poroseppu-gawa (river).
(Geographical Survey Institute of Japan, Photo numbers HO-83-5X C11-2, 3, and 4.)

Lower : Stereo pairs showing mud volcanoes 3, 4, and 5 and the Takae-gawa.
(Geographical Survey Institute of Japan, Photo numbers HO-83-5X C11-4 and 5.)