

論文

新潟県十日町市松代に分布する 泥火山の地質

新谷 俊一*・田中 和広**

Mud volcanoes in Matsudai,
Tokamachi City, Niigata Prefecture

Toshikazu SHINYA* and Kazuhiro TANAKA**

Abstract

We found and described two active mud volcanoes (abbr.: MV), i.e., Gamo MV and Muro MV, and one extinct mud volcano (Shosenji MV) in Tokamachi City, Niigata Prefecture. Active MVs are distributed along the wing of an anticline axis. High saline groundwater, inflammable gas and clay less than $2\mu\text{m}$ in diameter are erupted from both active MVs. Shosenji MV is exposed near the Gamo MV at a road construction site. Horizontal and vertical structures of the extinct mud volcano, consisting of mud breccia and scaly network clay can be observed. The activity of mud volcano is closely related to the formation of swelling mudstone in the Nabadachiyama Tunnel excavated at the depth of 150 m under Gamo MV and Shosenji MV.

キーワード：泥火山，膨潤性地山，地下水

Key words：Mud volcano, Swelling Sedimentary rock, Groundwater

1. はじめに

泥火山は石油に関係するガス，火山性のガスによって噴出した泥によって形成された円錐状の地形的高まりと定義されており（Jackson, 1997），その高さは数mから数10 mである（千木良・田中，

1997）。また，その分布は世界的に広く認められており，特にプレート収束域や，堆積物が厚く堆積している地域に集中する傾向がある（山縣・小川，1989）。油田地帯や天然ガス地帯に分布することから，それらの地域で生成した天然ガスが泥

* (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
** 山口大学理学部
Faculty of Science, Yamaguchi University

本論文に対する討論は平成17年11月末日まで受け付ける。

火山形成と大きく関わることも示唆されている(千木良・田中, 1997)。

田中・大山(2001)は、日本及び日本周辺に分布する泥火山と周囲の地質、地下水特性について整理し、日本周辺の泥火山は樺太の馬群漂泥火山を除き、一般に新第三紀の泥岩中に分布し、背斜軸及び背斜軸部に発達する断層に沿って一定の間隔で配列する場合が多いと述べている。

泥火山からの流体の噴出は地下に存在する異常間隙水圧が原動力となり発生すると考えられており、異常間隙水圧の直接的な発生原因は、急激な堆積作用による下位の未固結層の圧縮、地殻変動による構造的な圧縮、粘土鉱物の相転移による脱水及び、粘土堆積物中の有機物からのガスの発生の説が有力とされている(山縣・小川, 1989; 千木良・中田, 1994; 千木良・田中, 1997)。

近年、地下深部を積極的に利用する動きがあり、泥火山の活動が地下構造物を破壊し、トンネル掘削時に問題となる膨潤性堆積性軟岩と関係する可能性が指摘されている(千木良・田中, 1997)。

本論文では新潟県十日町市松代において新たに確認した室野泥火山、蒲生泥火山、松泉寺泥火山の記載を行ない、泥火山の活動と膨潤性地山との関係について議論する。

2. 調査地域の位置と地質、地質構造

調査地域は長野県との県境北部に広がる新潟県東頸城丘陵の中央部に位置し(図1)、新第三系～第四系が分布する新潟堆積盆地の南部に位置する。新潟堆積盆地の新生界は、堆積岩を主体とする中部中新統～下部更新統からなり、これらの地層は堆積盆地の縁辺部を除いて一連整合であり、全層厚は5000 m以上とされている(竹内ほか, 2000)。

調査地域内には地すべり地形が多く認められるため、空中写真判読及び現地での地形観察から、地すべりの影響を受けた露頭を避けて地質構造の検討を行なった。

調査地域に分布する中新統～下部更新統は下位から、須川層、田麦川層、東川層、及び魚沼層に区分される(図2)。

須川層は塊状の黒色泥岩が主体であり、泥岩優

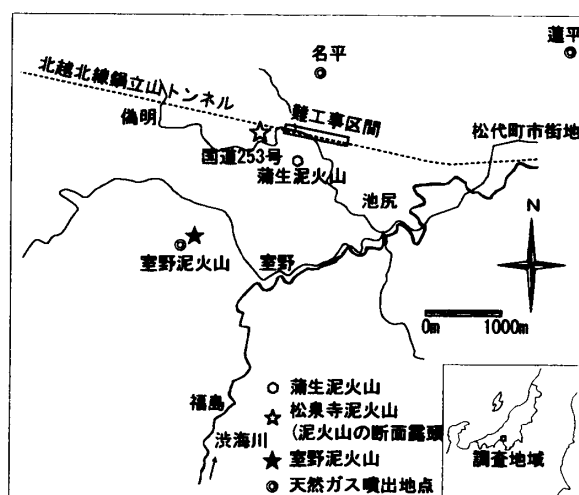


図1 調査地域の地図 調査地域は新潟県南部に位置する十日町市松代であり、その範囲内には松代町市街地から西の大島村にかけて貫通する全長9116 mの北越北線竈立山トンネルがある。

勢砂岩・泥岩互層を伴うことがある。須川層の分布地域では地すべりが多い。また、今回記載した泥火山は須川層が地表に露出する地域で認められる。

田麦川層は塊状シルト岩とシルト岩・泥岩互層からなる。下位の須川層、並びに上位の東川層とは整合関係にあり、岩相が漸移的に変化していることから明瞭な境界は認められない。

東川層は灰色の砂質シルト岩とシルト岩の境界不明瞭な互層からなる。層理面に沿って褐鉄鉱に富むノジュールが列を成して分布する。

魚沼層は無構造の砂層を主体とし、直径1 cm程度の円礫～亜角礫からなる礫岩層を挟む。砂層は塊状であり、生痕化石、円礫を多く含む。下部よりも上部の方が礫層を多く含み上方粗粒化の傾向が認められる。

調査地域内にはNNE-SSW方向に軸をもつ新潟方向と呼ばれる褶曲が繰り返し観察できる。この中でも儀明背斜、奈良立向斜は一波長が約6 kmの大きな褶曲構造である(図2)。

儀明背斜は調査地域の北西部に位置する延長3 km以上の閉じた背斜構造であり、軸の周辺には須川層が分布する。奈良立向斜は調査地域の南東に位置する延長6 km以上の向斜構造であり、軸

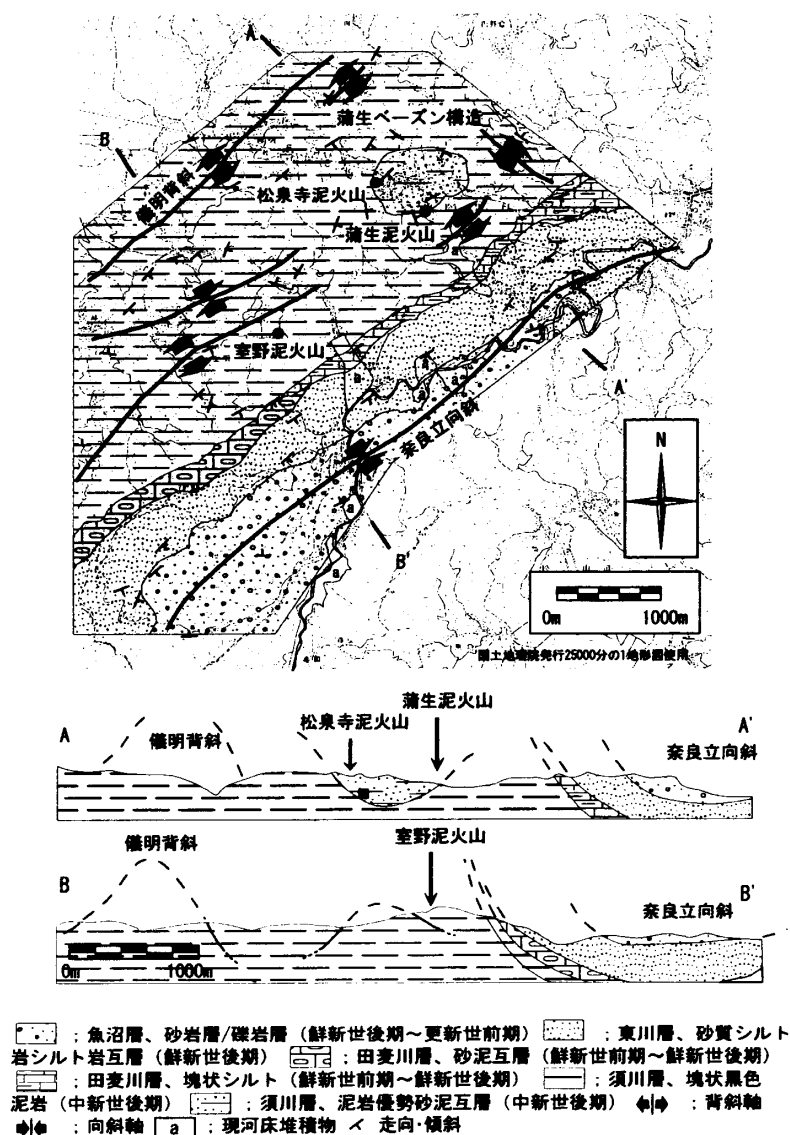


図2 調査地域内の地質・地質構造図

の周辺には調査地域で最も上位の魚沼層が分布している。

竹内ほか(2000)は蒲生地区の地層は南方及び南東方向に傾斜するとした。しかし、本研究では蒲生地区南東部において北西方向及び、北方向に傾斜する地層の走向/傾斜のデータを新たに得た。その結果、蒲生地区およびその周囲の地層は蒲生地区の中心に向かって傾斜することが明らかとなり、この構造を蒲生ベーズン構造とした。

竹内ほか(2000)は蒲生地区には田麦川層の砂岩泥岩互層が分布するとした。しかし、以下の理

由から、本研究では、蒲生地区のベーズン構造内部にはレンズ状に挟在される須川層上部の砂岩泥岩互層が分布すると判断した。

- ・蒲生地区に分布する砂岩泥岩互層は須川層の中に挟在される砂岩泥岩互層の岩相と類似する。

- ・田麦川層の砂岩泥岩互層が分布する地域の地形は尾根と谷の形状が急峻で、地すべりが少ない特徴を持つ。一方、須川層の分布する地域は尾根と谷との境界が不明瞭で、なだらかな地形であり、地すべりが多く発生する。蒲生地区の地形は須川層が分布する地形と類似している。

今回新たに記載する泥火山は、上述した須川層の分布域内に認められる。また、泥火山は背斜軸の直上ではなく、軸から離れた翼部に位置する(図2)。

3. 調査方法

3.1 泥火山の記載

現在も泥、ガス、地下水を噴出する泥火山(活動的泥火山と呼ぶ)については天然ガス、地下水、石油及び泥水の噴出地点の位置を1/5000のルートマップに記録した。

過去において活動し、現在は活動が終了した泥火山(非活動的泥火山と呼ぶ)では、検尺とクリノメーターによる簡易測量を行い、露頭スケッチを行った。

泥火山の地下構造を明らかにする為に、一部の泥噴出口の周辺でハンドオーガー調査を行った。掘削に際しては、10 cm 間隔で約5 cmのコアサンプルの観察を行い、柱状図を作成した。

泥火山噴出物に挟在する木片については ^{14}C 年代測定をジオスペースサイエンス(株)に依頼した。

3.2 水質調査

調査地域内の主な河川の水と湧水及び泥火山から噴出する地下水の電気伝導度とpHを測定した。電気伝導度の測定にはHORIBA compact conductivity METERを、pHの測定はHORIBA compact pH METERを使用した。

河川水及び湧水の電気伝導度とpHの測定は現地で行った。泥火山から噴出した泥水の電気伝導度とpHは、泥水をサンプル瓶に入れ数日間放置し泥を沈降させてから、その上澄み液を室内で測定した。

3.3 針貫入試験

松泉寺泥火山に観察された網目状粘土化帯において、針貫入試験を実施した。針貫入試験は丸東製作所(株)により作成された「軟岩の調査・試験の指針」の針貫入試験法(土木学会制定)準拠の軟岩ペネトロ計を使用して行った。

- ・測定機の先端に装着された針を軟岩に押し当て、貫入力(N)と貫入量(mm)を測定した。
- ・次式を用いて針貫入勾配を算出した。針貫入勾配=貫入力(N)/貫入量(mm)
- ・一軸圧縮強度(kN/m^2)と針貫入勾配(N/mm)の相関図(回帰式 $y=0.978x+1.599$, 相関係数 0.914)を使って、換算一軸圧縮強度を算出した。

4. 結果

今回、新たに新潟県十日町市松代において活動的泥火山(室野泥火山、蒲生泥火山)と非活動的泥火山(松泉寺泥火山)の存在を確認した。ここでは各泥火山の地形、地質の特徴及び地下構造について述べる。

4.1 十日町市室野地区

室野泥火山は十日町市室野地区の室野集落から西北西に1 km離れた所にあり、2本の沢に囲まれた300 m×400 mの広がりを持つ標高320 mの平坦地の西南端に位置し(図3)、天然ガス、地下水、石油及び泥が定常的に噴出している(図4)。

この平坦地の地形は人工的に少しずつ改変されており、改変前には平坦な地形の中に泥火山の噴出物によって作られた30 cm程度の円錐状の高まりがあったと言われている。また、松代町史編集委員会(1989)には人工改変前の室野泥火山周

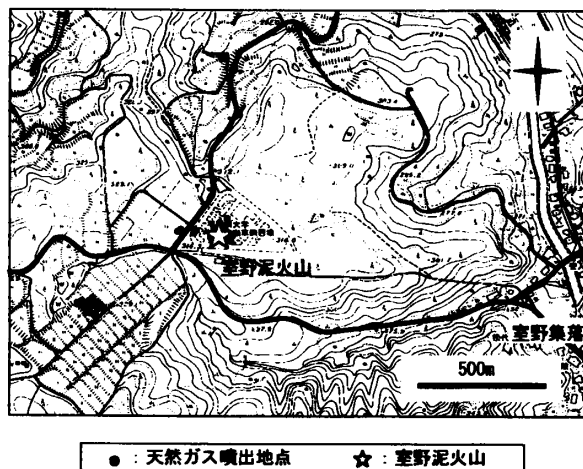


図3 室野泥火山周辺の地形図(地形図は1/5000 松代町全図を使用した)



図4 室野泥火山噴出口の写真
室野泥火山には上の写真以外に数多くの噴出口がある。

辺の様子を「天然ガスの出ている窪地には水が溜まって小さな湿原をなしていた」と記載されている。

天然ガス、地下水、石油及び泥が噴出する平坦地の12箇所においてハンドオーガーを使用して深度0.3 m～4.6 mまで掘削を行い、地下構造調査を行った。調査結果から室野泥火山の地下には、人工的な盛り土、イネ科の植物片を含む泥火山噴出物、基盤岩が分布することが明らかになった。

盛り土は茶色粘土の中に直径1 cm～4 cmの砂利が混入している。泥火山噴出物は灰色の泥であり油徴を示し、イネ科の植物の破片を含有する。基盤岩は新第三紀の塊状黒色泥岩であり、盛り土、泥火山噴出物よりも著しく硬質である。

調査結果により標高316 m付近に基盤が確認できる地点と標高316 mより深部まで掘削しても基盤が確認できない地点を確認した。また、噴出した泥が少なくとも約150 m×50 mの範囲を持って盛り土の下に分布していることが分かった。この結果、室野泥火山の地下には少なくとも直径30 m、深さ4 m以上の陥没があり、その陥没の中に過去の泥火山噴出物が充填されていることが明らかとなった(図5)。

陥没の中を充填する泥火山噴出物には泥岩の礫が多く含まれるが、現在は泥水とガスが噴出するのみである。そのことから、かつては地表に礫を

噴出させることが可能な著しい活動があったことが予想される。また、現在の地表面から4 m下の植物片の年代が $1,580 \pm 49$ BP (AMS法)を示すことから、その時期には既に窪地は形成されており、その窪地の中の湿地で噴出が繰り返して起きたと推定される。

4.2 十日町市蒲生地区

4.2.1 すり鉢状地形

十日町市蒲生地区は前述した室野泥火山の北東2 kmに位置する(図1)。十日町市蒲生地区にある松泉寺の東方250 mの尾根部には直径200 m、深さ30 mのすり鉢状地形がある(図6)。当箇所では尾根部であるにも関わらず少なくとも3箇所で湧水が認められる。現在、この窪地内では室野泥火山に認められるような泥、石油の噴出は認められない。

4.2.2 蒲生泥火山

蒲生集落から南東に500 mの地域の直径150 mの範囲内に数多くの天然ガス噴出地点があり、定常的に天然ガスが噴出している(図6)。この内、草地の一箇所ではガスに伴って石油を含む泥水が間欠的に地表に噴出しており、高さ5 cm程度の高まりをもつ噴出口が形成されている(図7)。このことから、これを泥火山とし蒲生泥火山と呼ぶこととした。

4.2.3 松泉寺泥火山

松泉寺泥火山は蒲生集落から西に250 mの尾根部にある松泉寺の裏山に位置し(図6)、国道の付け替え工事の掘削作業中に出現したものである(図8)。本露頭では泥火山の特徴である丘状の地形及び、天然ガス、泥水の噴出は認められないが、露頭の性状及び堆積物の構造から、過去の泥火山にともなって形成された構造が認められることより、松泉寺泥火山と呼び記載を行なった。

現在は天然ガス、泥の噴出は認められないが法面、犬走り面に泥火山の形成活動に関係した構造が観察できる(図9)。基盤岩である新第三紀の砂岩泥岩互層を下方から貫くように形成された円柱

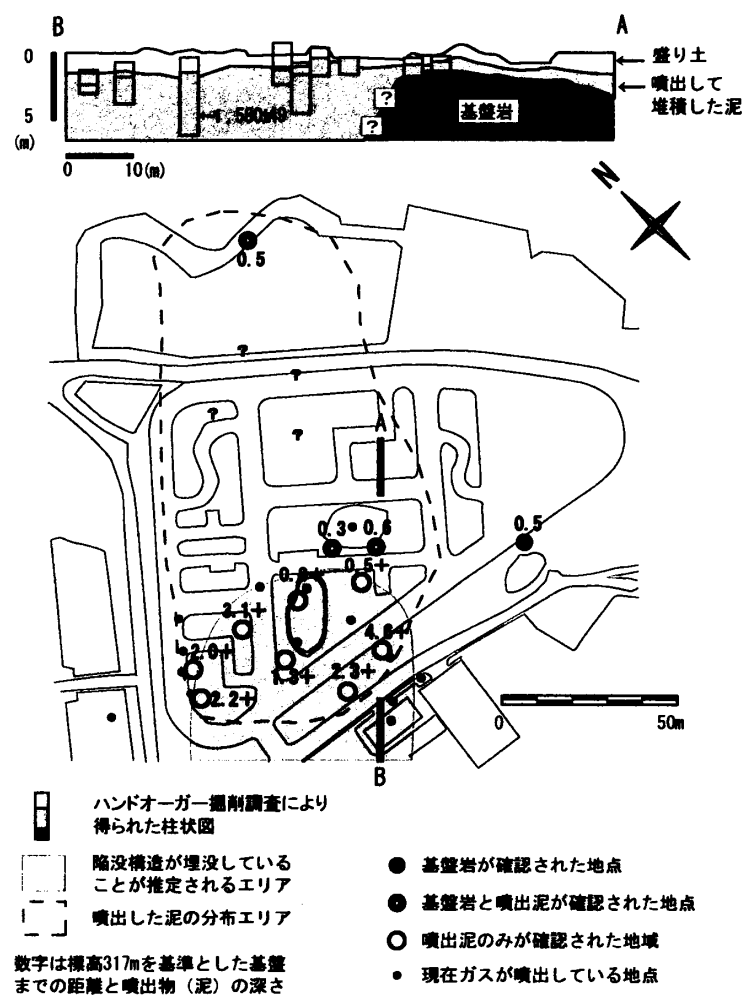


図5 室野泥火山噴出物の分布範囲と推定される陥没区域

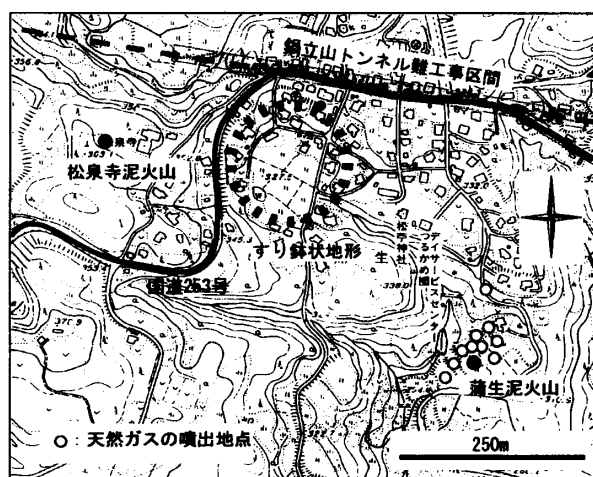


図6 蒲生地区周辺の地形図

鍋立山トンネル難工事区間の近辺には直径 200 m、深さ 30 m のすり鉢状地形、蒲生泥火山と松泉寺泥火山が分布する。地形図は 1/5000 松代町全図を使用した。



図7 蒲生泥火山噴出口の写真

状の構造を充填するように 1 mm～2 mm の泥質岩片を挟在する未固結粘土（以下含礫粘土と呼ぶ）、

湿地性堆積物が分布している。この露頭の上位には直径 30 m、深さ 4 m のすり鉢状地形が認められる。

含礫粘土の基質は混入物を含まない含水比の高い灰色の粘土のみからなり、直径 10 mm~20 mm の泥岩の角礫と植物片を含む（図 10）。角礫

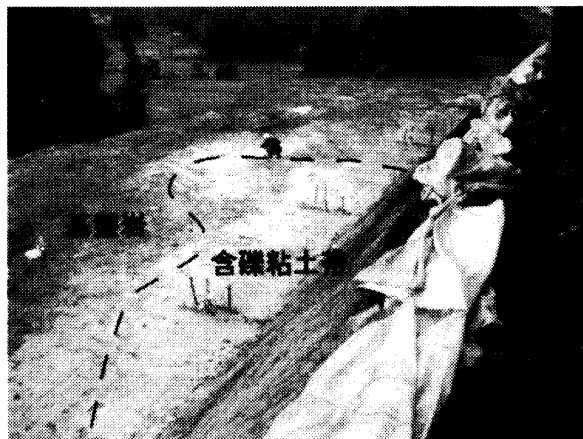


図 8 道路工事の際に出現した非活動的な松泉寺泥火山の露頭

と基質との境界は明瞭であり、明らかに礫として取り込まれている。また、この含礫粘土は室野泥火山の噴出物の特徴と類似することから泥火山噴出物と判断した。

基盤岩と含礫粘土との境界部には灰色で鱗片状組織を示し、空気に触れると酸化褐色化する粘土が、基盤岩に発達する網目状の割れ目に沿って分布する。この粘土と基盤岩との境界は不明瞭であり、基盤岩が地下水との反応により粘土化したものと考えられる（図 11）。以下では、この粘土を網目状粘土と呼び、それが分布する範囲を網目状粘土化帯と呼ぶ。

網目状粘土化帯において簡易的な針貫入試験を行なった。その結果、基盤岩と粘土化部分には著しい強度の差があることが明らかとなった（図 12）。

網目状粘土化帯には基盤岩が粘土化した部分と粘土化を免れた部分が繰り返し分布しており、両者の境界は漸移的である。図 13 に示した網目状粘土から採取された試料の XRD チャート上でのピーク強度はその他のポイントよりも大きくなっ

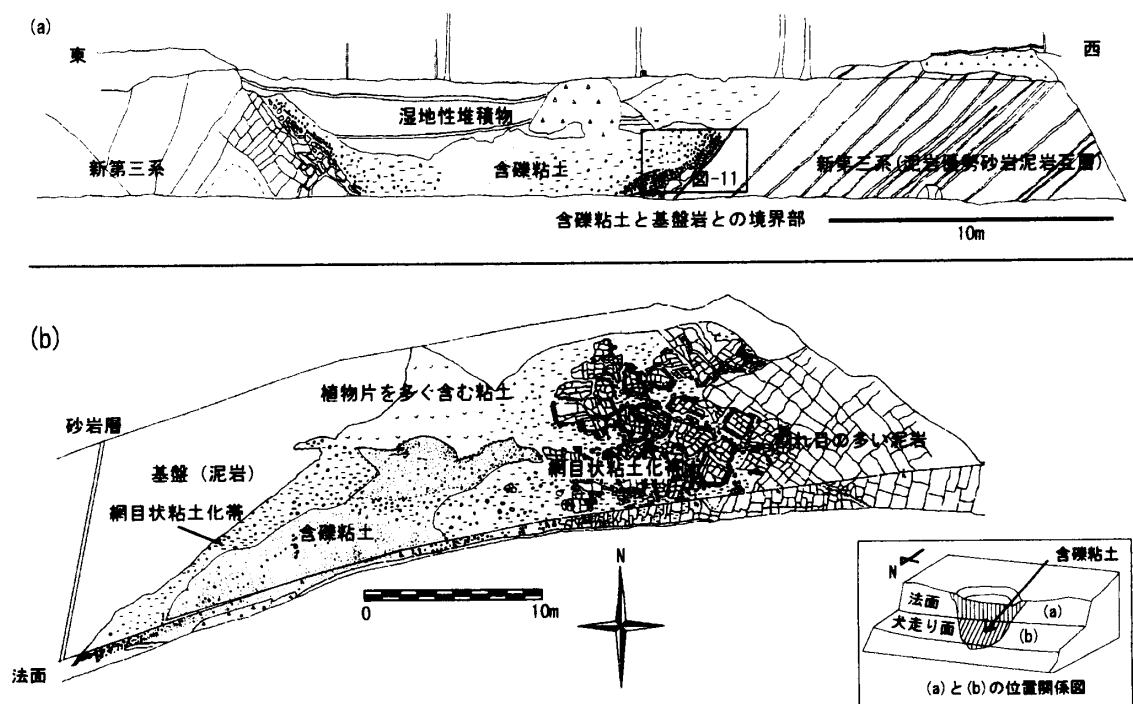


図 9 松泉寺泥火山の法面と犬走り面のスケッチ
(a) 道路工事の際に出現した露頭の法面
(b) 法面露頭の足元に観察される犬走り面

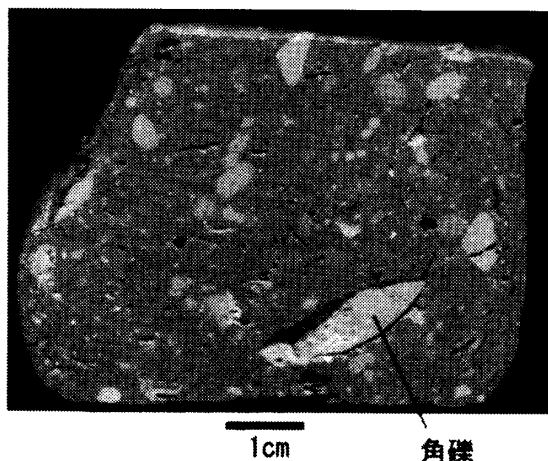


図10 松泉寺泥火山に観察される含礫粘土

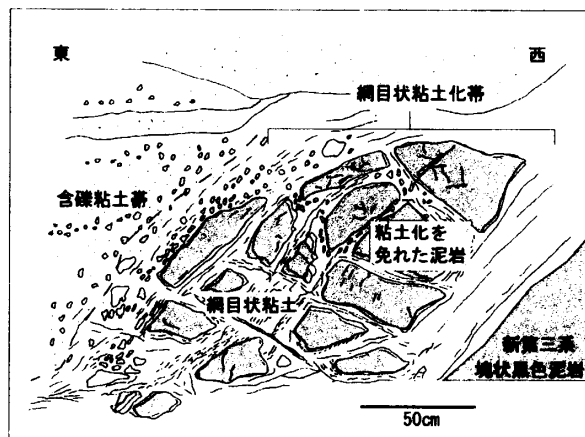


図11 松泉寺泥火山に観察される網目状粘土化帯

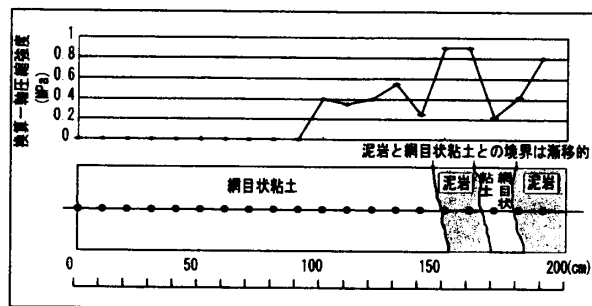


図12 網目状粘土化帯における物性変化

ていることから、網目状粘土は基盤岩の泥岩よりも、 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子を多く含むことが明らかとなった。網目状粘土と基盤岩にはイライト、

スメクタイト、緑泥石が含有されている(図13)。

湿地性堆積物は含礫粘土帯の上位と下位に分布しており、茶褐色を呈し、長さ1cm～6cmの木片が混入している。この木片の ^{14}C 年代値は $38,479 \pm 820$ BP (LS測定)である。

基盤岩は円柱状の構造に充填された堆積物に近づくにつれて割れ目が多くなり、離れるに従い塊状で割れ目が少ない基盤岩となる(図9)。

4.3 水質分析

図14は調査地域内における3箇所の河川水、5箇所の湧水、1箇所の水田水、室野泥火山と蒲生泥火山からの泥水の電気伝導度とpHを整理したものである。

調査地域内の地表水の電気伝導度は約 $200\mu\text{S}/\text{cm}$ である。室野泥火山と蒲生泥火山から噴出した泥水から分離した地下水の電気伝導度は $14\text{mS}/\text{cm}$ と $13\text{mS}/\text{cm}$ であり、他のデータより高い値を示す。室野泥火山と蒲生泥火山のpHは両者とも7.5であり弱アルカリ性を示すのが特徴である。

5. トンネル工事と泥火山

5.1 膨潤性地山と泥火山の活動との関係

調査地域内には膨潤性地山が原因で着工後21年間かけて掘削された、全長9116mの鍋立山トンネルがある。このトンネルは西工区、中工区、東工区の3工区に区分されて掘削が行なわれたトンネルであり、このうち中工区は強大な土圧と切羽の押出しにより掘削が難航した。中工区の中でも中6工区と呼ばれる、蒲生集落のほぼ直下に位置する区間では、極度の膨張性のため幾度も切り羽が押し戻され、貫通するまでに7年を要した。最難工区間の地質は、塊状泥岩・片状泥岩とともに軟質泥岩・含礫泥岩を主体に構成されており、地質は極めて劣化した状態にある(鉄建公団, 2000)。また、メタンガスを主成分とした可燃性ガスが最大 $17\text{kg}/\text{cm}^2$ という高圧で潜在しており、粘土質地山のため透気性も悪く、ガスが抜けにくい状態となっている。このガス圧のため、地山を固化させるセメントの注入作業時にヘドロ(含水

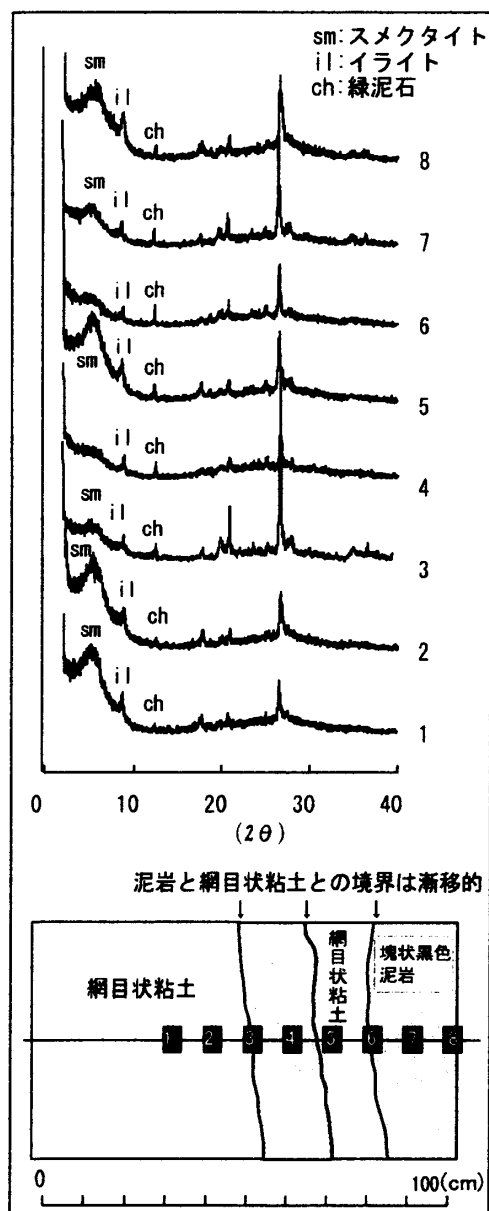


図 13 網目状粘土化帯の XRD 分析

比の高い泥水) がガスとともに切羽の 20~30 m 後方まで噴出する事があった(小暮・木村, 1995)。大木ほか(1992)は、鍋立山トンネル掘削当時の地山の異常な押し出しの様子を、切り羽からは高圧の泥とメタンガス及び塩化カルシウム型地下水が猛烈に噴出しており、まさにその状況は「泥噴火」であったと記載している。さらに、蒲生地区で掘削した地表ボーリングには噴泥現象が認められている(鉄道公団, 2000)。

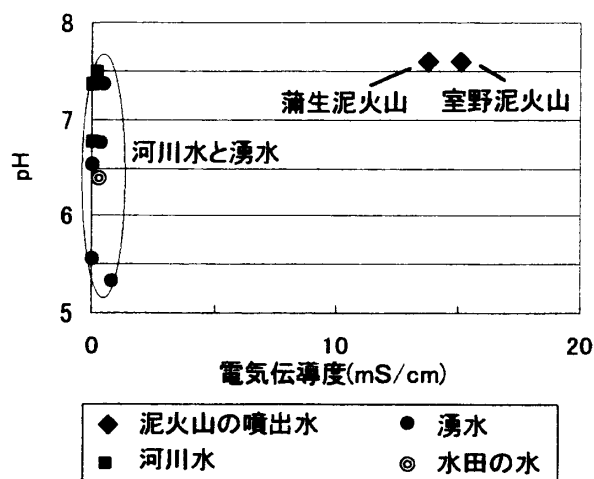


図 14 泥火山から噴出する地下水と地表水の pH と電気伝導度

上記の難工事区間は蒲生泥火山、すり鉢状地形及び松泉寺泥火山が分布する蒲生地区のほぼ直下 150 m に位置する。蒲生泥火山からは電気伝導度約 13 mS/cm の地下水とともに天然ガス、泥が噴出している。トンネル内で膨張性押し出しを強く受けた箇所にはナトリウムイオンと塩素イオンが海水の 3 分の 1 程度含まれる地下水が湧出している(大塚ほか, 1980)。松泉寺泥火山の網目状粘土や蒲生泥火山より噴出する泥水にはスメクタイト、イライト、緑泥石から構成される 2μ 以下の粘土が多く含まれている。トンネル内で難工事となった蒲生地区のほぼ直下に位置する中工区の岩盤には、①東工区や西工区に比べて 2μ 以下の粘土分が多く含まれていること、②網目状粘土化帯の力学特性が周囲の基盤岩の強度よりも著しく低いことから、異常間隙水圧が原因で地下から上昇する地下水が、松泉寺泥火山に観察されるような網目状の割れ目を通して、基盤岩の泥岩よりも強度が著しく低く、周囲の泥岩よりもスメクタイトを多く含む細粒な粘土からなる膨潤性地山を形成した可能性がある。以上のことから、蒲生地区直下に位置する膨潤性地山は泥火山の形成に関わる活動に伴って形成された可能性がある。

5.2 泥火山と地形的特徴

室野泥火山周辺には、地表の下に少なくとも深

さ4 m以上、直径30 mの陥没構造があり、その中に泥火山噴出物が充填されている。また、松泉寺泥火山の地表部には直径30 m、深さ5 mの陥没地形が観察され、さらに松泉寺泥火山の東250 mには直径250 m、深さ30 mのすり鉢状地形が分布する。

これらの地形及び陥没構造は泥火山の活動に伴って形成された可能性が高く、地下の膨潤性地山の存在を推定する上で重要な鍵となるものと考えられる。

6. まとめ

新潟県十日町市松代において泥火山の地形、地質学的調査及び、地下水調査を行い以下の結果を得た。

(1) 調査地域である新潟県十日町市松代には新第三紀～第四紀の堆積性軟岩が分布し、背斜構造、向斜構造が繰り返し認められる。

(2) 新たに確認した室野泥火山と蒲生泥火山は椎谷層相当層の須川層の分布する地域に認められ、背斜軸から離れた翼部に位置する。

(3) 室野泥火山からは天然ガス、地下水、石油及び泥が噴出している。噴出される泥水の電気伝導度は14 mS/cmである。地表には泥が噴出して堆積したために作られた高さ1 m、直径10 mの小丘が存在する。その小丘の地下には少なくとも直径30 m、深さ4 m以上の陥没構造があり、その中には泥火山噴出物が充填されている。

(4) 蒲生地区に位置する松泉寺泥火山には泥火山噴出物の含礫粘土と湿地性堆積物および、その周囲を取り巻く基盤岩と基盤岩が網目状の割れ目に沿って粘土化する網目状粘土が観察できる。

(5) 新潟県十日町市蒲生地区のほぼ直下150 mに位置する鍋立山トンネルの膨潤性地山は、泥火山の形成に関わる活動に伴って形成された可能性がある。

謝 辞

本研究を行うに当たり以下の方々にお世話になった。鉄道建設・運輸施設整備支援機構の服部修一氏、京都大学防災研究所の千木良雅弘教授、山口大学理工学部の宮田雄一郎助教授、金折裕司教授、

山口大学理工学研究科の徳安真吾氏、東京大学工学系研究科の徳永朋祥助教授、新潟大学の佐藤修名誉教授、朝日航洋株式会社の大塚正幸氏には文献の紹介や現地において有益な議論をさせていただいた。本研究を進めるにあたり「平成14年、15年度京都大学防災研究所共同研究 課題番号 14 G-01」の一部を使用した。また、本研究の一部には文部科学省科学研究費助成金(田中：課題番号14580505)を用いた。新潟県十日町市松代の方々にはサンプル採取や資料提供等に快く御協力していただいた。ここに深く御礼申し上げ、感謝の意を表します。

参考文献

- 千木良雅弘・中田英二：堆積岩の続成作用(その1)－圧密・脱水と水理地質特徴。電力中央研究所調査報告, U94026, 45 p, 1994.
- 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, 103, 781-791, 1997.
- 小暮誠・木村裕俊：超膨圧トンネル掘削完了 北越北線 鍋立山トンネル。トンネルと地下, 第26巻7号, 7-21, 1995.
- 松代町史編纂委員会：湧水。松代町史, 100-105, 1989.
- Jackson, J. A. (ed.): Glossary of Geology (4th ed.). American Geological Institute (Alexandria), 769 p, 1997.
- 大木靖衛・佐藤修・青木滋：北部ジオプレッシャー熱水系に起因する地震と地すべり。月刊地球, No. 5, 121-125, 1992.
- 大塚正幸・高野彬：膨張性泥岩におけるトンネルの挙動と地質特性。土と基礎 28-7 (270) 29-36, 1980.
- 竹内圭史・吉川敏之・釜井俊考：松之山温泉地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)。地質調査所, 76 p, 2000.
- 田中和広・大山隆弘：台湾南部における泥火山の地質・地下水特性。2001 日本応用地質学会講演論文集, 59-62, 2001.
- 鉄建公団：北幹、微動探査法地質調査解析報告書。
- 山縣毅・小川勇二郎：混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割。地質学雑誌, 95, 275-310, 1989.

(投稿受理：平成16年8月30日)

訂正稿受理：平成17年2月23日)