

53. 新潟県十日町市における泥火山の地下構造と膨潤性トンネル

Underground structure of mud volcanoes in Tokamachi-Shi, Niigata with special regard to the swelling tunnel

○徳安真吾（日本地下探査）、鈴木浩一（電力中央研究所）、田中和広（山口大学理工学研究科）

○Shingo, TOKUYASU, Koichi, SUZUKI, Kazuhiro, TANAKA

1. まえがき

新第三紀堆積岩の分布地域には、異常間隙水圧により地下深部から地下水、泥、ガスなどが上昇し噴出する現象が報告されており、噴出した泥により形成された地形的高まりは泥火山と呼ばれ、海底、陸上において多く報告されている¹⁾。泥火山の活動は破壊的であり、地下に建設された構造物を破壊する可能性がある。さらに、一旦形成された泥火山の直下をトンネル掘削する際には、地下深部からもたらされた軟質な泥や高圧の地下水さらにはガスに充填された脆弱な泥火山噴出物よりなる岩盤を掘削することとなり、切羽の自立が難しく、いわゆる膨潤性地山とよばれ多くのトラブルに遭遇する可能性がある。新潟県十日町市松代には、掘削に困難を極めた鍋立山トンネルがある。すでに、鍋立山トンネルの地表部には泥火山が分布しておりその一部は現在でも泥や地下水、ガスなどを噴出していることが報告されている²⁾。筆者らは、蒲生地区において泥火山の地下構造を明らかにするため、CSA-MT法による構造探査を実施しており、すでに地下深部に塩水地下水で満たされた箇所があることを報告した³⁾。今回、新たに測線を設置し計測を行い、すでに報告した蒲生地区の1測線の結果とあわせて泥火山の地下構造を推定し、膨潤性地山の形成に関して検討を行い新たな知見を得たので報告する。また、膨潤性地山との関係についても報告する。

2. 地質・地形概要

調査地域は新潟県十日町市松代で、蒲生地区と室野地区において活動的な2箇所の泥火山と非活動的な泥火山1箇所が報告されている²⁾（図-1）。

当地域に分布するのは、新第三紀～第四紀の堆積岩類であり、下位より層厚625m以上で主に塊状泥岩からなる須川層の上位に塊状シルト岩、シルト岩・泥岩互層からなる田麦川層が分布する。泥火山はいずれも、須川層に噴出している。

一般に、NE-SW方向の走向を有し、同方向に軸を持つ褶曲構造が認められる。

蒲生地区の泥火山分布域は標高330m付近にあり、詳細な地表踏査や鍋立山トンネル掘削時の資料の整



国土院刊行 数値地図50mメッシュ(標高)日本-II
カシミール3D Ver7.8.0 を使用

図-1 調査位置図

理により直径約400mの範囲の内側の地質構造が著しく乱されており、周辺の地質構造と調和的ではない。構成するのは須川層上部であり、塊状の泥岩から次第に砂岩優勢となっている。一方、室野地区は、須川層の塊状泥岩で構成され、NE-SW方向に軸をもつ背斜構造の南測翼部に泥火山の活動が認められる。

空中写真判読やレーザースキャナー探査により、泥火山地域の地形的特徴について検討を行った。

蒲生地区は尾根部であるにもかかわらず、直径300m、深さ約30mの凹地が判別され、ここではこの地形をすり鉢状地形と呼ぶ。すり鉢状地形の位置は地質構造が乱れている箇所とほぼ一致する。

室野地区は孤立した標高315mの山頂に直径300m程度の平坦面が認められ、そのほぼ中央部の小高い丘で泥火山の活動が認められる。

3. CSA-MT法探査

CSA-MT法は、調査対象地域より数kmはなれた箇所にケーブルを設置し、電流を流し発生する電磁波により誘導された電場と磁場を計測することにより地下の非抵抗分布を得るものである。手法の詳細についてはすでに報告したのでここでは省く³⁾。すでに報告したように、泥火山で噴出する地下水は高塩分濃度を有し、室内実験においても、淡水に飽

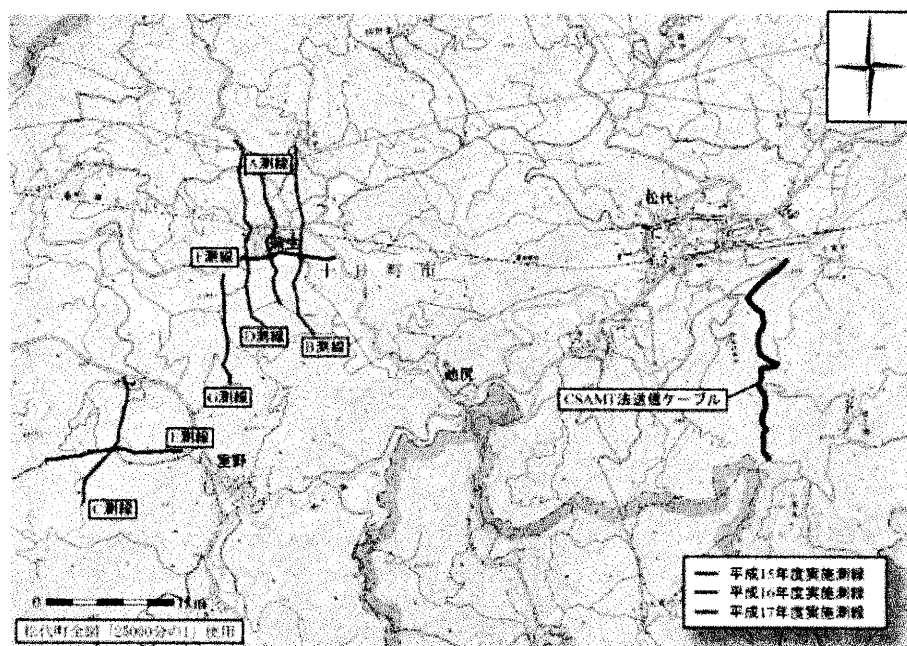


図-2 CSA-MT 法探査の探査測線

した泥岩の試料に比べ約 1 桁程度非抵抗が小さく、CSA-MT 法によりこれらの塩水地下水の分布を把握することは十分可能と考えられる³⁾。

今回も前回と同様に調査地域より約 2.5km はなれた箇所に南北方向に送信用ケーブルを設置した。

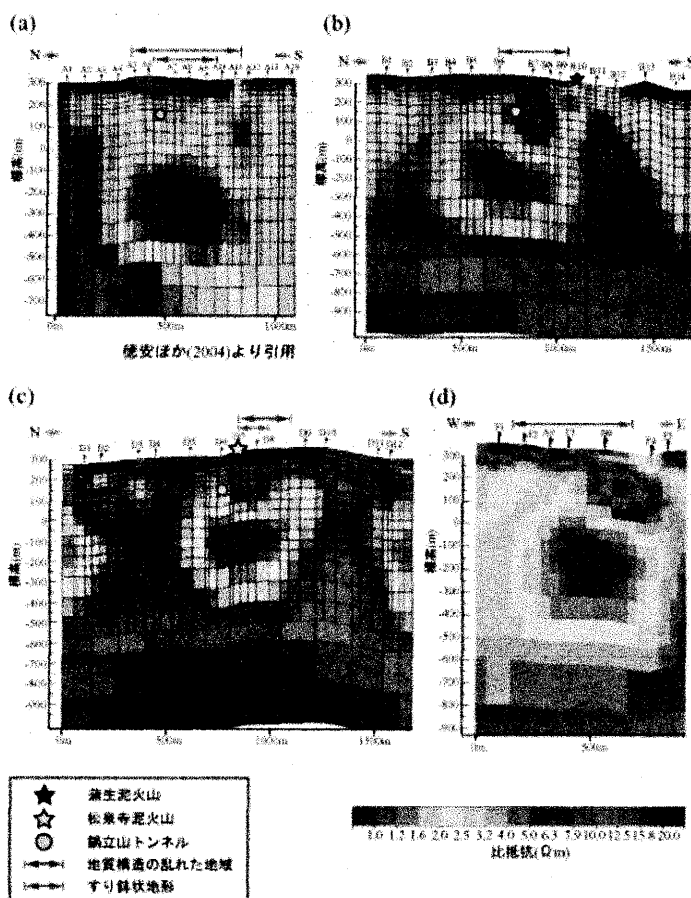


図-3 蒲生地区の 2 次元非抵抗分布

(a) A 測線, (b) B 測線, (c) D 測線, (d) F 測線

受信測線は蒲生地区で 4 測線、室野地区で 2 測線、両地区の間に 1 測線を設置した (図-2)。特に、蒲生地区では既設の測線を含め、すり鉢状地形の周辺に南北 3 測線、東西 1 測線を設置し 3 次元的地下構造の解明を試みた。

3.1 蒲生地区

南北測線においては、いずれの測線においても、地下約 400m 以深に非抵抗が $1 \Omega m$ 以下の領域が抽出されており、得られた非抵抗は室内実験の結果から約 $35 mS/cm$ に相当するものと考えられる。

この領域を海外の泥火山の例に倣って **mud chamber** と呼ぶ (図-3)⁴⁾。Mud chamber の実態については不明の点が多いが、非抵抗の小さい高塩分濃度の地下水に飽和しているものと想定される。東西断面においても同様の構造が抽出されており、直径 500m におよぶ **mud chamber** が 3 次元的に確認できた。

さらに、 $1.5-2.5 \Omega m$ の低非抵抗部がカルデラ状の構造の壁に沿って環状に地表へ向かい連続しており、その一部は地表面に達しており、活動的泥火山に連続する。低非抵抗部の電気伝導率は泥火山で噴出する地下水にほぼ等しい約 $10 mS/cm$ に相当する。

3.2 室野地区

室野地区においては、活動的泥火山付近で交差する 2 測線において、計測を実施した。その結果、活動的泥火山の 200m 深度に小規模の低非抵抗域が認められたものの、蒲生地区のような **mud chamber** は見出されなかった (図-4)。低非抵抗域の平面的な分布は、NEE-SWW 方向に縞状を呈し、一部雁行状を呈する。

4. 考察

4.1 異常間隙水圧層の上昇過程と地質構造

泥火山の地下構造に関しては、実データや物理探査結果に基づいて様々なモデルが提案されている。それらは噴出する泥や地下水の貫入の形態などにより大きく 3 つのタイプに分類される (図-5)。

① カルデラタイプ

陥没構造に伴い、同心断層が発達し **swarm** 状に流動化した泥が上昇し下方に凸のコーンを形成してい

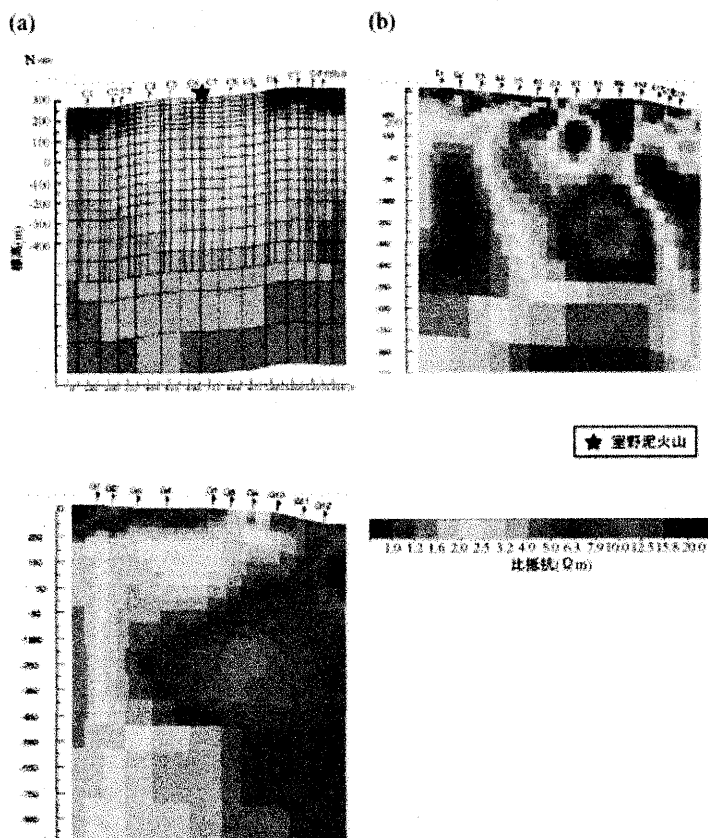


図-4 室野地区 2次元非抵抗分布
(a)C 測線, (b)E 測線, (c)G 測線

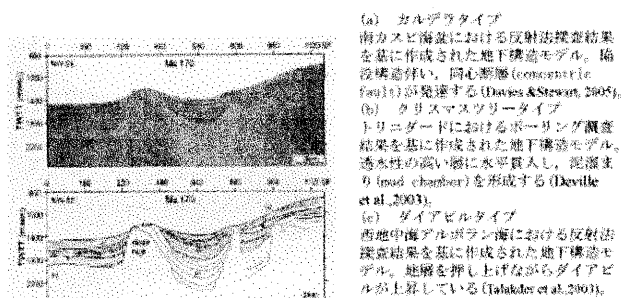
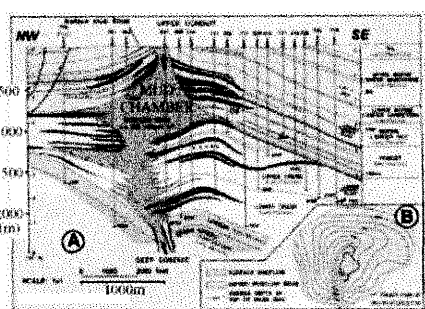
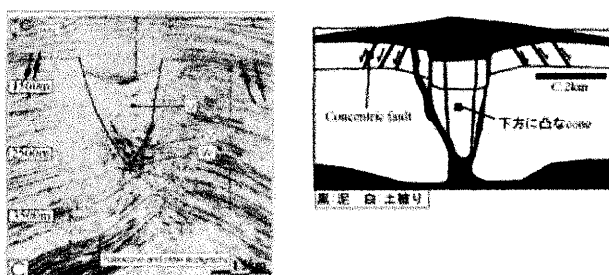


図-5 泥火山地下構造のタイプ

るものであり、カスピ海盆において反射法探査の結果を基に報告されている⁴⁾。

② クリスマスツリータイプ

地下から異常間隙水圧により上昇してきた流動化した泥が透水性の高い層に沿って貫入し、mud chamberを形成してクリスマスツリー状を呈しているもので、トリニダードで詳細なボーリング調査結果に基づき推定されている⁵⁾。ガラスビーズ砂とベントナイト粘土を用いた室内実験においても、ガラスビーズ砂において著しい泥の注入が認められ、一旦注入した流体はクリスマスツリー上に貯留されその後、新たな割れ目を上方に形成しながら上昇することが認められている⁶⁾。

③ ダイアピルタイプ

泥火山の一般的な形態であり、地層を押し上げるようにダイアピル状に盛り上がり認められ、特に海底表面に泥火山を形成するものである⁷⁾。田辺層群に見られるダイアピルも同様の形態を示す⁷⁾。

CSA-MT 法により想定される調査地域に分布する泥火山の地下構造について、上記のモデル構造との比較を行う。

蒲生地区については、地質構造の乱れた地域、すり鉢状地形の存在から、陥没構造が地下に想定される。さらに、高塩水地下水や泥の充填する高い間隙水圧を有する低非抵抗の mud chamberが形成されている。さらに、カルデラの壁面沿いに上昇した泥、地下水、ガスが活動的泥火山を形成している。蒲生地区に分布する須川層は主部をなす塊状泥岩と比較すると間隙率が高い砂岩優勢の砂岩・シルト岩互層からなっており、周囲より透水性は高いものと考えられる。

以上より、蒲生地区の地下構造はクリスマスツリータイプとカルデラタイプの複合型と考えられる。

一方、室野地区においては、地下 200m 以深に低非抵抗域が縞状に分布している。地表部においては、ガスや泥、地下水などが褶曲構造の翼部から噴出しており、泥火山の噴出通路は褶曲運動に関連して形成された断層沿いにダイアピル状に上昇した可能性があり、ダイアピルタイプと考えられる (図-6)。

4.2 鍋立山トンネルの膨潤性地山箇所と泥火山

蒲生地区を通過する鍋立山トンネルは掘削時に膨潤性地山に遭遇し、坑壁の崩壊や TBM の押し戻しなどが見られ、掘削に長期間を要することとなった⁸⁾。鍋立山トンネルの膨潤性地山の原因としては、これまで、吐出するガスを原因とするものやスメクタイトの様な膨潤性の粘土鉱物の存在を原因とするもの

ボーリング調査結果には破碎泥岩と記載されている⁸⁾.

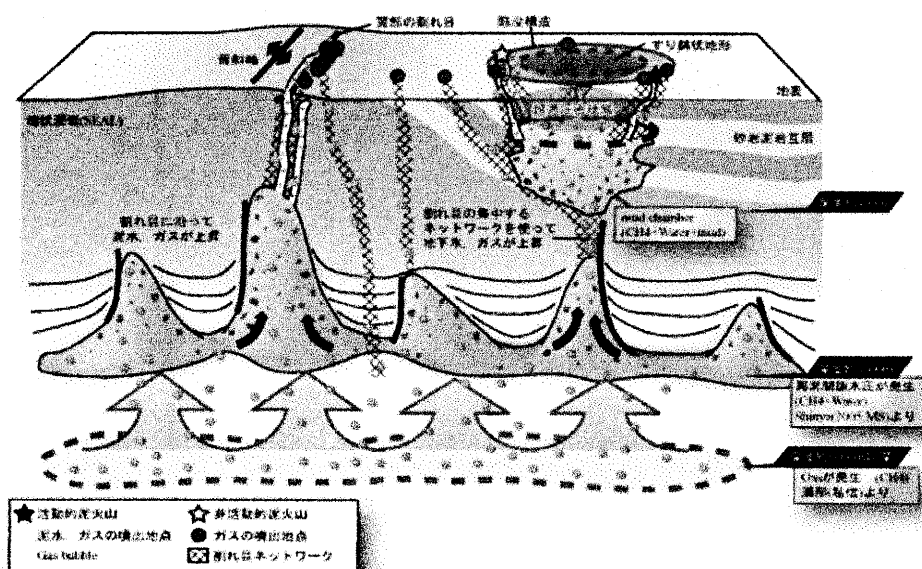


図-6 新潟県十日町市における泥火山の地下構造モデル

などさまざまである。今回新たに実施した、CSA-MT 法による泥火山の地下構造の 3 次元的な検討の結果に基づき異常間隙水圧層の分布との関係で議論を行う。

図-7に物理探査や周辺地質・地形調査結果を基に作成した蒲生地区の泥火山周辺の地下構造を示す。現在の地質構造は以下のように推定される。

異常間隙水圧層により上昇した泥、地下水、ガスが **mud chamber** において一旦貯留された後に、爆発的な泥や地下水の噴出の後に、カルデラ構造を形成し、現在、地下水は壁面に沿って上昇しているものと考えられる。すり鉢状地形の地下では地表で涵養した淡水地下水と地下深部から上昇した塩水地下水とがポテンシャルバランスをとっていることが予想されている。膨潤性地山区間では塩水地下水が湧出していることから、塩水地下水の分布域に位置し、

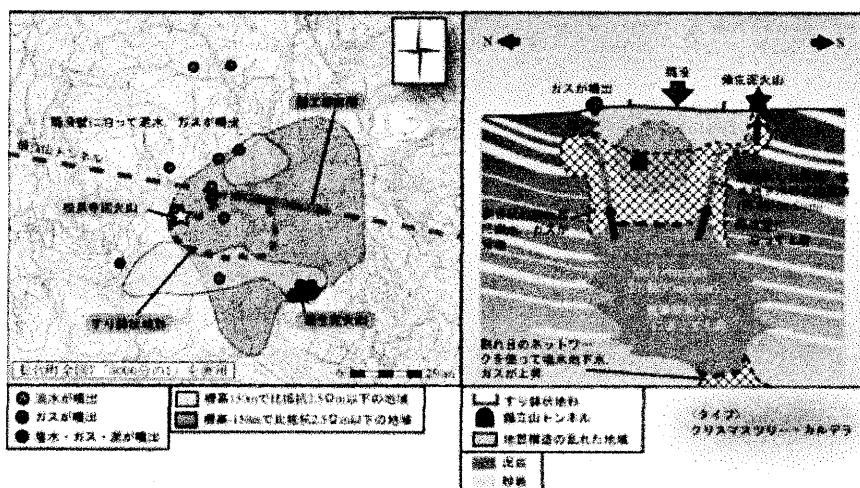


図-7 蒲生地区地下構造と地質、地形および鍋立山
トンネル膨潤性地山との関係

文献

- 1) Mirkov, E. et al.(2000) Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, Marine Geology, 167, 29 - 47

- 2) 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.
- 3) 徳安信吾・田中和広・鈴木浩一 (2004) 泥火山の地下構造の研究, 平成 16 年度応用地質学会研究発表会講演論文集, 19-22.
- 4) Davies, J. & Stewart, A. (2005) Emplacement of giant mud volcanoes in the South Caspian Sea: 30 seismic reflection imaging of their root zones, Jour. of Geol. Soc. 162, 1-4.
- 5) Devile, E. et al. (2003) The origin and processes of mud volcanism; new insight from Trinidad, In Rensbergen, P. et al. (eds), Subsurface Sediment Mobilization, Special Pub., 216, 475-490, (Geological Society).
- 6) 田中和広 (2006) 泥火山・マッドダイアピルが引き起こす地盤災害のメカニズムと対策, 科学研究費補助金 (基盤 C) 研究成果報告書, 84 p.
- 7) Talikder, R., Comas, C. & Sato, I. (2003) Pliocene

to recent mud diapirism
and related mud volcanoes
in the Alboran Sea
(Western Mediterranean),
In Rensbergen, P. et al.
(eds), *Subsurface
Sediment Mobilization*,
Special Pub. 216, 443-459,
(Geological Society)

- 8) 鍋立山トンネル特別小委員会（1990）北越北線鍋立山トンネルの設計，施工技術の研究（その4）報告書，178p.