

# 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

田中和広\* 石原朋和\*\*

## Mud Volcanism near the Nabetachiyama Tunnel and the Formation Mechanism of Swelling Rock Mass

Kazuhiro TANAKA\* and Tomokazu ISHIHARA\*\*

### Abstract

The Nabetachiyama Tunnel 9116 m long was excavated in Tokamachi City, Niigata Prefecture and encountered the serious difficulties during excavation. In particular, a 600 m long section in the Matsudai area had experienced difficulties caused by swelling mudstone in the Tertiary Sugawa Formation. A 120 m bore hole long was excavated in the neighborhood of the section and geological and geochemical examinations of sampled cores were carried out to investigate the formation mechanism of the swelling rock mass. Mudstone distributed deeper than 50 m in the bore hole can be correlated to the tunnel troubled section geologically and geochemically. The section is assumed to be composed of mud breccia with mudstone fragments and clayey matrix, which is thought to be generated by hydro-fracturing of mudstone, showing weak strength due to large quantities of clay minerals. A gas pressure of 1.6 MPa thought to be caused by degassing of methane was measured during tunnel construction, which would increase the swelling properties. Mud breccia distributed deeper than 50 m contains a lot of Na-smectite formed in highly saline pore water ascending from deep underground. The result of slaking test showed that mud breccia filled with saline groundwater is characterized by quick slaking and swelling due to the marked contraction of Na-smectite when drying. In summary, the swelling rock mass distributed in the troubled section was formed by the weak rock strength caused by hydro-fracturing and high gaseous pressure generated by degassing. Furthermore, quick slaking caused by repeated wetting and drying was another reason for swelling during excavation.

**Key words** : mud volcano, Nabetachiyama tunnel, swelling rock mass, slaking experiment, mudstone

キーワード : 泥火山, 鍋立山トンネル, 膨張性地山, 浸水崩壊試験, 泥岩

### I. ま え が き

北越急行鉄道ほくほく線は北陸本線直江津駅と上越本線六日町駅との間を結び、上越新幹線と北陸本線を短時間で結ぶ物流の主要幹線鉄道であ

る。路線のほとんどが山間部を通過するため、その大部分がトンネルからなる。特に路線の中央部に位置する<sup>なべたちやま</sup>鍋立山トンネルは上越市大島地区と十日町市<sup>まつだい</sup>松代地区とを結ぶ全長 9116.5 m のトンネルで、1973 年に掘削が開始され多くの施工上の

\* 山口大学大学院理工学研究科

\*\* 財団法人鉄道総合技術研究所防災技術研究部

\* Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

\*\* Disaster Prevention Technology Division, Railway Technical Research Institute

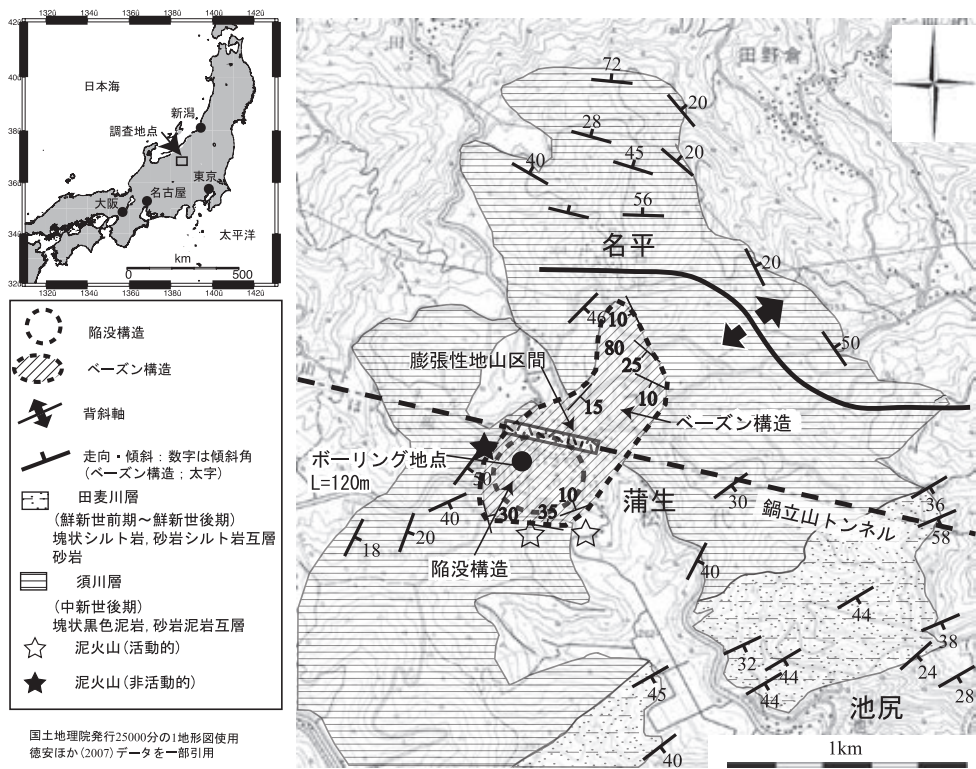


図 1 調査地域の地質図と鍋立山トンネル難工事区間、ボーリング調査の位置図。調査地域中央部に周辺の地質構造と非調和的なベーズン構造が認められ、その縁辺部に泥火山が分布する。鍋立山トンネルの難工事区間はベーズン構造の内側に位置し、陥没地形に接する。ボーリング掘削は陥没地形のほぼ中央部で実施された。

Fig. 1 Geological map of the study area and location of the troubled section in the Nabetachiyama Tunnel and bore hole at a depth of 120 m. The study area is mainly composed of Tertiary Sugawa Formation. Troubled section of the Nabetachiyama Tunnel is located in the basin structure and along the topographic depression wall. The bore hole was excavated in the center of depression.

トラブルに遭遇し、苦難の末、1995年に貫通した(図1)。特に、中工区は強大な土圧と切羽の押し出しにより掘削が難航した。この内、松代側の中6工区は十日町市蒲生地区の直下約150mを通過し、極度の地山の膨張のため幾度も切羽が押し戻され、645m区間の掘削に7年を要した。掘削時には高速掘削を行うことを目的としてトンネルボーリングマシン(TBM)を導入したが、強大な膨張圧のために、100m逆に押し戻されることとなった。難工事区間においては、切羽の押し出し力を抑制するために本坑半径の約3倍の範囲に高強度のセメント系注入材の注入と掘削

を繰り返すことにより掘削を完了することができた(Matsushita et al., 1995)。

鍋立山トンネルでみられた地盤は膨張性地山と呼ばれ、地山強度比が2以下の粘性土や破碎岩で地すべり地山を含み、地山の構成岩種としては蛇紋岩、膨張性泥岩・凝灰岩、温泉余土、粘土を伴う幅広い断層破碎帯、粘性土、地すべり地山がある(土木学会, 1992)。このような地盤は全国的に広く分布しており、トンネル掘削時に重大なトラブルが発生している(図2; 土木学会原子力土木委員会地下環境部会, 2006)。特にトンネル掘削などでトラブルの原因となっている泥岩・

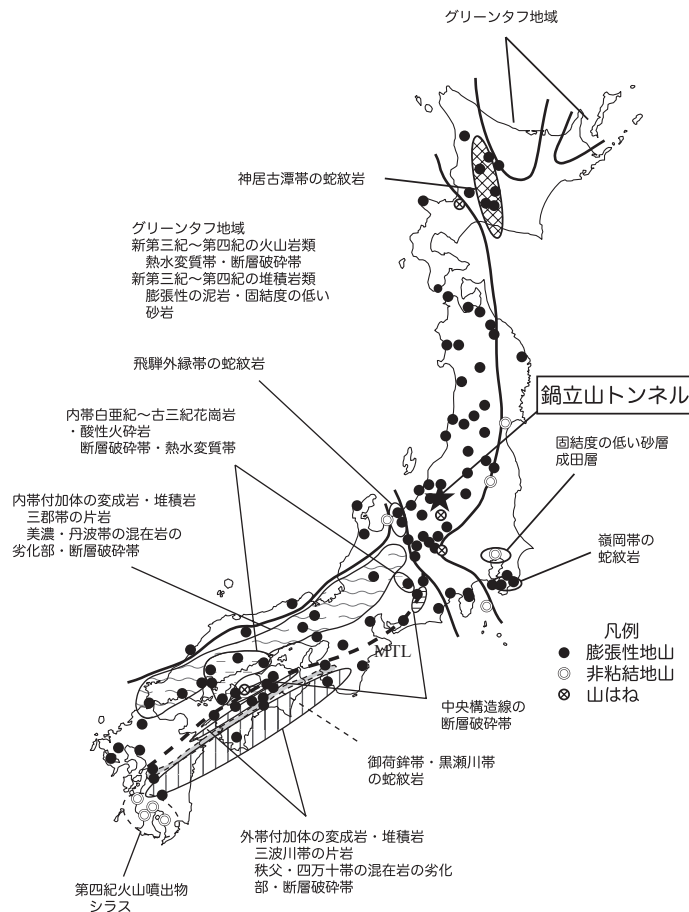


図 2 全国の膨張性地山の分布図, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会 (2006) に加筆.

Fig. 2 Distribution of swelling rock mass modified from JSCE (2006).

凝灰岩における膨張性地山の地質学的要因としては背斜構造や断層擾乱帯などにより破碎化, 粘土化し, モンモリロナイトや緑泥石などの粘土鉱物が存在することなどがあげられている (土木学会, 1992)。膨張性地山におけるトンネル掘削の例としては第三紀泥岩 (高松・羽根田, 1979; 佐々木・山岸, 1982; 山口ほか, 1982; 中山ほか, 1991; 中村ほか, 1993; 片寄ほか, 1997 など), 凝灰岩 (佐藤ほか, 1994), 温泉余土 (吉村ほか, 1980), 蛇紋岩 (梅津, 1995) の地質からなる地点の報告がある。

膨張性泥岩の地山評価方法としてはさまざまな

考え方が提案されているが, 吉川ほか (1983) は粘土分 (粒径  $5 \mu\text{m}$  以下) 含有率, 粘土+シルト ( $74 \mu\text{m}$  以下) 含有率, 塑性指数, 吸水率, 浸水崩壊度, モンモリロナイト含有量の 6 項目からなるヘキサダイアグラムを提案し, 膨潤能力を評価し, 地山強度比の検討結果とあわせ総合的な評価を行っている。

鍋立山トンネルも膨張性地山の事例であり, 掘削状況, 計測結果, 掘削工法などに関する報告が多く出されている (大塚・高野, 1980; 大塚・豊島, 1980; 谷・小島, 1986; 土居ほか, 1990; 秋田・佐藤, 1993; 小暮・木村, 1995; Matsushita *et al.*,

1995)。しかし、膨張性地山の原因などに関する応用地質学的考察は大塚・高野（1980）を除くとほとんどなされていない。一方、堆積岩分布地域にみられる泥火山やそれに伴われるマッドダイアピルが膨張性地山の原因となっている可能性が指摘されているが（千木良・田中, 1997）、実際に両者の関係が報告された例はない。鍋立山トンネルの難工事区間の直上である新潟県十日町市蒲生地区には複数の泥火山の分布が知られており（図1; 新谷・田中, 2005）、最近ボーリング調査により地下構造が解明されつつある（石原・田中, 2009）。本報告では、ボーリング調査で明らかとなった、鍋立山トンネル近傍に分布する泥火山周辺の地下構造や粘土鉱物組成や間隙水の地化学特性と鍋立山トンネル難工事区間の掘削で得られた情報とを比較検討しながら鍋立山トンネルの膨張性地山の原因について検討を行う。

## II. トンネル通過地の地形と 広域の地質・地質構造

### 1) 地形

レーザ計測の結果によれば、鍋立山トンネルの難工事区間が通過する十日町市蒲生地区には直径200 m、深さ30 mのすり鉢状地形がみられ（鈴木ほか, 2009）、泥火山の活動に伴い多量の地下水と泥が噴出したために陥没して形成された陥没地形（以下陥没地形と呼ぶ）と考えられている（石原・田中, 2009）。同様の泥火山活動に伴われて形成された陥没地形の存在は北海道新冠泥火山においても報告されている（千木良・田中, 1997）。トンネルは陥没地形の北側壁近傍を通過している（図1）。

### 2) 地質・地質構造

調査地域には新第三紀の須川層の泥岩、田麦川層の砂岩、泥岩、砂岩・泥岩互層が分布し、全体としては北東-南西方向の走向で南傾斜を示し、南向きの半ベズン構造が認められるとしている（竹内ほか, 2000）。新谷・田中（2005）、徳安ほか（2007）、石原・田中（2009）は蒲生地区を中心として直径800 mの範囲において周辺の地質構造と不調和なベズン構造を見出し、この構造と

構造の乱れていない周辺岩盤との境界付近に2個の活動的泥火山と1個の非活動的泥火山を報告している。新谷・田中（2005）は蒲生地区の国道工事箇所においてベズン構造と塊状泥岩との境界部に非活動的泥火山（松泉寺泥火山）を見出し、火道は泥岩岩片と粘土からなる網目状粘土化帯と泥火山噴出物からなり、ベズン構造から離れるに従い、インタクトな須川層の塊状泥岩が分布していることを報告している（図1）。網目状細粒粘土化帯は泥岩が現地で破碎され粘土化した性状を示し、針貫入試験により得られた換算一軸圧縮強度は0～0.6 MPaと著しく小さな値を示す（新谷・田中, 2005）。ベズン構造の形成には泥火山の活動に伴う陥没地形の形成が関与している可能性が指摘されている（石原・田中, 2009）。トンネルの難工事区間は、ベズン構造の中央部に位置する（図1）。

### 3) 物理探査による地下構造

徳安ほか（2007）、鈴木ほか（2009）はCSA-MT法により蒲生地区の地下600 m深度までの比抵抗分布を検討した。その結果、陥没地形の地下400 m付近に直径500 mの広がりを持つ、1 Ωm以下の低比抵抗帯を見出し、これを塩水地下水、泥、天然ガスからなるマッドチャンバー（Deville *et al.*, 2003）と呼んだ。さらに、マッドチャンバーからベズン構造の周辺境界に沿って、チューブ状に上昇する低比抵抗帯を検出し、一部は現在の活動的泥火山へ連続することが明らかとされた（鈴木ほか, 2009, Fig. 8）。類似の構造はDavies and Stewart（2005）により報告されており、Brown（1990）の提案したdiatremaに対比されるものと考えられる。これらはマッドチャンバーにおいて脱ガスによる著しい体積膨張により発生した高いガス圧により上昇した流体により破壊形成された構造であり、塩水地下水により飽和されているものと考えられる。トンネル難工事区間は、マッドチャンバーの上位の低比抵抗帯中（約3 Ωm）を通過しており、その区間には高塩分濃度の地下水が分布していることを示唆している。

### III. 鍋立山トンネル掘削時の状況

鍋立山トンネルの難工事区間には新第三紀須川層（竹内ほか, 2000）の粘土化した泥岩が分布する（大塚・高野, 1980）。難工事区間の特徴として、①構成粒子が非常に細かい（ $2\ \mu\text{m}$  以下が全体の50%以上）、②塑性指数が大きい（111～129%）、③土被り（約150 m）に対し一軸圧縮強度がきわめて小さい（0.24～0.33 MPa）ことがあげられる（小暮・木村, 1995）。また、メタンガスを主成分とした可燃性ガスが最大1.6 MPaという高压で存在し、含水率の高い粘土を噴出している。地圧は最大3 MPとトンネル土被り厚（150 m）の荷重に相当している。難工事区間から湧出する地下水には $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ が海水の3分の1程度含まれ、高塩分濃度を示す（大塚・高野, 1980）。

### IV. ボーリングコア調査結果

石原・田中（2009）はベーズン構造、陥没地形の中央部において鉛直120 mのボーリング調査を実施し、採取したコアの観察と間隙地下水の地化学的特性の検討を行った。ボーリング地点はトンネル通過箇所の南方約160 mに位置し、孔口標高329 m、孔底標高は209 mであり、孔底部はトンネル敷標高より約20 m高標高部にあたる。ボーリングコアの詳細な記載や間隙水の地化学的特性などについては石原・田中（2009）を参照されたい。

陥没地形の地下を構成する地質は、深度5.8 mまでは泥火山噴出物、深度50 mまでは須川層の塊状泥岩、深度50 m～孔底は泥岩岩片と軟質な泥基質よりなるマッドプレッチャー（Kopf, 2002）を主体とする。マッドプレッチャーでは、50 m深度以浅に比ベスメクタイト、雲母/スメクタイト混合層鉱物等よりなる粘土鉱物の量が相対的に増加しており、強度の低下が認められる。ペネトロメータ（SH70）により10 cm間隔で実施した針貫入試験の結果、換算一軸圧縮強度において、泥岩岩片では一部に2 MPaを超える値も得られたが深度50 m以深では軟質な泥質基質が卓

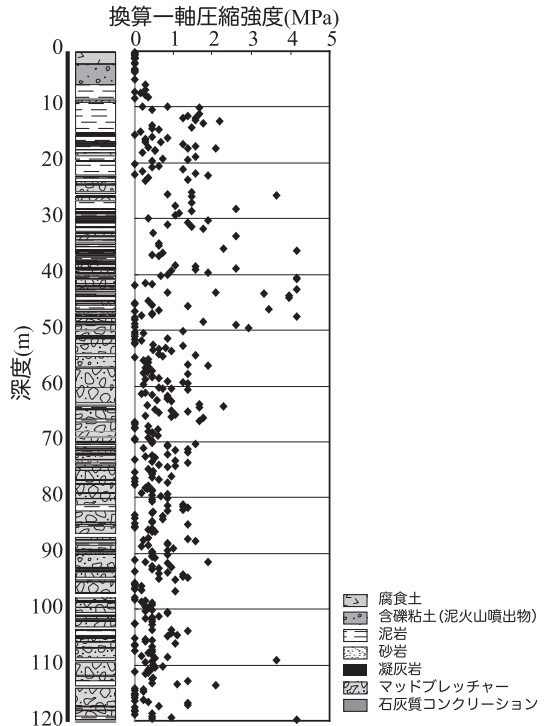


図3 針貫入試験による換算一軸圧縮強度の深度分布。ペネトロメータにより貫入力量を求め、一軸圧縮強度に換算した。計測深度間隔は約10 cmとした。深度50 m深部では値がそろっており、平均0.6 MPaを示す。

Fig. 3 Variations of converted uni-axial rock strength obtained by a needle penetration test. Penetrationability was measured at intervals of 10 cm and converted into uni-axial rock strength. Converted uni-axial rock strength deeper than 50 m was 0.1 MPa on average.

越しており、0 MPaを示すものが多く、平均0.6 MPaの値が得られた（図3）。ボーリングコアのXRD分析によるスメクタイトの層間距離の解析結果によれば、深度50 mまでは二価の陽イオンを層間にもつスメクタイトが、50 m以深では一価の陽イオンをもつスメクタイトが分布しており、層間イオンは、XRFによる分析結果から判断するとそれぞれ $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ と考えられる（石原・田中, 2009）。孔底標高が209 mであること、孔底のコアから抽出した間隙水の電気伝導度が約0.8 S/mであり、 $\text{Cl}^-$ 濃度が2000 ppmと高塩分

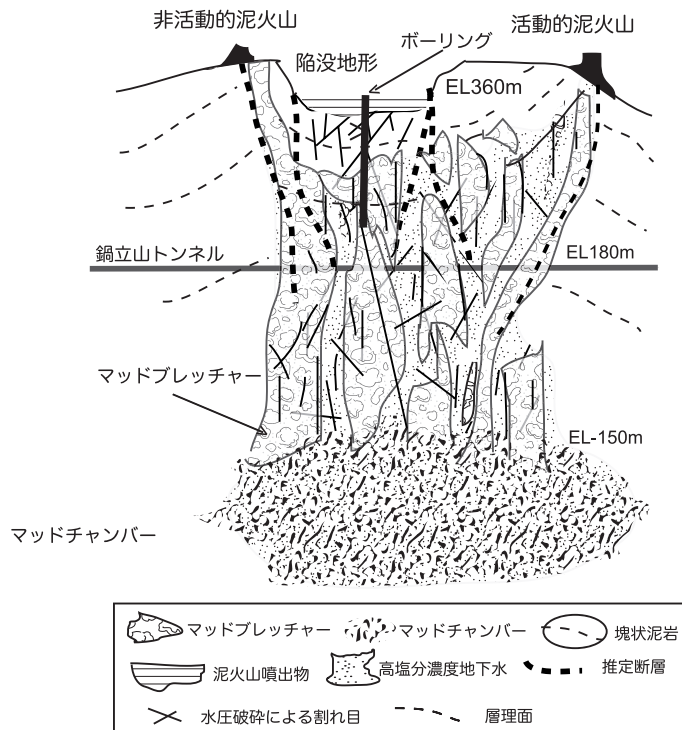


図 4 鍋立山トンネル周辺の地質構造概念図。鍋立山トンネルの膨張性地山はベースン構造の中で、陥没地形の壁面付近を通過している。主に、流体の上昇に伴い、破碎された泥岩と粘土質基質からなる地山強度比の小さいマッドブレッチャ中を掘削しており、トンネル壁面では湿潤・乾燥により浸水崩壊が発生したものと考えられる。

Fig. 4 Generalized structural model under the mud volcano and relationship with the troubled section in the Nabetachiyama Tunnel. Troubled interval of the Nabetachiyama Tunnel due to swelling mudstone is located in the basin structure and along the rim of the topographic depression. Swelling mudstone was composed of mud breccia with mudstone fragments and argillaceous matrix formed by hydro-fracturing. Quick slaking occurred due to the repeated drying and wetting during excavation.

濃度であることなどから、ボーリング孔の 50 m 以深はすでに III 章で述べた鍋立山トンネルの難工事区間に出現した地質と同様の性状を示すものと判断される。図 4 にボーリングコア調査や野外調査などをもとに作成したトンネル通過箇所の地質構造概念図を示す。

#### V. コア間隙水の地化学的性質

石原・田中 (2009) はコアより間隙水を抽出し水質分析を行っている。試料は掘削水の影響を取り除くため、木方ほか (1999) に従い、表面を削って整形し抽水用試料としている。結果によれば、電気伝導度は深度 0 ~ 50 m で 0.03 ~

0.21 S/m、深度 50 ~ 120 m で 0.47 ~ 0.83 S/m であり、深度 40 ~ 50 m を境に深部が急に高くなっている。また、深度 50 m 以浅が溶存イオン濃度の低い、循環地下水であるのに対し、深度 50 m 以深は  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の濃度が高く、酸素水素同位体比が海水に比して酸素が重く水素が軽くなっており、これらを総合すると、50 m 以深に分布する間隙水は地下深部から上昇した化石海水を起源とした高塩分濃度地下水であり、その結果 Ca-ス멕タイトから Na-ス멕タイトへの変化をもたらしたものと考えられる (石原・田中, 2009)。同様の現象は海底炭鉱においても報告されている (中田ほか, 2004)。

## VI. 泥岩試料の浸水崩壊試験

堆積岩を水に浸水した場合に試料の形態が変化することが知られており、このような形態の変化の評価のために、繰り返し乾湿を行う一般のスレーキング試験とは異なり、一度の乾湿による試料の形態の変化を観察する方法が提案されている(中田ほか, 2004)。ここでは、中田ほか(2004)に従い湿潤・乾燥を繰り返す試験をスレーキング試験と呼び、本試験を浸水崩壊試験と呼ぶ。結果の評価にあたっては従来のスレーキング試験の考え方を参考とした。浸水崩壊試験には地表で採取した泥岩(一部シルト岩)、ボーリングコアから採取した泥岩とマッドプレッシャーを用いた。新潟県十日町市の新第三紀後期須川層(竹内ほか, 2000)と比較のために、同時代で同様の岩相を呈する山口県長門市油谷地域の新第三紀中新世油谷層群川尻累層(松浦ほか, 2007)の試料を用いた(表1)。試験は土木学会岩盤力学委員会(1983)、小島・斉藤(1984)、中田ほか(2004)を参考とし、以下の手順で実施した。

- ①試料を約5 cm 四方の大きさに形を整え、自然重量を測定する。
- ②恒温器において60℃で乾燥したものを蒸留水と塩水に浸水させる。塩水の濃度は、泥火山より噴出する地下水のNaCl濃度と等しい0.102 mol/lとした。浸水時間はスレーキング指数と時間の関係よりスレーキング指数が安定する24時間以上とした(土木学会岩盤力学委員会, 1983)。
- ③浸水と同時に時間を計り、はじめの1時間はビデオで撮影し、その後1, 2日後におおの肉眼で観察を行った。
- ④観察の記載はスレーキング試験結果の評価のために提案された小島・斉藤(1984)をもとに、試験開始24時間における試料の変状の程度を以下のようにA～Eの5段階に分類した(表1)。本表はスレーキング特性評価のために提案されたものであることからスレーキングランクとして分類する。結果を、表2, 図5に示す。

表1 浸水崩壊試験の結果の分類(小島・斉藤, 1984)。

Table 1 Classification of the results of slaking test (Kojima and Saito, 1984).

ランク	状態
A	完全に泥状になる
B	泥状になるが、1～5mmの細片の集合
C	岩片状、5～10mmの細片の集合
D	塊状にブロック化する
E	こわれない

地表で採取した泥岩試料のうち、須川層泥岩は蒸留水、塩水ともにスレーキングランクB～Dであり、膨潤性を示さない。同様に、川尻累層の泥岩は蒸留水、塩水ともにスレーキングランクはD～Eであり、膨潤性は認められない。

一方、深度50 m以浅において採取したボーリングコア試料のうち、深度20.38 mの泥岩試料は蒸留水、塩水ともに1時間後にランクCとなり、2日以上経過しても結果は同様である。一方、深度32.38 mのマッドプレッシャーは蒸留水、塩水ともに、1時間後にB～Cランクとなり、その後は2日以上経過しても変化が認められない(図5a)。

深度50 m以深の塩水領域において採取したボーリングコア試料のうち、深度93.78 mの泥岩は蒸留水、塩水ともに1時間後にランクAとなり、泥状化するとともに、膨潤性が認められる。深度98 mのマッドプレッシャーも同様の結果を示す(図5b)。

要約すると、塩水領域から採取したボーリングコア試料のみが蒸留水、塩水に浸水した際にスレーキングランクAで膨潤性を示すという結果が得られ、浸水崩壊特性は間隙水の溶存イオン量あるいは塩分濃度を反映した粘土鉱物中の層間イオン(Na<sup>+</sup>)に支配されることが明らかとなった。

## VII. 鍋立山トンネルの膨潤性地山の成因

鍋立山トンネルの掘削において重大なトラブルとなった第6工区の膨脹性地山は、今回実施したボーリング調査箇所北側約160 mに位置し

表 2 浸水崩壊試験結果.

Table 2 Sample list and results of slaking test.

サンプル採取箇所	岩石	スレーキングランク (蒸留水)	スレーキングランク (塩水)
須川層			
KM-1 (20.38 m)	泥岩	C	C
KM-1 (32.38 m)	マッドプレッチャー	B～C	B～C
KM-1 (93.78～93.82 m)	泥岩	A	A
KM-1 (98～99 m)	マッドプレッチャー	A	A
MS-1 (釜塚)	塊状黒色泥岩	C	C
MS-2 (芝峠)	塊状黒色泥岩	C	C
MS-3 (芝峠)	シルト岩	B～C	B～C
MS-4 (芝峠)	塊状黒色泥岩	B～C	C
MS-5 (蒲生)	塊状黒色泥岩	C	C
MS-6 (名平)	塊状黒色泥岩	C	D
MS-7 (名平)	塊状黒色泥岩	C	C
MS-8 (田野倉)	塊状黒色泥岩	C	C
MS-9 (蒲生)	塊状黒色泥岩	D	D
MS-10 (儀明)	塊状黒色泥岩	C～D	C
MS-11 (木和田原)	塊状黒色泥岩	C	C
油谷湾層群川尻累層			
MS-1 (西立石)	泥岩	E	E
MS-2 (東立石)	泥岩	D	D

試験は土木学会岩盤力学委員会 (1983), 小島・斉藤 (1984), 中田ほか (2004) を参考にした。KM-1 (93.78～93.82 m) の泥岩, KM-1 (98～99 m) のマッドプレッチャーは乾燥後に蒸留水に浸水させると, 完全に泥状になり膨潤性を示す。KM-1 はボーリング試料, MS は地表で採取した試料を示す。

Procedure of slaking test was after JSCE (1983), Kojima and Saito (1984) and Nakata *et al.* (2004). Mudstone (KM-1, 93.78 to 93.82 m in depth) and mud breccia (KM-1, 98-99 m) became muddy after the slaking test and were characterized by swelling.

ている。トンネルの掘削時には原因究明のために, 多くの調査ボーリングがなされ, その結果, トンネル通過地には破碎泥岩が広く分布するとされた (大塚・高野, 1980)。また, トンネル掘削時の地質調査結果によれば, 当該区間は①破碎された強度の低い泥岩と膨潤性の高い泥, ②高いガス圧, ③塩分濃度の高い地下水の湧出で特徴付けられるとしている (土木学会, 1992)。

難工事区間とボーリング調査地点はともに, ベーズン構造の内部で, 陥没構造の壁および中央部に位置している。また, トンネル調査時に取得された地質・地下水データや掘削時の情報, 物理探査で得られた低比抵抗帯の分布 (鈴木ほか, 2009), 両箇所的位置関係から, ボーリング掘削

箇所, 高塩分濃度地下水に満たされ, マッドプレッチャーを主体とする深度約 50 m 以深に分布する地質は, その地下水の地化学特性を含め鍋立山トンネルの難工事区間に出現した地質と同様の性状を有するものと判断される (図 4)。

以下では, トンネル掘削時の情報, ボーリングコアの解析や各種試験により得られた情報をもとに, 膨張性地山の形成要因について考察する。

### 1) 地山特性

#### 地山の強度:

深度 50 m 以深のボーリングコアは大部分が泥岩と粘土質基質からなるマッドプレッチャーを主体とする。これらは地下 500 m 付近において脱ガスにより発生した大きなガス圧により急激な体



(a)

KM-1泥岩(深度20.38m) ランクC



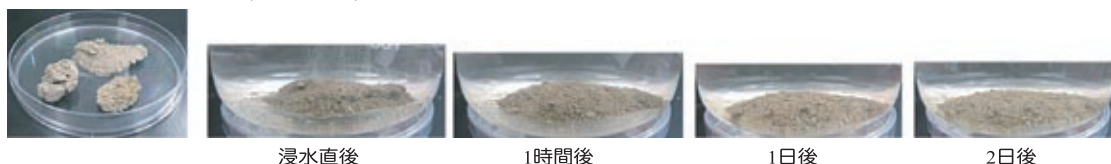
浸水直後

1時間後

1日後

2日後

KM-1マッドプレッチャー(深度32.38m) ランクB~C



浸水直後

1時間後

1日後

2日後

(b)

KM-1泥岩(ボーリングコア：深度93.78~93.82m) ランクA



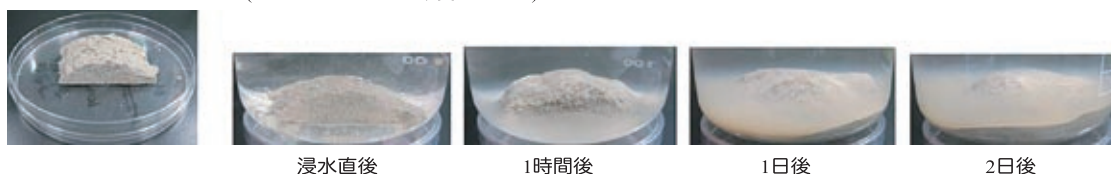
浸水直後

1時間後

1日後

2日後

KM-1マッドプレッチャー(ボーリングコア：深度98~99m) ランクA



浸水直後

1時間後

1日後

2日後

図5 浸水崩壊試験結果。(a) KM-1 (泥岩, 深度20.38m): 乾燥後に蒸留水に浸水させた。浸水1時間後にランクCとなり, その後は2日以上通過しても変化はみられない。KM-1 (マッドプレッチャー, 深度32.38m): 乾燥後に蒸留水に浸水させた。浸水1時間後にランクB~Cとなり, その後は2日以上通過しても変化はみられない。(b) KM-1 (泥岩, 深度93.78~93.82m): 乾燥後に蒸留水に浸水させた。浸水1時間後にランクAとなり, 膨潤性が認められる。その後は2日以上通過しても変化はみられない。KM-1 (マッドプレッチャー, 深度98~99m): 乾燥後に蒸留水に浸水させた。浸水1時間後にランクAとなり, 膨潤性が認められる。その後は2日以上通過しても変化はみられない。

Fig. 5 Images of the slaking experiment. (a) KM-1 (mudstone, 20.38 m in depth): Mudstone became to Rank C 1 hour after soaking into distilled water. No change was observed at two days. KM-1 (mud breccia, 32.38 m in depth): Mudstone became to Rank B-C 1 hour after soaking into distilled water. No change was observed in two days. (b) KM-1 (mudstone, 93.78~93.82 m in depth): Mud breccia became to Rank A 1 hour after soaking into distilled water and was swollen. KM-1 (mud breccia, 32.38 m in depth): Mud breccia was turned to Rank A 1 hour after soaking into distilled water and was heavily swelled.

積膨張が起こり, 上方の岩盤が水压破碎により破壊され形成されたものと考えられる (Brown, 1990; 石原・田中, 2009)。ボーリングコアの針貫入試験の結果では, 深度50m以深はばらつきがあ

るものの, 換算一軸圧縮強度は平均強度0.6MPaとなっており, これは全体として泥岩岩片と泥基質からなるマッドプレッチャーを主体とすること, 粘土鉱物の量が浅部に比べ相対的に多いこ

と、粘土鉱物が高塩分濃度地下水の影響で泥状化していることなどが原因と考えられる。土木学会(1992)によれば、鍋立山トンネルの膨張性地山箇所の一軸圧縮強度は約 0.4 MPa とされており、ほぼ同様の強度を有しているものと考えられる。

#### 地山強度比：

膨張性地山の判定には、地山強度比が一般的に用いられ、 $\sigma_c/\gamma H$  で示される。

ここで  $\sigma_c$  は地山の圧縮強度、 $\gamma$  は地山の単位体積重量、 $H$  は土被り高さである。

膨張性地山は地山強度比が 2 以下であり、鍋立山トンネルの難工事区間は、0.1 前後とされている(土木学会, 1992)。ボーリング掘削箇所の孔底における地山強度比は、深度 120 m、換算一軸圧縮強度 0.6 MPa、単位体積重量はコア試料のうち泥岩岩片 10 試料から求めた乾燥単位体積重量の平均値である  $\gamma = 2.1 \text{ g/cm}^3$  とすると 0.24 となり、膨張性地山の特徴を示しているものと判断される。

#### ガス圧：

異常間隙水圧により地下深部より上昇した流体は 500 m 深度においてマッドチャンバーを形成し、脱ガスが進行し、高いガス圧となり、急速な体積膨張が発生する。鍋立山トンネルでは掘削時に最大 1.6 MPa のガス圧を記録し、含水率の高い粘土が壁面よりガスとともに噴出するという現象が観察されている。ボーリング掘削においても、コアチューブより取り出した直後は、マッドプレッチャーの基質部などからガスの発泡が観測され、数%のコアの膨張が観測され、応力開放による膨張とともに、脱ガスによる影響も考えられる。

#### 2) 掘削時の浸水崩壊による岩盤劣化

トンネル掘削時には切羽を含むトンネル壁面は掘削直後より空気と接触し、掘削水などの影響を受けることにより、乾燥と湿潤を繰り返し、水の出入りにより、泥岩のスレーキングが起こるものと考えられている。ボーリングの深度 50 m 以深において採取した高塩分濃度地下水に飽和したコアの浸水崩壊試験の結果、急速な泥状化を起こすことが明らかとなった。原因としては、50 m 以

深の地盤は地下深部から上昇してきた高塩分濃度の地下水により飽和しており、このため粘土鉱物として Na-スメクタイトを多く含んでいる。Na-スメクタイトは Ca-スメクタイトと比較し乾燥した際の収縮量が大きく、粒子間の結合が切断されやすく、その後の掘削水などの塩分濃度の低い水の浸透のため粘土鉱物の電気二重層の存在により粘土粒子間に斥力が働き、膨潤、泥状化を引き起こされた可能性がある(中田ほか, 2004)。結果として、トンネル壁面に Na-スメクタイトを含む泥岩が出現した際には著しい岩盤劣化が起こり強度低下を引き起こしたものと考えられる。

#### 3) 鍋立山トンネル膨張性地山の形成のメカニズム

鍋立山トンネルの膨張性地山区間の形成メカニズムについて、陥没地形内で行ったボーリング調査により得られた地質・地下水データを参考とし、泥火山活動の観点から考察を行った。

#### 素因：

鍋立山トンネル膨張性地山区間は、泥火山の形成に関与した地質・地質構造に関係して形成されたものと考えられる。すなわち、地下深部から異常間隙水圧層によりもたらされた流体が地下約 500 m 深度において、減圧に伴い脱ガスしマッドチャンバーを形成し、その後、上方の泥岩を水圧破碎により、粘土質基質と岩片に分断した。さらに、上昇した高塩分濃度地下水に飽和した泥質基質と低塩分濃度地下水との接触により粘土鉱物にみられる電気二重層に働く斥力により泥岩が泥状化し、地山強度比を低下させたものと考えられる。

#### 誘因：

さらに、上昇した流体は、高塩分濃度であり、Ca-スメクタイトを Na-スメクタイトへ変化させ、このため掘削時には、浸水崩壊により急速な岩盤劣化を引き起こし、地山強度をさらに低下させたものと判断される。また、浅部における脱ガスの結果、最大 1.6 MPa といった高いガス圧が形成され、トンネル掘削時の壁面から含水率の高い粘土などがガスとともに噴出する原因ともなった。また、地下水の異常間隙水圧も同様に壁面に作用

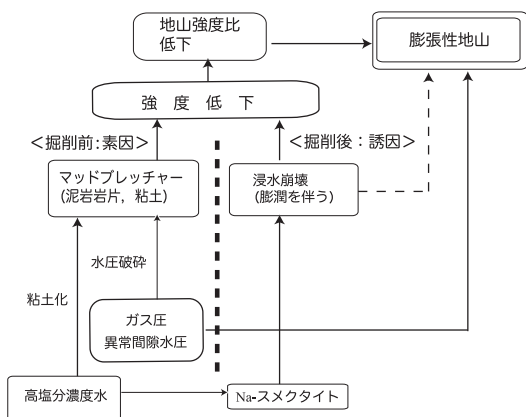


図 6 泥火山の活動と膨張性地山形成メカニズム。トンネル掘削前には、水圧破碎を伴う高塩分濃度地下水による泥質基質の注入と、泥状化（素因）が、トンネル掘削後は Na-スメクタイトの乾燥・湿潤および粘土粒子間に働く斥力の影響による泥状化および膨張や脱ガスによる高いガス圧（誘因）が膨張性地山の形成に深くかかわっている。

Fig. 6 Activity of mud volcano and formation mechanism of swelling rock mass. The primary factor of swelling is weakening of mudstone caused by the intrusion of highly saline groundwater with hydro-fracturing before tunneling. On the other hand, a motive factor is weakening of mudstone caused by drying and wetting of Na-smectite and repulsive force due to the interaction of fresh water and clay minerals.

したものと考えられる。

以上述べた膨張性地山の形成過程を図 6 に示す。

鍋立山トンネルは泥火山の形成に関与する異常間隙水圧と脱ガスによる高いガス圧によって岩盤が破壊し、岩盤強度が低下するとともに、上昇した高塩分地下水による地化学的環境の変化が岩盤掘削時の劣化を引き起こすことにより、著しい膨張性地山となったものと考えられる。全国で報告されている膨張性地山の一部には、鍋立山トンネルにみられるような異常間隙水圧層の上昇や泥火山に起因するものが含まれている可能性がある。

## VIII. 結 論

新潟県十日町市を通過する北越急行（株）ほく

ほく線鍋立山トンネルにみられた膨張性地山の実態と成因の検討を目的として、周辺の地形地質調査を実施するとともに、近傍でボーリング調査を実施し、採取したコアを用いた検討を行い、以下の結果を得た。

1. 難工事区間には、泥火山の高压流体が上昇する過程で水圧破碎により形成された泥岩岩片、軟質な泥基質からなるマッドブレッチャーが分布しており、著しい強度低下が認められる。

2. 地下浅部における、脱ガスにより最大 1.6 MPa の非常に高いガス圧が発生し、地山の膨張性をさらに強調したものと考えられる。

3. 地下深部より上昇した高塩分濃度地下水は、Na-スメクタイトを形成し、トンネル掘削時の湿潤・乾燥により浸水崩壊を引き起こし、岩盤強度をさらに低下させた可能性がある。

4. トンネル掘削時にみられる膨張性地山の生成の原因のひとつに、泥火山の形成にかかわる活動が関係している可能性が示された。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、山口大学理工学研究科宮田雄一郎教授、金折裕司教授、東京大学新領域研究科徳永朋祥准教授、京都大学防災研究所千木良雅弘教授、(財)電力中央研究所中田英二主任研究員には有益な議論と助言をいただいた。住鋳コンサルタント(株)水落幸広部長、小野雅弘氏にはボーリング調査においてお世話になるとともに、コア解析において助言をいただいた。ダイヤコンサルタント(株)新谷俊一氏、日本地下探査(株)徳安真吾氏には調査結果に関して議論をしていただいた。鉄道建設・運輸施設整備機構の服部修一氏、国際航業(株)の大島洋志博士、朝日航洋(株)の大塚正幸氏には鍋立山トンネルに関する多くの情報を提供していただくとともに、結果に関して多くの助言を得た。(独)土木研究所脇坂安彦博士、(財)電力中央研究所伊藤洋博士の査読により論文がおおきく改善された。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 17201039)を用いた。現地調査においては、十日町市蒲生地区、福島地区、室野地区の方々にお世話になった。ここに深く御礼申し上げ、感謝の意を表します。

## 文 献

- 秋田勝次・佐藤一義 (1993): 膨張性地山におけるトンネル掘削 (北越北線, 鍋立山トンネル). 土と基礎, **41**, 49-52.
- Brown, K.M. (1990): The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary system. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 8969-8982.
- 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.
- Davies, R.J. and Stewart, S.A. (2005): Emplacement of giant mud volcanoes in the South Caspian Basin: 3D seismic reflection imaging of their root zones. *Journal of Geological Society*, **162**, 1-4.
- 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 (1992): 軟岩評価-調査・設計・施工への適用. 386p.
- 土木学会岩盤力学委員会 (1983): トンネルの地質調査と岩盤計測. 丸善, 231p.
- 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.
- 土居則夫・服部修一・林 惇 (1990): 膨張性地山への挑戦 (続報) 一北越北線鍋立トンネル一. トンネルと地下, **21**, 7-12.
- 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一新潟県十日町市蒲生における検討一. 地学雑誌, **118**, 350-372.
- 片寄紀雄・興石逸樹・松本武海 (1997): 緩やかな膨張性地山と付き合って30年-JR信越本線 塚山トンネル. 地下とトンネル, **28**, 7-15.
- 木方建造・大山隆弘・馬原保典 (1999): 圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用. 応用地質, **40**, 260-269.
- 小暮 誠・木村裕俊 (1995): 超膨圧トンネル掘削完了一北越北線 鍋立山トンネル一. トンネルと地下, **26**, 7-12.
- 小島圭二・斉藤保祐 (1984): 軟岩の膨潤・スレーキング特性 (その1) 一簡易試験による評価一. 応用地質, **25**, 10-22.
- Kopf, A.J. (2002): Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, **40**, 1-51.
- Matsushita, Y., Mizoguchi, K., Ohira, T., Doi, N. and Ohtsuka, M. (1995): The geological characteristics and the construction methods of heavy squeezing mud rock at the Nabetachiyama Tunnel. *Proceedings 8<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan, **2**, 491-495.
- 松浦浩久・尾崎正紀・脇田浩二・牧本 博・水野清秀・亀高正男・須藤定久・森尻理恵・駒澤正夫 (2007): 20万分の1地質図幅「山具と及び見島」. 独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 中村良明・羽田 勝・木曾伸一 (1993): 超膨張性泥岩を克服一上信越自動車道日暮山トンネル. トンネルと地下, **24**, 16.
- 中田英二・大山隆弘・馬原保典・市原義久・松本裕之 (2004): 海底下堆積岩の浸水崩壊特性と水質が強度・透水性に与える影響. 応用地質, **45**, 71-82.
- 中山 隆・大利泰宏・吉田広幸 (1991): 膨張性地山と可燃性ガスを克服一国道113号線新宇津トンネル. トンネルと地下, **22**, 25-31.
- 大塚正幸・高野 彬 (1980): 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**, 29-36.
- 大塚正幸・豊島英明 (1980): 膨張地山での苦闘一北越北線鍋立山トンネルの計測と施工一. トンネルと地下, **11**, 49-58.
- 佐々木隆男・山岸俊男 (1982): 超膨張性地山区間と湧水区間におけるNATM一国道351号線新榎トンネル. トンネルと地下, **13**, 25-31.
- 佐藤重知・池田 豊・高橋信夫・一條 勝 (1994): 第三紀凝灰岩の膨張性地山を掘る (2) 一東北新幹線岩手トンネル一戸工区. トンネルと地下, **25**, 20.
- 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.
- 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.
- 高松 眞・羽根田汎美 (1979): 膨張性土圧を克服一北陸自動車道自動トンネル一. トンネルと地下, **10**, 17-24.
- 竹内圭史・吉川敏之・釜井俊孝 (2000): 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, 76p.
- 谷 利章・小島 隆 (1986): 超膨張性地山へ再挑戦一北越北線鍋立山トンネル一. トンネルと地下, **17**, 35-44.
- 徳安真吾・田中和広・鈴木浩一 (2007): 新潟県十日町市における泥火山の地下構造の研究. 日本地球惑星科学連合2007年大会予稿集, Y239-P010.
- 梅津一晴 (1995): 蛇紋岩の土地質的一検討. 応用地質, **36**, 366-375.
- 山口 進・佐々木敏夫・安藤順造 (1982): 膨張性泥岩における地山挙動一中央東線塩嶺トンネル. トンネルと地下, **13**, 7-16.
- 吉川恵也・桜井 孝・立松英信 (1983): 軟岩の劣化特性に関する簡易試験法およびそのトンネルへの適用. 応用地質, **24**, 17-29.
- 吉村 恒・飯田堅雄・高田允温 (1980): 超膨張地山におけるNATMの施工 (2). トンネルと地下, **11**, 15-22.

(2008年10月29日受付, 2009年4月15日受理)