

蛇紋岩地山の地質調査手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令和5～令和7

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：倉橋稔幸、日外勝仁、山崎秀策、
岡崎健治、丸藤大樹

【要旨】

蛇紋岩地山のトンネル掘削では、想定外の内空変位や崩落に伴う支保補強・縫返しなど、事前調査で予測できない地質リスクが顕在化する場合が散見される。その一因として、蛇紋岩類が岩盤分類上は単一岩種として扱われ、多様な性状を十分に分類・検出できていないことが挙げられる。本研究では、含水鉱物量比、密度および帯磁率に基づき蛇紋岩類の種類と蛇紋岩化の程度を分類し、その物性幅を制約した上で、地上磁気・重力探査結果と組み合わせる複合解析手法を検討した。その結果、先進ボーリングコア試料で確認された物性変化に対応する低密度部や岩体境界を検出できる可能性を示し、蛇紋岩地山の岩相変化や脆弱部を推定する地質調査法として有効であることを示した。

キーワード：蛇紋岩、トンネル地質調査、帯磁率、密度、地上物理探査

1. はじめに

蛇紋岩地山のトンネル掘削では、想定外の内空変位の発生に伴う支保構造の補強や縫返し施工など、事前調査では予測できなかったリスクが顕在化する事例が依然として散見されており、施工の安全性および経済性の両面で解決すべき重要な課題となっている。その要因の一つとして、地質学的には多種多様な蛇紋岩類が工学的に十分整理・分類されておらず¹⁾、事前調査における岩種区分や脆弱部を含む詳細な地質構造の推定を困難にしている点が挙げられる²⁾。したがって、蛇紋岩地山におけるトンネル掘削の地質リスクを適切に評価・最小化するためには、蛇紋岩類の工学的性状を分類し、その分類に基づいて地山構造の推定を可能とする地質調査手法の構築が必要である。

本研究は、特殊地山である蛇紋岩地山を対象に、地質・物理探査の複合解析による地質調査手法の提案を達成目標に、(1) 蛇紋岩の岩種分類手法の検証、(2) 岩種分類に基づく物性値の分析、(3) 蛇紋岩地山の脆弱部検出方法の検討、を実施した。

2. 調査対象・適用手法

2.1 蛇紋岩の岩種分類法と物性値の計測

過年度実施の基盤研究(R2-R4)では、北海道内の蛇紋岩トンネルAで採取された先進ボーリングコア試料を対象に、熱重量変化、帯磁率および密度に基づき、蛇紋岩の種類と蛇紋岩化の程度を判別する手法を提案

した³⁾。本研究では、この手法を蛇紋岩トンネルの地質調査に広く適用するため、多様な産地・産状および異なる掘削現場の蛇紋岩類に対する適用性を検証した。本研究では、日本全国の蛇紋岩掘削トンネル5箇所(トンネルB～F)から採取したボーリングコア試料および搬出ブリ試料の計40試料に加え、北海道内3地域(地表試料A,G,H地域、うちA地域はトンネルAと同一岩体)の蛇紋岩分布地域の地表露頭から採取した計31試料を対象として、蛇紋岩の岩種分類法の有効性を検証した。試料採取にあたっては、ハンディ型帯磁率計(Exploranium社製KT-9)を用い、採取試料が幅広い帯磁率範囲をカバーするよう留意した。

2.1.1 試料調整

帯磁率・密度測定用としての試料調製として、各試料からダイヤモンドカッターを用いて、1～1.5cm角の立方体試料を切り出した。さらに、示差熱重量分析用として、この立方体試料に隣接する位置から分析用試料を分取し、メノウ乳鉢を用いて微粉末化し、測定に供した。

2.1.2 示差熱重量分析

蛇紋岩20試料の示差熱重量分析(TG-DTA)を実施し、熱重量(TG)変化から、300-450℃のブルース石と550-810℃の蛇紋石類の脱水による重量減少から各含有量を算出した。さらに微分熱重量(DTG)プロファイルに、指数修正ガウス関数を用いたピークフィット解析を適用し、含水鉱物量に占めるブルーサイト(ピー

ク位置 350℃付近)、低温型蛇紋石 (500-700℃の複合ピーク)、高温型蛇紋石 (ピーク位置 740℃付近) の比率を推定した³⁾。

2.1.3 顕微ラマン分析

上記 DTG のピークフィット解析の妥当性を検証するため、代表的な蛇紋石種で構成される試料を対象に岩石薄片を作成し、顕微ラマン分析装置 (オックスフォード・インスツルメンツ社製 alpha300R) を用いたマッピング分析を実施し、光学・偏光顕微鏡観察では判別が困難な蛇紋岩の構成鉱物 (蛇紋石、ブルース石他の含水鉱物) の組織を観察し、その量比を計測した。測定条件は、レーザー波長 532 nm、レーザー出力 30~50 mW、対物レンズ 20 倍を使用した。

2.2 蛇紋岩の岩種分類に用いる物性値の計測

帯磁率・密度の物性値計測は、89 試料を対象に実施した。帯磁率は、切り出し試料を風乾後に帯磁率計 (Bartington 社製 MS3+MS2B) を用いて測定した。

密度測定は、切り出し試料を真空雰囲気下 (50 hPa) で 100 度 24 時間以上乾燥し、デシケーター内で放冷後、乾燥重量を測定した。その後ヘリウムガス置換方式の真密度測定装置 (Microtrac 社製 BELPYCNO-L) を用いて試料体積を計測し、乾燥重量と試料体積から試料密度 (g/cm^3) を計算した。また、試料体積をもとに、単位体積当たりの帯磁率 (SI) を求めた。

2.3 蛇紋岩地山の脆弱部検出のための物理探査

蛇紋岩地山の脆弱部検出方法を検討するため、北海道内に位置するトンネル A (延長 1,242 m) を対象に、地上磁気探査および地上重力探査を実施した。当初は電気 (比抵抗) 探査、磁気探査および重力探査の実施を計画していたが、トンネルルート周辺には高压送電線および鉄塔が近接しており、電氣的・磁氣的影響を十分に除外できないことから、電気探査は実施せず、磁気探査は影響範囲の確認を含めて実施し、影響が出ない範囲での解析を試みた。

磁気探査では、磁力計 (GEM Systems 社製 GSM-19) を用いて、トンネルルートおよびその近傍の全磁力を測定し、固定観測点での連続観測結果に基づき地磁気日変化補正を行った。重力探査では、トンネルルート直上に設定した測線長約 280 m の測線上 10 点で観測を実施した。観測重力値には、器械ドリフト、緯度、標高、ブーゲーおよび地形の各補正を行い、完全ブーゲー異常 (mGal) を算出した。さらに、完全ブーゲー異常に残存する標高依存トレンドを一次回帰により除去し、残差ブーゲー異常 (mGal) を求めた。

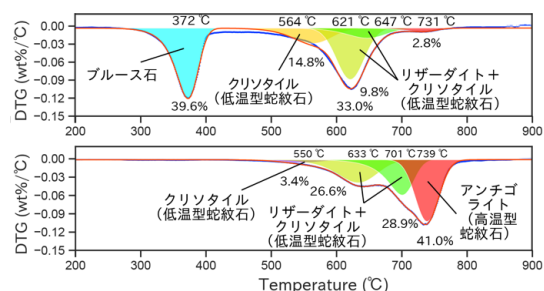


図-1 微分熱重量曲線 (DTG) のピークフィット解析の例 (上: 低温型蛇紋岩、下: 高温型蛇紋岩)

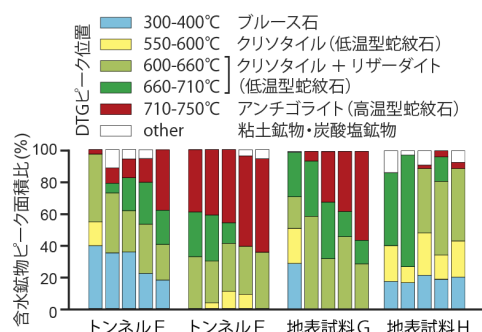


図-2 微分熱重量曲線 (DTG) のピークフィット解析による含水鉱物量比の推定結果 (一部)

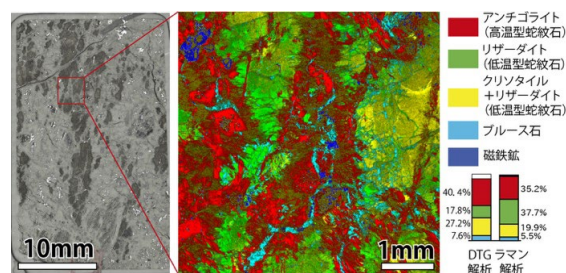


図-3 蛇紋岩 (トンネル A) の岩石薄片画像 (左)、ラマン顕微鏡によるマッピング分析による蛇紋岩組織の解析結果 (中央)、微分熱重量曲線 (DTG) 解析とラマンマッピング解析による含水鉱物量比の推定結果の比較 (右下)

3. 結果と考察

3.1 熱重量分析による蛇紋岩の岩種分類法の検証

TG-DTA により得られる微分重量変化曲線 (DTG) のピークフィット解析例を図-1 に示す。試料の加熱に伴い、含水鉱物は鉱物種に応じた温度域で脱水反応を生じるため、DTG 曲線には各脱水反応に対応したピークが形成される。したがって、各ピークの面積比は、含水鉱物総量に対する各鉱物の相対的な重量比を反映する指標として扱うことができる³⁾。

複数地点からの蛇紋岩試料に本手法を適用した結果、トンネル A を対象とした既報³⁾と同様に、含水鉱物の種類とその存在量比を半定量的に推定することが可能

であった(図-2)。また、図-3に示すように、DTG ピーク解析により推定されたブルース石および蛇紋石類の構成比は、顕微ラマン分析によるマッピング結果とよく整合した。これにより、本分類手法は多様な蛇紋岩類に対しても、高温型、低温型および中間型を半定量的に判別することが可能であり、蛇紋岩類の工学的分類を詳細化する手法として有効であると考えられる。

一方で、本手法には課題も残る。蛇紋岩が炭酸塩鉱物を伴う場合、TG-DTA のみでは低温型蛇紋石の脱水反応と炭酸塩鉱物の脱炭酸反応を十分に分離できない可能性があるため、必要に応じて発生ガス分析等を併用する必要がある。また、各種含水鉱物の高純度試料の入手が困難であり、純粋な DTG ピーク形状が十分に把握されていないことに加え、ピークフィット解析のパラメータ決定には経験的要素が含まれる。そのため、得られる鉱物比は半定量的な指標にとどまり、今後は標準試料や他の鉱物分析手法との比較により、本手法の定量精度を検証する必要がある。

3.2 蛇紋岩地山分類における密度・帯磁率測定の有効性の検証

蛇紋岩化作用は、原岩であるかんらん岩類が水-岩石反応を受け、かんらん石や輝石類が蛇紋石類やブルース石などの含水鉱物に交代される現象である。この過程では、交代される鉱物中の鉄分が強磁性の磁鉄鉱として晶出する場合があります、蛇紋岩化の進行に伴い帯磁率が増加する⁴⁾。また、高密度の初生鉱物が低密度の含水鉱物に置換されるため、密度が低下する。さらに、反応時の温度・圧力条件や流体の量・組成の違いにより、磁鉄鉱の量や組織、含水鉱物の組合せが変化し、その結果、蛇紋岩類は産地や形成場に応じて多様な密度および帯磁率の特性を示すと考えられている。

本研究で測定したトンネルおよび地表採取試料の密度・帯磁率測定結果を図-4に示す。トンネル試料では、密度が概ね2.5-2.7 g/cm³、帯磁率が0-0.14 SIの範囲に分布するグループと、同程度の密度範囲で0.04 SI以下の低帯磁率を示すグループが認められた。一方、地表試料では、トンネル試料と同様に低い密度範囲で高いSI値を示すもの、0.02 SI以下の低い帯磁率で密度2.5-2.9 g/cm³に集中するグループに加え、密度2.6~3.0 g/cm³前後の高い密度と、低帯磁率を示すグループが認められた。

各試料グループの特徴をみると、地表試料Cでは、密度低下に伴う帯磁率の上昇が0.02 SI程度にとどまるのに対し、地表試料Bでは、蛇紋岩化が進行した2.6 g/cm³前後の低密度域で0.10 SIを超える高帯磁率を示

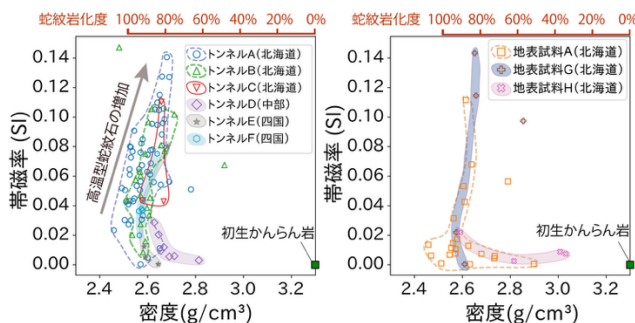


図-4 国内6トンネル(左)および北海道内3地域(右)の地表露頭からの採取した蛇紋岩試料の密度と帯磁率の関係

した。これらの違いは、熱分析で確認されたように、主に高温型蛇紋石の増加やブルース石の減少と対応しており、蛇紋岩化のタイプや進行程度の違いを反映していると考えられる。

以上より、蛇紋岩類は産地や岩相に応じて、一定の密度・帯磁率の物性幅をもつ分布域を示すことが確認された。このことは、密度と帯磁率の関係が、蛇紋岩化のタイプや進行程度を反映する指標となり得ることを示している。したがって、施工前調査段階でボーリングコア試料や地表試料を用いて、帯磁率と密度を測定することにより、トンネル地山内における蛇紋岩類の岩相変化を推定できる可能性がある。また、密度・帯磁率の取り得る範囲を事前に制約することができれば、物理探査による地質構造解釈の精度向上に寄与すると考えられる。

3.3 物理探査の実施結果と蛇紋岩地山地質調査としての重力・磁気探査の有効性

トンネルルート上は植生の繁茂によりアプローチが困難であったため、本研究では先進コア試料の解析で明らかとなっていた3種類の蛇紋岩からなる帯状分布全体を横断する測定は実施できず、低密度の低温型蛇紋岩からやや密度が高い低温-高温混合型蛇紋岩へと変化する箇所のみ探査を実施した。

磁気探査の結果を図-5に示す。トンネルルート上には鉄塔と送電線が存在し、その周辺では鉄塔との距離に応じて、その磁氣的・電氣的影響と考えられる異常が認められた。そのため、今回の調査ではトンネル直上で観測された磁気異常の変化を蛇紋岩内部の岩相変化として解釈することは困難であることが確認された。一方、鉄塔・送電線の影響範囲外に位置する蛇紋岩の岩体境界部付近では、明瞭な磁気異常の変化が認められた。このことから、地上磁気探査により、トンネル内に出現が想定される蛇紋岩岩体の分布範囲や境

界位置を推定できる可能性が示された。ただし、トンネルAの蛇紋岩類では、低温型から高温型蛇紋岩へ岩相が変化するに伴い帯磁率が高くなる傾向が認められるものの（図-4、図-6）、岩体内部の岩相変化を磁気探査により識別できるかについては、今後さらに検証する必要がある。

次に、Aトンネルにおけるコア試料の密度測定値の側方変化と、トンネルルート上の地表部で実施した重力探査による重力異常分布（残差ブーゲー異常）を図-6に示す。トンネル内750m付近から870m付近にかけて、地中の低密度部を反映すると考えられる低重力異常が認められた。この変化は、直下のトンネル内の先進コア試料で計測された密度低下傾向と概ね対応している。これは、ボーリングコア試料から得られる局所的な密度情報を面的かつ連続的に補完し、蛇紋岩地山内の密度変化の分布を推定するうえで重力探査が有効である可能性を示している。

以上の結果から、蛇紋岩地山に特徴的な密度・磁気特性の変化を、地上磁気探査および重力探査によって検出できる可能性が示された。したがって、コア試料の密度・帯磁率測定結果と地表物理探査結果を複合的に解析することで、蛇紋岩地山の岩相変化や脆弱部を推定する地質調査手法の提案につながる成果が得られたと考えられる。今後は、磁気および重力探査による難施工トンネル地山の地質構造の把握として、特に低温型から混合型、高温型に至る蛇紋岩類の一連の物性変化の検出に着目し、後継研究課題において検討を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、地質・物理探査の複合解析による蛇紋岩地山の地質調査手法の提案を目的に、複数地点のトンネルおよび地表から採取した蛇紋岩試料を対象として、熱分析、密度測定および帯磁率測定を実施した。また、モデルケースとなる蛇紋岩トンネル地山において、磁気探査および重力探査を実施し、以下の成果を得た。

- 1) 蛇紋岩の岩種分類手法について、含水鉱物量比に基づき、蛇紋岩化の程度および低温型・高温型蛇紋石鉱物の構成比を評価できることを示した。
- 2) 岩種分類に基づく物性値分析として、密度および帯磁率の関係が、蛇紋岩類の岩相や蛇紋岩化の程度に応じた物性幅を反映することを確認した。
- 3) 蛇紋岩地山の脆弱部検出方法について、地上磁気探査および重力探査により、蛇紋岩岩体の境界や低密度部に対応する異常を検出できる可能性を示し

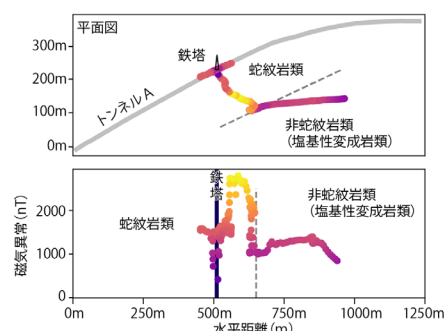


図-5 トンネルAにおける磁気探査結果、上から断面図、平面図と水平方向の磁気異常変化図（色は磁気異常値に対応）

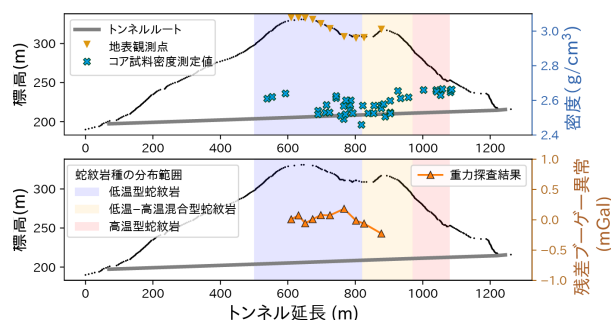


図-6 トンネル地山断面における先進コア試料の密度測定結果（上）、およびトンネルルート直上地表部における重力探査の実施結果（下）

た。

以上より、コア試料の物性測定と地表物理探査を組み合わせた複合解析は、蛇紋岩トンネル地山の岩相変化や脆弱部を推定する地質調査手法として有効であり、本研究の目標である地質・物理探査を組み合わせた調査手法の提案に資するものと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説〔山岳工法編〕・同解説、pp.43-53、2016
- 2) 佐々木博一・蟹江俊二：蛇紋岩トンネルにおける先進ボーリング活用方法の提案、トンネルと地下、第56号、第5巻、pp.55-65、2025
- 3) 山崎秀策・岡崎健治・倉橋稔幸：示差熱重量分析による蛇紋岩構成鉱物の定量化の試み、寒地土木研究所月報、第834号、pp.50-58、2022
- 4) Toft, P.B.; Arkani-Hamed, J.; Haggerty, S.E.: The Effects of Serpentinization on Density and Magnetic Susceptibility: A Petrophysical Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 65, 137–157, 1990

A Study on Geological Survey Methods for Serpentine Tunnel Ground

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Geological Hazards Research Team,

Cold-Region Construction Engineering Research Group

Author: KURAHASHI Toshiyuki

AGUI Katsuhito

YAMAZAKI Shusaku

OKAZAKI Kenji

MARUFUJI Taiki

Abstract: In tunnel excavation through serpentinite-bearing ground, unexpected geological risks, such as large tunnel deformation, collapse, and the need for support reinforcement or re-excavation, may occur despite pre-construction investigations. One possible reason is that serpentinites are generally treated as a single rock type in rock mass classification, and their diverse properties are not sufficiently classified or detected. In this study, serpentinite types and degrees of serpentinization were classified based on hydrous mineral ratios, density, and magnetic susceptibility. The ranges of these physical properties were then constrained and combined with surface magnetic and gravity survey results in an integrated analysis. The results indicate that serpentinite body boundaries and low-density zones corresponding to physical property changes identified in pilot boring cores can be detected. This demonstrates the effectiveness of the proposed method for estimating lithological variations and weakened zones in serpentinite-bearing tunnel ground.

Keywords: Tunnel ground, Serpentine, Geological investigation, Rock classification

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

学会発表等その他（計 1 本）

- e-1) 山崎秀策・岡崎健治・倉橋稔幸：幌加内オフィオライトマントルセクションの微閃緑岩ブロックに含まれる含ホウ素鉍物（datolite）の産状とその意義、日本地球惑星科学連合 2024 年大会 講演要旨集、SMP24-P03、2024