

赤外線画像を用いた山岳トンネル切羽面の膨潤性粘土鉱物量評価

奥澤 康一 板垣 昭

Evaluation of the Content Ratio of Swelling Clay Minerals on Mountain Tunnel Face Using Infrared Images

Koichi Okuzawa Akira Itagaki

Abstract

A method for evaluating the content ratio of swelling clay minerals, which cause bulges in rock mass, using infrared imaging was developed. According to the analysis results of the infrared images of rock samples and simulated samples of mixtures of swelling clay minerals and non-swelling minerals, the content of swelling clay minerals could be evaluated using the ratio of the infrared reflectance between the wavelengths absorbed by the swelling clay minerals and the wavelengths not absorbed by them. Infrared images of a mountain tunnel face containing swelling clay minerals showed that infrared rays were strongly absorbed by portions of the face.

概 要

盤膨れ等の原因となる膨潤性粘土鉱物の含有率を、遠隔で面的かつ迅速に評価する手法として、赤外線画像を用いた評価手法の開発を行っている。膨潤性粘土鉱物と膨潤しない鉱物を混ぜ合わせた模擬試料の赤外線画像を撮影した結果、膨潤性粘土鉱物が吸収する波長と吸収しない波長の赤外線反射率の比をとった赤外線反射率比を用いることで、赤外線画像から粘土鉱物含有率を評価できる可能性が示された。膨潤性粘土鉱物を含む岩石試料を対象に、室内にて赤外線画像撮影を行ったところ、膨潤性粘土鉱物含有率と赤外線反射率比に相関関係があることがわかった。膨潤性粘土鉱物を含むトンネル切羽面の赤外線画像を撮影したところ、赤外線反射率比に違いが認められた。これは切羽面を構成する岩石に含まれる膨潤性粘土鉱物の含有率や含水比の違いによるものと考えられる。

1. はじめに

膨潤性粘土鉱物が土壌や岩石に含まれている場所で工事を行った場合、盤膨れや構造物の変形といった被害が発生することがある¹⁾。膨潤性粘土鉱物の含有率は、一般に試料を採取してX線回折分析(XRD分析)やメチレンブルー吸着量試験等を実施して測定評価されるが、測定には手間や時間がかかる。また、膨潤性粘土鉱物の分布は不均質であることが多く、少数の試料の分析では膨潤性粘土鉱物を含む地山を見落とす可能性がある。特に山岳トンネルの施工では、全線にわたっての事前調査が難しいことが多く、膨潤性粘土鉱物を原因とした盤膨れや押し出しが、施工中や供用開始後に発生している。そのため、施工時に膨潤性粘土鉱物の有無を簡便に判別する手法が求められている。

鉱物には、種類ごとに特定の波長の赤外線を吸収する性質がある。膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの場合、1420~2350 nmの間の複数の波長の赤外線を吸収することが知られている(Fig. 1)²⁾。筆者らは、盤膨れ等の原因となる膨潤性粘土鉱物の含有率を、遠隔で面的かつ迅速に計測評価する手法として、赤外線画像を用いた評

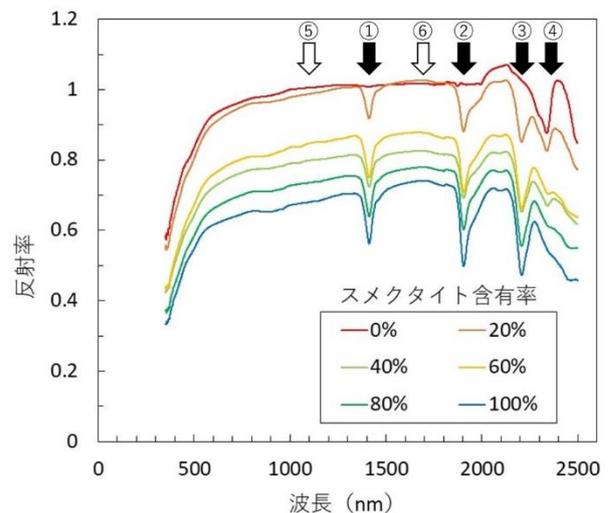


Fig. 1 スメクタイトと琉球石灰岩粉末混合試料の反射スペクトル

(黒矢印：スメクタイトが吸収する赤外線波長，白矢印：スメクタイトが吸収しない赤外線波長)

Reflectance Spectra of Mixed Samples of Smectite and Ryukyu Limestone Powders

価手法の開発を行ってきた。膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトと膨潤しない鉱物を混ぜ合わせた模擬試料の反射スペクトルを分光光度計にて測定した結果、スメクタイトが吸収する波長と吸収しない波長の赤外線反射率の比（赤外線反射率比）を用いることで、赤外線画像から粘土鉱物含有率を評価できる可能性が示された^{3),4)}。本稿では、膨潤性粘土鉱物の含有率を面的に評価する方法として、赤外線カメラを用い、膨潤性粘土鉱物を含む模擬試料や岩石試料、山岳トンネル切羽面を対象に、膨潤性粘土鉱物含有率と赤外線反射率比の関係を検討した結果について報告する。

2. 赤外線反射率比とは

上述の通り、スメクタイトには特定の波長の赤外線吸収する性質があるが、小池ら²⁾が示すように、鉱物によっては全体的に低い赤外線反射率を持つものもあり、吸収波長での反射率の絶対値のみでは、スメクタイト量の推定は困難である。そこで、スメクタイトの赤外線吸収波長（Fig.1の黒矢印）での反射率を分子、赤外線を吸収しない波長（Fig.1の白矢印）の反射率を分母とし、それらの比（以下、赤外線反射率比）を取ることで、スメクタイト含有量と赤外線反射率比の間に相関関係が認められるか否かについて、分光光度計を用いて検討した³⁾。

検討に用いた試料は、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトと、スメクタイトとは赤外線吸収波長が異なる方解石を複数の割合で混ぜ合わせたものである。スメクタイトとして粉末状の精製ベントナイト（クニミネ工業製クニピア F）を、方解石として琉球石灰岩を粉砕したものを使用した。クニピア Fはスメクタイトの一種であるモンモリロナイトを98%含むとされている。方解石については110℃、クニピア Fについては加熱による変質を避けるため60℃でそれぞれ一晩加熱して水分を飛ばしたものを実験に使用した。乾燥後のクニピア Fの含水比は1.3%であった。両者を十分に混ぜ合わせ、試料皿に0.5～1cm程度の厚さに敷きならして測定した。分光光度計による反射スペクトルの測定にはMalvern Panalytical社製のASD FieldSpec 4を使用した。赤外線反射率比の計算に用いるスメクタイトが吸収しない赤外線波長として、後述する赤外線カメラによる検討と同じ1710nmを選択した。スメクタイトの各吸収波長の赤外線反射率と、1710nmにおける赤外線反射率の比をFig.2に示す。3つの赤外線反射率比は、スメクタイトの含有率と負の相関を持つことが確認された。このことから、赤外線反射率比からスメクタイトの含有率を求めることができる可能性があると考えられる。

3. 赤外線カメラによる模擬試料を用いた検討

3.1 模擬試料の作製方法と撮影条件

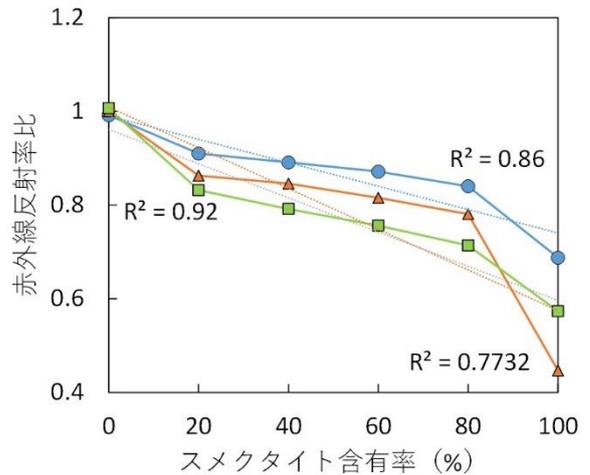


Fig. 2 模擬試料におけるスメクタイト含有率と分光光度計にて測定した赤外線反射率比の関係
Relationship between Smectite Content and Infrared Reflectance Ratio in Simulated Samples Measured with a Spectrometer



Fig. 3 赤外線カメラによる撮影状況⁴⁾
Shooting Situation with an Infrared Camera

Table 1 模擬試料の作成条件
Conditions of Simulating Sample

| | |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 使用材料 | <ul style="list-style-type: none"> ・スメクタイト（クニピアF：モンモリロナイト98%） ・炭酸カルシウム試薬 |
| 混合条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・5通り（スメクタイト：炭酸カルシウム＝100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100） |
| 含水条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・4通り（炭酸カルシウムのみ）（含水比0, 10, 20, 30%） |

前述の検討では分光光度計 (ASD FieldSpec 4) を使用したが、分光光度計で得られる情報は試料の中のある一点の情報である。面的にスペクトル情報を得られる装置にはハイパースペクトルカメラがあるが、スメクタイトが吸収する赤外線波長の撮影が可能なハイパースペクトルカメラは高額である。そこで本研究では、ハイパースペクトルカメラに代わるものとして、赤外線カメラによる評価方法について検討を行った。

初めに模擬試料の検討を行った。模擬試料の作成条件をTable 1に示す。スメクタイトについては2章で検討したものと同様の試料を使用し、方解石の代わりとして、林純薬工業製の特級炭酸カルシウム試薬を使用した。両者の混合割合を0:100~100:0の5通りに変化させた。撮影には波長1000~2350 nmの赤外線に感度を持つ赤外線カメラを使用した。撮影状況をFig. 3に示す。赤外線カメラにはビジョンセンシング社製NIR-CAM320EXを使用した。本カメラに使用されているセンサは、ノイズ低減のために冷却を必要としており、水冷式の冷却装置を備えている。しかし、今回使用したカメラは、カメラの小型化と防塵対策のため、空冷式の冷却装置を備えた特注品である。赤外線カメラにはバンドパスフィルターを装着し、特定の波長帯のみを撮影した。バンドパスフィルターとして、スメクタイトが吸収する波長1420, 1900, 2210, 2347 nm の赤外線を透過するもの、吸収しない波長として、波長1116, 1710 nmの赤外線を透過するもの計6枚を用意した。用意したバンドパスフィルターの透過率や半値幅がそれぞれ異なるため、試料と同時に反射率が既知である反射板を複数撮影した。赤外線光源にはハロゲンランプを使用し、ハロゲンランプに出力調整器を取り付けて赤外線画像の明るさを調整した。また、岩石には水分が含まれていることが一般的であるため、炭酸カルシウムだけの試料について、含水比を0~30%と変化させながら撮影を行った。

3.2 赤外線反射率比の検討

得られた赤外線画像の例をFig. 4に示す。反射率が既知の複数の反射板の明度から、反射率を求めるための相関式を画像ごとに取得し、試料の中央付近のエリアの平均値から、各試料の赤外線反射率を求めた。スメクタイトと炭酸カルシウムの混合試料の測定結果をFig. 5に示す。波長1710 nmに対する赤外線反射率比は、スメクタイトが吸収する4つの波長のうち、2347 nmではあまりはっきりしないが、残りの3つについてはスメクタイト含有率が高いほど赤外線反射率比が低くなるという負の相関を持つ⁴⁾。これにより、今回の模擬試料のように単純な鉱物組成を持つ試料においては、赤外線カメラを用いても、スペクトルメーターによる測定と同様に、赤外線反射率比を用いて膨潤性粘土鉱物含有率を評価できる可能性が示された。

炭酸カルシウムを対象として、含水比を変化させた場合の測定結果をFig. 6に示す。水は1200 nmよりも長い

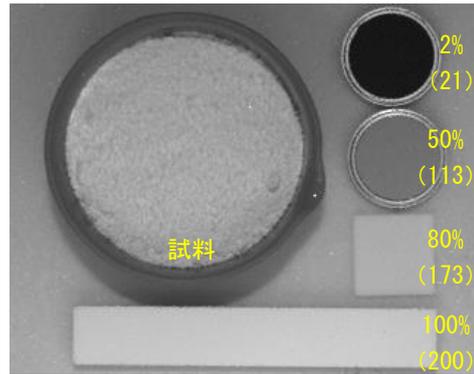


Fig. 4 炭酸カルシウム試料の赤外線画像 (波長1116 nm, 右側の数字は反射板の反射率 (%) と 黒: 0, 白: 255の256階調で示した明度)

Infrared Image of Calcium Carbonate Sample

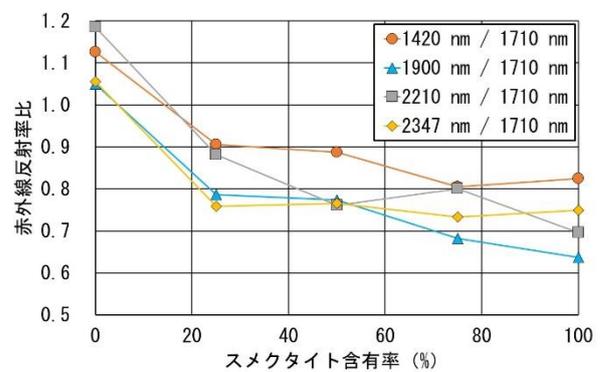


Fig. 5 模擬試料におけるスメクタイト含有率と赤外線画像から得られた赤外線反射率比の関係

Relationship between Montmorillonite Content and Infrared Reflectance Ratio in Simulated Samples Obtained from Infrared Images

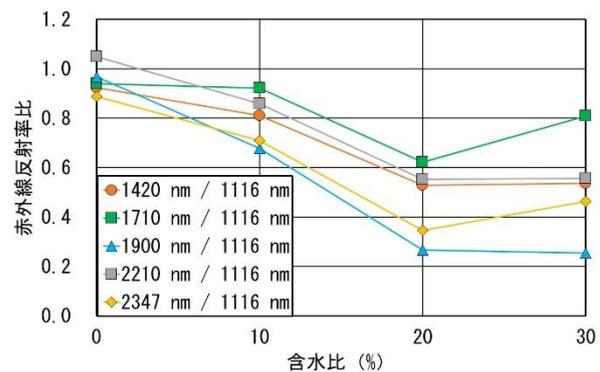


Fig. 6 炭酸カルシウム試料における含水比と赤外線画像から得られた赤外線反射率比の関係

Relationship between Water Content and Infrared Reflectance Ratio of Calcium Carbonate Samples Obtained from Infrared Images

波長の赤外線を吸収する性質があり⁵⁾、特に1450, 1900 nm付近で吸収が強くなる³⁾。そこで、1116 nmに対する

赤外線反射率を求めた。その結果、撮影したすべての波長で、含水比 20% までは含水比が高いほど赤外線反射率比が低くなる傾向が認められた。しかし、含水比 30% の結果を見ると、含水比 20% と比較して赤外線反射率比が同程度かやや高いものが多かった。膨潤性粘土鉱物の含有率と同様に含水比についても、単純な鉱物組成を持つ試料については、含水比 20% 程度までであれば、赤外線反射率比を用いて評価できる可能性が示された。

4. 岩石試料を用いた検討

4.1 撮影条件

次に、岩石試料を対象に赤外線カメラを用いて検討を行った。対象としたのは膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含む凝灰岩、凝灰角礫岩、安山岩、流紋岩等である。これらの試料は熱水変質作用を受けており、X線回折分析の結果、スメクタイトを 1~96% 含んでいる。各試料を風乾させた後、赤外線カメラで撮影を行った。撮影方法は模擬試料と同様である。撮影した赤外線画像の例を Fig. 7 に示す。

4.2 赤外線反射率比の検討

模擬試料と同様に、岩石試料のうち 3 か所の反射率を求め、その平均値について赤外線反射率比を計算した。スメクタイト含有量と赤外線反射率比の関係の中で、最も強い相関を示した 1420 nm / 1710 nm の例を Fig. 8 に示す。1420 nm / 1710 nm の赤外線反射率比におけるスメクタイト含有率と赤外線反射率比の負の相関の決定係数は 0.34 であった。岩石試料では、赤外線反射率比とスメクタイト含有率の間に模擬試料ほど強い相関が見られなかった原因としては、水やスメクタイト以外の鉱物による赤外線の吸収が生じたためや、スメクタイト含有率が 40% を超える試料がほとんどなく、試料数が多いスメクタイト含有率 0~30% の試料における反射率のばらつきの影響を受けたためと考えられる。今後は水や膨潤性粘土鉱物以外の鉱物などの阻害要因の影響を取り除く方法について検討を行う予定である。

5. トンネル切羽面での検討

5.1 撮影条件の検討

上述のように岩石試料の赤外線画像を撮影したところ、弱いながらも赤外線反射率比とスメクタイト含有量の間に負の相関が見られたため、スメクタイトを含む山岳トンネル切羽面を対象に、赤外線画像の撮影を行うこととした。大断面トンネルではトンネルの高さや幅が 10 m 以上となることもあり、光源を路盤に設置すると、光源から切羽面の端までの距離が 10 m 以上となる。そこで、光源を 10, 15, 20 m 離れた時に必要な光量について、室内で検討を行った。光源として、500 W のハロゲンランプを 6 台、計 3000 W 分用意した。また、切羽面で撮影を

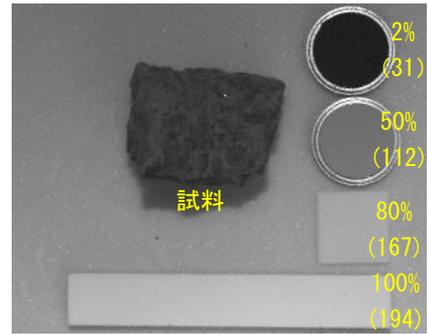


Fig. 7 岩石試料の赤外線画像
(波長1420 nm, 右側の数字は反射板の反射率 (%) と
黒 : 0, 白 : 255の256階調で示した明度)

Infrared Image of Rock Sample

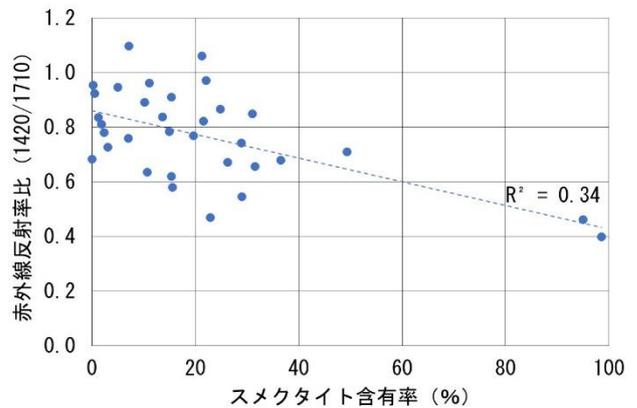


Fig. 8 赤外線画像から得られた岩石試料におけるスメクタイト含有率と赤外線反射率比 (1420 nm / 1710 nm) の関係⁶⁾

Relationship between Smectite Content and Infrared Reflectance Ratio in Rock Samples Obtained from Infrared Images

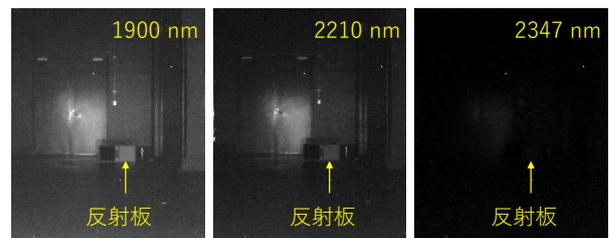


Fig. 9 光源から 20 m 離れた反射率約 80% の反射板の赤外線画像 (左から波長 1900, 2210, 2347 nm)

Infrared Images of a Reflector with a Reflectivity of Approximately 80% 20 m away from the Light Source

行うための大型反射板として、大きさ 30 cm 四方、反射率が約 2%, 80% の 2 枚の反射板を用意した。撮影に使用した赤外線カメラでは長波長側で感度が落ち、ハロゲンランプからの光量も長波長になるほど低下するため、波長が長いほど撮影された画像が暗くなる傾向にある。

そこで、1900, 2210, 2347 nm の3枚のバンドパスフィルターを使用して撮影した。ハロゲンランプ 3000 W 分の光源を 20 m 離れた位置にある反射板に照射して撮影した赤外線画像を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 を見ると、1900 および 2210 nm の画像では、白色反射板を認識することが可能であるが、2347 nm の画像は全体的に非常に暗く、白色反射板を認識することが困難であった。この傾向は、反射板を光源から 15 m 離れた位置に置いた場合でも同様で、10 m 離れた位置での検討でも、白色反射板がぼんやりと見える程度であった。そのため、山岳トンネル切羽での検討では、2347 nm のバンドパスフィルターを用いた撮影を省略した。

5.2 切羽面の地質と膨潤性粘土鉱物含有率

検討を行ったトンネル切羽は、流紋岩中の断層破碎帯に位置する⁹⁾。切羽面では、破碎を受けていない流紋岩と破碎された流紋岩が混在している。破碎されていない流紋岩は破碎部に囲まれたブロックをなしており、破碎部は熱水変質作用を受けている (Fig. 10)。切羽面前後の掘削ズリ 10 試料を対象に XRD 分析を行ったところ、破碎され、熱水変質を受けた試料はスメクタイトを最大 37% 含んでいたが、破碎や変質を受けていない試料のスメクタイト含有率は 1% 未満であった。採取から時間が経過していたが、含水比の測定も行った。破碎されていた試料の含水比は 4~19% であったのに対し、破碎されていない試料では 1% 未満と、破碎部と未破碎部の間に差が認められた。また、本トンネルではオールコアボーリングによる切羽前方探査を行っており、撮影した切羽面周辺のボーリングコア試料 6 試料を対象に XRD 分析を行ったところ、破碎され変質を受けた区間の試料はスメクタイトを最大で 32% 含んでいた。含水比は 10~26% であった。

5.3 撮影方法

トンネル切羽面においても、室内での撮影と同じ赤外線カメラを使用した。トンネルでの撮影時の状況を Fig. 11 に示す。撮影時間を短縮するため、カメラ用のバッテリーを入れたケースを撮影台とし、カメラをケースの蓋に固定して撮影を行った。切羽から 20 m 程度離れた位置から撮影した。撮影にあたっては、5.1 節での検討の通り、2347 nm を除く 5 枚のバンドパスフィルターを使用した。光源として 500 W のハロゲンランプを 6 台用意し、点灯するランプの数を考えることで画像の明るさを調整した。切羽面の手前に、5.1 節に記載した反射板を設置した (Fig. 10)。得られた赤外線画像の例を Fig. 12 に示す。破碎帯は比較的暗く、未破碎ブロックは比較的明るくなっている。また、画像の右上には吹付けコンクリートが比較的明るく写っている。

5.4 赤外線反射率比の検討

岩石試料のスメクタイト含有量と赤外線反射率比の関

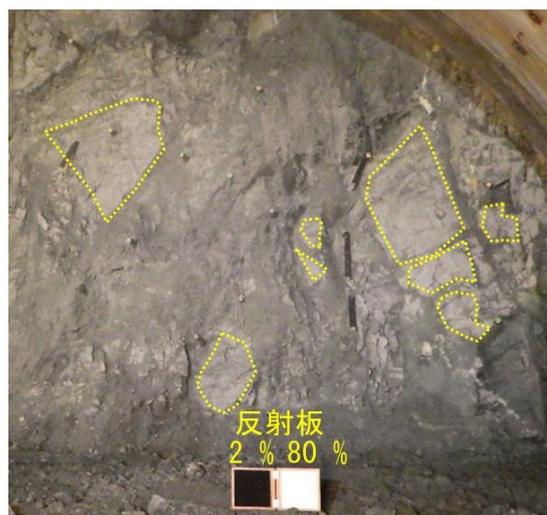


Fig. 10 撮影を行ったトンネル切羽面と反射板の可視光画像 (図中の数字は反射板の反射率、破線は主な未破碎ブロックを示す)

Visible Light Image of the Tunnel Face and Reflectors



Fig. 11 山岳トンネル現場における赤外線カメラ撮影状況

Infrared Camera Photographing at Mountain Tunnel Site

係の中で、最も強い相関を示した 1420 nm / 1710 nm について、切羽面の赤外線反射率比分布を Fig. 13 に示す。破碎部では赤外線反射率比が相対的に小さく、0.3~0.7 程度の赤外線反射率比となっている。一方、破碎されずに残っているブロックでは、赤外線反射率比が 0.8 と高い傾向が見て取れる。また、吹付けコンクリートや反射板の赤外線反射率比は 1 前後となっている。5.2 節に記述した通り、スメクタイト含有率や含水比は破碎部では高く、未破碎部では低いことが確認されている。すなわち、スメクタイト含有率や含水比が低いところでは赤外線反射率比が高く、スメクタイト含有率および含水比が高い

場所では赤外線反射率が低い傾向があるという結果が得られた。これにより、トンネル切羽面での膨潤性粘土鉱物の含有率や含水比が大きい地点を赤外線反射率比によって抽出できることが示された。

現状では、赤外線反射率比の違いが膨潤性粘土鉱物によるものか、含水比の違いによるものかの判別ができておらず、本手法のみで岩石試料や山岳トンネル切羽面に含まれる膨潤性粘土鉱物の割合を精度よく求めることは困難である。しかしながら、含水比は膨張性地山の指標にも採用されており⁷⁾、膨張性を持つ地質の抽出といった観点からは、現段階でも本手法は有効であると考えられる。すなわち、山岳トンネル切羽面やボーリングコア試料等を対象に本手法を用いて撮影すれば、膨潤性粘土鉱物が多く含まれる可能性がある場所を抽出することができ、更なる詳細な調査も可能となる。これにより、膨潤性粘土鉱物が局所的に多い場所の見落としによる盤膨れ等の発生を防ぐことは可能であると考えられる。

6. まとめ

赤外線カメラを用いて岩石中の膨潤性粘土鉱物の含有割合を計測する方法について、模擬試料と岩石試料を対象に検討を行った。模擬試料のように単純な鉱物組成を持つ試料では、膨潤性粘土鉱物の含有率や含水比と赤外線反射率比の間に比較的強い相関が現れ、赤外線反射率比により膨潤性粘土鉱物の含有率や含水比を推定できる可能性があることが明らかとなった。

一方、岩石試料については膨潤性粘土鉱物の含有率と赤外線反射率比の相関がやや弱く、岩石中の水分や対象とした粘土鉱物以外の鉱物とその阻害要因であると考えられる。

熱水変質を受けた断層破碎帯のトンネル切羽面の検討では、膨潤性粘土鉱物を多く含む破碎部では赤外線反射率比が低く、膨潤性粘土鉱物を含まない未破碎部では赤外線反射率比が高い傾向が認められた。このことから、赤外線反射率比によって切羽面の中で膨潤性粘土鉱物が多いところを抽出できることが明らかとなった。

今後は、岩石試料での阻害要因の検討や山岳トンネル切羽面での検証を進める予定である。

謝辞

本研究は国立大学法人京都大学との共同研究および一般社団法人防災研究協会への委託研究によって実施されたものです。京都大学小池教授、久保助教に感謝いたします。

参考文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 川越 健: 山岳トンネルの盤膨れメカニズムと対策工の効果, 鉄道総研報告, Vol. 35, No. 7, pp. 17-22, 2016.7
- 2) 小池克明, 古宇田亮一: 金属鉱物・地熱資源探査へ

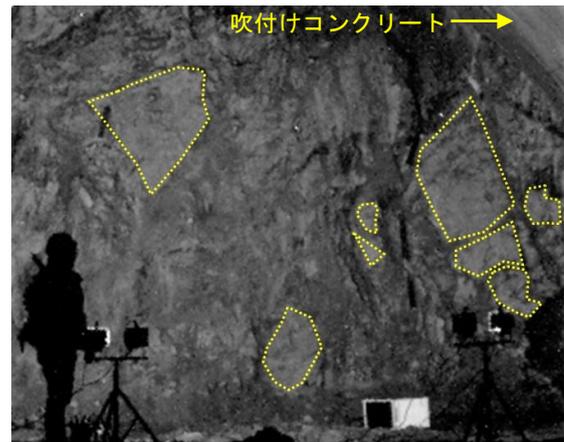


Fig. 12 山岳トンネル切羽面の赤外線画像の例 (1420nm, 破線は主な未破碎ブロックを示す)

Example of Infrared Image of the Mountain Tunnel Face

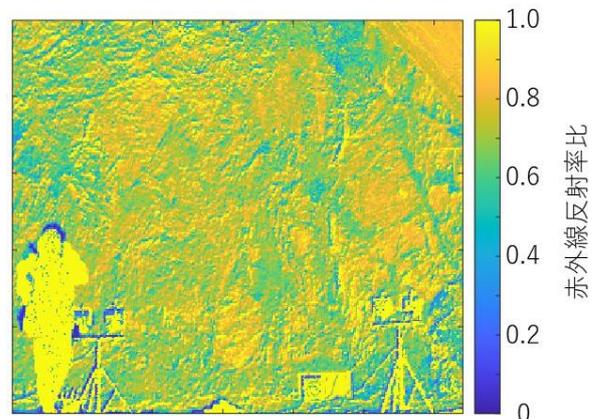


Fig. 13 山岳トンネル切羽面の赤外線反射率比分布の例 (バンド比 1420 nm/1710nm)

Example of Infrared Reflectance Ratio Distribution on the Mountain Tunnel Face

のリモートセンシング応用技術とその最近の動向, Journal of MMIJ, Vol. 132, pp. 96-113, 2016.6

- 3) 奥澤康一, 久保大樹, 小池克明: 赤外線画像を用いた膨潤性粘土鉱物の含有割合評価の試み, 土木学会第 75 回年次学術講演会講演要旨集, III-51, 2020.9.
- 4) 奥澤康一, 久保大樹, 小池克明: 赤外線画像による岩石中の膨潤性粘土鉱物の含有率評価, 第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 42, 4p., 2023.1
- 5) 山崎雅文, 住野 豊, 飯島由美: 水と氷の近赤外線反射スペクトルの測定, 雪氷研究大会 (2017・十日町), P1-54, 1p., 2017.9
- 6) 奥澤康一, 細谷旭弘, 板垣 昭, 久保大樹, 小池克明: 赤外線反射率比を用いた山岳トンネル切羽面の粘土鉱物量の推定, 土木学会第 79 回年次学術講演会講演要旨集, CS9-58, 2024.9
- 7) 土木学会: トンネル標準示方書「共通編」・同解説 / 「山岳工法編」・同解説, 419p., 2016.8