

# ハイパースペクトルカメラを用いた スメクタイト含有地山の評価法に関する研究

波長域の異なる2つのカメラを用いた比較実験

市来 孝志\*<sup>1</sup>・山上 順民\*<sup>1</sup>

**Keywords :** hyperspectral camera, spectrum, clay mineral, smectite, cut slope, near infrared / short wave infrared region  
ハイパースペクトルカメラ, スペクトル, 粘土鉱物, スメクタイト, 切土法面, 近赤外・短波長赤外域

## 1. はじめに

土木工事では、しばしば地盤中に含まれる粘土鉱物の影響を受け、想定外の被害を受ける場合がある。膨潤性粘土鉱物は、その結晶構造から水を吸収すると膨潤するものを用い、代表的なものとしてスメクタイトがある。スメクタイトの地盤中での存在が、トンネル工事では地山の押し出し<sup>2)</sup>等の原因となり、切土工事では法面の変状<sup>3)</sup>の原因となってきた。事前にスメクタイトの含有量が多い箇所や含まない箇所を把握できると、対策を検討する上で非常に有効である。

従来、スメクタイトの含有量の評価は、粉末 X 線回折試験（以下、XRD 試験）や陽イオン交換容量試験等により行われる。しかし、これらの試験は、試料採取のため法面直下など危険を伴う施工箇所に近接する必要があるため安全上の問題があるほか、分析前の試料準備に時間や手間がかかる。そのため、筆者らは、従来法に代わるスメクタイトの含有量の評価手法として、ハイパースペクトルカメラ（以下、HSC とする）を用いた遠隔かつ簡易な方法を研究している。本稿では、まず HSC を用いた評価の概要について述べる。次に、スメクタイト含有地山を対象に、波長域の異なる 2 つの HSC を用いて、スメクタイトの評価に適した波長域の HSC を検証するための比較実験について述べる。

## 2. HSC を用いた評価の概要

HSC を用いた評価の概要について、HSC の特徴、

HSC による分類画像作成方法、HSC を用いた岩石・鉱物の評価手法に分けて説明する。

### 2.1 HSC の特徴

図-1 の上図に示すように、一般的に人間の目やカラーカメラでは、可視光（可視域：概ね波長が 380～800nm の範囲）を赤・緑・青（RGB）の 3 色に分けて光を捉えている。一方で、図-1 の下図に示すように、マルチスペクトルカメラや HSC によるスペクトルイメージングは、対象物の分光情報を画像として捉える技術である<sup>4)</sup>。図-1 の右側に示すように、波長情報は波長ごとの反射率（太陽などの光源からの光を物質が受け

**スペクトルイメージング = 画像情報 + 分光情報（波長情報）**

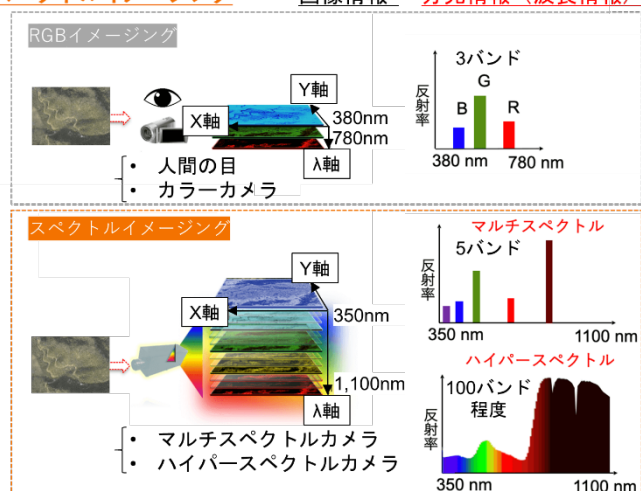


図-1 カラーカメラとマルチスペクトルカメラ・ハイパースペクトルカメラの違い（参考資料<sup>5)</sup>の図を加筆・修正）

Fig.1 Difference between color cameras and multispectral cameras / HSCs (added and modified to the figure in reference<sup>5)</sup>)

\*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

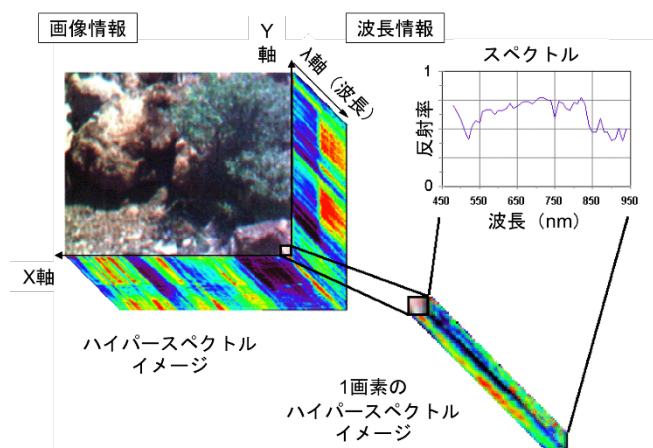


図-2 HSCにより取得できる画像情報と波長情報  
(参考文献<sup>6)</sup>の図を加筆・修正して引用)

Fig.2 Image and wavelength information obtained by HSC  
(cited by modifying the figure in the reference<sup>6)</sup>)

て反射する割合)として取得できる。マルチスペクトルカメラとHSCの違いは、取得できる波長情報の多さである。一般的にはマルチスペクトルカメラは4~50バンド程度(波長数)の情報を取得できるのに対して、HSCは数100のバンドの情報(スペクトルデータ)を取得できる。

図-2はHSCにより取得できる画像情報と波長情報を示した図である。HSCでは、図-2の左側で示す画像情報に加え、右側で示す波長情報(スペクトルデータ)を1画素ごとに取得できる。これら1画素ごとに取得できる多バンドのスペクトルデータを用いることで、非破壊・非接触な計測手順・方法により、人間の目やカラーカメラでは識別できない対象物の色の情報の識別や、物理特性の識別が可能となる。

## 2.2 HSCによる分類画像作成方法

HSCでは取得したスペクトルデータを用いて岩石や鉱物の評価に用いる場合、これらの識別や分布の図化を行うために分類画像を作成する。詳しくは、参考文献<sup>7)</sup>に記載のため、ここではこのうち本実験で用いるSAM(Spectral Angle Mapper)<sup>8)</sup>と呼ばれる分類画像作成手法について説明する。SAMでは、撮影画像範囲内に任意で指定した箇所から取得した基準スペクトルを、教師データとして用いる。分類の際には、図-2に示すように、1画素ごとのスペクトルデータに着目し、図-2の右側に示す、スペクトルの形状(波長に対する反射率の変化)を基準スペクトルのものと比較する。例えば、スペクトルデータを用いて岩種分類図を作成する場合、撮影画像範囲の1画素について、スペクトルの形状が、基準スペクトルのうち安山岩のものとも最も類

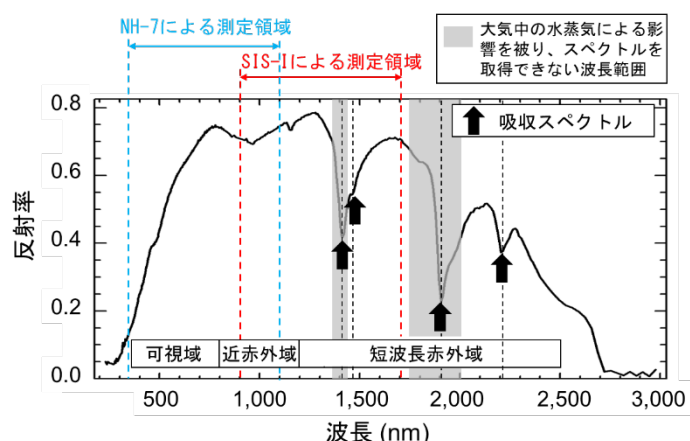


図-3 モンモリロナイトのスペクトル(スペクトルはアメリカ地質調査所のライブラリー<sup>14)</sup>のデータを使用)

Fig.3 Spectra of montmorillonite (the spectra in USGS Spectral Library<sup>14)</sup> is used)

似していれば、その画素の岩種を安山岩として分類する。このようにして撮影画像範囲の画素数分の分類を行うことで岩種分類図を得ることができる。

## 2.3 HSCを用いた岩石・鉱物の評価事例

HSCを用いた岩石・鉱物の評価事例としては、可視域のスペクトルデータを取得できるHSCを用いて、岩盤の風化・変質の程度の把握<sup>9),10)</sup>を目的としたものがある。その他の事例としては、HSCでは近赤外光と呼ばれる波長800~2,500nmの範囲の光を対象として、岩石や鉱物分布の図化や識別<sup>11)</sup>や、地盤中の含水量の把握<sup>12)</sup>を目的として行われている。スメクタイトを含む粘土鉱物の分布の図化の試みは、主に鉱山を対象として行われている<sup>13)</sup>など。参考文献<sup>13)</sup>では、波長2,000~2,500nmの範囲のスペクトルデータを取得できるHSCを用いて、スメクタイト等の粘土鉱物の分布の図化を目的として研究を行ったところ、スメクタイトについては、吸収スペクトルの認識が難しく、その分布を精度よく求められていなかった。

図-3にスメクタイトのうち、代表的な鉱物であるモンモリロナイトのスペクトル<sup>14)</sup>を示す。モンモリロナイトの吸収スペクトル(図中の黒色の矢印で示す、反射率が急低下する領域)は、短波長赤外域の1,400nm, 1,467nm, 1,900nm, 2,200nm付近に観測され<sup>15),16)</sup>、特に1,400~1,500nm付近では、反射率の低下が大きい吸収スペクトルが得られる。1,400~1,500nmの吸収スペクトルを観察することで、モンモリロナイト(スメクタイト)の含有の把握に有効と考えられる。このため、スメクタイトの評価には、可視域~近赤外域のHSC(NH-7;図-3中の水色点線の範囲にて測定波長を示す)



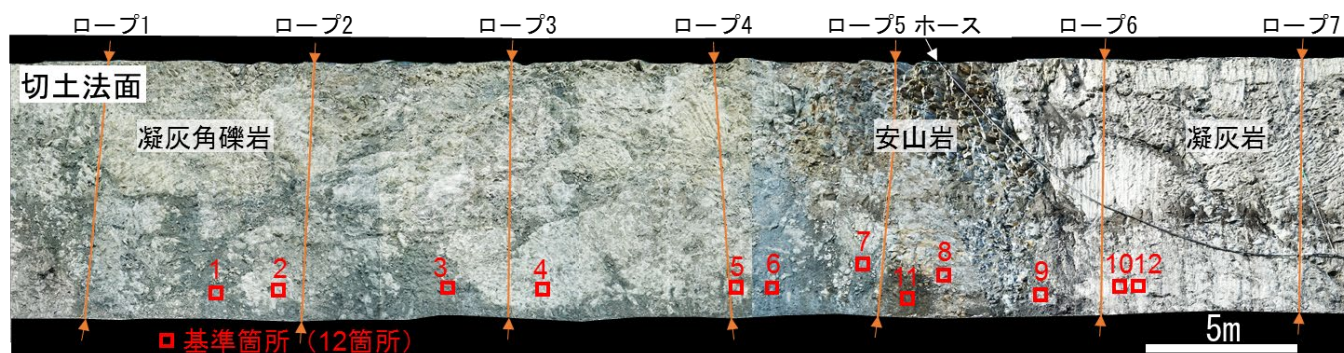


図-4 切土法面状況と基準箇所(12箇所)の位置

Fig.4 Rock types and quality distribution on the cut slope and location of reference points

表-1 実験に用いた HSC の仕様

Table 1 HSC specifications used in the experiment

機器名称	NH-7	SIS-I
波長範囲 (nm)	350~1,100 (可視域~近赤外域)	900~1,700 (近赤外域~短波長赤外域)
波長間隔 (nm)	5	10
バンド数 (波長数)	151	251
画像解像度 (ピクセル)	1,280×1,024 (131.1万画素)	400×320 (12.8万画素)
分光方式	内蔵分光ステージ スキャン方式	内蔵分光ステージ スキャン方式

よりも、1,400~1,500nm 付近の波長域を含む近赤外域~短波長赤外域のスペクトルデータを取得できる HSC (SIS-I; 図-3 中の赤色点線の範囲にて測定波長を示す)の方が有効と考え、これを検証するため、両方の HSC を用いた比較実験を行った。

### 3. 実験概要

実験は波長域の異なる 2 つの HSC を用いて、スメクタイトの評価に適した波長域の HSC を検証するために実施した<sup>17)</sup>。具体的には切土法面を対象に 2 つの HSC を用いて撮影し、ハイパースペクトルデータを取得した。撮影範囲内に分類画像作成用の基準スペクトルを取得するための基準箇所を設定した。基準スペクトルを用いてハイパースペクトルデータから岩種および岩質(粘土化の有無)の分類画像を作成し、検証データと比較することで、有効性を評価した。

#### 3.1 地質概要と基準箇所

撮影対象は図-4 に示す幅約 40m×高さ約 8m の切土法面である。法面左側から凝灰角礫岩、塊状の安山岩、凝灰岩が分布した。また、不規則な形状で粘土化する部分が分布した(分布箇所は図-7 にて詳述する)。

「2.2 HSC による画像分類作成方法」で述べたように、

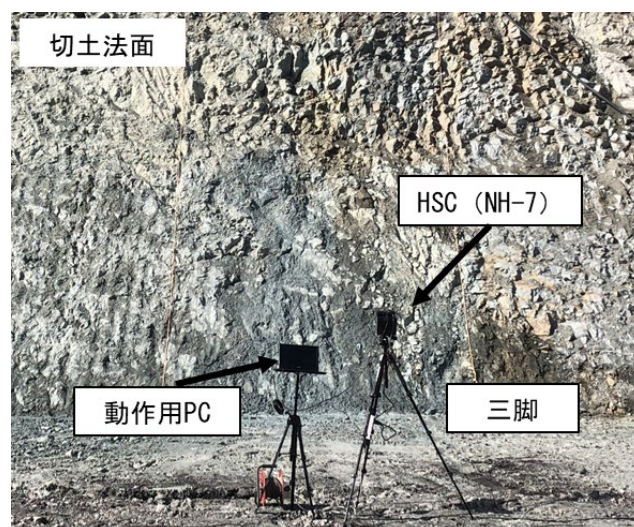


写真-1 NH-7 (350~1,100nm) による撮影状況  
Photo 1 Spectral imaging by NH-7 (350~1,100nm)

スペクトルデータを分類する際に使用する、基準スペクトルの取得箇所を基準箇所として定めた。基準箇所は幅約 20cm×高さ 20cm の範囲とし、安山岩、凝灰岩、凝灰角礫岩、凝灰岩の粘土化部および凝灰角礫岩の粘土化部について、現地にて代表的と考えられる 12 箇所を選定した(図-4 中の赤色四角の範囲にて示す)。

#### 3.2 撮影方法

表-1 に実験に用いた HSC の仕様を示す。実験には波長範囲の異なる 2 種類のエバ・ジャパン社製の HSC を用いた。1 台は可視域~近赤外域対象 (NH-7, 波長範囲: 350~1,100nm) であり、もう 1 台は近赤外域~短波長赤外域対象 (SIS-I, 波長範囲: 900~1,700nm) である。画像解像度はそれぞれ NH-7 では 1,280×1,024 ピクセルであり、SIS-I では 400×320 ピクセルである。分光方式はいずれもカメラ内部にスキャン機構を内蔵した方式である。従来法では撮影時にカメラ自体を走査させる必要があったが、この方式では、固定位置での撮影が可能であり、定位置での撮影に適している。

撮影は晴天の日に、法面に太陽光が直射する条件で

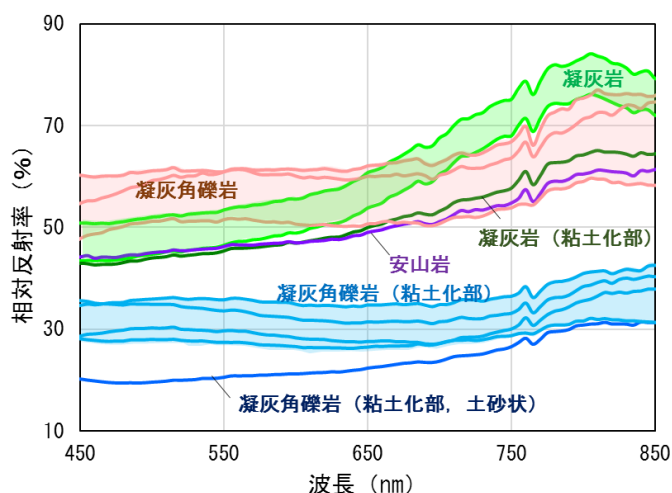


図-5 NH-7 (350~1,100nm) の基準スペクトル  
Fig.5 End-member spectra used for classification map in NH-7 (350~1,100nm)

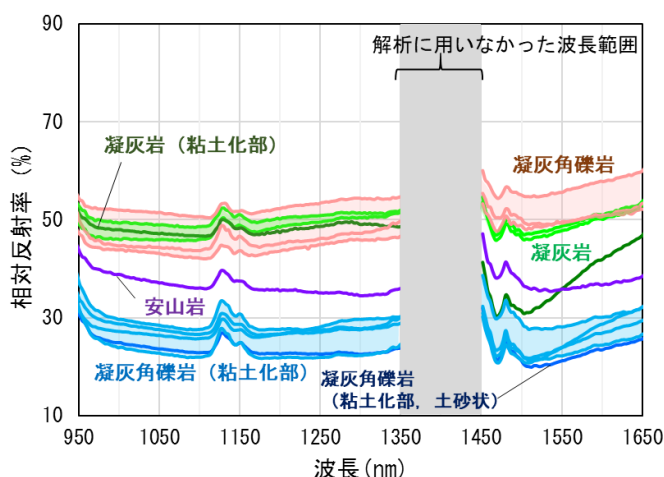


図-6 SIS-I (900~1,700nm) の基準スペクトル  
Fig.6 End-member spectra used for classification map in SIS-I (900~1,700nm)

実施した。NH-7による撮影状況を写真-1に示す。事前検討で明らかにした分解能を確保できる法面からの距離(約15m)の位置にHSCを設置後、法面を撮影してスペクトルデータを取得した。また、撮影時には反射率校正用の白板を法面に設置した。NH-7については、法面を左右に6分割、SIS-Iについては法面を上下左右に12分割して撮影し、各画像を合成した。移動時間を除いて、法面全体の撮影でNH-7では約20分、SIS-Iでは約40分を要した。

### 3.3 スペクトルデータの解析方法

エバ・ジャパン社製の専用ソフトウェアを用いて基準スペクトルをもとにスペクトルデータの解析を行い、岩種・岩質分類図を作成した。「3.1 地質概要と基準箇所」で述べたように、基準スペクトルは基準箇所にて取得したスペクトルデータであり、基準箇所内(幅約20cm×高さ20cmの範囲、図-4参照)の数ピクセルのデータを平均化して、各岩種・岩質の代表となるスペクトルデータを求めた。このようにして、12箇所の基準箇所から12の基準スペクトルを得た(岩種・岩質の内訳は、安山岩:1、凝灰岩:2、凝灰岩の粘土化:1、凝灰角礫岩:3、凝灰角礫岩の粘土化部:4、凝灰角礫岩の粘土化部かつ土砂状:1である)。図-5(NH-7)および図-6(SIS-I)に基準スペクトルのスペクトルデータを示す。図中の太実線にて基準スペクトルを示し、基準スペクトルに対してはその範囲を示すため塗色した。

「3.4 検証データ」で述べる検証データとの整合性を確認する目的として、「2.2 HSCによる分類画像作成方法」で述べたSAMの手法を用いて、岩種・岩質分類図を作成した。得られた岩種・岩質分類図と検証デー

表-2 XRD 試験結果

Table 2 Results of XRD analysis

基準箇所番号	岩種・岩質名	スメクタイト含有量 (wt%)
1	凝灰角礫岩 (粘土化部)	44.2
2	凝灰角礫岩	59.6
3	凝灰角礫岩 (粘土化部)	39.7
4	凝灰角礫岩	51.4
5	凝灰角礫岩	33.7
6	凝灰角礫岩 (粘土化部)	44.7
7	凝灰角礫岩 (粘土化部)	55.7
8	安山岩	未検出
9	凝灰岩 (粘土化部)	33.3
10	凝灰岩	32.8

タとを比較し、スメクタイトの評価に適した波長域のHSCの有効性を評価した。なお、大気中の水蒸気等の影響を受けたと評価される波長1,400nm付近<sup>18)</sup>のデータは解析には用いなかった(図-6中の灰色箇所)。

### 3.4 検証データ

HSCによる撮影結果の検証データについては、図-7で示す岩種・岩質分布と、XRD試験により得たスメクタイト含有量を用いた。

図-7は観察可能な高さ(約2m)で実施した目視観察および、観察可能な高さより上部については、写真を用いた評価により境界線を引いた岩種・岩質分布図である。図-7中に黄色の点線で安山岩の塊状部、青色の点線で凝灰角礫岩の粘土化部の境界線を示した。

また、基準箇所(No.1~No.12、図-4参照)のうち、No.1~No.10について岩種・岩質状況を反映し、代表的



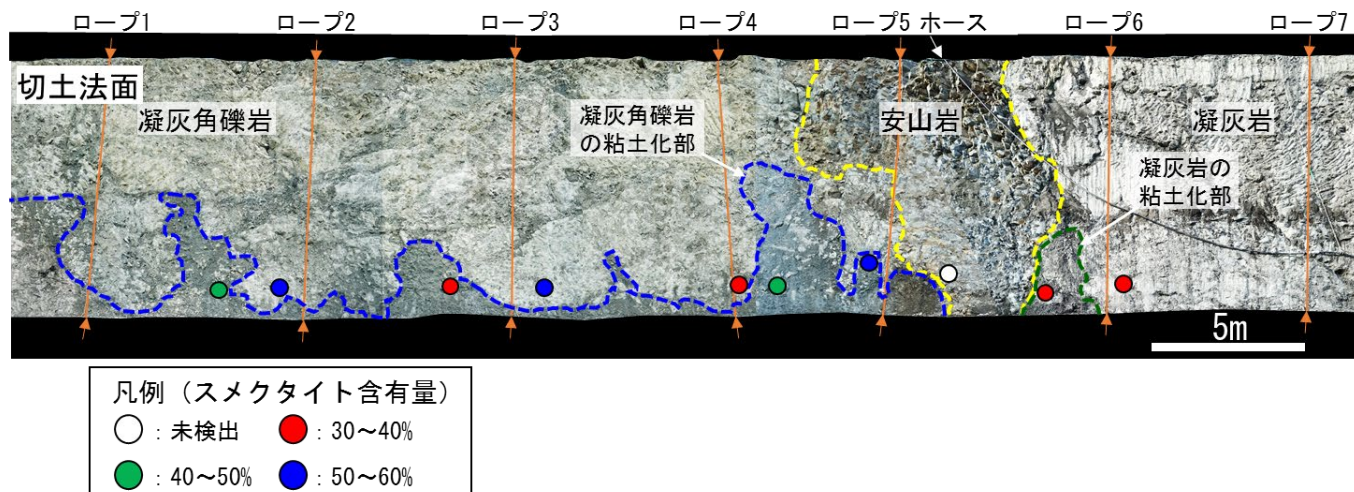


図-7 目視観察と写真による評価による岩種・岩質分布とスメクタイトの分布図  
 Fig.7 Distribution map of rock types and quality by visual observation and photo interpretation with smectite content

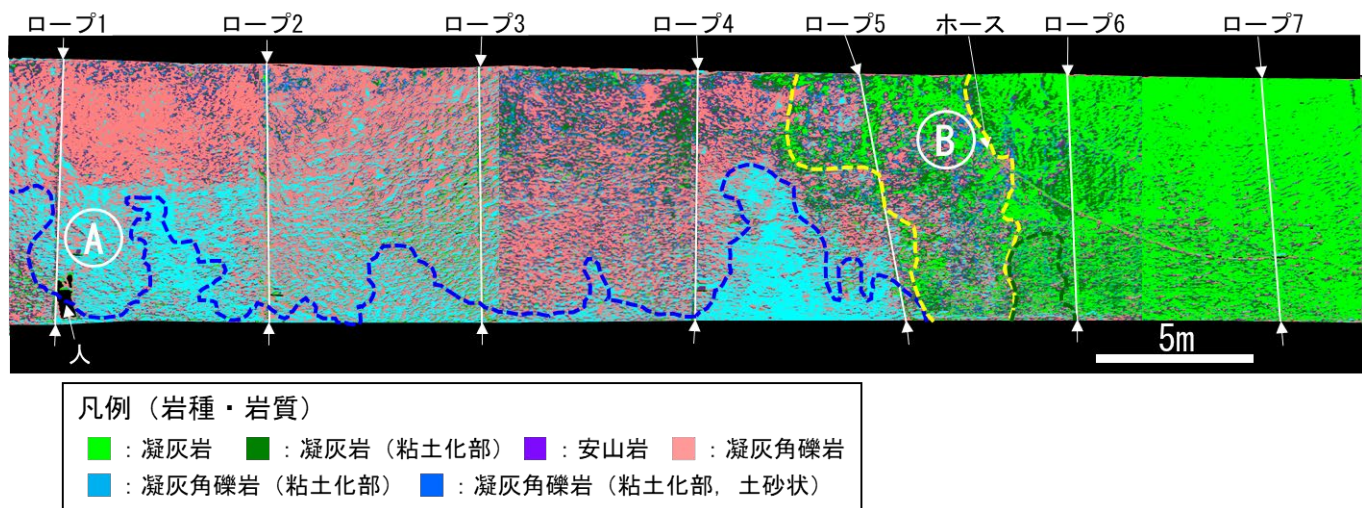


図-8 ハイパースペクトルデータを用いた岩種・岩質分類図 (NH-7; 350~1,100nm)  
 Fig.8 Rock types and quality classification map using hyperspectral data (NH-7; 350~1,100nm)

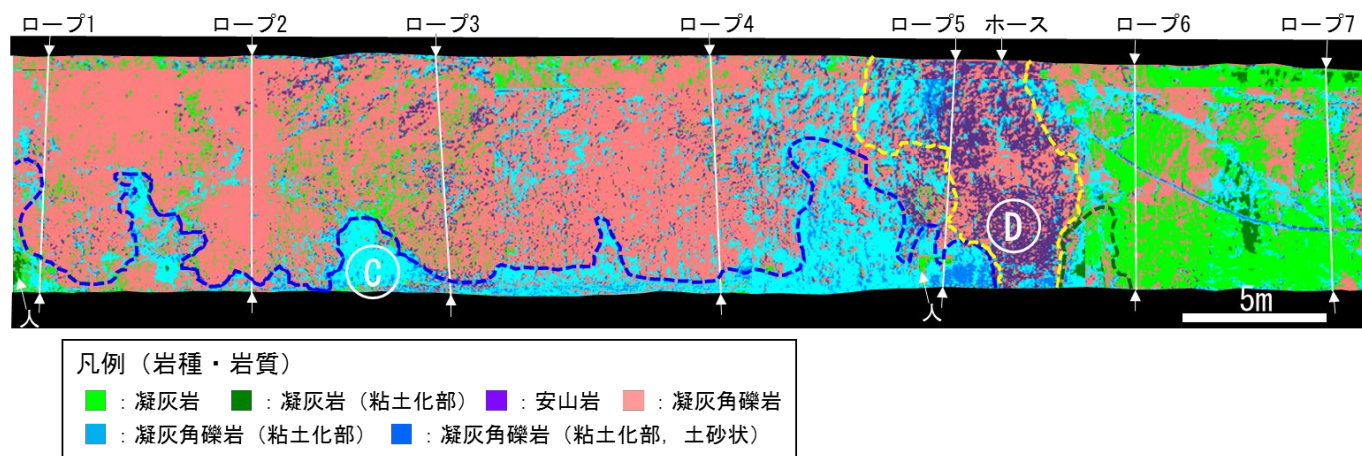


図-9 ハイパースペクトルデータを用いた岩種・岩質分類図 (SIS-I; 900~1,700nm)  
 Fig.9 Rock types and quality classification map using hyperspectral data (SIS-I; 900~1,700nm)

と思われるものを選定して、こぶし大ほどの大きさのものを10個採取した。得られた試料を用いて、XRD試験を行った。不定方位法によりスメクタイトの有無を確認し、スメクタイトが認められた試料について定方位法の結果を用いてスメクタイトの含有量を求めた(表-2)。図-7中に基準箇所の位置ごとに、スメクタイト未検出のものと、30%以上のものについては10%ごとに分類したスメクタイト含有量を記載した。

#### 4. 実験結果および考察

波長域の異なる2つのHSCを用いて、スメクタイトの評価に適した波長域のHSCを検証するため、2つのHSCによる結果を比較し考察した。

##### 4.1 波長域の異なる2つのHSCによる結果の比較

波長域の異なる2つのHSCによる結果として得られた岩種・岩質分類図の比較を行う上で、岩種・岩質ごとのスメクタイト含有量が重要となる。XRD試験の結果(表-2)、安山岩(No.8)からはスメクタイトは検出されなかった。凝灰岩からは粘土化部と関係なくスメクタイトが30%程度検出された(No.9およびNo.10)。凝灰角礫岩からも粘土化部と関係なくスメクタイトが30~60%程度検出された(No.1~No.7)。

次に、両機種種の岩種・岩質分類図(図-8および図-9)と法面での岩種・岩質分布(図-7)とを比較する。なお、図-8および図-9の岩種・岩質分類図には、図-7に記載の目視観察と写真による評価に基づく、安山岩(黄色点線の範囲)と凝灰角礫岩の粘土化部(青色点線の範囲)の境界線をそれぞれ記入した。

NH-7(350~1,100nm)の岩種・岩質分類図(図-8)において、凝灰角礫岩の粘土化部(水色)は、法面の観察結果に基づく範囲(図-8中の青色点線の範囲で示す)を超えて、粘土化部でない凝灰角礫岩の領域まで分布する結果となった(例えば、図-8中に(B)地点で示す)。また、安山岩(紫色)は、法面の観察結果に基づく塊状の安山岩の範囲(図-8中の黄色点線の範囲で示す)にはほとんど分布せず、凝灰岩(黄緑色)が分布する結果となった(例えば、図-8中に(A)地点で示す)。

一方、SIS-I(900~1,700nm)の岩種・岩質分類図(図-9)においては、凝灰角礫岩の粘土化部(水色、例えば、図-9中の(C)地点で示す)および安山岩(紫色、例えば、図-9中の(D)地点で示す)は、法面での観察結果による各岩種・岩質分布(図-9中の青色点線および黄色点線の範囲で示す)とほぼ整合的であった。

図-7に示すように、今回の実験では、対象とする法面でのスメクタイトの分布が連続的に変化するのではなく、スメクタイトが未検出の安山岩、30%程度を含有する凝灰岩、30~60%程度を含有する凝灰角礫岩が分布し、0~30%が認められない特殊な地山条件であった。このような地山条件ではあるが、近赤外域~短波長赤外域のSIS-Iでは、スメクタイトが検出されない塊状の安山岩の分布(図-9中の黄色点線の範囲)を、可視域~近赤外域のNH-7と比較して精度よく評価できた。このことから、それぞれスメクタイトを30%程度含有する凝灰岩と30~60%程度を含有する凝灰角礫岩についても、その分布を精度よく評価できている可能性があるため、今後法面上部から試料採取を行い、XRD試験によりスメクタイト含有量を求め、追加で検証したい。また、含有量0~30%のスメクタイトが分布する地山において、今回と同様の実験を行い、スメクタイトの検出精度の検証を行いたい。

以上より、SIS-I(900~1,700nm)を用いることで、スメクタイトの有無を判定できる可能性があることがわかった。

##### 4.2 SIS-Iにおけるスメクタイト含有量評価の有効性

岩種・岩質分類図作成の根拠となる基準スペクトルの特徴(図-10参照)を述べ、近赤外~短波長赤外域のSIS-I(900~1,700nm)の方がNH-7(350~1,100nm)よりも、スメクタイトの評価に有効であった理由を考察する。

図-10(再掲し加筆)に示すように、SIS-Iの基準スペクトルにおいて、凝灰角礫岩の粘土化部や凝灰岩の粘土化部のスペクトルに着目する。例えば、吸収スペク

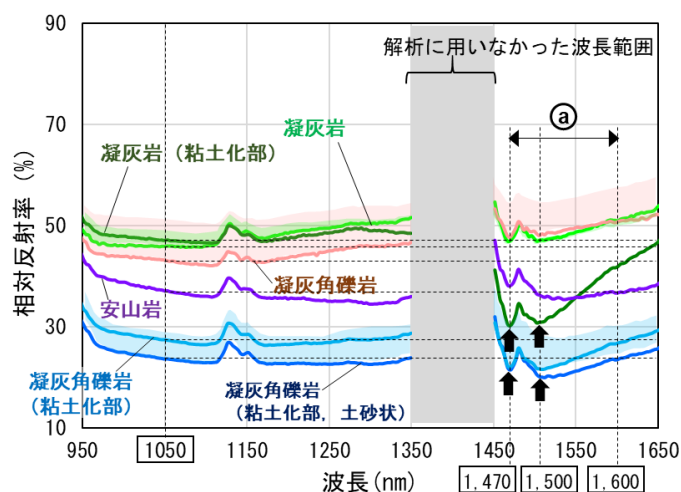


図-10 SIS-I(900~1,700nm)の基準スペクトル  
(再掲し加筆)

Fig.10 End-member spectra used for classification map in SIS-I(900~1,700nm) (reproduced and added)



トルの存在のない 1,050nm と波長範囲 1,470~1,600nm の反射率を比較すると、これらのスペクトルでは、水分子や水酸基 (OH 基) に起因すると考えられる吸収スペクトル (反射率の低下部)<sup>16)</sup>が得られている (波長範囲を図-10 中の(a)で示し、吸収スペクトルを黒矢印、各岩種の 1,050, 1,470, 1,500, 1,600nm の波長に対する反射率を示す)。可視光域にはない、短波長赤外域のこれらの吸収スペクトルの存在によって、凝灰角礫岩の粘土化部や凝灰岩の粘土化部のスペクトルと、安山岩、凝灰岩、凝灰角礫岩のスペクトルが異なるものとして特徴づけられたものと考えられる。このため、SIS-I では、SAM による分類により、安山岩、凝灰岩、凝灰角礫岩とそれぞれの粘土化部が区分でき、これらを反映した岩種・岩質分類図が得られ、スメクタイトの有無を判定できる可能性が得られたものと考えられる。

## 5. まとめ

スメクタイト含有地山を対象に、波長域の異なる2つの HSC を適用し、スメクタイトの評価に適した波長域の HSC を検証するための比較実験を行った。その結果、可視域~近赤外域 (NH-7) よりも、近赤外~短波長赤外域のスペクトルデータを取得できる HSC (SIS-I) の方が、評価に有効である可能性があることを示した。また、近赤外~短波長赤外域の HSC (SIS-I) で得た岩種・岩質分類図から、スメクタイトの有無を判定できる可能性があることがわかった。

今後は、追加分析により、本結果の妥当性を高めるとともに、含有量が 0~30%におけるスメクタイトの検出精度を確認したい。

## 参考文献

- 1) 白水晴雄：粘土鉱物学—粘土科学の基礎—，朝倉書店，pp.176，1988.
- 2) 木谷日出男編：トンネル技術者のための地相入門，土木工学社，pp.192，2014.
- 3) 小西純一ほか：不攪乱粘土試料の一次元膨潤圧特性とその異方性，土木学会論文集 C，66(2)，pp.264-279，2010.
- 4) 高良洋平：スペクトルイメージングと産業応用への期待，OPTRONICS，8，2019.
- 5) エバ・ジャパン株式会社ホームページ <https://ebajapan.jp/spectraltechnology/> 2022.6.28 閲覧.
- 6) McHugh, E. L. et al.: Simplified hyperspectral imaging for improved geologic mapping of mine slopes, Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, IPMM, pp.1-10, 2001.
- 7) 山口靖：光学センサ画像による岩石・鉱物マッピング 第3回，日本リモートセンシング学会誌，39，pp.315-322，2019.
- 8) Kruse, F. A. et al.: The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data, Remote Sensing of Environment, 44, pp.309-336, 1993.
- 9) 宇津木慎司ほか：マルチスペクトルカメラ，AI を利活用した施工現場地質状況自動評価システムの構築，建設機械施工，70(11)，2018.
- 10) Kim, J. et al.: A system of the granite weathering degree assessment using hyperspectral image and CNN, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 36(5), pp.368-380, 2022.
- 11) Kurz, T. H. et al.: Hyperspectral imaging: a novel geological mapping technique for subsurface construction sites, Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface Challenges – Underground Solutions At: Bergen, Norway, 2017.
- 12) 小野秀史：ハイパースペクトルカメラの災害調査への適用，建設機械施工，72(10)，2020.
- 13) Murphy R. J. et al.: Mapping clay minerals in an open-pit mine using hyperspectral and LiDAR data, European Journal of Remote Sensing, 48, pp.511-526, 2015.
- 14) Kokaly, R. F. et al.: USGS Spectral Library Version 7, U.S. Geological Survey Data Series 1035, pp.61, 2017.
- 15) Clark, R. N. et al.: High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals, Journal of Geophysical Research, 95, B8, pp.12,653-12,680, 1990.
- 16) Lepaczewski, P. et al.: Characterization of Mineralogy in the Highland Valley Porphyry Cu District Using Hyperspectral Imaging, and Potential Applications, Minerals, 10(473), pp.1-30, 2020.
- 17) 市來孝志・山上順民：ハイパースペクトルカメラによるスメクタイト含有地山の定量的評価法に関する研究，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，2022.9 (投稿中)。
- 18) Clark, R. N. et al.: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In A. N. Rencz (Ed.), Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, 3rd Edition, Volume 3 (pp. 3-58). John Wiley & Sons, Inc., 1999.