

# 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

宇津木 慎 司

ダムやトンネルなど岩盤構造物の建設に際しては、計画地点における地質状況を詳細に把握し、その状況に応じて最適な設計および施工を実施することが重要となる。これに対して、施工段階においては、実際の掘削のり面やトンネル切羽で地質観察を実施し、事前の想定と実際の状況との差異を評価するとともに、その状況に応じた最適な施工仕様を選定しなければならない。本稿においては、岩盤の工学的特性に影響を及ぼす岩種や風化区分の評価について、既往の目視観察による定性的な評価に対し、マルチスペクトルカメラ撮影により得られる125次元の色調情報データ処理により、岩種区分図および風化区分図を自動作成するシステムに関して、具体的な検討内容を詳述する。

キーワード：マルチスペクトルカメラ，AI，岩盤，自動評価

## 1. はじめに

ダムやトンネルなど岩盤構造物の建設に際しては、計画地点における地質状況を詳細に把握し、その状況に応じて最適な設計および施工を実施することが重要となる。これに対しては、調査・設計段階において、地質調査や物理探査などを実施することにより、計画地点を構成する地質の分布状況や工学的特性などを評価し、その結果をもとにダム基礎やトンネル支保などの設計が行われる。ただし、この調査・設計段階において、種々の検討にかかる費用に限度があると同時に、上述した地質調査や物理探査の精度自体に限界があるため、この段階で広範にわたり詳細な地質状況を把握することは困難となる。

上述した課題に対して、施工段階においては、実際の掘削のり面やトンネル切羽において地質状況を詳細に確認し、事前に想定されていた状況と実際の状況との差異を評価する。そして、その状況に応じて、追加対策工の検討など、施工計画や設計を見直すことが重要となる。

実際に施工時の掘削のり面やトンネル切羽において岩盤の工学的特性を評価する際には、地質技術者が目視により、岩種および岩盤の硬さ、割れ目分布状況、風化の程度など、所要の評価項目について状況を確認し、各項目の組み合わせや重み付けを考慮して総合的な判定がなされている。これについては、特にトンネル切羽において、安全上の観点より切羽に近接して詳

細な観察が実施できないことから、上述した各項目が定性的な評価であったり、幅を持った範囲での定量的な評価に留まっていることが課題とされてきた。また、各項目の組み合わせ方や重み付けの設定方法が実情に合致していない場合もあり、総合的な評価結果である支保パターン選定結果との整合性が取れない事例などが確認されている。

また、ダム基礎岩盤の適性評価など、重要度の高い箇所における地質観察については必ず地質技術者によって実施されるものの、トンネル切羽観察や道路土工掘削のり面の土岩判定などにおいては、現場に常駐する土木技術者による判断に委ねられる場合がほとんどである。このため、その評価の妥当性について懸念する指摘もあり、その対策として、岩盤評価の定量化、自動化に関する種々の取り組みが実施されている。

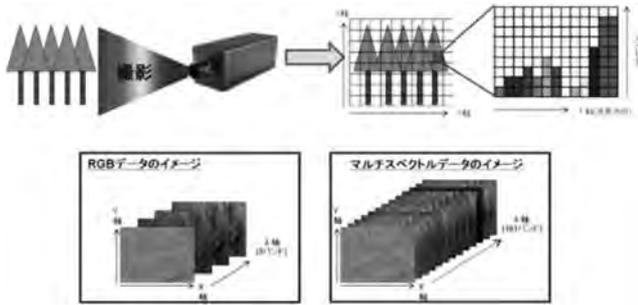
これに対して、筆者は、現時点で地質専門技術者が目視による定性的な評価を実施している地質観察において、マルチスペクトルカメラ（写真—1，2）で取得した125次元の色調情報データ（図—1）を有する岩盤の画像を撮影するとともに、評価アルゴリズムにAIの画像



写真—1 マルチスペクトルカメラの外観



写真一 2 マルチスペクトルカメラ画像取得状況



図一 1 マルチスペクトル画像の概念図

認識技術である CNN 法を適用し、岩種や風化区分などを瞬時に自動評価する手法を開発した。本稿においては、マルチスペクトル画像の取得方法および AI を用いた判定の自動化に関する検討内容について詳述する。

## 2. 既往の山岳土木施工現場における岩盤評価に関する課題

### (1) 山岳土木現場の岩盤評価における調査・設計に関する課題

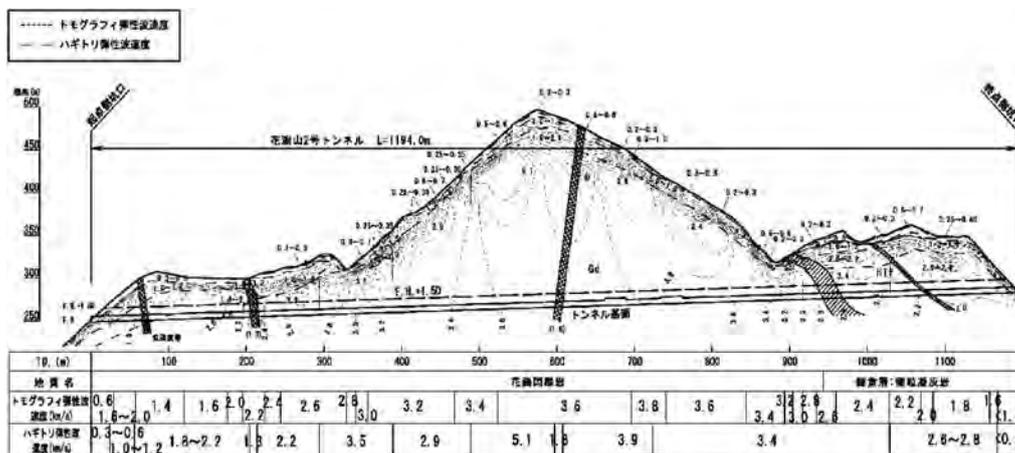
ダムやトンネル現場などの山岳土木現場における地質調査は、当該地域における既往地質調査に関する文献調査に始まり、その状況や構造物の規模に応じて、地表面踏査、ボーリング調査などの地質調査、地山の

弾性波速度や比抵抗値測定などの物理探査が実施される。しかしながら、構造物が広範にわたり設定される場合が多いこととともに、トンネルや大規模地下空洞においては最大数百 m 程度以深の地山深部に計画される場合もあるため、施工前に掘削箇所全ての地質状況を詳細に把握することは、調査費用の観点、そして調査精度の観点から、非常に困難である。

このため、特にトンネルの設計については、図一 2 に示すような、比較的容易に広範の調査を実施できる地表面からの弾性波探査や比抵抗探査の結果をもとに、地下深部のトンネル掘削箇所における岩盤の工学的特性を推定し、支保パターンの設計および低速帯や断層破碎帯の評価など、詳細な検討が実施される。ただし、上述したような種々の制約により、設計時に設定された支保パターンと実績との差異がある事例もあり、設計変更に伴う工費の増大などが課題として指摘されている。近年、公共工事における調査・設計段階から建設段階、そして維持管理段階まで見越した全体工費の抑制が重要課題として指摘されており、Q (品質)、C (工費)、D (工期)、S (安全)、E (慣用)、あらゆる側面に寄与するためのより効率的かつ効果的な建設工事の実現が求められている。

### (2) 山岳土木現場の岩盤評価における施工時調査に関する課題

上述した調査・設計に関する課題に対処するためには、施工開始前において、事前調査段階で推定された地質状況を把握し、その状況に応じた最適な施工計画を策定することが重要となる。また、施工時においては、掘削のり面やトンネル切羽の地質状況を詳細に観察することにより、事前想定との差異を確実に評価し、その状況に応じて最適な追加対策を講じるなど、種々の検討を速やかに実施する必要がある。



図二 トンネル地質縦断面図の例

これに対し、トンネル掘削時の地質状況観察結果を例に取ると、通常、一日一回、数m間隔で実施される図-3に示すような切羽観察記録として整理される。そして、支保パターンの変更などを企業者と現地で実施する岩判定時においては、既掘削箇所は吹付工が施されているため、この切羽観察記録を参照して状況を確認するとともに、唯一、直接、地質状況を確認できる切羽のみで評価が行われる。これについては、観察記録で当該箇所における地質状況は適格に整理されているものの、表-1に示すような、岩盤の圧縮強度や割れ目の頻度、風化変質などの各評価項目が、幅を持った定量的な評価が定性的な評価に留まっている。また、各評価項目に重み付けが課されそれを合算して得られる切羽評価点についても、図-4に示すように、支保パターンとの相関関係は確認されているものの、データのばらつきがやや大きいことが課題とされている。

上述した現状や課題を踏まえ、地質状況の複雑なわが国において岩盤構造物を建設する際には、事前地質調査結果より得られる情報に限界があることを認識するとともに、施工時に得られる地質情報や物理探査結果をもとに実際の地質状況をより詳細に把握した上で、その状況に応じたより効率的かつ効果的な施工を実現する必要があると考えられる。

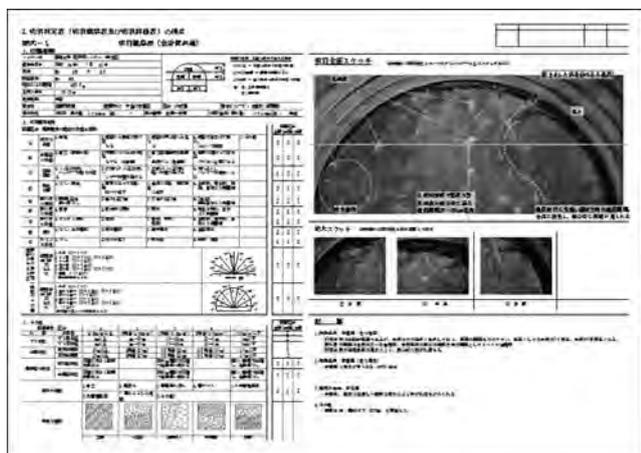
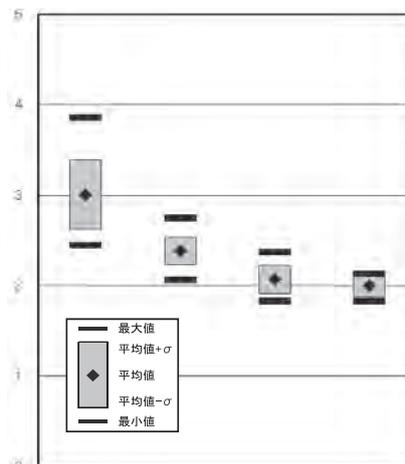


図-3 切羽観察記録の一例

表-1 切羽観察記録における地質状況評価項目の一例

	1	2	3	4
圧縮強度	100 MPa 以上 ハンマー打撃はね返る	100 ~ 20 MPa ハンマー打撃で砕ける	20 ~ 5 MPa 軽い打撃で砕ける	5 MPa 以下 ハンマーの刃先食いこむ
割れ目の頻度	1 m 以上 割れ目なし	1 m ~ 20 cm	20 ~ 5 cm	5 cm 以下 破碎当初より未固結
風化変質	なし・健全	岩目に沿って変色 強度やや劣化	全体に変色 強度相当に低下	土砂状・細片状・破碎 当初より未固結



区分	DI-b	CII-b	CI	CI-L
度数	65	73	26	9
最大値	3.86	2.75	2.37	2.13
平均値+σ	3.39	2.54	2.22	2.12
平均値	3.01	2.39	2.07	2.00
平均値-σ	2.62	2.23	1.91	1.87
最小値	2.45	2.06	1.83	1.83
標準偏差	0.38	0.15	0.16	0.12

(CI 拡張部)

図-4 支保パターンごとの切羽評価点頻度分布例

### 3. 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概要

#### (1) マルチスペクトル画像取得システム

可視光線の波長帯の電磁波や、不可視光線の波長帯の紫外線や赤外線、遠赤外線等の電磁波を各波長帯に分光して記録した画像をマルチスペクトル画像と呼ぶ。物体は種類ごとに波長帯ごとの電磁波の反射強度（スペクトル反射特性）が異なっており、異なる波長帯の電磁波を記録するマルチスペクトル画像は、物体のスペクトル反射特性を把握するために必要なデータとなる。

マルチスペクトル画像の取得にはエバジャパン社製のスペクトルカメラ NH-8 を用いた（写真-1）。波長範囲 380 nm ~ 980 nm のスペクトル反射特性の取得が可能である。今回は波長 5 nm ごと、125 波長帯に分光したマルチスペクトル画像を取得し検討に用いた。透過型分散素子をベースとした分光部により、スリットを透過した 1 ラインの光を分光して複数の波長データを同時に取得することで、スペクトルデータを

取得する。本方式の場合、従来はカメラもしくは対象物を動かす機構が必要となり、大型の外部装置が必要であったが、カメラ内部で光学系を駆動することにより外部装置を要さずカメラとノート PC のみで撮影可能となった。

マルチスペクトル画像取得時に用いる照明は、各波長帯の出力特性の強弱が少ないことが望ましいため、市販の照明の中で比較的各波長帯の出力特性の強弱が少ないハロゲンランプを照明として用いた。また、画像取得時と同時に標準反射板を撮影することにより、照明条件の違いの補正を行った。

写真一 2 に岩石のマルチスペクトル画像取得時の様子を示す。マルチスペクトルカメラは岩石試料から反射した反射スペクトルを計測するため、3 台のハロゲンランプとソフトボックスを用い、光源むらの少ない環境で撮影を行った。

## (2) 岩石種別自動判定手法の概要

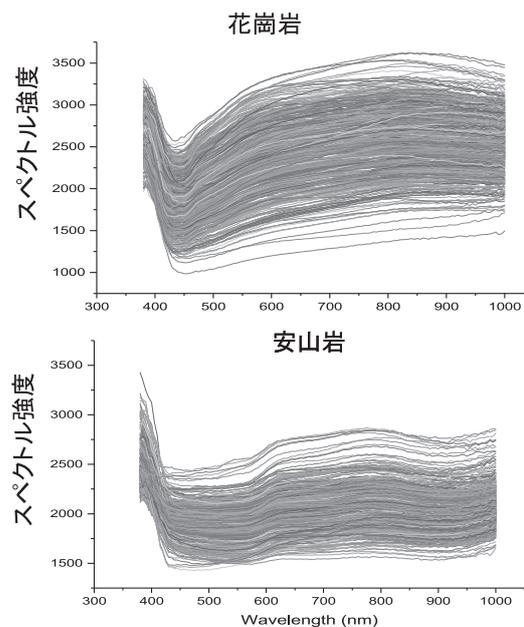
今回開発した手法は、人工知能の画像認識技術を活用し、岩石試料のマルチスペクトル画像から岩石の種別を自動判定するものである。

岩石試料の外観写真と岩石種別との関係を人工知能に学習させるのに際し、CNN 法と呼ばれる、他部門では広く適用事例がある人工知能の機械学習手法を適用した。CNN 法とは、情報を紐づけされた画像データをもとに反復的に学習し、そこに潜むパターンを自動的に見つけ出す機械学習の一手法である。脳機能に見られるいくつかの特性を、計算機上のシミュレーションによって表現することを目指した数学モデルであるニューラルネットワークを多層化した手法の一つで、畳み込みニューラルネットワークと呼ばれる。これに画像データを入力すると、情報が第 1 層からより深くに伝達されるうちに、各層で学習が繰り返される。この過程で、これまでは画像や音声などにより当該分野の研究者、技術者が手動で設定していた特徴量が自動で計算される。

岩石種別判定に使用した火山岩 4 種類、(安山岩、デイサイト、玄武岩、花崗岩) についての自動判定手法、自動判定結果について詳述する。玄武岩をマルチスペクトルカメラで撮影した特定波長 (580 nm) の反射強度イメージを図一 5 に、花崗岩と安山岩のマルチスペクトルパターンを図一 6 に示す。マルチスペクトルパターンは、横軸に波長をとり、スペクトル強度が縦軸に示されている。本検討では岩石試料の反射強度イメージを直接 AI に学習させるのではなく、岩石試料から得られたマルチスペクトルパターンの形



図一 5 波長 580 nm での反射強度イメージ (玄武岩)



図一 6 マルチスペクトルパターンの例

状と岩石種別の関係を教師データとして AI に学習させ、学習後に未知のマルチスペクトルパターンを AI に与えることで自動判定を行った。

AI での判定では、教師データとして多数のデータが必要となるため、一つの撮影した反射強度イメージから約 400 の領域を切り出し、それぞれの領域のマルチスペクトルパターンを得た。図一 6 の線の一本一本は、それぞれ 1 領域のマルチスペクトルパターンを表している。1 領域は反射強度イメージ (1200 × 1204 ピクセル) 上の約 50 × 50 ピクセル (約 5 × 5 mm) とした。

表一 2 に本検討の条件および判定結果をまとめる。今回 AI による岩石種別判定では、得られたマルチスペクトルパターンの 90% を教師データとして学習に用い、残りの 10% を自動判定のテストデータとした。4 岩石種から得た総データ数は 1804 データ、このうち 1624 データ (90%) を AI の学習に用い、181 データ (10%) を学習に用いずに自動判定のテストに用いた。

自動判定手法の精度検証のため、教師データの学習後、教師データの一部を用い、岩石種別の自動判定を

表—2 本検討の条件と自動評価結果

岩種	全データ数	各データ ピクセルサイズ (5 mm 枠)	教師データ数	テストデータ数	教師データの 正答率 (%)	テストデータの 正答率 (%)
・流紋岩 ・安山岩 ・玄武岩 ・デイサイト	1804	50 × 50	1624	181	98	93

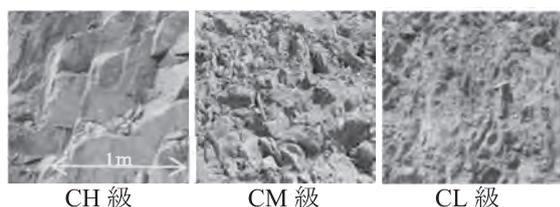
行った結果、98%の正答率が得られた。これにより、自動判定に用いた AI が適正に学習していることが確認された。また、教師データに用いていないマルチスペクトルパターン 181 データの岩石種別の自動判定を行った結果、93%の正答率が得られた。

### (3) 風化区分自動判定の概要

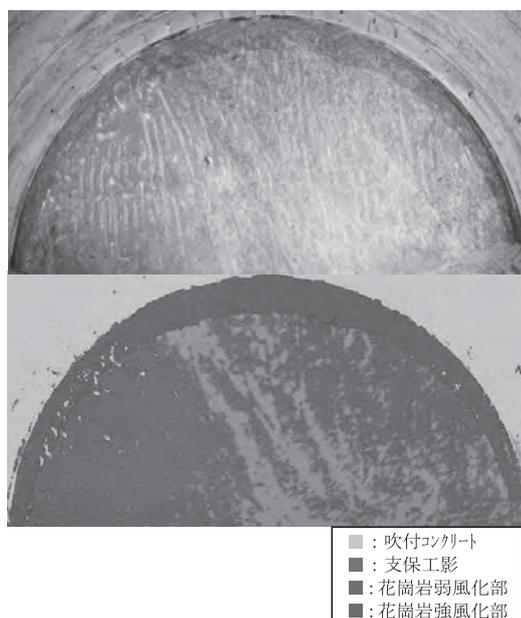
上述した、岩石を室内で撮影し種々の検討を実施した後、トンネル切羽全面に花崗岩が分布する現場において、原位置でマルチスペクトル画像を取得し、面的な広がりを持った岩盤評価への適用性および表—1に示した既往の風化区分自動評価の可否を検討した。

実際の掘削のり面やトンネル切羽における地質観察においては、図—7に示すような、新鮮岩～弱風化

岩～風化岩と漸移的に風化程度が変化する岩盤の外観を表—1の定性的な評価基準により区分している。これに対して、図—8に取得した切羽における画像を処理して風化区分図を自動作成した結果を示す。これをみると、幅 10 m 程度の広範における多次元の色調データを取得できているとともに、従来であれば地質技術者が時間をかけて手書きで作成していた風化区分図を精度よく瞬時に作成できていることがわかる。今後、トンネル切羽や掘削のり面において、このような多種の岩盤におけるデータを継続的に所得していくとともに、それぞれの対象ごとに異なる色情報を AI に学習させることにより評価アルゴリズムを継続的に改善していくことで、高度な地質評価を自動的に実施していく所存である。



図—7 岩盤等級区分評価例



図—8 トンネル切羽における風化区分図自動作成事例

## 4. おわりに

本稿においては、室内で撮影した火成岩のマルチスペクトル画像を用いることにより、高い精度で AI による岩種自動判定ができることを示した。現在、他の岩種についても火成岩と同様の自動判定手法を検討中である。また、同一の岩種が分布するトンネル切羽において、広範における多次元の色調データを取得できているとともに、従来であれば地質技術者が時間をかけて手書きで作成していた風化区分図を精度よく瞬時に作成できることを確認した。

今後は、様々な地質評価、工学的特性評価に本手法を展開し、その適用性を確認していくとともに、トンネル切羽のみならず屋外での切土法面などを遠隔から撮影し、面的な地質状況を判定する手法を開発する所存である。

JICMA

[筆者紹介]  
 宇津木 慎司 (うつき しんじ)  
 安藤ハザマ  
 先端技術開発部  
 担当部長

