

ハイパースペクトルカメラの災害調査への適用

小 野 秀 史

災害時の調査への適用を目的として、ハイパースペクトルイメージングによる火山性土壌の物性情報(特に含水状態)の取得方法について実効性の検証を行った。ハイパースペクトルイメージング手法を用いると、肉眼では識別できない光の波長情報から、非接触かつ迅速に対象物の特性を調べることができる。

ハイパースペクトルカメラによる室内・野外計測実験を行い、その結果、計測対象の組成・含水状態の差異とスペクトル特性との連関性を示す手法や解析画像の有用性を確認した。本手法を用いると、含水状態などの土壌表層の状態変化を非接触にて捉えることができるため、火山災害の緊急調査、とりわけ表層崩壊や土石流発生の予測情報提供に役立てることができる。

キーワード：火山防災, 災害調査, 現地計測, 野外計測, ハイパースペクトル, 火山性土壌, 土壌水分, 含水状態

1. はじめに

火山や火山性地盤が分布する山地の源頭では、地盤表層土壌中への水の含まれ方や水の流れによって、脆弱化や崩壊の発生しやすさに影響が及ぶ。発災のケースとしては、降灰後の多降雨による表面流や浸透流の発生が多いが、土壌中の含水状態変化の観点からは、山体崩壊につながる広義の液状化も含まれる。

特に活火山においては、噴火後の土石流の発生原因の一つとして、降灰による地表面の浸透能低下とそれに伴う表面流・浸透流発生との関連が議論されている^{1)~4)}。浸透能低下の素因として、火山灰の粒径粒度、密度、含水比、組成などの特性が関係すると考えられている。これらの情報は火山灰の堆積層厚とともに、土石流の発生とその流下を演算するための情報として重要であり、噴火直後の調査・観測にてこれらの情報をいち早く掴むことで、発生する土石流の規模や時期の予測に役立てることができる。

しかしながら、噴火直後の調査には困難と危険が伴われる上、迅速な情報収集が求められる。このため、現場での無人観測・間接観測による情報収集を想定し、その手法としてハイパースペクトル・マルチスペクトル計測法に着目して現場調査への実用化の検討を進めている。

2. ハイパースペクトルカメラの原理と構造

(1) ハイパースペクトルイメージング

ハイパースペクトルとは、約 50 ~ 100 バンド以上に分光されたスペクトルのことを指す。4 波長以上の多波長の分光情報をマルチスペクトルと呼んでいることから広義のマルチスペクトルに含まれるが、一般的にはマルチスペクトルは 50 バンド程度まで、ハイパースペクトルは 100 バンド程度の連続したスペクトル情報を含むものとして区別されることが多い(図—1)。

人間の肉眼は3つの錐体細胞により、RGB(赤・緑・青)の3バンドの光を感知し、可視光領域の光(おおむね波長が 400 ~ 800 nm の領域)の多くを RGB の合成として識別している。しかし、自然光はより細かく分けられる多数の帯域(バンド)の光でできており、それらは物質に応じて様々な吸収特性を有する。これら多バンドの光の吸収特性を用いると、肉眼や RGB カメラでは識別できない細かな色の情報の判別や、対象物の特性・材質などの微細な識別が可能となる。

(2) ハイパースペクトルカメラの構造

ハイパースペクトルカメラは、多バンドのスペクトルデータを画像 1 ピクセルごとに取得する構造をもつ(図—2)。つまり、2次元の位置情報に加えて、多バンドごとのスペクトルの情報を同時に取得することができる。これは、高解像度化のような従来の技術更

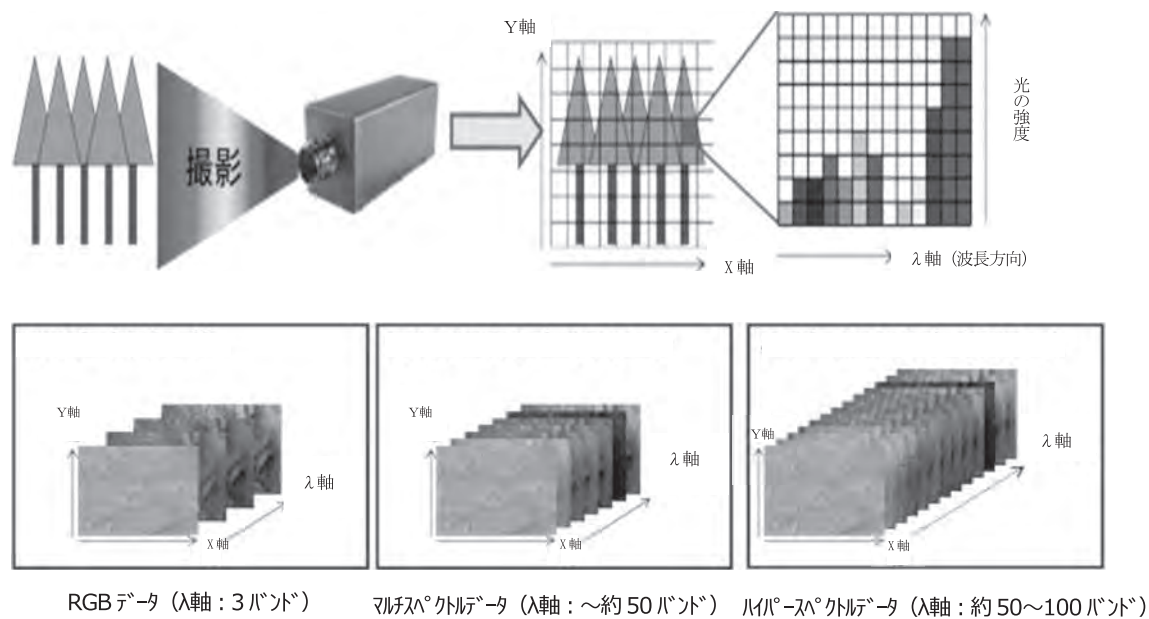


図-1 ハイパースペクトルカメラの原理

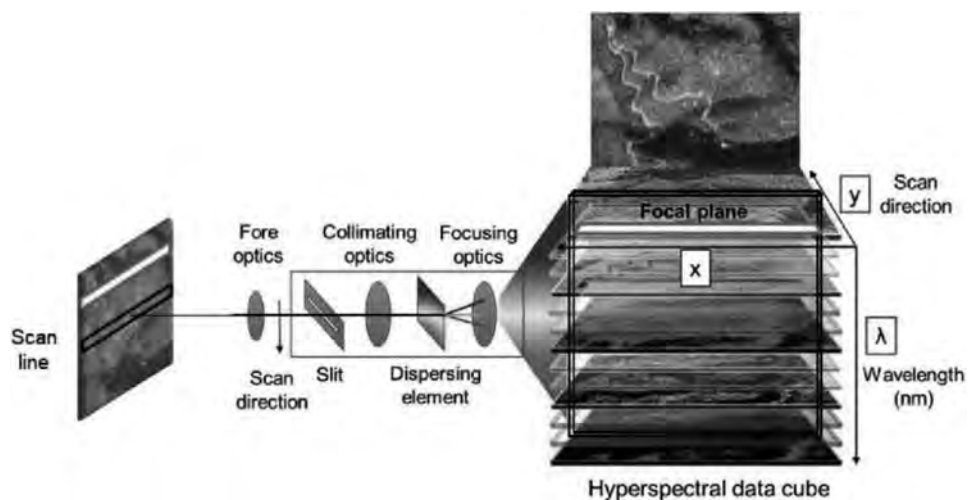


図-2 ハイパースペクトルカメラの構造

新とは異なり、質的变化を伴う技術革新である⁵⁾。肉眼では識別できないこれら多バンドのスペクトル情報を用い、非接触な計測手順・方法により対象物の物理特性や化学組成を調べることのできる装置として、ハイパースペクトルカメラが注目されている。

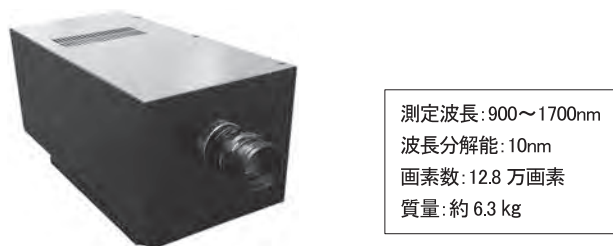
ハイパースペクトルカメラの分光方式には主として以下の2つのタイプが存在する^{5), 6)}。

- ①波長分散型：回折格子やプリズムを用いて分光を行う方式である。高い分光精度が保証されるが、2次元画像を取得するために空間方向のスキャンを要する。多くは外部スキャン機構をもつが、一部にはスキャン機構を内蔵したカメラもある。
- ②フィルタ型：特定の波長の光のみ透過させるバンドパスフィルターを用いている。このタイプはスキャン機構を要さないため1フレームで全波長の高速撮

影が可能である。しかし、その構造から波長毎の波長分解能が一定でなく、波長間分離性能の低下、偏光の影響などにより分光精度の信頼性保証に課題がある。

本研究では、エバ・ジャパン製ハイパースペクトルカメラ SIS-I 型 (図-3) を用いた。これは上記①波長分散型のうちスキャン機構を内蔵したタイプである。このため計測時にカメラ自体を走査させる必要がなく固定設置での撮影が可能であることから、定位置での観測に適している。

また、当該カメラの測定波長は 900 ~ 1700 nm で近赤外域をカバーする。2 (3) に示すとおり土壌中の水をはかることに主眼をおいたため、近赤外領域を捉える目的から機材の選定を行った。波長分解能は



図—3 SIS-I型ハイパースペクトルカメラ（エバ・ジャパン製）の外観

10 nm である。

ハイパースペクトルカメラの分光・検出系の概念図を図—4に示す。対物レンズを通過した入射光をスリットに通して1ライン分の入射光を取り出す。この光を分光ユニット内に設置した透過型分散素子により波長ごとに分光して、ディテクター（検出器）に結像させる。なお、ディテクターのセンサーには900～1700 nmの近赤外域に感度帯域を持つInGaAs（インジウム・ガリウム・ヒ素）センサーが採用されている。

図—4の点線で囲んだ構造部を上下にスキャンすることで、1ラインごとの分光データを取得し、2次元の分光データを作成する仕組みである。計測したデータはUSB2.0ケーブルを介してPCに出力し、バイナリデータとして記録される。

(3) ハイパースペクトルカメラによる近赤外分光

火山の源頭部における土石流発生や斜面崩壊の素因情報が主たるターゲットであるため、火山灰等の火山碎屑物の諸物性の中でも特に含水状態に留意する必要がある。したがって、土壌の含水状態が把握可能な近赤外分光法に着目して、近赤外域を測定可能なハイパースペクトルカメラを撮影機材として採用し、画像解析による対象土層の含水状態の可視化を試みた。なお既往の研究より、土壌水分や岩石の水和度を計測する手法として近赤外分光法が活用されており、OH基の伸縮運動の倍音に相当する吸収スペクトルの水和度評価の有効性が示されている^{6), 7)}など。

近赤外光は通常、波長800～2500 nm（波数12500～4000 cm^{-1} ）の領域の光を指す。近赤外分光法は、

この近赤外域における光の吸収、発光、反射、拡散反射に基づく分光法である。水は対称伸縮振動（ ν_1 ）、変角振動（ ν_2 ）、反対称伸縮振動（ ν_3 ）と呼ばれる3つの基準振動をもつ。水の近赤外吸収スペクトルは、970 nm, 1450 nm, 1940 nm 付近に観測されるが、これはそれぞれ水の3つの基準振動の結合音 $2\nu_1 + \nu_3$, $\nu_1 + \nu_3$, $\nu_2 + \nu_3$ によるものである⁶⁾。これらの帯域の吸収スペクトルを観察することで、対象物の含水状態を把握できる。

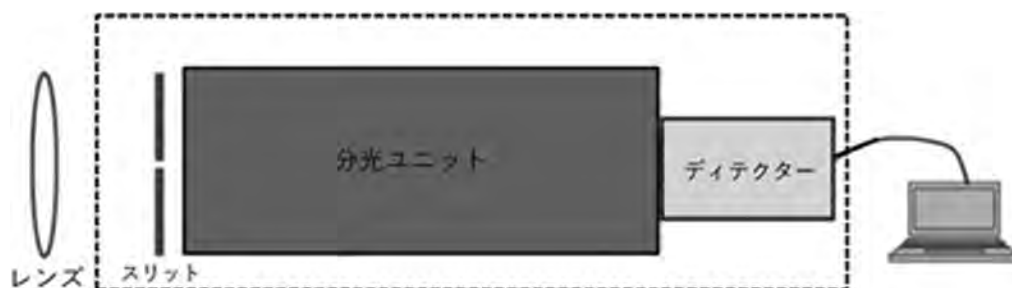
3. 基礎的な技術検討（室内計測実験）

ハイパースペクトルカメラを用いた火山性土壌の含水状態を把握する方法について室内実験・野外実験を行い、基礎的な有効性を確認した。室内実験では、天然の火山灰試料のほか人工調整試料も用いて検証を行い、測定対象物の組成、含水状態の違いとスペクトル特性の連関を確認した。特に、土壌試料の含水比の変化は、水分子基準振動に由来する特定波長の吸収特性を示すスペクトルパターンと連関することから、状態変化の可視化を可能とする。ハイパースペクトルカメラによるタイムラプス撮影やマルチスペクトルビデオカメラの動画撮影により、含水率変化に伴う土壌表層の状態変化を捉えることができる。

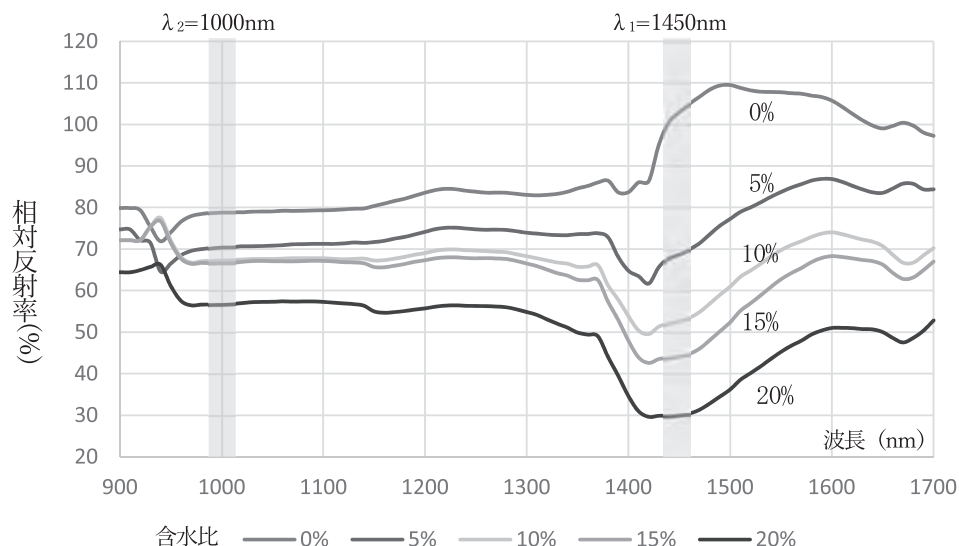
(1) 人工調整試料を用いた室内計測実験

ハイパースペクトルカメラを用いた土壌物性値の把握について、まずは方法の実効性を検証するため、粒度調整した人工試料を用いて室内計測実験を行った。光源には、近赤外波長域の光を照射可能なハロゲンランプを使用し、バックグラウンド補正、暗電流ノイズ除去補正を行っている。

実験結果の事例を図—5に示す。スペクトルデータ（相対反射率）の正規化には、NDSI（※ Normalized Difference Spectral Index）を用いた。これは、選択した2波長（ λ_1 （観測波長）、 λ_2 （基準波長））の吸収と反射の差分で正規化することにより、誤差因子の



図—4 SIS-I型ハイパースペクトルカメラの分光・検出系の概念図



図一5 人工調整試料の計測結果・スペクトルグラフ (例)

影響を軽減して特徴因子を鮮鋭化する方法である。単一波長の反射強度の比較評価だけでは目的とする含水比以外の要素の影響を受け、含水比にもとづく相対強度変化を検出しにくくなる。そこで2波長の反射強度の差分を計算することによりその影響を緩和するものである。

$$\text{NDSI} (\lambda_1 / \lambda_2) = (I_{\lambda_1} - I_{\lambda_2}) / (I_{\lambda_1} + I_{\lambda_2})$$

I_{λ} : λ nm の反射強度

実験結果より 1450 nm 付近に吸収特性が認められ、ハイパースペクトルカメラが試料中の水の存在を捉えている。さらに、試料の含水比が高まるにつれて吸収特性が大きくなる（相対反射強度が低下する）のが明瞭に現れている。図一6には、人工調整試料を、RGBカメラとハイパースペクトルカメラで撮影した画像を比較して掲載した。RGBカメラや肉眼では識別し難い含水比の変化を捉えられることが確認できる。

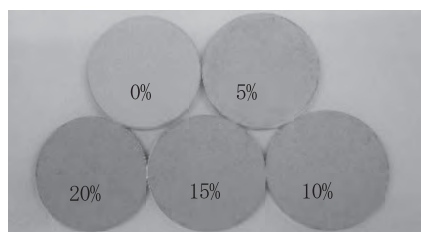
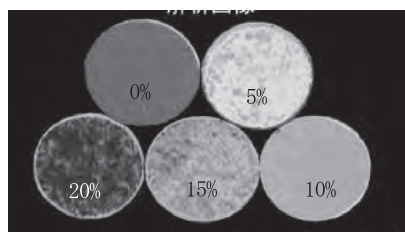
(2) 天然火山灰（火山碎屑物）試料を用いた室内計測実験

天然試料（未知試料）の計測実験では、粒径粒度の

違いによりカテゴリー分類し、各々について含水比の変化に伴う計測結果の変化を調べた。細粒分に富み粒径が比較的揃っている試料（カテゴリー A 試料）は、含水比の上昇とともにハイパースペクトル解析画像のカラーグラデーションが連続的に変化して認識しやすい結果であるのに対して、粗粒な鉱物を多く含む試料（カテゴリー B 試料）では平均カラーグラデーションだけをみると含水比 10% 試料と 15% 試料の識別が難しい（図一7）。しかし、解析画像の微小領域をよく観察すると、含水比 15% 試料の方が 10% 試料に比べて間隙水の領域が広く分布していることがわかる（図一8）。このように、ハイパースペクトルカメラにより、平均的な含水量だけでなくその分布状態についても調べることができる。

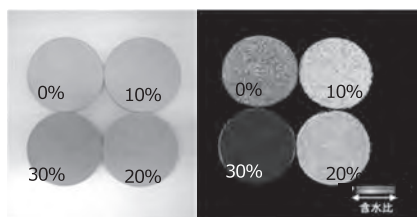
(3) 土壌表層の含水状態の連続変化を観測する実験

降雨による土壌表層の含水状態の連続変化とそれに伴う表層の形状変化を、ハイパースペクトルカメラによって捉えることが可能か検証するため、模型地盤を用いた人工降雨浸透実験を行った。降灰した斜面を模した模型地盤を準備し、これに人工降雨（30 mm/h

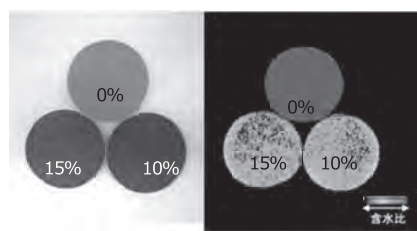
計測試料のRGB画像 (例)
数値は含水比

ハイパースペクトル解析画像 (例)

図一6 人工調整試料のハイパースペクトル解析画像 (例)



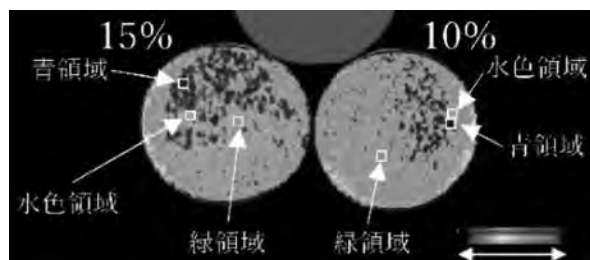
霧島硫黄山 (カテゴリーA試料)



霧島新燃岳 (カテゴリーB試料)

各左：RGB画像，各右：ハイパースペクトル解析画像（%は含水比）

図—7 天然試料の解析画像の比較



数字 (%) は分析試料全体の含水比の平均値を示す。
一方、分析試料中の色領域は微小領域の含水比をあらわす。
含水比が高い順に、青領域 (30%以上)、水色領域 (10～30%)、緑色領域 (10%未満) となる。

図—8 微小領域の比較 (霧島新燃岳：カテゴリーB試料)

程度の強度) を降らせ、模型地盤の上方に設置したハイパースペクトルカメラで経時撮影 (タイムラプス撮影) して連続解析画像を作成した (図—9)。

実験の結果から、解析画像には肉眼では識別しにくい土壌表層部の含水状態の変化とともに、亀裂の発生、表面流の発生の状況が捉えられた。土壌表層が飽和状態に近づき表層土壌の流動が始まるまでの経過を現しており、飽和 - 崩壊に至る過程とその経過時間の関係を調べることができる。土壌表層部の含水状態変化を客観的に把握し斜面崩壊・土石流発生の予測に活用できる可能性が示された。

4. 現地計測に関する検討 (野外計測実験)

室内実験ではハイパースペクトルカメラの基本的な活用方法と可能性について検証し、概ね期待した結果を得た。しかし、野外での撮影では、太陽を光源とする際の課題、大気中水分の影響、機器の対候性・携行上の課題など、災害時・野外の調査を想定した上で検討を必要とする課題が多い。

(1) ハイパースペクトルカメラによる土壌の含水状態の把握

野外の諸条件下で土壌中の含水状態を把握するためには、撮影条件を変えながら有効波長を探索していく

必要がある。基本的な計測手順は以下のとおりである。

(a) 撮影の手順

ハイパースペクトルカメラを三脚に設置し、太陽光を光源とした撮影を実施する。太陽光は天候状況によってその強度を常に変化させるため、対象物を撮影する際に標準反射板 (白板) を同時に (同じ撮影条件下で) 撮影し、太陽光のスペクトルを記録する。標準反射板の撮影データは、画像解析時にキャリブレーション用のデータとして使用する。

(b) 解析の手順

標準反射板の撮影データを用いてキャリブレーションを行ったデータを使用して、画像を解析する。

①第1段階の解析

水分含有量の異なる部位のスペクトルを比較し、水分含有量によって変化する特徴波長を探索する。この解析では、水分によって変化する波長と変化しない波長 (基準波長) の2波長の強度差 (差分) を利用し、水分分布の可視化画像を作成する。

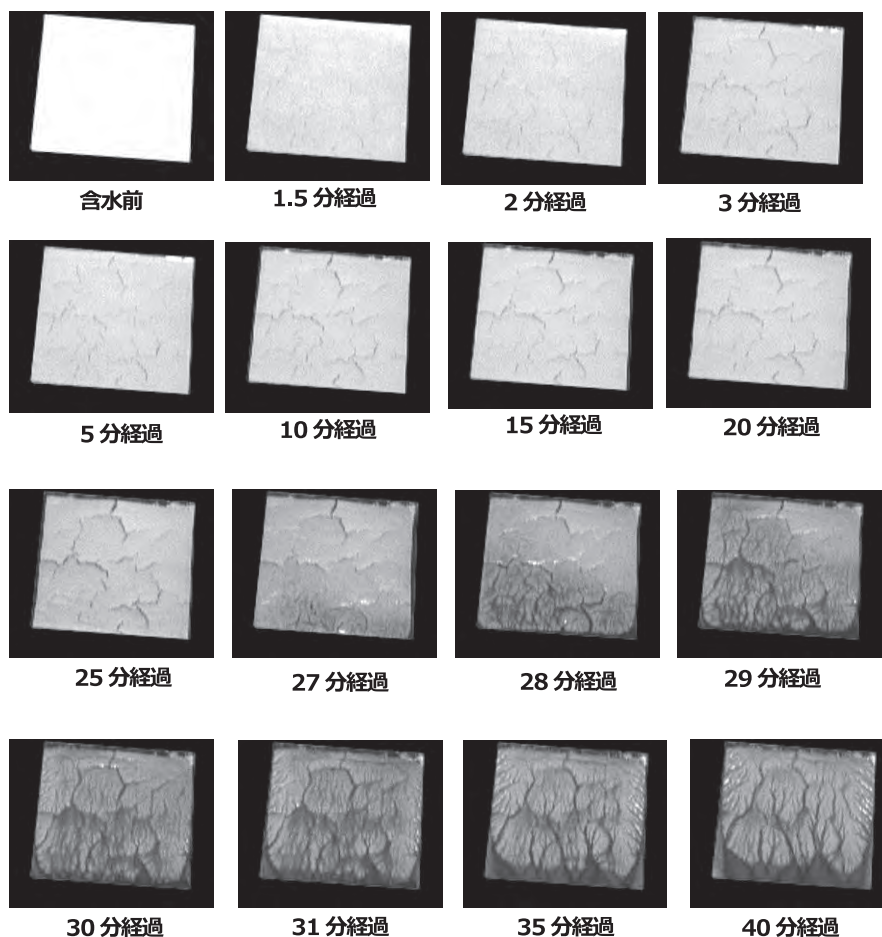
例として、火山灰堆積斜面に人工散水した前後の解析画像の比較写真を示す (図—10)。

図—10 左側写真の矢印先端 (2箇所) に散水を行っている。散水前は周囲の土壌と違いのない様相だが、散水から約20秒後の画像には土壌中の浸透水のハイパースペクトル像が現れている。この像はRGBカメラや肉眼では確認されなかった。

②第2段階の解析

第1段階の解析だけでは、水分が含まれる植生や大気等も検出されてしまう。そのため、土壌水分と直接関係なくかつ植生や大気の特徴的な波長を別途探索して植生・大気の検出画像を準備し、第1段階の解析画像に対してこれを合成処理することで、植生・大気を除去した処理画像が作成できる。

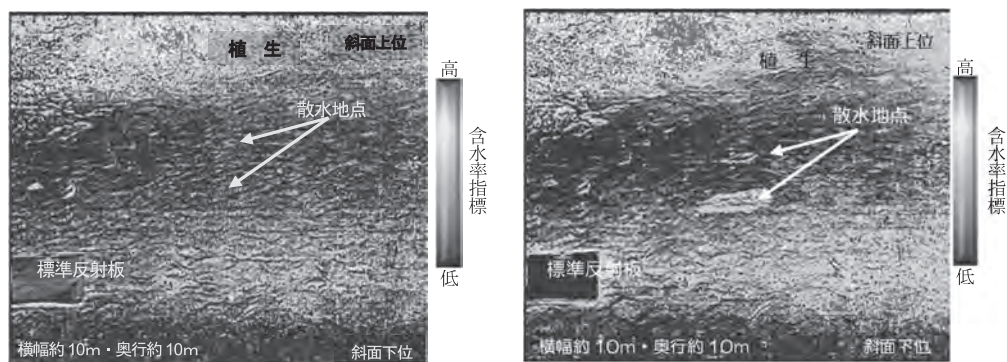
図—11 に第1段階と第2段階の各解析画像の例を示す。この解析で用いた教師データは限られた数しかなく、また解析処理も簡易なAIによるものであるが、より規模の大きい複雑な画像処理では十分な量の教師



模型平面サイズ：20 cm×20 cm

各写真は、模型の上方から撮影したもの
写真の上側は模型の斜面上方に相当する。

図一 9 模型実験（人工降雨浸透実験）・ハイパースペクトルカメラによるタイムラプス撮影結果



左：水散布前の状態

右：水散布から約20秒経過後

右写真の中央部、矢印先端散水地点から下・側方に水が浸透している像が見える。

図一 10 野外計測におけるハイパースペクトルカメラ撮影データ解析画像の例（1）

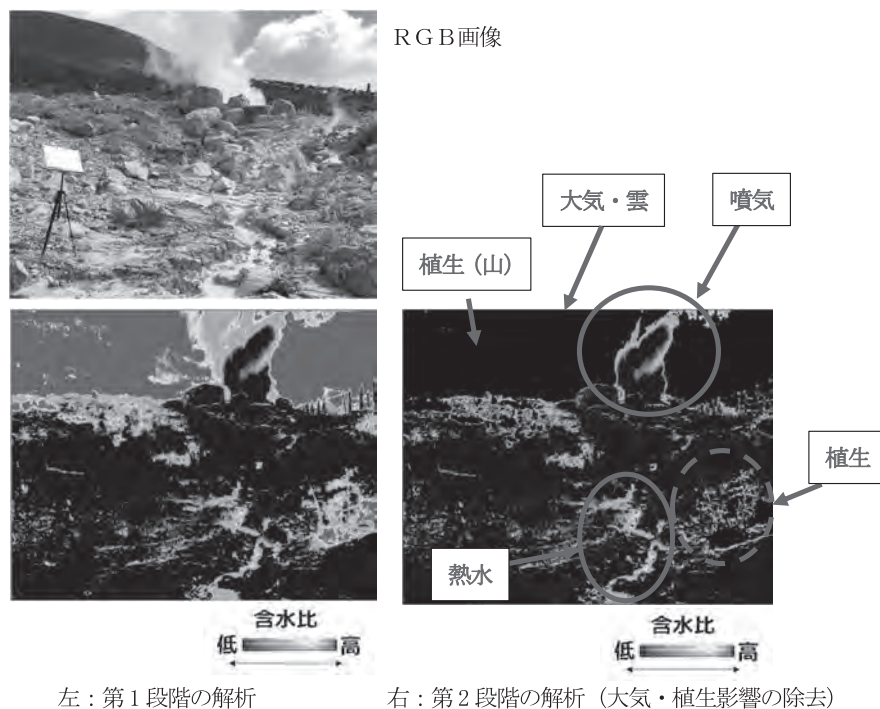
データと高度な AI 処理が求められることになる。

(2) リアルタイム・迅速撮影に向けた試み

ハイパースペクトルカメラは数十～数百波長を同時に取得でき分光性能が非常に高いが、一方で機器自体

のサイズが大型になり、かつ単位データあたりの撮影時間が長くなるため計測の迅速性確保に課題が残る。

そのため、取得波長数を目的帯域のみに制限して撮影時間の高速化をはかり、小型軽量化と計測の迅速性の向上に重点を置いた近赤外ビデオマルチスペクトル



下左図はハイパースペクトルの一次解析画像。目的である熱水・湧泉のほか、水分を有する大気・雲、植生も反応している。熱水・湧泉を識別するため、大気・雲や植生の情報を除いたのが下右図。水分子運動に影響のない他のバンドのスペクトル特性から植生や雲などを識別し、これらに該当するピクセルを除外する。

図—11 野外計測におけるハイパースペクトルカメラ撮影データ解析画像の例（2）



- ・撮像素子及び測定波長域: InGaAs センサー, 近赤外感度域 900nm~1700nm
- ・取得バンド数: 6 バンド
- ・サイズ: 110mm(W)x122mm(H)x145mm(D) ※突起部除く
- ・重量: 1.7kg
- ・電源: AC100V 電源
- ・撮影持続時間: 電源側に依存
- ・データ保存方式: 取得データはPCに転送され、バイナリデータとして保存

図—12 近赤外ビデオマルチスペクトルカメラ（エバ・ジャパン製）

カメラによる計測の検討を進めている。図—12 に近赤外ビデオマルチスペクトルカメラとその撮像例を示す。ハイパースペクトルカメラにより計測目的に合う有効波長を探索し、近赤外ビデオマルチスペクトルカメラによって迅速評価やリアルタイム計測を行うなどの使い分けが考えられる。

（3）現地計測における課題

現地計測では、以下のような検討課題がある。

（a）光源としての太陽光に関する課題

野外の計測では太陽光を光源とするが、太陽光の強度は計測地点、季節・時間帯及び天候によって異なる

ため、安定したデータを取得するためには基準となる太陽光情報を計測の原位置で同時に取得する有効な手段の開発が必要である。

将来的に UAV 等へスペクトルカメラを搭載して計測する場合、キャリブレーション用の日射計の併載や、撮影視野内に常に標準反射板を配置できる工夫などの検討が求められる。

また、太陽光が大気中を通過する際に、大気中に含まれる水分によって特定波長の光の多くが吸収されることから、土壌水分測定のために必要な波長帯が有効に使えない場合がありうる。したがって、その波長帯を代替する有効波長が事前に探索できていることが望ましい。そのためには、高いスペクトル解析技術が必要不可欠となる。なお、本稿で計測・解析例として示した解析画像は、代替波長を探索して解析に使用したものである。

（b）降雨時の課題

撮影装置自体の対候性確保が必要であるほか、太陽光照射量の極端な減少かつ大気中水分による光吸収の影響の圧倒的増大のため、太陽光による計測は困難と予測される。そのため照射光源として人工照明を用いる等が考えられるが、実現可能性については検証を要する。降雨時の計測は、降雨そのものが水の分子運動として捉えられてしまうため、現実的には降雨の瞬間を外した撮影を行うか、水分子運動の影響ないバンド

やバックグラウンドなど他の波長情報を利用する等の工夫が必要である。

5. おわりに

スペクトルイメージングによる解析手法は、従来知り得なかった情報を手にする可能性を秘めた観測方法であると同時に、非接触・迅速な調査手段として災害調査への適用可能性について期待されている。

技術的課題として、スペクトルデータの可視化における解析技術の精度向上や、4章で述べた現地計測における課題が残っている。特に野外撮影では、太陽光の入射角度、雲量による光量の変化などへの対応が必要で、計測から得られるスペクトル吸収特性の要因識別のため、AI技術の解析への導入が今後求められる。

これらの課題を解決できれば、スペクトルカメラのUAVへの搭載、リアルタイム画像解析について技術検討を進め、将来的には航空写真解析画像やレーザー光による微地形解析結果と照合・連関させて、より有効な防災情報の提供に寄与する展開が期待できる。

なお、ハイパースペクトルイメージング技術は、防災分野のみでなく、その他の分野でも活用のための検討が進められており、インフラ施設点検（漏水、腐食、

表面状態観察、材質管理）やトンネル切羽観察などでも活用が期待されている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 高橋保, 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004
- 2) 地頭園隆・永田治・寺本行芳・下川悦郎, 火砕流堆積物および火山灰に覆われた雲仙普賢岳山腹斜面における表面流出, 砂防学会誌, Vol.49, No.5, pp.42-48, 1997
- 3) 野村康裕・小杉賢一朗・水山高久, 三宅島・有珠山・桜島の火山灰の物理特性の比較検討, 砂防学会誌, Vol.55, no.6, pp.3-12, 2003
- 4) 清水収・地頭園隆・下川悦郎・山越隆雄・木佐洋志・瀧口茂隆・杉山光徳, 霧島山新燃岳の2011年1月噴火による降灰とその後の土砂移動, 砂防学会誌, Vol.64, No.3, pp.46-56, 2011
- 5) 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, No.8, pp.68-70, 2019
- 6) 尾崎幸洋, 近赤外分光法, 日本分光学会分光法シリーズ2, 講談社, 2015
- 7) 磯野陽子・木村隆行・中島悟, 近赤外分光法による花崗岩岩質の水和度の評価と岩石強度の相関, 応用地質, Vol.55, no.2, pp.86-92, 2014

【筆者紹介】

小野 秀史（おの ひでふみ）

（株）エイト日本技術開発 災害リスク研究センター
プロジェクトマネージャー

