ハイパースペクトルカメラによる
非接触且つ面的なコンクリートの性状分析の検討

Investigation of Non-contact and Areal Analysis for Concrete Properties
by Hyperspectral Camera

鈴　木　亮　汰※1
Ryota Suzuki

折　田　現　太※2
Genta Orita

桃　木　昌　平※2
Shouhei Momoki

松　田　浩　朗※1
Hiroaki Matsuda

【要旨】
見た目には違いの表れない素材の成分識別に活用される分光法に着目し，数百に及ぶバンド数で分光情報を面的に取得できるハイパースペクトルカメラを用いて，コンクリートの性状分析について検討を行った．水セメント比の変化や表面含浸材の塗布，凝結の進行，促進中性化によって引き起こされる反射スペクトルの変化を調査した結果，水セメント比の推定や表面含浸材の塗布の判定，凝結状態の推定，中性化領域の判定といった判断が分光法を応用した解析によって明らかになる可能性が示された．

【キーワード】　分光法　ハイパースペクトルカメラ　コンクリート　モルタル　セメントペースト

１．はじめに

透過・反射する光の強さを波長ごとに取得する分析手法である分光法は，見た目には違いが表れない異なる性状の物質を非接触・非破壊且つ迅速に識別できるという特徴から，食品製造における検査の場など幅広い分野で活用されている．また，分光法を適用する際に使用される機器の一つとしてハイパースペクトルカメラがあり，数百バンドにも及ぶ分解能でもって面的且つ定量的な分析を行うことが可能である．

本研究では，建設分野への分光法の適用性を検討するため，ハイパースペクトルカメラを用いてコンクリートやモルタル，セメントペーストを対象に性状変化による反射スペクトルの変化を調査した．実験にあたっては従来の品質・性能の検査を実施し，その結果との対比によって分光法の適用性を評価した．

２．実験方法

2.1 ハイパースペクトルカメラ

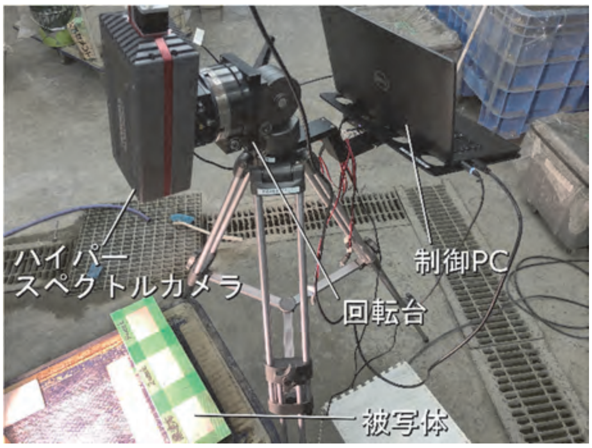
実験に使用したRESONON社ハイパースペクトルカメラの主な仕様を**表－１**に示す．本研究では，可視光域と近赤外域を分光領域の対象とする2種類のカメラを用いて分析を行った．いずれのカメラも，カメラ本体か被写体のどちらかを直線状に移動しながらスペクトル分布を面的に取得する，ラインスキャン形式のハイパースペクトルカメラである．

表－１ 使用したハイパースペクトルカメラ

モデル名	波長範囲 (nm)	波長分解能 (nm)	測定速度 (fps)
Pika XC2	400 ～ 1000 (可視光域)	2.3	165
Pika NIR-320	900 ～ 1700 (近赤外域)	9.7	520

2.2 機材の使用環境

ハイパースペクトルカメラによる計測状況を**写真－１**に示す．カメラ本体は専用の三脚に固定され，三脚上部の回転機構がPCによる制御で徐々に回転する．計測終了後にデータを合成することで，各スペクトルの面的な分布が形成される．



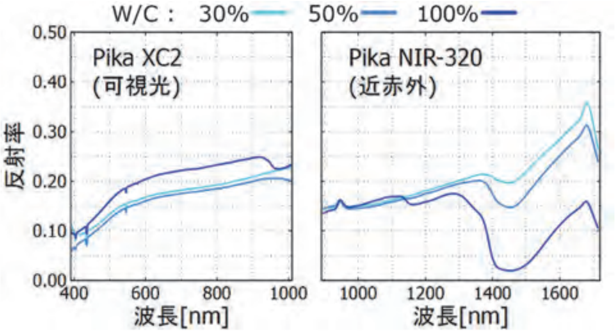
写真－１ 計測状況

1.技術研究所 研究開発Ｇ 第一研究室　2. 技術研究所 研究開発Ｇ 第三研究室

安定した計測環境を作るために，蛍光灯下の室内において，ハロゲンランプによる光を試料に照射した．ハロゲンランプは可視光域から近赤外域までの幅広い波長の光を発するため，この光源設置によって 2 種のハイパースペクトルカメラを使用するのに適した環境を作ることができると考えた．

3．水セメント比の差異評価

普通ポルトランドセメントを用いた，水セメント比の異なる 3 種（W/C = 30%, 50%, 100%）のセメントペーストを作製し，練り上がり直後の反射光で評価した．スペクトルカメラの機種別の反射スペクトル分布を**図－１**に示す．可視光域では水セメント比の違いによるスペクトル分布の顕著な差異は見られなかったが，近赤外域では波長 1,300nm を境に，それ以上の波長では水セメント比の値が高いほど反射率が小さい傾向が確認できた．近赤外域での反射率低減は，水単体の反射スペクトルを調べた過去の研究結果 [1]でも示されていることから，水セメント比の値による計測結果の変化は試料中の水分量の違いを表していると考えられる．この結果から近赤外域の分光法によってフレッシュコンクリートの水セメント比を推定できる可能性が示された．



図－１　W/C 別のスペクトル分布

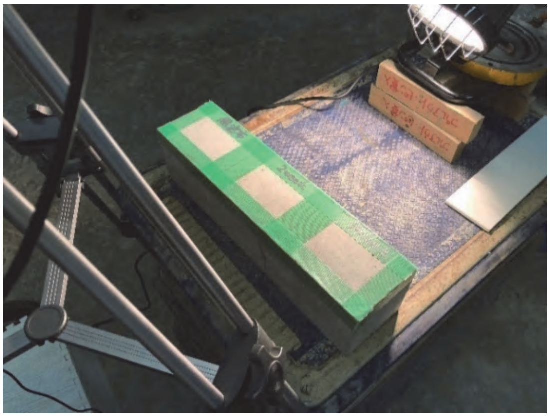
4．表面含浸材の効果検証

コンクリート表面部の緻密化が期待できる，けい酸塩系表面含浸材を供試体表面に塗布し，時間経過に伴うスペクトル特性を分析した．計測状況を**写真－２**に示す．評価対象は，塗布後2週間，4週間および比較として設定した無塗布の3水準である．

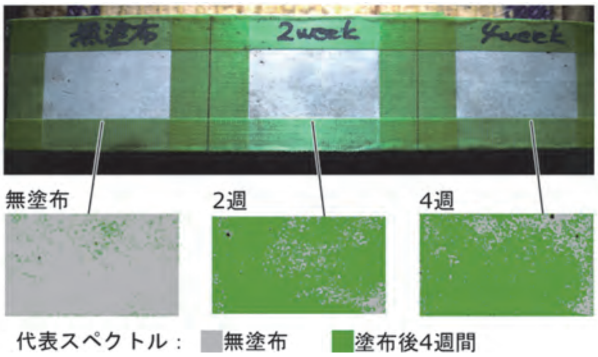
近赤外域のハイパースペクトルカメラを用いて供試体表面を計測し，無塗布・塗布後4週間の試料から中心部の微小領域を代表スペクトルと設定した後，Spectral Angle Mapper [2]（以下SAMと表記）を用いて類似する領域を色別した結果を**図－２**に示す．なお，SAMの出力で黒く示される範囲はどちらのスペクトルにも類似してない領域を表している．

SAMの出力において，塗布後4週間から採取した代表スペクトルと類似する反射スペクトルは，無塗布域にはほとんど分布しないことがわかる．しかし，塗布した時期の違いによって分布が変化することはなく，塗布したかどうかの違いを表していると判断できる．

なお，可視光域の計測結果にSAMを適用した場合では，塗布の有無による反射の違いは確認されなかった．

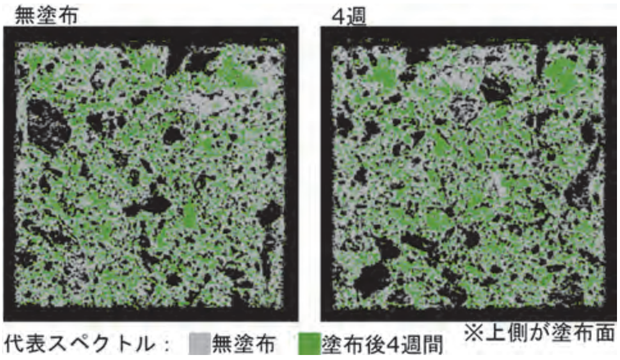


写真－２　使用した供試体の計測状況



図－２　供試体表面の SAM

さらに，供試体を割裂で切断し，断面の計測を行って同じく SAM を適用した結果を**図－３**に示す．画像の上側が表面含浸材塗布面であるが，いずれの試料も無塗布と塗布後 4 週間の色別が同様に混在しており，違いが認められなかった．



図－３　供試体断面の SAM

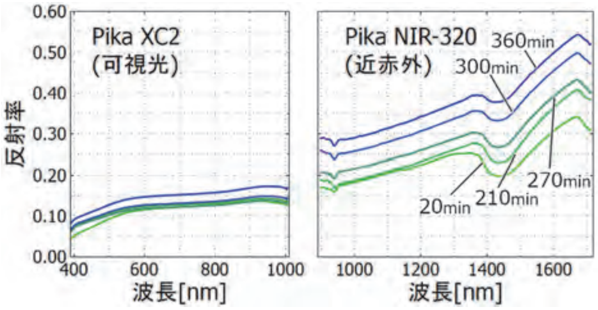
以上の結果から，ハイパースペクトルカメラはけい酸塩系表面含浸材塗布の有無を捉える可能性があるが，緻密化の効果を捉えることはできていないと判断される．

５．凝結過程の評価

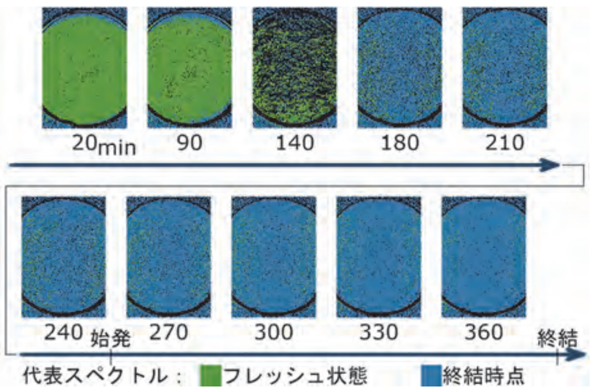
凝結過程の評価では，モルタルの凝結時間試験により凝結状態を評価し，打込みから凝結の終結時間までモルタル供試体上面のスペクトル分布を測定した．

経過時間ごとの計測結果から採取した代表スペクトルのスペクトル分布を図－４に示す．近赤外域でより顕著に変化しており，凝結の進行に従って反射率が上昇していることがわかる．

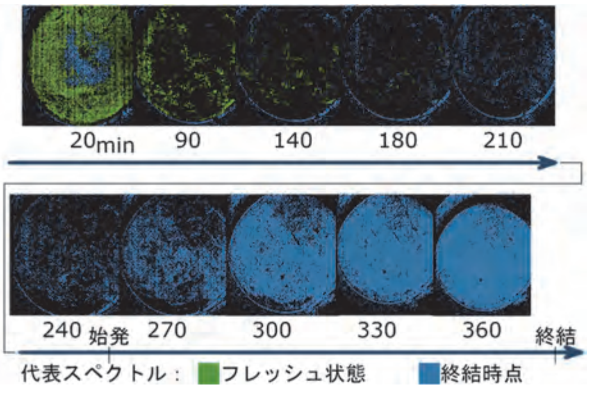
また，フレッシュ状態と凝結の終結時点の代表スペクトルに類似する箇所の分布をSAMから出力した結果を図－５（可視光域）と図－６（近赤外域）に示す．どちらの解析結果でも凝結の過程でのスペクトル分布の変化を捉えることができているが，可視光域の出力では，凝結の始発以降の変化を確認できていない．一方で近赤外域の出力では，経過時間が90分から270分の範囲でフレッシュ状態と終結時点のどちらのスペクトルとも類似しない，黒い色別の割合が高くなっている．



図－４ 経過時間ごとのスペクトル分布



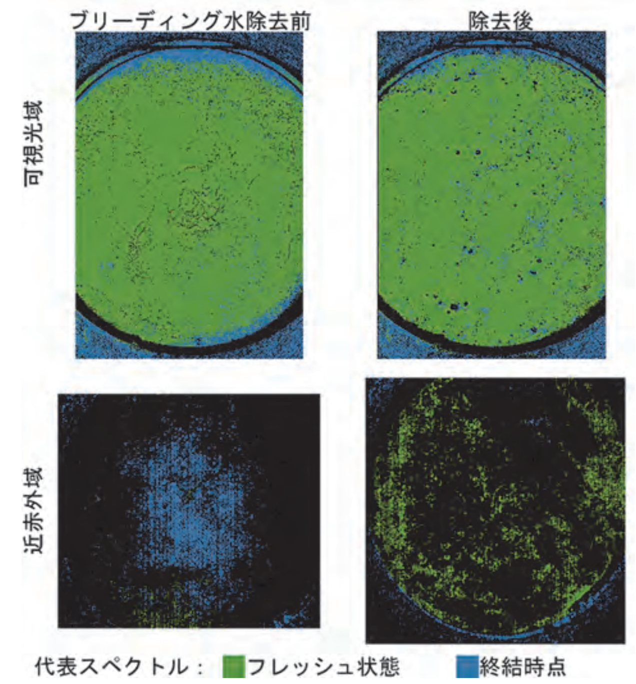
図－５ 経過時間ごとのSAM（可視光域）



図－６ 経過時間ごとのSAM（近赤外域）

なお，打込みから90分が経過した以降の測定では，上面に生じたブリーディング水を除去している．そこで，ブリーディング水の有無によるSAMの変化を図－７に示す．近赤外域の出力がブリーディング水除去によって大きく変化することが確認された．この傾向は，水セメント比の違いを評価できたように，水分量が近赤外域の反射スペクトルに影響したものと推測される．

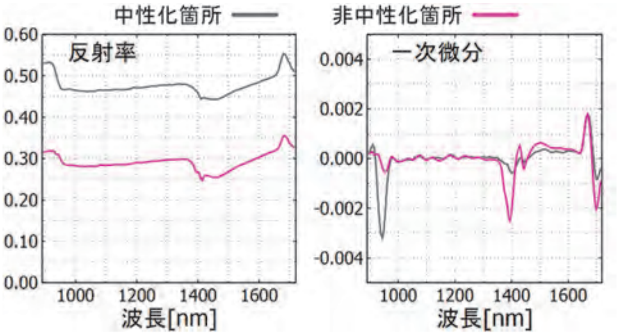
以上の結果より，セメントの水和反応を捉えることができているかなどの根拠は得られていないが，コンクリートの凝結を判定するためには，ブリーディング水除去の必要性はあるものの，近赤外域の分光法によって凝結状態を評価ができる可能性が示された．



図－７ ブリーディング水除去によるSAMの変化

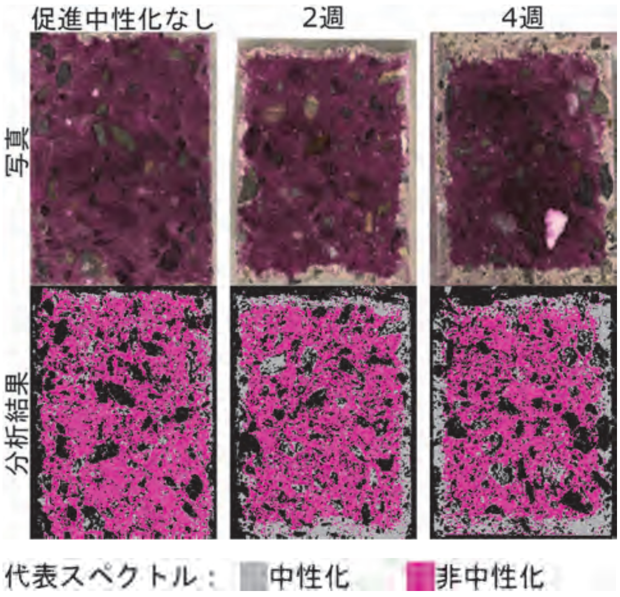
６．中性化の評価

100×100×400 mmのコンクリート試験体を割裂で三分割し，うち2つの試験体をCO_2濃度5%の促進中性化槽に静置し，3水準の試験体（促進中性化なし，中性化期間2週，4週）を作製した後，それぞれの断面の計測を行った．フェノールフタレイン液を噴霧した結果を参考に，中性化している箇所としていない箇所からそれぞれ代表スペクトルを採取し，中性化の有無による代表スペクトルの違いを調べた結果を図－８に示す．反射スペクトルへの中性化の影響は近赤外域で観測され，中性化域では全体的に反射率が上昇している他，波長で一次微分する処理を施した結果では900nmと1,400nm付近において顕著な違いが見られた．これらの傾向は，セメントペースト供試体に対して近赤外分光法を用いた過去の研究例[3)]でも観測されており，水酸化カルシウムと中性化によって生じた炭酸カルシウムの反射スペクトルを評価していると考えられる．



図－８ スペクトル分布

また，**図－９**は試験体にフェノールフタレイン液を噴霧した写真（上段）と，SAMを適用して出力したもの（下段）を比較した結果である．中性化の程度によらず，塩基性を示す箇所の着色域が一致しており，近赤外域のハイパースペクトルカメラを用いることによってもコンクリート断面の中性化域を識別できることが確認された．



図－９ フェノールフタレイン液を噴霧した試験体（上段）と代表スペクトルから出力したSAM（下段）

７．まとめ

コンクリート，モルタル，セメントペーストを対象に，ハイパースペクトルカメラによる計測を行い，性状ごとの比較を行った．結果からは以下のことが考察できる．

- 近赤外線域の分光法により，フレッシュコンクリートの水分量の違いや中性化の有無が識別できる可能性がある．
- 近赤外域の分光法は計測対象表面の水の状態に結果が大きく左右される．
- 視覚的な変化の少ない改質剤を塗布する場合に，塗布し忘れを防止するような観点では近赤外分光法が有効活用できる可能性がある．
- 可視光域，近赤外域の分光法ともにモルタルの凝結によるスペクトルの違いを評価できる可能性があり，近赤外域の方がより詳細にスペクトルの変化を観測することができる．
- コンクリート中の水酸化カルシウム，炭酸カルシウム程度の差異による中性化の進行は，分光法によって評価できる可能性がある．

謝辞：本研究はケイエルブイ（株）が展開するハイパースペクトルカメラのデモ測定を介して得られた成果である．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1） A. Watanabe et al.: Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near-infrared spectroscopy, Construction and Building Materials 196, pp.95-104, 2019.

2） Yuhas, R. H., Goetz, A. F. H. and Boardman, J. W.: Discrimination among semiarid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm, Summaries of 3rd Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 92-14, Vol.1, pp.147-149, 1992.

3） 石川 幸宏，金田 尚志，魚本 健人，矢島 哲司：近赤外分光法を用いたコンクリートの劣化因子の検出，土木学会年次学術講演会講演概要集, 2004.

Summary We focused on spectroscopy, which is used to identify the components of materials that do not appear to differ visually, and investigated the analysis of concrete properties using a hyperspectral camera that can acquire spectral information in hundreds of bands over an area. As a result of investigating changes in reflectance spectra caused by changes in water-cement ratio, application of surface-impregnating materials, progress of setting, and accelerated neutralization, the possibility that spectroscopic analysis can be used to estimate water-cement ratios, indicate areas where surface impregnation materials are applied, estimate penetration resistance in setting time tests, and indicate neutralization areas was shown.

Key Words : *Spectroscopy, Hyperspectral Camera, Concrete, Mortar, Cement Paste*