

ハイパースペクトルリモートセンシングによる コンクリート劣化評価手法の検討

Application of Hyper Spectrum Remote Sensing for Assessment of Deteriorated Concrete

有田 淳*・遠藤 貴宏*・奥山 康二*・越智 士郎*・安岡 善文*

Jun ARITA, Takahiro ENDO, Koji OKUYAMA, Shiro OCHI and Yoshifumi YASUOKA

1. はじめに

山陽新幹線の高架橋やトンネルにおける相次ぐコンクリートの剥落事故が起こったのを機に、コンクリートの劣化評価およびその維持管理への要望が高まっている¹⁾。筆者らは、劣化コンクリートの非破壊・非接触検査手法として、ハイパースペクトルリモートセンシングに着目し、その可能性を検討している。

一般に、2～20チャンネルの観測波長帯数をもつセンサをマルチスペクトルセンサ、20チャンネル以上の波長帯数を持つものをハイパースペクトルセンサと呼んでいる。近年、波長分解能の高いセンサ（ハイパースペクトルセンサ）が開発され、可視・近赤外・短波長赤外域（400～2500 nm）の波長域で波長分解能 10 nm（波長帯の数は 200～300チャンネル）程度で対象のスペクトル特性を連続的に観測できるようになった。これにより、これまで判別できなかった対象物の構成成分のスペクトル特性を計測できるようになった。しかし、現在のところ、岩石や鉱物、あるいは一部の農産物や植物については、スペクトル特性と構成化学物質との関係が明らかになっているが^{2,3,4)}、コンクリートの劣化に伴うスペクトル特性の変化を分析した研究はまったくされていないのが現状である。

本研究では、中性化劣化（コンクリート表面の水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応による劣化）したコンクリートを対象に、そのスペクトル特性を分析し、さらに、劣化の進行度合いを推定する手法を提案する。

2. 実験装置

本研究では、ハイパースペクトルセンサとして、GER 2600(GER社製)を使用した。計測波長範囲は、紫外域の一部(350～400 nm)、可視域(400～700 nm)、近赤

外域(700～1300 nm)、短波長赤外域の一部(1300～2500 nm)で、合計585チャンネルで構成される。

対象物のスペクトル特性の計測は暗室において行った。光源には、室内実験で一般的に用いられるタングステンランプを使用し、光量が一定になるように調整した。光源からの光が対象物に45度の角度で入射するように、また、対象物表面からセンサに接続された光ファイバケーブルまでの距離は常に4 cmとなるように、対象物と光源の下に昇降台を設置し、自由に高さを調節できるようにした。

3. 測定結果と考察

3.1 非劣化コンクリートのスペクトル特性

コンクリート表面は見た目にはほぼ一様に見えるが、内部の骨材の位置が異なるため、コンクリート表面の場所によって、スペクトル特性に違いが出る可能性がある。そこで、水セメント比が55%の標準的な配合のコンクリートを対象とし、表面を9ヶ所に分けて、それぞれの場所におけるスペクトル特性をハイパースペクトルメーターを用いて計測した。

図1は9ヶ所で測定した分光反射率である。場所ごとに反射率(明るさ)は異なるものの、その形状は類似してお

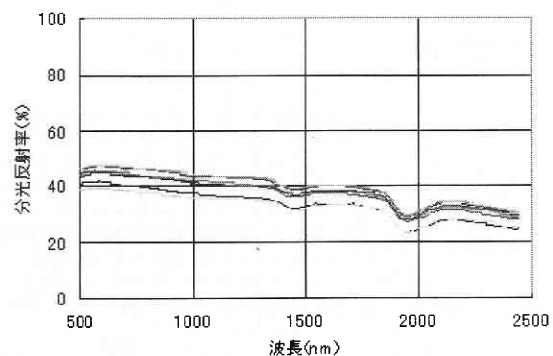


図1 コンクリート表面の場所の違いによるスペクトル特性

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

研 究 速 報

り、一次微分をとることで、オフセットを除くことにした。図2は、9ヵ所計測したコンクリート表面のスペクトル特性の一次微分である。どの波長域においても傾きが一致していることがわかり、図1の分光反射率のグラフに見られる1400 nm 付近と1900 nm 付近の吸収ピークの位置もほぼ一致していることがわかる。この結果から、コンクリート表面の分光反射率は、場所によってばらつくが、対象物の持つ固有のスペクトル特性（形状）は一致することがわかった。分光反射率の値が上下にばらつく原因としては、表面の色、明るさなどが考えられる。このばらつきは、一次微分することで解消できることが判明した。

3.2 劣化コンクリートのスペクトル特性

中性化、塩害、化学的腐食（硫酸劣化）によって劣化し

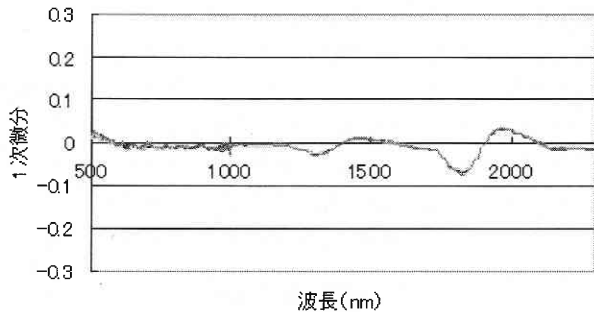


図2 コンクリート表面の場所の違いによる一次微分スペクトル

たコンクリートは、表面で化学変化を起こしており、正常なコンクリートと比べてスペクトル特性に変化が現れるものと予想される。模擬的な劣化コンクリートを準備し、そのスペクトル特性から、「劣化度」を推定するモデルの説明変数となる特徴波長を導いた。本稿では、中性化劣化のみの実験結果を示す。

サンプルとして、水セメント比40%のセメントペースト(A)、水セメント比55%のセメントペースト(B)の2種類を用意し、それぞれを二酸化炭素濃度10%に保った中性化槽に放置し、人工的に劣化を施した。サンプルは1週間隔で中性化槽から取り出し、ハイパースペクトルメーターを用いて表面分光特性の計測を行った。

図3に中性化槽で4週間人工劣化させたセメントペーストA、Bの分光反射率の1週間毎の計測結果を示す。どちらも、分光反射率がわずかながら変化している。水セメント比の小さいAの方が、変化の割合が大きいこともわかる。しかし、分光反射率だけでは、週によって上下動があるために、どの波長域にスペクトルの変化が生じているかを正確に分析することはできなかった。そこで、図4に示すように、一次微分スペクトルを用いて、各波長における一次微分の値と劣化日数との相関分析を行った。

図4より、劣化日数と高い相関が現れたのは、Aにおいては、450 nm ~ 700 nm, 1470 nm ~ 1570 nm, 1920 nm 付近、2250 nm 付近で、Bでは、450 nm ~ 700 nm, 1380 nm

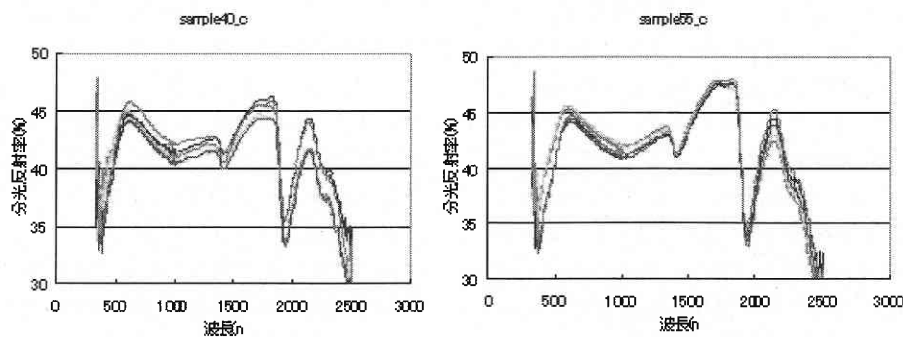


図3 中性化セメントペースト (A : 左, B : 右) の分光反射率

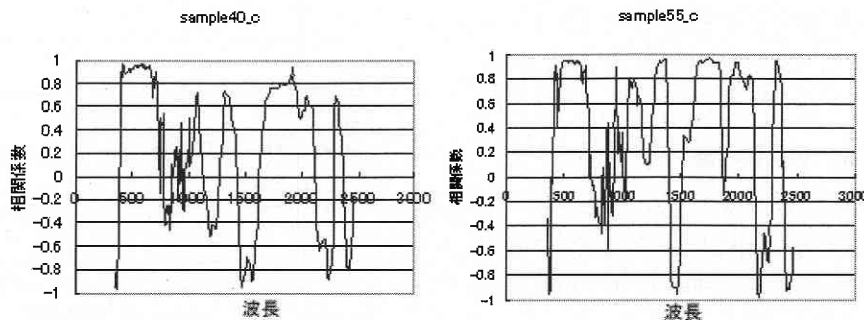


図4 各波長における一次微分値と劣化日数との相関

付近, 1470 nm 付近, 1650 nm ~ 1830 nm, 1930 nm 付近, 2200 nm 付近, 2330 nm 付近であった。相関係数の値に違いがあるものの相関が高く出る波長域は, 水セメント比によらず, ほぼ一定であることがわかった。このことより, 物理的意味を以下のように考察した:

- ・ 450 nm 付近: 可視域であることから, 劣化に伴って生成される炭酸カルシウムにより, コンクリート表面が白っぽくなっていくことに起因すると考えられる。
- ・ 1470 nm 付近: この波長域は, コンクリートの吸収ピークの極小点付近であり, 劣化に伴って生成される炭酸カルシウムのスペクトル特性により, この吸収ピークが小さくなることに起因すると考えられる。
- ・ 1900 nm 付近: この波長域もコンクリートの吸収ピークの極小点付近であり, 劣化に伴って生成される炭酸カルシウムのスペクトル特性により, この吸収ピークが小さくなることに起因すると考えられる。
- ・ 2200 nm 付近: 劣化に伴って生成される炭酸カルシウムのスペクトル特性により, 2300 nm 付近に新たな吸収ピークが生じることに起因すると考えられる。2300 nm 付近は C-O 共有結合の吸収ピークでもある。

これらの特徴波長域は, 各劣化において異なっているため, あるコンクリートの特徴波長域におけるスペクトル特性を正常なコンクリートのそれと比較することで, そのコンクリートがどのような劣化を受けているのかを容易に判断できると考えられる。また, 複数の劣化が同時に起こっている際にも, 各劣化における独立した特徴波長域におけるスペクトル特性から, 劣化種類を判断することは可能であると考えられる。

4. 劣化度診断モデルの構築

前章の結果を踏まえ, 中性化の深さを指標とする劣化度を推定するため, 以下の実験を実施した。

10 cm × 10 cm × 12 cm の大きさのサンプルを, 二酸化炭素濃度 10%, 湿度 55% に保った中性化曹に入れ, 人工的に劣化を施す。このサンプルの表面スペクトル特性を 1 週間おきにハイパースペクトルメーターを用いて計測する。表面スペクトル特性の計測が終わったサンプルは, 圧縮試験機で割裂し, 中性化深さの計測を行った。中性化深さの計測は, フェノールフタレインを割裂面に噴霧し, 赤色に着色しない部分, すなわち, 中性化された部分の表面からの距離を計測した。

図 5 に各週における中性化深さの結果を示す。中性化深さは, 4 週目あたりまでは劣化の進行が速く, 9 週目を過ぎるとしだいに収束してくる。

図 6 にハイパースペクトルメーターを用いて計測したコ

ンクリート表面の分光反射率 12 週分の結果を示す。

分光反射率は, どの波長においても 20% 近くばらついており, 1 週目から 12 週目までの傾向はこの図からはつかめない。図 7 に図 6 に示したスペクトル特性の各波長における傾きを表す一次微分スペクトルを示す。

図 7 の一次微分スペクトルは, 各波長における傾きを示している。一次微分スペクトルの値が負から正に変わる波長が, 吸収ピークの極小値を与える波長である。コンクリートには, 1450 nm 付近と 1950 nm 付近に顕著な吸収ピークが存在するが, その吸収ピークにおける傾きが, 劣化が進行するにつれて緩やかになることがわかる。さらに, 各波長において, 中性化深さと一次微分スペクトル値の相関

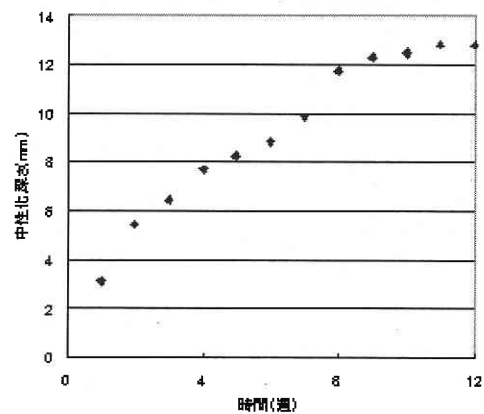


図 5 劣化時間と中性化深さの関係

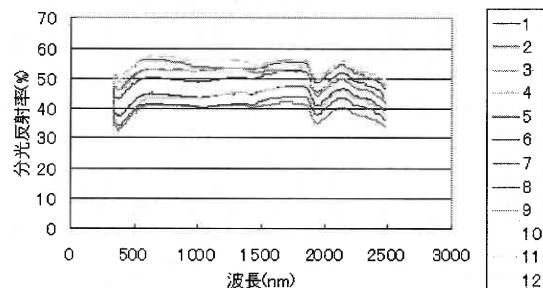


図 6 中性化コンクリートのスペクトル特性 (12 週分)

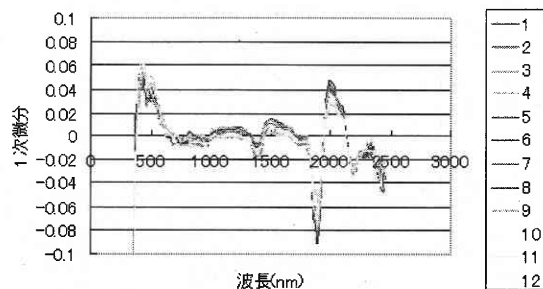


図 7 中性化コンクリートの一次微分スペクトル (12 週分)

研 究 速 報

を調べた。

図 8 より, 440 nm 付近, 1393 nm 付近, 1500 nm 付近, 1930 nm 付近, 2127 nm 付近, 2341 nm 付近で相関性が強くなっている. この結果は, 前章で示した中性化セメントペーストの結果とよく一致している.

この分析結果より, 中性化コンクリートの特徴波長域は, 440 nm 付近, 1393 nm 付近, 1500 nm 付近, 1930 nm 付近, 2127 nm 付近, 2340 nm 付近の 6 波長領域であると判断できる. ハイパースペクトルメーターのバンド幅が約 12 nm であるから, 各特長波長域から, 5 バンドずつ選定し, 計 30 バンドの特徴波長における一次微分値を説明変数として抽出した.

これらの説明変数を用いて, 式 (5.1) に示す式により, 線形回帰分析を行った^{5,6)}.

$$H_t = aX'_{\lambda_1} + bX'_{\lambda_2} + cX'_{\lambda_3} + d \dots \dots \dots \text{式 (5.1)}$$

- H_t : 中性化深さ
- a, b, c, d : パラメーター
- λ_i : 特徴波長
- X'_{λ_i} : 特徴波長における一次微分値

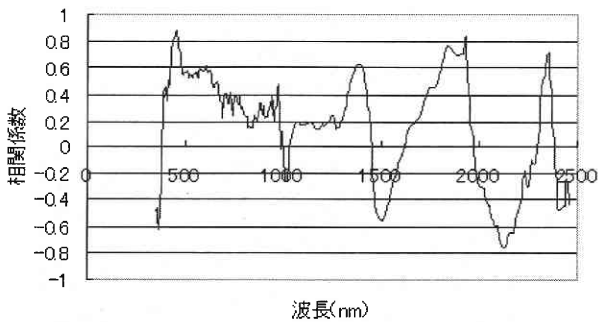


図 8 中性化深さと一次微分スペクトル値の相関

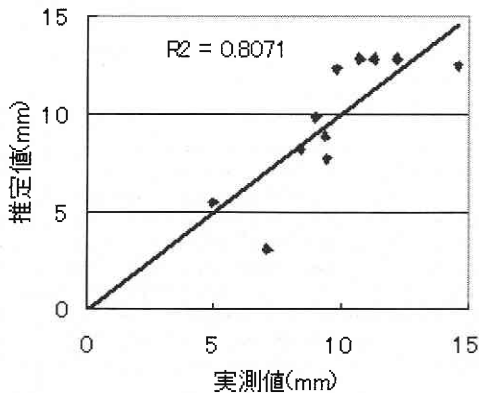


図 9 実測値と推定値の比較

パラメーター推定の結果, 440 nm, 1500 nm, 2341 nm における一次微分値が説明変数として, 有意であると判定された⁷⁾. 各変数どうしの相関をしらべたところ, いずれも相関係数が 0.5 以下であったので, 独立変数であるといえる. このモデル式を用いて, 中性化深さの実測値と推定値を比較した⁸⁾ 結果を図 9 に示す. 相関係数は 0.898, 決定係数は 0.807 であり, よい精度で推定できているといえる.

5. 結 論

本研究の成果を以下に示す.

- 1) コンクリート表面のスペクトル特性は, 計測する場所によってばらつきがあるが, 一次微分などの処理をすることによってスペクトルが一致することから, 配合が同じであれば上下に平行移動しているだけであることがわかった.
- 2) 中性化コンクリートは 450 nm 付近, 1470 nm 付近, 1900 nm 付近, 2200 nm 付近に特徴的な波長域があり, その波長域における分光反射率の一次微分値を比較することで, 他の劣化と種類を判別できることがわかった.
- 3) 中性化劣化において, 特徴波長域における一次微分値を入力変数として, 中性化深さを出力変数とする再現性の高いモデルを構築することができた. 同様のモデルは塩害劣化コンクリートにも適用できた.

謝 辞

本研究は, (社)セメント協会公募研究の一環として実施した. また, 本研究の実施においては, 本研究所魚本健人教授から貴重な助言を頂た. ここに関係各位に記して感謝の意を表する.

(2001 年 10 月 11 日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林一輔, 「コンクリートが危ない」, 岩波新書, 1999.
- 2) 岩元陸夫他, 「近赤外線分光入門」, 幸出版, 1998.
- 3) 遠藤貴宏, 「ハイパースペクトルリモートセンシングによる陸域生態系パラメータの計測に関する研究」, 東京大学修士論文, 2000.
- 4) 金属鉱業事業団, 「平成 11 年度資源衛星データ解析技術開発調査報告書」, pp. 8-87, 1999.
- 5) 石村貞夫, 「すぐわかる統計処理」, 東京図書, pp. 76-97, 1994.
- 6) 杉原敏夫, 藤田涉著, 「多変量解析」, 牧野書店, pp. 1-39, 1998.
- 7) 長谷川勝也, 「確率・統計のしくみがわかる本」, 技術評論社, pp. 341-343, 1994.
- 8) 松原望, 「統計学入門」, 東京大学出版会, pp. 47-57, 1991.