

画像のスペクトル分析によるレール劣化検出法

坪川 洋友* 水谷 淳** 石川 智行***

Rail Deterioration Detection Method by Image Spectral Analysis

Yosuke TSUBOKAWA Jun MIZUTANI Tomoyuki ISHIKAWA

Most of Railway facilities are visually inspected, so the use of images is being promoted to improve inspection efficiency. A hyperspectral camera can acquire two-dimensional spatial information of a photographed object and spectral information spectroscopically divided into several tens or more wavelengths. Using this camera, we expect to be able to capture changes in materials that are difficult to visually defect, according to changes in wavelength distribution and intensity of specific wavelengths. In this paper, in order to examine the application method of a hyperspectral camera for rail deterioration detection, we conducted basic tests and report the results.

キーワード：ハイパースペクトルカメラ、レールの劣化、傾き解析、差分解析

1. はじめに

鉄道の地上設備は、ほとんどが屋外に設置されているため、雨、雪、風、日光、気温などの自然現象の影響を直接受けて劣化する。鉄道事業者では、車両の走行安全性を確保するために、設備に使用されている各種部材の状態を定期的に検査しているが、現在の部材の検査の多くは目視または手計測により行われており、多大な時間と労力を必要としている。そのため、これらの検査の機械化・効率化を目的として、例えば軌道分野では、軌道検測車などの専用車両や旅客車両の床下に小型で高性能なラインセンサカメラ等を搭載して各種部材を撮影し、画像処理や機械学習により部材の状態を判定する技術の開発・導入が行われている。ここで使用されているセンサは、太陽光からの反射光を可視域の数バンド（波長）に分割した情報を取得するものであり、主に継目板やレール締結装置に使用されているボルトの脱落などのように、目視で確認できる明らかな劣化や損傷等の検出を目的としたものである。

一方、本研究は、目視でも判断可能な部材の形状変化をとらえるのではなく、画像のスペクトル分析を用いて、組成や結晶構造など変化から部材の劣化やその進行を定量的に把握する方法の開発を目的としている。

そこで、撮影した物体の2次元の空間情報と数十種類以上の波長に分光したスペクトル情報（ハイパースペクトル）を同時に取得できるハイパースペクトルカメラについて、鉄道車両の走行により生じるレール表面の初期の劣化検知への適用可能性を検討した。本稿では、白

色層やきしみ割れなど目視で確認できる劣化が存在するレールを対象に、本カメラによる基礎的な試験を行った結果を報告する。

2. ハイパースペクトルカメラの概要¹⁾

光は電磁波の一種であり、その波長に応じたエネルギーを持っている。物体はその構造・材質・状態によって、ある波長の光を反射し、それ以外の波長の光は吸収して光強度が低下する。そのため、反射光のスペクトルから組成や結晶構造などの情報を得て物体を特定することができる。

人間の目や通常のデジタルカメラは、波長を赤・緑・青の3色に区分して物体からの反射光を感知して色を識別している。一方、ハイパースペクトルカメラは、物体からの反射光を数十種類以上の波長に分光してスペクトル情報を取得するため、本カメラで撮影した部材の画像をスペクトル分析することにより、人間の目や通常のカメラでは把握することが困難な物体の性質の変化を捉えることができる。そのため、鉄道設備に使用されている部材の初期劣化の定量的な把握への応用が期待できる。

図1にハイパースペクトルカメラで取得できる情報の

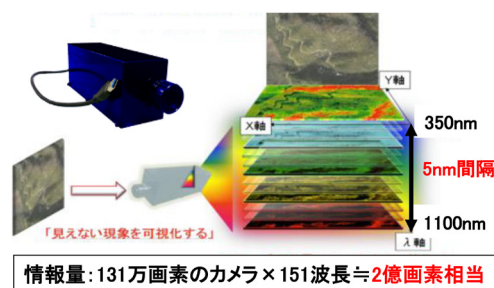


図1 ハイパースペクトルカメラの情報

* 信号・情報技術研究部 画像・IT研究室
 ** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
 *** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

概念を示す。ハイパースペクトル画像の取得において、例えば 350nm (近紫外) ~ 1100nm (近赤外) の波長を 5nm ごとに分光すると 151 波長帯のスペクトル情報を取得できるので、131 万画素のカメラの場合、画像 1 枚で 2 億画素相当の情報を有する計算になる。

3. 画像のスペクトル分析方法と撮影方法

3.1 室内試験の概要

レールを対象に、ハイパースペクトルカメラで撮影した画像の分析方法を検討した。レールの検査は、横裂の長さなどのレール内部の損傷の測定がレール探傷車や探傷器により定量的に行われているが、レール表面の劣化については目視で判定している。

本試験で使用したハイパースペクトルカメラの主な仕様を表 1 に示す。ハイパースペクトルカメラは取得する情報量が大きいため、本カメラの場合、1 枚の画像の撮影に要する時間は標準で 7.7 秒と長くなる。試験で使用する光源については、これまでハイパースペクトルカメラでレールを撮影した例がなく、レールからの反射光のスペクトル分布が不明であるため、本カメラで取得可能な波長帯域を全て含むハロゲンライトを用いた。

まず、レールからの反射光のスペクトルの把握と基本的な分析方法の検討を行うために、図 2 に示すレール表面に白色層が確認される普通レール²⁾を試験レールとして撮影した。また、カメラとレールとの相対的な位置関係、ハロゲンライトの照射方向、ディフューズ (光の拡

表 1 カメラの主な仕様

項目	仕様
解像度	1280×1024pixel (131.1万)画像
撮影速度	(標準)7.7秒
データ転送速度	133fps
波長範囲	350nm~1100nm
波長分解能	5nm

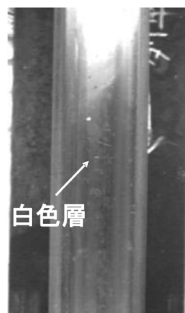


図 2 試験レール



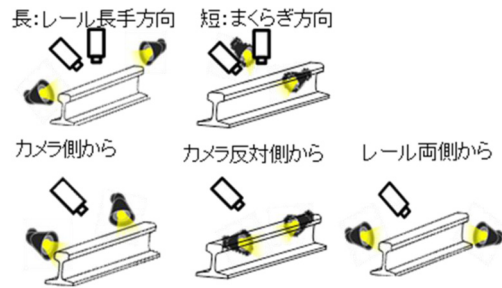
図 3 室内試験の様子

散)の有無が異なる 8 つの条件を設定し、撮影した画像のスペクトルに及ぼす影響を確認した。室内試験の様子を図 3 に、試験条件を表 2 に示す。

表 2 試験条件

カメラとレールの位置関係	ディフューズ	ライト方向	条件No
垂直上方 (90°)	有り	長	①
		短	②
	無し	長	③
		短	④
45°	無し	長	⑤
		短(順)	⑥
		短(逆)	⑦
		短(斜)	⑧

※ライト方向は以下のとおり



3.2 画像の分析方法の検討

まず、条件①で試験レールを撮影し、図 4 に示すハイパースペクトル画像から、目視により「①：さび、②：白色層、③：②と④の境界 (白色層の有無が明確ではない箇所)、④：白色層なし (ニレール鋼)、⑤：レール底部」の 5 箇所を解析範囲として設定した。それぞれの解析範囲について、波長 350nm ~ 1100nm の帯域のスペクトル

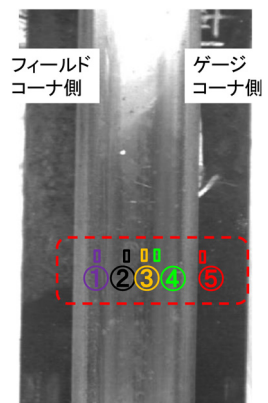


図 4 解析範囲

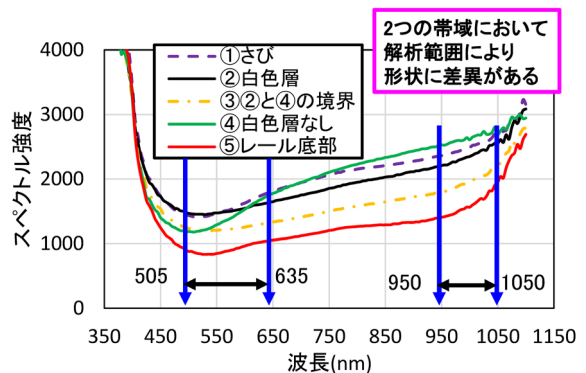


図 5 試験レールの各解析範囲のスペクトルグラフ

グラフを図5に示す。ここで、スペクトルグラフの縦軸は、撮影した物体からの光の反射率を表わすスペクトル強度（任意単位）で、光源の角度や周辺の明るさによっても変化するため、物体の性質の違いが各解析範囲のグラフの形状の差異として表れる。なお、ハイパースペクトルカメラの撮影で得られるスペクトルデータは、物体の反射率のスペクトル分布と光源のスペクトル分布を合わせたものとなる。そのため、表2に示す試験条件ごとに、予め白板を物体として撮影することにより光源のスペクトル分布を取得して、式(1)により物体のスペクトル強度を求める。

ここで、係数の4000は、本カメラの処理に使用したソフトウェアでスペクトル強度を求める際に乗ずる既定値である。

$$\text{スペクトル強度} = \frac{\text{物体のスペクトルデータ}}{\text{白板のスペクトルデータ}} \times 4000 \quad (1)$$

図5において、波長505nm～635nm付近と950nm～1050nm付近で各解析範囲のスペクトルの形状に差異が確認されるため、この帯域に着目して白色層の箇所を把握する分析方法を検討した。

3.2.1 傾き解析

傾き解析とは、正規化分光反射指数解析（NDSI解析）ともいい、スペクトルの吸収と反射の差分の大きさに基づいて画像の色分けを行う解析方法である。傾き解析の算出式は式(2)で表され、選択した2つの波長（ λ_1 , λ_2 ）の分光強度の差を和で正規化することにより、スペクトル波形の誤差因子の影響を軽減して特徴を求める。

$$NDSI = \frac{I_{\lambda_1} - I_{\lambda_2}}{I_{\lambda_1} + I_{\lambda_2}} \quad (2)$$

ここで、 I_{λ} は波長 λ nmにおける反射率を示す。

図6に、傾き解析の2つの波長を505nmと635nmとして、白色層の有無が明確な②と④を区別するように、NDSI値の違いによる色分けの閾値を設定した結果を示す。レール表面に白色層のある箇所は黄色、白色層のない箇所は黒色になっており、白色層の有無による色分けが行えている。ただし、白色層ありの解析範囲とレール底部の解析範囲のスペクトル形状が類似しているため、レール底部の一部に白色層があると判定されている。なお、目視での判断が難しかった③の境界については、②白色層のある箇所と同じ識別になった。

一方、傾き解析の2つの波長を950nmと1050nmとした結果を図7に示す。同図では白色層の有無を区別するのは困難である。これは、図5のスペクトルグラフにおいて、傾き解析で設定した波長間では、②と④のスペクトル形状に大きな差異がないためである。しかし、白色層ありの解析範囲とレール底部の解析範囲のスペクトル形状は、950nmと1050nmの波長帯域で異なってい

るため、レール頭部とレール底部は明確に色分けされている。このことから、2つの波長帯域の結果を併用することにより、白色層のある箇所の誤検出防止が図れると考えられる。

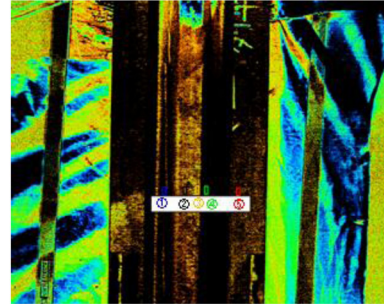


図6 傾き解析（波長505nm～635nm）

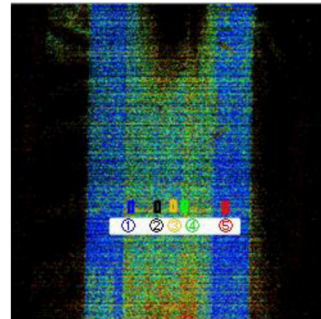


図7 傾き解析（波長950nm～1050nm）

3.2.2 差分解析

表1に示したとおり、試験に使用したハイパースペクトルカメラは、スペクトル強度を波長5nm間隔で取得している。そこで、スペクトル強度を式(3)により百分率にしたのち、各解析範囲について5nm間のスペクトル強度の差をとり5nm間の変化を求めた（以下、「差分解析」という）。

$$\text{スペクトル強度(百分率)} = \frac{\text{スペクトル強度}}{4000} \times 100 \quad (3)$$

図8に差分解析の結果を示す。同図で、「①さび、④白色層なし」と「②白色層あり、③②と④の境界」の結果を比較すると、波長500nm～650nmにおいて差があり、レール表面の状態を識別できることがわかる。ただし、いずれの状態の数値も波形のばらつき（振幅）が大きいことから、閾値を設定して識別するのは難しいと考えられる。そこで、図8の結果について、数値のばらつきを小さくするために、5データ（25nm間）の平均値を求めた結果を図9に示す。差分解析結果の波長25nm間の平均値をとることにより、レール表面の状態による差異はより明確になっている。よって、この差分解析の結果を用いて、傾き解析の波長やパラメータを設定することにより、傾き解析の色分けによる判定結果の精度が

向上する可能性がある。一方、「⑤レール底部」の結果については、白色層ありに近い結果であることから、傾き解析のように異なる波長の結果で識別するか、解析範囲の設定時に除外することが必要であることがわかる。

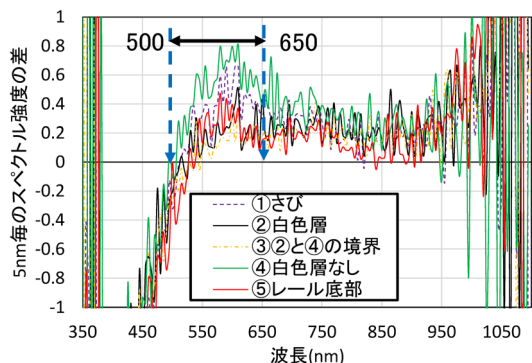


図8 差解析結果

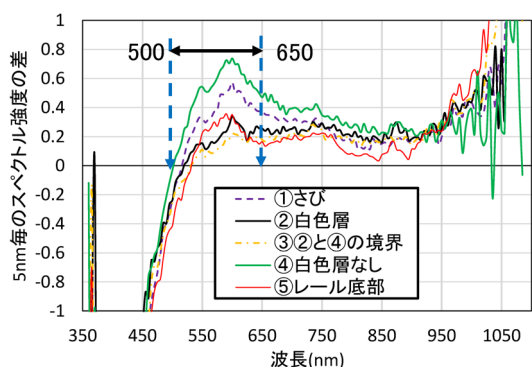


図9 差解析結果 (波長 25nm の平均)

3.3 画像の撮影方法の検討

撮影時の光源条件がスペクトルに及ぼす影響を把握するため、光源の条件② (ライト方向短) の条件で試験レールを撮影した。画像のスペクトルグラフを図10に示す。

図10と図5を比較すると、いずれの解析範囲についてもスペクトル強度は低下しており、その低下の割合は異なるがスペクトルの形状は類似している。スペクトル強度が全ての解析範囲で低下したことについては、条件②では、レール頭頂部の曲率がある箇所が光が照射されてレールからの反射光が分散したことにより、カメラに取り込まれる光量が少なくなったためだと考えられる。

次に、差解析を行って波長 25nm の平均値を求めた結果を図11に示す。「①さび・④白色層なし」と「②白色層あり・③②と④の境界」の結果を比較すると、波長 500nm ~ 650nm において明確な差がありレール表面の状態を識別できていることがわかる。ただし、全体的にスペクトル強度が低下したことにより、条件②の差解析結果は条件①に比べて数値が小さくなった。

また、光拡散用のディフューズボックスを取り外した条件③ (ライト方向長, ディフューズ無し) においても、スペクトル強度の低下は見られたが、解析範囲①~⑤の

スペクトル形状は類似していた。

「カメラとレールとの位置関係 45°」とする条件⑤~⑧についても、カメラに取り込まれる光量の低下により、スペクトル強度の大きさが変わること確認した。

以上の結果から、ハイパースペクトル画像からレール表面の状態を精度良く識別するためには、撮影時に一定の光量を確保することが重要であり、かつ、光源条件を設定して閾値を設定する必要があることがわかった。

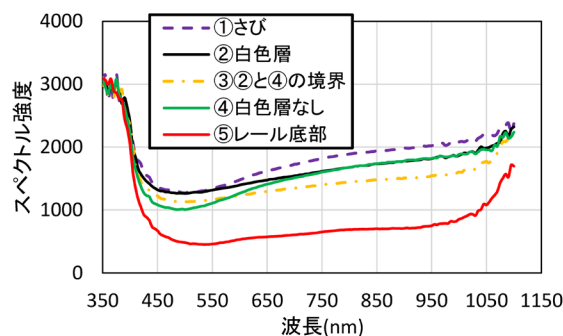


図10 条件②のスペクトルグラフ

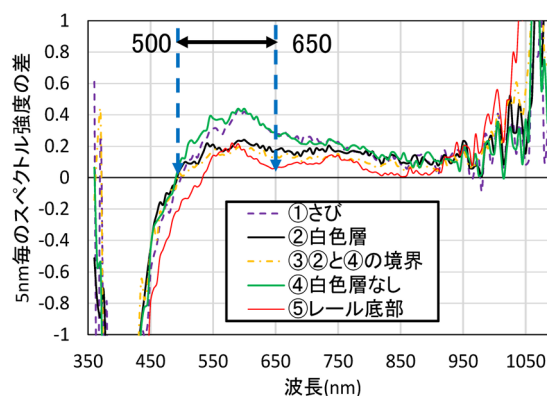


図11 条件②の差解析結果

4. レール劣化の識別

4.1 レールの材質の影響

レールの材質の違いによる影響を把握するために、図12に示すベイナイトレール³⁾を条件①で撮影した。画像のスペクトルグラフを図13に示す。

普通レールの場合に、白色層の識別に着目した波長 505nm と 635nm 間のスペクトル強度は、図13においてはいずれの解析範囲についても傾きは大きいですが、スペクトル形状の差異は小さくなっている。

次に、差解析を行って波長 25nm の平均値を求めた結果を図14に示す。差解析の結果では、波長 550nm

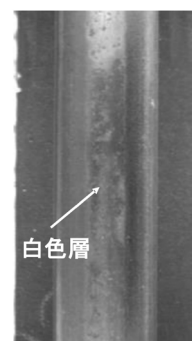


図12 白色層のあるベイナイトレール

～650nmの帯域において、白色層の有無で差異があるため識別できる可能性はあるが、普通レールの場合には、白色層があると差分解析の値が小さくなっていたのに対し、ペイナイトレールでは白色層がある箇所の方が差分解析の値が大きくなる結果となった。

このことから、レールの材質が異なると光の反射や吸収の程度が変化してスペクトルに差異が生じるため、劣化箇所の検出を行う場合には、材質を考慮して閾値を設定する必要があることがわかった。また、このことから溶接部等において同様の現象が生じる可能性が考えられる。

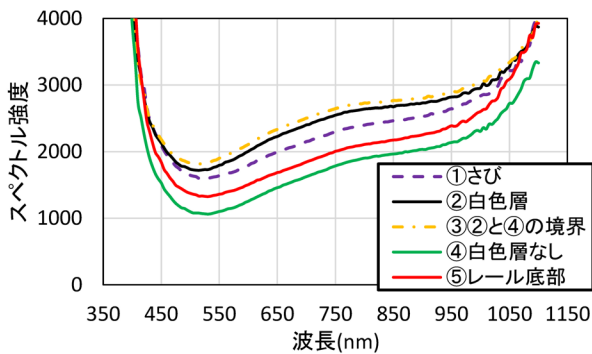


図13 ペイナイトレールのスペクトルグラフ（条件①）

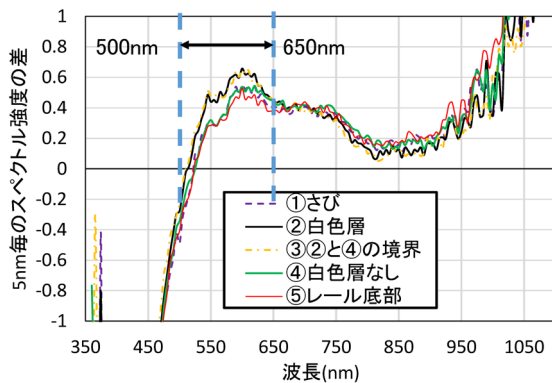


図14 ペイナイトレールの差分解析結果

4.2 異なるレール劣化（腐食）

ここまでは、レール頭部の劣化を対象に、ハイパースペクトルカメラによるスペクトル分析を行ってきたが、レールの側部や底部で顕著にみられる代表的な劣化である腐食について検討した。まず、図15に示す腐食レールを条件①で撮影してスペクトル情報を取得し、白色層のスペクトルと比較した。これは、鉄道車両の車輪フランジの接触がないレールの外側の画像である。なお、図15ではレール側部では著しい腐食が確認でき、頭頂部とは状態が異なるように見えるが、スペクトル強度の形状は類似しており、試験対象としたレールについては、解析範囲における組成が同じであることを確認できた。

そこで、白色層との区別が可能であるかを確認するために、レール鋼、腐食、白色層、さびのスペクトルグラ

フの比較を図16示す。これまで述べてきたとおり、白色層については波長500nm～650nm付近のスペクトル形状の違いに着目した検出の可能性を示したが、腐食については、さらに波長900nm～1050nm付近のスペクトルに違いが生じていることが確認できる。

次に、各解析範囲について差分解析を行い、波長範囲25nmの平均値を求めた結果を図17に示す。同図において波長500nm～650nmに着目すると、腐食の解析範囲ではレール鋼や白色層の解析範囲の結果とは異なっている。

よって、レールの白色層と腐食は、得られるスペクトルの形状が異なり、波長500nm～650nmと波長900nm～1050nmのスペクトル分析により、識別して検出できる可能性があることがわかった。

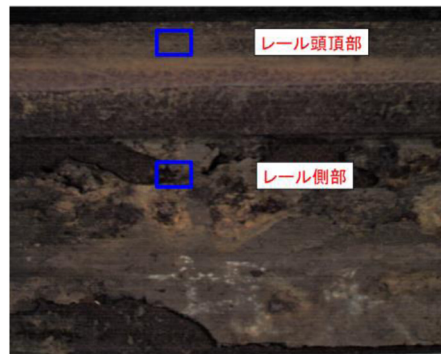


図15 腐食レールと解析範囲

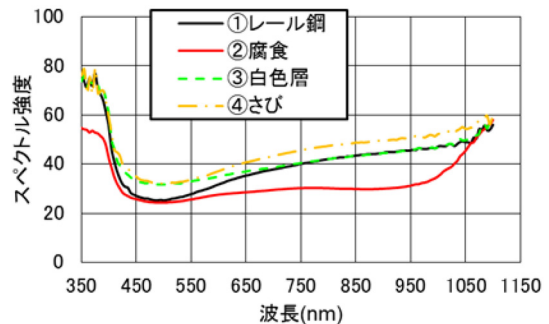


図16 劣化形態によるスペクトルの比較

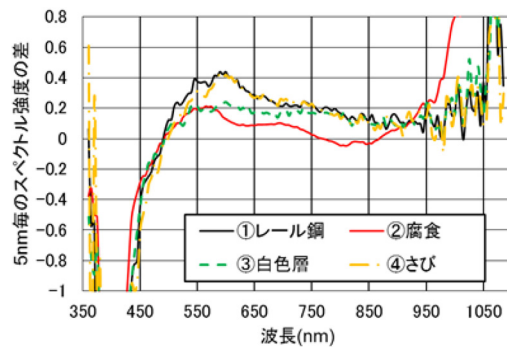


図17 解析範囲結果

5. 可搬型ハイパースペクトルカメラの検討

レール表面の劣化についてスペクトルにより検出できる可能性があることがわかったが、撮影時の光量によりスペクトルの大きさに差異が生じるため、定量的な評価指標を提案するためには、様々な条件で各劣化の画像を撮影・分析し、撮影方法や分析方法をさらに検討する必要がある。

3～4章で使用したカメラは大型で工場などの室内で使用されている例が多く、鉄道の現場に持ち込むことは困難である。そこで、可搬型のハイパースペクトルカメラを使用してハロゲンライトのみで腐食レールを撮影し、腐食範囲の検知が可能かどうかを確認した。

使用した可搬型のカメラは、固定式のカメラと比較すると、波長の分解能が7nmとわずかに粗く、1枚の画像の撮影に35秒程度を要するが、1.5kgと軽量で、かつ、簡易なスペクトル表示機能がカメラに内蔵されているため、現場で撮影してすぐに確認できる利点がある。

図18に示す腐食のないレール、通常の腐食レール、顕著な腐食レール（腐食箇所がはがれそうなレール）の3本を同時に撮影し、それぞれのレール頭部から解析範囲を選択した。

図19に解析範囲の差分解析結果を、図20に解析結果に基づいた識別結果を示す。図19からわかるように、通常の腐食や顕著な腐食のある解析範囲では光が反射しにくいため、波長500nm～650nmに着目すると、腐食

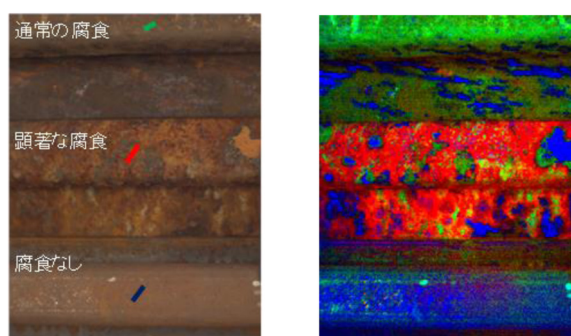


図18 撮影画像

図20 解析結果

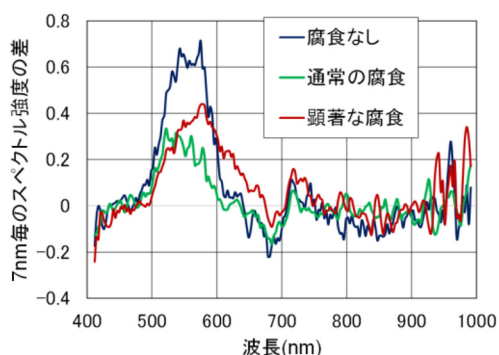


図19 腐食レールの差分解析結果

のない解析範囲と比較して差分解析におけるスペクトル強度の差は小さくなっている。これは、固定式のハイパースペクトルカメラによる画像の差分解析結果と一致する。また、通常の腐食と顕著な腐食では波長600nm～700nm付近で差異があった。

この差分解析の結果に基づいて、ハイパースペクトル画像を色分けすると、図20に示すとおり、各レールを明確に識別できていることがわかる。通常の腐食と顕著な腐食でスペクトル形状に差異が生じた理由については、今後サンプル数を増やして確認する必要がある。

6. まとめと今後の展望

鉄道設備に使用されている各種部材の検査の効率化を図るために、ハイパースペクトルカメラを用いて、特徴的なスペクトルの変化から部材の劣化を検出する方法を検討した。レール表面の劣化検出を目的に、基礎的な試験を行った結果を以下にまとめる。

- (1) 本カメラで取得するハイパースペクトル画像のスペクトル強度は、撮影時の周辺の明るさが影響するため、スペクトル分析による劣化の識別や検知判定を行うためには、撮影時に一定の光量を確保することが重要であることを確認した。
- (2) レール表面の白色層、腐食については、ハイパースペクトル画像の波長500nm～750nmと波長900nm～1050nm付近のスペクトルの形状に差異が生じることから、傾き解析または差分解析により、レール断面方向の存在範囲を定量的に把握できる可能性があることがわかった。
- (3) レールの材質が異なる場合には、光の反射や吸収の程度が変化してスペクトル形状や差分解析の結果が大きく変わることを確認した。

今後、可搬型のハイパースペクトルカメラにより画像のサンプル数を増やして分析を行い、スペクトル分析を活用したレールの劣化状態の検出精度の向上を図る計画である。

文献

- 1) 高良洋平ほか9名：ハイパースペクトルカメラ「NH-1」及び「NH-7」を用いたリモートセンシング分野における応用，第15回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム，2013.2
- 2) 辻江正裕ほか：白色層に起因するレール微小き裂の進展挙動と削正法の検討，鉄道総研報告，Vol.23, No.10, pp.53-58, 2009
- 3) 佐藤幸雄，辰巳光正：ベイナイトレールによるシェリングの予防，RRR，2009.4