

論文 ハイパースペクトルカメラを用いた レールの劣化検出に関する基礎検討

坪川 洋友¹・辻江 正裕¹・兼松 義一¹

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

E-mail:tsubokawa.yosuke.32@rtri.or.jp, tsujie.masahiro.13@rtri.or.jp, kanematsu.yoshikazu.23@rtri.or.jp

軌道部材の検査は、目視または手計測により行われているものが多く、多大な時間と労力を必要としている。そこで、検査の効率化を図るため、鉄道事業者においてはラインセンサカメラ等を車両床下に搭載して各種部材を撮影し、画像処理により状態を判定する技術の開発・導入が行われているが、これは主に目視で確認できる劣化の検出を目的としたものである。一方、ハイパースペクトルカメラは、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を取得できるカメラであり、波長分布や特定波長の強度の変化から、目視での把握が困難な材質の変化を捉えることができる可能性がある。そこで、ハイパースペクトルカメラのレールの劣化検出への適用方法を検討するために、基礎的な試験・検討を行ったのでその結果を報告する。

Key Words : hyperspectral camera, spectrum, inspection of track materials, white etching layer of a rail, wavelength resolution

1. はじめに

軌道はレール、まくらぎ、締結装置、道床から構成されている。これらの軌道部材の状態は、車両の走行安全性を確保するために定期的に検査する必要があるが、現在の軌道部材の検査は、徒歩巡回時に目視または手計測により行われているものが多く、多大な労力を必要としているため効率化が望まれている。

鉄道事業者においては検査の機械化・効率化を目的として、近年のセンシング技術の急速な進展とセンサの小型化が実現したことから、軌道検測車のような専用車や旅客車両の床下にラインセンサカメラ等を搭載して軌道の各種部材を撮影し、画像処理により部材の状態を把握する技術の開発・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しているものであり、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やレール表面のき裂などのように、目視で確認できる部材の劣化を検出するものである。

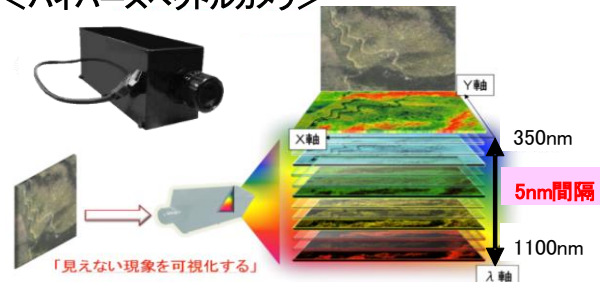
一方、本研究は、目視や上述のセンサでは検知することが困難な部材の初期の劣化やその進行を定量的に把握する方法の開発を目的としている。そこで、撮影した物体の2次元の空間情報と数十種類以上の波長に分光したスペクトル情報（ハイパースペクトル）を同時に取得で

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、本カメラについて、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

ハイパースペクトルカメラで取得できる情報の概念を図-1に示す。物体は光源からの光を反射しており、その構造・材質・状態によって、ある波長の光はそのまま反

＜ハイパースペクトルカメラ＞



情報量:131万画素のカメラ×151波長≒2億

図-1 ハイパースペクトルカメラの情報量

射し、別の波長の光は吸収されて光強度が低下する。人間の目や通常のカメらは、この波長を赤・緑・青の3色に区分し、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区分してスペクトル情報を取得することにより、人間の目や通常のカメら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。このことから、鉄道設備に用いられている部材の初期の劣化やその進行を定量的に判定することが期待できる。1枚のハイパースペクトル画像には、例えば131万画素のカメらで350nm（近紫外）～1100nm（近赤外）の波長を5nm間隔で分光した場合、1ピクセル毎に151波長のスペクトル情報を有することになるため、約2億もの情報量が含まれている。

3. 室内試験

軌道部材のうちレールについては、レール探傷車や探傷器により横裂の長さなどのレール内部の損傷の測定は定量的に行われているが、レール表面の劣化は目視によるものが多く、定量化が判断が難しいことがある。そこで、ハイパースペクトルカメラで図-2に示すⅠ～Ⅲの3種類のレールを撮影してスペクトル分析を行い、レール表面の初期の劣化検出が可能であるかを確認した。

- Ⅰ：白色層あり普通レール¹⁾
Ⅱ：白色層ありベイナイトレール²⁾
Ⅲ：中きしみ発生普通レール⁴⁾

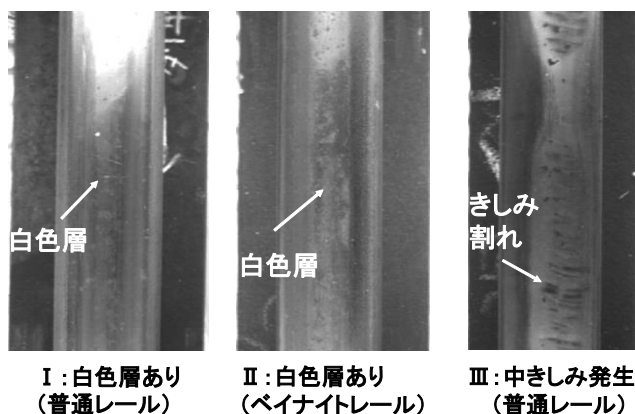


図-2 試験レール

表-1 ハイパースペクトルカメラの主な仕様

項目	仕様
解像度	1280×1024pixel (131.1万画素)
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

本試験で使用したハイパースペクトルカメラ（NH-7: エバ・ジャパン社製⁵⁾）の主な仕様を表-1に示す。また、室内試験の様子を図-3に示す。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カバーできるハロゲンライトとした。

また、本カメラを車両床下に設置してレールを連続で撮影する場合には、カメラとレールとの相対的な位置関係やレールに照査される光源の角度などが変化する。そこで、これらの条件の違いによるスペクトルへの影響を確認するために、表-2のように試験条件を設定してスペクトルの違いを分析した。



図-3 室内試験の作業風景

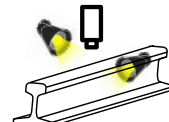
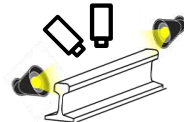
表-2 試験条件

カメラとレールの位置関係	ディフューズ	ライト方向
垂直上方 (90°)	有り	長
		短
	無し	長
		短
45°	無し	長
		短(順)
		短(逆)
		短(斜)

<ライト方向>

長：レール長手方向

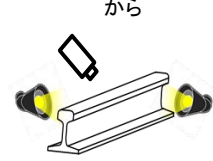
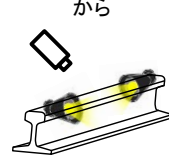
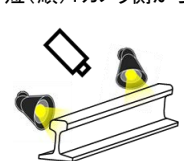
短：まくらぎ方向



短(順)：カメラ側から

短(逆)：カメラ反対側から

短(斜)：レール両側から



4. 室内試験の結果と分析方法の検討

基本的なレールからの反射光のスペクトルの把握と分析方法の検討を行うために、Ⅰ：白色層あり普通レールについて、「カメラとレールとの位置関係垂直上方、ディフューズあり、ライト方向長」の条件で撮影した結果とそのスペクトルグラフを図-4に示す。

(1) Ⅰ：白色層あり普通レールの結果

図-4(a)に示す白色層ありレールの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、⑤：レール底部」の5箇所を解析範囲として設定し、それぞれの解析範囲について350nm～1100nmの帯域のスペクトルグラフを図-4(b)のように描画して比較した。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、各解析範囲のグラフの形状の差異が物体の性質による違いを意味する。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、光源のスペクトル分布と物体の反射率のスペクトル分布を合わせ

たものである。そのため、ここでは表-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)により求めたものを物体のスペクトル強度とする。

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

ここで、係数の4000は今回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デフォルト値である。

図-4(b)において、波長505nm～635nm付近と950nm～1050nm付近で各解析範囲により形状に差異が確認されるため、この帯域に着目した分析方法を検討した。

(2) 分析方法

a) 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。算出式は式(2)のとおりであり、選択した2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。

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

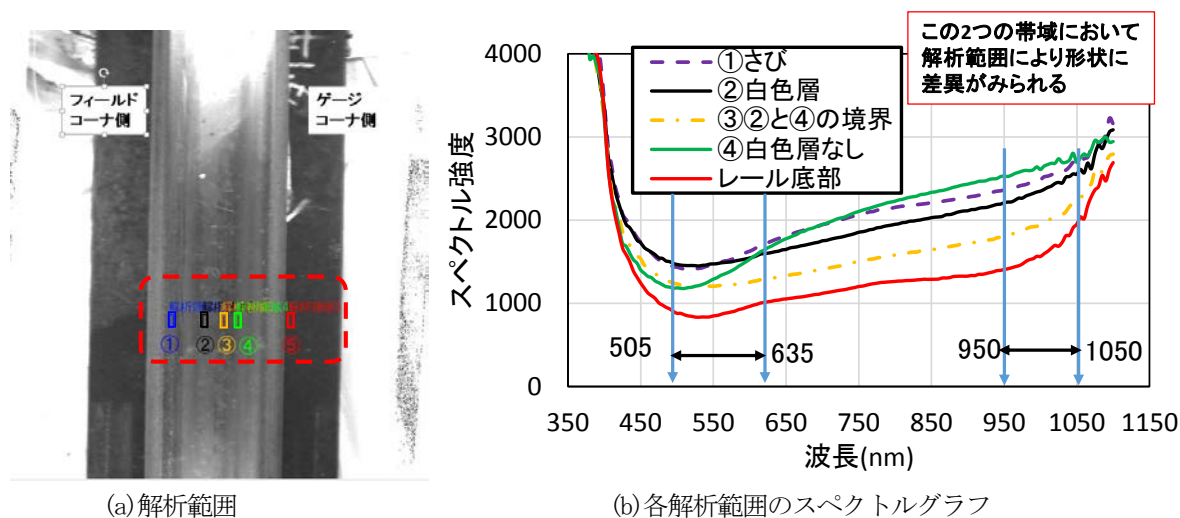


図-4 Ⅰ：白色層あり普通レールの解析範囲とスペクトルグラフ

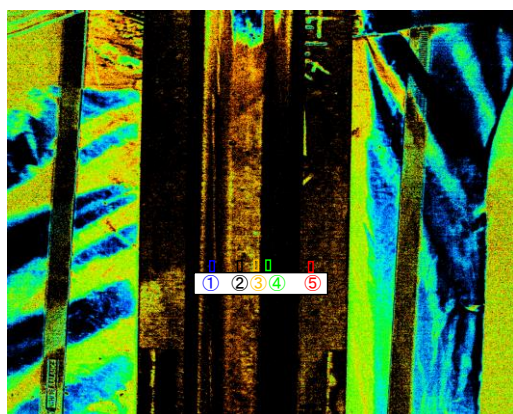


図-5 傾き解析(波長 505nm～635nm)画像

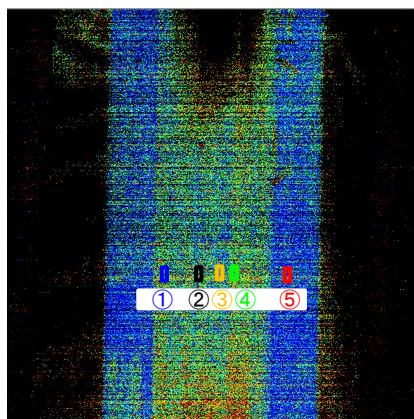


図-6 傾き解析(波長 950nm～1050nm)画像

ここで、 I_λ は λ nmの反射率を示す。

図-5に、傾き解析の2波長を505nmと635nmとして、白色層の有無が明確である②と④を区別するようにパラメータ（NDSI値の違いによる色分けをするための閾値）を設定した結果を示す。同図より、レール頭面で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ように考えられる。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分類という結果であった。一方、傾き解析の波長を950nmと1050nmとした結果を図-6に示す。同図では白色層の有無を区別するのが困難である。これは、図-4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区別するのが難しくなったものと考えられる。

ただし、図-4および図-5より、505nmと635nmの波長帯域に着目すると、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、傾き解析の画像の色分けの結果ではレール底部の一部に白色層があると判定する可能性がある。一方、950nmと1050nmの波長帯域に着目すると、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異なっており、傾き解析の結果では色分けがされている。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、白色層発生箇所の誤検出防止を図れると考えられる。

b) 波長間の差分

試験に使用したハイパースペクトルカメラでは、波長5nm間隔でスペクトル強度を取得している。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）。

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

その結果を図-7に示す。同図より、①さび・④白色層なし・⑤レール底部の条件と②白色層あり・③②と④の境界の条件を比較すると、波長500nm～650nmにおいて明確な差がありレール表面の状態を分類できることがわかる。ただし、差分析では、レール断面方向のスペクトルの解析範囲の設定条件によってはばらつきが大きくなる可能性が考えられるため、図-7の結果から25nm間の平均値を求めてプロットした結果を図-8に示す。差分析結果の波長25nm間の平均値をとることにより、ばらつきを小さくすることができ、解析範囲毎の差異もより明確になっていることがわかる。

差分析は、傾き解析の色分けのパラメータを数値化していることになるため、差分析により傾き解析のパラメータを検討するのがよいと考えられる。

(3) ライト方向等の影響分析

ハイパースペクトルカメラの撮影結果に対するライト方向の影響を把握するため、I：白色層ありレールについて、「カメラとレールとの位置関係垂直上方、ディフューズあり、ライト方向短」の条件で撮影した画像のスペクトルグラフの結果を図-9に示す。

同図と図-4とを比較すると、いずれの解析範囲においてもスペクトル強度が低下しており、また、解析範囲によってその低下の割合は異なっているが、スペクトルの形状は類似していることが分かる。

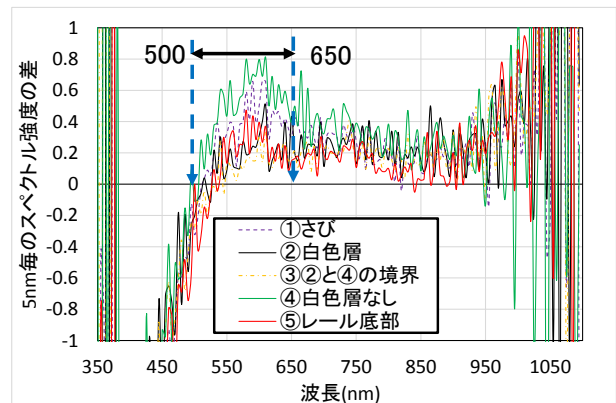


図-7 差分析結果

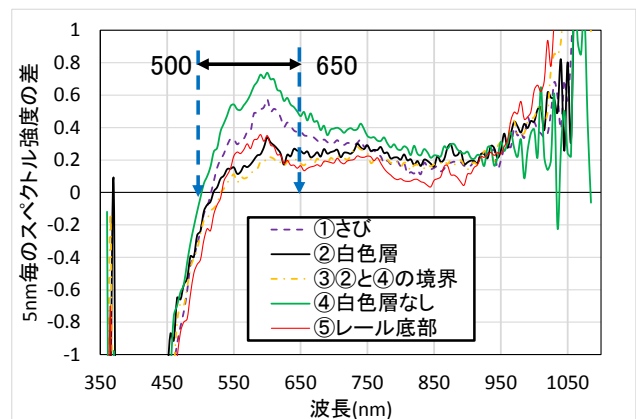


図-8 差分析結果（波長 25nm の平均）

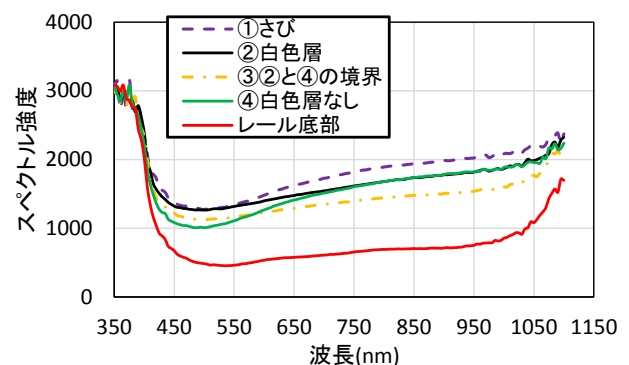


図-9 ライト方向の影響

(I：白色層あり普通レール，ライト方向：短)

そこで、差分解析を行って波長25nmの平均値を求めた結果を図-10に示す。ライト方向長の条件と同じく①さび・④白色層なし・⑤レール底部の条件と②白色層あり・③②と④の境界の条件を比較すると、波長500nm～650nmにおいて明確な差がありレール表面の状態を分類できることがわかる。ただし、ライト方向の違いによって差分解析結果の数値には違いが生じている。

光拡散用のディフューズボックスを取り外した「ディフューズ無し」の条件については、今回の試験においては、①～⑤の地点のスペクトルの形状は類似して差分解析の結果の数値にも大きな違いはなかったが、スペクトル画像の解析を行う範囲によっては、一定の光量が得られないためにスペクトルの形状に差が生じ、差分解析結果の数値に影響することがわかった。また、「カメラとレールとの位置関係45°」の条件については、ライト方向の違いがあることを確認した。

この結果から、車両床下で撮影する場合はレールとカメラとの位置関係を考慮する必要があり、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分類するためには、レールとカメラとライトの位置関係等が変化しても一定の光量を確保できる光源の設置方法等を検討する必要があると考えられる。

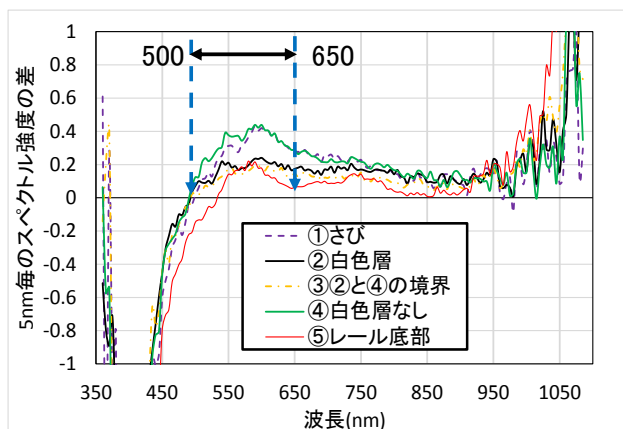


図-10 差分解析結果（波長 25nm の平均）
（Ⅰ：白色層あり普通レール，ライト方向：短）

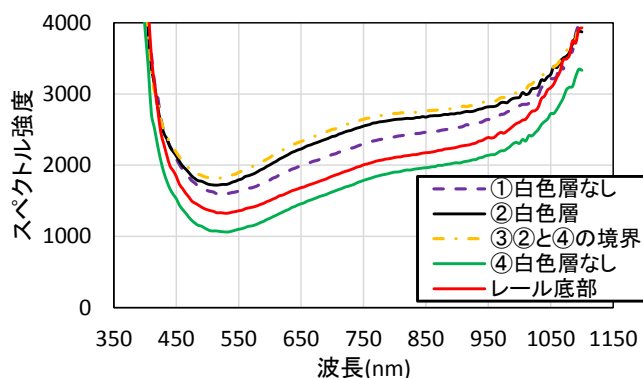


図-11 Ⅱ：白色層ありベイナイトレールの
スペクトルグラフ（ライト方向長）

(4) Ⅱ：白色層ありベイナイトレールの結果

レールの材質の違いによる影響を把握するために、白色層ありベイナイトレールについて、「カメラとレールとの位置関係垂直上方，ディフューズあり，ライト方向長」の条件で撮影した画像のスペクトルグラフの結果を図-11に示す。

同図と普通レールのスペクトルグラフである図-4とを比較すると、いずれの解析範囲においても波長505nmと635nm間のスペクトル強度の傾きは大きくなっているが、白色層の有無によるスペクトル形状の差異は小さくなっているように感じられる。

そこで、差分解析を行って波長25nmの平均値を求めた結果を図-12に示す。差分解析の結果では、波長550nm～650nmの帯域において、白色層の有無で差異が確認できることから分類は可能であると考えられるが、図-8の普通レールで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、ベ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、材質の違いにより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、材質を考慮したパラメータや閾値の設定が必要であることがわかる。また、このことは溶接部等においても同様の現象が生じることが考えられる。そのため、今後ベイナイトレールや溶接部のサンプルを増やして、検討を行う必要があると考えられる。

(5) Ⅲ：中きしみ発生普通レール

ここまではレール表面に発生した白色層について、ハイパースペクトルカメラの適用可能性を検討してきた。ここでは、別の劣化形態である中きしみ発生普通レールについて、「カメラとレールとの位置関係垂直上方，ディフューズあり，ライト方向長」の条件で撮影した画像とスペクトルグラフの結果を図-13に示す。ここで、図-13(a)に示す中きしみ発生普通レールのハイパースペクトル画像においては、白色に見える範囲が存在するが、

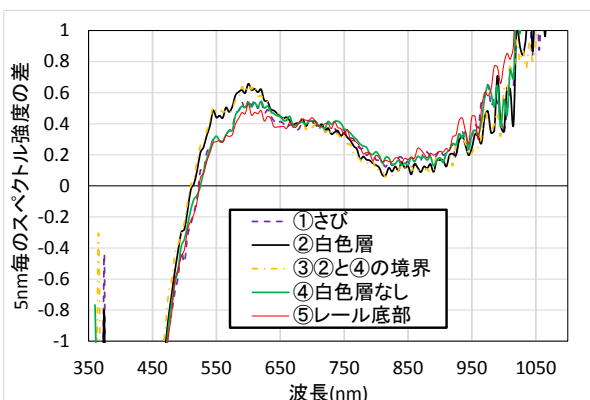
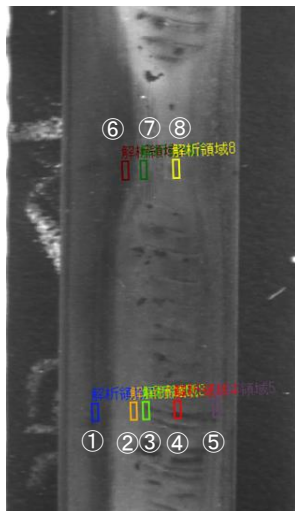
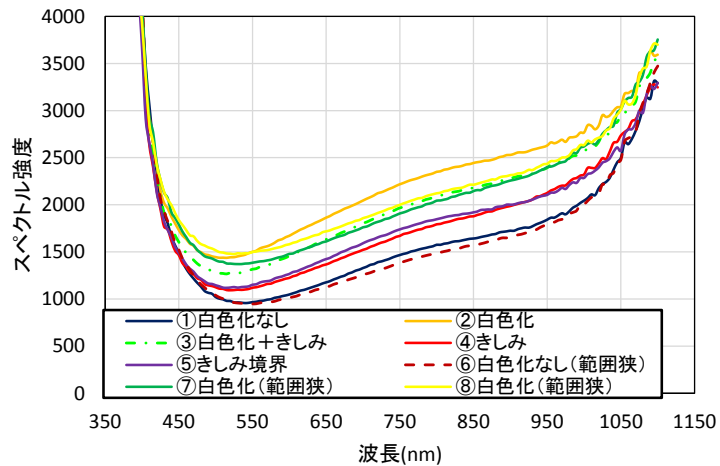


図-12 差分解析結果（波長 25nm の平均）
（Ⅱ：白色層ありベイナイトレール）



(a)解析範囲



(b)各解析範囲のスペクトルグラフ

図-13 III：中きしみ発生普通レール解析範囲とスペクトルグラフ

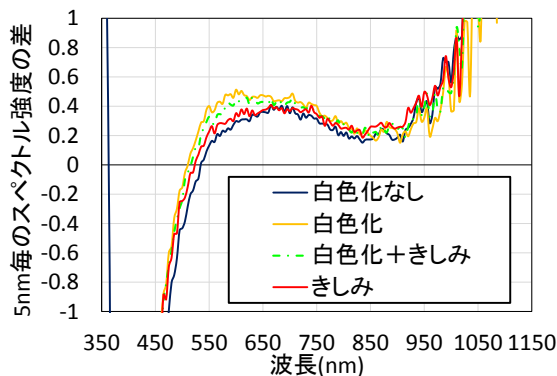


図-14 差解析結果（波長 25nmの平均）
（III：中きしみ発生レール）

白色層とは異なる可能性があるため、以下では白色層と区別するために「白色化」の箇所として説明する。なお、中きしみ割れは曲線内軌の頭頂面における、連続的に発生するきしみ割れと同様の亀裂のことである。

図-13(a)において、きしみ割れがレール断面方法の広範囲に存在する断面と狭範囲に存在する断面に分類し、広範囲の断面からは「①：白色化なし、②：白色化、③：白色化+きしみ、④：きしみ、⑤：きしみ境界」の5箇所、狭範囲の断面からは「⑥白色化なし（範囲狭）、⑦白色化（範囲狭）、⑧白色化（範囲狭）」の3箇所の合計8箇所を解析範囲として設定し、それぞれの解析範囲について350nm～1100nmの帯域のスペクトルグラフを図-13(b)のとおり描画して比較した。

同図より、①と⑥、④と⑤、③と⑦と⑧はスペクトルの強度、形状ともに類似しており、次のことがいえる。

- ・①、⑥のように目視で白色化が確認されない箇所についてはスペクトルは同じになる。
- ・図-13(a)のハイパースペクトル画像において、白色化

にきしみが確認される③と、白色化のみ確認される⑦と⑧のスペクトルが類似しており、目視では分類が困難であるが、両解析範囲のレール表面の状態は同じであると考えられる。

そこで、類似したスペクトルであった解析範囲を除き、①～④の解析範囲のみ抽出して差解析を行い、波長25nmの平均値を求めた結果を図-14に示す。同図より、中きしみ発生レールにおいては、波長帯域500nm～750nm付近で差異があり、白色化のない範囲と比較して検知したい白色化や中きしみの発生している範囲でスペクトル強度の差が大きいことが分かる。このように劣化の種類によってスペクトル分布は様々である。よって、今後サンプル数を増やす必要はあるが、劣化検出の判定に使用する波長帯域や閾値を変更することにより、劣化の形態を分類できる可能性があると考えられる。

5. まとめ

ハイパースペクトルカメラを用いたレールの劣化の検出への適用可能性を検討するために、白色層のある普通レール、白色層のあるベイナイトレール、中きしみ発生レールの3種類のレールをサンプルとして、カメラとレールとの位置（角度）および光源の照射方法等を変更してハイパースペクトル画像のスペクトル分析を行った。これまでの分析で把握できたことは以下のとおりである。

- ・レール表面の白色層の有無については、ハイパースペクトル画像の波長500nm～650nm付近のスペクトルの形状に差異が生じることから、傾き解析または差解析等を行うことにより、白色層の検知やレール断面方向の白色層の範囲を定量的に把握できる可能性があることを確認した。
- ・ハイパースペクトル画像の撮影方法について、ライト

方向（カメラと光源の角度）を変更して同じ解析範囲を分析した結果、スペクトル強度は異なるがスペクトルの形状は類似することを確認した。ただし、スペクトル強度の変化は解析範囲によって異なり、差分解析の結果にも影響するため、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分類するには、レールとカメラとライトの位置関係が変わっても一定の光量を確保できる光源の設置方法を検討する必要がある。

- 普通レールとベイナイトレールについて、ハイパースペクトル画像から白色層の検知法を検討した結果、材質が異なるとスペクトルの形状や差分解析の結果が大きく変わることを確認した。本現象は溶接部においても類似の結果が得られると考えられるため、今後ベイナイトレールや溶接部についてさらなる分析を行う必要がある。また、レールの劣化箇所の検出を行うパラメータの設定には考慮が必要であることを確認した。
- 中きしみ発生箇所と白色層の差分解析結果を比較したところ、劣化の種類によってスペクトル強度は異なるため、劣化検出の判定に使用する波長帯域や閾値を変更することにより、劣化の形態を分類できる可能性を得た。

- ハイパースペクトルカメラを使用することにより、レール表面の劣化を検知できる可能性を得たが、今後の課題として、その他の劣化についても分析を行い、傾き解析におけるパラメータや差分解析結果に対する劣化検知用の閾値の設定方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 辻江正裕等：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，2009.10
- 2) 辻江正裕,兼松義一：ベイナイトレールにおける白色層発生状況調査と微小き裂再現試験，トライボロジー会議 2016，2016.10.
- 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.
- 4) 辻江正裕,陳樺：曲線内軌のレール中きしみ割れ発生状況調査，第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-Rail2017），2017.12
- 5) 高良洋平他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

(2018.4.6 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON APPLICATION OF HYPERSPECTRAL CAMERA TO RAIL DETERIORATION DETECTION

Yosuke TSUBOKAWA, Masahiro TSUJIE and Yoshikazu KANEMATSU

In recent years, in order to improve the inspection efficiency of track materials, railway operators are advancing development and practical application of technology for determining the state by image processing by mounting a line sensor camera or the like under the floor of the vehicle. This is mainly aimed at detecting deterioration that can be visually confirmed. On the other hand, the hyperspectral camera can acquire two-dimensional spatial information of a photographed object and spectral information spectroscopically divided into several tens or more wavelengths. Therefore, we may be able to capture changes in materials that are difficult to grasp visually, due to changes in wavelength distribution and intensity of specific wavelengths. In this paper, in order to examine the application method of the hyperspectral camera for rail deterioration detection, basic test was conducted and the results are reported.