

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	可視光から近赤外線までの光学スペクトルによる耐候性鋼材表面の濡れ状態評価およびさび状態評価に関する研究 (Study on Evaluation of Wetting Condition and Rust Condition on Weathering Steel Surface by Optical Spectra in Visible Light and Near-Infrared)
氏 名 (Name)	井上 龍一
<p>耐候性鋼材は鋼材表面に生成される緻密な保護性さびによって腐食の原因となる酸素や水から鋼材を保護し、さびの進展を抑制する防食方法である。保護性さびの生成には鋼材表面が大気中にさらされて、適度な乾湿の繰り返しを受ける必要がある。しかし、腐食環境によっては保護性さびが生成されない場合もあり、国内外の耐候性鋼橋梁において異常な腐食の事例が報告されている。そのため、耐候性鋼橋梁の長寿命化へ向けた維持管理のためには、定期点検の際に鋼材表面のさび状態を把握することが必要不可欠である。加えて、水は腐食の本質的な要因であるため、耐候性鋼材表面の濡れ状態を把握することは腐食の進行を予測するうえで重要である。</p> <p>これまでは全ての橋梁とその部材について近接目視点検が実施されてきたが、我国の橋梁の多くは地方自治体が管理しているため、財政や人手不足の観点から十分な点検が実施できない場合もある。そのため、近接目視点検に代替するより効率的な橋梁点検方法の開発が期待されている。</p> <p>このような背景のもと、橋梁点検要領が改訂され、センサやロボット、非破壊検査技術等の活用が可能になった。本研究では近年土木分野において新たな非破壊検査技術として注目されているハイパースペクトルカメラ（HSC）に着目し、HSC で測定される光学スペクトルによって耐候性鋼材表面の濡れ状態とさび状態を評価するための基礎的な知見を得ることを目的とした。加えて、これまでほとんど実施されてこなかった、太陽光下での HSC による光学スペクトル測定方法を検討することを目的とした。</p> <p>第 1 章「序論」</p> <p>第 1 章では、本研究の背景、目的および構成を示した。</p> <p>第 2 章「既往の研究と本研究の位置付け」</p> <p>第 2 章では、HSC で測定される光学スペクトルや HSC の測定原理について説明したうえで、既往の研究を整理した。また、第 3 章から第 5 章の関連論文をレビューし、本研究の位置付けを示した。</p> <p>第 3 章「耐候性鋼材表面の濡れ状態評価に関する検討」</p> <p>第 3 章では、シャーレ内の水と腐食性生物上の水の光学スペクトル特性をそれぞれ検討し、耐候性鋼材表面に付着した水の非接触検出方法および検出した水の水位の定量評価方法を提案することを目的とした。その結果、波長 970 nm における反射強度比（乾燥状態の反射強度に対する湿潤状態の反射強度の相対値）から腐食への影響が顕著となる厚さ 0.1 mm の水膜を検出できることを示した。また、この波長における反射強度によって、耐候性鋼材表面に付着した水の水位を精度よく推定できることを示した。</p> <p>第 4 章「耐候性鋼材表面のさび状態評価に関する検討」</p>	

第 4 章では，耐候性鋼材表面の可視光および近赤外線における光学スペクトルと教師あり学習分類器を組み合わせた評価方法を提案した．はじめに，HSC を使用してさび状態の異なる耐候性鋼材表面の光学スペクトルを 1cm² 毎に測定し，測定された光学スペクトルの 1 次微分から波長 569 nm，波長 694 nm，波長 796 nm および波長 896 nm がさび状態評価に有効な波長であることを明らかにした．次に，これらの波長における反射強度に対してカーネル主成分分析を適用して第一主成分と第二主成分を抽出し，これらを使用してランダムフォレスト分類器を構築した．その結果，評価精度は 90.7 % であった．

第 5 章「太陽光下での光学スペクトル測定方法に関する検討」

第 4 章ではまず，暗室と太陽光下で耐候性鋼材表面の光学スペクトルをそれぞれ測定し，その特性を比較することで HSC による光学スペクトル測定を太陽光下で実施する際の課題を明らかにすることを目的とした．その結果，光源をハロゲンライトとする光学環境と光源を太陽光とする光学環境で測定された光学スペクトルでは近赤外線においてその特性が顕著に異なることや光源を太陽光とする光学環境で測定された光学スペクトルは光源と同じ波長で吸収帯をもつ場合があることを示した．次に，この課題は光源を太陽光とハロゲンライトの併用とすることで解決できることを示したうえで，太陽光下で測定された光学スペクトルデータによってさび状態評価を試みた．評価精度は屋内で 79.9 %，実橋梁で 90.0 % を達成しており，第 4 章で提案した分類器は太陽光下で測定された光学スペクトルから抽出された特徴量や異なる環境で生成したさびに対しても，汎用性や再現性があることが認められた．

第 6 章「総括」

第 6 章では，本研究の結論および今後の課題と展望を示した．

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	可視光から近赤外線までの光学スペクトルによる耐候性鋼材表面の濡れ状態評価およびさび状態評価に関する研究 (Study on Evaluation of Wetting Condition and Rust Condition on Weathering Steel Surface by Optical Spectra in Visible Light and Near-Infrared)
氏 名 (Name)	INOUE Ryuichi

Weathering steel is an anti-corrosion method that forms a dense protective rust layer on the surface, shielding the steel from oxygen and water. This protective rust layer develops when the weathering steel is exposed to the atmosphere and undergoes moderate cycles of wetting and drying. However, in certain corrosive environments, the protective rust layer does not form under corrosive environments, and such abnormal corrosion cases leading to are reported corrosion in weathering steel bridges both domestically and internationally. In order to maintain weathering steel bridges to extend their service life, Therefore, regular periodic inspections are essential to assess the rust condition of the steel surface and ensure the longevity of these bridges. Also Additionally, as water is a key factor in corrosion progress, understanding the wetting condition of the weathering steel surface is crucial for predicting corrosion progression, as water is a key factor in corrosion.

So far, Traditionally, close visual inspections have been conducted for all bridges and their components. However, many bridges in our country Japan are managed by local governments, which often lack the financial and manpower human resources for adequate enough inspections. Consequently, there is a pressing need for more efficient bridge inspection methods to supplement close visual inspections.

In response, bridge inspection guidelines have been revised to permit the use of sensors, robots, and non-destructive testing technologies. This study focuses on a non-destructive testing technology, hHyperspectral Ccameras (HSC), that has been used, a promising non-destructive testing technology in civil engineering areas in recent years., The aimingaim of this study is to develop methods for evaluating the wetting and rust conditions of weathering steel surfaces through optical spectra measured by HSC. Also, It also explores the methodology for measuring optical spectra under sunlight, is explored a subject that has received limited attention.

Chapter 1: Introduction

This chapter presents the study's background, objectives, and structure.

Chapter 2: Previous Research and Positioning of This Study

This chapter explains the principles of optical spectra measured by HSC, organizes previous research, and reviews related papers to position this study.

Chapter 3: Examination of Wetting Condition Evaluation of Weathering Steel Surface

This chapter investigates the optical spectral characteristics of water in a petri dish and on corrosive organisms, proposing a non-contact detection method for water on weathering steel surfaces and a quantitative evaluation method for the detected water levels. Results indicate that a water film with a thickness of 0.1 mm, which significantly affects corrosion, can be detected using the

reflection intensity ratio at a wavelength of 970 nm. Additionally, the water level on the steel surface can be accurately estimated from this reflection intensity.

Chapter 4: Examination of Rust Condition Evaluation of Weathering Steel Surface

This chapter proposes a method that combines optical spectra from the visible and near-infrared regions of weathering steel surfaces with a supervised learning classifier. Optical spectra of surfaces with varying rust conditions were measured using HSC, identifying wavelengths 569 nm, 694 nm, 796 nm, and 896 nm as effective for rust condition evaluation. Kernel principal component analysis was applied to these wavelengths, leading to the construction of a random forest classifier, which achieved an evaluation accuracy of 90.7%.

Chapter 5: Examination of Optical Spectrum Measurement Method Under Sunlight

This chapter explores the challenges of measuring optical spectra with HSC under sunlight, comparing results from darkroom measurements. It was found that spectra measured under sunlight differ significantly in the near-infrared region compared to those measured with halogen light. However, these issues can be resolved by combining sunlight with halogen light sources. The evaluation of rust condition using spectra measured under sunlight yielded accuracies of 79.9% indoors and 90.0% on actual bridges, confirming the generality and reproducibility of the classifier proposed in Chapter 4.

Chapter 6: Summary

This chapter presents the study's conclusions and discusses future challenges and prospects.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	井 上 龍 一
審 査 委 員	主 査： 麻生 稔彦
	副 査： 中村 秀明
	副 査： 中山 雅晴
	副 査： 吉武 勇
	副 査： 渡邊 学歩
論 文 題 目	可視光から近赤外線までの光学スペクトルによる耐候性鋼材表面の濡れ状態評価およびさび状態評価に関する研究 (Study on Evaluation of Wetting Condition and Rust Condition on Weathering Steel Surface by Optical Spectra in Visible Light and Near-Infrared)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>耐候性鋼橋梁は保護性の緻密なさびを鋼材表面に形成するため無塗装で使用でき、建設後の維持管理コストの低減が可能である。この経済的有利性のため、これまでに多くの耐候性鋼橋梁が建設されてきた。一方で、耐候性鋼橋梁の安全性を確保する上で耐候性鋼材に発生するさびの状態を定期的に把握する必要がある、耐候性鋼橋梁の点検・診断に関する技術開発は重要である。また、水は腐食の本質的な要因であるため、耐候性鋼材の濡れ状態を評価することは、耐候性鋼材の腐食の進行を予測する上で重要である。</p> <p>本研究では、ハイパースペクトルカメラより得られる光学スペクトルに着目して、耐候性鋼材表面の濡れ状態およびさび状態の評価を試みている。濡れ状態評価にあたっては水が近赤外線領域である 976nm の波長に特徴を持つことを確認し、光学スペクトルより鋼材表面の水膜厚を推定する方法を提案している。また、ハロゲンライト照射下において、さびが発生した耐候性鋼材表面の光学スペクトルには4つの特徴波長が存在することを見出し、これらの特徴波長の光学スペクトルにカーネル主成分分析とランダムフォレストを用いることによって、さび状態の評価が可能であることを示した。さらに、太陽光下でのさび状態評価の可否を実橋梁において検討し、ハロゲンライトを併用することにより、実橋梁においてもさび状態評価が可能であることを検証している。本論文は、以下の6章より構成されている。</p> <p>「第1章 序論」では我が国における橋梁の現状と鋼橋上部工の劣化要因および腐食メカニズムについて説明した上で、鋼材表面の濡れ評価および耐候性鋼材の腐食状態評価の必要性を示し、本研究の目的を述べている。</p> <p>「第2章 既往の研究と本研究の位置付け」では、ハイパースペクトルカメラの概要およびハイパースペクトルカメラを用いた既往の研究、およびさび状態評価に関する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けを示している。</p>	

「第 3 章 耐候性鋼材表面の濡れ状態評価に関する検討」では、シャーレを用いた基礎実験により波長 970nm において特徴的なスペクトルとなることを確認し、この波長での反射強度と水位に関係があることを示した。さらに腐食生成物上の水についても、この波長の反射強度から水位を推定する方法を提案し、0.1mm の水膜の評価が可能であることを示している。

「第 4 章 耐候性鋼材表面のさび状態評価に関する検討」では、可視光から近赤外線領域までの光学スペクトルを検討し、波長 569 nm, 694 nm, 796 nm および 896 nm の 4 波長が特徴的な波長であることを見出した。この結果より、耐候性鋼材表面のさびについてさび厚を 4 領域に分割し、これらの特徴波長からいずれの領域にあるさびかを推定する方法を検討している。この結果、カーネル主成分分析により得られる第 1 主成分と第 2 主成分をランダムフォレストの入力値とすることにより、さび状態を評価する手法を提案した。

「第 5 章 太陽光下での光学スペクトル測定方法に関する検討」では第 4 章で提案した評価方法の実橋梁への適用性を検討している。第 4 章ではハロゲンライトが光源として用いられているが、太陽光下でもハロゲンライトの併用によりさび状態推定に必要な特徴波長をとることが可能であり、本研究での提案手法が実橋梁にも適用可能であることを示した。

「第 6 章 総括」では、本研究の成果を取りまとめるとともに、今後の課題と展望を示している。

公聴会には学内外より 33 名の参加者があった。公聴会における主な質問は、評価手法構築における正解データの作成法、本研究の目的を達成するために必要な評価精度、提案手法を橋梁維持管理へ適用する場合の考え方、判別器により推定精度にばらつきが発生する原因、現場での測定および評価にかかる時間、評価日標水位を 0.1mm とした理由などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 3 編）

- 1) 井上龍一, 蓮池里菜, 古木宏和, 麻生稔彦, 可視光と近赤外線の光学スペクトルによる耐候性鋼材のさび状態評価の試み, 土木学会論文集 80 巻 6 号, 23-00191, 2024.
- 2) Ryuichi Inoue, Rina Hasuike, Hirokazu Furuki and Toshihiko Aso, Rust Evaluation of Weathering Steel Bridges by Optical Spectra in the Visible and Near-Infrared Regions, Proceedings of Bridge Engineering Institute Conference 2023, pp. 391-394, 2023.
- 3) RYUICHI INOUE, RINA HASUIKE, HIROKAZU FURUKI and TOSHIHIKO ASO, STUDY ON DETECTION OF THIN WATER FILM ON STEEL SURFACE USING A HYPERSPECTRAL CAMERA, Proceedings of International Structural Engineering and Construction, Vol. 9, Issue 2, STR-07, 2022.