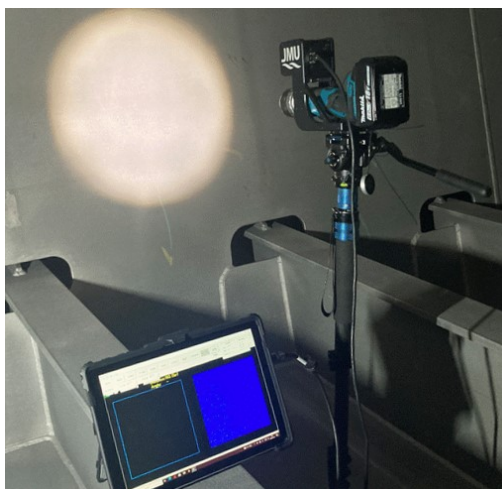


ブラスト処理後の鋼板表面状態の定量評価技術

Quantitative evaluation technology for steel plate surface condition after blasting



商船・海洋・エンジニアリング事業本部 生産センター

篠原 紀昭

SHINOHARA Toshiaki

概要

IMO の塗装性能基準 (Performance Standard for Protective Coatings: PSPC) では、塗装前の表面処理品質に関する定量的評価基準が規定されておらず、合否判定は検査員の主観的な目視評価に依存している。その結果、作業現場では確実に合格するために過剰なブラスト施工が行われる傾向があり、生産性低下の一因となっている。PSPC 要件を満たしつつ生産性を向上させるには、客観的かつ定量的な評価手法の確立が不可欠である。そこで本研究では、植物育成や異物検査等に用いられる正規化分光指数 (Normalized Difference Spectral Index: NDSI) を指標としたブラスト処理後の鋼板表面の定量評価技術の実用化を目指した。

Summary

The IMO Performance Standard for Protective Coatings (PSPC) does not specify quantitative evaluation criteria for the quality of surface treatment before painting, and pass/fail judgment relies on the subjective visual evaluation of inspectors. As a result, excessive blasting work tends to be performed at work sites to ensure passing, which is one of the causes of reduced productivity. In order to improve productivity while satisfying the PSPC requirements, it is essential to establish an objective and quantitative evaluation method. Therefore, in this study, we aimed to commercialize a quantitative evaluation technology for steel plate surfaces after blasting, using the Normalized Difference Spectral Index (NDSI), which is used for plant growth and foreign matter inspection, as an index.

1. 緒言

これまでに塗装下地グレードの定量評価技術として、鋼板表面で反射する光の色成分を基に清浄度を数値化する計測装置¹⁾や鋼板表面からの反射強度から残留するショッププライマ量を推定し下地グレードを数値化する装置²⁾などが開発されている。しかし、これらの計測装置は計測範囲が限定的で抜き取り評価になるため、広範囲にわたるブラスト処理鋼板を迅速に評価し

なければならない造船ブロックへの適用には運用上の課題がある。

そこで、従来の目視評価に相当する広範囲の塗装下地処理鋼板に対し、ハイパースペクトルカメラ技術を用いた定量評価手法の有効性を検証した。検証の結果、取得した画像データを解析することで塗装下地処理鋼板の表面状態を定量的に評価可能であることを確認できた³⁾。なお、ハイパースペクトルカメラは、極めて細く分光された波長成分ごとに撮像が可能であり、広

範囲な圃場の育成状態⁴⁾⁵⁾⁶⁾や植生分布、資源探査、材料の識別や異物検査など様々な分野で利用されている。

本研究では、検証に用いたハイパースペクトルカメラに代えて、計測する波長帯域を限定することで小型軽量化したターゲットスペクトルカメラを採用し、造船現場での実用性を考慮した塗装下地処理鋼板の定量評価装置の開発を目指した。

2. 開発装置の概要

2.1 装置構成

開発した計測装置のシステム構成を図 1 に示す。計測装置は、対象の反射強度を取得するターゲットスペクトルカメラ、白色 LED 照明（光源）、および計測制御と画像処理を行うタブレット PC で構成されている。計測装置に搭載したターゲットスペクトルカメラの主な仕様を表 1 に示す。

実船ブロック内では、ターゲットスペクトルカメラと白色 LED 照明を固定した専用治具を一脚に装着し、

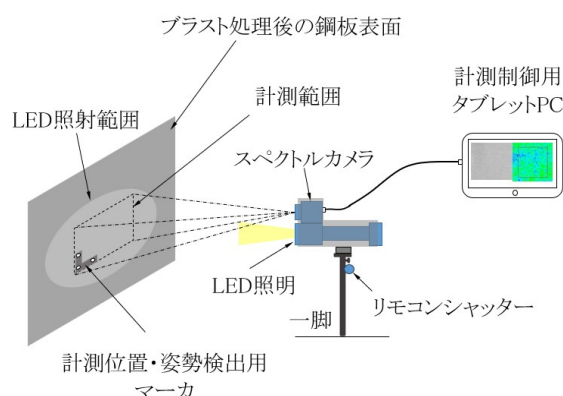


図 1 計測装置の構成

Fig.1 Equipment Configuration of a Measurement System

表 1 ターゲットスペクトルカメラの主要仕様
Table 1 Specifications of the target spectrum camera

項目	仕様
画像解像度 [pixel]	1280×1024
取得波長 [nm]	380 / 470 / 680
波長分解能 [nm]	10
サイズ [mm]	H52×W57×L30
重さ [kg]	0.15

所定の位置で計測する。計測に際しては、対象面にマグネット式の距離・姿勢検出用マーカを貼付し、ターゲットスペクトルカメラの視野内に配置することで、計測対象とカメラ間の距離および姿勢が所定の許容範囲内にあるか否かを自動検出可能な構成とした。

2.2 定量評価の指標

開発した計測装置では、下地処理鋼板の表面状態を定量評価する指標として正規化分光指数(Normalized Difference Spectral Index : NDSI)を適用した。NDSI の定義を式 (1) に示す。

$$NDSI[i, j] = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (1)$$

R_i および R_j は、それぞれ波長 i および j における反射強度を示している。NDSI は 2 波長における反射強度の差を和で正規化する簡易的な指標であるが、観測条件や対象の背景効果など誤差要因の影響を軽減化する効果がある⁴⁾ことが知られている。これまでのハイパースペクトルカメラを用いた検証の結果、ブラスト処理後の鋼板表面状態の定量評価では、波長 680 nm および 480 nm を用いた NDSI が適していることが確認されている³⁾。そこで本研究では、検証に用いた波長の組み合わせに近い波長帯域を取得可能な、表 1 に示す仕様のターゲットスペクトルカメラを採用した。

2.3 計測条件検出機能

カメラを用いた計測では、対象面との距離および姿勢が計測精度に影響をおよぼす主要な計測条件である。これらの条件を検出するために用いる計測距離・姿勢検出用マーカの外形図を図 2 に示す。

カメラ視野内に配置された距離・姿勢検出用マーカの画像から得られる 3 点の白色マーカ中心座標に基づき、式(2)および式(3)の条件が成立する場合、対象面とカメラとの計測距離および姿勢が基準値に対して所定の許容範囲内にあると判定される。

$$\left| \angle AOB - \frac{\pi}{2} \right| < \delta_1 \quad (2)$$

$$|OA - d| < \delta_2 \wedge |OB - d| < \delta_2 \quad (3)$$

ここで、 δ_1 は基準姿勢に対する許容誤差、 δ_2 は基準距離に対する許容誤差を示しており、任意に設定可能である。

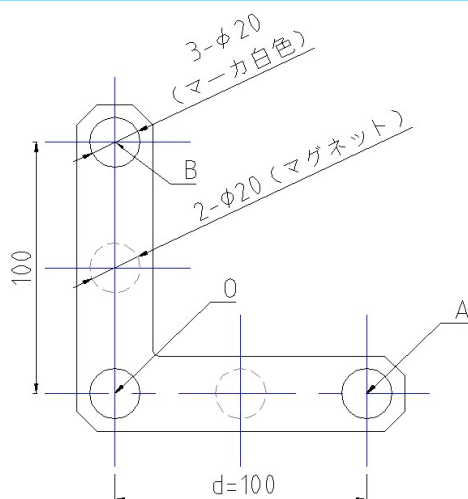


図2 計測条件自動検出用マーカ

Fig.2 Marker for Automatic Detection of Measurement Condition

2.4 環境光補正機能

実船ブロックの計測では建屋内であっても、明り取り窓からの太陽光や天井照明による環境光の影響を受ける。そこで、図3に示すように、白色LEDの照明時および消灯時の画像差分を解析用データとして用いることで、環境光の影響を補正し、計測結果の再現性を確保する機能を実装した。

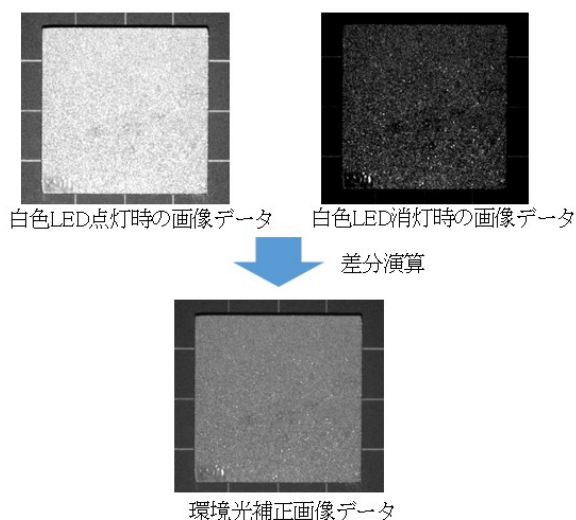


図3 環境光補正機能

Fig.3 Ambient Light Correction Function

3. 試験体を用いた計測試験

3.1 試験体の仕様

開発した計測装置がブラスト処理後の鋼板表面状態を適切に定量評価可能であることを確認するため、試験片を用いた評価試験を実施した。試験体はPSPCに準拠して一次防錆処理（防錆塗料銘柄：SD ZINC1000HA、標準膜厚 $15\mu\text{m}$ ）が施されたA級鋼

を使用した。試験体の寸法は $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、板厚は 12 mm とした。本試験では、これらの試験体に対してISO8501-1に規定されるブラスト下地処理の清浄度Sa3.0を10回のブラスト投射で達成するように施工条件を調整した上で、10回まで段階的にブラスト施工した試験体を準備した。製作した試験体の代表例を図4に示す。

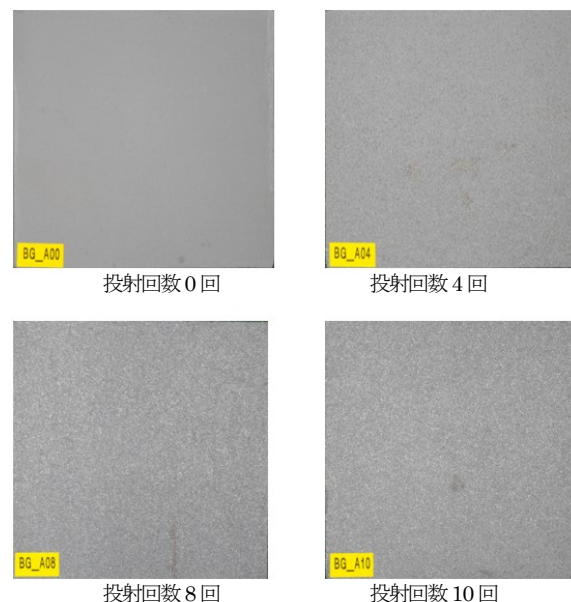


図4 試験体の外観（代表例）

Fig.4 Test Specimen Appearance(example)

3.2 試験体の計測要領

3.2.1 ターゲットスペクトルカメラでの計測

スペクトルカメラによる試験体の計測は、図5に示すようにカメラスタンドを用いて計測距離を 500 mm に設定し実施した。外部光の影響を排除するため計測は暗室内で行った。

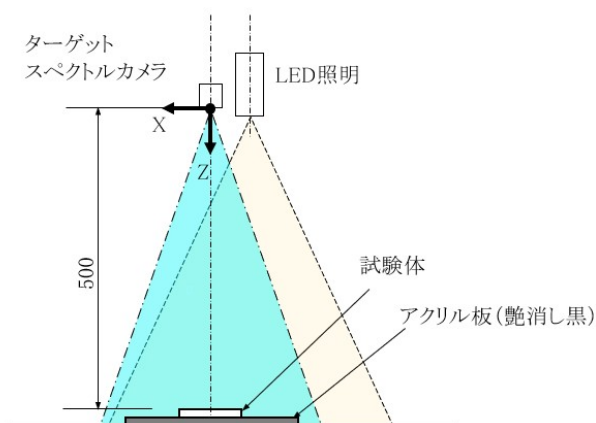


図5 試験体の計測要領

Fig.5 Experimental Method for the Test Specimen

3.2.2 表面性状の計測

ターゲットスペクトルカメラでの計測結果から得られる評価指標 NDSI を用いて試験体の表面性状の定量評価を試みた。評価項目としては表面粗度および残留ショッププライマ面積比率を対象とした。

表面粗度の計測には、共焦点レーザ顕微鏡(キーエンス、型式：VK-X3000)を用い、試験体の三次元表面粗さ分布を高精度に取得した。ここでの表面粗度の評価は、面粗度パラメータ S_z および線粗度パラメータ R_z を用いた。本計測では時間的制約により、試験体数を 5 体に限定した。また、残留ショッププライマの面積比率は、デジタルマイクロ스코プ(キーエンス、型式：VHX-8000)により取得した拡大写真を用いて算出した。画像中の残留ショッププライマ領域は手動で抽出し面積比率を定量的に評価した。試験体表面性状の計測に用いた領域を図 6 に示す。

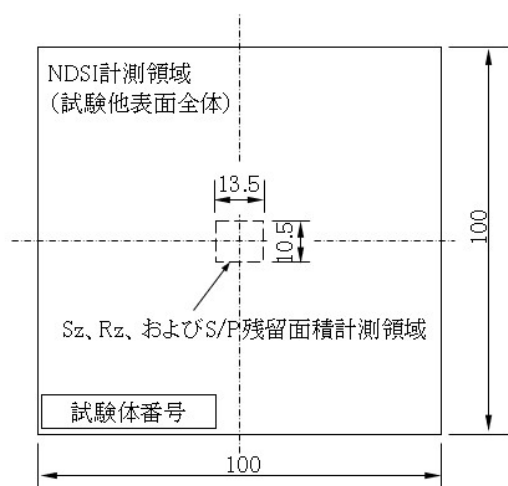


図 6 試験体表面の計測領域

Fig.6 Measurement Region on the Surface of the Test Specimen

3.3 試験体の計測結果

図 4 で示した試験体をターゲットスペクトルカメラで計測した結果を図 7 に示す。得られた NDSI の分布から、ブラスト投射回数の増加につれて、すなわち下地処理品質が向上するにつれて NDSI が高くなる傾向が確認された。この傾向は下地処理品質が低い領域であるブラスト投射回数の少ない試験体において顕著に認められた。ブラスト投射回数が 7~8 回を超える付近では、NDSI の変化量は僅少となり、ブラスト投射回数による影響が飽和傾向を示すことが確認された。

三次元表面粗さ(S_z)の計測結果を図 8 示す。ブラス

ト投射回数と三次元表面粗さ(S_z)との間には、ターゲットスペクトルカメラによる計測結果と同様の傾向が認められた。

図 9 に NDSI と表面粗度 (S_z および R_z) の関係を示す。面粗度 S_z は線粗度 R_z より大きな値を示す傾向があったが、両者とも NDSI と強い相関を示し、相関係数 r はそれぞれ、0.91 および 0.92 であった。図 10 は、NDSI と試験体表面におけるショッププライマ除去率(面積比率)の関係を示しており、破線はその関係に対する指数関数近似曲線を表している。ショッププライマ除去率は NDSI が 0.0 付近までは、見かけ上 NDSI に比例して増加し、NDSI が 0.05 を超える付近では飽和傾向を示している。この現象は、NDSI が 0.05 を超える領域では、鋼板表面の金属光沢部および粗度の増加により光の拡散が促進され、短波長域の反射強度が相対的に低下することで、NDSI の増加傾向が強まるためと考えられる。

これらの計測結果から、ブラスト処理後の鋼板表面状態を評価する代表的な評価項目である、表面粗度およびショッププライマ除去率に対し、NDSI を指標として定量的に評価可能であることを確認できた。

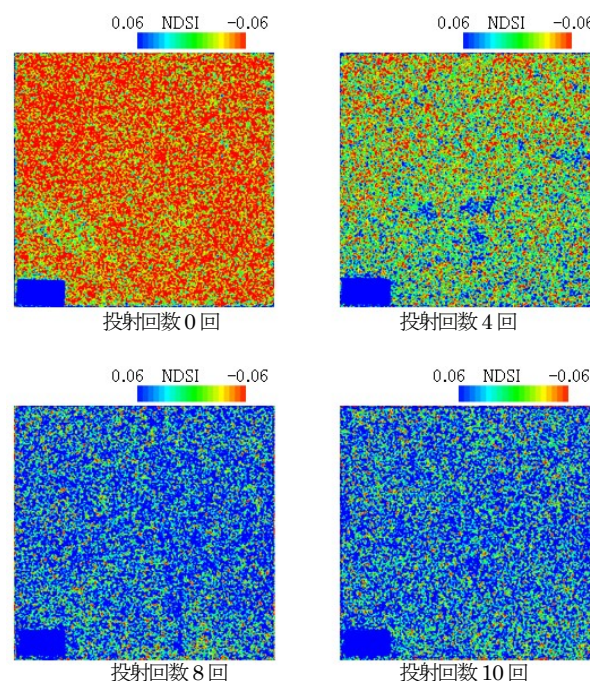


図 7 ターゲットスペクトルカメラによる計測結果

Fig.7 Measurement Results Obtained Using the Target Spectral Camera

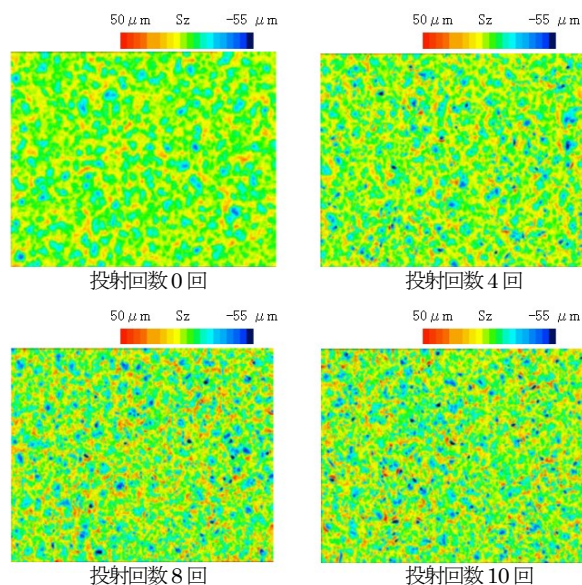


図8 三次元表面粗さ(S_z)の計測結果
Fig.8 Results of Tree-Dimensional Surface Roughness (S_z) Measurement

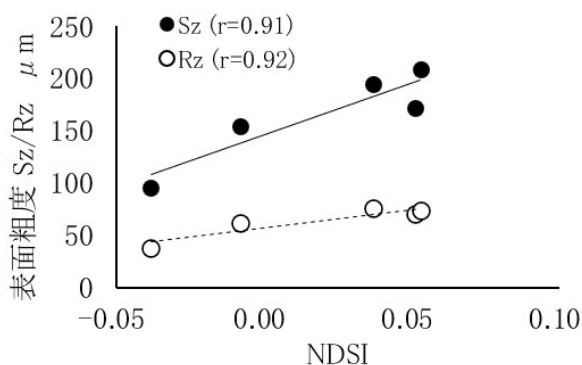


図9 NDSI と表面粗度 (S_z および R_z) の関係
Fig.9 Relationship Between NDSI and Surface Roughness Parameters (S_z and R_z)

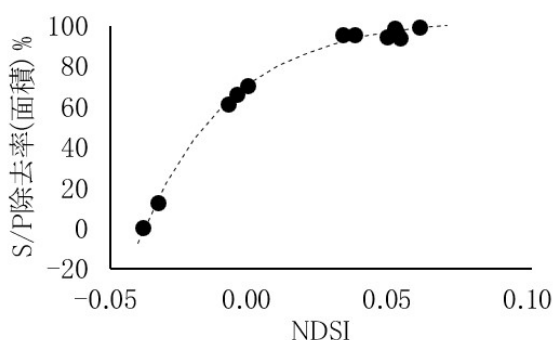


図10 NDSI とショッププライマ除去率の関係
Fig.10 Relationship Between NDSI and Shop Primer Removal Rate

4. 実船ブロックでの計測

4.1 実船ブロックの計測要領

建造中の実船ブロックのブラスト処理後の品質検査のタイミングで開発した計測装置を用いて、PSPC 対象区画の計測を行った。計測対象の実船ブロックは、大型船のバラストタンクとした。図 11 にバラストタンクの外観を示す。

実船ブロックの計測では、計測距離を 1,000 mm に設定し、再現性の確保と外乱光の影響を補正するため、計測条件自動検出機能と環境光補正機能を有効にして計測を実施した。鋼板表面の計測範囲は、横 285mm×縦 225mm である。鋼板表面性状の評価項目は、ポータブル型表面粗度計 (Mitutoyo、型式: SJ-210) を用いた線粗度(R_z)とした。計測位置は計測範囲中央部とした。図 12 に実船ブロック内での計測状況を示す。



図11 実船ブロックの外観例 (バラストタンク)
Fig.11 Example Appearance of Hull Block (Bilge Tank)

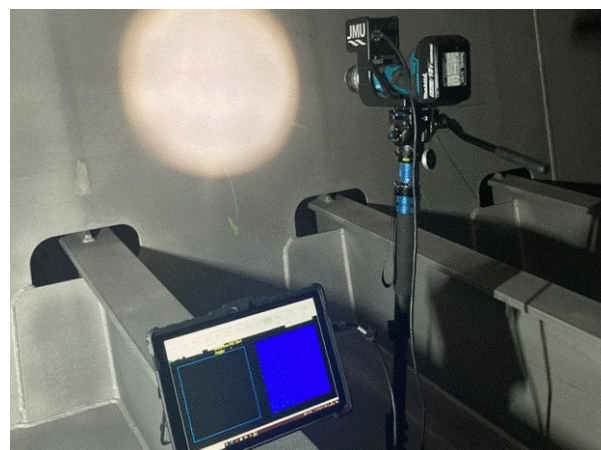


図12 実船ブロック内での計測状況
Fig.12 Measurement Conditions Inside the Hull block

4.2 実船ブロックの計測結果

図 13 に NDSI と実船ブロックおよび試験体での表面粗度 (R_z) の計測結果を示す。実線は試験体における計測結果に基づく近似直線を示している。実船ブロックにおける計測結果は、暗室環境下で取得した試験体の計測結果と良く一致しており、外乱光の影響を補正することで再現性が確保可能であることを確認できた。

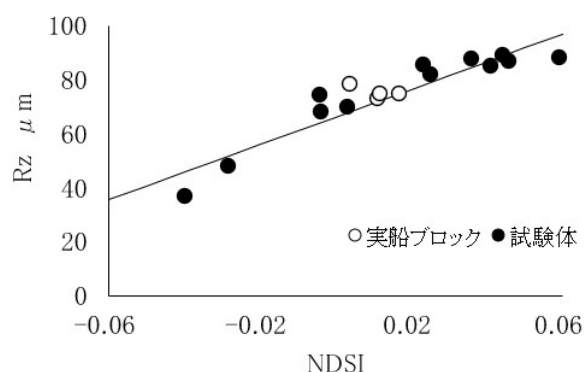


図 13 NDSI と表面粗度(R_z)の計測結果

Fig.13 Measured Relationship Between NDSI and Surface Roughness (R_z)

5. 結言

本研究では、NDSI を用いたブラスト処理後の鋼板表面状態の定量評価において、検証試験で使用したハイパースペクトルカメラに代わり小型かつ軽量のターゲットスペクトルカメラを採用した計測装置を開発した。開発した装置には現場環境に対応するため、計測条件の自動検知機能および環境光補正機能を搭載し、現場計測への適用性を高めた。

試験体を用いた計測試験により、ブラスト処理後の鋼板表面状態を定量的に評価可能であることを確認するとともに、実船ブロックへの適用においても今後のデータ蓄積を要するものの、検査装置としての有効性を示すことができた。

なお、本研究においては、鋼板表面の三次元表面性状の計測技術に関する共同研究を通じて、九州大学大学院工学研究院・田中先生には貴重なご助言とご支援を賜りました。謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) https://www.wabrasives.com/en/technologies/WA_Clean-surface-preparation.html, accessed 2023/2/21

- 2) 田中太氏、篠田岳思、石川祥太郎：塗装工程のデジタル化のための光学的解析によるブラストグレード識別装置の実用化に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 38 号、pp.351-352、(2024)
- 3) 篠原紀昭、木治昇：ハイパースペクトルカメラによる塗装前の鋼板表面状態の定量評価、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 36 号、pp.319-322、(2023)
- 4) 井上吉雄、ギャッシュディン ミア、境谷栄治、中野憲司、川村健介：ハイパースペクトル計測に基づく正規化分光反射指数 NDSI マップおよび波長選択型 PLS による植物・生態系変量の評価—米粒タンパク含有率・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例として—、日本リモートセンシング学会誌、28 巻 4 号、pp.317-330、(2008)
- 5) 横山正樹、井上吉雄、後藤元、小手和徳：ドローン搭載マルチバンド・ハイパースペクトルカメラの反射特性の解析と圃場観測、計測と制御、第 55 巻、第 9 号、pp.810-913、(2016)
- 6) 増田貴大、坂川涼、洞井晋一、東田光裕：高精度な分光画像を収集する撮影システムの検討と評価、マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム、(2017)



篠原 紀昭