

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発 (フェーズ2)

—塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト—

2023 年度成果報告書

概要版



2024 年 3 月

一般財団法人 日本船舶技術研究協会

目次

| | |
|--|----|
| はしがき..... | 1 |
| 1. 目的..... | 2 |
| 2. 研究開発の概要及び研究開発体制..... | 2 |
| 3. SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの改良..... | 3 |
| 3.1 撮影範囲の拡大、感度の向上..... | 3 |
| 3.2 カメラと光源の一体化..... | 4 |
| 3.3 撮影方式の最適化..... | 4 |
| 3.4 改良したカメラの実証実験..... | 5 |
| 4. 非 SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの開発..... | 6 |
| 4.1 非 SI 塗料用カメラ開発のためのハイパースペクトル解析..... | 6 |
| 4.2 開発した非 SI 塗料用カメラの実証実験..... | 7 |
| 5. 画像解析による塗膜欠陥検出システムの開発..... | 8 |
| 6. 計測した膜厚データの活用に関する検討..... | 10 |
| 6.1 3次元モデル上への膜厚計測結果マッピングの検討..... | 10 |
| 6.2 バラストタンク壁面等への膜厚計測結果投影法の検討..... | 11 |
| 7. 成果報告会の開催..... | 12 |
| 8. まとめ..... | 13 |
| 添付資料 1 塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 研究会参加者名簿..... | 14 |
| 添付資料 2 塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 会議等開催状況..... | 16 |
| 添付資料 3 塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 参加者業務分担..... | 18 |
| 参考資料 1 塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ 2 事業概要..... | 20 |

はしがき

本報告書は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施した「塗装工程の自動化・デジタル化研究開発(フェーズ2)」事業の中の「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト」の2023年度の成果をとりまとめたものである。

1. 目的

建造設備の拡張等を背景とした中国・韓国の造船所との国際競争にさらされる中、国内で引き続き造船業を幹産業として持続的に発展させるためには、国内造船が得意とする環境対応船等の商品力向上に加え、建造設備の拡張等の規模の力を背景とする海外勢に対し、新技術活用による建造効率と建造品質の向上が不可欠である。

特に、塗装についてはその工程のほとんどが手作業で、その品質も施工者の技能に依存しているため、作業工数は極めて大きく、品質の均一性の確保も困難であり、改善余地は大きい。

塗装の重要な工程である船体ブロックの塗装後の塗膜厚計測については、規定膜厚を判定するため、膨大な点計測を造船所検査員の手作業にて行っており、また不足膜厚防止のため過剰膜厚となる部分もあり、労力や材料コストの増加の要因となっている。

この課題を解決するためには、造船所の塗装現場で塗装後の塗膜厚を容易に面計測できるデジタル計測機器を開発する必要があり、本委託研究では、ハイパースペクトル技術を用いて、デジタル計測機器のプロトタイプ機を製作してその有効性を検証するとともに、計測結果をビッグデータとして活用するデータ処理システム実用化の課題を明確にし、デジタル計測機器とデータ処理システムを統合した塗膜管理システムの構築を目的とする。

2. 研究開発概要及び研究開発体制

2022年度に「塗装工程の自動化・デジタル化研究開発」事業の中で、SI 塗料（Self Indication 塗料）用のターゲットスペクトルカメラを用いた塗膜厚計測器の試作機の製作・改良を行ってきた。また、塗膜データ管理システムの開発を行い計測データの転送システムやクラウド上でデータを保存、表示するシステムを構築した。

2023年度は、これらの結果を踏まえ、以下の研究を実施した。

(1) SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの改良

2022年度に実施した造船現場における実証試験の結果をもとに、SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの改良及び撮影方法に関する最適化の検討を実施した。また、改良されたターゲットスペクトルカメラを用いて造船ブロックにおける検証試験を実施し、改良したカメラの性能評価を行った。

(2) 非 SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの開発

2022年度の試験片を用いた非 SI 塗料に対する計測可能性の検討結果に基づき非 SI 塗料用に対する膜厚計測用のターゲットスペクトルカメラの開発を行った。また、開発されたターゲットスペクトルカメラを用いて造船ブロックにおける検証試験を実施し、開発したカメラの性能評価を行った。

(3) 画像解析による塗膜欠陥検出システムの開発

膜厚計測によって取得した面的膜厚データ（または膜厚計測時に撮影した画像データ）を解析し、タレやゆず肌などの塗膜表面欠陥を検出する方法（データや画像の解析方法）の開発を行った。

(4) 計測した膜厚データの活用法に関する検討

膜厚計測によって検出された不具合箇所の情報は、実際に修正作業を行う作業者に正しく伝達されなければならない。そこで、作業者に判りやすい形で不具合箇所を表示できる手法を検討した。

膜厚計測結果を3次元CADモデル上にマッピングする技術やタンク壁面に計測結果を投影する手法について検討を行った。

なお、本プロジェクトは、下記の研究参加者間で共同研究契約を締結し、「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト研究会」を立ち上げ、研究会において研究開発を実施した。

研究会参加者

○今治造船株式会社（幹事）

○ジャパン マリンユナイテッド株式会社

- 住友重機械マリンエンジニアリング株式会社
- 常石造船株式会社
- 内海造船株式会社
- 一般財団法人日本船舶技術研究協会（事務局）

有識者

- 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

関係者

- 一般社団法人日本造船工業会

3. SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの改良

2022 年度に膜厚の自己指示（Self Indication: SI）機能を有した塗料である SI 塗料を対象とした膜厚測定用ターゲットスペクトルカメラ（数種類程度の波長の反射光で画像を撮影することができるカメラ）をエバ・ジャパン（株）に委託し開発した。2023 年 1 月に開発したカメラの性能を検証するための実証試験を行い、結果、以下の点が改善すべき項目として挙げられた。

- ・撮影範囲の拡大
- ・カメラ感度の向上
- ・カメラと光源の一体化
- ・撮影方法の最適化

以上の 4 項目について、エバ・ジャパン（株）に委託しターゲットスペクトルカメラの改良（機能追加等）を実施した。改良後、カメラの検証のため、実船のバラスタタンクを対象に実証試験を行った。

3.1 撮影範囲の拡大、感度の向上

ターゲットスペクトルカメラに使用するレンズを焦点距離が $f=12\text{mm}$ のレンズから $f=6\text{mm}$ のレンズに変更することにより撮影範囲を拡大した。図 1 にレンズの変更による撮影範囲の変化を示す。従来のレンズでは $40\text{cm}\times 32\text{cm}$ の撮影範囲（図の黒枠領域）であったが、レンズ変更により撮影範囲を $80\text{cm}\times 64\text{cm}$ （図の赤枠領域）に拡大させた。なお、試験片とカメラとの距離は約 1m で撮影している。

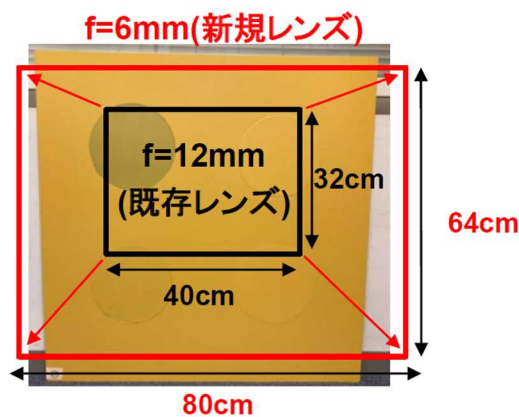


図 1 レンズ変更による撮影範囲の変化
エバ・ジャパン（株）提供

レンズ変更による撮影範囲の拡大とともに、光学系の改良等によりカメラの感度を向上させた。図 2 に感度向上前後の比較結果を示す。感度の向上により、同じ照明条件および撮影条件でもより明るい画像が撮影できるようになった。また、改良前後のそれぞれで膜厚測定を行った結果（「スペクトル解析画像」）から、感度向上により画像内の色ムラ（ノイズ）が低減し精度が向上していることがわかる。

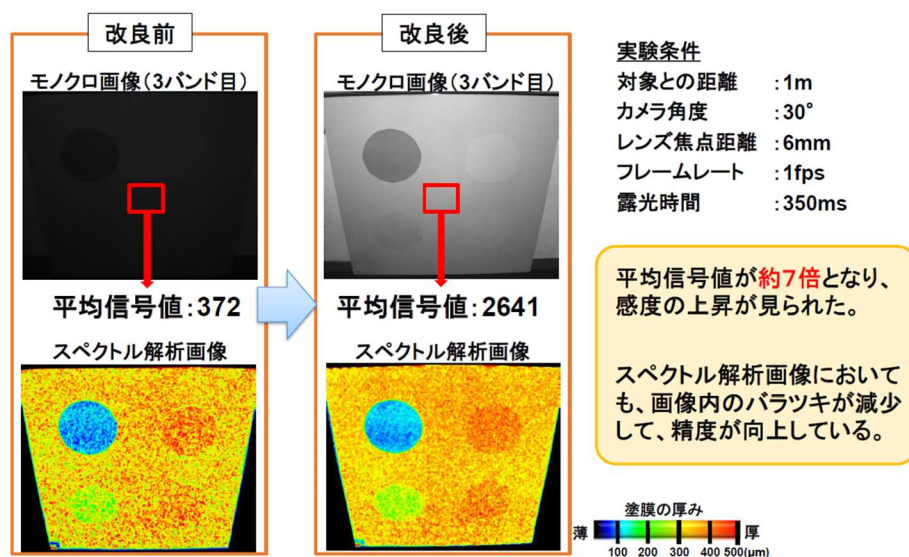


図2 感度向上の効果
 エバ・ジャパン (株) 提供

3.2 カメラと光源の一体化

ターゲットスペクトルカメラとLED光源との位置関係を一定に保つことで、膜厚測定精度を向上させることを目的に、専用の治具を作成しターゲットスペクトルカメラと光源とを一体化させた。一体化させた状態の外観を図3に示す。



図3 カメラと光源との一体化
 エバ・ジャパン (株) 提供

この様にカメラと光源を一体化させることで撮影条件の均一化が図れる。

3.3 撮影方法の最適化

膜厚計測面に対して垂直な方向から撮影を行うと直接LEDの照明が当たる部分に強い反射光(鏡面反射光)が計測され、膜厚測定時のノイズとなる。このため、反射光の影響を軽減するための最適な撮影方法について検討した。具体的には、撮影時に撮影対象に対してカメラを傾ける(角度をつける)ことにより、鏡面反射光の影響軽減を図った。

図4にカメラ角度と膜厚測定結果の関係を示す。角度が0°の条件では画像中心付近に鏡面反射光による膜厚測定誤差が生じている(図の「鏡面反射成分」の箇所)。角度20°、25°でも鏡面反射によるノイズが含まれているが角度の増大に伴ってその大きさは小さくなっている。角度が30°以上の条件では鏡面反射によるノイズが消えている。一方、角度が大きくなるほど計測対象の壁面が傾いて撮影されるため、必要最小限の角度が望ましい。このため、本研究では30°が最適な撮影角度であると考えた。

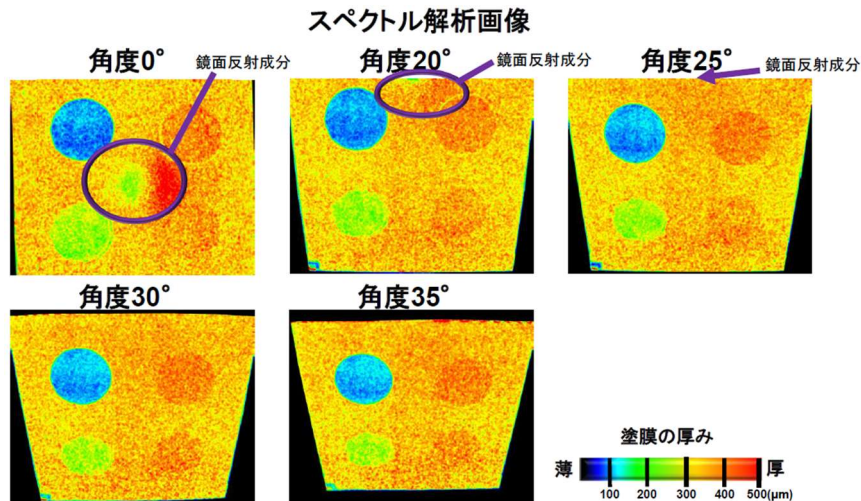


図4 カメラ角度と膜厚測定結果との関係

エバ・ジャパン (株) 提供

3.4 改良したカメラの実証試験

改良したカメラを検証するため、実船のバラストタンクを対象に実証試験を行った。

図5の右は計測した膜厚分布をカラーマップで表示したものである。膜厚が薄い箇所は青系の色で表示されている。マンホール近傍の薄膜部が青色で表示されており、実際の膜厚に対応した結果が得られている。なお、カラーマップの上部に赤色の領域が表れているが、これは補正時のエラーによるものであり実際に厚膜の領域が存在している訳ではない。

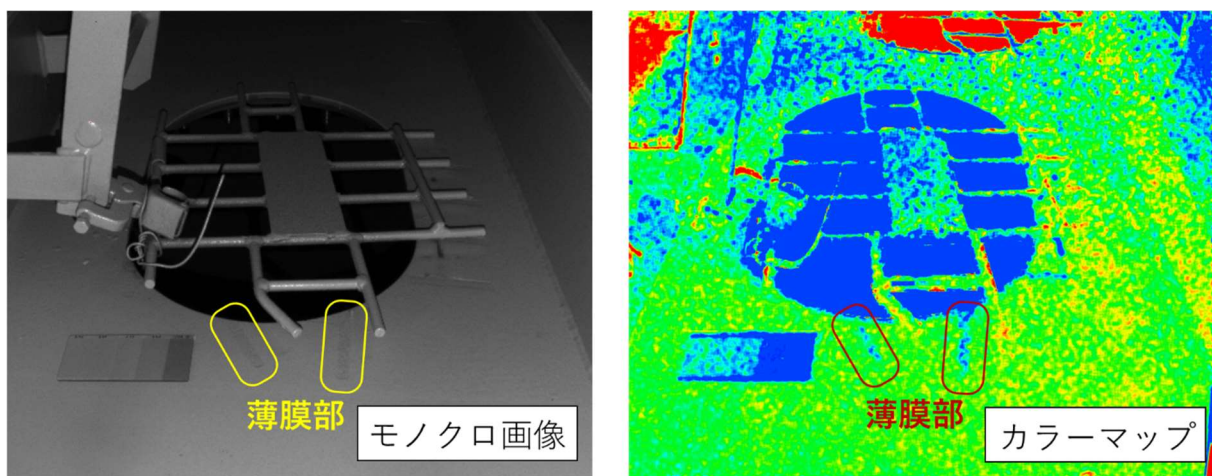


図5 膜厚分布の計測例：マンホール近傍

平坦の塗装面の他、たれやゆず肌等の塗装欠陥が見られた部分の撮影も実施したが、現場における計測では欠陥を検出することは出来なかった。カラーマップ作成時のパラメータの設定の最適化などにより検出出来る可能性もあり今後の検討課題となった。

改良したSI塗料用ターゲットスペクトルカメラの実証試験の結果を以下にまとめる。

- 平坦な塗装面については、実際の塗膜厚分布を反映した比較的良好な結果が得られた。
- タレやユズ肌などの塗膜欠陥については検出することはできなかったが、計測精度の改善により検出できるようになる可能性がある。

4. 非 SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの開発

2022 年度には SI 塗料を対象とした膜厚測定用ターゲットスペクトルカメラを開発した。しかし、SI 塗料以外の塗料（以下、非 SI 塗料と呼ぶ）を使用している造船所も多い。2022 年度に試験片を用いたハイパースペクトルカメラによる計測可能性を検証する試験を実施し、非 SI 塗料においても計測が出来る可能性が示された。このため、今年度は非 SI 塗料の膜厚を測定するためのターゲットスペクトルカメラをエバ・ジャパン（株）に委託し開発した。

まずは試験片を用いて、塗膜からの反射光スペクトルを詳細に調査した。次いで調査の結果に基づき非 SI 用ターゲットスペクトルカメラを開発した。最後に開発したカメラの性能を検証するための実証試験を行った。

4.1 非 SI 塗料用カメラ開発のためのハイパースペクトル解析

作成した試験片を用いて、非 SI 塗料の反射光スペクトルをハイパースペクトルカメラを使って詳細に調べた（図 6 参照）。

図 7 にクリーム色の階段状試験片の撮影結果を示す。スペクトルグラフから膜厚が増大すると相対反射率も大きくなっていくことがわかる。膜厚の推定結果を図の左下に示す。膜厚が薄いところは青系の色で、厚いところは赤系の色で表示するカラーマップで膜厚分布推定結果を表した。おおよそ 200 μm の膜厚までは、塗膜厚が厚くなるのに応じてカラーマップの色が変化していることがわかる。一方、200 μm 以上の領域ではカラーマップの色は同様になっている。このことから、今回用いたクリーム色の非 SI 塗料については、200 μm 以下の塗膜厚については膜厚測定が可能であると考えた。

| | |
|---|---|
| <p>評価目的</p> <p>非SI塗料の塗膜厚評価カメラの開発に向けて、ハイパースペクトルカメラを用いて、塗膜厚が異なる19種の塗装サンプルの膜厚評価の可能性を検証した。</p> <p>尚、光源には現場環境を想定したLEDライトを使用し、対象からの反射光を取得している。</p> | |
| <p>計測機材</p> <p>ハイパースペクトルカメラ NH-8</p>  <p>【測定波長域】：380nm～1000nm 【波長分解能】：5nm 【画像解像度】：122.8万画素 (1200×1024pixel)</p> | <p>撮影風景</p>  <p>ハイパースペクトルカメラ NH-8 LED照明 サンプル</p> <p>今回、2022年に実施したSI塗料での計測の知見をもとに、計測を実施した。</p> <p>照明の角度をつけ、偏光フィルターを用いて、鏡面反射の影響を極力避けて計測を行った。</p> |

図 6 ハイパースペクトルカメラによる撮影の概要

エバ・ジャパン（株）提供

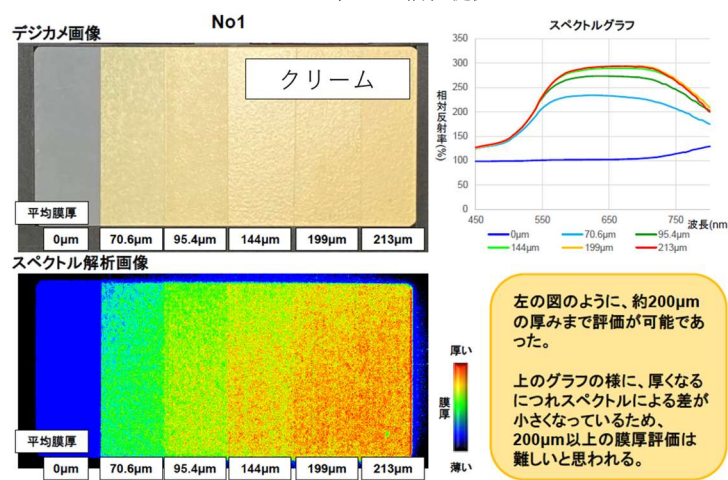


図 7 クリーム色の階段状試験片の解析結果

エバ・ジャパン（株）提供

同様にライトグレーの塗料及び1層目にクリーム色の塗料を挟んだライトグレーの塗料の計測も実施した。結果、今回計測対象としたライトグレーの塗料では約110 μm の膜厚まで、1層目にクリームを挟んだライトグレーの塗料では、約160 μm の膜厚まで計測できる可能性が示された。

4.2 開発した非SI塗料用カメラの実証実験

開発した非SI用ターゲットスペクトルカメラを検証するため、実船のバラストタンクを対象に実証試験を行った(図8参照)。

| | |
|--|--|
| <p>計測目的</p> <p>非SI塗料膜厚評価用に開発したターゲットスペクトルカメラを用いて、現場(実船ブロック壁面)における適用可能性の検証を行った。</p> | |
| <p>計測機材</p> <p>非SI塗料膜厚評価用試作カメラ</p> <p>【取得波長数】3バンド</p> <p>【画像解像度】30.7万画素(640×480 pixel)</p>  | <p>計測風景</p> <p>本試験においては、以下のような撮影セットで計測を行った。</p>  |

図8 非SI塗料用カメラの実証試験の概要

エバ・ジャパン(株)提供

図9に実際のバラストタンク壁面を計測した例を示す。一層目のクリーム色で塗装された壁面である。図の左がカラー画像(肉眼で観測するものと近い見た目の画像)、右側が膜厚分布をカラーマップで表現した画像である。画像の上方には部分的にライトグレー色(二層目)が塗装されている領域が写っている。クリーム色とライトグレー色の間は2つの色がまだらに混在している領域となっている。ターゲットスペクトルカメラによる撮影データを解析し、膜厚分布をカラーマップで表示した。図9の膜厚分布はクリーム色塗料の膜厚を表している。クリーム色塗料が塗装された領域は膜厚が厚いことを意味する赤系の色で、クリーム色がライトグレー色によって隠蔽された領域は膜厚が無いことを意味する青色で表示されている。また、クリーム色とライトグレー色が混在している領域は塗膜が中間的な膜厚であることを意味する緑色で表示されている。以上の通り、実際の塗装の状態に即した膜厚分布が得られた。

図10はライトグレー色を対象とした膜厚測定の結果である。撮影した壁面は下部がライトグレー色で塗装されており、上部はクリーム色とライトグレーが混在した領域となっている。膜厚分布を表すカラーマップでは、ライトグレー色が塗装された領域は膜厚が厚いことを意味する赤色で表示されている。また、クリーム色が混在している領域では、(クリーム色の上に塗装される)ライトグレー色が未塗装の箇所は塗膜がないことを意味する青色で、ライトグレー色がまばらに塗装されている箇所は緑色で表示されている。また、各領域の境界も明確に表示されている。以上の様に、ライトグレー色についても塗装面の膜厚分布が正確に計測されている。図9と図10でクリーム色、ライトグレー色それぞれを対象とした膜厚測定結果を示した。これらはいずれも同一の非SI用ターゲットスペクトルカメラ(図8)を用いて撮影したデータに基づき解析を行って算出した結果である。非SI用ターゲットスペクトルカメラの解析ソフトで計測対象とする塗料(クリーム色またはライトグレー色)を選択する(モードを切り替える)ことで、その塗料に応じた膜厚分布が表示される。

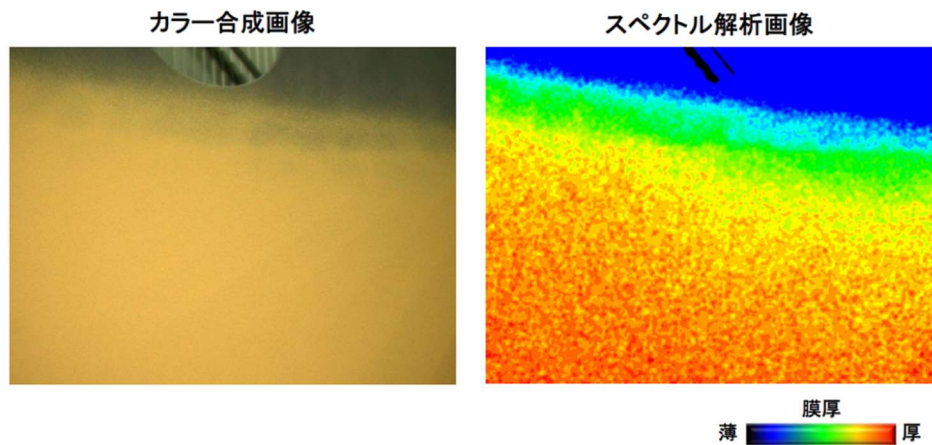


図9 膜厚分布の計測例Ⅰ：クリーム色（一層目）が塗装された壁面
エバ・ジャパン（株）提供

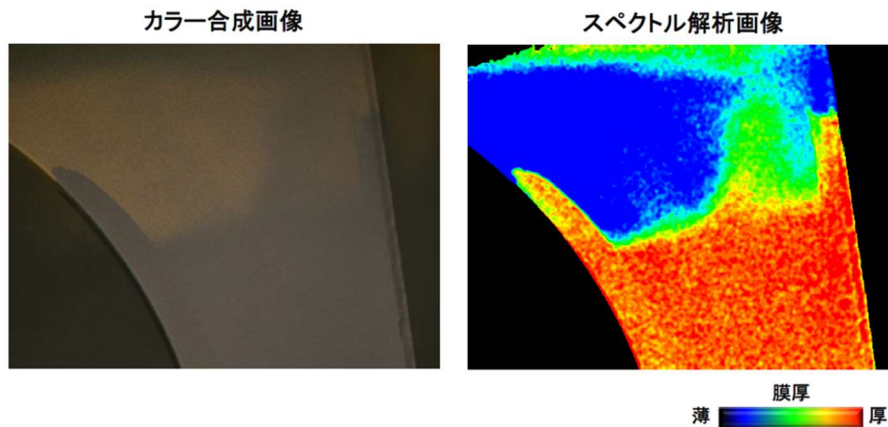


図10 膜厚分布の計測例Ⅱ：ライトグレー色（二層目）が塗装された壁面
エバ・ジャパン（株）提供

以上に示した通り、今回開発した非SI用ターゲットスペクトルカメラを用いて実船のバラスタタンク塗装壁面を計測した結果、実際の膜厚状態に応じた膜厚分布カラーマップが得られ、開発機の性能が実地で検証できた。一方で、屋外に置かれたブロックの計測した際は、撮影の前準備として計測時のノイズとなる外乱光（太陽光等）をさえぎるための作業が必要となった。具体的には、太陽光が射し込んでくるブロック開口部などを段ボールで塞ぎノイズ低減を図った。この様に撮影時にはある程度の前準備が必要となる場合がある。

5. 画像解析による塗膜欠陥検出システムの開発

図11は昨年度来、本プロジェクトで構想している「塗膜厚管理システム」の概要である。ターゲットスペクトルカメラを用いて建造船内で撮影された画像および解析結果（データ）は、無線LAN中継機（鋼製の船では無線通信が困難であるため中継機を用いる）を介してクラウド上にアップロードされる。クラウド上に送られたデータは、事務所等からクラウドにアクセスすることにより閲覧・確認することができる。昨年度には i) 無線LAN中継機等による船内データ転送システム、ii) データをローカル（現場で計測したタブレットPC等）からクラウドにアップロードするためのデスクトップアプリ、iii) クラウド上のデータを閲覧するためのwebアプリ等を開発し、今年度は開発されたプロトタイプの機能の拡充を行った。具体的には

- 塗膜厚計測結果（カラーマップ）から塗膜欠陥を検出する「塗膜欠陥検出機能」の開発

- クラウド上の不要なデータを削除する「データ削除機能」の追加

の2つの機能開発を行った。これらの追加機能はデスクトップアプリへの追加する形で作成した。なお、昨年度のデスクトップアプリおよびwebアプリの開発ならびに今年度の追加開発は(株)シルク・ラボラトリに委託して実施した。

今年度開発した「塗膜欠陥検出機能」の概要を図12に示す。図の左は試験片を撮影したデジタルカメラ画像である。ここでの試験片は、代表的な塗膜欠陥の一つであるタレを意図的に発生させたものである。図の右は当該試験片をスペクトルカメラを用いて撮影・解析した結果の膜厚カラーマップ画像である。塗膜欠陥検出機能では、タレの領域を検出し、矩形で囲んだ表示を出力し、画像上での座標位置を算出する。

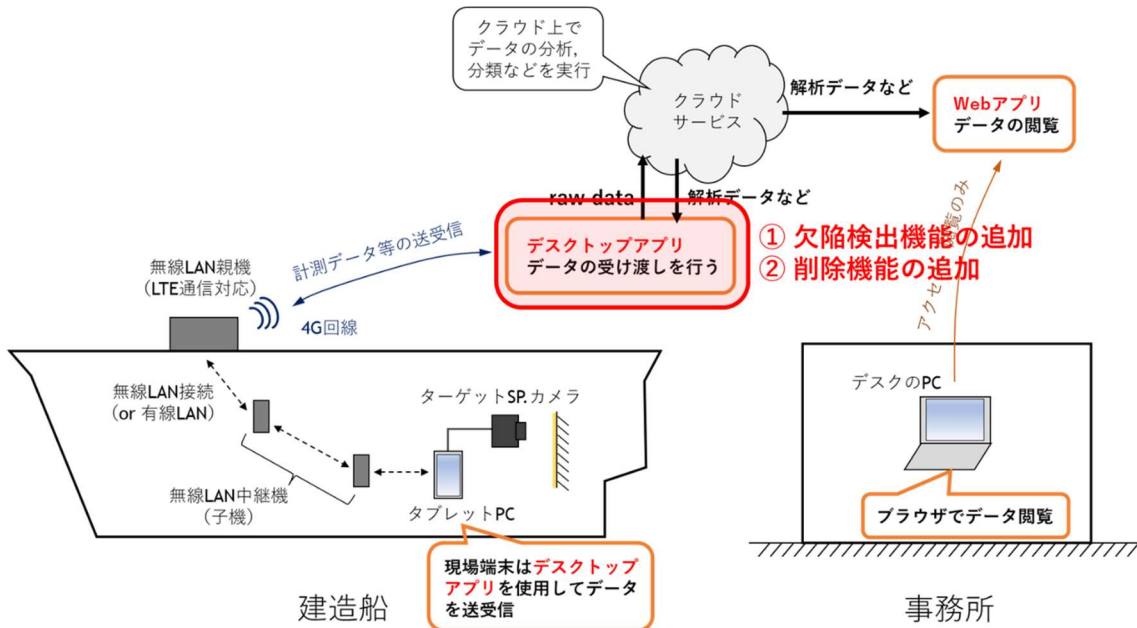
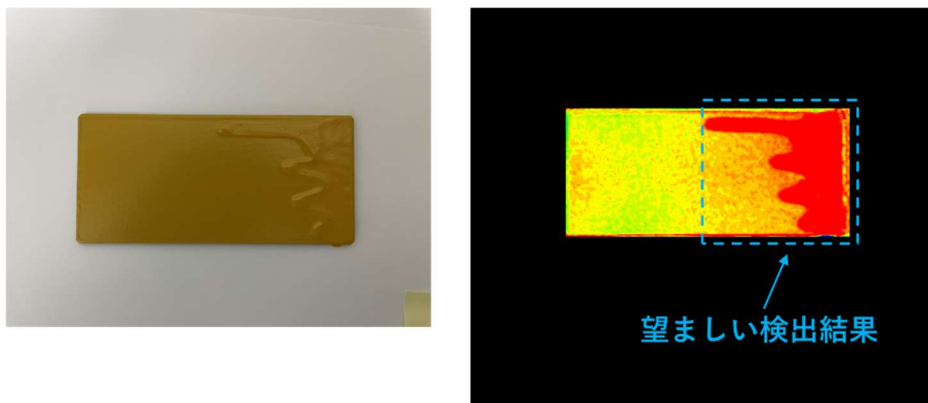


図11 塗膜厚管理システムの概要



※ 「欠陥検出機能」で得たい結果

図12 塗膜欠陥検出機能の概要

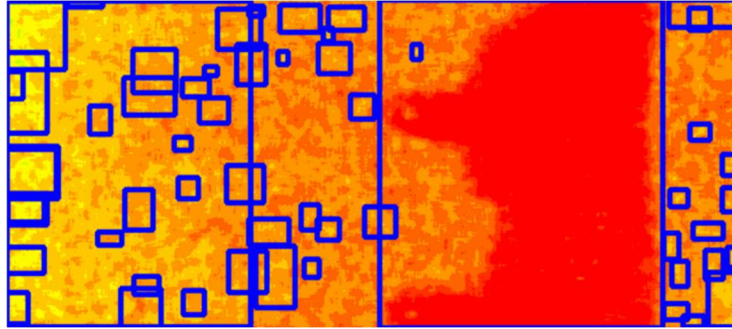


図 13 塗膜欠陥検出結果の例

図 13 の欠陥検出結果の例では、検出したいタレの領域以外にも多数の領域が欠陥候補として検出されている。欠陥検出時のパラメータを調整することで検出される欠陥のサイズなどを指定することができるため、パラメータを適切に設定すれば本来必要なタレの領域のみを検出できる。

図 14 に塗膜欠陥検出機能を追加したデスクトップアプリの画面を示す。塗膜欠陥検出が終了すると、図 14 の画面が表示され、欠陥候補として検出された領域が矩形で囲まれて表示される。また、右側のリストに検出された各欠陥候補領域の画像上の座標値が出力される。

以上が今年度開発した欠陥検出機能の概要である。試験片を用いて、タレやユズ肌など比較的面積の大きい欠陥については検出が可能であることを確認している。一方で、ピンホール等の比較的面積が小さい欠陥については現状の機能では検出が困難な場合があると想定される。そのため、欠陥検出機能を用いる際は、現状では人間の目視によるダブルチェック等も合わせて行う必要があると考える。ピンホール等の細かな欠陥を検出するためには、アルゴリズムの改善が必要だと思われる。

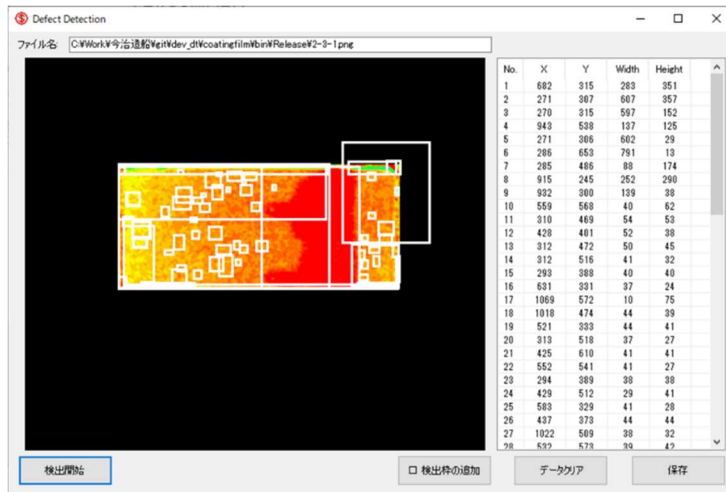


図 14 塗膜欠陥検出の結果表示

6. 計測した膜厚データの活用法に関する検討

6.1 3次元モデル上への膜厚計測結果マッピングの検討

計測した膜厚カラーマップデータを活用する方法の一案として、3次元モデル上へのマッピングの実現可能性を検討した。実際に3次元データへのマッピングを行う手段として Structure from Motion（以下、SfM と略記する）に着目した。SfM は対象を多数の視点から撮影した多数の画像から、撮影対象の3次元形状を復元する手法である。SfM は単純な平面だけではなく、曲面あるいはロンジ等がある複雑な形状に対しても形状が計測できる可能性がある。図 15 は試行として海上技術安全研究所 8 号館に保管されている 2 m 程度のブロック模型の画像を撮影し、SfM で3次元形状を復元した結果である。ロンジなどの比較的複雑な形状についても良好に3

次元形状が復元できていることがわかる。今年度は、実船のバラストタンク内の塗装面を対象に、SfMによる3次元形状復元を試みた。

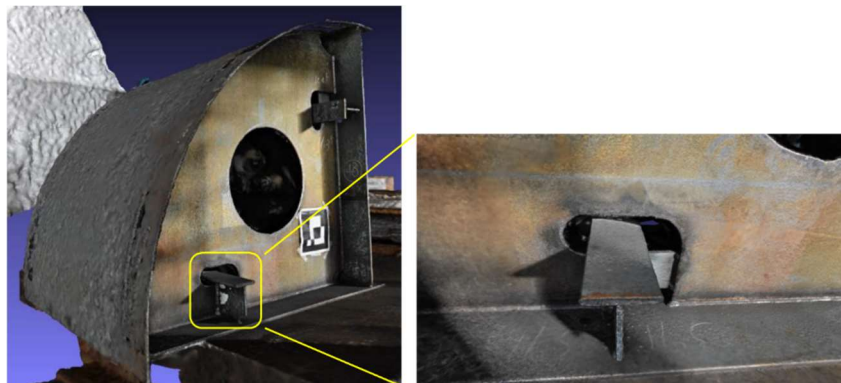


図 15 SfMによるブロック模型の3次元形状計測例

バラストタンク内の一区画について、デジタルカメラで多数の画像（1,100枚程度）を撮影し、SfM解析ソフト「Metashape Professional」を用いて撮影した全画像からバラストタンクの3次元形状復元を試した（図16）。その結果、対象区画のほとんどの壁面の形状を復元することができなかった。これは、塗装後のタンク内壁面の見た目が一様であり、場所ごとの特徴づけが困難であったためと考える。SfMでは撮影した画像内の特徴量を分析し複数枚の画像から同一の撮影箇所を同定することで3次元形状を復元するが、今回の撮影対象であるバラストタンク壁面では場所ごとの見た目の差異がほとんどなかったために撮影箇所同定がほとんどの場所についてできていなかった。区画の天井付近の一角のみ、ある程度の形状復元ができた（図16右）。これはこの箇所に塗装の塗り残しがあったため、かろうじて特徴づけが出来たためと考える。

以上に述べた通り、塗装後のバラストタンク内壁面についてはSfMによる3次元形状復元が困難であることがわかった。膜厚計測結果のカラーマップを3次元モデル上にマッピングするには、別途用意したバラストタンクの3次元CADデータ上に計測結果画像を貼り付けていく方法等が考えられるが、各カラーマップ画像の撮影対象位置を正確に記録しておく必要がある等、多くの手間がかかることから現実的ではないと思われる。

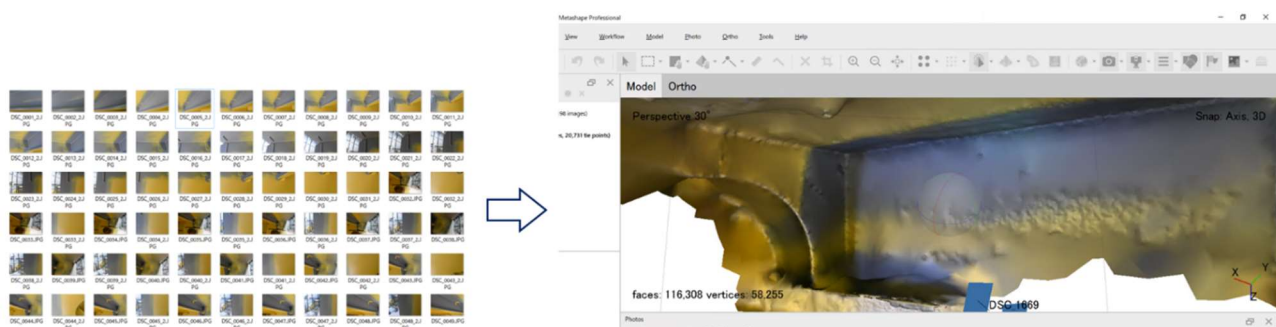


図 16 SfMによる実船バラストタンク内の3次元形状計測の結果

6.2 バラストタンク壁面等への膜厚計測結果投影法の検討

計測した膜厚カラーマップを直接塗装面に投影表示できれば、塗装の膜厚チェック等の際に膜厚の過不足箇所が一目で判り、有用と思われる。そこで、簡便に塗装面へのカラーマップ投影が行える装置を構想した。図17に装置の概要を示す。この装置はハーフミラーを利用し、ターゲットスペクトルカメラで撮影した領域にプロジェクタで画像を投影する。ハーフミラーは一定の割合で入射光を透過および反射させる。ハーフミラーの下方に設置されたターゲットスペクトルカメラでは、ミラーに映った塗装面の像を撮影・解析し膜厚カラーマップを作成する。作成されたカラーマップ画像はタブレットパソコンからの映像信号出力としてプロジェクタに送られる。

プロジェクタはハーフミラー越し（透過）にカラーマップを塗装面上に投影する。このような位置関係でカメラとプロジェクタを設置することで、撮影したカラーマップの（塗装面上での）位置情報を経ずに直接投影することができる。

なお、ターゲットスペクトルカメラによる撮影とプロジェクタによる投影を同時に行うことはできない（プロジェクタが投影するカラーマップがターゲットスペクトルカメラの撮影に影響するため）。このため、画像撮影と画像投影はタイミングをずらして実施する必要がある。また、この方式では平面上への画像投影を想定しており、ロンジなどの複雑な3次元形状への投影は困難である。

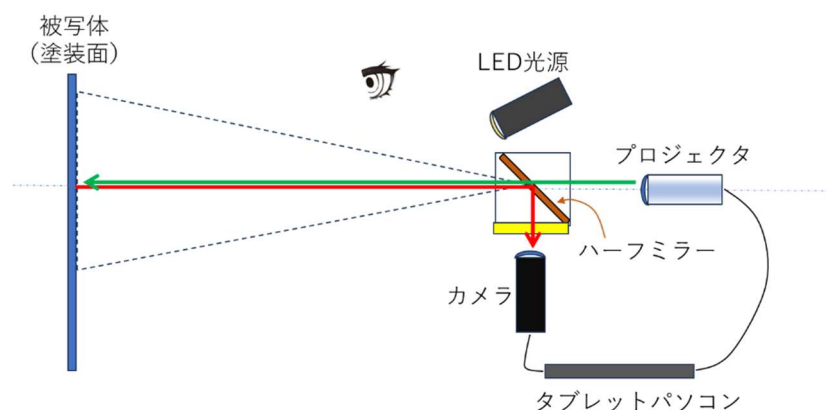


図 17 塗装面への膜厚計測結果投影装置の構想

7. 成果報告会の開催

2021年度のフェーズ1事業、2022年度から2023年度のフェーズ2事業と計3ヶ年の研究開発を実施してきた。3ヶ年の研究開発の成果としてSI塗料用及び非SI塗料用の2台の膜厚計測用ターゲットスペクトルカメラのプロトタイプを開発することが出来た。本成果を広報するため成果報告会を以下の様に開催し、41名の参加があった。

1. 開催日時 2024年3月12日（火） 13:00～16:30（開場13:00）
2. 開催場所 赤坂インターシティコンファレンス（AICC） 4F 401
（東京都港区赤坂1-8-1 赤坂インターシティAIR）
3. 展示概要 光学的手法を用いたデジタル膜厚計

Self Indication（目視判定機能付）塗料をベースに、塗膜厚の面計測が可能となるターゲットスペクトルカメラを開発した。この膜厚計の活用により、国際条約で要求されるバラストタンクへの膨大な量の塗膜厚の点計測の負荷軽減が期待される。

報告会では、開発したデジタル膜厚計のデモンストレーションを実施した。



8. まとめ

塗装作業後の塗膜厚計測作業の効率化を目的とし、本研究では塗膜厚測定 of 自動化機器開発に関して昨年度の開発の成果を踏まえて以下の研究開発を行った。

- SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの改良

昨年度開発したカメラを改良した。実船のバラストタンクを対象に実証試験を行い、改良の効果を確認した。

- 非 SI 塗料用ターゲットスペクトルカメラの開発

非 SI 塗料計測用のカメラを新規に開発した。実船のバラストタンク内を対象に実証試験を行い、開発機で膜厚分布測定が可能であることを確認した。

- 画像解析による塗膜欠陥検出システムの開発

画像解析により、タレやユズ肌等の比較的大きい塗膜欠陥を検出するシステムを開発した。試験片を対象とした性能検証を行い、今回対象とした塗膜欠陥が検出できることを確認した。

- 計測した膜厚データの活用法に関する検討

計測した膜厚カラーマップを活用する方法について検討した。SfM による塗装後のバラストタンク内形状の 3 次元形状計測は困難であることがわかった。膜厚カラーマップを直接塗装面に投影するための簡易的な機構を考案した。

また、開発したターゲットスペクトルカメラを広報するため成果報告会を開催した。

以上

添付資料 1

塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 研究参加者名簿

2023 年度「塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発」研究参加者名簿

| | 氏名 | 勤務先 |
|---------------------|-------|--|
| 研究参加者 | 眞屋 潔司 | 今治造船株式会社 品質管理グループ 主幹 |
| 研究参加者 ～2023.9.30 | 塩田 悟 | ジャパン マリンユナイテッド株式会社 商船・海洋・エンジニアリング事業本部 生産センター 技監 |
| 研究参加者 2023.10.1～ | 矢嶋 宏行 | ジャパン マリンユナイテッド株式会社 有明事業所 製造部 塗装グループ グループ長 |
| 研究参加者 | 堀内 亮 | 住友重機械マリンエンジニアリング株式会社 製造本部 工作部 塗装グループ 技師 |
| 研究参加者 | 上田 貴則 | 常石造船株式会社 設計本部 船体設計部 船装設計グループ |
| 研究参加者 | 平林 恭祐 | 内海造船株式会社 瀬戸田工場 造船工作部 塗装課 課長 |
| 有識者 | 藤本 修平 | 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 構造・産業システム系 産業システム研究グループ 主任研究員 |
| 関係者 | 志水 栄一 | 一般社団法人 日本造船工業会 技術・労務部 部長 |
| 事務局 | 平原 祐 | 一般財団法人日本船舶技術研究協会 参与 |
| 事務局 2023.11.1～ | 塩田 悟 | 一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ 主任研究員 |
| 事務局 | 高田 篤志 | 一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ プロジェクトリーダー |

添付資料 2

塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 会議等開催状況

塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト会議等開催状況

運営会議

第1回運営会議 2023年5月26日 AP新橋5階Lルーム及びオンラインのハイブリッド開催

- ・2023年度実施研究計画について

第2回運営会議 2024年2月13日 船技協大会議室及びオンラインのハイブリッド開催

- ・塗膜計測のデジタル化プロジェクトとりまとめについて

タスクフォースミーティング

第1回タスクフォースミーティング 2023年12月20日 オンライン開催

- ・研究開発の進捗について

第2回タスクフォースミーティング 2024年1月31日 オンライン開催

- ・研究開発の進捗について

添付資料 3

塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 参加各社業務分担

塗膜厚計測のデジタル化に関する研究開発 研究参加者 業務分担表

| | 業務分担 | | | | | |
|--|------|-----|-------|----|----|-----|
| | 今治 | JMU | SHIME | 常石 | 内海 | 船技協 |
| ①非SI塗料での膜厚計測可能性の検証 | | | | | | |
| ①-1：ハイパースペクトルカメラによる非SI塗料に対する膜厚計測実験 | ○ | | | | | |
| ①-2：非SI塗料での膜厚計測可能性の評価 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ②塗膜厚面計測機のプロトタイプの開発 | | | | | | |
| ②-1：膜厚計測機プロトタイプのパフォーマンス・仕様の検討 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| ②-2：膜厚計測機プロトタイプの実験 | ○ | | | | | |
| ②-3：塗膜厚計測データの無線送信機能の開発 | ○ | | | | | |
| ②-4：プロトタイプの評価（プロトタイプ作成・データ無線通信システム） | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ②-5：非SI塗料用ターゲットスペクトルカメラの製作 | ○ | | | | | |
| ③塗膜結果処理システムの開発 | | | | | | |
| ③-1：クラウド処理システムの実験 | ○ | | | | | |
| ③-2：塗膜欠陥検出法の開発 | ○ | | | | | |
| ③-3：塗膜不具合箇所の表示手法の検討 | ○ | | | | | |
| ③-4：塗膜結果処理システムの実験（クラウド処理システム、塗膜欠陥検出システム） | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ④塗膜管理システム開発 | | | | | | |
| ④-1：上記②と③との統合による塗膜管理システムの実験 | ○ | | | | | |
| ④-2：計測器実用化に向けた検討（現場での検証） | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| ④-3：計測器実用化に向けた検討（機器やシステムの改良） | ○ | | | | | |
| ④-4：塗膜管理システムの実験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

参考資料 1

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ 2
事業概要

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ2

□ 背景・目的

- 設備拡張等を背景とした中韓造船所との国際競争にさらされる中、国内造船所が引き続き持続的に発展するためには、得意とする環境対応船等の商品力向上に加え、設備規模ある海外勢に対し新技術活用による建造効率と建造品質の向上が不可欠。
- 特に塗装は、工程の殆どが手作業で、品質も施工者の技能に依存し、作業工数は大きく、品質の均一性の確保も困難であり、改善余地は大きい（作業工数は極めて大きく（全体の約2割を占める））。
- このため、自動化・デジタル化技術を応用して塗装工程の効率と塗装品質の向上を図るデジタル計測機器・自動塗装機を開発し、塗装工程の効率と塗装品質の向上を図り、以て船舶産業の発展の寄与する。

□ 事業概要

➢ 実施期間：2022年度～2023年度（2年間）

➢ 実施内容

① 塗装前処理検査のデジタル化

- ・ プラストグレードについて、マルチスペクトルカメラによる塗装前処理状態の定量計測技術を用いた実用デジタル機器を開発。

② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化

- ・ ストライプコートについて、ストライプコート用先端器具を搭載したポータブル自動塗装機器を開発。
- ・ 塗膜厚について、ハイバースペクトルカメラ技術を用いた塗膜厚計測機器を開発。現場作業の効率化に必要なデータ管理システム技術を組み合わせた作業検査工数削減と品質向上可能な実用化機器を開発。

➢ 予算：1億4,701万円（80%助成）

2022年度7,046万円、2023年度7,655万円



手作業による刷毛塗り（左）と塗膜厚の計測（右）



作業後の塗装状態（左）と塗装不良による錆（右）

1

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ2

（別添1）事業計画（実施内容・スケジュール）

□ 事業内容

- ① 塗装前処理検査のデジタル化：プラストグレードの定量測定機器
 - ・ 塗装前処理状態計測技術の精度向上（光学デジタル計測原理の改良等）
 - ・ プラストグレードの定量測定機器のプロトタイプ機の製作・実用機の開発（マルチスペクトルカメラ、実用化課題）
- ② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化：ストライプコート自動塗装機器
 - ・ ストライプコート自動塗装機器のプロトタイプ機の製作・実用機の開発（溶接部、突起部等の実用化課題）
- ③ 塗装作業・検査の自動化・デジタル化：塗膜厚測定自動化機器
 - ・ 塗膜厚測定自動化機器のプロトタイプ機の製作・実用機の開発（ハイバースペクトルカメラ、実用化課題）
 - ・ 塗膜厚計測データ管理システムの開発

| 2022年度 | | | | 2023年度 | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1/4半期 | 2/4半期 | 3/4半期 | 4/4半期 | 1/4半期 | 2/4半期 | 3/4半期 | 4/4半期 |
| ① 塗装前処理検査のデジタル化：プラストグレードの定量測定機器開発 | | | | | | | |
| 塗装前処理計測技術の精度向上 | | | | | | | |
| プロトタイプ機の開発 | | | | 実用機の開発 | | | |
| ② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化：ストライプコート | | | | | | | |
| プロトタイプ機の製作 | | | | 実用機の開発 | | | |
| ③ 自動塗装機器塗装作業・検査の自動化・デジタル化：塗膜厚測定自動化機器 | | | | | | | |
| プロトタイプ機の開発 | | | | 実用機の開発 | | | |
| 塗膜厚計測データ管理システムの開発 | | | | | | | |

2

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ2
(別添2) 事業概要



- ①プラストグレードの定量測定機器
 - ・ 2021年度に検証したマルチスペクトルカメラによる塗装前処理状態の定量計測技術を用いた実用デジタル機器の開発を実施。

蛍光X線分析の予備塗装除去率とマルチスペクトル分析輝度の相関

- ②ストライプコート自動塗装機器
 - ・ 2021年度に検証したストライプコート用先端器具を搭載したポータブル機器の開発を実施。

エッジ部の塗装の問題とストライプコートの現場

- ③塗膜厚測定自動化機器
 - ・ 2021年度に検証したハイパースペクトルカメラによる塗膜厚計測機器とデータ管理システムの開発を実施。

ハイパースペクトルカメラによる面計測と膜厚分析イメージ

①塗装前処理 (プラスト処理) ②スプレーコート ③ストライプコート ④膜厚検査
塗装工場での工程

①光学 ②マルチスペクトル ③ハイパースペクトル
光学カメラと多波長分光カメラの違い

- プロジェクト参加者
 - ・ 今治造船、川崎重工業、 ジャパン マリンユナイテッド、住友重機械マリンエンジニアリング、新来島どっく、常石造船、内海造船、楢垣造船 (研究参加者)、九州大学 (関係者)

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発・フェーズ2
(別添2) 事業概要 (22年度の進捗状況)



- 全般
 - ・ 研究参加者で構成するプロジェクト運営会議を開催 (6/23第1回)。
 - ①デジタル計測機器の開発：プラストグレード定量測定機器
 - ・ 分光分析によるプラストグレード識別手法、プロトタイプ機を検討。
 - ②塗装作業の自動化：ストライプコート自動化機器開発
 - ・ ポータブル試作機制作、現場試行結果を受けた試作機の改良を検討。
 - ③デジタル計測機器の開発：塗膜厚測定自動化機器
 - ・ SI塗料 (目視確認できる機能性塗料) 以外の塗料への適用性・膜厚推定手法、プロトタイプ機を検討。

蛍光X線分析の予備塗装除去率 (左) とマルチスペクトル分析輝度 (右) の相関 (輝度で相関)

プラストグレードの定量測定機器 (マルチスペクトルカメラ定量計測)

試作機製作 (現場試行) 試作機改良 (剛毛先アタッチメント)

ストライプコート自動化機器 (現場用ポータブル機器)

非SI塗料の膜厚計測

異なる膜厚の試験片による反射輝度と波長変化の関係

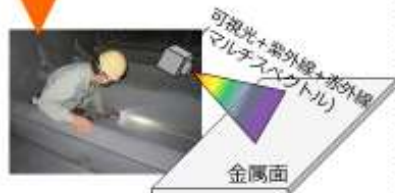
塗膜厚測定自動化機器 (ハイパースペクトルカメラ定量計測)

- プロジェクト参加者
 - ・ 今治造船、川崎重工業、 ジャパン マリンユナイテッド、住友重機械マリンエンジニアリング、新来島どっく、常石造船、内海造船、楢垣造船 (研究参加者)、九州大学 (関係者)

□ 塗装前処理検査 (フラストグレート)

- ・ 金属面の清浄度は現在目視で確認
- ・ 検査員の違いで品質にバラつき発生
- ・ 過度品質・再作業の発生→コスト増
- ・ 熟練検査員の不足
- あいまいさによる非効率

・ 最新の光計測技術のマルチスペクトルカメラで数値計測により検査員の判断誤差の排除



- 再作業の防止
- 過剰品質の防止
- 非熟練作業による検査

□ 塗装作業～手塗り作業

- ・ ストライプコート手作業の工数が膨大 (薄くなり割れるため刷毛2回塗り)
- ・ 高度ではないが技の必要な作業 (薄くならない刷毛や塗り方)
- 手作業に頼る非効率

・ 最新の計測技術 (安価な加速度センサー等) を用いた高速で高品質の塗布
 ・ ポータブル機器で自動塗布
 ・ 自動塗装機に搭載し単純形状部を自動塗装



- 膨大な刷毛塗り作業の工数削減
- 技量差解消による塗装品質の向上
- 労働力不足に備えた自動化技術への展開

□ 塗装検査～塗膜厚検査

- ・ 手作業による膜厚計測箇所が膨大
- ・ 不足膜厚防止のため、余剰膜厚となる部分が多い (320μに対して平均500-600μ)
- 膜厚確保作業の非効率

・ 最新の光計測技術のハイパースペクトルカメラで面撮影し膜厚の分布を計測
 ・ 画像解析で塗装欠陥の目視検査も自動検出



- 手作業計測点数の大幅な削減
- 膜厚分布把握での業者技量向上
- 塗料使用量の削減

塗装工程の効率と塗装品質の向上



この報告書は、日本財団の助成金を受けて作成しました。

塗装工程の自動化・デジタル化研究開発（フェーズ2）
ー塗膜厚計測のデジタル化プロジェクトー

2023 年度成果報告書
概要版

2024 年（令和 6 年）3 月発行

発行 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 2 丁目 10 番 9 号 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6428 FAX 03-5114-8941

URL <https://www.jstra.jp/> E-mail info@jstra.jp

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。