



# 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—

## 2022 年度成果報告書

### 概要版



2023 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.	研究概要及び研究体制	2
3.	非 SI 塗料に対する膜厚計測可能性の検証	3
4.	デジタル膜厚計測機のプロトタイプ製作	5
4.1	デジタル膜厚計測機のプロトタイプの性能・仕様の検討	5
4.2	デジタル膜厚計測機プロトタイプの開発	6
4.3	塗膜厚計測データの無線送信機能の開発	6
4.4	デジタル膜厚計測機のプロトタイプ及びデータ無線通信機能の評価	7
5.	膜厚計測データ処理システムの開発	8
5.1	クラウド処理システムの開発	8
5.2	塗膜不具合箇所の表示方法の検討	9
5.3	膜厚計測データ処理システムの評価	9
6.	まとめ	9
参考文献		10
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	11
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	13
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	15
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	17
参考資料 2	塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料	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2022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、国内造船所が引き続き幹産業として持続的に発展するためには、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により行っており、また不足膜厚防止のため、余剰膜厚となる部分もあり、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、本プロジェクトでは、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することを目的とする。

## 2. 研究概要及び研究体制

本プロジェクトは、非接触で面的な膜厚測定が可能な膜厚計測機（デジタル膜厚計測機）の開発及び膜厚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（膜厚計測データ処理システム）の実用化に向けて、以下の検討を実施する。

### （1）非 SI 塗料に対する膜厚計測可能性の検証

2021 年度のフェーズ 1 事業における検討では、塗膜厚によって色味が異なる SI 塗料（Self Indication 塗料）が主たる計測対象であった。そこで、SI 塗料以外の塗料（非 SI 塗料）に対する膜厚計測の可能性も検証するため、非 SI 塗料に対してハイパースペクトルカメラによる膜厚計測実験を行い、その計測結果に基づき画像計測による計測可能性の評価を行う。

### （2）デジタル膜厚計測機のプロトタイプの製作

#### ① デジタル膜厚計測機のプロトタイプの性能・仕様の検討

2021 年度に実施したハイパースペクトルカメラによる膜厚測定の実験結果に基づき、デジタル膜厚計測機のプロトタイプを開発する。まず造船所での計測ニーズを踏まえて計測機の性能・仕様を決定する。

#### ② デジタル膜厚計測機プロトタイプの開発

次いで、膜厚測定に必要な各種センサを選定し、デジタル膜厚計測機のプロトタイプを製作する。

#### ③ 塗膜厚計測データの無線送信機能の開発

実際の現場（バラストタンク内等）での使用を想定し、計測した膜厚データをサーバ上に無線通信で送信する機能を開発する。

#### ④ デジタル膜厚計測機のプロトタイプ及びデータ無線送信機能の評価

デジタル膜厚計測機のプロトタイプ及び開発した塗膜厚計測データの無線送信機能について、現場での試行計測などを通して性能評価を実施する。

### （3）膜厚計測データ処理システムの開発

#### ① クラウド処理システムの開発

デジタル膜厚計測器により計測した結果を迅速に共有し、現場だけでなく事務所等でも塗装作業の実績が確認できるようにするため、現場で計測した膜厚データをクラウド上で整理し表示することが可能なシステムを開発する。

#### ② 塗膜不具合箇所の表示手法の検討

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する。その際、プロ

ジェクションマッピング、VR ゴーグル等の技術の利用可能性を探る。また、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についても検討する。

③ 膜厚計測データ処理システムの評価

開発したクラウド処理システムについて、動作テストなどを通じて性能評価を実施する。

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）

関係者

- 一般社団法人日本造船工業会
- 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

3. 非SI塗料に対する膜厚計測可能性の検証

2021年度の検討では、塗膜厚によって色味が異なるSI塗料（Self Indication 塗料）が主たる計測対象であった。造船の現場では、SI塗料以外の塗料（非SI塗料）も広く使用されている。このため、この非SI塗料に対する膜厚計測の可能性も検証することを目的に、非SI塗料に対してハイパースペクトルカメラによる膜厚計測実験を行い、その計測結果に基づき画像計測による計測可能性の評価を行った。計測は、海上技術安全研究所に委託して実施した。

図3.1に検討に使用した試験板の概要を示す。膜厚測定の可能性を検証するための階段状試験片と下地色や2層塗りの影響を調べる単一膜厚の試験片を使用した。

### 試験片の仕様

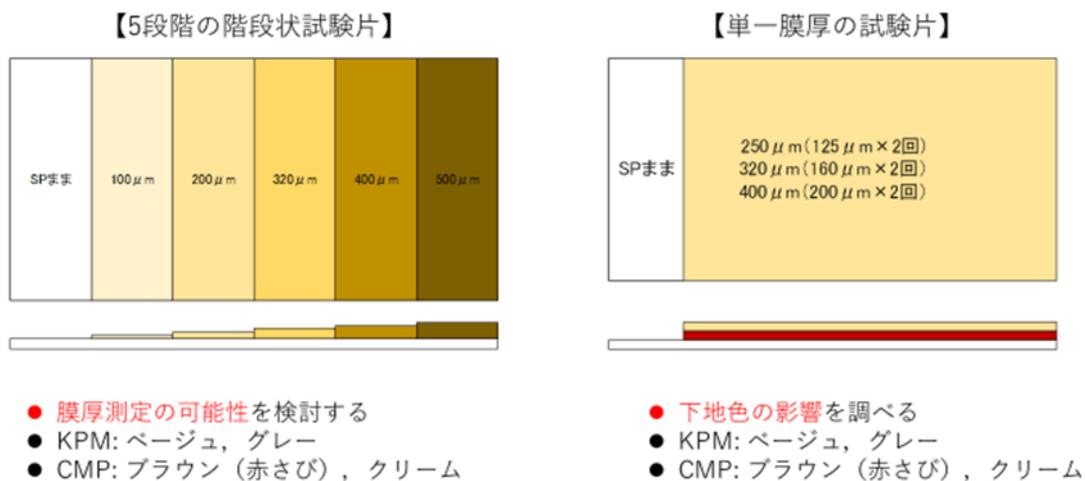


図3.1 非SI塗料の計測可能性を検証するための試験片

図 3.2 に計測に使用した Spectral Imaging 社のハイパースペクトルカメラ Specim IQ の概要を示す。

撮影に使用したハイパースペクトルカメラ



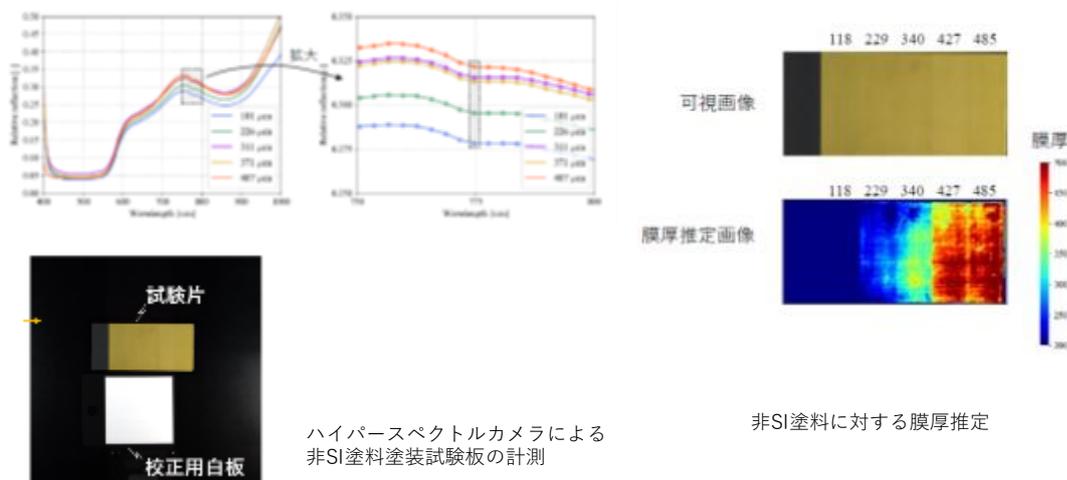
図 3.2 ハイパースペクトルカメラ (Specim IQ)

図 3.3 に非 SI 塗料についての検証結果の概要を示す。4 種の塗料についてハイパースペクトルカメラによる膜厚分布推定を試みたところ、非 SI 塗料についても塗装後の膜厚分布推定が可能であることが判った。ただし、塗料の色味などによって計測精度などが変化する点などに注意が必要である。

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  
2022年度実施内容



- ①非SI塗料での膜厚計測可能性の検証
  - 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  
SI 塗料以外の非 SI 塗料を対象に膜厚計測の可能性も検証するためハイパースペクトルカメラによる膜厚計測実験を実施
  - 非SI 塗料での膜厚計測可能性の評価



ハイパースペクトルカメラによる非SI塗料塗装試験板の計測

非SI塗料に対する膜厚推定

図 3.3 非 SI 塗料に対する計測可能性の検証

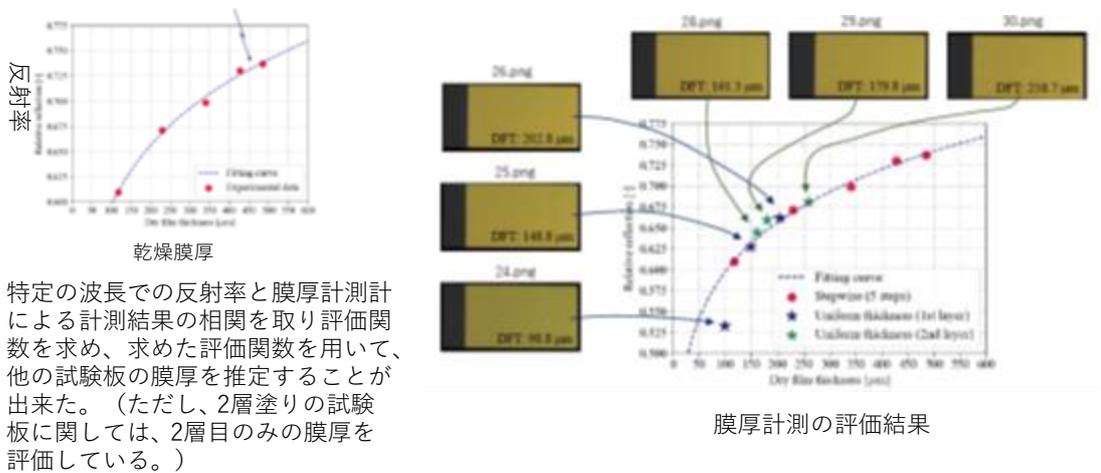
図 3.4 に階段状試験片で推定した評価関数を用いて単一膜厚の試験片の膜厚を推定した結果を示す。階段状試験片の計測結果を用いて推定したパラメータで、単一膜厚の試験片の膜厚と反射率の関係もおおよそ表すことができ、同一の塗料であれば（かつ諸々の撮影条件も同一であれば）同一のパラメータを使って膜厚分布推定が可能であることも判った。ただし、塗料の色を変えて2層塗りした塗装にハイパースペクトル撮影による膜厚推定を適用した場合は、2層目の膜厚のみが計測されることに注意が必要である。

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  
2022年度実施内容



➤ ①非SI塗料での膜厚計測可能性の検証

- 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  
SI 塗料以外の非 SI 塗料を対象に膜厚計測の可能性も検証するためハイパースペクトルカメラによる膜厚計測実験を実施
- 非SI 塗料での膜厚計測可能性の評価



特定の波長での反射率と膜厚計測計による計測結果の相関を取り評価関数を求め、求めた評価関数を用いて、他の試験板の膜厚を推定することが出来た。（ただし、2層塗りの試験板に関しては、2層目のみの膜厚を評価している。）

膜厚計測の評価結果

図 3.4 単一試験片の膜厚推定結果

4. デジタル膜厚計測機のプロトタイプ製作

図 4.1 に膜厚計測システムの全体構成案を示す。ターゲットスペクトルカメラから成る膜厚を計測するシステム、タンク内と船外とで無線通信するためのシステム、計測データを無線通信を介してクラウドに送信、クラウドにアクセスしてデータを閲覧するシステムから成る。

まず、初めに、2021 年度に実施した SI 塗料に対するハイパースペクトルカメラを用いた検討結果に基づき、膜厚計測に必要な波長を絞ったターゲットスペクトルカメラのプロトタイプを作成し、実際に建造中の船舶のバラスタタンクにおいて検証を行い実用機に向けた課題等の検討を実施した。

4.1 デジタル膜厚計測機のプロトタイプの性能・仕様の検討

造船現場で作業することが出来ることを念頭に、カメラは以下の項目を満たすこととした。

- ・膜厚計測に必要な特定の波長帯（2~3 波長）のみを計測するものとし、小型化を図ること。
- ・PSPC に規定されている 320 μm 90/10 ルールが判別できる精度を持つこと。
- ・現場において、1 人で取り扱える大きさであること。また、タブレットに接続して使用可能であること。
- ・塗膜欠陥等の検出も考慮し、可視光での撮影も併せて出来ること。
- ・USB バスパワーやポータブルバッテリーにより駆動出来ること。
- ・光源は現場持ち込みできる大きさ十分な精度が出る明るさ等を待つものとする。

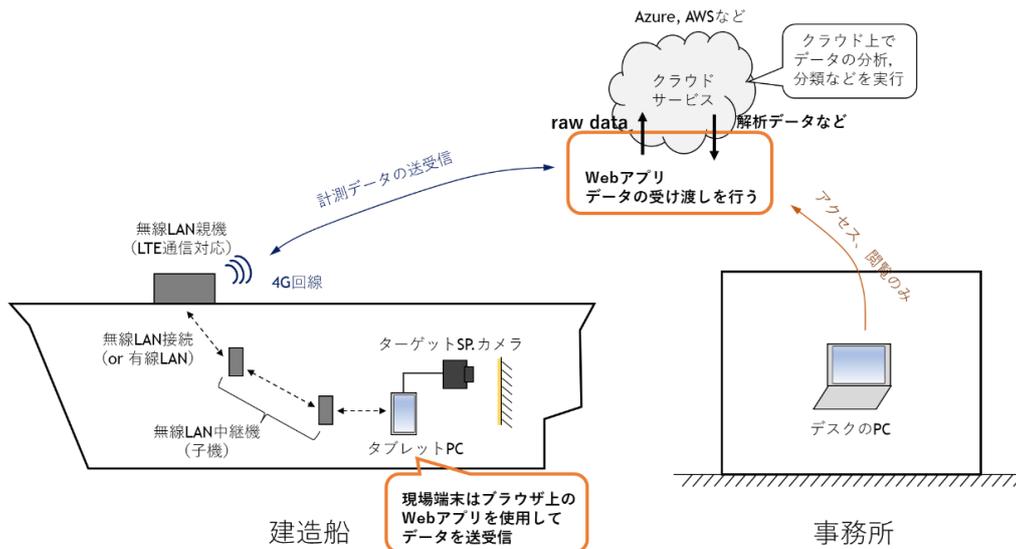


図 4.1 膜厚計測システム全体構成案

#### 4.2 デジタル膜厚計測機プロトタイプの開発

図 4.2 に開発したターゲットスペクトルカメラのプロトタイプを示す。開発したカメラはタブレットに接続して使用され、カメラの操作、計測はタブレット上で操作し、計測結果も併せてタブレット上に表示できものとした。なお、カメラの開発は、エバジャパン株式会社に委託して実施した。



図 4.2 開発したデジタル膜厚計測機プロトタイプ (エバジャパン提供)

#### 4.3 塗膜厚計測データの無線送信機能の開発

データの無線送信機能として、現場（バラストタンク内等）での使用を想定し、計測した膜厚データをサーバー上に無線通信で送信する機能の検討を行った。造船所における電波状態の予備調査の結果等や、現場での使用を考慮し、小型化した通信機器の開発を実施した。LTE ルーターと中継器から構成されるシステムで中継器を通して、バラストタンク内から、船外のサーバー等にデータの送受信ができるシステムを構築した。

図 4.3 に実際に開発した機器を併せて示す。なお、機器の開発はメカトラックス株式会社に委託して実施した。

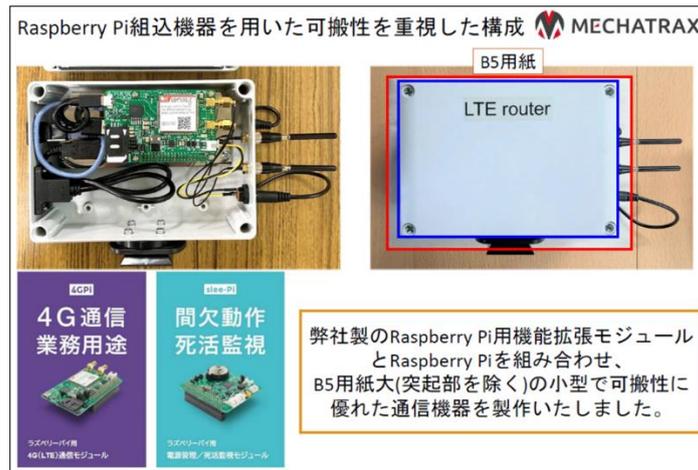


図 4.3 開発した LTE ルータ（メカトラックス提供）

#### 4.4 デジタル膜厚計測機のプロトタイプ及びデータ無線通信機能の評価

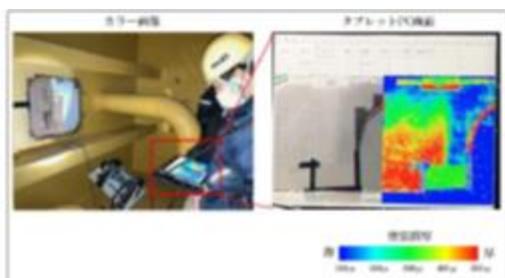
4.2 及び 4.3 で開発したカメラのプロトタイプ及びデータ無線通信機器の検証実験を、2023.1.26 に建造中船舶のバラストタンクを用いて実施した。塗装の未仕上げ部で計測を行った結果、膜厚に応じた色分け表示をすることが出来、開発したプロトタイプにより膜厚が面的に計測出来ることが判った（図 4.4 参照）。また、無線送信機能の検証は、通信ブリッジボックス、及びタンク内に 3 基の中継器を設置して行い、バラストタンク内から船外と十分通信可能であることが検証された。（図 4.5 参照）

### 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 2022年度実施内容

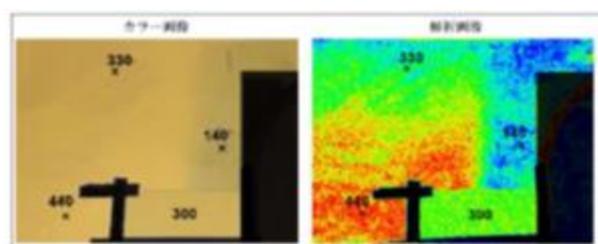


#### ➤ ②膜厚計測機プロトタイプ製作

- 膜厚計測機プロトタイプの開発  
膜厚計測に必要な波長等を選択しターゲットスペクトルカメラを用いたプロトタイプを製作
- 塗膜厚計測データの無線送信機能の開発  
バラストタンク内を想定し、計測した膜厚データをサーバー上に無線送信する機能を開発
- プロトタイプの評価  
造船現場における試行を行い性能評価を実施



造船現場における検証実験



検証実験時の計測結果の解析画像

図 4.4 バラストタンク内におけるターゲットスペクトルカメラによる検証（写真：エバジヤパン提供）



図 4.5 データ無線通信機器の検証の様子（メカトラックス提供）

検証実験の結果を受けて、ターゲットスペクトルカメラに対してハード及びソフトの改良を行った。

## 5. 膜厚計測データ処理システムの開発

### 5.1 クラウド処理システムの開発

膜厚を計測した結果を迅速に共有でき、現場だけでなく事務所等でも塗装作業の実績が確認できるようになることを目的に、現場で計測した膜厚データをクラウド上で整理し表示することが可能なシステムの開発を行った。

画像データ、テキストデータをクラウドへ送信するための、Windows OS のタブレットで動作するデスクトップアプリ及び画像データ、テキストデータをブラウザ上で閲覧するため、クラウド上のデータにアクセスし閲覧する web アプリの 2 つのアプリを開発した（図 5.1 参照）。システムの開発は、株式会社シルクラボラトリに委託して開発を実施した。

## 塗装工程の自動化・デジタル化研究開発フェーズ 2 -塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト 2022年度実施内容



### ➤ ③膜厚計測結果処理システムの開発

- クラウド処理システムの開発  
現場で計測した膜厚データをクラウド上で整理し表示することが可能なシステムを開発
- クラウド処理システムの評価  
開発したクラウド処理システムについて動作テストなどを通じて性能評価を実施。

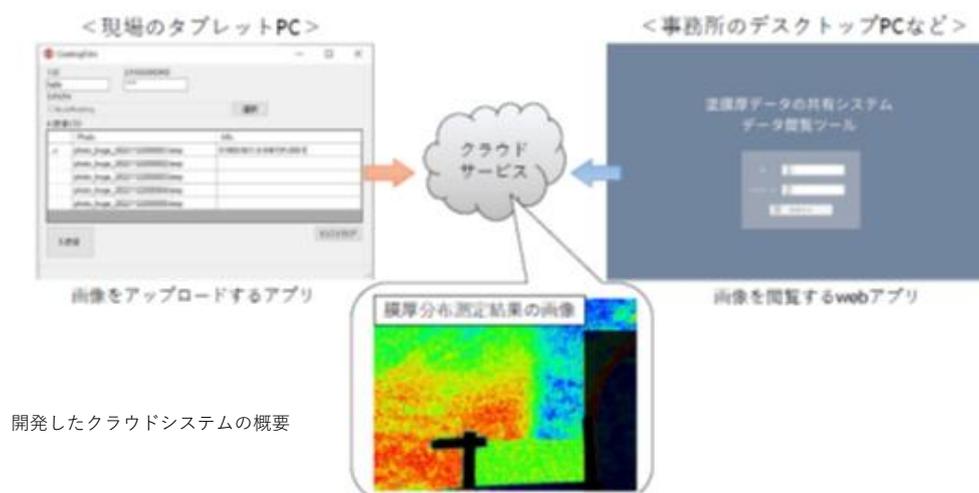


図 5.1 クラウド処理システム概要

## 5.2 塗膜不具合箇所の表示方法の検討

膜厚計測データ処理システムの開発の一環として、塗膜の不具合が検出された箇所を塗装技能者などに現場で簡便に伝達する手法について基礎的な検討を行った。

不具合箇所の表示方法の検討として、1) タブレットパソコンを用いる表示方法、2) スマートグラスを用いる表示方法、3) プロジェクタを用いる表示方法の検討を行い、併せて塗膜不具合箇所のマッピング機能に関する調査も行った。

検討した結果、塗膜不具合箇所の表示手法として、タブレットパソコン、スマートグラス、プロジェクタなどの利用が適していると考ええる。また、塗膜不具合箇所を 3D CAD モデル上にマッピングする手法として、Image Stitching (図 5.2 参照) や Structure from Motion を適用する方法が適していると考ええる。



図 5.2 Image Stitching による画像合成の例 (web サイト<sup>4)</sup>) より引用

## 5.3 膜厚計測データ処理システムの評価

5.1 で開発したアプリの検証実験を 1 月に実施したカメラのプロトタイプの実験の際に併せて実施した。バラストタンク内で計測した膜厚データ等を用いて、実証を行い、開発したアプリにより計測データをクラウドに転送できること、またクラウドのデータを任意のパソコンで閲覧できることの両機能について検証した。

## 6. まとめ

本業務は、非接触で面的な膜厚測定が可能な膜厚計測機 (デジタル膜厚計測機) の開発及び膜厚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 (膜厚計測データ処理システム) の実用化を目的とし、非 SI 塗料に対する膜厚計測可能性の検証及びデジタル膜厚計測機のプロトタイプ製作、膜厚計測データ処理システムの開発及び塗膜不具合箇所の表示方法の検討を実施して以下の結論を得た。

- 非 SI 塗料についてもハイパースペクトルカメラのデータ解析により塗装後の膜厚分布推定が可能であると考えられる。ただし、塗料の色味などによって計測精度などが変化する点などに注意が必要である。
- 膜厚計測機プロトタイプを用いて実船のバラストタンク内壁面を撮影し、膜厚測定が可能であることを確認した。
- 無線通信システムを用いてバラストタンク内でもインターネット回線に接続可能なことを確認した。
- クラウド処理システムを製作。実船を対象とした実証実験を行い、システムの動作を確認した。
- 塗膜不具合箇所の表示手法として、タブレットパソコン、スマートグラス、プロジェクタなどの利用が適していると考えられる。
- 塗膜不具合箇所を 3D CAD モデル上にマッピングする手法として、Image Stitching や Structure from Motion を適用する方法が適していると考えられる。

## 参考文献

- 1) N. Sakai and M. Takayama: SI Technology and its unique paint property, Proceedings of International Symposium on Shipbuilding Technology (ISST) -Fabrication and Coatings-, (2007), pp. 141-144.
- 2) 日本ペイントマリン社 web site “膜厚可視化による長期防食技術”, <https://www.nipponpaint-holdings.com/rd/technology/2020111801/>
- 3) Specim 社 web site “Specim IQ”, <https://www.specim.com/iq/>
- 4) “Image Stitching with OpenCV and Python”, <https://pyimagesearch.com/2018/12/17/image-stitching-with-opencv-and-python/>

## 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

2022 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	所属
研究参加者 (幹事)	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	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	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
関係者	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 技術部 次長
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	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 主任研究員

## 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

➤ 運営会議（SG）の開催

2022年度は、3回のSGを下記日程で開催した。

◆ 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト運営会議

第1回 SG（2022.6.23開催）：船技協会議室およびオンラインのハイブリッド開催

- ・今年度の事業計画
- ・共同研究契約について

第2回 SG（2023.1.27開催）：今治造船会議室およびオンラインのハイブリッド開催

- ・事業進捗状況報告
- ・実施計画および予算の変更について

第3回 SG(2023.2.13開催)： AICC会議室およびオンラインのハイブリッド開催

- ・事業進捗報告
- ・今年度事業の取りまとめについて

### 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

### 添付資料3

#### -塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト- 参加各社業務分担表



▶ 共同研究プロジェクト参加者の業務分担

	業務分担					
	今治	JMU	SHIME	常石	内海	船技協
<b>① 非SI塗料での膜厚計測可能性の検証</b>						
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	○	○	○	○	○	○
<b>② 塗膜厚計測機のプロトタイプの開発</b>						
②-1: 膜厚計測機プロトタイプの実験・仕様検討	○	○	○	○	○	
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等の開発	○					
②-4: プロトタイプの評価 (プロトタイプ作成・データ無線送信システム)	○	○	○	○	○	○
<b>③ 塗膜結果処理システムの開発</b>						
③-1: クラウド処理システムの開発	○					
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評価 (クラウド処理システム、塗膜欠陥検出システム)	○	○	○	○	○	○
<b>④ 塗膜管理システム開発</b>						
④-1: 上記②と③との統合による塗膜管理システムの開発	○					
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評価	○	○	○	○	○	○

## 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

- 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、国内造船所が引き続き幹産業として持続的に発展するためには、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。
- 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（全体の約2割を占める）、品質の均一性の確保も困難であり、改善余地は大きい。
- このため、最新の自動化・デジタル化技術を応用して、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

- 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。2022年度にプロトタイプ機器を製作し、2023年度に実用機器を開発。

#### ② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化

- 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ストライプコート機器及びハイパ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を実施。2022年度にプロトタイプ機器を製作し、2023年度に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、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：1億4,403万円（80%助成）

2022年度7,046万円、2023年度・7,357万円（計画）



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）

## 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）次年度計画～実施内容とスケジュール



### □ 事業内容

- ① 塗装前処理検査のデジタル化
  - a. 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）
  - b. 塗装前処理状態計測機器のプロトタイプ機の開発
  - c. 塗装前処理状態計測機器の実用機の開発
- ② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化
  - a. 自動塗装機器の開発（溶接部、突起部等の自動塗装機器の実用化課題）
  - b. 塗膜厚の面計測を可能とする機器のプロトタイプ機の開発（カメラ撮影・画像解析）
  - c. 塗膜厚の面計測を可能とする機器の実用機の開発（効果と実用化課題）
  - d. 塗膜厚計測データ管理システムの開発

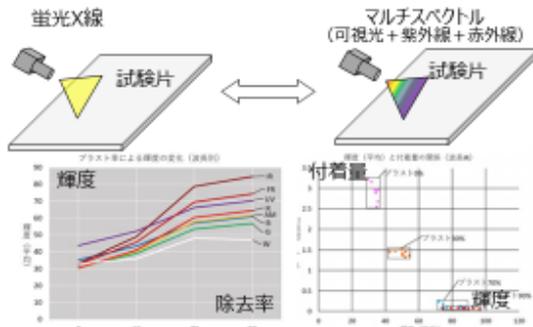
2022年度				2023年度			
1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期	1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期
① 塗装前処理検査のデジタル化							
a. 塗装前処理計測技術の精度向上							
b. 塗装前処理状態計測機器のプロトタイプ機の開発							
c. 塗装前処理状態計測機器の実用機の開発							
② 塗装作業及び検査の自動化・デジタル化							
a. 自動塗装機器の開発							
b. 塗膜厚面計測機器のプロトタイプ機の開発							
c. 塗膜厚面計測器の実用機の開発							
d. 塗膜厚計測データ管理システムの開発							

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) 次年度計画～事業詳細

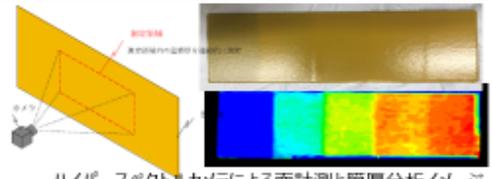


- 実施内容① 塗装前処理検査のデジタル化
- 2021年度に検証したマルチスペクトルカメラによる塗装前処理状態の定量計測技術を用いた実用デジタル機器の開発を実施。

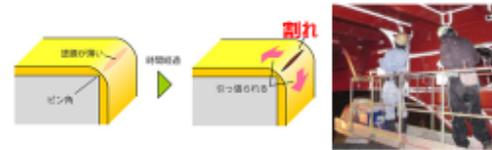
- 実施内容② 塗装作業・検査の自動化・デジタル化
- 2021年度に検証したストライプコート用先端器具を搭載したポータブル機器とハイパースペクトルカメラによる塗膜厚計測機器とデータ管理システムの開発を実施。



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



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



エッジ部の塗装の問題と現場用ポータブルストライプコート機器

塗装工場での工程

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 (予定)
- 今治造船、川崎重工業、 ジャパン マリユナイテッド、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、檜垣造船 (研究参加者)、九州大学、海上技術安全研究所 (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3) 参考～塗装工程の自動化・デジタル化がもたらす効果



<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 塗装前処理検査 (プラストグレート)</li> <li>• 金属面の清浄度は現在目視で確認</li> <li>• 検査員の違いで品質にバラツキ発生</li> <li>• 過度品質・再作業の発生→コスト増</li> <li>• 熟練検査員の不足</li> <li>➢ あいまいさによる非効率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 塗装検査～塗膜厚検査</li> <li>• 手作業による膜厚計測箇所が膨大</li> <li>• 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)</li> <li>➢ 膜厚確保作業の非効率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 塗装作業～手塗り作業</li> <li>• 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)</li> <li>• 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)</li> <li>➢ 手作業に頼る非効率</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                 • 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             </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                 • 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             </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                 • 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             </div>
<p>可視光+紫外線+赤外線 (マルチスペクトル)</p> <p>金属面</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 再作業の防止</li> <li>➢ 過剰品質の防止</li> <li>➢ 非熟練作業による検査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 手作業計測点数の大幅な削減</li> <li>➢ 膜厚分布把握での業者技量向上</li> <li>➢ 塗料使用量の削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 膨大な刷毛塗り作業の工数削減</li> <li>➢ 技量差解消による塗装品質の向上</li> <li>➢ 労働力不足に備えた自動化技術への展開</li> </ul>

**塗装工程の効率と塗装品質の向上**

## 参考資料 2

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の  
塗装での活用に関する資料



## 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

---

1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクトについて
2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外での活用について

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料

## 1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- 船舶建造工程における塗膜厚計測
  - 通常、造船現場における膜厚計測は、電磁式の膜厚計を用いて、スポットで計測を行っている。
  - バラスタックにおいては、PSPCの規則上、2回塗り塗装による320 $\mu$ mの膜厚を確保することが求められている。また、計測された膜厚は、90/10ルールにより合否が判定されている。(90/10ルール:最低膜厚は、320 $\mu$ mの90%(288 $\mu$ m以上)かつ288 $\mu$ m~320 $\mu$ m未満の箇所は、計測点数の10%未満)
  - 規定膜厚が確保されているか確認するため次ページに参考で記載する箇所を計測する必要があり、計測点数は膨大なものとなっており塗装検査員の負担になっている。
  - また、不足膜厚防止のため、余剰膜厚となる部分もあり、コストの増加の要因となっている。

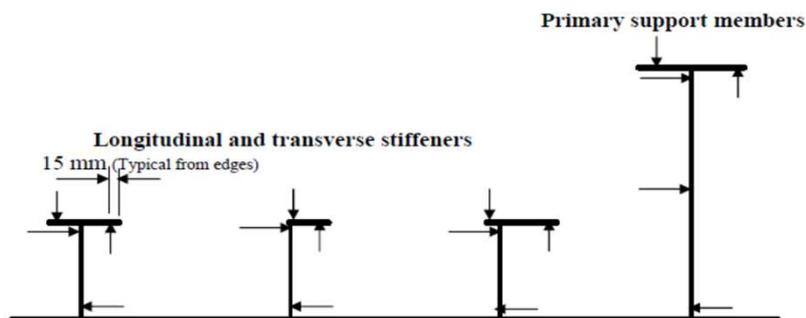


電磁膜厚計による膜厚計測の様子

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

## 1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- 参考：PSPCにおける塗膜厚計測箇所
  - PSPCにおいては、附属書3に以下のように膜厚計測箇所が定められている。
    - .1 平坦な面は、5m<sup>2</sup>毎に1計測
    - .2 タンク境界になるべく近く、タンク境界のエッジから15mmを超えない範囲は、2~3m毎に1計測
    - .3 縦通防撓材及び横式防撓材：  
2~3m毎に図に示す1セットを計測。ただし、主要支持部材間で2セットを下回らないこと。



塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

## 1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

---

- 参考:PSPCにおける塗膜厚計測箇所
  - PSPCにおいては、附属書3に以下のように膜厚計測箇所が定められている(つづき)。
    - .4 主要支持部材は、図に矢印で示すセット毎に3計測、その他の部材はセット毎に2計測。
    - .5 主要支持部材(縦桁及び横桁)は、2~3m毎に図に示す1セットを計測。ただし、3セットを下回らないこと。
    - .6 開口の周りは、開口の両面を各1計測
    - .7 複雑な構造の面(主要支持部材の大型のブラケット等)は、1m<sup>2</sup>毎に5計測。ただし3計測を下回らないこと。
    - .8 塗装検査員が必要と判断する面については、膜厚を検証するために確認箇所を追加。

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

## 1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

### ○ 船技協 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- 日本船舶技術研究協会において、塗装膜厚検査の効率化を図り、また膜厚分布を把握することで、作業者の技量向上、ひいては塗料使用量の削減と塗装品質の向上を図ることを目的に、ハイパースペクトル技術を用いて、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光学的デジタル計測機器を開発を進めている。
- 現在、SI機能(規定膜厚目視判定機能)を有している塗料に対して、ハイパースペクトルカメラによる計測結果の分析から、塗膜厚計測に有用ないくつかの波長を抽出。
- 抽出した波長を計測できるターゲットスペクトルカメラを開発し、造船現場での検証実験を実施している。



開発した膜厚計測用ターゲットスペクトルカメラ試作機

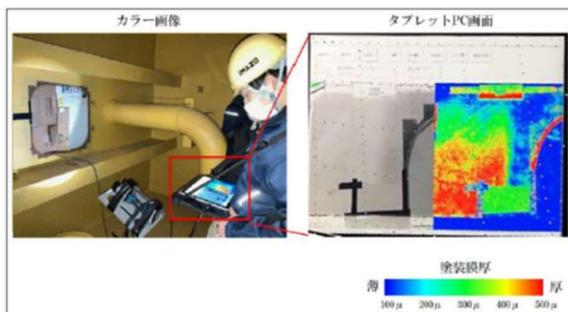
日本船舶技術研究協会「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト」第2回運営会議資料より

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

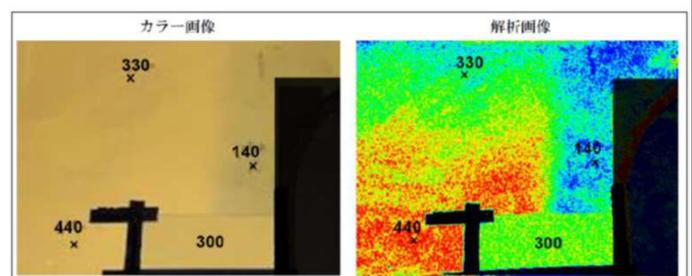
## 1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

### ○ 船技協 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- 実際の建造中のコンテナ船バラストタンク内で検証実験を行っている。
- 試作機を用いた検証実験の結果、PSPCで求められる $320\mu\text{m}$ の近傍の領域、膜厚不足の領域及び過膜厚の領域等が2次元画像として認識できるところまできている。



造船現場における検証実験



検証実験時の計測結果の解析画像

日本船舶技術研究協会 「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト」 第2回運営会議資料より

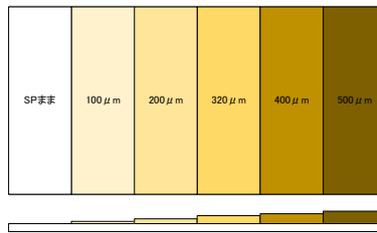
塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料  
1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- 船技協 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト
  - 実際の造船現場では、主流で使用されている塗料はSI機能を持たない塗料であり、この非SI塗料に対する検討も実施されている。
  - ハイパースペクトルカメラを用いて非SI塗料が塗装された2種類の試験板(階段状に膜厚を変化させた試験板及びPSPCの規定に沿った色違いの塗装を塗り重ねた2層塗りの試験板)の計測を行い、スペクトルの解析を実施。

**SPECIM IQ**  
HYPERSPSPECTRAL GOES MOBILE



使用したハイパースペクトルカメラ  
(Specim webサイトより)



5段階の階段状に塗装された試験板

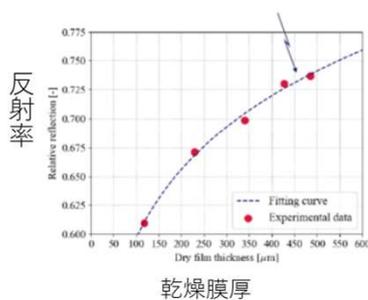


2層塗りの単一膜厚の試験板

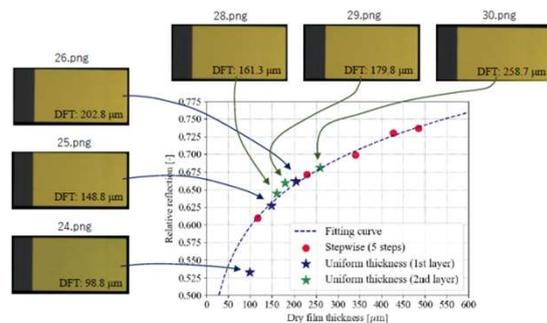
塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料  
**1. 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト**

○ 船技協 塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト

- ハイパースペクトルカメラで計測したスペクトルを解析し、特定の波長での反射率と電磁膜厚計による膜厚計測結果との相関を求めている。
- 階段状の試験板の結果から求めた評価関数でを用いて、単一膜厚の試験板の評価を実施。同種の塗料かつ同一撮影条件であれば階段状の試験板で推定した評価関数で単一膜厚試験板膜厚の評価が可能。
- しかしながら、2層塗りの試験板では、最外層の膜厚のみが計測されている。



乾燥膜厚と反射率の相関



単一膜厚試験板の膜厚推定結果

日本船舶技術研究協会 「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト」 第2回運営会議資料より

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料

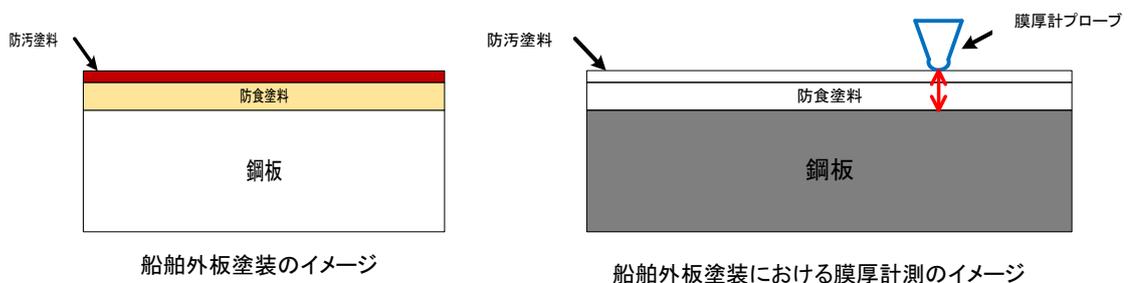
## 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の活用について

---

- 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外での活用について
  - 1.において、日本船舶技術研究協会に「塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト」実施しているハイパースペクトルカメラを用いたバラスタック用塗料の膜厚計測に関する検討について記述した。
  - ここでは、このハイパースペクトルカメラを用いた解析技術について、バラスタック用塗料の膜厚計測以外の活用法について検討を行う。

## 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外での活用について

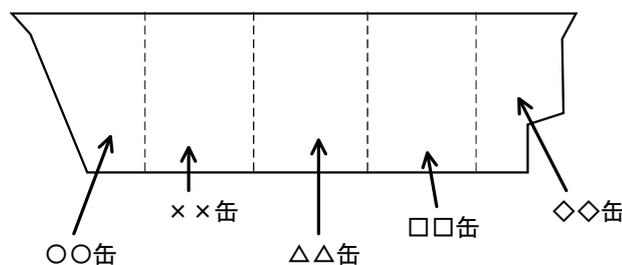
- 船舶の外板におけるAF塗料の膜厚計測
  - 船底及び船側の外板は、防食のための防食塗料と生物付着を抑制する防汚塗料の異なる塗料が塗り重ねられている。
  - 造船現場で使用されている電磁式膜厚計は、塗膜厚さそのものを計測しているわけではなく、素地である鋼板とプローブとの距離を計測している。(右図中 赤い矢印の距離を計測している。)
  - このため、現状では、最外層に塗装されている防汚塗料の単独の膜厚は正確には計測されてはならず、塗布量管理により管理されている。



## 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の活用について

### ○ 船舶の外板塗装における塗布量管理

- 塗布量管理とは、船体をいくつかの部位に分け、塗装すべき塗料の膜厚や部位の面積、塗着効率等を勘案してあらかじめ対象部位に塗装する塗料の量を算定しておき、規定量の塗料を塗ることで規定の仕様を満たしているとする管理法。
- このため、各所の正確な膜厚は把握できておらず、就航後、塗装に不具合が出た際の対応等が難しいといったこともある。
- 当然、防食塗料の塗装が終わった段階で膜厚計測を行い、さらに防汚塗料の塗装後に再度膜厚計測を行うことで防汚塗料の平均的な膜厚について推定することは出来るが、防汚塗料のみの膜厚を正確に把握することは出来ない。(1.の非SI塗料の2層塗り試験板の2層目の塗膜厚も同様な手法で推定している。)



外板塗装の塗布量管理のイメージ図

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料

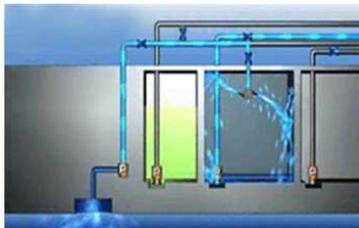
## 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の活用について

- 船舶の外板塗装におけるハイパースペクトルカメラの適用可能性
  - 1.において非SI塗料に対するハイパースペクトルカメラを用いた膜厚計測の検討で、2層塗りの塗料に対しては、最外層の2層目の膜厚の値が計測できたことを述べた。
  - 外板用の防汚塗料もSI機能は有していない塗料であり、かつ防食塗料上に塗り重ねられている。
  - このため、ハイパースペクトルカメラにより、最外層の防汚塗料の膜厚のみを計測することの可能性があると考えられる。
  - 今後、防汚塗料に対して、塗膜厚計測のデジタル化プロジェクトの成果を活用し、防汚塗料のみの膜厚計測が可能となれば、建造の際に膜厚管理ができるようになりコスト削減につながる可能性があるだけでなく、就航後の塗り替えの判断の材料としてしよう出来たり、不具合が発生した際の対応等で非常に有用であると考えられる。

塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外の塗装での活用に関する資料

## 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラストタンク以外での活用について

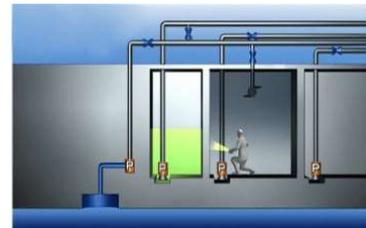
- ケミカルタンカーのタンク内洗浄状態の検査に対する活用
  - ケミカルタンカーにおいては、前の貨物が次に積載する貨物と混ざって貨物の品質を落とさないように、タンク内部のクリーニングを行う必要がある。
  - カーゴタンクには、タンク内クリーニングマシンを装備しクリーニングを行う構造になっている。
  - タンク洗浄は、前の貨物や次の貨物の性状等に応じて、温水洗浄やスチーム洗浄、洗剤洗浄等を行い、乾燥、すすぎの後検査を行っている。
  - 積載する貨物によっては人体に有害なものもあり、この検査にハイパースペクトルカメラの技術を活用できないだろうか。



温水洗浄イメージ図



スチーム洗浄イメージ図



検査イメージ図

MOL CHEMICAL TANKERS ホームページより

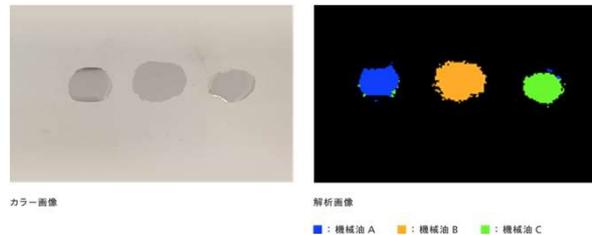
## 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の塗装での活用に関する資料

### 2. 塗膜厚計測のデジタル化技術のバラスタック以外の活用について

- ケミカルタンカーのタンク内洗浄状態の検査に対する活用
  - ハイパースペクトルカメラによる計測では、油脂等の有機物を判別することができ、ケミカルタンカーのカーゴタンク内の清掃が十分にできているかの判別に使用できる可能性があると考える。

金属上の油種の判別

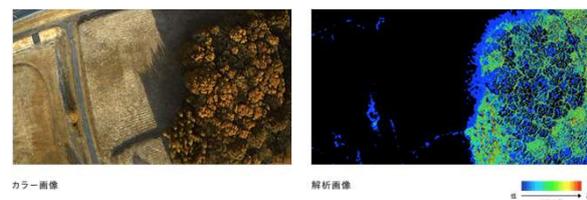
エバジャパン ホームページより



- また、ドローン等に積載して計測も可能であり、防爆のドローン等に搭載することが出来れば人がタンク内に立ち入らずに検査することも考えられる。

ドローンからのカラー/NDVI(正規化植生指数)の計測

エバジャパン ホームページより







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）  
－塗膜厚計測のデジタル化プロジェクト－

2022年度成果報告書  
概要版

2023年（令和5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 <http://www.jstra.jp/>

E-mail [info@jstra.jp](mailto:info@jstra.jp)

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。