

課題番号: 1G-2201

研究課題: 省エネ・低環境負荷を実現する次世代船底塗膜ならびに塗工プロセスの開発

研究代表者: 辻井敬亘(京都大学)

体系的番号 : JPMEERF20221G01

重点課題 : ④環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用

⑩大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

行政ニーズ : 非該当

研究実施期間: 2022年度～2024年度

【研究体制】

* 協力者

サブテーマ1

辻井敬亘(京都大学)

黄瀬雄司(京都大学)

特定研究員(京都大学)

* 連携企業A社

* 連携企業B社

* 連携企業C社

サブテーマ2

荒船博之(鶴岡高専)

佐藤貴哉(沖縄高専)

* 鎌田功一(鳥羽商船高専)

* 南 清和(東京海洋大学)

* 向瀬紀一郎(富山高専)

サブテーマ3

吉川千晶(NIMS)

研究業務員3名(NIMS)

* 武方宏樹(琉球大学)

* 金城篤史(沖縄高専)

* 磯村尚子(沖縄高専)

* Dr. Helmut Thissen (CSIRO Manufacturing)

* Prof. Henning Menzel (TU Braunschweig)

1.研究背景、研究開発目的及び研究目標

2

【研究背景】

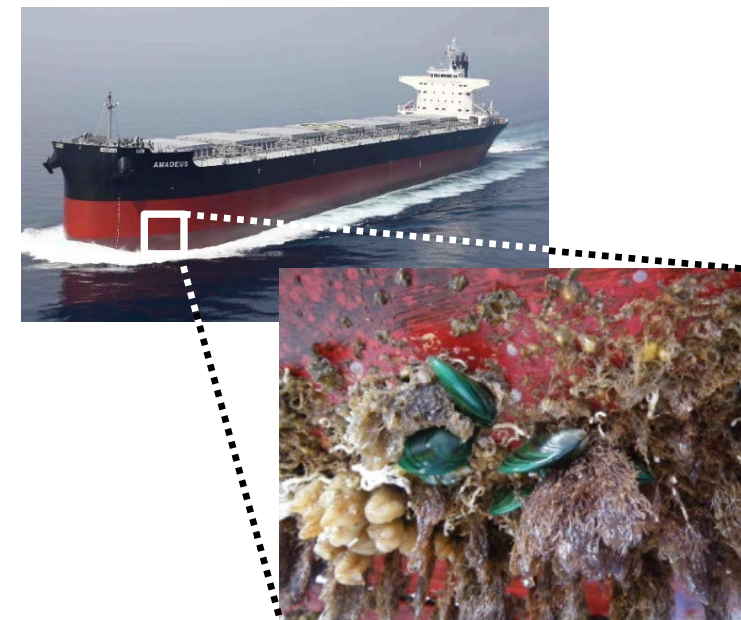
世界経済の基盤であるグローバル船舶輸送が増大する中、**船舶由来の(i)外来水生生物の越境移動、(ii)防汚剤による海洋汚染、(iii)温室効果ガスの発生が課題**となっている。

CO₂排出削減(国連専門機関IMOの国際ルール対応するための燃費改善)に加えて、環境政策の観点からも、上記3項目の抑制に資する海洋生物が付着しない安全・安心な船底塗料が求められているが、未だ防汚剤フリーで十分な性能を有する材料の開発には至っていない。

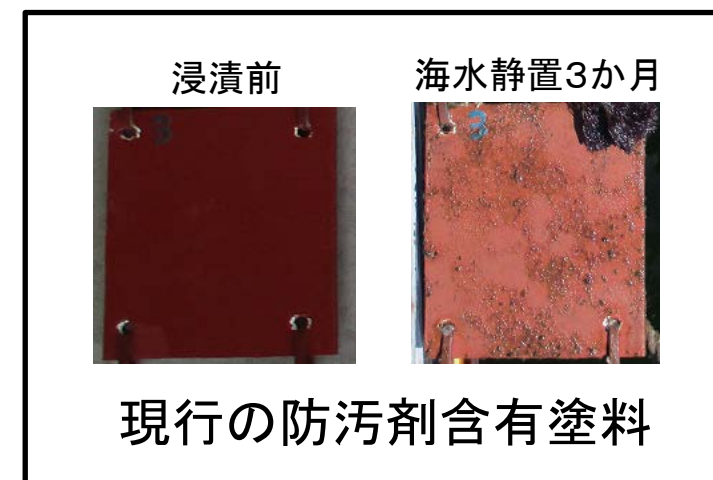
【研究開発目的】

上記課題を解決する**ゲームチェンジングテクノロジーを生み出し**、すなわち、省エネ/低環境負荷船底塗膜を低環境負荷プロセスで施工する技術基盤を確立し、**地球環境改善に貢献する**。具体的には、安全性の高い、環境にやさしい防汚剤フリー塗料を開発し、長期的に海洋生物付着防止を達成することのより、生物越境汚染防止、生物多様性保全、地球温暖化防止を図る。

また、本研究推進にあたり、機能性ポリマー合成、塗液調整、塗膜形成を担う**関連企業との協働により実用化を加速しうる体制**を構築する。



船底への海洋生物付着



1.研究背景、研究開発目的及び研究目標

【研究目標(全体目標)】

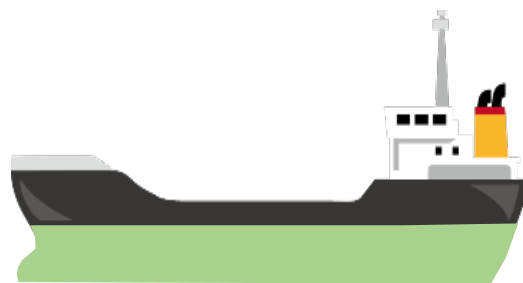
ソフト&レジリエント・トライボロジー(SRT)による革新的ステルス性(海洋生物付着抑制、流体抵抗低減、自己修復性)の付与をゲームチェンジングテクノロジーとして、**省エネ・低環境負荷を実現する次世代船底塗膜と塗膜形成プロセスを確立**する。

SRTスキン技術により革新的“ステルス性”を実現！

- # 生体適合性:海洋生物付着を防止
- # 界面滑り:流体抵抗を低減
- # 防汚剤フリー／自己修復性:環境負荷を低減

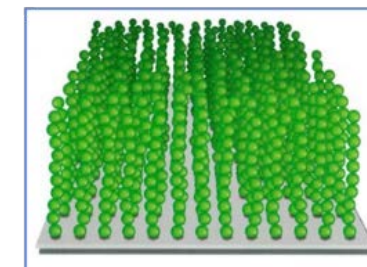
→船舶航行速度の改善と国際規制への対応

(船舶航行における低環境負荷とCO2排出削減の実用基盤を構築)

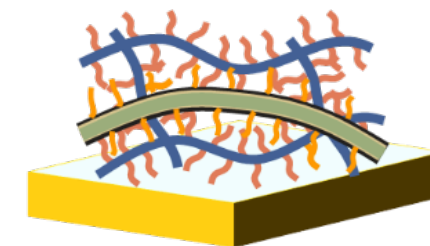


最終目標

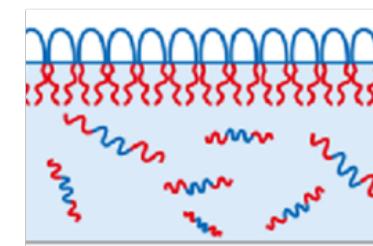
- ✓ ロールtoロールプロセスでのSRTスキン製造：ロール幅30cm
- ✓ SRTスキン貼付安定性：実航行試験で6か月以上
- ✓ 海洋生物付着抑制：野外試験で6か月以上
- ✓ 流体抵抗低減：未処理と比較して15%の摩擦低減
- ✓ 自己修復性：1日以内の特性回復（生物付着時間スケールを加味）



濃厚ポリマーブラシ
(CPB)



ボトルブラシポリマー
(BBP)



自己修復型ブラシ
(Inverted PB)

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ1)

(1)進捗状況に対する自己評価

サブテーマ1:次世代船底塗膜形成のためのSRT技術の確立ーSRT材料設計と基礎特性

【研究目標】 SRT材料として実績のあるボトルブラシポリマー架橋膜やブロックポリマー表面偏析膜をベースフィルムにラミネートした高機能フィルム(密着・離型タイプ)をロールtoロールで製造するプロセス基盤を構築するとともに、基礎物性評価と他グループでの実地性能評価の相関データをもとに、**流体抵抗低減や海洋生物付着防止性の向上に資する材料設計指針を提示**する。具体的には、商用性を加味した成膜プロセスとして、**30cm幅ロールtoロール成膜でSRTスキンフィルムを製造**することを目指す。

【技術目標】

- 4年度 ① ポリマー合成スケールとして、SRTスキン成膜に必要な**固形分100gを1バッチで製造**できること(関連企業への技術展開も検討)。
- 5年度 ② ラミネート成膜技術として、**30cm幅のロールtoロール成膜**を達成すること。
- ③ **機能性CNF／モノリス膜**についてはA4サイズを目標、ロール状でのCPB付与を実施できること。
- 6年度 ④ ベースフィルムの下地処理等により、他グループの実地評価に耐えうる**密着性および安定性を実現**すること。

【自己評価】 計画以上の進展がある

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ1)

5

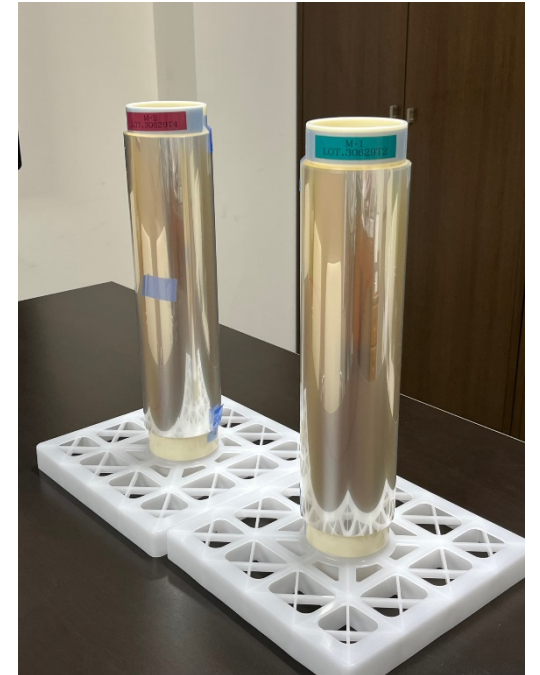
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し

【具体的な理由・根拠】

- ◆ 4年度技術目標①②をクリアーしたのみならず、**BBP設計@京大→スケールアップ合成@連携企業A→ロールtoロール成膜@連携企業Bの産学協働体制**を確立できた(各段階1週間程度でSRTスキン製造が可能)。
- ◆ 6年度技術目標④に前倒しで取り組み、**有効なプライマー材料の設計・合成に目処**がたったことは大きな成果である。
- ◆ 5年度技術目標③に関しては石田紘一朗助教(CNFの製造・構造制御の専門家)を研究分担者に加えて年度内の達成を見込んでいる。

【目標達成の見通し】

最終技術目標「商用性を加味した成膜プロセスとして、30cm幅ロールtoロール成膜でのSRTスキンフィルムを製造できること」に向けては、すでに産学連携による研究開発基盤を構築済みである。**今後の課題は、ベースフィルム密着性の改善ならびにロールtoロールプロセスにおける硬化時間短縮(目標値を1minに設定)である。**触媒添加や光誘起酸発生による加水分解促進を検討する。いずれも、塗工メーカーで標準的に利用されて大幅な時間短縮が期待されるプロセスであり、加えて、流体抵抗低減と海洋生物付着抑制に効果的なBBP設計と架橋システムの最適化が完了すれば、直ちに実施可能である。



R2R成膜したPMMA系SRTスキン
(幅30cm長さ10m)

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ2)

(1)進捗状況に対する自己評価

サブテーマ2:SRTスキンによる流体抵抗低減効果の実機検証と機能向上

【研究目標】 SRTスキンを貼付した**平板やモデル船における流体抵抗低減効果**を明らかにする。また、基材内部からの自己偏析により基材表面にCPB層を形成するinverted grafting-to法を活用し、塗面剥離後も流体抵抗低減効果および防汚効果を維持する**新たな自己修復性船底フィルムの開発**を狙う。更に商船高専の実習船へSRTスキン貼付により**航行時のSRTスキンの効果と耐久性を実地検証**する。具体的には、未処理品に比べて15%の流体抵抗低減と野外試験において6か月以上の防汚性、貼付耐久性を目指す。

【技術目標】

- 4年度 ① 未処理品に比べ**5%の流体抵抗低減**を達成すること。
- 5年度 ② 野外試験における**3か月以上の防汚性**を達成すること。
- 6年度 ③ 未処理品に比べ**15%の流体抵抗低減**を達成すること。
 - ④ 野外試験における**6か月以上の防汚性、貼付耐久性**を達成すること。
 - ⑤ **1日以内の特性回復**を達成すること。

【自己評価】 計画以上の進展がある

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ2)

7

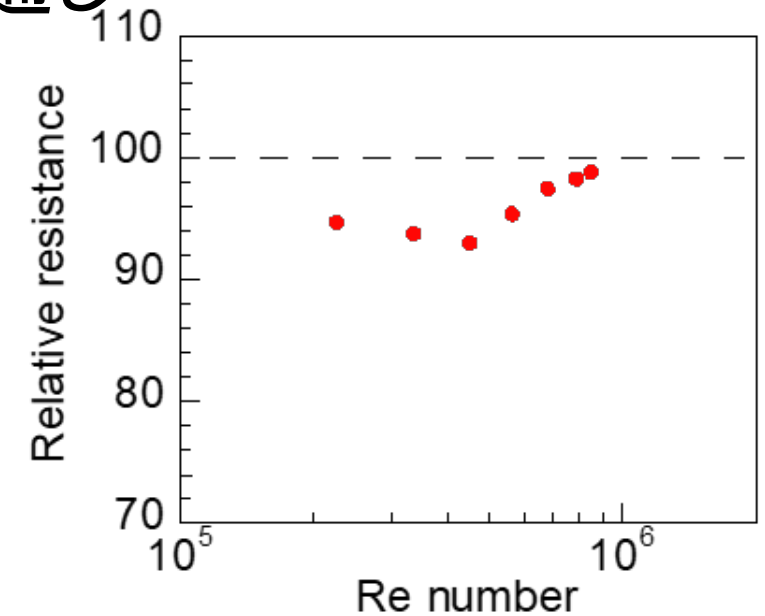
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し

【具体的な理由・根拠】

- ◆ AI平板における回流水槽試験により、CPB型SRTスキンにおいて**約7%の流体抵抗低減効果**を確認し、4年度技術目標①をクリアした。
- ◆ 自己修復塗膜の加速試験の結果、**野外試験3か月に相当する安定性**を確認し、5年度技術目標②を1年前倒しで達成した。
- ◆ 自己修復塗膜の表面摩擦損傷後の特性回復検証から、**2時間で78%の回復性**を確認した。完全回復ではないが、6年度目標⑤よりも12倍速い回復を2年前倒しで実現した。

【目標達成の見通し】

最終技術目標④については、協力機関連携のもと回流水槽試験を行い、流体抵抗3成分の**モデル解析により高Re数での抵抗値を試算**することに加え、実機検証に向けて練習船への貼り付け工程開発を早期に実施する。現時点で2時間78%の回復が確認されている⑥については、今後、**第2世代型自己修復性塗膜**にて十分達成可能と考えている。現時点で3か月相当の防汚性を確認できている⑤に関しては、今後、**練習船にSRTスキンを貼り付けて実機検証**することで達成可能と考えている。



CPB形成による流体抵抗低減効果 (PET比)

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ3)

(1)進捗状況に対する自己評価

サブテーマ3:SRTスキン塗膜の生体適合性と海洋生物付着防止性の評価と向上

【研究目標】 基材の素材や形状によらず塗布できるSRT塗膜(ボトルブラシ架橋膜)の開発を行うとともに、他グループで開発される各種SRT塗膜をも対象に、以下の目標を達成する**生体適合性(ステルス性)と安定性を実現、実証**する。具体的な最終技術目標として、SRT塗膜が人工海水中で**3か月剥離せず、生体適合性が浸漬前の表面と同程度**であり、**野外試験6か月後の海洋生物付着10%以下**を目指す。

【技術目標】

- 4年度 ① SRT塗膜の物理的安定性として、**3か月間**、人工海水／生理食塩水中で安定であること。
② 生体適合性として、細胞の播種密度に対する接着数(相対値)**10%以下**を達成すること。
③ 海洋生物(キプリス幼生や珪藻類)の付着抑制として、相対付着数**10%以下**を達成すること。
- 5年度 ④ ①において、化学組成変化量15%以下、または、細胞・海洋生物の相対付着数**10%以下**を達成すること。
⑤ 野外試験(海洋浸漬)を実施、3か月後の生物付着面積**10%以下**であること。
- 6年度 ⑥ この海洋生物付着防止性能が**6か月以上**維持できていること。

【自己評価】 計画以上の大きな進展がある

2.研究目標の進捗状況(サブテーマ1)

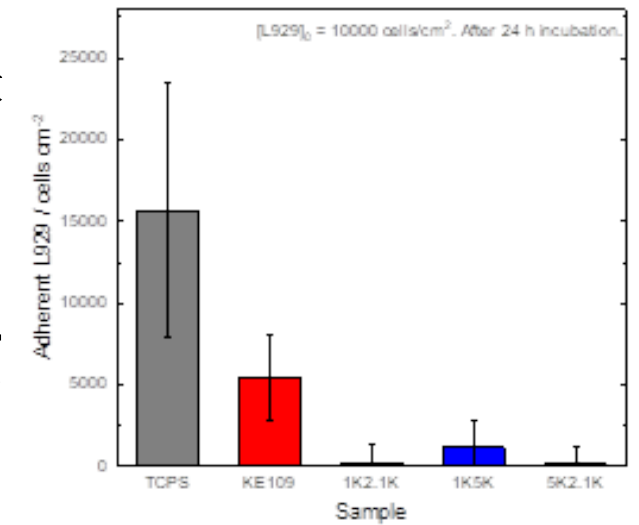
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し

【具体的な理由・根拠】

- ◆ 4年度の**技術目標①～③**をクリアするとともに、5年度技術目標に関して、④の生体適合性試験を実施中であり、また、Inverted PBフィルムを用いて⑤を2か月前倒しで開始した(BBP付与PETフィルムもまもなく開始予定)。
- ◆ **【新規】**(i)海水安定性の**加速試験の確立**、(ii) **準自然環境による海洋生物付着防止性能評価体制**の構築、(iii) **抗菌性SRT塗膜の開発**に着手し、本プロジェクトの研究加速に大きく貢献した。
- ◆ 加速試験方法の確立は、他のグループにも展開、各技術目標の前倒しに貢献した。

【目標達成の見通し】

最終技術目標のうち2つについては、(加速試験ながら)Inverted PBフィルム、BBP架橋膜(基材密着性の改善を残す)でほぼ達成できている。また、残る「**6か月の海洋生物付着防止性能維持**」については、材料合成基盤として多様なBBP/架橋系が確立されており、その達成は十分に見込める状況となっている。特に、**沖縄で準自然環境試験を通年実施**できることになり、研究開発の加速が期待できる。



Inverted PBの
優れた生体適合性

3.研究成果のアウトカム(環境政策等への貢献)

10

【行政等が活用することが見込まれる成果】

- ◆ 海洋生物付着防止→**外来水生生物越境移動の抑制**
- ◆ 防汚剤フリーによる海洋生物への負荷低減→**生物多様性保全**
- ◆ 高専や水産高校での実地教育→次世代における**環境問題への意識向上**
- ◆ 低摩擦化によるCO2排出削減→**地球温暖化防止**

※船舶運航に限らず大きな波及効果が期待される。例えば、

＜取水路@海洋沿岸部施設＞発電所(海上風力・波力・原子力発電など)、海水淡水化プラントなど

＜海洋計測:各種センサー、スキャナー、ソナー、カメラ等＞ブイ搭載長期観測用を含め需要増見通し(海洋における物質循環モニター、地球観測システムなど)

＜係留ワイヤー＞潮流等に対する抵抗低減→メンテナンスフリーへ

なお、琉球大学/沖縄高専との連携において、サンゴ保全研究開発での活用も期待されている。



<https://www.jamstec.go.jp/mutsu/co2/index.html>
JAMSTEC「海洋二酸化炭素センサー開発」



<https://toyokeizai.net/articles/-/244158?page=2>
企業が次々参画、「浮体式」風力発電に熱視線

【誌上発表(査読あり):該当なし】

各グループで準備中(年内投稿完了予定)

【口頭発表(学会等):15件】

[招待講演]

- ◆ 辻井敬亘,「なのセルロース工房」講演会(2022.12.6)
- ◆ 辻井敬亘, FSBL第12回研究発表会(2023.1.11)
- ◆ 辻井敬亘, 22-2高分子学会講演会(2023.2.7)
- ◆ 辻井敬亘, 第72回高分子学会年次大会(2023.5.25)
- ◆ H. Arafune et al., IUMRS-ICYRAM2023(2022.12.3-6)
- ◆ C. Yoshikawa, Interdisziplinäres Seminar für Ökologische und Nachhaltige Chemie, Physikalische und Theoretische Chemie, Technische Chemie(2022.11.30) 等

【知的財産権:2件】

※他1件新規出願予定

【国民との科学・技術対話:5件】

- ◆ 環境研究総合推進費1G-2201セミナー「ソフト&レジリエント・トライボロジー技術:省エネ・低環境負荷を実現する次世代船底塗膜の開発に向けて」(2023.3.30)
 - SRT技術とは?
 - 自己修復型SRT表面の形成と機能
 - SRT表面の生体適合性と船底塗料への応用

※セミナー終了後に複数企業よりコンタクトあり、
共同研究を検討中
- ◆ NIMS WEEK(2022.11.14) 2件

5. 研究の効率性

研究推進にあたり、**グループ間の課題共有と連携を重視**するとともに、各グループがすでに有する**産学・高専機構・国際的ネットワーク**を活用している。その波及効果として、**琉球大学熱帯生物圏研究センター**ならびに**沖縄高専との連携**に繋がった。この連携により、船底塗料用途以外に、今後増大するであろう魚の陸上養殖用の水槽内環境、水中カメラ・ドローンへの適用など、**SRT塗膜の用途を大きく展開**しうる可能性が出てきたことに加えて、**海洋環境悪化によるサンゴ減少**に対する生物学的研究にも貢献できることが判明した。

