



2023 年度

IMO 基準に適合可能な小型・高効率の
船体付着生物除去システムの技術開発

成果報告書

2024 年 6 月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2023年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「IMO 基準に適合可能な小型・高効率の船体付着生物除去システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2023年度の1年計画で、ヤンマーパワーテクノロジー株式会社に委託して実施しており、その報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2024年6月
(一社)日本船用工業

目次

1. 事業の目的	- 1 -
2. 事業の目標	- 3 -
3. 2023 年度の実施内容	- 3 -
3.1. 船体形状の調査	- 3 -
3.1.1. 背景	- 3 -
3.1.2. 調査内容と結果	- 4 -
3.2. 設計	- 8 -
3.2.1. デブリ回収装置—ろ過装置の設計改善	- 8 -
3.2.1.1. デブリろ過速度およびろ過精度の設計目標値	- 8 -
3.2.1.2. 目標値の達成要件	- 8 -
3.2.1.3. 要件①—デブリ回収ポンプの選定	- 8 -
3.2.1.4. 要件②—ろ過装置の設計	- 9 -
3.2.1.5. 要件③—デブリ回収装置の設計	- 14 -
3.2.2. 船体洗浄 ROV—洗浄速度向上と消費電力低減	- 20 -
3.2.2.1. 設計目標値の設定	- 20 -
3.2.2.2. 必要装備一式の決定	- 20 -
3.2.2.3. 船体洗浄 ROV の設計	- 22 -
3.2.2.4. 洗浄速度と消費電力量の実現に必要な推進機の織り込み	- 28 -
3.2.2.5. 最大消費電力の低減	- 30 -
3.2.3. 船体洗浄 ROV—洗浄力向上	- 30 -
3.2.3.1. 設計目標値と達成要件	- 30 -
3.2.3.2. 要件①適正な洗浄力の設計	- 31 -
3.2.3.3. 要件②洗い残しが発生しない洗浄装置の設計	- 33 -
3.2.3.4. 洗浄機の設計	- 33 -
3.3. 試作	- 36 -

3.3.1.	試作状況	- 36 -
3.3.2.	試作品評価	- 42 -
3.4.	陸上水槽試験	- 43 -
3.4.1.	張付き時最大推進速度	- 43 -
3.4.1.1.	目標値の設定	- 43 -
3.4.1.2.	試験方法	- 43 -
3.4.1.3.	結果および考察	- 43 -
3.4.2.	洗浄円盤回転数	- 44 -
3.4.2.1.	目標値の設定	- 44 -
3.4.2.2.	試験方法	- 44 -
3.4.2.3.	結果	- 45 -
3.4.2.4.	考察	- 45 -
3.4.3.	洗浄水圧	- 46 -
3.4.3.1.	目標値の設定	- 46 -
3.4.3.2.	試験方法	- 46 -
3.4.3.3.	試験結果	- 47 -
3.4.3.4.	考察	- 48 -
3.4.4.	デブリ回収速度	- 49 -
3.4.4.1.	目標値の設定	- 49 -
3.4.4.2.	試験方法	- 49 -
3.4.4.3.	結果および考察	- 50 -
3.5.	実船洗浄試験	- 51 -
3.5.1.	試験概要	- 51 -
3.5.1.1.	洗浄対象船舶	- 51 -
3.5.1.2.	試験機材	- 51 -
3.5.2.	船体洗浄最大速度	- 53 -
3.5.2.1.	目標値の設定	- 53 -

3.5.2.2. 試験方法	- 53 -
3.5.2.3. 結果および考察	- 55 -
3.5.3. 船体洗浄精度	- 55 -
3.5.3.1. 目標値の設定	- 55 -
3.5.3.2. 試験方法	- 55 -
3.5.3.3. 結果および考察	- 60 -
3.5.4. デブリ回収ろ過精度	- 60 -
3.5.4.1. 目標値の設定	- 60 -
3.5.4.2. 試験方法	- 60 -
3.5.4.3. 結果および考察	- 63 -
3.5.5. 補足試験	- 64 -
3.5.5.1. 洗浄精度の評価	- 64 -
3.5.5.2. デブリ回収ろ過精度の評価	- 66 -
4. 目標の達成状況.....	- 68 -
4.1. デブリろ過精度および速度	- 68 -
4.2. 船体洗浄 ROV 最大洗浄速度	- 68 -
4.3. 船体洗浄 ROV 付着物除去精度.....	- 68 -
5. 2023 年度の実施内容の概要.....	- 69 -
6. 今後の予定	- 72 -
7. まとめ	- 72 -

1. 事業の目的

船体付着生物の移動による外来種移入リスクが、世界的に問題視されている。近年、複数の国で入港船舶に対して船体の付着生物除去を義務付ける規制が施行されており、海運業者において、運航計画への影響や洗浄コストの問題が顕在化している。

本事業では、外来種移入リスク低減のため、水中で船体を素早く洗浄する船体洗浄 ROV*と、洗浄時に発生するデブリ**の回収技術の開発に取り組み、世界に先駆けて IMO 基準に適合可能な船体洗浄システムを確立することを目的とする。

個別事項について、以下に補足説明する。

(1) 船体付着物に関する規制について

オーストラリアでは 2022 年 6 月 15 日、ニュージーランドでは、2018 年 5 月 15 日から入港前の付着物除去の義務付けと入港時の船体付着物検査を行っている。

IMO は生物移入リスクへの対策として、「船体付着生物管理ガイドライン」***を 2011 年 7 月に採択した。本ガイドラインは、船体付着生物の地域間移動を最小限に抑制するよう管理指針を示したものである。現在、そのガイドラインの改正作業と審議が継続的に行われており、水中洗浄の要件が 2023 年度以降に明確化される見込みである。当社は IMO の基準審議に参画している日本船舶技術研究協会と連携し、実現可能なデブリ回収率や回収サイズの決定に向けた試験的取り組みを実施し、国際基準化に貢献する。

(2) 当社の水中 ROV 開発技術背景について

当社は遠隔自走式の養殖網水中洗浄機「せんすいくん」(右図)の製造・販売を 2000 年から実施している。「せんすいくん」は、養殖網を高圧水の噴射により洗浄する ROV で、網生地に張付きながら、タイヤまたはクローラで走行・移動しながら洗浄作業を行うことができる。



養殖網水中洗浄機
「せんすいくん」

操縦者は、作業船上で水中カメラ映像を見ながら本体を操作する。

本洗浄機は、洗浄する場所へ自由に遊泳移動できないことや、デブリ回収の機能を有していないため、そのまま船体の洗浄に転用することができないため、本洗浄機で培った技術をベースに、船体洗浄に適した ROV を開発する必要がある。

(3) 船体洗浄 ROV での洗浄を導入する効果について

海洋生物除去技術としては、船体をドックインして洗浄する方法や、ダイバーによる除去作業が行われている。前者は、非常に費用が掛かるだけでなく、運航できない期間が発生することで、海運業者の運航計画に大きく影響し、また経済的

負担は大きい。一方、ダイバーによる潜水除去作業は、非常に危険で労力を要する作業であることや除去された海洋生物が海中に放出されることで、生態系保護や作業安全性の観点で課題が残っている。

船体洗浄 ROV によって船体を効率よく洗浄し、デブリを回収することが可能になれば、洗浄コストと安全性、生態系保全に関する課題が解決される。また、頻繁に、手軽に洗浄できるようになり、副次的効果として、船体抵抗の減少と航行時の燃費改善が期待できる。

(4) 本事業において開発を予定している船体洗浄システムの特徴

船体洗浄システム全体の構成としては、船体洗浄 ROV と、デブリを回収しろ過するデブリ回収装置、船体洗浄 ROV に洗浄用の高圧水を供給する高圧ポンプ、船体洗浄システム本体に駆動電力を供給する発電装置等から構成されている。本事業で開発する船体洗浄 ROV とデブリ回収装置の特徴は、以下①、②の通りである。

① 船体洗浄 ROV

駆動方式 : 電動スラスタにより水中の遊泳移動および船体への張付きを行う。スラスタの駆動電力は、作業船上へ設置する発電機から供給される。

洗浄機能 : 船体洗浄 ROV 下部に設置する回転円盤から高圧水を噴射し、船体付着生物を除去する。高圧水は、作業船上へ設置する高圧ポンプから供給される

デブリ回収機能 : 上記洗浄装置の周囲にデブリ回収フードと吸引ホースを設置し周囲への拡散を防止しながら、デブリを含む海水を回収する。

操作方式 : カメラ映像を見ながら船上でリモコン操作により操縦する。

② デブリ回収装置

デブリ吸引 : 自給式ポンプにより、船体洗浄 ROV からデブリを含む海水をホースで吸引し、ろ過装置へ供給する。

フィルタリング : 多段階に設置する連続逆洗ドラム式ろ過機により、デブリ粒子をろ過する。

排水殺菌 : ろ過後の海水を紫外線殺菌装置により殺菌して排水する。

他社比較

会社名	当社	海外			国内	
		HW社	FC社	CL社	HB社	
本体	外観	 開発予定機のイメージ				
	駆動方式	スラスタ	スラスタ	駆動輪	スラスタ	駆動輪
	船底への張付き方式	スラスタ推力	スラスタ推力	マグネット	スラスタ推力	スラスタ推力
	洗浄方法	高圧水噴射	高圧水噴射	高圧水噴射	高圧水噴射	ブラシ式
	操作方式	作業船上から遠隔操作	作業船上から遠隔操作	作業船上から遠隔操作	作業船上から遠隔操作	作業船上から遠隔操作
デブリ回収	回収	○	○	○	△	△
	回収装置（作業船上）	○	○	○	×（ROV内蔵ネット）	×（ROV内蔵ネット）
	回収精度	マイクロフィルタ	マイクロフィルタ	マイクロフィルタ	目の粗いネット	目の粗いネット
	排水殺菌	○	○	○	×	×
システム	電源電圧	200V	690V	N.D.	N.D.	N.D.
	高圧水供給方法	高圧ポンプ（作業船上）	油圧ポンプ（本体）	高圧ポンプ（作業船上）	N.D.	—
	作業距離	100m	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

* ROV：Remote Operation Vehicle

** デブリ：船体から除去した汚れ、船体付着生物等

*** 2011 GUIDELINES FOR THE CONTROL AND MANAGEMENT OF SHIPS' BIOFOULING TO MINIMIZE THE TRANSFER OF INVASIVE AQUATIC SPECIES

2. 事業の目標

(1) デブリろ過精度および速度

目標値：ろ過精度を0.05mm以下*とし、ろ過速度は100L/min.

世界的要求レベル：0.05mm**

(2) 船体洗浄 ROV 最大洗浄速度

目標値：最大洗浄速度を2,000 m²/hとし、最大消費電力は31kW

世界的技術レベル：300～2,000 m²/h、最大消費電力36kW

(3) 船体洗浄 ROV 付着物除去精度

目標値：船体付着生物を95%以上除去可能

* 判断基準として、排水中に含まれるデブリ粒子の95%が目標値未満であること

** オーストラリア、ニュージーランドにて、義務付けられているろ過精度

3. 2023年度の実施内容

3.1. 船体形状の調査

3.1.1. 背景

船舶の船体形状には、平面状のエリアと曲面状のエリアが存在しており、本船体洗浄 ROV の開発においては、急な曲面のバルバスバウ周辺や複雑な構造を成すプロペラの存在する船尾エリアを除き、平面状ないし比較的緩やかな曲面のエリアを広く網羅的に洗浄することができる船体洗浄 ROV の開発をターゲットとしている。本開発の基本設計段階においては、船体への洗浄機の接地形状の関係から、洗浄走行が可能な曲面は半径 4m 以上と試算している。

本項では、貨物用船舶を中心に、その船体形状を調査し、船体洗浄のターゲットとする全長 300m クラスの船舶において、洗浄可能曲面の下限値を半径 4m とすることの妥当性を検証する。

3.1.2. 調査内容と結果

本調査において、船体設計情報が得られた全長 175~330m までの一般的な貨物船の寸法情報について、表 1-1 の通り取りまとめた。本表のうち船体の詳細な曲率に関する情報まで取得できたものは Ship No. 1 であり、その他の船舶の寸法情報に関しては、一部簡易算定によって得られた値と、推定値を記載している。

Ship No. 1 については、3D モデル化と曲面の解析を実施することにより、船体ボディ部(図 1-2)の概ね平面状を成すエリア(ビルジサークル部分を除く)の面積は、喫水下の船体面積全体に対して、72%であった。更に、曲面部分の多い船首部分と船尾部分(図 1-2)において、半径 4m 以上の緩やかな曲面の割合を含めると、半径 4m 以上の曲面の洗浄ができる船体洗浄 ROV で網羅できる面積は、船体面積全体の 75%となった(表 1-1 の 1)。更に、残りの 25%を占める曲面のうち、ビルジサークル部分が約 10%、船尾部のプロペラ周りが 10%、船首のバウ付近が約 5%となった。

一般的な船舶の断面図を参照した図 1-1 より、ビルジサークルは半径の小さい曲面構造になっていることが分かる。ビルジサークルの半径としては、表 1-1 の通り、1.2m~1.96m の船舶が実在しており、半径 2m 以下が主流となっている傾向が推察された。ビルジサークルは、ROV の走行の障害となるビルジキールが存在していることが多く、複雑な形状に対応する船体洗浄 ROV を開発しない限り、リモートでの洗浄作業が難しいエリアである。また、船尾部のプロペラ周りにおいても複雑な起伏変化に対応できる船体洗浄 ROV を開発する必要があると、本開発の狙いとする大型の船体洗浄 ROV では対応が難しいと考えられた。

Ship No. 2~No. 7 については、船体の曲面構造に関する詳細な設計情報は得られなかったため、全長・全幅・喫水下高さ・船体ボディ部(図 1-2)の長さ・ビルジサークル半径より概ね平面状を成すエリアの面積を算出した。その結果、ボディ部の洗浄可能な面積(表 1-1 の g)が、喫水下の船体面積の推定値に占める割合(表 1-1 の j)は、57~67%となった。ボディ部以外の半径 4m 以上の緩やかな曲面を含めた面積については、曲面の詳細データが得られなかったため、正確な算出は出来ないが、Ship No. 1 の比率を参考とすると、船体のおよそ 60~70%に相当するエリアが半径 4m 以上

の曲面あるいは平面状を成しているものと推察された。

全長 300m 以上の Ship No. 4～No. 7 については、ボディ部の長さが全長に占める割合が 62～68%と、その他の船舶（76～79%）と 9～17%低いことが影響し、半径 4m 以上の曲面あるいは平面状を成しているエリアの面積が 60%と推定され、その他の船舶に比べて最も低い値となった。しかし、一般的に、大型船の船首部および船尾部の曲率は、小型の船舶に比べて緩やかな傾向が想定されるため、船首部と船尾部における半径 4m 以上の曲面については、本試算以上の面積が想定される。

以上のことから、一般的な貨物用船舶の船体形状について調査した結果、300m 級の船舶において、半径 4m 以上の曲面の割合は、少なくとも 60%以上であることが推定でき、船体洗浄において網羅的に素早く洗浄するための基準として妥当であると判断した。

表 1-1 貨物船の船体寸法調査結果

対象船 No.			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
	項目	算定方法	General Cargo Carrier	Ore Carrier	Bulk Carrier	Crude Oil Tanker	Ore Carrier	Crude Oil Tanker	Ore Carrier
a	全長 (m)	図面情報	175	260	240	340	361	340	330
b	全幅 (m)	図面情報	30	42	30	60.0	65	60	57
c	喫水下高さ (m)	図面情報	10	15.6	12.5	21.1	23	21.05	18
d	船体ボディ部※1の長さ (m)	$d=a/e$	139	195.6	182.4	230.0	230	209	204.6
e	全長に占めるボディ部※1の割合	$e=d/a$	79%	75%	76%	68%	64%	60%	62%
f	ビルジサークル半径 (m)	図面情報	1.7	1.96	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

g	ボディ部の洗淨可能面積 (m ²)	$g=d*(b-2f)+d*2(c-f)$	6,005	12,805	8,719	21,843	23,874	19,834	17,555
h	喫水下の船体面積 (m ²)	実測値	8,373	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
i		推定値(簡易算出)	—	19,055	13,200	34,738	40,071	34,714	30,690
j	喫水下の船体面積に占めるボディ部の洗淨可能面積	$d=a/e$	72%	67%	66%	63%	60%	57%	57%
k	喫水下の船体面積に占める半径4m以上の曲面および平面面積 (m ²)	実測値	6254	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
l	喫水下の船体面積	実測値	75%	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
m	に占める、半径4m以上の曲面割合	推定値	—	68～70%と推定される					
	出展		独自保有データ ※モデル解析	図説船舶工学 (S47, 高城清著)	日本財団図書館 図 B-14	JMU テクニカルレビュー No. 4	JMU テクニカルレビュー No. 7	JMU テクニカルレビュー No. 13	名村造船テクニカルレビュー No. 20

※ ビルジサークルを除く

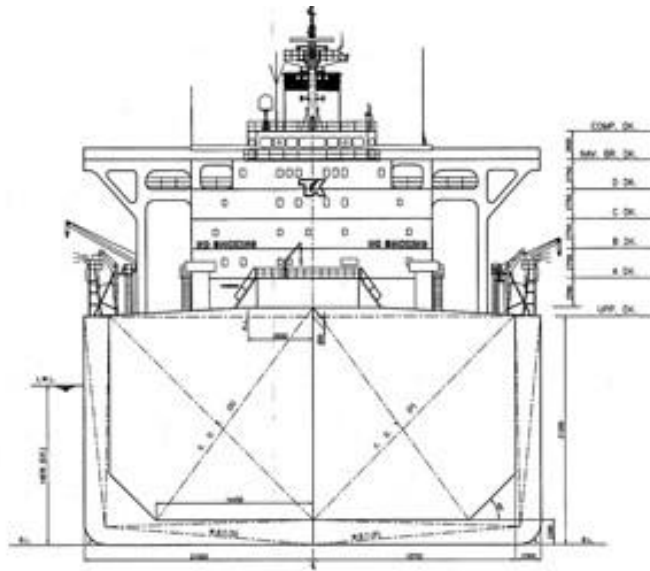


図 1-1 一般的な貨物船舶のボディ部断面形状

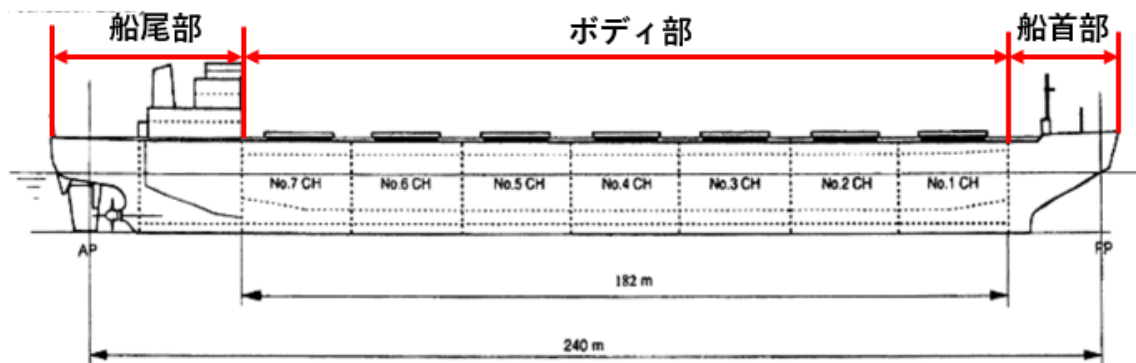


図 1-2 船舶の部分に関する仮名称

3.2. 設計

3.2.1. デブリ回収装置—ろ過装置の設計改善

3.2.1.1. デブリろ過速度およびろ過精度の設計目標値

ろ過速度の設計目標値は、船体洗浄 ROV を用いて船体を洗浄する際、周囲の海域へのデブリ拡散を防止することができる吸引流量を基準に決定した。2.2 項にて後述するが、本事業では、高圧水の噴射により船体の付着生物を除去する船体洗浄 ROV の開発を計画しており、その洗浄水の流量は 75L/min. を予定している。また、周囲の海域へのデブリの拡散防止のため、洗浄水吐出部を FRP フードでカバーし、その後端部からデブリを含む海水を吸引するよう設計している。従い、この FRP フードと船体のクリアランスにおいて、洗浄水流量よりも高い流量でデブリを吸引することにより、周囲海域へのデブリ拡散を防止できる。本項では、十分な負圧を得るため、洗浄水流量の 1.33 倍にあたる 100L/min. の流量でデブリを吸引できるデブリ回収装置の設計に取り組んだ。

ろ過精度の設計目標値は、事業計画書に記載の通り、オーストラリア、ニュージーランドが世界に先駆けて法令化した船体洗浄時のデブリ回収精度 0.05mm(50 μ m) から引用した。

3.2.1.2. 目標値の達成要件

目標とするデブリろ過流量 100L/min. とろ過精度 0.05mm を達成するための主要要件としては、次の 3 つが挙げられる。

- ① 水中にある船体洗浄 ROV から、100m のホースを介して作業船上にデブリを吸引することのできるデブリ回収ポンプとホースの選定、設計への織り込み
- ② 100L/min. の流量で、かつ 0.05mm のろ過精度で目詰まりがなく、連続的なるろ過作業が可能なるろ過装置の設計織り込み
- ③ 上記装置を搭載するデブリ回収装置の設計

3.2.1.3. 要件①—デブリ回収ポンプの選定

水中に位置する船体洗浄 ROV から、100m のホースを介し、作業船上に配置するデブリ回収装置において 100L/min. の吸引が可能なポンプとして、表 2-2 に記載の自給式ポンプを選定した。

ポンプ型式の選定は、以下の使用条件から損失水頭を求め、経年劣化と安全率を考慮のうえ定格出力 1.5kW、定格流量 0.17m³/min. のモデルを選択した。

ホース長：100m

ホース径：50A

ホース材質：軟質塩化ビニル管

水面からポンプまでの高さ：3m

作業最大水深：20m

3.2.1.4. 要件②—ろ過装置の設計

船体洗浄では、数時間に渡って、連続して洗浄作業を行うことが想定されており、洗浄によって発生するデブリも連続的に発生する。一般的な配管用フィルタなどの、スクリーンを透過するだけの物理ろ過装置では、すぐに目詰まりが発生し、船体洗浄作業を定期的に止めてフィルタの目詰まりを解消するか、膨大なサイズのスクリーンを使用する必要がある。従い、フィルタの目詰まりを定期的あるいは連続的に解消する仕組みを備えるろ過装置を導入する必要がある。

さらに、フィルタへの目詰まり頻度は、水中に含まれるデブリの粒度分布に適合する目合いのフィルタを設定することにより改善される。

船体洗浄デブリには、数 μm ～数千 μm まで、大小さまざまな懸濁物が含まれることが想定されているが、これらを含んだ海水を、いきなりターゲットとなる0.05mmの精度でろ過を行うよりも、粗い目合いのスクリーンから、細かい目合いのスクリーンに、2段階以上の段階的ろ過の仕組みを導入することにより、細目のスクリーンに対する負荷が減り、目詰まりが少なく、コンパクトなろ過装置に仕上げられると考えた。

本デブリ回収装置の開発では、以上の使用条件を満たし、海水で使用可能で数十 μm までのろ過精度発揮が可能な連続ろ過装置として実績のある「ドラムフィルタ」と呼ばれるろ過装置の仕組みが最適な手段と考え、以下の主要諸元および図2-1の通り、既述の目標値を達成できるドラムフィルタを開発した。

表 2-1 ドラムフィルタ主要諸元

項目	仕様
サイズ(概寸)	L980×W1180×H1010mm
乾燥重量	約 140kg
適用液体	海水
処理量	100L/min. (6.0m ³ /h)
スクリーン (フィルタ)	
目合い	0.05 および 0.3mm
材質	ナイロン
回転ドラム	
サイズ (円筒径×長さ)	φ 500×500
材質	SUS316
接続	
規格 (フランジ)	JIS 10K

使用口径	
原水入口	75A
処理水出口	75A
逆洗システム	
方式	ノズル噴射圧によるフィルタ付着物の除去
制御	タンク内水位センサによる
ノズル	
数量	5 個
噴霧形状	均等扇形
噴角	90°
噴量	0.3L/min. 噴圧 0.3MPa 時
逆洗ポンプ	
種類	横形多段うず巻ポンプ
電源	3φ AC200V (50/60Hz)
定格出力	0.74kW
定格流量	2.04m ³ /h
ドラム駆動システム	
方式	モータ直結
駆動モータ	
種類	直交軸ギヤードモータ
電源	3φ AC200V (50/60Hz)
出力	0.4kW
主な部品の材質	
水槽、水槽蓋	FRP
配管材	PVC
主要金属部	SUS316

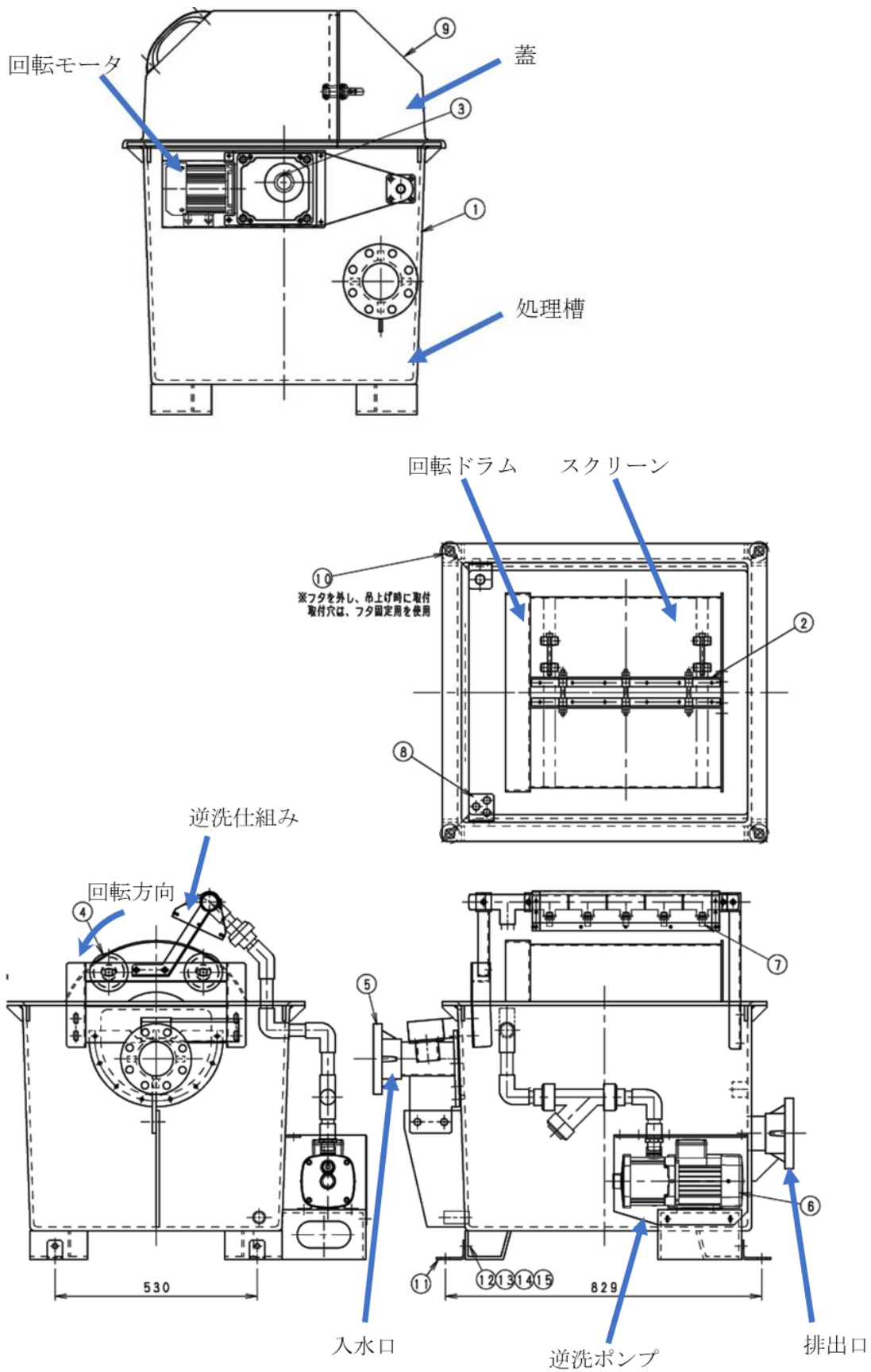


図 2-1 ドラムフィルタ構造概要

【設計のポイント】

＜入出水配管径と接続方式＞

処理速度の低下を防ぐため、入出水配管径は、管内流速が 0.5m/s 以下となるよう、75A 配管を採用した（図 2-1）。

＜フィルタのろ過面積とスクリーン目合いサイズの選定＞

スクリーンの目合いは、目詰まりリスクを低減するため、第一段階として 0.3mm、第二段階として 0.05mm の 2 段階ろ過とした。また、ドラムサイズと回転数は、スクリーンの単位面積あたりのろ過速度が 1kg(乾燥重量)未満/m²・min⁻¹となるように、ドラム直径 500mm×長さ 500mm およびドラム回転数 9min⁻¹となるように設計した。

本設計値の妥当性については、補足資料 1 の通り、乾燥デブリ（海洋付着生物を採取し、破碎して乾燥したサンプル）と試験用ドラムフィルタを用いた試験を実施して検証した。

＜ドラム回転速度＞

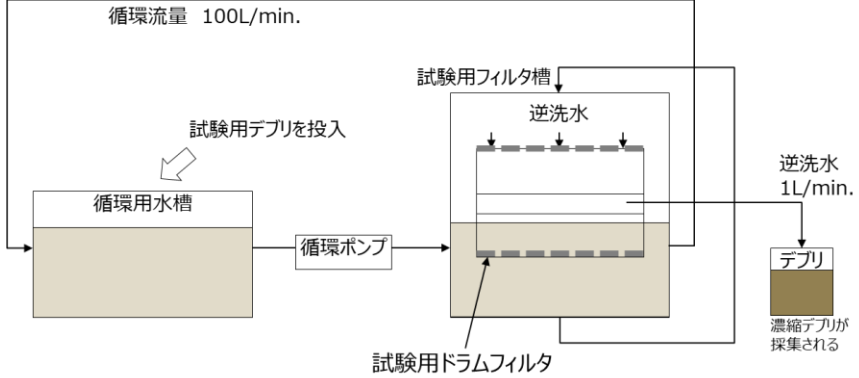
ドラム回転速度は、スクリーンサイズ 0.79 m²に対し、単位面積あたりのろ過速度が最大 200~250g(乾燥重量)/m²・min⁻¹となるよう、直行軸ギヤードモータと減速機を使用して、9min⁻¹となるように設計した。

＜逆洗方式と流速＞

逆洗は、回転ドラム上部の気中で高圧水吹き付けによりスクリーン内側に目詰まりした懸濁物をドラム内側に吹き飛ばす仕組みとした。ドラム内側にはデブリを含む逆洗水を受ける仕組みを設け、ドラム開口部を通して系外に排出できる仕組みとした。逆洗水はドラムフィルタ処理槽下部から取水し、配管フィルタを通して回転ドラム上部の逆洗ノズル仕組みへ供給する方式とした。流量は、0.5~1.5L/min. まで、バルブにより調節できる仕組みとした。

【補足資料 1】 スクリーンサイズに関する事前試験概要

※2022 年度内に当社内にて実施

項目	内容
試験目的	設計したドラムフィルタによって 100L/min. のろ過速度を発揮することができることを確認する。
材料	機材：試験用ドラムフィルタおよび試験用循環システム スクリーンサイズ：0.3mm および 0.05mm を使用 ドラム回転数：9min ⁻¹ システム循環流量：100L/min. 試験用デブリ投入量：0.5～4.5kg(乾燥体重量)/100L
方法	<ol style="list-style-type: none"> ① 試験機材は、以下の図 2-2 のとおり、循環システムとし、循環用水槽へ試験用デブリを投入し、試験用ドラムフィルタへ供試した。 ② 20 分間、循環ろ過を実施し、試験用ドラムフィルタ内の水位をモニタリングし、オーバーフローの有無を確認することにより、ろ過の正常/異常を検出した。(ドラムフィルタへの目詰まりが激しいとオーバーフローが発生する) ③ 試験は、2 段階ろ過方式を再現するため、まず 0.3mm スクリーンを用いて実施し、その後、0.05mm のスクリーンへ変更して、それぞれでオーバーフローの有無を確認した。 ④ 最後に、0.05mm スクリーンによってろ過された試験水を採取し、顕微鏡撮影画像を用いて粒形計測ソフトにより透過デブリの粒度分布を確認した。
試験実施機材	 <p style="text-align: center;">図 2-2</p>
結果	<ol style="list-style-type: none"> ① 本試験により、本項にて設計したドラムフィルタを用いることにより、4.5kg/100L までのデブリろ過が正常に行えることが確認され(図 2-3)、100L/min. のデブリろ過処理が求められるデブリ回収装置への搭載について妥当性が確認された。

② また、0.05mm スクリーンを用いてろ過することにより、投下デブリ粒形が25 μ m(0.025mm)以下であることが確認され(図2-3)、本ドラムフィルタを用いたデブリろ過により、ろ過精度0.05mm以下の達成に目処がついた。

試験条件			結果	
スクリーン目合い	設定流量 (L/min)	乾燥デブリ投入量 (kg)	オーバーフローした時間の割合 (%)	結論
0.3mm	100	0.5	0	全ての条件で目詰まりによるオーバーフローなし
		1.0	0	
		1.5	0	
		3.0	0	
		4.5	0	
0.05mm	100	0.5	0	全ての条件で目詰まりによるオーバーフローなし
		1.0	0	
		1.5	0	
		3.0	0	
		4.5	0	

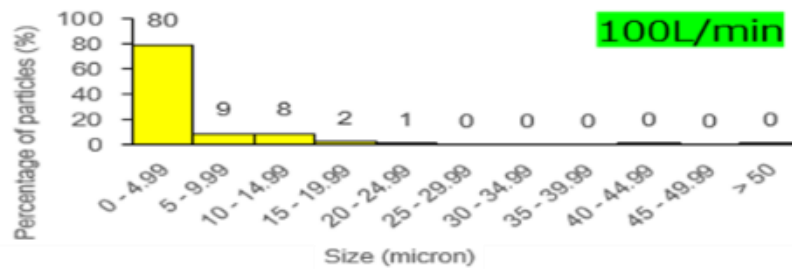


図 2-3

3.2.1.5. 要件③—デブリ回収装置の設計

前項までに検討したデブリ回収ポンプおよびドラムフィルタを用いて、以下の主要諸元表(表2-2)と3Dモデル(図2-5~2-10)の通り、デブリ回収装置の設計に取り組んだ。

表 2-2 デブリ回収装置 主要諸元

項目	仕様
型式名	BS100
サイズ(概寸)	L2810×W1750×H2100mm(ホース、集積槽は含まない)
乾燥重量	約 960 k g
適用液体	船体洗浄により発生したデブリを含む海水
処理量	100L/min. (6.0m ³ /h)
(懸濁物量条件)	7.5kg(湿重量ベース)/100L 以下とする
本体架台	

材質	SUS304（塗装）
製造方法	溶接による接合品
吊り上げ方法	架台上部の吊り上げ用アイボルトによる４点吊り
固定方法	本体下部接地面へのアンカーボルト設置による
デブリ回収ポンプ	
種類	自給式うず巻ポンプ
電源	3φ AC200V（50Hz）
定格出力	1.5kW
定格流量	0.17m ³ /min.
流量計	
種類	非接触超音波式流量計
適用配管	PVC 配管
電圧	AC100V
電力量	15W 以下
ドラムフィルタ	表 2-1 に記載
紫外線殺菌装置	
サイズ（概寸	φ 219×L965 mm
重量	
シリンダ	20kg
制御盤	7kg
処理能力	7.0m ³ /h（117L/min.）
電圧	AC100V
消費電力量	140W
材質	
シリンダ	SUS316
制御盤	ABS 樹脂
配管	
材質	PVC
接続口規格	JIS 10K フランジ 80A（75A 配管と接続可能）
デブリ流入配管径	40A, 75A
処理水排水管径	75A, 50A

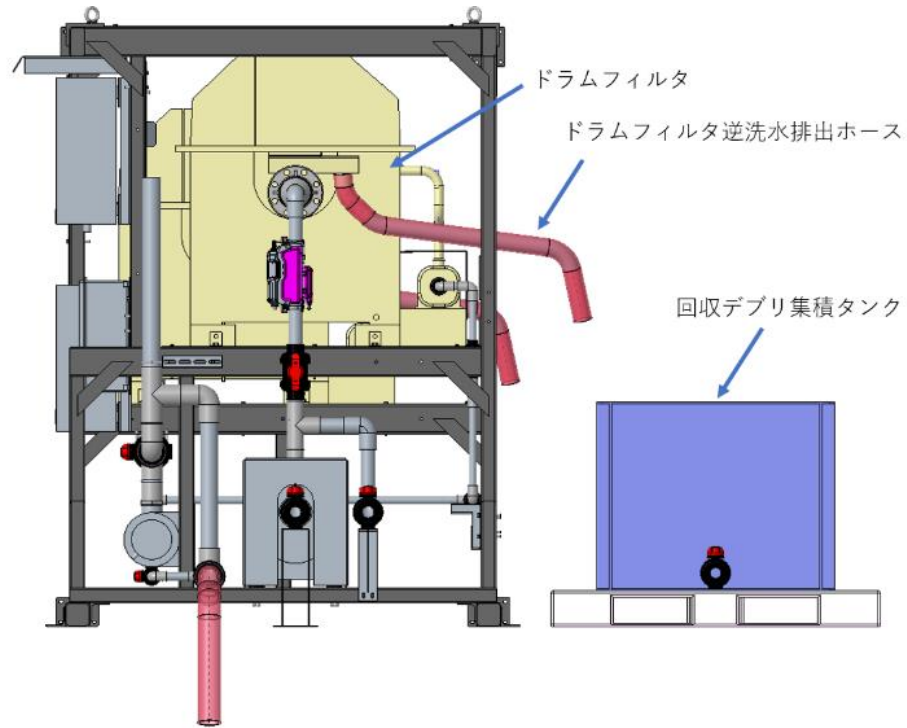


図 2-6 デブリ回収装置 3D モデル（右側面図）

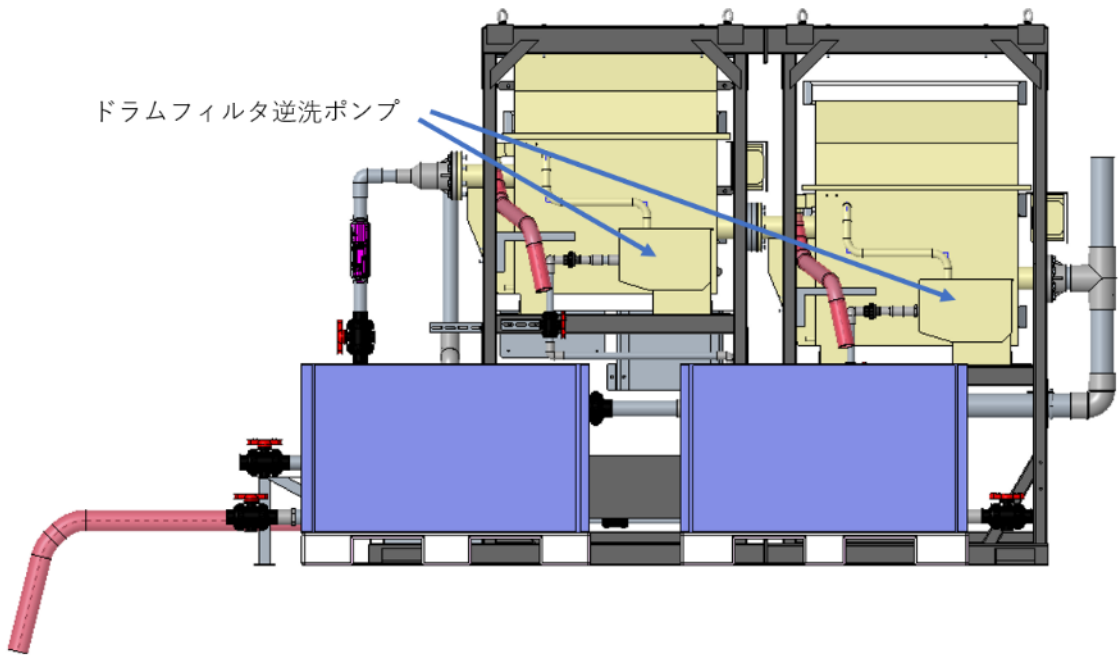


図 2-7 デブリ回収装置 3D モデル（後方図）

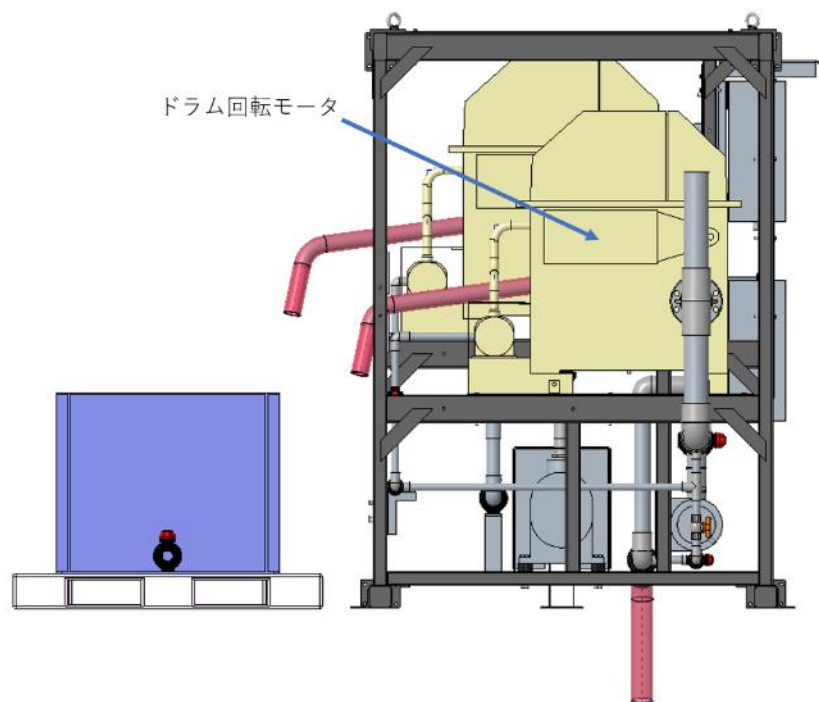


図 2-8 デブリ回収装置 3D モデル（左側面図）

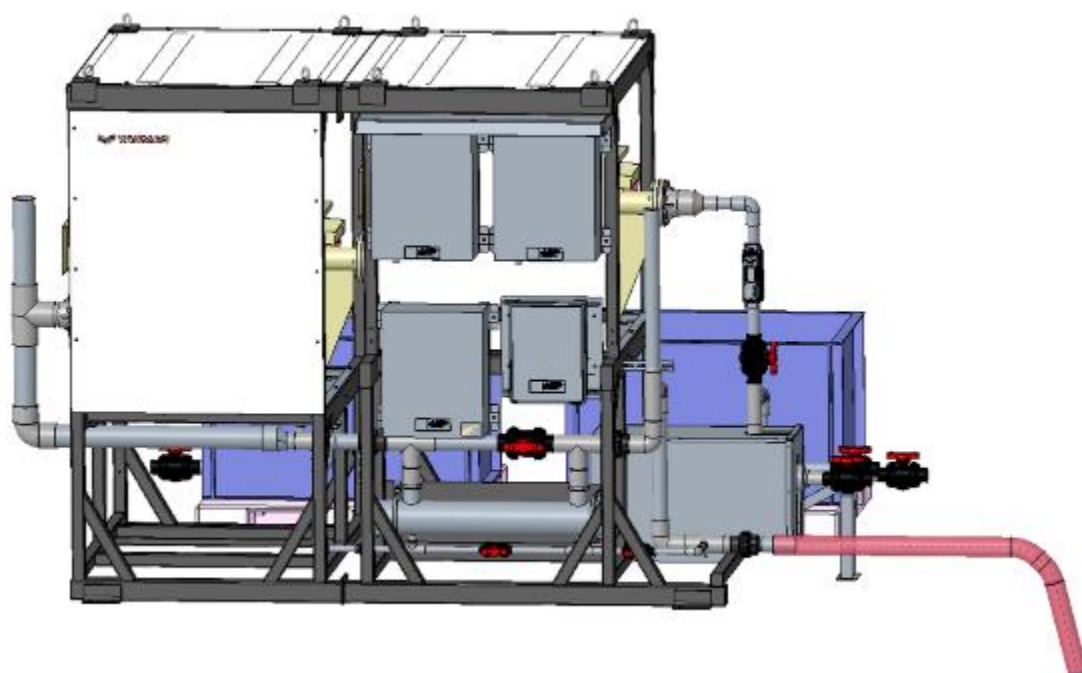


図 2-9 デブリ回収装置 3D モデル（全景）

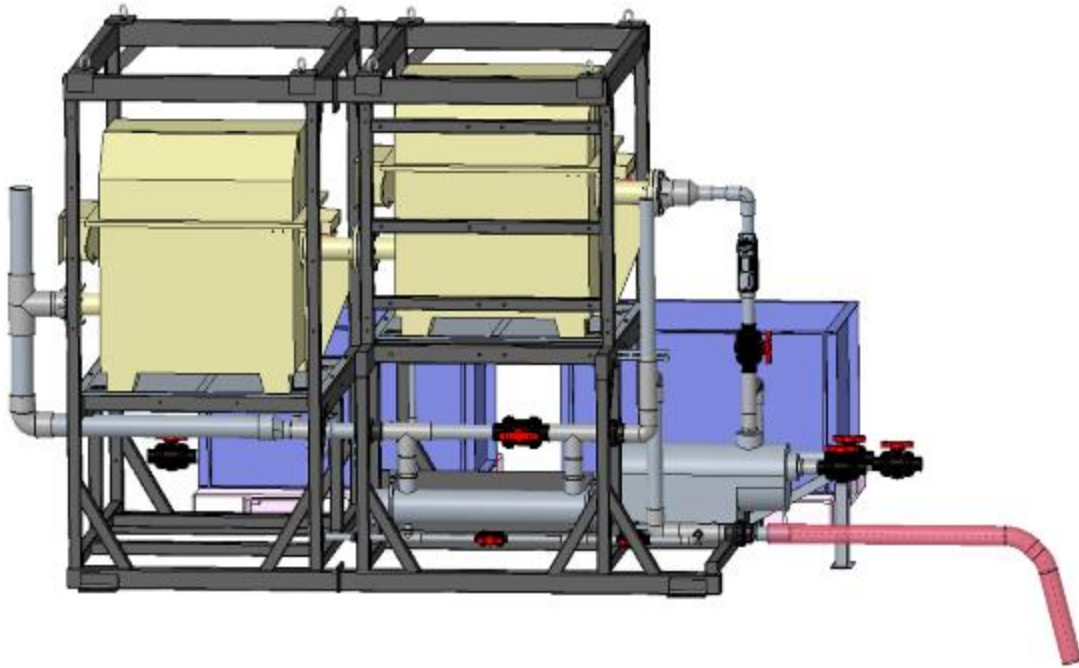


図 2-10 デブリ回収装置 3D モデル（全景・内部構造標記）

【設計のポイント】

＜処理の流れと配管構造＞

ろ過から排水に至るまでの主たる処理フローにおいて、水の流れを生む動力源を1つに絞るため、船体洗浄 ROV からデブリを吸引するポンプを利用し、高さの異なる 2 台のドラムフィルタ (DF1, DF2) によってろ過された海水は、その後重力落下により紫外線殺菌装置を通過して周囲海域へ排出される仕組みとした。

紫外線殺菌装置は、水中に気泡が大量に含まれると殺菌性能の低下が懸念されることからエア抜き配管を設けた (図 2-5)

＜ろ過装置とデブリ回収の仕組み＞

事前試験の結果に基づき、DF1 のスクリーン目合いは 0.3mm、DF2 は 0.05mm とし、ろ過されたデブリは連続的に逆洗が掛かり、それぞれのドラムフィルタから系外に排出され、集積タンクに溜まるような処理フローとした。

＜デブリ処理速度の調節＞

デブリ処理速度は、デブリ回収ポンプと DF1 の間の非接触式の流量計と手動のボールバルブの操作により調整できるように設計した。

＜紫外線殺菌装置の搭載＞

ろ過した海水には、0.05mm のフィルタを透過するサイズの微生物が含まれていることが考えられるため、デブリ回収流量 6.0 m³/h に対し、安全率を考慮して 7.0 m³/h の殺菌処理能力を持つ紫外線殺菌装置を搭載した。

3.2.2. 船体洗浄 ROV—洗浄速度向上と消費電力低減

3.2.2.1. 設計目標値の設定

本事業では、全長 300m クラスの外航船（洗浄必要面積：約 14,000 m²）を 7 時間以内に洗浄が可能となる洗浄速度 2,000 m²/h を実現できる船体洗浄 ROV を開発することを目標値とした。

また、他社の船体洗浄 ROV 水中ユニットに対し、13%の省エネとなる消費電力量 31kW の実現を目標値とした。

3.2.2.2. 必要装備一式の決定

船体洗浄 ROV の装備および推進機の設計は、まず洗浄方式と必要装備一式を決定し、水中でスムーズな遊泳動作や船体に張り付きやすい構造となるよう設計を行い、目標とする洗浄速度と消費電力量の実現に必要な推進機と洗浄装置の設計織り込みを行った。

船体洗浄 ROV の必要装備一式の検討状況は表 2-3 に示した通りである。

洗浄方式は、当社の従来機「養殖網洗浄機」にて、海洋付着生物除去の実績のある高圧水噴射タイプの回転洗浄円盤（以下、「洗浄円盤」）を応用することとした。洗浄円盤は、洗浄水供給圧力 10～13MPa、洗浄水流量 30～60L/min.、最大直径 600mm まで対応可能で、複数枚を並列に装備することにより、単位時間あたりの仕事面積を広げることが可能である。高圧水噴射の留意点として、被洗浄面との距離を広げ過ぎると洗浄圧の低下が起こること、被洗浄面との距離を狭め過ぎると接触が起こり船体塗料剥離などの問題が発生することが挙げられる。そのため、洗浄円盤と被洗浄面は、半径 4m までの船体曲面部の洗浄走行においても船体との接触を避けることができるよう、平地でのクリアランス 20mm を基準とした。

また、本事業では洗浄速度 2,000 m²/h を達成するため、直径 600mm の洗浄円盤を 2 枚並列に備える構造とした。

水中での推進手段としては、船体洗浄の作業環境が、作業船上からの ROV 操作になることを想定し、離れた場所からでも船体に接近し、任意の場所に張り付いて作業を行えるよう、自遊泳することができるスラスト駆動方式により設計検討を行った。また、船体への張付き方法についても、スラストによる駆動方式とし、変化する潮流に対して張付き力を任意に調整できるように設計検討を行った。

表 2-3 船体洗浄 ROV の必要装備一覧

	装備名	役割	設計要件	必要数量	主な材質
ボディー	本体シャーシ	本体剛性を保つ支持具	空中での吊り上げ、水中での衝突、衝撃に耐え得る骨組み構造	1	SUS316
	ボディ（トップカバー）	本体装備品等の保護、推進抵抗の低減	低床流線形	1	FRP
	ボディ（アンダーカバー）	回転洗浄円盤の保護 洗浄によるデブリの拡散を防止	低床形となる FRP カバーを設計	1	FRP
	浮力体	海水中での中性浮力を担う浮力体	樹脂コーティング 独立発泡体	2	
推進機	推進用スラスタ	水中 ROV 用スラスタ	水中浮遊物吸込みに強いコアレススラスタ	2	
	ホバリング用スラスタ（船体張り付き時）	水中 ROV 用スラスタ	水中浮遊物吸込みに強いコアレススラスタ	4	
洗浄装置	洗浄装置	回転洗浄円盤	直径 600mm、3 ノズルタイプとして設計	2	SUS316
カメラ等の装備品	カメラ	水中視認性を確保する低照度 USB カメラ	ROV 前後を視認できるカメラ仕組み	1	
	ジャンクションボックス	推進装置等に電力を供給する給電仕組	水深 30m まで使用可能な防水耐圧ボックスに封入	1	

	センサユニット	センサ等のデータ集積装置と伝送装置	水深 30m まで使用可能な防水耐圧ボックスに封入	1	ボックス : SUS316 カバー : アクリル
	水中ライト	水中での視認性を確保する照明装置	LED ライト	4	ボディ : アルミ アルマイト (塗装)
ホース・ケーブル類	高圧ホース	洗浄装置に高圧水を供給する高圧ホース	φ 19 高圧ゴムホース	1	耐水性剛性ゴム
	デブリ回収ホース	洗浄により発生するデブリを回収し、作業船上のデブリ回収装置へ吸引するホース	50A サクションホース	1	軟質 PVC
	アンビリカルケーブル	ROV への給電とデータ伝送を行う電線	中性浮力ケーブル	3	

3.2.2.3. 船体洗浄 ROV の設計

表 2-3 の必要装備一式を備える船体洗浄 ROV の設計に取り組み、表 2-4 および図 2-11~2-19 の通り、低床かつ流線形となるコンパクトな ROV の設計を完了した。

洗浄円盤は、洗浄ノズルを下部に 3 個備える直径 600mm の平板構造とし、並列に 2 枚配置した (図 2-13)。洗浄円盤は高圧水の噴射力を利用して回転する構造とし、回転体に高圧水を連続的に供給できるロータリージョイント機構の高圧水供給仕組みを円盤上部に設置した (図 2-16)。海中へのデブリ拡散を防止するため、FRP 製のボディ (アンダーカバー) で洗浄円盤を覆い、それらを本体シャーシで支持した。

推進機となるスラスタは、推進用スラスタとして 2 台を後方に配置し、船体への張付きのために必要なホバリング用スラスタとして 4 台を四方に、いずれも本体シャーシで支持するように設置した。

その他の装備品となるカメラ、ジャンクションボックス、センサユニット、水中ライトは、本体シャーシ上への固定とし、これらを保護するようにボディ (トップカバー) をシャーシ上面に配置した。

ボディ (トップカバー) は推進の際の抵抗を極力減らすため、低床かつ流線形状となるよう設計した。

ホース・ケーブル類は、全て本体後方部の接続とし、デブリ回収ホースについて

は、ボディ（アンダーカバー）の後端に設けたデブリ吸込み口へ接続した。

本体シャーシ等の構造支持具は、空中での本体吊り上げ時や水中での衝突衝撃の荷重に耐え得る強度となるよう、厚みとサイズを調整し、防水構造の部品（スラスト、ジャンクションボックス、センサユニット、水中ライト、カメラ）については、水深 30m までの水圧に耐え得る耐圧構造とした。また、浮力体は、全ての構造体の水中重量を算出のうえ、ROV 本体の水中重量が中性浮力となるよう、必要体積を算出のうえ設計に織り込んだ。

表 2-4 船体洗浄 ROV 主要緒元

項目	仕様
概要	
型式名	HC12
サイズ（概寸）	L1002×W1934×H380.5mm（ホース含まず）
乾燥重量	約 150kg
水中ユニット	
スラスト	
推力	100N
定格電圧	200V
回転洗浄円盤	
洗浄方式	高圧水噴射式（円盤 2 枚、ノズル 3 個/円盤）
洗浄幅	1.22m（円盤 2 枚の幅）
材質	SUS316
カメラユニット	
解像度	1920x1080
フレーム数	30fps
焦点距離	3.6mm
海中ライト	
最大明るさ	1500 ルーメン
船体洗浄 ROV 制御盤ユニット	
制御方式	インバータ入力によるスラスト制御電力の供給
インバータ	
出力	2.2kW
定格電圧	3 相 200～240V
制御盤クーラー	
冷媒	R1234yf
定格電圧	単相 100～120V

材質	SUS
受信機	
方式	2.4GHz スペクトラム拡散方式 (DMSS※完全互換)
PWM 出力 ch	1ch-8ch
コントローラユニット	
コントローラ	JR PROPO 製 2.4GHz DMSS※送信機
ホース・ケーブルユニット	
高圧ホース	
内径・外径	内径：19.0mm、外径：26.6mm
最高使用圧力	14.0MPa
デブリ回収ホース	
内径・外径	内径：50mm、外径：63mm
許容圧力	0.5MPa 以下
制御盤用コネクタ	
保護等級	IP66
アンビリカルケーブル	
電力線	10x1.25 mm ²
センサケーブル	
電力線	4x2 mm ²
高圧ポンプユニット	
サイズ (概寸)	L1845×W1030×H1195mm
使用液体	海水
吐出圧力	10MPa
理論吐出量	75L/min
起動方式	スターデルタ起動
質量	900kg
トップカバー	
サイズ (概寸)	L624×W1270×H215mm
材質	FRP
アンダーカバー	
サイズ (概寸)	L730×W1330×H145mm
材質	FRP
ボディフレーム	
サイズ (概寸)	L876×W1808×H218mm
材質	SUS316

※Dual Modulation Spectrum System (JR PROPO 製送信機独自の 변調方式の規格)

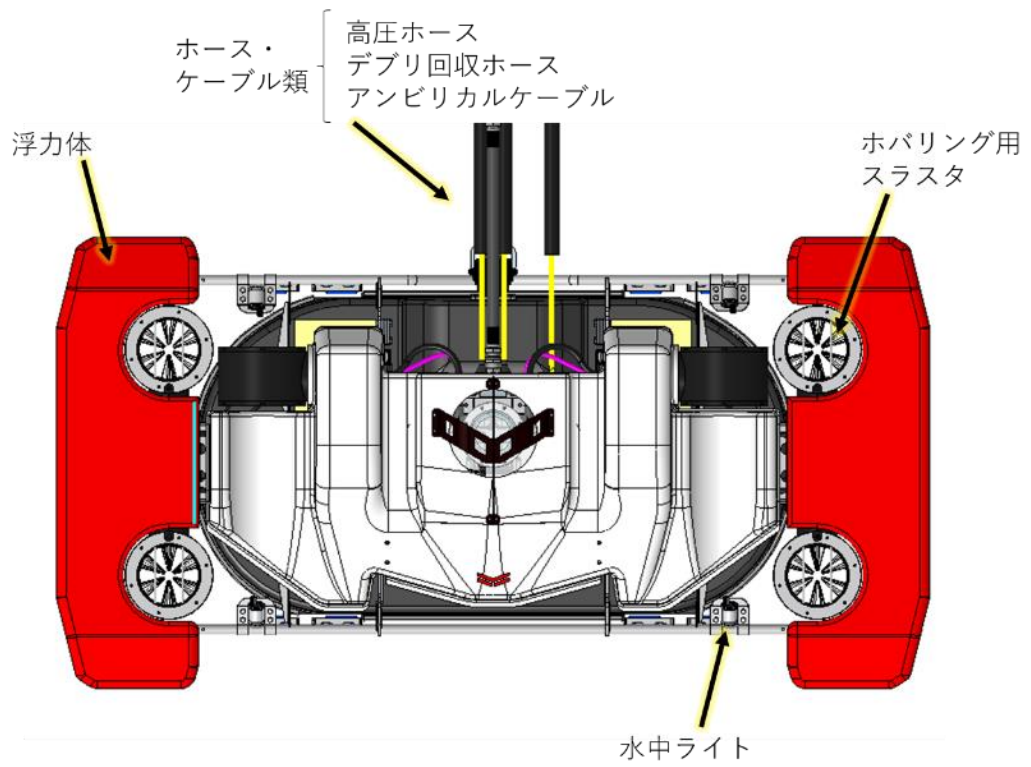


図 2-11 船体洗浄 ROV 上面図

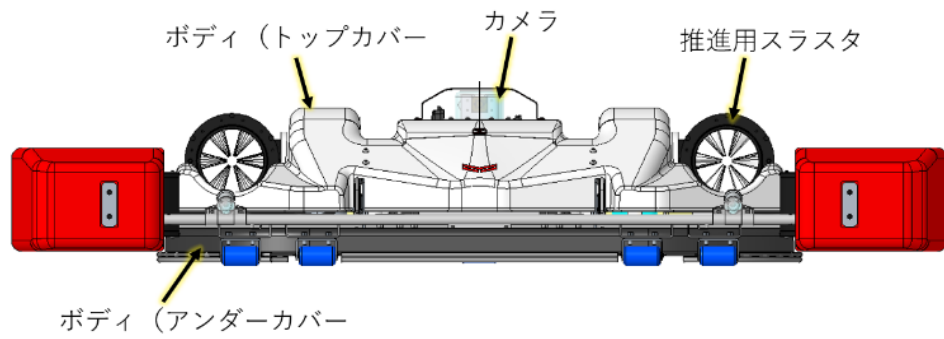


図 2-12 船体洗浄 ROV 正面図

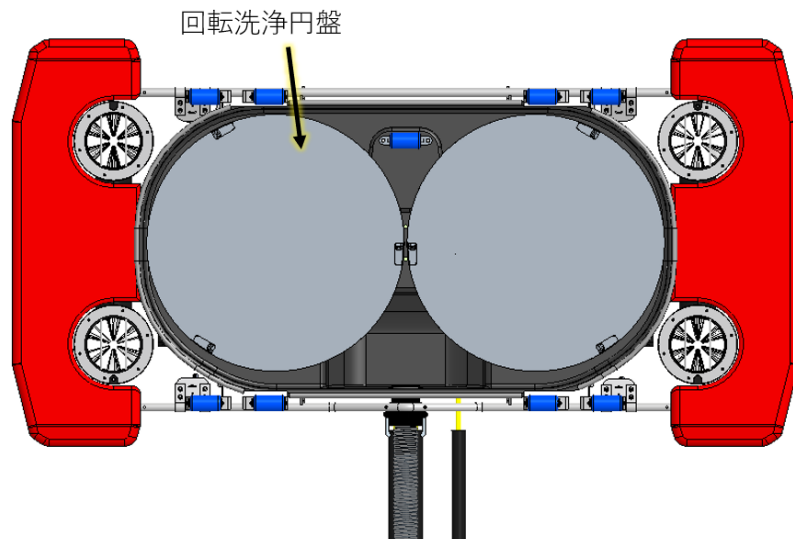


図 2-13 船体洗浄 ROV 下面図

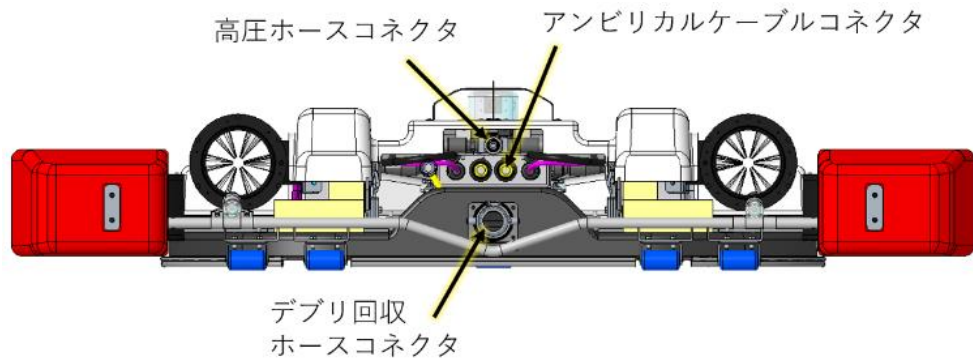


図 2-14 船体洗浄 ROV 後方図

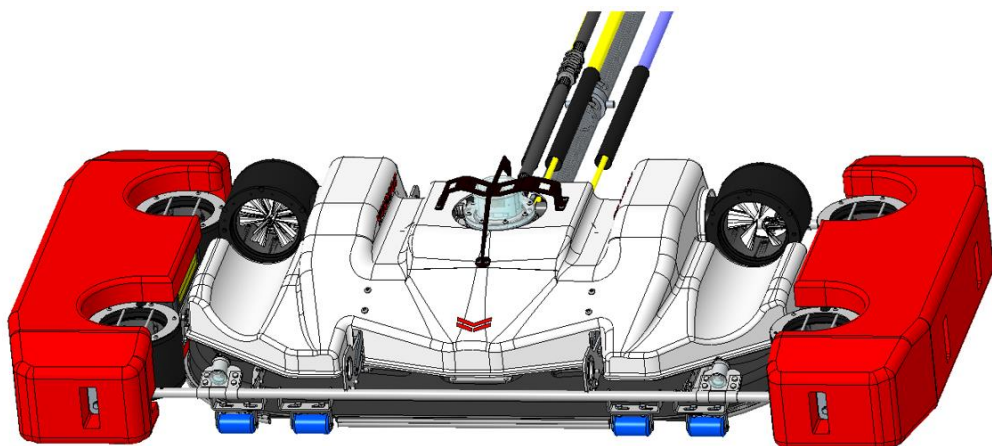


図 2-15 船体洗浄 ROV (全景)

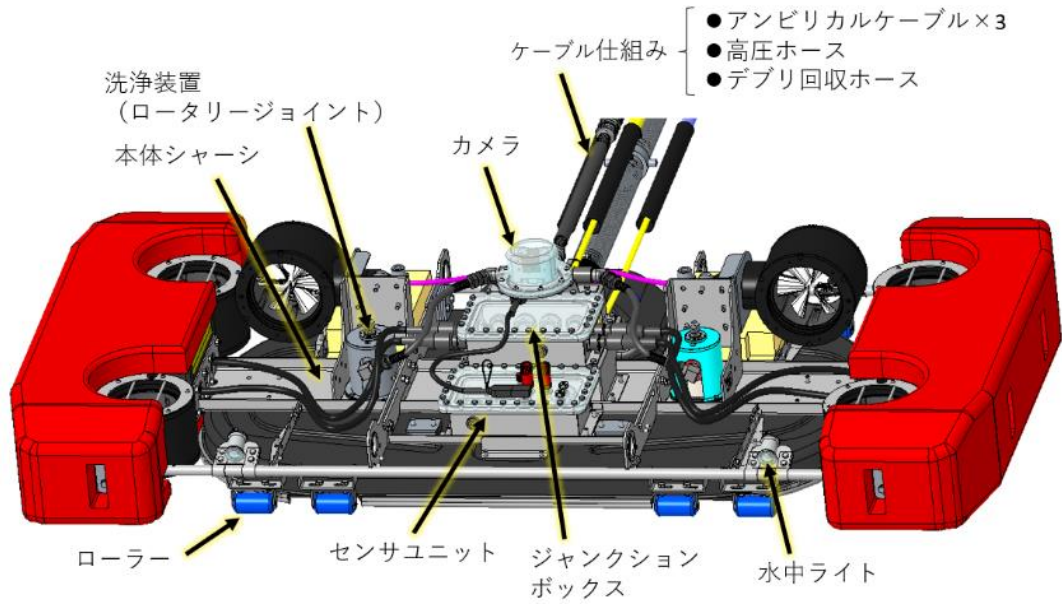


図 2-16 船体洗浄 ROV (全景・トップカバー内部仕組み)

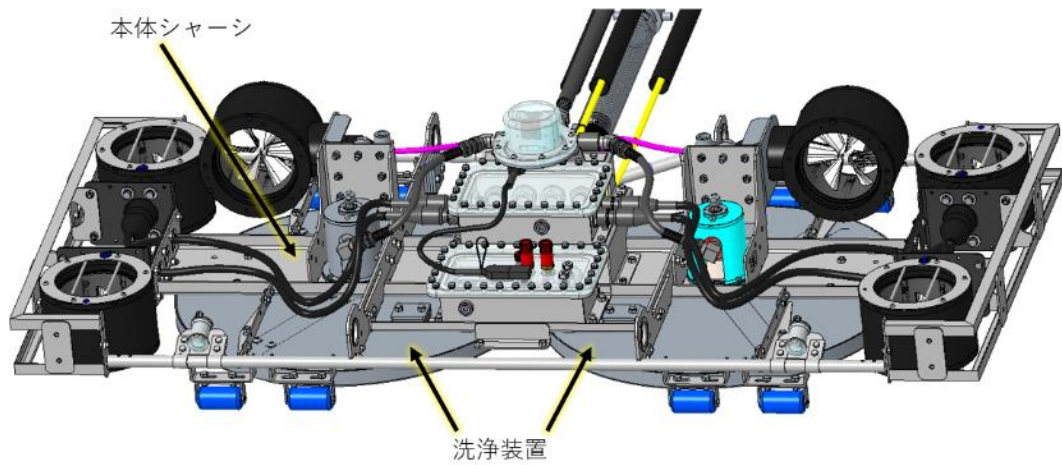


図 2-17 船体洗浄 ROV (全景・シャーシ構成仕組み)

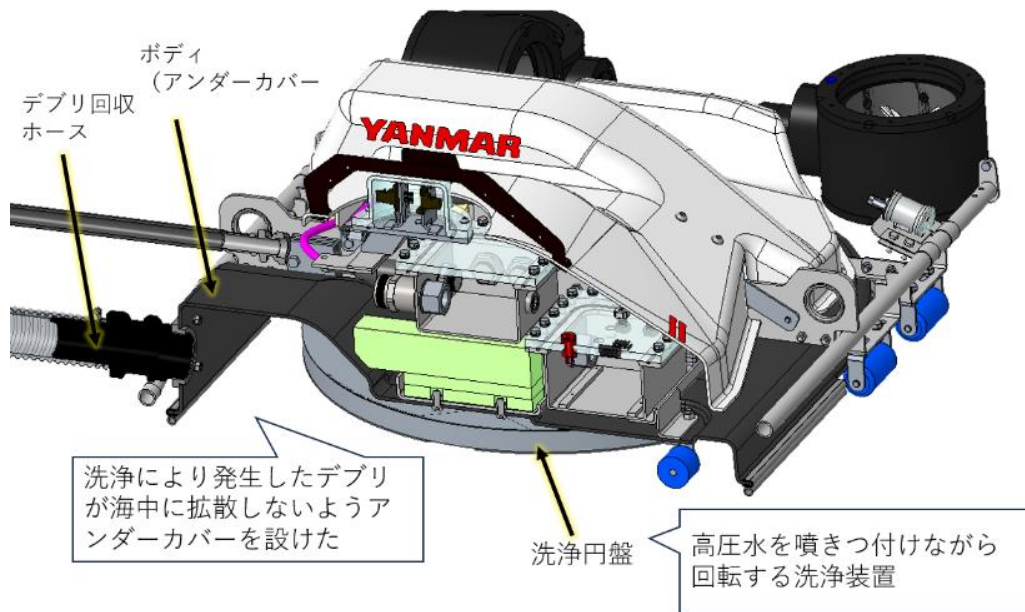


図 2-18 船体洗浄 ROV 中央断面図

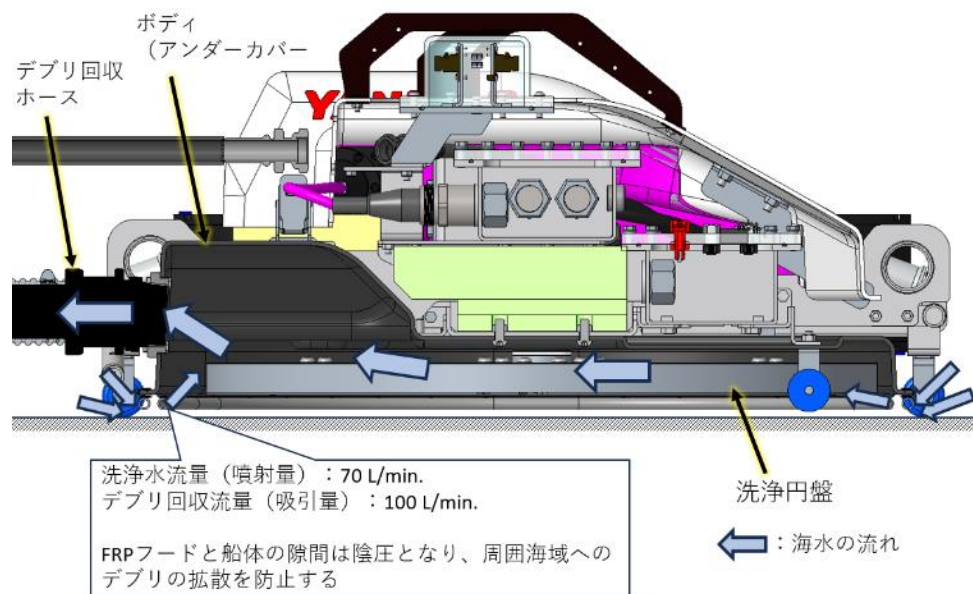


図 2-19 船体洗浄 ROV 中央断面図 (デブリ吸引仕組み)

3.2.2.4. 洗浄速度と消費電力量の実現に必要な推進機の織り込み

洗浄速度は、本 ROV が目標速度で水中を移動した際に受ける総走行抵抗 (F_t) を算出し、それ以上の推進力を備えることで担保することができる。総走行抵抗は、図 2-20 に示す通り、ROV が水中を走行することによって発生する正面からの抵抗 (F) と、ROV が船体に張り付く際に発揮するスラスト荷重による走行負荷 (ThF)、ホース・ケーブル類の引張抵抗 (HsF) を計算のうえ、その総和を求めることにより導いた。

総走行抵抗 $F_t = ThF + HsF + F$

① ROV 走行に伴う正面抵抗 $F = rCd * \rho * A * V^2 / 2$

② スラスト荷重による走行負荷 $ThF = Th * \mu$

③ ホース・ケーブル類の引張抵抗[※] $HsF = hCd * \rho * rA * V^2 / 2 / 2$

※ホース・ケーブル類の内 1/2 が潮流に対抗して移動することを想定

<ROV 仕事条件>

走行速度 $V = 0.46 \text{ m/s} (27.8 \text{ m/min}) + V_s$

<環境条件>

海水密度 $\rho = 1,020 \text{ kg/m}^3$

潮流 $V_s = 0.129 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (対向潮流とする)

<ROV 寸法条件>

ROV 正面代表面積 $rA = 0.57 \text{ m}^2$ (W=1.9m, H=0.3m)

ローラー摩擦係数 $\mu = 0.1$

スラスト力 $Th = 421 \text{ N}$

ROV 本体の抵抗係数[※] $rCd = 0.82$

<ホース・ケーブル類の寸法条件>

ホース・ケーブル仕様 外径 60mm、ホース長 100m

ホース・ケーブルの水中抵抗係数 $hCd = 1.2$

上記計算により、目標とする 27.8m/min. の速度で洗浄作業を実施する際の総走行抵抗(F_t)は 361N と算出された。よって、推進用スラストに必要な推力を、スラスト 2 台合計で 361N 以上となるようスペック調整することにより、目標とする 2,000 m^2 /h の洗浄速度が得られる。本項では、25%程度の安全率を考慮し、推進用スラストとしては、1 台あたり最大 240N(1.8kW, 1640 min^{-1})、2 台合計 480N の推力が得られる 2kW スラストを採用し、目標洗浄速度 27.8m/min. の達成に目処を付けた。

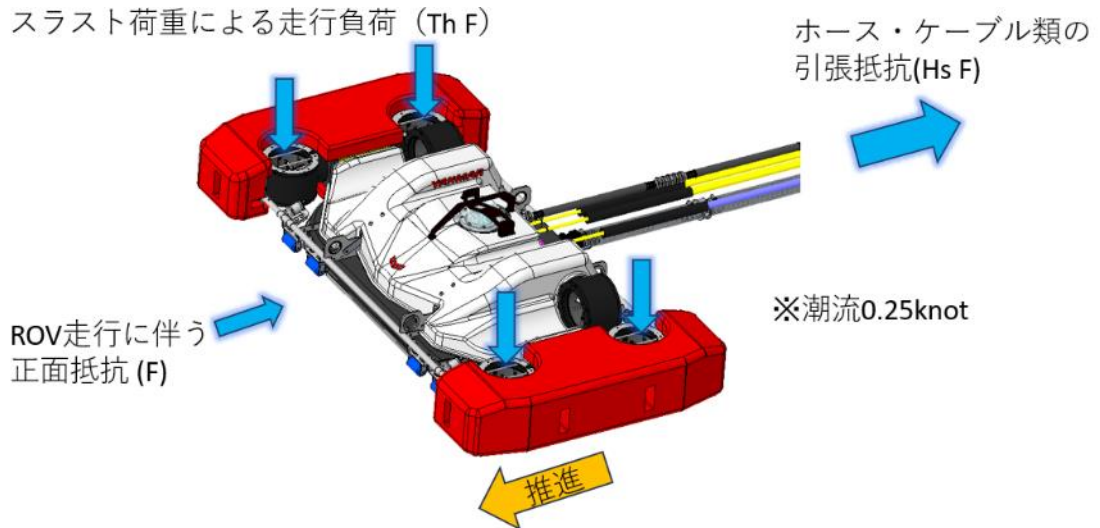


図 2-20 ROV が水中で受ける抵抗のイメージ

3. 2. 2. 5. 最大消費電力の低減

以上の船体洗浄 ROV の設計により、図 2-21 の通り、推進用および船体張り付き用スラスタとして 2kW のスラスタを合計 6 台、洗浄機として 18.5kW の高圧ポンプユニット（ポンプ本体は作業船上に配置）を 1 台、その他センサ等装備品を搭載し、合計消費電力量約 31kW の船体洗浄 ROV の開発に目処をたてた。

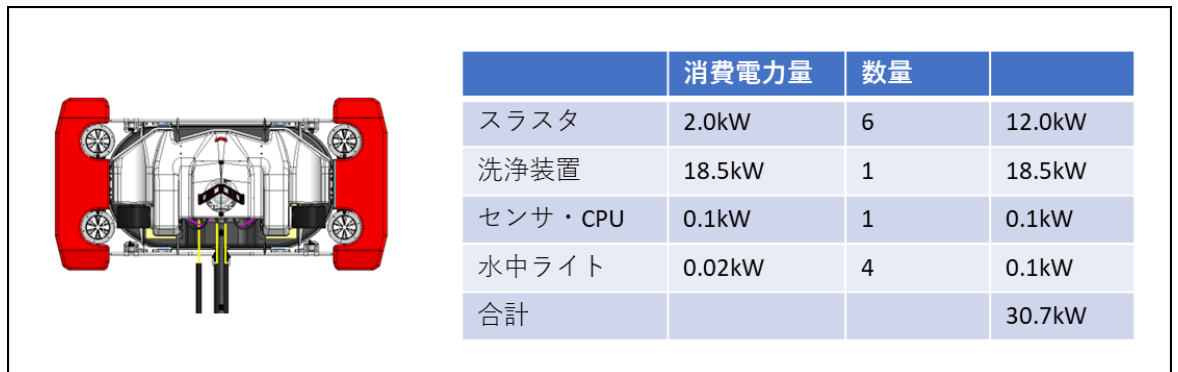


図 2-21 ROV の消費電力量

3. 2. 3. 船体洗浄 ROV－洗浄力向上

3. 2. 3. 1. 設計目標値と達成要件

本事業では、船体洗浄 ROV の洗浄力に関し、船体付着生物を 95%以上除去できる洗浄機能の実現を目標値としている。

本目標値の達成要件としては、以下の 2 点である。

- ① 適正な洗浄力の設計（海洋付着生物の除去が可能で、かつ船体塗料の剥離がない洗浄機の設計）
- ② 洗い残しが発生しない洗浄機の設計

3.2.3.2. 要件①適正な洗浄力の設計

海洋付着生物の除去が可能な洗浄水圧については、当社の従来製品である養殖網水中洗浄機の実績から、洗浄面圧 2MPa 以上で沿岸域にて付着する海洋生物の除去が可能になると判断した。一方、船体塗料の剥離については、以下の表 2-5 の通り、前述の養殖網水中洗浄機を用いて当社独自に実施した試験の結果から、2~3MPa の洗浄面圧を発揮することによって回避できることが分かっている。従い、表 2-5 に記載の通り、本 ROV の洗浄水圧力（洗浄面の有効洗浄圧）の設計目標値を 2.0MPa とし、設計することによって、海洋付着生物の除去が可能で、かつ船体塗料剥離を抑える洗浄機を実現できると考えた。

表 2-5 水中洗浄機による塗料剥離確認試験の概要(2020年3月実施)

項目	内容
目的	高压洗浄円盤を用いた水中洗浄による、船体塗料剥離の有無を確認する
材料と方法	<p>【材料】</p> <p>洗浄装置：養殖網水中洗浄機（洗浄面圧 2~3MPa） ※当社従来機</p> <p>船体塗料：加水分解型 A/F システム (SPC①) 加水分解型 A/F システム (SPC②) シリコンラバー系船体防汚システム (FR)</p> <p>以上の 3 種を使用</p> <p>試験板：SUS 製の平板を使用（図 2-22）</p> <p>【方法】</p> <p>船体塗料を塗布した試験板を、高压洗浄円盤を有する水中洗浄機を用いて洗浄（図 2-23、2-24）し、洗浄前後の塗料表面の粗度を比較することにより、塗料剥離の度合いを把握した。</p> <p>粗度の解析は凹凸の大きさを評価するため、以下の 2 通りのデータを算出し、洗浄前後での差を確認した。</p> <p>Sa：算術平均高さ（平均面からの高さの差の絶対値の平均） Sq：二乗平均平方根高さ（高さ分布の標準偏差）</p> <p>試験は 3 反復行った。</p>

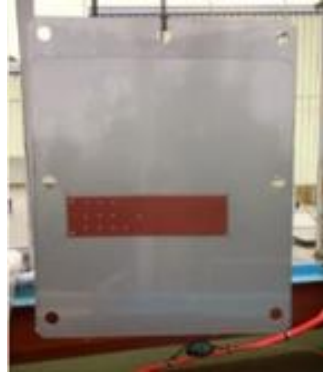


図 2-22 船体塗料を塗布した試験板



図 2-23 試験に用いた水中洗浄機



条件: 洗浄時間30sec
 3000min^{-1} 13.0MPa)
 ※実際の運転状況に近い状況



図 2-24 試験板を洗浄している様子

結果

塗料表面粗度について、 S_a 、 S_q の両方の算出条件において、洗浄前後の違いを解析した結果を図 2-25 および 2-26 に示した。洗浄前後の粗度に関し、3 回の試験結果に明らかな違いを示す傾向はなく、また、試験板への洗浄痕についても確認できなかったことから、洗浄水圧 2~3MPa による塗料剥離の懸念はないものと考えられた。

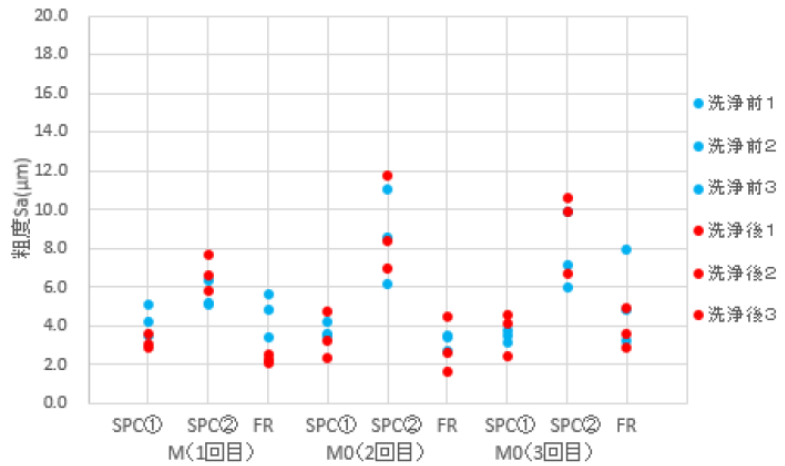


図 2-25 塗料表面粗度の解析結果 (Sa)

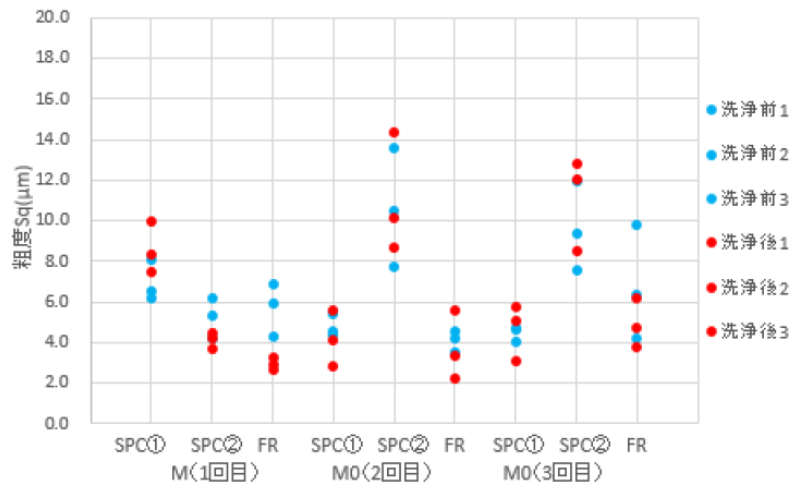


図 2-26 塗料表面粗度の解析結果 (Sq)

3.2.3.3. 要件②洗い残しが発生しない洗浄装置の設計

洗浄用の高圧水は、回転洗浄円盤に設置する高圧噴射ノズルから噴射し、船体に噴きつけることによって船体の付着生物を除去する仕組みとなる。また、この洗浄円盤が回転しながら、ROVが前後に推進することによって、船体を洗浄する仕組みとなる。従い、高圧水の噴流が当たり、有効な洗浄面圧を発揮することができるノズル洗浄幅と円盤の回転、ROVの推進速度から、洗浄痕のシミュレーションを行うことによって、洗い残しが発生しない洗浄円盤の設計条件を導いた。

3.2.3.4. 洗浄機の設計

本ROVに搭載する洗浄機として、図2-27および2-28の通り、回転洗浄円盤の設計を行った。高圧水は、中空の円盤回転軸に対し、ロータリージョイントを介して配管内圧10MPaが供給できる仕様として設計した。また、本洗浄円盤裏側には、高

圧水噴射ノズルを3個設置し、自身の高圧噴流の反力で円盤が円滑に回る構造とした。表2-4に記載の通り、本洗浄円盤はROVに2枚搭載し、円盤の回転方向が左右で対称となるよう設計した。

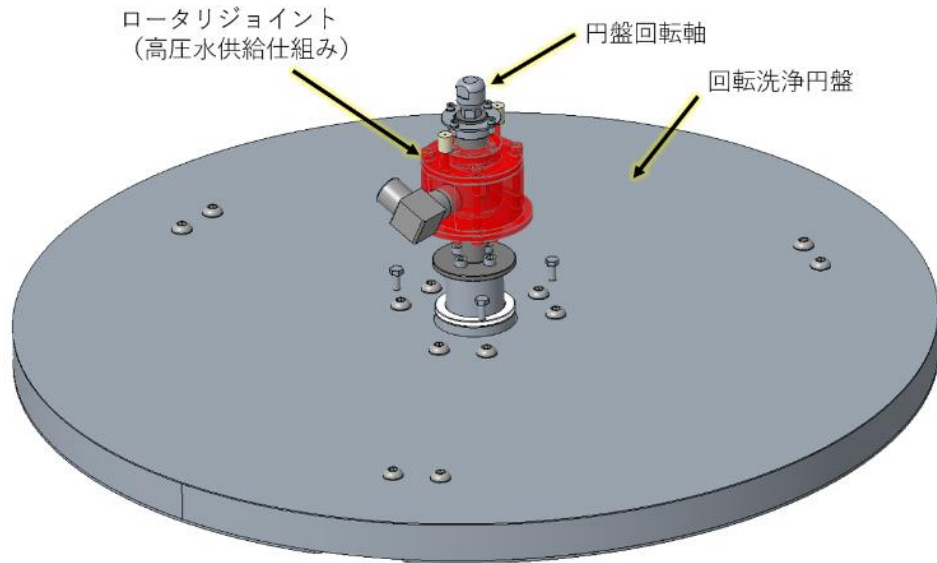


図 2-27 回転洗浄円盤（表側）の 3D モデル

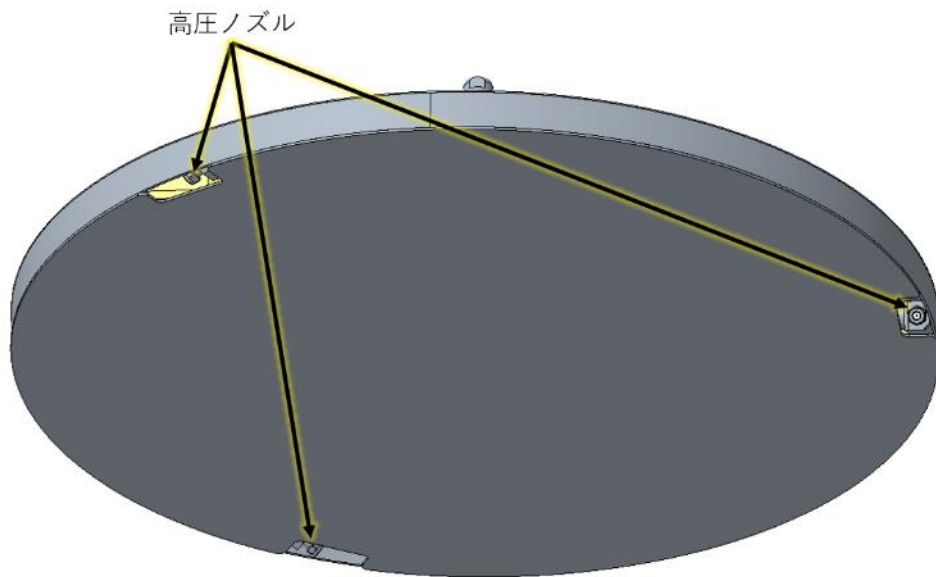


図 2-28 回転洗浄円盤（裏側）の 3D モデル

上記回転洗浄円盤に取り付けるノズルは、供給水圧と噴射水量、噴射によって得られる推力の推定値から、噴口直径 1.4mm の直噴流ノズルを採用した。また、事前実施した要素試験（図 2-29）から、本ノズルを用いた際に 2MPa 以上の洗浄面圧が得られるノズル洗浄幅を 35mm と断定し、洗浄痕のシミュレーションを行った。その結果、ROV の設計最大速度となる 27.5m/min. において、円盤回転数 250min.^{-1} とすることによって、洗浄円盤が通る 95%以上のエリアで洗い残しの無い洗浄痕が

得られた（図 2-30）。従い、洗浄円盤の回転速度が 250min.^{-1} となるよう、ノズル噴流による反力の計算から、洗浄面に対するノズル角度が 30 度になるよう設計した。

感圧シートと試作円盤を用いて、高圧ノズルの有効洗浄幅を計測した

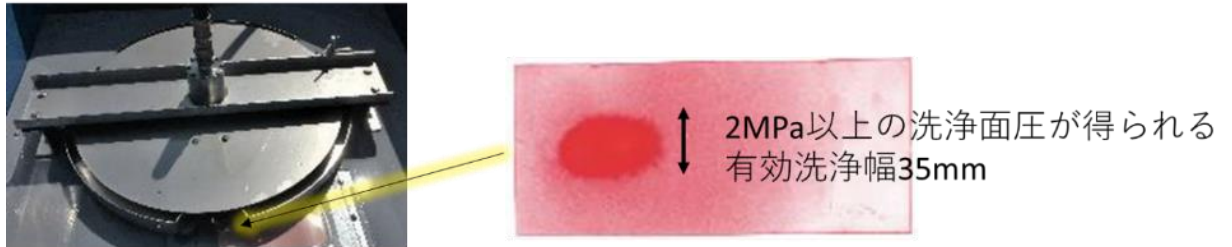


図 2-29 感圧シートを用いたノズル洗浄幅の確認試験

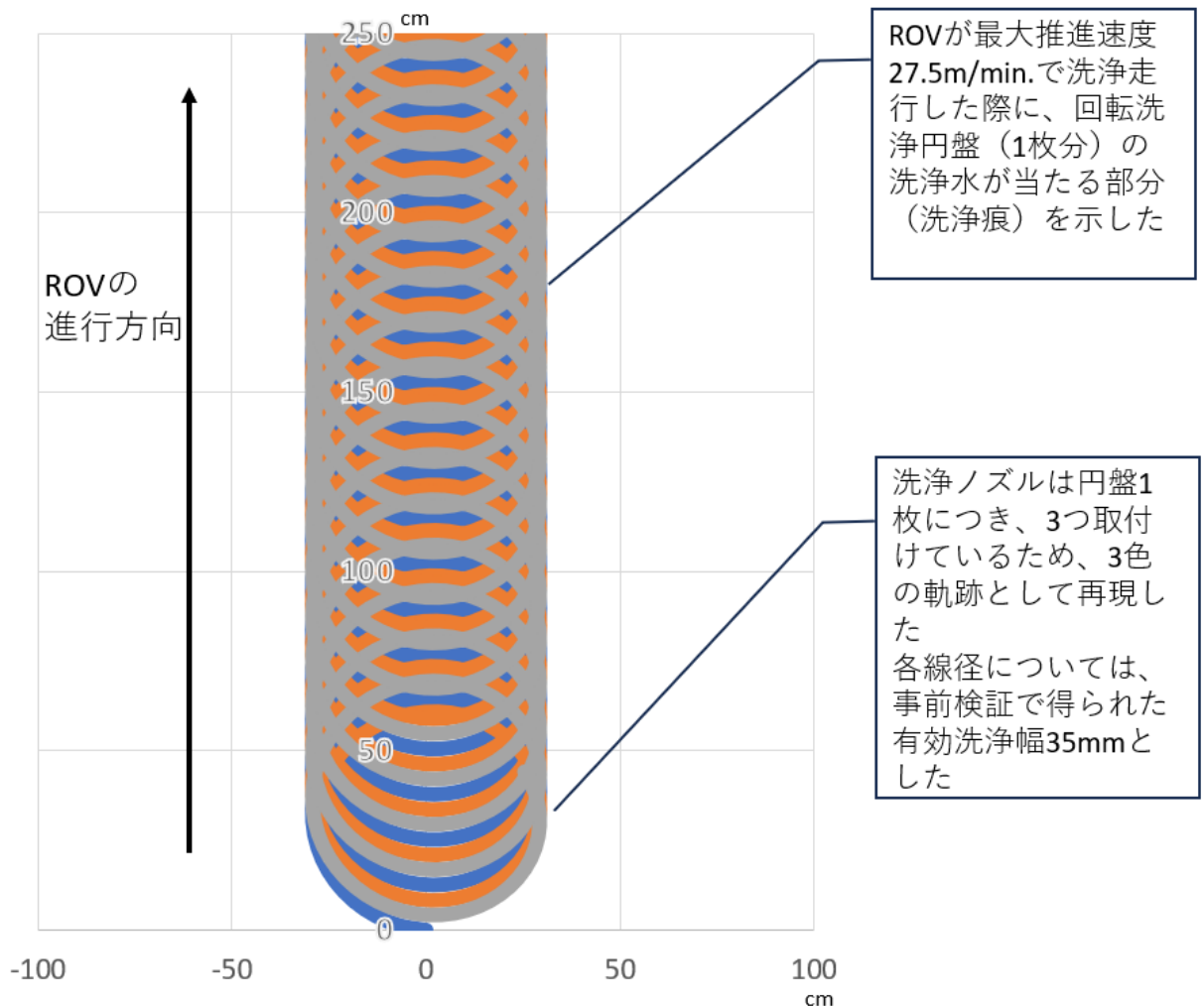


図 2-30 洗浄円盤の洗浄痕シミュレーション結果

3.3. 試作

3.3.1. 試作状況

船体洗浄 ROV およびデブリ回収装置について、図 3-1～6 の通り試作を行った。

ROV 水中ユニット (外観)



ROV 水中ユニット (内部)

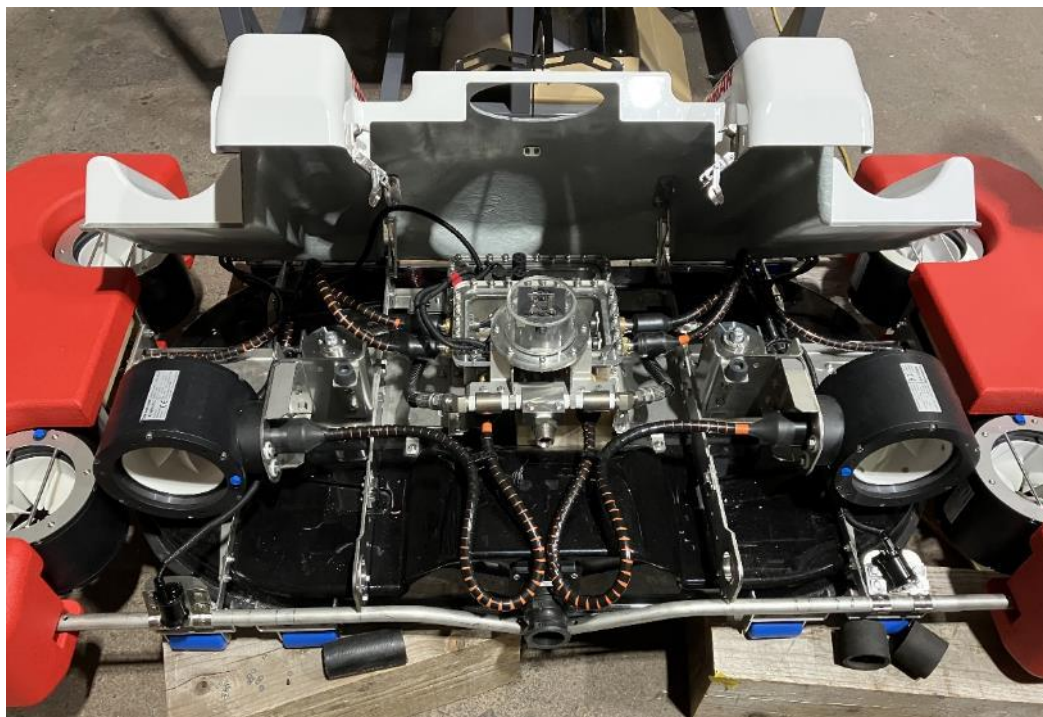


図 3-1 ROV 水中ユニット完成写真

コントローラユニット



ROV 制御盤



図 3-2 コントローラユニット・ROV 制御盤完成写真

配電盤



センサ制御盤



図 3-3 配電盤・センサ制御盤完成写真

高圧ポンプユニット



発電機



図 3-4 高圧ポンプユニット・発電機完成写真

デブリ回収装置_制御盤側



デブリ回収装置_ドラムフィルタ側



図 3-5 デブリ回収装置写真

ホース・ケーブルユニット



図 3-6 ホース・ケーブルユニット完成写真

3.3.2. 試作品評価

各試作品の試作状況は以下表 3-1～2 の通りとなった。

表 3-1 船体洗浄 ROV 評価表

項目	実測値
外寸	L: 1,000 mm
	W: 1,930 mm
	H: 386 mm
質量	160kg
洗浄幅	1,220 mm

表 3-2 デブリ回収装置評価表

項目	実測値
外寸	L: 2,925 mm
	W: 1,591 mm
	H: 2,113 mm
質量	880kg

3.4. 陸上水槽試験

3.4.1. 張付き時最大推進速度

3.4.1.1. 目標値の設定

本 ROV の洗浄仕事幅は 1,220mm を予定しており、目標仕事速度である 2,000 m²/h を達成するためには、最低 27.3m/min. 以上の推進速度が必要である。そのため、目標最大推進速度は 27.5m/min. を目標値とした。

3.4.1.2. 試験方法

張付き時最大推進速度は、当社内に設置した陸上水槽内(水深約 0.6m)で、水槽の底面に ROV を張付かせ、最大推進力で直進する際の最大推進速度を計測することにより確認した(図 4-1)。実際の洗浄作業時の水中抵抗や負荷を再現するため、ROV にはホース・ケーブル類を全て接続し、洗浄円盤を作動(ポンプ水圧は 11MPa)させて試験を実施した。試験中の張付き力は、設計値となる 36kgf になるよう調整した。

計測は、水中動画を撮影(水中カメラ GoPro9 120fps にて撮影)し、水槽内にラインを引いて作成した計測区間ライン間(1m)の移動にかかった時間により導いた。時間の計測は、より正確な値を得るため、動画フレーム数の計数により行った。



図 4-1 洗浄時における最大推進速度試験風景

3.4.1.3. 結果および考察

張付き時最大推進速度の試験結果を表 4-1、試験の様子を図 4-1 に示した。本試験では、張付き時最大推進速度は 38.9m/min. となり、目標とする 27.5m/min. を 41% 上回る結果が得られた。これは、水槽内での実施につき、実際の船体洗浄の実施状況と比較して潮流による水中抵抗が再現できないことや、ホース・ケーブル類の引張抵抗の再現度が低いためと考えられた。

本項目は、5 項 実船洗浄試験において、実際の海域で船体に張り付き、最大推進速度を計測して実証することとする。

表 4-1 最大推進速度試験結果

スラスト	ポンプ水圧	移動距離	フレーム数	速度(m/min.)
144Hz、36kgf	11MPa	1m	185	38.9

3.4.2. 洗浄円盤回転数

3.4.2.1. 目標値の設定

2.4 に示した通り、船体洗浄 ROV 試作機の洗浄円盤回転数の目標値は 250min^{-1} とした。

3.4.2.2. 試験方法

洗浄円盤回転数計測の実施模式図は図 4-2 の通りである。回転数は以下の手順で計測した。

- ① 水中で船体洗浄 ROV を作動させ、高圧ポンプ*により洗浄円盤を回転させる
※高圧ポンプの設定圧力は設計値 11.0MPa とした
- ② 洗浄円盤の回転軸を水中カメラで撮影する
- ③ 水中カメラ (GoPro9 120fps にて撮影)の映像から円盤 1 回転あたりのフレーム数を計測する
- ④ 円盤 1 回転あたりのフレーム数から洗浄円盤の回転数を算出する
洗浄円盤回転数の算出式は、以下の通り

$$n = F / f * 60$$

n : 1 分間あたりの洗浄円盤回転数 (min^{-1})

F : カメラのフレームレート = 120 (frame/sec)

f : 円盤 1 回転あたりのフレーム数 (frame)

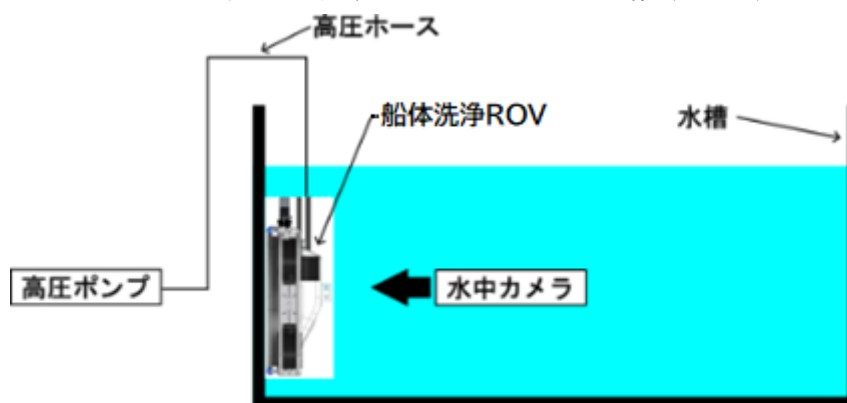
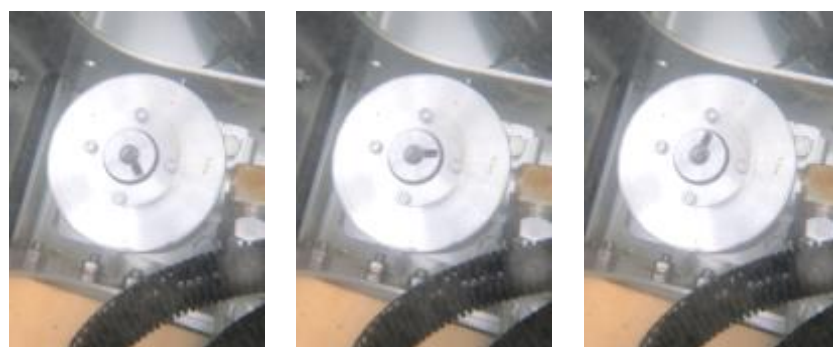


図 4-2 洗浄円盤回転数計測試験の概念図

3.4.2.3. 結果

洗浄円盤の回転軸の水中カメラ映像を図 4-3 に示した。また、試験結果を表 4-2 に示した。表 4-2 より、円盤 1 回転あたりのフレーム数の計測を計 5 回転分実施し、いずれも 29 フレームの結果となった。円盤 1 回転あたりのフレーム数 f が 29 フレームのとき、前節の洗浄円盤回転数の算出式より、洗浄円盤回転数 n は 248.3min^{-1} と算出され、目標値 250min^{-1} に対し、99.3%を達成することができた。



(a) 0 フレーム目 (b) 5 フレーム目 (c) 10 フレーム目

図 4-3 洗浄円盤回転軸の水中カメラ映像

表 4-2 円盤 1 回転あたりのフレーム数の計測結果

計測回	円盤 1 回転あたりの フレーム数 f (frame)	洗浄円盤回転数 n (min^{-1})
1	29	248.3
2	29	248.3
3	29	248.3
4	29	248.3
5	29	248.3

3.4.2.4. 考察

前項の試験結果は、目標値に対して 0.7%の差があるものの、実際の洗浄作業に影響がでるような差異はなく、実質的に目標設計値通りの結果として評価できると考えられる。目標値をわずかに下回った原因としては、以下のようなことが考えられる。

・摺動抵抗

洗浄円盤は金属製であることから、加工や溶接時に歪みが発生する。この歪みにより円盤が偏心し、摺動抵抗による回転数低下が発生したものと考えられる。

- ・ 流体抵抗

ROV の洗浄円盤が、FRP フードに覆われた狭い空間で回転しているため、広い空間に比べて流体抵抗が大きいと推測できる。したがって、流体抵抗による回転数低下が発生したものと考えられる。

- ・ 配管抵抗

本試験では、試験環境の都合上、100m の高圧ホースの内、約 80m 分を渦巻状に束ねた状態（ホースの曲がり強く、高圧水が通りにくい状態）で行った。実際の船体洗浄時は、高圧ホースは伸ばした状態で使用することを想定しており、本試験はより配管抵抗の大きい状態で実施したことによって、回転数低下が発生したものと考えられる。

3.4.3. 洗浄水圧

3.4.3.1. 目標値の設定

2.4 に示した通り、船体洗浄 ROV 試作機の洗浄水圧の目標値は 2MPa とした。

3.4.3.2. 試験方法

洗浄水圧は、以下の要領と図 4-4 に示した模式図の通り、水中で ROV の洗浄装置を作動させ感圧シートを張り付けた板材の上を洗浄走行することにより計測した。

- ① 水槽底面に感圧シートを貼り付けた板材（図 4-5）を固定する
- ② 感圧シート上を船体洗浄 ROV 試作機で走行する
- ③ 感圧シートを画像解析することにより洗浄水圧を算出する※

※感圧シートは富士フィルム社製の圧力測定フィルム「プレスケール LW」を使用した。本品は圧力を受けると赤く発色し、その発色濃度により圧力を計測することができる。

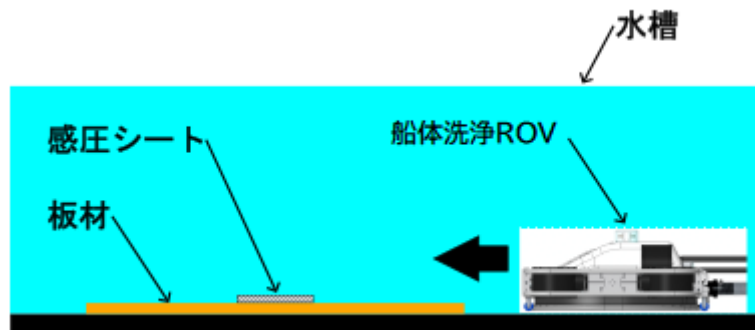


図 4-4 洗浄水圧計測試験の概念図



図 4-5 感圧シート（赤矢印部）を貼り付けた板材

3.4.3.3. 試験結果

試験後の感圧シートの発色状況は図 4-6 の通りである。ROV 試作機の進行方向は本図の左側から右側である。本図より、シート全体にわたって薄い赤色が発色し、更に、噴射ノズルの噴流が特に強く当たっていると考えられる部分に、縞状の濃い赤色の発色が確認された。

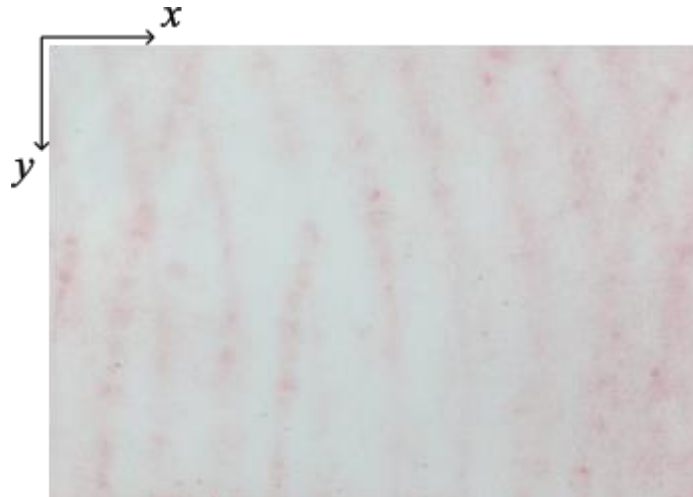


図 4-6 洗浄水圧計測試験後の感圧シート

感圧シートの画像解析結果を図 4-7 と図 4-8 に示した。図 4-7 は、洗浄水圧計測試験後の感圧シートの 3D プロットである。図 4-8 は、感圧シートから画像解析により算出された洗浄水圧のヒストグラムである。解析の結果、全プロットで得られた洗浄水圧の平均値は 2.4MPa であった。また、洗浄水圧の目標値 2MPa 以上を発揮したプロットの割合は 92.9%であった。

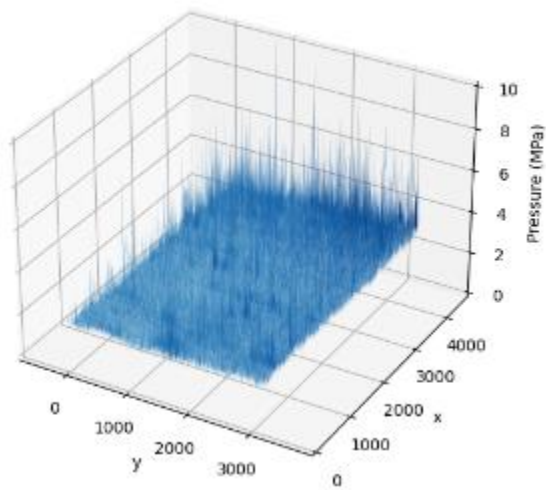


図 4-7 洗浄水圧計測試験後の感圧シートの 3D プロット

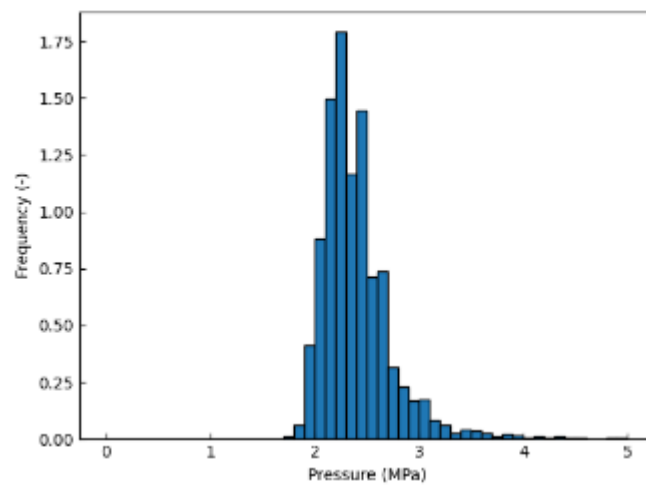


図 4-8 洗浄水圧のヒストグラム

3.4.3.4. 考察

前項の試験結果より、ROV 試作機の洗浄水圧は、目標値 2MPa に対して 20%上回る平均 2.4MPa を達成した。図 4-8 より、洗浄水圧のヒストグラムは正規分布に近い形状であり、目標値を下回るプロットは全体の 7.1%で、その値も 1.8MPa 以上であることから、洗浄水圧は目標値を達成したと言える。

実際の付着生物除去性能については、実船試験により確認することとする。

3.4.4. デブリ回収速度

3.4.4.1. 目標値の設定

2.1 に示した通り、船体洗浄 ROV 試作機のデブリ回収速度の目標値は 100L/min. とした。

3.4.4.2. 試験方法

デブリ回収速度は、以下の要領と図 4-9 に示した模式図の通り、水中で ROV の洗浄装置を作動させ、デブリ回収装置を用いてデブリ海水を吸引する試験を実施して測定した。実際の作業環境としては、デブリ回収装置は作業船上に配置するため、設置高さは海水面から 1~2m 程度を想定している。従い、本試験では、デブリ回収装置の設置高さを水面上 2m に設定しているが、更に厳しい設置高さの使用環境も想定して 3m の条件でも試験を行った。

- ① 試験海域に ROV を浸水させて固定し、洗浄装置を作動させる
- ② デブリ回収装置のポンプを起動してデブリ海水を ROV のデブリ回収口から吸引する (図 4-9)。この時、デブリ回収装置を水面から 2m および 3m の高さとなるよう設置しておく。
- ③ デブリ回収ポンプ直上の流量調節バルブを 100%開放の状態デブリを吸引し、デブリ回収装置に設置した流量計により、その流量を測定する
- ④ デブリ回収ポンプ直上の流量調節バルブを調整し、100L/min. の流量に調整し、10 分間以上、流量が安定し続けることを確認する

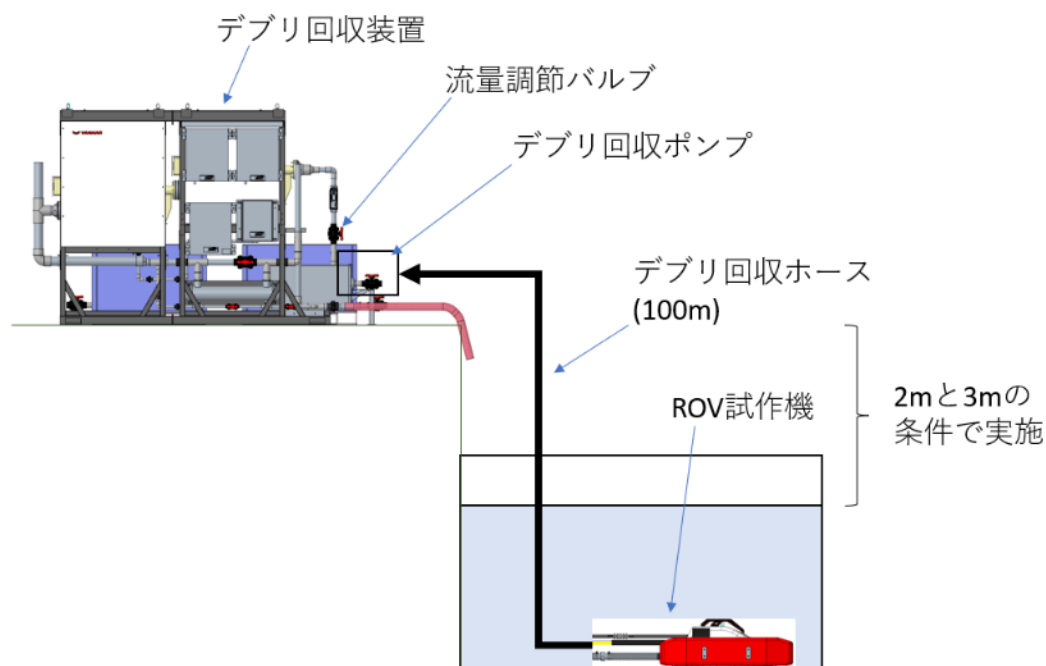


図 4-9 デブリ回収速度試験の模式図

3.4.4.3. 結果および考察

デブリ回収速度の最大値の計測結果を表 4-3 に示した。流量は、それぞれの条件で 10L 程度の幅で上下したが、高さ 2m の条件において 140～150L/min.、高さ 3m の条件において 120～130L/min. となり、いずれも目標値以上を達成した。流量の上下動は、洗浄時に ROV の洗浄円盤付近でキャビテーション現象によって発生した気泡がデブリ海水に混ざり、デブリ回収装置に設置した超音波式の非接触流量計の計測値が安定しなかったのが原因と考えられた。

表 4-3 デブリ回収速度試験結果

条件		最大流量
A	装置設置高さ 2m	140～150 L/min.
B	装置設置高さ 3m	120～130 L/min.

さらに、デブリ回収装置直上に設置した流量調節バルブを調整することにより、デブリ回収速度を 100L/min. 程度に調整し、10 分間以上 100～110L/min. を逸脱しない範囲で安定することを確認した。この際、上記試験結果と同様に、10L 前後の上下動が見られたが、バルブ調整により、常に 100L/min. を上回る流量に調節することが容易に行えることを確認した。以上のことから、目標とするデブリ回収速度の達成に目処を付けた。



図 4-10 デブリ回収速度試験風景

3.5. 実船洗浄試験

3.5.1. 試験概要

3.5.1.1. 洗浄対象船舶

某 NPO 法人所有の災害医療支援船（以下、支援船）に協力いただき、2024 年 5 月 13 日に船体洗浄 ROV 試作機による船体の洗浄試験を実施した。支援船の外観と船舶情報の主要目は図 5-1 および表 5-1 に示した通りである。



表 5-1 支援船 主要目

1	国際総トン数	3,453 トン
2	全長	68.00 m
3	幅	17.40 m
4	深さ	6.10 m
5	喫水	5.016 m / 4.50 m

3.5.1.2. 試験機材

試験は、船体洗浄 ROV およびデブリ回収装置を含む全ての機器類をトラックに積載して試験現場へ運搬し、支援船の停泊岸壁の船首側に設置して実施した(図 5-2)。船体洗浄 ROV は船首側岸壁から海上へ下架(図 5-3)し、自己遊泳により右舷へ移動して船体に張付き(図 5-4 および図 5-5)、試験を開始した。

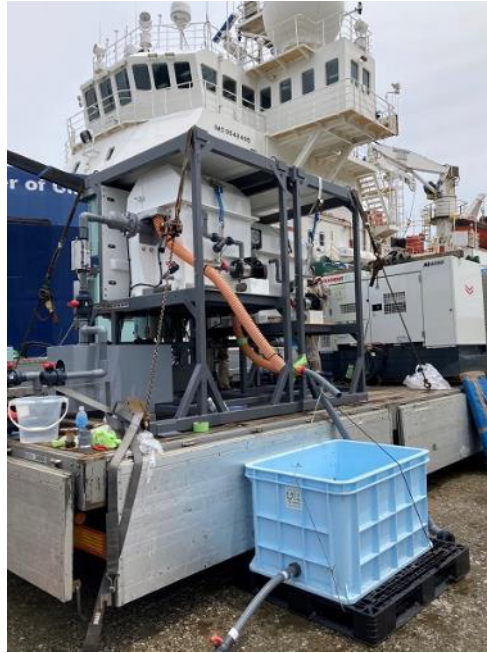


図 5-2 試験現場の岸壁に設置したデブリ回収装置

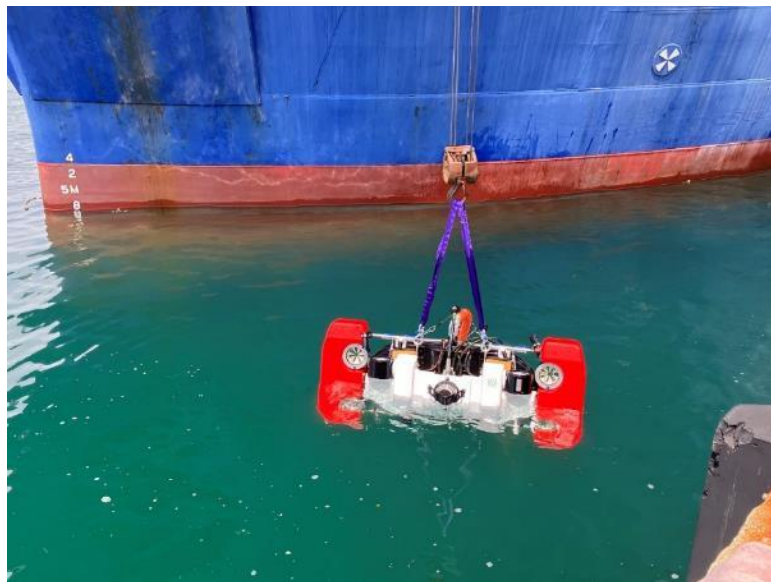


図 5-3 海上へ船体洗浄 ROV を下架している様子



図 5-4 船体洗浄 ROV が動作している支援船の右舷の様子



図 5-5 支援船の右舷に張り付いている船体洗浄 ROV

3.5.2. 船体洗浄最大速度

3.5.2.1. 目標値の設定

4.1.1 にて実施した陸上水槽試験と同様に目標最大推進速度は 27.5m/min. を目標値とした。

3.5.2.2. 試験方法

船体洗浄最大速度は、支援船側面の Fr50 付近(図 5-6)に ROV を張付かせ、最大推進力で直進する際の推進速度を計測することにより確認した。陸上水槽試験時と同様に ROV にはホース・ケーブル類を全て接続し、洗浄円盤を作動(ポンプ水圧は

11MPa) させて試験を実施した。試験中の張付き力は、設計値となる 36kgf になるよう調整した。



図 5-6 支援船 洗浄試験実施箇所

計測は、水中動画を撮影（水中カメラ GoPro9 120fps にて撮影）し、船体の喫水線に測量テープ(3m)を磁石で貼付け(図 5-7)で作成した計測区間ライン間(1m)の移動にかかった時間により導いた。ROV の進行方向は船首⇒船尾、船尾⇒船首の 2 方向への移動時間を計測した。時間の計測は、より正確な値を得るため、動画フレーム数の計数により行った。



図 5-7 船体洗浄速度試験風景

3.5.2.3. 結果および考察

船体洗浄最大速度の試験結果を表 5-2 に示した。本試験では、船体洗浄最大速度進行方向が船首側から船尾側は 41.2m/min.、船尾側から船主側へは 37.2m/min. となり、目標とする 27.5m/min. を 35-50%上回る結果が得られた。このため実際の船体洗浄の実施状況で潮流による水中抵抗や、ホース・ケーブル類の引張抵抗を受けても目標値を十分に満たすことが確認できた。

また、進行方向の違いで速度差がみられるのは潮流や船体に打ち付ける波の影響による差異であると考えられる。

表 5-2 船体洗浄速度試験結果

スラスト力 (張付き力)	ポンプ水圧	計測距離	進行方向	フレーム数	速度 (m/min.)
36kgf	11MPa	1m	船首⇒船尾	175	41.2
			船尾⇒船首	194	37.2

3.5.3. 船体洗浄精度

3.5.3.1. 目標値の設定

船体付着生物が 95 %以上除去されていることを目標値とし、洗浄前後の付着生物量について、カメラ画像解析による比色率換算により解析を実施した。

3.5.3.2. 試験方法

<解析用画像の撮影機材>

使用した撮影機材を図 5-8 に示した。水中で船体表面の付着生物を一定距離でマクロ撮影するため、塩ビパイプ製の撮影用フレームを作成し、それにデジタルカメラ (RICOH WG-30) と補助光となる水中ライト (Sealion B15) を取り付けた。本機材の前方を船体に押し付けて撮影することで、船体の表面の状態を約 10 cm の距離で手ブレを避けて撮影できるように調節した。

またカメラ前方に等間隔 (8 cm) で水糸を張りスケールとすることで、おおよそ 8cm×8cm の評価面が撮影できるよう調節した。撮影モードは水中撮影モード、画素数は 1024×768px とした。



図 5-8 分析画像撮影機材

<撮影方法>

撮影風景を図 5-9 に示した。船体の洗浄前後に図 5-4 の撮影機材を用いてダイバーによる水中撮影を行った。

撮影箇所は図 5-7 で設置した測量テープを目印に、水平方向に 0cm の位置から船尾側へ 20cm 刻みで 5 箇所とし、垂直方向にはいずれも喫水線から深さ約 1m の位置とした。水中での撮影の為、洗浄前後で正確に同一ヶ所の撮影は困難となったが、洗浄前後の評価位置が、可能な限り定点での評価となるよう撮影を行った。



図 5-9 ダイバーによる解析画像の撮影風景

<解析方法>

船体付着生物の除去率の解析は、海洋生物・付着生物の調査試験を行っている株式会社セルリサーチへ委託し、船体塗装の露出面と生物付着面の割合を画像解析することにより行った。

船体は赤色の防汚塗料 (Seaforce Active) で塗装されていることから、画像編集ソフト (Adobe Photoshop Elements 6) により赤色部分を抽出して、それを塗装露出面とした。また、防汚塗料の下にはプラム色の下塗り材として、Safeguard UNIES が塗装されているため、そのプラム色が露出している部分を防汚塗料の剥離箇所と判断し、塗装露出面とした。

一方、塗装の露出していない部分を生物付着面とした。ただし生物には様々な色合いのものが存在するため、塗料との区別が難しい部分は個別にマニュアルで範囲指定して抽出した。

抽出した塗装露出面と生物付着面の面積は、画像解析ソフト (Image J, 1.54f) で算出した。まず抽出画像を2値化し、TIF画像として保存した。これを基に2値化した数値 (px) を読み取り、エリア面積割合を計算した。洗浄前後の撮影画像と2値化した画像の例を図5-10および図5-11に示した。


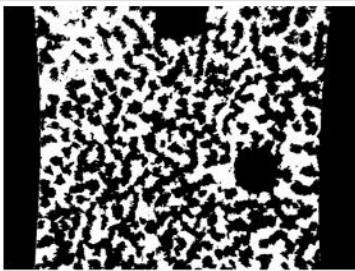

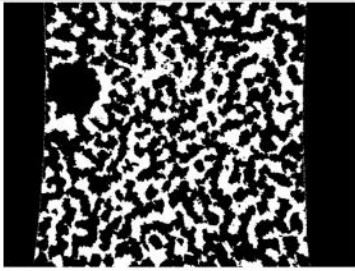

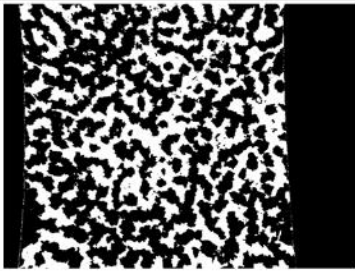

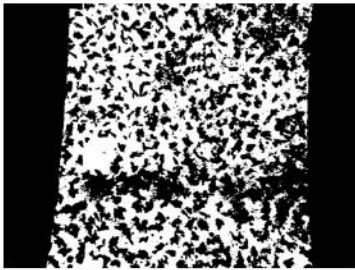

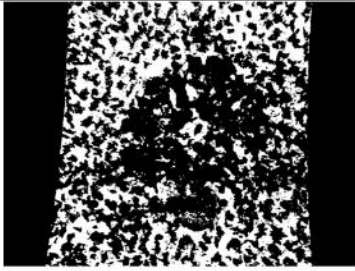
	生の撮影画像	2値化画像	備考
1			【付着物】 ・ヨコエビの棲管 ・タテジマフジツボ (13mm) ・ウズマキゴカイ類の棲管
2			【付着物】 ・ヨコエビの棲管 ・タテジマフジツボ (15mm) ・ウズマキゴカイ類の棲管
3			【付着物】 ・ヨコエビの棲管 ・タテジマフジツボ ・ウズマキゴカイ類の棲管
4			【付着物】 ・ヨコエビの棲管 ・ウズマキゴカイ類の棲管 ※画像下部の盛上がりは船体溶接部
5			【付着物】 ・ヨコエビの棲管 ・タテジマフジツボ (5mm) ・カンザシゴカイ類の棲管 ・コケムシ類 ※画像下部の盛上がりは船体溶接部

図 5-10 洗浄前の船体表面

(注記)

*2 値化画像は、塗装の露出部分が白、生物付着部分が黒とした

*黄色い線は分析区画指定に用いた水糸


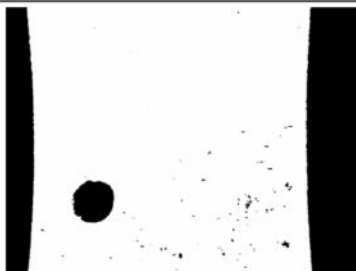

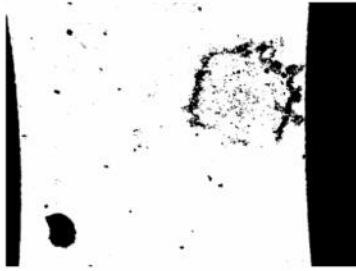



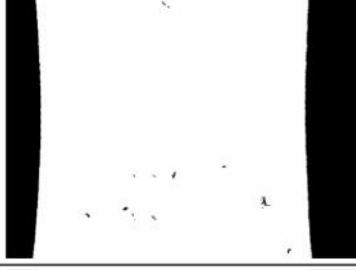


	生の撮影画像	2値化画像	備考
1			塗装露出面97.8% フジツボ底板（剥離痕、14mm）が残ったが生体部分は除去された
2			塗装露出面95.4% フジツボ底板（剥離痕、14mm）、ウズマキゴカイ類の残骸、コケムシ類の残骸が残った
3			塗装露出面100% 付着生物は全て除去された
4			塗装露出面99.9% ヨコエビ類の棲管残骸がわずかに残った
5			塗装露出面99.9% ウズマキゴカイ類の棲管と棲管を失ったヨコエビ類がわずかに見られた

図 5-11 洗浄後の船体表面

(注記)

*2 値化画像は、塗装の露出部分が白、生物付着部分が黒とした

*黄色い線は分析区画指定に用いた水糸

3.5.3.3. 結果および考察

洗浄前後の塗装露出面および付着生物面の面積割合(%)を表 5-3 に示した。洗浄前の生物付着面の割合は 45.0 ～ 60.0% (平均 55.5%) であったのに対し、洗浄後は 0.0 ～ 4.6% (平均 1.4%) まで減少し、大きな洗浄効果が認められた。

本平均値から、洗浄前に対する洗浄後の生物除去率は、次の通り算出された。

$$\text{平均除去率 (\%)} = (55.5 - 1.4) \div 55.5 \times 100 = 97.5 \%$$

以上のことから、本試験における船体付着生物の除去率は 97.5% となり、目標値の 95% 以上を達成した。ただし、付着生物除去の難易度は付着生物の種類や船体のコンディションによって異なることに留意する必要がある。今後、更なる試行を重ねて検証を続けることにより、一層の性能実証ができると期待される。

表 5-3 船体洗浄前後の塗装露出面と生物付着面の割合

洗浄前		1	2	3	4	5	平均
塗装露出面	px	295343	228055	246677	303706	221227	
生物付着面	px	338109	356758	339482	248135	331971	
塗装露出面	%	46.6	39.0	42.1	55.0	40.0	44.5
生物付着面	%	53.4	61.0	57.9	45.0	60.0	55.5
洗浄後		1	2	3	4	5	平均
塗装露出面	px	601616	616633	601276	597553	592447	
生物付着面	px	13297	29433	0	807	506	
塗装露出面	%	97.8	95.4	100.0	99.9	99.9	98.6
生物付着面	%	2.2	4.6	0.0	0.1	0.1	1.4
評価面： 約 8cm×8cm							

3.5.4. デブリ回収ろ過精度

3.5.4.1. 目標値の設定

デブリ回収後の排水中に含まれるデブリ粒子の内、95%以上が 0.05mm 未満であることを目標とした。

3.5.4.2. 試験方法

<サンプリング>

5.3 において、支援船の洗浄試験を実施した際に、デブリ回収装置を用いて回収デブリをろ過し、その排水をサンプリングした (図 5-12)。その際、デブリ回収ホ

ースと装置内の海水の滞留時間を考慮し、船舶の洗浄とデブリの吸引を開始後、3分後にサンプリングを行った。デブリ回収装置のろ過速度は、設計値通り100~110L/min.に調節した。サンプルは500ml取水し、冷蔵状態にして持ち帰り、顕微鏡を用いて粒度の分析に供試した。



図 5-12 ROV から吸引したデブリを含む海水とデブリ回収装置の排水

(注記)

*左側が、船体洗浄 ROV からデブリ回収装置へ吸引した海水（ろ過処理前）

*右側がデブリ回収装置の排水（ろ過処理後）

*本項では、デブリろ過装置の排水中の懸濁物粒度を測定するため、右側のサンプルについて粒度解析を行った。

<粒度の分析方法>

持ち帰ったサンプル水を、12,000回転/min.にて15分間の遠心分離し、懸濁成分を沈殿させて回収した。顕微鏡撮影時の被写体距離の一定性を担保するため、血球算定盤フックスローゼンタール(Fuchs Rosenthal, サンプル水充填時の深さ0.25mm)に回収した沈殿物を海水ごと滴下し、プレパラートを作成した。プレパラートを顕微鏡へセットし、接眼レンズ接続マウントにセットした一眼レフデジタルカメラ(図5-13)で撮影し、画像をJPEG形式にて保存した。計測作業は、保存した画像を計測ソフト”Image J 1.54G”に取り込んでPC上で実施した(図5-14)。

粒子のサイズは、千差万別な粒子形状がある中で一律に評価する手段として等価直径を基準に評価した(ICS および BIMCO の定義を引用)。等価直径は、計測ソフト上の解析により得られた粒子のエリア面積から、次の算出式を用いて、その等価な円形の直径を算出することにより導いた。

(算出式)

等価直径 $\phi = 2\sqrt{S/\pi}$

*S=エリア面積



図 5-13 粒度解析用画像撮影に用いた顕微鏡撮影キット

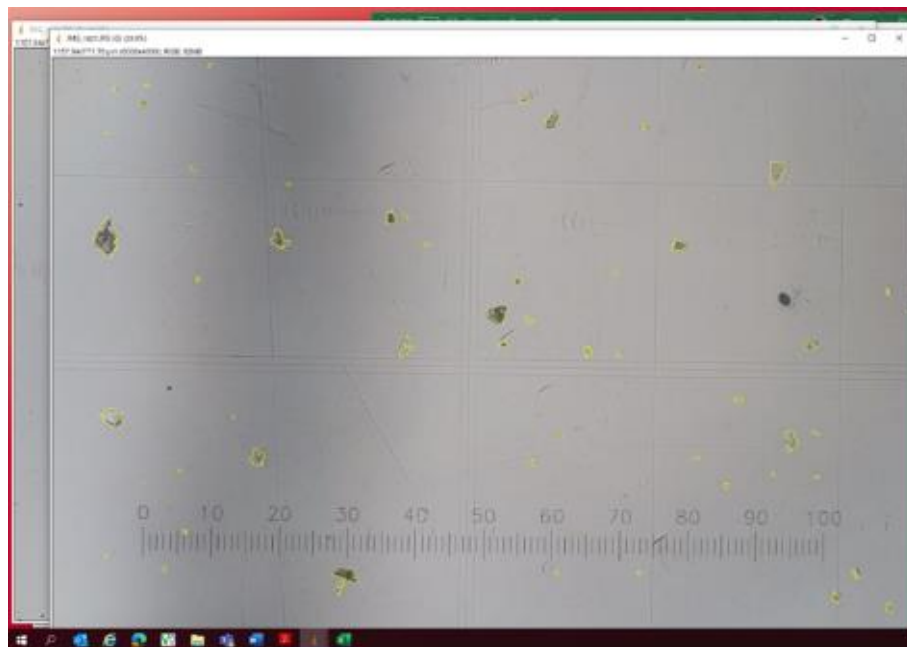


図 5-14 計測作業中の写真(一部を抜粋)

(注記)

*黄色線がエリア面積計測のために描画した懸濁物の輪郭線

*図中のスケールは顕微鏡内に設置された接眼スケールにつき、実際の長さを示すものではない。本解析で用いた撮影倍率の画像については、予め長さの判る標準

物の計測により、図中のスケール 100 目盛り当たりの長さを 0.92mm として補正して解析した。

*作業者の選択圧が発生しないように、1 画像内の全ての粒子を計測した

*計測サンプル数は 500 個以上とした

3.5.4.3. 結果および考察

デブリ回収装置の排水中に含まれる粒子サイズ（等価直径）のヒストグラムを図 5-15 に示した。

デブリ回収装置の排水中に含まれる粒子のうち、等価直径 0.05mm 未満の粒子の割合は 97.4%となり、目標とする 95%以上を達成した。

回収したサンプルに含まれる粒子のうち、最も割合が高かったのは 0.01mm 未満の粒子で、回収したデブリの破片や微細藻類、バクテリアなどがこれに含まれていると考えられた。一方、0.05mm 以上の粒子については、細かなデブリ粒子が凝集して形成されたような塊が含まれていた。付着生物は、タンパク質を多く含んでいるため、デブリろ過の際に 0.05mm の目合いのフィルタを透過した後に凝集している可能性も考えられた。

以上の結果より、船舶の洗浄により発生したデブリを用いて、本事業で開発したデブリ回収装置でろ過することにより、0.05mm 以上の粒子が 5%以内に収まる精度でろ過・回収できることが実証された。

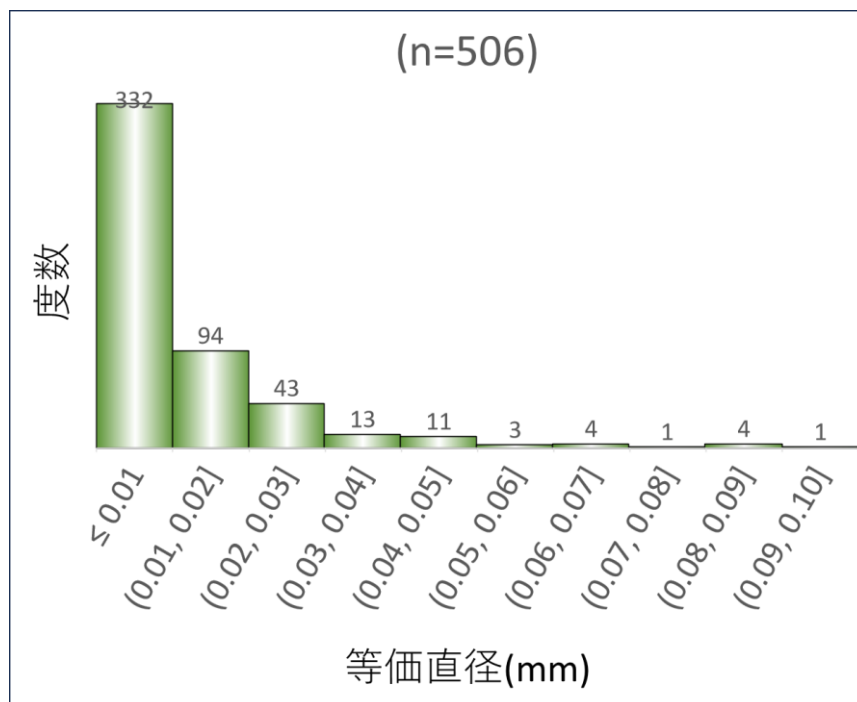


図 5-15 デブリ回収水に含まれる懸濁物の等価直径ヒストグラム

3.5.5. 補足試験

前項までの船舶洗浄試験に続き、さらに付着物が多い場合の洗浄時の知見を得るため、浮きドック設備を保有するA社に協力を頂き、2024年5月15日に浮きドック壁面の洗浄試験を実施した。浮きドックの外観と側面の生物付着状況を図5-16に示した。

浮きドック壁面には、海藻類やフジツボ類など複数の海洋生物が密集して付着しており、5.1.1項の支援船よりも洗浄の難易度が高い状況であった。



図 5-16 浮きドック外観と側面の生物付着の状況

3.5.5.1. 洗浄精度の評価

<試験方法>

洗浄試験は、図5-17に模式図として示した浮きドック先端部側面の垂直平面のエリアで行った。洗浄前後の付着物状況の評価は、5.3.2と同様の機材と方法を用いて画像による評価とした。

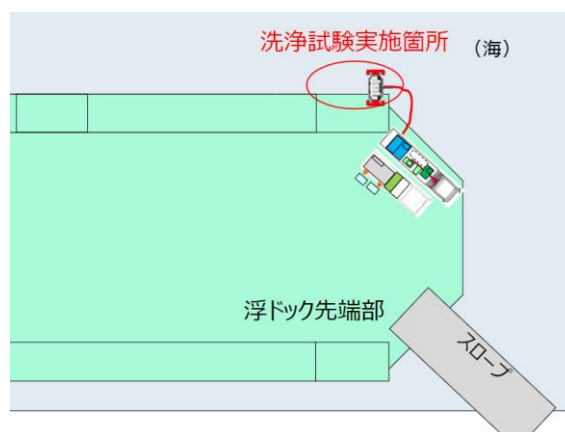


図 5-17 浮きドック洗浄試験実施位置

<試験結果>

洗浄前後の撮影画像を図5-17に示した。洗浄前の画像から把握できる付着生物は、フサコケムシやホヤ類であったが、長年、水中に浸漬されているために、何層

にも付着生物が重なっており、下に隠れた生体は視認することが出来ない状態だった。洗浄後は浮きドック側面に付着した生体は概ね除去されており、固い殻をもつフジツボ類やカキ類についても、剥離痕から、ほとんどの個体が除去されている様子が分かった。しかし、比色法による画像解析は、浮きドック側面の茶褐色状の部分が経年劣化によるものか付着藻類などの付着生物によるものか断定が難しく、また、生体としては除去できているものの、底板だけが一部残されているフジツボ類も多く、2次元解析として除去率の適正な数値化が出来なかった。







	洗浄前	洗浄後	備考
1			洗浄前は全体的に付着生物の種類が多く、フサコケムシやホヤ類に覆われフジツボ類やカキ類は隠れている状態
2			洗浄後は密集して10mm径以上のフジツボ類や殻高20mmのカキ類等がまばらに残ったが、表面の生体のほとんどは除去された
3			基盤の地色が均一でないことと底板が多く残っている為、比色分析は不可

図 5-17 浮きドック洗浄試験における洗浄前後の比較画像

<考察>

ドック側面には洗浄前に付着していたフサコケムシ、ホヤ類、フジツボ類(約1~10mm)、カキ類(約10~20mm)等、大量の生体が付着していたが、船体洗浄 ROV による洗浄により、付着していた生体は概ね除去できることが分かった。しかし、比色法による除去率の数値化が難しく、本試験では目標値達成状況は評価することが出来なかった。洗浄後の画像では、フジツボ類では殻長約10mm以上、または密集している群体、カキ類では殻高約20mm以上の個体で一部除去できなかったものが見られたことから、当該サイズまでが、本船体洗浄 ROV による洗浄可能なサイズを目安になると考えられた。

付着物除去率の評価方法に関しては、5.3.2の支援船のように、塗装の定期的な

メンテナンスが成されている洗浄対象は船体塗料表面の露出評価がし易く、比色率による付着物除去率の評価が可能なのに対し、汚れが経年沈着している場所においては、適正な評価が困難であった。その他の評価手法としては、単位面積当たりの付着物重量による除去率の評価が考えられるが、洗浄前後で付着物サンプリングが必要となるため、定点での評価が不可能となる。また、継続的に運航されている船舶においては、スライム状の付着生物が多いため、水中でのサンプリングそのものが難しく、同様の条件での評価が難しいものと考えられた。

3.5.5.2. デブリ回収ろ過精度の評価

<試験方法>

5.4.2に記載の方法と同様に、浮きドック壁面の洗浄を実施した際に、同時にデブリ回収装置を用いてデブリのろ過を行い、その排水をサンプリングして粒度を計測した。

<試験結果>

デブリ回収装置の排水中に含まれる粒子サイズ（等価直径）のヒストグラムを図5-18に示した。

デブリ回収装置の排水中に含まれる粒子のうち、等価直径0.05mm未満の粒子の割合は99.4%となり、目標とする95%以上を達成した。

5.4.3と同様に、回収したサンプルに含まれる粒子のうち、最も割合が高かったのは0.01mm未満の粒子で、回収したデブリの破片や微細藻類、バクテリアなどがこれに含まれていると考えられた。

以上の結果より、船舶の洗浄試験に続き、より付着物量の多い壁面の洗浄においても、本事業で開発したデブリ回収装置でろ過することにより、0.05mm以上の粒子が5%以内に収まる精度でろ過・回収できることが実証された。

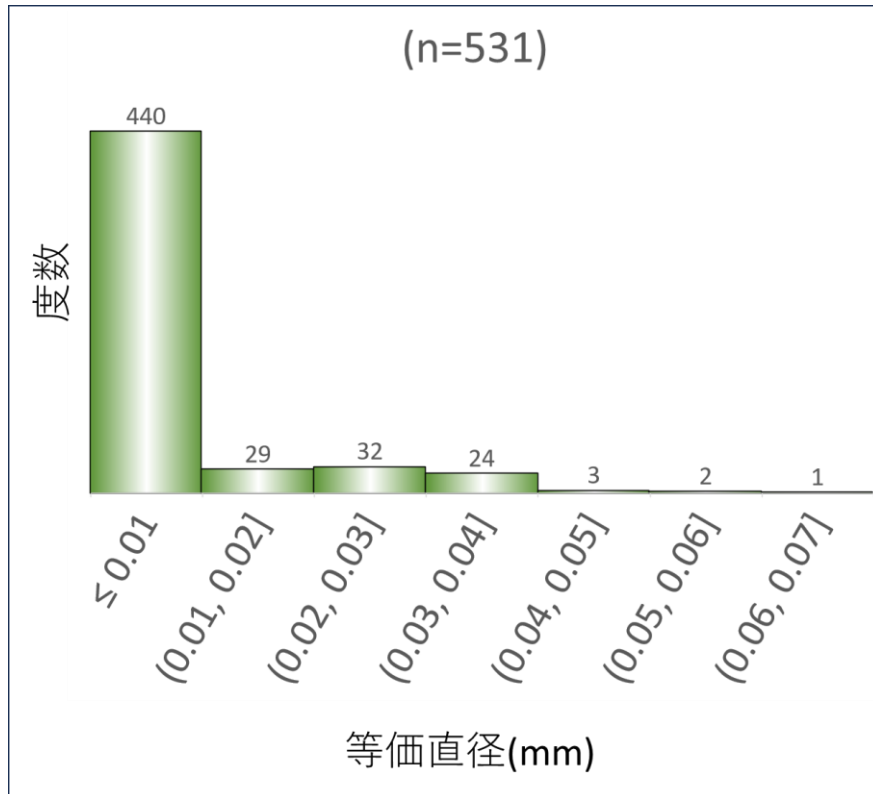


図 5-18 デブリ回収水に含まれる懸濁物の等価直径ヒストグラム

4. 目標の達成状況

4.1. デブリろ過精度および速度

ろ過精度 0.05mm 以下、且つ、ろ過速度 100L/min. となるデブリ回収装置の設計と試作に取り組み、陸上水槽試験と船舶の洗浄試験において性能評価を行った。

デブリろ過速度は、陸上水槽試験において、100L/min. から 110L/min. で 10 分間以上ろ過速度が維持できることを確認した。また、海面からのデブリ回収装置設置高さを 2m ないし 3m (船体洗浄作業の実施現場として想定される設置高さ) とした場合の最大ろ過速度はそれぞれ 140~150L/min. ないし 120~130L/min. となり、目標とする 100L/min. を達成した。

ろ過精度は、船舶の洗浄試験において 100L/min. のろ過速度でデブリ回収とろ過の実験を実施し、デブリ回収装置の排水中の粒度を分析した結果、排出粒子の 97.4% が等価直径 0.05mm 未満であることを確認し、目標とするろ過精度 0.05mm 以下を達成した。

4.2. 船体洗浄 ROV 最大洗浄速度

最大洗浄速度 2,000 m³/h に相当する、最大推進速度 27.5m/min. の推進性能を持ち、且つ、最大消費電力 31kW となる船体洗浄 ROV の設計と試作に取り組み、陸上水槽試験と船舶の洗浄試験において性能評価を行った。

最大推進速度は、陸上水槽試験において 38.9m/min.、船舶の洗浄試験において 37.2m/min. および 41.2m/min. (潮流を考慮し、2つの進行方向で試行) を記録した。これは、1時間あたりの洗浄速度として 2,670~2960 m³/h に相当する結果であり、目標とする 2,000 m³/h を達成した。

尚且つ、設計において最大消費電力を 30.7kW とすることができたため、31kW 以下となり目標を達成することができた。

4.3. 船体洗浄 ROV 付着物除去精度

試作した船体洗浄 ROV を用いて船舶の洗浄試験を実施し、洗浄前後の船体表面の画像解析により、船体付着生物の除去率を解析した結果、洗浄前に付着していた生物の 97.5% が除去されたことが確認され、目標とする船体付着生物除去率 95% 以上を達成した。

5. 2023 年度の実施内容の概要

本事業に先駆けて、2022 年度から基本機能を有した船体洗浄 ROV の開発とプロトタイプ製作を開始し、このプロトタイプを用いて 2023 年度に船体洗浄のトライアルを実施している。本事業においては、このトライアルで船体洗浄 ROV の設計上の課題を洗い出し、その課題に対する解決方法を明確化した上で以下の内容に取り組むことで、事業目標値の達成と、実効性の高い船体洗浄システムの開発に取り組んだ。

(1) 船体形状の調査

ばら積み船やタンカーを主とする全長 300m 以上の大型外航船の船体形状に関する情報を収集し、曲面形状に対する走行可能範囲を検討した。その結果、300m 級の船舶において、半径 4m 以上の曲面の割合は、少なくとも 60%以上であることが推定され、半径 4m 以上の曲面において、正常な走行と洗浄が可能となるような船体洗浄 ROV を設計することにより、網羅的に素早く洗浄することが可能になると結論付けた。

(2) 設計

① デブリ回収装置—ろ過装置の設計改善

目標とする、デブリろ過精度 0.05mm 以下および処理速度 100L/min. を実現し、実務上の実効性の高いろ過装置の設計を行った。

② 船体洗浄 ROV—洗浄速度向上と消費電力低減

船体洗浄 ROV の水中抵抗の低減と軽量化、推進力の適正化を図る設計見直しにより、目標とする洗浄速度 2,000 m³/h の実現と、他社機に対し、13%の省エネとなる最大消費電力 31kW を実現するよう設計に取り組んだ。

③ 船体洗浄 ROV—洗浄力向上

船体付着生物を 95%以上*除去できる洗浄機能を実現する回転円盤と高圧水通水機構の設計見直しを行い、船体付着生物の除去が可能で、かつ船体塗料の剥離がない洗浄力に調整するよう設計に取り組んだ。

*船体洗浄 ROV により洗浄を実施した箇所において、付着物が除去された割合。

(3) 試作

④ デブリ回収装置の試作

(2) 項①の設計改善による改良型デブリ回収装置の試作を実施した。

⑤ ②船体洗浄 ROV の試作

(2) 項②および③の設計改善による改良型船体洗浄 ROV の試作を実施した。

(4) 陸上水槽試験

(3) 項にて試作した改良型船体洗浄 ROV および改良型デブリ回収装置の基本動作

性能の確認試験を実施した。確認内容は、本事業の目標値達成のために必要な、以下の項目とした。

項目	指標
張付き時最大推進速度*	27.5 m/min.
洗浄円盤回転数**	250 min ⁻¹
洗浄水圧***	2 MPa
デブリ回収速度	100L/min.

- * 船体洗浄 ROV の洗浄仕事幅は 1.22m とするため、目標とする 2,000 m²/h を達成するためには、2,000 m²/1.22m/60min. ≒27.32m/min. 以上の推進速度が必要
- ** 高圧水を噴射する洗浄円盤は、定速で回転することにより、船体洗浄 ROV が直進した際に、洗い残しが発生しないように調整する必要がある。上記 27.5m/min. で走行した際に、理論上、洗い残し部分が発生しない回転速度が 250 min⁻¹ である
- *** 船体付着生物を除去でき、かつ船体塗料の剥離が概ね無いレベルの洗浄水圧（当社独自の試験による）

【試験結果の確認状況】

- ① 張付き時最大推進速度

水槽内で、水中での張付き時の最大推進速度を計測したところ、38.9m/min. となり、目標とする 27.5m/min. を達成することができた。
- ② 洗浄円盤回転数

水槽内で洗浄機を稼働し、洗浄円盤の回転数を計測したところ、平均 248.3min⁻¹ となり、目標とする 250min⁻¹ に対し、99.3%を達成した。目標値をわずかに下回ったものの、概ね設計回転数通りの結果を得ており、洗浄作業の実用上、問題無い範囲であると考えられた。
- ③ 洗浄水圧

水槽内で洗浄走行を実施し、感圧シートを用いて洗浄水圧を計測したところ、平均洗浄水圧は 2.4MPa となり、目標とする 2MPa を達成することができた。
- ④ デブリ回収速度

水槽実験において、デブリ回収ポンプによるろ過速度を計測した結果、100L/min. から 110L/min. で 10 分間以上ろ過速度が維持できることを確認した。また、海面からのデブリ回収装置設置高さを 2m ないし 3m（船体洗浄作業の実施現場として想定される設置高さ）とした場合の最大ろ過速度はそれぞれ 140～150L/min. ないし 120～130L/min. となり、目標とする 100L/min. を達成した。

(5) 実船洗浄試験

改良型船体洗浄 ROV および改良型デブリ回収装置の試作機を用いて、実際の船舶で船体洗浄を実施し、洗浄速度、洗浄力、デブリ回収精度等の性能評価を行った。確認内容は、本事業の目標値達成のために必要な、以下の項目とした。

項目	指標
船体洗浄最大速度*	27.5 m/min.
船体洗浄精度	カメラ映像の目視により確認できる船体付着生物が 95%以上除去されていること（単位面積当たりの比色率で評価）**
デブリ回収ろ過精度	デブリ回収後の排水中に含まれるデブリ粒子の 95%以上が 0.05mm 未満であること

- * 船体洗浄 ROV の洗浄仕事幅は 1.22m を予定しているため、目標とする 2,000 m²/h を達成するためには、2,000 m²/1.22m/60min. ≒27.32m/min. 以上の推進速度が必要となる。(4)項にて確認した推進速度が、実際の海域において、船体洗浄とデブリ回収を実施した際の仕事速度として発揮できることを確認した
- ** 付着生物の量や種類等により、得られる洗浄効果に差が出ることが予想される。最大推進速度での洗浄を行った場合、概ね 100g/m²以下の付着生物量を目安とした

【試験結果の確認状況】

① 船体洗浄最大速度

船舶の洗浄試験において、洗浄時の最大推進速度を計測した結果、37.2m/min. および 41.2m/min. (潮流を考慮し、2つの進行方向で試行)となり、陸上水槽試験に続き、目標とする 27.5m/min. を達成した。

② 船体洗浄精度

船体洗浄 ROV による船体洗浄試験を行い、洗浄前後の船体表面の画像解析により船体付着生物の除去率を解析した結果、洗浄前に付着していた生物の 97.5%が除去されたことが確認され、目標とする船体付着生物除去率 95%以上を達成した。

③ デブリ回収ろ過精度

船舶の洗浄試験において 100L/min. のろ過速度でデブリ回収ろ過の実験を実施し、デブリ回収装置の排水中の粒度を分析した結果、排出粒子の 97.4%が等価直径 0.05mm 未満であることが確認され、目標とするろ過精度 0.05mm 以下を達成した。

(6) 報告書作成

2023 年度の事業内容を取りまとめ、報告書を作成した。

6. 今後の予定

今後は、2025年3月までの商品化を目処に、更に実証試験を重ね、実用性の検証と改良を行う予定である。また、この間にIMOガイドラインが明確化され、規制が開始されることを見据えて、世界の関係港湾に順次販売営業を開始する。

7. まとめ

本事業では、環境問題として元来から認識されてきた外来生物の移入を防止する手段として、水中で頻繁に、素早く洗浄することができる船体洗浄ROVと、デブリ回収装置の開発に取り組み、世界最速レベルの洗浄速度と省エネ性能を併せ持つ船体洗浄システムの開発を完了した。

近年は、水中ドローン技術の発達により、リモートセンシングによる水中調査や水中アクチュエータを用いたリモート作業などが可能になる等、水中ロボティクス技術は飛躍的に高まっているが、本開発成果のように、産業上有効なスペックの船体洗浄ROVは世界的にもまだ少なく、国産モデル商品化の実現に対し、業界各所から期待の声を多く頂戴している。今後はユーザー視点での実用性と機能性の向上に努め、海運業におけるSDGsの実現に貢献していく所存である。

最後に、本開発事業は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<https://www.jsmea.or.jp>