



2021年度

微弱電流を用いた船用プロペラ生物付着防止装置の技術開発
成果報告書

2022年11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、2020年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「微弱電流を用いた船用プロペラ生物付着防止装置の技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2020年度、2021年度の2年計画で、ジャパン マリンユナイテッド株式会社に委託して実施しており、2年度分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。

2022年11月
(一社)日本船用工業会

目 次

第Ⅰ部 2020年度	1
1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	2
2.1 本事業の最終目標	2
2.2 2020年度の目標	2
3. 2020年度の実施内容	2
3.1 小型船舶通電なし試験	2
3.1.1 供試船舶	2
3.1.2 プロペラ表面粗度計測	3
3.1.3 係留運転	4
3.1.4 航行試験	6
3.1.5 プロペラ表面観察	15
3.1.6 小型船舶の燃費経年劣化傾向の把握	18
3.2 通電あり試験の計画	20
3.2.1 プロペラ面積を基とした必要通電量の算定	20
3.2.2 シミュレーションを用いた陽極配置検討	26
3.2.3 装置選定、設置方法の検討	33
3.3 実運航船での効果の推定法検討	37
3.3.1 大型船の燃費経年劣化傾向の把握	37
3.3.2 大型船と小型船の燃費経年劣化傾向の比較および考察	39
3.3.3 実運航船での通電による燃費経年劣化防止効果の推定法	41
4. 2020年度の目標達成状況	43
第Ⅱ部 2021年度	44
5. 2021年度の実施内容	44
5.1 小型船舶通電あり試験	44
5.1.1 供試船舶	44
5.1.2 プロペラ研磨および表面粗度計測	47
5.1.3 係留運転	48
5.1.4 航行試験	51
5.1.5 プロペラ表面観察	58
5.1.6 プロペラ面の電位モニタリング	63

5.1.7	小型船舶（通電あり時）の燃費経年劣化傾向の把握	67
5.2	微弱電流法の効果の確認	69
5.2.1	汚損による燃料消費量増加影響の成分分離	69
5.2.2	プロペラへの通電による燃費劣化抑制効果	70
5.3	実運航船での効果の推定法の見直し	71
5.3.1	大型船の燃費経年劣化傾向の把握	71
5.3.2	大型船と小型船の燃費経年劣化傾向の比較および考察	72
5.3.3	大型鉱石運搬船における効果の推定	75
6.	2021年度の目標達成状況	76
7.	実施内容の要旨	76
7.1	2020年度の実施内容の要旨	76
7.2	2021年度の実施内容の要旨	79
8.	本技術開発における自己評価	81
9.	今後の取り組み	82

第 I 部 2020 年度

1. 事業の目的

燃料費の高騰による船舶の運航コストの上昇や、国際海運における GHG 削減の要請など、船舶の運航時の省エネ対策が強く求められている。船が実海域を運航する際に求められる省エネ対策は、船体抵抗低減、プロペラの効率化、省エネ装置の採用、波浪中抵抗の低減、風圧抵抗の低減などがあり、これらについては各方面で取り組みが行われている。一方で、生物付着や汚損などに起因する船舶の燃費の経年劣化については、定期的なドック入りの際の船体清掃、プロペラ研磨などで対応しているが、プロペラへの生物付着は主に停泊時に発生し、このような対応は停泊ごとに行っているわけではない。このためプロペラ研磨実施の間の期間では、生物付着による燃費悪化の影響は避けられない。

就航中の船舶の燃費は年数とともに劣化するが、その原因の大部分はプロペラへの生物付着によるものである。弊社の建造船モニタリング結果によれば、鉾石運搬船での燃費経年劣化は 5%/年であり、そのうち 7 割がプロペラへの生物付着によるものである。

本事業では、微弱電流を停泊中のプロペラに通電してプロペラ表面を無酸素状態にし、生物付着を抑制する装置について、小型船舶を用いた実証試験を通じて開発することを目的とする。

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について説明すると以下のとおりである。

原理

水を電気分解させると、陰極（マイナス側）から水素が発生し、陽極（プラス側）から酸素が発生する。この原理を活用して、プロペラを陰極、船体を陽極とし、微弱電流を流すことで、陰極側のプロペラから水素を発生させることにより無酸素状態を作り出すことが可能になる。

より詳しく言うと、ある一定の電流密度までは陰極近傍にある溶存酸素が徐々に消費される溶存酸素の還元反応が起こり、さらに電流密度を上昇させると陰極近傍の酸素がなくなって水の還元反応が始まる。水の還元反応が始まる場所の電流をプロペラに通電することで、プロペラ近傍を無酸素状態にして生物の付着防止を図ることができる。

一方、船体表面に陽極の端子を設置することになるが、陽極からは次亜塩素酸等の塩素類が発生し、これが船体塗膜を傷める可能性がある。これについては試験片に塗膜を形成して陽極通電した浸漬試験を行い、微弱電流を流しても船体側への悪影響はないことを確認している。

課題

現在までに各種要素試験、試験片を用いた浸漬試験を実施してきたが、実船での検証、特に燃費悪化抑制効果の実証ができていない。

効果

就航後の燃料消費増加量を抑えることにより、コスト削減、GHG 削減につながる。

新規性

生物が付着したプロペラの研磨は、ダイバーによる水中研磨ないし入渠時の研磨など従来手作業で行っており、本方法のような自動的な抑制方法は過去に例がない。

2. 事業の目標

2.1 本事業の最終目標

- 1) プロペラへの生物付着を抑制する装置を開発し、小型船舶による試験で、通電時及び非通電時の燃料消費量を比較し、通電時の燃料消費量を 1.5%低減する。

2.2 2020年度の目標

- 1) 実験に供する小型船舶のプロペラにおいて、プロペラ表面の電流密度が均一になる陽極の配置を通電シミュレーションにより決定し、プロペラの電流密度のムラを 20%以下に抑える。

3. 2020年度の実施内容

3.1 小型船舶通電なし試験

通電による効果を 2021 年度に実施する通電あり試験と比較して把握するため、通電なし試験を実施して燃料消費量を把握した。

3.1.1 供試船舶

2020 年度小型船舶通電なし試験には、図 1 に示す JMU アムテック所有の小型船舶「椿」(「けやき」から改名)を用いた。供試船舶の主要目は以下の通りである。

全長：10m

全幅：2.5m

喫水：1.1m

プロペラ直径：0.7m



図1 供試船舶「樁」
(上段：陸上、下段：係留中)

3.1.2 プロペラ表面粗度計測

船体整備の一環として、表面が活性化しない程度に供試船舶のプロペラ研磨を実施した。図2に研磨後のプロペラの外観を示す。



図2 表面研磨後のプロペラ外観

通電なし試験前のプロペラの状態を把握するため、プロペラ研磨後の表面粗度を計測した。計測にはミットヨ製サーフテスト SJ-210 表面粗さ測定器を用いた。

特定の1翼を対象として、プロペラ中心から 0.5R (R:プロペラ半径)、0.7R、0.9R 付近の両面を複数点計測した。表1に粗度の計測結果を示す。計測箇所によりある程度のばらつきが見られるが、平均すると Pressure side (船尾側) で算術平均粗さ Ra:4.66 μm 、Suction side (船首側) で Ra:6.39 μm となった。

表1 プロペラ表面粗度計測結果

No	surface	measuring part	Ra	Rq	Rz
			算術平均粗さ (μm)	二乗平均平方根高さ (μm)	最大高さ (μm)
1	pressure	0.5R	5.906	8.088	43.965
2	pressure	0.5R	4.356	5.961	34.03
3	pressure	0.5R	5.005	6.466	33.52
4	pressure	0.5R	6.087	7.732	35.374
5	pressure	0.7R	3.943	5.431	32.075
6	pressure	0.7R	4.062	5.326	30.125
7	pressure	0.7R	4.531	6.089	35.165
8	pressure	0.9R	3.392	4.514	25.799
9	suction	0.5R	6.176	7.706	36.322
10	suction	0.5R	6.557	8.719	46.537
11	suction	0.5R	5.185	6.664	34.273
12	suction	0.5R	7.962	10.494	52.501
13	suction	0.5R	8.015	10.237	48.002
14	suction	0.5R	5.56	6.974	36.057
15	suction	0.7R	4.792	6.406	37.935
16	suction	0.7R	7.513	9.452	46.535
17	suction	0.7R	5.106	6.842	37.603
18	suction	0.7R	7.108	8.708	41.824
19	suction	0.7R	7.959	9.84	46.142
20	suction	0.7R	5.681	7.138	33.708
21	suction	0.7R	6.502	8.169	37.819
22	suction	0.9R	5.394	6.718	33.429

3.1.3 係留運転

次節で1年間を通した生物付着や経年劣化による燃費の変化の計測について説明する

が、基本的に供試船舶は計測日を除いて、係留状態のまま長期間運転されない状態が続くことになる。防汚装置の適用対象となる大型船舶の一般的な運航では、荷役に伴う停泊期間は最長でも1週間程度であり、荷役後の運航再開に伴うプロペラ回転により、停泊中に付着した生物のうちいくらかは脱落しているものと推測される。実運航の状態に近づけるため、供試船舶においても1週間おきにプロペラを回すこととした。回転数は300rpm、係留運転時間は30分程度とし、あわせて海水温の計測を行った。表2に航行試験、係留運転を含んだ運転の記録および海水温の計測結果を示す。また、図3に海水温の推移のグラフを示す。

海水温は、1月下旬ごろに最低値（8℃）を記録し、8月にかけて徐々に上昇し、8月上旬に30℃を記録した。

表2 運転記録および海水温計測結果

日付	種別	海水温 (℃)	日付	種別	海水温 (℃)
2020/11/26	航行試験	17.0	2021/5/13	係留運転	19.0
2020/12/4	係留運転	15.0	2021/5/20	係留運転	19.0
2020/12/11	係留運転	13.0	2021/5/25	航行試験	20.0
2020/12/18	係留運転	10.0	2021/6/3	係留運転	22.0
2020/12/22	航行試験	11.0	2021/6/10	係留運転	24.0
2021/1/21	航行試験	8.0	2021/6/17	係留運転	24.0
2021/1/28	係留運転	10.0	2021/6/25	航行試験	25.5
2021/2/5	係留運転	9.0	2021/7/2	係留運転	24.5
2021/2/11	係留運転	9.0	2021/7/9	係留運転	25.0
2021/2/18	係留運転	9.0	2021/7/15	係留運転	27.0
2021/2/22	航行試験	12.0	2021/7/21	航行試験	27.0
2021/3/4	係留運転	10.0	2021/8/5	係留運転	30.0
2021/3/11	係留運転	10.0	2021/8/20	航行試験	25.0
2021/3/18	係留運転	12.0	2021/8/26	係留運転	29.0
2021/3/23	航行試験	12.0	2021/9/2	係留運転	28.0
2021/4/1	係留運転	14.0	2021/9/9	係留運転	28.0
2021/4/8	係留運転	14.0	2021/9/16	航行試験	25.0
2021/4/14	係留運転	16.0	2021/9/30	係留運転	27.0
2021/4/21	係留運転	16.0	2021/10/7	係留運転	25.0
2021/4/27	航行試験	16.0	2021/10/15	航行試験	25.0
2021/5/6	係留運転	16.0			

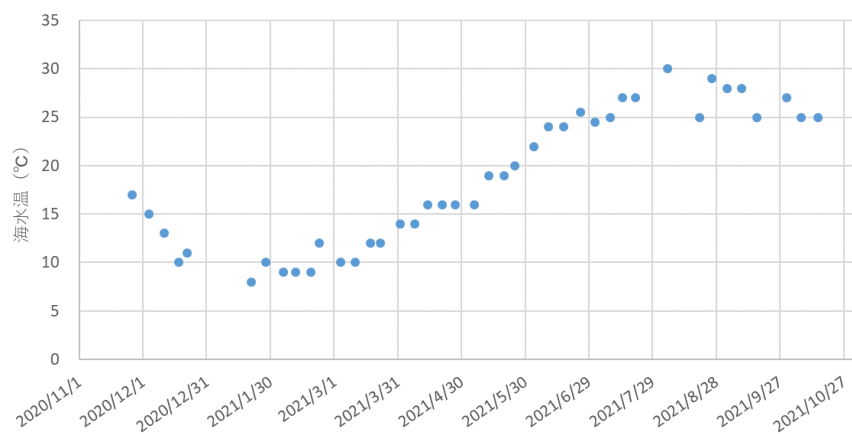


図3 海水温の推移

3.1.4 航行試験

船体やプロペラへの海生生物付着による汚損の傾向を把握するため、年間を通じた航行試験を実施した。

航行試験は JMU アムテックが位置する相生港で実施し、予め設定した航路 2 海里を 2 往復することとした。図 4 に設定した航路を示す。航行時は主機回転数 2000rpm (変速後 666rpm) 一定回転で航行し、船舶の位置、対地船速、対水船速、燃料消費量を計測した。表 3 に航行試験実施日を示す。

表 3 航行試験実施日

	日時
1	2020/11/26
2	2020/12/22
3	2021/1/21
4	2021/2/22
5	2021/3/23
6	2021/4/27
7	2021/5/25
8	2021/6/25
9	2021/7/21
10	2021/8/20
11	2021/9/16
12	2021/10/15

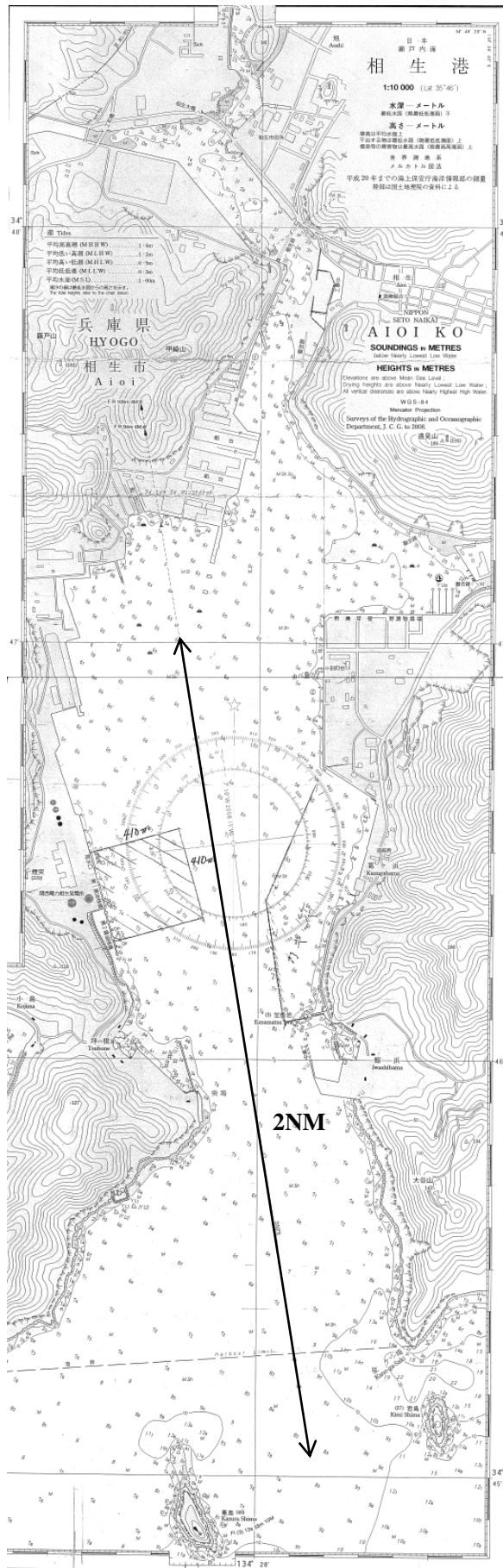


図4 所定航路 (出典：海上保安庁 相生港 水路通報)

1) 計測装置

船舶の位置および対地船速の計測については、ディファレンシャル GPS および船舶誘導システム (ソフトウェア) を利用した。ディファレンシャル GPS は、TRIMBLE 製 SPS351 DGPS/ビーコン受信機を用いた。図 5 にディファレンシャル GPS、船舶誘導システムの外観を示す。

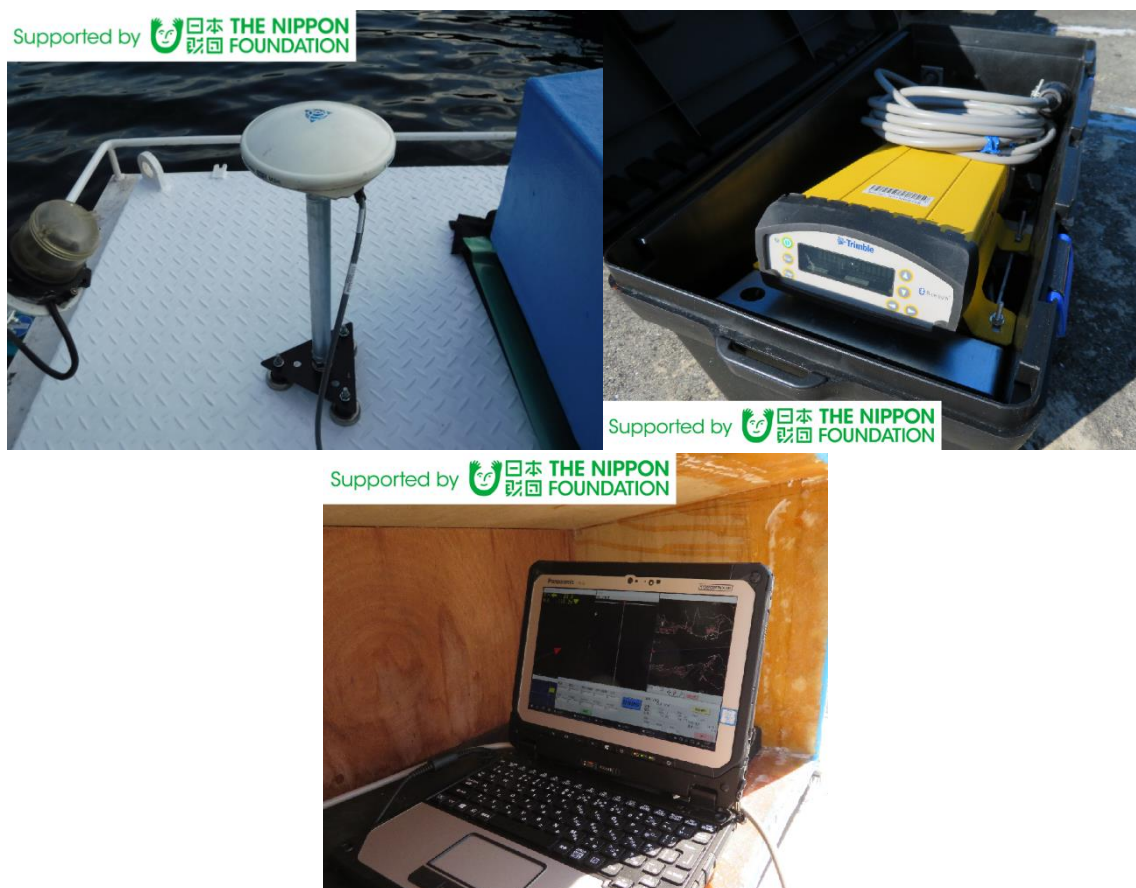


図 5 ディファレンシャル GPS および船舶誘導システム外観 (左上：アンテナ、右上：ビーコン受信機、下：船舶誘導システム画面)

対水船速の計測については、横河電子機器製ポータブル電波流速計 RYUKAN WJ7661 を用いた。図 6 にポータブル電波流速計の外観を示す。



図6 ポータブル電波流速計外観

燃料消費量の計測については、あかつき精機製油用アナログ流量計 FGGB423BAL-04X およびあかつき精機製電子式油用流量計 FGGB423BAL-74X を用いた。図7に流量計の外観を示す。なお、主機へのサプライラインに電子式流量計、リターンラインにアナログ流量計を設置し、両者の差分から正味の燃料流量を算出した。

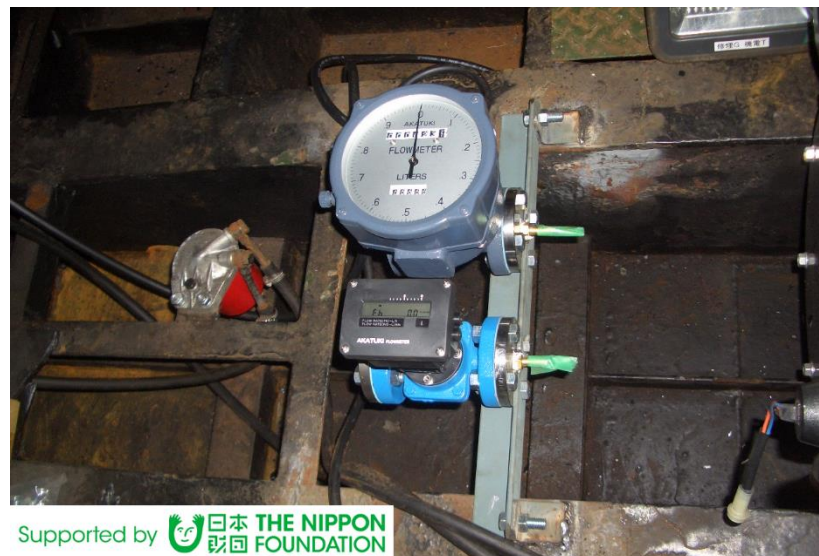


図7 燃料流量計外観（上段：アナログ流量計、下段：電子式流量計）

2) 計測結果

表4-1、4-2および図8に航行試験で計測した航行時間、対地船速、対水船速、消費燃料を示す。表4-1、4-2における航行時間は、直線2海里に要した時間および蛇行等含め2海里の航行に要した時間を併記している。

加えて、表5および図9に各回の往航、復航の平均値を示す。

対地船速と対水船速には0.5~1.0knot程度の差が存在しているが、両者の傾向は一致していることが確認できる。両者で傾向が異なる2020年12月および2021年4月の計測については、潮流等の影響により表層流速と対地速度に差があったと考えられる。

各計測項目にばらつきはあるものの、おおむね2020年11月から2021年4月までの期間は汚損による影響はなく、ほぼ初期状態を維持できているものと推測される。

2021年5月から2021年9月までの間は航行時間、船速、燃料消費量いずれもばらつきは見られるもののほぼ直線上に悪化しており、一定の速度で汚損が進行しているものと考えられる。

上記から、毎月一回の対地船速、対水船速、燃料消費量の計測により、汚損影響の傾向を把握可能であることが確認できた。

表4-1 航行試験計測結果

			タイム		平均対地船速 (knot)	平均対水船速 (knot)	消費燃料 (ℓ)
			直線距離	実航行距離			
2020/11/26	1st	往航	0:16:19	0:16:16	7.36	7.05	2.467
		復航	0:15:59	0:15:58	7.52	6.94	2.350
	2nd	往航	0:16:36	0:16:35	7.24	6.86	2.304
		復航	0:16:02	0:16:02	7.49	6.96	2.371
2020/12/22	1st	往航	0:17:31	0:17:26	6.88	6.94	2.344
		復航	0:16:26	0:16:20	7.35	7.05	2.189
	2nd	往航	0:16:38	0:16:36	7.23	7.30	2.463
		復航	0:15:58	0:15:56	7.54	7.38	2.294
2021/1/21	1st	往航	0:16:27	0:16:25	7.30	6.87	2.042
		復航	0:16:28	0:16:27	7.29	6.98	2.104
	2nd	往航	0:17:00	0:16:58	7.07	6.75	2.108
		復航	0:16:25	0:16:23	7.33	6.73	1.968
2021/2/22	1st	往航	0:16:36	0:16:29	7.28	※1	2.180
		復航	0:16:40	0:16:37	7.23		2.035
	2nd	往航	0:16:51	0:16:47	7.15	6.71	2.222
		復航	0:16:20	0:16:14	7.40	6.87	2.095

※1：計測データ破損

表 4 - 2 航行試験計測結果

			タイム		平均対地船速	平均対水船速	消費燃料
			直線距離	実航行距離	(knot)	(knot)	(ℓ)
2021/3/23	1st	往航	0:16:02	0:16:00	7.50	※1	2.209
		復航	0:16:42	0:16:41	7.20		2.166
	2nd	往航	0:16:38	0:16:30	7.27	6.97	2.336
		復航	0:16:14	0:16:13	7.41	6.84	2.156
2021/4/27	1st	往航	0:16:19	0:16:16	7.38	7.15	2.317
		復航	0:16:25	0:16:22	7.34	7.23	2.260
	2nd	往航	0:16:16	0:16:15	7.38	7.21	2.254
		復航	0:16:34	0:16:32	7.26	7.23	2.239
2021/5/25	1st	往航	0:17:24	0:17:22	6.91	6.46	2.343
		復航	0:16:58	0:16:54	7.10	6.47	2.215
	2nd	往航	0:17:06	0:17:04	7.03	6.68	2.496
		復航	0:16:46	0:16:42	7.19	6.60	2.309
2021/6/25	1st	往航	0:17:31	0:17:30	6.86	6.29	2.941
		復航	0:18:25	0:18:21	6.54	6.11	2.875
	2nd	往航	0:18:02	0:17:56	6.69	6.14	2.909
		復航	0:18:13	0:18:12	6.60	6.12	2.818
2021/7/21	1st	往航	0:19:00	0:18:57	6.33	※2	3.308
		復航	0:19:44	0:19:41	6.10		3.408
	2nd	往航	0:20:42	0:20:41	5.81		3.488
		復航	0:18:38	0:18:36	6.45		3.076
2021/8/20	1st	往航	0:18:29	0:18:28	6.50	5.31	2.985
		復航	0:20:06	0:20:02	5.99	5.32	3.238
	2nd	往航	0:20:11	0:20:09	5.96	5.34	3.275
		復航	0:19:02	0:19:00	6.32	5.15	2.819
2021/9/16	1st	往航	0:19:28	0:19:23	6.19	※2	3.600
		復航	0:20:29	0:20:26	5.87		3.898
	2nd	往航	0:20:13	0:20:08	5.97		3.423
		復航	0:20:26	0:20:23	5.88		3.404
2021/10/15	1st	往航	0:19:35	0:19:33	6.14	4.86	3.419
		復航	0:20:04	0:20:03	5.99	4.87	3.423
	2nd	往航	0:20:29	0:20:25	5.88	4.90	3.600
		復航	0:19:25	0:19:23	6.19	4.91	3.190

※1 : 計測データ破損

※2 : 流速計の空気がなくレンタルできなかった

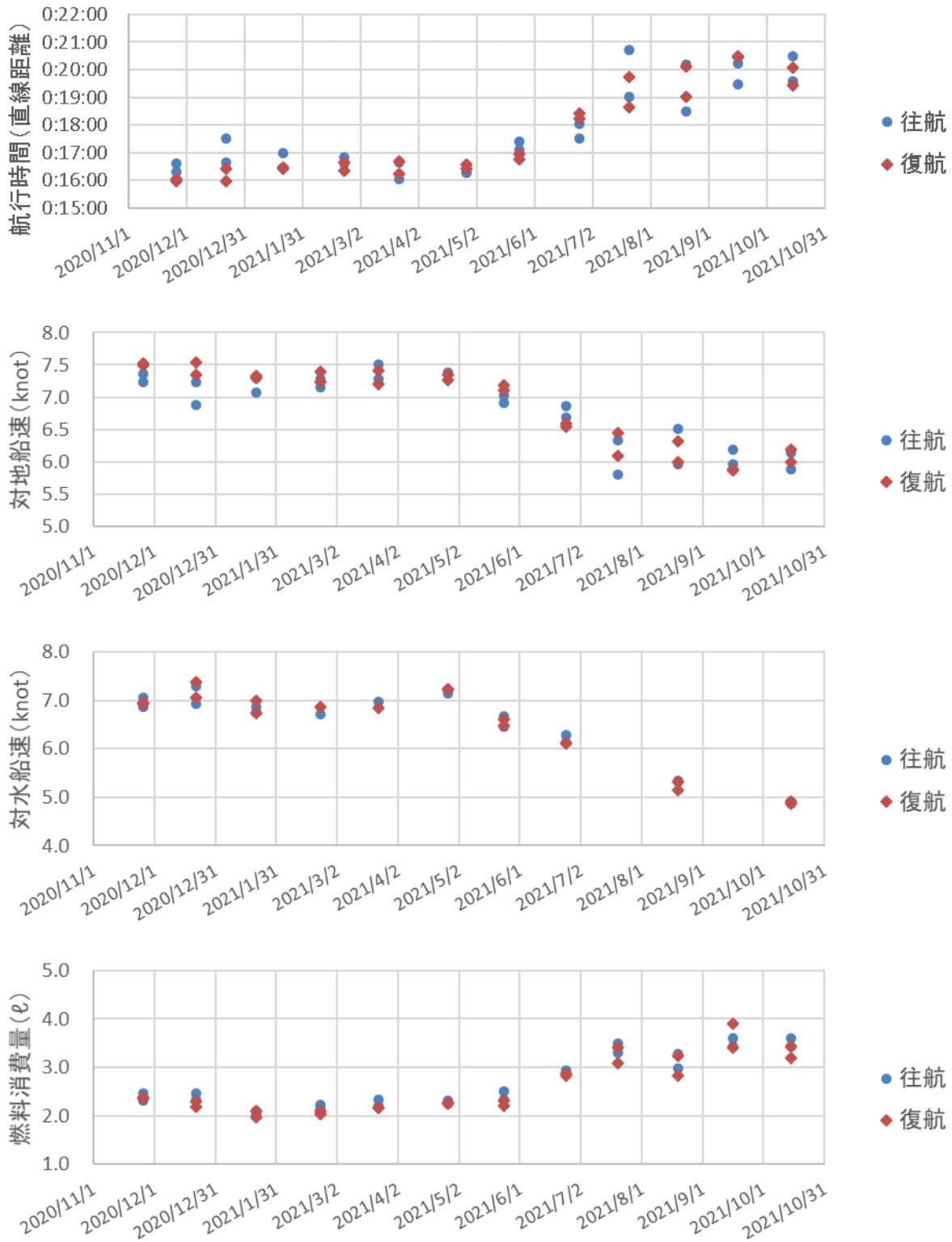


図8 航行試験計測結果

表5 航行試験計測結果（往復平均）

往復平均		タイム		平均対地船速	平均対水船速	消費燃料
		直線距離	実航行距離	(knot)	(knot)	(ℓ)
2020/11/26	1st	0:16:09	0:16:07	7.44	6.99	2.409
	2nd	0:16:19	0:16:18	7.36	6.87	2.338
2020/12/22	1st	0:16:58	0:16:53	7.11	7.00	2.267
	2nd	0:16:18	0:16:16	7.38	7.34	2.379
2021/1/21	1st	0:16:27	0:16:26	7.30	6.93	2.073
	2nd	0:16:43	0:16:40	7.20	6.74	2.038
2021/2/22	1st	0:16:38	0:16:33	7.25	※1	2.108
	2nd	0:16:36	0:16:30	7.28	6.79	2.159
2021/3/23	1st	0:16:22	0:16:20	7.35	※1	2.188
	2nd	0:16:26	0:16:21	7.34	6.91	2.246
2021/4/27	1st	0:16:22	0:16:19	7.36	7.19	2.288
	2nd	0:16:25	0:16:24	7.32	7.22	2.247
2021/5/25	1st	0:17:11	0:17:08	7.01	6.47	2.279
	2nd	0:16:56	0:16:53	7.11	6.64	2.402
2021/6/25	1st	0:17:58	0:17:55	6.70	6.20	2.908
	2nd	0:18:08	0:18:04	6.64	6.13	2.864
2021/7/21	1st	0:19:22	0:19:19	6.22	※2	3.358
	2nd	0:19:40	0:19:38	6.13		3.282
2021/8/20	1st	0:19:18	0:19:15	6.25	5.32	3.112
	2nd	0:19:37	0:19:35	6.14	5.25	3.047
2021/9/16	1st	0:19:59	0:19:55	6.03	※2	3.749
	2nd	0:20:20	0:20:16	5.92		3.413
2021/10/15	1st	0:19:49	0:19:48	6.06	4.87	3.421
	2nd	0:19:57	0:19:54	6.04	4.91	3.395

※1：計測データ破損

※2：流速計の空きがなくレンタルできなかった

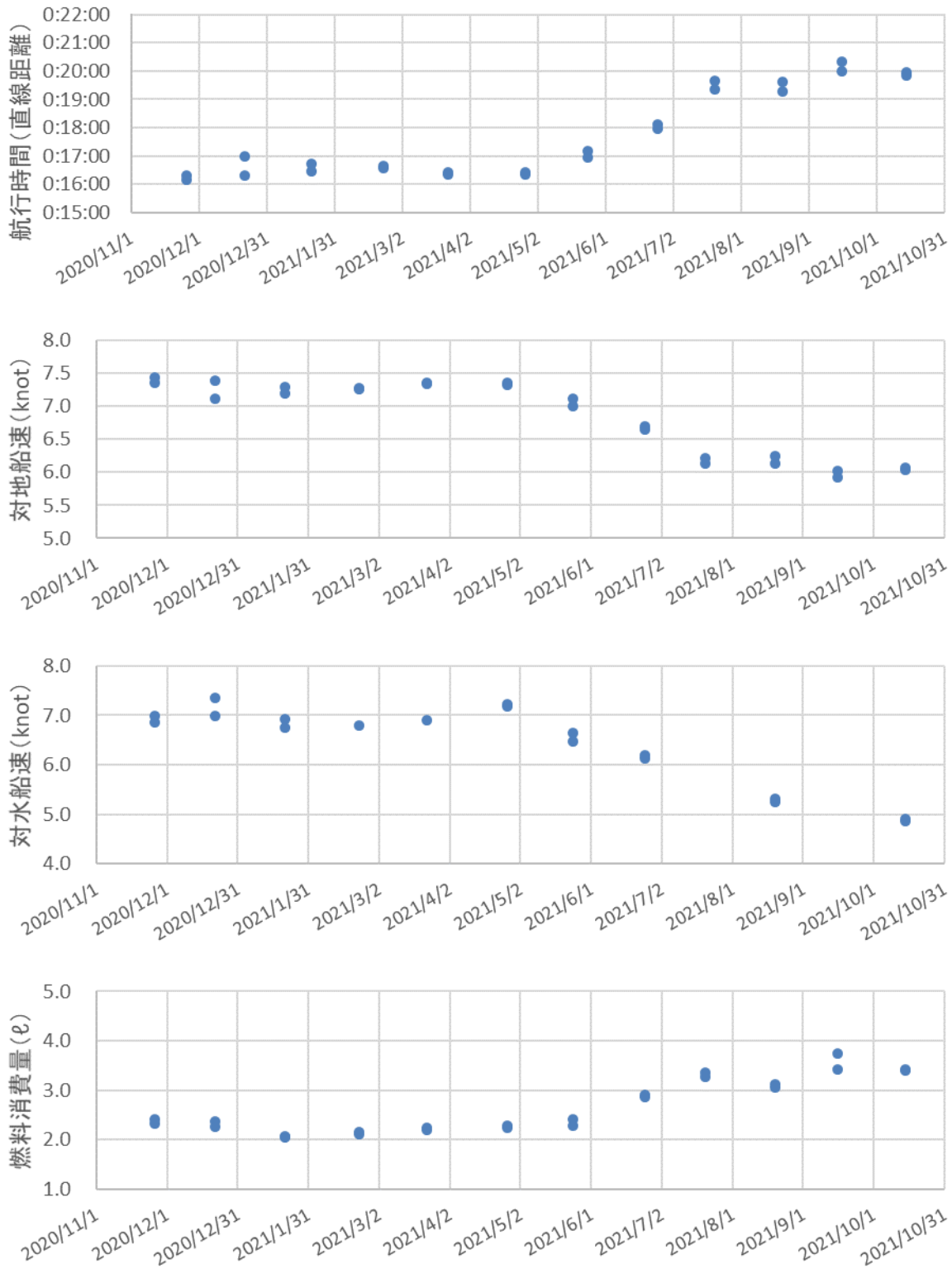


図9 航行試験計測結果 (往復平均)

3.1.5 プロペラ表面観察

プロペラへの生物付着状況の確認のため、航行試験の前後に水中ドローンを用いてプロペラ表面の観察を行った。図10に使用した水中ドローンの外観を示す。

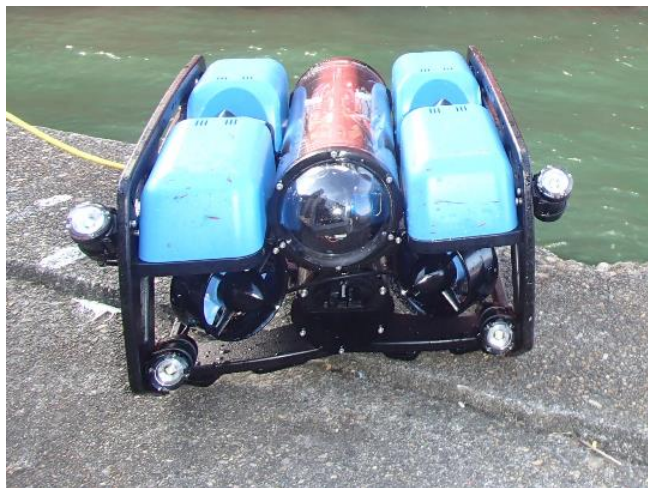


図10 水中ドローン外観

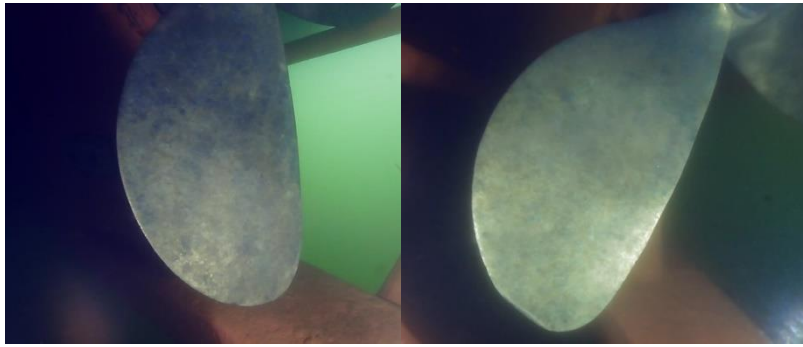
また、図11-1、11-2、11-3に撮影したプロペラ表面の様子を示す。航行試験開始から3ヶ月程度経過した2021年2月まではプロペラ表面に汚損は確認できない。2021年3月の観察で初めて表面に藻類の付着が確認できた。ただし、この付着していた藻類は航行試験後にはほぼすべて脱落しており、燃費への影響はないと考えられる。航行試験後に明確な生物付着が確認できたのは、2021年5月の計測からであり、プロペラ表面の根元側周縁にフジツボの付着が見られた。5月以降（海水温では20℃以上となる期間）海生生物の付着は急速に進み、11月時点ではフジツボに加えてゴカイ類がプロペラおよび船体全面を覆う状況となっている。

航行試験計測結果で燃費の悪化が見られたのは2021年5月の計測からであり、これはプロペラへのフジツボ付着が見られた時期と一致している。

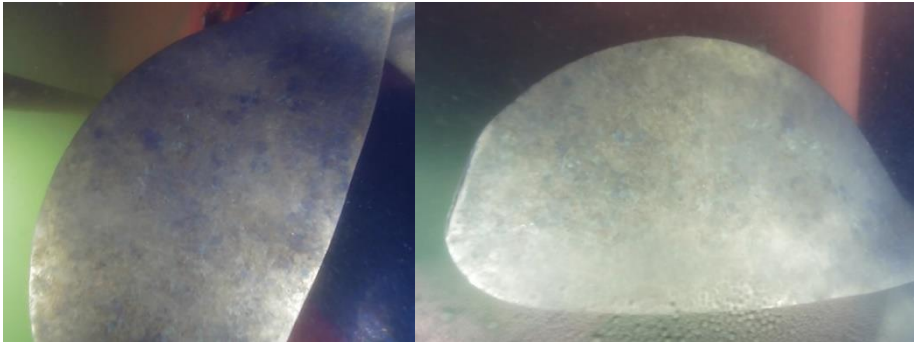
航行試験前

航行試験後

2020/11/26



2020/12/22



2021/1/21



データ破損

2021/2/22



2021/3/23



図 1 1 - 1 プロペラ表面の様子 (2020/11-2021/3)

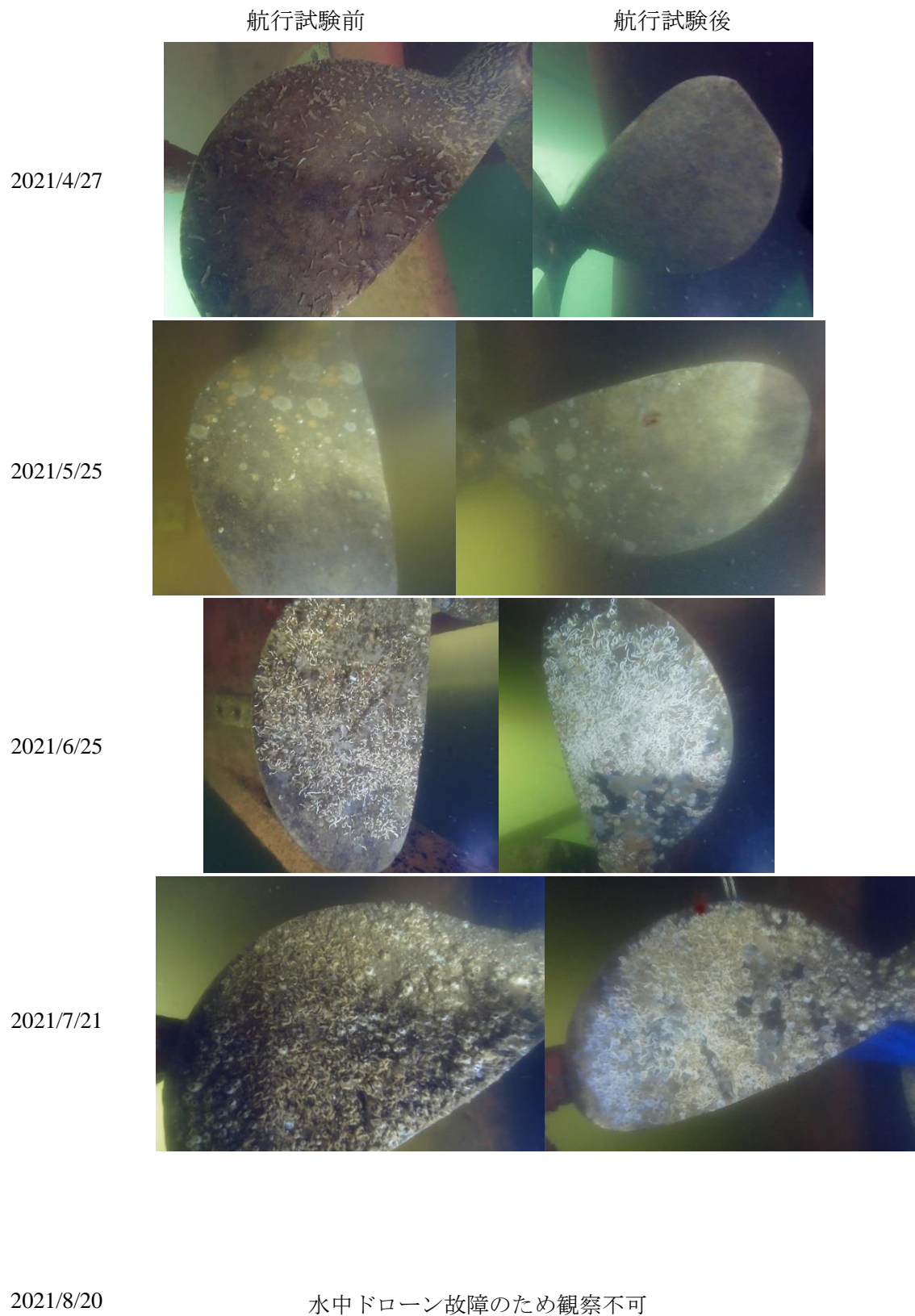


図 1 1 - 2 プロペラ表面の様子 (2021/4-2021/8)

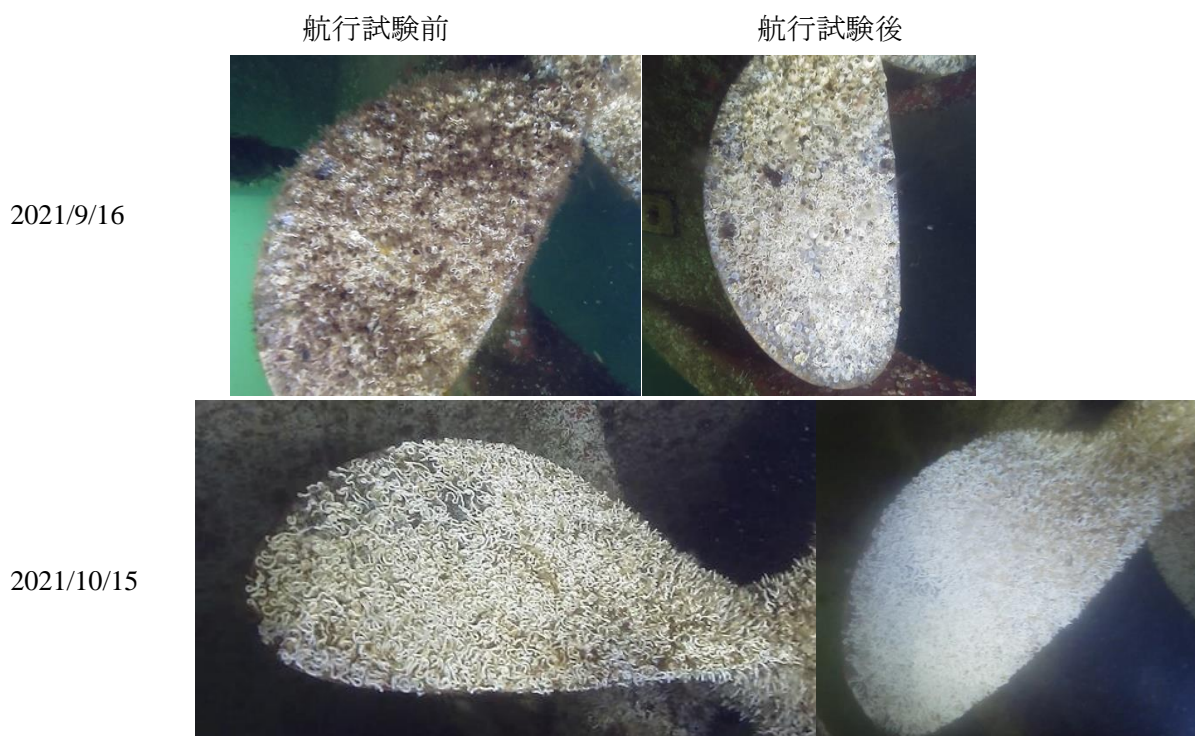


図 1 1 - 3 プロペラ表面の様子 (2021/9-2021/10)

3.1.6 小型船舶の燃費経年劣化傾向の把握

本節では、1年間にわたり計測した供試船舶の結果から、生物付着による燃費悪化の程度を評価する。表 6 および図 1 2 に対地船速 7.5knot 相当に換算した燃料消費量を示す。

2020 年 11 月から 2021 年 4 月までは汚損の影響がないと考え同期間の燃料消費量の平均を基準とすると、基準燃料消費量は 2.407ℓ となる。また、生物付着による燃費悪化は 2021 年 5 月から 2021 年 9 月まで一定の速度で進行したと仮定する。図 1 3 に燃料消費量増加の模式図を示す。生物付着による燃料消費量増加の傾きは 0.0347ℓ/日であり、供試船舶が生物付着の発生する期間に停泊していた場合、燃料消費量は停泊 1 日あたり 0.0347ℓ 増加していくこととなる。

大型船では馬力増加率として評価しているため、供試船舶においても燃料消費量の増加率を算出すると生物付着による燃料消費量増加率は 1.44%/日となった。図 1 4 に燃料消費量増加率の模式図を示す。

表6 7.5knot 換算燃料消費量 (往復平均)

往復平均		消費燃料 (ℓ)	7.5knot 換算消費燃料 (ℓ)	7.5knot 換算平均消費燃料 (ℓ)
2020/11/26	1st	2.409	2.466	2.468
	2nd	2.338	2.470	
2020/12/22	1st	2.267	2.655	2.574
	2nd	2.379	2.492	
2021/1/21	1st	2.073	2.252	2.277
	2nd	2.038	2.302	
2021/2/22	1st	2.108	2.329	2.347
	2nd	2.159	2.365	
2021/3/23	1st	2.188	2.324	2.360
	2nd	2.246	2.396	
2021/4/27	1st	2.288	2.423	2.418
	2nd	2.247	2.413	
2021/5/25	1st	2.279	2.795	2.808
	2nd	2.402	2.822	
2021/6/25	1st	2.908	4.077	4.097
	2nd	2.864	4.118	
2021/7/21	1st	3.358	5.900	5.957
	2nd	3.282	6.014	
2021/8/20	1st	3.112	5.384	5.472
	2nd	3.047	5.560	
2021/9/16	1st	3.749	7.216	7.069
	2nd	3.413	6.923	
2021/10/15	1st	3.421	6.472	6.490
	2nd	3.395	6.508	

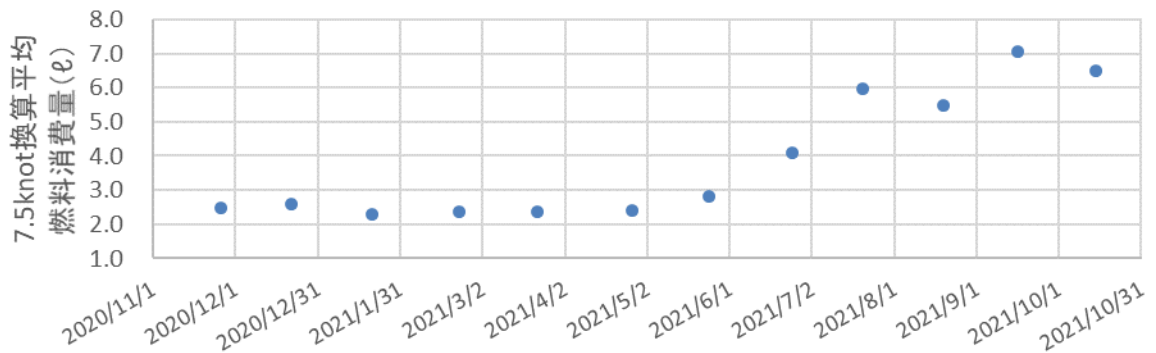


図1.2 7.5knot 換算燃料消費量の推移

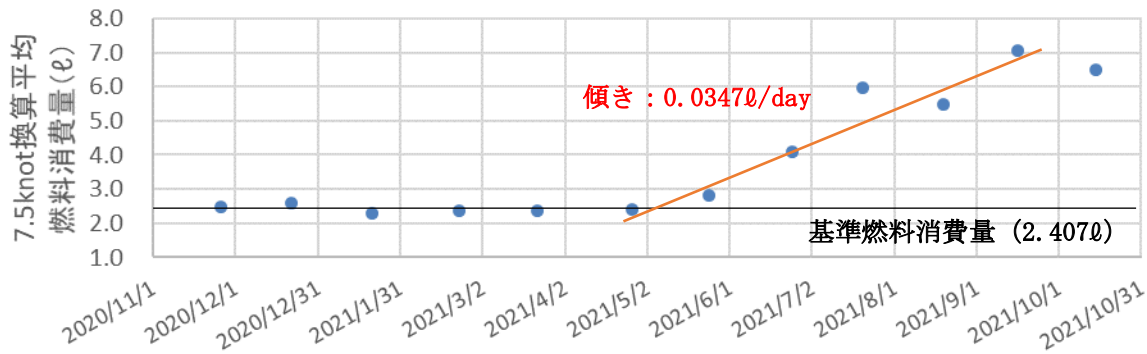


図 1.3 基準燃料消費量および燃料消費増加量の模式図

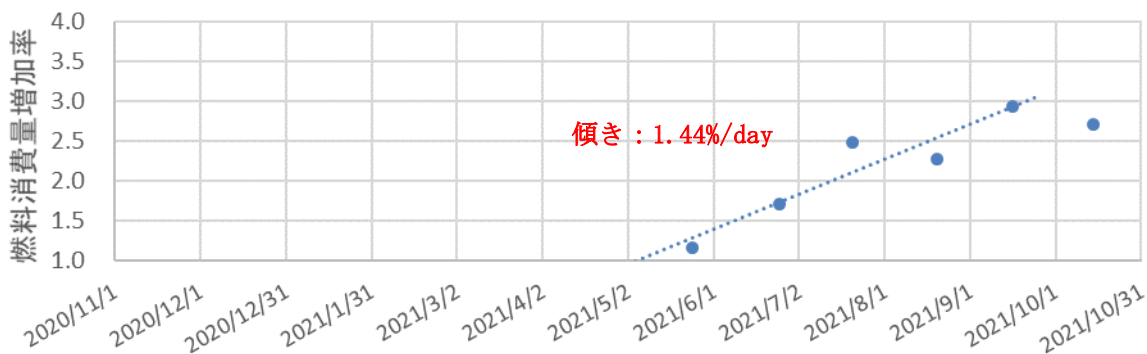


図 1.4 燃料消費量増加率の模式図

3.2 通電あり試験の計画

2021年11月より生物付着防止のためプロペラへの通電を行い、通電なし試験と同様に1年間の経年劣化状況の把握を行う予定としている。ここでは、プロペラへの通電に当たり必要となる、通電量および通電に必要な陽極の形状、配置の検討、陽極の設置方法の検討を行った。

3.2.1 プロペラ面積を基とした必要通電量の算定

通電量が大きければ生物付着は抑えられるが、短期間で電着被膜が生成してしまう。電着被膜は海水中に溶存しているカルシウムイオン、マグネシウムイオンが通電により石灰質被膜（炭酸カルシウム、水酸化マグネシウムから成る沈着物）として図1.5のように析出生成されたものである。

電着被膜が生成されるとプロペラ表面の粗度が増し、燃費悪化につながる。電着被膜が生成されずかつ生物が付着しない最低限の通電量として、先行する要素試験により単位面積あたりの通電量 $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を割り出している。使用する小型船舶のプロペラについては図面がないため、写真解析や現物実測によりプロペラ面積を割り出し、単位面積あたりの通電量を $0.25\text{A}/\text{m}^2$ として必要通電量を算定した。

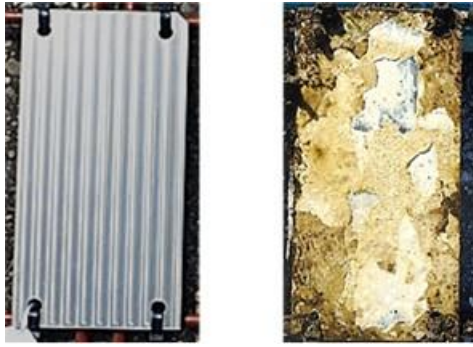


図 1 5 通电により形成された電着被膜（左：通电前、右：通电 1 か月後）

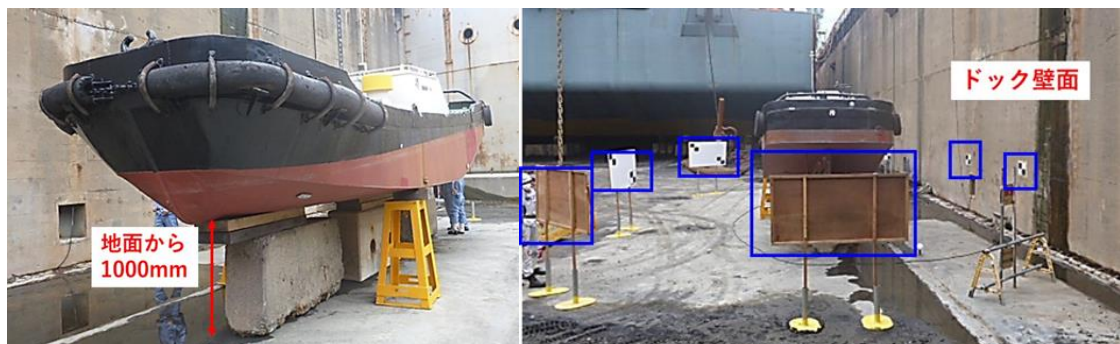
1) プロペラおよび船体の 3 次元計測

JMU アムテックのドックに陸揚げされた供試船舶に対して、FARO 製 3D レーザースキャナ FARO Focus3D を用いて船体およびプロペラ単体の形状を計測した。図 1 6 にドック内の供試船舶の様子を示す。計測により得られたスキャンデータを結合し、点群データに変換した。



図 1 6 ドック内に置かれた供試船舶の様子

船体はコンクリート盤木を使用し、船底がドック底面から高さ約 1.0m の位置となるように設置し、船体の周囲には 2~5m の空間を設けた。また、3D レーザースキャナのターゲットを配置する関係で、船体側面にドック壁面がある位置とした。図 1 7 に船体の設置高さおよび 3D レーザースキャナターゲットの配置を示す。



□ : ターゲット

図 1 7 船体設置高さおよび 3D レーザースキャナターゲットの配置

船体の形状計測においては、チェック状ターゲット（A4 サイズ）を全 16 箇所、球状ターゲットを 5 箇所設置し、測定位置は供試船舶の周囲 9 箇所とした。図 1 8 にチェック状ターゲットおよび球状ターゲットの模式図を示す。ターゲットは、各測定位置で取得したスキャンデータのつなぎ合わせに使用するものである。図 1 9 にターゲット設置箇所および測定位置の模式図を、図 2 0 にターゲット設置後の外観を示す。



図 1 8 チェック状ターゲットおよび球状ターゲットの模式図

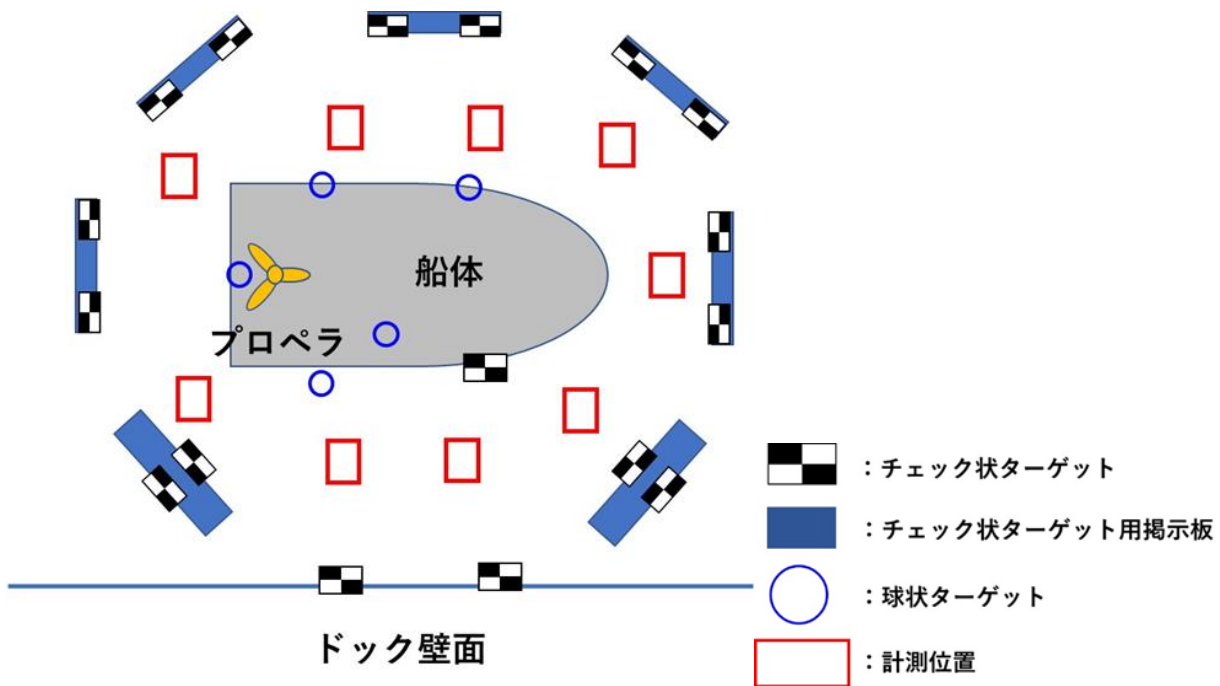


図 1 9 船体形状計測におけるターゲット設置箇所および測定位置の模式図

プロペラ単体の形状計測においては、図 2 1 に示す位置関係でターゲット設置ならびに形状計測を実施した。プロペラ形状計測時の外観を図 2 2 に示す。

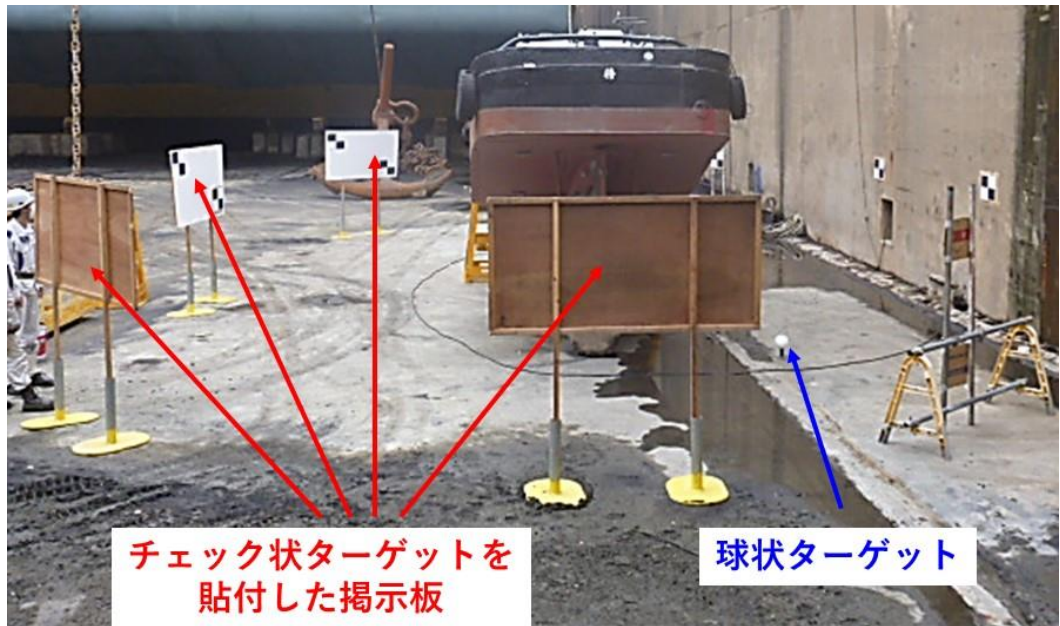


図 2 0 船体形状計測におけるターゲット設置後の外観

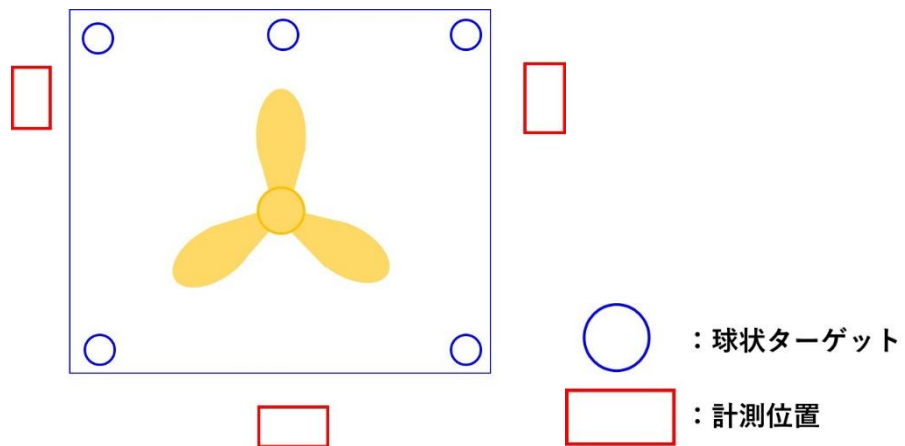


図 2 1 プロペラ単体の形状計測におけるターゲット設置箇所および測定位置の模式図

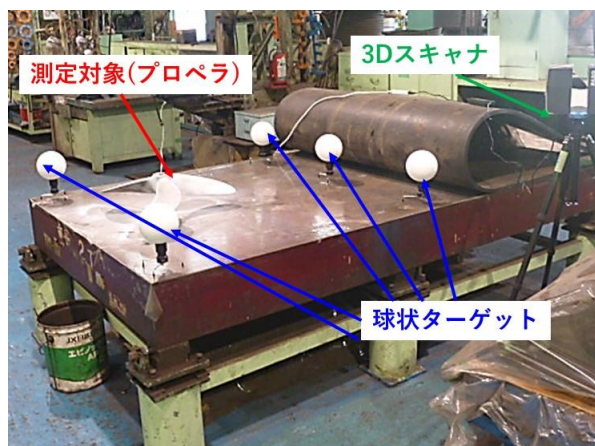


図 2 2 プロペラ形状計測時の外観

3D レーザースキャナ専用解析ソフト（FARO 製 FARO SCENE）により、各計測箇所から得られたスキャンデータをターゲットとして用いて結合した。また、同解析ソフトを用いてスキャンデータを点群データに変換し、点群処理ソフトを用いて点群データ内のノイズデータを除去した。図 2 3 に船体の点群データを、図 2 4 にプロペラの点群データを示す。

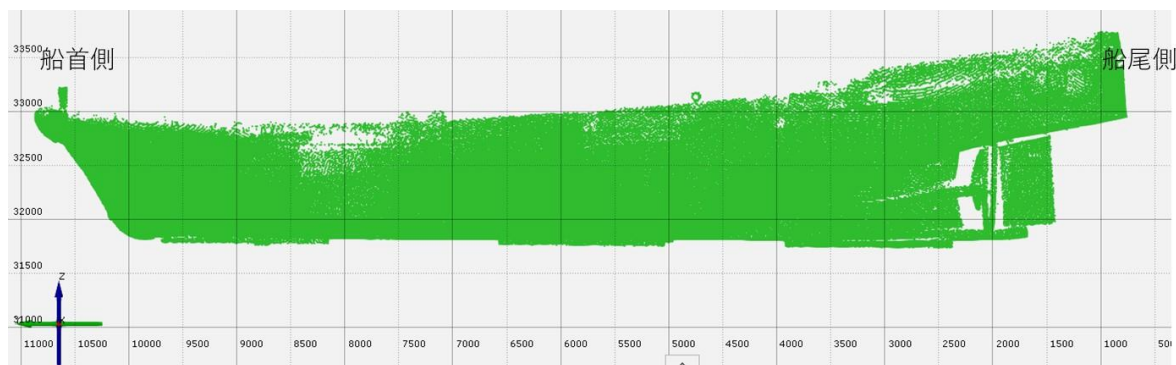


図 2 3 船体の点群データ（側面図）

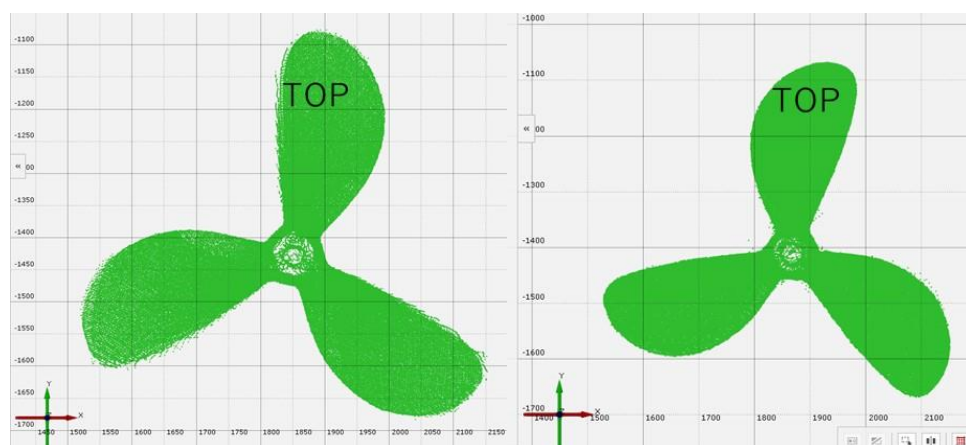


図 2 4 プロペラの点群データ（左：船首側、右：船尾側）

2) 3D CAD モデルの作成とプロペラ面積および通電電流量の算出

3D スキャンより得られた点群データから CAD モデルを作成可能なソフト（データ・デザイン製 Geomagic DesignX）を使用して、1) で得られた船体およびプロペラの点群データから CAD モデルを作成した。点群データよりモデリングした船体およびプロペラ CAD モデルの外観を図 2 5 および図 2 6 に示す。CAD モデルは実測データの 5mm 以内の公差で作成した。

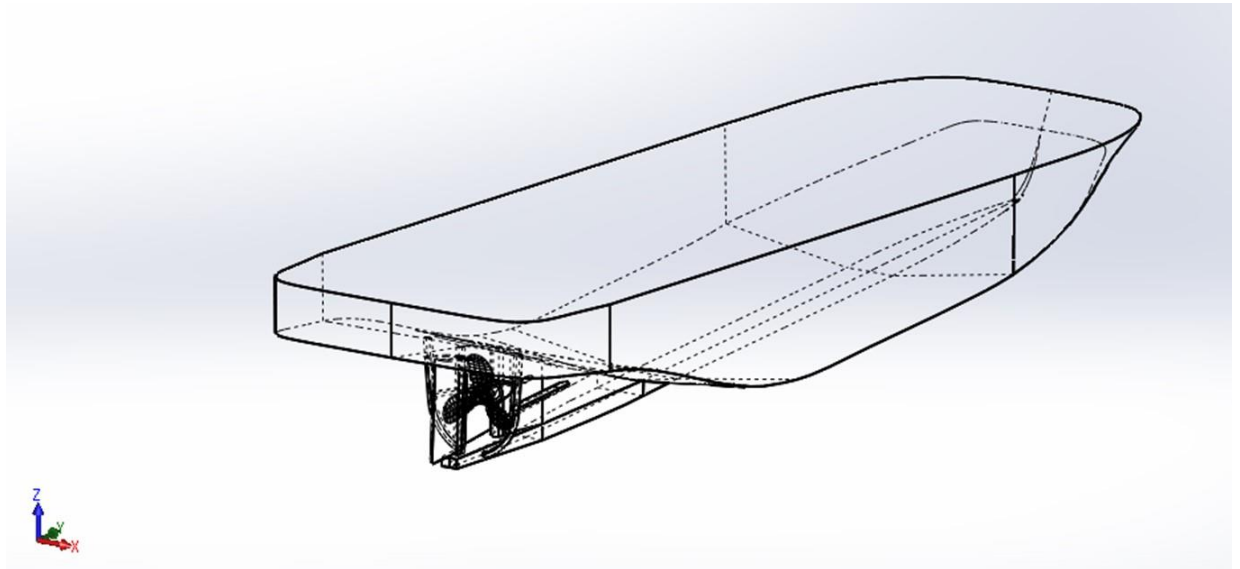


図 2 5 船体形状

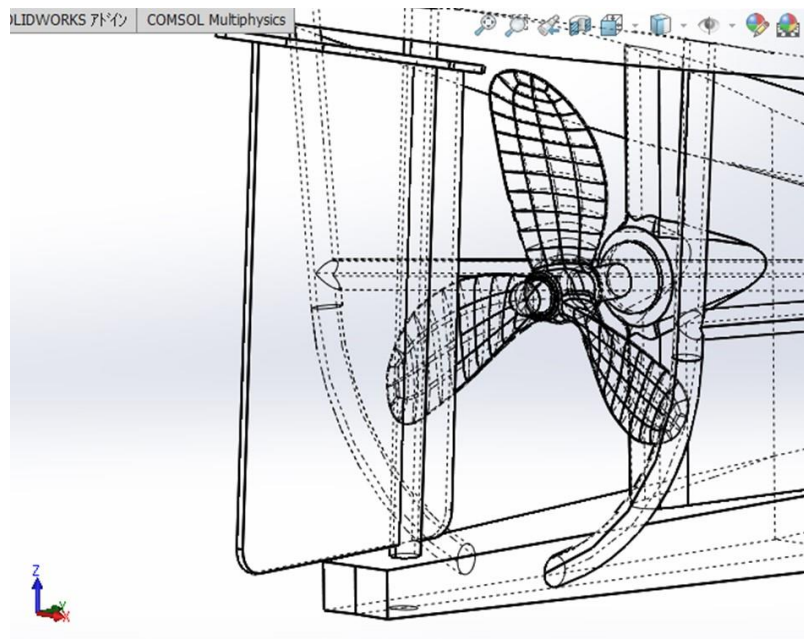


図 2 6 プロペラ周りの形状

CAD モデルを基にプロペラの表面積を算出した。表面積計測対象部分の外観を図 2 7 および図 2 8 に、表面積計測結果を表 7 に示す。計測の結果、プロペラの表面積は約 0.295m^2 であることがわかった。

防汚に必要な単位面積あたりの通電量は $0.25\text{A}/\text{m}^2$ であるため、供試船舶のプロペラの防汚に必要な通電量は $0.25\text{A}/\text{m}^2 \times 0.3\text{m}^2 (\approx 0.295\text{m}^2)$ となることから 0.075A とし、 0.075A を次節で示す通電シミュレーションのインプットデータとして用いることとした。

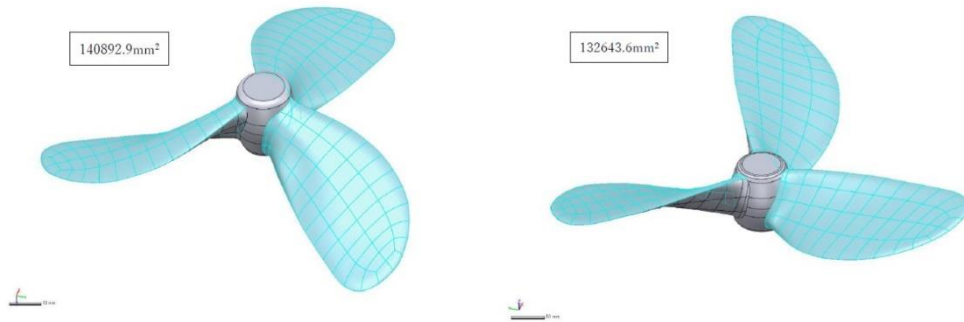


図 2 7 プロペラの表面積計測対象部（左：船首側、右：船尾側）

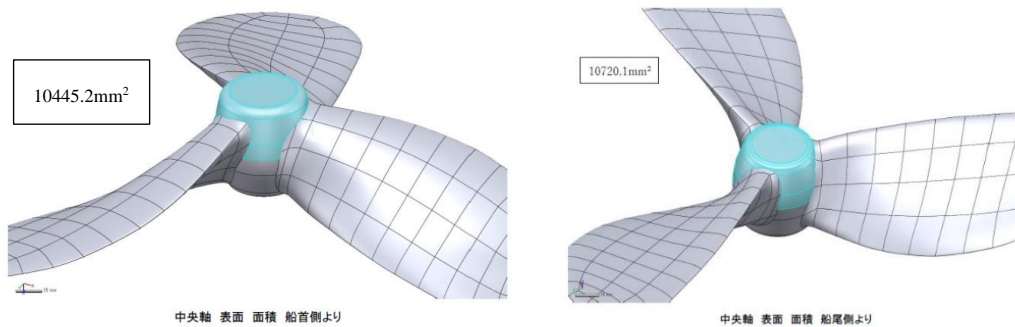


図 2 8 プロペラボスの表面積計測対象部（左：船首側、右：船尾側）

表 7 プロペラ表面積の計測結果

	表面積 (m ²)
プロペラ (船首側)	0.14089
プロペラ (船尾側)	0.13264
ボス (船首側)	0.01045
ボス (船尾側)	0.01072
合計	0.29470

3.2.2 シミュレーションを用いた陽極配置検討

通電による生物付着抑止を効率的に行うためには、少ない通電量、かつプロペラ表面の通電量が均一でムラがないものにする必要がある。ムラがあると通電量が多いところでは電着被膜が生成し、少ないところでは生物付着抑止効果が薄れてしまう。複雑な形状をしたプロペラ表面での通電量を均一にするためには、陽極をどこにどの程度配置するかが重要であり、通電シミュレーションにより試験対象の小型船舶における陽極配置を決める。

点群データより作成した船体の 3D CAD モデル（図 2 5 および 2 6）から有限要素解析が可能なモデルを作成した。

解析領域は図 2 9 に示すとおり X : 20,000mm、Y : 20,000mm、Z : 10,000mm のサイズとした。船体は通電対象部であるプロペラを含む船尾周りのみとし、図 3 0 に示すとおり船体領域を解析対象とした。

通電シミュレーションによる数値解析は、以下の条件に基づき実施した。

<ソフトウェア>

- ・プリポスト処理：シーメンス PLM ソフトウェア製 FEMAP V11.3.2
- ・ソルバー：ムサシ技研合同会社製 電流分布解析システム 膜厚案内人 Ver9.5

<解析条件>

- ・FEM 解析格子：四面体 1 次要素
- ・解析領域（海水の範囲）：20 m（幅）× 20 m（奥行）× 10 m（水深）
- ・電解液：自然海水（電気伝導度 4.7882 S/m、温度 25℃）
- ・陰極（プロペラ）の材質：アルミ青銅鋳物第 3 種（ALBC3）
- ・陰極（プロペラ）表面積：0.3 m²（軸部分含む）
- ・陰極設定電流密度：-0.25A/m²（全電流：0.075A）
- ・陽極：酸化イリジウムコーティングチタン
- ・陽極配置箇所：図 3 4、図 3 5 参照
- ・分極特性：

$V = A_0 + A_1 \times I + A_2 \times \log(I)$ （V：過電圧、I：電流密度、log：底 10 の常用対数）

陰極側の係数：A0 = 0.9098、A1 = 0.0、A2 = 0.4611（A2 = 0.2002 × 2.303）

陽極側の係数：A0 = 0.0、A1 = 0.0009、A2 = 0.0

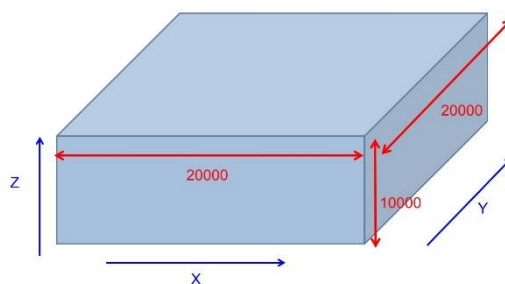
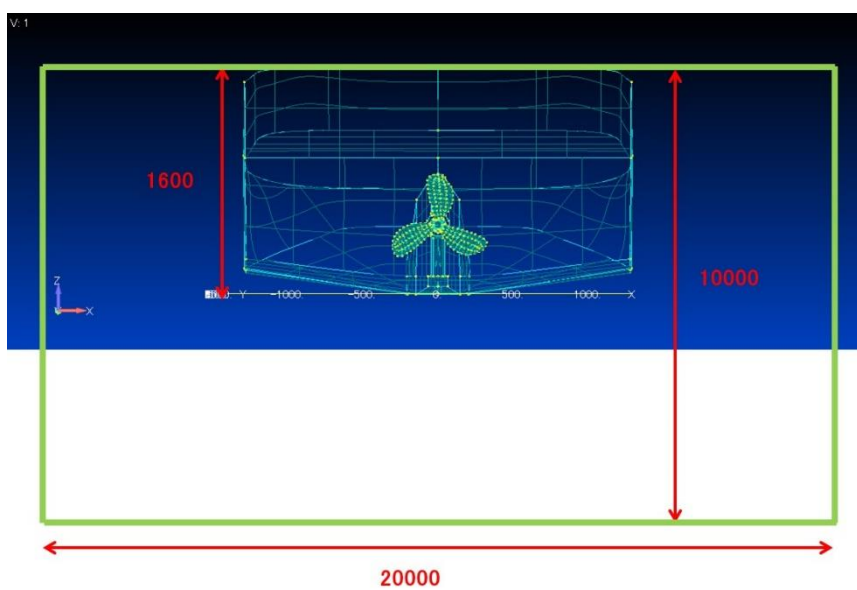
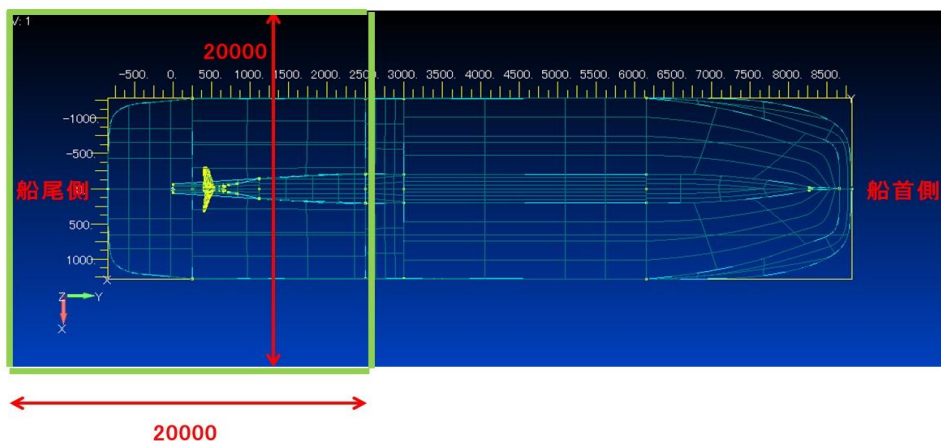


図 2 9 通電シミュレーション解析領域

船体のモデルをX座標: 2500の位置で
切断する。



船体のモデルをここで切断する。

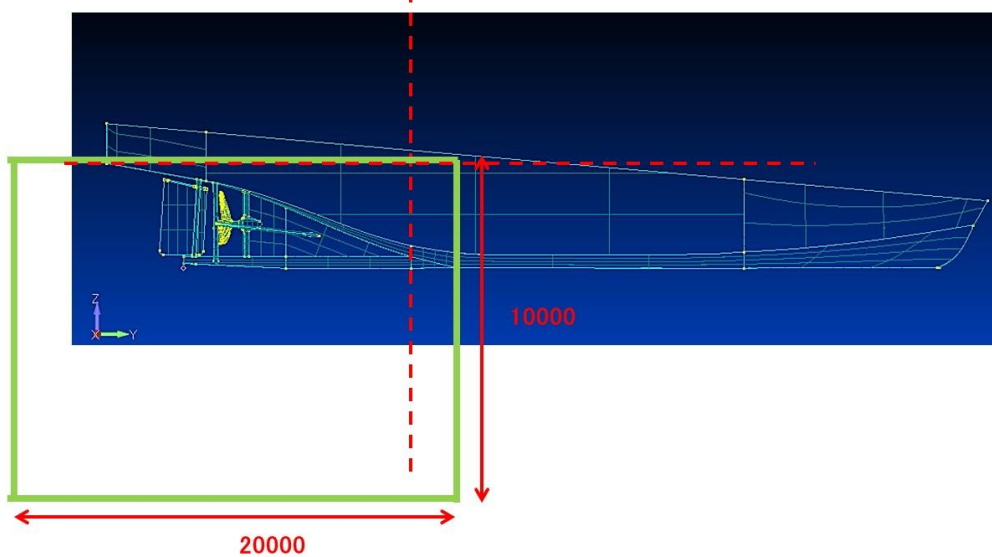
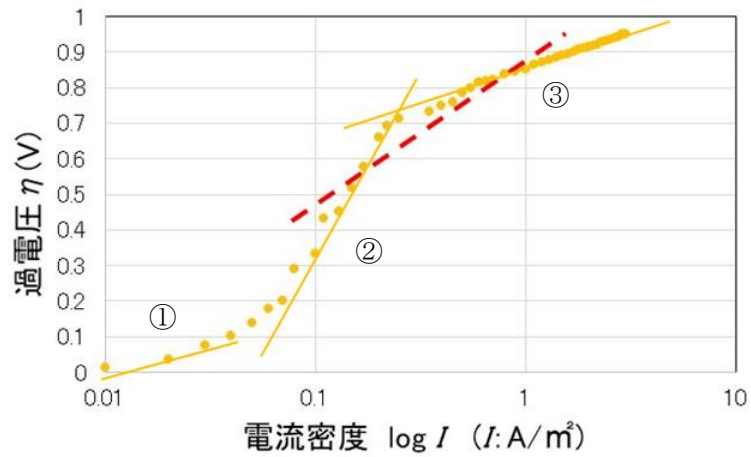


図30 通電シミュレーション解析範囲 (船体)

通電シミュレーションに用いた陰極分極曲線を図3-1、陽極分極曲線を図3-2に示す。生物付着防止に必要な反応は、遷移域（図3-1の②）よりも高い電流密度にて起こることから、②と③それぞれの傾きを平均化した傾き（図3-1の点線）を陰極分極のインプットデータとした。

FEMAPにて作成した解析モデル全体を図3-3に示す。



----- : インプットデータとして用いた傾き

図3-1 陰極分極曲線

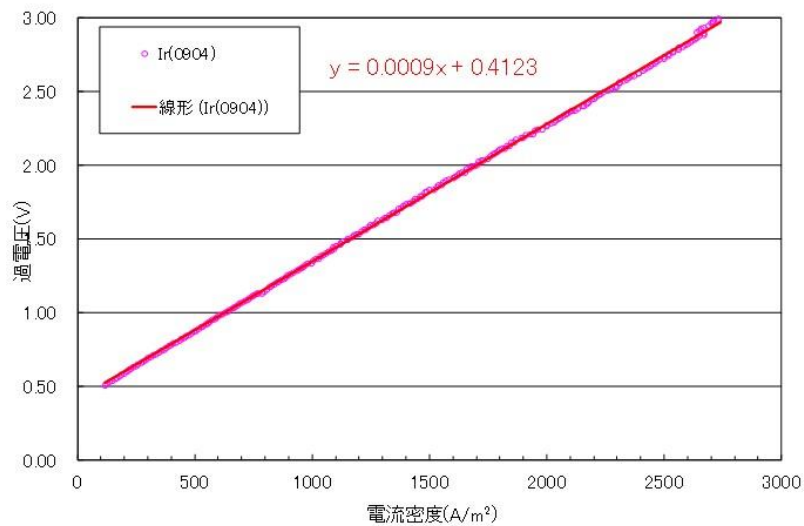


図3-2 陽極分極曲線

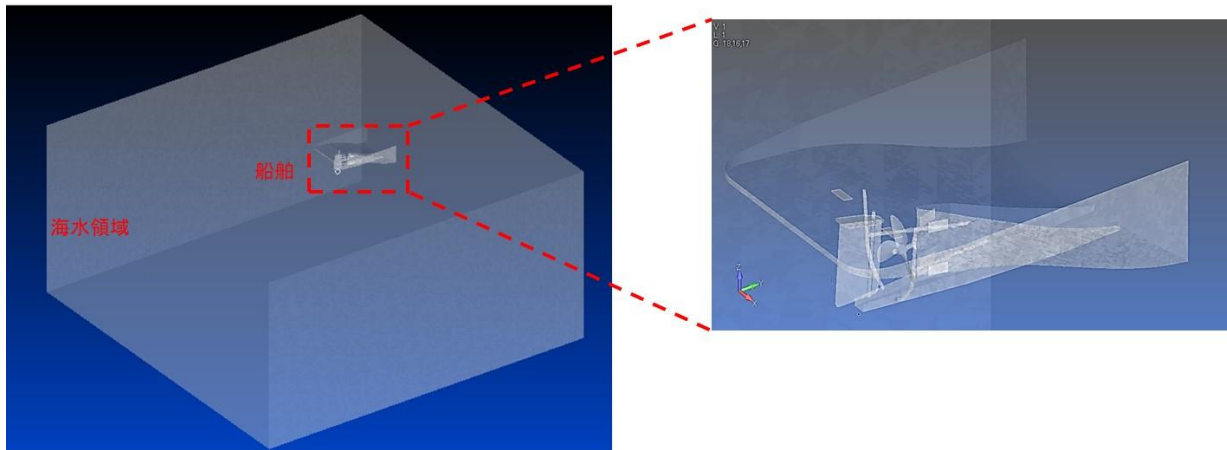


図 3 3 解析モデル全体外観

陽極の配置箇所として、プロペラ面全体に対して均一に通電できること、取り外しが容易かつ可能な部位であること、走行中に船体抵抗や走行の妨げにならないことが前提となる。この点を考慮し、プロペラの前方船首側に 4 箇所、プロペラ後方上部に 2 箇所陽極を配置する案について検討した。検討案に基づき、作成した有限要素解析モデルを図 3 4 に示す。陽極の寸法は、縦×横×厚み=100mm×100mm×5mm とし、陽極の位置を図 3 5 に示す。

解析後のプロペラ船首側、船尾側それぞれの電流密度分布のコンター図を図 3 6 に示す。また、図 3 7 に示すプロペラ面の船首側①～⑨および船尾側①'～⑨'における電流密度を表 8 に示す。

船首側、船尾側ともに、プロペラ先端部分（①、④、⑦、①'、④'、⑦'）は電流密度が高いのに対し、プロペラボスの周辺（③、⑥、⑨、③'、⑥'、⑨'）は電流密度が低いことがわかった。また、船首側においては電流密度分布が $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を基準とし、 $-15.6\sim+17.6\%$ の範囲内であったのに対し、船尾側においては、 $-19.5\sim+18.0\%$ と、船首側よりもばらつきが大きいことがわかった。これは、陽極がプロペラの船首側に設置してあることから船首側の方が均一に通電されやすかったためと考えられる。船首側のみに 4 箇所陽極を配置する案、船首側に 4 箇所さらにはプロペラ後方に 4 箇所の計 8 箇所陽極を配置する案についても検討したが、前者は船尾側における電流密度分布のばらつきが大きいこと、後者に関しては顕著な電流分布改善が見られなかったことや設置の手間を考慮し、本検討条件を適正配置と考えた。

これらの検討結果より、電流密度分布は $-19.5\sim+18.0\%$ の範囲となり、 $\pm 20\%$ 以内とする目標を達成することができた。

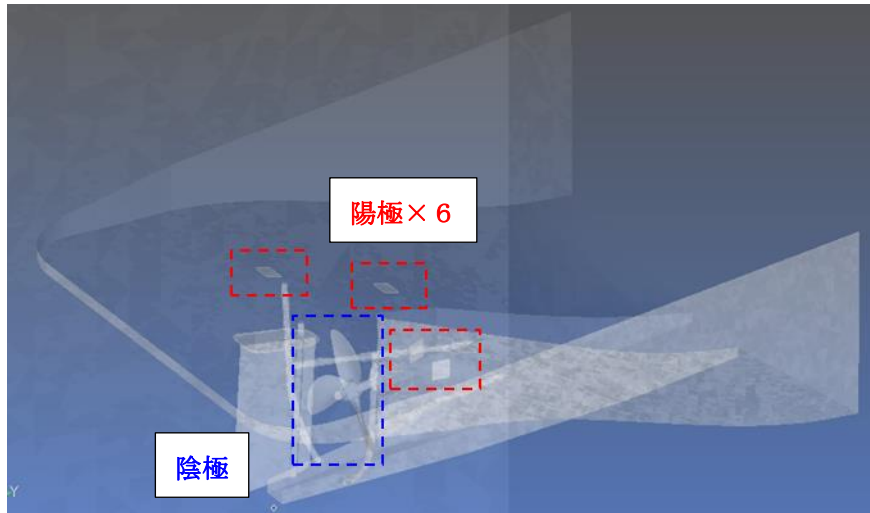


図 3 4 陽極を 6 箇所配置した有限要素解析モデル

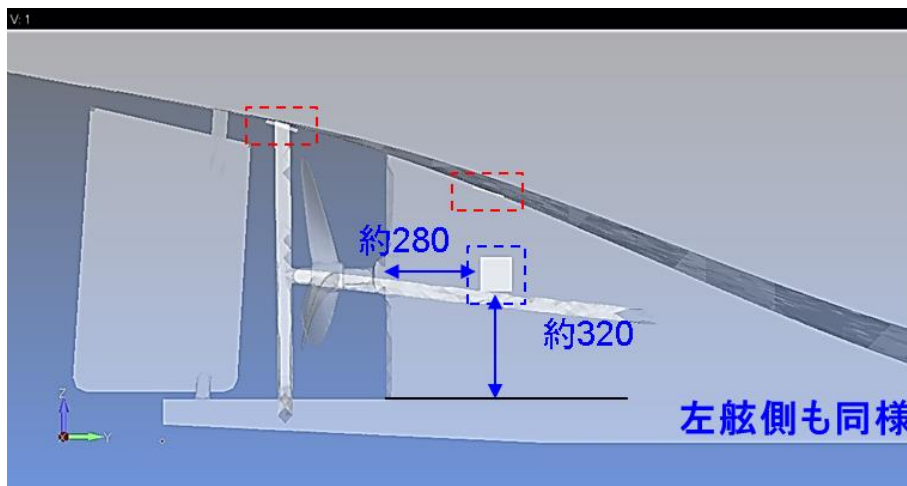
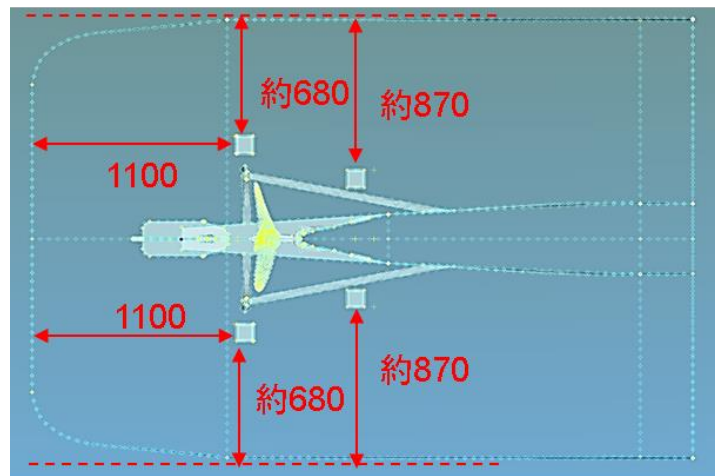


図 3 5 陽極配置

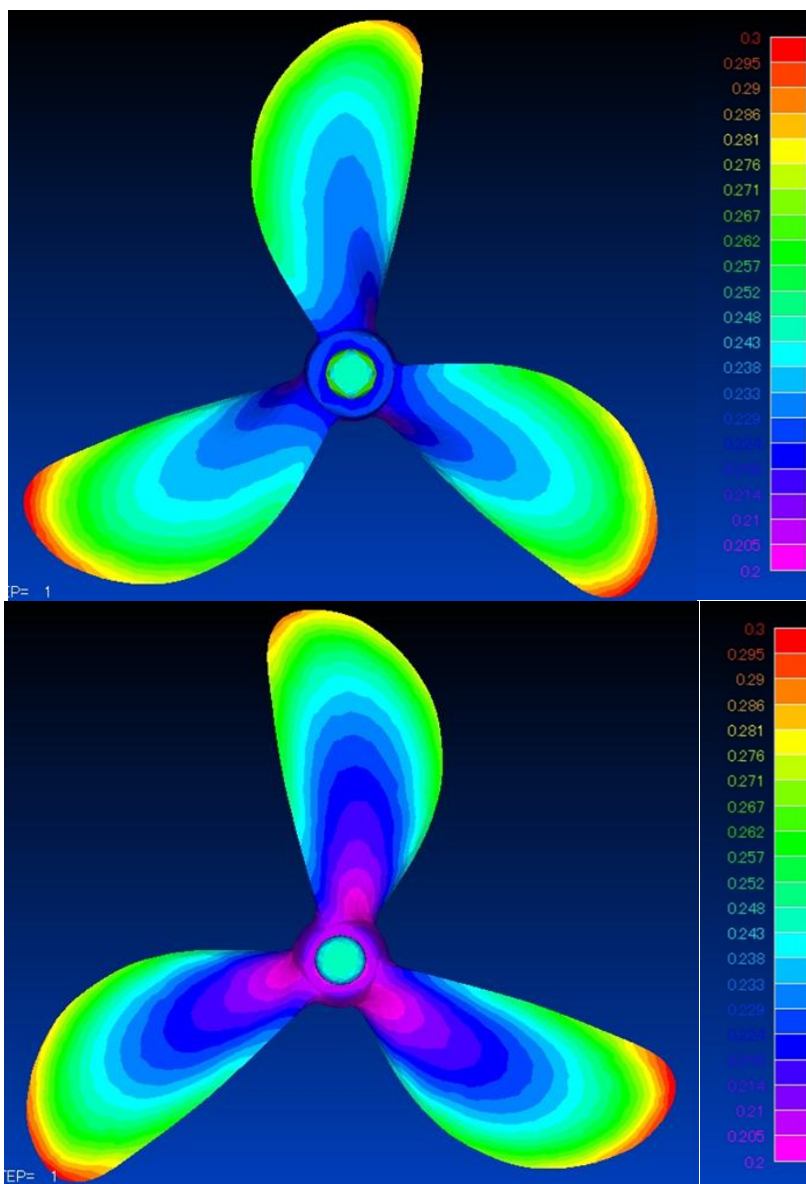


図 3 6 プロペラ表面の電流密度分布 (上段：船首側、下段：船尾側)

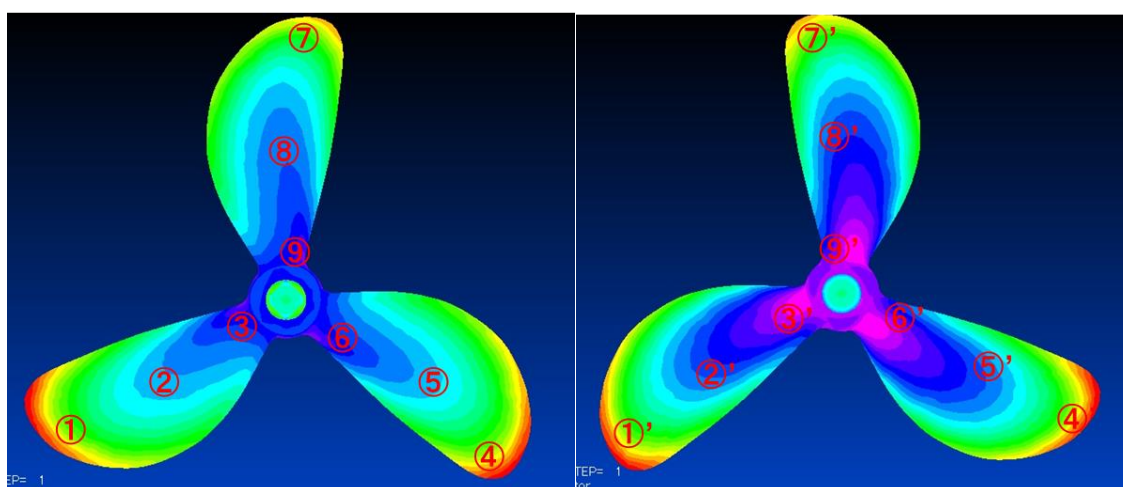


図 3 7 プロペラ表面の電流密度計測位置 (左：船首側、右：船尾側)

表8 プロペラ表面の電流密度計測結果

船首側	電流密度I (A/m ²)	船尾側	電流密度I (A/m ²)
①	0.294	①'	0.295
②	0.233	②'	0.234
③	0.211	③'	0.204
④	0.294	④'	0.294
⑤	0.225	⑤'	0.220
⑥	0.213	⑥'	0.201
⑦	0.287	⑦'	0.284
⑧	0.230	⑧'	0.221
⑨	0.213	⑨'	0.203
最小	0.211	最小	0.201
最大	0.294	最大	0.295
マイナス側誤差	-15.6	マイナス側誤差	-19.5
プラス側誤差	17.6	プラス側誤差	18.0

3.2.3 装置選定、設置方法の検討

必要通電量に対応した電源を選定し、試験に供する小型船舶内での設置方法を検討した。また小型船舶船底への陽極設置方法を検討するとともに、配線方法について検討した。

1) 装置選定

必要電流量および通電シミュレーション結果を基に、電源に求められる条件を以下のように設定した。

- ① 通電時の電圧が10V程度となっても支障がないこと
- ② 設定電流値が0.075A（最低電流量）であることから分解能が0.001A（=1mA）であること
- ③ 電源の可搬性および船体搭載時の排水量への影響を小さくするため、1台当たりの重量が10kg程度までに収まること

上記要求を満たす電源を4機種選定した。表9に電源の候補一覧を示す。性能・重量のバランスおよびノイズ特性、さらには通電に必要な電流を0.1mAまで設定可能であることから菊水電子工業製コンパクト直流安定化電源PMX-18-5Aを使用することとした。また、シミュレーション結果から必要となる陽極数が6個となり、左右対称の配置であること、陽極2個に対し、電源1台にて均一に通電可能という観点から電源の台数は3台とした。電源の外観を図38に示す。

電源は供試船舶の船倉内に電源区画を設け、船倉内に固定することとした。図39に船倉ハッチ位置を示す。

表 9 電源装置候補一覧

メーカー	製品名	型式	性能	重量 (kg)	備考
菊水電子工業	コンパクト・ ワイドレンジ 直流電源	PWR-401L	400W 設定電圧：0-40V 設定電流：0-40A 分解能：1mA	3	要素試験で利用
菊水電子工業	コンパクト直 流安定化電源	PMX-18-5A	設定電圧：0-18V 設定電流：0-5A 電圧分解能：1mV 電流分解能：0.1mA	6	上記モデルと比べ低ノイズ
高砂製作所	電着塗装用電 源システム	SD-EC- 400-M-S	最大電力：400W 設定電圧：0-320V 分解能：1mA	8	電荷量（クーロン値） のリアルタイム制御を 備え、CC 設定分解性能 が高い
高砂製作所	ズーム直流電 源	ZX-S-400M	設定電圧：0-320V 設定電流：0-5A 分解能：1mA	8	



図 3 8 電源外観



図 3 9 船倉位置

2) 陽極設置方法

通電シミュレーション結果から、通電用の陽極を船尾まわりの船体表面に 6 箇所設置することとなる。陽極は船体と電氣的に切り離す必要があり、かつ電線を船上へ引き上げてくる必要があることから、陽極の船体への設置方法の検討を行った。電線を船体表面に這わせると抵抗になる点、流れにより船体から剥離し断線する恐れがある点から、電線は船外に出さず船内で陽極との接点を設けることとした。

設定した陽極の設置方法の妥当性をモックアップ試験により確認したため、その流れを以下に示す。モックアップ試験では、ボルトと船体の絶縁に凸型絶縁ブッシュを使用していたが、陽極の締め付け時にブッシュが破損する恐れがあるため、実際の工事では絶縁チューブを用いることとしている。そのため、写真では凸型絶縁ブッシュが使用されている。

① 資材準備 (図 4 0)

止水用パッキン、模擬陽極、船体と陽極間の絶縁用パッキン、絶縁チューブ、ボルト、ナットを用意する

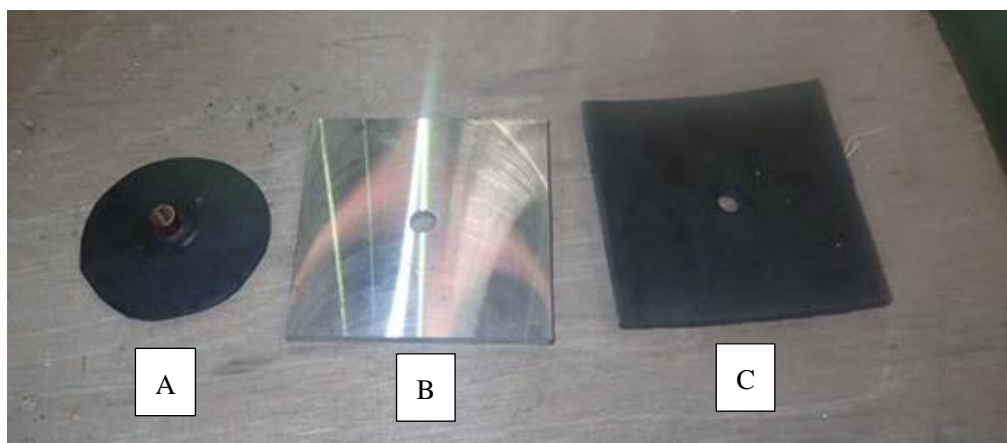




図 4 0 モックアップ試験用資材 (A : 止水用パッキン、B : 模擬陽極、C : 絶縁パッキン、D : 絶縁チューブ)

② 船体貫通穴開口、止水用パッキン設置 (図 4 1)

船体に貫通穴をあけ、絶縁チューブおよび止水パッキンを取り付ける



図 4 1 船内側の止水パッキン

③ 模擬陽極取り付け (図 4 2)

絶縁パッキンの上に模擬陽極を取り付け、ボルト・ナットで固定する

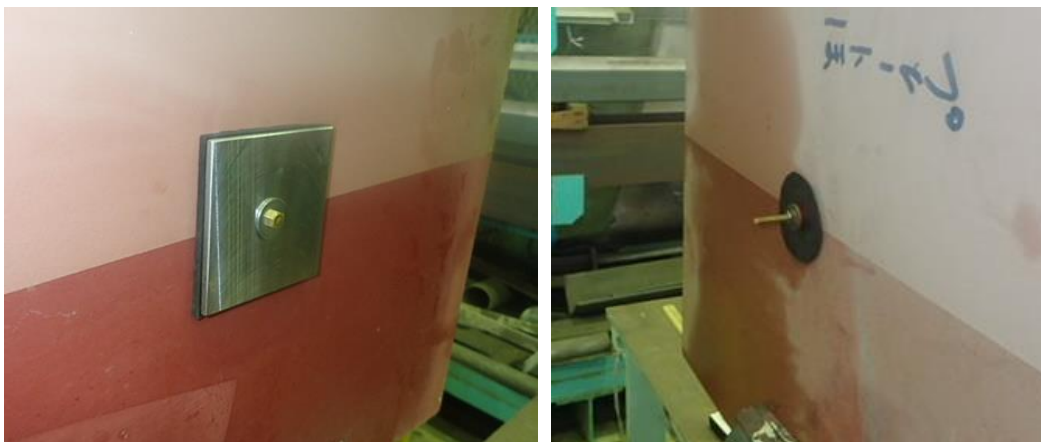


図 4 2 模擬陽極固定 (左 : 船外側、右 : 船内側)

④ 結線（図4-3）

圧着端子を取り付けた電線をボルトに取り付け陽極取り付け工事完了



図4-3 船内側配線

3.3 実運航船での効果の推定法検討

本事業では、小型船舶「椿」について、微弱電流を用いた舶用プロペラ生物付着防止装置の効果（消費燃料増加の抑制）に関するデータが得られる予定である。本装置を一般の大型船舶に適用するには、小型船舶のデータを基に大型船舶ではどのような効果となるか推定する方法が必要となる。小型船舶を用いた試験では、プロペラ係留運転が週1回、運航が月1回であるのに対し、一般の大型商船においては、停泊は年数回かつ1回数日程度、残りが運航状態という違いも存在する。実際の運航スケジュールと今回の試験結果を元に、一般の大型商船での効果を推定する手法を検討した。ただし現状においては通電試験が未実施なので以下の2点が不明である。

- ① 小型船舶の燃費悪化におけるプロペラの寄与率
- ② 通電による生物付着抑制率（燃費悪化抑制率）

①については後述する大型鉱石運搬船のモニタリングデータから寄与率がわかっているため、2020年度の推定においては小型船舶におけるプロペラの寄与率を大型船の寄与率に合わせる。②については暫定的に通電による生物付着抑制率は100%（通電によりプロペラ起因の燃費悪化はなくなる）として以降の検討を行った。

3.3.1 大型船の燃費経年劣化傾向の把握

JMUで建造した大型鉱石運搬船の就航後馬力増加率の推移を図4-4に示す。また本船の主要目を「椿」と比較して表1-0に示す。図4-4より、消費燃料は概ね年5%の割合で増加していることがわかる。また本船は就航後32か月目にドック入りし、プロペラ清掃を行っている。プロペラ清掃後には消費燃料の増加はプロペラ清掃前の約3割まで回復している。このことから消費燃料増加量のうち約7割がプロペラ起因であると考えられる。「椿」においては2020年11月～2021年4月の期間は生物付着がなく、消費燃料の増加は認められなかった。大型鉱石運搬船では11月～4月の停泊地は、ブラジル、

大分、名古屋、シンガポールであり、大分、名古屋では生物付着がなかった可能性もあるが、この点は無視して就航後1年間の停泊日数をカウントすると64.2日であった。従って、1日あたりの消費燃料増加率は、 $5\% \div 64.2$ 日から約0.08%と推定される。

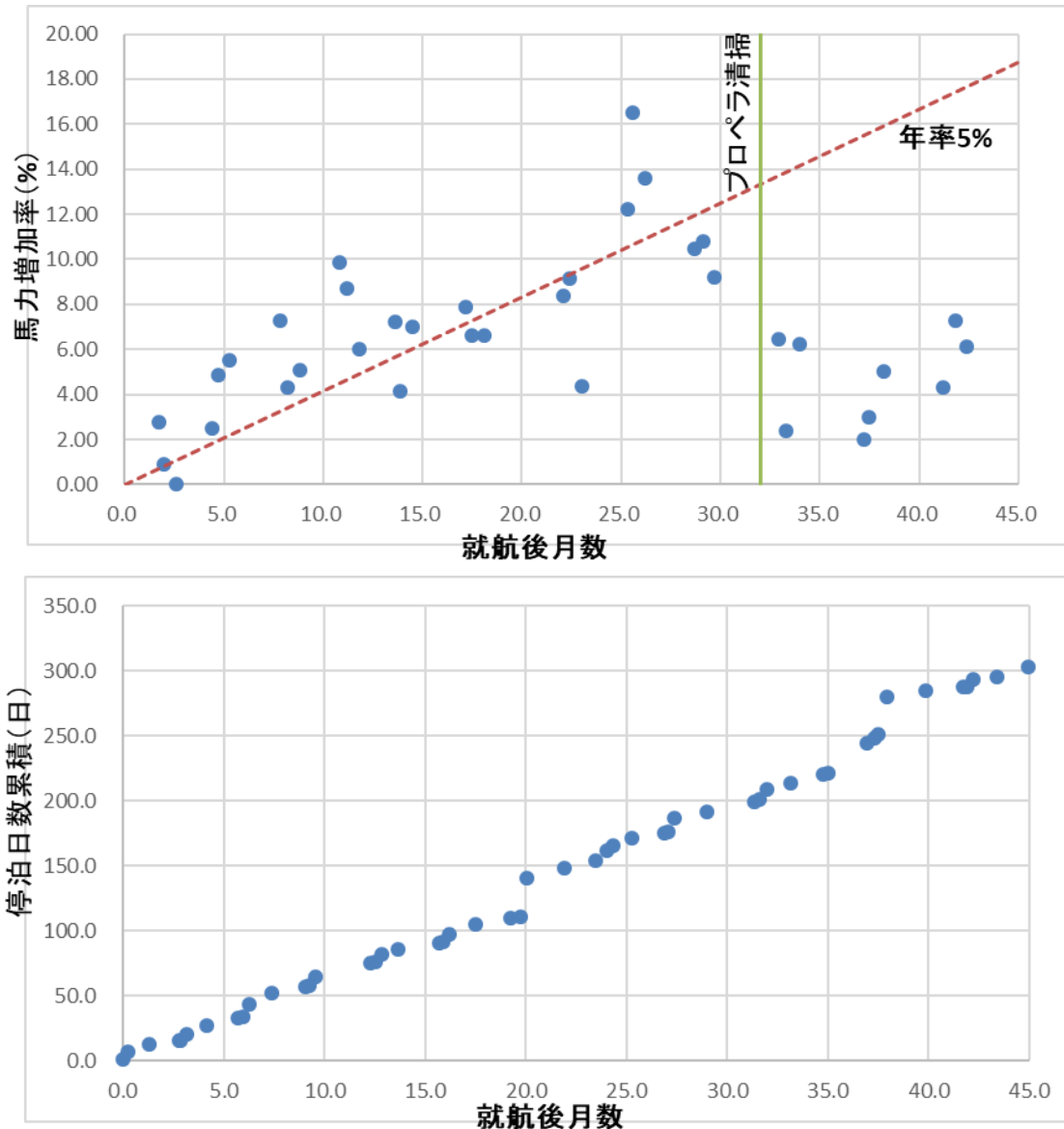


図4.4 大型鉄石運搬船の馬力増加率と停泊日数累計

表1.0 対象船の主要目比較

		大型鉄石運搬船	小型船舶「椿」
船体	船長 Lpp (m)	318	10
	船速 V (knots)	15	7.5
プロペラ	直径 D (m)	9.0	0.7
	翼数 z	5	3
	プロペラ回転数 (rpm)	72	660

3.3.2 大型船と小型船の燃費経年劣化傾向の比較および考察

3.1節において、小型船舶「椿」の消費燃料増加率は1.44%/日であると結論付けた。一方で、上記大型鉍石運搬船においては0.08%/日となっている。両者の関係を以下に考察する。

プロペラへの生物付着の影響は、プロペラ表面の粗度が増し、プロペラのトルクが増加することにより馬力増加⇨燃料消費量増加をもたらすと考える。プロペラ粗度による馬力への影響は、厳密にはトルク増のほかにプロペラ推力への影響、プロペラ前進係数変化の影響等、考慮しなくてはならない事項があり複雑な解析を要する。しかし、ここでは簡単に、燃料消費量は馬力に比例し、馬力はプロペラ馬力で代表でき、プロペラ推力は生物付着によって影響を受けない、と仮定してプロペラ粗度の影響を検討することとする。その上で、小型船舶「椿」のプロペラ馬力悪化率が実測と合うよう等価粗度を求め、同じ等価粗度を用いて大型船舶のプロペラ馬力悪化率を求める。

プロペラ馬力は(1)式で表される。

$$\text{プロペラ馬力} = \frac{2\pi n Q}{75} \quad (1)$$

ここでQ：所要回転トルク (kgf-m)、n：プロペラ回転数 (rps) である。

トルクQは翼素理論を用いると以下のように表せる。

$$Q = z \int_0^R dF r dr = z \int_0^R (dL \sin\beta + dD \cos\beta) r dr \quad (2)$$

ここで、

$$dL = c_L(r) \frac{1}{2} \rho V(r)^2 c(r) \quad (3)$$

$$dD = c_D(r) \frac{1}{2} \rho V(r)^2 c(r) \quad (4)$$

であり、z：プロペラ翼数、dL：半径rでの翼素の揚力、dD：半径rでの翼素の抗力、 β ：翼素の迎角、 $c_L(r)$ ：翼素の揚力係数、 $c_D(r)$ ：翼素の抗力係数、 ρ ：海水密度、V(r)：翼素への流入速度、c(r)：翼素のコード長である。

検討にあたっては、迎角 β は 14° とした。迎角はピッチ角よりスリップ分小さくなることから、大型鉍石運搬船のピッチ角を参考に決めた。大型鉍石運搬船のプロペラピッチ比は $p=P/D=0.7803$ であるため、 $D=9\text{m}$ より $P=7.0227$ となる。 $r=0.7R=0.35D$ とすると、ピッチ角は $\tan^{-1}(P/2\pi r)=19.5^\circ$ となる。これより小さい値として $\beta=14^\circ$ とし、大型鉍石運搬船、小型船舶「椿」とも同一とした。迎角 $\beta=14^\circ$ のときの c_L 、 c_D は船舶工学便覧の典型的な翼の性能曲線より、 $c_L=1.4$ 、 $c_D=0.08$ とした。

また、簡略化のため以下の仮定をおいた。

$$c_L(r) = c_L \quad (5)$$

$$c_D(r) = c_D \quad (6)$$

$$V(r) = \sqrt{V_a^2 + (0.7\pi D)^2} = \sqrt{V^2 + (0.7\pi D)^2} \quad (7)$$

$$c(r) = c_{0.7} \quad (8)$$

ここで、 V_a はプロペラへの流入速度であるが、これは船速 V に置き換える。 D はプロペラ直径、 $C_{0.7}$ は $0.7R$ における翼素のコード長である。これにより (2) 式は以下のように簡単な式となる。

$$Q = z \int_0^R (dL \sin \beta + dD \cos \beta) r dr = \frac{z}{2} (dL \sin \beta + dD \cos \beta) R^2 \quad (9)$$

生物付着を粗度として扱う場合の扱い方は以下のようにする。まず、生物付着がない場合は以下の Prandtl-Schlichting の平板摩擦抵抗係数式を用いる。

$$c_f = 0.455 (\log Rn)^{-2.58} \quad (10)$$

ここで、 Rn はレイノルズ数であり、以下の Kempf のレイノルズ数を用いる。

$$Rn = \frac{c_{0.7} \sqrt{V(r)^2}}{\nu} \quad (11)$$

一方で、生物が付着した場合は以下の Schlichting の完全粗面の平板摩擦抵抗係数式を用いる。

$$\bar{c}_f = \left(1.89 + 1.62 \log \frac{c_{0.7}}{k} \right)^{-2.5} \quad (12)$$

ここで、 k は粗度高さ (m) である。生物付着がある場合の C_D は、生物付着がない場合の C_D を C_{D0} として以下のように表せる。

$$C_D = C_{D0} - c_f + \bar{c}_f \quad (13)$$

上記式を用いて計算を行った結果を表 1 1 に示す。

小型船舶「椿」で計測された消費燃料増加率 1.4%/日と大型鉱石運搬船のモニタリングから得られた消費燃料増加率 0.08%/日に対して、プロペラの寄与分が 7 割とすると、それぞれ 0.98%/日、0.056%/日となる。

表 1 1 中の粗度なしの欄には、「椿」、鉱石運搬船それぞれについて、生物付着がない場合のプロペラ馬力の計算結果が示されている。「椿」は 177.7HP、鉱石運搬船は 134,600HP となる。

まず、「椿」における 1 日経過後の悪化した馬力量を求めると、悪化率は 0.98%なので、 $1.0098 \times 177.7 = 179.5$ HP となる。次に、表 1 1 中の右の粗度高さとある欄では、粗度高さを与えた場合のプロペラ馬力の計算結果が示されているが、粗度高さを 0.00013(m) とすると、「椿」のプロペラ馬力が、先に計算した悪化した馬力量とほぼ一致する。同じ粗度高さを用いて鉱石運搬船の場合を計算すると 135,297HP であり、これは悪化率 0.51%に相当する。モニタリング結果から得られた悪化率は 0.056%なので、計算結果とはほぼ 1 桁の違いがある。

この 1 桁の違いについては、現在確かなエビデンスがあるわけではないが、生物付着の速度によるものではないかと考えている。「椿」と大型鉱石運搬船とでは、プロペラ直径に約 1 桁の差がある。付着する生物の賦存量を均一とすると、プロペラ近傍の生物

量は面積に比例すると考えられ、約2桁の差となる。しかしながら、生物は一般に周縁部に付着すると言われているので、ほぼ同一時間でプロペラの周縁には生物が付着すると考える。これが徐々に周縁部から中心に向かって付着していくと考えると、その時間はプロペラ直径の比になると考えられる。

3.3.3 実運航船での通電による燃費経年劣化防止効果の推定法

実運航船での通電による燃費経年劣化防止効果の推定法について、3.3.2節での考察から、現状では以下のようにまとめられる。

- ① 実運航船のプロペラ主要目（直径、翼数、代表的な翼コード長（ $r=0.7R$ 位置など）、展開面積比、回転数）、船速、航海スケジュール（停泊日数）を準備する
- ② 表11により、粗度なし、および粗度高さ0.00013mのときのプロペラ馬力 $P=2\pi nQ/75$ を計算する
- ③ 粗度ありと粗度なしのプロペラ馬力の比より、馬力悪化率を算出する
- ④ 上記馬力悪化率を「樁」とのプロペラ直径比で割る
- ⑤ ④に年間停泊日数を乗じることにより、プロペラ起因の実運航船の年間消費燃料増加率が求まる
- ⑥ 現時点では通電により上記燃料増加が抑えられると仮定しているため、実運航船での通電による燃費経年劣化防止効果は⑤の数値となる

4. 2020年度の目標達成状況

2020年度の目標

実験に供する小型船舶のプロペラにおいて、プロペラ表面の電流密度が均一になる陽極の配置を通電シミュレーションにより決定し、プロペラの電流密度のムラを20%以下に抑える。

【目標の達成状況】

船体およびプロペラの3Dスキャンデータを用い、通電シミュレーションにより2021年度の通電あり試験の陽極配置を決定した。プロペラ前方に片舷2箇所計4箇所、プロペラ後方上部に片舷1箇所計2箇所、全体で6箇所に陽極を配置することで、プロペラ表面の電流密度のばらつきは $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を基準として、 -19.5% ～ $+18.0\%$ の範囲となった。従って、プロペラ表面の電流密度のばらつきを $\pm 20\%$ 以下とする目標を達成できた。

5. 2021年度の実施内容

5.1 小型船舶通電あり試験

通電による効果を2020年度に実施した通電なし試験と比較して把握するため、通電あり試験を実施して燃料消費量を把握した。

5.1.1 供試船舶

2021年度小型船舶通電あり試験には、2020年度に引き続きJMUアムテック所有の小型船舶「椿」を用いた。

2020年度の小型船舶通電なし試験では、2020年4月から10月ごろにかけて船体およびプロペラに多数の生物が付着したが、小型船舶通電あり試験を行うにあたり、プロペラに付着した生物を除去・研磨した。一方、船体は清掃や再塗装は行わず、生物が付着したままの状態を開始した。これは、生物付着による燃料消費量増加のうちプロペラ寄与分を分離するためである。図45に小型船舶通電なし試験後の船体の様子を示す。船尾部に生物の付着が見られない箇所があるが、これはプロペラへの通電のための電極を取り付ける準備として、最小限の範囲の生物を除去したためである。



図45 小型船舶通電なし試験後の船体およびプロペラの様子（左：船首部、右：船尾部）

通電用電極を取り付けた船体の様子を図46に示す。写真では右舷側のみを示しているが、左舷側も同位置に電極が取り付けられている。なお、通電なし試験ではプロペラ前方片舷3箇所には防食のため流電陽極を取り付けていたが、通電あり試験では通電により船体防食が実現されることから、通電用電極設置に合わせて撤去した。

また、当初は電極を電位シミュレーションにより求めた位置（図47）に設置することとしていたが、設置工事不可能な箇所があることが判明したため、プロペラ前方上部に設置する予定であった電極をプロペラ前方下部に移すこととした。

そのため、一部の電極を移設した場合のプロペラ表面の電位分布を電位シミュレーションにより事前に確認することとした。電位シミュレーションで得られたプロペラ船首側、船尾側それぞれの電流密度分布のコンター図を図48に示す。また、図48に示す

プロペラ面の船首側①～⑨および船尾側①'～⑨'における電流密度を表12に示す。

船首側においては電流密度分布が $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を基準とし、 $-12.8\sim+19.2\%$ の範囲内であったのに対し、船尾側においては、 $-18.8\sim+17.2\%$ と、船首側よりもばらつきが大きいことがわかった。しかし、移設後においても電流密度分布は基準となる $0.25\text{A}/\text{m}^2$ に対して、 $\pm 20\%$ の範囲に収まっており、目標を達成していることを確認した。

加えて、通電のため、船倉（図39）内に棚を新設し、菊水電子工業製コンパクト直流安定化電源 PMX-18-5A 3台を設置した。電源設置の様子を図49に示す。一台の電源には左右舷対称位置の電極2枚が接続されており、各電極につながる電線の長さを一致させることで、左右舷の電流値に差が出ないようにした。



図46 通電用電極の配置

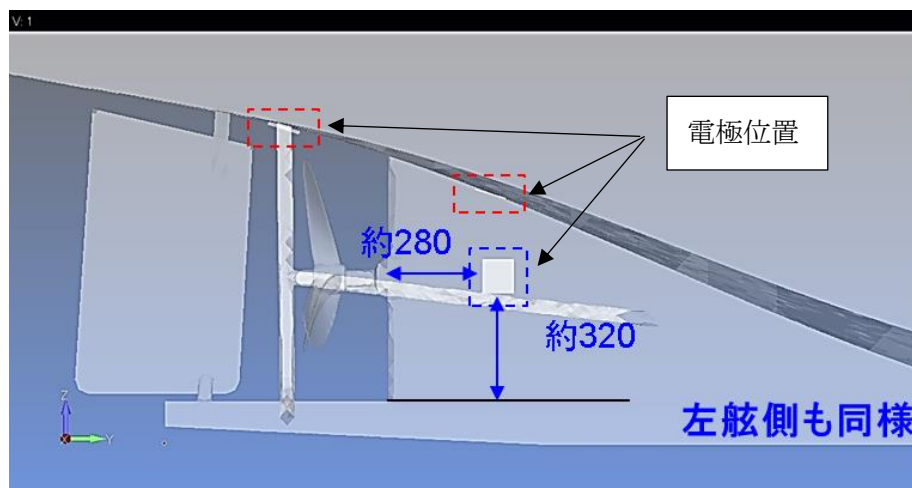


図47 2020年度の電位シミュレーションで得られた電極配置

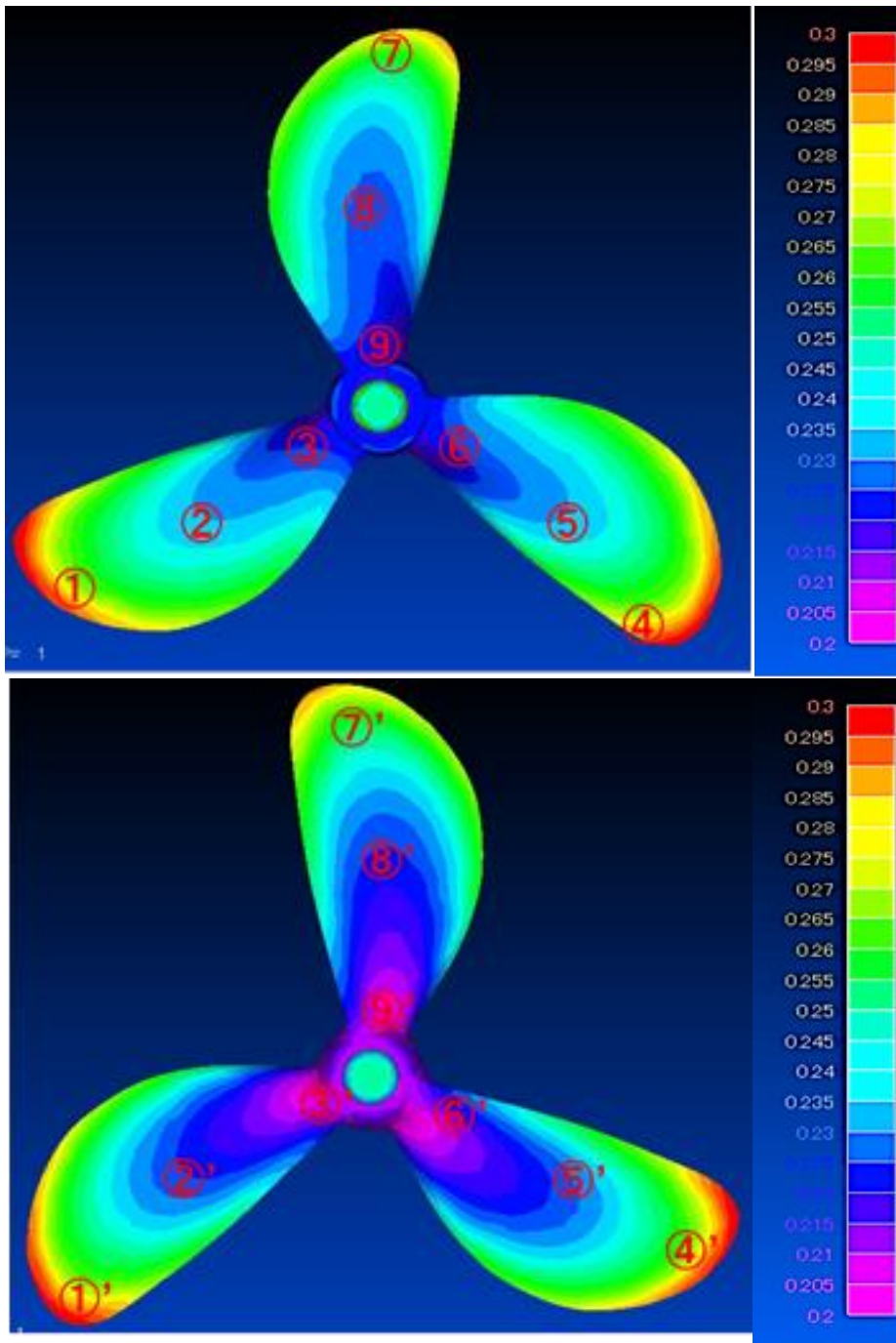


図 4 8 実際の電極配置におけるプロペラ表面の電流密度分布
 (上段：船首側、下段：船尾側)

表 1 2 実際の電極配置における計測点ごとの電流密度推定結果

船首側	電流密度 I (A/m ²)	船尾側	電流密度 I (A/m ²)
①	0.294	①'	0.293
②	0.234	②'	0.234
③	0.219	③'	0.203
④	0.298	④'	0.280
⑤	0.235	⑤'	0.227
⑥	0.219	⑥'	0.205
⑦	0.285	⑦'	0.280
⑧	0.224	⑧'	0.223
⑨	0.218	⑨'	0.203
最小	0.218	最小	0.203
最大	0.298	最大	0.293
マイナス側誤差(%)	-12.8%	マイナス側誤差(%)	-18.8%
プラス側誤差(%)	19.2%	プラス側誤差(%)	17.2%



図 4 9 通電用直流安定化電源設置の様子

5.1.2 プロペラ研磨および表面粗度計測

図 4 5 でわかるように、小型船舶通電なし試験後のプロペラには全面にわたり生物が付着している。微弱電流法の効果確認の中で、船体起因の燃料消費量増加分とプロペラ起因の燃料消費量増加分に分離することとしており、プロペラのみ清掃を行うことで、プロペラ起因の燃料消費量増加分がゼロとなるようにした。

2020 年度小型船舶通電なし試験開始前と同様に、表面が活性化しない程度に供試船舶

のプロペラ研磨を実施した。図50に研磨後のプロペラの外観を示す。



図50 研磨後のプロペラの様子（左：船首側、右：船尾側）

通電あり試験前のプロペラの状態を把握するため、2020年度と同様にプロペラ研磨後の表面粗度を計測した。計測にはミットヨ製サーフテスト SJ-210 表面粗さ測定器を用いた。

特定の1翼を対象として、プロペラ中心から0.5R（R：プロペラ半径）、0.7R、0.9R付近の両面を複数点計測した。表13に粗度の計測結果を示す。計測箇所によりある程度のばらつきが見られるが、平均するとPressure side（船尾側）で算術平均粗さRa：4.46 μ m、Suction side（船首側）でRa：5.04 μ mとなった。

通電なし試験開始前は、Pressure sideが4.66 μ m、Suction sideが6.39 μ mであったため、Pressure sideはほぼ同等、Suction sideは1.35 μ m程度粗度が小さいという結果であった。表面粗度が5~8 μ m程度の範囲では、1 μ mの差が0.4%程度の燃料消費量の差に相当すると言われている。そのため、Suction sideの粗度の差1.35 μ mは、燃料消費量に換算すると約0.6%となり、通電あり試験開始時のプロペラは、通電なし試験開始時より0.6%燃料消費量が少なくなることを考慮する必要がある。

5.1.3 係留運転

通電なし試験時と同様に、実運航の状態に近づけるため、供試船舶においても1週間おきにプロペラを回すこととした。回転数は300rpm、係留運転時間は30分程度とし、あわせて海水温の計測を行った。表14に通電あり試験時の航行試験、係留運転を含んだ運転の記録および海水温の計測結果を示す。また、図51に海水温の推移のグラフを示す。

通電あり試験期間中の海水温は、通電なし試験の期間とほぼ同じように推移しており、1月下旬ごろに最低値（8 $^{\circ}$ C）を記録し、8月にかけて徐々に上昇し、8月中旬に32 $^{\circ}$ Cを記録した。ただし、通電あり試験の期間では、6月下旬から7月上旬にかけての約2週間で7 $^{\circ}$ C上昇しており、これまでで最も急な温度変化が発生している。

表 1 3 通電あり試験前のプロペラ表面粗度計測結果

No	surface	measuring part	Ra	Rq	Rz
			算術平均粗さ (μm)	二乗平均平方根高さ (μm)	最大高さ (μm)
1	pressure	0.5R	4.710	5.892	27.63
2	pressure	0.5R	5.282	6.720	31.76
3	pressure	0.5R	4.268	5.442	26.57
4	pressure	0.5R	4.071	5.185	25.15
5	pressure	0.5R	2.894	3.710	18.33
6	pressure	0.5R	3.635	4.783	26.28
7	pressure	0.7R	5.215	6.167	25.37
8	pressure	0.7R	3.325	4.489	24.04
9	pressure	0.7R	3.045	4.302	27.40
10	pressure	0.7R	5.807	7.234	35.59
11	pressure	0.9R	2.989	3.890	20.64
12	pressure	0.9R	5.897	7.735	41.21
13	pressure	0.9R	6.040	7.809	37.97
14	pressure	0.9R	5.265	6.547	32.99
15	suction	0.5R	3.762	4.961	26.40
16	suction	0.5R	4.105	4.945	23.07
17	suction	0.5R	6.146	7.507	33.66
18	suction	0.5R	4.433	5.682	27.51
19	suction	0.5R	7.685	10.156	48.80
20	suction	0.5R	6.216	7.609	33.45
21	suction	0.5R	5.703	7.199	33.64
22	suction	0.5R	7.507	9.025	42.00
23	suction	0.7R	4.460	5.786	30.44
24	suction	0.7R	3.912	4.745	22.60
25	suction	0.7R	4.208	5.333	27.76
26	suction	0.7R	5.333	7.269	39.53
27	suction	0.7R	3.164	3.816	18.33
28	suction	0.7R	4.795	6.738	33.75
29	suction	0.7R	3.987	5.013	25.89
30	suction	0.9R	5.967	7.442	38.35
31	suction	0.9R	3.123	3.975	21.19
32	suction	0.9R	6.867	8.677	42.60
33	suction	0.9R	4.381	5.758	31.21

表 1 4 運転記録および海水温計測結果（通電あり試験）

日付	種別	海水温 (℃)	日付	種別	海水温 (℃)
2021/11/3	試運転	20.0	2022/5/12	係留運転	19.0
2021/11/4	係留運転	19.0	2022/5/18	係留運転	18.0
2021/11/8	陽極確認	19.0	2022/5/23	航行試験	19.5
2021/11/12	航行試験	17.0	2022/6/1	係留運転	20.0
2021/12/6	係留運転	14.0	2022/6/8	係留運転	20.0
2021/12/16	航行試験	13.0	2022/6/15	係留運転	21.0
2021/12/20	係留運転	12.0	2022/6/24	航行試験	25.0
2021/12/27	係留運転	10.0	2022/7/1	係留運転	29.0
2022/1/5	係留運転	9.0	2022/7/7	係留運転	28.0
2022/1/11	係留運転	9.0	2022/7/15	係留運転	28.0
2022/1/19	その他運転	8.0	2022/7/22	航行試験	30.0
2022/1/26	係留運転	8.0	2022/7/28	係留運転	30.0
2022/2/2	係留運転	8.0	2022/8/5	係留運転	30.0
2022/2/9	係留運転	9.0	2022/8/11	係留運転	32.0
2022/2/16	係留運転	8.0	2022/8/24	係留運転	29.0
2022/2/24	航行試験	8.0	2022/8/26	航行試験	30.0
2022/3/2	係留運転	8.0	2022/9/2	係留運転	29.0
2022/3/9	係留運転	9.0	2022/9/8	係留運転	28.0
2022/3/16	係留運転	11.0	2022/9/16	航行試験	29.0
2022/3/25	航行試験	12.0	2022/9/22	係留運転	26.0
2022/3/31	係留運転	14.0	2022/9/30	係留運転	26.0
2022/4/13	係留運転	18.0	2022/10/6	係留運転	25.0
2022/4/22	航行試験	18.0	2022/10/13	航行試験	23.0
2022/4/27	係留運転	19.0			

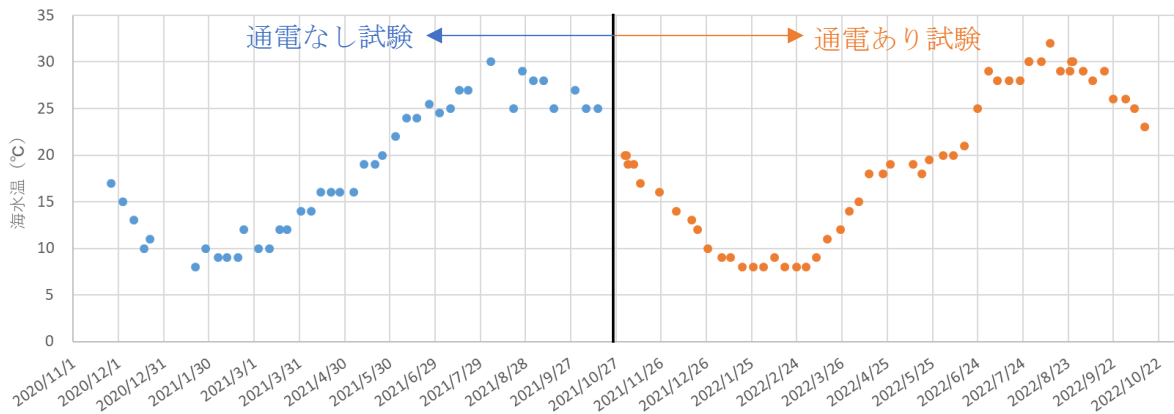


図 5 1 通電なし試験開始時からの海水温の推移

5.1.4 航行試験

通電時の船体やプロペラへの海生生物付着による汚損の傾向を把握するため、年間を通した航行試験を実施した。

航行試験は JMU アムテックが位置する相生港で実施し、予め設定した航路 2 海里を 2 往復することとした。航行時は主機回転数 2000rpm (変速後 666rpm) 一定回転で航行し、船舶の位置、対地船速、対水船速、燃料消費量を計測した。通電は停泊中のみとし、航行試験および係留運転中は通電を停止した。表 1 5 に通電あり試験時の航行試験実施日を示す。なお、航路および計測に使用した機器は 2020 年度と同様である。

表 1 5 航行試験実施日 (通電あり試験)

	日時
1	2021/11/12
2	2021/12/16
	※
3	2022/2/24
4	2022/3/25
5	2022/4/22
6	2022/5/23
7	2022/6/24
8	2022/7/22
9	2022/8/26
10	2022/9/16
11	2022/10/13

※2022 年 1 月は JMU アムテックで新型コロナウイルス感染が急拡大し入構が規制されたため計測を中止した

表16-1、16-2および図52に航行試験（通電あり）で計測した航行時間、対地船速、対水船速、消費燃料を示す。表16-1、16-2における航行時間は、直線2海里に要した時間および蛇行等含め2海里の航行に要した時間を併記している。加えて、表17および図53に各回の往航、復航の平均値を示す。

対地船速と対水船速には1.0~1.5kt程度の差が存在しているが、両者の傾向は通電なし試験時と同様に一致していることが確認できる。

通電あり試験の開始にあたり、プロペラのみ付着していた生物の除去および研磨を行っていることで、対地船速でみると通電なしの6月時点の速度まで回復していることがわかる。

各計測項目にばらつきはあるものの、通電あり試験ではおおむね2021年11月から2022年3月までの期間は燃料消費量が一定であるため、ほぼ初期状態を維持できていると推測される。

2022年4月以降は燃料消費量が、2022年5月以降は航行時間、船速が悪化しており、通電しているものの汚損が進行しているものと考えられる。7月下旬の計測では6月と比較して船速が著しく低下し、往復の平均燃料消費量が2.810から3.860と37%も大幅に増加した。結果として、通電ありの7月の計測では、通電なし期間の往復平均の最大燃料消費量3.580を超えて悪化することとなった。また、後述するように水中ドローンの観察では、プロペラ全面にフジツボの付着が見られた。これは全くの想定外の事象であり、原因究明と対策が必要となった。

プロペラには防汚に必要な電流は流れておりプロペラ基材そのものへの生物付着は考えにくい。おそらく何らかの原因でプロペラ表面に電着被膜が形成され、その上に生物が付着したのではないかと推測した。電着被膜は高い電流密度を与えることにより、軟質な電着被膜に変質させ剥離させることができる。そこで、8月の航行試験前数日間にわたり、通常より高い電流密度を加えて、プロペラの回転で電着被膜ごと生物を除去できないか試行した。詳細は次節以降で説明するが、通電電流量を増やすことで電着被膜とともに生物も除去でき、船速、燃料消費量とも大きく改善し、大幅に性能が悪化した7月以前の水準まで回復した。以降の計測では念のため、航行試験前数日間は通電電流量を増やして不測の電着被膜形成に対し、これを剥離で除去できるよう計らった。

最終的に、通電あり／なしの10月の計測結果の比較により、対水船速は同程度であるものの、航行時間、対地船速、対水船速は通電することで大幅に改善しており、プロペラ通電に生物付着による性能悪化を大幅に抑制する効果があると結論付けられた。

表 16-1 航行試験計測結果 (通電あり)

			タイム		平均対地船速	平均対水船速	消費燃料
			直線距離	実航行距離	(knot)	(knot)	(ℓ)
2021/11/12	1st	往航	0:17:46	0:17:45	6.76	5.63	2.366
		復航	0:18:26	0:18:24	6.52	5.59	2.387
	2nd	往航	0:18:03	0:18:00	6.66	5.65	2.402
		復航	0:17:58	0:17:57	6.69	5.67	2.348
2021/12/16	1st	往航	0:17:58	0:17:53	6.71	5.75	2.418
		復航	0:18:08	0:18:07	6.63	5.77	2.376
	2nd	往航	0:17:34	0:17:34	6.83	5.84	2.386
		復航	0:18:20	0:18:19	6.55	5.81	2.412
2022/2/24	1st	往航	0:17:38	0:17:37	6.81	5.65	2.312
		復航	0:18:59	0:18:58	6.33	5.61	2.361
	2nd	往航	0:17:46	0:17:45	6.77	5.82	2.394
		復航	0:18:04	0:18:03	6.65	5.91	2.350
2022/3/25	1st	往航	0:17:33	0:17:31	6.85	5.43	2.380
		復航	0:18:25	0:18:24	6.52	5.40	2.422
	2nd	往航	0:17:42	0:17:40	6.79	5.47	2.345
		復航	0:18:18	0:18:14	6.58	5.46	2.427
2022/4/22	1st	往航	0:19:06	0:18:57	6.34	5.31	2.524
		復航	0:17:44	0:17:40	6.79	5.57	2.462
	2nd	往航	0:19:02	0:18:57	6.33	5.36	2.496
		復航	0:17:55	0:17:50	6.73	5.44	2.331
2022/5/23	1st	往航	0:18:22	0:18:20	6.55	5.50	2.493
		復航	0:18:40	0:18:37	6.45	5.49	2.585
	2nd	往航	0:18:25	0:18:24	6.52	5.54	2.517
		復航	0:18:28	0:18:27	6.51	5.53	2.512
2022/6/24	1st	往航	0:19:19	0:19:17	6.22	5.25	2.963
		復航	0:18:47	0:18:43	6.41	5.26	2.749
	2nd	往航	0:19:22	0:19:18	6.22	5.31	2.901
		復航	0:18:43	0:18:39	6.43	5.27	2.635
2022/7/22	1st	往航	0:20:01	0:19:50	6.05	4.47	3.866
		復航	0:21:18	0:21:10	5.67	4.45	3.951
	2nd	往航	0:19:50	0:19:44	6.08	4.56	3.863
		復航	0:20:43	0:20:31	5.85	4.46	3.756

[2022年1月はJMUアムテックで新型コロナウイルス感染が急拡大し入構が規制されたため計測を中止した]

表 1 6 - 2 航行試験計測結果 (通電あり)

			タイム		平均対地船速	平均対水船速	消費燃料
			直線距離	実航行距離	(knot)	(knot)	(ℓ)
2022/8/26	1st	往航	0:18:38	0:18:36	6.45	4.97	2.704
		復航	0:18:46	0:18:42	6.42	4.94	2.599
	2nd	往航	0:19:05	0:19:01	6.31	4.96	2.587
		復航	0:18:35	0:18:30	6.49	5.09	2.571
2022/9/16	1st	往航	0:19:30	0:19:29	6.16	4.78	2.790
		復航	0:18:18	0:18:16	6.57	4.81	2.610
	2nd	往航	0:19:30	0:19:28	6.17	4.79	2.687
		復航	0:18:27	0:18:23	6.53	4.78	2.459
2022/10/13	1st	往航	0:18:58	0:18:57	6.34	4.92	2.734
		復航	0:18:21	0:18:18	6.56	4.91	2.584
	2nd	往航	0:19:04	0:19:03	6.30	4.89	2.703
		復航	0:18:24	0:18:16	6.57	4.84	2.513

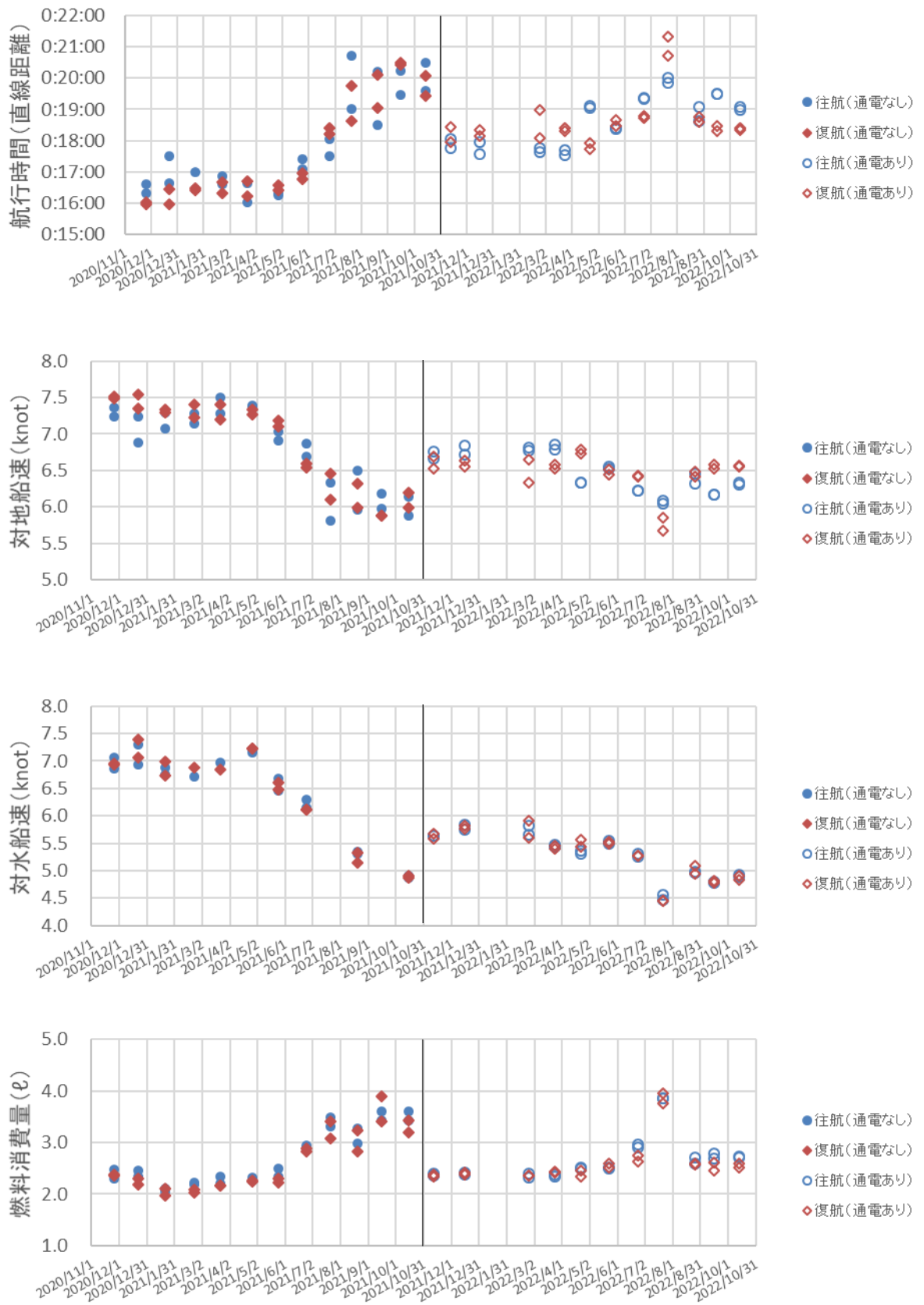


図 5 2 航行試験計測結果 (通電なし期間含む)

表 1 7 通電あり期間の航行試験計測結果（往復平均）

往復平均		タイム		平均対地船速 (knot)	平均対水船速 (knot)	消費燃料 (ℓ)
		直線距離	実航行距離			
2021/11/12	1st	0:18:06	0:18:04	6.64	5.61	2.377
	2nd	0:18:00	0:17:59	6.68	5.66	2.375
2021/12/16	1st	0:18:03	0:18:00	6.67	5.76	2.397
	2nd	0:17:57	0:17:56	6.69	5.83	2.399
2022/2/24	1st	0:18:18	0:18:17	6.57	5.63	2.337
	2nd	0:17:55	0:17:54	6.71	5.87	2.372
2022/3/25	1st	0:17:59	0:17:58	6.69	5.42	2.401
	2nd	0:18:00	0:17:57	6.69	5.47	2.386
2022/4/22	1st	0:18:25	0:18:18	6.56	5.44	2.493
	2nd	0:18:28	0:18:23	6.53	5.40	2.413
2022/5/23	1st	0:18:31	0:18:28	6.50	5.49	2.539
	2nd	0:18:26	0:18:25	6.52	5.54	2.515
2022/6/24	1st	0:19:03	0:19:00	6.32	5.26	2.856
	2nd	0:19:02	0:18:59	6.33	5.29	2.768
2022/7/22	1st	0:20:39	0:20:30	5.86	4.46	3.908
	2nd	0:20:17	0:20:08	5.96	4.51	3.809
2022/8/26	1st	0:18:42	0:18:39	6.44	4.96	2.651
	2nd	0:18:50	0:18:46	6.40	5.02	2.579
2022/9/16	1st	0:18:54	0:18:52	6.37	4.79	2.700
	2nd	0:18:59	0:18:56	6.35	4.79	2.573
2022/10/13	1st	0:18:39	0:18:37	6.45	4.91	2.659
	2nd	0:18:44	0:18:40	6.44	4.86	2.608

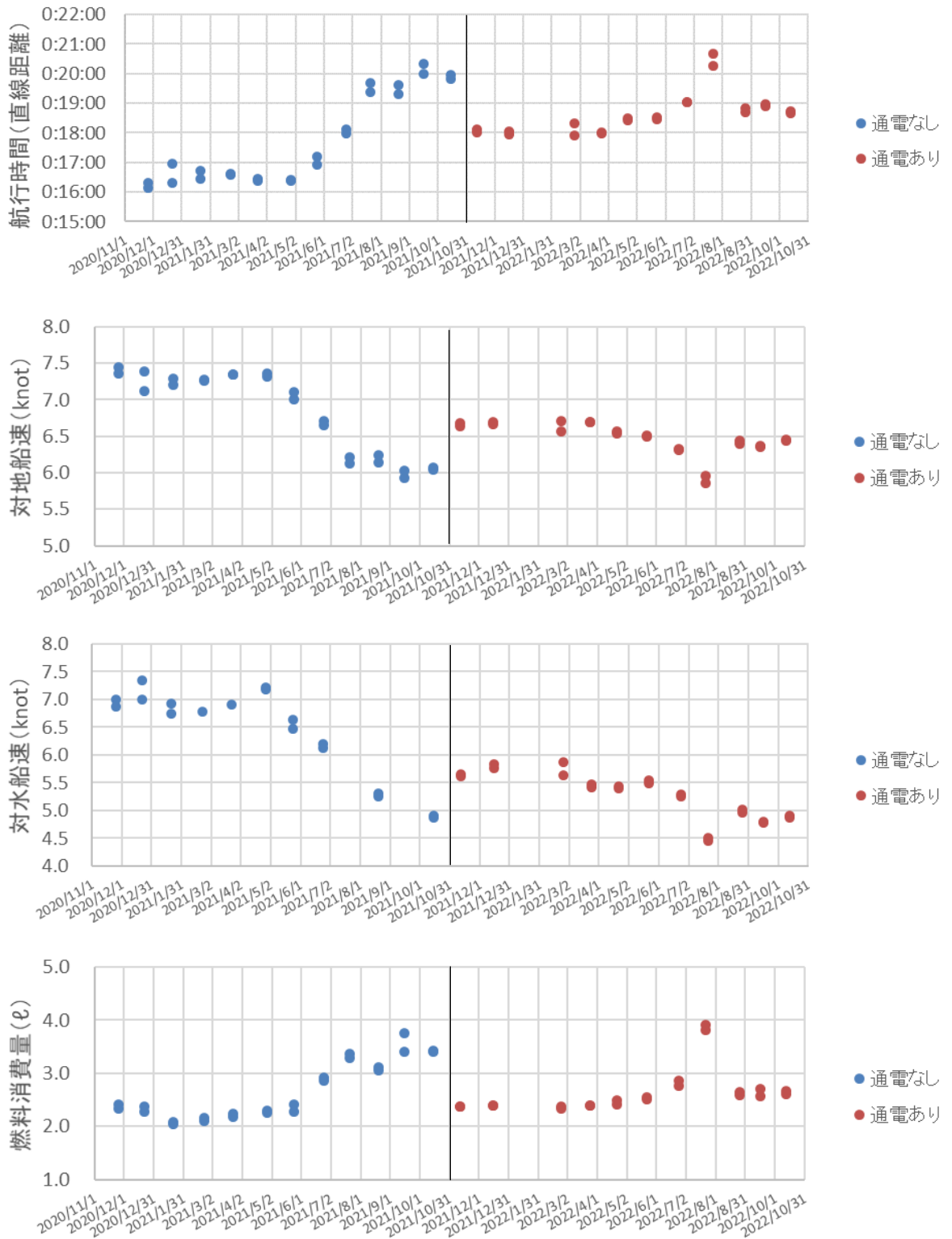


図 5 3 航行試験計測結果 (往復平均、通電なし期間含む)

5.1.5 プロペラ表面観察

通電時のプロペラへの生物付着状況確認のため、航行試験の前後に水中ドローンを用いてプロペラ表面の観察を行った。

図54-1、54-2、54-3に水中ドローンで撮影したプロペラ表面の様子を示す。写真はすべて船尾側のプロペラ表面の様子であるが、必ずしも3翼あるうちの特定の1翼のみを示しているわけではない。

また、図55-1、55-2に通電の有無で比較したプロペラ表面の様子を示す。

通電なしでは明確に生物の付着が確認されたのは2021年5月の計測からであり、5月以降は10月まで徐々に汚損が進行し、10月にはプロペラ全面がフジツボやゴカイ類で埋め尽くされていた。

一方、通電ありでは2022年2月の計測の時点でプロペラの根元側半分程度の範囲にまばらにフジツボの幼生の付着が確認でき、通電なしと比較して約3ヶ月も早く生物の付着が発生した。付着時期が早いこともさることながら、通電しているにもかかわらず生物が付着してしまったことは問題であり、電流密度の不足が懸念された。詳細は次節以降で述べるが、11月下旬よりプロペラへの通電を開始し、同時にプロペラ全体の電位をモニタリング（この時点では現地データを確認する必要があった）していたが、通電当初はプロペラの電位が安定せず、プロペラの防汚に必要な電流密度に達していない期間が断続的に存在していた。かつ、プロペラの根元付近は先端に比べて電流が流れにくいことが要素研究や電位シミュレーションから分かっており、プロペラの根元に近いほど電流密度が低くなるため、プロペラ根元側に生物が付着してしまったと考えられる。

上記電流密度が不足している問題が発生したため、5/16以降は設定電流量を増やすことで、通電中は常時プロペラに十分な防汚電流が流れるように調整を行った。

しかしながら、海水温が急上昇した6月下旬から7月上旬を経た7月のプロペラ観察で、プロペラ先端までフジツボに覆われていることが判明した。原因は特定できていないが、7/1に係留運転を行ってから7/5まで電位が急激に下がっており、電位から推定した電流密度は $3.0\text{A}/\text{m}^2$ 以上であり、プロペラに過大な電流が流れていたものと推測される。その結果、電着被膜が発達し、電着被膜上にフジツボが付着してしまったと考えられる。電着被膜上に付着した生物を剥離するため、8月は計測前に大電流通電を行い、被膜を脆くして生物ごと剥離させる工程を行った。結果として、プロペラの先端側の大部分の生物が剥離し、試験開始直後のプロペラ素地と変わらない金属光沢が保たれていることを確認できた。

プロペラの前縁付近は流速が早いため通電なし試験でも生物が剥離しているが、円形のフジツボの付着跡が残ったままとなっており、通電しない場合フジツボはプロペラ素地に直接付着していることがわかる。一方で、通電している場合は、電着被膜剥離後のプロペラ素地にはフジツボの付着跡が残っていないことから、フジツボは電着被膜上に付着していたと考えられ、電着被膜を剥離できれば生物付着による影響を完全に排除することが可能となることの証左と言える。

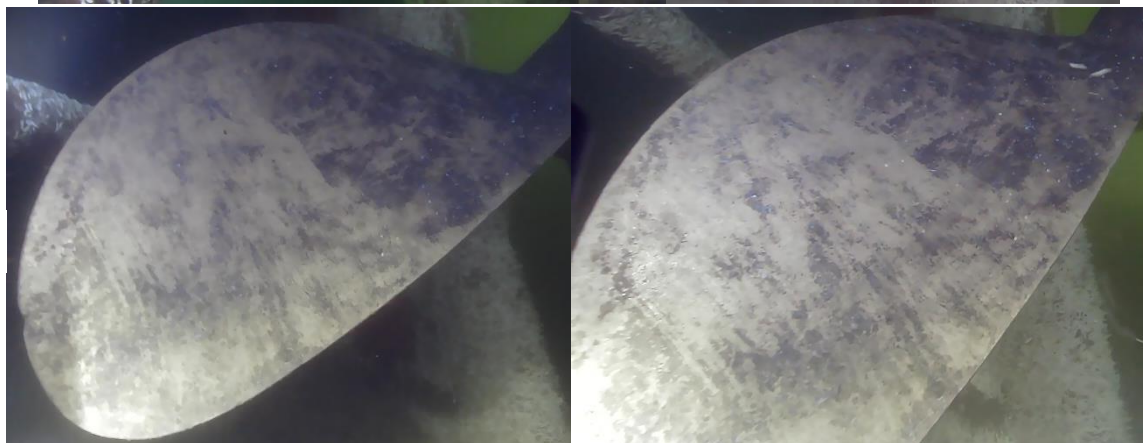
航行試験前

航行試験後

2021/11/12



2021/12/16



2022/1

試験中止

2022/2/24

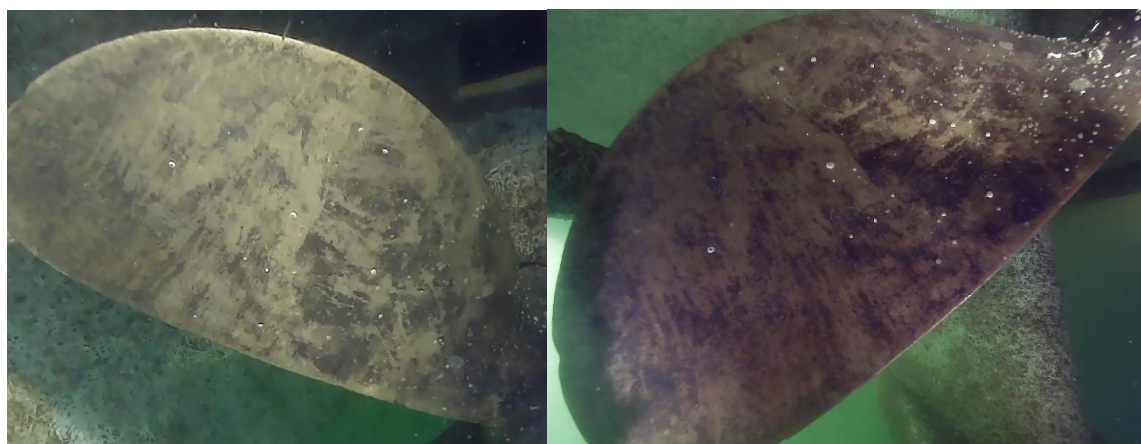
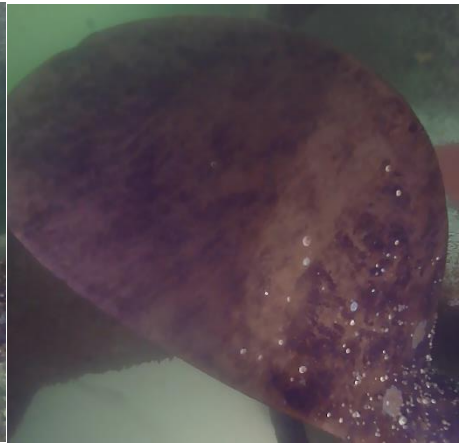
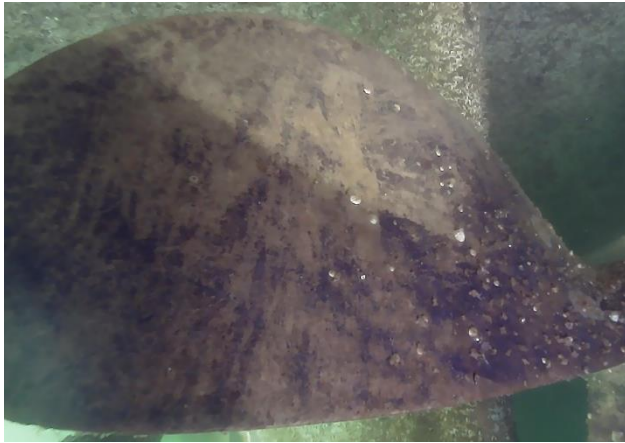


図 5 4 - 1 プロペラ表面の様子 (2021/11-2022/2)

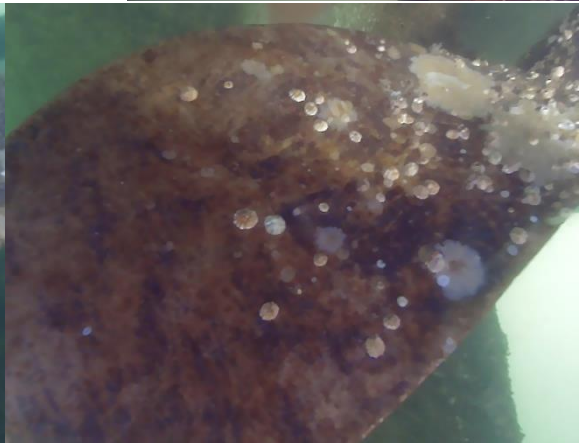
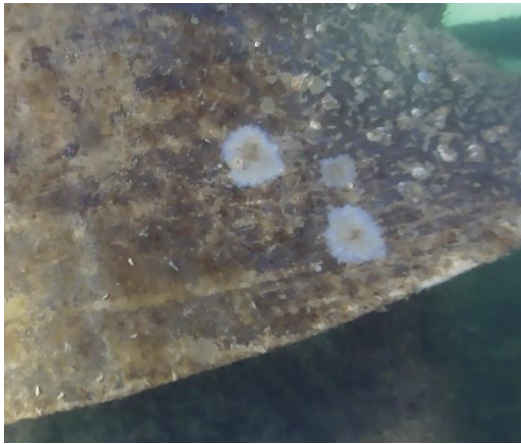
航行試験前

航行試験後

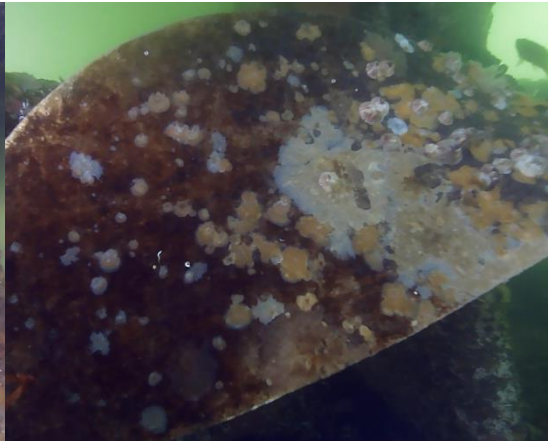
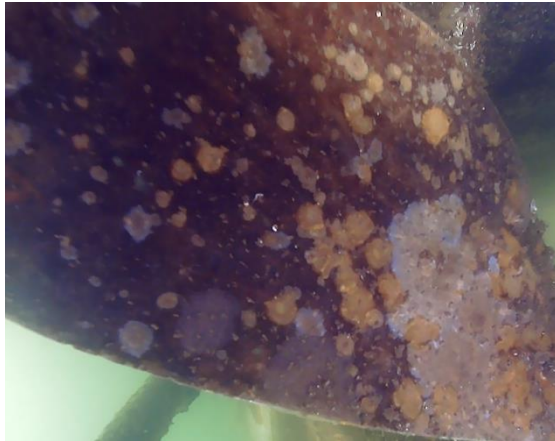
2022/3/25



2022/4/22



2022/5/23



2022/6/24

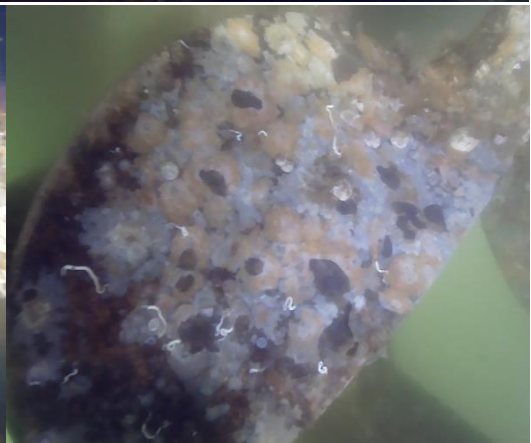
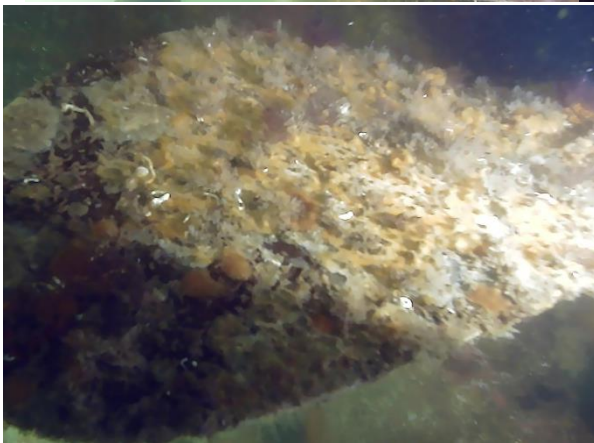
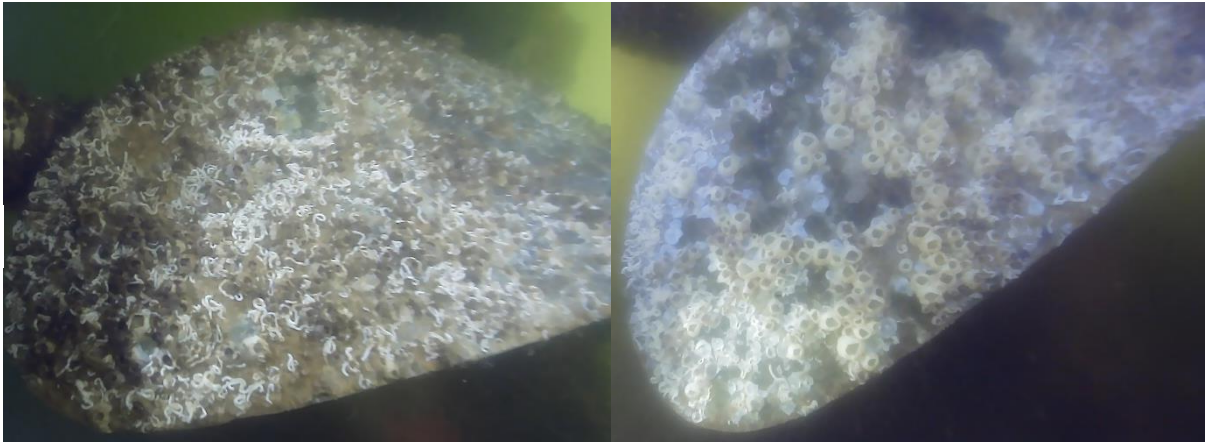


図 5 4 - 2 プロペラ表面の様子 (2022/3-2022/6)

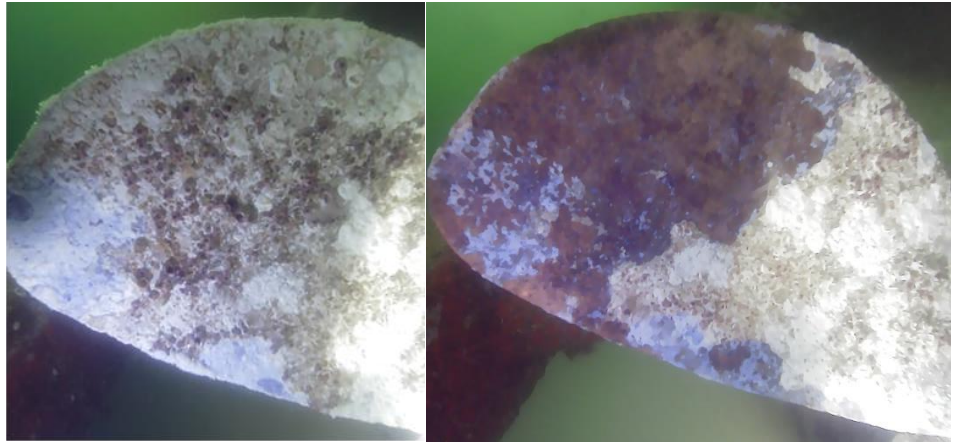
航行試験前

航行試験後

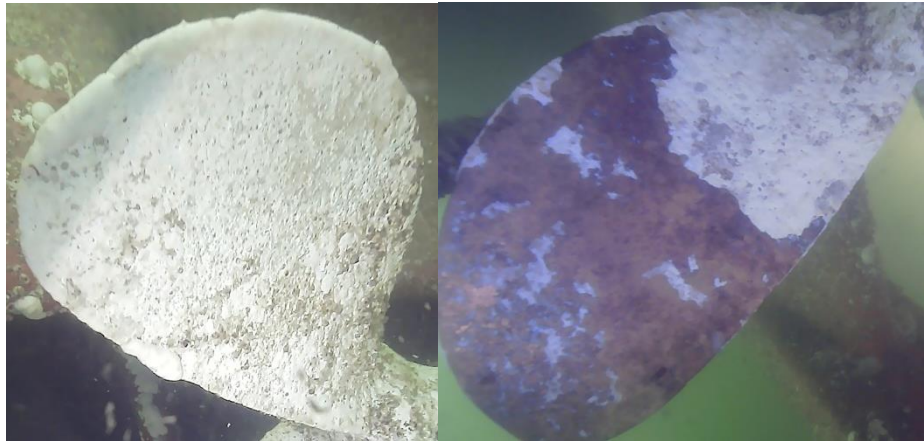
2022/7/22



2022/8/25 (左)
2022/8/26 (右)



2022/9/16



2022/10/13

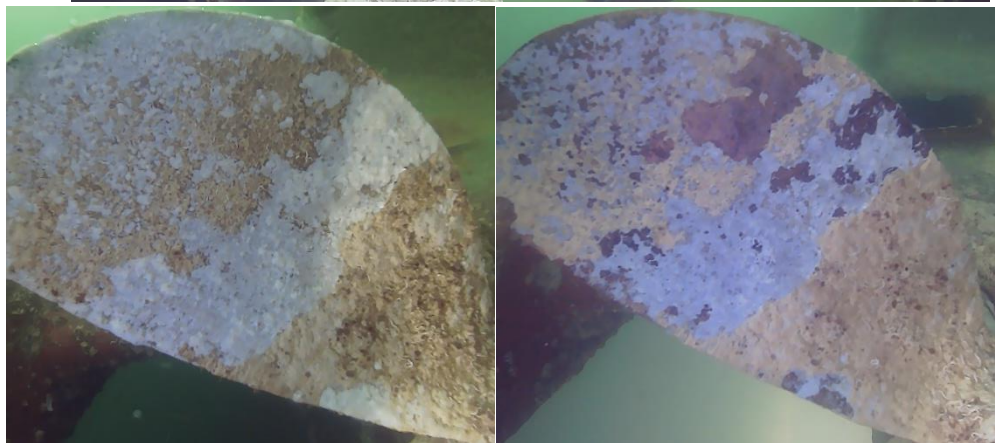
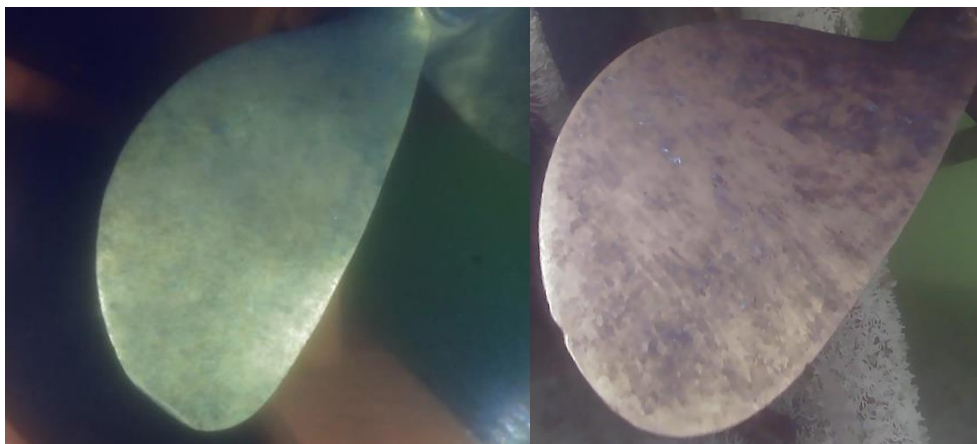


図 5 4 - 3 プロペラ表面の様子 (2022/7-2022/10)

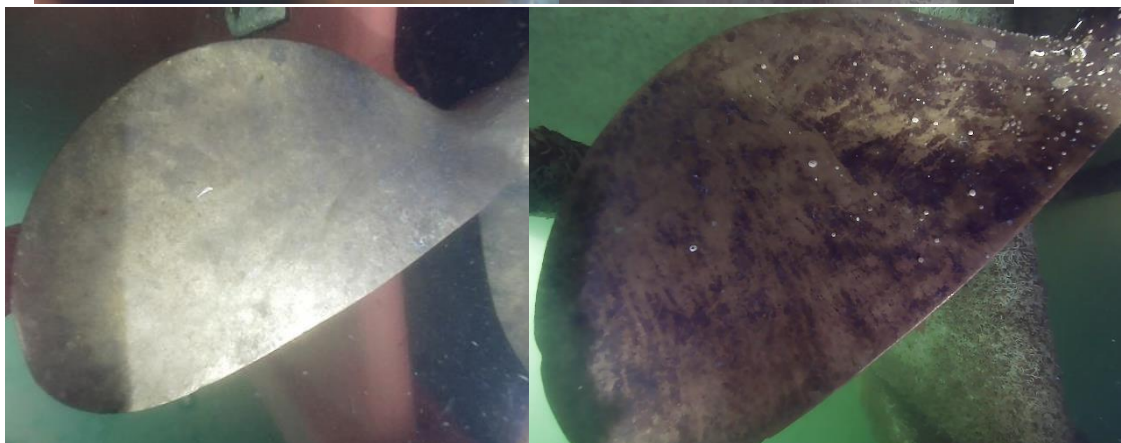
通電なし

通電あり

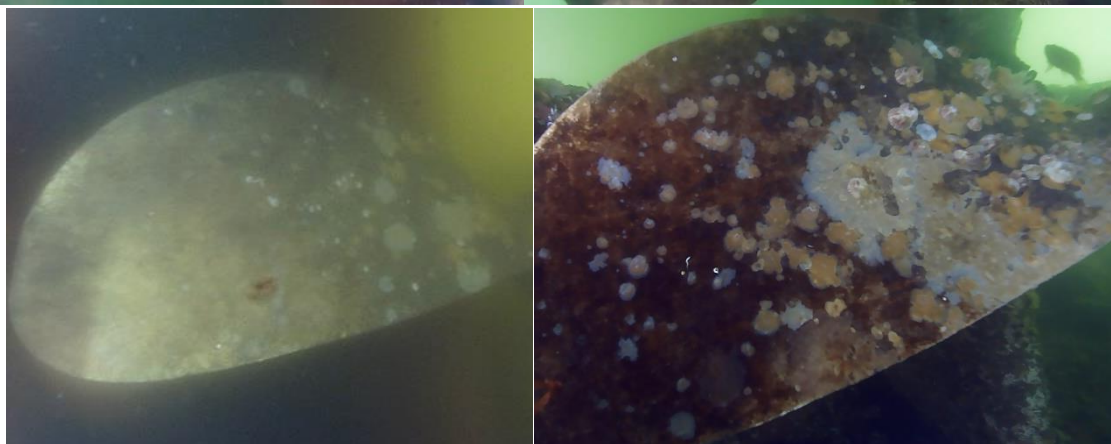
11月



2月



5月



7月



図 5 5 - 1 通電あり／なしのプロペラ表面の比較 (11 月～7 月)

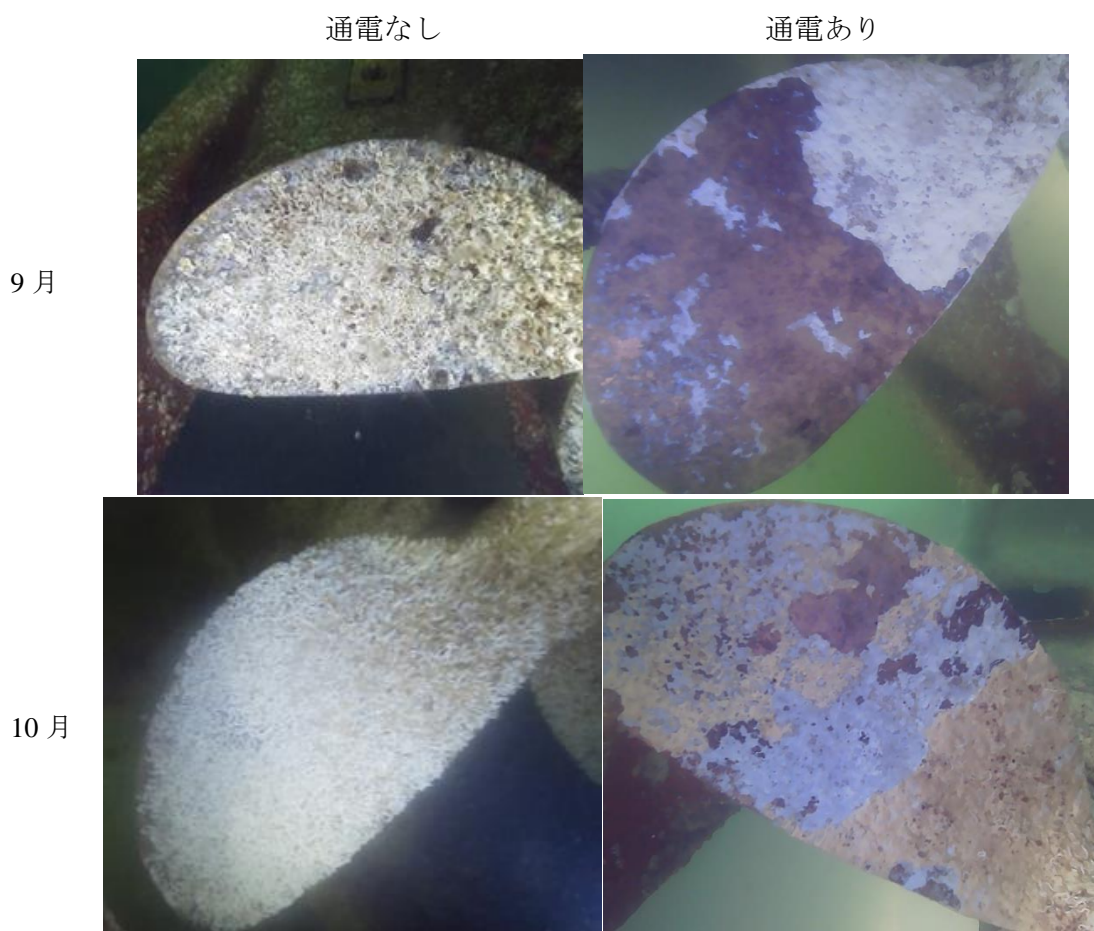


図 5 5 - 2 通電あり／なしのプロペラ表面の比較 (9月、10月)

5.1.6 プロペラ面の電位モニタリング

設置した直流安定化電源を用いて 2021 年 11 月 25 日午後より通電試験を開始した。生物付着防止に必要な最低電流密度は $0.25\text{A}/\text{m}^2$ であるが、安全率を考慮し、 $0.30\text{A}/\text{m}^2$ (通電電流 : 0.09A) になるよう、1 台あたりの電源を 0.03A に設定した。

プロペラ表面の電位の計測には電圧データロガーを用い、プロペラ表面全体の電位をモニタリングした。通電開始後約 2 週間分のモニタリング結果を図 5 6 に示す。

時間により変動はあるもののプロペラ表面の電位は $-0.62\text{V vs. Ag}/\text{AgCl}$ (以降単に V とする) を示しており、生物付着防止に必要な電位 (約 -1.0V 以下) を示していないことがわかった。

防汚に必要な電位まで下がらない原因を究明するため、小型船舶の停泊場所の近傍で、ほぼ同じ面積の別プロペラを用いて、プロペラ単体への通電を行った。図 5 7 にプロペラ単体の通電試験の様子を示す。加えて、図 5 8 にプロペラ単体で分極測定を行った際の結果を示す。図 5 8 からプロペラ単体では想定していた設定電流密度 $0.25\text{A}/\text{m}^2$ で電位が -1.05V まで下がっており、設定電流密度 $0.25\text{A}/\text{m}^2$ 以上では十分に生物付着防止が可能な遷移域に達していることを改めて確認した。

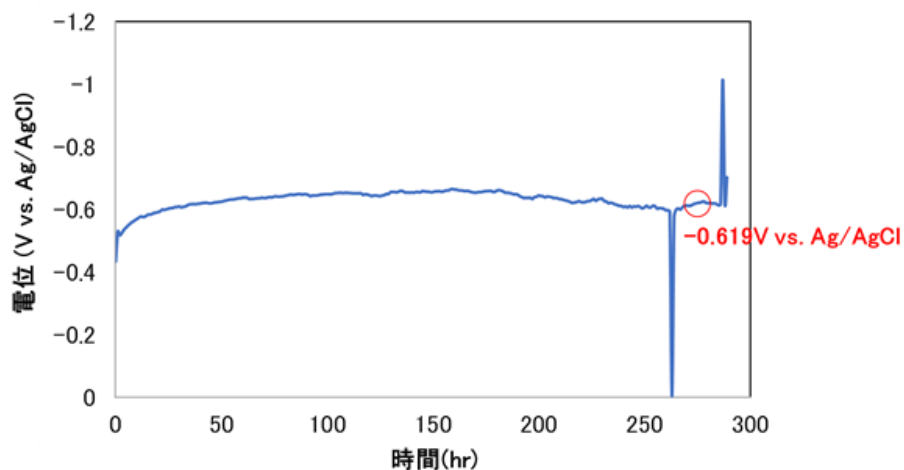


図 5 6 電位モニタリング結果



図 5 7 プロペラ単体の通電試験の様子

また、プロペラの電位測定に加えて、船体の電位についても測定したところ船体にも少くない電流が流れていることが確認された。船体に漏電した原因は、通電なし試験の1年間で、塗膜の劣化や岸壁との接触により塗膜の欠陥が起これ、船体外板が海中にむき出しになった箇所があるためと推測された。この段階では推測に過ぎなかったが、8月以降、大電流を加えた際に船体や舵のいたるところに電着被膜が厚く形成されており、船体外板のかなりの面積に通電していることが判明した。

これらの結果を踏まえ、プロペラ防汚を達成するために、プロペラの電位の値に基づき、設定電流値を制御することとした。基準とする電位は図5-8から-1.05Vとし、毎月の水中ドローンによるプロペラ観察結果も考慮し、設定電流値を適宜見直した。

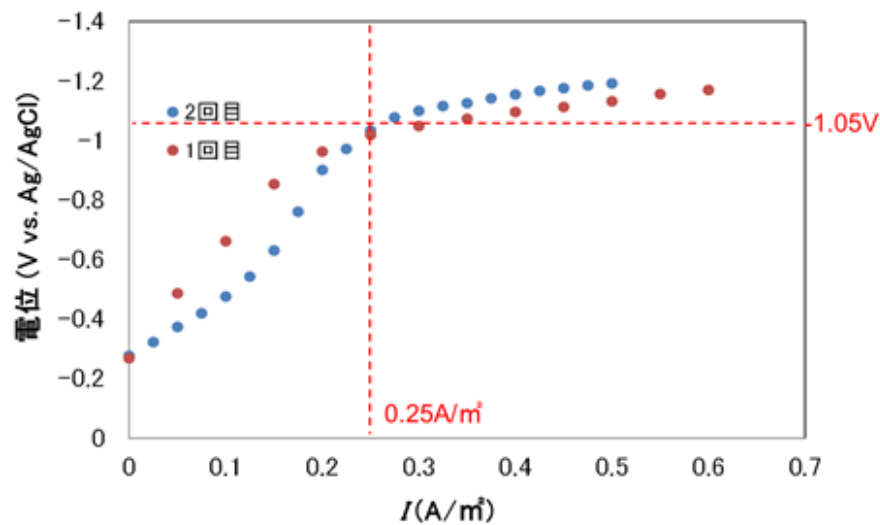


図 5 8 プロペラ単体の分極測定結果

加えて、これまではプロペラの電位の確認には現地に赴く必要があったが、7/22（金）より、プロペラの電位をリモートで確認することができる機器を導入し、リアルタイムに電位を確認できるようにした。

以下に設定電流密度の変更履歴および変更理由を示す。

1) 1 回目の電流密度の設定変更

変更日：2021/12/8（水）

変更前の設定電流密度：0.3A/m²

変更後の設定電流密度：1.5A/m²

変更理由：生物付着防止に必要な電位(-1.05V 以下の値)を示していないことがわかったため電流密度を上げた。

2) 2 回目の電流密度の設定変更

変更日：2021/12/13（月）

変更前の設定電流密度：1.5A/m²

変更後の設定電流密度：0.75A/m²

変更理由：プロペラ表面全体の電位が-1.31 V と防汚電位-1.05 を超えて卑側にシフトしていた。低電位の状態が長く持続されると、海水中に含まれるマグネシウムイオンおよびカルシウムイオンがプロペラ表面に電着被膜として析出形成されるリスクがあると考え、電流密度を 0.75A/m²とした。

3) 3 回目の電流密度の設定変更

変更日：2022/5/13（金）

変更前の設定電流密度：0.75A/m²

変更後の設定電流密度：2.8A/m²

変更理由：4月の航行試験時に水中ドローンでプロペラ表面を観察した際に通電あり試験開始時には見られなかった生物付着がプロペラ表面の一部に認められるようになった。そのため、改めてダイバー作業によりプロペラの表面近傍の局所電位測定を実施した結果、通常電位モニタリングで計測しているプロペラ表面全体の電位は生物付着防止に必要な値を示しているのに対し、プロペラ表面近傍の局所電位は防汚に十分な値を示していないことが判明した。そこで、プロペラ表面近傍の局所電位が生物付着防止に必要な値を安定的に示すための電流密度を検討した結果、2.8A/m²であることがわかった。2)にも示すように低電位の状態が長く維持されることで電着被膜がプロペラ表面に形成されるリスクがあるが、生物付着防止を確実にを行うことを最優先とし、設定電流密度を2.8A/m²に変更することとした。

4) 4回目の電流密度の設定変更

変更期間：2022/8/22（月）～26（金）

2022/9/9（金）～16（金）

2022/10/11（火）～13（木）

上記期間以外の設定電流密度：2.8A/m²

一時変更後の設定電流密度：50.0A/m²

変更理由：7月の航行試験時に水中ドローンでプロペラ表面を観察した際にプロペラ先端部にまで海生生物の付着が認められた。生物がプロペラ基材へ直接付着することは考えにくいため、プロペラ表面に電着被膜が形成され、電着被膜上に生物が付着してしまったのではないかと推測した。そのため、航行試験前の数日間は高電流密度にて通電をすることで電着被膜を脆い組成に変化させプロペラ表面から浮き上がらせて、電着被膜ごと付着した生物を剥離する手法を試みることにした。結果として、航行試験後においてプロペラ表面上の付着生物を除去することができた（図59）。

図60に設定電流密度を0.75A/m²に変えてからのプロペラ全面の電位の推移を示す。0.75A/m²の期間では、ところどころ防汚電位-1.05Vを切り、十分防汚できていない期間が存在するが、2.8A/m²に変えてからは通電停止期間を除いて常時-1.05Vより低い電位を維持できており、防汚効果が保たれていると言える。一方で、原因は不明だが、6月下旬から7月上旬にかけて電位が-2.2V程度まで電位が急激に下がっており、推定電流密度は3.0A/m²以上と過大な電流量となっている。この影響により、プロペラ表面に電着被膜が急速に形成されたと考えられる。また、この期間はプロペラ表面の観察で、生物付着の進行が見られた時期と重なる。電着被膜ができていない箇所が存在すると、抵抗差により電流は電着被膜ができていない箇所に優先的に流れるため、一時的に電着被膜上の防汚効果が薄まることになる。加えて、6月下旬から7月上旬にかけては過去1年で最も急上昇した期間でもあり、活発に活動を始めた生物

が防汚効果の薄れた電着被膜上に多量に付着し急成長したものと推測される。

一方、生物は電着被膜上に付着しているため、プロペラ基材には根を張っておらず、大電流通電により電着被膜を硬質な被膜から軟質な被膜に変化させることで、プロペラの回転に伴う水流で電着被膜ごと付着した生物を剥離することが可能となる。

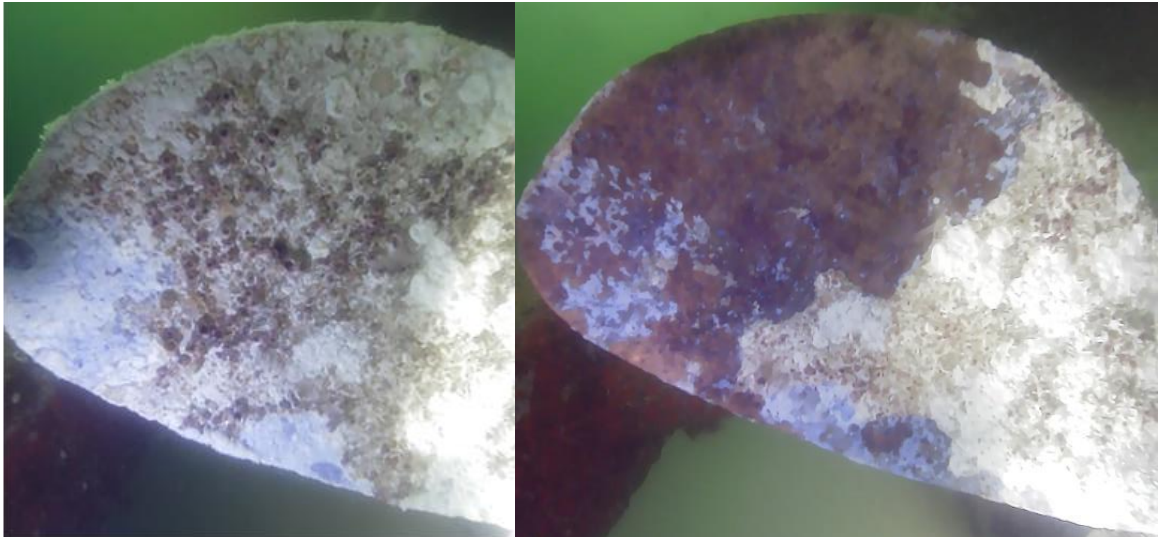


図 5 9 2022 年 8 月の大電流通電における航行試験前後のプロペラ表面の様子
(左：約 6 日間の大電流通電後、右：航行試験後)

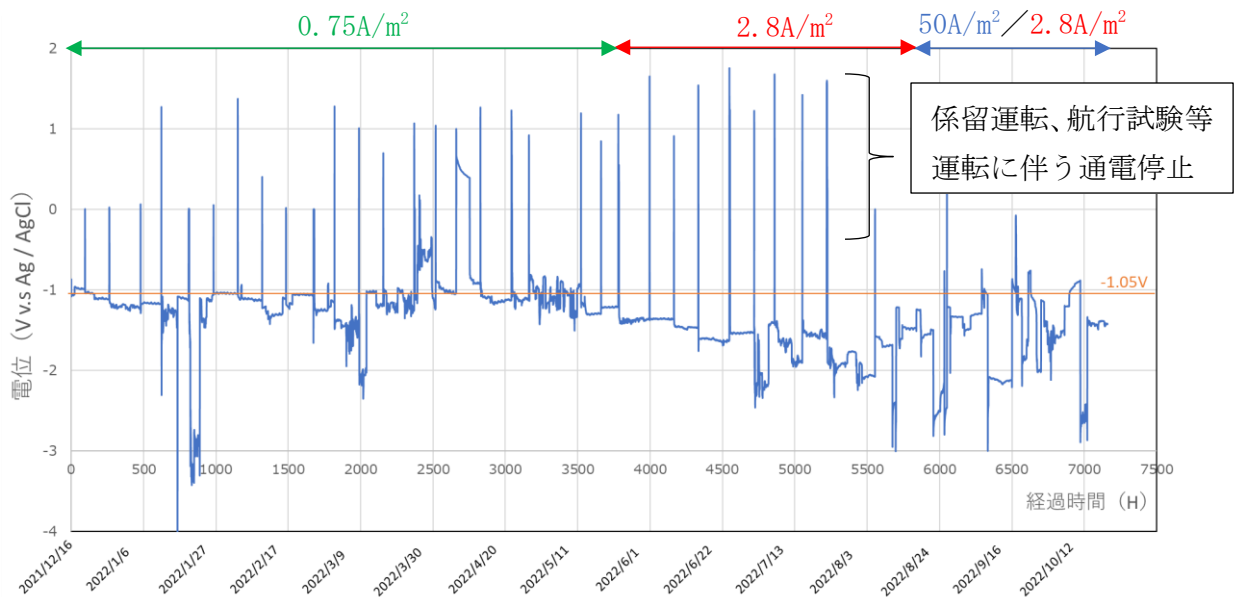


図 6 0 プロペラ全面の電位モニタリング結果

5. 1. 7 小型船舶（通電あり時）の燃費経年劣化傾向の把握

本節では、1 年間にわたり計測した供試船舶の通電ありの航行試験結果から、生物付着による燃費悪化の程度を評価する。表 1 8 および図 6 1 に対地船速 7.5knot 相当に換算した燃料消費量を示す。

燃料消費量がほぼ一定となっている 2021 年 11 月から 2022 年 3 月計測分は汚損の影

響がないと考え同期間の燃料消費量の平均を基準とすると、通電あり試験の基準燃料消費量は3.389 ℓ となる。図6-2に燃料消費量増加の模式図を示す。生物付着による燃料消費量増加の傾きは0.00477 ℓ /日であり、供試船舶が生物付着の発生する期間に停泊していた場合、燃料消費量は停泊1日あたり0.00477 ℓ 増加していくこととなる。

燃料消費量の増加率を算出すると通電あり試験の生物付着による燃料消費量増加率は0.198%/日となった。図6-3に燃料消費量増加率の模式図を示す。燃料消費量増加率算出時の基準となる燃料消費量は、通電なし試験時の基準燃料消費量2.407 ℓ としている。

表1-8 通電あり試験時の7.5knot換算燃料消費量（往復平均）

往復平均		消費燃料 (ℓ)	7.5knot換算消費燃料 (ℓ)	7.5knot換算平均消費燃料 (ℓ)
2021/11/12	1st	2.377	3.424	3.393
	2nd	2.375	3.361	
2021/12/16	1st	2.397	3.406	3.391
	2nd	2.399	3.376	
2022/2/24	1st	2.337	3.476	3.394
	2nd	2.372	3.313	
2022/3/25	1st	2.401	3.386	3.376
	2nd	2.386	3.367	
2022/4/22	1st	2.493	3.719	3.685
	2nd	2.413	3.651	
2022/5/23	1st	2.539	3.907	3.870
	2nd	2.515	3.834	
2022/6/24	1st	2.856	4.780	4.695
	2nd	2.768	4.611	
2022/7/22	1st	3.908	8.199	7.889
	2nd	3.809	7.579	
2022/8/26	1st	2.651	4.196	4.174
	2nd	2.579	4.151	
2022/9/16	1st	2.700	4.413	4.328
	2nd	2.573	4.243	
2022/10/13	1st	2.659	4.188	4.158
	2nd	2.608	4.128	

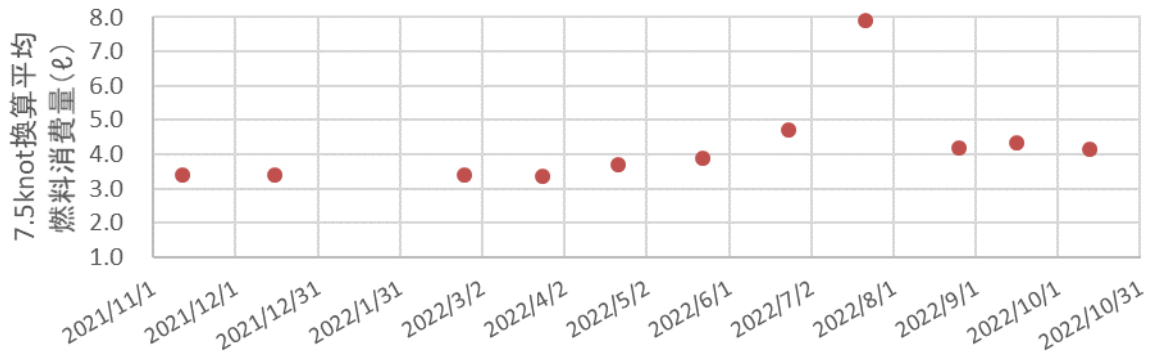


図 6 1 7.5knot 換算燃料消費量の推移 (通電あり)

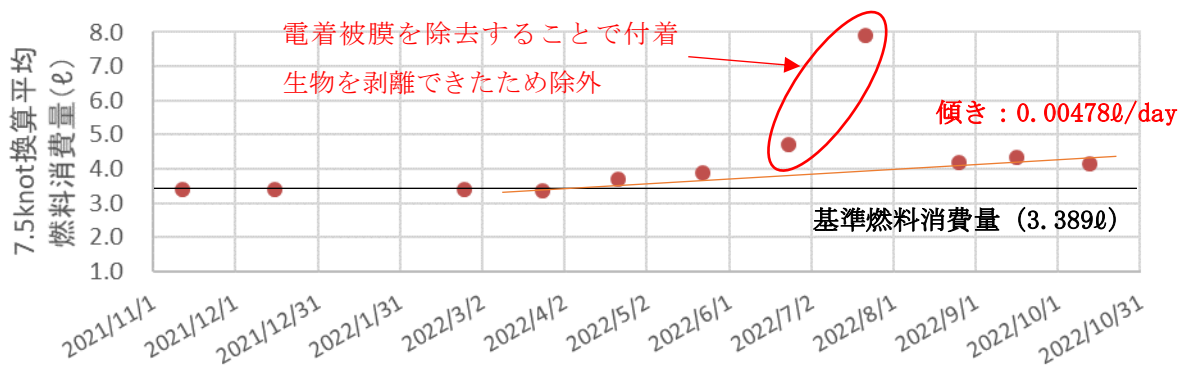


図 6 2 基準燃料消費量および消費燃料増加量の模式図 (通電あり)

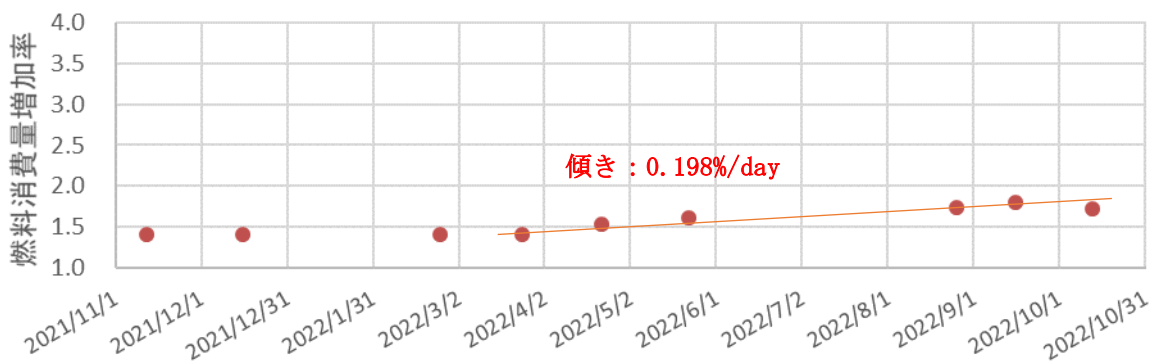


図 6 3 燃料消費量増加率の模式図 (通電あり)

5.2 微弱電流法の効果の確認

2020 年度の通電なし試験で計測した燃料消費量と 2021 年度の通電あり試験で計測した燃料消費量を比較することにより、微弱電流法の効果（燃費劣化軽減効果、生物付着抑制効果）を確認、考察する。

5.2.1 汚損による燃料消費量増加影響の成分分離

通電あり試験開始にあたり、プロペラのみ研磨し、プロペラに付着した生物等をすべて除去しているため、通電なし試験時の基準燃料消費量 2.407ℓと通電あり試験時の基準燃料消費量 3.389ℓの差である 0.982ℓが船体の汚損による燃料消費量の増加分と考えら

れる。一方で、通電なし試験で得られた燃料消費量の最大増加量 4.662ℓ から船体の汚損による燃料消費量増加分 0.982ℓ を引いた 3.680ℓ がプロペラの汚損による燃料消費量増加分とみなすことができる。

上記から、燃料消費量増加分のうち、船体の汚損影響が 21%、プロペラの汚損影響が 79%となることがわかった。

5.2.2 プロペラへの通電による燃費劣化抑制効果

5.1.7 節で、生物付着が発生する期間における通電なしの燃料消費量増加率は 1.44%/日、通電ありの場合は 0.198%/日となることがわかった。ただし、この増加率の中には、プロペラの汚損によるものと、船体の汚損によるものの両者が含まれている。5.2.1 節から、通電なし試験におけるプロペラと船体の汚損の割合が、79%:21%となることがわかっているため、通電あり試験でも同比率で汚損が進行したと仮定する。図 6 4 に通電あり試験における燃料消費量増加率に想定される船体汚損による燃料消費量増加率を重ねたものを示す。赤線で示す通電あり試験の燃料消費量増加率の傾きと緑線で示す想定される船体汚損による燃料消費量増加率の傾きは同程度であり、値では通電あり試験の傾きが 0.198%/日、船体の汚損の傾きが 0.302%/日であり、オーダーとしては同程度で、絶対値は船体汚損の傾きの方が大きい。このことから、通電あり試験における燃料消費量の増加率は船体汚損の増加率と等しいとみなすことができる。

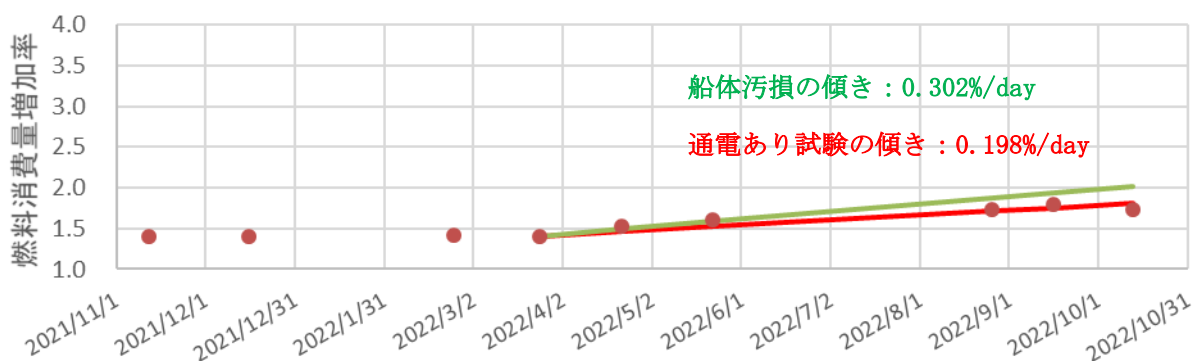


図 6 4 通電あり試験の燃料消費量増加率と船体汚損による増加率の比較

加えて、通電なし/あり試験開始時のプロペラ粗度の影響による性能差 0.6%を考慮しても、燃料消費量増加率の大小関係は変わらない。

以上より、2020 年度の通電なし試験で計測した燃料消費量と 2021 年度の通電あり試験で計測した燃料消費量を比較した結果、プロペラへ通電を行うことで、プロペラの汚損による燃費悪化を完全に抑制することができる結論付ける。

1 年のうち 5 か月間 (150 日) のみ生物付着による燃費悪化が発生すると仮定し、その悪化率を通電なし試験で得られた 1.44%/日とする。毎日 2 海里を航行するとして、通電しない場合の年間燃料消費量は 1268.5ℓ となる。一方、通電している場合はプロペラの汚損による燃費の悪化はゼロとなり、船体の汚損に伴う燃費の悪化のみ発生する。燃

費悪化のうち、船体寄与分が 21%とわかっているため、通電している場合の燃費悪化率は 0.302%/日となり、通電ありの年間燃料消費量を通電しない場合と同様に算出すると 960.40 となる。これらより、通電による燃料消費量削減効果は 24.3%となった。

水中ドローンの映像では、計測最終回の 2022 年 10 月時点でもプロペラ根本側に電着被膜やフジツボの付着が残っていることが見て取れるが、プロペラの推力の大部分は先端側が持っており、先端側に生物の付着がなく、残った被膜もかなり薄いと思われることから、プロペラの性能は試験開始時の研磨後の性能とほぼ変わらないと判断できる。

今回の試験では、電流が船体側にも流れていたため、電位がなかなか安定しなかった。特に 6 月下旬から 7 月上旬にかけて原因不明の電位低下によると思われる電着被膜の生成という不測の事態が発生してしまい、この電着被膜を剥離させるために 50A/m² の大電流通電をせざるを得なかった。しかし設定電流密度を 2.8A/m² に変更し安定的にプロペラに防汚電流を流せていた期間には生物付着は見られず、プロペラ汚損起因の燃料消費量の増加も認められなかったことから、微弱電流法による燃費劣化軽減効果ならびに生物付着抑制効果を確認できたと判断する。

5.3 実運航船での効果の推定法の見直し

実運航船での効果の推定法検討に際し、2020 年度の段階では通電あり試験が未実施であったため、以下の 2 点が不明であった。

- ① 小型船舶の燃費悪化におけるプロペラの寄与率
- ② 通電による生物付着抑制率（燃費悪化抑制率）

2020 年度の検討では①を 70%、②を 100%と仮定して検討を行ったが、今年度の通電試験により①は約 80%、②は約 100%であることがわかった。これを加味して昨年度の検討に若干の修正を加える。

5.3.1 大型船の燃費経年劣化傾向の把握

2020 年度は大型鉱石運搬船の 1 日あたりの消費燃料増加率を算出するにあたり、1 年間の消費燃料増加率 5%を年間停泊日数 64.2 日で割ることにより、0.08%と算出していた。一方、2020 年度および 2021 年度の小型船舶を用いた試験結果を見ると、消費燃料増加は 1 年のうちの半分（5 月～10 月）の時期しか起こっていない。そこで今回は、大型鉱石運搬船において最初のプロペラ清掃（就航後 32 か月後）までの全停泊日数のうち冬場の停泊日数を計上しないことにし、北半球においては 11 月～4 月、南半球においては 5 月～10 月の日数を除いて算出してみた。図 6 5 に就航後馬力増加率の推移を図 6 6 に夏場の停泊日数の推移を示す。32 か月後の馬力増加率は $5\% \times 32 \text{ か月} / 12 \text{ か月} = 13.3\%$ に対し、夏場の停泊日数の累計は 89.4 日となり、1 日あたりの消費燃料増加率は $13.3/89.4 = 0.149\%$ となった。

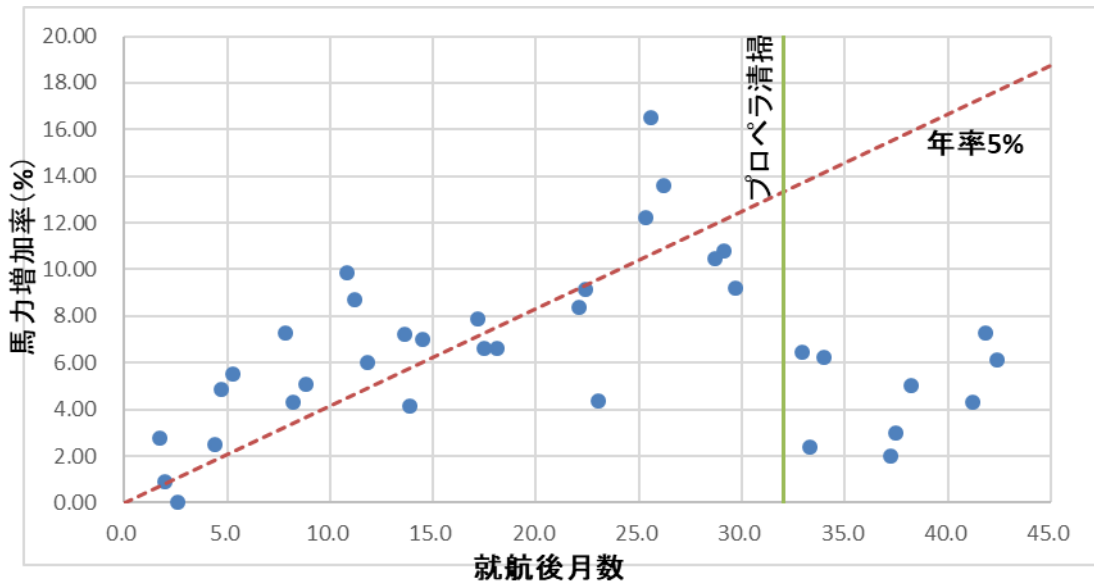


図 6 5 大型鉱石運搬船の馬力増加率の推移

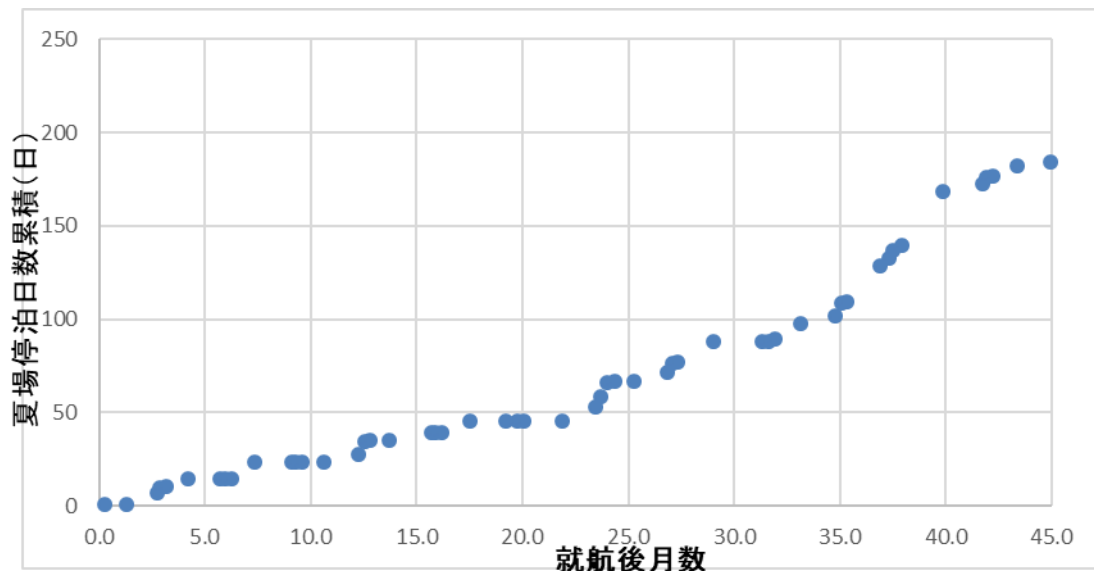


図 6 6 大型鉱石運搬船の夏場の停泊日数の推移

5.3.2 大型船と小型船の燃費経年劣化傾向の比較および考察

2020 年度に行った考察において、以下を変更して計算した結果を表 1 9 に示す。

- ・小型船における燃費悪化へのプロペラ寄与率を 80%に変更
- ・大型鉱石運搬船の 1 日当たり消費燃料増加率を 0.149%に変更

表 1 9 中の粗度なしの欄には、「椿」・大型鉱石運搬船それぞれについて、生物付着がない場合のプロペラ馬力の計算結果が示されている。「椿」は 177.7HP、大型鉱石運搬船は 134,600HP となっており、これは 2020 年度の結果から変えていない。

まず「椿」における 1 日経過後のプロペラ馬力の悪化量を求めると、全体の悪化率は 1.44%/日なので、プロペラ分は $1.44 \times 0.8 = 1.152\%$ であり、プロペラ馬力の悪化量は $1.01152 \times 177.7 = 179.7\text{HP}$ となる。次に、表 1 9 中の右の粗度高さとある欄には、粗度高

さを与えた場合のプロペラ馬力の計算結果が示されているが、粗度高さを 0.00016(m) とすると、「椿」のプロペラ馬力は 179.7HP となり、先に計算したプロペラ馬力の悪化量と一致する。同じ粗度高さを用いて大型鉦石運搬船の場合を計算すると 135,359HP であり、これは悪化率 0.51%に相当する。モニタリング結果から得られた悪化率は 0.10%であり、計算結果の 1/5 程度となっている。

昨年度の推定では、「椿」のプロペラ寄与分 70%、大型鉦石運搬船の生物付着日数は全停泊日数と仮定しており、大型鉦石運搬船のプロペラ馬力の想定悪化率 0.51%、モニタリングによる悪化率 0.056%と 1 桁の開きがあった。今回の計算結果では、想定悪化率はあまり変わらず、生物付着日数を夏場停泊日数にとることによりモニタリングによる悪化率が大きくなった結果、両者の差が半減した。2020 年度は 1 桁の開きをプロペラ直径比によるものではないかと推測したが、今回の結果を見るとモニタリング結果から生物付着日数をどのように評価するかの方が影響は大きいように思われる。また、今回は生物付着日数を夏場の停泊日数としたが、各港湾における水温や水質（生物付着度合等）を考慮に入れることにより、さらに精度が向上すると考える。

5.3.3 大型鉱石運搬船における効果の推定

大型鉱石運搬船における微弱電流法の効果の推定を行う。図6-7に汚損による燃料消費量の増加を模式的に示す。模式図では以下を前提としている。

- ・ 図の横軸は5年
- ・ 汚損による消費燃料増加量は年5%
- ・ 汚損による消費燃料増加量のうちのプロペラ分は7割
- ・ ダイバーの投入等により5年で4回プロペラ清掃を実施

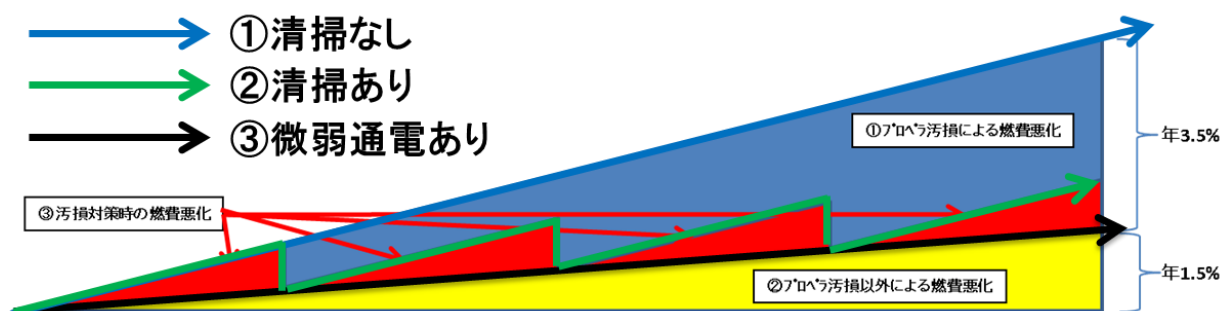


図6-7 汚損による燃料消費量の増加の模式図

今回の小型船舶の試験では、通電によりプロペラによる消費燃料増加はゼロに抑えられたため、図6-7中のプロペラ汚損以外による燃費悪化（黄色）の部分のみが残ることになる。ここで、新造時年間燃料消費量を20,000t、燃料費を50,000円/tとして10年間運航したときの効果を見積もってみる。

- ・ 汚損がない場合の燃料消費量： $20,000\text{t} \times 10\text{年} = 200,000\text{t}$
- ・ 汚損による消費燃料増加量： $(5\% \times 10\text{年}) \times 200,000\text{t} / 2 = 50,000\text{t}$
- ・ うちプロペラ以外によるもの： $(1.5\% \times 10\text{年}) \times 200,000\text{t} / 2 = 15,000\text{t}$

したがって途中のプロペラ清掃を考慮しなければ、通電による消費燃料削減効果は、 $(50,000\text{t} - 15,000\text{t}) / (200,000\text{t} + 50,000\text{t}) = 0.14$

で14%となる。

途中でプロペラ清掃を行う場合と比較すると、通電により削減できる燃料消費量は図6-7の赤の部分のみとなる。赤の部分は10年間で、

$$(3.5\% \times 10\text{年} / 8\text{回}) \times 20,000\text{t} \times 10\text{年} / 8\text{回} / 2 \times 8\text{回} = 4,375\text{t}$$

したがって通電による燃料削減効果は

$$4,375\text{t} / (200,000\text{t} + 50,000\text{t} / 2 \times 1.5\% + 4,375\text{t}) = 0.021$$

で約2%となる。

金額に換算すれば

$$4,375\text{t} \times 5\text{万円} = 21,875\text{万円}$$

であり、10年間で約2億円の費用削減が見込まれる。

なお、装置設置費用については精査していないが、装置構成が類似となる外部電源防食装置の設置費用が約600万円程度であり、本装置の設置費用も同程度と考えられる。

6. 2021年度の目標達成状況

2021年度の目標（本事業の最終目標）

プロペラへの生物付着を抑制する装置を開発し、小型船舶による試験で、通電時及び非通電時の燃料消費量を比較し、通電時の燃料消費量を1.5%低減する。

【目標の達成状況】

小型船舶による通電なし／あり試験で計測した燃料消費量から算出した通電による燃料消費量削減効果は24.3%となり、目標を達成した。

プロペラの汚損による燃料消費量増加率を算出し比較した結果、通電時のプロペラの汚損による燃料消費量の増加分はゼロとなった。

加えて、本試験結果を基に試算した大型鉱石運搬船における通電による燃料消費量削減効果は2.1%となり、大型商船においても大きな効果が得られることが分かった。

これらの結果から、目標値として設定した通電時の燃料消費量1.5%削減を達成できた。

なお、小型船舶と大型商船で燃料消費量削減効果に大きな差があるのは、燃料消費量に対する生物付着による悪化影響が小型船舶：1.44%/日、大型商船：0.149%/日と小型船舶の方が圧倒的に大きいことに起因するものである。

7. 実施内容の要旨

7.1 2020年度の実施内容の要旨

（1）小型船舶通電なし試験

- 1) 通電による効果を2021年度に実施する通電あり試験と比較して把握するため、通電なし試験を実施して燃料消費量を把握する。

2020年11月から2021年10月までの1年間、月1回計12回の航行試験を実施した。

- 2) 試験にはJMUアムテック所有の小型船舶「けやき」を使用する。

「けやき」主要目 長さ：10m、幅：2.5m、喫水：1.1m、プロペラ径：0.7m
試験前に、表面が活性化しない程度にプロペラを清掃し、表面粗度を計測する。

供試船舶は、同一船であるが、船名が「けやき」から「椿」に変更している。

プロペラ表面の粗度を計測した結果、Suction side（船首側）の算術平均粗さは $6.39\mu\text{m}$ 、Pressure side（船尾側）の算術平均粗さは $4.66\mu\text{m}$ となった。

- 3) ばら積み船の一般的な運航では、停泊期間は長くて1週間程度と考えられるため、小型船舶「けやき」において1週間おきに係留状態でプロペラを毎分300回転、30分ほど回転させる。また海水温を計測する。

2020年11月下旬の航行試験実施後、航行試験を実施する週を除いて約1週間おきに計29回係留運転を実施し、実際の運航に近い状態を再現した。また、航行試験および係留運転に合わせ海水温を計測した。海水温は、2021年1月下旬にかけて低下し、8℃を記録した後、2021年8月まで徐々に増加し30℃が最高水温であった。

- 4) 1か月に1回、所定航路を所定速力で航走し、そのときの速力ならびに燃料消費量を記録する。速力は速力計測器、燃料消費量はロータリー式燃料流量計を用いて計測する。生物付着は季節、海水状態等により異なるため、2020年度、2021年度とも可能な限り同一時期、同一航路を航走し、そのデータを約1年間にわたって取得することによって、プロペラへの生物付着状況の差を小さくする。

設定した2海里の航行に要した燃料および対地船速を用いて換算した7.5kt相当で航行した際の消費燃料で評価した結果、2020年11月から2021年4月まではほぼ一定の燃料消費量となり、2021年5月から急速に燃料消費量が増加する結果となった。燃料消費量の増加率の傾きから、供試船舶の燃料消費量増加率は1.44%/日であると結論付けた。

- 5) 1か月に1回、プロペラへの生物付着状況を確認する。確認は船を陸上に引き上げて写真撮影するか、もしくは係留状態でJMU保有の水中ドローンを使用して写真撮影して行う。

航行試験の前後に水中ドローンを用いてプロペラの生物付着状況を確認した。2020年11月から2021年2月まではプロペラへの海生生物付着は確認できなかった。2021年3月に藻類の付着が確認できたが、航行試験後には剥離しており、燃費への影響はなかったと判断した。2021年5月からプロペラへのフジツボの付着が確認でき、以降2021年10月まで加速度的に生物の付着が見られた。航行試験結果で燃費の劣化が見られたのは2021年5月の計測からであり、これはフジツボの付着が確認できた時期と一致している。

(2) 通電あり試験の計画

- 1) 2021年度に実施する小型船舶通電あり試験の計画を立てる。
- 2) プロペラ面積を基とした必要通電量の算定

通電量が大きければ生物付着は抑えられるが、短期間で電着被膜が生成してしまう。電着被膜が生成されるとプロペラ表面の粗度が増し、燃費悪化につながる。電着被膜が生成されずかつ生物が付着しない最低限の通電量として、先行する要素試験により単位面積あたりの通電量 $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を割り出している。使用する小型船舶のプロペラについては図面がないため、写真解析や現物実測によりプロペラ面積を割り出し、単位面積あたりの通電量を $0.25\text{A}/\text{m}^2$ として必要通電量を算定する。

小型船舶およびプロペラの 3D スキャンを行い、通電シミュレーションの船体およびプロペラ形状として利用した。また、プロペラ表面積から防汚面積を算出し、防汚に必要な通電量を 0.075A と設定した。

3) シミュレーションを用いた陽極配置検討

通電による生物付着抑止を効率的に行うためには、少ない通電量、かつプロペラ表面の通電量が均一でムラがないものにする必要がある。ムラがあると通電量が多いところでは電着被膜が生成し、少ないところでは生物付着抑止効果が薄れてしまう。複雑な形状をしたプロペラ表面での通電量を均一にするためには、陽極をどこにどの程度配置するかが重要であり、通電シミュレーションにより試験対象の小型船舶における陽極配置を決める。

小型船舶およびプロペラの 3D スキャンデータおよびプロペラ面積から算出した防汚に必要な通電量 0.075A を入力として、通電シミュレーションにより陽極配置の検討を行った。プロペラ前方に片舷 2 箇所計 4 箇所、プロペラ後方上部に片舷 1 箇所計 2 箇所、全体で 6 箇所に陽極を配置することで、プロペラ表面の電流密度のばらつきは $0.25\text{A}/\text{m}^2$ を基準として、 -19.5% ～ $+18.0\%$ の範囲となった。

4) 装置選定、設置方法の検討

必要通電量に対応した電源を選定し、試験に供する小型船舶内での設置方法を検討する。また小型船舶船底への陽極設置方法を検討するとともに、配線方法について検討する。

通電時の電圧、設定電流値の分解能、重量から電源の選定を行い、菊水電子工業製コンパクト直流安定化電源 PMX-18-5A を 3 台用いることとし、船倉内に電源区画を設け、船倉内に固定することとした。

モックアップ試験により、陽極設置方法の妥当性確認を行った。陽極の接点は船内側に設けることとした。

(3) 実運航船での効果の推定法検討

小型船舶を用いた試験では、プロペラ係留運転が週 1 回、運航が月 1 回であるのに対し、実際のばら積み貨物船では、停泊は年数回で 1 回数日程度、残りが運航状態である。実際の運航スケジュールと今回の試験結果を元に、実際のばら積み貨物船での効果を推定する手法を検討する。

小型船舶および実運航船のプロペラ主要目（直径、翼数、代表コード長、展開面積比、回転数）、船速、航海スケジュール（停泊日数）の比から実運航船の通電に

よる燃費経年劣化防止効果を試算するエクセルを作成した。

7.2 2021年度の実施内容の要旨

(1) 小型船舶通電あり試験

- 1) 通電による効果を2020年度に実施した通電なし試験と比較して把握するため、通電あり試験を実施して燃料消費量を把握する。

2021年11月から2022年10月までの1年間、月1回計11回の航行試験を実施した。新型コロナウイルスによる感染急拡大に伴い、2022年1月の計測は中止した。

- 2) 試験には2020年度と同じくJMUアムテック所有の小型船舶「椿」を使用する。
「椿」主要目 長さ：10m、幅：2.5m、喫水：1.1m、プロペラ径：0.7m
試験前にプロペラを2020年度と同程度に清掃し、表面粗度を計測する。

プロペラ表面の粗度を計測した結果、Suction side（船首側）の算術平均粗さは $5.04\mu\text{m}$ （通電なし試験開始時： $6.39\mu\text{m}$ ）、Pressure side（船尾側）の算術平均粗さは $4.46\mu\text{m}$ （通電なし試験開始時： $4.66\mu\text{m}$ ）となった。

Suction sideの粗度の差 $1.35\mu\text{m}$ は、燃料消費量に換算すると約0.6%と推測されるため、通電あり試験開始時のプロペラは、通電なし試験開始時より0.6%燃料消費量が少なくなることを考慮する必要がある。

- 3) 小型船舶「椿」において、1週間おきに係留状態でプロペラを毎分300回転、30分ほど回転させる。通電なしの場合と同じ理由のほかに、通電時にはあまり長くプロペラを回転させないでいると、プロペラに電着被膜が生成されてしまうためである。また海水温を計測する。

2021年11月から航行試験を実施する週を除いて約1週間おきに計33回係留運転を実施し、実際の運航に近い状態を再現した。また、航行試験および係留運転に合わせ海水温を計測した。海水温は、2020年度と同じように変動しており、2022年1月下旬にかけて低下し、最低水温 8°C を記録した後、2022年8月まで増加し 32°C が最高水温であった。2022年6月下旬から7月上旬の約2週間で 7°C 上昇しており、2年間で最も急な温度変化となっていた。

- 4) 1か月に1回、所定航路を所定速力で航走し、そのときの速力ならびに燃料消費量を記録する。速力は速力計測器、燃料消費量はロータリー式燃料流量計を用いて計測する。生物付着は季節、海水状態等により異なるため、1年間を通じたデータを取得する。

設定した 2 海里の航行に要した燃料および対地船速を用いて換算した船速 7.5knot 相当で航行した際の消費燃料で評価した結果、通電あり試験では 2021 年 11 月から 2022 年 3 月まではほぼ一定の燃料消費量となり、2021 年 4 月から徐々に燃料消費量が増加し、2022 年 7 月の計測では 2 年間で燃料消費量が最大となる結果となってしまった。

プロペラには防汚電流が流れているためプロペラ基材に直接生物が付着したとは考えにくいと、電着被膜が形成され、電着被膜上に生物が付着してしまったと推測した。電着被膜を剥離すれば燃料消費量は改善すると考え、大電流通電により電着被膜を脆くした結果、その後の計測では船速、燃料消費量ともに大きく改善した。

燃料消費量の増加率の傾きから、通電あり試験における供試船舶の燃料消費量増加率は 0.198%/日（通電なし試験：1.44%/日）であると結論付けた。

- 5) 1 か月に 1 回、プロペラへの生物付着状況を確認する。確認は船を陸上に引き上げて写真撮影するか、もしくは係留状態で JMU 保有の水中ドローンを使用して写真撮影して行う。

航行試験の前後に水中ドローンを用いてプロペラの生物付着状況を確認した。2021 年 12 月まではプロペラへの海生生物付着は確認できなかったが、通電なし試験より早く 2 月時点でプロペラ根本側にフジツボの付着が発生した。これは、通電開始から 2022 年 5 月ごろまで電位が安定せず、想定以上の電流が船体に流れていたこともあり、プロペラの防汚に必要な電流密度に達していない期間が断続的に存在していたことに起因すると考えられる。

2022 年 5 月下旬以降は安定的に防汚電流を流すことができていたが、7 月上旬に急激に電位が下がっており、その後のプロペラ観察でプロペラ全体がフジツボに覆われていることが判明した。4) にもあるが、急激に電位が下がった期間でプロペラ表面に電着被膜が発達し、電着被膜上に生物が付着したものと推測される。電着被膜を剥離するため、大電流通電を行った結果、プロペラの性能に大きく寄与するプロペラ先端側の生物の大部分が剥離し、試験開始直後のプロペラ素地と変わらない金属光沢が保たれていることを確認した。

(2) 微弱電流法の効果の確認

2020 年度の燃料消費量と 2021 年度の燃料消費量を比較することにより、微弱電流法の効果（燃費劣化軽減効果、生物付着抑制効果）を確認、考察する。燃料増加データにはプロペラへの生物付着によるものと船体への生物付着によるものの両方が含まれる。船体には防汚塗料が塗装してあるため、生物付着は少ないと考えられるが、燃料増加データをプロペラ起因のものと船体起因のものとの分離は以下のように行う。

- 1) 2020 年度の結果から、燃料増加の勾配を求める。これにはプロペラ起因のものとは船体起因のものとの両方が含まれる。
- 2) 2021 年度にプロペラを清掃した直後の走行試験結果においては、プロペラ汚損による燃料増加分が取り除かれるので、清掃直前の燃料増加量のうちプロペラ起因の燃料増加量がどの程度だったかがわかる。これにより燃料増加の勾配をプロペラ起因のものとは船体起因のものとの分離できる。
- 3) 2020 年度に船体の再塗装や清掃は行わない。これを実施してしまうと、2) でのプロペラ起因の燃料増加量の把握ができないためである。
- 4) 微弱電流法によりプロペラへの生物付着が完全に無い場合は、2021 年度の燃料増加の勾配は、2) で求めた船体起因の燃料増加の勾配と同一となり、燃料増加曲線は 2020 年度の船体起因の燃料増加曲線と同一勾配の延長線となるはずである。2021 年度のプロペラ起因の燃料増加は、この曲線との差によって求められる。仮に 2021 年度の燃料増加曲線の勾配が、2) で求めた船体起因の燃料増加曲線の勾配より小さい場合には、プロペラ清掃時に生物付着を完全に除去できなかったことになり、再度 2) の結果を見直す。

2020 年度の通電なし試験および 2021 年度の通電あり試験時の燃料消費量の推移から、船体・プロペラの寄与割合を求めた結果、燃料消費量増加分のうち、船体の汚損影響が 21%、プロペラの汚損影響が 79%であることがわかった。

上記の割合を基に、船体の汚損による燃料消費量増加率を求めると 0.302%/日となり、通電あり試験の燃料消費量増加率は 0.198%/日であるため、船体汚損の傾きが大きいものの、オーダーは同じであることから、通電あり試験における燃料消費量の増加率は船体汚損の増加率と等しいとみなすことができる。

以上より、2020 年度の通電なし試験で計測した燃料消費量と 2021 年度の通電あり試験で計測した燃料消費量を比較した結果、プロペラへ通電を行うことで、プロペラの汚損による燃費悪化を完全に抑制することができると結論付けた。

2021 年度の通電あり試験結果に基づき、2020 年度に作成した小型船舶および実運航船のプロペラ主要目（直径、翼数、代表コード長、展開面積比、回転数）、船速、航海スケジュール（停泊日数）の比から実運航船の通電による燃費経年劣化防止効果を試算するエクセルの見直しを行った。

8. 本技術開発における自己評価

2020 年度から 2021 年度に亘る「微弱電流を用いた舶用プロペラ生物付着防止装置の開発」を自己評価すると、当初の目標を大きく上回る成果が得られたと考える。特に、通電時のプロペラの汚損による燃料消費量の増加をゼロとすることができたことは想定を大きく上回っており、本技術開発の大きな成果であると評価できる。

9. 今後の取り組み

引き続き実船での評価試験を行い、第一段階として、2024年度中に建造中の船舶の艤装期間におけるプロペラの汚損防止を目的とした装置としての導入を目指す。これを足掛かりに2025年度中に、自社建造の大型商船への導入、装置の販売事業への拡大を予定している。

最後に本開発は公益財団法人日本財団からBOAT RACEの交付金による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。

以上

「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

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