

令和 7 年 4 月 7 日

報告書

表 題:

「曳航バージの抵抗増加に関わる要因の分析と抵抗推定手法の精度向上」

2023 年度、これまでの曳航抵抗推定方法に代わる新たな推定手法を確立するため
広島大学、流体テクノ(株)と共同実験として同大学にある水槽にて台船模型を用いた
平水中並びに波浪中の曳航抵抗の水槽試験を実施した。
その結果から 2024 年度は、平水中における摩擦抵抗の増加特性を実験的に明らかにし、
曳航抵抗推定方法の精度向上を図る取り組みを行った。

結果は、以下の流体テクノ(株)報告書を参照されたい。

目次




1. はじめに.....	1
1.1 研究背景と目的.....	1
1.2 曳航バージの抵抗推定における課題.....	1
1.3 本研究の概要.....	1
2. 試験方法および解析方法.....	2
2.1 平板曳航水槽試験.....	2
2.1.1 目的.....	2
2.1.2 設備.....	2
2.1.3 試験平板とフジツボ模型.....	3
2.1.4 試験条件および計測項目.....	7
2.1.5 解析方法.....	8
2.2 浸漬試験.....	9
2.2.1 目的.....	9
2.2.2 試験場所.....	9
2.2.3 試験条件および観察方法.....	10
2.2.4 解析方法.....	11
3. 試験結果.....	12
3.1 粗度による摩擦抵抗増加傾向の評価.....	12
3.1.1 平板の抵抗.....	12
3.1.2 摩擦抵抗増加量 ΔCF の解析.....	15
3.2 フジツボの付着傾向.....	20
3.2.1 海中に浸漬させた鉄板の表面状態.....	20
3.2.2 フジツボの高さおよび幅の成長曲線.....	24
4. 今年度実施試験および結言.....	26

付属書 水槽試験報告書

付属書 浸漬試験報告書

付属書 広島大学報告書

曳航バージの抵抗増加に関わる要因の分析と
抵抗推定手法の精度向上

承認	査閲	作成
		

令和7年4月7日

1. はじめに

1.1 研究背景と目的

地球温暖化対策として、温室効果ガス排出量の削減が国際的な課題となっており、海運・造船分野においても対応が急務となっている。国際海事機関(IMO)は新造船に対してエネルギー効率設計指標(EEDI: Energy Efficiency Design Index)を導入し、さらに既存船に対しても EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index)および年間燃費性能に基づく CII(Carbon Intensity Indicator)による格付け制度を導入している。これらの制度は国際トン数 400 トン以上の国際航路を航行する船舶を対象とするが、今後はそれ以外の内航船にも環境対応が求められるようになることが予想される。

そのような中、曳航バージにおいても、タグボートによる牽引に伴う CO₂排出の削減が強く求められている。曳航タグの燃費性能を向上させるためには、タグにかかる負荷、すなわち曳航バージが受ける流体抵抗を高精度に推定する必要がある。本研究では、曳航バージの抵抗推定精度を向上させるために、船体汚損による摩擦抵抗の増加量に注目し、その定量的評価手法の確立を目的とする。

1.2 曳航バージの抵抗推定における課題

曳航バージは一般的に、推進装置を持たず、タグボートにより牽引される構造であり、船体形状が単純な箱型に近いのが特徴である。これまでの研究や水槽試験の蓄積は乏しく、抵抗推定に関する体系的な知見は限られている。

また、搭載する貨物の形状や重量、重心位置に応じて喫水や浮心が大きく変化し、商船向けの試験や推定式をそのまま適用することは難しいのが実情である。加えて、自航機能を持たないバージに対して水槽試験を個別に実施することは、経済的にも実務的にも困難であることが多い。このため、タグボートの出力は、安全を見込んだ過大な設定となるケースが一般的であり、結果としてエネルギー効率の低下や燃料消費量の増加を招いている。

さらに、実船では船体表面に海洋生物が付着(汚損)することで、摩擦抵抗が大きく増加する。これは特に長期間港湾に係留されることの多い曳航バージにおいて顕著であり、汚損の程度に応じた抵抗変化を正しく評価する手法の確立が切望されている。

1.3 本研究の概要

本研究では、フジツボ付着を模擬した粗面を持つ平板を用いた曳航水槽試験を実施し、摩擦抵抗の増加特性を実験的に明らかにする。また、長期の海中浸漬試験により、フジツボの種類・付着傾向・成長速度などの定量データを取得し、船体汚損の実態把握を行う。

得られた実験結果を基に、バージ設計やタグボート出力設計における抵抗推定精度の向上、および CO₂排出削減への貢献を目指した新しい抵抗推定手法の構築を図る。

2. 試験方法および解析方法

2.1 平板曳航水槽試験

2.1.1 目的

本試験は、フジツボ付着を模擬した粗面平板を用いて、摩擦抵抗の増加特性を定量的に把握する。特に、被覆率およびフジツボ模型のサイズが摩擦抵抗に与える影響を明らかにし、最終的には曳航バージの抵抗推定モデルへ適用する。あわせて、平滑平板との比較を通じて、粗面による抵抗増加の寄与を明確化することを試みる。

2.1.2 設備

広島大学曳航水槽(長さ 100m、幅 8m、深さ 3.5m)にて試験を実施した。水槽試験報告書は付属書に示す。曳航水槽を図 1 に示す。



図 1 曳航水槽

図 2 に平板取り付け用の治具と検力計の電車取り付け部の写真を示す。治具は検力計を挟み込むように設置し、曳航電車の N 軸と接続した。N 軸は本来、船体模型の運動性能を計測するための回転軸であるが、本試験では上下移動機構を備えた本装置に平板を固定し、異なる喫水条件での試験を行うために活用した。

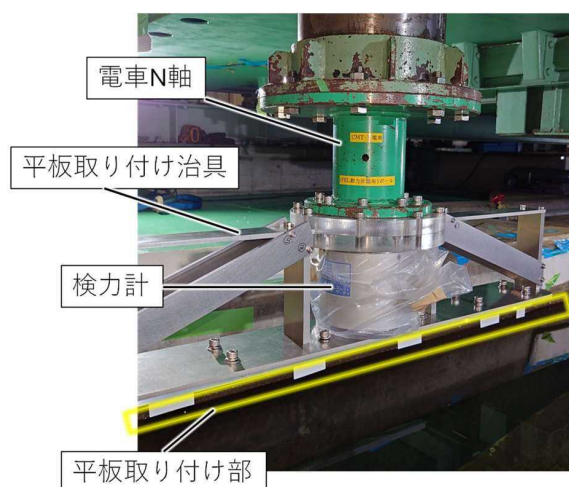


図 2 平板取り付け用の治具と検力計の電車取り付け部

2.1.3 試験平板とフジツボ模型

曳航試験には $L_{pp}=0.900\text{m}$ 、幅 0.008m 、高さ 0.550m の鉄製の平板を使用し、前後端には先端を尖らせる形状加工を施した。この端部処理は、流れの剥離や渦の発生を最小限に抑えることを目的としており、圧力抵抗の影響を極力排除し、摩擦抵抗のみを評価可能な状態とするために行った。側面が平滑な平板を CASE-1 と呼称し基準とした。粗面はフジツボ模型の高さと平板側面に貼り付けた際の被覆率を調整して模倣し、それぞれの平板を CASE-2 から CASE-6 と呼称した。図 3 に試験平板の寸法図、図 4 から図 6 にフジツボ模型の寸法図と 3D 形状図を示す。表 1 に平板の名前とフジツボ模型の高さ、側面被覆率の組み合わせを、図 7 試験平板の全体像に試験に用いた 6 種類の平板の全体像を示す。フジツボの配置は、米国材料試験協会 (ASTM: American Society for Testing and Materials) が制定する ASTM-D6990-20 に準拠して決定した。ASTM-D6990-20 は、海洋生物付着に対する材料の耐性評価を標準化した試験法であり、付着物の分布や再現性のある試験条件の確保を目的としている。

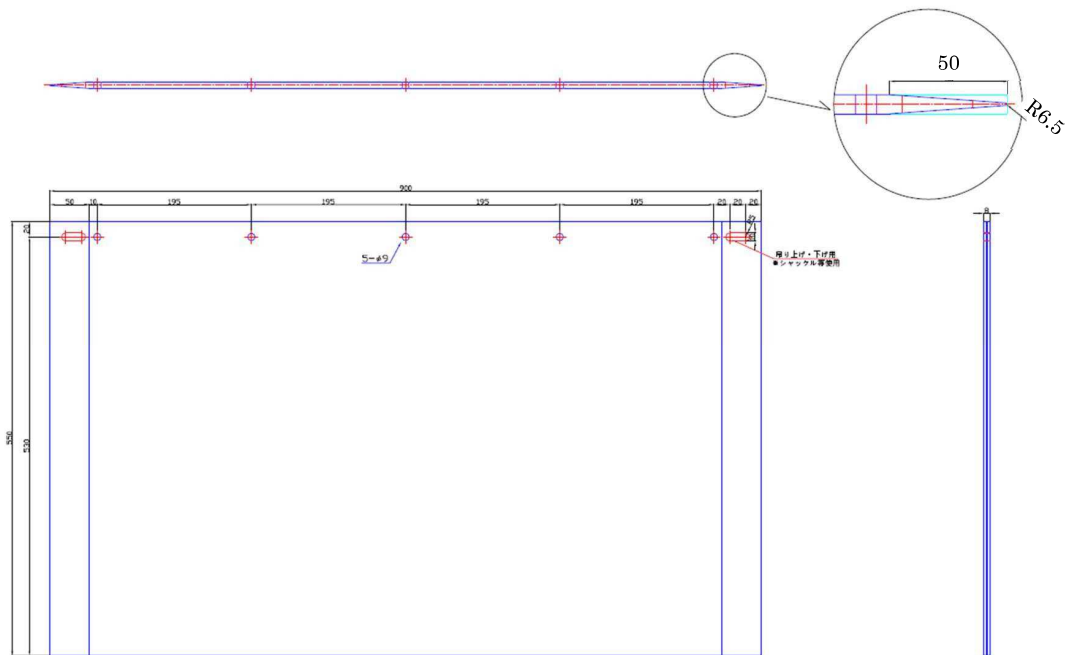


図 3 試験平板の寸法

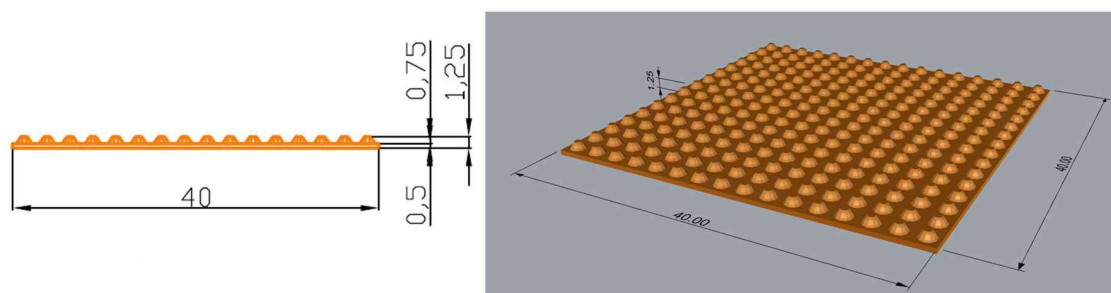


図 4 フジツボ S サイズ(小)の寸法と 3D 形状図

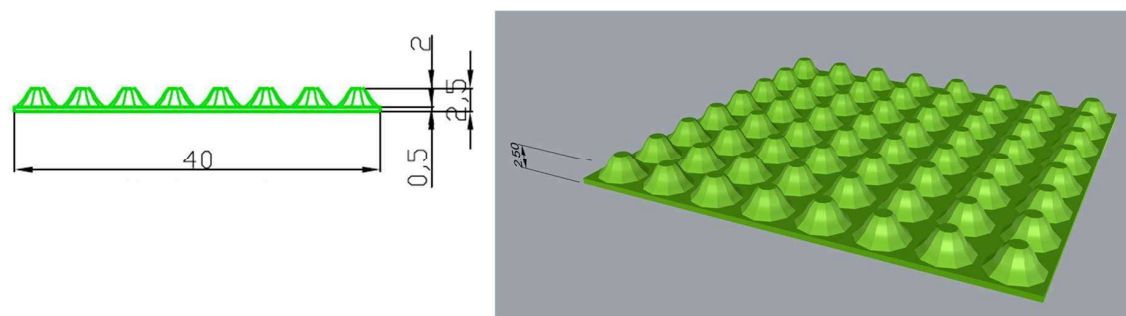


図 5 フジツボ M サイズ(中)の寸法と 3D 形状図

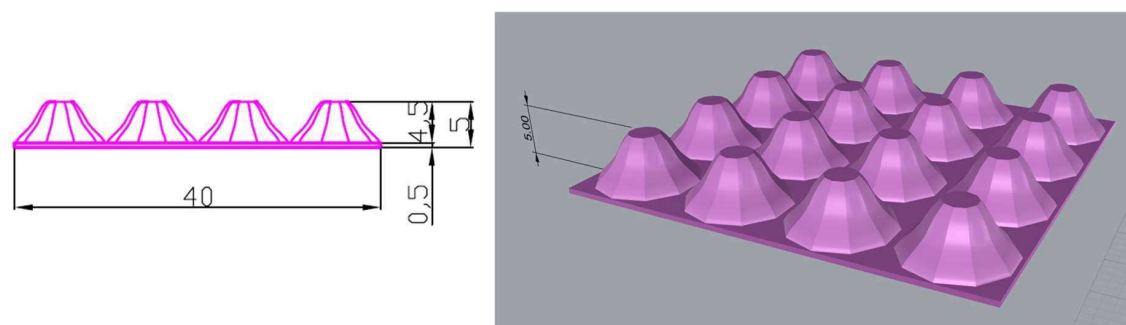


図 6 フジツボ B サイズ(大)の寸法と 3D 形状図

表 1 試験平板の名称とフジツボのサイズと被覆率の組み合わせ

	フジツボタイプ	被覆率
CASE-1	-	0 %
CASE-2	Sタイプ	20 %
CASE-3	Mタイプ	40 %
CASE-4	Mタイプ	60 %
CASE-5	Bタイプ	80 %
CASE-6	Bタイプ	100 %

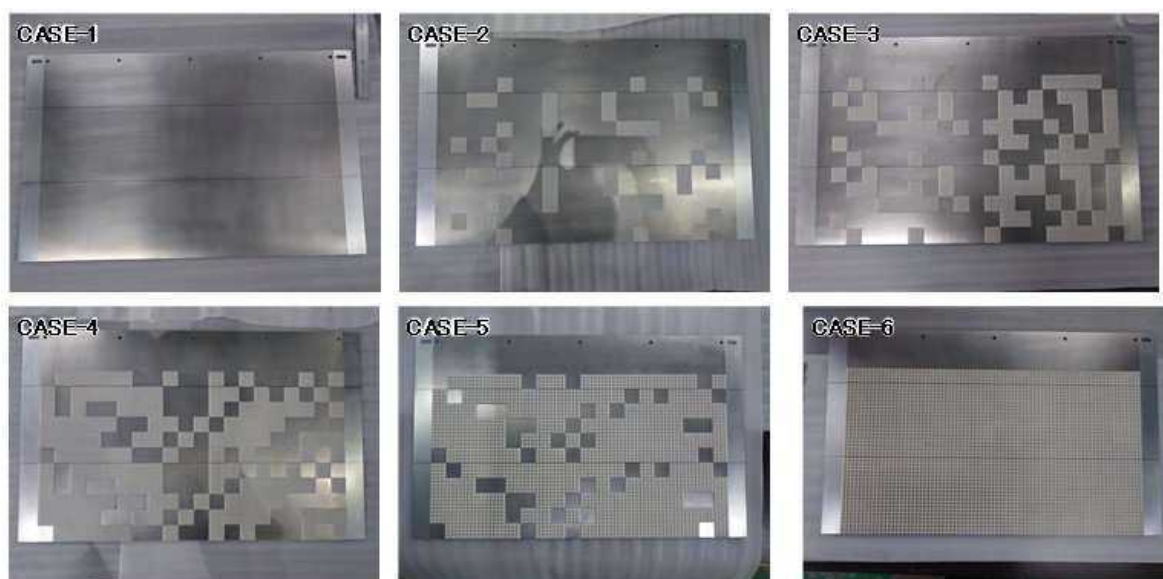


図 7 試験平板の全体像

図 8 に平板を計測器に取り付けたときの写真を示す。電車 N 軸の回転による調整と、平板前端における水線および動力計の中心と水槽壁面の間隔が等しくなるよう調整を行って、試験平板の平行性を確保した。左右揺、横揺は固定した。平板に作用する前後力(X 軸), 横力(Y 軸), 回頭モーメントは治具の中央部に取り付けられた検力計で計測した。使用した検力計の耐荷重は、X 成分は 25kgf、Y 成分は 50kgf であった。

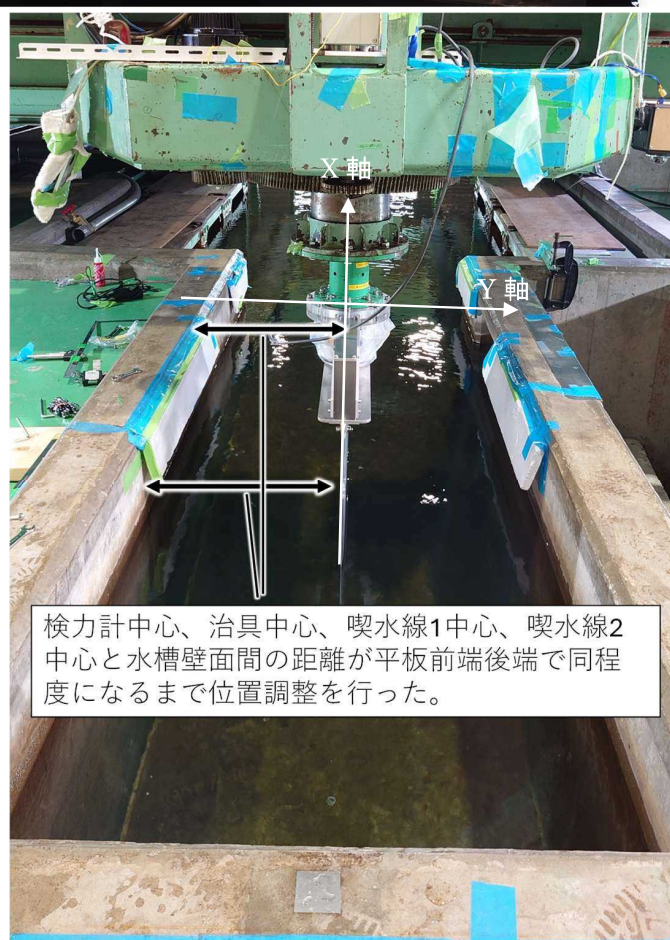


図 8 治具に取り付けた平板

2.1.4 試験条件および計測項目

本試験では、各 CASE において曳航速度を 6 速度とし、各速度 5 走航ずつ試験を行った。試験の条件は表 2 に示す。

計測項目は、平板に作用する抵抗値 R 、試験平板前方の流速 U である。全ての平板について、試験を開始する前に曳航速度 1.5m/s で平板にかかる横力と回頭モーメントが 0 に近くなるように N 軸を回転させて平板の直進性を調整した。さらに試験中は平板の横力と回頭モーメントを計測し、平板が曳航方向に対し平行であることを確認した。

表 2 平板試験速度

TANK TEST PROCEDURE

MSNO.	-	Scale	1/ 1.0000
Lpp (m)	0.900	Lppm (m)	0.9000
Lwl (m)	0.900	Lwlm (m)	0.9000

Vs(kn): corresponding ship speed

Vm(m/s): model ship speed

Fn: Froude no.

MEASURING VELOCITY (d=0.4m)

test no.	Vs(kn)	Fn	Vm(m/s)	抵抗試験	回数	備考
1		0.168	0.500	○	5	
2		0.337	1.000	○	5	
3		0.505	1.500	○	5	
4		0.673	2.000	○	5	
5		0.841	2.500	○	5	
6		1.010	3.000	○	5	

MEASURING VELOCITY (d=0.2m)

test no.	Vs(kn)	Fn	Vm(m/s)	抵抗試験	回数	備考
1		0.168	0.500	○	5	
2		0.337	1.000	○	5	
3		0.505	1.500	○	5	
4		0.673	2.000	○	5	
5		0.841	2.500	○	5	
6		1.010	3.000	○	5	

2.1.5 解析方法

平板の全抵抗(抗力) R_T は二つの成分で、剰余抵抗 R_R と摩擦抵抗 R_F を用いて以下のように表される。

$$R_T = R_R + R_F \cdots \cdots (1)$$

剰余抵抗は平板の造波や縁で生ずる渦などの圧力抵抗によって生じる。一方、摩擦抵抗は平板表面上の摩擦によって生じる。このとき厚み 5 mmの板の圧力抵抗は無視できるものとする。

各抵抗は以下のように無次元化される。

$$R_T = \frac{1}{2} \rho S C_T V^2 \cdots \cdots (2)$$

$$R_R = \frac{1}{2} \rho S C_R V^2 \cdots \cdots (3)$$

$$R_F = \frac{1}{2} \rho S C_F V^2 \cdots \cdots (4)$$

ここで、 ρ :水の密度、 S :浸水表面積、 C_T :全抵抗係数、 C_R :剰余抵抗係数、 C_F :摩擦抵抗係数、 V :平板の速度である。

(1)式は以下のように表される。前者はフルード数 F_n に、後者はレイノルズ数 R_n に依存する。

$$C_T = C_R(F_n) + C_F(R_n) \cdots \cdots (5)$$

平板の剰余抵抗は表面粗さに影響されないとすると、表面粗さを有する平板の摩擦抵抗係数は以下のように求められる。

$$C_{R_s} = C_{T_s} - C_{F_s} \cdots \cdots (6)$$

$$C_{R_s} = C_{R_r} \cdots \cdots (7)$$

$$C_{F_r} = C_{T_r} - C_{R_r} \cdots \cdots (8)$$

ここで、下付き文字 s は平滑な平板、 r は粗い平板を示す。

このとき、平滑平板の C_{F_s} をSchoenherrの式などを参照して決定すれば、(6)より、平滑面の剰余抵抗係数 C_{R_s} を求めることができる。 C_{R_s} を粗面の全抵抗係数 C_{T_r} から差し引いた値が粗面の摩擦抵抗係数 C_{F_r} である(8)となる。

一方で、フジツボなど粗度が大きい場合は(7)の関係が成立しにくくなる。特に、造波抵抗や平板下端の剥離などは粗度に影響される。これらを取り除くために試験平板の喫水を変更して計測する方法が用いられている。2つの喫水を d_1 、 d_2 とし、それぞれの喫水における全抵抗を R_{T_1} 、 R_{T_2} とすると次のように表せる。

$$R_{T_1} = R_{R_1} + R_{F_1} \cdots \cdots (9)$$

$$R_{T_2} = R_{R_2} + R_{F_2} \cdots \cdots (10)$$

ここで、下付き文字1と2は2種類の喫水を示す。

R_{R_1} 、 R_{R_2} は造波抵抗、試験平板下端の渦抵抗および平板の圧力抵抗からなる。これらは喫水を変更しても変わらないとみなすことができ、以下の関係が成立する。

$$R_{T_1} - R_{T_2} = R_{F_1} - R_{F_2} \cdots \cdots (9)$$

喫水下の面積をそれぞれ S_1 、 S_2 として無次元化すると摩擦抵抗係数 C_F は以下の式から求まる。

$$C_F = \frac{R_{T_1} - R_{T_2}}{\frac{1}{2} \rho V^2 (S_1 - S_2)} \cdots \cdots (10)$$

2.2 浸漬試験

2.2.1 目的

本試験は、実海域におけるフジツボの付着状況および成長特性を定量的に把握し、鉄板表面の塗装の有無がフジツボの付着密度や成長速度に与える影響を明らかにすることで、船体表面の汚損状態が摩擦抵抗増加に及ぼす影響を評価するための基礎データを取得することを目的とする。

また、得られた成長データは実船の抵抗推定モデルへの適用を見据えた試験と位置づける。

2.2.2 試験場所

前畑造船株式会社(〒857-0852 長崎県佐世保市干尽町 6-3)の工場内の浮棧橋を利用して試験を行った。浸漬試験報告書は付属書に示す。試験実施場所を図9に示す。

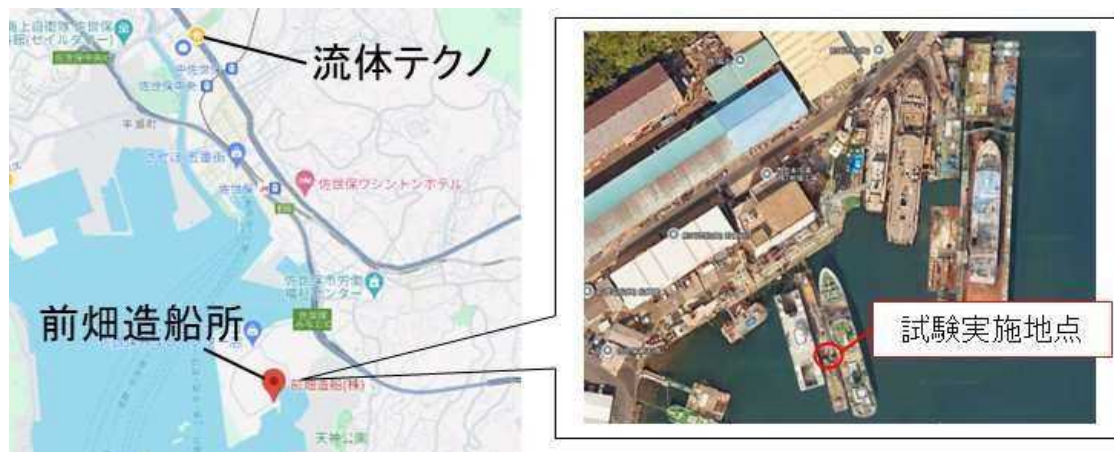


図9 試験実施場所

2.2.3 試験条件および観察方法

図 10 に試験風景を示す。本試験では、30.0cm 四方の鉄板を 10 枚用意し、内 2 枚は AF 塗料により表面を塗装した。鉄板は海水面から約 1.0m 海水中に沈めた。この時、鉄板の観測面の表面は海に向け、反対面は浮棧橋の壁に向けるように沈めた。試験中は市販のロガーを用いて海水温を記録した。初期は 1 週間間隔で観察を行い、鉄板両面の写真撮影および付着したフジツボの高さと幅を計測した。フジツボの成長が止まった、または成長が緩やかになったら観察の間隔を長くした。平板に付着したフジツボから無作為に 5 つ選び、それぞれ高さと幅を計測した。死亡個体や、小型のフジツボ、外観では同定不可能な個体は計測の対象から除外した。

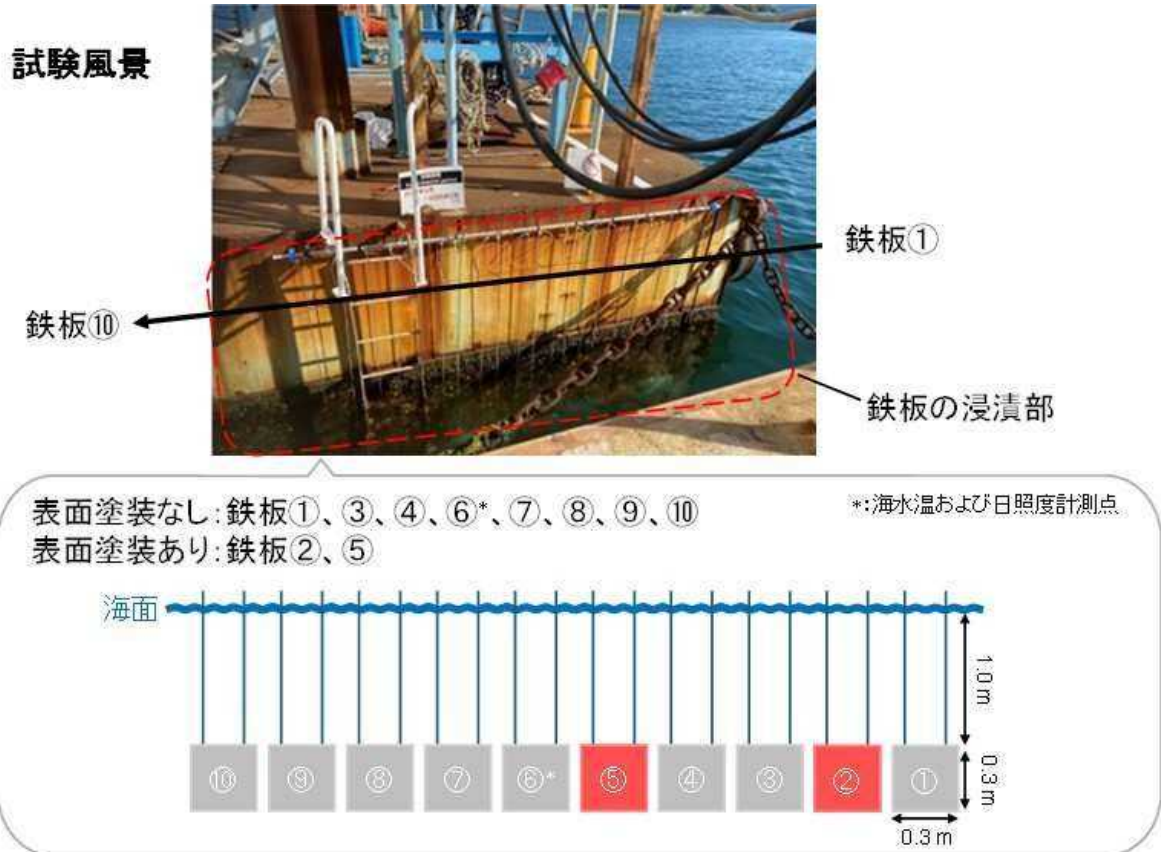


図 10 試験実施風景

2.2.4 解析方法

フジツボの高さと幅について、シグモイド型のゴンペルツ曲線の式を用いて成長曲線を表現した。シグモイド型の関数は座標の中でS字型の曲線を描くものである。

ゴンペルツ曲線の特徴は成長がゆっくりと始まり、加速して、ある飽和量に達するにつれて減速していく成長の本質を表現できることである。以下の式はゴンペルツ曲線の数式である。

$$y = Kb^{e^{-cx}} \dots\dots(11)$$

x は時間、 y はある時間における成長率、 K は成長が止まる飽和量を示す。 b は初期の成長率に影響を及ぼす係数、 c は成長速度が鈍化する速度を決定する係数である。図 11 にそれぞれ b 、 c の値を変化させた場合のゴンペルツ曲線を示す。

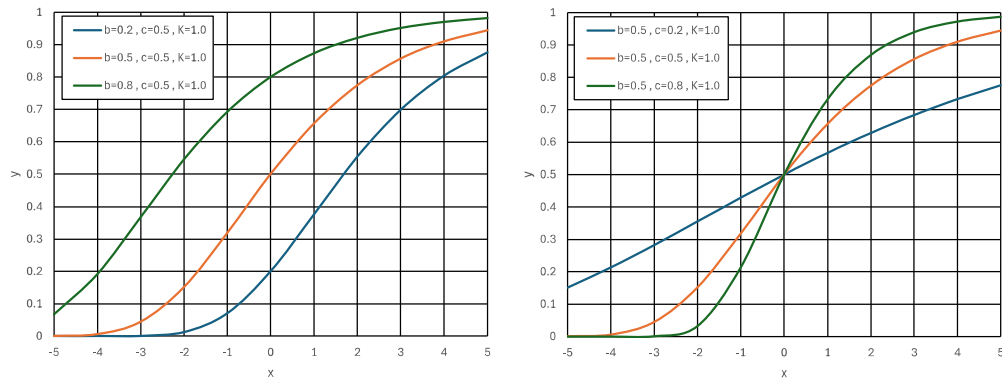


図 11 ゴンペルツ曲線の特徴 (左: b に対する変化、右: c に対する変化)

3. 試験結果

3.1 粗度による摩擦抵抗増加傾向の評価

3.1.1 平板の抵抗

喫水 0.2m、および 0.4m における CASE-1 から CASE-6 までの流速 V_m に対する全抵抗 R_t の関係を、それぞれ図 12 と図 13 に示す。 R_T は CASE-1 から CASE-5 にかけて順に大きくなり、CASE-5 と CASE-6 のの間ではほとんど差が見られなかった。喫水 0.2m のとき、各 CASE の R_T は流速が速くなるに伴い 2 次曲線的に増加する傾向だった。一方、喫水 0.4m のとき、 V_m が 2.5m/s 付近で CASE5 と CASE6 の R_T は増加量が減少する傾向が見られた。模擬フジツボの被覆率は CASE-1(0%) から CASE-6(100%) まで段階的に増加している。

喫水 0.2m および 0.4m における CASE-1 から CASE-6 までの全抵抗係数 CT およびシェーンヘルの式に基づき算出した摩擦抵抗係数 CF_0 とレイノルズ数 R_n の関係を、それぞれ図 14 と図 15 に示す。 R_n が 0.5×10^6 付近の結果は各 CASE において結果のばらつきが大きかったが、平板周りの流れが層流から乱流に十分に遷移しきっていなかったことが原因だと考えられる。喫水 0.2m において、CASE-1 から CASE-3 の CT は CF_0 にほぼ平行であった。一方、CASE-4 から CASE-6 の CT は R_n に対する減少の傾向が CASE-1 から CASE-3 よりも急であった。喫水 0.4m において、CASE-1 の CT は CF_0 の曲線とほぼ一致し、CASE-2 から CASE-6 の CT は R_n に対する減少の傾向は喫水 0.2m のときよりも急であった。

本試験で使用した平板は、各 CASE で喫水が異なっても造波と平板下端の流れの剥離が同程度となるように設計した。しかしながら、計測された R_T は喫水間で異なる増加傾向を示した。このことから、突起状の粗面を形成した平板の平水中の抵抗には、造波や平板下端の流れの剥離以外の要素が影響する可能性があるとし唆された。模擬フジツボの被覆率が高くなると R_n に対する傾向が異なるのは、突起間の流れの特徴によるものが考えられる。

Rt curve d=0.2m

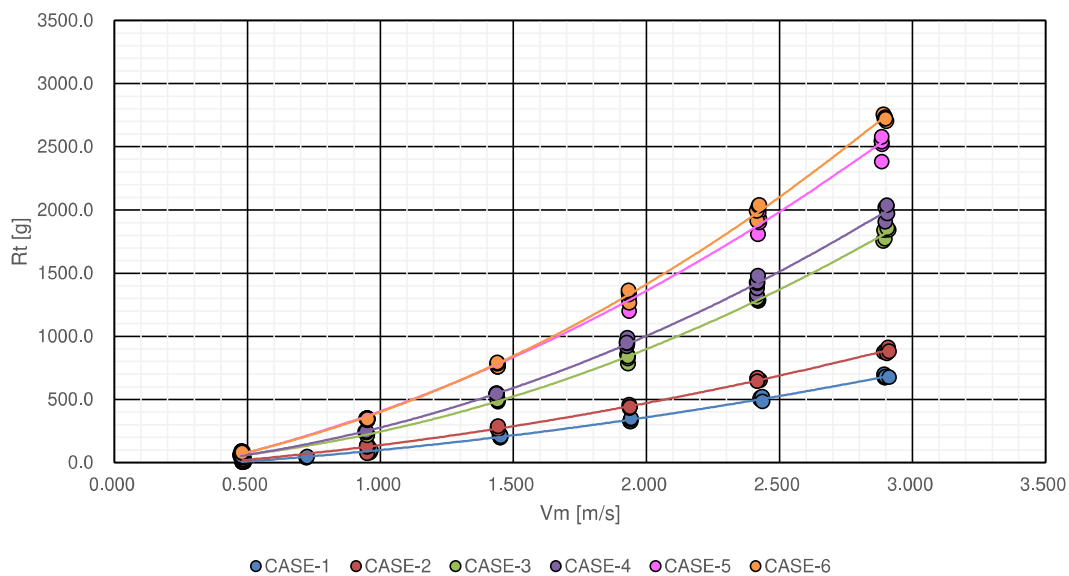


图 12 全抵抗 R_T (喫水 0.2m)

Rt curve d=0.4m

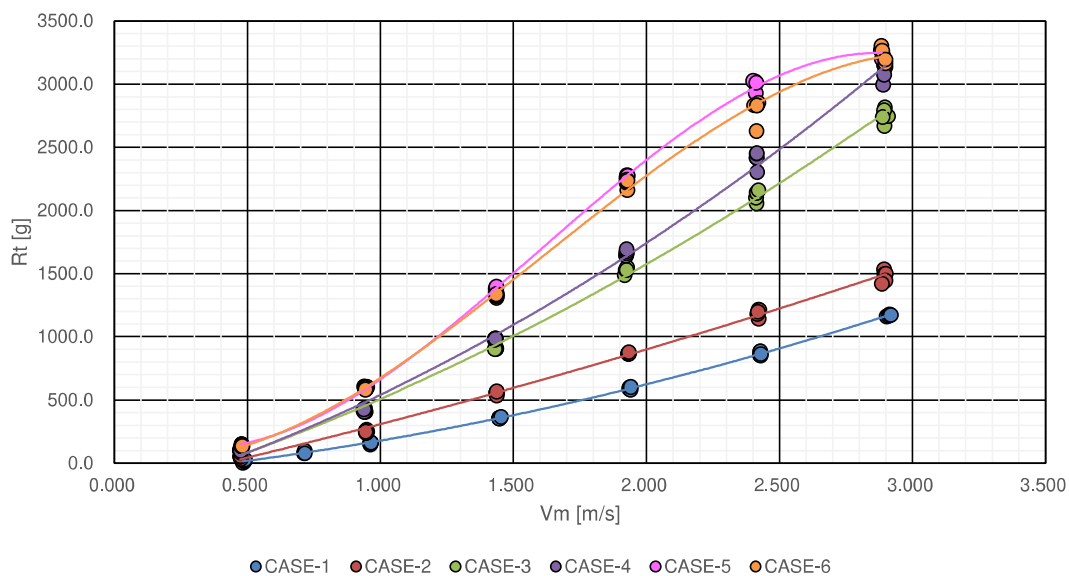


图 13 全抵抗 R_T (喫水 0.4m)

CT curve (喫水0.2m)

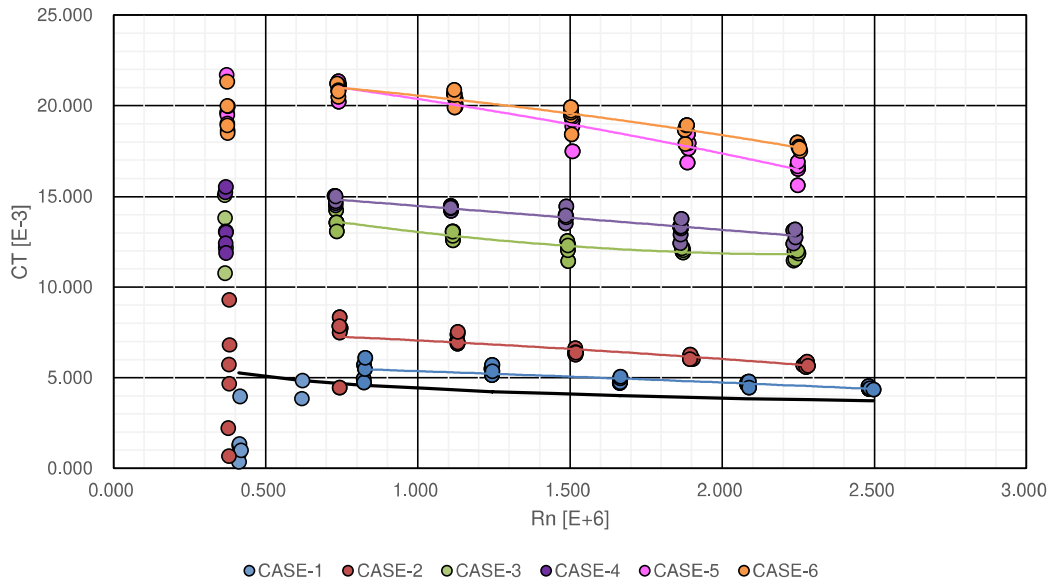


图 14 全抵抗係数CT (喫水 0.2m)

CT curve (喫水0.4m)

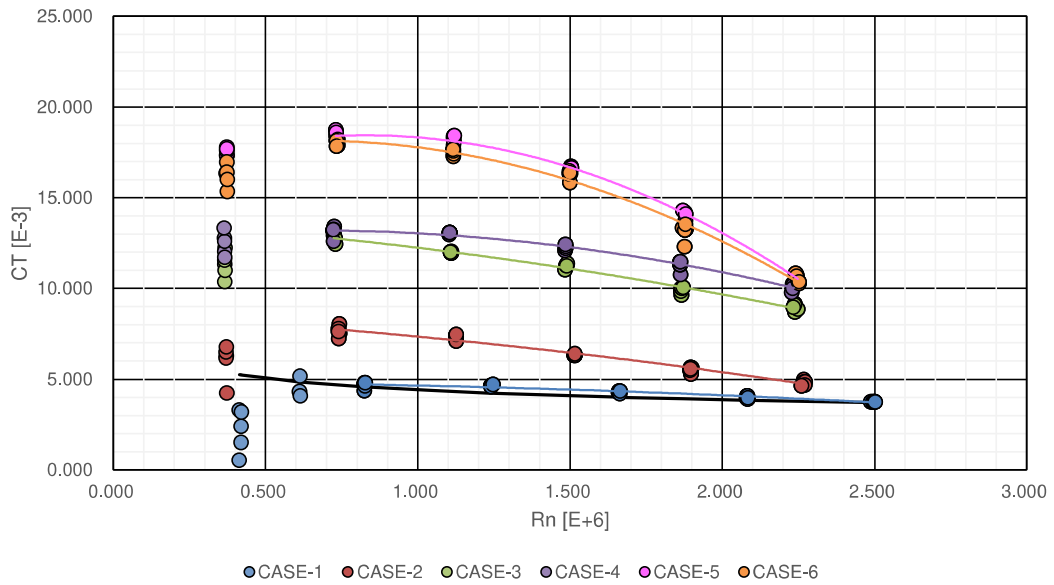


图 15 全抵抗係数CT (喫水 0.4m)

3.1.2 摩擦抵抗増加量 ΔCF の解析

[1] 差分法による摩擦抵抗係数 CF の解析

摩擦抵抗係数 CF は、造波と平板下端における流れの剥離の影響を除去するため、式(12)に基づく差分法により、喫水 0.2m と 0.4m の試験結果から解析した。

$$CF = \frac{R_{T1} - R_{T2}}{\frac{1}{2}\rho V^2 (S_1 - S_2)} \dots\dots(12)$$

ここで、 R_T :全抵抗 [kg]、 ρ :水の密度 [$kg \cdot s^2/m^4$]、 S :浸水表面積 [m^2]、 V :平板の速度 m/s である。下付き文字1と2は2種類の喫水を示す。

図 16 に差分法で解析した CASE-1 から CASE-6 までの CF とレイノルズ数 R_n の関係を示す。層流影響が顕著に見られた領域は除外した。図中の破線はシェーンヘル摩擦抵抗係数 CF_0 である。

CASE-1 の CF は CF_0 とほぼ一致した。低 R_n のときは平板周りの流れが完全に乱流に遷移していなかったと考えられる。CASE-2 の CF は R_n が増すにつれ小さくなり CF_0 に漸近した。CASE-3 と CASE-4 の CF は低い R_n において同等で、 R_n が増すにつれ分離して CASE-4 の CF の方が大きくなった。CASE-5 の CF は他の平板の CF とは異なる傾向を示し、 R_n が 1.2×10^6 付近で最大となる上に凸な曲線を描いた。CASE-6 の CF は R_n が大きくなるにつれて CF が急激に減少した。以上により、CASE-1 から CASE-6 の CF 曲線は CF_0 曲線とは異なり R_n に対し大きな変化率を示した。

差分法による CF の解析は、2 喫水の R_T の差により造波と平板下端の剥離を除去することに着目した解析方法である。3-1.で述べたように、計測した R_T は2 喫水間で異なる傾向を示しており、これらの影響以外の要素が考えられ、差分法で CF を求めるのは適切でないと考えられる。

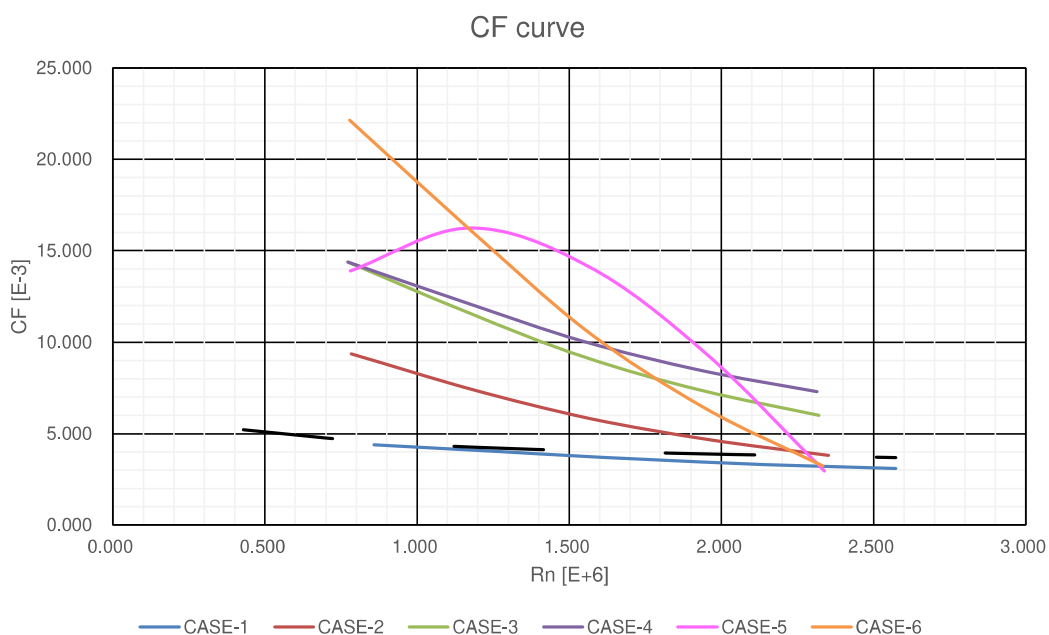


図 16 差分法により解析した CF

[2] 喫水毎の摩擦抵抗係数 CF の解析

次に式(7)が成立すると仮定して喫水毎に摩擦抵抗係数 CF を解析した。

$$CR_s = CR_r \cdots \cdots (7)$$

ここで、 CR_s は平滑面平板の剰余抵抗係数、 CR_r は粗面平板の剰余抵抗係数を表す。

このとき CASE-1 の CF はシェーンヘル摩擦抵抗係数 CF_0 と同一であるとみなす。喫水 0.2m と 0.4m で計測した R_T を用いて求めた CF と R_n の関係を、それぞれ図 17 と図 18 に示す。図中の破線は CASE-1 の $CF(=CF_0)$ である。

喫水 0.2m において、CASE-2 から CASE-6 までの CF は CF_0 と同等の傾向を示している。一方で、喫水 0.4m では、CASE-2 から CASE-6 までの CF 曲線は CF_0 曲線とは異なり、 R_n に対し大きな変化率を示したが、差分法で求めた CF よりその傾向は弱い。以上より、浸水面積が増加すると、 CF 曲線は平滑平板の CF_0 の R_n 依存性から逸脱する傾向が見られた。

平水中の全抵抗を構成する要素は摩擦抵抗成分と圧力抵抗成分に大別できる。平滑平板の場合は、圧力成分は限りなく小さく、平滑平板の平水中の抵抗は摩擦抵抗成分が大半を占める。今回、喫水 0.4m のとき CF が CF_0 の傾向から逸脱したことは、圧力抵抗成分が全抵抗に対して無視できない影響を与えている可能性を示している。したがって、フジツボ等の海洋生物が付着し、高低差が大きな粗面に対しては圧力抵抗の寄与も含めた総合的な抵抗増加の要因について検討する必要がある。

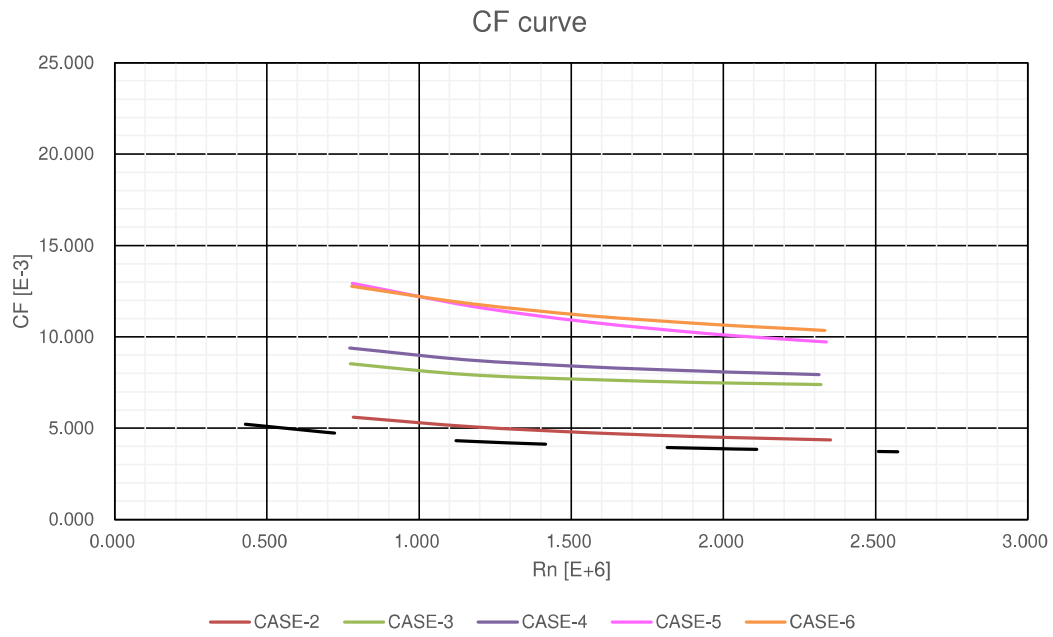


図 17 喫水 0.2m で計測した抵抗値を基に解析したCF

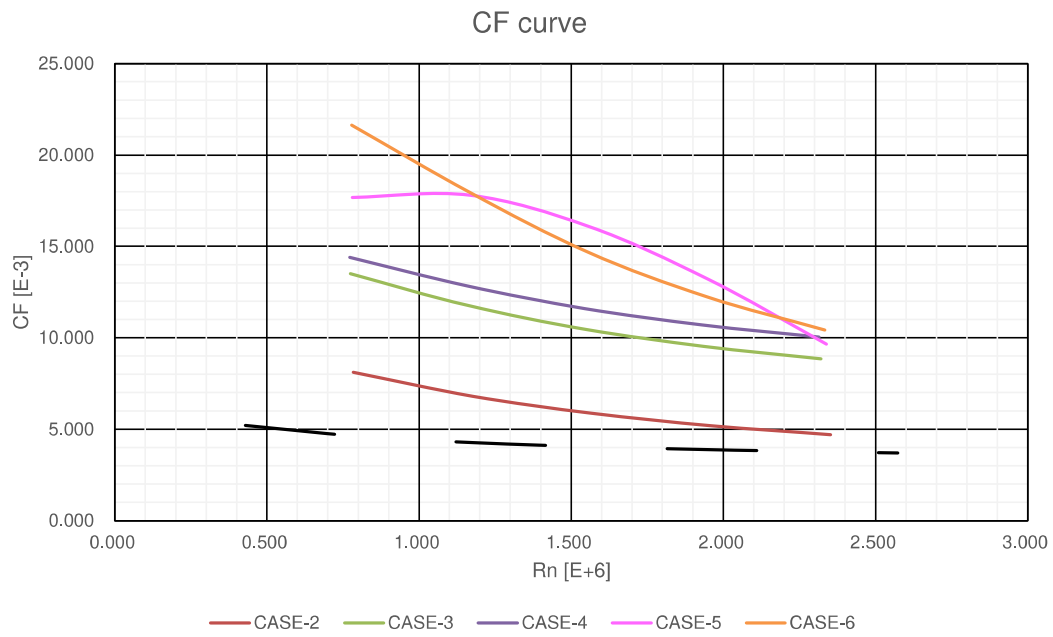


図 18 喫水 0.4m で計測した抵抗値を基に解析したCF

[3] 摩擦抵抗増加量 ΔCF の評価と抵抗推定プログラムへの適用

各喫水における CASE-2 から CASE-6 までの摩擦抵抗増加量 ΔCF を図 19 と図 20 に示す。 ΔCF は各喫水の摩擦抵抗係数 CF からシェーンヘル摩擦抵抗係数 CF_0 を差し引いて求めた。

ΔCF についても喫水毎にレイノルズ数 R_n に対する傾向に差異が見られた。喫水 0.2m では CASE-2 から CASE-4 までの ΔCF はレイノルズ数 R_n に対しなだらかに変化し、 R_n が 0.5×10^6 以降はほぼ一定であったが、喫水 0.4m では変化が急で R_n に対し減少し続けた。CASE-5 と CASE-6 の ΔCF は喫水に関係なく、 R_n に対し減少し続けたが、喫水 0.4m の方が減少の傾向が大きかった。

以上の結果を踏まえ、本年度のまとめとして、実船に近い喫水である 0.4m、かつ試験中の最高船速(最大の R_n)における ΔCF を採用し、バージ船の抵抗推定プログラムに組み込むことにした。

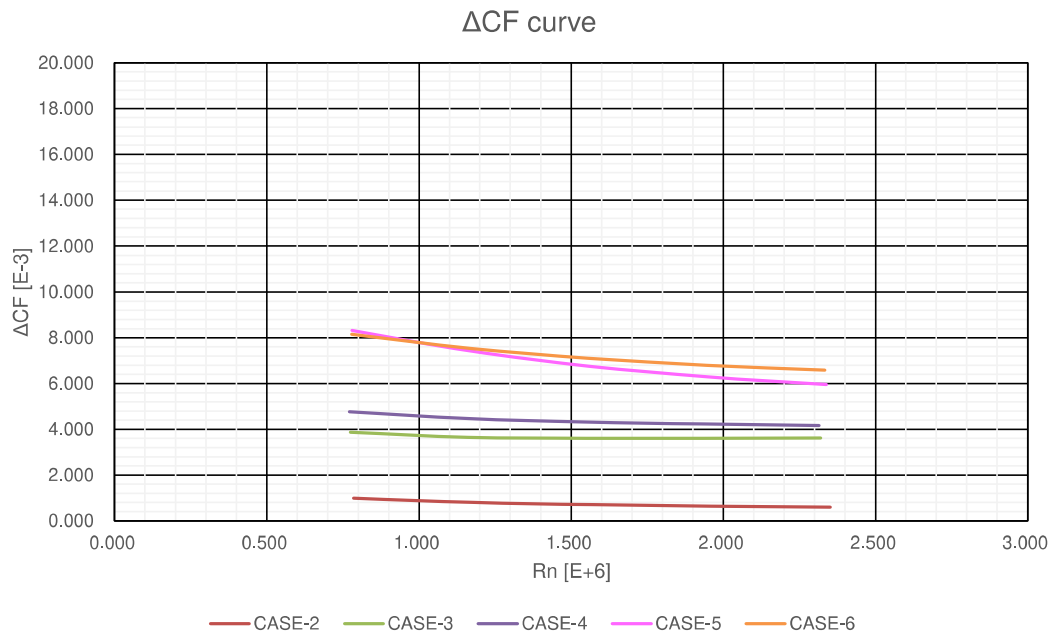


図 19 喫水 0.2m のときの ΔCF

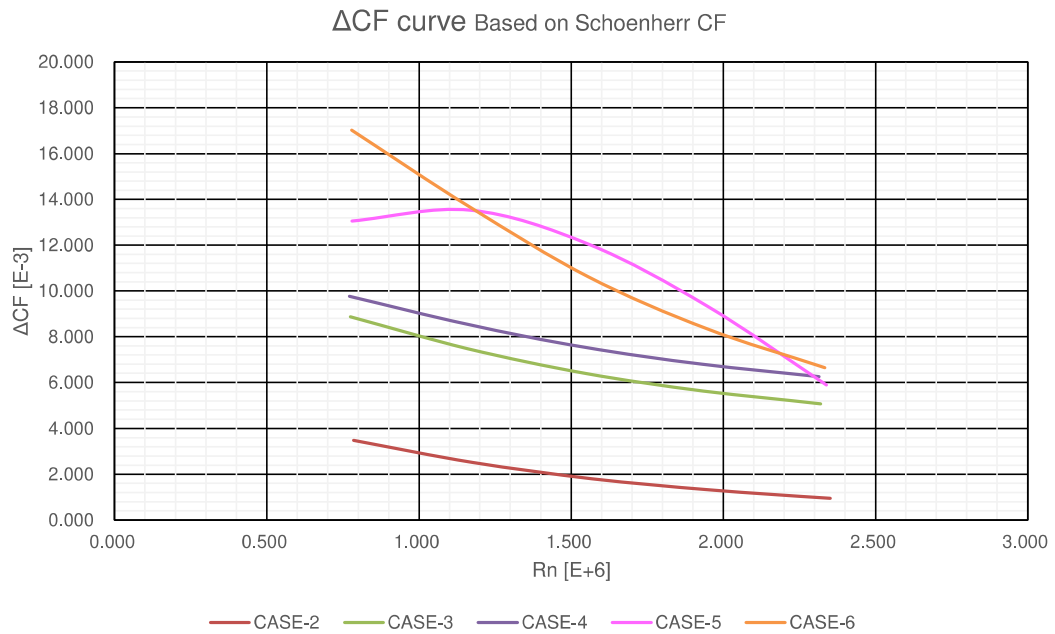


図 20 喫水 0.4m のときの ΔCF

3.2 フジツボの付着傾向

3.2.1 海中に浸漬させた鉄板の表面状態

図 21 に最低水温のタイムヒストリーと生物付着の経過、図 22 と図 23 に塗装なしの鉄板の表面状態を、図 24 と図 25 に塗装ありの鉄板の表面状態を示す。ここで示した写真は代表例であり、その他の鉄板、その他の時期の表面状態の写真は付属書類中に示す。また、図 26 に鉄板上に付着した海洋生物の写真を示す。

塗装なしの鉄板は海中に浸漬後 30 日程度でフジツボを含め海洋生物が表面を均一に覆い始めた。観察初期はミズガイが大量に表面に付着した他、フジツボの幼体やフサコケムシが散見された。観察中期は、海水温の上昇に伴い、ミズガイやフジツボが成長し大きさや個体数が増加した。また、イソギンチャクやアメフラシ、ヒラムシがよく観察された。観察後期になると、海水温の低下に伴いフジツボの死骸が多く観察されるようになった。また、その他生物が表面から剥離し、鉄板表面が露出した箇所が散見された。この頃にはフジツボの個体数は減少するのみで、新たなフジツボの付着は確認されなかった。また、イソギンチャクやアメフラシが見られなくなった代わりに、シロボヤやフサコケムシが大量に付着していた。

塗装ありの鉄板は海中に浸漬後 60 日程度でフジツボが付着する様子が観察されたが、鉄板の大半の部分は露出していた。海水温の上昇に伴い、フジツボのサイズが大きくなったが、個体数の変化はほとんどなかった。観察初期から後期にかけて鉄板表面に付着したのはフジツボのみであった。海水温の低下に伴い、フジツボが死骸になると、そこを起点にフサコケムシやその他生物が付着する様子が見られた。

興味深いことに、塗装なしの鉄板と塗装ありの鉄板では付着するフジツボの種類が異なるようであった。塗装なしの鉄板ではヨーロッパフジツボが多く見られ、塗装ありの鉄板ではタテジマフジツボのみ観察された。

最低水温のタイムヒストリーと生物付着の経過

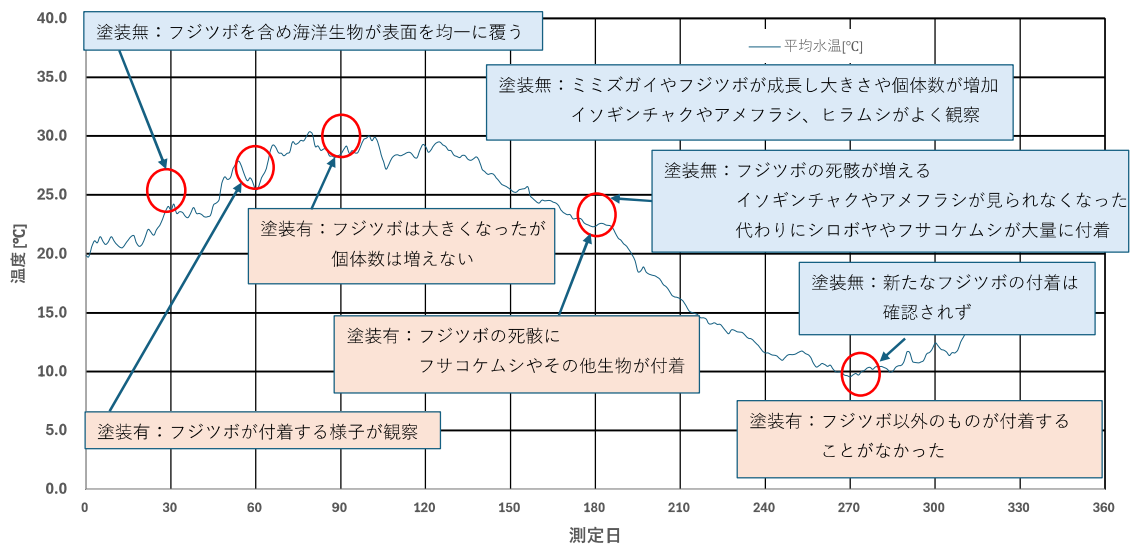


図 21 最低水温のタイムヒストリーと生物付着の経過

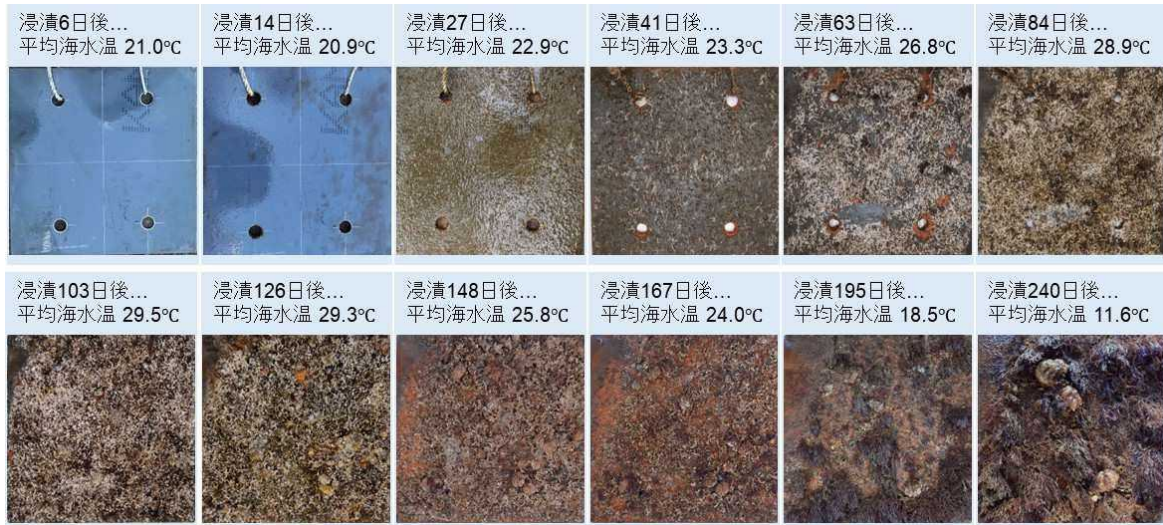


図 22 海中に浸漬させた塗装なし鉄板の表面状態(表面)

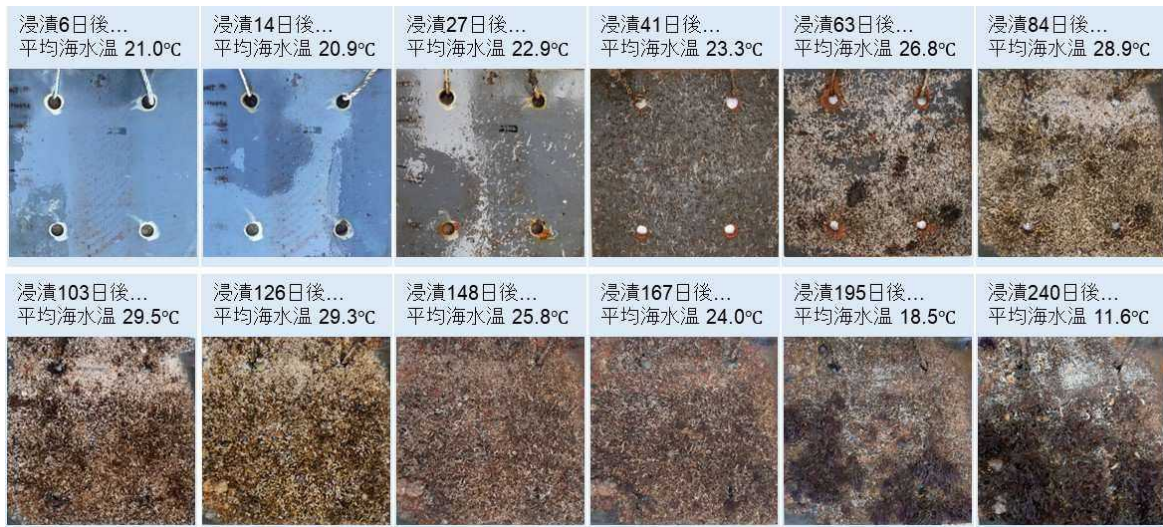


図 23 海中に浸漬させた塗装なし鉄板の表面状態(裏面)

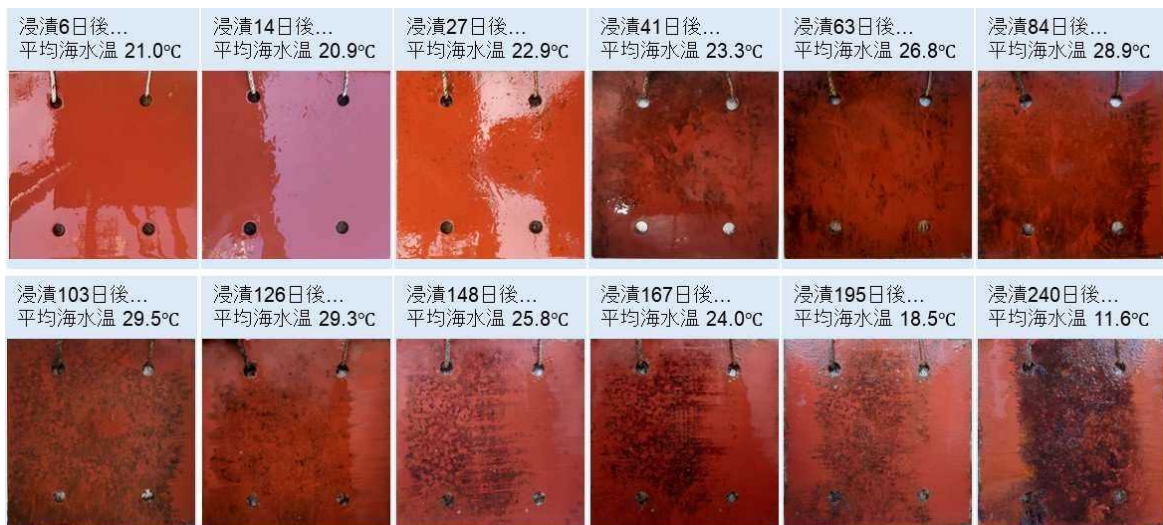


図 24 海中に浸漬させた塗装あり鉄板の表面状態(表面)

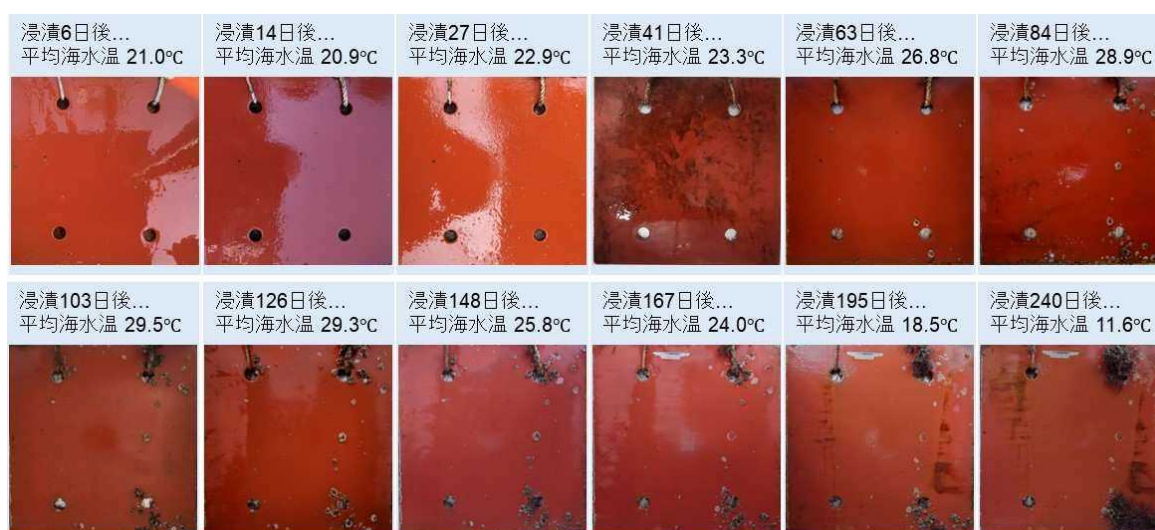


図 25 海中に浸漬させた塗装あり鉄板の表面状態(裏面)



図 26 海中に浸漬させた鉄板上の海洋生物

3.2.2 フジツボの高さおよび幅の成長曲線

図 27 に海水温度と塗装なしまたはありの鉄板上に付着したフジツボの高さと幅の成長曲線を示す。図中の丸印と実線がそれぞれ表面のフジツボの大きさと成長曲線を示し、四角印と破線がそれぞれ裏面のフジツボの大きさと成長曲線を示す。

塗装の有無に関わらず、6月から8月にかけて20℃付近から30℃付近まで海水温度の上昇に伴い、フジツボの高さと幅の成長速度が急となり、8月から9月にかけて海水温度が28℃付近で安定する時期にフジツボの成長速度が緩やかになった。10月以降の海水温度の低下に伴い、死滅するフジツボが多く見られた。この期間に生存していたフジツボに関して、大きさはほとんど変わらなかった。

鉄板の表面裏面で比較すると、フジツボの高さおよび幅の経時変化には、壁に面した裏面に付着したフジツボの方が大きくなり易い傾向が見られた。

表面塗装の有無で比較すると、フジツボの幅は同程度の大きさであったが、高さは表面に付着したフジツボの方が大きかった。3-2-1 で述べたように、塗装の有無によって付着したフジツボの種類が異なっており、ヨーロッパフジツボの高さは10から20mm、幅は10から20mmであり、タテジマフジツボの高さは7から12mm、幅は10から25mmと報告されている。本試験において見られたフジツボの高さの差は、表面塗装の有無ではなく付着したフジツボの種類に依るものだと考えられる。

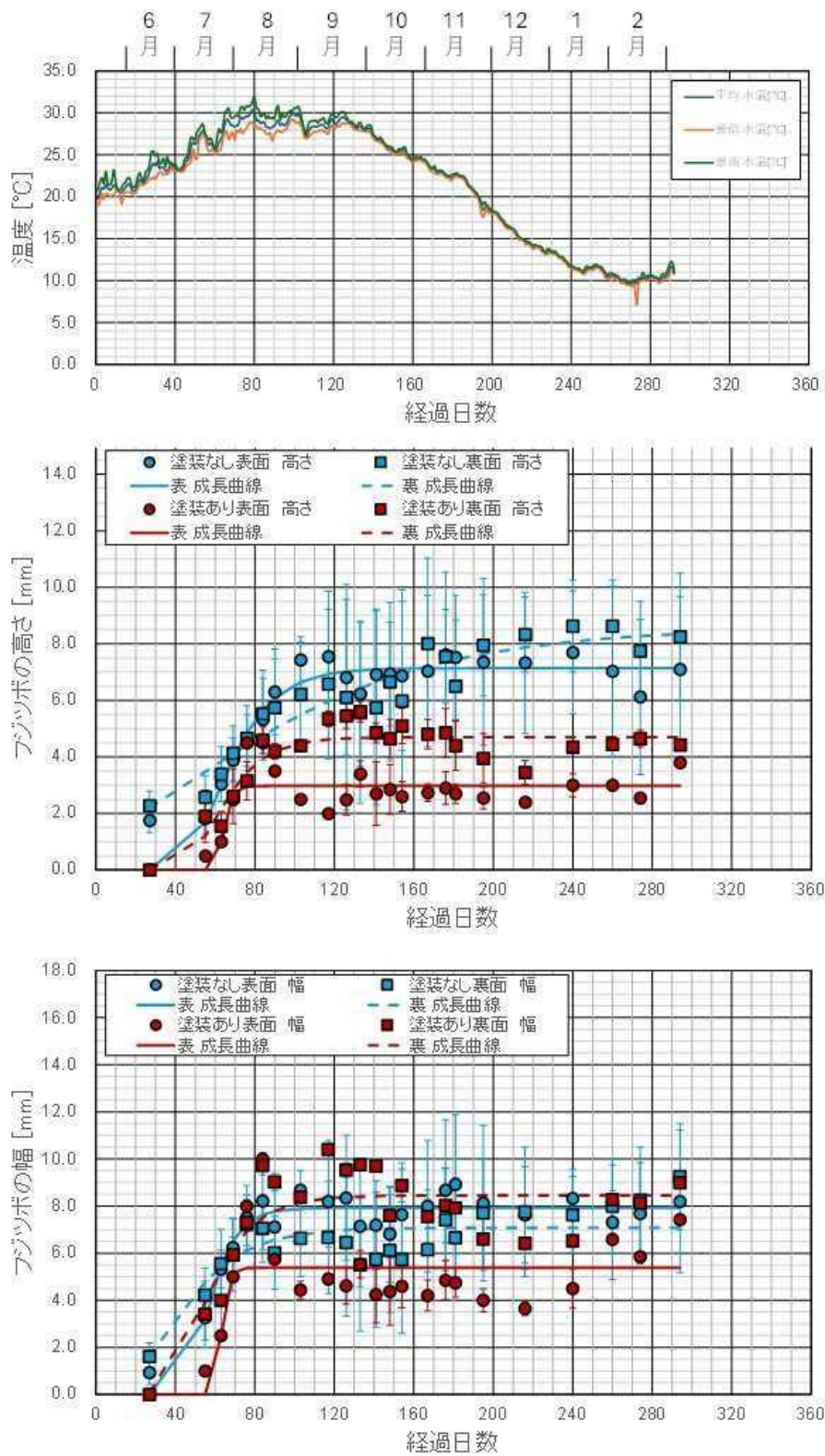


図 27 フジツボの成長曲線

4. 今年度実施試験および結言

平板の曳航試験により、フジツボお付着による摩擦抵抗増加量の推定方法の確立を試みた。フジツボの付着を模擬するため、平板の側面に高さ・幅、配置を調整したフジツボ模型を貼り付け、粗さが異なる 5 種類の平板を作成した。各平板は 0.2m、0.4m の 2 喫水で試験を実施し、乱流促進として全ての平板の前端部に紙やすりを貼り付けた。本試験で使用した平板は各 CASE で喫水線の形状は同一、水面下の形状は平板下端から高さ 0.2m 毎に繰り返す形状になるようにフジツボ模型を配置したが、喫水が異なると全抵抗の増加傾向に差異がみられた。各喫水に対して摩擦抵抗係数 CF を導出すると喫水 0.2m のときの CF 曲線はシェーンヘル摩擦抵抗係数 CF_0 と同じ傾向であったが、喫水 0.4m のときの CF は CF_0 から逸脱する傾向が見られた。この結果により、フジツボ等の海洋生物が付着した高低差が大きな粗面において抵抗増加には摩擦抵抗成分だけでなく、圧力抵抗成分の寄与も無視することができないことが示唆された。

一般的に用いられている船体汚損防止用の塗料で塗装された鉄板と、未処理の鉄板へのフジツボの海中における付着傾向を約 1 年間観察した。表面塗装なしの鉄板ではフジツボとその他海洋生物が表面全体を覆うように付着する様子が観察され、表面塗装ありの鉄板では表面の一部にフジツボのみの付着が観察された。また、フジツボは表面塗装の有無に依らず、浸漬 80 日後までに海水温の上昇とともに急激に成長し、浸漬後 80 から 120 日にかけて海水温の変動が小さくなるとともに成長が緩やかになり、その後海水温が低下するとフジツボの成長が横ばいになる傾向が観察された。この結果より、フジツボの付着と成長には塗装の有無だけでなく、海水温の変動が大きく影響していることが明らかとなった。これは、実海域における船体汚損の進行や、その対策のタイミングを予測する上で有用な知見となる。

本年度の試験を通じて、フジツボなど海洋生物の付着による摩擦抵抗増加の特性を、水槽試験および浸漬試験の両面から定量的に把握することができた。

今後は、これらの知見をもとに、曳航バージの船体汚損を考慮した抵抗推定手法の高度化を図る必要がある。

あわせて次年度は、以下の取り組みを実施予定である：

- ・ 浸漬試験の継続によるフジツボ付着の季節変動と長期成長の追跡
- ・ フジツボを模擬した模型船体による抵抗試験
- ・ 0 ノット時の波浪中抵抗増加に関する基礎的な実験
- ・ 実船のレイノルズ数条件を想定した CFD 解析による平板摩擦抵抗の評価

これらを通じて、より現実的かつ信頼性の高いバージの抵抗推定手法の確立を目指す。