

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02368

研究課題名（和文）低摩擦型塗料の実船摩擦抵抗評価手法の開発

研究課題名（英文）The evaluation method of full-scale ship performance using low-friction ship bottom paint

研究代表者

勝井 辰博（Katsui, Tokihiro）

神戸大学・海洋底探査センター・教授

研究者番号：80343416

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では塗膜粗面を波状粗面と捉え、その波長波高比によって粗度関数が変化すると推察のもと、回転円筒装置を用いて粗度関数を計測することを試みた。回転円筒の回転トルクと円筒表面近傍の速度分布をLDVによって詳細に計測することによって、波長波高比が異なる3種の塗膜粗面に対して粗度関数を算定した。塗膜表面の形状はレーザー変位計によって計測している。その結果、塗膜の粗度関数は一般的な砂粗度の粗度関数とは異なり、波長が長いほど小さくなること、また高粗度レイノルズ数域での挙動は上に凸の関数となり、概ね一定値に近づく傾向があること、その一定値は波長が長いほど小さいこと、などが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、船舶の脱炭素化に向けた動きが活発化しており、その一連の動きの中で既存船に対しても二酸化炭素排出量に規制がかかるようになってきている。このため、船舶の燃費性能向上がこれまで以上に必要とされており、その一つの手法として低摩擦型塗料の開発が進められている。低摩擦型の塗料は有望な手法と目される一方、その実船燃費低減量を定量的に評価する手法がないことが難点であった。本研究では塗膜粗面を波状粗面と捉え、その波長波高比によって粗度関数がどのように変化するかを実船粗度レイノルズ数域で初めて調査した。これにより、低摩擦型塗料の性能評価法について新たな指針を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The present study investigates the roughness function of the painted surface under assumption that painted surfaces are considered to be wavy surfaces. The roughness functions for three kinds of painted surfaces which have different ratio of wave length to wave height were estimated based on a newly developed method using rotating cylinder measurement. The velocity distribution of turbulent boundary layer of the painted rotating cylinder surfaces were measured using laser doppler velocimeter and the rotating torque of cylinders were also measured to estimate the frictional velocity of the painted surfaces. The estimated roughness functions for painted surfaces based on velocity profile and frictional velocity indicate that it is getting lower for the painted surface with lower ratio of wave length to wave height. The shape of roughness functions for painted surfaces is convex at higher roughness Reynolds number and this attitude is quite different from the sand-grain rough surface.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：低摩擦型塗料 粗度抵抗 粗度関数 LDV 船舶性能

1. 研究開始当初の背景

国際海事機関は燃費性能改善指標である EEXI の適用を開始した。これにより、現在運用されている既存船を含む 400GT を超える船舶が温室効果ガス排出規制の対象となった。EEXI 規制に合致しない船舶への対策としては、新造船への更新や省エネへの改造などがあるが、その中で低摩擦型塗料による燃費改善は比較的安価で容易に実施できる方法として期待されている。船体に塗布される塗料は、塗料の表面粗度により船体に作用する摩擦抵抗を増加させるが、低摩擦型塗料を用いることで、その増加量である粗度抵抗を低減できる。

この抵抗増加量の無次元値である粗度抵抗係数は通常 ITTC の推定式によってレイノルズ数、粗度高さや満載喫水線長さから求められている。しかし、三重野らの研究によると、塗膜粗面は波状に近い形状を有し、粗度抵抗は粗度の高さのみならず、粗度の波長の影響もあると考えられている。よって、ITTC の推定式では塗膜粗面の特徴的な幾何学的特徴を考慮できていないため、低摩擦型塗料の違いによる粗度抵抗の差を評価することができていないと考えられる。

勝井らは境界層内速度分布の相似則と運動量理論に基づいた、表面粗度をもつ平板の摩擦抵抗算定法を示している。表面粗度が乱流境界層内速度分布に与える影響は粗度関数で定義され、塗膜粗面の表面粗度形状に対応する粗度関数を求めることができれば、粗度抵抗を算定できる。しかし、塗膜粗面の表面粗度形状と粗度関数の関係は明らかになっていない。Hama や Granville は粗度関数を抵抗値から間接的に推定する手法を示している。しかし、実船スケールのレイノルズ数における抵抗値を計測することは難しい。また、Yeginbayeva らは汚損のある塗膜粗面が船舶に及ぼす影響を調べるため、低摩擦型塗料を塗布した平板近傍流れの流速を計測することにより、直接的に粗度関数を推定している。しかし、実験はキャビテーショントンネルで実施されているため、実船スケールの粗度レイノルズ数域での粗度関数は計測できていない。このような背景から、各種の低摩擦型塗料を含む任意の塗膜形状に対する粗度関数を実船粗度レイノルズ域において高精度で推定できることが求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、塗膜粗面の幾何学的特徴と粗度関数の関係を明らかにし、低摩擦型塗料の定量的な評価を可能にすることを目的として、円筒が高速で回転することによって実船スケールに近い、高いレイノルズ数の計測が行える回転円筒試験装置を用いた塗膜粗面近傍の乱流境界層内速度分布の計測を行い、塗膜粗面の粗度関数を推定することを試みるものである。また、得られた粗度を関数平板摩擦抵抗算定法に組み込むことで、実船スケールのレイノルズ数の粗度抵抗の推定を行い、既存の粗度抵抗評価手法との比較を行うことまでを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 回転円筒試験

回転円筒試験装置を用いた回転円筒側面近傍の流場計測およびトルクの計測について説明する。Fig. 1, Fig. 2 に示すように円筒型水槽の内部に塩化ビニル製の円筒を設置して回転させ、35[rps]までの回転数で計測を行った。円筒型水槽の直径は 450[mm]、回転円筒の直径および高さは 150[mm]である。Fig. 2 に示すように円筒型水槽の内部には流れが二次元的になるように、回転円筒の上面、底面の近くにはアクリルの上蓋と底板が設置されている。回転円筒側面近傍の流場は LDV (レーザー Doppler 流速計) を用いて計測を行った。水槽下部からレーザー光を水平に照射し、鏡を用いて鉛直上方に照射方向を変えることで、回転円筒の側面近傍に照射する。流速は装置の都合上、回転円筒の底面から約 50[mm] のあたりの計測を行っている。なお、円等半径方向距離の円筒壁面 (0[mm]地点) の設定については LDV の信号が返らなくなる点とした。粗面円筒に関しては膜厚も計測している。円筒の回転トルクはトルクメータで行っており、サンプリング周期は 1.0[ms]としている。また水温は熱電対により流速およびトルクと同時に計測を行った。測定位置は、円筒が回転している部分ではなく、上蓋の上の部分である。回転円筒の表

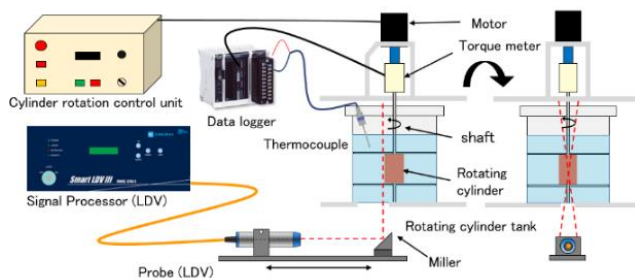


Fig. 1 Experimental Setup.

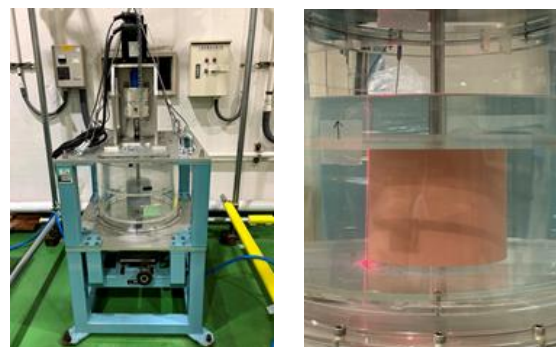


Fig. 2 Frictional resistance measurement system using rotating cylinder.



Fig. 3 Painted Rough surface (Short, Medium, Long).

Table 1 Specifications of the painted rough surface (Kobe univ. Experiment).

Parameters [μm]	Short Wave length	Medium Wave length	Long Wave length
Rz	147.9	148.4	147.5
Rc	57.0	51.3	68.5
RSm	1744	3406	5426
Thickness	265.2	1225	1799

面の種類は塗料を塗布していない平滑面と、表面の幾何形状が異なる三種類の塗膜粗面が塗布された粗面の合計四種類である。三種類の塗膜粗面の各種粗度形状パラメタと膜厚を Table 1 に示す。Rz, Rc, RSm は JIS B 0601 で定められた線粗さのパラメタであり、それぞれ最大高さ、平均高さ、輪郭曲線要素長さの平均を表す。粗面の形状は三重野らが開発した三次元船体表面粗度計により計測されている。本実験で用いられた三種の塗膜粗面は概ね Rc が等しく、RSm が大きく異なる。RSm が小さい順に短波長、中波長、長波長粗面と呼ぶことにし、各種粗面の表面の様子を Fig.3 に示す。Fig. 3 より短波長は他と異なり、ザラザラとした砂粗面に近い性質をもった塗膜粗面であることがわかる。

(2)塗膜粗面の粗度関数

粗度関数は対数速度分布領域における塗膜粗面近傍の速度分布と壁面摩擦応力が分かれば求めることが可能である。粗度関数の算定には壁面摩擦応力を計測する必要があるが回転円筒に作用する壁面摩擦応力を計測することは困難なため、「LDV により計測した滑面円筒周りの流速から、摩擦速度推定法である Clauser method を用いて、推定した壁面摩擦応力が円筒側面で概ね一様である」、「表面粗度により、摩擦応力は滑面円筒側面に働く摩擦応力に対して概ね一様に上昇する。その上昇分は滑面円筒と粗面円筒に作用するトルクの差によって求められる」という2つの仮定の元に摩擦応力の推定を行った。Fig. 4 に速度分布の計測結果の一例を示す。明確な対数領域が存在し、それにより摩擦速度が算定できることが分かる。回転円筒試験装置では流れが二次元的になるように、回転円筒上面、底面の近くにそれぞれ上蓋、底板が設置されている。そこで、流速の計測を行っている円筒の底から約 50[mm]のところ、それらの影響がないか流速計測位置を円筒の上下方向に変化させ、速度分布から摩擦速度を推定、比較を行うことで調べた。回転数は低、中、高回転域で行い、比較結果を Fig. 5 に示す。凡例に示す距離は円筒の底からの距離を表し、小さいほど底板と近い。図より 22[mm]までは摩擦速度の推定値が概ね等しいため、計測を行った円筒下端より 50[mm]の流場は底板などの影響はほぼ受けず、2次元的な流れになっていると考えられる。滑面と粗面の壁面摩擦応力の差はそれぞれの

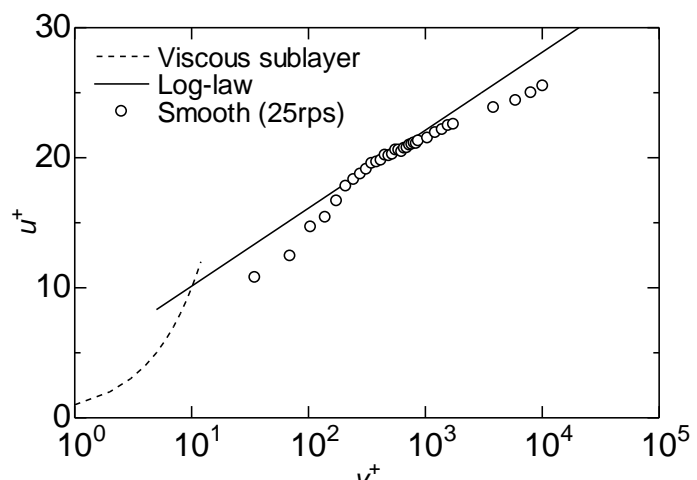


Fig.4 Velocity profile near rotating cylinder rotating cylinder.

円筒の無次元回転トルクの差から求めている。すなわち、シャフトのみのトルクも計測し、これがその回転数で共通した機械損失や円筒側面以外のトルクを含むと仮定し、円筒回転トルクから差し引いて無次元摩擦トルクを算定している。

以上の手法を用いて速度分布から推定した粗度関数を Fig. 6 に示す。横軸は粗度レイノルズ数であり、粗度高さは R_c を用いている。また比較として、Hama の方法で求めた粗度関数を同時に示している。Fig. 6 中に実線で示しているのは、砂粗度の粗度関数である White の粗度関数である。短波長粗面が White の粗度関数と概ね同じような傾向を示したのは、ドライ

スプレーである短波長粗面が砂粗度に近い特性を持った塗膜粗面であるからだと考えられる。また、速度分布から求めた粗度関数と Hama の方法で求めた粗度関数が概ね一致していることから、粗面の壁面せん断応力の推定精度も概ね妥当であると推測される。

(3) 塗膜粗面の粗度抵抗

推定した粗度関数を用いて、塗膜粗面平板の摩擦抵抗を算定する手法について説明する。圧力勾配のない平板周りの定常二次元乱流場を考えたとき、粘性底層を除く乱流境界層内速度分布を表す Cole's law は(1)式ようになる。また、運動量則により平板摩擦抵抗係数 C_F と運動量厚さ θ の関係は(10)式のように表される。なお、 x は平板の長さ方向の距離である。(1), (2)式から平板摩擦抵抗係数 C_F を求めるための微分方程式が得られる。この微分方程式中で粗度関数 ΔB を適切に設定して C_F を求めれば、 $\Delta B = 0$ として計算される滑面の C_F との差から粗度抵抗係数 ΔC_F を求めることができる。なお、後流関数 Π については、吉岡が示したものを使用する。

回転円筒試験装置の計測より推定した粗度関数を k^+ の関数でフィッティングし、平板摩擦抵抗算定法に組みこむことで、塗膜粗面の粗度抵抗を推定する。しかし、回転円筒試験では低回転数域で乱流状態にできないため、Fig.6 に示すように低い粗度レイノルズ数 k^+ での粗度関数を計測することができなかった。そこで、低いレイノルズ数での計測が行える平板曳航試験による摩擦抵抗係数 C_F の結果を用いて、Granville の方法により低い k^+ における粗度関数を推定した。川島ら¹⁷⁾は波高波長比の異なる三種類の塗膜粗面平板の抵抗計測を行い、それぞれの粗度抵抗係数を示している。平板長は 2[m] と 14[m] で、2[m] 平板については短波長、中波長、長波長の三種類の塗膜面で、14[m] 平板に

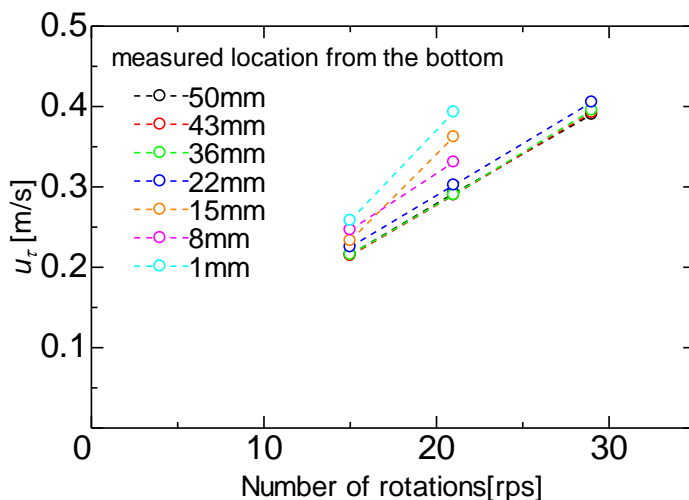


Fig. 5 Friction velocities at various location of cylinder.

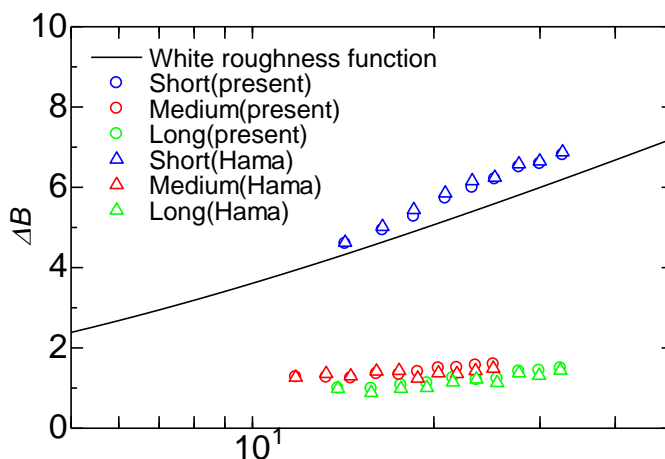


Fig. 6 Comparison of roughness function.

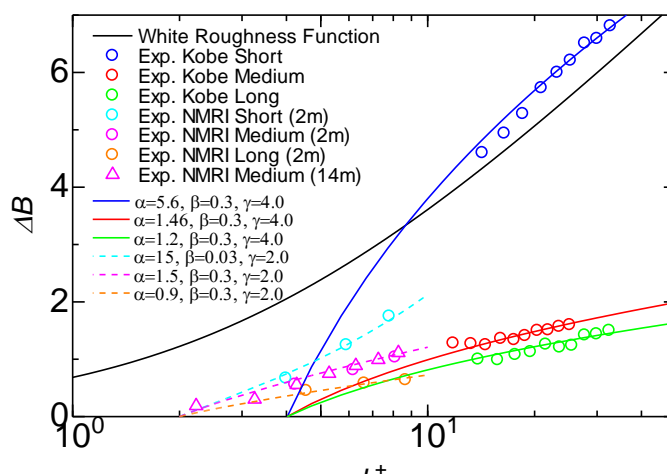


Fig. 7 Obtained roughness functions.

については中波長の塗膜面のみで粗度抵抗を計測している。本研究で用いた塗膜粗面と川島らの実験で用いられた塗膜粗面は、その表面形状が異なるものの、本研究の短波長粗面と川島らの短波長粗面、本研究の中波長粗面と川島らの長波長粗面は概ね波長波高比が等しいため同等の塗膜粗面と見なしてよいと考える。よって、本研究で用いた短波長と中波長の塗膜粗面はそれぞれ、川島らの実験で用いられた短波長と長波長の塗膜粗面に相当するので、各塗膜粗面の粗度関数は Fig. 7 に示す水色の破線が青い実線に、オレンジの破線が赤い実線に滑らかに接続していくような挙動になるのではないかと推察される。 Fig. 7

に示す粗度関数を用いて、今回実験に用いた塗膜粗面の実船レイノルズ数での粗度抵抗係数の算定を行った。平板長さは 300[m]とし、速度 V_S [kt]に対する粗度抵抗係数を求めている。また ITTC の式との比較を行う。平板計算と同様に満水喫水線上長さ L_{WL} は 300[m]とし、粗度高さ K_S には標準値である 150[μm]と、Table 1 を参考に R_c の値に概ね近い 60[μm]を用いた。これらの結果を Fig. 8 に示す。

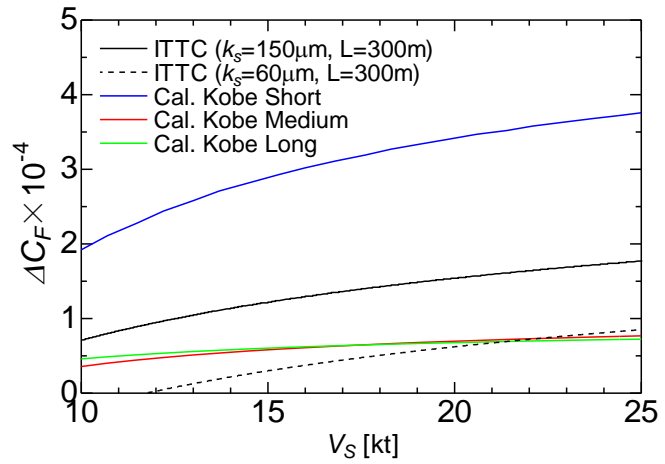


Fig. 8 Calculated results of ΔC_F (ship scale)

$$\begin{cases} u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B + \frac{\Pi(\delta^+)}{\kappa} w\left(\frac{y^+}{\delta^+}\right) - \Delta B \\ w\left(\frac{y^+}{\delta^+}\right) = 1 - \cos\left(\pi \frac{y^+}{\delta^+}\right) \\ \Pi(\delta^+) = 0.52 - 0.28 \exp\left(-\frac{\delta^+}{511.0}\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} C_F x \\ \theta \equiv \int_0^\delta \frac{u}{U_e} \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \end{cases} \quad (2)$$

4. 研究成果

本研究は実船スケールの高いレイノルズ数の計測が行える回転円筒試験装置を用いて、速度分布を計測して、実船スケールの高い粗度レイノルズ数における粗度関数の推定結果を示した、そして塗膜粗面の粗度抵抗を推定し、既存の粗度抵抗評価手法との比較を行うことで以下の結論を得た。

- ・推定した粗度関数は、高い粗度レイノルズ数では上に凸な関数となり、粗度レイノルズ数が大きくなるにつれて粗度関数が一定になるような傾向が得られた。
- ・推定した ΔC_F は粗度高さに標準値である 150[μm]を用いた場合の ITTC の式と比べて短波長は大きく、中波長と長波長は小さくなった。

短波長粗面の ΔC_F が大きくなるのは通常の塗膜面とは異なり、砂粗度に近い塗膜形状であるためと推察される。Fig. 11 の結果より、計算された ΔC_F の船速に対する傾向は ITTC の推定式と概ね同様であるものの、塗膜の形状によって値は大きく異なるため、粗度高さのみを粗度パラメタとする既存の ITTC の推定式では不十分である。特に、塗膜面の波長成分が ΔC_F に与える影響が大きく、今後様々な表面形状の塗膜面に対する粗度関数を計測することによって、粗度関数の塗膜形状依存性について詳細に検討する予定である。また、今回の計測では、低粗度レイノルズ数域での粗度関数計測が困難であったため、粗度関数の立ち上がり挙動が不明である。既存の研究を参考におよその傾向はつかめるものの、今後は低粗度レイノルズ数域の計測についても検討していく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高島公貴, 勝井辰博, 川根孝生, 西岡諒, 三重野紘	4. 巻 第36号
2. 論文標題 回転円筒試験による塗膜粗面の粗度関数計測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 383, 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 勝井辰博, 吉岡秀晃, 高島公貴, 川根孝生, 三重野紘央, 西尾茂	4. 巻 第34号
2. 論文標題 塗膜粗面の粗度関数の直接計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 287, 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高島公貴, 勝井辰博, 三重野紘央	4. 巻 第32号
2. 論文標題 塗膜粗面の粗度抵抗推定法に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演論文集	6. 最初と最後の頁 245, 248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mieno Hirohisa, Katsui Tokihiro	4. 巻 26
2. 論文標題 Experimental investigation of added frictional resistance by paint rough surface using a rotating cylinder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-020-00717-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 勝井辰博
2. 発表標題 回転円筒試験による塗膜粗面の粗度関数計測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 勝井辰博
2. 発表標題 塗膜粗面の粗度関数の直接計測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島公貴
2. 発表標題 塗膜粗面の粗度抵抗推定法に関する研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------