

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02366

研究課題名(和文) 流れ場依存性を排除した機能性船底塗料の抵抗増減率推算に関する統合的アプローチ

研究課題名(英文) Comprehensive approach for estimating the drag reduction ratio of functional ship painting without the dependency of flow field

研究代表者

高木 洋平 (Takagi, Youhei)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40435772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦抵抗低減効果を持つ水和型塗料の流れ場に依存した機能性発現を調べるために、平行平板間流れ、回転二重円筒内流れ、平板境界層流れの数値解析及び抵抗試験を行なった。また、船底塗料として使用する際に問題となる粗度の影響についても調べた。水和型塗料は粗度があっても抵抗低減効果を示し、非一様な粗度パターンを有するときに抵抗低減効果が增大することがわかった。また、平板境界層流れにおいては層流・乱流状態のいずれかであるかが重要であり、乱流促進を行わない条件において、層流-乱流遷移時に見られる横渦構造の発生抑制によって抵抗低減が顕著であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶からの温室効果ガスの削減は重要な課題であり、燃費に直結する船体抵抗の多くは流体による摩擦抵抗が占めている。水和型の船底塗料は抵抗低減効果が確認されているが、その性能を最大限に引き出す利用方法が確立されていない。船体周りの流れは複雑であるため、本研究では抵抗に結び付く要因をいくつかの流れ場に対する数値的・実験的解析によって個々に抽出し、抵抗の増減に大きく寄与する因子を特定した。これにより、使用する船底塗料や船体形状、塗装する船体箇所によって抵抗を減らすための方法について一定の知見が得られ、新規塗料の開発や塗装方法について新しい提案ができることが見出された。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the function onset of hydrophilic painting with frictional drag reduction effect that is dependent on flow field, the numerical analyses and resistance measurements for channel flow, Taylor-Couette rotating annular flow, and boundary layer on a flat plate were carried out. And also, the roughness effect was investigated and it becomes an important problem when the painting is used for ship hull. The hydrophilic painting showed the drag reduction effect if the surface had roughness, and an inhomogeneous roughness pattern led to enhance the effect. At the boundary layer, the state of laminar or turbulence was significant. At the condition without turbulence stimulation, the drag reduction was remarkable because the generation of spanwise rolling vortex seen in the transition of laminar-turbulent flow was suppressed by the hydrophilic painting.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船底塗料 水和型塗料 粘性摩擦抵抗 抵抗低減効果 流体制御 乱流 数値シミュレーション 水槽試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型船舶からのCO₂ガス排出量の削減は全世界共通の課題であり、年々削減要求が厳しくなっている。海水中を航行する大型商船での燃費向上は船体に働く流体抵抗を削減することによって実現できる。流体抵抗は主に造波抵抗と粘性摩擦抵抗に分けることができ、前者に関しては船体形状を改善することによってある程度の低減が達成されている。一方、後者の粘性摩擦抵抗を減らす技術は空気潤滑法などの能動的手法が数多く提案されているが、新たな注入エネルギーを必要とする場合が多い。近年、受動的手法として、防汚性が重視される船底塗料に摩擦抵抗低減効果を持たせた新規塗料の開発が進められている。そのうち、水和型塗料はイルカの皮膚を模して開発され、水槽試験や実船試験において一定の抵抗低減効果が確認されている。しかしながら、塗料の開発は塗料を構成する高分子の性質を選択して合成する化学的アプローチをベースとしており、流体力学的観点からなぜ抵抗が減るのかは明らかになっていない。また、大型船舶での塗装では平滑な塗膜面を作製することが難しく、粗さも考慮した粘性摩擦抵抗の推算が重要となる。

2. 研究の目的

従来からの船舶での粘性摩擦抵抗の推算は、平板での境界層理論をベースとして行われており、そこに機能性塗料を用いたときの境界条件の変化、例えば壁面上でのすべり効果などを平均速度分布の推算式に組み入れることができれば、塗料による抵抗増減を簡易に評価できると思われる。しかしながら、平板に対する境界層理論を摩擦抵抗低減現象と単純に組み合わせると良いかは未解明であり、また平板と異なって3次元性を有する船体形状でははく離などの複雑な流体現象を伴っている。そこで本研究では、水和型塗料による摩擦抵抗低減効果と流れ場の性質について個々に支配因子を抽出して評価し、その後実際の塗料使用や船型開発に応じて、流れ場依存性を排除した塗料による抵抗増減率を推算する手法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

対象とする流れ場は、平行平板間流れ、回転二重円筒内流れ、平板境界層の3種類である。平行平板間流れと回転二重円筒内流れに関しては主に数値解析による検討を行い、平板境界層に関しては数値解析・抵抗試験(実験)の両者を行なった。

(1) 数値解析手法

解析対象は非圧縮性流れであるため、支配方程式は連続の方程式及びナビエ・ストークス方程式である。支配方程式は非構造格子に対応した有限体積法によって空間離散化され、速度場と圧力場の連成解析にはSIMPLE法を非定常流れに拡張したPIMPLE法を使用した。境界条件は平行平板流れでは流入・流出境界に流量一定条件を課して流れを駆動し、回転二重円筒内流れでは試験体となる内円筒を一定の各速度で回転させた。平行平板間流れでは実験と同じ様流入速度を与えた。解析コードはオープンソースの汎用流体解析コードであるOpenFOAMを使用し、後処理等については部分的に改良を加えた。また、平板境界層の数値計算では生成される渦構造を乱流モデルを用いずに解像できる直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)も実施した。DNSはOpenFOAMでも解析可能であるが、計算コストが非常に高くなるため、同じくオープンソースであり、直交格子を採用したIncompact3dを解析コードとして使用した。

(2) 水槽試験

平板境界層に対しては、回流水槽を用いた抵抗試験を実施した。回流水槽は横浜国立大学が保有する実験装置であり、観測部は長さ3m、幅1.2m、深さ0.85mである。水槽下部に設置された二つのインペラによって清水が循環し、最大流速は1.1m/sである。試験平板は長さ1.6m、高さ0.56m、厚み5mmのアルマイト平板であり、前縁部と後縁部はエッジ効果を低減させるために塩化ビニル製のテーパ形状としている。また、前縁部分には乱流促進装置であるスタッドを設けており、乱流境界層を得ることができ、比較対象としてスタッドがない試験平板も用意した。試験塗料は従来型の硬化型塗料(RIGid)と水和型塗料(HYDrophilic)の二種類を用意し、平板のスタッド有無と組み合わせで4枚の試験平板を用意した。また、塗料を塗布しない滑面平板も用意した。抵抗は平板中心に結合された分力計によって測定され、平板は上流部・下流部で板バネによって支持され、流れ方向の変位のみ許容されている。流速は最大流速1.1m/sまで0.1m/s刻み(低速域)または0.05m/s刻み(高速域)で設定し、対応するレイノルズ数は $6.0 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$ であり、乱流促進装置がない場合は平板境界層での層流-乱流遷移域に相当する。

4. 研究成果

(1) 粗度高さ及び粗度パターンが摩擦抵抗増減に与える影響

水槽試験における抵抗値を摩擦抵抗係数として比較すると、水和型塗料を使用した平板の結果は滑面平板の値よりも増大しており、今回の平均的な粗度高さが100 μ m程度の塗膜面ではその粗度影響を無視することができないが、従来型の硬化型塗料の結果と比べると抵抗が減少しており、粗度があっても水和型塗料の機能が発現することが示された。実験では粗度パターンを自

由に変化させることが難しいため、平行平板間流れの数値解析において粗度パターンを変更させてその依存性を調査した。粗度がない平滑な塗膜面を設定したケースでの値を比較すると、流路幅に対して 3%-5%の塗膜厚みに設定すると最大で 0.8%の抵抗低減効果が得られた。次に塗膜厚さを 5%に固定して等方的な粗度を与え、水和製を考慮した解析を行うと、平滑チャンネルに比べて抵抗が 30-40%増加し、流体が透過しない場合の方が抵抗の増大率が少なくなることがわかった。さらに、同じ塗膜厚みで粗度を非等方なパターン(本解析では流れ方向に対する粗度要素のアスペクト比が 10 とした)に変更すると、抵抗は増大するが抵抗増大率が 3%-7%程度に抑えられることが示され、流体透過性の依存性は等方的な粗度と同様であった。非等方な粗度分布を与えたときの平均速度を図 1 に示す。図中において R15An は流体が透過しない 5%厚みの非等方粗度、RP5An は流体が透過する 5%厚みの非等方粗度、SI は塗膜なしの結果を示している。流路中心付近ではどのケースでも同じ流速になっており、塗膜に極めて近い領域での速度分布が抵抗増減に寄与していることがわかる。同じ解析ケースにおいて速度の変動成分分布に注目すると(図は省略)、壁付近において、粗度の非等方性の影響が現れて流れ方向成分の変動が不透過膜において大きくなることがわかった。すなわち、今回の解析で設定したような流体透過性によるすべり効果が大きく抵抗低減に寄与しない塗膜及びレイノルズ数では、粗度パターンによる乱流渦の変調が重要であることがわかった。

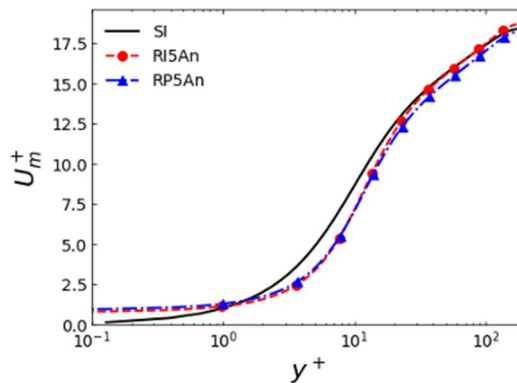


図 1 平均速度分布

(2) 層流-乱流遷移状態における乱流渦と水和型塗料による抵抗低減効果

平板境界層での抵抗試験における結果を図 2 に示す。図中で Alumite は塗装なし平板、HYD は水和型塗料、RIG は非水和型塗料、STUD は乱流促進装置あり、NONE は乱流促進装置なしを示しており、平板境界層の経験則であるシュリヒティングの曲線を層流(Lam.)・乱流(Turb.)のそれぞれについて比較のために示してある。乱流促進装置の有無による違いに注目すると、乱流促進装置が無い条件の方がレイノルズ数が低くなるにつれて水和型塗料の抵抗低減率が大きくなることわかった。平板境界層では、スタッドや何らかの擾乱で励起された二次元的な横渦構造が発生し、下流に進むにつれて三次元的な縦渦構造に遷移することが知られており、対応する DNS を実施し、乱流渦構造を抽出すると、図 3 に示す渦構造の遷移が実際に観察された。水和型塗料のせん断応答性が抵抗低減に寄与していると仮定すると、乱流促進装置がない試験平板上では遷移状態に発生する横渦構造が下流方向に渡ってゆっくりと成長するため、支配的な流れ方向の壁面速度勾配が緩和されることによって抵抗低減効果が顕著となったと考えられる。乱流促進装置がある場合は、三次元的な縦渦構造が優位となりスパン方向の壁面速度勾配が誘起されるが、その方向への水和型塗料によるすべり効果は渦度を増長して抵抗増大につながるため、乱流促進装置を設けた試験平板では抵抗低減効果が少なかったと考えられる。

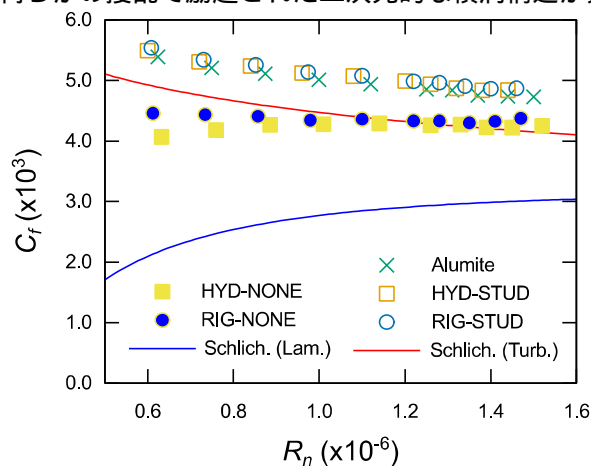


図 2 抵抗試験結果



図 3 平板境界層でのスタッド後方での乱流渦

(3) 今後の展望

本研究成果によって、摩擦抵抗低減効果を持つ水和型塗料は粗度影響を受け、また流れの層流-乱流遷移状態ではその機能発現が高まることが示されたため、両者を併せ持つ船体周り流れでは塗膜の性質や乱流状態を加味した抵抗推算法を提案することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木洋平, 城間琉星, 日野孝則
2. 発表標題 OpenFOAM を用いた平板境界層における乱流促進装置の形状影響評価
3. 学会等名 オープンCAEシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木洋平, 城間琉星, 日野孝則
2. 発表標題 スタッド付き平板境界層での乱流促進に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木洋平, 城間琉星, 日野孝則
2. 発表標題 低速域における平板境界層での乱流促進装置の効果検証
3. 学会等名 第160回回流水槽研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木洋平, 岩本真莉絵, 日野孝則
2. 発表標題 チャンネル流れにおける気泡の変形と乱流運動の関係
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木洋平
2. 発表標題 船体周り流体解析における計算格子が抵抗成分評価に与える影響
3. 学会等名 オープンCAE・Front ISTR合同シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木洋平, 岩本真莉絵, 日野孝則
2. 発表標題 チャンネル乱流における変形する気泡が流れ場に及ぼす影響
3. 学会等名 第34回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市坪翔, 高木洋平
2. 発表標題 Xcompact3dを用いた乱流促進装置付き乱流境界層の直接数值シミュレーション
3. 学会等名 オープンCAEシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市坪翔, 高木洋平
2. 発表標題 乱流促進装置付き平板境界層の直接数值シミュレーション
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和4年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木洋平, 市坪翔
2. 発表標題 スタッド付き平板境界層流れの直接数値シミュレーション
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022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
---------	---------