

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06963

研究課題名(和文)せん断応答性を有するハイドロゲル塗膜のメソスケールモデルによる抵抗低減効果予測

研究課題名(英文) Prediction of Drag Reduction Effect of Hydrogel Painting Having Shear Stress Responsibility by Using Mesoscale Model

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大型船舶に用いられる機能性船底塗料の一つであるハイドロゲル塗料を対象に、その摩擦低減効果を明らかにするために、水槽試験における抵抗試験及び数値計算を行った。水槽試験ではハイドロゲル塗料と塗布した平板が一樣流中で受ける摩擦抵抗を測定し、層流-乱流遷移域と発達乱流域では形成される乱流渦の形態が異なり、抵抗低減効果は遷移域で顕著となることが明らかになった。また、数値計算では塗膜の粗度を一樣な粗度分布から非等方な分布に変更することによって、粗度があってもハイドロゲル塗膜のせん断応答性によって抵抗低減効果が得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機能性船底塗料の一つであるハイドロゲル塗料の摩擦抵抗低減効果をメソスケールな観点から明らかにするために実験及び数値解析を行った。ハイドロゲルの抵抗低減効果について流体力学的な観点から乱流中の渦構造との関係から明らかにし、抵抗低減率を向上させるための塗膜形成法を提案した。本研究で成果を実船での塗装に活かすことによって、大型船舶からのCO2削減、燃費性能の向上が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have carried out the resistance test with a water tank and a simulation in order to investigate the frictional drag reduction of hydrogel paint that is one of the functional paints of ship hull used in commercial large ship. At the water tank experiment, the frictional drag on a flat plate coated with hydrogel paint was measured in a uniform flow. From the experimental result, it was found that turbulent eddy structures were different in the laminar-turbulence transition regime and fully-developed turbulence state, and the drag reduction effect became prominent in the transition regime. In addition, the roughness of painting film was numerically changed from homogenous pattern to anisotropic one and the flow simulation was conducted. From the numerical result, it was shown that the drag reduction effect was obtained due to the shear stress response of hydrogel paint if rough film was used.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：機能性船底塗料 ハイドロゲル 乱流 抵抗低減 水槽試験 直接数値計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型船舶用の船底塗料として、防汚性の機能以外に海水中での粘性摩擦抵抗を低減させる効果を持つ機能性塗料が開発されている。このような塗料のうち、水中で水和層を形成するハイドロゲル塗料は海水中に塗料成分を溶出しないため環境に優しく、さらに燃費低減の効果があるが、なぜ抵抗が低減するかは明らかになっていなかった。また、船底塗料は使用した際に無視できない粗度を塗膜表面で持つが、ハイドロゲル塗料では粗度があるにもかかわらず抵抗低減効果が発現することが知られていた。ハイドロゲル塗料の抵抗低減効果につながる特性としては、水中で形成される水和層によって water trap layer が形成され、そこでの流体のすべり速度が発生し、抵抗増大につながるせん断応力を緩和するモデルが提案されている。本研究ではこのモデルと同様に、壁面近傍での流体现象、特に乱流渦の生成・消滅の関係性に注目した。

2. 研究の目的

流体中で水和層を形成するハイドロゲル船底塗料の抵抗低減効果を解明するために、表面粗さを有するハイドロゲル塗膜の壁乱流中でのダイナミクスを実験的・数値的に明らかにし、抵抗低減効果が得られるときの塗膜物性、塗膜形状、流動状態を決定するための手法を開発する。ハイドロゲル塗膜の挙動をモデリングするために、塗料高分子の情報を流体場のマクロスケールと結び付けるメソスケール塗膜モデルを提案し、乱流中での挙動を予測するために必要となるモデルパラメータを実験と数値計算を結合して決定する。さらに得られた塗膜モデルを用いて、実船での抵抗低減効果を数値的に予測する手法を提案する。

3. 研究の方法

ハイドロゲルが乱流場のせん断応力に応答して粘性摩擦抵抗を減少させる効果を解明するために、回流水槽を用いた抵抗試験とゲル塗膜を考慮した数値解析を実施した。実験及び計算の概略を以下に述べる。

(1) 回流水槽を用いた抵抗試験

横浜国立大学が保有する回流水槽(西日本流体技研製)を用いて試験平板にハイドロゲル塗料を塗布して一様流中での抵抗試験を行った。試験平板は図1に示すような長さ1.66 mのアルミニウム平板であり、前後縁部分はくさび形状にしてエッジ効果が少なくなるようにしてある。用いた水和型塗料はメタクリル酸メチル(MMA)とアクリル酸 2-メトキシエチル(MEA)を 50wt%-50wt%で重合した

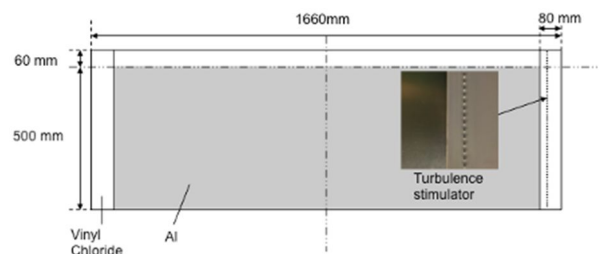


図1 試験平板

高分子塗料であり、比較対象の非水和型塗料として、MMA とアクリル酸 2-エチルヘキシル(EHA)を 50wt%-50wt%で重合した高分子塗料も用いた。また、試験平板前縁部分には乱流促進装置を付けたもの・付けないものの2種類を用意し、境界層の乱流発達状態の依存性も検討した。回流水槽の流速は0.5 m/s から 1.2 m/s まで変化させて実験を行い、平板中央に接続された1分力計を用いて平板にかかる抵抗値を測定して時間平均したものを利用した。

(2) ゲル塗膜を考慮した数値解析

回流水槽と同様な平板境界層での数値計算を実行することは現状での利用可能な計算機資源を考えると現実的ではないため、周期境界条件を利用して計算コストを削減できる平行平板間乱流(チャンネル乱流)にゲル塗膜領域を設定した解析を行った。支配方程式は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と連続の式であり、有限体積法にて離散化を行った。境界条件は流れ方向とスパン方向に周期境界条件を適用し、図2に示すように2つの壁境界には多孔質として流体透過性を持つ塗膜領域を設けた。塗膜領域の性質・条件としては、塗膜の厚みを流路幅に対して1%~20%まで設定し、平滑な

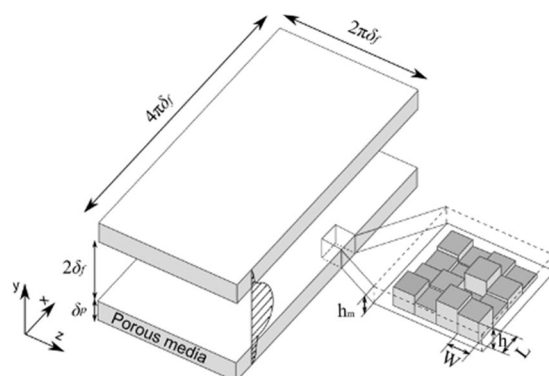


図2 塗膜付きチャンネル流れ

塗膜面の場合と粗度を持つ場合を計算した。粗度の与え方は乱数によって与え、さらに等方的な粗度分布を持つ場合と流れ方向に配向した非等方的な粗度分布の場合について解析を行った。得られた計算結果より塗膜を設定していない平滑境界条件に対する抵抗低減率を算出するとともに、平均速度分布及び乱流統計量から抵抗低減効果と乱流状態との相関を調べた。

4. 研究成果

(1) 回流水槽を用いた抵抗試験結果

まず抵抗試験を行う前に、各試験平板の粗度分布を測定した。2種類の塗料、乱流促進装置の有無により合計4枚の試験平板を用意したが、粗度の大きさは概ね $100\ \mu\text{m}$ で平板による差異は小さく、どの試験平板も粗度の影響は無視できないが試験平板による塗装状態の違いは見られなかった。次に各平板に対して抵抗を測定し、結果をまとめたものを図3に示す。図の横軸は一樣流速と平板長さ、動粘性係数で定義されるレイノルズ数であり、縦軸は抵抗値を無次元化した抵抗係数である。本実験でのレイノルズ数は $0.6 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^6$ であり、平板境界層では乱流促進装置を用いない場合、層流-乱流遷移状態となる。図3中において、Alumite は塗装なしのアルマイト平板、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。塗料の違いに注目すると、水和型塗料は非水和型塗料に比べて今回のレイノルズ数範囲では抵抗係数が小さい値をとり、平板境界層において抵抗低減効果を持つことが確認された。次に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がわかった。一般に、乱流促進を行わない平板境界層では、前縁部分から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いる。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、層流-乱流遷移状態に発生する横渦構造で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。三次元的な縦渦構造では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膜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。

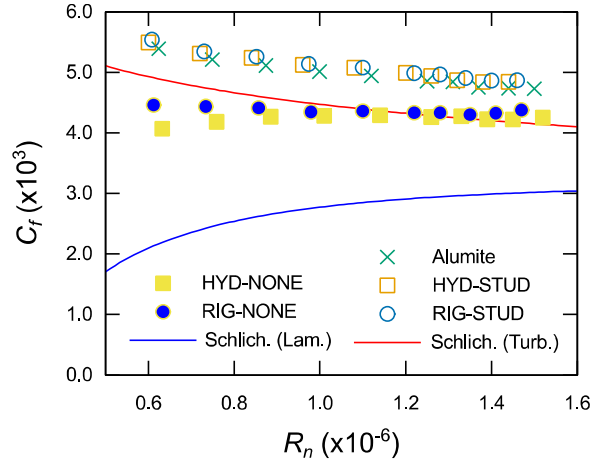


図3 抵抗試験結果

(2) ゲル塗膜を考慮した数値解析結果

チャンネル乱流の直接数値計算結果より壁面に働くせん断応力を積分して、塗膜なしの場合の平滑チャンネルでの抵抗値に対して各ケースでの抵抗低減率を算出した。なお、本解析での壁面摩擦速度に基づくレイノルズ数は約180であり、乱流状態ではあるが比較的低いレイノルズ数である。まず、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、流体透過性を変化させた解析を行うと、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4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。

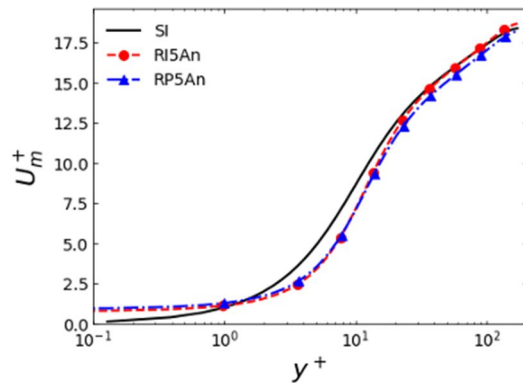


図4 平均速度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Petya Valentinova Stoyanova, Lei Wang, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano and Youhei Takagi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Effect of thin and rough layers of porous materials on drag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 -
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 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7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, 中村麻子, 日野孝則, 鈴木和夫, 西村雅翔, 麻生宏実
2. 発表標題 平板境界層における水和型塗料の摩擦抵抗低減効果
3. 学会等名 平成30年日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野勇斗, 日野孝則, 高木洋平, 鈴木和夫
2. 発表標題 CFD による塗膜粗面の抵抗評価
3. 学会等名 平成30年日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Youhei Takagi, Takanori Hino, Masanari Nishimura and Hiromi Aso
2. 発表標題 Experimental study on the friction drag reduction of hydrogel paint in a boundary layer on flat plate
3. 学会等名 ASME2019 AJKFluids
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木洋平, Wang Lei, Petya Stoyanova, 岡野泰則
2. 発表標題 多孔質壁面の非等方性による乱流渦の変調
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木洋平
2. 発表標題 回転を伴う一様等方乱流中での高分子挙動
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木洋平, 中田亜紀
2. 発表標題 壁乱流中での高分子挙動と乱流渦の相関
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木洋平, ワンライ, 岡野泰則
2. 発表標題 摩擦抵抗低減効果を持つ機能性船底塗料の数値解析
3. 学会等名 第8回推進・運動性能研究会
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----