

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760675

研究課題名(和文) ハイドロゲル塗膜による乱流渦の抑制と船底摩擦抵抗低減効果の解明

研究課題名(英文) Investigation of the suppression of turbulent vortex formation and the frictional drag reduction effect on ship hull due to hydrogel painting

研究代表者

高木 洋平 (Takagi, Youhei)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：40435772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：船底塗料として用いられるハイドロゲル塗料は海水中で水和層を形成し、さまざま機能を発現する。本研究ではハイドロゲル塗膜による摩擦抵抗低減効果を、乱流中の渦構造形成過程との関連から明らかにした。まず内円筒表面に塗装を施した回転二重円筒装置を作製し円筒にかかるトルク値を測定した。その結果、ハイドロゲル塗料による抵抗低減効果が塗膜厚みが薄くなることによって顕著になることを実験的に示した。さらに、壁面上での局所すべり速度を考慮した場合や壁面への流体透過性を考慮したチャンネル乱流の数値計算を行い、抵抗低減効果が渦構造のスケールや境界層の厚みに依存することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Hydrogel painting for ship hull makes hydration layer in sea water and has various functionalities. In this study, we revealed the effect of frictional drag reduction with hydrogel painting surface based on the relation with turbulent vortical structure formation. In experiment, we made a rotating annular cylinders apparatus with painted surface on the inner cylinder, and measured the torque acted on the inner cylinder. From experimental data, it was shown that the drag reduction effect of hydrogel painting became strong when the thickness of painting layer became small. In addition, we carried out the numerical simulations of channel flow with local slip velocity and penetration of fluid into wall, and found that the drag reduction effect depended on the scale of turbulent vortex structure and the thickness of boundary layer.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：乱流制御 水和型塗膜 ハイドロゲル 直接数値計算 すべり速度 多孔質性 乱流渦

1. 研究開始当初の背景

近年の海上輸送需要の増加により、大型船舶からの二酸化炭素排出量削減が求められている。タンカーなどの肥大船の推進抵抗は、40%が造波抵抗、60%が粘性摩擦抵抗が占めている。このうち造波抵抗については船首形状の最適化によってある程度の抵抗削減が達成されているが、粘性摩擦抵抗についてはまだ削減の余地がある。船舶などの大型輸送機器が高速で移動する場合、流体は高レイノルズ数の乱流状態であり、乱流摩擦抵抗を削減する技術が今までに提案されてきた。例えば船首から微細な気泡を吹き出す空気潤滑法と呼ばれる技術は大幅な抵抗低減効果を期待できるが、気泡発生装置の施行や船底に気泡を這わせるための付加物が必要となる。一方、受動的ではあるが一定程度の抵抗低減効果を見込める方法として、防汚目的で用いられる船底塗料に機能性を付加する技術がある。近年、イルカやマグロなどの海洋生物体表に着想を得たハイドロゲル塗料が開発されており、実際に抵抗低減効果があるとされている。ハイドロゲル塗料を用いた船底塗膜は海水中で水和層を形成し、ゲルの高分子効果等で何らかの抵抗削減効果を持つとされているがそのメカニズムは明らかになっておらず、様々な船型や運行条件に合わせた塗膜形成技術は確立されていないのが現状である。

2. 研究の目的

海水中でハイドロゲル水和層を形成する水和型船底塗料を用いたときに現れる乱流摩擦抵抗低減効果を、ゲルを構成している高分子の応力緩和作用と壁面近傍に存在する乱流渦の関係から明らかにする。本研究では回転二重円筒装置を用いた室内実験で塗料成分や塗膜厚みを変化させた試験を行い、内円筒にかかるトルク値から抵抗低減率を評価する。また、ハイドロゲルの特性をモデル化した乱流数値シミュレーションを実施し、乱流中の渦構造を抽出してそれらの構造が乱流摩擦抵抗の増減にどのように寄与して

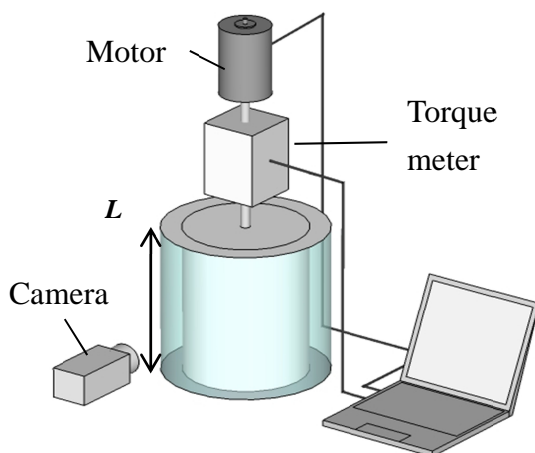


図1 回転二重円筒装置

いるかを探る。さらに渦構造のスケーリングを用いて最適なハイドロゲル塗膜の形成法について考察する。

3. 研究の方法

(1) 回転二重円筒装置を用いた抵抗低減率の測定

作製した回転二重円筒装置の概略を図1に示す。装置は二重円筒部分、トルクメータ、モータ部分から構成され、塗料が塗布されたステンレス製内円筒を所定の回転数で回転させる。外円筒はアクリル製で内部流動を観察できる。内外円筒の半径はそれぞれ48 mm、64 mmであり、測定部高さは128 mmである。円筒間に作動流体(純水及びグリセリン水溶液)を密閉し、回転時にかかるトルクを測定した。内外径差と回転速度に基づくレイノルズ数は 4.4×10^4 から 7.9×10^4 として実験を行った。内円筒に塗布した塗料は通常の熱硬化型樹脂及び水和型塗料であり、塗膜厚みが $380 \mu\text{m}$ 及び $240 \mu\text{m}$ の二種類の条件で測定を行った。

(2) ハイドロゲル特性を壁面境界条件に考慮したチャンネル乱流直接数値計算

平行平板間乱流(チャンネル乱流)の直接数値計算を行った。壁面の境界条件として通常の滑面すべりなし条件の他に、壁面速度勾配に比例するすべり速度が局所的に発生する条件、及びゲル内への流体透過性を模擬した多孔質壁境界条件を用いた計算を行った。支配方程式は非圧縮性流体の連続式、ナビエ・ストークス方程式であり、有限差分法または有限体積法を用いて離散化を行った。レイノルズ数は流路平均速度を用いるバルクレイノルズ数で5600、壁面摩擦速度に基づくレイノルズ数で約180とした。

4. 研究成果

(1) 塗料組成及び膜厚みが抵抗低減効果に及ぼす影響

回転二重円筒装置を用いて測定したトル

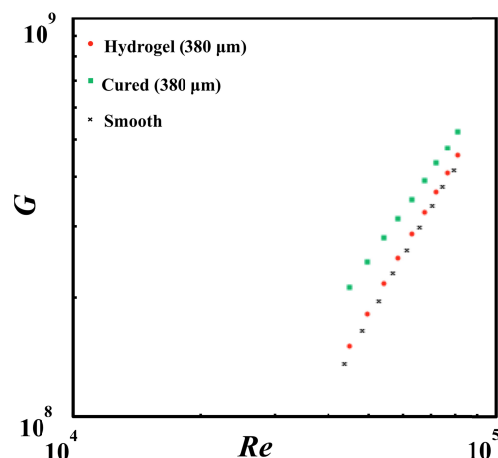


図2 無次元化トルクとレイノルズ数の関係(塗料組成の影響)

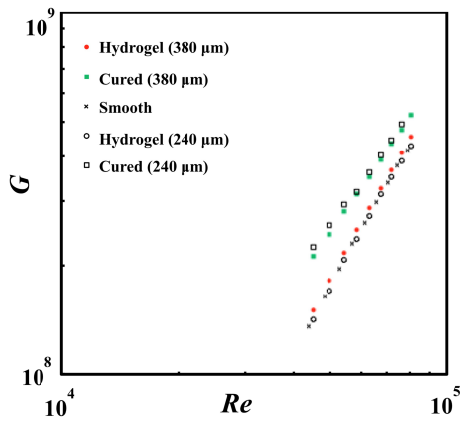


図 3 無次元化トルクとレイノルズ数の関係(塗膜厚さの影響)

ク値を密度、動粘度、測定部長さを用いて無次元化し、レイノルズ数に対する相関を整理したものを図 2・3 に示す。まず図 2 より、通常の熱硬化型(Cured)塗料は塗料なしの滑面(Smooth)の場合よりも抵抗値が大幅に上昇していることがわかる。これは塗料を塗布すると表面粗さの影響が出てくるためである。この熱硬化型と同程度の表面粗度でハイドロゲル(Hydrogel)塗料を塗布すると、熱硬化型に比べてトルクが大幅に減少し、最大で 37%の抵抗低減効果が得られた。次に図 3 より、膜厚みを 380 μm から 240 μm まで薄くすると、熱硬化型では抵抗が増大してしまうが、ハイドロゲル塗料では抵抗が減少して更なる抵抗低減効果が得られることが明らかになった。

(2)局所すべり速度の発生による抵抗低減効果の発現とすべり周期の依存性

山盛らの報告(TECHNO-COSMOS, 18, 2005)によれば、粗さが存在する塗膜表面ではハイドロゲル塗料を利用すると塗膜表面の凹み部分に海水がトラップされ、その結果境界層中ですべり速度が発生することによって壁面摩擦抵抗が減少する、と予想されている。そこで本研究では凹凸の存在する塗膜面を平板に置き換え、周期的なすべり速度を発生する境界条件を設定することによって実際に抵抗低減効果が得られるかどうか検証した。図 4 に抵抗低減率(DR)のすべり周期依存性を示す。本研究では流れ方向及びスパン方向それぞれのすべり周期を変化させて行ったが、図中では横軸に流れ方向すべり周期を取り、スパン方向の条件ごとに結果を示している。抵抗低減率が最大となる明確な最適条件は決定できなかったが、乱流中のコヒーレント構造である縦渦構造のスケールに対応した条件($\lambda_x^+ = 300 \sim 400$, $\lambda_z^+ = 100 \sim 200$)で抵抗低減効果が大きくなることがわかった。

(3)すべり速度のせん断応答性

ハイドロゲル塗膜による摩擦抵抗低減効果は、ゲルのせん断応力に対する反発性(粘弾性効果)も寄与していると考えられる。上述のすべり速度境界条件は壁面速度勾配に

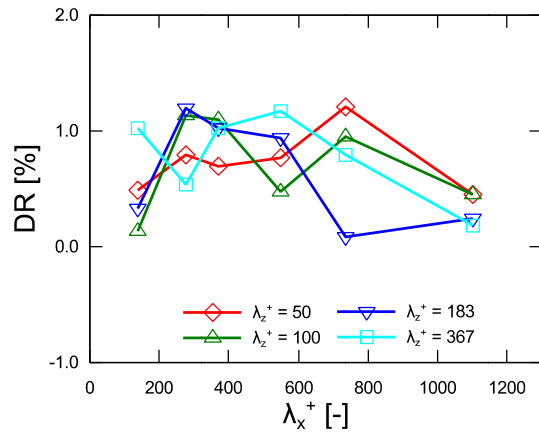


図 4 抵抗低減効果のすべり周期依存性

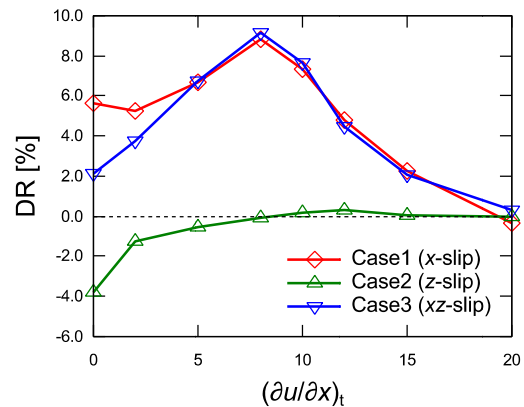


図 5 抵抗低減効果の限界すべり条件依存性

比例するすべり速度を設定しているが、壁面速度勾配のあるしきい値まではすべり速度が発生しないすべりなし条件とし、壁面速度勾配が大きい強いせん断応力状態ですべり速度が発生するとして粘弾性効果を模擬した計算を実施した。壁面速度勾配のしきい値を変化させて抵抗低減率に対する依存性を整理した結果を図 5 に示す。図中において、Case 1 は流れ方向のみにすべりを考慮した場合、Case 2 はスパン方向のみにすべりを考慮した場合である。Case 3 は両方向にすべりを考慮した場合である。Case 1 及び Case 3 の結果は、縦渦構造の形成をそれぞれ抑制・増強しているためである。Case 3 はこれらの結果の重ね合わせになっており、この条件が等方的な組成を持つ塗膜により近い条件であるが、壁面速度勾配のしきい値が 8 程度で抵抗低減率が最大となった。この値は塗膜無しの滑面状態の計算から求められる壁面速度勾配の平均値に一致しており、滑面状態の数値計算を行うことができれば最適な粘弾性特性を決定できることを意味している。

数値計算による検討では、上述の(2)及び(3)以外に、ゲルの多孔質性や塗膜面の凹凸形状の影響についても考察を行った。その結果、ハイドロゲル塗膜の多孔質においては、塗膜厚みを境界層厚み程度に設定することが重要であり、また凹凸形状においては、うねりの周期が局所すべり速度の検討と同様

に乱流渦のスケールと同程度であるときに抵抗低減効果が得られることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計7件)

Y. Takagi, M. Nakamoto and Y. Okano, "Numerical study on turbulent drag reduction in channel flow with non-uniform slip wall responding shear stress", 9th World Congress of Chemical Engineering Incorporating 15th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (WCCE9 & APCCHE2013), Aug. 18-23 (2013), Seoul, Korea.

Y. Takagi, M. Nakamoto and Y. Okano, "Numerical investigation of the drag reduction mechanism in turbulent channel flow with local slip velocity", The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2013, June 3-6 (2013), Hong Kong, China.

M. Nakamoto, Y. Takagi and Y. Okano, "Numerical study on the influence of turbulent structure in a channel with wavy-walls on drag reduction", 8th International OpenFOAM Workshop, June 11-14 (2013), Jeju, Korea.

高木, 中本, 岡野, "せん断応答性を有する塗膜の乱流抵抗低減効果", 化学工学会第45秋季大会, 2013年9月16日～18日, 岡山大学.

中本, 高木, 岡野, "薄い多孔質壁を持つチャネル乱流での乱流構造と抵抗増減効果の関連性", 第27回数値流体力学シンポジウム, 2013年12月17日～19日, 名古屋大学.

高木, 中本, 岡野, "流路壁面の多孔質性が乱流場に及ぼす影響", 化学工学会第79年会, 2014年3月18日～21日, 岐阜大学.

中本, 高木, 岡野, "流体透過性を有する多孔質壁面上での乱流抵抗増減効果に関する数値解析", 2014年3月18日～21日, 岐阜大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

高木 洋平 (TAKAGI, Youhei)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号: 40435772

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし