

補助事業番号 2024M-422

補助事業名 2024年度 表面テクスチャリングによる空気充填面の創製と摩擦抵抗低減技術の開発 補助事業

補助事業者名 京都工芸繊維大学 北川石英

1 研究の概要

本事業では、空気充填面を用いた持続的な摩擦抵抗低減技術の開発を目的として、撥水面上の微小溝群に生成される空気膜の可視化計測や液体速度計測を実施した。その結果、レイノルズ数 Re が4000～6000の範囲では、全ての微小溝に空気が完全に充填されることがわかった。また、 Re 数と摩擦抵抗低減率 DR の関係を算出した結果、 $Re = 4000 \sim 7000$ の範囲では、空気膜の利用により摩擦抵抗が低減することがわかった。

2 研究の目的と背景

現在、地球環境問題の解決と持続可能な低炭素社会の実現が世界的に強く望まれており、温室効果ガス排出削減のための技術開発が様々な分野において実施されている。輸送機器の一つである船舶に目を向けると、化石燃料を利用する船舶では CO_2 が多量に排出され、近年の国際海運からの排出量は年間あたり約9億トンにも達する。これは全世界の CO_2 総排出量の3%に相当することから、船舶からの CO_2 排出量の削減は地球規模での喫緊の重要課題であると言える。特に、タンカー船などの大型船舶が航行時に受ける抵抗の約80%は船体と海水間での摩擦抵抗であることから、この摩擦抵抗の低減こそが船舶の省エネルギー化をもたらす極めて重要な要素である。

本事業では、撥水性表面における微小溝内の空気の充填状況や空気充填面付近での流動構造を理解することにより、空気充填面を利用した摩擦抵抗低減技術を開発することを目的としている。この目的を達成するため、高速度カメラを用いた可視化計測および速度計測を実施し、空気充填面を利用した摩擦抵抗低減技術開発のための最適条件を見出す。

3 研究内容

表面テクスチャリングによる空気充填面の創製と摩擦抵抗低減技術の開発

<http://www.cis.kit.ac.jp/~kitagawa/>

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は、透明アクリル製上流チャンバー、透明アクリル製矩形流路、透明アクリル製下流チャンバー、空気供給装置、恒温循環水槽、水冷式熱交換器、マグネットポンプ、および流量計から構成された。空気供給装置はニードル、アクリル板、整流板、およびぜん動ポンプから構成され、空気はチャンネルの上壁に取り付けられたニードルを介して、ぜん動ポンプにより流路内に注入された。作動流体には $22^\circ C$ の水道水を使用した。なお、座標軸は流れ方向を x ($x = 0$ mm:微小溝下流エッジ)、垂直方向を y ($y = 0$ mm:上壁面)、スパン方向を z とした。

矩形流路は助走区間およびテスト区間から構成され、長さをそれぞれ1500 mmとした。実験の際にはテスト区間にテスト板を挿入し、ボルトにより上壁に固定した。テスト板はアクリル板とテフロン板により構成された。アクリル板の全長および幅をそれぞれ、1500 mm、100 mmとした。アクリル板表面に長さ200 mm、幅100 mm、深さ10 mmの溝を設け、そこに撥水性を有するテフロン板を取り付けた。テフロン板の表面には切削加工により微小溝群が設けられた(図2)。溝の長さを100 mm、深さを1.5 mm、幅を1 mmとした。また、微小溝の本数は44本とし、スパン方向の溝間の距離は1.5 mmとした。

モノクロハイスピードカメラ、マクロレンズ、半導体レーザー、シリンドリカルレンズ、ミラーおよびPCを用いて、PTV(粒子追跡速度計測法)による気液二相流の速度計測を行った。液体トレーサーとして平均粒径が60 μm の多孔質粒子を用いた。レーザー光を2枚のシリンドリカルレンズを通して厚さ約1 mmのシート状にし、ミラーを介して、流路下部からテスト板に対して垂直に照射した。レーザー光は、液体中に存在するトレーサー粒子の表面にて散乱し、カメラにて撮像された。カメラによって撮像された粒子画像は、512 \times 1024 pixelsで256階調のデジタル画像として直接PCに保存された。取得画像に対して、粒子マスク相関法を用いて粒子重心位置を算出し、その後、3時刻追跡法を用いて個々の粒子の速度ベクトルを算出した。

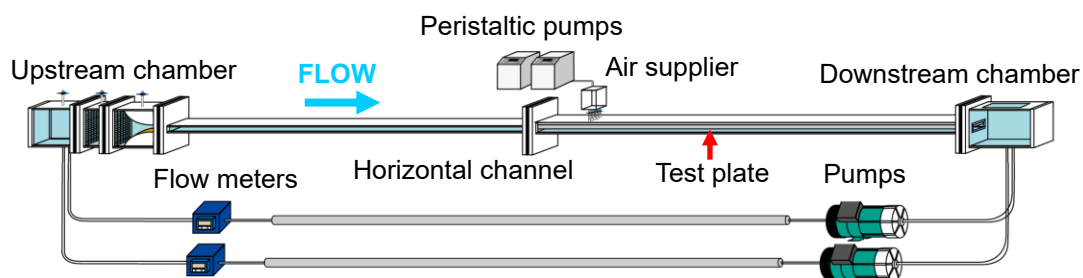


図1 実験装置の概略図

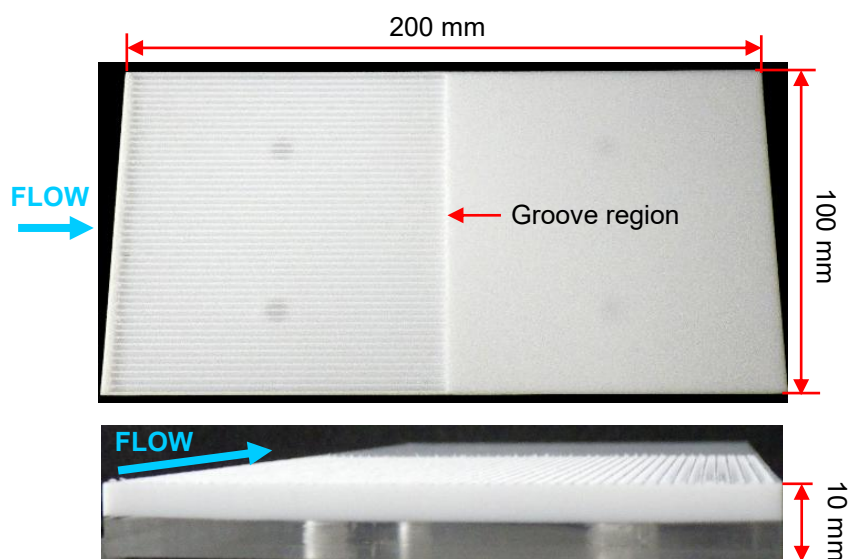


図2 微小溝群を有するテフロン板

Re = 4000, 10000の条件における微小溝内の空気膜の様子を図3に示す. 図3より, いずれのRe数に対しても微小溝内で空気膜の生成が生じていることがわかる. しかし, Re = 10000の条件では溝の下流側で空気膜の消失が生じる. 流路横からの可視化観察によれば, Re数の増加とともに気液界面の微視的な振動が顕著になり, これが空気膜の破断のトリガーとなることがわかった.

Re数と空気膜存在率 α の関係を図4に示す. ここで, 空気膜存在率とは, 微小溝内に存在する空気膜の存在割合であり, 図3で得られた画像を二値化処理することによって算出した. 図4より, Re = 4000~6000の範囲では, α が100%となることがわかる. これは全ての微小溝内に空気が完全に充填されていることを示すことから, 空気充填面の創製に成功したと言える. しかし, α はRe数の増加とともに低下し, 特に, Re = 10000の条件では約85%となる.

Re = 4000の条件における液体平均速度の分布を図5に, レイノルズ応力の分布を図6に示す. 図5の縦軸は断面平均液体速度 u_b により, 図6の縦軸は u_b^2 により正規化されている. 一方, 図中の横軸は流路高さ h によって正規化されている. 図5より, 上壁近傍では, $x = 25$ mmの位置における液体速度が平板(Flat plate)に対するそれよりも増加することがわかる. これは, 微小溝内に存在する気液界面のFree-slip条件に伴う速度増加の影響が持続されていることを意味する. 一方で, $x = 50, 75$ mmの位置での液体速度は平板に対するそれとほぼ同じになる. このため, 気液界面のFree-slip条件に伴う速度増加は, 粘性によるダンピングにより溝の下流50 mmで消失したと言える. 図6より, 上壁近傍では, 平板の場合に比して, レイノルズ応力の絶対値が, $x = 25$ mmの位置では最大約11%, $x = 50$ mmの位置では最大約5%低下することがわかる. 気液界面上ではFree-slip条件に伴い, 乱流エネルギーが生成されないことから, 空気膜上での縦渦運動は著しく減衰する.

Re数と摩擦抵抗低減率DRの関係を図7に示す. 図7より, Re = 4000~7000の範囲では, DRが正の値となっており, 空気膜の利用により摩擦抵抗の低減に成功していることがわかる. 特に, Re = 4000の条件のDRは約6%に達している. しかし, Re = 8000~10000の範囲では, DRが負の値となっており, 微小溝の存在によって摩擦抵抗が増加している. これは流速増加に伴う空気膜存在率の低下, 気液界面の微視的な振動, そして, 微小溝の空気膜消失部に生じた圧力抵抗の増加に起因していると考えられる.

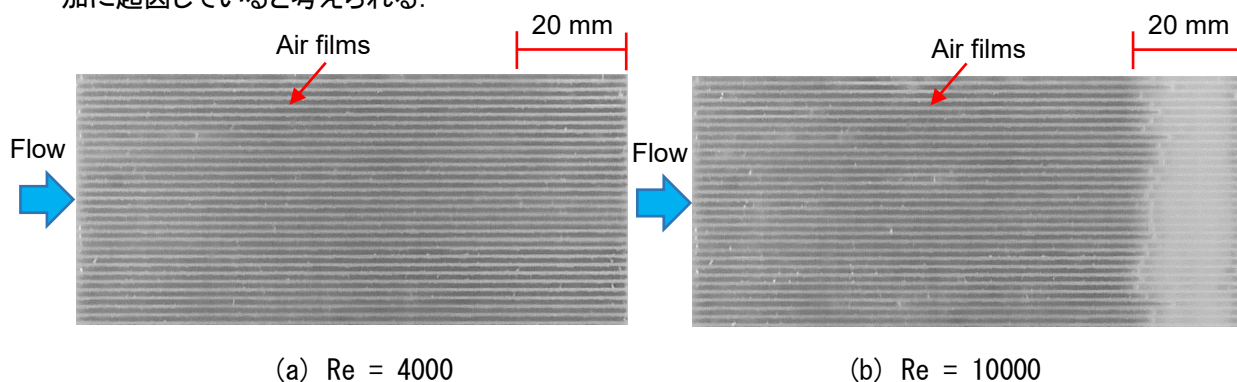


図3 微小溝内の空気膜の様子

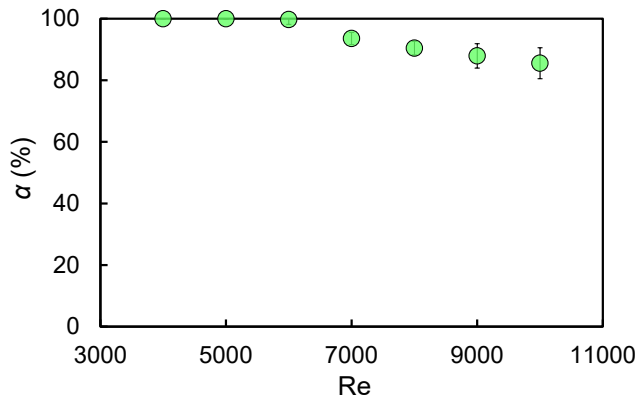


図4 Re数と空気膜存在率 α の関係

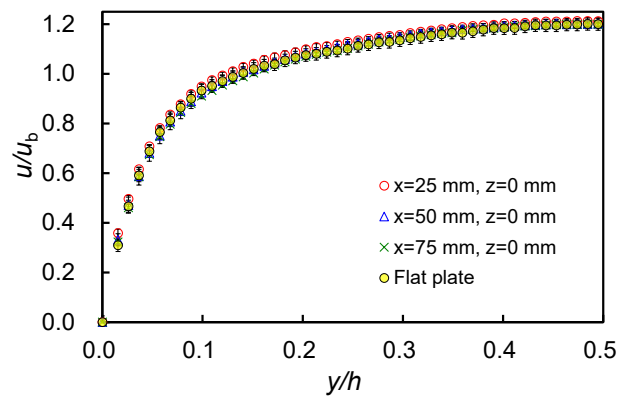


図5 液体平均速度の分布

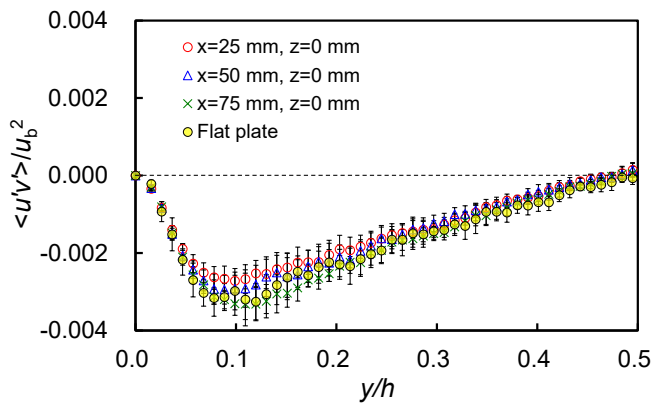


図6 レイノルズ応力の分布

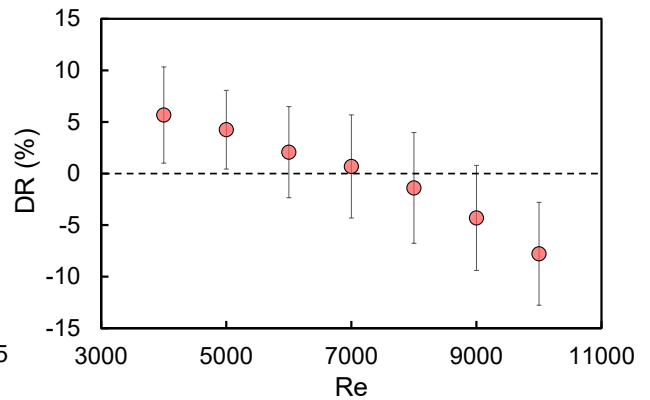


図7 Re数と摩擦抵抗低減率DRの関係

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本事業により開発される「空気充填面を利用した摩擦抵抗低減技術」は、船舶に対する利用だけでなく、長距離パイプラインでの石油輸送や冷房システムの冷媒輸送への応用も期待される。また、構築される「計測システム」は、二相流場の流動特性に関する詳細な情報を提供するだけでなく、気液二相流を利用した多くの装置の性能向上のための有益な計測ツールとして幅広い分野での活用が期待される。さらに、学術的には、取得される「計測データ」を利用することにより、混相流に関する数理モデルおよび数値計算手法の開発に貢献することができる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

空気充填面を利用した摩擦抵抗低減技術を構築できれば、化石燃料を利用する船舶からのCO₂排出量を削減することができる。これは、地球温暖化の原因とされる温室効果ガスの削減に直結することから、地球環境問題の早期解決に大いに貢献できる。申請者は流体力学・混相流工学を専門として、これまでに気液二相流関連の研究に深く携わっており、その知識と経験を駆使

することで新たな摩擦抵抗低減技術を構築できると判断し、本研究を実施した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

竹川周吾, 久保舜哉, 北川石英, 微細溝を有する撥水性平板における空気捕獲率の可視化計測, 2024年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 1. (2024)

Shunya Kubo, Atsuhide Kitagawa, Visualization and measurement of air films on a micro-structured hydrophobic surface in horizontal channel flows, Proc. 34th International Symposium on Transport Phenomena, 1-4. (2024)

7 補助事業に係る成果物

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 京都工芸繊維大学(キョウトコウゲイセンイダイガク)

住 所: 〒606-8585

京都市左京区松ヶ崎御所海道町

担 当 者: 教授 北川石英(キタガワアツヒデ)

担 当 部 署: 機械工学系(キカイコウガクケイ)

E - m a i l: kitagawa@kit.ac.jp

U R L: <http://www.cis.kit.ac.jp/~kitagawa/>