

Study on Mechanism of Frictional Drag Reduction by Bubbles

(気泡による摩擦抵抗低減機構の研究)

学位論文内容の要旨

壁面摩擦抵抗の制御は、従来の安全管理・設計から輸送機械の効率化や環境保護まで複合的な技術として期待されている。特に船舶やパイプラインなどの長距離輸送システムでは、それらの駆動力の大部分が液体の壁面乱流摩擦に費やされている。近年、この壁面摩擦を効果的に減らす手法として気泡を用いた方法が検討されている。1970年代に、潜水艇模型を用いて数十マイクロ以下の気泡を乱流境界層中に混入させることによって摩擦抵抗が低減することが発見された。以来、その現象を実際に活用することに向けて、様々な現象解明の基礎実験や性能確認の研究が進められてきた。しかし、平均的な実験データの集約で装置依存の評価に終始していることや、数値計算と実験との条件の隔たりにより理論的な考察とその実証が不足していることが度重なる研究者会議で指摘され続けている。そもそも本現象は、高速気液二相乱流境界層を扱うものであり、気液界面も乱流干涉によって変形することなど、流体力学の研究対象としては最高度の複雑性をもつ。そのため抵抗低減メカニズムの全容解明は一筋縄では進められない。しかし流れ場に共通に存在する現象をとらえることによって、抵抗低減コントロールを様々な目的と対象で活用できるようにするのが本課題の狙いである。

そこで本研究は、複数の矩形チャンネルにおける気液二相乱流に限定した可視化計測を実施し、抵抗低減に関する特徴的な現象を明らかにすることを目的とした。本論文では気泡の変形、気泡の直径など変化に伴う壁面摩擦抵抗の計測と気泡周りの流動特性に着目し実験を行った。摩擦抵抗低減機構の解明について議論するにあたり、本論文では主に5つの研究に別けた。それぞれ、二相流のレイノルズ応力分布計測、強い変形状態における摩擦抵抗の増減の計測および気液界面と壁面摩擦抵抗の同期計測、単一気泡周りの流れ場計測、気液界面で汚れの影響を含まない条件での計測、微細気泡と乱流構造の可視化計測である。

本論文は全7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、気泡流による摩擦抵抗低減に関する従来の研究を総括し、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、気液二相乱流におけるレイノルズ方程式から3つの乱流せん断応力を導出

し、PTV(Particle Tracking Velocimetry) によってチャンネル内流れを計測した。本研究においては 1mm から 2mm の気泡を混入させ実験を行った。その結果、垂直成分に起因した流動変動が最も負の運動量交換に寄与することと壁面近傍において気泡が上下運動することが観察された。この気泡の運動は周期的な運動を呈することから縦渦などの乱流渦に呼応していることが示唆された。また、十分下流の位置ではこの現象が顕著に見られないことから、気泡吹き込み直後で起きる過渡的な現象であることが確認された。

第 3 章では、気泡直径が比較的大きい気泡 (2~20mm) を用いて気泡流の可視化計測と壁面摩擦の直接計測を行った。まず初めに、流動様式を観察し摩擦抵抗係数など統計的なデータ収集を行った。次に、瞬時の局所摩擦抵抗と気液界面構造の関係を同期計測した。統計計測の結果、気泡を混入させると同時に摩擦抵抗が増加し、さらにボイド率を上げると低減することが確認された。このときゲイン (ボイド率に対する摩擦抵抗係数比) が 1 を超え、単に空気膜が形成されたときに低減効果を持つのではなく大きな気泡が混入されたことに摩擦抵抗低減効果を持つことを示した。また、瞬時計測結果から、単一の大気泡が壁面を通過するとき気泡の下流側の流れ場では摩擦抵抗が極端に低減し、気泡の上流側の流れ場ではわずかに増加することが確認された。

第 4 章では、前章で計測された単一の気泡周りの流れ場を PTV によって計測した。流速分布から気泡の前後に気泡の移流と追従するロール状の渦が確認された。また、このロール状の渦が気泡の上流側で壁面摩擦応力の増加に寄与するイベントを生成し、下流側で壁面摩擦応力の減少に寄与するイベントが起きることが確認された。これは前章で得られた結果と共通する結果が得られた。

第 5 章では、作動流体にシリコンオイルを用いて変形の影響と汚れの影響が少ない場合の実験を実施した。試験部は矩形チャンネルを用い層流から乱流までの条件で、せん断力センサによる直接計測により摩擦抵抗を計測した。その結果、摩擦抵抗係数が層流の条件では 2 倍に増加し、乱流条件では単相流より小さくなった。この中でも特に低減効果の原因を調査するため、壁面摩擦抵抗と気泡の同時計測を行った。その結果、複数の気泡の集合した気泡群が乱流境界層中に周期的に混合することで流体の流体が変動することが明らかになった。また、単一気泡周りの流れ場を計測し、単一の気泡によるレイノルズ応力の変化により摩擦抵抗が低減することを示した。

第 6 章では、チャンネル内に 20~30 μm のマイクロバブルを電気分解によって発生させ、乱流中におけるマイクロバブルの挙動を乱流構造の可視化を行った。乱流構造の可視化には Kalliroscope という 2~10 μm 以下の板状の微粒子を用いた。Kalliroscope によって縦渦を確認した後、マイクロバブルを混入させ観察したところ、縦渦構造が微細化していくことが確認された。また、マイクロバブルの挙動を PTV によって計測すると、気泡がスパン方向に振動することが確認された。これによって、マイクロバブルが乱流構造に干渉しそれぞれの運動特性によって相互に壁面摩擦に働きかけていることを示唆することが得られた。

第 7 章では、本論文の結言をまとめる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 田 靖
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 大 島 伸 行
副 査 准教授 村 井 祐 一
副 査 教 授 菱 田 公 一 (慶応大学理工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Study on Mechanism of Frictional Drag Reduction by Bubbles

(気泡による摩擦抵抗低減機構の研究)

壁面摩擦抵抗の制御は、従来の安全管理・設計から輸送機械の効率化や環境保護まで複合的な技術として期待されている。特に船舶やパイプラインなどの長距離輸送システムでは、それらの駆動力の大部分が液体の壁面乱流摩擦に費やされている。近年、この壁面摩擦を効果的に減らす手法として気泡を用いた方法が検討されている。1970年代に、潜水艇模型を用いて数十マイクロ以下の気泡を乱流境界層中に混入させることによって摩擦抵抗が低減することが発見された。以来、その現象を実際に活用することに向けて、様々な現象解明の基礎実験や性能確認の研究が進められてきた。しかし、平均的な実験データの集約で装置依存の評価に終始していることや、数値計算と実験との条件の隔たりにより理論的な考察とその実証が不足していることが度重なる研究者会議で指摘され続けている。そもそも本現象は、高速気液二相乱流境界層を扱うものであり、気液界面も乱流干渉によって変形することなど、流体力学の研究対象としては最高度の複雑性をもつ。そのため抵抗低減メカニズムの全容解明は一筋縄では進められない。しかし流れ場に共通に存在する現象をとらえることによって、抵抗低減コントロールを様々な目的と対象で活用できるようにするのが本課題の狙いである。

本論文では、複数の矩形チャネルにおける気液二相乱流に限定した可視化計測を実施し、抵抗低減に関する特徴的な現象を明らかにすることを目的とされている。特に気泡の変形、気泡の直径など変化に伴う壁面摩擦抵抗の計測と気泡周りの流動特性に着目し実験を実施している。摩擦抵抗低減機構の解明について議論するにあたり、主に5つの研究ターゲットから構成されている。それぞれ、二相流のレイノルズ応力分布と気泡挙動、強い変形状態における摩擦抵抗の増減の計測および気液界面と壁面摩擦抵抗の時間応答、単一気泡周りの流れ場が引き起こす摩擦抵抗増減効果、気液界面で汚れの影響を含まない条件での摩擦抵抗低減効果、微細気泡と乱流構造の干渉である。本論文で得られた結果は以下のように要約される。

(1) 気液二相乱流の運動方程式より平均成分と変動成分に分解することで壁面に3つの乱流せん断

応力が存在することを導出し、PTV(Particle Tracking Velocimetry)によってチャンネル内流れを基にそれら3種のレイノルズ応力分布が抽出された。1~2mmの気泡では二相流のレイノルズ応力分布から垂直成分に起因した流動変動が最も負の運動量交換に寄与する。このとき気泡は上下運動することが確認され、その気泡の周期的な運動が縦渦などの乱流渦に呼応することが発見された。また、十分下流の位置ではこの現象が消去することから、これによる抵抗低減は気泡吹き込み直後で起きる過渡的な現象と結論された。

(2) 気泡直径が比較的大きい気泡(2~20mm)を用いたとき、気泡を混入させると低ボイド率のとき摩擦抵抗が増加、高ボイド率のとき低減する。このときゲイン(ボイド率に対する摩擦抵抗係数比)が1を超え、単に空気膜が形成されたときに低減効果を持つのではなく大きな気泡が摩擦抵抗低減効果を持つことが明らかになった。また、単一の大気泡が壁面を通過するとき気泡の下流側の流れ場では摩擦抵抗が極端に低減し、気泡の上流側の流れ場ではわずかに増加することが判明した。

(3) 単一の気泡周りの流れ場の流速分布から気泡の前後に気泡の移流と追従するロール状の渦が確認された。この結果、ロール状の渦が気泡の上流側で壁面摩擦応力の増加に寄与するイベントを生成し、下流側で壁面摩擦応力の減少に寄与するイベントが起きる。これは壁面せん断応力の直接計測で得られた結果と対応した。

(4) 作動流体にシリコンオイルを用いて変形の影響と汚れの影響が少ない条件を実現させた。摩擦抵抗係数は層流の条件では2倍に増加し、乱流条件では单相流より小さく低減効果が確認された。低減時において複数の気泡の集合した気泡群が乱流境界層中に周期的に混合することで流体の速度が変動することが明らかになった。

(5) チャンネル内に20~30 μm の電気分解によるマイクロバブルは縦渦構造を微細化する作用があることを確認した。また、マイクロバブルの挙動をPTVによって計測すると、気泡がスパン方向に振動することが確認された。これによって、マイクロバブルが乱流構造に干渉しそれぞれの運動特性によって相互に壁面摩擦に働きかけていることが示唆された。

これを要するに、著者は、乱流壁面近傍における気泡の挙動と壁面摩擦抵抗の実験研究から気泡サイズ別に見られる一連の異なる摩擦抵抗増減機構を提示した。特に抵抗低減に関して気泡周りの流れ場や気泡と縦渦構造の関係などに対して流体力学的に厳密な検証を行っている。これにより二相乱流の流体力学に学術的成果を残すと共に、気泡による乱流制御に対して、特に流体輸送や船舶などの工学の実務的な分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。