



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on modulation of flow transition by microbubble injection [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	渡村, 友昭
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11449号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55618
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoaki_Watamura_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 渡村 友昭

学 位 論 文 題 名

Study on modulation of flow transition by microbubble injection

(マイクロバブルによる流動遷移の変調に関する研究)

液体の壁面摩擦抵抗の低減は、運用時の環境負荷やコスト等の観点から有用な省エネルギー技術として注目されている。気泡を用いた抵抗低減技術は既存設備への実装が容易であることや様々な流れに適用可能であるため、現在、海運の省エネルギー技術として大型船舶に搭載されている。この技術は 1970 年代に始まり、現在までに多くの研究が成されている。特に直径 $100\mu\text{m}$ 以下の気泡“マイクロバブル”を用いた研究では最大で 80% の抵抗低減効果が得られることが知られ、その実用化あるいはメカニズム解明が注目されている。しかし、その効果の大きさは均質流モデルや二流体モデルの従来理論では説明が不可能であり、マイクロバブルがもたらす抵抗低減メカニズムは未解明な部分が多い。流れ場の状態について調査したいくつかの研究は、乱流構造と気泡の粗密分布構造との相互干渉を示唆している。液相場に形成された瞬時乱流渦構造と気泡の分布構造を同時に可視化し、如何なる流れの要素が抵抗低減に寄与しているか、基礎的な体系を用いて注意深く観察し、気泡の混入による流動場の変形について共通した現象を見出すことが本課題の目標である。

第 1 章は序論であり、気泡流による抵抗低減に関する従来研究を総括し、マイクロバブル抵抗低減法に注目する背景と目的について述べた。

第 2 章では色情報を活用した (粒子追跡速度計測法)PTV の開発を行った。粒子画像の色情報から 30 種類の粒子を認識可能であることを示した。奥行き方向に色相のグラデーションを持つ照明光を用い、粒子による散乱光の色相情報から、色情報と画像面外位置情報との線形写像により、一台のカメラによる三次元三成分速度場計測を提案した。また、気泡気液界面からのレーザ散乱光とトレーサ粒子の散乱光が持つ色情報を用い、単一カメラによる混相流の速度計測法の提案を行った。

第 3 章では同軸回転二重円筒間に形成されるテイラー・クエット流れを対象として、乱流構造を模擬したモデル実験を行った。テイラー・クエット流れは周方向に閉じた系であるため、流れの時空間発達問題がなく流れの再現性が高い。また、内円筒の回転のみによってレイノルズ数を制御でき、レイノルズ数の増加と共に流れ場には旋回流、渦 (テイラー渦)、周方向波動、およびその変調波動が順に出現し成長することから、これら流れの状態から流動モードを定量的に決定できる。この結果として、マイクロバブルが粗密構造を形成し、時空間で高度に組織化されて浮上する様子を画像計測により可視化した。気泡群の自己選択的な運動により周方向波動の強度が変化するため、流れの遷移が遅延することが分

かった. また, 気泡の運動が流れの副次成分と干渉し合い, 重力方向と一致する速度成分以外にも, 重力方向と直交する主流方向速度の空間分布までも変形させ, これが抵抗低減に寄与することが分かった.

第4章では実験と数値計算により得られる速度場情報を同時相補的に組み合わせた解析手法を応用し, 3章で得られた実験結果を数値的に再現した. 高レイノルズ数における流体の流動現象はその強い非線形性のため, 解析的に予想することが困難である. また, 実験で得られる情報は実際の流れ場に対して, 時空間で限定された一部の領域についてのみある. 数値計算では, 系に現れる摂動に対して, 解はその初期値や境界値に依存し, また長周期現象や非周期構造の全てを再現することは不可能である. 本章では実験で得られた空間二次元の時系列速度場情報と三次元非定常直接数値計算の速度場を線形結合し, テイラー・クエット流れにおける気泡混入の影響を再現した. その結果として, 速度場の変形が3%の抵抗低減効果を持ち, 気泡分布やドリフト速度, それらの非線形効果が7%の抵抗低減効果を持つことを示した.

第5章は自由浮上気泡流の時空間発達について定量的な観察を行った. 二対の気泡や粒子が浮上あるいは沈降する際に見られる, 吸引や反発, 衝突については, 気泡や粒子の周囲の圧力場により整理されている. しかし, 無数の気泡や粒子などの分散体が存在する場合には, 圧力場からでは説明できない大規模な分散体の粗密構造が形成されることが報告されている. 本章では, 静止流体中を浮上するマイクロバブルの粗密構造が時空間で発達する様子と, それに誘起される液相速度構造を計測した. その結果として, 気泡の混入初期には空間周波数の大きな気泡プルームが出現し, 駆動された液相の運動によりプルーム同士が合一を繰り返し, 肥大化する様子を示した. また, 気泡流量に時間的変動を与えると, 初期流動構造の空間スケールが気泡の濃度界面からレイリー・テイラー不安定の支配波長と一致すること, ならびに発達過程では液相速度の時間変動が気泡流量の変動周期と同程度であることを示し, 気泡流の空間発達する要素と過程について議論した.

第6章はマイクロバブルの存在が時空間発達流れに与える影響を調査した. 水平混合層の下部からマイクロバブルを導入し, せん断層に形成される速度変動振幅や流れの非線形性による巻き上がり渦の発達を調査した. その結果, 流れ場が持つ初期乱れの速度変動強度が大きい場合において, マイクロバブルの混入が渦層厚さを増加させることが分かった. また, 速度変動のスペクトルは初期渦層厚さに対応する波数と同程度の波数に対応したスペクトル強度が限定的に低下することが分かった. これらの結果から, 気泡の粗密分布は流れ場が持つ乱れにより形成され, 気泡の粗密分布がその浮力によりせん断層内の渦構造の肥大化を促進するため, 渦層厚さの増加とスペクトル分布を変形させることを示した.

第7章では本論文の各章から得られた知見についてまとめた. また, 本論文の結言として, 速度変動強度, 気泡数密度の変動強度および変動波数を代表スケールとしたレイノルズ数およびフルード数を定義し, 一連の現象を整理するための指標を提示した.