



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Numerical investigation on large-sized bubble injection for control of turbulent boundary layer : Horizontal channel flow and bubble-induced drag reduction [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	KIM, Sangwon
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14674号
Issue Date	2021-09-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/83209
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Sangwon_Kim_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 Kim Sangwon

審査担当者 主 査 教 授 大島 伸行
 副 査 教 授 渡部 正夫
 副 査 教 授 村井 祐一
 副 査 准教授 寺島 洋史

学位論文題名

Numerical investigation on large-sized bubble injection for control of turbulent boundary layer
-Horizontal channel flow and bubble-induced drag reduction-

(乱流境界層を制御するための大型気泡注入に関する数値計算研究 -水平チャネル流れと気泡による抵抗低減-)

気泡注入による乱流境界層の制御は、揚力改善や摩擦抵抗低減のための主要な研究課題であり、他の手法と比べて境界層への大域的な影響を非侵襲的に得られるなど多くの利点がある。これらの気泡流の特性は主流方向に対する浮力方向にて垂直気泡流と水平気泡流に分類される。前者では気泡の浮力は流れ方向に沿って作用して流れ速度に応じて空隙率の分布と流れパターンに明確な違いが生じ、原子炉や発電所などの熱交換器に関連する産業需要にとって重要とされてきた。一方、後者は一般に主流と壁の間の熱交換または物質移動を妨げることから比較的産業需要が乏しい。しかし、同時に乱流境界層内の気泡により壁面摩擦抵抗を低減する効果が知られており、船舶の船体流れなどに適用されはじめ巨大船のエネルギー効率の向上が期待されつつある。

水平気泡流に関するこれまでの多くの研究の中では、微小気泡による乱流変調および気相膜による方法が主要な抵抗低減機構とされているが、実機の船体流れではそれらの実現は困難であり、大気泡による抵抗低減機構が望まれる。近年の実験的研究では、気泡の抗力変調 (抗力の増加と減少) に及ぼす気泡サイズの影響、局所的な変調機構などの知見が示されているが、これらによる抗力変調メカニズムには未解決の問題が多く残されている。そこで、本研究の目的として大気泡が混入する乱流境界層の特性を数値シミュレーションによって詳細調査し、大規模な気泡のダイナミクスと抵抗低減に関わる機構を包括的に理解することが試みられた。

第1章にて上記の気泡抵抗低減、および、気液2相流れの数値シミュレーション法を調査し、本研究の目的と実施方針を定めた。

第2章ではまず乱流中の大気泡運動を解析できる数値シミュレーション法として本研究に採用するVOF (Volume of Fluid) 法による一流体モデルの数学的基礎理論とそれに基づく質量と運動量保存の基礎式を著している。さらに、気液境界の不連続性に対しての数値的拡散を除く数値手法としてisoAdvector methodを導入して、気液界面での相体積率と速度場に対する計算格子より小さな変化を近似するSubgrid scaleモデルを表した。この方法により気液界面の大変形において薄い界面解を安定に保つことができることを二次元界面の純対流課題の数値解にて示した。

第3章では前章の数値シミュレーション法を本研究の対象である水平乱流気泡流れに対して適用して数値検証を行った。まず、計算対象として (1) 乱流チャネル流れの生成、(2) 流れへの大気泡の導

入, および, (3) 乱流中の大気泡の維持 を順次安定に実現する具体的な数値計算手順を構築した. その数値計算結果によって乱流チャネル流れに導入された大気泡の界面形状と周囲流れ運動量, および, 壁面せん断応力の時間変化が詳細に解析され, 既研究により同条件で示された実験可視化, 計測値との比較によって, 本研究の数値シミュレーション解の妥当性を検証した.

第4章では乱流チャネル流れ (乱流ポアズイユ流れ) に導入された大気泡の運動と壁面抵抗への影響を調査するため異なる気泡サイズ (すなわち気泡 We 数) に対する一連のシミュレーション解を示した. 本解析では, 第3章で検証した数値シミュレーション法の計算精度の向上を図るため, 壁面乱流場と大気泡の変形を解像する細分化された格子を適用することで予測信頼性を高めている. 数値計算結果より大気泡の変形挙動と摩擦抵抗への効果は気泡サイズに大きく依存することが示された. その詳細として, 気泡サイズが増大すると気泡形状は流れ横方向に顕著に広がる傾向が示された. 一方, 摩擦抵抗への効果は気泡と壁面に挟まれた薄い気膜にて始まり, 気泡サイズが増大すると流れが安定化する. このとき, 流れ横方向への応力がこの領域の運動量輸送の指標となっていると考えられ, 流れ横方向への気泡変形拡大によって壁面抵抗は減少する傾向が明らかとなった.

第5章では前章と同様の数値シミュレーションを, 上下壁面のせん断速度差により駆動される乱流クエット流れに適用した. この流れは前章での平均圧力差の駆動力がなく, 船体境界層流れのせん断速度場により近いモデルと考えられる. その数値シミュレーション解では, 気泡による摩擦抵抗への効果は圧力駆動チャネル流れと同様であるが, 気泡変形挙動が異なり気泡分裂を生じやすいことが予測された.

第6章ではさらに実際の気泡抵抗低減に近い条件として, 4,5 章の乱流チャネル流れ (ポアズイユ流れとクエット流れ) に対して複数気泡を導入した数値シミュレーション解を示した. 数値計算結果により乱流中の大気泡の分布形状と壁面抵抗の時間変化が予測された. 2つの流れ条件とも気体導入量が多く気泡群が気膜状分布となるときの気泡と壁面間の液膜部の壁面抵抗が非常に小さくなることが予測された. この現象は実験的研究により液膜流れの層流化として観察された現象を予測するものと考えられ, 従来研究における微小気泡あるいは気相膜によるものとは異なる抵抗低減機構の存在を示唆している.

第7章は本論文の成果を総括し, 今後の研究課題について展望している.

以上のように本論文では, 気泡導入による境界層抵抗変化の予測法として, 乱流への気泡導入および気液界面の大変形を伴う非定常流れを精度よく予測する数値シミュレーション法を確立し, 大気泡による壁面抵抗への影響を詳細に解析予測するとともに, 大気泡による抵抗低減機構に対して重要かつ新たな知見を与えたといえる. これらは, 機械工学, 特に計算流体工学および乱流工学の発展に寄与するところ大であり, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.