

過渡的影響を考慮したマイクロバブル流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation of Transient Effect on Microbubble Flow

物性班 杉山 和靖 (海技研) 川村 隆文 (東大工) 高木 周 (東大工) 松本 洋一郎 (東大工)

乱流境界層中へマイクロバブルを添加すると摩擦抵抗が大幅に低下することが知られており、最大 80% もの抵抗低減効果があるとの報告がある(Madavan ら, 1984)。マイクロバブルは摩擦抵抗が全抵抗の大部分を占める大型船舶に対する抵抗低減デバイスとして実用化されつつあるが (例えば, 児玉ら, 2002), 最適な気泡発生方法の決定などに不可欠な抵抗低減メカニズムは、ほとんど知られていない。本研究では、抵抗低減メカニズムの解明を目的として、チャンネル内気泡流乱流を対象とした数値シミュレーションを行っている。昨年度までは、周期境界条件や統計的定常状態を仮定して、気泡表面での滑りや気泡流の圧縮性などを単純化したモデル計算や、直接数値シミュレーション(DNS)を行ってきたが、抵抗が減る結果を得ることができず、メカニズムの解明には至っていない。本年度は、気泡分布の揺らぎや流れの過渡的な影響を考慮して数値シミュレーションを行った。

最近, Xu ら(2002)は、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減の数値計算に世界で初めて成功した。Xu らの計算は、格子幅に比べて大きな気泡を扱う force coupling 法と呼ばれる手法に基づいて定式化され、無重力、周期境界条件の仮定の下で行われている。初期の気泡は壁面近くに配置されており、時間の経過とともに摩擦抵抗が減少することが示されている。本研究では、初期気泡配置をパラメータとして、格子幅に比べて小さな気泡を扱う平均化方程式を用いた数値計算を行い、Xu らと同様に摩擦抵抗が減るかどうかを調べる。支配方程式は、気相・液相の質量保存式、気液混合流体の運動量保存式、気泡の並進運動方程式からなる。解析手法は個々の気泡をラグランジュ的に追跡する Euler-Lagrange 法(村井ら, 1997)を用いる。計算条件に関して、壁面レイノルズ数は 150、計算領域の大きさは、主流(x)方向、壁面垂直(y)方向、スパン(z)方向に対し $2\pi h \times 2h \times \pi h$ 、格子点数は $64 \times 64 \times 64$ とする。主流方向には周期境界条件を課す。ストークス数は 0.1、気泡直径 $d_b^+ = 2$ とする。気泡位置の初期条件は、①気泡なし、②バブルボイド率 $f_{G0} = 0.1\%$ 、全領域に一樣、③ $f_{G0} = 0.1\%$ 、 $0 < y^+ < 10$ の領域、④ $f_{G0} = 0.1\%$ 、 $0 < y^+ < 20$ の領域、とする。図 1 に時刻 0~ $2.0u_\tau/h$ における摩擦係数 C_f の時間変化を示す。 C_f は気液混合流体の平均速度と液密度でスケールした。図 1 より、初期気泡位置が全領域に一樣である場合の C_f は気泡がない場合に比べて有意な差が見られないのに対して、初期気泡位置が一樣でない場合には摩擦抵抗が低下することがわかる。また、摩擦抵抗低減効果は初期気泡位置が壁面に近いほど大きいことがわかる。なお、さらに長い時間が経過すると、 C_f には気泡の有無に対する有意な差が認められなくなった。以上の結果より、気泡分布が乱流により拡散し、密度分布が過渡的に変化する際に摩擦抵抗が低下することが確認できる。この結果は、Xu らの結果と定性的に一致する。

次に、図 2 に示すように、気泡の吹出しおよび浮力の考慮して、より実験に近い状況で計算を行う。計算領域は 2 つに分割し、気泡の吹出しを伴う領域では、周期境界条件下で得られた速度場を流入条件として与える。気泡吹出し領域は $0.5\pi < x < 1.0\pi$ とする。ストークス数は 0.1、気泡直径 $d_b^+ = 2$ とする。気泡の吹出し流量で換算したボイド率 f_{G0} は 0.03, 0.3% とする。また、浮力の影響は、浮力なしと静止流体中での終端速度が $1.0u_\tau$ の条件とする。図 2 に時刻 0~ $1.0u_\tau/h$ における摩擦係数 C_f の時間変化を示す。 C_f は上壁面全体の平均摩擦応力から算出した。図より、ボイド率が高く、浮力を考慮する場合に抵抗低減効果が大きいことがわかる。浮力の影響に関して、気泡が浮上すると、周囲の液相が下降することにより下向きに運動量が輸送する。その結果、吹出し・吸込み壁(例えば, Simpson ら, 1969; Sumitani and Kasagi, 1995)の吹出し壁側の抵抗低減と同様の機構で抵抗が減ると考えられる。

以上より、気泡流の大規模な流動構造や流れの過渡的な影響が摩擦抵抗低減に寄与していることを確認した。今後は、気泡の吹出しを伴う計算で十分なサンプリングを行い、乱流統計量の変調を調査する。また、DNS によっても過渡的な流れの影響について現在調査中であり、今年度中に結果を解析して報告する。

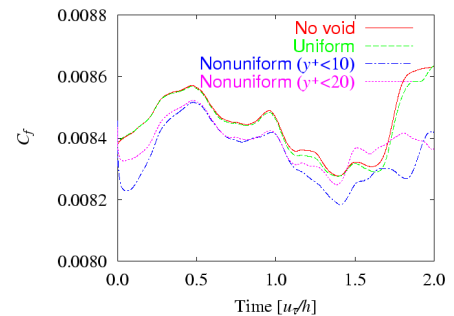


Fig. 1 Temporal behavior of friction coefficient

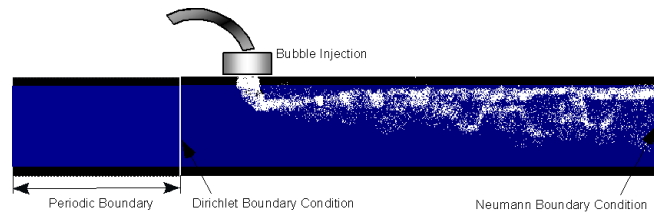


Fig. 2 Schematic figure of simulation with bubble injection

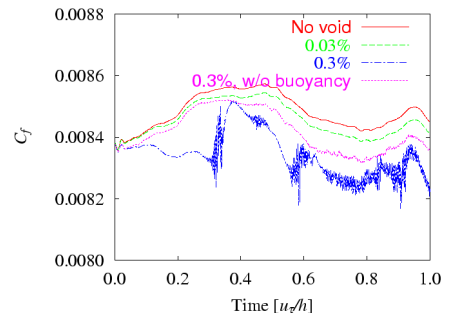


Fig. 3 Temporal behavior of friction coefficient

参考文献 Madavan ら, 1984, *Phys. Fluids*, **27**, 356-363. 児玉ら, 2002, *造学論*, **192**, 1-14. Sugiyama ら, 2002, *Proc. of the 3rd Symp. on Smart Control of Turbulence*, 129-138. Xu ら, 2002, *J. Fluid Mech.*, **468**, 271-281. 村井ら, 1997, *機論 B*, **63**, 2277-2282. Simpson ら, 1969, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **12**, 771-789. Sumitani and Kasagi, 1995, *AIJA J.*, **33**, 1220-1228.