マイクロバブル流れの壁面摩擦力に対するエネルギ散逸の影響

The Effect of Energy Dissipation on Wall Shear Stress in Microbubble Flow

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) 1.はじめに

本研究では、マイクロバブル添加に伴う抵抗低減メカニズムの解明を目的として、チャネル内マイクロバブル流の数値解 析を行っている. Xu ら^[1]は Force Coupling(FC)法により、気泡群が乱流によって分散する過渡的な状況下で抵抗低減が起こ ることを報告した.筆者らも異なる計算手法により同様の結果を確認した¹².しかし、Xuらの計算では気泡周りに速度勾配 が存在しても流れが変調せず、気泡周囲のエネルギ散逸率の変化を無視している。本年度は、マイクロバブル流れにおける エネルギ散逸と壁面摩擦力の関係式を導出し、摩擦抵抗低減機構の解明には何に着目すればよいのかを明らかにする. そし て FC 法, DNS, Front-Tracking(FT)法による数値解析を行い, 摩擦抵抗に対する気泡周囲流場の局所的な影響について調べる. 2. 摩擦係数とエネルギ散逸率の関係

駆動圧力勾配を一定,流れ方向,スパン方向を周期境界とする.運動量保存式,応力と速度の内積に発散を施したものを, ともに流場全体で体積分し、整理すると、上下壁面の摩擦係数の和 $C_t^{Top}+C_t^{Bat}$ は以下のように書き表される.

$$C_{f}^{Top} + C_{f}^{Bot.} = \frac{4\nu_{L}L_{y}\langle \mathbf{S}:\mathbf{S}\rangle_{L}}{\left(\langle u\rangle_{L} + \langle u\rangle_{G}\right)^{3}} + \frac{L_{y}}{\left(\langle u\rangle_{L} + \langle u\rangle_{G}\right)^{2}} \left[\frac{1}{\langle u\rangle_{L} + \langle u\rangle_{G}} \frac{d\langle \mathbf{u}\cdot\mathbf{u}\rangle_{L}}{dt} - 2\frac{d\langle u\rangle_{L}}{dt}\right] + \frac{(\rho_{G}/\rho_{L})L_{y}}{\left(\langle u\rangle_{L} + \langle u\rangle_{G}\right)^{2}} \left[\frac{1}{\langle u\rangle_{L} + \langle u\rangle_{G}} \frac{d\langle \mathbf{u}\cdot\mathbf{u}\rangle_{G}}{dt} - 2\frac{d\langle u\rangle_{G}}{dt}\right], \quad (1)$$

ここで, v,L,S,u, pは, それぞれ, 動粘性係数, チャネル幅, ひずみ速度テンソル, 速度ベクトル, 密度である. 下付添字 G,Lは、それぞれ、気相、液相を表す.また、() は相平均であり、インディケータ関数 Iを用いると、次式で与えられる.

$$\langle \phi \rangle_{L,G} = \frac{1}{L L L} \int_{0}^{L_{x}} dx \int_{0}^{L_{y}} dy \int_{0}^{L_{z}} dz \quad \phi(x, y, z) I_{L,G}(x, y, z).$$
(2)

(3)

摩擦係数に対して,式(1)の右辺第1項はエネルギ散逸,第2,3項は非定常性の貢献を表す.式(1)の右辺第1項より,統計的 定常状態で抵抗低減を実現するには、エネルギ散逸率の相平均値の低下、もしくは、気液混合体の流速の増加が必要である. また、抵抗低減に過渡影響が効くのであれば、式(1)の右辺第2,3項が低下する.気泡注入に伴う速度変調がなければ、液相 体積の減少により、式(1)中のエネルギ散逸率の相平均値は低下する.しかし、層流を対象とした実効粘性理論によると、気 泡周囲の局所的なエネルギ散逸率は増加する.数値計算,もしくは,光学計測により,気泡周囲のエネルギ散逸率分布の局 所的な変化を詳細に調査することで、マイクロバブル流れの抵抗低減機構の解明につながると期待できる。 <u>3.FC 法による数値シミュレーション</u>

FC法は表面の速度滑りが0で、変形しない球形気泡群を対象とする.FC法の運動量保存式は以下のように書き表される.

$$\rho_L \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \sum_{n=1}^{N_b} \left(F_i^{(n)} \Delta(\mathbf{x} - \mathbf{Y}^{(n)}, \sigma_m) + F_{ij}^{(n)} \frac{\partial}{\partial x_j} \Delta(\mathbf{x} - \mathbf{Y}^{(n)}, \sigma_d) \right)$$

ここで、総和記号中の第1項は気泡に働く力の反力を表す Force Monopole (FM)、第 2項は気泡周囲の速度勾配の寄与を表す Couple/Dipole (C/D)である. Xu らの解析で は FM の影響のみが考慮されている.本研究では、気泡表面での境界条件を Xu ら よりも厳密に考慮するため、C/Dの影響を高速に計算する方法を考案する.そして、 摩擦抵抗に対するC/Dの影響を調査する.壁面レイノルズ数を150、気泡半径を0.25h、 ボイド率を5%、気泡初期重心位置を上壁面から0.3h離れた場所とする.図1に摩 擦係数の時間変化を示す.図1より、Xuらと同様に C/D を無視すると抵抗が低下 するのに対して、C/Dを考慮すると抵抗が増加する.式(1)の各項の収支を調べたと ころ、この抵抗増加は気泡周囲のエネルギ散逸率の増加が原因であることを確認し

た. また, 式(1)の右辺第2,3項は, 気泡群の分散に伴い減少す る. すなわち, 抵抗増加する状況であっても, これまでの Xu ら や我々の報告と同様に、密度の過渡的変化には抵抗を減らす効 果があることを確認した.なお、同じ計算条件で、気泡表面上 での滑りなし条件を矩形格子で近似する DNS^[3]も行った. C/D を考慮した FC 法と同様に、気泡周囲のエネルギ散逸率の増加 により摩擦抵抗が増加することを確認した.

4.FT 法による数値シミュレーション

第3章で述べた FC 法による数値解析で抵抗が減らない理由には、気泡の変形 を無視していること、実験と比べてレイノルズ数が低いことが考えられる.これ らの理由と関連して、図2に統計的定常状態で抵抗低減に寄与しうる要因を2つ 示す.1 つは気泡の変形であり,気泡よりも大スケールの速度勾配が図のように 変化すると考えられる.もう1つは,気泡よりも小スケールで,かつ,エネルギ 散逸率の高い乱流渦の生成が気泡により阻害されることである.後者の影響は式 (1)の右辺第1項の低下をもたらし、高いレイノルズ数ほど、その効果が大きいと 考えられる. そこで,現在,変形気泡を扱うFT法⁴⁴を採用し,実験条件に近いレ イノルズ数(Re=1100)での LES を行っている.現在,計算中であるが,これまで に抵抗が減る結果を得ている(図3).第2章の理論を踏まえ、今後、詳細に解析する予定である.



Re =150 Top wall





Fig.2 Statistically steady factors to reduce skin friction



参考文献 [1] Xu b, 2002, J. Fluid Mech., 468, 271-281. [2] Sugiyama b, 2003, Proc. of the 4th Symp. on Smart Control of Turbulence, 51-60. [3] Sugiyama b, 2001, Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng., 101, 689-704. [4] Kawamura & Kodama, 2001, Int. J. Heat and Fluid Flow, 23, 627-638.