PS-20 時系列 PTV とせん断応力計の同時計測による 気泡流抵抗低減メカニズムの調査

流体設計系 * 拾井 隆道、濱田 達也 、川北 千春

1. 緒言

乱流境界層に気泡を混入させることによる摩擦抵抗低減法は、McCormick and Bhattacharyya の報告 ¹⁾以来多くの研究が実施され、現在では空気潤滑システムとして実船に搭載されるに至っている ²⁾. 一方、抵抗低減の詳細なメカニズムについては未だ明らかになっておらず、これを明らかにすることにより気泡の制御等が可能となり抵抗低減効果が向上することが期待される。先行研究においては定常的な気泡流の特性を評価するために、壁面せん断応力の計測や気泡流中のPTV (Particle Tracking Velocimetry) 計測などが個別に実施されてきた ³⁾. 一方、近年気泡流中のボイド率の変動により高い抵抗低減効果がするとの報告があり ⁴⁾、現象の把握のためには非定常な気泡の変動とそれに伴うせん断応力及び流場の変化を評価する必要があると考えられる。

本研究では、気泡の変動に伴う流場およびせん断応力の変化を調査するため、気泡画像と液相速度が同時に計測可能な気泡流中時系列PTVとせん断応力計の同時計測システムを構築した。構築したシステムを用い、抵抗低減が生じる水平チャネルにおける気泡流を対象に計測を行った。

2. 実験手法

2. 1 FBG せん断応力計

高周波数領域でのせん断応力の変化を評価するために、FBG(Fiber Bragg Grating)をセンサーとして用いた高応答のせん断応力計(以下、FBG せん断応力計)を開発した.耐水性および低ノイズであるという利点から FBG をセンサーに採用した.検力機構はカンチレバー方式で、内部のロッドにFBG を貼付した(図-1).ロッドの形状を変化させることにより固有周期を 300-400Hz 程度にし、多くの先行研究で使用されているせん断力計(SSK 製 S10W-2、応答周波数 40Hz 半導体歪みゲージ式)より高応答化を実現した.また FBG を両面に貼付し、温度保証および高感度化を実現した.検力面直径は 10mm である.

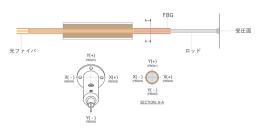


図-1 FBG せん断応力計

2. 2 気泡流中時系列 PTV システム

気泡流中時系列PTVとせん断応力の同時計測システムを図一2に示す。気泡流中PTVはKitagawaら30が用いたものと同様のシステムで、流場にミラーを挿入することにより水中光路長を短くし画像上での気泡のオーバーラップを小さくして撮影を行い、蛍光粒子とロングパスフィルターにより液相の流場を計測し、赤外線LEDを用いた背景照明により気泡画像を取得するものである。本研究においては、二つのミラーの間にFBG せん断応力計を設置することにより、流場計測を実施している壁面上のせん断応力の変化を同時に計測することを可能とした。ハイスピードカメラには Photron Nova S16を使用した。

実験は長さ 3,000 mm, 幅 100 mm, 高さ 2h = 20 mm のアクリル製の試験部を持つ水平チャネルで実施した.

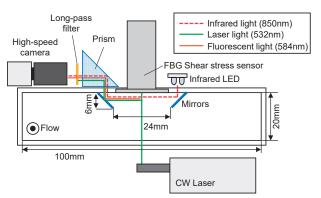


図-2 気泡流中時系列 PTV せん断応力同時計測システム

3. 計測結果

計測は断面内平均流速 U_m =5m/s において、空間平均ボイド率 α_m =0,0.5%と変化させて計測を行った。 α_m =0.5%では摩擦抵抗が 2.4%低減した。FBG せん断力計の計測は5,000Hz、ハイスピードカメラの撮影は80,000fpsで4秒間同期して計測を行った。画素数は256pixel×128pixelで空間解像度は0.01002mm/pixelである。図一3に計測した画像の一部を示す。撮影された画像から輝度値の高い蛍光粒子を追跡することにより液相の速度を、気泡像を反転して画像内の輝度値の平均することにより画像から推定されるボイド率 α_{proj} を算出した。ボイド率 α_{proj} とせん断応力の τ_m の波形データを図一4に示す(50Hz に再標本化)。ボイド率の変動に伴いせん断応力も変動していることがわかるが、明確な関係性を見いだすことは難しい。

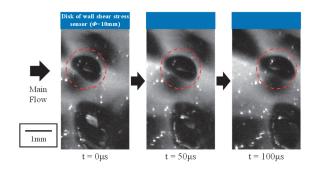


図-3 ボイド率せん断応力波形

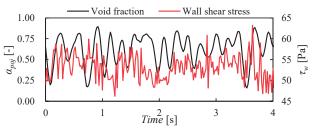


図-4 ボイド率せん断応力波形

図-5 (a) は、空間平均ボイド率 $\alpha_m = 0.5$ %における 20 秒間の計測データを基に平均ボイド率 α_{proj} からのボイド率の変化率と摩擦抵抗係数 C_F の変化率を示したものである(50Hz に再標本化して解析). これより、ボイド率が高くなると摩擦抵抗は小さくなるがその相関はあまり高くないことがわかる. 図-5 (b) は、ボイド率の次の時刻との増減と摩擦抵抗変化率の関係である. ボイド率の大小と比較して相関が高く、ボイド率の減少時に更なる抵抗低減が発生していることがわかる. これより、ボイド率の変化に対して抵抗の変化は時間遅れがあり、ボイド率が最大となり低下し始める際に抵抗低減が最大化しているものと考えられる.

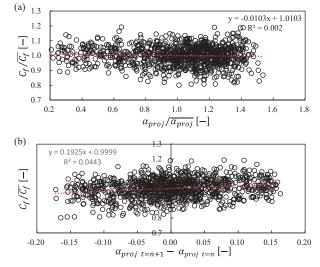


図-5 (a) ボイド率の大小と摩擦抵抗抵抗変化率の関係及び (b) ボイド率の増減と摩擦抵抗抵抗変化率の関係

ボイド率の増加および減少時毎に分けて、PTV による液相流速から主流方向平均速度およびレイノルズ応力を算出した(図一6). ここでは 4 秒間の計測データを解析対象とした. 抵抗低減の大きいボイド率の増加時には、抵抗低減に寄与する主流速とレイノルズ応力の低下が見られる. ボイド率低下時は増加時と比較して、2. 6%抵抗が低減していた. 本研究において計測した最も壁面近傍の計測点においては(y \cong 0. 18mm, y \cong 40) 、3. 0%の主流速の低下が見られ、抵抗低減量と同オーダーであった.

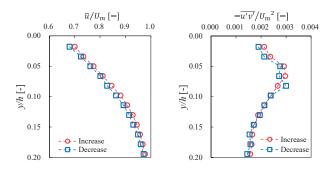


図-6 主流方向平均速度分布およびレイノルズ応力分布

4. 結言

本研究では、気泡の変動に伴う流場およびせん断応力の変化を調査するため、気泡画像と液相速度が同時に計測可能な気泡流中時系列PTVとせん断応力計の同時計測システムを構築し、計測を行った。ボイド率の減少時、主流速度およびレイノルズ応力が低下することにより、抵抗低減効果が大きくなることがわかった。またボイド率の変化に対して抵抗の変化は時間遅れがある可能性が高いことが明らかになった。

謝辞

本研究は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 Grant Number JPJ004596 の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) Mccormick, M. E. and Bhattacharyya, R.: Drag reduction of a submersible hull by electrolysis, Nav Eng J., Vol. 85, 1973, pp. 11-16.
- 2) Mizokami, S., *et al.*: Experimental study of air lubrication method and verification of effects on actual hull by means of sea trial, Mitsubishi Heavy Ind Tech Rev, Vol. 47, 2010, pp. 41-47.
- 3) Kitagawa, A., Hishida, K. and Kodama, Y.: Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique, Exp Fluids, 38, 2005, pp. 466-475.
- 4) Park, H. J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y.: Drag reduction promoted by repetitive bubble injection in turbulent channel flows, Int J Multiph Flow, 38, 2005, pp. 466-475.