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.



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 -2 に示す.気泡流中 PTV は Kitagawa ら³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 2*h* = 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 $\alpha_m = 0$, 0.5 %と変化させて計測を行った. $\alpha_m = 0.5$ % 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—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—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-5 (a)は、空間平均ボイド率 *a*_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*ā*_{proj}からのボイド率 の変化率と摩擦抵抗係数 *C*_r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—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, $y^{t} \cong 40$),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

 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.