

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減について（局所ボイド率の影響）

川島英幹、角川明、高橋孝仁、児玉良明（船舶技術研究所）

Frictional Drag Reduction by Microbubbles (The Effect of Local Void Ratio)

H. Kawashima, A. Kakugawa, T. Takahashi, Y. Kodama
Ship Research Institute

ABSTRACT

Local frictional drag and local void ratio in the flow with microbubbles were measured in the high speed small circulating water tunnel, by systematically changing the average void ratio, the main flow velocity and the measurement position from the microbubble injection point. The velocity distribution of microbubble-flow was also measured by using PIV. The results indicate that the local void ratio near the wall is important for efficient frictional drag reduction.

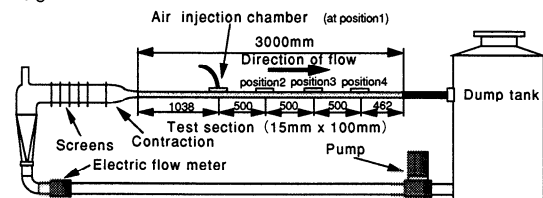
1. はじめに

タンカー等の排水量型船舶の場合、水と船体との摩擦抵抗が全抵抗の70～80%を占め、その低減による船舶の低燃費化が期待されている。マイクロバブルを物体壁面の境界層中に吹き出す方法^{1,2)}は効果的な摩擦抵抗低減法として知られているが、実際の船舶に応用するには、更に効率を高める必要がある。しかしマイクロバブルによる摩擦抵抗低減のメカニズムは明らかになっていない。そこで摩擦抵抗低減メカニズム解明の一步として、局所ボイド率分布と局所摩擦抵抗との相関を調べた。またPIVによりマイクロバブルが混入した状態での速度場の計測を行なった。

2. 実験装置

実験は、試験部での流れが2次元的で、十分に発達した乱流境界層となるように設計された小型高速流路で行なった。その形状をFig.1に示す。試験部には取り外し式の計測窓が備わり、上流端の計測窓(position 1)は、試験部の入口より1038mm下流に設置され、他の3箇所の窓(position 2,3,4)は、下流方向に500mm間隔で配列されている。マイクロバブルは、position 1に備え付けた空気

吹き出しチャンバーより、多孔質板（公称孔径 $2\mu\text{m}$ ）を通して空気を吹き出すことにより発生させた。また局所摩擦抵抗は、position 2,3,4に設置した容量2g重の剪断力計により計測した。局所ボイド率はFig.2に示す吸い込み式の計測装置^{3,4)}により計測した。この装置は真空タンクと流路内の圧力差を利用して気泡流を吸い込み、水と空気を分離して、各々の体積を計測することにより局所ボイド率を求める。真空タンク内の圧力は調整式となっており、吸い込み位置での流速に応じて、吸い込み速度を調整できる。吸い込み口には、内径1.2mm外径1.6mmの円管を用いた。



test section area	15mm × 100mm
length of test section	3000mm
maximum speed	12m/s

Fig.1: Small high speed water tunnel

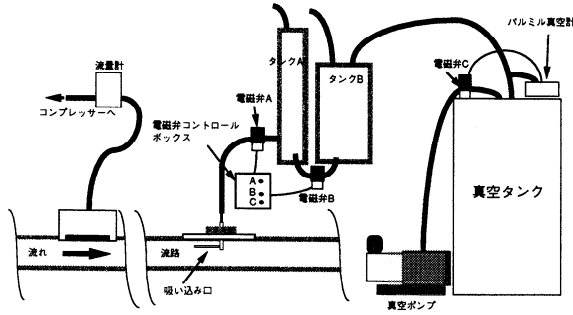


Fig.2: Suction type local void ratio measurement system

3. マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果の流れ方向の変化

流路平均速度 5.0, 7.0, 10.0 m/s において、(1) 式により定義される平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ を 0.0 から 0.12 まで変化させ、局所摩擦抵抗を計測し、摩擦抵抗低減効果の流れ方向の変化を調べた。

$$\bar{\alpha}_a = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad (1)$$

Q_a : air flow rate

Q_w : water flow rate
 $= b \times h \times U$

b : width of the test section (100mm)

h : height of the test section (15mm)

U : average speed of water

局所摩擦抵抗と平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a$ の関係を Fig.3 に示す。ここで、 C_f はマイクロバブル混入時の無次元局所摩擦抵抗、 C_{f0} は水の場合の無次元局所摩擦抵抗であるが、気泡の注入による流速の増加を (2) 式及び (3) 式で補正した。

$$C_{f0}(Q_a) = C_{f0}(0) \frac{\tau(u)}{\tau(U)} \quad (2)$$

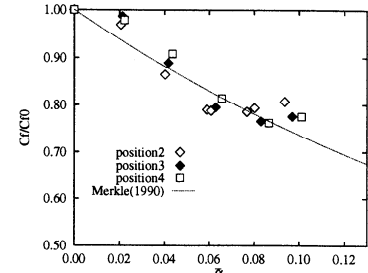
$$\tau(f) = 0.03325 \rho \nu^{\frac{1}{4}} f^{\frac{7}{4}} r^{-\frac{1}{4}} \quad (3)$$

$C_{f0}(Q_a)$: corrected nondimensionalized frictional drag

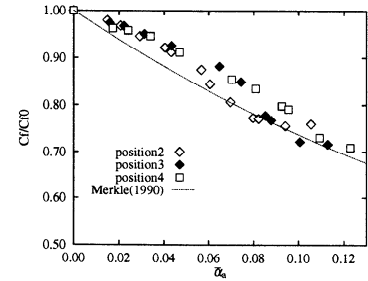
U : velocity of water at $Q_a = 0$

u : velocity of water at $Q_a > 0$

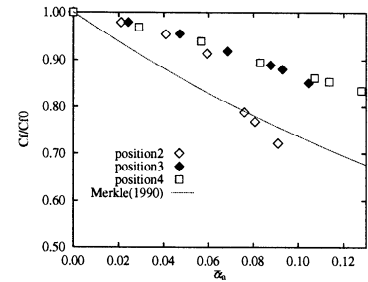
r : hydraulic radius



(a) $U = 5.0 \text{ m/s}$



(b) $U = 7.0 \text{ m/s}$



(c) $U = 10.0 \text{ m/s}$

Fig.3: The frictional drag reduction by microbubble injection

流速 5.0 m/s と流速 7.0 m/s の場合、計測位置による抵抗低減効果の傾向の差は小さい。一方、流速 10.0 m/s の場合は、計測位置により抵抗低減効果の傾向に差が見られ、position 3,4 (空気吹き出し位置より 1000 mm 及び 1500 mm 下流) では、position 2 (同 500 mm 下流) に比べて、抵抗低減効果が小さくなっている。

Merkle ら⁵⁾ は、実験により、境界層中の平均ボイド率と抵抗低減効果を (4) 式のように整理している。

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = 0.8e^{-4\bar{\alpha}_a} + 0.2 \quad (4)$$

流速が 5.0 m/s と 7.0 m/s の場合の今回の実験結果は (4) 式と良く一致する。流速 10.0 m/s においては、position 2 では、(4) 式とかなり似た傾向を示すが、position 3,4 では、(4) 式に比べて平均ボイド率に対する抵抗低減効果が小さい。

4. 局所ボイド率の計測

position 2 において平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a = 0.08$ となる場合の、抵抗低減効果の流れ方向変化を Fig.4 に示す。

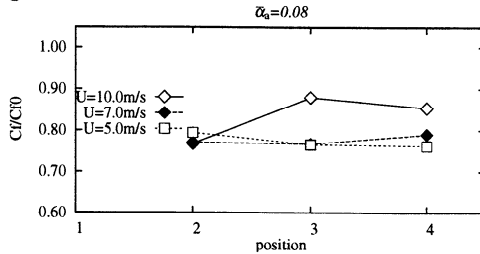
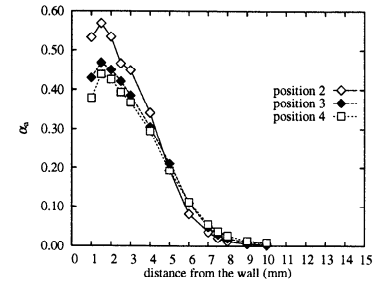


Fig.4: Streamwise variation of the skin friction reduction

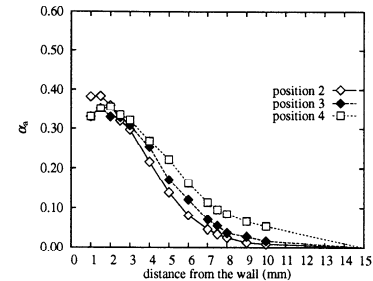
流速が $5.0m/s$ と $7.0m/s$ の場合は、計測場所による抵抗低減効果の差は小さいが、流速 $10.0m/s$ の場合、position 3, position 4 の抵抗低減効果は、position 2 での抵抗低減効果の 60% 前後と小さくなっている。

そこで平均ボイド率 $\bar{\alpha}_a = 0.08$ での境界層厚み方向の局所ボイド率 α_a の分布を position 2,3,4 において計測した。局所ボイド率は、壁面近傍を $0.5mm$ 間隔で、その他を $1.0mm$ 間隔で計測した。計測時の吸い込み圧力は、気泡無しの状態において水の吸い込み速度がその位置での流速に等しくなるよう調節した。流速 $5.0m/s$ と $7.0m/s$ の場合、この条件は、ほぼ達成されたが、流速 $10.0m/s$ の場合、吸い込み圧力が不足したため、真空タンク内の圧力を $0.105atm$ ($80mmHg$) に固定した。局所ボイド率 α_a の境界層方向分布を Fig.5 に示す。

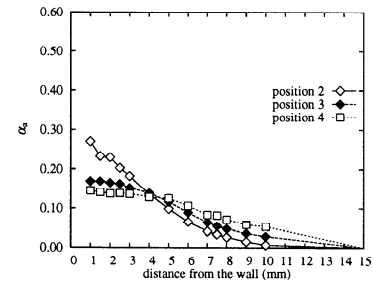
流速が $5.0m/s$ と $7.0m/s$ の場合、 α_a の分布は、各位置で傾向が類似している。一方、流速が $10.0m/s$ の場合、position 2 では流速が $7.0m/s$ の場合と同様に壁面近傍に α_a の高いピークを持ち、分布の傾向はよく似ている。しかし position 3,4 と position 2 では α_a の分布の傾向がはっきりと違い、抵抗低減効果の小さい position 3,4 での壁面近傍の α_a のピークは、position 2 における壁面近傍の α_a のピークに比べて低くなだらかなる一方、流路中央では α_a が高くなっている。このことは壁面近傍の局所ボイド率が高いことが摩擦抵抗低減に効果的であることを示している。また $10.0m/s$ の流れの下流域において壁面近傍の α_a が低いのは、乱流による気泡の拡散効果が、遅い流速の時に比べて大きいからだと考えられる。



(a) $U = 5.0m/s$



(b) $U = 7.0m/s$



(c) $U = 10.0m/s$

Fig.5: The local void ratios (raw data)

計測された α_a の分布がスパン方向に一定と仮定し流路全体で積分すると、その積分値は、 $5.0m/s$ の場合、平均ボイド率に対して $1.61 \sim 2.04$ 倍、 $7.0m/s$ の場合は、 $1.42 \sim 1.56$ 倍となった。これは吸い込み速度を気泡無し時の流速に合わせたため、比重の軽い気泡流を吸い込む場合、吸い込み過多になったのが原因だと考えられる。実際に吸い込み速度は、気泡無し時の流速の 10% 増し程度となっている。 $10.0m/s$ の場合には、 α_a の積分値は、平均ボイド率に対して $0.72 \sim 0.99$ 倍となった。これは吸い込み速度が、気泡無し時の流速に比べて最大で 20% 程度遅くなっていることが原因だと考えられる。そこで計測した局所ボイド率がスパン方向に一定と仮定して流路断面で積分した値と平均ボイド率が一致するように補正した結果を Fig.6 に示す。

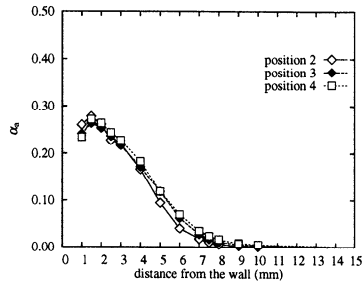
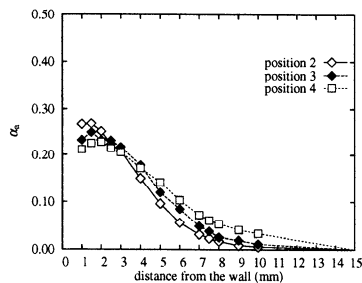
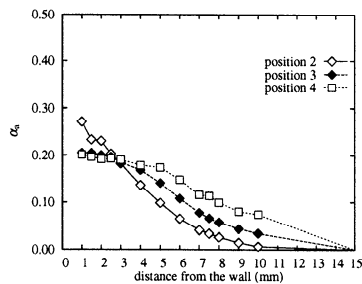
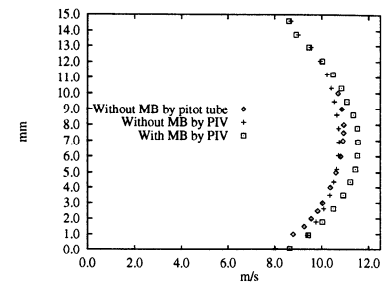
(a) $U = 5.0\text{m/s}$ (b) $U = 7.0\text{m/s}$ (c) $U = 10.0\text{m/s}$

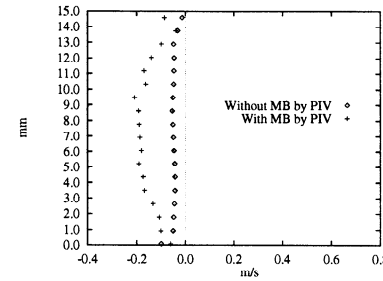
Fig.6: The local void ratios (corrected data)

5. PIV による速度場の計測

PIVによりマイクロバブルを注入した状態での速度場の計測⁶⁾を行なった。流速 10.0m/s の流れにおいて、 18mm 角の視野、 $1000 \times 1000\text{pixel}$ の画像で、流路中心から 30mm 側壁よりの流れ方向垂直断面を position 2 の位置で側方から撮影した。また気泡の画面内移動量を 0.1mm とするため、YAGレーザの発光間隔は $10\mu\text{sec}$ に設定し、トレーサには公称 $50\mu\text{mm}$ の空気封入ビーズと気泡を用いた。そのため気泡流では水ではなく気泡の速度分布を計測している。レーザシート光は厚み 1mm に設定したが、気泡流の場合は気泡による光の散乱で、厚さ 5mm 程度となった。PIVによる流速分布計測結果を Fig.7 に示す。



(a) Streamwise direction (u)



(b) normal to wall direction (v)

Fig.7: The velocity distribution of microbubble flow (PIV)

6. まとめ

- 吸い込み式の計測装置により局所ポイド率の計測を行ない、壁面近傍の局所ポイド率が摩擦抵抗低減に効果的であることが確認された。
- 吸い込み式の局所ポイド率の計測法は、吸い込み速度と局所流速の速度差により吸い込み空気量に変化する。補正法も含め改良の余地がある。
- PIVにより高密度の気泡を含む流れの速度場を計測した。

今後は、局所ポイド率の計測法の補正法を含めた改良、幅方向の局所ポイド率の分布の計測を行なう予定である。

参考文献

- 1) Madavan et al., J.F.M Vol.156 1985
- 2) Kato et al., FED Vol.190, ASME, 1994
- 3) 高橋他, 造船学会論文集 182号, 1997
- 4) Guin et al., ASME symp. San Diego, 1996
- 5) Merkle et al., Vol.123, Progress in Astronautics and Aeronautics
- 6) 角川他, 機械学会関西, 1998