壁面近傍の縦渦と気泡群の相互作用

Mutual Interaction between Streamwise Vortex and Bubbles

大岩	浩司,	福井大	・院	〒910-8507	福井市文京 3-9-1	E-mail:ohiwa@fv.mech.fukui-u.ac.jp
村井	祐一,	福井大	·Ι	〒910-8507	福井市文京 3-9-1	E-mail:murai@fv.mech.fukui-u.ac.jp
高橋	義明,	IHI 船湾	事本部	〒135-8731	東京都江東区豊洲 2-1-1	E-mail:yoshiaki_takahashi_1@ihi.co.jp
山本	富士夫,	福井大	·Ι	〒910-8507	福井市文京 3-9-1	E-mail:yamamoto@fv.mech.fukui-u.ac.jp
Hiro	shi OHIWA	A ,	Dept. o	f Mech. Eng., F	ukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo F	ukui-shi, 910-8507, JAPAN
Yuic	hi MURAI	,	Dept. o	of Mech. Eng., F	ukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo F	ukui-shi, 910-8507, JAPAN
Yoshiaki TAKAHASHI, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 1-1, Toyosu 2-chome, Koto-ku, Tokyo 135, Japan						
Fujio	O YAMAM	OTO,	Dept. o	of Mech. Eng., F	ukui-Univ., 3-9-1 Bunkyo F	ukui-shi, 910-8507, JAPAN

In resent years, it has been watched with keen interest that microbubbles decrease turbulent friction resistance in wall boundary layers. This effect is experimentally confirmed by several research institutes regarding ship-building, however, theoretical explanation for the drag modification has not been sufficiently made. Especially, the interaction between the bubbles and the three-dimensional vortex structures in the turbulent boundary layer must have close relationship with the drag modification. In this study, it is shown that the mutual interaction between bubbly flow and streamwise vortex, and stability of streamwise vortex structures can be predicated by the numerical analysis using Eulerian-Lagrangian model.

1. 緒言

近年,環境問題が様々なところで取り上げられ,エネルギ 資源の大量消費に起因する地球の温暖化など,早急に解決し なければならない問題が多くなっている.流体に関係した摩 擦低減による種々システムの高効率化もこの問題の解決策 の一つであり,特に,大型船舶航行やパイプラインなどで 様々な研究が行われている.例えば,石油タンカーなどの大 型船舶では,推進エネルギの50~90%が海水と船底との摩擦 によって消費される.これら摩擦抵抗軽減に関する技術は, 高分子ポリマー法,リブレット法など多くのアイデアが出さ れている.

現在,この種の摩擦抵抗を低減させるために気泡を吹き込 むマイクロバブル法が有効であることが報告⁽¹⁾されている. この方法は,固体壁表面に形成される乱流境界層に微細な気 泡を流入し,境界層内の乱流特性を変化させ,摩擦抵抗を低 減させるものである.この方法によれば実際に抵抗が60%程 度減少するという実験結果⁽²⁾が得られており,また,加工費 も安価で,環境汚染の心配も少なく,船舶研究分野では実用 化のための検討段階に入っている.しかし,壁面せん断力の 変化のメカニズムについては,いくつかの流体力学的な説明 ⁽³⁾や乱流モデルによる数値計算⁽⁴⁾が試みられているものの, 壁面乱流中の組織渦と気泡群の干渉などの具体的な知見が 明らかにされていない.

乱流境界層に形成される様々な組織渦の中でも、いわゆる 縦渦は、乱流境界層中のレイノルズ応力の発生や運動量・熱 などの輸送に大きく寄与することが知られており、気泡によ る乱流摩擦抵抗の増減にも深く関係していると推察される. 具体的には、ホースシュー渦、ヘアピン渦、∧渦、バナナ渦 などと呼ばれるループ形の渦構造が壁面摩擦抵抗を決定づ ける構造と考えられている、本研究では、壁面乱流中に気泡 を混入させたときの縦渦と気泡の相互作用を3次元数値解 析によって明らかにする.

現状では、気泡の界面変形を含めた混相乱流の DNS(Direct Numerical Simulation)は、計算機性能から考えて不可能であり、解析条件の限定された数理モデルを利用するしか方法はない.これらの候補としてあげられるものには、三次元解析が可能なものに限定すれば、二流体モデル、数密度モデル、Eulerian-Lagrangian モデル(E-L モデル)⁽⁵⁾の三つがある.本研

究では、平均化方程式の中でも最も空間分解能に優れている ことが確認されている E-L モデルを採用する.E-L モデル では、厳密な気泡の運動方程式を利用して、個々の気泡の位 置、速度、体積を記憶しながら追跡するため、数値拡散の影 響を一切受けず、境界層内の気泡の運動を精度よく予測する ことができ、同時に、気泡が液体に与える影響についても忠実 に計算できる Two-Way 解析モデルである、杉山ら⁽⁶⁾により LES を用いたチャネル内流れにおける気泡の分布や流れ構 造の変化については報告されている.しかし縦渦と気泡の干 渉については未解明である.本報では、E-L モデルを用いて、 壁面上に形成される縦渦と気泡の3次元的な Two-Way 干渉 の予測を試みる.

実現象としての縦渦は不特定の場所に短時間に発生する 現象である.このような現象を数値シミュレーションにより 解析することはフィボナッチ配列を利用した格子等を用い れば可能である.しかしながら縦渦の局部的な構造解明のた めには定常的な縦渦を特定の場所に作る必要がある.

そこで今回は床面において流れと垂直方向にせん断条件 を与え、人為的に縦渦を発生させ、その構造と気泡との干渉、 ならびに縦渦の崩壊原因を考察した.また、単相との相関係 数を計算し、気泡流入条件との関係を示した.

2. 数値解析手法及び計算条件

今回シミュレーションで解析したモデルを Fig.1 に示す. 流路の左右と上部の壁面における境界条件は Free-slip 条件, 流入口は一様流入で気液間の相対速度は0とし,気泡は流入



Copyright © 2000 by JSCFD

口のランダムな位置で発生するものとする.流出口は自由流 出とし,圧力(ゲージ圧力)を0としている.ホイド率 は流 入する気泡流の平均ボイド率で表すこととする.床面におけ る境界条件は Non-slip 条件を基本とし部分的に流入速度 u₀ と同じ速度で流れと垂直方向に床が動く条件(せん断条件)を 与えた.気泡流は x 軸方向に流れていく計算条件は Table1, 2 に示す.Reynolds 数は代表長さをせん断領域の幅,代表速 度を一様流入速度として定義した.

Table1 Simulation conditions 1

Calculation Domain	$300 \times 200 \times 100 \text{mm}^3$
Grid Division Number	$60 \times 40 \times 20$
Density of Liquid	$\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$
Radius of Bubble	$r_g = 5.0 \times 10^{-4} m$
Atmospheric Pressure	$P_a = 101.3 \times 10^3 Pa$
Kinematic Viscosity of Liquid	$v_1 = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Calculation Period	t*=0 ~ 100

Table2 Simulation conditions 2				
Conditions	Re	(%)	$g(m/s^2)$	
	10	3.0	9.81	
	100	3.0	9.81	
	1000	3.0	9.81	
	100	1.0	9.81	
	100	3.0	9.81	
	100	5.0	9.81	
	100	1.0	0.0	
	100	3.0	0.0	
	100	5.0	0.0	

 ~ は Reynolds 数を変化させた計算である. ~ は Re=100 でボイド率を, ~ は無重力状態におけるボイド 率を変化させて計算を行った.

本研究では縦渦の崩壊具合を定量的に評価するため(1)式 で表される相関係数を計算した.今回は単相時の時間平均速 度分布と二相時の時間平均速度分布での間の相互相関係数 を計算した.渦の相関を表すのに速度ベクトル分布を用いた のは,渦度は速度ベクトルの微分値であるため精度が速度ベ クトルより低いためである.

$$C_{\lambda} = \frac{\int f \cdot g dx}{\sqrt{\int f^2 dx \int g^2 dx}} \tag{1}$$

今回のシミュレーションではすべて式(2)で表される無次元 時間で100まで計算を行った.

$$t^* = \frac{Ut}{L} \tag{2}$$

ここで U は代表速度,L は代表長さ,t は実時間を示す. 代表長さにはせん断領域の幅である 0.06mを用いた.

3. 縦渦構造崩壊原因の推測

本研究では縦渦崩壊の主要な原因を次の三つと考えた.

- 1. 渦中心に気泡が集まることによってできた渦内の 密度勾配に起因する渦運動の崩壊.
- 2. 気泡の浮力による渦発生の抑制.
- 3. 気泡混入による実効粘性増加に伴う角運動量の散逸.

● 渦中心に気泡が集まることによってできた渦内の密度勾配に起因する渦運動の崩壊。

渦の中心部は圧力が低くなる.その結果,圧力勾配が渦周辺で生じる.密度が小さく遠心力が少ない気泡は渦中心部に 集まり,中心のボイド率が増加する.その結果,渦運動の中 心は外側に遷移し,ひいては崩壊する.この原因が気泡流中 の乱流境界層の縦渦崩壊にいたる最も大きな原因だと考え られる.



Fig.2 Streamwise vortex collapse process by the density gradient

● 気泡の浮力による渦発生の抑制.

壁面から垂直に離れていく流れ"Ejection"と縦渦との間に は密接なかかわりがある.この Ejection が気泡の浮力によっ て妨げられるために縦渦の発達が妨げられると考えられる.

<u>| | ||||||</u>



///

Fig.3 Streamwise vortex collapse process by buoyancy of bubbles

● 気泡混入による実効粘性増加に伴う角運動量の散逸



by effective viscosity of bubbly media

今回の計算ではこの三つが主要な原因であると考えて考 察を行った.



⁽ Re=1000, g=9.8 ²=0.72, =3.0%) Fig.5 Time averaged equiscalar surface of vorticity squared

4.計算結果及び考察

● 重力下における Reynolds 数と相関係数の関係

Fig.5 は条件 ~ の結果を時間平均した x 方向の渦度の 二乗等値面を示したものである.比較のため Fig.6 に単相時 の等値面を示した.気泡を入れることによって Fig.6 のよう に形成されていた縦渦構造が Fig.5 のように変化したことを 表している.変化を定量的に評価するために 液相の速度ベクトルの相関係数を計算したのが Table3 であ る.

Table3 Cross-correlation coefficient of streamwise vortex (Re=10 ~ 1000)

Conditions	Re	(%)	Cross-correlation
	10	3.0% & 0.0%	-0.01890
	100	3.0% & 0.0%	0.58926
	1000	3.0% & 0.0%	0.97708



(Re=1000, g=9.8 2 =0.72, =0.0%) Fig.6 Time averaged equiscalar surface of vorticity squared



Fig.7 Cross-correlation coefficient (Re=10 ~ 1000)

Table3 及び Fig.7 からわかるように Re=1000 では相関係数 が 0.97708 となっており,気泡を入れても渦が崩壊しないこ とがわかる .これは今回の計算では上記の縦渦崩壊原因の2,浮力による効果が大きいためである.



Re=10, =3.0%

Re=100, =3.0%



Re=1000, =3.0%



Re=100, =3.0%, g=0.0

Fig.8 Distribution of liquid velocity vectors and bubbles (y=130mm,t*=100)

 Fig.8 に y=130mm 断面,t*=100 の液相の速度ベクトル及

 び気泡分布図を示す.比較のために Re=100 の無重力場にお

 ける計算結果条件の分布も併記した.Fig.8 からわかるように

 うに
 では流動構造が大きく異なっている.と同じ

 Reynolds 数の条件の流れはよりの流れに近い.これは

 流動構造が Reynolds 数ではなく,Froude 数に依存するため

 である.Froude 数は定義を式(3)に示されるように重力と慣性

 力の比の平方根で表される.条件のFroude 数を

 Table4 に示す.

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho U_{\infty}(U_{\infty}/L)}{\rho g h/L}} = U/\sqrt{g h}$$
(3)

Table 4 Froude number

Co	Fr	
Re=10,	=3.0%, g=9.8m ² /s	1.683×10^{-2}
Re=100,	=3.0%, g=9.8m ² /s	1.683 × 10 ⁻¹
Re=1000,	=3.0%, g=9.8m ² /s	1.683
Re=100,	$=3.0\%$, g $=0.0m^{2}/s$	

の Re=1000 では浮力よりも慣性力が支配的であるため, 浮力による縦渦崩壊はわずかで相関係数も高くなったと考 えられる.逆に では慣性力より浮力が支配的であるため, 浮力による縦渦崩壊が起こった.

これらの結果から,浮力による縦渦崩壊は Froude 数に依存することがわかった.

● ボイド率と縦渦崩壊率の関係



(Re=100, g=9.8 2 =0.72, =1.0%)



(Re=100, g=9.8 2 =0.72, =3.0%)



Fig.9 Time averaged equiscalar surface of vorticity squared

Copyright © 2000 by JSCFD



Fig.9 に ~ の時間平均した渦度の二乗等値面を示す. 上からボイド率1,3,5%となっている.また, ~ と同様 の条件を無重力下で計算した ~ の時間平均した渦度の 二乗等値面を Fig.10 に示す. ~ と気泡を含まない流れの

液相速度ベクトルの相関係数を計算したのが Table5 である.

....

Table5 Cross-correlation coefficient

	of streamwise vortex (Re=100, $1 \approx 5\%$)				
Conditions	(%)	$g(m/s^2)$	cross-correlation		
	1.0% & 0.0%	9.8	0.67716		
	3.0% & 0.0%	9.8	0.58926		
	5.0% & 0.0%	9.8	0.51373		
	1.0% & 0.0%	0.0	0.99824		
	3.0% & 0.0%	0.0	0.99565		
	5.0% & 0.0%	0.0	0.99285		



Fig.11 Cross-correlation coefficient(Re=100, 1 ~ 5%)

Fig.11 の相関係数のグラフによれば重力がある場合はボイ ド率が高いほど縦渦崩壊が促進される.これに対し無重力で はボイド率が上がっても縦渦崩壊は実現していない.これは, 重力がある場合は浮力が支配的であり,崩壊率のボイド率依 存性が高いためである.グラフには現れていないが,Table5 において重力がない場合,わずかではあるが気泡が多いほど 相関係数が小さな値をとっている.前述の原因1及び3の効 果であると思われる.

5. 結言

縦渦と気泡との干渉に関するシミュレーションを行い,次の ことがわかった.

- (1) 浮力による縦渦の崩壊は Froude 数に依存し, Froude 数が低いほどその効果は大きくなる.
- (2) Froude 数が高い条件では気泡の浮力による崩壊現 象が効果をもたなくなるので縦渦の崩壊とボイド 率は関係なくなる.
- (3) 今回は渦内の圧力勾配が小さいので渦構造の密度 差に起因する縦渦崩壊は見られなかった.

参考文献

- 児玉良明,加藤洋治,"マイクロバブルによる摩擦抵抗低減 と船舶への適応性可視化情報論文集,(1999),Vol.19,Suppl., No.1, 361-364
- (2) Kato, H., et al., "Effect of microbubbles on the structure of turbulence in a turbulent boundary layer," J Mar Sci Technol(1999) 4:155-162
- (3) Madavan, N.K., Deutch, S., Merkle, C.L., "Numerical Investigation into the Mechanisms of Micro-bubble Drag Reduction," Journal of Fluids Engineering, Vol.107 (1985) 370-377.
- (4) Yoshida, Y., et al., "Simple Lagrangian Formulation of Bubbly Flow in a Turbulent Boundary Layer," J. Marine Science and Technology, Vol.2, (1998) 1-11.
 (5) Murai,Y., Matsumoto,Y., Numerical Analysis of Detailed
- (5) Murai,Y., Matsumoto,Y., Numerical Analysis of Detailed Flow Structures of a Bubble Plume, JSME Int.J., Vol.41, No.3 (1998) 568-575.
- (6) Sugiyama, K., Matumoto, Y., Large Eddy Simulation of Bubbly Turbulent Channel Flow, ICMF(1998) p1-7