

# ジャーナル軸受すきま内におけるマイクロバブル径と摩擦特性に関する研究 (第2報 気液二相流解析を用いたマイクロバブル径が与える影響)

Study of Microbubbles Diameter and Friction Characteristics in Journal Bearing Clearance  
(Report 2 Effect of Microbubbles Diameter by Using Gas-Liquid Two-Phase Flow Analysis)

東海大・院(学)\*山崎 佑人 東海大・工(正)川本 裕樹 東海大・学(学)吉村 友輝  
東海大・院(学)加々美 昌樹 東海大・学(学)山崎 浩作 東海大・工(正)畔津 昭彦  
東海大・工(正)落合 成行

Yuto Yamazaki\*, Yuki Kawamoto\*, Yuki Yoshimura\*, Masaki Kagami\*, Kosaku Yamazaki\*, Akihiko Azetsu\*,

Masayuki Ochiai\*

\*Tokai University

## 1. 緒言

近年、環境問題やエネルギー問題の解決に向けて、本研究の対象であるジャーナル軸受を含む機械要素には運転時に生じる摩擦の低減が求められている。そこでジャーナル軸受の新たな摩擦低減手法として、本研究ではマイクロバブルに着目している。マイクロバブル<sup>1)</sup>とは直径数  $\mu\text{m}$  から  $100\ \mu\text{m}$  程度の気泡を指し、ジャーナル軸受の潤滑油にマイクロバブルの混入を模擬した数値解析では、壁面近傍の速度勾配が変化することで摩擦が低減すると考えられている<sup>2)</sup>。しかし、マイクロバブルによる摩擦低減メカニズムは未だ明らかになっていない点も多い。そのため、本研究ではマイクロバブルによる摩擦低減メカニズムの解明を目的とする。これまでは軸受すきまより径が小さいマイクロバブルに限定していた。しかし、新たに摩擦低減率の向上も目的の1つとし、軸受すきまより径が大きいマイクロバブルも含めた気液二相流解析を実施し、マイクロバブル径がジャーナル軸受の摩擦特性に与える影響を調査した。

## 2. 計算手法

本研究の支配方程式は、式(1)の連続の式および式(2)に示す非圧縮 Navier-Stokes 方程式とした。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \{(\mathbf{U} - \mathbf{U}_0) \cdot \nabla\} \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{U}$  は流体の速度、 $\mathbf{U}_0$  は格子の移動速度、 $\rho$  は密度、 $P$  は圧力、 $\mu$  は粘性係数を示す。また、本研究では ALE (Arbitrary Lagrangian Eularian) 法を用いたため、流れ方向のバブルの移動に計算領域が追従する。なお、格子の移動速度  $\mathbf{U}_0$  はバブル内部の平均速度から算出される。速度と圧力の連成は Fractional step 法を用い、離散化は等間隔直交格子上で行う。気液界面は Level set 法<sup>3)</sup>で定義され、気液界面の時間変化は式(3)に示す移流方程式から求められる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{U} - \mathbf{U}_0) \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

$\phi$  は気液界面に対する Level set 関数を示し、Level set 関数は式(3)の移流に伴い、適切な距離関数の維持が困難となる。よって、界面近傍を除く計算格子においては再初期化を行う。本研究では界面付近の不連続な物理量に対応するため、境界近傍の計算格子に任意の境界条件を与える Ghost fluid 法<sup>4)</sup>を用いた。また、移動する物体形状を Level set 関数で定義し、物体表面の Non-Slip 条件の決定は Ghost cell 法<sup>4)</sup>を用いた。各項の離散化手法として、式(2)および式(3)の時間積分は3次精度 TVD (Total Variation Diminishing) Runge-Kutta 法を、式(2)および式(3)の対流項には5次精度 WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 法を用いた。また、粘性項は2次精度中心差分法を用いて、圧力の Poisson 方程式は SOR (Successive Over-Relaxation) 法で解いた。

## 3. 計算領域および計算条件

本研究では三次元解析を実施し、軸受全体ではなく、一部の微小領域を対象とした。そのため、軸と軸受の周長差は微小と考え、曲率の考慮はしていない。計算領域に軸および軸受を模擬した壁面を各5格子設け、境界条件として軸側の壁面に周速度を与え、軸受側の壁面は静止状態とした。また、その他の境界は周期境界条件を用いた。計算条件を Table 1 に示す。空気の物性値は標準気圧における  $20\ ^\circ\text{C}$  の値、表面張力は空気と潤滑油の一般的な値を用いた。潤滑油の物性値、回転数、軸直径、軸受すきま(以下、すきまと称する)は実験と同条件にした。計算領域の中心に単一のバ

ブルを配置し、すきまより直径が小さいバブルは球として、すきま以上の直径のバブルは球と同一体積の楕円体で定義した。本稿はバブル径を 40  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、60  $\mu\text{m}$  の 3 ケースで比較し、すきまとバブル径の関係が全て異なる条件とした。

#### 4. 結果および考察

Figure 1 に、無次元せん断応力および  $X$  方向速度の可視化結果を示す。上下壁面は単相流のせん断応力で正規化した無次元せん断応力を、 $Z$  方向中心に配置した面には  $X$  方向速度の可視化結果を示している。なお、紙面の都合上、Fig. 1 はすきまよりバブル径が小さい 40  $\mu\text{m}$  とバブル径が大きい 60  $\mu\text{m}$  の 2 ケースの結果である。また、Fig. 2 に軸側壁面のせん断応力の平均値を示し、w/o bubble と表記した結果は単相流のせん断応力である。Figure 2 より、バブルの混入でバブル上方の壁面せん断応力は低減しており、バブル径の増加に伴い、せん断応力の低減効果は大きくなることが分かる。しかし、すきまよりバブル径が小さい 40  $\mu\text{m}$  ではその影響度合いが小さい。これはバブルの前後で増加領域が存在し、増加量と減少量の差が小さいためだと考えられる。次はバブル径の増加でせん断応力が低減した理由を考察する。本稿では 50  $\mu\text{m}$  の結果を示していないが、バブル径の増加に伴い、 $X$  方向のバブルの伸びは大きくなっており、Fig. 1 からその様子が一部確認できる。また、せん断応力が低減する領域はバブルの直上であり、バブルと壁面間の速度差（速度勾配）は小さくなっている。これらからバブル径の増加で、流れ方向である  $X$  方向にバブルが占める領域は拡大し、バブルと壁面間の速度差（速度勾配）が小さくなる領域が増加したからだと考える。

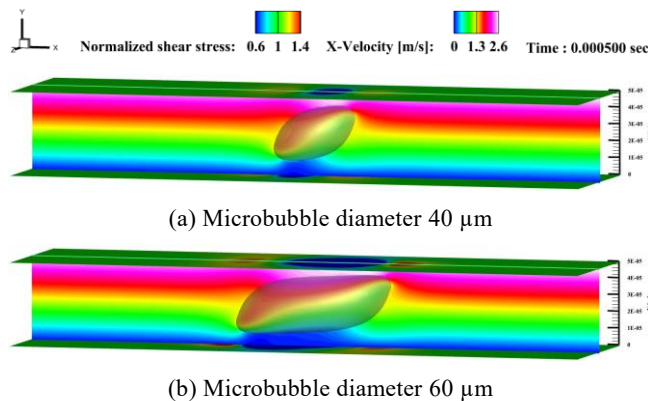


Fig. 1 Visualization results of dimensionless shear stress and  $X$  direction velocity

Table 1 Computational condition

	Air	Oil
Density, $\text{kg/m}^3$	1.2	861.8
Viscosity, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$2.823 \times 10^{-2}$
Surface tension, $\text{mN/m}$	36	
Shaft diameter, $\text{mm}$	50	
Rotational speed, $\text{rpm}$	1,000	
Bearing clearance, $\mu\text{m}$	50	
Bubble Diameter, $\mu\text{m}$ (size, $\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	40 ( 40 $\times$ 40 $\times$ 40) 50 ( 78 $\times$ 40 $\times$ 40) 60 (135 $\times$ 40 $\times$ 40)	
Grid size, $\mu\text{m}$	1.0	
Number of grid	350 $\times$ 60 $\times$ 100 = 2,100,000	
CFL Number	0.3	

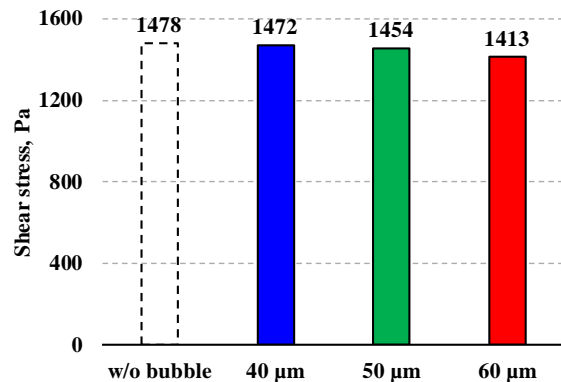


Fig. 2 Average wall shear stress (shaft side)

#### 5. 結言

本研究では、マイクロバブルによる摩擦低減メカニズムの解明および摩擦低減率の向上を目的に、すきまより大きいバブルを仮定した気液二相流解析を実施した。その結果、すきま以上の大きいバブルの混入で摩擦低減率向上の可能性が示唆された。今後はさらにバブル径の条件を追加した比較および回転数（周速）の影響を調査する予定である。

#### 謝辞

本研究は自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）の委託事業の成果であり、関係者各位に深く感謝いたします。また、計算は東北大学サイバーサイエンスセンターで実行されたものであり、職員の皆様には感謝申し上げます。

#### 文献

- 1) 芹澤：マイクロ／ナノバブルの基礎，日本マリンエンジニアリング学会誌，46，6 (2011) 56.
- 2) 川本・小谷・セイタン・高橋・落合：ジャーナル軸受の摩擦特性に及ぼす潤滑油中のマイクロバブルの影響 — 第2報 二相流 CFD 解析と摩擦低減メカニズムの考察—，トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集，(2020) 532.
- 3) Y. Kawamoto, S. Takahashi, M. Ochiai, A. Azetsu & K. Yamamoto: Prediction of oil behavior in piston ring groove based on gas-liquid two-phase flow analysis, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 14, 6 (2020).
- 4) S. Takahashi, T. Nonomura & K. Fukuda: A Numerical Scheme Based on an Immersed Boundary Method for Compressible Turbulent Flows with Shocks: Application to Two-Dimensional Flows around Cylinders, Journal of Applied Mathematics, 2014 (2014).