

[共同研究成果]

マイクロバブル径によるジャーナル軸受の摩擦特性と気液二相流解析

山崎佑人, 川本裕樹, 落合成行, 畔津昭彦
東海大学

環境問題の解決に向けて, 自動車は燃費の向上が要求され, 本研究の対象であるジャーナル軸受も摩擦の低減が必要である. そこで新たな摩擦低減手法としてマイクロバブルに着目しており, 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気液二相流解析から調査した. 軸受すきまより大きいバブル径においても新たに摩擦低減効果を確認でき, バブル径の増加により, 低減率は向上する結果となった.

1. 緒言

近年, 地球温暖化のような環境問題やエネルギー問題は社会的な課題とされている. そのため, 自動車では燃費の向上が強く求められ, 燃費の向上にはエネルギー損失の低減が重要である. また, エンジンの摩擦損失は自動車全体のエネルギー損失の約 2 割[1]を占めるとされている. 特にエンジンは多くの部品で構成されることから摺動部が多く, 本研究の対象であるジャーナル軸受を含む各機械要素で摩擦低減が必要となる. ここでジャーナル軸受とは, 回転軸と軸受のすきまに供給される潤滑油から生じる油膜圧力により, 軸を非接触で支持する機械要素である. 特徴として負荷容量が高く, 耐衝撃性や耐摩耗性に優れていることから, 自動車だけでなく高速回転機械にも多く利用されている. 摩擦低減手法として, 従来は潤滑油の低粘度化[1]や添加剤の使用がされてきたが, これらは焼付きや環境に悪影響を及ぼす可能性が考えられる. そこで環境に低負荷な摩擦低減手法が求められる.

本研究は新たな手法としてマイクロバブルに着目している. マイクロバブルは直径数 μm から $100\mu\text{m}$ 程度の微細な気泡を指す[2]. 海洋分野では船底にマイクロバブルを発生させることで摩擦抵抗の低減が確認されている[3]. また, 洗浄や医療分野など多岐にわたる分野[2]でマイクロバブルの応用に向けた研究が行われている.

そこで本研究はジャーナル軸受の潤滑油にマイクロバブルを応用する取り組みを行っている. これまでの成果から, マイクロバブルの混入による摩擦の低減が確認されており, 同心状態では軸受すきま (以下, すきまと称する) 内のバブルの挙動が実験と二相流解析で一致する傾向を得られている[4, 5]. さらに二相流解析の結果から, マイクロバブルの混入で壁面近傍の速度勾配が緩和し, 摩擦が低減したと考えられている[5]. しかし, 摩擦低減メカニズムについては未だ明らかになっていない点も多くある. よって, 本研究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し, 本稿ではマイクロバブル径に着目した. これまではすきまより小さいバブル径を対象としていた. しかし, 摩擦低減率の向上も新たに本研究の目的とし, すきまより大きいバブル径も含めたジャーナル軸受の摩擦特性に与える影響を二相流解析から調査した.

2. 計算手法

本研究は支配方程式として式(1)に示す連続の式および式(2)に示す非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた.

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

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

ここで $\mathbf{U}$ は流体の速度, $\mathbf{U}_0$ は格子の移動速度, ρ は密度, P は圧力, μ は粘性係数を示す. 本研究は

単一のバブルの挙動および周辺の流れ場に着目する．このため移動するバブルに計算領域が追従するよう ALE (Arbitrary Eulerian and Lagrangian) 法に基づき、式(2)に格子の移動速度 $\mathbf{U}_0$ を考慮した．なお $\mathbf{U}_0$ は気相領域の平均速度とした．また速度と圧力の連成は Fractional step 法を用い、空間の離散化は等間隔直交格子上で行う．空間の離散化手法として式(2)に示す移流項は数値振動の抑制に利点を有する高次精度スキームである 5 次精度 WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 法、粘性項には 2 次精度中心差分法を用いた．また、時間の離散化手法は移流項および粘性項ともに 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法を用いた．圧力の Poisson 方程式は SOR 法で解いた．

気液界面と物体形状は Level set 法[6, 7]で定義しており、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．

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

ϕ は気液界面に対する Level set 関数を指し、空間の離散化は 5 次精度 WENO 法、時間の離散化は 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法を用いた．しかし、式(3)の移流に伴い、Level set 関数は適切な距離関数としての性質の維持が困難となるため、界面近傍を除く計算格子は式(4)を解くことで Level set 関数の再初期化を行う．なお、 τ は Level set 関数の更新に関する疑似時間の変数を指す．

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \text{sign}(\phi)(1 - |\nabla \phi|) \quad (4)$$

また、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[6, 7]を用いた．本研究においては液相の速度、気相の法線方向速度および圧力は外挿して求め、これらの値を示す q_{Gf} は式(5)を解くことで決定される．表面張力は液相の圧力境界条件として Laplace 圧力の関係式を考慮し、式(6)よりジャンプ条件として与えられる．

$$\frac{\partial q_{Gf}}{\partial \tau} + \text{sign}(\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \cdot \nabla q_{Gf} = 0 \quad (5)$$

$$P_{Gf,l} = P_{Rf,g} + \sigma \kappa \quad (6)$$

ここで σ は表面張力、 κ は界面の曲率を示す．

本研究は移動する物体形状を Level set 関数で定義したが、物体表面の Non-Slip 条件の決定には Ghost cell 法[6, 7]を用いた．本手法は物体内部の境界に設けられた計算格子を Ghost cell として、Ghost cell の値の決定は Image point を用いる．Ghost cell の速度 $\mathbf{U}_{Gc}$ は式(7)から求められる．

$$\mathbf{U}_{Gc} = \mathbf{U}_{Ip} - \frac{d_{Ip} + d_{Gc}}{d_{Ip}} (\mathbf{U}_{Ip} - \mathbf{U}_{lb}) \quad (7)$$

ここで Image point の速度 $\mathbf{U}_{Ip}$ はその点を囲む 8 つの格子点から Tri-linear 内挿によって算出される． d_{Ip} はプローブの長さを示し、本研究は $1.75\Delta x$ とした． d_{Gc} は Ghost cell から物体表面までの法線距離、 $\mathbf{U}_{lb}$ は物体の移動速度である．圧力と Level set 関数は Image point の値を Ghost cell に用いることで、物体近傍で Neumann 条件を満たすように決定した．

3. 計算条件

本解析は軸受全体を模擬するのではなく、ある微小領域を対象とした三次元解析を実施した[8]．図 1 は計算領域であり、50 μm のバブル径を例に示す．本来、軸と軸受は円筒形状であり曲率を

有するが、微小領域において曲率の影響は小さいと考え、考慮していない。計算領域の上下には各5格子の物体を設け、境界条件として上側の壁面は軸の回転を模擬するため周速度を付与した。また、下側の壁面は軸受を想定していることから静止状態とした。その他の境界は周期境界条件を用いている。計算条件は表1に示し、流体の物性は空気および粘度グレードISO VG32相当のオイルを想定して設定した。また軸の直径や回転数は実験[4]での条件に基づき決定した。

本解析は同心状態を想定し、すきま内に単一のバブルを配置した。すきまより小さいバブル径である30 μm と40 μm の2ケースは初期形状を球体で定義した。しかし、すきま以上のバブル径である50 μm から70 μm の3ケースは初期形状を球体で定義することができない。そのため、球

体と同一の体積となる楕円体で定義をした。本研究では壁面せん断応力の平均値を用いて摩擦力の評価を行う。この基準を明確化するため、流体領域に占めるバブルの体積割合(ボイド率)が2.0%となるように計算領域を設定した。よって、計算領域の格子点数はバブル径で異なり、最小である30 μm は1,946,637点、最大となる70 μm で24,667,412点である。なお、格子幅は格子依存性の検証から0.75 μm と決定した。本解析はMPIを用いた並列計算により実施し、32並列とした。

表1 計算条件

	Air	Oil
Density [kg/m ³]	1.2	868.5
Viscosity [Pa·s]	1.8×10^{-5}	2.805×10^{-2}
Surface tension [mN/m]	33.3	
Shaft diameter [mm]	50	
Rotational speed [rpm] (Peripheral velocity [m/s])	2000 (5.24)	
Bearing clearance [μm]	50	
Bubble diameter [μm]	30, 40, 50, 60, 70	
Void fraction [%]	2.0	
Grid size [μm]	0.75	
CFL Number	0.3	

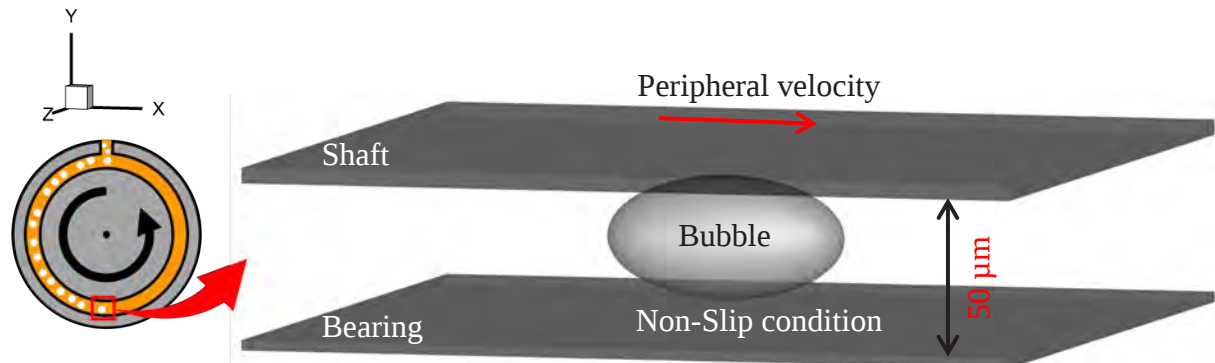


図1 計算領域

4. 結果および考察

図2に無次元せん断応力で可視化した結果を示す。せん断応力の無次元化は单相流(バブルなし)のせん断応力を用いて実施した。可視化結果より、全ての条件でバブルは流れ方向に延伸する挙動を示しており、バブル径の増加に伴い、変形は大きくなっていることが分かる。またせん断応力に着目すると、変形したバブルの直上で低減効果を確認することができた。一方、バブルの先端ではせん断応力の増加も生じている。図3に各バブル径における壁面せん断応力の平均値から低減率を算出した結果を示す。バブル径の増加に伴い、低減率が向上する結果を得られており、最大で2.38%の低減効果を確認できた。傾向はバブル径の増加に対して、低減率の上昇割合が徐々に小さくなることから、あるバブル径で低減率は収束すると推測される。

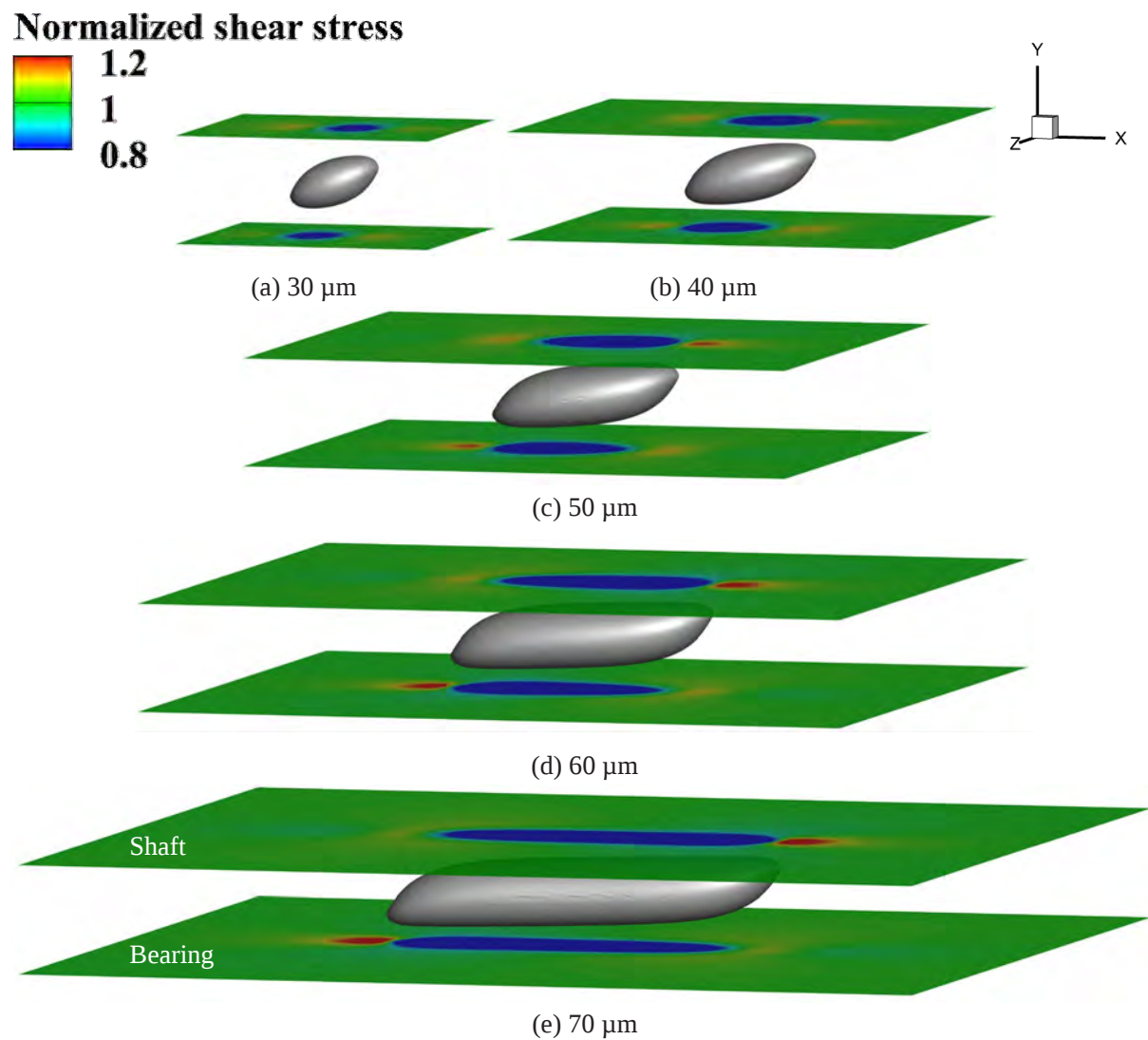


図2 各バブル径における無次元せん断応力分布

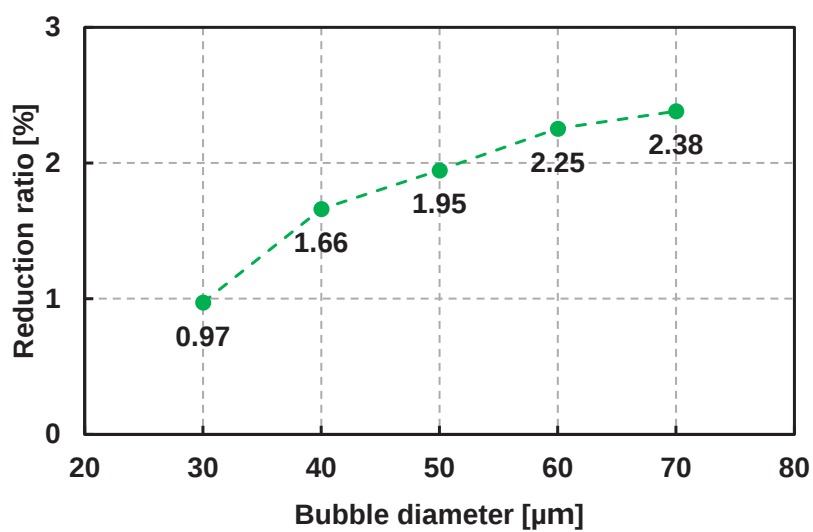


図3 バブル径と低減率の関係

図 4 に速度の絶対値で可視化した結果とその直上における無次元せん断応力の 1 次元分布 (X 方向) を示す. なお, 速度の絶対値は Z 方向の計算領域に対して中心で可視化している. ここではすきまより小さい $30\ \mu\text{m}$, すきまと同等の $50\ \mu\text{m}$, すきまより大きい $70\ \mu\text{m}$ の計 3 ケースの結果を示し, すきま以下とすきま以上のバブル径に分けて説明する. まず, すきま以下のバブル径である $30\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ に着目すると, 局所的な最大低減率が異なり, バブル径の増加で最大低減率も向上している. 可視化図から, $30\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ ではバブルの界面と壁面までの距離 (Y 方向) が異なり, バブル径の増加で狭くなり, 壁面との速度差も小さいことが分かる. よって, すきま以下のバブル径においてはバブル径の増加に伴い, 局所的な最大低減率が上昇し, 低減率の向上に繋がったと考えられる. 次にすきま以上のバブル径である $50\ \mu\text{m}$ と $70\ \mu\text{m}$ においては前者と異なり, 局所的な最大低減率は変化していない. また, 可視化図からもバブル径による, 界面と壁面までの距離に差が生じていないことを定性的に確認できる. 特にすきま以上のバブルでは, すきまの大きさによる制約を受け, 変化しなかったと考えられる. 一方, X 方向に対する変形は顕著に確認でき, バブル径が増加することで低減領域は拡大し, 低減率の向上に寄与したと考える.

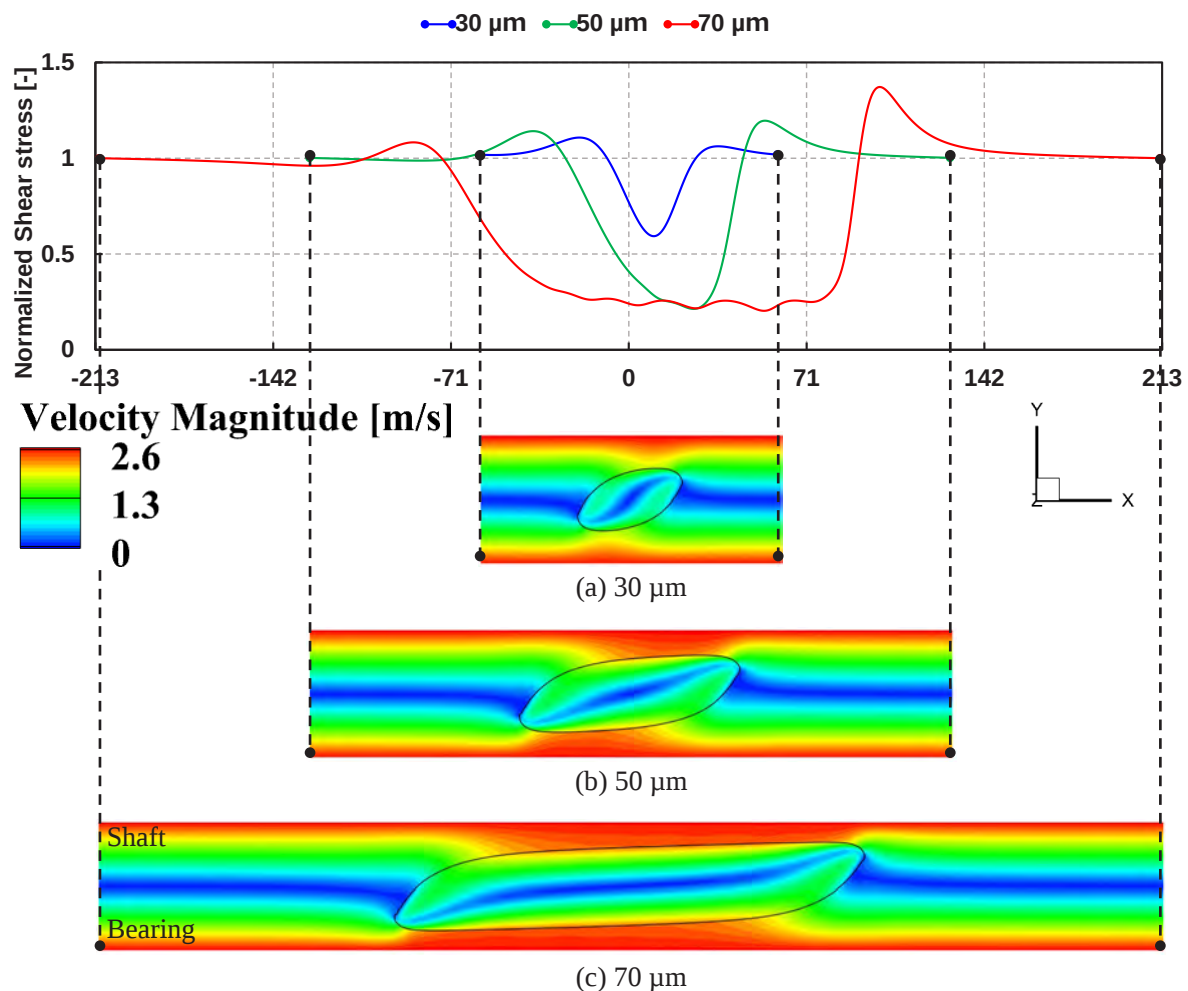


図 4 速度の絶対値分布および直上の無次元せん断応力分布

5. 結言

本研究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, すきま以上の大きいバブルも含めたバブル径が摩擦特性に与える影響を気液二相流解析から調査した. 全てのバブル径でボイド率を統一したことで, バブル径のみが与える影響を評価でき, バ

ブル径の増加に伴う、摩擦低減率の向上を確認した。本解析では単一のバブルとしたが、今後は回転数の変更や複数のバブルを考慮したバブル同士の相互的な影響を調査する必要がある。

謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで得られた結果であり、同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。また、本研究は自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）の委託事業として得られた成果である。

参考文献

- [1] 中村隆, トライボロジー技術の進展による自動車の省エネ, トライボロジスト, 第 61 巻, 第 2 号, 65-70, 2016
- [2] 芹澤昭示, 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, 第 46 巻, 第 6 号, 56-61, 2011
- [3] T. Takahashi, A. Kakugawa, Y. Kodama and M. Makino, Experimental Study on Drag Reduction by Microbubbles Using a 50m-Long Flat Plate Ship, 2nd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 175-180, 2001
- [4] 小谷晋平, 田代祐樹, 川本裕樹, 高橋俊, 落合成行, 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 1 報 実験的検討—, トライボロジー会議 2020 秋別府予稿集, 528-531, 2020
- [5] 川本裕樹, 小谷晋平, アプサラセイタン, 高橋俊, 落合成行, 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, 532-533, 2020
- [6] Y. Kawamoto, S. Takahashi, M. Ochiai, A. Azetsu and 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
- [7] S. Takahashi, T. Nonomura and 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
- [8] 山崎佑人, 川本裕樹, 吉村友輝, 加々美昌樹, 山崎浩作, 畔津昭彦, 落合成行, 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), トライボロジー会議 2024 春東京予稿集, 3-4, 2024