

ウルトラファインバブルがエンジンしゅう動面の摩擦低減に与える効果

Effect of ultra-fine bubbles on friction reduction in internal combustion engines

都市大・総研（正）*三原 雄司 モトラ（正）岩田 拓実 モトラ（正）尾鷲 道康 都市大（正）及川 昌訓

Yuji MIHARA*, Takumi Iwata**, Michiyasu Owashi**, Masakuni Oikawa*

*Tokyo City University (TCU), **MOTORA Inc.

1. はじめに

近年様々な分野でファインバブルの活用が進み、水にウルトラファインバブル(以下 UFB)を発生させた場合に摩擦調整剤として働くことが報告されている¹⁾。潤滑油への応用例は極めて少ないが、筆者らは UFB を潤滑油に発生させ、ピストン-シリンダー間やすべり軸受における摩擦損失低減効果を調べた結果、最大で 10%を超える効果が得られた。ここではピストン系及びすべり軸受系を対象として UFB の発生条件を変えた場合の摩擦低減効果について紹介する。

2. 摩擦低減効果の実験

2.1 実験装置 本試験で用いた浮動ライナーエンジンの構造を Fig.1 に示す。単気筒 4 ストロークガソリンエンジンで、ボア・ストロークは 80.5 mm および 88.3 mm である。シリンダーライナーは Fig.4 (1)(2)のように二重構造で、(2)アウターライナーとエンジンブロック間の Th(スラスト)と Ath(反スラスト)側にそれぞれ上中下 6 か所、合計 12 か所に(6) 3 分力センサを取り付けインナーライナーの摺動面で発生するピストン/リングとシリンダーライナー間の摩擦力を計測する。Fig.2 はエンジン軸受試験機のすべり軸受試験部の詳細で、摺動部はすべり軸受によるメインジャーナル部と両端の 2 つの支持軸受で構成される。すべり軸受は剛性の高いコンロッドの大端部に組み込まれ、小端部はアクチュエータとピンで結合されており、試験軸を駆動した際に発生する軸トルクをトルクメーターで計測する。軸受荷重は油圧アクチュエータによって試験部のメインジャーナルへ作用させ、この荷重をロードセルで計測する。

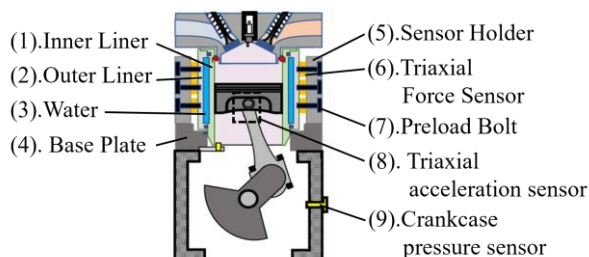


Fig. 1 Overview of ultra-fine bubbles device²⁾

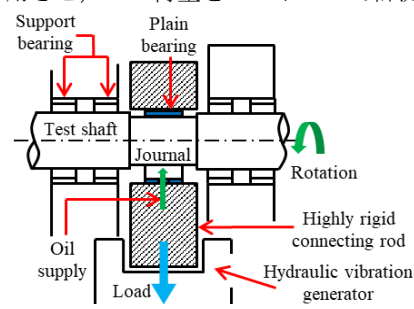


Fig. 2 Overview of engine bearing tester³⁾

2.2 UFB 発生装置 UFB の発生に用いた超微細孔式 UFB 発生装置は多孔質カーボンセラミックスを使用し、装置内部へ送った圧縮空気が多孔質の界面から液体内に送り出され、液体の流れる力によりバブルが大きくなる前にせん断はく離によって数十 μm 以下のバブルが発生する。そのバブルが自らの表面張力作用により自己収縮することで、ナノスケールのバブルとなる機構である。

2.3 潤滑油の循環回路 Fig.3 に浮動ライナーエンジンの潤滑油供給装置の系統図を示す。オイルタンクはエンジン外部に設置され、メインギャラリー直前に設置された UFB 発生装置により UFB を含む潤滑油を各部へ供給する。供給するガスは空気とし、コンプレッサーにより圧縮した空気をマスフローコントローラーを介して圧力 0.5 MPa、流量 1 L/min で供給した。ピストン系では潤滑油の粘度を変更し、0W-20 と 0W-8 の汎用ガソリン用潤滑油を使用した。Fig.4 は軸受試験機のオイル供給経路で、浮動ライナーエンジンと比較してオイル供給量が多いため、オイルタンクの手前に UFB 発生装置を設け、UFB が含まれた潤滑油を常時オイルタンクから試験部に供給すると同時に、オイルタンク内に戻る潤滑油も含めて常時 UFB 発生装置に戻して UFB を再度発生させる方式とした。UFB 発生方法は同じだが、すべり軸受では潤滑油を 0W-20 とし、供給する圧縮ガス量を 0.5 L/min から 3 L/min まで変えて UFB を発生させた。

2.4 実験結果 Fig.4 に SAE 0W-20 で UFB 無しの潤滑油(図中 ALLSTD)と、UFB を発生させた潤滑油(図中 STD+UFB)での FMEP(摩擦平均有効圧力)の変化を示し、Fig.6 は SAE 0W-8 の場合の FMEP の変化を示す。回転数は 1000~2000 rpm とし、IMEP(図示平均有効圧力)は 800 kPa とした。0W-20 の場合は 1000 rpm では FMEP が 3%程悪化するが、1500, 2000 rpm では約 10%の摩擦低減効果が得られた。一方、0W-8 の場合は 1000 rpm では 20%の FMEP の悪化が見られ、1500 rpm や 2000 rpm でも FMEP の低減効果は 4%程度に留まった。このような要因は摺動面の表面性状(粗さ)にも関係しており、本論には無いがシリンダーライナーの R_{vk} が $0.17 \mu\text{m}$ では FMEP の低減効果が大きい、 R_{vk} が $1.17 \mu\text{m}$ では FMEP は逆に悪化した結果も得られた。今回のようなオイル粘度の低下は、摺動表面に供給される UFB の摺動界面での保持が低下して境界潤滑領域が増加する傾向に進んだと考えられる。

Fig.7 はすべり軸受での摩擦低減効果で、潤滑油は 0W-20 とし、UFB 無しの潤滑油を UFB w/o、UFB を発生させる圧縮空気流量を 0.5 L/min から 3.0 L/min まで変更し、それぞれ UFB-0.5 L/min, UFB-1 L/min, UFB-2 L/min, UFB-3

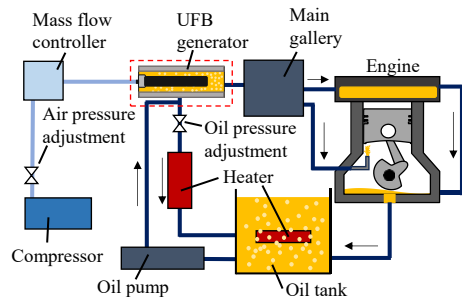


Fig. 3 Oil supply unit for floating liner engine ⁴⁾

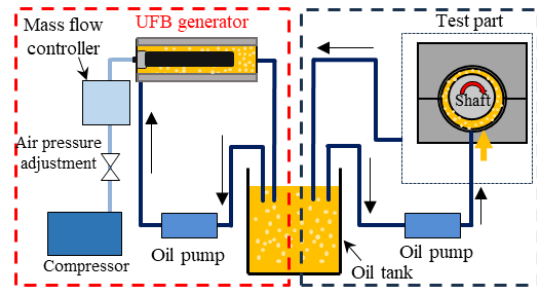


Fig. 4 Oil supply unit for engine bearing tester

L/min と表記した。負荷条件が 0~15kN で回転数が 4000 rpm 及び 5000 rpm の場合の摩擦トルクの推移を見ると、4000 rpm では全ての空気流量の条件で摩擦トルクの低減が見られた。特にどの荷重域でも 1L/min の条件で最も大きな低減効果が見られ、3 kN 時には最大 16 % の低減効果が得られた。比較的高荷重である 15 kN においても約 5~7 % の低減率であった。5000 rpm でも UFB-1 L/min で最大の摩擦低減効果が得られ、3 kN で 16 %、15 kN で 9~10 % の摩擦低減効果を確認した。傾向として 0.5 L/min から 1 L/min への空気流量の増加で大きな摩擦低減効果が得られるが、2 L/min、3 L/min と増やすと摩擦低減効果は減少した。本実験の条件では UFB 発生原理であるせん断剥離に変化が生じ、UFB の発生密度や粒径分布が変化すると推察する。水の場合と異なり、UFB の発生条件を変えた場合の発生密度や粒径の観察手法は潤滑油の場合は非常に少ないが、摩擦低減効果の相関が分れば更なる摩擦低減効果に繋がる可能性がある。

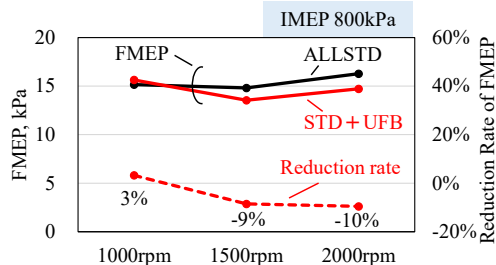


Fig. 5 FMEP comparison in each rpm by using 0W-20 oil ⁴⁾

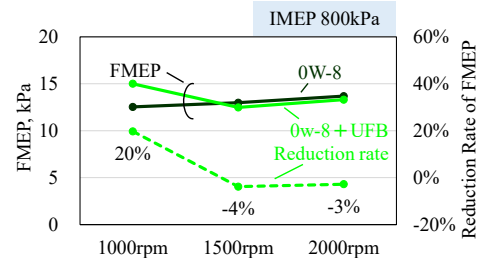


Fig. 6 FMEP comparison in each rpm by using 0W-8 oil ⁴⁾

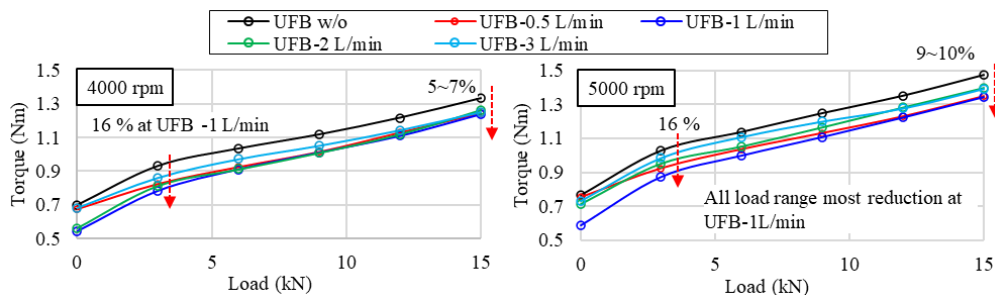


Fig. 7 Friction reduction effect by changing UFB generating condition

3. おわりに

流体潤滑領域での摩擦低減効果は主には低粘度化や低温—高温領域でのフラット粘度化等が代表的な手法である。ファインバブルを潤滑油に導入する場合は、今回の実験結果のようにエンジンの回転数や負荷によって摩擦低減効果が異なり、加えて潤滑油の粘度や表面性状(粗さ)も最適値が存在する傾向が得られている。UFB を積極的に潤滑油に供給する場合、発電機等のように最高熱効率点での運転が主になるような運転条件の際は、この運転条件で最大の摩擦低減効果が得られる条件を設定することで 10%を超える摩擦低減効果が得られる可能性もある。

謝辞

この成果は、自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施した助成事業(JPNP21014)の結果得られた。また、本実験における潤滑油はENEOS 株式会社から提供を受け、装置は安斉管鉄・安斉氏、ファインテック東京・南部氏の協力を得た。深く感謝いたします。

文献

- 1) Nakagawa, M., Kioka, A., Tagomori, K. : Nanobubbles as friction modifier, Tribology International, vol.165, (2022), 107333.
- 2) 堀場海・三原雄司・岩田拓海・石橋優汰・福田将也・及川昌訓: 超微細孔式によるナノバブルを含むエンジン油がピストン系摩擦損失低減に与える効果, トライボロジー会議 春 予稿集 (2024) A4.
- 3) 星野秀介・堀場海・岩田拓実・三原雄司・及川昌訓: ウルトラファインバブルを含むエンジン油がエンジン軸受の摩擦低減に与える効果, 自動車技術会 春季大会 予稿集 (2025) 文献番号 20255270.
- 4) 堀場海・三原雄司・星野秀介・岩田拓海・及川昌訓: ウルトラファインバブルを含むエンジン油がピストン系摩擦損失低減に与える効果, 自動車技術会 春季大会 予稿集 (2025) 文献番号 20255269