

エジェクタ式マイクロバブル混入燃料による ディーゼルエンジンの燃焼改善*

中武靖仁^{*1}，渡邊孝司^{*2}，江口俊彦^{*3}

Combustion Improvement for Diesel Engines with Ejector-Type Micro-Bubble Mixed Fuel

Yasuhito NAKATAKE^{*4}，Takashi WATANABE and Toshihiko EGUCHI

^{*4} Kurume National College of Technology Dept. of Mechanical Engineering
Komorino 1-1-1, Kurume, Fukuoka, 830-8555 Japan

We studied on combustion improvement for diesel engines by using the fuel that mixed the Micro Bubble (MB : micro order bubble) with ejector-type micro-bubble generator which was the small size that was able to be installing in an actual engine.

Ejector-Type Micro-Bubble Generator (EMBG) has a smaller size ($\phi 21\text{mm}$, $L=33\text{mm}$) than other generators and enough performance. The results showed that an improvement of specific fuel consumption, a decrease in the density of the exhaust smoke and the improvement of the charging efficiency, etc. were admitted by mixing the micro bubble into the fuel. It is guessed that combustion was promoted and improved by a physical and chemical action in mixing the micro bubble into the fuel.

Key Words : Diesel Engine, Fuel, Micro-Bubble, Ejector, Dissolved Oxygen

1. 緒 言

京都議定書あるいは東京都の公害条例の施行により地球環境への関心が高まる中で、近年の原油価格の高騰から、再び自動車の低燃費化への関心が高まってきている。ディーゼルエンジンは、欧米ではガソリンエンジンと比較して燃費がよく経済的で、しかも耐久性も良いことから、環境に優しい高級なエンジンとして人気が高い。しかし、日本ではディーゼルエンジンの排気ガスによる環境や健康被害が大きな社会問題となっており、あまり良いイメージがない。特に、首都圏においてディーゼルエンジンから排出される NO_x や黒煙、PM の低減が主題になっているが、これら有害排出物のトレードオフの関係が避けられないのが現状である。

従来より、燃料に添加物を加えるなどディーゼルエンジンの燃焼を改善し、有害排気物質を同時に低減する研究が行われている。著者の一人はシラス多孔質ガラス (SPG) 膜を用いた微粒化単分散エマルジョン燃

料により、これの同時低減のみならず燃料消費率の低減も可能になったことを報告した⁽¹⁾。

また、近年、マイクロバブル (超微細気泡) は優れた物理的、化学的性質を持つことから、カキや帆立貝などの海産物の養殖、汚水や汚染土壌の浄化などの環境分野、船舶の抵抗低減化、ペットの洗浄、特に、最近では、医療への応用が期待されるなど様々な分野ですでに利用、あるいは応用が期待されている⁽²⁾。しかし、これまでの研究における供試媒体には、水、海水あるいは汚染水などを対象としており、本研究で対象とするような燃料油に適用された研究はみられない。マイクロバブルとしてではなく、燃料に予め空気を混入させる、すなわち燃料中の溶存酸素量を高めることで燃焼を改善させる研究⁽³⁾⁽⁴⁾はあるが装置の複雑さ、ならびに使用電力量などの問題から、期待できる効果が得られていない。

そこで、本研究では、マイクロバブルを燃料に混入する装置の大きさが、実車への搭載が可能なほど超小型であり、しかも小動力であるエジェクタ - 式マイクロバブル発生器を用いて、マイクロバブル混入燃料を

*1 機正，久留米高専 (〒830-8555 福岡県久留米市小森野 1-1-1)

*2 自正・機正，久留米工業大学

*3 オーラテック(株)

E-mail: nakatake@kurume-nct.ac.jp

用い、ディーゼルエンジンの燃焼改善、すなわち燃料消費率、ならびに排気ガス特性を同時に向上させることを目的とする。

2. マイクロバブル

2・1 特性 マイクロバブルとは、直径が数十 μm 以下の小さな泡を総称している。これまでの研究⁽²⁾によると、主に以下の特性が報告されている。

(1)気泡同士の合体や吸収が起こらず、単一気体のままで水中に長時間留まり、その寿命は比較的長い。

(2)浮上速度が極めて遅いため、水平方向への拡散性に優れている。

(3)水中に長時間留まり、単位体積当りの気泡表面積が大きいため、水に溶けやすい。

(4)電氣的に帯電しているため、水中浮遊物に対する吸着性を持つ。

以上のような特性から様々な分野で利用されている。本研究では、上記(3)の特徴である燃料液中への溶存酸素量の増加、(4)の特徴である気液界面に生成された OH^- 、 H^+ ラジカルの含有が、ディーゼルエンジンの燃焼を促進、すなわち改善することを期待する。

2・2 発生装置の種類 マイクロバブルの発生器には、用途・特性など様々なタイプのものがある^{(2),(5)}。以下に、それぞれのタイプと簡単な原理、および特徴について列挙する。

(a)エジェクタタイプ 気体と液体が共存する状態を乱流にして、気体をせん断するように気泡として分離する。超低压で生成可能である。

(b)キャピテーションタイプ 液中の溶存空気を析出させ、気泡核を気泡に成長させる。低压で生成可能である。

(c)旋回タイプ せん断による手法で、激しい流れの中に気体を吹き込んで気体を引きちぎって気泡を細かくする。通水口径が大きいため廃水処理などに適する。閉塞はしない。

(d)加圧溶解タイプ 加圧して気体をより多く溶解した状態からキャピテーションなどを用いて発生させる。低压、濁水に対応できる。溶存酸素量 0 の淡水から過飽和水を 1 パスで生成することができる。

(e)超音波による手法 超音波を与えることにより気泡を加振させて分裂させる。細かい気泡を生成できる。

(f)衝撃波による手法 ベンチェリ管による衝撃波を用いて発生させる。

また、表 1 に各種マイクロバブル発生器の中で、代表的な上記の(1)~(4)の発生器について最低作動圧、流量範囲および通水口径をまとめて示す⁽⁶⁾。

Table 1 Features of micro-bubble generator by four types

Type	Adjusting liquid	Minimum operational pressure [MPa]	Minimum flow rate [L/min] (Pipe diameter [mm])
(a)	Seawater/wastewater	0.01	0.3 (0.5 ~ 10.0)
(b)	Fresh water	0.07	2.0 (1.2 ~ 3.0)
(c)	Seawater/wastewater	0.03	10 (10 ~ 50)
(d)	Fresh water	0.15	1.0 (2.0 ~ 7.0)

Type (a): Ejector, (b): Cavitation, (c): Swirl, (d): Pressurizing dissolution

本研究では、1) 実機に搭載可能な小型サイズ、2) 効率が良い、すなわち消費動力が少なく、しかも細かいサイズのバブルを高い数密度で生成することができることを条件に、表 1 より、タイプ(a)のエジェクタ式のマイクロバブル発生器を採用した。

2・3 エジェクタ-式マイクロバブル発生器 (EMBG) によるマイクロバブル混入燃料の作成方法

図 1 にエジェクタ-式マイクロバブル発生器 (EMBG) の外観写真を示す。本発生器は、外径 21mm、長さ 33mm の大きさで、真鍮製である。図中、左側が軽油の入口、上側が空気の入口、右側がマイクロバブル混入軽油の出口である。

図 2 に概略構造図を示す。本発生器はエジェクター効果、すなわちノズル(絞り)を用い、そこから軽油を高速に噴出させ、その出口付近に生じた負圧領域に引き込まれた空気柱を、噴出してきた軽油の乱流混合、ならびにせん断機構により気泡化する。

図 3 にマイクロバブル混入燃料の作成方法の概略を示す。本研究で使用したエジェクタ-式マイクロバブル発生器の最低作動流量は、表 1 に示す様に 0.3L/min であり、供試機関の実験に必要な軽油の消費量 6 ~ 40cc/min と比較して、8 倍から 50

倍程度大きい。そのため、図3に示すようなバイパス経路を設け、EMBGを通ったほとんどの軽油はバイパス流路へ行くようにバルブで調節し、一部のマイクロバブル混入燃料を供試機関へ導いた。さらに、バイパス経路の設置は、EMBGが1パス、すなわち軽油が1回の通過ではバブル混入量が少ないため、混入量を多くする役目もなしている。

図4にマイクロバブルを混入する前と混入した後の軽油の写真を示す。この観察は透明なポリカーボネイト製の容器内で循環させながら行った。混入前は薄緑色に透明であるが、混入後は乳白色になっていることがわかる。

2・4 溶存酸素量と粒径分布

溶存酸素(DO)は、液体の温度が上昇するほど小さくなり、また、軽油の飽和溶存酸素量が不明であったため、軽油中の溶存酸素量は、軽油と同じ温度に対する水の飽和溶存酸素量の比、すなわち式(1)で定義される相対溶存酸素量 DO_R で整理した。

$$DO_R = \frac{\text{軽油中の溶存酸素量}}{\text{水中の飽和溶存酸素量}} \quad (1)$$

なお、軽油中の DO の計測には、有機溶媒用 DOメータ(ポラログラフ方式 DO 電極)を用いた。

図5にEMBGで発生した空気自吸部の負圧をゲージ圧で-70kPaから-40kPaまで10kPa毎に変化させた場合における相対溶存酸素量の経時変化を示す。なお、黒丸はMBを混入しない軽油の場合である。本図より、EMBGからMBを混入直後、 $DO_R=1.6\sim 1.8$ 程度であり、本数値が軽油中の飽和値に相当するものと推定される。時間が経過するに従い、多少の増減はあるものの、徐々に減少し、90分を経過すると、 $DO_R=1.1\sim 1.4$ 程度となる。

空気自吸部の負圧の差異で比較すると、明確な差は認められないものの、真空度が高い、すなわち-70kPa、-60kPaの方が DO_R が高い結果となっている。これは、真空度が高い方が吸込まれる空気の流量が少なく、より細かい気泡が軽油中に混入し、 DO_R が高くなったものと考察される。また、時間の経過とともに DO_R がばらつく理由は、気泡の上昇、ならびにDO計の計測のばらつきによるものと考えられる。

図6に、EMBGにより生成したバブルの粒径分布を示す⁽⁶⁾。本測定媒体は軽油ではなく水の場合であり、ここでは参考までに示す。測定には、

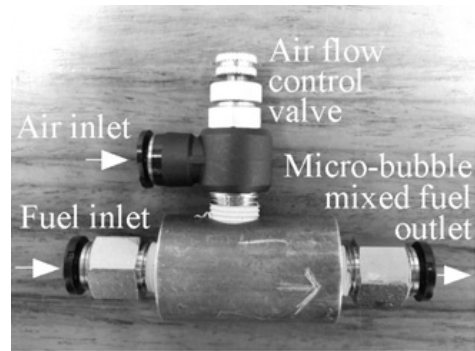


Fig. 1 Appearance of the ejector-type micro-bubble generator (EMBG)

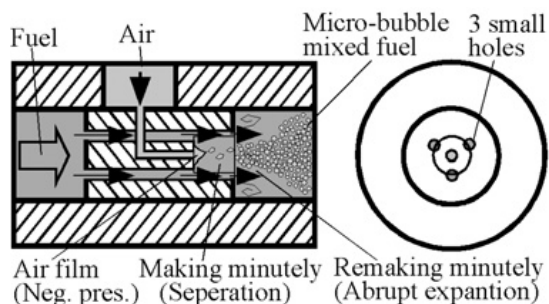


Fig. 2 Schematic diagram of the EMBG ($\phi 21\text{mm}$, $L=33\text{mm}$)

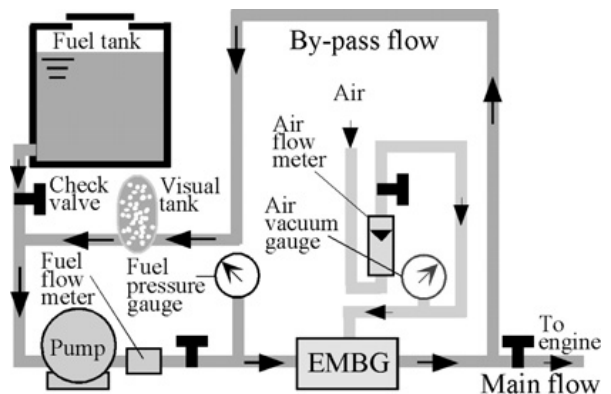
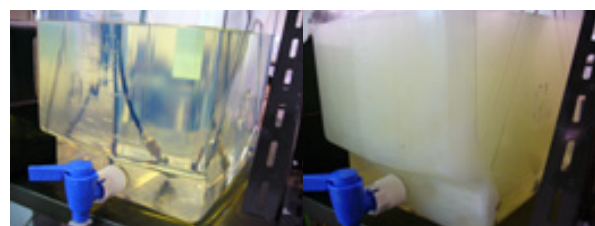


Fig. 3 Method of making micro bubble mixed fuel



(a) before (b) after

Fig. 4 Appearance before/after micro-bubble mixed gas oil

バッチ式レーザ/散乱式粒度分布測定装置を使用した。粒径が $0.1\mu\text{m}$ 辺りに集中しており、非常に細かな気泡が検出されていることがわかる。この理由としては、それより大きな気泡は測定装置が、バッチ式であったため、検出されるまでに時間を要し、その間に気泡が上昇したためと推察される。

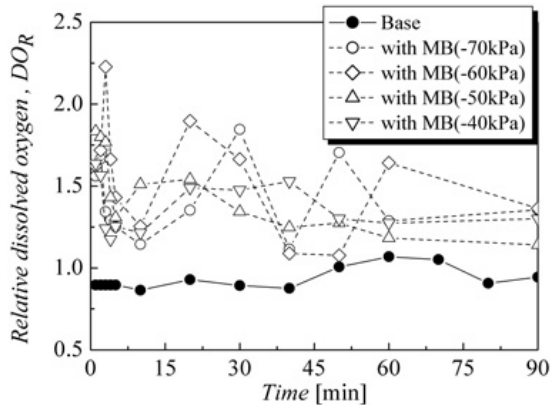


Fig. 5 Time variation of dissolved oxygen in gas oil

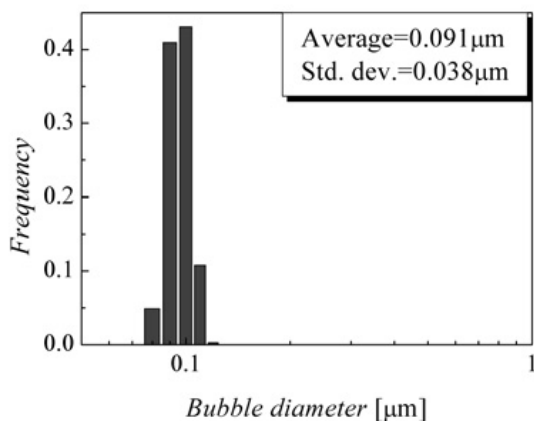


Fig. 6 Bubble diameter distribution from in water from EMBG

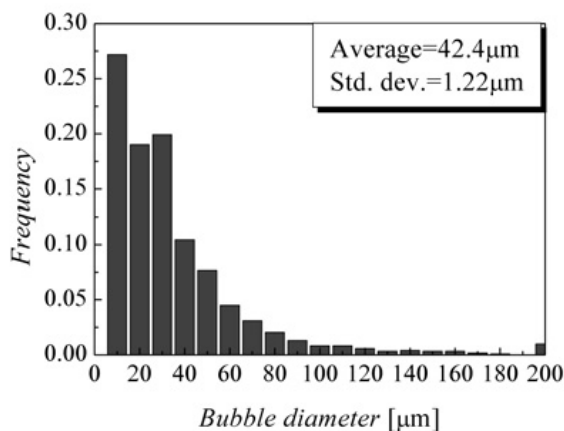


Fig. 7 Bubble diameter distribution from in water from EMBG

図7にEMBGを用い、連続式で気泡粒径を測定した例を示す。パブルの直径はCCDカメラでパブルを撮影し、その面積より面積等価直径として求めている。5から $15\mu\text{m}$ の間で出現頻度27%をピークに粒径が大きくなるに従い、徐々に出現頻度が低下していることがわかる。25 μm 以下が46%、35 μm 以下が66%を占めており、算術平均は $42.4\mu\text{m}$ である。図6と比較すると、EMBGから連続的に粒径を測定すると大きな粒径のものが検出されていることがわかる。

マイクロバブルは水中よりも海中の方が安定して、細かな粒径のものができやすいことが報告されている。本研究で対象とする軽油においても、目視観察、ならびに粘度、表面張力などの物性値から、水中よりも細かなバブルが生成しているものと予測される。

3. 機関性能実験および方法

3・1 実験装置 実験装置はディーゼル機関総合性能試験装置であり、水冷渦電流式動力計： $1\phi 200\text{V}$ 、最大吸出力： $30\text{PS}/6600\text{rpm}$ 、最大吸トルク： 17.9kgfm 、腕の長さ： 0.3581m 、荷重検出方式：台秤方式である。

表2に供試機関の仕様を示す。供試機関は水冷式単気筒直噴ディーゼル機関（クボタMB改造）である。

Table 2 Specifications of test engine

Combustion chamber	D.I.
Cycle	4
Number of cylinder	1
Bore & stroke	$\phi 100 \times 150 \text{ mm}$
Displacement volume	$1.178 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Compression ratio	17.0/1
Output power	7.36kW/1000rpm
Nozzle opening pressure	20.0 MPa
Injection timing	20.0 ° BTDC

また、図8に示す8箇所のシリンダー壁の位置に、シリンダー壁温を測定し、充填効率を評価するための熱電対を埋め込んだ。

3・2 排気ガス分析装置 方式はダイレクト測定、同一サンプリング、5成分同時分析である。測定原理は CO/CO_2 ：非分散型赤外線吸収（NDIR）
 THC ：加熱型水素炎イオン検出法（H-FID）、
 NO/NO_x ：加熱型化学発光法（H-CLD）、測定範囲は CO ：0-100,0-3,000ppm、 CO_2 ：0-16%、 THC ：0-50,000ppm/9step、 NO/NO_x ：0-5,000ppm/6step、応

答速度 1.5-2.0sec, 直線性, ドリフト, ノイズ: $\pm 1\%$ F.S.以下, 再現性: $\pm 0.5\%$ F.S.以下である.

3.3 実験方法 エンジン回転数 N を 1,000 rpm で一定にして, 負荷を大気修正の正味(軸)平均有効圧力 $P_{mec} = 0.1 \sim 0.7\text{MPa}$ (0.1 毎) におけるエンジンの総合性能を測定し, さらに排気ガス分析を比較実験した.

4. 実験結果および考察

図9にエンジン回転速度 1000rpm 一定におけるマイクロバブル混入燃料が機関性能に及ぼす影響を示す. 図中, 下から左縦軸/右縦軸より, 正味燃料消費率(BSFC), 充填効率(η_c), エンジン騒音(Noise), 黒煙濃度(Smoke), 排気ガスの温度(T_{eg}), 正味炭化水素濃度(BSHC), 正味一酸化炭素濃度(BSCO), 正味窒素酸化物濃度(BSNO_x), 吸気側基準空気過剰率(λ_s), ならびに排気ガス側基準空気過剰率(λ_e)を示す. また, 図10にシリンダーライナーの温度分布を示す. 図中 印の軽油を基本に, 印のマイクロバブル入りとのエンジン性能, および排気ガス特性の比較を下記に示す.

正味燃料消費率(BSFC)は平均 10%の減少率を示した. 特に, 高負荷域での減少が顕著であり, 最大 27%の減少率である. これは, マイクロバブルの混入により燃焼が促進され, 短時間で燃焼が完結して, 膨張比の増加のため有効ストロークが向上したためと考えられる. これは, 図10のシリンダライナー温度分布から, マイクロバブルの混入により, 正味平均有効圧力 (P_{mec}) の上昇に対して, TDC から BDC に至って一様に 10~22K 程, シリンダライナ壁面の温度低下が見られ, この事実はマイクロバブルの混入により充填効率が 5%程, 向上していることを示している.

マイクロバブルの混入によって, 充填効率の上昇による吸気側基準空気過剰率(λ_s)の上昇, ならびに軽油中の含有酸素濃度の向上による排気ガス側基準空気過剰率(λ_e)が向上している事実からも燃焼改善に寄与していることが理解できる.

さらに, マイクロバブルの混入により, 軽油の粘度の低下, 噴霧液滴の微粒化の促進などの物理的效果, 含有酸素量と含有ラジカル量の増大などの化学的效果が燃費向上につながったと考えられる.

エンジン騒音(Noise)の増加は最大で 0.8dB・A であった. これは, マイクロバブルを混入することにより, 最大燃焼圧力の上昇と燃焼時間の短縮に伴い, 圧力上昇率が増加したためと推測される.

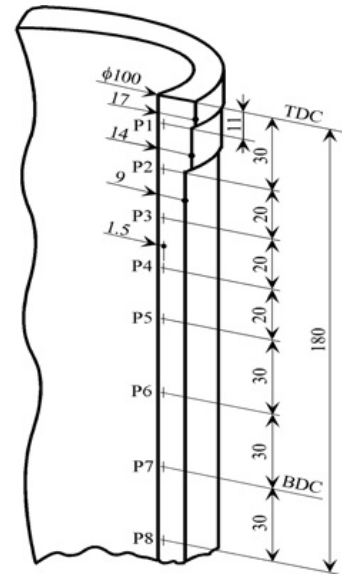


Fig. 8 Thermo-couple location in cylinder liner

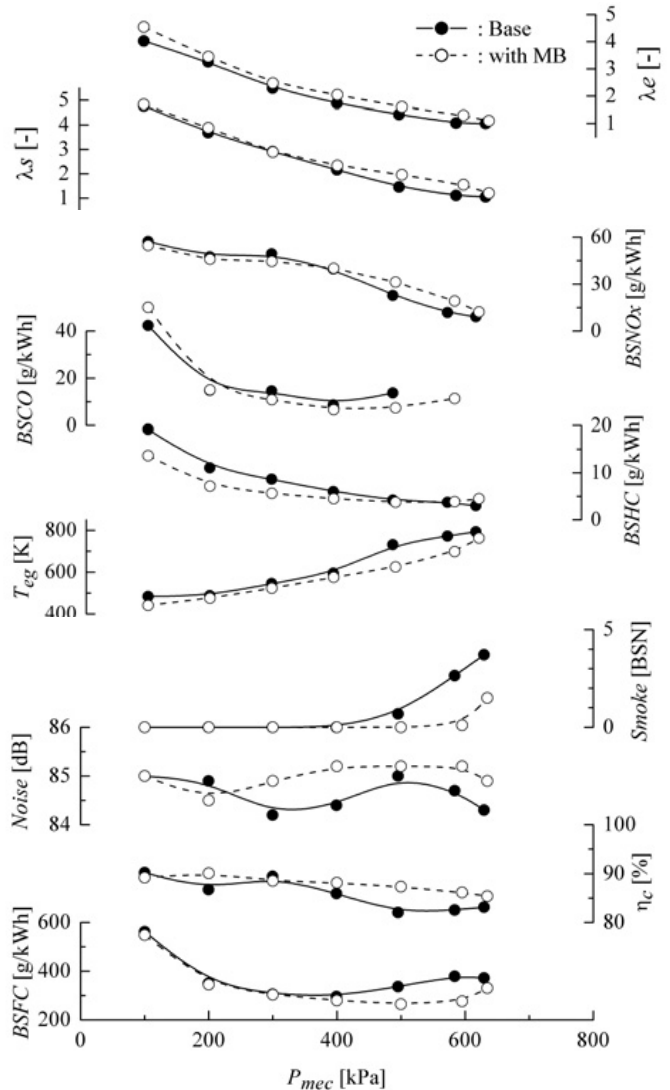


Fig. 9 Effect of micro-bubble mixed gas oil on engine performance

黒煙(Smoke)は、最大で2.5BSNの減少であるが、検出限界以下の場合があった。これは燃料消費率と同様な理由で、マイクロバブルの混入により燃焼が促進したものと推察される。黒煙が減少したことより、PMの低減も予想される。

マイクロバブルの混入により、正味炭化水素濃度(BSHC)と正味一酸化炭素濃度(BSCO)は低負荷に僅か

に増加の傾向を示したが、中、高負荷域ではほとんど有意差は見られなかった。また、正味窒素酸化物(BSNO_x)はマイクロバブルの混入の影響は見られなかった。なお、NO_xの低減についてはマイクロバブルの混入に加えて微粒化単分散エマルジョン燃料を混合することにより同時低減、および燃費の向上が期待できる。

5. 結 言

マイクロバブル混入燃料によりディーゼルエンジンの燃焼を改善することを目的に実験的に、比較・検討した。本研究の結果は以下のように要約できる。

- (1) エジェクタ - 式マイクロバブル発生器は、小型、小動力でしかも性能も優れており、実車への搭載が可能である。
- (2) マイクロバブル混入燃料は、燃焼速度を向上させ、仕事を短時間で完了するため排気ガス温度、シリンダー壁温を低くし、充填効率を上げることにより、燃費を平均で10%、最大で27%向上させることができる。
- (3) マイクロバブル混入燃料は燃焼を促進させる作用があるため、黒煙濃度を最大で検出限界以下まで低減することができる。

今後は、ディーゼルエンジンの燃焼改善に対する、マイクロバブル混入燃料の粘度の低下、あるいは噴霧液滴の微粒化の促進などの物理的效果、含有酸素量、あるいは含有ラジカル量の増大などの化学的效果を各要素ごとの検証を行う予定である。

文 献

- (1) Watanabe, T. and Tamura, I., Diesel combustion with Microscopic monodispersion emulsified fuel using a membrane for multi porous Glass, *Proceeding of the 19th Internal Combustion Engine Symposium*, (2006).
- (2) Ueyama, S. and Miyamoto, M., The world of micro-bubbles, *Industrial investigation committee*, (2006).
- (3) Nakahara, H., Study on the air-mixed fuel injection in a diesel engine, *Proceeding of JSAE*, 912,(1991), pp. 3.5-3.8.
- (4) Ohhashi, K. and Maruyama, S., Reduction of smoke emission in Diesel engines by injection of air-solved fuel, *Reports of Mech. Eng. Lab.*, Vol.46, No.1 (1992).
- (5) Serizawa, A., Inui, T., Yahiro, T. and Kawara, Z., Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe, *3rd European-Japanese Two-Phase Flow Meeting*, (2003), pp. 21-27.
- (6) Eguchi, T., Generation technology of micro-bubble by four types, *Aura-Tech HP*, (2005), <http://www.kumin.ne.jp/aura-tec/type-betsu.htm>

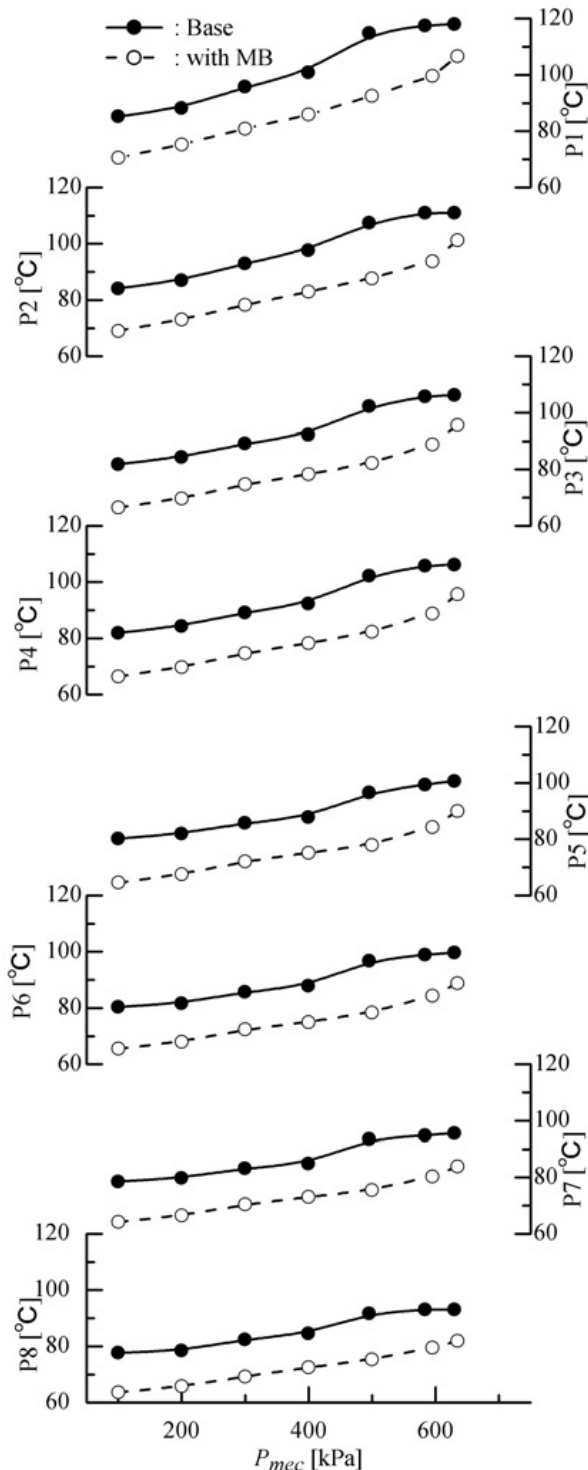


Fig. 10 Effect of micro-bubble mixed gas oil on cylinder liner temperature