

【論文】

Low-SAPS低粘度ディーゼルエンジン油の 全摩擦損失低減効果に関する研究

副島 光洋 * 長藤 将史 **

Study on Effect of Low-SAPS Low-Viscosity Diesel Engine Oil on Reduction of Total Friction Loss

Mitsuhiro Soejima Masashi Nagafuji

Abstract: Diesel engine oils have been refined to be DL-1 class oils or DH-2 class oils lower in sulfated ash, phosphorous and sulfur named as Low-SAPS oils to protect the diesel particulate filter and the deNOx catalyst. The effect of lowering oil viscosity from SAE10W30 to SAE5W30 on the reduction of frictional power loss in a fired and braked engine was examined by measuring the total friction torque directly by the simplified run-out method. The following study results were made obvious. (1) The total friction losses of the SAE5W-30 oils lowered in viscosity are smaller than those of the SAE10W-30 oils. (2) The effect of DH-2 class oil on reducing the friction loss is larger than that of DH-1 class oil.

Keywords: Diesel Engine, Tribology, Friction / Low-SAPS Engine Oil, Friction Loss, Run-out Method, Total FMEP, Multi-grade Oil, Viscosity

1. はじめに

内燃機関とりわけディーゼル機関の性能と信頼性を高めるために、トライボロジー技術の向上すなわち摩擦損失を減らし高効率・高性能化することと焼付き、摩耗ならびにエンジン油劣化を防止し高信頼性・長寿命化することが望まれている^{(1) - (4)}。その中で注目される課題として、低粘度マルチグレード油を適用し摩擦損失を減らして燃費を改善するためのエンジン油の開発がある。しかし、高分子ポリマー粘度指数向上剤を含有するマルチグレード油では、高せん断域における実効粘度が低下し膜厚過小 (Oil Thinning) の問題が起こる。そこで、実働機関における高温高せん断粘度 (HTHS Viscosity) の許容限界を調べ、摩擦調整剤 (Friction Modifier) 等の添加剤配合を検討し、摩擦損失低減の効果が大きくエンジン要素の焼付きや摩耗などの不具合も起こさないエンジン油を開発する必要がある^{(5) - (13)}。

一方、機関運転時にオイル消費し排気ガスと共に排出されるエンジン油中の金属元素、硫黄分などが原因の排気ガス後処理装置すなわちディーゼル粒子状物質フィルター (DPF : Diesel Particulate Filter) の目詰まりや NOx 還元触媒のりん被毒の問題を解決することも望まれている。とくに、エンジン油の Ca スルフォネート, Mg サリシレートなどの金属系清浄分散剤ならびに ZnDTP などの酸化防止剤や摩耗防止剤のような Ca, Mg, P, S などの金属元素および硫黄分を含む添加剤および基油を対象に、低硫酸灰分化, 低りん化や低硫黄化 (Low-SAPS : Sulfated Ash, Phosphorous and Sulfur) する必要がある。すなわち、エンジン油の粘度と添加剤の適正化が急務である^{(14) - (18)}。

本研究では、Low-SAPS 対策油の DH-2 級規格・エンジン油について、その粘度等級が SAE10W-30 と SAE5W-30 の低粘度マルチグレード油を用い、実働ディーゼル機関の全摩擦損失を測定し、それぞれの摩擦損失低減効果を評価した。とくに、機関の負荷、回転速度、冷却水温度などの運転条件と全摩擦平均有効圧力の関係を調べ、従来の粘度等級が SAE10W-30 の CD

* 工学部機械工学科

** 大学院工学研究科機械工学専攻

級や SAE5W-30 の DH-1 級のエンジン油の場合と比較した。その概要を報告する。

2. 実験方法

2.1. 全摩擦損失の測定方法

エンジン全摩擦損失の測定は、既報^{(1), (6), (19)}と同様に、実働ディーゼル機関を渦電流式動力計で制御する台上の実験装置で行った。供試機関は、出力が 8.8kW/2400rpm の小形予燃焼室式ディーゼル機関である。測定の方法は、運転停止法を簡便化した以下のような直接簡便・運転停止法 (Direct and Simplified Run-out Method) である。

実働エンジンの全摩擦損失を測定する方法の一つである運転停止法とは、機関の標準フライホイール装着の状態とそれに付加的に増設フライホイールを装着する状態とに分けて、負荷制動運転中にエンジンの燃料供給を停止し、その直後の機関回転の角減速度 $\dot{\omega}$ をそれぞれ測定し、それら 2 つの角減速度の測定値、増設フライホイールの慣性モーメント、制動トルクなどから摩擦トルクを求める方法である⁽¹⁹⁾。既に、本研究と同一の供試ディーゼル機関を用い、SAE10W, SAE30, SAE50 などの粘度等級が異なるエンジン油を対象に、機関の回転速度、負荷率や冷却水温度を変化させ、運転停止法で測定した全摩擦損失のデータがある^{(6), (12)}。

そこで、それら個々の実験設定条件で得られた摩擦トルクを用い、供試機関の回転慣性モーメント I の値を求め、その値の回転速度 n_e 、シリンダ壁温度 T_c ならびにエンジン油粘度に対する回帰を負荷率の別に調べたところ、図 1 のようになった。図示のように、 I の値が各実験条件で平均値 ($I_{ec}=1.39\text{Nms}^2$) からずれる割合は、回転速度に対し $\pm 0.6\%$ 以下、シリンダ

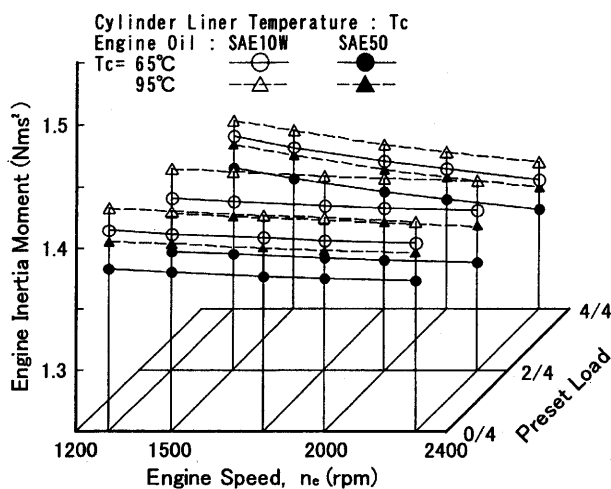


Fig.1 Engine inertia moment

壁温度に対し $\pm 0.9\%$ 以下ならびにエンジン油粘度に対し $\pm 0.9\%$ 以下であり、また負荷率に対しても $\pm 1.3\%$ 以下であり、いずれも無視できるほど小さい。さらに、複数条件の変化による相乗的な平均値からのずれ、すなわち重なり誤差は最大 $\pm 3.6\%$ であり、この種の測定では小さいと言える。したがって、機関の回転慣性モーメントを平均値 I_{ec} 一定とし、増設フライホイールの脱着を伴わない標準装備のみの状態で、燃料供給を停止した直後の角減速度 $\dot{\omega}$ の測定値と負荷制動トルク T_b を用い、次式で摩擦トルク T_f を算出し、直接かつ簡便に全摩擦平均有効圧力 P_{ff} (ポンピング損失を含む) を求めた。

$$T_f = -I_{ec}\dot{\omega} - T_b$$

なお試験機関には、シリンダライナ (ピストンリングのピストン行程の上・下死点と中央の位置に計 12 箇所)、主軸受メタルならびにオイルパン内潤滑油の各温度を測定するための熱電対を埋め込んでいる。なお、ピストン・スカート部にはグラファイト・コーティング加工 (厚さ約 10 ミクロン) を施している。

2.2. 供試エンジン油の性状と実験の設定条件

表 1 に、実験に供試したディーゼル機関用エンジン油の性状を示す。粘度等級を SAE10W-30 から SAE5W-30 へ、より低い粘度のマルチグレード油に変更する場合の摩擦損失の低減効果を調べた。なお、DH-2 級規格・エンジン油の SAE10W-30(DH-2)と SAE5W-30(DH-2)は、いずれも Low-SAPS 対策油である。また、従来の CD 級規格・マルチグレード油の SAE10W-30(CD)と DH-1 級規格・低粘度マルチグレード油の SAE5W-30(DH-1)をリファレンス油として供試した。これ

Table 1 Property of test engine oils

Test Oil	SAE	SAE	SAE	SAE
	5W-30 DH-1	5W-30 DH-2	10W-30 DH-2	10W-30 CD
Density at 15deg (g/cm ³)	0.86	0.85	0.86	0.88
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40deg	59.59	56.26	69.63
	100deg	10.25	10.41	10.89
Viscosity Index	161	177	147	144
HTHS Viscosity (mPas)	150deg	3.21	3.10	3.36
Total Acid Number (mgKOH/g)		2.45	2.60	2.60
Total Base Number (mgKOH/g)	HCl	9.71	5.70	5.70
	HClO ₄	13.0	7.50	7.50
Metal Content (ppm)	B	-	83	83
	Ca	4600	2200	2200
	Mg	10	-	-
	Zn	1200	1300	1300
	P	1000	1000	1000
	Mo	49	120	120
	S	-	4300	4300

らの供試エンジン油は、動粘度とHTHS粘度だけでなく、全塩基価(TBN)や含有金属元素量すなわち添加剤の種類や量は互いに異なっている。

各供試エンジン油について測定した全摩擦平均有効圧力 P_{if} を比較し摩擦低減の効果を評価した。実験の設定条件は、粘度が低いSAE5W-30油の場合、機関の負荷率(無負荷, 1/4, 2/4, 3/4, 全負荷), 回転速度 n_e (1300, 1500, 1800, 2000, 2300rpm) および冷却水・入口温度 T_w (30, 50, 70°C) を組み合わせた全75点とし、粘度が高いSAE10W-30の場合は、負荷率(無負荷, 2/4, 全負荷), 回転速度(1300, 1500, 1800, 2000, 2300rpm) および冷却水・入口温度(30, 50, 70°C) の全45点などと減数した。

3. 実験結果と考察

3.1. SAE5W-30油の全摩擦損失

図2と図3に、SAE5W-30(DH-1)油とSAE5W-30(DH-2)油の場合の全摩擦平均有効圧力 P_{if} の測定値を示す。DH-1級とDH-2級のいずれの場合も、全摩擦平均有効圧力 P_{if} は回転速度 n_e の増大につれ大きくなり、かつ冷却水温度 T_w の上昇すなわちオイル粘度の低下につれ小さくなる流体摩擦特性を示している。

しかし、エンジン内部の摩擦損失は、ピストン系のようなピストン行程の上・下死点近傍の混合潤滑下の境界摩擦とピストン行程中央の流体潤滑下の粘性摩擦が混在する摩擦損失、軸受系のようなオイル粘性摩擦が主体の摩擦損失、動弁系のような混合潤滑下の境界摩擦主体の摩擦損失など、油膜形成部の粘性摩擦と固体接触部の境界摩擦の合計であり、このオイル粘性摩擦に支配されているような特性は見掛けの特性であると考えられるべきである。

3.2. 全摩擦損失の低減効果

3.2.1. SAE10W-30(CD)油との比較

図5は、SAE5W-30(DH-1)油ならびにSAE5W-30(DH-2)油の場合と図4のリファレンス油SAE10W-30(CD)の場合の全摩擦平均有効圧力 P_{if} の測定値の比較である。図から、SAE10W-30(CD)油に対するSAE5W-30(DH-1)油あるいはSAE5W-30(DH-2)油の全摩擦損失の低減効果について、以下のことが分かる。

図5(a)のように、SAE5W-30(DH-1)油では、その P_{if} がSAE10W-30(CD)油の P_{if} よりやや小さくなり、全摩擦損失の低減効果が認められる。また、低い負荷率、高い回転速度および高い冷却水温度の機関運転時ほど、全摩擦損失の低減効果が大きくなる傾向にある。この摩擦低減効果の主たる理由は粘度等級の差にあるものと思われるが、後述のような添加剤配合の違いの影響が重なった結果であると考えられる。

一方、図5(b)のように、SAE5W-30(DH-2)油とSAE10W-30(CD)油の P_{if} の差は、図5(a)のSAE5W-30(DH-1)

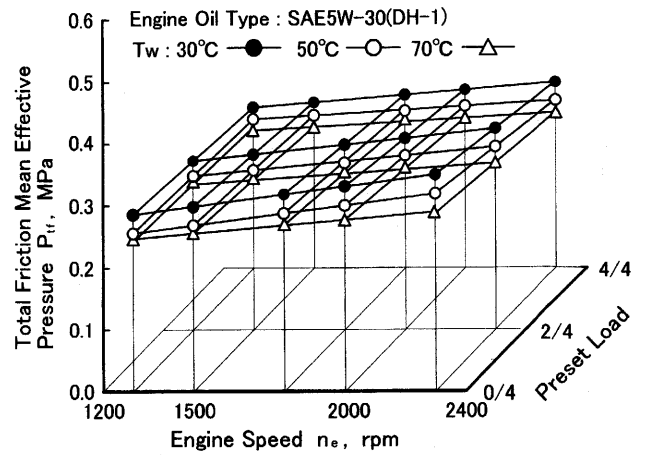


Fig.2 Changes of P_{if} with n_e , load and T_w for SAE5W-30(DH-1) oil

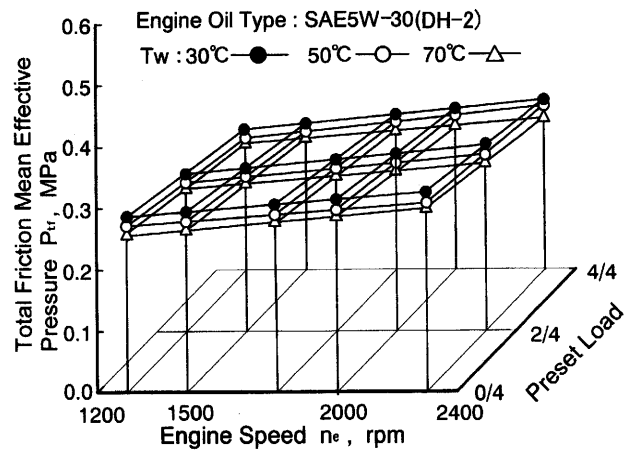


Fig.3 Changes of P_{if} with n_e , load and T_w for SAE5W-30(DH-2) oil

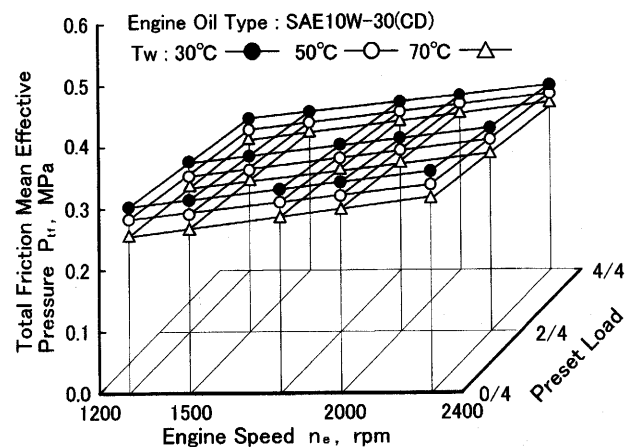


Fig.4 Changes of P_{if} with n_e , load and T_w for SAE10W-30(CD) oil

1)油と SAE10W-30(CD)油の P_{if} の差より大きくなり、全摩擦損失は大きく低減される。とくに、冷却水温度

が低いときに低減の効果は著しい。すなわち、SAE5W-30への低粘度化ならびにDH-2級規格の添加剤配合に伴う相乗的な摩擦低減効果が現れたものとする。

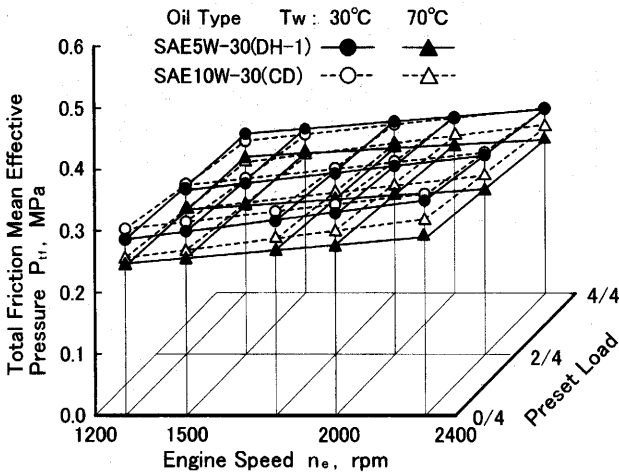
3.2.2. エンジン各部の測定温度

図6に、実験中に計測したSAE5W-30(DH-2)油の場合とSAE10W-30(CD)油の場合のシリンダライナ壁(ピストンリングのピストン行程の中央の位置)の温度を示す。図示のように、測定された温度には、供試エンジン油の違いによる大きな差が認められない。粘度が高く摩擦が大きいSAE10W-30(CD)の方がやや高い温度になると想定したが、実際はそれと異なる結果になった。なお、主軸受メタルの温度とオイルパン内エンジン油の温度の測定値についても、供試エンジン油の違いによる大きな差は認められなかった。

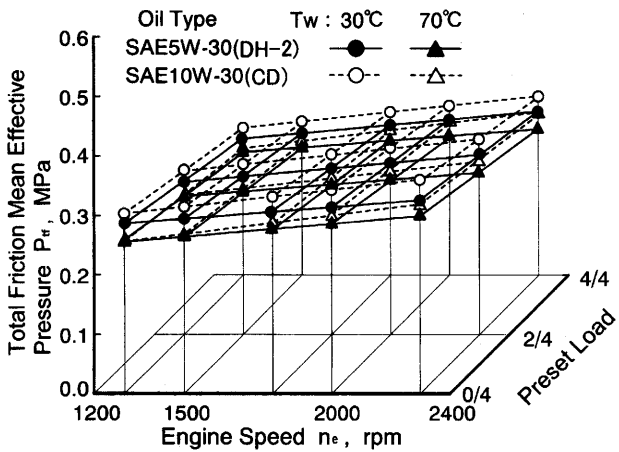
3.2.3. SAE10W-30(DH-2)油との比較

図7は、同じDH-2級規格のSAE5W-30(DH-2)油とSAE10W-30(DH-2)油の全摩擦平均有効圧力 P_{if} の比較すなわち粘度等級の違いの影響を示している。図示のように、全ての回転速度、負荷率ならびに冷却水温度の機関運転時で、低粘度のSAE5W-30(DH-2)油の P_{if} が粘度の高いSAE10W-30(DH-2)油の P_{if} より小さくなり、全摩擦損失が低減されている。また、低い回転速度や冷却水温度の機関運転のときほど、その低減効果が大きくなる傾向にある。

図8の粘度-温度線図に示されているように、SAE5W-30(DH-2)油とSAE10W-30(DH-2)油の間の粘度の差は、低い温度で大きく、高い温度になるほど小さくなる。すなわち粘度指数を高くし、高温高せん断粘度(HTHS Viscosity)が低くなり過ぎないように配慮されている。このようにSAE5W-30(DH-2)油の全摩擦損失がSAE10W-30(DH-2)油の全摩擦損失より低く



(a) SAE5W-30(DH-1) and SAE10W-30(CD)



(b) SAE5W-30(DH-2) and SAE10W-30(CD)

Fig.5 Comparison of P_{if} for every two test oils

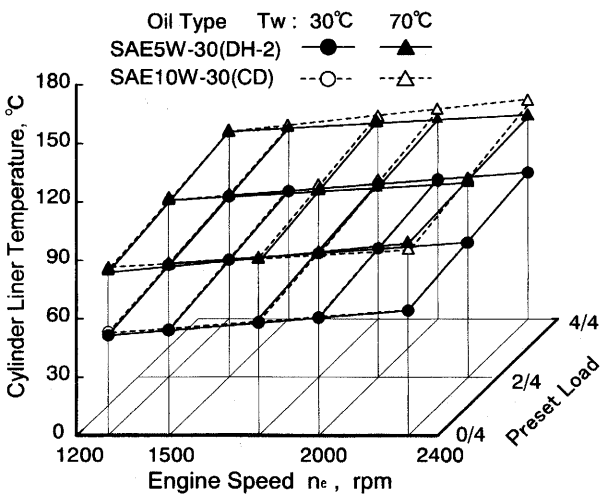


Fig.6 Cylinder liner temperature

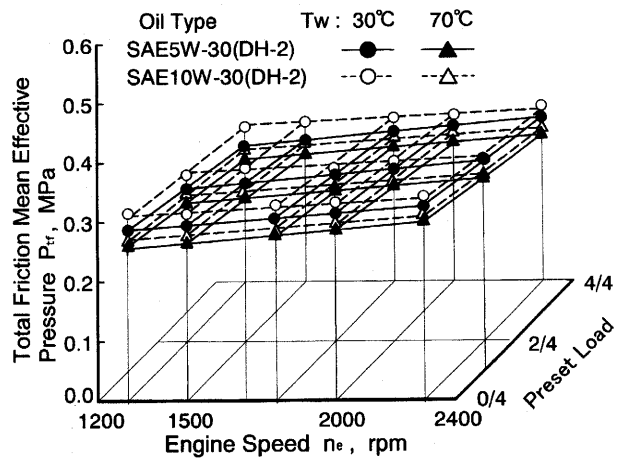


Fig.7 Comparison of P_{if} for two test oils, SAE5W-30(DH-2) and SAE10W-30(DH-2)

なった理由として、粘度-温度特性の設定がエンジン要素の油膜形成部における粘性摩擦の低下をもたらしたことで、表1に示すような組成の添加剤配合で固体接触部における境界摩擦の増大を抑えたことなどを指摘できる。

3.2.4. 全供試エンジン油の比較

図9は、(a) 機関の回転速度 $n_e=1300\text{rpm}$ で冷却水温度 $T_w=70^\circ\text{C}$ のときの比較的低い摩擦損失の場合と (b) $n_e=2300\text{rpm}$, $T_w=30^\circ\text{C}$ のときの比較的高い摩擦損失の場合について、4つの供試エンジン油の全摩擦平均有効圧力 P_{if} を比較したものである。これらの図から、DH-2 級規格の低粘度マルチグレード油 SAE 5W-30(DH-2)の適用により、従来の CD 級の SAE10W-30(CD)油や SAE5W-30(DH-1)の場合あるいは同じ DH-2 級規格の SAE10W-30(DH-2)油の場合に対して、次のような変化が起こり P_{if} は小さくなり、全摩擦損失が低減されるものと解釈できる。

まず第一義的には、粘度等級の SAE10W-30 から高粘度指数の SAE5W-30 への低粘度化に伴い、各エンジン要素の油膜形成部における粘性摩擦の低下分として全摩擦損失は低減される。しかし副次的に、その低粘度化に伴う油膜厚さの減少が原因で増加する固体接触部における境界摩擦の増大を防止する必要性が高まる。そこで、有機 Mo 系・摩擦調整剤などの添加剤の配合により、境界摩擦は減少し、全摩擦損失が低減される。同時に、代替の無灰系分散剤などの適正な添加剤の配合すなわち CD 級から DH 級へ低灰分化し、そのクラスを DH-1 から DH-2 へと更に低灰分化、低リン化および低硫黄化すること、すなわち本研究で対象とした Low-SAPS 対策すなわち DH-2 級規格の適用

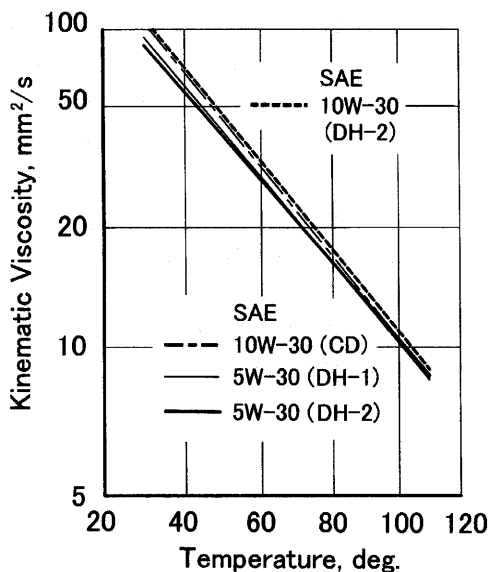
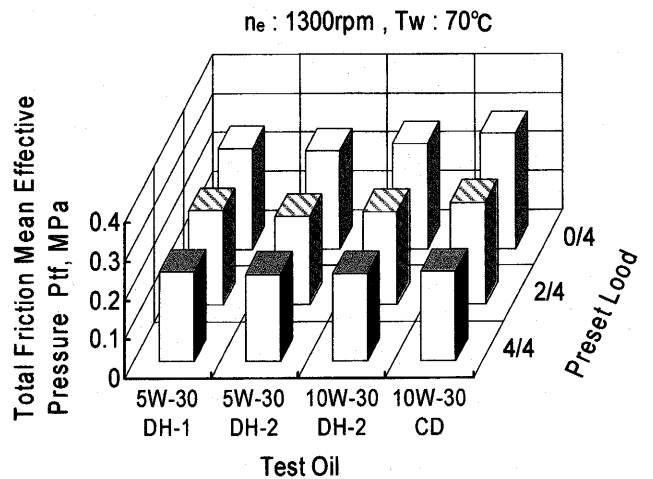
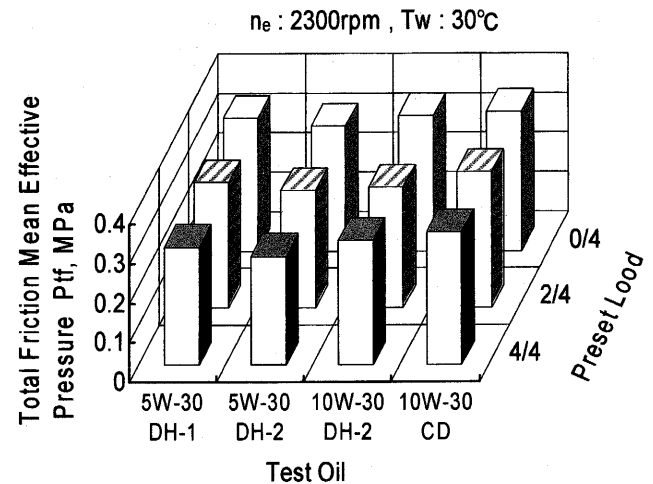


Fig.8 Changes of viscosity with temperature



(a) $n_e=1300\text{rpm}$ and $T_w=70^\circ\text{C}$



(b) $n_e=2300\text{rpm}$ and $T_w=30^\circ\text{C}$

Fig.9 Comparison of P_{if} for four test oils

に伴い、低粘度マルチグレード油の全摩擦損失低減効果は一段と大きくなる。

4. 結 論

ディーゼル機関エンジン油の排ガス後処理装置保護のための低硫酸灰分・低リン・低硫黄化すなわち Low-SAPS 対策油としての DH-2 級規格・SAE5W-30 低粘度マルチグレード油について、その全摩擦損失の低減効果を調べるために、実働機関の直接簡便・運転停止法により全摩擦トルクを測定し全摩擦平均有効圧力を求め評価した。とくに、機関の回転速度、負荷率、冷却水温度などの運転条件と全摩擦平均有効圧力の関係を調べ、従来の CD 級 SAE10W-30 油や DH-1 級 SAE5W-30 油あるいは同じ DH-2 級 SAE10W-30 油の場合と比較した結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) SAE5W-30(DH-1)油や SAE5W-30(DH-2)油の全摩擦平均有効圧力は、低い冷却水温度すなわちオイル粘度が高く機関の回転速度が高くなるほど増大し、従来の SAE10W-30(CD)油の場合と同じように、見掛け的にオイル粘性摩擦の影響が支配的な特性となる。

(2) 供試オイルによる各部温度の違いは極めて小さい。

(3) SAE5W-30(DH-1)油の全摩擦平均有効圧力は、機関の低い負荷率、高い回転速度あるいは高い冷却水温度の運転時に、SAE10W-30(CD)油の場合より小さくなり、低粘度化による全摩擦損失の低減効果が認められる。

(4) SAE5W-30(DH-2)油の全摩擦平均有効圧力は、機関の全ての負荷率、回転速度および冷却水温度の運転時に、SAE10W-30(CD)油の場合より小さくなり、明らかな全摩擦損失の低減効果が認められ、SAE5W-30(DH-1)油の場合よりも摩擦低減効果が大きい。とくに低い冷却水温度のときに、その低減効果は著しく大きい。

(5) したがって、エンジン油の粘度等級を SAE10W-30 から SAE5W-30 へと低粘度化すると共に、その規格を CD 級から DH 級へ、そのクラスを DH-1 から DH-2 へと低硫酸灰分・低リン・低硫黄化すなわち Low-SAPS 対策を施すことにより、低粘度マルチグレード油の全摩擦損失低減効果は一段と大きくなる。

なお、本研究に際し平成 17 年度科学研究費補助金(基盤研究 C, 課題番号 16560129)を活用したことを附記する。

参 考 文 献

- (1) Wakuri, Y., et al. : Studies on Friction Characteristics of Reciprocating Engines, SAE Paper 952471
- (2) Lechner, G., et al. : Engine Oil Effects on the Friction and Emission of a Light-Duty 2.2L Direct Injection Diesel Engine, Part 1- Engine Test Results, SAE Paper 2002-01-2681
- (3) Comfort, A. : An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses and Lubricant Properties Affecting Fuel Economy - Part1, SAE Paper 2003-01-3225
- (4) Wakuri, Y., et al. : Studies on Tribology between Cylinder Liner and Piston Ring in Marine Diesel Engine : Past 30 Years, Proc. of the 24th CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, p.1-16 (2004)
- (5) Monaghan, M. L. : Engine Friction Change in Emphasis, Proc. Instn Mech. Engrs, Vol.202, No.D4, p.215-226 (1988)
- (6) 副島, ほか 5 名 : エンジン全摩擦損失に関する研究 - マルチグレード油の影響, 自動車技術会論文集, Vol.30, No.4, p.23-29 (1999)
- (7) Korcek, S., et al. : Additive Systems for Engine Oils - Future Challenges, Proc. of Int. Tribology Conf. Nagasaki, p.71-78 (2000)
- (8) Nagakari, M., et al. : Formulation Effects on Engine Oil Performance, Proc. of Int. Tribology Conf. Nagasaki, p.189-194 (2000)
- (9) Zalar, F. V., et al. : Heavy Duty Engine Lubricants for a Global Market - Formulating a Global Additive Technology, SAE Paper 2000-01-1984
- (10) Froelund, K., et al. : Impact of Lubricant Oil on Regulated Emissions of a Light-Duty Mercedes-Benz OM611 CIDI-Engine, SAE Paper 2001-01-1901
- (11) Boffa, A. B. and Hirano, S. : Oil Impacts on Sequence VIB Fuel Economy, SAE Paper 2001-01-1903
- (12) Hamatake, T., et al. : Some Studies on the Tribology of Diesel Engines, Proc. of the 23rd CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, p.1426-1440 (2001)
- (13) McGeehan, J. A., et al. : API CI-4 : The First Oil Category for Diesel Engines Using Cooled Exhaust Gas Recirculation, SAE Paper 2002-01-1673
- (14) 内藤康司・山崎 剛 : 超低硫黄ディーゼルエンジン油の技術検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.70-03, p.23-26 (2003)
- (15) Arrowsmith, S. : Challenges for Future Heavy Duty Diesel Lubricant Development, SAE Paper 2003-01-1964
- (16) Wilby, I. and Fisher, A. : Development of Future Low Emission Engine Oils, SAE Paper 2003-01-1990
- (17) Givens, W. A., et al. : Lube Formulation Effects on Transfer of Elements to Exhaust After-Treatment System Components, SAE Paper 2003-01-3109
- (18) Kurihara, I., et al. : Development of Low-Ash Type Heavy Duty Diesel Engine Oil for After-treatment Devices, SAE Paper 2004-01-1955
- (19) 副島, ほか 4 名 : 内燃機関全摩擦損失の測定方法に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編), 60 巻, 573 号, p.346-351 (1994)