

【論文】

ディーゼル機関全摩擦損失の低減に関する研究

副島 光洋 * 松下 祐樹 ** 坂口 慎吾 ***

Studies on Reduction of Total Friction Loss for Diesel Engine

Mitsuhiro Soejima Yuuki Matsushita Shingo Sakaguchi

Abstract: In order to prevent the global warming the improvement of fuel economy for internal combustion engines should be more thoroughly done in both technological fields of the combustion and the tribology. In this paper some experimental study results on the reduction of frictional power loss in a practical diesel engine are described. The total friction loss has been measured by the run-out method for fired and braked engines.

The total friction mean effective pressures P_{tf} changing with the engine speed, load rate and cooling water temperature have been examined for following design factors concerned with the piston system and the engine lubricating oil. The effects of the sliding surface roughness or coating of piston components on the reduction of P_{tf} are evaluated, followed by those of the engine oil properties, namely lowering the viscosity of single grade oils, applying the low viscosity multi-grade oils SAE10W30 and SAE5W30. Also, the influence of the oil deterioration on P_{tf} has been examined.

Further, the diesel engine oils have been refined to be DL-class or DH-class oils lower in sulfated ash, phosphorus and sulfur contents formulated as Low-SAPS oils to protect the diesel particulate filter and the deNOx catalyst. Therefore, the influences of the Low-SAPS oils like DH-1, DH-2 and other newly developed oils less in additives ZnDTP have been examined. Likewise, the effects of lowering the viscosity of the Low-SAPS oils on the reduction of P_{tf} are evaluated.

Keywords: Diesel Engine, Frictional Power Loss, Run-out Method, Total Friction Mean Effective Pressure, Piston System, Multi-grade Engine Oil, HTHS Viscosity, Low-SAPS Oil

1. はじめに

地球温暖化の防止など深刻な課題を抱え、内燃機関とりわけディーゼル機関の技術改善策の一つとして、そ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、焼付き、摩耗ならびにエンジン油劣化を防止し高信頼性・長寿命化することなどが望まれている。その中で注目されているものとしては、高粘度指数の低粘度マルチグレード・エンジン油を適用し摩擦損失を減らして

燃費を改善する方策がある。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、高せん断域において実効粘度が低下し膜厚過小 (Oil Thinning) となる問題が起こる。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) 等の添加剤を配合し、摩擦損失低減の効果は大きくエンジン要素各部で焼付きや摩耗の不具合が起こらないようなエンジン油を開発する必要がある⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

ところが一方、エンジン油が機関の運転時に消費され排気ガスと共に排出されるために、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

* 工学部機械工学科

** 大学院工学研究科機械工学専攻 1 年

*** 工学部機械工学科 4 年

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が起こる。その解決には、エンジン油に配合する 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、低りん化ならびに低硫黄化 (Low-SAPS: Low 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強く望まれる状況に変わった (8) - (11)。

本研究では、運転停止法で測定した実働ディーゼル機関 (8.8kW / 2400rpm) の全摩擦損失のデータ (1), (2), (4), (8) を対象に、ピストン系部品の表面の粗さやコーティング, エンジン油の性状や劣化などの各因子が摩擦損失に及ぼす影響を調べた。シリンダとピストンリングの表面粗さやピストン・スカートのグラファイト被覆の有無による全摩擦損失の変化およびエンジン油の SAE30 や SAE5W-30 の粘度等級, CD 級や Low-SAPS 仕様 DH 級の添加剤配合, 機関運転に伴うすす混入劣化汚損などによる全摩擦損失の変化を相対的に比較した結果, 各因子の摩擦損失低減の効果とその機関の負荷率, 回転数, 冷却水やシリンダ壁の温度による変化などが明らかになったので, その概要を報告する。

2. 各要因の全摩擦損失低減効果

2.1. ピストン系部品の表面状態の影響

2.1.1. しゅう動面馴染みの効果 図 1 に, 本研究に供試したディーゼル機関のピストンリング 3 本とシリンダライナのしゅう動面の表面粗さ形状を示す。新品の状態とその数百時間の機関運転

後の状態を較べたものである。しゅう動面は機関運転で馴染み表面粗さが小さくなる。表 1 は, その変化を数値で表したものである。とくに, ピストンリングのしゅう動面は滑らかな丸味を帯びたバレル形状に変化している。

図 2 は, 上述のピストン・スカートなどのピス

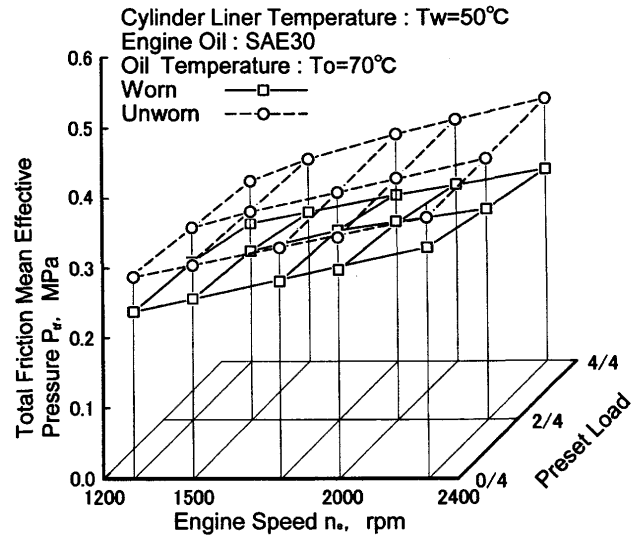


Fig.2 Influence of piston / rings / cylinder exchange on Pfr

Table 1 Sliding surface roughness of piston / rings / cylinder

Unit : μm

Component	Unworn	Worn
Piston Skirt	1.2-1.5	0.5-1.5
Piston Rings	0.7-2.0	0.2-0.4
Cylinder Liner	1.8-2.2	0.8-1.2

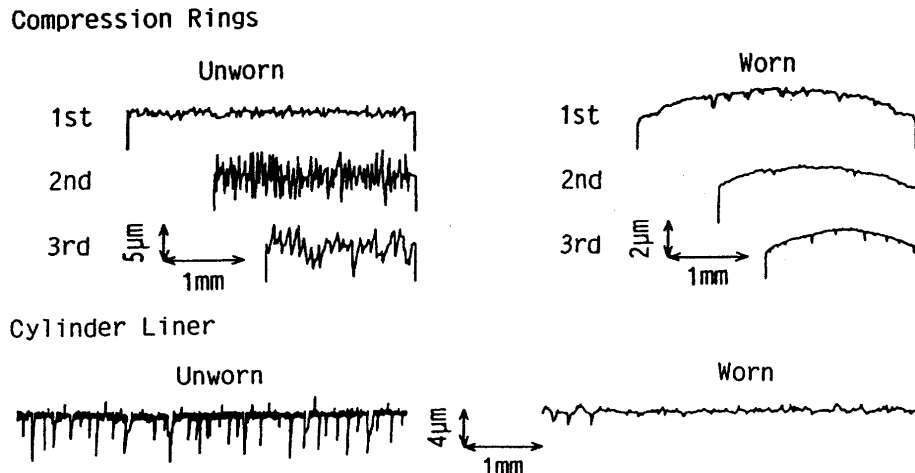


Fig.1 Surface profiles of piston components

トン系主要部品のしゅう動面が新品の状態の場合とそれらが機関の運転で滑らかに馴染んだ場合について、供試機関の実働下の摩擦トルクを運転停止法で測定し得た全摩擦平均有効圧力 P_{tf} の値を比較したものである。供試エンジン油はSAE30油である。

図3は、図2の馴染み前の P_{tf} に対する馴染み後の P_{tf} の減少率を求め、しゅう動面の馴染みによる摩擦損失の低減効果を調べたものである。図示のように、馴染み後の方が馴染み前よりも P_{tf} は20%~30%も減少しており、その効果は極めて大きい。また、高い負荷率の機関運転ほど P_{tf} の減少率は大きくなる。さらに、機関の回転速度 n_e が減少率に及ぼす影響は小さいが、 n_e が小さいほど P_{tf} の減少率は大きい。

これらは、表1と図1から分かるように、馴染みにより表面の粗さが小さいしゅう動面となり流体力学的な油膜の形成が促され、固体接触が減少するためであり、また高負荷率や低回転速度のときほど、油膜は薄く固体接触の多い混合潤滑の状態に近づき表面粗さ変化の影響は顕著になるためであると考えられる(4)。(12)-(14)。

2.1.2. ピストン・コーティングの効果

図4に、供試機関にスカート部をグラファイト・コーティング加工したピストンを装着する場合とコーティング加工していないピストンを装着する場合について、それぞれ測定した全摩擦平均有効圧力 P_{tf} を示す。使用したエンジン油は市販CD級SAE10W-30(S)である。また図5に、ピストン・スカートにグラファイト・コーティングしていない場合の P_{tf} に対するグラファイト・コーティングした場合の P_{tf} の減少率を示す。

図示のように、 n_e の小さな低回転速度で P_{tf} の減少率は負となるが、 n_e の大きな高回転速度では P_{tf} の減少率は正に転じる。また、高負荷率の運転条件で低負荷率の時よりも10%~20%ほど P_{tf} の減少率は大きい。

このように P_{tf} 減少効果が正と負の両域にまたがる原因は、ピストン・スカート部に厚さ約10ミクロンのグラファイト・コーティングを施したために、ピストン・スカートの外径が増大しピストン・シリンダ間のボア・クリアランスが減少してスカート部の粘性摩擦が増大したことによるものと考えられる。

一方、 P_{tf} の減少率が機関の負荷や回転速度に強く依存する理由として、高負荷率や高回転速度の稼働時は、ピストン周りのエンジン油量が少なく

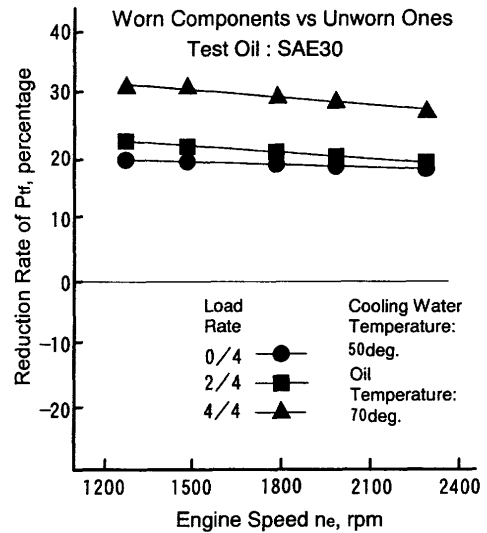


Fig.3 Reduction rate of P_{tf} for worn components vs unworn components

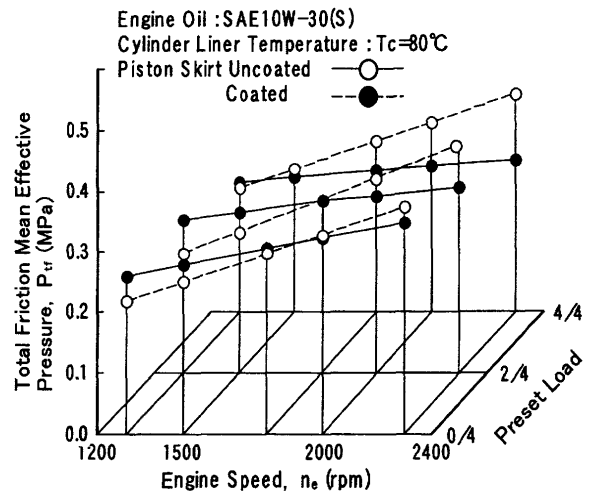


Fig.4 Change of P_{tf} with n_e , load and piston skirt coating for SAE10W-30 class oil

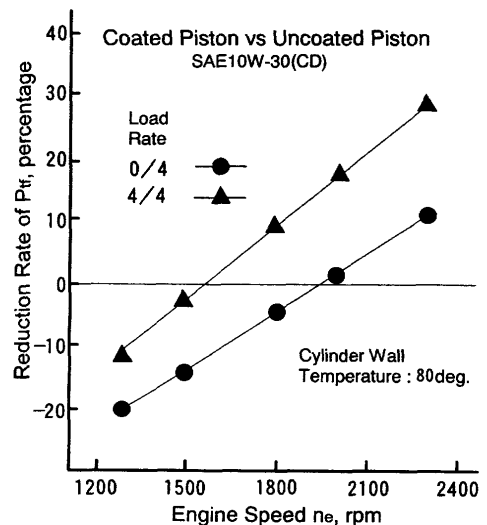


Fig.5 Reduction rate of P_{tf} for coated piston vs uncoated piston

固体接触が起こり混合潤滑の状態となり，コーティングしたグラファイトの固体潤滑作用で境界摩擦の作用が低減され， P_{if} の減少率が大きくなると思われる。

2.2.エンジン油性状の影響

2.2.1.低粘度マルチグレード化の効果 表2に供試エンジン油の粘度性状を示す。これらは，粘度等級がシングルグレードの SAE10W, SAE30, SAE50 とマルチグレードの SAE10W-50 の供試油である。

図6に，SAE30, SAE10W および SAE50 のシングルグレード油を用いたときの全摩擦平均有効圧力 P_{if} の測定値を示す。また図7は，SAE10W-50 マルチグレード油の場合の P_{if} である。図8に，シリンダ壁温一定（80℃）の条件で調べた SAE30 油の P_{if} に対する SAE10W 油，SAE50 油および SAE10W-50 油の P_{if} の減少率を示す。

図示のように，低粘度の SAE10W 油の場合，全ての負荷・回転速度の領域で P_{if} の減少率は6%～8%と大きく全摩擦損失低減の効果が認められる。

しかし，高粘度の SAE50 油の場合は減少率が負となり全摩擦損失は増大する。一方，マルチグレ

Table 2 Property of test engine oils

Test Oil	SAE 10W	SAE 30	SAE 50	SAE 10W-50
Density at 15deg (g/cm ³)	0.879	0.888	0.896	0.88
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40deg	36.9	98.3	215.6
	100deg	6.25	11.6	19.37
Viscosity Index	116	106	103	176
HTHS Viscosity (mPas) 150deg	2.18	3.45	5.59	4.16

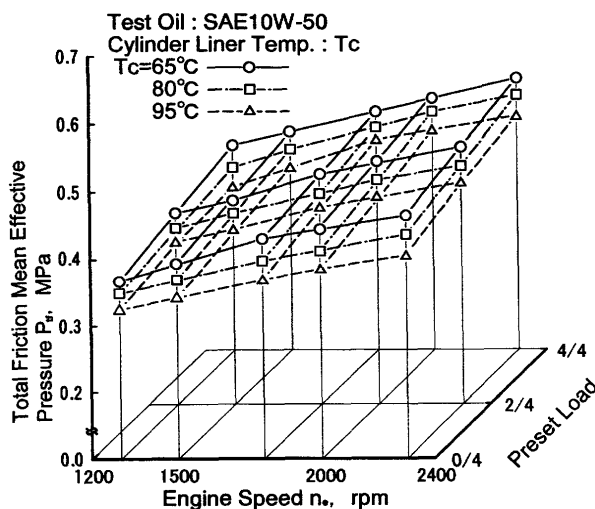
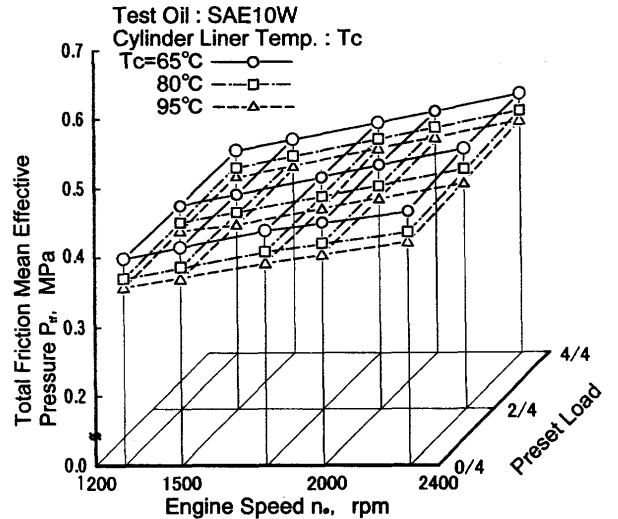
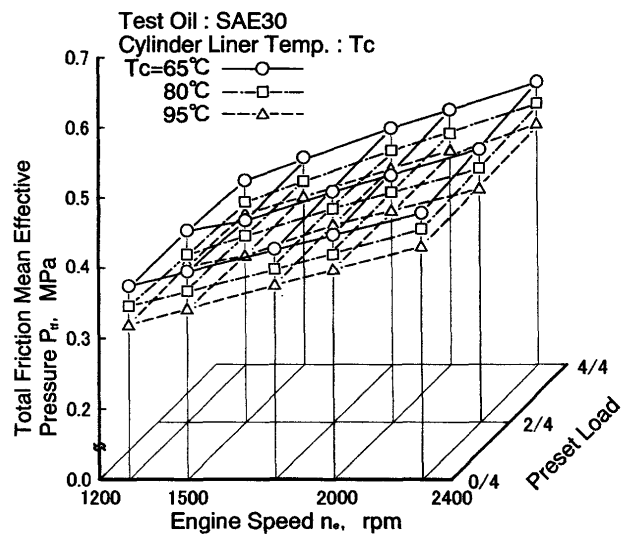


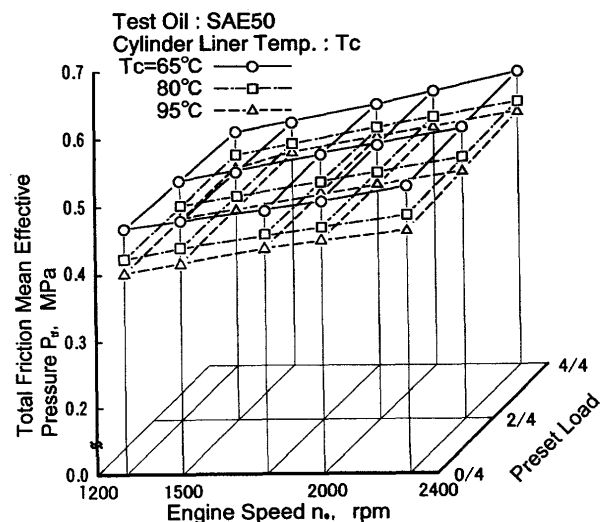
Fig.7 Comparison of P_{if} with n_e , load and cylinder liner temperature for multigrade oil SAE10W-50



(a) Test lubricating oil : SAE10W



(b) Test lubricating oil : SAE30



(c) Test lubricating oil : SAE50

Fig.6 Comparison of P_{if} with n_e , load and cylinder liner temperature for monograde oils

ードの SAE10W-50 油の場合は、高回転速度で SAE30 油とほとんど差がないが、低回転速度のときは P_{tf} の減少率が約 5% となり SAE10W 油と同程度の全摩擦損失低減の効果が現れることが分かる。

このように低粘度油で全摩擦損失は低減し、高粘度油の場合は逆に増大する特性が現れることから、油の粘性が全摩擦損失に大きく影響することが分かる。

また図 9 は、同様にシングルグレード SAE30 油とマルチグレード SAE10W-30 油の場合について、油温と冷却水温度が一定の条件で比較した全摩擦平均有効圧力 P_{tf} の測定値である。図 10 に、SAE30 油の P_{tf} に対する SAE10W-30 油の P_{tf} の減少率を示す。図示のように、 P_{tf} の減少率は 3%~28% であり、低負荷・低回転速度ほど全摩擦損失低減の効果が大きくなる傾向にある。

これらのようなマルチグレード油の全摩擦損失低減の効果は、その低い粘度と高い粘度指数によるものであり、高温高せん断粘度 (HTHS Viscosity) の許容限界を拡張し、より一層の低粘度マルチグレード化を計ることが望まれる (4), (6), (13)。

2.2.2. 使用油の場合 図 11 は、エンジン油が機関運転で使用されず混入劣化汚損したときの全摩擦平均有効圧力 P_{tf} の測定値である。対象オイルは市販 CD 級 SAE30(S)油の新油とその数百時間の機関運転後の使用油である。

図 12 に、新油のときの P_{tf} に対する使用油の P_{tf} の減少率を示す。図示のように、 P_{tf} の減少率は 5%

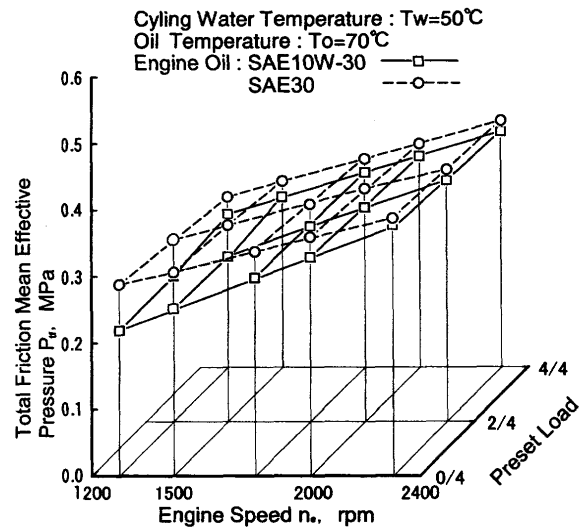


Fig.9 Influence of engine oil property on P_{tf}

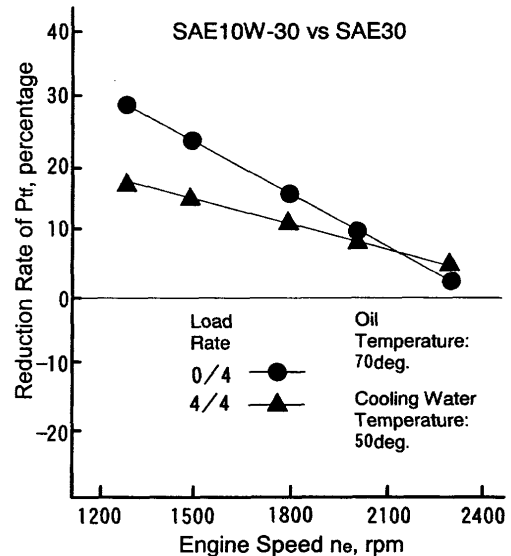


Fig.10 Reduction rate of P_{tf} for SAE 10W-30 vs SAE30

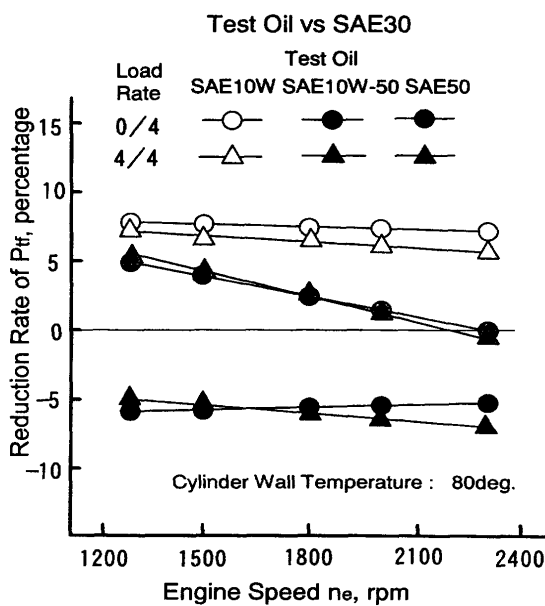


Fig.8 Reduction rate of P_{tf} for test oils vs SAE30

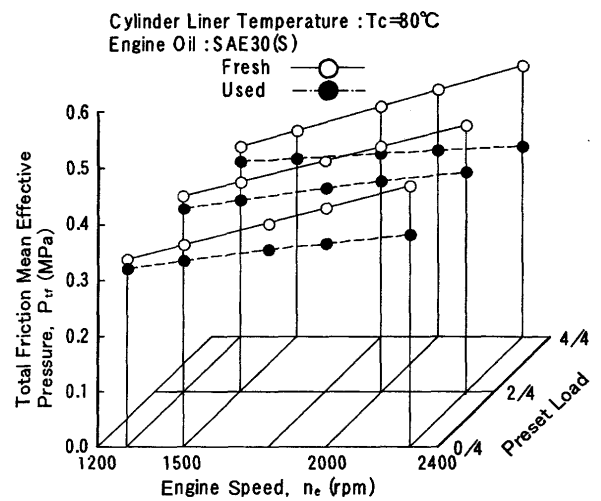


Fig.11 Change of P_{tf} with n_e , load and oil deterioration for SAE30(S)

～25%であり，すす混入劣化汚損した使用油の方が新油の場合より全摩擦損失はかなり小さい．また，高負荷率で高回転速度の運転条件ほど P_{tf} の減少率は大きくなる．

このような測定結果になる理由として，機関運転に伴いエンジン油にすすが混入し劣化汚損は進むが，混入すす分の作用でしゅう動面が馴染み，燃料希釈などによるオイル粘度の低下も起こり，摩擦が減少したものと考えられる．また同時に，少量のすす混入の条件で摩擦は減るか否か，すなわちすす粒子の固体潤滑作用による効果の有無を調べる必要があると考える．

2.2.3. DH 級 Low-SAPS オイルの場合 図 13 と図 14 は，表 3 に示す性状や組成をもつ Low-SAPS 対策エンジン油 SAE10W-30(DH-2)，SAE5W-30(DH-2)および従来エンジン油 SAE10W-30(CD)について測定した全摩擦平均有効圧力 P_{tf} の比較である．

図 15 に，SAE10W-30(CD)油の P_{tf} に対する SAE10W-30(DH-2)油の P_{tf} の減少率を示す．図示のように，低回転速度で減少率は負であるが， n_e が増大すると減少率は正に転じる．回転速度が高いほど全摩擦損失低減の効果は大きい，負荷率や冷却水温度の影響は小さいことが分かる．

また図 16 に，SAE10W-30(CD)油の P_{tf} に対する SAE5W-30(DH-2)油の P_{tf} の減少率を示す．図示のように， P_{tf} の減少率は 2%～8%であり，全摩擦損失がかなり低減される．また，冷却水温度が低いほど低減の効果は大きい．

ところが図 17 に示すように，SAE10W-30(DH-2)

Table 3 Property of test engine oils

Test Oil	SAE 10W-30 (CD)	SAE 10W-30 (DH-2)	SAE 5W-30 (DH-2)
Density at 15deg (g/cm ³)	0.88	0.86	0.85
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40deg	66.76	69.63
	100deg	10.45	10.89
Viscosity Index	144	147	177
HTHS Viscosity (mPas)	150deg	3.30	3.36
Total Acid Number (mgKOH/g)	2.74	2.60	2.60
Total Base Number (mgKOH/g)	HCl	13.0	5.70
	HClO ₄	-	7.50
Metal Content (ppm)	B	-	83
	Ca	5200	2200
	Mg	10	-
	Zn	1210	1300
	P	1130	1000
	Mo	-	120
	S	-	4300

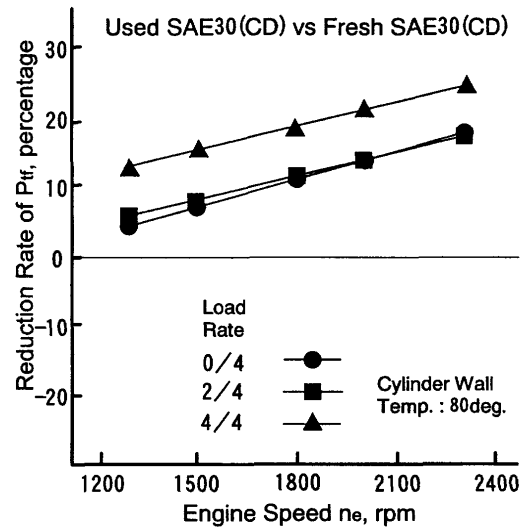


Fig.12 Reduction rate of P_{tf} for used SAE30 (CD) vs fresh SAE30(CD)

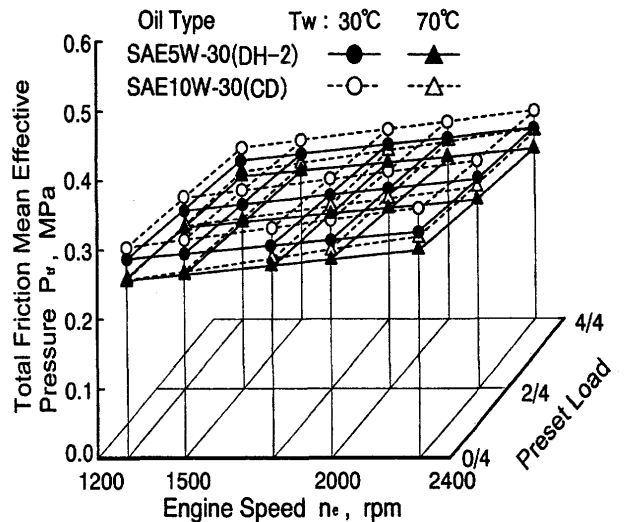


Fig.13 Comparison of P_{tf} between SAE5W-30 (DH-2) and SAE10W-30(CD)

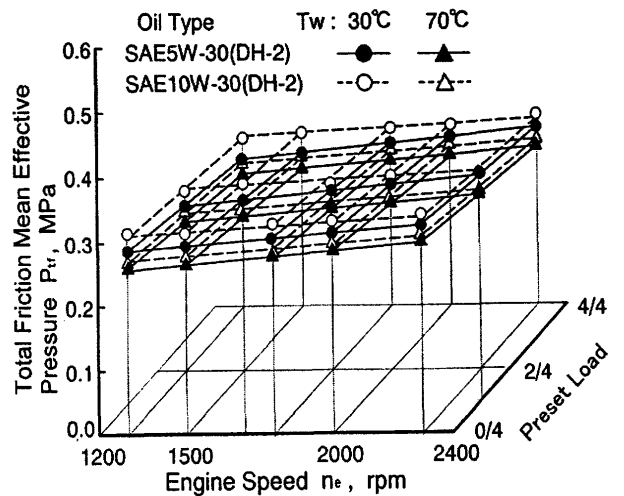


Fig.14 Comparison of P_{tf} between SAE5W-30 (DH-2) and SAE10W-30(DH-2)

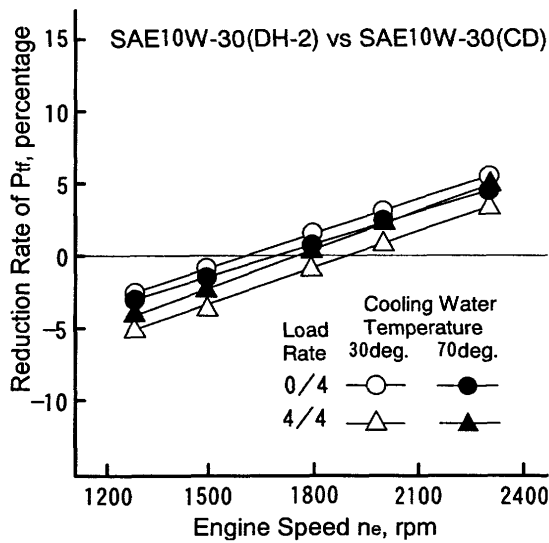


Fig.15 Reduction rate of P_{fr} for SAE10W-30 (DH-2) vs SAE10W-30(CD)

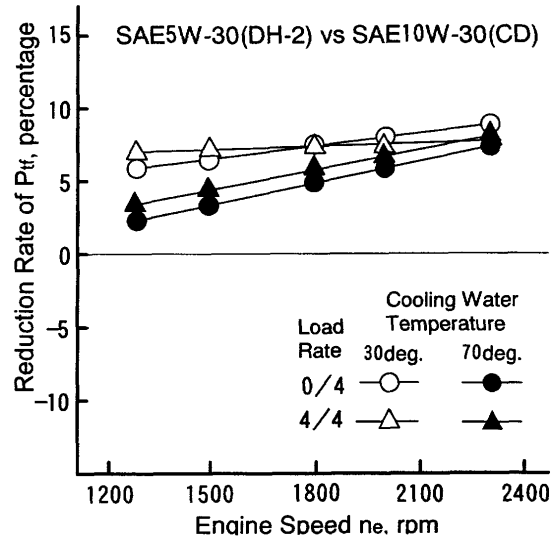


Fig.16 Reduction rate of P_{fr} for SAE5W-30 (DH-2) vs SAE10W-30(CD)

油に対する SAE5W-30(DH-2)油の P_{fr} の減少率は 3%~12%と大きく、全ての負荷率、回転速度、冷却水温度の機関運転条件で全摩擦損失が低減される。また、回転速度や冷却水温度が低いほど低減の効果はより大きくなる。

これらのことから、粘度等級 SAE10W-30 油で従来の CD 級オイルから Low-SAPS 対策 DH-2 級オイルへ添加剤配合を改良するだけでなく、同じ Low-SAPS 対策の SAE10W-30(DH-2)油から SAE 5W-30(DH-2)油へ変更すること、すなわち DH-2 添加剤配合と低粘度マルチグレード化の相乗的な効果で摩擦損失を低減できることが明らかになった。これは、低い粘度でしゅう動面油膜が薄くなり境界接触が増える状況下で、DH-2 級オイルに配合された添加剤が剪断抵抗の小さい表面膜を形成する能力をもつことを示している。このような適性をもつ Low-SAPS エンジン油の研究開発に力を注ぐ必要がある。

3. 結 論

実働ディーゼル機関についてピストン系部品の表面の粗さやコーティング、エンジン油の性状や劣化などの因子による全摩擦損失低減の効果を調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1) ピストン系部品の表面状態に関して、新品の馴染み前に比べ、機関運転に伴う馴染み後の方が摩擦損失は 20%~30%小さい。またピストン・スカート部にグラファイト・コーティング加工すると摩擦損失は 10%~20%低減される。

(2) エンジン油を低粘度マルチグレード化するこ

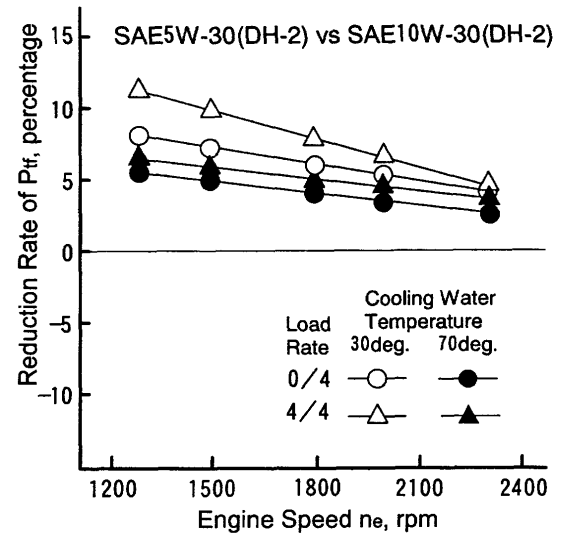


Fig.17 Reduction rate of P_{fr} for SAE5W-30 (DH-2) vs SAE10W-30(DH-2)

とによる摩擦損失低減の効果は大きい。マルチグレード油の全摩擦損失低減の効果は、機関の負荷率、回転速度、冷却水温度などの運転条件で異なり、低負荷・低回転速度の運転時に効果はより大きくなる。

(3) エンジン油の機関運転によるすす混入・劣化汚損に伴い全摩擦損失は低減される。

(4) エンジン油の粘度等級を SAE10W-30 から SAE5W-30 へ低粘度化すると共に、添加剤配合を CD 級から DH 級へと低灰分・低りん・低硫黄化する 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の効果は一段と大きくなる。

最後に、本研究における九州産業大学の栗山道高、葉石秀文、武田 桂、橋本勝美、森若英俊の諸氏の協力に対し謝意を表する。

なお、本研究に際し平成 19 年度科学研究費補助金（基盤研究 C、課題番号 19560152）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) 副島光洋, 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)
- (3) Soejima, M., et al. : Studies on Tribology of Cam and Tappet in a Diesel Engine, Proc. 22nd CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, p.593-608 (1998)
- (4) 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)
- (5) Soejima, M., et al. : Friction and Wear Characteristics for Cam and Follower Influenced by Soot Contamination, Plenary and Session Key Papers from the 2nd WTC Vienna 2001, p.423-428 (2001)
- (6) Wakuri, Y., et al. : Studies on Tribology between Cylinder Liner and Piston Ring in Marine Diesel Engine : Past 30 Years, Proc. of 24th CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, p.1-16 (2004)
- (7) Soejima, M. and Matsuo, K. : Influences of Soot Contamination in Semi-Used Engine Oil Supplemented with both Additives of Anti-Wear Agent and Friction Modifier on Friction and Wear for Cam and Follower, Proc. of 3rd Asia Int. Conf. on Tribology 2006, Kanazawa, p.555-556 (2006)
- (8) 副島光洋・長藤将史 : DH 級低粘度ディーゼルエンジン油の全摩擦損失低減効果, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.3, p.129-134 (2006)
- (9) Soejima, M., et al. : Studies on Tribology of Valve Trains and Engine Oils in Diesel Engines, Proc. of 25th CIMAC, Paper No.220, p.1-14 (2007)
- (10) Soejima, M., et al. : A Review of Solutions for the Mechanism of Oil Consumption in Internal Combustion Engine, Proc. of 2007 JSAE/SAE Int. Fuels and Lubricants Meeting, JSAE 20077160, SAE 2007-01-1973, p.1610-1617
- (11) Tsujimoto, T., et al. : Operational Performance of Eco-friendly Engine Oils Formulated with the Sulfur-free Additive ZP, Proc. of JSAE-SAE Fuels & Lubricants Meeting, JSAE 20077300, SAE 2007-01-1991, pp.928-934
- (12) 浜武俊朗, ほか 3 名 : ピストンリングの混合潤滑に関する研究, 日本船用機関学会誌, Vol.34, No.12, p.788-797 (1999)
- (13) Hamatake, T., et al. : Effects of Lubricant Viscosity on the Mixed Lubrication of Piston Ring Pack in Internal Combustion Engine, Lubrication Science, Vol.15, No.2, p.101-117 (2003)
- (14) Soejima, M., et al. : Studies on Microtopography of Oil-Film for Piston Rings, Proc. of the First European Conference in Lubrication Management and Technology, p.1-8 (2006)