

高粘度指数ベース油の低フリクション性能と 5W-20 エンジンオイルへの展開

Research on Low-Friction Properties of High Viscosity Index Petroleum Base Stock
and Development of Upgraded Engine Oil

長 島 隆* 坂 勉*
Takashi NAGASHIMA Tsutomu SAKA

田 中 秀 樹* 佐 藤 孝 之*
Hideki TANAKA Takayuki SATO

要 旨

近年のエネルギー、環境問題から自動車の燃費向上技術が求められている。そのひとつとして、低粘度型省燃費エンジンオイルの研究が行われているが、現行の鉱油系ベース油では、技術的に限界に至っている。

本研究では、鉱油系高粘度指数ベース油の低フリクション性能評価とその考察を行い、更に5W-20省燃費エンジンオイルへの展開について研究を行った。

まず、単体摩擦摩耗試験機でのフリクション低減効果では、従来ベース油に対して最大28%のフリクション低減効果を確認し、これはベース油の持つ高圧粘度特性に起因する特性であることを明確にした。

次に、この鉱油系高粘度指数ベース油を用い、将来のILSAC GF-2規格を目標にした5W-20エンジンオイルを試作し、同様な5W-30エンジンオイルに対して約1.8%の燃費改善効果を確認した。

ABSTRACT

High viscosity index (HVI) petroleum base stock, with excellent temperature-viscosity characteristics, oxidation resistance, and low-evaporation properties, offers advantages as the base stock for high fuel economy engine oils, particularly because of its low-friction properties in the boundary and/or "E.H.L (Elastohydrodynamic Lubrication)" area due to its rheological characteristics.

This research evaluated HVI base stock's low-friction properties. Upgrading the oil from 5W-30 to 5W-20 was also investigated.

The friction properties of the HVI base stock were measured by a unit friction platform. The results show a 28% reduction in friction coefficient compared with the conventional, solvent refined oil, which is attributable to the high-pressure viscosity of the base oil.

The prototype 5W-20 engine oil, (made with this base stock) with a view to meeting the ILSAC GF-2 standard now expected to be mandatory in the future has been shown to superior to the 5W-30 engine oil in saving fuel consumption, by about 1.8%.

1. まえがき

近年地球環境問題対策が社会的にもクローズアップされており、その中でCAFE(Corporate Average Fuel Economy)値の段階的規制強化が提案されている。その対応策の一つにエンジンオイルによる燃費向上技術があり、省燃費効果に優れたエンジンオイル開発のニーズが高まっている。既に、ホンダにおいてもFig. 1に示すように、低粘度型省燃費エンジンオイルの工場充填油への適用を行ってきているが、ILSAC(International Lubricant Standardization and Approval Committee)

規格等で要求されている高温高せん断粘度(HTHS粘度)、蒸発特性規定に対し、従来のベース油での対応が難しくなっており、90年代よりベース油の研究を行ってきた。

このような背景の中、低粘度型省燃費エンジンオイルへの高粘度指数(高VI:100ニュートラルベース油にて粘度指数が120以上)ベース油の利用が注目されている^{1)~4)}。高VIベース油を用いたエンジンオイルは高HTHS粘度と低蒸発特性が両立できるため、エンジンの摩耗防止とオイル消費の低減が可能となるからである。

* 栃木研究所

高 VI ベース油で代表的なものは、合成油であるポリ- α -オレフィン (PAO) で、一般的に 100 ニュートラル相当の粘度を持つ PAO の粘度指数 (VI) は、120~125 である。近年、水素化分解^{5)~8)}あるいはパラフィン異性化プロセスにより鉱油系高 VI ベース油が製造されるようになってきた^{9)~10)}。

高 VI ベース油の省燃費エンジンオイルへの利用は、前記の優れた特性のため、より普及されると考える。本報告では、この鉱油系高 VI ベース油のフリクション性能評価を行い、その優れた低フリクション性能が高 VI ベース油の高圧粘度特性に起因することを明らかにし、高 VI ベース油を用いた 5W-20 省燃費エンジンオイルを試作し、フリクション低減効果と燃費改善効果を明確にした。

2. 高 VI ベース油のフリクション低減効果

高 VI ベース油のフリクション特性については、従来の溶剤精製 (SR: Solvent Refined) ベース油に対して部分的に金属接触をとまう弾性流体潤滑領域にて低摩擦係数を示すことが既に報告されている¹¹⁾。そこで、より詳細なフリクション低減メカニズムを明らかにするために、摩擦摩耗試験装置でのフリクション測定、実機動弁系を用いたフリクション測定、さらに実機モータリングでのフリクション測定を溶剤精製ベース油と高 VI ベース油のベース油単独および添加剤を加えて製品にしたエンジンオイルについて行った。

Table 1 Viscometric Properties of Base Stocks

	Solvent Refined				High VI	
	SR-1	SR-2	SR-3	SR-4	HVI-1	HVI-2
Kinematic Viscosity						
100°C mm ² /s	2.25	4.22	6.40	8.83	2.56	4.28
Viscosity Index	83	99	101	100	107	120

2.1. 摩擦摩耗試験装置でのフリクション低減効果

溶剤精製ベース油と鉱油系高 VI ベース油の摩擦特性を評価するために、摩擦摩耗試験装置を用いて、摩擦係数を測定した。装置概要を Fig. 2 に示す。

本装置は、Chip-on-Disk タイプの試験装置であり、その測定条件は実機動弁系と同一になるように、Chip にはロッカーアーム材を Disk にはカムシャフトと同一材料を同一面粗度に加工したテストピースを用いた。また、測定条件も実機条件をシミュレートさせるため、荷重、

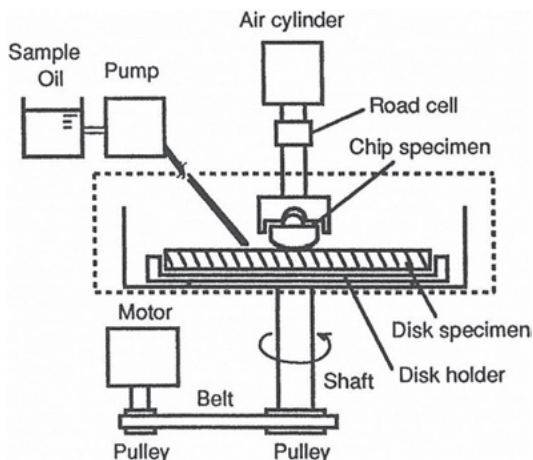


Fig. 2 Chip-on-Disk Type Friction Tester

Year	1980	85	90	95	2000
MARKET TREND	API* SF		API SG	API SH ILSAC GF-1	
FACTORY FILL	API SE 10W-30	API SF 10W-30	API SF 5W-30	API SG/ECII 5W-30	API SH/ECII ILSAC GF-1 5W-30
RESEARCH WORK TREND	FRICTION MODIFIER STUDY			IMPROVEMENT OF BASE OIL	

*API: American Petroleum Institute

Fig. 1 History of Engine Oil Research in HONDA

Table 2 Composition and Properties of Formulated Test Oils

		SR-1 Oil	SR-2 Oil	SR-3 Oil	SR-4 Oil	HVI-1 Oil	HVI-2 Oil
Composition		← Solvent Refined →				← High VI →	
Base Stock		←					
Additive		← DI** Package SG →					
Properties							
Kinematic Viscosity	100°C mm ² /s	3.14	5.73	8.35	11.3	3.48	5.63
Viscosity Index		123	123	115	108	138	137
High Shear Viscosity*	60°C MPa•s	6.2	13.4	22.0	29.1	6.0	12.1
	80°C MPa•s	3.8	7.4	11.5	15.2	3.9	7.0
	100°C MPa•s	2.5	4.6	6.8	9.0	2.7	4.5
	150°C MPa•s	1.2	2.0	2.7	3.5	1.4	2.0

*Shear rate=10⁶ 1/s **DI:Detergent Inhibitor

High shear viscosities at 100°C and 150°C were measured actually.

High shear viscosities at 60°C and 80°C were extrapolated from those at 100°C and 150°C

周速を実機動弁系条件に合わせた。

評価を行ったベース油の代表性状を Table 1 に示す。溶剤精製ベース油で 4 種類、鉱油系高 VI ベース油として 2 種類のそれぞれ粘度グレードの異なるベース油を用いて測定した。

Fig. 3 に縦軸を摩擦係数、横軸に粘度×速度÷荷重をとった結果を示す。

この図から明らかなように高 VI ベース油の摩擦係数は、溶剤精製ベース油に比べて低い傾向を示している。その摩擦係数の低減効果は、流体潤滑領域に比較して部分的に金属接触をとまう弾性流体潤滑領域の方がより大きな差となって現れており、カムシャフト回転数 750rpm (エンジン回転数 1500rpm) で比較すると、高荷重領域で低フリクション特性を示す傾向であり、約 28% の摩擦係数の低減が図られている。

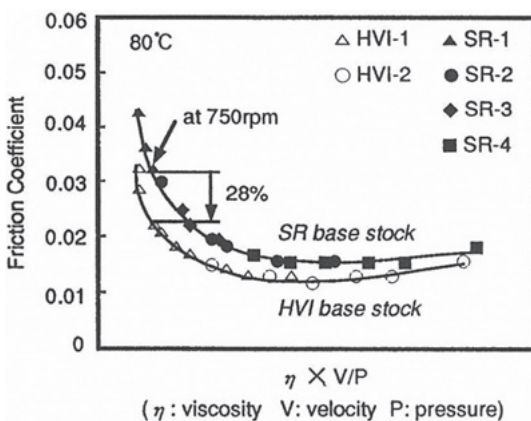


Fig. 3 Friction Coefficient of HVI and SR Base Stock

2.2. 実機動弁系フリクション測定による

高 VI ベース油のフリクション低減効果

摩擦摩耗試験装置でのフリクション測定結果にみられる高 VI ベース油の低フリクション特性が、動弁系の部分的に金属接触のとまう弾性流体潤滑領域において、大きなフリクション低減効果となって得られると考えられることから、実機の動弁系を用いた動弁系フリクション測定法を開発し、評価を行った。

このテスト法は、実機エンジンの動弁系部分を用いて、モータリングで一定回転数で運転し、動弁系のフリクショントルクを測定するもので、エンジンオイルのフリクション低減効果を簡易的に精度よく測定できる手法である。測定装置の概要を Fig. 4 に示す。

また、測定に用いたエンジンオイルは、摩擦摩耗試験で用いた鉱油系高 VI ベース油と溶剤精製ベース油に同一添加剤を処方したエンジンオイルであり、Table 2 に性

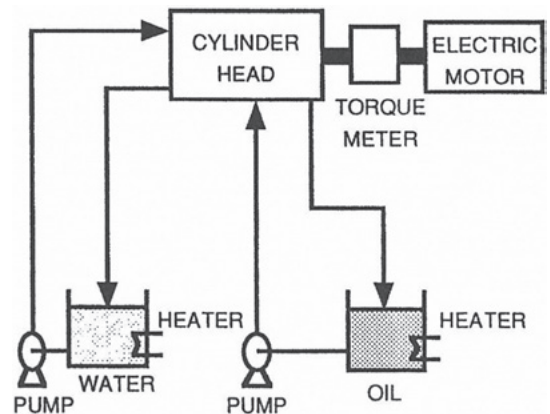


Fig. 4 Valve Train Friction Tester

状を示す。Fig. 5 に示すエンジンオイルの動弁系フリクショントルクの測定結果から明らかなように、縦軸に動弁系フリクショントルク (VTF: Valve Train Friction) をとり、横軸に高せん断粘度をとると、高 VI ベースエンジンオイルは、溶剤精製ベースエンジンオイルに対して低フリクション特性を示す。

更に Fig. 6 に横軸をカムシャフト回転数で整理した結果を示す。高粘度指数ベースエンジンオイルは、溶剤精製ベースエンジンオイルに対して、カムシャフト回転数 750rpm にて約 15% のフリクション低減効果を示す。

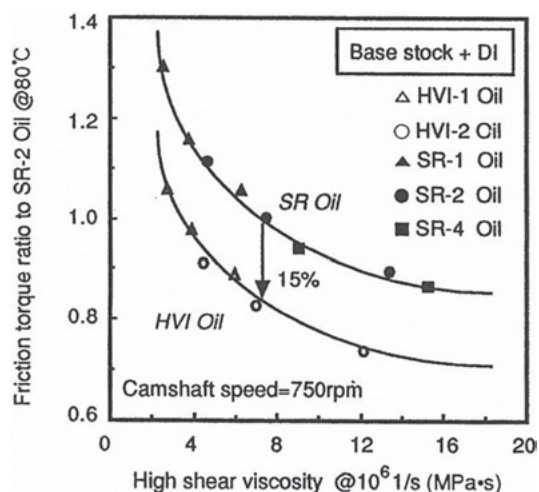


Fig. 5 Influence of Different Base Stocks on VTF

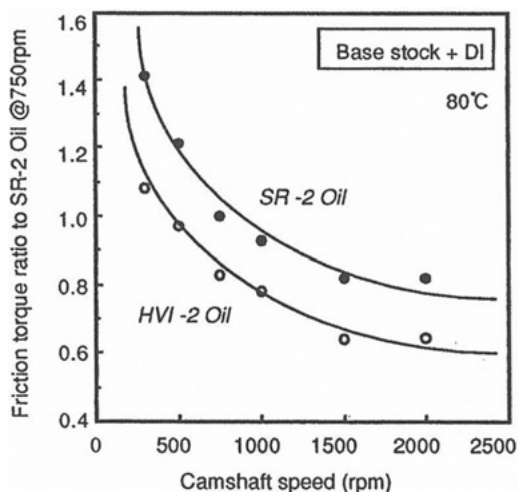


Fig. 6 Influence of Different Base Stocks on VTF

2.3. 実機モータリングフリクション測定による高 VI ベース油のフリクション低減効果

鉱油系高 VI ベース油のフリクション低減効果は、最終的にエンジンによるモータリングフリクションテストで確認した。テストは、単体および動弁系フリクション測定でシミュレートさせてきた 2.2ℓ、4 シリンダ、OHC エンジンを使用して行った。テスト装置の概要を Fig. 7 に示す。

テストに使用したエンジンオイルは、動弁系フリクション測定に使用した同一添加剤で処方した高 VI ベースエンジンオイルと溶剤精製ベースエンジンオイルである。テスト条件は、エンジン回転数 1500rpm、マニホールド負圧 400mmHg、油温 80°C で行った。

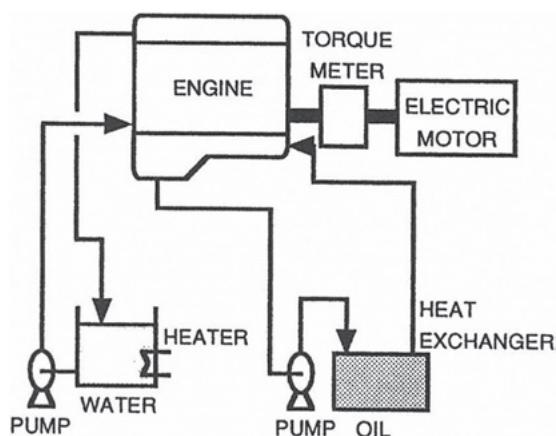


Fig. 7 Engine Motoring Tester

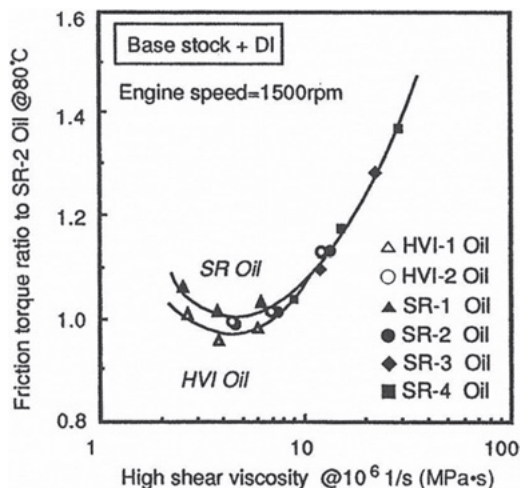


Fig. 8 Influence of different Base Stocks on Engine Motoring Friction

Fig. 8 に高 VI ベースエンジンオイルと溶剤精製ベースエンジンオイルによるフリクショントルクの比較を示す。フリクショントルクはどちらのエンジンオイルも高せん断粘度の低下と共に低減している。また、高 VI ベースエンジンオイルは溶剤精製ベースエンジンオイルより低いフリクショントルク値を示している。これは、動弁系フリクション測定結果と同様に高 VI ベース油の優れた低フリクション特性によるものである。

このように高 VI ベース油は、従来の溶剤精製ベース油に対して、単体から実機にいたるまで低フリクション特性を示すことが確認された。また、この効果は低粘度化するほど顕著であり、今後の省燃費型エンジンオイルの低粘度化に対して、フリクション低減効果の面でも優れた特性を有していることが立証され、今後の低粘度型省燃費エンジンオイルにとって非常に有用なベース油であると考えられる。

3. 高 VI ベース油のフリクション低減メカニズム解明

以前から、エンジンフリクションの低減は低粘度化により改善されることがわかっている¹²⁾。したがって、今回の高 VI ベース油のフリクション低減効果を測定する時には、同一高せん断粘度で比較できるようにエンジンオイルを試作し、測定条件を考慮してきた。その結果、同一高せん断粘度において常に高 VI ベース油は溶剤精製

ベース油に対して低フリクション特性を示し、動弁系フリクショントルクでは、約 15% のフリクション低減効果を、単体での摩擦係数では約 28% の摩擦係数低減効果を示した。しかし、ベース油の粘性の違いからこれを説明するのは困難である。そこで、高圧下での粘度特性が関係すると考え、更に検討を行った。

高圧粘度特性は、ベース油の組成に関係していることはすでに知られており、パラフィン成分が多いほど高圧粘度が低い^{13)~14)}。今回評価に供した高 VI ベース油もパラフィン成分が多く、従来の溶剤精製ベース油に比較して高圧粘度が低いと考える。ここで、それぞれのベース油の圧力粘度特性を、ベース油の組成を反映させた Roelands 式¹⁵⁾を用いて計算を行い、結果を Fig. 9 に示す。これにより、高 VI ベース油は溶剤精製ベース油に比較して 0.5GPa では半分以下の粘度であることがわかった。エンジン内部でベース油にこのような高圧力が作用すると、ベース油によってフリクション性能が異なることになる。

動弁系フリクション測定では、先に示したように溶剤精製ベースエンジンオイルに比較して高 VI ベースエンジンオイルは優れたフリクション低減効果を示した。一般的に、動弁系のカムとフォロワの接触部分は部分的に金属接触をとまなう弾性流体潤滑状態下にある^{16)~19)}。このため接触する両者の間に介在し、荷重を支える油には高い圧力が作用する。Fig. 10 にカムシャフト回転角度に対するヘルツ接触圧の変化を示す。これにより前述した圧力とはほぼ同等の圧力が作用していることがわかる。

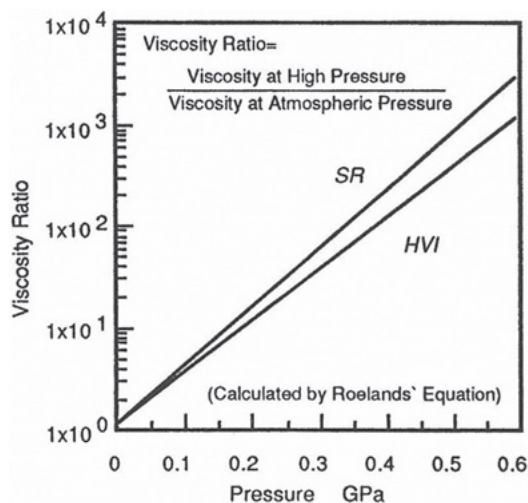


Fig. 9 Viscosity Figure Pressure Relationship

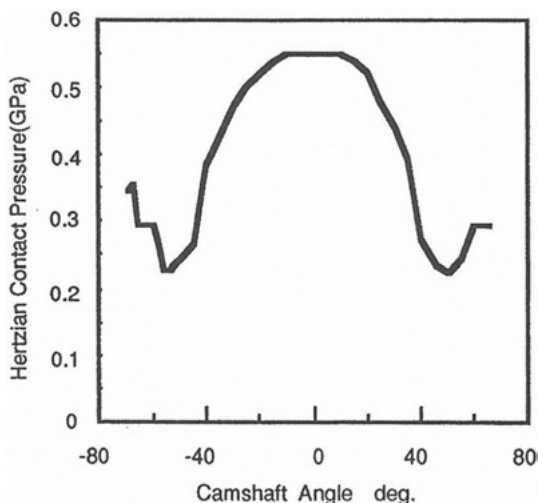


Fig. 10 Hertzian Contact Pressure at the contact area between the Camshaft and Followers

これらの解析結果より、高 VI ベース油は、その高圧粘度特性から、HTHS 粘度が同一でもより優れた省燃費効果を示すことが解明できた。

4. 低粘度化によるフリクション低減効果の限界性確認

高 VI ベース油は、優れた温度-粘度特性、低いオイル蒸発特性、優れた酸化安定性から、低粘度エンジンオイルへの適用が期待されるベース油である。そこで、エンジンオイルの低粘度化によりフリクションの低減がどこまで可能かを調査した。Fig. 8 で高せん断粘度の低粘度化によりフリクショントルクが下がることを示したが、フリクショントルクの下限としては 3~4 MPa・s 位に最小値があることがわかる。

低粘度化によるフリクショントルクの限界値を明確にするために、モータリングフリクション測定で更に詳細な検討を行った。テストは高 VI ベースエンジンオイルと同エンジンオイルに有機金属系 FM (Friction Modifier) 剤を添加したエンジンオイルの 2 種類で行った。測定結果を Fig. 11 に示す。この図から明らかなように有機金属系 FM 剤を添加したエンジンオイルは添加しないエンジンオイルと比較し、約 18% のフリクション低減効果が得られ、フリクション低減化ポイントの下限が低く、より低粘度化が可能である。さらにその下限粘度は、今回の測定結果からでは、有機金属系 FM 剤がない場合で約 3~4 MPa・s であり、添加した場合は、約 2.5 MPa・s が下限粘度と推定された。

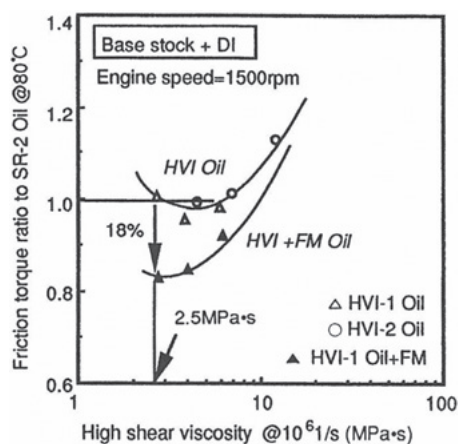


Fig. 11 Effect of Friction Modifier on Engine Motoring Friction

Table 3 Properties of Engine Oils

SAE Viscosity Grades		5W-20	5W-30
Kinematic Viscosity	40°C mm ² /s	46.9	51.0
	100°C mm ² /s	8.94	10.0
Viscosity Index		178	188
HTHS* Viscosity	150°C MPa·s	2.72	2.92
CCS** Viscosity	-25°C MPa·s	2530	2760
Friction Modifier		Organometallic	

*High Temperature High Shear
150°C, Shear rate=10⁶ 1/s

**Cold Cranking Simulator

このように高 VI ベース油と優れた FM 剤を使用することで、フリクション低減化の限界粘度が下がり、更なるフリクション低減化が可能となる。ILSAC 規格で検討されている 5W-20 低粘度省燃費油による燃費改善効果が期待される。

5. 高 VI ベース油を用いた 5W-20 省燃費エンジンオイルの省燃費性能

高 VI ベースエンジンオイルの省燃費性能は、低粘度化と効果的な有機金属系 FM 剤を用いることによって、さらに向上させることが可能である²⁰⁾。有機金属系 FM 剤を用い、今まで述べてきた高 VI ベース油で高せん断粘度をフリクション低減効果の下限粘度付近で、かつ ILSAC 規格で検討している 5W-20 粘度グレードの規格値 2.6 MPa・s 以上に設定した 5W-20 省燃費エンジンオイルを試作し、その省燃費性能を測定した。試作した 5W-20 および比較とした 5W-30 エンジンオイルの性状

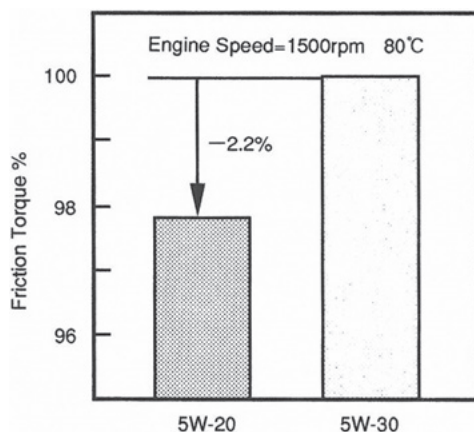


Fig. 12 Engine Friction Reduction

を Table 3 に示す。両エンジンオイルとも添加剤処方は同一である。

まず、測定エンジンおよび条件を 2 章と同一として、モータリングフリクシントルク測定を行った。結果を Fig. 12 に示す。同一処方の 5W-30 と比較して約 2.2% のフリクシントルクの低減効果を得た。

高 VI ベース 5W-20 エンジンオイルの燃費改善効果は、実車を用いたモード燃費テストで確認した。テストは、1.6 ℓ、4 シリンダ、OHC エンジンを搭載した車で行い、日本の 10・15 モード²¹⁾で燃費測定を行った。Fig. 13 に示すように、5W-20 エンジンオイルは 5W-30 エンジンオイルに比較して約 1.8% の燃費改善効果が得られた。

以上より、今回試作した 5W-20 省燃費エンジンオイルは従来の 5W-30 省燃費エンジンオイルに比較して、約 1.8% の燃費改善効果が得られ、今後の環境問題に対して燃料消費量の低減による貢献が期待できるエンジンオイルであることが確認できた。また、このような低粘度省燃費エンジンオイルにとって、低粘度化に伴うオイル蒸発量の増加や HTHS 粘度の低下を対策できる高 VI ベース油は、その優れた低フリクシオン特性と相まって最適なベース油であると期待される。

6. まとめ

鉱油系高 VI ベース油の低フリクシオン性能評価と 5W-20 省燃費エンジンオイルの省燃費性能評価を単体および実機で行ってきた結果、以下の知見が得られた。

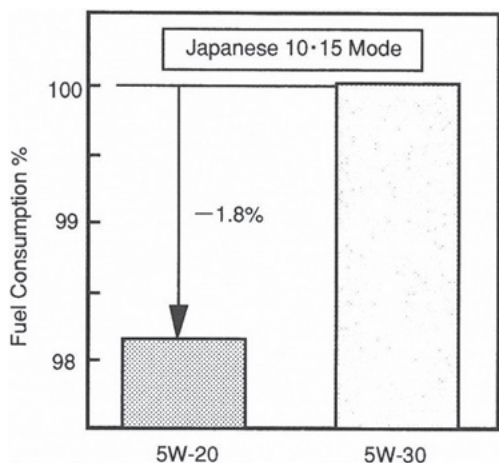


Fig. 13 Fuel Efficiency Increase

- (1) 高 VI ベース油は、従来の溶剤精製ベース油に比較して、摩擦係数が低く、同一高せん断粘度においても、実機フリクシントルクの低減効果がある。
- (2) 動弁系のカムとフォロワ接触部は高い接触圧力が存在し、このとき高 VI ベース油は、溶剤精製ベース油の約 1/2 の高圧粘度である。
- (3) 低い高圧粘度特性を持つ高 VI ベース油は、動弁系において溶剤精製ベース油に比較して約 15% の低フリクシオン効果を示す。
- (4) 低粘度化の限界として、実機を用いたフリクシントルク測定結果より、高せん断粘度で約 2.5MPa・s を得た。
- (5) 高 VI ベース油と有機金属系 FM 剤を用いた 5W-20 エンジンオイルは、同一処方の 5W-30 エンジンオイルに対して約 1.8% の省燃費性を示す。

次期 ILSAC 規格で検討されている 5W-20 省燃費エンジンオイルへの高 VI ベース油の適用は、低フリクシオン特性の有効性が明らかになり、今後より一層拡大されるであろう。

謝 辞

本研究をまとめるにあたりエンジンオイル試作でご協力下さった日本石油(株)中央技術研究所および出光興産(株)営業研究所の関係方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) C. E. Goldmann, "A Synthesized Engine oil Providing Fuel Economy Benefits," SAE Paper No.760854, Off Highway Meeting, Milwaukee, Wisconsin, September 1976.
- 2) A. G. Papay, E. B. Rifkin, R. L. Shubkin, P. F. Jackisch, R. B. Dawson, "Advanced Fuel Economy Engine Oils," SAE Paper No.790947, Fuel and Lubricants Meeting, Houston, Texas, October 1979.
- 3) D. B. Barton, H. V. Lowther, T. W. Roger, "Advantages of Synthetic Automotive Engine Lubricants," SAE Paper No.811413, International Pacific Congress, Honolulu, Hawaii, November 1981.

- 4) H. V. Lowter, W. L. Maxwell, T. W. Roger, "Improving the Fuel Saving Benefits of Synthetic Engine Oils," SAE Paper No.830166, international Congress and Exposition, Detroit, Michigan, February 1983.
- 5) A. Billon, M. Derrien, J. C. Lavergne, "Manufacturing New Base Oils by the I.F.P. Hydrorefining Process," 34th Mid-Year A.P.I. Meeting, Proceedings, 1969, pp.38-69.
- 6) J. Denis, J. C. Lavergne, G. Pace, "Better Multigrade Oils From High-Viscosity Index Hydrotreated Stocks," 34th Mid-Year A.P.I. Meeting, Div. Refining, Proceedings, 1969, pp.50-69.
- 7) K. Cashmore, M. Moyle, P. J. Sullivan, "Hydrotreated Lube Oil Base Stocks," SAE Paper No.821235, Fuels and Lubricants Meeting, Toronto, Ontario, Canada, October 1982.
- 8) M. Ushio, K. Kamiya, T. Yoshida, I. Honjou, "Product of High VI Base Oil by VGO Deep Hydrocracking," "Symposium on Processing, Characterization and Application of Lubricant Base Oils," American Chemical Society, Proceedings, August 1992, pp.1293-1302.
- 9) F. Breimer, H. I. Wareman, A. B. R. Weber, "Hydroisomerization of Paraffin Wax," J. Inst. Petrol., Vol.43 1957, pp.297-306.
- 10) H. M. J. Bijward, W. K. J. Bremer, P. V. Doorne, "The Shell Hybrid Process, an optimized Route for HVI Lube Oil Manufacture," Petroleum Refining Conference of Japan Petroleum Institute, October 1986, pp.16-17.
- 11) J. Igarashi, M. Kagaya, T. Nagashima, T. Satoh, "High Viscosity Index Petroleum Base Stocks - The High Potential Base Stocks for Fuel Economy Automotive Lubricants," SAE Paper No.920659, 1992.
- 12) J. E. Clevenger, D. C. Carlson, W. M. Kleiser, "The Effects of Engine Oil Viscosity and Composition on Fuel Efficiency," SAE Paper No.841389, Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Baltimore, Maryland, October 1984.
- 13) M. Muraki, Y. Kimura, "Traction Characteristics of Lubricating Oils (4th Report): Traction Characteristics of Mineral Oils," J. JSLE, Int. edn., Vol.7, 1986, pp.113.
- 14) M. Muraki, "Molecular Structure of Synthetic Hydrocarbon Oils and Their Rheological Properties Governing Traction Characteristics," Tribology International, Vol.20, 1987, pp.347-354.
- 15) C. J. A. Roeland, J. C. Vlugter, H. I. Waterman, "The Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils and Its Correlation with Chemical Constitution," Trans. ASME, December 1963, 85, pp.601.
- 16) A. Dyson, "Elastohydrodynamic Lubrication and Wear of Cams Bearing Against Cylindrical Tappets," SAE Paper No.770018, International Automotive Engineering Congress and Exposition, Detroit, Michigan, February 1977.
- 17) G. M. Hamilton, "The Hydrodynamics of a Cam Follower," Tribology International, Vol.13, 1980, pp.113-119.
- 18) A. K. van Helden, R. J. van der Meer, J. J. van Staaden, E. van Gelderen, "Dynamic Friction in Cam/Tappet Lubrication," SAE Paper No.850441, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, February 1985.
- 19) P. D. Purmer, W. van den Berg, "Measurement of Camshaft Wear-Wear and Kinematics of Overhead Camshafts," SAE Paper No.850442, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, February 1985.
- 20) J. Igarashi, Y. Yamada, M. Ishimaru, M. Kagaya, "Degradation of Friction Modifiers," Proc. of the Japan International Tribology Conference Nagoya, 1990, pp.421-426.
- 21) TRIAS (Traffic Safety and Nuisance Research Institute's Automobile Type Approval Test Standard) 23-4-1991.

■著 者■



長 島 隆



坂 勉



田 中 秀 樹



佐 藤 孝 之