

低粘度エンジン油の省燃費効果と しゅう動摩耗に与える影響

Effects of Low-viscosity Engine Oil on Fuel Economy and Wear

奥 山 庸 介*
Yosuke OKUYAMA
八 田 剛 志*
Takeshi HATTA

下荒地 大 地*
Daichi SHIMOKOJI
丸 山 雅 司*
Masashi MARUYAMA

川 内 昌 司*
Syouji KAWAUCHI

要 旨

ABSTRACT

エンジン油による省燃費性向上を目的とし、SAE 粘度規格にとらわれることなく、低粘度化がもたらす燃費効果とエンジン信頼性について検討した。省燃費効果の予測としては、低粘度エンジン油を用い、フリクショントルクを測定することで、効果を予測した。その結果、エンジン油の低粘度化は省燃費に対し、有望であることがわかった。

エンジン信頼性については、低粘度エンジン油の最大の課題である高温時のしゅう動摩耗への影響性を確認した。確認手法として、CAE 解析とエンジン耐久試験を実施した。その結果、供試量産エンジンにおいて、SAE 粘度規格以下の低粘度エンジン油を用いても、高温時のしゅう動部の耐摩耗の成立性が見通せた。

また、SAE 粘度規格以下のいくつかの低粘度エンジン油を試作した。試作エンジン油の性状値と SAE 粘度規格との位置づけを確認した。

現行 SAE 粘度規格以下の低粘度エンジン油には、一層の省燃費性向上が期待できるため、さらなる低粘度規格の制定が望まれる。

The effects of lower engine oil viscosity on fuel economy and engine reliability were investigated, unhampered by the SAE viscosity standard, with the aim of enhancing fuel economy. The fuel economy effects were predicted by using low-viscosity engine oil and measuring the friction torque. The results showed that lowering the engine oil viscosity provides favorable prospects for enhancing fuel economy.

Engine reliability was investigated by confirming the effects on sliding wear at high temperature, which is the greatest issue for low-viscosity engine oil. These effects were confirmed through CAE analysis and engine endurance tests. The results provided prospects for wear resistance of sliding parts at high temperature, even when using engine oil with a lower viscosity than specified in the SAE viscosity standard in the tested mass-production engine.

In addition, a number of prototype engine oils with a lower viscosity than specified in the SAE viscosity standard were created, and the property values and positioning of these prototype engine oils relative to the SAE viscosity standard were confirmed.

Engine oil with a lower viscosity than specified in the current SAE viscosity standard can be expected to further enhance fuel economy, so the establishment of further low-viscosity standards is desired.

1. ま え が き

近年、地球温暖化抑制などの課題を受け、CO₂ 削減のために、自動車の燃費改善が求められている。燃費改善手法の一つとして、エンジン油の低粘度化が有効であることが知られている^{(1), (2)}。しかし、エンジン機構によっては、過度な低粘度化は、逆に省燃費性を低下させる^{(3), (4)}。ま

た、単純にエンジン油を低粘度化しても、高温時の摩耗性、油圧デバイスの作動性低下、オイル消費増加などが懸念される⁽⁵⁾。

エンジン油は、交換頻度や市場入手性が最も高い汎用的な部品であるため、SAE (Society of Automotive Engineer) 粘度規格 (SAE-J300) に代表されるような、いくつかの規格が制定されている。その規格により、省燃費性や高温時のしゅう

* 四輪 R&D センター

Table 1 SAE viscosity standard

	Viscosity grade	CCS viscosity		MRV viscosity		Kinematic viscosity (100 °C) (mm ² /s)		HTHS viscosity (150 °C) (mPa·s)
		mPa·s	°C	mPa·s	°C	Min.	Max.	
Winter grade	0 W	6200	-35	60000	-40	3.8		
	5 W	6600	-30	60000	-35	3.8		
	10 W	7000	-25	60000	-30	4.1		
	15 W	7000	-20	60000	-25	5.6		
	20 W	9500	-15	60000	-20	5.6		
	25 W	10000	-10	60000	-15	9.3		
	20					5.6	9.3	2.6
	30					9.3	12.5	2.9
	40 (0 W, 5 W, 10 W)					12.5	16.3	2.9
	40 (15 W, 20 W, 25 W)					12.5	16.3	3.7
	50					16.3	21.9	3.7
	60					21.9	26.1	3.7

う動摩耗の保証がなされている。そのため、エンジン油の省燃費性やしゅう動摩耗に関する論文の多くは、現行 SAE 粘度規格への適合を前提とした報告となっている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

そこで本研究では、まず、現行 SAE 粘度規格にとられない低粘度エンジン油を用い、省燃費効果を予測した。次に、低粘度エンジン油の最大の課題である高温時における、しゅう動部の耐摩耗性を検証した。それらの結果を踏まえ、いくつかの低粘度エンジン油を試作し、SAE 粘度規格との位置づけを確認した。

2. 本研究の進め方

エンジン油は高温では粘度が低くなり、低温では粘度が高くなる特性を有する。常用温度で粘度が高ければ、粘性抵抗による燃費低化が懸念される。一方、高温時に粘度が下がりすぎれば、しゅう動摩耗が懸念される。最近では、高温粘度を保持しつつ、常用粘度を一層低減した省燃費エンジン油の開発が求められている⁽⁶⁾。

このようなニーズに応えるため、エンジン油中には粘度指数向上剤と呼ばれる高分子成分が加えられることが多い。粘度指数向上剤を添加したエンジン油は、非ニュートン流体となることが知られている⁽⁷⁾。

非ニュートン流体となったエンジン油は、エンジン稼動時のようなせん断下において、粘性が一時的に低下する。一時的な粘度低下は、高分子の配向によりもたらされる⁽⁸⁾。特に、高速せん断下における粘度低下割合が大きいことが知られている。一方、ニュートン流体には、高分子成分が添加されていないことから、一時的なせん断による粘度低下は生じない。

粘度と燃費、粘度としゅう動摩耗との相関をより正確に把握することを考えれば、せん断により粘度が変化しない

ニュートン流体でのエンジン試験が望ましい。そこで、常用温度 (80 °C 程度) と高温 (130 °C 程度) とを切り分けて考慮し、別々の油で粘度を調整すれば、ニュートン流体でエンジン試験ができると考えた。

つまり、一方では燃費と粘度との関係を把握するため、常用温度の粘度にのみ着目し、ニュートン流体油を調整することとした。検証には、フリクショントルク (エンジン台上モータリングフリクショントルク) 測定を用い、燃費と粘度との相関を概算した。

他方、高温時のしゅう動摩耗と粘度との関係を把握するため、高温粘度にのみ着目し、ニュートン流体油を調整することとした。検証には、CAE によるベアリング油膜解析とエンジン耐久 (エンジン台上ファイアリング耐久) 試験を用い、低粘度油の適用成立性を確認した。なお、ニュートン流体の粘度は、動粘度に密度を乗じることで算出した⁽⁹⁾。

ニュートン流体油での試験結果を踏まえ、省燃費性を追求したいくつかの低粘度エンジン油を試作した。高分子成分である粘度指数向上剤を添加するため、最終的な省燃費エンジン油を試作すれば、非ニュートン流体となる。先述のように、ニュートン流体と非ニュートン流体とでは、せん断による粘性挙動が異なる。この影響差を最小限にとどめるため、より非ニュートン流体の粘性が低下する高温高せん断 (High Temperature High Share:HTHS ASTM D4624) 粘度測定により、試作した省燃費エンジン油の粘度を評価した。

3. SAE 粘度規格と市販油の位置付け

Table 1 に、現行 SAE 粘度規格の概要を示す。Table 1 に示すように、SAE 粘度では、高温時の粘度規定はあるものの、常用温度での粘度規定は無い。エンジン油の省燃費

性改善を目的とすれば、常用温度の粘度を把握することが重要である。

そこで、SAE 粘度規格に適合した市販油の常用温度での粘度を調査し、本研究で用いる試験油の粘度設定の一助とした。前章に記載したように、近年のマルチグレードエンジン油は、非ニュートン流体であるため、粘度については、HTHS 粘度にて整理した。Fig. 1 に、市販油の各温度ごとの HTHS 粘度を示す。HTHS 粘度については、100, 150 °C を実測し、それ以外の温度については、実測値に基づく計算値を用いている⁽⁹⁾。

市販油を調査した結果、SAE 粘度規格に適合する油の中ではどの温度域においても、Honda 0W-20 油は最も HTHS 粘度の低い位置付けであることが確認された。

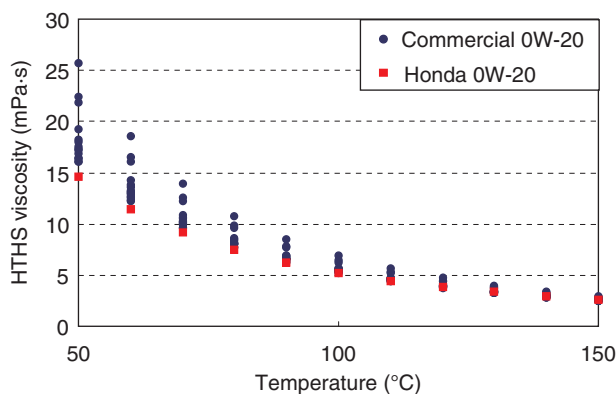


Fig. 1 Market data for commercial oil (HTHS viscosity)

4. 低粘度エンジン油の省燃費効果

4.1. 低粘度エンジン油での摩擦損失低減効果の見極め

摩擦理論として、ストライベック曲線が良く知られている⁽⁸⁾。Fig. 2 にストライベック曲線を示す。荷重、速度条件が一定であれば、流体潤滑下 (Fig. 2 中のⅢ) ではエンジン油の粘度低下とともに摩擦係数が減少する。よって、流体潤滑下におけるエンジン油での省燃費貢献を考える場合、低粘度化が有効である。しかし、エンジン油の粘度を下げ過ぎれば、やがて、金属接触が発生する混合潤滑や境界潤滑となり、摩擦係数は増加するといわれている^{(3), (4)}。

従って、エンジン油の低粘度化による摩擦損失の低減効果の限界性を見極めることが重要である。

4.2. フリクショントルク測定条件

エンジン油による摩擦損失低減効果の確認として一般的である、フリクショントルク測定を実施した⁽¹⁾。Fig. 3 に、フリクショントルク測定に用いた試験装置を示す。Fig. 4 に、フリクショントルク測定に使用した試験油の粘度性状を示す。市販の SAE 粘度規格適合油の調査結果を元に、試験

油の粘度を設定した。純粹に低粘度化による省燃費効果性を把握するため、添加剤を一切使用せず、ニュートン流体油 (基油のみ) を用い、フリクショントルク測定をおこなった。Table 2 に、使用したエンジン諸元および試験条件を示す。試験条件としては、代表的な運転条件である 10・15 モードを考慮し、油温 80 °C、エンジン回転数 700-3500 rpm とした^{(2), (6)}。

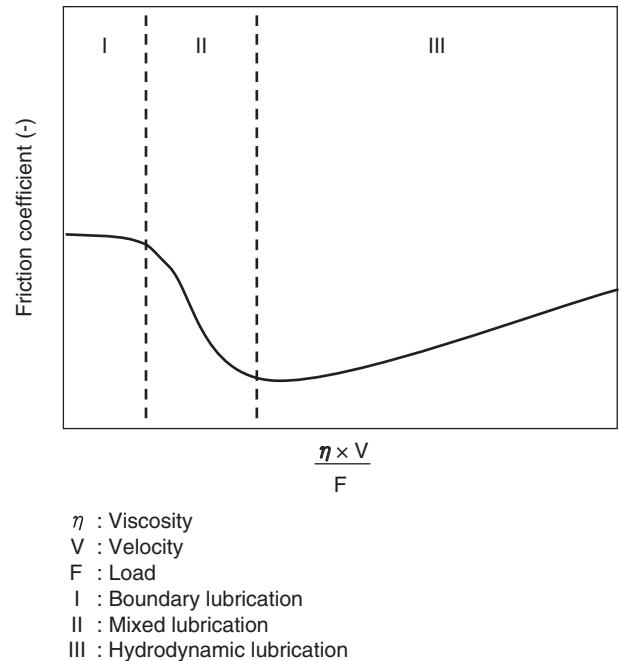


Fig. 2 Stribeck curve

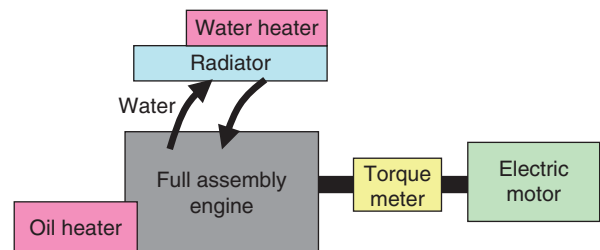


Fig. 3 Schematic diagram of engine motoring tester

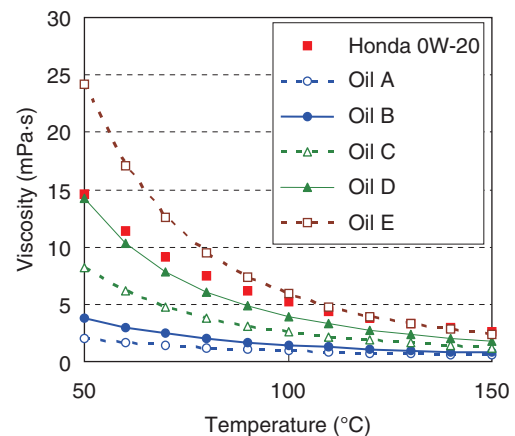


Fig. 4 Viscosity of test oils with engine motoring tester

Table 2 Engine specifications (friction torque tests)

Engine	L13
Number of cylinders and configuration	Inline 4
Valve train	SOHC 4-valve, Roller follower
Displacement (cm ³)	1,339
Bore × Stroke (mm)	73.0 × 80.0
Compression ratio	10.5

4.3. フリクシントルク測定結果と解析

Fig. 5 に、各回転数ごとにおける粘度 (80 °C) とフリクシントルクとの相関を示す。ほぼ全ての回転域において、低粘度化に伴い、フリクシントルクが減少している。1995 年の長島らの報告以上の低粘度エンジン油でも、フリクシントルクの改善が確認された⁽⁴⁾。これは、エンジン技術の進化により、動弁系のローラーフォロワー化や、各しゅう動部の面粗度向上などで、エンジン自体が低摩擦化したためと考えられる。

一方で、低回転、低粘度下においては、わずかながらフリクシントルク増加が確認された。これは、ストライバック曲線の理論に従えば、周速と粘度が極端に低下したことで、混合潤滑、境界潤滑の領域に達したためと考えられる。

4.4. 燃費効果の予測

フリクシントルク測定結果を用い、試験油 A から E について、燃費改善効果の予測をおこなった。燃費予測の演算アルゴリズムのベース式を式 (1) に示す⁽¹⁰⁾。

$$\Sigma G_{fuel} = \Sigma \{BSFC \times P_{se} \times Hr\} \quad (1)$$

G_{fuel} : 燃料消費量

$BSFC$: 正味燃料消費率

P_{se} : 正味出力

Hr : 時間

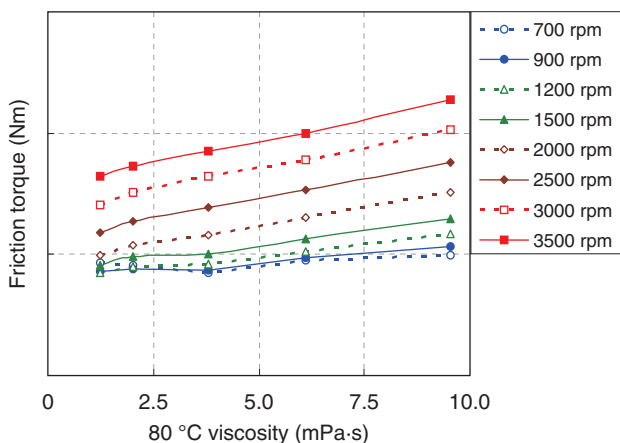


Fig. 5 Friction measured in fully assembled engine

式 (1) に対し、試験油を変更した場合の G_{fuel} の算出式を式 (2) に示す。

$$\Sigma G_{fuel}' = \Sigma \{BSFC' \times P_{se} \times Hr\} \quad (2)$$

$$BSFC' = \{ (P_{se} + P_{sf}') \times BSFC \} / (P_{se} + P_{sf}) \quad (3)$$

G_{fuel}' : 試験油変更後の燃料消費量

$BSFC'$: 試験油変更後の正味燃料消費率

P_{sf} : 機関 (摩擦) 損失

P_{sf}' : 試験油変更後の機関 (摩擦) 損失

Fig. 6 に、燃費効果予測手法の概念図を示す。式 (1) - (3) および、Fig. 6 に示されるように、車輛特性やモードデータがある場合、標準油にて正味燃料消費率、正味出力、機関損失 (フリクシントルク) を測定しておけば、評価したい試験油のフリクシントルクを測定するだけで、燃費効果が予測できる。

そこで、標準油として、Honda 0W-20 油を用い、Honda L13 エンジンにおける正味燃料消費率、正味出力とフリクシントルクの測定をおこなった。

これらの測定データと Fig. 7 のフリクシントルク測定結果を用い、燃費改善の効果予測をおこなった。燃費改善の効果予測には、燃費モードとして一般的である 10・15 モードを用いた。Fig. 7 に燃費効果予測の結果を示す。Fig. 7 より、フリクシントルク測定において、低回転側で

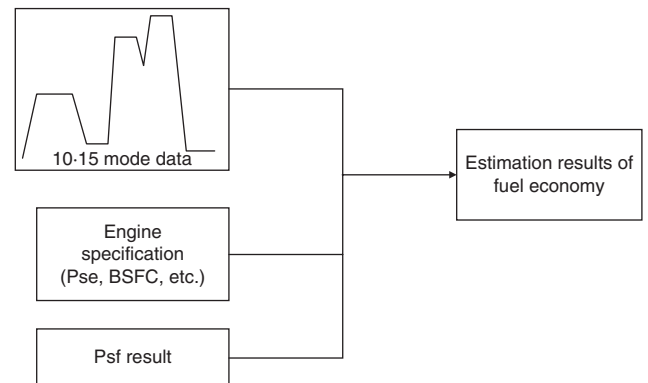


Fig. 6 Simulation model structure

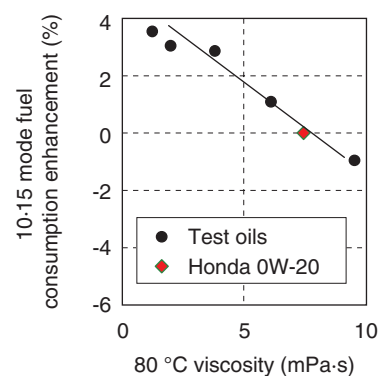


Fig. 7 Relationship between 80 °C viscosity and estimated fuel economy enhancement

ずかなフリクショントルク増加が確認されたような低粘度油においても、一般的な実走行モードを考慮すれば、燃費改善効果が見られる。つまり、実走の燃費を考えれば、常用温度の粘度は低いほど省燃費性が高まるといえる。

5. しゅう動部摩耗への影響

5.1. 低粘度化による高温としゅう動摩耗の懸念

高速、高負荷運転条件において、エンジン油が高温となり、粘度は低下する。そのため、しゅう動部の耐摩耗性が課題となる。特に、爆発荷重や慣性荷重により、最も摩耗影響が大きいエンジンしゅう動部位の一つとして、コンロッドの大端部ベアリングが挙げられる⁽¹¹⁾。そこで、以下の二つのアプローチ手法を用い、低粘度化によるベアリング摩耗への影響性を確認した。

- (1) CAE での油膜計算
- (2) エンジン耐久試験

5.2. 使用した試験油

Table 3 に、CAE もしくはエンジン耐久試験に用いた試験油を示す。市販の SAE 粘度規格適合油の調査結果を元に、試験油の粘度を設定した。また、最も粘度の高い位置付けである Oil I については、高温粘度が Honda 0W-20 と同等程度になるよう調整した。Fig. 8 に、それら試験油の粘度データを示す。純粋に低粘度化によるしゅう動摩耗への影響を把握するため、添加剤を一切使用せず、ニュートン流体油（基油のみ）でエンジン耐久試験をおこなった。CAE による油膜解析においても、ニュートン流体として取り扱った。

5.3. 油膜計算手法と条件

油膜計算には、コンロッド大端部の弾性変形を考慮するため、Elastohydrodynamic (EHD) 計算をおこなった。油膜特性の計算手法は佐藤らの報告に基づき、油膜厚さと油膜圧力の計算をおこなった⁽¹²⁾。

計算に用いたコンロッドモデルや各種データは、後述するエンジン耐久試験で用いているエンジンデータとした。計算条件も、耐久条件と同様、高速、高負荷運転モードとした。

5.4. CAE による油膜計算結果と考察

最小油膜厚さが小さくなれば、面粗度の粗い部位での金属接触が懸念され、最大油膜圧力が大きくなれば、しゅう動部位の疲労剥離などが懸念される。Fig. 9 に油膜計算結果として、粘度ごとにおける最小油膜厚さ、最大油膜圧力を示す。Fig. 9 より、低粘度エンジン油を使用することで、最小油膜厚さがわずかに小さくなり、最大油膜圧力が顕著に大きくなる傾向が確認できる。

Table 3 CAE and engine bench test oils

Oil name	CAE	Engine bench
F	✓	
G	✓	
H	✓	✓
I	✓	✓

この理由として、ある程度油膜厚さが小さい場合、わずかでもそれ以上に油膜厚さが小さくなれば、油膜を保持しようとする反作用効果が大きく得られるためと考えられる。従って、低粘度エンジン油を適用する場合、金属接触による摩耗以上に、油膜圧力増大に伴う疲労剥離を起点とする摩耗が課題になると考えられる。

実機を用いたエンジン台上試験を実施するにあたり、この点に注意し、現行 SAE 粘度適合油とほぼ同等の油膜圧力となるよう試験油の粘度を調整した。

5.5. エンジン耐久試験条件

Table 4 に、エンジン耐久試験条件を示す。CAE との整合を図るため、L13 エンジンを使用し、高速、高負荷運転での耐久モードを実施した。また、CAE での油膜圧力の計算結果を踏まえ、エンジン耐久試験には試験油 H、I を用いた。

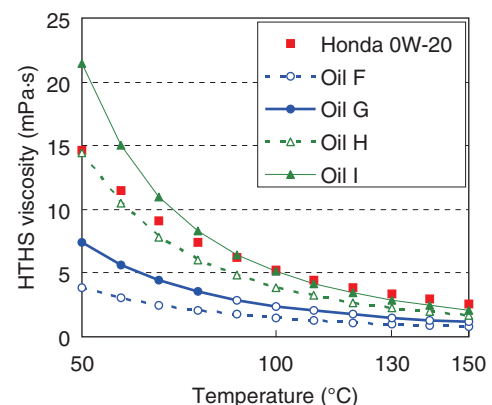


Fig. 8 HTS viscosity of CAE and engine bench test oils

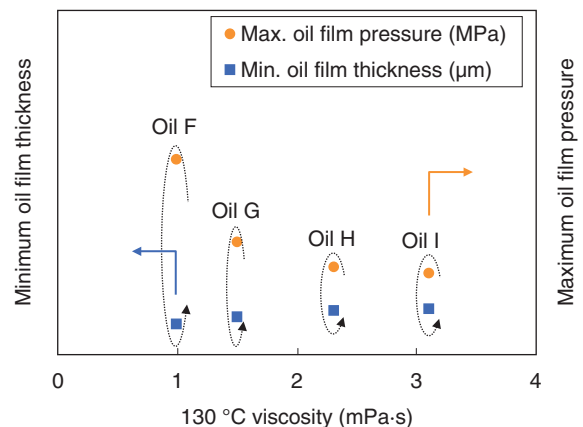


Fig. 9 CAE results of oil film on conrod bearing

Table 4 Engine bench test conditions

Engine	L13
Engine speed	High
Throttle	Wide open
Engine oil temperature	About 130 °C

5.6. エンジン耐久試験結果

Fig. 10 に、エンジン耐久試験後のコンロッド大端部ベアリングの摩耗量を示す。また、Fig. 11 に、耐久前後でのエンジン油の ICP 分析 (ASTM D5185) による Fe, Al 量を示す。

Oil I の高温粘度が Honda 0W-20 とほぼ同程度であることから、低粘度化による顕著な摩耗の傾向は小さいと考えられる (Fig. 10)。また、コンロッド大端部ベアリング以外のしゅう動部についても、低粘度化による顕著な摩耗は確認されなかった。それを裏付けるデータとして、低粘度化に伴うエンジン油中の Fe, Al 成分量の顕著な増加も、確認されなかった (Fig. 11)。

これらの結果より、高温粘度を現行 SAE 粘度以下にしても、発生する油膜圧力を現行 SAE 粘度適合油と同等程度におさえれば、しゅう動摩耗に対し、成立見通しがあると考えられる。

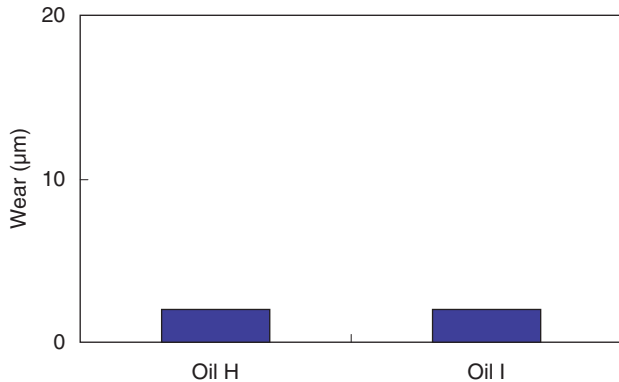


Fig. 10 Average bearing wear results

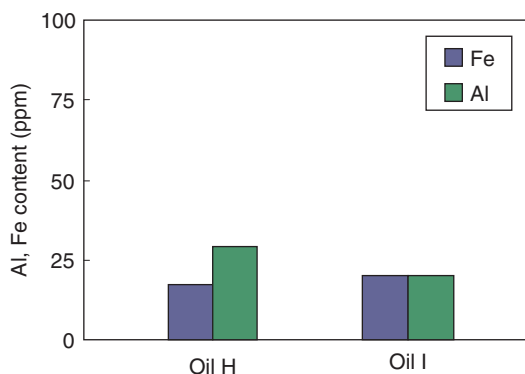


Fig. 11 Metal contents in engine oil after endurance tests

Table 5 Prototype engine oil formulation

Base oil	Viscosity index improver	Other additives
Gr. III Gr. IV Gr. V	PMA-1 PMA-2	Commercial additive pack (GF-4)

6. オイル配合の考え方

6.1. 低粘度油のオイル配合の考え方

燃費と粘度、しゅう動摩耗と粘度との関係を把握するため、ニュートン流体油を用い、検証を進めてきた。これは、常用粘度と高温粘度を切り分け、パラメータスタディとして試験を進めていたからである。しかし、最終的には、常用温度の粘度低減と高温粘度の保持は同時に求められ、粘度指数向上剤が必要となる。これまでの試験結果を踏まえ、以下の二つの観点から最大の粘度指数化を目指し、低粘度エンジン油の試作をおこなった。

- ・ 常用温度の粘度は低いほど省燃費性が改善される。
- ・ 高温時のしゅう動摩耗を保証するには、油膜圧力が増大しない程度の粘度設定が必要

Table 5 に試作油の処方概要を示す。良好な温度粘度特性を目指すため、ベース油には、Gr. III, IV, V の混合品を用いた。粘度指数向上剤には、粘度指数向上に効果が高い PolyMethacrylate (PMA) を用い、非ニュートン流体化した⁽⁸⁾。その他の添加剤は、ILSAC GF-4 相当の添加剤パッケージを用い、いくつかの低粘度エンジン油を処方した。

6.2. 試作油の粘度と SAE 粘度規格との位置付け

Fig. 1 より、0W-20 油の中でも Honda 0W-20 油は、最も常用温度の HTHS 粘度が低い位置付けにある。従って、常用温度の HTHS 粘度をこれ以上低減しようとするれば、Fig. 12 に示す試作油のように、高温粘度を現行 SAE 粘度規格に適合させることは困難である。

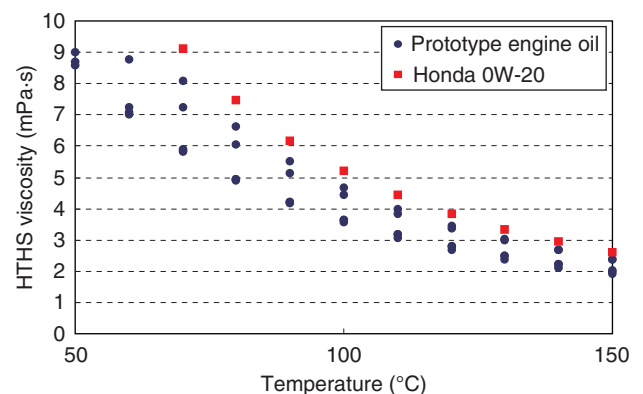


Fig. 12 HTHS viscosity of prototype engine oil

7. まとめ

低粘度エンジン油を供試量産エンジンに用い、省燃費効果と高油温時のしゅう動摩擦を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 常用温度の粘度を低減しても、境界／混合潤滑によるフリクション増加影響はほとんど確認されず、省燃費エンジン油を作成する上で、粘度低減は有効な手段である。
- (2) 高温時のしゅう動摩擦への影響性を検証した結果、現行 SAE 粘度規格の粘度以下でも、耐摩耗性の成立見通しが得られた。
- (3) 常用温度の粘度を一定以上に低減する場合、SAE 粘度規格の高温粘度に適合させることは困難である。

以上より、一層の省燃費性をエンジン油の低粘度化によって追求するには、SAE 粘度規格にさらなる低粘度規格が制定されることが望ましい。

8. 今後の展望

本研究より、低粘度エンジン油の効果と、最大の課題である高温時のしゅう動部における耐摩耗の成立性が示された。しかし、現行 SAE 粘度規格以下の低粘度エンジン油を実際に量産適用する場合、下記の点に注意する必要があると考える。

- ・ 油圧低下が予想されるため、油圧機構への配慮。
- ・ ILSAC (International Lubricant Standardization and Approval Committee) などの規格に設けられているような、エンジン油の蒸発性などへの配慮。
- ・ フリクショントルク測定結果で確認された低回転域での境界、混合潤滑と推測される事象へのエンジン信頼性の配慮。

参考文献

- (1) 田中秀樹, 長島隆, 佐藤孝之, 川内昌司: 0W-20 低粘度エンジンオイルの省燃費効果, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.143-148
- (2) Sagawa, T.: Development 0W-20 ILSAC GF-3 Gasoline Engine Oil, SAE Paper, 2002-01-1636
- (3) 田本芳隆, 波岸俊哉: ガソリンエンジン油の省燃費への取り組み, IDEMITSU TRIBO REVIEW, No.29, p.1-4(2006)
- (4) 長島隆: 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, HONDA R&D Technical Review, Vol.7, p.131-139
- (5) 佐藤孝之, 川内昌司: ILSAC GF-4 対応 0W-20 ガソリンエンジンオイルの開発, Honda R&D Technical

Review, Vol.16, No.2, p.171-176

- (6) Kobayashi, N., Suzuki, T., Kamioka, R., Murakami, M., Yamashita, M., Ogawa, T., Komiya, K., Moritani, H.: Study of Future Engine Oil (First Report): Future Engine Oil Scenario, SAE Paper, 2007-01-1977
- (7) 西田稔: 粘度指数向上剤の機能と用途, 潤滑経済, Vol.3, p.14-18(2003)
- (8) 小西誠一, 上田亨: 潤滑油の基礎と応用, コロナ社, 372p.(1992)
- (9) Tamoto, Y.: Possibility of Ultra Low Viscosity Fuel Saving Gasoline Engine Oil, SAE Paper, 2004-01-1936
- (10) 山本和久, 青木隆: CVT と自動 MT が燃費に与える影響の解析と燃費向上予測, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p.63-72
- (11) 長島隆: トライボロジーを語る, トライボロジスト, Vol.53, No.2, p.1(2008)
- (12) 佐藤謙次, 町田恭一, 牧野克紀: コンロッド大端部の剛性が油膜に与える影響について, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p.33-38

■ 著 者 ■



奥山庸介



下荒地大地



川内昌司



八田剛志



丸山雅司