

## 環境適応型超低粘度ガソリンエンジン油の研究

(GE油超低粘度化グループ)

○久保浩一、佐藤武司、森木恵一

### 1. 試験研究の内容

#### 1.1 研究開発の背景

日本の石油需要は年間約2.5億KIであり、そのうちの約4割がガソリンや軽油などの自動車用燃料として消費されている。その結果、全炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)排出量の内の約2割が運輸部門から排出され、またその排出量は年々増加する傾向にある。1997年12月に日本の京都で地球温暖化防止会議(COP3)が開かれた。会議では、これらCO<sub>2</sub>の排出量の増加に歯止めを掛けるため、1990年のCO<sub>2</sub>排出量より6%削減することが日本の目標として合意されている。このため運輸部門では、2010年までに1995年比で約20%の燃費向上を達成しなければならないことが提示されている。こうした背景から、現在のガソリン及びディーゼル内燃機関をいかに効率よく稼働させ、燃焼によって排出されるCO<sub>2</sub>の量を削減するかが最も重要な課題となっている。

自動車の燃費を向上し、エンジンから排出されるCO<sub>2</sub>を低減する方法は、エンジン燃焼効率の改善、車体及びエンジンの軽量化等数多くあるが、使用する潤滑油によるエンジン摩擦の低減による燃費向上も非常に有効な1つの方法である。またこの方法は、燃焼効率の改善等と異なって、エンジン自体のシステムの変更を必要としないため、手軽でかつ広範囲に適用することができる。

#### 1.2 研究開発の方法

使用する潤滑油によってエンジンの摩擦を低減する方法としては2つある。1つはエンジンが低温高速運転条件の場合、使用するエンジン油の粘度を下げ、粘性抵抗を低減してエンジン摩擦を下げることである(エンジン油の超低粘度化)。しかし極端なエンジン油の低粘度化は、エンジンが高温低速運転条件下において油膜形成能力が低下し、金属間接触が増大、異常なエンジン摩擦上昇や摩耗を引き起こす可能性がある。このような運転条件下では、2つめの方法として摩擦低減剤(摩擦調整剤ともいう。以後FMと略す)を適用する方法がある。これは、FMによって表面に強固な吸着膜や反応膜を形成させ、金属間接触を防止しエンジン摩擦を下げるという方法である。この方法では、エンジン油の中にあらかじめ添加されている耐摩耗剤とFMの競争吸着や相互作用によってエンジン油の耐摩耗性を著しく低下させる場合があるため、十分な試験による耐摩耗性やエンジン摩擦の確認と実験、調査研究が必要である。

エンジン油の低粘度化によるエンジン摩耗への影響は、研究報告が少なくまた対応策については明確な方法が提示されていないのが現状である。また、一般的にはエンジン油の超低粘度化を実現するためには摩耗防止及びスラッジ抑制の観点から耐摩耗剤を増量しなければならない。しかし、こうした耐摩耗剤の増量は、排出ガス浄化触媒への悪影響や使用油の廃油処理時の環境汚染

といった点からあまり好ましい方法ではないという問題がある。

本プロジェクトでは、エンジン油の粘性特性がエンジン摩耗や摩擦に与える影響を調査検討し、エンジン油の粘度や耐摩耗剤の配合組成と摩耗、摩擦との関係を明らかにすることによって超低粘度油であっても高い油膜保持能力を持ち、かつ耐摩耗性が高く、エンジン摩擦の低いエンジン油を開発することにある。このためには、粘度指数向上剤や基油の油膜保持能力を明らかにし、エンジン油の粘性とエンジンの潤滑領域を明らかにする必要がある。また超低粘度であってもエンジン油の耐摩耗性を低下させないためには、エンジン油の粘性特性が与える耐摩耗性への影響、及びエンジン油に配合される耐摩耗剤と分散剤、清浄剤、基油との相互作用を明らかにして、耐摩耗剤の効果を最大限に引き出す処方を開発しなければならない。

### 1.3 基準油と試作油マトリックス

エンジン油の粘性特性に対する耐摩耗性を評価、比較検討するため、現在市販されているSAE 5W-30、API SJ、ILSAC GF-2に合格しているガソリンエンジン油を本研究開発の基準油として設定した。この基準油の $150^{\circ}\text{C} \times 10^6\text{s}^{-1}$ における高温高せん断粘度（以下HTHS粘度と略）は $3.10\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、エンジン油中のリン元素含有量は $0.097\text{mass}\%$ である。

平成11年度は、エンジン油の超低粘度化を検討するための基盤となるデータを取得することを目的として、基準油のHTHS粘度、低温クランキング粘度（以下CCS粘度と略）といった粘性特性を変化させた試作油、およびエンジン油中のリン元素含有量を変化させた試作油を調製し、各種評価試験をおこなった。これら試作油のマトリックスを図1.2-1に示す。

なお、基準油および試作油1～10の基油組成は鉱油系基油を用いた。試作油11は合成基油を評価するために基油はポリ- $\alpha$ -オレフィン（以下PAOと略）を用いた。

### 1.4 摩擦摩耗評価試験方法について

試作油の耐摩耗性は、社団法人自動車技術会のJASO M328-95試験法による動弁系摩耗試験法にて評価した。本試験法は、自動車用ガソリンエンジン油の動弁系の耐摩耗性を評価するものである。試験法では、ロッカーアームパッドスカuffingとカムノーズ部に発生した摩耗の深さが評価項目として規定されているが、試験前後のカム形状の変化もあわせて計測した。また本エンジン試験では、吸入空気の温度・湿度が試験のシビアリティー（過酷度）に大きく

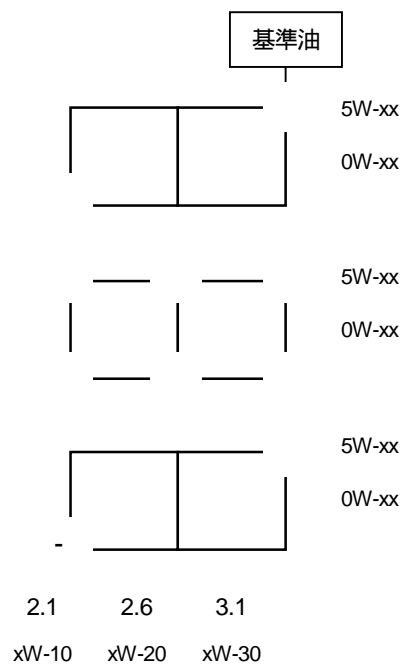


図1.3-1 試作油マトリックス  
(図中番号が試作油番号)

影響することが知られている<sup>1)</sup>。このため試験法には特別な吸入空気温度・湿度の規定はないが、全ての試験において温度25℃、相対湿度40%に調整した試験条件下で本エンジン試験を実施した。

また試作油の耐摩耗性能を簡便に評価することを目的として、往復運動摩擦摩耗試験機を用いた摩耗試験を実施した。試験条件は、荷重120N、油温50℃、振幅1.0mm×50Hzで30分間運転し、試験後のボールの摩耗痕径を測定し評価した。試験は5回実施し、その平均値を算出した。

その他、試作油の油膜形成能を評価するため、光干渉法を用いた油膜厚さ解析装置による潤滑油膜厚を測定し、油膜形成能を評価検討した<sup>2)</sup>。

## 1.5 潤滑油添加剤の分析について

エンジン油に使用する市販の石油製品添加剤について、研究開発に必要なデータを取得することを目的として、本年度は市販の石油製品添加剤に含まれる各種の元素量を測定した。金属系の元素含有量はJPI 5S-44-95(ICP法)、窒素元素量はJIS K 2609、イオウ元素量はJIS K 2541、塩素元素量は波長分散蛍光X線分光法(内部標準添加法)で測定した。

## 2 試験研究の結果と解析

### 2.1 基準油及び試作油の性状

基準油及び各種評価試験に用いた試作油の各種性状を表2.1-1に示す。

表2.1-1 試作油の各種性状

	基準油	試作油1	試作油2	試作油3	試作油4	試作油5	
SAE 粘度グレード	5W-30	5W-30	0W-10	5W-10	5W-30	5W-20	
動粘度 40℃	mm <sup>2</sup> /s	66.27	62.02	30.09	34.02	65.44	47.57
動粘度 100℃	mm <sup>2</sup> /s	11.06	10.32	6.091	6.058	10.68	8.116
粘度指数		159	155	155	125	153	144
HTHS粘度	mPa・s	3.1	3.1	2.1	2.1	3.1	2.6
CCS粘度-25℃	mPa・s	3300	3150	-	3310	3300	3280
CCS粘度-30℃	mPa・s	-	-	3070	-	-	-
油中リン元素量	mass%	0.097	0.100	0.100	0.075	0.075	0.075

	試作油6	試作油7	試作油8	試作油9	試作油10	試作油11	
SAE 粘度グレード	0W-20	0W-10	0W-30	5W-30	0W-10	0W-10	
動粘度 40℃	mm <sup>2</sup> /s	39.57	29.74	64.83	63.12	29.64	33.95
動粘度 100℃	mm <sup>2</sup> /s	7.685	6.091	10.91	10.41	6.010	6.431
粘度指数		168	158	160	155	155	145
HTHS粘度	mPa・s	2.6	2.1	3.1	3.1	2.1	2.1
CCS粘度-25℃	mPa・s	-	-	-	3270	-	-
CCS粘度-30℃	mPa・s	3060	3000	3020	-	3050	3130
油中リン元素量	mass%	0.075	0.075	0.075	0.050	0.050	0.050

なお試作油の動粘度、粘度指数はJIS K 2283、HTHS粘度はASTM D 4741、CCS粘度はASTM D 5923、油中リン元素量はJPI試験法に従って測定した。

## 2.2 エンジン耐摩耗性の試験結果

基準油および試作油のJASO M328-95による耐摩耗性試験結果を表2.2-1に示す。低リン量・低HTHS粘度の組み合わせ(試作油10および11)が最も耐摩耗性が劣るという結果が得られた。

表2.2-1 M328-95エンジン試験の結果

供試油名	油中リン量 (mass%)	SAE 粘度グレード	カムノーズ 平均摩耗量 ( $\mu\text{m}$ )	ロッカーパット スカuffing (%)
基準油	0.095	5W-30	9.7	34.7
試作油 1	0.100	5W-30	13.0	33.8
試作油 2	0.100	0W-10	10.4	28.0
試作油 3	0.075	5W-10	20.0	44.8
試作油 4	0.075	5W-30	6.8	20.5
試作油 5	0.075	5W-20	4.5	17.1
試作油 6	0.075	0W-20	13.7	27.8
試作油 7	0.075	0W-10	23.2	35.8
試作油 8	0.075	0W-30	10.7	34.6
試作油 9	0.050	5W-30	34.7	56.7
試作油10	0.050	0W-10	40.9	67.1
試作油11	0.050	0W-10	42.1	64.2

カムノーズ平均摩耗量 ( $\mu\text{m}$ )とロッカーパットスカuffing面積平均 (%)の相関関係を図2.2-1に示す。図でも明らかのように、摩耗量とスカuffingに高い相関関係が見られた。このため、主にカムノーズ平均摩耗量を用いて試作油の粘度特性と耐摩耗性について考察した。

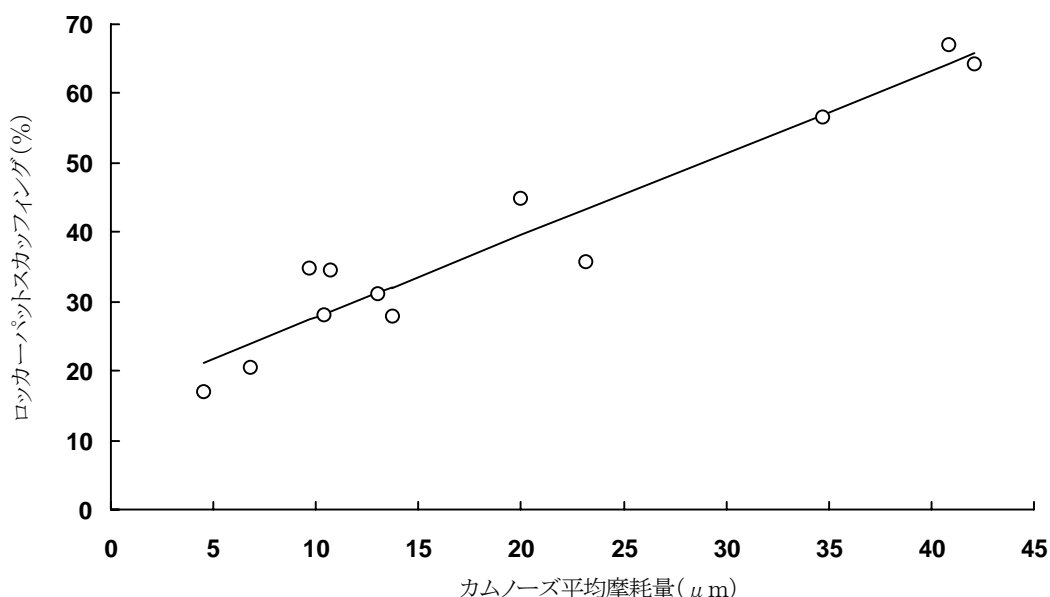


図2.2-1 カムノーズ平均摩耗量とスカuffing面積の関係

エンジン油の粘性特性が与える動弁系摩耗への影響を明らかにするため、油中リン元素量が0.075mass%の試作油について、カムノーズ摩耗量と試作油のHTHS粘度で結果を整理した(図2.2-2)。その結果、CCS粘度は試作油の耐摩耗性には大きな影響を与えないことがわかった。しかしHTHS粘度については粘度が下がるに連れて摩耗量が増加し、耐摩耗性が整理できることが

分かった。またHTHS粘度が低い2.1mPa・sでは、摩耗量は著しく増加しており、エンジン油の超低粘度化を達成するためには、耐摩耗性を大きく改善する処方技術が必要であることがわかった。

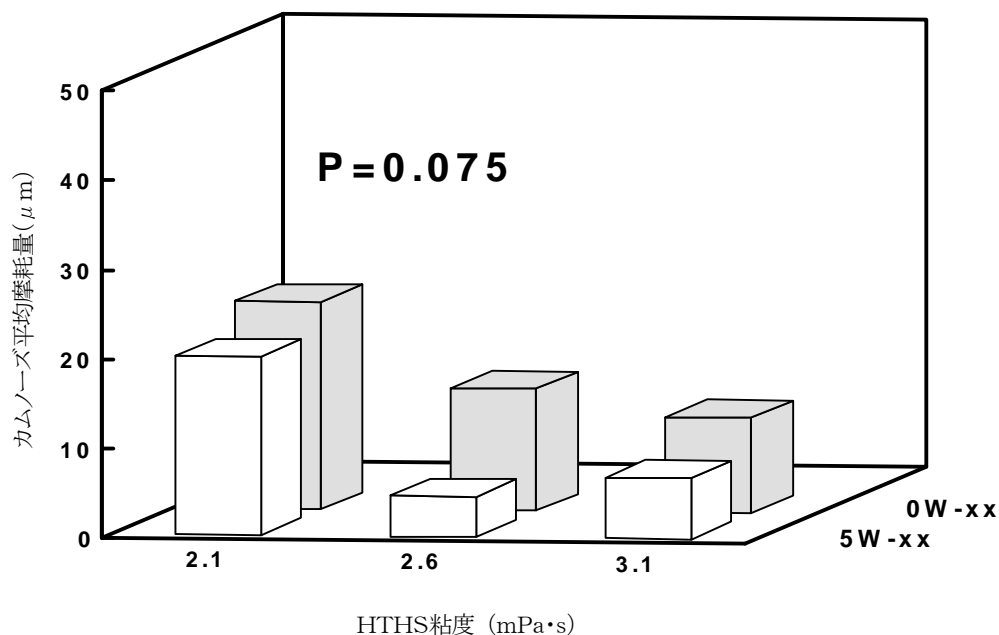


図 2. 2-2 粘性特性とカムノーズ摩耗量の関係

次に油中リン量でカムノーズ摩耗量を整理すると(図 2. 2-3)、HTHS粘度が3.1mPa・sと高い場合でも、リン量が0.050%では著しく摩耗が増加することがわかった。

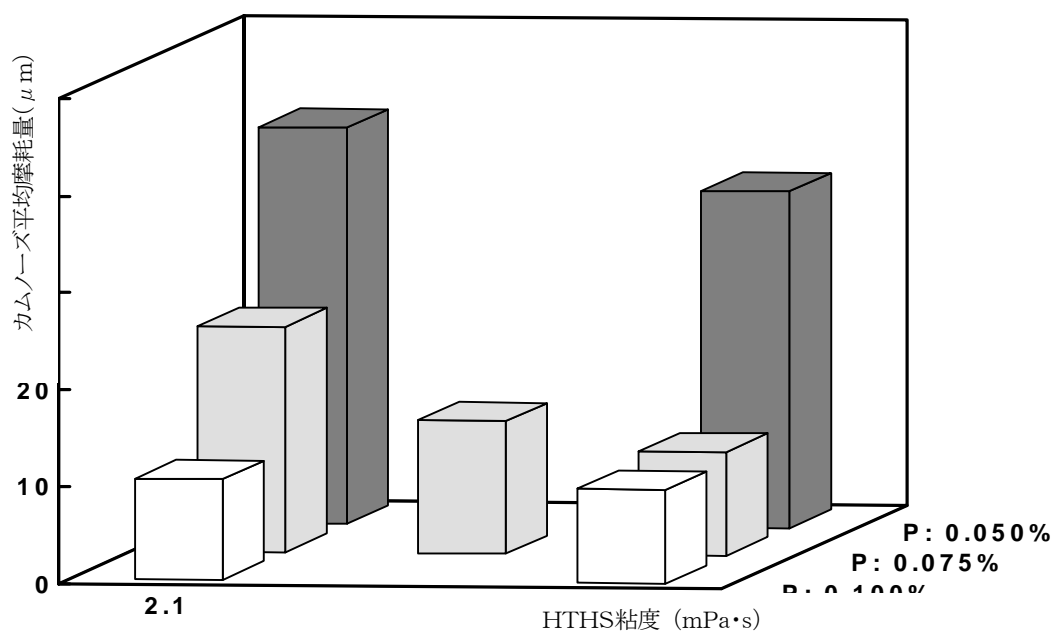


図 2. 2-3 油中リン量とカムノーズ摩耗量の関係

またHTHS粘度が2.1 mPa・sでは、リン量が減少するに従って、摩耗量も著しく増加することがわかった。低リン量・低HTHS粘度の組み合わせで、基油の組成が鉱油系とPAOとでは異なるかどうかを試作油10と試作油11にて同様のJASO動弁系摩耗試験を行った。その結果、試作油10と11の摩耗量の差は見られず、この条件下では、基油組成は耐摩耗性に大きく影響しないことがわかった。

これらの結果整理すると、次のようになる。試作油のCCS粘度は耐摩耗性能には影響を与えない。一方、油中リン量とHTHS粘度は耐摩耗性能に大きく影響した。特に油中リン量はエンジン油の耐摩耗性に対して支配的であり、リン量が低くなるにつれてHTHS粘度が耐摩耗性に徐々に影響してくる。

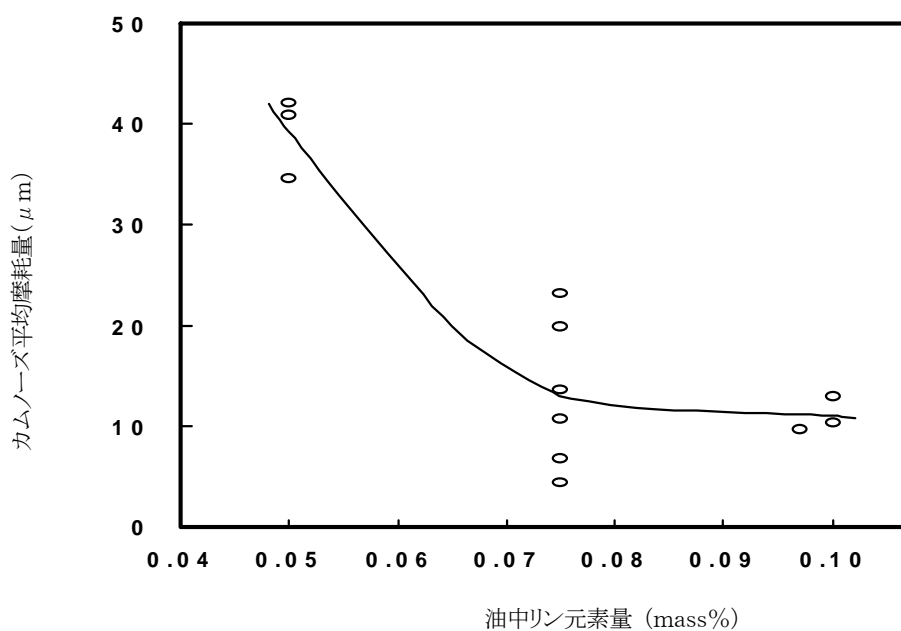


図 2.2-4 エンジン試験における油中リン量とカムノーズ摩耗量の関係

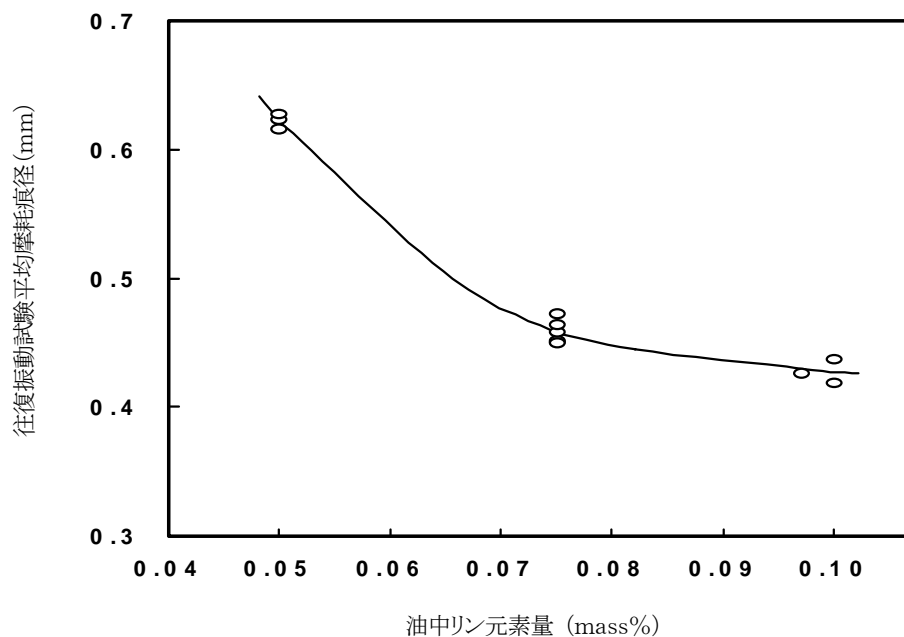


図 2.2-5 リグ試験における油中リン量とカムノーズ摩耗量の関係

次に往復振動摩擦摩耗試験機を用いて、境界潤滑条件下で試作油の耐摩耗性能を評価した(図2.2-5)。先に示した動弁系摩耗試験結果を、油中リン量でカムノズ摩耗量を整理したグラフを図2.2-4に併記した。

これらのグラフからエンジン油の動弁系の耐摩耗性能については、リン量が支配的であることが裏付けられ、リン量がある敷居値を下回ると摩耗量が急激に増大することを示唆している。エンジン試験結果のグラフのカーブの湾曲が大きい理由は、リグ試験とは異なって粘性特性(流体潤滑条件)の影響が含まれているためと思われる。

以上の点から、超低粘度エンジン油を研究開発するためには耐摩耗添加剤の効果を十分に引き出す処方技術を確認することが重要であることがわかった。

### 2.3 基油の油膜厚さ形成能力の解析結果

油膜厚さ解析装置を用いて、粘度指数が100の150N基油、および粘度指数が135のPAOの油膜形成能力の測定をおこなった(図2.3-1)。

その結果、1)滑り速度が小さくなると、スクイーズ効果が低下するため油膜厚さが薄くなる、2)基油の動粘度は高くても、密度が低い方場合はせん断条件下での油膜厚さは薄くなる、ということがわかった。

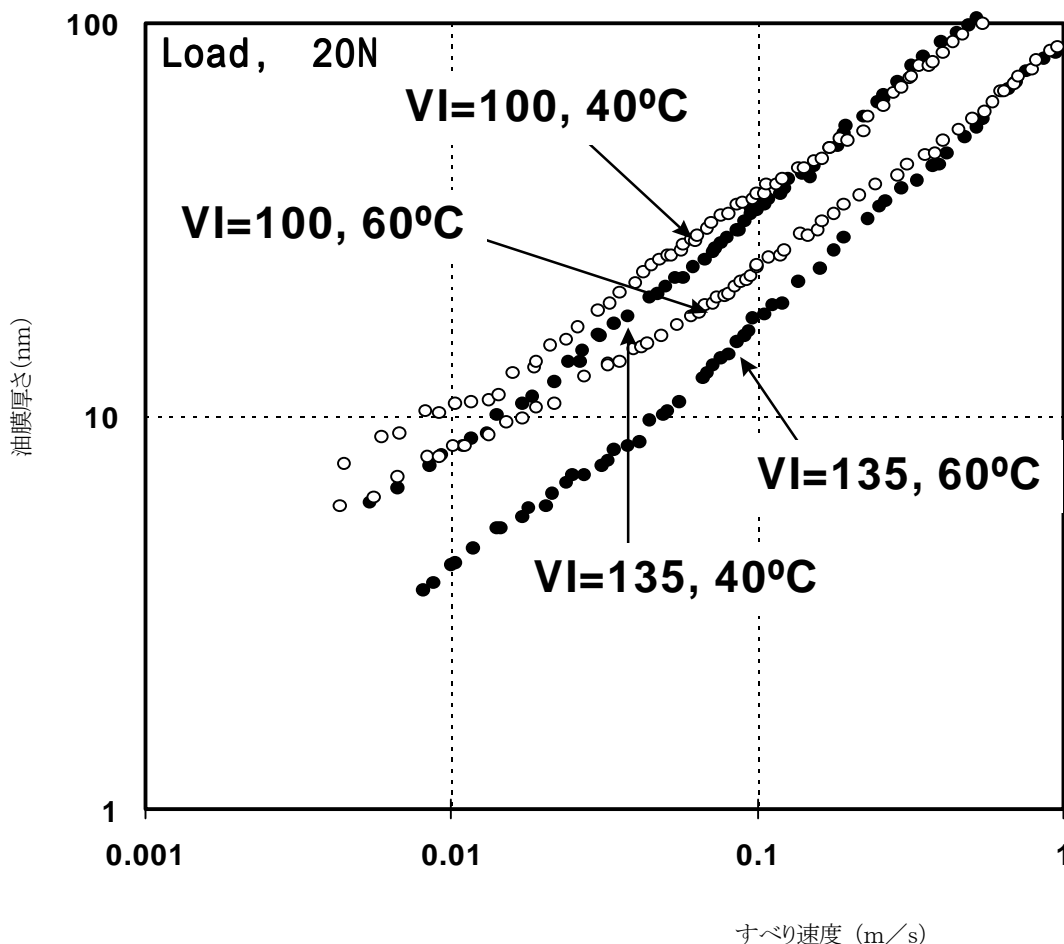


図2.3-1 基油の油膜形成能測定結果

## 2.4 潤滑油添加剤の分析結果

市販のガソリンエンジン油用潤滑油添加剤について、各種元素の分析をおこなった。その結果の1部を表2.4-1に示す。

表2.4-1 潤滑油添加剤の分析結果

		Ca (mass%)	Zn (mass%)	P (mass%)	N (mass%)	S (mass%)	Cl (ppm)
分散剤1	コハク酸イミドビスタイプ A	—	—	—	1.8	—	1050
分散剤2	コハク酸イミドビスタイプ B	—	—	—	2.0	—	410
分散剤3	コハク酸イミドビスタイプ C	—	—	—	0.8	—	120
分散剤4	コハク酸イミドモノタイプ A	—	—	—	2.0	—	2350
分散剤5	コハク酸イミドモノタイプ B	—	—	—	1.7	—	210
分散剤6	コハク酸エステル A	—	—	—	2.3	—	2200
分散剤7	コハク酸エステル B	—	—	—	2.1	—	<5
清浄剤1	スルフォネート A	12.0	—	—	—	1.6	2000
清浄剤2	スルフォネート B	12.8	—	—	—	2.2	200
清浄剤3	フィネート	9.3	—	—	—	3.1	8
清浄剤4	サリシレート	2.5	—	—	—	—	6
耐摩耗剤1	ZnDTP(注2) A	—	9.0	8.2	—	17.1	98
耐摩耗剤2	ZnDTP B	—	8.7	7.5	—	15.0	6
基油1	鉱油	—	—	—	—	0.4	<5
基油2	高度精製基油	—	—	—	—	—	<5
基油3	合成油(PAO)	—	—	—	—	—	<5
VII1(注1)	PMA(注3)	—	—	—	—	—	<5
VII2	OCP(注4)	—	—	—	—	—	<5

(注1) VII: 粘度指数向上剤、(注2) ZnDTP: ジンクジチオフォスフェート、

(注3) PMA: ポリメタクリル酸エステル、(注4) OCP: オレフィン共重合体

エンジン油に含まれる塩素は表2.4-1に示すように、主に分散剤と清浄剤に由来していることがわかる。エンジン油(API)性能によっても異なるが、現在市販されている一般的なガソリンエンジン油にはこれら分散剤が約6%、清浄剤が約3%、耐摩耗剤が約1%前後配合されている。

通常のエンジン油の塩素含有量にこれら分散剤や清浄剤がどの程度影響するか、簡単に類推できるように分散剤を6%、および清浄剤を3%基油に希釈した場合の塩素量含有量を計算し、その結果を図2.4-1および図2.4-2に示す。

清浄分散剤中に塩素が含まれる理由は、合成過程における反応促進剤、触媒、塩素化反応、中和促進剤による有機塩素化合物の残留が考えられる<sup>3)</sup>。分散剤の製法として、塩素化法と、熱反応法が挙げられるが、後者は塩素を使用しないため、添加剤中の塩素含有量が少ない。また1部のスルフォネート系清浄剤の製法には、アルキルベンゼンからスルホン酸を合成し、その後中和



促進剤 ( $\text{CaCl}_2$ ) を添加して中和するために、 $\text{CaCl}_2$  が添加剤に残留し塩素元素が含まれてしまう。

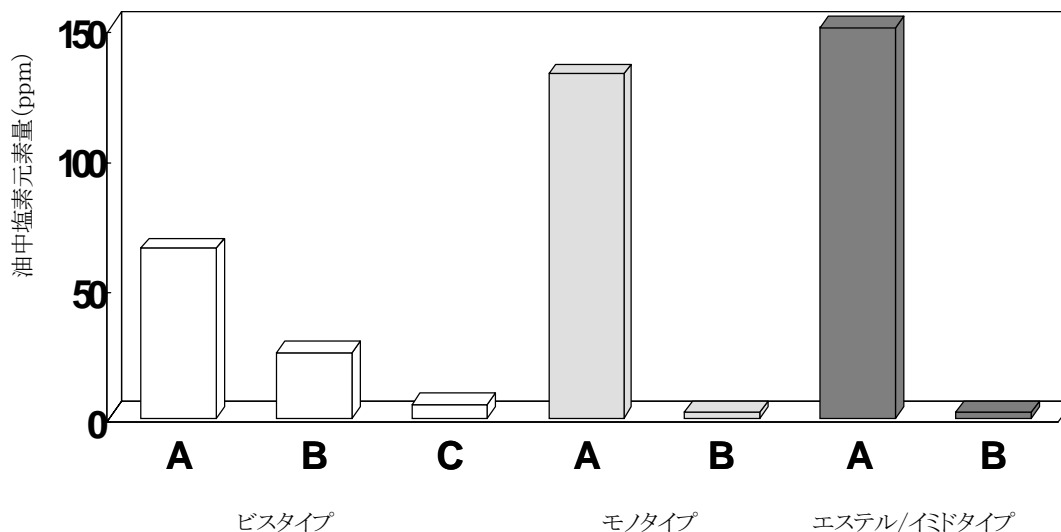


図 2. 4-1 エンジン油に含まれる塩素量：分散剤から由来する塩素量  
(基油にエンジン油用分散剤を6% mass 添加した場合の塩素量)

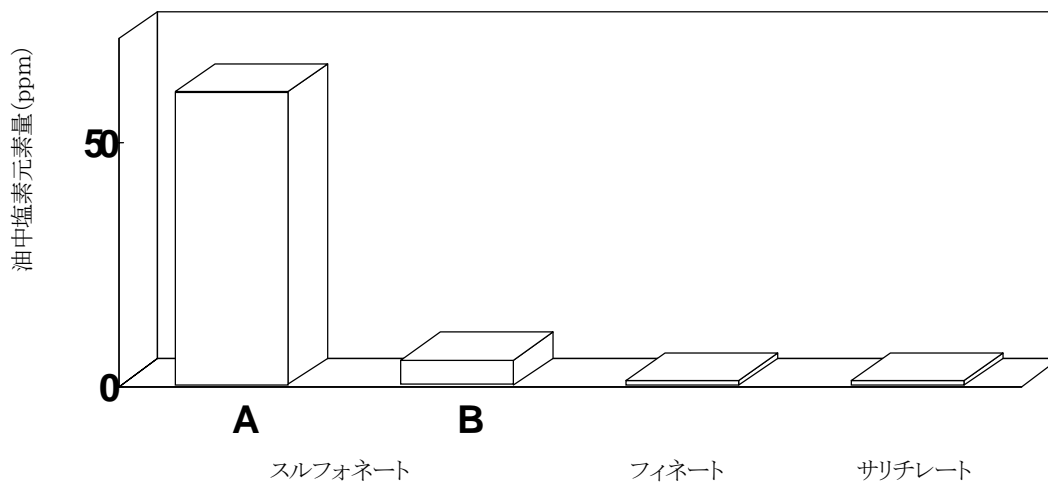


図 2. 4-2 エンジン油に含まれる塩素量：清浄剤から由来する塩素量  
(基油にエンジン油用清浄剤を3% mass 添加した場合の油中塩素量)

表 2. 4-1 の分析結果は、一方ではエンジン油に使用する添加剤を注意して選定し、配合処方を決めればエンジン油中に含まれる塩素量を低めに抑えることが可能であることを示唆している。エンジン油を使用している期間は環境保全の意味で、また使用後の廃棄処理する上では環境汚染や取り扱い上の点で、できるだけ塩素を含まない配合処方を今後開発する必要がある。

### 3 試験研究の成果

#### 3.1 エンジン油の粘度特性、リン元素含有量とエンジン摩耗の関係

試作油の粘度及びリン元素含有量(耐摩耗剤添加量)を変化させ、JASO動弁系摩耗試験を実施した。その結果以下のことが明確になった。

- (1) エンジン油の摩耗量は、エンジン油に含まれるリン元素量(耐摩耗剤添加量)に大きく影響される。
- (2) エンジン油に含まれるリン元素量が0.100%mass添加されれば、エンジン油のHTHS粘度が2.1mPa・sと非常に低くても、エンジン油は十分な耐摩耗性を示した。
- (3) エンジン油に含まれるリン元素量が0.050%massの場合、HTHS粘度が3.1mPa・sとエンジン油の粘性が高い試作油を使用しても、エンジンの摩耗量は非常に大きく、エンジン油の耐摩耗性は著しく低下した。
- (4) エンジン油に含まれるリン元素量が0.75%massの場合、試作油のHTHS粘度が高いものほど良好な耐摩耗性を示す傾向が見られた。
- (5) エンジン油のCCS粘度は、エンジン油の耐摩耗性に大きく影響しない。
- (6) エンジン試験の摩耗結果の中で、カムノーズ平均摩耗量とロッカーパッドスカuffing面積の間に強い相関が見られた。
- (7) 往復振動摩擦摩耗試験機による境界潤滑領域での摩擦試験結果にて、同様に油中リン元素含有量による耐摩耗性の違いが見られた。

#### 3.2 基油の油膜厚さ形成能力

エンジン油に使用する鉱物系基油と合成系基油について、光干渉法により油膜厚さを測定した結果、以下のことが判った。

- (1) 実際のせん断下における粘性は基油の密度にも比例するため、動粘度が高い基油を使用しても油膜厚さは必ず厚くなるとは限らない。高い密度を示す基油の方が同じ動粘度で同じ潤滑条件下では、油膜厚さは厚くなる。
- (2) 滑り速度が遅くなれば、スクイーズ効果が低下するため油膜厚さは低下する。

#### 3.3 エンジン油の添加剤分析

エンジン油に含まれる各種の元素量を測定した。特にエンジン油に含まれる塩素量については以下のことが判った。

- (1) エンジン油に含まれる塩素量は、主に分散剤及び清浄剤から由来する。
- (2) これらにふくまれる塩素は、その製造過程中における反応促進剤や触媒、中和促進剤からくる不純物が主体である。
- (3) エンジン油に使用する添加剤を選択すれば、含まれる塩素の量を大幅に削減する処方を作成可能であることが分かった。

## 4 まとめと今後の課題

### 4.1 耐摩耗剤の配合処方とエンジン摩耗との関係調査

優れた耐摩耗性を有する低粘度・低リン元素含有量エンジン油の処方技術の開発を目的として、平成11年度はエンジン油の粘性及びリン元素量の間関係をJASO動弁系摩耗試験を実施し、その関係を明らかにした。

今後は試作油の組成を見直し、超低粘度低リン量の新たな試作油を作成し、摩擦摩耗試験機および規格エンジン台上摩耗試験を通して評価・検討する。またエンジン油用の摩擦調整剤を検討する。エンジン油に添加し省燃費性を評価すると同時に、摩擦調整剤が与える耐摩耗性への影響も確認、整理する。また、規格エンジン台上試験法を用いて、試作油の清浄性および酸化安定性を調査する。

### 4.2 基油及び粘度指数向上剤の粘性特性・油膜形成能力の解析

エンジン油に配合される基油や粘度指数向上剤がエンジン油の粘性特性を決めている。平成11年度では、エンジン油に使用される基油の油膜形成能を中心に測定及び解析を行った。今後は粘度指数向上剤を含めて試作油の粘性特性と油膜形成保持能力の間関係を油膜厚さ解析装置により調査する。また実際の国産エンジンを用いた台上モータリングエンジン摩擦試験機を使用して、試作油の粘性特性や油膜形成能力と省燃費効果の間関係を調査し、優れた省燃費性能を有する試作油の研究のための基礎的なデータを蓄積する。

### 4.3 エンジン油添加剤の分析

平成11年度は、エンジン油に使用する添加剤の元素分析を中心に検討し、今後の配合処方についてその方向性を考察し、示唆した。平成12年度は各種鉱物系基油、合成基油及び粘度指数向上剤の分子構造と高せん断滑り速度下における粘性特性の間関係を明らかにするため、分子構造、分子量定性分析と高温高せん断粘度の測定等を行う。エンジン油を構成する各組成物の元素含有量の測定も継続して行い、低塩素含有量試作油の設計に必要なデータを取得する。また各種潤滑油添加剤の油中における相互作用を調査する。

## 引用文献

1. T. Fujitsu, et. al, SAE Technical Paper Series No. 981445 (1998)
2. G. Guangteng, et. al, Trib. Trans. 39, 448 - 454 (1996)
3. M.W. Ranney "LUBRICANT ADDITIVES" 4 (1973) Noyes Data Corporation