

報 文 1

省燃費デファレンシャルギヤオイル 「ギヤグランドDX GL-5」の開発

中央技術研究所 潤滑油研究所 駆動系油グループ やすだ たかま
安田 高真



1. はじめに

地球温暖化問題への対応は現代社会において重大な課題となっており、温暖化原因物質である二酸化炭素の排出量削減は、世界の産業界で重要なテーマとして位置づけられている。2013年度の日本の二酸化炭素排出量は13億1100万トンであるが、運輸部門（自動車等）はその間接排出量で約17%（約2億2400万トン）を占めており、二酸化炭素の大きな排出源の一つとなっている（表1）。

表1 日本の部門別二酸化炭素排出量の割合¹⁾

部門	各部門の間接排出量,万t	間接排出量シェア, %
エネルギー転換部門（発電所等）	101	8%
産業部門（工場等）	429	33%
運輸部門（自動車等）	224	17%
業務その他部門（商業・サービス・事業所等）	279	21%
家庭部門	201	15%
工業プロセス（石灰石消費等）	47	4%
廃棄物（廃プラスチック、廃油の焼却）	28	2%
農業、その他	1	0.10%
合計	1,276	100

自動車業界に目を向けると、欧州、北米、日本は燃費規制を課しており、日本では2015年度燃費基準（2004年度対比平均23.5%の燃費改善）、2020年度燃費基準が施行されている。これに違反した場合、メーカー・車種公表と罰金が科せられる厳しいものとなっており、ユーザーの環境意識も年々高まっている。乗用車メーカーは二酸化炭素の排出量低減、すなわち燃費向上技術でしのぎを削っており、ハイブリッド自動車をはじめ、クリーンディーゼル自動車、電気自動車、燃料電池自動車など、環境に優しい自動車を次々と開発し、市場へ投入している。

自動車の燃費向上手法として、エンジンおよび駆動系の高効率化、車両の軽量化などが挙げられるが、駆動系の一要素である最終減速機（ファイナルギヤと差動歯車を組み合わせた機構）に着目すると、ファイナルギヤの構成要素の一つであるハイポイドギヤは、特に他歯車要素と比べて伝達効率が低いと言われており、ハイポイドギヤの効率

向上は、自動車の省燃費化における重要な課題となっている。そこで、当社はハイポイドギヤの伝達効率に関する研究開発を行い、自動車の省燃費性を向上可能な省燃費デファレンシャルギヤオイル「ギヤグランド DX GL-5」を開発したので、その開発経緯ならびに諸性能を紹介する。

2. 最終減速機の機構

2.1 ファイナルギヤ（終減速歯車）²⁾

エンジンからトランスミッションを経由し、プロペラシャフトへと出力された回転動力を減速してトルクを増加させ、さらに回転方向を直角方向へ変換し左右の車輪へ駆動力を伝える装置をファイナルギヤと言う（図1）。ファイナルギヤはプロペラシャフトから回転動力を受けるドライブピニオンと、これと直角に交わり減速を行うリングギヤから構成され、ドライブピニオンとリングギヤの組み合わせをリダクションギヤ（減速歯車）と呼ぶ。リダクションギヤにはスパイラルベベルギヤ（まがりかさ歯車）と、ドライブピニオンギヤをオフセット配置したハイポイドギヤ^{注)}がある。

注) Gleason Corporation の商標（日本ではニッセイ「HYPOID」商標登録（登録番号第1681881号）

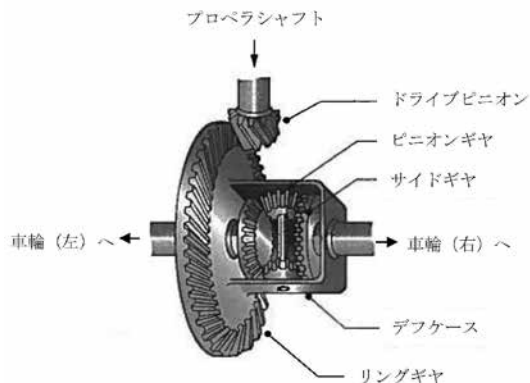


図1 ファイナルギヤ（終減速歯車）の構造³⁾

(1) スパイラルベベルギヤ

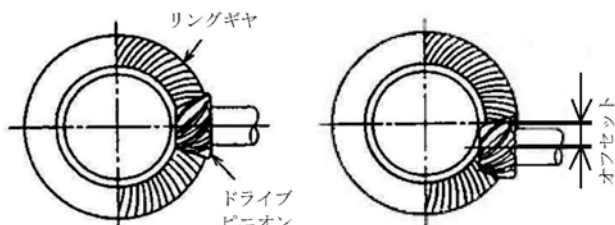
スパイラルベベルギヤとは図2(a)の様に、ベベルギヤの歯をらせん状にねじる様に切削したものである。歯と歯のかみ合いが大きく、回転が円滑で摩擦が少ない特徴があり、主に軽負荷の乗用車や小型トラックに使用される。

(2) ハイポイドギヤ

ハイポイドギヤとは図2(b)の様に、歯のかみ合い率を大きくするためにリングギヤとドライブピニオンの中心を偏心(オフセット)したリダクションギヤで、その偏心量(オフセット量)に応じて重心を低く設定できる。ただし、オフセット量を大きく設定することで伝達効率が低下する特徴を有する。また、ハイポイドギヤはスパイラルベベルギヤに比べより静粛で高負荷に耐えられる特徴を有するため、高負荷で使用される乗用車や大型トラックに適用される。しかし、ギヤ歯面間の接触面に生じる滑りによって大きな熱が発生するため、適切な潤滑が必要となる。ハイポイドギヤは厳しい潤滑状態で使用されるため、優れた耐焼付き性が必要となることからハイポイドギヤ専用オイルが必要となる。

(3) ギヤ効率

スパイラルベベルギヤとハイポイドギヤの違いは、ピニオン軸とギヤ軸の中心に対するオフセットの有無である。図3に示すように、ギヤ伝達効率はオフセット量に応じて悪化することがわかる。近年、燃費向上のために伝達効率を重視してスパイラルベベルギヤを適用する例が増えているが、伝達トルクの大きい大型トラックや、より静粛性が求められる高級車などのハイポイドギヤを全て置換えることは出来ない。そこで、自動車にさらなる省燃費性を付与するためには、ギヤ伝達効率に優れたハイポイドギヤ専用オイルが必要となる。



(a) スパイラルベベルギヤ (b) ハイポイドギヤ

図2 リダクションギヤの種類⁴⁾

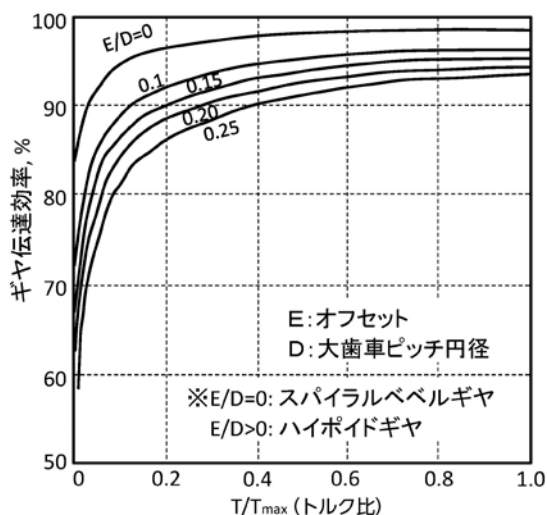


図3 スパイラルベベルギヤとハイポイドギヤの伝達効率⁵⁾

出典：自動車工学全書9 動力伝達装置 石原智男 山海堂 P316

2.2 差動歯車

自動車走行時、左右のタイヤの回転数が常に一定値である場合、カーブをスムーズに曲がることは出来ない。自動車ですべてのタイヤがカーブを曲がる時は、図4の様に外側の車輪と内側の車輪が描く軌跡が異なるため、それぞれの車輪が転がる距離(回転数)は異ならなければならない。すなわち、自動車がスムーズにカーブを曲がる為には左右の車輪の回転数に差をつける必要があり、それを与える装置を差動歯車という。また、差動歯車を含むファイナルギヤを、一般的にデファレンシャルギヤ(略してデフ)と称する。

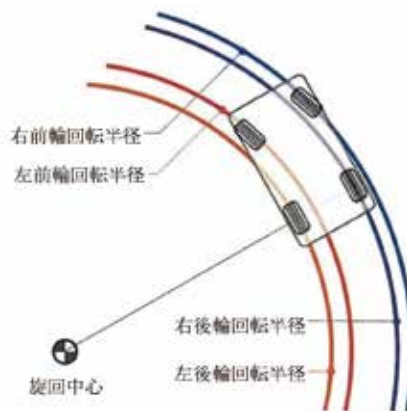


図4 自動車旋回時の各車輪の軌跡⁶⁾

出典：MortorFan illustrated p45, 2014/10/30 発行

3. ハイポイドギヤの省燃費化手法

3.1 潤滑状態とギヤオイルの省燃費化手法

潤滑油は基油と添加剤から成り、基油は原油由来の鉱油と化学的に合成された合成油および天然に製造される動植物油脂に分類され⁷⁾、添加剤は目的に応じて様々な化合物が適用される。潤滑油は機械の接触部の摩擦を低減するために用いられ、その潤滑状態は、一般的にジャーナル軸受を例にとったストライベック曲線を用いて表現される(図5)。これによれば金属間の摩擦状態は、潤滑油の粘度、摺動速度および荷重により3つの領域に区分され、それぞれ潤滑油が金属間に介在し両者を完全に分離し潤滑する流体潤滑、潤滑油膜が著しく薄くなり2面間が直接接触する境界潤滑および流体潤滑と境界潤滑が混在する混合潤滑と呼ばれる。また、流体潤滑のうち、金属表面の弾性変形と、潤滑油の粘度の圧力変化により油膜が介在する潤滑状態を弾性流体潤滑(EHL)と呼ぶ。

次にギヤオイルの省燃費化手法について述べる。歯車のエネルギー損失は回転体(ギヤ歯面)がオイルを攪拌する時に生じる攪拌損失と、金属部位(ギヤ歯面)どうしが接触することで生じる摩擦損失に大別できる。攪拌損失低減には流体潤滑の摩擦低減が求められ、オイルの低粘度化が有効となる。摩擦損失低減には境界潤滑、および弾性流体潤滑の摩擦低減が求められる。境界潤滑においては、摩擦調整剤(FM: Friction Modifier)と呼ばれる摩

擦を低減する添加剤の適用が有効である。また弾性流体潤滑では、基油分子同士の引っ掛かり（基油の内部摩擦：トラクション）が少ない構造を有する基油の適用が有効である⁸⁾。基油の内部摩擦の大小はトラクション係数によって表され、直線的な構造を有する合成油のPAOはトラクション係数が小さく弾性流体潤滑の摩擦低減に有効である（図6、図7）。

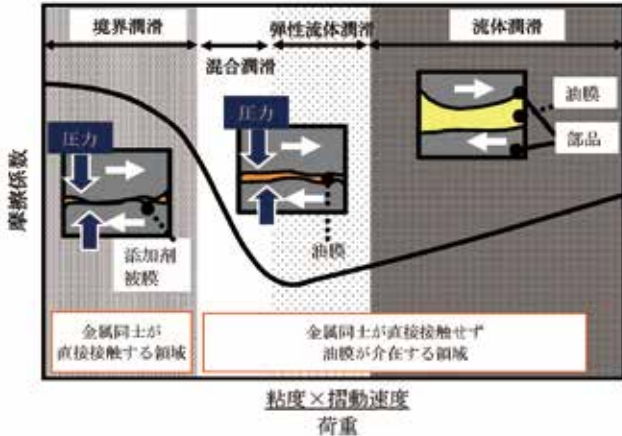


図5 ストライベック曲線のイメージ図

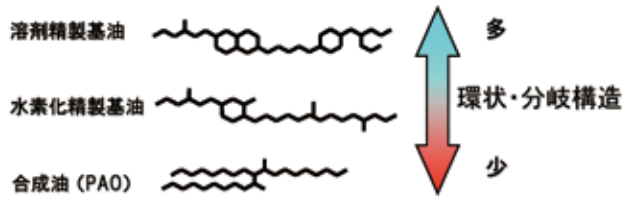


図6 各基油の構造

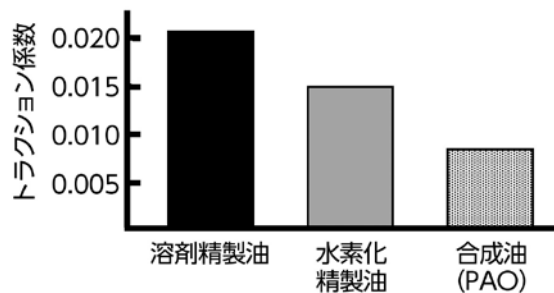


図7 各基油のトラクション係数

3.2 ハイポイドギヤ油の低粘度化と効果

従来油から単純に低粘度化した場合、図8に示すように実用領域における攪拌損失が低減されるためハイポイドギヤの効率は向上すると考えられる。そこで実用領域下の低粘度化効果を確認するため、表2に示す評価サンプルおよびデフ単体効率試験機を用い、伝達効率の測定を行った。測定の結果、低粘度油は高粘度油に対し伝達効率が悪化する結果が確認された（図9）。ハイポイドギヤの場合、歯車噛みあい時の接触圧力が極めて高いため、ほとんどの場合で歯面間は境界潤滑状態下にあると言われている⁹⁾。低粘度化により油膜厚さが減少するとギヤ歯面の潤滑状態

が「弾性流体潤滑」から「境界潤滑」へ遷移し易くなるため、摩擦損失が増大し、ギヤ伝達効率が悪化したと推測される。また、金属同士の直接接触による摩擦損失増大は、金属部品の耐久性を低下させる懸念を生じる。一方、図8に示すようにユニットの最高到達油温において製品粘度を一定値確保しつつ、実用領域での粘度を低減する高粘度指数油は、一般的に高品質基油（高度精製鉱油、合成油等）の適用や、低粘度基油に粘度指数向上剤を多量に添加することで達成可能であるが、製品コストは大幅に増加する。また、低粘度基油を用いた場合、低速かつ高圧等の厳しい潤滑状態下で油膜が薄くなり金属同士の直接接触が増加するため、金属部品の耐久性低下が懸念される。

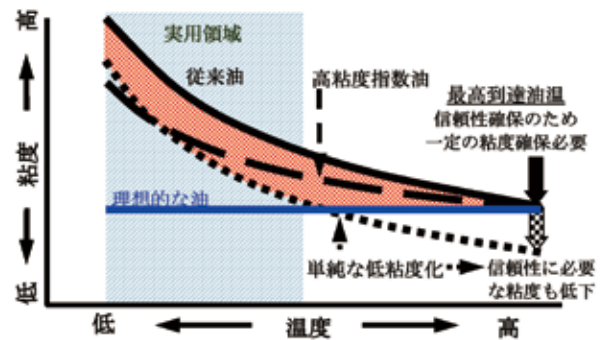
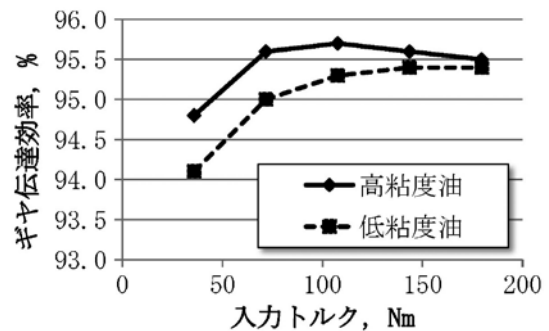


図8 ギヤ油の低粘度化手法

表2 評価サンプル

	高粘度油	低粘度油
基油	合成油	
性能添加剤	GL-5 添加剤	
高粘度基材 (PAO) *	◎	○
動粘度 (100℃) mm ² /s	16	8

※添加量： 添加量多 ◎>○ 添加量少



(入力回転数：2870rpm, 出力回転数：515rpm, ギヤ比：5.571, 油温60℃)

図9 デフ油の動粘度がギヤ伝達効率へ与える影響

4. ギヤグランド DX GL-5の開発

4.1 開発コンセプト

ハイポイドギヤに関し、単純に低粘度化を行っても省燃費化は図れないことが明らかとなったため、当社は境界潤滑

滑と弾性流体潤滑の摩擦損失低減に着目した。境界潤滑においては当社独自の添加剤配合技術を用い、潤滑被膜形成による低摩擦化を図り、弾性流体潤滑においては世界初の油膜形成技術の適用による弾性流体潤滑域の拡大を狙って開発を行った。

4.2 境界潤滑の摩擦低減

境界潤滑における摩擦低減を図るため、性能添加剤の検討を行った。検討した処方を表3に、SRV 摩擦試験機 (ball on disk 方式) による摩擦係数測定結果を図10に示す。タイプの異なる3種類のFM (アミド系、アミン系、モリブデン系) を適用した試作油の摩擦係数を比較すると、モリブデン系 FM < アミン系 FM < アミド系 FM の順に摩擦係数が低い結果となった。アミド系およびアミン系 FM は金属表面に吸着し摩擦を下げる効果があり、アミン系 FM はアミド系 FM よりも吸着力が高いため、大きな摩擦低減効果を示したと考えられる。モリブデン系 FM は、金属表面に摩擦係数が低い MoS₂ (二硫化モリブデン) 被膜を生成し、その潤滑膜によって摺動時の摩擦を下げる事が知られている¹⁰⁾。

アミン系 FM を適用した試作油 A からさらなる低摩擦化を図るため、FM の吸着を阻害するホウ素系分散剤の減量および、硫黄系極圧剤をリバランスした試作油 B を作製した。測定の結果、モリブデン系 FM を適用した試作油 C には及ばないものの、さらなる低摩擦化が確認された。

以上より、モリブデン系 FM とアミン系 FM は境界潤滑の摩擦低減に有効と判断した。

4.3 弾性流体潤滑域の拡大

弾性流体潤滑域の拡大を図るため、新規基材である極性高粘度基材の適用を行った。極性高粘度基材とは、基油に相当し、極性基 (分子の電気的かたより) を有する粘度の大きい基材である。一般的なギヤオイルの性能添加剤に極性高粘度基材を適用した試作油と、極性を有しない非極性高粘度基材を適用した試作油について EHL 膜厚測定試験機で油膜厚さの測定を行った。図11に示すように、潤滑状態が厳しい低速領域において、極性高粘度基材適用油は油膜が厚い結果が得られ、油膜保持効果を有する可能性が示唆された。次に、基準油に対し分子構造が異なる2種類の極性高粘度基材 A, B を適用した試作油 D, E を用意し (表4)、MTM (Mini Traction Machine: ミニトラクション計測器) を用いて摩擦係数および接触電気抵抗を測定した。図12 (a) に摩擦係数測定結果を示す。極性高粘度基材適用油は高速領域 (弾性流体潤滑域) で基準油と同等の摩擦係数を有するが、低速領域 (境界潤滑域) にかけて基準油より全体的に摩擦係数が低く、弾性流体潤滑の拡大のみならず境界潤滑の摩擦低減効果も確認された。一方、図12 (b) に摩擦係数測定時の接触電気抵抗を示すが、極性高粘度基材適用油は潤滑状態が厳しい低速領域において、接触電気抵抗が大きい結果が得られていることから、境界潤滑での部材同士の接触を抑制しているものと考えられる。また、極性高粘度基材 A は B に比べて接触電気抵抗値が大きいことから、A で用いられている極性基は油膜形成により効果的である可能性が示唆された。

表3 添加剤による低摩擦化 評価サンプル

		基準油	試作油 A	試作油 B	試作油 C
基油		溶剤精製鉱油			
性能添加剤*	摩擦調整剤 (FM)	アミド系	アミン系	アミン系	モリブデン系
	ホウ素系分散剤	◎	◎	○	◎
	硫黄系極圧剤	B	◎	△	◎
		C	△	△	◎
その他	GL-5用添加剤	○	○	○	

※添加量: 添加量多 ◎>○>△ 添加量少

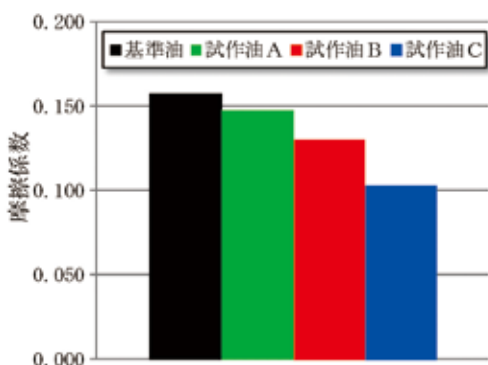


図10 性能添加剤による低摩擦化検討 (SRV 試験 ball on disk, 荷重: 30N, すべり速度: 0.1m/s, 温度: 100°C)

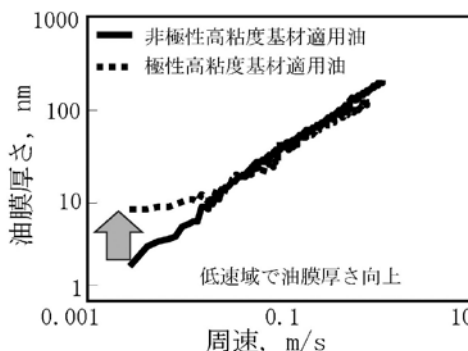


図11 極性高粘度基材が油膜厚さに与える影響 (EHL 膜厚測定試験, 面圧: 0.39GPa, 油温: 40°C)

表 4 MTM 試験 評価サンプル

項目	内容	基準油	試作油 D	試作油 E
基油	溶剤精製鈹油	○	○	○
添加剤	性能添加剤	○	○	○
	極性高粘度基材	A B	○	○
動粘度	40℃	mm ² /s	204	194
	100℃	mm ² /s	18.3	18.4
粘度指数			98	105
			105	115

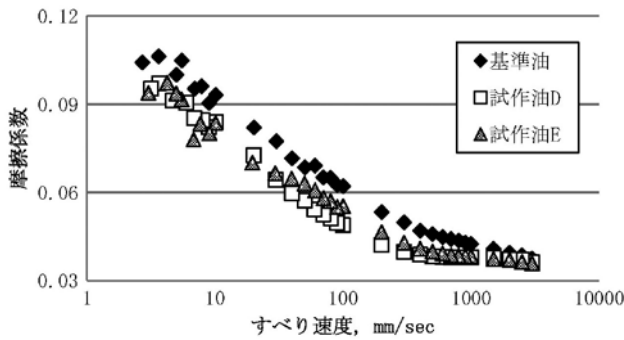


図 12 (a) 極性高粘度基材の金属間摩擦係数への影響 (MTM, 荷重: 50N, すべり率 50%, 油温: 120℃)

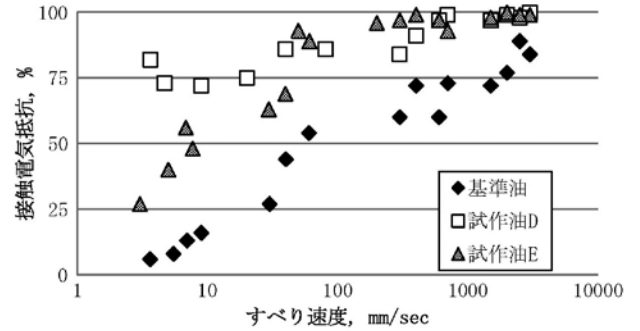


図 12 (b) 金属間摩擦係数測定時の接触電気抵抗 (MTM, 荷重: 50N, すべり率 50%, 油温: 120℃)

以上の結果から考えられる極性高粘度基材の油膜形成メカニズムを図 13 に示す。添加した極性高粘度基材が金属表面に静電的な力で吸着し、厳しい潤滑状態においても系外へ排出されことなく金属間に存在することで油膜を形成するものと思われる。この油膜形成効果により、図 14 に示すように弾性流体潤滑域から境界潤滑域への遷移が緩和され (弾性流体潤滑域の拡大)、低速域のような厳しい潤滑条件下の摩擦が低減されると考えられる。

摩擦低減効果がより高い、極性高粘度基材 A を適用した試作油について実車のデフユニットを用いたギヤ効率試験機により伝達効率を測定した。図 15 に示すように、試作油は基準油と比べ約 1.6% 伝達効率が向上する結果が得られ、極性高粘度基材の油膜形成効果によるギヤ伝達効率の向上が確認された。

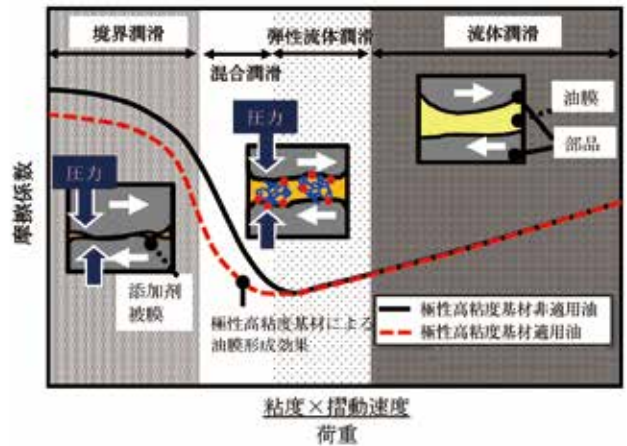


図 14 極性高粘度基材適用効果 (イメージ図)

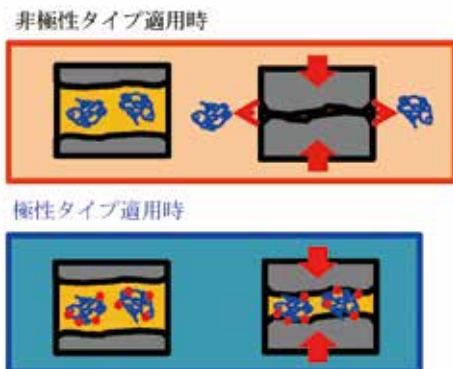


図 13 極性高粘度基材の油膜形成メカニズム

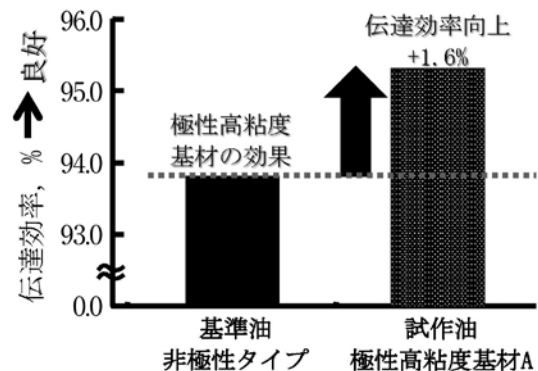


図 15 ギヤ伝達効率試験機による効率測定結果 (入力回転数: 2870rpm, 出力回転数: 515rpm, 入力トルク: 40N・m, ギヤ比: 5.571, 油温: 60℃)

4.4 実車による省燃費効果の確認

これまでに紹介した省燃費化アイテムの効果を実車で検証する為、デフの潤滑状態が異なる二つのモード条件(一定速モード、JC08モード)において実車燃費試験を実施した。評価サンプルを表5に示すが、アミン系FMを適用した試作油Bの添加剤を基準油に用い、弾性流体潤滑領域で効果が期待される合成油、境界潤滑領域で効果が期待されるモリブデン系FM、両潤滑領域で効果が期待される極性高粘度基材の影響を確認した。

図16に測定結果を示す。ハイポイドギヤの負荷が比較的軽く、弾性流体潤滑が支配的と考えられる高速一定速モード(80km/h)においては、トラクション係数が小さい合成油を用いたサンプルで3%以上の大幅な省燃費効果が確認され、極性高粘度基材を適用したサンプルについても1%以上の省燃費効果が確認された。一方でモリブデン系FMを適用したサンプルの省燃費効果は0.5%程度となり、本走行条件における効果は最も低い結果となった。加減速条件の多さからハイポイドギヤの負荷が比較的高く、境界潤滑が多く存在すると考えられるJC08モードの測定結果においては、合成油の燃費向上効果は小さく、境界潤滑の摩擦低減に最も効果的と考えられていたモリブデン系FMを添加したサンプルは0.8%程度の燃費向上効果を示すこ

とが確認された。極性高粘度基材を適用したサンプルにおいては、2%以上の大幅な省燃費効果が確認され、モリブデン系FMを凌駕する省燃費性を有することがわかった。

以上の結果より、極性高粘度基材を適用したサンプルは、実車においても弾性流体潤滑～境界潤滑の双方で省燃費性を有することが確認された。同様の潤滑領域で省燃費性を有すると思われる全合成油にモリブデン系FMを添加したサンプルについても評価を実施したところ一定速条件では4%以上の驚異的な省燃費性を示すものの、JC08モードにおいては1%程度の省燃費効果となり、極性高粘度基材適用油に満たない結果となった。

極性高粘度基材については更なる検討を重ね、燃費向上率を最大化できる最適添加量があることを見出した(図17)。

ギヤグランドDXの開発にあたり、高価な合成油を使用した最高性能を求める声もあったが、表5に示すように合成油の適用はコストが非常に高価となる。そこで、あえて安価な溶剤精製基油(グループI)を用い、性能添加剤の最適化、および省燃費効果が高い極性高粘度基材を採用することで、経済性と省燃費性のバランスを高次元で図った処方とした。

表5 実車燃費評価用サンプル

		基準油 #80	全合成油	モリブデン系FM適用油	全合成油+モリブデン系FM適用油	極性高粘度基材適用油
基油	溶剤精製基油	○		○		○
	PAO/エステル		○		○	
性能添加剤	GL-5 添加剤 ^{注)}	○	○	○	○	○
摩擦調整剤	モリブデン系			○	○	
高粘度基材	極性高粘度基材					○
動粘度 (65℃)	mm ² /s	25.2	24.4	25.2	25.1	25.1
摩擦低減効果を発揮する潤滑状態			弾性流体	境界	弾性流体～境界	
コスト		基準	高い	低～中程度	非常に高い	中程度

注) …表3に示す試作油Bと同一品を使用

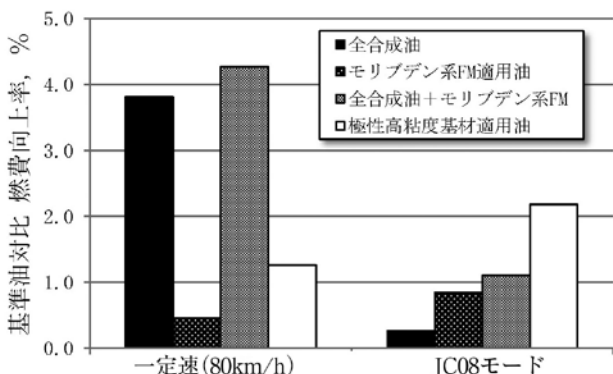


図16 各省燃費化アイテムが実車燃費へ与える影響

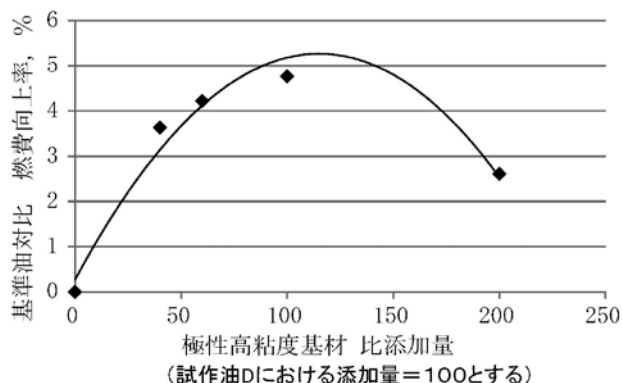


図17 極性高粘度基材の最適添加量検討 (JC08モード)

5. ギヤグランド DX GL-5の実用性能

当社独自の添加剤配合技術と新規極性高粘度基材による油膜形成技術の相乗効果により、優れた経済性と省燃費性を有するギヤグランド DX を開発した。

同油の一般性状を表 6 に示す。省燃費効果について、シャーシダイナモを使用した実車燃費評価を実施した。乗用車（ガソリン車）ならびに商用車（ディーゼル車）を用い、評価はJC08 モードで行った（図 18）。乗用車 A および商用車 B ともにギヤグランド DX は基準油（当社従来ギヤ油）対比で省燃費効果が確認されており、特に乗用車 A では 3.5% 以上の驚異的な効果が得られた。また、ローリー車における燃費比較試験の結果においても基準油対比 3% 以上の燃費向上効果が確認されている。

また、ギヤグランド DX は、L-37 試験、L-42 試験をはじめとする API 規格 GL-5 認証試験に合格し、十分な信頼性を有することも確認した。

表 6 ギヤグランド DX GL-5 の一般性状

API 規格	GL-5	
SAE 粘度グレード	90	140
色 (ASTM)	L1.5	L2.5
密度, g/cm ³	0.899	0.906
動粘度 (40℃), mm ² /s	193	385
(100℃), mm ² /s	17.9	28.1
粘度指数	101	100
引火点, °C	238	236
流動点, °C	-22.5	-15
酸価, mgKOH/g	1.04	1.02
銅板腐食 (100℃, 3h)	1	1
消防法危険物分類	第 4 石油類	

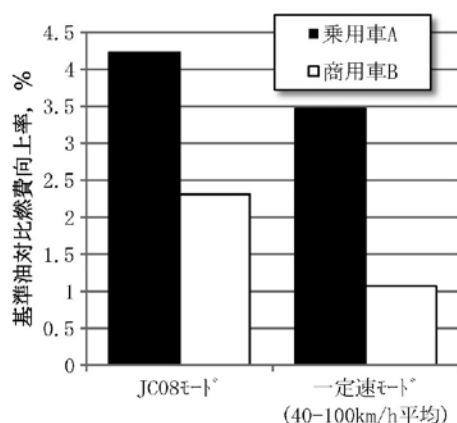


図 18 ギヤグランド DX GL-5 #90 の燃費測定結果

6. まとめ

省燃費性・経済性・信頼性に優れたデファレンシャルギヤオイル、ギヤグランド DX GL-5 を開発した。従来油同等の粘度設計による油膜の確保、および GL-5 認証添加

剤の採用によって信頼性を担保し、安価な溶剤精製基油の適用により優れた経済性を有する。当社独自の添加剤配合技術と新規極性高粘度基材による油膜形成技術の相乗効果により、境界潤滑状態で多く使用されるハイポイドギヤの歯面間の低摩擦化を実現し、ギヤ伝達効率を向上した。ギヤグランド DX はハイポイドギヤを有する車両において従来油対比で大幅な省燃費を達成した。

7. おわりに

自動車の省燃費化への要望は高い水準にあるが、今後はトラック・バスなどの大型車においても一層要望が高まってゆくと予想される。当社は引き続き、地球環境に配慮した環境配慮型潤滑油商品の開発を至上命題とし、市場へ上市・拡販することで社会へ貢献する所存である。

－ 引用文献 －

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス；日本の温室効果ガス排出量データ (1990～2013 年度) 確報値 (2015 年 4 月 23 日発表)
- 2, 4) 齋輝夫；自動車工学入門, 理工学社, p128 - 129
- 3) モーターファン別冊 駆動系再考, (株)三栄書房, 2014 年, p43
- 5) 石原智男；自動車工学全書 9 動力伝達装置, 山海堂, p316
- 6) モーターファン別冊 駆動系再考, (株)三栄書房, 2014 年, p46
- 7) 村木正芳；図解トライボロジー, 日刊工業, p126
- 8) 菖蒲祐輔；ENEOS Technical Review, Vol57, No.2, p64 - 68 (2015)
- 9) 田中宏明ら；マツダ技報, 23, p136 - 141 (2005)
- 10) 遠山護ら；豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol32, No.4, p35 - 44 (1997)