潤滑油における基油の役割と高引火点潤滑油について

Roll of Base Oil in Lubricants and Trends of High Flash Point Type Lubricants

岡野 知晃

出光興産株式会社 潤滑油二部
営業研究所 加工油グループ
〒299-0107
千葉県市原市姉崎海岸 24-4

Tomoaki OKANO
Metal Working Oil Group, Lubricant Research
Laboratory, Idemitsu Kosan Co., Ltd.
24-4, Anesakikaigan, Ichihara-shi,
Chiba 299-0107, Japan

論文要旨：潤滑油は「機械の血液」と呼ばれており、機械を動かす上で重要な構成要素である。潤滑油は主にベースオイル（基油）と添加剤から構成されており、潤滑油の基本性能はベースオイルによって大きく左右されるため、非常に重要な役割を担っている。本項では潤滑油におけるベースオイルの役割について解説すると共に、潤滑油を取り巻く法規制への対応の一例として、潤滑油の高引火点化による消防法への対応およびその効果について紹介する。

Abstract: Lubricant is a very important component of machine which contributes to their stable operations. Its basic performance mostly depends on the base oil that composes 80 to 90% of the Lubricant itself. In addition to above mentioned, there are many kinds of base oil and we have to choose the most appropriate one for operating environment of Lubricant. On the other hand, there is a growing need for high-performance Lubricant corresponding to the enhancement of laws and regulations all over the world. In this review, we summarize the property and application of base oil, in particular, the mineral, synthetic and vegetable types. Furthermore, we introduce an example of the countermeasures and its results for the Fire Defense Law compliance, in consideration of the change of the Lubricant to high flash point type.

Key words: lubricant, base oil, tribology, legal compliance, high flash point

1 はじめに

有史以来、ものものが動く界面には摩擦・摩耗という現象が生じることが知られており、人類は如何にこれら摩擦・摩耗を減らせるか、つまり「潤滑」させるかといった取り組みが行われてきた。潤滑の手法としては液体（潤滑油）を添加することが古来より知られており、紀元前に描かれたとされるエジプト時代の壁画には、石像を動かすためにオリーブ油（と考えられている液体）を用いている様子が既に描写されていることから、潤滑油のアプリケーションにおける歴史の深さを垣間見ることが出来る¹⁾。

潤滑油の主な適用が石像の運搬から機械の稼働に移っ

た現代においても、潤滑油は「機械の血液」と呼ばれるほど機械が正常に稼働するためには必要不可欠な要素であることが広く知られている。18世紀半ばにイギリスで起こった産業革命から約250年が経過するが、その間にも機械文明は著しい発展を遂げ、潤滑油技術もその発展に伴い著しく多様化・高性能化してきた。産業革命期（1730年代～1820年代頃）までは、動植物に由来する油脂類が潤滑油として用いられてきたが、1850年頃の英国にて鉱物油系潤滑油が開発され、1857年に米国にて原油の機械掘りに成功してから、潤滑油の原料は現在でも主流である石油へと転換していくこととなった²⁾。

これら歴史を経た今日の潤滑油の主構成要素は、ベースオイル（基油）と添加剤とから成り立っており、中でもベースオイルは凡そ8割～9割を占めている。もちろん潤滑油技術を論ずるにあたっては、残りの1割～2割

連絡者：岡野 知晃
E-mail : tomoaki.okano.1000@idemitsu.com

の添加剤配合（処方）技術が重要となってくるわけであるが、潤滑油への要求がどれだけ厳しくなっても潤滑油の基本性能はベースオイルによって大きく左右されるため、ベースオイルの品質向上は潤滑油製品の性能向上にかかせない。さらに近年は、地球温暖化の深刻化に伴い、機械の設計思想は高性能化から高効率化へと移行しており、これらの動きに合わせて潤滑油も、環境対応、低毒性、生分解性といった新たな性能や物性への要求が追加されつつあり、ベースオイルが担う役割というものも従来以上に大きくなりつつある。

本稿では、時代の変化に伴い目まぐるしく変化する潤滑油を取り巻く法規制・環境に対して、潤滑油開発では如何にブレイクスルーを実現してきたか、ベースオイルという観点に着目し、概説する。

2 ベースオイルの種類とそれぞれの特徴

潤滑油に使用される主なベースオイルを Table 1 に示す。ベースオイルは鉱物油系、合成油系、植物油系に大別することが可能であり、それぞれの特徴に合わせて様々な潤滑油が開発されている。

鉱物油系ベースオイルはその名のとおりに原油から蒸留・精製されたものであり、1920年代に溶剤精製法や脱蠟工程と言った精製工程が確立されて以降、鉱物油系ベースオイルが広く普及することとなった³⁾。加えて第二次世界大戦以降の産業の大幅な進歩、機械の高性能化に伴い、潤滑油に要求される性能も年々高まり、更なる高精製基油が求められる分野が増えてきた。これら要求に応えるべく、1970年代には水素化処理法が開発され、1980年代にはベースオイルに含まれるワックス分の異性化による高粘度指数・低流動点ベースオイルが、また2000年代にはフィッシャー・トロプシュ法を利用した天然ガスの液化プロセスによる、GTL（Gas to Liquid）系ベースオイルなどが開発・実用化され、特に潤滑油の

熱・酸化安定性、省燃費化といった性能向上に大きく寄与してきた⁴⁾。

合成油系ベースオイルは1930年代にドイツや日本などの石油資源を持たない国が、鉱油に代わって α -オレフィンオリゴマーからジエステル、ポリオールエステルといった合成基油を開発したことに端を発した形で多くの研究・生産が開始された⁵⁾。その後、ポリ α -オレフィン（PAO）やポリアルキレングリコールといった合成系ベースオイルが多く開発・実用化されてきたが、その製造方法が鉱油より複雑であり、生産量も少ないことから、性能は優れているにも関わらず経済性の観点からまだまだ特殊用途での使用が主である。しかし、近年の法規制の厳格化や環境意識の高まりより、合成油系ベースオイルは今まで以上に需要が高まりつつある⁶⁾。これらニーズにおける合成油系ベースオイルの寄与については、詳細を後述する。

植物油系ベースオイルは、その名のとおりに植物由来のエステル系基油であり、グリセロール1分子に脂肪酸3分子がエステル結合したトリアシルグリセロールを主として構成されている^{7, 8)}。特に生分解性に優れており、環境中に漏洩した場合でも、比較的少量であれば自然界のバクテリアなどによって、炭酸ガスと水に分解されることから、環境への漏洩が懸念される森林や水源地の建設機械、船用エンジンなどに幅広く使用されている。

このように潤滑油のベースオイルだけでも様々な種類があり、時代の変遷および社会のニーズに合わせて、それぞれの特徴を考慮した潤滑油技術開発が為されてきたことがわかる。近年の環境・法規制における潤滑油のベースオイルを用いた対応は、省エネ・エコマークへの取り組み等これまでも多く実例があるが、中でも潤滑油の高引火点化に着目することによる、日本の消防法への対応、また高引火点ベースオイルによる環境対応（作業環境性の改善）の具体例について、次項より紹介したい。

Table 1 潤滑油のベースオイルとその特徴

	分類	特徴	適用潤滑油（一例）
鉱物油系	パラフィン系	汎用性が最も高い	エンジンオイル, 汎用工業油
	ナフテン系	ワックスを含まない 溶解性が比較的高い	絶縁油 ゴム用プロセスオイル
合成油系	オレフィン系	比較的鉱油に近い 耐熱性に優れる, 低流動点	極低・高温用特殊環境潤滑油
	エステル系	潤滑性に優れる, 難燃性	難燃性作動油
	エーテル系	耐熱性, 耐薬品性に優れる	不燃性作動油, 宇宙機器用潤滑油
	植物油系	生分解性に優れる	船用エンジン, チェーンソー

3 潤滑油の高引火点化

3・1 日本の消防法と高引火点潤滑油

潤滑油は石油製品であることから、半固体状潤滑剤であるグリースや水を含む水溶性切削油等を除き、その多くが引火性を有している。労働安全衛生法には、「引火性の物」と規定した規律分類はあるものの、その分類は引火点 65℃未満が対象となっており、多くの潤滑油が対象外となる。

一方で消防法の区分上では、潤滑油の危険物第四類の第三および第四石油類、可燃性液体類に分類される⁹⁾。特に潤滑油を多く使用する工場では、消防法にて規定された取扱数量を遵守する必要がある、その取扱数量は各危険物分類によって決定される。つまり、潤滑油の引火点そのものが取扱数量を決定する大きなファクターとなるため、潤滑油の引火点というものは生産現場にて使用する上でも、また管理する上でも非常に重要なパラメー

タとなる。

中でも平成13年7月の消防法の改正により平成14年6月から引火点 250℃以上の潤滑油は危険物から除外され、可燃性液体類として取扱われるようになった。この消防法の改正が、潤滑油メーカー各社での高引火点潤滑油の開発が大幅に加速する契機となった^{10, 11)}。

Table 2 に改正後の第3石油類(引火点: 70℃以上 200℃未満)ならびに第4石油類(引火点: 200℃以上 250℃未満)、可燃性液体類の取扱いの違いを示す。引火点が 250℃以上の潤滑油は第4石油類から外れても可燃性液体類として分類される。可燃性液体類は数量 2 立方メートル(2,000 L)以上で指定可燃物となり市町村条例の規制を受けるため、所轄消防署への届出が必須となるが、少量危険物(危険物取扱量が指定数量の 1/5 以上、指定数量未満の場合)と同等の取扱いが可能となる。特に、工場内に新しい機械を増設し、少量危険物取扱所から一般危険物取扱所になる場合や、新設工場建設時に最

Table 2 可燃性液体類およびその他危険物分類潤滑油の取扱いについて¹⁰⁾

消防法による分類	取扱数量	適用	届出許可申請	貯蔵・取扱いにおける技術上の基準
可燃性液体類	2,000L未満	指定可燃物対象外	—	—
	2,000L以上	指定可燃物	指定可燃物貯蔵取扱所	市町村条例
第4類 第3石油類	400L以上2,000L未満	少量危険物	少量危険物貯蔵取扱所	市町村条例
	2,000L以上	危険物	危険物の製造所、貯蔵所および取扱所	政令
第4類 第4石油類	1,200L以上6,000L未満	少量危険物	少量危険物貯蔵取扱所	市町村条例
	6,000L以上	危険物	危険物の製造所、貯蔵所および取扱所	政令

Table 3 高引火点潤滑油(可燃性液体)の採用によるコスト削減事例

業種	コスト削減例	削減額, 円
精密機械 製造業	新設工場の建設 可燃性液体の加工油・設備油を採用 不燃材使用コスト、防爆・消化設備の設置費削減	約6億
自動車 部品製造業	設備増強による危険物保有量の指定数量オーバー 油圧作動油を可燃性液体へ切替え 防火壁・天井への改造費、消化設備の増設費削減	約1億5千万
プラスチック 加工業	新設工場(成形機: 30台)建設 可燃性液体の作動油を採用 耐火構造・排煙設備・消化設備費の削減	約1億3千万

Fig. 1 ベースオイルの分子量分布イメージ

初から可燃性液体類である高引火点潤滑油の全面採用を前提に建屋を建設するのでは、Table 3 の例に示すように各種設備にかかるコストに大きな差（～数億円）が発生する。このように消防法対応に伴う高引火点潤滑油の適用は、安全性の観点のみならずコストメリットに大きく寄与することからも、潤滑油の高引火点化は非常に重要な課題であることがわかる。ただし、ギヤ油およびシリンダー油のみ品目指定で第四石油類に指定されているため、引火点が250℃を超えた場合においても可燃性液体類とならないことに注意が必要である。

3・2 潤滑油の高引火点化

前述にもあるように、潤滑油の8割～9割はベースオイルによって構成されているため、潤滑油の引火点における支配因子は凡そベースオイルに依存する。特に大半の潤滑油は原油を精製した鉱物油系ベースオイルが使用されているが、鉱物油は水や合成油と異なり、単一物質ではなく混合物である。より分かりやすく説明するため、鉱物油系ベースオイルと合成油系ベースオイルの分子量分布のイメージ図をFig. 1に示す。Fig. 1に示すように、通常の鉱物油は分子量の異なる各種炭化水素が混合されて一つの粘度グレードとなっている。特にこの低分子量側の留分が引火点を下げてしまうことから、潤滑油自体の引火点を向上させるためには、分子量分布が狭い鉱物油系ベースオイル（ナローカットと呼ばれる）を採用するか、合成油系を採用する必要がある。

鉱物油系ベースオイルと合成油系ベースオイルにおける40℃動粘度と引火点の関係性をFig. 2に示す¹²⁾。Fig. 2からも明らかなように、同等の動粘度で比較した場合、合成油系ベースオイルの方が鉱物油系ベースオイルと比較して高い引火点を示していることが見て取れる。これはFig. 1でも示したように、鉱物油は低分子量側の留分

Fig. 2 各種ベースオイルの粘度と引火点の関係¹²⁾

Fig. 3 ヒューム発生試験の概要

が大きく影響を及ぼしているためである。また鉱物系、合成系のどちらにおいても、高粘度であるほど高引火点を示すことがわかる。これは高分子量留分が多いことに加え、高粘度であるほど分子間の相互作用が強く、気化しにくくなるため引火点が高くなることに由来している。

以上からも、潤滑油の高引火点化には最適なベースオイルの選択が非常に重要となる。また潤滑油の適用先によっては添加剤を多く配合しなければいけない油種もあるため、添加剤の種類によっては引火点の低下を引き起こす可能性があることから、潤滑油開発の際には添加剤の選定にも留意しなければいけない点もある。

3・3 高引火点油剤による作業環境の改善

近年の生産現場では消防法をはじめとした法規制に対応したニーズの他に、製造のコスト競争力強化のために生産の高効率化や環境意識の高まり、また人体への負荷低減といった付加価値が新たに求められる傾向にある。

例えば金属加工の一種である切削に使用される潤滑油

(不水溶性切削油)を例に挙げると、近年の高効率化に伴い加工負荷が高くなる傾向にある。つまり、切削油が従来よりも過酷な条件で使用される傾向にあり、加工の高速・高送り化や難削材(チタン合金、ニッケル合金等)の増加が従来の加工に比べて切削温度を上昇させ、ベースオイル起因のヒューム(油煙)の発生を引き起こしている。このヒュームは生産現場の視認性の低下のみならず、吸入による人体への健康被害を引き起こす可能性があることから、近年問題視されている。本項では、これら作業環境性の改善に不水溶性切削油の高引火点化が寄与した事例について紹介する¹³⁾。

ヒュームの発生要因は引火点と大きく関係している。引火点とは、物質の可燃性蒸気と空気の混合気が点火源により引火する温度であり、引火点が低いということは

可燃性蒸気が発生し易いということを意味する。つまりベースオイルに含まれる低分子量側の留分が多ければ多いほど、切削加工における加工熱により気化し易く、ヒュームが多く発生することになる。加えて、不水溶性切削油は $5\sim 32\text{ mm}^2/\text{s}$ の低粘度油が一般的に使用されており、ヒュームによる影響が顕著に現れやすい油剤である。

ここでヒュームの発生量を比較すべく、 40°C 動粘度が約 $8\text{ mm}^2/\text{s}$ 、約 $20\text{ mm}^2/\text{s}$ の鉱物油系ベースオイルと合成油系ベースオイルを供試油として、弊社にて可視化試験を実施した結果を紹介する。Fig. 3に示すとおり、 170°C に熱したアルミ板にスポイトで供試油を滴下し、ガラス容器を被せて観察を実施した。尚、観察時にヒュームの発生をより可視化すべく、シート状のレーザーを当

Fig. 4 各種ベースオイル滴下後30秒後のヒューム発生状況

Table 4 切削加工条件

被削材	SCM435(クロムモリブデン鋼)
インサート	VP15TF CNMG120404-MS(三菱マテリアル)
切削速度	300 m/min
送り	0.1 mm/rev
切り込み	1.0 mm

Fig. 5 旋削加工時における工作機械内のヒューム発生状況¹³⁾

てた。供試油を滴下して約30秒後の外観を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 から明らかなように、高粘度のベースオイルの方が低粘度のベースオイルと比較してヒュームの発生量が少なく、合成油系ベースオイルの方が鉱物油系ベースオイルと比較してヒュームの発生量が少ないことがわかる。本傾向は引火点と同様の傾向であることから、引火点がヒューム発生量に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

続いて、実際に切削加工が行われている生産現場を模擬すべく、同じ供試油を用いて合金鋼 (SCM435) の旋削加工を実施し、工作機械 (NC 旋盤) 内のヒューム発生の様子を観察した。加工試験における切削条件を Table 4 に、NC 旋盤内にカメラを設置して加工時の様子を撮影した結果を Fig. 5 にそれぞれ示す。

Fig. 5 から明らかなように、実際の切削加工時においてもヒューム発生試験と同様に、低粘度のベースオイルと比較して高粘度のベースオイルの方が、また鉱物油系ベースオイルよりも合成油系ベースオイルの方がヒューム発生量が少なくなり、工作機械内での視認性は大きく改善されることがわかる。本試験に加えて、ピエゾバランス式の粉塵計 (日本カノマックス社製、Model 352) を用いて、旋削加工中に NC 旋盤の扉のすき間から漏れ出る飛散成分発生量の定量化を試みた。尚、ここで言う飛散成分とは、旋削加工時の切削熱で発生するヒュームに加え、ポンプでの給油に伴う切削油のミスト化も発生するため、ここでは飛散成分量として定義している。加工試験における切削条件は Table 4 と同条件で実施し、測定した結果を Fig. 6 に示す。

本結果より、いずれの動粘度においても合成油系ベースオイルは鉱物油系ベースオイルと比較して約 60% も飛散成分が削減され、たとえ鉱物油系ベースオイルであっても高粘度のベースオイルの方が約 65% も飛散成分が少なくなることがわかる。

以上より、生産現場での作業環境性向上のためには潤滑油の高引火点化が非常に有効であり、中でもヒューム低減に伴う生産現場の視認性向上、健康被害リスクの低減といった効果が期待できる。そのため、高引火点潤滑油の開発の際には高粘度化に加え、合成油系ベースオイルの選定がキーポイントとなる。ただし、金属加工においては加工形態や加工条件に応じて最適な粘度を有する潤滑油を選択する必要があるため、高粘度ベースオイルを使用することは必ずしも望ましくなく、適切な合成油を選択することが求められる。

4 おわりに

本項では潤滑油におけるベースオイルの種類およびそ

Fig. 6 ピエゾバランス式粉塵計にて測定した工作機械内の飛散成分量

の役割について説明するとともに、潤滑油の高引火点化を例にとった消防法への対応、生産現場の作業環境性改善効果について概説した。しかし自動車・機械技術をはじめとした産業の進展はめざましく、筆者が本稿を執筆している間にも新しい産業技術は生まれており、その技術に付随して新たな潤滑油が開発されている。潤滑油は目立たない存在であるが、産業を支える必須の製品であることは間違いない。

また昨今の安全感度・環境意識の高まりから、潤滑油に求められる性能も年々増えており、本稿では紹介することができなかったが、これまでもベースオイル技術を中心とした潤滑油技術の進展により課題解決を実現してきた。身近なものを例に挙げると、冷蔵庫やエアコンに使用されている冷凍機油は、1987 年のモントリオール議定書をはじめとする冷媒の規制・変化に合わせながら、ポリアルキレングリコールやポリビニルエーテルをはじめとする合成基油が新たに開発され、今日の冷凍機油として主に使用されている¹⁴⁾。また油圧機器に主に利用される油圧作動油では、1998 年に改正された「省エネ法」をきっかけとして、潤滑油による省電力・高効率化の検討が進められ、低粘度基油および最適な摩擦調整剤の適用により、消費電力を 2~5% 低減する省エネ化を実現してきた¹⁵⁾。

近年では、2015 年に採択された「持続可能な開発目標 (SDGs)」が話題であり、環境意識はこれまで以上に高まっていることから、今まで以上に潤滑油に求められる性能目標は高くなることが予想される。このような時流・環境を敢えてチャンスとして捉え、今まで以上に潤滑油開発が活発化し、技術レベルが向上することを期待したい。

文 献

- 1) 山本雄二, 兼田槇宏, トライボロジー, 理工学社 (1998).

- (Yamamoto, Y. *et al. Tribology*, Rikogakusha Publishing Co., Ltd. (1998).)
- 2) 浜口仁, 世界の潤滑油 / 潤滑油添加剤技術と市場・規格動向, S&T 出版, 4 (2014).
(Hamaguchi, H. *World Market of Lubricants*, S&T Publishing Inc. (2014).)
 - 3) 浜口仁, トライボロジスト, **61**, 665 (2016).
(Hamaguchi, H. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **61**, 665 (2016).)
 - 4) 渡辺治道, トライボロジスト, **50**, 277 (2005).
(Watanabe, H. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **50**, 277 (2005).)
 - 5) 渡嘉敷通秀, 有機合成化学, **43**, 704 (1985).
(Tokashiki, M. *Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan* **43**, 704 (1985).)
 - 6) 足立之彦, トライボロジスト, **64**, 135 (2019).
(Adachi, Y. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **64**, 135 (2019).)
 - 7) 高柳正明, オレオサイエンス, **5**, 455 (2005).
(Takayanagi, M. *Oleosience* **5**, 455 (2005).)
 - 8) ジョン・イーストウッド, トライボロジスト, **64**, 144 (2019).
(Eastwood, J. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **64**, 144 (2019).)
 - 9) 出光興産: 潤滑油と法規制, <https://www.idss.co.jp/business/lube/about/understand/law01/>
(Idemitsu Kosan Co., Ltd. <https://www.idss.co.jp/business/lube/about/understand/law01/>)
 - 10) 松山雄一, 出光トライボレビュー, **25**, 1547 (2002).
(Matsuyama, Y. *Idemitsu Tribo Review* **25**, 1547 (2002).)
 - 11) 白神善隆, 出光トライボレビュー, **29**, 1808 (2006).
(Shirakami, Y. *Idemitsu Tribo Review* **29**, 1808 (2006).)
 - 12) 浅田佳史, 月刊トライボロジー, **379**, 16 (2019).
(Asada, Y. *The Tribology* **379**, 16 (2019).)
 - 13) 服部秀章, 近藤隆史, 出光トライボレビュー, **41**, 2558 (2018).
(Hattori, H. *et al. Idemitsu Tribo Review* **41**, 2558 (2018).)
 - 14) 東條健司, トライボロジスト, **59**, 426 (2014).
(Tojo, K. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **59**, 426 (2014).)
 - 15) 置塩直史, トライボロジスト, **59**, 400 (2014).
(Oshio, T. *Journal of Japanese Society of Tribologists* **59**, 400 (2014).)