

## 解説 1

# 工作機械用高引火点軸受油 「スーパーマルパスEX」の開発

潤滑油カンパニー 潤滑油研究開発部 工業用潤滑油グループ 小谷田 早季



## 1. はじめに

近年、危険物施設の大規模化、多様化、複雑化が進んでいることから、危険物に関する法令の改正が逐次行われており<sup>1)</sup>、規制は年々厳しくなっている。潤滑油は、その多くが危険物第4類引火性液体に分類され、消防法別表において貯蔵可能な指定数量が定められている(表1)。引火点が分類の基準となり、引火点が高いほど指定数量が緩和される。指定数量以上の危険物は消防法による規制を受け、貯蔵に関して厳しい制約を受けることとなる。また昨今の生産性向上のニーズを受け、IoTを活用した無人化や自動化による24時間稼働がトレンドとなっており、無人環境下での火災リスク低減の要望も高まっている。

表1 危険物第4類の分類

品名	性質	引火点	指定数量
特殊引火物	—	-20℃以下	50 L
第1石油類	非水溶性液体	21℃未満	200 L
	水溶性液体		400 L
アルコール類	—	—	400 L
第2石油類	非水溶性液体	21℃以上70℃未満	1,000 L
	水溶性液体		2,000 L
第3石油類	非水溶性液体	70℃以上200℃未満	2,000 L
	水溶性液体		4,000 L
第4石油類	—	200℃以上250℃未満	6,000 L
動植物油類	—	250℃未満	10,000 L

このように、消防法の危険物貯蔵指定数量の制限および生産現場における安全意識の向上から、より高い引火点を有する潤滑油へのニーズが高まっている。本稿では、このようなニーズに応えるべく、工作機械用高引火点軸受油「スーパーマルパス EX」を2019年7月に上市したので、同油の開発事例について解説する。

## 2. 工作機械用軸受油とは

### 2.1 工作機械主軸の特徴

工作機械は、自動車部品や航空機部品、プラスチック製造用の金型など、様々な部品を製作するために「切る」「削る」「磨く」の加工を行う機械である。工作機械の精度が最終製品の精度や品質に多分に影響するため、各国最高水準の技術が適用され、技術革新も著しい分野となる。日本の工作機械は世界の市場および技術をリードする存在であり、中国やドイツとともに主要生産国の一翼を担っている<sup>2,3)</sup>。

工作機械の機械要素の中で、加工精度に直接の影響を及ぼす主軸は、最も重要な要素の1つである。一般的に、軸受のタイプは転がり軸受とすべり軸受に大別されるが、主軸には転がり軸受が主に使用され<sup>4)</sup>、その潤滑方式はグリース潤滑、オイルミスト潤滑、オイルエア潤滑、ジェット潤滑、アンダーレース潤滑の5種類に分類される<sup>5)</sup>。表2に各潤滑方式の特徴と使用限界 $d_{mn}$ 値(軸受転動体の

表2 主軸転がり軸受の潤滑方法<sup>5)</sup>

潤滑方法	限界 $d_{mn}$ 値	潤滑剤の働き	取り扱い	信頼性	温度上昇	冷却効果	シール構造	動力損失	環境汚染	特徴
グリース	80万まで	潤滑	◎	○	△	×	×	○	○	メンテナンスが容易 冷却性が低く、高速には不向き
オイルミスト	120万まで	潤滑	○	△	△	△	○	○	×	メンテナンスが容易 大径主軸の高速化に適する 給油量が多く摩擦抵抗が大きい
オイルエア	150万まで	潤滑	○	○	○	○	○	○	○	空気による冷却効果が大きい 高速化に適している 一般的に粘度は10~40mm <sup>2</sup> /s@40℃
ジェット	220万まで	潤滑と冷却	△	◎	◎	◎	×	×	○	冷却効果が大きく高速に適する 大型の冷却装置が必要 粘度は2mm <sup>2</sup> /s@40℃
アンダーレース	300万まで	潤滑と冷却	○	◎	◎	◎	○	○	○	高速回転(遠心力利用)でも潤滑油が軸受内部に的確に導入される

中心径と回転数の積)を示す。最近では工作機械の高精度・高効率化に伴って主軸の更なる高速化が進み、 $d_m n$  値 500 万での運転が可能な軸受が開発されている<sup>6)</sup>。しかしながら、主軸の高速化に伴って発熱量は増加し、サブミクロンオーダーの超高精度の加工精度が求められる工作機械では、主軸部の熱膨張によって加工精度が低下する問題があった。それに対してハード面では、軸受構造の最適化による低昇温化<sup>7,8)</sup>や熱変形補正の制御<sup>9)</sup>など、数多くの取り組みがなされている。一方、潤滑油からのアプローチとして、流体抵抗の小さい低粘度軸受油を潤滑剤に使用し、発熱量を抑制する手法が適用されている。同手法を適用したジェット潤滑やアンダーレース潤滑には ISO VG2 程度の低粘度軸受油が使用されている。

### 2.2 工作機械主軸の低粘度軸受油

工作機械では軸受油や摺動面油をはじめ、様々な潤滑油が使用されている(図1)。先述のとおり、工作機械の高性能化において重要視されるのは高精度・高速化に大きく影響する主軸であり、主軸の潤滑に加え、冷却にも使用される ISO VG2～10 の低粘度軸受油は寄与が大きく、潤滑性(耐焼き付き性、耐摩耗性)や酸化安定性、防錆性、冷却性、高粘度指数、消泡性などの性能を有することが求められる<sup>10)</sup>。

現状、これらを満足する既存の低粘度軸受油には、基油に鉱物油が用いられており、揮発しやすい低分子成分を含んでいる。そのため、多くの低粘度軸受油は第3石油類(非水溶性液体)に分類され、工作機械で使用される他の潤滑油と比較して、より厳しい消防法上の規制を受ける。第4石油類の潤滑油は指定数量が6,000Lであるのに対し、第3石油類の低粘度軸受油の指定数量は2,000Lと3分の1となるが、工作機械主軸の潤滑・冷却には多量の軸受油が使われるため、貯蔵危険物の中でも高い比率を占める。第3石油類から第4石油類への高引火点化は、危険物貯蔵管理の煩雑さの緩和に繋がりやすく生産者にとってメリットが大きいことから、昨今では高引火点化の要望が相次いでいる。

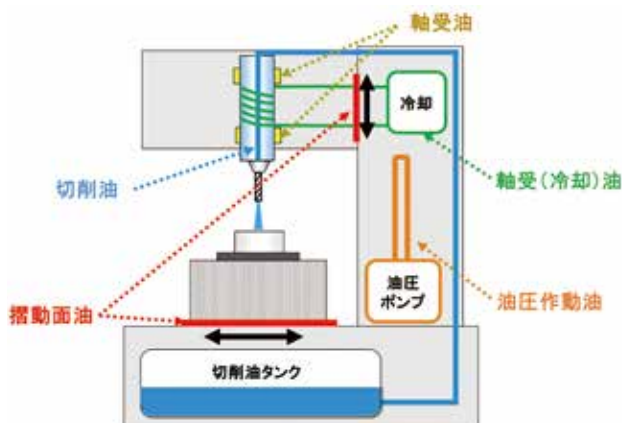


図1 工作機械の潤滑

### 3. 工作機械用高引火点軸受油「スーパーマルパス EX」の開発

潤滑油は基油と添加剤から構成される。軸受油では基油が大半を占めており、動粘度や引火点への影響は基油に起因する部分が多い。基油の低粘度化と高引火点化はトレードオフの関係にあり、鉱物油を適用して低粘度と第4石油類を両立することは難しい。これら2つの性能の両立が可能となる適切な基油を新たに選定し、その基油に適した添加剤処方設計が必要となる。上記コンセプトをもとに、当社では低粘度・高引火点化を両立した工作機械用高引火点軸受油「スーパーマルパス EX」を開発したので、以下に諸性能を紹介する。

#### 3.1 スーパーマルパス EX の粘度特性・引火点

図2に、代表的な鉱物油と脂肪酸エステル油における動粘度と引火点の関係を示す。ISO VG2～10 程度の鉱物油の引火点は100～160℃程度であり、第4石油類の引火点基準の200℃以上を満足することができない。引火点200℃以上を担保するためにはVG10以上の粘度が必要となる。一方で、特定の構造を有する脂肪酸エステル油の場合、VG5相当でも引火点200℃以上を担保可能となることがわかった。脂肪酸エステル油も鉱物油と同様、一般に分子量が小さいほど引火点が低くなるが、同じ動粘度で比較した場合、鉱物油よりも脂肪酸エステル油の方が高い引火点を示す。これは脂肪酸エステル油が単一化合物であり分子量の分布を持たないことと、同一粘度の鉱物油と比較して分子量が大きいことに起因すると考えられる。動粘度と引火点を両立できる最適な分子構造を有する脂肪酸エステル油を選定し、スーパーマルパス EX に適用した。また、脂肪酸エステル油は鉱物油よりも温度による粘度変化が小さいため、スーパーマルパス EX は従来の鉱物油系軸受油と比較し、低温時の発熱抑制および省エネルギー性への貢献も期待できる。このように、基油として脂肪酸エステル油を採用することで、VG5 相当の粘度域において、第4石油類化することが可能となった。

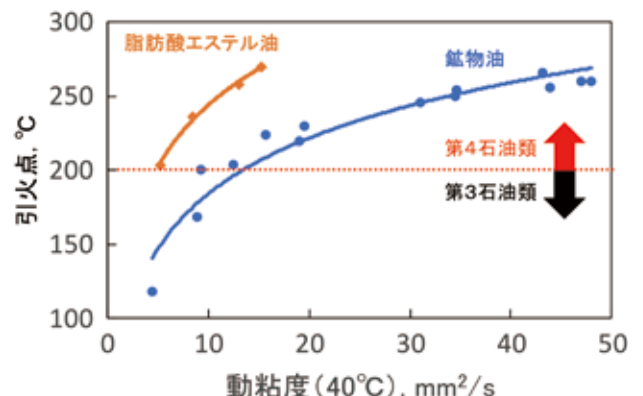


図2 基油と引火点の関係<sup>11)</sup>

3.2 スーパーマルパス EX のさび止め性

潤滑油の基本性能として優れたさび止め性が求められるが、軸受油も例外ではなく、機器の保護を目的にさび止め性が付与される。さび止め剤には金属に対する十分な吸着性と基油に対する適当な溶解性が求められ<sup>13)</sup>、基油の特徴にあった適切な構造のさび止め剤を選定する必要がある。鉱物油と脂肪酸エステル油では極性が大きく異なるため、さび止め剤としての相応しい構造も異なってくる。上記を踏まえ、脂肪酸エステル油に最適なさび止め剤の検討を行った。

表3に、JIS K 2510に規定されるさび止め性試験(蒸留水)の結果を示す。さび止め剤Aは鉱物油への配合では優れた効果が得られたが、脂肪酸エステル油への配合ではさび止め性の向上は確認されなかった。一方で、より強い極性構造を有するさび止め剤B、Cを選定したところ、優れたさび止め性を示した。極性の弱いさび止め剤Aとは異なり、脂肪酸エステル油中であっても金属表面へのさび止め剤の吸着が適度に進行し、さびを抑制する効果が得られたと考えられる。

しかしながら、脂肪酸エステル油は酸触媒によって加水分解が促進され、安定性が低下するため、極性の強いさび止め剤による潤滑油の過剰な酸性環境は長期間の使用が想定される軸受油には適さない。図3に、水添加・高温条件下で安定性を評価した際の酸価増減の検証結果を示す。さび止め剤Bを添加した候補油2は酸価が増大する一方で、さび止め剤Cを添加したスーパーマルパスEX5は酸価増加を抑制できており、優れた加水分解安定性を示した。さび止め剤Bは、さび止め剤Cよりも酸性が強いため脂肪酸エステル油の加水分解を促進したと考えられ、さび止め性と安定性を両立するためには、各基油に適した構造のさび止め剤の選定が必要であることが明らかとなった。

これらの結果より、スーパーマルパスEXには、脂肪酸エステル油に配合した際にさび止め性と加水分解安定性の両立が可能なさび止め剤Cを選定し、要求性能を満足することに成功した。

表3 さび止め性の評価結果

	候補油1	候補油2	スーパーマルパスEX5	比較油
鉱物油VG5	—	—	—	○
脂肪酸エステル油VG5	○	○	○	—
さび止め剤A	○	—	—	○
さび止め剤B	—	○	—	—
さび止め剤C	—	—	○	—
さび止め性(蒸留水)	さびあり(高度)	さびなし	さびなし	さびなし

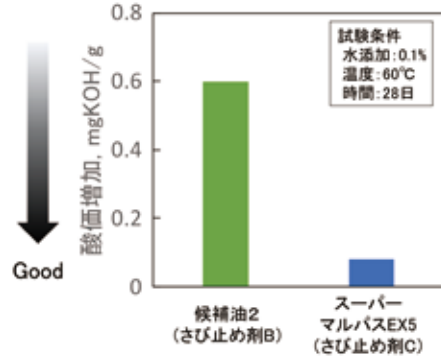


図3 加水分解による酸価増加の評価結果

3.3 スーパーマルパス EX の潤滑性

工作機械主軸用軸受では、潤滑状態が厳しいことによる焼き付きや摩耗が主な損傷要因であり<sup>12)</sup>、この厳しい使用条件下で優れた特性を示す軸受油が求められる。耐焼き付き性や耐摩耗性の向上には、基油に適した極圧剤、摩耗防止剤の選定が重要となる。スーパーマルパスEXの性能を評価するため、高速四球試験を実施し、鉱物油系軸受油との性能を比較した(図4)。脂肪酸エステル油に適した極圧剤、摩耗防止剤を配合したスーパーマルパスEXは、従来の鉱物油系軸受油と同等以上の性能を有することが示された。

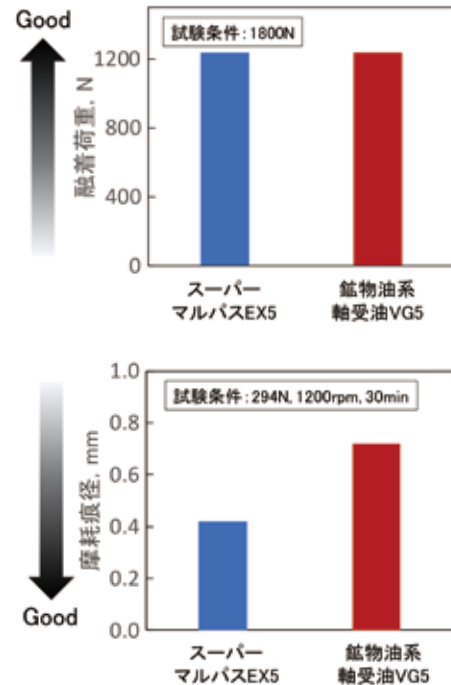


図4 四球試験における潤滑性の評価結果

3.4 スーパーマルパス EX の酸化・熱安定性

脂肪酸エステル油の酸化安定性を向上させるには、酸化防止剤の選定が重要となる。スーパーマルパスEXと候補油2、脂肪酸エステル油単体を用いて、60°Cでの安定性評価を実施した。図5に酸価増減量の推移を示す。スー

パーマルパス EX5 は酸価増加がほとんど見られないが、候補油 2 および脂肪酸エステル油単体は初期より酸価の増加が大きく、同様の推移を見せた。候補油 2 は、スーパーマルパス EX5 と同等の酸化防止剤を配合しているが、さび止め剤 B によって安定性に悪影響が生じた結果、酸化防止剤の効果が抑制されたと考えられる。

このように、スーパーマルパス EX は基油に最適な添加剤の配合により酸化・熱安定性を向上することが可能となった。

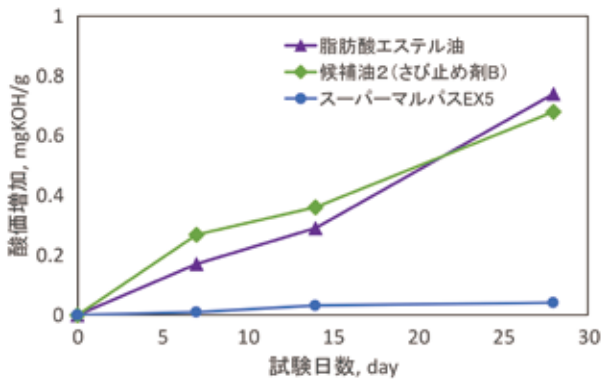


図 5 酸化安定性の評価結果

### 3.5 スーパーマルパス EX の冷却性

低粘度軸受油は、軸受の潤滑の他に、軸受の高速回転による発熱を外部に伝達し放熱する重要な役割も担っている。流体の冷却性能は、固体表面と流体の間の熱移動の大小を示す熱伝達量に起因し、熱伝達量の指標である熱伝達率は流体の密度や粘度、熱伝導率、比熱、流速、配管の代表寸法などの独立の因子に影響を受ける。熱伝達率の算出には経験則や理論から様々な式が導出されているが、例えば Dittus-Boelter の式を用いると、熱伝達率  $h$  は式 (1) のように表される。

$$h=0.023D^{-0.2} k^{0.6} u^{0.8} \nu^{-0.4} \rho^{0.4} Cp^{0.4} \dots \text{式 (1)}$$

$h$  : 熱伝達率 ( $W / (m^2 \cdot K)$ )

$D$  : 配管の直径 (m)

$k$  : 熱伝導率 ( $W / (m \cdot K)$ )

$u$  : 流速 (m/s)

$\nu$  : 動粘度 ( $mm^2/s$ )

$\rho$  : 密度 ( $kg/m^3$ )

$Cp$  : 定圧比熱 ( $J / (kg \cdot K)$ )

スーパーマルパス EX と鉱物油系軸受油で熱伝達率  $h$  を比較する場合、密度  $\rho$ 、動粘度  $\nu$ 、熱伝導率  $k$ 、定圧比熱  $Cp$  は測定値より既知であり、流速  $u$  および配管の直径  $D$  は同一であることから、以下のとおり、両者の熱伝達率の比率  $h_1/h_2$  を求めることができる。

$$h_1/h_2 = (k_1/k_2)^{0.6} (\nu_1/\nu_2)^{-0.4} (\rho_1/\rho_2)^{0.4} (Cp_1/Cp_2)^{0.4} \dots \text{式 (2)}$$

鉱物油系軸受油 VG2 を基準とした際のスーパーマルパス EX5,10 と鉱物油系軸受油 VG5,10 の熱伝達率の比較結果を図 6 に示す。動粘度の影響が大きいことが明らかであり、鉱物油系軸受油 VG2 と比較するといずれも冷却性能に劣る結果となった。同 VG での比較では、スーパーマルパス EX5 は、基油の制約上、鉱物油系軸受油 VG5 よりも動粘度が高い処方設計となっているため、その影響から熱伝達率は若干低く、スーパーマルパス EX10 は鉱物油系軸受油 VG10 と同等の性能となった。一方で特定の顧客において、鉱物油系軸受油 VG2 を軸受冷却油として使用している機械にスーパーマルパス EX5 を代替適用し、主軸温度の変動を検証したところ、主軸温度は VG2 使用時と同程度を維持しており、冷却性能に問題がないことが確認されている。このように一部の機種においては、鉱物油系軸受油 VG2 をスーパーマルパス EX5 で置き換えた際の実用性の実証も進められつつある。

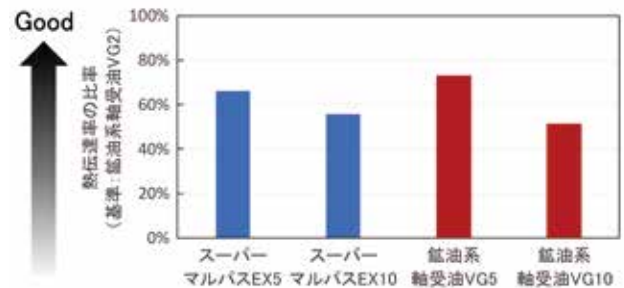


図 6 熱伝達率  $h$  の比較結果

### 3.6 スーパーマルパス EX の一般性状

以上のように、スーパーマルパス EX は低粘度と高引火点の両立に成功し、さび止め性や潤滑性、冷却性について鉱物油系軸受油と同等性能を達成した。表 4 に、スーパーマルパス EX の一般性状を示す。消泡性や低温流動性にも優れており、工作機械主軸の軸受油および軸受冷却油として従来の鉱物油系軸受油からの代替使用が可能である。

表 4 スーパーマルパス EX の一般性状

試験項目	単位	スーパーマルパスEX	
		5	10
JIS規格		FC5相当	FC10
色(ASTM)		L0.5	L0.5
密度(15°C)	g/cm <sup>3</sup>	0.871	0.852
動粘度(40°C)	mm <sup>2</sup> /s	5.9	9.6
" (100°C)	mm <sup>2</sup> /s	2.2	2.6
粘度指数		214	162
流動点	°C	-20.0	-25.0
酸価	mgKOH/g	0.11	0.09
引火点	°C	200以上	200以上
さび止め性(蒸留水, 60°C, 24h)		さびなし	さびなし
銅板腐食(100°C, 3h)		1	1
抗乳化(54°C)	mL	41-38-1	40-39-1
	(min.)	(5)	(10)
泡立ち性 シーケンス I	mL	0/0	0/0

#### 4. おわりに

消防法に関する潤滑油を取り巻く環境と工作機械主軸軸受油に求められる性能を説明するとともに、昨今の社会的な要求の高まりを受けて開発した低粘度と高引火点化を両立した工作機械用高引火点軸受油「スーパーマルパス EX」の各種性能を紹介した。スーパーマルパス EX は 2019 年 7 月に発売を開始し、危険物指定数量の規定に苦慮する顧客や高い安全意識を持つ顧客に採用され始めている。スーパーマルパス EX の適用によって、生産設備における生産性の向上および安全操業に貢献できれば幸いである。

#### － 引用文献 －

- 1) 船木猛；潤滑経済, 437, 23 (2002)
- 2) 一般社団法人日本工作機械工業会；潤滑経済, 642, 28 (2018)
- 3) 中尾元；ENEOS Technical Review, 48, 2, 84 (2006)
- 4) 清水伸二；初歩から学ぶ工作機械, 大河出版, 2011, 155
- 5) 藤原新吾；潤滑経済, 619, 14 (2016)
- 6) 赤松良信, 森正継；NTN TECHNICAL REVIEW, 72, 6 (2004)
- 7) 東本修；月刊トライボロジー, 355, 29 (2017)
- 8) 古山峰夫；月刊トライボロジー, 358, 18 (2017)
- 9) 立矢広ほか；日本機械学会論文集 C 編, 79, 804, 2960 (2013)
- 10) 大西賢治；潤滑経済, 623, 2 (2017)
- 11) 遠藤龍太, 小谷田早季；石油製品討論会, 38 (2019)
- 12) 杉田芳史；月刊トライボロジー, 332, 16 (2015)
- 13) 桜井俊男；石油製品添加剤, 幸書房, 1973, 224