

自動車しゅう動部品用グリース潤滑技術

Grease Lubrication Technology for Sliding Automobile Parts

中田竜二 R. NAKATA

To address the issue of grease for automobile sliding parts, we took into consideration the prevention of starvation by improving inflow, friction reduction under boundary lubrication conditions, and the improvement of resin compatibility. Inflow into the sliding contact face improved by using a thickener with high gelling ability, which reduced shear viscosity in high-speed areas of over 10^2 s^{-1} . The friction coefficient under boundary lubrication conditions was reduced more than 50% by use of a stearate oiliness agent. Furthermore, penetration of the agent into resin was reduced by selecting an agent with metal elements. With these low-friction and resin-compatible technologies, we have created a grease lubrication technology that can contribute to a broad range of automobile parts.

Key Words: grease, sliding contact, rheology, inflow, resin compatibility, automobile

1. はじめに

近年、地球環境保全や温暖化防止の観点から、自動車に対する省エネルギーやCO₂排出量削減の要求はますます高まり、自動車部品に対しても摩擦の低減や軽量化のニーズが高まっている。また、自動車の電動化・ハイブリッド化に伴い、高度な静粛性が要求されている。これらの背景により、自動車部品を構成する歯車やスライドなどのしゅう動機構には樹脂材料が多用される。またこれらの機構の潤滑には、密封装置の簡素化の要求からグリースを用いることが多い。樹脂部品のしゅう動による発熱は、樹脂の変形や破壊に直接的に繋がるため、潤滑に用いられるグリースには高度な低摩擦性が求められる。また、高温下で長期間の使用では樹脂材料の物性変化が懸念されることから、グリースによる樹脂の物性変化の促進を極力抑える必要がある。

本報では、樹脂/鉄しゅう動機構用として、低摩擦性と樹脂適合性を両立させたグリース技術を構築し、樹脂を用いたしゅう動機構部品のグリースによる高性能化と信頼性向上を図った事例を紹介する。

2. グリースの低摩擦化技術

2.1 すべり界面への流入性向上

すべり接触面のグリース潤滑における課題として、機構の運動に伴いグリースが排除されることによる枯渇が挙げられる。転がり接触においては、機構の相対運動に速度差がなく接触面へのグリースの引き込み効果が期待できる。また、低速度領域では増ちょう剤の接触部への堆積によるEHL (Elast-Hydrodynamic Lubrication) 油膜厚さの増大が報告されており¹⁾、これによる潤滑効果が期待できる。これに対し、すべり接触では機構の相対速度差からグリースは単純にせん断され、接触面から排除されることが支配的となり、転がり接触用グリースよりもさらに流入性を向上させる必要がある。そこで、流入性向上のための、グリースのレオロジー特性改善に着目した。

流入性を定量的に評価するために、しゅう動機構部品を模したすべり摩擦試験において、少量潤滑下と十分潤滑下における摩擦係数の経時変化の比較試験を実施し、そのかい離からグリースの枯渇に至るまでの時間を評価することで枯渇特性を評価した²⁾。一方で、グリース流入性と相関するレオロジーパラメータの検討を行った。その結果、せん断速度 $\dot{\gamma} = 10^2 \text{ s}^{-1}$ 以上の高せん断速度域でのせん断粘度 $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ (τ : せん断応力) と枯渇に至るまでの時間に相関が認められ、せん断粘度の低いグリースが流入性に優れることがわかった。図1に各種グリースのせん断粘度と枯渇までの時間の関係を示す。

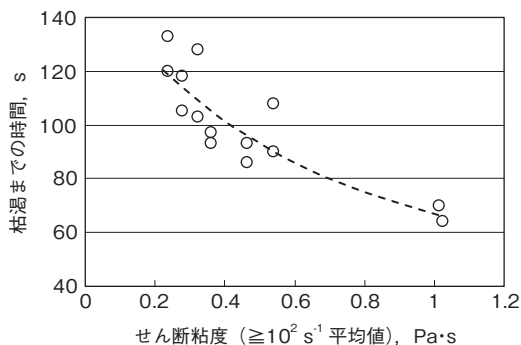


図1 各種グリースのせん断粘度と枯渇までの時間の関係
Relationship between shear viscosity and time until starvation

せん断粘度を低減するためのグリース設計としてはちよう度の増大（軟化）が考えられるが、これは機器への付着性の低下を招く。このため、増ちよう剤組成の検討により硬さの保持と低せん断粘度化の両立を検討した。グリースはせん断応力がある降伏値を超えたときにはじめて流動し、せん断速度とともにせん断粘度が低下するビンガム塑性流動を示す。つまり、静的には固体として挙動するが、これは増ちよう剤繊維で形成されたネットワークの内部構造によるものとされる。また、せん断粘度はせん断速度の増加とともに低下し、基油粘度に近づくが、この特性はせん断による増ちよう剤繊維の配向によるものとされる³⁾。静的には硬さを保持しながら、動的には低粘度化する方策として、増ちよう剤のゲル化能（単位質量あたりの硬さ）向上による増ちよう剤の低濃度化を検討した。増ちよう剤の低濃度化により、せん断による配向時の粘性抵抗を低減可能と考えた。各種増ちよう剤を用いたちよう度 280 のグリースの、増ちよう剤量とせん断粘度の関係を図2に示す。静的には同一硬さでも動的にせん断を加えたときのせん断粘度は異なり、増ちよう剤が低濃度なほど、せん断粘度が低いことが分かる。この検討結果より、特定の脂肪族アミンを原料とするジウレア（以下、脂肪族ジウレア）の増ちよう剤のゲル化能が非常に高く、また、せん断粘度が低いことを見出した。以上の検討により、所定の硬さを保持しながらも、動的状態におけるせん断粘度を低減することが可能となり、付着性を損なわず、すべり接触面への流入性向上を実現した。

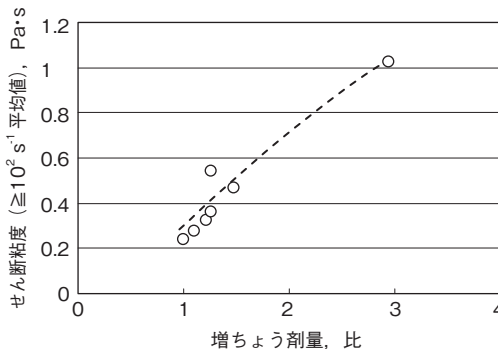


図2 増ちよう剤量とせん断粘度の関係（ちよう度 280）
Relationship between thickener concentrations and shear viscosity (conepenetration 280)

2.2 境界潤滑下での低摩擦化

しゅう動機構の潤滑では、流入性の向上と同時に貧潤滑状態を想定した油膜切れへの対策が重要となる。グリースの油膜厚さは安定状態でも基油による油膜厚さの 0.5～0.7 倍に減少する⁴⁾とされるが、枯渇を伴うとさらに薄膜化し油膜切れに至る可能性もある。これを補完するため、境界潤滑状態で摩擦を低減する摩擦調整剤の選定を行った。樹脂／鉄で構成されるしゅう動機構部品の接触面圧は数 10～数 100MPa の単位である。この面圧領域では、鉄／鉄の接触下で摩擦調整剤として多用される極圧添加剤はその作用機構⁵⁾から、効果を示さない傾向にある。このため、この接触面圧領域で効果を発揮すると予測される固体潤滑剤や油性向上剤の選定を検討した。

前述の特定の脂肪族ジウレアを増ちよう剤に、合成炭化水素を基油に用いたベースグリース（G-1）に、各種固体潤滑剤や油性向上剤を添加したグリースの摩擦係数を図3に示す。ベースグリース（G-1）の摩擦係数が常温で 0.15 を超え、かつ 80℃ で 0.1 を超える値であったのに対し、各種添加剤を添加したグリースは、いずれも一定の低摩擦化の効果を示した。固体潤滑剤 S-1 を添加したグリース（G-2）、S-2 を添加したグリース（G-3）はいずれも常温、80℃ ともに 25% 程度の摩擦係数低減であったのに対し、ステアレート系の油性向上剤 ST-1 を添加したグリース（G-4）、ST-2 を添加したグリース（G-5）は、いずれも優れた低摩擦特性を示し、80℃ では無添加グリース比で摩擦係数を 50% 以上低減する効果を有することが分かった。これらの差は、その作用機構にあると解釈できる。すなわち、固体潤滑剤は物理吸着や層間すべりにより低摩擦性を発揮するとされる。一方で、大きい効果を示したステアレート系油性向上剤は

化学吸着により低摩擦性を発揮するとされ、この作用が樹脂／鉄すべり界面において大きい低摩擦効果を発揮したものと推定される。

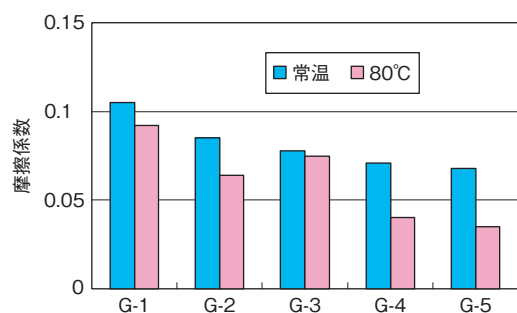
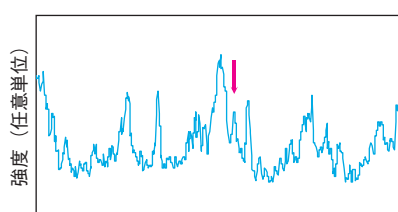
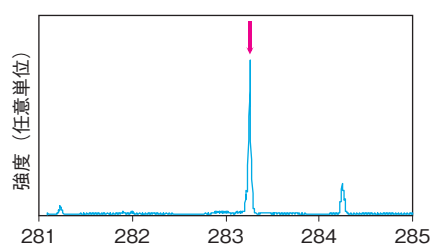


図3 各種添加剤による摩擦係数低減効果
Reduction effect of friction coefficient by additives

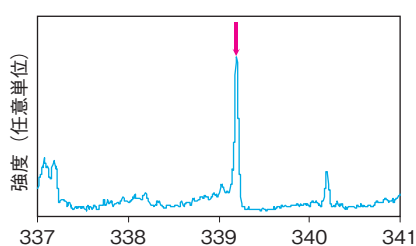
この、ステアレート系油性向上剤の低摩擦メカニズムを検証するため、G-5による試験後の鉄側摩擦面について、飛行時間型二次イオン質量分析法 (Time-of-flight secondary ion mass spectrometry : TOF-SIMS) による吸着種分析を行った結果を図4に示す。添加剤である金属ステアレート (ST-2) そのものは検出されなかったが (図4(a)), カルボキシレート ($C_{17}H_{35}COO^-$, 図4(b)) およびステアリン酸鉄 ($C_{18}H_{35}O_2Fe$, 図4(c)) に帰属する mass ピークが明瞭に検出された。このことから、低摩擦化のメカニズムは、ステアレート系油性向上剤からトライボケミカル反応により解離したカルボキシレートが摩擦面の Fe との化学吸着によりステアリン酸鉄を生成し、図4(d) に示すようなモデルのせん断力の低い潤滑膜を安定的に形成したものと推定される。



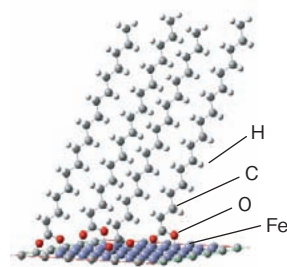
(a) 金属ステアレート ($C_{18}H_{35}O_2Me^+$)



(b) カルボキシレート ($C_{17}H_{35}COO^-$)



(c) ステアリン酸鉄 ($C_{18}H_{35}O_2Fe^+$)



(d) 吸着膜モデル

図4 TOF-SIMS による摩擦面分析
Frictional surface analysis by TOF-SIMS

3. 樹脂材料との適合性向上技術

高温下における長期の使用においては、グリースによる樹脂の物性変化が懸念される。一般的に、樹脂適合性が高いとされる合成炭化水素を基油とするグリースにおいても、物性変化促進が認められる場合がある。本検討では添加剤組成に着目し、グリースによる樹脂物性変化の抑制を検討した⁶⁾。

試料グリースとして、前述の特定の脂肪族ジウレアを増ちょう剤に、合成炭化水素を基油に用いたベースグリース (G-1) に、金属元素の異なるステアレート系の油性向上剤 ST-1, ST-2 をそれぞれ添加したグリース (G-4) と (G-5) を用い、さらに比較対照として一般的に樹脂適合性が優れるとされる Ba 複合石けんを増ちょう剤とするグリース (BC) を用いた。これらのグリース試料を、樹脂しゅう動部材として一般的なポリアミド 66 のダンベル試験片に塗布した際の $140^\circ C \times 1,500h$ における物性変化を図5に示す。本試験条件ではグリース塗布なしの試験片において、強度で 5%、伸びで 46% の低下が認められた。これに対し、一般的に樹脂との適合性が良いとされる合成炭化水素を基油とする試料グリースすべてにおいて、試験片にはグリース塗布なしと比較して強度と伸びの低下が認められた。特に、ベースグリース (G-1) とステアレート系油性向上剤 ST-1 を配合した (G-4) における伸びの低下が著しい。一方で、含有する金属元素の異なるステアレート系油性向上剤 ST-2 を添加した (G-5) については、Ba 複合石けん系グリース

(BC) よりも伸び変化が小さい結果となり、ステアレート系油性向上剤に含有する金属元素の違いにより大きな差が生じた。

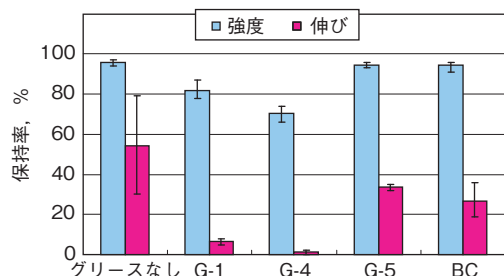


図5 ポリアミド66に対する適合性 (140℃×1 500h)
Compatibility against PA66 at 140℃×1 500h

この試験片の物性変化に及ぼすグリース組成の影響の差異のメカニズムを検証するため、グリース塗布なし、(G-4)、(G-5) および (BC) での 140℃×1 500h 浸漬後のポリアミド 66 について、劣化状態を分析した⁷⁾。フーリエ変換型赤外分光法 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR) による試験片表面の酸化状態を図6に示す。物性変化の大きい (G-4) に浸漬した樹脂表面には 1 660 ~ 1 780cm⁻¹ にかけてカルボニル基に由来するとみられる幅広い波長の吸光度に上昇が見られ、他のグリースと比較し樹脂表面の酸化進行が認められる。このことから、図5のグリースによる試験片の物性変化の差異は酸化劣化促進の影響によるものと示唆された。

トリフルオロ酢酸 (Trifluoroacetic acid : TFA) 化によるゲル浸透クロマトグラフィ (Gel Permeation Chromatography : GPC) による樹脂の分子量の表面から深さ方向の分布を図7に示す。物性変化が大きかった (G-4) 浸漬後の樹脂では表面の分子量低下が顕著であり、前述の酸化劣化促進と関連するものと考えられる。一方でグリース塗布なし、(G-5)、(BC) 浸漬後との比較において、深さ 500μm 程度まで分子量低下の明確な進行が認められる。このことから、グリースによる樹脂の物性変化は表面の酸化による影響のみならず、ポリアミド分子主鎖の切断による分子量低下が、深さ方向に進行した影響によるものと推定された。

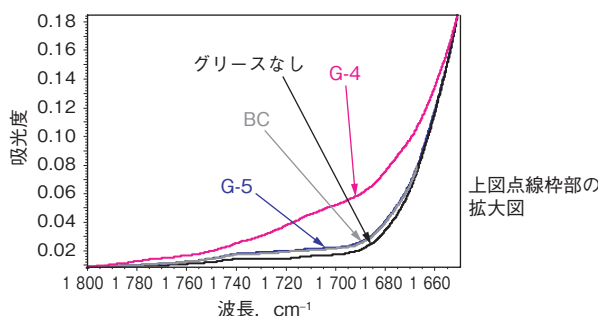
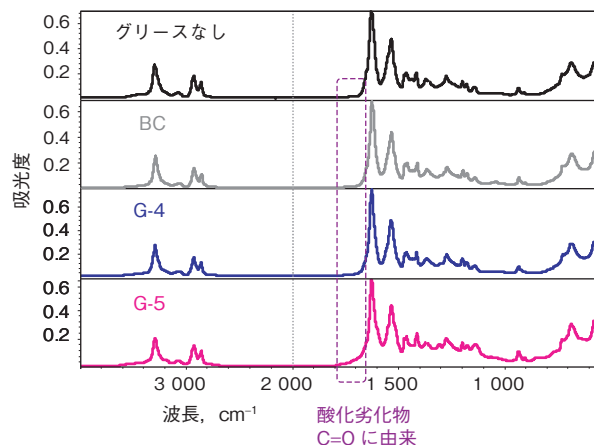


図6 FT-IR による試験片表面の酸化状態
Surface oxidation of typical specimens by FT-IR

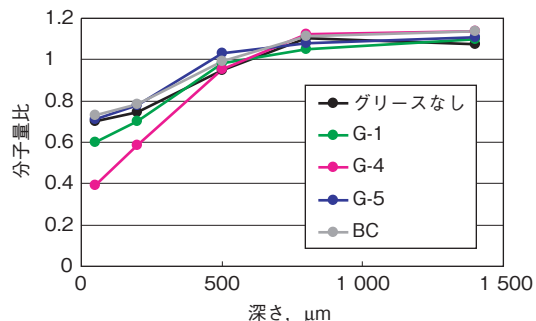


図7 GPC による樹脂分子量の深さ方向分布
Depth distribution of resin molecular weight by GPC

(G-4)、(G-5) および (BC) 浸漬後の樹脂について、断面の TOF-SIMS の元素マッピングによるグリース由来の金属元素の深さ方向分布を図8に示す。物性変化の小さかった (G-5)、(BC) では含有金属元素の浸透がほとんど認められず表面に偏析しているが、物性変化の大きかった (G-4) については、グリース由来の金属元素が深さ 500μm 程度まで明瞭に観測され、樹脂の内部にまでグリース成分が浸透していることが分かる。前述の分子量低下が進行している深さと、グリース成分浸透深さはほぼ一致することから、物性変化は浸透したグリース成分の影響と考えられる。すなわち、ポリアミド 66 への浸透性の低いグリース成分の選定が、物性変化を抑

制する鍵になると推察される。この検討により、ステアレート系油性向上剤に含まれる金属元素の選定による樹脂浸透性の低下が樹脂の物性変化防止に有効であることが分かった。

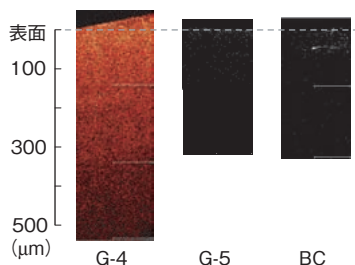


図8 TOF-SIMSによる樹脂断面のグリース成分の深さ方向分布

Depth profile of grease ingredient on the section of the resin by TOF-SIMS

以上の検討に基づき、最適設計した開発グリースの組成と性状を表1に示す。増ちょう剤には高ゲル化能の脂肪族ジウレアを、基油には合成炭化水素を、また摩擦調整剤にはステアレート系油性向上剤を選定し、混和ちよう度はさらなる低せん断粘度化を狙い300に設定した。なお、酸化防止剤の選定による耐熱性の向上、さびどめ剤の選定による耐腐食性の向上についても検討し、実車で必要なグリース性能を十分に確保している。

表1 開発グリースの組成、性状

Composition and properties of developed grease

増ちょう剤	脂肪族ジウレア
基油	合成炭化水素
基油動粘度 mm ² /s@40°C	48
ちよう度	300
添加剤	ステアレート系油性向上剤 酸化防止剤 さびどめ剤

4. 実車での性能

自動車用の電動パワーステアリングにおける代表的な樹脂/鉄しゅう動部位(鉄製ウォーム/樹脂製ホイール)である、モータ減速機用ウォーム歯車を図9に示す。このかみあい部の潤滑に、前述の技術によるグリースの適用を検討した。ウォーム軸の昇温と樹脂ギヤ折損寿命を図10に、減速機効率を図11に示す。

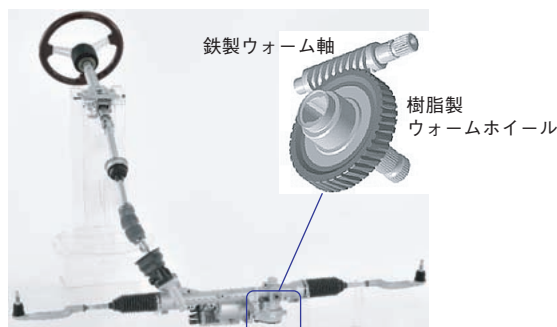


図9 モータ減速機用ウォーム歯車
Worm reducer for motor

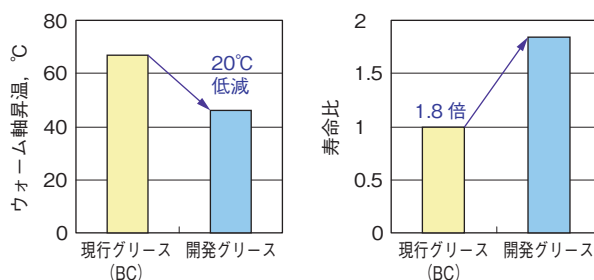


図10 ウォーム軸昇温と樹脂ギヤ折損寿命

Temperature rise of worm shaft and resin gear life up until breakage

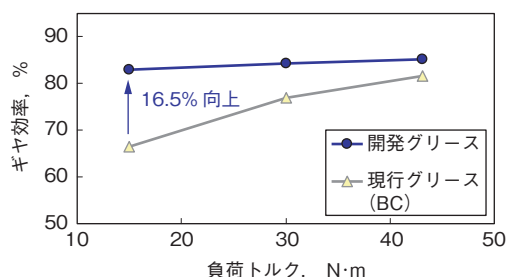


図11 減速機効率
Reducer efficiency

現行グリースであるBa複合石けん系グリース(BC)に比較してウォーム軸昇温で20°Cの低昇温化を達成しているが、これはかみあい部のグリースによる低摩擦化の効果と考えられる。また、樹脂ホイール破損までの寿命を1.8倍に延長できているが、これは前述の低昇温効果とともに樹脂適合性の向上によるものと考えられる。さらに、減速機効率については低負荷トルク領域で16.5%の向上と非常に大きな効果を達成しているが、これもグリースの低摩擦化の効果によるものと判断される。

5. おわりに

樹脂／鉄しゅう動用として、低摩擦性と樹脂適合性を両立させるグリース技術を構築し、摩擦発熱の低減と樹脂物性変化の抑制により、樹脂を用いたしゅう動機構部品の高性能化と信頼性向上を達成した。自動車部品用の樹脂化比率はこれまで以上に増加すると予測されるが、本報で紹介したグリース技術により、自動車部品の高性能化と信頼性向上に貢献したいと考える。

参考文献

- 1) P. M. Cann, H. A. Spikes : Film thickness measurement of lubricating grease under normally starved conditions, NLGI Spokesman, 56, 2(1992)21.
- 2) 中田竜二, 木村幸治, 松山博樹 : グリースの摩擦面介入性に及ぼすレオロジー特性の影響, トライボロジー会議予稿集(福井 2010-9)287.
- 3) 桜井俊男, 星野道男, 渡嘉敷通秀, 藤田 稔 : 潤滑グリースと合成潤滑油, 幸書房(1983)82.
- 4) 相原 了, D. Dowson : 弾性流体潤滑におけるグリース膜厚さの実験的研究(第1報), 潤滑, 25, 4(1980)254.
- 5) 星野道男 : 化学屋から見た潤滑理論の理解と応用(7) - 油の成分と添加剤の効果 -, 機械の研究, 49, 3(1997)85.
- 6) 中田竜二, 山田 渉, 松山博樹, 齊藤利幸, 筒井大介 : ポリアミドの物性変化と摩擦特性に及ぼすグリース組成の影響, トライボロジー会議予稿集(室蘭 2012-9)327.
- 7) 保木井美和, 中田竜二, 桑原寛文 : 潤滑剤存在下でのポリアミド樹脂の劣化分析手法の検討高分子分析, 討論会講演要旨集, 14(2009)153.

筆者



中田竜二*

R. NAKATA

* 研究開発本部 材料技術研究部