

二硫化モリブデン等の固体潤滑コーティングについて

1. はじめに

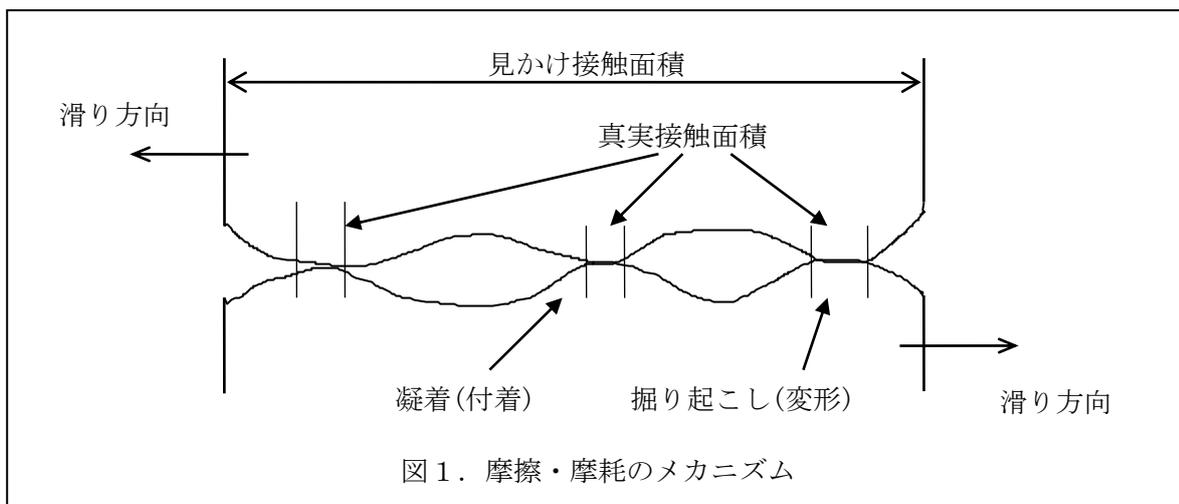
ドライ潤滑コーティングは乾性潤滑被膜の総称である。固体潤滑剤（二硫化モリブデン、グラファイト、PTFEフッ素樹脂等）を含有させた高機能コーティングであり、OA機器、家電、自動車、産業機械等に初期馴染み対策、耐摩耗性向上、焼き付き防止性向上、オイルレス化等、さまざまな分野に適用されている。

2. 摩擦・摩耗について

ドライ潤滑コーティングの性能の基本を理解するには潤滑剤の基本について把握する必要があると考える。基本にもどると、潤滑剤とは摩擦・摩耗を減少させる物質ではあるが、その摩擦・摩耗とは何か？から話を進める必要があると考える。

(1) 凝着説について

摩擦の本質は何かという問いに対し、物理学の物質間力の考え方を応用しているのが、「摩擦も物質間力で、摩擦力は接触（凝着）部分を引き離す力ではないか」という考え方である。摩擦とは金属と金属の凝着、金属と油などの吸着を引き離す力であることが再認識され、これを摩擦の凝着説という。凝着説に従えば摩擦部分の組み合わせを個々に引き離す力の総合が摩擦力として測定される。そのため凝着部分の組み合わせは油膜の厚さや、お互いの材質、運動による潤滑剤の供給など状況により常に変化するため、摩擦係数とは運転している最中の「その場の」摩擦の状況を表現しているだけであり、普遍的な値ではないことになる。



(2) 潤滑方法

上述の凝着理論に従えば、摩擦力を下げる（潤滑する）には次の3つの方法が考えられる。

①金属同士の接触割合を下げる。

表面粗さ：表面粗さの4倍の油膜（ベアリング表面では3cSt程度で十分とも言われている）

油の粘度：大きければ金属接触はなくなるが粘性抵抗は増加（最適値がある）

温度影響：温度が高くなると動粘度は低下し、温度が低くなると動粘度は増加する。どの程度変化するかは粘度指数で推測できる。

滑り速度：速ければくさび効果で油膜は厚くなる。

②金属のせん断力をさげる。

化学反応で柔らかい物質に変える。極圧添加剤（鉄を硫化鉄に…硫黄系 EP 剤等）

③金属表面に、よりせん断力の小さい物質を付着させる。

固体潤滑剤：（二硫化モリブデン・グラファイト・PTFE）

油性向上剤：（有機モリブデン・脂肪酸）

それぞれの方法の単独もしくは組み合わせで潤滑剤及び潤滑機構を選定・設定し、より良い潤滑状態を形成する事が機器の寿命延長につながるものと確信する。今回は潤滑方法のうち上述③にある金属表面に、よりせん断力の小さい物質をあらかじめ被覆させることで摩擦摩耗に効果を与えるドライ潤滑コーティングについて解説する。

3. ドライ潤滑コーティング（乾性潤滑被膜）について

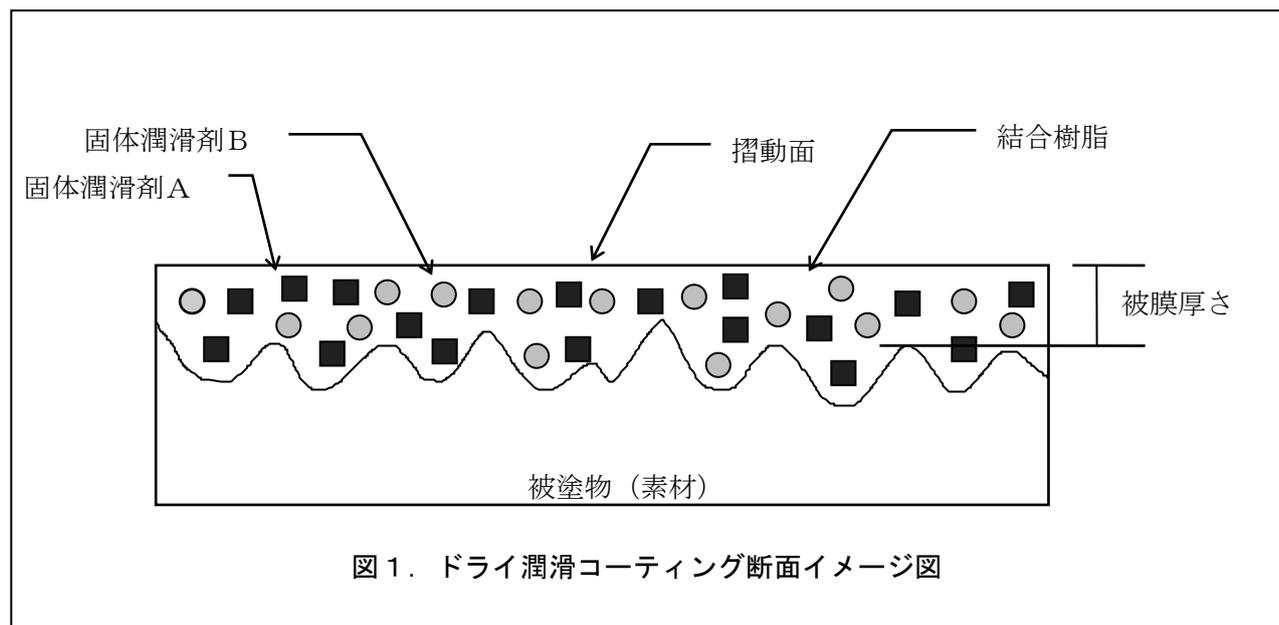
ドライ潤滑コーティングの組成とその働き

ドライフィルムは乾性潤滑被膜、すなわち、固体潤滑剤（二硫化モリブデン、グラファイト、PTFE等）を結合樹脂中に分散含有させ、結合樹脂の接着力によって摺動面に定着させる高機能コーティングである。潤滑剤としては、この塗料を適切な膜厚に塗布し、乾燥、または加熱硬化させることで被膜化し、この被膜が潤滑剤として作用する。

表1. ドライ潤滑コーティングの構成

構成	結合樹脂	固体潤滑剤	特殊添加剤	塗料添加剤	溶剤(希釈剤)
目的	素材と固体潤滑剤を密着させる目的。配合量によっては樹脂の摩擦係数も重要である	摩擦係数低減のため使用環境に応じて選択する。	樹脂の摩耗耐久性向上、防錆性等の+αの効能を目的として添加する。	塗料化のために必要な添加剤であり、軽潤滑の場合には被膜の平滑度が重要。	塗布加工法に応じて選択されるが、樹脂の特性に大きく影響される。
代表組成	ポリアミドイミド樹脂、エポキシ樹脂 アクリル系樹脂、等	二硫化モリブデン グラファイト PTFE、等	社外秘	社外秘	酢酸エチル キシレン メチルエチルケトン NMP・DMF、等

被膜化（コーティング）された状態のイメージ図を以下に示す。



結合樹脂の選択

- ①結合樹脂の特性により常温乾燥で成膜するものと、焼き付けが必要な樹脂がある。
- ②被加工材によって何度まで加熱できるか？ドライ潤滑コーティングの焼成温度として何度まで可能か？により焼成温度を考慮した樹脂選定が必要である。一般に鉄系は230℃、アルミ系は180～200℃以下。銅系は150℃以下。素材の材料硬度変化を嫌うことが多い。
- ③下地処理を行なうことで結合樹脂の密着性は向上する。
鉄系はリン酸被膜や軟窒化、アルミ系はアルマイト、その他ショットブラストが有効である。
リン酸系は200℃を超えると結晶水が発生するといわれており、下地処理の特性を理解し適用可否の判断を検討する必要がある。
- ④相手材が樹脂・ゴムの場合、一般には素材の使用温度範囲内で加工温度決定し、結合樹脂を選択するが、場合によっては加熱硬化タイプの使用が可能である。これには十分な事前試験が必要である。
- ⑤環境要因（耐薬品特性等）は重要である。万能な樹脂はない。ポリアミドイミド（PAI）は多価アルコール（代表的には不凍液）や、アルカリ雰囲気弱い。エポキシは紫外線（UV）に弱い等、各種特徴がある。

固体潤滑剤の選択

代表的な固体潤滑剤の特性を以下に示す。

表 2. 固体潤滑剤の特性

固体潤滑剤	外観	密度	摩擦係数	耐荷重性	耐熱性
二硫化モリブデン	灰銀色	4.8	0.04	784Mpa	350℃から徐々に酸化(MoO ₃)
グラファイト	黒色	2.2	0.06	490Mpa	550℃から徐々に酸化(CO ₂)
PTFE	白色	2.2	0.04	196Mpa	300℃前後より熱分解生成物発生

二硫化モリブデンは分子間がへき開し、層間にずれを与えるエネルギーが低いいため低摩擦が得られる。低速重荷重に適し、荷重依存性（負荷が高まるにつれ、焼き付き防止能力や摩擦係数が低減する傾向）を有すると言われている。軽荷重の場合、へき開が起こり難くなることが考えられる。

グラファイトも同様に分子間におけるへき開より低摩擦が得られると言われている。耐熱性が良好であるため、発熱を伴う高速低荷重にも適する。

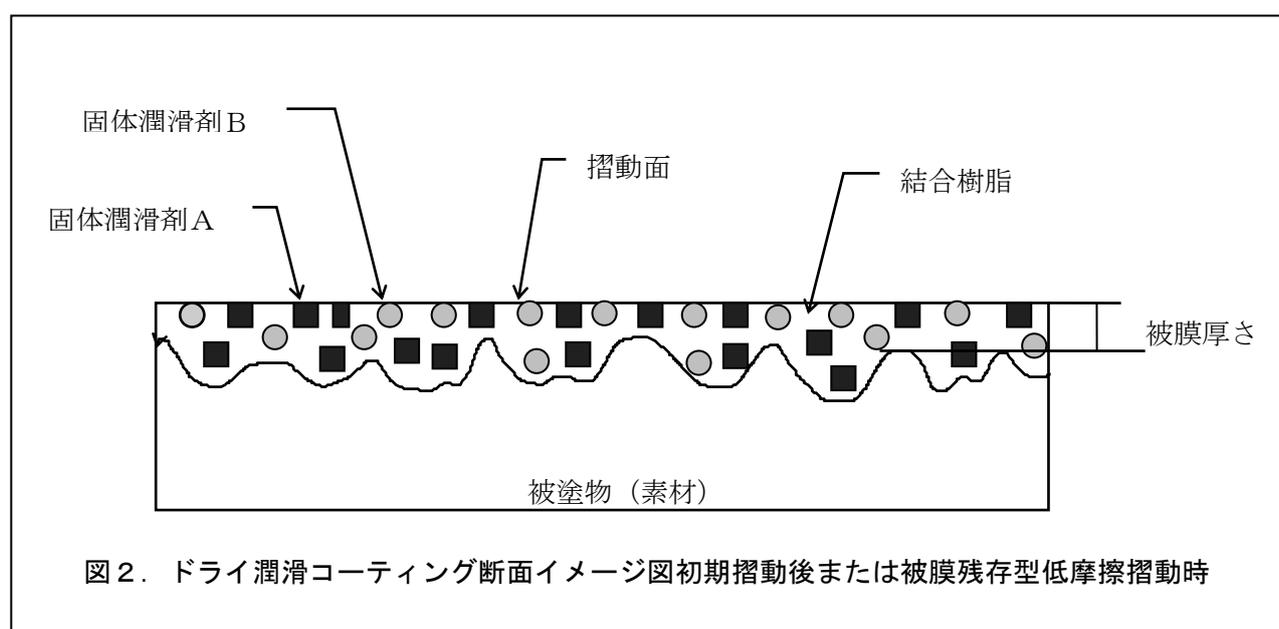
PTFEフッ素樹脂はポリテトラフルオロエチレンで、表面の摩擦係数が低く、また構造もバンド構造であるため比較的高荷重にも耐えうる。耐熱性が比較して低いことと、熱分解生成物の毒性という欠点以外は、速度・荷重に対してバランスのよい固体潤滑剤である。

上述の3種がもっとも利用されている固体潤滑剤である。それぞれの特徴を活かし、また複合化させることでお互いの欠点を補い、目的に応じた被膜組成設計を行なっている。

乾性被膜潤滑剤の選定に関する考え方

① 低摩擦係数被膜残存型(低摩擦コーティング)

上述の被膜化された直後の状態から、摺動部位において摩擦を繰り返すことで、図2で示すような摺動表面に固体潤滑剤が顔を出すようになる。固体潤滑剤としてPTFEを主体に配合することで表面の摩擦抵抗を軽減するようになる。この被膜は運転条件において徐々に摩滅し、素材との接触が始まる時点で寿命を迎える。二硫化モリブデンやグラファイトを配合することで焼き付き防止効果を兼ね備えることも可能であるが、耐摩耗性（どれだけ長く摩滅時間をとれるか？）を重視し考慮すると配合量を制御するため、焼き付き防止型被膜ほどの効力は発揮できない。使用される摺動条件としては比較的低面圧下で、負荷が低いほどPTFE配合型の適用を推奨する。高速摺動の場合は、摩擦熱を考慮し、この被膜系の中でもPTFE&グラファイト系を選択する機会が多い。使用環境としては、オイル・グリース等の油脂を併用する、または油脂潤滑では不満足な場合等において、更に低摩擦係数を実現できる場合が多い。



② 初期馴染み及び焼き付き防止型（初期馴染みコーティング）

二硫化モリブデンを主体とした固体潤滑剤を高濃度に配合した製品が多く、被膜自体は比較的軟質であることから、初期摩耗量が多い。被膜化された直後の状態から、摺動部位において摩擦を受けることで、図3のように表面粗さの凹部が被膜で埋まる状態になる。ここで、真実の接触面積を増すことで面圧低減効果を与え、また、摺動表面の素材が露出した部分には、凹部の残存被膜中の固体潤滑剤のへき開により移着が始まる。素材の硬度を活かしながら、摩擦面の凝着が発生し易い個所（粗さ凸部）に固体潤滑剤の供給が続くことで、軟質な膜でも大きな負荷において長寿命で耐えうるということが可能となる。ここで注意することは素材の表面粗さや、被膜が埋まるポケットが耐久寿命に大きく影響するという点であり、鏡面状態では被膜寿命は極端に短くなることが多い。下地にリン酸マンガン等の化成処理・窒化処理等を併用することにより性能（耐荷重能、寿命等）が飛躍的に向上することになる。使用される摺動条件としては高面圧下で、負荷が高いほど固体潤滑剤を多く配合した被膜となる。低速高荷重摺動に適し、下地処理との併用、オイル・グリース等との併用により高負荷でも耐えうる場合もある。低負荷の場合、樹脂がせん断され、固体潤滑剤がへき開し難い環境では、固体潤滑剤の効果を全く発揮できないこともある。また、高速軽荷重では固体が異物として挙動し、逆に発熱などの悪影響も生ずることもある。よって選定には注意を払う必要がある。

