

## 境界潤滑と潤滑剤

東京工業大学工学部 広中 清一郎

### 1. はじめに

トライボロジーという言葉が摩擦・摩耗および潤滑を総括する工学として用いられるようになって、はや 18 年余になるが、トライボロジーとは“ 相対運動している互いに作用し合う表面およびこれに関連する実際の諸問題の科学と技術 ” と定義され、機械産業および少しでも機械に関係する分野において、重要な研究対象の一つとなっている。特に産業界では最近の著しい機械の発達および機械の高速化などにより、生産速度は増したが、その反面機械の損傷やエネルギー浪費により経費は膨大となり、トライボロジーがますます注目視されるようになっている。特にトライボロジー上の問題を解決することにより年間 8,000 億から 1 兆円もの金額の節約が期待される。

本稿では、特に摩擦面間接触が起こり、種々の複雑な問題が起きやすい境界潤滑を取り上げ、これに関連する基本的事項を解説すると共に、境界潤滑における潤滑剤の役割を概説する。

### 2. 境界潤滑モード

Stribeck は軸受の摩擦実験から、摩擦係数 ( $f$ ) と潤滑油の粘度  $[\eta]$ 、荷重  $[F_N]$  および速度  $[V]$  との関係を、Stribeck 曲線(図 1)で示し、これによって [I] 境界潤滑 [Boundary Lubrication]、[ ] 弾性流体潤滑 [Elastohydrodynamic Lubrication, EHL] および混合潤滑 [Mixed Lubrication] の潤滑領域をうまく整理している。

流体潤滑では摩擦面は流体によって完全に分離されており  $[h > > R]$ 、そのトライボロジー特性は流体の内部摩擦によって支配され、弾性流体潤滑  $[h \sim R]$  においては流体の粘性、粘度～圧力係数、固体表面の弾性率などが主に関係している。これに対して境界潤滑モードは主に次の 3 点によって特徴づけられる。

- (i) 摩擦面は微小突起部間で互いに接触している。
- (ii) トライボロジー特性は潤滑油の流体力学的効果やバルクのレオロジー特性の影響はあまり受けない。
- (iii) トライボロジー特性は摩擦面同士の接触の相互作用お

目

次

1. はじめに	1
2. 境界潤滑モード	1
3. 境界潤滑における摩耗	3
4. 潤滑膜の形成	4
5. 固体潤滑剤	4

6. フリクション・モディフィケーション	6
ケミカルテクノロジーの結晶 パンドー シリーズの商品紹介	7
3 B グループの活動情報	8

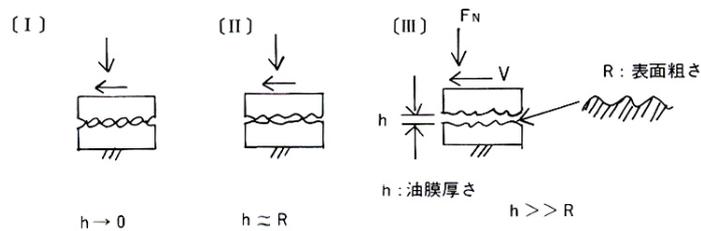
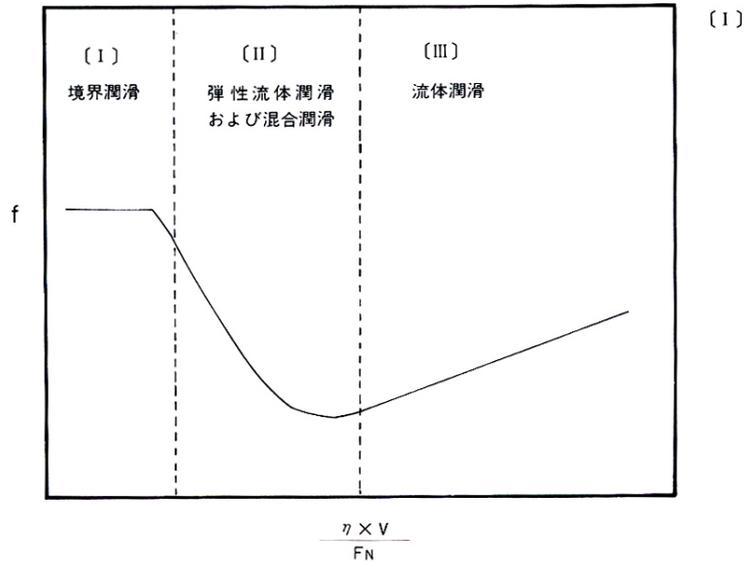


図1 . Stribeck 曲線と潤滑領域

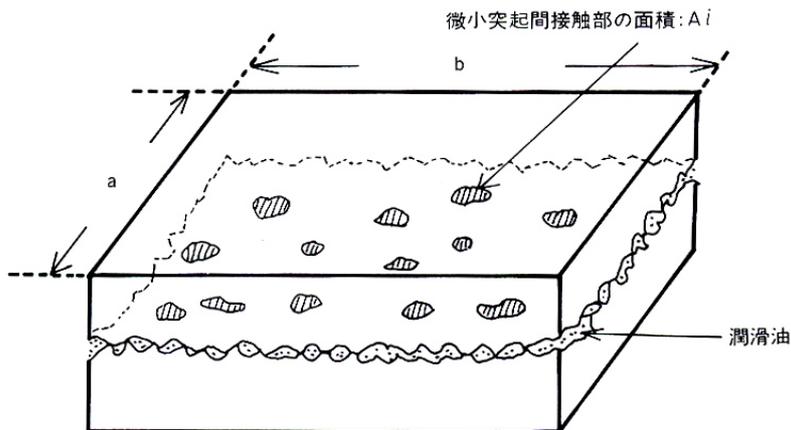


図2 . 摩擦面の接触モデル(A)

よび摩擦面と潤滑油〔添加剤を含めて〕との相互作用によって支配される。  
すなわち、境界潤滑では図2に示すように、摩擦面間に介在する潤滑油の油膜厚さ〔h〕が摩擦面の表面粗さ〔R〕より

小さいために各所で金属接触が起こっている。摩擦面は不連続な微小突起間接触部の面積〔 $A_i$ 〕の総和  $\sum_1^n A_i$ 、n:接触点の数〕である真実接触面積で接触しており、荷重は見かけの接触面積〔 $a \times b$ 〕よりかなり小さい面積で支えられて

いることになる。したがって高い摩擦による摩擦面温度の上昇や摩耗、焼付きなどが生じ、思わぬトラブルが引き起こされる境界潤滑では、この金属接触を防ぐことによる摩擦・磨耗の軽減が重要なポイントである。すなわち潤滑剤〔潤滑油、添加剤、固体潤滑剤〕による摩擦面での潤滑膜形成が重要となる。

図3〔図2の断面図〕に示すように、油膜破断により金属接触が起こると、摩擦力〔F〕は油膜のせん断だけでなく

金属結合部のせん断にも費やされる。したがって、Fは次式で示される。

$$F = A \{ aSm + (1 - a)S_1 \}$$

ここで、Aは荷重負担面積、 $a$ は金属接触の起こっている割合、Smは金属結合部のせん断強さ、 $S_1$ は油膜のせん断強さ、 $S_1$ はSmより非常に小さいから、 $a$ を出来るだけ小さくすることが摩擦を減少させることになる。

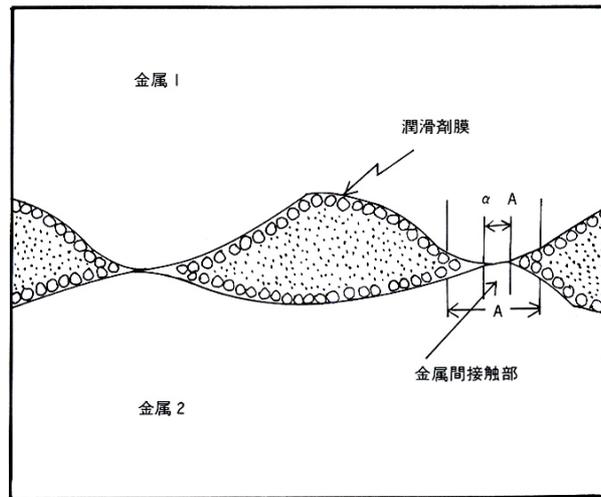


図3．摩擦面の接触のモデル（B）

### 3．境界潤滑における摩耗

境界潤滑下で起こる摩耗のタイプは主なものに次のものがある。

- (i) 接着〔凝着〕摩耗〔Adhesive wear〕：摩擦面の微小突起部の接着によって起こる。
- (ii) ざらつき摩耗〔Abrasive wear〕：油中の硬い異物粒子や摩耗粒子の切削作用によって起こる。
- (iii) 表面疲れ摩耗〔Surface fatigue wear〕：くり返し応力とトライボ化学作用による表面疲れが原因で起こる。
- (iv) 科学磨耗〔Chemical wear〕：摩擦面と潤滑剤分子との科学反応が支配的である。

ほとんどの場合、これらの摩耗は多かれ少なかれ併行して起こっているが、機械的条件、潤滑剤や金属材料の種類、

油温、雰囲気、摩擦熱の発生、エキソエレクトロン放射などによって、摩擦面では複雑な現象がいくつも起こり、境界潤滑を難しくしている。

図4に示すように、固体〔1〕と固体〔2〕とはある機械的条件〔荷重とすべり速度〕で相対運動している。この2固体間の接触部では接着と相手面への相互移着により接着摩耗が起こり、また生成摩耗粒子や硬い異物粒子によりざらつき摩耗などが起こる。これに対して〔1〕〔2〕と潤滑剤〔3〕または雰囲気〔4〕との相互作用〔例えば吸着、化学反応など〕によって潤滑膜を形成し、摩擦・磨耗を軽減し、焼付きを防止する。また一方では化学反応生成物がせん断や溶解によって油中に除去され、科学摩耗が起こる場合がある。

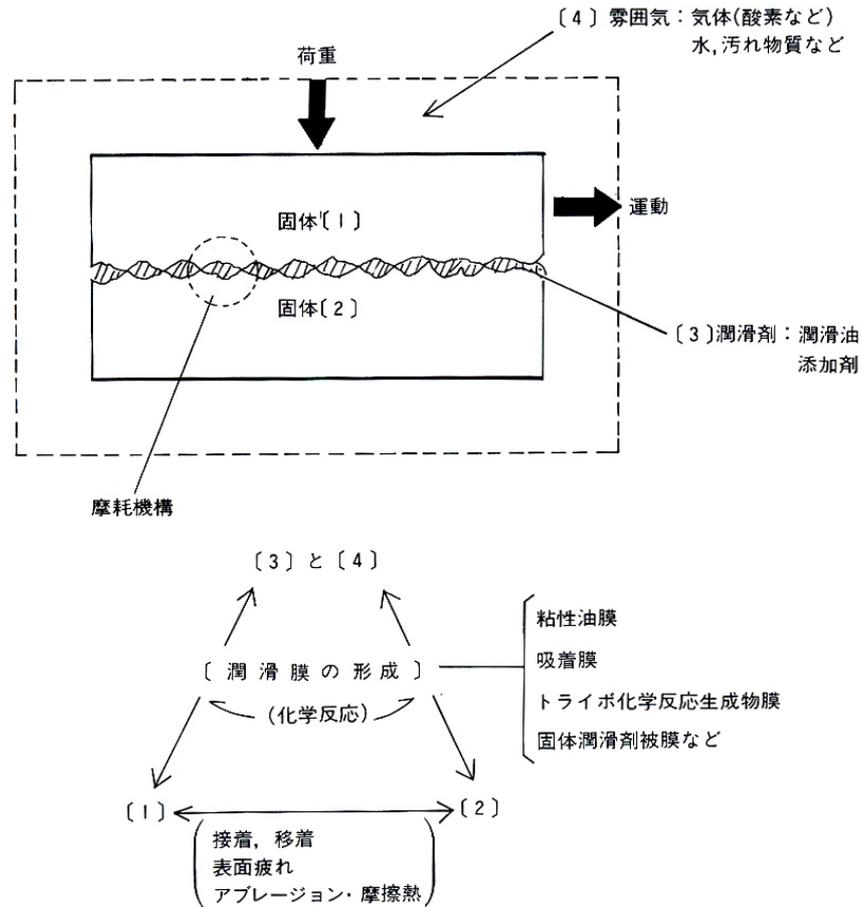


図4．境界潤滑下における磨耗

#### 4．潤滑膜の形成

潤滑剤が摩擦面に潤滑膜を形成して摩擦・摩耗を軽減し、焼付きを防止する、いわゆる境界潤滑性を示す膜形成要因に次のようなものがある。

- (i)粘性油膜の形成。
- (ii)物理吸着膜および化学吸着膜の形成。
- (iii)In - situ 潤滑膜の形成。
  - (a) 摩擦面スポットにおける重合体の膜〔例えばフリクション・ポリマー、Friction polymer〕の形成。
  - (b) 固体潤滑剤膜の形成。
- (iv)無機反応生成物膜の形成。
- (v)固体潤滑剤被膜の形成。

これらの潤滑膜は厚さ 20～30 の吸着分子膜から μm 程度の反応膜までである。油性剤〔Oiliness improver〕は分子中に長い炭化水素鎖と末端に強い極性基をもつ化合物で、摩擦面に物理吸着しないしは化学吸着して潤滑膜を形成し、金属接触を防止し、摩擦・摩耗を軽減する。代表的なものにステアリン酸などの長鎖脂肪酸や長鎖の脂肪族アルコール、アミンなどがある。油性剤は低～中荷重条件に適しており、高荷重、高温の厳しい条件ではもはや潤滑性は期待

できない。これに対して耐摩耗剤〔Antiwear agent〕〔例えば金属ジチオホスフェート塩やりん酸エステルなど〕は低～中荷重、高温条件で、摩擦面との反応膜により摩耗を減少させる。高荷重条件では摩擦面の表面凸部が油膜を突き破って金属接触が起こり、これによる摩擦面温度の上昇、さらには強いせん断によって、油膜は摩擦面から脱離または除去され、摩擦・摩耗が増大し、ついには焼付きに至り、潤滑不能となる。この極圧潤滑条件において、摩擦〔金属〕表面と反応して、その金属よりせん断強度の小さい反応被膜を形成して、焼付きを防止するのが極圧剤〔Extrem pressure agent, EP agent〕である。極圧潤滑で形成される膜は一般には無機の反応膜で、この代表例として有機硫黄化合物による硫化鉄〔酸化鉄も含まれる〕被膜がある。また二硫化モリブデン、グラファイトなどの固体潤滑剤による被膜も有効である。

#### 5．固体潤滑剤

固体潤滑剤とは摩擦面に付与されて、摩擦や摩耗を軽減したり、表面損傷を防止する目的で、粉末、薄膜または複合材料として使用される固体をいう。固体潤滑剤を大別すると表1のようになる。これらのうちで特に多用されている

のは層状構造〔代表例として、図5にグラファイトの結晶構造を示す〕を持つ二硫化モリブデンやグラファイトなどがある。これらの固体潤滑剤は異方性が強く、特定の結晶面または分子間の結合力が弱く、小さい摩擦係数を与える自己潤滑性を持っている。

固体潤滑剤の主な利用法として、次のようなものがあげられる。

- 〔1〕油脂類との混合。
  - (a) 油中分散または懸濁液。
  - (b) グリースへの添加。
- 〔2〕乾燥被膜
  - (a) ビヒクルに分散させた固体潤滑剤を固体表面にコーティングまたはスプレーした後、乾燥する。
  - (b) スパッタリング〔Sputtering〕: 真空中で二硫化モリブデンなど固体潤滑剤を陰極にし、不活ガスイオンの衝撃により陰極からたたき出された粒子を固体表面に堆積被覆する。
  - (c) イオンプレーティング〔Ion plating〕: 真空中においてめっき材〔金、銀など〕をイオン化し、電場で加速して固体表面に金属被覆を蒸着する。
- 〔3〕複合材料: 樹脂やセラミックスなどに充填する。
- 〔4〕固体潤滑剤をそのまま摺動面に適用。

いずれの方法にしても、固体潤滑剤は油の使用をきらう場合や油に混合しても油が流出した場合でも、摩擦面に被膜を形成して固体潤滑を行なう。

二硫化モリブデンやグラファイトは、熱安定性に優れた極圧剤として多用されているが〔二硫化モリブデンは空气中で約 350、真空中で 1200、グラファイトは空气中で約 500、真空中で 3600 まで安定〕、これらの添加剤の潤滑性は物理的に固体被膜を形成することによって発揮されるので、有機硫黄化合物のような化学反応型の極圧剤と異なり、下地金属を腐食するようなことはない。しかし二硫化モリブデンは条件によっては、分解して硫黄を放出して腐食摩耗を引起こしたり、潤滑作用機構が硫黄による硫化鉄被膜形成と考えられる場合もある。

固体潤滑剤の適用法として、もう一つ反応生成被膜がある。これは金属表面にあらかじめ化学反応によって被膜を形成する場合と潤滑中に摩擦熱などによって被膜、いわゆる in-situ 膜を形成する方法がある。前者の例としては金属表面を硫化水素で処理し、硫化鉄膜を形成する。この表面には脂肪酸などの油性剤が良く吸着し、耐摩耗性が向上する。後者には硫黄を含む有機モリブデン化合物がある。この化合物は摩擦熱によって分解し、摩擦面に二硫化モリブデンの被膜を形成して極圧性を発揮する。

表1．固体潤滑剤の分類

種 類	例
〔 〕 金属および無機化合物	
(a) 層状構造化合物	二硫化モリブデン、グラファイト、窒化ほう素
(b) 非層状化合物	PbO, CaF <sub>2</sub>
(c) 軟質金属	Pb, Sn, Au Ag, Cu
〔 〕 有機化合物	
(a) 脂肪、石けん、ワックス類	牛脂、ステアリン酸リチウム、蜜ろう
(b) 高分子	ポリテトラフロロエチレン (PTFE), ポリイミド
(c) 属性物質	フタロシアニン

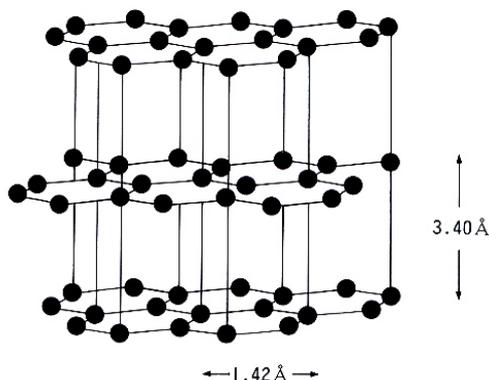


図5．グラファイトの結晶構造

## 6 . フリクション・モディフィケーション (Friction modification)

石油危機による省資源、省エネルギーが注目されるようになってから久くなるが、潤滑分野においても省エネルギーの観点から、潤滑剤の改良による低摩擦、低摩耗の研究が盛んに行なわれている。特に石油資源を多量に消費する自動車でも燃費節減に世界的関心が寄せられている。すなわちエンジン油の改良によって、摩擦を低減し、省エネルギーをはかることである。エンジン油の基油として従来の油より低粘度のものを用いた場合、粘性抵抗が下がることによって動力損失が軽減され、粘度低下による粘性油膜の形成能力の低下はフリクション・モディファイヤー〔Friction modifier、摩擦調整剤：潤滑油を望ましい摩擦特性に調整する添加剤〕の添加によって改善される。フリクシ

ョン・モディファイヤーとしては脂肪酸などの油性剤や極圧剤、固体潤滑剤(二硫化モリブデンやグラファイトなど)があげられる。フリクション・モディフィケーションの一例としてエンジン油への二硫化モリブデン、グラファイトまたは二硫化モリブデン/グラファイトの添加による省燃費、脂肪酸と有機硫黄化合物の併用による低摩擦、低摩耗などがある。

図6はStribeck曲線とフリクション・モディフィケーションとの関係を示す。荷重、速度の機械的条件を一定にした場合、流体潤滑領域では粘度低下とともに摩擦係数は減少するが、その反面粘性油膜の形成能力が低下するため、摩擦面接触が起こる高摩擦の境界潤滑状態に陥る危険がある。これをフリクション・モディフィケーションで改善すると、図中の点線領域の潤滑が可能となり、低摩擦が維持される。

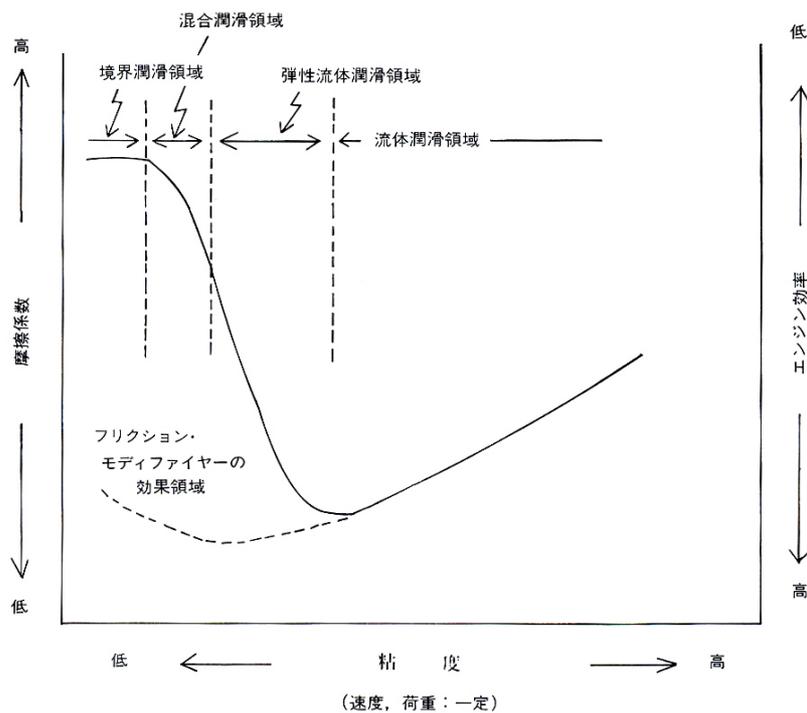


図6 . Stribeck 曲線とフリクション・モディフィケーションとの関係

## ケミカルテクノロジーの結晶 パンドー商品紹介

パンドーシリーズは、57年7月より発売を開始したルート販売商品です。これで100商品になりました。今後とも(1)接着剤(2)シール剤(3)潤滑剤(4)防錆剤(5)洗浄剤(6)コーティング剤(7)補修剤などを主力に、広い分野の商品を用途別に最高の性能と品質を追求しながら商品化を進め、市場のニーズにお応えしてまいりたいと考えております。

パンドーシリーズについてのお問い合わせは当社営業技術員にご用命ください。

### PANDO661C

ギヤオイル減摩剤



二硫化モリブデンを主剤とし、当社独自の製法によって開発されたデフ、ミッション専用のギヤオイル減摩剤です。どんなギヤオイルにも自然に混ざり、二硫化モリブデンの微粒子が摺動面になめらかで強靱な耐極圧、耐熱性潤滑皮膜をつくりま

す。そしていつも十分な潤滑状態を保ちギヤの摩耗防止、寿命の延長など優れた性能を発揮します。

### PANDO258A

電気部品用プラスチックグリース



最近の電気電子機器には多くのプラスチック部品が使用されています。しかし一般のグリースはプラスチックを侵すため潤滑剤を使用することができません。パンドー電気部品用プラスチックグリースは、プラスチックを侵さない特殊な非シリコン系のグリースです。プラスチックギヤなどに使用してください。優れた潤滑剤により機械的疲労、摩耗変形を防止します。またボリュームのつまみなどをシャフトにセットするときに一吹きしてください。組みつけをスムーズにします。シリコンオイルを全く含んでいませんので接点に悪い影響を与えません。

### PANDO661D

軽油用水分除去・燃費向上剤



水分除去と燃費向上効果を合せもった軽油用の添加剤です。ディーゼルエンジンなどの燃料タンクには、温度差による結露などで水分がたまりやすく、この水分が腐食やエンスト、ノッキング、始動困難などのトラブルを引き起こします。また燃料噴射口などの燃料燃焼機関にはカーボンなどの不燃性物質がたまり燃焼効率を悪化させます。パンドー軽油用水分除去・燃費向上剤は、タンク中の水分を分散させトラブルを防止すると同時に完全燃焼を促進し燃費の向上をはかります。

### PANDO614C

スパッタ 付着防止剤



溶接時に飛散し、鉄板表面に付着するスパッタを簡単に取り除くことができるエアゾールタイプのスパッター付着防止剤です。溶接時に発生するスパッターの付着は仕上り度を低下させ、溶接部の腐食を促進させるなどたいへんやっかいなものです。吹きつけるだけで飛び散り付着するスパッターを簡単に取り除くことが可能となり、加えて溶接部の仕上りと塗装効果を向上させ、作業時間・作業工程を短縮し大幅なコストダウンをもたらします。

### PANDO660B

アルミホイールクリーナー



アルミホイールの表面に塗布し、こするだけでタール、ピッチなどの汚れを落とし同時に強力な保護膜をつくります。特にフッ素樹脂が強力にコーティングされ長期間にわたり融雪剤・海水などによる腐食を防止、さらに汚れをつきにくくします。また深味のある重厚な金属光沢が得られ新品同様の美しさをとりもどします。

## 3 B グループの活動情報

### ・ TQC でよりよいサービス

スリーボンドでは59年度よりTQC（全社的、総合的品質管理）を導入し、顧客へのサービス体制をよりよく整え、併せて企業体質の強化を行ない、4年後の63年にはデミング賞獲得を目標に活動しております。

現在ではTQC推進本部を設置し、全社的なTQC知識の向上教育を行なっており、社員一人ひとりが業務改善提案、QCサークル活動ができるよう指導しております。

また、日本科学技術連盟よりの指導講師も定期的に招へいし、TQCの推進原動力として教育面で指導を受けております。

今後のスリーボンド製品の品質管理がさらに向上され、顧客の皆さまに安心して使用していただける商品をお届けする努力をまいります。

皆さまの変わらぬご愛念によるお導びきによって、スリーボンドはユーザー殿のご期待に報いるべく、精進を続けております。



技術力で躍動する

**株式会社スリーボンド**

本社 〒193 東京都八王子市狭間町 1456 電話 0426(61)1333 代

●スリーボンド・テクニカルニュース編集委員会