



# 第1章

## 潤滑の基礎 “トライボロジー”

.....

機械を正しく設計するためには、機械の稼動部分の「摩擦、潤滑」について知らなければなりません。トライボロジーに関する知識が十分でないとエネルギーロスや機械部品の摩耗等の損傷を引起すこととなります。トライボロジーは、省資源・省エネの基盤技術であり、この技術をもっと有効に活用することを考えていく必要があります。

機械には、直線的に、あるいは回転する稼動部分があり、その稼動部分には摩擦・摩耗が発生します。この相對運動する二面間の摩擦・摩耗は、振動の発生、機能・性能・信頼性の低下、エネルギーの損失をもたらします。

例えば、摩擦が急上昇などすると、いわゆる焼付きによる故障などをおこし、機械が停止してしまうこともあります。また、機械の摺動部が摩耗し、機械の作動精度が大幅に低下し、使いものにならなくなってしまいます。これが摩耗による機械の寿命です。

産業革命以前から、摩擦を減らすためには摺動部分に油を注げばよいことが経験的に知られており、これが潤滑（Lubrication）と呼ばれてきました。近代工業の発展に伴い、潤滑問題は摩擦・摩耗・潤滑の原理と方法、潤滑剤、材料、潤滑系などについて幅広い学問技術が関係することが明らかになったのです。しかし、英語の“Lubrication”という言葉は、「摩擦部分に油を注ぐ」という作業のみを表す意味に使用されていました。

1966年、イギリス教育科学省は、潤滑問題の実態調査と検討を行ない、“Lubrication (tribology)”という表題の報告書（通称JOSTレポート）を発表しました。その中で潤滑関連の学問技術の範囲に対する社会の認識を改めるため、新しく“トライボロジー (tribology)”という用語が提案されました。これはギリシャ語のtribos（摩擦する）を基にしたものです。そしてこのトライボロジーを「相對運動をして相互に接触しあう2表面ならびにそれに関連する諸問題と実際についての科学と技術」と定義しました。

JOSTレポートでは潤滑上の問題を、経済の枠組みの中で捉え、潤滑の適正化による経済効果を7項目に分けて解析しました。図1.1はJOSTレポートに基づき、わが国の経済諸数値を基に算出したものですが、潤滑の適正化はGNPの3%にも相当する経済効果を及ぼすのです。

この図からもトライボロジーが機械の機能・性能・信頼性・寿命などの向上および省エネルギーに繋がるがよく分かります。地球環境の保護、社会の持続的発展のためには、省資源・省エネルギーを図ることが必要不可欠です。そしてそれを効果的に実現するために、もっとトライボロジーを活用する事が必要だと考えます。

ところで、最近の機械は産業革命当時の機械と比較すると飛躍的に高性能になっており、精密な直線あるいは回転運動することが求められています。また、高荷重、高速回転、高温度の雰囲気で使用される機械もあり、適切な潤滑剤の選定と使用が必要不可欠です。工業用潤滑剤とは、機械工場で使用される潤滑剤の総称であり、切削油、熱処理油、防錆油といった金属加工油と、油圧作動油や歯車油など機械工

場の設備機械に用いられる設備油に大別されています。本書では、設備油について選定方法と使用方法について解説していきます。

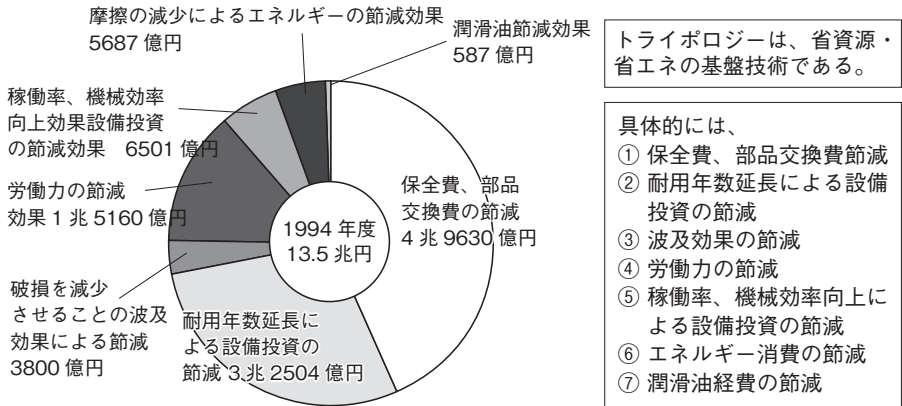


図 1.1 トライボロジーの経済効果 (出典：潤滑油協会)

## 1-2 摩擦とは？

### 1.2.1 固体 2 面間の接触

#### (1) 真実接触面積

「トライボロジーは、互いに接触しながら相対運動を行なう 2 面間の現象に関する科学と技術である」と定義されています。ここで、2 面間の表面の接触について考えてみましょう。金属表面はどんなに高精度に仕上げられていたとしても粗さという凹凸が存在します。そのため 2 面が接触するといっても幾何学的な平面同士が接触するわけではなく、図 1.2 (a) に示すように尖った山の先端のごくわずかな部分だけで接触していることとなります。これを見かけの接触に対して真実接触と呼びます。

真実接触面積は、多くても見かけの接触面積の数%以下であり、わずかな面積で荷重を支えるので、接触点では、塑性流動圧力に達するまで変形します。接触点の山の先端はつぶされ凝着を起します。そこで一方を動かそうとすれば、その凝着している部分が引きちぎられ、同時に新しい凝着が起こります。この繰り返しに必

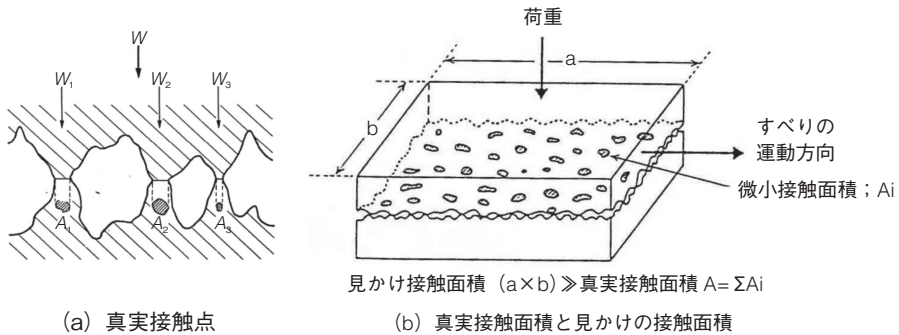


図 1.2 固体 2 面間の接触 (出典：トライボロジー入門)

要な力が摩擦力です。摩擦力をこのよう考える考え方を「摩擦の凝着説」といいます。

## (2) 掘り起こしによる摩擦の発生

接触する 2 面間の表面に硬い突起が存在したり、2 面間に硬質の粒子が存在すると、柔らかい表面にこれらが食い込んだ状態になります。この状態で 2 面間を滑らせると硬い表面の突起が柔らかい表面を掘り起こすことになります。この掘り起こしに必要な力が摩擦力です。他に摩擦力の説明には、種々の説がありますが、実際の摩擦の発生メカニズムは、これらが複合していると考えられます。

## 1.2.2 摩擦力

### (1) 摩擦とは

接触する二つの物体が外力の作用のもとで、滑りや転がり運動をする時、あるいはしようとするときに、その接触面において運動を妨げる方向に力（摩擦力）が生じます。この現象を「摩擦」と呼びます。

### (2) クーロン・アモントンの法則

摩擦について、学問的な問題として初めて掘り下げたのはレオナルド・ダ・ビンチです。クーロンおよびアモントンがレオナルド・ダ・ビンチの研究結果を実験的に確認しており、クーロン・アモントンの法則と呼ばれる下記の法則が確認されています（図 1.3 にクーロンの摩擦測定装置の原理図を示す）。

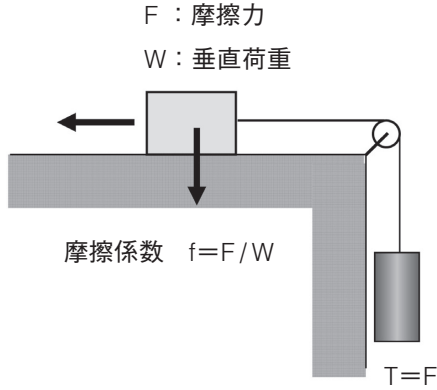


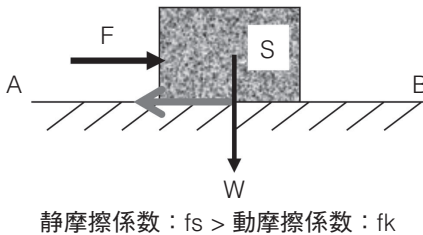
図 1.3 クーロンの摩擦測定装置の原理図

- ①摩擦力は接触面に加えられる垂直荷重に比例する。
- ②摩擦力は接触面積に無関係である。
- ③摩擦力は滑り速度に無関係である。
- ④摩擦力は滑り面の性質に関係する。

この法則が摩擦の研究の基本となっています。

摩擦係数は、図 1.4 に示すように摩擦力  $F$  を垂直荷重  $W$  で、除した係数であり、この係数は相対運動する 2 面間の材質・形状・雰囲気によって変わります。

摩擦力を低減し、より小さい力で物体を動かすためには、摩擦係数を下げることです。転がり摩擦は、滑り摩擦より小さいことから、古来より重量物の移動にころが用いられています。また、2 面間に油を介在させると摩擦係数が小さくなることも知られており、動植物油を使用していました。



摩擦係数とは、物質 S と水平面 AB の材質・形状によって決まる定数で次式で表す。

$$f \text{ (摩擦係数)} = F/W$$

動いている時の動摩擦力よりも、動き始める時の静止摩擦力の方が大きい

図 1.4 クーロン・アモントンの法則

### 1.3.1 摩耗現象

相対運動する2面間に潤滑油膜が存在しない無潤滑や高荷重下での固体潤滑では、金属2面間が直接接触します。そして金属同士が直接接触すると摩耗します。摩擦と摩耗は比例すると考えられがちですが、摩耗は摩擦によって摩擦面の一部が分離する現象であり、摩擦はこの分離を伴うとは限りません。また、腐食反応が同時に起こる場合には低摩擦においても摩耗は増大します。

一般に摩耗要因として取り上げられるものは、摩擦速度、摩擦負荷、潤滑剤の有無、その質と量、温度、雰囲気の変化、さらに摩擦面の仕上げ状態、混入する異物の有無などです。

摩耗現象・摩耗の形態としては次のように分けられます。

- |                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| (1) 凝着摩耗        | Adhesive wear                 |
| (2) アブレシブ摩耗     | Abrasive wear                 |
| (3) 腐食摩耗        | Corrosive wear                |
| (4) 疲労摩耗        | Fatigue wear                  |
| (5) ピッチング       | Pitting……………歯車歯面に生じる          |
| (6) フレーキング      | Flaking……………転がり軸受の軌道面や転道面に生じる |
| (7) その他の摩耗      |                               |
| ・エロージョン         | Erosion                       |
| ・キャビテーションエロージョン | Cavitation erosion            |
| ・微動摩耗           | Fretting                      |

### 1.3.2 凝着摩耗 (Adhesive wear)

凝着摩耗とは、相接する2面の微小突起が金属凝着を起こし、相対運動によって引き離されるとき、相手方に付着して摩耗が進行するものです。凝着が起こるのを防ぐものは、油などの有機物やガスなどの吸着分子であり、金属表面に存在する酸化膜です。

従って凝着摩耗の第一段階である凝着を生じるときには、まず酸化膜の破壊が起こり、小さな塑性ひずみで凝着を起こします。凝着摩耗の特殊なものとしては融着摩耗(スカuffing)や塑性変形が挙げられます。

### 1.3.3 アブレシブ摩耗 (Abrasive Wear)

アブレシブ摩耗とは、表面の粗い・硬い材料による引っかかり作用、摩擦面間に摩耗粉や硬い塵埃などが混入した場合のラッピング作用などが主要因となる現象で