

機械には必ず“動く”部分がある。二つの物体が相対運動することによって機械としての機能が生まれる。この“動く”部分がひとたび、摩耗、焼付きを起こすと、機械としての機能が失われるばかりでなく、機械を部品として構成している機械システム自体の機能をも損なうことになる。逆に、“動く”部分をうまく制御、利用することによって、今までにない新しい機械、新しい機械システムの実現が可能となる。

ここでは、摩擦、摩耗を制御、利用する技術“トライボロジー”について、その社会に及ぼす重要性を述べるとともに、当社の製品開発の事例を通して“トライボロジー”のひらく新しい世界を紹介する。

Any machine will definitely contain a section that moves. Moreover, it is through the relative movement of two objects that the functions of a machine are generated. Once wear and seizure occur in the moving section, however, not only are the parts and the functions of the machine lost but the functions of the machine system itself will also be harmed. Conversely, by controlling and appropriately using the moving section, a new machine and machine system can be realized that had not previously been possible.

This paper describes the importance to society of tribology technology, which is a key technology enabling machines to be controlled and developed, and introduces new worlds opened up by this technology using Toshiba's product development activities as examples.

## 身近なトライボロジー

トライボロジー(Tribology)という言葉は、摩擦、摩耗、潤滑に関連した学術分野の振興をはかるため、1966年にイギリスのジョスト委員会が新しく使った言葉である。“摩擦”を意味するギリシャ語の“tribos”にちなんで名づけられたものである。定義は次のようになっている。「トライボロジーとは、相対運動をしながらたがいに干渉しあう二面、ならびにそれに関連した諸問題と実地応用に関する科学と技術である。」

このような経緯で生まれたトライボロジーであるが、実は意外と身近な技術なのである。先に長野で開催された冬季五輪では、スキー、スケート、ボブスレーなどが脚光を浴びた。これらはいずれも1/1,000秒を争う厳しい競技である。このタイムを大きく左右しているのが、滑走面と雪面あるいは氷面の間のトライボロジー(摩擦)である。いかに、低

摩擦にして損失を減らすかがポイントである。スキーではワックスの選択、塗布のしかたのよしあしが結果に大きく影響する。また、スケートでは大きい氷の単結晶で結晶方向をそろえたほうが摩擦係数が低いという結果が最近報告されている。

一方、トライボロジーに関する代表的な機械要素としてベアリングがある。ベアリングは、可動物体(回転する場合が多い)を支える重要な部品で軸受と呼ばれることもある。従来の水車、電動機といった大型機械では摩擦、摩耗の小さいベアリングが、また、最近のハードディスクドライブ(HDD)、DVDといった情報機器ではさらに振動が小さく、極限まで摩擦、摩耗の制御されたベアリングが必要となる。

## トライボロジーの社会貢献

トライボロジーの重要性を示す例としてよく言われるのが、その経済効果である。64年に当時のイギリ

スの科学教育大臣のパウデン卿の依頼を受けて検討を行ったピーター・ジョスト氏(トライボロジーの生みの親)によると、摩擦、摩耗、潤滑の改善により、イギリスで年間5.15億ポンド(当時の換算レートで約5,000億円)の節約が可能であるとの報告がなされている。このうちの半分は軸受の長寿命化による交換コストの低減であると位置づけている。最近の機械システムでは、軸受の交換などが非常に少なくなっていることを考えると、トライボロジーのこの観点での重要性は、この30年間で十分に認識され、かなり実際の製品開発に反映されていると言える。

また、最近では製品の高性能化に伴い、軸受を極限状態の非常に厳しい条件で使用する場合も多く、これに伴い機械システムとしての信頼性をいかに向上させるかがトライボロジーの重要な使命となっている。特に、大型の機械システムにおいては、焼付きなどの故障により、いったん停止するとその社会的影響は計り知

れないものがある。トライボロジーの原理を経験的に、また一部理論的に体系付けることにより、限界設計が可能となりつつある。

さらに、最近では摩擦、摩耗を制御し利用することによって製品の性能を向上させる方向にトライボロジーが活用されている。高密度HDD、半導体プロセスの一つである化学的機械研磨(CMP)技術などはこの例と言える。

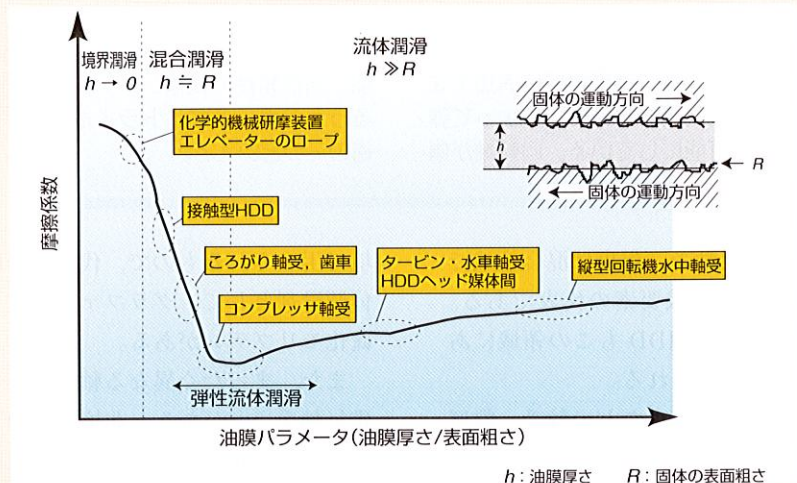
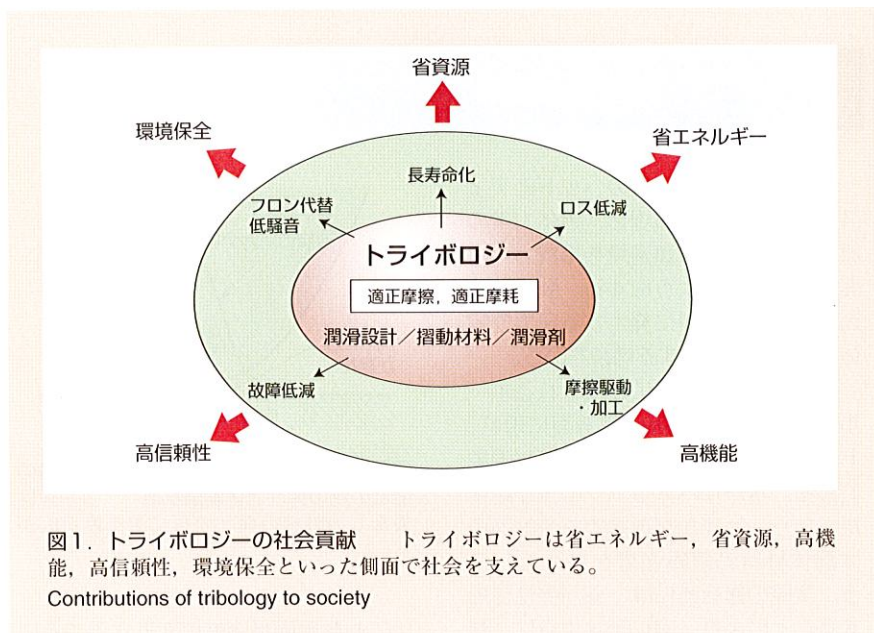
HDDの場合には、記録密度の向上のために、いかに低浮上を実現するかが、また化学的機械研磨においては、化学的および機械的条件をいかに最適化して、所望の研磨特性を得るかがポイントとなる。

図1にトライボロジーの社会貢献を示す。このように、トライボロジーは省エネルギー、省資源、高機能、高信頼性、環境保全といった側面で社会を支えている。

### 機械システムとトライボロジー

機械システムとトライボロジーの関係を図2に示している。図中、横軸は油膜パラメータ(潤滑膜の平均厚さと固体の表面粗さの比)、縦軸は摩擦係数<sup>(注1)</sup>である。この図は一般にストライバック線図と呼ばれている。左から、順に境界潤滑、混合潤滑、流体潤滑と呼ばれている。油、水、空気などの潤滑膜で形成される軸受をもつ機械システムを分類するのに有効である。

簡単のために、横置き回転機械がジャーナル軸受<sup>(注2)</sup>で支持されている状態を考える。回転体の回転数をゼロから上げていくと、最初は回転体の自重が流体力より大きいため、回転体と軸受は境界潤滑(固体と固体が接触)状態にある。この領



域では油膜厚さ  $h$  はほとんどゼロである。さらに回転数を上げていくと、流体力の増大とともに薄い油膜が形成され、混合潤滑状態となる。この領域では、油膜厚さと表面粗さが同等のオーダーである。さらに回転数を上げると完全な流体潤滑状態になり、固体の表面粗さはほとんど無視できる。回転数が低いときは、固体

摩擦が、逆に回転数が大きいときは流体粘性による摩擦が主体となる。この中間に、摩擦係数が最小となる領域がある。

境界潤滑で使用される機械システムとしては、エレベータのロープ(摩擦低減のための潤滑)、および化学的機械研磨装置(この場合は潤滑が目的ではないが)がある。

(注1) 摩擦係数(Coefficient of Friction)

摩擦力を垂直荷重で割った値。いろいろな潤滑領域での摩擦があるため、特定のメカニズムに対応する概念ではない。

(注2) ジャーナル軸受(Journal Bearing)

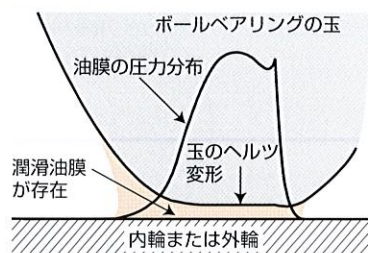
ラジアル荷重を受け、回転軸を支持する円筒形の軸受。圧力発生機構によって流体潤滑軸受、静圧軸受に大別される。

## 弾性流体潤滑

すべり軸受やHDDのヘッドとディスクの間を潤滑する場合、流体力学の原理で油や空気の潤滑膜を形成し、二面が接触しないようにする。弾性流体潤滑とは、潤滑膜に発生する圧力で固体表面が弾性変形する場合をいう。

この状態は、一般に使用されるボールベアリングや歯車の潤滑面に現れ、トライボロジーの分野では重要な現象である。ボールベアリングの玉が剛体だったら、わずかな荷重でも接触面圧は固体材料の限界強度を越えてしまう。実際の運転時には、玉が弾性変形することにより、図に示すように、潤滑膜の領域が広がり、接触面圧は緩和される。このため、ボールベアリングは高い荷重を受けることができる。

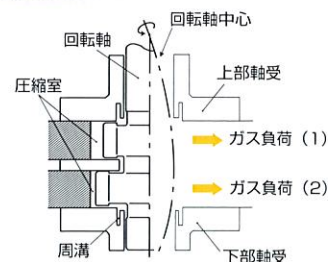
エアコン用ツインロータリコンプレッサの軸受では、軸受端部に溝加工を施し、薄肉構造とすることによって弾性変形を可能にしている。回転軸が傾



運転時のボールベアリングの玉と内外輪の面との間の弾性流体潤滑状態 玉が弾性変形し内外輪の面との間に潤滑膜が広がる。

いても軸受面が適度に変形することによって、潤滑膜が形成しやすくなり、良好な潤滑が維持できるように工夫している。

このように、弾性流体潤滑は、高性能、高信頼性の機械システムを設計するうえでキーとなるトライボロジー技術の一つといえる。



エアコン用ツインロータリコンプレッサの軸受 軸受端部に溝加工することで回転軸が傾いても良好な潤滑を維持できる。

ころがり軸受、歯車は混合領域で使用される機械要素の代表である。また、接触型HDDもこの領域にあるものと想定される。

タービン、水車などの軸受、縦型回転機の水中軸受、現在市販されているHDDのヘッド媒体間の潤滑状態はいずれも流体潤滑である。

混合潤滑から流体潤滑に至る潤滑領域は、潤滑膜圧力による固体表面の弾性変形や潤滑剤の粘度変化などが無視できないことより、弾性流体潤滑(EHL)として別途体系付けられることがある。エアコン用コンプレッサの軸受がこの例である(囲み記事参照)。

一方、油膜を使わない潤滑として、固体潤滑がある。宇宙機器など一般の潤滑剤が使用できない特殊な環

境で用いられるもので、代表的な固体潤滑剤として、グラファイト、二硫化モリブデンがある。

また、まったく異なる軸受として磁気軸受<sup>(注3)</sup>がある。非接触式のため、従来の軸受に比べて飛躍的に摩擦係数と発塵(じん)を減らすことができる。

一方、摩擦を利用した機械システムとして前述の化学的機械研磨装置や郵便物、紙幣などの搬送装置がある。これらの装置では摩擦、摩耗を制御して所望の性能を得ている。

### トライボロジーを支える基礎工学

トライボロジーという名称は摩擦、摩耗、潤滑に関する技術の総称

である。トライボロジーにかかわる事象を知るには総合的な基礎工学が必要となる。図3にトライボロジーを支える基礎工学の分野を示す。このように、機械、電気、物理、化学が関係する学際的な基盤技術といえる。

### 当社のトライボロジーへの取組み

当社では、トライボロジー技術のグループ全体への普及を目的に、86年に“トライボロジー連絡会”を設立、以後今日にいたるまで活動を行っている。グループ内のトライボロジーにかかわる問題をデータベース化するとともに、共通の課題に関しては研究所で先行的に技術開発を行

(注3) 磁気軸受(Magnetic Bearing)

永久磁石、電磁石による吸引力や反発力を利用して、非接触で回転軸を定位置に保持する軸受。磁気浮上と同じ原理が利用できるが、すき間を小さくできるため、電磁石と磁性体間の吸引力を制御する方式が一般的である。

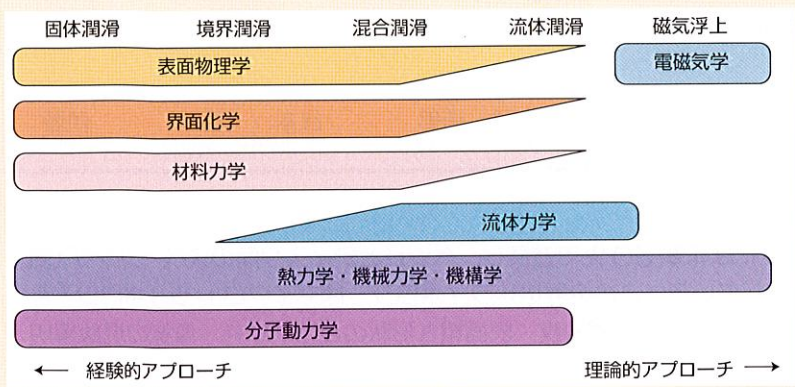


図3. トライボロジーを支える基礎工学 トライボロジーにかかわる事象を知るには総合的な基礎工学が必要となる。  
Basic engineering sciences supporting tribology

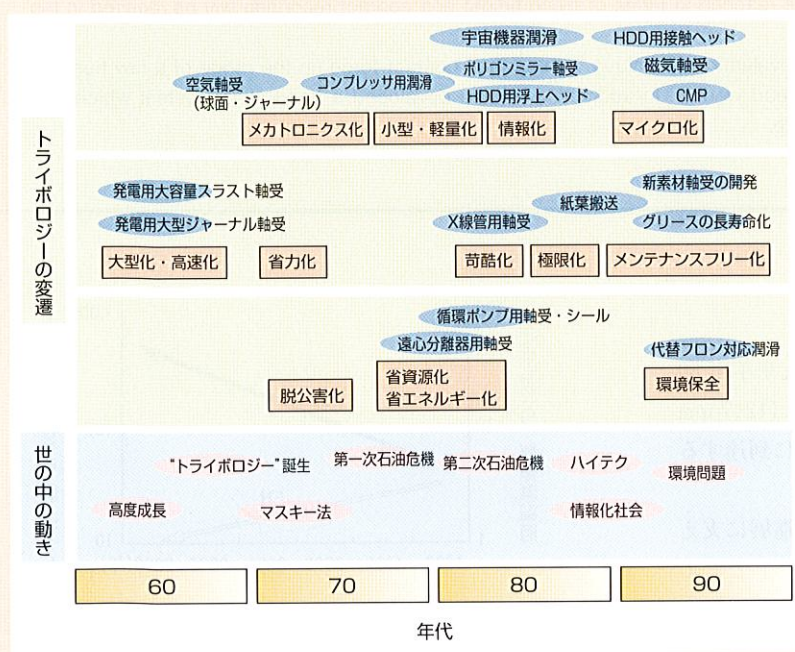


図4. トライボロジーの変遷 世の中の動きと同様にトライボロジーも多様化している。  
Trends in tribology

っている。また、特に力を入れているのは、他業種との交流会である。お互いの弱い部分を補完する意味と、つねに問題意識を高揚する意味で非常に効果を上げている。

### ■ トライボロジーの目ざすもの

図4にトライボロジーの60年代以降の変遷を示す。このように、社会の多様化に伴い、トライボロジーも同様に多様化の色彩が強くなっている。

21世紀に向けて、トライボロジー技術を駆使して、さらに省資源、省エネルギー、高信頼性、高機能、耐環境性に優れた製品を提供するとともに、トライボロジーを利用した新しい機械システムが続々と生まれるものと期待している。そのためには、これを実現するための努力を継続的に行うことが重要である。



大富 浩一

OHTOMI Koichi, Ph.D.

研究開発センター 機械システム研究所 ラボラトリー・リーダー、工博。  
メカ基盤技術の研究・開発に従事。日本機械学会、ASME 会員。  
Mechanical Systems Research Labs.