

# NACHI-BUSINESS

Components **news**

Vol. **7** D1  
May/2005

機能部品事業

マテリアル  
コーティング  
マシニング

■ 技術講座

知りたいトライボロジー講座①

## 「トライボロジー入門」

Things to know about Tribology  
"Introduction of a Course on Tribology"

〈キーワード〉 摩擦・摩耗・潤滑・油膜厚さ・転がり摩擦  
接触楕円・コーティング・ドライ切削

監修 開発本部／開発二部

渡辺 孝一

Kouichi Watanabe



## 要 旨

NACHIは、軸受や油圧をはじめ、工具、熱処理、表面処理など、摩擦や摩耗に少なからず関係した技術を多く有しています。これらの技術を、トライボロジーの視点から大系的な解説をこころみることにより、それぞれの商品の理解とトライボロジーの理解を一層深め、より良い機能を引き出すことが期待できます。

身の周りで生じている些細な現象も、トライボロジーの視点から見ると、より理解し易く、興味深い事例が多くあります。これから始まる本講座で、新たな発見をしていただきたいと思います。

## Abstract

Nachi has developed various technologies that relates to the reduction of friction and wear in a great deal as seen in bearings, hydraulic equipment, cutting tools, heat treatment and surface treatment. When these technologies are outlined from the tribological viewpoint, a greater understanding of these products and tribology will be achieved and better functions and performances can be brought out.

Even small things that are happening around us can be understood easily when these are observed from the tribological viewpoint. There are many interesting occurrences that may be seen. We hope that you will discover something new with this course.

# 1. トライボロジー (Tribology) とは

トライボロジーという言葉は「摩擦」を意味するギリシア語の「tribos」から引用されています。相対運動をしながら相互作用をおよぼしあう表面、またはそれらに関連する実用上の問題についての、学問分野の名称です。言葉の由来からもいえることですが、トライボロジーにかかわる現象は、わたしたちの身近にも多く見られます。

## (良い摩擦)

代表的な分野に“摩擦”があります。摩擦は、接触しあう2つの物体の相互作用の問題です。

摩擦現象はあらゆる場面で発生し、無意識のうちに摩擦の恩恵にあずかっているのもあれば、摩擦の被害から逃れるために、大変な苦勞をしているものもあります。例えば、路面と靴との間の摩擦は有益な摩擦です。摩擦のほとんど発生しない氷の上を歩くことは、大変危険なことです。ブレーキの摩擦も同様で、回転、移動しているものを、摩擦を使って止めるのです。このように摩擦がないと困る箇所は、わたしたちの身の周りにはどこにでもあふれている現象です。

## (悪い摩擦)

一方、重い荷物をひきずるときなど、動くものと動かないものとの間で発生する摩擦は、あると困る摩擦です。例えば、古代では重量物をソリ※1のようなもので運んでいたのですが、ソリと地面の間にオリーブ油※2を垂らしながら移動させて、摩擦を軽減していたようです。専門的には、この構造はすべり軸受の一種で、摩擦がどうしても大きくなるのですが、この摩擦を緩和するために油を使ったようです。(図1-2)

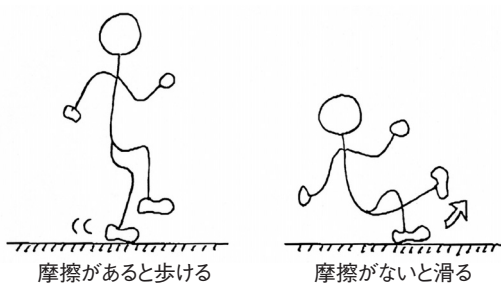


図1-1. 足と地面の摩擦



図1-2. 油を垂らして運搬物を運んだ古代の様子

摩擦はどんな構造体にも発生するものですから、何かを創ると、どうしても摩擦の問題に行き当たります。このため、トライボロジーは「油をさすこと」と短絡的に受け止められてきたように思われますが、摩擦は決して害のみになるのではなく、なくてはならないもの

でもあります。要は、どのように使うかということにかかっているのです。原理を把握すれば欠点は長所に変えることもできるのです。トライボロジーはまさしく、そのような学問体系といえます。

## 2. すべり軸受と転がり軸受

トライボロジーによる研究成果が最も良く応用される分野は、軸受です。

軸受は、英語でベアリング" Bearing"と呼ばれます。Bearには「支える」の他、「耐える」という意味もあり、文字通り、「縁の下の力持ち」的な役割を果たしているものです。

軸受は、回転する軸を荷重を支持しながら回転するもので、機械部品には必ず使われています。大きく分けると、すべり軸受と転がり軸受があります。

(図2-1、図2-2)

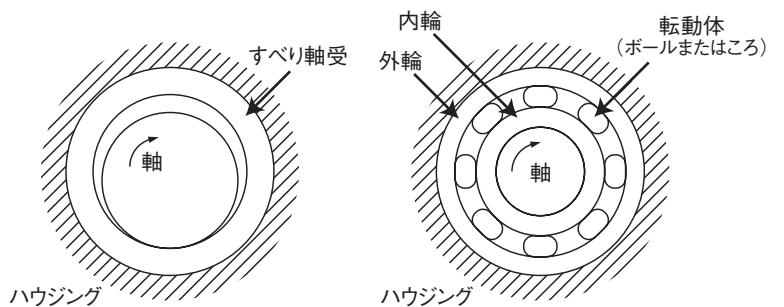


図2-1. すべり軸受

図2-2. 転がり軸受

## (転がり軸受の起源)

すべり軸受は、回転部分が機構的にすべる構造ですので、一般的には摩擦が大きくなります。これに対し、すべり部分に転動体という“ころ”またはボールを介在させて、転がり運動をさせることで摩擦低減を図ったのが、転がり軸受です。転がり軸受は、ピラミッドの建造石を運んだソリにその起源を求めることができます。そして、今日の転がり軸受の基本構成要素をそこに見いだすことができます。

古代エジプト人のように、大きな石を板の上に載せ、地面と板との間にころを引いた状況を想像してみてください。ころを使って転がり運動をさせたとはいえ、重労働だったはず。少しでも楽に運ぶにはどうしたでしょうか？

まず、移動する道路です。彼らはきつと砂道などは通らず、硬い道を選んで通ったと思います。軟らかい地面だと、ころがめり込んでしまうからです。つまり、軸受の材料は、変形しないくらい硬くなければならないのです。どれくらい硬いかは、連載の中で解説していきます。

次に、ころの形状と大きさの不揃いについてです。いびつなころだと廻りにくかったでしょうし、大きさが揃ってないと、遊んでいるころがでてきたと思います。つまり、転がり軸受の転動体は、丸くて大きさがそろっているものでなければなりません。

さらに、板を引いて行くと、ころの姿勢が斜めになったり、板からはみ出してきたりしたと思います。これを

防ぐには、ころが真っ直ぐに移動するように案内するものが<sup>※3</sup>必要になります。これが、案内つばとか、軌道輪の肩と呼ばれる構成体<sup>※4</sup>に変わっていくことになります。

最後に、板がどんどん移動していくと、板の後ろのころを前へもってこなくてははいけません。大変面倒です。これをなくすため、保持器が考案されました。キャタピラのようにころをつなげて、それを輪のようにし、板をその輪で囲めば、順送りにころを板の下にもって行くことができます。(図2-3)

このように、今日の転がり軸受の構成要素を考えると、古代エジプト人たちの知恵を拝借すれば、理解が容易になります。

転がり軸受は、英語でAnti-Friction-Bearingと書かれますが、文字通り、それまでのすべり軸受にみられた摩擦frictionを克服したものと いえます。

そうすると、すべり軸受ではダメだと思われるかも知れませんが、精度良く製造され、管理された使い方ができれば、摩擦を極小化できる構造を構成することができます。<sup>※5</sup>エアールベアリング(Air Bearing)などがそうです。超精密加工する機械の軸支持部にはなくてはならないものとなっています。

このように、軸受のもつ個性を把握して適切に使い分けすれば、毒も薬に変わります。本講座では、そのようなことを事例をまじえて説明していきます。

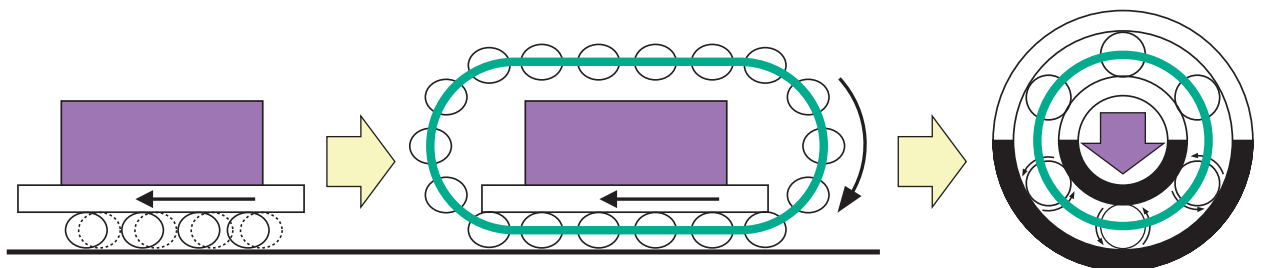


図2-3.ころを使用したソリから転がり軸受への発想

### 3. 摩擦・摩耗

接触しあって運動する物体は摩擦がゼロではありませんので、いずれ摩耗という現象が発生します。接触状態が良好だと、摩耗は目に見えない速さでしか進行しないので、普段は目に付くことはありません。

#### (良い摩耗)

例えば包丁です。硬いもので軟らかいものを切るので摩耗はないと思われがちですが、ちゃんと摩耗しています。その証拠にいずれ切れなくなります。これは包丁の刃先の鋭い部分が次第に摩耗して丸みを帯びてくるからです。これらは自然に発生する摩耗ですが、強制的に摩耗を行なわせることがあります。それが包丁研ぎです。

包丁よりも硬い砥石で、刃先部分をゆっくりと摩耗させているのが研ぐということです。なぜゆっくりかという、急激に砥石で摩耗させると、凝着といって「害の摩耗」が発生してしまうからです。

包丁を研ぐと金属の摩耗粉がでてきますが、放っておくと、次第に赤茶色に変色していきます。これは、空気中の酸素と結びつくからです。

これは、トライボロジー的には擬着という現象を説明するにはとても重要です。摩耗した直後の摩耗粉は、つきたての餅みみたいなものなのです。摩耗動作の進行が遅いと、何かにくっつく前に空気中の酸素と一緒にになります。そして、その途端に餅のようなくっつく特性はなくなって、単なる粉のようになり、害の摩耗にはならないのです。

#### (悪い摩耗)

急激な摩耗を強制させるとどうなるのでしょうか？ できあがった摩耗粉が十分に酸素と結びつかないまま、次の摩耗現象が始まってしまいます。その結果、できたての摩耗粉が餅のようになって、こすりあう面に再度付着してしまうのです。

付着すると表面がザラザラになり、より大きな摩耗粉になって、くっついたり離れたりの繰り返しになります。ついには、接触しあう2つの物体がくっついたままになってしまいます。これが機械部品によく見られる焼き付きという現象のひとつの代表的なメカニズムです。

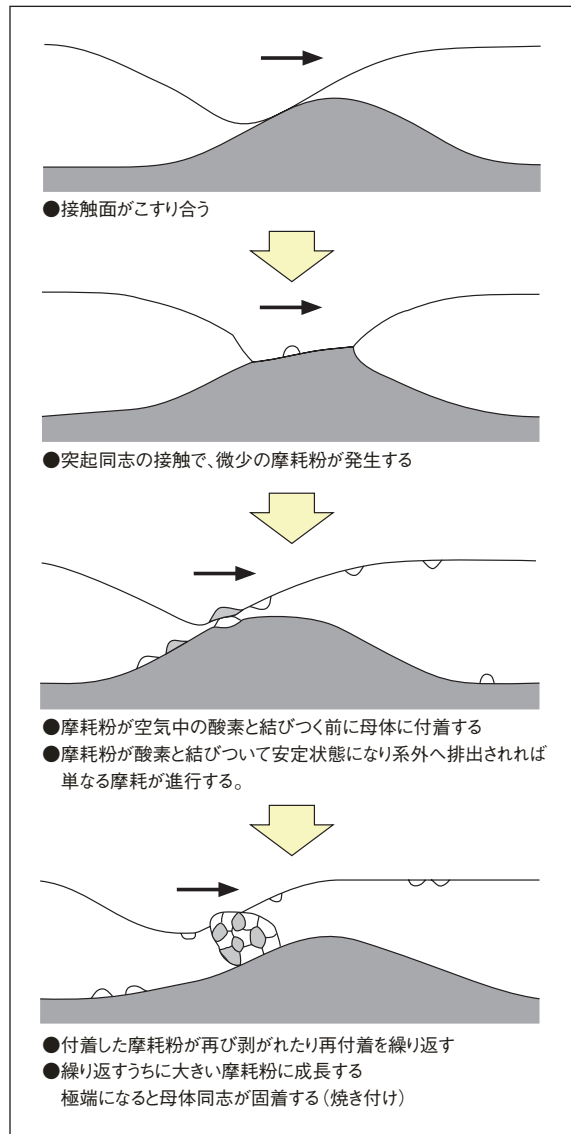


図3. 摩耗粉の擬着プロセス

こうして、摩耗にも、良い摩耗と悪い摩耗がありますが、原理は全く同じことです。原理を把握した上で、どうコントロールするかにかかっています。(図3)

摩擦・摩耗および転がり運動編では、摩擦をネガティブにとらえて転がり摩擦の摩擦を低減する技術の他に、摩擦をポジティブにとらえて動力伝達を行なう、トラクション技術などの開発事例の紹介をしています。

# 4. 潤滑

## (物体を引き離す)

摩擦を小さくする手段として、最も良く用いられる方法が、潤滑、すなわち油をさすことです。油をさすとどうなるのでしょうか?実は接触しあう2つの物体が離れるようになるのです。

どれくらい離れるかという、詳しくは弾性流体潤滑理論という分野で計算されるのですが、0.001ミリ程度です。当然目には見えません。ですが、油はそのような性格をもっているのです。

油には「粘度」という粘りけがあります。油の中で物体を移動させると、その粘りけにより、物体の周辺に油がへばりついて移動します。接触しあう2つの物体の間に油がやってくると、一気に狭い空間へ潜りこまざるを得なくなります。すると、油の圧力が急激に高まり、接触面で2つの物体を引き離してしまうのです。

## (油膜厚さと面粗度)

ただし、この距離は0.001ミリのレベルです。ですから、接触する2物体の表面の凹凸が大きいと、せっかく引き離した距離が、凹凸高さよりも小さくなるので、完全に引き離すことができなくなります。(図4-2)

このような場合、大きい摩擦軽減は期待できなくなります。歯車でも軸受でも表面粗度を気にするのは、このような理由によります。

この引き離された量は、油膜厚さと呼ばれますが、油だけがそうなのではなく、他の液体でも、このような現象は発生します。

例えば水では、水膜形成を感じられる身のまわりの現象に、自動車のタイヤのハイドロプレーン現象があります。雨の多い日に高速で自動車を走らせると、

ゴムタイヤが地面から離れてしまう現象です。これはタイヤと地面の間に水膜ができてしまうからなのです。

別の例をあげると、雨の日にゴムシューズを履いて、あわてて走ったら、すべって転んでしまった経験はないでしょうか。これも水膜です。しかし、ゲタではすべった経験はあまりないと思います。実はこの水膜は、接触しあう2物体の硬さにも大きく依存していて、柔らかければ水膜ができやすいのです。ですから、水は本来、水膜はできにくい性質なのですが、ゴムなどのように軟らかい場合には水膜を発生させてしまうのです。

でも、新品のゴムシューズの場合はそれほどでもありません。使い古したゴムシューズは底がツルツルになっているからすべるのです。水膜の厚みは0.001ミリ程度ですから、ツルツル面の凹凸がなくなり、接触する2物体は離れ易くなっているのです。水膜でも油膜でも、接触する2つの物体が軟らかいほど、滑らかなほど、そして速く接触するほど形成しやすいのです。

このような学問体系が潤滑理論と呼ばれるもので、多くの分野で活用されています。具体的に潤滑を行なうには、油の他にグリースがありますし、同じ油でも、供給方法に応じて様々な用途があります。また、接触しあう部分は0.001ミリといった精度が必要ですから、外部からのゴミ侵入に敏感になります。また、油が外へ漏れると環境を汚すので、密封という<sup>※7</sup>シール機構が採用されることもあります。

これらの潤滑に係わる実用上の問題や事例について、詳細に解説していくことにします。

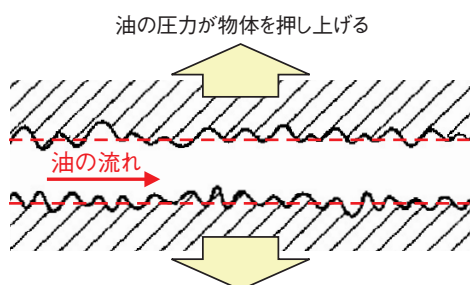


図4-1. 良い表面粗度の状態

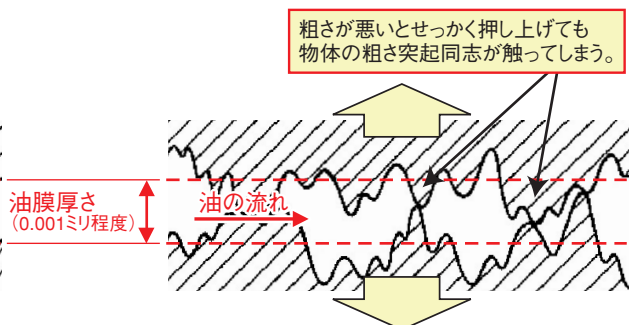


図4-2. 悪い表面粗度の状態

## 5. 接触形状と転がり運動

では、接触しあう物体は、どんな形状でも転がり運動して、油さえあれば摩擦は小さくなるのでしょうか？

表面の粗さのことはすでに述べました。0.001ミリ程度の離れ量ですから、接触面の形状も大きく影響をおよぼします。転がり軸受では、転動体といて、荷重を受けながら、自転および公転するボール、またはころが介在します。転動体がどのように接触するかにより、摩擦は大きく変わることが分かっています。

### (ヘルツの論文)

接触問題を初めて学問的に取り扱ったのは、ドイツのヘルツ(Hertz…周波数の単位ヘルツと同一人物です)です。

今日、市場で最も良くみられるのは、転動体にボールを使用した、ボールベアリングと呼ばれるものです。ヘルツは、ボールとボールをどれくらいの力で押し潰したらどれくらいの変形がで、どれくらいの接触跡ができるのかといった研究をしました。しかし、この数値も、通常の条件では、0.001ミリの変形量だったり、直径1ミリ程度の接触跡であったりと、気にとめるには小さい数値でした。そのためか、ヘルツの論文は、当時の学会ではあまり気にとめられませんでした。それでも気を引きたかったのでしょうか、ヘルツは地球と地球がぶつかった場合、どんな現象になるかを計算しています。現実にはありえないことですが、計算では数メートルほど地面が凹んで、数分後には地球同志は再び離れていき、凹みも元にもどるとして

この発表についての反響はわかりませんが、当時接触問題を論じる学問は、軸受が縁の下の力持ちであるように、地味であったことは間違いのないようです。

しかし、接触状態が明らかになったことで、摩擦の発生メカニズムなどが、次第に解明されていくようになりました。

### (転がり摩擦)

ボールの接触跡はかなり小さいのですが、それでも細かく見ると、その接触内ですべりが発生しています。ボールの半径 $R$ よりもやや大きい半径 $R'$ の半径を持った溝にボールが転がる場合を考えます。その溝には楕円形の接触跡が造られますが(これを接触楕円と呼びます)この楕円内でボールは転がります。この楕円は溝に沿って形成され、湾曲しているので、ボールが転がる時は中央の方は早く進み、端はそれに引きずられるようにすすむことになり、すべりが生じることとなります。(図5)

このすべりは、「差動すべり」といって、接触楕円が形成される場合には必ず発生するものです。ですから、接触する物体の摩擦がゼロということはありません。ですが、摩擦係数0.001というレベルですので、すべり運動に較べると、きわめて小さい数値です。

このようにして、今日では転がり摩擦がどの程度になるかは計算で求められるようになりました。接触形状と転がり運動編では、このような接触問題を活用した応用例を説明します。

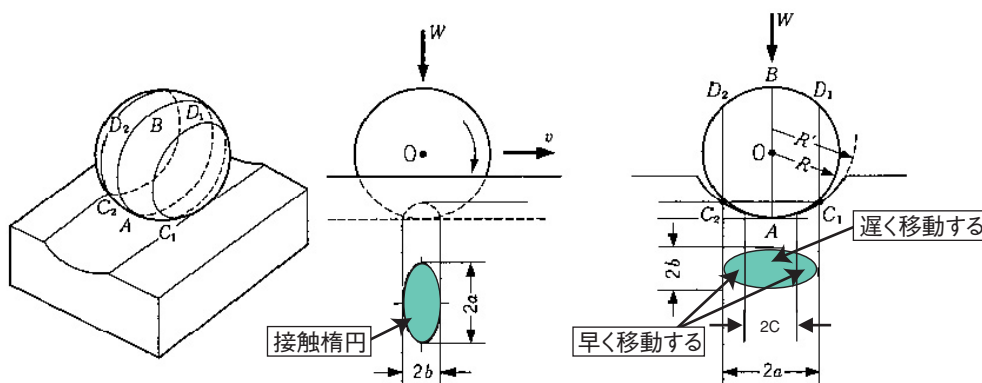


図5. 溝を転がるボールの接触形状と、転がり摩擦の発生メカニズム

## 6. 摩擦を低減させる表面処理技術

摩擦を低減させるための潤滑や接触形状について説明しましたが、これ以外に方法はないのでしょうか。潤滑の効用のひとつは、接触しあう2物体を引き離すことにあります。また、接触してはいるが摩擦・摩耗の低減に効果をもたらすものとして、表面処理があります。表面処理には、固体潤滑材を塗布する方法の他に、材料の表面に金属膜を付着させるコーティング、またはメッキ、さらに、表面そのものの物性を変えてしまう表面改質などがあります。

宇宙空間の潤滑では、油が真空中で飛散してしまいますので、このような表面処理がよく使われます。また、切削工具では金属膜のコーティングがよく用いられます。

切削加工では切りくずの排出性を良くすることが重要になりますが、削られる材料と加工工具との間の摩擦を小さくすることも重要です。しかも、刃先端部では800℃程度の高温ですが、その環境で成

立するようになければなりません。このような背景などから、コーティング処理技術が開発されてきているのです。

このようにして、トライボロジーは切削工具にも応用され、NACHIでは切削のドライ化、すなわちオイルレス化を図った穴空けドリルや、金型加工のエンドミルを商品化しています。ここでは、表面処理の観点から、転がり軸受の環境対応としてのトライボロジー、加工におけるトライボロジーを論じてみたいと思います。



図6-1. アクアドリル  
(鉄鋼のドライ加工用ドリル)



図6-2. DLCドリル  
(アルミのドライ加工用ドリル)

## 7. 講座の予定

以上、トライボロジーについて、事例を交えながら概略を説明してきました。この他に、材料面から見たトライボロジー、油以外の潤滑材から見たトライボロジーなど、NACHI独自の技術が多くあります。これらを、次号から順に、次のような内容で、講座を展開していきます。

- (1) 摩擦・摩耗のトライボロジー
- (2) 潤滑におけるトライボロジー
- (3) トライボロジーにおける材料特性
- (4) トライボロジーにおける表面処理
- (5) 転がり運動とトライボロジー
- (6) 接触形状とトライボロジー
- (7) 加工におけるトライボロジー
- (8) トライボロジーのすべり軸受への応用

### 用語解説

- ※1 ソリ  
ものを運搬するとき運搬物を載せるもの。古代日本の古墳建造では「アシュラ」と呼ばれるソリが使用された。
- ※2 オリーブ油  
潤滑油に使用された最も古いもののひとつ。映画「ベンハー」にでてくるようなローマ時代の戦車にはコルシカ島でとれたオリーブ油が使用されたといわれる。
- ※3 案内つば  
転動体ころを使用した転がり軸受にみられるもので、ころがはみ出さないように外輪または内輪にもうけたリブ状の構成部品。
- ※4 軌道輪の肩  
転動体にボールを使用した転がり軸受にみられるもので、ころの案内つばと同様の機能を果たし「ボール抱き込み」とも呼ばれる。
- ※5 エアーベアリング  
すべり軸受と類似構造であるが、摺動面に圧縮エアーを送り込み、その圧力で摺動面の接触を防止しているもの。静圧軸受の一種で、耐荷重性は低いが、回転抵抗がほとんどゼロに近い。
- ※6 焼き付き  
機械部品の軸が、高速または不十分な潤滑環境で回転したとき、軸が次第に発熱し、ついにはロックして回転不能になる現象。
- ※7 シール機構  
軸受内部の油の外部への飛散防止、または、外部から軸受内部へのゴミの侵入防止のためにもうけられる摺動可能な構成体で、通常はゴムでできた「接触シール」と呼ばれる部品が使用される。