

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Components

Vol. **19**D1
Sep/2009

機能部品事業

■ 技術講座

知りたいトライボロジー講座^⑩

トライボロジーの「過ぎたるは・・・」

Things to Know about Tribology

"Too Much Could Be as Good as Nice Little"

〈キーワード〉 クラウニング・調心軸受・偏心軸受・
揺動運動・必要磨耗

部品事業部

渡辺 孝一

Kouichi WATANABE

要 旨

これまで、摩擦・磨耗を総括的に扱うトライボロジーの目で、日常生じている現象を見つめ直したり、接触面で生じている変形度合いや潤滑油の役目などを解説してきたが、ここでは、軸受の状態が、あえて異常な状態になったものは価値があるのか、を論じてみたい。

ひょんなことから、とんでもない機能が生まれ出ることがある。

ここでは、「不完全性なるもの」は、「価値」にもなりうることを、トライボロジーの視点で見たい。

Abstract

Some phenomena in our daily lives have been reviewed, and the degree of contact surface deformation and the role of lubricant have been explained so far from the viewpoint of tribology that is the comprehensive study of friction and wear. In this article, the value of a bearing that is in an abnormal condition is discussed.

Unbelievable function may originate in an unexpected status. Observed here from the viewpoint of tribology is the fact that the imperfection can hold some value.

1. 直線は、まっすぐだけが良いとは限らない

転がり軸受には、その転動体に「ボール」を使う玉軸受と「ころ」を使うころ軸受があるが、ころ軸受においてはその事例は具体的に存在する。クラウニングという技法である。

もともと、ころ軸受というのは、ころとこれをはさむ軌道輪とが、直線状の接触面を形成して接触するようにすることで、外力負荷能力を向上させる方策として考案されたものだが、これが余りにもまっすぐな形状になると、却って接触面の端だけが、外力分担に過敏になる弊害を招いてしまうことがある。これをエッジロードという。これがひどくなると、軸受耐久性が想定外に短くなり、頻繁な軸受交換を招くことになる。



今日では、このメカニズムは理屈的にも解明されており、これを回避するには、外力に応じてまっすぐさ加減からどれだけ逸脱・乖離すれば、適切になるかが計算できるようになっている。

この形状がクラウニングというものであり、円筒ころ軸受や円錐ころ軸受には標準的に設計展開されている。

※2
線接触軸受は、負荷容量が大きく、強く軸を固定してくれるのだが、その背反として、軸が大きく傾いたりすると、今度は強く固定することの代償に、クラウニングでは補填できないくらいのエッジロードが発生することがある。

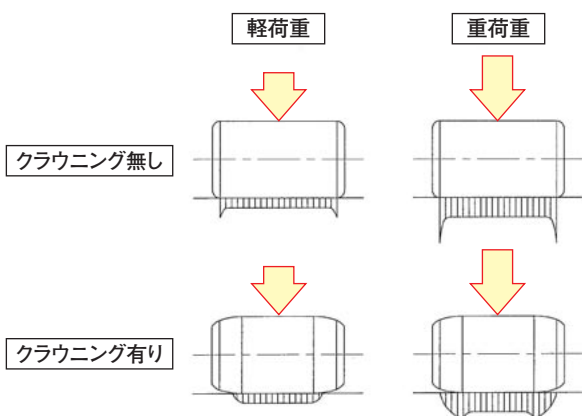


図1 クラウニングによるエッジロード回避

どうすればよいか。いっそのこと、強く固定するという線接触の考え方を捨てたらどうなるかである。これが自動調心ころ軸受である。あえて言えば、クラウニングとは形容しがたい程の、とんでもないダレ量を、軌道輪にもころにも設けた転がり軸受である。

この極みとして、外輪の軌道は球状になっている。強い拘束力はほとんどなく、外輪と内輪がフラフラする文字通りの自動調心軸受になる。軸受を精度よくとり付けることができない産業機械に多用されている。

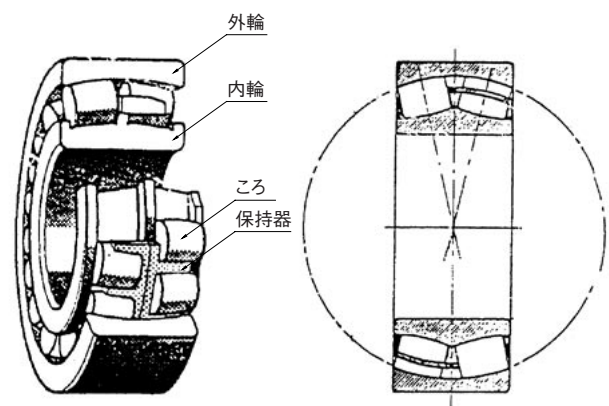


図2 自動調心ころ軸受の断面図

2. 円は必ずしも真円が良いとは限らない

転がり軸受に使用されているボールは、大量生産されている工業製品ではピカーの精度を誇る。このボールは、外輪と内輪の軌道の中に挟まれて、外力を受けながら、回転運動を行なう。

一方で、ボールが、両軌道の間から外力を受けたときのつぶれる量（これを「弾性近接量」と呼ぶ）は数ミクロンのオーダーであることが計算上でも実験上でも検証されている。ボール表面の凸凹は少ないのだから、軌道の表面もこの程度でないと、外力を受けたり、受けなかったりするボールが発生してしまい、軸受が振動してしまうことになる。だから、軌道輪表面の凹凸もきわめて小さくなるように加工されている。ボールの真球度並とは言わないが、真円からの乖離はきわめて小さい。転がり軸受が精密機械部品といわれるゆえんである。そして、真円になればなるほど、外力を支持できる転動体の数は理論値に近くなっていく。

標準の深溝玉軸受だと、計算上は軸受のスキマを考慮すると、外力を支持してくれるボール数は全体で8～10ヶ程度^{※3}あっても、実質2～4ヶ程度である。他のボールは負荷圏に来ない以上は遊んでいる。通常では問題にはならないのだが、超高速では真円は却って弊害になるのである。

1) 高速回転では、遊ぶボールのすべりは傷をもたらす

軸受はどれだけでも早く回転できるというものではない。これを示すのが許容回転数であり、軸受メーカーのカタログにはその数値が、軸受ごとに記載されている。

概略、軸受内径 d (mm)と回転数 n (min^{-1})を乗じた dn 値の許容値が、軸受形式により、ほぼ一定値になることが多く、軸受サイズが変わっても、この考え方をういて推定することができる。しかし、これ以上に回転させなければならないことがある。軸受サイズを小さくすれば、より高速回転に適用することができるのだが、負荷容量を犠牲することができないときは、これを乗り越えないといけない。とくに、航空機エンジンの場合で、超高速が求められる場合は、この技術が問われることになる。

丸さを追求していく延長線上に乗ればいいのかというと、実はそれとは全く逆の方向をとる。固定輪である外輪の軌道は、あえて疑似3角形のようにするなど、真円から逸脱していくのである。

この大きな理由は、高速回転になるとボールの遠心力が大きくなるので、ボールが外輪軌道面に張り付いてしまい、内輪とボールの接触が不足気味になって、ボールと内輪の間ですべりが発生してしまうからである。このようなケースでは、スキッピングといって、滑った表面が早期に損傷してしまうことがある。

これを対策するひとつの方法として、外輪の軌道をあえて真円から逸脱させることで、負荷圏領域を拡大し、遊びボールを少なくして、回転力（これを駆動力という）を確保するボール数を増やすのである。こうして、すべり現象が回避しやすくするものである。

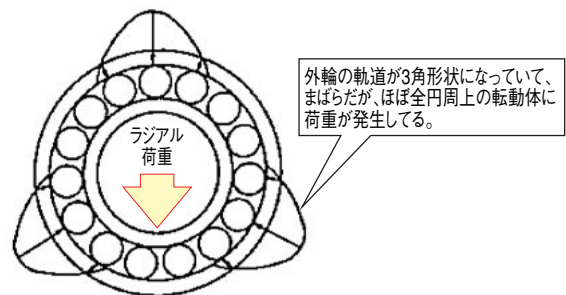


図3 ジェットエンジン主軸用に応用される外輪軌道形状

2) 精度を追求するには振れ0 意識的に大きくすれば別機能

軸受の軌道輪、特に回転輪は円周方向の肉厚不同（これを同心度という）が小さくなるように加工されている。これのお客様から見た規格用語は、ラジアル振れである。小さくすることの理由は、主に回転軸が振動するからであり、これの弊害は、高速回転になればなるほど顕在化していく。このため、公共規格で定められた「ラジアル振れ」の規格値よりも、はるかに小さい数値で加工されるのが一般的であり、精度等級の向上につれて、「振れ」の大きさは小さくなる。

これを意識的に大きくしたらどうなるか？

たとえば、ミリ単位で大きくしてみると、いわゆる偏心軸受ができ上がる。図4では、外輪の偏心を意識的に大きくしたものをつくり、これを外輪外径の芯を中心に回転させた状況を示した。内輪の芯が外輪外径の芯の周りに、偏心量の半径で公転運動することがわかる。内輪は自転および公転をしようが、転動体があるので内輪の自転を防止させる構造を付加することができる。

このような構造を応用すれば、クランク軸には応用が効き、クランク構造のコンプレッサのダウンサイジング化に応用が可能になり、一部実用化もすすんでいる。これは、軸受のラジアル振れの概念を利用したものだが、アキシャル方向の振れを利用した構造でもひよんな価値は造りうる。この実用例を次に紹介する。

3) アキシャル振れは回転をアキシャル方向揺動運動に置き換えられる

軸受のアキシャル振れとは、主に軌道の回転方向が軸受端面と平行になっていないことにより、軸

受を回転させると、軸受の端面がアキシャル方向に振れ、その最大振れ量のことをいう。

これは、内輪にも外輪にも存在し、内輪での極端な事例を、図5に示す。

軸受そのものでは、本来あってはならないものであるが、たとえばこれをミリの単位で大きくし、内輪にこれを設けて、内輪回転、外輪回転停止させると、外輪が軸方向に揺動する機構を構成することができる。

回転運動を直動運動に変換する代表的な機能部品は「ねじ」であり、回転の抵抗を少なくしたものがねじ部のすべり摩擦を転がり摩擦に変えた「ボールねじ」であるが、これらの機能は、産業部品に多く使用されているものの、ストロークを多く取れる利点の代わりに、往復運動は、回転方向を正逆にすることにより行なわねばならないという欠点がある。

これは、慣性が高い場合は、駆動エネルギーの大きい消費をもたらすが、ここで紹介したような機構であれば、ストロークの小さい場合は、同一回転方向で往復運動を構成できる利点がある。この応用は、実際にハンマドリルの往復運動に適用されている。

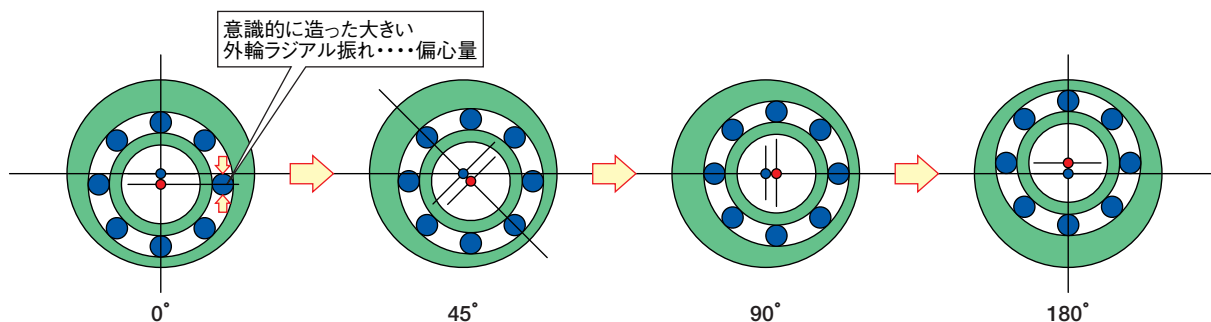


図4 外輪ラジアル振れを意識的に大きくした軸受の外輪回転時の内輪公転運動

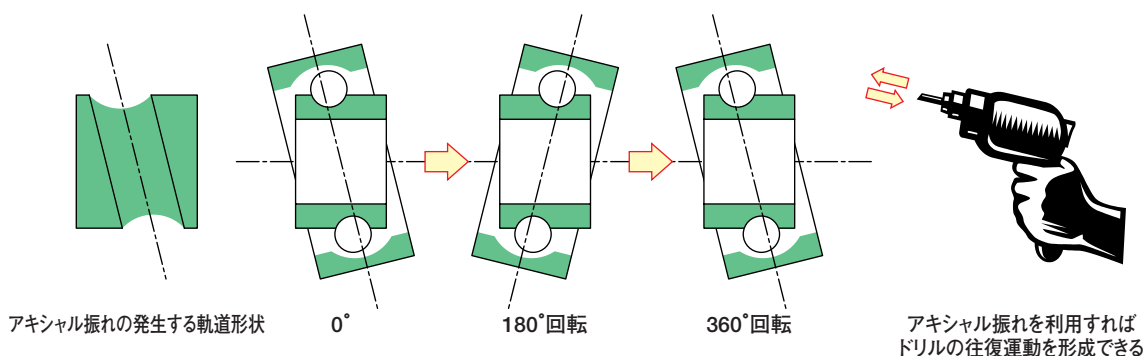


図5 内輪アキシャル振れを利用した往復揺動運動の構成例

3. 磨耗は必ずしも悪ではない

摩擦が必ずしも悪ではなく、むしろなくてはならないこともありうるのだということは、前にも書いた。

機械部品に磨耗が生じると、一般にはガタガタになって使い物にならなくなるので、にくき磨耗といわれがちだが、実は、磨耗もなくてはならないというか、なければものづくりはできない。硬いものが磨耗しにくくなるので、喜ばれるかも知れないが、その硬いものとして望みの形状にするには、削らなくてはいけないのである。

削るという行為は、積極的な磨耗を生じさせるという他にない。言い換えれば、にくき磨耗ではあっても、いっそのこと積極磨耗を推進したのが、加工ということである。硬いものは、だから、それより硬いもので削らなければならない。加工工具にダイヤモンドやセラミックスコーティングという用語をよく耳にするゆえんである。

1) 日常生活での磨耗の恩恵

飲み屋さんへ行って、帰りに靴を履いたら居心地が悪い、よく見たら他人の靴だった、という経験はあるであろう。足と靴のサイズの不一致もあるかも知れないが、歩きはじめたらもっとよくわかると思う。理由は、変形や磨耗の違いの差である。実は、靴に限らず、可動するものはすべて多かれ少なかれ磨耗している。

どのように磨耗するか？それは系としての動作系がもっとも楽になるように磨耗する。つまり、靴にすれば、靴のダメージが最も進まないように、人に見れば最も歩きやすいように、靴は自ら自分の身を削って、わずかではあるが磨耗し、その形で安定になろうとしているのである。

新品の靴を買っても、この形に至るまでには、比較的早く磨耗する。安定形状に至ったあとは、人も靴も居心地がよくなる。したがって、まさしくオーダーメイドであり、ひとつとして世の中に同じ靴はない。名前を書かなくても、靴を見分けられるゆえんである。

2) 機械部品での必要な磨耗

実は、軸受も含めて、ほとんどの機械部品には多かれ少なかれ、このようなことが生じている。

機械は基本的に部品の集合体である。これが回転など動作をすると、各部品間に押し合いへし合いの動作が発生すると考えられている。動作時の断面写真を仮に瞬間的にいつでも撮れるものと仮定すると、果たして、動作前の写真とどれかがぴったりと重なるであろうか？

微視的にみれば、窮屈な思いをしている部品はたいてい存在する。この窮屈さから逃れるため、部品はわずかに自分の身を削り、居心地を確保するのである。この居心地のための磨耗を造るには、急激な動作で行なってはならない。包丁をゆっくり磨耗させるのは「研ぐ」という行為だが、グラインダで急激に磨耗させると、焼けることがあるのと同じ理屈である。取れた磨耗粉を系外へ排出しながら、漸次磨耗を促進しなければならないからである。

高速回転する工作機械で、組み付け直後に一気に高速回転まで回転域を上昇させると昇温が止まらなくなるが、ゆっくりと時間をかけて高速回転域まで増速させるならし回転をさせると、その後、一気に増速させても温度は安定するという話を、よく聞くが、メカニズムはこの「必要磨耗」の成立如何にかかわっていることだと考えられる。

3) 摩擦とは、つなぎとめておいた2物体を分けるのに必要な力と解釈できる

すべり軸受から転がり軸受に変わって、摩擦は一気に1/10～1/100に減じることができた。^{※4}エアベアリングでは、さらに一桁小さくなっている。しかし、摩擦低減の技術がいかに進もうと、接触という現象がある以上、摩擦0はありえないと考えたほうがいい。摩擦0が完全遊離ならば、摩擦無限大はいわゆる完全密着である。だから、摩擦を議論するのは完全遊離を果たせないが故の問題であり、遊離させたいのだが接触せざるを得ないケースに限られる。接触問題といわれるゆえんである。

したがって、摩擦は見方を変えれば、分離した2ケの物体をつなぎとめておいたのを引き裂くための力とも考えられる。

この代表的な事例は、NACHIの扱っている商品に、免震装置があり、かつてはトルク制限器があった。免震装置は、この講座で動作原理を説明してある。

トルク制限器とは、ボルト締めを作業を行なうとき、必要以上の締め付け力が加わらないようにするため、或る以上の力が加わると、締め付け工具が空回りするように構成されたツールである。

原理は、組みあわされた2ケのリングの間に摩擦発生機構を設け、一方のリングを動力側に、あと一方のリングをボルト側に固定することで、所定の締め付け力が入力されるまでは、2ケのリングはあたかも一体化されたひとつのリングとして挙動するが、入力が大きくなりすぎると、摩擦がそれに負けて、2ケのリングが離れてしまう、つまり空回りする機構になったものである。

このように、物事の現象は見方次第では、新たな価値の発見につなげることもできるのである。

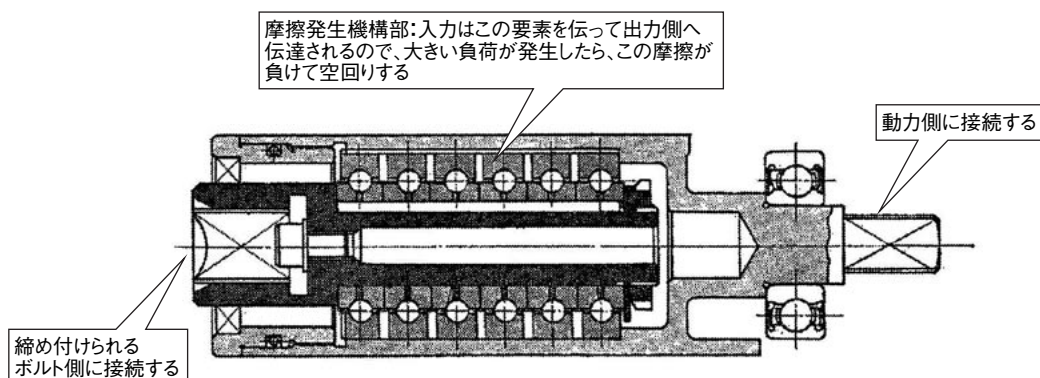


図6 トルク制限器の概観と構造図

4. 価値の発見

精度追求、性能追及は確かに製品そのものの性能を向上させることができる。しかし、それはその機構の延長線上の話であり、仮に極みにいたっても、その機構が持つ価値以上のものは成立しえない。見方を変えれば、却って精度劣化、性能劣化が別の価値を生み出すことがありえる。

そんな考え方をここでは述べたつもりである。不完全は決して「悪」ではない。

過ぎたるは……完全になることもある、そんな見方と価値の発見が、今後の技術課題のように思われる。

用語解説

※1 軌道輪

転動体をはさみ、一方はハウジングに固定され、一方は軸に固定され回転する2ヶのリングのことをいい、各々外輪および内輪と呼ばれるが、これらの総称をさす。

※2 線接触軸受

転動体に「ころ」を使用して、接触痕が点ではなく、線状になる転がり軸受ボールを用いたものは、接触痕が点になるので、点接触軸受と呼ばれる。

※3 負荷圏

軸受内部で、外力を支持する円周方向での領域を言う通常は外輪に転送跡がつくので、目視でその領域確認できる軸受にスキマがある以上は、その角度範囲は180°以下になる。

※4 エアベアリング

転動体の機能を圧縮エアで持たせた軸受回転抵抗が少なく高速回転に適しているが、外力支持能力は低い。

関連記事

- 1) 渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座①「トライボロジー入門」
NACHI-BUSINESS news、Vol.7 D1、May / 2005
- 2) 横山 良彦・渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座②「摩擦・摩耗」
NACHI-BUSINESS news、Vol.9 D2、November (2005)
- 3) 高木 俊行・渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座③
「転がり接触について」
NACHI-BUSINESS news、Vol.10 D1、June (2006)
- 4) 渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座④
「弾性流体潤滑理論 (EHL理論)」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.11 D1、October (2006)
- 5) 菅洞 英樹・渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座⑤
「転がり運動について」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.13 D1、June (2007)
- 6) 渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座⑥
「転がり接触面下の応力」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.14 D1、October (2007)
- 7) 岡島 正和：知りたいトライボロジー講座⑦
「潤滑グリスについて」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.16 D1、June (2008)
- 8) 渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座⑧
「免震とトライボロジー」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.17 D1、October (2008)
- 9) 渡辺 孝一：知りたいトライボロジー講座⑨
「生活の中のトライボロジー」
NACHI TECHNICAL REPORT、Vol.18 D1、February (2009)