NACHi

NACHI TECHNICAL REPORT

Components

Vol.13D1
June/2007

機能部品事業

■ 技術講座

知りたいトライボロジー講座⑤
「転がり運動について」

Things to know about Tribology
"Rolling Motion"

〈キーワード〉　転がり軌跡・公転・自転・回転ベクトル

部品事業部／技術一部／自動車パワーユニット
菅 洞　英 樹　Hideki Sugadou
監修　部品事業部／技術一部
渡 辺　孝 一　Kouichi Watanabe

株式会社 不二越

要　旨

転がり軸受の内部で転動体(ボール、ころ)が、どの様な運動をしているのかを幾何学的な観点から考えることは、軸受を設計するうえで最も重要な要素の一つといえます。

ここでは、転がり軸受を構成する外輪、内輪、および転動体の自転運動や公転運動といった転がり運動のメカニズムについて、簡単な幾何学的モデルを用いて解説します。

また、転がり軸受と相対するすべり軸受との構造の比較や、ボールに発生するスピン運動の原理と、どの様にコントロールするかを分かりやすく述べていきます。

Abstract

It is one of the most important factors in designing a bearing to examine the movement of rolling elements such as balls and rollers inside a rolling bearing from the geometric viewpoint.
Using a simple geometric model, we will explain the mechanism of rolling motions such as axial rotation and orbital motion that are made by rolling elements and the roles of inner ring and outer ring that make up a rolling bearing.
In addition, we will compare the structures of a rolling bearing and plane bearing and explain the principle of ball spinning motion and its control in plain language.

1.転がり運動の メカニズム

あたりを見回したとき、ものが移動している光景は多くあります。例えば人が歩いている風景、自転車に乗って移動している風景などです。同じ距離を移動したとしても、歩いたときと自転車で移動したときとでは、人のエネルギーしか使ってないのは同じなのですが、歩いたときは大変疲れて、自転車で移動したときは疲れが少ないのは、なぜかと考えられたことはないでしょうか?

(重心移動を伴う運動)

これには重心移動ということが大きくかかわっています。人が歩くときは、脚を広げたり閉じたりしてるわけですから、体の重心が歩くたびに上下しているのです。ですから、自分の体重を頻繁に上下させながら移動している姿が歩くということになります。このことは位置エネルギーを消費していることですので、階段を上がるときが最もこのことが顕著に表われることになりますが、疲れるはずなのです。

(重心移動を伴なわない運動)

ですが、自転車に乗って移動するときには、体の重心位置はほとんど上下しません。筋肉のエネルギーを位置エネルギーに費やす必要がないのです。ですから疲れにくくなります。どうやって移動するのでしょう?そこに、転がり運動の基本要素のひとつがあります。重力などの力を受けながら、重心位置の上下運動をほとんど発生させることなく移動を可能にするのに、転がり運動はなくてはならないのです。

ここでは、転がり運動の基本要素について論じてみたいと思います。

2. 転がり運動の要件

エジプト時代に岩石を板の上に載せて運んでいた風景を想像して下さい。岩石の重力を受ける「ころ」がいびつだったら、転がり移動するときに、岩石が上下して運ぶのに疲れます。また、地面が凸凹してもそうなります。ですから、平滑な「ころ」及び地面が前提条件になります。そのため、丸い「ころ」が平滑な面を転がることを前提として話をすすめます。

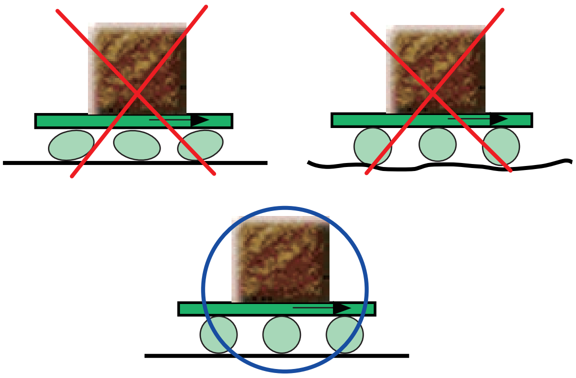


図1　転がり運動での平滑さの要件

転がり運動の要件は、次の3つに集約できると考えられます。

(1) 荷重を受ける接触点があること

(2) 荷重を受ける物体が回転することにより、接触点を移動させれること

(3) 接触点が移動したとき、接触しあう1組の2つの点の移動軌跡長さが同一であること

転がり運動は積載物の力を受けて、その積載物を力の方向と直角方向に移動させるときに一般的に用いられる手段です。転がり軸受に応用した場合は、この力が外力であり、移動方向が回転方向になります。ですから、基本的に力を受けれるだけの接触面があることが前提となります。

（転がりによる「自転」と「公転」）

移動の軌跡長さはどうでしょう。図2のように、外輪が固定されて内輪が回転する転がり軸受の模式図で示してみます。軌道半径roの外輪と軌道半径riの内輪に半径rのボールを介して内輪だけ角度ξ回転させたとします。内輪回転する前に、図のように接触点に記号を付けておきます。内輪を回転させたら、内輪の移動前の接触点B1が、移動後は点B1’へ来たとします。

ボールは回転しながら（これを「自転」といいます）移動しますので（これを「公転」といいます）、ボールの移動前の接触点だった点Ar、Brはボールが角度δだけ自転し、また角度βだけ公転して、各々点Ar’、Br’へ移動し、ボールは再び点A1”、B1”で外輪および内輪に接触したとします。転がり運動するとすれば、ボールの転がり軌跡について

弧Ar’A1”＝外輪の接触軌跡の弧長さA1A1”

数式にして　$r\delta = ro\beta$

弧Br’B1”＝内輪の接触軌跡の弧長さB1’B1”

数式にして　$r\delta = ri(\xi - \beta)$

の、成立することが要件ということになります。

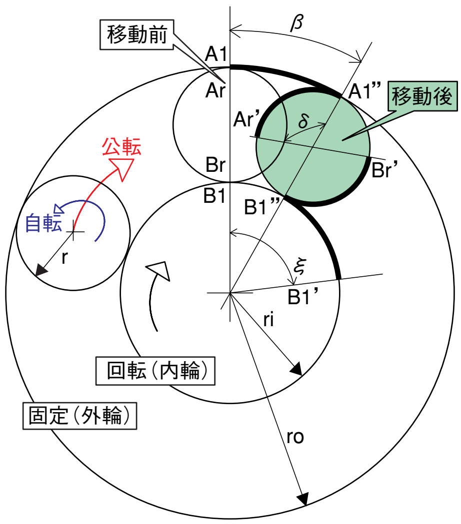


図2　内輪回転する転がり軸受のボールの転がり軌跡

この式を書き直せば

$$\beta=\frac{ri}{ro+ri}\xi=\frac{1}{2}\left(1-\frac{r}{r+ri}\right)\xi$$
$$=\frac{1}{2}\left(1-\frac{Da}{dpc}\right)\xi$$

$$\delta=\frac{ro}{r}\beta=\frac{dpc+Da}{Da}\,\frac{1}{2}\left(1-\frac{Da}{dpc}\right)\xi$$
$$=\frac{1}{2}\left(1-\frac{Da}{dpc}\right)\left(1+\frac{Da}{dpc}\right)\frac{dpc}{Da}\,\xi$$

ここに　Da＝2r（ボール径）

　　　　dpc＝r＋ri（ボールピッチ円形）

となります。接触角といってボールが外内輪と斜めの角度αをもって接触する場合は

$ro=rpc+r\cdot\cos\alpha$

$ri=rpc-r\cdot\cos\alpha$

と、しなければなりませんので、$\gamma=Da\cdot\cos\alpha/dpc$の項をつくって、上の式を書き直すと、

$$\beta=\frac{1-\gamma}{2}\xi \qquad \delta=\frac{1-\gamma^2}{2\gamma}\xi$$

となります。

ほとんどの転がり軸受では、γの数値は0.1〜0.3程度ですので、仮に$\gamma=0.1$とすると

$\beta=0.45\xi$　$\delta=4.95\xi$

となり、転がり運動では、回転輪の約1／2しかボールは公転しないことが、このようにして説明できます。これは転がり運動のとても大きな特長の一つになっています。

また、ボールは内輪の回転数の実に5倍ほどの自転を繰り返しているのです。転がり軸受を回転させると、ボールが最も発熱してしまうのは、この理由によるとされています。

3.すべり軸受と転がり軸受

転がり運動の利点は、すべりの発生をなくすることで、荷重を受けながら移動するときの抵抗を大変小さくできることにあります。

これに対し図3のように、一般にメタルベアリングと呼ばれているものは、2項の（1）（2）の要件は満たしているのですが、（3）の要件は満たしてはいません。100％すべり現象が発生しています。

ですが、（1）の要件は転がり軸受では達成しえないほどの大きい容量を有しているので、（3）の要件を何らかの形で補うことで、今日でも多用されています。

ですが、移動（回転）の抵抗は、とくに起動時には転がり軸受とは比べものにならないくらい大きいものがあります。一般に、転がり運動が成立するかを判断するときには、荷重を受ける接触点を歯車のかみあいに置き換えて概念的に考えてみれば、常識的に大体判断することができます。メタルベアリングはかみあいが成立しないことが分かりますし、転がり軸受はかみあって回転することが概念的に理解できます。

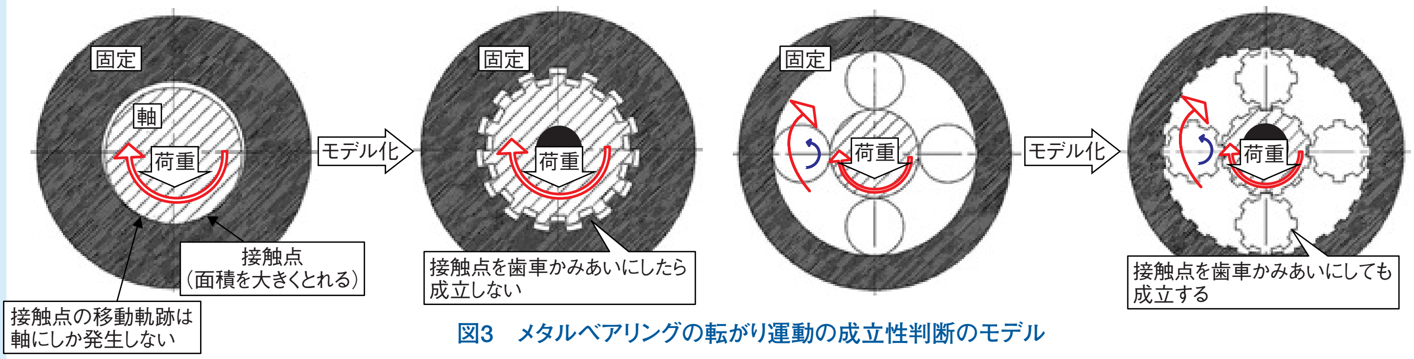


図3　メタルベアリングの転がり運動の成立性判断のモデル

4.転がり軸受のボール自転数および公転数の計算式

1）内輪回転、外輪回転での　ボールの運動

2項では内輪が回転するときの、ボール自転数および公転数が、内輪の回転数に対し、どれだけの比になるかの計算式をつくりました。

外輪が回転して内輪が固定されているときはどうなるのでしょう？

考え方は、2項と全く同様ですので、本書を読まれている方々には是非とも考えて誘導してほしいものです。答えを書きますと、次の表1のようにまとめられます。なお、ここからは話をすすめるのにボールの自転数をωb、ボールの公転数をωc、回転輪の回転数をωとすることとします。

2）内輪と外輪とが同時に　回転する場合の運動

軸受が回転しているときは、ボールは必ず公転しています。ここまで書きました計算式などは、絶対座標といって、軸受の外から見た様子を示しています。ボールから見たら、外輪や内輪はどのように移動しているでしょう?これを、内輪回転の場合で見てみます。

ボールは内輪より遅くすすみますから、内輪はすすむ方向に遠ざかっていくように見えるはずです。どれくらいかというと、その差の分だけの速度で遠ざかりますから

内輪の遠ざかる速さ＝$\omega-\omega$c

逆に、外輪は止まっていますから、回転方向とは反対方向にボールの公転数の速さで遠ざかります。

外輪の遠ざかる速さ＝$-\omega$c

です。マイナス(ー)の記号の意味は、回転方向と逆を意味させるためです。

そうであれば、内輪を$\omega-\omega$cで回転させ、外輪を$-\omega$cで回転させたらどうなるでしょう?表の計算図表があるわけですから、それに代入して、方向を整理して計算すると

$$\text{ボールの公転数}=\frac{1-\gamma}{2}(\omega-\omega\mathrm{c})+\frac{1+\gamma}{2}(-\omega\mathrm{c})$$

$$=\frac{1-\gamma}{2}\,\omega-\omega\mathrm{c}=0$$

となります。ωで内輪を回転させたときの、ボールの公転数がωcですから、予想どおり0になりました。

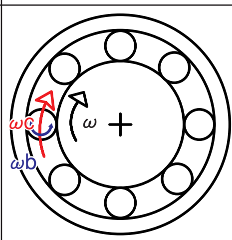
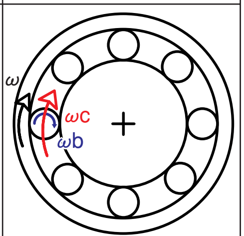
ボールの自転数はどうでしょう?公転数のときと同様にして、

$$\text{ボールの公転数}=\frac{1-\gamma^2}{2\gamma}(\omega-\omega\mathrm{c})-\frac{1-\gamma^2}{2\gamma}(-\omega\mathrm{c})$$

$$=\frac{1-\gamma^2}{2\gamma}\,\omega$$

となります。ωで内輪を回転させたときの、ボールの自転数ωbとまったく同一の式になりました。

表1　転がり軸受のボールの公転及び自転回転数計算式

回転区分	内輪回転	外輪回転
図		
ωc／ω	$\frac{1-\gamma}{2}$	$\frac{1+\gamma}{2}$
ωb／ω	$\frac{1-\gamma^2}{2\gamma}$　ボールの自転方向に注意ください	

（外輪固定の場合）

つまり、外輪固定してωで内輪を回転させたときの状態は、このときのボールの公転数ωcを使って内輪を（$\omega - \omega c$）で回転させ、反対方向に外輪をωcで回転させたときと、等価になるということなのです。

このことは軸受の運動を解析する上で、大変重要な特性であり、実際上はボールが公転しますが、紙の上ではボールの公転をとめて、計算することができますので、特にボール遠心力などの因子を考慮する場合などでは、多くの方々がこの手法を使って解析されています。内輪固定、外輪回転の等価モデルも当然構成することができます。原理はここで述べたのとまったく同様に行なえます。

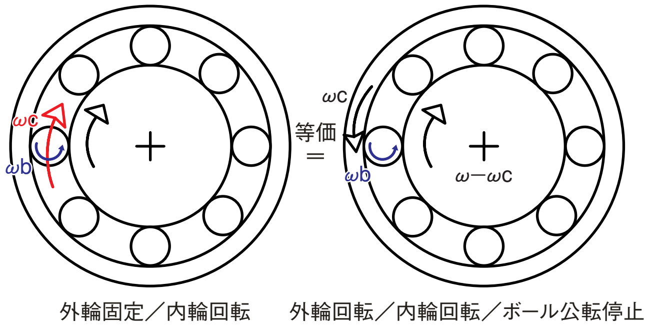


図4　内輪回転の等価モデル

5. 回転運動のコントロール

（転がり運動の特性）

転がり運動の成立性の判断の仕方、そのときのボールの運動を見てきました。ボールはどの断面で切っても、断面がボールの中心さえ通れば、常に同じ円形であるという特徴があります。この性質を使って、ボールの運動をコントロールすることができます。たとえば、図5のようにボールを斜めにあてて、片方の軌道輪を紙面の奥へ向かって回転させたとします。するとボールは駆動輪から回転方向の力を受けて、ボールは紙面の奥へ向かって公転しようとします。これの回転方向を表わすのに、回転ベクトル記号を使うことがあります。

（ボールの駆動力）

回転ベクトルとは図6のように、回転方向を右ねじのすすむ方向として表わしたベクトル記号であり、ベクトル分解などは力のベクトルと同様に扱うことができることが分かっています。このベクトル記号を使うと、ボールには図5のように回転駆動力が伝わります。

駆動力を受けたボールはどのような回転をするかは、「ボールのかってでしょ」ということになるのですが、通常は、外内輪との接触線上と直角方向に回転ベクトルをもつように回転します。それらを表わすと、図6の様なベクトル分解になり、駆動力全てがボールの回転には費やされなくなります。

（スピンモーメント）

余った分がベクトル分解上出てくることになります。それは摩擦として表われてくるのですが、ボールには接触角線を中心にして自転するコマ運動のような成分が発生することになります。これがスピンモーメントと呼ばれているもので、接触角をもった軸受の摩擦のほとんどがこれで占められていることが分かっています 。

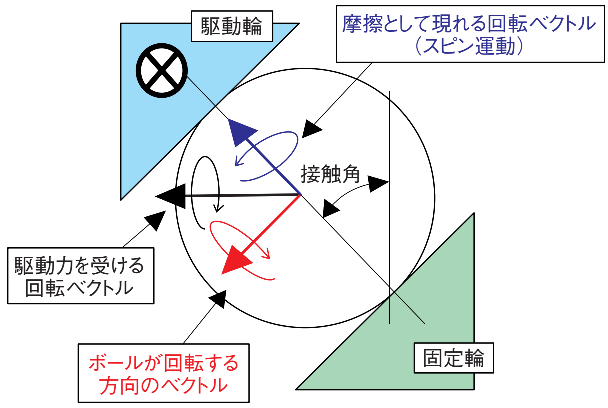


図5　接触角をもったボールの運動

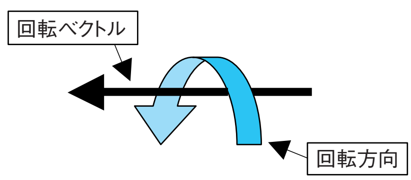


図6　回転方向と回転ベクトルの方向

このように、回転をベクトル分解すると、実際ボールがどのように回転してくれるのかを、予測することができます。そして、このようなスピンの運動を利用することで、100%転がりとはいえないまでも、本来ならすべり軸受にしかならない構造のものでも、転がり運動を成立させることができます。

(フリーベアリングの場合)

その代表的な事例が、フリーベアリング※1です。フリーベアリングのひとつに、図7の様な円筒の窪みに小ボールを多く配置させ、その上に大ボールを1ヶ配置したものがあります。この上に何かを載せて、紙面の奥へ向かって移動させようとしても、転がり運動は発生しません。

ですが、固定した円筒をやや傾けてやると、図8の様に駆動の回転ベクトルが分解され、ボールの自転しようとする回転ベクトルを発生させることができます。その結果、大ボールも小ボールも大ボールの自転方向に向けて、転がり運動を開始します。

このように、回転をベクトル分解すると、実際ボールがどのように回転してくれるのかを、予測することができます。ただし、紙面の左右方向の駆動に対しては、転がり運動は発生しません。この応用は、空港などで荷物を運ぶコンベア代わりとして多用されています。

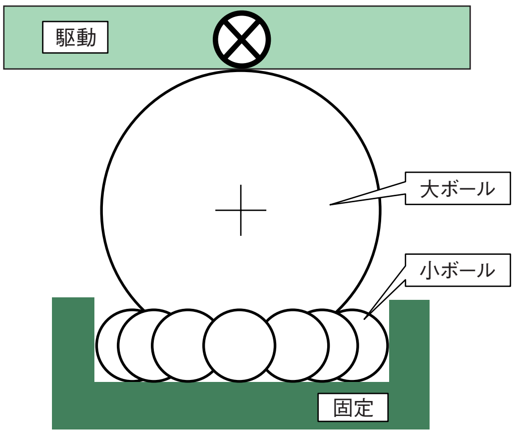


図7　水平設置したフリーベアリング

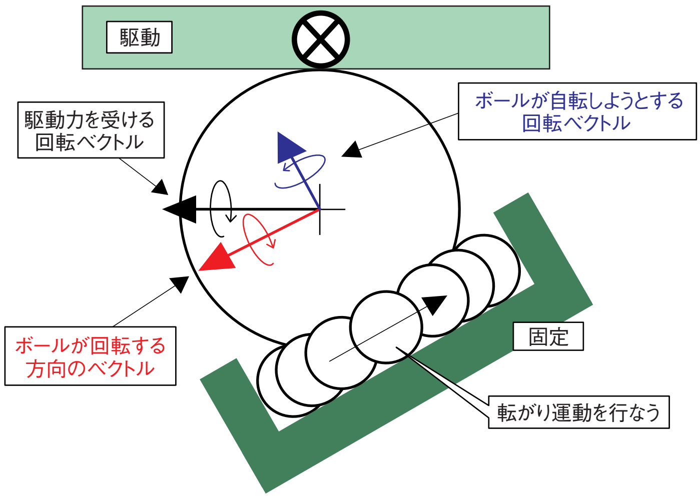


図8　傾斜設置したフリーベアリング

6. 効率の良い転がり軸受

このように、転がり運動を歯車運動に置き換えたり、回転ベクトルに分解して運動を考えることで、応用分野を広げることができます。転がり軸受の最も大きな役割である、動力伝達の支持を効率よく行なう使命は、転がり運動の基本原理が担っていることがわかります。

回転することが、重心の上下がなく、ものの移動には最も楽な方法であることをすでに書きました。機械装置のほとんどが、回転体の集まりでできていることは、この理由によるものと思われます。自動車のタイヤは転がり運動そのものですし、タイヤの回転中心が径方向にずれないようにしてくれているのは、これを支えている転がり軸受のおかげです。

減速機など、回転体の回転数を漸次小さくして駆動力を上げていく軸の支持にも、転がり軸受が使われています。

転がり軸受は、英語ではRollingではなくてAnti-Friction Bearingと呼ばれています。

労力を少なくして、ものを移動できるという意味では、転がり運動は、現在工業化されている手段としては、最良のエネルギー伝達手段のように思えます。

そして、その応用が広がるにつれ、摩擦コントロール、回転コントロールといった様々な転がり構造体が、今後も出現していくように思われます。

用語解説

※1 フリーベアリング
前後左右どの方向にも回転ないしは移動できる軸受のことで、通常は外力を直接受ける大ボールとこれを支える複数個の小ボールで構成される。

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

NACHI TECHNICAL REPORT
Vol.13 D1 | June / 2007

〈発　行〉2007年6月20日
株式会社 不二越　開発本部　開発企画部
富山市不二越本町1-1-1 〒930-8511
Tel.076-423-5118 Fax.076-493-5213