

解説3 転がり軸受を支える解析技術

NTN 藤原 宏樹*

*ふじわら ひろき：先端技術研究所 主査
設計工学, Vol.52, No.3(2017), p.122より転載

はじめに

転がり軸受は軌道面と転動体の転がり接触によって摩擦を低減する装置であり、理想的な状態を考えれば、転動体はすべて等速で軌道輪上を公転することになる。しかし、転がり軸受は工業製品である以上、一定の製造誤差は避けられず、仮に誤差がゼロであったとしても、転動体の運動は荷重の分布状況や接触角の変化によって攪乱されるため、転動体が厳密に等速で公転することはない。転動体の公転速度が一定でなければ、いずれ転動体同士が接触して過大な摩擦を発生させ、場合によっては焼付きが生じることもある。また、転動体が不等速で公転し、分布が不均一になると荷重を負荷する転動体数の変動が大きくなるため、振動の原因ともなる。

転動体同士の接触を防止するため、転動体は保持器と呼ばれる部品で分離されており、保持器は

転がり軸受が高速回転時にも静粛かつ低摩擦で機能するために必要不可欠の部品である。軌道輪や転動体のほとんどが鋼製でシンプルな形状であるのに対し、保持器は種々の材料・形状が実用化されている。保持器は転動体や軌道輪と接触するのみならず、潤滑剤の流動にも影響を与える。転がり軸受の特徴である転がり運動によるエネルギー損失の低減を直接発現する部品ではないが、軸受の性能に大きな影響を及ぼすので、適切な設計を実現するための解析技術が現在も精力的に開発されている。

本稿では、保持器の代表的な数値解析および実験解析について紹介する。

保持器に作用する力

1. 保持器の遠心強度

保持器材料には鋼や銅合金などの金属と樹脂がある。工作機械主軸用軸受に使用する繊維入りフェノール樹脂など一部の樹脂製保持器は素形材から機械加工によって削り出しで製作するが、ポリアミドやポリエーテルエーテルケトンなどは射出成形によって製作する。とくに多用される深溝玉軸受用ポリアミド製保持器は、成形性や組立て性を考慮し、図1のようないわゆる冠形保持器が多い。深溝玉軸受用保持器として同じく多用される鉄板波形保持器は、2つの同形の部品で軸方向から玉を挟み込み、リベットで締結するのに対し、樹脂製冠形保持器は、部品1個で保持器として成立する。玉を保持するポケットは軸方向の一端で

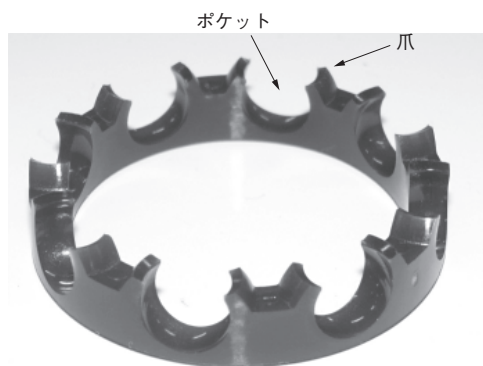


図1 一般的な深溝玉軸受用冠形樹脂保持器

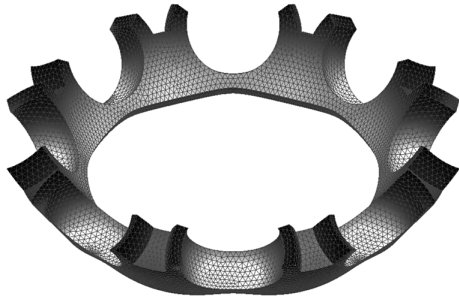


図2 遠心力による深溝玉軸受用冠形樹脂保持器の変形(変形を10倍に拡大表示)

開口した形状であり、これによって金型からの引き抜きと玉のスナップ的な組込みを可能としている。

樹脂製保持器は金属製保持器に比べ自己潤滑性に優れ、潤滑剤が不足しても焼き付きにくいという長所はあるものの、剛性が低いため変形しやすいという欠点もある。冠形保持器の場合、上述のような形状であるため、高速回転時の変形に注意を要する。ポケットの開口側は爪部の支持構造が存在しないため、遠心力による変形が生じやすい。一方で反開口側は開口側に比べ剛性が高く変形しにくい。そのため、高速回転時には爪が外径側に広がり、極端に言えば花びら状の変形を生じる。その結果、爪の先端が玉や外輪と干渉し、摩擦トルクの増大や過大な発熱などを引き起こす恐れもある。

したがって、設計時には所望の回転速度で干渉を起こさないことを確認する必要があるが、これにはFEM解析を用いればよい。もちろん保持器全体をモデル化して計算してもよいが、通常、保持器は玉数分の回転対称体であるから、計算時間短縮のため玉数分の1のモデルを作成してもよい。その場合、切断面の境界は面方向の変形を拘束し、モデル全体に遠心力を与える。使用するソフトによってはモデルの一点を軸方向に固定する、遠心力として半径方向に逐次異なる体積力を設定するなどの工夫が必要になることもあるが、設定した軸回りの回転速度での遠心力が作用するという境界条件を与えることのできるソフトもある。

図2はFEM解析結果の一例である。上述の通り、爪が外径側に大きく変形している。このとき、ポ



図3 冠形保持器の爪部の変形を抑える設計例
[出典：文献2]

ケット反開口側の底面付近に大きな応力が作用しており、この部分で爪部の変形を支持している。

2. 保持器の変形を低減する設計例

当然のことながら、保持器の爪と他の部品の干渉は可能な限り避けるべきであり、樹脂製保持器でも遠心力による変形を抑制しようとする工夫も見られる。考え方として、ここでは2つ挙げる。1つは爪に働く遠心力を小さくする方法である。単純には爪の質量が小さければ遠心力は小さくなり変形量も小さくなる。最も一般的な形状では保持器の半径方向の厚さは軸方向に均一であるが、爪の質量を小さくするためには爪先端に行くにしたがって肉厚を小さくすればよい¹⁾。ただし、保持器の本来の機能である玉を保持する機能は確保しなければならない。

2つ目の方法は、爪部の剛性を上げることである。具体的には図3のような構造²⁾がある。鉄板波形保持器のように軸方向両側から同形状の部品で玉を挟み込む構造で、係合部同士がかみ合うことで剛性を上げている。この形状では成形時に保持器本体に係合部を作り込んでおり、リベットのような締結のための別部品は必要ない。冠形保持器より部品点数は増えるが、変形を抑えることができるため、サーボモータなど高速回転用途に採用されている。

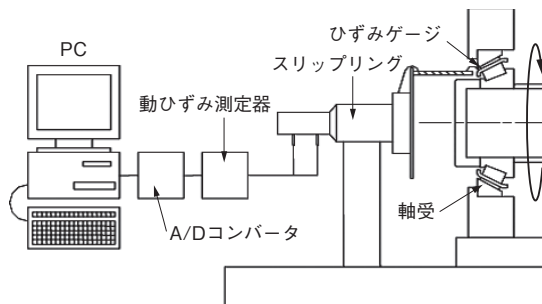
3. 干渉力の測定

保持器は転動体や軌道輪と滑り接触するため、その摩擦力は無視できない。摩擦力を求めるためには転動体と保持器の干渉を理解する必要があり、以前から研究の対象となってきた。角田らは保持器にひずみゲージを貼り付け、その干渉力を測定

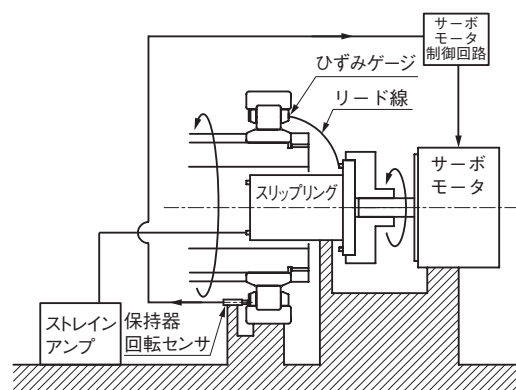
している³⁾。保持器は回転するから、ひずみゲージの信号を静止系に出力する工夫が必要である。角田らは内外輪を逆転させる方法を採用している。このようにすれば、保持器を静止させることができるので、容易に測定できる。しかし、現実には転がり軸受の大半は内輪もしくは外輪の一方のみが回転し、他方は静止している。

藤原らは、低速時の保持器ところの干渉によって生じる保持器の応力を調査するため、同じくひずみゲージを保持器に貼り付けて測定しているが、図4(a)のように、ひずみゲージの出力を水銀スリップリングで取り出すことにより、回転系から静止系へ信号を伝達している⁴⁾。スリップリングはひずみゲージのリード線を介して保持器の駆動力によって回転させている。この研究では比較的大形の軸受を使用しており、低速、高荷重という条件ではあるものの、スリップリングを駆動するためのトルクが保持器に作用することは避けられない。

藤原らの別の研究では、図4(b)のような構成を採用している。スリップリングで回転系のひずみゲージの信号を取り出すことは図4(a)と同じであるが、保持器の回転速度を測定し、これに合わせてスリップリングをサーボモータで駆動している⁵⁾。この方法であれば、保持器に発生する応力に対しひずみゲージのリード線に作用する遠心力の影響は残存するものの、スリップリングの駆動力は保持器には作用しない。



(a) 保持器でスリップリングを駆動する方法 [出典：文献4]



(b) スリップリングを保持器と同期回転させる方法 [出典：文献5]

図4 保持器に作用する応力を測定する方法の一例

コンロッド用軸受を対象として保持器に作用する力を求めることを目的に保持器挙動を計算し実験検証を行っている⁷⁾。しかし、これらの研究では保持器本体を剛体として扱うことしかできず、接触部のみが局部的に弾性接触するという近似を導入するにとどまっている。また、現実の複雑な保持器形状をモデル化することが困難なため、汎用性の点で課題があった。

近年は市販の動力学解析ソフトの高性能化、低価格化が進み、高性能パソコンレベルの規模で実用的な計算が可能となっている。さらには構造解析ソフトとも連成が可能となっており、3次元CADで作成したモデルを用いて、変形や応力を計算しながら、同時に運動方程式を解いて挙動を求めることができる。ただし、まともにこのような計算を行うと、運動方程式を1回積分するごとに全領域の変形を計算することになり、膨大な計算時間が必要となる。Sakaguchiらはこの対処法として、モード合成法を導入している⁸⁾。保持器

保持器の動的挙動の数値解析

保持器に作用する力の解析に関し、保持器単体あるいは定常的な現象に注目して計算や実験解析の事例を紹介したが、これらの現象を複合的に扱う場合や時間変動を伴う現象については、動力学的な検討が必要である。原理的には、個々の軸受要素に働く力を求め、運動方程式を解けばよいのだが、これを数値解析で扱うのは相当の困難を伴う。

過去には、Guptaが精力的に研究し、その著書で軸受部品の挙動を解析するFORTRANのソースコードを公開している⁶⁾。藤原らも、エンジンの