

転がり軸受の振動・音響

桃野達信*, 野田万朶*

Sound and Vibration in Rolling Bearings

by T. Momono, B. Noda

Recent progress in information technology devices and their spread throughout much of the world have happened at an astonishingly rapid pace. Not only has there been remarkable improvements in automobiles and electric home appliances themselves, but the total number of such products owned and used by people has increased dramatically.

In the midst of such conditions, demands have grown tighter and tighter on rolling bearings to have low vibration and low noise. To respond to such stringent demands, extensive research and intensive developments are undertaken.

This paper attempts to explain some of the key findings accumulated from research up to now on sound and vibration in bearings. Also, vibration modes of bearing rings are discussed. In addition, a summary chart on sound and vibration in bearings is included for the convenient reference.

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. 軸受の振動・音響の分類 3. 軸受の振動・音響の概説 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 本質的な振動・音響 <ul style="list-style-type: none"> 3.1.1 レース音 3.1.2 転動体落ち音 3.1.3 きしり音 3.1.4 保持器音 3.1.5 転動体通過振動 3.2 軸受の製作に関する振動・音響 <ul style="list-style-type: none"> 3.2.1 びびり音（うねりによる振動） | <ul style="list-style-type: none"> 3.3 取扱い不良による振動・音響 <ul style="list-style-type: none"> 3.3.1 きず音 3.3.2 ごみ音 3.4 その他の振動・音響 4. 軸受の振動・音響の周波数 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 軌道輪の固有振動数 <ul style="list-style-type: none"> 4.1.1 剛体モード 4.1.2 弾性体モード 4.2 転動体の回転周波数 5. あとがき |
|---|---|

1. まえがき

最近の情報機器の進歩と普及はめざましいものがある。オフィスにはいわゆるパーソナルコンピュータが何台も並び、その高性能化はとどまることを知らないように見える。ソフトウェア、周辺機器も急速に充実してきている。パーソナルコンピュータを頂点とした

OA機器の性能向上要求に伴い、可動部品の一層の低振動、低騒音化が求められている。また、家庭においても自動車、家電製品などの高性能化が進み、保有台数も増えている。エアコン、洗濯機、冷蔵庫、掃除機などの家電製品又は自動車などでは、セールスポイントの一つとして「静かさ」が取り上げられることが多くなってきた。

このような状況の中で、転がり軸受に対する低振動、低騒音化の要求は年々厳しくなっており、それに応えるべく研究・開発が行われてきた。特に小

* 総合研究所

径、極小径の玉軸受では、VTRから始まった低振動、低騒音化に対する研究成果が、最近のHDD（ハードディスクドライブ）まで引き継がれ、その品質は世界のトップクラスを誇っている。そして今なお、その性能向上への努力が続けられており、転がり軸受の振動・音響は重要特性の一つとして認識されている。

ここでは、これまでの研究によって明らかになっている「転がり軸受単体の振動・音響」について解説を試みる。

2. 軸受の振動・音響の分類

転がり軸受単体の振動・音響は表1に示すように4種類に大別され、さらにそれらは、いくつかに分類される¹⁾。ただし、これらの境界線は絶対的なものではなく、本質的な音又は振動であってもその大小が製作に関係したり、逆に製作に関係する音又は振動であっても、正常な場合に完全に無くなるわけではない。

表1では、音と振動をまとめて書いてある。音が発

生しているときには、大抵の場合振動が発生しており、振動が発生しているときは、通常音も発生している。例えば、うねりによる振動が発生しているときには、同時にびびり音が発生していると思われる。しかし、振動と音が同時に問題視されることは少ない。それは、振動と音に対する人の感知能力が周波数によって異なるからである。周波数が低い音はあまり聞こえないし、振動は周波数が高くなるとあまり感知できなくなる。このため、周波数が低いときは振動が、周波数が高くなると音が問題視されることが多い。この時の周波数の境目の目安としては、1 000Hz位になると言われている。

なお、振動と音の発生機構の観点からは、表1とは異なった分類も考えられるが、ここでは表1の分類に従って、解説を試みる。

表1 転がり軸受で発生する振動・音響の分類表
Table 1 Classification of sound and vibration in rolling bearings (表1は次ページにつづく)

	音	振 動	音 色	特 徴	
本 質 的	レース音	(軌道輪の固有振動)	シャー、シュー (松風)	連続音、全ての軸受で発生する基本的な音	
	転動体落ち音	(軌道輪の固有振動) (保持器の固有振動)	カタカタ、コトコト	特定の間隔で規則的に出る、大形軸受・横軸で発生、ラジアル荷重・回転速度小で発生	
	きしり音	(軌道輪の固有振動)	キュルキュル、キーキー (きしる、金属性)	断続的または連続、主に大形の円筒ころ軸受(玉軸受)で発生、ラジアル荷重・グリース潤滑・特定の回転速度で発生	
	保持器音	CK音	(保持器の固有振動)	カヤカヤ、カヤカヤ、チャチャ、パタパタ	特定の間隔で規則的に出る、全ての軸受で発生
		CG音	保持器の振動	ジャージャー、ガーガー(かえる音)	断続的または連続、特定のグリースで発生
		衝突音	(保持器の固有振動)	ガチガチ	特定の間隔で出るがやや不規則、ラジアル荷重・回転初期に発生
	(ごろごろ音)	転動体通過振動	ゴロゴロ	連続、全ての軸受・ラジアル荷重で発生	
製 作 上	びびり音	うねりによる振動	内輪 ウーウー、ゴーゴー、 外輪 ウォンウォン、ヒュー 転動体 (サイレン、笛)	連続音 連続音だが時々消えることもある；(玉)	
取 扱 不 良	きず音	(きずによる振動)	内輪 ジー、ピー、ザー、ジャー 外輪 (パルスの、リベット打ち) 転動体	特定の間隔で規則的に出る 規則的だが時々消えることもある；(玉)	
	ごみ音	(ごみによる振動)	チチチ、カリカリ、チリッチリッ	不規則	
そ の 他	シール音	(シールの固有振動)	ピー	接触シールで発生	
	潤滑剤の音 (グリース音)	—————	ピシピシ、ピンピン、ピチピチ、ジューツ	不規則	
	(ごろごろ音)	振れ回り	f_r	ゴロゴロ	連続
			f_c	ゴロゴロ	連続
$f_r - 2f_c$			ゴロゴロ	連続	

3. 軸受の振動・音響の概説

3.1 本質的な振動・音響

本質的な振動又は音とは、現在のすぐれた軸受加工技術を用いても発生する転がり軸受本来の振動又は音である。したがって、これらの振動又は音は、発生してもその他の軸受機能に支障をおよぼすことはない。

3.1.1 レース音

レース音は、すべての軸受で常に発生する転がり軸受の最も基本的な音である。この音は、なめらかな「シャー」という連続した音である。転がり軸受の音のレベルと言うときは、通常この音の大きさを指す。

この音の大きさを身近な音と比較すると、図1のようになる²⁾。図中、最も音の大きい軸受6410の音でも、普通の会話の音響出力の約1/100しかなく、エネルギー的に大変小さいことがわかる。

レース音の特徴は次の通りである³⁾。

- (1) 音の周波数は回転速度が変化しても変わらず一定である。この周波数は、後述の軸受の固有振動数である (図2)。
- (2) 回転速度が速くなると、音の大きさは大きくなる (図2)。
- (3) ラジアルすきまが小さくなると、音の大きさは急に大きくなる。
- (4) 潤滑剤は、粘度が高い方が音の大きさは小さくなる。しかし、グリースでは粘度のほかに、ちょう度、石けん繊維の形及び大きさが影響する。
- (5) ハウジングの剛性は高いほど、音の大きさは小さくなる。

レース音の発生機構は、次のように考えられている。軸受の軌道面と転動体の表面は、現在のすぐれた加工技術を用いても、ミクロ的にはうねり (ウェービネスとも言う) と呼ばれる形状誤差が存在する。この凹凸のため、軌道輪と転動体の間の接触ばねが、微小に変化する。ばね力の変化が、軸受の軌道輪に加振力と

(表1つづき)

発生周波数 (周波数分析)		エンベロープ後のFFT (基本波)	発生原因 (源)	低減対策
半径 (角) 方向	軸方向			
f_{rIN}, f_{MI}	f_{aIN}, f_{AM}	—	うねりの選択共振 (転がり摩擦)	軸受まわりの剛性アップ、適正なラジアルすきま、油粘度大、高品質の軸受の使用
f_{rIN}, f_{MI} (保持器の固有振動数)	f_{aIN}, f_{AM}	Zf_c	転動体が内輪または保持器に衝突	ラジアルすきま小、予圧をかける、油粘度大
($\approx f_{r2N}, f_{r3N}$)	—	?	転走面の滑り摩擦による自励振動	ラジアルすきま小、予圧をかける、グリース変更、対策軸受の使用
(保持器の固有振動数)		f_c	保持器と転動体または軌道輪との衝突	予圧をかける、油粘度大、取付け誤差小
(保持器の固有振動数)		?	保持器案内面の摩擦による自励振動	グリース変更、対策保持器に変更
(保持器の固有振動数)		Zf_c	グリースの抵抗による保持器と転動体の衝突	ラジアルすきま小、予圧をかける、油粘度小
Zf_c	—	—	転動体通過に伴う内輪 (軸) の変位	ラジアルすきま小、予圧をかける
$nZf_i \pm f_r$ ($nZ \pm 1$ 山)	nZf_i (nZ 山)	—	内輪のうねり、軸外径面のびびり	高品質の軸受の使用、軸外径面の改善
nZf_c ($nZ \pm 1$ 山)	nZf_c (nZ 山)	—	外輪のうねり、ハウジング内径面のびびり	高品質の軸受の使用、ハウジング内径面の改善
$2nf_b \pm f_c$ ($2n$ 山)	$2nf_b$ ($2n$ 山)	—	転動体のうねり	高品質の軸受の使用
f_{rIN}, f_{MI}	f_{aIN}, f_{AM}	Zf_i	内輪のきず・圧こん・打こん・さび・フレーキング	交換、軸受の取扱に注意する
		Zf_c	外輪のきず・圧こん・打こん・さび・フレーキング	交換、軸受の取扱に注意する
		$2f_b$	転動体のきず・圧こん・打こん・さび・フレーキング	交換、軸受の取扱に注意する
f_{rIN}, f_{MI}	f_{aIN}, f_{AM}	(不規則)	ごみ・異物の侵入	洗浄、密封方法改良
(シールの固有振動数)		(f_r)	シール接触部の摩擦による自励振動	シール変更、グリース変更
?	?	(不規則)	潤滑剤中の気泡のつぶれる音 飛散した潤滑剤を押しつぶす音	(グリース変更)
f_r	—	—	内輪の偏肉	高品質の軸受の使用
f_c	—	—	玉の相互差・不等配による内輪 (軸) の変位	高品質の軸受の使用
$f_r - 2f_c$	—	—	玉の相互差に基く剛性の異方性による非線形振動	高品質の軸受の使用

n : 正の整数 (1, 2, 3, ...) , Z : 転動体の数, f_{rIN} : 軌道輪の半径方向曲げ固有振動数 (Hz), f_{MI} : 外輪慣性モーメント系角方向固有振動数 (Hz), f_r : 内輪 (軸) の回転周波数 (Hz), f_c : 転動体の公転周波数 (Hz), f_{aIN} : 軌道輪の軸方向曲げ固有振動数 (Hz), f_{AM} : 外輪質量系軸方向固有振動数 (Hz), f_i : $f_i = f_r - f_c$ (Hz), f_b : 転動体の自転周波数 (Hz)

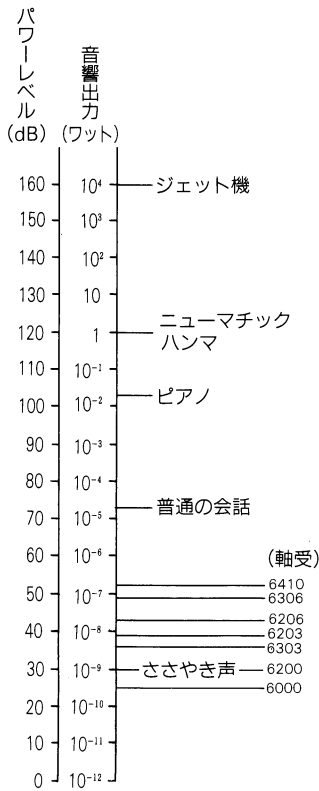


図1 レース音の音響出力
Fig.1 Loudness range of race noise

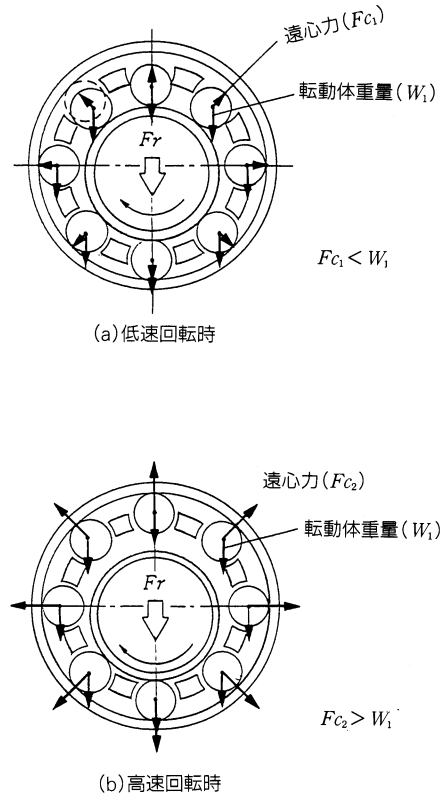


図3 転動体落ち音の発生原因
Fig.3 Mechanism of rolling element falling noise

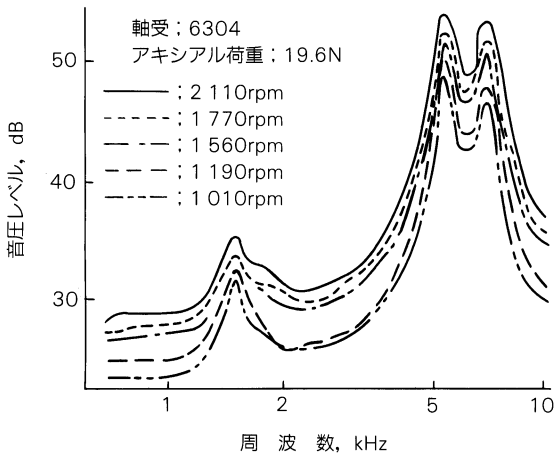


図2 レース音に及ぼす回転速度の影響
Fig.2 Influence of rotation speed on race noise

して作用し、その結果引き起こされる振動によってレース音が発生する。この加振力は広い周波数成分を持つ。このため軌道輪は、加振力の中でも自らが振動しやすい周波数である固有振動数付近の加振力成分を選んで振動する（選択共振）。

レース音は必ず発生する音であるため、特別な対策方法はないが、レベルを少しでも下げるには、高精度・高品質の軸受を使用する方がよい。

3.1.2 転動体落ち音

この音は、玉軸受の場合は玉落ち音、ころ軸受ではころ落ち音と呼ばれる。比較的大形の軸受がラジアル荷重で使用される場合に発生することが多い。しかも、低速回転域でのみ発生し、高速になると消滅する。この音は、「カタカタ」という衝突音で、後述のきず音と多少性質が似ている。

音の発生機構は、次のように考えられる（図3）。

まず、ラジアル荷重で軸受が使用されると、軸受内部に負荷を受ける部分（負荷域）とそうでない部分（無負荷域）が生じる。無負荷域では軸受にすきまが存在するために、転動体は内輪と接触せず、遠心力（ F_{C2} ）によって外輪側に接している。ところが、低速回転域で、遠心力（ F_{C1} ）が重力より小さくなると、転動体が落ちて保持器又は内輪と衝突する。転動体落ち音は、このとき発生する衝突音である。

対策としては、予圧をかけるのが有効であり、ラジアルすきまを小さくするのも、効果が多少期待される。また、セラミックスのような軽い転動体を使用すれば、転動体落ち音は軽減されるはずである。

3.1.3 きしり音

きしり音は「キュルキュル」という、文字どおり“きしる”ような金属性の音で、時として大きな音が発生する。しかし、きしり音が発生しても一般には軸受の温度上昇はなく、また、軸受寿命そしてグリス寿命への悪影響もないことから、音響的問題を別にすれば軸受の運転に対する支障はない。

きしり音は、比較的大形の軸受がラジアル荷重で使用されるときに発生しやすい。円筒ころ軸受で問題となることが多いが、玉軸受でも発生する。

きしり音の特徴は次の通りである。

- (1) 軸受のラジアルすきまが大きいときに発生しやすい。
- (2) グリス潤滑の場合に発生し、油潤滑ではほとんど発生しない。
- (3) 冬季に発生することが多い。
- (4) ある回転速度範囲で発生する。この発生回転速度範囲は、大きい軸受の方が低くなる傾向がある。
- (5) きしり音は、発生状況が不安定で、グリスの種類、量及び周囲の状況で変化する。

きしり音の発生原因については、潤滑が関係し外輪の振動が大きくなることなどから、外輪と転動体との摩擦が関係していると考えられている。すなわち、摩擦が関与した自励振動の一種と考えられている。ただし、外輪円周上のどの部分から出ているかという点に関しては、負荷域説と無負荷域説があり、いずれも確たる証明はなされていない⁹⁾。

きしり音対策としては、軸受のラジアルすきまを小さくすること又は、外輪軌道面に特殊な加工を施した軸受の使用が有効である⁹⁾。

3.1.4 保持器音

保持器音には、「カチャカチャ」という衝突音的なもの又は、「ガーガー」という音質のものなどいくつかの種類がある。NSKでは、これらの音をCK音、CG音などと呼んで区別している。

CK音はどのタイプの保持器でも発生する音で、音色は表1に示すようにいろいろな表現がある。音のレベルは通常それほど大きくない。

この音は次の特徴を持っている。

- (1) 波形プレス保持器、もみ抜き保持器、ブラケージなど、どの保持器でも発生する。
- (2) グリス潤滑、油潤滑のどちらでも発生する。
- (3) 軸受の外輪にモーメント荷重を加えると発生しやすい。
- (4) ラジアルすきまが大きいほど、発生しやすい。

CK音は、回転中の保持器が転動体又は軌道輪と衝

突するために発生すると考えられる。保持器と転動体又は軌道輪との間にはすきまが存在するために、衝突による振動を完全に無くすることは困難である。このためCK音を完全に無くすることは困難であるが、予圧を加えたり、取付け誤差を小さくするとある程度低減することができる。

CG音は、“かえる音”と呼ばれることもある独特の音であり、案内面の滑り摩擦のために保持器が振れ回る自励振動によって出る音と思われる。この音は大きな音となることが多く、使用上問題になりやすい。このため、このタイプの保持器音の抑制を目的とした特別な設計の保持器を用いた軸受が開発されている⁷⁾。

図4は、保持器音の対策を施していない一般軸受と対策を施した軸受をスピンドルに組み込み、性能比較したものである。CG音は温度が低くなるほど発生しやすいため、周囲温度を低下させながら比較試験をしているが、対策軸受では周囲が0°C以下になっても保持器音が発生しない。

この音はグリス潤滑で発生し、比較的固いグリスで出やすい。

このためCG音は、対策保持器にすることが有効であるが、グリスを潤滑性の良いものにすることも効果が期待できる。

このほかに、ラジアル荷重下で固いグリスを使ったときなどに、回転初期に「ガチガチ」という激しい保持器音が出ることもある。これは、負荷域を出た転動体が、グリスによる抵抗のため公転速度が急激に遅くなり、保持器と衝突して出ている音である。この

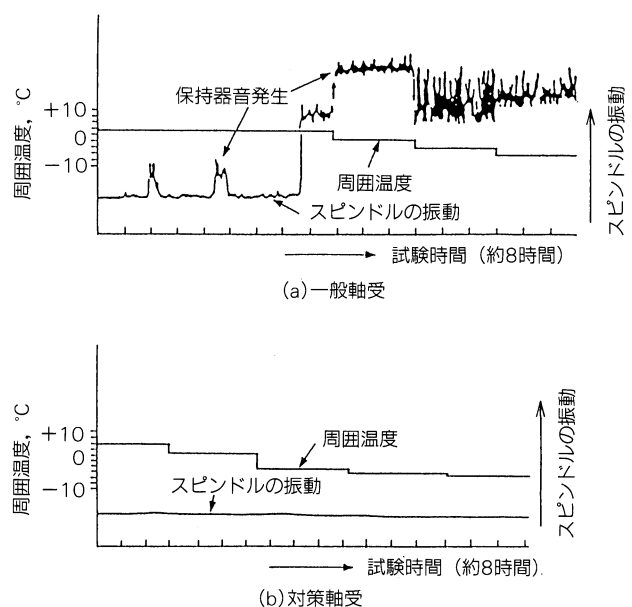


図4 保持器音(CG音)の性能比較試験

Fig.4 Performance evaluation test of cage noise (CG noise)

音は時間の経過とともに消滅するので問題になることはほとんど無い。

3.1.5 転動体通過振動

転動体通過振動は、ラジアル荷重で使用されるときに発生する振動である。この振動が発生すると、回転軸の中心が上下又は左右に振れ、「ゴロゴロ」という音が生じることもある。

この振動の振幅は、ラジアルすきま、ラジアル荷重、転動体の数などの影響を受ける。

この振動は、負荷域にある各転動体の位置によって荷重の分担が変化し、回転軸の変位量と変位の方向が微小に変化するために発生する。すなわち、図5に示す(a)と(b)では、上下方向の変位量が微小に異なる。

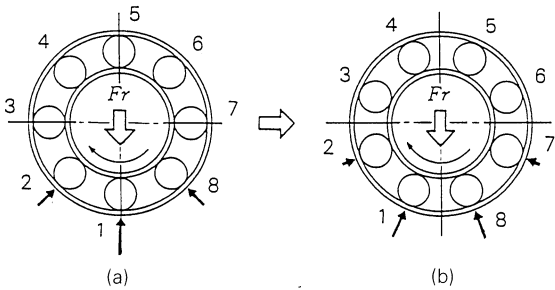


図5 転動体通過振動の発生原因
Fig.5 Mechanism of vibration due to rolling elements passing

また、この中間の位置に転動体があるときは、左右にも変位する。この振動に関しては、理論的、実験的研究が進んでおり、実際はかなり複雑な動きをすること、振動の周波数(f)は次式となることなどがわかっている⁸⁾。

$$f = Z \cdot fc \text{ (Hz)} \quad Z: \text{転動体の数}$$

$$fc: \text{転動体の公転周波数 (Hz)}$$

転動体通過振動は、通常振幅が小さいので、問題となることはまれである。万一問題となったときは、ラジアルすきまを小さくすること又は、予圧を与えることで低減することができる。

3.2 軸受の製作に関する振動・音響

このグループの振動・音響は軸受の製作誤差が関係するが、現在の精密な軸受加工技術を用いても完全には防ぐことができない。したがって、本質的な振動・音響との区別は厳密にはできない。しかし、びびり音又はうねりによる振動は、ある程度以上のレベルになったときに問題となることが多く、通常はこのようなレベル以下であるので、本質的な音とは区別した。

3.2.1 びびり音 (うねりによる振動)

びびり音は、「ウーウー」とか「ウォンウォン」というサイレンに似た音である。軸受の回転速度が一定のときは、一定の周波数を持った耳につく音となる。

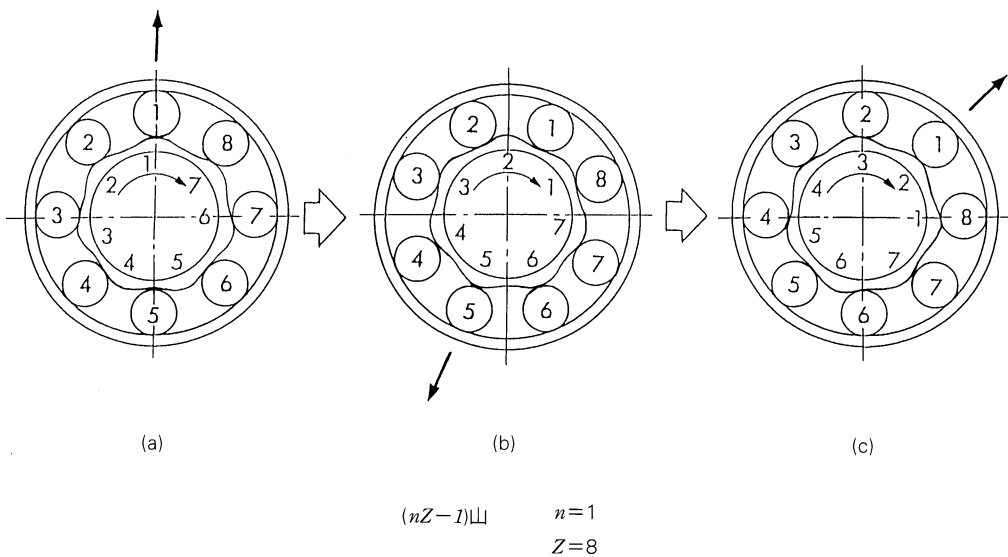


図6 うねりによる振動の発生原因
Fig.6 Mechanism of vibration due to waviness of raceway or rolling surface

発生する音又は振動の周波数は、回転速度とともに変化する。このため、停止するまでの惰走時など回転速度が変化するときには、「ヒューン」という音となり、特に耳障りとなる。転がり軸受で発生する音の中でびびり音以外の代表的な音は、軸受部品の固有振動と関係しており、その周波数は回転速度によって変化しない。このため、この点を確認できればびびり音と他の音とは区別ができる。

びびり音は、うねりによる振動が原因であり、一般的にはこの振動が大きいときに音も問題となる。

うねりによる振動については、GUSTAFSSONによって基本的な研究が行われている⁹⁾。GUSTAFSSONは、内外輪の軌道面及び転動体の表面の円周方向うねりを正弦波の集まりとし、このうねりが存在するときの軸受内の力の釣り合いを検討し、これによって生じる軸受の振動を計算によって求めた。その結果、振動を発生させるうねりの山数と、その山数のうねりによって発生する振動の周波数を明らかにした。表1のびびり音の発生周波数の欄は、これを示したものである。表1から明らかのように、特定の山数を持ったうねりが、この振動の発生原因となる。

この中で、内輪に $(nZ-1)$ 山のうねりがあるとき、半径方向の振動が発生する様子を図6に示す。

ただし、GUSTAFSSONは、一定のアキシャル荷重が加わり、軸受の一つの部品にのみうねりが存在する場合について解析した。その後、他の研究者により、二つの部品にうねりが存在する場合とラジアル荷重下での解析も行われた¹⁰⁾¹¹⁾。それによると、その他の山数のうねりでも振動が発生する場合があることが指摘されている。GUSTAFSSONが導いた、表1の周波数の振動(びびり音)が発生することは、多くの例によって確認されている。一方、その後の研究は最近のものであり、その理論の妥当性は今後証明されていくものと思われる。

この振動(びびり音)は、軸受部品の仕上げ面の円周方向うねりを小さくすることによって、ほとんど問題とならないレベルまで下げることができる。しかし、軸受を取り付ける軸又はハウジングのはめあい面にうねりがあると、はめあいがきつい場合にこれらのうねりが軸受軌道面に写って、振動が発生することがある。また、軸にスプラインが切つてある場合にも同じようなことが起こるので、注意が必要である。

3.3 取扱い不良による振動・音響

軸受の主要部品は、通常HRC60以上のかなり硬い表面を持つが、取扱いを誤って軸受を落下させたり、衝撃を加えると、軸受仕上げ面に打こんやきずがついてしまう。わずかな形状不良でも、軸受の振動又は音

の発生原因となるので、このような打こんやきずをはじめ、微小なごみでさえも問題となることがある。このグループの振動・音響は、このように主として軸受の取扱いに問題があったときに発生するものである。

3.3.1 きず音

転がり軸受の仕上げ面にきず、圧こん又はさびなどがあると、軸受を回転させたときに、「ビー」というパルスのなリベット打ちのような音がする。この音は仕上げ面のきずなどの部分に転動体が衝突することによって発生する音で、きず音と呼ばれる。

表1に示すように、きず音自体の周波数はレース音の周波数と同じであり、この音が発生しているときは周波数スペクトル全体のレベルが上がる。したがって、単にFFTで周波数分析をしても他の音との区別はできない。この音は、音の発生周期(間隔)に特徴がある(図7)。回転速度が一定ならば音の発生周期も一定であり、回転速度が低下するとそれに伴って音の発生周期は長くなる。この周期は回転速度と軸受の内部諸元などで決まり、表1に示すようにきずが軸受のどの部分にあるかによっても変化する。この性質により、きずが軸受に存在するかどうか、存在する場合はどこにあるかなどがわかる。このような音の発生周期を求めるには、通常エンベロープ解析が用いられる。

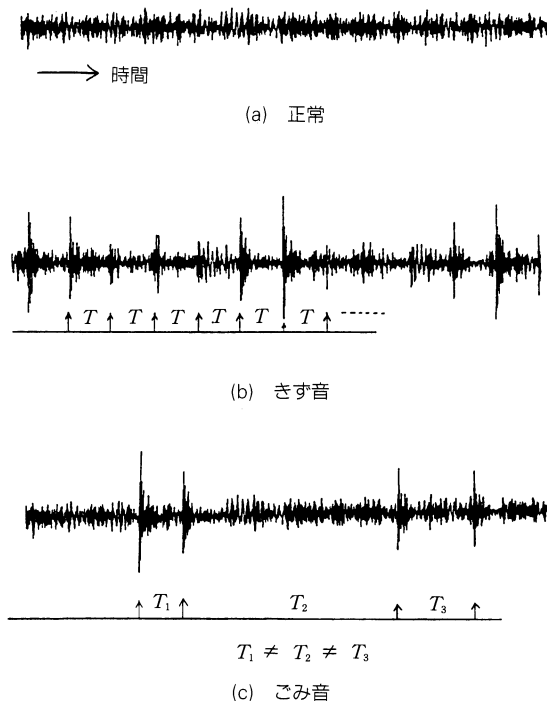


図7 きず音、ごみ音の波形

Fig.7 Waveform of noise due to flaw and contamination

なお、玉軸受で玉が玉にあるときは玉の転走面上に常にきずがあるとは限らないので、きず音が発生したりしなかったりする。しかし、この時でもきず音の発生中は必ず周期性がある。

粘度が高い潤滑油を使用した場合は、音がマスクされ、きず音のレベルがやや小さくなる傾向がある。

きず音が発生した場合は、通常軸受を交換する。

3.3.2 ごみ音

軸受の洗浄が不十分な場合、潤滑剤中に異物が混入している場合、あるいは回転中の軸受にごみが侵入した場合などに「チチチ」という音が発生する。

この音は、異物又はごみを転走面にかみ込んだときに生じるもので、ごみ音と呼ばれる。

ごみ音は音の大きさが一定せず、発生も不規則である(図7)。異物又はごみの影響は、概して軸受が小さくなるほど大きくなり小径、極小径の玉軸受で問題となることが多い。

ごみの混入は、ごみ音の発生はもちろん、時には軸受の転走面に圧こんを生じ、軸受の寿命を縮める原因にもなるため、注意する必要がある。

ごみ音が発生したときは、軸受内部を洗浄し、潤滑剤中の異物も取り除く。また、軸受の密封方法などを改良しないと根本的には解決しないこともある。

3.4 その他の振動・音響

以上の他にも軸受から発生する振動・音響はあるが、それらについてはあまり詳しいことはわかっていない。表1にはそれらの中から、いくつか取り上げ記入した。

接触シール付きの軸受でグリース潤滑時に、「ピー」という音が発生することがある。この音はシールの接触部の摩擦による自励振動と思われる。シール又はグリースの変更が対策としてとられている。

また、グリース潤滑時の回転初期などに「ピンピン」とか「ジュー」という音が聞えることがある。これらは、かみ込んだ潤滑剤を押しつぶしたり、潤滑剤中の気泡がつぶれたりするときに出る音と思われる。発生は不規則で、回転時間とともに消えたりする。音のレベルはそれ程大きくないので大きな問題となることはない。

軸受が関与する振動として次の三つを取り上げた。

一つ目は f_r 成分である。 f_r 成分は軸のアンバランスなどでも発生する回転周波数の振れであるが、内輪回転で使用される場合、軸受内輪の偏肉でも発生する。

二つ目は f_c 成分である。転動体の径の相互差があったり、転動体の配置が等間隔からずれたりすると、転

動体の公転周波数である f_c 成分の振れが生じる¹³⁾。

三つ目は $(f_r - 2f_c)$ 成分である。転動体の径の相互差があると、軸受を含めた軸のばね特性に方向性が生じる。この方向性は f_c で回転することにより $(f_r - 2f_c)$ の周波数の振れ回りが発生すると指摘されている¹³⁾。

これらの振動は、うねりによる振動などと同様にその周波数が回転速度とともに変化する。

うねりによる振動又は f_c 、 $(f_r - 2f_c)$ などの振動が、最近のHDDでクローズアップされているNRRO(非回転同期振れ)の成分となる。

4. 軸受の振動・音響の周波数

4.1 軌道輪の固有振動数

表1からわかるように、軸受から発生する振動・音響の周波数は、レース音をはじめとして大半が軸受軌道輪の固有振動数である。軌道輪の中でも、取付け条件の関係で、外輪の固有振動数が問題となることが多い。

外輪に関する固有振動はいくつかあり、外輪を剛体とするモードと弾性体とみなすモードに大別される³⁾。

その他にも、保持器をはじめとして軸受各部件の固有振動があるが、系統的に研究されたことはない。その理由は、形状・材質の種類が多いこと、振動モードが複雑なこと、また、これらの振動・音響が問題となったのが比較的最近であることなどのためと思われる。

4.1.1 剛体モード

剛体モードには、外輪慣性モーメント系角方向固有振動と外輪質量系固有振動がある。後者にはさらに軸方向と半径方向の二つがある。しかし、外輪質量系で半径方向の固有振動が問題になることはまれで、通常軸方向の振動のみが取り上げられるので、ここでも外輪質量系は軸方向とする。

前者は、外輪の直径方向に関する慣性モーメントと軸受の角方向(傾き方向)ばねで形成される固有振動で、図8のような振動モードである。

後者は、外輪の質量と軸受の軸方向ばねで形成される軸方向の固有振動で、図9のような振動モードである。

これらの固有振動の周波数を求めるときは、軸受のばね定数を求めるのに時間がかかるが、玉軸受で純アキシャル荷重のときには、簡単に計算できる式がある¹⁴⁾。

4.1.2 弾性体モード

軌道輪(外輪)を弾性体とみなす振動モードの代表例は、曲げ固有振動である。この振動モードには図10に示すように半径方向と軸方向の二つの固有振動があ

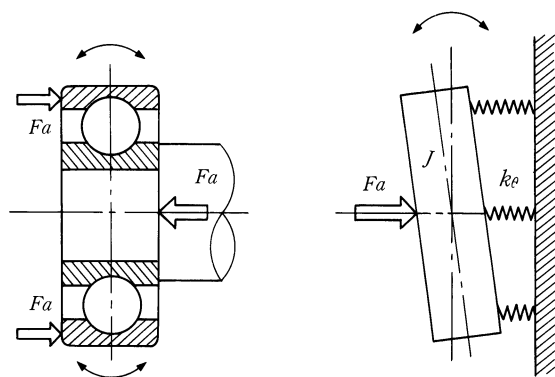


図8 外輪慣性モーメント系角方向固有振動
Fig. 8 Mode of angular vibration in inertia of outer ring-spring system

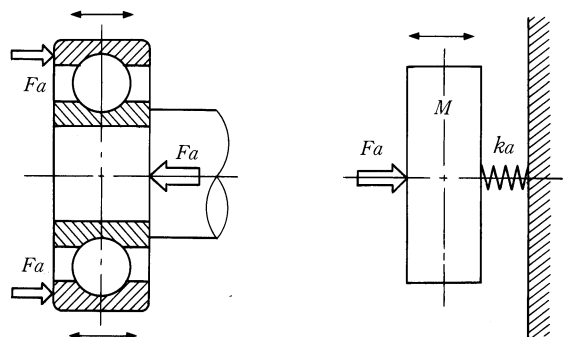
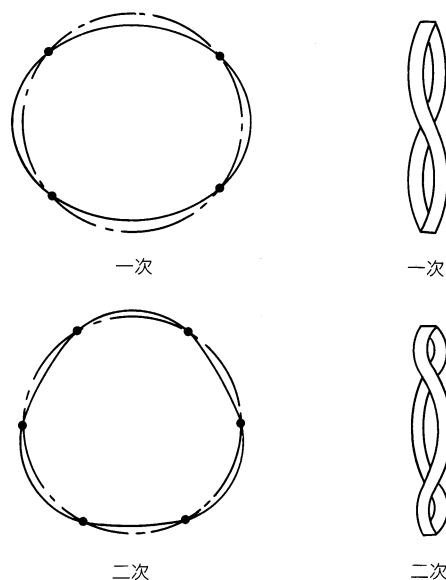


図9 外輪質量系軸方向固有振動
Fig. 9 Mode of axial vibration in mass of outer ring-spring system



(a) 半径方向モード (b) 軸方向モード

図10 軌道輪の曲げ固有振動
Fig. 10 Mode shapes for bearing rings (bending mode)

これらの値は軸受の内部諸元と回転速度で決まり、次式で表わされる³⁾。

$$f_c = \frac{1}{60} \cdot \frac{n_i}{2} \left(\frac{d_m - D_a \cdot \cos \alpha}{d_m} \right)$$

$$f_b = \frac{1}{60} \cdot \frac{-n_i}{2} \left(\frac{d_m}{D_a} - \frac{D_a \cdot \cos^2 \alpha}{d_m} \right)$$

る。これらは、面内振動、面外振動と呼ばれることもある。

この振動モードも、通常は外輪が問題となることが多い。玉軸受の外輪の曲げ固有振動数が計算できる式がいくつかある^{15) 16) 17)}。

ただし、これらの計算式による値は、軸受がフリーの場合の固有振動数であり、実際の固有振動数は取付け回りの影響を受けて変化する。軸受が機械に組み込まれたときには、軸受単体の固有振動数ではなく、軸受回りを含めた振動系の固有振動数として求めるべきである。しかし、それは計算が複雑であり、通常それほど正確な値を必要としないので、上記の計算式を用いることが多い。

4.2 転動体の回転周波数

表1に示すように、うねりによる振動の周波数や、きず音の発生周期を求めたりするときに、転動体の公転周波数 (f_c) や自転周波数 (f_b) の値が必要となる。

ここで、記号は次の通りである。

- f_c : 転動体の公転周波数 (Hz)
- f_b : 転動体の自転周波数 (Hz)
- n_i : 内輪の回転速度 (rpm)
- D_a : 転動体の直径 (mm)
- d_m : 転動体のPCD (mm)
- α : 接触角 (°)

5. あとがき

転がり軸受の振動・音響について概説したが、これらの中には発生機構が完全には解明されていないために十分な防止ができないものがある。また、発生機構が分っていても、加工技術の限界からある程度発生してしまうものもある。

しかし、大きさがはなはだしいときには、どの振動・音響についても、ここに述べたような対策によってある程度抑制することはできる。

転がり軸受から発生する振動・音響は、現在の加工技術のレベルから考えると、他の機械部品と比べかなり小さいと言える。それでもなおかつ低減要求があるということは、軸受が回転の支持部品であり、機械の性能に与える影響が大きいと思われる。また、構造上軸受から発生した振動・音響が機械の他の部品に伝達され、そこで拡大される場合があるからであろう。ここでは紙面の関係で、機械に軸受を組み込んだ場合については割愛した。今後、機械としての低振動、低騒音をさらに進めていくには、軸受単体だけでなく、取付け回りを含めて構造体として取り扱っていかなければならないと思われる。

参考文献

- 1) 野田, “転がり軸受の騒音” 油圧と空気圧, 17-7 (1986) 507-513.
- 2) 五十嵐, 野田, “玉軸受の音響” NSK Bearing J., 635 (1974) 8-17.
- 3) 上野ほか, “転がり軸受工学” (1975) 139, 101, 養賢堂.
- 4) 小林, “転がり軸受の音響に及ぼすグリースの影響” 潤滑, 19-4 (1974) 306-320.
- 5) 中井, 横井ほか, “円筒ころ軸受のきしり音について” 日本機械学会論文集 C, 56-525 (1990) 1244-1252, 1253-1259.
- 6) 新製品紹介, “電動機用きしり音対策円筒ころ軸受NU300Uシリーズ” NSK Bearing J., 623 (1969) 62.
- 7) 藤井, “コンピュータ磁気ディスクスピンドル用軸受” NSK Bearing J., 644 (1984) 14-23.
- 8) 田村ほか, “玉軸受の静的回転精度について” 日本機械学会論文集 C, 52-475 (1986) 851-858.
- 9) O. GUSTAFSSON, “Study of the Vibration Characteristics of Bearings” SKF Report, AL 62 L 005 (1962).
- 10) F. P. WARDLE, “Vibration Forces Produced by Waviness of the Rolling Surfaces of Thrust Loaded Ball Bearings” Proc. IME, 202-C5 (1988) 305-312, 313-319.
- 11) E. YHLAND, “A Linear Theory of Vibrations Caused by Ball Bearings with Form Errors Operating at Moderate Speed” Trans. ASME, J. Tribol., 114-APRIL (1992) 348-359.
- 12) 小林, 橋本, 後藤, “転がり軸受の音と振動に関する諸問題(1)” 機械の研究, 20-1 (1988) 19-24.
- 13) 山本, “玉軸受の寸法誤差に基づく危険速度について” 日本機械学会論文集, 20-99 (1954) 750-755, 755-760.
- 14) NSKレポートNo.457 “軸受軌道輪の固有振動数(剛体モード)” 機械の研究, 47-4 (1995) 中付 1 (50).
- 15) 谷口, 遠藤, “円環の振動数計算法” 機械の研究, 24-2 (1972) 271-275.
- 16) NSKレポートNo.337 “軸受軌道輪単体の固有振動数(その1)” 機械の研究, 37-4 (1985) 中付 1 (52).
- 17) NSKレポートNo.338 “軸受軌道輪単体の固有振動数(その2)” 機械の研究, 37-5 (1985) 中付 1 (56).