

転がり軸受の基礎(3)

- 内容
- ・定格荷重と疲労寿命
 - ・軸受荷重

東京理科大学
野口 昭治

I : 定格荷重と疲労寿命

1. 転がり軸受の寿命

- (1) 疲労寿命 : 材料の繰返し応力による転がり疲れ
→ 剥離
- (2) 潤滑寿命 : 潤滑剤の劣化による潤滑不良
→ 焼付き
- (3) 音響寿命 : 回転音の増大
→ 音・振動上昇
- (4) 摩耗寿命 : 軸受内部、内径、外径摩耗
→ クリープ
- (5) 精度寿命 : 回転精度劣化 (性能劣化)
→ 工作機械用軸受等に見られる

これらにおいて、(1)は不可避、(2)はグリース潤滑では不可避、(3)～(5)は回避可能

2.基本定格寿命と基本動定格荷重

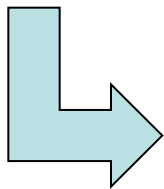
基本定格寿命: 同じ型番の軸受を同じ条件で個々に回転させたとき、その90%が転がり疲れによるはく離を生ずることなく、回転できる総回転数

基本動定格荷重: 転がり軸受の動的な負荷能力を表す指標で、100万回転の基本定格寿命を与える一定荷重

ラジアル荷重: C_r アキシアル荷重: C_a

基本動定格荷重は、軸受メーカーのカタログに必ず記載されている。

基本定格寿命の 計算方法(1): 軸受1個の場合



寿命はばらつくので、
統計学的な処理
が必要。

90%信頼寿命で
あるが、 L_{10} と
表記されている

L_{10} : 総回転数

L_{10h} : 総回転時間

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

ここで、

L_{10} : 基本定格寿命 10^6 回転

L_{10h} : 基本定格寿命 h (時間)

C : 基本動定格荷重 N {kgf}

C_r : ラジアル軸受

C_a : スラスト軸受

P : 動等価荷重 N {kgf}

P_r : ラジアル軸受

P_a : スラスト軸受

n : 回転速度 min^{-1}

p : 玉軸受 $p=3$

ころ軸受 $p=10/3$

基本定格寿命の計算方法(2):

複数の軸受が使われている場合

複数の軸受を組み込んだ機械において、どれか1つの軸受が疲労によって破損するまでの寿命を軸受全体の総合寿命と考える

$$L = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1^e} + \frac{1}{L_2^e} + \dots + \frac{1}{L_n^e}\right)^{1/e}}$$

ここで、

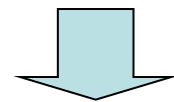
L : 軸受全体としての総合基本定格寿命 h

$L_1, L_2 \dots L_n$: 個々の軸受1, 2...

n の基本定格寿命 h

e : 玉軸受..... $e = 10/9$

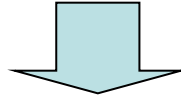
ころ軸受..... $e = 9/8$



単体として、最も早く壊れる軸受の寿命ではない
(統計学的な扱いが必要)

3. 定格寿命の補正

機械における軸受の使用条件、軸受に求められる信頼性等によって、定格寿命をより詳しく推定する必要がある。



定格寿命の補正式が提案されている

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10}$$

ここで、

L_{na} : 補正定格寿命 10^6 回転

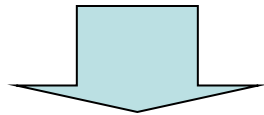
a_1 : 信頼度係数

a_2 : 軸受特性係数

a_3 : 使用条件係数

(1) 信頼度係数 a_1

寿命の信頼性に関する係数。一般的な機械であれば、90%の信頼性で十分であるが、ジェットエンジン等人命に関わる用途においては、高い信頼性が必要となる。



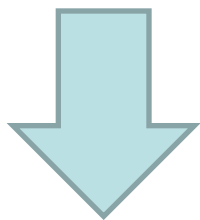
信頼度 %	L_n	信頼度係数 a_1
90	L_{10}	1.00
95	L_5	0.62
96	L_4	0.53
97	L_3	0.44
98	L_2	0.33
99	L_1	0.21

この値は、
統計学的に
決まっている
数値である

(2) 軸受特性係数 a_2

通常は1

軸受材料や製造工程等が特殊である場合に
1以外となる場合がある。



寸法安定化処理による軸受特性の変化 (NTNの場合)
・熱処理温度により表面硬さが低下し、寿命に影響
するので、1より小さい値となる。

記号	最高使用温度 $^{\circ}\text{C}$	軸受特性係数 a_2
TS2	160	1.0
TS3	200	0.73
TS4	250	0.48

(3) 使用条件係数 a_3

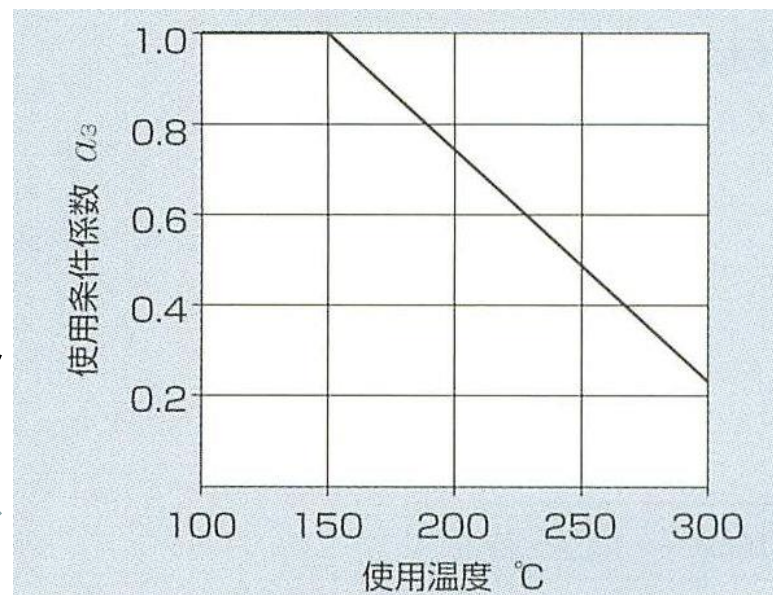
潤滑条件、回転速度、運転温度等軸受の使用条件に依存する係数(一般的な条件では、1)

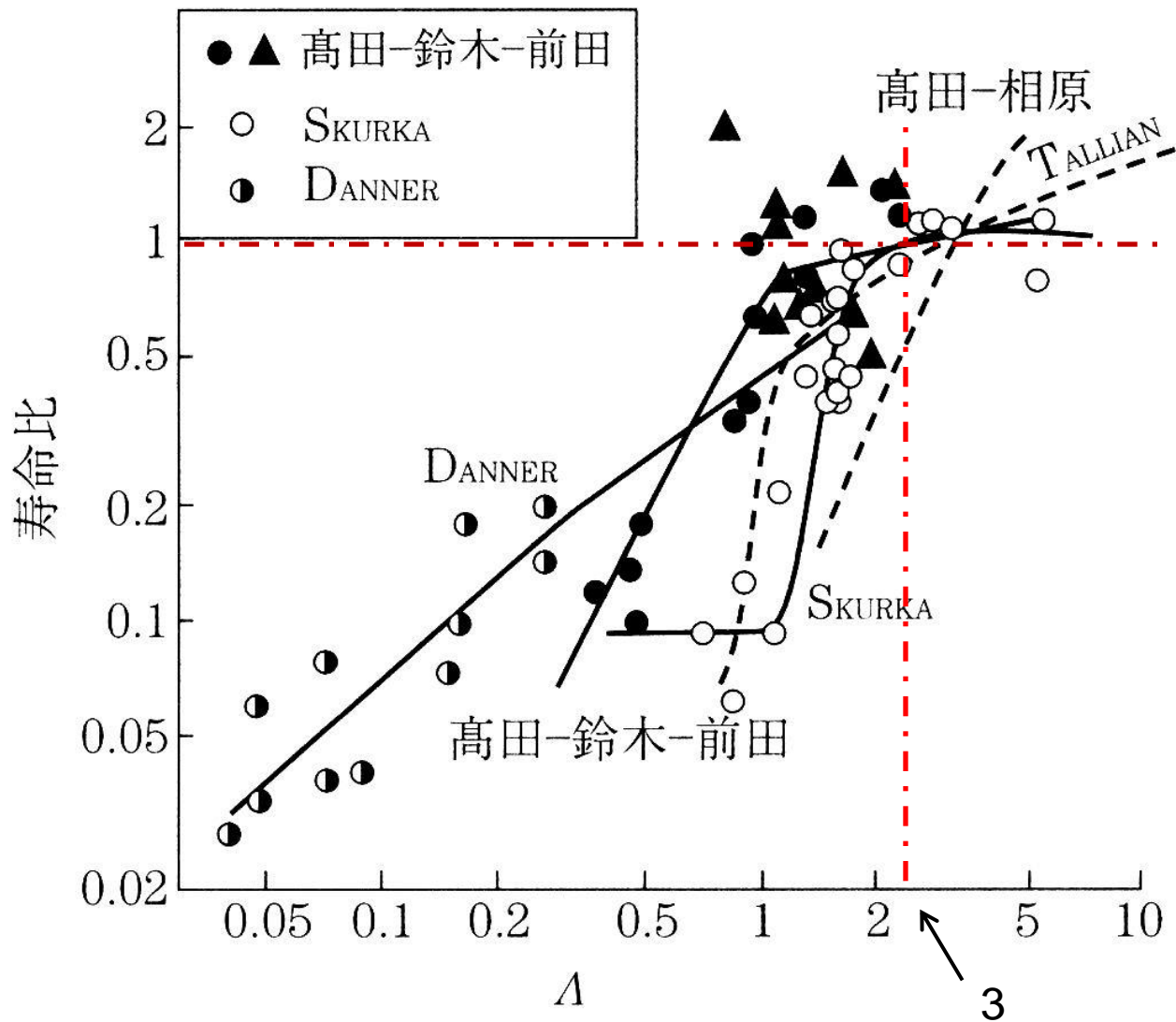
$a_3 > 1$ となる場合

- ・潤滑油が非常にクリーンで、 Λ が常に3以上確保されている

$a_3 < 1$ となる場合

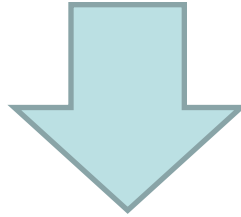
- ・潤滑油粘度が非常に小さい場合
- ・回転速度(周速度)が高い場合
- ・潤滑油に水分や異物が混入した場合
- ・取付誤差が大きい場合
- ・使用温度が高い場合





油膜パラメータ λ と寿命比

しかし、 a_2 、 a_3 とも定性的で、具体的な使用条件による係数の値が決まっていないことが多い



ユーザーでは決められないので、
軸受メーカーへ相談するのがベスト

また、疲労寿命は弾性変形の範囲内の話であって、大きな荷重(0.5C以上が目安)では、計算式が適応できないことがある。小型玉軸受では、基本動定格荷重 > 基本静定各荷重であることが多いが、基本静定各荷重より大きな荷重を加えることはできない。

4. 機械の一般的な設計寿命

軸受が組み込まれる機械の設計寿命に合わせて、軸受を選定することが重要

製品よりも長すぎる寿命は、過剰スペック(コスト、サイズダウンが可能)

使用区分	使用機械と必要寿命時間 L_{10h} × 10 ³ 時間				
	~4	4~12	12~30	30~60	60~
短時間又は、ときどき使用される機械	家庭用電気機器 電動工具	農業機械 事務機械			
短時間又は、ときどきしか使用されないが、確実な運転を必要とする機械	医療機器 計器	家庭用エアコン 建設機械 エレベータ クレーン	クレーン (シーブ)		
常時ではないが、長時間運転される機械	乗用車 二輪車	小形モータ バス・トラック 一般歯車装置 木工機械	工作機械スピンドル 工場用汎用モータ クラッシャ 振動スクリーン	重要な歯車装置 ゴム・プラスチック用 カレンダーロール 輪転印刷機	
常時1日8時間以上運転される機械		圧延機ロールネック エスカレータ コンベヤ 遠心分離機	客車・貨車 (車軸) 空調設備 大形モータ コンプレッサ・ポンプ	機関車 (車軸) トラクションモータ 鉱山ホイスト プレスフライホイール	パルプ・製紙機械 船用推進装置
1日24時間運転され事故による停止が許されない機械					水道設備 鉱山排水・換気設備 発電所設備

(この表は参考値)

5. 基本静定格荷重 (C_{0r} 、 C_{0a})

基本静定格荷重とは、最大応力を受けている転動体と軌道の接触部の中央において、次の計算上の接触応力を生じさせるような静荷重をいう。

自動調心玉軸受	4 600 MP _a {469 kgf/mm ² }
その他の玉軸受	4 200 MP _a {428 kgf/mm ² }
ころ軸受	4 000 MP _a {408 kgf/mm ² }

この接触応力を受けている接触部において、転動体の永久変形量と軌道の永久変形量との和は、転動体の直径のほぼ0.0001倍となる。基本静定格荷重 C_0 の値は、それぞれの軸受について、ラジアル軸受では C_{0r} 、スラスト軸受では C_{0a} として軸受寸法表に記載されている。

玉軸受の基本動定格荷重と静定各荷重 (NSK カタログ)

サイズが小さい方がCとC₀との差が大きくなっている。

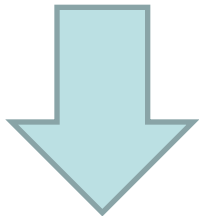
主要寸法 (mm)						基本定格荷重 (N) {kgf}				
<i>d</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>B</i> ₁	<i>r</i> ⁽¹⁾ (最小)	<i>r</i> ₁ ⁽¹⁾ (最小)	<i>C</i> _r	<i>C</i> _{0r}	<i>C</i> _r	<i>C</i> _{0r}	
5	8	2	—	0.1	—	310	120	31	12	
	8	—	2.5	—	0.1	278	131	28	13	
	9	2.5	3	0.15	0.15	430	168	44	17	
	10	3	4	0.15	0.15	430	168	44	17	
	11	—	4	—	0.15	715	276	73	28	
	11	3	5	0.15	0.15	715	281	73	29	
	13	4	4	0.2	0.2	1 080	430	110	44	
	14	5	5	0.2	0.2	1 330	505	135	52	
	16	5	5	0.3	0.3	1 730	670	177	68	
	19	6	6	0.3	0.3	2 340	885	238	90	
	6	10	2.5	3	0.15	0.1	495	218	51	22
		12	3	4	0.2	0.15	715	292	73	30
13		3.5	5	0.15	0.15	1 080	440	110	45	
15		5	5	0.2	0.2	1 730	670	177	68	
17		6	6	0.3	0.3	2 260	835	231	85	
19		6	6	0.3	0.3	2 340	885	238	90	
22		7	7	0.3	0.3	3 300	1 370	335	140	
7		11	2.5	3	0.15	0.1	455	201	47	21
	13	3	4	0.2	0.15	540	276	55	28	
	14	3.5	5	0.15	0.15	1 170	510	120	52	
	17	5	5	0.3	0.3	1 610	710	164	73	
	19	6	6	0.3	0.3	2 340	885	238	90	
	22	7	7	0.3	0.3	3 300	1 370	335	140	
	26	9	9	0.3	0.3	4 550	1 970	465	201	
8	12	2.5	3.5	0.15	0.1	545	274	56	28	
	14	3.5	4	0.2	0.15	820	385	83	39	
	16	4	5	0.2	0.2	1 610	710	164	73	
	19	6	6	0.3	0.3	2 240	910	228	93	
	22	7	7	0.3	0.3	3 300	1 370	335	140	
608	24	8	8	0.3	0.3	3 350	1 430	340	146	
	28	9	9	0.3	0.3	4 550	1 970	465	201	
	9	17	4	5	0.2	0.2	1 330	665	136	68
20		6	6	0.3	0.3	1 720	840	175	86	
24		7	7	0.3	0.3	3 350	1 430	340	146	
26		8	8	(0.6)	(0.6)	4 550	1 970	465	201	
30		10	10	0.6	0.6	5 100	2 390	520	244	

主要寸法 (mm)				基本定格荷重 (N) {kgf}			
<i>d</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>r</i> (最小)	<i>C</i> _r	<i>C</i> _{0r}	<i>C</i> _r	<i>C</i> _{0r}
50	65	7	0.3	6 400	6 200	655	635
	72	12	0.6	14 500	11 700	1 480	1 200
	80	10	0.6	15 400	12 400	1 570	1 260
	80	16	1	21 800	16 600	2 220	1 700
	90	20	1.1	35 000	23 200	3 600	2 370
55	110	27	2	62 000	38 500	6 300	3 900
	72	9	0.3	8 800	8 500	900	865
	80	13	1	16 000	13 300	1 630	1 350
	90	11	0.6	19 400	16 300	1 980	1 660
	90	18	1.1	28 300	21 200	2 880	2 170
60	100	21	1.5	43 500	29 300	4 450	2 980
	120	29	2	71 500	44 500	7 300	4 550
	78	10	0.3	11 500	10 900	1 170	1 120
	85	13	1	19 400	16 300	1 980	1 660
	95	11	0.6	20 000	17 500	2 040	1 780
65	95	18	1.1	29 500	23 200	3 000	2 370
	110	22	1.5	52 500	36 000	5 350	3 700
	130	31	2.1	82 000	52 000	8 350	5 300
	85	10	0.6	11 900	12 100	1 220	1 230
	90	13	1	17 400	16 100	1 770	1 640
70	100	11	0.6	20 500	18 700	2 090	1 910
	100	18	1.1	30 500	25 200	3 100	2 570
	120	23	1.5	57 500	40 000	5 850	4 100
	140	33	2.1	92 500	60 000	9 450	6 100
	90	10	0.6	12 100	12 700	1 230	1 300
75	100	16	1	23 700	21 200	2 420	2 160
	110	13	0.6	26 800	23 600	2 730	2 410
	110	20	1.1	38 000	31 000	3 900	3 150
	125	24	1.5	62 000	44 000	6 350	4 500
	150	35	2.1	104 000	68 000	10 600	6 950
80	95	10	0.6	12 500	13 900	1 280	1 410
	105	16	1	24 400	22 600	2 480	2 300
	115	13	0.6	27 600	25 300	2 820	2 580
	115	20	1.1	39 500	33 500	4 050	3 400
	130	25	1.5	66 000	49 500	6 750	5 050
	160	37	2.1	113 000	77 000	11 600	7 850

6.許容静等価荷重

使われる機械の機能要求により、静的荷重にも目安がある

$$S_0 = C_0 / P_0$$



S_0 : 安全率
 C_0 : 基本静定格荷重
 P_0 : 静等価荷重

運 転 条 件	玉軸受	ころ軸受
高い回転精度を要する場合	2	3
普通の回転精度を要する場合(汎用)	1	1.5
多少の回転精度の劣化を許容する場合(低速回転, 重荷重用など)	0.5	1

- 備考
1. スラスト自動調心ころ軸受では S_0 の下限値を4に採る。
 2. シェル形針状ころ軸受では S_0 の下限値を3に採る。
 3. 振動・衝撃荷重がかかる場合は、衝撃による荷重係数を加味した P_0 を求める。
 4. 深溝玉軸受、アンギュラ玉軸受に大きなアキシアル荷重が作用すると接触だ円が軌道面を乗り越えることがあり、別途検討が必要である。

Ⅱ.軸受荷重

1.軸系に作用する荷重

(1)使用環境を考慮した係数

静的な荷重に、環境係数を掛けて実荷重とする
(安全率を高める)

歯車係数 f_s

歯車の種類	f_s
精密歯車 (ピッチ誤差, 歯形誤差ともに 0.02 mm 以下)	1.05 ~ 1.1
普通歯車 (ピッチ誤差, 歯形誤差ともに 0.02~0.1 mm のもの)	1.1 ~ 1.3

機械係数 f_d

機械の種類	例	f_d
衝撃のない回転機械	電動機, ターボプロワ	1.0 ~ 1.2
往復部分をもつ機械	内燃機関, 空気圧縮機	1.2 ~ 1.5
激しい衝撃を伴う機械	圧延機, クラッシャ	1.5 ~ 3.0

チェーン・ベルト係数 f_b

チェーン・ベルトの種類	f_b
チェーン (単列)	1.2~1.5
Vベルト	1.5~2.0
タイミングベルト	1.1~1.3
平ベルト (テンショプーリ付き)	2.5~3.0
平ベルト	3.0~4.0

$$K = f_z \times f_d \times f_b \times K_c$$

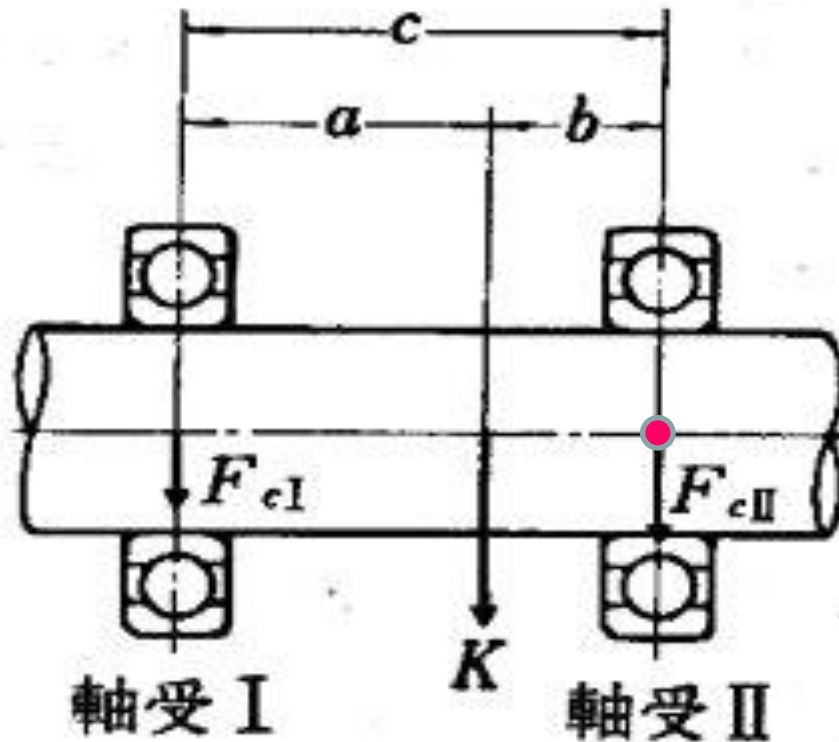
K : 軸系に作用する実荷重

K_c : 理論的荷重 (計算値)

2. 軸受への荷重配分

(1) 1本の軸を軸受2つで支持する場合

モーメントの釣り合いを考えて軸受に作用するラジアル荷重を計算する。



① 軸受 II 回りのモーメントの釣り合い

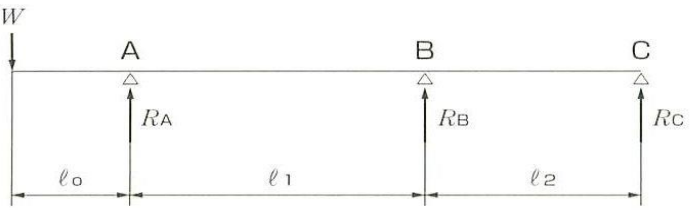
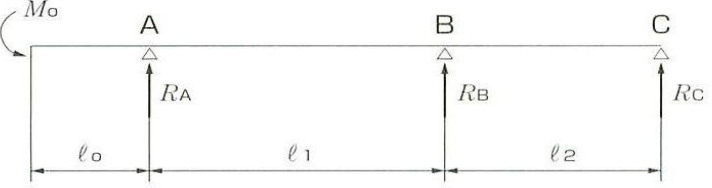
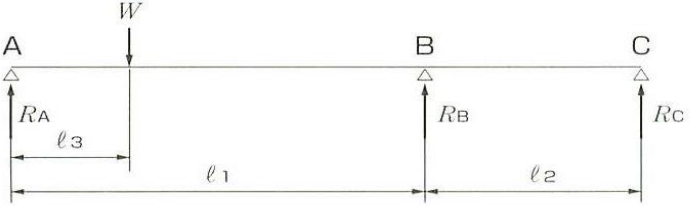
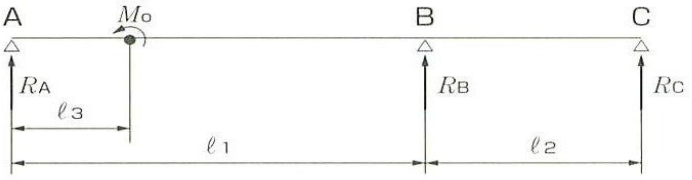
$$F_{c1} \times c = K \times b$$

$$F_{c1} = K \times b / c$$

② $K = F_{c1} + F_{c2}$

$$F_{c2} = K \times a / c$$

(2) 1本の軸を3つの軸受で支持する場合

荷重及びモーメントの方向	軸受荷重
	$R_B = - \frac{l_0 (2 l_2 + l_1)}{2 l_1 l_2} W$ $R_A = \frac{(l_1 + l_2 + l_0) W - l_2 R_B}{l_1 + l_2}$ $R_C = - \frac{l_0 W + l_1 R_B}{l_1 + l_2}$
	$R_B = - \frac{(2 l_2 + l_1) M_0}{2 l_1 l_2}$ $R_A = \frac{M_0 - l_2 R_B}{l_1 + l_2}$ $R_C = - \frac{M_0 + l_1 R_B}{l_1 + l_2}$
	$R_B = \frac{l_3 (l_1^2 + 2 l_1 l_2 - l_3^2) W}{2 l_1^2 l_2}$ $R_A = \frac{(l_1 + l_2 - l_3) W - l_2 R_B}{l_1 + l_2}$ $R_C = \frac{l_3 W - l_1 R_B}{l_1 + l_2}$
	$R_B = \frac{(- l_1^2 - 2 l_1 l_2 + 3 l_3^2) M_0}{2 l_1^2 l_2}$ $R_A = \frac{M_0 - l_2 R_B}{l_1 + l_2}$ $R_C = - \frac{M_0 + l_1 R_B}{l_1 + l_2}$

3. 等価荷重

ラジアル荷重とアキシアル荷重が同時に作用した場合、両者を合成して、1つのラジアル荷重に置き換える。

$$P = X F_r + Y F_a$$

P: 等価荷重

X: ラジアル荷重係数、 F_r : ラジアル荷重

Y: アキシアル荷重係数、 F_a : アキシアル荷重

XとYは、ラジアル荷重とアキシアル荷重の
大小関係で決まる(カタログに記載)

玉軸受における動等価荷重の求め方

動等価荷重

$$P = XF_r + YF_a$$

$\frac{f_0 F_a}{C_{Or}}$	e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y
0.172	0.19	1	0	0.56	2.30
0.345	0.22	1	0	0.56	1.99
0.689	0.26	1	0	0.56	1.71
1.03	0.28	1	0	0.56	1.55
1.38	0.30	1	0	0.56	1.45
2.07	0.34	1	0	0.56	1.31
3.45	0.38	1	0	0.56	1.15
5.17	0.42	1	0	0.56	1.04
6.89	0.44	1	0	0.56	1.00

静等価荷重

$$P_0 = 0.6F_r + 0.5F_a$$

ただし、 $F_r > 0.6F_r + 0.5F_a$ のときは、 $P_0 = F_r$ とする。

f_0 : 最大接触応力で
決まる係数

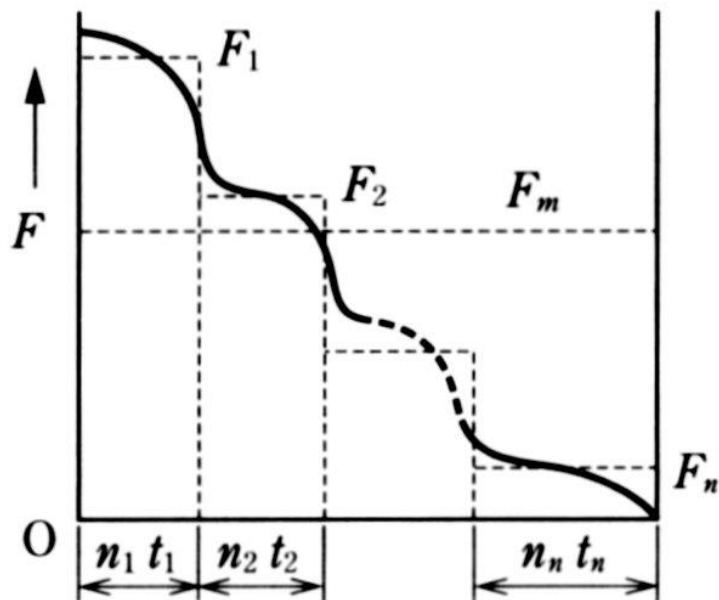
C_{Or} : 基本静定格荷重

F_a : アキシアル荷重

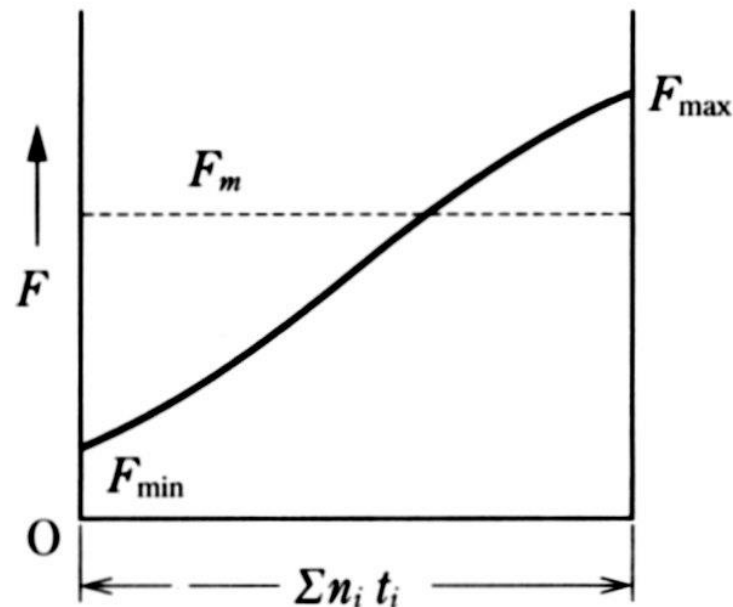
e : F_a/F_r の限界値□□

* F_a が小さい場合
には無視できるが、
 e より比率が高い
場合には、 F_a の方
が支配的になる

荷重が変動する場合の平均荷重の求め方



(a) 段階的な変動荷重



(b) 単調な変動荷重

$$F_m = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (F_i^p n_i t_i)}{\sum_{i=1}^n (n_i t_i)} \right]^{1/p}$$

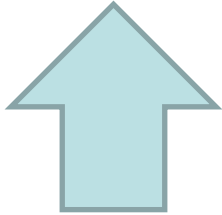
$$F_m = (F_{\min} + 2F_{\max})/3$$

玉軸受の場合 $p = 3$, ころ軸受の場合 $p = 10/3$.

4.許容アキシアル荷重

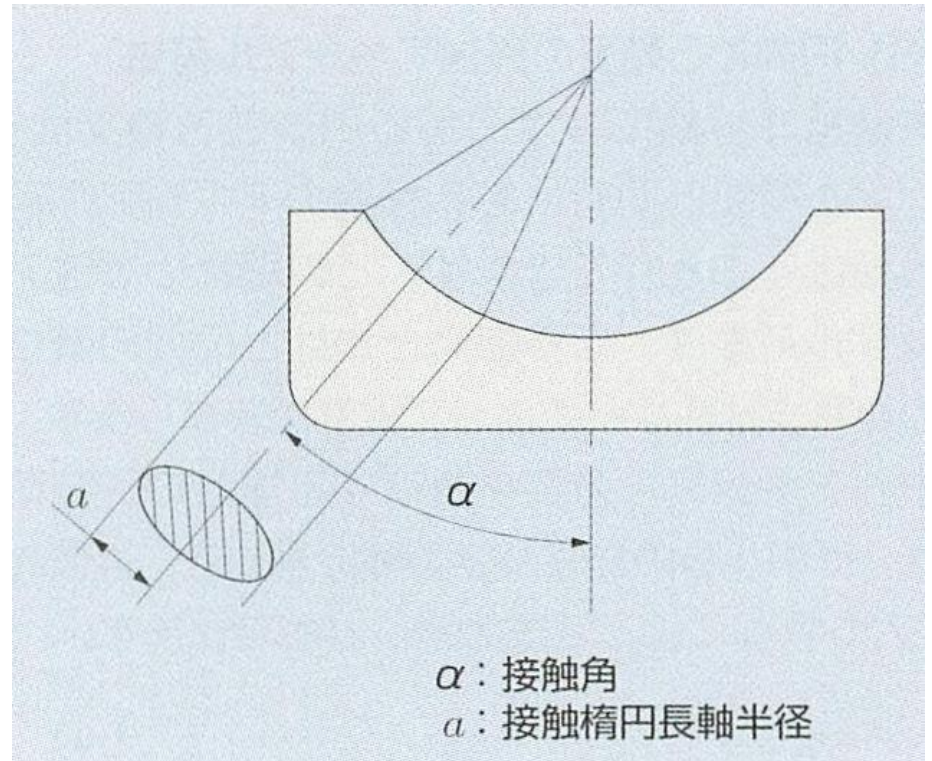
カタログには記載がない

しかし、ラジアル軸受にはアキシアル荷重の限界がある



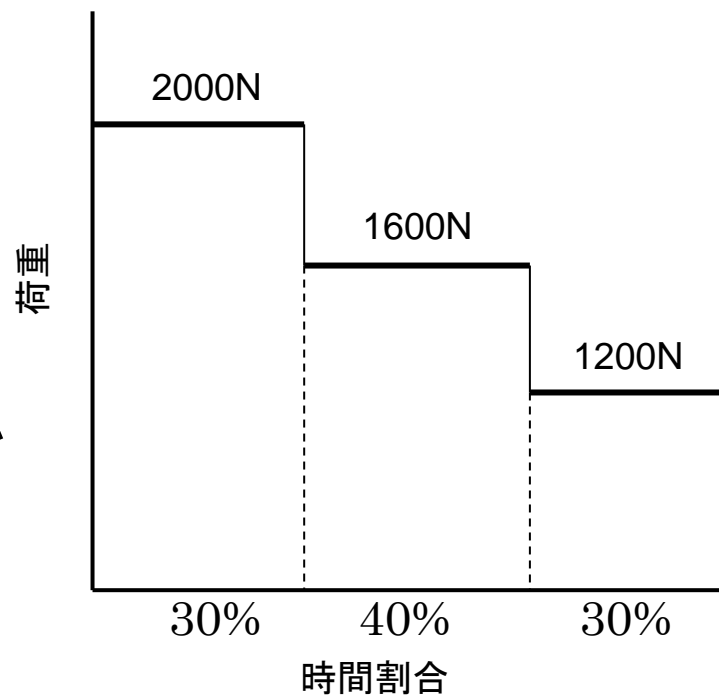
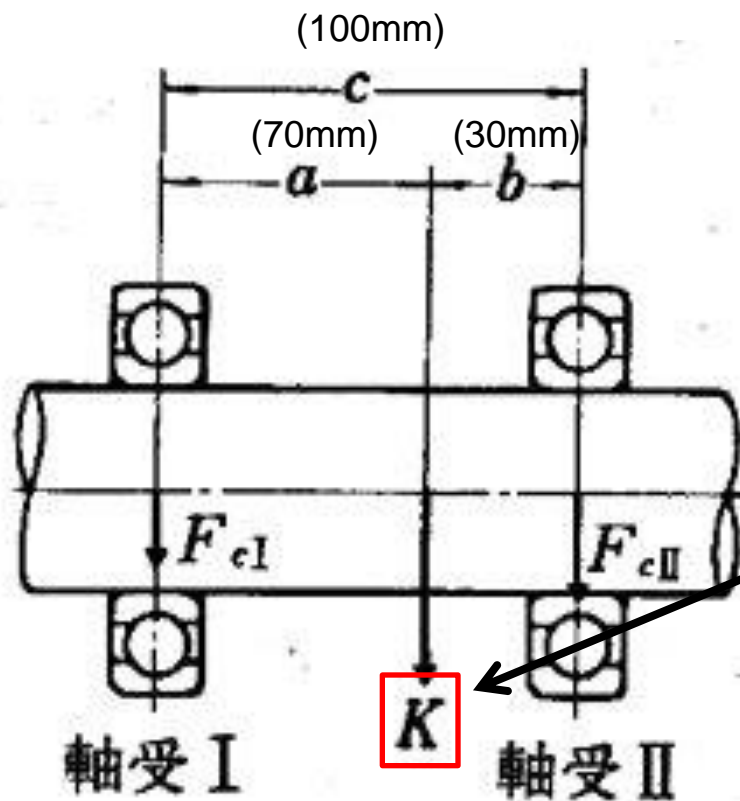
玉軸受では、接触楕円が確保できないと正常な回転ができない

接触楕円が溝の中に確保されるまでが、限界



疲労寿命の計算例1

図1のように軸受Iから $a=70\text{mm}$ 、軸受IIから $b=30\text{mm}$ の位置Kに図2に示すパターンの荷重が加わって、 1500rpm で回転している。軸受Iを深溝玉軸受6006としたときの寿命を求めよ。ただし、寿命の信頼度は95%とする。



① Kに加わる平均荷重は、

$$F_m = (2000^3 \times 0.3 + 1600^3 \times 0.4 + 1200^3 \times 0.3)^{1/3} \\ = 1657.9 \text{ N}$$

② 軸受 I に加わるラジアル荷重は、

$$F_1 \times c = K \times b \text{ より } F_1 = 1657.9 \times 30 / (70 + 30) \\ = 497.4 \text{ N}$$

③ 軸受 I は6006なので、

基本動定格荷重は、13200 N

定格寿命の計算は、

$$L_n = (C/P)^3 = (13200/497.4)^3 = 18689.79 \\ (\times 10^6 \text{ rev})$$

回転速度1500rpmなので時間に換算して、

$$L_t = L_n / 60 / 1500 = 207664.33 \text{ (hr)}$$

④ 信頼度95%なので、係数0.62を掛ける

$$L_{t95} = 0.62 \times L_t = 128751.88 \text{ (hr) よって、} \\ 128751 \text{ 時間 (約14.7年)}$$

疲労寿命の計算例2

深溝玉軸受6308にラジアル荷重3000Nとアキシアル荷重2000Nが同時に作用している。回転速度 500min^{-1} で回転させた時の定格寿命を求めよ。ただし、荷重係数1.2とする。

動等価荷重

$$P = XF_r + YF_a$$

$\frac{f_0 F_a}{C_{or}}$	e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y
0.172	0.19	1	0	0.56	2.30
0.345	0.22	1	0	0.56	1.99
0.689	0.26	1	0	0.56	1.71
1.03	0.28	1	0	0.56	1.55
1.38	0.30	1	0	0.56	1.45
2.07	0.34	1	0	0.56	1.31
3.45	0.38	1	0	0.56	1.15
5.17	0.42	1	0	0.56	1.04
6.89	0.44	1	0	0.56	1.00

6308

$C_0 : 40500 \text{ N}$

$C_{or} : 24000 \text{ N}$

静等価荷重

$$P_0 = 0.6F_r + 0.5F_a$$

ただし、 $F_r > 0.6F_r + 0.5F_a$ のときは、 $P_0 = F_r$ とする。

① 等価ラジアル荷重を求める

6308の表と荷重条件から

$$f_0 Fa / C_{or} = 13.2 \times 2000 / 24000 = 1.1$$

資料表からeを比例配分して求める

$$e = 0.28 + (0.3 - 0.28) \times (1.1 - 1.03) / (1.38 - 1.03) = 0.284$$

$Fa / Fr = 2000 / 3000 = 0.67$ より、 $Fa / Fr > e$ となるので、

$X = 0.56$ 、Yを比例配分して

$$Y = 1.55 - (1.55 - 1.45) \times (1.1 - 1.03) / (1.38 - 1.03) = 1.53$$

$$P = XFr + YFa = 0.56 \times 3000 + 1.53 \times 2000 = 4740 \text{ N}$$

② 荷重係数を考慮する

荷重係数が1.2なので、Pを1.2倍する必要がある。

$$P' = 1.2P = 5688 \text{ N}$$

③ 定格寿命を求める

定格寿命なので信頼度は90%である。回転速度は 500 min^{-1} なので、

$$\begin{aligned} L_{10} &= (10^6 / 60n) (C_r / P')^3 = (10^6 / 60 \cdot 500) (40500 / 5688)^3 \\ &= 12032.75 \text{ hr} \end{aligned}$$

よって、12032.7時間(切り下げる)