D1 Components

多列玉軸受の動等価荷重X、Y係数

Dynamic Equivalent Load Factors, X and Y in Multi-row Ball Bearing

キーワード 多列軸受・動等価荷重・等価荷重係数・ラジアル軸受
スラスト軸受

軸受事業部
渡辺 孝一 Kouichi Watanabe

多列玉軸受の動等価荷重X、Y係数

要　旨

転がり軸受の寿命計算には動定格荷重と動等価荷重が必要になります。どれだけの列数の軸受でも動定格荷重は容易に計算できますが、動等価荷重については、単列と複列軸受については規格化されているものの、3列以上の軸受については、接触角別に、組みあわせ列数別に、整理されたものは、部分的に公表されているだけです。ここでは、単列、複列軸受の動等価荷重係数X、Yを構成した経過と類似の方法で、3列以上の軸受の動等価荷重係数X、Yを求める計算式を構成してみました。

Abstract

Calculation of a rolling bearing's life requires dynamic load rating and dynamic equivalent load. The dynamic load rating can be easily calculated for bearings with any number of rows. However, the calculation of the dynamic equivalent load is standardized for only single-row and double-row bearings. For three or more rows bearings, the organized calculation method according to contact angle or number of combination rows has not been published enough yet.

This article shows the process of developing a formula to calculate the dynamic equivalent load factors, X and Y for the bearings with three or more rows, using the similar method of developing the formula for the dynamic equivalent load factors, X and Y for single-row and double-row bearings.

1. はじめに

転がり軸受の寿命計算式は、JISなどの公共規格に記載されているように、機械部品の中では比較的計算しやすい形で表わされていますが、この計算を行なうときには、外力荷重を動等価荷重に置き換える計算をしなければいけません。

この計算方法は、単列と複列軸受については、ISOやJISなどの公共規格に書かれていますが、3列以上の軸受については記載されてはいません。一方で、最近の機械のコンパクト化などによる外力荷重増加に伴い、軸受を3例以上の多列で使う応用例は増えてきています。このため、軸受ユーザーにおいて多列軸受の寿命計算を簡単に行なうことができるようにすることが必要になってきています。

ここでは、3列、4列などの多列軸受に、ラジアル、アキシャルの合成荷重が負荷されたときの動等価荷重計算に使われる動等価荷重係数X、Yを、複列軸受で算出された方法を推定し、それと同様の方法で誘導してみることにします。

2. ラジアル軸受の動等価荷重係数X、Y

1）単列、複列の動等価荷重線図

軸受の転がり疲れ寿命を評価するときは、軸受に負荷される荷重を、大きさと方向が一定の荷重に置き換えて評価されます。これを動等価ラジアル荷重Prと呼び、軸受に負荷されるラジアル荷重Frおよび、アキシャル荷重Faを用いて、

$$Pr=X\cdot Fr+Y\cdot Fa\cdots\cdots(1)$$

と表わされます。これと軸受の動定格荷重Crとの比Cr/Prにより、軸受寿命が算出されます。XとYは動等価荷重係数と呼ばれています。どんなFrとFaの組みあわせであろうと、Cr/Prが同一であれば、軸受寿命は同一値になるという考え方から誘導されたもので、単列および、複列軸受については公共規格で記載されています。

多列軸受に適用できる係数X、Yを決定するには、単列および、複列軸受で算出されたときの計算原理に戻る必要があるので、ここから解説することにします。

図1は、単列軸受および、複列軸受の動等価荷重線図と呼ばれているもので、どんなFrとFaの組みあわせでも、同等の寿命となる、いい換えれば同等のPrになるようなFrとFaの組みあわせを表わした線図になります。

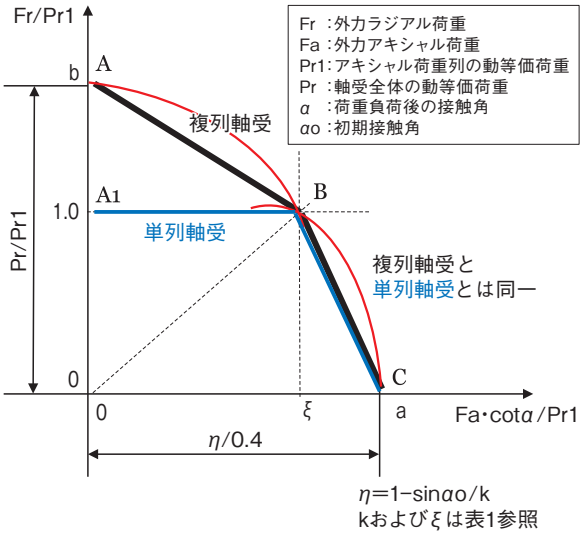

図1　アンギュラ玉軸受の等価荷重線図

最初に、単列軸受について説明します。

純ラジアル荷重を負荷した状態に、ある程度までのアキシャル荷重を負荷しても寿命は低下しませんが、あるアキシャル荷重を超えると寿命は低下していくと考えられます。このようなとき、アキシャル荷重があっても同等の寿命を確保するには、その分ラジアル荷重を小さくしなければいけません。これらの状況を線図で表わすと線A1BCのように表わすことができると考えられます。今日では、実際は赤線(—)のように、精密に理論計算できるのですが、誰でも計算できるようにするため、理論計算に基づき、直線で近似するものです。この「寿命が等しくなるFrとFaの組みあわせ」というコンセプトを設けることにより、単列軸受の動等価荷重は、A1Bおよび、BCの各々の直線の方程式を構成することにより、誘導できると考えられます。

次に複列軸受で説明します。

複列軸受での考え方は単列軸受の線図を利用して行なわれています。複列の場合、アキシャル荷重が小さいうちは両列でラジアル荷重を支持しますが、アキシャル荷重が増加していくと、反アキシャル側の列には、すきまが空くようになっていきますので、両列のラジアル荷重分担比率は、徐々にアキシャル荷重支持側列へと移動していきます。そして、あるアキシャル荷重を超えると、最終的に、あたかもアキシャル荷重列だけで外力支持してしまうので、単列相当と同等になり、この境界点をBとすると、B点以降は、単列も複列も同一の直線になってしまいます。したがって、B点以降は、あたかも「アキシャル荷重を受ける側の列だけで動等価荷重を計算する」ということになります。

B点よりも小さいアキシャル荷重のときは、ラジアル荷重は全体列で受けることになります。図1の線図は単列軸受の線図を利用していますので、複列軸受に適用したときのPr1はアキシャル列側の動等価荷重として表わされていることになります。したがって、B点よりもFaが小さいときは両列でラジアル荷重を支持しているので、

Fa＝0となる縦軸Fr/Pr1と荷重線図の直線との交点では、アキシャル列側だけの動等価荷重Pr1は外力Frよりも小さく設定しなければなりません。どの程度小さくなるかと云うと、複列の動定格荷重は列数の0.7乗で効きますので、$2^{0.7}$(＝1.625) 倍小さくなります。同時に、この数値は、複列軸受としての動等価荷重をPrとすると、PrとPr1の比率に相当することになるので、Pr/Pr1＝b＝$2^{0.7}$(＝1.625) となります。このようにして、複列軸受の荷重線図を特定することができます。

ラジアル荷重を一定にして、アキシャル荷重を徐々に大きくしていくと、ラジアル荷重の分担比重がアキシャル荷重列へと移動していくので、荷重線図は、Fa＝0の点Aから、片列のみで外力を支持してしまう点Bを経由して、純アキシャル荷重状態となる点Cに至る線ABCのようになります。これも実際は赤線(—)のように精密な理論計算はできるのですが、計算しやすさを狙いに直線で近似することにしています。

線図は、アキシャル荷重列側の等価荷重として表わしているので、この変曲点となるB点は単列と複列で共通点であり、これを境に動等価荷重Prの係数X、Yの数値が変わることになります。その区切りとなるB点を特定すれば、数式が構成できることになります。

2) B点の位置特定とX、Yの数式特定

B点のFa･cotα/Pr1軸上の座標をξとすると、直線OBは傾き1/ξの原点を通る直線の方程式になるので、これより

$$Fr/Pr1=1/\xi \cdot Fa \cdot \cot\alpha/Pr1$$

がいえますので、

$$Fa=\xi Fr \cdot \tan\alpha$$

書き直して

$$Fa/Fr=\xi \cdot \tan\alpha(=e\text{とする}) \cdots\cdots(2)$$

が誘導できます。

ξの計算誘導は長くなるので割愛しますが、定数になる（表1参照）ので、Fa/Frとeの大小関係により、適用線図が分かれることになります。

(2)−1　Fa/Fr＜eのとき

単列軸受のときは、線A1Bをたどるので、

$$Fr/Pr1=1 \cdots(3-1)$$

であり、単列軸受なのでPr1＝Prとなるから、X＝1、Y＝0です。

複列軸受のとき、線ABは、点Aを通る、傾き−(b−1)/ξの直線の方程式なので

$$Fr/Pr1-b=-(b-1)/\xi \cdot Fa \cdot \cot\alpha/Pr1$$

がいえますので、これを書き直すと

$$Fr+(b-1) \cdot \cot\alpha/\xi \cdot Fa=b \cdot Pr1=Pr$$

$$(\ \because\ \ Pr/Pr1=b) \cdots(3-2)$$

となりますから、X＝1、Y＝(b−1)･cotα/ξとなります。

複列軸受では、b＝$2^{0.7}$(＝1.625) です。

(2)−2　Fa/Fr＞eのとき

単列軸受、複列軸受共に、点Cを通る傾き−1/(a−ξ)の線BC方程式になるので、

$$Fr/Pr1=-1/(a-\xi) \cdot (Fa \cdot \cot\alpha/Pr1-a)$$

がいえますので、書き直して

$$(1-\xi/a) \cdot Fr+\cot\alpha/a \cdot Fa=Pr1$$

両辺にbを乗じれば

$$b(1-\xi/a) \cdot Fr+b \cdot \cot\alpha/a \cdot Fa=b \cdot Pr1=Pr \cdots(4)$$

となります。

このbを乗じる方法は、単列軸受での等価荷重Pr1が複列軸受の等価荷重Prにおきかわる絶妙な方法であり、この考え方はこの後も使われていきます。(単列のときはb＝1であり式の実質的な変化はありません)

後ほど出てきますが、a＝η/0.4になることが分かっていますので(η＝1−sinαo/kであり、kは表1参照)、統一式を意識して、これに置き換えると

$$b(1-0.4\xi/\eta) \cdot Fr+b \cdot 0.4\cot\alpha/\eta \cdot Fa=Pr$$

となりますから

$$X=b(1-0.4\xi/\eta),\ Y=b \cdot 0.4\cot\alpha/\eta \cdots\cdots(5)$$

となります。

繰り返しますが、b･Pr1＝Prとして、bを乗じることにより、スラスト列の動等価荷重Pr1を軸受全体の動等価荷重Prに変換しているのであり、係数X、Yに、b＝$2^{0.7}$が生じていることは注目すべきことです。この考え方は後でも出てきます。

以上のようにして、表1のように、単列および、複列軸受の係数X、Yをまとめることができました。係数X、Yは、単列、複列、Fa/Frのeとの大小関係により異なりますので、区別した記号を採った方がよく、TS1281に準じて、X、X1、X2、X3などのように添え数字を付けました。

表1　アンギュラ玉軸受の単列および、複列軸受の動等価荷重係数X、Y

	単列、DT		複列（DBまたはDF）	
	Fa/Fr≦e	Fa/Fr>e	Fa/Fr≦e	Fa/Fr>e
X	X=1	$X1=1-0.4\xi/\eta$	X3=1	$X2=2^{0.7}\cdot(1-0.4\xi/\eta)$
Y	Y=0	$Y1=0.4\cot\alpha/\eta$	$Y3=(2^{0.7}-1)\cdot\cot\alpha/\xi$	$Y2=2^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta$

αo(deg)	ξ	k
5	1.05	2.5
10～15	1.25	2.5
15～	1.25	2.75

注1）X、Yの添え字1,2,3はTS1281をそのまま流用してある。
注2）$2^{0.7}=1.625$である。

ここに
αo；初期接触角
α　；荷重(Fa)負荷後の接触角
αは次より求める
$(\cos\alpha o/\cos\alpha-1)^{1.5}\cdot\sin\alpha=Fa/Z/Da^2\cdot(c/a)^{1.5}(\alpha o<20)$
$\cos\alpha=0.972402*\cos\alpha o(\alpha o>20)$
ここにc=0.0004387（N/mm系のとき,kgf/mmであれば0.002）、a=0.035　Da；ボール径、Z；ボール数
$\eta=1-\sin\alpha o/k$
ξ、k；上表による(TS1281記載値)

3）bの数値の意味

ここで、bの数値のもつ意味を記しておきます。繰り返しますが、図1は、単列、複列の軸受において、寿命が同一となるFrとFaの組みあわせを線図化したものです。線図は、アキシャル荷重を受ける列の（今の適用図の場合1列しかないです）動等価荷重Pr1の計算式を造り、それを複列の動等価荷重Prとして、これに換算する方法が採られていますが、その時にbの数値を使っています。

この線図の場合、複列軸受の2列のうち、スラストを受ける列の動等価荷重を求めているわけですから、Fa=0の場合は、スラスト列の動等価荷重は、外力ラジアル荷重の1/2に相当する動定格荷重成分にならなくてはいけません。したがって、b=（列数2）$^{0.7}$=1.625としてその調整を行なっているわけです。なぜ、2=2/1なのかは、アキシャルを受ける列とラジアルの受ける列の比になっているという見方もできます。

4）3列以上の多列軸受

3列軸受の場合、FFFのようにすべてが同一方向の配列ならば、単列軸受もしくはDTとなった複列軸受と同じX、Y係数になるのは感覚で理解できると思います。

次に、アキシャル荷重を受ける列が3列のうち1列となる場合を考えてみます。

同等価荷重線図はこれまでと同形状になるとすると、3列でラジアル荷重を受け、そのうちのアキシャル荷重を受ける列1列だけの動等価荷重を求めるので、その列の同等価荷重は軸受全体の1/3相当に減じることになるので、$b=(3/1)^{0.7}$になります。

もし、アキシャル荷重を受ける列が3列のうち2列となるのであれば、2列で受けたラジアル荷重とアキシャル荷重の動等価荷重を算出することになるので、$b=(3/2)^{0.7}$になります。

このようにして、3列軸受の動等価荷重係数の計算式は、これまでの考え方を展開していけば表2のようになると考えられます。

表2　アンギュラ玉軸受の3列組みあわせ品の動等価荷重係数X、Y

	3列でスラスト受ける（単列と同一）		2列でスラスト受ける		1列でスラスト受ける	
	i/j=3/3		i/j=2/3		i/j=1/3	
	Fa/Fr≦e	Fa/Fr>e	Fa/Fr≦e	Fa/Fr>e	Fa/Fr≦e	Fa/Fr>e
X	X=1	$X1=(3/3)^{0.7}\cdot(1-0.4\xi/\eta)$	X5=1	$X4=(3/2)^{0.7}\cdot(1-0.4\xi/\eta)$	X7=1	$X6=(3/1)^{0.7}\cdot(1-0.4\xi/\eta)$
Y	$Y=((3/3)^{0.7}-1)\cdot\cot\alpha/\xi$	$Y1=(3/3)^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta$	$Y5=((3/2)^{0.7}-1)\cdot\cot\alpha/\xi$	$Y4=(3/2)^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta$	$Y7=((3/1)^{0.7}-1)\cdot\cot\alpha/\xi$	$Y6=(3/1)^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta$

注1）X、Yの添え字は、1,2,3まではTS1281で使用されているのと同一としたが、3列組みあわせ以降では、それに準じて番号を採り、場合分けを行なってある。

この表をみれば分かりますが、bは、アキシャル荷重を受ける列数に依存して変わっているだけで、計算式は複列と同様の式になっているということが分かります。

ここで、アキシャル荷重を受ける列数を3とすれば、単列軸受と同等のX,Yになるというのは感覚的にも理解できるのですが、あえて、$b=(3/3)^{0.7}(=1)$を造って、アキシャル荷重を受ける列数を3列としたときの式を構成してみると、その数値は想定通り、単列軸受と同一になることが分かります。表2ではあえてそのような書き方をしてみました。

ISOでは単列、複列だけにとどめていますが、この考え方に基づき、4列軸受まで計算してみたものを表3に示します。計算式の類似性が見えてくると思います。

これらの式は、元々はA.Palmgrenによるものですが、目にする文献などでは、表1のような書き方で、且つ、$2^{0.7}$の数値は出さずに、$(2^{0.7}=)1.625$として、計算した結果の数値を使った計算表になっています。したがって、これらのような統一式にまとめられるとは想像がつきにくいのですが、以上までに述べたことが意識された上での計算式であったとすると、一見、統一性のないような式に見えるものの、計算し尽くしされた理論構成であったことが想像できます。

表3-1　アンギュラ玉軸受、単列、複列軸受の動等価荷重係数X、Y

呼び(初期)接触角 αo	N、mm単位系		e=ξ·tanα			単列				DB/DF			
						Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e	
	Fa/Z/Da2	for Fa/Cor	α	e	e (複列)	X	Y	X1	Y1	X3	Y3	X2	Y2
5°	0.172	0.173	10.230	0.19	0.23	1	0	0.56	2.30	1	2.77	0.78	3.73
	0.345	0.346	11.811	0.22	0.26	1	0	0.56	1.98	1	2.39	0.78	3.22
	0.690	0.692	13.734	0.26	0.31	1	0	0.56	1.70	1	2.04	0.78	2.75
	1.03	1.04	15.037	0.28	0.34	1	0	0.56	1.54	1	1.86	0.78	2.51
	1.38	1.38	16.048	0.30	0.36	1	0	0.56	1.44	1	1.74	0.78	2.34
	2.07	2.08	17.607	0.33	0.40	1	0	0.56	1.31	1	1.57	0.78	2.12
	3.45	3.46	19.809	0.38	0.45	1	0	0.56	1.15	1	1.39	0.78	1.87
	5.17	5.19	21.761	0.42	0.50	1	0	0.56	1.04	1	1.25	0.78	1.69
	6.89	6.92	22.500	0.43	0.52	1	0	0.56	1.00	1	1.21	0.78	1.63
10°	0.172	0.175	12.953	0.29		1	0	0.46	1.87	1	2.17	0.75	3.04
	0.345	0.350	14.177	0.32		1	0	0.46	1.70	1	1.98	0.75	2.76
	0.689	0.700	15.768	0.35		1	0	0.46	1.52	1	1.77	0.75	2.47
	1.03	1.05	16.893	0.38		1	0	0.46	1.46	1	1.65	0.75	2.30
	1.38	1.40	17.786	0.40		1	0	0.46	1.39	1	1.56	0.75	2.18
	2.07	2.10	19.187	0.43		1	0	0.46	1.29	1	1.44	0.75	2.01
	3.45	3.50	21.207	0.49		1	0	0.46	1.17	1	1.29	0.75	1.80
	5.17	5.25	23.028	0.53		1	0	0.46	1.08	1	1.18	0.75	1.64
	6.89	7.00	23.500	0.54		1	0	0.46	1.06	1	1.15	0.75	1.61
15°	0.172	0.179	16.781	0.377		1	0	0.44	1.48	1	1.66	0.72	2.40
	0.345	0.357	17.652	0.398		1	0	0.44	1.40	1	1.57	0.72	2.28
	0.689	0.714	18.866	0.427		1	0	0.44	1.31	1	1.46	0.72	2.12
	1.03	1.07	19.767	0.449		1	0	0.44	1.24	1	1.39	0.72	2.02
	1.38	1.43	20.503	0.467		1	0	0.44	1.19	1	1.34	0.72	1.94
	2.07	2.14	21.688	0.497		1	0	0.44	1.12	1	1.26	0.72	1.82
	3.45	3.57	23.448	0.542		1	0	0.44	1.03	1	1.15	0.72	1.67
	5.17	5.35	24.000	0.56		1	0	0.44	1.00	1	1.12	0.72	1.63
	6.89	7.14	24.000	0.56		1	0	0.44	1.00	1	1.12	0.72	1.63
20°			24.500	0.57		1	0	0.43	1.02	1	1.10	0.70	1.63
25°			28.500	0.68		1	0	0.41	0.88	1	0.92	0.66	1.41
30°			32.635	0.80		1	0	0.39	0.76	1	0.78	0.63	1.24
35°			37.199	0.95		1	0	0.37	0.66	1	0.66	0.60	1.08
40°			41.849	1.12		1	0	0.35	0.57	1	0.56	0.56	0.95
45°			46.560	1.32		1	0	0.33	0.50	1	0.47	0.53	0.83
50°			51.314	1.56		1	0	0.31	0.43	1	0.40	0.50	0.72
55°			56.100	1.86		1	0	0.29	0.37	1	0.34	0.47	0.62
60°			60.909	2.25		1	0	0.27	0.31	1	0.28	0.44	0.53

注1）深溝玉軸受は、αo=5°のアンギュラ玉軸受と同等に扱うが、深溝の複列の数値は単列と同値とする。
注2）　　はTS1281記載値と一致しているが、TS1281では、これまでのISO規格値とは異なると断ってある。
注3）　　は、TS1281のX、Y等と整合採るため、指定計算方法で求めたαに対し、操作したαで計算してある。
注4）45°を超える場合は、ラジアル軸受とされてはいないが、計算範囲を延長してみたものである。

多列玉軸受の動等価荷重X、Y係数

表3-2　アンギュラ玉軸受、3列軸受の動等価荷重係数X、Y

呼び(初期)接触角 αo	i＝スラスト数／j＝全体列数				3列 FFB/BBF							
					i/j=2/3				i/j=1/3			
	N、mm単位系		e=ξ·tanα		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e	
	Fa/Z/Da2	for Fa/Cor	α	e	X5	Y5	X4	Y4	X7	Y7	X6	Y6
5°	0.172	0.173	10.230	0.23	1	1.45	0.64	3.05	1	5.13	1.04	4.96
	0.345	0.346	11.811	0.26	1	1.26	0.64	2.63	1	4.43	1.04	4.28
	0.690	0.692	13.734	0.31	1	1.07	0.64	2.25	1	3.79	1.04	3.66
	1.03	1.04	15.037	0.34	1	0.98	0.64	2.05	1	3.45	1.04	3.33
	1.38	1.38	16.048	0.36	1	0.91	0.64	1.91	1	3.22	1.04	3.11
	2.07	2.08	17.607	0.40	1	0.83	0.64	1.73	1	2.92	1.04	2.82
	3.45	3.46	19.809	0.45	1	0.73	0.64	1.53	1	2.57	1.04	2.48
	5.17	5.19	21.761	0.50	1	0.66	0.64	1.38	1	2.32	1.04	2.24
	6.89	6.92	22.500	0.52	1	0.63	0.64	1.33	1	2.24	1.04	2.16
10°	0.172	0.175	12.953	0.29	1	1.14	0.61	2.48	1	4.03	1.00	4.03
	0.345	0.350	14.177	0.32	1	1.04	0.61	2.26	1	3.67	1.00	3.67
	0.689	0.700	15.768	0.35	1	0.93	0.61	2.02	1	3.28	1.00	3.28
	1.03	1.05	16.893	0.38	1	0.86	0.61	1.88	1	3.05	1.00	3.05
	1.38	1.40	17.786	0.40	1	0.82	0.61	1.78	1	2.89	1.00	2.89
	2.07	2.10	19.187	0.43	1	0.75	0.61	1.64	1	2.66	1.00	2.67
	3.45	3.50	21.207	0.49	1	0.68	0.61	1.47	1	2.39	1.00	2.39
	5.17	5.25	23.028	0.53	1	0.62	0.61	1.34	1	2.18	1.00	2.18
	6.89	7.00	23.500	0.54	1	0.60	0.61	1.31	1	2.13	1.00	2.13
15°	0.172	0.179	16.781	0.38	1	0.87	0.59	1.97	1	3.07	0.95	3.19
	0.345	0.357	17.652	0.40	1	0.83	0.59	1.86	1	2.91	0.95	3.03
	0.689	0.714	18.866	0.43	1	0.77	0.59	1.73	1	2.71	0.95	2.82
	1.03	1.07	19.767	0.45	1	0.73	0.59	1.65	1	2.58	0.95	2.68
	1.38	1.43	20.503	0.47	1	0.70	0.59	1.58	1	2.48	0.95	2.57
	2.07	2.14	21.688	0.50	1	0.66	0.59	1.49	1	2.33	0.95	2.42
	3.45	3.57	23.448	0.54	1	0.61	0.59	1.37	1	2.14	0.95	2.22
	5.17	5.35	24.000	0.56	1	0.59	0.59	1.33	1	2.08	0.95	2.16
	6.89	7.14	24.000	0.56	1	0.59	0.59	1.33	1	2.08	0.95	2.16
20°			24.500	0.57	1	0.58	0.57	1.33	1	2.03	0.93	2.16
25°			28.500	0.68	1	0.48	0.54	1.16	1	1.71	0.88	1.88
30°			32.635	0.80	1	0.41	0.52	1.01	1	1.45	0.84	1.65
35°			37.199	0.95	1	0.35	0.49	0.88	1	1.22	0.79	1.44
40°			41.849	1.12	1	0.29	0.46	0.77	1	1.03	0.75	1.26
45°			46.560	1.32	1	0.25	0.43	0.68	1	0.88	0.71	1.10
50°			51.314	1.56	1	0.21	0.41	0.59	1	0.74	0.66	0.96
55°			56.100	1.86	1	0.18	0.38	0.51	1	0.62	0.62	0.83
60°			60.909	2.25	1	0.15	0.36	0.43	1	0.52	0.58	0.70

注1）単列、複列での、TS1281と整合図るために採ったαの操作は、そのままここでも使用している。

表3-3　アンギュラ玉軸受、4列軸受の動等価荷重係数X、Y

呼び(初期)接触角 αo	i＝スラスト数／j＝全体列数				4列 FFFB/BBBF							
					i/j=3/4				i/j=1/4			
	N、mm単位系		e=ξ·tanα		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e	
	Fa/Z/Da2	for Fa/Cor	α	e	X9	Y9	X8	Y8	X11	Y11	X10	Y10
5°	0.172	0.173	10.230	0.23	1	0.99	0.59	2.81	1	7.27	1.27	6.06
	0.345	0.346	11.811	0.26	1	0.85	0.59	2.42	1	6.27	1.27	5.23
	0.690	0.692	13.734	0.31	1	0.73	0.59	2.07	1	5.36	1.27	4.48
	1.03	1.04	15.037	0.34	1	0.66	0.59	1.89	1	4.88	1.27	4.07
	1.38	1.38	16.048	0.36	1	0.62	0.59	1.76	1	4.56	1.27	3.80
	2.07	2.08	17.607	0.40	1	0.56	0.59	1.60	1	4.13	1.27	3.45
	3.45	3.46	19.809	0.45	1	0.50	0.59	1.41	1	3.64	1.27	3.04
	5.17	5.19	21.761	0.50	1	0.45	0.59	1.27	1	3.28	1.27	2.74
	6.89	6.92	22.500	0.52	1	0.43	0.59	1.22	1	3.17	1.27	2.64
10°	0.172	0.175	12.953	0.29	1	0.78	0.57	2.29	1	5.70	1.22	4.93
	0.345	0.350	14.177	0.32	1	0.71	0.57	2.08	1	5.19	1.22	4.49
	0.689	0.700	15.768	0.35	1	0.63	0.57	1.86	1	4.64	1.22	4.02
	1.03	1.05	16.893	0.38	1	0.59	0.57	1.73	1	4.32	1.22	3.74
	1.38	1.40	17.786	0.40	1	0.56	0.57	1.64	1	4.09	1.22	3.54
	2.07	2.10	19.187	0.43	1	0.51	0.57	1.51	1	3.77	1.22	3.26
	3.45	3.50	21.207	0.49	1	0.46	0.57	1.35	1	3.38	1.22	2.92
	5.17	5.25	23.028	0.53	1	0.42	0.57	1.24	1	3.08	1.22	2.67
	6.89	7.00	23.500	0.54	1	0.41	0.57	1.21	1	3.02	1.22	2.61
15°	0.172	0.179	16.781	0.38	1	0.59	0.54	1.81	1	4.35	1.17	3.90
	0.345	0.357	17.652	0.40	1	0.56	0.54	1.71	1	4.12	1.17	3.70
	0.689	0.714	18.866	0.43	1	0.52	0.54	1.60	1	3.84	1.17	3.45
	1.03	1.07	19.767	0.45	1	0.50	0.54	1.52	1	3.65	1.17	3.28
	1.38	1.43	20.503	0.47	1	0.48	0.54	1.46	1	3.51	1.17	3.15
	2.07	2.14	21.688	0.50	1	0.45	0.54	1.37	1	3.30	1.17	2.96
	3.45	3.57	23.448	0.54	1	0.41	0.54	1.26	1	3.02	1.17	2.71
	5.17	5.35	24.000	0.56	1	0.40	0.54	1.23	1	2.95	1.17	2.64
	6.89	7.14	24.000	0.56	1	0.40	0.54	1.23	1	2.95	1.17	2.64
20°			24.500	0.57	1	0.39	0.52	1.23	1	2.88	1.13	2.65
25°			28.500	0.68	1	0.33	0.50	1.06	1	2.41	1.08	2.30
30°			32.635	0.80	1	0.28	0.48	0.93	1	2.05	1.03	2.01
35°			37.199	0.95	1	0.24	0.45	0.81	1	1.73	0.97	1.76
40°			41.849	1.12	1	0.20	0.42	0.71	1	1.46	0.92	1.54
45°			46.560	1.32	1	0.17	0.40	0.62	1	1.24	0.86	1.35
50°			51.314	1.56	1	0.14	0.38	0.54	1	1.05	0.81	1.17
55°			56.100	1.86	1	0.12	0.35	0.47	1	0.88	0.76	1.01
60°			60.909	2.25	1	0.10	0.33	0.40	1	0.73	0.71	0.86

注1）単列、複列での、TS1281と整合図るために採ったαの操作は、そのままここでも使用している。
注2）FFBB/BBFFの数値は、DB/DFの数値と同一になる。

3. アキシャル軸受の動等価荷重係数Xa1、Ya1

アキシャル軸受の動等価荷重係数X、Yは、ラジアル軸受のような線図を使って求めているわけではありません。ラジアル軸受での結果を利用して、スラスト係数を乗じることにより、簡易的に求めています。その手順を示すと次の通りです。

Fa/Fr＞eのときの単列ラジアル軸受の動等価ラジアル荷重Prは、係数X1、Y1を用い、

$$Pr=X1\cdot Fr+Y1\cdot Fa\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(1)'$$

と表わされます。ここで、動等価アキシャル荷重Pa相当の純アキシャル荷重が負荷されたとすると、そのときの動等価ラジアル荷重は

$$Pr=Y1\cdot Pa$$

となりますから、PrとCr、PaとCaが各々対応しますので、

$$Cr=Y1\cdot Ca$$

書き替えて

$$Ca=Cr/Y1\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(6)$$

とすることができる、として算出しているものです。

簡易すぎるかも知れませんが、この考え方による計算方法はISOでも採用されていて、これを踏襲し、Prの両辺をY1で除すと

$$Pa=Pr/Y1=X1/Y1\cdot Fr+Fa=Xa1\cdot Fr+Ya1\cdot Fa$$

よって

$$Xa1=X1/Y1、Ya1=1\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot(7)$$

としたのが、アキシャル軸受の動等価荷重係数になります。したがって、ラジアル方向の動等価荷重係数が確定していれば、アキシャル方向の動等価荷重係数は比較的容易に特定することができることになります。

ここでは単列軸受での式の構成例を示しましたので、単列軸受でのFa/Fr＞eでのY係数Y1を用いましたが、複列、あるいは3列軸軸受等になれば、その組みあわせにおけるラジアル軸受としての、Fa/Fr＞eでのY係数を用いればよいわけです。

このようにして計算してみた多列組みあわせの動等価荷重係数Xa、Yaを表4に示します。

表4-1　スラスト玉軸受、単列、複列軸受の動等価荷重係数Xa、Ya

呼び(初期)接触角 αo	i/j；i列スラスト／全体j列		単列およびDT				DB/DF			
			−				i/j=1/2			
	e=1.25·tanα		Fa/Fr≦e		Fa/Fr＞e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr＞e	
	α	e	Xa	Ya	Xa1	Ya1	Xa3	Ya3	Xa2	Ya2
30°	32.635	0.80	−	−	0.53	1	0.82	0.64	0.53	1
35°	37.199	0.95			0.59	1	0.94	0.62	0.59	1
40°	41.849	1.12	−	−	0.64	1	1.08	0.60	0.64	1
45°	45	1.25			0.66	1	1.18	0.59	0.66	1
50°	50	1.49	−	−	0.73	1	1.37	0.57	0.73	1
55°	55	1.79	−	−	0.81	1	1.60	0.56	0.81	1
60°	60	2.17	−	−	0.92	1	1.90	0.55	0.92	1
65°	65	2.68	−	−	1.06	1	2.30	0.54	1.06	1
70°	70	3.43	−	−	1.28	1	2.90	0.53	1.28	1
75°	75	4.67	−	−	1.66	1	3.89	0.52	1.66	1
80°	80	7.09	−	−	2.44	1	5.86	0.52	2.43	1
85°	85	14.29	−	−	4.80	1	11.75	0.51	4.80	1

注1）αo＜40ではラジアル軸受と同一のαを使用して計算すれば、JIS、ISO規定値と同一結果になる。
注2）単列軸受のFa/Fr≦eの係数はありえない。

表4-2　スラスト玉軸受、3列の動等価荷重係数Xa、Ya

呼び(初期)接触角 αo	i/j ; i 列スラスト／全体j列		3列 FFB/BBF							
			i/j=2/3				i/j=1/3			
	e=1.25·tanα		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e	
	α	e	Xa5	Ya5	Xa4	Ya4	Xa7	Ya7	Xa6	Ya6
30°	32.635	0.80	1.00	0.41	0.53	1	0.62	0.89	0.53	1
35°	37.199	0.95	1.16	0.40	0.59	1	0.71	0.87	0.59	1
40°	41.849	1.12	1.32	0.39	0.64	1	0.82	0.84	0.64	1
45°	45	1.25	1.44	0.38	0.66	1	0.89	0.82	0.66	1
50°	50	1.49	1.67	0.37	0.73	1	1.03	0.80	0.73	1
55°	55	1.79	1.95	0.36	0.81	1	1.20	0.78	0.81	1
60°	60	2.17	2.32	0.35	0.92	1	1.43	0.76	0.92	1
65°	65	2.68	2.82	0.34	1.06	1	1.73	0.75	1.06	1
70°	70	3.43	3.55	0.34	1.28	1	2.19	0.74	1.28	1
75°	75	4.67	4.76	0.34	1.66	1	2.93	0.73	1.66	1
80°	80	7.09	7.17	0.33	2.43	1	4.41	0.72	2.43	1
85°	85	14.29	14.37	0.33	4.80	1	8.85	0.72	4.80	1

表4-3　スラスト玉軸受、4列の動等価荷重係数Xa、Ya

呼び(初期)接触角 αo	i/j ; i 列スラスト／全体j列		4列 FFBB/BBFFまたはFFFB/BBBF							
			i/j=3/4				i/j=1/4			
	e=1.25·tanα		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e		Fa/Fr≦e		Fa/Fr>e	
	α	e	Xa9	Ya9	Xa8	Ya8	Xa11	Ya11	Xa10	Ya10
30°	32.635	0.80	1.09	0.30	0.53	1	0.51	1.04	0.53	1
35°	37.199	0.95	1.25	0.30	0.59	1	0.58	1.00	0.59	1
40°	41.849	1.12	1.44	0.29	0.64	1	0.67	0.98	0.64	1
45°	45	1.25	1.56	0.28	0.66	1	0.72	0.95	0.66	1
50°	50	1.49	1.81	0.27	0.73	1	0.84	0.92	0.73	1
55°	55	1.79	2.12	0.27	0.81	1	0.98	0.90	0.81	1
60°	60	2.17	2.52	0.26	0.92	1	1.17	0.88	0.92	1
65°	65	2.68	3.06	0.25	1.06	1	1.42	0.87	1.06	1
70°	70	3.43	3.86	0.25	1.28	1	1.79	0.85	1.28	1
75°	75	4.67	5.17	0.25	1.66	1	2.40	0.84	1.66	1
80°	80	7.09	7.79	0.25	2.43	1	3.61	0.83	2.43	1
85°	85	14.29	15.61	0.24	4.80	1	7.23	0.83	4.80	1

注）FFBB/BBFFの数値は、DB/DFの数値と同一になる。

ここまで来ると、TS1281のTable12に書かれている式と異なるのではないかといわれるかも知れませんが、上記の定義のようにした計算式を展開すると同一になることが分かります。例えば、TS1281では

$Xa1=Xa2=(2.5\eta-\xi)\cdot\tan\alpha$

$Xa3=X3/Y2=1/(2^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha\cdot\eta)=20/13\cdot\eta\cdot\tan\alpha$

$Ya3=25\eta/(26\xi)$

と書かれていますが、これまでの式の展開ですすめると

$Xa1=X1/Y1=(1-0.4\xi/\eta)/(0.4\cot\alpha/\eta)=(2.5\eta-\xi)\cdot\tan\alpha$

$Xa3=X3/Y2=1/(2^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta)=20/12.996\cdot\eta\cdot\tan\alpha$

$Ya3=Y3/Y2=((2^{0.7}-1)\cdot\cot\alpha/\xi)/(2^{0.7}\cdot0.4\cot\alpha/\eta)$

$=25\eta/(26.0128\xi)$

となって、一致することが分かります。ラウンド数値は式の見やすさのためと思われます。

このようにして、多列スラスト軸受のXa、Yaは、(5)式同様の考え方で算出することができることになります。

なお、動定格荷重Cr、Caを計算する際に用いられる係数fc、fcaは、軌道輪のボール径に対する曲率半径比を、ラジアル軸受では52%、スラスト軸受では54%に設定して計算されているようです。なので、ラジアル軸受のCaを算出するにあたり、Crの数値とその時の計算に使用した接触角および、Y1係数から求めた数値と、fcaと軸受内部緒言を用いて計算した数値とは、乖離することは予測がつきますが、同一曲率と同一接触角を用いて計算した場合は、両者の差異は表5のように、10%程度以内にとどまるようです。

表5　7206(30deg)の多列軸受での動定格荷重(bm1)計算比較

DaxZxdpc；9.525×13×46.5

	Y1(単列)	0.76	Ca(kgf)		
	アキシャル列数	Cr(kgf)	Cr/Y1としたもの	fe=fi=0.52のfca使用	fe=fi=0.54のfca使用
単列	1列	1,770	2,320	2,260	1,730
DB、DF		2,870	2,320	2,260	1,730
FBB(3列)		3,810	2,320	2,260	1,730
FFB(3列)	2列	3,810	3,770	3,700	2,830
FFBB(4列)		4,660	3,770	3,700	2,830

・Y1係数は、アキシャル荷重負荷後の想定規格接触角α32.635を用いている。
・Crはfe0.52、fi0.52として計算してあり、Ca=Cr/Y1のときもその数値としてある。
・Caをfe0.52、fi0.52として計算したfcaを用い、α32.635として計算すると、Ca=2,260kgfになりCa=Cr/Y1の近似解と近い数値になる。
ただし、JISにあるfca(fe0.54、fi0.54)を用いれば、Ca=1,730となり、曲率差の分は大きく乖離する。

以上のことから、係数Y1を用いたアキシャル軸受の動等価荷重の計算方法は、ラジアル軸受での寿命計算と同程度に十分に使用に耐えると判断できます。

4. まとめ

動定格荷重と動等価荷重による軸受寿命計算方法は、誰にでも計算できる手法として長い間にわたり、軸受を扱う機械設計者に使用されてきているものです。

しかし、国際規格でも複列軸受までしか整備されておらず、近年の多列軸受の使用増加に伴い、軸受メーカーに対して、3列以上の軸受の動等価荷重り計算方法の問いあわせは多くなっているように思います。

また、複列軸受での国際規格の原式となった文献には難解なところが多くあり、そのためなのか、規格化ということにまではなかなか至っていないようです。軸受メーカーにおいても、3列以上の軸受の動等価荷重係数をカタログなどに記載しているメーカーはあまりありません。ここでは、複列軸受の動等価荷重係数を構成した原式に戻り、同様の考え方を適用して、3列、4列軸受の動等価荷重係数の計算式を構成してみました。

3列以上の軸受についても、複列軸受の構成式と類似の式で延長展開できたのは、弊員が技術関連の職務に在籍していた頃の担当者、中村陽一の視点による負うところが多く、統一化した式を構成するために、ずいぶんと貢献してくれました。お礼を申し上げると同時に、今後の軸受に携わる人たちのお役に立てたということには自負心をもっていただければと思っております。

引用文献

1) 岡本 純三
ころがり軸受・ころ軸受の動的負荷容量−Lundberg−Palmgren理論の詳解 正文社 P.121 ～ P.152
上記著者Lundberg、PalmgrenのDynamic Capacity of Rolling Bearings(1947)の翻訳版に相当します