

標準化教育プログラム 個別技術分野編 機械分野

第12.1章 軸受材料改良による軸受メーカーの標準化戦略

本資料は、経済産業省委託事業である「平成17年度基準認証研究開発事業(標準化に関する研修・教育プログラムの開発)」の成果である。

制作日:2007年12月21日
制作:東京農工大学教授 山本隆司
大同メタル工業(株) 岡本 裕

代表的な機械要素の一つである転がり軸受を例に、メーカーの優位性確保の基本的戦略として、「製品規格」や「標準化」という観点から、どのような戦略がとられてきたかを学習する。

1. 転がり軸受の規格
 2. 転がり軸受メーカーの競争
 3. 転がり軸受に要求される主要性能と影響因子および規格との関連
 4. 軸受の寿命と転がり疲れ
 5. 標準化と企業戦略
 6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷
- まとめ

1. 転がり軸受の規格 JIS規格における制定状況

JIS規格**26件**の内容分類



種類・構成要素・形状・寸法・記号**(18件)**
精度・性能**(6件)**
製図法・検索・仕様書**(2件)**
試験・測定法**(2件)** (重複有り)

材料に関する規格は皆無

4

p. 4

◆ 解説

JIS規格における転がり軸受の制定範囲を示す。

- ・種類・構成要素・形状・寸法・記号(18件)
- ・精度・性能(6件)
- ・製図法・検索・仕様書(2件)
- ・試験・測定法(2件)

ここで、注目すべき点は、材料に関する規定が皆無であるという点である。ここに、軸受メーカーの対応の鍵がある。

1. 転がり軸受の規格 ISO規格における制定状況

ISO規格**51件**の内容分類



種類・構成要素・形状・寸法・記号(**36件**)

精度・性能(**19件**)

製図法・検索・仕様書(**5件**)

試験・測定法(**3件**) (重複有り)

材料に関する規格は皆無

5

p. 5

◆ 解説

次に、国際規格であるISO規格についても同様に調べてみよう。

- ・種類・構成要素・形状・寸法・記号(36件)
- ・精度・性能(19件)
- ・製図法・検索・仕様書(5件)
- ・試験・測定法(3件)

JIS規格と同様に、材料に関する規定が皆無である。

2. 転がり軸受メーカーの競争 長寿命化と低コスト化

長寿命化

→ {
材料の改良
(熱処理, 規格範囲内での新合金元素の添加)

製造法の改良による精度向上に基づく応力緩和
(適正なクラウニングの付与, 曲率半径の変更等)

低コスト化

→ {
製造コストの削減
(材料調達費, 製造法の改良, 労務費の削減)

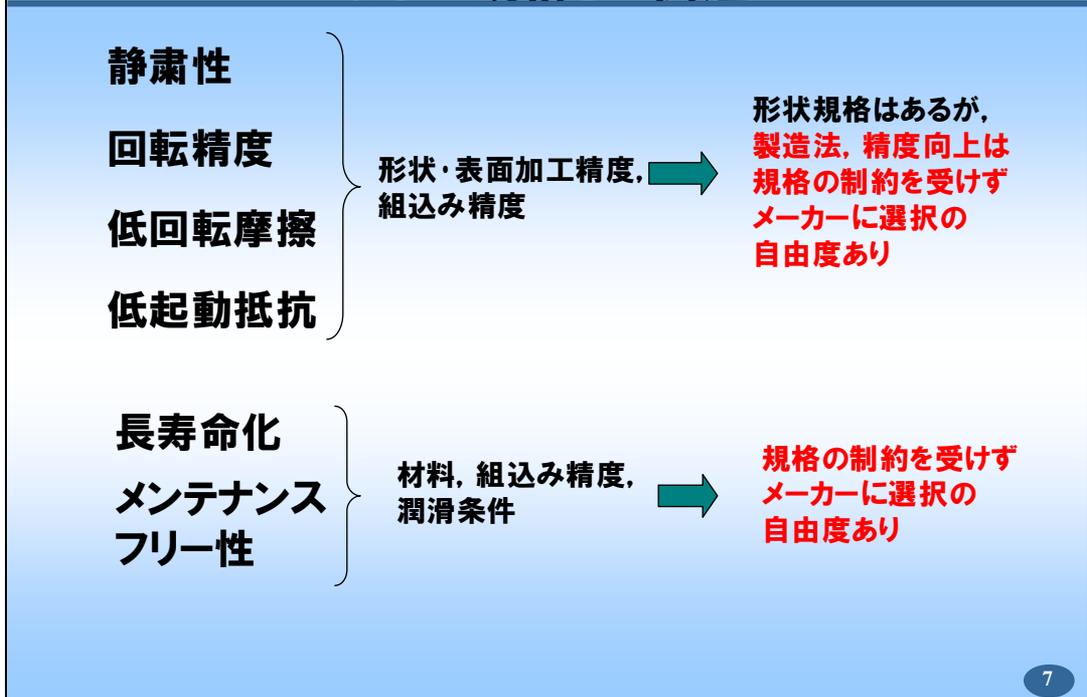
6

p. 6

◆ 解説

これらの規格の制定範囲の状況からも理解できるが、転がり軸受メーカーの技術競争は主として、規格により規定されていない分野や技術的側面、すなわち、軸受の長寿命化、コストの低さという観点に立脚して進められている。

3. 転がり軸受に要求される主要性能と影響因子 および規格との関連



p. 7

◆ 解説

転がり軸受に要求される主要性能と影響因子および規格との関連を示している。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ 軸受の寿命

寿命は転がり疲れにより支配される

軸受が荷重を受けて回転すると、適正な使用条件下でも軌道輪と転動体の転走面には絶えず繰り返し荷重が作用し、**うろこ状の損傷**が生じることがある。これを**はく離**または**フレーキング**という。この損傷が生じると回転中に大きな振動が発生し、そのまま継続使用すると軸受が破壊し、場合によっては機械に大きな損傷を与える。ジェットエンジンにこの現象が生じると飛行機の墜落を招く。

この損傷は材料の疲れに起因しており、防ぐことができないという理由で「**軸受の寿命**」という。

8

p. 8

◆ 解説

転がり軸受の寿命は、転がり疲れにより支配される。軸受が荷重を受けて回転すると、適正な使用条件下でも軌道輪と転動体の転走面には絶えず繰り返し荷重が作用し、うろこ状の損傷が生じることがある。これを**はく離**または**フレーキング**という。この損傷が生じると回転中に大きな振動が発生し、そのまま継続使用すると軸受が破壊し、場合によっては機械に大きな損傷を与える。ジェットエンジンにこの現象が生じると飛行機の墜落を招く。

この損傷は材料の疲れに起因しており、防ぐことができないという理由で「**軸受の寿命**」という。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ

転がり疲れの発生機構

深部発生説

・・・ 材料の清浄度が関連

現在使用されている寿命計算式の理論的根拠となる機構。材料内部の金属学的欠陥を起点とする考え方

表面発生説

・・・ 材料の破壊靱性が関連

材料の清浄度が向上した結果、1970年代後半から注目され出した機構。砂塵、摩耗粉などの固形異物噛み込みにより発生した微小き裂を起点とする考え方

p. 9

◆ 解説

転がり疲れの発生機構として、深部発生説と表面発生説がある。

転がり疲れにより発生したフレーキング

薄片状の金属塊が脱落して、転動面に凹状のくぼみが生じ、その後の円滑な転がり運動を阻害する。フレーキングとも呼ばれる。

転がり疲れにより発生したフレーキング

図版転載許諾申請中

トライボロジー故障例とその対策
(日本トライボロジー学会編)

p. 10

◆ 解説

転がり疲れにより発生したフレーキングの例を示す。薄片状の金属塊が脱落して、転動面に凹状のくぼみが生じ、その後の円滑な転がり運動を阻害する。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ その他のフレーキングの発生例

その他のフレーキングの発生例

図版転載許諾申請中

11

p. 11

◆ 解説

その他のフレーキングの発生例を示す。類似の損傷は歯車の歯面にも生じることがある。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ

転がり疲れの影響因子

外的因子

垂直荷重
接線荷重
衝撃負荷
固形異物混入

内的因子

接触面における応力状態
潤滑状態
軸受材料

p. 12

◆ 解説

転がり疲れの影響因子には、外的因子として、垂直荷重、接線荷重、衝撃負荷、固形異物混入があり、また内的因子として、接触面における応力状態、潤滑状態、軸受材料がある。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ 寿命の表記法

寿命計算式の標準がISO規格で規定されている。

軸受の寿命は、同じ軸受を同じ条件で運転しても大きなばらつきが生じる。これは材料そのものの疲れ現象のばらつきである。

一群の同じ軸受を同じ条件で個々に運転したときの寿命を統計的に取り扱い、そのうち90%の軸受が転がり疲れによる損傷を起こさずに回転できる総回転数を軸受の「基本定格寿命」という。これをL10(エルテン)寿命という。この値はワイブル線図から求める。

13

p. 13

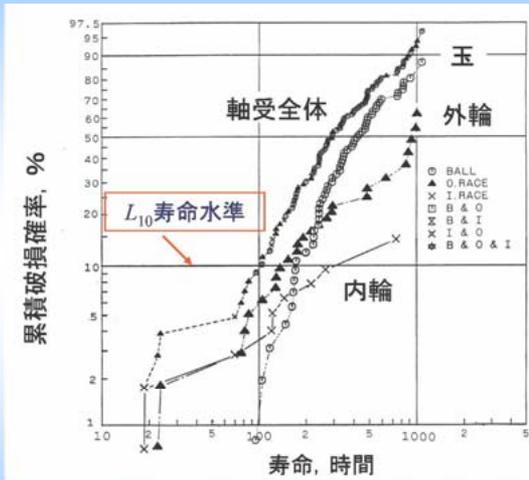
◆ 解説

寿命の表記法として、寿命計算式の標準がISO規格で規定されている。

軸受の寿命は、同じ軸受を同じ条件で運転しても大きなばらつきが生じる。これは材料そのものの疲れ現象のばらつきである。一群の同じ軸受を同じ条件で個々に運転したときの寿命を統計的に取り扱い、そのうち90%の軸受が転がり疲れによる損傷を起こさずに回転できる総回転数を軸受の「基本定格寿命」という。これをL10(エルテン)寿命という。この値は次頁のワイブル線図から求めることができる。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ 寿命データの例 (ワイブル線図)

寿命データは大きくばらつくのでワイブル確率紙上で整理する。



同じ軸受を同じ条件で
運転しても最短寿命と
最長寿命は、50倍以上
上ばらつくことはめずら
しくない。

最長寿命: 1078h
最短寿命: 19h

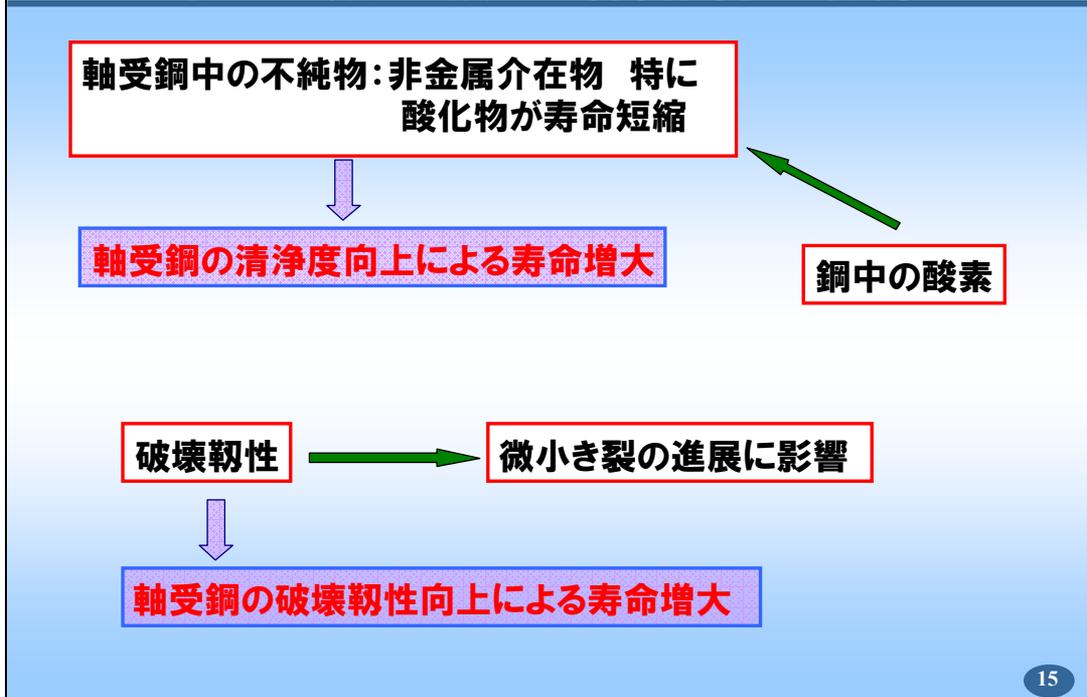
軸受寿命と部品寿命(140タービン油)

p. 14

◆ 解説

寿命データの例 (ワイブル線図)を示す。寿命データは、大きくばらつくのでワイブル確率紙上で整理する。

4. 軸受の寿命と転がり疲れ 転がり疲れに及ぼす材料因子の影響



p. 15

◆ 解説

転がり疲れに及ぼす材料因子の影響の状況を示す。

鋼中の酸素や不純物の存在が大きな影響を及ぼすので、材料の製造工程の管理が重要となる。

5. 標準化と企業戦略

転がり軸受メーカーの優位性確保の基本戦略

規格化(標準化)されていない領域における技術開発と改良により高品位・低コストの転がり軸受を製造する。



軸受材料の改良

p. 16

◆ 解説

転がり軸受メーカーの優位性確保の基本戦略は、
「規格化(標準化)されていない領域における技術開発と改良により高品位・低コストの転がり軸受を製造する」
という点に着目している。機械要素は一般に規格により、寸法や性能などの規定を受けていることが多い。このような条件の中で、他社と差別化を図る製品を供給するためには、規格により規定されていない(標準化されていない)領域で差別化を図ることが、一つの有効な基本戦略となる。

5. 標準化と企業戦略

転がり軸受材料の改良の手法

- ① 転がり軸受材料の変更
- ② 材料組成の改良
- ③ 熱処理

**これらは、現行規格の制約を受けずにメーカーの
努力で達成可能**

p. 17

◆ 解説

転がり軸受材料の改良の手法を示す。

- ① 材料(溶解金属か、セラミックスかなど)の変更・選択
- ② 材料組成の改良
- ③ 熱処理

などにより達成する。これらは、いずれも現行規格の制約を受けずに、メーカーの努力で達成可能である。

材料変更による改良①……新幹線車軸用軸受

材料変更による改良①
……新幹線車軸用軸受

図版転載許諾申請中

新幹線用台車の例

ラジアル荷重は円筒ころ軸受で支持し、
アキシャル荷重は玉軸受で支持

車軸支持部

0,100,200系
(玉軸受+円筒ころ軸受)

軸受材料の製鋼技術の改良によって実現

p. 18

◆ 解説

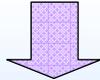
材料の改良によって、新しい「工業製品」が実用化あるいは問題が解決した例を、新幹線車軸用軸受や自動車用オルタネーター(次頁)に見ることができる。

新幹線は1964年(昭和39年)に営業運転を開始したが、当初、転がり高速運行に車軸軸受が耐えられないであろうとされていたが、特殊な鋼材の製鋼工程によりそれに耐える軸受の製造が可能となり、実用化が達成された。

材料変更による改良②……オルタネーター

自動車用発電機が直流発電機から交流発電機(オルタネーター)に移行した際に多発した転がり軸受破損の発生機構の解明

転走面からの材料内部への水素原子侵入による材料の水素脆性が特異なき裂発生の主因であることが解明



**軸受材料の改良, グリースの成分
による対策で解決**

材料変更による改良②

……オイルネーター

図版転載許諾申請中

p. 19

◆ 解説

オルタネーター(自動車用交流発電機)には, 特殊な水素脆性が関与する特異な破損が多発したが, これも軸受材料の改良やグリース成分の変更などによって解決されている。

5. 標準化と企業戦略 熱処理による改良①

高炭素クロム軸受鋼

軌道輪と転動体の材料は、一般にJISに規定されており「高炭素クロム軸受鋼」を焼入れ、焼き戻し処理して用いる。

SUJ2:最も多く使用されている軸受鋼

SUJ3:SUJ2のMn含有量を多くして焼き入れ性を向上。中型・大型軸受に用いられている。

SUJ5:SUJ3にMoを添加してさらに焼き入れ性を高めている。厚肉、超大形軸受に用いる。

規格	記号	化学記号(%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
JIS G 4805	SUJ2	0.95~ 1.10	0.15~ 0.35	0.50以下	0.025 以下	0.025 以下	1.30~1.60	-
	SUJ3	0.95~ 1.10	0.40~ 0.70	0.90~ 1.15	0.025 以下	0.025 以下	0.90~1.20	-
	SUJ5	0.95~ 1.10	0.40~ 0.70	0.90~ 1.15	0.025 以下	0.025 以下	0.90~1.20	0.10~ 0.25
SAEJ404	5210 0	0.98~ 1.10	0.15~ 0.35	0.25~ 0.45	0.025 以下	0.025 以下	1.30~1.60	0.06以下

p. 20

◆ 解説

転がり軸受材料には、高炭素クロム軸受鋼が主として用いられている。軌道輪と転動体の材料は、一般にJISに規定されている「高炭素クロム軸受鋼」を焼入れ、焼き戻し処理して用いる。代表的鋼種がSUJ2である。これは、最も多く使用されている軸受鋼である。他に、SUJ3(SUJ2のMn含有量を多くして焼き入れ性を向上。中形・大形軸受に用いられる。), SUJ5(SUJ3にMoを添加してさらに焼き入れ性を高めている)がある。

5. 標準化と企業戦略 熱処理による改良②

はだ焼鋼

軸受に衝撃荷重がかかる場合には、表面は硬く、内部は柔らかい材料が必要となるので、はだ焼鋼を用いて浸炭焼入れ、焼戻し処理して用いる。

規格	記号	化学成分(%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
JIS G 4104	SCr415	0.13~ 0.18	0.15~ 0.35	0.60~ 0.85	0.030 以下	0.030 以下	-	0.90~ 1.20	-
	SCr420	0.18~ 0.23	0.15~ 0.35	0.60~ 0.85	0.030 以下	0.030 以下	-	0.90~ 1.20	-
JIS G 4105	SCM420	0.18~ 0.23	0.15~ 0.35	0.60~ 0.85	0.030 以下	0.030 以下	-	0.90~ 1.20	0.15~ 0.30
JIS Q 4103	SNCM 220	0.17~ 0.23	0.15~ 0.35	0.60~ 0.85	0.030 以下	0.030 以下	0.40~ 0.70	0.40~ 0.65	0.15~ 0.30
	SNCM 420	0.17~ 0.23	0.15~ 0.35	0.40~ 0.70	0.030 以下	0.030 以下	1.60~ 2.00	0.40~ 0.65	0.15~ 0.30
	SNCM 815	0.12~ 0.18	0.15~ 0.35	0.30~ 0.60	0.030 以下	0.030 以下	4.00~ 4.50	0.70~ 1.00	0.15~ 0.30
SAE J 404	5120	0.17~ 0.22	0.15~ 0.35	0.70~ 0.90	0.035 以下	0.040 以下	-	0.70~ 0.90	-
	8620	0.18~ 0.23	0.15~ 0.35	0.70~ 0.90	0.035 以下	0.040 以下	0.40~ 0.70	0.40~ 0.60	0.15~ 0.25
	4320	0.17~ 0.22	0.15~ 0.30	0.45~ 0.65	0.035 以下	0.040 以下	1.65~ 2.00	0.40~ 0.60	0.20~ 0.30

p. 21

◆ 解説

はだ焼鋼も使用される。これは、軸受に衝撃荷重がかかる場合には、表面は硬く、内部は柔らかい材料が必要となるので、熱処理として、浸炭焼入れ、焼戻し処理して用いる。

5. 標準化と企業戦略

転がり軸受の寿命に及ぼす製鋼法の影響

転がり軸受の寿命に及ぼす製鋼法の影響

図版転載許諾申請中

22

p. 22

◆ 解説

転がり軸受材料の改良の歴史を見てみよう。1964年から年度ごとに寿命は着実に延びており、とくに真空脱ガス材に切り替わった後には、寿命の増大の傾向は顕著である。

転がり軸受の寿命に及ぼす製鋼法の影響を示す。新幹線が登場した1964年が原点となっていることがわかる。この後の寿命向上が着実に実現されていることがわかる。

5. 標準化と企業戦略

軸受鋼中酸素の含有量の推移

軸受鋼中酸素の含有量の推移

図版転載許諾申請中

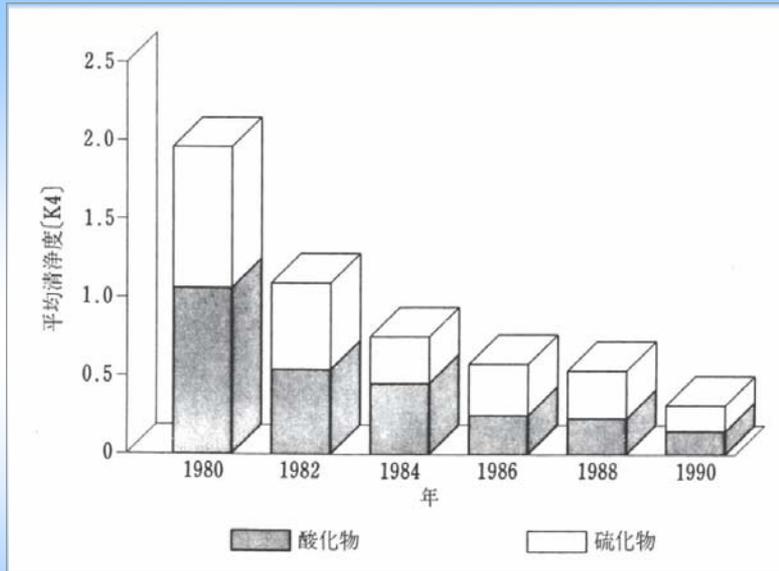
23

p. 23

◆ 解説

軸受鋼中酸素の含有量は寿命に大きな影響を与えるが、その減少による推移を示す。

軸受材料の清浄度の向上



DIN50602による評価

p. 24

◆ 解説

また、軸受材料の清浄度の向上も着実に実現されている。

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 寿命計算式の国際標準化

Lundberg-Palmgren (1947, 1952)

転がり軸受の動的負荷容量



ISO/R281-1962

基本定格寿命 L_{10}

- 累積破損確率10%(信頼度90%)の計算寿命 -

$$L_{10} = (C/P)^p$$

C : 基本動定格荷重

P : 動等価荷重

p : 定数(玉軸受:3, ころ軸受10/3)

p. 25

◆ 解説

転がり軸受の寿命計算式をめぐる規格の変遷を見てみよう。

寿命計算式の国際標準化はすでに1947年, 1952年に行われている。

寿命計算式の理論的裏付け

Lundberg-Palmgren (1947, 1952) が提唱した深部発生説に基づく。

現在使用されている寿命計算式の理論的根拠となる機構。材料内部の金属学的欠陥を起点とする考え方

…材料の清浄度が関連

深部発生説に基づく寿命計算式

の最大の問題点

⇒ 転がり軸受の外的負荷である垂直荷重のみが考慮されているのみ

p. 26

◆ 解説

寿命計算式の理論的裏付けは、深部発生説に基づくものであり、ここでは、転がり軸受に作用する外的負荷のうち、垂直荷重のみが考慮されている。

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 補正定格寿命

基本計算式では、寿命の支配因子は軸受荷重Pのみであり、軸受寿命への多くの因子の影響が十分に配慮されていない。

そこで、基本定格寿命 L_{10} を補正した補正定格寿命 (Adjusted rating life)が規定された。

p. 27

◆ 解説

これに対して、材料の改良の技術的背景や使用条件を考慮してより適用性の広い補正定格寿命が提唱されるに至った。それは、基本計算式では、寿命の支配因子は軸受荷重Pのみであり、軸受寿命への多くの因子の影響が十分には配慮されていないからであった。

そこで、基本定格寿命 L_{10} を補正した補正定格寿命 (adjusted rating life)が規定された。これは、ISO 281/I-1977として規定されている。補正係数の具体的な数値は a_1 以外には規定がないことを認識しておく必要がある。

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 ISO281/I-1977

補正定格寿命 L_{na}

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

a_1 : **信頼度係数** 
信頼度(100-n)%の寿命を
算出するための補正係数

信頼度 %	a_1
90	1
95	0.62
96	0.53
97	0.44
98	0.33
99	0.21

a_2 : **材料係数** 数値規定なし
特殊な材料特性を有する軸受に対する補正係数

a_3 : **使用条件係数** 数値規定なし
特殊な使用条件に対する補正係数

p. 28

◆ 解説
(なし)

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 ISO281/I-1977

信頼度係数 a_1

破損確率が $n\%$ 、すなわち信頼度 $(100-n)\%$ に対する信頼度係数 a_1 は、右表のとおりISO、JISにも規格化されている。

信頼度係数 a_1

信頼度, %	L_{na}	a_1
90	L_{10a}	1
95	L_{5a}	0.62
96	L_{4a}	0.53
97	L_{3a}	0.44
98	L_{2a}	0.33
99	L_{1a}	0.21

通常 a_1 の値は、信頼度が90%のときの $a_1 = 1$ が採用されるが、航空機用軸受のように特別に信頼性が重視される場合には、信頼度が95%あるいは、99%のときの a_1 の値を採用して軸受寿命を安全側に見積もる場合もある。

p. 29

◆ 解説

(なし)

信頼度係数 a_1 の補足

破損確率 $n\%$ のときの a_1 の値の根拠は以下のとおりである。

Weibull理論により, a_1 は次式で与えられる。

$$a_1 = \frac{L_n}{L_{10}} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - n / 100} \right) / \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \right]^{1/e}$$

ここに, L_n : 破損確率 $n\%$ の寿命

L_{10} : 破損確率 10% の寿命

n : 破損確率, %

指数 e : $10/9$ (玉軸受), $9/8$ (ころ軸受)

この式の適合性は, $10 < n < 50$ と言われており, $n < 10$ ではワイブル分布より寿命の長いほうに偏ることがよく知られている。したがって, $n < 10$ の a_1 の値は実験的に求めるより他に方法がない。

p. 30

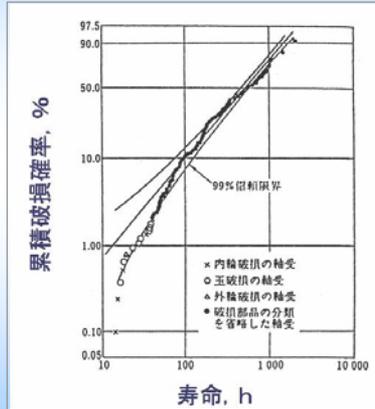
◆ 解説

(なし)

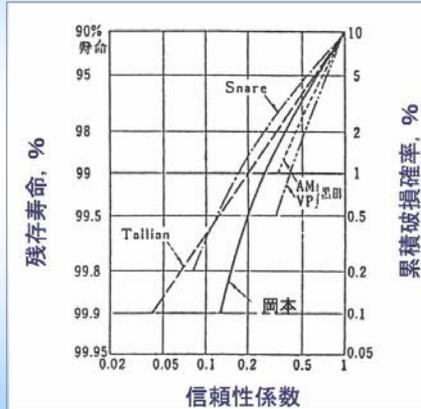
6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 ISO281/I-1977

$n < 10$ の a_1 の実験値

a_1 の値は研究者により若干異なるが Tallian の実験地が ISO 規格に採用されている。同実験は、93グループ、2520個のデータである。



寿命データのワイブル分布



a_1 決定の実験値

p. 31

◆ 解説
(なし)

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷

ISO281/I-1977

軸受特性係数 a_2

材料の種類, 品質, 製造工程, 設計が特殊な場合には, a_2 を用いて補正する。

- | | | |
|--|---|-----------|
| 1. 不純物が特に少ない鋼 | } | $a_2 > 1$ |
| 特殊な成分の鋼 | | |
| 硬さが低下した軸受 | | |
| 2. 転動体と軌道の接触面内の応力の
均一性の向上, または低下する特別な設計 | } | a_2 で補正 |
| 3. 潤滑不良で $a_3 < 1$ のとき | | |

p. 32

◆ 解説

(なし)

6. 転がり軸受寿命計算式の規格の変遷 ISO281/I-1977

使用条件係数 a_3



使用速度および温度における潤滑状態、潤滑剤に含まれる異物、材料の特性を変化させる条件の影響は、 a_3 を用いて補正する。

- | | | |
|--|---|-----------|
| 1. 転動体と軌道との接触面の油脂厚さ
\geq 接触表面の合成粗さのとき | } | $a_3=1$ |
| 2. 動粘度(玉軸受) $< 13\text{mm}^2/\text{s}$
動粘度(ころ軸受) $< 20\text{mm}^2/\text{s}$ | | $a_3 < 1$ |
| 3. 潤滑条件が特に良好 | | $a_3 > 1$ |

日本で製造される航空機であっても米国のメーカーからライセンスされているときは、使用条件係数 a_3 はASME線図を使用するようにスペックで決められている場合が多い。

p. 33

◆ 解説

(なし)

- (1) 転がり軸受メーカーの優位性確保の基本戦略は、
「規格化(標準化)されていない領域における技術開発と改良により
高品位・低コストの転がり軸受を製造する」
という点に着目している。
- (2) 転がり軸受では、材料に関する規格が制定されていない。この観点から、
高品位・低コストの製品開発戦略を立てている。
- (3) 例えば、材料の改良として具体的には
- ① 材料の変更
 - ② 材料組成の改良
 - ③ 熱処理
- などにより他社との差別化を図っている。

p. 34

◆ 解説

(なし)