

● 軸受材料

13. 軸受材料

13.1 軌道輪および転動体

転がり軸受は、軌道面と転動体との小さい接触面で大きな荷重を受けながら、高い精度を保って回転する必要がある。

このため、軌道輪および転動体は、硬さが高いこと、転がり疲労に強いこと、耐摩耗性のあることおよび寸法安定性の高いことなどの特性が要求される。特に転がり疲労寿命に大きく影響を及ぼすものとして、鋼中の非金属介在物が挙げられる。非金属介在物の中でも、硬い酸化物系の介在物は、疲労き裂の起点となりやすいため、非金属介在物の少ない清浄な鋼を用いる必要がある。

NTNの軸受は、真空脱ガス処理および炉外精錬を行うことにより有害な酸化物系の介在物を少なくした清浄な鋼を用いている。特に高信頼性を必要とする軸受には、さらに、清浄度の高い真空溶解材（VIM・VAR）やエレクトロスラグ溶解材（ESR）を使用している。

13.1.1 軌道輪および転動体の材料

1) 高・中炭素合金鋼

一般に転がり軸受の軌道輪および転動体は、いわゆる「ずぶ焼入れ」により、表面だけでなく内部まで硬くする材料が用いられる。この高・中炭素合金鋼としては、高炭素クロム軸受鋼が広く用いられる。また、大形軸受、断面寸法が大きな軸受に対しては、マンガンやモリブデンの添加により、焼入れ性を高めた軸受鋼が用いられる。その他に、中炭素鋼にシリコン、マンガンを添加し、高炭素クロム鋼と同等の焼入れ性をもった材料も使用している。

JISで規定されている代表的な高炭素クロム軸受鋼の化学成分を表13.1（A-127）に示す。多く使用されるのはSUJ2であり、大形の軸受にはMnを多くして焼入れ性を高めたSUJ3が用いられる。SUJ5はSUJ3にMoを添加して、さらに、焼入れ性を高めたもので、超大形の軸受や肉厚の厚い軸受に用いられる。

表13.1（A-127）中には、これらのJISの高炭素クロム軸受鋼に相当、あるいは近い化学成分の各国主要材料の化学成分も列挙した。JISのSUJ2の化学成分はアメリカAISI、SAE規格の52100、ドイツDIN規格の100Cr6、中国GB規格のGCr15とほぼ同等である。

2) 浸炭鋼（はだ焼鋼）

浸炭焼入れは表面から適当な深さまで硬化させ、比較的硬さの低い心部（コア）を形成させるものである。硬さと靱性を兼ね備えており、耐衝撃性に優れている。NTNの多くの円すいころ軸受は浸炭鋼（はだ焼鋼）を使用している。このうち小中形軸受に対してはクロム鋼、クロム・モリブデン鋼を、大形軸受に対してはニッケル・クロム・モリブデン鋼を使用している。JISの代表的浸炭鋼（はだ焼鋼）の化学成分を表13.2（A-128）に示す。

表中には類似の各国主要材料の化学成分も列挙した。JISのSCM420の化学成分はアメリカAISI、SAE規格の4118、ドイツDIN規格の20CrMo4や25CrMo4とほぼ同等である。中国GB規格のG20CrMoはややCrとMo量が異なる。

3) 耐熱軸受鋼

標準的な熱処理を施した高炭素クロム鋼の軸受は、13.1.2で述べるように、高温で長時間使用すると、比較的大きな経年寸法変化が生じる。したがって、その最高使用温度に応じた寸法安定化処理（TS処理）を施した軸受が用いられる。この寸法安定化処理を行うことにより、硬さが低下するため、転がり疲労寿命は低下する（A-18「3.3.2 軸受特性係数 a_2 」項参照）。なお、通常の使用においても経年寸法変化を生じる。

150～200℃程度の準高温用軸受に用いられる材料としては、シリコンを添加し耐熱性を上げた材料があり、高温での硬さ低下および寸法変化が少なく、優れた転がり疲労寿命を示す。

さらに、高温で用いられる軸受には、使用中の軟化および寸法変化の少ない耐熱鋼が用いられる。耐熱鋼は、モリブデン系の高速度鋼やタンゲストン系の高速度鋼である〔表13.3（A-129）参照〕。

また、耐熱性が要求され、かつ高速回転で用いられる軸受には、モリブデン系の耐熱浸炭鋼（耐熱はだ焼鋼）を使用している。

4) 耐食軸受鋼

耐食性を求められる用途には、**ステンレス鋼**が用いられる。耐食性に寄与する合金元素であるクロムを多く含有したマルテンサイト系ステンレス鋼【表 13.4 (A-129) 参照】を使用している。

5) 高周波焼入れ鋼

浸炭焼入れ以外に軌道面を表面硬化する方法として、高周波焼入れが挙げられる。この場合、ずぶ焼入れ鋼よりも炭素量の少ない**中炭素鋼**が主に使用される。

小形製品に用いられるJISの代表的中炭素鋼(機械構造用炭素鋼)と類似の各国主要材料の化学成分を表 13.5 (A-129) に列挙した。**大形軸受**や**断面寸法が大きな軸受**で、深い硬化層が要求される場合には、**クロム**や**モリブデン**を添加した**中炭素鋼**を用いる。

6) その他の材料

超高速回転や耐食性用途には、セラミックス(Si₃N₄)材料が使用される。

13.1.2 軸受材料の性質および特性

1) 軸受用材料の物理的性質、機械的性質(樹脂以外)

軌道輪や転動体、保持器に用いられる代表材料の物理的性質、機械的性質を表 13.6 および表 13.7 (A-130) に示す。

2) 軸受の経年寸法変化

軸受は使用条件によっては長時間使用した場合に、寸法変化を起こすことがある。この現象を経年寸法変化という。

<経年寸法変化発生メカニズム>

標準的な軸受鋼の組織は、硬いマルテンサイトの素地に少量のオーステナイトが存在している。このオーステナイトは、軸受鋼焼入れ工程の冷却過程でマルテンサイトに変態せずに一部が残ったものであり、残留オーステナイトと呼ばれている。

残留オーステナイトは不安定な組織であるため、軸受使用中に安定な組織(マルテンサイト)へと変態していく。この組織変態が軸受の経年寸法変化の原因である。

図 13.1 に、標準軸受を 120℃ で長時間保持した場合の経年寸法変化の実測値を例示する。

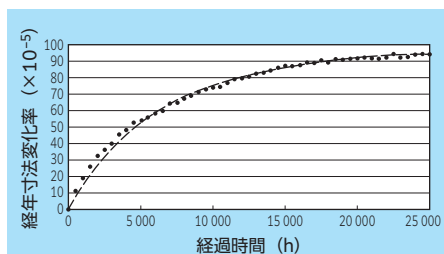


図 13.1 標準軸受を 120℃ で長時間保持した場合の経年寸法変化率(実測値)例

経年寸法変化率は、経過時間が長いほど、また、保持温度が高いほど、大きくなる。

使用条件によっては、一般的な軸受鋼製軸受の常時使用限界である 100℃ 以下の温度であっても、**経年寸法変化が発生する点**に十分注意しなければならない。

なお、寸法安定化処理(TS処理)を施した軸受では、経年寸法変化率が大幅に低下する。詳細については、NTN にご照会ください。

<経年寸法変化によって起こり得るトラブルおよび対策>

寸法変化では、特に内輪の膨張に注意する必要がある。経年寸法変化により内輪が膨張すると、内輪と軸のしめしろが減少し、クリープや軸方向の移動によって、重大な損傷につながる可能性がある。そのため、**軸受を長期間使用する場合には、経年寸法変化によるしめしろ減少についても十分考慮し、軸受仕様や軸受の固定方法を決定しなければならない。**例として、しめしろの増加(「7. はめあい」項参照)やアキシアル方向の固定強化(「14. 軸およびハウジングの設計」項参照)などが挙げられる。

<特に経年寸法変化に注意すべき状況>

軸受の経年寸法変化量は、軸受寸法×経年寸法変化率で表される。そのため、同一温度・同一経過時間の条件であれば、サイズの大きい軸受の方がより大きな経年寸法変化量を示す。したがって、サイズの大きい軸受をしめしろが小さいはめあい

で使用する場合、特に経年寸法変化量に注意すべきである。

また、経年寸法変化は軸受を取付けた直後の回転検査などでは発生せず、長期間の運転後に判明する。そのため、長期間使用される機械や使用箇所では、定期的な保守点検がトラブル防止に有効である。詳細検討が必要な場合は、事前に NTN にご照会ください。

13.2 保持器

保持器の材料には回転中に受ける振動や衝撃荷重に耐えることのできる強度や転動体および軌道輪との摩擦が小さく、軽量でかつ軸受の運転温度に耐えることが要求される。

13.2.1 金属材料

小形、中形軸受に用いる打抜き保持器の材料には、0.1%程度の低炭素の冷間または熱間圧延鋼板が使用されるほか、用途に応じてオーステナイト系ステンレス鋼板が使用される。**大形軸受**では、一般的に、もみ抜き保持器を用い、材料は**機械構造用炭素鋼**および**高力黄銅**が多く使用され、**アルミ合金**なども用いられる。これらの代表的な保持器材料の化学成分を表 13.8、表 13.9 (A-130) に示す。

航空機用軸受には、**高力黄銅**以外に中炭素の**ニッケル・クロム・モリブデン鋼**の焼入れ・高温焼もどし処理されたものが用いられる。また、潤滑特性を向上させるため、これらの材料に**銀めっき**を施したものが多く用いられている。

13.2.2 樹脂材料

近年、金属に替わり、軽量かつ複雑な形状の成形が容易な樹脂製保持器が多用されるようになっている。一方で、樹脂は金属に比べ強度、耐熱性が低いなどの欠点を有するため、使用に際しては特徴を生かした樹脂材の選定が重要である。表 13.10 (A-131) に主な保持器樹脂材料の特徴を示す。これらの材料は無充填で使われることは少なく、通常はガラス繊維(GF)や炭素繊維(CF)で強化して使われる。

【樹脂材料の特徴】

(利 点)	(欠 点)
・軽量	・金属と比べ強度が低い。
・耐食性が高い。	・金属と比べ耐熱性が低い。
・自己潤滑性が高く、摩擦耗粉を出しにくい。	・温度に対する強度、弾性率の変化が大きい。
・低騒音	・長期にわたり高温に曝されると物性(強度)が変化する。
・複雑な形状の成形が容易設計の自由度が高い。	・ある種の薬品、油脂に侵され強度が低下することがある。
・生産性が高い。	・熱膨張係数が高く、金属よりも寸法変化が大きい。

<<ポリアミド(PA): 66, 46 >>

強度、耐熱性、耐摩耗性、成形性に優れ、廉価なため一般的な保持器材として最適である。本材料の特徴として、吸水性が高く、吸水による物性の低下や寸法変化があるという短所がある反面、吸水により可撓性、靱性が向上するため、保持器の組立て性、耐衝撃性という面では、長所にもなっている。ただし、高温下、硫黄系(S系)やリン系(P系)極圧添加剤を含む潤滑油に曝されると急激に物性(強度)が低下することがある。特にガラス繊維で強化したポリアミド 66 は保持器材として優れた性能を示すため、最も多く使用されている。

<<ポリフェニレンサルファイド(PPS) >>

耐熱性が高く(連続使用温度は 220~240℃)、耐薬品性、熔融流動性、成形性に対しても優れた性能を示す。

<<ポリエーテルエーテルケトン(PEEK) >>

熱可塑性樹脂の中で最も高い耐熱性を有する(連続使用温度は 240~260℃)。自己潤滑性、耐衝撃性、耐薬品性にも優れているが、残念ながら非常に高価である。主に、工作機械用超高速円筒ころ軸受の保持器として使用されている。

<<布入りフェノール樹脂>>

熱硬化性樹脂である。フェノール樹脂の硬くて脆い、耐衝撃性が低いという短所を布入りすることで解消している。軽量で潤滑性が高く、機械的特性が良好である。熱硬化性のため射出成形ができず、保持器は機械加工で製作される。主に、工作機械用高速アングュラ玉軸受の保持器として使用されている。

13.3 シール用ゴム

シール用ゴム材料には、耐熱性、耐油性の高い合成ゴムが使用され、耐熱性の違いにより使い分けられている。

表 13.11 (A-131) にゴム材料の代表的な特徴を示す。

≪ニトリルゴム (NBR) ≫

耐油性、耐熱性、耐摩耗性が高く、一般的なゴムシールとして多く使用されている。使用温度範囲は -20 ~ 120 °C である。

≪アクリルゴム (ACM) ≫

NBR よりも耐熱性が高く、NBR の適用温度以上で使用される。耐油性に優れているが、エステル油中では膨潤するため、注意が必要である。耐エステル油グレードを用意している。使用温度範囲は -15 ~ 150 °C である。

≪ふっ素ゴム (FKM) ≫

ゴム材料として、耐熱性、耐油性、耐薬品性に優れている。アミンにより劣化するため、高温でアミンを析出するウレア系グリースとの組合せは注意を要する。使用温度範囲は -20 ~ 230 °C である。

13.4 軸受周辺 (軸, ハウジング)

軸, ハウジングに用いられる代表材料の物性値, 機械的特性値を表 13.12 (A-131) および表 13.13 (A-132) に示す。軸材料の場合, 基本的に大きな荷重が作用する用途では熱処理を施し, 曲げ強度や耐摩耗性 (フレッチング強度) を高めた鋼が使用される。このような用途では軸受用の鋼材 [表 13.6 および表 13.7 (A-130) 参照] も軸材料として使われることが多い。

ハウジング材料でも大きな荷重が作用する用途では熱処理を施し, 耐摩耗性 (フレッチング強度) を高めたものが使用されるが, 軽量化用途ではアルミニウム合金が多く使用されている。

13.5 NTN 長寿命軸受の紹介

NTN では, 軸受の長寿命化に対して, さまざまな観点からのアプローチや研究開発を進めている。ここでは, 軸受材料および熱処理からのアプローチの一例として, (1) TAB・ETA・EA 軸受, (2) FA 円すいころ軸受について紹介する。

13.5.1 TAB・ETA・EA 軸受シリーズ

1) 特徴

①高硬度異物混入の潤滑に強い

自動車の T/M 軸受の損傷は, 潤滑油中の異物によるものが多い。そのような潤滑条件下では, TAB・ETA・EA 軸受を使用することにより装置の実寿命の延長が図れる。

②耐ピーリング強度が高い

ピーリング損傷は, 使用中の潤滑条件の低下により引き起こされる。ピーリング強度を高くすることにより, 極限寿命の延長が図れる。

2) 長寿命化の機構

軸受の損傷は, 軌道表面部に発生するため, 特殊熱処理および材料の選定により表層組織の靱性を高め, 表面硬度を落とさずにねばり強い組織とした。また, 円すいころ軸受では, クラウニングも最適化している。これらにより, 剥離や各種損傷の起点となる微小なクラックの発生を抑制しており長寿命等各種の特徴がある。

①き裂抵抗と応力緩和効果

マルテンサイト母相に比べ軟かい残留オーステナイトは, 異物混入潤滑条件下では, 転走面に生じた異物による圧こん周辺に作用する応力集中を緩和し, き裂の発生を抑える効果がある。

図 13.2 に示すように圧こん部の極表層は, いずれも残留応力が引張り側へ移行しており, ずぶ焼入鋼の標準熱処理品は残留引張応力を生じている。特殊熱処理品と標準熱処理品を比較すると, 特殊熱処理品の方が有害な引張り側への応力の移行が少なく応力緩和作用が認められる。

②長寿命の理由

ETA・EA 軸受は, 前記の特殊熱処理により, 表層部に適度の残留オーステナイトと炭化物を分散させた組織とし, かつ, この組織の熱的安定性を図ったものである。

通常, 軌道面は, 転動による発熱やせん断応力の作用により材料 (残留応力, 硬さ, ミクロ組織など) が変化し, 疲労き裂が発生しやすくなる。したがって, 焼もどし軟化抵抗性の向上が表面起点型損傷に対して有効である。通常の浸炭により得られる残留オーステナイトは, き裂の発生や進展を抑え, また, 使用中に加工硬化する (強度が上がる) ので, 適度を含むことで強靱な材料にすることができるが, 熱に対しては不安定である。これに対し, 適切な条件での窒素を侵入拡散させると, 残留オーステナイトや母相 (マトリックス) のマルテンサイトが熱に対して安定になり, 変化しにくい材料になる。

3) 対応軸受サイズ

表 13.15

●深溝玉シリーズ	●円すいころシリーズ
TAB000~TAB020	軸受外径φ600 mm以下の全型番
TAB200~TAB217	
TAB300~TAB311	

上記以外の型番については NTN にご照会ください。

表 13.14 各種材料の圧こん形状の比較

材 料	表面硬さ [HRC]	残留オーステナイト量 [%]	圧こん径 [mm]	圧こん深さ [μm]	盛りり量 [μm]	
ずぶ焼入鋼	標準軸受	62.0	10	2.40	80	5
浸炭鋼 (はだ焼鋼)	TAB軸受	62.0	28	2.45	83	4
	標準軸受	61.0	25	2.80	102.5	1
	ETA軸受	62.5	29	2.63	97.5	1

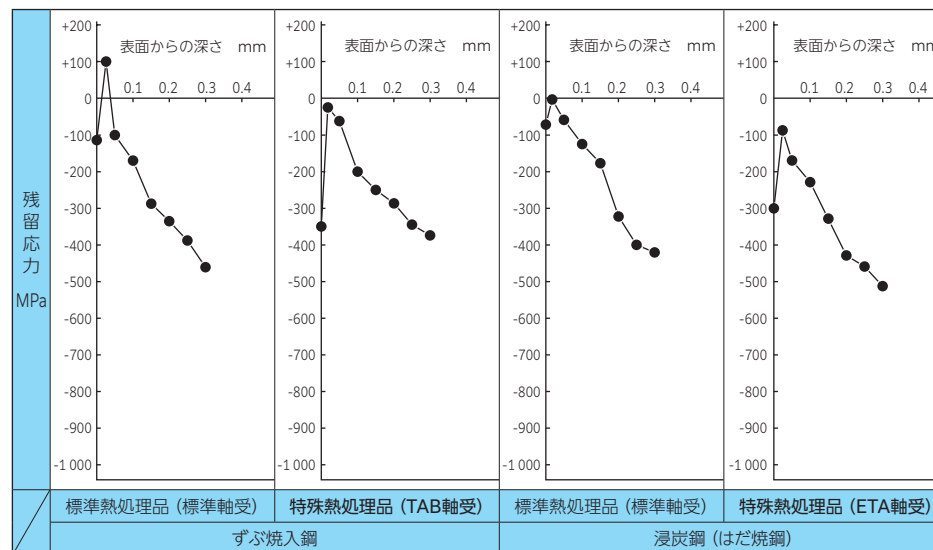


図 13.2 圧こん部の残留応力

4) 寿命試験

標準軸受とTAB軸受およびETA軸受についての寿命試験結果を示すが、異物混入潤滑油条件下では異物の種類などに依存するデータのばらつきがあるので参考としてください。

① 試験軸受と試験条件

表 13.16 に試験軸受、表 13.17 および表 13.18 に試験条件を示す。

② 寿命データ

異物混入潤滑油条件 (参考)

NTN 標準異物を混入した潤滑条件下での試験結果を図 13.3 および図 13.4 に示す。

表 13.16 試験軸受

軸受名称	主要寸法 mm
標準軸受 6206	φ30 × φ62 × 16
TAB軸受 TAB206	↑
標準軸受 30206	φ30 × φ62 × 17.25
ETA軸受 ETA-30206	↑

表 13.17 試験条件 (6206, TAB206)

ラジアル荷重 kN	6.9
回転速度 min ⁻¹	2 000
潤滑油	タービンオイル56 + NTN標準異物
潤滑方法	油浴潤滑

表 13.18 試験条件 (30206, ETA-30206)

ラジアル荷重 kN	17.64
回転速度 min ⁻¹	2 000
潤滑油	タービンオイル56 + NTN標準異物
潤滑方法	油浴潤滑

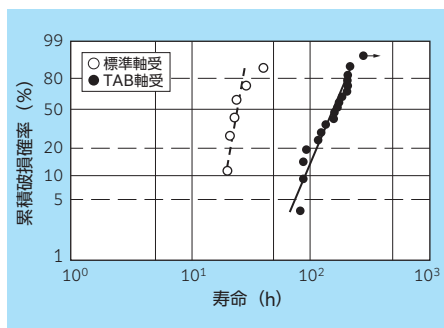


図 13.3 TAB 深溝玉軸受と標準軸受の寿命比較 (異物混入)

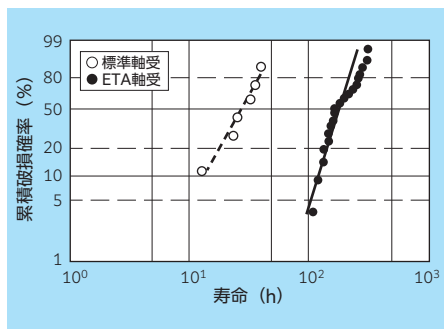


図 13.4 ETA 円すいころ軸受と標準軸受の寿命比較 (異物混入)

13.5.2 FA 円すいころ軸受

NTN は、結晶粒の微細化強化に着目し、軸受鋼の結晶粒を従来の半分以下に微細化する特殊熱処理 (FA 処理) を開発した (図 13.5 参照)。「FA 円すいころ軸受」は、この技術を採用することにより耐圧こん強度の向上と異物混入潤滑条件下での世界最高水準の長寿命を実現した。さらに、ECO-Top 円すいころ軸受で培った軸受内部の最適化設計技術を融合することにより、つば部の耐焼付き性も向上させ、軸受サイズの大幅なコンパクト化を可能にした。

注) FA 処理: Fine Austenite Strengthening 処理の略称

1) 長寿命化

- ・結晶粒微細化強化による転動疲労寿命の向上
- ・浸炭浸窒処理による残留オーステナイト量の最適化および結晶粒微細化強化技術による異物噛込み等に起因する表面起点型損傷への耐力向上
- ・軽荷重から重荷重まで最適な接触応力分布が得られるように設計された特殊クラウニングの採用

以上により、実機条件に近い油種および異物混入潤滑条件下での寿命が、標準品よりはるかに延長された。

2) 最適油膜形成設計

円すいころ軸受のつば部は滑り接触をしており、この部分の油膜形成能力の善し悪しが軸受の性能を大きく左右する。

FA 円すいころ軸受では、ECO-Top 円すいころ軸受で培ったつばおよびころの接触部形状、精度、粗さ等の最適化技術により、つば部の油膜形成能力を向上させ、回転トルクの低減、耐焼付き性と耐予圧抜け性の向上を実現した。

3) 組立幅の早期安定化

円すいころ軸受に予圧をかけて使用する場合は、その組立工程で、軸受に十分な落ち着き回転を与え、ころ端面と内輪つば面が接触した適正な状態にする必要がある。

この落ち着き回転数が少ないほど確実に予圧設定ができ、組立作業のスピードアップが図れる。

FA 円すいころ軸受では、内部設計の最適化により、確実な予圧設定が短時間で可能である。例

えば、早期安定化のためにギヤ油を塗布している場合は、塗布を止め、防せい油状態で従来と同等の回転数で、ころが落ち着く。

4) 耐圧こん性の向上

軸受のコンパクト化を実現するためには、定格荷重の低下による安全率の低下を防ぐため、耐圧こん性の向上が必要である。

FA 円すいころ軸受は、安全率 (S_0) = 0.6 の静的荷重負荷を行っても、圧こん深さは転動体直径の 1 万分の 1 未満である。

FA処理 (Fine Austenite Strengthening)

- ・軸受鋼の結晶粒微細化技術により長寿命化を実現
- ・軸受鋼の結晶粒を従来の半分以下に微細化

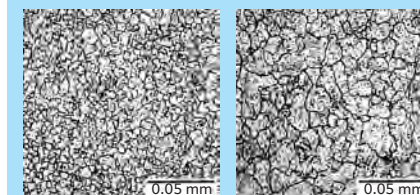


図 13.5 旧オーステナイト結晶粒界

5) 試験データ

①寿命

(線接触型寿命試験条件)

試験機 : NTN 線接触型寿命試験機
 試験片 (mm) : $\phi 12 \times L12, R480$
 相手試片 (mm) : $\phi 20$ ころ (SUJ2)
 荷重 (kN) : 13.74
 接触応力 (MPa) : 4 155 (P_{max})
 潤滑油 : タービンオイル 68

表 13.19 清浄油潤滑条件下での寿命試験結果 (線接触型試験片での比較試験結果)

熱処理方法	L_{10} 寿命, $\times 10^4$ 回	L_{10} 寿命比
4Top	1 523	1.0
ECO-Top (ETA)	3 140	2.1
FA	4 290	2.8

* L_{10} 寿命比は 4Top を 1.0 としたときの比較

(軸受寿命試験条件)

試験機 : NTN 軸受寿命試験機
 試験軸受 : ① 30206
 : ② 30306D
 試験荷重 : ① $F_r = 17.64$ kN, $F_a = 1.47$ kN
 : ② $F_r = 19.6$ kN, $F_a = 13.72$ kN
 回転速度 : $2\ 000\ \text{min}^{-1}$
 潤滑 : ①タービンオイル 56 油浴 (30 ml)
 : ② ATF 油浴 (50 ml)
 異物 : ① $50\ \mu\text{m}$ 以下 : 90 wt% } $1.0\ \text{g/l}$
 : $100\sim 180\ \mu\text{m}$: 10 wt% }
 : ② $50\ \mu\text{m}$ 以下 : 75 wt% } $0.2\ \text{g/l}$
 : $100\sim 180\ \mu\text{m}$: 25 wt% }
 計算寿命 : ① 169 h (異物なし)
 : ② 171 h (異物なし)

表 13.20 異物混入潤滑条件下での寿命試験結果 (軸受による比較試験結果)

試験条件		4Top	ECO-Top (ETA)	FA
条件①	L_{10} 寿命(h)	52.4	314.9	415.6
	L_{10} 寿命比	1.0	6.0	7.9
条件②	L_{10} 寿命(h)	22.5	—	309.7
	L_{10} 寿命比	1.0	—	13.8

* L_{10} 寿命比は 4Top を 1.0 としたときの比較

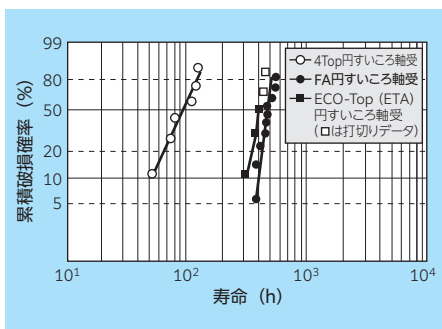


図 13.16 条件① 30206 寿命試験結果 (異物混入潤滑下)

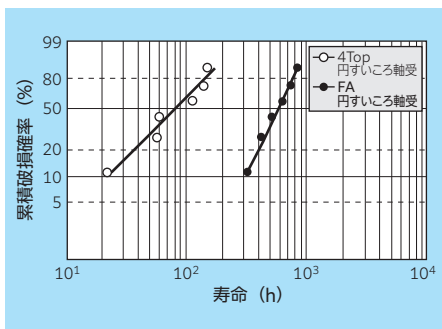


図 13.17 条件② 30306D 寿命試験結果 (異物混入潤滑下)

②回転トルク

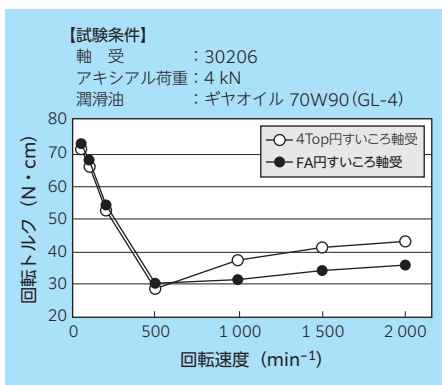


図 13.18 回転トルク測定結果

③耐焼付き性

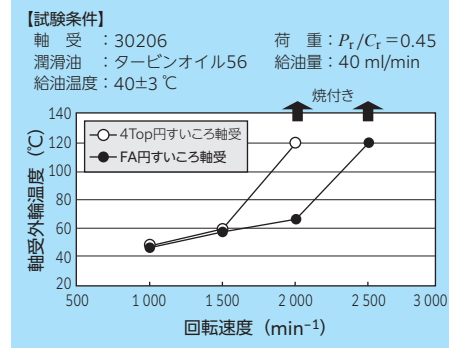


図 13.9 昇温確認試験結果

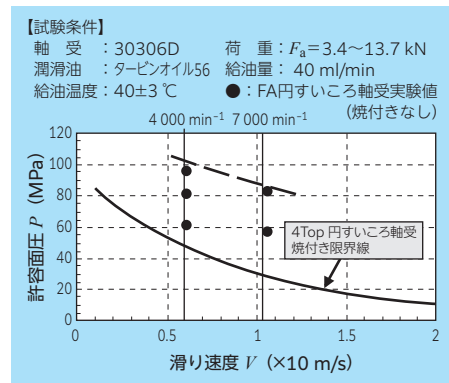


図 13.10 耐面圧確認試験結果

④耐予圧抜け性

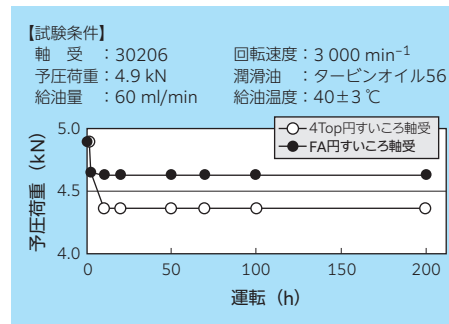


図 13.11 耐予圧抜け試験結果

⑤組立幅早期安定化

軸受 : 30206
 アキシャル荷重 : 29.4 N
 試験方法 : 軸受を図 13.12 に示す姿勢にして置き、アキシャル荷重 (おもり) を作用させて内輪を回転させ、1 回転ごとの内輪下がり量を測定し、落ち着くまでの回転数を求める。

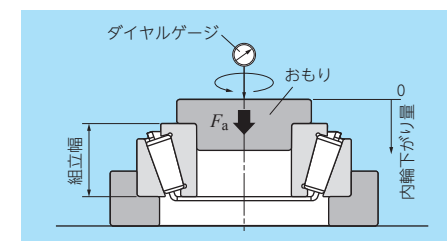


図 13.12 組立幅落ち着き回転数測定方法

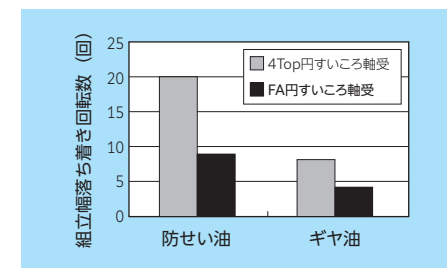


図 13.13 組立幅落ち着き回転数測定結果

⑥耐圧こん強度

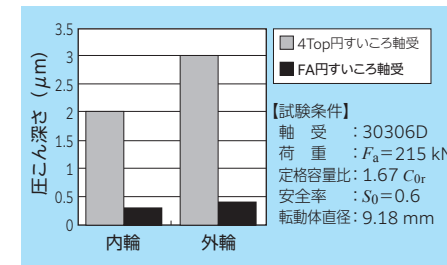


図 13.14 圧こん深さ測定結果

6) FA円すいころ軸受によるコンパクト化

軸受寿命, 耐焼付き性, 耐圧こん強度の向上により, FA円すいころ軸受を採用すれば, 以下に示すコンパクト化が可能になる(図 13.15 参照)。

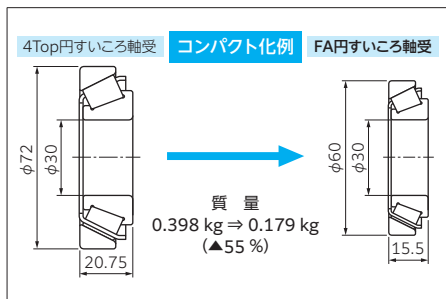


図 13.15 コンパクト化例

7) 対応軸受サイズ

軸受外径φ145 mm以下を対象としているが, 詳細については, NTNにご照会ください。

13.6 軸受の疲労解析技術の紹介

転動疲労により, 塑性変形を受けた領域では, X線応力測定で得られる各種X線分析値(残留応力, 回折線半価幅, 残留オーステナイト)が変化。この性質を利用して, X線応力測定の結果から転動疲労の進行度(疲労度)を推定する技術がある(図 13.16 参照)。NTNでは1980年代半ばより, 市場で発生頻度の高い代表的な表面起点型損傷(ピーリング, 圧こん起点型早期剥離)を対象として, X線分析値(図 13.16 では疲労度)と寿命比(ピーリングまたは剥離が生じた運転時間を100%として, それまでの運転時間を百分率で表した値)の関係进行调查してきた。この関係は, さまざまな転動条件(表面粗さの組合せ, 荷重, 潤滑条件)で変化するため, あくまで参考値であるが, この関係図を使えばおおまかには余寿命が見積られる。

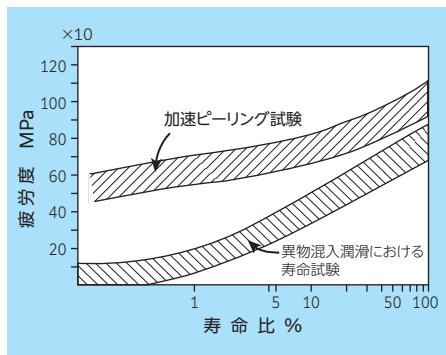


図 13.16 疲労度と寿命比の関係

最近では, 疲労後期にも感度が高いX線回折ピーク強度のばらつきも使った疲労度推定の研究が行われている。

表 13.1 代表的な高炭素クロム軸受鋼の化学成分

国名	規格名	材料	主要化学成分 (%)								JISの相当鋼, 近似鋼	
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo		Cu
日本	JIS G 4805 (2019)	SUJ2	0.95 ~1.10	0.15 ~0.35	≤0.50	≤0.025	≤0.025	≤0.25	1.30 ~1.60	≤0.08	≤0.25	
		SUJ3	0.95 ~1.10	0.40 ~0.70	0.90 ~1.15	≤0.025	≤0.025	≤0.25	0.90 ~1.20	≤0.08	≤0.25	
		SUJ4	0.95 ~1.10	0.15 ~0.35	≤0.50	≤0.025	≤0.025	≤0.25	1.30 ~1.60	0.10 ~0.25	≤0.25	
		SUJ5	0.95 ~1.10	0.40 ~0.70	0.90 ~1.15	≤0.025	≤0.025	≤0.25	0.90 ~1.20	0.10 ~0.25	≤0.25	
USA	ASTM A1040 (2010)	50100	0.98 ~1.10	0.15 ~0.35	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.025	≤0.25	0.40 ~0.60	≤0.10	≤0.35	
		51100	0.98 ~1.10	0.15 ~0.35	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.025	≤0.25	0.90 ~1.15	≤0.10	≤0.35	
	ASTM A295/295M (2014) AISI A295/295M (2014) SAE AMS 6440S (2015)	52100	0.93 ~1.05	0.15 ~0.35	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.015	≤0.25	1.35 ~1.60	≤0.10	≤0.30	SUJ2
		ASTM A485 (2014)	A485 Grade1	0.90 ~1.05	0.45 ~0.75	0.90 ~1.20	≤0.025	≤0.015	≤0.25	0.90 ~1.20	≤0.10	≤0.30
フランス ドイツ	NF EN ISO 683-17 (2014) DIN EN ISO 683-17 (2014)	100Cr6	0.93 ~1.05	0.15 ~0.35	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.015	—	1.35 ~1.60	≤0.10	≤0.30	SUJ2
		100CrMnSi4-4	0.93 ~1.05	0.45 ~0.75	0.90 ~1.20	≤0.025	≤0.015	—	0.90 ~1.20	≤0.10	≤0.30	SUJ3
		100CrMnSi6-4	0.93 ~1.05	0.45 ~0.75	1.00 ~1.20	≤0.025	≤0.015	—	1.40 ~1.65	≤0.10	≤0.30	
		100CrMo7	0.93 ~1.05	0.15 ~0.45	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.015	—	1.65 ~1.95	0.15 ~0.30	≤0.30	
		100CrMo7-3	0.93 ~1.05	0.15 ~0.45	0.60 ~0.80	≤0.025	≤0.015	—	1.65 ~1.95	0.20 ~0.35	≤0.30	
		100CrMnMoSi8-4-6	0.93 ~1.05	0.40 ~0.60	0.80 ~1.10	≤0.025	≤0.015	—	1.80 ~2.05	0.50 ~0.60	≤0.30	
中国	GB/T 18254 (2016)	GCr4	0.95 ~1.05	0.15 ~0.30	0.15 ~0.30	≤0.025	≤0.020	≤0.25	0.35 ~0.50	≤0.08	≤0.20	
		GCr15	0.95 ~1.05	0.15 ~0.35	0.25 ~0.45	≤0.025	≤0.025	≤0.30	1.40 ~1.65	≤0.10	≤0.25	SUJ2
		GCr15SiMn	0.95 ~1.05	0.45 ~0.75	0.95 ~1.25	≤0.025	≤0.025	≤0.30	1.40 ~1.65	≤0.10	≤0.25	
		GCr15SiMo	0.95 ~1.10	0.65 ~0.85	0.20 ~0.40	≤0.027	≤0.020	≤0.30	1.40 ~1.70	0.30 ~0.40	≤0.25	
		GCr18Mo	0.95 ~1.05	0.20 ~0.40	0.25 ~0.40	≤0.025	≤0.020	≤0.25	1.65 ~1.95	0.15 ~0.25	≤0.25	

表 13.2 各国主要材料成分比較表〔浸炭鋼（はだ焼鋼）〕

国名	規格名	材料	主要化学成分 (%)									JISの相当鋼、 近似鋼
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	
日本	JIS G 4053 (2016)	SCr420	0.18 ~0.23	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.25	0.90 ~1.20	—	≤0.30	
		SCr435	0.33 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.25	0.90 ~1.20	—	≤0.30	
		SCM420	0.18 ~0.23	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.25	0.90 ~1.20	0.15 ~0.25	≤0.30	
		SCM435	0.33 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.25	0.90 ~1.20	0.15 ~0.30	≤0.30	
		SNCM420	0.17 ~0.23	0.15 ~0.35	0.40 ~0.70	≤0.030	≤0.030	1.60 ~2.00	0.40 ~0.60	0.15 ~0.30	≤0.30	
		SNCM815	0.12 ~0.18	0.15 ~0.35	0.30 ~0.60	≤0.030	≤0.030	4.00 ~4.50	0.70 ~1.00	0.15 ~0.30	≤0.30	
USA	AISI A29/29M (2015) SAE J404 (2009)	5120	0.17 ~0.22	0.15 ~0.35	0.70 ~0.90	≤0.035	≤0.040	≤0.25	0.70 ~0.90	≤0.06	≤0.35	SCr420
		4118	0.18 ~0.23	0.15 ~0.35	0.70 ~0.90	≤0.035	≤0.040	≤0.25	0.40 ~0.60	0.08 ~0.15	≤0.35	SCM420
		4135	0.33 ~0.38	0.15 ~0.35	0.70 ~0.90	≤0.035	≤0.040	≤0.25	0.80 ~1.10	0.15 ~0.25	≤0.35	SCM435
		4320	0.17 ~0.22	0.15 ~0.35	0.45 ~0.65	≤0.035	≤0.040	1.65 ~2.00	0.40 ~0.60	0.20 ~0.30	≤0.35	SNCM420
		8620	0.17 ~0.22	0.15 ~0.35	0.70 ~0.90	≤0.035	≤0.040	0.40 ~0.60	0.40 ~0.60	0.15 ~0.25	≤0.35	SNCM220
	AISI A29/29M (2015)	5135	0.33 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.80	≤0.035	≤0.040	≤0.25	0.80 ~1.05	≤0.06	≤0.35	SCr435
AISI SAE AMS 6263M (2016)	9315	0.11 ~0.17	0.15 ~0.35	0.40 ~0.70	≤0.025	≤0.025	3.00 ~3.50	1.00 ~1.40	0.08 ~0.15	≤0.35	SNCM815	
フランス ・ ドイツ	NF EN ISO 683-17 (2014) ・ DIN EN ISO 683-17 (2014)	20Cr4	0.17 ~0.23	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.025	≤0.015	—	0.90 ~1.20	—	≤0.30	SCr420
		20CrMo4	0.17 ~0.23	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.025	≤0.015	—	0.90 ~1.20	0.15 ~0.25	≤0.30	SCM420
		20NiCrMo7	0.17 ~0.23	≤0.40	0.40 ~0.70	≤0.025	≤0.015	1.60 ~2.00	0.35 ~0.65	0.20 ~0.30	≤0.30	
	NF EN 10084 (2008) ・ DIN EN 10084 (2008)	18NiCrMo14-6	0.15 ~0.20	≤0.40	0.40 ~0.70	≤0.025	≤0.015	3.25 ~3.75	1.30 ~1.60	0.15 ~0.25	≤0.30	
		17NiCrMo6-4	0.14 ~0.20	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.025	≤0.035	1.20 ~1.50	0.80 ~1.10	0.15 ~0.25	—	
		37Cr4	0.34 ~0.41	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.035	≤0.035	—	0.90 ~1.20	—	—	SCr435
NF EN 10083-1 (1996) ・ DIN EN 10083-1 (1996)	25CrMo4	0.22 ~0.29	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.035	≤0.035	—	0.90 ~1.20	0.15 ~0.30	—	SCM420	
	34CrMo4	0.30 ~0.37	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.035	≤0.035	—	0.90 ~1.20	0.15 ~0.30	—	SCM435	
中国	GB/T 3203 (1982)	G20CrMo	0.17 ~0.23	0.20 ~0.35	0.65 ~0.95	≤0.030	≤0.030	—	0.35 ~0.65	0.08 ~0.15	≤0.25	
		G20CrNiMo	0.17 ~0.23	0.15 ~0.40	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.030	0.40 ~0.70	0.35 ~0.65	0.15 ~0.30	≤0.25	
		G20CrNi2Mo	0.17 ~0.23	0.15 ~0.40	0.40 ~0.70	≤0.030	≤0.030	1.60 ~2.00	0.35 ~0.65	0.20 ~0.30	≤0.25	SNCM420
		G20Cr2Ni4	0.17 ~0.23	0.15 ~0.40	0.30 ~0.60	≤0.030	≤0.030	3.25 ~3.75	1.25 ~1.75	—	≤0.25	
		G10CrNi3Mo	0.08 ~0.13	0.15 ~0.40	0.40 ~0.70	≤0.030	≤0.030	3.00 ~3.50	1.00 ~1.40	0.08 ~0.15	≤0.25	
		G20Cr2Mn2Mo	0.17 ~0.23	0.15 ~0.40	1.30 ~1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.30	1.70 ~2.00	0.20 ~0.30	≤0.25	

表 13.3 高速度鋼の化学成分

規格	化学成分 (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Co	W
AMS 6491 (M50)	0.77~0.85	0.25以下	0.35以下	0.015以下	0.015以下	3.75~4.25	4.00~4.50	0.90~1.10	0.15以下	0.10以下	0.25以下	0.25以下
5626	0.65~0.80	0.20~0.40	0.20~0.40	0.030以下	0.030以下	3.75~4.50	1.00以下	0.90~1.30	—	—	—	17.25~18.25
2315 (M50NiL)	0.11~0.15	0.10~0.25	0.15~0.35	0.015以下	0.010以下	4.00~4.25	4.00~4.50	1.13~1.33	3.20~3.60	0.10以下	0.25以下	0.25以下

表 13.4 ステンレス鋼の化学成分

規格	材料	化学成分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
JIS G 4303	SUS440C	0.95~1.20	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.030以下	16.00~18.00	0.75以下
AISI	440C	0.95~1.20	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.030以下	16.00~18.00	0.75以下

表 13.5 各国主要材料成分比較表（機械構造用炭素鋼）

国名	規格名	材料	主要化学成分 (%)							JISの相当鋼、 近似鋼	
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr		Mo
日本	JIS G 4051 (2016)	S45C	0.42 ~0.48	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20	—	
		S53C	0.50 ~0.56	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20	—	
		S55C	0.52 ~0.58	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20	—	
USA	AISI A29/29M (2015) SAE J403 (2014)	1045	0.43 ~0.50	—	0.60 ~0.90	≤0.040	≤0.050	—	—	—	S45C
		1046	0.43 ~0.50	—	0.70 ~1.00	≤0.040	≤0.050	—	—	—	S45C
		1050	0.48 ~0.53	—	0.60 ~0.90	≤0.040	≤0.050	—	—	—	S50C
		1053	0.48 ~0.55	—	0.70 ~1.00	≤0.040	≤0.050	—	—	—	S53C
		1055	0.50 ~0.60	—	0.60 ~0.90	≤0.040	≤0.050	—	—	—	S55C
フランス ・ ドイツ	NF EN 10083-1,2 (2006) ・ DIN EN 10083-1,2 (2006)	C45	0.42 ~0.50	≤0.40	0.50 ~0.80	≤0.045	≤0.045	≤0.40	≤0.40	≤0.10	S45C
		C45E	0.42 ~0.50	≤0.40	0.50 ~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.40	≤0.40	≤0.10	S45C
		C45R	0.42 ~0.50	≤0.40	0.50 ~0.80	≤0.035	0.020 ~0.040	≤0.40	≤0.40	≤0.10	S45C
		C55	0.52 ~0.60	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.045	≤0.045	≤0.40	≤0.40	≤0.10	S55C
		C55E	0.52 ~0.60	≤0.40	0.60 ~0.90	≤0.030	≤0.035	≤0.40	≤0.40	≤0.10	S55C
中国	GB/T 24595 (2009) ・ GB/T 699 (2015)	45	0.42 ~0.50	0.17 ~0.37	0.50 ~0.80	≤0.025	≤0.025	≤0.30	≤0.25	≤0.10	S45C
		50Mn	0.48 ~0.56	0.17 ~0.37	0.70 ~1.00	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.25	—	S53C
		55	0.52 ~0.60	0.17 ~0.37	0.50 ~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.25	—	S55C

表 13.6 軸受用材料の物性値

材料	密度 ρ (g/cm ³)	縦弾性係数 E (GPa)	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	熱伝導度 (W/m ² · $^{\circ}\text{C}$)	比熱 (J/kg· $^{\circ}\text{C}$)	備考
SUJ2	7.83	208	12.5	46	468	焼入れ焼もどし
SCr420	7.84	208	12.6	47	(470)	焼入れ焼もどし
SCM420	7.85	208	12.5	45	(470)	焼入れ焼もどし
SNCM420	7.85	208	12.0	44	(470)	焼入れ焼もどし
M50	7.85	210	11.4	25	460	焼入れ焼もどし
SUS440C	7.75	205	10.6	24.2	460	焼入れ焼もどし
SPCC	7.86	206	11.5	59	470	焼鈍 (硬質でない)
SUS304	7.93	193	17.3	16.3	500	焼鈍
クロム鋼	7.84	206	11.2	42~50	465	0.09~0.25C, 0.55~1.5Cr
特別極軟鋼	7.86	209	11.6	58.2	473	C<0.08
極軟鋼	7.86	206	11.4	58.7	475	0.08~0.12C
軟鋼	7.86	207	11.2	55.2	477	0.12~0.2C
半硬鋼	7.85	207	10.8	46.5	485	0.3~0.45C
硬鋼	7.84	205	10.7	44.1	489	0.4~0.5C
高炭素鋼	7.82	201	10.2	40.1	510	0.8~1.6C
中炭素鋼	7.8	202	10.7	38	460	0.5C
窒化珪素	3.24	308	3.0	20	680	Si ₃ N ₄
六四黄銅	8.4~8.8	103~105	18.4~20.8	81~121	377~381	(CAC301相当)

備考 () は参考値

表 13.7 軸受用材料の機械的特性値

材料	硬度 (HV)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	シャルピー衝撃 値(J/cm ²)	備考
SUJ2	700~750	(≥ 1176)	(≥ 1617)	≤ 0.5	—	(5~8)	焼入れ焼もどし
SCr420	250~340	—	≥ 830	≥ 14	≥ 35	≥ 49	焼入れ焼もどし
SCM420	275~370	(≥ 700)	≥ 930	≥ 14	≥ 40	≥ 59	焼入れ焼もどし
SNCM420	310~395	—	≥ 980	≥ 15	≥ 40	≥ 69	焼入れ焼もどし
SNCM815	330~395	—	≥ 1050	≥ 12	≥ 40	≥ 69	焼入れ焼もどし
SPCE	≤ 100	—	≥ 270	$\geq 32\sim 43$	—	—	焼鈍
SUS304	≤ 195	耐力 ≥ 206	≥ 520	≥ 40	≥ 60	—	焼鈍
S10C	115~160	≥ 206	≥ 314	≥ 33	—	—	900 $^{\circ}\text{C}$ 炉冷
S25C	130~190	≥ 265	≥ 411	≥ 27	—	—	850 $^{\circ}\text{C}$ 炉冷
S45C	175~240	≥ 343	≥ 569	≥ 20	—	—	焼入れ高温焼もどし
S53C	190~270	≥ 392	≥ 647	≥ 15	—	—	焼入れ高温焼もどし
窒化珪素	1500	—	曲げ ≥ 300	—	—	—	Si ₃ N ₄
六四黄銅	100~150	—	≥ 430	≥ 20	—	—	(CAC301相当)

備考 機械的性質はサンプルサイズの影響が大きいので注意のこと。() は参考値、- は不明

表 13.8 打抜き保持器用鋼板およびもみ抜き保持器用炭素鋼の化学成分

	規格	材料	化学成分 (%)						
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
打抜き保持器	JIS G 3141	SPCC	—	—	—	—	—	—	—
	JIS G 3131	SPHC	—	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—	—
	JIS G 4305	SUS304	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00~10.50	18.00~20.00
もみ抜き保持器	JIS G 4051	S25C	0.22~0.28	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030 以下	0.035 以下	—	—

表 13.9 もみ抜き保持器用高力黄銅鑄物の化学成分

規格	材料	化学成分 (%)								不純物	
		Cu	Zn	Mn	Fe	Al	Sn	Ni	Pb	Si	
JIS H 5120	CAC301	55.0~60.0	33.0~42.0	0.1~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5	1.0 以下	1.0 以下	0.4 以下	0.1 以下	

表 13.10 保持器に使用される樹脂材料の代表的な特徴

分類	ポリアミド		ポリフェニレンサルファイド	ポリエーテルエーテルケトン	布入りフェノール樹脂	
	66	46	PPS	PEEK		
分類	結晶性熱可塑性樹脂		←	←	熱硬化性樹脂	
融点 $^{\circ}\text{C}$	265	295	285	343	—	
ガラス転移温度 $^{\circ}\text{C}$	66	78	88	143	—	
連続使用温度 max $^{\circ}\text{C}$	120	150	230	260	—	
価格 1(低)~5(高)	1	2	3	5	4	
特徴	成形性	◎	○	○	×	
	靱性	◎	◎	△	○~△	
	強度	○	○	○	◎	△
	耐油性	○~△	○~△	◎	◎	○
	吸湿/吸水	多	多	微	微	少
総合評価	全般的に安定した特性を示す。	ポリアミド66に比べて成形性にやや難があるが、耐熱性が高い。	吸水性が低く、耐油、耐熱性が高い。	保持器に必要な物性を備えているが、高価である。	潤滑性が高いが、機械加工のため複雑形状は不可である。	
適用	汎用	ポリアミド66以上の高温	ポリアミド以上の耐油、耐熱性を要する用途	高温、高速工作機械用高速軸受	工作機械用高速アンギュラ玉軸受	

記号説明 ◎:優 ○:良 △:可 ×:不適

表 13.11 シール用ゴム材料の代表的な特徴

ゴム種	ニトリルゴム	アクリルゴム	ふっ素ゴム
略号	NBR	ACM	FKM
特徴	伸び	○	△
	圧縮永久歪み	◎	×
	耐摩耗性	◎	○
	耐老化性	◎	◎
	耐候、耐オゾン性	△	◎
	耐水性	◎	△
	許容温度範囲 $^{\circ}\text{C}$	-20~120	-15~150
総合評価	耐油、耐熱、耐摩耗性が高い。ゴムシールとして多用されている。	NBRの適用温度以上で使用エステル油に対し膨潤しやすい。耐エステル油グレードがある。	高価最高の耐熱性、耐薬品性があるが、ウレア系グリースに侵されやすい。

記号説明 ◎:優 ○:良 △:可 ×:不適

表 13.12 軸、ハウジング用材料の物性値

部位	材料	密度 ρ (g/cm ³)	硬度 (HV)	縦弾性係数 E (GPa)	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	熱伝導度 (W/m ² · $^{\circ}\text{C}$)	比熱 (J/kg· $^{\circ}\text{C}$)	備考
軸	S25C	7.86	130	212	11.1	53	470	焼なまし
	S45C	7.85	230	205	(11.9)	(41)	460	調質
	SS400	7.86	—	205	11.3	50	460	—
	SCM415	7.85	300	200	11.0	42	460	調質
	SCM425	7.85	320	208	12.8	45	470	調質
	SCM440	7.85	340	205	12.0	41	460	調質
	SNCM439	7.85	340	208	12.0	44	470	調質
ハウジング	FC200	7.2	≤ 240	100	10.0~11.0	43	530	ねずみ鉄
	FC250	7.3	≤ 250	100	10.0~11.0	41	530	—
	FCD450	7.2	150~220	154	12.0	34	620	—
	FCD500	7.2	160~240	154	11.0	30	—	球状黒鉛鉄
	FCD700	7.2	190~320	154	10.0	26	—	—
	ADC12	2.7	(54 HRB)	71	21.0	96	(900)	Al-Si-Cu 合金
	SUS304	8.0	≤ 200	197	17.3	16	500	オーステナイト系ステンレス
	SUS410	7.8	≥ 170	204	10.8	(25)	460	マルテンサイト系ステンレス
	SUS410L	7.8	(200)	204	10.8	(25)	—	フェライト系ステンレス

備考 不等号は規格値 () は参考値

表 13.13 軸，ハウジング用材料の機械的特性値

部位	材料	硬度 (HV)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	備考
軸	S25C	180	≥270	≥440	≥27	焼ならし
	S45C	240	≥345	≥570	≥20	焼ならし
	SS400	—	(215)	≥400	≥17	構造用圧延鋼材
	SCM425	320	670	800	15	調質
	SCM440	340	835	980	17	調質
	SNCM439	340	900	980	18	調質
ハウジング	FC200	≤235	—	≥200	—	ねずみ鉄 別鑄込み供試材
	FC250	≤250	—	≥250	—	
	FCD350-22	≤160	≥220	≥350	≥22	球状黒鉛鉄 別鑄込み供試材
	FCD450-10	150~220	≥250	≥450	≥10	
	FCD500-7	160~240	≥320	≥500	≥7	
	FCD700-2	190~320	≥420	≥700	≥2	
	ADC12	(54 HRB)	150	310	3.5	Al-Si-Cu 合金
	SUS304	≤200	(205)	(520)	≥40	オーステナイト系ステンレス
SUS410	≥170	(345)	(540)	≥25	マルテンサイト系ステンレス	
SUS410L	≤200	(195)	(400)	≥20	フェライト系ステンレス	

備考 不等号は規格値 () は参考値