

軸受鋼

坪田 一一 *

High Carbon Chromium Bearing Steels

1. はじめに

軸受は産業の米といわれ、あらゆる機械の回転部分を支持する重要な部品である。したがって軸受には高い精度、信頼性、さらに低価格が要求される。これらに対応するには高品質の鋼材を使用しかつ適切な加工および熱処理が行われる必要がある。現在使用されている高炭素クロム軸受鋼の基本的な化学成分は20世紀の初頭に確立され、以後1世紀の間ほぼそのまま使用されている。しかし化学成分はほぼ同一ではあるが最近の精錬技術の進歩により諸特性は向上しており、特に転がり寿命に関しては全く別の鋼といってもいいほどである。

本稿では軸受鋼を用いた優れた特性を有する部品を製造するに際しての参考とするため最近の軸受鋼の製造、熱処理および諸特性について解説する。

2. 化学成分

JISに規定されている軸受鋼の化学成分を表1に示す。各鋼種の特徴を以下に示す。

SUJ1 SAE51100に相当する。この鋼種は焼入性が低い
ため使用可能範囲が狭いので現在ほとんど使用
されていない。

SUJ2 SAE52100, BS535A99, DIN100Cr6, NF100Cr6,
ШX15に相当する。軸受鋼の基本鋼であり、軸受
鋼の95%程度が当鋼種である。

SUJ3 ASTM A485Grade-1に相当する。SUJ1の焼入性を

SiとMnで高めた鋼種である。

SUJ4 SUJ2の焼入性をMoで高めた鋼種である。焼入性はSUJ2とSUJ3の間である。該当外国規格はない。新幹線用軸受などに使用され、使用量は非常に少ない。

SUJ5 SUJ3の焼入性をMoで高めた鋼種である。該当外国規格はない。大型軸受に使用される。

3. 製造方法

軸受鋼の製造工程は次のようである。

3・1 溶解—鑄造工程

軸受鋼の溶製方法は、古くは電気炉鋼に限定されていたが現在は制限がなく、電気炉、高炉—転炉など各種の溶解法が用いられている。

量産鋼における最近の製造工程は図1に示すように「電気炉・高炉—転炉→取鍋精錬→RH脱ガス→連続鑄造」となっている。電気炉・高炉—転炉は溶鋼を製造するだけのものであり、精錬は次工程の取鍋精錬に委ねられる。ここで主として化学成分の調整と脱硫が行われる。続いて寿命に著しい影響を及ぼす酸化物を減少させるため長時間のRH脱ガスが行われる。最終の鑄造工程では最近連続鑄造が多く用いられている。これは以前主流であった鋼塊工程と比較すると、連続鑄造では溶鋼と耐火物との接触が少ないため、生産性と品質の両面において優れているためである。連続鑄造では中心偏析の軽減のため種々の電磁攪拌と凝固末期圧下が行われている。

表1 化学成分

鋼種	mass %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SUJ1	0.95 / 1.10	0.15 / 0.35	<0.50	<0.025	<0.025	0.90 / 1.20	—
SUJ2	0.95 / 1.10	0.15 / 0.35	<0.50	<0.025	<0.025	1.30 / 1.60	—
SUJ3	0.95 / 1.10	0.40 / 0.70	0.90 / 1.15	<0.025	<0.025	0.90 / 1.20	—
SUJ4	0.95 / 1.10	0.15 / 0.35	<0.50	<0.025	<0.025	1.30 / 1.60	0.10 / 0.25
SUJ5	0.95 / 1.10	0.15 / 0.35	0.90 / 1.15	<0.025	<0.025	0.90 / 1.20	0.10 / 0.25

* 技術研究所, 工博

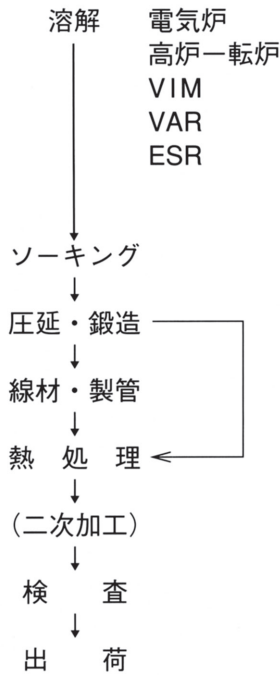


図1 軸受鋼製造工程

3・2 熱間圧延

鑄造された鋼塊は、鑄造時に生成する巨大炭化物を消滅させるための高温（およそ1200℃前後）での「均熱処理」を受けた後、圧延される。軸受鋼の熱間圧延は比較的容易である。最近軟化熱処理の省略のため、限定された寸法ではあるが、一部制御圧延が行われている。^{1, 2)}

3・3 製管

軸受の内外輪用鋼管の製管法にはマンネスマン法、熱間押出法などがある。熱間で製管された鋼管は寸法精度の向上のため、一部冷間で引抜加工やコールドピルガーミルなどにより冷間加工される³⁾。軸受鋼鋼管は最終的に切断されて軸受リングとなる。

最近軸受リングはコールド・ロール・フォーミングといわれる冷間成形法により鋼管または鍛造リングからも製造されている。

3・4 線材

軸受鋼線材はコロ、ニードルおよび鋼球に加工される。以前鋼球は連続鑄造で発生する炭素の中心偏析を忌避して鋼塊工程材に限定されていたが、電磁攪拌等の連続鑄造における技術進歩により最近連続鑄造材が使用されるようになりつつある。

4. 熱処理

軸受鋼の熱処理は熱間あるいは冷間加工後の軟化のための熱処理と、軸受用の硬化のための熱処理とに大別される。前者は良好な加工性を得るため、後者は優れた軸受性能を得るため、それぞれ重要である。

4・1 焼ならし

熱間圧延されたφ50～60以上の鋼材は冷却速度が比較的遅いため網状炭化物が粒界に析出しており、これを分断するため焼ならしが必要である。これ以下の細物では焼ならしは不要である場合もある⁴⁾。焼ならし温度は通常870～900℃程度で、当該温度に達すれば直ちに冷却してよい。冷却は通常自然空冷である。熱処理曲線を図2-a)に示す。

4・2 軟化焼なまし

熱間圧延されたままか、焼ならし後切断のために軟化焼なましが行われることがある。この熱処理は加熱時の組織がオーステナイト+炭化物となる温度以下で行われる。この処理の加熱温度は720～730℃以下であり、保持時間は数時間以下である。昇温後直ちに冷却を開始してもよい。冷却は通常自然空冷である。熱処理曲線を図2-b)に示す。

4・3 球状化焼なまし

軸受鋼の加工性（冷間加工，切削等）を改善するため炭化物の球状化が行われる。この熱処理は軸受鋼には不可欠のものであるが、長時間を要するためコストアップ要因でありその短縮のための検討が多く行われている。これにはいくつかの熱処理曲線があるが、代表的な方法は図2-c)⁴⁾に示すようにオーステナイト+炭化物組織になるよう加熱した後、徐冷する方法である。この時炭化物を全数固溶させてはならない。加熱によって微細化した残留炭化物を核として均一に炭化物を再析出させるためである。球状化焼なましミクロ組織例を図3に示す。

またA1点直上直下の温度で加熱冷却を繰り返す方法⁵⁾もある。この方法によれば処理時間が半減するといわれている。

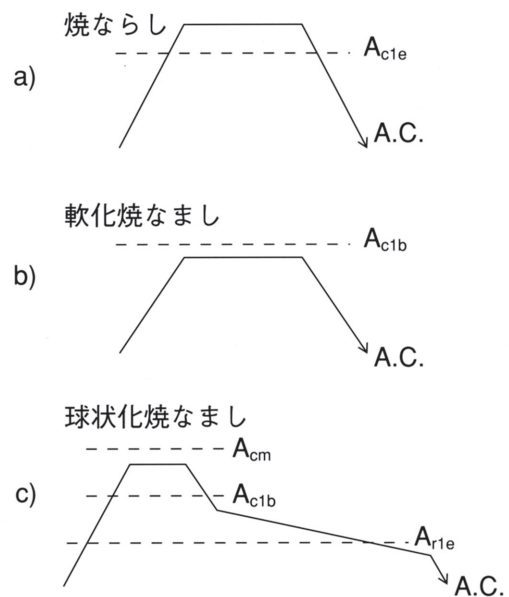


図2 熱処理曲線

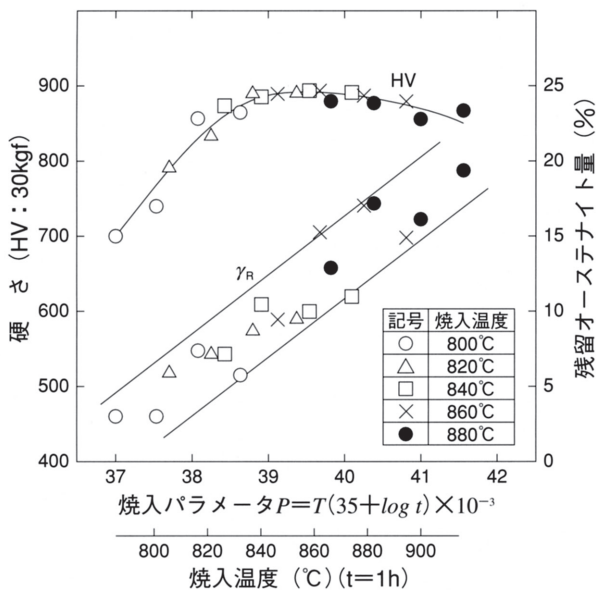


図4 焼入母曲線

寸法安定性の必要な軸受では使用温度に対応して下記のサブゼロや高温焼戻しが行われる。これが寸法安定化処理である。

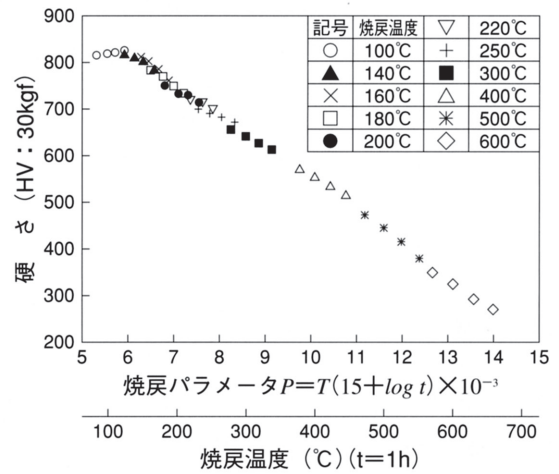


図6 焼戻母曲線

4・5 焼戻し

焼入れされたままのマルテンサイトは非常に脆いので焼戻しが行われる。焼戻しによってε炭化物が析出し、硬さが若干低下し（HRC1～2ポイント程度）、収縮が起る。

焼戻し中の寸法変化を図5⁶⁾に示す。150℃付近での収縮の終了には約2時間を要する。焼戻温度と時間は目標とする硬さによって決定されるべきものである。

焼戻しにおいても上述の焼入れと同様の関係式があり、焼戻母曲線⁷⁾といわれている。図6に示すように上述の焼入れの場合と同様、Pが同一なら同一の硬さが得られる。またこの場合も高温・短時間よりは低温・長時間の方が適切であろう。

$$P = T (15 + \log t) \times 10^{-3} \dots (2)$$

P: 焼戻パラメータ, T: 温度 ℃, t: 時間 h

なお残留オーステナイトはおよそ200℃の焼戻しから減少を始め、250℃付近で消滅する。したがって残留オーステナイトは通常行われる180℃以下の焼戻しでは変化しない。

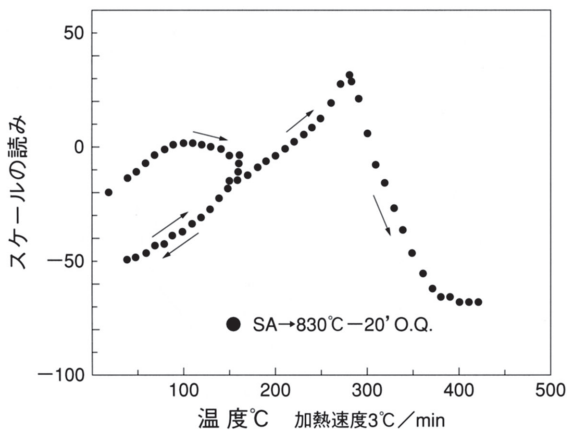


図5 焼戻しによる寸法変化 (SA: 球状化焼なまし)

4・6 焼入性

「焼入性」はJISによれば「鉄鋼を焼入硬化させた場合の焼きの入りやすさ、すなわち、焼きの入る深さと硬さの分布を支配する性能」と定義されている。通常焼入性はジョミニー式一端焼入方法によって測定される。図7にSUJ1～5のジョミニー式一端焼入試験結果を示す。通常SUJ1→2→4→3→5の順に焼入性が高くなる。SUJ2などの焼入性曲線においてHRC40～45のあたりで硬さが反転するのは粗大なペーナイトと微細なパーライトの硬さに差があるためである⁸⁾。

焼入性の大小によって焼きの入る鋼材の寸法が変化する。表4⁴⁾はその概略寸法を示している。

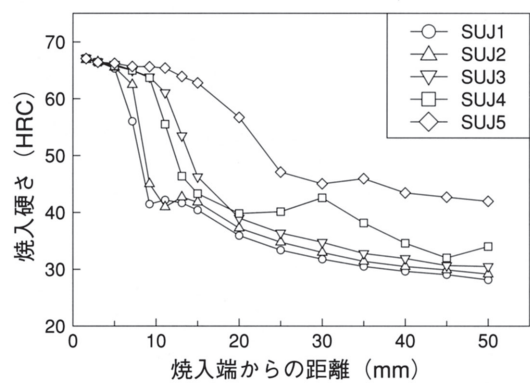


図7 ジョミニー試験結果

表4 HRC60が得られる丸棒の最大直径 (mm)

位置	SUJ2	SUJ3	SUJ4	SUJ5
中心	25	51	43	89
表面	33	89	64	165

4・7 サブゼロ

残留オーステナイトは使用中の繰返し応力負荷によってマルテンサイトに変態し寸法変化生成の原因となる。これを防止するため特に寸法安定性の必要な軸受ではサブゼロ処理が行われる。この処理はドライアイスや機械的冷凍機等を用いて通常零下40～100℃で行われる。しかしこの処理はコスト高となるため、可能なかぎり寸法安定化熱処理としては焼戻しが用いられる。

5. 非金属介在物

軸受鋼の最も重要な特性は良好な転がり寿命であり、その寿命は非金属介在物—特に酸化物系非金属介在物—の影響を強く受けるため、軸受鋼における非金属介在物の低減は極めて重要である。

JISに規定された非金属介在物には次の3種類がある。それらのミクロ組織例を図8に示す。

- ・ A系介在物 加工によって粘性変形したもの
 - A1 硫化物 (ASTM法：A系)
 - A2 けい酸塩 (ASTM法：C系)
- ・ B系介在物 加工方向に集団をなして不連続的に粒状の介在物が並んだもの
 - B1 アルミナなどの酸化物 (ASTM法：B系)
 - B2 Nb, Ti, Zrの炭窒化物

- ・ C系介在物 粘性変形をしないで不規則に分散するもの
 - C1 酸化物 (ASTM法：D系)
 - C2 Nb, Ti, Zrの炭窒化物

転がり寿命を最も低下させるのは酸化物系非金属介在物である。図9⁹⁾に鋼中の酸素含有量と寿命との関係を示す。鋼中の酸素は全量酸化物系非金属介在物になっていると考えてよい。図に示されているように酸素の低下とともに著しく寿命が向上することが分かる。図中のSNRP鋼は最近開発された高纯净度の軸受鋼であり、その寿命は極めて優れている。

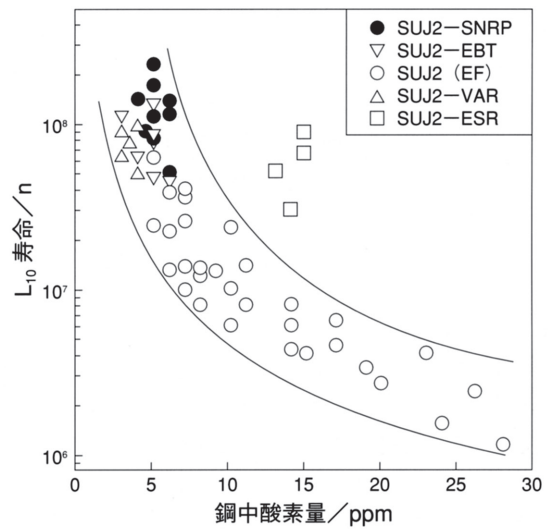


図9 鋼中酸素量と寿命との関係

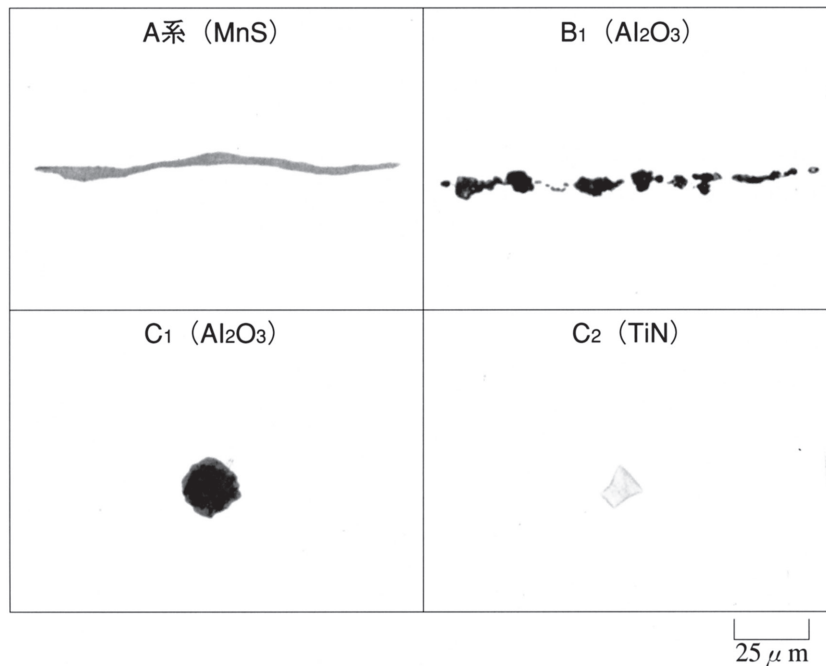
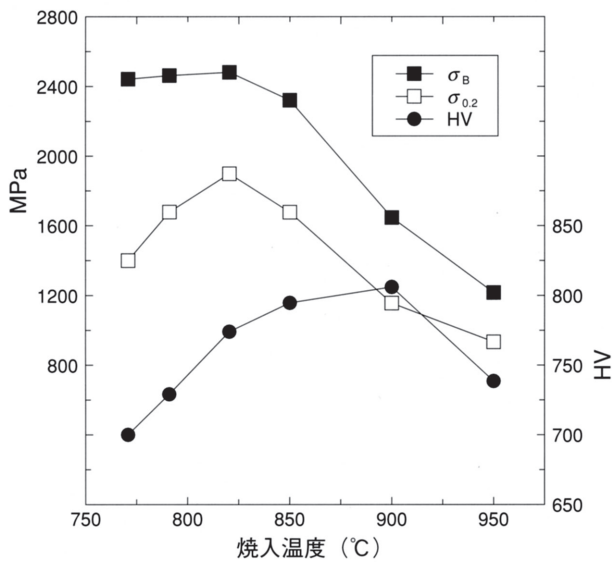


図8 非金属介在物のミクロ組織例

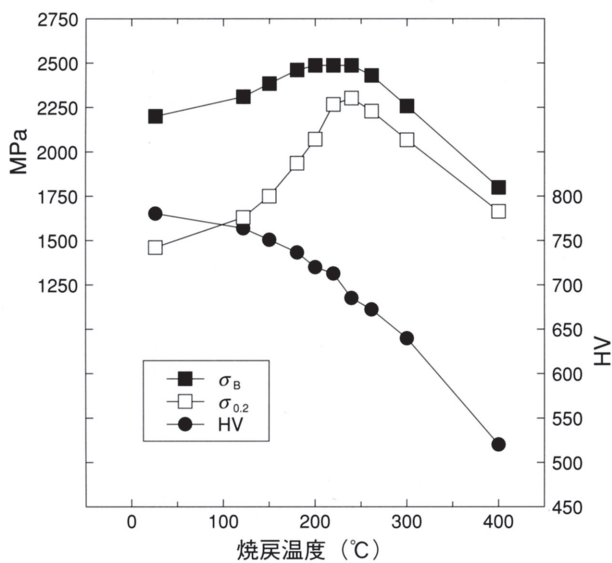
最近清浄度の測定法としてJIS法の限界がしばしば問題にされつつある¹⁰⁾。事現場においてJIS法の外にASTM法が多く併用されている。しかしASTM法も最近の高清浄鋼の清浄度測定法としては十分ではなく、特に清浄度と寿命との相関性を議論する場合にはこれらの方法はまったく無力である。このような意味から最近極値統計を用いた清浄度の測定法¹⁰⁾や超音波を用いた方法¹¹⁾などが注目されており、今後清浄度の測定法に関する検討が多く行われるであろう。

6. 材力特性

軸受において材力—引張強度などが問題になることは通常ほとんどないが、材力は種々の熱処理を行う場合それが適正であるかどうか、あるいは鋼材の内質が正常



(a) 焼入—180°C—2h焼戻し



(b) 830°C焼入れ—焼戻し(2h)

図10 焼入・焼もどし材の引張試験結果

であるかどうかなどを判断する特性の一つとして位置付けられる。

6・1 引張特性

図10¹²⁾に引張強度に及ぼす焼入温度と焼戻温度の影響を示す。これによると最も高強度となる焼入温度は約820°Cであり、焼戻温度は220°C程度であることが分かる。実際の熱処理は質量効果を考慮して焼入温度はこれより10—30°C程度高めであり、焼戻温度は硬さを考慮して180°C前後が多いと思われるが、用途に応じて多様な温度が用いられている。

6・2 衝撃値

図11¹³⁾に焼入焼戻状態の衝撃値を示す。高硬度材の衝撃値は一般に低く、軸受鋼も例外ではない。しかし830°Cの前後でかなり差があり、高衝撃値とするには低めの焼入温度を採用することが好ましい。

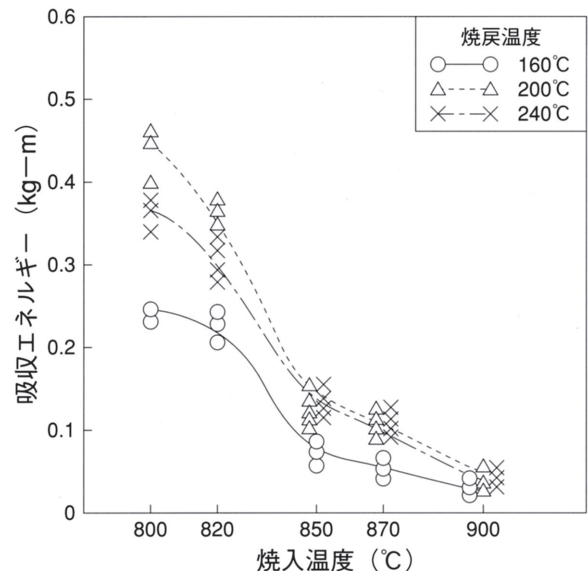


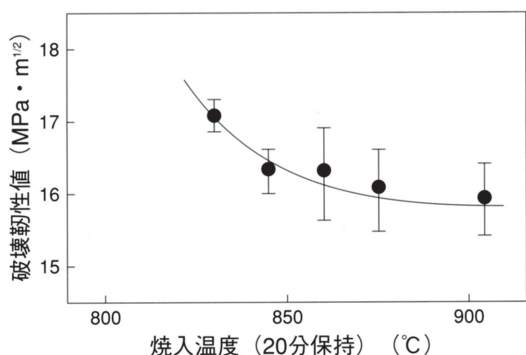
図11 焼入焼戻材の衝撃試験結果 (Vノッチ)

6・3 圧壊値

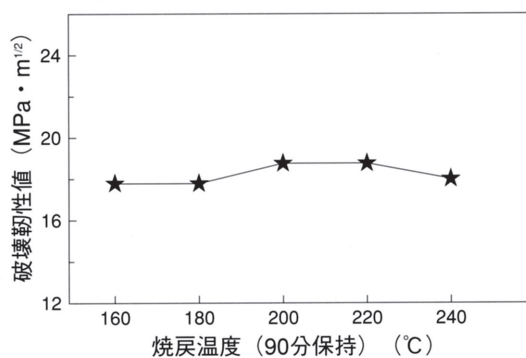
現在JISに圧壊値の規定はないが、以前は規定されていた。現在の脱ガス鋼では特に問題とする必要はない。不純物のSと酸化物を低減することは効果がある。

6・4 破壊靱性値

破壊靱性値はき裂に対する感受性を示す材料定数である。熱処理が異なると破壊靱性値も変化する。図12¹⁴⁾に軸受鋼の破壊靱性値に及ぼす熱処理の影響を示す。焼入温度が高くなると破壊靱性値が低下している。しかし焼戻温度の影響はほとんどない。



(a) 焼入温度の影響(焼戻し：160°C-90分)



(b) 焼戻温度の影響(焼入れ：860°C-20分)

図12 破壊靱性値に及ぼす熱処理の影響

7. 疲労特性

7・1 回転曲げ疲労強度

軸受の内外輪は繰返し曲げ疲労を受けるので、曲げ疲労強度は高いことが要求される。図13¹⁵⁾は最近の高清浄鋼の回転曲げ疲労試験結果である。これによると清浄度が高い材料の疲労強度が高いことがわかる。これは疲労破壊の起点となる非金属介在物—特に酸化物系介在物—が減少したためである。

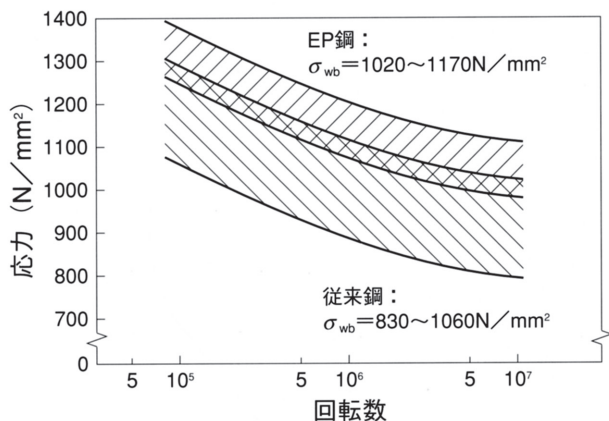


図13 回転曲げ疲労試験結果

7・2 転がり疲労強度

軸受にとって最も重要な特性は転がり疲労強度である。最近軸受鋼中の酸素量は非常に低くなってきており、2000年の予想値は図14⁹⁾に示すように2.7ppmに達すると考えられている。

一方いわゆるゴミ潤滑下ではく離の起点は表面にあり、このような場合には内部起点はく離の原因となる非金属介在物と寿命との間には相関がないと考えられている。しかしグリス潤滑など清浄雰囲気で使用される軸受も多数存在するので鋼材の清浄度は高いほど好ましいことは事実である。

前掲の図9に示したように低酸素化とともに寿命は飛躍的に向上する。最近のSNRP鋼の寿命は以前の非脱ガス鋼と比較すると数100倍の寿命を示している。

転がり疲労に及ぼす合金元素の影響についても多くの研究がある。耐焼戻軟化抵抗性を増すSi¹⁶⁾、マトリックスを強化する作用のあるNi¹⁷⁾、Mo¹⁸⁾さらに残留オーステナイトを増量するMn¹⁹⁾などは寿命向上に有効とされているが、JIS規格の範囲内では著しい影響があるとは考えにくい。

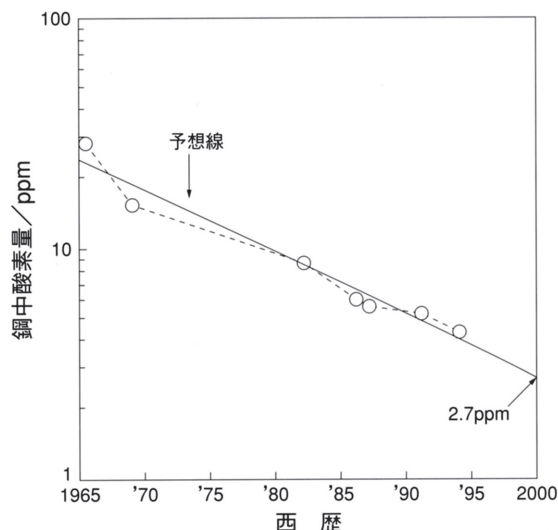


図14 西暦2000年の予想酸素値

8. 加工性

8・1 冷間加工性

軸受鋼の球状化焼なまし状態の硬さは90HRB前後である。引抜きコイルのように冷間加工を受けると硬さが上昇する。図15に変形抵抗曲線を示す。比較のため代表的なオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304とはだ焼鋼SCM420のデータを併記した。これから分かるように軸受鋼の変形抵抗はこれらの2鋼種のほぼ中間にあることが分かる。冷間加工時の割れ発生率は表5に示すように高清浄度鋼ほど低く、非金属介在物が割れ発生の原因となるこ

とが分かる。したがって冷間加工度が高い部品には高纯净度鋼が適している。

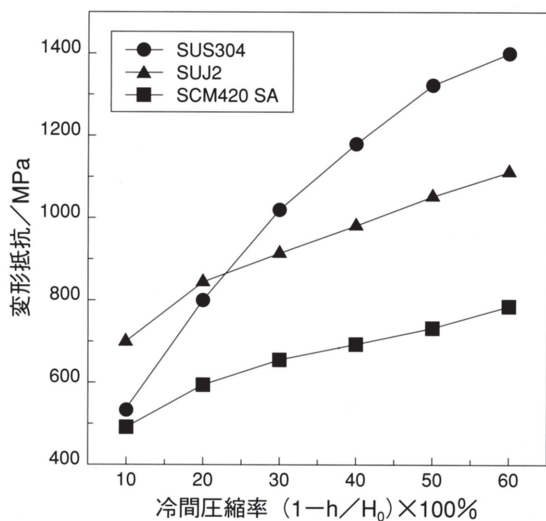


図15 変形抵抗曲線

表5 冷間加工時の割れ発生率 (SUJ2)

区分	75%冷間据え込み時の割れ発生率
高纯净度鋼 (SNRP 鋼)	1/10
一般鋼	10/10

8・2 被削性

球状化焼なまし状態の軸受鋼の被削性はAISI B1112の37%²⁰⁾とされている。今日では工具材料の進歩により難削材とは考えられていない。

軸受鋼の被削性は硬さ、ミクロ組織、炭化物粒度およびS含有量によって影響される。図16²¹⁾は炭化物粒度およびS含有量と被削性の関係を示す図である。この場合炭化物粒度と硬さは関連があり、微細な炭化物粒度の材料の硬さは粗粒のそれよりも高い。このようにJIS規格内でも被削性は微妙に変化することが分かる。

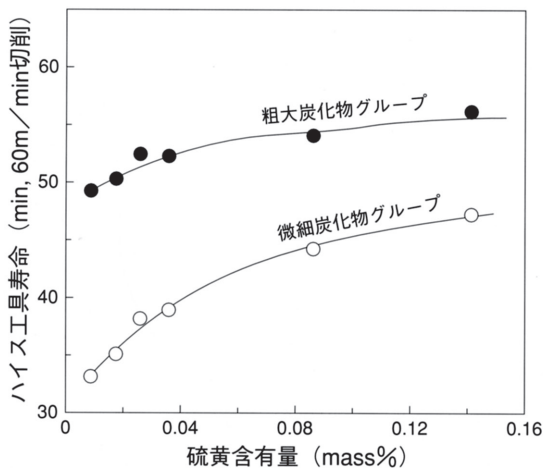


図16 被削性に及ぼす硫黄含有量および炭化物粒度の影響

最近cBN工具の発達によりHRC60以上の高硬度材も切削加工が行われている。

9. まとめ

紀元2000年の軸受鋼中の酸素含有量は3ppmを切ると予想されており、今後さらに高纯净化の努力が続けられるであろう。そして5-10年後に一定の水準に落ち着くと思われる。

軸受に使用される鋼材は今後ますます多様化し、炭素鋼、浸炭鋼、合金鋼などが用途に応じて使用されると思われる。いずれの場合にも重要なことは高纯净度の鋼材であることと、適正な熱処理が行われることである。

当社の軸受用鋼はこれらの諸点を考慮して製造されている。

最後に、本稿において図表の転載許可をいただいた方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 田畑 純久, 星野 俊幸, 中野 昭三郎, 山中 栄輔, 人見 潔: 材料とプロセス, 2 (1989), 1756
- 2) 鈴木 伸一, 松本 和明, 三瓶 哲也, 田川 寿俊, 大和田 能由: 材料とプロセス, 2 (1989), 1772
- 3) 坪田 一一, 大西 公雄, 坂上 高志, 石原 晟好: 鉄と鋼, 70 (1984), 854
- 4) 特殊鋼ガイド第4編—熱処理, (1977), 87, 特殊鋼倶楽部
- 5) 岡田 康孝, 大塚 伸夫, 森川 隆, 藤岡 靖英, 谷本 征司: までりあ, 33 (1994), 647
- 6) 坪田 一一: 大阪大学学位論文, 1984
- 7) 小林 一博: 熱処理, 22 (1982), 35
- 8) 河井 泰治: 鉄と鋼, 39 (1953), 1159
- 9) 加藤 恵之, 塗 嘉夫: 大量生産規模における不純物元素の精錬限界, 26, (1996), (社) 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会精錬フォーラム 日本学術振興会製鋼第19委員会反応プロセス研究会
- 10) 村上 敬宜, 鳥山 寿之: 鉄と鋼, 79 (1993), 1380
- 11) 石川 登, 藤盛 紀明: 鉄と鋼, 71 (1985), 893
- 12) O.Zwirlein, R.M. tzel und H.Schlicht: HTM, 31 (1976), 277
- 13) S.Nunomura, T.Kashiwamura, K.Machida and S.Sakui: Int.Conf.Fract.Mech.Technol., [1], 553-561, (1977)
- 14) J.M.Beswick: Met.Trans., 20A (1989), 1961
- 15) 西森 博, 増田 孜, 川上 潔, 古村 恭三郎, 橋爪 一弘: 日本金属学会会報, 32 (1993), 441
- 16) 仕幸 三郎, 岡本 一生, 渡辺 章三: 鉄と鋼, 54 (1968), 1353
- 17) 安本 聡, 星野 俊幸, 松崎 明博, 天野 虔一: 材料とプロセス, 7 (1994), 1751
- 18) 柴田 正道, 宮川 利宏: 材料とプロセス, 3 (1990), 854
- 19) 安本 聡, 星野 俊幸, 天野 虔一: 材料とプロセス, 8 (1995), 1582
- 20) Alloy Digest, SA-16 (1954)
- 21) A.Koyanagi and T.Sakajo: Proceedings, Int.Symp.on Infl.of Metall.on Machinability of Steel, Tokyo, (1977) 275, ASM, ISIJ