

技 術 資 料

軸 受 鋼 の 研 究 の 展 望 (I)

上 野 学*・中 島 宏 興*

目 次	目 次
I. 緒 言	IV. 熱処理の問題について
II. 製鋼の問題について	V. 機械的性質に関する問題について
III. 加工法の問題について	VI. 残渣分析法による炭化物抽出の研究
以上 本 号	VII. ち ゅ ず び (以上 4 月号掲載)

I. 緒 言

最近ベアリング・メーカーは軸受鋼の耐久性向上についての研究を真剣にとり上げ始め、諸外国に劣らない軸受を製造し外国に輸出せんとしている。

今日、鋼の中で軸受鋼ほど製鋼メーカーと使用者との間で問題となる鋼種は外にないのではないかと考えられる。それで今日までの軸受鋼に関する研究を整理報告しこれに筆者の意見を加えて参考に供したいと思ひ筆をとる次第である。

現在わが国の一流ベアリング・メーカーで使用している軸受鋼材は主として高炭素—低クロム鋼とNi-Cr-Mo 肌焼鋼である。前者は主としてボール・ベアリングに、後者はローラー・ベアリングに使用されるのが普通である。

本稿は前者の高炭素—低クロム鋼についての研究を整理したものである。

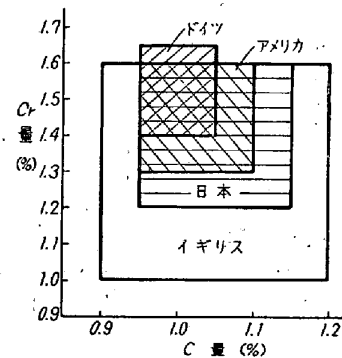
II. 製鋼の問題について

1. 化学組成の問題

(a) 各国の軸受鋼の規格成分範囲の比較

ベアリングの部品および大きさの相異によつて軸受鋼の化学組成、すなわち C, Cr, Mn などに多少の相異がある。そのために軸受鋼の規格は二、三の鋼種に区別されている。以下第 1 表に各国における軸受鋼の規格組成を列挙し、我国のそれと比較検討してみよう。但しドイツは E. Houdremont の Sonderstahlkunde¹⁾ から軸受鋼の化学成分範囲を拝借した。更にスウェーデンの SKF の材料供給メーカーである Hofers の社内規格およびフランスの L'est Hagondange (moselle) にある特殊鋼協会の軸受鋼規格を併記する。

全般的に見ると、イギリスの規格成分範囲は他に比べてやゝ巾が広いようであり、SKF Hofers の社内規格は目標のみで範囲はわからない。次に各成分について比較して見ると、C はいずれも 0.90~1.10% が普通である。イギリスは 0.90~1.20% でやゝ巾が広い。Cr は用途によつていろいろの組成範囲をもつが、中寸法の材料について比較すると、日本は 1.20~1.60%、アメリカは 1.30~1.60%、イギリスは 1.00~1.60% である。今、C と Cr の成分範囲を図示すると第 1 図のようになる。



第 1 図 中寸法軸受鋼の C と Cr 量の関係

Si の上限は中寸法の材料については 0.40% (フランス) が最大で、下限は各国によつて異つてゐる。Mn は各国ともまちまちでやはり中寸法材について比較すると SAE は 0.25~0.45%、イギリスの En 31 は 0.30~0.75%、ドイツは 0.25~0.40%、JIS は 0.50% 以下である。

P, S については SAE の規格が最も厳しく 0.025% 以下である。イギリスのそれは 0.05% である。ドイツ

* 金属材料技術研究所

第1表 軸受鋼の規格化学組成

日 本							
JIS No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	用 途
SUJ 1	・90~1・10	・15~・35	<・50	<・030	<・030	・80~1・20	17.5 mm φ 以下のボールおよびローラ,
SUJ 2	・95~1・15	・15~・35	<・50	<・030	<・030	1・20~1・60	中寸法のボール, ローラおよびリング,
SUJ 3	・90~1・15	・30~・60	・90~1・10	<・030	<・030	・90~1・20	径または肉厚 30 mm 以上のボール, ローラおよびリング
アメリカ							
SAE No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	AISI No.
50100	・95~1・10	・20~・35	・25~・45	<・025	<・025	・40~・60	E 50100
51100	・95~1・10	・20~・35	・25~・45	<・025	<・025	・90~1・15	E 51100
52100	・95~1・10	・20~・35	・25~・45	<・025	<・025	1・30~1・60	E 52100
イギリス (B. S. 971 : 1950)							
1% [C-Cr steel]	C	Si	Mn	P	S	Cr	用 途
En 31	・90~1・20	・10~・35	・30~・75	<・05	<・05	1・00~1・60	リング
ド イ ツ (E. Houdremont による: Sonderstahlkunde)							
記 号	C	Si	Mn	P,	S	Cr	用 途
105 Cr 2 (W 1)	1・00~1・10	・15~・35	・25~・40	平炉および高周波炉		・40~・60	10 mm φ 以下のボール, ローラ, ニードル
105 Cr 4 (W 2)	1・00~1・10	・15~・35	・25~・40	<・030	<・025	・90~1・50	10~17 mm φ のボール, ローラ, リング, あらゆる寸法のボール, ローラ, 肉厚 30 mm 以下のリング
100 Cr 6 (W 3)	・95~1・05	・15~・35	・25~・40	塩基性電気炉		1・40~1・65	
100 Cr Mn 6 (W 4)	・95~1・05	・50~・70	1・00~1・20	<・025	<・020	1・40~1・65	肉厚 30 mm 以上のリング
フランス (La Sociétt des Aciers Fine de l'est Hagondange)							
記 号	SAFE	C	Si	Mn	P	S	Cr
100 C 5	LB	・90~1・10	<・40	<・40	<・030	<・025	1・00~1・30
106 C 6	L	・90~1・10	<・40	<・40	<・030	<・025	1・30~1・60
スウェーデン (SKF Hofors)							
記 号	C	Si	Mn	Cr	用 途		
Hofors-3	1・00	・35	・35	1・50	リング, ボール, ローラ		
Hofors-1	1・00	・60	1・10	1・10	大きいボール, ベアリング, 工具, 機械部品		

では平炉鋼 (高周波炉を含む) と塩基性電気炉鋼で P, S の値に差があるが, このことは賢明な処置と考えられる. この規格で (W) は軸受鋼工業で用いられている記号である.

(b) 軸受鋼の微量不純物の影響

規格に規定してある化学成分以外の元素でも軸受の耐久性 (寿命) を初めとして諸性質にいろいろな相異を生ずることは想像され, この点については出口²⁾, 川口³⁾, 5⁶⁾, 山中, 日下⁷⁾ などがかなり詳しく報告しているが, これらはそれぞれの項目において述べることにする.

最近筆者は軸受鋼炭化物の抽出のための電解分離の際の電解電位の変化を研究中⁸⁾, 炭化物残渣に混入する未溶解基地鉄は鋼中に含まれる Cu 含有量 (0.3% 以下でも) とかなり相関をもつことを見出した. このようにして, 軸受鋼の良否に従来余り問題にされなかつた微量不純物も将来問題となつてくることが予想される.

(c) V 添加の影響

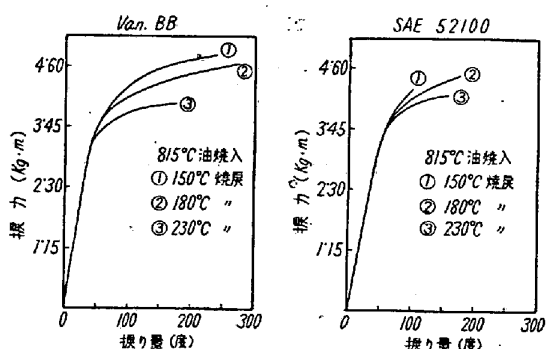
前項における微量成分は不純物としてのものであるが鋼の機械的性質および耐久性を良くするためにわざわざ加えられる元素に V と Mo とがある. Mo は戦前には

添加されたこともあるが、最近では Mo 添加の軸受鋼はあまりみうけられない。しかしアメリカの SAE 52100 に V が 0.2% 程度添加されているのをしばしば文献で見ると、それで筆者⁹⁾はボール線材に 0.1% V を添加した場合の影響について研究したが、その結果フレーキングの発生による耐久性 (寿命) には V の添加が好影響を与えることが判明した。

この V の添加は脱酸、脱窒の効果がある外に結晶粒を微細化する利点があるが、V は炭化物をつくり易い元素であるために、V を含む軸受鋼は熱処理に際して炭化物が溶け込み難いので焼入温度が高くなるおそれがある。

しかし球状炭化物を微細に分布させれば炭化物は低温の加熱でも溶け込み易くなり、V を含有する炭化物の溶け込み難い性質とあいまって焼入感受性* の鈍感な軸受鋼ができる。

次にアメリカの Vanadium Alloy Co. のカタログ¹⁰⁾をみると、0.2% V が添加されると、静的振り試験の結果が第 2 図のように良好となるとの報告がある。このことは V の添加は靱性を増すことに効果があることを示す。



第 2 図 0.2% V を含んだ軸受鋼 (Van. BB) と SAE 52100 との静的振り強さの比較

2. 製鋼上の問題

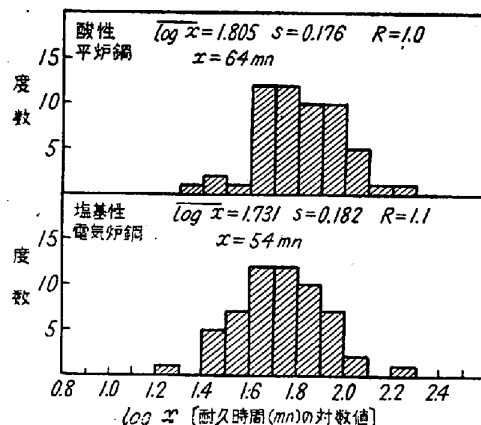
(a) 熔製する熔解炉

現在、軸受鋼は酸性平炉と塩基性弧光電気炉で熔製されている。しかし最近では真空熔解炉や真空鍛造による軸受鋼の熔製も各会社で計画されている。

第 1 回世界冶金会議で、SKF の技師 B. Kjerrman¹¹⁾は酸性平炉と塩基性電気炉で熔製した軸受鋼の寿命試験を実施して、スウェーデンで熔製された酸性平炉鋼が優秀であることを報告している。筆者¹²⁾も外国より輸入した上記 2 種の軸受鋼パイプ材の平均耐久時間の優劣を比較したところ、第 3 図のように酸性平炉で熔製した軸受鋼の平均耐久時間が塩基性電気炉のそれよりも良好である

* 一般にわが国の軸受鋼は焼入感受性が敏感である。

ことが判明した。



第 3 図 酸性平炉鋼と塩基性電気炉鋼のパイプ材より削り出した試験ニードルの耐久時間の対数の度数分布図。

更に P. H. Frith¹³⁾も酸性平炉と塩基性電気炉で熔製した合金鋼の疲労試験を実施し、酸性平炉鋼の方が疲労強度が強いことを報告している。酸性平炉で熔製された鋼が耐久性が良好である理由として、P. H. Frith は塩基性電気炉で熔製した合金鋼には、ある B 型非金属介在物に “diamond shaped cavity” をもつものがあり、応力を繰返し受けると、その cavity に応力の集中をうけるために非常に早く疲労の起点となり、そこから割れを生じて破断すると報告している。

筆者は輸入した塩基性電気炉鋼のパイプ材について上記 “diamond shaped cavity” のある介在物の存否を調べた所、写真 1 の如き圧延方向に間隙がある B 型非金属介在物があった。また、この “diamond shaped cavity” は $2FeO \cdot SiO_2$ といわれている。P. H. Frith は塩基性電気炉で “silicious slag” のもとで合金鋼を熔製すると、“diamond shaped cavity” が生じないで疲労強度の強い合金鋼ができると報告している。

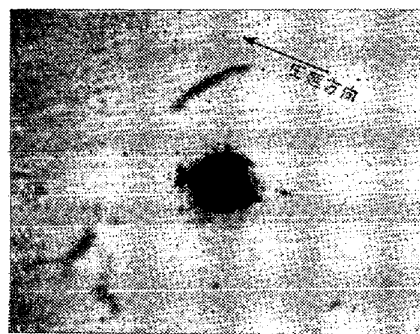
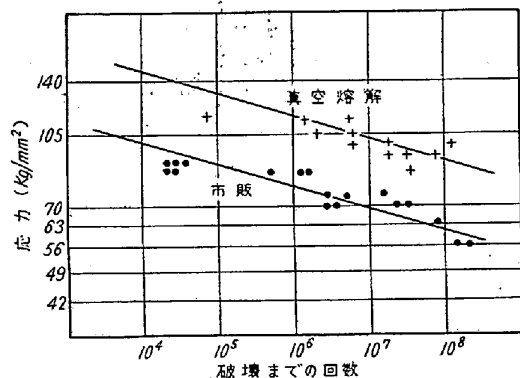


写真 1 ダイヤモンド型間隙を有する非金属介在物 ×1380 (2/3)

酸性平炉鋼と塩基性電気炉鋼との優劣を明快に断定することはできないが、現在のような塩基性電気炉の繰業

法では酸性平炉で熔製した軸受鋼の方が疲労強度が強いといえる。

H. Styri¹⁴⁾は真空熔解した軸受鋼 (SAE 52100) と市販の軸受鋼との疲労試験を実施し、第4図に示すように、真空熔解した軸受鋼は市販のものよりも、約90 kg/mm² の応力のもとでは繰返し回数が約2倍程度になり疲労強度が強いと報告している。



第4図 真空熔解した軸受鋼と市販の軸受鋼の疲労強さ。

真空鑄造による大型鋼塊よりの軸受鋼の製造は非常に興味のある問題で、今後軸受鋼の品質とコストの関連において有望であるのではないかと考えられる。

(b) 造塊法

わが国では軸受鋼の造塊は主として上注法を採用しているが、山陽製鋼 K. K. ではソ連の方法を採用して下注法で造塊している。

この上注法か下注法かということは今後の研究にまたなければならぬが、福島、伊藤¹⁵⁾によると、下注法は注入条件すなわち注入温度と注入速度、更に注入方法を十分気をつけ、特に押湯部の注入に注意すると、内部の偏析も収縮孔も上注法と大差なく、しかも表面は上注法と比較にならないほどスムーズな鋼塊になるとのことである。そして歩留が相当向上すると述べている。

(c) 白点、非金属介在物および巨大炭化物

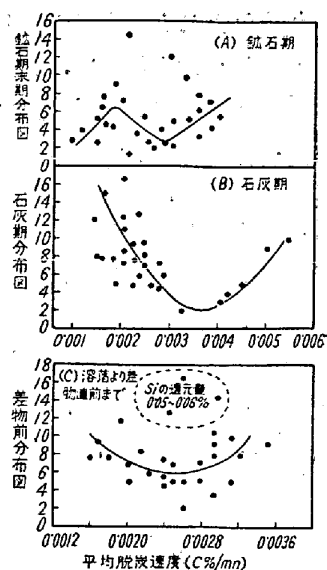
Hieber, Georg¹⁶⁾ は球軸受鋼を塩基性弧光電気炉で熔製する場合、沸騰時間が50~60 mnの際に最も白点の生成が少く、還元精錬時間が延長すれば白点の生ずる傾向が増大すると報告している。また、介在物をできるだけ少なくするには熔け落ちの際も沸騰の完了後も炭素量を高くするようしなければならない。そして精錬の場合に添加する Fe-Si は介在物の量を増加し、装入物中に Cr の量が多くなれば介在物の量が増すと報告している。

石塚¹⁷⁾は酸性平炉操業と非金属介在物の関係について

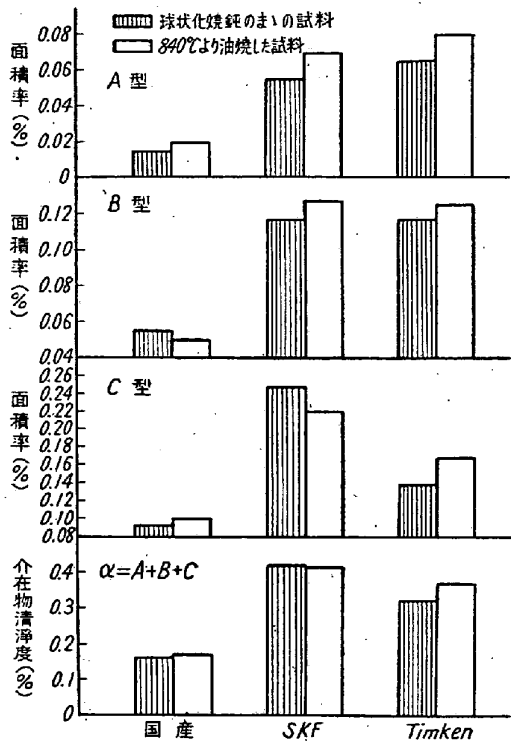
報告している。熔解時の鋼浴の Si 量は 0.4% 位が望ましく、Mn 量の大きい時、介在物は多くなり、かつ Cr 量が大きいと介在物量は多い。第5図よりも明らかなように、沸騰精錬の際の脱炭速度が約 0.002% C/mn 以上になると酸化除去が活発に行われ始め、約 0.003% C/mn 程度の時、介在物は最も低値を示す。更に脱炭速度が急激になると介在物は再び増加する。

片桐、酒井、真崎¹⁸⁾は塩基性電気炉による軸受鋼熔製中における非金属介在物の挙動について研究し、次のように報告している。すなわち、酸化期沸騰作用は0.007% C/mn 程度の脱炭速度で酸化末期の C 濃度が約 0.63% 位になることが介在物を少なくするに有効であり、Fe-Cr の添加量を出鋼トンあたり 22 kg 前後に押えなければならぬ。そして出鋼温度および鑄込温度をできる限り下げた方が良いと報告している。

以上は非金属介在物をできるだけ少なくするための製鋼条件であるが、筆者の研究によると、わが国の軸受鋼はスエーデンの SKF、アメリカの Timken に比して著しく非金属介在物が少いにもかかわらず、軸受鋼の耐久性が必ずしも良好とはいえない。3種の軸受鋼の非金属介在物を点算法で測定して得た結果を第6図に示す。SKF と Timken は硫化物系の A 型、アルミナ系の B 型および酸化物系の C 型介在物とも国産に比して著しく多い。それにもかかわらず耐久性が必ずしも悪くないという事実は、耐久性は非金属介在物の量によるのではなく、耐久性に対して悪影響を与える介在物が非金属介在物中に存在するかどうかによると考える方がより合理的である。それでは耐久性に対して悪影響を与える介在物はどれかということになると、更に研究すべき問題が沢山あるが、前述したように P. H. Frith は “diamond shaped cavity” だといっている。だが筆者の考えでは、基地と介在物との親和力が問題であると考えている。すなわち、基地と介在物の親和力が強固であれば、それが疲労の起点となつても相当の繰返し回数になつて始めて割れに発展する。しかるに基地と介在物の親和力が弱ければ、疲労の起点となると直ちに割れの発生となり、フレ



第5図 脱炭速度と介在物との関係。



第6図 点算法による国産, SKF, Timken 軸受鋼の介在物量.

ーキングとなる。そのため介在物と基地の親和力の如何が問題であると考え。では、A型、B型、C型介在物のいずれの介在物が基地との親和力が強いかということになれば今後の研究にまたなければならぬが、A型介在物はC型介在物よりも親和力があるのではないかと考えられる理由がある。ともかく今後この方面で十分に研究する余地がある。

次に出口¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾は軸受鋼の巨大炭化物の析出について研究し、次のように論じている。すなわち、鋼塊内部の最後に凝固する部分にはCやPなどの多い γ が生ずる。この γ がA₁変態で θ を析出する際に、高P部では炭化物の溶解度が小さいために容易に θ を析出し、これが凝集して巨大炭化物を形成する。実際に1.6% C, 1.5% Cr 鋼について、冷却速度の遅いほど巨大炭化物の偏析が著しく、かつ偏析部の化学組成を調べると C=2.20%, P=0.30%, Cr=2.88% で、Pの偏析と関係のあることを述べている。そして巨大炭化物の生成の阻止には、CとPの偏析を少なくすることが望ましく、そのためには

- (i) Cをあまり高くしない。
- (ii) Pのできるだけ低い原料を選ぶ。
- (iii) Sも低い方がよい。
- (iv) Al, Ti, V などのように結晶粒を小さくする元素を加える。
- (v) 鋼塊の冷却速度を速くする。

などの手段が考えられる。

また、酒井²²⁾は巨大炭化物は1130°Cで析出する γ , θ , η (Cr₇C₃)の三元共晶であるといっている。

(d) 原料の問題

焼入し、低温で焼戻して殆んど靱性のないような高硬度で、点接触の繰返し疲労を受ける苛酷な条件下に使用される軸受鋼は他の鋼種に比して、原料の選択の問題を十分再検討するべきであると考えられる。4, 5年前までは、原料に全部スクラップを用いていた特殊鋼会社もあつたが、悪い原料では絶対に耐久性のよい軸受鋼はできない。東大名誉教授の三島先生や東北大学の佐藤知雄教授はSKFのHoforsの工場を見学されて、軸受鋼の原料は海綿鉄と木炭鉄と工場のリターン・スクラップのみを使用し市場クズを使用していなかつたと報告されている。スウェーデンでもこの原料の内木炭鉄は漸次減少し、海綿鉄がそれに代ろうとしている現状である。

このスウェーデンのWiberg-Söderfors法による海綿鉄を高級特殊鋼に使用する際の利点について、J. L. Stalhed²³⁾は次のように報告している。

- (i) 出鋼量が多くなる。
- (ii) 圧延し易くなるので圧延量が増加する。
- (iii) 不良品が少くなる。
- (iv) 工場内を循環しているスクラップ中の不純物、特にCr, Cu, Snなどの量が減少してくる。

上記利点の外に、スウェーデンではスクラップが海綿鉄よりも安値であるが、熔解コストで海綿鉄の方が安くつくので十分採算がとれると報告している。

又、最近アメリカではHydrocarbon Research Inc. がBethlehem Steel Co. と共同でH-アイアン・プロセス²⁴⁾すなわち水素の直接還元による海綿鉄の製造の研究を始め、本格的な工場建設計画を進めているとのことである。そしてこのH-アイアンの特徴は、なんといつでもヴァージニティーが高いことにあり、平炉、電気炉の鉄源として極めて有効で、特に最近のようにスクラップが入手難でかつその汚染度が甚しい時には、特殊鋼原料として好適であると考えられている。それでわが国でも高級特殊鋼の原料として海綿鉄の利用を考慮すべき段階ではないかと思つている。

金属材料技術研究所でもこの点に着目して軸受メーカーとの共同研究の一環として海綿鉄と耐久性との関連を追求しているので、後日その結果を報告できると思う。

III. 加工法の問題について

1. 鍛造比

鋼塊の凝固の際に最初に凝固した樹枝状部に比べて、後で凝固した部分はC濃度も高く、また結晶も小さいので、鍛造後の球状化焼鈍で炭化物が密集し、しかもこの層は圧延方向に一致する。この層を縞状偏析といふ。適当な熱処理によつて消滅させることができる。また、この層の中によつて鍛造比などが推定される。この外に、鋼塊を圧延すると結晶の偏析や介在物が圧延方向に延ばされ、いわゆる繊維組織を作る。これは鋼塊の内部に著しく、鍛造、圧延した棒材から内外輪を削り出せば、内輪に現れ易いわけである。縞状偏析については酒井²²⁾、繊維組織については久道²⁵⁾が、それぞれの原因および改良について述べている。

筆者がスウェーデンのSKFと国産の軸受について繊維組織を調べたところ、写真2、写真3のように、SKF

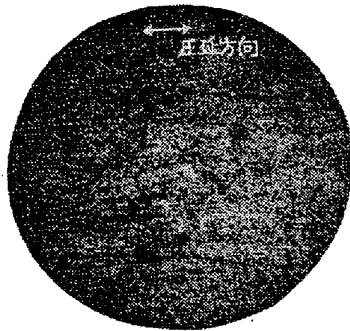


写真2 SKF軸受鋼の繊維組織
×50 (1/2)

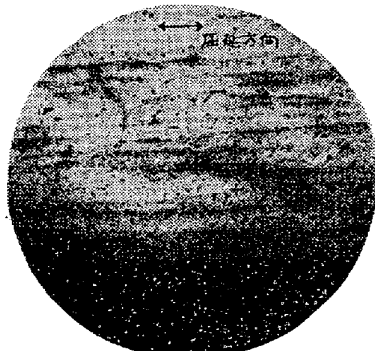
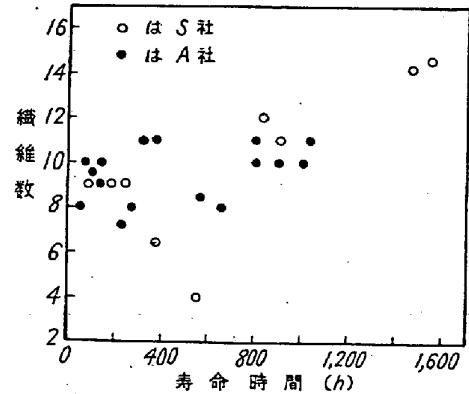


写真3 国産軸受鋼の繊維組織
×50 (1/2)

の軸受の繊維組織の層の間隔は密であるのに国産のそれは著しく粗である。このことは前者は鋼塊が大きくて鍛造比が大きいことを示し、国産のそれは鋼塊が小さくて鍛造比が小さいことを示す。この鍛造比の小さいことは軸受の寿命を著しく低下させる。不二越鋼材の近藤²⁶⁾は長さ1.7mmの間の繊維数と寿命時間の関係を調べて、第7図のように繊維数の大きいほど（鍛造比が大きいほど）寿命が長くなることを報告している。

このように鍛造比は軸受鋼の耐久性の向上に対する一つの重要な因子であると考えられる。スウェーデンの



第7図 繊維数と寿命との関係

SKF Hofors では1tの角型鋼塊、アメリカのTimkenでは3tの鋼塊であるといわれているが、これに比べてわが国の特殊鋼会社の軸受鋼塊は少し小さいのではないかとと思われる。

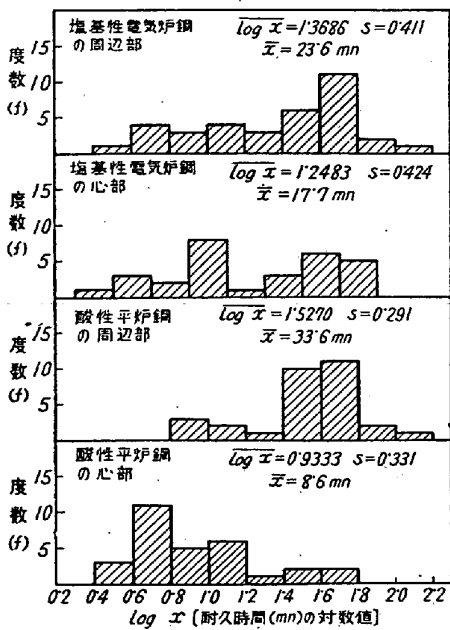
2. パイプ材とバー材

鍛造比を上げるには、鋼塊を大きくするばかりでなく熱間加工法を変えることによつて、繊維組織の間隔を密にすることができる。

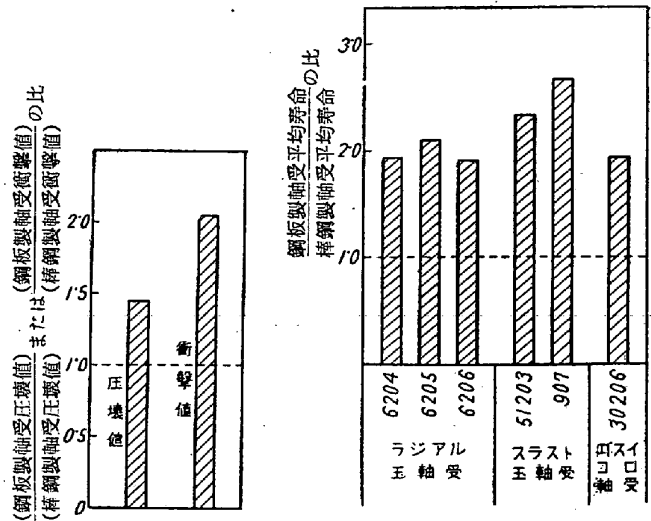
現在のところ、ステーフェル・マンネスマン圧延機かユーデン・セヂュルネー押出法によつて軸受鋼パイプ材が製造されているが、これらのパイプ材はバー材比して著しく繊維組織が密である。後者のユーデン・セヂュルネー押出法による軸受鋼パイプ材の製造は非常に最近のことであつて、今後の発展が注目される段階である。

パイプ材とバー材の耐久性（寿命）の比較を筆者¹²⁾が機械試験所で早期耐久試験機で実施したところ、パイプ材の耐久性がバー材よりも優れていることが判明した。それで将来、パイプ材がバー材にとつて変わることは当然考えられる。

軸受鋼バー材の周辺部と芯部より試験ニードルを削り出して上記早期耐久試験機で耐久試験したところ、芯部より削り出したニードルの平均耐久時間は第8図に示すように、周辺部のそれに比べて著しく短い。しかるに、現在軸受メーカーでは軸受を製造する際に、バー材の周辺部より外輪を、芯部より内輪を削り出しているが、ベアリングの実用寿命試験では内輪が一番フレーキングを起す確率が多いのである。それで平均耐久時間の悪い芯部をフレーキングの最も起り易い内輪に使用していることになるので、バー材の使用方法にも一考すべきと思う。すなわち、バー材の外周部より内輪を、芯部より更に寸法の小さいベアリングの外輪を削り出したらよいのではないかと考えられる。



第8図 塩基性電気炉鋼と酸性平炉鋼の周辺部と芯部より圧延方向に平行に削り出したニードルの耐久試験による耐久時間の対数の度数分布図。



第9図 鋼板製軸受と棒鋼製軸受の圧壊値と衝撃値
第10図 鋼板製軸受と棒鋼製軸受の寿命の比較。

3. 鋼板製ベアリング

軸受鋼の鍛造比を上げることが寿命に好結果を及ぼすことについては前々項で述べたが、この鍛造比を上げるために不二越鋼材 K. K. では鋼板製ベアリングなるものを考案し製造している。この鋼板製ベアリングの製造法は最初鋼塊より鍛造圧延して鋼板の軸受鋼を造り、球状化焼鈍後にこれをドーナツ型に打抜き加工する。これを熱間で円環に絞り出す。これから内輪と外輪を機械加工して削り出すのである。それで鋼板の表面が内輪と外輪の軌道面となり、相当の加工を受けていることになる。

このような鋼板製ベアリングは最初に鋼板に圧延するため、鍛造比が増加し、砂きずについては鋼板の表面近くに集中し延ばされているので、削りとることによって減少する利点を生ずる外に炭化物の分布の均一性、圧壊値および衝撃値の増加を来す(第9図)。また、鋼板製ベアリングの平均寿命は棒鋼製のベアリングに比して約2倍になったと不二越では報告している²⁶⁾²⁷⁾(第10図)

(昭和 32 年 12 月寄稿)。

文 献

1) E. Houdremont: Handbuch der Sonderstahlkunde, Düsseldorf (1956)
2) 出口: 鉄と鋼, 40 (1954) 510
3) 川口: 電気製鋼, 22 (1951) 150

4) " : " " " 185
5) " : " 23 (1952) 45
6) " : " " " 165
7) 山中・日下: 鉄と鋼, 38 (1952) 921
8) 上野・中島: 鉄と鋼に発表予定
9) 上野・中野: 鉄と鋼, 43 (1957) 1137
10) Vanadium Alloy Co.: Tool steels Catalog
11) B. Kjerrman; Proceedings World metallurgical Congress 1951 p. 502
12) 上野: 日本機械学会誌, 59 (1956) 891
13) P. H. Frith: J. of Iron & Steel Inst. 180 (1955) 26
14) H. Styri: A.S.T.M. Preprint, Nov. 23, 1951
15) 福島・伊藤: ソ連の製鋼法, p. 119
16) Hieber, Georg: Stahl u. Eisen, 58 (1938) 761
17) 石塚: 鉄と鋼, 38 (1952) 278
18) 片桐・酒井・真崎: 不二越月報 9 (1953) No. 1, p. 3, No. 2, p. 1
19) 出口: 鉄と鋼, 38 (1952) 406
20) 出口: 鉄と鋼, 39 (1953) 189
21) 出口: 鉄と鋼, 41 (1955) 277
22) 酒井: 不二越月報 7 (1951) No. 2, p. 4
23) J. L. Stalhed: J. of Metals 9 (1957) 246
24) A. M. Squires. C. A. Jhonson: J. of Metals 9 (1957) 586
25) 久道: 不二越月報 8 (1952) No. 3 p. 8
26) 近藤: 不二越月報 12 (1956) No. 3 p. 9
27) 石坂: 不二越月報 12 (1956) No. 3 p. 7