

抗張力, 降伏点, 硬度は極めて僅かに増大するが, 伸, 絞は低下する.

4) 焼戻性能については, Cu が増すにつれて焼戻抵抗が増すが特に 400~450°C における変化が大である.

5) ばねの耐久限に対しては Cu は悪い影響をあたえる様である.

本研究は日本ばね協会のばね技術研究会より委託された「ばね鋼の改善」研究の一部として行つたものであつて, 研究費については文部省科学試験研究費の補助を抑ぎ, 実験については大同製鋼他各方面の御協力を煩はしたものである. 此処に深謝の意を表する次第である.

(昭和 30 年 3 月寄稿)

文 献

- 1) Stogoff u. Messkin: Arch. f. Eisenhüttenw **2**, (1928), 321.
- 2) 俵 信次: 鉄と鋼, **23**, (1937), 875.
- 3) Breuil: J. Iron & Steel Inst., **74**, (1907), 1~78.
- 4) Nehl: Stahl u. Eisen, **50**, (1930), 678.
- 5) Gregg & Daniloff: Alloys of Iron and Copper; pp. 144~166.

軸 受 鋼 の 研 究 (II)*

(ベアリングの寿命に及ぼす金相学的因子の影響について)

上 野 学***・三 橋 鉄太郎**・中 野 泰***

STUDIES ON BALL BEARING STEELS (II)

(Effect of Some Metallurgical Factors on Life of Ball Bearing Steels)

Manabu Ueno, Tetsutaro Mitsuhashi, Dr. Eng. and Yutaka Nakano

Synopsis:

The inner rings of the ball bearing, which had been known the life time in life test, was studied in order to look for the relation between some metallurgical factors and life.

As some factors the chemical composition, non-metallic inclusions, hardness, compressive load of inner rings, cementite content, grain size and forging degree were tested.

The results obtained by our investigation were summarized as follows.

(1) Generally speaking, the chemical composition had no direct relation to life of ball bearing. By our results carbon content of our home-made ball bearing steels was controlled in a higher range of the standard, but it must be controlled in a lower range to avoid the segregation and coarse carbide. Chromium content must be controlled in 1.40~1.50 per cent.

(2) Nitrogen content had no clear relation to life of ball bearing steels.

But some group of the nitrogen had relation to cementite content, while the other group had no relation to cementite content.

(3) The higher hardness of after heat-treatment, the longer was life of ball bearing.

Hardness of inner ring increased mostly after life test. It is due to transformation of the retained austenite. Hardness of after life test has no relation to the life.

(4) The compressive load of inner ring had no direct relation to life of ball bearing.

(5) Non-metallic inclusions had scarcely relation to life of ball bearing according to our investigation.

(6) In the forging ratio our home-made ball bearing steels were considerably lower. It must be raised by using the bigger ingot.

(7) Cementite content retained after heat-treatment had clear relation to life of ball bearing.

Maximum life was in about 6~8 percent of cementite content

(8) Grain Size had no distinct relation to life of ball bearing. But some group of it had relation to life, and the other group had no relation to life.

* 昭和 30 年 4 月 本会講演大会にて発表, ** 工業技術院機械試験所・工博, *** 同機械試験所

I. 緒言

我国で製造されているベアリングの寿命の向上については、なお相当の研究と調査を必要とすることは、当所のベアリングの寿命試験の結果明らかとなつた。この結果によるとベアリングの故障は主として内輪に発生する確率が多く、次にボール、それから外輪である。そこで寿命試験の結果寿命の判明せる内輪について金相学的因子、即ち化学組成、非金属介在物、硬度、圧壊値、セメントナイト含有量、結晶粒度、鍛造程度等を調べた。そしてベアリングの寿命とこれらの金相学的因子の間の相関性について調査研究したので本稿に報告する。

さて、ここで寿命とは型番 6304 のボール・ベアリングをラジアル荷重 500kg、廻転数 1200r.p.m. の条件下で試験した時に、内輪のレース面に“pitting”および“flaking”が発生するまでの時間をいうのである。調査研究したベアリングは5大メーカー、即ち日本精工、東洋ベアリング、光洋精工、不二越鋼材、旭精工 K.K. のベアリングである。6304 の型番のベアリングの寸法は内径 20mm、外径 52mm、巾 15mm である。

II. 実験結果及び考察

(1) 化学組成と寿命との関係

寿命時間の判明している内輪を圧壊試験した後、グラインダー切断機で4等分し、その1つを 600°C×1h 光輝焼鈍した後にボール盤で分析試料を採集する。分析した化学組成は C, Si, Mn, P, S, Cr の6成分で、CとCrと寿命の関係を Fig. 1, Fig. 2 に示す。これからも明らかな様に寿命とこれらの成分の間に一義的な関係はない。Fig. 1 より軸受鋼のC量は JIS の SUJ 2 の規格の高目を目標にしている。然しC量が高目になると粗大炭化物が発生する危険があるので、SKF の如く低目のC量 (0.95~1.05%) を目標にすべきであろう。したがって我国の様にC量を高くして、鋼塊を小さくして急冷して粗大炭化物の発生を阻止する方法は誤っているのではなからうか。他の成分について寿命と一義的な関係はないが、Cr についていえば国内のベアリングは約 1.2%~1.5% の範囲にばらついているが、SKF の素材は約 1.4%~1.5% の範囲に目標をおいている。

(2) Nガスと寿命の関係

学振法による全N量と寿命には一義的な関係はない。更にハロゲン・エステル法¹⁾による不溶解のNの含有量と寿命にも関係がない。

(3) 硬度と寿命の関係

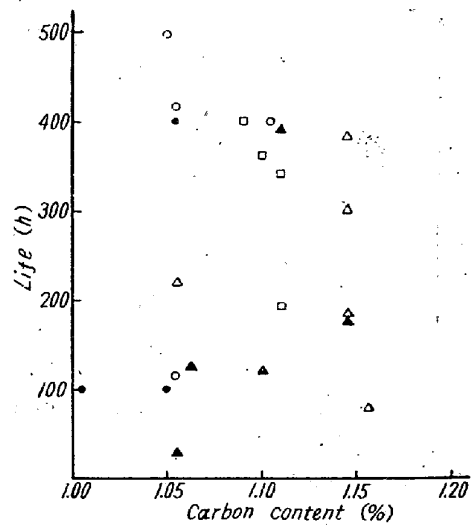


Fig. 1. Relation between carbon content and life.

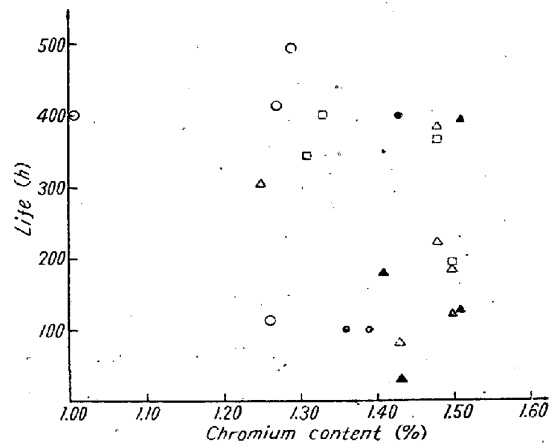


Fig. 2. Relation between chromium content and life.

硬度は明石製作所の微小硬度計にて測定した。そして内輪の軌道面および内輪の外周の硬度を荷重 1kg にて 20箇所測定し、その平均値およびそのばらつきを示す標準偏差と寿命との関係を求めた。Fig. 3 は内輪の軌道面の硬度の平均値と寿命の関係を示す。これからも明らかな如く一義的な関係はない。Fig. 3 より軌道面の硬度の平均値と寿命の相関係数 (r) を求めると、 $r=0.14$ となり、 $r^2=0.02$ なる故に寿命の分散の約 2% はこの軌道面の平均硬度に関係してかわる。Fig. 4 は内輪の外周の硬度の平均値と寿命の関係を示すもので、硬度が高くなる程寿命が長いことを示している。この相関係数 (r) を求めると、 $r=0.56$ となり、 $r^2=0.31$ なる故に寿命の分散の約 31% はこの外周の硬度に関係してかわる。そしてこのことは軸受鋼を熱処理した後の硬度が高い方が寿命に対して有効であることを示す。また、一度寿命試験して硬度変化した軌道面の硬度は寿命に殆んど

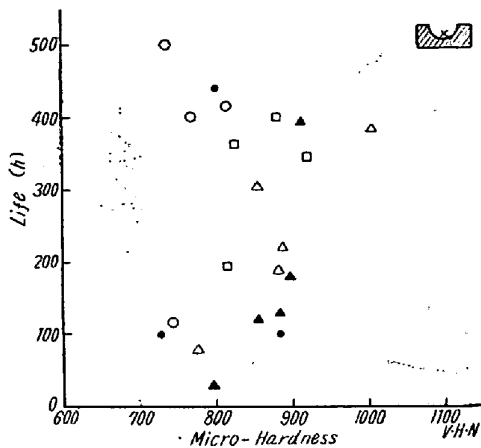


Fig. 3. Relation between life and hardness of inner race.

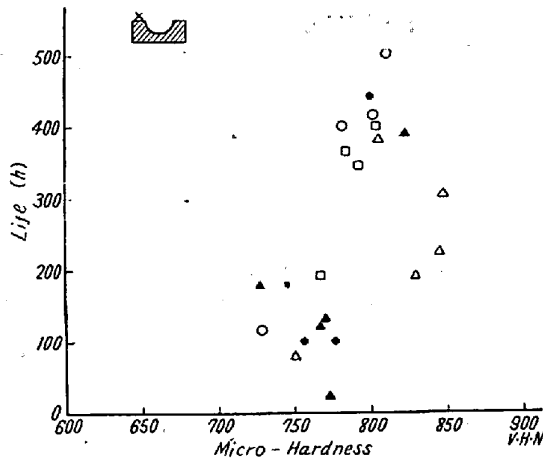


Fig. 4. Relation between life and hardness of shoulder in inner ring.

相関がない。内輪の外周の硬度のばらつきと寿命の関係を求めると、ばらつきが大きい程、即ち標準偏差が大きい程寿命が長いことを示す。著者は硬度ブロックの研究²⁾で表面硬度を高くする程硬度のばらつきが多くなることを報告したが、それと上記の結果は一致する。次に内輪の外周の硬度と軌道面の硬度の差と寿命の関係は、Fig. 5 に示す。これも一義的關係はないが、運転試験後に軌道面の硬度が高くなるものが多いことが判明される (Fig. 5 において硬度差の (-) が多い)。この硬度増加の原因は残留オーステナイトの分解にもとづくものと考えられる。ベアリングは約 840°C より油焼入して約 150°C~170°C の間に焼戻されているので、球状セメントライト、マルテンサイトおよび残留オーステナイトよりなりたっている。球状セメントライトは焼戻処理にて変化しないので、硬度増加の原因は残留オーステナイトか、マルテンサイトかのいずれかになる。H. Hane-mann³⁾によるとマルテンサイトは 150°C 以上に焼戻す

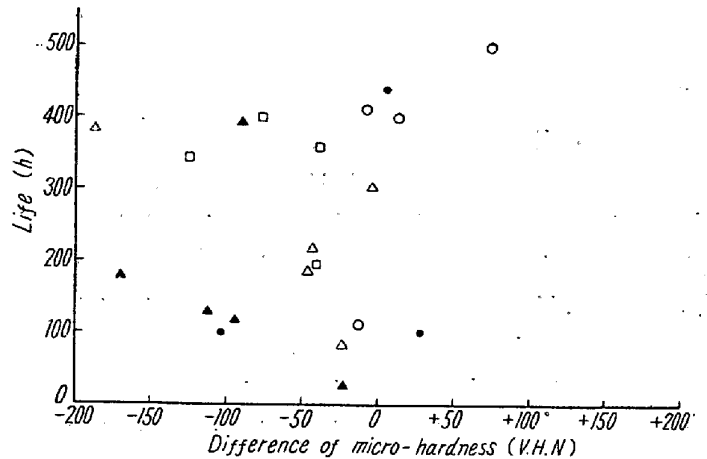


Fig. 5. Relation of life and hardness difference between shoulder and inner race in inner ring.

ると硬度が低下すると報告している。それでベアリングの様に 150°C~170°C で焼戻されているものではマルテンサイトの硬度は充分高くなつていて、運転試験中に温度が上昇すると、かえつてマルテンサイトの硬度は低下する等であるので、運転試験中における硬度増加は残留オーステナイトに帰因するのである。

(4) 圧壊荷重と寿命の関係

寿命の判明せる内輪を 30ton のアムスラー試験機にて圧壊試験する。ところが各軸受メーカーにより内輪の断面形状が異なるので、この断面積を求めて先に求めた圧壊値を割つた圧壊荷重 (kg/mm²) と寿命の関係を求めた。Fig. 6 がそれである。軸受メーカーは圧壊値と硬度の関係を重要視しているが、上記の結果圧壊値の高いものが必ずしも寿命が長いとはいえない。次にこの圧

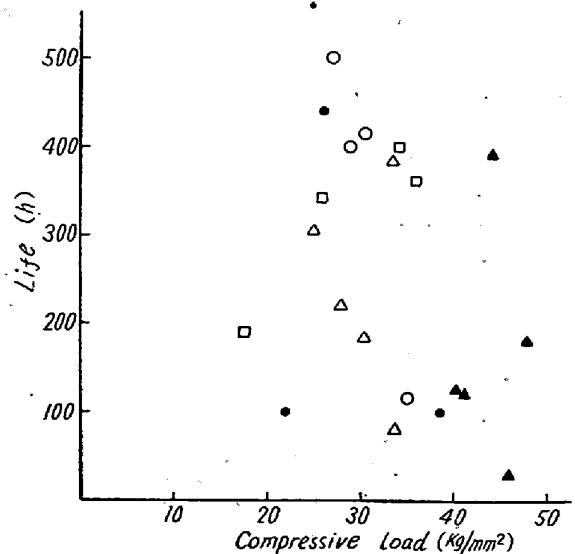


Fig. 6. Relation between compressive load and life.

壊荷重と寿命との相関係数 (r) を求めると、 $r = -0.3$ となる。 $r^2 = 0.09$ なる故に寿命の分散の約 9% は圧壊荷重に関係してかわる。 r が (-) である故に圧壊荷重が低い程寿命が長いという傾向を示している。

(5) 非金属介在物と寿命の関係

非金属介在物には 2 種類あり、A 型非金属介在物は加工により粘性変形をなすもので硫化物、珪酸塩等である。B 型は粘性変形をなさざる酸化物である。寿命の判明せる内輪を切断し、圧延方向の断面について視野数 50 以上測定して A 型、B 型非金属介在物の清浄度を求めた。この A、B 型非金属介在物の清浄度と寿命の関係を Fig. 7, 8 に示す。いずれも一義の関係はないが、Fig. 7 より知られる如く A 型非金属介在物の清浄度をよくすることにより寿命が向上する Δ 印会社の製品があつた。今 A 型と寿命の相関係数 (r) を求めると、 $r = 0.15$ となり、 $r^2 = 0.023$ となる故に寿命の分散の約 2.3% は A 型非金属介在物に関係して変るにすぎない。それで A 型 B 型とも余り寿命とは直接的な関係はないように思える。

(6) 鍛造程度について

河合泰治氏が Woodfine 氏試薬による焼入鋼の一次晶顯出について発表している。著者もこの Woodfine 氏試薬 (ピクリン酸飽和水溶液) を使用して圧延方向の縞状組織を調べた。S. K. F. の素材は国内の素材に比して非常に縞状組織の間隔が稠密である。しかるに国内の素材ではその間隔が相当あり、縞状偏析が相当ある。

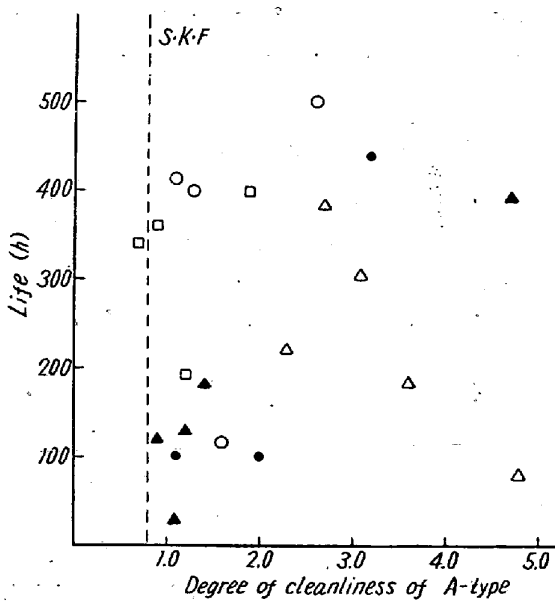


Fig. 7. Relation between cleanliness of A-type non-metallic inclusions and life.

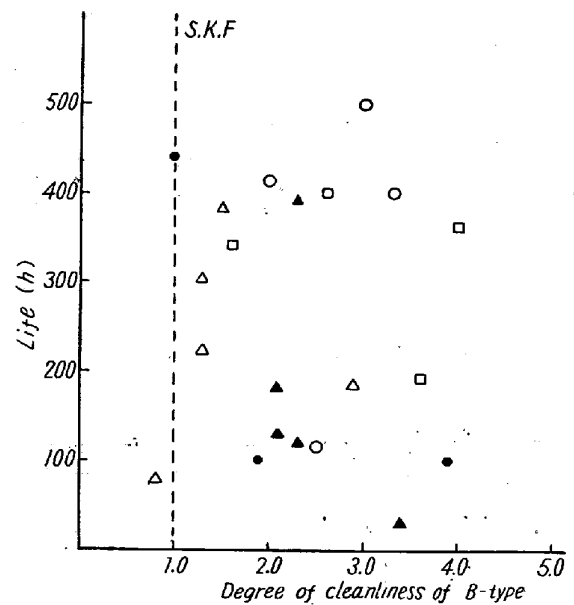


Fig. 8. Relation between cleanliness of B-type non metallic inclusion and life.

これらの事実より考察すると我国の軸受鋼の鋼塊の大きさが小さいのではないかと考えられる。実際に国内の軸受鋼メーカーを調査しても S. K. F. の素材供給メーカーたる Hofors Steel Works の 1~1.3ton 角形鋼塊に比して可成り我国では小さい鋼塊を使用している状態である。このことは相当ベアリングの寿命に影響する。

(7) セメントイト含有量と寿命との関係

軸受鋼の素材は球状化焼鈍した状態にあるので、組織は球状セメントイトがフェライト地に分布している。軸受鋼の C 量は約 1% 前後存在するので、素材の Fe_3C の量は約 15% 前後存在している。これを焼入処理して硬化し得るのは、オーステナイト状態に保持されている時に Fe_3C が地に溶込んで C を供給するからである。

我国のベアリングの内輪について、この Fe_3C 量を Lineal analysis にて約 5mm の距離の間の線分比より求めると、約 4%~約 12% の間にばらついている。

即ち、或るものは Fe_3C が溶込み易く、或るものは固溶しにくいことを示している。この残存する Fe_3C 量と寿命の関係を求めると Fig. 9 の如くなる。これより大体 Fe_3C 量が約 6~8% の間に寿命の最大な所があると思われる。特に Δ 印会社の内輪については直線的に Fe_3C 量が 8% に近くなるにつれて寿命が向上する。 Fe_3C 量が 8% よりも多くなると反対に寿命は低下する傾向を示す。

今、そこで Fe_3C 量 8% 以下のものについて Fe_3C 量と寿命との相関係数 (r) を求めると、 $r = 0.598$ となり、 $r^2 = 0.36$ なる故に寿命の分散の約 36% は Fe_3C 量に

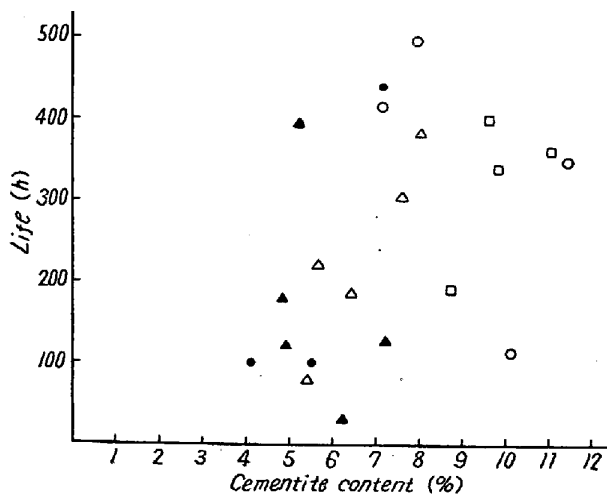


Fig. 9. Relation between cementite content and life..

関係して変る。

この相関係数と内輪の外周の硬度と寿命の相関係数が殆んど等しく、他のいずれの因子よりも寿命に対して相関がある。

素材中の約 15% Fe_3C が硬化処理により 6~8% Fe_3C に残存する時に寿命の最大な所がある理由は次の様に考えられる。硬化処理後残存する Fe_3C が 8% よりも多いときには、地の C 量が低くなつて、たとえば Fe_3C が 12% もあると地の C 量が約 0.2% 前後になり、地は硬化処理にて充分焼が入らないので軟くなつている。然し Fe_3C が沢山残っているので全体の硬度は Rc で 60 上になつている。このようなものでは寿命試験の際地が荒れて早く“flaking”を起すにいたる。次に硬化処理後残存する Fe_3C が 8% よりもはるかに少ないときには、地の C 量が充分多くなり、例えば Fe_3C が 5% 残存すると地の C 量は約 0.7% 近くになる。それで焼入後地に残留オーステナイトが相当残存する。然し Fe_3C が 6~8% では、地の C 量は約 0.5% 程度であり、焼入により充分硬化し得るし、かつまた残留オーステナイトの残存も比較的少ないのである。このことは B. L. Averbach 等⁹⁾の文献による残留オーステナイト量と C 量の関係からも明らかである。

次に Fe_3C 量とロックウェル硬度の関係を示すと Fig. 10 の如くなる。これからも明らかな様に Fe_3C が地に溶込む程、即ち残存する Fe_3C が少い程硬度が高くなる。各 Fe_3C 量の所の最高の硬度の点を見ると Fe_3C が 7.5% の所が硬度が最高となり、 Fe_3C が少くなると、かえつて硬度が低下している。これは焼入した際に残留オーステナイトが漸次増加するためと考えられる。Fig. 12, 13 より硬化後残存する Fe_3C 量が 6~8% の間に

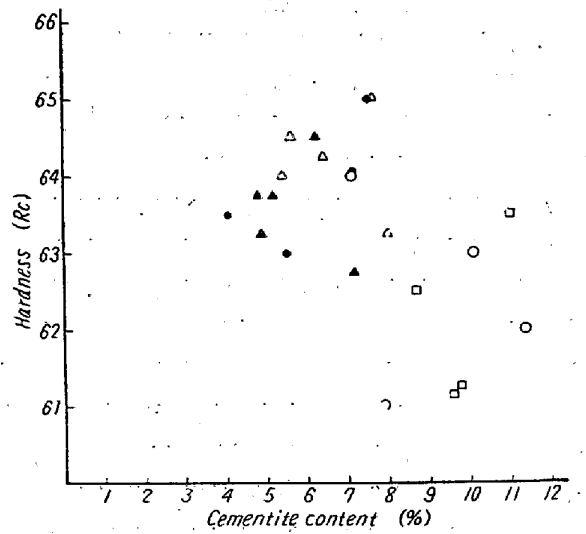


Fig. 10. Relation between cementite content and hardness.

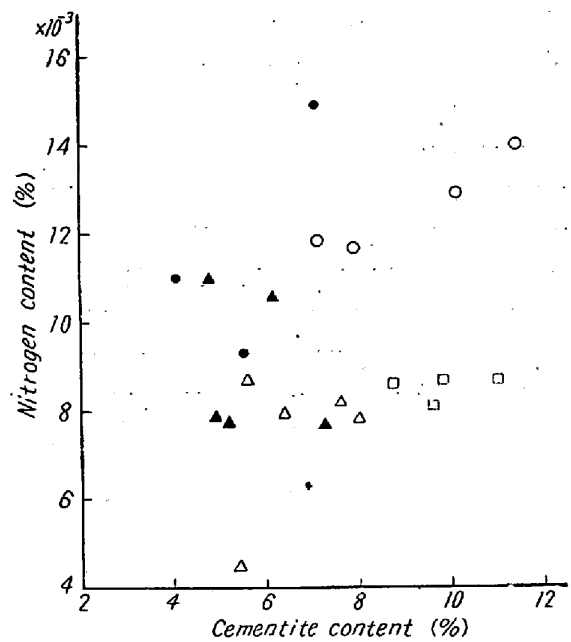


Fig. 11. Relation between nitrogen content and cementite content.

あるとき寿命が最大であると考えてもよい。

Fe_3C 量と N 量の関係についていえば (Fig. 11), N 量が Fe_3C 量に関係するものと、しからざるものがある。N 量が Fe_3C 量に関係するものでは N 量が減少するにつれて Fe_3C 量は減少する傾向を示す。N 量が Fe_3C 量に関係しないものについて、オーステナイト状態で C の拡散をさまたげる元素 Si, Cr の影響があるのではないかと思つて関係を求めたが一義的關係はなく、原因は不明である。然しこれは鋼の“Virginity”と関係があるのではないかと考えている。

(8) 結晶粒度と寿命との関係

結晶粒度を調べ、粒度と寿命との関係を求めるために焼入法を採用した。即ち、各試料を $925^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 加熱して、水焼入を行い、 $250^{\circ}\text{C} \times 15\text{min}$ 焼戻する。この試料を研磨して、ピクリン酸(1gr)+HCl(s.g=1.19) 5cc+エチルアルコール 95cc の腐蝕液で 5~10 秒腐蝕する。粒度の測定は学振法によらないで、5~6mm の間にある結晶粒の数をかぞえて単位距離あたりの結晶粒の数であらわす。その結晶粒の数と寿命との関係を示すと Fig. 12 の如くなる。

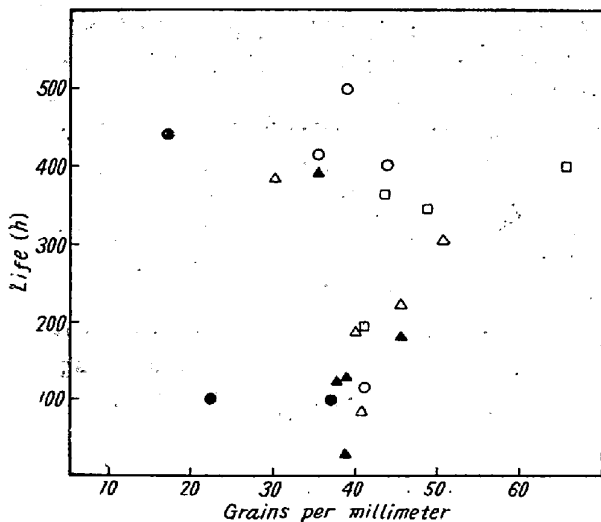


Fig. 12. Relation between life and grain size.

これにより明らかな様に結晶粒度と寿命の関係において、あるものは無関係であり、他のものは結晶粒が小さくなると寿命を増す傾向を示す。

III. 結 論

以上のことを総括して考えると、

(1) 化学成分についていえば、いずれも寿命とは一義的な関係はない。然し我国の軸受鋼のC量は規格の範囲で高目である。粗大炭化物防止の点かCは低目を目標として鋼塊の大きさを大きくすべきであろう。Crについては規格の高目を目標にし、1.40~1.50% の間にCr含

有量がある様にすべきであろう。

(2) N含有量と寿命についても一義的な関係はない。然しN量と Fe_3C 量との間には関係のあるものと、ないものがある。

(3) 焼入焼戻後の硬度が高い程寿命が長い。寿命試験後に硬度が増加するベアリングが多い。この硬度増加は残留オーステナイトに帰因する。硬度が増加した後の硬度と寿命には一義的な関係はない。

(4) 圧壊試験による圧壊荷重と寿命には殆んど関係がない。その相関係数を求めると、値も低くて符号はマイナスである。それで符号の点よりいえば圧壊荷重が低い程よいことになる。

(5) 非金属介在物と寿命の関係については一義的な関係はない。

(6) 鍛造の問題については我国の軸受鋼は鍛造比が低いと考えられる。我国でも軸受鋼の鋼塊の大きさを大きくして充分鍛造比を上げる必要がある。

(7) 硬化処理後に残存する Fe_3C 量と寿命の間には相当の関係があり、 Fe_3C 量が約 6%~8% の間に寿命の最大な点がある。 Fe_3C 量と硬度の間にも関係があり、最高の硬度は Fe_3C 量の最適の範囲にある。

(8) 結晶粒度と寿命の関係については、あるものは関係し、他のものは寿命とは関係しない。寿命と関係するものでは結晶粒が小さい程寿命は良好である。

終りに本研究に御援助を戴いた機械試験所第2部2課の軸受研究室の一同に深く感謝する。

(昭和 30 年 4 月寄稿)

文 献

- 1) H. F. Beeghly: Analytical Chemistry, **21** (1949), p. 1513.
- 2) 三橋, 上野, 萩原: 機械試験所所報, **7** (1953) No.3, p. 94.
- 3) H. Hanemann: Metallurgia, **32** (1945), 62.
- 4) 河井泰治, 小川楠雄: 鉄と鋼, **40** (1954) No. 9, p. 899.
- 5) B. L. Averbach, L. S. Castleman & M. Cohen: Trans. A.S.M., **42** (1950), p. 112.