軸受鋼の耐久寿命におよぼすマルテンサイト中の炭素およびクロム量の影響*

門 間 改 三** 丸 田 良 平***
山 本 俊 郎*** 脇 門 恵 洋***

Kaizo Monma, Ryohei Maruta, Toshiro Yamamoto and Yoshihiro Wakikado :
Effects of Carbon and Chromium in Martensite Matrix on the Fatigue Life of Bearing Steel. In this work, the specimens containing various amounts of carbon and chromium were quenched avoiding the precipitation of undissolved carbides and then the fatigue life and other properties were tested.

The results may be summarized as follows :

- (1) The most suitable carbon content in martensite matrix to obtain the long fatigue life and high mechanical properties is about 0.40 to 0.50%.
- (2) The fatigue life, compressive breaking strength and tensile strength show the highest values, when the specimens hardened without undissolved carbides and tempered at low temperatures have hardnesses in a range of 50 to 57 in HRC.
- (3) Under the above condition, the fatigue life and the compressive breaking strength depend mainly on the carbon content in martensite matrix, and chromium has little effect on them.
- (4) The presence of chromium as a chemical component of bearing steel is effective to produce homogeneous and fine particle carbides, and facilitates the control of quenching work and increases its hardenability.

(Received May 9, 1968)

I. 緒 言

軸受鋼の化学成分は製造される部品やその大きさによって多少の差はあるが、大体 1% C, 1.5% Cr が標準成分で、永年ほとんど変化がない。

軸受鋼の材質的要求の究極の目標は軸受の耐久寿命をいかにして安定に、かつ長くするかにあることはいうまでもない。この点に関し、従来、きわめて多くの研究⁽¹⁾が行なわれてきたが、いまだ確定的な解答はえられていない。軸受鋼は一般には、焼準、球状化焼鈍後、軸受リングに製作してから焼入焼戻を行なつて使用しており、その組織はマルテンサイトの地質中に未溶解炭化物を残存したものである。したがって、軸受の耐久寿命を改良する立場からの研究はマルテンサイト素地そのものと、これと共存する未溶解炭化物の影響とを、別々に検討しなければならない。

著者らはかかる観点より軸受鋼の耐久寿命についての考察を試みたが、その第一として本報告では耐久寿命にとつて焼入マルテンサイト中の最適炭素量はどの程度か、またかかる性質にとつてマルテンサイト中のクロム量はいかなる影響をあたえるかについて検討した。

II. 試 料

試料は A, B2 系列からなる。Table 1 にそれらの化学

** 東北大学工学部金属材料工学科 (Department of Materials Science, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)

*** 愛知製鋼株式会社 (Aichi Steel Works, Ltd., Nagoya)

* 1967 年 10 月本会札幌大会に発表

(1) たとえば上野, 三橋, 中野: 鉄と鋼, 41 (1955), 1102.

組成を示した。耐久寿命におよぼすマルテンサイト中の炭素量の影響を検討するにあたっては、0.2~0.8% の範囲に

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A-1	0.20	0.20	0.22	0.010	0.024	0.16	0.06	0.14
A-2	0.38	0.23	0.26	0.009	0.025	0.15	0.06	0.12
A-3	0.51	0.23	0.30	0.009	0.023	0.15	0.06	0.13
A-4	0.61	0.22	0.29	0.009	0.022	0.15	0.06	0.12
A-5	0.84	0.25	0.24	0.009	0.022	0.16	0.06	0.12
A-6	0.23	0.25	0.39	0.017	0.037	0.16	0.09	0.14
A-7	0.40	0.26	0.43	0.017	0.039	0.16	0.09	0.14
A-8	0.44	0.20	0.34	0.019	0.036	0.16	0.09	0.14
A-9	0.50	0.21	0.35	0.019	0.033	0.15	0.09	0.14
A-10	0.61	0.26	0.44	0.019	0.042	0.16	0.09	0.14
A-11	0.80	0.26	0.44	0.020	0.045	0.16	0.09	0.14
B-1	0.53	0.25	0.34	0.010	0.021	0.16	0.07	0.12
B-2	0.56	0.25	0.35	0.010	0.019	0.16	0.07	0.80
B-3	0.53	0.25	0.36	0.010	0.020	0.16	0.07	1.19
B-4	0.52	0.27	0.36	0.009	0.018	0.15	0.07	0.11
B-5	0.51	0.25	0.34	0.007	0.020	0.16	0.07	0.61
B-6	0.51	0.25	0.34	0.007	0.021	0.16	0.07	0.93
B-7	0.50	0.26	0.36	0.007	0.020	0.16	0.07	1.43

炭素量を変化させた炭素鋼 (A 系列試料) を使用し、またクロム量の影響の検討には炭素量を 0.5% 一定、クロム量を 0.1~1.4% の範囲に変化させた低クロム鋼 (B 系列試料) を使用した。A, B 両系列の寿命試験片は、実験用高周波炉で溶製した 5 kg 鋼塊 (A 系列試料および B 系列, B4~B7 試料) および 20 kg 鋼塊 (B 系列, B1~B3 試料) を鍛伸、据込後、切削加工して作製したが、いずれもオーステナイト域より完全焼入し、未溶解炭化物の存在しない状態で実験を進めた。なお、各試料につき硬度、圧壊値などの機械的性質も合わせて検討し寿命試験の結果の参考にした。

III. 実験結果および考察

1. 炭素量による機械的性質および耐久寿命の変化

本実験ではまず鋼の機械的性質がマルテンサイト中の炭素量によっていかに変化し、またこの性質が耐久寿命といかなる相関関係にあるかを知るために、寿命試験にさきだつて、引張試験および圧壊試験を行なつた。実験に供した試料はA系列、A1～A5で、それらの炭素量はそれぞれ大体0.2, 0.4, 0.5, 0.6および0.8%に近く、したがつて各試料のオーステナイト化温度は A_3 点以上大体 50°C として、Table 2のごとく選んだ。なお、各試料の焼入時のオ

Table 2 Conditions of heat treatment used for specimens

Carbon in specimen (%)	Austenitizing temperature ($^\circ\text{C}$)	Holding time (min)	Cooling way
0.2	900	30	Water quench
0.4	860	30	"
0.45	860	30	"
0.5	850	30	"
0.6	830	30	"
0.8	800	30	Oil quench

ーステナイト結晶粒度はいずれも JIS 8 であつた。

マルテンサイト状態の引張試験には JIS 4 号試験片は不適当であるので、本実験では比較的切欠効果を少なくした形状の試験片 (Fig. 1) を使用した。焼入浴は原則として水

Fig. 1 Tensile specimen

としたが、0.8% C の試料のみ、試験片 2 本のうち 1 本を水焼入、他の 1 本を油焼入した。試料はすべて 200°C , 90 min 焼戻して後、引張試験を行なつた。

Fig. 2(a) に真の破断力および耐力 (0.2%) を、Fig. 2(b) に伸びおよび絞り をそれぞれの炭素量に対して示した。Fig. 2(a) にはまた、引張試験片において測定した硬度も併示している。

Fig. 2(a) にみるように硬度は炭素含有量 0.2～0.6% の間で急激に上昇し、0.6% 以上でその上昇がゆるやかになる。これに対して真の破断力および耐力は大体同様な傾向を示し、0.5% まで炭素含有量が増加するにつれてその値を上昇し炭素量 0.5% 付近で最大となり、これより炭素量が増加すると逆に低下する。一方、靱性についてみると (Fig. 2(b))、絞り、伸びともに炭素量の増加につれて急激に低下し、伸びは炭素量 0.4%、絞りは炭素量 0.6% 以上ではほとんど認められなくなる。

従来の研究⁽²⁾⁽³⁾によれば鋼の降伏点および抗張力は、その鋼の炭素量に無関係に硬度が高くなるにつれて、その値

Fig. 2 Relation between carbon content in martensite matrix and mechanical properties

を増すが、この関係の成立するのは硬度が約 HRC 50 以下の場合であつて、これ以上の硬度を示す状態においては、硬度上昇にもなつて引張強度は急激に低下することが報告されている。このことは HRC 50 程度を境として破壊機構の様相が異なることによると考えられる。すなわち、HRC 50 以下では一般に延性破壊を示すのに対して、HRC 50 以上では脆性破壊の傾向が現われるのである。本実験の結果でも真の破断力、0.2% 耐力は 0.5% C の試料で最高値を示しているが、その試料の硬度が大体 HRC 50 程度であることは上記研究結果⁽²⁾⁽³⁾と対応しているように思われる。いずれにせよ、本実験によつて炭素鋼の 200°C 焼戻状態のマルテンサイトの機械的強度は、固溶炭素量約 0.5% 付近で極大を示すことが明らかとなつた。

軸受鋼ではその強度の比較に通常圧壊値が用いられるので、本実験でも圧壊値におよぼすマルテンサイト中の炭素量の影響を検討した。圧壊試験は、10～20 mm $\phi \times 10$ mm のリング試験片について Table 2 に示した熱処理条件で焼入後、 150°C , 90 min 焼戻して行なつた。なお、この寸法の軸受鋼の試験片では圧壊値の規格下限は 2400 kg である。

Fig. 3 はえられた圧壊値を炭素量に対して図示したものである。また同図には圧壊試験片の端面で測定した硬度もあわせて示してある。炭素量に対する硬度の変化は引張試験片の場合と大体類似の傾向を示している。これに対し圧壊値は炭素量が 0.2～0.4% と増加するにつれてやや上昇し、約 0.4% C で極大を示したのち、0.6% C まで急激に下降し、それ以上の炭素量の増加に対してはゆるやかに低下する。また破断後の試験片を観察した結果、0.2% C の

(2) H. Muir, B. L. Averbach and M. Cohen: Trans. ASM, **47** (1955), 380.

(3) S.W. Lyon: Trans. ASM, **28** (1940), 128.

試料ではかなりの塑性変形を伴った破壊であるが、0.4% C 以上の試料ではほとんど変形なしに破壊していることが

Fig. 3 Relation between carbon content in martensite matrix and hardness, and compressive breaking strength

認められた。以上のごとく 150°C 焼戻状態における圧壊値は固溶炭素量が 0.4% 付近で最大値を示すことがわかった。

つぎに耐久寿命におよぼすマルテンサイト中の炭素量の影響を検討した。一般にころがり軸受の寿命は転動体やレースの転動接触面が、はくりするまでの時間あるいは負荷繰返し数によつて表わすのが普通である。ころがり運動によつて生じる繰返し応力が表面層に加えられると、やがて材料の疲労破壊が生じ表面層に亀裂ができる。これを一般にその形状から flaking と呼んでいる。

本研究の寿命試験にはスラスト型軸受鋼寿命試験機⁽⁴⁾を採用した。本試験機の寿命試験結果は軸受メーカーにおける実際の寿命試験の結果と非常によく相関を示すことから一応信頼できるものと考えられる。

本試験機に使用する試験片の形状は 60 mm ϕ $\times$ 5.5 mm の円板で、さらに焼入性を良好にするために、中心に 18 mm ϕ の穴をあけてドーナツ型の板 (以後円板と略記する) とした。この試験片を焼入焼戻後、表面の粗度を 0.5 μ 程度に研磨して試験に供している。本試験機は円板試験片上に 3 個のボールが一定の円軌道で回転し、円板試験片の上に点接触によつて繰返し応力をあたえる機構となっている。試験片に flaking が生じるとボールが通過するごとに異常振動を生じるので、この機械振動をピック・アップによつて電気振動に変換し、さらに増巾器を通して制御回路にみちびき、規定値以上 (本実験では 10 μ 以上) の振動となつたとき、リレーが動作して試験機の運動を自動的に停止させる。

本研究ではボールの直径 3/8", 1 球あたりの荷重約 130 kg とし、転動部の潤滑油には 60 井スピンドル油を用い、ボールの転がり回転数、毎分 900 回の条件で試験した。

寿命試験に用いた試料は A 系列、A 6～A 11 である。その目標炭素量は、0.2, 0.4, 0.45, 0.5, 0.6 および 0.8% の 6

種類の組成としたが、各目標炭素量ごとにそれぞれ 2～5 の異なるチャージからの試料について実験を行ない、これらの結果を総合して耐久寿命におよぼす炭素量の影響をできるだけ正確に把握するように心がけた。したがって、Table 1 の A 6～A 11 試料の分析組成は、数チャージの平均値である。

各試料は Table 2 に示したような熱処理条件で焼入し、焼戻 (150°C, 90 min) 後、上述のごとき条件で寿命試験を行なつた。実験結果は Fig. 4 に示すごとくである。横軸に

Fig. 4 Fatigue life of the specimens having various carbon contents

は繰返し数の対数値、縦軸は weibull plot による累積度数を示した。炭素量の異なる各試料について、試験片数は 10～15 個であり、またそれぞれの寿命の最大値と最小値を比較すると 20～25 : 1 程度に大きくばらついているとはいえ、マルテンサイト中の炭素量の耐久寿命におよぼす効果は明瞭に認められる。

この関係を一層明確にするために、Fig. 5 に炭素量に対

Fig. 5 Relation between carbon content in martensite matrix and fatigue life

して各試料の定格寿命 (90% 寿命) と平均寿命 (50% 寿命) とを図示した。同図には参考のためまた各試料の平均硬度

(4) 上野, 中島, 池田: 金属材料技術研究所報告, 4 (1961), 73.

も併示してある。定格寿命、平均寿命ともほとんど同様な傾向を示し、炭素量 0.45% 付近に寿命の最大値のあることが明らかに認められ、これより炭素量が減少しても増加しても耐久寿命は急激に低下する。低炭素側、すなわち 0.23% C 試料の耐久寿命の値の低いのはマルテンサイト自身の強度の低いことのためであり、高炭素側、すなわち 0.5% C 以上で耐久寿命が低下するのは、マルテンサイトの炭素量の増加に応じて、マルテンサイトの脆性化が起るためであると考えられる。

軸受鋼の材質の検討にあたっては、はくりによる耐久寿命の良否が最大の課題であるが、耐摩耗性もまた重要な問題であるから、マルテンサイト地質中の炭素量と耐摩耗性との関係も把握しておく必要がある。本研究では A1~A5 試料について、大越式迅速摩耗試験機によって耐摩耗性を検討した。

摩耗試験を行なうにあたってはつぎの点に注意した。

- (1) 試験は乾燥状態で行なうので、摩耗粉の焼付きがなく、かつ摩耗による温度上昇をできるだけ小さくする。
- (2) 0.2~0.8% C の全試料について摩耗痕巾が 1~3 mm の範囲に入るようにする。

したがって、上記の二つの事柄を同時に満足させる摩擦距離および荷重を選ぶために一連の予備実験を行なつて、回転子 SUJ 2 とし、摩擦距離 400 m に一定にし、摩擦速度 0.94 m/sec - 荷重 6.1 kg、摩擦速度 0.208 m/sec - 荷重 13.2 kg および摩擦速度 0.382 m/sec - 荷重 6.1 kg の 3 条件で試験を行なつた。なお、試験片寸法は 30 mm × 70 mm × 10 mm、熱処理条件は寿命試験の場合と同一である。

Fig. 6 にえられた結果を示す。マルテンサイトの炭素量

Fig. 6 Relation between carbon content in martensite matrix and wear resistance

の増加にしたがつて明らかに比摩耗量は減少する。さらにその変化の割合についてみれば、炭素量が 0.2% から 0.4% までの範囲では炭素量の増加につれて比摩耗量は急激に減少するが、それより炭素量が増加しても比摩耗量の減少はむしろわずかである。以上の結果を総合して考察するとマルテンサイト中に 0.4~0.5% 程度の炭素量を固溶してお

れば、耐摩耗性に関しては一応満足すべき状態であると考えられる。

2. マルテンサイト中の炭素量と鋼の機械的強度および耐久寿命との関係

以上、炭素含有量 0.2~0.8% の種々の炭素鋼試料について、完全焼入後、焼戻した状態において各種試験を行ないマルテンサイト中の固溶炭素量と鋼の強度との関係をしらべた。その結果、耐摩耗性のみについてはマルテンサイト中の炭素量が多いほど好ましい結果がえられたが、圧壊値については炭素量 0.4% 付近、耐久寿命については 0.45% 付近、引張強度および 0.2% 耐力については 0.5% 付近にその最大値のあることが認められた。したがって、引張強度、圧壊値および耐久寿命については、ある硬度値のところでそれらの性質が最大となることが明らかである。そこで横軸に硬度をとり、縦軸にこの 3 者の性質を比較図示したのが Fig. 7 である。図にみられるように硬度 HRC 50~

Fig. 7 Relation between hardness and true stress, compressive breaking strength and fatigue life

57 程度で、引張強度、圧壊値、耐久寿命はいずれも最大値を示す。

このように引張強度、耐力、圧壊値、耐久寿命というように一見異なつて考えられる性質が炭化物が共存しない完全焼入後、低温焼戻した場合について比較すれば、大体一定硬度範囲 (HRC 50~57) で最大を示すことは非常に興味ある事実というべきである。これらの結果は軸受鋼の使用状態、すなわち焼入後、150°C 付近で焼戻した状態ではマルテンサイト中に 0.4~0.5% の炭素を固溶するように焼入したものが、最良の機械的強度および耐久寿命を有することを示すものである。これに対して 0.4% 以下の炭素を固溶したマルテンサイトの場合、マルテンサイト自身の強度の低いことが上記性質の劣下をもたらし、逆に 0.5% 以上の炭素を固溶したマルテンサイトの場合、かえつて脆化してこれらの性質を低下させるものと思われる。しかも焼入時にマルテンサイト中に 0.4~0.5% の炭素を固溶した場合には、一応の靱性が認められまたその耐摩耗性も 0.8% C のような高炭素量の場合と比較していちじるしく

はとらない。

このようにして軸受鋼の場合、最良の性質を示す焼入時のマルテンサイトの炭素量は0.4～0.5%であると結論しうる。しかしながら現用軸受鋼についてはマルテンサイト以外にかなりの炭化物が残存しているので、この点についてもさらに考慮する必要がある。これに関しては後報で詳述する。

3. クロム量による耐久寿命、硬度、圧壊値および耐摩耗性の変化

一般に鋼におよぼすクロムの影響については焼入性の向上、機械的性質の改善、耐食性、耐酸化性の向上などがあげられる。しかしながら軸受鋼について材質におよぼすクロムの影響に関する研究は比較的少なく、とくにそのマルテンサイトのクロム量と強度との関係については、ほとんど考察されていない。換言すれば軸受鋼の組成におけるクロムの役割については十分な検討がなされていないといえる。耐久寿命についても、マルテンサイト中のクロム量の影響に注目して検討しているものはまったくない。

本実験ではこの点に注目して、まずB系列のB1～B3試料について軸受鋼の耐久寿命におよぼすマルテンサイト中のクロムの影響を検討した。ここで試料の炭素量を0.5%に選んだのは前述の実験結果より焼入処理時のマルテンサイト中に固溶される炭素量が大体0.5%であるときに耐久寿命が最高であると判明したためである。寿命試験の方法は前述のものとまったく同様である。各試料はいずれも850℃に30 min オーステナイト化後、未溶解炭化物の存在しない状態で油焼入し、150℃、90 min 焼戻して実験に供した。

Fig.8 に寿命試験結果を示した。寿命試験の結果はかな

Fig.8 Fatigue life of the specimens having various chromium contents

りばらっているが、クロム量の増加と耐久寿命との間には一義的な関係はむしろ認められないということが出来る。これらの関係をより明確に把握するために、Fig.9 にはクロム量に対する定格寿命 (90% 寿命) および平均寿命 (50% 寿命) の値を示した。同図にはまた、クロム量に対す

る硬度 および 圧壊値 (3 個の平均値、試験片寸法 10×20 mm φ×10 mm) の変化も併記した。この図より知られるよ

Fig.9 Relation between chromium content and hardness, compressive breaking strength and fatigue life

うに、マルテンサイト中のクロム量を0.12～1.19%に変化させても、焼入後、150℃程度の低温焼戻した組織の場合には、耐久寿命および硬度、圧壊値などの機械的性質にはクロムはほとんど影響はあたえないと考えられる。ここで図中に認められる耐久寿命、硬度および圧壊値のわずかな変化については試料の炭素含有量の変化によるものであることを注意しておく必要がある。したがって、クロムがその焼入性を変えたり、Ms 点を下げたり、あるいは残留オーステナイト量を増加することによって間接的には機械的性質に影響をあたえることがあるにしても、クロム元素はマルテンサイト自身の強度を大きく変化させず、また耐久寿命の改良にもほとんど役割を演じていないであろうと結論できよう。

つぎに B4～B7 試料について耐摩耗性におよぼすマルテンサイト中のクロム量の影響を検討した。試験条件は前述のそれと同一である。従来、クロムが鋼材に付与する重要な性質として耐摩耗性の向上ということがあげられている。しかし本実験の場合のように、未溶解炭化物の存在しない組織の場合の耐摩耗性におよぼすクロム量の影響は必

Fig.10 Relation between chromium content and wear resistance

ずしも明確ではない。

Fig. 10 には 3 種の条件で摩耗試験を行なった結果を示したが、これらにみられるように、本実験の結果、すなわち未溶解炭化物の存在しない状態ではクロム量を 0.11 ~ 1.43% の範囲に増加しても耐摩耗性のいちじるしい向上は認められない。

4. 軸受鋼におけるクロムの役割に関する考察

以上、炭素量約 0.5% の場合について、耐久寿命、硬度および圧壊値におよぼすマルテンサイト中のクロム量の影響を検討したが、その結果、クロム含有量が 0.1 ~ 1.4% 程度の範囲では、これらの性質にほとんど影響をあたえないことがわかった。また耐摩耗性についても、0.5% 程度の炭素量の場合に関するかぎり、クロム量の同程度の範囲の変化によつてあまり影響されない。

ところで軸受鋼の化学組成としてクロムの含有量は大体 0.5 ~ 2.0% と規定されており、とくに現用軸受鋼中主力をなしている第 2 種 (SUJ 2) ではクロムの含有量の成分範囲は 1.30 ~ 1.60% である。しかしながらクロムが上述のように強度にほとんど無関係であるとする、一体何のため含有されているのであろうか。この間に対して軸受鋼におけるクロムの役割は以下のように推定される。

(1) 球状化焼鈍工程において、その最適熱処理温度範囲をひろげて熱処理作業を容易にし、かつ球状化炭化物の粒度を細かく、しかも分布を均一にすることに効果がある。

(2) 焼入にあたってオーステナイト化中に炭化物の固溶

を遅延させるので、その結果、焼入作業の管理を容易にする効果がある。

(3) 焼入性を向上する。

IV. 結 言

軸受鋼の耐久寿命におよぼすマルテンサイト中の炭素およびクロム量の影響を考察するために、炭素およびクロム量を変化させた試料について、未溶解炭化物の存在しない状態における耐久寿命およびその他の性質を比較検討してつぎの諸結果をえた。

(1) 耐久寿命および機械的性質にとつて、焼入マルテンサイト中の炭素量は、0.4 ~ 0.5% 程度が最適であり、それより炭素量が多くても少なくても、耐久寿命および圧壊値などのとき機械的強度は劣下する。

(2) 耐久寿命、圧壊値、引張強度というような一見異なる性質は炭化物の共存しない焼入低温焼戻の状態と比較すれば、大体一定硬度範囲、すなわち、HrC 50 ~ 57 程度で最大の値を示す。

(3) 焼入後、低温で焼戻した状態では耐久寿命および圧壊値にとつては、マルテンサイト中の炭素量が支配的であつて、クロムはほとんど影響をあたえない。

(4) 軸受鋼の化学成分としてのクロムの役割は良好な球状化組織をうる効果のあること、焼入作業の管理を容易にする効果があることおよび焼入性の向上にある。