

軸受鋼の研究(IV)*

(リング状試片の内部応力に及ぼす焼入温度の影響)

上野 学**・村 外志夫***

STUDIES ON BALL-BEARING STEEL (IV)

(Effect of the Tempering Temperature on the Internal Stress of the Ring-Type Test Pieces)

Manabu Ueno and Toshio Mura

Synopsis:

The method for measuring the internal stress of the ring-type test pieces such as ball bearing was not established firmly, and so the calculating formula for measuring two dimensional stresses of it was obtained.

By using this formula, the effect of tempering temperature on the internal stress of the ring-type ball bearing steels was studied and the results were obtained as follows.

(1) In case of oil quenching of the ring-type test pieces, the radial internal stress was very small in comparison with the circumferential internal stress. The latter was tension-stress near the inner face. In quenching, the circumferential stress was about $+76.9 \text{ kg per mm}^2$ (tension) at about 1.4 mm, and then about $-28.3 \text{ kg per mm}^2$ (compression) at about 5.5 mm from the inner face.

(2) In case of the $130^\circ\text{C} \times 1 \text{ hr}$ tempering, the internal stress increased about twice by the ϵ carbide precipitation. The circumferential stress was about $+139.5 \text{ kg per mm}^2$ at about 1.4 mm from the inner face.

(3) When the 180°C tempering ring-type test piece was compared with the 130°C tempering one, the former increased a little in the circumferential stress distribution. If the tempering temperature raised such as the above, the internal stress should be reduced by the stress relief. But the internal stress increased a little in fact. This cause was considered to be the expansion phenomenon that the retained austenite decomposed to martensite at $180^\circ\text{C} \times 1 \text{ hr}$ tempering. It was necessary for the 180°C tempering to be avoided in the practical heat-treatment.

(4) In case of the $200^\circ\text{C} \times 1 \text{ hr}$ tempering, the internal stress decreased in comparison with the 180°C and 150°C tempering.

The circumferential stress was about $+25.1 \text{ kg per mm}^2$ (tension) at about 1.4 mm from the inner face.

I. 緒 言

一般に金属に処理、操作を行うと、内部応力の発生をともなうが、内部応力を考える場合、まず、その測定法の種類、発生の原因、除去法並びにこれに関連した各種現象が問題となる。測定法には (1) 機械的方法 (2) X線以外の物理的方法 (3) X線的方法の3種がある。(1)の機械的方法の内には (a) E. Heyn¹⁾, G. Sachs²⁾ 等による円筒体の内部応力の測定法, (b) 薄いパイプの内部応力を求める方法³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾, (c) 板⁸⁾および細い棒の内部応力の測定法等がある。

然しベアリングの如きリング状試片の内部応力の機械的測定法は未だ明確に確立されていないので、著者はリング状試片の円周方向の内部応力と半径方向の内部応力を求める計算式を導びき、この計算式に基いて軸受鋼のリング試験片を焼入焼戻処理したものについて内部応力を実験的に求めた。かくして焼入によつて生じた内部応力が焼戻温度によつて如何に変わるかを本稿に報告する。

* 昭 30 年 4 月 本会 講演大会にて発表

** 工業技術院機械試験所

*** 明治大学工学部

II. 数学的考察

Fig. 1 に示す如くリングの内面から任意点 r まで切削した時、外半径 b が Δb だけ変化したとする。しかる時この切削によつて生じた外半径位置における円周方向のひずみ ϵ_θ は $\Delta b/b$ となる。

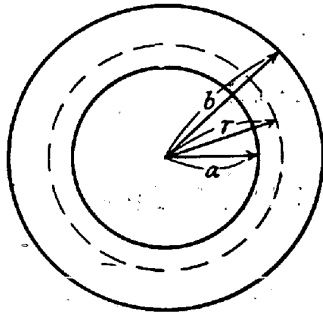


Fig. 1

内部応力のあるリングを内面から r 点まで切削した時の力学的効果は、 a から r までの応力が消失し、 r 面が自由面となつたことである。即ち、 r 面に垂直に作用していた半径方向の内部応力 σ_r が消失したため、外半径点に $\Delta b/b$ の円周方向ひずみが発生したとみるのである。このひずみ $\Delta b/b$ は内半径 r の中空円柱に大きさ σ_r の内圧が加つた時の外半径点における円周方向ひずみと等しい。これは内圧を受ける円柱の弾性問題を解けばよく、普通の弾性学の教科書から容易に、

$$\omega \equiv \frac{\Delta b}{b} = (\epsilon_\theta)_b = \frac{1}{E} \left\{ (\sigma_\theta)_b - \nu(\sigma_r)_b \right\}$$

$$= \frac{1}{E} (\sigma_\theta)_b = \frac{2r^2\sigma_r}{E(b^2-r^2)}$$

故に r 点における半径方向内部応力は r 点までの切削による実験データであらわされ、

$$\frac{\sigma_r}{E} = \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right) \dots\dots\dots(1)$$

b : 外半径, Δb : 内径を切削した時に生ずる外半径の寸法変化, E : ヤング率, r : 任意の半径, ω : $\Delta b/b$, R : r/b

となる。 r 点における円周方向内部応力 σ_θ は釣合方程

Table 1. Chemical composition of ball-bearing steel.

Type of Steel	Composition							
	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Cu%	Ni%
Ball bearing steel	1.10	0.34	0.45	0.02	0.022	1.42	0.11	0.28

Table 2. Heat treating conditions used for the experiment.

Mark	Quenching conitions	Tempering conditions
No. 1 specimen	840°C × 40min → Oil quenching	As quenched
No. 2	〃	130°C × 1h tempering
No. 3	〃	150°C × 1h
No. 4	〃	180°C × 1h
No. 5	〃	200°C × 1h

式,
$$\sigma_\theta = R \frac{d\sigma_r}{dR} + \sigma_r$$

から求まる。故に

$$\frac{\sigma_\theta}{E} = \frac{1}{2} \frac{d\omega}{dR} \left(\frac{1}{R} - R \right) - \frac{\omega}{R^2} + \frac{\omega}{R} \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{d\omega}{dR} \left(\frac{1}{R} - R \right) - \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{R^2} + 1 \right) \dots(2)$$

以上、(1) (2) 式により任意点 r の内部応力は r 点までの切削データ $\omega (= \Delta b/b)$ により算出できる。本実験では内面から切削して外面まで切削しないから外面附近の応力はでない。

然し外面は内面と等しい冷却条件であるので応力も内面とはほぼ同様な形であることが推定できる。

III. 試料と実験方法

実験に使用した素材は高炭素クロム軸受鋼第2種で、その化学的組成は Table 1 に示す通りである。

内部応力の測定に使用した試験片は外径 110mm, 内径 60mm, 厚さ 10mm のリング試片である。実験を行つた熱処理法は Table 2 に示す如く、焼入温度を一定として、焼戻温度を変えて、その際に表われる内部応力変化の挙動を追求した。

上記の熱処理したリング試片の外径を標準のゲージ・ブロックを基準として理研製の測微指示計で測定する。その際試片の円周を 8 等分し、それぞれの所にマークしておき、その各部分の外径を測定する。そして 8 個の平均をもつてその外径とする。測微計の精度は $\pm 0.2\mu$ 程度である。

次にリング試片の内径をグラインダーで 1~2mm づつ切削し、切削し終つた後に各試片の外径を前述の方法で測定して 8 個の平均外径を求める。そして切削しない前と切削後の外径の変化量より $2\Delta b$ が求められる。 Δb より ω が求められる。次に ω と R の関係曲線を求め、

その切線の傾斜より dw/dR が求められる。これらの値を (1), (2) 式に導入することにより σ_r, σ_θ を求めることができる。

IV. 実験結果と考察

(1), (2) 式より σ_r, σ_θ が求められることが明らかとなった。今, Table 2 の条件で熱処理したものについて $R, \omega, \sigma_r/E, \sigma_\theta/E$ の関係を求めると, Table 3, Table 4, Table 5, Table 6, Table 7 の如くなる。

この各表より R と $\sigma_r/E, R$ と σ_θ/E の関係を図示すると Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 の如くなる。

Table 3 より R と $\sigma_r/E, R$ と σ_θ/E の関係曲線を求めると, Fig. 2 の如くなる。斜線で示した部分が始めの内面である。この Fig. 2 からわかるように σ_r/E 即ち半径方向の内部応力は円周方向の σ_θ/E に比して非常

に僅かである。そのため $\sigma_r/E \times 10$ の曲線で示した。次に σ_θ は内面近くでは引張内部応力で、それから少し内部に入ると圧縮内部応力となり、更に内部で引張応力となり、中心部では圧縮応力となつている。

$R=0.57$ の所、即ち $b=55$ mm なる故に $r=31.4$ mm となる。故に内面より 1.4 mm の所では $\sigma_\theta/E=36.64 \times 10^{-4}$ となつている。 E (ヤング率) は鋼の場合 21000 kg/mm² とすれば、 $\sigma_\theta=36.64 \times 10^{-4} \times 21000$ kg/mm² 即ち $\sigma_\theta=76.9$ kg/mm² となる。故に焼入れしたままでは内面より約 1.4 mm の内部は約 76.9 kg/mm² の引張応力の内部応力が発生している。内面より約 2.7 mm の所では約 0.8 kg/mm² の σ_θ の引張応力となり、更に内面より約 5.5 mm の所では約 28.3 kg/mm² の圧縮内部応力となつている。

次に焼入後 130°C で 1 h 焼戻した No. 2 の試料の

Table 3. Relation between $R, \omega, \sigma_r/E$ and σ_θ/E of No. 1 specimen.

R	0.57	0.595	0.62	0.645	0.67	0.695	0.72	0.75
$\omega \times 10^4$	-0.56	0.12	0.76	0.04	0.12	0.36	0.28	0.04
$\sigma_r/E \times 10^4$	-0.79	0.109	0.607	0.028	0.073	0.192	0.131	0.016
$\sigma_\theta/E \times 10^4$	36.64	0.312	-6.12	-13.468	6.357	-1.141	-1.82	-2.27

Table 4. Relation between $R, \omega, \sigma_r/E$ and σ_θ/E of No. 2 specimen.

R	0.57	0.595	0.62	0.645	0.67	0.695	0.72	0.75
$\omega \times 10^4$	-1.2	-2.8	0.32	0.44	0.32	0.16	0.24	0.34
$\sigma_r/E \times 10^4$	-1.25	-2.25	0.256	0.308	0.195	0.0855	0.13	0.13
$\sigma_\theta/E \times 10^4$	66.45	-48.55	1.804	1.411	-3.175	0.934	1.068	-0.239

Table 5. Relation between $R, \omega, \sigma_r/E$ and σ_θ/E and σ_θ/E of No. 3 specimen.

R	0.57	0.597	0.62	0.645	0.67	0.695	0.72	0.75
$\omega \times 10^4$	-0.16	0.44	0.28	0.16	0.36	0.68	0.52	0.27
$\sigma_r/E \times 10^4$	-0.0166	0.4	0.221	0.0112	0.24	0.364	0.242	0.105
$\sigma_\theta/E \times 10^4$	14.526	7.81	-4.46	-1.892	5.972	-1.884	-3.631	-1.895

Table 6. Relation between $R, \omega, \sigma_r/E$ and σ_θ/E of No. 4 specimen.

R	0.57	0.595	0.62	0.645	0.67	0.695	0.72	0.75
$\omega \times 10^4$	-0.56	0.08	0.12	-0.24	-0.12	0.2	0.08	-0.09
$\sigma_r/E \times 10^4$	-0.575	0.0724	0.096	-0.169	-0.0738	0.16	0.0372	-0.035
$\sigma_\theta/E \times 10^4$	15.34	12.648	-5.71	-6.94	6.782	-1.506	-2.237	-0.895

Table 7. Relation between $R, \omega, \sigma_r/E$ and σ_θ/E of No. 5 specimen.

R	0.57	0.595	0.62	0.645	0.67	0.695	0.72	0.75
$\omega \times 10^4$	-0.28	0.24	0.04	0.12	0.24	0.36	0.40	0.33
$\sigma_r/E \times 10^4$	-0.291	0.218	0.032	0.084	0.147	0.193	0.186	0.128
$\sigma_\theta/E \times 10^4$	11.972	7.102	-0.567	1.956	1.794	1.784	-0.766	-2.265

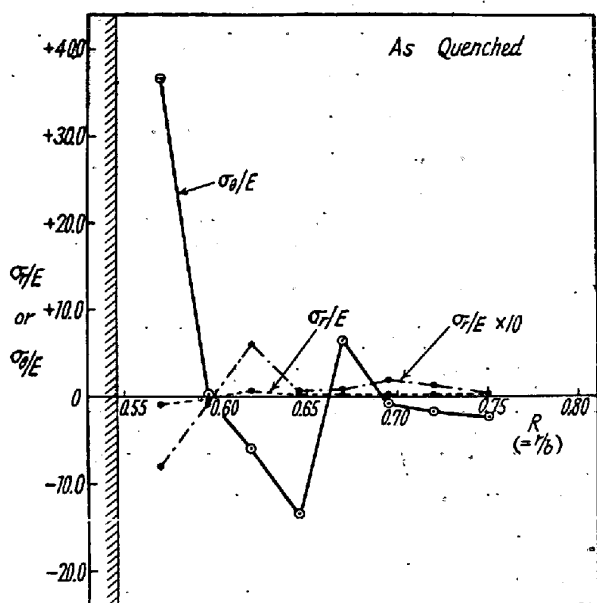


Fig. 2. Relation between σ_r/E , σ_θ/E and R of No. 1 specimen.

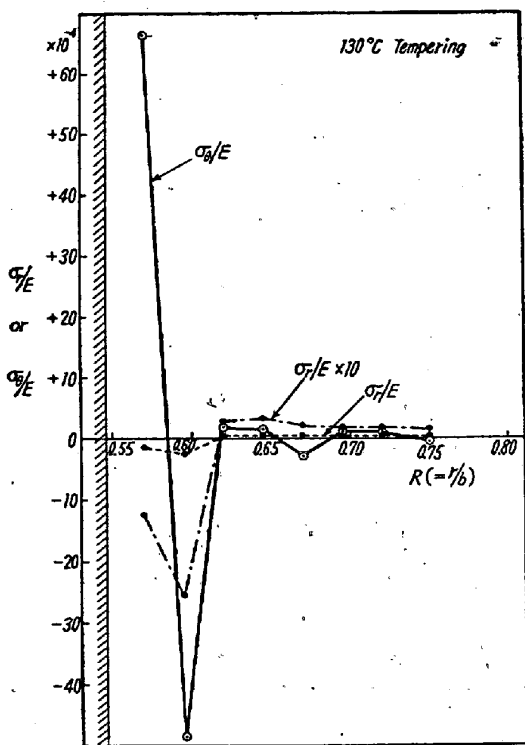


Fig. 3. Relation between σ_r/E , σ_θ/E and R of No. 2 specimen.

R と σ_θ/E , R と σ_r/E の関係は Fig. 3 に示されてある。内面より約 1.4mm の所では約 139.5 kg/mm^2 の引張内部応力となり、内面より約 2.7mm の所では約 102 kg/mm^2 の圧縮内部応力となっている。Fig. 2 に比して内部応力の増加を来し、内面近くで引張応力から圧縮応力への変換が急である。この事実は焼入後 130

°C 附近で焼戻すると硬度増加を来す現象と一致して、この内部応力の増加は ϵ 炭化物 (Fe_3C) がマルテンサイト葉に析出することに帰因する。

Fig. 4 は $150^\circ\text{C} \times 1\text{h}$, Fig. 5 は $180^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ の焼戻処理したリング試片の σ_r/E と R , σ_θ/E と R の関係を示す。

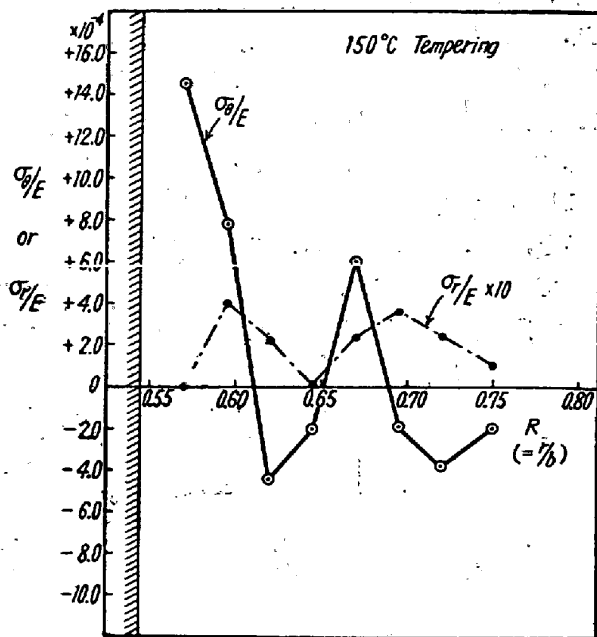


Fig. 4. Relation between σ_r/E , σ_θ/E and R of No. 3 specimen.

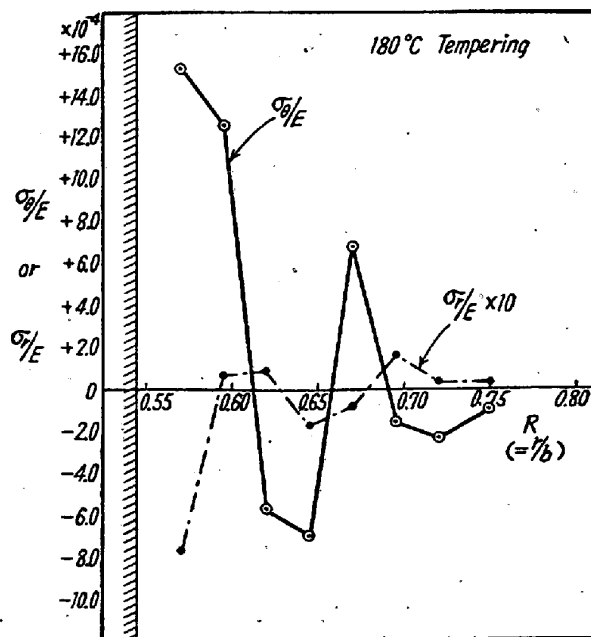


Fig. 5. Relation between σ_r/E , σ_θ/E and R of No. 4 specimen.

$150^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 焼戻した試片では内面より約 1.4mm の所で σ_θ は $+30.5 \text{ kg/mm}^2$ であるが、 $180^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 焼戻

した試片では内面より約 1.4 mm の内部では σ_r は +32.2 kg/mm² である。この様に 180°C で焼戻したリング試片の内部応力分布は 150°C の試片の内部応力分布に比して相対的に増加している。然し焼戻温度が高くなると、当然内部応力が減少するはずであるのに、180°C で焼戻するとかえつて内部応力が増加している。著者が第 1 報⁹⁾にて軸受鋼を焼戻して 180°C にて 1 時間焼戻すると切欠脆性があらわれることを報告したが、このことと内部応力の増加とは関連があるようにみえる。著者はこの 180°C の焼戻による内部応力の増加と切欠脆性は残留オーステナイトがマルテンサイトに分解する膨脹現象に帰因すると考えているが、この問題は未だ充分明らかではない。

H. Hanemann¹⁰⁾ は残留オーステナイトは 150°C 以上の焼戻温度より硬度の増加をきたすことを報告している。そして残留オーステナイトが 250°C 以下の温度でも分解することを見とめている。B. S. Lement, B. L. Averbach & M. Cohen¹¹⁾ はこの現象は残留オーステナイトの "Subboundary" に炭化物が析出するためだと主張しているが、Philip Stark & B. S. Lement¹²⁾ は残留オーステナイトが "Surface Martensite" に分解するといっている。実際的な方面でも New Departure Mfg. Co. の L. D. Cobbs¹³⁾ はこの 180°C の温度を "x-temperature" と呼んで、軸受鋼の焼戻処理の際にこの温度を避けるように注意すべきだと報告している。

以上の報告を考慮して、内部応力の増大を来す 180°C

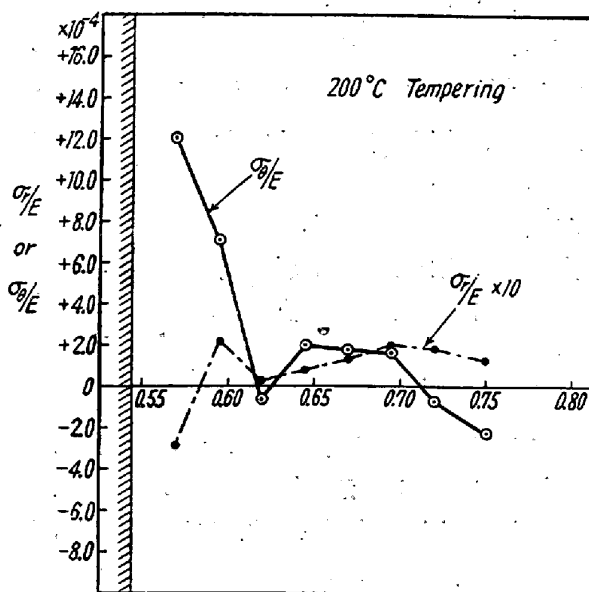


Fig. 6. Relation between σ_r/E , σ_θ/E and R of No. 5 specimen.

の焼戻温度は注意して避けるべきであろう。

Fig. 6 は 200°C × 1h 焼戻したものである。内面より約 1.4 mm の内部の σ_θ は +25.1 kg/mm² の引張応力であり、Fig. 5 に比して σ_θ は減少している。勿論この場合も残留オーステナイトは分解して膨脹現象をおこすのであるが、温度が高いため膨脹による内部応力を除去する。このために 200°C で焼戻すると内部応力が減少しているのである。

V. 結 論

以上の研究結果を総括すると次の様になる。

(1) リング状試験片を焼戻した場合、半径方向の内部応力は円周方向の内部応力に比して非常に僅かである。円周方向の内部応力は内面近くでは引張応力であり、焼戻したままのものでは内面より約 1.4 mm の内部で約 76.9 kg/mm² の程度の引張内部応力が存在している。更に内面より約 5.5 mm の所では逆に約 28.3 kg/mm² の圧縮内部応力に変る。

(2) 焼戻したリング試片を 130°C で 1h 焼戻すると、炭化物の析出硬化現象と併行して、内部応力の増加をきたす。内面より約 1.4 mm の内部で約 139.5 kg/mm² 程度の引張内部応力となつていて、焼戻のままよりも内部応力は増加している。

(3) 180°C で焼戻したリング試片の内部応力分布と 150°C で焼戻したリング試片の内部応力分布とを比較すると、前者の円周方向の内部応力が相対的に増加している。この様に焼戻温度が高くなると、当然内部応力が減少するはずであるのに、かえつて内部応力が増加の傾向を示すのは残留オーステナイトがマルテンサイトに分解するにもとづく膨脹に帰因するものと思われる。この様に 180°C の焼戻温度であらわれる内部応力の増大および切欠脆性等のため、実際の軸受鋼の焼戻処理ではこの 180°C の焼戻温度を避けるべきであろう。

(4) 200°C で焼戻すると 180°C の焼戻の場合よりも、内部応力が遙かに減少している。内面より約 1.4 mm の内部では約 25.1 kg/mm² 程度の引張内部応力が存在している。

終りに、本研究の試料を提供していただいた日本精工株式会社に厚く御礼申上げる次第である。

(昭和 30 年 5 月寄稿)

文 献

- 1) E. Heyn: J. Inst. Metals, 12 (1913), 3.
- 2) G. Sachs: Z. Metallk., 19 (1927), 352.
- 3) W. H. Hatfield & G. L. Thirkell: J. Inst.

- Metals, 22 (1919), 67.
- 4) R. J. Anderson & E. G. Fahlmen: J. Inst. Metals, 32 (1924), 367.
- 5) H. W. Swift: Proc. Inst. Automobile Eng., 39 (1940), 390.
- 6) N. Paardenkow: Z. Metallk., 24 (1932), 25.
- 7) G. Sachs & G. Aspey: Trans. A.I.M.E., 147 (1942), 348.
- 8) D. Rosenthal & J. T. Norton: Am. Welding Soc. Research Sup., May (1945), 295 s.
- 9) 三橋鉄太郎, 上野 学: 本誌, 39, No. 7 (1953) 722.
- 10) H. Hanemann: Metallurgia 32 (1945), 62.
- 11) B. S. Lement, B. L. Averbach & M. Cohen: Trans. A.S.M., 46 (1954), 851.
- 12) Philip Stark & B. S. Lement: Journal of Metals, Sep., (1954), 1074.
- 13) C. D. Cobbs: Lubrication Eng., 9(1953), 73.

軸受鋼の熱処理による変形について*

足 立 彰**・森 田 善 一 郎***

THE DISTORTION OF BALL BEARING STEEL AFTER VARIOUS HEAT-TREATMENTS

Akira Adachi Dr. Eng., and Zen-ichiro Morita

Synopsis:

The distortion of the standard specimens, A and B type, made of ball-bearing steel was measured after various heat-treatments, such as conventional heat-treatment and-interrupted quenching the so-called martempering or marquenching, and subzero-treatment.

The most of distortions on quenching were due to the thermal stress during the rapid cooling. By martempering, the thermal strains were eliminated excepting the unavoidable strains directly caused by austenite-martensite transformation. The distortion produced on quenching was reduced by subsequent tempering but increased by subzero-treatment, and in A type specimen whose shape was so complicated its tendency was less than in B type.

From these experimental results, it was indicated that hot-oil-quenching and martempering were suitable for the heat-treatment of ball-bearing steel, and that the distortion after quench-temper-subzero-treatment was generally less than that after quench-subzero-treatment-temper.

I. 緒 言

軸受鋼では一般に水焼入または油焼入を行つて後焼戻を行う処理がなされているが、最近ではマルテンパー或いはマルクエンチ等の処理が行われ、またそれらのサブゼロ処理も実用化されつつある。

普通鋼の焼入際に生ずる歪の原因となるものは熱応力および変態応力であり、熱応力は焼入時に材料の各部に急激なる温度変化を生ずる結果その温度差から生ずるもので、水焼入等の如き冷却速度の非常に速い場合にはこれによる歪が著しい。また変態応力はオーステナイト→マルテンサイト変態によつて生ずるもので材料の膨脹を伴うが、しかしこれも Ms 点附近の冷却速度によつてその大きさは異なる。従つて焼入による変形量を減少さ

せるには、これ等の熱応力と変態応力を軽減する事が必要である。

そこで我々は軸受鋼の熱処理およびサブゼロ処理による変形の傾向を知るために、軸受鋼 (SUJ-2) の2つの標準型試料によりそれらを研究した。

II. 実 験 試 料

実験試料としては軸受鋼 (SUJ-2) を使用した。その化学組成は Table 1 に示す如くである。

この試料を完全焼鈍後所定の寸法に切削加工し、更に

* 昭和 30 年 4 月 本会講演大会にて発表

** 大阪大学教授 工博

*** 〃 大学院学生工修