

4. 炭素鋼に対しては本処理はほとんど効果は認められない。

5. Ni-Cr-Mo 鋼において本処理はとくに有効と考えられる。

本研究は著者が株式会社日本製鋼所室蘭製作所研究部在職中に行つたもので、御指導を頂いた常務取締役小林佐三郎博士、検査部長阿部富美男氏ならびに北海道大学萩原巖博士に厚く御礼申上げる次第である。また本研究の発表を許可された株式会社日本製鋼所に感謝するとともに、実験に熱心に協力された研究部松尾治男君その他の

の各位に厚く御礼申上げる。(昭和 31 年 2 月寄稿)

文 献

- 1) 萩原: 鉄と鋼, 28 年, 11 号, p. 1209
- 2) W. P. Fishel W. P. Roe & J. F. Ellis: J. of Metals, Aug, 1951 p. 674
- 3) 斎藤: 鉄と鋼, 39 年, 1 号, p. 29
- 4) W. W. Austin: Blast Furnace & Steel Plant, March 1952 p. 330
- 5) Priestly W. J.: Iron Age. 1921, 108 p. 1658
- 6) 山中, 大宮: 鉄と鋼, 41 年, 3 号, p. 302

軸受鋼の時効変形に関する研究 (I)*

服 部 喬**・浅見 莞爾**

THE DIMENSIONAL STABILITY OF BALL BEARING STEEL (I)

Takashi Hattori and Kanji Asami

Synopsis:

The dimensional stability of ball bearing steel was discussed from the different points of view by M. Cohen. (Trans. A.S.M., 1945, vol. 34, p. 216). Apart from his studies, the authors studied on the influence of the ordinary industrial oil quenching and tempering, including no sub-zero treatment, on the dimensional stability of ball bearing steel. Specially, they investigated the effects of the difference of cooling method, the temperature of quenching oil, the time of tempering, the secondary tempering (after the grinding) and the repeated quench.

The effects, afforded by these treatments to dimensional changes which occurred in aging at room temperature, were mentioned on the basis of austenite-martensite reaction and dislocation theory.

(a) If the specimen is arrested at the higher temperature, the greater dimensional changes will occur in aging at room temperature.

(b) The most parts of dimensional changes which may occur in aging at room temperature, reveal in the period of one and a half days after the quench.

(c) Rapid cooling in the cold water to the room temperature directly after the arrested quench gives less dimensional changes.

(d) The tempering directly after the arrested quench, which is prevailed in the industrial heat treatments of steel in order to avoid the cracks and distortions, gives the greatest dimensional changes in aging at room temperature.

(e) High temperature of the quenching oil will afford no good effect to the dimensional stability, but in the case of arrested quench, it will not be influenced by the temperature of quenching oil.

(f) The increase of tempering time and the secondary tempering will affect favourably the dimensional stability.

(g) Repeated quench, involving the increase of the content of dissolved carbide in austenitic matrix during the repeated heating, increases the retained austenite. Nevertheless, the result that the dimensional changes have occurred unexpectedly less in aging at room temperature is noteworthy in respect of the behavior of retained austenite.

I. 緒 言

軸受鋼の時効変形については M. Cohen⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ の種々の角度からの研究があるが、まずサブ・ゼロ処理を行わない通常の油焼入後焼戻の操作が時効変形におよぼ

す影響、とくに焼入における冷却方法の影響についてき

* 昭和 29 年 4 月日本金属学会講演大会において発表

** 日本精工株式会社

らに研究を行つた。

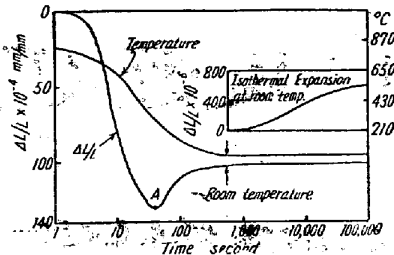


Fig. 1. Quenching dilatometer curves for ball bearing steel.

Fig. 1 に示すごとく焼入によりA点で austenite の martensite への変態が開始し、これより martensite への変態に伴つて膨脹を続け常温に達してもなお膨脹を続けることが分る。この曲線の形は焼入温度（再焼も含む）および焼入油の温度によつて異なるが、retained austenite 量は焼入後の冷却速度によつて異なるわけで焼入後冷却が不完全のまま焼戻す場合と完全冷却後焼戻す場合とでは、前者は後者よりも retained austenite は多くなる。時効変形は retained austenite 量とその安定化および martensite の量によるのであるから、焼戻前に存在する retained austenite の量および安定化と焼戻による retained austenite の安定化と martensite の分解の量によつて時効変形がきまることになる。したがつて焼入後試料の冷却方法によつて時効変形量が異なることが考えられ、また焼戻時間および焼戻を2回行う二次テンパーの形で行う場合にも異なることが考えられる。

つぎに焼入温度および再焼の時効変形におよぼす影響については未だ研究がほとんどない。焼入温度が高い場合には球状化炭化物の地への溶け込みが多くなり、そのため、Ms 点が下り retained austenite を増加する。また再焼を行う場合には第1回の焼入により歪が増加しそのため再焼に際し球状化物の溶け込みを加速し、このため retained austenite が同一焼入温度で一回焼入したものよりも増加することが考えられる。このような retained austenite の増加は時効変形に影響を与えまた焼戻によつても異なることが考えられる。

以上のごとき見地から外径 280mm 内径 250mm 巾 58mm の軸受鋼2種を用いて時効変形を研究した結果について報告する。

II. 焼入冷却方法による焼入直後からの時効変形量の変化

焼入における冷却方法によつて焼入直後からの時効変形量が如何に変化するかを求めた。

I-1 熱処理方法

830°C より焼入油の温度 50°C の Jet (油を吹きつけ油の攪拌をよくした油槽) に焼入れ、中断焼入の方法で試料の温度がそれぞれ 270°C, 230°C, 210°C, 100°C, 80°C, 50°C より空冷した場合および 230°C より水冷した場合の7つの方法をとつた。

I-2 時効変形量

焼入直後からの時効変形量を測定した。測定は焼入直後から 67 時間までは研磨せずに行い 67 時間目を測定後外径研磨し焼入7日目よりその外径寸法を基準にして時効変形量を測定した。これらの関係を図示すると Fig. 2のごとくなる。なお時効変形量は単位長さに換算した値である。

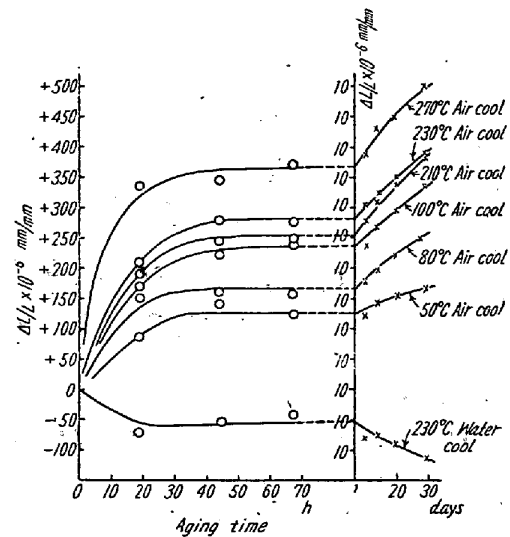


Fig. 2. The effect of arrested temperature on the dimensional changes after arrested quenching.

II-3 実験結果および考察

これらの結果から、(1) 中断焼入温度が高い程時効変形量が多い。(2) 焼入直後 1.5 日で変形量が飽和する傾向にある。(3) 中断焼入温度が高くても水冷することにより時効変形量は却つて収縮することが分る。これは、中断焼入温度が高い程 retained austenite 量が多く焼入直後より 1.5 日の間に retained austenite の分解および安定化がほとんど飽和し、冷却速度を早くする程早く進むことを示している。

III. 焼入の冷却方法と焼戻後の時効変形量

I の結果および緒言に述べた見地より、焼入後種々の冷却方法の差によつて焼戻後の時効変形量が如何に変化するかを調べた。

II-1 熱処理方法

焼入温度は 830°C, Jet にて焼入を行い Jet より引上げた時の試料の温度は約 130°C である. 焼戻温度は 150°C で焼戻時間は 1 時間, 焼入油温度は 38°C である. Jet 中断焼入後焼戻までの処理は次の 6 つの方法をとった.

(1) Jet 引上直後焼戻, (2) Jet 引上直後 33°C oil にて 30mn 油冷直後焼戻, (3) Jet 引上げ直後 33°C oil にて 90mn 油冷直後焼戻, (4) Jet 引上げ直後 33°C oil にて 180mn 油冷直後焼戻, (5) Jet 引上げ直後 4 mn 水冷直後焼戻, (6) Jet 引上げ 1.5 日空冷後焼戻. 焼入後の硬度は 63.8 H_{RC}, 焼戻後の硬度は 61.9 H_{RC} であった.

II-2 時効変形量

熱処理後研磨し, 研磨完了後時効日数に伴う時効変形量を測定した. 熱処理後研磨完了までに 14 日を要したので外径寸法測定第 1 回は熱処理後 14 日目より測定した. したがって時効日数は研磨後第 1 回測定後の日数である. 時効変形量測定結果を Fig. 3 に示す.

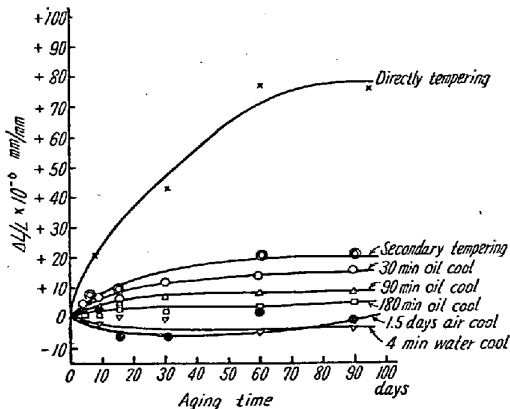


Fig. 3. The effect of cooling method on the dimensional changes after tempering.

II-3 実験結果および考察

以上の結果から次のことが分る. (1) 焼入後油冷時間を長くする程時効変形量が少くなること. (2) 油冷よりも水冷することにより時効変形量が非常に少くなり, その時効変形量は焼入後 1.5 日空冷と同程度の時効変形量となる. (3) 直後焼戻を行うことは時効変形量を大きくする.

これは焼入後の冷却速度によつて焼戻前に存在する retained austenite の分解および安定化が変化し, これによつて時効変形量が支配されることを示すもので, 焼入後冷却速度を早くして retained austenite を減少させ, また安定化させることが多い. すなわち水冷するか油冷時間を長くするか, 空冷時間を長くすることによつて焼戻後の時効変形量が少なくなることが分る. これ

は Fig. 2 の焼入後の時効変形よりも明らかである.

IV. 焼入油温度の影響

焼入油の温度によつて焼入における冷却速度が異り, そのため retained austenite 量が変化し, これが時効変形に影響することが考えられるのでこの影響をしらべる目的で実験を行った.

IV-1 熱処理方法

焼入温度 830°C, 焼入油温度 38°C と 50°C の 2 つの場合につき Jet にて II. 1 と同様に Jet にて中断焼入後直後焼戻す方法と, Jet に焼入し 15mn 間油冷し試料が油温に完全に達する完全冷却の方法にて行い, 焼戻は 150°C で 10h 行った. 焼入後硬度は 63.0 H_{RC}, 焼戻後の硬度は 59.0 H_{RC} であった.

IV-2 時効変形量

熱処理後研磨し研磨完了後時効日数に伴う時効変形量を測定した. 熱処理後研磨完了までに 23 日を要したので外径寸法測定第 1 回は焼入後 23 日目より測定した. したがって, 時効日数は研磨後第 1 回測定後の日数である. 時効変形量測定結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す.

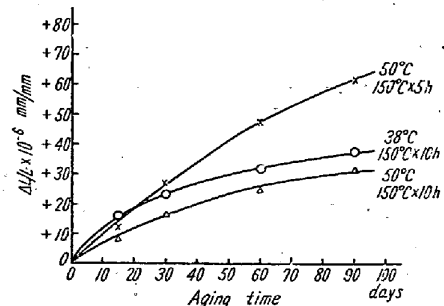


Fig. 4. The effect of quenching oil temperature and tempering time on the dimensional changes after arrested quenching and directly tempering.

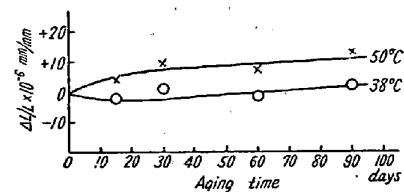


Fig. 5. The effect of quenching oil temperature on the dimensional changes after perfect cooling and 150°C x 10h tempering.

IV-3 実験結果および考察

この実験では焼入油の温度の相異が余りなかつたので明らかとはならなかつたが, 完全冷却の場合には焼入油の温度に依存し, 焼入油温度の高い方が時効変形量が多い傾向があるが, 中断焼入の場合には焼入油温度に依存

しないようである。

焼入油の温度が高い程完全冷却の際に時効変形量が多いのは、retained rustenite が焼入油温度が高い程多いからである。完全冷却の際に焼入油温度に依存し、中断焼入の場合に依存しないのは冷却速度の影響により試料が焼入油の温度に達しない前に引上げるためである。

V- 焼戻時間の影響

焼入によつて残る retained austenite は常温において分解して martensite に変態するが 150°C 程度の焼戻の場合には retained austenite はほとんど分解せず martensite の分解があるのみである。しかし焼戻により retained austenite の安定化が起りこれは焼戻時間に影響される筈である。この焼戻時間によつて時効変形量が如何に変化するかを行つた。

V-1 熱処理方法

焼入温度 830°C III. 1 と同様な条件で Jet にて中断焼入し、中断焼入直後焼戻を行つた。この方法は時効変形量が多くその相異が大きくあらわれると考えたからである。焼入油温度は 50°C であり、焼戻温度は 150°C、焼戻時間は 5 h と 10 h について行つた。焼入硬度は 63.0 H_{RC}、焼戻後の硬度は焼戻時間 5 h で 59.9 H_{RC} 10 h で 59.0 H_{RC} であつた。

V-2 時効変形量

熱処理後研磨し研磨完了後時効日数に伴う時効変形量を測定した。IV と同様熱処理後研磨完了までに 23 日を要したので外径寸法測定第 1 回は焼入後 23 日目より測定した。したがつて時効日数は研磨後第 1 回測定後の日数である。時効変形量測定結果を Fig. 4 に同時に示す。

V-3 実験結果および考察

焼戻 10 h の方が 5 h よりも時効変形量が少い。これは焼戻時間が長い程 retained austenite の安定化が起つたものと考えられる。

VI. 二次テンパーの影響

焼入直後焼戻を行うと焼戻後の常温時効変形量が増加することが明らかとなつたが、直後焼戻を行つても焼戻後空冷し再び焼戻を行えば、直後焼戻後つぎの焼戻までの間に retained austenite の分解および安定化が起り、二次焼戻により retained austenite が再び安定化することが考えられるので、この影響をしらべる目的で実験を行つた。

VI-1 熱処理方法

830°C 焼入、焼入油温度 76°C、中断焼入 130°C、直後焼戻 1.5 h、12.5 h 空冷再び 3.5 h 焼戻、焼戻温度は 150°C で行つた。焼入後の硬度は 63.5 H_{RC}、焼戻後の硬度は 61.0 H_{RC} であつた。

VI-2 時効変形量

このような処理を行つたものの時効変形の影響を Fig. 3 に同時に示した。

VI-3 実験結果および考察

二次テンパーを行つたものは直後焼戻を行つても二次焼戻を行うことによつて時効変形量が減少することが明らかである。

焼入直後焼戻を行う場合と焼入直後焼戻を行い空冷した後再び焼戻を行う二次テンパーを行う場合の時効変形におよぼす相異として考えられるものは、二次焼戻後空冷の間において retained austenite の分解および安定化が進み、また二次テンパーによつてさらに安定化されるためと考えられよう。

したがつて形状が複雑であつて焼入後放冷するとか、完全冷却すると残留応力の影響によつて割れの起る危険のある場合には、この二次テンパーの方法を用いれば焼割を防止し時効変形を少なくすることが出来る。

VII. 焼入温度および再焼の影響

緒言に述べた見地より焼入温度および再焼によつて焼戻後の時効変形量が如何に変化するかを行つた。

VI-1 熱処理方法

焼入温度および再焼の影響の差を大きく求めるために焼入直後焼戻を行う方法にて行い、焼入油温度は 40°C で焼入方法は前述と同様である。焼戻は 150°C で 1 h および 5 h の 2 つの場合について行つた。焼入温度および再焼温度と焼戻硬度を Table 1 に示す。

Table 1. Heat treatment and hardness.

Quenching temp.	150°C×1h	150°C×5h
900°C	64.4 H _{RC}	63.3 H _{RC}
850°C	63.5 "	62.5
800°C 840°C	63.8 "	62.8
830°C	62.6 "	61.4
800°C 820°C	62.8 "	61.8

つぎに 850°C で焼入したものおよび 800°C で焼入れ 820°C、840°C のそれぞれの温度で再焼したものの前述のごとき二次テンパーの影響および焼入後 1.5 日空冷後 150°C×5h 焼戻を行う空冷の影響をしらべた。

VI-2 時効変形量

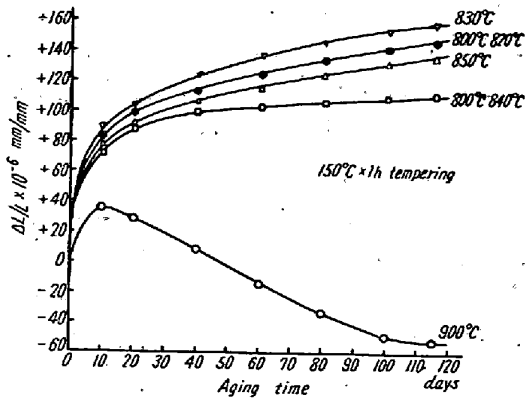


Fig. 6. The effect of quenching temperature and repeated quenching on the dimensional changes after arrested quenching and directly 150°C × 1h tempering.

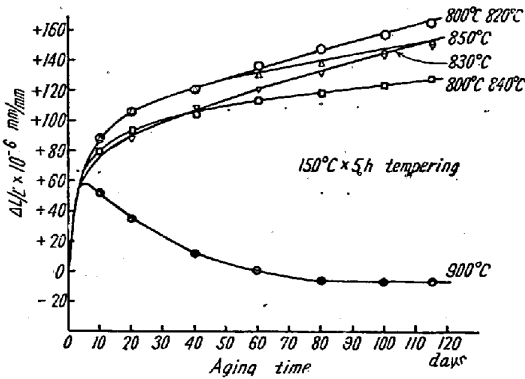


Fig. 7. The effect of quenching temperature and repeated quenching on the dimensional changes after arrested quenching and directly 150°C × 5h tempering.

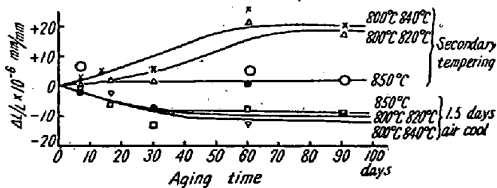


Fig. 8. The effect of secondary tempering and tempering after 1.5 days air cooling on the dimensional changes after high temperature quenching, repeated quenching and tempering.

焼入直後焼戻せるものの時効変形測定結果を Fig. 6 Fig. 7 に示す。測定は焼戻後 2 日目より測定した。

次に焼入後二次テンパーせるものおよび 1.5 日空冷後焼戻せるものの時効変形測定結果を Fig. 8 に示す。測定は焼戻後 23 日目より測定した。

Ⅶ-3. 実験結果および考察

これらの結果から

(1) 150°C × 1h 直後焼戻の場合焼入温度が高い場

合および再焼したものの方が 830°C で焼入したものより時効変形量が少ない。とくに 900°C 焼入のものでは収縮する結果を得た

(2) 150°C × 5h 直後焼戻の場合には 150°C × 1h の場合と順序は逆転するものはあるが、焼入温度 830°C の場合にはⅤに述べたと同様焼戻 1 h より 5 h の方が時効変形量が少ないが、850°C, 900°C 再焼したものは 5 h の方が却つて時効変形量が多い結果を得た。

(3) 焼入後二次テンパーを行つたもの、また焼入後 1.5 日空冷後焼戻を行つたものはⅢ, Ⅵに 830°C 焼入について行つたと同結果を得た。

(1), (2) の結果につき考察を行うこととする。

焼入温度が高い場合および再焼を行うと retained austenite が增加することが考えられ (retained austenite 量の X 線による定量結果は後報においてのべる。) この増加は時効変形量を増加させると考えられるにも拘らず時効変形量が逆に減少するか、ほとんど変わらない現象について考察するに、この場合焼入温度が高い場合、再焼せる場合の共通の現象は、(a) retained austenite の炭素濃度が増加する。(b) 球状炭化物が減少する。(c) retained austenite が增加する。(d) martensite の歪が増加することが考えられる。

(c) の retained austenite の増加は martensite になるべき量の増加であるが、逆の現象を起すことは、

(a) の retained austenite の炭素濃度が増加することにより carbon が interstitial に入ることにより格子が膨脹しそのため dislocation の移動を困難にさせる。これは Ms 点の降下と関係して常温における isothermal の変態をしにくく作用すると考えられる。(b) の球状炭化物の減少は炭化物が存在すればその近傍において格子に歪を与えしたがって carbide が多く存在する程そのような歪が多くなる。retained austenite の martensite への変態がこのような歪の大きな所より発生すると考えれば carbide の減少は retained austenite の martensite への変態を減少することになる。(d) の martensite の歪の増加は retained austenite の martensite への変態を周囲より阻止する作用をする。したがって (c) の増加は逆に (a), (b) (d) の作用を増加させこの結果焼入温度が高い場合および再焼せる場合却つて時効変形量が減少することになると考えられよう。

なお再焼の場合に (a), (b), (c), (d) の結果を生ずることは、一度焼入ることにより martensite 内の歪および dislocation や vacancy を増加させこの結果再

び加熱する際における carbon の拡散を増加するためと考えられる。これは Table 1 の再焼温度と硬度との関係からも再焼による carbide の拡散の加速が当然考えられる。(球状化炭化物量の定量結果については後報にのべる。)

つぎに焼入温度の高い場合および再焼せるものの時効変形量が、焼戻時間が長いほど却つて多いという結果はその理由は明らかではないが、焼戻における martensite の分解が焼入温度が高い場合および再焼の場合には 830°C に比し歪が大でその分解が加速され常温における martensite の分解が少くなり、一方焼戻時間を長くすれば歪の減少を生じ、(c) の retained austenite 量の増加による martensite への分解量の増加を来し、この両者の影響によるものではないかと考えられよう。

VIII. 総 括

以上種々の角度から行つた結果を要約するとつぎのようないえる。

(1) 焼入冷却方法による焼入直後からの時効変形量測定結果より、(a) 中断焼入温度が高いほど時効変形量が多い。(b) 焼入直後 1.5 日で変形量が飽和する傾向にある。(c) 中断焼入温度が高くても水冷することにより時効変形量がかえつて収縮する。

(2) 焼入の冷却方法と焼戻後の時効変形量測定結果より、(a) 焼入後油冷時間を長くするほど時効変形量が少くなる。(b) 油冷よりも水冷することにより時効変形量が非常に少くなり、その時効変形量は焼入後 1.5 日空冷と同程度の時効変形量となる。(c) 直後焼戻を行うことは時効変形量を大きくする。

(3) 焼入油温度の影響と時効変形量測定結果より、完全冷却を行う場合には、焼入油温度が高いほど時効変形量が多いが、中断焼入の場合には依存しないようである。

(4) 焼戻時間の影響と時効変形量測定結果より、830°C 焼入の場合には焼戻時間が長いほど時効変形量

が少ない。

(5) 二次テンパーの影響による時効変形量測定結果より二次テンパーを行つたものは直後焼戻を行つても二次焼戻を行うことによつて時効変形量が減少する。

(6) 焼入温度、再焼の影響による時効変形量測定結果より (a) 150°C×1h 直後焼戻の場合、焼入温度の高い場合 (860°C以上) および再焼したものの方が 830°C で焼入したものより時効変形量が小さい。(b) 150°C×5h 直後焼戻の場合、150°C×1h の場合と順序は逆転するものがあるが焼入温度 830°C の場合には焼戻時間の長い方が時効変形量が少いが焼入温度の高い場合および再焼したものでは 5 h の方がかえつて時効変形量が多い結果を得た。(c) 焼入後二次テンパーを行つたものまた焼入後 1.5 日空冷後焼戻を行つたものは、830°C 焼入について行つたと同様直後焼戻に比し時効変形量を著しく減少させる。

以上のおのおのの結果について考察を行つた。

最後に種々御指導と御教示を戴いた東大橋口教授に対し深甚の謝意を表する次第である。(昭和31年3月寄稿)

文 献

- 1) S. G. Fletcher, M. Cohen: Trans A.S.M. 1945 **34** p. 216
- 2) S. G. Fletcher, B. L. Averbach, M. Cohen: Trans A.S.M. 1948 **40** p. 703
- 3) B. L. Averbach, M. Cohen, S. G. Fletcher: Trans A.S.M. 1948 **40** p. 728
- 4) B. L. Lement, B. L. Averbach, M. Cohen: Trans A.S.M. 1949 **41** p. 1061
- 5) B. L. Averbach, M. Cohen: A.I.M.E. 1948 159. Tech. Pub. No. 2342
- 6) B. L. Averbach, M. Cohen: Trans. A.S.M. 1949. **41** p.1024
- 7) E. Orowan: Inst. of Metals, 1948 Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys p. 47