602. 172. 251. 2 : 539. 376 : 620. 178. 38

高温における低炭素鋼の動クリープ特性*

平 修 二**, 田中吉之助**, 小寺沢良一**

田中秀樹***, 藤田愛之****

Dynamic Creep Characteristics of Low Carbon Steel at Elevated Temperature

by Shūji TAIRA, Kichinosuke TANAKA, Ryōichi KOTERAZAWA,
Hideki TANAKA, and Yoshiyuki FUJITA

Dynamic creep and rupture tests were made with annealed low carbon steel. The test temperature was 450°C and the frequencies of alternating stress were 1 800 and 5 600 cpm. As the results of the tests, it is clarified that the creep strain is increased significantly by alternating stress superimposed over static stress. Allowable mean stress is reduced to about 86 or 63 percent of static creep strength when stress ratio (alternating stress/mean stress) is increased from 0 (static) to 0.23 or to 0.70, respectively.

On the other hand, the dynamic creep strength was analysed on the basis of mechanical equation of state and the results of static creep tests. The results of analysis agree well with the experimental ones. It was also indicated that both the results experimented and calculated show a fair agreement for the values of dynamic creep rupture strength.

1. 緒 言

高温において使用される機械部分の設計に際して、その材料の一定荷重に対する強度を知ることが重要なことはもちろんであり、したがって以前からクリープ試験が盛んに行われ、多くの試験結果が報告されているが、より実際に近いものとして、材料の変動荷重に対する強度を十分に はあく しておくことが、よりいっそう重要な問題となる。

変動荷重の下におけるクリープの研究としては、第一に、実際の機械部分の受ける応力が、負荷の変化、運転休止等のため、時によって異なった値を持つことに対応して、比較的長い時間間隔の階段的応力変動下のクリープを取扱うものと、第二にタービン翼が運転状態において遠心力による静荷重と振動による繰返し荷重を受ける場合のごとく、比較的大きい繰返し速度の正弦的変動応力の下におけるクリープを取扱うものとが重要なものとしてあげられる。第一の問題に関しては、すでに筆者らの一部が共同研究者とともに数年来研究を行って来た^{(1)~(4)}ところであるが、第二の問題

に関しても、最近特にこの目的のために試作された高温引張圧縮動クリープ試験機⁽⁵⁾を使用して研究を行いつつある。この問題は、その実験的な面に関しては、欧米諸国においてすでに多くの研究が行われている^{(6)~(11)}が、理論的研究はほとんどその例を見ないので、本研究では理論と実験の両面より研究を進めんとしている。本報告では、耐熱材料についての研究を行うための基礎実験として、低炭素鋼について、ある静応力の上に繰返し応力が重畳して加わった場合にクリープ伸びおよび破断強さが受ける影響について実験を行い、あわせて、静クリープ試験結果から動クリープ強度を推定することを目的として理論的解析を行った結果について報告する。

2. 実 験 装 置

本実験に使用した試験機は、先に報告した高温引張圧縮動クリープ試験機⁽⁵⁾である。これは、ばね力によって試験片に平均荷重を与え、回転する偏心質量の遠心力により繰返し荷重を与えるものであって、試験片に作用する繰返し変動応力は第1図に示すように、一定平均応力と、時間とともに正弦的に変化する繰返し応力を組合わせたものとなる。加え得る応力範囲は、両振繰返し応力より、静引張応力に至る範囲の任意の変動応力である。

* 昭和 33 年 3 月 20 日 関西支部第 33 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 33 年 10 月 27 日。

** 正員、京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

*** 准員、住友金属工業会社。

**** 准員、東洋紡績会社。

試験材料は住友金属工業会社鋼管製造所の提供になる 0.15% 炭素鋼で, その化学成分, 熱処理条件は第 1 表に示したとおりである. 常温における引張強さは 39.4 kg/mm^2 , 降伏点は 23.2 kg/mm^2 となっている.

試験片は直径 6 mm, 標点距離 50 mm で, その形状, 寸法を第 2 図に示す.

伸び測定は試験片の標点距離の両端に取りつけられた取出棒の相対変位をダイヤルゲージを用いて読取ることにより行った. この際, 繰返し荷重による振動はダッシュポットにより吸収せしめている.

試験片の加熱はニクロム線を発熱体とする電気炉を使用しており, ニクロム抵抗体を上中下の 3 部分に分割して各独立に電圧を調節し, 試験片軸方向温度分布の一様化をはかっている. 温度制御には白金抵抗体を検出部とする横河電機製作所製自動温度調節器を使用し, 温度測定はアルメル-クロメル熱電対と電位差計式温度計によった. 試験片標点間の上端, 中央, 下端の温度差は 450°C で $\pm 2^\circ\text{C}$ それらの時間的変動は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内である.

3. 実験結果

本実験における試験条件は第 2 表に示すとおりである. ここで, 応力比 A は応力振幅 σ_a の平均応力 σ_m に対する比 σ_a/σ_m とする. この表の中

第 1 図

第 2 図 試験片

第 1 表 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
0.15	0.26	0.43	0.013	0.007	0.009	残

機械加工後, 900°C 1 時間真空焼なまし炉中冷却

第 2 表 試験条件

試験温度	450°C
繰返し速度	1 800, 5 600 cpm
応力比 ($A=\sigma_a/\sigma_m$)	0(静クリープ), 0.23, 0.70
試験時間	100 時間まで

で, 応力繰返し速度 5 600 cpm における実験は, 繰返し速度が動クリープに及ぼす影響を調べるために行ったもので, これについては後述することとし, 本節では, 繰返し速度 1 800 cpm の下で, 静応力の上に重畳して加えられた繰返し応力がクリープ伸びおよび破断に及ぼす影響を調べるために行った実験について述べる.

上記実験条件の下において得られたクリープ曲線を第 3 図に示す. 黒丸と実線で示したものが実験結果であって, (a), (b), (c) 図はそれぞれ応力比 $A=0$, 0.23, 0.70 に対する結果である. (a) 図の $A=0$ に対する結果は静クリープ試験結果であり, (b), (c) 図が動クリープ試験結果であるが, これらの曲線よりわ

(a)

(b)

(c)

第 3 図 クリープ曲線

かるように、繰返し変動応力の下でのクリープ曲線は静応力の下でのクリープ曲線とほぼ同じ形を持っている。

次に、静応力の上に重畳して加えられた繰返し応力がクリープにいかなる影響を与えるかを見るために、ひずみが5%に達するまでの時間を横軸にとり、縦軸に平均応力および最大応力をとって図示すると第4図(a)(b)が得られる。(a)図よりわかるごとく、同一の平均応力に対しては、応力比の大きい方がひずみの5%に達するまでの時間が著しく短く、また、同一の時間に対しては、応力比の大きい方が平均応力が小となっており、繰返し応力が著しくクリープを促進することを示している。同一の最大応力に対しては、(b)図に見るごとく、動クリープの場合($A=0.23, 0.70$)の方が静クリープの場合($A=0$)よりもひずみの5%に達するまでの時間が長い。第5図は破断寿命を横軸にとって、第4図と同様の図を描いたものである。この場合もひずみ5%の場合とほぼ同様の傾向を示している。

次に、これらの結果を、横軸に平均応力 σ_m 、縦軸に応力振幅 σ_a をとって時間強度線図として表わすと第6図(a)(b)が得られる。同図で原点を通る放射状の直線は応力比 A 一定の線で、横軸は応力比 $A=0$ すなわち静クリープの線となっている。白丸を結んだ曲線群は負荷後ある時間における許容ひずみを規定した場合に許容し得る応力の限界線を表わしており、黒丸を結んだ曲線は破断に対する許容応力の限界線である。(a)図は負荷時間10時間、(b)図は100時間に対するもので許容ひずみは両図とも、3%、5%、8%にとっている。これらの曲線は、応力比0の点より著しく左へ傾斜しており、応力比が大きくなるにつれて、同一負荷時間および同一許容ひずみに対して許容し得る平均応力が著しく減少することを示している。

以上のように、本実験結果では、静応力の上に重畳して加えられた繰返し応力はクリープおよびクリープ破断強度を著しく減少せしめるものであって、繰返し応力が加わることにより、許容し得る平均応力は、応力比 $A=0.23$ の場合において、静クリープ($A=0$)の場合の約86%、 $A=0.70$ において約63%に減少する。

4. 固体状態の力学方程式に基く動クリープの解析および実験結果との比較

固体状態の力学方程式⁽¹²⁾の考え方によれば、ある時刻 t におけるひずみ速度 $d\epsilon/dt$ は、その時の応力 σ 、ひずみ ϵ および温度 T のみの関数であって、過去に

(a)

(b)

第4図 ひずみ5%に対する平均応力、最大応力と時間の関係

(a)

(b)

第5図 平均応力、最大応力と破断時間の関係

おける履歴に関係しない。すなわち、

$$\frac{d\epsilon}{dt} = F(\sigma, \epsilon, T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

この考え方は、高温において材料が変形を受ける場合、一般的に成立するものではなく、なかんずく、相当長期の休止期間において間欠的に応力が加わる場合には、かなり大きい相違を示すことは著者らの一部もすでに報告して来たごとくであるが⁽¹³⁾、休止期間の短い

場合,あるいは階段状周期変動応力が加わる場合には,ほぼ,上の考え方が成立することが認められる⁽⁴⁾.これは,応力変化の time scale が比較的長い,いわゆる静クリープの範囲に属する場合についての結果であるが,クリープの著しい温度における低炭素鋼の高温疲れについて,応力振幅が同一であれば繰返し速度が異なっても同一時間で破断するという実験事実が示されている⁽¹⁴⁾ことから考えて,動クリープの場合にも繰返し速度のきわめておそい場合の結果が速い場合に拡張し得ることが考えられるので,以下,上記固体状態力学方程式の考え方が,繰返し速度の大きい場合にも成立すると仮定して解析を試みる.

今,温度一定の場合について考えると,(1)式は, T を除いて次式で表わすことができる*.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = f(\sigma, \varepsilon) \quad \dots\dots\dots (1a)$$

一方,静クリープ試験におけるクリープひずみは,第2期クリープまでをとると,一般に次式により表わされる⁽⁸⁾⁽¹⁵⁾.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + bt^\beta + ct \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで ε_0 は瞬間ひずみ, β は遷移(第1期)クリープの時間指数で,通常 $0 < \beta < 1$ の値, b はその係数, c は定常(第2期)クリープ速度である. ε_0 , b , c はともに応力の関数であり, β は応力,時間に無関係な定数である. ひずみ速度は(2)式を時間 t で微分して

$$d\varepsilon/dt = \beta bt^{-(1-\beta)} + c \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2)(3)より,右辺の t を消去した式,あるいは, t をパラメータ τ として

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 + b\tau^\beta + c\tau \\ d\varepsilon/dt &= \beta b\tau^{-(1-\beta)} + c \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

がこの場合の(1a)式に相当する固体状態の力学方程式を与える. 一般には,この方程式の解は数値積分により求めなければならないが,クリープ曲線が定常クリープあるいは遷移クリープのみにより表わされる場合,すなわち,(4)において $\varepsilon_0 = 0$, $b = 0$,あるいは $\varepsilon_0 = 0$, $c = 0$ の場合は,簡単な形に導くことができる. 前の場合はすでに Lazan⁽⁹⁾により解が与えられており,また,これは後の場合において $\beta = 1$ とした特別の場合に相当するもので,以下後の場合について計算

* この式は本来,変形に伴って試験片断面積の変化することを考慮して求めた真の応力を σ として用いた時の関係式であるが,変形前の断面積で荷重を割って求めた公称応力を用いた場合も同じ関係が成り立つ.すなわち真応力を σ ,公称応力を σ_0 とすると体積一定の条件より $\sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon)$ なる関係が成立する.これを(1a)式に代入すると $d\varepsilon/dt = f(\sigma_0(1 + \varepsilon), \varepsilon)$ となるが,これは $d\varepsilon/dt = \varphi(\sigma_0, \varepsilon)$ と書きなおすことができる.これは(1a)と全く同形の式である.したがって σ について(1a)が成り立てば σ_0 についても同形の式が成り立つ.以下簡単のため σ_0 の代りに単に σ と書くこととする.

第6図 時間強度線図

を試みる.

この場合(2)式は $b = a\sigma^\alpha$ とおいて

$$\varepsilon = a\sigma^\alpha t^\beta \quad \dots\dots\dots (2a)$$

ただし, a , α は応力,時間に無関係な定数

また(4)式は

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= a\sigma^\alpha \tau^\beta \\ d\varepsilon/dt &= \beta a\sigma^\alpha \tau^{-(1-\beta)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

あるいは τ を消去して

$$d\varepsilon/dt = \beta a^{1/\beta} \sigma^{\alpha/\beta} \varepsilon^{-(1-\beta)/\beta} \quad \dots\dots\dots (4b)$$

$t=0$ において $\varepsilon=0$ として積分すると

$$\varepsilon = a \left[\int_0^\varepsilon \sigma^{\alpha/\beta} d\varepsilon \right]^\beta \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって, σ が時間の関数として与えられれば(5)式の積分を行うことにより,ひずみ ε を計算することができる.

ここで,本実験の条件に従って

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, σ_m : 平均応力, σ_a : 応力振幅

ω : 繰返し応力の角周波数

とし, $A = \sigma_a / \sigma_m$ と書くこと

$$\varepsilon = a\sigma_m^\alpha \left[\int_0^t (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/\beta} dt \right]^\beta$$

繰返し応力の繰返し数を N とすれば

$$\varepsilon = a\sigma_m^\alpha \left[\frac{N}{\omega} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/\beta} d(\omega t) \right]^\beta$$

$\omega t = 2\pi N$ の関係より

$$\varepsilon = a \sigma_m^\alpha t^\beta I^\beta \dots\dots\dots (7)$$

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/\beta} d(\omega t) \dots\dots\dots (7a)$$

(7a) 式で表わされる積分 I は, t , σ_m , ω に無関係に応力比 A のみにより定まるものであって, (7) 式は I^β が係数としてかかっている以外は静クリープ曲線を表わす (2a) 式と全く同形である. これは, さきに示した動クリープ曲線が静クリープ曲線とはほぼ同形であるという実験結果と一致している. そこでいま

$$\sigma_e = \sigma_m I^{\beta/\alpha} \dots\dots\dots (8)$$

なる等価静応力 σ_e を考えると, (7) 式は

$$\varepsilon = a \sigma_e^\alpha t^\beta \dots\dots\dots (9)$$

となり, (2a) 式と全く同形の式が得られる. すなわち平均応力 σ_m , 応力比 A の下における動クリープ曲線は (8) 式で与えられる等価静応力 σ_e の下における静クリープ曲線と全く同一である. (7a) 式よりわかるごとく, I は応力比 A , 応力指数 α , 時間指数 β が与えられれば定まるものであるから, 静クリープ試験結果より α , β を求めておけば, (8) 式により計算される等価静応力 σ_e の下におけるクリープ曲線として動クリープ曲線が求まることとなる.

第3図中の破線で示したものは (2a) 式および (9) 式において $a = 8.52 \times 10^{-6}$, $\alpha = 4.10$, $\beta = 0.132$ (ただし, $\varepsilon : \%$, $\sigma : \text{kg/mm}^2$, $t : \text{h}$ を単位とする.) として計算した値である. (a) 図では, 静クリープ曲線が (2a) 式により近似的に表わし得ることが示されており, (b), (c) 図では, 等価静応力を用いて (9) 式で計算された値が, 実験結果とほぼ満足な一致を示すことが見られる.

また, (9) 式を書直すと

$$\log \sigma_e + \frac{\beta}{\alpha} \log t = \frac{1}{\alpha} \log \frac{\varepsilon}{a} \dots\dots\dots (10)$$

すなわち, 同一の ε に対する $\log \sigma_e - \log t$ 線図は応力比 A および繰返し速度 ω に無関係に一つの直線となることになる. 第7図は第4図に示した実験結果を縦軸に $\log \sigma_e$ をとって整理しなおしたもので, 各応力比における結果は, 新たに書き加えた繰返し速度 5600 cpm における結果とともにほぼ一直線上にあり, 上記解析結果を裏書きしている.

次に (8) 式を変形すると

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_m}{\sigma_e} &= I^{-\beta/\alpha} \\ &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/\beta} d(\omega t) \right]^{-\beta/\alpha} \end{aligned} \dots\dots\dots (8a)$$

第7図 ひずみ5%に対する等価静応力と時間との関係

第8図 時間強度線図解析結果

左辺は σ_e の定義より, 平均応力と, これと同一の時間に同一のひずみを生ぜしめる静応力の比を与えるもので, (8a) 式は, この比を応力比 A の関数として与えることとなる. この関係を, α/β をパラメータにとり, σ_m/σ_e と σ_a/σ_e の関係として図示したものが第8図である. これは, 時間強度線図の両軸 σ_m , σ_a を, σ_m/σ_e , σ_a/σ_e におきかえて無次元表示したものに相当する. 定常クリープの場合は (8a) 式において $\beta=1$ として

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^\alpha d(\omega t) \right]^{-1/\alpha} \dots\dots\dots (8b)$$

これは Lazan⁽⁹⁾ により与えられている式と同一内容のものである. また, (8a) 式は (8b) 式において α の代りに α/β を代入したものに等しい. すなわち, 遷移クリープの場合は定常クリープの場合の結果において, 応力指数 α の代りに, 応力指数 α の時間指数 β に対する比 α/β を用いればよいこととなる.

第9図は, σ_m/σ_e , σ_a/σ_e を用いた無次元表示時間強度線図の, 上記方法による計算結果と, 遷移クリープの範囲内における実験結果を比較した一つの例であって, 両者は良好な一致を示している. ここには, 負荷

時間 100 時間における許容ひずみ 5% の場合のみを示したが, 他の場合もほぼ同様の結果が得られる。

なお, 以上の解析は遷移クリープのみについて行ったものであるが, 第 3 図より知られるごとく, 許容ひずみがあまり大きくない時 (本実験では 5% 以下) はクリープ曲線は遷移クリープの範囲にあるとみられるから, 実際問題としてもかなりの一般性を持つものと考えられる。

5. 繰返し速度の影響

前節 (7) 式は既述のごとく, 動クリープひずみが繰返し速度に無関係に平均応力および応力比のみにより定まることを示している。このことは前節のはじめにおいて触れたごとく, 非常に長周期 (40~3 000 分) の階段の変動応力が加わる場合にも本実験の場合と同様に固体状態力学方程式の考え方が成立する⁽⁴⁾ということから, 1 800 cpm 以下の繰返し速度では広範囲に成立することが推定されるが, 更に高い繰返し速度における結果をみるため, 5 600 cpm における動クリープ試験を行った。この結果を, 1 800 cpm における結果および静クリープ試験結果と比較したものが第 10 図および第 7 図である。5 600 cpm における結果がやや大きいひずみを示しているが, 大きい差異があるものとは言えず, いちおう, この程度の繰返し速度までは速度に無関係で, 等価静応力により, 動クリープ強度の推定をなし得ると言える。

6. 破断試験結果と解析結果の比較

静クリープ破断試験結果から動クリープ破断特性を推定するための解析については, 筆者らがすでに報告したところであり⁽¹⁶⁾, また, Hoffman⁽¹⁷⁾ によっても同様の解析が行われている。

いま, 破断は内部ひずみ ϕ の蓄積量がある限界値 ϕ_c に達した時に生ずるとし, また内部ひずみの増加速度は応力の関数として次式で表わされたとする。

$$d\phi/dt = f(\sigma) \quad \dots\dots\dots(11)$$

静応力の下における破断条件は破断時間を t_c として

$$\phi_c = f(\sigma)t_c \quad \dots\dots\dots(12)$$

静応力と破断時間の関係は第 5 図に示したごとく, 両対数線図上で直線となるから

$$d\phi/dt = f(\sigma) = a'\sigma^{\alpha'} \quad \dots\dots\dots(13)$$

と表わすことができる。ただし, a' , α' は応力に無関係な定数とする。(6) 式で表わされる変動応力に対する破断条件は (13) 式を積分して

$$\phi_c = a'\sigma_m^{\alpha'}t_cI' \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$I' = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha'} d(\omega t) \quad \dots\dots\dots(14)$$

第 9 図 計算結果と実験結果の比較 (動クリープ)

第 10 図 繰返し速度の影響 (負荷後 10 時間および 100 時間における等価静応力とひずみの関係)

あるいは

$$\sigma_e' = \sigma_m (I')^{1/\alpha'} \quad \dots\dots\dots(15a)$$

とおけば

$$\phi_c = a'(\sigma_e')^{\alpha'} t_c \quad \dots\dots\dots(15)$$

すなわち, σ_e' は破断に対する等価静応力である。また, 動クリープ変形の場合と同様に (8) 式に相当して

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_e'} = (I')^{-1/\alpha'}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha'} d(\omega t) \right]^{-1/\alpha'} \quad \dots\dots\dots(16)$$

したがって, 静クリープ破断試験結果より α' を求めておけば, (16) 式により破断に対する無次元表示時間強度線図を描くことができる⁽¹⁶⁾。

第 5 図の応力-破断時間の両対数線図中の静クリープ試験結果を示す直線のこう配より α' を求めれば, $\alpha' \cong 31$ であって, 第 11 図は (15a) 式により破断に対する等価静応力を求めて, これを縦軸にとって実験結果を整理したものである。3 種類の応力比に対する実験値は一つの直線の近傍にあり, 等価静応力を用いて, 静クリープ破断試験結果から, 動クリープ破断強

度を推定することが可能であることを示している。

第 12 図は等価静応力を用いて無次元表示した時間強度線図の (16) 式による計算結果と、実験結果を比較したものであって、両者は良好な一致を示している。

7. 結 言

低炭素鋼について、温度 450°C において動クリープおよび破断試験を行い、また、固体状態力学方程式の考え方を基礎として静クリープ試験結果より動クリープ強度を推定すべき解析を遷移クリープの範囲内において行った。その結果によると、静応力の上に繰返し応力が加わることにより、クリープひずみは著しく増大するもので、解析結果は実験結果とよく一致する。また、破断に関しても、さきに筆者らが静クリープ破断試験結果から動クリープ破断強度を推定することを目的として行った解析結果が、本実験結果と良く一致することが確かめられた。

これらの解析結果は、析出硬化、時効硬化あるいは回復等の著しい材料についても一般的に実験結果と一致するとは考えられないが、本実験の 450°C 附近における焼なましされた低炭素鋼のごとき、組織的に安定な⁽¹⁴⁾材料に関しては成立するものと考えられ、またより複雑な材料の挙動を はあく するための基礎として重要な意義を持つものと考ええる。

終りに、本研究を行うに際して終始御鞭達を賜った京都大学 西原利夫名誉教授に深甚の謝意を表し、また、試験材料を提供された住友金属工業会社鋼管製造所に対して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **21**, 111 (昭 30), 791.
- (2) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **21**, 111 (昭 30), 796.
- (3) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **22**, 123 (昭 31), 832.

第 11 図 等価静応力と破断時間の関係

第 12 図 計算結果と実験結果の比較
(動クリープ破断)

- (4) 西原, 平, 田中, 大路, 材料試験, **7**, 56(昭 33), 254.
- (5) 平, 田中, 小寺沢, 材料試験, **7**, 61(昭 33), 545.
- (6) Hempel u. Tillmanns, *Mitt. K. W. I. Eisenforschung*, **18**(1936), 163.
- (7) Bernhardt u. Hanemann, *Z für Metallkunde*, **30**, 12(1938), 401.
- (8) Hempel u. Krug, *Mitt. K. W. I. Eisenforschung*, **24** (1942), 71.
- (9) B. J. Lazan, *ASTM, Proc.*, **49**(1949), 757.
- (10) B. J. Lazan & E. Westberg, *ASTM, Proc.*, **52** (1952), 837.
- (11) F. W. DeMoney & B. J. Lazan, *ASTM, Proc.*, **54** (1954), 769.
- (12) J. E. Hollomon & J. D. Lubahn, *General Electric Review*, **50**(1947).
- (13) 平, 田中, 大路, 紙谷, 関西支部第 33 期定時総会議演会にて講演(昭 33).
- (14) P. G. Forrest & H. J. Tapsell, *Instn. Mech. Engrs., Proc.*, **168**, (1954), 763.
- (15) M. Tanenbaum & W. Kauzmann, *Appl. Phys., J.*, **25**, 4(1954), 451.
- (16) T. Nishihara, S. Taira, K. Tanaka & R. Kote-razawa, *6th Japan Nat. Cong. Appl. Mech., Proc.*, (1956), 221.
- (17) C. A. Hoffman, *ASTM, Proc.*, **56**(1956), 1063.