539.376:539.434:539.389.4

クリープにおける温度履歴の影響*

平 修二**, 大南正英***, 坂戸瑞根****

Influence of Temperature History on Creep

by Shuji TAIRA, Masateru OHNAMI, and Mizune SAKATO

In the present paper, some problems of temperature history on transient stage creep are discussed, and the experimental and analytical results on 0.15 per cent carbon steel are presented. From these results the following are concluded:

(1) In the case of single temperature cycle as shown in Fig. 5(a) under fixed tensile stress, the "incubation period" is observed immediately after the lowering of temperature and it is found that the period depends on the time interval t' elapsed under a higher temperature level, being larger for the larger t' .

(2) In the case of Fig. 5(b), it is found that the amount of strain increment just after the raise of temperature is likely to depend on both the time interval t' elapsed under a lower temperature level, being slightly larger for the larger t' , and the strain at which the temperature is lowered from the reference temperature T_0 , being larger for the small strain.

(3) The effect of temperature history on creep is composed of transitional change in internal yield stress, that is, recovery or aging, where the internal yield stress is defined as the local stress at which deformation begins without the aid of thermal fluctuation.

(4) From a practical point of view, however, these effects are negligibly small and the concept of "mechanical equation of state in solid" is applicable to the prediction of creep under such temperature variation, within an error of 5 per cent in terms of strain.

1. はしがき

筆者らはさきの報告⁽¹⁾において低炭素鋼に対する温度変動下のクリープについて実験的考察を行ない、応力一定の下で温度のみ変動させた二、三の場合のクリープを近似的に固体状態力学方程式により一定温度下のクリープ試験結果から推定しうること認めた。しかしながら温度変動下のクリープに対しては本質的には温度履歴を考慮せねばならないと考えるのが妥当である。すなわち、いままでに発表された二、三の実験結果⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によれば温度変動下のクリープにおいてある種の材料および実験条件（主として温度変動の最高温度）下では、かなり顕著な過渡的クリープひずみあるいはひずみ速度の増加が認められており、固体状態力学方程式による近似計算によっては必ずしも推定し得ない場合のあることが示されている。しかし一方では、J.E. Dorn ら⁽⁵⁾のアルミニウム合金に関する報告によれば固体状態力学方程式の考えを基礎におく簡易

な温度変動下のクリープの推定基準から計算せるものは、かなりよく実験結果と一致することが認められており、したがって温度変動下のクリープが履歴の影響を無視せる固体状態力学方程式により近似的に推定しうる場合は材料および温度変動下の諸条件により、かなり左右されるようである。かかる事情に基き温度変動下のクリープの実際的な取扱いに対する一方向としては温度履歴の影響の十分なる検討の上に立って固体状態力学方程式による簡易推定法の適否を材料ならびに変動条件に応じて規制して行くことが必要であると考えられる。

本報告では上述の趣旨にそって温度変動下のクリープに関する研究の一環として、一定応力および温度下のクリープ試験の途中で温度のみを階段状に変動させて後再びもとの状態にもどすという2段階状温度変動下の基礎実験を行ない、温度履歴の影響をうけると考えられる二、三の諸因子について実験的ならびに解析的検討を試みた。したがって本報告はこれらの実験結果に基いて温度変動下のクリープ挙動の内容を理解するとともに、一方かかる温度変動下のクリープを固体状態力学方程式により近似的に推定した場合の実測値との差異について論じ、温度変動下のクリープの取扱

* 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 35 年 10 月 12 日。

** 正員，京都大学工学部。

*** 正員，京都大学工学研究所（京都市左京区吉田本町）。

**** 准員，神戸製鋼所。

いに対する一指針を得んとするにある。

2. 実験材料および実験方法

(1) 材料 本実験に用いた材料は 0.15 % C の低炭素鋼で、住友製鋼所で作られた同一鋼塊より圧延された素材を用いた。第1表および第2表は本材料の化学的成分および常温における機械的性質を示す。

(2) 試験片 試験片は上述の直径 1 in の同一母材から切り出し、第1図における形状寸法に機械加工の後、900°C で1時間の真空焼なまし(炉中冷却)を施した。

(3) 試験機および加熱装置 実験に用いたクリープ試験機はレバー比 1:20 の単一レバー方式による容量 5 t の一定引張荷重試験機である。なお、実験を一

第1表 化学的成分 (%)

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

第2表 常温における静機械的性質

降伏点 σ_s kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	伸び ϕ %	絞り ψ %	かたさ VHN (50g)
25.1	38.2	34.8	65.0	137

第1図 試験片

第2図 加熱および伸び測定装置

定引張応力で行なうため、負荷用おもりに補助おもりを設け、これを試験片の伸びに応じて取り去る方法を採用した。

また伸びの測定は第2図に示す既報⁽¹⁾の方法により2個のダイヤルゲージの読みの平均値を採っている。本実験で採用した温度変動装置としては既設の電気加熱炉および温度自動調節器を用い、ただ加熱炉を第2図に示すように一部改造して用いた。すなわち温度を基準温度よりできるだけ早く低温側へ変動せしめるため、炉の上、下に通風管を左右に設け、かかる変動時に石綿せんを抜いて強制冷却を施した。また温度を低温から基準温度へもどす際には炉電流を一時的に多量通電することによりその目的を果たした。なお、かかる温度変動時における伸び測定用引出棒(材料 18-8 ステンレス鋼)の熱膨張あるいは収縮量を伸びの測定時に補正することについては次に詳述する。

(4) 実験方法 低炭素鋼の遷移クリープにおける温度履歴の影響を調べるため、本実験ではとくに温度変動直後におけるクリープ伸びの測定に注意を払った。まず、加熱および冷却は上述の方法によりたとえば第3図の黒丸に示すように平均 10°/min の速度で温度変動を与えることができ、温度変動時における試験片長さ方向の温度分布は温度一定時(±1°C)に比べて悪くなるが(±5°C 以内)変動後短時間内に元の温度一定時の分布にもどる。なお、温度変動過程におけ

第3図 温度変化に伴うダイヤルゲージの変化

第4図 温度変動に伴う熱膨張および収縮に対するクリープ伸びの補正

る試片半径方向の温度変化に基く半径方向の熱応力の発生については、変動速度が $10^{\circ}/\text{min}$ であることから事実上問題にはならない*。

試験片伸びの測定用引出棒の先端に取り付けられた2個のダイヤルゲージの読みは温度変動時(加熱および冷却時)に引出棒の熱膨張の急変により変化する。すなわち、第3図の白丸に示すように黒丸で示す温度変化に伴って加熱と冷却時にそれぞれダイヤルゲージの読みが増減する。したがってたとえば温度 450°C 、負荷応力 20.0 kg/mm^2 下のクリープ試験の途中で温度のみ 300°C に減少し、ある時間の後温度を再び 450°C へもどした場合のダイヤルゲージの読みから算定したクリープ曲線は第4図の黒丸のようになる。すなわち、温度変動時におけるダイヤルゲージの読みから求められる伸び測定値は急激に増減することになる。したがって、かかる温度変動時の試験片の実際の伸びは第3図の例に示すように無負荷状態で行なった読みの変化から補正する必要がある、温度変動時における実際のクリープ曲線は第4図の白丸に示すごとく補正

することができる。

本実験ではクリープ試験を引張応力 20.0 kg/mm^2 の一定応力下で行ない、基準温度としては 450°C を採用している。また、クリープ試験は遷移クリープ(第1期クリープ)の範囲内で行ない、試験時間は高々500時間までである。実験方法としては以下に示す2種類の方法によった。

(a) 一定応力下で温度のみ基準温度 T_0 より高温側へ変動せしめ、その高温側温度 T_1 である時間 t' 保った後再び温度を基準温度へもどす実験(第5図の実験I)。

(b) 一定応力下で温度のみ T_0 より低温側へ変動せしめ、その低温側温度 T_1 である時間 t' 保った後再び温度を基準温度へもどす実験(第5図の実験II)。

3. 実験結果

3.1 基準温度から高温側へ長方形的温度変動を与える場合のクリープ 本実験結果を第6図に示す。図は $\sigma = 20.0\text{ kg/mm}^2$ の下で最初 450°C でひずみ $\epsilon_1 \approx 2\%$ ($t_1 = 480\text{ min}$) までクリープ実験を行なった後 475°C にそれぞれ $t' = 220, 995$ および 5680 min 間保って後再び 450°C にもどしたときの各クリープ曲線を示す。図からわかるように温度 475°C から 450°C へもどした直後、かなりの期間クリープがほとんど進行しない期間、すなわち、図ではクリープ曲線が横軸の時間軸に水平になる期間が認められる。しかもこの期間は高温側保持時間に左右される傾向をもつ。すなわち、この期間(induction period⁽⁶⁾あるいは incubation period⁽³⁾と呼ばれているが、図ではこれを i.p. で示す)は第7図**に示すように高温側温度

第5図 温度波形

第6図 温度減少直後におけるクリープ伸びの停止

* この点に関する G.R. Brophy および D.E. Furman⁽²⁾の実験において冷却速度 $3.5^{\circ}\text{F}/\text{min}$ による半径方向の熱応力がクリープの過渡現象の主因とする考えは疑問に思われる。

第7図 induction period の t' による変化

** この場合 i.p. の実測は第6図に示すクリープ曲線からひずみ速度-時間曲線を作成し、これより温度下降直後ひずみ速度がほとんど零の状態から徐々にある連続的なひずみ速度の値をとるまでの時間として求めたものである。

475°C での負荷時間 t' が大きくなるほど大きくなる傾向を有し, これはまた t' のある大いさに対してある飽和値に達する傾向がみられる. したがって, かかる温度変動下のクリープは厳密には温度履歴の影響を受けるものであることがわかる. したがって, かかる induction period の存在は厳密には基準温度へもどした直後におけるクリープ曲線において実測値と固体状態力学方程式による計算値との間に差違を期す. というのは固体状態力学方程式の考えでは高温側保持の温度履歴の影響を無視して変動直後のクリープ速度がそのときの温度 (すなわち基準温度 T_0) およびひずみの大いさによって決定されることから当然かかる induction period の存在は無視していることによる. なお, 第7図に示す結果は J.G. Leschen⁽⁸⁾ らの鉛に関する実験結果の傾向と全く一致する.

3.2 基準温度から低温側へ長方形波的温度変動を与えた場合のクリープ 第4図の白丸の例に示したように基準温度 450°C から 300°C へ温度変動を与えている期間中, クリープひずみにはほとんど変化が認められない. 本実験ではかかる温度履歴の影響が温度を再び基準温度へもどした直後のクリープ挙動にいかなる影響を与えるかを調べんとするものである. すなわち, 本実験では上述の温度履歴がクリープ挙動に与えられ二, 三の諸因子について実験的検討を試みる. すなわち,

- (a) 低温側保持時間 t' の影響
- (b) 温度変動を与える際のひずみの大いさ ϵ_1 の影響
- (c) 低温側保持温度 T_1 の影響

以下に各因子の影響を調べた実験結果を述べる.

(a) 保持時間 t' の影響 まず低温側保持時間の影響を調べた実験結果の一例を第8図に示す. すなわち, 同図は縦軸にクリープ速度 $\%/min$ を横軸に 450°C の温度下における負荷時間 $\bar{t}$ min をそれぞれ両対数目盛上に示したクリープ速度-時間曲線を示し, 黒丸にて示す実験点は一点鎖線にて示す時間 (全ひずみにして $\epsilon_1 \approx 2\%$) で温度を 300°C へ変動し $t'=120$, 1000 および 10000 min 間 300°C に保持して後再び 450°C にもどしたときのクリープ挙動を示す. ここで $\bar{t}$ とは全負荷時間 t から 300°C での負荷時間 t' を差引いた時間を表わす. 図から明らかなようにいずれの保持時間 t' においても 450°C へもどした直後においてかなりクリープ速度の過渡的増加がみられ, またこれは短時間内に 450°C の一定温度下のクリープ速度-時間曲線に一致する傾向をもつ. すなわち, 図に示す点線は横軸の時間を 450°C の温度下の負荷時間 $\bar{t}$ をとるとき, 温度 450°C の一定温度下のクリープ実験結果を用いて固体状態力学方程式から計算したクリープ速度-時間曲線を示し, これはまた当然 450°C の一定温度下の実験より直接得られるものと一致すべきものである.

ところで第8図において t' が大きくなるほど (すなわち t' の対数的な増加の程度に従って) わずかではあるが過渡的クリープ速度の増加量も大きくなる傾向がみられる. しかしこれらの差違は定量的にはかなり小さいものであることがわかる. 一方, このクリープ速度の過渡的増分に伴うクリープひずみの増分もごく短時間に起るものであり, 固体状態力学方程式から計算するクリープ曲線と大差のないことも第9図に示すクリープ曲線から明らかである. すなわち, 図は横

第8図 温度増加直後におけるひずみ速度の過渡的増加に及ぼす低温側負荷時間 t' の影響

軸に 450°C の温度下の負荷時間 $\bar{t}$ min を、縦軸にそれに伴うひずみ $\epsilon\%$ をとったもので、一点鎖線で示す温度変動を与えた時間以後のクリープ曲線は点線で示す計算結果よりわずかに増加側にあるが、クリープ曲線では t' の依存性はほとんど認められない。かかる実験結果から基準温度より温度変動を与える低温側の保持時間の大きさが対数的増加のオーダーで大きくなるに従い基準温度へもどした直後の過渡的なクリープ速度あるいはクリープひずみ増分が増加する傾向にあるが、しかしかかるひずみの増加量はいずれも固体状態力学方程式による計算値とそのときのひずみ量のおよそ 5% 以内の相違にとどまる。

(b) ひずみ ϵ_1 の影響 第10図は 450°C から 400°C へ $t'=1000$ min 間の温度変動を与える際のひずみ ϵ_1 の大きさの影響を調べた実験結果を示し、図はかかる場合のクリープ速度-時間曲線を示す。ここで

第9図 温度増加直後におけるひずみの過渡的増加に及ぼす低温側負荷時間 t' の影響

第10図 温度増加直後におけるひずみ速度の過渡的増加に及ぼすひずみ ϵ_1 の影響

横軸の時間 $\bar{t}$ は前図と同様 450°C の温度下での負荷時間を示す。図からわかるように ϵ_1 の値の小さいほど換言すればクリープ実験の比較的初期にかかる温度変動を与えるほど過渡的なクリープ挙動の程度も大きくなる傾向が伺われる。なお、図の点線は上述方程式による計算結果を示す。

以上のことはクリープひずみについてもほぼその傾向を認めることができる。すなわち、第11図はかかる温度変動下のクリープ曲線を示し、一点鎖線は温度変動を与える際の負荷時間を表わし、横軸の $\bar{t}$ は第10図と同様のものである。図からわかるようにクリープ曲線は ϵ_1 の小なる場合には固体状態力学方程式による計算結果と差違を生ずることがわかる。このことは実際問題としてこのような温度変動が周期的に繰返される場合、繰返しの初期に生じた過渡的なひずみ増分が繰返し変動下のクリープ曲線にみられる過渡的な現象を支配する傾向のあることを示唆するものであり、このことについては次報⁽⁷⁾にゆずる。

(c) 低温側温度 T_1 の影響 本実験の結果例を第12図に示す。図は 450°C より $\epsilon_1 \cong 2\%$ において $T_1 = \text{常温}, 300^{\circ}\text{C}$ および 400°C の各温度に $t'=1000$ min 間温度変動を与えた場合のクリープ速度-時間曲線を示し、図からわかるようにクリープ速度の過渡的な現象に及ぼす T_1 の影響はほとんど見受けられない。なお、このことはクリープ曲線についても同様であり、その表示は省略する。

第11図 温度増加直後におけるひずみの過渡的増加に及ぼすひずみ ϵ_1 の影響

4. 実験結果に対する考察

4.1 induction period に対する考察 induction period の存在については以下に示すクリープ変形機構に対する仮定から定性的解釈を与えることができる。ただしこれら仮定には問題を引張応力による変形に限定し、かつ特異なや金学的変化に基づく特殊な変形機構の問題には触れないものとする。したがって本考察は特異なや金学的変化の影響を含まない理想材料のクリープ変形機構を対象とするものであり、かかる基礎的考察を通じて実用材料に対する実験結果の定性的解釈の根拠を与えようとするものである。

すなわち、クリープ速度は材料中の何らかの障害点にたい積された転位(刃状転位)の集積状況およびその集積転位が上昇運動その他により障害点から脱出する状況によって定まるものと考え、かつかかる転位の集積状況によって材料のもつ内部降伏応力が変化するものと考えられる。ここで内部降伏応力とは材料が熱揺動の助けなくしてすべるに要する限界応力をいう⁽⁶⁾。ところでこの内部降伏応力はクリープひずみ ϵ の増加に伴い増加および減少する二つの相反する特性を有し、材料の任意時間 t における内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ は一般に

$$\bar{\sigma} = f(\epsilon, t) \quad (1)$$

で表わすことができる。したがって任意時刻における内部降伏応力の変化量 $d\bar{\sigma}$ は純現象論的に回復の存在しないときの材料の応力-ひずみ線図の傾斜から加工硬化係数 $h = \partial\bar{\sigma}/\partial\epsilon$ を、また加工硬化する材料の焼なましたときの $\bar{\sigma}$ の時間的減少から回復速度 $r = \partial\bar{\sigma}/\partial t$ を定義して(1)式から次式のごとく表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} d\bar{\sigma} &= (\partial\bar{\sigma}/\partial\epsilon)d\epsilon + (\partial\bar{\sigma}/\partial t)dt \\ &= h \cdot d\epsilon + r \cdot dt, \quad (d\epsilon \geq 0, dt \geq 0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

いま、高温側保持温度 T_1 から T_0 へ減少せしめる直前の内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ の時間的变化の割合 $d\bar{\sigma}/dt$ は(2)式から次式で与えられる。

$$d\bar{\sigma}/dt = r + h \cdot (d\epsilon/dt) \quad (3)$$

ここで $d\epsilon/dt$ はクリープ速度を表わし、また回復速度 r は D. Kulhman⁽⁸⁾, A.H. Cottrell および V. Aytekin⁽⁹⁾ らの解析結果にしたがえば以下のごとく表わしうる。すなわち、高温側温度 T_1 の下での回復速度、換言すれば $\bar{\sigma}$ の焼なまし状態における時間的变化の割合はある範囲の $\bar{\sigma}$ について

$$r = d\bar{\sigma}/dt = -D \cdot \exp\{-(W - q \cdot \bar{\sigma})/kT_1\} \quad (4)$$

で表わすことができる。ここで D , q および W はそれぞれ定数であり、 k は Boltzmann 定数、 T_1 は絶対温度を表わす。したがって(4)式から

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 - \left(\frac{kT_1}{q}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right) \quad (5)$$

の関係を得る。ここで $\bar{\sigma}_0$ は $t'=0$ (第5図参照)における内部降伏応力を、また $\bar{\sigma}$ は任意時刻 t (ただし $0 < t < t'$) におけるそれを表わす。なお、(5)式において t_0 と $\bar{\sigma}_0$ とは次式の関係満足せねばならない。

$$t_0 = (kT_1/qD) \cdot \exp\{(W - q \cdot \bar{\sigma}_0)/kT_1\} \quad (6)$$

したがって温度下降直前における回復速度をいま時間 t の関数で表わすと(5)式から $t=t'$ とおくことにより次式のごとくなる。

$$r = d\bar{\sigma}/dt = -(kT_1/q) \cdot \frac{1}{t_0 + t'} \quad (7)$$

ところで induction period の大いさは温度の急激下降による内部降伏応力の増加量を減少せしめるに要する時間から決定されるはずであり、induction period の大いさ (*i. p.*) は、温度減少に伴う内部降伏応力の増加量を $\Delta\bar{\sigma}$ と考えて

$$(d\bar{\sigma}/dt) \cdot (i. p.) = \Delta\bar{\sigma} \quad (8)$$

第12図 温度増加直後におけるひずみ速度の過渡的増加に及ぼす低温側温度 T_1 の影響

とおき、かつ(8)式の $d\bar{\sigma}/dt$ に(3)および(7)式を用いて(i. p.)は次式のごとく表わすことができる。

$$(i. p.) = \Delta\bar{\sigma} / \left\{ -\frac{kT_1}{q} \cdot \frac{1}{t_0 + t'} + h \cdot (d\epsilon/dt) \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式からわかるように高温側保持時間 t' が大きくなるほど、あるいは高温側温度でのクリープひずみ量が増加するに伴い加工硬化率 h およびクリープ速度 $(d\epsilon/dt)$ が減少することから(i. p.)が増加する。このことは第7図に示す低炭素鋼に対する実験結果においてある範囲の t' についていちおう定性的に一致する。同様に(9)式から減少せしめた温度差が大きくなるほど、換言すれば $\Delta\bar{\sigma}$ が大きくなるほど(i. p.)が増加する傾向にあることがわかる。

4.2 温度上昇直後における増加ひずみに対する考察 上述の(1)式からクリープひずみ ϵ は負荷応力および温度が一定なとき内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ のみの関数として

$$\epsilon = g(\bar{\sigma}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表わすことができる。ところで温度を基準温度から低温側へ減少して再び基準温度へもどす時間 t' の間において材料はほとんどクリープ変形を起さずして温度増加直後において増加ひずみ $\Delta\epsilon$ を生ずることは(10)式から

$$\Delta\epsilon = g'(\bar{\sigma}) \cdot \Delta\bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots (11)$$

にて表わされるとき $\Delta\bar{\sigma}$ なる内部降伏応力の変化が起っていない限り、この内部降伏応力の減少量 $\Delta\bar{\sigma}$ は前述せる

$$\Delta\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 - \bar{\sigma} = \left(\frac{kT_1}{q} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{t'}{t_0} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

で表わされるはずである。ここで $\bar{\sigma}_0$ は $t'=0$ における内部降伏応力を、 $\bar{\sigma}$ は $t'=t'$ におけるそれを表わし、また t_0 と σ_0 との間には前述の(6)式の関係为满足せねばならない。

したがって増加ひずみ $\Delta\epsilon$ は(11)式および(5)式から次式で与えられる。

$$\Delta\epsilon = g'(\bar{\sigma}) \left(\frac{kT_1}{q} \right) \ln \left(1 + \frac{t'}{t_0} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

すなわち、(13)式から基準温度へもどした直後のクリープひずみの増分 $\Delta\epsilon$ は温度変動中の負荷時間 t' の対数的増加の程度に伴い増加し、また $g(\bar{\sigma})$ が $\bar{\sigma}$ の単調増加の放物線関数で表わされる性質をもつこと⁽¹⁰⁾から $g'(\bar{\sigma})$ はクリープひずみ ϵ_1 が小さくなるほど大きくなり、したがって $\Delta\epsilon$ が増加する傾向をもつ。これらの傾向は前節で述べた実験結果と定性的にいちおう一致する。なお、4.1、4.2 項の温度履歴の影響

に対する考察はたとえば J. H. Hollomon や J. D. Lubahn らによる核生成論的考察⁽³⁾からも行なわれている。

4.3 温度変動下のクリープにおける固体状態力学方程式の適用 前項までに述べた2段温度変動下のクリープ実験結果およびその考察から明らかなごとく温度変動下のクリープにおいては本質的には温度履歴の影響を考慮に入れなければならないことを知った。すなわち、2段階状温度変動下のクリープにおいて高温側温度から低温側温度(基準温度)および低温側温度から高温側温度(基準温度)に変動直後の各ひずみ量は固体状態力学方程式による一定温度下の静クリープ実験結果からの推定値と多少異にすることを知った。

しかし、これらの二つの過渡現象は階段状温度変動を繰返し与えるときは互に相殺される関係にあり、また一方、本問題を温度変動下のクリープを静クリープより類推するという工学的見地から見れば、上述のひずみの差異は実際問題として無視することができ、固体状態力学方程式による近似計算は有効なものと考えられる。なお、繰返し温度変動下のクリープの固体状態力学方程式による解析については別報⁽⁷⁾⁽¹¹⁾にゆずる。ただし、ここで取りあげているのは負荷応力一定の下で温度のみ変動する場合の問題で、既報⁽¹²⁾のごとく応力変動が温度変動に付随して起るような場合には応力履歴の影響も当然考慮に入れられるべきであり、また温度変動に伴って過酷な材質変化が起るような場合にはその点を考慮されるべきである。なお、温度変動下のクリープに伴う材質変化を考慮せる場合の問題については別報⁽¹³⁾にゆずる。

5. 結 論

一定引張応力負荷の下で温度のみを基準温度(クリープ試験をはじめた最初の温度)から高温側および低温側へ長方形波状の2段温度変動下のクリープ実験を低炭素鋼について行ない、基準温度へもどした直後の過渡現象について以下の傾向を認めた。すなわち、

(1) 温度減少直後においてクリープの停止期間(induction period)を認め、これは高温側保持時間が長くなるに従って大きくなる傾向にある。この induction period の存在およびその高温側保持時間の依存性については温度の減少による材料の内部降伏応力の増加量を回復によって減少せしめるに要する時間から決まるものと考えてその定性的解釈を与えた。

(2) クリープのほとんど休止状態にある低温側温度から温度を上昇せしめた直後においてはクリープ速度

あるいはクリープひずみの過渡的増加が認められる。
このクリープの過渡的増分は低温側温度の保持時間の
対数的増加の程度に従って増加し、また、温度変動を
与える際のひずみの小さいほど、換言すればクリープ
の比較的初期に変動を与えるほど増加し、さらに低温
側保持温度にはほとんど影響されないことを実験的に
確かめた。ひずみ増分については低温側保持時間中
において回復、すなわち材料の内部降伏応力の減少が助
長されるものと考え、上述の因子の定性的解釈を与え
た。

次にかかる2段階段状温度変動下のクリープを静ク
リープ試験結果から推定するという工学的見地に立つ
とき、上述の過渡現象によるひずみ量の差異はそのと
きのひずみの約5%以内のものであることから、温度
履歴を無視する固体状態力学方程式による近似計算が
十分有効なものであると考えられる。

最後に本研究を行なうに当り有益な助言をいただい
た京都大学 田中吉之助 助教授と本実験を行なうに当
り実験材料の便宜を受けた住友金属製鋼所に対して深
じんの意を表わすものである。

文 献

- (1) T. Nishihara, S. Taira, & M. Ohnami, *Proc. 1st Japan Congr. Test. Mat.*, (1958), 48; 田中, 大南, 材料試験, 6, 45 (昭 33), 8.
- (2) G.R. Brophy & D.E. Furman, *Trans. Amer. Soc. Metals*, 30 (1942), 1115.
- (3) J.G. Leschen, R.P. Carreker, & J.H. Hollomon, *Trans. AIME*, 180 (1949), 131; R.P. Carreker, J. G. Leschen, & J.D. Lubahn, 同, 139.
- (4) ASTM, STP. No. 165, "Symposium of Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperature" (1954).
- (5) J.E. Dorn, ASTM, STP. No. 165 (1954); "Creep and Fracture of Metals at High Temperature" (1955), 89, National Physical Laboratory.
- (6) A.H. Cottrell, *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, (1956), 208, Oxford.
- (7) 平, 大南, 杉岡, 本論文集, 380 ページ.
- (8) D. Kuhlmann, *Proc. Phys. Soc.*, A 64 (1951), 40.
- (9) A.H. Cottrell & V. Aytakin, *J. Inst. Metal*, 77 (1950), 389.
- (10) N.F. Mott, *Phil. Mag.*, 44 (1953), 756.
- (11) 平, 大南, 材料試験, 8, 74 (昭 34), 28; S. Taira & M. Ohnami, *Proc. 3rd Japan Congr. Test. Mat.*, (1960), 77.
- (12) S. Taira, K. Tanaka, & M. Ohnami, *Proc. 2nd Japan Congr. Test. Mat.*, (1959), 50.
- (13) 平, 大南, 本論文集, 387 ページ.

539.376 : 539.434 : 539.389.4

周期的階段状温度変動下のクリープ*

平 修二**, 大南正瑛***, 杉岡正一****

Creep under Step-wise Temperature Cycling

by Shuji TAIRA, Masateru OHNAMI, and Syoichi SUGIOKA

In the present paper, the analytical relation of creep under temperature cycling to static creep under steady temperature is presented and is examined by the creep tests under step-wise temperature cycling on low carbon steel, 13 chromium steel and 18-8 stainless steel. The following are the conclusions from the present study :

(1) The experimental creep curves of multiple cycle of step-wise temperature variation under fixed tensile stress are fairly close to the analytical ones based on the concept of "mechanical equation of state in solid" for the case of small value of τ/p , where τ/p denotes the ratio of τ , the time exposed to the reference temperature, to the period p of every cycle. The creep curves under such cyclic temperatures can be predicted from the results of test at constant temperature within an error of 5 per cent in term of strain.

(2) The creep strain under cyclic temperatures can be predicted easily from the static creep test data by introducing the equivalent steady temperature T_e as defined by Eqs. (9) and (10). The analytical results are in good agreement with the experimental ones.

* 昭和 34 年 3 月 18 日 関西支部第 204 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 35 年 10 月 12 日.

** 正員, 京都大学工学部.

*** 正員, 京都大学工学研究所(京都市左京区吉田本町).

**** 准員, 東洋アルミ会社.