

定荷重クリープ試験における 2.25Cr-1Mo鋼の状態方程式の構築

石 建中*・遠藤 孝雄*²

State-Equation of a 2.25Cr-1Mo Steel under Constant Load Creep Testing

Jianzhong SHI and Takao ENDO

Synopsis : Creep testing was conducted on the pre-crept specimens of a 2.25Cr-1Mo steel under constant load. The amount of pre-strain was between 4.4 and 12.0%, and the range of temperature and initial stress was 853 to 903 K and 78.4 to 127.4 MPa, respectively. The relation between creep rate, $\dot{\epsilon}$ and creep strain, ϵ was expressed as below over a wide range of creep strain :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(s\epsilon),$$

where s is the acceleration factor, $\dot{\epsilon}_0$ is the imaginary initial strain rate, and the stress and temperature dependence of $\dot{\epsilon}_0$ is given as :

$$\dot{\epsilon}_0 = A\sigma^n \exp(-Q_0/RT),$$

where Q_0 is the apparent activation energy for creep of the magnitude of $400 \pm 10 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, σ is the true stress, n is the stress exponent of the magnitude of 9.7 and A is the mechanically defined structure factor expressed as below :

$$A = A_0 \exp[(m-n)\epsilon_p],$$

where A_0 is the structure factor for virgin specimens and m is the constant. These experimental facts lead to the conclusion that pre-strain and creep strain do not alter the creep mechanism but cause the increase in the mechanically defined structure factor, and creep life, t_r is given by $t_r = 1/(s\dot{\epsilon}_0)$.

Key words : 2.25Cr-1Mo steel ; pre-strain ; creep curve ; creep equation ; creep life.

1. 緒言

純金属や単相合金を一定応力の下でクリープ変形すると、定常状態が観察され、その構成方程式は以下のように表される。

$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp[-Q_c/RT] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は定常クリープ速度、 A は定数、 σ は負荷応力、 n は応力指数、 Q_c はクリープの見掛けの活性化エネルギーで、一般には自己拡散の活性化エネルギーに近い値である。また、 R および T は通常用いられている意味である。式(1)における定数 A および n は材料定数と変形機構にのみ依存する値であるから、これらの値は変形の機構を知る手がかりになる。これに対し、実用耐熱鋼を定荷重下でクリープ変形したときには、定常クリープが観察されずに最小クリープが観察される。この理由は、多くの耐熱鋼が準安定相で強化されているので変形中に組織が変化すること¹⁾²⁾、変形にもなって試験片にかかる真応力が増加するためである。

最小クリープ速度は、Monkman-Grant 則³⁾によってク

リープ寿命と関係づけられる。それゆえ、最小クリープを記述する構成方程式が種々の耐熱鋼について調べられ、それが、式(1)と同様の形をしていることが明らかにされている。しかし、丸山ら⁴⁾も指摘しているように、最小クリープ速度に関する見掛けの活性化エネルギーは、自己拡散の活性化エネルギーよりも一般に高く、最小クリープ速度に関する構成方程式が耐熱鋼の変形律速機構を反映しているかどうか疑わしい。

本研究で取り扱う2.25Cr-1Mo鋼の未使用材については、戴ら⁵⁾が最小クリープ速度の応力および温度依存性を詳細に調べており、構成方程式は以下の式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_m = B\sigma^n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_m$ は最小クリープ速度、 B は応力および温度に依存しない定数、 n は応力指数で、その温度依存性は次式で表される。

$$n = aT - b \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 T は絶対温度、 a および b は定数で、それぞれの値は

平成6年3月17日受付 平成6年7月8日受理 (Received on Mar. 17, 1994; Accepted on July 8, 1994)

* 横浜国立大学大学院生 (Graduates Student, Yokohama National University)

* 2 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

$1.83 \times 10^{-2} \cdot K^{-1}$, および7.33である。

上述のように、2.25Cr-1Mo鋼の最小クリープ速度を記述する構成方程式は式(1)と著しく異なっている。この事実、耐熱鋼の定荷重クリープ試験においては式(1)の定数Aが試験温度とクリープ時間、恐らくはクリープ歪にも依存して変化していることを示唆している。

本研究の目的は、2.25Cr-1Mo鋼の定荷重クリープ試験挙動を記述する構成方程式を決定すること、構成方程式に含まれるパラメータを変形条件および試験片の初期条件に依存する項と材料に固有な項とに分離することである。この目的のために、定荷重下のクリープ速度 ($\dot{\epsilon}$) と歪 (ϵ) との関係性を詳細に調べた。その結果、 $\dot{\epsilon}$ の対数と ϵ との間に直線関係が成立すること、その勾配(s)が温度および応力に依存すること、 $\epsilon = 0$ に対応する仮想的初期歪速度($\dot{\epsilon}_0$)の温度および応力依存性が式(1)に類似していること、 $\dot{\epsilon}_0$ の構成方程式における応力指数は式(1)と同様に温度にも予変形の程度にも依存しないこと、式(1)のAに対応する項は予歪に依存することなどが明らかにされた。本報告においては、これらの結果とsおよび $\dot{\epsilon}_0$ を用いると、予変形材のクリープ曲線およびそのクリープ寿命が記述できることについても報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材は中間温度域(803-853K)で耐熱性に優れている2.25Cr-1Mo鋼で、試験片は市販の配管用鋼管から、その軸方向に沿って切り出し、切削加工によって直径6mm、長さ30mmの平行部分を有する全長80mm、両端部M8ネジ付きの丸棒状試験片とした。試験片の化学成分はTable 1に示した。

2.2 引張りクリープ試験

Fig. 1は予クリープ試験およびそれに続く再荷重クリープの様子を模式的に示したものである。本報告では、大気中、温度873K、応力117.6MPaにおいて予クリープを施した。予クリープ歪は4.4%、7.7%または12%である。予クリープ変形後は直ちに除荷して再負荷クリープ試験温度に切り替えた。設定した試験温度に到達する時間は約0.6ksで、その後1時間保持後に予め定めた応力(78.4~127.4MPa)を負荷した。再負荷クリープ試験温度は853~903Kである。予クリープおよび再負荷クリープの試験条件は図中に示した。なお、再負荷クリープ試験における試験応力は、予クリープする前の断面積に対応した応力、すなわち初期応力(σ_0)

Table 1. Chemical composition (in mass%) of a 2.25Cr-1Mo steel.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.10	0.27	0.43	0.014	0.008	2.07	0.90

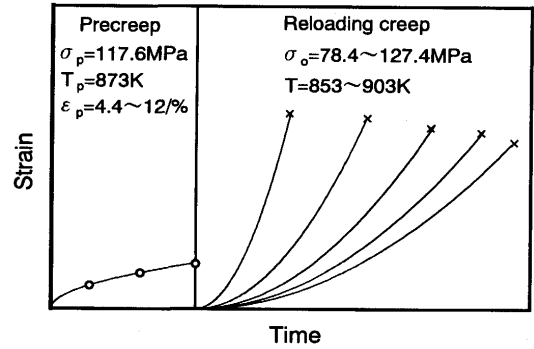


Fig. 1. Schematic representation of programmed creep testing.

を用いた。なお、本論文に示されている歪 (ϵ) はいずれも真歪である。

3. 結果

3.1 クリープ曲線

Fig. 2は予変形材の代表的なクリープ曲線の例で、縦軸にはクリープ歪 (ϵ)、横軸にはクリープ時間 (t) を予変形材のクリープ破断寿命 (t_r) で規格化した値が示してあり、試験片はいずれも4.4%の予クリープ材である。図において横軸の t/t_r はその時点での寿命消費率である。ここで同一歪の寿命消費率を比較すると、再負荷クリープ試験温度が同じであっても応力が高いほど寿命消費率が小さいことが分かる。また、図は省くが応力が同じであっても再負荷クリープ試験温度が高いほど寿命消費率が小さいことが確かめられた。換言すれば、破断時間の長いクリープ条件の場合ほど寿命消費率が大きくなることが分かった。同様のことは未使用材に関する浅川ら⁶⁾の結果においても認められる。

以上の結果を踏まえて、歪速度の対数をクリープ歪に対して図示した結果をFig. 3に示す。Fig. 3から明らかなよう

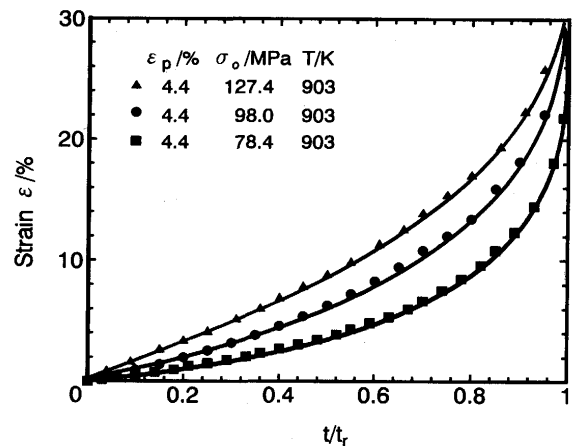


Fig. 2. Relationship between creep strain and life consumption rate, t/t_r at various stresses for the samples precrept to 4.4%.

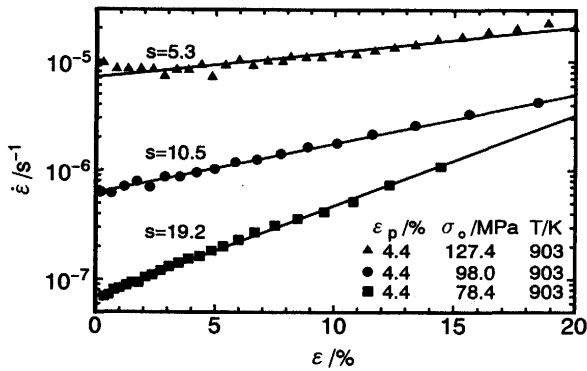


Fig. 3. Relationship between creep rate and creep strain at various stresses for the samples precrept to 4.4%.

に、比較的広い歪範囲にわたって歪速度($\dot{\epsilon}$)の対数と歪(ϵ)の間に直線関係が成立する。また、同図には最小自乗法で回帰した直線を実線で示し、直線の勾配(s)の値も示されている。Fig. 3はクリープ温度が固定されて応力だけが異なっている場合であるが、応力が固定されて再負荷クリープ試験温度だけが異なる場合についても同様な結果を得た。これらの結果を基にして以下の関係が得られる。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(s\epsilon) \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_0$ は直線と縦軸との交点での歪速度で、以下では仮想的初期歪速度と呼ぶ。また、 s はFig. 3における直線の勾配で、これ以後歪速度加速因子または単に加速因子と呼ぶ。加速因子の特質としては、 s が応力に強く依存し、温度にも弱い依存性を示すことで、全体的にみれば、破断時間の長いクリープ条件の場合ほど s の値は大きい。他に注目すべきことは、初期クリープ段階の様子である。本研究で扱う予変形材では、遷移クリープ段階の歪が小さいので仮想的初期歪速度の値は最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)に近い値であり、最小クリープが観察されない場合は $\dot{\epsilon}_0$ が実質的な最小クリープ速度を意味する。それゆえ、最小クリープ速度に関する以下の検討では仮想的初期歪速度を用いる。

3・2 仮想的初期歪速度の予歪、応力および温度の依存性

最小クリープ速度に影響を及ぼす因子として、未処理材の場合はクリープ温度および応力などが考えられるが、予変形材の場合には、これらの因子の他に、予クリープ歪の大きさも考慮しなければならない。そこで、本節では、予クリープ歪、クリープ応力そして温度の順にそれらの依存性を調べる。

Fig. 4は応力を固定し、異なるクリープ温度で得られた $\dot{\epsilon}_0$ と予クリープ歪(ϵ_p)との関係を示したものである。この図に示しているように、 $\ln(\dot{\epsilon}_0)$ と ϵ_p との間に比例関係が成り立ち、比例係数 m が再負荷温度に関係なくほぼ一定($m=10.0-10.8$)であることが分かる。なお、温度を固定し、異なる応力でも同様な関係が得られ、 m 値は9.5から10.0の値であった。これらのことから、式(5)が成立する。ここ

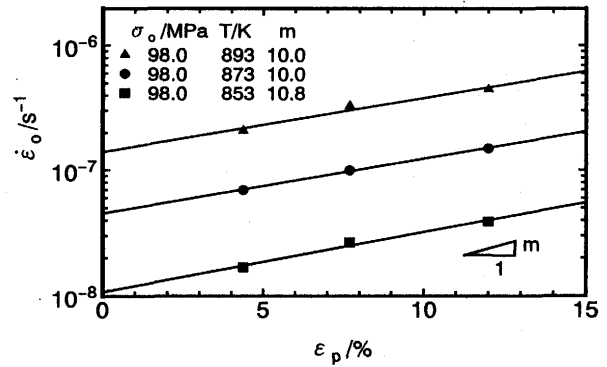


Fig. 4. Relationship between the imaginary initial creep rate, $\dot{\epsilon}_0$ and precreep strain for different temperatures.

に m は再負荷温度にも、再負荷応力にも依存しない定数で、その値は 10.1 ± 0.4 である(以下において誤差範囲は標準誤差を示す)。また、 m 値は、予変形の条件が異なると異なるものと考えられ、このことについては4・2節で言及する。

$$\dot{\epsilon}_0 \propto \exp(m\epsilon_p) \quad (5)$$

Fig. 5は、再負荷試験温度を固定して $\dot{\epsilon}_0$ と再負荷応力 σ_0 との関係を両対数で示したもので、直線の勾配(n)の値は図中にも示してある。また、図は省くが、 ϵ_p を固定して $\dot{\epsilon}_0$ の応力依存性に及ぼす試験温度の影響を調べたところ、いずれの場合にも同様な直線関係が得られた。従って、 $\dot{\epsilon}_0$ の初期応力依存性は以下のように表される。

$$\dot{\epsilon}_0 \propto \sigma_0^n \quad (6)$$

ここにおいて、仮想的初期歪速度の応力指数(n)は、予クリープ歪(ϵ_p)の大きさにも、クリープ温度にも依存せず、ほぼ 9.7 ± 0.2 の一定値である。Fig. 6は $\dot{\epsilon}_0$ の温度依存性を示したものである。図が示すように予変形の程度に関係なく一定の勾配を持つ直線群が得られ、見掛けの活性化エネルギーの値は図中に示してある。また、図は省くが、予変形歪を4.4%に固定し、初期応力によって $\dot{\epsilon}_0$ の温度依存性が変化するか否かを調べたところ、Fig. 6と同様に見掛けの活性

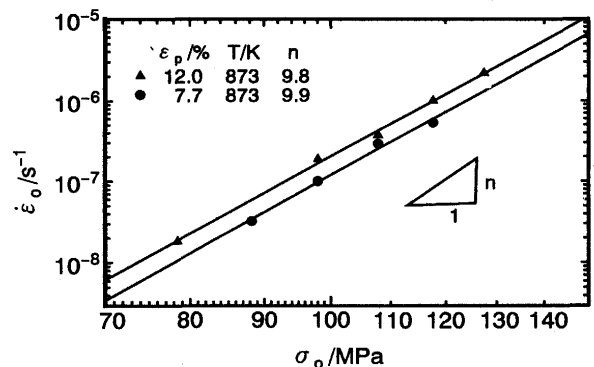


Fig. 5. Double logarithmic plot of $\dot{\epsilon}_0$ versus initial stress, σ_0 for different prestrains.

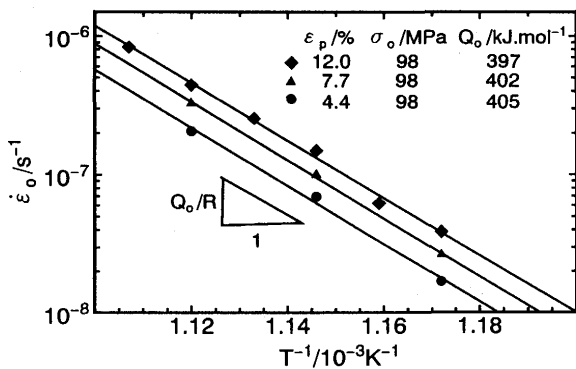


Fig. 6. Arrhenius plot of $\dot{\epsilon}_0$ for different prestrains.

化エネルギーに応力の依存性は認められなかった。この事実は、未使用材の最小クリープ速度の構成方程式に関する戴ら⁵⁾の結果と著しく様相を異にしている。即ち、戴らの試験結果では、見掛けの活性化エネルギー (Q_m) には強い応力依存性が観察されるからである。以上の結果から、仮想的初期歪速度の温度依存性は次式のように表現できる。

$$\dot{\epsilon}_0 \propto \exp(-Q_0/RT) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 Q_0 は仮想的初期歪速度に関する見掛けの活性化エネルギーで、 Q_0 の値は応力および予クリープ歪に関係なく、 $400 \pm 10 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ である。

式(5)~(7)を組み合わせることによって、仮想的初期歪速度の状態方程式は以下のように記述できる。

$$\dot{\epsilon}_0 = A_0 \exp(m\epsilon_p) \sigma_0^n \exp(-Q_0/RT) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 A_0 の値は予歪、試験温度および応力に依存しない定数で σ_0 の単位をMPaとしたとき、 A_0 は $1.55 \times 10^{-3} / \text{s}$ である。Fig. 7は式(8)の妥当性を検討するために、縦軸に $\dot{\epsilon}_0 \exp(-m\epsilon_p) \exp(Q_0/RT)$ 、横軸に σ_0 をとって図示したものであるが、全ての測定点が一本の直線上に集まり、仮想的初期歪速度を記述する状態方程式が存在することが分かる。

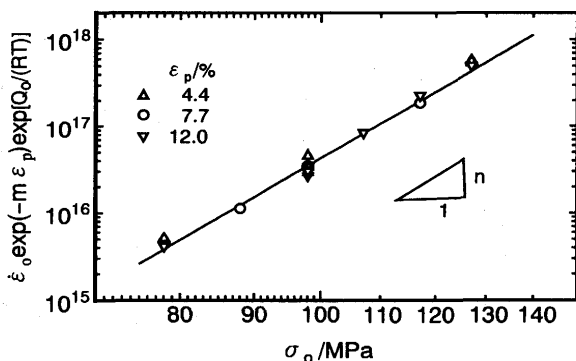


Fig. 7. Temperature and prestrain compensated $\dot{\epsilon}_0$ versus initial stress.

4. 考察

4.1 仮想的初期歪速度の定式化

未使用材の定荷重クリープ試験では最小クリープ速度が観測され、その値は式(2)および(3)で表される。これに対し、単相材料の定応力クリープ試験では定常状態が現れ、定常クリープ速度は式(1)のように表される。このように、実用耐熱鋼の最小クリープ速度を記述する構成方程式と単相材料の定常クリープに関する構成方程式との間には際立った相違がある。この理由は、実用耐熱鋼の場合はクリープ変形中に組織が変化するためと考えられる。換言すれば、実用耐熱鋼の場合には式(1)におけるAが温度および負荷応力などに依存してクリープ変形中に変化するためであろう。加えて、定荷重クリープ試験では変形歪の増加にともなって真応力が増加し、その結果として歪速度が増加するので式(1)のAは歪にも依存する。それゆえ、ここでは式(1)のA(以下では機械的組織因子と呼ぶ)の変化について検討する。

本研究においては、再負荷クリープ試験時の応力(σ_0)が予変形前の初期断面積を基準にして算出されている。従って、予クリープ歪(ϵ_p)が大きいほど真応力は見掛けの応力(σ_0)よりも高くなる。今、クリープ変形中の体積が一定であると仮定すると、再負荷クリープを開始するときの真応力 σ と初期応力 σ_0 (予クリープ前の断面積に基づく見掛けの応力)の間には $\sigma = \sigma_0 \exp(\epsilon_p)$ という関係が成り立つ。これを式(8)に代入すると次式が得られる。

$$\dot{\epsilon}_0 = A \sigma^n \exp(-Q_0/RT) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$A = A_0 \exp[(m-n)\epsilon_p] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 A_0 およびAは、それぞれ予クリープ歪を受ける前および予クリープを受けた後の機械的組織因子である。式(9)において注目すべきことは、式(9)が単相材料に関する定常クリープの構成方程式、即ち、式(1)と良く似ていることである。例えば、 α 鉄の場合は、式(1)のnが約7であるが、式(9)におけるn値は約9でいずれの場合も温度には依存しない。また、本鋼における自己拡散の活性化エネルギーは $350 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ と報告されているが⁷⁾、 Q_0 の値はこの値に比較的近い値である。これらのことは、式(9)が単相材の構成方程式に対応し、これが変形機構を反映した状態方程式であることを示唆している。また、本研究の場合、 $(m-n) > 0$ であるから、式(9)における機械的組織因子Aは ϵ_p の増加につれて徐々に増加すること、予変形によってnおよび Q_0 が変化しないことから、予変形によってクリープの機構そのものは変化せず、機械的組織因子のみが増加すること、換言すれば予変形で組織が劣化することが分かる。

4.2 任意の歪におけるクリープ速度の定式化

再負荷クリープ試験後の任意の歪(ϵ)における歪速度($\dot{\epsilon}$)は、加速因子(s)と仮想的初期歪速度($\dot{\epsilon}_0$)を用いて式(4)

で表すことができる。また、仮想的初期歪速度は式(9)で表されるので、これらの式を組み合わせることによって次式を得ることができる。

$$\dot{\epsilon} = A \exp(s\epsilon) \sigma^n \exp(-Q_0/RT) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 σ は再負荷クリープ開始時の真応力であるが、定荷重クリープ試験ではこの値が歪に依存する。それゆえ、再負荷後の任意の歪が ϵ の時の真応力を σ^* とすると、 $\sigma^* = \sigma \exp(\epsilon)$ という関係が成り立つので、これを式(11)に代入すると次式が得られる。

$$\dot{\epsilon} = A^* \sigma^{*n} \exp(-Q_0/RT) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$A^* = A \exp[(s-n)\epsilon] \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 A^* は再負荷クリープ変形中の機械的組織因子である。ここにおいて、式(10)と式(13)との類似点を強調する必要があるであろう。その第1の点は、式(10)と式(13)が良く似た形をしていることである。式(10)は予クリープによる機械的組織因子の変化を記述したものであり、式(13)は再負荷クリープ試験中に生じる歪の増加にともなう機械的組織因子の変化を示したものであるから、式(10)における m 値が式(13)における s と物理的には同じものと考えられる。第2は、 m 値と s 値の比較である。本研究では予クリープ試験が温度873K、応力117.6MPaの下で行われ、 m 値として 10.1 ± 0.4 を得たが、戴ら⁹⁾によれば同じ条件の下で得られた未使用材の s 値は9.2で、両者は比較的近い値である。また、以前に報告されている戴らの結果を調べると、予変形条件の温度および応力がそれぞれ873Kおよび127.4MPaの場合、 m 値は7.75で、 s 値は7.0であるから s 値と m 値はこの場合においても測定誤差の範囲内で一致していると考えてよい。以上のことを要約すると、(1)予クリープ歪と再負荷クリープにおける初期歪速度との関係を記述する指数、 m 値は予クリープ条件には依存するが、再負荷クリープ試験条件には依存しないこと、(2)予クリープ試験材で得られた m 値は、予クリープ試験と同じクリープ条件で得られた未使用材の s 値、即ち、未使用材のクリープ速度と歪との関係を記述する指数 s 値と測定誤差の範囲で一致すること、(3)再負荷クリープにおける歪速度に及ぼす歪の影響が、予クリープ材に再負荷クリープ試験を施したときの初期クリープ速度に及ぼす予クリープ歪の影響が同一の歪依存性を示すことが分かる。以上のことから、物理的には s と m は同じものと考えられる。また、広い歪範囲にわたって、歪速度が式(12)で表現できることは、クリープ変形が進行しても変形機構に変化はなく、単に機械的組織因子が変化するに過ぎないこと、クリープ前に予変形を加えても変形機構に変化はなく、予変形歪の大きさと加速因子の変化を通して機械的組織因子が変化するに過ぎないことが分かる。

機械的組織因子に及ぼす歪の影響について、さらにつけ加えるならば以下のようなものである。即ち、式(13)において、

$(s-n)$ が正の場合は、機械的組織因子が歪とともに増加するが、これは定歪速度引張試験における加工軟化に相当することが式(12)から分かる。これとは逆に、 $(s-n)$ が負の場合は再負荷クリープ試験中の機械的組織因子は歪とともに減少するが、これは定歪速度引張試験における加工硬化に相当する。このことは、Fig. 3からも窺い知ることができるはずである。即ち、Fig. 3の予クリープ条件は温度が873K、応力が117.6MPaであるが、予クリープ過程で形成された組織がその後の再負荷過程で加工硬化するか加工軟化するかを考えてみればよい。Fig. 3では再負荷クリープの温度がいずれも903Kに固定され、再負荷クリープ時の初期応力は127.4、98.0および78.4の3種類であるが、予クリープ温度と再負荷クリープ温度の相違を無視するならば、後2者は明らかに予クリープ条件よりも再負荷クリープ条件の方が緩やかで、前1者は予クリープ条件よりも再負荷クリープ試験条件の方が厳しい。このことを知って予クリープ条件の m 値(~ 10.0)と再負荷クリープ時の s 値とを比較すると再負荷クリープの試験条件が厳しい場合には、 s 値が m 値よりも小さいのに対し、再負荷クリープ試験条件が予クリープ試験条件よりも緩やかな場合は、 s 値が m 値よりも大きくなっている。このことは、 $s < m$ の場合には、予クリープ試験中に作られた組織が再負荷クリープ試験中により強固な、換言すれば、転位運動がより困難な組織に変化しつつあること、 $s > m$ の場合には予クリープ中に形成された組織が再負荷クリープ過程で転位運動が容易な組織へと変化していること、 $s = m$ の場合には予クリープ試験中に形成された組織が再負荷クリープ試験中に変化しないことを示していることが推測される。

なお、式(10)を式(13)に代入すれば、再負荷中の機械的組織因子は次のようにまとめられる。

$$A^* = A_0 \exp[(m-n)\epsilon_p + (s-n)\epsilon] \quad \dots\dots\dots (14)$$

以上、予クリープ材の機械的組織因子 A は予歪(ϵ_p)のみではなく、加速因子 s にも依存し、 s の値は予クリープ応力および温度に依存する。このことは余寿命を評価するとき加速因子 s を考慮しなければならないことを示している。Fig. 3が示しているように広い歪域にわたって、式(4)が成立するので、その式を書き直して積分すると式(15)が得られる。

$$\int \exp(-s\epsilon) d\epsilon = \int \dot{\epsilon}_0 dt \\ \epsilon = \ln [1 / (1 - s\dot{\epsilon}_0 t)] \quad \dots\dots\dots (15)$$

この式を用いると s と $\dot{\epsilon}_0$ が既知の場合、クリープ曲線を描くことができる。Fig. 8の実線は式(15)を用いて描いたクリープ曲線で、 s の値はFig. 3から得られた s の値を用いた。図中には測定点も同時に示してあるが、式(15)によって首尾よくクリープ曲線を表記できることが分かる。ここで、指摘すべきことは、 $\dot{\epsilon}_0$ が予クリープ歪に依存するので、式(15)

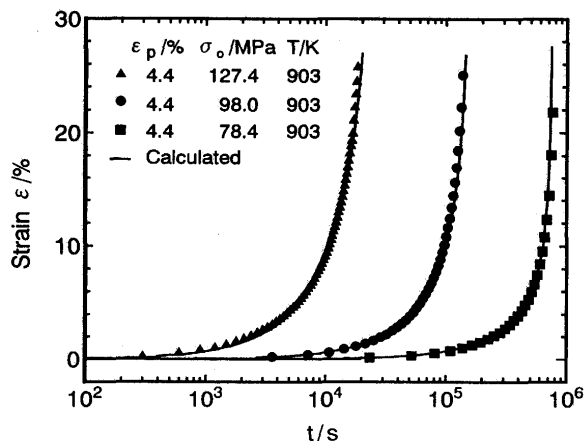


Fig. 8. Comparison of calculated creep curve with experimental one.

は予クリープ歪をも考慮した式になっていることである。

また、式(15)における ϵ を破断歪 ϵ_r に、 t をクリープ寿命 t_r に置き換えるとクリープ寿命と破断歪の関係が得られる。本研究の場合、 $\exp(-s\epsilon_r)$ の値はおよそ $9 \times 10^{-2} \sim 9 \times 10^{-6}$ 程度であるから1よりもかなり小さい。従って、予変形材の余寿命は式(17)で与えられる。

$$t_r = [1 - \exp(-s\epsilon_r)] / (s\dot{\epsilon}_0) \quad (16)$$

$$t_r = 1 / (s\dot{\epsilon}_0) \quad (17)$$

Fig. 9は破断時間の実験値と式(17)による計算値との比較で、両者は良く一致することが分かる。これまでに示したように、 $\dot{\epsilon}_0$ の値の応力依存性は既に示されたので、 s の値の応力依存性が明らかにされると、加速クリープ領域のクリープ特性から低温・低応力域のクリープ特性を推定することができると考えられる。

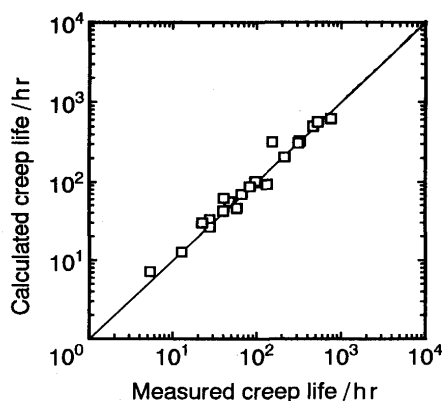


Fig. 9. Comparison of calculated creep life with measured one.

5. 結論

火力発電設備の耐熱材として良く使用される2.25Cr-1Mo鋼の未使用材を用いて、温度873K、応力117.6MPaの予クリープ条件で、4.4%、7.7%および12%の3通りの予クリープ歪を与えた後、温度が853K-903K、応力が78MPa-127MPaの範囲においてクリープ破断試験を行い、幾つかのパラメータでクリープ特性を表記することを試みた。得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 予クリープを施すことによって、遷移クリープが殆ど観察されないほど短くなり、加速因子を s 、クリープ歪を ϵ 、仮想的初期歪速度を $\dot{\epsilon}_0$ とすると、殆ど全歪範囲にわたって、クリープ速度($\dot{\epsilon}$)は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(s\epsilon)$$

(2) $\dot{\epsilon}_0$ は次式で表される。

$$\dot{\epsilon}_0 = A_0 \exp(m\epsilon_p) \sigma_0^n \exp(-Q_0/RT)$$

ここに、 σ_0 (MPa)および T (K)はそれぞれ再負荷応力および温度、 A_0 および m は定数でそれぞれ 1.55×10^{-3} および10.1であり、応力指数 n および Q_0 は予歪 ϵ_p にも温度 T にも依存せず、それぞれ9.7および $400 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ である。

(3) 予クリープ歪(ϵ_p)およびクリープ歪(ϵ)の増加にともなう機械的組織因子の変化は次式で与えられ、予歪やクリープ歪によって変形機構が変化することはなく、これらの変化は機械的組織因子の変化をもたらしことをこの式は意味している。

$$A^* = A_0 \exp[(m-n)\epsilon_p + (s-n)\epsilon]$$

(4) 予変形材の余寿命は次式で与えられる。

$$t_r = 1 / (s\dot{\epsilon}_0)$$

文 献

- 1) Kanemaru, M. Shimizu, T. Ohba and K. Yagi : Int. J. Pres. Ves. & Piping, 48 (1991), p.167
- 2) 西村宣彦, 増山不二光, 馬田政寛, 今里敏幸 : 三菱重工技報, 29 (1992), p.1
- 3) F. C. Monkman and N. S. Grant : Proc. JASTM, 56 (1956), p.593
- 4) 丸山公一, 及川 洪 : 日本金属学会誌, 50 (1986), p.701
- 5) 戴 国政, 増山不二光, 遠藤孝雄 : 鉄と鋼, 79 (1993), p.1115
- 6) 浅川幸一, 大友 暁, 雑賀喜規 : 鉄と鋼, 65 (1979), p.869
- 7) B. Million and J. Kucera : Kovove mater., 22 (1984), p.372