

改良 9Cr-1Mo 鋼の第3次クリープを記述する構成方程式

朴 奎侠*・増山 不二光*²・遠藤 孝雄*³

Constitutive Equation Describing Tertiary Creep of a Modified 9Cr-1Mo Steel

Kyu Seop PARK, Fujimitsu MASUYAMA and Takao ENDO

Synopsis : Creep tests has been conducted of a Mod.9Cr-1Mo steel to describe the creep behavior on a basis of the omega method. The test conditions were in the range from 107.9 to 196.1 MPa and from 873 to 923 K. The stress and temperature dependence of the Ω value was expressed in the form:

$$\Omega = A_{\Omega} \cdot \sigma_0^{-n_{\Omega}} \cdot \exp(Q_{\Omega}/RT),$$

where A_{Ω} is the constant independent of temperature and stress, σ_0 is the initial stress, n_{Ω} is the stress exponent for Ω , Q_{Ω} is the parameter describing the temperature dependence of Ω , respectively. The magnitudes of A_{Ω} , n_{Ω} , Q_{Ω} are 0.15/s, 1.46 and 97.8 kJ/mol, respectively.

The studies on the effect of prestrain showed that the magnitude of Ω was substantially independent of the amount of prestrain. The measured creep life was compared with the predicted one based on the omega method. It was revealed that the calculated creep life was longer than the measured one by a factor of 1.5 to 3.1 with stress and temperature. This discrepancy was ascribed to the fact that the fraction of primary creep was relatively large in the whole creep life of a Mod.9Cr-1Mo steel. However, the calculated creep life coincides with the measured one when the specimens were prestrained up to 4%. This was due to the decrease of the fraction of primary creep with increasing strain.

Key words : Ω method; pre-creep; creep life; strain rate acceleration factor; tertiary creep; imaginary initial creep rate; stress exponent.

1. 緒言

一般に、一定応力の下で単相材料のクリープ試験を行うと定常クリープが観察され、定常クリープの期間がクリープ寿命の大部分を占める。それゆえ、試験条件によって破断歪が変化しなければ、定常クリープの構成方程式とモンクマン-グラント則からクリープ寿命を推定できる。これに対し、準安定相で強化された多くの実用鋼では最小クリープが現れ、定常クリープが一般には現れない。最小クリープは組織の弱化と強化の競合の結果生じるので、その物理的な意味は定常クリープ速度ほど明確ではない¹⁻³⁾。それゆえ、最小クリープ速度よりも物理的な意味が明白な値を記録として残すことが望ましいと考えられる^{2,3)}。また、高温構造物の設計に用いるクリープデータは、定荷重の下で得られたクリープ成績を基にしているの、定荷重クリープの特性を記述する手法を開発してクリープ試験の結果を蓄積することは工学上極めて重要である。

定常クリープの時期が極めて短いか或いは存在しない実用鋼のクリープ特性を記述する最も一般的な方法は、最小クリープ速度、クリープ寿命および破断歪を記録として保存する方法である。これに対して、クリープ曲線全体が持

つ情報を記録として残す方法も提案されている。一つは、 θ 法³⁻⁵⁾であり、他の一つは Ω 法^{1,2,6-15)}である。前者は、クリープ曲線を3個または4個のパラメータを用いて表し、それらのパラメータの温度および応力依存性を通してクリープ寿命を予測する方法である。後者の Ω 法は第3次クリープのみに注目してクリープ挙動を解析する手法であるから第1次クリープを記述することができないが、第3次クリープを記述する2つのパラメータの物理的な意味が明白であると云う利点がある[†]。

著者らはマルテンサイト単相組織を持つMod.9Cr-1Mo鋼の加速条件におけるクリープ挙動を詳細に解析し、最小クリープ速度と仮想的初期歪速度の応力および温度依存性を前報で報告した¹⁴⁾。しかし、第3次クリープ挙動を Ω 法で記述するには歪速度加速因子、すなわち Ω 値に及ぼす応力、温度および予歪の影響を知る必要があり、本報ではその結果を報告する。

2. 解析方法

Fig. 1は定荷重クリープにおける歪速度の対数と真歪との関係を模式的に示したものである。Fig. 1の模式図にお

平成10年1月30日受付 平成10年4月24日受理 (Received on Jan. 30, 1998; Accepted on Apr. 24, 1998)

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

*² 三菱重工業 (株) 長崎研究所 (Nagasaki Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*³ 横浜国立大工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240-8501)

† 文献(6)では記号Bが、文献(1)および文献(10)-(15)では記号Sが Ω の代わりに用いられているが、物理的な意味は Ω と同じである。

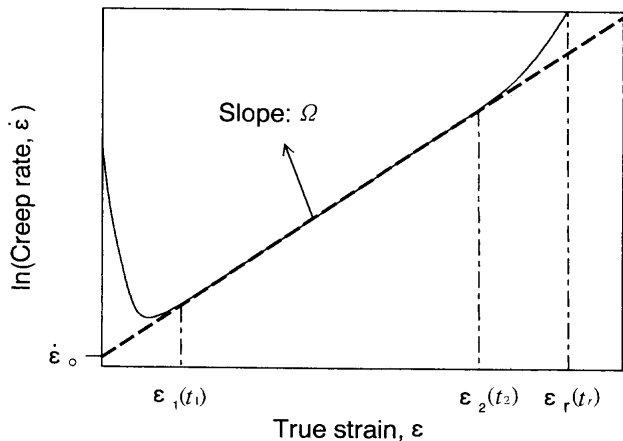


Fig. 1. Schematic illustration of logarithm of strain rate plotted against true strain.

いて ϵ_1 は破線で示した直線関係が成立する最小の歪、 t_1 は歪が ϵ_1 に到達するまでに要する時間、 ϵ_r は破断歪、 t_r はクリープ破断時間である。図中の破線は以下に示す式(1)で表される^{1,6-15)}。

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}_0 + \Omega \epsilon \dots \dots \dots (1)$$

式(1)において、 $\dot{\epsilon}$ は刻々の歪速度、 $\dot{\epsilon}_0$ は式(1)がクリープの全域で成立すると仮定したときに期待される初期歪速度で、以下では仮想的初期歪速度と呼ぶ。 Ω は破線の勾配で、単位歪の増加に対する歪速度の増加を表しているの、以下では歪速度加速因子と呼ぶ。

一般に、第3次クリープに至る時間が全クリープ寿命に比して短い場合には、クリープ寿命 t_r は式(2)で与えられる^{1,2,8-15)}。

$$t_r = 1/\Omega \dot{\epsilon}_0 \dots \dots \dots (2)$$

式(1)を時間で積分して式(2)の関係を用いると、任意の時間 t におけるクリープ歪を式(3)で表すことができる^{13,15)}。

$$\epsilon = (1/\Omega) \cdot \ln[1/(1-t/t_r)] \dots \dots \dots (3)$$

クリープの全域で式(1)が成立する場合には、クリープ曲線を式(3)で表すことができる。しかし、式(1)が限られた領域でのみ成立する場合は、第3次クリープの開始歪と開始時間を基準にしてクリープ曲線を表現する必要がある。この場合、クリープ曲線は式(4)のように表される。

$$\epsilon - \epsilon_1 = (1/\Omega) \cdot \ln[1/\{1 - \Omega \dot{\epsilon}_1 (t - t^*)\}] \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 ϵ_1 は歪速度の対数と真歪との関係が成立する最小の歪、 $\dot{\epsilon}_1$ は ϵ_1 における歪速度、 t^* は ϵ_1 までの時間である。前報で示したように本鋼のクリープ破断歪は凡そ25%であるが¹⁴⁾、 Ω 値および仮想的初期歪速度を決定する際には、歪が約3%から10%の部分における歪と時間との関係を用いた。その理由は、破断時間に近づくと式(1)の関係が成

立しないこと、式(1)が成立しなくなってから破断に至るまでの時間は全クリープ寿命に比べて短いからである。最小の歪を凡そ3%にした理由は4.4節で示すように凡そ3%程度の予歪を与えるとクリープの全域で式(1)が成立するようになるからである。

3. 供試材および実験方法

供試材はマルテンサイト単相組織を持つ Mod.9Cr-1Mo 鋼で、ASTM, A213に規定された焼なまし (1313K 以上)、焼戻し (1003K 以上) の状態である。供試材の化学組成は前報⁷⁾に示した。クリープ試験の負荷方式は一定荷重方式である。荷重の負荷に先立ち、試験片を試験温度で86.4ks 保持し、試験片と試験機系の熱的な安定を確認した後に応力を負荷した。試験応力および温度は108~196MPa および873~923Kで、刻々の歪と時間との関係はデジタル記録計で連続的に記録した。

クリープ挙動に及ぼす予歪の影響を調べる際には、温度898K、応力166.7MPa 条件のもとで所定の歪に到達するまでクリープ試験で予歪を与え、その後予め定めたクリープ試験条件に変更してクリープ試験を行った。予歪材に式(1)を適用する場合には、予歪を与えた後の歪と時間の関係を用いた。なお、予歪によって断面積が減少するが、本研究で記載されている初期応力は試験片の元の断面積を基準にした初期応力である。

4. 結果

4.1 歪速度の対数と真歪との関係

Mod.9Cr-1Mo 鋼に定荷重クリープ試験を施し、刻々の歪速度の対数と真歪との関係を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。Fig. 2 は温度を固定して応力を変化させた場合、Fig. 3 は応

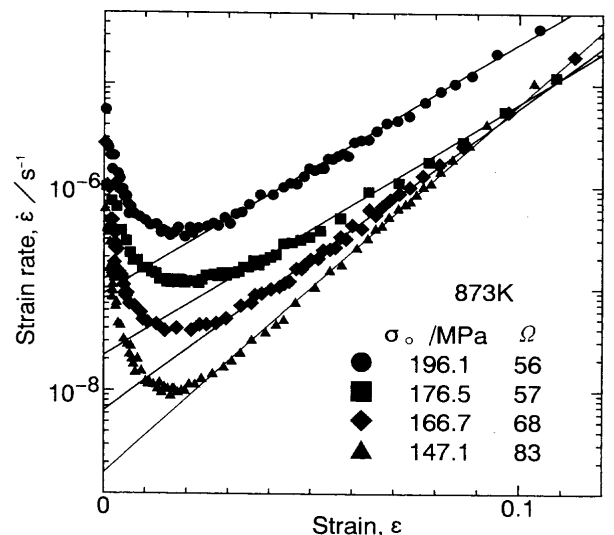


Fig. 2. Relationship between creep rate and creep strain at various stresses.

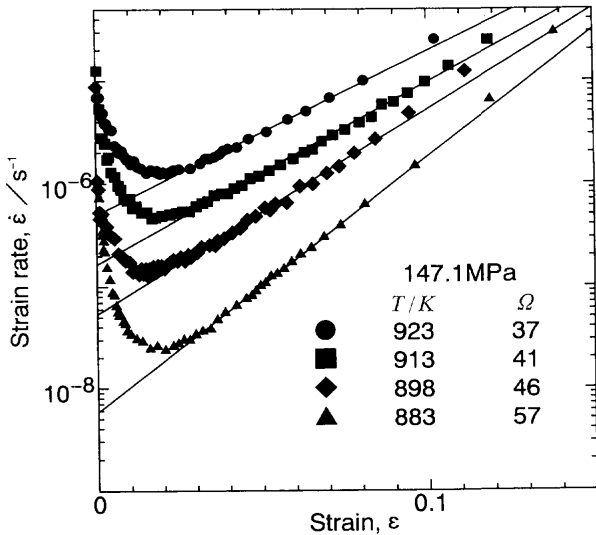


Fig. 3. Relationship between creep rate and creep strain at various temperatures.

力を固定して温度を変化させた場合の例である。いずれの場合においても、第3次クリープ域の比較的広い歪領域にわたって式(1)の直線関係が成立している。図中に示したΩの値は直線の勾配で、本実験の条件では凡そ37から83程度の値である。これらの値を比較すると、温度が一定ならば応力が高いほど、また、応力が一定ならば温度が高いほどΩの値は小さくなるのがわかる。換言すれば、応力が小さくなればなるほど、第3次クリープ域における歪速度の増加率が大きくなるので、同じ歪で比較すると低応力の歪速度がより高い応力の歪速度よりも大きくなる場合が生じ、Fig. 2において見られるように直線群が高歪域で交差する場合が生じる。

4.2 Ωの応力および温度依存性

Fig. 4はΩ値の初期応力依存性を両対数グラフ上に図示したものである。各温度における直線の勾配、すなわちn_Ωの値は図中に示してある。図中の値が示すように、n_Ωの値は温度にほとんど依存せず、1.46である。これらの結果に基づき、Ω値の応力依存性は次式で表される。

$$\Omega \propto \sigma_0^{-n_{\Omega}} \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 4から明らかなように、一定応力の下で比較するとΩ値は温度が高くなるにつれて減少する。Fig. 5はΩ値を温度の逆数に対して図示したものである。図が示すように、両者の関係は直線で近似することができ、直線の勾配Q_Ωは初期応力に依存しない。Fig. 5の結果から、Ωの温度依存性は式(6)のように表現できる。

$$\Omega \propto \exp(Q_{\Omega}/RT) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、Q_ΩはΩに関する温度依存性パラメータで、101±1 kJ/molである。

4.3 歪速度加速因子Ωの構成方程式

前節で示したように、歪速度加速因子の応力および温度

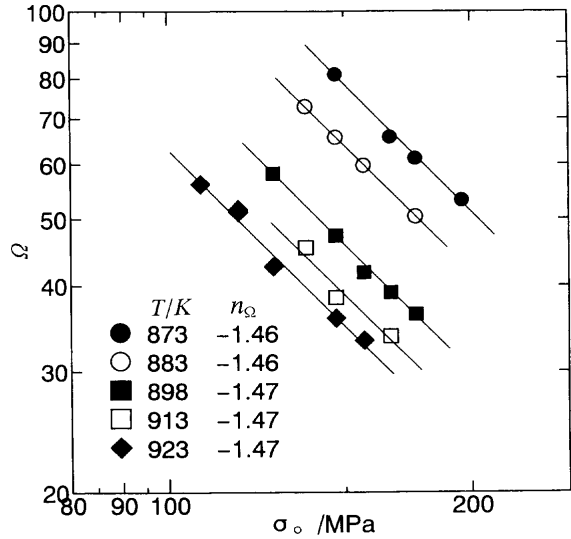


Fig. 4. Double logarithmic plot of Ω versus initial stress, σ₀ for different temperatures.

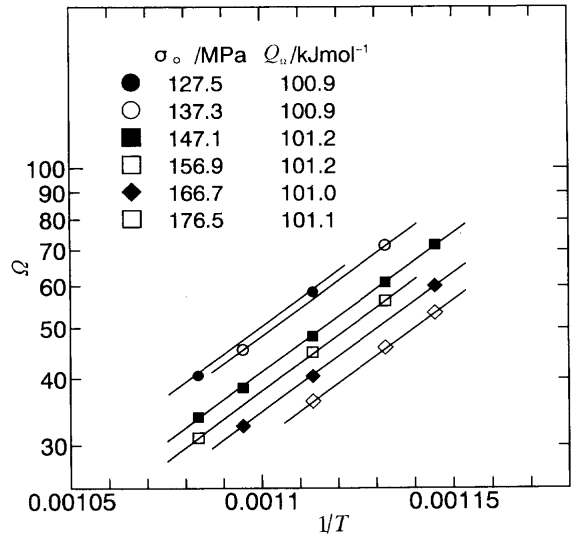


Fig. 5. Semi-logarithmic plot of Ω versus 1/T at different stresses.

依存性は式(5)および式(6)で表記できるから、両式から歪速度加速因子、Ωは次式のように表される。

$$\Omega = A_{\Omega} \cdot \sigma_0^{-n_{\Omega}} \cdot \exp(Q_{\Omega}/RT) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、A_Ωは温度および応力に依存しない定数である。Fig. 6は縦軸にΩ・σ₀^{n_Ω}、横軸に温度の逆数をとって半対数グラフに図示したもので、n_Ωの値としては1.46を用いた。ばらつきは比較的大きいが、Fig. 6の直線の勾配から決定したQ_Ω値は97.8 kJ/mol、A_Ω値は0.15/sである。Fig. 7は式(7)から計算したΩ値と実測値とを比較したものである。ばらつきは大きい、計算値は対角線の近傍に集まっており、Ω値の温度および応力依存性が式(7)で近似できることがわかる。

4.4 第3次クリープ挙動に及ぼす予歪の影響

Fig. 8は予歪がゼロ、2%および4%の場合の歪速度の対

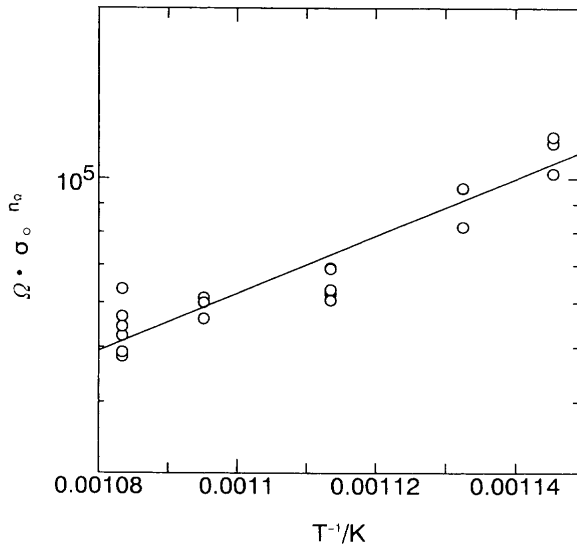


Fig. 6. Effect of temperature on the magnitude of stress-compensated Ω value.

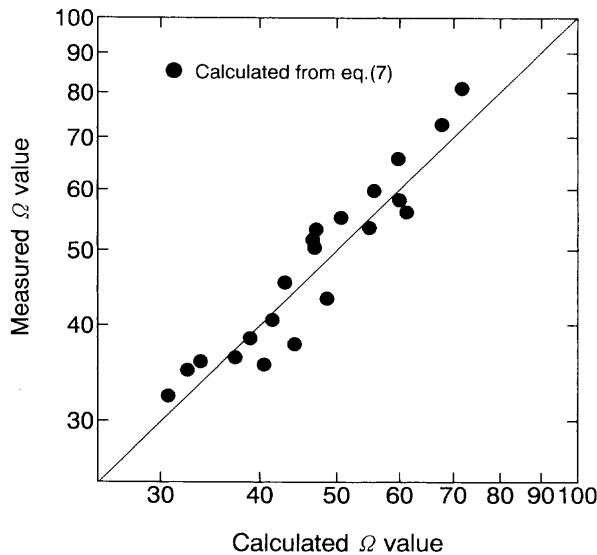


Fig. 7. Comparison of calculated Ω with experimental one.

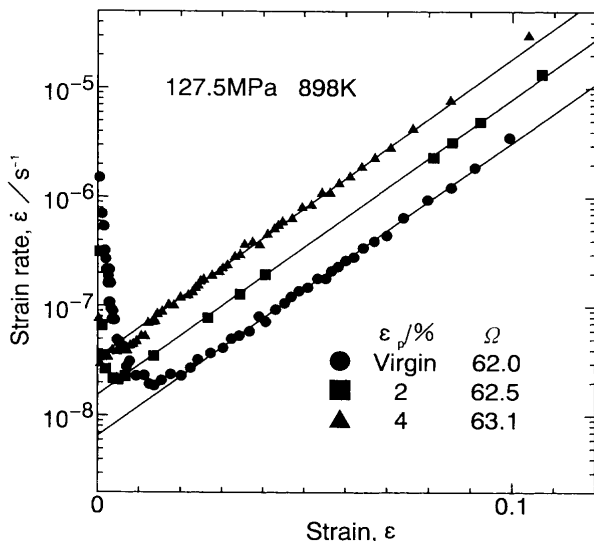


Fig. 8. Effect of prestrain on the relationship between logarithm of strain rate and creep strain.

数と真歪との関係で、応力が127.5 MPa、温度898Kの場合である。Fig. 8から明らかなように、予歪を与えると最小クリープに対応する歪が減少し、式(1)が成立する範囲が広がることわかる。 Ω 値について見ると、予歪を加えると Ω 値が増加する傾向が認められるが、ほぼ一定と見なして良い。

5. 考察

5.1 式(2)の適用性

Ω 法の利点の一つは、簡単な関係式、すなわち式(2)でクリープ寿命が表現できることである。クリープ寿命を表現する経験則としては、モンクマン-グラント則¹⁰⁾が良く知られており、式(8)で表される。

$$t_r = K_{MG} / \dot{\epsilon}_m^{\gamma} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 K_{MG} および γ は温度および応力に依存しない材料定数、 $\dot{\epsilon}_m$ は最小クリープ速度である。前報で示したように、本鋼の K_{MG} および γ はそれぞれ0.884および0.216である。モンクマン-グラント則の有用性は良く知られているが、 K_{MG} および γ の物理的な意味は明らかではない。これに対し、式(2)に現れる2つの値、すなわち仮想的初期歪速度 $\dot{\epsilon}_0$ と Ω 値の物理的意味は式(1)から明らかである。この点において式(1)はモンクマン-グラント則よりも優位性を持っているが、式(1)は第3次クリープしか表現できないので、第1次クリープの期間が長い材料に式(2)を適用しても寿命予測の精度が悪くなる可能性がある。それゆえ、以下では式(2)から計算したクリープ寿命と実測値との比較を行う。

式(2)を用いて計算でクリープ寿命を推定するには、Mod.9Cr-1Mo鋼の仮想的初期歪速度が必要である。著者らは仮想的初期歪速度の応力および温度依存性を詳細に調べて前報¹⁴⁾に示したが、便宜のために、その結果を以下に示す。

$$\dot{\epsilon}_0 = A_0 \cdot \sigma_0^{n_0} \cdot \exp(-Q_0/Rt) \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_0$ は仮想的初期歪速度、 A_0 は定数、 n_0 は応力指数、 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、それぞれの値はこの順に 1.08×10^8 s、 13.0 ± 0.2 、 751 ± 5 kJ/molである。式(7)および式(9)を用いると、原理的には任意の応力および温度のクリープ寿命が式(2)から計算できる。この計算値を縦軸に、横軸に実測値として両者の比較を示したのがFig. 9で、図中の白丸印は計算で求めたクリープ寿命、図中の対角線は計算値と実測値が一致したときに期待される値である。図からわかるように、測定範囲の長時間側で3.1倍、短時間側で1.5倍程度計算値の方が実測値よりも長い。この点は、著者らが以前に解析した2.25Cr-1Mo鋼の場合^{11-13,15)}と異なっており、式(2)を用い

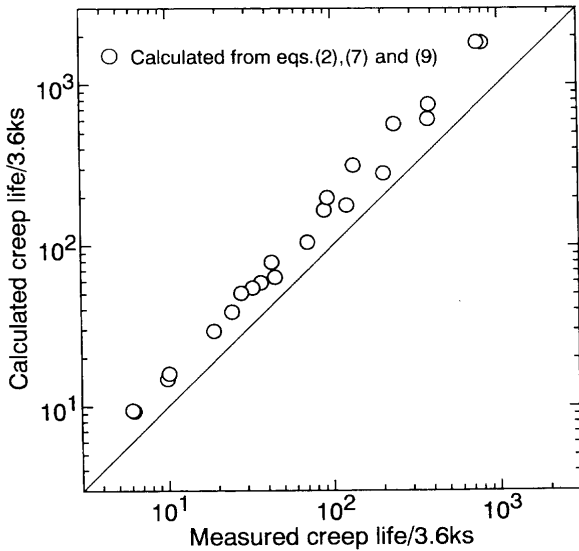


Fig. 9. Comparison of calculated creep life with experimental one.

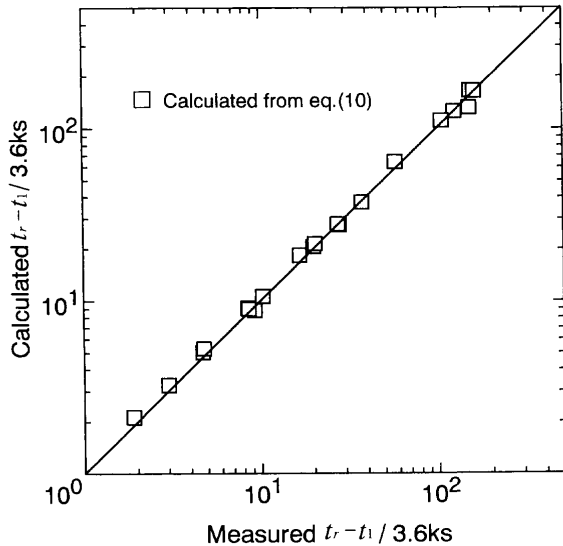


Fig. 10. Comparison of calculated $t_r - t_1$ and measured $t_r - t_1$.

てMod.9Cr-1Mo鋼のクリープ寿命を予測すると実測値よりも長いクリープ寿命を推定することになる。これは、Mod.9Cr-1Mo鋼の第1次クリープの期間が2.25Cr-1Mo鋼のそれよりも大きいためであるが、これは焼戻しマルテンサイト組織を持つ本鋼の場合にはクリープの初期に多くの運動転位が存在するためであろう。

5.2 第3次クリープの期間

前報⁷⁾で指摘したようにMod.9Cr-1Mo鋼では、全クリープ寿命の中で、最小クリープ速度に至るまでに費やす時間の比率、すなわち、第1次クリープが占める割合が2.25Cr-1Mo鋼に比してかなり大きく、クリープ寿命を 10^5 時間まで外挿すると40%にも及ぶと推定される。そこで、第3次クリープが式(2)、(7)および(9)でどの程度まで記述できるかを以下の方法で検討する。

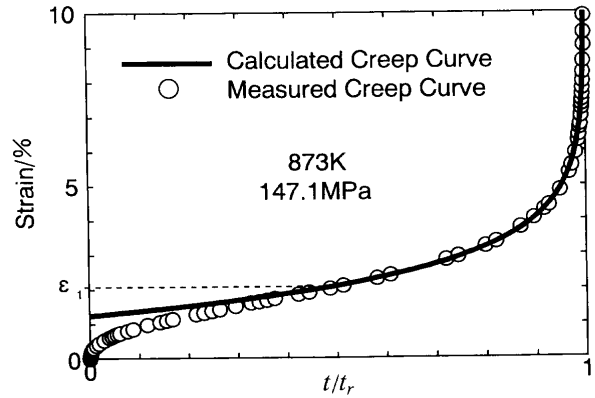


Fig. 11. Comparison of calculated creep curve with measured one.

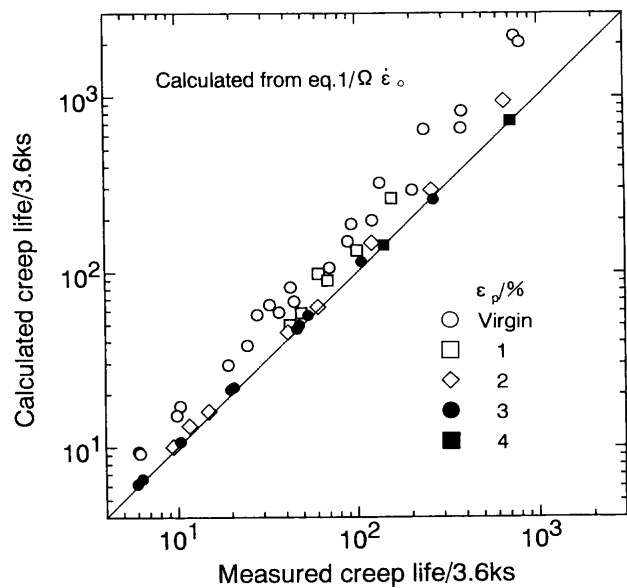


Fig. 12. Effect of prestrain on the relationship between calculated creep life and measured one.

Fig. 1の模式図において、式(1)が成立している時間、 $(t_r - t_1)$ は次式で表すことができる。

$$t_r - t_1 = [1/(\Omega \cdot \dot{\epsilon}_0)] e^{-\Omega \epsilon_1} \dots \dots \dots (10)$$

Fig.10は t_1 から t_r までのクリープ時間を式(10)から計算した値と実測値とを比較したものである。図が示すように実測値は計算値とよく一致している。前節において式(2)から計算したクリープ寿命が実測値よりも長いことを示したが、Mod.9Cr-1Mo鋼において、式(2)に基づく推定クリープ寿命が実測値よりも長い理由は、クリープの全域で式(1)が成立すると仮定したこと起因することがわかる。

前記のように、 Ω の値を用いると第3次クリープの挙動を忠実に表現することができることがわかったので、以下では第3次クリープ域のクリープ曲線と式(4)に基づくクリープ曲線とを比較する。Fig.11は計算によるクリープ曲線と実測のクリープ曲線を比較したもので、実線は式(4)に基づく計算値、○印は実測値である。図から明らか

うに、第1次クリープ域では計算によるクリープ歪が実測値よりも大きい、寿命消費率(t/t_r) 40%以上、真歪2%以上の広い第3次クリープ域において、クリープ曲線が首尾よく式(4)で記述できることがわかる。

Fig.12は式(2)による計算クリープ寿命と実測値との関係に及ぼす予変形の影響を明示したものである。予変形歪がゼロの場合は Fig. 9で示したように計算で得たクリープ寿命は実測値よりも長い、予変形歪が増加するにつれて実測値が対角線で示した直線に近付き、4%の予変形を受けた場合はほとんど対角線に一致する。これはFig. 8で見たごとく、予変形歪が増加するにつれて第1次クリープの期間が減少し、式(2)を適用したときの精度が向上するためである。

6. 結論

マルテンサイト単相組織を持つMod.9Cr-1Mo鋼のクリープ寿命を定量的に評価するために、応力108から196MPa、温度873から923Kにおいて Ω 値の応力、温度および予歪の影響を調べ、 Ω 法によるクリープ寿命予測精度を検討して以下の結論を得た。

1) 歪速度加速因子 Ω の応力および温度依存性は以下のように表現できる。

$$\Omega = A_{\Omega} \cdot \sigma_0^{-n_{\Omega}} \cdot \exp(Q_{\Omega}/RT)$$

ここに、 A_{Ω} は温度および応力に依存しない定数、 n_{Ω} は Ω に関する応力指数、 Q_{Ω} は Ω に関する温度依存性パラメータで、これらの値はそれぞれ、0.15/s、1.46および97.81 kJ/molである。

2) 焼戻しマルテンサイト組織を持つ本鋼ではフェライト系の2.25Cr-1Mo鋼に比して第1次クリープ域が長く、第3次クリープは次式によって記述される。ここに ε_1 は第3次クリープの開始歪、 t_1 は歪が ε_1 に到達するまでの時間、 ε_0 は仮想的初期歪速度である。

$$t_r - t_1 = [1/(\Omega \cdot \dot{\varepsilon}_0)] e^{-\Omega \varepsilon}$$

3) 予変形材および予変形がゼロの未使用材に式(2)を適用してクリープ寿命を推定し、推定値と実測値とを比較した。その結果、未使用材に式(2)を適用すると、測定範囲の長時間側で3.1倍、短時間側で1.5倍程度になった。これは、Mod.9Cr-1Mo鋼の第1次クリープの期間が長いことに起因している。他方、予変形材に式(2)を適用した場合、予歪量が増加するにつれて推定クリープ寿命は実測値に近付き、予歪量が4%では式(2)でクリープ寿命がほぼ正しく推定できた。今後、経年変化を受けた抜管材に式(2)が適用可能かどうか、予歪を受けていない未変形材料については第1次クリープ中の時間をも考慮した Ω 法の改良が必要である。

本研究費の一部は平成9年度文部省科学研究費の基盤研究(c)および鉄鋼研究振興資金(日本鉄鋼協会)の研究助成金によって賄われたことを記録し、深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) 遠藤孝雄, 石 建中, 増山不二光: 鉄と鋼, **81** (1995), 862.
- 2) 遠藤孝雄, 増山不二光: までりあ, **36** (1997), 225.
- 3) 丸山公一: までりあ, **33** (1994), 601.
- 4) 丸山公一: 鉄と鋼, **78** (1992), 1617.
- 5) R.W. Evans, J.D.Parker and B.Wilshire: Recent Advances in Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, ed. by B. Wilshire and D.R.J.Owen, Pineridge Press, Swansea, (1982), 135.
- 6) R.Sandstorm and A.Kondyr: ICM 3, Cambridge, UK, **2** (1979), 275.
- 7) M.Prager: J.Press. Vess. Tech., **117** (1995), 95.
- 8) M.Prager: Strength of Materials, ed. by H.Oikawa, K.Maruyama, S.Takeuchi and M.Yamaguchi, JIM, Sendai, (1994), 571.
- 9) M.Prager and F.Masuyama: Proc. of ICSMA 10, ed. by H.Oikawa, K.Maruyama, S.Takeuchi and M.Yamaguchi, JIM, Sendai, (1994), 575.
- 10) T.Endo and J.Shi: Strength of Materials, ed. by H.Oikawa, K.Maruyama, S.Takeuchi and M.Yamaguchi, JIM, Sendai, (1994), 665.
- 11) J.Shi and T.Endo: Scr. Metall. Mater., **32** (1995), 1159.
- 12) T.Endo and J.Shi: Materials Aging and Component Life Extension, ed. by V.Bicego, A.Nitta and R.Viswanatham, CISE, Vol. 1, (1995), 429.
- 13) 石 建中, 遠藤孝雄: 鉄と鋼, **80** (1994), 795.
- 14) 朴 奎侠, 増山不二光, 遠藤孝雄: 鉄と鋼, **84** (1998), 526.
- 15) 石 建中, 戴 国政, 遠藤孝雄: 鉄と鋼, **81** (1995), 839.
- 16) F.C.Monkman and N.S.Grant: Proc. JASTM, **56** (1956), 593.