

論文 多量の析出物を含むオーステナイト耐熱鋼の 高温クリープ変形におよぼす結晶粒径の影響

田 中 学*・藤 田 春 彦*・藤 代 大*²

Effect of Grain Size on the High Temperature Creep Deformation of Austenitic Heat Resisting Steel with a Large Amount of Precipitates

Manabu TANAKA, Haruhiko FUJITA, and Dai FUJISHIRO

Synopsis :

Effect of grain size on the high temperature creep deformation has been investigated at temperatures of 873K and 973K on an austenitic steel 21-4N with a large amount of $M_{23}C_6$ carbides as well as on steel SUS304 without precipitates.

In steel 21-4N, steady-state creep rate decreased with an increase of grain diameter in the range below 100~200 μ both at 873K and 973K. In the range above this grain diameter, it increased with an increase of grain size at 973K, while it showed the minimum value at 873K. This increase in steady-state creep rate at 973K was associated with the change in the microstructures during creep such as coarsening of grain boundary carbides, formation of ledges and irregularities in grain boundaries. Internal stress during steady-state creep in this steel was almost independent of grain size provided that stress and temperature was constant, and it was primarily related to particle size and interparticle spacing of $M_{23}C_6$ carbides in the interior of the grain.

In steel SUS304, steady-state creep rate decreased with an increase of grain size, and showed a constant value in the range above about 70 μ . This is attributed to a decrease in effective stress (increase in internal stress) with an increase of grain size.

1. 緒 言

高温クリープへの結晶粒径の影響について、これまで多くの研究が行われている^{1)~10)}が、金属や合金によつて異なる実験結果が報告されており、その解釈も一様ではない。たとえば、GAROFALO ら¹⁾はオーステナイト鋼で定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ を最小にする結晶粒径 d_{min} が存在することを見出し、これを結晶粒界と亜粒界での転位の生成に基づくモデルによつて説明している。一方、BARRETT ら²⁾は純銅でこのような結晶粒径 d_{min} が存在しないこと、この理由として、広域の粒界すべりやクリープ中に形成されるサブグレイン組織が、定常クリープ速度の結晶粒径依存性に関連することなどを報告している。また、クリープの機構が異なると、定常クリープ速度の結晶粒径依存性や応力依存性などが異なる³⁾ことも考えられる。さらに、最近ではクリープ中の内部応力と転位組織⁴⁾⁵⁾⁷⁾¹¹⁾¹²⁾、析出物など^{13)~18)}との関係についてしだいに明らかにされてきており、定常クリープ速度の結晶粒径依存性と内部応力との関連も議論されている⁴⁾⁵⁾⁷⁾。

クリープ中に析出が生じる場合、これがクリープ変形へ影響をおよぼすため⁹⁾¹⁰⁾、クリープ変形への結晶粒径のみの影響について調べることがむずかしい。内燃機関用排気弁などに用いられるオーステナイト耐熱鋼や Ni 基耐熱合金は、熱処理などによつて析出硬化させたのち使用されるのが普通であるため、この状態でのクリープ変形への結晶粒径の影響を調べることは興味深い。しかし、この種の材料のクリープ変形への結晶粒径の影響についてはあまり知られていない。

本研究では 21-4N オーステナイト耐熱鋼を用いて、熱処理によつて炭化物の析出量および分布状態をだいた一定とし結晶粒径のみを変え、クリープ変形への結晶粒径の影響について調べた。また、定常クリープ中の内部応力を測定し、定常クリープ速度の結晶粒径依存性について考察した。さらに、同様の実験を析出物をあらかじめ含まない SUS 304 鋼についても行い、比較検討した。

2. 供試材および実験方法

本研究ではおもな供試材として $\phi 16$ mm に鍛伸した市

昭和 56 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 11 月 29 日受付 (Received Nov. 29, 1982)

* 秋田大学鉱山学部 工博 (The Mining College, Akita University, 1-1 Tegatagakuenmachi Akita 010)

*2 日鍛バルブ(株) (Nittan Valve Co., Ltd.)

Table 1. Chemical composition of steels used (wt%).

Steel	C	N	Cr	Ni	Mn	Si	S	P	Fe
21-4N	0.54	0.39	21.10	4.07	9.74	0.19	0.008	0.017	bal.
SUS 304	0.08	—	8.60	18.04	1.32	0.34	0.016	0.32	bal.

Table 2. Heat treatment and grain size of steels used.

Steels	Heat treatment	Grain diameter, μ
21-4N	1 373K \times 3.6ks \rightarrow W. Q. + 1 023K \times 108ks \rightarrow A. C.	8.4
	1 423K \times 3.6ks \rightarrow W. Q. + 1 023K \times 108ks \rightarrow A. C.	24
	1 473K \times 3.6ks \rightarrow W. Q. + 1 023K \times 108ks \rightarrow A. C.	99
	1 523K \times 3.6ks \rightarrow W. Q. + 1 023K \times 108ks \rightarrow A. C.	180
	1 573K \times 3.6ks \rightarrow W. Q. + 1 023K \times 108ks \rightarrow A. C.	310
SUS 304	1 273K \times 1.8ks \rightarrow W. Q.	15
	1 323K \times 1.8ks \rightarrow W. Q.	30
	1 373K \times 1.8ks \rightarrow W. Q.	65
	1 423K \times 1.8ks \rightarrow W. Q.	140
	1 523K \times 3.6ks \rightarrow W. Q.	250

W. Q. : Water-quenched

A. C. : Air-cooled

販の 21-4N 鋼を、比較材として $\phi 16$ mm の SUS 304 鋼を用いた。Table 1 にそれらの化学成分を示した。また、Table 2 に供試材の熱処理と結晶粒径を示した。21-4N 鋼については 1 373 K ~ 1 573 K で溶体化処理を行い、8.4 ~ 310 μ の範囲で結晶粒径を変えたのち、1 023 K で 108 Ks の時効を行って $M_{23}C_6$ 型炭化物を析出させた。また、SUS 304 鋼については 1 273 K ~ 1 523 K で溶体化処理のみを行い、結晶粒径を 15 ~ 250 μ の範囲で変えた。結晶粒径の測定は顕微鏡を用いて線分析法により、50 ~ 300 個の結晶粒について行つた。

これらの熱処理を施した素材を直径 $\phi 6$ mm、標点間距離 30 mm のつば付きの丸棒試験片に加工した。本研究では伸びによる応力増加を考慮し容量 19.6 kN の単一レバー式クリープ試験機を用いて荷重を手動で調節し、873 K と 973 K で $\pm 0.5\%$ の精度の定応力クリープ試験を行つた。なお、21-4N 鋼については前報¹⁷⁾の結果から、負荷応力はおもに 873 K でのクリープ中の内部応力が Orowan stress にほぼ等しい高応力の 431 MPa と、クリープへの粒界すべりの寄与が大きい低応力の 196 MPa を、それぞれ上限および下限とする範囲内で選んだ。また、SUS 304 鋼については 973 K において二つの応力水準でクリープ試験を行つた。

標点間の伸びは通常は約 1 μ の精度のダイヤルゲージ式の変位計で測定したが、応力急変前後のひずみの変化は変位計のアームの下端にクリップゲージを取り付けて、約 3×10^{-7} のひずみの精度で測定した。定常クリープ中の内部応力は前報¹⁷⁾と同じく、定常クリープ期に十分入つたのち応力急変試験を行い、応力急変後の変形停滞時間を求め、その応力依存性から外挿法¹⁹⁾によつて求

めた。さらに、温度変化試験と応力急変試験の結果¹⁷⁾から、クリープの活性化エネルギーを求めた。

前述の熱処理を施した試料とクリープ試験後に負荷したまま空冷した試験片について、電解研磨によつて薄膜を作製し、加速電圧 100 kV で透過電顕観察を行い、粒内および粒界での $M_{23}C_6$ 炭化物の寸法、粒子間隔などを調べたほか、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡による組織観察も行つた。

3. 実験結果

3.1 熱処理後の組織

Photo. 1 に熱処理後の 21-4N 鋼の光顕組織を示した。結晶粒径が最も小さい 8.4 μ のものでは溶体化がや

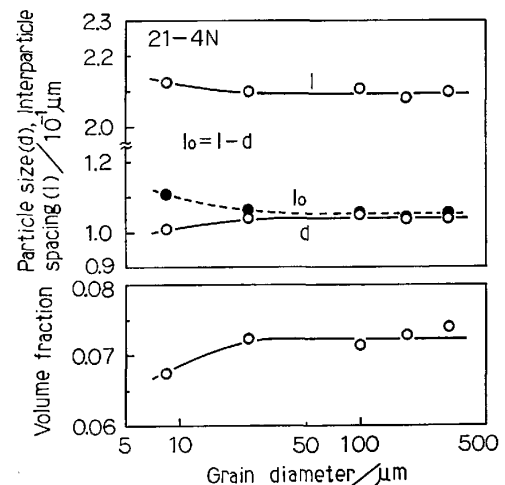
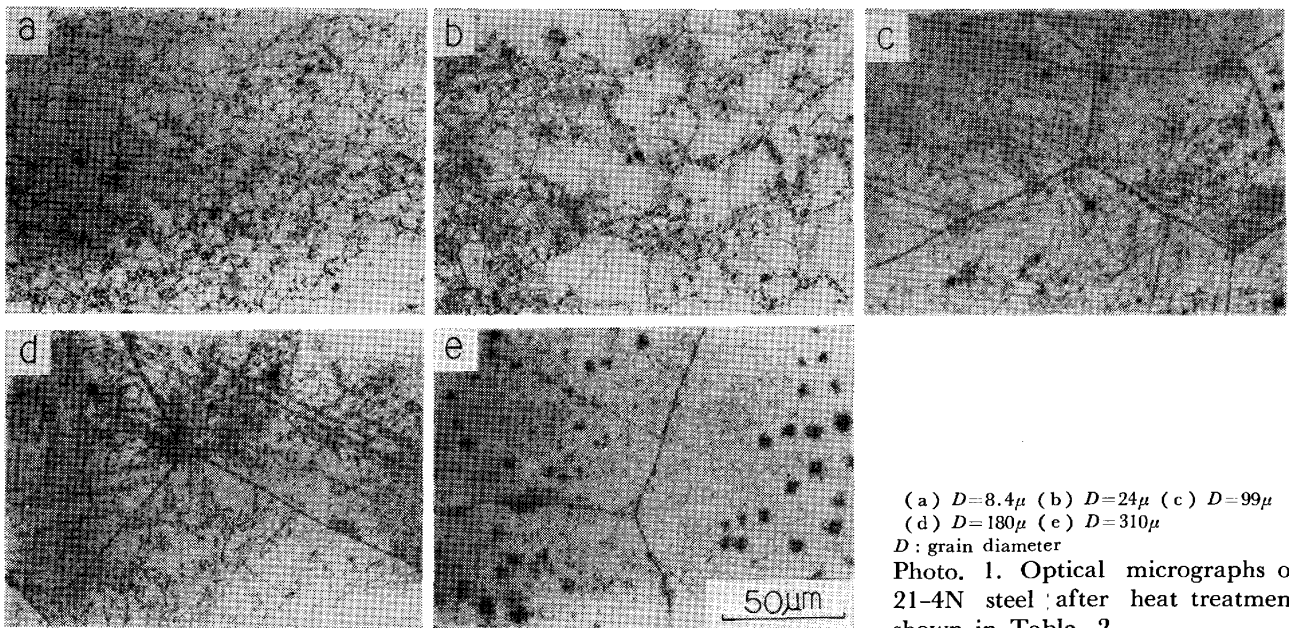


Fig. 1. Variation of volume fraction, particle size and interparticle spacing of precipitates in the interior of the grain with grain size in 21-4N steel after heat treatment shown in Table 2.



(a) $D=8.4\mu$ (b) $D=24\mu$ (c) $D=99\mu$
 (d) $D=180\mu$ (e) $D=310\mu$
 D : grain diameter

Photo. 1. Optical micrographs of 21-4N steel after heat treatment shown in Table 2.

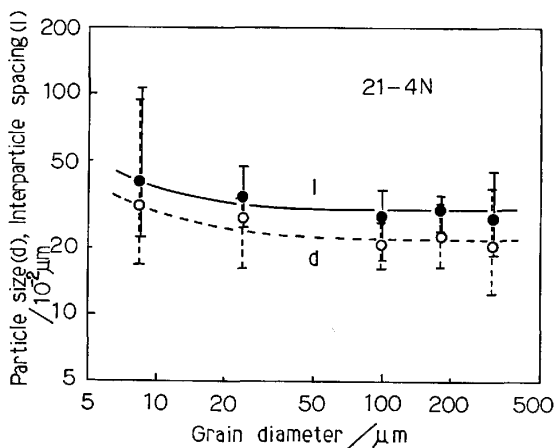


Fig. 2. Variation of particle size and interparticle spacing of grain boundary precipitates with grain size in 21-4N steel after heat treatment shown in Table 2.

や不完全のため少し残留析出物が多いが、いずれの試料でも結晶粒の大きさはほぼ均一であつた。また、粒内析出物は Fig. 1 に示したように、結晶粒径が 8.4μ の場合を除けば、粒子寸法、粒子間隔および析出量は結晶粒径によらずほぼ一定である。これは、Fig. 2 の粒界析出物の平均粒子寸法や粒子間隔についても同様である。さらに、透過電顕観察から、クリープ中に粒内析出物の凝集粗大化はほとんど起こらないことがわかつた。SUS 304 鋼についてはすべての溶体化材において残留析出物のほとんどない、オーステナイト単相の組織であつて、この状態での転位密度は粒径によらず、約 $4.8 \times 10^{10} \text{m}^{-2}$ であつた。

3.2 クリープ変形の結晶粒径依存性

Fig. 3 に 21-4N 鋼におけるクリープ曲線の一例を示

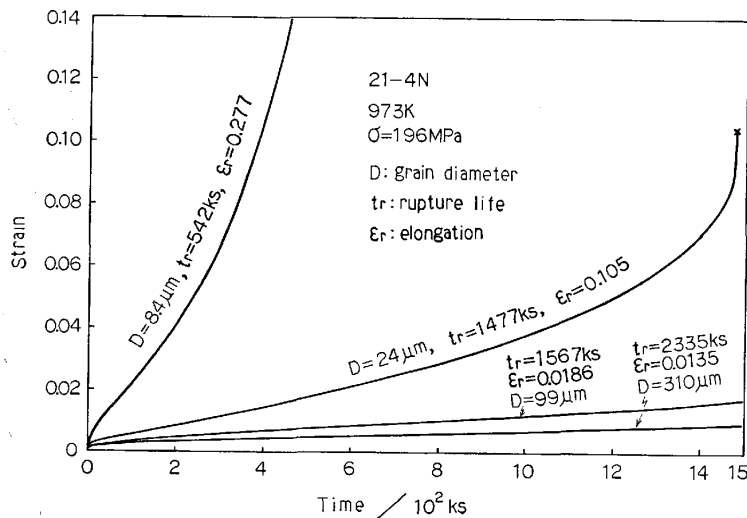


Fig. 3. Representative creep curves of 21-4N steel.

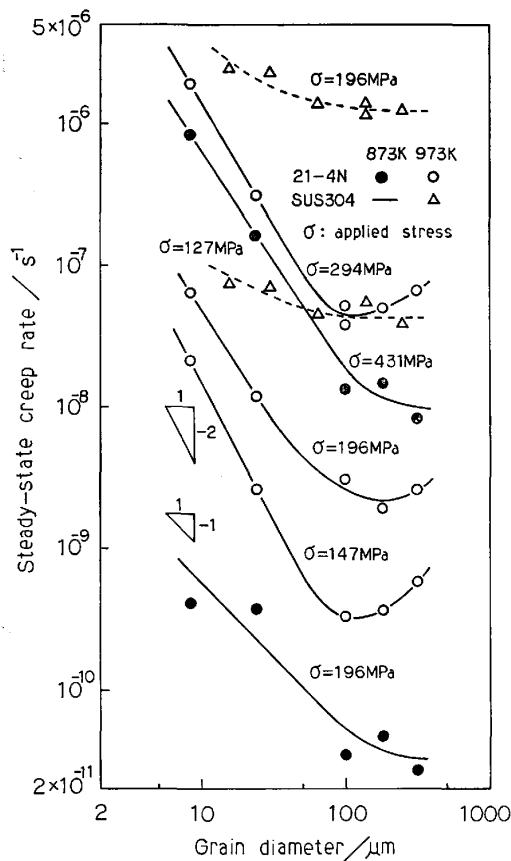


Fig. 4. Grain size dependence of steady-state creep rate in 21-4N and SUS 304 steels.

した。結晶粒径が約 100 μ 以下では結晶粒径が小さいほどクリープ変形が著しく生じるが、約 100 μ 以上ではクリープ変形挙動に大きな差異が認められない。また、SUS 304 鋼も 973K では 21-4N 鋼と同じく通常のクリープ変形挙動を示した。

Fig. 4 に 21-4N 鋼および SUS 304 鋼の定常クリープ速度の結晶粒径依存性を示した。21-4N 鋼は 973K でいずれの応力でも、結晶粒径が約 100~200 μ のときに定常クリープ速度は最小になる。約 100~200 μ 以下の細粒側では定常クリープ速度は粒径の増加とともに著しく減少し、それ以上の結晶粒径では逆に増加する。しかし、873K では結晶粒径が約 100 μ までは結晶粒径の増加とともに定常クリープ速度は減少し、約 100 μ 以上の粗粒側ではその減少の割合は著しく小さくなるものの、増加する傾向はみられない。また、いずれの温度でも細粒側では、定常クリープ速度は応力によらずだいたい粒径の -1 乗から -2 乗に比例する。Ni 基耐熱合金では高応力になると、定常クリープ速度は結晶粒径に依存なくなることが報告されている⁹⁾が、本研究のオーステナイト耐熱鋼の結果はこのような傾向とは異なっている。一方、973K における SUS 304 鋼は、21-4N 鋼

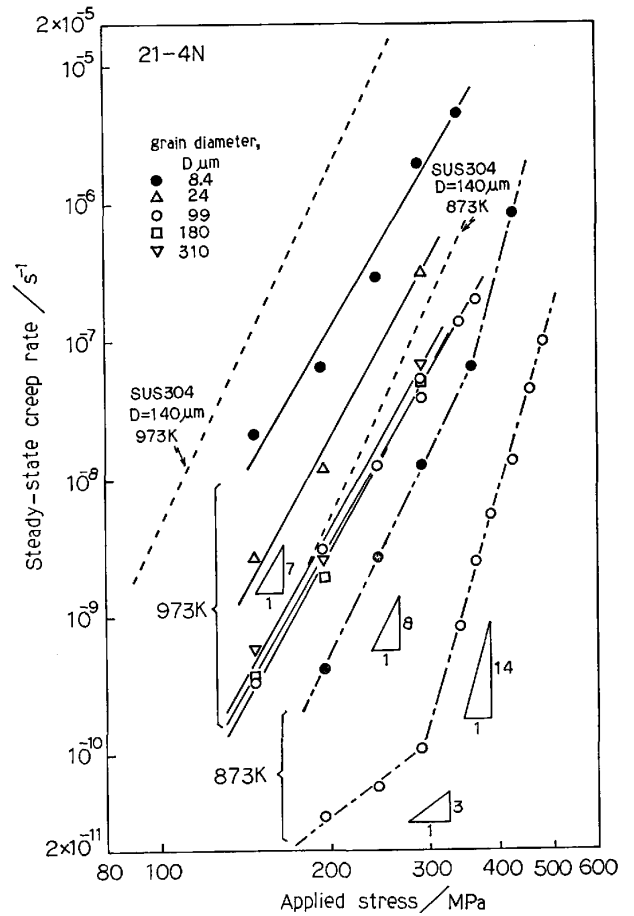


Fig. 5. Applied stress dependence of steady-state creep rate in 21-4N steel.

に比べて定常クリープ速度の結晶粒径依存性が小さく、結晶粒径が約 70 μ までは結晶粒径の増加とともに定常クリープ速度はゆるやかに低下し、それ以上の結晶粒径では定常クリープ速度はほぼ一定となる。

つぎに、21-4N 鋼の定常クリープ速度の負荷応力依存性を Fig. 5 に示した。973K では応力指数 $n(\dot{\epsilon}_s \propto \sigma^n)$ は結晶粒径によらず約 7 であり、全応力範囲にわたってほぼ一定である。しかし、873K では応力指数 n は、たとえば結晶粒径が 99 μ の場合、負荷応力が約 300 MPa より高いと約 14 であるが、それ以下では約 3 と小さく、図中の SUS 304 鋼の結果と異なる。

3.3 定常クリープ中の内部応力と活性化エネルギーの結晶粒径依存性

Fig. 6 に 21-4N 鋼と SUS 304 鋼における定常クリープ中の内部応力 σ_i と負荷応力 σ の比 σ_i/σ の結晶粒径による変化を示した。21-4N 鋼においては内部応力は、結晶粒径が最も小さい 8.4 μ のもので析出物の析出量が少なく分散度がやや低いためわずかに低いほかは、結晶粒径によらずほぼ一定である。さらに、内部応力の

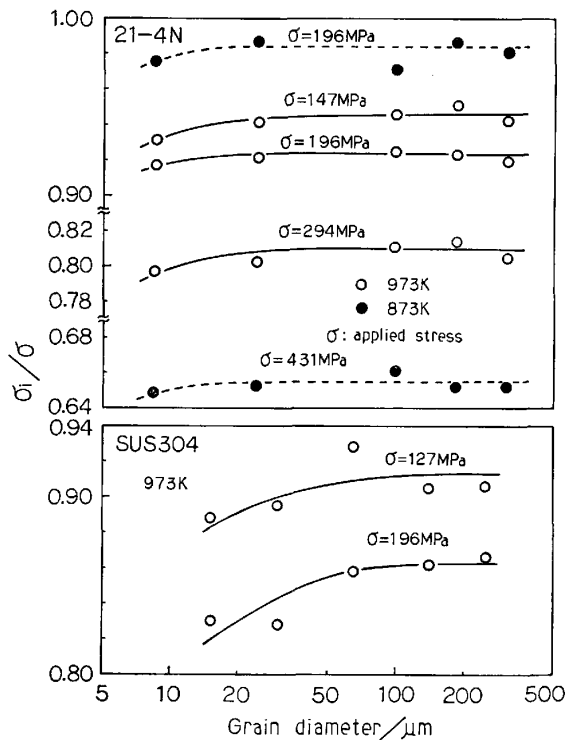


Fig. 6. Changes in the ratio of internal stress to applied stress (σ_i/σ) with grain size in 21-4N and SUS 304 steels.

負荷応力に対する割合 σ_i/σ は、一定温度では負荷応力が低いほど大きく、1に近い。また、一定負荷応力では温度が低いほど σ_i/σ は大きい。873K で $\sigma=431$ MPa の場合、内部応力は結晶粒径が 99μ の材料の、粒内析出物の粒子間隔から計算される Orowan stress (=312 MPa)¹⁷⁾ にほぼ等しく、他の負荷応力では内部応力はいずれも Orowan stress より低い。一方、SUS 304 鋼では、結晶粒径が約 70μ までは結晶粒径の増加とともに σ_i/σ の値は増すが、それ以上ではほぼ一定となる。また、低応力の方が σ_i/σ の比が大きいことは、21-4N 鋼の場合と同様である。

以上のことから、 $M_{23}C_6$ 型炭化物を析出させた 21-4N 鋼では、定常クリープ中の内部応力は Fig. 1, 2 に示した粒内と粒界の析出物、とくに粒内析出物の析出量や分散度と密接な関係があると考えられる。すなわち、析出物の析出量や分散度がほぼ同じならば、結晶粒径によらず内部応力は温度、負荷応力が一定の場合、一定の値となる。これに対し、SUS 304 鋼では約 70μ 以下の細粒側で σ_i/σ の値が小さくなるが、これは後述するように、結晶粒径が小さくなるほど、粒内の転位組織が粒界の影響をうけてその回復が促進され、転位組織を構成する転位数が減少する⁴⁾ ことが原因であろう。

Fig. 7 に 21-4N 鋼と SUS 304 鋼におけるクリープ

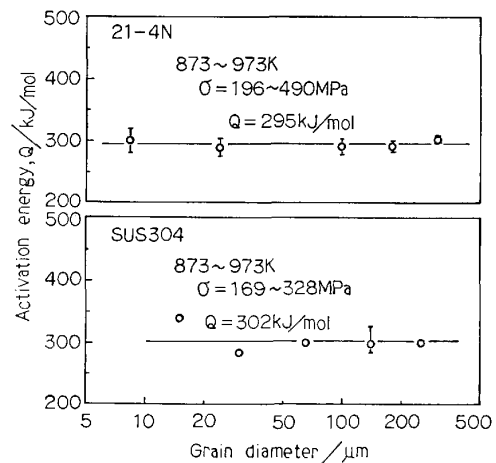


Fig. 7. Changes in activation energy for creep with grain size in 21-4N and SUS 304 steel.

の活性化エネルギーを示した。クリープの活性化エネルギーは、多少のばらつきはあるが、ほぼ結晶粒径によらず 21-4N 鋼では約 295 kJ/mol、SUS 304 鋼では約 302 kJ/mol の一定値であり、これは γ -Fe の自己拡散の活性化エネルギーの 270 kJ/mol²⁰⁾ にほぼ等しい。したがって、クリープの活性化エネルギーの大きさから考えて、両鋼において内部応力の負荷応力に対する割合 σ_i/σ が 1 に近い低応力では、転位の刃状部分の上昇運動と消滅がクリープを律速するものと思われる。しかし、 σ_i/σ の割合は高応力になると 1 よりかなり小さくなり、有効応力の存在が無視できないことから、高応力側ではクリープへの転位の粘性的な運動の影響も考えられる。

つぎに、21-4N 鋼における定常クリープ速度と有効応力の関係を Fig. 8, 9 に示した。まず、973K では、定常クリープ速度は結晶粒径によらず有効応力の 2 乗~3 乗に比例し、図中の SUS 304 鋼の定常クリープ速度の有効応力依存性とほぼ同じである。一方、21-4N 鋼の 873K クリープでは同じ温度での SUS 304 鋼と異なり、定常クリープ速度と有効応力の関係は単一の直線では表せない。これは、低応力側では全クリープ変形量への粒界すべりの寄与が大きいことと関係がある¹⁷⁾。なお、SUS 304 鋼では 973K でのクリープ中に少量の $Cr_{23}C_6$ が析出するが、転位組織への影響などから考えて、その定常クリープ速度や内部応力への影響は小さいと思われる¹⁷⁾。

4. 考 察

Fig. 10 に示したように、973K での定常クリープ速度を有効応力 $\sigma_e=20$ MPa 一定で整理すると、21-4N 鋼においては結晶粒径が約 100μ 以下の細粒側で、定常

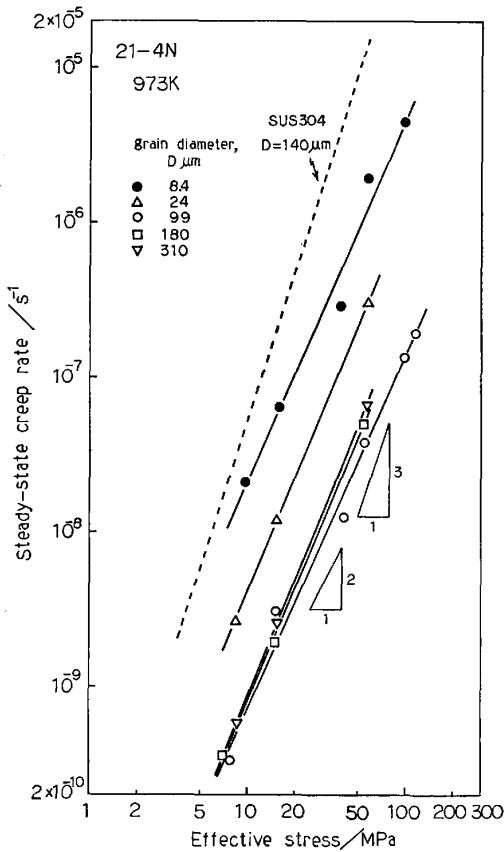


Fig. 8. Relationship between steady-state creep rate and effective stress in 21-4N steel at 973K.

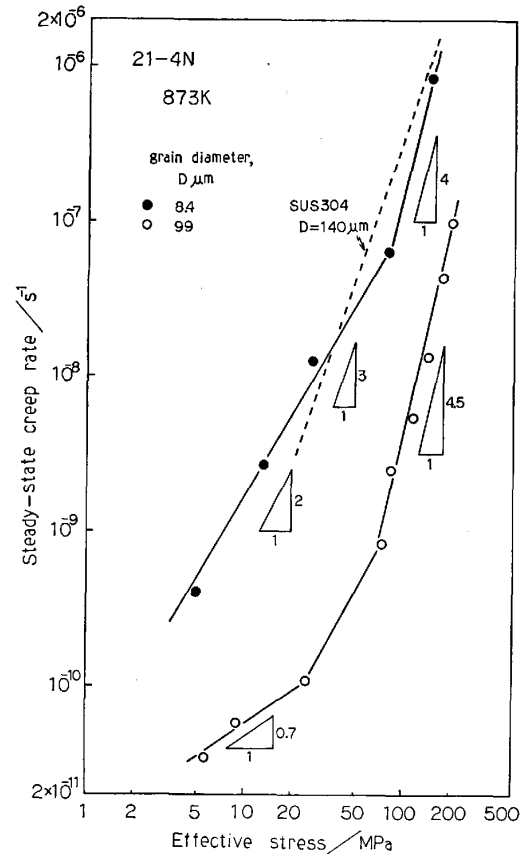


Fig. 9. Relationship between steady-state creep rate and effective stress in 21-4N steel at 873K.

クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ は結晶粒径 D のほぼ -1.4 乗に比例する。これは結晶粒界での転位発生モデル¹⁾から導き出される $\dot{\epsilon}_s \propto D^{-1}$ の関係に近い。また、873K~973Kにおいて、21-4N 鋼の細粒側での定常クリープ速度の結晶粒径依存性は、負荷応力や温度によつてほとんど変化しない。この鋼では転位の運動の障害となる析出物の寸法や分布が、結晶粒径によつてあまり大きくは変化しないため、クリープ中に析出物の周囲に形成される転位組織にもとづく内部応力場も、析出物間隔程度の周期で存在し、同一温度、同一応力下では結晶粒径によらず大体同じ程度の大きさである、と考えられる。

これに対し、クリープ中に粒内にセル組織を形成し、セル寸法やセルを構成する転位数が結晶粒径によつて異なる場合、この転位組織の違いがクリープ変形へ大きな影響をおよぼす²⁾⁴⁾ことがある。例えば、結晶粒径が小さくなると結晶粒径とセル寸法の大きさの割合が減少し、粒内の転位組織に対する粒界での回復の影響が相対的に大きくなり²⁾、クリープ変形が著しくなる。本研究の SUS 304 鋼の結果では、定常クリープ中のセル寸法は結晶粒径が $15 \sim 65 \mu$ の範囲では、粒径の増加とともにわずかに小さくなり、セル壁を構成する転位密度も少

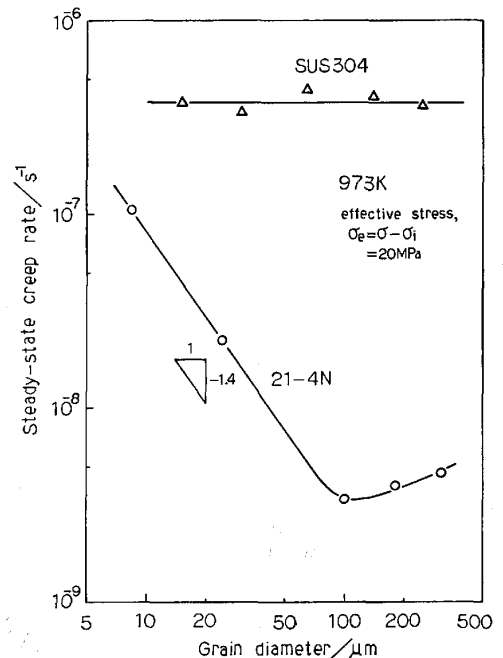
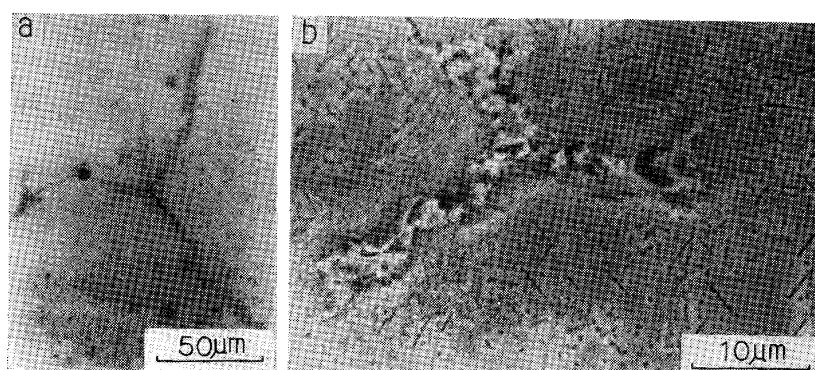


Fig. 10. Grain size dependence of steady-state creep rate in 21-4N and SUS 304 steels under constant effective stress of 20MPa at 973K.

し高くなつてセル組織がしだいに明瞭になる傾向がみられた。このような粒径の増加にともなう転位組織の変化



(a) optical micrograph of grain boundary precipitates.
 (b) scanning electron micrograph of precipitates at the grain boundary triple point.

Photo. 2. Microstructures of 21-4N steel with grain diameter of 310μ crept for 32.5ks at 973K, 294MPa.

によって内部応力は増大する。しかし、Fig. 10 のように定常クリープ速度を一定の有効応力で整理すると、ほとんど結晶粒径依存性がなくなる。このことから、SUS 304 鋼では定常クリープ速度の結晶粒径依存性は、クリープ中の粒内の転位組織が粒径によって変わり内部応力が異なることがおもな原因と考えられる。

21-4N 鋼において 973 K では、結晶粒径が約 100μ あるいは 200μ 以上になると、有効応力一定で比較しても結晶粒径の増加とともに定常クリープ速度は増す傾向にあり、本研究で測定された内部応力の結晶粒径依存性から、これを説明することはできない。これは、クリープ中に粒界およびその付近での析出物の凝集、粗大化などが起こることと関係がある。一例として、Photo. 2 に 973 K でクリープ試験を行った、結晶粒径が 310μ の 21-4N 鋼の粒界とその近傍の組織を示した。Photo. 2(a) の光顕写真では、粒界三重点近傍の粒内は析出物の凝集が生じているため灰色に、また、粒界は析出物が粗大化しているため黒くみえる。Photo. 2 (b) の走査電顕写真では、粒界三重点での析出物の粗大化とともに、粒界に ledge が生成し、また、粒界三重点付近の粒界は屈曲しているのがわかる。このような組織変化は細粒材の 973 K クリープや、全試料の 873 K クリープにおいては認められなかった。Ni 基耐熱合金ではクリープ中の粒内析出物の粗大化による内部応力の低下が報告されているが¹⁵⁾、本鋼においても同様の組織変化が粒界とその近傍で生じた場合、この部分では変形抵抗が低下し、クリープが起こりやすくなるであろう。しかし、内部応力の実測値には粗粒側での低下はほとんどみられない。これは、上述の組織変化が粒界近傍のみで生じるためか、あるいは、ひずみの測定精度に限界があるので、応力急変後の変形停滞時間を過大に見積もつて実際よりも内部応力値が大きくなったため²¹⁾かもしれない。また、結晶粒径が大きいほど、粒界すべりによる粒界三重点付近での応力集中は大きいと考えられる²²⁾。このため、上述の粒界の ledge や屈曲部での転位発生が著しく

なつて、この部分でのクリープ変形は促進される⁴⁾。このような粒界性状の変化も、粗粒側での定常クリープ速度増加の原因のひとつと考えられる。21-4N 鋼においては、873 K では 973 K の場合とは異なり、クリープ中に顕著な組織変化が生じないために、粗粒側での定常クリープ速度の増加は起こらない。

比較材の SUS 304 鋼の 973 K クリープでは 21-4N 鋼の 973 K の場合とは異なり、約 70μ 以上の粗粒側では定常クリープ速度は結晶粒径依存性を示さない。これは、約 70μ 以上の結晶粒径では、クリープ中に形成される転位組織が粒径に依存せず、ほぼ同じとなることに関連している。また、SUS 304 鋼のクリープ試験後の各試験片の光顕および透過電顕観察においても、粒界移動や再結晶は全く認められなかった。

5. 結 言

本研究では $M_{23}C_6$ 型炭化物を含む 21-4N 鋼を供試材とし、873 K と 973 K において定応力クリープ試験を行い、クリープ変形におよぼす結晶粒径の影響について調べた。また、析出物を含まない SUS 304 鋼についても同様の試験を行い、比較検討した。得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 21-4N 鋼においては、873 K と 973 K で定常クリープ速度は結晶粒径が約 100μ 以下のとき、粒径の増加とともに粒径の -1 乗から -2 乗に比例して減少する。結晶粒径が約 100μ あるいは 200μ 以上では、定常クリープ速度は 973 K においては粒径の増加とともに増すが、873 K では定常クリープ速度の減少が著しく小さくなるのみである。また、SUS 304 鋼では結晶粒径が約 70μ までは定常クリープ速度は粒径の増加とともに減少するが、それ以上では一定となる。

(2) 21-4N 鋼では、温度、負荷応力が同じならば定常クリープ中の内部応力は、おもに粒内析出物の寸法と分布によって決まり、これらがだいたい同じであれば内部応力も同程度の大きさとなり、結晶粒径には依存し

ない。内部応力と負荷応力の比は、一定温度では負荷応力の増加とともに、また、一定負荷応力では温度が高いほど、小さくなる。一方、973KでのSUS 304鋼では、内部応力は結晶粒径の増加とともに約70 μ までは増加するが、それ以上では一定となる。

(3) 有効応力を一定として定常クリープ速度の結晶粒径依存性を調べると、例えば、973Kにおいては21-4N鋼の約100 μ 以下の細粒側で、定常クリープ速度は粒径の-1.4乗に比例し、粒界での転位発生モデルによる結晶粒径依存性に近い。また、有効応力一定としても、21-4N鋼では結晶粒径が約100 μ あるいは200 μ 以上で、定常クリープ速度は粒径とともに増す。これは、クリープ中に粗粒材で粒界三重点およびその近傍で析出物の粗大化が生じ、そこでの変形抵抗が小さくなるほか、ledgeや屈曲が生じるなど、粒界性状が変化し、粒界近傍でのクリープが加速されることが原因と考えられる。

(4) SUS 304鋼においては、一定の有効応力では定常クリープ速度の結晶粒径依存性がなくなる。このことから、この鋼では粒径の減少にともない粒内の転位組織が粒界での回復の影響をうけ、転位密度が低くなつて内部応力が減少し、有効応力が増すことが定常クリープ速度の結晶粒径依存性のおもな原因と考えられる。

(5) クリープの活性化エネルギーは結晶粒径によらず、21-4N鋼で約295kJ/mol、SUS 304鋼で約302kJ/molであり、これらは γ -Feの自己拡散の活性化エネルギー270kJ/molに近い。

終わりに、実験に協力していただいた秋田大学鉱山学部技官葦原文夫氏、ならびに堤純一、野左近武両工学士に心から感謝の意を表します。

文 献

1) F. GAROFALO, W. F. DOMIS, and F. von GEMMINGEN: Trans. Metall. Soc. AIME, 230

(1964), p. 1460
 2) C. R. BARRETT, J. L. LYTTON, and O. D. SHERBY: Trans. Metall. Soc. AIME, 239 (1967), p. 170
 3) T. G. LANGDON: Phil. Mag., 22 (1970), p. 689
 4) 近藤義宏, 松尾 孝, 篠田隆之, 田中良平: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 896
 5) 近藤義宏, 松尾 孝, 篠田隆之, 田中良平: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 987
 6) Y. TAKAHASHI and T. YAMANE: J. Mater. Sci., 14 (1979), p. 2818
 7) Y. TAKAHASHI and T. YAMANE: J. Mater. Sci., 16 (1981), p. 397
 8) 田村 学, 亀村佳樹, 渡辺力蔵, 千葉芳孝: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1022
 9) 仲西恒雄, 松本紀昭, 河田 修: 日本金属学会誌 41 (1977), p. 263
 10) 藤岡順三, 村瀬宏一, 松田昭三: 日本金属学会誌 43 (1979), p. 1078
 11) T. HASEGAWA, S. KARASHIMA, and Y. IKEUCHI: Acta Metall., 21 (1973), p. 887
 12) L. J. CUDDY: Metall. Trans., 1 (1970), p. 395
 13) S. PURUSHOTHAMAN and J. K. TIEN: Acta Metall., 26 (1978), p. 519
 14) C. CARRY and J. L. STRUDEL: Acta Metall., 26 (1978), p. 859
 15) H. BURT, J. P. DENNISON, and B. WILSHIRE: Met. Sci., 13 (1979), p. 295
 16) W. J. EVANS and G. F. HARRISON: Met. Sci., 13 (1979), p. 641
 17) 田中 学, 藤田春彦: 日本金属学会誌, 45 (1981), p. 1187
 18) S. NATEGH, P. J. GOODHEW, and Z. C. SZKOPIAK: Acta Metall., 29 (1981), p. 1299
 19) 当摩 建, 吉永日出男, 諸住正太郎: 日本金属学会誌, 38 (1974), p. 170
 20) 幸田成康: 金属物理学序論 (1966), p. 237 [コロナ社]
 21) J. C. GIBELING and W. D. NIX: Met. Sci., 11 (1977), p. 453
 22) A. N. STROH: Proc. Roy. Soc., A223 (1954), p. 404