

## SUS 304 の塑性変形におよぼす温度変化とクリープ変形の影響\*

新津 靖\*\*, 池上 皓三\*\*\*, 白鳥 英亮\*\*\*\*  
Yasushi NIITSU, Kozo Ikegami, Eiryo Shiratori**Key Words:** Stainless-Steel, Stress-Strain, Combined Stress, High Temperature, Plastic Deformation, Creep Deformation, Plasticity-Creep Interaction

## 1. 緒 言

原子力機器やガスタービンなどの高温用機械構造物の多くは、高圧、高回転速度などの機械的負荷に温度変化による熱応力が重畳されるなど、きわめて厳しい条件で使用されている。したがって、このような過酷な条件下では弾性、塑性変形のみならずクリープ変形や温度変化によって生ずる変形が重要な役割を演ずる。従来、塑性変形のみやクリープ変形のみを対象とする研究は多く行われているが、両方の変形の相互関係についてほとんど検討されていない。また、温度変化のある場合の塑性変形やクリープ変形に関する研究も少ない。たとえば、Brown<sup>(1)</sup>は、アルミニウム合金に対しクリープ変形と塑性変形の相互関係について議論している。そして、室温であたえた塑性変形により、高温での定常クリープひずみ速度曲面の形状は変化するが、高温であたえたクリープ変形は、室温での降伏曲面に変化をあたえないという結果を得ている。また、Phillips<sup>(2)</sup>はアルミニウムに対し室温でねじり負荷をあたえた後、他の温度での降伏曲面を実験的に求めている。田中・石崎ら<sup>(3)(4)</sup>は、炭素鋼とアルミニウム合金について、室温と高温で塑性ひずみをあたえた後の高温での降伏曲面の比較およびクリープひずみをあたえた後の降伏曲面の変化について実験を行い検討している。Kujawski<sup>(5)</sup>らは、ステンレス鋼 SUS 304 について、応力速度とひずみ速度の変化による応力-ひずみ曲線の変化およびクリープひずみをあたえ

た後再負荷したときの応力-ひずみ曲線について室温で実験を行っている。しかし、塑性変形とクリープ変形の相互関係や、温度変化の履歴が変形におよぼす影響についての研究は少ない。

著者らは、本報告で、これらを明らかにするための第一歩として次の研究を行った。すなわち、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 の試験片を用い、室温から 600°C までの温度範囲で、ある温度であたえた塑性ひずみが別の温度での変形におよぼす影響、温度変化による一定応力下での変形進行現象、およびクリープひずみが塑性変形におよぼす影響について実験的に検討した。

## 2. 実験方法

**2.1 試験片および試験機** 実験に用いた試験片材料は、ステンレス鋼 SUS 304 である。その成分および形状をそれぞれ表 1 と図 1 に示す。試験片には、1050°C で固溶体化処理を施した。実験は、電気-油圧サーボ式多軸応力試験機<sup>(6)</sup>を用い、試験片に軸方向負荷とねじり負荷を組合せて加えることにより行った。図 2

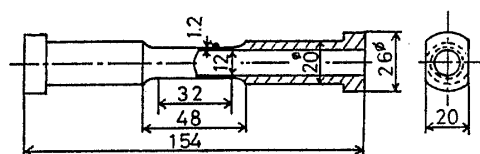


図 1 試験片の形状

表 1 試験片の化学成分 (重量%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
試験片A	0.06	0.61	1.78	0.32	0.03	8.24	18.21	70.75
試験片B	0.07	0.62	1.23	0.27	0.03	8.74	18.20	70.84

\* 昭和 56 年 10 月 31 日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和 57 年 4 月 18 日。

\*\* 准員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

\*\*\* 正員 東京工業大学精密工学研究所。

\*\*\*\* 正員 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 225)。

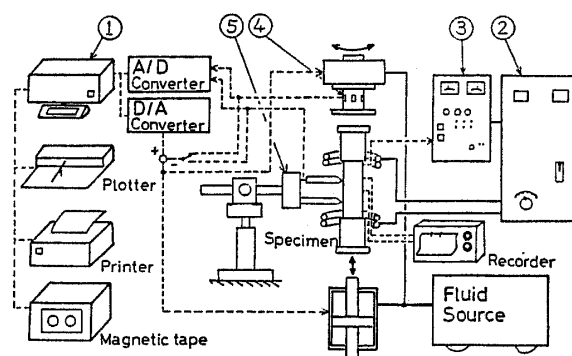


図 2 試験機

に試験機の模式図を示す。試験機の制御およびデータ処理は、マイクロコンピュータ①で行った。試験片の加熱には、高周波加熱装置②、③を用い、温度測定は、試験片に白金-白金ロジウム熱電対を溶接して行った。軸方向荷重およびねじりモーメントの測定は、主軸に直結したロードセル④によって行い、試験片に生じるひずみの測定には、図3に示すひずみ測定装置⑤を用いた。この装置は、試験片のひずみを、試験片にばねで押し当てた石英ガラス棒によって板ばねのたわみに変換し、測定するようになっている。図3は軸方向ひずみの測定装置であるが、せん断ひずみの測定は、これと同じ形状で板ばねの方向を90°ずらしたものを用いた。なお、試験片の標点間距離は20 mmであった。

**2.2 実験条件** 実験は、軸方向応力 ( $\sigma_z$ ) とせん断応力 ( $\tau_{z\theta}$ ) の組合せ状態で行い、応力およびひずみの表示には次の式を用いた。

$$|\sigma| = (\sigma_z^2 + 3\tau_{z\theta}^2)^{1/2}$$

$$\rho = \int d\epsilon^{ie}, \quad d\epsilon^{ie} = \left\{ (d\epsilon_z^{ie})^2 + \frac{1}{3} (dr_{z\theta}^{ie})^2 \right\}^{1/2}$$

$$\theta_o = \text{Tan}^{-1}(\sqrt{3} \tau_{z\theta} / \sigma_z)$$

ここで、 $|\sigma|$ ,  $d\epsilon^{ie}$ ,  $dr_{z\theta}^{ie}$ ,  $\rho$ ,  $\theta_o$  は、それぞれミーゼス形相当応力、軸方向非弾性ひずみ増分、せん断非弾性ひずみ増分、ミーゼス形相当ひずみ量および負荷方

向を表す角度である。

実験での応力は真応力で表示し、また、負荷および除荷は応力速度 19.6 MPa/min で行った。600°Cで、この応力速度で負荷した場合、非弾性ひずみが生じはじめてから、4.5% ひずみを得るまで約6分間を用いた。それに対し、4.5% の非常弾性ひずみを得るまで負荷し応力を保持した後の最初の6分間で生じた非弾性ひずみは0.4% 以下であった。よって、一定応力速度で負荷している間の時間依存性非弾性ひずみは無視し、このとき生じた非弾性ひずみを塑性ひずみとした。また、一定応力状態で生じた非弾性ひずみをクリープひずみとして扱った。試験片は所定の温度まで2°C/s の速度で昇温および降温し、その温度で約5分間保持した後、実験を開始した。

図4(a)~(d) は、本報告で行った試験の説明図である。図で  $\rho_1^p$ ,  $\rho_1^c$  はそれぞれ塑性予ひずみ量およびクリープ予ひずみ量を表し、 $\rho_2$ ,  $\rho_2'$  はそれぞれ負荷経路折り曲げ後、および完全除荷後の塑性ひずみ量を表す。また、 $T_1$ ,  $T_2$  はそれぞれ前負荷時、および再負荷時の温度を表し、 $R.T$  は室温を表す。図4の(a), (b) は、温度変化をあたえた場合の塑性変形を調べるための実験であり、これには試験片Aを用いた。図4の(c), (d) は、クリープ変形が塑性変形にあたる影響を調べるための実験であり、これには試験片Bを用いた。実験の具体的内容は次のとおりである。

(a) 600°Cで引張り方向に塑性予ひずみ  $\rho_1^p$  をあたえ、部分除荷後、温度を400°C, 200°C および室温に下げ、引張り方向と圧縮方向に再負荷する。

(b) 引張応力を一定に保持したまま、温度を室温から600°Cまで1°C/sの速度で上昇させる。

(c) 600°Cにおいて引張り方向に塑性予ひずみ  $\rho_1^p$  をあたえた後、さらにクリープ予ひずみ  $\rho_1^c$  をあたえ、その後同じ温度で完全除荷した後、軸方向負荷とねじりの組合せ応力状態で比例負荷を行う。

(d) (c)と同様に、600°Cで塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後、温度を室温に下げ、完全除荷後比例負荷を行う。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各温度での応力-ひずみ曲線

図5に室温, 200°C, 400°C, 600°Cの各温度での単軸引張りにおける応力-ひずみ曲線を示す。400°C以下の

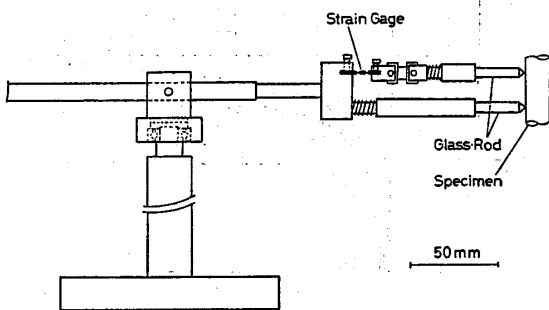


図3 ひずみ測定装置

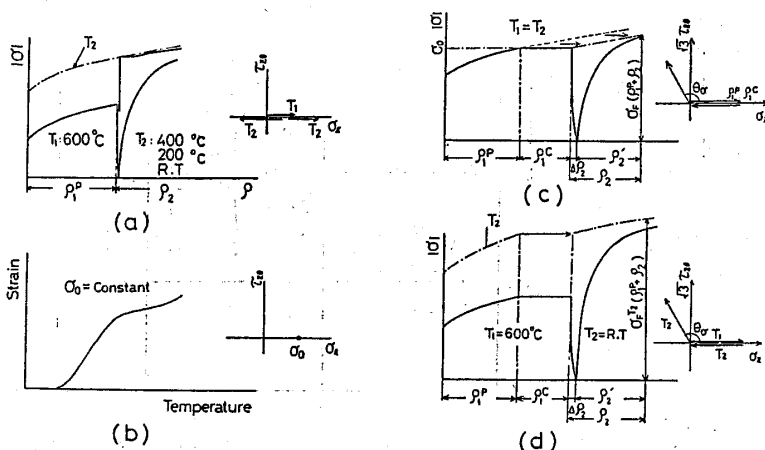


図4 実験に用いた負荷条件

温度での応力-ひずみ曲線はなめらかであるのに対し、600°C では応力-ひずみ曲線に、セレーション<sup>(7)</sup>による階段状の形状が見られる。また、各温度での加工硬化率はほぼ等しく、流動応力は室温から 200°C の間で大きく低下している。

**3.2 塑性予ひずみをあたえた後の他の温度での塑性変形挙動** ある温度であたえた塑性変形が他の温度での塑性変形におよぼす影響を調べるため行った図 4(a) の実験結果を図 6 から図 9 に示す。図 6 は、600°C で塑性予ひずみ  $\rho_1^p$  をあたえた後、温度を変えて引張り方向に再負荷したときの実験結果である。ここで一点鎖線は最初から再負荷時の温度で引張り負荷をあたえた応力-ひずみ曲線である。図 6 からは、200°C と 400°C の場合、ある応力値以上で急に塑性ひずみが増加する軟鋼形の降伏現象が見られるが、室温ではこのような現象は見られず、応力-ひずみ曲線はなめらかであることがわかる。また、再負荷後の応力-ひずみ曲線と一点鎖線はほぼ一致しており、加工硬化が塑性予ひずみをあたえた温度にはあまり影響されず、あたえたひずみ量に大きく依存していることがわかる。図 7 と図 8 は 600°C で塑性予ひずみをあたえた後、他の温度で圧縮方向に再負荷したときの実験結果

である。図中の一点鎖線は最初から再負荷時の温度で塑性予ひずみ  $\rho_1^p$  をあたえた後、圧縮方向に再負荷したときの結果である。塑性予ひずみを 600°C であたえた場合、最初から同じ温度で塑性予ひずみをあたえた場合に比べ、変形初期にはバウソング効果は小さい。特に、 $\rho_1^p$  が 4.5% の場合、硬化の傾向が顕著に見られる。これより、図 6 の場合と異なり、逆方向へ再負荷する場合には、はじめの塑性予ひずみをあた

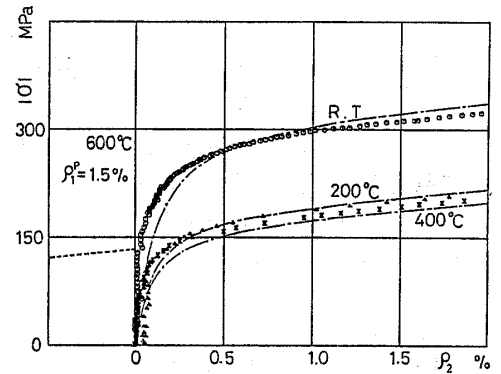


図 7 600°C で引張り塑性予ひずみをあたえた後、他の温度で逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線 (1)

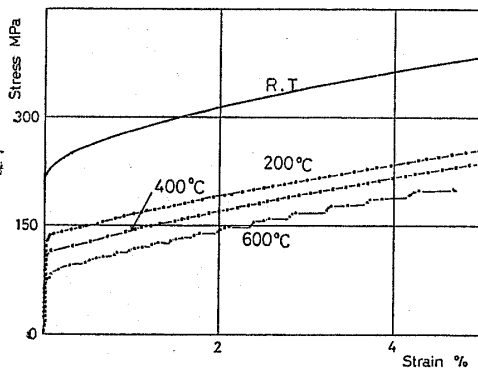


図 5 一定温度下での応力-ひずみ曲線

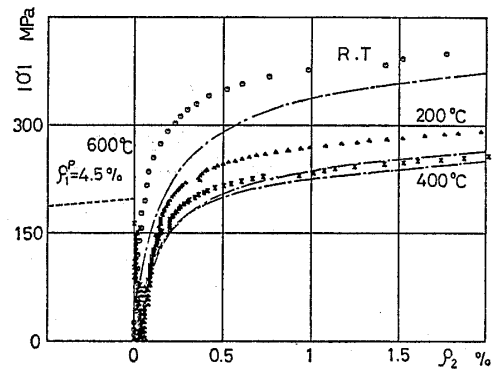


図 8 600°C で引張り塑性予ひずみをあたえた後、他の温度で逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線 (2)

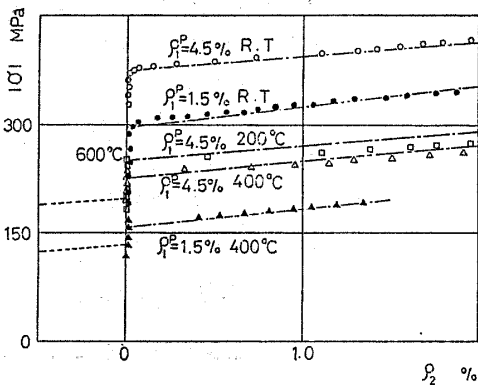


図 6 600°C で引張り塑性予ひずみをあたえた後、他の温度で同方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

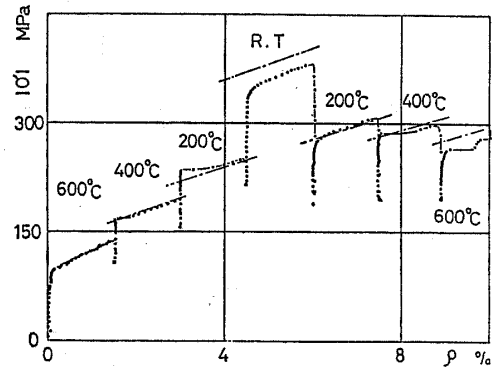


図 9 負荷途中で温度を変化させたときの応力-ひずみ曲線

えたときの温度の影響が認められる。図9は引張り負荷途中で温度変化をあたえたときの応力-ひずみ曲線である。温度は1.5%の塑性ひずみをあたえるごとに、600°Cから室温まで降温し、その後再び600°Cまで昇温させた。試験片の温度変化は部分除荷をしてあたえた。図9のひずみは熱ひずみを差し引いた値で示してある。図9の一点鎖線は、それぞれの温度で最初から引張り負荷をあたえたときの応力-ひずみ曲線である。実験点と一点鎖線を比較すると、室温での結果にはやや相違が見られるが、それ以外の温度では途中で温度を変化させても、一定温度下での応力-ひずみ曲線にはほぼ一致している。

**3・3 連続的溫度変化下での塑性変形挙動** 図10は温度が上昇するときに、流動応力の低下に伴って生じる塑性変形を調べた結果である。図4(b)の実験に対応する。実験では試験片の引張応力( $\sigma_0$ )を一定に保ち、温度を室温から1.0°C/sの速度で600°Cまで上昇させたときの塑性変形の進行を示している。以後、このようにして得られた温度とひずみの関係を「温度-ひずみ曲線」と呼ぶことにする。また、試験片に加えた応力は室温では塑性変形を生じない範囲に選んでいる。図10より、各応力での温度-ひずみ曲線の形状は複雑にもかかわらずやや類似性を有しており、530°C付近でひずみが急激に進展している。この急激なひずみ変化の生じる温度の前後にはひずみの進展が非常に小さいかまたはほとんど零の領域がある。

図10の温度-ひずみ曲線で、温度上昇に伴うひずみ速度の平均値は0.2%/minから0.6%/min程度、図5の応力-ひずみ曲線におけるひずみ速度は0.6%/minから0.9%/min程度であった。両者のひずみ速度には大きな差はないのでひずみ速度の影響を無視し、温度ひずみ曲線と応力ひずみ曲線との比較を行う。結果を図11に示す。

図10で一定応力 $\sigma_0$ が180MPaの場合について考

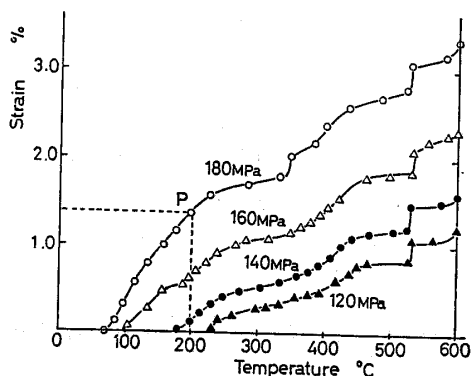


図10 一定応力下で温度を上昇させたときの温度とひずみの関係

えると、温度が200°Cになったときのひずみは約1.3%である。これは図11のP点に対応する。同様に、温度ひずみ曲線の200°C、400°Cおよび600°Cに対応する点を図11中にそれぞれ○、●および●印で示してある。これらの点はそれぞれ対応する温度での応力-ひずみ曲線の上にはほぼのっている。いま点Pの状態について考察すると、温度ひずみ曲線における点Pの塑性ひずみは、180MPaの応力で室温から200°Cまでの温度上昇中に生じたひずみであるにもかかわらず、200°Cの一定温度下で引張応力が180MPaになるまでに生じる塑性ひずみとほぼ一致している。このことは、引張り負荷過程では低い温度であたえた塑性ひずみ履歴が、より高い温度であたえた塑性ひずみ履歴と応力-ひずみ関係においてほぼ等価であることを示している。また、任意の温度での応力-ひずみ曲線を図11の温度-ひずみ曲線から推定できることを示している。

**3・4 600°Cで塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後の塑性変形挙動** 図4(c)、(d)の、クリープ予ひずみをあたえた後の塑性変形挙動を調べるための実験には、試験片Bを用いた。試験片Bは試験片Aに比べ、単軸引張試験における流動応力は、600°Cで約17%、室温で約8%高く、また、600°Cで応力が234MPaのとき4.5%の塑性ひずみを生じた。この応力で試験片にクリープ変形をあたえたとき、約130分で3.0%、約240分で4.5%のクリープひずみが生じた。また、クリープひずみ速度は約40分後からほぼ一定となった。図12と図13に、クリープ変形をあたえた後、同温度で引張り負荷、あるいは、圧縮負荷を加えたときの応力-ひずみ曲線を示す。図12は600°Cで塑性予ひずみ4.5%をあたえ、さらに種々の大きさのクリープ予ひずみをあたえた後完全除荷し、引張り方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。一点鎖線は600°Cにおける単軸引張りの応力-ひずみ曲線であり、点線はクリープ予ひずみが塑性ひ

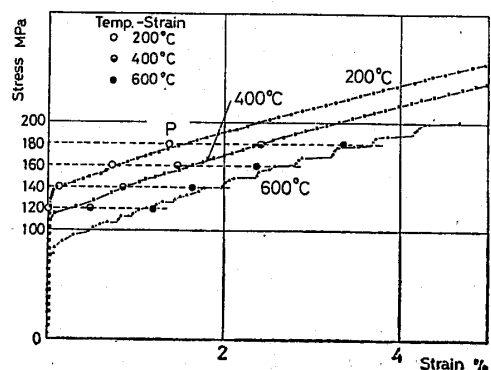


図11

ずみと同じ加工硬化をあたえると仮定したときの応力-ひずみ曲線である。図 12 で、 $\rho_1^c=0$  の結果は、4.5% の塑性予ひずみをあたえた後、クリープ予ひずみをあたえないで一度完全除荷し、再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。完全除荷後、再負荷時の応力-ひずみ曲線を比較すると、クリープ予ひずみをあたえた場合には、あたえない場合に比べ流動応力は高くなっている。しかし、クリープ予ひずみをあたえた後の応力-ひずみ曲線を、クリープ予ひずみが塑性予ひずみと加工硬化に対して同じ効果をもつと仮定して得られた応力-ひずみ曲線（点線）と比べると、その流動応力は大きく下回っている。すなわち、クリープ予ひずみによる硬化は、塑性予ひずみによる硬化に比べ小さい。また、図 12 で、 $\rho_1^c$  が 1.5% と 4.5% の場合の実験結果を比較すると、両者の流動応力に大きな差がないことから定常クリープは、遷移クリープに比べ材料の塑性変形にあたえる影響が小さいと考えられる。図 13 は、図 12 の場合と同様の予ひずみをあたえた後、圧縮方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。図 13 の一点鎖線は、クリープ予ひず

みをあたえないで再負荷したときの応力-ひずみ曲線であり、点線は、クリープ予ひずみが塑性予ひずみと同じ加工硬化をあたえると仮定したときの応力-ひずみ曲線である。実験結果は、SUS 304 が、クリープ予ひずみをあたえることにより、圧縮方向にも硬化することを示している。図 13 で、クリープ予ひずみをあたえた後の応力-ひずみ曲線を、クリープ予ひずみが塑性予ひずみと加工硬化に対し同じ効果をもつと仮定して得られた応力-ひずみ曲線（点線）と比べると、その流動応力は下回っており、圧縮方向に対してもクリープ予ひずみによる硬化は、塑性予ひずみによる硬化に比べ小さい。

図 14 と図 15 は、塑性予ひずみとクリープ予ひずみが、引張りとねじりの組合せ応力下での塑性変形におよぼす影響を調べた結果である。図 14 は、600°C で引張り方向に塑性予ひずみ 4.5% のみをあたえ、完全除荷後に同温度で種々の方向に比例負荷を行った結果である。実験点は、後続ひずみ量  $\rho_2^c$  がそれぞれ 0.05%、0.2% および 1.0% 生じたときの応力状態を示している。また、後続ひずみ量が等しい実験点を結ぶと一つの曲線群が得られるが、以後このような線図を「等塑性ひずみ線図」と呼ぶ。完全除荷後の再負荷方向は 5 本の試験片を用い、 $\theta_0$  が、0°、45°、90°、135° および 180° について実験を行った。実験点における

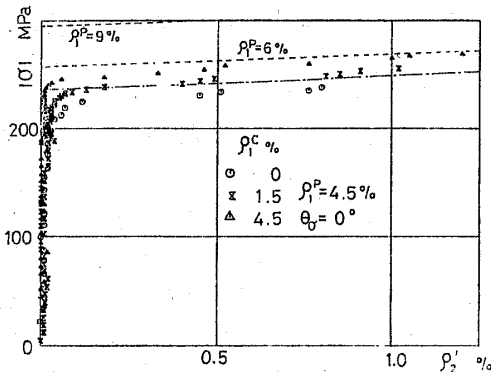


図 12 600°C で引張りクリープ予ひずみをあたえた後、同方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

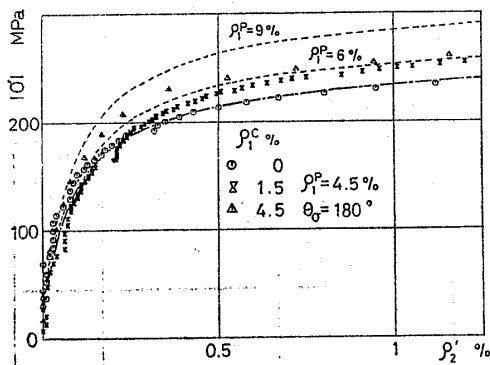


図 13 600°C で引張りクリープ予ひずみをあたえた後、逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

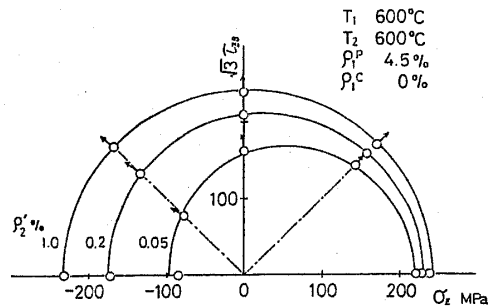


図 14 600°C で塑性予ひずみをあたえた後の等塑性ひずみ線

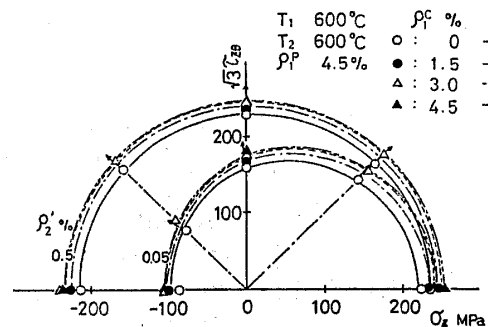


図 15 600°C で塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後の等塑性ひずみ線

矢印は、横軸を  $\epsilon_2^p$ 、たて軸を  $r_{20}^p/\sqrt{3}$  にとったひずみ平面での塑性ひずみの増分方向を表す。ただし、 $\epsilon_2^p$ 、 $r_{20}^p$  はそれぞれ軸方向塑性ひずみせん断塑性ひずみである。等塑性ひずみ曲線は、塑性予ひずみをあたえた引張り方向に出っぱり、その逆方向に偏平な形状をしている。また、後続ひずみ量  $\rho_2'$  の増分に伴い、等塑性ひずみ曲線は原点を中心とする円に近づいている。図 15 は、600°C で引張り方向に塑性予ひずみ 4.5% をあたえ、さらに種々のクリープ予ひずみをあたえた場合の、完全除荷後の等塑性ひずみ線図である。クリープ予ひずみをあたえることにより、等塑性ひずみ曲線は、わずかに相似的に膨張している。また、クリープ予ひずみが大きくなるにしたがい、その効果は飽和している。Kujawski<sup>(9)</sup> らは、ステンレス鋼 SUS 304 に対し、室温で引張り方向に塑性ひずみとりクリープひずみをあたえた後、引張り方向に再負荷する実験を行っており、室温でのクリープひずみが、塑性ひずみとほぼ等価の硬化を示している実験結果を得ている。本実験において硬化の傾向は見られるものの、Kujawski らの実験結果が示すような大きな硬化ではない。これ

は、本実験は、600°C の高温で行っており、クリープ変形が定常クリープを含む大ひずみであるのに対し、Kujawski らは、室温での定常クリープ変形を含まない小さなクリープひずみを対象としているという違いによるものと考えられる。

**3.5 600°C で塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後、室温での塑性変形挙動** 図 16 と図 17 は、600°C で引張り方向に塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後、室温での塑性変形挙動を調べた結果である。図 16 は完全除荷後、引張り方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。図中の一点鎖線は、最初から室温で引張り負荷をあたえたときの応力-ひずみ曲線である。クリープ予ひずみをあたえた場合とあたえない場合とでは、応力-ひずみ曲線にほとんど差がない。また、図 6 の実験結果と同様に、実験点と一点鎖線はほぼ一致しており、試験片 B においても、加工硬化が塑性予ひずみをあたえる温度にはあまり影響されていない。図 17 は、図 16 と同様の予ひずみをあたえた後、室温で完全除荷後圧縮方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。点線は、最初から室温で引張り方向に 4.5% の塑性予ひずみをあたえた後、圧縮方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線である。図 8 の結果と同様に、実験点は点線に比べ顕著な硬化の傾向が見られる。また、図 17 で、4.5% のクリープ予ひずみをあたえた後の応力-ひずみ曲線では、そのほかの応力-ひずみ曲線に比べ、変形初期においてバウシニング効果がやや小さいが、0%、1.5%、および 3.0% のクリープ予ひずみをあたえた後の応力-ひずみ曲線には、あたえたクリープ予ひずみの大きさによる顕著な差は見られない。また、それぞれの応力-ひずみ曲線で、 $\rho_2'$  が 1.0% を越えた状態では、クリープ予ひずみのみ差による流動応力の顕著な差は見られない。図 18 は、クリープ予ひずみが、室温での組合せ応力下の塑性変形挙動におよぼす影響を調べた結果である。600°C でクリープ予ひずみをあたえた場合と

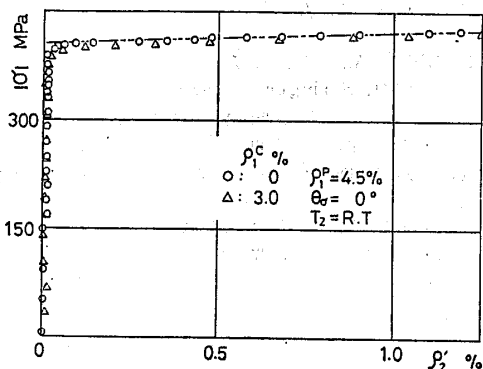


図 16 600°C で引張りクリープ予ひずみをあたえた後、室温で同方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

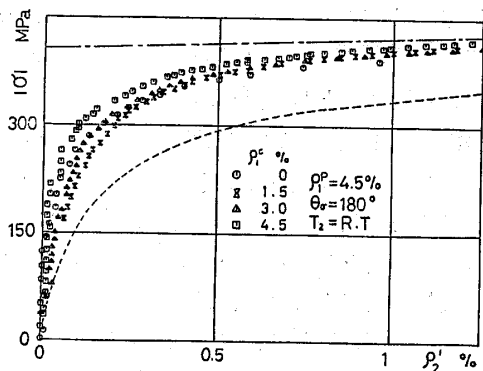


図 17 600°C で引張りクリープ予ひずみをあたえた後、室温で逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

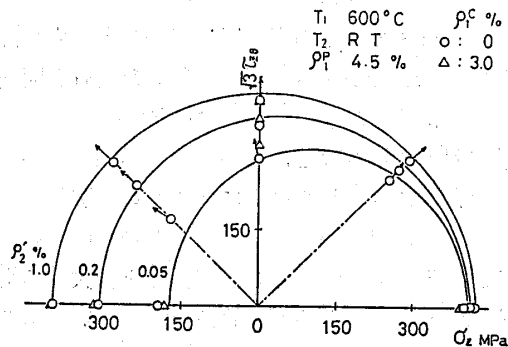


図 18 600°C で塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた後の室温での等塑性ひずみ線図

あたえない場合の比較を示してある。両者の差はほとんどなく、高温でのクリープひずみは、室温での塑性変形に顕著な影響をおよぼしていない。Brown<sup>(1)</sup>は、高温でクリープひずみをあたえたアルミニウム試験片について、室温での降伏曲面を定め、クリープひずみが室温での降伏曲面におよぼす影響は小さいことを見出ししている。材料および実験条件に差はあるが、図 18 の結果は、Brown の結果と類似している。

#### 4. 結 言

高温機器の設計上問題となっている。塑性変形とクリープ変形を相互関係、および温度と変形挙動の関係を明らかにするため、その第一歩として、高温機器の構造材として多用されている SUS 304 について、その薄肉円筒試験片に、軸方向負荷とねじりを組合せて加える実験を、室温から 600°C の温度範囲で行った。負荷は 19.6 MPa/min で行った。600°C で負荷したときの塑性ひずみ速度は、応力を保持したときのクリープひずみ速度に比べ十分大きかったことにより、塑性ひずみに含まれる時間依存性非弾性ひずみは無視した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 600°C での応力-ひずみ曲線には、セレーションによる階段状の形状が見られた。また、各温度での加工硬化率はほぼ等しく、流動応力は室温から 200°C の間で大きく低下していた。

(2) 600°C で引張り方向に塑性予ひずみをあたえた後、他の温度で引張り方向に再負荷した場合の応力-ひずみ曲線は、塑性予ひずみをあたえた温度にはあま

り影響されず、最初から再負荷時の温度で引張ったときの応力-ひずみ曲線にほぼ一致した。しかし、同様の予ひずみをあたえ、他の温度で逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線は、最初から再負荷時の温度で塑性予ひずみをあたえ、逆方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線に比べ、変形初期のバウシング効果は小さく現れた。

(3) 一定応力状態で、試験片の温度を室温から 600°C まで 1°C/s の速度で、上昇させたときの温度とひずみの関係を、一定温度下での応力-ひずみ関係と比較した結果、同一温度および応力状態において、塑性ひずみ量はよく一致した。

(4) 600°C で塑性予ひずみをあたえ、さらにクリープ予ひずみをあたえたときの、600°C での等塑性ひずみ線図は、クリープ予ひずみ量の大きさに対し、ほぼ相似的に膨張する傾向にあった。しかし、600°C で同様の予ひずみをあたえた後の室温での等塑性予ひずみ線図には、600°C であたえたクリープ予ひずみの影響は顕著には現れなかった。

#### 文 献

- (1) Brown, G.M., *J. Mech. Phys. Solids*, 18 (1970), 383.
- (2) Phillips, A., *IUT-AM-Symp, Thermoelasticity*, (1968), 241, Springer-Verlag.
- (3) 田中・ほか 2 名, 機論, 38-314 (昭 47), 2439.
- (4) 石崎・ほか 3 名, 機論, 39-326 (昭 48), 3010.
- (5) Kujawski, D., *J. Mech. Phys. Solids*, 28 (1979), 129.
- (6) 白鳥・ほか 4 名, 機論, 47-416, A (昭 56), 441.
- (7) 平川・ほか 2 名, 材料, 27-30 (昭 53), 948.

#### 討 論

〔質問〕 井上 達雄 [京都大学工学部]

最近とくに重要性が指摘されている塑性-クリープ相互作用について貴重な実験をされた意義は大きいと敬服する。二、三ご教示願いたい。

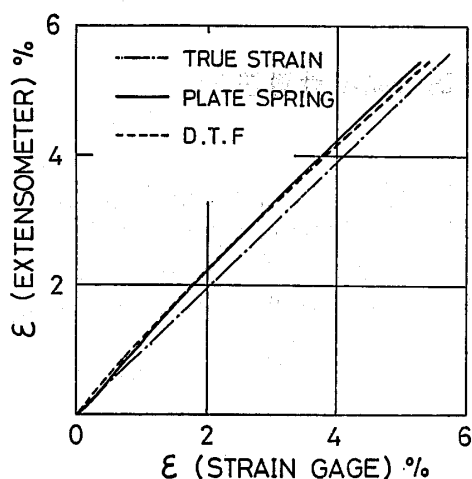
(1) これまでの差動変圧器を用いた多軸変位計を改良して板ばねとひずみゲージを用いた装置を開発されたわけであるが、前の装置との優劣、さらにここでの実験に対する精度などについてご教示願いたい。

(2) 図 5 にみられるように、600°C の引張試験でセレーションが出ているが、これは材料固有のものか。それとも、もし変形速度を変えると消失するものか。また、これが生じる温度範囲などについてもデータがあればお示し願いたい。

(3) 得られた結果を拝見すると、いくつかの場合

を除いて塑性予ひずみとクリープ予ひずみが、その後の変形に与える影響はほとんど等価であるようにみうけられる。今後、塑性-クリープ相互作用を考慮した構成関係を構築するためにあたって、このようなことを一般化してよいとお考えか。

〔回答〕 (1) 差動変圧器を用いた変位計では<sup>(6)</sup>、二点間の絶対変位を別々に測定し、その差としてひずみを求めていたため、軸方向とねじりで計 4 台の動ひずみ計を必要とした。また、差動変圧器の本体にコアが接触した場合には正確なひずみ測定ができなくなるなど、調整、取付けには熟練を要した。それに対し、今回試作した板ばねによる変位計では二点間の相対変位を出力として得ることができ、調整、取付けも容易である。

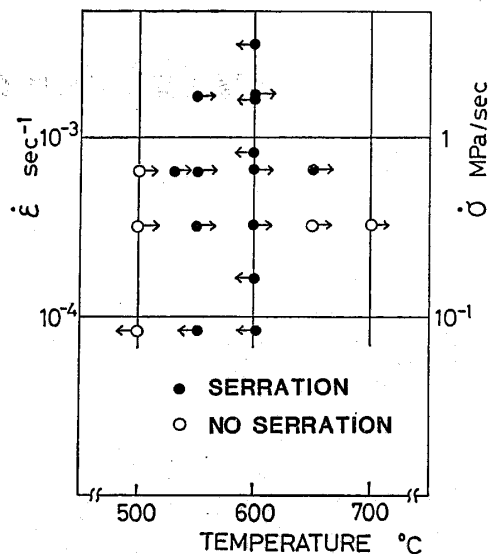


付図 1 変位計の精度

付図 1 に、室温で引張り負荷をあたえたときの差動変圧器による変位計および板ばねによる変位計の出力と、試験片にはったひずみゲージの出力との比較を示す。二つの変位計とも直線性ではほぼ同程度の精度である。また板ばねによる変位計では、引張り後、圧縮方向に再負荷したときの付図 1 上での引張り時と圧縮時のひずみの差は、再負荷後のひずみが 0.5% までは  $\pm 0.02\%$  以内であった。せん断ひずみについても同程度の精度が得られた。

(2) ひずみ時効と同様に、セレーションは主に転位と溶質原子の相互作用によるもので、その起きる温度とひずみ速度は、ある範囲をもつと考えられている(付 1)。付図 2 に、著者らが SUS 304 に対し行った実験結果を示す。黒丸はセレーションが認められた点であり、白丸は認められなかった点である。実験点上

(付 1) たとえば幸田・ほか 4 名, 合金の析出, (昭 47), 293, 丸善。



付図 2 セレーションの現れる条件

の左矢印は応力制御で、右矢印はひずみ制御でその実験が行われたことを示す。また 500°C 以下ではセレーションは認められなかった。

(3) 一定温度下では、高応力下でのクリープ予ひずみが、その後の塑性変形時に、材料に硬化の傾向をあたえると性質は、SUS 304 については一般的に言えると著者らは考えている。しかしながら、その硬化の程度は、クリープひずみ量ばかりでなく、温度、応力およびクリープ変形が遷移クリープであるか、あるいは定常クリープであるかといったクリープ予ひずみの条件によって差があると考えられ、塑性-クリープ相互作用を考慮した構成関係を構築するためには、今後多くの、定性的および定量的実験データをそろえて検討していく必要があると著者らは考えている。