

## 論 文

UDC 669.14.018.85 : 669.15'24'26'28'74-194 : 539.431 : 539.379

SUS 316 鋼の高温低サイクル疲れ寿命におよぼす  
漸増平均ひずみの影響\*

金澤 健二\*\*・山口 弘二\*\*\*・永井 博文\*\*\*\*

## Effect of Rising Mean Strain on Elevated-Temperature, Low-Cycle Fatigue Life of a SUS 316 Steel

Kenji KANAZAWA, Koji YAMAGUCHI, and Hirobumi NAGAI

## Synopsis:

Fatigue tests were carried out on a Type 316 stainless steel at 600 and 700°C in order to clarify the effect of creep deformation increasing gradually during fatigue tests on elevated-temperature, low-cycle fatigue life. Strain wave forms with or without rising mean strain were used for truncated wave form with a 10-min hold in tension only and triangular wave form. The strain rate of ramps were 40%/min.

For a given total strain range, fatigue life of the truncated wave form is smaller than that of the triangular wave form. The difference between them obtained at 600°C is larger than obtained at 700°C. Well-defined intergranular facets covered with small dimples were observed for specimens tested under truncated wave form at 600°C, but not at 700°C. These results could be explained by phenomenon of recovery process at 700°C, because of which stress applied grain boundaries might have decreased under truncated wave form.

Rising mean strain per cycle under truncated wave form was creep strain, however no clear effect of the rising mean strain on low-cycle fatigue life was observed. Summation of the creep strain corresponding to relaxation stress and rising mean strain per cycle were almost constant for a given total strain range. It is considered that this is a reason why no effect of rising mean strain on fatigue life was observed.

## 1. 緒 言

近年、原子炉やガスタービンの開発に伴い、優れた高温強度をもつた新しい金属材料の開発が望まれる一方、既存の実用金属材料に対しては高温特性を十分に把握しておくことが望まれている。その一つとして高温低サイクル疲れ特性についての関心が高まり、多くの研究がなされてきた<sup>1)2)</sup>。

ASME のボイラ、圧力容器設計基準でも、クリープ温度域で使用される構造機器の設計手法を Code Case 1592 で述べている<sup>3)</sup>。そこでは、予想される高温度領域において、構成要素の累積非弾性ひずみ量の制限や、疲れクリープ相互作用に対する扱い方が記述されている。なお、そこでの疲れクリープ相互作用の考え方は、累積損傷則<sup>4)</sup>に基づくものであるが、その妥当性については現在なお活発な議論の対象になつている\*。これ

までも、高温低サイクル疲れにおけるひずみ波形の効果等を調べるといった実験的研究によつて、疲れクリープ相互作用に関する知見もかなり得られている<sup>5)</sup>。しかし Code Case 1592 において制限されているような非弾性ひずみが累積される条件下で、繰返しひずみが与えられた場合、材料はどのような挙動を示すのか、疲れ寿命は累積ひずみに影響を受けるのかといった研究はこれまでほとんどなされていない<sup>6)</sup>。

そこで本研究においては SUS 316 鋼を供試材とし平均ひずみが漸増する条件下で高温低サイクル疲れ試験を行い、疲れ寿命におよぼす漸増平均ひずみの影響を調べ、疲れクリープ相互作用の観点から検討を試みた。

## 2. 実験方法

本実験に供した材料は原子炉構造材などとして、高温

\* 日本鉄鋼協会 クリープ委員会 高温クリープ疲労試験分科会

\* 昭和 53 年 10 月 13 日受付 (Received Oct. 13, 1978)

\*\* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku 153)

\*\*\* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

\*\*\*\* 工学院大学大学院 (現: 白木金属工業(株)) Graduate School, Kogakuin University, Now Shiroki Corp.)

Table 1. Chemical composition of the material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.07	0.53	1.66	0.023	0.008	10.73	16.75	2.23

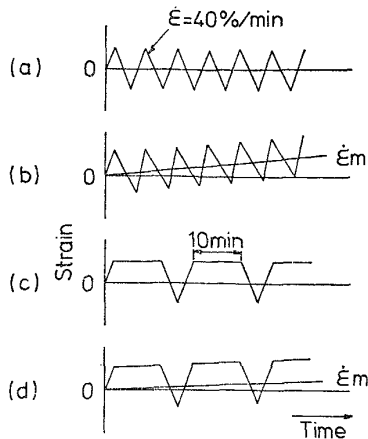


Fig. 1. Strain wave form with or without rising mean strain. ( $\dot{\epsilon}_m$  means strain rate of rising mean strain.)

強度特性の把握が至急に望まれているオーステナイトステンレス鋼 SUS 316 で、その化学成分を Table 1 に示す。素材の形状は直径 22 mm の丸棒で、1050°C から水冷による固溶化熱処理が施されている。本供試材の三角波のひずみ波形による高温低サイクル疲れ試験の結果はすでに報告されている<sup>7)</sup>。

疲れ試験片形状は、平行部直径 6 mm、長さ 15 mm の平滑試験片で、平行部表面の最終仕上げは 04 番エメリ紙で軸方向研磨によつた。疲れ試験は加熱炉を有する引張圧縮のサーボ油圧式高温低サイクル疲れ試験機によつた。本実験においては軸方向ひずみを制御した。試験片形状、試験機およびひずみ制御方法の詳細は文献 7) と同じである。ひずみ波形を Fig. 1 に示す。(a) は完全両振りの三角波、(b) は  $1.8 \times 10^{-2}$  から  $1.6 \times 10^{-1} \%$ /min までの一定の漸増平均ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon}_m$ ) を有する三角波、(c) は引張最大ひずみ時に 10 min 間の保持時間を有する台形波、(d) は  $4.7 \times 10^{-4}$  から  $2.3 \times 10^{-3} \%$ /min の漸増平均ひずみ速度下で、引張最大ひずみ時に 10 min 間の保持時間を有する台形波である。各ひずみ波形とも立ち上りのひずみ速度は 40%/min とした。ここで採用した漸増平均ひずみ速度は、破断時に数%以下の平均ひずみが与えられるようにして選んだ。

得られた疲れ破面を走査型電子顕微鏡で観察した。オーステナイトステンレス鋼の高温低サイクル疲れでは、試験片を破断に導くき裂以外にも多くのき裂が発生する

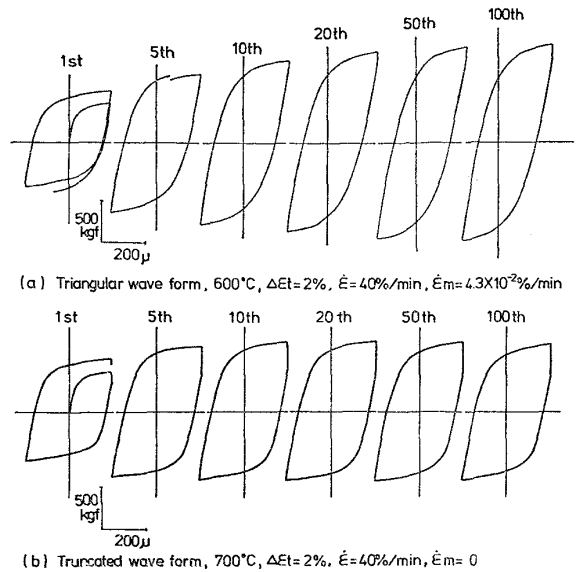


Fig. 2. Examples of change in load-longation hysteresis loops under strain cycling.

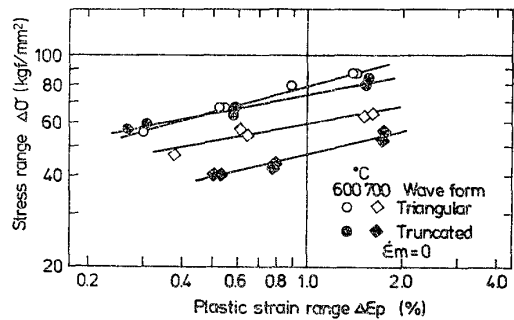


Fig. 3. Relation between the plastic strain range and the stress range.

ので<sup>8)</sup>、本実験によつて得られた破断試験片に対して、光学顕微鏡により試験片表面、断面におけるき裂を観察した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 繰返しひずみに伴う変形挙動

ひずみの繰返しに伴う荷重-伸び履歴曲線の変化の一例を Fig. 2 に示す。引張側最大応力 ( $\sigma_t$ )、圧縮側最小応力 ( $\sigma_c$ ) の絶対値は次第に大きくなる。数サイクル目あたりから漸増平均ひずみがある場合でも記録紙上ではほぼ閉じたヒステリシスループを描くようになり、この段階では各条件の試験において  $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  の絶対値の差は小さくなる。台形波の場合も、保持時間中に応力は緩和するが、 $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  の絶対値はほぼ等しい。以下破断繰返し数 ( $N_f$ ) の約 1/2 における応力幅、塑性ひずみ幅の値をその試験における代表値として結果をまとめた。

漸増平均ひずみがない場合の応力幅と塑性ひずみ幅の

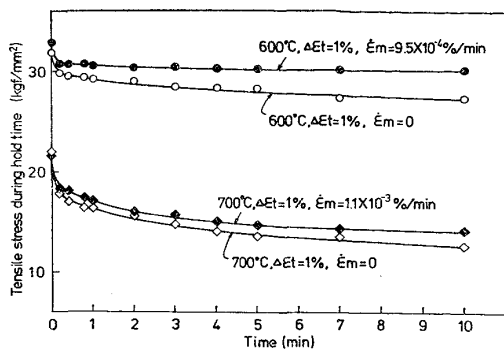


Fig. 4. Stress relaxation during hold period in the maximum tensile strain.

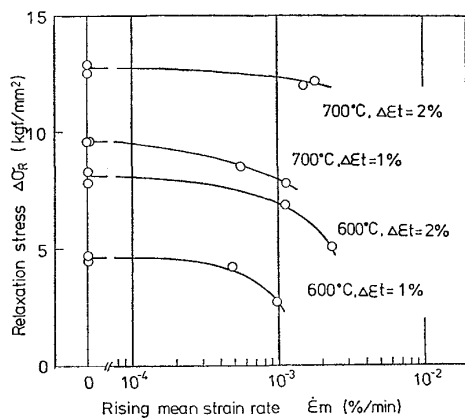


Fig. 5. Relation between the rising mean strain rate and the relaxation stress.

関係を Fig. 3 に示す。700°C では三角波の応力幅の方が台形波の応力幅より明らかに大きい値になっているが、600°C ではその差はわずかで、低ひずみレベルでは逆に台形波の応力幅の方が大きくなっている。漸増平均ひずみが入ると、入らない場合に比べ応力幅が小さくなる場合もあるが、その差は大きくない。

保持時間中の応力リラクゼーションの挙動についても、各試験における代表的なものとして、約  $0.5N_f$  におけるサイクルのリラクゼーション曲線を取り、試験条件の影響をみた。全ひずみ幅 1% の場合のリラクゼーション曲線を Fig. 4 に示す。700°C では 10 min の保持の間、応力の低下は続く。600°C では初めの 1 min 以内で応力の低下は顕著で、その後の低下は少ない。しかし漸増平均ひずみがある場合でも、保持時間中に応力が増加するという事はなかった。引張側最大ひずみ時で 10 min 間保持する間に低下した応力、すなわちリラクゼーション量 ( $\Delta\sigma_R$ ) を漸増平均ひずみ速度に対してプロットしたのが Fig. 5 である。リラクゼーション量は 600°C よりも 700°C における方が、また全ひずみ幅の大きい方が大きい。また漸増平均ひずみ速度が大きくなるに伴い、リラクゼーション量は減少する。なお、そ

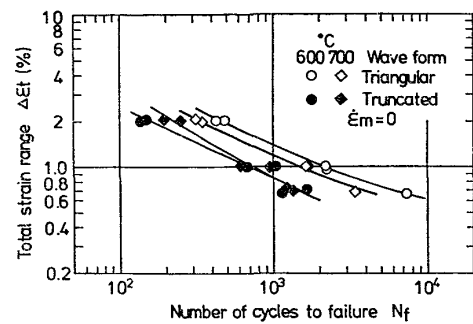


Fig. 6. Relation between the total strain range and the number of cycles to failure.

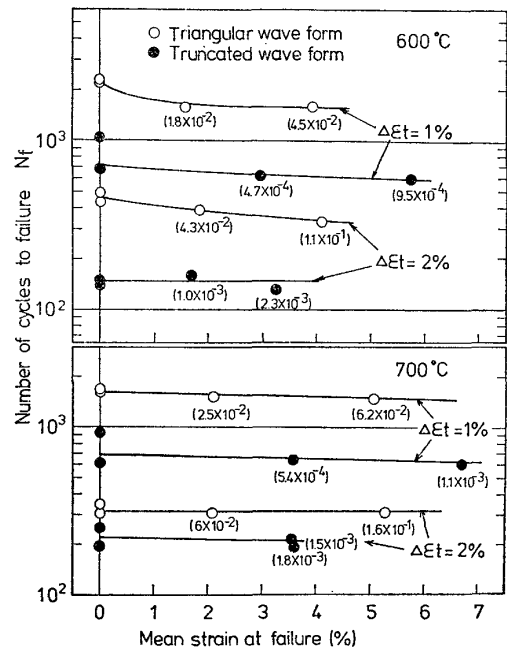


Fig. 7. Effect of the rising mean strain on the number of cycles to failure. (Numbers in parentheses indicate rising mean strain rate in %/min.)

の傾向は 600°C における方が顕著である。

### 3.2 破断繰返し数

漸増平均ひずみのない場合の、全ひずみ幅と破断繰返し数の関係を Fig. 6 に示す。ひずみ速度 40%/min の三角波の場合、各ひずみレベルで 700°C における破断繰返し数の方が 600°C における破断繰返し数よりも小さい。引張側 10 min 保持の台形波による試験では、全ひずみ幅 1%, 0.7% では温度による差はあまりないが、全ひずみ幅 2% の場合は 600°C における破断繰返し数の方が小さい。すなわち、三角波の結果と比べると 600°C における方が保持時間を入れることによる寿命の低下が大きい。

漸増平均ひずみの効果を明確にするために、破断時の平均ひずみと破断繰返し数の関係をプロットしたのが

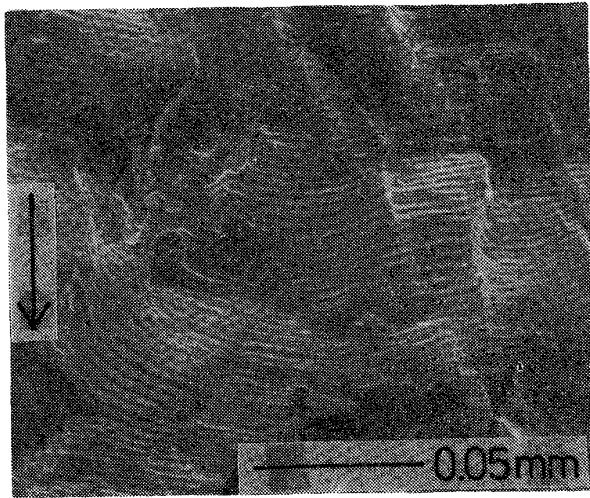
Fig. 7 である. 図中の数値は漸増平均ひずみ速度 (単位: %/min) である. 台形波では漸増平均ひずみが入ることによる破断繰返し数の低下はほとんどない. 三角波で 600°C の場合は平均ひずみが大きい程破断繰返し数は小さくなるが, 700°C ではその傾向はみられない. しかし 600°C の場合でも, 10 min の保持時間を入れることによる寿命の低下程は低下しない.

3.3 破面, き裂観察

ひずみ速度 40 %/min, 漸増平均ひずみなしの三角波

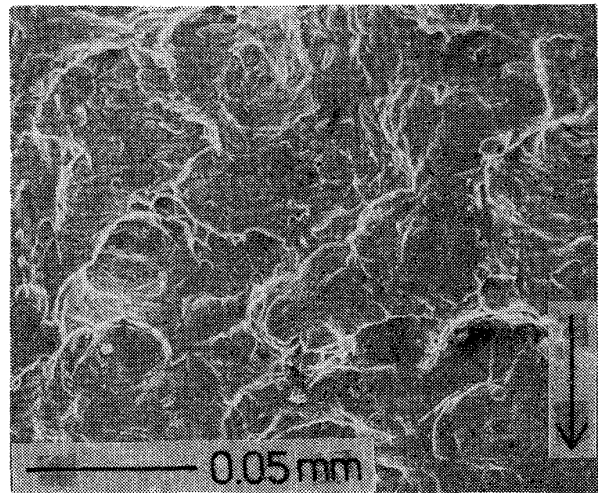
による疲れ破面には, 疲れ破壊特有の条こんが観察された. その代表的な例を Photo. 1 に示す. 漸増平均ひずみのある 40 %/min の三角波による疲れ破面にも条こんがよく観察されるが, 漸増平均ひずみのない場合と異なる点は Photo. 2 に示すように, 最終破断の領域でない破面の中心部に, き裂伝ば方向に伸びたディンプルが観察されることである.

600°C, 台形波, 漸増平均ひずみなしの条件による疲れ破面の特徴を Photo. 3 に示す. 一般に粒界破壊で,



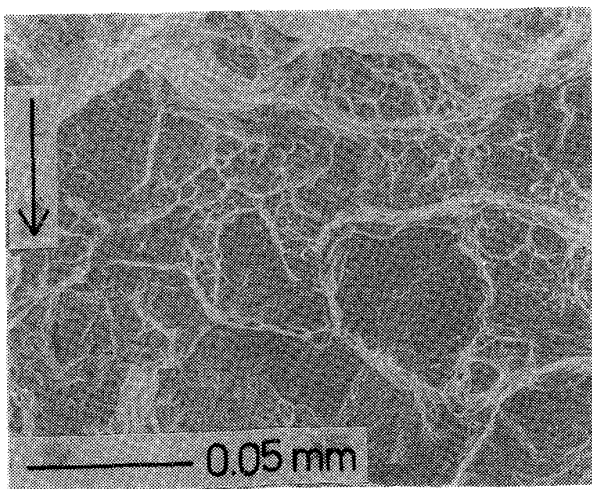
Test temperature  $T: 600^{\circ}\text{C}$ , Total strain range  $\Delta\epsilon_t: 1\%$ , Mean strain at failure  $\epsilon_m: 0\%$ , Triangular wave form, Number of cycles to failure  $N_f: 2224$ .

Photo. 1. Scanning electron micrograph of fracture surface of a fatigued specimen. (Arrow indicates macroscopic direction of crack propagation.)

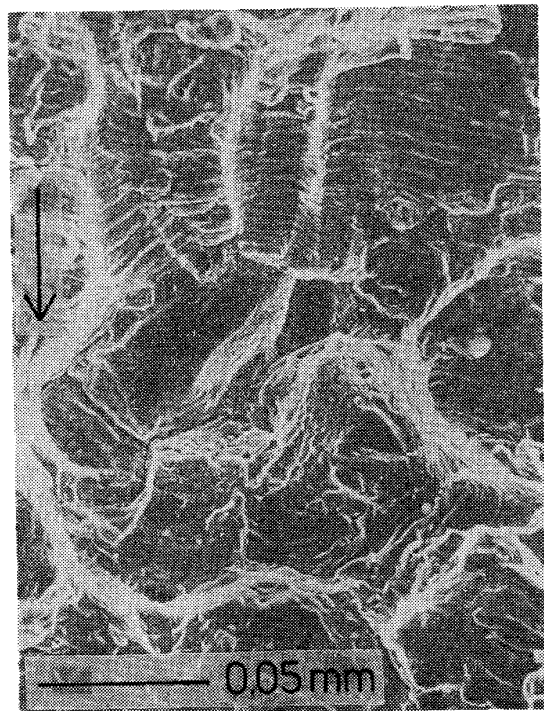


$T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_t: 2\%$ ,  $\epsilon_m: 4.1\%$   
Triangular wave form,  $N_f: 331$ .

Photo. 2. Scanning electron micrograph of fracture surface of a fatigued specimen.

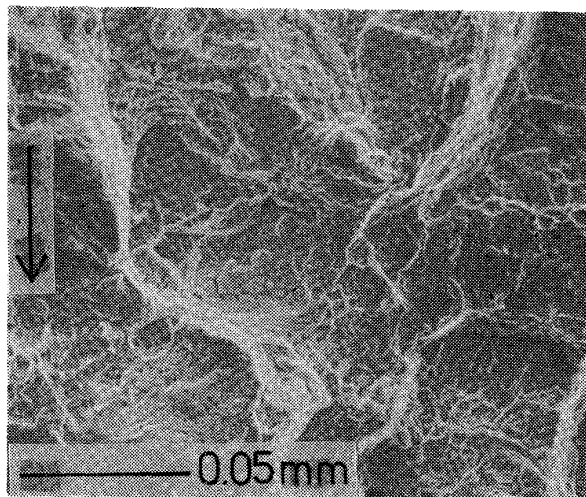


(a)  $T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_t: 2\%$ ,  $\epsilon_m: 0\%$   
Truncated wave form,  $N_f: 147$ .



(b)  $T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon: 0.7\%$ ,  $\epsilon_m: 0\%$   
Truncated wave form,  $N_f: 1615$ .

Photo. 3. Scanning electron micrographs of fracture surfaces of fatigued specimens.



$T: 700^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_f: 1\%$ ,  $\epsilon_m: 0\%$ ,  
Truncated wave form.  $N_f: 939$ .

Photo. 4. Scanning electron micrograph of fracture surface of a fatigued specimen.

その粒界面は小さなディンプルでおおわれている所が多い。この傾向は全ひずみ幅の大きい方 (2%) が明瞭で (Photo. 3 (a)), 全ひずみ幅が小さくなると (0.7%), 粒界破面と条こんが形成されている破面とが混在して観察されることがある (Photo. 3 (b)).  $700^{\circ}\text{C}$ 、台形波、漸増平均ひずみなしの条件による疲れ破面の一例を Photo. 4 に示す。部分的には粒界面もあるが、 $600^{\circ}\text{C}$  における破面 (Photo. 3 (a)) に比べ不明瞭である。また全ひずみ幅が小さくなると  $600^{\circ}\text{C}$  の場合と同様、条こんを観察することができる。

台形波で漸増平均ひずみがある場合の破面は、平均ひずみのない場合と同様であり、 $600^{\circ}\text{C}$  ではディンプルを有する明瞭な粒界破面が観察されるが、 $700^{\circ}\text{C}$  では粒界破面は不明瞭になる。

$600^{\circ}\text{C}$ 、台形波で漸増平均ひずみがある条件による疲れき裂を Photo. 5 に示す。表面では主に粒界にそつてき裂は発生し、部分的には粒内を通るが主に粒界にそつて内部方向に伝ばする。なお断面には、表面から伝ばしたき裂以外にも粒界にそつたき裂が観察されるが、その頻度は漸増平均ひずみのない場合より多かつた。このようなき裂は三角波による試験片にはみられなかつた。

台形波の場合に観察される、試験片内部で発生する粒界にそつたき裂についてより詳細に走査型電子顕微鏡で調べた。 $600^{\circ}\text{C}$  で漸増平均ひずみのない場合を Photo. 6 に、漸増平均ひずみのある場合を Photo. 7 に示す。漸増平均ひずみのない台形波では、所々の粒界にそつてポイドが形成されているのが観察され (Photo. 6 (a)), それらが連結しあつて一結晶粒の一辺にわたつてき裂となつている所もあつた (Photo. 6 (b)). 漸増平均ひず

みのある場合は、平均ひずみのない場合と同様、粒界にそつたポイドが観察されるが、さらに粒界すべりに起因したと思われる粒界き裂も観察された (Photo. 7)。なお、これらの粒界ポイドがエッチピットや粒界析出物に関係する可能性もあるので、観察した試料と同じ試験片の平行部以外の部分から試料を切出し、同一条件で電解腐食して走査型顕微鏡で観察した。しかしその場合には、Photo. 6 (a) に示すようなポイドは観察されなかつた。なお、 $700^{\circ}\text{C}$  における台形波による試験片にも同様なポイドは観察されている<sup>9)</sup>。

## 4. 考 察

### 4.1 各ひずみ波形における非弾性ひずみの性格

MANSON らは種々のひずみ波形の高温低サイクル疲れ寿命を推定する方法として、ひずみ範囲分割法を提唱している<sup>10)</sup>。そこでは非弾性ひずみを粒内すべり変形を主とする塑性ひずみ成分と、粒界すべりや拡散を伴うクリープひずみ成分とに分け、引張過程と圧縮過程のひずみの与えられ方によつて一サイクル当りの塑性ひずみ幅を4種類のひずみ範囲に分割することを基本としている。

本実験結果より漸増平均ひずみの効果を考えるに際し、各ひずみ波形における非弾性ひずみの性格および累積される平均ひずみの性格について明確にしておく。Fig. 2 に示すように漸増平均ひずみがある場合でも、荷重一伸び曲線は記録計の感度と漸増平均ひずみ速度の関係で閉じたループになつている。しかし、模式的に画けば、各ひずみ波形の定常状態時の応力-ひずみ履歴曲線は Fig. 8 のようになる。図中の (a), (b), (c), (d) は Fig. 1 のそれらと対応している。

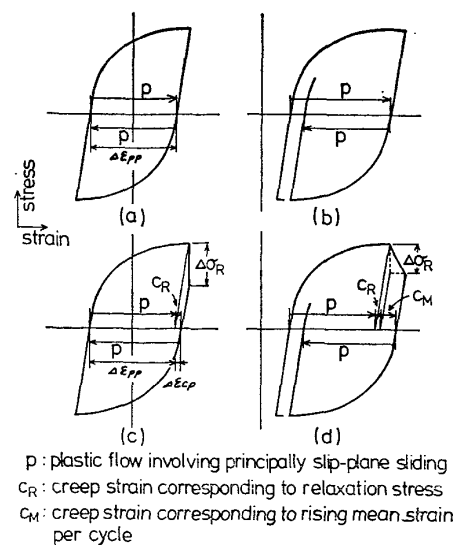
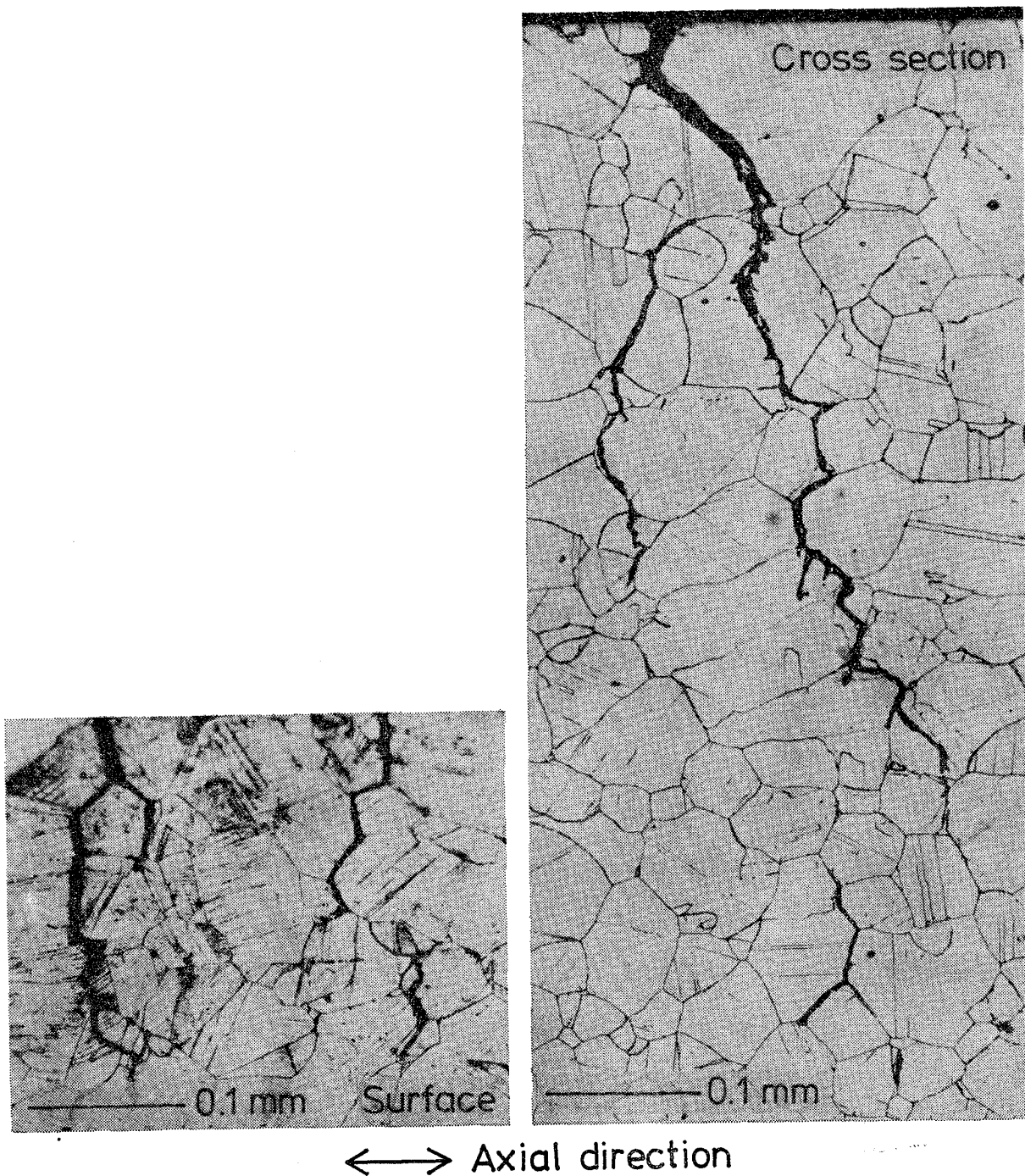


Fig. 8. Idealized hysteresis loops for the strain wave forms shown in Fig. 1.



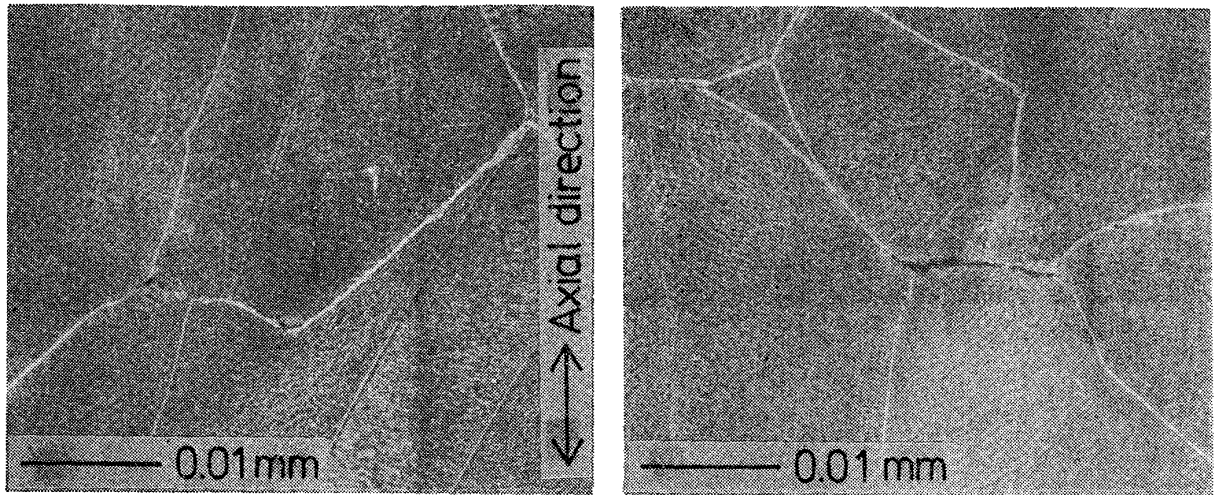
$T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_f: 1\%$ ,  $\epsilon_m: 5.9\%$ . Truncated wave form,  $N_f: 598$ .

Photo. 5. Micrographs of surface and cross section of a fatigued specimen.

ひずみ速度  $40\%/min$  の三角波では、引張、圧縮過程とも変形は主に粒内すべり変形と考えられる。漸増平均ひずみのない場合 (Fig. 8 (a)), このようなひずみ成分はひずみ範囲分割法によれば  $\Delta\epsilon_{pp}$  成分として表わされる。漸増平均ひずみがある場合 (Fig. 8 (b)), 引張過程の塑性ひずみが大きく、圧縮過程の塑性ひずみとの差が累積される。この累積される平均ひずみには、たとえ漸増平均ひずみ速度が  $10^{-3}\%/min$  のオーダーでも、

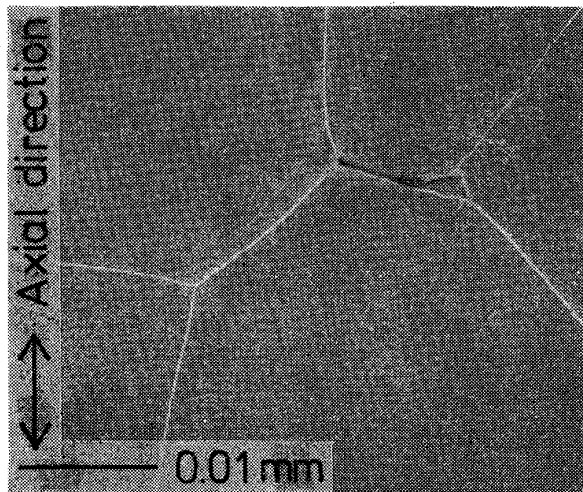
クリープひずみの成分は含まれていないものと考えられる。

漸増平均ひずみのない引張保持台形波においては (Fig. 8 (c)), 引張保持時間中の応力リラクゼーションに対応するクリープひずみ ( $C_R$ ) が引張過程にのみ起こる。このようなひずみ成分はひずみ範囲分割法によれば  $\Delta\epsilon_{cp}$  成分として表わされている。一方漸増平均ひずみがある場合は (Fig. 8 (d)), 引張過程では粒内すべりを



$T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_t: 1\%$ ,  $\epsilon_m: 0\%$ . Truncated wave form,  $N_f: 675$ .

Photo. 6. Scanning electron micrographs of cross section of a fatigued specimen (Voids along grain boundaries).



$T: 600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\epsilon_t: 1\%$ ,  $\epsilon_m: 5.7\%$ .  
Truncated wave form,  $N_f: 598$ .

Photo. 7. Scanning electron micrograph of cross section of a fatigued specimen (Crack initiation by grain boundary sliding).

主とする塑性ひずみの他に、応力リラクセーションに対応するクリープひずみ ( $C_R$ ) と平均ひずみの増分に対応するクリープひずみ ( $C_M$ ) とがあり、圧縮過程では粒内すべり変形のみ起こる。なお、ここで平均ひずみはほとんど応力リラクセーション中に増加するので、その変形はクリープひずみによるものと言える。このような状態のもとで累積される平均ひずみにはクリープひずみ成分が含まれるものと考えられる。

#### 4.2 最大引張ひずみ時における保持時間効果

三角波と引張保持台形波による高温低サイクル疲れ寿命におよぼす漸増平均ひずみの影響を検討する前に、まず引張保持効果について検討する。

オーステナイトステンレス鋼の高温低サイクル疲れで

は、最大引張ひずみ時に保持時間が入ると寿命が低下することは、すでに多くの研究によつて明らかにされている<sup>11)12)</sup>。COFFINはこのような保持時間効果をひずみ速度の効果と合せて周波数で整理している<sup>13)</sup>。すなわち、一サイクル当りの時間が長くなると寿命は低下するものと考え、その原因としては酸化雰囲気の効果을挙げている。しかし最大引張、圧縮時に保持時間が入ると、一サイクル当りの時間が長くなるにもかかわらず寿命の低下はほとんどない<sup>14)</sup>など、寿命を周波数でまとめること、周波数の効果を酸化雰囲気の効果だけで説明することに無理なデータもある。著者らは SUS 321 鋼の高温低サイクル疲れに関連して、 $600^{\circ}\text{C}$  以上の温度では、三角波のひずみ波形試験におけるひずみ速度効果は酸化の影響があつてはじめて生じ、引張側のみ保持時間を入れることによる寿命の低下はクリープの効果が存在することによると考えるのが妥当であることを示した<sup>5)</sup>。

文献 12) では SUS 316 鋼に対して、最大引張ひずみ時に保持時間を有するひずみ波形の疲れ寿命を調べ、より高温である  $650^{\circ}\text{C}$  の方が  $550^{\circ}\text{C}$  におけるよりも、保持時間を入れることによる寿命の低下が小さいことを示している。その理由として、 $650^{\circ}\text{C}$  における方が保持時間を入れることによる応力幅の低下が大きくなるので、クリープ損傷の効果が小さくなるからであろうと考えている。本研究においても  $700^{\circ}\text{C}$  の方が保持時間効果は小さく、また Fig. 3 に示したように、 $700^{\circ}\text{C}$  の方が  $600^{\circ}\text{C}$  よりも保持時間を入れることによる応力幅の低下が大きく、文献 12) と同じ結果が得られた。しかしその理由としては破面観察の結果と合せ、次のように考えられる。

600°C では同一ひずみレベルに対する負荷応力は三角波と引張保持台形波であり差がない。引張保持の試験では、粒界にそつてポイドが形成されるので、そのような粒界の破壊強度が条こんを形成する粒内破壊強度より相対的に低下し、ディンプルを有する粒界破壊になり、その結果寿命が低下したものと考えられる。粒界にそつたポイドは、試験片表面と接触のない内部の粒界においても形成されるので、このような粒界破壊は酸化雰囲気の効果によるものではなく、クリープ的損傷によるものと思われる。事実、真空中における引張保持台形波による疲れ寿命は、大気中のそれよりあまり増加しないというデータも報告されている<sup>14)</sup>。Fig. 8 (a), (c) における三角波と台形波のヒステリシスループの比較から、引張保持台形波における粒界ポイドの形成は、引張保持時間中の応力リラクセーションに対応するクリープひずみが引張過程にのみ加わることによるものと思われる。オーステナイトステンレス鋼の高温低サイクル疲れにおいて、このような  $\Delta\epsilon_{cp}$  成分を含む波形の場合、特に疲れ寿命が低下するという事は MANSON らによつて指摘されている<sup>10)</sup>。

一方 700°C では、Fig. 5 にみられるようにリラクセーション量  $\Delta\sigma_R$  は 600°C におけるよりも大きい。それに対応するクリープひずみも大きく、 $\Delta\epsilon_{cp}$  成分は大きくなるので、三角波の場合に比べ寿命は大きく低下するものと思われた。しかし、600°C の結果に比べむしろ寿命の低下は小さい。このことは次のように説明することができる。700°C における台形波の応力幅は三角波の応力幅に比べ小さい。この応力幅の低下は引張保持時間が入り、試験時間が長くなるので回復が起ることによるものと思われる。三角波でひずみ速度を小さくして、台形波の場合と同程度の破断時間を要した疲れ試験片の透過電子顕微鏡観察によると、600°C では回復は認められないが、700°C では回復が起つていることが認められている<sup>15)</sup>。回復が起ることによつて変形応力は小さくなるので、粒界に作用する応力は小さくなり、ポイドが形成されている粒界でも粒界破壊が起り難くなるものと思われる。そのために、疲れ破面にはディンプルを有する粒界破面も部分的にはみられるが、全体としては 600°C における程明瞭でなく、粒内破壊の三角波に比べ寿命の低下は大きくなかつたものと言える。

### 4.3 漸増平均ひずみの効果

試験結果 (Fig. 7) によると、漸増平均ひずみは、累積ひずみにクリープひずみが含まれない三角波の 600°C における疲れに対しては寿命をわずかながら低下させ、700°C における三角波および累積ひずみにクリープひず

みが含まれる台形波の場合には疲れ寿命に対してほとんど影響を与えない。

DIERCKS<sup>6)</sup> は、304 鋼に対して 593°C、ひずみ速度  $24\%/min$  の三角波、漸増平均ひずみ速度  $3 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-2}\%/min$  の疲れ試験を行い、漸増平均ひずみの効果を調べている。本実験における 600°C での三角波の結果は DIERCKS によつて得られた結果とほぼ一致している。彼は、漸増平均ひずみ速度と同じ速度による引張試験の破断伸び、あるいは漸増平均ひずみ速度を最小クリープ速度とするクリープ試験の破断伸びに対する疲れ試験の破断時の伸びの割合をクリープ損傷として、得られた結果をまとめている。しかし先に述べたように、三角波の場合に累積されるひずみにはクリープひずみは含まれていないため、漸増平均ひずみの効果をクリープ損傷として考えることは疑問である。

304 鋼の平均ひずみ下での高温低サイクル疲れでは、平均ひずみが全ひずみ幅の数倍以上の場合に寿命の低下が認められている<sup>16)</sup>。三角波における漸増平均ひずみの効果を、破断時の平均ひずみが一サイクル目から与えられた場合の平均ひずみの効果と見なしても、600°C と 700°C における結果を統一的に説明することはできない。

引張保持台形波の場合、リラクセーションに対応するクリープひずみ ( $C_R$ ) の存在が疲れ寿命に影響を及ぼすことを前節において検討した。Fig. 4 に示したように、漸増平均ひずみ速度が大きくなるとリラクセーション量は減少する。したがつて漸増平均ひずみ速度が大きくなると、リラクセーションに対応するクリープひずみ ( $C_R$ ) が小さくなり、漸増平均ひずみのない場合に比べ寿命を大きくさせる要因もあると思われる。しかし一方、漸増平均ひずみ速度が大きくなると、平均ひずみの増分に対応するクリープひずみ ( $C_M$ ) は大きくなる。一サイクル当りの両者の値を加え合せて示したのが Fig. 9 であ

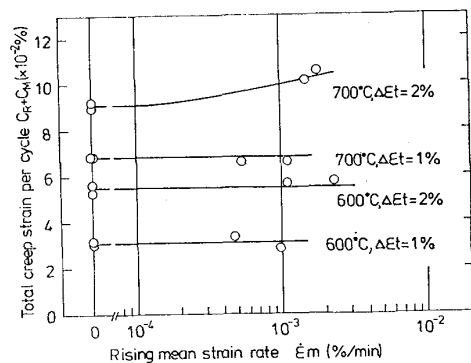


Fig. 9. Relation between the rising mean strain rate and the creep strain per cycle.



る。700°C, 全ひずみ幅 2% に対する結果を除いて, 漸増平均ひずみの有無, あるいはその大きさによらず, 一サイクル当りに引張過程で与えられるクリープひずみ量は一定である。したがって台形波の場合には漸増平均ひずみがあつても, 疲れ寿命に対しては影響を与えなかつたものと考えられる。

本実験では破断時の平均ひずみはせいぜい数%で, 一サイクル当りのヒステリシスループもほぼ閉じているために, 台形波の場合リラクセーションに対応するクリープひずみと, 平均ひずみの増分に対応するクリープひずみの効果を同一にして扱うことができた。しかし, 平均ひずみが材料の引張破断伸び, あるいはクリープ破断伸びと同程度の大きさになるような条件では, 平均ひずみの効果を別に考えなければならぬかもしれない。

## 5. 結 言

疲れ-クリープ相互作用の問題に関連した知見を得るために, オーステナイトステンレス鋼 SUS 316 に対して, 600°C と 700°C において平均ひずみが漸増する条件下で, 三角波と最大引張ひずみ時に保持時間を有する台形波による高温低サイクル疲れ試験を行い, 次の結果を得た。

(1) 最大引張ひずみ時に保持時間を有する台形波による疲れ寿命は三角波による疲れ寿命より小さく, その差は 700°C におけるよりも 600°C における方が大きい。三角波 (ひずみ速度 40%/min) の場合いずれの温度においても破面には条こんが観察される。台形波の場合, 600°C における破面には, 全ひずみ幅が大きい程ディンプルを有する粒界面が明瞭に観察される。700°C における疲れ破面には部分的にディンプルを有する粒界面もあるが, 全体的には粒界破面は不明瞭になる。

(2) 漸増平均ひずみは, 600°C, 三角波による疲れに対して寿命をわずかながら低下させる。700°C では三角波の場合にも寿命の低下は認められない。台形波で漸増平均ひずみがある場合の寿命は, 漸増平均ひずみがない場合の寿命に比べほとんど差はない。両者の破面には特徴的な相違はないが, 断面を観察すると, 表面から発生, 伝ばしたき裂以外に粒界にそつた微小き裂が観察され, その頻度は漸増平均ひずみがある場合の方が多い。

以上の結果を次のように説明づけることができた。

(3) 台形波の場合, 最大引張ひずみ保持中のリラクセーションに対応するクリープひずみにより粒界にポイドが形成され, ディンプルを有する粒界破壊が起るため

に三角波に比べ疲れ寿命は低下する。なお, 700°C における台形波では, 回復により粒界に作用する応力は低下するので粒界破壊は起り難く, 粒界破面の様子は不明瞭になる。そのため 700°C では, 台形波による寿命の低下は 600°C におけるよりも小さい。

(4) 漸増平均ひずみのある台形波の場合, 平均ひずみの増加に対応する変形はクリープひずみによるものであるが, 漸増平均ひずみがあるとリラクセーション量は低下しそれに対するクリープひずみは減少する。両者を合せた一サイクル当りのクリープひずみ量をみると, 漸増平均ひずみの有無にかかわらずほぼ一定になる。そのため, 台形波の場合には漸増平均ひずみがあつても, 疲れ寿命には差がなかつたものと考えられる。

## 文 献

- 1) J. B. CONWAY, R. H. STENTZ, and J. T. BERLING: Technical Information Center, U. S. Atomic Energy Commission, (1975)
- 2) E. KREMPL and B. W. WUNDT: Ame. Soc. Testing Mats, STP 489 (1969)
- 3) Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case 1592 (1974)
- 4) S. TAIRA: Creep in Structure, Academic Press, New York, (1962), p. 96
- 5) 山口弘二, 金澤健二, 吉田 進: 鉄と鋼, 64 (1978) 8, p. 1197
- 6) D. R. DIERCKS: Quarterly Progress Report for Period Ending, ORNL No. 5103, (1974), p. 7
- 7) Y. YOSHIDA, K. KANAZAWA, K. YAMAGUCHI, M. SASAKI, K. KOBAYASHI, and M. SATO: Trans. Nat. Res. Inst. Metals, 19 (1977), p. 247
- 8) 山口弘二, 金澤健二, 吉田 進: 材料, 24 (1975) 258, p. 234
- 9) 山口弘二, 金澤健二: 未発表データ
- 10) S. S. MANSON, G. R. HALFORD, and M. H. HIRSCHBERG: NASA TMX-67838 (1971)
- 11) J. T. BERLING and J. B. CONWAY: Proc. 1st Int. Conf. Pressure Vessel Technology, II (1969), p. 1233, Delft.
- 12) 日本溶接協会原子力研究委員会・48 FCI 小委員会報告書, (1975), p. 20
- 13) L. F. COFFIN, Jr.: Ame. Soc. Testing Mats, STP 520, (1973), p. 5
- 14) 鶴戸口英善, 朝田泰英, 三橋俊作, 山中一由: 日本機械学会講演論文集, 770-11 (1977), p. 130
- 15) 山口弘二, 金澤健二: 日本金属学会誌, 40(1976) 4, p. 315
- 16) T. BUI-QUOC and A. BIRON: Trans. ASME Ser. J, 97 (1975) 4, p. 238