鋼の疲労における内部応力および有効応力*

岩崎 親裕** 猪飼 靖*** 松田 勝**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 51, No. 3 (1987), pp. 181-186

Internal Stress and Effective Stress during Fatigue of Steel

Chikahiro Iwasaki**, Yasushi Ikai*** and Masaru Matsuda**

A new procedure is demonstrated to comprehend fatigue phenomena. The internal stress and the effective stress in a material are defined to analyze the fatigue process. The internal stress is attributed to the dislocation structure developed during fatigue. From this viewpoint, fatigue tests were carried out and some characteristics such as internal stress, effective stress and hysteresis loop were measured. The internal and effective stresses were measured by means of the strain dip test.

The main results are as follows:

- (1) The internal stress increased with the progress of fatigue.
- (2) The effective stress obtained during fatigue under a maximum stress larger than the fatigue limit (over-stress) was larger than that under or below the fatigue limit (under-stress).
- (3) During fatigue under manifold multiple-repeated stress in two stress levels (over-stress and under-stress), both the effective stress and the plastic strain range measured at the under-stress increased by the over-stress loading.
- (4) The effective stress depended on plastic strain rate.

From those results, the concept of internal stress is anticipated to contribute not only to the understanding of fatigue mechanism but also to the establishment of a cumulative damage rule.

(Received August 27, 1986)

Keywords: internal stress, effective stress, plastic strain range, relaxation strain, fatigue limit, strain dip test, plastic strain rate, manifold multiple-repeated stress in two stress levels, high-cycle fatigue, structural carbon steel

I. 緒 言

金属材料の疲労という現象に関して、従来より様々な角度から研究が続けられてきているが、現在でもなお不明瞭な点は多い。鉄鋼材料などで顕著に見られる疲労限度の出現の機構についても多方面から説明されてきているが、それらも統一的にまとめられるまでには至っていない。このような状況において、疲労現象の本質を調べるために新しい角度からの検討が必要とされるようになってきている。

著者らは、疲労現象の本質について新たな角度から考察を加えるため、金属材料の高温強度や結晶塑性の研究においてしばしば用いられている材料の「内部応力」に着目し疲労を取り扱ってきた。既報⁽¹⁾では内部応力の観点から疲労現象を考察し、疲労限度以下の応力のみによる破壊をも説明し得ることを報告している。ここで言う内部応力とは、

材料内部の転位の運動の抵抗となる応力のことであり、巨視的には塑性変形の抵抗となる逆方向応力を意味する。ある大きさの外部応力が働いたとき、それと内部応力との差に当たる有効応力が実際に転位線に働く応力すなわち塑性変形を生じさせている応力であると説明される。このような考え方に立脚すると、疲労負荷と変形挙動や寿命・強度との関係を取り扱う際には、応力として負荷応力を用いるだけでは不十分で、内部応力を考慮した有効応力によって検討を加えなければならないことになる。

内部応力については近年盛んに研究され、特に高温変形やクリープなどの分野で用いられてきており、長谷川ら⁽²⁾や吉永⁽³⁾による詳細な解説もなされている。また、繰返し変形中の内部応力について、Mughrabi⁽⁴⁾はセル壁とセル内部との界面がそれを発生させるとし、同様の考え方で著者らも内部応力が転位構造に起因することを示した⁽¹⁾。しかしながら、これらの研究以外には疲労過程での内部応力

** 神戸大学大学院生(Graduate Student, Kobe University, Kobe)

*** 神戸大学工学部生産機械工学科(Department of Production Engineering, Kobe University, Kobe)

* 1985年10月日本金属学会新潟大会に一部発表

の研究例⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾は比較的少なく、また、それらも低サイクル疲労の場合に限られている。著者らも既報⁽¹⁾では、疲労過程における内部応力の値を実験的に示すところまでは至っていない。もし、内部応力を疲労中に測定できれば、既報⁽¹⁾で考察したように疲労の進行に応じて内部応力が変化していくことが確認できる可能性もある。そうすると、一定応力振幅であっても有効応力の大きさは変化していることになって、疲労損傷の過程や、従来から取り扱いが困難であった負荷応力振幅が変動する疲労過程の機構の解明にも寄与できるものと考えられる。

疲労研究において内部応力の研究が少なく、また低サイクル疲労での研究に限られているのは、測定が比較的困難であり特別な測定システムを必要とするという理由によるものであろう。そこで本報では、市販のパーソナル・コンピュータで制御される油圧サーボ式引張圧縮疲労試験機を用いて、鋼の高サイクル疲労における内部応力の測定例を示し、その疲労研究における有用性について報告する。

II. 供試材料および実験方法

1. 供試材料

実験に用いた材料は疲労限度付近でも比較的大きな塑性ひずみが生じる機械構造用炭素鋼 S35C であり、1123 K, 3.6 ks(850°C, 1h)加熱後炉冷して、Fig.1 に示す形状寸法に加工した。平均結晶粒径は約 20 μm であった。その化学成分を Table 1 に示す。

Fig.1 Configuration of test specimen. (dimension: mm).

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

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.34	0.24	0.76	0.03	0.025	0.04	0.13	0.09

Fig.2 The system of testing equipment.

2. 実験方法

(1) 疲労試験

油圧サーボ引張圧縮疲労試験機(鷺宮製作所、容量 49 kN)をパーソナル・コンピュータ(日本電気、PC-8001 mk II)を用いて制御して周波数 20 Hz にて両振引張圧縮疲労試験(応力比 $R=-1$)を行なった。

実験にあたり、既報⁽¹⁾と同様に Fig.2 に示す測定システムを構成し、パーソナル・コンピュータから D/A 変換器(12 ビット)を経由して負荷制御信号を試験機に対し出力する一方、試験機のロードセルより荷重を、また試験片表面に貼付したひずみゲージよりひずみをそれぞれ A/D 変換器(12 ビット、2 チャンネル)を経由してパーソナル・コンピュータに入力し、応力とひずみのデータを得た。

疲労試験中に適宜最大応力(または、最小応力)が負荷される瞬間における内部応力と有効応力、および応力-ひずみヒステリシス・ループの最大幅である塑性ひずみ幅の測定を周波数 20 Hz, 7 Hz, 0.7 Hz および 0.07 Hz の下で行なった。

(2) 内部応力および有効応力の測定法

疲労中の内部応力は、その測定のために考案された応力急変法(Stress Dip Test)⁽⁹⁾を用いて行なったが、応力急変後は応力変化ではなくひずみ変化を測定するいわゆる Strain Dip Test⁽¹⁰⁾を適用した。

これらの測定法の原理については長谷川ら⁽²⁾や吉永⁽³⁾によっても解説されているが、それらはクリープ試験中あるいは引張試験中でのものであるため、ここでは疲労中の応力急変法について述べる。

疲労中の内部応力といっても、疲労の場合は負荷応力は刻々と変動しているので内部応力も変動している⁽¹⁾⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。そこで本実験においては、疲労負荷は正弦波応力とし、その負荷 1 サイクルにおける最大応力および最小応力が負荷される瞬間の内部応力および有効応力のみを測定した。

まず、あらかじめプログラムされた繰返し数に達すると、最大応力(または最小応力)が負荷された瞬間に $\Delta\sigma$ だけ応力を急変させ(最大応力のとき $\Delta\sigma < 0$, 最小応力のとき $\Delta\sigma > 0$)、その急変後の応力で約 18 s 保持してその間の緩和ひずみ ϵ_r の変化をひずみゲージで測定する(本システムでは 2×10^{-6} の変化まで測定できる)。 ϵ_r の測定後は、引続いて正弦波負荷をさらに 1~2 サイクル負荷して $\Delta\sigma$ を変えて($\epsilon_r > 0$ なら急変後の保持応力がやや低くなるように、 $\epsilon_r < 0$ ならそれがやや大きくなるように $\Delta\sigma$ を変える)応力急変試験を行なう。この操作を繰り返すように

$\varepsilon_r = 0$ となる $\Delta\sigma$ を求め、そのときの $-\Delta\sigma$ の値が最大応力(または最小応力)での有効応力であると決定される。そして内部応力は、最大応力(または最小応力)とその有効応力との差として得られる。Fig.3 に応力振幅 183 MPa での疲労中に繰返し数 $9.9196 \times 10^6 \sim 9.92 \times 10^6$ の間に測定された $\Delta\sigma$ と ε_r との関係を示す。この図には最大応力(引張側)から応力を急減したときの急変量 $\Delta\sigma$ 、および最小応力(圧縮側)から応力を急増したときの急変量 $\Delta\sigma$ の種々の大きさ(絶対値)に対して、急変後の応力で 18 s 間保持した時の緩和ひずみ量 ε_r を示した。最大応力から応力を急減した場合を例にとると、 $|\Delta\sigma|$ が大きくなるほど ε_r が減少し、 $|\Delta\sigma| = 48$ MPa になったときに初めて $\varepsilon_r < 2 \times 10^{-6}$ 、すなわち $\varepsilon_r = 0$ となっている。そして、そのときの $|\Delta\sigma|$ が最大応力 $\sigma_{\max}$ が負荷されたときの有効応力 (=48 MPa) と決定され、 $\sigma_{\max} - |\Delta\sigma| = 135$ MPa が内部応力と決定される。ところで、それよりも $|\Delta\sigma|$ を大きくしても、 ε_r が負とならず逆方向の緩和ひずみは生じていない。実際は、図示した範囲よりも $|\Delta\sigma|$ を大きくすると、ようやく負の ε_r が発生し始めるが、このように $|\Delta\sigma|$ の広い範囲にわたって $\varepsilon_r = 0$ となっており、その原因は次のように考えられる。内部応力またはそれを発生させている転位構造は、負荷応力の変化に対応して刻々と変化している⁽¹⁾⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。疲労の初期にはそのような転位構造は負荷応力の変化によって容易に変化するが、疲労が進行するとセルなどの安定した転位構造が形成され、それは負荷応力の変化に対しても安定な構造となる⁽¹¹⁾。実験結果のように、初めて $\varepsilon_r = 0$ となる $|\Delta\sigma|$ 以上に、すなわち内部応力以下に応力を急減して負の ε_r が発生しにくいのは、転位構造が安定化していて、応力急変試験による負荷応力の変化に対してもその構造が容易に変化せず、転位が運動しにくいためであると考えられる。すなわち、最大応力からそのときの内部応力以下にまで応力を急減する場合、疲労が進行し

てセル組織などが形成され転位構造が安定すると、内部応力よりやや低い応力まで急減しても負の ε_r が発生するほどに転位が運動できないものと考えられる。

上述の方法によって内部応力および有効応力の値を決定するには数十サイクルの負荷を要するが、この間には内部構造は変化しないものと考え、それらの値を疲労中のその時期における内部応力および有効応力とした。本測定法による信頼度を得るため、応力振幅が 183 MPa での疲労中、繰返し数 1×10^5 回から 1.1×10^5 回の間に有効応力(最大応力および最小応力で測定した有効応力の絶対値の平均)を 18 回測定し、平均と標準偏差を求めた。これらの平均値は 48.9 MPa で、試料標準偏差は 1.9 MPa であった。本報で示すある繰返し数における有効応力は、3 回の測定の平均である。したがって、その有効応力の平均値を x とすると平均値の 90% 信頼区間は $(x \pm 3.2)$ MPa となる。

III. 実験結果

1. 疲労過程における諸量の変化

(1) 内部応力および有効応力

一定応力振幅で疲労負荷をする場合、負荷応力が大きいほど損傷が大きく短寿命で破壊するが、負荷応力が低いと長寿命化し、あるいは破壊を起こさない。これを内部応力あるいは有効応力の立場から見るとどのようなになるか調べるため、一定応力振幅による疲労試験を行なった。

周波数 20 Hz での疲労中に測定した内部応力および有効応力の変化をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。結果は、応力振幅が 207 MPa (7×10^4 回で破断)、196 MPa (1×10^5 回で破断)、186 MPa (10^7 回で未破断)、および 182 MPa (10^7 回で未破断)における疲労過程での最大応力および最小応力が負荷される瞬間の各絶対値の平均で示した。

内部応力は、応力振幅にかかわらず疲労進行に伴って上昇していく傾向を示している。既報⁽¹⁾で考察した内部応力の由来を考慮すると、材料内部の転位配列が疲労の進行につれてある構造(例えば Mughrabi⁽⁴⁾の示したようなセル

Fig.3 Relaxation strain ε_r vs amount of stress dip $|\Delta\sigma|$ (absolute value) from maximum stress $\sigma_{\max}$ and minimum stress $\sigma_{\min}$ during fatigue (stress amplitude $\sigma_a = 183$ MPa).

Fig.4 Change in internal stress σ_i during fatigue of various stress amplitudes (stress amplitude $\sigma_a = 207, 196, 186$ and 182 MPa).

Fig.5 Change in effective stress σ_{eff} during fatigue of various stress amplitudes (stress amplitude $\sigma_a = 207, 196, 186$ and 182 MPa).

構造)をとり、それが発達することで内部応力が上昇していったものと考えられる。すなわち材料内部での転位の運動に対する抵抗力は、疲労進行により大きくなっていくことになるから、材料には負荷の大きさにかかわらず、基本的には強化作用が働くものであると言えよう。

有効応力は、応力振幅が大きいほどその値は大きく、特に疲労初期にはかなりの有効応力が働き、その後は漸減していく傾向にある。有効応力によって生じるひずみが微視的に不可逆な場合は、材料に損傷を与えることになると考えられるので、内部応力による強化で耐え得る限度以上の有効応力が働く場合、材料は損傷を受け、その損傷が累積されていくと疲労き裂の発生・伝ばを促すことになる。

(2) 塑性ひずみ幅

ここでは、塑性ひずみ幅を有効応力との関連で調べた。塑性ひずみが有効応力によって生じるのであれば、塑性ひずみ量と有効応力の間には対応関係があるはずである。そこで Fig.6 に疲労中の塑性ひずみ幅の変化を示す。この結果は前述の内部応力および有効応力の測定を行なった試験により得られたものである。

疲労の初期段階を除けば(繰返し数>数 1000 回)、塑性ひずみ幅の挙動は有効応力のそれと類似しており、やはり

Fig.6 Change in plastic strain range $\Delta\epsilon_p$ during fatigue of various stress amplitudes (stress amplitude $\sigma_a = 207, 196, 186$ and 182 MPa).

負荷が大きいほどその値も大きい。しかしながら、極めて初期の段階(繰返し数が 1000 回程度まで)では内部応力は小さい、すなわち有効応力が大きいにもかかわらず塑性ひずみ幅は小さい。これは処女材の転位密度が低いこと、また転位が固着から解放されていないことにより実質的な可動転位密度が低いためであると考えられる。

2. 負荷応力変動の影響

実働負荷条件の場合、予測寿命と実際の寿命が必ずしも一致しないため、その破壊のメカニズムの研究や設計基準の確立に多くの努力がなされている。そこでこれらの問題に対する本研究の考え方の有用性を確認するため、二段多重重複繰返し応力による疲労試験を行い、有効応力および塑性ひずみ幅の変化を調べた。

実験は、疲労限度付近の応力 $\sigma_1 (=191 \text{ MPa})$ で 10^7 回予め負荷された試験片を用い、その σ_1 で繰返し数 $n_1 = 1.98 \times 10^5$ 回、疲労限度以上の応力 $\sigma_2 (211 \text{ MPa})$ で繰返し数 $n_2 = 2000$ 回という繰返し負荷を 1 周期として行った。各周期内では、有効応力 σ_{eff} および塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ の測定を、 σ_1 の応力で 5×10^4 回の繰返し数ごとに 4 回行なった。測定は合計 11 周期にわたって行ったが、各周期での測定のうち最初の 1 回は過大応力 σ_2 の負荷直後に、他の 3 回はそれぞれそれから 5×10^4 回、 1×10^5 回および 1.5×10^5 回経過後に行った。その結果を Fig.7 に示す。本試験は σ_1 で 10^7 回負荷された後であるので、各周期間相互の結果には測定のバラツキ程度の差しかなく、図には各周期の同時期における塑性ひずみ幅および有効応力の 11 周期を通しての平均と、それらの最大値と最小値で示した。

有効応力は σ_2 負荷直後を除く 3 回の測定での平均が 39.0 MPa であるのに対し、 σ_2 負荷直後は 42.1 MPa で

Fig.7 Change in effective stress σ_{eff} and plastic strain range $\Delta\epsilon_p$ during fatigue process under manifold multiple repeated stress in two stress levels (1st stress amplitude $\sigma_1 = 191 \text{ MPa}$, 2nd stress amplitude $\sigma_2 = 211 \text{ MPa}$, and number of cycles at 1st stress amplitude in a period $n_1 = 1.98 \times 10^5$, that at 2nd stress amplitude $n_2 = 2000$), measured during σ_1 loading.

† σ_2 負荷後、多くとも 5×10^4 回の σ_1 の負荷により、 σ_2 が負荷された影響が無くなっていることになる。

3.1 MPa, すなわち約 8% 大きい. また同様に塑性ひずみ幅も σ_2 負荷直後を除く 3 回の測定での平均が 268×10^{-6} であるのに対し, σ_2 負荷直後には 297×10^{-6} に増加しており, 約 11% 大きい. 過大応力の負荷がそれに引き続く過小応力負荷時における塑性ひずみ幅に与える影響はよく知られているが⁽¹²⁾, その原因は主として有効応力の増加によるものであると考えることができる. すなわち, 過大応力が負荷されることでそれまで安定していた転位構造が乱されて内部応力が低下し, 過小応力でも運動できる転位が導入される⁽¹¹⁾. その結果, 引き続き過小応力の負荷においても以前より大きな有効応力が働くことになって, 塑性変形量が増加するものと考えられる.

過大応力負荷の直後に内部応力が減少して有効応力が増加するというこの事実は大きな示唆を与えてくれる. 単に負荷応力で考えていた従来の直線被害則での推定寿命が実際の寿命と一致しなくなることがあるのは, このように内部応力が負荷履歴に依存しているためであると考えられ, 寿命予測をする場合には内部応力の評価を通して有効応力を考慮しなければならないことになる.

3. 有効応力の周波数による相違

塑性変形の速度は, 運転する転位数が同じならば転位の運動速度に依存する. この転位の運動速度を速くするためには, Johnston-Gilman⁽¹³⁾ 流の考え方により転位に負荷される有効応力を大きくしなければならない. したがって, 本実験で得られた有効応力が正しく求められているとすると, その大きさは周波数によって異なる可能性がある.

そこで, 周波数を 3 種類 (7 Hz, 0.7 Hz および 0.07 Hz) に変えて疲労試験を行なった. それらの試験での有効応力の変化を Fig.8 に, 塑性ひずみ幅の変化を Fig.9 に示す. 明らかに高い周波数ほど有効応力が大きくなっていることがわかる. ところが, 塑性ひずみ幅は逆に高い周波数ほど小さくなっている. すなわち, 大きな有効応力が負荷されるほど塑性ひずみ幅が小さいという一見矛盾した結果が得られたことになる. しかしながら周波数が高いほど 1 サイクル中で有効応力が作用する時間は短いわけであるから, 塑性変形量は有効応力が負荷されている時間の影響をかな

Fig.8 Difference in effective stress σ_{eff} among 3 kinds of frequencies (0.07, 0.7 and 7 Hz) during fatigue (stress amplitude $\sigma_a = 177$ MPa).

Fig.9 Difference in the plastic strain range $\Delta \epsilon_p$ among 3 kinds of frequencies (0.07, 0.7 and 7 Hz) during fatigue (stress amplitude $\sigma_a = 177$ MPa).

り受けていると考えられる. これについては, 次に詳しく検討する.

IV. 検 討

1. 疲労現象の考察

疲労過程において有効応力が働くという事実は, 材料中の転位が運動することによって塑性ひずみが生じるということを示しており, さらにその一部の不可逆塑性ひずみが損傷となって累積されていくものと考えられる. つまり, 有効応力の一部が損傷を促し, その累積がある限界を越えると破壊に至るものではないかと推測される.

この一方で, 内部応力は応力振幅によらず疲労進行に伴って上昇しており, これは先に述べたように材料内部の転位の運動を抑制するような転位構造が形成されていくことを意味している.

これらの損傷と強化の相反する作用が平衡状態になる条件が疲労限度であると考えることができる. 換言すると, 疲労は内部応力の上昇という強化作用と, それに対する有効応力による損傷との競合過程であると考えられる. しかしながら, 疲労限度以下の負荷でもかなりの塑性ひずみ幅を生じ有効応力も働いていることから, 今後疲労損傷を与え得る有効応力成分と, 損傷に至らない部分とを分離して検討する必要がある.

一定応力振幅による疲労試験で得られた有効応力の挙動は, 疲労初期に特に大きな有効応力が働いているという特徴を示しており, その後は内部応力が上昇していった強化されていくことを併せて考えると, このような初期の有効応力による変形がその後の疲労過程にかなりの影響を及ぼすものと考えられる.

応力振幅変動試験の結果, 内部応力によって履歴の影響を定量的に評価できることが分かった. 本研究のように内部応力あるいは有効応力の観点から疲労現象を取り扱うと, 変動応力振幅による疲労の寿命予測やその機構の解明に大きく寄与できるものと期待される.

2. 有効応力のひずみ速度依存性

内部応力が内部の転位運動に対する運動抵抗を意味し,

これが応力速度には依存せず変わらないものとする。ここで1個の転位のみが運動するとする1転位モデルで引張過程の半サイクルを考えると、応力が無限に遅く変わる場合には負荷応力が内部応力をわずかに越えると有効応力が働き転位は運動し、その転位はやがて次の障害で止められる(この時は負荷応力=内部応力で平衡状態にある)。しかし、負荷応力が続いてわずかに上昇すると有効応力もまたわずかに働き再び次の障害まで運動する。そしてこのような運動を繰り返す結果、転位は障害で止められるまで十分に移動するため、最も大きな塑性ひずみを生じることになる。一方、負荷応力が速く変化すると有効応力は大きくなるが、平衡状態に達しないうちに応力が変化していくために、障害によって止められる位置(負荷応力が内部応力と一致する位置)まで転位が動くことはなく、ついにはその手前で応力速度の符号が変化する(除荷過程に入る)。したがって、応力がゆっくり変化する場合に比べて塑性ひずみは小さくなってしまふ。すなわち、周波数が高いほど有効応力は大きくなるが、塑性ひずみ幅は減少するということになる。

上記の周波数による有効応力の違いは有効応力のひずみ速度依存性を示していることにはほかならない。一般に、有効応力 σ_{eff} と塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ との間には、

$$\dot{\epsilon}_p = A \cdot \sigma_{eff}^m \quad (1)$$

なる関係がある(ただし、 A は定数、 m はべき指数)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。ここで、本研究で用いた3種の周波数で測定された有効応力と応力急変直前の塑性ひずみ速度との関係を Fig.10 の両対数グラフに示す。結果は式(1)の関係をほぼ満足していることを示し、本方法で疲労中に測定された有効応力にも式(1)型のひずみ速度依存性があることがわかった。

Fig.10 Plastic strain rate $\dot{\epsilon}_p$ vs effective stress σ_{eff} during fatigue (stress amplitude $\sigma_a = 177$ MPa, measured at 10^4 , 10^5 and 10^6 cycles).

したがって、内部応力および有効応力の観点から疲労による変形を議論する場合には、その繰返し変形速度も考慮に入れなければならない。特に、2組以上の疲労試験結果の有効応力を比較する際は、繰返し速度が同じであるという条件のもとで議論する必要がある。

V. 結 言

鋼の疲労過程において、内部応力と有効応力および塑性ひずみ幅などを測定し、次の結果を得た。

(1) 応力急変法を用いて、疲労中の内部応力および有効応力を測定することができた。

(2) 内部応力は、応力振幅にかかわらず疲労進行に伴って上昇する傾向を示した。これは、材料は疲労負荷によって基本的には強化されることを示す。

(3) 過大応力下で測定された有効応力は、過小応力下でのそれよりも大きな値を示し、疲労損傷が有効応力によるものであることが示唆される。また、特に疲労初期に大きな有効応力がはたらく。

(4) 疲労限度の応力と疲労限度以上の応力による二段多重繰返し疲労試験において、疲労限度以上の応力が負荷されると、引き続く疲労限度応力による疲労過程に影響を及ぼし、有効応力、塑性ひずみ幅ともに増加する。

(5) 周波数が変化すると(すなわち、ひずみ速度が変化すると)有効応力は異なる値を示す。

(6) 塑性ひずみ速度は有効応力のべき乗に比例し、有効応力にはひずみ速度依存性があることが確認された。

文 献

- (1) 岩崎親裕, 猪飼 靖: 材料, 34(1985), 1133.
- (2) 長谷川 正, 及川 洪: 日本金属学会会報, 11(1972), 192.
- (3) 吉永日出男: 日本金属学会会報, 16(1977), 197.
- (4) H. Mughrabi: Acta Metall., 31(1983), 1367.
- (5) J. Polák, M. Klesnil and J. Helešic: Scr. Metall., 13(1979), 847.
- (6) J. Polák and M. Klesnil: Fatigue of Eng. Materials and Structures, 5(1982), 19.
- (7) J.C. Tsou and D.J. Quesnel: Mater. Sci. Eng., 56(1982), 289.
- (8) 幡中憲治, 山田敏郎, 広瀬勇次: 日本機械学会論文集, A-47(1981), 1119.
- (9) A.A. Solomon: Rev. Sci. Instr., 40(1969), 1025.
- (10) C.N. Ahlquist and W.D. Nix: Scr. Metall., 3(1969), 679.
- (11) T. Hasegawa, T. Yakou, H. Akashi and S. Karashima: Trans. JIM, 19(1978), 129.
- (12) たとえば, 菊川 真: 日本機械学会誌, 75(1972), 1485.
- (13) W.G. Johnston and J.J. Gilman: J. Appl. Phys., 30(1959), 129.
- (14) E. Orowan: Proc. Phys. Soc., 52(1940), 8.