

多結晶金属材料の応力繰返しに伴う塑性変形挙動に及ぼす静水圧力の影響

塩沢和章・大南正瑛^{*}・山蔭哲郎^{**}

INFLUENCE OF HYDROSTATIC STRESS ON THE PLASTIC DEFORMATION OF POLYCRYSTALLINE METAL SUBJECTED TO CYCLIC STRESSING

by Kazuaki SHIOZAWA, Masateru OHNAMI^{*} and Tetsuro YAMAKAGE^{**}

In a series of studies on the influence of hydrostatic stress on the plastic deformation of polycrystalline metals subjected to cyclic stressing, in the present paper, the experimental studies on low-cycle-torsional pulsating of 0.15 per cent carbon steel under hydrostatic pressure at room temperature were presented. It was concluded that cycle-dependent plastic deformation of the metal under combined stress cycling and hydrostatic pressure was remarkably larger than that in atmosphere. In order to elucidate the difference of the behavior of plastic deformation of the metal subjected to cyclic stressing under hydrostatic pressure and that under atmospheric pressure, the unified correlation between Bauschinger effect of the material and the influence of hydrostatic stress was discussed. It was obviously observed that Bauschinger strain under combined stress cycling and hydrostatic pressure was larger than that under atmospheric pressure. Therefore, it was considered that the Bauschinger effect of the material subjected to low-cycle-torsional stressing was more remarkably occurred under combined hydrostatic pressure than that under atmospheric pressure. From these facts, it was suggested that the barriers against the movement of dislocations was decreased by combined subjection of hydrostatic stress when the direction of applied stress was changed during one cycle of stressing.

1. 緒言

多結晶金属材料の塑性変形挙動におよぼすひずみ履歴の影響に関する研究の一環として、これまでに

応力繰返しに伴う塑性変形の機構をひずみ履歴との関連のもとに主として降伏問題として研究を進めてきた。^{1) 2)} その中で応力の繰返し負荷を含む一般負荷の

* 立命館大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto.

** 豊田機械株式会社
Toyoda Machine Works, Ltd., Kariya.

もとにおける多結晶金属材料の非弾性挙動の取扱い^{2) 3)}のためには、一般負荷のもとでの同材料の構造変化および材料空間における微視的応力およびひずみ分布の不均一性を考慮に入れる必要のあることを指摘した。他方、材料の降伏条件におよぼす静水圧応力の影響に対する検証の必要性が、微視的立場での塑性変形 (microplasticity)⁴⁾ や格子欠陥を含む材料空間を対象とする塑性変形に関する一般連続体力学 (mechanics of generalized continua)⁵⁾ の研究とかかわって指摘されてきた。したがって、応力繰返しに伴う塑性変形挙動については静水圧応力の影響との関連においても考察する必要があるものと考えられる。

静水圧応力が金属材料の力学的挙動に種々の影響をもたらすことについては、金属材料のより正確な塑性法則あるいは破壊法則を確立すること、および高压下の塑性加工の基礎資料を得ることを目的として、近年広範囲な研究および報告がなされている。⁶⁾ すなわち、静水圧力下での金属材料の静的塑性変形において著しく延性を増すこと、さらには常温、高温を問わず金属材料のクリープ現象にも静水圧力の影響が明らかに存在することが認められている。⁷⁾ また、材料の塑性変形挙動におよぼす静水圧応力の微視的立場からの研究として、筆者らは塑性変形を受けた多結晶アルミニウムの静水圧力処理 (pressure soaking)⁸⁾ に伴う材料の構造変化および静水圧力下における同材料の塑性変形に伴う構造変化⁹⁾ を X 線的に観察した結果、液圧処理によって材料内の転位密度はほとんど変化しないが、転位の配列の変化すなわち再配列の可能性が観察され、静水圧力下の塑性変形においても同様の傾向が観察された。また、静水圧力処理後の引張再負荷時に加工軟化現象 (後述の図10に示すように降伏応力の過渡的低下) の生ずることが観察された。すなわち、これらの実験結果から静水圧応力は転位の易動度に影響を与えることが明らかになった。¹⁰⁾

本研究では、多結晶金属材料の応力繰返しに伴う塑性変形挙動におよぼす静水圧応力の影響を考察するために、静水圧力下における低炭素鋼のねじり応力繰返し実験を行った。金属材料の疲れ寿命におよぼす静水圧力の影響については、今までに Crossland,¹¹⁾ Burns と Parry および Tuler と Ruoff らによるねじ

り疲れ、White, Crossland および Morrison¹⁴⁾ による引張一圧縮疲れ、中沢らによる低サイクル疲れ強さ¹⁵⁾ などの実験結果が報告されているが、繰返し負荷に伴う塑性変形挙動に関する報告はきわめて少ないように思われる。先に述べたように、静水圧応力が転位の易動度に影響を与えるとすれば、静水圧力下において負荷応力の方向の変化する条件のもとでは、静水圧力下の静的一方向変形とは異なった変形挙動を呈することが考えられる。本論文では、静水圧応力の転位の易動度に及ぼす影響に関する考察をふまえて、静水圧力下における片振りねじり応力繰返しに伴う金属材料の塑性変形挙動を考察した。なお、片振り応力繰返し負荷としてねじりを採用したことは、後述するように、応力繰返し中静水圧力成分の変動しない条件下で材料のパウシガー効果におよぼす重畳静水圧力の影響を検証することを意図した理由によるものである。

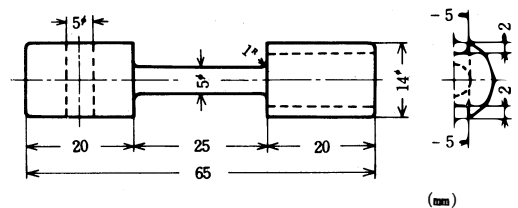
2. 実験装置および実験方法

2.1 試験片

本実験に使用した試験片は、図1に示すように直径5mm、標点間距離25mmの0.15% C低炭素鋼 (S15CK) の中実丸棒試験片である。表1にその化学成分を示す。試験片は試験片形状に機械加工の後、900℃、1時間の真空完全焼なましを行い実験に供した。

2.2 実験装置

本実験に使用した静水圧力下の材料強度試験機はこれまで筆者らによって報告されている静水圧力



図一 試験片の形状および寸法

表1 試験片材料の化学組成 (%)

| C | Si | Mn | P | S |
|------|------|------|-------|-------|
| 0.15 | 0.22 | 0.56 | 0.011 | 0.026 |

S15CK (JIS G3102)

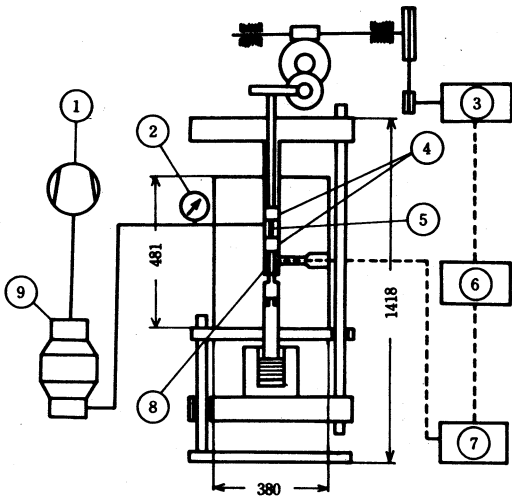


図-2 高静水圧力下におけるねじり応力繰返し実験装置概略図

- ①コンプレッサー②圧力計③モーター④試験片ホルダー⑤試験片⑥制御回路⑦ひずみ計⑧ロードセル⑨ポンプ

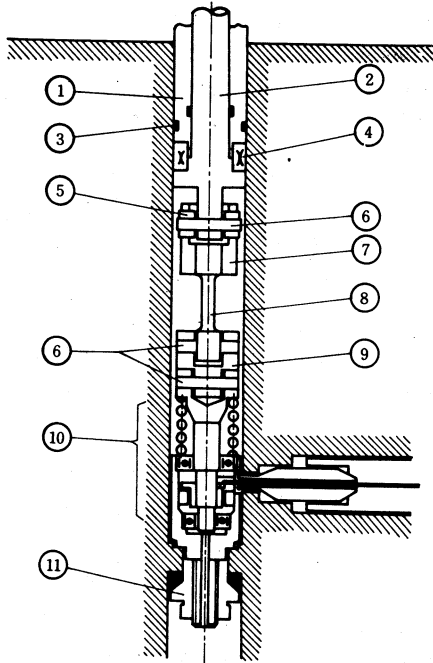


図-3 高静水圧力下におけるねじり応力繰返し実験装置の圧力容器内部の詳細図

- ①トルク伝達軸支持部②トルク伝達軸③O-リング④スラスト・ベアリング⑤ニードル・ベアリング⑥ピン⑦試験片上部つかみ部⑧試験片⑨試験片下部つかみ部⑩ロード・セル⑪ロード・セル固定板

下のねじり試験装置と同一のものであるが、応力繰返し負荷のできるように一部改良して使用した。実験装置の概略を図2に、また、圧力容器内の詳細図を図3に示す。なお、ねじり応力繰返し実験において試験片に変形異方性による軸方向変位を生ずるので、これをニードル・ベアリング⑤により拘束しないように考慮されている。また、トルク伝達軸部のシーリングは摩擦抵抗の少ないO-リング③を使用し、圧力によるトルク軸の軸力支持部の摩擦抵抗も少なくするためスラスト・ベアリング④を使用している。荷重検出部のロードセルとしてコイルばねを使用し、コイルばねの微小ねじれ角を圧力容器外に取付けた差動変圧器を通じて計測し、同時に制御装置に入れ応力繰返し実験を行った。また、試験片のねじれ角はモーターに直結した変速ギヤ部にカウンターを取付けて測定した。なお、圧力媒体にはモービルオイル#90を用いた。

3. 実験結果およびその考察

3.1 静水圧力下の単純ねじり実験結果

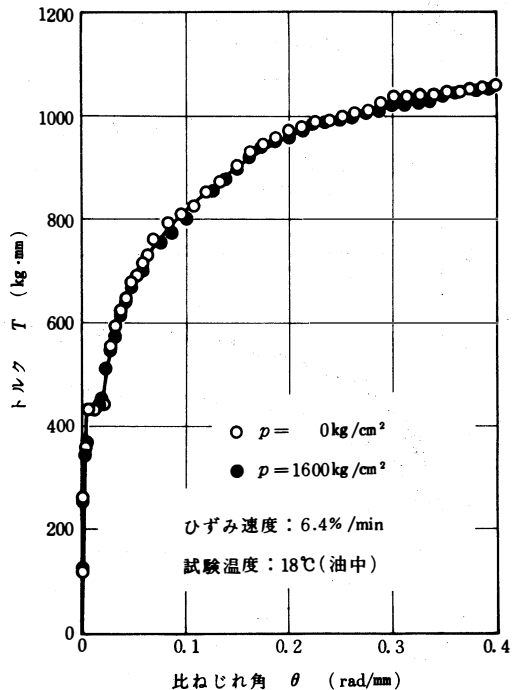


図-4 大気圧下および静水圧力 ($p = 1600 \text{ kg/cm}^2$) 下における単純ねじり実験結果

応力繰返し実験に先立ち、大気圧下および1600 kg/cm²の静水圧力下における単純ねじり試験を行った。図4は一定せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = 6.4\%/min$ で変形させた実験結果を示す。試験温度は18℃(油中)一定である。図はトルク T- 比ねじれ角 θ 線図で示したものである。図から明らかなように、本実験の範囲内では静水圧力の影響はほとんど見受けられない。なお、塑性流動応力におよぼす静水圧力の影響は変形量の増加に伴って幾分大きくなり、破壊附近でその効果が大きくなること多くの金属において認められているが、本実験のひずみ範囲内においては顕著な静水圧応力の効果は見受けられなかった。

3・2 静水圧力下の片振りねじり応力繰返し実験結果

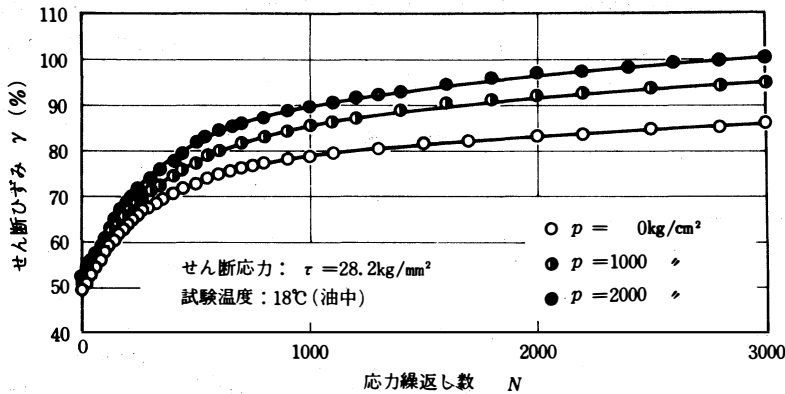


図-5 最高負荷時の外皮せん断応力 $\tau = 28.2\text{kg/mm}^2$ を一定とした場合の各静水圧力下における片振りねじり応力繰返し実験結果

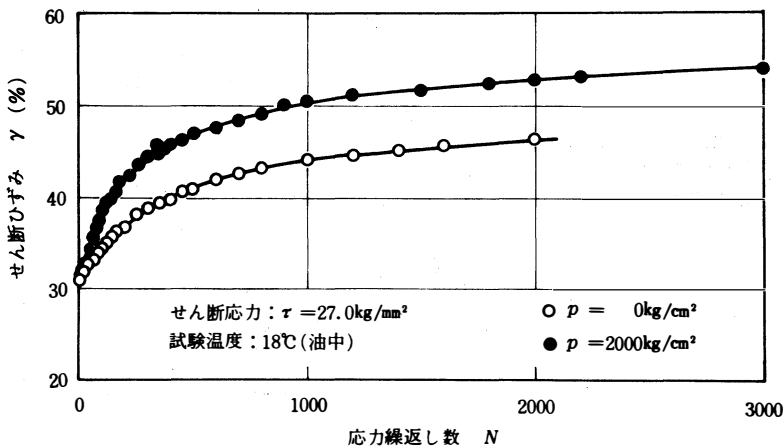


図-6 最高負荷時の外皮せん断応力 $\tau = 27.0\text{kg/mm}^2$ を一定とした場合の各静水圧力下における片振りねじり応力繰返し実験結果

図5および図6は最高負荷時の外皮せん断応力 $\tau = 28.2\text{kg/mm}^2$ および $\tau = 27.0\text{kg/mm}^2$ を一定とし、各静水圧力下における片振りねじり実験結果を示したものである。なお、一サイクル所要時間はそれぞれ約40秒、35秒であった。図からわかるように、応力繰返しに伴って静水圧力下における変形量が大气圧下におけるそれに比較して大きくなっており、応力繰返しに伴う塑性変形に対して静水圧力の影響のあることがわかる。そこで以下において $\tau = 28.2\text{kg/mm}^2$ の場合の実験結果をもとに考察を進める。

図5の実験結果をもとに、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と応力繰返し数 N との関係を整理したものを図7に、また、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とせん断ひずみ γ との関係を図8に示す。これらの図より、せん断ひずみ速度は大气圧下に比較して静水圧力下の方が大きく、静水圧力を重畳することにより材料は変形しやすくなることがわかる。

今までに、高静水圧力下における金属材料の静的塑性変形挙動に関する実験において、静水圧力の重畳により一般に静的降伏応力が増加すること、さらには、静的クリープ実験においてクリープひずみ速度が低下することが報告されているが、ここに示した応力繰返しの場合には明らかに静的塑性変形時とは異なった傾向を示している。これらの違いとして繰返し負荷による応力方向の変化から生ずるひずみ履歴の影響、とりわけバウシinger効果におよぼす静水圧応力の影響が考えられる。金属材料の塑性変形挙動におよぼすひずみ履歴の影響のなかで重要な因子である材料の変形異方性の影響やバウシinger効果が静水圧応力の影響と如何なる関連をもつかについて

ては一義的に論ずることは困難であるが、少くともバウシinger効果と静水圧応力の影響との関係を議論するには負荷中静水圧応力の変動しない条件下でのねじり反転負荷によって検証する必要がある。したがって、本研究では、大気圧下と静水圧力下における片振りねじり応力繰返し負荷に伴う塑性変形挙動の相違について、バウシinger効果と静水圧応力との関連性のもとに考察を行うことにする。

3.3 転位の易動度におよぼす静水圧応力の影響

応力繰返しに伴う塑性変形挙動におよぼすバウシinger効果と静水圧応力の影響を考察する

に先立って、転位の易動度におよぼす静水圧応力の影響について考えてみる。金属材料の塑性変形の主機構は転位の移動によるものであるとして、Gilman-Johnston¹⁸⁾は巨視的機構と微視的なそれとの間の関係を次式のように定式化した。

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} b N v \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は巨視的ひずみ速度、 N は可動転位の平均密度、 v は転位の平均速度、 b はバーガス・ベクトルである。個々の転位の有効質量(effective mass)にもとづく慣性力は通常それらの転位に作用する弾性力に比較すれば小さいものであるから、個々の転位の加速効果(acceleration effects)は重要ではない。しかし、転位を集合体として取扱う際にはこれらを考えに入れる必要があると考えられる。いま、(1)式を時間 t で微分すると

$$\frac{d\dot{\epsilon}}{dt} = \frac{1}{2} b \left(N \frac{dv}{dt} + v \frac{dN}{dt} \right) \quad (2)$$

となり、ここで $d\dot{\epsilon}/dt = \ddot{\epsilon}$, $dv/dt = a$, $dN/dt = \dot{N}$ とおくと(2)式は

$$\ddot{\epsilon} = \frac{1}{2} b (N a + v \dot{N}) \quad (3)$$

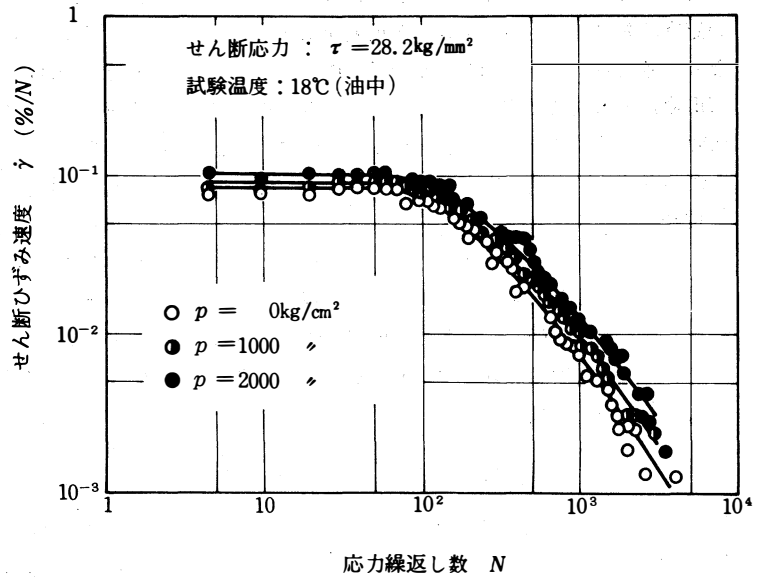


図-7 せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とねじり応力繰返し数 N との関係

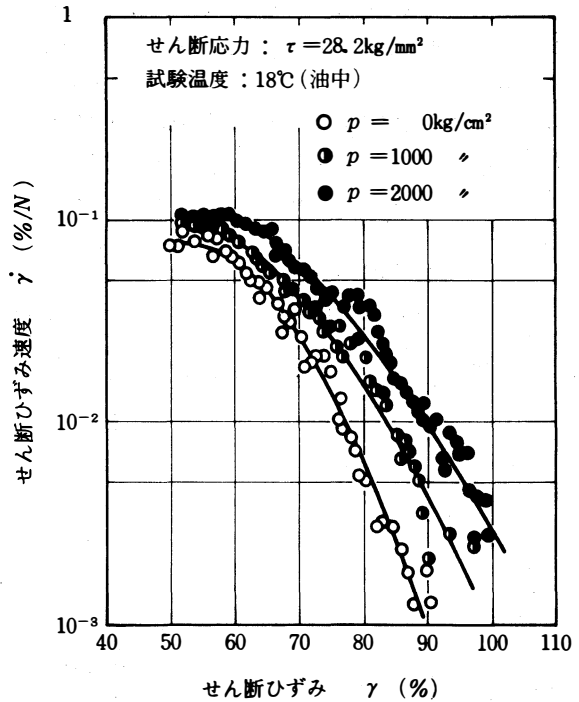


図-8 せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とせん断ひずみ γ との関係

と書くことができる。¹⁹⁾この加速度方程式は塑性流動が定常状態にあるときはそれほど重要な意味をもたないと考えられるが、種々の非定常状態、たとえば荷重除荷後再負荷する場合などによって生ずる遷移状態において意味をなすと思われる。一般に、結晶を变形させるに必要な応力、すなわち変形応力 τ_f と転位密度 N との間には

$$\tau_f = \beta b G N^{1/2} \quad (4)$$

の関係のあることが種々の実験によって確かめられている。^{20) 21)}そこで、材料の変形応力は転位密度 N の増大に伴って単調に増加するものとする(3)式は次式のように書き換えられる。

$$\ddot{\epsilon} = \frac{\tau_f}{2b\beta^2 G^2} \left(\alpha + 2 \frac{v}{\tau_f} \dot{\tau}_f \right) \quad (5)$$

ただし、 $\dot{\tau}_f = d\tau_f/dt$ 、 G は剛性率、 β は1/3~1/5程度²¹⁾の定数である。

ここで、(3)または(5)式のもつ意味について考えてみる。右辺第一項は転位の加速度 α によってひずみ速度に変化を与えるものであり、また、第二項は転位密度の時間的変化、すなわち変形応力の時間的変化に起因してひずみ速度の変化を与えるものである。これら各々の変化による応力-ひずみ曲線の変化を模式的に示したのが図9である。すなわち、荷重除荷後除荷し、再負荷した場合の応力-ひずみ曲線は

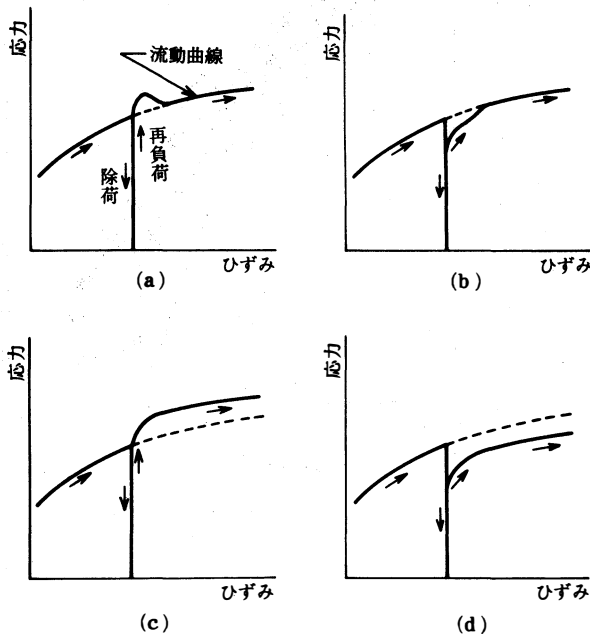


図-9 荷重再負荷時における応力-ひずみ曲線の模式的表示

以下の諸条件によって種々の形式をとる。

(a)結晶の内部変形応力は負荷時のそれに等しく、転位の加速度 α のみが変化する場合であり、予荷重負荷時の加速度 α_0 が再負荷時のそれ α_p よりも大きい場合、

(b)(a)の場合と同様であり $\alpha_0 < \alpha_p$ の場合。

(c)転位の加速度 α は無視し得る程小さく、転位密度の時間的変化 \dot{N} 、すなわち変形応力 τ_f が変化する場合であり、予荷重負荷時の転位密度 N_0 にくらべ再負荷時のそれ N_p が大きい場合、すなわち再負荷によって変形応力が増加した場合 ($\dot{N} > 0$)

(d)(c)の場合と同様であり $N_0 > N_p$ ($\dot{N} < 0$) の場合。

ここで、(a)および(b)は再負荷時において変形応力の変化はないので、再負荷後もとの応力-ひずみ曲線上にもどるが、(c)と(d)は変形応力に変化を生ずるためとの曲線にもどらない。したがって、前者は遷移状態において転位の易動度に変化を生ずるものであり、変形応力の変化は二次的な影響しか与えないと考えられよう。

図10は市販純アルミニウム (99.5%Al) の板状試験片において、予ひずみを与え除荷後、2000kg/cm²、1時間の静水圧力処理を行い、さらに引張再負荷試験を行った実験結果の一例を示したものである。図

からわかるように、静水圧力処理を行った後の応力-ひずみ曲線は先の分類図9(b)に属するものである。この事実より、静水圧力処理により転位密度にほとんど変化はないが、その配列の仕方が変化し、再負荷時において一時的に急激な転位の移動を生ずることが推察される。このことは緒言でも述べたようにX線観察によっても推察されている。⁸⁾この静水圧力処理による転位の易動度の変化は矢島ら²²⁾によって鉄の降伏現象の変化と関連して報告されており、静水圧力処理により転位の摩擦力および固着力を減少させ、自由な転位が増加することを指摘している。

3.4 バウシinger効果におよぼす静水圧応力の影響

金属材料のバウシinger効果の機構に関する研究は古くから多くの研究者によって研究され、各種金属材料に対する現象の整理とその理論的取扱いがなされているが、現在のところ、降伏

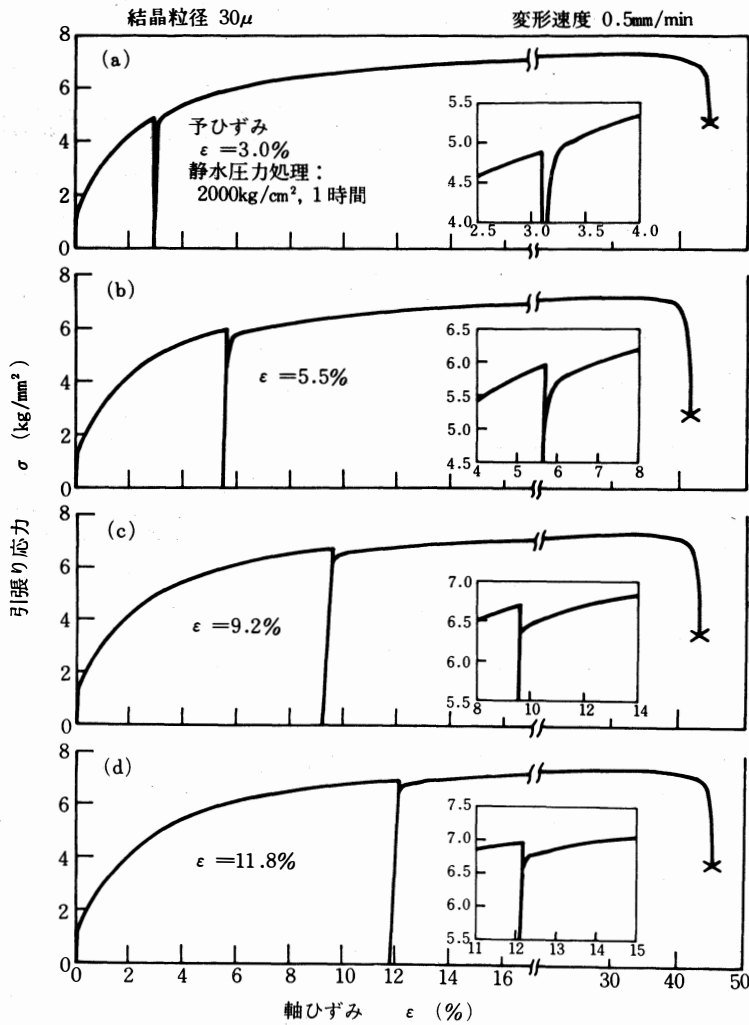


図-10 市販純アルミニウムの静水圧力処理後の引張応力-ひずみ線図

条件式および加工硬化理論と対比させた微視的機構等について確立された考え方はもちろんのこと、各種金属学的因子、変形条件がバウシinger効果にどのように影響するかも統一的に整理されていないのが現状である。本節では、バウシinger効果におよぼす静水圧応力の影響について考えてみる。

一般に、バウシinger効果は予ひずみと逆方向に負荷した場合、その材料の降伏応力は予ひずみ方向における降伏応力と比較して大きく低下する現象であるが、さらに広い意味において逆方向のみならず応力方向の変化がある場合の降伏応力の低下と考えることができる。バウシinger効果の大きさを表示

する方法として種々のものがあるが、ここでは次のように考える。図11に示すように、除荷した際弾性的なひずみ回復 γ_E と、バウシinger効果によって生ずるひずみ回復 γ_B が生ずるが、ここではこれらのひずみの和 $\gamma_B = \gamma_E + \gamma_B$ をバウシingerひずみと呼ぶことにする。

図12は応力繰返しに伴うバウシingerひずみ γ_B の変化を各静水圧力重量の場合について示したものである。また、図13はバウシingerひずみ γ_B と応力繰返しに伴うせん断ひずみ量 γ との関係を示したものである。図からわかるように、バウシingerひずみ量は大気圧下に比較して静水圧力下の場合の方

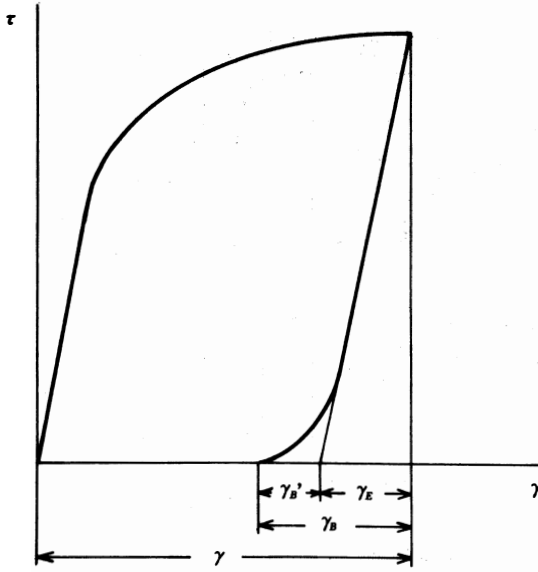


図-1 バウシingerひずみの定義

が大きくなっており、静水圧応力はバウシinger効果を増大させる効果をもつことが考えられる。

バウシinger効果の機構として種々の考え方が提案されているが、除荷過程において、その主機構は以前の変形に働いたと同じ転位の可逆運動によるものであるとされている。筆者らによる市販純アルミニウムの粗大結晶粒試験片の繰返し曲げに伴うバウシinger効果に関するX線の研究において、除荷過程では若干の転位密度の減少がミスオリエンテーションの計測を通じて観察され、また転位の再配列の生じていることが推察された。さらに、前節でも述べたように静水圧応力は転位の再配列を生じさせることから考えて、応力方向の変化する場合、静水圧力下において応力繰返しに伴って、可逆運動する転位の数が増加すると考えられる。すなわち、このことは以下のように説明できるものと考えられる。転位が可逆運動をする際、その移動に対する抵抗力の働く場を通過する必要がある。鶴戸口、岡村によれば、転位の動きに対する抵抗力場を形づくる原因として、抵抗力が転位の位置の関数として定まっているポテンシャルの場と、さらには位置だけでなく転位の移動方向にも依存する非保存力の場とに大別している。本実験の範囲内における片振り応力繰返しでは後者の影響は小さいものと考えられる。すなわち、前述した繰返し曲げ実験より、逆方向負荷し

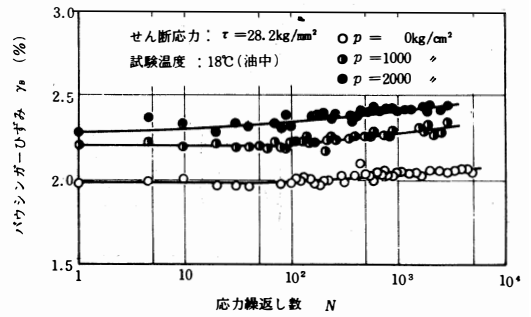


図-12 各種静水圧力を重畳したときのねじり応力繰返しに伴うバウシingerひずみ γ_B の変化

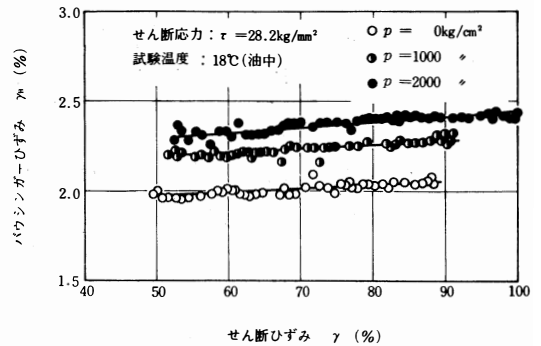


図-13 各種静水圧力を重畳したときのねじり応力繰返しに伴うせん断ひずみ γ とバウシingerひずみ γ_B との関係

た際、ラクエはん点ののび方向が変化し材料の構造変化の方向性を考える必要のあることを指摘し、除荷過程では材料の構造変化の方向性を考える必要のないことが考察された。したがって、静水圧応力はポテンシャルの場として与えられる抵抗力場、たとえば転位の固着力、摩擦力などを減少させる効果をもち、転位の往復運動を容易にするものと考えられる。なお、バウシinger効果によぼす雰囲気の影響については温度の効果に対する研究がある程度であり、静水圧応力重畳下において応力繰返しを受ける金属材料の変形挙動を明らかにすることは、バウシinger効果の機構や応力繰返しに伴う塑性変形挙動および低サイクル疲れの機構を解明する上できわめて有効な手段と考えられる。

最後に、静水圧力下における繰返し負荷にともなう塑性変形量と疲れ寿命との関係について触れておく。これまでの定応力低繰返し数疲れにおいて、静水圧力下におけるその疲れ寿命は大気圧下におけるそれよりも増加する傾向にあることが報告されて

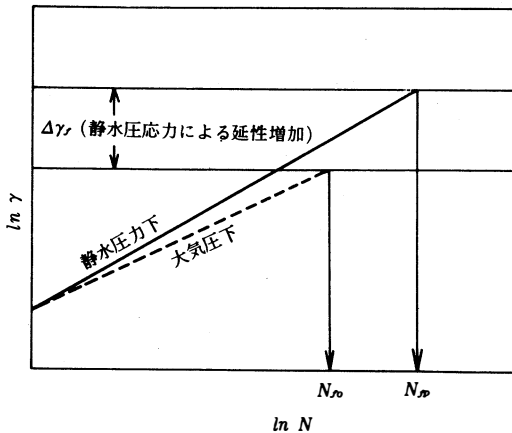


図-14 応力繰返しに伴う塑性変形量と疲れ寿命との関係の模式的表示 (N_{fo} : 大気圧下における破断繰返し数、 N_{fp} : 静水圧力下における破断繰返し数)

いる。これらの結果にしたがえば、本研究における静水圧力下および大気圧下の塑性変形量の差から比較して、一見矛盾するように思える。しかしながら、静水圧力下における破断までの伸びは大気圧下のそれに比較して顕著に増加することより、静水圧力下における応力繰返しに伴う塑性変形量が大きいからと言って必ずしも静水圧力下における疲れ寿命が低下するとは言えない。図14に示すように、静水圧力下における破断までの伸びの増加と、繰返しにともなう塑性変形量の両者によって破断繰返し数が決定されることができると考えることができる。したがって、疲れ寿命におよぼす静水圧力の影響については、クラックの発生、伝播の問題はもちろんのこと、塑性変形挙動との関連において議論する必要があると考えられ、今後の課題であろう。

4. 結言

多結晶金属材料の応力繰返しに伴う塑性変形挙動におよぼす静水圧力の影響を考察するために、大気圧下および静水圧力下における0.15% C炭素鋼の中実丸棒試験片の片振りねじり応力繰返し実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1)大気圧下および静水圧力重畳下における片振りねじり応力繰返し実験において、応力繰返しに伴うせん断ひずみは前者に比較して後者の方が大きく、

また、せん断ひずみ速度も後者の方が大きいことが明らかとなった。

(2)応力繰返しの各サイクルにおけるバウシingerひずみは静水圧力重畳の場合の方が大気圧下の場合に比較して大きいことが明らかとなった。

(3)応力繰返しのような応力の方向が変化する場合、静水圧力場においては金属材料の非弾性挙動、とりわけバウシinger効果が顕著となる。すなわち、静水圧力場は転位の可逆運動に対する抵抗力場を減少させる効果をもつことが考えられる。

終りに、本実験を行うに当り実験装置の一部の加工をいただいた舞鶴工専、阿波屋義照教授に対して、また、試験片加工の便宜を載いた山下鉄工(株)、技術部長 河内 博氏に対して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大南、塩沢、材料、**19**-197 (1970)、103.
- 2) 同 上、材料、**20**-217 (1971)、1107.
- 3) 同 上、材料、**21**-220 (1972)、16 :
同材料、**21**-223 (1972)、295.
- 4) たとえば、McMahon, C. J., Microplasticity, (1968)
Interscience Pub., New York.
- 5) たとえば、IUTAM - Symp., Mechanics of Generalized
Continua, (1968)、Springer-Verlag, Berlin.
- 6) たとえば、総説的なものとして、Mechanical Behavior
of Materials under Pressure, (Ed, by H, L, D, Pugh)
(1970)、Elsevier Pub.
- 7) たとえば、高温における塑性法則に沿う総説として、
大南、元家、材料、**20**-210 (1971)、236.
- 8) 大南、塩沢、神谷、材料、**21**-221 (1972)、109.
- 9) 同 上、機論、**39**-322 (1973)、1795.
- 10) 大南、大村、塩沢、神谷、材料、**22**-233 (1973)、122.
- 11) Crossland, B., Proc, International Conference on
Fatigue of Metals, (1956)、138. Inst, Mech. Engr.
- 12) Burns, D. J. and Parry, J. S. C., J. Mech. Eng. Sci., **6**
(1964)、293.
- 13) Tuler, F. R. and Ruoff, A. L., Cornell Univ. Report,
No. 448 (1966).
- 14) White, D. J., Crossland, B. and Morrison, J. L. M., J.
Mech. Eng. Sci., **1** (1962)、39.
- 15) 中沢、小泉、小林、丸山、機講論、**M6724-2** (1971)、
68.

塩沢和章・大南正瑛・山藤哲郎

- 16) 元家、山藤、大南、材料、**21**-227 (1972)、782.
- 17) 大南、元家、Proc. 12th Jap. Congr. Mat. Res., (1969)、
78: 大南、山藤、材料、**21**-222 (1972)、225.
- 18) Johnston, W. G., J. App. phys., **33** (1962)、2716.
- 19) Gilman, J. J., Dislocation Dynamics, (1967)、8、
McGraw-Hill.
- 20) たとえば、橋口隆吉他編、結晶の強度、材料科学講座
3 (1968)、朝倉書店.
- 21) 塩沢、大南、Proc. 1973 Symp. on Mechanical Behavior
of Materials, 93 (Soc. Mat. Sci., Jap., 1974).
- 22) 矢島、石井、塑性と加工、**7**-69 (1966)、498.
- 23) 大南、塩沢、機論、**40**-336 (1974)、2135.
- 24) 鶴戸口、岡村、材料試験、**10**-99 (1961)、994.
- 25) Abel, A. and Ham, R. K., Acta Met., **14** (1966)、1495.